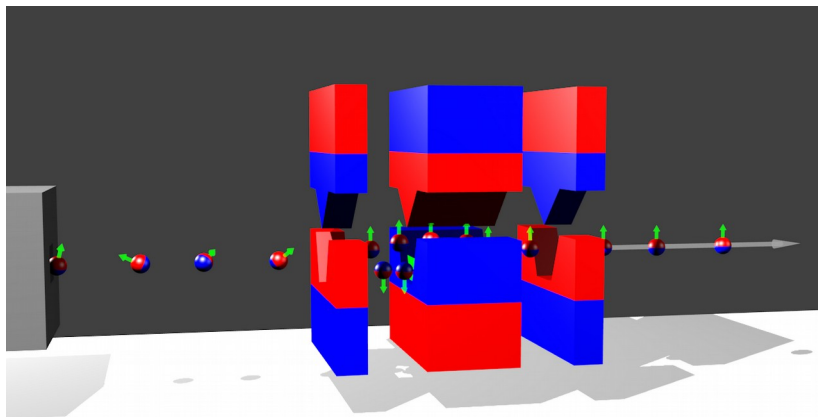


LA PHYSIQUE QUANTIQUE EN TOURISTE

Saisons 1 et 2 :
Aperçus et concepts fondamentaux

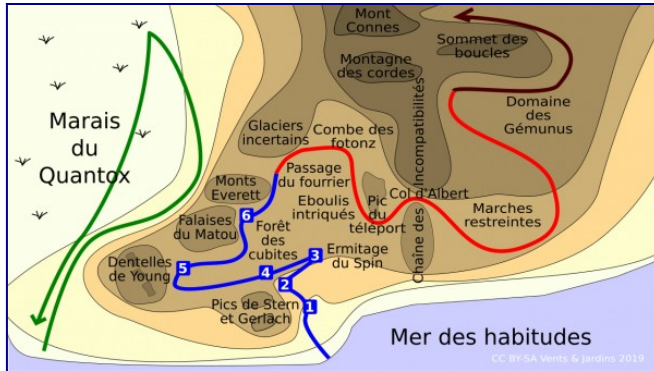


Christophe Dioux

Vents & Jardins 2020

Introduction

Ce guide vous invite à découvrir la vraie physique quantique « en touriste », autrement dit en amateur.



Il vous amènera au cœur des questionnements philosophiques que pose cette physique nouvelle, avec plus de rigueur que ne peuvent le faire les vulgarisations courtes habituelles, mais sans pour autant vous noyer dans les mathématiques compliquées des professionnels. Et ainsi, il vous permettra de vous faire votre propre opinion, scientifiquement étayée, sur tous ces produits et services qui se prétendent « quantiques » de nos jours.

Christophe Dioux est un ancien instituteur, amateur d'arts, de lettres et de sciences. Partant du principe qu'on explique beaucoup mieux les choses quand on a mis soi-même longtemps à les comprendre, il partage avec nous ses carnets de voyage dans un domaine parfois difficile d'accès, en s'appuyant sur les cours des experts les plus réputés.

Table des matières

| | |
|---|----|
| LA PHYSIQUE QUANTIQUE EN TOURISTE..... | 1 |
| Introduction..... | 2 |
| Table des matières..... | 3 |
| Remerciements..... | 10 |
| Invitation au voyage..... | 11 |
| Révolutions conceptuelles..... | 12 |
| Notre progression..... | 18 |
| Peut-on « comprendre » la physique quantique ?..... | 18 |
| Et pour les étudiants ?..... | 18 |
| Atténuer les difficultés mathématiques..... | 20 |
| Peut-on la comprendre sans faire de maths du tout ?..... | 21 |
| Et si on a toujours été mauvais en maths ?..... | 21 |
| Quel niveau pour commencer et quel niveau en fin de parcours ?..... | 22 |
| OK, alors pour commencer, que signifie le mot « quantique » ?..... | 22 |
| « Physique quantique » ou « Mécanique quantique » ?. | 23 |
| Quantique et quantox..... | 25 |
| Le précédent « magnétique »..... | 25 |
| La quantique et le chinois..... | 27 |
| La fabrique de l'intox..... | 29 |
| Physique et métaphysique..... | 30 |
| Théories, hypothèses et réfutabilité..... | 32 |
| Les génies incompris..... | 34 |
| Métaphores abusives et quantox commerciaux..... | 35 |
| Les gourous..... | 37 |
| Alors comment s'y retrouver dans tout ça ?..... | 40 |
| Carte, compléments et guides..... | 41 |

| | |
|---|----|
| La carte..... | 41 |
| Le site web et les vidéos sur Youtube..... | 43 |
| Votre guide..... | 44 |
| Saison 1 : Marche d’approche rapide..... | 45 |
| Présentation de l’expérience de Stern et Gerlach..... | 46 |
| Expériences de pensée..... | 48 |
| Une expérience classique avec des aimants..... | 50 |
| Notre dispositif..... | 51 |
| Premier aimant..... | 52 |
| Deuxième aimant..... | 54 |
| Dans n’importe quelle autre position..... | 54 |
| Les grands aimants du laboratoire..... | 57 |
| L’atome d’argent..... | 58 |
| Des motifs erronés mais instructifs..... | 58 |
| Les modèles de Rutherford et Bohr..... | 59 |
| Champ magnétique dans le modèle de Rutherford..... | 61 |
| Structure électronique..... | 64 |
| Mais franchement !!!..... | 65 |
| Les aimants bizarres..... | 67 |
| Forme bizarre..... | 67 |
| Électroaimants..... | 68 |
| Une mauvaise idée..... | 69 |
| La solution..... | 70 |
| Le montage final..... | 71 |
| Le résultat historique..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| Électroaimants débranchés..... | 74 |
| Électroaimants branchés, résultat "classique" attendu..... | 76 |
| La réponse de la nature..... | 77 |
| Derniers espoirs classiques..... | 80 |
| Deux états observés possibles..... | 80 |
| États non observés à la sortie de l'expérience..... | 82 |
| États impossibles..... | 84 |
| Dernières tentatives d'explications classiques..... | 85 |
| Bienvenue dans le monde quantique !..... | 90 |
| Quizz de fin de la saison 01..... | 91 |
| Questions..... | 91 |
| Réponses..... | 97 |
| Selon vos résultats..... | 99 |
| Saison 2 : Aperçus de physique quantique..... | 101 |
| La Lune existe-t-elle quand je ne la regarde pas ?..... | 102 |
| La saison 02 de notre voyage..... | 107 |
| Deux expériences de pensée..... | 110 |
| En bref..... | 110 |
| Deux appareils imaginaires..... | 110 |
| Le dispositif de Stern et Gerlach « amélioré » par Feynman | 112 |
| L'appareil « mystérieux » de Leonard Susskind..... | 119 |
| Vers le prochain chapitre..... | 123 |
| « Comprendre » la mesure du spin..... | 124 |
| En bref..... | 124 |

| | |
|--|-----|
| Un peu de terminologie..... | 125 |
| Spin..... | 125 |
| Détecteurs..... | 127 |
| États bien définis..... | 127 |
| Up, Down, et Right..... | 128 |
| « Kets » de Dirac..... | 129 |
| « Bras » de Dirac..... | 130 |
| « Brackets » de Dirac..... | 131 |
| Détecteurs et mesures..... | 132 |
| Exemples d'états bien définis..... | 133 |
| Spins dans l'état Up, appareil en position Up..... | 133 |
| Spins dans l'état Up, appareil en position Down..... | 134 |
| Quatre autres configurations « bien définies »..... | 135 |
| États « sans valeur bien définie »..... | 136 |
| Spins « légèrement penchés »..... | 136 |
| Spins « d'avantage penchés »..... | 139 |
| Spins dans l'état bien défini $ R\rangle$ | 140 |
| Notre première équation quantique..... | 141 |
| Deux autres configurations « sans état bien défini ».... | 142 |
| « Bien définis » par rapport à quelle observation ?..... | 143 |
| « Superposition » et « décohérence »..... | 144 |
| Spins dans l'état "Up"..... | 145 |
| Basculement du détecteur..... | 146 |
| Sélection des spins orientés vers la droite..... | 147 |
| Retour du détecteur à sa position initiale..... | 148 |
| Indétermination, hasard et incertitude..... | 149 |
| « Comprendre » les lois de la Nature ?..... | 150 |
| États classiques et états quantiques..... | 152 |
| En bref..... | 152 |
| États classiques..... | 152 |
| États quantiques..... | 154 |

| | |
|---|-----|
| Un peu plus de terminologie..... | 155 |
| Températures..... | 159 |
| Positions..... | 160 |
| Vitesses et positions..... | 161 |
| Polarisation d'un photon..... | 162 |
| Et enfin, le célèbre chat !..... | 163 |
| Un détour par le supermarché quantique..... | 164 |
| Le cœur du « mystère quantique » en un seul chapitre..... | 168 |
| En bref..... | 168 |
| La quantique et les maths..... | 168 |
| Un photon et deux boîtes..... | 170 |
| Très peu de maths..... | 171 |
| Calcul de la probabilité..... | 173 |
| En résumé :..... | 175 |
| Et avec de la matière ?..... | 175 |
| L'effet tunnel sous forme de jeu..... | 177 |
| En bref..... | 177 |
| Démocrite, la gentille particule..... | 178 |
| Le jeu de l'effet tunnel..... | 182 |
| Et si elle était passée ?..... | 186 |
| Et si la plaque avait été plus épaisse ?..... | 187 |
| Le téléphérique des postulats..... | 188 |
| En bref..... | 188 |
| La « déraisonnable efficacité des mathématiques »..... | 188 |
| On embarque pour la montée !..... | 191 |
| 1) Principe de combinaison..... | 192 |
| 2) Principe de correspondance..... | 194 |
| 3) Principe de quantification..... | 196 |
| 4) Règle de Born..... | 197 |

| | |
|---|-----|
| 5) Réduction du paquet d'ondes..... | 197 |
| 6) Evolution du système quantique dans le temps..... | 199 |
| Attention à la descente !..... | 200 |
| Corpuscules, ondes, champs et particules..... | 201 |
| En bref..... | 201 |
| Trois exemples..... | 202 |
| Comment conceptualiser l'abstraction en physique ?..... | 203 |
| Les corpuscules..... | 204 |
| Les ondes..... | 206 |
| Les champs..... | 209 |
| Copenhague et le réel..... | 211 |
| Le principe holographique..... | 214 |
| Du microcosme quantique au macrocosme classique..... | 216 |
| En bref..... | 216 |
| La « table d'émeraude »..... | 217 |
| Questions de taille..... | 219 |
| Le blé..... | 219 |
| La quantité de lumière..... | 219 |
| L'électricité..... | 220 |
| Et bien plus encore..... | 221 |
| Questions de moyennes..... | 222 |
| Température moyenne..... | 222 |
| Aimantation moyenne..... | 224 |
| Questions de durées..... | 226 |
| Nombres complexes..... | 228 |
| Trois pistes et un postulat..... | 229 |
| Fentes, chats, intrications et Qbits..... | 230 |
| En bref..... | 230 |
| Les fentes de Young..... | 231 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Le chat de Schrödinger..... | 233 |
| Spins intriqués..... | 235 |
| Une analogie..... | 236 |
| Pour aller plus loin..... | 239 |
| Qbits et informatique quantique..... | 240 |
| Conclusion de la saison 02..... | 244 |
| Bibliographie..... | 246 |

Remerciements

Tout d'abord un très grand merci à Dame Nature, sous son double aspect de Nature naturante et de Nature naturée cher aux spinoziens.

Merci à Épicure ainsi qu'à Antoine et Marie-Anne Lavoisier. Puisque toute inspiration vient d'en haut, je les place tous les trois au pinacle de mon Panthéon.

Et un très grand merci aux ami(e)s qui m'ont aidé à finaliser ce livre et plus particulièrement, pour leurs conseils, leurs critiques, leurs corrections, leurs encouragements et leurs retours :

Bernard Bénédic, Pierre Von Berg, Dominique Bonifas, Joseph Eskenazy, Philippe Loutrel, Joël Picault, Bernard Pouchin.

Avec une mention spéciale à Frédéric Da Vitoria pour ses très nombreux conseils. Son regard très aiguisé et ses pdf longuement annotés m'ont été vraiment très précieux¹.

