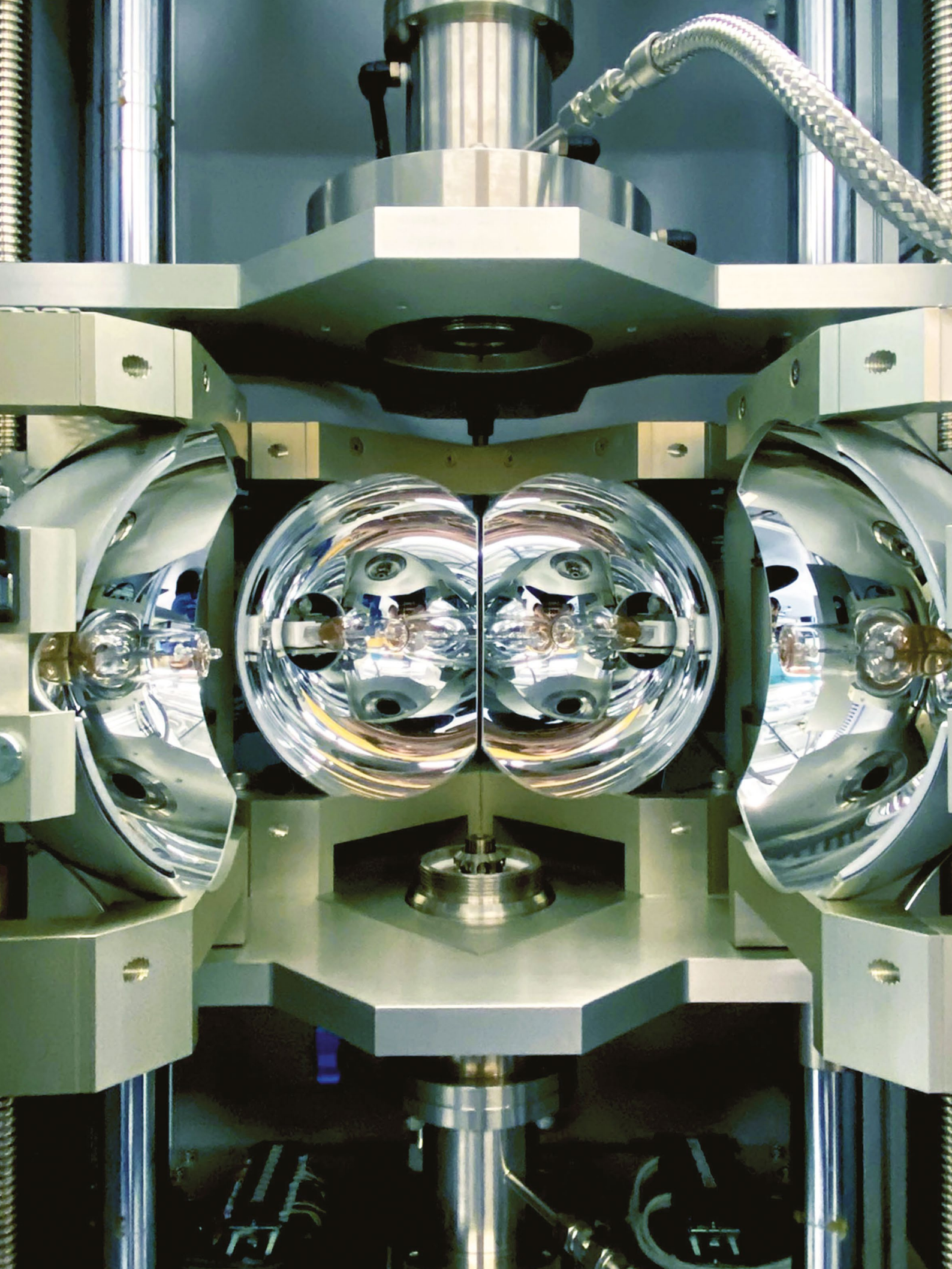




Sensation Quantique
atomes et souvenirs

Quantum Sensation
atoms and memories

CONTENT

15 QUANTUM DIFFRACTIONS

Céline Boissérie-Lacroix

22 CAN YOU SEE ME?

Caroline Delétoille

37 ART+SCIENCE COLLABORATIONS: CONVERSATION 1

Céline Boissérie-Lacroix, Aurore Young, Caroline Delétoille, Shelly Rosenblum

47 QUANTUM NOISE

Caroline Delétoille

55 HISTORY & CONCEPTS

87 KNOWLEDGE PUT TO THE TEST BY QUANTUM MECHANICS

Dominique Mouhanna

141 SCENOGRAPHY AND ARTISTIC DESIGN

Kevin Lebouvier

143 ATOMS AND MEMORIES

Céline Boissérie-Lacroix

167 ART+SCIENCE COLLABORATIONS: CONVERSATION 2

Jules Grucker, Chadi Abo, Céline Boissérie-Lacroix

177 NOTE ON THE SOUND COMPONENT OF THE EXHIBITION

Max-Louis Raugel

179 DIARY OF QUANTUM RESIDENCIES

Caroline Delétoille

217 MEMORY'S BLACK BOX AND GRINS WITHOUT CATS

Élie During

SOMMAIRE

- 7 DIFFRACTIONS QUANTIQUES
Céline Boissérie-Lacroix
- 22 ME VOIS-TU ?
Caroline Delétoille
- 29 COLLABORATIONS ART+SCIENCE : CONVERSATION 1
Céline Boissérie-Lacroix, Aurore Young, Caroline Delétoille, Shelly Rosenblum
- 45 LE BRUIT DU QUANTIQUE
Caroline Delétoille
- 53 HISTOIRE ET CONCEPTS
- 57 LA CONNAISSANCE À L'ÉPREUVE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE
Dominique Mouhanna
- 139 SCÉNOGRAPHIE ET CONCEPTION ARTISTIQUE
Kevin Lebouvier
- 143 ATOMES ET SOUVENIRS
Céline Boissérie-Lacroix
- 161 COLLABORATIONS ART+SCIENCE : CONVERSATION 2
Jules Grucker, Chadi Abo, Céline Boissérie-Lacroix
- 175 NOTE SUR LA COMPOSANTE SONORE DE L'EXPOSITION
Max-Louis Raugel
- 179 JOURNAL DE BORD
Caroline Delétoille
- 207 LA BOÎTE NOIRE DU SOUVENIR ET LE SOURIRE SANS CHAT
Élie During



DIFFRACTIONS QUANTIQUES

Premières impressions

Il y a une dizaine d'années, j'étudiais les sciences expérimentales à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI). Je me souviens avoir été troublée en réalisant que les théories et les expériences scientifiques ont une forme, et que celle-ci est particulièrement belle. Cet émerveillement était d'autant plus intense que le monde que je découvrais n'est pas notre monde ordinaire. Celui de la science expérimentale est composé d'objets tels que des «franges d'interférences», des «réseaux cristallins», des «précipités», et bien d'autres encore. Le laboratoire m'est apparu comme un cabinet de curiosités peuplé de verreries aux formes étranges et d'appareils électroniques futuristes.

Il était possible de suivre un cours d'introduction à la physique quantique et je m'y suis inscrite. Cette langue concise, peuplée d'équations mathématiques complexes, a suscité en moi une rage de comprendre, redoublée par des travaux pratiques aux intitulés énigmatiques. Dans une salle encombrée de machines, on nous avait demandé de nous pencher sur les fluctuations du vide. Dans un essai paru récemment, la philosophe Joëlle Zask nous rappelle que «la nature dépasse l'imagination, même la plus débridée¹», et c'est un imaginaire infra-matériel qui se déployait sous nos yeux. Traversé de micro-changements, investi de qualités insoupçonnées, le vide décrit par la physique quantique semblait acquérir un statut poétique.

Des désorientations fondatrices

Pourtant, est-ce vraiment la beauté du monde quantique qui frappe d'emblée ceux qui le côtoient? Les mathématiciens parlent volontiers de la beauté de leurs théories. À y regarder de plus près, cette beauté surprend. Elle étreint celui qui l'appréhende, comme un «étrange saisissement», un «dépaysement soudain²». Fortement mathématisée, la physique quantique serait à même de susciter cette sorte de vertige confus auprès des physiciens.

La plongée dans ses débuts fait droit à ces désorientations théoriques. Le physicien Carlo Rovelli énonce «qu'il n'y a pas d'émotion comparable à celle d'entrevoir une loi mathématique derrière le désordre des apparences³», et cite Werner Heisenberg. «Profondément troublé» par les découvertes qu'il fit sur l'île d'Helgoland en juin 1925, ce père fondateur de la physique théorique déclare avoir eu «la sensation de regarder, à travers la surface des phénomènes, vers un intérieur d'une étrange beauté».

Ce caractère déroutant de la théorie quantique est à la mesure du bouleversement qu'elle a induit dans notre façon d'envisager la réalité. Niels Bohr, un autre de ses créateurs, a proposé une interprétation classique du formalisme quantique, dite de Copenhague, selon laquelle, de façon surprenante, les mesures expérimentales ont une incidence sur les objets observés. Ce constat distingue fondamentalement le monde quantique du monde classique, où ce «problème de la mesure» ne se pose pas. L'épistémologie classique, qui repose sur la présence d'un observateur neutre, détaché, est mise en faillite, tandis que les conditions de possibilité d'une

connaissance objective supposent de tenir compte de l'ensemble formé par l'observateur (le scientifique), l'objet observé (la particule) et le dispositif de mesure.

Plus récemment, la physicienne et philosophe Karen Barad a développé une «ontologie relationnelle» à partir de sa pensée, en incorporant des apports de la théorie critique^{4,5}. En un mot, il ne fait pas sens de s'intéresser aux propriétés des objets en tant que tels, seules importent les relations qui lient ces «objets» entre eux. Par extension, les distinctions classiques entre observateur et observé, sujet et objet, théorie scientifique et monde décrit, n'ont plus cours. Alors qu'elle propose qu'il n'y aurait pas de réalité objective, indépendamment de tout point de vue, sa thèse, aussi radicale qu'elle soit, interroge.

Si les choses du monde n'ont pas de réalité en elles-mêmes et si ce que nous appelons réalité n'est que relations, cette approche foncièrement contre-intuitive pourrait-elle inspirer, si ce n'est devenir, la matière d'une démarche artistique? Quelle forme sensible serait-il possible de lui donner? Tels ont été les premiers questionnements qui ont enclenché la démarche de recherche-crédation que nous avons menée avec l'artiste Caroline Delétoille et la physicienne Aurore Young.

Artistes et scientifiques en dialogue

Au début du siècle dernier, la possibilité d'un dialogue approfondi entre les arts et les sciences semblait impossible tant les deux mondes s'étaient éloignés l'un de l'autre, au XIX^e tout particulièrement. «Deux cultures⁶» s'étaient formées, à la portée et aux langages distincts⁷. Comme Bohr l'a indiqué avec justesse dans un essai philosophique portant sur l'unité de la connaissance, la science «consiste en des efforts systématiques pour augmenter notre expérience et développer les concepts appropriés à sa mise en œuvre», quand l'art rassemble «des efforts plus individuels, plus fondés sur la sensibilité, pour éveiller des sentiments qui évoquent la totalité de notre situation⁸».

Pourtant, le XX^e siècle a aussi été celui où, précisément, les rencontres entre artistes et scientifiques se sont développées. L'arrivée de la physique quantique et de la théorie de la relativité ont ouvert une brèche telle qu'elles ont trouvé un écho auprès des avant-gardes artistiques, au rang desquelles les surréalistes. Cet intérêt s'est amplifié après la Seconde Guerre Mondiale avec l'émergence d'initiatives collaboratives réunissant des scientifiques, des ingénieurs et des artistes, telles que l'organisation E.A.T. (Experiments in Arts and Technology) ainsi que le CAVS (Center for Advanced Visual Studies) au MIT.

Ces rapprochements se sont accélérés au tournant des années 1980 avec l'arrivée de l'art numérique et du bio-art, reposant sur les avancées des technosciences. Une «troisième culture⁹» s'est fait jour, hybride d'art, de science et de technologie, qui n'a eu de cesse de s'amplifier et s'est progressivement institutionnalisée¹⁰. Cette troisième culture a permis un enrichissement mutuel des mondes artistiques et scientifiques.

Que pouvaient bien chercher les artistes en participant à de tels programmes? Une première motivation, assez évidente, réside dans la nature même de leurs pratiques. Pratiques d'avant-garde, elles se caractérisent par un désir d'expérimentation tous azimuts. De fait, l'exploration de frontières à la lisière du monde de l'art, dont des incursions dans l'univers scientifique, s'est avérée un terrain de création relativement naturel. Une seconde motivation pourrait se trouver à un niveau plus fin, en examinant les intentions exprimées par les artistes. Pour beaucoup, la rencontre avec des scientifiques procède de questionnements communs portant sur la compréhension du monde, l'élucidation des mécanismes invisibles qui le sous-tendent.

Dans une autre perspective, les évolutions propres au monde scientifique peuvent apporter des éléments d'explication. Les sciences contemporaines sont en effet marquées par deux inflexions majeures par rapport aux sciences classiques : leur abstraction et leur technicisation. À travers les théories de l'infiniment grand (relativité restreinte et générale) et de l'infiniment petit (physique quantique), une rupture épistémologique s'est opérée par rapport à la physique classique où la complexité, l'indéterminisme et l'incertitude ont pris une place considérable¹¹.

Interroger le réel, les perceptions et les représentations ordinaires que nous en avons, sont des enjeux qui motivent nombre de démarches artistiques. Ce donné, subverti par la démarche artistique, peut être de différentes natures. Il peut avoir été apporté par nos sens et rendre compte de notre environnement ordinaire, tout comme il peut avoir été historiquement ou socialement construit. Aussi, les rencontres entre artistes et scientifiques, en créant des espaces propices au croisement des regards, apparaissent comme de formidables sources d'inspiration. En déplaçant nos représentations ordinaires vers des ordres de réalité infiniment petits, la physique quantique peut favoriser de tels décentrement.

Les fondements fantastiques de la réalité¹²

À échelle quantique, un certain nombre de phénomènes excentriques apparaissent. Parmi les plus surprenants, le problème de la mesure, qui suggère un réel à jamais « voilé », pour reprendre l'expression du physicien et philosophe Bernard d'Espagnat¹³, la dualité onde-corpuscule, la superposition quantique (qu'une particule puisse se trouver dans différents états à la fois), l'intrication quantique (qu'il existe une corrélation entre deux particules, pourtant séparées par des kilomètres de distance, à condition qu'elles aient été initialement réunies), l'effet tunnel (phénomène de passe-muraille) ou encore, selon la manière dont la théorie est interprétée, l'existence de mondes multiples¹⁴.

Parce qu'elle porte sur des objets qui ne sont pas visualisables directement, dont les propriétés et les comportements sont fortement contre-intuitifs, la physique quantique se prête volontiers à des interprétations artistiques. Une pensée par l'image appelée de ses vœux par Bohr, lorsqu'il énonçait que « lorsqu'il s'agit des atomes, le langage ne peut être employé que comme il l'est dans la poésie : il ne s'agit plus de se préoccuper de décrire des faits, mais de créer des images et d'établir des connexions mentales¹⁵ ». Cette pensée par l'image peut aussi se nourrir de philosophies autres, à l'instar des philosophies orientales¹⁶.

Mais alors, comment rendre compte d'objets infiniment petits, dont les représentations scientifiques ont elles-mêmes beaucoup évolué ? Il n'y a qu'à penser à nos images de l'atome, que l'on se représentait hier sous la forme d'une planète et de son satellite, modèle aujourd'hui abandonné au profit d'un nuage électronique. Ce dernier rend compte avec davantage de justesse de la probabilité de présence des électrons autour du noyau. La quantique suppose un monde aux contours flous, d'autant plus complexe à appréhender.

Le temps est loin où les physiciens étaient sommés de « se taire et de calculer¹⁷ ». Le formalisme quantique soulève des questions d'interprétation toujours vivaces, qui ont trait par exemple à sa portée descriptive. Les formules mathématiques sur lesquelles repose la physique quantique décrivent-elles notre monde et si oui, quel monde décrivent-elles, au juste ? Ces questions d'ordre philosophique soulèvent des défis stimulants sur la nature de la réalité et de notre connaissance du monde¹⁸.

Des artistes peuvent-ils exprimer à leur tour cette sidération qui a été celle des fondateurs de la physique quantique, et qui nourrit de vives discussions

philosophiques ? Provoquer un «dérangement» en ouvrant la porte d'un infiniment petit, au risque de tomber dans le terrier d'*Alice au Pays des Merveilles* : un envers du décor fantastique, où l'impossible devient possible.

Plasticités quantiques¹⁹

Une difficulté des démarches collaboratives entre artistes et scientifiques est d'éviter le double écueil d'une illustration littérale des théories mobilisées et d'un dévoiement de ces dernières. Beaucoup d'artistes louvoient habilement dans ces méandres pour imaginer des œuvres – très souvent, des installations de nouveaux médias, comportant une composante vidéo – qui mobilisent la physique quantique en réponse à différentes intentions et à des niveaux variés²⁰.

Si l'un des enjeux est d'ouvrir le regard au-delà de nos expériences ordinaires, la mise en scène d'un merveilleux quantique s'avère un ressort important pour un certain nombre de démarches. À ce titre, certains artistes vont jusqu'à retrouver des «chambres à brouillard», ces ancêtres des détecteurs de particules devenues curiosités de l'histoire de la physique. Lorsque l'on se penche sur le dispositif *Memory Vapor* (2011) du duo d'artistes russe et biélorusse Evelina Domnitch & Dmitry Gelfand, de multiples traces colorées évanescences apparaissent dans la chambre à brouillard. Fascinante fenêtre sur l'infiniment petit, la machine se peuple rapidement de traînées de condensation qui témoignent du passage aléatoire de particules, comme autant de lignes d'erre.

Certains scientifiques eux-mêmes, mus par une envie de partage de la charge poétique de la science, entament une démarche artistique et prennent à parti les objets du laboratoire. Le physicien Olivier Dadoun a ainsi «exfiltré» un détecteur de particules du monde scientifique pour l'utiliser comme «déclencheur artistique²¹». De façon plus métaphorique, l'installation et performance *Rêve quantique, le jour où j'ai imaginé l'océan* (Virgile Novarina, Walid Breidi et Labofactory, 2020) allie les imaginaires de la mécanique des fluides, des sciences cognitives et de la quantique, pour explorer artistiquement l'activité corticale intense qui accompagne notre sommeil.

Cet infiniment petit fugace, indéterminé et insaisissable, peut aussi être exposé dans toute son étrangeté, laquelle semble être l'un des ressorts de la démarche de l'artiste coréen Yunchul Kim. Son œuvre *Cascade* (2018), machine technologique complexe, s'apparente à un organisme vivant tentaculaire dont les parties sont remplies de fluides qui réagissent à la détection de muons. Ce dévoilement d'une réalité scientifique fabuleuse est aussi le registre choisi par Josèfa Ntjam dans sa sculpture *Luciferin Drop* (2020), accompagnée du film *Myceaqua Vitae* (2020). Inspirées par sa résidence dans un laboratoire canadien spécialisé dans l'astrophysique des particules, le SNOLAB, les deux œuvres mêlent les genres du merveilleux et de la science-fiction pour raconter le transport d'une curieuse matière lumineuse à travers un vaisseau spatial. L'histoire fait écho au fonctionnement d'un détecteur de matière noire reposant sur la scintillation de l'argon liquide.

Ces œuvres présentent le point commun d'utiliser comme médiums, de façon littérale ou métaphorique, des appareils qui permettent aux scientifiques de visualiser des phénomènes quantiques, pour montrer à un plus large public ce qui s'y observe. D'autres œuvres reposent aussi sur des médiums numériques pour susciter la compréhension d'ordres de réalité inhabituels. Ryoji Ikeda, dans son exposition *Supersymmetry* (2014), propose ainsi une installation immersive reposant sur la superposition de compositions sonores minimalistes avec des images numériques renvoyant pour certaines à l'interprétation continue de flux de données, tandis que d'autres montrent la collision de particules sur des caissons lumineux pour évoquer le concept physique de «supersymétrie».

La théorie quantique intéresse également les artistes pour les questionnements philosophiques qu'elle soulève. À travers l'installation *The View from Nowhere* (2018), le duo d'artistes britanniques Semiconductor interroge la signification de la théorie scientifique, son objectivité, et de façon plus générale, la place de l'homme dans le monde, en rendant manifestes la culture du laboratoire et les contextes institutionnels de production de la connaissance. Enfin, quelques démarches cherchent à susciter une réflexion critique autour des catégories établies et l'émergence de nouveaux possibles. La théorie quantique, par son caractère indéterminé et sa remise en question de l'ordinaire, se prête bien à de telles interrogations qu'explorent les artistes britannique et canadien Libby Heaney et Ben Bogart.

Sensation quantique

Lorsque nous avons commencé à échanger avec l'artiste Caroline Delétoille et la physicienne Aurore Young autour d'une collaboration qui mêlerait l'art, la physique quantique et la philosophie, plusieurs thèmes nous sont spontanément venus. L'expérience des interférences de Young, peut-être «la plus belle expérience de la physique²²», les entremêlements observateur – objet observé – dispositif d'observation, et, en lien avec le travail de Caroline Delétoille, la question des souvenirs. Nous avions une envie initiale, celle de créer des formes sensibles autour d'un monde quantique encore trop peu connu. Se sont ensuivies de premières discussions animées autour de la mémoire, de son fonctionnement cognitif et de la reconstruction des souvenirs.

La suggestion d'un parallèle entre l'observation de souvenirs (dans le cas de processus de mémoire volontaire, lorsque l'on s'efforce de se remémorer certains souvenirs) et les observations de particules à échelle quantique, s'est trouvée confirmée autour de plusieurs points d'analogie. Notamment, le fait que la forme des souvenirs change à chaque occurrence d'observation, que la mémoire reconstruit une scène souvenir à partir de fragments éclatés, que l'itération des observations peut permettre de reconstruire le souvenir avec davantage de fidélité.

Aussi, par cette démarche de recherche-crédation, nous avons souhaité développer ce parallèle entre des conséquences philosophiques du problème de la mesure et le fonctionnement de notre mémoire. Cette interprétation (artistique) d'une interprétation (philosophique) de la physique quantique constitue le cœur de la démarche de recherche-crédation que nous avons menée. Des grands principes de la physique quantique et de ses nombreuses «bizarreries», nous avons retenu le problème de la mesure pour deux raisons. D'une part, peut-être plus que tout autre problème, il soulève des questions particulièrement pressantes sur la nature de la réalité et la connaissance que l'on peut en avoir, questions qui nous ont immédiatement inspirées. D'autre part, il nous a permis de concevoir un espace à la fois conceptuel et sensible dans lequel introduire une démarche picturale figurative.

Réunir peinture et physique quantique, la démarche relevait de la gageure, d'autant plus en prenant le parti d'engager une démarche picturale figurative. En effet, la peinture semble être au premier abord le médium le moins approprié pour rendre compte du monde scientifique – et à plus forte raison, de la physique quantique, science la mieux vérifiée de toutes –, car il compte parmi les plus imprécis. Pourtant, ce flou constitutif de la touche du peintre nous a semblé entrer singulièrement en résonance avec l'indétermination du monde quantique et les enjeux de représentation qu'il suscite, dans un effort de se placer au plus près de la texture du monde pour en explorer le versant sensible.

Cette incongruité plastique nous a aussi paru particulièrement pertinente pour prendre le contrepied d'un imaginaire scientifique souvent associé à une

esthétique technologique. Au siècle dernier, quelques rares démarches picturales ont tenté de réconcilier peinture et quantique – on peut citer la peintre abstraite germano-américaine Bettina Brendel, qui s’est efforcée de traduire quelques principes de la physique atomique, l’artiste chilien Roberto Matta, ou encore Salvador Dalí, qui s’est illustré sur le thème de la constitution de la matière, composée selon lui d’atomes en suspension, avec des peintures telles que *Leda Atomica* (1949), et son portrait photographique resté célèbre, par Philippe Halsman, *Dalí Atomicus*^{23,24} (1948).

Alors, comment donner une forme et une matière picturales au monde de la physique quantique et, plus particulièrement, à ce problème général de la mesure ? En réponse, cette démarche de recherche-crédation s’est rapidement matérialisée par la conception d’un parcours d’exposition complet.

Tomographie des souvenirs

Au cœur du dispositif, une déambulation immersive à travers des peintures originales de Caroline Delétoille est proposée. Ces peintures représentent des fragments mémoriels d’une même scène, choisie pour son caractère prototypique : une scène de repas de famille, glanée dans les archives photographiques du Musée Nicéphore Niépce de la photographie de Chalon-sur-Saône, premier fonds photographique de France. Les tableaux seraient autant de « mesures » opérées sur le système observé – la scène souvenir.

Le spectateur est invité à arpenter une mémoire qui pourrait être la sienne, à activement reconstruire la scène souvenir, pour retrouver une partie du cheminement expérimental de chercheurs en physique quantique, notamment au Laboratoire Kastler Brossel du Collège de France, où Caroline Delétoille a effectué une résidence artistique. Il y est question de l’observation d’atomes « piégés » par des pinces optiques, rendus visibles sur écran pour en examiner l’évolution au cours du temps. En explorant la tension entre l’étrangeté du monde quantique et la familiarité du souvenir, provoquer une immersion dans cet infiniment petit qui nous constitue. Celle-ci est d’autant plus facilitée que l’exposition s’accompagne d’une ambiance sonore évoquant le monde quantique, composition de l’artiste Max-Louis Raugel.

Rythmant le parcours, des nuages peints sur des couvertures de survie viennent rappeler l’univers du laboratoire de physique à double titre. De façon très littérale, ce matériau se retrouve habituellement dans les laboratoires quantiques pour ses propriétés isolantes. De façon plus métaphorique, les nuages font poétiquement référence aux représentations actuelles de l’atome sous forme de nuage électronique. Ces nuages ont été peints par Caroline Delétoille à partir d’une série de photographies de Peter Knapp, réinterprétées avec son accord.

Autour de cette salle centrale s’articulent plusieurs propositions artistiques qui offrent chacune une interprétation différente de la quantique. Une première installation met en scène des images d’une instagrammeuse avant l’heure, des auto-portraits qu’une inconnue a pris dans les années 1940, que Caroline Delétoille s’est réappropriés par un travail numérique dans la continuité de ses œuvres sérigraphiques. L’inconnue se dévoile au gré des photographies, entrée en matière avant de parcourir la salle principale de l’exposition, consacrée à la scène souvenir.

À la sortie de cette salle, une plongée plus concrète dans l’univers du laboratoire est proposée. Différents éléments récupérés par Caroline Delétoille dans ses résidences au Laboratoire Kastler Brossel à Paris et au Quantum Matter Institute de Vancouver sont exposés à la manière d’un musée d’ethnographie. Ils font écho au travail pionnier d’immersion en laboratoire scientifique mené par Latour et

Woolgar, raconté dans leur ouvrage *La vie de laboratoire* (1979). Ici, les machines spectaculaires font place aux laissés-pour-compte de la recherche expérimentale : brouillons, petits outils, systèmes de comptage de café... autant d'objets anodins et pourtant révélateurs de l'univers du laboratoire, où le bricolé côtoie l'appareil de pointe et où des touches d'humour apparaissent incidemment.

Au cours de ses résidences, Caroline Delétoille a aussi croqué et peint sur le vif – l'espace d'un instant, le laboratoire est devenu atelier. Quelques chercheurs ont posé pour elle ; ils apparaissent sur des feuilles qu'ils ont griffonnées, formant des palimpsestes où se mêlent équations et pensées plus personnelles. Le parcours d'exposition se termine avec une vidéo réalisée par Chadi Abo, épopée psychédélique dans laquelle apparaît la scène souvenir reconstituée.

En définitive, nous espérons que cette exposition sera « diffractante » dans le sens (métaphorique)²⁵ où, résultant d'un croisement de savoirs et de pratiques, elle invite à un renouvellement des regards, une expérience de « sensation quantique » dont le voile aura été partiellement levé.

Notes

- 1 J. Zask (2024), *Admirer. Éloge d'un sentiment qui nous fait grandir*.
- 2 A. Grothendieck (1983-86/2022), *Récoltes et semailles*.
- 3 C. Rovelli (2020), *Helgoland*.
- 4 « Posthuman performativity » (2003) et *Meeting the Universe Halfway* (2007).
- 5 L'introduction de cette théorie est due à C. Rovelli (1996), « Relational quantum mechanics ».
- 6 Pour reprendre l'expression du chimiste britannique C.P. Snow (1959) dans un discours resté célèbre, « The Two Cultures and the Scientific Revolution ».
- 7 Pour l'histoire de ce divorce entre science et culture, voir aussi J. M. Lévy-Leblond (2013), *Le grand écart : la science entre technique et culture*.
- 8 N. Bohr (1955), « The unity of knowledge ».
- 9 A. Miller (2014), *Colliding Worlds. How Cutting-Edge Science is Redefining Contemporary Art*.
- 10 Par exemple, l'arrivée d'institutions muséographiques dédiées (ZKM, Centre des arts et médias de Karlsruhe), des réseaux de recherche en propre (le réseau canadien Hexagram ou le laboratoire SymbioticA en Australie), des biennales (Ars Electronica en Autriche, Transmediale à Berlin, ou encore la biennale Nemo en France). Un grand nombre d'initiatives ont vu le jour à partir des années 2000, tels que les programmes de résidences artistiques au CERN et au CNES, parmi les plus visibles dans le monde francophone.
- 11 I. Prigogine et I. Stengers (1996), *La fin des certitudes*.
- 12 « The fantastic foundations of reality ». Citation de F. Coppola, reprise dans J. Kripkal (2024), *How to Think Impossibly*.
- 13 *Un atome de sagesse* (1982). La théorie quantique ne renverrait pas à des réalités ayant une existence en soi, mais qui seraient au contraire certainement de nature relationnelle.
- 14 Interprétation dite « des mondes multiples » (Everett, 1957).
- 15 Citation rapportée par W. Heisenberg.
- 16 Voir à ce titre, F. Capra (1975), *The Tao of Physics. An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism*, qui examine les ponts entre physique quantique et taoïsme. Au sujet des implications philosophiques de la quantique, C. Rovelli (2020) cite volontiers l'un des penseurs phares de la philosophie indienne, Nāgārjuna.
- 17 Cette boutade, introduite par le physicien David Mermin (« Could Feynman have said this? », 2004), renvoie à une approche de la physique des années cinquante, davantage tournée vers les applications pratiques que les discussions philosophiques.

- 18 À ce sujet voir par exemple M. Bitbol (1996), *Mécanique quantique. Une introduction philosophique*.
- 19 Titre emprunté à P. Weber et J. Delsaux (2024), « Pour une plasticité quantique ». Les auteurs renvoient par cette expression à « la forme qu'en imagination le novice peut chercher à donner à des phénomènes avérés mais qui ne seraient pas accessibles à ses sens de perception ».
- 20 Je reviens ici sur plusieurs démarches qui rendent compte de la grande diversité des « diffractions » quantiques dans le domaine des arts plastiques.
- 21 Selon les mots de Mériam Korichi et d'Olivier Dadoun. Catalogue de l'exposition « Chambre à brouillard » (Commissariat : O. Dadoun, L'ahah, Paris, 2023).
- 22 Selon le nom d'une vidéo du Youtubeur David Louapre dans sa chaîne « Science étonnante » : <https://youtu.be/zPolTpOddRg>, vidéo consultée le 15 décembre 2024.
- 23 Une peinture peut-elle influencer un physicien quantique ? Le père du physicien Bernard d'Espagnat, Georges d'Espagnat, était lui-même peintre, et il lui donne crédit d'avoir eu une influence dans sa sensibilité de chercheur.
- 24 Autre artiste incontournable, dans le domaine de la gravure cette fois, Maurits Cornelis Escher, qui a correspondu avec le scientifique Roger Penrose et l'aurait inspiré.
- 25 Au sens strict, la diffraction est un phénomène physique qui se produit lorsque des ondes rencontrent un obstacle sur leur passage, suscitant des interférences.

QUANTUM DIFFRACTIONS

First impressions

About ten years ago, I was studying experimental sciences at ESPCI. I remember being troubled when realizing that scientific theories and experiments have a form, and that this form is particularly beautiful. This wonder was all the more intense because the world I was discovering is not our ordinary world. The world of experimental science is composed of objects such as “interference fringes”, “crystalline networks”, “precipitates”, and many others. The laboratory appeared to me as a cabinet of curiosities inhabited with glassware of strange shapes and futuristic electronic devices.

It was possible to take an introductory course in quantum physics, and I enrolled. This concise language, populated with complex mathematical equations, doubled by practical work with enigmatic titles, sparked in me a rage to understand. In a room cluttered with machines, we were asked to delve into the fluctuations of the vacuum. In a recently published essay, philosopher Joëlle Zask reminds us that “nature surpasses imagination, even the wildest one”¹, and it is an infra-material imagination that unfolded before our eyes. Traversed by micro-changes, imbued with unsuspected qualities, the vacuum described by quantum physics seemed to acquire a poetic status.

Foundational Disorientations

Yet, is it really the beauty of the quantum world that immediately strikes those who encounter it? Mathematicians readily speak of the beauty of their theories. Upon closer inspection, this beauty surprises. It seizes the one who apprehends it, like a “strange bewilderment”, a “sudden disorientation”². Highly mathematized, quantum physics could evoke this kind of confused vertigo among physicists. Diving into its beginnings justifies these theoretical disorientations. Physicist Carlo Rovelli states that “there is no emotion comparable to that of glimpsing a mathematical law behind the disorder of appearances”³, and quotes Werner Heisenberg. “Deeply troubled” by the discoveries he made on the island of Helgoland in June 1925, this founding father of theoretical physics declared having had “the sensation of looking, through the surface of phenomena, into an interior of strange beauty”.

This disconcerting nature of quantum theory reflects the upheaval it has induced in our way of envisioning reality. Niels Bohr, another of its creators, proposed a classical interpretation of quantum formalism, known as the Copenhagen interpretation, according to which, surprisingly, experimental measurements have an impact on the observed objects. This observation fundamentally distinguishes the quantum world from the classical world, where this “measurement problem” does not arise. Classical epistemology, which relies on the presence of a neutral, detached observer, is undermined, while the conditions for the possibility of objective knowledge must take into account the set formed by the observer (the scientist), the observed object (the particle), and the measuring apparatus.

More recently, physicist and philosopher Karen Barad has developed a “relational ontology” based on his thought, incorporating contributions from critical

theory^{4,5}. In short, it makes no sense to be interested in the properties of objects as such; only the relationships that link these “objects” to each other matter. By extension, the classical distinctions between observer and observed, subject and object, scientific theory and described world, no longer hold. While she proposes that there is no objective reality, independent of any point of view, her thesis, as radical as it is, raises questions.

If the things of the world have no reality in themselves and if what we call reality is only relations, could this fundamentally counter-intuitive approach inspire, if not become, the subject of an artistic approach? What sensible form could be given to it? These were the first questions that initiated the research-creation approach we undertook with artist Caroline Delétoille and physicist Aurore Young.

Artists and Scientists in Dialogue

At the beginning of the last century, the possibility of an in-depth dialogue between the arts and sciences seemed impossible as the two worlds had moved away from each other, particularly in the 19th century. “Two cultures”⁶ had formed, with distinct scopes and languages⁷. As Bohr rightly pointed out in a philosophical essay on the unity of knowledge, science “consists of systematic efforts to increase our experience and develop concepts appropriate to its implementation”, while art brings together “more individual efforts, more based on sensitivity, to awaken feelings that evoke the totality of our situation”⁸.

Yet, the 20th century was also the one where, precisely, encounters between artists and scientists developed. The advent of quantum physics and the theory of relativity created a breach that resonated with artistic avant-gardes, among which the surrealists. This interest intensified after World War II with the emergence of collaborative initiatives bringing together scientists, engineers, and artists, such as the organization E.A.T. (Experiments in Arts and Technology) and the CAVS (Center for Advanced Visual Studies) at MIT.

These rapprochements accelerated at the turn of the 1980s with the advent of digital art and bio-art, based on advancements in technosciences. A “third culture”⁹ emerged, a hybrid of art, science, and technology, which has continued to amplify and has gradually become institutionalized¹⁰. This third culture enabled a mutual enrichment of the artistic and scientific worlds.

What could artists have been seeking by participating in such programs? A first motivation, quite obvious, lies in the very nature of their practices. Avant-garde practices are characterized by a desire for all-out experimentation. Indeed, the exploration of borders at the edge of the art world, including incursions into the scientific universe, proved to be a relatively natural terrain for creation. A second motivation can be found at a finer level, by examining the intentions expressed by the artists. For many, the encounter with scientists stems from common questions about understanding the world, elucidating the invisible mechanisms that underpin it.

From another perspective, developments within the scientific world itself can provide explanatory elements. Contemporary sciences are marked by two major inflections compared to classical sciences: their abstraction and their technicization. Through the theories of the infinitely large (special and general relativity) and the infinitely small (quantum physics), an epistemological rupture occurred compared to classical physics, where complexity, indeterminism, and uncertainty have taken a considerable place¹¹.

Questioning reality, perceptions, and ordinary representations we have of it, are issues that motivate many artistic approaches. This data, subverted by the artistic approach, can be of different natures. It may have been brought by our senses and reflect our ordinary environment, just as it may have been historically or socially constructed. Also, the encounters between artists and scientists, by creating spaces conducive to the crossing of perspectives, appear as formidable sources of inspiration. By shifting our ordinary representations towards infinitely small orders of reality, quantum physics can foster such displacements.

The Fantastic Foundations of Reality¹²

At the quantum scale, a number of eccentric phenomena appear. Among the most surprising is the measurement problem, which suggests a reality forever “veiled”, to use the expression of physicist and philosopher Bernard d’Espagnat¹³, wave-particle duality, quantum superposition (a particle can be in different states at the same time), quantum entanglement (there is a correlation between two particles, even if they are separated by kilometers, as long as they were initially together), the tunnel effect (phenomenon of passing through walls), or even, depending on how the theory is interpreted, the existence of multiple worlds¹⁴.

Because it deals with objects that cannot be directly visualized, whose properties and behaviors are highly counter-intuitive, quantum physics readily lends itself to artistic interpretations. A thought through images as desired by Bohr, when he stated that “when it comes to atoms, language can only be used as it is in poetry: it is not a matter of worrying about describing facts, but of creating images and establishing mental connections”¹⁵. This thought through images can also be nourished by other philosophies, such as Eastern philosophies¹⁶.

But then, how can we account for infinitely small objects, whose scientific representations have themselves evolved significantly? Just think of our images of the atom, which we used to represent as a planet and its satellite, a model now abandoned in favor of an electron cloud. This latter model more accurately represents the probability of electron presence around the nucleus. Quantum physics assumes a world with blurred boundaries, making it even more complex to understand.

The time is long past when physicists were urged to “shut up and calculate”¹⁷. Quantum formalism raises ever-present questions of interpretation, for example concerning its descriptive scope. Do the mathematical formulas on which quantum physics is based describe our world, and if so, what world do they describe exactly? These philosophical questions raise stimulating challenges about the nature of reality and our knowledge of the world¹⁸.

Can artists in turn express the astonishment that the founders of quantum physics experienced, which fuels lively philosophical discussions? Provoking a “disturbance” by opening the door to the infinitely small, at the risk of falling into *Alice in Wonderland*’s rabbit hole: a fantastic backstage, where the impossible becomes possible.

Quantum Plasticities¹⁹

One difficulty in collaborative approaches between artists and scientists is to avoid the double pitfall of a literal illustration of the theories used and a distortion of them. Many artists skilfully navigate these complexities to imagine works—very often, new media installations with a video component—that engage quantum physics in response to different intentions and at various levels²⁰.

If one of the challenges is to open the gaze beyond our ordinary experiences, staging a quantum wonder proves to be an important element for a number of approaches. In this respect, some artists go as far as rediscovering “cloud chambers”, those ancestors of particle detectors that have become curiosities of the history of physics. When looking at the *Memory Vapor* (2011) installation by the Russian-Belarusian artist duo Evelina Domnitch & Dmitry Gelfand, multiple evanescent colored traces appear in the cloud chamber. A fascinating window into the infinitely small, the machine quickly becomes populated with condensation trails that testify to the random passage of particles, like so many wander lines.

Some scientists themselves, driven by a desire to share the poetic charge of science, undertake an artistic approach and take laboratory objects as their subjects. Physicist Olivier Dadoun thus “exfiltrated” a particle detector from the scientific world to use it as an “artistic trigger”²¹. More metaphorically, the installation and performance *Quantum Dream, the Day I Imagined the Ocean* (Virgile Novarina, Walid Breidi, and Labofactory, 2020) combines the imaginations of fluid mechanics, cognitive sciences, and quantum physics to artistically explore the intense cortical activity that accompanies our sleep.

This fleeting, indeterminate, and elusive infinitesimally small can also be exposed in all its strangeness, which seems to be one of the driving forces behind the approach of Korean artist Yunchul Kim. His work *Cascade* (2018), a complex technological machine, resembles a tentacled living organism, with parts filled with fluids that react to the detection of muons. This revelation of a fabulous scientific reality is also the register chosen by Josèfa Ntjam in her sculpture *Luciferin Drop* (2020), accompanied by the film *Myceaqua Vitae* (2020). Inspired by her residency at a Canadian laboratory specializing in particle astrophysics, SNOLAB, the two works blend the genres of the marvelous and science fiction to tell the story of the transport of a curious luminous matter through a spacecraft. The story echoes the functioning of a dark matter detector based on the scintillation of liquid argon.

These works share the common point of using, literally or metaphorically, devices that allow scientists to visualize quantum phenomena, to show a wider audience what is observed. Other works also rely on digital media to evoke the understanding of unusual orders of reality. In his exhibition *Supersymmetry* (2014), Ryoji Ikeda proposes an immersive installation based on the superposition of minimalist sound compositions with digital images, some of which refer to the continuous interpretation of data flows, while others show the collision of particles on illuminated boxes to evoke the physical concept of “supersymmetry”.

Quantum theory also interests artists for the philosophical questions it raises. Through the installation *The View from Nowhere* (2018), the British artist duo Semiconductor questions the meaning of scientific theory, its objectivity, and more generally, the place of man in the world, by making the culture of the laboratory and the institutional contexts of knowledge production manifest. Finally, some approaches seek to provoke a critical reflection on established categories and the emergence of new possibilities. Quantum theory, with its indeterminate nature and questioning of the ordinary, lends itself well to such interrogations explored by British and Canadian artists Libby Heaney and Ben Bogart.

Quantum sensation

When we began discussing a collaboration that would blend art, quantum physics, and philosophy with artist Caroline Delétoille and physicist Aurore Young, several themes spontaneously came to mind. Young’s interference experiment, perhaps “the most beautiful experiment in physics”²², the observer-observed object-observation device entanglements, and, in relation to Caroline Delétoille’s work,

the question of memories. Our initial desire was to create sensitive forms around a quantum world that is still little known. This led to the first lively discussions about memory, its cognitive functioning, and the reconstruction of memories.

The suggestion of a parallel between the observation of memories (in the case of voluntary memory processes, when we strive to recall certain memories) and the observation of particles on a quantum scale was confirmed by several points of analogy. Notably, the fact that the form of memories changes with each occurrence of observation, that memory reconstructs a memory scene from scattered fragments, and that the iteration of observations can allow the memory to be reconstructed with greater fidelity.

Thus, through this research-creation approach, we sought to develop this parallel between the philosophical consequences of the measurement problem and the functioning of our memory. This (artistic) interpretation of a (philosophical) interpretation of quantum physics is at the heart of the research-creation approach we have undertaken. Among the great principles of quantum physics and its numerous “oddities”, we focused on the measurement problem for two reasons. First, perhaps more than any other problem, it raises particularly pressing questions about the nature of reality and the knowledge one can have of it, questions that immediately inspired us. Second, it allowed us to conceive a space that is both conceptual and sensitive in which to introduce a figurative pictorial approach.

Bringing together painting and quantum physics was a challenge, especially since we chose to engage in a figurative pictorial approach. Indeed, at first glance, painting seems to be the least appropriate medium to account for the scientific world—and even more so for quantum physics, the most verified science of all—as it is among the most imprecise. Yet, this constitutive blur of the painter’s touch seemed to resonate singularly with the indeterminacy of the quantum world and the representational issues it raises, in an effort to get as close as possible to the texture of the world to explore its sensitive side.

This plastic incongruity also seemed particularly relevant to counter a scientific imagination often associated with a technological aesthetic. In the last century, a few rare pictorial approaches have attempted to reconcile painting and quantum physics—we can mention the German-American abstract painter Bettina Brendel, who endeavoured to translate some principles of atomic physics, the Chilean artist Roberto Matta, or even Salvador Dalí, who illustrated the theme of the constitution of matter, composed according to him of suspended atoms, with paintings such as *Leda Atomica* (1949), and his famous photographic portrait by Philippe Halsman, *Dalí Atomicus* (1948)^{23,24}.

So, how can we give a pictorial form and material to the world of quantum physics and, more particularly, to this general problem of measurement? In response, this research-creation approach quickly materialized through the conception of a complete exhibition path.

Tomography of Memories

At the heart of the device, an immersive walk through original paintings by Caroline Delétoille is proposed. These paintings represent memory fragments of the same scene, chosen for its prototypical character: a family meal scene, gleaned from the photographic archives of the Nicéphore Niépce Museum of Photography in Chalon-sur-Saône, the first photographic collection in France. The paintings would be as many “measurements” performed on the observed system—the memory scene.

The viewer is invited to walk through a memory that could be their own, to actively reconstruct the memory scene, to retrace part of the experimental journey of quantum physics researchers, notably at the Kastler Brossel Laboratory of the Collège de France, where Caroline Delétoille undertook an artistic residency. It involves observing atoms “trapped” by optical tweezers, made visible on a screen to examine their evolution over time. By exploring the tension between the strangeness of the quantum world and the familiarity of memory, provoking an immersion in this infinitesimal that constitutes us. This immersion is further facilitated by the exhibition’s sound ambiance evoking the quantum world, composed by artist Max-Louis Raugel.

Punctuating the walk, clouds painted on survival blankets recall the world of the physics laboratory in two ways. Very literally, this material is usually found in quantum laboratories for its insulating properties. In a more metaphorical way, the clouds poetically refer to the current representations of the atom in the form of an electronic cloud. These clouds were painted by Caroline Delétoille based on a series of photographs by Peter Knapp, reinterpreted with his permission.

Around this central room, several artistic proposals are articulated, each offering a different interpretation of quantum physics. A first installation features images of an early female Instagrammer ahead of her time, self-portraits taken by an unknown woman in the 1940s, which Caroline Delétoille has reappropriated through digital work in continuity with her silkscreen works. The unknown woman reveals herself through the photographs, serving as an introduction before exploring the main exhibition room dedicated to the memory scene.

Upon exiting this room, a more concrete dive into the laboratory universe is proposed. Various elements collected by Caroline Delétoille during her residencies at the Kastler Brossel Laboratory in Paris and the Quantum Matter Institute in Vancouver are displayed in the manner of an ethnographic museum. They echo the pioneering work of laboratory immersion conducted by Latour and Woolgar, recounted in their book *Laboratory Life* (1979). Here, the spectacular machines give way to the cast-offs of experimental research: drafts, small tools, coffee counting systems... seemingly mundane objects that nonetheless reveal the laboratory’s universe, where makeshift solutions coexist with cutting-edge equipment and where touches of humor appear incidentally.

During her residencies, Caroline Delétoille also sketched and painted on the spot—for a moment, the laboratory became an atelier. A few researchers posed for her; they appear on sheets they have scribbled on, forming palimpsests where equations and more personal thoughts intermingle. The exhibition path ends with a video by Chadi Abo, a psychedelic epic in which the reconstructed memory scene appears.

Ultimately, we hope this exhibition will be “diffractive” in the (metaphorical) sense²⁵, where, resulting from a crossing of knowledge and practices, it invites a renewal of perspectives, a “quantum sensation” experience whose veil will have been partially lifted.

Notes

- 1 J. Zask (2024), *Admire. Praise of a Feeling that Makes Us Grow* (in French).
- 2 A. Grothendieck (1983-86/2022), *Harvest and Sowing*.
- 3 C. Rovelli (2020), *Helgoland*.
- 4 “Posthuman Performativity” (2003) and *Meeting the Universe Halfway* (2007).
- 5 The introduction of this theory is due to C. Rovelli (1996), “Relational Quantum Mechanics.”
- 6 To quote the British chemist C.P. Snow (1959) in a famous speech, “The Two Cultures and the Scientific Revolution”.
- 7 For the history of this divide between science and culture, see also J. M. Lévy-Leblond (2013), *The Great Divide: Science Between Technology and Culture* (in French).
- 8 N. Bohr (1955), “The Unity of Knowledge”.
- 9 A. Miller (2014), *Colliding Worlds. How Cutting-Edge Science is Redefining Contemporary Art*.
- 10 For example, the arrival of dedicated museographic institutions (ZKM, Center for Art and Media Karlsruhe), independent research networks (the Canadian Hexagram network or the SymbioticA laboratory in Australia), biennials (Ars Electronica in Austria, Transmediale in Berlin, or the Nemo biennial in France). A large number of initiatives have emerged since the 2000s, such as the artistic residency programs at CERN and CNES, among the most visible in the French-speaking world.
- 11 I. Prigogine and I. Stengers (1996), *The End of Certainty*.
- 12 “The fantastic foundations of reality.” Quote by F. Coppola, referenced in J. Kripkal (2024), *How to Think Impossibly*.
- 13 *An Atom of Wisdom. Writings by a Physicist on Veiled Reality* (1982). Quantum theory would not refer to realities having an existence in themselves, but would rather certainly be relational in nature.
- 14 The so-called “Many-Worlds Interpretation” (Everett, 1957).
- 15 Quote reported by W. Heisenberg.
- 16 See also F. Capra (1975), *The Tao of Physics. An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism*, which examines the bridges between quantum physics and Taoism. Regarding the philosophical implications of quantum theory, C. Rovelli (2020) frequently cites one of the leading thinkers of Indian philosophy, Nāgārjuna.
- 17 This jest, introduced by physicist David Mermin (“Could Feynman have said this?”, 2004), refers to a 1950s approach to physics, more focused on practical applications than philosophical discussions.
- 18 On this subject, see for example M. Bitbol (1996), *Quantum Mechanics: A Philosophical Introduction* (in French).
- 19 Title borrowed from P. Weber and J. Delsaux (2024), “For a Quantum Plasticity” (in French). The authors refer by this expression to “the form that in imagination the novice may seek to give to proven phenomena but that would not be accessible to his senses of perception.”
- 20 Here I refer to several approaches that account for the great diversity of “quantum diffractions” in the field of visual arts.
- 21 According to the words of Mériam Korichi and Olivier Dadoun. Catalogue of the exhibition “Cloud Chamber” (Curator: O. Dadoun, L’ahah, Paris, 2023).
- 22 According to the title of a video by YouTuber David Louapre on his channel “Stunning Science” <https://youtu.be/zPolTp0ddRg> (in French), video viewed on December 15, 2024.
- 23 Can a painting influence a quantum physicist? The father of physicist Bernard d’Espagnat, Georges d’Espagnat, was a painter himself, and Bernard credits his father with having influenced his sensibility as a researcher.
- 24 Another essential artist, in the field of engraving this time, Maurits Cornelis Escher, corresponded with the scientist Roger Penrose and is said to have inspired him.
- 25 Strictly speaking, diffraction is a physical phenomenon that occurs when waves encounter an obstacle in their path, causing interferences.

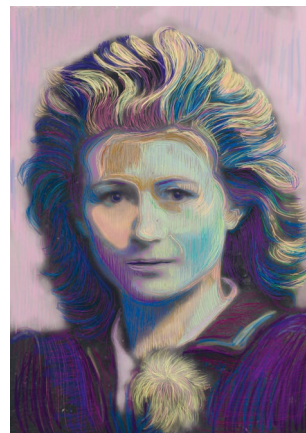
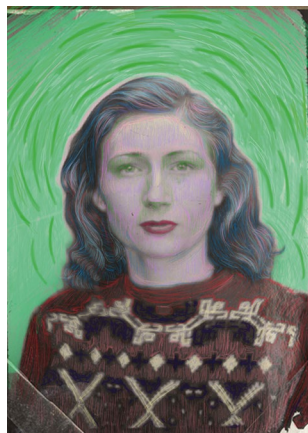
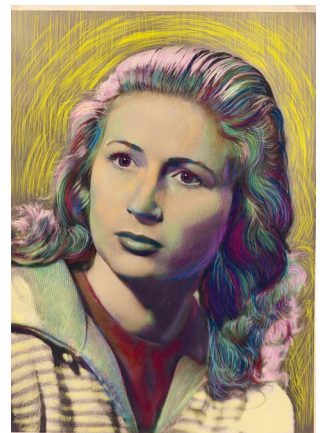
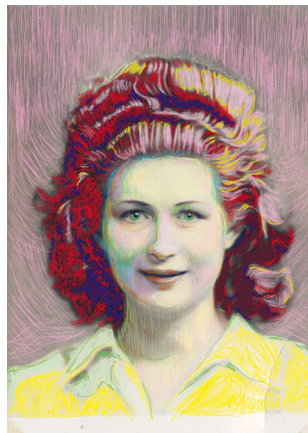
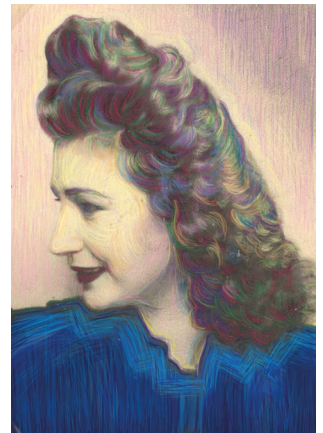
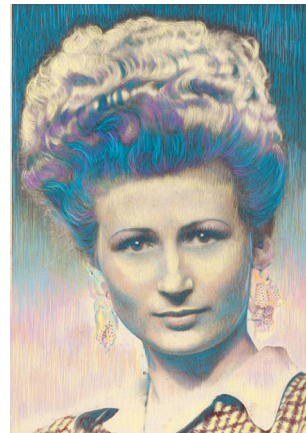
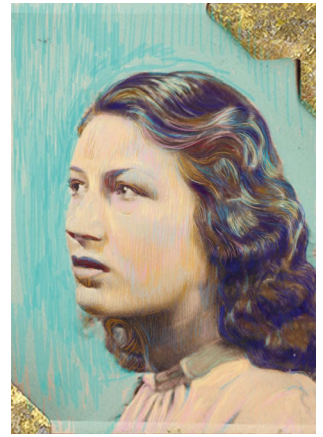
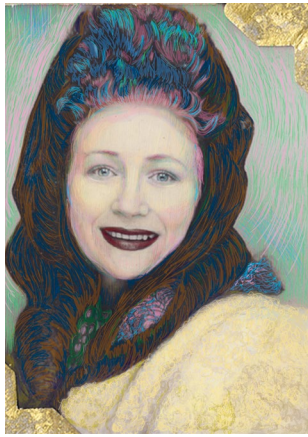
Caroline Delétoille

ME VOIS-TU ?

Une expérience importante menée dans les laboratoires quantiques consiste à observer des atomes. Les scientifiques les piègent à l'aide de pinces optiques créées à partir de faisceaux lumineux. Ces objets invisibles se dévoilent alors, s'allumant et s'éteignant. Ils révèlent à chaque observation une facette sensiblement différente et identique. J'y ai trouvé un écho dans l'album de cette inconnue des années 40 qui, étrangement, s'est prise en photo et mise en scène dans une centaine d'autoportraits précieusement compilés dans un album qu'elle a gardé toute sa vie. Comme dans un jeu, elle semble nous dire : « me voyez-vous? ».

CAN YOU SEE ME?

Observing atoms is a key experiment conducted in quantum laboratories today. Scientists trap them using optical tweezers created from beams of light. These invisible objects then reveal themselves, lighting up and fading away. With each observation, they show a facet that is both subtly different and identical. I found an echo of this in the album of an unknown woman from the 1940s who, strangely, photographed herself and staged herself in a hundred self-portraits carefully compiled in an album she kept her whole life. Like in a game, she seems to ask us: "Can you see me?".



dition Image Calque Texte Sélection Filtre Affichage Modules externes Fenêtre Aide

11 Mode : Normal Opacité : 23 % Flux : 100 % Lissage : 10 % 0°

@ 100% (Calque 6, RVB/8) x



Sélectionner un sujet

Supprimer l'arrière-plan

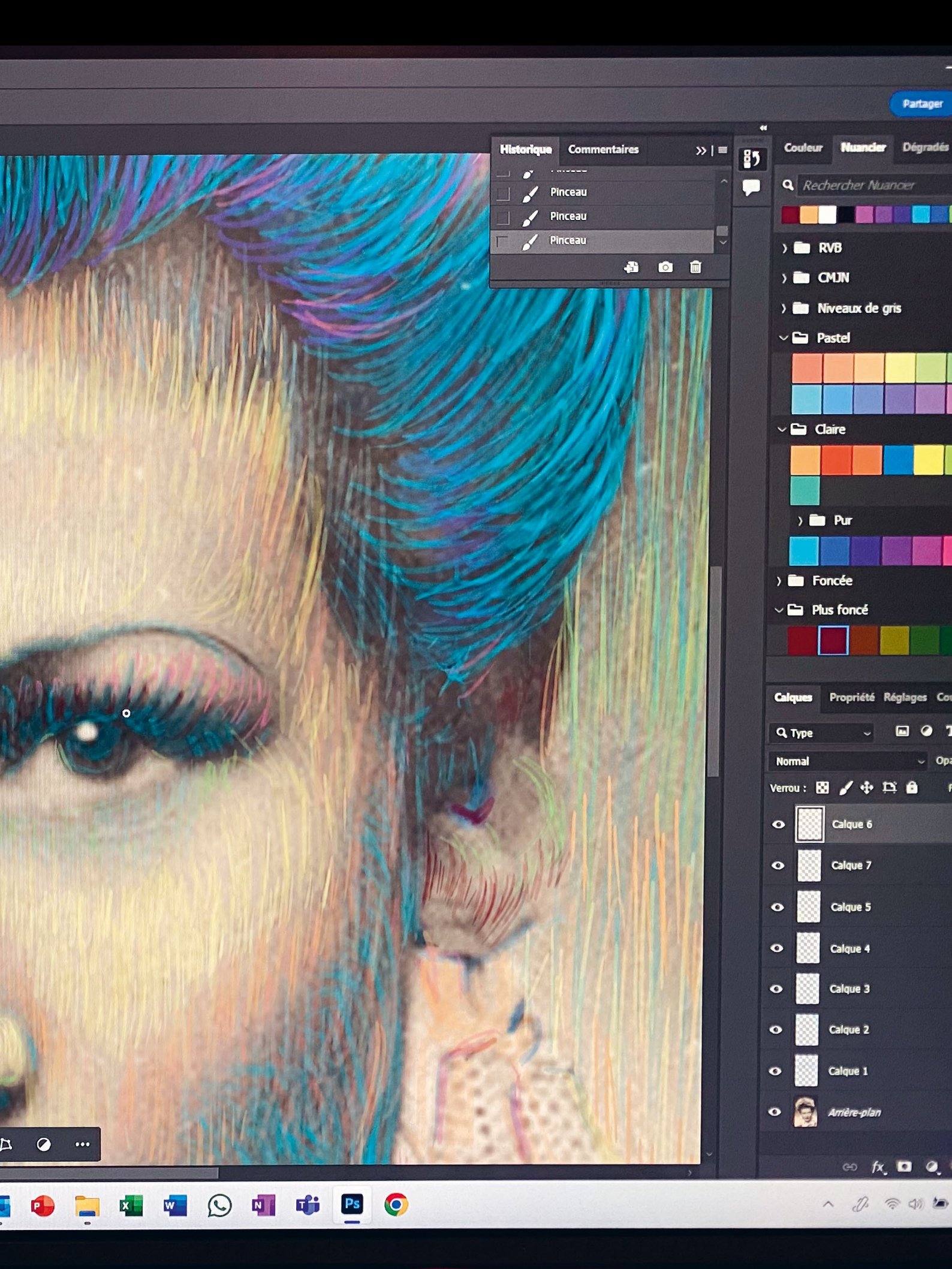
100 % 2480 px x 3508 px (72 ppp)

1°C
Nuageux



Rechercher





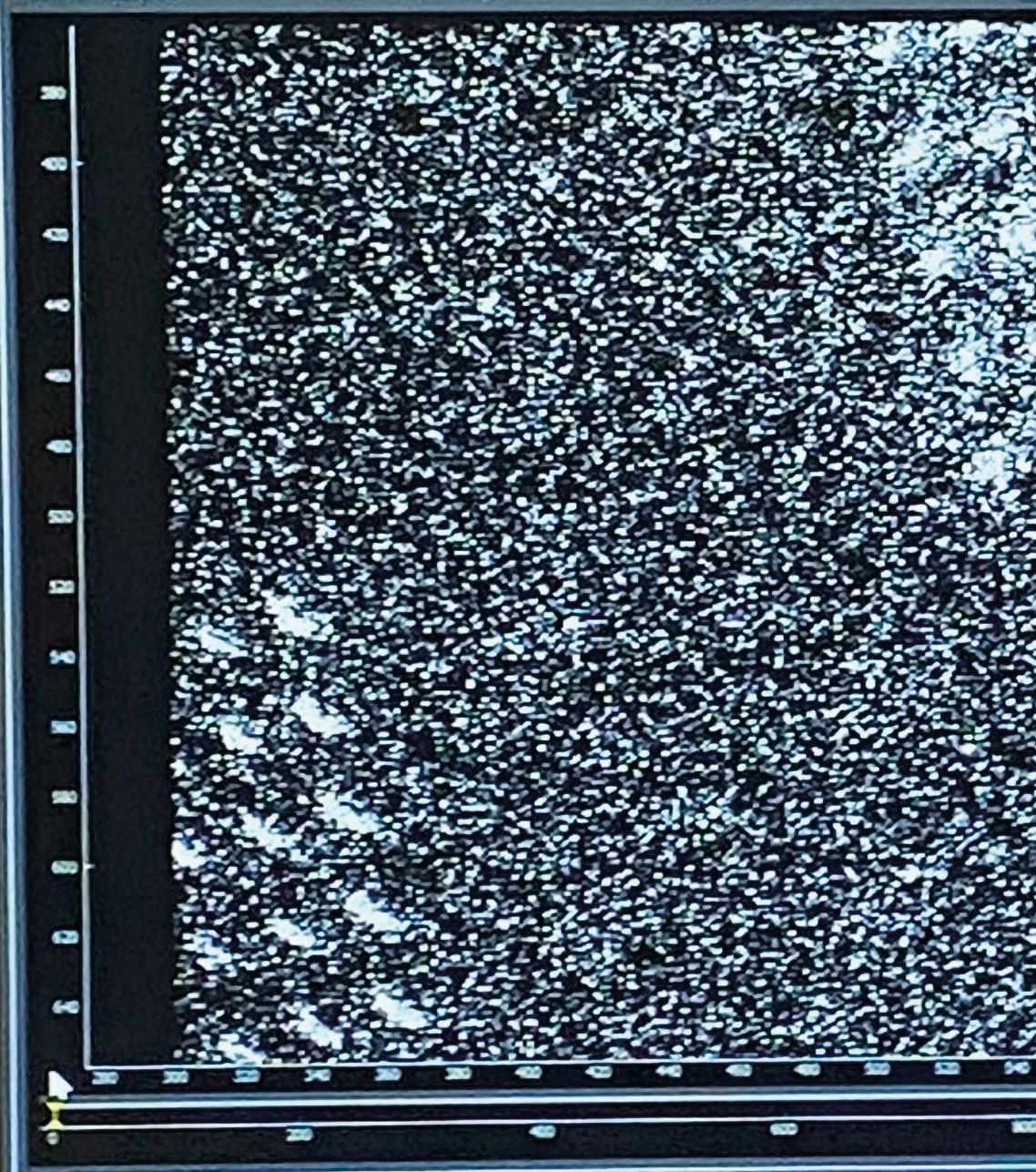
File

1238/1238

☒ 1st ☒ 2nd ☐ 3rd

☐ Display ROIs

Imin



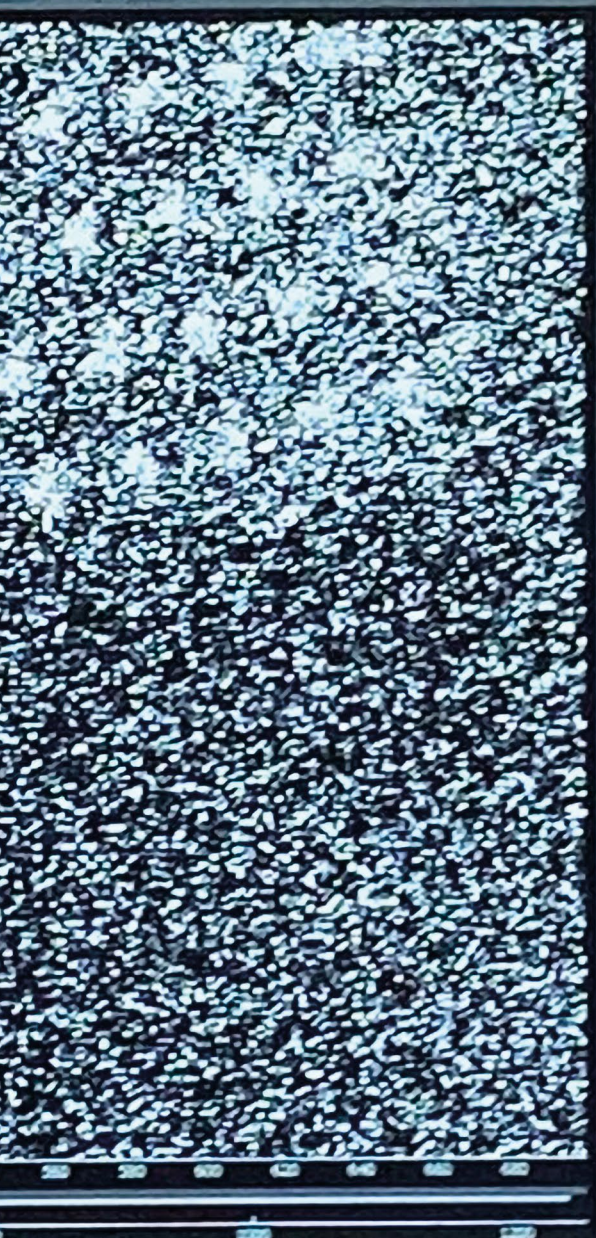
X:

Y:

Get Temperature

CESAR

Plot Average



Acquire

About

Auto

1250

Settings

- .json file

- By Ryd seq

Get from Delta E

■ Keep Optical Data

Compute ROI Data

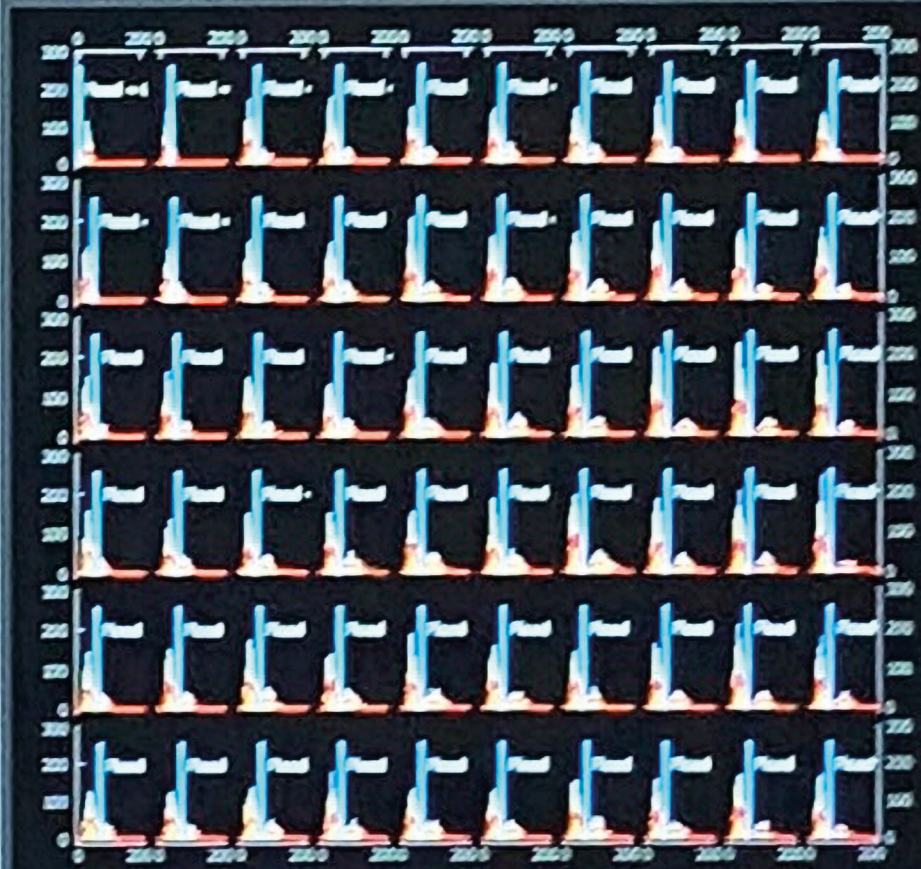
☐ Raw images Save D

Histograms

● Fit thresholds

Plot Histograms

Pload= 0.3525



Data Analysis

Data Input: ■ Latest acquisition

Data name: CA004

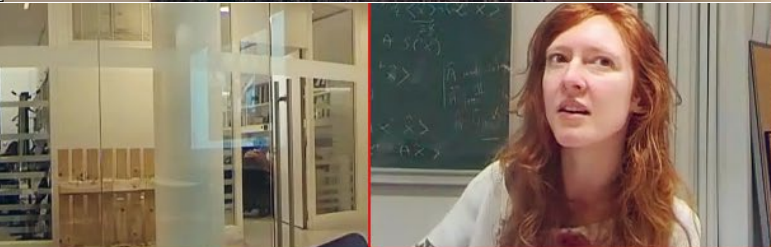
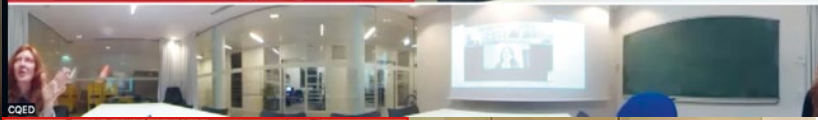
Script: scan_loading_tweezers.py

Update!