1 Et au moment d'écrire ces deux derniers adjectifs, je ne peux m'empêcher de sourire en me souvenant que c'est lui qui m'a fait découvrir Tolkien il y a 40 ans. Merci pour ça aussi, Fred ! :-D

Invitation au voyage

Il y a sans doute beaucoup moins de **physiciens amateurs** que d'astronomes amateurs ou d'amateurs d'art.

On peut d'autant plus le regretter que la physique dite moderne (et qui est pourtant déjà plus que centenaire) a considérablement bouleversé l'ensemble des activités humaines.

Elle l'a fait sur le plan technique avec l'électronique qui nous accompagne désormais dans toutes nos activités, mais elle l'a fait aussi au plan des concepts philosophiques, en remettant en cause de manière expérimentale et théorique tout ce que les anciens croyaient savoir en matière de lois physiques, de hasard, de causalité, de matière, d'énergie, d'espace et de temps.

Mais elle a un handicap, c'est qu'elle est abstraite. Pas toujours très compliquée, du moins dans ses principes fondamentaux, mais souvent très abstraite, c'est vrai. Mais en tout cas pas totalement inaccessible au commun des mortels, je crois en être la preuve.

Alors, envie de visiter un peu l'univers des physiciens amateurs ? Dans ce cas, suivez-moi !

Révolutions conceptuelles

« *La physique moderne nous dit que :*

1. *Les particules élémentaires sont à la fois des ondes et des corpuscules.*
2. *Un électron peut être à deux endroits différents en même temps.*
3. *Un chat peut être à la fois mort et vivant.*
4. *Deux photons très éloignés l'un de l'autre peuvent communiquer instantanément.*
5. *Le résultat d'une expérience de physique quantique dépend de l'observateur ».*

Ces phrases, vous les avez sans doute entendues cent fois.

Mais sont-elles vraies ? Est-ce que la « physique moderne » dit vraiment ça ?

En fait, la réponse est « non ». La physique moderne ne dit rien de tout ça.

Elle dit que :

- On ne peut pas prévoir le comportement des particules élémentaires si on ne les décrit pas avec **des équations qui ressemblent** à la fois aux équations des ondes et à celles qui décrivent des particules.

- On ne peut pas calculer correctement le mouvement des électrons si on ne fait pas **comme si** ils pouvaient avoir plusieurs trajectoires en même temps.
- Un atome (mais pas un chat !) peut se trouver dans des états qui n'existent pas dans notre monde habituel, et qu'on ne peut décrire **mathématiquement** que comme une combinaison d'états normalement incompatibles.
- Le **calcul du comportement** de deux photons intriqués donne le même résultat quand ils sont séparés et quand ils ne le sont pas.
- Le résultat d'une expérience de physique quantique comporte toujours une part de **hasard** et qu'on ne peut jamais négliger le rôle tenu par **l'appareil de mesure**.

« Ah bon ? Du coup, c'est juste une question de calculs ? Aucun intérêt de se compliquer la vie avec ça, les conceptions des anciens sur la nature du monde physique sont toujours valides ? On peut continuer à philosopher sur la nature des choses comme on le faisait autrefois ? »

Non plus ! La physique quantique prouve, et elle le prouve par l'expérience et pas seulement par le calcul, que la matière n'est pas une substance continue comme le croyaient certains des anciens.

Elle prouve aussi que non, « *Ce qui est en haut n'est pas comme ce qui est en bas* » et en tout cas pas de la manière qui était envisagée par les alchimistes de la Renaissance.

Elle a mis à bas aussi ce qu'on appelle désormais le « réalisme naïf » selon lequel le monde devrait, en gros, se conformer à notre « bon sens ».

Elle a démenti le « matérialisme naïf » selon lequel le monde serait constitué d'une multitude de petites particules matérielles ou d'atomes indivisibles comme le pensait Démocrite.

Elle remet surtout en question, au niveau le plus fondamental qui soit, et sous le contrôle de la vérification expérimentale, les rapports entre le « réel » et la « connaissance » que nous en avons.

Toutefois, dans toutes ces révolutions, loin de rompre complètement tout lien avec avec le passé, la « physique moderne » s'inscrit dans une manière d'interroger le monde qui remonte elle aussi à l'antiquité.

Pythagore :

Tout est nombre.

Platon :

Nul n'entre ici s'il n'est géomètre.

Galilée :

Le livre de la nature est écrit en langage mathématique.

Hermann Weyl² :

Tous les résultats a priori de la physique ont eu leur origine dans la symétrie.

Pour autant, est-ce que les mathématiques sont vraiment le constituant ultime de toute chose, ou est-ce qu'elles ne sont qu'un moyen de décrire un « réel » qui nous échappe toujours plus chaque fois qu'on tente de le saisir ?

Les scientifiques sont divisés sur ce sujet, comme un témoin le dialogue suivant³ :

Un étudiant qui venait de lire un livre célèbre de physique théorique :

Et si l'espace, après tout, n'était que le champ d'application des opérateurs hermitiens⁴ ?

Et Heisenberg⁵ de lui répondre :

Absurde ! L'espace est bleu et il y a des oiseaux qui volent dedans.

Alors qui a raison ?

Évidemment, nous n'avons pas la prétention de résoudre l'énigme, nous nous contenterons de l'approcher de plus près,

2 Hermann Weyl, 1885-1955, mathématicien et physicien

3 Cité par Georges Lochack, « La géométrisation de la physique », Flammarion, 1994, p.178

4 Les opérateurs hermitiens sont des objets mathématiques que nous étudierons dans la saison 4 de notre voyage.

5 Werner Heisenberg, 1901-1976, prix Nobel en 1932 « pour la création de la mécanique quantique », nous reparlerons souvent de lui.

car au final, comme toujours, c'est la Nature et elle seule qui séparera le vrai du faux.

Un exemple concret de ce que je veux dire par là :

En 1928, Paul Dirac trouve une équation qui, depuis, porte son nom. Il remarque qu'elle présente une symétrie particulière. Cette solution symétrique correspond à des particules qui n'ont jamais été observées. Il postule que ces particules pourraient exister réellement. Elles seront effectivement observées quatre ans plus tard. Ce sont les anti-électrons. Avec eux vient la découverte de l'anti-matière.

Et voilà comment des considérations géométriques très abstraites ont abouti à la découverte expérimentale d'une nouvelle sorte de matière, totalement inconnue jusque là.

Dans les années 1960, les physiciens repèrent dans les équations une autre symétrie intéressante. Ils tentent de renouveler l'exploit et élaborent une nouvelle théorie baptisée « supersymétrie » (« SuSy » pour les intimes). On monte les expériences au CERN. Manque de chance, la Nature, 50 ans plus tard, alors qu'elle vient tout juste de dire enfin « oui » pour le « boson de Higgs », dit « non » à SuSy. Les particules supersymétriques attendues ne sont pas au rendez-vous de l'expérience. Cinquante années de travail, des vies entières de chercheurs, à refaire entièrement !

Comment ne pas penser alors qu'il existe bien quelque part un « réel », capable de résister à nos idées les plus brillantes, et

que la géométrie et l'intelligence ne gagnent pas à tous les coups ?

« *Ouh là làààà ! Me direz-vous. Que tout ça a l'air compliqué tout ça ! Je n'y comprendrai jamais rien !* »

Relax !

Tout l'objet de ce livre est justement de vous expliquer toutes ces choses de manière suffisamment simple pour que tout le monde puisse suivre, mais suffisamment approfondie pour que chacun puisse se faire sa propre opinion, sur des bases solides.

Aucune autre raison de s'y intéresser ?

Oh que si !

Dans vos moments d'*otium*⁶, et plus particulièrement si vous êtes à la retraite, il est très important de garder vos neurones actifs. Vous pouvez les faire travailler avec des mots-croisés ou des sudokus, mais c'est mieux de le faire avec des sujets plus vastes et plus divers, qui les sortiront un peu plus de leur routine.

Vous intéresser à la physique quantique à la retraite pourrait bien vous aider à mieux vieillir !

6 *L'otium* est un concept de la Rome antique, hélas oublié de nos jours et qui pourrait avantageusement remplacer le concept de « retraite ». Il correspond au temps de la vie pendant lequel le citoyen est libre de travailler pour le bien commun comme il le veut et quand il le veut.

Notre progression

Peut-on « comprendre » la physique quantique ?

Si les avis sont partagés sur cette question, notamment parmi les plus grands spécialistes⁷, c'est parce qu'il faudrait commencer par s'entendre sur ce qu'on appelle « comprendre » les lois de l'Univers. C'est l'une des questions auxquelles nous répondrons ici.

Mais **oui**, pas besoin d'être un génie, avec un peu de patience, n'importe qui peut en comprendre au moins les grandes lignes.

Et pour les étudiants ?

Tout ce voyage est organisé pour **des touristes**, autrement dit pour des gens qui s'intéressent à la physique en **amateurs**, comme d'autres s'intéressent à la peinture ou à l'astronomie en amateurs.

Il ne convient probablement pas à des étudiants qui se destinent à devenir ingénieurs ou chercheurs. Pourquoi ?

Les futurs chercheurs étudient les mathématiques et la physique à l'université. Ils consacrent à ces études plus de 10 années, à temps plein, pendant lesquels ils vont vraiment au fond des choses. Ils n'hésiteront pas, par exemple, à consacrer

⁷ « Si vous croyez comprendre la mécanique quantique, c'est que vous ne la comprenez pas. » Citation célèbre de R. Feynman, mais qui nécessite d'être replacée dans son contexte.

plusieurs semaines ou mois de leurs études à vérifier rigoureusement que $1+1=2$ ⁸.

Les futurs ingénieurs approfondissent moins la théorie. Pour eux, le temps consacré à chaque notion est compté. En classes préparatoires puis en école d'ingénieur, ils doivent avant tout faire preuve d'efficacité. Si une notion à leur programme doit être acquise en un mois, ils ne peuvent lui consacrer qu'un seul mois, au terme duquel ils devront savoir résoudre les problèmes concrets que cette notion porte de résoudre.

Pour **les amateurs** comme nous, les choses sont très différentes. Nous pouvons consacrer à cette étude un peu de notre temps libre, mais ce n'est pas notre occupation principale. Nous survolerons peut-être avec intérêt la preuve que $1+1=2$, mais nous n'y consacrerons certainement pas plusieurs mois à temps plein ! De même, nous n'essayerons pas de résoudre des problèmes industriels. Notre méthode consistera plutôt à essayer de comprendre **l'idée générale** en manipulant **des cas simples**.

Voilà pourquoi un étudiant n'a pas, normalement, de temps à perdre avec des voyages touristiques comme le nôtre, du moins dans le champ de ses études. Mieux vaut qu'il se concentre sur son cursus officiel et, s'il lui reste du temps, qu'il aille se changer les idées, s'occuper de sa vie affective et/ou faire un peu du sport.

8 Voir [1+1=2 \(en arithmétique de Peano\)](#)

Atténuer les difficultés mathématiques

Les mathématiques de la physique moderne sont beaucoup plus abstraites que celles de la physique classique. C'est pourquoi la plupart des vulgarisations du sujet n'en traitent pas du tout, au risque de se limiter à des analogies parfois éclairantes mais le plus souvent trompeuses. L'amateur de physique s'en aperçoit rapidement et se décourage, souvent.

Comment allons-nous procéder ? Il est temps d'introduire un tout petit peu de vocabulaire. Surtout ne vous effrayez pas tout de suite, ça ne durera pas longtemps !

Le concept de base pour comprendre un peu sérieusement la physique quantique, c'est le concept d'**état quantique**. C'est un concept abstrait qui fait appel à des mathématiques abstraites et à ce qu'on appelle des **espaces de Hilbert**. Une des grosses difficultés avec les espaces de Hilbert, c'est qu'ils n'ont presque jamais seulement deux ou trois dimensions, mais le plus souvent une **infinité de dimensions**. Du coup, pour faire des calculs dans des situations aussi compliquées, il faut utiliser des outils mathématiques très avancés.

L'astuce que nous allons utiliser dans notre voyage, c'est celle qu'utilise Leonard Susskind au début de célèbre cours de Stanford⁹ : Nous nous limiterons aux cas les plus simples qu'on puisse trouver : Lorsqu'il n'y a que deux ou trois dimensions comme c'est le cas pour « l'aimantation » (le spin) d'un électron.

9 [The theoretical minimum, winter 2012](#)

Peut-on la comprendre sans faire de maths du tout ?

Hélas **non** !

Je le répéterai souvent : Galilée avait raison, « *La nature est un livre écrit en langage mathématique* ». C'est comme ça, on n'y peut rien. Mais ici, nous allons progresser **dou-ce-ment**. Nous ne *ferons* pas de maths dans les deux premières "saisons" (ce qui ne nous empêchera pas d'en *parler* un peu) et même sans maths, nous commencerons à comprendre beaucoup de choses.

A partir de la saison 03, nous ferons un peu plus de maths¹⁰, mais toujours très progressivement et d'une manière accessible à tous. C'est là tout notre pari. Ce sera possible car nous nous adressons à un public de citoyen(ne)s curieux, prêts à consacrer un peu de temps à la physique quantique pour en comprendre les grandes lignes, et non pas à un public de futurs ingénieurs, obligés d'en maîtriser de nombreux détails, au prix de plusieurs années d'étude.

Et si on a toujours été mauvais en maths ?

Pourra-t-on suivre si on a toujours été mauvais en maths ? Oui, OUI, **OUI !!!** A condition de ne pas prétendre rivaliser avec les ingénieurs et les chercheurs et d'avancer progressivement. C'est ce qui m'est arrivé et c'est ce que nous allons démontrer !

Soyez modeste mais n'ayez aucun complexe : Ce que j'ai fini par comprendre, n'importe quel autre imbécile peut le

¹⁰ OK, **beaucoup** plus de maths.

comprendre aussi. Donc pour quelqu'un d'aussi intelligent que vous, ça ne posera aucun problème. Il faudra seulement faire preuve d'un peu de patience et de persévérance.

Quel niveau pour commencer et quel niveau en fin de parcours ?

Pour les deux premières saisons, aucun niveau n'est pré-requis en mathématiques. Dans la saison 3, nous réviserons un peu de mathématiques de niveau collège-lycée, puis nous irons un peu au-delà du lycée à partir de la saison 4, mais en nous limitant toujours à des cas simples, facilement compréhensibles.

À la fin de notre voyage, nous devrions être en mesure de raccrocher (si nous le souhaitons et au prix évidemment d'un sérieux effort complémentaire, notamment en mathématiques) des formations plus académiques, voire de niveau licence.

OK, alors pour commencer, que signifie le mot « quantique » ?

L'adjectif "quantique" vient du mot latin "*quantum*" et il correspond au fait qu'il existe dans la nature des quantités minimales de la plupart des choses¹¹.

On ne peut pas avoir moins d'argent qu'un atome d'argent, on ne peut pas avoir moins de lumière bleue qu'une certaine quantité minimale de lumière bleue, on ne peut pas avoir moins d'électricité que celle qui est contenue dans un électron, et on

11 De la plupart des choses ou de toutes ? Disons que pour les distances et les durées, c'est plus compliqué.

ne peut pas avoir moins d'aimantation que celle qu'on observe dans les atomes de l'expérience de Stern et Gerlach, comme nous allons le vérifier bientôt.

C'est assez contre-intuitif, parce qu'à notre échelle, tout ce qui est matériel peut toujours être divisé en parties plus petites.

Et nous verrons bientôt comment l'existence de ces quantités indivisibles de la plupart des choses va nous obliger à changer beaucoup plus nos habitudes de pensée en ce qui concerne le « réel » que ce qu'on pourrait croire de prime abord.

« **Physique quantique** » ou « **Mécanique quantique** » ?

En deux mots, la **mécanique quantique** n'est que la première partie de la physique quantique.

Elle est toujours enseignée en premier. Nous commencerons donc par elle.

Après elle vient la **théorie quantique des champs**. C'est plus compliqué, puisque ça mêle la mécanique quantique avec la relativité restreinte. Nous y jetterons un œil seulement bien plus tard.

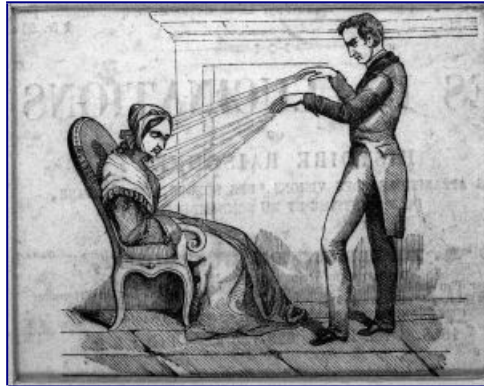
Vient ensuite, en suivant l'ordre habituel, la **chromodynamique quantique**, qui va s'intéresser notamment à ce qui se passe à l'intérieur des protons. Nous n'en parlerons probablement pas dans notre voyage.

Viennent, ensuite encore, les recherches sur la **gravitation quantique**. Non seulement ce sont des sujets extrêmement difficiles, mais de plus, à la différence des précédents, jusqu'à présent, aucune vérification expérimentale n'existe encore. Ça restera donc hors de notre portée. Peut-être pourrons-nous en dire quelques généralités et les observer de très loin mais notre voyage « en touristes » ne nous permettra pas de randonner à de pareilles hauteurs.

Désolé si je vous déçois. Mais dites-vous qu'à défaut de tout voir, nous explorerons tout de même beaucoup de territoires passionnants.

Et dans un premier temps, nous allons observer maintenant le paysage d'un peu loin pour planter le décor et éviter de prendre par la suite des vessies pour des lanternes.

Quantique et quantox



Le précédent « magnétique »

À la fin du 18ème siècle, la physique commence à réaliser des progrès importants dans les domaines de l'électricité et du magnétisme. Dans une expérience célèbre, le physicien et médecin italien Galvani étudie l'influence de l'électricité sur les membres inférieurs de grenouilles. Il formule l'hypothèse d'une « électricité animale » sécrétée par le cerveau.

Ces travaux inspirent le médecin viennois Franz Mesmer qui prétend soigner ses patients par le « magnétisme animal ». De nos jours encore, on vend des aimants censés aider les gens à se maintenir en bonne santé.

Sont-ils efficaces ? Nous n'allons pas ici discuter de l'efficacité des croyances, ce n'est pas notre propos.

Nous pouvons en revanche constater qu'un même mot, à savoir le mot « magnétisme » désigne des phénomènes très différents qui peuvent tous sembler mystérieux, en tout cas qui échappent en partie à nos 5 sens et à notre intuition.

En effet, d'où vient cette force qui repousse ou attire deux aimants ? Si je passe ma main entre les deux aimants qui se repoussent ou s'attirent ainsi, je ne sens rien. Rien d'étonnant donc à ce que ça puisse sembler un peu "magique".

Et d'ailleurs, les prestidigitateurs du 19ème siècle le comprennent bien, puisqu'à cette époque, il est fréquent de rebaptiser les numéros de magie sous le nom de "physique amusante".

Le mot « magnétisme » est donc utilisé de cinq manières différentes:

- En **sciences physiques**, il désigne une classe de phénomènes qui sont expérimentés et théorisés par la méthode scientifique.
- En prestidigitation et **dans le monde du spectacle**, il est utilisé comme métaphore artistique pour faire imaginer au public l'existence de phénomènes extraordinaires. Tout le monde sait bien qu'il y a un truc, mais ça ne gêne pas le plaisir de l'étonnement.
- En **publicité**, il est utilisé pour attirer le client sans que le produit vendu ait quoi que ce soit de particulièrement magnétique.

- Dans le domaine des « **sciences occultes** », de la voyance et des médecines parallèles, il est également utilisé comme une métaphore pour désigner des phénomènes mystérieux auxquels chacun est libre de croire ou de ne pas croire¹², mais qui ne relèvent en tout cas pas des sciences expérimentales en général et de la physique en particulier.
- Enfin, certains **charlatans** vont plus loin encore et prétendent en savoir plus sur le magnétisme étudié par les physiciens que les physiciens eux-mêmes, afin de tirer profit d'un public de crédules.

D'une certaine manière, nous assistons au même genre de confusions de nos jours avec le mot « quantique ».

La quantique et le chinois

Pour préparer ce chapitre, je me suis beaucoup inspiré de l'article de Richard Monvoisin mentionné dans les sources. Et je vais en reprendre mot pour mot cette citation :

Une théorie scientifique, c'est comme une langue vivante.

- *Soit on en ignore tout, mais on en est conscient : par conséquent aux questions sur le sujet on répond qu'on ne sait pas et on fait le deuil d'un avis éclairé sur le domaine.*

12 Je ne milite personnellement contre aucune croyance. Apportons simplement de la lumière (« *Mehr Licht* ») et que chacun se fasse ensuite sa propre opinion.

- *Soit on bosse le lexique de base, les phrases-type : on sait qu'on n'est pas spécialiste, mais on n'est pas dupe, et au moins pourra-t-on se débrouiller dans les cas urgents.*
- *Soit on maîtrise la théorie. Mais cela demande du boulot, d'autant plus que la langue/théorie est exigeante. Rien d'impossible, bien sûr. Comprendre la MQ, c'est comme lire du chinois. C'est possible, mais ça prend du temps.¹³*

Je ne saurais mieux dire. Il n'y a pas plus besoin d'être un génie pour comprendre la physique quantique que pour lire du chinois. Des millions de gens qui ne sont pas du tout des génies savent lire le chinois. Ce n'est pas difficile mais ça prend du temps.

D'ailleurs, tel est bien l'objectif de notre série d'articles sur la « mécanique quantique en touriste ». **Apprendre à lire un peu de physique quantique**, comme on peut apprendre à lire un peu de chinois, sans prétendre devenir des spécialistes, mais en y consacrant suffisamment de temps pour comprendre les bases et ne pas se laisser duper par les charlatans.

13 Quantox : l'art d'accommoder le mot quantique à toutes les sauces
Richard Monvoisin, 2011

La fabrique de l'intox



D'après Richard Monvoisin, la manière dont la presse scientifique française traite des découvertes de la physique quantique jouerait un rôle important dans l'incompréhension assez générale du sujet. Je partage largement son avis.

En 2019, la presse scientifique française est dans un état bien pire encore que la presse généraliste ou régionale. Les abonnés ont disparu, les meilleurs titres ont été rachetés par des "fournisseurs de contenu" pour lesquels la seule chose qui compte est la survie économique, qui dépend de la publicité, donc du chiffre des ventes en kiosque et du nombre de clics sur l'Internet.

Pour y parvenir, le contenu des articles importe peu. Le contenu doit être de qualité correcte, sans plus, afin de ne pas faire fuir les lecteurs, mais **ce qui importe surtout c'est d'attirer le lecteur et de le diriger vers les publicités.**

C'est la raison pour laquelle on voit tant de titres racoleurs à la une des articles et des publications sur les réseaux sociaux. Ces

titres n'ont le plus souvent qu'un très lointain rapport avec le contenu de l'article, lequel, lui-même, n'est souvent hélas que la traduction d'une vulgarisation approximative, rédigée en anglais, d'un article paru dans la véritable presse scientifique.

On en trouvera quelques exemples dans la section "travaux pratiques" ci-dessous.

Physique et métaphysique

Dans notre tour d'horizon des abus du mot "quantique", nous allons commencer par le plus "soft", mais c'est aussi le plus difficile à démêler.

Des physiciens célèbres et extrêmement compétents se lancent parfois dans des spéculations qui sortent de leur domaine d'expertise pour se lancer dans des réflexions philosophiques et métaphysiques. C'est leur droit le plus absolu, mais ça ne retire par la nécessité, pour leurs lecteurs, de faire la distinction entre les faits démontrés par la physique et les hypothèses théoriques voire métaphysiques. Nous allons prendre trois exemples particulièrement connus:

- **Isaac Newton.** Évidemment, Newton ne connaissait rien de la physique quantique. Mais je voudrais citer ce très grand savant ici car s'il est mondialement célèbre pour ses apports décisifs dans les sciences, ce qui est moins connu, c'est qu'il s'intéressait aussi beaucoup à la théologie et à l'alchimie. Il ne viendrait à l'idée de personne, de nos jours, de confondre les théories scientifiques de Newton, maintes et maintes fois

validées par l'expérience¹⁴ avec ses hypothèses alchimiques ou avec ses conclusions théologiques. C'est cette distinction qu'il convient de maintenir aussi pour des savants illustres issus de la physique quantique.