Analyze

DOLL

13°



Céline Boissérie-Lacroix, Aurore Young,
Caroline Delétoille, Shelly Rosenblum

COLLABORATIONS ART+SCIENCE : CONVERSATION 1

Cette conversation entre Céline Boissérie-Lacroix, Caroline Delétoille, Aurore Young et Shelly Rosenblum a eu lieu en octobre-novembre 2024. Elle a été révisée et condensée pour en améliorer la clarté.

Céline Boissérie-Lacroix : Je suis philosophe, spécialisée en philosophie de l'esprit et en sciences cognitives. Mon travail porte sur les émotions. Ma thèse de doctorat concernait plus particulièrement la relation entre les émotions et la rationalité. Par ailleurs, je m'intéresse aux liens et aux écarts entre les arts et les sciences contemporaines.

Aurore Young : Je suis doctorante en physique quantique au Laboratoire Kastler Brossel à Paris. Ma thèse porte sur les simulations quantiques. Pourquoi les atomes interagissent-ils de cette façon ? C'est en gros ce que je fais, surtout quand je suis au labo, et un peu de théorie pendant mon temps libre. J'ai rencontré Caroline pendant mes études de mathématiques, avant de passer par une école d'ingénieur et de travailler dans la programmation pour l'industrie du jeu vidéo. Au fond, je voulais retourner aux sciences fondamentales, et c'est ce qui a motivé la suite de mon parcours.

Caroline Delétoille : Je suis artiste visuelle. Je m'intéresse dans mon travail à la mémoire, aux traces qu'elle nous laisse et aux récits que nous nous racontons à leur sujet. Je travaille beaucoup avec la peinture, en utilisant différents médiums. Pour ce projet, je me tourne plus vers l'installation, pour créer une atmosphère immersive, que nous souhaitons être une véritable expérience sensorielle.

Shelly Rosenblum : Je suis conservatrice des programmes académiques à la Belkin, une galerie d'art contemporain située sur le campus de l'Université de British Columbia à Vancouver. Mon parcours m'a conduite à un doctorat en littérature anglaise. Je m'intéresse aussi depuis longtemps aux cultures visuelles et imprimées américaines, notamment aux transformations des technologies du visible au XIX^e siècle.

Je trouve que la question des termes que chacune d'entre vous utilise, issus de vos disciplines respectives, est très intéressante. Lorsque vous les employez dans vos échanges, ils semblent appartenir à un même lexique, mais peut-être qu'ils désignent des réalités très différentes. Est-ce un point que vous avez abordé dans votre travail ? Plus généralement, je suis curieuse de savoir comment vous communiquez entre vous. Est-ce que les mêmes termes ont la même signification pour toutes, ou sont-ils interprétés différemment ?

Caroline Delétoille : On a beaucoup discuté de l'utilisation du terme « analogie ». Pour Céline et moi, et même pour un public plus large, cela veut simplement dire « comparaison », dans un sens assez large. Mais pour les physiciens, ce mot a une définition beaucoup plus stricte. Cela nous a conduit à des discussions animées sur la direction à prendre. D'ailleurs, la définition même de notre sujet a été un point de friction.

Céline Boisserie-Lacroix : J'aborde la question des souvenirs et des émotions, ainsi que les termes autour de l'idée d'expérience, à travers ma perspective philosophique. Comme Caroline vient de le dire, la question de l'analogie a été au cœur de nos discussions dès le début, surtout parce qu'on voulait établir une connexion claire entre la physique quantique et les souvenirs. On a vite constaté que l'analogie pouvait être une clé intéressante pour ça. Ce qui m'a un peu surprise, c'est que les physiciens et les philosophes ne comprennent pas ce terme de la même façon.

Aurore Young : Quand on a discuté avec le comité scientifique, je ne pensais pas que des physiciens allaient réagir à un mot aussi simple. Au début, je le comprenais de la même manière que Céline et Caroline. Mais quand on a dû le préciser, j'ai vu qu'il y avait une vraie différence dans nos approches car en science, l'analogie est très stricte. Cela veut dire qu'on peut expliquer un phénomène par un autre, parce qu'ils obéissent aux mêmes équations. C'est vraiment un sens très étroit. Du coup, on a craint qu'en utilisant ce mot, certains pensent que la mémoire et le souvenir fonctionnent de la même manière que la physique quantique, ce qui est faux.

Caroline Delétoille : Il y a aussi un autre point sur le langage et la communication. Souvent, nos discussions restaient entre nous trois, mais il y a aussi eu des moments où il fallait partager nos idées avec des gens extérieurs, comme les physiciens du Laboratoire Kastler Brossel. Et là, Aurore a vraiment joué le rôle de traductrice de nos concepts. Ensuite, d'autres ont pu prendre le relais. Ils parlaient un autre langage, celui des principes de la physique quantique, avec des débats autour de concepts comme l'inégalité d'Heisenberg. Je me souviens m'être mise à l'écart de ces discussions, en me disant qu'Aurore me traduirait tout ça et qu'on pourrait avancer ensemble ensuite.

Céline Boisserie-Lacroix : Je ne sais pas ce que vous en pensez, mais je trouve que la philosophie a vraiment été un terrain d'entente naturel entre nous, qui nous a permis d'aller à l'essentiel tout en naviguant à travers nos différentes disciplines.

Caroline Delétoille : Oui, je suis tout à fait d'accord. Tu t'es positionnée à des niveaux plus théoriques et méthodologiques, tout en nous guidant dans le projet, en revenant aux fondamentaux, en nous posant les bonnes questions sur notre méthodologie ou la nature de notre analogie.

Shelly Rosenblum : Je me demande si on pourrait aller plus loin dans la réflexion pour savoir s'il est nécessaire de créer ou de faire évoluer une méthodologie unique pour ce genre de projets. À quoi pourrait-elle ressembler? Et concrètement, à quoi ressemble une collaboration entre l'art et la science?

Caroline Delétoille : Notre approche au début a été de visiter le laboratoire et de commencer à échanger. On discutait toutes les deux semaines, puis c'est devenu toutes les semaines. On abordait des sujets différents, mais on revenait aussi toujours au cœur du projet, pour discuter de ce qui n'était pas encore clair. On a débattu de façon vraiment ouverte, chacune pouvait dire ce qu'elle voulait, et je pense que c'était très important qu'il n'y ait pas eu de barrière intellectuelle, qu'aucune d'entre nous ne pense qu'elle ne pouvait pas dire quelque chose, par peur que ça semble stupide.

Céline Boisserie-Lacroix : Ce qui nous préoccupait surtout, c'était de savoir comment transmettre la physique quantique à travers des ressentis, et quels ressentis chercher à susciter. Très vite, l'idée d'une analogie entre les objets quantiques et les souvenirs nous est apparue comme la bonne. Nous avons simplement constaté qu'on se trouvait au croisement de différentes notions : « expérimenter » la physique quantique, mais aussi la question de la mémoire. Ce qu'est une particule,

comment on peut la reconstruire, et d'autres questions philosophiques que les scientifiques peuvent se poser dans leurs recherches.

J'ai l'impression qu'au début, on a eu beaucoup de discussions théoriques au croisement de ces différentes notions. Peut-être que je suis un peu biaisée, mais je trouve que ces discussions étaient quasi-philosophiques, au sens où, comme tu l'as dit Shelly, on a eu une véritable discussion sur ce qu'on entend par « expérience », et on a aussi cherché à clarifier d'autres termes. Par exemple, qu'est-ce qu'une intrication ? Comment peut-elle être liée à la notion d'expérience ? Qu'est-ce que la mémoire ? On a dû affiner chacun des concepts qu'on utilise pour arriver à un point de vue commun.

Aurore Young : Je pense qu'il y a eu aussi une autre méthodologie qu'on n'a pas choisie mais qui s'est imposée à nous, c'est qu'on a dû parler à beaucoup de personnes différentes. On a dû parler aux scientifiques, ainsi qu'à ceux qui travaillent dans les instituts scientifiques et qui font de la vulgarisation. On a aussi dû parler à un producteur de films et à des gens dans la finance. Avec toutes ces différentes personnes impliquées d'une manière ou d'une autre dans le projet, il nous a fallu trouver des façons de parler qui puissent les toucher toutes. Et on s'est rendu compte qu'on ne pouvait pas utiliser le même type de discours pour toutes. On l'a donc adapté en fonction de ceux à qui on parlait.

Céline Boisserie-Lacroix : Je pense aussi à un autre concept clé dans notre démarche, pour lequel nous avions initialement des points de vue distincts Aurore et moi : la notion d'enchevêtrement, qui est au cœur de la réflexion de la philosophe Karen Barad. J'avais abordé ce terme dans la continuité de sa pensée, c'est-à-dire un enchevêtrement entre l'objet observé (la particule), l'observateur (le scientifique), et aussi le dispositif de mesure.

Notre approche a été de tester différentes idées. Parfois, avec Aurore on trouvait qu'elles étaient super intéressantes d'un point de vue conceptuel, mais Caroline nous répondait : « Où est l'art dans tout ça ? ». C'était comme une petite lutte de pouvoir entre nos disciplines.

Caroline Delétoille : Oui, parfois c'était un peu flou dans ma tête. Alors je leur disais : « D'accord, donc c'est cette chose, ce concept, qu'on essaie de faire. Mais alors, où se situe la peinture dans tout ça ? ». Dans le même temps, je voulais que nous restions ancrées dans le laboratoire, et proches de la recherche. Qu'on parle vraiment de ce qui s'y passe.

Mais aussi, je pense que parmi les choses qui ont compté – je ne suis pas sûre que ce soit propre à notre collaboration – c'est que nous avons toutes les trois un parcours scientifique. Nous avons toutes commencé par faire des maths, peut-être que ça nous a aidées à mieux nous comprendre, d'une certaine manière.

Shelly Rosenblum : Dans la vulgarisation de la physique quantique, on retrouve souvent que les observations et les expériences ont un effet réel sur les résultats de ces expériences. C'est parfois interprété comme suggérant qu'il n'y a pas de « monde tout fait » là dehors, que les faits sont façonnés par notre observation. Il me semble qu'il y a quelque chose d'analogue pour les faits des émotions humaines, qui sont aussi façonnées par nos interactions. Nous ne pensons pas, par exemple, que les émotions doivent être expliquées sur une base strictement individuelle, mais plutôt, à une échelle sociale plus large. Et du côté de la pratique artistique, la relation avec le public occupe souvent une place centrale pour l'artiste ou l'interprète. Que pensez-vous de cette question si vaste, et un peu déroutante ?

Céline Boisserie-Lacroix : Merci beaucoup. Tu as raison, cet effet de l'observation est vraiment au cœur de la façon dont la physique quantique a été théorisée. Du point de vue du physicien, cela signifie que l'observateur a un effet sur ce qu'il observe ; c'est l'interprétation classique de la physique quantique. D'un point de

vue philosophique, cela a deux conséquences : une ontologique et une épistémique. La première, c'est l'idée que peut-être les choses n'ont pas de propriétés en soi, mais qu'elles seraient simplement relatives. Et d'un point de vue épistémique, on peut se demander s'il est vraiment possible de connaître les choses, sans avoir de point de vue particulier.

Aurore Young : Je veux bien entrer dans la discussion, mais tu as dit tellement de choses !

Céline Boisserie-Lacroix : C'est juste qu'il y a plusieurs façons d'aborder la question. Je ne veux pas être trop catégorique, mais une approche forte serait de dire qu'en fait, les particules ne possèderaient pas de propriétés intrinsèquement, en dehors d'un dispositif relationnel.

Aurore Young : Oui, on interfère avec la particule, il y a une sorte de flou, mais on sait exactement ce que c'est, comment elle va se comporter, et où elle va se trouver. On sait exactement où elle sera centrée. Si tu parles d'une sorte de propriété existant sur une sphère, on sait qu'on ne va pas la retrouver sur un carré ou sur un cube. Par exemple, on sait qu'elle sera un peu floue, mais globalement, on saura quelle sera la trajectoire principale de l'objet.

Céline Boisserie-Lacroix : C'est pour ça qu'on n'est pas au même niveau de discussion. Parce que quand j'ai dit qu'il y avait toutes ces approches, c'est important de comprendre que ce qu'on entend par « système », c'est le système d'observation dans son ensemble. Ça veut dire la particule observée, le dispositif expérimental qui permet de l'observer – dans ton cas, un microscope, les différentes optiques, le système de visualisation, etc. –, et toi bien entendu. Donc, ce qu'on cherche dans cette théorie philosophique, c'est de savoir si des propriétés de la particule pourraient exister ou être connues indépendamment du système d'observation.

Aurore Young : Oui, c'est juste un peu étrange parce que je comprends ce que tu veux dire par les propriétés, mais pour l'objet en lui-même, on sait que si on répète l'expérience, on va observer quelque chose. Ça ne va pas simplement sortir du néant. Mais oui, tant que je ne l'ai pas observé, je ne peux pas exactement prédire sa propriété.

Céline Boisserie-Lacroix : Oui, tout à fait.

Aurore Young : Mais une fois que je l'ai observé, je sais où il va se trouver, dans une certaine mesure. Et je sais que je vais mesurer quelque chose.

Céline Boisserie-Lacroix : Fondamentalement, que tu veuilles connaître le spin ou une autre propriété, tu ne peux pas le savoir à l'avance. Ça ne devient clair que si tu fais une observation. C'est ce qu'explique l'expérience très connue du chat de Schrödinger, cette idée qu'on ne peut pas savoir si le chat est vivant ou mort tant qu'on n'a pas ouvert la boîte – c'est ça qu'on entend par « propriété » ici.

Aurore Young : Je veux dire, on sait que le chat est là. Il est dans la boîte, mais ce qu'on ne sait pas, c'est laquelle de ses propriétés est là.

Céline Boisserie-Lacroix : Oui, si sa propriété est d'être vivant ou d'être mort. Si tu ne peux pas connaître cette propriété indépendamment de tout acte d'observation et de tout système d'observation, alors cela soulève la question de savoir si cette propriété peut être connue dans l'absolu, voire même, si elle a une réalité hors de ceux-ci.

Souvent, on distingue les propriétés indépendantes de l'observateur, comme le dangereux, de celles qui en dépendent, comme l'effrayant ou le drôle. Par exemple, je vais dire que cette blague est amusante, peut-être seulement si j'en ris.

Si on reprend cette distinction, on peut alors se demander : puisque nous avons ces deux types de propriétés bien distinctes, que peut-on dire des propriétés des objets quantiques ?

Aurore Young : Mais comment cela remet-il en question la notion de réalité ? Parce qu'on parle de certaines propriétés de certains objets, et ce sont des objets au niveau microscopique. Dans notre monde où on appelle beaucoup de choses « classiques », la science peut prédire exactement ce qui va se passer. Et donc, pourquoi parle-t-on de réalité ? Parce qu'on sait que ces objets existent. On ne sait juste pas la réalité de certaines de leurs propriétés.

Céline Boisserie-Lacroix : C'est cette question des propriétés des choses qui constituent notre monde.

Aurore Young : Oui, d'accord.

Caroline Delétoille : On parlait justement avec un chercheur à Paris et il nous disait qu'il y avait une cinquantaine d'articles par jour sur ces questions soulevées par la physique quantique et les physiciens. Cela crée toujours, au sein de la recherche, une petite discussion animée comme celle-ci.

Aurore Young : Oui, il y a beaucoup d'interprétations sur ce qui se cache exactement derrière la réalité de certaines propriétés de certains objets. Donc oui, cela soulève beaucoup de débats, mais je pense que c'est surtout une question d'interprétation. Mais peut-être que c'est justement sur ça que porte la philosophie, et la philosophie quantique en particulier.

Céline Boisserie-Lacroix : Pour faire très simple, une partie de notre connaissance du monde est très basique, acquise directement par l'expérience. On voit le monde, et puis on en tire des connaissances. Et puis il y a une autre manière d'acquérir des connaissances, plus rationnelle : par le raisonnement, par la réflexion, etc. Les connaissances qu'on acquiert en physique quantique sont-elles de nature différente de celles qu'on acquiert en physique classique, où ces deux manières d'acquérir de la connaissance concordent ?

Aurore Young : Oui, dans une perspective plus large, parce qu'on peut observer des phénomènes qui n'apparaissent pas dans le monde macroscopique (le monde classique). Du point de vue de la connaissance, on sait qu'on élargit notre vision, parce qu'on observe davantage de phénomènes. On peut reconstruire un objet mathématique qui n'a pas de pertinence pour la physique classique, mais qui en a pour la physique quantique. Mais pour moi, cela reste toujours la réalité.

Caroline Delétoille : Mais, par exemple, j'ai discuté avec un physicien émérite, et il m'expliquait un phénomène quantique sur lequel il travaille. Je lui ai dit : « On dirait de la magie, parce que cela ressemble vraiment à quelque chose que je n'aurais jamais imaginé dans ma tête. » Et il m'a répondu : « Non, c'est de la physique quantique. Il faut simplement que vous admettiez que c'est ainsi, et ne pas vous dire que c'est de la magie. C'est la vraie vie ! Une fois que vous arrêterez de chercher à l'expliquer rationnellement, contentez-vous de suivre l'équation, de faire la mesure, et vous avancerez. »

Aurore Young : Quelque chose est magique tant qu'on ne le comprend pas. Peut-être qu'il y a des choses que nous ne serons jamais capables de comprendre, parce que nous sommes construits d'une manière qui ne nous permet pas d'accéder à ce type de connaissance. Donc peut-être que certaines choses resteront toujours magiques. Mais quand ce physicien a dit qu'il fallait abandonner une certaine rationalité, peut-être voulait-il dire qu'il fallait abandonner l'espoir de

comprendre pourquoi c'est ainsi. Le « pourquoi » est une question très large. Et peut-être que c'est cela, la philosophie.

Peut-être qu'en tant que physiciens, on essaie davantage de répondre à la question du « comment ». Si j'ai cette condition initiale, que va-t-il se passer ? Et comment ? Mais le « pourquoi », on ne s'en occupe pas. C'est de la philosophie, voire de la métaphysique, et non de la physique à proprement parler. Je dirais que lorsque ce professeur émérite dit qu'il faut simplement suivre l'équation et ne pas chercher rationnellement à comprendre pourquoi c'est ainsi, oui, je suis assez d'accord avec ça. Parce qu'il y a tellement de questions en « pourquoi » auxquelles on ne peut pas répondre. Alors, concentrons-nous juste sur ce qui va nous arriver si on fait cette expérience et essayons de prédire ce qui va arriver. C'est ce qui nous intéresse, et ça suffit. Il y a déjà assez de choses qu'on ne comprend pas encore, mais qu'on pourrait espérer comprendre. La partie du « pourquoi », on la laisse à d'autres.

Caroline Delétoille : Aux philosophes et aux artistes, n'est-ce pas ?

Aurore Young : Beaucoup de physiciens deviennent philosophes après leur carrière, comme Niels Bohr. Il a commencé en tant que physicien, puis il a développé un point de vue philosophique. Mais ce sont justement des points de vue philosophiques. Du point de vue du physicien, ce ne sont pas des choses prouvées ou testées. Peut-être qu'on doit simplement faire la distinction entre les deux.

Céline Boisserie-Lacroix : Ce sont des ordres de vérité différents, non ?

Aurore Young : Je ne sais pas ce que tu entends par vérité.

Céline Boisserie-Lacroix : Une vérité scientifique, par exemple. Ou une théorie, qu'elle soit scientifique ou philosophique, on essaie de prouver qu'elle est vraie.

Aurore Young : Quand tu parles de vérité scientifique, tu veux dire en lien avec quelque chose qu'on peut observer dans notre réalité. Mais quand tu parles de vérité, comme *la vérité*, je ne sais pas ce que c'est.

Quand j'observe des phénomènes quantiques, à l'échelle microscopique, je pense que j'ai développé une sorte d'intuition. Mais j'aurais toujours cette impression d'étrangeté quand je pense au pourquoi, quand je me demande *pourquoi* c'est comme ça. C'est un peu comme quand on se met à penser à ce qu'il y a au-delà de l'univers, au-delà de ce qu'on peut observer. Ça provoque une sensation similaire à celle d'une perte d'équilibre.

Céline Boisserie-Lacroix : Et peut-être une sensation d'inconnu, un vertige... comme le Pascal le penserait.

Aurore Young : Oui. D'accord, donc on voulait revenir aux émotions, mais je ne me souviens plus comment.

Caroline Delétoille : Peut-être en revenant à mon travail. J'utilise la figure humaine parce que cela m'émeut, et cela transmet aussi une émotion aux spectateurs. Les spectateurs peuvent s'identifier, entrer en relation à l'objet, et c'est vraiment ce que je recherche quand je développe un sujet. Et c'est ce qu'on a trouvé intéressant aussi : une façon de saisir l'étrangeté de la physique quantique, de manière intuitive.

Aurore Young : Oui, peut-être que c'est une bonne façon de transmettre un concept quantique, car si les gens peuvent vraiment s'identifier à cela, cela deviendra plus facilement compréhensible, avec des intuitions.

Caroline Delétoille : Sur la question de la compréhension des concepts, il y a beaucoup à dire. L'artiste Luis Camnitzer est très intéressant. Il explique qu'à un

moment de son travail, il a retiré les images et n'a gardé que les mots, comme si les mots eux-mêmes transmettaient de grandes émotions, d'une autre manière. Peut-être que les émotions peuvent être transmises par des images avec lesquelles on s'identifie. Céline, tu pourras nous en dire plus.

Céline Boisserie-Lacroix : Très tôt dans le projet pour l'exposition, on voulait transmettre quelque chose de ce regard que la physique quantique nous pousse à porter sur le monde, sa singularité. Peux-tu développer le parallèle avec les souvenirs, comment cela se rapporte à ton travail ?

Caroline Delétoille : Quand nous avons réfléchi à la manière dont ce principe de l'observation quantique pourrait être traduit pour parler aux gens, la mémoire est un sujet qui est naturellement venu sur la table, car c'est l'un de mes principaux domaines de recherche. Or la mémoire est subjective, les souvenirs changent légèrement à chaque fois qu'on y pense. À chaque fois qu'on pense à un même souvenir, on l'affine et on reconstruit progressivement une image plus claire de ce qui s'est passé ce jour-là, à ce moment précis.

Cela nous a amenées à proposer dans cette exposition une scène archétypale, une mémoire anonyme partagée. Les visiteurs pourraient ainsi vivre une expérience qui résonnerait intimement en eux, les mettant en mouvement, un peu comme au cinéma. Cela fonctionnerait comme un parallèle avec le processus suivi par les physiciens quantiques pendant leurs mesures et leurs observations.

Pour cela, nous avons collaboré avec le Musée Niépce de la photographie. Nous avons discuté avec eux des archives qu'ils possédaient, des scènes qui pourraient être intéressantes. Nous avons parcouru de nombreuses images jusqu'à trouver cette captation d'un déjeuner familial qui dégageait une sorte d'étrangeté. J'aime l'étrangeté, car elle suscite une interaction, une réaction. Lorsqu'une image est étrange, on se demande : « Quoi ? Qu'est-ce qu'il se passe ? ». Cette interrogation crée une relation à l'image.

Aurore Young : On aime l'étrangeté. Sinon, on ne s'y intéresserait pas autant.

Céline Boisserie-Lacroix : C'est un peu comme l'expression de Freud, l'« inquiétante étrangeté ». Et des objets du quotidien, d'ordinaire très communs, peuvent parfois nous apparaître étranges, voire inquiétants.

Caroline Delétoille : Oui, je pense que l'étrangeté crée un petit décalage, à un moment donné. Donc au final, on a choisi cette scène familiale. On ne comprenait pas tout à fait ce qui s'y passait...

Puis le Musée Niépce est venu avec l'idée d'une archive de Peter Knapp, un photographe suisse qui a réalisé toute une série avec des nuages, et j'ai aimé ça. Ensuite, pour le public, on voulait aussi jouer sur cette sensation, cette sensibilité. Disons que tu es dans un espace qui brouille tes repères. Tu avances, puis soudain tu as une vision, tu te souviens de cette scène. Tu traverses un nuage, tu ne sais plus où tu es. Puis vient la perception du son. On voulait vraiment explorer ce que pourrait être un son quantique, une atmosphère sonore.

En travaillant sur cette analogie, pour la rendre sensible, sensorielle, on a eu de plus en plus de discussions, on s'est de plus en plus immergées dans le laboratoire. Et on s'est rendu compte que le laboratoire était un peu comme un atelier d'artiste.

Petit à petit, l'idée d'un autre espace s'est naturellement imposée. On voulait que les visiteurs passent d'un monde à un autre : du monde des atomes au monde du laboratoire. Tu entres dans l'arrière-salle, tu ouvres une porte... qu'est-ce qui se passe ? J'aime cette zone floue entre l'atelier d'artiste et le labo scientifique. Les scientifiques, ce sont aussi des artisans, d'une certaine manière. Et il y a une vraie similitude dans les processus de recherche. Il y a une esthétique du mystère et de l'inconnu qui se dégage.

Finalement, cela fera aussi partie de l'exposition. Et on va travailler avec un réalisateur pour créer un film qui rassemblera tous ces mondes. Le monde des atomes

sera mis en relation avec celui des scientifiques qui collaborent en laboratoire – le tout sous le regard du réalisateur.

Shelly Rosenblum : Au début, Aurore disait qu'elle acceptait l'étrangeté de l'inconnu, mais qu'il y a ensuite un travail de traduction. La dernière fois, nous avons beaucoup parlé de l'analogie comme outil, et aujourd'hui, on a beaucoup discuté de ses limites. Par exemple, dans le dialogue entre un philosophe et un physicien. À un moment donné, dans une collaboration comme celle-ci, il faut mettre de côté ses doutes, ne pas forcément renoncer à la rigueur, mais peut-être une certaine précision est requise pour vraiment pouvoir travailler ensemble.

Caroline Delétoille : Une chose qu'un physicien m'a dite et qui m'a frappée, c'est que lorsqu'on parle à un scientifique ou un physicien, ce qu'on attend d'eux, c'est une objectivité pure. Et lorsqu'on parle à un artiste de ce qu'il fait, on attend une pure subjectivité. Mais ce sont aussi des injonctions. Et c'est précisément ces deux choses qu'on essaie de rapprocher.

Céline Boissérie-Lacroix : Oui c'est vrai. Je ne sais pas pour toi, Caroline, mais Aurore est peut-être la plus objective d'entre nous. Mais en tant que philosophe, je manie aussi une autre forme d'objectivité. Donc il fallait naviguer entre cela.

Aurore Young : Oui, et puis c'est un préjugé sur les artistes et les scientifiques, non ? Les artistes doivent faire preuve de rigueur dans leurs techniques. Et les scientifiques doivent être créatifs pour imaginer de nouvelles façons de penser le monde. Donc, au final, ce n'est peut-être pas si difficile de travailler ensemble... une fois qu'on dépasse ces idées reçues.

Caroline Delétoille : Ces préjugés, oui.

Shelly Rosenblum : Et c'est aussi ce qui rend ces collaborations si riches : la déconstruction de ces stéréotypes tenaces.

Céline Boissérie-Lacroix, Aurore Young,
Caroline Delétoille, Shelly Rosenblum

ART+SCIENCE COLLABORATIONS: CONVERSATION 1

This conversation between Céline Boissérie-Lacroix, Caroline Delétoille, Aurore Young, and Shelly Rosenblum took place throughout October-November 2024 and has been edited and condensed for clarity.

Céline Boissérie-Lacroix: I'm a philosopher, specializing in philosophy of mind and cognitive science. My work focuses on emotions. My PhD thesis was specifically about the relationship between emotions and rationality. Additionally, I'm interested in the connections and gaps between contemporary arts and sciences.

Aurore Young: I'm a PhD student in quantum physics at the Laboratoire Kastler Brossel in Paris. My thesis is about quantum simulations, trying to understand why some atoms interact like they do. So that's what I do, mainly in my lab time and a bit of theoretical things in my free time. I met Caroline during my mathematics studies before going to an engineering school and working in programming for the video game industry. Ultimately, I wanted to return to fundamental sciences, and that's what motivated the next phase of my career.

Caroline Delétoille: I'm a visual artist. My work focuses on memory, the traces it leaves, and the stories we tell ourselves about them. I work a lot with painting, using different mediums. For this project, I have turned more towards installation to create an immersive atmosphere, which we want to be a true sensory experience.

Shelly Rosenblum: I'm the curator of academic programs at the Belkin, a contemporary art gallery here at the University of British Columbia. My own circuitous path took me through a PhD in English literature. I have a longstanding interest in thinking about US print and visual cultures, specifically changes in technologies of seeing in the 19th century.

I'm really interested in the terms that you each use that come from your own disciplines. When you bring them together, they seem like the same lexicon, but maybe they index very different things, and I wonder if that's something you address in your work together. For example, some of the words that I've heard today in our conversations, such as surface and depth, the way we think about past, history, or memory, or more obvious terms, such as uncertainty or entanglement. I'm really curious about the question of communication among all of you. Do the same terms that you use index the same things or different things?

Caroline Delétoille: We have had so many discussions about the term "analogy" itself. For Céline and for me, and even for a broader audience, it just means "comparison" in a broad sense. But for physicists, it has a much stricter definition. This led to some heated discussions about which direction to take. In fact, even the definition of our subject became a point of friction.

Céline Boissérie-Lacroix: I approach the question of memory and emotions, as well as terms related to the idea of experience, from my philosophical perspective. As Caroline just mentioned, the question of analogy was at the heart of our

discussions from the start, especially because we wanted to establish a clear connection between quantum physics and memory. We quickly realized that analogy could be an interesting key for that. What surprised me a bit was that physicists and philosophers don't understand the term "analogy" the same way.

Aurore Young: When we discussed this with the scientific committee, I didn't think physicists would react to such a simple word. At first, I understood it in the same way as Céline and Caroline. But when we had to clarify it, I saw there was a real difference in our approaches because, in science, "analogy" is very strict. It means you can explain one phenomenon by another because they obey the same equations. It's a very narrow sense. So we were worried that by using this word, some people might think memory and recollection work the same way as quantum physics, which is false.

Caroline Delétoille: There is also another point with the language and the communication. Often, our discussions stayed between the three of us, but there were also times when we had to share our ideas with outsiders, like the physicists at the Kastler Brossel Laboratory. And here, Aurore really played the role of translating our concepts. Then, others could take over. They spoke a different language, the one of quantum physics principles, with debates around concepts like Heisenberg's uncertainty principle. I remember stepping back from these discussions, thinking that Aurore would translate everything for me, and then we could move forward together.

Céline Boisserie-Lacroix: I don't know if you agree with me, but I feel like philosophy was really a natural common ground for us, one that allowed us to get to the heart of things while navigating through our different disciplines.

Caroline Delétoille: Yes, I totally agree. You positioned yourself at more theoretical and methodological levels, while guiding us through the project, returning to the basics, asking the right questions about our methodology or the nature of our analogy.

Shelly Rosenblum: I'm wondering if we could just press a little more on whether you have to invent or evolve a unique methodology for this kind of work and what it looks like. What does an art-science collaboration really look like?

Caroline Delétoille: At the start, our approach was to visit the laboratory and begin exchanging ideas. We met every two weeks, and then it became every week. We addressed different topics, but always came back to the heart of the project to discuss what was still unclear. We debated very openly, and anyone could say whatever they wanted, which I think was very important—there were no intellectual barriers, no one thought they couldn't speak up for fear of sounding stupid.

Céline Boisserie-Lacroix: What concerned us most was how to convey quantum physics through feelings, and which feelings we wanted to evoke. Very quickly, the idea of an analogy between quantum objects and memories appeared to us as the right one. We simply realized that we were at the crossroads of different concepts: "experiencing" quantum physics, but also the question of memory. What is a particle? How can we reconstruct it? And other philosophical questions that scientists might also ask in their research.

I feel like, at the beginning, we had a lot of theoretical discussions at the intersection of these different concepts. Maybe I'm a little biased, but I feel these discussions were almost philosophical, in the sense that, as you said Shelly, we had a real discussion about what we mean by "experience", and we also tried to clarify other terms. For example, what is entanglement? How could it be related to the concept of experience? What is memory? We had to refine each of the concepts we were using to arrive at a shared perspective.

Aurore Young: I think there was also another methodology we didn't choose but that imposed itself on us, which was that we had to talk to a lot of different people. We had to talk to scientists, as well as those who work in scientific institutes and do science communication. We also had to talk to a film producer and people in finance. With all these different people involved in the project in one way or another, we had to find ways to talk that would resonate with all of them. And we realized we couldn't use the same type of discourse for everyone. So we adapted it depending on who we were talking to.

Céline Boisserie-Lacroix: I'm also thinking of another key concept in our approach, for which Aurore and I initially had different views: the notion of entanglement, which is at the heart of philosopher Karen Barad's thinking. I had approached this term in continuity with her thought, meaning an entanglement between the observed object (the particle), the observer (the scientist), and the measurement device. Our approach was to test different ideas. Sometimes, Aurore and I found them really interesting conceptually, but Caroline would respond: "Where's the art in all this?" It was like a small power struggle between our disciplines.

Caroline Delétoille: Yes, sometimes it was a bit unclear in my mind. So I would say to them, "Okay, so this thing, this concept, that we're trying to do. But where does painting fit into all of this?" At the same time, I wanted us to stay grounded in the lab and close to the research. To really talk about all of this. But also, I think one of the things that mattered—I'm not sure if it's unique to our collaboration—is that we all have a scientific background. We all started with math, maybe that helped us understand each other better, in a way.

Shelly Rosenblum: In the popularization of quantum physics people often say that the facts of observation and experiments have an actual effect on the very outcomes of those experiments. This is sometimes interpreted to suggest that there isn't a "ready-made world" out there, that the facts are shaped by our observation. It seems like something analogous is true for the facts of human emotions as well, shaped as they are by human interactions. We don't think, for example, that emotional goings-on are to be accounted for on an individualistic basis, but rather on a broader social scale. And on the side of artistic practice, the rapport with the audience of the practice often takes center stage for the artist or performer. Could each of you speak to this broad and somewhat confusing area of concern?

Céline Boisserie-Lacroix: Thank you very much. You're right that this observation effect is really central to how we theorized quantum physics. From a physicist's point, it just means that the observer has an effect on what they observe; that's the classical interpretation of quantum physics. From a philosophical point of view, it has two consequences: one ontological and one epistemic. The first is the idea that maybe things don't have properties in themselves, but are simply relative. And from an epistemic point of view, we might ask whether it's truly possible to know things without a particular perspective.

Aurore Young: I want to enter into a discussion, but you said so many things!

Céline Boisserie-Lacroix: It's just that there are many ways to approach the question. I don't want to be too categorical, but one strong approach would be to say that particles don't actually have intrinsic properties, outside of a relational framework.

Aurore Young: Yes, we interfere with the particle, so there's a sort of blur, but we still know exactly what it is, how it will behave, and where it will be. We know exactly where it will be centered. When you were talking about a property existing on a sphere, we know it won't be found on a square or a cube. For example, we know it'll be a little blurry, but overall, we'll know the main trajectory of the object.

Céline Boissérie-Lacroix: That's why we are not on the same level in this discussion. Because when I said there are all these approaches, it's important to understand that what we mean by "system" is the whole observation system. This includes the particle being observed, the experimental setup that lets us observe it—in your case, a microscope, the different optics, the visualization system, etc.—and, of course, you. So, what we're trying to figure out in this philosophical theory is whether the properties of a particle could exist or be known independently of the observation system.

Aurore Young: Yes, it's just a bit weird because I get what you mean about properties, but for the object itself, we know that if we repeat an experiment, we'll observe something. It won't just come out of nowhere. But yes, as long as I haven't observed it, I cannot exactly predict its property.

Céline Boissérie-Lacroix: Yes, absolutely.

Aurore Young: But once I've observed it, I know where it will be, to some extent. And I know I'll measure something.

Céline Boissérie-Lacroix: Basically, whether you want to know the spin or another property, you can't know it in advance. It only becomes clear once you observe it. This is what the famous Schrödinger's cat experiment explains: you can't know whether the cat is alive or dead until you open the box—that's what we mean by property here.

Aurore Young: I mean, we know the cat is here. It's in the box, but what we don't know is which of its properties is there.

Céline Boissérie-Lacroix: Yes, if its property is being alive or being dead. If we can't know this property independently of any act of observation or any observation system, then it raises the question of whether this property can be known in the absolute, or even if it has any reality outside of the observation. We often distinguish between properties independent of the observer, like dangerous, and those that depend on the observer, like scary or funny. For example, I might say this joke is funny, maybe only if I laugh at it. If we go back to this distinction, we can then ask: since we have these two distinct types of properties, what can we say about the properties of quantum objects?

Aurore Young: But how does this challenge the notion of reality? Because we're talking about some properties of objects, and these are objects at the microscopic level. In our world, which we call "classical", science can predict exactly what's going to happen. So, why are we even discussing reality? Because we know these objects exist, we just don't know the reality of some of their properties.

Céline Boissérie-Lacroix: It's about the question of properties of things that make up our world.

Aurore Young: Yes, okay.

Caroline Delétoille: We were actually talking with a researcher in Paris, and he was saying that there are about fifty articles a day on the questions raised by quantum physics and physicists. And it sparked a little animated discussion within the research community, just like this one.

Aurore Young: Yeah, there are many interpretations about what exactly lies behind the reality of certain properties of certain objects. So yes, this raises a lot of debates, but I think it's mostly a question of interpretation. But maybe that's exactly what philosophy is about, and quantum philosophy in particular.

Céline Boissérie-Lacroix: To put it simply, part of our knowledge of the world is very basic, acquired directly through experience. We see the world, and then we gain knowledge from it. Then, there's another way of acquiring knowledge, a more rational one: through reasoning, reflection, etc. Are the knowledge we gain in quantum physics different from the knowledge we gain in classical physics, where these two ways of acquiring knowledge line up?

Aurore Young: Yes, from a broader perspective, because we can observe phenomena that don't appear in the macroscopic world (the classical world). From knowledge standpoint, we know we are expanding our view because we observe more phenomena. We can reconstruct a mathematical object that has no relevance for classical physics, but that does for quantum physics. But to me, it's still reality.

Caroline Delétoille: But, for instance, I discussed with an emeritus physicist, and he was explaining to me a quantum phenomenon he's been working on. I said to him: "Well, it looks like magic, because it really seems like something I would never have imagined in my head." And he said: "No, it's quantum physics. You just need to admit that it's like this, and not think it's magic. It's real life. Once you stop trying to explain it rationally, just follow the equation, take the measurement, and you'll move forward".

Aurore Young: Something feels like magic until we understand it. Maybe there are things we'll never be able to understand because we're made in a way that doesn't allow us to access this kind of knowledge. So maybe something will always remain magical. But when he said we need to abandon a certain rationality, maybe he meant we need to abandon the hope of understanding *why* it's like that. The "why" is a very broad question. And maybe that's philosophy.

Maybe, as physicists, we try more to answer the question of *how*. If I have this initial condition, what will happen? And how? But the why, we don't deal with. That's philosophy, or even metaphysics, not really physics. I would say, when this emeritus professor says we should just follow the equation and rationally try to understand why it's like this, yes, I can agree with that. Because there are so many "why" questions we can't answer. So let's just focus on what will happen if we conduct this experiment and try to predict what will happen. That's what interests us, and that's enough. There are already plenty of things we don't understand yet, but might hope to understand. The "why" part, we leave it to others.

Caroline Delétoille: To philosophers and artists, right?

Aurore Young: A lot of physicists become philosophers after their careers, like Niels Bohr. He started as a physicist, then developed a philosophical point of view. But those are precisely philosophical viewpoints. From the physicist's perspective, these aren't things that are proved or tested. Maybe we just need to make a distinction between the two.

Céline Boissérie-Lacroix: There are different orders of truth, right?

Aurore Young: I'm not sure what you mean by "truth".

Céline Boissérie-Lacroix: A scientific truth, for example. Or a theory, whether it's scientific or philosophical, we try to prove that it's true.

Aurore Young: When you talk about scientific truth, you're talking about something that can be observed in our reality. But when you talk about truth, like *the* truth, I don't know what that is.

When I observe quantum phenomena at the microscopic scale, I think I've developed a sort of intuition about this specific scientific truth. But I will always have this sense of strangeness when I think about the why, when I ask myself why it's

like that. It's a bit like when you start thinking about what's beyond the universe, beyond what we can observe. It causes a feeling similar to losing your balance.

Céline Boissérie-Lacroix: And maybe a feeling of the unknown, vertigo... as Pascal would think.

Aurore Young: Yes. Okay, so we wanted to go back to emotions, but I don't remember how.

Caroline Delétoille: Maybe by going back to my work. I use the human figure because it moves me, and it also conveys emotion to the viewers. They can identify, relate to the object, and that's really what I'm looking for when I develop a subject. And it's also we found interesting: a way of capturing the strangeness of quantum physics, intuitively.

Aurore Young: Yeah, maybe this is a good way to convey a quantum concept, because if people can really identify with it, it'll become more understandable, with intuitions.

Caroline Delétoille: On the subject of understanding concepts, there's a lot to say. The artist Luis Camnitzer is very interesting. He explains that at one point in his work, he removed the images and kept only the words, as if the words themselves conveyed great emotions, in another way. Maybe emotions can be conveyed through images with which we identify. Céline, you can tell us more.

Céline Boissérie-Lacroix: Early in the project for the exhibition, we wanted to convey something about the way quantum physics pushes us to look at the world, its uniqueness. Can you develop the parallel with memories, how that relates to your work?

Caroline Delétoille: When we thought about how this principle of quantum observation could be translated to speak to people, memory was a topic that naturally came up because it's one of my main research areas. Memory is subjective; memories change slightly each time we think about them. Every time we think of the same memory, we refine it and gradually reconstruct a clearer image of what happened that day, at that exact moment.

That led us to provide an archetypal scene, an anonymous shared memory, for this exhibition. Visitors could then experience something that would resonate intimately with them, moving them, a bit like in cinema. It would work as a parallel with the process followed by quantum physicists during their measurements and observations.

For that, we collaborated with the Nicéphore Niépce Museum of Photography. We talked with them about the archives they had, about scenes that could be interesting. We went through many images until we found this capture of a family lunch that had a kind of strangeness to it. I like strangeness because it sparks interaction, a reaction. When an image is strange, you ask, "What? What's going on?". This questioning creates a relationship with the image.

Aurore Young: We like strangeness. Otherwise, we wouldn't be so interested in understanding it.

Céline Boissérie-Lacroix: It's a bit like Freud's expression, the "uncanny". Everyday objects, usually very common, can sometimes seem strange or even unsettling to us.

Caroline Delétoille: Yeah, I think strangeness creates a little shift, at some point. So in the end, we chose this family scene, where we didn't quite understand what was going on. Then the Niépce Museum also came up with the idea of an archive

by Peter Knapp, a Swiss photographer who did a whole series with clouds, and I liked that.

For the public, we wanted to play with that feeling, that sensitivity. Let's say you're in a space that blurs your sense of orientation. You move forward, and then suddenly you have a vision, you remember that scene. You pass through a cloud, and you're not sure where you are. Then comes the perception of sound. We really wanted to explore what a quantum sound might be, a sound atmosphere.

When working on this analogy, to make it tangible, we had more and more discussions, we got deeper and deeper into the lab. And we realized that the lab was a bit like an artist's workshop.

Slowly, the idea of another room naturally emerged. We wanted the visitors to move from one world to another: from the world of the atom to the world of the lab. You enter the back room, open a door...what happens? I like that blurry zone between the artist's workshop and the scientific lab. Scientists are also craftsmen, in a way. And there's a real similarity in the research processes. There's an aesthetics of mystery and the unknown that emerges.

In the end, this will also be part of the exhibition. We will also work with a director to create a film that will bring together all these worlds. The world of atoms will be connected with that of the scientists collaborating in the laboratory—all under the director's gaze.

Shelly Rosenblum: Where we started, Aurore was saying that she sits with the strangeness of the unknown, but then there's an act of translation. We talked so much last time about analogy as a tool, and a lot of today's conversation was about the inherent, problematic nature of the analogy framework. For example, a philosopher speaking with a physicist. What are the limitations of that? In collaborations like these at some point, you have to suspend your disbelief and move away, maybe not from the rigor, but from the precision, in order to actually do the work together.

Caroline Delétoille: One last thing a physicist told me, that really struck me, is that when you talk to a scientist or a physicist, what you expect from them is pure objectivity. And when you talk to an artist about what they do, you expect pure subjectivity. But these are also injunctions. And it's precisely these two things that we're trying to bring together.

Céline Boissérie-Lacroix: Yes, that's true. I don't know about you, Caroline, but Aurore might be the most objective of us. But as a philosopher, I also work with another form of objectivity. So we had to navigate between that.

Aurore Young: Yes. I think it's a prejudice about artists and scientists, right? I mean, artists need to show rigor in their techniques. And scientists need to be creative to come up with new ways to think about the world. So, in the end, maybe it's not that difficult to work together... once we get past these ideas.

Caroline Delétoille: Those prejudices, yes.

Shelly Rosenblum: But it's a critical part of these collaborations that's so powerful, which is the dismantling of those stubborn stereotypes and what you call prejudice.



Caroline Delétoille

LE BRUIT DU QUANTIQUE

« La physique quantique suscite en général des réactions qui mêlent curiosité, interrogation, méfiance (parfois passion), et, le plus souvent, la crainte de paraître bête. Parce qu'en général, aborder la recherche quantique, c'est avoir la sensation de n'y rien comprendre et devoir assumer ses limites, ou risquer de se lancer dans des argumentaires sans convictions bien ancrées. J'ai voulu prendre le pouls de ce « bruit » quantique. J'ai donc demandé aux gens (des proches, des scientifiques, des artistes, des inconnus) ce qu'était pour eux la physique quantique. Je leur ai garanti qu'il n'y avait pas de mauvaise réponse (si ce n'est leur plus honnête réponse), et que leur anonymat serait préservé ». Caroline Delétoille, 5 décembre 2024

Qu'est-ce que pour vous la physique quantique ?

« C'est l'infini et l'univers • C'est une suite de maths et une sensation de tourbillon • C'est rien j'en sais rien ça me parle pas du tout • C'est le pan de la physique qui étudie les propriétés des particules • C'est l'infiniment petit, c'est Antman dans le film il est fou • Ça m'évoque de Broglie, des impulsions d'énergie, des espèces de pulse • C'est des calculs mathématiques compliqués qui permettent de faire après des calculs encore plus compliqués • C'est une remodelisation des choses, tu transformes ton corps, tu deviens poisson, tu deviens aigle • C'est la dualité, tu es dans deux états à la fois, mais je comprends pas bien • C'est des chercheurs qui essaient de faire l'ordinateur du futur • Je pourrais avoir une autre vie grâce au quantique, moins de chaos • En premier lieu, la confusion, alors j'ai eu besoin de comprendre • C'est les particules, c'est l'atome qui fait des choses pas normales • C'est une science dure qui étudie les interactions de la matière, axée sur les quantas et il y a des ondulations quelque part • C'est la physique du vide • C'est le vide • C'est compliqué, abstrait, mystérieux »



Grow me a cristal, huile sur toile, 15 × 10 cm

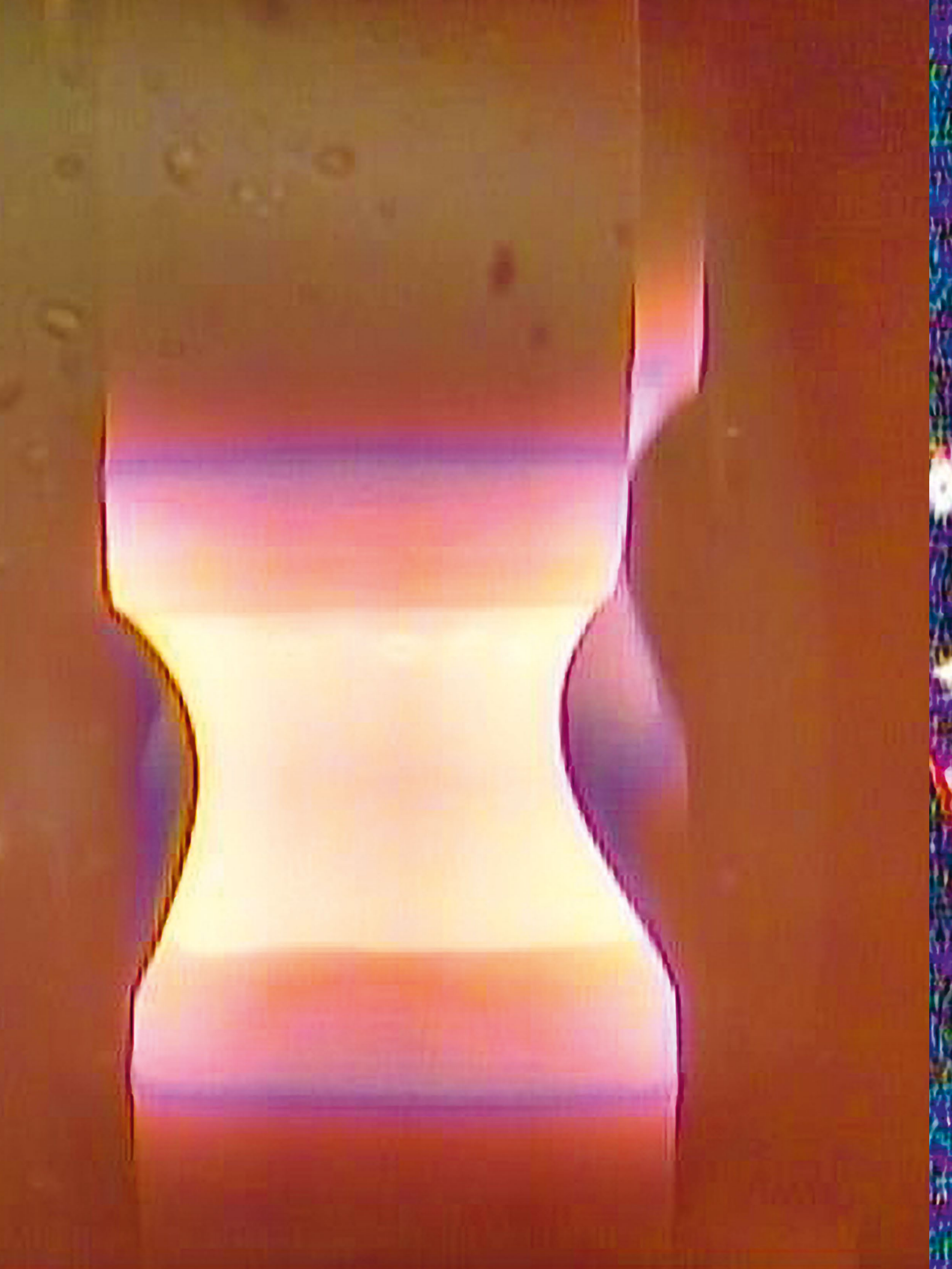
Caroline Delétoille

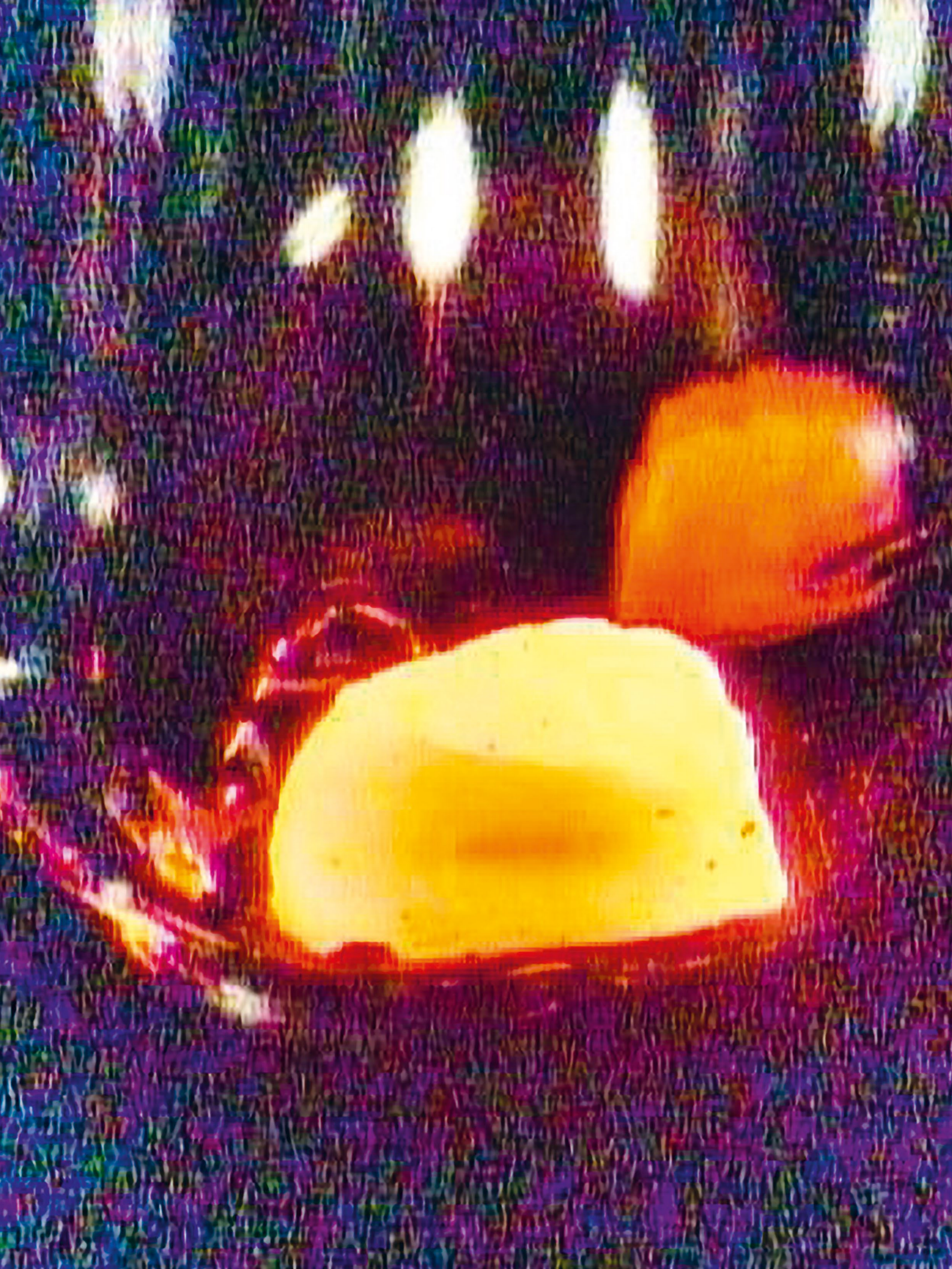
QUANTUM NOISE

“Quantum research often elicits reactions ranging from curiosity and distrust to wonder, sometimes passion, and, most of the time, the fear of sounding stupid. Because approaching quantum physics often leaves one with the feeling of not understanding anything and having to accept one’s limitations, or risking engaging in random conversations without any grounded convictions. I wanted to take the pulse of this quantum “noise”. So I asked people (relatives, scientists, artists, strangers, etc.) what quantum physics meant to them. I assured them that there were no wrong answers (other than their plain full and honest reply) and that their anonymity would be preserved”. Caroline Delétoille, December 5th, 2024

What is quantum physics for you?

“It’s infinity and the universe • It’s a series of maths and a feeling of whirlwind • It’s nothing I don’t know, it doesn’t speak to me at all • It’s the part of physics that studies the properties of particles • It’s the infinitely small, it’s Antman in the film, he’s crazy • It reminds me of de Broglie, pulses of energy, some kind of pulse • It’s complicated mathematical calculations that allow even more complicated calculations to be made afterwards • It’s a remodelling of things, you transform your body, you become a fish, you become an eagle • It’s duality, you’re in two states at once, but I don’t quite understand • It’s researchers trying to make the computer of the future • I could have another life thanks to quantum, less chaos • First of all, confusion, so I needed to understand • It’s the particles, It’s the atom that does things that aren’t normal • It’s a hard science that studies the interactions of matter, focusing on quantas and there are ripples somewhere • It’s the physics of the vacuum • It’s the vacuum • It’s complicated, abstract, mysterious”





« Le monde du laboratoire quantique recèle une part de merveilleux. Les optiques utilisées, les rayons lasers, ou encore les cristaux créés spécifiquement par les chercheurs m'ont fascinés et j'ai voulu en faire des sujets de tableaux à part entière. » Caroline Delétoille

“The world of the quantum laboratory holds a touch of wonder. The optics used, the laser beams, and the crystals specifically created by the researchers fascinated me, and I wanted to make them subjects of paintings in their own right.” Caroline Delétoille





Congrès Solvay, 1911

HISTOIRE ET CONCEPTS

1900 Plank

Quantification de l'énergie

Au niveau microscopique l'énergie d'un système est généralement quantifiée, ce qui signifie qu'elle ne peut pas prendre n'importe quelle valeur mais uniquement certaines valeurs discrètes appelées

niveaux d'énergie, et ces dernières sont déterminées par la physique quantique. Cela implique également que les échanges d'énergie entre la matière et la lumière ont lieu par quanta.

1905 Einstein

Lumière : onde et quanta d'énergie

Einstein va plus loin en proposant que ces propriétés quantiques sont inhérentes à la lumière elle-même, qui serait constituée de particules,

appelées plus tard photons. Il a été depuis observé que la lumière se comportait à la fois comme une onde et une particule.

1924 Louis De Broglie

Matière : dualité onde-particule

En plus de la lumière, cette dualité s'applique aussi à la matière : quand on parvient à réunir les bonnes conditions en laboratoire, une particule comme l'électron n'est

plus considérée comme un point, mais comme une onde étalée sur une petite portion d'espace : la particule est à plusieurs endroits à la fois.

1926 Max Born

Onde de probabilité

Cette onde est décrite mathématiquement par une quantité appelée fonction d'onde, d'après Schrödinger. Born a montré qu'elle permet

d'obtenir la probabilité de trouver la particule en chaque endroit et de faire des prédictions sur ce que l'on peut mesurer ensuite en laboratoire.

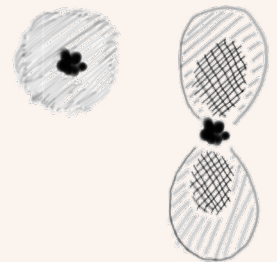
Ces découvertes ont conduit à la définition de plusieurs grands postulats de mécanique quantique

Principe de superposition

Un électron (ou toute autre particule) peut être dans une superposition de positions. Ce principe s'applique à toute autre grandeur observable, la vitesse, l'énergie... La

fonction d'onde représente ici cette superposition et associe à chaque position autour du noyau une probabilité d'être mesurée.

Deux fonctions d'onde différentes : chacune représente une superposition de positions pour un électron autour du noyau. Plus la couleur est foncée, plus la probabilité est élevée.

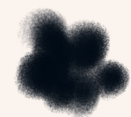


Mesure

Au moment de la mesure, on observe toujours la particule en un seul point. Une mesure aura ainsi pour effet de détruire l'état de superposition (ou aspect ondulatoire) de la particule observée. On parle alors d'effondrement de la fonction d'onde. C'est à cet instant que l'on va retrouver l'aspect ponctuel de la dualité onde-particule.

1^{ère} mesure

2^e mesure

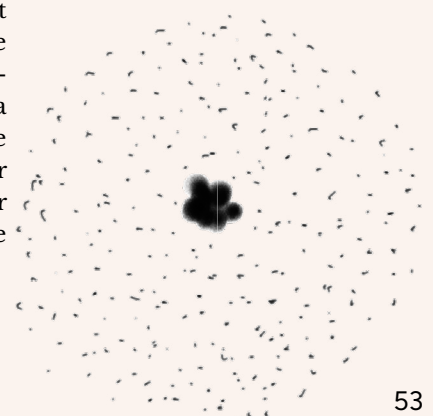


3^e mesure

Reconstruction quantique

La fonction d'onde peut être reconstruite par une série de mesures expérimentales. Il faut pour cela faire un grand nombre de mesures afin de retrouver la probabilité de mesurer la particule en chaque point.

10 000 mesures





Congrès Solvay, 1927

HISTORY & CONCEPTS

1900 Plank

Energy quantification

At the microscopic level, a system's energy is generally quantized, meaning it cannot take just any value but only certain discrete values called energy levels, which are determined

by quantum physics. This also implies that energy exchanges between matter and light occur in discrete packets, called quanta.

1905 Einstein

Light: energy waves and quanta

Einstein went further, proposing that these quantum properties are inherent to light itself, which he suggested was

made up of particles, later called *photons*.

It has since been observed that light behaves both as a wave and as a particle.

1924 Louis De Broglie

Matter: wave-particle duality

Beyond light, this wave-particle duality also applies to matter: under the right laboratory conditions, a particle such as an electron is no longer

considered a point but rather a wave spread out over a small region of space. In this state, the particle exists *in multiple locations simultaneously*.

1926 Max Born

Probability wave

This wave is mathematically described by a quantity called the wave function, introduced by Schrödinger. Born demonstrated that the wave function provides

the probability of finding the particle at a given location and allows predictions about what can be measured in the laboratory.

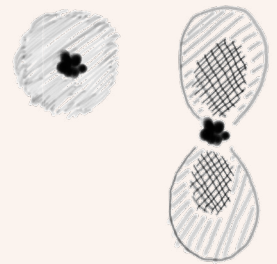
These discoveries led to the definition of several major quantum mechanical postulates

Superposition principle

An electron (or any other particle) can exist in a superposition of positions. This principle applies to any observable quantity, such as speed or energy. The wave

function represents this superposition and assigns a probability to each position around the nucleus where the particle may be measured.

Two different wave functions: each represents a superposition of positions for an electron around the nucleus. The darker the color, the higher the probability.

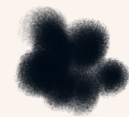


Measurement

At the moment of measurement, the particle is always observed at a single point. The act of measurement thus destroys the superposition state (or wave-like nature) of the observed particle. This phenomenon is known as wave function collapse.

1st measurement

2nd measurement

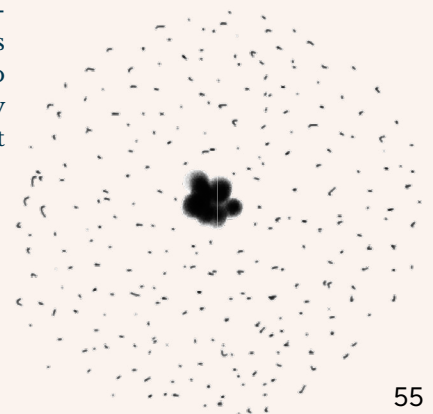


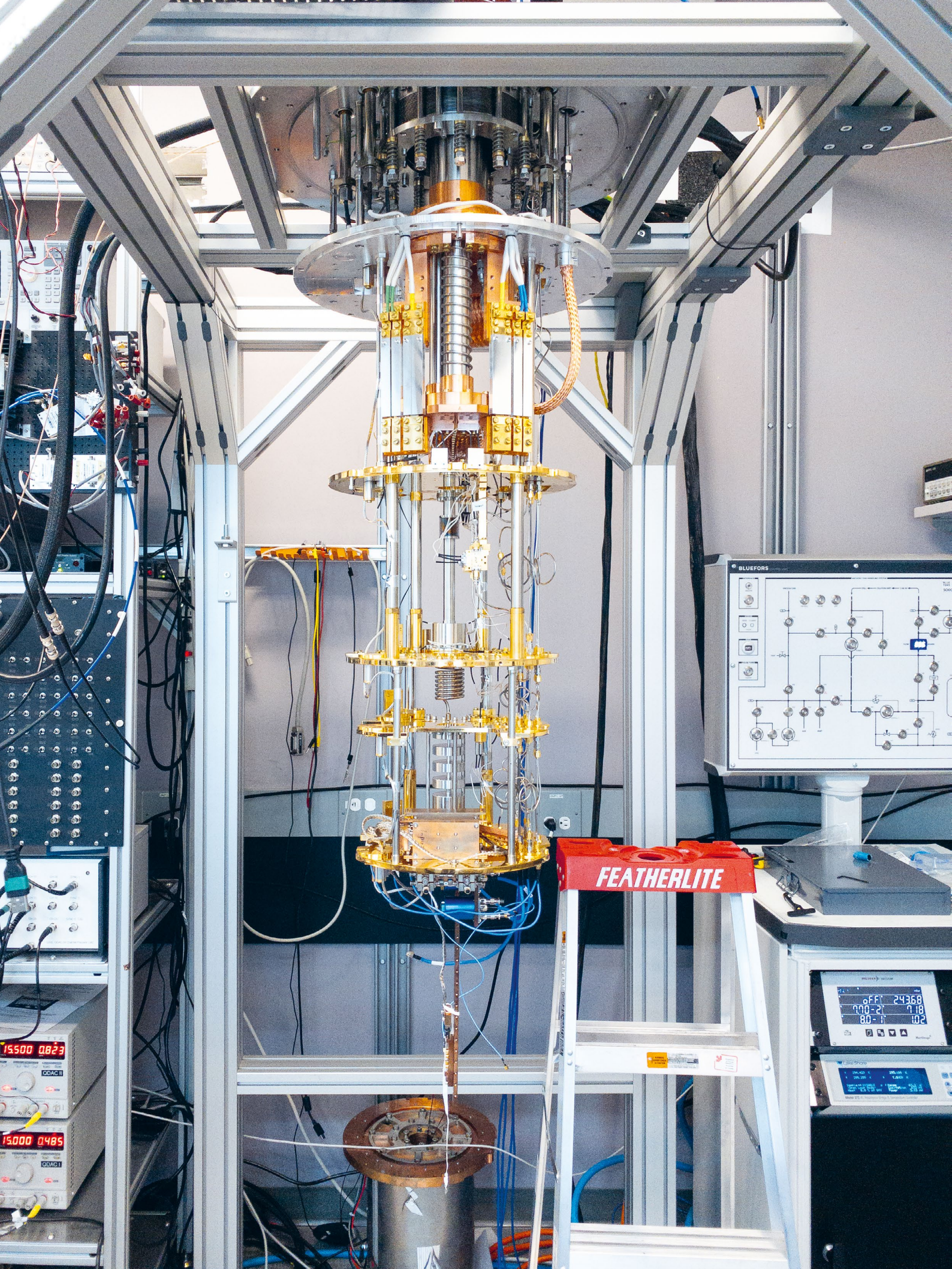
Quantum reconstruction

The wave function can be reconstructed through a series of experimental measurements. To achieve this, a large number of measurements must be conducted to determine the probability of detecting the particle at each point.

3d measurement

10 000 measurements





15500 0823

15000 0485

FEATHERLITE

BLUEFORS

24368
7.18
80-1
102

LA CONNAISSANCE À L'ÉPREUVE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

«Je suis ingénieur quantique, mais le dimanche, j'ai des principes.»
– John Stewart Bell –

1 Introduction : la physique, une succession de révolutions

Un des aspects singuliers de la physique réside dans le fait qu'elle est le lieu, non seulement d'innovations techniques transformant profondément notre vie matérielle, mais aussi de révolutions conceptuelles bouleversant notre manière d'appréhender le réel. Parmi ces révolutions, celle qui survient au XVI^{e} siècle, dite «copernicienne», ne fait rien de moins que de déplacer le «centre du monde» de la Terre au Soleil, marquant ainsi le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme. Les révolutions suivantes, galiléenne et newtonienne, aux XVII^{e} et XVIII^{e} siècles, ouvrent la voie à l'idée de lois physiques *universelles*. On comprend, d'une part, que tous les objets chutent dans le vide de la *même manière*, c'est-à-dire avec la même accélération ; d'autre part, que la *même loi* – en l'occurrence celle de la gravitation universelle – régit simultanément la chute des corps sur Terre et le mouvement des astres dans le ciel. Cette rupture marque l'abandon du particularisme sous-jacent au géocentrisme qui prévalait depuis l'Antiquité. Avec la physique newtonienne, et sous l'influence de penseurs comme Descartes, émerge également une vision mécaniste et déterministe du monde, reléguant partiellement la vision théologique de l'univers.

Au XIX^{e} siècle s'enclenche un processus qui ne cessera d'obséder les physiciens : celui de l'unification des phénomènes qui les entourent. Maxwell, s'appuyant sur les travaux de Gauss, Faraday et Ampère, réalise que deux catégories de phénomènes, apparemment disparates – les phénomènes électriques et magnétiques – ne relèvent, en réalité, que d'une seule : l'électromagnétisme. Celui-ci se condense en un ensemble de quatre équations, dites équations de Maxwell. Un nouveau paradigme émerge alors : celui de *champ*, une grandeur dynamique qui exhibe une double dépendance spatiale et temporelle, comme les champs électrique $\vec{E}(\vec{x}, t)$ et magnétique $\vec{B}(\vec{x}, t)$. Ce concept mathématique permet de décrire formellement une perturbation qui se propage dans un milieu physique¹ – autrement dit, une *onde* – et vient compléter celui de variable $\vec{x}(t)$, utilisée pour spécifier la position d'un point ou d'un corps matériel en mouvement.

Parallèlement, de la fin du XVIII^{e} siècle à la fin du siècle suivant, se développe, sous l'impulsion de Watt, Thompson, Carnot, Clausius et Kelvin, la thermodynamique, étymologiquement l'«étude de la chaleur et du travail». Par la suite, grâce à Maxwell, Boltzmann et Gibbs, la mécanique statistique voit le jour et en établit les fondements microscopiques. Ces théories conduisent, elles aussi, à l'unification de deux concepts jusque-là considérés comme distincts : la chaleur et le travail, et permettent de formuler l'un des principes les plus fondamentaux de la physique : la conservation de l'*énergie* pour un système isolé. On y introduit également une notion centrale : celle d'*entropie*, qui signifie étymologiquement «changement à l'intérieur». L'entropie mesure le *désordre* au sein d'un système. Sa croissance quasi-systématique traduit la tendance presque inévitable du désordre

à augmenter dans un système isolé. Ce phénomène illustre la conversion d'une forme d'énergie organisée, comme l'énergie mécanique ou chimique, en une forme d'énergie désorganisée, telle que l'énergie thermique (ou chaleur), au cours d'une transformation thermodynamique. La croissance de l'entropie caractérise également la quasi-*irréversibilité* de ces transformations puisque le système ne peut – quasiment – jamais revenir à son état initial, ordonné. Ainsi, la mécanique statistique, outre qu'elle permet d'expliquer une multitude de phénomènes physiques, éclaire également la dissymétrie entre le passé et le futur, autrement dit, l'existence d'une *flèche du temps*.

Au début du xx^e siècle, deux théories vont fonder l'essentiel de la physique contemporaine : la théorie de la relativité, dite improprement *restreinte*², d'Einstein, et la mécanique quantique, à travers les travaux de Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, de Broglie, Dirac, Pauli, Born, von Neumann ainsi que d'autres. Plus que de simples théories, la relativité et la mécanique quantique³ sont considérées comme des « théories-cadres », car elles fournissent chacune une structure formelle globale regroupant des concepts et des principes généraux que doivent respecter des théories plus spécifiques. Celles qui ne respectent pas strictement ces principes sont alors considérées comme des approximations valables uniquement dans des limites appropriées.

La relativité d'Einstein, en associant le concept de relativité du mouvement⁴ à l'invariance de la vitesse de la lumière⁵, fusionne les notions d'espace et de temps. Ces notions, qui étaient absolues dans la physique galiléenne ou newtonienne, deviennent alors relatives. Elle fait émerger la notion d'*espace-temps*, qui devient le nouveau cadre dans lequel tout mouvement doit être considéré. Elle impose également un principe d'invariance, dite invariance relativiste einsteinienne⁶, auquel toute théorie décrivant des phénomènes impliquant des vitesses proches de celle de la lumière doit obéir, comme c'est le cas de l'électromagnétisme de Maxwell.

Si la théorie de la relativité modifie le cadre spatio-temporel dans lequel réside et évolue la matière, la mécanique quantique, dont l'objectif est de décrire les composants microscopiques de cette matière, bouleverse notre conception même de celle-ci. Elle présente, notamment, ces composants comme des entités qui allient, bien que non simultanément, des caractéristiques *corpusculaires* et *ondulatoires*, deux aspects incompatibles au sein de la physique newtonienne. Elle rend caduque la notion de trajectoire et invalide les idées de déterminisme et de localité, qui sont fondatrices de la physique classique. Cependant, cette théorie, qui s'avère être la plus précise, tant dans sa forme originale que dans sa version relativiste⁷, fournit également le cadre général dans lequel toute théorie du monde microscopique doit s'intégrer.

Peu après l'avènement de la théorie de la relativité restreinte, Einstein élabore celle de la relativité *générale*, qui se propose de fournir un cadre relativiste à la gravitation. Dans ce cadre, cette dernière perd son statut de force, tel qu'il était défini dans la physique newtonienne, pour devenir une notion purement *géométrique* : la courbure de l'espace-temps, générée par la présence de matière et d'énergie. Ces révolutions se sont poursuivies dans la seconde moitié du xx^e siècle avec la découverte de deux interactions fondamentales : l'interaction « forte », qui agit entre les quarks ainsi qu'entre les protons et les neutrons (appelés « hadrons »), dont ils sont constitués⁸. Cette force garantit la cohésion du noyau atomique, de la même manière que l'interaction électromagnétique, qui agit entre le noyau et les électrons, assure celle des atomes et des molécules. L'autre interaction, dite « faible »⁹, agit sur les quarks et les leptons, tels que les électrons et les neutrinos. Elle régit divers processus radioactifs et permet, en particulier, la conversion des différents types de quarks, et donc des hadrons, entre eux. Ce phénomène est crucial, notamment dans le cadre de la fusion nucléaire qui se produit au cœur des étoiles.

Avec l'électromagnétisme et la gravité, les interactions forte et faible constituent les quatre interactions fondamentales connues à ce jour. Les deux dernières possèdent d'emblée des formulations qui respectent à la fois les exigences de l'invariance relativiste einsteinienne et de la théorie quantique, ce qui en fait des *théories quantiques relativistes*. L'électromagnétisme de Maxwell, aussi connu sous le nom d'électrodynamique, respecte, comme nous l'avons mentionné, l'invariance relativiste, mais n'est pas formulé dans un cadre quantique. Ce n'est qu'entre 1920 et 1950, avec les travaux de Dirac, puis, plus tard, ceux de Feynman, Schwinger et Tomonaga, que l'*électrodynamique quantique* voit le jour. Un intense travail est alors entrepris pour établir un cadre unifié des interactions faible, électromagnétique et forte. Ce travail aboutit, dans les années 70, notamment grâce aux contributions de Glashow, Salam et Weinberg, à l'élaboration du modèle dit « standard », qui unifie les deux premières interactions. Les théories, dites de « grande unification », développées également dans les années 70, ont cherché et continuent de chercher à unifier les trois interactions dans un ensemble cohérent. Cela reste, en partie, encore prospectif, car des modèles concurrents n'ont pas été départagés, principalement en raison des très hautes énergies nécessaires pour les tester expérimentalement.

Quant à la gravité, bien qu'Einstein lui ait donné une formulation relativiste, il reste encore à la concilier avec les principes de la théorie quantique. Cette *gravité quantique* représente le Graal pour de nombreux théoriciens de la physique des hautes énergies. On peut parier que cette théorie, si elle se concrétise un jour¹⁰, conduira également à une révolution conceptuelle dans notre compréhension du monde. En effet, étant donné qu'Einstein a établi une correspondance profonde entre gravitation et espace-temps, la quantification de l'une devrait entraîner, *ipso facto*, celle de l'autre, à l'échelle caractéristique de la gravité quantique, la *longueur de Planck*, $L_p = 10^{-34}$ cm. Cela impliquerait un bouleversement radical de notre conception de l'espace-temps qui, perçu comme continu à notre échelle, se révélerait *discret* à l'échelle L_p . Des approches telles que la théorie des cordes, la gravité quantique à boucles, ou encore la gravité *émergente*¹¹ ont été proposées, mais aucune n'a encore reçu de confirmation expérimentale, les échelles de longueur ou d'énergie pertinentes étant totalement inaccessibles avec les moyens techniques actuels.

2 La mécanique quantique : quelle révolution ?

Après avoir esquissé une vue d'ensemble des grandes révolutions de la physique, il est temps de se concentrer sur la situation particulièrement singulière de la mécanique quantique. Singulière, d'abord, car, comme nous l'avons déjà mentionné, elle est la théorie qui permet de réaliser des prédictions d'une précision inégalée dans toutes les sciences. Singulière, ensuite, parce qu'elle bouleverse en profondeur les fondements de la physique classique et, par conséquent, nos conceptions du monde qui en découlaient. Singulière, enfin, en raison des ambiguïtés qu'elle laisse planer sur la nature de la relation qui opère entre les éléments du formalisme mathématique et la réalité physique qu'ils sont censés décrire, ce qui rend très difficile de répondre clairement à la question de la nature de la révolution qui a suivi l'avènement de la théorie.

En effet, bien que la théorie de la relativité ait transformé de manière radicale nos conceptions de l'espace et du temps, qui, auparavant absolus, deviennent relatifs, elle conserve néanmoins une caractéristique fondamentale : l'objectivité. Dans le cadre de la relativité, les éléments de réalité physique, tels que les intervalles d'espace, de temps et les vitesses, dépendent certes du mouvement relatif de l'observateur par rapport aux événements considérés. Cependant, ils n'en demeurent pas moins des grandeurs objectives, ne serait-ce que parce que leurs variations d'un observateur à l'autre, suivent des lois universelles (les fameuses transformations

de Lorentz), qui sont complètement indépendantes de l'interprétation subjective de l'observateur. Cette objectivité persiste tout autant dans le cadre de la relativité générale. Enfin, les éléments du formalisme de ces théories sont en correspondance directe avec les éléments de la réalité physique. En mécanique quantique, en revanche, cette objectivité pourrait disparaître, laissant place à un rapport radicalement différent entre les phénomènes physiques, leurs mesures, leurs observateurs et le formalisme qui les décrit. Ainsi, sans préjuger de l'avenir, la mécanique quantique pourrait constituer un point culminant dans l'évolution de notre connaissance du monde.

Mais avant d'entrer dans ces considérations, nous allons exposer brièvement les éléments fondamentaux du formalisme de la mécanique quantique, souvent appelés postulats. Cela nous servira de point de départ pour la discussion des implications conceptuelles de la théorie. Nous présenterons ces éléments de manière aussi neutre et objective que possible, sans entrer immédiatement dans les considérations philosophiques.

2.1 Les postulats de la mécanique quantique

Nous énonçons ici les postulats de la mécanique quantique, sans prétendre à l'exhaustivité. L'objectif est de présenter ceux qui sont les plus pertinents pour la discussion à venir.

- État d'un système physique

À un instant t donné, un système quantique est décrit par un *vecteur d'état*, noté $|\Psi(t)\rangle$, qui appartient à un espace, appelé espace de Hilbert, noté $\mathcal{H}$. Cet espace est muni d'un produit scalaire qui associe, à deux vecteurs d'état quelconques $|\Psi_1(t)\rangle$ et $|\Psi_2(t)\rangle$, un nombre *complexe* noté $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle$. Ce produit scalaire représente le « recouvrement » entre deux états et indique dans quelle mesure un état peut être considéré comme similaire à un autre. Ainsi, l'identité des états correspond à $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle = 1^{12}$, tandis que l'altérité totale correspond à l'orthogonalité, c'est-à-dire $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle = 0$. Physiquement, et comme nous le verrons plus tard, le produit scalaire $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle$ est étroitement lié à la *transition* entre les états correspondants ; pour cette raison on l'appelle aussi *amplitude de transition* entre les états $|\Psi_1(t)\rangle$ et $|\Psi_2(t)\rangle$.

- Grandeurs physiques

Toute grandeur physique mesurable, souvent appelée *observable* – telle que la position, l'énergie, etc. – et notée de façon générique A , est représentée, dans l'espace de Hilbert $\mathcal{H}$, par un opérateur hermitien¹³, noté $\hat{A}$, qui agit sur les vecteurs d'état. Une caractéristique fondamentale de la mécanique quantique est qu'une grandeur physique ne peut prendre que certaines valeurs numériques précises, qui correspondent aux valeurs propres de l'opérateur $\hat{A}$ ¹⁴. Le caractère hermitien de ces opérateurs est essentiel : il garantit que les valeurs propres de $\hat{A}$ sont *réelles*, conformément aux résultats observés. De plus, les vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes sont orthogonaux, c'est-à-dire que leur produit scalaire est nul. Enfin, selon le contexte physique, ces valeurs propres peuvent être discrètes ou continues. Pour simplifier, et sauf indication contraire, nous supposons que les valeurs propres sont discrètes, et nous noterons $\{a_n\}$ ¹⁵ l'ensemble de toutes les valeurs possibles de la grandeur A . Dans ce cas, on dit que les valeurs de A sont *quantifiées* et que son spectre est *discret*. Il s'agit là d'un des aspects essentiels de la mécanique quantique, en rupture avec la mécanique classique où presque toutes les grandeurs physiques prennent des valeurs continues¹⁶.

- Décomposition spectrale

À chaque valeur propre a_n d'un opérateur $\hat{A}$ est associé *un* ou *plusieurs* vecteurs propres. Dans le cas le plus simple, il existe un unique vecteur propre $|a_n\rangle$ associé

à la valeur propre a_n , laquelle est alors dite «non-dégénérée». Les vecteurs $\{|a_n\rangle\}$ forment alors une base orthogonale de l'espace des états, ce qui permet de décomposer n'importe quel état $|\Psi\rangle$ du système de la façon suivante :

$$\left| \Psi(t) \right\rangle = c_1(t) \left| a_1 \right\rangle + c_2(t) \left| a_2 \right\rangle + \dots = \sum_n c_n(t) \left| a_n \right\rangle \quad (1)$$

où $\sum_n$ est une notation représentant une somme sur l'entier n . L'expression (1) revêt une importance fondamentale. En effet, en raison de la structure de l'espace vectoriel $\mathcal{H}$, il est possible de décomposer l'état $|\Psi\rangle$ en une *superposition* d'états $\{|a_n\rangle\}$ où les coefficients $\{c_n(t)\}$ sont des nombres complexes qui indiquent le poids relatif de chaque état dans la décomposition – dite spectrale – de $|\Psi(t)\rangle$. Cette capacité à combiner ou superposer plusieurs états, appelée *principe de superposition*, constitue l'une des propriétés les plus remarquables de la mécanique quantique, sans aucun équivalent classique¹⁷. Cette propriété constitue, notamment, l'un des fondements du calcul quantique, dont l'un des aspects clés est la possibilité de créer des états superposant deux *qubits*, comme dans l'état $|u\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$. Une telle propriété est exclusivement propre à la mécanique quantique et à la structure *linéaire* qui la sous-tend. Il est également essentiel de noter que la décomposition (1) n'est pas unique : il est possible de décomposer un état sur l'ensemble des états propres associés à différents opérateurs (correspondant à différentes grandeurs physiques).

Notons que l'identification de chaque poids $c_k(t)$ dans la décomposition (1) se fait en calculant le produit scalaire de $|\Psi(t)\rangle$ avec le vecteur propre $|a_k\rangle$ de l'opérateur $\hat{A}$:

$$\left\langle a_k \left| \Psi(t) \right\rangle = \sum_n c_n(t) \left\langle a_k \left| a_n \right\rangle = c_k(t) \quad (2)$$

où nous avons utilisé l'orthogonalité des vecteurs $\{|a_n\rangle\}$ ¹⁸. L'expression ci-dessus n'est rien d'autre que la généralisation, dans l'espace abstrait $\mathcal{H}$, de la projection d'un vecteur de l'espace des réels sur les axes d'un repère orthonormé (voir la figure (1) qui illustre la projection d'un vecteur dans $\mathbb{R}^2$ sur un repère orthonormé), chaque coefficient c_k représentant le «recouvrement» de l'état $|\Psi(t)\rangle$ avec le vecteur de base $|a_k\rangle$.

Pour compléter cette discussion, il est intéressant d'envisager le cas d'une grandeur dont le spectre de valeurs peut être continu, par exemple l'opérateur «position» $\hat{x}$. On écrira, de façon analogue à (1) :

$$|\Psi(t)\rangle = \int dx' \Psi(x', t) |x'\rangle \quad (3)$$

où la somme est remplacée par une intégrale avec, de façon analogue à (2) :

$$\langle x | \Psi(t) \rangle = \int dx' \Psi(x', t) \langle x | x' \rangle = \Psi(x, t)$$

On retrouve ici, comme «coefficients» de la décomposition de $|\Psi(t)\rangle$ sur la base des états de position $\{|x'\rangle\}$, la *fonction d'onde* $\psi(x, t)$ de l'«ancienne» mécanique quantique, au point x considéré.

- Évolution temporelle : équation de Schrödinger

On suppose qu'à un instant donné t_0 , le système est décrit par le vecteur d'état $|\psi_0\rangle$. Si aucune *mesure* n'intervient entre les instants t_0 et t , l'évolution temporelle du vecteur d'état du système est dictée par l'équation différentielle suivante, connue sous le nom d'*équation de Schrödinger* :

$$\boxed{i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle} \quad (4)$$

où $\hbar = h/2\pi$, h étant la constante de Planck. L'opérateur $\hat{H}$, appelé Hamiltonien, est associé à la grandeur énergie du système. Ainsi, l'interprétation physique

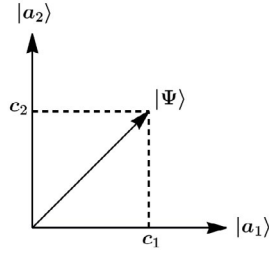


FIGURE 1 – Représentation imagée de la décomposition d'un état quantique sur une base constituée de deux états orthogonaux $|a_1\rangle$ et $|a_2\rangle$. On représente ici un vecteur de l'espace $\mathbb{R}^2$ des vecteurs à deux composantes réelles, décomposé en ses projections c_1 et c_2 sur les « axes » $|a_1\rangle$ et $|a_2\rangle$, respectivement.

de l'équation (4) est que le taux de variation temporelle du vecteur d'état est déterminé par l'action de l'opérateur Hamiltonien sur ce même vecteur d'état. L'équation de Schrödinger, assortie de la condition initiale $|\Psi(t=0)\rangle = |\Psi_0\rangle$, permet de déterminer *complètement* l'état du système à tout instant t .

- Règle de Born

Tandis que, dans le formalisme de la mécanique quantique, un système est *représenté* par une entité abstraite, le vecteur d'état $|\Psi(t)\rangle$, qui appartient à un espace de Hilbert $\mathcal{H}$ et évolue dans le temps selon l'équation de Schrödinger (4), la règle – ou postulat – de Born établit la *correspondance* entre le contenu formel et le contenu opérationnel de la théorie :

La probabilité de *trouver*, lors d'une *mesure* de la grandeur physique A , effectuée sur l'état normalisé¹⁹ $|\Psi(t)\rangle$, la valeur a_k , est donnée par :

$$\boxed{\mathcal{P}(a_k) = |\langle a_k | \Psi(t) \rangle|^2 = |c_k(t)|^2} \quad (5)$$

où $|c_k(t)|^2 = c_k(t)\overline{c_k(t)}$ désigne le carré du module du nombre complexe $c_k(t)$. Comme on le voit, $\mathcal{P}(a_k)$ n'est rien d'autre que le carré de l'amplitude de transition entre les états $|\Psi(t)\rangle$ et $|a_k\rangle$. Si l'on considère, par exemple, la grandeur *continue* position $\hat{x}$, alors la probabilité de trouver le système sur un intervalle de taille dx centré en x , à l'instant t , est donnée par²⁰ :

$$d\mathcal{P}(x) = |\langle x | \Psi(t) \rangle|^2 dx = |\Psi(x, t)|^2 dx.$$

On entrevoit immédiatement, à partir de l'expression (5), la possibilité, au moins formelle, de reconstruire l'état $|\Psi(t)\rangle$, c'est-à-dire de déterminer la totalité des coefficients $\{c_n\}$ de la décomposition (1)²¹. Cela nécessite tout d'abord de préparer un très grand nombre N de systèmes dans le *même état* $|\Psi(t)\rangle$, puis de mesurer la grandeur A . Ces mesures fournissent un ensemble de résultats $\{a_n\}$ associés aux nombres d'occurrences $\{N_n\}$ et, par conséquent, à des fréquences d'apparition respectives $\{f_n\} = \{N_n/N\}$. Ces fréquences statistiques sont alors assimilées aux probabilités $\{\mathcal{P}(a_n)\}$, et donc, via (5), aux carrés des modules des coefficients $\{c_n\}$. On constate ainsi qu'en mécanique quantique, les prédictions étant de nature *probabiliste*, cela implique, en pratique, de considérer un *ensemble statistique* de systèmes conçus, on dit « préparés », identiquement.

- Réduction du vecteur d'état

Le postulat de *réduction du vecteur d'état* spécifie la forme du vecteur d'état immédiatement après la mesure ayant conduit au résultat a_k pour la grandeur A , le vecteur d'état est projeté sur le vecteur propre $|a_k\rangle$ associé à la valeur propre a_k :

$$\left| \Psi(t) \right\rangle = \sum_n c_n(t) \left| a_n \right\rangle \longrightarrow \left| a_k \right\rangle. \quad (6)$$

- **Grandeurs physiques compatibles**

Parmi l'ensemble des grandeurs physiques mesurables, certaines jouent un rôle privilégié : ce sont celles qui sont dites *compatibles* entre elles. Physiquement, cela signifie que la mesure de l'une n'affecte pas le résultat de la mesure de l'autre (voir ci-dessous). Cette notion de compatibilité est cruciale, notamment dans les situations où la mesure d'une grandeur A ne conduit pas à la détermination d'un vecteur *unique*, mais plutôt à celle d'un *sous-espace* de l'espace de Hilbert. Ce cas correspond à celui d'une valeur propre a_k dite « dégénérée ». Dans ce contexte, afin de spécifier complètement le vecteur d'état après la mesure de A , il est nécessaire de considérer une autre grandeur physique, B , *compatible* avec A . Cette compatibilité implique que l'ensemble $\{b_m\}$ des valeurs possibles de B , évaluées à partir du vecteur initial $|\Psi(t)\rangle$, n'est pas affecté par la mesure préalable de la grandeur A , laquelle projette $|\Psi(t)\rangle$ dans le sous-espace associé à la valeur propre a_k de $\hat{A}$, généralisant ainsi l'idée de projection (6) :

$$|\Psi(t)\rangle \longrightarrow P_{a_k} |\Psi(t)\rangle$$

où P_{a_k} est le *projecteur* sur le sous-espace $\mathcal{H}_{a_k}$ associé à la valeur propre a_k .

L'existence de grandeurs physiques compatibles offre la possibilité de reconstruire complètement le vecteur d'état $|\Psi(t)\rangle$ à partir des mesures des grandeurs A et B , *quel que soit* l'ordre dans lequel ces mesures sont effectuées. Cette propriété repose sur le fait que les opérateurs correspondants, $\hat{A}$ et $\hat{B}$, *commutent* entre eux. Cela signifie que leur *commutateur* est nul, soit :

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} = 0 \text{ soit } \hat{A}\hat{B} = \hat{B}\hat{A}$$

En d'autres termes, l'ordre des opérations de mesure n'a pas d'importance. Ainsi, si l'on mesure successivement les grandeurs A et B , l'état du système peut être décomposé de la façon suivante :

$$\left| \Psi(t) \right\rangle = \sum_{n,m} d_{nm}(t) \left| a_n, b_m \right\rangle$$

où les vecteurs $\{|a_n, b_m\rangle\}$ sont des *états propres communs* aux opérateurs $\hat{A}$ et $\hat{B}$. Dans ces états, les deux grandeurs A et B sont simultanément bien définies, respectivement par les valeurs a_n et b_m . Ces considérations se généralisent à un nombre quelconque d'opérateurs, ce qui permet de considérer des situations dans lesquelles plusieurs grandeurs sont simultanément bien définies, voire aussi nécessaires pour spécifier complètement l'état du système, si les mesures de A et de B ne l'ont pas permis.

L'un des principes fondamentaux de la mécanique quantique est que les grandeurs position x et quantité de mouvement (ou impulsion) p sont *incompatibles*. En termes mathématiques, cela signifie que les opérateurs correspondants ne commutent pas entre eux. Cette situation s'exprime par la formule suivante :

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar.$$

En d'autres termes, il est impossible de trouver des vecteurs propres du type $|x, p\rangle$ qui soient communs aux opérateurs $\hat{x}$ et $\hat{p}$, dans lesquels ces deux grandeurs sont simultanément bien définies. Cela signifie que la mesure de l'une de ces grandeurs perturbe nécessairement le spectre de valeurs possibles de l'autre. En effet, il découle de la relation de commutation $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ que les spectres Δx et

Δp des valeurs possibles de x et de p , respectivement, sont liés par une relation fondamentale :

$$\boxed{\Delta x \Delta p \geq \hbar}. \quad (7)$$

Cette relation est connue sous le nom d'*inégalité de Heisenberg*²². Elle montre clairement qu'une mesure de x , qui, en général, réduit le spectre Δx des valeurs possibles de cette grandeur²³, *étend* le spectre Δp des valeurs possibles de la quantité de mouvement p .

Il est parfois dit que les inégalités de Heisenberg (7) *interdisent de mesurer* simultanément x et p mais cette affirmation est incorrecte. En effet, il est toujours possible de mesurer simultanément n'importe quel jeu de grandeurs physiques d'un système quantique. La véritable limitation imposée par l'inégalité (7) réside dans le fait que l'information obtenue sur une certaine grandeur, par exemple, la position x , affecte nécessairement l'information que l'on peut obtenir sur l'autre grandeur, par exemple la quantité de mouvement p , dite, alors, *conjuguée*.

2.2 Les difficultés

Après cet exposé succinct du formalisme de la mécanique quantique, il est temps d'explorer certaines de ses implications. Le premier point remarquable réside dans la manière dont, au sein de ce formalisme, la description d'un système classique – fondée sur les concepts de position et de vitesse, donc sur la notion de *trajectoire* – est remplacée par une description basée sur la notion de vecteur d'état. Dans ce cadre, l'abandon du couple (x, p) se justifie par l'impossibilité de concevoir un état dans lequel ces deux grandeurs seraient simultanément bien définies, au sens où nous l'avons précisé plus haut. Ce point constitue l'un des aspects les plus révolutionnaires de la mécanique quantique, tant l'esprit humain – qu'il s'agisse de celui d'un profane ou d'un physicien – reste profondément attaché à l'idée de *localisation* d'un objet dans l'espace ainsi qu'à celle de son *évolution continue* au sein de cet espace.

Ce renoncement à ce que l'on pourrait appeler le *réalisme classique* ne s'est pas fait sans résistance et, d'ailleurs, n'est pas encore totalement accepté par tous. Cependant, pour la grande majorité des praticiens du domaine, la mécanique quantique, en tant que système de pures prédictions expérimentales, a très largement démontré son efficacité. Il convient donc de s'en tenir à cela, c'est-à-dire de ne pas s'interroger outre mesure sur la nature de la «réalité quantique», voire de considérer cette question comme un *non-problème*. Cette attitude pragmatique peut se résumer parfaitement par la célèbre formule ironique du physicien américain David Mermin : «Shut up and calculate^{24, 25}». On peut largement souscrire à cette position de neutralité idéologique – ou, plus précisément, épistémique – en reconnaissant combien la question évoquée ci-dessus et, plus généralement, celle des *propriétés* d'un système quantique, est devenue une véritable bouteille à l'encre. On recense, au bas mot, une vingtaine de tentatives distinctes visant à clarifier cette situation, regroupées sous le terme générique d'«*interprétations de la mécanique quantique*», voir plus bas. Cette neutralité peut également s'avérer féconde car elle préserve la possibilité d'atteindre une compréhension plus profonde de ces problématiques au sein même de la pratique scientifique. Les réponses aux questions soulevées pourraient, en effet, émerger dans un cadre conceptuel élargi, comme celui d'une théorie de la gravité quantique.

Pour autant, l'examen de la relation entre les éléments du formalisme, tels que présentés ci-dessus, et ce que l'on peut appeler la question de l'*ontologie* – c'est-à-dire celle de l'*existence en soi* – des systèmes quantiques, mérite que l'on y prête attention. Cette question a en effet été soulevée par des physiciens éminents,

tels qu'Albert Einstein et, plus tard, John Stewart Bell qui ont contribué à faire émerger l'un des concepts les plus révolutionnaires de la mécanique quantique : l'*intrication*. Là encore, nous nous en tiendrons à une position aussi neutre que possible, en présentant les différents points de vue qui se sont développés autour de cette problématique.

Un moyen simple d'entrer dans ce dédale intellectuel sans s'y égarer consiste à examiner de près la nature des termes utilisés au sein du formalisme. Ce qui saisit alors immédiatement c'est que l'élément fondamental de ce dernier, à savoir le vecteur d'état, joue un rôle purement *probabiliste* et, dans une perspective strictement opérationnaliste, un rôle *statistique*. En effet, comme mentionné précédemment, *stricto sensu*, les prédictions de la théorie ne s'appliquent pas à un système individuel, mais à une collection, un *ensemble* de systèmes préparés de manière identique. Dans ce cadre, le vecteur d'état $|\Psi(t)\rangle$ fournit la distribution *statistique* des valeurs mesurées pour une grandeur physique quelconque donnée, à un instant t . La théorie, en revanche, ne se prononce en rien sur ce qu'est l'état d'un système *individuel*.

Résumons :

1) La théorie quantique fournit les probabilités des valeurs que peuvent prendre les grandeurs physiques, appelées observables, lors de mesures effectuées sur un ensemble *statistique* de systèmes préparés de manière identique²⁶.

Ce qui frappe l'esprit, en second lieu, c'est que la *mesure* joue un rôle fondamental dans la théorie. En effet, l'objet central du formalisme, l'état $|\Psi(t)\rangle$, n'est qu'un outil destiné à calculer la probabilité d'*obtenir* une valeur donnée d'une grandeur A lors d'une *mesure* et, en aucun cas, la probabilité de *révéler* une valeur préexistante de cette grandeur au sein du système physique avant la *mesure*. Nul n'a mieux formulé le renoncement profond imposé par cette situation que Bell : «Au début, les philosophes naturels ont tenté de comprendre le monde qui les entourait. En poursuivant cet objectif, ils ont eu l'idée géniale de concevoir des situations artificiellement simples où le nombre de facteurs en jeu est réduit au minimum. Diviser pour régner. Ainsi est née la science expérimentale. Mais l'expérience n'est qu'un outil. L'objectif reste : comprendre le monde. Restreindre la mécanique quantique à de simples opérations de laboratoire insignifiantes, c'est trahir cette grande entreprise. Une formulation sérieuse ne peut pas exclure le vaste monde extérieur au laboratoire.»

En termes de renoncement, les choses ne s'arrêtent pas là. L'équation de Schrödinger (4) se présente, dans le formalisme quantique, comme l'analogue du *principe fondamental de la dynamique* (ou deuxième loi de Newton) $\vec{F} = m \vec{a}$, qui décrit le mouvement des objets *classiques*. Tout comme cette dernière permet de prédire l'évolution d'un système classique sous l'effet des forces, l'équation de Schrödinger régit l'évolution temporelle de l'état d'un système quantique dans un paysage énergétique donné. Cependant, alors que dans le cadre classique, il existe une loi d'évolution temporelle *fondamentale, universelle et unique*, le formalisme quantique, quant à lui, apparaît comme schizophrène quant à la question de la dynamique temporelle du système²⁷. En effet, le postulat d'évolution temporelle stipule qu'en l'absence de mesure, le système évolue selon l'équation de Schrödinger (4), c'est-à-dire de manière parfaitement *déterministe* : l'état $|\Psi(t=0)\rangle$ étant connu, l'état $|\Psi(t)\rangle$ l'est alors à tout instant t . En revanche, lors d'une mesure, l'évolution du vecteur d'état devient aléatoire, celui-ci étant projeté dans l'un des états $|a_k\rangle$ avec une probabilité $\mathcal{P}(a_k)$.

Mais ce n'est pas tout. L'évolution décrite par (4) respecte la propriété d'*unitarité*, ce qui signifie que la norme (ou la «longueur») de l'état $|\Psi(t)\rangle$ reste constante au cours du temps. Cette caractéristique reflète la conservation de la probabilité totale. En

revanche, lors d'une mesure, l'évolution de l'état, qui correspond à une projection, ne conserve généralement pas la norme du vecteur (voir la figure (1)). Cela constitue une rupture avec l'évolution unitaire, impliquant que la mesure induit une transformation qui ne respecte pas la conservation de la probabilité totale²⁸.

Résumons :

2) En mécanique quantique, l'évolution temporelle d'un système est déterministe et unitaire en l'absence de mesure, tandis qu'elle devient non-déterministe et non-unitaire en présence d'une mesure.

Vis-à-vis de la difficulté²⁹ 2), mentionnée ci-dessus, une analyse comparative de la mesure dans les cas classique et quantique s'avère éclairante. En effet, en physique classique, la mesure n'a pas un rôle fondamental. Cela s'explique par le fait que les deux systèmes – l'appareil de mesure et le système mesuré – sont de même *nature*, une nature que l'on peut qualifier de manière simplifiée de macroscopique, bien que la distinction *classique/quantique* ne coïncide pas toujours avec celle *macroscopique/microscopique*. Cette situation implique que, même si la mesure nécessite une interaction entre les deux systèmes, celle-ci peut toujours être considérée comme *non invasive* par rapport au système étudié, n'affectant que façon négligeable le résultat obtenu³⁰. Autrement dit, la mesure se contente de *révéler* une propriété préexistante du système sans la modifier de façon significative.

Il en va tout autrement dans le contexte de la mesure d'un système quantique. En effet, dans ce cas, l'appareil de mesure, qui relève toujours d'une conception *classique*, tant en termes de sa constitution matérielle que de la nature des grandeurs mesurées, entre en interaction avec un système, quant à lui, *quantique*. Ce dernier, comme l'indique (1), est décrit, en général, par une *superposition* d'états correspondant à des *valeurs différentes* de la grandeur physique mesurée. Or, l'appareil de mesure classique ne peut, en revanche, par sa définition même, aboutir qu'à la sélection d'une *seule valeur* pour cette grandeur. On peut donc affirmer que, *en général*, la mesure d'une quantité physique quantique ne se limite pas à simplement *révéler* une propriété préexistante du système, comme c'est le cas en physique classique³¹. Il est donc naturel de penser que quelque chose de fondamental se joue lors de la confrontation de deux catégories physiques radicalement différentes, à savoir l'appareil de mesure classique et le système quantique.

La discussion qui précède repose néanmoins sur un double implicite. Le premier, qui se traduit par le glissement sémantique courant que j'ai mentionné plus tôt^{32,33}, consiste à supposer que le vecteur d'état décrit un système *unique*, et non un *ensemble* de systèmes. C'est cette hypothèse qui permet d'interpréter une superposition d'états, comme dans l'expression (1), comme une propriété intrinsèque d'un système particulier, et non comme une propriété statistique d'un ensemble de tels systèmes³⁴.

Le second implicite réside dans le fait de considérer le vecteur d'état comme une propriété intrinsèque, ontologique d'un système physique. Or, dans ce que l'on appelle traditionnellement l'*Interprétation de Copenhague* formulée par Bohr, Heisenberg, Born et d'autres, ce n'est absolument pas le cas ; le vecteur d'état est, au contraire, considéré comme une quantité extrinsèque et épistémique, c'est-à-dire qui ne porte ni sur le système physique en tant que tel, ni sur ses propriétés, mais uniquement sur l'état de nos *connaissances* à propos de ce système. Bohr est très clair – et très radical – à ce sujet : « Il n'y a pas de monde quantique. Il n'y a qu'une description abstraite de la physique quantique. C'est une erreur de penser que la tâche de la physique est de découvrir comment est faite la nature. La physique concerne ce que nous pouvons dire de la nature ». Dans une telle position, généralement qualifiée de « positiviste », le passage de l'évolution déterministe (4) à l'évolution non-déterministe (6) n'a rien de fondamental ni de dramatique, car

il s'agit simplement d'acter le passage d'un état cognitif, où coexistent plusieurs possibilités – symbolisées par la somme sur les états $\{|a_n\rangle\}$ – à un autre état cognitif – symbolisé par l'état $|a_k\rangle$.

Cette opposition entre deux points de vue radicalement différents – l'un, de nature ontologique, défendant l'existence d'une réalité objective pour les systèmes quantiques, et ne considérant l'appareil de mesure que comme un simple instrument d'investigation de leurs propriétés, l'autre, de nature épistémique insistant sur une physique réduite à l'organisation des connaissances que nous pouvons tirer de ces expériences – constitue le cœur des débats portant sur l'interprétation de la mécanique quantique.

2.3 La mécanique quantique : une théorie incomplète ?

Pour les partisans d'une vision réaliste de la physique, tels qu'Einstein et Bell, celle-ci ne saurait se limiter à une simple description, qui plus est, probabiliste, de ce que nous *pouvons savoir* sur le monde. Selon eux, il doit exister une réalité objective, indépendante de l'observation et de l'observateur, à l'origine des phénomènes quantiques. La possibilité d'une mécanique quantique plus objective repose sur le fait que, comme nous l'avons souligné, cette théorie se contente de fournir des prédictions probabilistes, testables uniquement sur un *ensemble statistique de systèmes*, tout en restant muette quant aux propriétés d'un système individuel. Einstein, ainsi que d'autres, émet donc l'hypothèse que la mécanique quantique, sous sa forme actuelle, est une théorie *incomplète*. Cela signifie qu'il doit exister un niveau plus fondamental, où un système est caractérisé par des propriétés objectives, représentées par des variables dites «cachées». Dans cette hypothèse, le recours au formalisme probabiliste n'est qu'une solution provisoire, en attente de voir émerger un niveau de compréhension plus profond. On peut établir ici un parallèle éclairant entre la mécanique quantique et la thermodynamique : cette dernière discipline est formulée en termes de variables macroscopiques, telles que pression, température, volume, etc., qui subissent des fluctuations. La mécanique statistique, quant à elle, fournit une description plus précise en termes d'états microscopiques dans lesquels les positions et les vitesses des particules sont bien définies. Les fluctuations thermodynamiques y sont expliquées par les moyennes sur ces états microscopiques, accompagnées de leurs dispersions. Dans ce cadre, les états microscopiques jouent le rôle des variables cachées.

De manière similaire, la mécanique quantique actuelle pourrait être vue, au même titre que la thermodynamique, comme une version «approximative» de la théorie, en attente d'une formulation plus exhaustive, plus fondamentale, qui, pour le moment, demeure inconnue. Aussi, dans ce cadre, les *inégalités de Heisenberg* pourraient prendre le sens de *relations d'incertitudes*, puisqu'un système quantique pourrait bel et bien être caractérisé par une paire d'observables (x, p) bien définie. Cependant, un *ensemble* de tels systèmes, bien que préparés de manière identique, présenterait – pour une raison encore inconnue – des *dispersions statistiques* pour ces grandeurs, formalisées, justement, par les *relations d'incertitudes* de Heisenberg. Bien entendu, cette théorie devra expliquer les phénomènes spécifiquement quantiques, ce qui exclut que les systèmes de cette nature possèdent exactement le même type de propriétés objectives que dans le cadre de la théorie newtonienne.

Deux arguments vont permettre de mettre en lumière les insuffisances présumées de la formulation actuelle de la théorie.

- L'argument EPR

Einstein, accompagné de ses collègues Boris Podolski et Nathan Rosen³⁵, dans ce qui demeure l'un des moments d'inspiration fulgurante de l'histoire de la physique, formule un argument d'incomplétude en mettant en lumière un paradoxe – connu sous le nom de paradoxe EPR, selon les initiales de leurs auteurs – visant à démontrer que la théorie quantique, telle qu'elle est formulée, conduit à une contradiction. Nous nous concentrons ici sur la version de ce paradoxe proposée par David Bohm, qui se distingue par sa grande simplicité. L'idée fondamentale est de considérer une grandeur vectorielle, sans équivalent classique, le spin $\vec{S}$, une propriété intrinsèque de la particule, à l'instar de sa masse ou de sa charge. L'une des particularités de cette quantité est que sa projection sur une direction quelconque $\vec{n}$, notée $S_n = \vec{S} \cdot \vec{n}$, ne peut prendre que des valeurs discrètes. Dans le cas d'une particule de spin $S = \frac{1}{2}$, ces valeurs sont $\pm \frac{1}{2}$. *En outre*, et c'est là un point fondamental pour la suite de la discussion, les composantes S_x , S_y et S_z du spin obéissent à des inégalités de Heisenberg :

$$\begin{aligned}\Delta S_x \Delta S_y &\geq |\langle S_z \rangle| \\ \Delta S_y \Delta S_z &\geq |\langle S_x \rangle| \\ \Delta S_z \Delta S_x &\geq |\langle S_y \rangle|\end{aligned}\tag{8}$$

qui interdisent l'existence d'un état dans lequel deux – et *a fortiori*, trois – composantes du spin, telles que S_x , S_y et S_z , seraient simultanément bien déterminées.

Bohm, à la suite d'Einstein, Podolski et Rosen, considère une situation dans laquelle deux particules ont interagi à un moment donné ou ont été émises simultanément à partir d'une source commune, de telle sorte qu'elles sont décrites, en ce qui concerne l'observable spin³⁶, par l'état suivant :

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\uparrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\downarrow_{2,\vec{n}}\rangle - |\downarrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\uparrow_{2,\vec{n}}\rangle \right)\tag{9}$$

Dans cette expression, $|\uparrow_{i,\vec{n}}\rangle$, avec $i = \{1, 2\}$, désigne l'état propre de la projection du spin de la particule $i = \{1, 2\}$ selon la direction $\vec{n}$, avec la valeur propre $+\frac{1}{2}$, tandis que $|\downarrow_{i,\vec{n}}\rangle$ désigne l'état propre correspondant à la valeur propre $-\frac{1}{2}$. L'état $|\Psi\rangle$ consiste donc en une superposition de deux états constitués *chacun* d'un produit d'états individuels du type $|A_1\rangle \otimes |B_2\rangle$ où les indices 1 et 2 se rapportent toujours aux indices des particules³⁷. Ainsi, dans le premier état constituant l'état global (9), la particule 1 (resp. 2) est dans l'état $+\frac{1}{2}$ (resp. $-\frac{1}{2}$) selon la direction $\vec{n}$; dans le second état, c'est l'inverse.

Une particularité fondamentale de l'état $|\Psi\rangle$, appelé état singlet de spin, réside dans le fait que l'expression (9) reste valide *quelle que soit* la direction $\vec{n}$ choisie pour la projection du spin, qu'il s'agisse des directions $\vec{n} = \vec{x}, \vec{y}$ ou $\vec{z}$, ou encore de toute combinaison linéaire de celles-ci. Une autre particularité fondamentale de l'état (9) est que les particules sont dans un état dit *intriqué*. Mathématiquement, cela signifie que cet état *ne peut pas* être factorisé sous la forme :

$$|\Psi\rangle \neq |\Psi_1\rangle \otimes |\Psi_2\rangle\tag{10}$$

où $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ seraient des états associés aux particules 1 et 2, respectivement. La conséquence de cette *intrication* est que les mesures du spin des particules 1 et 2, effectuées dans une direction donnée, présentent des (anti-)corrélations strictes : si la mesure du spin de la particule 1 selon une direction $\vec{n}$ égale $+\frac{1}{2}$ (resp. $-\frac{1}{2}$), alors la mesure du spin de la particule 2 selon la même direction sera, avec probabilité 1, égale à $-\frac{1}{2}$ (resp. $+\frac{1}{2}$).

On imagine maintenant que les particules 1 et 2 s'éloignent dans des sens opposés. Deux observateurs, O_1 et O_2 , décident alors de mesurer la projection du spin selon une direction $\vec{n}$, alors que les particules se trouvent dans des régions suffisamment éloignées et à des instants tels qu'aucun signal n'a pu se propager de l'une à l'autre

durant le processus de mesure. Cela garantit qu'une mesure effectuée sur l'une des particules, disons la particule 1, ne peut influencer la situation physique de la particule 2. Cette hypothèse, connue sous le nom de *séparabilité einsteinienne* ou *localité*, repose sur le principe selon lequel aucune interaction ne peut se propager plus rapidement que la vitesse de la lumière.

Envisageons alors un ensemble de tels systèmes et la série de mesures correspondantes. L'observateur O_1 mesure le spin de la particule 1 selon une direction arbitraire $\vec{n}$ et obtient la séquence suivante³⁸ :

$$O_1 : +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, \dots \quad (11)$$

Pour cet observateur, la séquence des résultats ne possède aucune régularité ; elle apparaît, conformément aux principes de la mécanique quantique, comme totalement *aléatoire*. La forme de l'état (9) indique seulement que, pour l'observateur 1, ignorant le sort de la particule 2, la particule 1 est dans une superposition d'états $|\uparrow_{1,\vec{n}}\rangle$ et $|\downarrow_{1,\vec{n}}\rangle$, de valeurs propres respectives $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$, et que les probabilités de mesurer ces deux valeurs sont identiques, chacune étant égale à $(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$.

De son côté, l'observateur O_2 , mesurant le spin de la particule jumelle 2 selon la *même direction* $\vec{n}$, obtient la séquence suivante :

$$O_2 : -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \dots \quad (12)$$

Cette séquence est évidemment tout aussi aléatoire. Rien ne pose problème tant que l'on se limite à effectuer des mesures et à enregistrer les résultats.

Cependant, si, maintenant, les deux observateurs O_1 et O_2 décident de comparer leurs résultats, ils vont constater l'existence d'anti-corrélations strictes entre les mesures des spins des deux particules selon la direction $\vec{n}$: chaque fois que la mesure du spin de la particule 1 donne $+\frac{1}{2}$ (resp. $-\frac{1}{2}$) celle de la particule 2 donne $-\frac{1}{2}$ (resp. $+\frac{1}{2}$).

Que vont-ils conclure de cette série d'expériences, dans laquelle les résultats des mesures des spins des particules 1 et 2, réputés être *aléatoires*, sont systématiquement *anti-corrélés*? Ils vont conclure que l'état $|\Psi\rangle$ ne constitue certainement pas une description complète des états de spins des deux particules, mais qu'il s'agit d'une description *incomplète* de l'état du spin d'un *ensemble de paires de particules*³⁹. Au sein de cet ensemble, chaque paire de particules doit pouvoir être décrite par un état du type $|\uparrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\downarrow_{2,\vec{n}}\rangle$ ou bien $|\downarrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\uparrow_{2,\vec{n}}\rangle$ dans lequel le spin des particules 1 et 2 selon une direction donnée $\vec{n}$ n'est pas aléatoire mais *prédéterminé* par des variables cachées.

Einstein et ses collègues veulent, en outre, démontrer que le type d'état (9) permet d'exhiber une contradiction interne à la mécanique quantique. Pour cela, ils définissent le concept d'*élément de réalité* : « Si, sans perturber un système, on peut prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité correspondant à cette quantité physique. »

Dans l'expérience décrite plus haut, en raison des anti-corrélations strictes entre les mesures des spins des deux particules selon la direction $\vec{n}$, il est possible, par la mesure du spin de la particule 1 selon cette direction, de prédire avec certitude le résultat de la mesure du spin de la particule 2 selon cette même direction, sans la perturber. D'après la définition donnée par EPR, ceci démontre qu'il existe un élément de réalité associé à cette quantité physique.

Mais, comme on l'a mentionné plus haut, le recours à un état singlet de spin rend la direction $\vec{n}$ *arbitraire*, de sorte qu'il semble possible d'étendre le raisonnement à *toute* composante du spin de la particule 2, et de lui associer un élément de réalité. Toutefois, ce raisonnement se heurte à une règle fondamentale de la mécanique quantique, formalisée par les relations (8), selon lesquelles deux (et, *a fortiori* trois) composantes du spin ne peuvent être simultanément bien définies. En d'autres termes, il est impossible qu'elles correspondent, en même temps, à des éléments de réalité.

Pour les partisans du réalisme, cette expérience de pensée met en évidence une faille fondamentale de la mécanique quantique, ouvrant la voie à l'idée que celle-ci pourrait être complétée par une théorie à variables cachées. Toutefois, dans l'interprétation orthodoxe, ou dite de Copenhague, et, en particulier, selon Niels Bohr, cette expérience ne démontre rien, car ses prémisses sont jugées incorrectes. L'état $|\Psi\rangle$ ne représente en aucun cas une réalité *objective* du système formé par la particule 1 et la particule 2, mais constitue uniquement un outil destiné à prédire les résultats possibles des mesures effectuées dans un *contexte expérimental bien spécifique*. Or, les considérations d'Einstein et de ses collègues, portent sur *diverses mesures* à la fois hypothétiques⁴⁰, mutuellement exclusives et relatives à *un seul et même état*⁴¹ ; elles sont, par conséquent, dépourvues de fondement. Bohr rejette donc la notion d'élément de réalité au sens d'EPR et, plus encore, leur conclusion d'incomplétude de la mécanique quantique.

Un fait absolument remarquable est que le physicien John Bell, qui pensait, tout comme Einstein, que la mécanique quantique était une théorie incomplète, a pu, sur la base de l'expérience de pensée d'EPR, concevoir un test prenant la forme d'inégalités, dites *inégalités de Bell*, que doit respecter une théorie à variables cachées *déterministe et locale*. Un autre fait remarquable est que ce test ne dépend ni de la nature ni de la structure des variables cachées, outre le fait que celles-ci respectent les propriétés susmentionnées. La dérivation de ces inégalités est un peu technique : on renvoie pour cela le lecteur au recueil d'articles édifiants de Bell⁴². Les expériences, toutes aussi remarquables, testant ces inégalités ont été menées principalement par Alain Aspect et ses collaborateurs entre 1980 et 1982⁴³ – sur une proposition formulée par Clauser, Horne, Shimony et Holt en 1969⁴⁴ – puis, de façon beaucoup plus sophistiquée par Hensen et collaborateurs en 2015⁴⁵, pour exclure un certain nombre de failles, dites « *angles morts* », possibles. Ces expériences montrent toutes une violation significative des inégalités de Bell et excluent donc la possibilité de variables cachées locales. Cela signifie qu'une théorie déterministe à variables cachées doit fatalement présenter des propriétés incompatibles avec l'invariance relativiste.

- Le problème de la mesure

Le second argument avancé pour démontrer l'incomplétude de la mécanique quantique repose sur la difficulté soulevée par la question « de la mesure », dans son cadre théorique. Comme nous l'avons vu, deux types d'évolution temporelle interviennent en son sein : la première, avant la mesure, (4), est déterministe et unitaire ; la seconde, survenant lors – ou immédiatement après – la mesure, (6), est aléatoire et non-unitaire. Ces deux modalités d'évolution rendent effectivement très bien compte des expériences. Toutefois, les succès de la mécanique quantique obtenus au cours des cent dernières années, son caractère universel, ainsi que les limites de son domaine d'applicabilité, sans cesse repoussées, ont conduit à jeter un regard nouveau sur l'acte de mesure et amené les physiciens à poser les questions suivantes : l'appareil de mesure n'est-il pas un système physique comme un autre ? Et l'acte de mesure n'est-il pas simplement une *interaction* entre un « grand » et un « petit » système⁴⁶, susceptible d'être décrit en termes de cette théorie *fondamentale et universelle* qu'est la mécanique quantique ? Et si l'on admet que deux modalités de traitement peuvent être *utiles*, voire *indispensables*, dans la pratique – car considérer le « grand » système dans le cadre de la mécanique

quantique pourrait s'avérer extrêmement complexe – ne devrait-on pas chercher à *comprendre* le passage de l'évolution unitaire (4) à l'évolution non-unitaire (6) en des termes physiques, plutôt que de simplement les postuler?

Citons, de nouveau Bell, qui exprime ces idées avec une clarté intellectuelle sans égale : « Il semblerait que la théorie soit exclusivement concernée par les 'résultats de mesure' et n'ait rien à dire sur autre chose. Qu'est-ce qui qualifie exactement certains systèmes physiques à jouer le rôle de 'mesureur'? La fonction d'onde de l'univers a-t-elle attendu pendant des milliards d'années avant qu'une créature unicellulaire n'apparaisse? Ou a-t-elle dû attendre un peu plus longtemps, pour un système un peu mieux qualifié... titulaire d'un doctorat? Si la théorie doit s'appliquer à autre chose que des opérations de laboratoire hautement idéalisées, ne sommes-nous pas obligés d'admettre que des processus plus ou moins 'semblables à des mesures' se produisent plus ou moins tout le temps, plus ou moins partout? N'avons-nous pas alors des sauts [de la fonction d'onde] tout le temps? »

Ces considérations, à l'instar du paradoxe EPR, soulèvent une nouvelle difficulté conceptuelle, désormais connue sous le nom de *problème de la mesure*. Pour mieux en comprendre la nature, examinons plus en détail le processus de mesure, en considérant un système quantique S décrit par un vecteur d'état du type (1). Réécrivons cet état en négligeant la dépendance temporelle, qui n'est pas essentielle ici :

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \quad (13)$$

Nous introduisons ensuite un appareil de mesure M conçu spécifiquement pour sa capacité à mesurer la grandeur A , et que nous traitons, cette fois, également dans le cadre de la mécanique quantique. Comme tout système quantique, l'appareil M est décrit par un vecteur d'état $|M_0\rangle$, représentant son état initial, neutre. Juste avant la mesure, le système composé $S + M$ est donc décrit par le vecteur d'état $|\Phi_i\rangle = |\Psi\rangle \otimes |M_0\rangle$. L'interaction entre les deux systèmes conduit le système composé de l'état $|\Phi_i\rangle$ vers l'état $|\Phi_c\rangle$ – avec c pour corrélé – défini comme suit :

$$|\Phi_i\rangle = |\Psi\rangle \otimes |M_0\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \otimes |M_0\rangle \longrightarrow |\Phi_c\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \otimes |M_n\rangle. \quad (14)$$

L'état $|\Phi_c\rangle$ décrit l'existence de *corrélations* – même une intrication, analogue à celle rencontrée dans le cadre du paradoxe EPR – entre les états propres $\{|a_n\rangle\}$ de l'opérateur $\hat{A}$ et les états correspondants $\{|M_n\rangle\}$ de l'appareil de mesure M . Toutefois, si l'on suit le formalisme de la mécanique quantique, l'expression (14) doit être comprise comme une *superposition d'états macroscopiques* $\{|M_n\rangle\}$ de l'appareil de mesure.