- **Erwin Schrödinger** À tout seigneur, tout honneur, personne ne pourrait contester à Erwin Schrödinger ses compétences en physique quantique ! Mais ce brillant savant ne limitait pas ses réflexions au domaine de la physique. Il a aussi développé une profonde réflexion philosophique qu'on peut découvrir en français notamment dans une compilation éditée à titre posthume¹⁵. Nous ne nous risquerons évidemment pas ici à critiquer l'œuvre de Schrödinger. Rappelons toutefois que s'il avait parfaitement le droit de voir dans les théories physiques des concordances avec les philosophies orientales, il convient de faire la distinction entre ses travaux de physique - validés maintes fois par l'expérience et par l'ensemble de la communauté scientifique - et ses opinions philosophiques personnelles. Il serait évidemment faux d'affirmer que les premières seraient la preuve de la validité des secondes.
- **Stephen Hawking** était lui aussi un immense savant et personne ne pourrait le contester. Mais quand, un peu à

14 Bien que complétées par la relativité d'Einstein quelques siècles plus tard, les lois de Newton restent totalement pertinentes dans leur domaine d'application.

15 Erwin Schrödinger, *Ma Conception du Monde. Le Veda d'un physicien*, Mercure de France, 1982

l'inverse de Schrödinger, il a publié en 2010 un livre intitulé "*The Grand Design*" dans lequel il se livrait à des réflexions sur l'inexistence ou en tout cas la non-nécessité de Dieu, cette prise de position fit scandale et beaucoup de scientifiques tout aussi compétents que lui estimèrent qu'il était sorti de son domaine de compétence et que ses affirmations sur le sujet n'étaient que l'expression de ses (in)croyances personnelles.

Certes, la frontière entre la philosophie et les sciences expérimentales n'est pas toujours nette. Pas plus que celle qui sépare la physique de la métaphysique. Mais le fait qu'une frontière soit floue ne signifie pas que les deux territoires seraient impossibles à distinguer. Je sais distinguer la nuit du jour même si je suis bien incapable de vous dire à la seconde près quand finit l'un et quand commence l'autre.

Théories, hypothèses et réfutabilité

Normalement, en français, le mot « théorie » devrait être réservé aux ensembles cohérents d'explications démontrés par des preuves expérimentales. Mais dans la pratique, de plus en plus souvent, il est employé à la manière américaine, pour parler aussi bien de théories au sens premier que de simples hypothèses, non encore vérifiées. C'est la raison pour laquelle on mentionne chaque année, dans la presse de vulgarisation scientifique, des dizaines de nouvelles « théories ».

Ce qui importe, au-delà des querelles de mots, c'est de rester capables de distinguer les choses:

- La théorie quantique ou la théorie de la relativité générale sont des **théories au sens français** du mot. Elles ont été maintes et maintes fois confirmées par l'expérience.
- En revanche, des choses comme la « théorie des cordes » ou la « gravitation quantique à boucles » se situent à **mi-chemin des véritables théories et des simples hypothèses**. Elles ont été étudiées de manière très approfondie et le sont encore, mais il manque encore les preuves expérimentales qui permettraient de les valider.
- Vient ensuite **la multitude des « nouvelles théories »** dont on parle si souvent et qui ne sont en fait que de simples hypothèses scientifiques. Évidemment, de simples touristes comme nous serions bien incapables d'inventer de nouvelles hypothèses en physique, mais les scientifiques assurent que ce n'est pas si difficile à faire. Ce qui est beaucoup plus difficile, nous disent-ils, c'est de trouver des hypothèses qui, une fois approfondies, non seulement ne soient pas en contradiction avec les résultats déjà connus, mais qui de plus permettent d'en prévoir d'autres. Pour employer un mot savant, une théorie scientifique se doit d'être **réfutable**, c'est à dire de proposer des expériences nouvelles permettant de la départager des autres théories en cours. Sur les dizaines de nouvelles pistes qui sont explorées chaque année en sciences, très peu

parviennent à ce stade. La plupart se terminent par un échec. C'était bien essayé, mais la nature a dit non.

- Viennent enfin la multitude des hypothèses plus ou moins farfelues et plus ou moins éloignées de la physique professionnelle. Les touristes dans notre genre ne sont évidemment pas capables de les distinguer des précédentes mais il y a un signe qui ne trompe pas. Quand tous les spécialistes, ou presque tous, lèvent les yeux au ciel, contentons-nous d'accorder aux originaux le bénéfice du doute, mais évitons de perdre notre temps avec ces **génies scientifiques solitaires et incompris** auxquels nous allons consacrer la section suivante.

Les génies incompris

Contrairement à une idée assez largement répandue, les génies scientifiques incompris sont extrêmement rares dans le monde réel. S'il a pu en exister dans l'Antiquité (et ça reste à démontrer) l'histoire des sciences tend plutôt à montrer leur inexistence dans le monde actuel.

Ce n'est pas un hasard si de nombreuses avancées théoriques sont souvent revendiquées, à quelques semaines d'intervalle, par plusieurs équipes. **La recherche scientifique moderne est un sport collectif**, des centaines de personnes travaillent en même temps sur les mêmes idées. Certes des découvertes inattendues se produisent régulièrement, mais elles ne concernent jusqu'ici que des sujets très limités, au moins au moment de leur découverte. Même Da Vinci, Galilée, Einstein ou Tesla, qu'on prend souvent comme modèles de génies

solitaires, n'étaient pas isolés du reste de la recherche ni incompris de la totalité de leurs pairs.

Il n'est pas rare qu'un grand scientifique ait été incompris par des autorités politiques, religieuses ou autres. Il n'est pas rare non plus qu'un grand scientifique ait été fortement critiqué par beaucoup de ses pairs pour **une partie** de son travail scientifique, ou pour ses prises de position **en dehors** de son domaine d'expertise.

Mais je n'ai pas trouvé d'exemples de grands scientifiques dont les théories n'auraient reçu le soutien **d'aucun de leurs pairs** avant d'être validées par l'expérience. Avec le recul, il semblerait bien au contraire qu'à chaque fois qu'un scientifique s'est retrouvé tout seul dans son domaine à défendre une théorie, la suite de l'histoire des sciences lui a donné tort¹⁶.

Le génie solitaire et incompris, dans le domaine des sciences expérimentales, a donc toutes les chances de n'être en réalité qu'un original comme on en a vu tant, à toutes les époques, depuis les découvreurs de quadratures du cercle jusqu'aux inventeurs de mouvements perpétuels.

Métaphores abusives et quantox commerciaux

De la même manière que la frontière entre les hypothèses physiques et les hypothèses métaphysiques peut être parfois imprécise, ce qui n'empêche pas les deux domaines d'être clairement distincts, il nous faut pour terminer faire la

16 Si vous connaissez des contre-exemples, n'hésitez pas à me les faire connaître par email, Facebook ou tout autre moyen.

distinction entre les métaphores abusives et les gros « quantox » commerciaux.

Les deux partent des mêmes éléments. Il s'agit des analogies très approximatives que nous avons vues dans l'introduction.

Toutes ces analogies ne sont donc pas totalement absurdes. Elles peuvent jouer un rôle utile, pédagogique ou de vulgarisation. Le problème commence lorsqu'elles ne sont plus présentées comme telles mais comme des faits scientifiques, puis utilisées à de toutes autres fins que la vulgarisation scientifique.

Quelques exemples relevés sur l'internet :

- *« Tous les êtres vivants fonctionnent avec des vibrations. Ces vibrations sont émises à partir de plusieurs plans : de la partie la plus dense de notre être comme notre squelette, aux parties les plus subtiles comme notre intuition / notre petite voix intérieure / notre âme (tout dépend de vos croyances, optez pour le terme qui vous parle le plus). Ces vibrations sont en mouvement et peuvent être retranscrites en informations. La Communication Quantique® permet de capter ces informations (provenant de tous les plans de notre être), essentiellement sous forme de mots ».*

Ici, le mot "quantique" est utilisé, au mieux comme une métaphore. Et l'expression « Communication Quantique® » comme une marque déposée (à l'INPI, dans le domaine du coaching). Pourquoi pas? L'important est de ne pas tomber

dans le panneau: « Communication Quantique® » si vous voulez, puisque c'est une marque déposée, mais il n'y a rien là-dedans qui relève de la **physique** quantique.

- « *L'enfantement "Entre science et sacré" avec l'approche quantique de la naissance* »

Bien sûr, il n'y a pas d'interdiction d'utiliser le mot "quantique" pour en faire un usage totalement différent de celui de la science. L'important étant de ne pas tout mélanger.

Les gourous

Dans cette dernière catégorie, inutile d'épiloguer. Voici quelques morceaux choisis:

- « *Qu'est-ce que la physique vient faire dans tout ça ? Préparez-vous à effectuer un saut quantique. Avec son livre avant-gardiste, "God Is Not Dead", xxx démontrait non seulement que science et religion étaient compatibles, mais que la physique quantique prouvait jusqu'à l'existence de Dieu...* »

Franchement, si la physique quantique avait vraiment « prouvé l'existence de Dieu », vous ne pensez pas que vous en auriez entendu parler absolument partout? Achetez le livre, les stages et les formations de cet auteur si vous voulez, mais vous ne risquez sûrement pas d'effectuer un « saut quantique ». Ce gourou indien s'appuie sur sa connaissance (sans doute réelle dans son cas) de la physique quantique pour vendre la nouvelle religion qu'il vient d'inventer.

- *« La science quantique dit que la Conscience est et a toujours été dans l'univers par l'intermédiaire de particules quantiques. La conscience est créée à un niveau quantique, subatomique, à travers l'énergie contenue sans cesse dans l'univers. »*

Ah bon? Elle dit ça la science quantique? Et on pourrait avoir la bibliographie pour vérifier? Ça a été publié où dans la presse scientifique officielle? Ah bon, c'est « pas encore reconnu par la science officielle »? Donc c'est pas la « science quantique » qui le dit, du coup?

- *« Des recherches scientifiques révèlent que le cœur humain possède un « esprit » quantique. Le champ magnétique du cœur est relié aux champs d'information qui ne sont pas limités aux barrières classiques du temps et de l'espace. »*

Sans blague? Et on peut avoir un lien vers les publications officielles de ces « recherches scientifiques »? Non? Franchement, c'est dommage !

- *« Aujourd'hui, la grande préoccupation de la science est de comprendre l'esprit et la conscience. La physique quantique ouvre-t-elle à cette compréhension, ou faut-il d'autres outils pour comprendre ce qui n'est pas du domaine de la physique? Les découvertes de la Haute Métaphysique et du supramental permettent d'aborder les profondeurs spirituelles avec une attitude hyper rationnelle. Pour aller plus loin, ne manquez*

surtout pas l'atelier : Activer votre supra mental. Voici le lien d'inscription... »

Au moins dans ce cas, il n'y a pas vraiment d'arnaque. Les auteurs jouent franc-jeu: Ils nous vendent un stage de « Haute Métaphysique » (avec des majuscules!) pour comprendre « ce qui n'est pas du domaine de la physique ».

On peut juste se demander à quoi ça servait alors de parler de physique pour vendre un stage d'autre chose.

- *« Méditation quantique: Explorez les espaces parallèles grâce aux dernières découvertes scientifiques »*

La méditation est une activité très saine, pas de souci, mais par pitié, laissez la physique quantique à l'écart de ça!



Quantum Magnetic Resonance Body
Analyzer Newest 6TH 47 Report
« Quantique »? Vraiment???

Tiens, un dernier exemple tout simple : Si quelqu'un vous explique que l'étude de la physique quantique va vous permettre de mieux comprendre le sens de la vie, vous en penserez quoi ?

Oui, «Quantox» bien sûr ! D'une manière générale, les sciences expérimentales tentent de découvrir les lois de la nature, c'est à dire comment fonctionnent les choses.

Si vous êtes croyant, la science vous dira comment Dieu a fait le monde, elle ne vous dira pas pourquoi il l'a fait ainsi.

Et si vous ne l'êtes pas, ça ne change rien : elle vous dira comment l'Univers fonctionne et pas pourquoi il est ainsi. Bien sûr, certaines lois peuvent être déduites de lois plus fondamentales. Mais les lois fondamentales, elles, ne découlent de rien. Certains cosmologistes sont parfaitement capables d'imaginer des Univers différents, qui fonctionneraient différemment. Seule l'expérience peut nous dire comme la Nature a fait l'Univers dans lequel nous vivons.