Pour souligner la difficulté, Schrödinger a proposé d'illustrer cette situation par le célèbre paradoxe du chat⁴⁷. Dans cette expérience de pensée, l'appareil de mesure, macroscopique, est remplacé par un chat, également macroscopique. Un système quantique, dans une superposition de deux états $|v\rangle$ et $|m\rangle$, est couplé à un mécanisme qui, en fonction de l'état de ce système, déclenche ou non la libération d'un poison contenu dans une fiole. Cela détermine alors le sort du chat : s'il vit ou s'il meurt. Formellement, selon l'évolution unitaire postulée par la mécanique quantique, le système est décrit par l'état corrélé suivant, analogue à (14) :

$$|\Phi_c\rangle = \alpha |v\rangle \otimes |\text{chat vivant}\rangle + \beta |m\rangle \otimes |\text{chat mort}\rangle \quad (15)$$

qui correspond à une superposition des états $|\text{chat vivant}\rangle$ et $|\text{chat mort}\rangle$ ⁴⁸. Naturellement, dans la réalité, cette superposition n'a aucun sens ; on observe un état bien défini du chat⁴⁹ : $|\text{chat vivant}\rangle$ ou bien $|\text{chat mort}\rangle$. Dans le cadre du processus de mesure que nous avons décrit précédemment, l'état bien défini du chat correspond à un état bien défini $|M_k\rangle$ de l'appareil de mesure⁴⁹ :

$$|\Phi_c\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \otimes |M_n\rangle \longrightarrow |\Phi_f\rangle = |a_k\rangle \otimes |M_k\rangle. \quad (16)$$

On perçoit ici clairement la nécessité *pratique* du postulat correspondant (6). De plus, dans le cadre de l'interprétation orthodoxe, cela ne soulève aucune difficulté *conceptuelle*, le vecteur d'état étant considéré comme un condensé de l'information portant sur le système. Ainsi, le passage d'un mode d'évolution du vecteur d'état à un autre ne traduit rien d'autre qu'une modification de l'état de notre *connaissance* du système au moment où une mesure est effectuée⁵⁰. À l'opposé, certains défendent une approche au sein de laquelle le vecteur d'état est envisagé comme une description intrinsèque et objective de la réalité physique du système. Dans un tel contexte, la réduction du vecteur d'état au moment de la mesure nécessite une véritable explication ; d'où les *interprétations* variées, qui penchent plus ou moins d'un côté ou de l'autre (voir plus bas). Einstein, quant à lui, croyait en l'existence d'une réalité objective et déterministe. Sa célèbre maxime « Dieu ne joue pas aux dés » reflète son rejet du hasard fondamental : selon Einstein, la nature ne peut être gouvernée par un véritable indéterminisme. Autrement dit, pour lui, le résultat d'une mesure doit être causalement déterminé. C'est cette conviction qui le conduisit à postuler l'existence de variables cachées permettant de restaurer une description causale des phénomènes physiques. Mais, comme on l'a dit, cette hypothèse a été invalidée par les inégalités de Bell et leur violation par ce que l'on a coutume de nommer les « expériences d'Aspect ».

2.4 Conclusion : de multiples interprétations

Répondre à la question de la nature de la révolution provoquée par l'avènement de la mécanique quantique ne peut se faire que de façon partielle et temporaire. En effet, en près de cent ans, la mécanique quantique s'est déployée de façon spectaculaire tant dans l'élucidation de phénomènes physiques complexes – tels que la supraconductivité, les condensats de Bose-Einstein, le magnétisme quantique, la spintronique, l'effet Hall, etc. –, que dans le développement de nouvelles technologies, comme les sciences des matériaux, la cryptographie, la métrologie et l'information quantique. Cette activité intense témoigne de l'efficacité impressionnante et incontestable de la mécanique quantique, non seulement en tant que domaine de recherche fondamentale, mais aussi en tant que moteur d'innovations technologiques concrètes. Si révolution il y a, c'est déjà celle-ci.

En revanche, en ce qui concerne la révolution conceptuelle apportée par la mécanique quantique, les avancées n'ont pas été aussi spectaculaires que ses applications pratiques, et il apparaît que le cœur du problème reste encore hors de portée. C'est précisément dans ce caractère insaisissable de son sens profond que la mécanique quantique se distingue des autres domaines de la physique. Cette singularité repose principalement sur la dissolution de la frontière traditionnelle entre le *sujet* et l'*objet*, une distinction que la mécanique quantique remet en question de manière radicale.

Dans le domaine classique, l'objet d'étude est clairement défini, doté de propriétés intrinsèques et, surtout, indépendant de l'acte d'observation, et encore moins de l'observateur. En mécanique quantique, au contraire, l'acte de mesure induit un enchevêtrement – et même une intrication caractérisée par les états (14) et (15) – entre l'objet et les moyens mêmes de son observation, et, par conséquent, entre l'objet et le sujet qui a le contrôle du processus d'observation. Ainsi, l'observateur ne peut plus vraiment se positionner comme un simple spectateur extérieur : son interaction avec le système étudié contribue à définir ce qui est mesuré. Enfin, cette interdépendance se manifeste aussi via l'émergence de superpositions quantiques macroscopiques (14), une conséquence directe du formalisme quantique⁵¹, qui constitue un défi à relever pour la théorie.

Cette situation introduit un élément de relativisme fondamental dans notre compréhension de ce que l'on pourrait appeler la « réalité ». Face à cela, l'attitude

positiviste, qui réduit le vecteur d'état à un simple catalogue de notre connaissance des résultats possibles, ne résout pas l'énigme. Au contraire, elle l'amplifie en rendant encore plus difficile l'identification d'une réalité objective, indépendante de l'observateur. Ce défi conceptuel constitue l'un des aspects les plus fascinants et troublants de la mécanique quantique.

Pour ce qui est de débat portant sur l'incomplétude de la mécanique quantique – le paradoxe EPR, les inégalités de Bell ainsi que leur violation – il a, sans doute, été à l'origine des bouleversements conceptuels les plus spectaculaires et avérés de cette science⁵².

Il a rendu caduque la vision traditionnelle expliquant l'intrusion des probabilités en mécanique quantique comme un reflet de notre *ignorance* de processus sous-jacents, au profit d'une conception reconnaissant l'existence d'une *indétermination fondamentale* au cœur même de cette science. Ainsi, la mécanique quantique pose un défi majeur : appréhender la notion de probabilités *intrinsèques*, en la mettant en opposition avec celle de probabilités *extrinsèques*, qui, elles, renvoient simplement à notre déficit de connaissance.

En outre, ce débat a conduit à l'émergence du concept probablement le plus déroutant de la théorie : celui d'intrication, c'est-à-dire une situation dans laquelle deux – ou plusieurs – particules se trouvent dans un état qui n'est pas simplement un produit de deux – ou plusieurs – états individuels. Dans un tel état, des corrélations entre les particules se manifestent de manière *instantanée* sur des distances apparemment arbitraires⁵³. Ces corrélations, appelées corrélations EPR, constituent un indice manifeste d'une forme de «non-localité». Il convient de préciser l'usage du terme «forme», car une véritable non-localité impliquerait un transfert d'information à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui n'est pas le cas ici. En effet, les corrélations EPR respectent la causalité einsteinienne. Pour saisir le caractère profondément subversif du concept d'intrication, mentionnons des spéculations assez récentes⁵⁴, qui suggèrent que les «paires EPR⁵⁵» pourraient être reliées par un «*trou de ver*» également appelé «*pont d'Einstein-Rosen*» (abrégé en ER), selon un article publié la même année que celui portant sur le paradoxe EPR. Un tel «pont» serait une structure reliant deux régions potentiellement très éloignées de l'espace-temps, créant ainsi un raccourci dans celui-ci. Cette connexion hypothétique, connue sous le nom de conjecture ER=EPR, n'a pas encore été confirmée, mais elle offre une perspective fascinante sur la nature de ces corrélations quantiques.

Quant au débat relatif à la question de la mesure en mécanique quantique, il trouve sa genèse dans le concept de *superposition d'états*, probablement le plus emblématique de cette théorie. Ce concept traduit le fait qu'à l'échelle quantique, un système peut exister dans une combinaison de plusieurs états propres d'un opérateur associé à une grandeur physique donnée. Le problème de la mesure, lui-même, qui, toujours dans une approche objective du vecteur d'état, conduit à envisager des superpositions macroscopiques d'états, a donné naissance à diverses interprétations originales, parfois même extravagantes, de la mécanique quantique. Pour n'en citer que quelques-unes⁵⁶ :

- L'interprétation des «mondes multiples», proposée par Everett, postule que, lors d'une mesure, *tous* les résultats sont réalisés mais dans des «mondes parallèles». L'avantage de cette interprétation est qu'elle évite la question de l'articulation entre deux types d'évolution, car il n'est plus question de réduction du vecteur d'état. On peut cependant critiquer son caractère... peu économique qui fait qu'elle passe difficilement le test du rasoir d'Oc-cam : «Entia non sunt multiplicanda sine necessitate⁵⁷».
- L'interprétation *objective* de l'effondrement proposée par Ghirardi, Rimini et Weber (GRW), suppose l'existence d'un processus interne qui provoque la

réduction du vecteur d'état. Il s'agit d'une théorie à variables cachées (donc non-locale) qui modifie de façon *ad hoc* l'équation de Schrödinger en y ajoutant des termes supplémentaires.

- L'interprétation de Bohm-de Broglie, ou interprétation de l'onde pilote, postule que la particule ou l'ensemble des particules – est guidée par une onde et suit une trajectoire classique. Il s'agit d'une théorie déterministe en accord avec toutes les prédictions de la mécanique quantique. Elle résout, tout comme la théorie GRW, le problème de la mesure, mais de façon plus naturelle car elle n'implique pas de modifier le formalisme. Cependant, elle s'avère, comme il se doit, non-locale et incompatible avec l'invariance relativiste.
- L'interprétation relationnelle, proposée par Carlo Rovelli, soutient que le vecteur d'état ne décrit pas une propriété objective du système, mais les *relations* entre systèmes, notamment entre le système et le (ou les) observateur(s). Cette interprétation s'inspire largement de la théorie de la relativité d'Einstein, où la plupart des grandeurs sont relatives à l'observateur. Le problème de la mesure y est « résolu » par l'idée que celle-ci n'est plus associée à une réduction objective du vecteur d'état, mais à l'établissement de relations spécifiques entre observateurs, conduisant à des interprétations différentes, mais compatibles entre elles, de la réalité. Il existe, d'ailleurs, plusieurs interprétations très intéressantes dans lesquelles un tel glissement ontologique s'opère, au cours duquel le concept central de la mécanique quantique se déplace du *système* vers les *corrélations entre systèmes*, reconnaissant ainsi l'idée, présente chez de nombreux philosophes, de l'impossibilité d'accéder à la chose « en soi »⁵⁸.
- L'interprétation via la décohérence. La décohérence est un concept introduit par H. Dieter Zeh en 1970 et développé, plus tard, notamment par Wojciech H. Zurek. Elle représente sans doute l'une des approches les plus fructueuses destinées à comprendre les comportements de systèmes macroscopiques ainsi que pour aborder la question de la mesure. En effet, tout en se fondant sur le formalisme quantique tel qu'il est, cette approche parvient à justifier l'émergence d'un comportement classique, tant pour les systèmes macroscopiques que pour les systèmes quantiques en interaction avec leur environnement, notamment lors de la mesure. L'idée fondamentale repose sur le fait que, dans les deux cas, le système n'est pas isolé : il interagit de manière continue avec son environnement⁵⁹. Cette interaction perturbe – en fait, délocalise dans l'environnement – les relations de phase entre des états macroscopiques superposés, compromettant ainsi la cohérence et la stabilité d'une telle superposition d'états⁶⁰. La décohérence permet de résoudre, en partie, le problème de la mesure car elle montre comment, en pratique, les effets de superpositions quantiques deviennent inobservables à l'échelle macroscopique. Mais elle ne résout cependant pas le problème de la réduction du vecteur d'état, en ce sens qu'elle ne conduit jamais à la sélection, pour une observable donnée, d'une valeur parmi d'autres.

On constate que les tentatives d'interprétation de la mécanique quantique sont non seulement variées, mais aussi en constante prolifération, ce qui témoigne du fait que le sujet demeure profondément ouvert et loin d'avoir révélé tous ses secrets.

3 La mécanique quantique et la question de la connaissance

Nous avons exploré les aspects de la mécanique quantique susceptibles de susciter une réflexion sur la nature du lien entre cette théorie et la connaissance qu'elle nous offre du monde. Or, elle semble remettre en question des notions profondément enracinées dans l'esprit humain : le déterminisme, l'idée que les probabilités ne seraient qu'un simple reflet de notre ignorance, l'indépendance des systèmes séparés spatialement (la localité), ainsi que la conviction tenace selon

laquelle la réalité existe indépendamment des moyens employés pour l'étudier et, plus encore, de l'observateur. Autant d'éléments qui ébranlent les concepts d'objectivité et la nature même de la réalité.

Comme nous l'avons dit, il est plus qu'évident que les progrès scientifiques et techniques à venir apporteront un regard neuf sur ces problématiques qui, de conceptuelles, voire philosophiques, pourraient largement s'intégrer dans les principes ou propriétés d'une théorie physique en gestation, ou qui reste encore à découvrir *in extenso*. Nous avons trop souvent entendu évoquer la « fin de la physique », la « fin de la science » ou la « fin de l'histoire » pour penser que nous soyons parvenus à une sorte de dénouement ultime.

Il est toutefois possible de se livrer à un exercice de réflexion, en étant pleinement conscients de ses limites : envisager la *possibilité*, tout aussi intéressante, d'une frontière dans l'investigation scientifique, à la lumière de ce que la mécanique quantique nous révèle – ou, plus précisément, à la lumière de notre compréhension de ce que qu'elle nous révèle. Plutôt que d'aborder cette question de manière frontale, nous nous proposons de l'examiner en empruntant un détour par les sciences cognitives et les neurosciences. En effet, il nous semble illusoire de penser que la construction de nos représentations et de notre compréhension du monde puisse s'affranchir des mécanismes spécifiques à l'œuvre au sein de l'*esprit humain*. Or, ces disciplines nous enseignent un fait essentiel : les êtres humains portent un regard *subjectif* sur le monde qui les entoure. Cette subjectivité se manifeste à plusieurs niveaux : à l'échelle de l'espèce, par des biais *physiologiques* ; à l'échelle individuelle, à travers des biais *de perception* ou des biais *cognitifs* propres à chaque personne – ou groupe de personnes ; et enfin, à l'échelle collective, par des biais *culturels* caractéristiques de tel ou tel groupe social ou même de la société toute entière.

Des biais physiologiques. En tant qu'humains, comme toute autre espèce, nous accédons au monde et aux événements qui nous entourent par l'intermédiaire de nos sens, c'est-à-dire par des récepteurs sensoriels physico-chimiques spécifiques. Les stimuli physiques issus du monde extérieur induisent des modifications bio-chimiques dans les récepteurs concernés, donnant ainsi naissance à des signaux chimiques. Ces signaux sont ensuite convertis en impulsions électriques, qui sont acheminées, via les neurones, jusqu'au cerveau, où elles donnent lieu à la formation d'une *représentation* mentale cohérente de l'événement perçu.

Cependant, nos cinq sens, aussi sophistiqués soient-ils, restent imparfaits. Ils sont limités à des spectres sensoriels restreints, c'est-à-dire à des plages spécifiques de fréquences visuelles et auditives, de goûts, d'odeurs et de sensations, qui définissent ce que nous sommes *capables* de percevoir. Ainsi, notre vision n'est sensible qu'à une infime portion du spectre électromagnétique, de l'ordre de quelques centaines de nanomètres, située entre l'ultraviolet et l'infrarouge. De même, notre ouïe est limitée aux fréquences sonores comprises approximativement entre 20 et 20 000 Hz. Quant à nos autres sens – le goût, l'odorat et le toucher –, ils ne sont opérants, eux aussi, que sur des plages restreintes.

Bien que nous ne soyons pas les moins bien placés parmi les espèces du règne animal, certaines d'entre elles surpassent largement nos capacités sensorielles dans des domaines spécifiques. Ainsi, les chats et autres félins disposent d'une vision nocturne exceptionnelle, leur permettant de percevoir des niveaux de luminosité bien plus faibles que les nôtres. De même, des rapaces comme les faucons et les aigles, dont l'acuité visuelle est 4 à 8 fois supérieure à la nôtre, sont capables de repérer de petites proies à plusieurs kilomètres de distance.

En ce qui concerne l'ouïe, les chats et les chiens sont particulièrement sensibles aux hautes fréquences (au-delà de 20 000 Hz), ce qui les rend aptes à détecter les mouvements de leurs proies. Les chauves-souris et les dauphins, quant à eux,

perçoivent des fréquences beaucoup plus élevées, souvent dans le domaine des ultrasons, ce qui leur permet de se déplacer et de chasser grâce à l'écholocalisation. Notre odorat, bien qu'il soit relativement efficace, est bien plus limité que celui de certains animaux.

Par exemple, le chien possède un sens de l'odorat environ 100 000 fois plus développé que le nôtre, ce qui lui permet de détecter des composés chimiques à des concentrations infimes. En outre, grâce à leur odorat surdéveloppé, à leur mémoire associative qui établit des liens profonds entre leurs sens et leur sentiment d'attachement, ainsi qu'à leur perception particulière du passage du temps, les chiens parviennent à ressentir la présence de leur maître ou maîtresse, même en leur absence. L'éléphant, quant à lui, est capable de repérer des sources d'eau et de nourriture à plusieurs kilomètres de distance. Enfin, l'odorat du requin est si précis qu'il peut détecter la présence de sang dans l'eau à une concentration aussi faible qu'une partie par milliard.

En ce qui concerne le goût, on observe également une grande variabilité entre espèces. Par exemple, les rats possèdent environ 50% de papilles gustatives de plus que les humains, avec une sensibilité particulière aux saveurs sucrées et amères, ce qui leur est utile pour détecter d'éventuelles substances toxiques. Quant au toucher, bien que les humains possèdent un sens tactile relativement développé, notamment au niveau de la peau et des muscles, des animaux tels que l'éléphant et le dauphin disposent de capacités sensorielles exceptionnelles au niveau de la peau, leur permettant de détecter des variations de texture, de température et de pression de très faible intensité dans leur environnement. En définitive, bien que nos sens nous permettent de nous orienter et d'interagir efficacement avec le monde, il existe une grande diversité dans la manière dont les autres espèces perçoivent leur environnement. Chaque espèce animale a développé des capacités sensorielles spécifiques, souvent bien au-delà de ce que nous, en tant qu'humains, pouvons percevoir. Il est évident que ces biais physiologiques jouent un rôle déterminant dans notre perception du monde.

Des biais de perception. Plaçons-nous maintenant à l'échelle *individuelle* ou à celle du groupe d'individus. Indépendamment de nos capacités sensorielles intrinsèques, nous pouvons être sujets à des perceptions déformées de la réalité, à des « illusions » ou, pour être plus précis, à des biais de perception, et ce, dans tous nos sens. Ces biais peuvent d'ailleurs se manifester à l'échelle de l'espèce toute entière.

Nous connaissons bien les illusions visuelles, mais il en existe aussi de nombreuses autres, notamment auditives. Par exemple, l'effet McGurk illustre comment l'interférence entre l'audition d'un premier son et la « vision » d'un second son, lu sur les lèvres d'une personne, peut conduire à la perception d'un troisième son, qui n'a jamais été émis.

Il existe aussi des illusions olfactives, telles que la phantosmie, durant laquelle l'on perçoit une odeur qui n'est pas présente dans l'environnement. En ce qui concerne le goût, en dehors de possibles « goûts fantômes », celui-ci est fréquemment influencé par de nombreux facteurs externes : la couleur des aliments, leur texture, leur odeur, ainsi que des éléments tels que le niveau d'acidité ou d'amertume. Ces facteurs peuvent profondément altérer notre perception gustative. Ceci est mis à profit dans le cadre de la cuisine moléculaire, qui se propose notamment de créer de nouvelles textures propres à induire des sensations gustatives originales.

Enfin, les illusions tactiles ne sont pas en reste et peuvent être particulièrement spectaculaires. L'un des exemples les plus célèbres est celui de la main fantôme, où une personne amputée perçoit encore des sensations dans le membre disparu. Un autre exemple, très courant, est l'habituation tactile : lorsque nous sommes

soumis à une stimulation tactile constante, comme le contact d'un vêtement sur la peau, notre perception de cette stimulation peut diminuer avec le temps, au point où nous ne la remarquons plus, bien qu'elle soit toujours présente.

Ainsi, notre expérience sensorielle du monde n'est ni totalement objective, ni entièrement fidèle à la réalité ; elle est constamment modelée par des biais de perceptions, des illusions qui en révèlent les limites.

Des biais cognitifs. Mais ce n'est pas tout. Il existe également une série absolument impressionnante de biais – ou effets – *cognitifs* impliquant des processus de *traitement* de l'information par le cerveau⁶¹. Ces biais engagent des mécanismes psychologiques ou intellectuels, tels que l'attention, la mémoire, le raisonnement et la prise de décision, qui vont au-delà des simples perceptions sensorielles. Il est impossible – et, par ailleurs, inutile – d'en dresser ici une liste exhaustive. Nous nous contenterons de mentionner ceux qui sont pertinents pour notre propos, et qui renforcent l'idée d'une appréhension subjective du monde, déjà mise en évidence par les biais physiologiques et les biais de perception.

★ L'effet de halo – ou de contamination, ou encore de notoriété – désigne le phénomène par lequel la perception des caractéristiques d'une personne est altérée par un ou plusieurs traits initiaux. Par exemple, une personne très avenante pourra se voir attribuer, sans fondement, d'autres qualités et suscitera, sans justification, des sentiments tels que la confiance ou le respect.

★ L'effet Dunning-Kruger – ou biais de surconfiance – désigne le phénomène selon lequel des personnes peu qualifiées surestiment leurs compétences, tandis que les individus les plus qualifiés les sous-estiment.

★ L'effet, ou biais, de confirmation désigne la tendance à accorder plus de crédibilité aux informations qui confirment nos croyances préexistantes, nos idées préconçues.

★ L'effet placebo – ou son opposé, l'effet nocebo – repose sur la croyance en l'effet positif – ou négatif – d'une substance, souvent médicamenteuse, induisant ainsi un effet physiologique réel.

★ Le biais de la « pensée magique » consiste à imaginer que nos pratiques, croyances, superstitions ou pensées peuvent avoir une influence concrète sur la réalité du monde⁶². Ce biais peut être vu comme une réponse psychologique à la conscience de notre propre finitude et, de façon plus générale, à nos angoisses métaphysiques.

★ Le biais de mémoire désigne l'influence de l'environnement, de l'état psychologique ou émotionnel d'un individu sur la manière dont il emmagasine et retrouve ses souvenirs. En raison de ce phénomène, la reconstruction précise d'un souvenir se fait souvent à travers plusieurs « expériences » réalisées dans des contextes ou états différents, qui, sous l'influence de stimuli externes⁶³, contribuent à en consolider le contenu. Toutefois, il ne faut pas croire que cette reconstruction soit fidèle à la réalité, car le souvenir lui-même est une construction mentale déjà biaisée par l'état psychologique de l'individu. L'identification du souvenir est ainsi inévitablement imparfaite, influencée par l'état émotionnel ou mental du moment. Certains aspects sont embellis ou noircis, tandis que d'autres peuvent être complétés par des détails inventés. Ainsi, la reconstruction de la mémoire est intrinsèquement *contextuelle*. Il est également prouvé que certains états altérés de conscience, tels que la semi-conscience, l'hypnose, l'hypnagogie (état intermédiaire entre veille et sommeil) ou encore la transe, permettent d'exhumer des souvenirs enfouis⁶⁴. *Par pure analogie*, ce phénomène peut être comparé à la reconstruction d'un état quantique dans une superposition d'états (1), à savoir la détermination des coefficients

$c_n(t)$, réalisée à travers une série de mesures. Il est aussi intéressant, mais toujours par pure analogie, de signaler que la notion de contextualité est aussi présente en mécanique quantique. En effet, on peut montrer⁶⁵ que si une théorie à variables cachées existe, alors elle doit nécessairement être *contextuelle*. Cela signifie que si le résultat de la mesure d'une observable A était déterminé par des variables cachées déterministes, alors il devrait nécessairement dépendre du groupe d'observables – $\{B, C, \dots\}$ – compatibles entre elles et compatibles avec A avec lequel on choisit de mesurer cette grandeur⁶⁶. C'est cette contextualité qui se transforme en non-localité lorsque l'on considère une situation dans laquelle les observables sont spatialement distantes les unes des autres.

★ L'effet «cocktail» désigne la situation très courante dans laquelle un individu est capable de se concentrer sur un stimulus particulier tout en faisant abstraction de nombreux autres. En neurosciences⁶⁷, ce phénomène est expliqué par le fait que l'inconscient reçoit une multitude de stimuli extérieurs, mais ne permet le passage à la conscience que d'un seul ou d'un très petit nombre d'entre eux seulement. L'*attention sélective* agit comme un filtre, décidant quels stimuli auront accès à la conscience et lesquels seront ignorés. Un rapprochement, purement analogique, peut être fait à nouveau, cette fois, entre cette prise de conscience et la réduction du vecteur d'état⁶⁷, symbolisé par le passage de (1) à (6)⁶⁸. Dans cette analogie, l'inconscient, qui perçoit de multiples stimuli, correspond à un système quantique dans un état de superposition d'états propres. L'attention sélective joue le rôle de l'appareil de mesure, tandis que la conscience d'un événement psychique se rapproche d'un état quantique bien défini, c'est-à-dire d'un état propre d'un opérateur.

★ Le biais de maîtrise et, plus généralement, ce que l'on pourrait nommer, de façon un peu provocatrice, l'«illusion» du libre arbitre renvoie à la tendance de certains individus – voire de tous – à surévaluer leur capacité à maîtriser les événements et à prendre des décisions de manière autonome, ou même, à posséder une *réelle liberté de choix*. Il convient toutefois d'éviter de s'engager dans le débat complexe portant sur l'existence même du libre arbitre, une problématique qui n'a, à ce jour, reçu aucune réponse définitive dans le cadre des neurosciences⁶⁷. Une telle discussion nécessiterait, au préalable, de préciser ce que l'on entend par «libre arbitre». Sommes-nous libres de quoi, exactement? De toute influence historique, personnelle, génétique, spirituelle ou métaphysique? Et, si l'on écarte toutes ces influences, que reste-t-il réellement pour justifier ou engendrer une décision⁶⁹? Sans trancher définitivement sur ce débat, il est légitime de penser, à l'instar des mécanismes observés dans le cadre de l'effet cocktail, que notre inconscient joue un rôle déterminant dans nos processus de prise de décision, influençant des choix que nous croyons conscients et rationnels. On pourrait alors dire, avec Spinoza que : «La liberté n'est que l'ignorance des causes qui nous déterminent.»

★ L'«effet *Gestalt*»⁷⁰ renvoie à la théorie de la *Gestalt* qui tire son nom du mot allemand *Gestalt* signifiant «forme» ou «configuration». Cet effet est sans doute le plus important pour notre propos (voir plus bas). Issue de la psychologie et de la philosophie, la théorie de la *Gestalt* regroupe un ensemble de principes qui expliquent comment, face à une situation complexe, le cerveau humain cherche spontanément à lui attribuer un sens ou une «forme». Selon cette théorie, les stimuli sensoriels, notamment *visuels*, sont perçus de manière globale et organisée, plutôt que de façon locale et désorganisée. L'un de ses principes fondamentaux est que «le tout est plus que la somme de ses parties». Un tel effet permet notamment d'expliquer⁷¹ :

Cmmnt un txt mal écrti peut êtr nénmois êtr cmpri

dénommé – via un jeu de mots un peu discutable – «typoglycémie» fusion de «typographie» et de «hypoglycémie⁷²».

★ Considérons un dernier effet, également très important au sein des sciences cognitives, celui de la *dissonance cognitive*. Ce concept désigne une situation dans laquelle le comportement d'un individu entre en conflit avec ses croyances, convictions ou valeurs profondes. Face à cette tension psychologique, l'individu tente, souvent de manière inconsciente, de réduire la contradiction en modifiant soit son comportement (ce qui est rare), soit ses croyances, même si cette modification peut parfois être superficielle, voire désinvolte. À titre d'exemple, on peut citer le cas de pratiques proscrites ou nuisibles à la santé, que l'on justifie par des principes tels que le fameux *Carpe diem*, souvent invoqué pour légitimer un comportement irrationnel ou risqué. De même, certains comportements généralement jugés socialement, ou même légalement, inappropriés sont légitimés par leur caractère largement répandu – *tout le monde le fait* – ou leur antériorité – *ça s'est toujours fait* – ce qui peut être simplement qualifié de mauvaise foi ! Mais, comme on va le voir, cet effet opère dans un contexte moins trivial.

Des biais culturels. Tous ces biais ou effets, qu'ils soient physiologiques, perceptifs ou cognitifs, montrent que le cerveau humain est loin d'appréhender la réalité de manière objective. Ses modalités sensorielles et ses croyances profondes, toutes deux façonnées par une évolution s'étendant sur plus de trois cent mille ans⁷³, sont inévitablement entachées d'une forme de subjectivité.

À ce stade, on pourrait soutenir que la science, en tant que construction, certes humaine mais *collective*, tend vers l'objectivité. En effet, la vocation de la science consiste précisément à dépasser les perceptions, les croyances, ainsi que les convictions personnelles et subjectives du monde. Ce dépassement repose sur un processus rigoureux d'élaboration des savoirs : il inclut l'expérimentation, l'analyse des résultats, la production et la formalisation d'hypothèses, puis l'édification d'une théorie, le recours au principe de réfutabilité pour la tester et la valider – ou l'invalidier –, ainsi que l'exercice permanent d'un regard critique. Enfin, la diffusion de ces savoirs joue un rôle central. Ce processus ne vise pas à atteindre une objectivité totale, qui resterait largement utopique, mais à établir ce que l'on appelle un *consensus intersubjectif*, c'est-à-dire un accord partagé sur des faits, des principes, des théories, considérés comme justes par une communauté scientifique. Les connaissances qui en découlent permettent alors non seulement d'identifier les biais cognitifs, mais aussi de les contrôler ou même, dans certains cas, de s'en abstraire partiellement grâce à des contre-mesures, processus souvent désigné, dans ce contexte, sous le terme de «débiaisement».

Mais la science, même dans sa force collective, peut-elle réellement contourner les biais de perception humaine, les illusions et les impressions subjectives ? On avance que, bien au-delà de la subjectivité individuelle, il existe également, de manière plus insidieuse, une subjectivité collective, y compris dans le domaine scientifique. Cette subjectivité repose, elle aussi, sur des biais culturels profonds et reste largement tributaire de notre expérience sensible.

Considérons ainsi les *mathématiques*, souvent perçues comme la science la plus abstraite, à laquelle on attribue la capacité de produire un corpus de connaissances existant indépendamment de l'esprit humain. Même si l'on accepte volontiers cette idée, il n'en reste pas moins que l'*ordre* dans lequel les mathématiques sont découvertes⁷⁴ dépend non seulement de l'histoire de l'humanité, mais aussi de la nature profonde de l'homme et de son environnement⁷⁵. Pour citer un argument emprunté à Carlo Rovelli⁷⁶ : si nous étions des habitants de Jupiter, une planète gazeuse, il est probable que nous n'aurions pas découvert *de prime abord* les nombres entiers ni l'arithmétique, qui sont pertinents dans un monde composé d'entités dénombrables. À la place, nous⁷⁷ aurions sans doute développé une

forme de calcul adaptée aux structures continues, en raison de la nature spécifique de notre environnement. Ce n'est que plus tard, peut-être beaucoup plus tard, que nous aurions découvert l'arithmétique. Or l'ordre des découvertes est évidemment crucial, d'autant plus lorsqu'il s'agit d'un corpus de connaissances potentiellement infini. Cet ordre détermine les concepts pertinents pour décrire des phénomènes qui échappent aux sens premiers de l'être humain, comme c'est le cas en mécanique quantique.

Revenons d'ailleurs à cette discipline. Bohr insistait avec force sur l'importance d'utiliser le langage *classique* dans le cadre de la mécanique quantique, non seulement pour rendre compte des phénomènes observés, mais aussi pour faciliter la communication au sein de la communauté scientifique. Il considérait ce langage comme essentiel pour décrire les aspects ondulatoires et corpusculaires des particules quantiques. *Pourtant*, il reconnaissait également que ce même langage, bien que fonctionnel à un certain niveau, demeurerait fondamentalement insuffisant pour appréhender la nature des systèmes quantiques dans toute leur complexité.

Afin d'illustrer cette dernière idée et montrer que certaines notions quantiques entrent clairement en tension avec notre conception première, voire archaïque, du monde physique, il est utile de revenir sur le formalisme de la théorie. L'exemple de ce que l'on appelle *identité* – ou, à tort, *indiscernabilité* – des particules est particulièrement éclairant. En effet, une propriété fondamentale de la mécanique quantique est que, deux particules, ou plus, dites identiques, c'est-à-dire possédant les mêmes propriétés intrinsèques, comme la masse, la charge, le spin, etc., ne peuvent pas se voir attribuer des états individuels distincts. Pour de telles particules, la notion d'individualité perd même toute pertinence. Ce concept d'identité, propre à la mécanique quantique, est particulièrement difficile, voire impossible, à concevoir intellectuellement. Cela se traduit, d'ailleurs, par l'absence de vocabulaire véritablement adapté : le terme « indiscernabilité » évoque un jugement *extérieur*, comme si l'observateur était simplement incapable de *différencier* une particule d'une autre, à la manière de deux balles de tennis. Quant au terme « identité », bien qu'il ne fasse pas explicitement appel aux sens, il renvoie implicitement à celui de vision. En réalité, il s'agit d'une identité *intrinsèque et structurelle*, inhérente à ces particules, bien au-delà d'une simple limitation liée à l'observation. *De surcroît*, cette notion d'identité, comme nous allons le voir, ne trouve pas de traduction naturelle dans le formalisme de la mécanique quantique.

Considérons donc deux particules, 1 et 2, initialement éloignées l'une de l'autre, décrites par des états $|\Psi_A\rangle_1$ et $|\Psi_B\rangle_2$, où A et B indexent des états distincts. Si ces particules se rapprochent, entraînant un mélange, un recouvrement possible de leurs vecteurs d'états, l'état global décrivant ces deux particules doit alors refléter leur identité intrinsèque. Comme nous l'avons mentionné, cela implique l'impossibilité de leur attribuer un état – ou bien un numéro – individuel bien défini.

Comme nous l'avons mentionné, il n'existe pas de manière naturelle et immédiate de *formaliser* cette situation. Toutefois, on peut procéder à la manipulation suivante pour la décrire : on attribue *malgré tout* l'état $|\Psi_A\rangle$ à la particule 1 et $|\Psi_B\rangle$ à la particule 2. Ensuite, pour compenser cette attribution illégitime d'états individuels aux particules, on considère également la situation symétrique dans laquelle les rôles des particules 1 et 2 sont échangés. Enfin, on construit l'état global résultant de cette opération en formant une superposition des deux configurations :

$$|\Psi\rangle = |\Psi_A\rangle_1 \otimes |\Psi_B\rangle_2 \pm |\Psi_A\rangle_2 \otimes |\Psi_B\rangle_1.$$

L'état global est alors une combinaison des états individuels des particules, qui peut être soit symétrique (signe +, ce qui s'applique à une certaine catégorie de particules appelées bosons), soit antisymétrique (signe -, dans le cas des particules de la catégorie dite des fermions). Cette (anti-)symétrie de l'état final obtenu

garantit son indépendance vis-à-vis de l'attribution des états individuels aux particules.

Cette démarche est parfaitement opérationnelle, car elle permet d'obtenir mathématiquement l'état correct du système, comme le confirment de très nombreuses expériences mettant en jeu des particules identiques. Toutefois, le point crucial reste qu'il est, en général, impossible de construire d'emblée l'état global des particules sans passer, au préalable, par une attribution arbitraire des états individuels aux particules⁷⁸, suivie d'une (anti-)symétrisation de cette configuration.

Cet exemple illustre de manière éclairante une limitation fondamentale de la capacité humaine à appréhender la propriété d'*identité* des particules. Toutefois, la technique mathématique, par le biais du formalisme quantique, permet de surmonter cette limite et de traiter cette situation de façon adéquate, le prix à payer étant ce «subterfuge» qui consiste à considérer l'identité des particules comme... la négation de leur altérité.

Par extension, il est tentant d'imaginer que la notion même de superposition d'états, bien que, de nouveau, extrêmement opérationnelle, n'est, en réalité, qu'une solution de compromis vis-à-vis de notre incapacité à décrire de manière plus précise la singularité des systèmes quantiques. En effet, nous superposons des états d'énergie, de position ou d'impulsion bien définis afin de rendre compte de l'étalement spectral de ces quantités, un peu comme nous superposons des états de particules dissemblables afin de rendre compte de leur identité. Mais ce processus de superposition peut être vu comme une manière de «lisser» la complexité inhérente aux phénomènes quantiques, afin de les rendre compréhensibles en termes du langage et des concepts dont nous disposons. Autrement dit, la superposition d'états pourrait n'être, elle aussi, qu'un artifice de calcul, nous permettant de traiter des réalités intrinsèquement plus subtiles et paradoxales, tout en restant dans le cadre de notre appréhension classique du monde.

Les considérations précédentes s'appliquent également au concept de non-localité qui implique la *négation* du concept classique de localité. Bien que cela puisse relever d'un vœu pieu, il est envisageable qu'une définition plus précise et plus positive de la non-localité voit le jour. Une telle évolution pourrait offrir une nouvelle façon de concevoir les relations entre les entités quantiques, lesquelles ne seraient alors ni contraintes par la distance, ni limitées par les notions classiques d'interaction.

Enfin, le recours à la notion de probabilité intrinsèque, qui est au cœur de la mécanique quantique, pourrait, lui aussi, n'être qu'un compromis théorique provisoire. Cette approche probabiliste demeure un outil précieux, en attendant une théorie plus aboutie, qui reste à définir sans, *bien sûr*, en revenir aux considérations d'Einstein, de Bell et à leurs variables cachées. Mais cette notion masque probablement, elle aussi, notre incapacité à décrire la réalité quantique de manière pleinement satisfaisante.

4 Conclusion

Les neurosciences et les sciences cognitives nous révèlent un fait fondamental : les êtres humains ont un besoin profond et instinctif de structurer et de donner forme à leurs perceptions et expériences. Via une sorte d'«*effet Gestalt généralisé*», ils cherchent non seulement à les décrire et à les comprendre, mais aussi à les organiser, puis à les unifier *en un tout* aussi cohérent que possible.

Cependant, en tant qu'êtres complexes, les humains ont développé, en parallèle de leurs facultés cognitives permettant d'analyser et d'ordonner le monde, une dimension psychologique d'une autre nature. Pour des raisons encore partiellement comprises, mais qui pourraient être liées à un traitement accéléré d'un excès

d'informations⁷⁹, leurs jugements «logiques» et «rationnels» sont fréquemment court-circuités par des processus mentaux inconscients : les biais cognitifs.

Les sciences, et plus généralement les savoirs collectifs produits dans nos sociétés, tentent d'affranchir les êtres humains de ces biais cognitifs. Cependant, il faut garder à l'esprit que les outils conceptuels à l'origine de ces savoirs ont été façonnés par l'histoire collective des humains, et par leurs cultures propres. Or, il faut aussi réaliser que la dichotomie nature/culture est très largement artificielle. Certes, la culture est, en grande partie, une façon de dépasser, voire de transcender la nature ; mais elle en est aussi, et ce, dans une large mesure, l'émanation : la plupart des institutions, structures, normes, valeurs, interdits sociaux (ne) sont (que) des moyens de contrôler, de canaliser, bref, de donner une forme «civilisée» aux instincts primaires des êtres humains. Ce projet est toutefois loin d'avoir abouti. Ainsi, il est souvent dit que la société est violente, patriarcale, inégalitaire, qu'elle entretient des rapports de domination, de coercition, voire d'oppression. Certes, elle l'est, pour des raisons qui lui sont propres, notamment en raison des normes et interdits qu'elle impose, générant frustration, insatisfaction et ressentiment. Toutefois, ces travers trouvent, aussi et surtout, leur origine dans la nature même de l'être humain, dans ce que l'on pourrait appeler sa condition animale, au sein de laquelle son comportement est avant tout guidé par le besoin de satisfaire ses instincts fondamentaux : la faim, la sécurité, la reproduction, la domination, etc. Il s'ensuit que nos outils d'analyse eux-mêmes, aussi sophistiqués soient-ils, sont imprégnés de notre connexion primaire, instinctive et sensorielle au monde qui nous entoure.

En conséquence, même lorsque nous faisons face à une situation éminemment complexe, comme l'analyse des phénomènes quantiques que nous tentons de formaliser, nous recourons aux notions primitives profondément enracinées en nous, que Bohr qualifiait de «classiques», bien que ces notions ne soient fondamentalement pas adaptées à la description de ces phénomènes. C'est assez probablement ici que se trouve l'origine de la dissonance cognitive, qui se manifeste dans la confrontation entre le silence ontologique du formalisme de la mécanique quantique et notre quête de sens. L'idée d'Einstein, de Bell et d'autres, de *compléter* la mécanique quantique fut une tentative de la *réduire*. Mais, face à l'échec de cette idée, des «interprétations» diverses et variées, fondées sur des présupposés philosophiques ou idéologiques très forts, s'affrontent, chacune cherchant à combler, à sa manière, les lacunes et le silence de ce formalisme. Cette diversité témoigne de la richesse des points de vue et aussi de l'acharnement de l'être humain à remplir les vides laissés. On peut espérer que de nouveaux Einstein, Bell et Aspect surgiront, pour transformer ces interprétations en expériences de pensée, puis de laboratoire, ouvrant ainsi la voie à la genèse d'une nouvelle ontologie capable de réconcilier notre quête d'explication avec la singularité des phénomènes quantiques. Mais on peut également penser que nous avons rencontré une forme de réalité non appréhendable par l'être humain.

Notes

- 1 Un milieu qui peut être le vide.
- 2 Elle fournit le cadre *général* de toutes les théories relativistes (voir plus bas).
- 3 On pourra parfois lui préférer le vocable plus général de *théorie quantique* notamment lorsqu'elle incorpore le principe de relativité einsteinienne.
- 4 La notion de relativité du mouvement est déjà présente dans la physique galiléenne.
- 5 ou, pour être plus précis : à l'invariance par changement de référentiel d'une vitesse c , qui, si le photon n'a pas de masse coïncide avec la vitesse de la lumière (les expériences actuelles sont compatibles avec une masse du photon inférieure à 10^{-54} kg).
- 6 ou, plus simplement, invariance relativiste.
- 7 Ainsi, la version quantique de l'électrodynamique a permis de calculer, notamment, une quantité appelée anomalie du moment magnétique de l'électron, qui, comparée à l'expérience, présente une erreur inférieure à un milliardième de la valeur mesurée.
- 8 On doit cette découverte essentiellement à Yukawa, Gell-Mann et Zweig. La compréhension de certains aspects plus formels doit beaucoup à l'apport de 't Hooft et Veltman, de Gross et Wilczek, et de Politzer, notamment.
- 9 Une nouvelle fois, il s'agit d'une œuvre collective impliquant notamment Fermi et Wu.
- 10 Depuis peu, des théories proposent de conserver une forme classique à la gravitation, y compris dans un cadre unifiant les quatre interactions fondamentales.
- 11 Il s'agit d'une théorie selon laquelle la gravité ne sera pas une interaction fondamentale, mais pourrait émerger d'une physique microscopique sous-jacente.
- 12 à une phase complexe près.
- 13 On renvoie aux ouvrages spécialisés pour la définition de cette notion qui n'est pas essentielle ici.
- 14 Quelques définitions utiles pour la suite : on appelle *vecteur propre* d'un opérateur $\hat{A}$, un vecteur $|u\rangle$, non nul, tel que l'action de $\hat{A}$ sur ce vecteur conserve sa direction. Ce vecteur n'est donc modifié, sous l'action de $\hat{A}$, que par un facteur multiplicatif a , appelé *valeur propre* de $\hat{A}$. On a alors : $\hat{A}|u\rangle = a|u\rangle$.
- 15 où n parcourt, par exemple, l'ensemble des entiers naturels.
- 16 On notera l'exception notable de certains systèmes vibratoires classiques, en particulier ceux définis sur un espace fini, pour lesquels les fréquences ou longueurs d'onde peuvent prendre des valeurs discrètes.
- 17 Bien qu'en physique des ondes classiques il soit possible de superposer deux ou plusieurs ondes, ce qui conduit à l'addition ou à la soustraction de leurs amplitudes – le phénomène d'interférence –, il ne s'agit pas de faire coexister plusieurs valeurs d'une même grandeur physique au sein d'un unique système.
- 18 On a $\langle a_k | a_n \rangle = \delta_{kn}$, où δ_{kn} , appelé symbole de Kronecker, prend la valeur 1 lorsque $n = k$ et 0 sinon.
- 19 On choisit généralement de considérer un vecteur de norme carrée unité : $|\langle \Psi(t) | \Psi(t) \rangle|^2 = 1$.
- 20 Considérer une grandeur physique continue implique de définir, non pas la probabilité $\mathcal{P}(x)$ d'une valeur – probabilité qui est mathématiquement nulle –, mais une probabilité infinitésimale $d\mathcal{P}(x)$ sur un intervalle d'extension infinitésimale dx .
- 21 La même procédure s'applique, mais encore plus formellement, puisqu'il s'agit alors de déterminer une fonction $\Psi(x, t)$ tout entière, à l'expression (3).
- 22 On parle parfois, à tort, de *relations d'incertitude* de Heisenberg, une notion trop connotée car elle renvoie à l'idée d'une *méconnaissance* de l'état physique du système, un positionnement épistémique très partial – voir plus bas.
- 23 Une mesure de x consiste à déterminer la valeur de la position x avec une précision δx , en général inférieure à la largeur spectrale Δx .
- 24 En français : « Tais-toi et calcule ».
- 25 N.D. Mermin, « What's Wrong with this Pillow? » *Physics Today*, 42, 9 (1989).
- 26 Il est important de noter que, dans la pratique, la plupart des physiciens associent couramment le vecteur d'état, la fonction d'onde ou le Hamiltonien à un système donné, et non à un ensemble de systèmes. Cela témoigne d'une certaine résistance à adopter une perspective strictement opérationnelle.
- 27 Pour faire plus court que l'expression « d'un ensemble statistique de systèmes ».

- 28 En pratique on normalise, «à la main», à l'unité, le vecteur obtenu après réduction du vecteur d'état, et ce, afin de poursuivre avec un vecteur bien normalisé.
- 29 Difficulté, ou pas, selon le point de vue que l'on adopte sur toute la problématique.
- 30 Pensons, par exemple, à la mesure de la température d'un fluide : cette mesure n'affectera pas de manière significative l'état du système – en l'occurrence, du fluide – et, en retour, le résultat de la mesure, tant que la capacité calorifique du système mesuré est largement supérieure à celle de l'appareil de mesure – en l'occurrence un thermomètre.
- 31 On justifie parfois cette situation en invoquant le fait que, en raison de la nature microscopique du système quantique, l'interaction entre l'appareil de mesure et le système mesuré entraîne irrémédiablement un échange d'action entre les deux systèmes, au minimum égal à $\hbar$, ce qui provoque une perturbation du système étudié. En réalité, les choses ne sont pas si simples. En effet, si l'on considère un système dans un état propre d'un certain opérateur, disons $\hat{A}$, et que l'on effectue une mesure de la quantité physique A correspondante, cette mesure révélera avec probabilité égale à 1 la valeur propre associée à l'état propre. On ne peut donc pas considérer que, dans ce cas, la mesure perturbe réellement le système. Ou bien il faut admettre que le vecteur d'état qui décrit le système dans un état propre d'une grandeur donnée *tient compte* de la perturbation induite par la mesure.
- 32 Une action correspond à toute quantité dimensionnée comme un moment cinétique ; c'est notamment le produit d'une quantité de mouvement par une longueur, ou bien celui d'une énergie par un temps.
- 33 Voir note 26.
- 34 Le lecteur ou la lectrice pourrait objecter que, dans certaines circonstances – notamment la plus emblématique de la mécanique quantique, à savoir l'expérience de fentes de Young –, la notion de superposition d'états s'avère non seulement pertinente, mais même incontournable pour décrire un système *unique*. Considérons donc cette expérience, dans laquelle des photons sont envoyés *un par un* sur un écran percé de deux fentes. On analyse ensuite le résultat de cette expérience, c'est-à-dire les impacts de ces photons sur un second écran, équipé de détecteurs, placé derrière le premier. Lors de cette expérience, chaque impact individuel semble apparaître de manière aléatoire. Cependant, lorsqu'on examine la distribution statistique obtenue après un grand nombre d'impacts, une figure d'*interférences* se dessine. Dès lors, il semble naturel de conclure, sur la base de ces observations, que chaque photon possède une forme d'ubiquité ou, en d'autres termes, qu'il est intrinsèquement «porteur» du phénomène interférentiel. L'état qui le décrit avant l'impact sur le second écran devrait donc correspondre à une superposition du type $|\Psi\rangle = a|T_1\rangle + b|T_2\rangle$ où $|T_1\rangle$ et $|T_2\rangle$ correspondent à des états associés au passage par le trou 1 et le trou 2, respectivement. Cette conclusion, bien qu'intuitive, n'est cependant pas inéluctable. En effet, on peut envisager un mécanisme qui contraint chaque photon à emprunter *une fente spécifique*, tout en assurant l'apparition d'une figure d'interférence à partir d'un grand nombre d'impacts. C'est précisément ce que l'on appelle une «théorie à variables cachées», que nous examinerons plus en détail ci-dessous.
- 35 A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Phys. Rev.*, 47, 777 (1935).
- 36 On ne s'intéresse pas ici à l'observable position des particules.
- 37 Le produit, dit tensoriel, noté $\otimes$, est une opération mathématique qui permet de combiner les états quantiques de deux systèmes – ou plus – distincts pour former un état global décrivant le système composite.
- 38 Dans une situation classique, ceci correspondrait, par exemple, aux résultats d'un jeu de pile (correspondant, par exemple à $+\frac{1}{2}$) ou face (correspondant à $-\frac{1}{2}$).
- 39 Dans la situation classique d'un jeu de pile ou face, imaginez que vous ayez obtenu, par exemple, la série (11) et votre partenaire de jeu, la série (12). L'existence de résultats *systématiquement opposés* entre vous deux va naturellement vous conduire à penser que les pièces sont truquées. «Variables cachées» est le nom donné à ce trucage, dans le cadre de la mécanique quantique.
- 40 On parle d'expériences *contrafactuelles* dans le cas d'expériences qui ne sont pas effectivement réalisées.
- 41 Il faut savoir qu'en mécanique quantique, très souvent, la mesure détruit ou rend inexploitable le système physique mesuré.

- 42 J.S. Bell, «Speakable and unspeakable in quantum mechanics». Cambridge University Press (1987).
- 43 Voir, par exemple, A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger «Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers» *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1804 (1982).
- 44 J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony and R. A. Holt, «Proposed experiment to test local hidden-variable theories», *Phys. Rev. Lett.*, 23, 880 (1969).
- 45 B. Hensen *et al.* (2015) «Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres» *Nature*, 526, 682 (2015).
- 46 L'usage de «grand» et «petit» permet d'éviter celui des termes de «microscopique» et «macroscopique», qui suppose implicitement un traitement spécifique pour chacun des deux systèmes.
- 47 Baptisé par la suite «Chat de Schrödinger».
- 48 de poids respectifs α et β .
- 49 Et du système quantique.
- 50 Ce point de vue est partagé par des auteurs contemporains affiliés au QBism (Quantum Bayesianism), pour qui le vecteur d'état n'est pas non plus une description objective du système, mais un outil mathématique permettant à un observateur donné de structurer ses croyances concernant les résultats possibles. Voir, pour une introduction au sujet : C.A. Fuchs, N.D. Mermin and R. Schack «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*, 82, 749 (2014).
- 51 Toujours dans l'hypothèse où l'on considère le vecteur d'état comme un attribut *intrinsèque* d'un système quantique donné.
- 52 Le physicien Henry Stapp a même qualifié les inégalités de Bell de «plus profonde découverte de la science.». H. Stapp, «Bell's theorem and the world process». *Il Nuovo Cimento B*, 29, 270 (1975).
- 53 Les expériences les plus récentes font état de corrélations entre deux photons sur une distance supérieure à 1200 km.
- 54 J. Maldacena and L. Susskind «Cool horizons for entangled black holes», *Fortsch. Phys.* 6, 781 (2013).
- 55 c'est-à-dire les particules dans un état intriqué de type (9).
- 56 Il existe une littérature pléthorique sur ce sujet. Mentionnons simplement : M. Jammer, «The Philosophy of Quantum Mechanics : The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective», Wiley-Interscience, New York, 1974. B. d'Espagnat, «Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques», (Le temps des sciences), Paris, Fayard, 1994. F.Laloë, «Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?», EDP Sciences/CNRS Editions, Paris, 2011.
- 57 En français : «Les entités ne doivent pas être multipliées sans nécessité».
- 58 On pourra lire les deux articles lumineux de David Mermin, même s'il s'est assez largement renié depuis : N.D. Mermin «The Ithaca Interpretation of Quantum Mechanics» *Pramana*, 51, 549 (1998) et «What is quantum mechanics trying to tell us?» *American Journal of Physics*, 66, 753 (1998).
- 59 L'environnement est, ici, à prendre au sens large. Pour un «petit» système, il s'agit de son environnement au sens traditionnel. Pour un «grand» système, on isole une ou plusieurs variables macroscopiques – par exemple, le centre de gravité du système – des autres degrés de liberté qui constituent alors l'environnement vis-à-vis des degrés de liberté macroscopiques dont on étudie le comportement, en l'occurrence la décohérence.
- 60 On pourra consulter, par exemple, la revue suivante : M. Schlosshauer «The quantum to classical transition and decoherence», *arXiv :1404.2635 [quant-ph]* (2019).
- 61 Pour toute la discussion qui suit, on renvoie, par exemple, aux excellents livres de S. Dehaene, «Le code de la conscience», Odile Jacob, 2014 et de A. Moukheiber, «Votre Cerveau vous joue des tours», Allary, 2019.
- 62 On pourrait objecter que c'est bien le cas pour les effets placebo ou nocebo. Mais il s'agit alors de l'influence de l'état psychologique sur l'état physique, qui ne relève en rien de la magie.
- 63 Songeons à la fameuse madeleine de Proust.
- 64 On pourra consulter la magnifique enquête de Céline Loozen dédiée à ce sujet : «Transe : Enquête sur un état de conscience modifié», CNRS éditions, 2024.

- 65 On doit ces résultats à Bell, Kochen et Specker, Greenberger, Horn et Zeilinger ainsi que Mermin. Pour une liste exhaustive des références et pour la compréhension de ces résultats on pourra consulter l'article édifiant de Mermin à ce sujet : N.D. Mermin «Hidden Variables and the Two Theorems of John Bell», *Reviews of Modern Physics*, 65, 803 (1993).
- 66 Précisons : la contextualité implique que, sous l'hypothèse de l'existence de variables cachées, le résultat de la mesure de la grandeur A devra dépendre du groupe d'observables – $\{B, C \dots\}$ ou bien $\{B', C' \dots\}$ – compatibles entre elles et compatibles avec A avec lequel on choisit de mesurer cette grandeur si certaines observables – B ou C ou ... – d'un groupe ne sont pas compatibles avec certaines observables – B' ou C' ou ... – de l'autre groupe.
- 67 S. Dehaene, *op. cit.*
- 68 Il ne s'agit en aucune façon de spéculer sur la nature quantique du phénomène de prise de conscience, bien que cela ait été envisagé ailleurs.
- 69 On renvoie au très bel article de Latorre : J.I. Latorre, «Quantum Will: Determinism meets Quantum Mechanics», *Euresis journal*, 5 , 1 (2013).
- 70 Appellation proposée par l'auteur.
- 71 Voir A. Moukheiber, *op. cit.*
- 72 et dont l'auteur décline toute responsabilité.
- 73 Date approximative d'apparition de Homo sapiens.
- 74 par opposition à inventées. Mais l'argument développé ici fonctionnerait tout autant, même encore mieux, dans ce dernier cas.
- 75 On renvoie ici au très bel article de Carlo Rovelli : C. Rovelli «Michelangelo's Stone: an Argument against Platonism in Mathematics», *European Journal for Philosophy of Science*, 7, 285 (2016).
- 76 C. Rovelli, *op. cit.*
- 77 L'auteur se garde bien de s'engager sur la question de la forme que pourrait prendre ce «nous» sur une planète gazeuse . . .
- 78 ou, de façon équivalente, par une attribution arbitraire de numéros aux particules.
- 79 Voir A. Moukheiber, *op. cit.*

KNOWLEDGE PUT TO THE TEST BY QUANTUM MECHANICS

“I am a quantum engineer, but on Sundays, I have principles.”
— John Stewart Bell —

1 Introduction: Physics, a Series of Revolutions

One of the unique aspects of physics lies in the fact that it is the place, not only of technical innovations deeply transforming our material life but also of conceptual revolutions overturning our way of apprehending reality. Among these revolutions, the one occurring in the 16th century, known as the “Copernican” revolution, does nothing less than move the “center of the world” from the Earth to the Sun, marking the shift from geocentrism to heliocentrism. The subsequent revolutions, Galilean and Newtonian, in the 17th and 18th centuries, pave the way for the idea of *universal* physical laws. It is understood, on the one hand, that all objects fall in a vacuum in the *same manner*, that is, with the same acceleration; on the other hand, that the *same law*—in this case, the law of universal gravitation—simultaneously governs the fall of bodies on Earth and the movement of celestial bodies in the sky. This rupture marks the abandonment of the particularism underlying geocentrism, which had prevailed since Antiquity. With Newtonian physics, and under the influence of thinkers like Descartes, a mechanistic and deterministic view of the world also emerges, partially relegating the theological vision of the universe.

In the 19th century, a process begins that will continuously obsess physicists: the unification of the phenomena surrounding them. Maxwell, building on the work of Gauss, Faraday, and Ampere, realizes that two apparently disparate categories of phenomena—electrical and magnetic phenomena—actually belong to a single category: electromagnetism. This condenses into a set of four equations, known as Maxwell’s equations. A new paradigm then emerges: that of the *field*, a dynamic quantity exhibiting both spatial and temporal dependence, like the electric field $\vec{E}(\vec{x}, t)$ and magnetic field $\vec{B}(\vec{x}, t)$. This mathematical concept allows for the formal description of a disturbance propagating in a physical medium¹— in other words, a *wave*—and complements the concept of variable $\vec{x}(t)$, used to specify the position of a point or a moving material body.

Simultaneously, from the late 18th century to the end of the following century, thermodynamics develops under the impetus of Watt, Thompson, Carnot, Clausius, and Kelvin, etymologically the “study of heat and work”. Subsequently, thanks to Maxwell, Boltzmann, and Gibbs, statistical mechanics comes into being and establishes its microscopic foundations. These theories also lead to the unification of two concepts previously considered distinct: heat and work, allowing the formulation of one of the most fundamental principles in physics: the conservation of *energy* in an isolated system. A central notion is also introduced: *entropy*, which etymologically means “change within”. Entropy measures the *disorder* within a system. Its quasi-systematic growth translates the almost inevitable tendency of disorder to increase in an isolated system. This phenomenon illustrates the conversion of an organized form of energy, such as mechanical or chemical

energy, into a disorganized form of energy, such as thermal energy (or heat), during a thermodynamic transformation. The growth of entropy also characterizes the quasi-*irreversibility* of these transformations, since the system can almost never return to its initial, ordered state. Thus, statistical mechanics not only explains a multitude of physical phenomena but also sheds light on the asymmetry between the past and the future, in other words, the existence of an *arrow of time*.

At the beginning of the 20th century, two theories would form the basis of contemporary physics: Einstein's theory of relativity, improperly called *special* relativity², and quantum mechanics, through the works of Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, de Broglie, Dirac, Pauli, Born, von Neumann, and others. More than simple theories, relativity and quantum mechanics³ are considered "framework theories" because they each provide a global formal structure that groups general concepts and principles that more specific theories must respect. Those that do not strictly adhere to these principles are considered valid approximations only within appropriate limits.

Einstein's relativity, by associating the concept of the relativity of motion⁴ with the invariance of the speed of light⁵, merges the notions of *space and time*. These notions, which were absolute in Galilean or Newtonian physics, then become relative. It brings forth the notion of space-time, which becomes the new framework within which all motion must be considered. It also imposes a principle of invariance, called Einsteinian relativistic invariance⁶, which any theory describing phenomena involving speeds close to that of light must obey, as is the case with Maxwell's electromagnetism.

If the theory of relativity modifies the spatio-temporal framework in which matter resides and evolves, quantum mechanics, whose objective is to describe the microscopic components of this matter, overturns our very conception of it. It presents, in particular, these components as entities that combine, although not simultaneously, both *particle-like* and *wave-like* characteristics, two aspects incompatible within Newtonian physics. It makes the notion of trajectory obsolete and invalidates the ideas of determinism and locality, which are foundational to classical physics. However, this theory, which turns out to be the most precise, both in its original form and in its relativistic version⁷, also provides the general framework into which any theory of the microscopic world must integrate.

Shortly after the advent of the theory of special relativity, Einstein developed the theory of general relativity, which aims to provide a relativistic framework for gravitation. In this framework, gravitation loses its status as a force, as defined in Newtonian physics, to become a purely *geometric* notion: the curvature of space-time, generated by the presence of matter and energy.

These revolutions continued in the second half of the 20th century with the discovery of two fundamental interactions: the "strong" interaction, which acts between quarks as well as between protons and neutrons (called "hadrons"), which they constitute⁸. This force ensures the cohesion of the atomic nucleus, in the same way that the electromagnetic interaction, which acts between the nucleus and the electrons, ensures the cohesion of atoms and molecules. The other interaction, called "weak",⁹ acts on quarks and leptons, such as electrons and neutrinos. It governs various radioactive processes and allows, in particular, the conversion of different types of quarks, and thus hadrons, into one another. This phenomenon is crucial, especially in the context of nuclear fusion that occurs in the hearts of stars.

With electromagnetism and gravity, the strong and weak interactions constitute the four fundamental interactions known to date. The latter two have formulations that inherently respect both the requirements of Einsteinian relativistic invariance

and quantum theory, making them *relativistic quantum theories*. Maxwell's electromagnetism, also known as electrodynamics, respects relativistic invariance but is not formulated in a quantum framework. It is only between 1920 and 1950, through the works of Dirac, and later, Feynman, Schwinger, and Tomonaga, that *quantum electrodynamics* emerged.

Intense work was then undertaken to establish a unified framework for the weak, electromagnetic, and strong interactions. This work culminated in the 1970s, notably through contributions from Glashow, Salam, and Weinberg, in the development of the so-called "standard model", which unifies the first two interactions. Theories of "grand unification", also developed in the 1970s, have sought and continue to seek to unify the three interactions into a coherent whole. This remains, in part, still prospective, as competing models have not been adjudicated, primarily due to the very high energies required to test them experimentally.

As for gravity, although Einstein provided it with a relativistic formulation, it still needs to be reconciled with the principles of quantum theory. This *quantum gravity* represents the Holy Grail for many theoretical high-energy physicists. One can wager that this theory, if it ever materializes¹⁰, will also lead to a conceptual revolution in our understanding of the world. Indeed, since Einstein established a profound correspondence between gravitation and space-time, the quantization of one should *ipso facto* entail the quantization of the other, at the characteristic scale of quantum gravity, the *Planck length*, $L_p = 10^{-34}$ cm. This would imply a radical upheaval in our conception of space-time, which, perceived as continuous on our scale, would be revealed as *discrete* on the Planck scale. Approaches such as string theory, loop quantum gravity, or *emergent* gravity¹¹ have been proposed, but none have yet received experimental confirmation, as the relevant length or energy scales are entirely inaccessible with current technical means.

2 Quantum Mechanics: What Revolution?

Having sketched an overview of the major revolutions in physics, it is time to focus on the particularly singular situation of quantum mechanics. Singular, firstly, because, as we have already mentioned, it is the theory that allows predictions of unparalleled precision in all sciences. Singular, secondly, because it profoundly disrupts the foundations of classical physics and, consequently, our worldviews derived from it. Singular, finally, because of the ambiguities it leaves over the nature of the relationship between the elements of its mathematical formalism and the physical reality they are supposed to describe, making it very difficult to clearly answer the question of the nature of the revolution that followed the advent of the theory.

Indeed, although the theory of relativity has radically transformed our conceptions of space and time, which, previously absolute, become relative, it nevertheless retains a fundamental characteristic: objectivity. Within the framework of relativity, the elements of physical reality, such as intervals of space, time, and speeds, indeed depend on the relative motion of the observer with respect to the events considered. However, they remain objective quantities, if only because their variations from one observer to another follow universal laws (the famous Lorentz transformations), which are entirely independent of the observer's subjective interpretation. This objectivity persists equally within the framework of general relativity. Finally, the elements of the formalism of these theories are in direct correspondence with the elements of physical reality. In quantum mechanics, however, this objectivity disappears, giving way to a radically different relationship between physical phenomena, their measurements, their observers, and the formalism that describes them. Thus, without prejudging the future, quantum mechanics could constitute a pinnacle in the evolution of our knowledge of the world.

But before entering into these considerations, we will briefly set out the fundamental elements of the formalism of quantum mechanics, often called postulates. This will serve as a starting point for discussing the conceptual implications of the theory. We will present these elements as neutrally and objectively as possible, without immediately delving into more *philosophical* considerations.

2.1 The Postulates of Quantum Mechanics

Here, we state the postulates of quantum mechanics, without claiming exhaustiveness. The objective is to present those most pertinent for the forthcoming discussion.