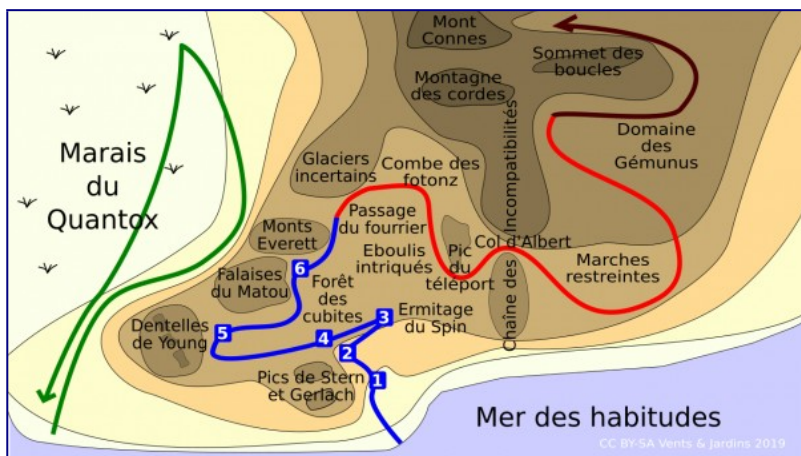
Alors comment s'y retrouver dans tout ça ?

Pas d'inquiétude à avoir, si vous êtes arrivés jusqu'ici, vous commencez déjà à distinguer le quantique du quantox. Et à la fin de ce livre, vous y parviendrez au premier coup d'œil, c'est promis !

Carte, compléments et guides

La carte

Voici la carte prévisionnelle de notre voyage. Elle sera mise à jour au fur et à mesure de notre progression.



Nouveau voyage en pays quantique - mise à jour octobre 2019

L'**itinéraire vert** symbolise ce qu'il est possible de voir, d'assez loin, au moyen de vulgarisations sans mathématiques et sans véritable progression logique. Il est utile, voire indispensable, mais pas suffisant pour véritablement "comprendre" les choses, quoi qu'on désigne par le mot "comprendre".

L'**itinéraire bleu** est celui que nous suivrons. En décembre 2019, nous avons terminé la deuxième étape.

L'**itinéraire rouge** sera pour un autre voyage¹⁷. Le **noir** est hors de portée des amateurs.

Le « **marais du Quantox** » symbolise les charlataneries qui vendent des trucs "quantiques" comme d'autres aux siècles précédents vendaient des appareils "magnétiques" sensés tout guérir. Nous venons d'en parler.

Notre voyage sera divisé comme une série télévisée, en saisons et en épisodes, publiés d'abord sur notre site web et/ou sur notre chaîne Youtube, puis réunis en tomes d'un livre. Le tome 1 qui vous lisez en ce moment synthétise les deux premières saisons.

La **saison 01** constitue une **marche d'approche rapide**. Elle reprend l'**expérience historique de Stern et Gerlach**, conduite en 1922, et nous mènera directement sur le seuil des territoires quantiques avec la découverte du spin.

La **saison 02** nous permet de nous familiariser, avant même de commencer la partie mathématique du voyage, avec les **concepts fondamentaux de la physique quantique** et notamment les postulats de la physique quantique, et quelques-unes des « bizarreries » quantiques les plus célèbres.

La **saison 03** prendra la forme d'une **retraite mathématique à « l'ermitage du Spin »**, ainsi nommé en l'honneur du mathématicien Charles Hermite et de l'étude du spin des particules élémentaires. Nous y resterons le temps nécessaire

17 Vers la physique quantique plus avancée et vers la théorie de la relativité.

pour que chacun puisse se familiariser à son rythme avec le formalisme mathématique de base de la physique quantique.

La **saison 04** nous permettra de revenir de manière beaucoup plus détaillée sur les **postulats de la mécanique quantique** qui auront été rapidement survolés dans la saison 2. Elle aussi sera essentiellement de nature mathématique.

Le site web et les vidéos sur Youtube

Ce livre est repris et complété par deux autres sources d'informations :

- Notre site web : <http://www.ventsetjardins.fr>, rubrique « Comprendre ». Vous y trouverez des compléments, des liens externes et des mises à jour. La présentation y est un peu différente aussi. En effet, les pages du site web sont rédigées au fil de l'eau à la manière d'un wiki. Chaque « épisode » sur le site correspond à peu près à un chapitre du livre, mais il y a sur le site plus de liens externes et plus de digressions, au prix sans doute d'un ensemble moins structuré et de plus de répétitions.
- [Notre chaîne Youtube](#), qui présente les choses de manière plus linéaire et plus succincte mais peut-être aussi plus simple d'accès.

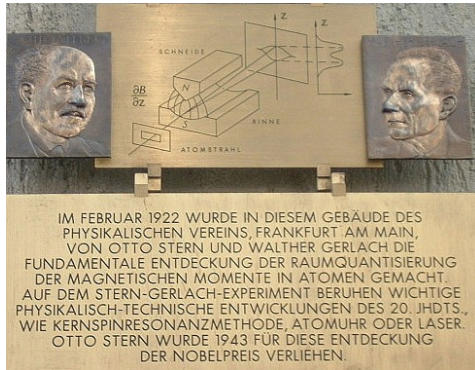
Votre guide

L'auteur n'est pas physicien. Il ne s'intéresse depuis l'enfance à la physique qu'en amateur. Ancien instituteur, il a une conviction, issue de son expérience professionnelle : Les gens qui ont eu beaucoup de mal à comprendre quelque chose l'expliquent souvent mieux que ceux qui ont eu la chance de la comprendre sans effort.

Et ça tombe bien : j'ai mis vraiment très longtemps à comprendre ce qui suit. Le simple fait que j'y sois parvenu suffit à prouver que vous le pouvez aussi.

Alors, rendez-vous dans le chapitre suivant !

Saison 1 : Marche d'approche rapide



*Plaque commémorative de l'expérience
(cc by-sa Peng/Wikimedia)*

Toute la première saison sera consacrée à l'expérience historique de Stern et Gerlach. Elle va nous permettre de découvrir les propriétés du spin de l'électron.

Ce sont ces propriétés qui nous accompagneront ensuite tout au long de la saison 2, au cours de laquelle nous découvrirons les principes fondamentaux de la mécanique quantique.

Présentation de l'expérience de Stern et Gerlach

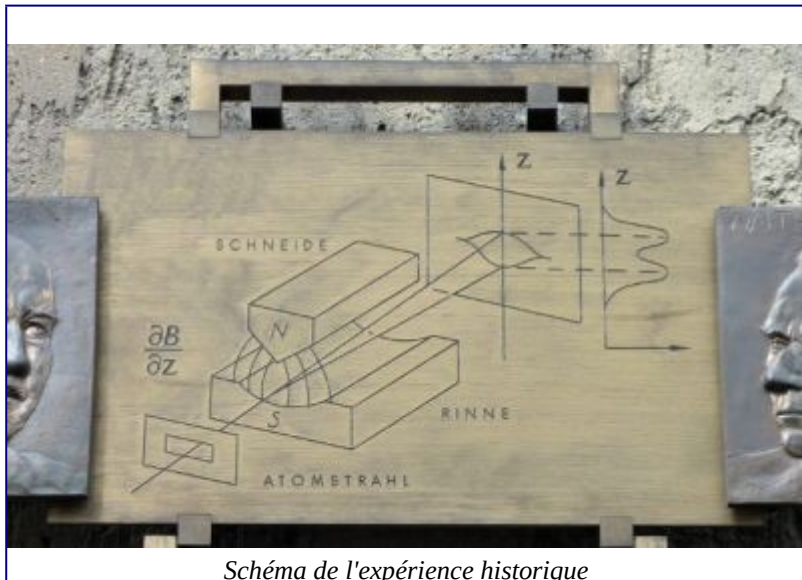


Schéma de l'expérience historique

Le célèbre physicien Leonard Susskind a donné à Stanford, en 2012, un cours destiné à un public beaucoup plus large que celui de ses étudiants habituels.

Ce cours n'est toutefois pas vraiment accessible à tout public. En effet, il est en anglais et il s'adresse à des personnes qui ont déjà acquis par le passé un niveau de mathématiques qui se situe au-delà de ce qu'on apprend dans les classes de terminale. Il suppose notamment acquises la manipulation des nombres

complexes et les notions d'espaces vectoriels ou de calcul matriciel.

Dans « la physique quantique en touriste », nous n'allons pas réinventer la roue. Nous nous baserons sur ce cours de Leonard Susskind et nous en suivrons globalement la logique. En revanche, nous prendrons tout notre temps afin de ne perdre aucun lecteur en route, y compris ceux qui n'ont jamais fait de maths au delà du collège.

Le cours de Leonard Susskind prend comme point de départ le concept de spin de l'électron, qu'il suppose acquis, même s'il en rappelle les grands principes au début de sa première intervention. En effet, le spin de l'électron est le meilleur moyen qui soit de commencer à comprendre les mystères de la mécanique quantique. De plus, lorsque nous commencerons à toucher aux mathématiques dans la saison 3 de notre voyage, il nous offrira des situations beaucoup plus faciles à modéliser et à calculer que d'autres exemples tout aussi célèbres, tels que les fentes de Young.

Nous allons donc consacrer toute la première saison de notre voyage dans les territoires quantiques à **l'expérience historique par laquelle Stern et Gerlach ont mis en évidence, en 1922, le spin de l'électron**. Nous disposerons ainsi d'exemples et de bases solides qui nous resserviront dans toute la suite de notre voyage.

Expériences de pensée

Avant d'aller plus loin, je voudrais donner une information importante qui n'est presque jamais mentionnée dans les articles sur le sujet.

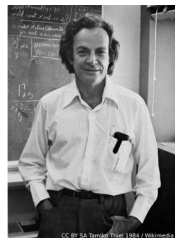
En fait, **la plupart des grands auteurs, et notamment Feynman et Susskind, ne partent pas vraiment de la vraie expérience de Stern et Gerlach**, telle qu'elle a été réalisée en 1922.

Et il y a deux très bonnes raisons à cela.

La première raison, c'est qu'en fait, la véritable expérience est plus compliquée à réaliser que celle qu'on décrit habituellement dans les vidéos de vulgarisation, voire même dans les cours avancés. Ça n'a rien d'étonnant, ça arrive très souvent et c'est très classique. Les expérimentateurs le savent tous : Sur le papier, tout est toujours plus simple que dans la pratique, où il y a toujours un tas d'embêtements matériels à résoudre.

La deuxième raison, c'est que les enseignants ont besoin de se concentrer sur les choses qu'ils veulent étudier et que pour cela, il faut parfois prendre un peu de distances avec le monde réel.

Feynman, par exemple, utilise dans son cours ce qu'il appelle un « **appareil de Stern et Gerlach amélioré** » et dont il dit clairement qu'il est imaginaire. Cet « appareil amélioré » n'a à ma connaissance jamais existé, car il serait incroyablement compliqué et coûteux à réaliser.



Susskind de son côté est encore plus radical. Il parle d'un appareil qui mesure le spin comme par magie, sans rien dire de son fonctionnement interne. Évidemment, son appareil « magique » n'a jamais existé non plus.



Dans les deux cas, il ne s'agit donc pas d'expériences réelles, mais

- soit d'expériences idéalisées,
- soit de ce qu'on appelle des « expériences de pensée », c'est à dire des expériences totalement fictives, mais qui montrent ce que toute la communauté scientifique s'attend à voir le jour où quelqu'un parviendra à les réaliser en vrai.

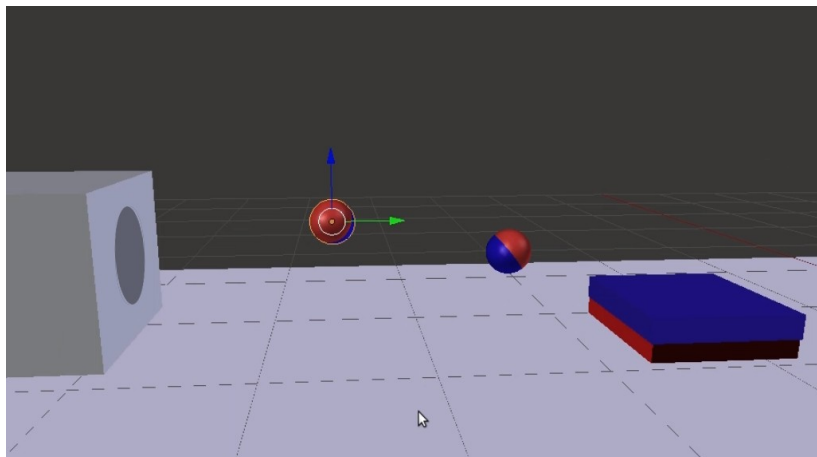
Ça n'a rien d'inhabituel. On a tous vu des dessins expliquant par exemple ce que verrait un voyageur qui se déplacerait dans une fusée à une vitesse proche de la vitesse de la lumière. Et pourtant, personne jusqu'ici ne l'a jamais fait.

Une expérience classique avec des aimants

Maintenant que nous savons ce qu'est une expérience de pensée, nous allons en réaliser une avec des aimants classiques. Cette expérience « classique » nous permettra de comprendre quels résultats Stern et Gerlach auraient obtenu en 1922 si le monde microscopique, à l'échelle atomique, se comportait comme le monde auquel nous sommes habitués, à notre échelle.

En effet, ce n'est qu'après avoir bien compris comment la nature se comporte à notre échelle dans ce genre de situation que nous pourrons commencer à comprendre à quel point elle se comporte d'une manière radicalement différente à l'échelle atomique.

Notre dispositif

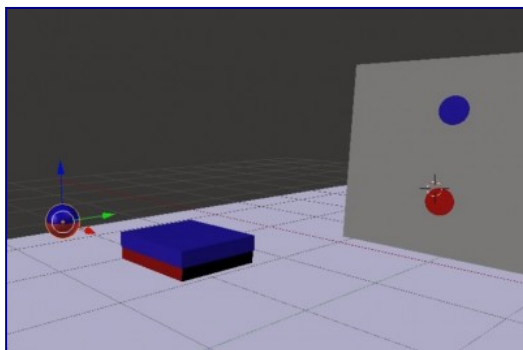


Nous avons ici à gauche un appareil qui dans un instant va lancer des petits aimants sphériques. En fait d'aimants, dans la véritable expérience, il s'agira en réalité d'atomes d'argent dont les physiciens ont toutes les raisons de penser qu'ils vont se comporter comme des aimants. Mais pour le moment nous imaginerons qu'il s'agit de petits aimants ordinaires et sphériques, lancés par l'appareil situé à gauche de l'image.

Ces petits aimants vont survoler ce très gros aimant que j'ai placé sur le sol de mon laboratoire virtuel. Tout l'enjeu de l'expérience est d'essayer de comprendre comment les petits aimants sphériques, qui représentent des atomes aimantés, vont se comporter en survolant le gros aimant.

Premier aimant

Voici notre premier aimant:



Comme tous les aimants, il a un pôle nord, colorié ici en rouge, et un pôle sud, colorié ici en bleu. Si j'ai mis le pôle nord en bas, c'est pour coller au plus près de l'expérience de Stern et Gerlach telle qu'elle est le plus souvent décrite, mais j'aurais pu faire le contraire sans que ça ne change le résultat final, comme on le verra dans un instant.

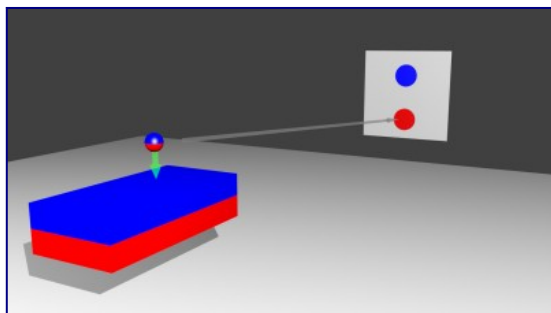
Que va-t-il se passer au moment où notre petit aimant va survoler le gros aimant fixe ?

C'est une expérience de pensée mais je suppose que comme moi, vous avez déjà suffisamment manipulé des aimants dans votre enfance pour le prévoir.

Si je remplaçais le petit aimant sphérique par une bille de verre, elle ne serait pas du tout influencée par l'aimant carré et elle continuerait sa course tout droit pour la terminer bien au milieu de l'écran que j'ai placé au fond de mon labo, entre la cible bleue et la cible rouge.

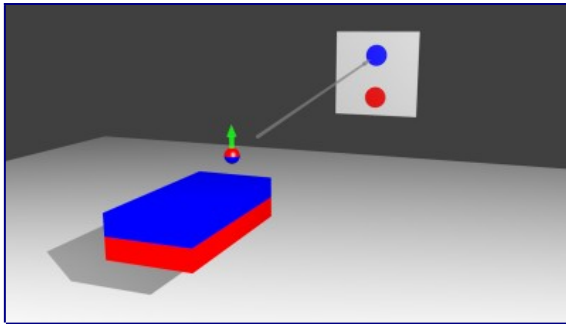
Mais bien sûr, avec un aimant sphérique, les choses seront différentes. Les pôles opposés vont s'attirer et le petit aimant va avoir tendance à venir se coller sur le gros.

Toutefois, s'il a été lancé assez vite, au lieu de venir se coller sur le gros aimant placé au sol de notre laboratoire, il va seulement être dévié dans sa course, vers le bas, et il finira son voyage du côté de la cible rouge.



Deuxième aimant

Si l'aimant est positionné dans le sens inverse, évidemment, les pôles qui se font face seront de même nature. Comme nous l'avons tous expérimenté dans notre enfance, ils vont donc se repousser et notre deuxième aimant finira sa course du côté de la cible bleue.

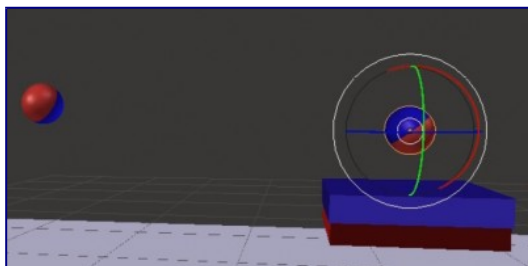


Dans n'importe quelle autre position

Il n'y a bien sûr aucune raison que nos petits aimants sphériques soient toujours bien alignés verticalement.

Ils peuvent se trouver dans n'importe quelle autre position, comme les deux de cette image, et c'est d'ailleurs là que va commencer à se jouer tout le mystère de l'expérience de Stern et Gerlach comme nous le verrons bientôt.

Encore une fois, nous avons tous observé dans notre jeunesse comment se comportent des aimants dans ce genre de situation. Si on ne les maintient pas fermement, ils vont basculer sur eux-mêmes puis venir se coller l'un à l'autre.

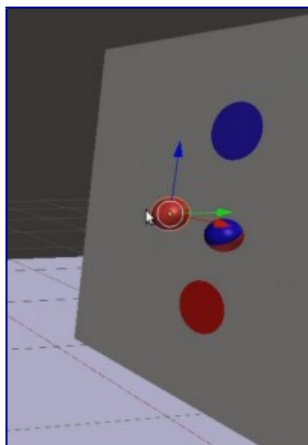


Mais souvenons-nous que nos aimants se déplacent assez vite au dessus des gros aimants. Ils n'auront donc pas le temps de faire complètement ce mouvement.

Au lieu de cela, on peut donc raisonnablement imaginer que les aimants dans des positions intermédiaires basculeront un peu mais surtout seront moins déviés verticalement que ceux qui étaient soit complètement poussés vers le haut soit complètement attirés vers le bas.

En tout logique, nous devrions donc les retrouver à des positions intermédiaires sur la cible.

Et si nous avons déjà quelques connaissances un peu solides en physique, nous pouvons même calculer ces positions intermédiaires¹⁸.



Résumons-nous:

- Les petits aimants sphériques qui sont parfaitement alignés dans le même sens que le gros aimant seront attirés par lui et déviés fortement vers le bas.
- Ceux qui sont exactement alignés dans la position inverse, seront repoussés et fortement déviés vers le
- Ceux qui sont dans des positions intermédiaires subiront des déviations intermédiaires.

Vous l'avez compris, si on passe autant de temps à approfondir tout ça, c'est parce que, justement, les atomes ne se

¹⁸ Elles sont fonction du cosinus de l'angle que fait le projectile avec la verticale. Mais comme nous avons promis de ne pas faire de maths dans les deux premières saisons, je ne le mentionne qu'en note de bas de page.

comporteront pas comme ça. Ils se comporteront de manière quantique et c'est là tout l'objet de notre voyage. Mais chaque chose en son temps.

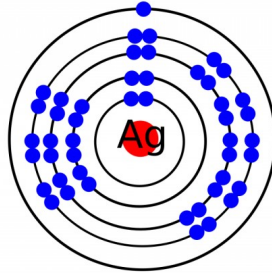
Les grands aimants du laboratoire

Arrivés à ce stade, ceux qui ont déjà vu des dessins représentant l'expérience de Stern et Gerlach se demandent sans doute pourquoi je n'ai représenté qu'un seul gros aimant alors que dans les représentations habituelles il y en a toujours deux, qui ont d'ailleurs des formes bizarres ?

Afin de ne rien laisser dans l'ombre, nous consacrerons tout un autre chapitre à la forme de ces aimants, mais nous pouvons dès à présent donner l'idée générale: Pour que l'expérience fonctionne bien, il faut un champ magnétique beaucoup plus puissant que celui qu'on obtiendrait en ne faisant que survoler un aimant plat.

Mais essayons d'abord de comprendre pourquoi diable Stern et Gerlach pouvaient penser, en 1922, que des atomes d'argent se comporteraient peut être comme de minuscules aimants ?

L'atome d'argent



Pourquoi Stern et Gerlach ont-ils utilisé des atomes d'argent et pourquoi s'attendaient-ils à ce qu'ils se comportent comme de minuscules aimants dans leur expérience ?

Des motifs erronés mais instructifs

En 1922, on commençait tout juste à découvrir la mécanique quantique. C'est pourquoi, si les scientifiques de l'époque avaient raison de penser que les atomes d'argent pourraient se comporter comme de minuscules aimants, ils le pensaient pour de mauvaises raisons.

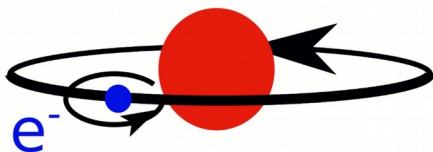
Mais ces mauvaises raisons, nous allons quand même les passer en revue maintenant. Pourquoi ?

- Parce qu'il est important d'essayer de suivre le raisonnement des scientifiques et que leurs erreurs sont souvent aussi riches d'enseignements que leurs succès.
- Parce que ces erreurs, dans notre cas, sont encore répandues y compris dans beaucoup de vulgarisations.

- Et enfin parce que nous aurons l'occasion de revenir réfléchir à leur sujet. En effet, la conception que se faisaient Stern et Gerlach de l'atome d'argent était encore une conception « classique ». C'est à la suite de leurs travaux et de ceux des scientifiques de leur époque qu'on a compris à quel point le monde quantique est différent du monde classique. Eux, ils ne pouvaient pas encore le savoir.

Les modèles de Rutherford et Bohr

Bien que Démocrite, dans l'Antiquité, ait envisagé l'existence des atomes, les expériences qui prouvent leur existence n'ont pu être réalisées qu'à la fin du 19ème siècle.



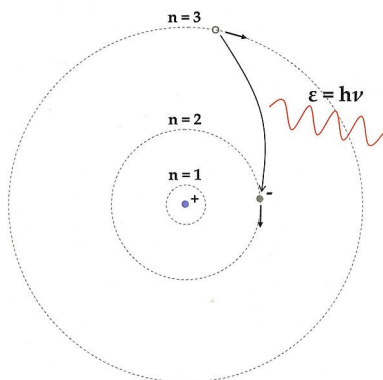
Modèle de Rutherford

À l'époque de Stern et Gerlach, c'est le modèle de Rutherford, complété par Bohr en 1913, qui rend le mieux compte de toutes les découvertes de l'époque.

Ce modèle est au fond l'analogie au niveau atomique du mouvement des planètes autour du Soleil. Il conçoit en effet

l'atome comme étant formé d'un noyau autour duquel tourneraient les électrons. Ces électrons sont imaginés comme étant des corpuscules, c'est à dire des sortes de petites billes microscopiques qui tourneraient non seulement autour du noyau mais aussi sur elles-mêmes.

Le modèle de Bohr est encore « presque » classique. Il est presque identique à celui de Rutherford. En fait, il n'y ajoute qu'une seule caractéristique quantique, c'est que selon lui toutes les orbites ne sont pas possibles pour les électrons, qui « sautent » d'une orbite autorisées à l'autre.