- **State of a Physical System**

At a given instant t , a quantum system is described by a *state vector*, denoted $|\Psi(t)\rangle$, which belongs to a space called Hilbert space, denoted $\mathcal{H}$. This space is equipped with an inner product that associates, with any two state vectors $|\Psi_1(t)\rangle$ and $|\Psi_2(t)\rangle$, a *complex* number denoted $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle$. This inner product represents the “overlap” between two states and indicates the extent to which one state can be considered similar to another. Thus, the identity of states corresponds to $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle = 1^{12}$, while total difference corresponds to orthogonality, that is $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle = 0$. Physically, as we will see later, the inner product $\langle\Psi_1(t)|\Psi_2(t)\rangle$ is closely related to the *transition* between the corresponding states; for this reason, it is also called the *transition amplitude* between the states $|\Psi_1(t)\rangle$ and $|\Psi_2(t)\rangle$.

- **Physical Quantities**

Any measurable physical quantity, often called an *observable*—such as position, energy, etc.—and generically denoted A , is represented in the Hilbert space $\mathcal{H}$, by a Hermitian operator¹³, denoted $\hat{A}$, which acts on the state vectors. A fundamental characteristic of quantum mechanics is that a physical quantity can only take certain precise numerical values, corresponding to the eigenvalues of the operator $\hat{A}$ ¹⁴. The Hermitian nature of these operators is essential: it ensures that the eigenvalues of $\hat{A}$ are *real*, in accordance with observed results. Furthermore, the eigenvectors associated with distinct eigenvalues are orthogonal, meaning their inner product is zero. Finally, depending on the physical context, these eigenvalues can be discrete or continuous. For simplicity, and unless otherwise indicated, we will assume that the eigenvalues are discrete and denote the set of all possible values of the quantity A by $\{a_n\}$ ¹⁵. In this case, we say that the values of A are *quantized* and that its spectrum is *discrete*. This is one of the essential aspects of quantum mechanics, breaking from classical mechanics where almost all physical quantities take continuous values¹⁶.

- **Spectral Decomposition**

To each eigenvalue a_n of an operator $\hat{A}$ is associated *one or more* eigenvectors. In the simplest case, there exists a unique eigenvector $|a_n\rangle$ associated with the eigenvalue a_n , which is then said to be “non-degenerate”. The vectors $\{|a_n\rangle\}$ then form an orthogonal basis of the state space, allowing any state $|\Psi\rangle$ of the system to be decomposed as follows:

$$\left| \Psi(t) \right\rangle = c_1(t) \left| a_1 \right\rangle + c_2(t) \left| a_2 \right\rangle + \dots = \sum_n c_n(t) \left| a_n \right\rangle \quad (1)$$

Where $\sum_n$ represents a summation over the integer n . Expression (1) is of fundamental importance. Indeed, due to the structure of the vector space $\mathcal{H}$, it is possible to decompose the state $|\Psi\rangle$ into a *superposition* of states $\{|a_n\rangle\}$ where the coefficients $\{c_n(t)\}$ are complex numbers that indicate the relative weight of each state in the spectral decomposition of $|\Psi(t)\rangle$. This ability to combine or superimpose multiple states, called the *principle of superposition*, is one of the most remarkable

properties of quantum mechanics, with no classical equivalent¹⁷. This property is, notably, one of the foundations of quantum computing, where one of the key aspects is the possibility of creating states that superimpose two *qubits*, such as in the state $|u\rangle = c_0 |0\rangle + c_1 |1\rangle$. Such a property is uniquely associated with quantum mechanics and the *linear* structure that underpins it. It is also important to note that the decomposition (1) is not unique: it is possible to decompose a state over the set of eigenstates associated with different operators (corresponding to different physical quantities).

Note that the identification of each weight $c_k(t)$ in the decomposition (1) is done by calculating the scalar product of $|\Psi(t)\rangle$ with the eigenvector $|a_k\rangle$ of the operator $\hat{A}$:

$$\left\langle a_k \left| \Psi(t) \right\rangle = \sum_n c_n(t) \left\langle a_k \left| a_n \right\rangle = c_k(t) \quad (2)$$

where we have used the orthogonality of the vectors $\{|a_n\rangle\}$ ¹⁸. The expression above is nothing more than the generalization, in the abstract space $\mathcal{H}$, of the projection of a vector from the real space onto the axes of an orthonormal frame (see figure (1) illustrating the projection of a vector in $\mathbb{R}^2$ onto an orthonormal frame), each coefficient c_k representing the “overlap” of the state $|\Psi(t)\rangle$ with the basis vector $|a_k\rangle$.

To complete this discussion, it is interesting to consider the case of an observable whose spectrum of values may be continuous, such as the “position” operator $\hat{x}$. One writes, in a manner analogous to (1):

$$|\Psi(t)\rangle = \int dx' \Psi(x', t) |x'\rangle \quad (3)$$

where the summation is replaced by an integral, similarly to (2):

$$\langle x | \Psi(t) \rangle = \int dx' \Psi(x', t) \langle x | x' \rangle = \Psi(x, t).$$

Here, we find, as “coefficients” of the decomposition of $|\Psi(t)\rangle$ over the position eigenstates $\{|x'\rangle\}$, the wavefunction $\psi(x, t)$ from the “old” quantum mechanics, at the considered point x .

- Temporal Evolution: Schrödinger’s Equation

It is assumed that at a given time t_0 , the system is described by the state vector $|\psi_0\rangle$. If no *measurement* occurs between times t_0 and t , the time evolution of the system’s state vector is governed by the following differential equation, known as the *Schrödinger equation*:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle \quad (4)$$

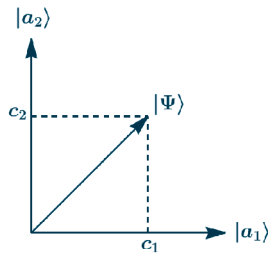


Figure 1 – Pictorial representation of the decomposition of a quantum state onto a basis consisting of two orthogonal states $|a_1\rangle$ and $|a_2\rangle$. Here, a vector from the $\mathbb{R}^2$ space of two-component real vectors is decomposed into its projections c_1 and c_2 onto the «axes» $|a_1\rangle$ and $|a_2\rangle$, respectively.

where $\hbar = h/2\pi$, with h being Planck’s constant. The operator $\hat{H}$, called the Hamiltonian, is associated with the energy quantity of the system. Thus, the physical interpretation of equation (4) is that the rate of change of the state vector is

determined by the action of the Hamiltonian operator on that same state vector. The Schrödinger equation, along with the initial condition $|\Psi(t=0)\rangle = |\Psi_0\rangle$, allows for a *complete* determination of the system's state at any given time t .

- **Born's Rule**

While, in the formalism of quantum mechanics, a system is represented by an abstract entity, the state vector $|\Psi(t)\rangle$, which belongs to a Hilbert space $\mathcal{H}$ and evolves over time according to the Schrödinger equation (4), the rule—or postulate—of Born establishes the *correspondence* between the formal content and the operational content of the theory:

The probability of *finding*, during a *measurement* of the physical quantity A , performed on the normalized state¹⁹ $|\Psi(t)\rangle$, the value a_k , is given by:

$$\mathcal{P}(a_k) = |\langle a_k | \Psi(t) \rangle|^2 = |c_k(t)|^2 \quad (5)$$

where $|c_k(t)|^2 = c_k(t)\overline{c_k(t)}$ denotes the square of the modulus of the complex number $c_k(t)$. As we can see, $\mathcal{P}(a_k)$ is nothing other than the square of the transition amplitude between the states $|\Psi(t)\rangle$ and $|a_k\rangle$. If, for example, we consider the *continuous* quantity position $\hat{x}$, then the probability of finding the system in a position within an interval of size dx centered at x , at time t , is given by²⁰:

$$d\mathcal{P}(x) = |\langle x | \Psi(t) \rangle|^2 dx = |\Psi(x, t)|^2 dx.$$

It is immediately apparent, from the expression (5), that it is at least formally possible to reconstruct the state $|\Psi(t)\rangle$, i.e., to determine all the coefficients $\{c_n\}$ of the decomposition (1)²¹. This requires, first of all, preparing a very large number N of systems *in the same state* $|\Psi(t)\rangle$, and then measuring the quantity A . These measurements provide a set of results $\{a_n\}$ associated with the occurrence numbers $\{N_n\}$ and, consequently, with respective frequencies of occurrence $\{f_n\} = \{N_n/N\}$. These statistical frequencies are then equated with the probabilities $\{\mathcal{P}(a_n)\}$, and thus, via (5), with the squares of the moduli of the coefficients $\{c_n\}$. It is thus observed that in quantum mechanics, since predictions are *probabilistic* in nature, this implies, in practice, considering a *statistical ensemble* of systems that are said to be “prepared” identically.

- **State Vector Reduction**

The postulate of *state vector reduction* specifies the form of the state vector immediately after measurement:

Immediately after the measurement that results in the outcome a_k for the quantity A , the state vector is projected onto the eigenvector $|a_k\rangle$ associated with the eigenvalue a_k :

$$\left| \Psi(t) \right\rangle = \sum_n c_n(t) \left| a_n \right\rangle \longrightarrow \left| a_k \right\rangle. \quad (6)$$

- **Compatible Physical Quantities**

Among the set of measurable physical quantities, some play a privileged role: these are the ones that are said to be *compatible* with each other. Physically, this means that the measurement of one does not affect the result of the measurement of the other (see below). This notion of compatibility is crucial, especially in situations where the measurement of a quantity A does not lead to the determination of a unique vector, but rather to the determination of a *subspace* of the Hilbert space. This case corresponds to the situation of a “degenerate” eigenvalue a_k .

In this context, in order to completely specify the state vector after the measurement of A , it is necessary to consider another physical quantity, B , that is *compatible*

with A . This compatibility implies that the set $\{b_m\}$ of possible values of B , evaluated from the initial vector $|\Psi(t)\rangle$, is not affected by the prior measurement of the quantity A , which projects $|\Psi(t)\rangle$ into the subspace associated with the eigenvalue a_k of $\hat{A}$, thus generalizing the idea of projection (6):

$$|\Psi(t)\rangle \longrightarrow P_{a_k}|\Psi(t)\rangle$$

where P_{a_k} is the *projector* onto the subspace $\mathcal{H}_{a_k}$ associated with the eigenvalue a_k .

The existence of compatible physical quantities provides the possibility of completely reconstructing the state vector $|\Psi(t)\rangle$ from the measurements of quantities A and B , *regardless of the order* in which these measurements are performed. This property relies on the fact that the corresponding operators, $\hat{A}$ and $\hat{B}$, *commute* with each other. This means that their *commutator* is zero, i.e.:

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} = 0 \text{ soit } \hat{A}\hat{B} = \hat{B}\hat{A}$$

In other words, the order of the measurement operations does not matter. Thus, if we measure the quantities A and B successively, the state of the system can be decomposed as follows:

$$\left| \Psi(t) \right\rangle = \sum_{n,m} d_{nm} \left(t \right) \left| a_n, b_m \right\rangle$$

where the vectors $\{|a_n, b_m\rangle\}$ are *common eigenstates* of the operators $\hat{A}$ and $\hat{B}$. In these states, both quantities A and B are simultaneously well-defined, with values a_n and b_m , respectively. These considerations generalize to any number of operators, allowing for the consideration of situations where several quantities are simultaneously well-defined, or even necessary to fully specify the state of the system if the measurements of A and B have not done so.

One of the fundamental principles of quantum mechanics is that the position x and momentum p are *incompatible* quantities. Mathematically, this means that the corresponding operators do not commute with each other. This situation is expressed by the following formula:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar.$$

In other words, it is impossible to find eigenvectors of the form $|x, p\rangle$ that are common to both $\hat{x}$ and $\hat{p}$ operators, in which both quantities are simultaneously well-defined. This means that the measurement of one of these quantities necessarily disturbs the possible spectrum of values of the other. Indeed, it follows from the commutation relation $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ that the spectra Δx and Δp of the possible values of x and p , respectively, are related by a fundamental relation:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar. \quad (7)$$

This relation is known as the *Heisenberg's inequality*²². It clearly shows that a measurement of x , which generally reduces the spectrum Δx of possible values of this quantity²³, *extends* the spectrum Δp of possible values of the momentum p .

It is sometimes stated that the Heisenberg inequalities (7) *prevent* the simultaneous *measurement* of x and p , but this assertion is incorrect. In fact, it is always possible to measure any set of physical quantities of a quantum system simultaneously. The true limitation imposed by inequality (7) lies in the fact that the information obtained about one quantity, for example, the position x , necessarily affects the information that can be obtained about the other quantity, for example, the momentum p , which is then referred to as the *conjugate* quantity.

2.2 The Difficulties

After this brief overview of the formalism of quantum mechanics, it is time to explore some of its implications. The first remarkable point lies in the way, within this formalism, the description of a classical system—based on the concepts of position and velocity, thus on the notion of *trajectory*—is replaced by a description based on the notion of the state vector. In this framework, the abandonment of the pair (x,p) is justified by the impossibility of conceiving a state in which these two quantities would be simultaneously well-defined, as we have clarified earlier. This point constitutes one of the most revolutionary aspects of quantum mechanics, as the human mind—whether of a layperson or a physicist—remains deeply attached to the idea of *localizing* an object in space as well as its *continuous evolution* within this space.

This renunciation of what one could call *classical realism* was not without resistance and, in fact, is not yet fully accepted by everyone. However, for the vast majority of practitioners in the field, quantum mechanics, as a system of pure experimental predictions, has overwhelmingly proven its effectiveness. It is therefore appropriate to stick to this, that is, not to question too much the nature of “quantum reality”, or even to consider this question as a *non-issue*. This pragmatic attitude can be perfectly summarized by the famous ironic formula of American physicist David Mermin: “Shut up and calculate”.^{24 25} One can largely subscribe to this position of ideological—or more precisely, epistemic—neutrality by recognizing how much the question mentioned above and, more generally, that of the *properties* of a quantum system, has become a real quagmire. There are, at the very least, twenty distinct attempts to clarify this situation, grouped under the generic term “interpretations of quantum mechanics”, as mentioned below. This neutrality can also prove fruitful, as it preserves the possibility of achieving a deeper understanding of these issues within the scientific practice itself. The answers to the questions raised might, indeed, emerge within an expanded conceptual framework, such as that of a theory of quantum gravity.

Nevertheless, examining the relationship between the elements of the formalism, as presented above, and what can be called the question of *ontology*—that is, the question of the existence in itself—of quantum systems, deserves attention. This question has indeed been raised by eminent physicists, such as Albert Einstein and, later, John Stewart Bell, who contributed to the emergence of one of the most revolutionary concepts in quantum mechanics: *entanglement*. Again, we will adopt as neutral a position as possible, presenting the various viewpoints that have developed around this issue.

A simple way to enter this intellectual maze without getting lost is to closely examine the nature of the terms used within the formalism. What immediately strikes is that the fundamental element of this formalism, the state vector, plays a purely *probabilistic* role and, in a strictly operationalist perspective, a *statistical* role. Indeed, as mentioned earlier, strictly speaking, the predictions of the theory do not apply to an individual system but to a collection, an ensemble of systems prepared identically. In this context, the state vector $|\Psi(t)\rangle$ provides the *statistical* distribution of measured values for any given physical quantity at a specific time t . The theory, however, does not make any statements about what the state of an *individual* system is.

To summarize:

1) Quantum theory provides the probabilities of the values that physical quantities, called observables, can take when measurements are performed on a *statistically* prepared ensemble of identical systems.²⁶

What strikes the mind, secondly, is that measurement plays a fundamental role in the theory. Indeed, the central object of the formalism, the state $|\Psi(t)\rangle$, is actually just a tool designed to calculate the probabilities of obtaining a given value of a physical quantity A during a measurement. It is, in no way, related to the probabilities of revealing a *preexisting* value of this quantity within the physical system before the measurement, as clearly stated by the Born postulate (5). No one has better articulated the profound renunciation imposed by this situation than Bell: “In the beginning, natural philosophers tried to understand the world around them. In pursuing this goal, they had the brilliant idea of designing artificially simple situations where the number of factors involved is minimized. Divide and conquer. Thus, experimental science was born. But experience is just a tool. The goal remains: to understand the world. Restricting quantum mechanics to mere insignificant laboratory operations betrays this great endeavour. A serious formulation cannot exclude the vast world outside the laboratory”.

In terms of renunciation, things do not stop there. Schrödinger’s equation (4) appears, in quantum formalism, as the analogue of the *fundamental principle of dynamics* (or Newton’s second law) $\vec{F} = m\vec{a}$ which describes the motion of classical objects. Just as the latter allows for predicting the evolution of a classical system under the influence of forces, Schrödinger’s equation governs the temporal evolution of a quantum system’s state within a given energy landscape. However, while in the classical framework there is a *fundamental, universal, and unique* law of temporal evolution, the quantum formalism, in contrast, appears schizophrenic when it comes to the temporal dynamics of the system²⁷. Indeed, the temporal evolution postulate stipulates that, in the absence of measurement, the system evolves according to Schrödinger’s equation (4), that is, in a perfectly *deterministic* manner: the state $|\Psi(t=0)\rangle$ being known, the state $|\Psi(t)\rangle$ is known at any time t . On the other hand, during a measurement, the evolution of the state vector becomes random, and it is projected into one of the states $|a_k\rangle$ with a probability $\mathcal{P}(a_k)$.

But that’s not all. The evolution described by (4) respects the *unitarity* property, meaning that the norm (or “length”) of the state $|\Psi(t)\rangle$ remains constant over time. This characteristic reflects the conservation of total probability. In contrast, during a measurement, the evolution of the state, which corresponds to a projection, generally does not conserve the vector’s norm (see figure (1)). This constitutes a break with the unitary evolution, implying that the measurement induces a transformation that does not respect the conservation of total probability²⁸.

To summarize:

2) In quantum mechanics, the temporal evolution of a system is deterministic and unitary in the absence of measurement, whereas it becomes non-deterministic and non-unitary in the presence of a measurement.

With regard to difficulty²⁹ 2) mentioned above, a comparative analysis of measurement in classical and quantum cases proves enlightening. Indeed, in classical physics, measurement does not play a fundamental role. This is explained by the fact that both systems—the measuring apparatus and the system being measured—are of the same nature, which can be simplistically described as macroscopic, although the *classical/quantum* distinction does not always coincide with the *macroscopic/microscopic* one. This situation implies that, even if the measurement requires interaction between the two systems, it can always be considered *non-invasive* with respect to the system under study, affecting the result obtained in only a negligible manner³⁰. In other words, measurement merely *reveals* a pre-existing property of the system without significantly altering it.

The situation is quite different in the context of measuring a quantum system. Indeed, in this case, the measuring apparatus, which is always of a *classical* nature—both in terms of its material constitution and the nature of the quantities measured—interacts with a system that is *quantum*. The latter, as indicated in (1), is generally described by a *superposition* of states corresponding to *different values* of the measured physical quantity. However, the classical measuring apparatus, by its very definition, can only result in the selection of a *single value* for this quantity. Therefore, it can be stated that, *in general*, the measurement of a quantum physical quantity does not simply reveal a pre-existing property of the system, as is the case in classical physics³¹. It is thus natural to think that something fundamental occurs when two radically different physical categories, namely the classical measuring apparatus and the quantum system, are confronted.

However, the preceding discussion relies on an implicit double assumption. The first, which translates into the common semantic shift I mentioned earlier⁽³²⁾³³, consists of assuming that the state vector describes a *single* system, not a *collection* of systems. It is this assumption that allows the interpretation of a superposition of states, as in expression (1), as an intrinsic property of a particular system, rather than as a statistical property of a collection of such systems³⁴.

The second implicit assumption lies in considering the state vector as an objective property of a physical system. However, in what is traditionally known as the *Copenhagen Interpretation*, formulated by Bohr, Heisenberg, Born, and others, this is absolutely not the case. Instead, the state vector is considered a *subjective* quantity that does not pertain to the physical system as such, nor to its properties, but only to the state of our *knowledge* about that system. Bohr is very clear—and very radical—on this point: “There is no quantum world. There is only an abstract description of quantum physics. It is a mistake to think that the task of physics is to discover what nature is made of. Physics is concerned with what we can say about nature”. In such a position, typically referred to as “positivist”, the transition from deterministic evolution (4) to non-deterministic evolution (6) is neither fundamental nor dramatic, as it merely reflects the shift from one *subjective* state, where multiple possibilities coexist—symbolized by the sum over states $\{|a_n\rangle\}$ —to another *subjective* state—symbolized by the state $|a_k\rangle$.

This opposition between two radically different viewpoints—one defending the existence of an objective reality for quantum systems, considering the measurement apparatus merely as an instrument for investigating their properties, and the other emphasizing a physics reduced to the organization of knowledge that we can derive from these experiments—lies at the heart of debates about the interpretation of quantum mechanics.

2.3 Quantum Mechanics: An Incomplete Theory?

For proponents of a realistic view of physics, such as Einstein and Bell, physics cannot be reduced to a mere description, especially a probabilistic one, of what we *can know* about the world. According to them, there must exist an objective reality, independent of observation and the observer, at the origin of quantum phenomena. The possibility of a more objective quantum mechanics rests on the fact that, as we have highlighted, this theory merely provides probabilistic predictions, testable only on a *statistical ensemble of systems*, while remaining silent about the properties of an individual system. Einstein, along with others, thus hypothesized that quantum mechanics, in its current form, is an *incomplete* theory. This means that there must be a more fundamental level, where a system is characterized by objective properties, represented by so-called “hidden” variables. In this hypothesis, the use of the probabilistic formalism is merely a provisional solution, awaiting a deeper level of understanding.

One can draw a revealing parallel between quantum mechanics and thermodynamics: the latter discipline is formulated in terms of macroscopic variables, such as pressure, temperature, volume, etc., that undergo fluctuations. Statistical mechanics, on the other hand, provides a more precise description in terms of microscopic states where the positions and velocities of particles are well-defined. Thermodynamic fluctuations are explained within this framework through averages over these microscopic states, accompanied by their dispersions. In this context, microscopic states play the role of hidden variables.

Similarly, current quantum mechanics could be seen, just like thermodynamics, as an “approximate” version of the theory, awaiting a more exhaustive, more fundamental formulation, which remains unknown at the moment. Thus, in this framework, *Heisenberg’s inequalities* could take the form of *uncertainty relations*, as a quantum system could indeed be characterized by a well-defined pair of observables (x, p) . However, a *set of* such systems, even when prepared identically, would present—due to a reason still unknown—statistical dispersions for these quantities, precisely formalized by *Heisenberg’s uncertainty relations*. Of course, this theory would need to explain specifically quantum phenomena, which excludes the possibility that such systems possess exactly the same type of objective properties as in the framework of Newtonian theory.

Two arguments will highlight the presumed inadequacies of the current formulation of the theory.

- The EPR Argument

Einstein, along with his colleagues Boris Podolski and Nathan Rosen³⁵, in what remains one of the most brilliant moments in the history of physics, formulated an argument of incompleteness by highlighting a paradox—known as the EPR paradox, after the initials of its authors—aiming to demonstrate that quantum theory, as currently formulated, leads to a contradiction. We will focus here on the version of this paradox proposed by David Bohm, which stands out for its simplicity. The fundamental idea is to consider a vector quantity, with no classical equivalent, called spin $\vec{S}$, an intrinsic property of the particle, similar to its mass or charge. One peculiar feature of this quantity is that its projection along any direction $\vec{n}$, denoted $S_n = \vec{S} \cdot \vec{n}$, can only take discrete values. In the case of a particle with spin $S = \frac{1}{2}$, these values are $\pm \frac{1}{2}$. Moreover, and this is a fundamental point for the following discussion, the components S_x, S_y, S_z of the spin obey Heisenberg’s inequalities:

$$\begin{aligned}\Delta S_x \Delta S_y &\geq |\langle S_z \rangle| \\ \Delta S_y \Delta S_z &\geq |\langle S_x \rangle| \\ \Delta S_z \Delta S_x &\geq |\langle S_y \rangle|\end{aligned}\tag{8}$$

which prohibit the existence of a state in which two—and *by extension*, three—components of the spin, such as S_x, S_y, S_z are simultaneously well-defined.

Bohm, following Einstein, Podolski, and Rosen, considers a situation in which two particles have interacted at some point or were emitted simultaneously from a common source, such that they are described, with regard to the observable spin³⁶, by the following state:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\uparrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\downarrow_{2,\vec{n}}\rangle - |\downarrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\uparrow_{2,\vec{n}}\rangle \right)\tag{9}$$

In this expression, $|\uparrow_{i,\vec{n}}\rangle$, with $i = \{1, 2\}$, denotes the eigenstate of the spin projection of particle $i = \{1, 2\}$ along the direction $\vec{n}$, with the eigenvalue $+\frac{1}{2}$ while $|\downarrow_{i,\vec{n}}\rangle$ denotes the eigenstate of the projection with the eigenvalue $-\frac{1}{2}$. The state $|\Psi\rangle$ thus consists of a superposition of two states, *each* formed by a product of individual states of the form $|A_1\rangle \otimes |B_2\rangle$, where the indices 1 and 2 always refer to the indices of the particles³⁷. Thus, in the first state constituting the global state (9), particle 1

(resp. particle 2) is in the state $+\frac{1}{2}$ (resp. $-\frac{1}{2}$) according to the direction $\vec{n}$; in the second state, it is the reverse.

A fundamental feature of the state $|\Psi\rangle$, called the singlet spin state, is that the expression (9) remains valid *regardless* of the direction $\vec{n}$ chosen for the spin projection, whether it is the directions $\vec{n} = \vec{x}, \vec{y}$ or $\vec{z}$, or any linear combination of these. Another fundamental feature of the state (9) is that the particles are in what is called an *entangled* state. Mathematically, this means that this state cannot be factored as follows:

$$|\Psi\rangle \neq |\Psi_1\rangle \otimes |\Psi_2\rangle \quad (10)$$

where $|\Psi_1\rangle$ and $|\Psi_2\rangle$ would be states associated with particles 1 and 2, respectively. The consequence of this *entanglement* is that measurements of the spin of particles 1 and 2, performed in a given direction, show strict (anti-)correlations: if the measurement of the spin of particle 1 in a direction $\vec{n}$ equals $+\frac{1}{2}$ (resp. $-\frac{1}{2}$), then the measurement of the spin of particle 2 in the same direction will, with probability 1, equal $-\frac{1}{2}$ (resp. $+\frac{1}{2}$).

Now imagine that particles 1 and 2 move apart in opposite directions. Two observers, O_1 and O_2 , then decide to measure the spin projection in a direction $\vec{n}$, while the particles are in sufficiently distant regions and at such moments that no signal could have propagated from one to the other during the measurement process. This ensures that a measurement made on one of the particles, say particle 1, cannot influence the physical situation of particle 2. This hypothesis, known as *Einstein's separability* or *locality*, is based on the principle that no interaction can propagate faster than the speed of light.

Now, let's consider a set of such systems and the corresponding sequence of measurements. Observer O_1 measures the spin of particle 1 in an arbitrary direction $\vec{n}$ and obtains the following sequence³⁸:

$$O_1 : +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, \dots \quad (11)$$

For this observer, the sequence of results shows no regularity; it appears, in accordance with the principles of quantum mechanics, as completely *random*. The form of state (9) only indicates that, for observer 1, unaware of the fate of particle 2, particle 1 is in a superposition of states $|\uparrow_{1,\vec{n}}\rangle$ and $|\downarrow_{1,\vec{n}}\rangle$, with eigenvalues $+\frac{1}{2}$ and $-\frac{1}{2}$, and that the probabilities of measuring these two values are identical, each being equal to $(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$.

On the other hand, observer O_2 , measuring the spin of particle 2 in the *same direction* $\vec{n}$, obtains the following sequence:

$$O_2 : -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \dots \quad (12)$$

This sequence is obviously equally random. There is no issue as long as we limit ourselves to performing measurements and recording the results.

However, if now the two observers, O_1 and O_2 , decide to compare their results, they will observe the existence of strict anti-correlations between the spin measurements of the two particles along the direction $\vec{n}$: every time the measurement of the spin of particle 1 gives $+\frac{1}{2}$ (or $-\frac{1}{2}$), the measurement of particle 2 gives $-\frac{1}{2}$ (or $+\frac{1}{2}$).

What will they conclude from this series of experiments, where the spin measurement results of particles 1 and 2, which are believed to be *random*, are systematically *anti-correlated*? They will conclude that the state $|\Psi\rangle$ certainly does not

constitute a complete description of the spin states of the two particles but that it is an *incomplete* description of the spin state of a *set of particle pairs*³⁹. Within this set, each pair of particles should be describable by a state of the form $|\uparrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\downarrow_{2,\vec{n}}\rangle$ or $|\downarrow_{1,\vec{n}}\rangle \otimes |\uparrow_{2,\vec{n}}\rangle$ in which the spin of particles 1 and 2 along a given direction $\vec{n}$ is not random but *predetermined* by hidden variables.

Einstein and his colleagues also want to demonstrate that the type of state (9) allows an internal contradiction in quantum mechanics to be revealed. For this, they define the concept of an *element of reality*: “If, without disturbing a system, one can predict with certainty (that is, with a probability equal to one) the value of a physical quantity, then there exists an element of reality corresponding to that physical quantity”.

In the experiment described above, due to the strict anti-correlations between the spin measurements of the two particles along the direction $\vec{n}$, it is possible, by measuring the spin of particle 1 along this direction, to predict with certainty the result of the measurement of the spin of particle 2 along the same direction, without disturbing it. According to the definition given by EPR, this demonstrates that there exists an element of reality associated with this physical quantity.

But, as mentioned above, the use of a spin singlet state makes the direction $\vec{n}$ *arbitrary*, so it seems possible to extend the reasoning to *any* component of the spin of particle 2, and to associate it with an element of reality. However, this reasoning clashes with a fundamental rule of quantum mechanics, formalized by relations (8), according to which two (and, *a fortiori*, three) components of the spin cannot be simultaneously well-defined. In other words, it is impossible for them to correspond, at the same time, to elements of reality.

For supporters of realism, this thought experiment highlights a fundamental flaw in quantum mechanics, opening the way to the idea that it could be completed by a hidden variable theory. However, in the orthodox interpretation, or Copenhagen interpretation, and in particular according to Niels Bohr, this experiment demonstrates nothing, as its premises are considered incorrect. The state $|\Psi\rangle$ in no way represents an objective reality of the system formed by particle 1 and particle 2 but is merely a tool for predicting the possible results of measurements made in a *specific experimental context*. Now, the considerations of Einstein and his colleagues concern *various* hypothetical⁴⁰, mutually exclusive *measurements* relative to a *single state*⁴¹; they are, therefore, without foundation. Bohr rejects thus the notion of an element of reality in the sense of EPR and, even more so, their conclusion of the incompleteness of quantum mechanics.

An absolutely remarkable fact is that physicist John Bell, who, like Einstein, believed that quantum mechanics was an incomplete theory, was able to, based on the EPR thought experiment, conceive of a test in the form of inequalities, known as *Bell's inequalities*, which must be respected by a deterministic and local hidden variables theory. Another remarkable fact is that this test does not depend on the nature or structure of the hidden variables, other than the fact that they respect the aforementioned properties. The derivation of these inequalities is somewhat technical: for that, the reader is referred to Bell's collection of enlightening articles⁴². The experiments, equally remarkable, testing these inequalities were primarily conducted by Alain Aspect and his collaborators between 1980 and 1982⁴³—based on a proposal made by Clauser, Horne, Shimony, and Holt in 1969⁴⁴—and then, in a much more sophisticated manner, by Hensen and collaborators in 2015⁴⁵, to exclude a number of possible loopholes, referred to as “dead zones.” These experiments all show a significant violation of Bell's inequalities and thus exclude the possibility of local hidden variables. This means that a deterministic hidden variables theory must inevitably exhibit properties incompatible with relativistic invariance.

- The Measurement Problem

The second argument put forward to demonstrate the incompleteness of quantum mechanics revolves around the difficulty raised by the question of “measurement” within its theoretical framework. As we have seen, two types of time evolution occur within it: the first, before the measurement, (4), is deterministic and unitary; the second, occurring during or immediately after the measurement, (6), is random and non-unitary. These two modes of evolution effectively account for the experimental results. However, the successes of quantum mechanics over the past hundred years, its universal character, as well as the limits of its applicability, which have been constantly pushed further, have led to a new perspective on the act of measurement and prompted physicists to ask the following questions: is the measuring apparatus not a physical system like any other? And is the act of measurement not simply an *interaction* between a “large” system and a “small” system⁴⁶, which could be described in terms of this *fundamental* and *universal* theory, quantum mechanics? And if we accept that two methods of treatment can be useful, even *indispensable*, in practice—because considering the “large” system within the framework of quantum mechanics could prove extremely complex—should we not seek to *understand* the transition from unitary evolution (4) to non-unitary evolution (6) in physical terms, rather than simply postulating them?

Let us again quote Bell, who expresses these ideas with unparalleled intellectual clarity: “It would seem that the theory is exclusively concerned with ‘measurement results’ and has nothing to say about anything else. What exactly qualifies certain physical systems to play the role of ‘measurer’? Did the wave function of the universe wait for billions of years before a single-celled creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for a slightly better-qualified system... holding a PhD? If the theory is to apply to anything other than highly idealized laboratory operations, aren’t we forced to admit that processes more or less ‘resembling measurements’ are occurring more or less all the time, more or less everywhere? And doesn’t this imply that wave function jumps happen all the time?”

These considerations, like the EPR paradox, raise a new conceptual difficulty, now known as the *measurement problem*. To better understand its nature, let’s examine the measurement process in more detail by considering a quantum system S described by a state vector of the form (1). Let’s rewrite this state, ignoring the time dependence, which is not essential here:

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \quad (13)$$

We then introduce a measurement device M specifically designed for its ability to measure the quantity A , and we treat it, this time, within the framework of quantum mechanics. Like any quantum system, the device M is described by a state vector $|M_0\rangle$, representing its initial, neutral state. Just before the measurement, the composed system $S + M$ is thus described by the state vector $|\Phi_i\rangle = |\Psi\rangle \otimes |M_0\rangle$. The interaction between the two systems leads the composed system from the state $|\Phi_i\rangle$ to the correlated state $|\Phi_c\rangle$, defined as follows:

$$|\Phi_i\rangle = |\Psi\rangle \otimes |M_0\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \otimes |M_0\rangle \longrightarrow |\Phi_c\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \otimes |M_n\rangle. \quad (14)$$

The state $|\Phi_c\rangle$ describes the existence of *correlations*—even an entanglement, analogous to that encountered in the EPR paradox—between the eigenstates $\{|a_n\rangle\}$ of the operator $\hat{A}$ and the corresponding states $\{|M_n\rangle\}$ of the measurement device M . However, if we follow the formalism of quantum mechanics, the expression (14) must be understood as a *superposition of macroscopic states* $\{|M_n\rangle\}$ of the measurement device.

To highlight the difficulty, Schrödinger proposed illustrating this situation with the famous cat paradox⁴⁷. In this thought experiment, the macroscopic

measurement device is replaced by a cat, which is also macroscopic. A quantum system, in a superposition of two states $|v\rangle$ and $|m\rangle$, is coupled to a mechanism that, depending on the state of the system, either triggers or does not trigger the release of poison from a vial. This then determines the fate of the cat: whether it lives or dies. Formally, according to the unitary evolution postulated by quantum mechanics, the system is described by the following correlated state, analogous to (14):

$$|\Phi_c\rangle = \alpha|v\rangle \otimes |\text{alive cat}\rangle + \beta|m\rangle \otimes |\text{dead cat}\rangle \quad (15)$$

which corresponds to a superposition of the states $|\text{alive cat}\rangle$ and $|\text{dead cat}\rangle$ ⁴⁸. Naturally, in reality, this superposition makes no sense; we observe a well-defined state of the cat⁴⁹: $|\text{alive cat}\rangle$ or $|\text{dead cat}\rangle$. In the framework of the measurement process we described earlier, the well-defined state of the cat corresponds to a well-defined state $|M_k\rangle$ of the measuring device:

$$|\Phi_c\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle \otimes |M_n\rangle \longrightarrow |\Phi_f\rangle = |a_k\rangle \otimes |M_k\rangle . \quad (16)$$

Here, the *practical* necessity of the corresponding postulate (6) is clearly evident. Moreover, within the context of the orthodox interpretation, this does not raise any *conceptual* difficulty, as the state vector is considered a condensation of the information about the system. Thus, the transition from one mode of state vector evolution to another simply represents a change in our *knowledge* of the system at the moment a measurement is made⁵⁰. On the other hand, some defend an approach where the state vector is viewed as an intrinsic and objective description of the physical reality of the system. In such a context, the reduction of the state vector at the time of measurement requires a true explanation, leading to the varied *interpretations*, which lean more or less to one side or the other (see below). Einstein, for his part, believed in the existence of an objective and deterministic reality. His famous maxim, “God does not play dice”, reflects his rejection of fundamental chance: according to Einstein, nature cannot be governed by genuine indeterminism. In other words, for him, the result of a measurement must be causally determined. This conviction led him to postulate the existence of hidden variables that would restore a causal description of physical phenomena. However, as mentioned, this hypothesis was invalidated by Bell’s inequalities and their violation in what are commonly referred to as the “Aspect experiments”.

2.4 Conclusion: Multiple Interpretations

Answering the question of the nature of the revolution caused by the advent of quantum mechanics can only be done partially and temporarily. Indeed, in nearly a hundred years, quantum mechanics has developed spectacularly, both in elucidating complex physical phenomena—such as superconductivity, Bose-Einstein condensates, quantum magnetism, spintronics, the Hall effect, etc.—and in the development of new technologies like materials science, cryptography, metrology, and quantum information. This intense activity demonstrates the impressive and undeniable effectiveness of quantum mechanics, not only as a field of fundamental research but also as a driver of concrete technological innovations. If there is a revolution, it is already this one.

On the other hand, when it comes to the conceptual revolution brought about by quantum mechanics, the advances have not been as spectacular as its practical applications, and it appears that the core of the problem remains out of reach. It is precisely in this elusive nature of its profound meaning that quantum mechanics distinguishes itself from other areas of physics. This uniqueness primarily rests on the dissolution of the traditional boundary between the *subject* and the *object*, a distinction that quantum mechanics radically questions.

In classical mechanics, the object of study is clearly defined, endowed with intrinsic properties, and, most importantly, independent of the act of observation, and even more so, the observer. In quantum mechanics, on the other hand, the act of measurement induces an entanglement—and even an entanglement characterized by the states (14) and (15)—between the object and the very means of its observation, and, consequently, between the object and the subject who controls the observation process. Thus, the observer can no longer position themselves as a mere external spectator: their interaction with the system under study contributes to defining what is being measured. Finally, this interdependence is also manifested through the emergence of macroscopic quantum superpositions (14), a direct consequence of quantum formalism⁵¹, which presents a challenge to the theory.

This situation introduces a fundamental element of subjectivity in our understanding of what could be called “reality”. In this regard, the subjectivist attitude, which reduces the state vector to a mere catalog of our knowledge of possible outcomes, does not resolve the puzzle. On the contrary, it amplifies it by making it even more difficult to identify an objective reality, independent of the observer. This conceptual challenge is one of the most fascinating and troubling aspects of quantum mechanics.

As for the debate about the incompleteness of quantum mechanics—the EPR paradox, Bell’s inequalities, and their violation—it has undoubtedly been the source of the most spectacular and established conceptual upheavals in this science⁵².

It has rendered the traditional view, which explains the intrusion of probabilities in quantum mechanics as a reflection of our ignorance of underlying processes, obsolete, in favor of a conception that recognizes the existence of a *fundamental indeterminacy* at the very core of this science. Thus, quantum mechanics presents a major challenge: to understand the notion of intrinsic probabilities, contrasting it with that of extrinsic probabilities, which simply refer to our lack of knowledge.

Furthermore, this debate led to the emergence of perhaps the most perplexing concept in the theory: that of entanglement, which refers to a situation where two—or more—particles are in a state that is not simply a product of two—or more—individual states. In such a state, correlations between the particles manifest *instantaneously* over seemingly arbitrary distances⁵³. These correlations, known as EPR correlations, constitute a clear indication of a form of “non-locality”. It is important to clarify the use of the term “form”, because true non-locality would involve the transfer of information at a speed faster than light, which is not the case here. Indeed, EPR correlations respect Einsteinian causality.

To grasp the deeply subversive nature of the concept of entanglement, we mention some rather recent speculations⁵⁴, which suggest that “EPR pairs”⁵⁵ could be connected by a “wormhole”, also called an “*Einstein-Rosen bridge*” (abbreviated ER), according to an article published the same year as the one on the EPR paradox. Such a “bridge” would be a structure linking two potentially very distant regions of space-time, thus creating a shortcut within it. This hypothetical connection, known as the ER=EPR conjecture, has not yet been confirmed, but it offers a fascinating perspective on the nature of these quantum correlations.

As for the debate concerning the issue of measurement in quantum mechanics, it originates from the concept of *superposition of states*, probably the most emblematic of this theory. This concept reflects the fact that, at the quantum scale, a system can exist in a combination of several eigenstates of an operator associated with a given physical quantity. The measurement problem itself, which, in an objective approach to the state vector, leads to considering macroscopic superpositions of states, has given rise to various original, sometimes even extravagant, interpretations of quantum mechanics. To name just a few⁵⁶:

– The “many-worlds” interpretation, proposed by Everett, posits that during a measurement, *all* results are realized but in “parallel worlds”. The advantage of this interpretation is that it avoids the question of the articulation between two types of evolution, as there is no need to reduce the state vector. However, its... uneconomical nature makes it difficult to pass the test of Occam’s razor: “*Entia non sunt multiplicanda sine necessitate*”.⁵⁷

– The *objective* collapse interpretation proposed by Ghirardi, Rimini, and Weber (GRW), assumes the existence of an internal process that causes the state vector to collapse. This is a hidden-variable (non-local) theory that modifies Schrödinger’s equation *ad hoc* by adding extra terms.

– The Bohm-de Broglie interpretation, or pilot-wave theory, postulates that the particle—or the collection of particles—is guided by a wave and follows a classical trajectory. This is a deterministic theory consistent with all predictions of quantum mechanics. It resolves, like the GRW theory, the measurement problem, but more naturally, as it does not require modifications to the formalism. However, it proves to be, as it should be, non-local and incompatible with relativistic invariance.

– The relational interpretation, proposed by Carlo Rovelli, maintains that the state vector does not describe an objective property of the system, but rather the relationships between systems, especially between the system and the (or the) observer(s). This interpretation is heavily inspired by Einstein’s theory of relativity, where most quantities are relative to the observer. The measurement problem is “resolved” by the idea that it is no longer associated with an objective reduction of the state vector, but with the establishment of specific relationships between observers, leading to different but compatible interpretations of reality. There are, moreover, several very interesting interpretations in which such an ontological shift occurs, during which the central concept of quantum mechanics shifts from the *system* to the *correlations between systems*, thus recognizing the idea, present in many philosophers, of the impossibility of accessing the thing “in itself”.⁵⁸

– The interpretation via decoherence. Decoherence is a concept introduced by H. Dieter Zeh in 1970 and later developed, notably by Wojciech H. Zurek. It is undoubtedly one of the most fruitful approaches to understanding the behaviors of macroscopic systems and for addressing the question of measurement. Indeed, while relying on quantum formalism as it is, this approach manages to justify the emergence of classical behavior, both for macroscopic systems and for quantum systems interacting with their environment, particularly during measurement. The fundamental idea is based on the fact that, in both cases, the system is not isolated: it interacts continuously with its environment⁵⁹. This interaction disturbs—in fact, delocalizes in the environment—the phase relationships between superposed macroscopic states, thus compromising the coherence and stability of such a superposition of states⁶⁰. Decoherence helps partially resolve the measurement problem because it shows how, in practice, the effects of quantum superpositions become unobservable at the macroscopic scale. However, it does not solve the problem of state vector reduction, in the sense that it never leads to the selection, for a given observable, of a value from among others.

We observe that the attempts to interpret quantum mechanics are not only varied but also continuously proliferating, which shows that the subject remains deeply open and far from having revealed all its secrets.

3 Quantum Mechanics and the Question of Knowledge

We have explored aspects of quantum mechanics that may prompt reflection on the nature of the relationship between this theory and the knowledge it provides us of the world. It seems, however, to question deeply rooted notions in the human mind: determinism, the idea that probabilities are merely a reflection of our ignorance, the independence of spatially separated systems (locality), as well as the persistent belief that reality exists independently of the means used to study it and, moreover, of the observer. All these elements shake the concepts of objectivity and the very nature of reality.

As we have said, it is more than evident that future scientific and technical advances will provide a new perspective on these issues, which, moving from conceptual to philosophical, could largely be integrated into the principles or properties of an emerging theory, or one that still needs to be fully discovered *in extenso*. We have too often heard about the “end of physics”, the “end of science”, or the “end of history” to believe that we have reached some sort of final resolution.

However, it is possible to engage in a thought exercise, fully aware of its limitations: considering the *possibility*, just as interesting, of a boundary in scientific investigation, in light of what quantum mechanics reveals to us—or more precisely, in light of our understanding of what it reveals to us. Rather than approaching this question head-on, we propose to examine it by taking a detour through cognitive sciences and neuroscience. Indeed, it seems illusory to think that the construction of representations and our understanding of the world can free themselves from the specific mechanisms at work within the *human mind*. However, these disciplines teach us an essential fact: human beings have a subjective view of the world around them. This subjectivity manifests at several levels: at the species level, through *physiological* biases; at the individual level, through *perception* biases or *cognitive* biases specific to each person—or group of people; and finally, at the collective level, through cultural biases characteristic of particular social groups or even society as a whole.

Physiological biases. As humans, like any other species, we access the world and the events around us through our senses, meaning through specific physico-chemical sensory receptors. Physical stimuli from the outside world induce biochemical changes in the relevant receptors, giving rise to chemical signals. These signals are then converted into electrical impulses, which are transmitted, via neurons, to the brain, where they form a coherent mental *representation* of the perceived event.

However, our five senses, no matter how sophisticated, remain imperfect. They are limited to narrow sensory spectra, that is, to specific ranges of visual and auditory frequencies, tastes, smells, and sensations that define what we are *able* to perceive. Thus, our vision is only sensitive to a tiny portion of the electromagnetic spectrum, roughly a few hundred nanometers, situated between ultraviolet and infrared. Similarly, our hearing is limited to sound frequencies approximately between 20 and 20,000 Hz. As for our other senses—taste, smell, and touch—they too only function within restricted ranges.

Although we are not the least well-equipped among animal species, some of them far surpass our sensory capabilities in specific areas. For example, cats and other felines possess exceptional night vision, allowing them to perceive much lower light levels than we can. Likewise, birds of prey such as hawks and eagles, whose visual acuity is 4 to 8 times greater than ours, are able to spot small prey from several kilometers away.

As for hearing, cats and dogs are particularly sensitive to high frequencies (above 20,000 Hz), enabling them to detect the movements of their prey. Bats and

dolphins, for their part, perceive much higher frequencies, often in the ultrasonic range, allowing them to navigate and hunt using echolocation.

Our sense of smell, while relatively effective, is far more limited than that of certain animals. For instance, dogs have a sense of smell about 100,000 times more developed than ours, allowing them to detect chemical compounds at incredibly low concentrations. Moreover, due to their highly developed sense of smell, their associative memory that creates deep links between their senses and attachment feelings, as well as their particular perception of the passage of time, dogs can sense the presence of their owner, even in their absence. The elephant, on the other hand, can locate sources of water and food from several kilometers away. Finally, the shark's sense of smell is so precise that it can detect the presence of blood in the water at a concentration as low as one part per billion.

Regarding taste, there is also considerable variability between species. For example, rats have about 50% more taste buds than humans, with particular sensitivity to sweet and bitter flavors, which helps them detect potential toxic substances. As for touch, while humans possess a relatively developed sense of touch, notably in terms of skin and muscles, animals such as elephants and dolphins have exceptional sensory capabilities at the skin level, allowing them to detect very slight variations in texture, temperature, and pressure in their environment.

In the end, while our senses allow us to navigate and interact effectively with the world, there is a great diversity in how other species perceive their environment. Each animal species has developed specific sensory abilities, often far beyond what we, as humans, can perceive. It is clear that these physiological biases play a crucial role in our perception of the world.

Perception biases. Now let us focus on the *individual* or group level. Regardless of our intrinsic sensory capabilities, we can be subject to distorted perceptions of reality, to “illusions”, or, to be more precise, to biases of perception, across all our senses. These biases can even manifest at the species level.

We are well aware of visual illusions, but there are many other types, particularly auditory ones. For example, the McGurk effect illustrates how the interference between hearing one sound and “seeing” another sound, lip-read from a person, can lead to the perception of a third sound, which was never emitted.

There are also olfactory illusions, such as phantosmia, during which one perceives a smell that is not present in the environment. As for taste, apart from possible “ghost tastes”, it is often influenced by numerous external factors: the color of food, its texture, its odor, as well as elements such as the level of acidity or bitterness. These factors can profoundly alter our gustatory perception. This is exploited in molecular gastronomy, which seeks to create new textures that induce original taste sensations.

Finally, tactile illusions are no less significant and can be particularly spectacular. One of the most famous examples is the phantom limb, where an amputee still perceives sensations in the missing limb. Another very common example is tactile habituation: when we are subjected to constant tactile stimulation, such as the contact of clothing on the skin, our perception of this stimulation may decrease over time, to the point where we no longer notice it, even though it is still present.

Thus, our sensory experience of the world is neither entirely objective nor completely faithful to reality; it is constantly shaped by perception biases, illusions that reveal its limitations.

Cognitive biases. But that's not all. There is also an absolutely impressive series of biases—or effects—*cognitive* in nature, involving the brain's processes of information processing⁶¹. These biases involve psychological or intellectual mechanisms, such as attention, memory, reasoning, and decision-making, which go beyond mere sensory perceptions. It is impossible—and, moreover, unnecessary—to list them all here. We will only mention those relevant to our discussion, which reinforce the idea of a subjective apprehension of the world, already highlighted by physiological and perception biases.

★ The halo effect — or contamination effect, or notoriety effect — refers to the phenomenon whereby the perception of a person's characteristics is altered by one or more initial traits. For example, a very friendly person may be, without basis, attributed other qualities and will, without justification, evoke feelings such as trust or respect.

★ The Dunning-Kruger effect — or overconfidence bias — refers to the phenomenon in which less qualified people overestimate their skills, while the most qualified individuals tend to underestimate theirs.

★ Confirmation bias refers to the tendency to give more credibility to information that confirms our pre-existing beliefs or preconceived ideas.

★ The placebo effect — or its opposite, the nocebo effect — relies on the belief in the positive or negative effect of a substance, often medicinal, inducing a real physiological effect.

★ Magical thinking bias refers to the belief that our practices, beliefs, superstitions, or thoughts can have a concrete influence on the reality of the world⁶². This bias can be seen as a psychological response to the awareness of our own finitude and, more generally, to our metaphysical anxieties.

★ Memory bias refers to the influence of the environment, psychological, or emotional state of an individual on the way they store and retrieve their memories. Due to this phenomenon, the precise reconstruction of a memory often occurs through several “experiences” made in different contexts or states, which, under the influence of external stimuli⁶³, contribute to consolidating the content. However, it should not be believed that this reconstruction is faithful to reality, because the memory itself is a mental construction already biased by the individual's psychological state. The identification of the memory is thus inevitably imperfect, influenced by the emotional or mental state at the time. Certain aspects are embellished or darkened, while others may be filled in with invented details. Thus, the reconstruction of memory is inherently *contextual*. It is also proven that certain altered states of consciousness, such as semi-consciousness, hypnosis, hypnagogia (the intermediate state between wakefulness and sleep), or trance, can help unearth buried memories⁶⁴.

By *pure analogy*, this phenomenon can be compared to the reconstruction of a quantum state in a superposition of states (1), namely the determination of the coefficients $c_n(t)$, performed through a series of measurements. It is also interesting, but still by pure analogy, to note that the concept of contextuality is also present in quantum mechanics. Indeed, it can be shown⁶⁵ that if a theory with hidden variables exists, then it must necessarily be *contextual*. This means that if the result of the measurement of an observable A were determined by deterministic hidden variables, it would necessarily depend on the group of observables — $\{B, C, \dots\}$ —compatible with each other and compatible with A with which we choose to measure this quantity⁶⁶. This contextuality transforms into non-locality when considering a situation where the observables are spatially distant from each other.

★ The “cocktail” effect refers to the very common situation in which an individual is able to focus on a particular stimulus while disregarding many others. In neuroscience⁶⁷, this phenomenon is explained by the fact that the unconscious receives a multitude of external stimuli but only allows one or very few of them to reach consciousness. *Selective attention* acts as a filter, deciding which stimuli will enter consciousness and which will be ignored.

A purely analogical comparison can be made once again, this time between this awareness and the reduction of the state vector⁶⁷, symbolized by the transition from (1) to (6)⁶⁸. In this analogy, the unconscious, which perceives multiple stimuli, corresponds to a quantum system in a superposition of eigenstates. Selective attention plays the role of the measurement apparatus, while the consciousness of a psychic event approaches a well-defined quantum state, that is, an eigenstate of an operator.

★ The mastery bias and, more generally, what could be provocatively named the “illusion” of free will refers to the tendency of certain individuals—or perhaps everyone—to overestimate their ability to control events and make decisions autonomously, or even to possess *real freedom of choice*. However, it is important to avoid engaging in the complex debate surrounding the very existence of free will, a topic that, to date, has not received any definitive answers within the framework of neuroscience⁶⁷. Such a discussion would require, beforehand, a clarification of what we mean by “free will.” What exactly are we free from? Are we free from any historical, personal, genetic, spiritual, or metaphysical influences? And, if we exclude all these influences, what remains to justify or generate a decision?⁶⁹ Without definitively settling this debate, it is reasonable to think, as we see in the mechanisms observed in the cocktail effect, that our unconscious plays a key role in our decision-making processes, influencing choices that we believe to be conscious and rational. One could then say, with Spinoza: “Freedom is nothing but the ignorance of the causes that determine us.”

★ The “*Gestalt* effect”⁷⁰ refers to the theory of *Gestalt*, which takes its name from the German word *Gestalt*, meaning “form” or “configuration.” This effect is perhaps the most important for our discussion (see below). Originating from psychology and philosophy, the *Gestalt* theory encompasses a set of principles explaining how, in the face of a complex situation, the human brain spontaneously seeks to attribute meaning or a “form” to it. According to this theory, sensory stimuli, especially *visual* ones, are perceived in a global and organized manner, rather than in a local and disorganized fashion. One of its fundamental principles is that “the whole is greater than the sum of its parts.”

This effect can help explain⁷¹ :

Hw a prly wrttn txt cn stil b undrstd

is termed—through a somewhat questionable wordplay—“typoglycemia,” a fusion of “typography” and “hypoglycemia.”⁷²

★ Let’s consider one final effect, also very important within cognitive sciences: *cognitive dissonance*. This concept refers to a situation in which an individual’s behavior conflicts with their deep beliefs, convictions, or values. Faced with this psychological tension, the individual often tries, unconsciously, to reduce the contradiction by either modifying their behavior (which is rare) or their beliefs, even if the modification may sometimes be superficial or cavalier. For example, one might justify harmful or prohibited practices with principles like the famous “*Carpe diem*”, often invoked to legitimize an irrational or risky behavior. Similarly, some behaviors, generally judged socially or even legally inappropriate, are legitimized by their widespread nature—*everyone does it*—or their historical precedence

—*it's always been done*—which can simply be classified as bad faith! But, as we will see, this effect operates in a less trivial context.

- *Cultural biases.* All these biases or effects, whether physiological, perceptual, or cognitive, show that the human brain is far from perceiving reality objectively. Its sensory modalities and deep beliefs, both shaped by an evolution spanning over three hundred thousand years⁷³, are inevitably tainted by a form of subjectivity.

At this point, one could argue that science, as a human but *collective* construct, tends toward objectivity. Indeed, the vocation of science is precisely to transcend perceptions, beliefs, and personal and subjective convictions about the world. This transcendence relies on a rigorous process of knowledge construction: it includes experimentation, analysis of results, the production and formalization of hypotheses, the building of a theory, the use of the principle of falsifiability to test and validate (or invalidate) it, as well as the constant exercise of critical scrutiny. Finally, the diffusion of this knowledge plays a central role. This process does not aim to achieve total objectivity, which would remain largely utopian, but to establish what is called an *intersubjective consensus*, meaning a shared agreement on facts, principles, and theories, considered as valid by a scientific community. The knowledge derived from this process allows not only identifying cognitive biases but also controlling them or, in some cases, partially abstracting from them through countermeasures, a process often referred to, in this context, as “debiasing”.

But can science, even in its collective strength, truly bypass human perceptual biases, illusions, and subjective impressions? It is argued that, well beyond individual subjectivity, there also exists, more insidiously, a collective subjectivity, even in the scientific field. This subjectivity also relies on deep cultural biases and remains largely dependent on our sensory experience.

Consider *mathematics*, often perceived as the most abstract science, which is credited with the ability to produce a body of knowledge that exists independently of the human mind. Even if we willingly accept this idea, it remains true that the order in which Mathematics is discovered⁷⁴ not only depends on the history of humanity but also on the deep nature of humans and their environment⁷⁵. To quote an argument borrowed from Carlo Rovelli⁷⁶: if we were inhabitants of Jupiter, a gaseous planet, it is likely that we would not have *initially* discovered whole numbers or arithmetic, which are relevant in a world made up of countable entities. Instead, we⁷⁷ would likely have developed a form of calculation suited to continuous structures, due to the specific nature of our environment. It is only later, perhaps much later, that we would have discovered arithmetic. Now, the order of discoveries is obviously crucial, especially when dealing with a body of knowledge potentially infinite. This order determines the relevant concepts used to describe phenomena that escape the immediate senses of human beings, as is the case in quantum mechanics.

Let's go back to this discipline. Bohr strongly emphasized the importance of using *classical* language within quantum mechanics, not only to account for observed phenomena but also to facilitate communication within the scientific community. He considered this language essential to describe both the wave-like and particle-like aspects of quantum particles. *However*, he also acknowledged that this same language, while functional at a certain level, remained fundamentally insufficient for grasping the nature of quantum systems in all their complexity. To illustrate this idea and show that certain quantum concepts clearly conflict with our initial, even archaic, conceptions of the physical world, it is helpful to revisit the formalism of the theory. The example of what is called the *identity*—or, wrongly, *indiscernibility*—of particles is particularly enlightening. In fact, a fundamental property of quantum mechanics is that two or more particles, called

identical, i.e., possessing the same intrinsic properties, such as mass, charge, spin, etc., cannot be assigned distinct individual states. For such particles, the notion of individuality even loses all relevance. This concept of identity, specific to quantum mechanics, is particularly difficult, even impossible, to intellectually conceive. This is reflected, moreover, by the absence of truly suitable vocabulary: the term “indiscernibility” evokes an *external* judgment, as if the observer were simply unable to *differentiate* one particle from another, like two tennis balls. As for the term “identity,” although it does not explicitly appeal to the senses, it implicitly refers to the idea of vision. In reality, it refers to an *intrinsic* and *structural* identity inherent to these particles, far beyond a simple observation-related limitation. Furthermore, this notion of identity, as we will see, has no natural translation in the formalism of quantum mechanics.

So, consider two particles, 1 and 2, initially far from each other, described by states $|\Psi_A\rangle_1$ and $|\Psi_B\rangle_2$, where A and B index distinct states. If these particles approach, causing a mix, a possible overlap of their state vectors, the overall state describing these two particles must then reflect their intrinsic identity. As we mentioned, this implies the impossibility of assigning them a well-defined individual state—or number.

As we have pointed out, there is no natural or immediate way to *formalize* this situation. However, we can proceed with the following manipulation to describe it: we *still* assign the state $|\Psi_A\rangle$ to particle 1 and $|\Psi_B\rangle$ to particle 2. Then, to compensate for this illegitimate assignment of individual states to the particles, we also consider the symmetric situation in which the roles of particles 1 and 2 are exchanged. Finally, we construct the resulting global state of this operation by forming a superposition of the two configurations:

$$|\Psi\rangle = |\Psi_A\rangle_1 \otimes |\Psi_B\rangle_2 \pm |\Psi_A\rangle_2 \otimes |\Psi_B\rangle_1.$$

The global state is then a combination of the individual states of the particles, which can be either symmetric (sign +, applying to a certain category of particles called bosons) or antisymmetric (sign –, in the case of particles from the category known as fermions). This (anti-)symmetry of the final state ensures its independence from the attribution of individual states to the particles.

This approach is perfectly operational, as it allows us to mathematically obtain the correct state of the system, as confirmed by numerous experiments involving identical particles. However, the crucial point remains that, in general, it is impossible to construct the global state of the particles without first making an arbitrary assignment of individual states to the particles⁷⁸, followed by an (anti-)symmetrization of this configuration.

This example clearly illustrates a fundamental limitation of human ability to comprehend the *identity* property of particles. However, the mathematical technique, through the quantum formalism, allows us to overcome this limit and handle this situation adequately, the price to pay being this “subterfuge” that consists of considering the identity of the particles as... the negation of their otherness.

By extension, it is tempting to imagine that the very notion of superposition of states, although once again extremely operational, is, in reality, just a compromise solution to our inability to describe the singularity of quantum systems more precisely. Indeed, we superimpose states of well-defined energy, position, or momentum in order to account for the spectral spreading of these quantities, much like we superimpose states of dissimilar particles to account for their identity. But this process of superposition can be seen as a way of “smoothing out” the inherent complexity of quantum phenomena, in order to make them understandable in terms of the language and concepts available to us. In other words,

the superposition of states could also be just a computational artifice, allowing us to handle intrinsically subtler and more paradoxical realities while remaining within the framework of our classical understanding of the world.

The previous considerations also apply to the concept of non-locality, which involves the *negation* of the classical concept of locality. While this may be wishful thinking, it is conceivable that a more precise and positive definition of non-locality may emerge. Such an evolution could offer a new way of conceiving the relationships between quantum entities, which would then be neither constrained by distance nor limited by the classical notions of interaction.

Finally, the use of the concept of intrinsic probability, which is at the heart of quantum mechanics, could also be nothing more than a provisional theoretical compromise. This probabilistic approach remains a valuable tool, awaiting a more developed theory, which has yet to be defined without, *of course*, returning to the considerations of Einstein, Bell, and their hidden variables. However, this concept probably also hides our inability to fully describe quantum reality in a completely satisfactory way.

4 Conclusion

Neuroscience and cognitive sciences reveal a fundamental fact: human beings have a deep and instinctive need to structure and shape their perceptions and experiences. Through a kind of “*generalized Gestalt effect*”, they seek not only to describe and understand them but also to organize and unify them into a coherent *whole* as much as possible.

However, as complex beings, humans have developed, alongside their cognitive faculties that allow them to analyze and order the world, a psychological dimension of a different nature. For reasons that are still only partially understood, but which could be related to an accelerated processing of an excess of information⁷⁹, their “logical” and “rational” judgments are frequently short-circuited by unconscious mental processes: cognitive biases.

Science, and more generally the collective knowledge produced in our societies, attempts to free human beings from these cognitive biases. However, it is essential to keep in mind that the conceptual tools that underpin this knowledge were shaped by the collective history of humans and their respective cultures. It is also crucial to realize that the nature/culture dichotomy is largely artificial. Indeed, culture is, to a large extent, a way to overcome or even transcend nature; but it is also, in many respects, its emanation: most institutions, structures, norms, values, and social taboos are (only) ways of controlling, channeling, and ultimately giving a “civilized” form to human beings’ primary instincts. This project, however, is far from being completed.

Thus, it is often said that society is violent, patriarchal, unequal, that it fosters relationships of domination, coercion, and even oppression. Indeed, it is, for reasons that are intrinsic to it, particularly due to the norms and prohibitions it imposes, generating frustration, dissatisfaction, and resentment. However, these flaws also and especially find their origin in the very nature of human beings, in what one could call their animal condition, within which their behavior is primarily driven by the need to satisfy their basic instincts: hunger, security, reproduction, domination, etc. As a result, our analytical tools, no matter how sophisticated they are, are imbued with our primary, instinctive, and sensory connection to the world around us.

Consequently, even when we face an eminently complex situation, such as the analysis of quantum phenomena that we attempt to formalize, we resort to primitive concepts deeply rooted in us, which Bohr called “classical,” even though these notions are fundamentally unsuitable for describing these phenomena.

It is quite likely that this is where the origin of cognitive dissonance lies, which manifests in the confrontation between the ontological silence of the formalism of quantum mechanics and our quest for meaning. The idea of Einstein, Bell, and others to *complete* quantum mechanics was an attempt to *reduce* it. But, in the face of the failure of this idea, various and diverse “interpretations” based on very strong philosophical or ideological assumptions, opposing views clash, each attempting to fill, in its own way, the gaps and silence of this formalism. This diversity reflects the richness of perspectives and also the human determination to fill the voids left behind. One can hope that new Einsteins, Bells, and Aspects will emerge to transform these interpretations into thought experiments, then laboratory experiments, thus paving the way for the genesis of a new ontology capable of reconciling our quest for explanation with the uniqueness of quantum phenomena. However, it is also possible that we have encountered a form of reality that is beyond human comprehension.