Modèle de Bohr, 1913

Curieusement, ce modèle de Bohr est encore parfois enseigné de nos jours alors qu'il a été détrôné par celui de Schrödinger dès 1926 et que c'est toujours ce modèle de 1926 qui rend le mieux compte des phénomènes que nous étudions en ce moment. Bien sûr, d'autres progrès considérables ont été

réalisés depuis, mais ils concernent principalement le noyau des atomes et pas le mouvement des électrons auquel nous allons nous consacrer maintenant. Pourquoi le modèle de Bohr garde-t-il cette célébrité ? Il y a en fait une raison pratique à cela. Il permet de réaliser des schémas mnémotechniques qui ne correspondent pas au véritable mouvement des électrons, mais qui permettent de se souvenir facilement de la structure électronique des atomes et de leurs différents niveaux d'énergie.

Mais en ce qui nous concerne, c'est pour une autre raison que nous allons prendre le temps de regarder de plus près ce modèle de 1913 : Ce n'est en effet qu'après avoir compris les résultats de l'expérience de Stern et Gerlach et les autres progrès réalisés par la mécanique quantique entre 1913 et 1926 que nous pourrions vraiment comprendre en quoi le modèle atomique de Bohr est aujourd'hui obsolète.

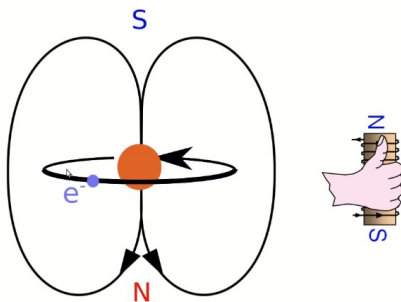
Champ magnétique dans le modèle de Rutherford

Dans le modèle de Rutherford, l'électron tourne autour du noyau. Ce faisant, il se comporte comme un courant électrique qui circule dans un bobinage et il génère un champ magnétique¹⁹. C'est comme ça que fonctionnent tous les

19 Quelques lecteurs m'ont demandé d'expliquer ici **pourquoi** les courants électriques génèrent des champs magnétiques. Je ne peux pas le faire parce que ça nous emmènerait trop loin. Ça a quelque chose à voir avec la théorie de la relativité.

moteurs électriques : Les courants électriques génèrent des champs magnétiques qui obéissent à la « règle de la main droite ».

Si des charges positives circulent en faisant des boucles, on suit leur mouvement avec la main droite qui avance en se repliant le long des boucles. La direction du pouce indique alors le pôle Nord du champ magnétique ainsi généré.



Mais dans notre cas, ce sont des électrons, porteurs de charges négatives, qui sont sensés tourner autour du noyau. Il faut donc inverser la polarité, comme sur l'image ci-dessus.

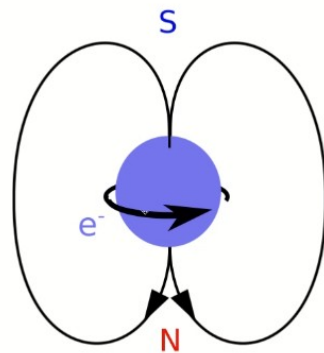
Bon, il y a quand même un problème avec ce modèle de Rutherford, et Bohr et les autres l'avaient bien vu. Si les électrons tournaient vraiment autour du noyau en générant un champ magnétique permanent et classique, ils devraient rayonner de l'énergie en permanence. Et du coup, perdant de l'énergie, ils devraient finir par tomber sur le noyau, ce qui ne se produit pas.

Mais nous ne discuterons pas de ce problème ici, ça nous entraînerait trop loin. Je le mentionne uniquement pour bien montrer qu'à l'époque de Stern et Gerlach, on était déjà très

conscients qu'on n'en était qu'aux débuts des recherches en matière de mécanique quantique.

Imaginons maintenant que notre électron, non content de tourner autour du noyau, se mette en plus à tourner sur lui-même. Les mêmes causes produisant les mêmes effets, il générerait un champ magnétique supplémentaire.

C'est d'ailleurs en calculant ce champ magnétique supplémentaire que les scientifiques ont commencé à se rendre compte que quelque chose clochait dans ce modèle. Pour expliquer les effets observés, si l'électron était vraiment une petite bille tournant sur elle-même, il faudrait que son équateur tourne plus vite que la vitesse de la lumière. Or on sait depuis 1905 que c'est impossible.



Mais bon, faute de disposer d'un modèle plus performant, les scientifiques de l'époque continuent de réfléchir et construire des expériences à partir de celui-ci. Et au bout du compte, c'est la nature et elle seule qui leur donnera les résultats parfois surprenants qui leur permettront de construire de meilleurs concepts.

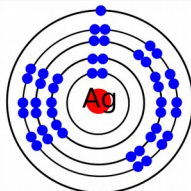
Structure électronique



Article Discussion Lire Modifier Modifi

Configuration électronique par élément chimique

| 47 Ag Argent : [Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹ | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|--|--|--|--|--|--|
| 1s ² | 2s ² | 2p ⁶ | 3s ² | 3p ⁶ | 3d ¹⁰ | 4s ² | 4p ⁶ | 4d ¹⁰ | 5s ¹ | | | | | | |
| 2 | 8 | | 18 | | | 18 | | | 1 | | | | | | |



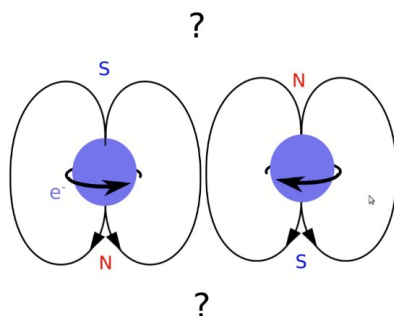
Regardons maintenant de plus près la structure électronique de l'atome d'argent. Elle est composée de 47 électrons répartis par paires ainsi:

- 2 sur la première couche, la plus proche du noyau.
- 2 + 6 = 10 sur la deuxième
- 2 + 6 + 10 = 18 sur la troisième
- 2 + 6 + 10 = 18 aussi sur la quatrième
- et pour finir un électron tout seul sur la dernière couche.

C'est cet électron tout seul qui faisait penser que l'atome d'argent avait toutes les chances de se comporter comme un minuscule aimant. Pourquoi donc ?

Et bien parce que tous les électrons, s'ils sont "aimantés" vont avoir tendance à faire comme tous les aimants "bien élevés" du monde lorsqu'ils sont contraints de se placer côté à côté, c'est à dire à se mettre tête bêche.

Or, s'ils se regroupent ainsi par paires - et on avait déjà à l'époque toutes sortes de raisons de penser qu'ils faisaient quelque chose de ce genre - leurs champs magnétiques opposés vont se neutraliser dès qu'on s'éloignera un peu d'eux.



Mais même dans ce cas, il restera l'électron solitaire qui ne pourra trouver aucun partenaire.

D'une manière ou d'une autre, **l'atome d'argent est donc un très bon candidat pour observer un champ magnétique élémentaire** et c'est justement ce qu'on voudrait observer à l'époque de Stern et Gerlach, le comportement d'un possible champ magnétique élémentaire.

Mais franchement !!!

Mais franchement, me direz-vous, c'est vraiment utile de consacrer autant de temps à ces modèles obsolètes ?

En fait, il y a une autre raison dont je ne vous ai pas encore parlé :

Quand nous aurons compris comment fonctionne le monde quantique, nous n'aurons fait que la moitié de notre voyage !

En effet, il nous faudra tôt ou tard revenir dans le monde de tous les jours et comprendre pourquoi, à notre échelle, il se comporte de manière « classique », si différente des comportements « quantiques » de ses composants élémentaires.

Nous apprendrons en effet, dans la saison 2, par quelle sorte de "miracle" un grand nombre de particules élémentaires finit par se comporter de la manière « classique » habituelle. Déjà au niveau d'un simple atome d'argent, nous verrons bientôt que, bien qu'aucun des électrons ne se comporte de la manière classique imaginée par Rutherford, l'atome dans son ensemble se comporte de manière presque classique. Bien sûr, toute la subtilité est dans le « presque ».

Mais chaque chose en son temps, il nous faut maintenant comprendre la forme bizarre des aimants utilisés par Stern et Gerlach. Nous pourrons ensuite brancher l'expérience et admirer le résultat.

Les aimants bizarres

S'il y a une chose que j'ai comprise lorsque j'enseignais à des élèves en difficulté, c'est que souvent, les gens qui se croient nuls en physique ou en maths ne le sont pas du tout. Au contraire ! Il n'est pas rare que leurs difficultés proviennent du fait qu'ils se posent trop de questions fort pertinentes, mais qu'ils n'osent pas poser ou auxquelles leurs profs n'ont pas le temps de répondre.

Forme bizarre

C'est pourquoi, maintenant qu'on a bien pris tout notre temps pour comprendre en quoi des atomes d'argent pouvaient ressembler à des aimants, on va s'attarder aussi sur la forme bizarre qu'ont les aimants de Stern et Gerlach sur la plaque commémorative ainsi que sur la plupart des vidéos qui traitent du sujet.

Notre objectif, c'est de dévier les atomes d'un jet de vapeur d'argent avec des aimants.

Pour ça, l'aimant ordinaire de notre expérience de pensée ne va pas suffire. En effet, l'aimantation d'un atome d'argent est très

faible et, de plus, un atome d'argent qui sort d'un four après avoir été volatilisé, ça va très vite²⁰. Il nous faut quelque chose de beaucoup plus musclé.

Un aimant plus gros serait encore insuffisant.

Il va nous falloir utiliser des **électroaimants**.

Électroaimants



La photographie de gauche montre un électroaimant utilisé en 1915 pour tenter d'enlever des éclats métalliques des yeux de soldats blessés. Il a une particularité, c'est qu'il se termine par

20 Très vite à quel point? Voici un lien vers une vidéo qui explique le calcul correspondant :

<https://www.youtube.com/watch?v=BLQwE4scMxs>

C'est un calcul un peu difficile, alors donnons tout de suite la réponse: environ 500 mètres par seconde, soit 1800 km/h. Pour les dévier, il va nous falloir des aimants vraiment puissants!

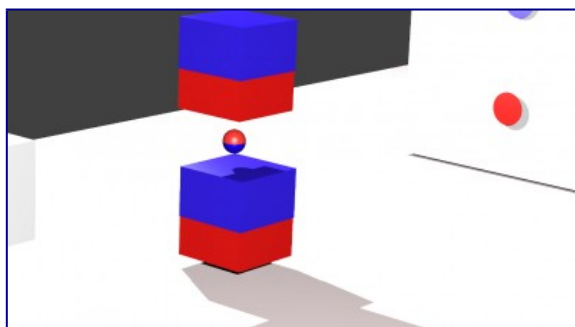
une pointe fine. Les champs magnétiques sont plus intenses au voisinage d'une pointe.

La photographie de droite montre un électroaimant plus ancien. Il a été utilisé par le grand savant Faraday. Il se replie sur lui-même, de sorte que le champ est renforcé entre les deux pôles, qui se touchent presque.

Pour réaliser notre expérience, il va nous falloir un électroaimant très puissant, avec des pôles fins, et nous placer entre ses pôles.

Une mauvaise idée

Mais quelle forme donner à ces pôles ?



Faire ceci serait une mauvaise idée. Pourquoi ?

Parce que le champ serait très certes puissant mais que le pôle nord de l'aimant repousserait le pôle nord de l'atome aussi fort

que le pôle sud de l'aimant repousserait le pôle sud de l'atome dans l'autre sens. Et si on inversait la position de l'atome, **le pôle nord attirerait l'atome aussi fort que le pôle sud l'attirerait dans l'autre sens.**

Bref, le champ magnétique serait certes très puissant, mais son effet de déviation sur nos atomes serait nul

Ce qu'il nous faut, c'est un champ magnétique à la fois très puissant et très peu homogène, avec une pointe au niveau du pôle Nord, pour le renforcer, et un creux du côté du pôle sud, pour l'affaiblir. Ainsi, l'un des deux pôles l'emportera sur l'autre et l'effet deviendra sensible.

La solution

Et c'est bien ce qu'ont fait Stern et Gerlach, comme on le voit sur la gravure de la plaque commémorative.



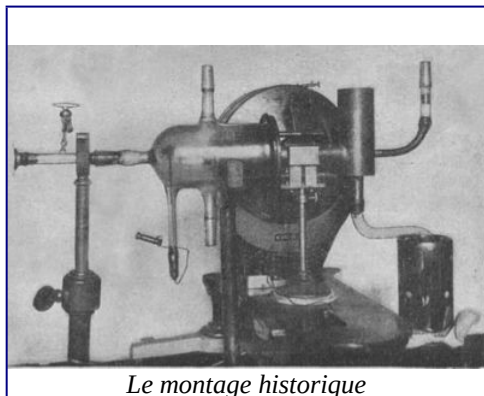
D'ailleurs , les aimants d'origine ont été conservés dans un musée. Les voici. On voit clairement à droite l'aimant qui

présente un tranchant (« *Schneide* » en allemand sur la plaque commémorative), et celui qui présente une gouttière (« *Rinne* » en allemand). La notation mathématique $\delta B/\delta z$ signifie quant à elle que le champ magnétique (« B ») n'est pas homogène dans l'axe vertical (« z »).