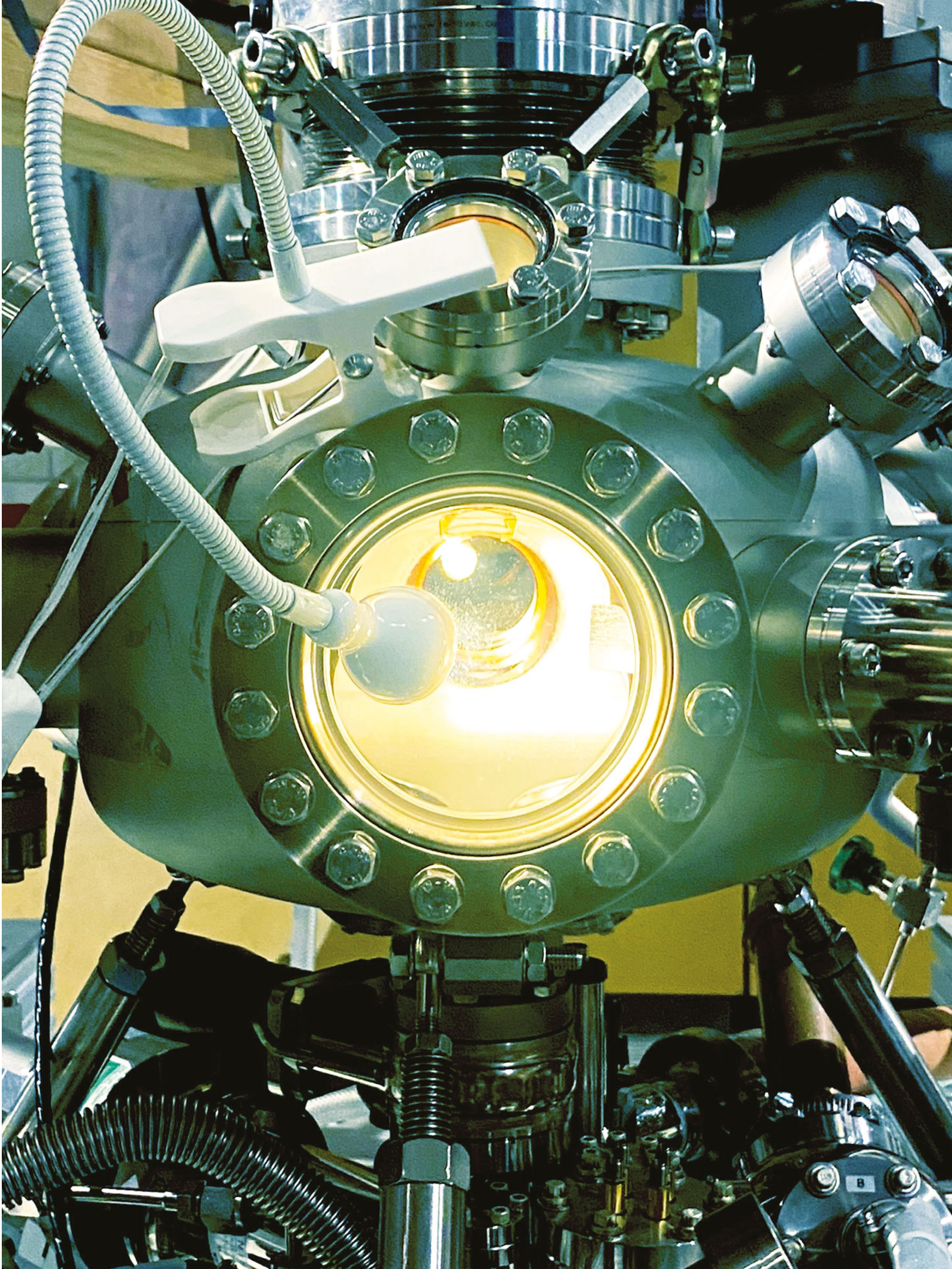
Notes

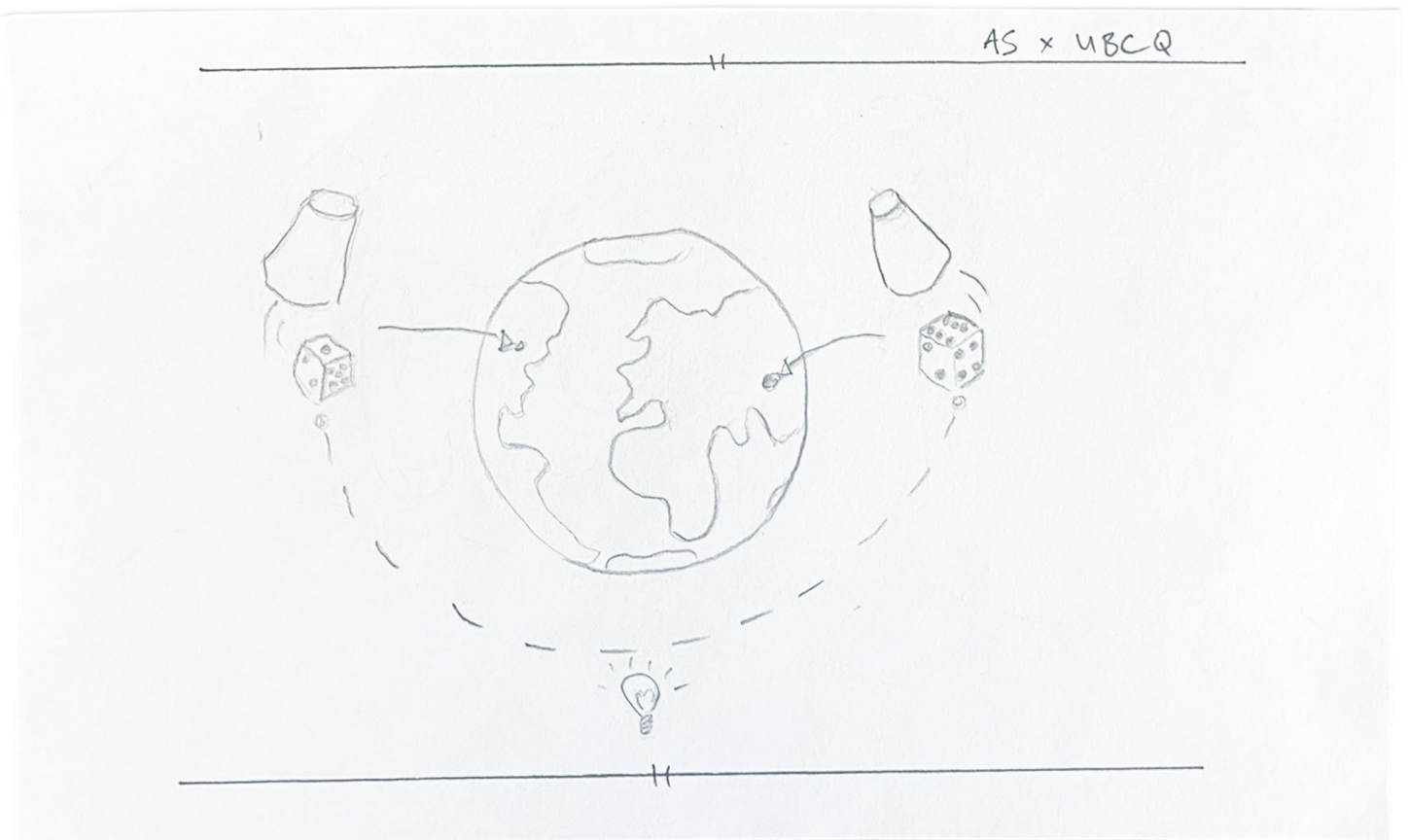
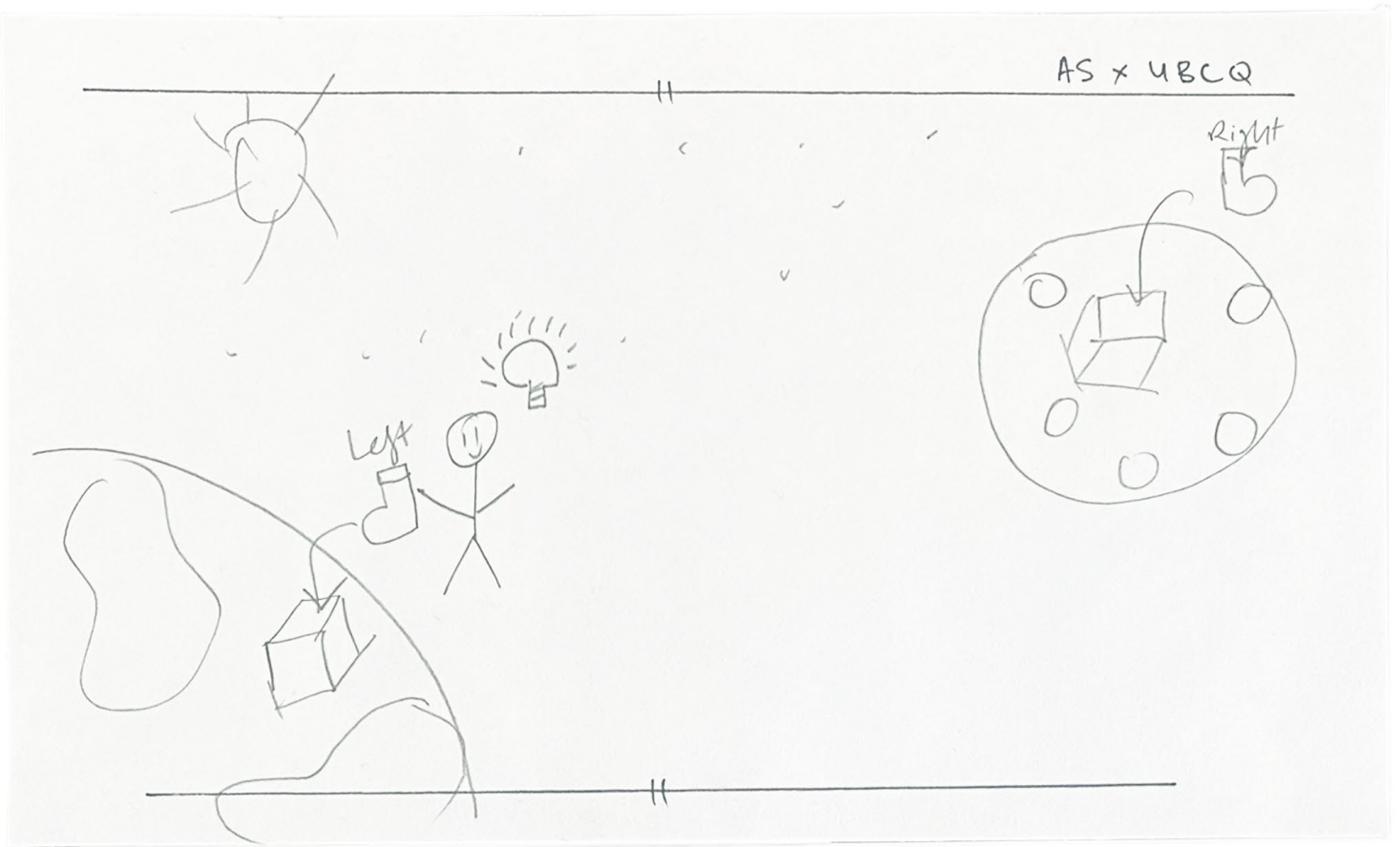
- 1 A medium that can be the vacuum.
- 2 It provides the *general* framework for all relativistic theories (see below).
- 3 Sometimes, the more general term *quantum theory* may be preferred, especially when it incorporates Einstein’s principle of relativity
- 4 The concept of the relativity of motion is already present in Galilean physics.
- 5 Or, to be more precise: the invariance by reference frame change of a speed c , which, if the photon has no mass, coincides with the speed of light (current experiments are compatible with a photon mass less than 10^{-54} kg).
- 6 Or, more simply, relativistic invariance.
- 7 Thus, the quantum version of electrodynamics has allowed the calculation of a quantity called the anomalous magnetic moment of the electron, which, when compared to the experiment, presents an error of less than one billionth of the measured value.
- 8 This discovery is mainly attributed to Yukawa, Gell-Mann, and Zweig. The understanding of certain more formal aspects owes much to the contributions of ‘t Hooft and Veltman, Gross and Wilczek, and Politzer, in particular.
- 9 Once again, this is a collective work involving, in particular, Fermi and Wu.
- 10 Recently, theories have been proposed to maintain a classical form of gravitation, even within a framework that unifies the four fundamental interactions.
- 11 This is a theory in which gravity would not be a fundamental interaction, but could emerge from an underlying microscopic physics.
- 12 à une phase complexe près.
- 13 Specialized works are referred to for the definition of this concept, which is not essential here.
- 14 Here are some useful definitions for what follows: a eigenvector of an operator $\hat{A}$ is a non-zero vector $|u\rangle$ such that the action of $\hat{A}$ on this vector preserves its direction. Therefore, this vector is only modified by a multiplicative factor a , called the eigenvalue of $\hat{A}$. We then have: $\hat{A}|u\rangle = a|u\rangle$.
- 15 where n ranges, for example, over the set of natural integers.
- 16 A notable exception will be made for certain classical vibratory systems, particularly those defined on a finite space, where the frequencies or wavelengths can take discrete values.
- 17 Although in classical wave physics it is possible to superimpose two or more waves, leading to the addition or subtraction of their amplitudes – the phenomenon of interference

- it does not involve making several values of the same physical quantity coexist within a single system.
- 18 We have $\langle a_k | a_n \rangle = \delta_{kn}$, where δ_{kn} , called the Kronecker delta, takes the value 1 when $n = k$ and 0 otherwise.
- 19 It is generally chosen to consider a vector of unit squared norm: $|\langle \Psi(t) | \Psi(t) \rangle|^2 = 1$.
- 20 Considering a continuous physical quantity implies defining not the probability $\mathcal{P}(x)$ of a value – which is mathematically zero – but an infinitesimal probability $d\mathcal{P}(x)$ over an infinitesimal interval of length dx .
- 21 The same procedure applies, but even more formally, since it now involves determining the entire function $\Psi(x, t)$ in the expression (3).
- 22 It is sometimes incorrectly referred to as Heisenberg's *uncertainty relations*, a term that carries too much connotation because it suggests a misunderstanding of the physical state of the system, representing a very partial epistemic stance – see further below.
- 23 A measurement of x consists of determining the value of the position x with a precision δx , generally smaller than the spectral width Δx .
- 24 In French : « Tais-toi et calcule ».
- 25 N.D. Mermin, « What's Wrong with this Pillow? » *Physics Today*, 42, 9 (1989).
- 26 It is important to note that, in practice, most physicists commonly associate the state vector, the wave function, or the Hamiltonian with a given system, rather than with an ensemble of systems. This reflects a certain resistance to adopting a strictly operationalist perspective.
- 27 To be more concise than the expression 'a statistical ensemble of systems'.
- 28 In practice, the vector obtained after state vector reduction is manually normalized to unity, in order to continue with a properly normalized vector.
- 29 Difficulty, or not, depending on the perspective one adopts on the entire issue.
- 30 For example, let's consider the measurement of the temperature of a fluid: this measurement will not significantly affect the state of the system – in this case, the fluid – and, in return, the result of the measurement, as long as the heat capacity of the measured system is much greater than that of the measuring device – in this case, a thermometer
- 31 This situation is sometimes justified by invoking the fact that, due to the microscopic nature of the quantum system, the interaction between the measuring device and the measured system inevitably results in an exchange of action between the two systems, at least equal to $\hbar$, which causes a disturbance in the studied system. In reality, things are not so simple. Indeed, if we consider a system in an eigenstate of a certain operator, say $\hat{A}$, and we perform a measurement of the corresponding physical quantity A , this measurement will reveal with probability 1 the eigenvalue associated with the eigenstate. Therefore, we cannot consider that, in this case, the measurement actually disturbs the system. Or, we must admit that the state vector describing the system in an eigenstate of a given quantity *accounts for* the disturbance induced by the measurement.
- 32 An action corresponds to any quantity dimensioned as a kinetic moment; it is notably the product of momentum by length, or of energy by time.
- 33 See note 26.
- 34 The reader might object that, in certain circumstances – notably the most emblematic one in quantum mechanics, namely the double-slit experiment – the notion of superposition of states is not only relevant but even essential to describe a *single* system. Let us consider this experiment, in which photons are sent *one by one* toward a screen pierced with two slits. The result of this experiment is then analyzed, which is the impacts of these photons on a second screen, equipped with detectors, placed behind the first one. During this experiment, each individual impact appears to occur randomly. However, when examining the statistical distribution obtained after a large number of impacts, an *interference* pattern emerges. It then seems natural to conclude, based on these observations, that each photon possesses a form of ubiquity or, in other words, that it is intrinsically « carrier » of the interference phenomenon. The state that describes it before the impact on the second screen should therefore correspond to a superposition of the type $|\Psi\rangle = a|T_1\rangle + b|T_2\rangle$, where $|T_1\rangle$ and $|T_2\rangle$ correspond to states associated with passing through slit 1 and slit 2, respectively. This conclusion, although intuitive, is not inevitable. Indeed, one could envisage a mechanism that forces each photon to pass through a *specific slit*, while still ensuring the appearance of an interference pattern from a large

- number of impacts. This is precisely what is referred to as a «hidden variables theory,» which we will examine in more detail below.
- 35 A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?» , *Phys. Rev.*, 47, 777 (1935).
- 36 We are not concerned here with the position observable of the particles.
- 37 The tensor product, denoted $\otimes$, is a mathematical operation that allows the combination of the quantum states of two (or more) distinct systems to form a global state describing the composite system
- 38 In a classical situation, this would correspond, for example, to the results of a coin toss (corresponding, for example, to $+\frac{1}{2}$ for heads and $-\frac{1}{2}$ for tails).
- 39 In the classical situation of a coin toss game, imagine you obtained, for example, the sequence (11) and your game partner obtained the sequence (12). The existence of systematically opposing results between the two of you would naturally lead you to think that the coins are rigged. «Hidden variables» is the term used to describe this rigging, in the context of quantum mechanics.
- 40 We speak of counterfactual experiments in the case of experiments that are not actually conducted.
- 41 It should be noted that in quantum mechanics, very often, measurement destroys or makes the physical system unworkable.
- 42 J.S. Bell, «Speakable and unspeakable in quantum mechanics». Cambridge University Press (1987).
- 43 For example, see A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, «Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers,» *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1804 (1982).
- 44 J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony and R. A. Holt, «Proposed experiment to test local hidden-variable theories», *Phys. Rev. Lett.*, 23, 880 (1969).
- 45 B. Hensen et al. (2015) «Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres» *Nature*, 526, 682 (2015).
- 46 The use of «large» and «small» avoids the terms «microscopic» and «macroscopic,» which implicitly assume a specific treatment for each of the two systems.
- 47 This was later named the «Schrödinger's cat» paradox.
- 48 with respective weights α and β .
- 49 And of the quantum system.
- 50 This viewpoint is shared by contemporary authors affiliated with QBism (Quantum Bayesianism), for whom the state vector is also not an objective description of the system, but a mathematical tool that allows a given observer to structure their beliefs regarding the possible outcomes. For an introduction to the subject, see: C.A. Fuchs, N.D. Mermin, and R. Schack, «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics,» *American Journal of Physics*, 82, 749 (2014).
- 51 Still within the hypothesis where the state vector is considered as an objective attribute of a given quantum system.
- 52 The physicist Henry Stapp even described Bell's inequalities as «the deepest discovery in science.» H. Stapp, «Bell's theorem and the world process.» *Il Nuovo Cimento B*, 29, 270 (1975).
- 53 The most recent experiments report correlations between two photons over a distance greater than 1200 kilometers.
- 54 J. Maldacena and L. Susskind «Cool horizons for entangled black holes», *Fortsch. Phys.* 6, 781 (2013).
- 55 That is, the particles in an entangled state of type (9).
- 56 There is an extensive literature on this subject. Let us simply mention: M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, Wiley-Interscience, New York, 1974. B. d'Espagnat, *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, (Le temps des sciences), Paris, Fayard, 1994. F. Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*, EDP Sciences/CNRS Editions, Paris, 2011.
- 57 In English : «Entities should not be multiplied without necessity.»
- 58 One can read the two enlightening articles by David Mermin, even though he has largely renounced them since: N.D. Mermin, «The Ithaca Interpretation of Quantum Mechanics,» *Pramana*, 51, 549 (1998) and «What is quantum mechanics trying to tell us?» *American Journal of Physics*, 66, 753 (1998).

- 59 The environment, here, should be understood in a broad sense. For a ‘small’ system, it refers to its environment in the traditional sense. For a ‘large’ system, one isolates one or more macroscopic variables – for example, the center of mass of the system – from the other degrees of freedom, which then constitute the environment with respect to the macroscopic degrees of freedom whose behavior is being studied, in this case, decoherence.
- 60 One can refer to, for example, the following review: M. Schlosshauer «The quantum to classical transition and decoherence,» *arXiv:1404.2635 [quant-ph]* (2019).
- 61 For all the following discussion, reference is made, for example, to the excellent books by S. Dehaene, “*The Code of Consciousness*”, Odile Jacob, 2014, and A. Moukheiber, “*Your Brain is Playing Tricks on You*”, Allary, 2019.
- 62 One could argue that this is indeed the case for placebo or nocebo effects. However, it is then a matter of the influence of the psychological state on the physical state, which in no way relates to magic.
- 63 Let us think of Proust’s famous madeleine.
- 64 One can consult the magnificent research by Céline Loozen dedicated to this subject: «Transe: Enquête sur un état de conscience modifié,» CNRS editions, 2024.
- 65 These results are due to Bell, Kochen and Specker, Greenberger, Horn and Zeilinger, as well as Mermin. For a comprehensive list of references and for understanding these results, one can consult Mermin’s enlightening article on the subject: N.D. Mermin «Hidden Variables and the Two Theorems of John Bell,» *Reviews of Modern Physics*, 65, 803 (1993).
- 66 To clarify: contextuality implies that, under the assumption of the existence of hidden variables, the result of the measurement of the observable A must depend on the group of observables – $\{B, C, \dots\}$ or $\{B', C', \dots\}$ – that are compatible with each other and compatible with A with which we choose to measure this quantity, if certain observables – B or C or ... – from one group are not compatible with certain observables – B' or C' or ... – from the other group.
- 67 S. Dehaene, *op. cit.*
- 68 It is in no way about speculating on the quantum nature of the phenomenon of consciousness, although this has been considered elsewhere.
- 69 We refer to the excellent article by Latorre: J. I. Latorre, ‘Quantum Will: Determinism meets Quantum Mechanics,’ *Euresis journal*, 5, 1 (2013).
- 70 Term proposed by the author.
- 71 See A. Moukheiber, *op. cit.*
- 72 and for which the author disclaims all responsibility.
- 73 Approximate date of the emergence of Homo sapiens.
- 74 In contrast to invented. But the argument developed here would work just as well, or even better, in the latter case.
- 75 We refer here to the excellent article by Carlo Rovelli: C. Rovelli, «Michelangelo’s Stone: an Argument against Platonism in Mathematics,» *European Journal for Philosophy of Science*, 7, 285 (2016).
- 76 C. Rovelli, *op. cit.*
- 77 The author refrains from committing to the question of what form this «we» might take on a gas giant planet...
- 78 Or, equivalently, by an arbitrary assignment of numbers to the particles.
- 79 See A. Moukheiber, *op. cit.*







DESSINE-MOI UNE INTRICATION

L'intrication est parmi les propriétés les plus surprenantes des objets quantiques : après leur rencontre, des particules gardent en mémoire cet événement et restent liées, même à distance. À l'occasion d'une session de dessin en laboratoire, des chercheurs ont dessiné cette intrication. Chacun son point de vue, chacun son explication.

DRAW ME AN ENTANGLEMENT

Entanglement is one of the most surprising properties of quantum objects: after their interaction, particles retain the memory of this event and remain linked, even at a distance. During a drawing session in the laboratory, quantum physicists illustrated this entanglement. Each with their own point of view, each with their own explanation.



«J'ai parfois eu l'impression de me trouver dans un atelier de bricolage façon Géo Trouvetou, où certains des objets utilisés par les scientifiques (scotch, ficelle, papiers, ciseaux, pigments...) ne sont pas si éloignés de ceux d'un atelier d'artiste ». Caroline Delétoille

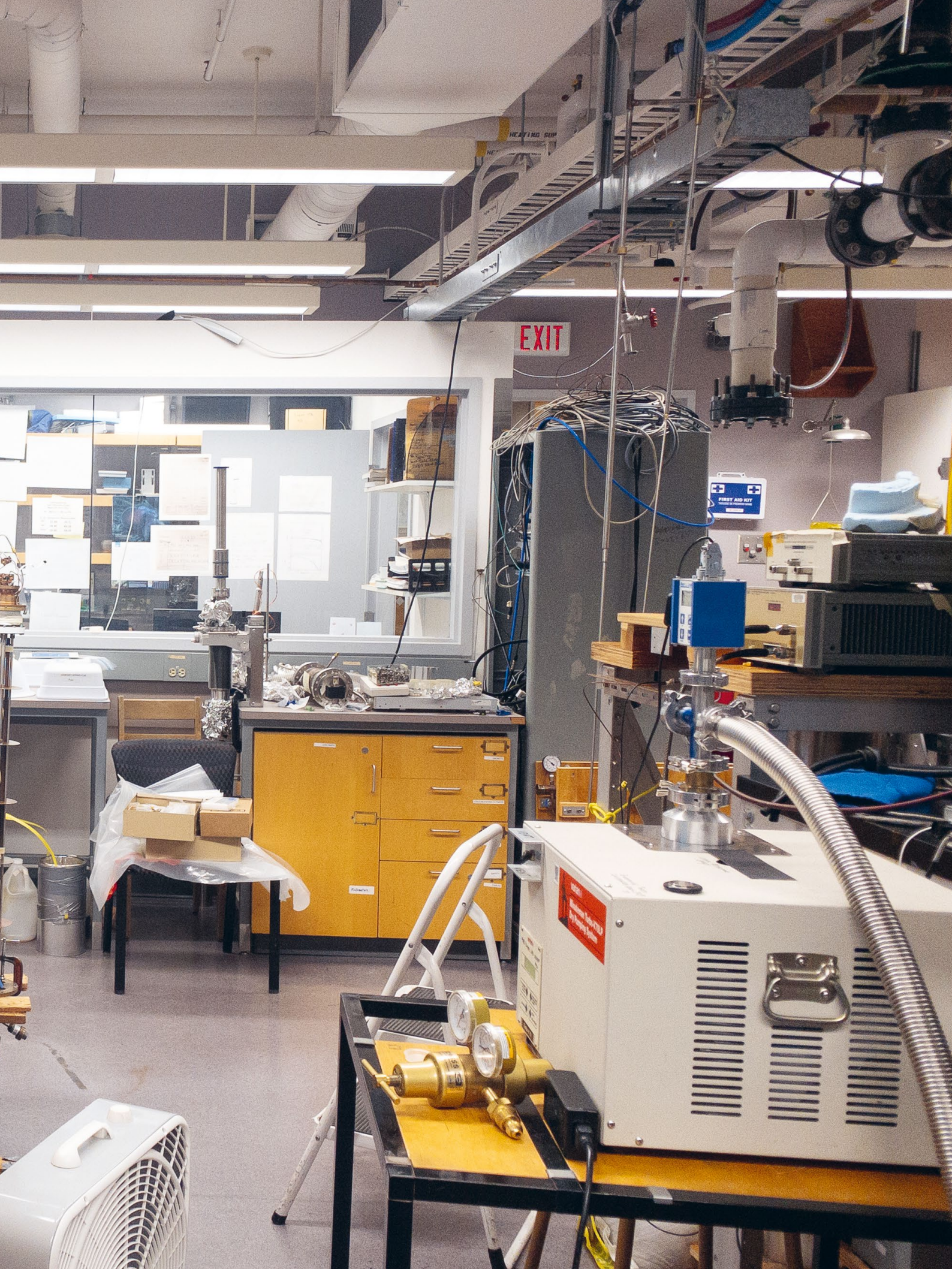
"At times, I felt like I was in a DIY workshop, Gyro Gearloose alike, where some of the objects used by scientists (tape, string, paper, scissors, pigments, etc.) are not so far away from those of an artist's studio". Caroline Delétoille



« Le monde du laboratoire quantique est un mélange d'appareils de pointe et d'éléments bricolés. Ce bureau d'artiste-scientifique illustre le rapprochement entre l'art et la science à travers leur dimension créative ». Céline Boissérie-Lacroix

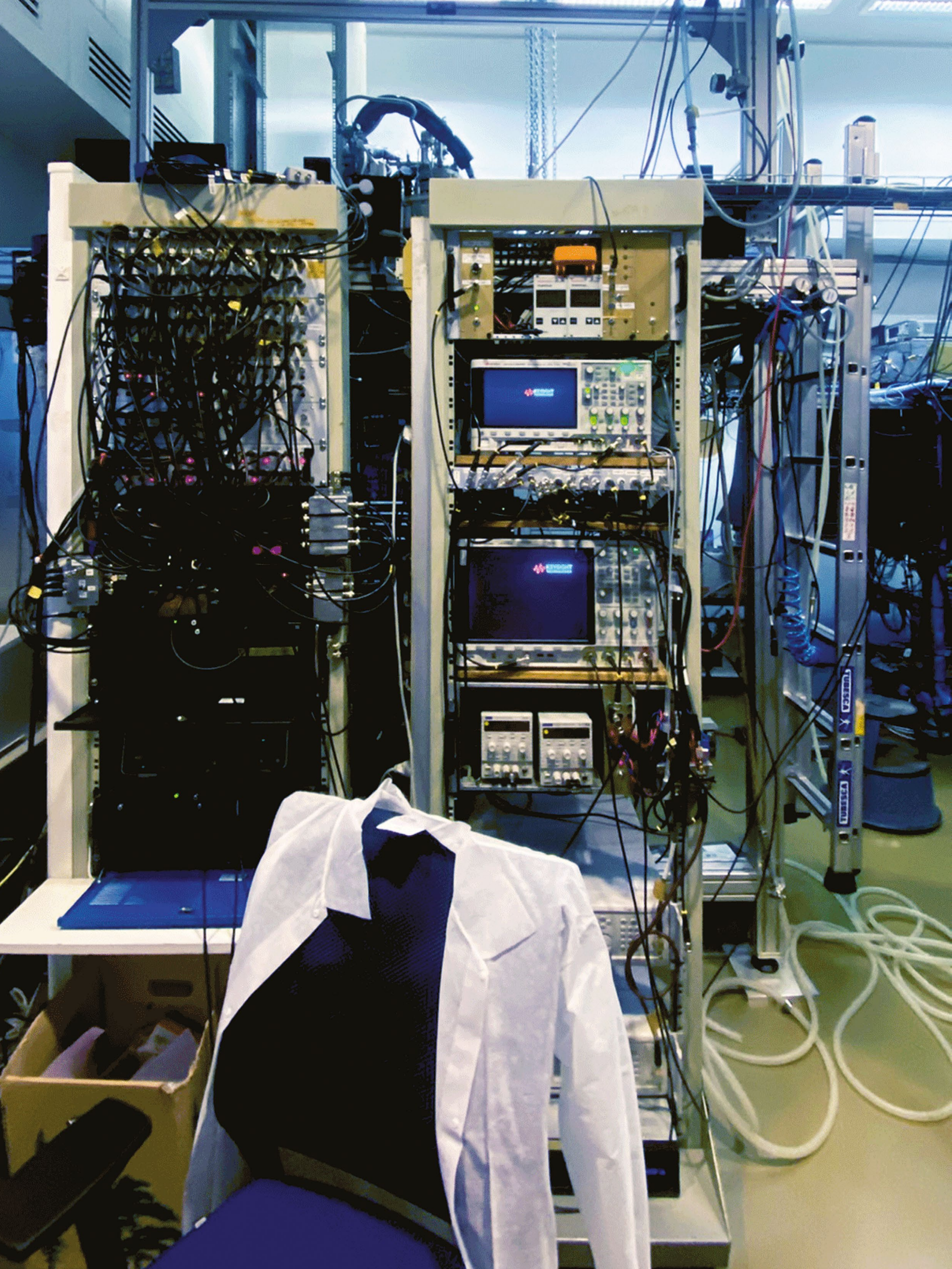
“The world of the quantum laboratory is a mix of cutting-edge equipment and make-shift elements. This artist-scientist desk illustrates the connection between art and science, which can be linked by their creative aspect”. Céline Boissérie-Lacroix

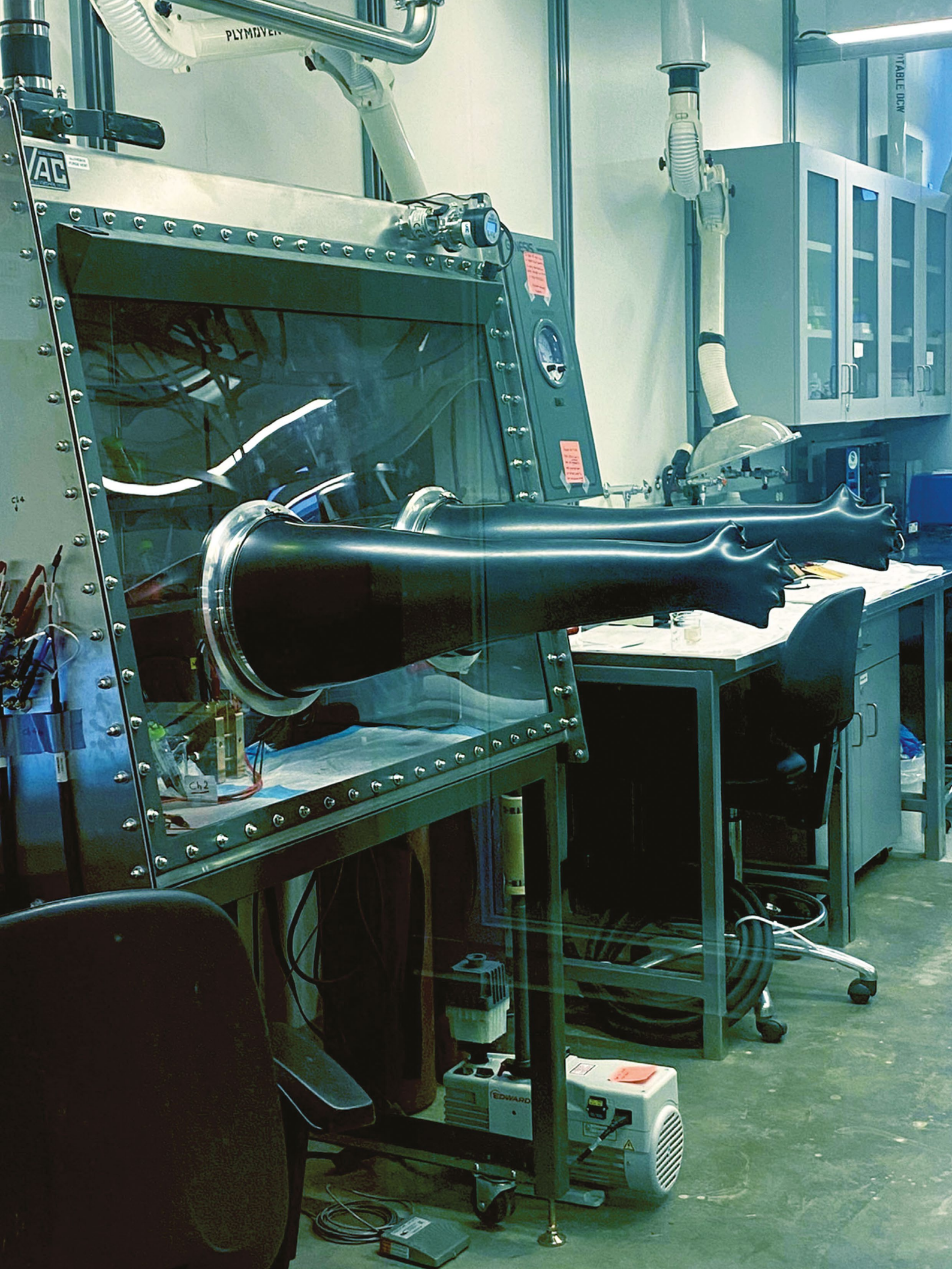


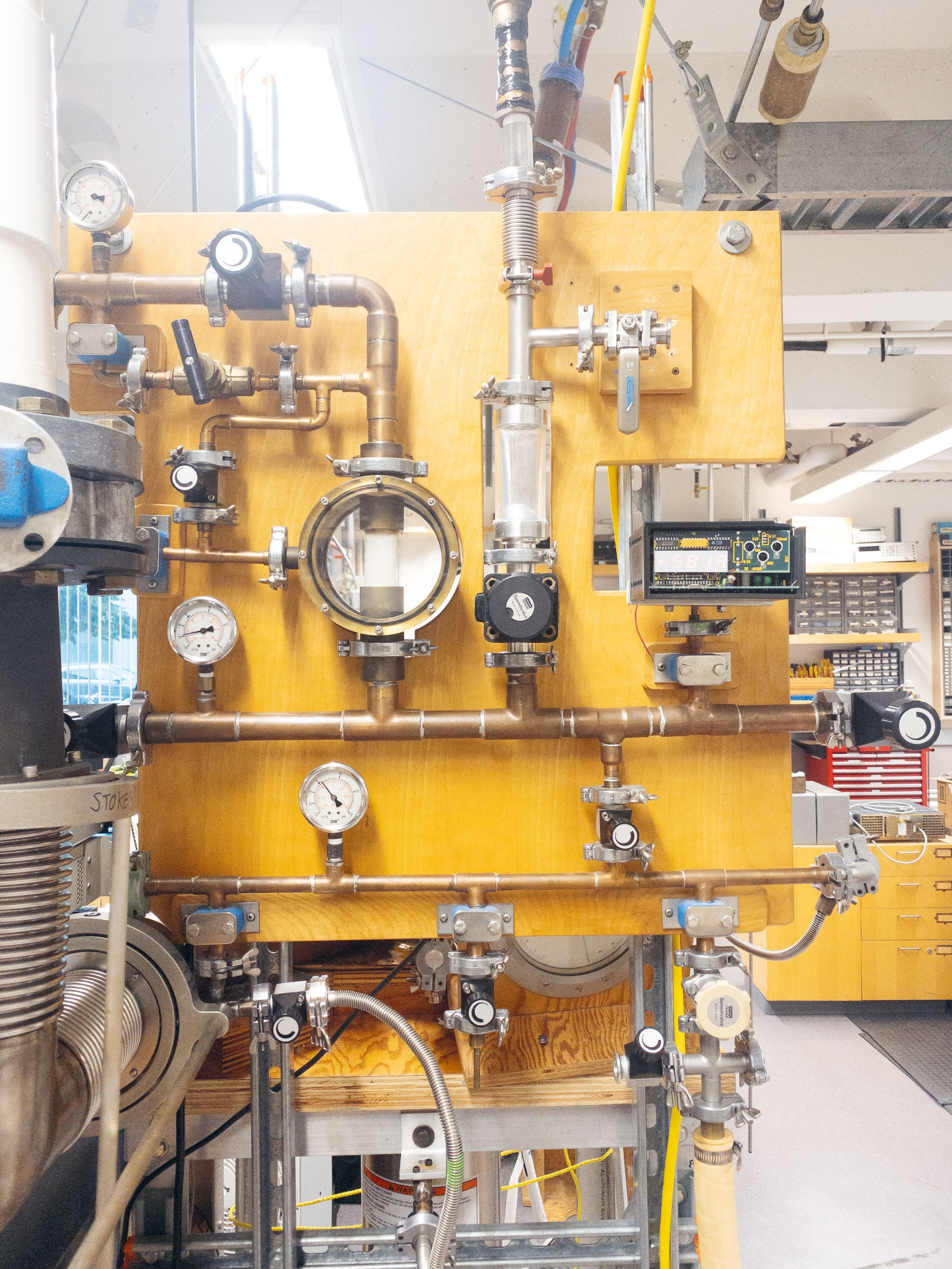


EXIT

FIRST AID KIT
FIRE EXTINGUISHER



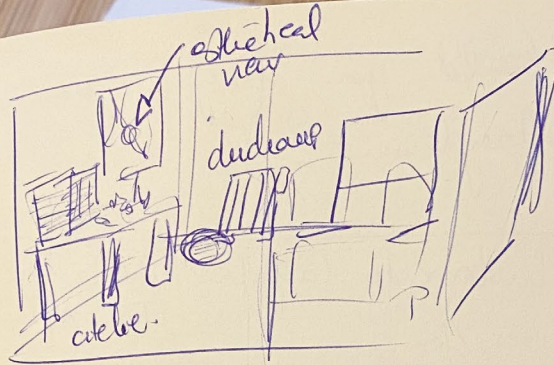




⊕ version faust
na (colb)

vailler sur maps

profil
entrée.
livre



créer un atelier
bndel. rentrer dans le
bazar et l'esprit de créat
d'un labo graphique.

→ Dans tous les labs il y a
des bureaux et des boks
remplies de chose (cable, vis...).

⊕ recep un vrai oscilloscope
des cartons etc.

STM1 - 10-pin Resistor Matrix
 A1 - J1. all are O.L. > 20MS2.

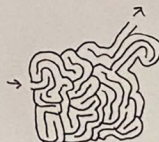
STM1 - GND & F2.

A1-J1 to F2. all O.L. > 20MS2 except for E1-F2 - 0.51K2.
 A1-J1 to GND. all O.L. > 20MS2.

Capacitance.

	F2 (nF)	
A1	3.6	3.7
B1	2.8	2.9
C1	2.8	3.0
D1	2.5	2.7
E1	0.6	2.9
F1	2.3	2.4
G1	2.3	2.4
	4.0	4.2
		3.0
J1	2.7	

	E2 (nF)	
A2	1.0	1.0
B2	1.0	1.0
C2	1.0	1.0
D2	0.9	0.9



By Tuning the position of E1 wire in. the short E1-F2 is removed.
 to make sure ~~the~~ no relative motion between E1 wire and magnet, I added a sheet
 of teflon on top of the magnet and then tightened the teflon support.

to increase the
 friction between
 magnet & teflon support.

$$C_{E1-F2} = 2.8 \text{ nF}$$

there didn't change.



SENSATION QUANTIQUE.

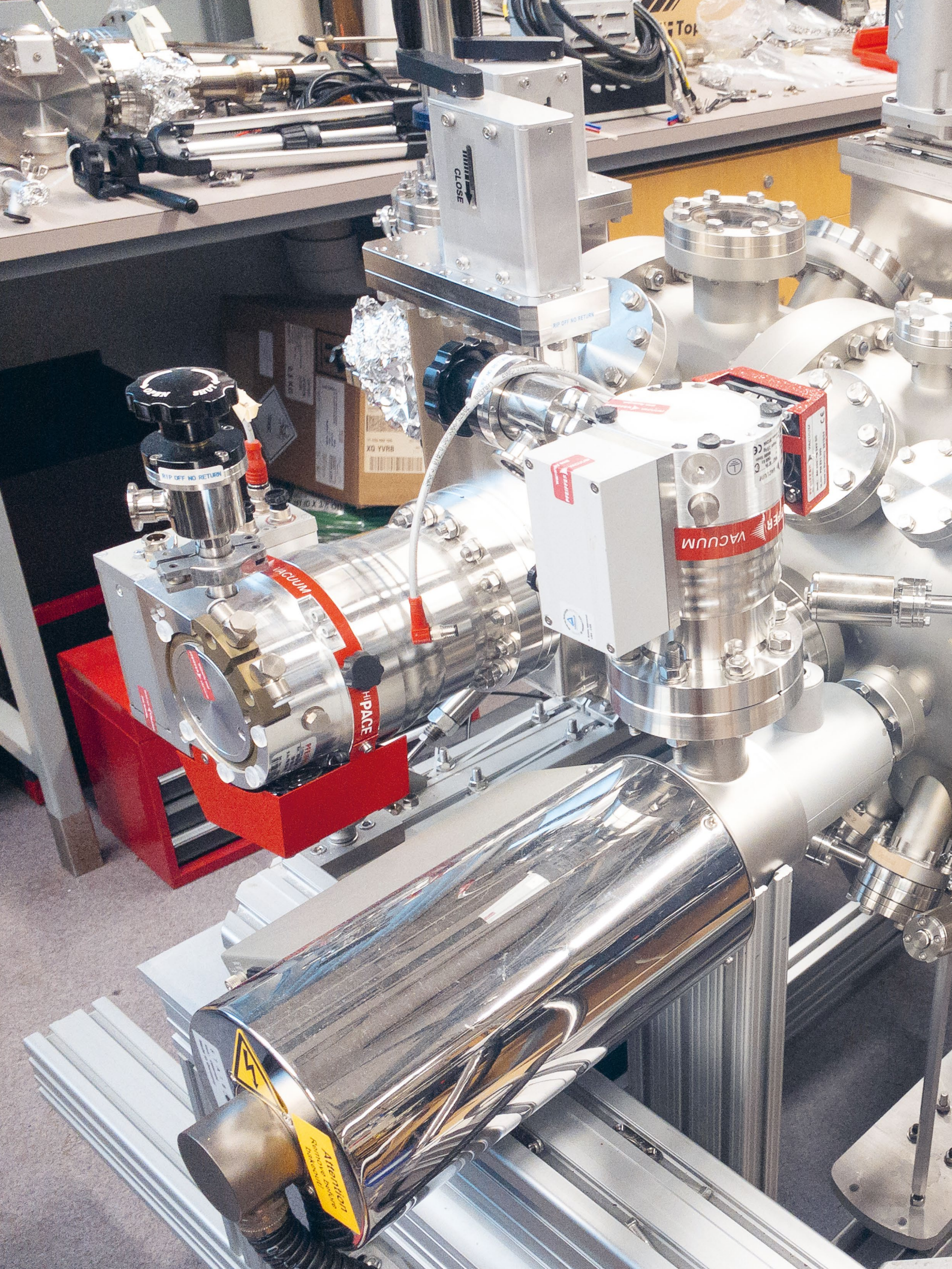
entremêlements & intrications.

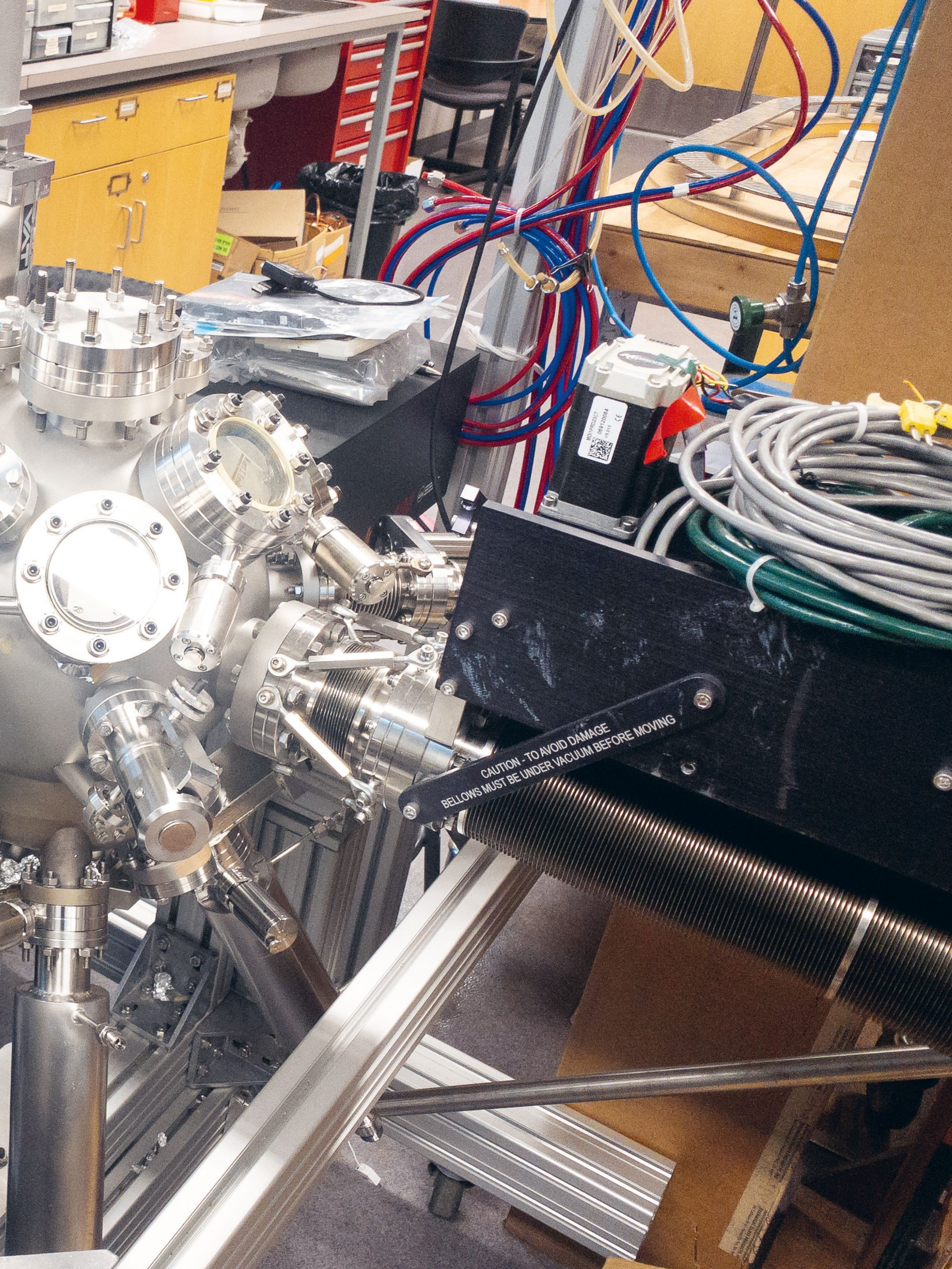
monde observé



observateurs.





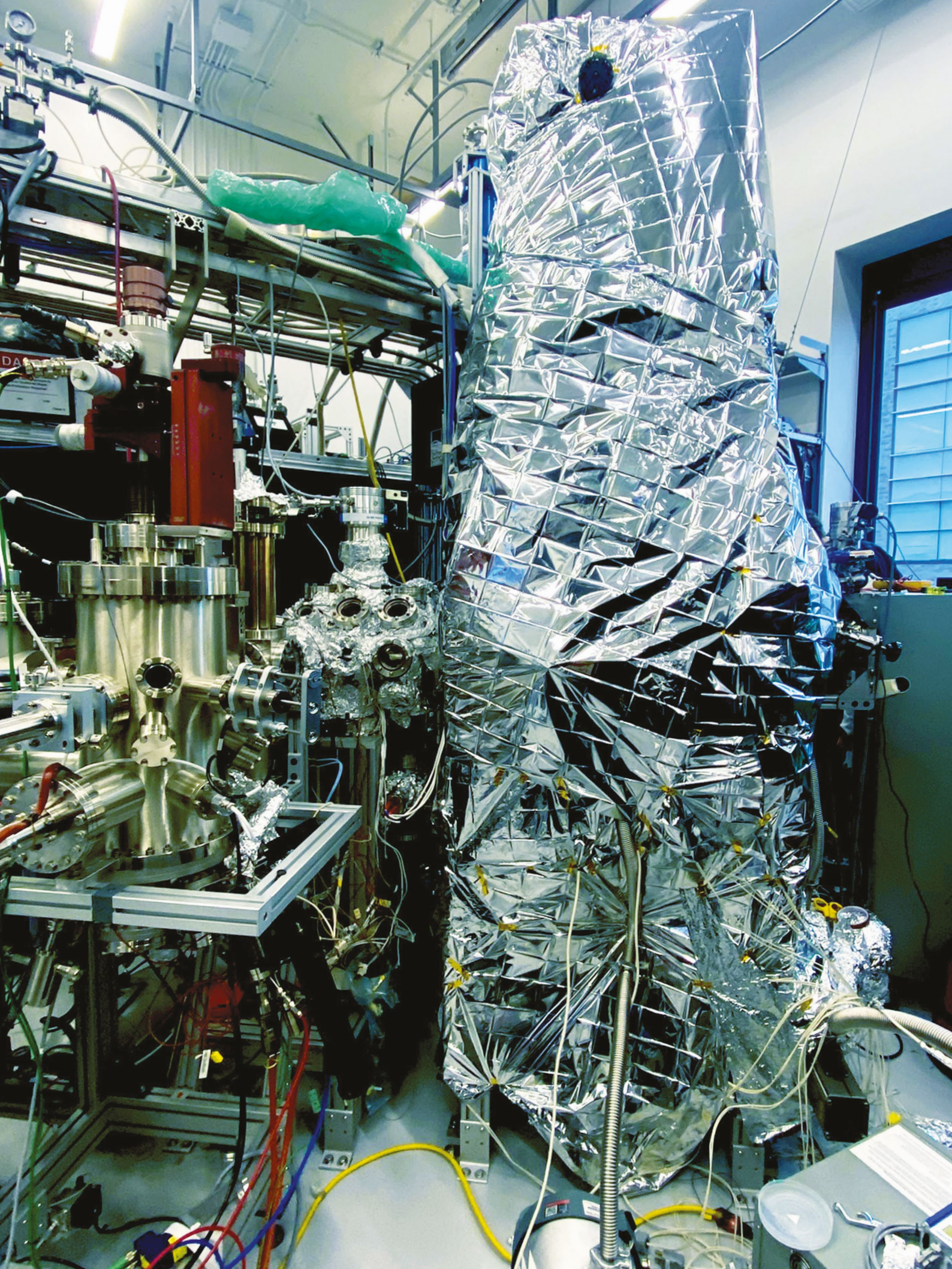












SCÉNOGRAPHIE ET CONCEPTION ARTISTIQUE

Lorsque l'on m'a invité à participer au projet d'exposition, j'ai immédiatement été captivé par le sujet et par cette association sensible entre l'art et la science. La physique quantique m'a toujours semblé être un domaine à la fois profondément abstrait et difficile à verbaliser. Dans mon esprit, je l'associe à la dimension métaphysique de l'art, à cette volonté de questionner la perception et la réalité cachée, en incitant à réfléchir sur les dimensions immatérielles ou invisibles du monde. Je ne cherche pas à savoir si ce rapprochement est légitime, mais c'est ainsi que je le perçois. Car au-delà de la difficulté à la définir avec des mots, la physique quantique alimente un imaginaire visuel collectif fascinant qui m'intrigue et m'inspire.

Mon rôle au sein du projet a consisté à concevoir les scénographies des expositions et de développer un ensemble d'installations artistiques. En collaboration avec l'artiste Caroline Delétoille, j'ai apporté un regard artistique complémentaire sur la finalisation de certaines de ses pièces, ainsi que sur la mise en espace de l'ensemble des œuvres.

Après avoir eu l'opportunité de visiter un laboratoire au sein du Collège de France, mon intention pour les scénographies était de définir un équilibre subtil entre le domaine de la physique quantique et les œuvres artistiques présentées. J'ai notamment introduit un vocabulaire formel adapté à une exposition d'art contemporain, tout en évitant une évocation trop littérale du laboratoire de physique quantique. Équilibre que nous avons notamment traduit à travers l'utilisation de la couverture de survie comme support artistique et scénographique.

Dans cette même perspective, pour la conception des trois installations, j'ai cherché à développer un design illustrant l'esthétique sensible et imaginaire que l'on peut retrouver dans l'espace de travail d'un chercheur en physique quantique et dans celui d'un artiste plasticien. À travers un jeu d'assemblages de matières et de structures, l'objectif était de créer des ensembles modulables, mettant en valeur l'idée que la recherche, qu'elle soit artistique ou quantique, est un processus en constante évolution.

Ma participation à ce projet m'a permis de poursuivre l'exploration des frontières entre espace scénique et installation plastique. J'ai pu explorer ma propre vision de la physique quantique, ainsi que ses qualités esthétiques et plastiques, en les transposant à mes propres intérêts, l'art et la scénographie.



Kevin Lebouvier

SCENOGRAPHY AND ARTISTIC DESIGN

When I was invited to participate in the exhibition project, I was immediately captivated by the subject and by this sensitive association between art and science. Quantum physics has always seemed to me to be a field that is both profoundly abstract and difficult to verbalize. In my mind, I associate it with the metaphysical dimension of art, with this desire to question perception and hidden reality, encouraging reflection on the immaterial or invisible dimensions of the world. I do not seek to know if this connection is legitimate, but that is how I perceive it. Because beyond the difficulty of defining it with words, quantum physics fuels a fascinating collective visual imagination that intrigues and inspires me.

My role in the project was to design the scenographies of the exhibitions and to develop a set of artistic installations. In collaboration with the artist Caroline Delétoile, I brought a complementary artistic perspective to the finalization of some of her pieces, as well as to the spatial arrangement of all the works.

After having the opportunity to visit a laboratory at the Collège de France, my intention for the scenographies was to define a subtle balance between the field of quantum physics and the presented artistic works. I notably introduced a formal vocabulary adapted to a contemporary art exhibition, while avoiding a too literal evocation of the quantum physics laboratory. This balance was notably translated through the use of the survival blanket as an artistic and scenographic medium.

In this same perspective, for the design of the three installations, I sought to develop a design illustrating the sensitive and imaginary aesthetics that can be found in the workspace of a quantum physics researcher and that of a visual artist. Through a play of material and structure assemblies, the objective was to create modular sets, highlighting the idea that research, whether artistic or quantum, is a constantly evolving process.

My participation in this project allowed me to continue exploring the boundaries between scenic space and plastic installation. I was able to explore my own vision of quantum physics, as well as its aesthetic and plastic qualities, by transposing them to my own interests, art and scenography.



ATOMES ET SOUVENIRS

La singularité du regard quantique peut être mise en évidence par un parallèle avec les souvenirs. À l'instar de nombreux souvenirs, l'appréhension des objets quantiques semble prendre sens dans le cadre de l'interaction que nous avons avec eux. De plus, tout comme les souvenirs, ces objets se transforment à mesure que nous les observons. Alors, quelle réalité se cache derrière ce monde que nous reconstruisons à travers notre regard? Quelle connaissance pouvons-nous en tirer?

En s'immergeant dans des souvenirs qui pourraient être les nôtres, se prendre à reconstituer la scène initiale, tout comme le physicien, face à ses expériences et ses équations, reconstruit une particule quantique. Que ce soit pour les souvenirs ou les particules, la

reconstitution se fait à partir d'observations partielles. L'inégalité de Heisenberg révèle également un flou fondamental au cœur du monde quantique : plus on mesure précisément la position d'une particule, plus sa vitesse devient incertaine, et vice versa. Cette incertitude est une réalité inhérente à la nature, où chaque observation façonne ce qui est, dissipant ce qui aurait pu être. Ainsi, chaque coup de pinceau, en tentant de saisir le souvenir, fait disparaître une partie de ses contours.

Les nuages peints sur des couvertures de survie rappellent l'univers du laboratoire de physique quantique, tout en évoquant les représentations actuelles de l'atome sous forme de nuage électronique.

ATOMS AND MEMORIES

The singularity of the quantum gaze can be highlighted by a parallel with memories. Like many memories, the apprehension of quantum objects seems to make sense in the context of our interaction with them. What's more, like memories, these objects change as we observe them. So what reality lies behind the world we reconstruct through our eyes? What can we learn from it?

By immersing ourselves in memories that could be our own, we catch ourselves reconstructing the initial scene, just as a physicist, faced with his experiments and equations, reconstructs a quantum particle. Whether for memories or particles, reconstruction is based on partial observations. Heisenberg's inequality also reveals a fundamental vagueness at the heart of the quantum

world: the more precisely we measure a particle's position, the more uncertain its velocity becomes, and vice versa. This uncertainty is an inherent reality of nature, where each observation shapes what is, dissipating what might have been. Thus, each brushstroke, in attempting to capture the memory, makes part of its outline disappear.

The clouds painted on survival blankets recall the world of the quantum physics laboratory, while evoking present-day representations of the atom in the form of an electronic cloud.









Pages précédentes :

À table. *Le bouquet de fleurs*, 75 × 105 cm

À table. *Le papier peint*, détail

À table. *Ils riaient tous deux*, 50 × 65 cm

Ci-contre : À table. *Le bouquet de fleurs*, détail

Ci-dessus : À table. *Le papier peint*, polyptique, 30 × 40 cm

Pages suivantes :

À table. *Les deux aînées sont devant le téléviseur*, 80 × 80 cm

À table. *Elle était assise à côté d'une dame plus âgée*, 80 × 100 cm







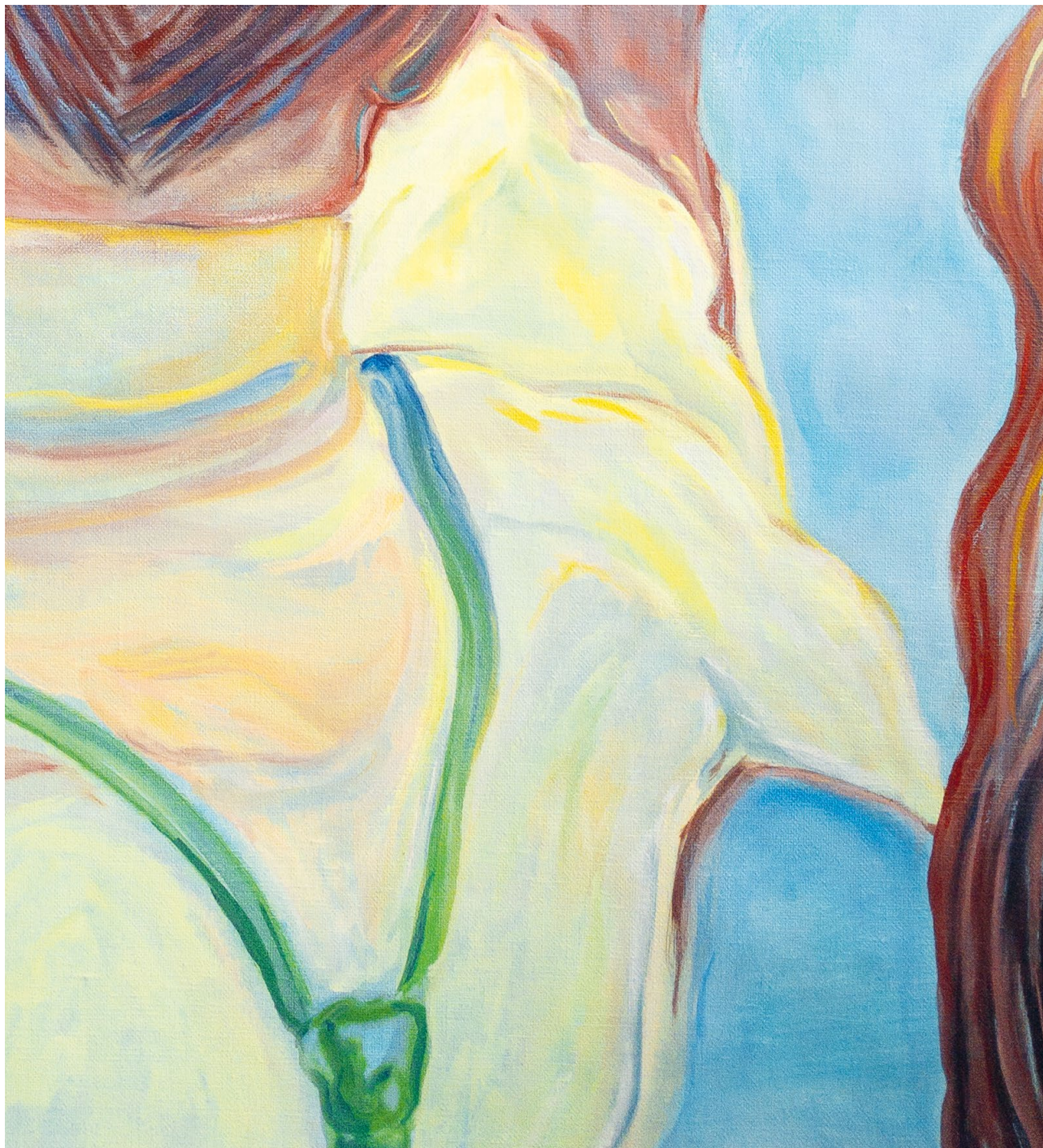


Pages précédentes, ci-dessus et ci-contre :
À table. Les deux aînées sont devant le téléviseur, détails









Pages précédentes :

À table. Ils s'étaient rassemblés autour d'elle, huile sur toile, 80 × 100 cm

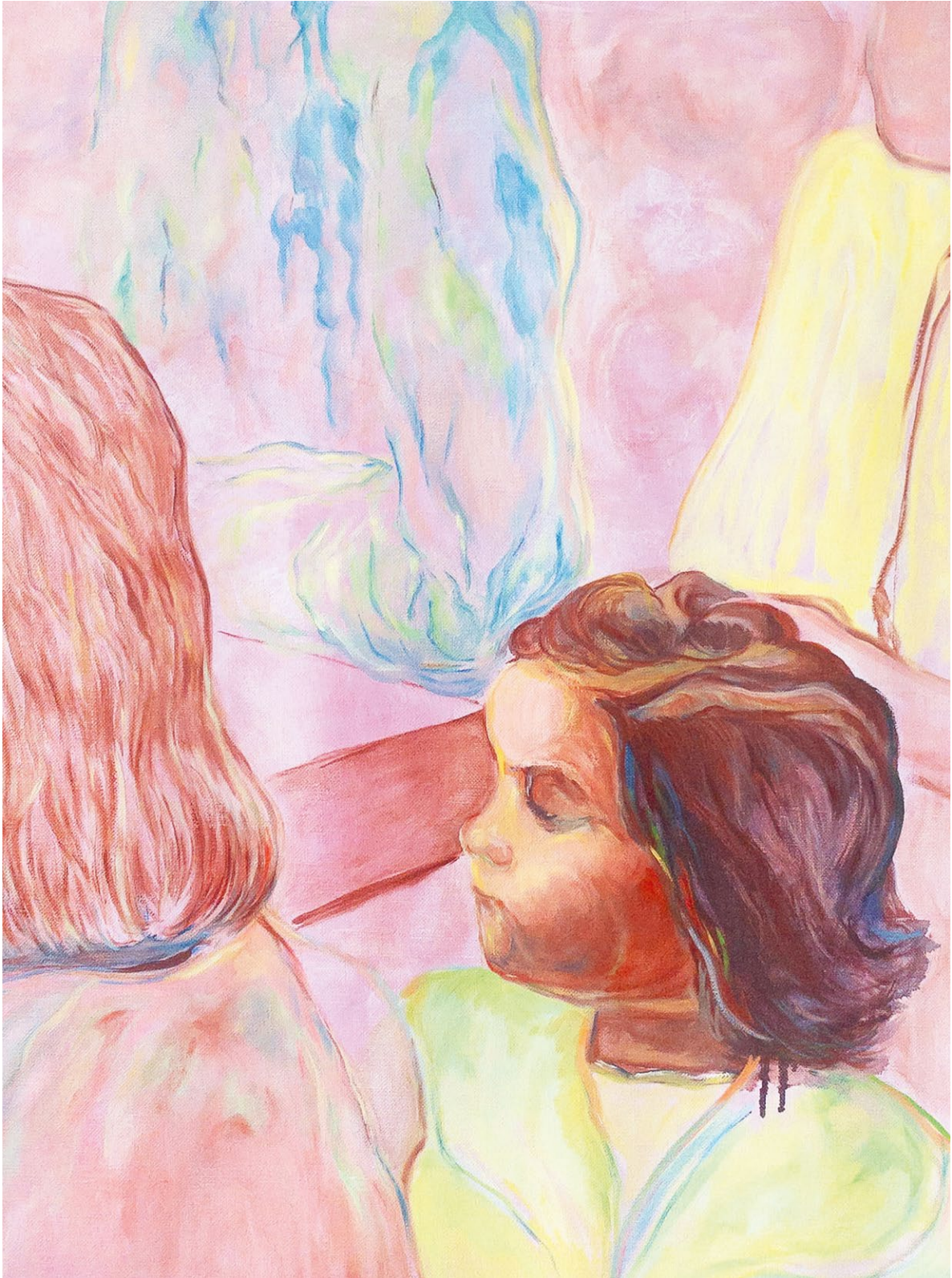
À table. La petite fille, huile sur toile, 60 × 73 cm

Ci-dessus : À table. Ils s'étaient rassemblés autour d'elle, détail

Ci-contre : À table. La petite fille, huile sur toile, 50 × 61 cm

Pages suivantes :

À table. À manger et à boire, huile sur toile, 74 × 106 cm









COLLABORATIONS ART+SCIENCE : CONVERSATION 2

Dialogue croisé entre Jules Grucker (physicien, Laboratoire Kastler Brossel) & Chadi Abo (producteur, réalisateur, spécialiste effets spéciaux, Hecat Studio).
Entretien mené par Céline Boisserie-Lacroix.

Jules : Je suis physicien au Laboratoire Kastler Brossel, un laboratoire de physique quantique qui s'intéresse principalement aux atomes froids et à l'optique quantique. Personnellement, je travaille sur l'hélium liquide, qui présente des propriétés importantes dues à la physique quantique. En ce moment, je mène des expériences de mesure de la vitesse du son dans ce fluide afin de mieux le comprendre.

Chadi : Je suis producteur et réalisateur. Je me suis aussi spécialisé dans les effets spéciaux, après avoir suivi une formation initiale en architecture. J'ai fondé mon studio de production, Hecat Studio, il y a bientôt quinze ans, et j'ai eu la chance de travailler pour des réalisateurs renommés. Lorsque j'écris mes propres films, je cherche à imaginer des mondes inspirés par la science-fiction, à recréer une réalité parallèle.

Jules : Un dialogue que j'aimerais avoir avec un artiste pourrait être le suivant. Je lui décrirais ma vision probablement idéalisée et caricaturale de ce que je pense être un artiste, puis je lui demanderais quelle est sa vision d'un scientifique. Cela devrait aboutir à des points de vue assez différents.

Pour commencer, je dirais que ce que nous avons en commun, artistes et scientifiques, c'est une façon de parler aux autres. Ma vision idéalisée d'un artiste, c'est quelqu'un qui arrive à partager aux autres ses émotions, que son œuvre corresponde bien à ce qu'il veut dire.

Chadi : J'ai souvent des réserves à me considérer comme un artiste dans la mesure où j'utilise beaucoup la science et la technique pour exprimer mon art. Si je me suis intéressé au dessin lorsque j'étais enfant, c'était comme échappatoire à une vie assez dure et monotone – je suis né et j'ai grandi en Syrie. Je ne cherchais pas l'émotion en particulier, mais plutôt une dimension logique, de conformité, car j'étais très technique. Je dessinais des voitures, des avions, des vaisseaux spatiaux, et j'ai vite été attiré par le monde de la science-fiction. Aussi, si pour Jules il est important de chercher l'émotion, c'est quelque chose que je commence à comprendre maintenant seulement.

Les questions autour de la réalité, du réalisme et de l'étrangeté me perturbent. Je me trouve souvent dans une position où je suis un émulateur de la réalité : je fais tout pour simuler la réalité, car autrement, les images que je crée évoquent la fameuse « uncanny valley¹ », cet endroit du cerveau qui nous dit que ce que nous voyons est dérangement, pas réel. C'est un point important pour moi, car aujourd'hui, on peut sympathiser bien plus facilement avec un smiley (juste deux points et une bouche) qu'avec une créature ou un être humain (bien) fait mais qui reste synthétique.

Jules : Pour moi, le mot de réalité me semble compliqué, car il peut avoir plusieurs significations selon les disciplines. Dans mon métier, ce que je vais appeler réalité, c'est le résultat d'une expérience, qu'il se matérialise sous la forme d'une image, d'un signal électrique, etc. Savoir comment l'interpréter, le comprendre, c'est une autre question. Quand tu parles de l'étrangeté de la physique quantique, cela me semble une étrangeté conceptuelle. Les concepts peuvent sembler bizarres, difficiles à imaginer, mais ils ne constituent pas un vrai problème pour moi, en tant que scientifique, car je m'en tiens aux résultats de mon expérience. D'autant que l'objectif de ma démarche, c'est d'inventer des théories qui traduisent cette expérience et permettent d'aboutir à ce résultat. Je suis très fortement contraint par cette réalité.

Chadi : De mon côté, je dirais que ma pratique est régie par deux sortes de réalités, que j'essaie de confronter l'une à l'autre. La première, la réalité « algorithmique » – je préfère ce terme à celui de scientifique, qui est un peu fort – constitue le fond des logiciels que j'utilise pour mes effets spéciaux. Il faut la respecter lorsque l'on simule un phénomène. La seconde réalité, tout aussi importante, est la réalité de l'artiste. Cette réalité captée par la caméra ignore la réalité algorithmique. J'ai eu l'honneur de travailler avec les sœurs Wachowski pour leur film *Speed Racer*. À chaque fois que je leur présentais une piste visuelle, elles me poussaient à détruire le réalisme, parfois, en s'appuyant sur des éléments aussi basiques que la friction d'un pneu sur le sol. Cela n'arrive qu'une fois dans la vie d'un artiste !

Jules : Le fait qu'il y ait une science établie, que tu appelles algorithmique, te permet de la contredire, de créer un monde réaliste car il s'appuie sur la science. Alors, est-ce que tu cherches à créer une science parallèle ? Auquel cas j'aurai quelques problèmes à te suivre !

Chadi : Je pense à la démarche de Christopher Nolan pour le film *Interstellar*. Il a certainement contribué à faire avancer les recherches visuelles sur les trous noirs. Il a travaillé avec des scientifiques pour créer sa propre vision de cette réalité scientifique. L'artiste, en ce sens, peut créer une sorte de vérité. D'un autre côté, lorsque l'on pense à des films comme *Retour vers le futur* ou *Contact*, des inventions impossibles à l'époque sont devenues réalité.

Jules : Pour moi, le trou noir de Nolan, cela reste la vision d'un trou noir par un artiste. On pourrait imaginer le trou noir de Miró, ou d'autres encore... Si je devais avoir la vision d'un trou noir, j'irais plutôt du côté des images fournies par des télescopes lors d'expériences scientifiques... même s'il en ressort une image floue beaucoup moins parlante².

Céline : Ces images artistiques peuvent-elles avoir une utilité pour les scientifiques ?

Jules : Est-ce qu'on en apprend plus sur les trous noirs grâce à celui de Nolan ? Je ne le sais pas, mais je dirais qu'on en apprend différemment. Le trou noir du scientifique va être analysé pour donner lieu à des courbes et des équations. À partir de cette substance, valider notre conception de grandes théories physiques. Le problème du trou noir de Nolan, c'est que je ne peux pas l'utiliser scientifiquement. Il a été créé par lui seul : je ne peux pas le reproduire ni tester le modèle sur lequel il repose. Pour autant, il alimente beaucoup de discussions, autant auprès des scientifiques et des artistes qu'auprès du grand public.

Céline : Que dire des images de l'infiniment petit ?

Chadi : On trouve beaucoup moins de choses narratives sur l'infiniment petit. Je pense à des crash-zooms³ comme dans le film *Spiderman*, où la caméra entre

dans le doigt d'un homme qui se transforme en sable. On entre dans son doigt, puis à l'intérieur de sa peau, et on agrandit jusqu'à arriver à l'atome. L'exemple inversé, regarder la taille incroyable de l'univers, est sûrement plus évocateur pour l'imagination populaire. On est beaucoup plus intéressés par le plus grand que par le plus petit. Mais le plus petit est vraiment intéressant, d'une manière qui est très dérangeante car on a beaucoup plus de mal à se l'imaginer.

Jules : Je ne sais pas bien me faire une image d'un atome et pourtant, j'en ai quelques-unes à montrer à mes étudiants. Je sais que ce ne sont pas de bonnes représentations car elles sont trop simplistes, mais elles sont utiles pour l'explication. Représenter l'atome comme une petite boule, c'est assez limité.

Chadi : Le cinéma est un art populaire, qui est lié d'une façon très directe à notre héritage visuel. Depuis la nuit des temps, nous avons été habitués à voir et être impressionnés par l'infiniment grand. C'est sûrement pour ça que l'on n'est pas habitués aux plus petites échelles. Nous ignorons qu'il y a un monde infiniment petit. Qu'est-ce qu'un atome ? Un pixel blanc qui tremble ?

Jules : Dans ta démarche, tu as besoin de la science, que tu veux justement questionner. Je vois une vraie fascination pour elle.

Chadi : Je ne peux pas écrire de scénario si je ne suis pas capable d'évaluer si c'est faisable ou non dans la réalité. Cela ne me fait pas rêver de rencontrer des vampires, des dragons ou des orques, car la science prouve qu'ils n'existent pas. Tout comme des films de science-fiction qui ne seraient pas réalistes.

Céline : À l'inverse, la science ne crée-t-elle pas de la fiction, des récits ?

Chadi : La science ne fait pas de narrations, tandis que c'est une chose importante pour l'artiste. On s'attend à ce que l'on explique ce que l'on veut dire, à travers nos créations. Je pense que cette question de la fiction revient aussi à des questions émotionnelles, comme l'a formulé Jules. Pour moi, il est important que la fiction crée une émotion – sûrement du rêve, de l'évasion, du fantasmagorique – à partir de la science, en créant des mondes possibles et plausibles.

Jules : La question du plausible est importante chez les scientifiques aussi. Surtout lorsque l'on interroge les lois scientifiques existantes, la dimension plausible d'une nouvelle théorie discutée entre en jeu. Il y a quelques années, une expérience a été menée au CERN, où une particule qui allait plus vite que la vitesse de la lumière a été mesurée⁴. Il s'est avéré que c'était une histoire de câble mal soudé. Cela nous a vraiment tous interrogés : ce résultat était-il plausible en l'état actuel des connaissances ? Dans le monde tel qu'il est conçu par les scientifiques, c'est impensable que quelque chose aille plus vite que la lumière. Mais un artiste peut vouloir concevoir un film avec des éléments qui vont plus vite que la lumière. Et cela peut questionner des scientifiques en retour.

Céline : Existe-t-il des films qui ne prennent pas la science pour sujet, mais où elle intervient au niveau de la démarche ou de la forme cinématographique même ?

Chadi : Oui, je pense à une séquence d'*Interstellar* où les personnages arrivent sur la nouvelle planète. Un vrai travail a été fait sur le tempo de la musique pour évoquer le fait que le temps s'écoule différemment sur chacune des planètes. Quand on voit le film, c'est émotionnel, c'est fort. On sent qu'il y a un changement de tempo, la musique est plus stressante. On comprend que les personnages ont passé 20 min sur cette planète, ce qui correspond à 40 ans sur Terre. Le film *Tenet*, aussi, est intéressant. Nolan a inventé une machine à remonter le temps. Il a expliqué qu'il a créé sa science, et il a pour cela trouvé une matière qui s'étire, où le temps revient en arrière. Il y a cette séquence avec une scène qui se

passer dans les deux mondes, une qui suit le temps actuel, et l'autre, qui se déroule dans le temps inversé. Elles sont filmées par la même caméra. On voit les deux mondes entrer en collision, et c'est la fin du film. C'est magnifique.

Jules : Plus précisément, comment intègres-tu la science pour créer tes effets spéciaux ?

Chadi : Je me rappelle d'une séquence que j'ai réalisée pour le deuxième *Matrix*. Le réalisateur voulait que la caméra entre dans des écrans télé et que l'on montre ce qui se passe à l'intérieur. On avait acheté des loupes pour voir ce qui se produit quand on s'approche au maximum d'un écran. Ce détail-là, nous l'avons questionné scientifiquement pour mieux le comprendre et essayer de le recréer.

Jules : Finalement, est-ce que tu préfères te contenter de simuler la réalité, ou plutôt, de créer une réalité indépendante ?

Chadi : Cela dépend des projets. On peut parfois laisser notre touche ! Pour le même *Matrix* auquel j'ai contribué, nous avons dû travailler une scène comportant des milliers d'images d'écrans. Nous avons décidé avec toute l'équipe d'insérer nos têtes dans ces écrans, comme il était question de création du monde. C'était notre signature, et les réalisateurs ont aimé. Donc oui, je propose aussi ma version de la réalité, en la retouchant un peu.

Céline : Qu'est-ce qu'un art de l'image comme le cinéma peut représenter pour les scientifiques ?

Jules : L'image, pour le scientifique, c'est un support d'investigation en tant que tel. Certains résultats d'expériences sont des images, comme des courbes par exemple. Dans mon travail, j'obtiens des images beaucoup moins jolies – ou du moins différentes – de celles que produit Chadi. Cela me rappelle des propos de Feynman, un scientifique que j'admire beaucoup⁵. Dans l'un de ses cours, il parle de l'arc-en-ciel, ce phénomène qui nous fascine tous, physiciens, peintres et rêveurs, et montre pour cela des courbes d'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Il pose alors cette question importante : ces courbes sont-elles belles comme un arc-en-ciel ? Pour un physicien, il s'agit d'une image de l'arc-en-ciel. Elle est très belle car elle a en elle la façon dont le physicien appréhende un arc-en-ciel. Il peut y voir une beauté incroyable car il y voit la décomposition de la lumière blanche sous certaines conditions. Il peut aussi y voir des rayons lumineux qui y entrent et qui en ressortent avec des angles différents. C'est une certaine image de l'arc-en-ciel. Cela m'a beaucoup interrogé étudiant, cette question de savoir comment partager cette image, sa beauté, aux non-physiciens.

Chadi : Les images ne sont pas que visuelles. Il y en a dans les textes, la poésie... Je comprends ce que tu veux dire. La courbe de Feynman, ce n'est pas que du visuel, il y a beaucoup d'informations dedans. Je regardais justement il y a quelques jours une interview d'un astronaute japonais connu. Sa quête, c'est de découvrir des supernovae. Il montrait des courbes à l'écran et d'un coup, quand il en a vu une avec un pic, il s'est mis à pleurer, presque hystériquement. Cela m'a impressionné et je me suis dit qu'il a vu quelque chose que je ne suis pas capable de voir.

Jules : Pour revenir à la question des images, lorsque je suis face à un tableau, je vais m'interroger sur ce qu'est cette image. Une fois, un collègue physicien a proposé de définir une image comme un tableau de chiffres. Mais lorsque je suis face à un tableau, est-ce juste un tableau de chiffres ? Qu'est-ce qui les différencie ? Peut-être que ce qui les différencie, c'est la relation des chiffres entre eux ? En tout cas pour un artiste, il y a sûrement quelque chose d'autre à penser.

Chadi : Au début de ma carrière, je codais des programmes. J'ai compris que l'image, ce n'est pas qu'un tableau de chiffres. Ce sont aussi trois couleurs mélangées, des formes, avec des nuances que l'œil ne peut apercevoir.

Jules : Je suis pour ma part un très mauvais programmeur. Pourtant, j'ai cette façon-là de parler à mon quotidien, une façon particulière, presque obsessionnelle, et c'est quelque chose que l'on partage sûrement. Et aujourd'hui, on commence à parler à des ordinateurs par le biais de notre propre langage, comme avec ChatGPT.

Chadi : L'intelligence artificielle, c'est un sujet brûlant dans mon domaine. Heureusement, il est facile de détecter une image produite par une IA. Pourtant, je trouve que l'IA dévoile aussi des choses très intéressantes. Les formes qu'elle produit évoquent des souvenirs de nos rêves. Si l'on vivait vraiment dans une simulation, l'IA serait-elle la partie qui produit les rêves ?

Notes

- 1 « Vallée de l'étrange » (Mori, 1970).
- 2 La première image d'un trou noir, produite par le projet Event Horizon Telescope, a été publiée en avril 2019.
- 3 Lorsque la caméra zoome ou dézoome rapidement d'un personnage ou un objet.
- 4 Expérience menée au CERN en 2011, mesurant la vitesse d'un neutrino.
- 5 Physicien américain de la seconde partie du xx^e siècle, connu pour sa contribution à la mécanique quantique.



ART+SCIENCE COLLABORATIONS: CONVERSATION 2

A Dialogue between Jules Grucker (Physicist, Kastler Brossel Laboratory) & Chadi Abo (Producer, Director, Special Effects Specialist, Hecat Studio). Interview conducted by Céline Boisserie-Lacroix.

Jules: I am a physicist at the Kastler Brossel Laboratory, a quantum physics laboratory mainly interested in cold atoms and quantum optics. Personally, I work on liquid helium, which presents important properties due to quantum physics. At the moment, I am conducting experiments to measure the speed of sound in this fluid to better understand it.

Chadi: I am a producer and director. I have also specialized in special effects after initially training in architecture. I founded my production studio, Hecat Studio, nearly fifteen years ago, and I have had the opportunity to work for renowned directors. When I write my own films, I seek to imagine worlds inspired by science fiction, to recreate a parallel reality.

Jules: A dialogue I would like to have with an artist could be the following. I would describe to them my probably idealized and caricatured vision of what I think an artist is, then I would ask them what their vision of a scientist is. This should lead to quite different points of view.

To start, I would say that what we have in common, artists and scientists, is a way of speaking to others. My idealized vision of an artist is someone who manages to share their emotions with others, ensuring that their work reflects well what they want to convey.

Chadi: I often have reservations about considering myself an artist insofar as I use a lot of science and technology to express my art. If I became interested in drawing when I was a child, it was as an escape from a rather hard and monotonous life—I was born and raised in Syria. I was not specifically looking for emotion but rather a logical dimension, of conformity, as I was very technical. I drew cars, planes, spaceships, and I was quickly attracted to the world of science fiction. Also, if for Jules it is important to seek emotion, it is something that I am only now beginning to understand.

The questions around reality, realism, and strangeness disturb me. I often find myself in a position where I am an emulator of reality: I do everything to simulate reality, otherwise the images I create evoke the famous “uncanny valley”¹, that place in the brain that tells us what we see is disturbing, not real. This is an important point for me, because today, we can sympathize much more easily with a smiley (just two dots and a mouth) than with a creature or a human being (well) made but which remains synthetic.

Jules: For me, the word reality seems complicated because it can have several meanings depending on the disciplines. In my field, what I will call reality is the result of an experiment, whether it materializes in the form of an image, an

electrical signal, etc. Knowing how to interpret it, to understand it, is another question. When you talk about the strangeness of quantum physics, it seems to me to be a conceptual strangeness. The concepts may seem bizarre, difficult to imagine, but they do not constitute a real problem for me, as a scientist, because I stick to the results of my experiments. Moreover, the goal of my approach is to invent theories that translate this experiment and lead to this result. I am strongly constrained by this reality.

Chadi: For my part, I would say that my practice is governed by two kinds of realities, which I try to confront with each other. The first, the “algorithmic” reality—I prefer this term to scientific, which is a bit strong—constitutes the foundation of the software I use for my special effects. It must be respected when simulating a phenomenon. The second reality, just as important, is the reality of the artist. This reality captured by the camera ignores the algorithmic reality. I had the honor of working with the Wachowski sisters for their film *Speed Racer*. Every time I presented them with a visual track, they pushed me to destroy realism, sometimes by relying on elements as basic as the friction of a tire on the ground. This happens only once in the life of an artist!

Jules: The fact that there is an established science, which you call algorithmic, allows you to contradict it, to create a realistic world because it is based on science. So, are you trying to create a parallel science? In which case I will have some difficulty following you!

Chadi: I think of Christopher Nolan’s approach for the film *Interstellar*. He certainly helped advance visual research on black holes. He worked with scientists to create his own vision of this scientific reality. The artist, in this sense, can create a kind of truth. On the other hand, when we think of films like *Back to the Future* or *Contact*, inventions that were impossible at the time have become reality.

Jules: For me, Nolan’s black hole remains the vision of a black hole by an artist. One could imagine the black hole of Miró, or others still... If I had to have a vision of a black hole, I would rather go towards the images provided by telescopes during scientific experiments... even if it results in a much less eloquent blurry image².

Céline: Can these artistic images be useful for scientists?

Jules: Do we learn more about black holes thanks to Nolan’s? I do not know, but I would say that we learn differently. The scientist’s black hole will be analyzed to give rise to curves and equations. From this substance, validate our conception of great physical theories. The problem with Nolan’s black hole is that I can’t use it scientifically. It was created by him alone: I can’t reproduce it or test the model on which it is based. However, it generates a lot of discussions, among scientists and artists as well as the general public.

Céline: What about images of the infinitely small?

Chadi: There are far fewer narrative elements about the infinitely small. I think of crash-zooms³ like in the *Spider-Man* movie, where the camera enters the finger of a man who turns into sand. We enter his finger, then inside his skin, and zoom in until we reach the atom. The reverse example, looking at the incredible size of the universe, is surely more evocative for popular imagination. We are much more interested in the larger than the smaller. But the smaller is really interesting in a way that is very disturbing because it is much harder to imagine.

Jules: I can’t quite visualize an atom, yet I have a few images to show my students. I know they are not good representations because they are too simplistic, but they are useful for explanation. Representing the atom as a small ball is quite limited.

Chadi: Cinema is a popular art, which is very directly linked to our visual heritage. Since the dawn of time, we have been used to seeing and being impressed by the infinitely large. That's probably why we are not used to the smaller scales. We ignore that there is an infinitely small world. What is an atom? A trembling white pixel?

Jules: In your approach, you need science, which you precisely want to question. I see a real fascination for it.

Chadi: I can't write a screenplay if I'm not able to evaluate whether it is feasible in reality or not. It doesn't make me dream to meet vampires, dragons, or orcs, because science proves they don't exist. Just as science fiction movies that wouldn't be realistic.

Céline: On the contrary, doesn't science create fiction, stories?

Chadi: Science doesn't do storytelling, whereas it's an important thing for the artist. We are expected to explain what we mean through our creations. I think this question of fiction also comes back to emotional questions, as Jules formulated. For me, it's important that fiction creates an emotion—surely of dreams, escapism, the phantasmagorical—from science, by creating possible and plausible worlds.

Jules: The question of plausibility is important for scientists too. Especially when questioning existing scientific laws, the plausible dimension of a new discussed theory comes into play. A few years ago, an experiment was conducted at CERN, where a particle that traveled faster than the speed of light was measured.⁴ It turned out to be a matter of a poorly soldered cable. It really made us all question: was this result plausible given the current state of knowledge? In the world as conceived by scientists, it is unthinkable that anything could travel faster than light. But an artist may want to create a film with elements that go faster than light. And that can in turn question scientists.

Céline: Are there films that do not take science as a subject but where science plays a role in the approach or even the cinematic form itself?

Chadi: Yes, I think of a sequence in *Interstellar* where the characters arrive on the new planet. A lot of work was done on the tempo of the music to evoke the fact that time passes differently on each of the planets. When we watch the film, it's emotional, it's powerful. We feel that there is a change in tempo, the music is more stressful. We understand that the characters spent 20 minutes on this planet, which corresponds to 40 years on Earth.

The film *Tenet* is also interesting. Nolan invented a time machine. He explained that he created his own science, and for that, he found a material that stretches, where time goes backward. There is this session with a scene happening in both worlds, one that follows the current time, and the other, which unfolds in the inverted time. They are filmed by the same camera. We see both worlds collide, and it's the end of the film. It's magnificent.

Jules: More precisely, how do you integrate science to create your special effects?

Chadi: I remember a sequence I did for the second *Matrix*. The director wanted the camera to enter TV screens and show what was happening inside. We bought magnifying glasses to see what happens when we get as close as possible to a screen. We scientifically questioned this detail to better understand it and try to recreate it.

Jules: Finally, do you prefer to simply simulate reality, or rather, to create an independent reality?

Chadi: It depends on the projects. We can sometimes leave our mark! For the same *Matrix* I worked on, we had to create a scene with thousands of screen images. We decided with the whole team to insert our heads into these screens, as it was a question of creating the world. It was our signature, and the directors loved it. So yes, I also propose my version of reality, by retouching it a little.

Céline: What can an art of the image like cinema represent for scientists?

Jules: The image, for the scientist, is an investigative medium in itself. Some experimental results are images, like curves for example. In my work, I get images much less beautiful—or at least different—from those produced by Chadi. It reminds me of the words of Feynman, a scientist I greatly admire.⁵ In one of his lectures, he talks about the rainbow, a phenomenon that fascinates us all, physicists, painters, and dreamers, and shows curves of light intensity as a function of wavelength. He then asks this important question: are these curves as beautiful as a rainbow? For a physicist, it is an image of the rainbow. It is very beautiful because it embodies the way a physicist apprehends a rainbow. He can see an incredible beauty in it because he sees the decomposition of white light under certain conditions. He can also see light rays entering it and exiting it at different angles. It's a certain image of the rainbow. This question of how to share this image, its beauty, with non-physicists puzzled me a lot as a student.

Chadi: Images are not just visual. They are in texts, poetry... I understand what you mean. Feynman's curve is not just visual; it contains a lot of information. Just a few days ago, I was watching an interview with a well-known Japanese astronaut. His quest is to discover supernovae. He was showing curves on the screen, and suddenly, when he saw one with a peak, he started crying, almost hysterically. It impressed me, and I thought he saw something that I am not capable of seeing.

Jules: To return to the question of images, when I am facing a painting, I will question what this image is. Once, a physicist colleague suggested defining an image as a table of numbers. But when I am facing a painting, is it just a table of numbers? What differentiates them? Maybe what differentiates them is the relationship between the numbers? In any case, for an artist, there is surely something else to consider.

Chadi: At the beginning of my career, I was coding programs. I understood that the image is not just a table of numbers. It is also three mixed colors, shapes, with nuances that the eye cannot perceive.

Jules: I am a very bad programmer myself. However, I have this particular way of speaking to my daily life, almost obsessively, and it is something we surely share. And today, we are starting to talk to computers through our own language, like with ChatGPT.

Chadi: Artificial intelligence is a hot topic in my field. Fortunately, it is easy to detect an image produced by AI. However, I find that AI also reveals very interesting things. The forms it produces evoke memories of our dreams. If we really lived in a simulation, would AI be the part that produces dreams?

Notes

- 1 “Uncanny Valley” (Mori, 1970)
- 2 The first image of a black hole, produced by the Event Horizon Telescope project, was published in April 2019.
- 3 When the camera quickly zooms in or out on a character or an object.
- 4 An experiment conducted at CERN in 2011, measuring the speed of a neutrino.
- 5 American physicist from the second half of the 20th century, known for his contribution to quantum mechanics.

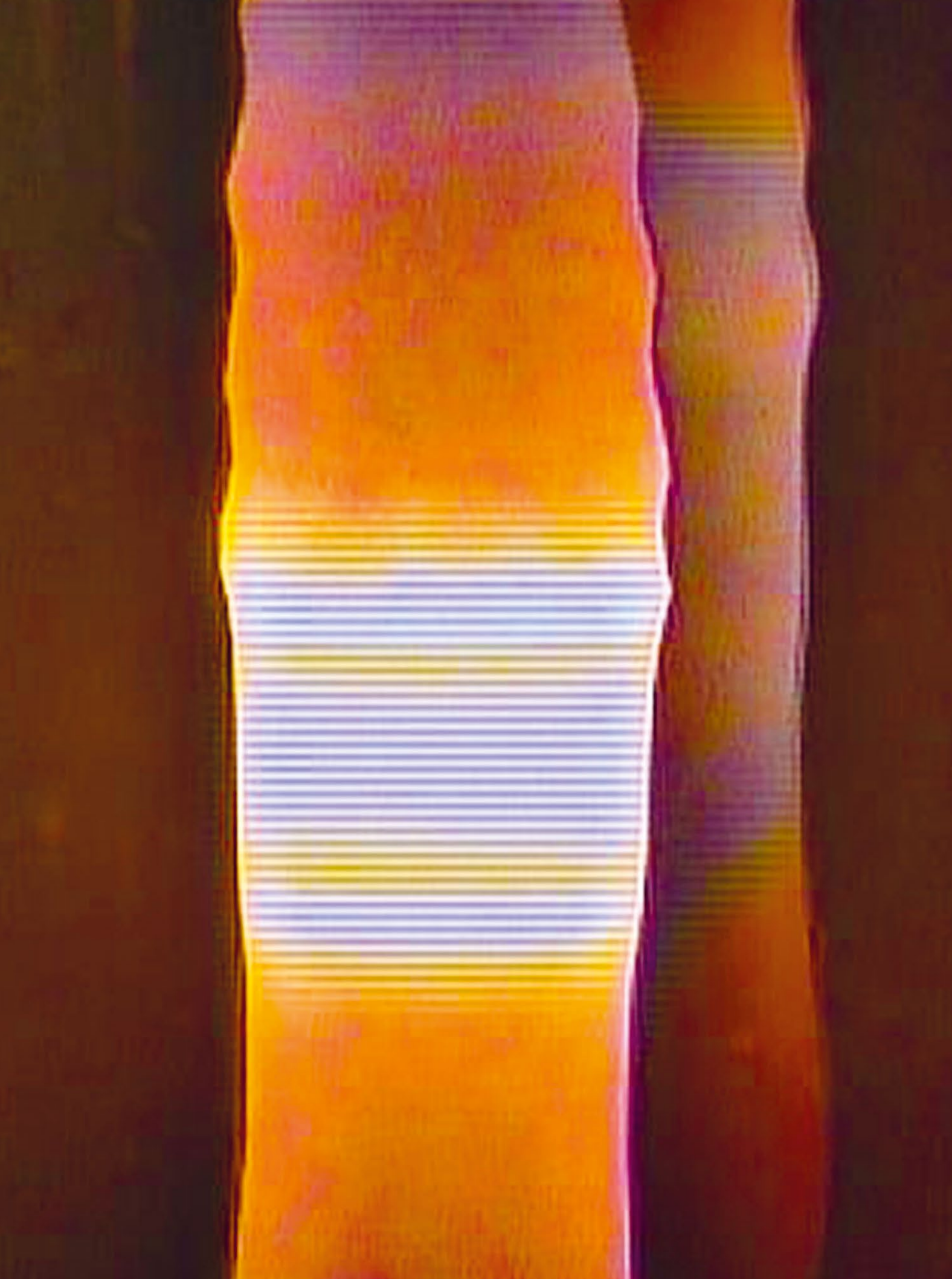


Voir le film / Watch the film

...ity and our understanding of it. Highly mathematical, it deals with objects that are ordinarily beyond our sense
... and knowledge - The classical interpretation, known as the Copenhagen interpretation, constructs it—meaning it appears
... quantum objects and memories. Regarding memories, Bohr's process is a process of construction. Bohr's process is a process of construction.

QUANTUM SENSATION

[illegible]



Les deux textes suivants ont été écrits en parallèle. Ils partagent des observations faites au même moment et avec un objectif similaire, mais dans des langues différentes – celles que je parle et dans lesquelles je pense régulièrement, chacune apportant une voix et une perspective distinctes.

The two following texts were written in parallel. They share observations made at the same time and with a similar purpose, but in different languages—the two that I speak and think regularly, lending each a different voice and perspective.

Max-Louis Raugel

NOTE SUR LA COMPOSANTE SONORE DE L'EXPOSITION

J'aimais beaucoup les mathématiques et la physique quand j'étais au lycée et ma pratique sonore tire son énergie des mêmes racines – une pensée intuitive abstraite, une relation au détail et à la nature.

Du coup, je me pose souvent la question du rapport entre l'intellect et la sensibilité – à la fois au niveau de la perception, mais aussi en termes de notre expérience et de la relation qu'on entretient à l'universel. Les sciences permettent d'étudier la nature et la réalité physique, mais les arts permettent aussi d'en prendre conscience, à différents niveaux d'incarnation : en tant que sujet, en tant que membre du règne animal, et en tant que corps.

Par exemple, le sentiment tragique peut nous relier à l'éternité et à une forme de vérité en passant par des états agités et troubles. Cette vision indirecte, comme de voir à travers de la buée, nous fait percevoir le monde comme rêve et comme changement.

Au contraire, un travail plus méditatif et précis nous positionne au-delà de notre ego et nous permet de percevoir dans le temps présent, en détail et avec sérénité. Mais cette expérience est du même coup vidée de son poids, très légère, et en quelque sorte étrangère à la communication et au temps.

Dans une approche artistique, les questions de la solitude ou de la sociabilité sont récurrentes. La musique a toujours été un art populaire, tout en entretenant des liens directs, profonds avec l'esprit, et notamment avec l'esprit scientifique, les mathématiques, la physique et désormais l'informatique. C'est ce qui me plaît beaucoup dans ce médium.

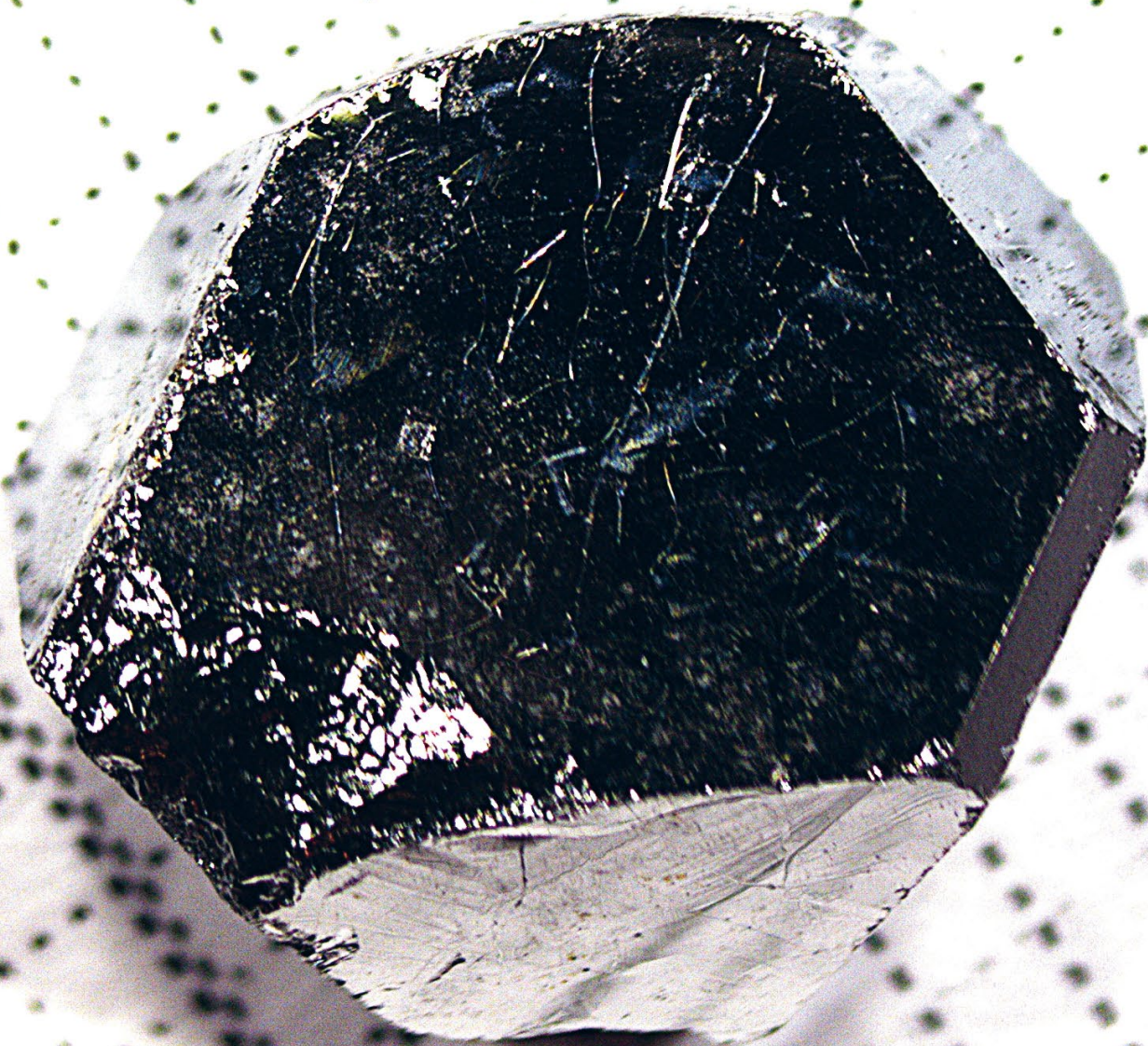
Pour ce projet, j'ai voulu coder des phénomènes audios à partir d'idées qui me sont venues suite à des conversations avec des scientifiques dans des laboratoires de physique quantique à Paris et Vancouver.

J'utilise un langage informatique (Supercollider) qui m'a permis d'expérimenter avec le passage de notre seuil de perception aux alentours de 20Hz, lorsqu'une pulsation devient si rapide que nous percevons une tonalité. Une multitude chaotique devient alors une texture ou un bruit continu – comme en physique, une même réalité peut se manifester de différentes manières selon l'échelle d'observation, en particules distinctes ou en onde continue par exemple. J'ai pu appliquer cette expérience sur des grains sonores, synthétisés ou échantillonnés à différentes hauteurs et temporalités selon des nuages de probabilités.

En parallèle, j'ai revu une large archive d'enregistrements afin d'y sélectionner des éléments qui correspondent au projet, provenant de centaines de sessions d'enregistrement. Ce processus a été assez intuitif, influencé par le sujet ainsi que par l'esthétique visuelle globale de l'exposition. J'ai enfin assemblé ces différents éléments, et surtout posé les premières notes et nappes harmoniques, sur la base du ressenti. Ce sont des catalyseurs profonds de notre expérience sensible du son.

Les découvertes en physique quantique peuvent servir d'exemple ou de muse. On parle de particules qui sont aussi des vibrations, d'électrons qui sont un nuage de probabilités. Qu'en est-il de la différence entre un objet et ce qui est vivant? Comment passe-t-on de la matière à la vie, à un organisme biologique? Je suis très curieux de la circulation de ces concepts et de leur traduction dans le domaine du vivant, à la fois dans les arts mais aussi en théorie de l'information, en biologie ou en philosophie.

J'espère que cette exposition pourra contribuer à éveiller la curiosité et la sensibilité du public à un sujet encore magique – en évidence contradictoire avec les lois de notre réalité à plus grande échelle. Et j'espère ainsi que nous pourrions partager un peu de l'attention que nous y mettons chacun.e aux petites choses qui nous composent.



Max-Louis Raugel

NOTE ON THE SOUND COMPONENT OF THE EXHIBITION

The night I was offered to participate in this show I stayed up late thinking and woke up before dawn. I have always been curious about science—going into detail, abstract logic and the deep relation to nature that goes with it.

As a child, I particularly enjoyed the maths classes for instance. They take a grip on you, you don't know what's making your mind work its way through. In the end you're also just *feeling* what's right, like a game, based on rules and axioms on a bottom-most layer that you also have to accept from intuition.

Back then I wanted to study astrophysics, until one day I realised that all I had in mind was the stars and cosmos, not really the equations, diagrams and lab atmosphere. That same day I also found out that i could 'see' things with my eyes closed, either imagined or remembered, quite clearly, and I was drawn to that possibility—the life of the senses and imagination. I thought of it as an empirical science—to seek out from perception and feeling rather than mediated through a symbolic language.

This brings me to the title of the show “Sensation Quantique” and its multidisciplinary nature. It's an art show on a scientific subject and with a scientific committee. It's an immersive sensorial experience about phenomena too small to even touch. This all raises questions about how ideas can be communicated and translated across disciplines as well as the relationship between logic and sensuality.

As a part of a research-creation project, we are a team of scientists, researchers and artists. We got to meet each other in order to seek common inspiration and dialogue, which is in itself immensely valuable. The line is often difficult to cross as these fields are highly specific. Yet at the root they are all expressions of our human curiosity, our desire to probe the world around us. I feel that there is something deeply meaningful about connecting these communities that deal with the unknown and depend on moments of research and experimentation, often without utilitarian concerns.

Perhaps the aim is not only to learn about physics, or to be entertained by images and sound—perhaps it has to do instead with mystery, with engaging with a subject and material that feels alive, elusive, at the bottom or

our living fabric—something which isn't fully understandable but slowly reveals itself, audible in murmurs and promises, and which we are paying homage to. Perhaps it has to do with accepting uncertainty.

For a moment I hope you might sense how much larger and surprising the world really is, and maybe you'll reset somewhere on a personal level. As you're reading this you may have other thoughts running in parallel, an inner monologue or something less constructed – fleeting ideas and desires which may seem unobservable or hard to catch. It's never just what we think on the surface, and there is much to learn in looking beyond.

SALLE

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi$$

15h à 16h

Caroline Delétoille

JOURNAL DE BORD

Journal de bord de résidences
quantiques. Les observateurs
observés. Brèves de laboratoire.

Diary of Quantum Residencies:
The Observers Observed.
Laboratory Tidbits.

G. doit lâcher prise cette semaine, laisser les autres le faire.

G. must let go this week, let others do it.

Cette semaine :

- TA:
- envoyer un message à Samir ??
 - commencer à faire le décompte des heures pour le mid-term
 - faire les slides tuto 5.
 - répondre Slack.

- Recherche:
- relecture + références (surtout laconch).
 - ~~vérifier stat. Reed Miller avec le gubik out?~~
 - se concentrer là dessus et pas sur le nouveau projet.
 - Committee meeting Oct 31
 - ↳ commencer semaine pro.
 - ↳ Supervisory expectations document.

- GSA:
- vendredi après-midi réserver Thea
 - avant ça s'assurer de la date avec les autres.
 - avoir la prochaine rev à tous
 - ↳ besoin d'un autre VP internal
 - RCU avec Nic pour finance → et coffee hour.

- Peso:
- Réserver camping Janning.
 - Tobino → laisser prise, laisser les autres le faire.
 - trouver du temps avec Clem pour parler du voir.

La recherche du vide. En physique quantique, les chercheurs passent leur temps à aspirer la poussière pour faire le vide. J'ai parfois eu l'impression qu'un doctorat en aspirateur était un pré-requis pour la recherche quantique.

The Search for the Void. In quantum physics, researchers spend their time vacuuming dust to create a void. I sometimes felt that a PhD in vacuuming was a prerequisite for research in this field.

Rotate in $\hat{x}$, $\hat{y}$, then $\hat{z}$
(Easier for in-plane rot.)

$$P_{0^\circ}: [0, \frac{\pi}{2}, 0]$$

$$P_{95^\circ}: [0, \pi, \frac{\pi}{4}]$$

$$T_{0^\circ}: [\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 0]$$

$$T_{90^\circ}: [\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 0]$$



De l'importance des canards dans les labos.
Lorsque l'on a un problème en informatique, on
invoque le canard pour débloquer la situation.

The Importance of Ducks in Labs. When there's
a problem in computing, a duck is invoked to
unblock the situation.





J. espère qu'en faisant interagir des artistes et des scientifiques, un jour, une idée naîtra, et qu'une découverte scientifique majeure en sortira.

J. hopes that by making artists and scientists interact, one day an idea will be born, and a major scientific discovery will come out of it.

* RF2 3k52

• Agilent 10V

7V

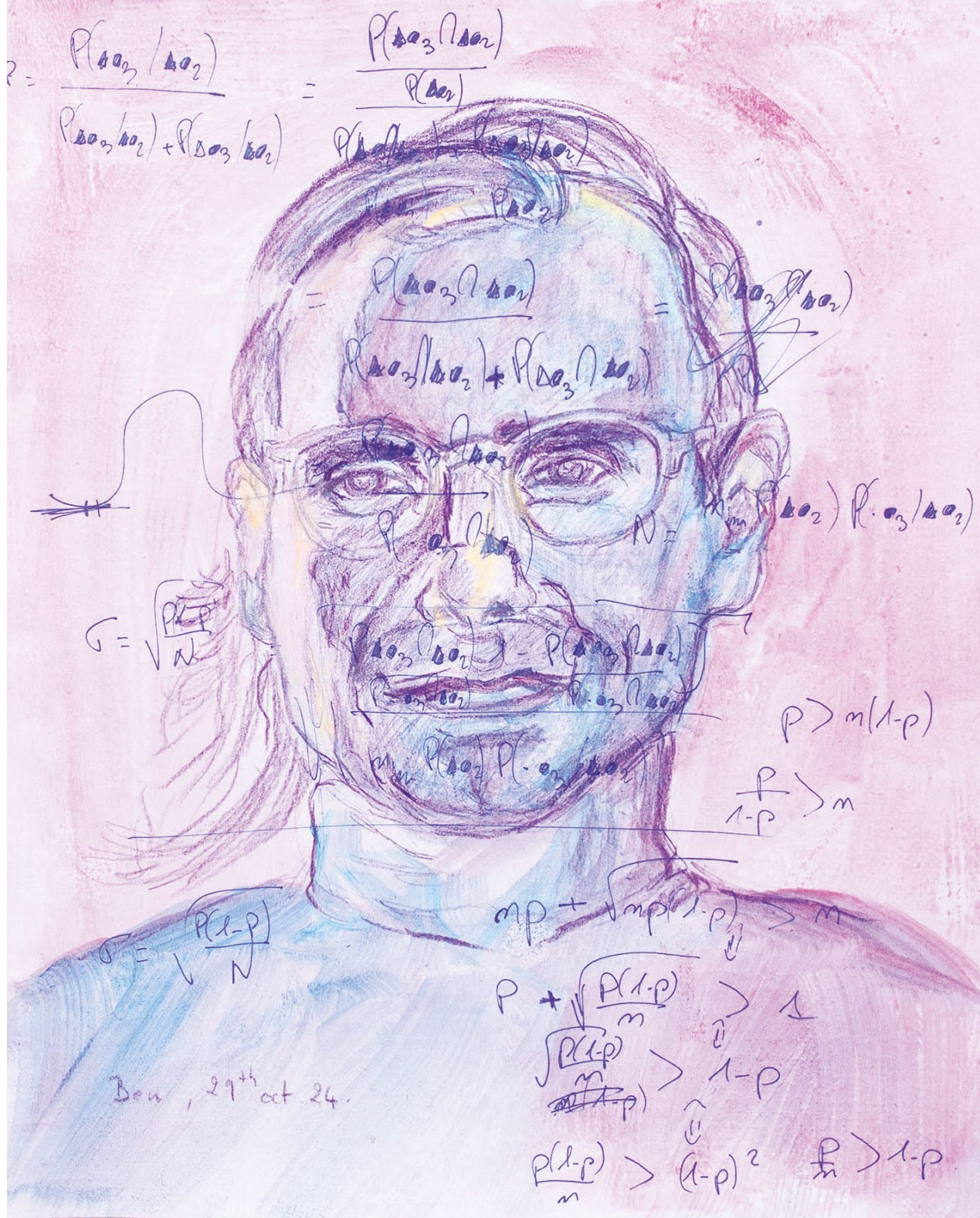
5V

3V

10	8.77	8.77	07.20	-0.07
9.5	8.43	8.43	6.93	-1.50
9	7.97	7.97	6.57	-1.40
8.5	7.60	7.60	6.20	-1.40
8	7.10	6.93	6.20	-0.90
7.5	6.60	6.43		
7	6.10	5.77	5.27	-0.83
6.5	5.60	5.27		
6	4.77	4.60	4.10	-0.67
5.5	4.10	3.77		
5	3.43	3.27	2.93	-1.50
4.5	2.60	2.43	2.10	-0.57
4	1.77	1.60	1.27	-2.07
3.5	0.60	0.10	0.27	-2.57
3	-0.57	-0.87	-0.97	-3.40
2.5	-2.07	-2.07	-2.23	-4.57
2	-3.90	-3.73	-3.73	-6.07
1.5	-6.40	-6.23	-5.90	-8.23
1	-9.40	-9.57	-9.40	-12.23
0.5	-15.73	-15.40	-15.23	-27.23
0	-30.07	-30.73	-32.57	-38.4

B. est artiste et cherche à résoudre l'énigme de son identité grâce aux clés de la physique quantique. Sa mère ne sait toujours pas que B. aime les garçons.

B. is an artist trying to solve the riddle of their identity with the keys of quantum physics. Their mother still doesn't know that B. likes boys.



Pierre de rosette. Un brouillon où on retrouve le détail d'un protocole d'expérience, avant que la chercheuse ne rencontre des problèmes avec son stylo rouge, puis fasse ses calculs à l'aide des formules de la physique quantique (et un autre stylo).

Rosetta Stone. A draft detailing an experimental protocol, before the researcher runs into issues with their red pen, then proceeds to perform calculations using quantum physics formulas (and another pen).

- Arrêter séquence
- Fermer vanne des atomes
- Eteindre lock ON/OFF (MOPA) - gain à 0
- " laser Finir par le spectro
- Reset + gain à 0
- Pas éternel 820 400.

60
(7.75) e

Chaille Chaille Chaille petit stylo
chaille chaille chaille chaille
chaille chaille chaille chaille
ça y est, tu es chauffé ?
ah non! pas encore

$$e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

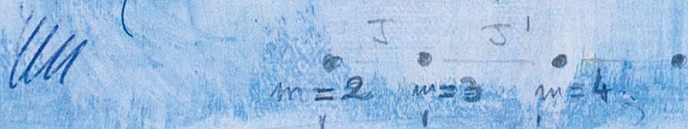
$$\frac{1}{2\pi\sigma^2} = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

$$-10 \text{ W/mm}^2 = \frac{2 \times 220 \text{ mW}}{\pi \cdot \omega^2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \times 220 \text{ mW/mm}}{\pi \cdot 10 \text{ W}}}$$

$$\sqrt{10^{-2}} = 10^{-1} = 0.100 \text{ mm}$$

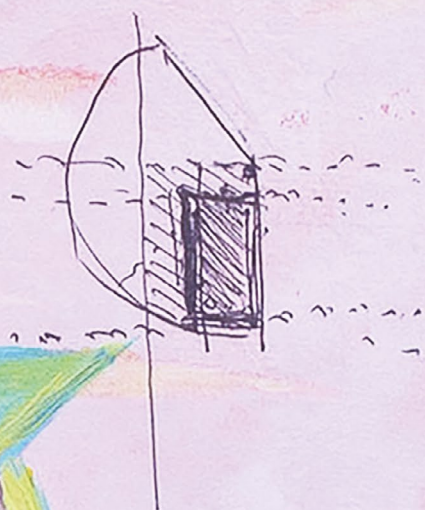
$$SE = k \left(\sum_{n'} \frac{\langle n' | \hat{W} | n \rangle \langle n | \hat{W} | n' \rangle}{E_n - E_{n'}} \right) |F|^2$$











$$\rho = \frac{SR}{l}$$

0.69mm



1.106mm







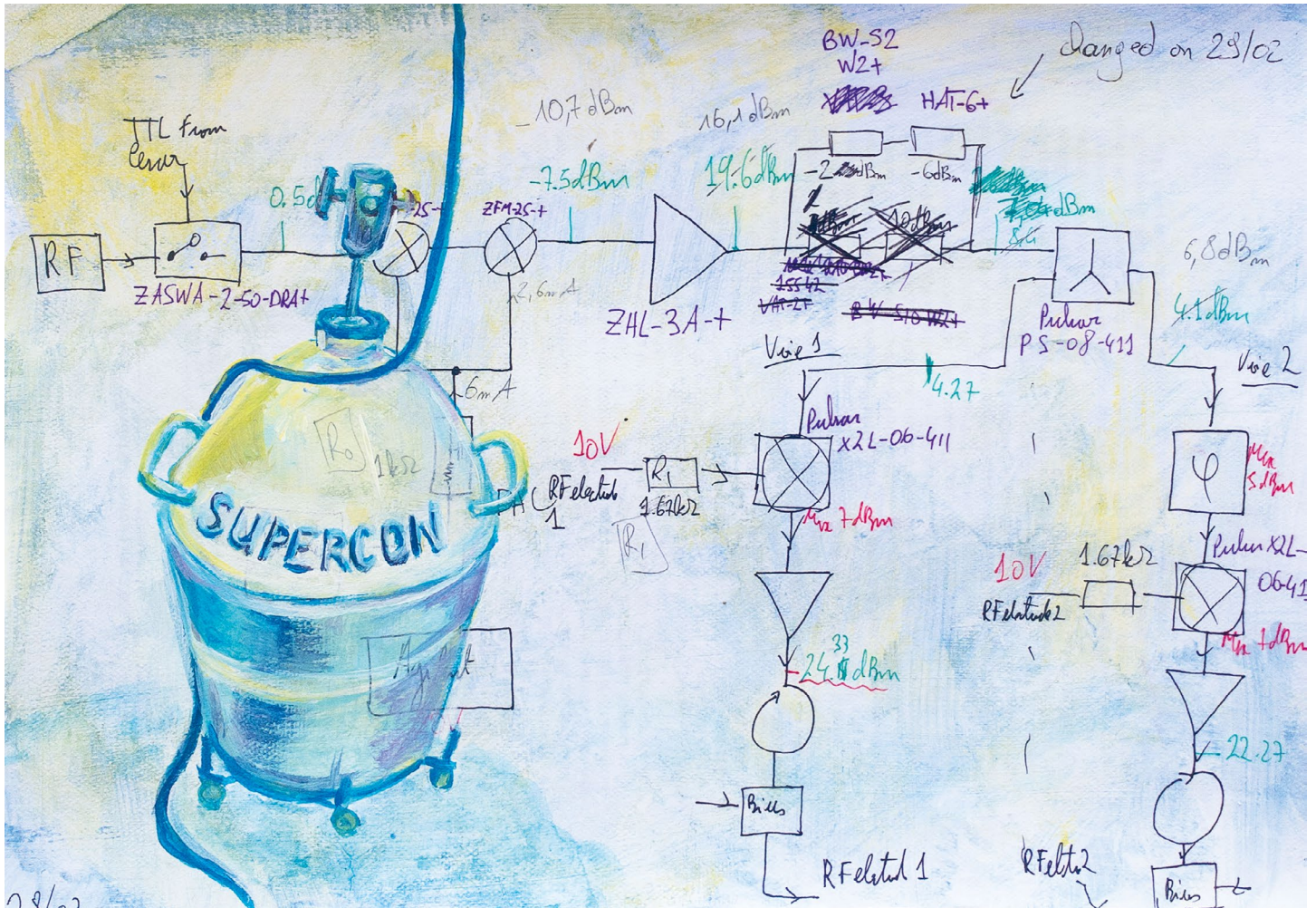




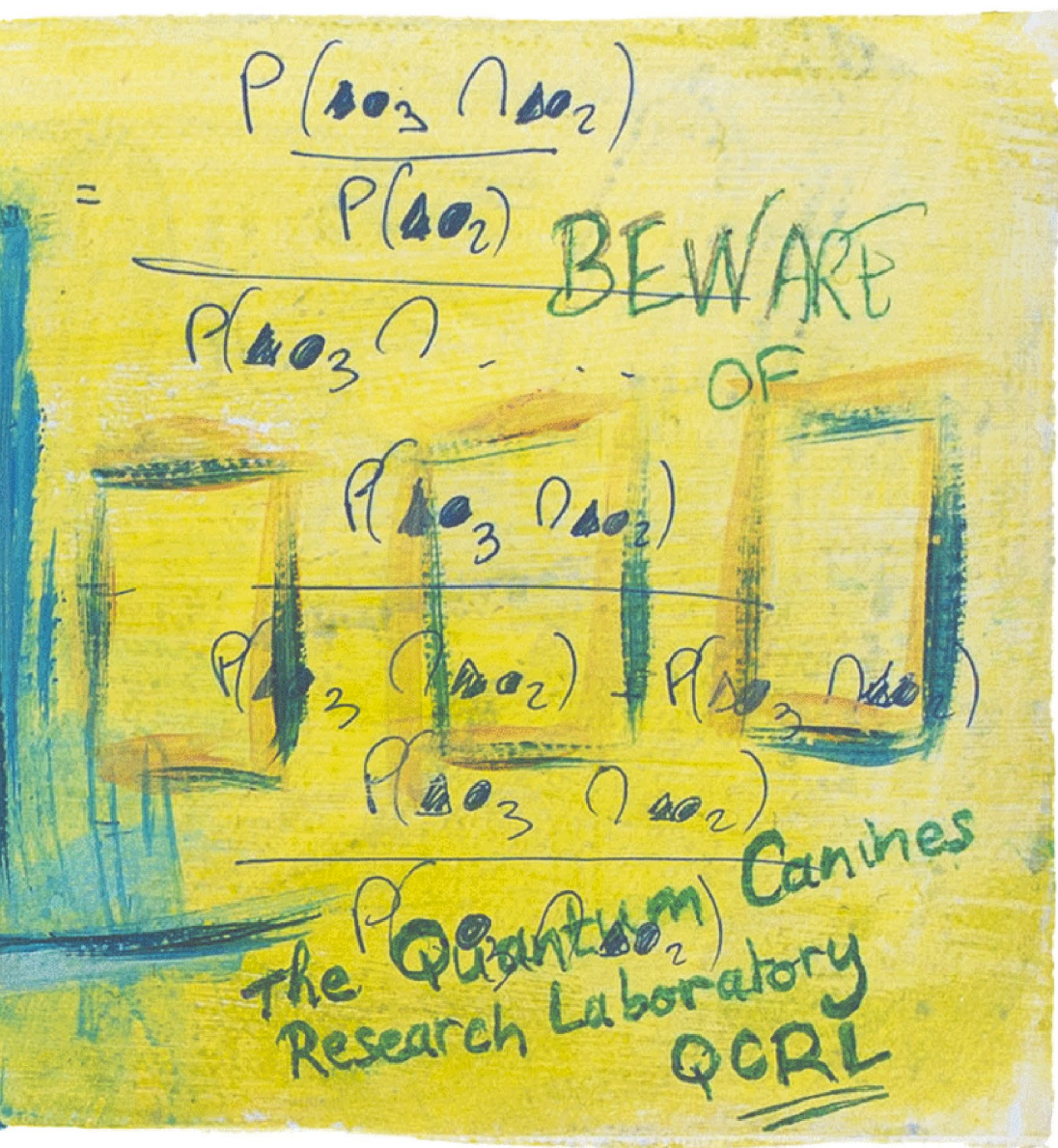


Supercon[ducteur]. Comment je me suis souvent sentie face à des explications qui se voulaient pourtant très pédagogiques.

Supercon[ductor]. How I often felt when faced with explanations that were meant to be very educational.



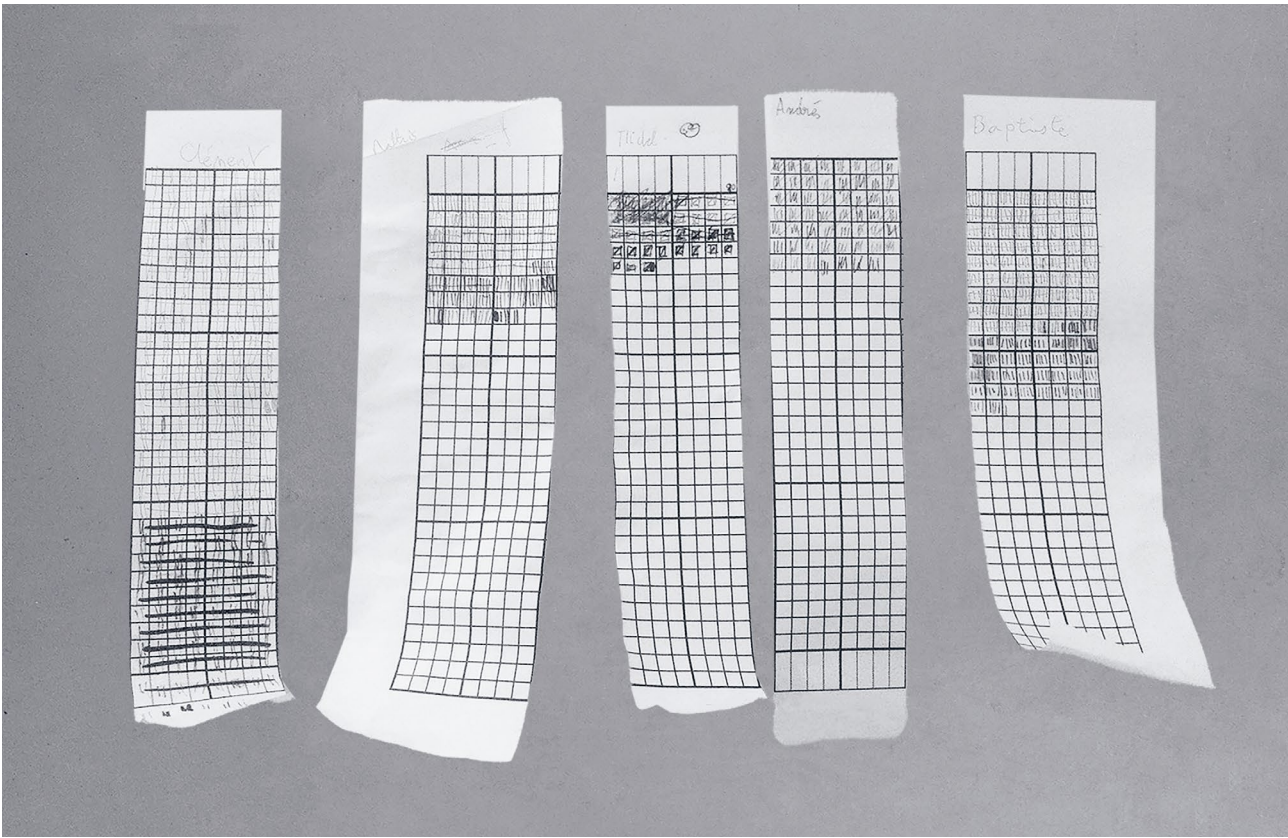




Le Quantum Canine Institute accueille les meilleurs amis des chercheurs.

The Quantum Canine Institute welcomes the researchers' best friends.

CAFÉ ET MESURES / COFFEE METRICS Dans les laboratoires que j'ai visités au fil de mes résidences, j'ai pu observer à ma surprise qu'un système de mesure très précis avait été mis en place. Signe peut-être aussi de l'importance de cette boisson pour les chercheurs. / In the laboratories I visited during my residencies, I was struck by the fact that every precise measurement system had been established, a sign of how important the beverage is to the researchers.

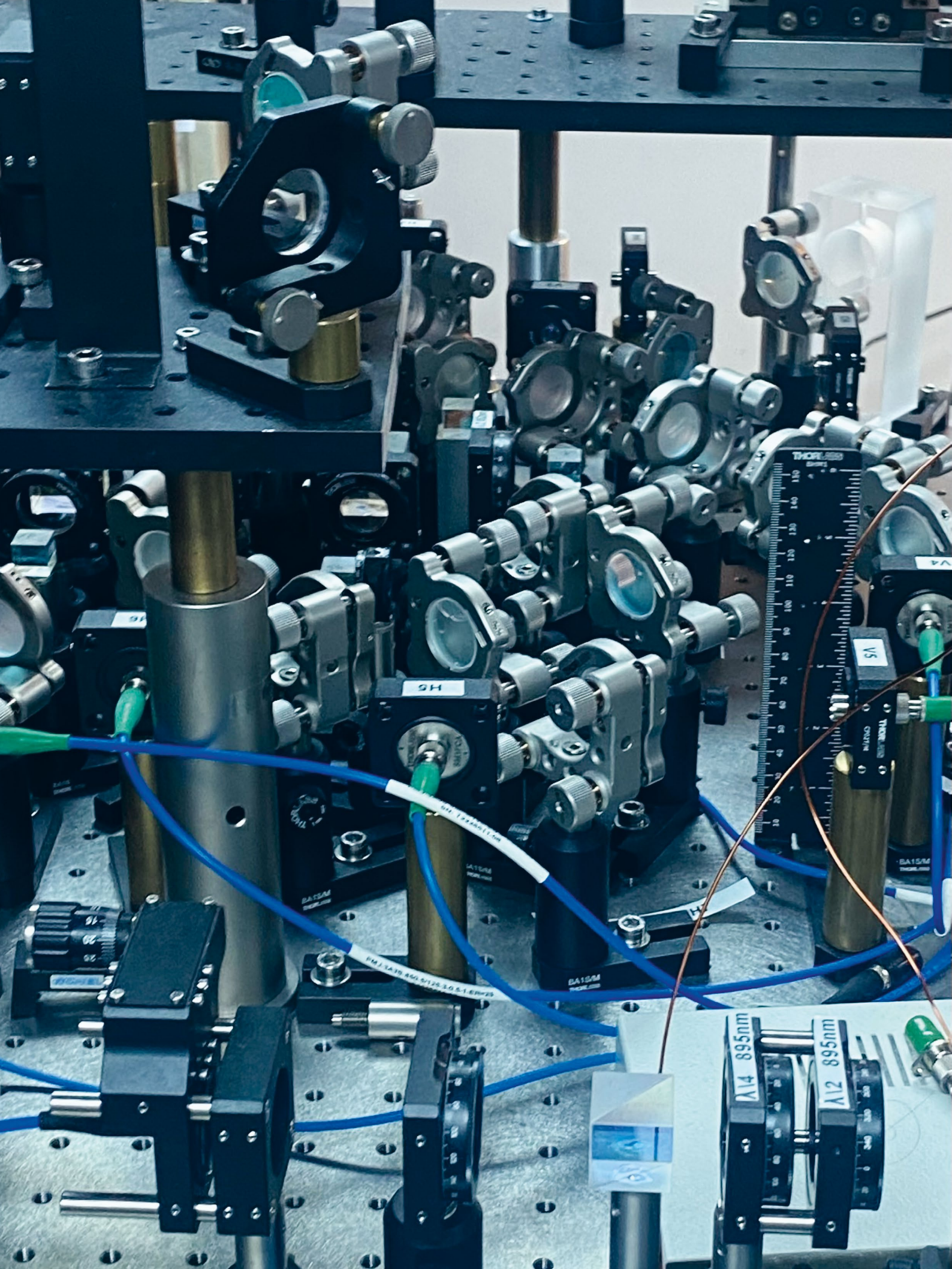


Adrien → 09/12/24

Thank you to tick for your coffee ☺

H10-INDELICATO		
H11-HILICO		
H12-CHERRORRET		
H13G-GUELLATI		145 320
H13N-NEZ		
H15B-BRAMATI Cherise Le Jeune		145 320
H15L-LAURAT Leroy		145 320
H15T-TREPS		140 365 535
H16-ELECTRONIQUE		
H18-ADMIN		
H19-INFORMATIQUE		
H24-HEIDMANN		150 300
H25-VERRERIE		

suggestion, use this system
2/10 1 5 7 0 0
1 0 1 0 3 4 5



Élie During

LA BOÎTE NOIRE DU SOUVENIR ET LE SOURIRE SANS CHAT

Dès l'origine de la théorie associée aux noms de Bohr, de Broglie, Heisenberg et Schrödinger, l'étrangeté du monde quantique a été une source de perplexité philosophique autant qu'un casse-tête pour les physiciens eux-mêmes. Elle contrariait les intuitions réalistes les plus familières, à commencer par l'idée selon laquelle une théorie concernant les phénomènes microphysiques a pour fonction de *décrire* l'état des choses telles qu'elles sont en soi, indépendamment des circonstances de l'observation. Il fallait aller jusque-là pour éviter de s'installer durablement dans le paradoxe. En attendant, l'imagination s'affolait. Que des objets que nous observons et manipulons comme des particules puissent se comporter en même temps comme des ondes, en produisant par exemple des motifs d'interférence dans des dispositifs comme ceux de la célèbre expérience de la « double fente », c'était déjà un sujet d'étonnement. Les choses deviennent franchement déroutantes lorsqu'il est question de corrélations « non locales », et que des mesures conduites sur des particules distantes semblent être coordonnées et synchronisées comme si elles composaient un seul et même système, en quelque sorte indifférent à la séparation spatiale. Ces manières de parler sont suggestives, mais elles passent peut-être à côté du problème, qui concerne précisément la portée qu'il faut reconnaître, dans ce contexte nouveau théorique, aux termes familiers d'« objet », de « système » ou d'« état ». C'est sur ce point précis qu'une réflexion sur la nature du souvenir peut nous venir en aide.

Naturellement, les étrangetés quantiques ont trouvé des prolongements dans la science-fiction, comme aussi dans le champ de la création artistique, sous la forme d'extrapolations hasardeuses, et plus souvent hélas, d'applications un peu trop littérales. On en trouve une version grotesque dans l'imaginaire graphique qui domine les ouvrages ou les revues de vulgarisation scientifique : débauche de jets de lumière colorée, effets de brumes et de halo, nuages de particules irisés, trames cristallines superposées ou intriquées, franges d'interférences, motifs sinusoïdaux, courbes de densité, etc. Tout cela est vaguement « ondulatoire », mais le style pompier de ces images monotones, désormais produites à la demande par des systèmes d'intelligence artificielle, fait regretter les procédés plus rustiques mais souvent plus inventifs élaborés, il y a un siècle, par les peintres futuristes au moment où se diffusaient les idées concernant la radioactivité ou la relativité. Peut-on quitter ce registre métaphorique et platement illustratif pour tenter d'approcher avec un peu plus de patience et de doigté les résonances sensibles du phénomène quantique, au-delà de la sidération que suscite inévitablement la mise en échec de nos intuitions immédiates ? C'est le pari de cette exposition, *Sensation quantique*, qui entend communiquer quelque chose des dimensions d'expérience que suggère la pratique même de la physique quantique, lorsque les prodiges de la « phénoménoteknik » produisent des états de la matière à la fois inouïs et tangibles, qui font entrevoir de nouvelles façons de sentir et de penser.

Pour faire apparaître les enjeux de cette affaire, il faut paradoxalement prendre un peu de champ et franchir un palier d'abstraction en se rappelant quelle fut, d'un point de vue philosophique, la véritable nouveauté introduite par les concepts quantiques. On comprendra mieux alors l'intérêt qu'il y a à aborder la question par le biais de la mémoire et du souvenir, ce qui n'a *a priori* rien d'évident. Le

titre baroque sous lequel se rangent ces remarques s'en trouvera du même coup éclairci.

Il y a en effet une première « boîte noire » : celle du cerveau – ou du psychisme, selon le point de vue. Le fonctionnement de la mémoire en offre une illustration frappante : partielle, fragmentaire, sans cesse reconstruite, consolidée au gré des actes de remémoration, sa nature reste quelque peu mystérieuse. Les neuroscientifiques, qui sont parfois psychologues, proposent à ce sujet des théories et des modèles sophistiqués qui reviennent peu ou prou à souligner la nature artificielle, fabriquée, machinée, de la mémoire biographique (ou « épisodique »), reprise et reconsolidée au gré de nos efforts d'attention et de réminiscence, par des processus de renforcement ou de potentialisation à long terme des connexions synaptiques impliquées dans la conservation... de quoi d'ailleurs ? Des souvenirs eux-mêmes, subsistant dans l'intervalle entre deux réminiscences ? Ou plutôt des représentations multiples qui leur correspondent lorsqu'ils s'actualisent dans la conscience sous forme d'images, à mi-chemin de l'imagination et de la perception ? Les tenants de l'approche connexionniste de l'esprit parlent volontiers de « motifs d'activation neuronale » distribués en réseau dans la matière cérébrale, pour mieux souligner le caractère dynamique du processus de formation et de conservation des souvenirs, mais le problème reste entier de savoir comment recoller ces descriptions en troisième personne à l'expérience en première personne que chacun peut faire des souvenirs vécus, c'est-à-dire perdus et retrouvés, remémorés et transformés. Quel est le mode d'existence d'un souvenir singulier, si l'on tient compte de sa texture phénoménologique évasive et labile, confirmée par le caractère essentiellement composite et reconstruit que lui reconnaissent les connexionnistes ?

Une lecture sobre, déflationniste, voire réductionniste de la situation consisterait à dire qu'en réalité il n'y a pas de souvenir, seulement des remémorations. « Souvenir » est un mot que nous associons par commodité à une classe de représentations diverses, rangées sous un même thème mnésique. Mais alors la question ne se reporte-t-elle pas sur le thème lui-même ? Comment subsiste-t-il ? Car il y a bien un pôle référentiel auquel nous revenons de loin en loin : un épisode vécu dans le passé, un segment d'autobiographie, se trouve visé, non comme le présent qu'il était, mais comme élément de notre passé, à travers des évocations diverses, à différents degrés de généralité, et parfois directement dans le rappel de souvenirs épisodiques dont le détail vivant peut procurer un véritable sentiment de reviviscence. Ce couplage entre un thème mnésique et ses effectuations ponctuelles dans des souvenirs évoqués ou remémorés paraît essentiellement liée à notre expérience subjective de la mémoire. Et la place des souvenirs dans nos vies suggère qu'on s'intéresse sérieusement à la vie du souvenir. Une manière de le faire consiste à se donner une définition temporelle du souvenir comme une espèce de performance à l'échelle d'un moment, d'une période, ou d'une vie entière. En parlant d'un souvenir, nous désignerions en réalité un ensemble d'actes de remémoration qui ont en commun de mobiliser à chaque fois une multiplicité de traces mnésiques visant un même événement-source dans le passé. Sur cette base, philosophes et neuroscientifiques peuvent commencer à discuter, sans que l'un conteste ou réduise trop violemment les objets de l'autre. Mais tout reste à faire.

« Motifs », « thèmes » : ce n'est pas pour rien que la métaphore musicale se suggère irrésistiblement à nous. Bergson, qui comparait la durée à un flux mélodique, insistait sur le fait que le processus de localisation d'un souvenir dans le passé « ne consiste pas du tout, comme on l'a dit, à plonger dans la masse de nos souvenirs comme dans un sac, pour en retirer des souvenirs de plus en plus rapprochés entre lesquels prendra place le souvenir à localiser » (*Matière et mémoire* [1896], Paris, Puf, 2006, p. 191). Mais s'il n'y a pas non plus de grand album où les souvenirs seraient archivés comme des photographies, l'existence des souvenirs

eux-mêmes a-t-elle davantage d'évidence, au-delà des épisodes où nous les rap-
pelons comme des images? Accordons que le mode d'existence du souvenir n'est
pas celui d'une perception fixée en image, susceptible d'être archivé, que l'identité
du souvenir n'est donc pas celle d'un objet ou d'un contenu psychique déterminé
qui entrerait momentanément dans le champ de la conscience. Reste ce sentiment
irrépressible qu'il y a là plus qu'une reconstruction *ad hoc* sur la base de résidus
d'expériences déposés dans les replis du cerveau, et constamment réorganisés.
La suggestion de Bergson est la suivante : nous sentons bien que *quelque chose* se
conserve, au-delà des épisodes de réminiscence et des motifs d'activation distri-
bués dans la matière cérébrale.

C'est à cette intuition qu'il faut tenter de donner forme, même si cela nous engage
sur d'étranges chemins. La philosophie de Bergson fraie la voie en nous appre-
nant pour commencer que l'expérience elle-même est irréductible à une série
de « clichés » archivés tour à tour. Le vécu a une certaine densité ou qualité de
présence qui se développe dans la durée, et c'est peut-être précisément cela qui se
conserve lorsqu'il est question de mémoire épisodique, attachée à des moments
singuliers. Non pas la scène spatiale où se distribue l'action, mais le geste qui ras-
semble dans un même élan ses éléments épars ; non pas le portrait de groupe où
chacun prend dignement la pose, mais la tension et le frémissement qui traverse
les corps, une certaine qualité atmosphérique qui donne sa tonalité particulière
à cette heure. Ces qualités fluentes ne sont pas attachées à des instants ponctuels ;
ce sont des fibres de durée que l'attention identifie vaguement sur le moment, des
fibres superposées à d'autres fibres que nous vivons simultanément sur plusieurs
échelles, sur des plans de conscience plus ou moins amples, plus ou moins pro-
fonds. Il y a dans le vécu perceptif lui-même quelque chose qui est autre chose
qu'une image, qui est moins déterminé qu'une image, et qui est déjà plus qu'une
nuée indistincte d'aspects sensoriels livrés à la machine cérébrale.

La mémoire est donc solidaire d'une activité perceptive continue qui n'a rien à
voir avec ce que pourrait suggérer la recomposition cinématographique du vécu
par une succession de captures discrètes. S'il y a enregistrement, c'est à la manière
du modelage continu d'un rocher battu par le flot d'un torrent. Si le cerveau se
débrouille pour arracher au présent ce qui lui sera utile pour recomposer, le
moment venu, des souvenirs avec des lambeaux de perception, il ne le fait pas en
clichant les choses au rythme de 24 images par seconde, mais au gré de l'action
en cours, suivant les oscillations de l'attention. Au demeurant, chaque moment
d'expérience se laisse décomposer, après coup, d'une multiplicité de points de
vue. Quelle qu'en soit l'unité d'atmosphère, le pique-nique à la campagne, cet
après-midi d'été, il y a dix ans, admet une multiplicité indéfinie de décomposi-
tions possibles, et en ce sens il enveloppe virtuellement une multiplicité indéfinie
d'« images », de clichés, de séquences et de saynètes plus ou moins floues qu'on
pourra se repasser le moment venu. Mais précisément, ce n'est pas *cela* qui se
conserve, même si c'est le plus souvent ainsi qu'on se le remémore. L'essence
sensible de Combray condensée dans le goût d'une madeleine est bien entendu
l'exception qui confirme la règle.

Laissons là provisoirement Bergson, dont l'information scientifique, très riche
pour son époque, ne peut que nous paraître insuffisante à l'heure où l'imagerie
cérébrale semble réaliser le fantasme de pouvoir suivre la dynamique du souvenir
à la trace, en temps réel. Il y a encore beaucoup de choses à découvrir au sujet
de la mémoire, et ce ne sont pas les modèles qui manquent. Qu'on n'en soit pas
quitte pour autant avec les questions du philosophe, on en a la preuve dans le fait
que le problème de la conscience – ou de l'émergence de l'esprit sur une base
neuronale – ne cesse de resurgir, comme un serpent de mer. À supposer que le
problème soit bien posé, il y a sans doute là quelque chose d'irréductiblement
opaque. Aussi opaque dans son genre que le dispositif de l'expérience de la double
fente, cette autre boîte noire imaginée par les physiciens pour tester les propriétés

de la lumière : une plaque à double fente vers laquelle on projette un faisceau de particules, des entrées et des sorties correspondant à des mesures faites aux extrémités, un format mathématique permettant d'organiser les résultats de ces mesures, et dans l'intervalle, au cœur du dispositif, un processus qu'on ne peut décrire selon nos catégories usuelles et qui semble entièrement échapper à l'intuition ordinaire que nous avons de particules se mouvant dans l'espace.

Dira-t-on que la particule émise à l'entrée se répand aussitôt dans l'espace, semblable à un champ, vivant d'une existence diffuse tant qu'on ne l'observe pas ? Il faut tout de même rendre compte du fait que les franges d'interférence qui se dessinent sur le fond de la boîte, et dont le motif caractéristique témoigne en effet d'un aspect ondulatoire, sont entièrement composées de traces d'impact signalant l'écrasement ponctuel des particules sur la plaque d'arrivée. Schrödinger décrivait ainsi cette situation inédite :

« Nous devons donc, semble-t-il, abandonner l'idée de reconstituer jusqu'à son origine l'histoire d'une particule qui se manifeste sur la plaque en réduisant un grain de bromure d'argent. *Nous ne pouvons pas dire où se trouvait la particule avant de toucher la plaque.* Nous ne pouvons pas dire à travers quelle ouverture elle est venue. C'est là une des lacunes typiques de notre description des événements observables, et en même temps un exemple très caractéristique du défaut d'individualité des particules. Nous devons penser en termes d'ondes sphériques émises par la source : des parties de chaque front d'onde passent à travers les deux ouvertures et produisent notre figure d'interférences sur la plaque – mais cette figure se manifeste à *l'observation* sous la forme de particules isolées. » (*Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Points-Seuil, 1992, p. 67)

Entre deux observations ponctuelles de l'état d'une particule (électron ou photon), entre l'entrée et la sortie, il n'y a plus moyen de retracer une trajectoire continue au sein de la boîte, plus moyen du même coup de la distinguer d'autres particules du même genre, empruntant d'autres trajectoires. Le physicien doit se résigner à abandonner le principe de causalité dans sa version habituelle, et son objet même lui échappe.

De ce point de vue déjà, il y a quelque chose de similaire entre la boîte noire de la mémoire-cerveau et celle des ondes-particules. Le souvenir lui-même, tel que chacun peut en faire l'expérience dans le rappel volontaire ou involontaire, semble lui aussi échapper à l'exigence de traçabilité qui permettrait de connecter causalement ses états successifs en remontant de proche en proche jusqu'à la cause première, l'événement-source d'une rencontre ou d'une expérience située dans le passé. La cristallisation soudaine du souvenir dans les épisodes de rappel involontaire évoque l'onde-particule qui se matérialise aléatoirement ici ou là au moment de la mesure, sans qu'on puisse reconstituer sa trajectoire continue ni donc déduire sa position en mobilisant un schéma d'explication déterministe. Seuls les grands nombres se prêtent à une description déterministe, en termes statistiques : la distribution des mesures dans l'espace, comme celle des états dynamiques associés, peut être prédite avec une grande exactitude, mais elle ne concerne jamais que des foules d'occurrences du même genre, et jamais aucun événement ponctuel. Et tout comme la fonction d'onde « s'effondre » brusquement lors de la mesure sur une valeur correspondant à un état propre d'une observable, un souvenir, lors de sa remémoration, se cristallise temporairement dans une version particulière, plus ou moins probable, qui dépend des circonstances du rappel et de multiples indices contextuels. Plus précisément, l'équivalent du contexte expérimental de la mesure en physique serait donné ici par le réseau complexe de connexions qu'un souvenir donné entretient avec d'autres souvenirs,

mais aussi avec les émotions, les perceptions et les pensées qui le colorent et le transforment à ce moment précis. Modulé par le contexte de rappel, le souvenir cristallise pour apparaître sous un profil particulier.

S'il y avait moyen d'exprimer mathématiquement une « fonction d'onde mnésique », elle associerait à chaque variable un spectre de valeurs correspondant aux différents états propres du souvenir, avec leurs probabilités respectives. Il ne s'agit évidemment là que d'une analogie, puisque la différence fondamentale entre les probabilités quantiques et les probabilités mnésiques est que les premières renvoient à une indétermination intrinsèque de la situation, tandis qu'en première approche les probabilités associées aux souvenirs pourraient bien n'être que l'expression d'une description incomplète des configurations neuronales sous-jacentes. Encore convient-il de préciser que cette limite posée à l'analogie ne vaut strictement que sous l'hypothèse d'une correspondance terme à terme entre les souvenirs distincts, individualisés, et leur contrepartie matérielle. Si l'on tient compte du fait que chaque composante sensorielle du souvenir mobilise en fait des réseaux distincts, et qu'inversement les mêmes réseaux peuvent entrer en jeu dans la conservation et le rappel d'une diversité de souvenirs, l'idée qu'à chaque souvenir correspondrait une configuration neuronale bien déterminée perd un peu de son évidence : elle subsiste surtout comme hypothèse heuristique. Le problème s'aggrave du fait que la nature psychique du souvenir, de son côté, devient de plus en plus évasive, de moins en moins assimilable à un état ponctuel aux contours déterminés, à mesure qu'on se détache du souvenir actualisé pour se rapprocher du fond nébuleux sur lequel il se détache. Le couplage entre le souvenir remémoré et les motifs d'activation neuronale distribués perd de sa pertinence lorsqu'on s'intéresse précisément à ce qui subsiste entre deux épisodes de remémoration.

On notera du reste que dans la conception connexionniste, le contenu ponctuellement réengendré ne survit pas à l'épisode de remémoration ; il se dissipe aussitôt sous la forme de traces distribuées dans une diversité d'aires cérébrales, traces qui sont moins des engrammes que des « poids » associés à des connexions synaptiques, autrement dit à des probabilités d'activations futures. Une configuration particulière des poids de connexion correspond en pratique à une disposition à produire certains motifs d'activation en réponse à certains stimuli, sensoriels ou autres. La conservation ne renvoie pas à un encodage de traces discrètes, qu'on pourrait faire correspondre terme à terme à des contenus mnésiques bien définis, mais plutôt à une multiplicité de trames déposées à différents niveaux d'organisation du cerveau, suivant différents chemins ou réseaux de dispositions ou de probabilités d'activation superposés, selon un rapport non bijectif qui autorise en principe une pluralité de réalisations possibles (John Sutton & Gerard O'Brien, « Distributed traces and the causal theory of constructive memory », in *Current Controversies in Philosophy of Memory*, A. Sant'Anna et. al. (eds), London, Routledge, 2024, p. 88). Pour ne pas trop s'embarrasser des « traces », il reste au moins la possibilité de modéliser directement les souvenirs eux-mêmes, en associant des probabilités d'occurrence à certaines versions possibles du souvenir, ou encore à des motifs d'activation donnés, susceptibles de donner lieu au « rappel » de certains souvenirs. La production de l'image mnésique correspondante serait alors une sorte de « mesure » : elle reviendrait à tirer aléatoirement un des états possibles du souvenir, suivant la distribution de probabilités qui lui correspond, ou suivant la distribution de probabilités associée à la superposition des motifs d'activation neuronale associés.

Bien entendu, le terme de superposition doit être manié avec une grande prudence dans ce contexte macroscopique où il n'est de toute façon pas question de mobiliser directement des probabilités quantiques (ce que suggèrent par exemple Roger Penrose et Stuart Hameroff, en partant de l'hypothèse selon laquelle la conscience et la mémoire mettent en jeu des processus quantiques au niveau

des microtubules des neurones). Il faut néanmoins reconnaître que l'analogie demeure valable à un certain niveau de généralité. Elle revient à souligner, dans les deux cas, l'inséparabilité de l'observateur et de l'observé, de la mesure et du contexte expérimental, et aussi du même coup une indétermination fondamentale liée à la mesure. Sans entrer dans le détail complexe de cette affaire, convoquons simplement le chat, celui de Schrödinger. On se souvient que dans un apologue célèbre, le physicien envisageait l'animal dans ses états « superposés », mais aussi « intriqué » avec tout le contexte expérimental dans lequel on l'avait installé, au risque du paradoxe. En réalité, il fallait l'envisager, non comme mort *ou* vivant (disjonctivement), ni comme mort-vivant (conjunctivement), malgré l'intérêt purement spéculatif de cette hypothèse, mais plus simplement comme n'étant *ni* l'un *ni* l'autre (double négation), ni mort ni vivant, et ceci jusqu'à preuve du contraire, avant qu'on ait ouvert la boîte pour s'assurer de sa bonne santé. En somme, le système quantique que le chat est censé représenter dans cette histoire n'a pas la substantialité qu'on lui attribue spontanément en en faisant le support permanent de propriétés, fussent-elles contradictoires ; il n'est pas un sujet stable susceptible de se trouver, à des degrés de probabilité variable, dans un état qu'on supposerait déterminé en lui-même avant toute observation ou mesure. Telle est à peu près la leçon que les philosophes les plus perspicaces, et sans doute déjà Schrödinger, avaient tiré de cette situation théorique bien emmêlée : en définitive, il convenait d'abandonner notre ontologie par défaut, une ontologie d'objets dotés de propriétés en bonne et due forme, pour parler plutôt de champs de potentialités ou de propensions dont l'équation d'onde décrirait l'évolution en termes de probabilités de détection. Peut-être serait-il d'ailleurs plus prudent de s'abstenir de toute ontologie, et de s'en tenir à ce que Schrödinger recommandait de voir dans la fonction d'onde : un « catalogue de prédictions » liées à des dispositifs expérimentaux d'un genre particulier (voir Michel Bitbol, *L'Aveuglante proximité du réel*, Paris, Champs-Flammarion, 1998). Dans tous les cas, la théorie quantique nous conduit à réviser sérieusement la grammaire réaliste de la prédication qui attribue en propre à des sujets certaines propriétés bien déterminées. Mais on rejoint par cette voie également la leçon fondamentale sans cesse répétée par le physicien :

« Nous ne devons pas admettre la possibilité d'une observation continue. Les observations doivent être considérées comme des événements discrets, disjoints les uns des autres. Entre elles il y a des lacunes que nous ne pouvons combler. Il y a des cas où nous bouleverserions tout si nous admettions la possibilité d'une observation continue. C'est pourquoi j'ai dit qu'il vaut mieux ne pas regarder une particule comme une entité permanente, mais plutôt comme un événement instantané. Parfois ces événements forment des chaînes qui donnent l'illusion d'être des objets permanents, mais cela n'arrive que dans des circonstances particulières et pendant une période de temps extrêmement courte dans chaque cas particulier. » (*Physique quantique et représentation du monde*, op. cit., p. 46-47)

Malgré cette mise en garde, pour le philosophe doté d'un tempérament métaphysique, les phénomènes quantiques et leurs quasi-objets présentent l'occasion rêvée de donner libre cours à son imagination ontologique. Le nouveau statut des « objets » quantiques suggère de remplacer les substances et leurs états par des processus et des événements sans support : des *sourires sans chat*. Lewis Carroll s'invite donc à la table, bientôt rejoint par Julio Cortazar, Alfred Whitehead, et à nouveau Bergson. Ce dernier expliquait en effet que le changement réel, c'est-à-dire qualitatif, irréductible au transport dans l'espace, est seul véritablement substantiel – plus substantiel en tout cas que le « quelque chose » qui est supposé changer en passant par des états successifs. La nervure de tout devenir, disait-il, ce qui lui donne sa tenue, sa consistance, c'est justement la mémoire ; mais une mémoire intérieure au changement, qui n'est autre que la continuation et la conservation

du passé dans le présent. En suivant un autre fil métaphysique, on serait tenté d'identifier le chat lui-même à un faisceau de sourires, mais aussi de miaulements, de ronronnements et autres dos ronds, formant un bouquet de « tropes » ou de « particuliers abstraits », détachés de tout support. Quelle que soit la solution adoptée, la question, en définitive, est toujours celle de savoir si nous sommes capables d'appréhender le sourire de manière purement adjectivale ou adverbiale, plutôt qu'attributive. Pour revenir au pays des merveilles, il faudrait oublier le chat et dire simplement qu'« il sourit », comme on dirait « il pleut » : là-haut dans l'arbre, il y a du sourire, et peut être alors du chat... De la même manière, dans la boîte noire de l'expérience à double fente où les particules semblent se comporter comme des ondes, il vaudrait mieux dire qu'il y a de l'interférence, et plus généralement de l'ondulatoire, qui confère un halo d'indétermination aux mesures effectuées par un observateur, mais sans se prononcer sur la nature intrinsèque du phénomène, qui en vérité n'est pas plus onde que particule.

La nature du souvenir pose un problème du même genre. Nous le fixons en le rappelant, avec plus ou moins de netteté et de détail, et ce faisant nous lui donnons un profil nouveau. Réduction du paquet d'ondes mnésiques... En réalité, comme s'accordent à le dire psychologues et neuroscientifiques, nous le reconstruisons de fond en comble, et du même coup nous contribuons à sa « reconsolidation », quitte à l'appauvrir ou à le faire décanter en une épure que prendront en charge les modules de la mémoire sémantique. C'est comme si un même souvenir se constituait à mesure qu'il se projetait en une multiplicité de versions distinctes de lui-même. Mais encore une fois, qu'est-ce qui fait son individualité ? On l'a suggéré plus haut, ce qui manque dans la description connexionniste habituelle, c'est justement l'*unité d'allure* du souvenir, sa physionomie ou son profil temporel, qui lui permettent de s'insérer dans la continuité de la vie psychique sans perdre entièrement sa singularité. Avant d'être récupéré comme image, ou délayé comme idée, le souvenir est d'abord ce qui se conserve dans la séquence elle-même, au moment où elle a lieu : c'est le principe temporel d'individuation d'une portion d'expérience, pour autant qu'on la vit en effet en durée. Il y a une mémoire intérieure au changement qui l'extrait de la ponctualité évanescence des moments, qui lui confère une tenue et aussi une forme de surexistence dont témoigne sa seconde vie comme souvenir. C'est ce qui faisait dire à Bergson que le souvenir ne se constitue pas après coup, une fois passée la perception, mais en même temps qu'elle : contemporanéité du souvenir et de la perception dont témoigne l'anomalie fascinante du « déjà-vu », ce « souvenir du présent » (Henri Bergson, *Le Souvenir du présent et la fausse reconnaissance*, Paris, Puf, 2012). Le principe de conservation ou de continuation du passé dans le présent explique que ce qui se fait ne passe pas, justement parce qu'il n'est pas formé au présent, d'instant en instant, mais continûment, dans un flux de durée qui ne s'interrompt jamais. Seul le présent passe ; le passé ne passe pas, il n'est pas passé. Emporté par ces formules sidérantes, Bergson n'est pas loin de liquider tout simplement le problème : à la limite, il n'y a pas à se demander où se conserve le souvenir. Certainement pas, selon lui, dans le cerveau. Si le cerveau est requis, c'est seulement comme un instrument de rappel, c'est-à-dire de filtrage, de sélection et de fixation du souvenir en image. Quant au passé, il se conserve *en soi*, automatiquement ! Mais, au risque de nous répéter : comment se conserve une unité d'allure ? Comment la durée vécue, qui porte en elle-même son principe de conservation, est-elle conservée par la mémoire sous la forme de souvenirs individualisés, plutôt que comme le continuum hétérogène qu'elle est par ailleurs ? Sur quelle base l'expérience se monnaie-t-elle en moments mémorables ?

En réalité, cette question est insoluble si on persiste à la formuler *sur un seul plan de réalité*. La proposition de Bergson à cet égard consiste à distinguer fermement la nature *virtuelle* du souvenir en soi, qu'il appelle le « souvenir pur », et ses actualisations multiples sous forme d'images présentées à la conscience. Entre ces deux plans de l'actuel et du virtuel, le souvenir prend la forme d'un « schéma

dynamique» qui déploie le souvenir sur des plans d'organisation différenciés de la conscience, correspondant à des degrés divers de profondeur et d'intensité. Le souvenir s'extrait d'une matière mnésique labile et flottante, que Bergson décrit comme une «nébulosité», un champ pré-individuel qui est le milieu même du passé :

« S'agit-il de retrouver un souvenir, d'évoquer une période de notre histoire? Nous avons conscience d'un acte *sui generis* par lequel nous nous détachons du présent pour nous replacer d'abord dans le passé en général, puis dans une certaine région du passé : travail de tâtonnement, analogue à la mise au point d'un appareil photographique. Mais notre souvenir reste encore à l'état virtuel ; nous nous disposons simplement ainsi à le recevoir en adoptant l'attitude appropriée. Peu à peu il apparaît comme une nébulosité en voie d'expansion ; de virtuel il passe à l'état actuel ; et à mesure que ses contours se dessinent et que sa surface se colore, il tend à imiter la perception. Mais il demeure attaché au passé par ses racines profondes, et si, une fois réalisé, il ne se ressentait pas de sa virtualité originelle, s'il n'était pas, en même temps qu'un état présent, quelque chose qui tranche sur le présent, nous ne le reconnâtrions jamais pour un souvenir. » (*Matière et mémoire*, op. cit., p. 148)

La «nébulosité» n'assimile pas le souvenir pur à un objet indéterminé, ou surdéterminé au sens où peut le laisser entendre la «superposition» des états quantiques avant l'acte de mesure. Elle le replonge plutôt dans le milieu même du passé, en dehors de toute détermination actuelle. C'est vers ce milieu que nous nous tournons spontanément à chaque fois que nous faisons l'effort de nous remémorer. C'est bien un milieu, et non un substrat, ou un support : la nébulosité ne constitue en aucun cas le support des images actualisées, ravivées dans la conscience par le mécanisme du rappel. Elle désigne simplement la modalité du souvenir avant son actualisation. Il n'est donc pas question de remonter au souvenir pur comme à un original qui servirait de patron ou de prototype au souvenir actualisé en image. Et ceci explique au passage qu'on ne puisse aisément faire remonter le souvenir, suivant un enchaînement causal continu, à l'événement-source qui l'a suscité dans le passé. La difficulté que rencontrent aujourd'hui les théories causales du souvenir trouve ici son vrai fondement.

Attardons-nous un instant sur le mécanisme du rappel volontaire :

« Quand nous laissons notre mémoire errer au hasard, sans effort, les images succèdent aux images, toutes situées sur un même plan de conscience. Au contraire, dès que nous faisons effort pour nous souvenir, il semble que nous nous ramassions à un étage supérieur pour descendre ensuite progressivement vers les images à évoquer. » (Henri Bergson, « L'effort intellectuel », in *L'Énergie spirituelle* [1919], Paris, Puf, 2009, p. 166)

La description met en scène le souvenir émergeant d'un fond nébuleux. C'est d'abord une présence sourde, une sorte d'appel. S'il prend finalement corps, c'est au prix d'une série de décrochages plus ou moins abrupts qui le branchent sur diverses séries associatives (souvenirs connexes, résonances sémantiques, échos sensoriels), suivant différents plans d'organisation de la conscience. Il y a certainement là quelque chose de stochastique, sinon de quantique : c'est un train d'images discontinues qui cristallisent tour à tour, qui se font et se défont brusquement comme autant de vues kaléidoscopiques, avant de livrer d'un coup le souvenir manquant – en l'occurrence, un nom propre que le philosophe avait, comme on dit, sur le bout de la langue. L'exemple est aussi l'occasion de vérifier

que le milieu du souvenir pur n'a rien d'un champ indifférencié : il enveloppe déjà une multiplicité de nébuleuses en expansion, et parmi elles des points lumineux qui n'attendent que de se développer en constellations de souvenirs. On en revient donc pour finir à cette unité d'allure, mais exprimée cette fois-ci à travers le processus heurté d'actualisation du souvenir. Ce qui se conserve essentiellement (et peut-être exclusivement sur le plan psychique), ce ne sont pas les traits d'expérience dont le cerveau redistribue les traces, ni les motifs d'activation neuronale sans cesse remis en chantier ; c'est un certain schéma d'ensemble, déjà évoqué sous le nom de « schéma dynamique » (*ibid.*, p. 161), qui organise les éléments du souvenir et les rend solidaires les uns des autres dans leur processualité même. Ce schéma, tout effort de remémoration le vise obscurément. À la limite, il désigne « un point où la multiplicité des images semble se condenser en une représentation unique, simple et indivisée » (*ibid.*). Mais pour cela, justement, manque l'image ; et ce n'est certainement pas un objet. Si le travail de l'art peut le faire du moins entrevoir – et jusqu'à un certain point ressentir –, en résonance avec les idées du physicien ou du neuroscientifique, alors le métaphysicien ne se sera pas contenté de peindre des figures à la surface de l'eau.

Élie During

MEMORY'S BLACK BOX AND GRINS WITHOUT CATS

Ever since quantum theory first emerged through the work of Bohr, de Broglie, Heisenberg, and Schrödinger, the peculiar nature of the quantum world has bewildered philosophers and confounded physicists alike. It challenged our most basic realist intuitions, particularly the notion that theories about microphysical phenomena should *describe* the state of things as they are in themselves, independent of observation. One had to abandon such intuitions to avoid becoming permanently trapped in paradox. Meanwhile, the imagination ran wild. The discovery that objects we observe and handle as particles could simultaneously behave as waves—creating interference patterns in setups like the famous “double-slit” experiment—was astonishing enough. Things become truly disorienting when confronting “non-local” correlations, where measurements on distant particles appear coordinated and synchronized as if forming a single system, somehow transcending spatial separation. These ways of speaking are evocative, but they might miss the crucial point, which concerns exactly what meaning we should assign, in this novel theoretical framework, to familiar terms like “object,” “system,” or “state.” It is precisely here that reflecting on the nature of memory can offer valuable insight.

Naturally, quantum oddities have found their way into science fiction and artistic creation, appearing as speculative extrapolations and, unfortunately more often, overly literal applications. A grotesque version pervades the visual imagery dominating popular science books and magazines: colored light beams, misty halos, iridescent particle clouds, layered crystalline patterns, interference fringes, wave patterns, density curves. While vaguely “wavelike,” the pompous style of these monotonous images—now mass-produced by AI systems—makes one nostalgic for the simpler but more inventive approaches developed a century ago by Futurist painters when ideas about radioactivity and relativity were first circulating. Can we move beyond a metaphorical, flatly illustrative approach to engage more attentively and sensitively with the sensory resonances of quantum phenomena—beyond the inevitable shock that arises when our immediate intuitions falter? This is the ambition of *Quantum Sensation*, an exhibition that seeks to evoke something of the experiential dimensions inherent in the practice of quantum physics itself, whose “phenomenotechnique” not only generates extraordinary states of matter but also renders them tangible—offering glimpses of new ways to feel and think.

To fully grasp what is at stake, we must paradoxically step back, ascending to a higher level of abstraction, by recalling what constituted the genuine philosophical novelty introduced by quantum concepts. This will help us understand why addressing the question through memory and remembrance—an approach that may not seem immediately intuitive—proves so insightful. The baroque title under which these remarks are gathered will thereby become clearer.

The first “black box” is the brain itself—or the psyche, depending on your viewpoint. Memory’s functioning offers a striking illustration: partial, fragmentary, constantly reconstructed, and reinforced through acts of recollection, its nature remains somewhat mysterious. Neuroscientists, sometimes doubling as psychologists, propose sophisticated theories and models that essentially highlight the

artificial, fabricated, engineered nature of biographical (or “episodic”) memory, revisited and reconsolidated through our acts of attention and reminiscence, via processes of reinforcement or long-term potentiation of the synaptic connections involved in preserving... *what* exactly? The memories themselves, persisting between reminiscences? Or rather the multiple representations corresponding to them when they actualize in consciousness as images, hovering between imagination and perception? Proponents of the connectionist approach to mind readily speak of “neural activation patterns” distributed throughout brain matter to emphasize the dynamic nature of memory formation and preservation, but the fundamental problem remains: how to reconcile these third-person descriptions with the first-person experience we all have of lived memories—memories lost and found, recollected and transformed. What is the mode of existence of a singular memory, given its elusive, unstable phenomenological texture, confirmed by connectionists’ recognition of its essentially composite and reconstructed character?

A sober, deflationary, even reductionist interpretation would claim that in reality there is no such things as memories, only acts of recollection. “Memory” thus becomes merely a convenient label for a class of diverse representations grouped under a common mnemonic theme. But doesn’t this simply shift the question to the theme itself? How does the theme persist? For clearly there exists a referential anchor to which we return periodically: a past experience, a fragment of autobiography, is targeted not as the present it once was but as an element of our past, that we can target at different levels of generality, and sometimes recall directly as episodic memories whose vivid details create a genuine sense of revival. This coupling between a mnemonic theme and its specific manifestations in evoked or recollected memories seems fundamentally tied to our subjective experience of memory. The central role memories play in our lives suggests we consider that memories have a life of their own. One approach is to frame memory temporally as a kind of performance occurring at the scale of a moment, a period, or an entire lifetime. When speaking of a memory, we actually refer to a set of remembering acts that involve mobilizing multiple mnemonic traces pointing toward the same source-event in the past. This framework allows philosophers and neuroscientists to begin a dialogue without either side dismissing or drastically reducing the other’s viewpoint. But the real work remains ahead.

“Patterns,” [*motifs*] “themes”: it is not for nothing that the musical metaphor irresistibly suggests itself to us. Bergson, who compared duration to a melodic flow, insisted on the fact that the process of localizing a recollection in the past “cannot at all consist, as has been said, in plunging into the mass of our memories, as into a bag, to draw out memories, closer and closer to each other, between which the memory to be localized may find its place.” (*Matter and Memory*, New York, Zone Books, 1991, p. 171). But if there’s also no grand album where memories are archived like photographs, what evidence do we have for the existence of memories themselves, beyond the episodes where we recall them as images? Let’s acknowledge that a memory’s mode of existence isn’t that of a fixed perceptual image that can be archived—its identity isn’t that of an object or specific mental content momentarily entering consciousness. There remains the persistent feeling that recollection involves more than *ad hoc* reconstruction cobbled together from experience-fragments stored in our neural circuitry and perpetually reshuffled. Bergson argues that we intuitively grasp that *something* endures beyond our moments of recollection—something not reducible to the neural firing patterns scattered throughout our brains.

We must try to give shape to this intuition, even if it leads us down strange paths. Bergson’s philosophy blazes the trail by first teaching us that experience itself can’t be reduced to a series of archived “snapshots.” Lived experience possesses a certain density or quality of presence that unfolds in duration, and perhaps this is

precisely what persists in episodic memory, attached to singular moments. Not the spatial scene where action unfolds, but the gesture that gathers scattered elements in a single impulse [*élan*]; not the group portrait where everyone poses properly, but the tension and energy running through bodies, a certain atmospheric quality giving that hour its particular tone. These flowing qualities are not attached to discrete instants; they are strands of duration that attention vaguely identifies in the moment, strands overlaid with other strands experienced simultaneously across multiple scales, as well as more or less expansive, more or less profound planes of consciousness. Within perceptual experience itself exists something other than an image, something less defined than an image, yet already more than an indistinct cloud of sensory aspects delivered to the brain's machinery.

To put it in another way, memory is inseparable from a continuous perceptual activity, a process that bears no resemblance to what might be suggested by the cinematographic recomposition of experience through successive discrete captures. If recording occurs on some level, it happens like the continuous sculpting of a rock by flowing water. If the brain manages to extract from the present what will later prove useful for reconstructing memories from perceptual fragments, it doesn't do so by capturing things at 24 frames per second, but in keeping with the ongoing action, following attention's oscillations. Of course, each moment of experience can be decomposed, in retrospect, from multiple viewpoints. Whatever its atmospheric unity, the countryside picnic from that summer afternoon ten years ago admits an indefinite multiplicity of possible decompositions, virtually enveloping countless "images," snapshots, sequences, and more or less blurred vignettes we might replay when the time comes. But precisely, this isn't what's preserved, even if this is how we typically remember it. In this regard, the sensible essence of Combray condensed in a madeleine's taste remains the exception proving the rule.

Let us provisionally leave Bergson, whose scientific knowledge, though impressive, inevitably seems insufficient at a time when brain imaging appears to realize the fantasy of tracking memory dynamics in real time. Much remains to discover on that subject, and models abound. Yet the relevance and persistence of the philosopher's questions is clear from how the problem of consciousness—of the emergence of mind from neural processes—keeps resurfacing like a sea serpent. Assuming the problem is properly framed, we're still left facing something essentially opaque here. As opaque, perhaps, as the double-slit apparatus, that other black box physicists devised to test light's properties: a double-slit plate toward which particles are projected, inputs and outputs corresponding to measurements taken at the extremities, a mathematical framework organizing these measurement results, and in between, at the device's core, a process that defies description in conventional terms and utterly escapes our ordinary intuition about particles moving through space.

Shall we say the particle emitted at the entrance immediately spreads throughout space like a field, enjoying diffuse existence until observed? We must still acknowledge that the observed interference fringes—whose characteristic pattern indeed signals wave-like behavior—consist entirely of impact traces marking where particles struck the screen. Schrödinger described this unprecedented situation:

"We must, so it seems, give up the idea of tracing back to the source the history of a particle that manifests itself on the plate by reducing a grain of silver-bromide. *We cannot tell where the particle was before it hit the plate.* We cannot tell through which opening it has come. This is one of the typical gaps in the description of observable events, and very characteristic of the lack of individuality in the particle. We must *think* in terms of spherical waves

emitted by the source, parts of each wave-front passing through both openings, and producing our interference pattern on the plate—but this pattern manifests itself to *observation* in the form of single particles.” (Erwin Schrödinger, “Science and Humanism”, in *Science and the Greeks and Science and Humanism* p. 151).

Between two discrete observations of a particle’s state (be it an electron or a photon), between entrance and exit, we can no longer trace a continuous trajectory within the box, no longer distinguish it from other similar particles following other trajectories. The physicist must resign himself to abandoning causality in its conventional form, and his very subject matter eludes him.

From this perspective, similarities already emerge between the brain-memory black box and the wave-particle black box. Memory itself, as experienced by us through voluntary or involuntary recall, likewise eludes the kind of causal tracing that would let us follow its thread backward through successive steps to its origin—the source-event of an encounter or experience located in our past. Memory’s sudden crystallization during involuntary recall evokes the wave-particle materializing randomly here or there during measurement, in a way that precludes the reconstruction of a continuous trajectory, and consequently the deduction of its position from knowledge of its previous states using deterministic schemes. Only large numbers permit deterministic description in statistical terms: the distribution of measurements in space, just as the associated dynamic states, can be predicted with remarkable accuracy, but this applies only to crowds of generic occurrences, never to specific events. And just as the wave function “collapses” abruptly during measurement to a value corresponding to an observable’s eigenstate, a memory temporarily crystallizes during recall into a particular version—more or less probable—depending on the circumstances of recall and various contextual cues. More precisely, the parallel to the context of experimental measurement in physics would be the complex network that connects a given memory with other memories, but also with the emotions, perceptions, and thoughts coloring and transforming it at that precise moment. Thus, modulated by context, memory crystallizes to appear in a particular form.

If there was a way to give mathematical expression to a “mnemonic wave function,” it would associate each variable with a spectrum of values corresponding to the memory’s different eigenstates, with their respective probabilities. This remains only an analogy, since the fundamental difference is that quantum probabilities reflect the situation’s intrinsic indeterminacy, while at first glance, memory-associated probabilities might simply express an incomplete description of the underlying neuronal configurations. However, in all fairness, this limitation strictly applies only under the hypothesis of one-to-one correspondence between distinct, individualized memories and their material counterparts. Considering that each sensory memory component actually activates distinct networks, and conversely that identical networks can participate in preserving and recalling a host of different memories, the idea that each memory corresponds to a well-defined neuronal configuration only retains persisting heuristic value. And the problem worsens because memory’s psychic nature grows increasingly elusive and less resembling a discrete state with defined contours as we move from actualized memory toward the nebulous background against which it stands out. The coupling between memories and distributed neural activation patterns loses much of its relevance when we focus specifically on what persists between two recollection episodes.

It will be noted, moreover, that in connectionist conceptions, the momentarily regenerated mnemonic content doesn’t survive the recollection episode; it immediately dissipates as a flow of traces distributed across various brain regions—traces

that function less as engrams than as “weights” assigned to synaptic connections, that we may reinterpret in terms of probabilities of future activations. A particular configuration of connection weights corresponds practically to a disposition for producing certain activation patterns in response to specific stimuli, sensory or otherwise. To repeat, conservation doesn’t involve encoding discrete traces that correspond one-to-one with well-defined memory contents. Rather, there are multiple patterns deposited across different brain organizational levels, following different pathways or networks of superimposed dispositions or activation probabilities in a non-bijective relationship that theoretically allows multiple possible realizations (John Sutton & Gerard O’Brien, “Distributed traces and the causal theory of constructive memory,” in *Current Controversies in Philosophy of Memory*, A. Sant’Anna et. al. (eds), London, Routledge, 2024, p. 88). To avoid excessive focus on “traces,” we could directly model memories themselves, assigning occurrence probabilities to certain possible versions of a given memory, or to activation patterns capable of triggering memory “recalls” of a particular kind. In any case, producing the corresponding mnemonic image becomes a kind of “measurement” in the sense that it involves randomly selecting one possible memory state based on its own probability distribution, or on the probability distribution associated with superimposed neural activation patterns likely to correspond to that memory.

Naturally, the term “superposition” must be handled cautiously, as there is no point in invoking quantum probabilities in a macroscopic context (unless we follow Roger Penrose and Stuart Hameroff, who hypothesize that consciousness and memory involve quantum processes within neuron microtubules). Nevertheless, the analogy remains valid at a certain level of generality, emphasizing in both cases the inseparability of observer and observed, of measurement and experimental context, and consequently a fundamental measurement-related indeterminacy. Without delving into this matter’s complexities, let’s simply summon Schrödinger’s cat. In his famous thought experiment, the physicist envisioned the animal in “superimposed” states, “entangled” with the entire experimental setup, raising a famous paradox. In reality, we should consider the cat to be *neither* dead *nor* alive (double negation)—not dead *or* alive (disjunctively), nor dead-alive (conjunctively), despite this hypothesis’ speculative interest. Pending evidence, before opening the box to verify its condition, the cat remains suspended in quantum superposition: not the combination of two incompatible states, but a fundamentally undetermined state. Essentially, we should acknowledge that the quantum system the cat stands for lacks the substantiality or a permanent property-bearer, even if these properties are contradictory ones. The cat isn’t a stable subject existing, with variable probability degrees, in some mixed state determined in itself before observation or measurement. This roughly summarizes the lesson perceptive philosophers, likely including Schrödinger himself, drew from this theoretically entangled situation: ultimately, we should abandon our default ontology—objects with proper properties—to instead discuss fields of potentialities or propensities, the evolution of which is described by the wave equation in terms of detection probability. Perhaps we should avoid ontology altogether, adhering to Schrödinger’s recommendation to view the wave function as a “prediction catalog” linked to particular experimental setups (see Michel Bitbol, *L’Aveuglante proximité du réel*, Paris, Champs-Flammarion, 1998)? In every case, quantum theory demands serious revision of the spontaneously realistic grammar of predication that attributes well-defined properties to subjects. This approach is aligned with the fundamental lesson the physicist repeatedly emphasized regarding the supposed individuality of quantum “objects”:

“We must not admit the possibility of continuous observation. Observations are to be regarded as discrete, disconnected events. Between them there are gaps which we cannot fill in. There are cases where we should upset everything if we admitted the

possibility of continuous observation. That is why I said it is better to regard a particle not as a permanent entity but as an instantaneous event. Sometimes these events form chains that give the illusion of permanent beings—but only in particular circumstances and only for an extremely short period of time in every single case.” (Erwin Schrödinger, *op. cit.*, pp. 131-132).

Despite this warning, for metaphysically-inclined philosophers, quantum phenomena and their quasi-objects present the perfect opportunity to give free rein to their ontological imagination. The new status of quantum “objects” suggests replacing substances and states with process and events without support: *grins without cats*. Lewis Carroll thus joins the conversation, soon accompanied by Julio Cortazar, Alfred Whitehead, and Bergson again. The latter explained that real change—qualitative change, irreducible to spatial movement—alone possesses true substance: it is more substantial, in fact, than the “something” supposedly changing by moving through successive states. The core of all becoming, he claimed, what accounts for its cohesion and robustness, is precisely memory—but memory internal to change, i.e., the past’s continuation and preservation within the present. Following another metaphysical thread, we might identify the Cheshire cat itself as a bundle of smiles, meows, purrs, and backs-archs, forming a bouquet of “tropes” or “abstract particulars” detached from any subject. Whatever solution we adopt, the ultimate question remains whether we can apprehend grins purely adjectivally or adverbially rather than attributively. Returning to Wonderland, we must forget the cat and simply say “it smiles” as we say “it rains”: up in the tree, smiling occurs, and perhaps a cat materializes around it... Similarly, regarding the double-slit black box where particles behave wave-like, we should say interference occurs, and wavelike behavior generally, in a way that confers inevitable indeterminacy to measurement, without pronouncing on the phenomenon’s intrinsic nature, which as we said truly is neither wave nor particle.

Memory poses a problem of the same kind. We fix it by recalling it, with varying clarity and detail, thereby giving it a new profile: collapse of the mnemonic wave packet... In reality, as psychologists and neuroscientists agree, we reconstruct it entirely, contributing to its “reconsolidation,” potentially impoverishing it or distilling it to an outline that may be handled by semantic memory modules. It’s as if memory constitutes itself while projecting into multiple distinct self-versions. But again, how do we account for its individuality? As suggested earlier, conventional connectionist descriptions notably miss an important feature of memories, namely their *distinctive cadence*, the temporal physiognomy or profile that allows them to mesh with the continuity of psychic life without completely losing their singularity. Before being recovered as an image or diluting as a schematic idea, memory first develops and preserves itself in the action itself, when it occurs: it’s inherently linked with the temporal individuating principle that Bergson recognizes in the dynamics of duration, and consequently in every thread of experience, insofar as it is lived in duration. Change comes with an internal memory that saves it from the fleeting punctuality of the moment, gives it resilience and a form of super-existence evidenced by its second life as memory. This led Bergson to the startling claim that memory forms not afterward, once perception has passed, but simultaneously with it: this contemporaneity of memory and perception is illustrated by the fascinating “*déjà vu*” anomaly, which he describes as a “memory of the present” (Henri Bergson, “Memory of the present and false recognition,” in *Mind-Energy*, New York, Henry Holt, 1920). The principle of past preserving and continuing itself in the present explains why what is in the making, enduring real change, itself doesn’t pass away, precisely because it is not formed in the instant, or moment by moment, but in an uninterrupted, continuous flow of duration. Only the present passes; the past doesn’t pass but preserves itself. Carried away by these startling claims, Bergson is very close to dissolving the problem altogether:

ultimately, we needn't ask *where* memory is preserved. Certainly not in the brain, according to him. If the brain serves any purpose, it's merely as a recall instrument—filtering, selecting, and fixing memory as image. The past is preserved *by itself*, automatically! But at the risk of repetition: how does this apply to the distinctive physionomy of a single memory? How is lived duration, containing as it does its own preservation principle, preserved in the form of individualized memories rather than the heterogeneous continuum it otherwise represents? How does the flow of experience transform into memorable moments?

This question remains insoluble if framed *on a single reality plane*. Bergson's proposal firmly distinguishes the *virtual* character of memory considered in itself, which he refers to as "pure memory," [*souvenir pur*] from its multiple actualizations as consciousness-presented memory-images. Between these actual and virtual planes, memory forms a "dynamic schema" deploying across differentiated planes of consciousness, corresponding to various degrees of depth and intensity, different levels of organization. Memories are extracted from an unstable, floating mnemonic matter that Bergson describes as "nebulosity," a pre-individual field constituting the past's very medium:

"Whenever we are trying to recover a recollection, to call up some period of our history, we become conscious of an act *sui generis* by which we detach ourselves from the present in order to replace ourselves, first, in the past in general, then, in a certain region of the past - a work of adjustment, something like the focusing of a camera. But our recollection still remains virtual; we simply prepare ourselves to receive it by adopting the appropriate attitude. Little by little it comes into view like a condensing cloud; from the virtual state it passes into the actual; and as its outlines become more distinct and its surface takes on color, it tends to imitate perception. But it remains attached to the past by its deepest roots, and if, when once realized, it did not retain something of its original virtuality, if, being a present state, it were not also something which stands out distinct from the present, we should never know it for a memory." (*Matter and Memory*, *op. cit.*, pp. 133-134)

"Nebulosity" doesn't equate pure memory with an indeterminate or overdetermined object, in the sense suggested by the "superposition" of quantum states before measurement. Rather, it returns memory to the past's very medium, beyond any actual determination. We spontaneously turn toward this medium whenever we make the effort to remember. It's truly a medium, not a substrate or support: nebulosity is not the carrier of actualized images revived in consciousness through recall, but the milieu from which they are extracted. More simply, it designates memory's modality before actualization happens. There's no question of returning to pure memory as a template or prototype for memory actualized as image. This, by the way, explains why we can't easily trace memories back through a continuous causal chain to the source-events that triggered them. Here lies the true source of the difficulties faced by contemporary causal theories of memory.

To conclude, let's briefly examine the mechanism of voluntary recollection:

"When we let our memory wander at random, without effort, images succeed images, all situated on the same plane of consciousness. On the contrary, as soon as we make an effort to remember, it seems that we gather ourselves at a higher level to then descend progressively toward the images to be evoked." (Henri Bergson, «Intellectual Effort,» in *Mind-Energy*, New York, Henry Holt, 1920 p. 201).

This description portrays memory emerging from its nebulous background. Initially, it is but a dull presence, a kind of call. If it eventually takes form, it's through a series of more-or-less abrupt shifts connecting it to various associative series (related memories, semantic resonances, sensory echoes) across different organizational planes of consciousness. This process certainly contains something stochastic, perhaps quantum even: a train of discontinuous images crystallizing in turn, forming and dissolving abruptly like kaleidoscopic views, before suddenly delivering the missing memory—in this case, a name the philosopher had “on the tip of his tongue.” This example also confirms that the medium of pure memory isn't an undifferentiated field: it already encompasses multiple expanding nebulosities, including more luminous points awaiting development into memory constellations. We ultimately return to the rhythmic physiognomy mentioned earlier, only expressed now through memory's jerky actualization process. What's essentially preserved (perhaps exclusively on the psychic plane) isn't features of experience whose traces the brain can redistribute, nor constantly reworked neural activation patterns, but a certain overall schema, what we previously called a “dynamic schema” (*ibid.*, p. 161), organizing memory elements, making them mutually supportive as part of an integrated dynamical process. Every recollecting effort is dimly oriented by this schema which, in its pure form, designates “a point where the multiplicity of images seems to condense into a single, simple and undivided representation” (*ibid.*). Of course, no image can capture this—and it's certainly not an object. If art can offer a fleeting glimpse—and, to some extent, let us feel it—echoing the insights of physicists or neuroscientists, then the metaphysician's work will not have been mere figures traced upon the water's surface.

Remerciements

Cet ouvrage fait suite à une exposition et un projet de recherche conçus par l'association Convergences Créations, le musée Nicéphore Niépce, le Laboratoire Kastler Brossel, le Quantum Matter Institute et la Morris and Helen Belkin Art Gallery de l'Université de la Colombie-Britannique, en partenariat avec la Maison Poincaré.

Avec le soutien du Fonds de dotation d'Elaia, le Fonds de dotation de l'Institut Henri Poincaré, le Quantum Information Center Sorbonne Université, le DIM QuanTiP de la Région Ile-de-France, CISCO France, la Société Française de Physique, l'Ambassade de France au Canada et Paragon.

Nos remerciements vont également aux personnes suivantes qui ont soutenu le projet ou ont participé à ses différentes phases :

Shahrazad Abbasi, Mathilde Alibert, Gilles Alvarez, Paola Baca, Nicolas Baudouin, Sylvie Benzoni, Sylvain Besson, Marialya Bestougeff, Anne Biraben, Anne Blanchard, Sylvie Boulanger, Anya Brochier, Clara Chalou, Anne Chatellier, Élodie Christophe, Senka Cuk, Aurélie Dablanc, Jean Dalibard, Andrea Damascelli, Géraldine Dantelle, Gratianne Daum, James Day, Stéphanie Dubois, Valentin Durand, Menattallah Elserafy, Jean-Baptiste Entremont, Elisabeth Giacobino, Frédéric Grosshans, Anne-Marine Guiberteau, Khamsa Habouchi, Antoine Heidmann, Daniel Hennequin, Capucine Jefroykin-Senné, Amal Kasry, Peter Knapp, Florence Lamy, Xavier Lazarus, Enora Le Seach, Theo Lelieur, Marie-Christine Lemardeley, Andrew MacFarlane, Claire McNichol, Pierre-Michel Menger, Jose Merino-Lopez, Charlotte Montel, Dominique Mouhanna, Hernan Gabriel Pais, Valentina Parigi, Aurélien Peilloux, Emmanuel Perez-Duarte, Hélène Perrin, Hermann Petre, Shelly Rosenblum, Patrick Sauze, Dongjoon Song, Irène Souroque, Nicolas Treps, Jana Tyner, Olivier Valiente, Zoé Vessière, Léa Viale, Josie Xu, Brigitte Zana, Jing Zhao, Vincent Zonca.

EXPOSITION

Ce livre est une extension de la démarche de recherche-création menée par Céline Boisserie-Lacroix, Caroline Delétoille et Aurore Young, qui a abouti à l'exposition « Sensation Quantique ».

L'exposition inaugurale a été proposée à la Maison Poincaré    Paris du 10 avril au 26 juillet 2025. Elle fait suite à des résidences au sein du Laboratoire Kastler Brossel (Paris) et du Stewart Blusson Quantum Matter Institute (Vancouver).

Le projet est porté par l'association Convergences Créations.

COMMISSARIAT ARTISTIQUE

Céline Boisserie-Lacroix

ARTISTES

Caroline Delétoille
Chadi Abo
Max-Louis Raugel

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Direction scientifique : Aurore Young
Comité scientifique : Tristan Briant, Allegra Calabrese, Rémi Coulon, Jules Grucker, Tanguy Loison, Dominique Mouhanna, Adrien Rossille, Alban Urvoy

SCÉNOGRAPHIE

Kevin Lebouvier

EFFETS VISUELS

Hecat Studio (Chadi Abo, Nasser Abo, Phil Man, Lucio Mazza, Yasmeen Fanari, Fourkane Mhoma, Amandine Meydan, Ahlam Fallatah, Mysoon Alrammal).

Cette publication, ainsi que l'exposition associée, ont bénéficié du soutien du Fonds de dotation d'Elaia, du Fonds de dotation de l'Institut Henri Poincaré, de la Société Française de Physique, de CISCO France, du Quantum Information Center Sorbonne Université (QICS), du DIM QuantIP de la Région Ile-de-France, du musée Nicéphore Niépce, Ville de Chalon-sur-Saône.

L'exposition est placée sous le patronage de la Commission nationale française de l'UNESCO.

Institut Henri Poincaré | Maison Poincaré
(Sorbonne Université / CNRS)

Laboratoire Kastler Brossel (CNRS, ENS, Sorbonne Université, Collège de France)

Stewart Blusson Quantum Matter Institute et The Morris and Helen Belkin Art Gallery, University of British Columbia (Vancouver, Canada)
Ambassade de France au Canada

CATALOGUE

  ditions Naima, Julien B  zille
Direction   ditoriale : Céline Boisserie-Lacroix
Traduction : Claire McNichol

PHOTOGRAPHIES DES LABORATOIRES

p. 1, 115, 120, 121, 123, 124, 128, 129, 132, 133, 138, 174, 176, 192-193, 200 : Stewart Blusson Quantum Matter Institute (University of British Columbia, Vancouver)
p. 44, 48, 49, 174 : Stewart Blusson Quantum Matter Institute (University of British Columbia, Vancouver), courtesy Dongjoon Song
p. 6, 56, 196, 197, 199 : Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, Paris)
p. 26-27, 206, 122, 136, 184, 206 : Laboratoire Kastler Brossel (Collège de France, Paris)

Achevé d'imprimer en mars 2025 par Merico (groupe Paragon)    Bozouls (France).

ISBN 978-2-37440-212-3
ISBN 978-2-37440-213-0 (PDF)
ISBN 978-2-37440-214-7 (EPUB)

Ce catalogue a bénéficié du soutien de Paragon.

   Convergences Créations
   Les auteurs des textes et images, 2025



musée Nicéphore Niépce



FONDS DE
DOTATION



PARAGON



MORRIS AND HELEN BELKIN ART GALLERY
belkin.ubc.ca