Le montage final

Bien, maintenant que nous savons quelle forme donner à nos électroaimants, « Yapuka » inventer un four capable de chauffer de l'argent assez fort pour en faire de la vapeur, une fente très fine pour envoyer un fin pinceau d'argent dans le dispositif et pouvoir observer l'effet attendu et aussi une pompe à vide pour que nos atomes d'argent ne soient pas trop gênés par ceux de l'air ambiant pendant leur parcours.

Bref, « yapuka » faire un travail énorme pour passer de l'expérience de pensée à l'expérience réelle et aboutir enfin au montage de l'expérience historique.



Maintenant, nous pouvons enfin lancer l'expérience et observer les résultats. C'est ce que nous ferons dans le prochain chapitre.

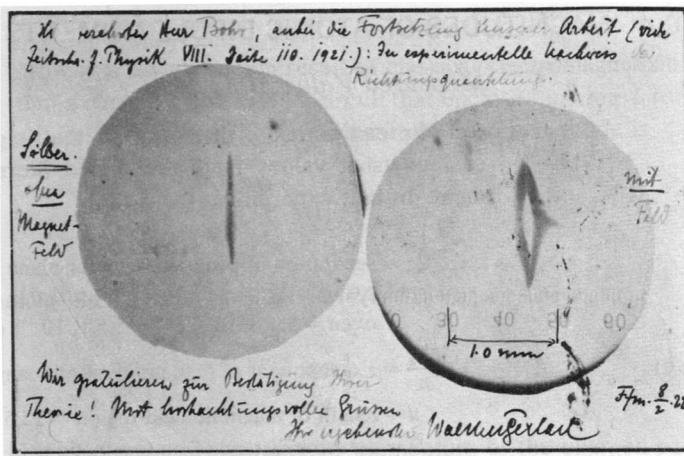
Le résultat historique

Nous voici arrivés au bout de nos peines.

On a compris l'expérience, on a compris son fonctionnement, on a lancé la machine en février 1922.

Il est temps maintenant de prendre connaissance de la réponse de la nature.

La voici ! C'est la photo immortalisée par Stern et Gerlach et qu'ils ont envoyée sous forme de carte postale à Niels Bohr.



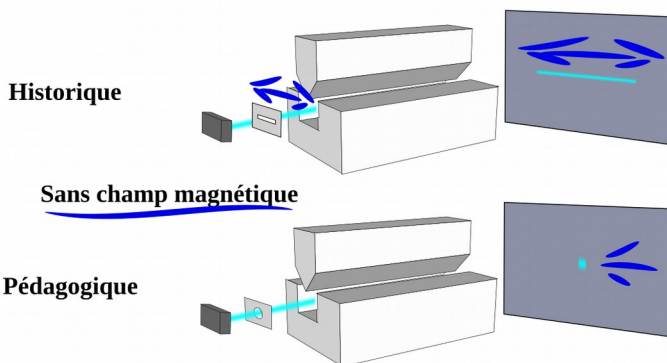
Alors là, j'entends déjà d'ici ceux qui se croient à jamais "nuls en physique" parce qu'ils réfléchissent trop!

« Mais ça ne va pas du tout, ça ne ressemble pas du tout à ce que j'ai vu dans mon bouquin de physique, ça me prend trop la tête tout ça, je savais bien que j'y comprendrai jamais rien ! »

Mais si ! Relax ! Même pour ceux qui n'ont pas du tout l'habitude de ces choses, tout ça va s'éclairer avant la fin de ce chapitre, et vous serez bientôt arrivés à l'entrée du monde quantique, je vous le promets.

Électroaimants débranchés

Pour commencer, c'est le moment de nous souvenir de ce que nous avons dit au sujet des expériences de pensée et des expériences réelles.



Dans l'expérience historique, on envoie les atomes d'argent à travers une fente horizontale. On va donc avoir un jet plat.

Alors que dans l'explication pédagogique, on se concentre sur l'essentiel de l'essentiel, donc on imagine que les atomes passent bien sagement un par un par un trou, à la queue leu leu, pour former un pinceau idéalement fin.

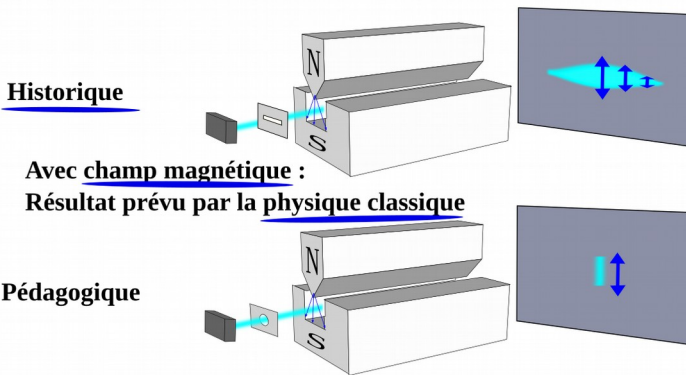
Du coup, dans l'explication pédagogique, s'il n'y a pas de champ magnétique, les atomes arrivent tous au même endroit, comme sur l'illustration du bas.

Alors qu'évidemment, dans le monde réel, c'est plus compliqué. Les atomes étaient dans une forme un peu comme un ruban, et ce ruban s'étale encore un peu plus en sortant de l'appareil, ce qui donne sur l'écran le trait qu'on voit sur le dessin du haut.

Et c'est exactement le même résultat qu'on observe sur la carte postale historique, tout à fait à gauche, à côté de la mention « *Ohne Magnet-Feld* » (« sans champ magnétique »).

Électroaimants branchés, résultat "classique" attendu

Une fois qu'on a branché l'électroaimant, que va-t-il se passer ?



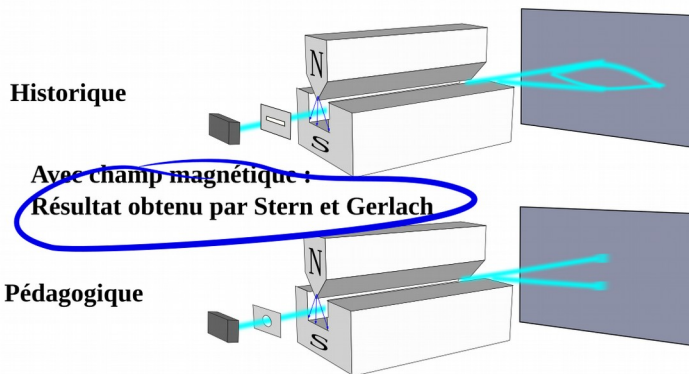
La physique classique prévoit que les atomes vont se disperser verticalement, pour les raisons qu'on a vues précédemment. Dans le cas idéal des manuels, ça donnerait une barre verticale comme sur le dessin du bas.

Mais dans le monde réel, c'est toute la ligne horizontale du montage historique qui va être dispersée verticalement. Et comme l'effet des aimants sera moins fort sur les côtés, on s'attend à obtenir la forme ovale qu'on voit ici, en haut et à droite.

Dans les deux cas, ce qui constitue tout l'objet de l'expérience, que les atomes vont se disperser plus ou moins dans l'axe vertical, selon la force de leur aimantation et selon leur orientation. Si leurs électrons étaient plus ou moins penchés, ou s'ils tournaient sur eux-mêmes plus ou moins vite, ils auraient des aimantations de force et de direction différentes, et ils se répartiraient un peu partout sur la cible, entre les positions extrêmes, qui correspondent aux points d'arrivée de ceux qui seraient le plus aimantés, et le plus parfaitement dans l'axe.

La réponse de la nature

Voici maintenant le résultat obtenu par Stern et Gerlach.



C'est celui qu'on voit sur la photo historique, à droite de la carte postale, avec la mention « *mit Feld* » (« avec le champ »).

Dans sa version pédagogique, on se concentre sur la région de sensibilité maximale, celle qui était parfaitement dans l'axe. Cela qui correspond aux deux taches qu'on trouve dans la plupart des manuels.

Dans sa version historique, il y a deux lignes, qui se rejoignent aux extrémités pour les mêmes raisons que dans le cas classique.

Mais que signifie ce résultat ?

Ça signifie que nos atomes ne sont pas sortis de l'expérience dans toutes sortes d'états différents, mais seulement dans deux états, déviés vers le haut au maximum, ou déviés vers le bas au maximum. **Les états intermédiaires n'existent pas.**

« Bon, vous me direz, peut-être que les atomes d'argent sont entrés dans la machine dans toutes sortes d'état différents et que c'est juste quelque chose dans ma machine qui les a obligés à se mettre dans un état ou dans l'autre et seulement dans un de ces deux là, je ne vois rien d'extraordinaire à ça ? »

Félicitations ! C'est exactement ça !

Pour comprendre ce qu'il y a de très nouveau ici, on va devoir essayer de comprendre ce qui aurait pu provoquer ce qu'on observe, à savoir ces deux états sans état intermédiaire, tout en restant dans le cadre de la bonne vieille physique classique.

Ça n'est que si nous n'y parvenons pas dans le cadre de la physique classique que nous pourrions être certains qu'il y a là quelque chose de vraiment nouveau.

Et c'est ce que nous allons voir dans le prochain chapitre.

Derniers espoirs classiques

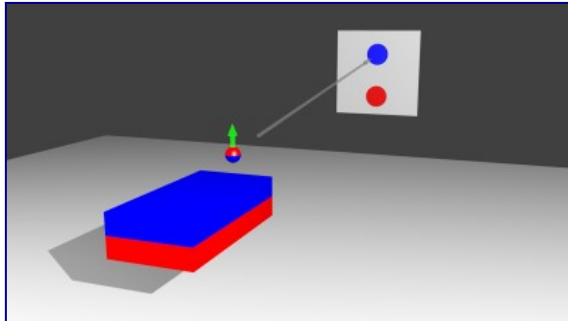
Nous voici arrivés à l'avant-dernier chapitre de notre marche d'approche vers le pays quantique. Dans ce chapitre, nous allons chercher à expliquer l'expérience de Stern et Gerlach de manière classique.

Comme vous vous en doutez, on n'y arrivera pas, mais cet échec va nous aider à mieux comprendre les choses.

Deux états observés possibles

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que, dans cette expérience, **les atomes d'argent sont observés dans deux états possibles et seulement deux.**

Ou bien ils se dirigent vers le haut de la cible en suivant le mouvement indiqué par la flèche grise²¹.



Et s'ils se dirigent vers le haut, comme ici, C'est parce que leur aimantation est dirigée de telle manière qu'elle repousse l'aimant du dessous.

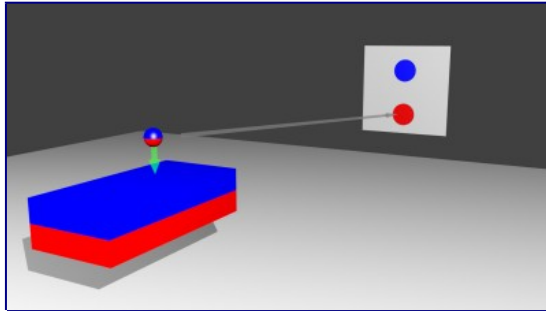
Leur aimantation²² a une certaine direction et une certaine intensité, on peut donc la représenter elle aussi par une flèche, ici en vert.

21 Il y a ici une approximation sur laquelle nous reviendrons dans un autre chapitre. Disons simplement pour le moment qu'on ne peut pas vraiment définir de trajectoire mais que les atomes qui auront "basculé" dans l'état de spin "Up" au niveau de notre détecteur, comme ici, seront bel et bien observés plus tard dans la cible du haut. Le "chemin" qu'ils prendront entre les deux est une chose plus compliquée qu'en physique classique et en tout cas ça ne sera pas une simple ligne droite.

22 Il y a ici une autre approximation. Les physiciens ne parleraient pas ici d'aimantation, ils utiliseraient un autre mot, plus compliqué. Mais l'idée intuitive reste sensiblement la même.

Souvent dans les livres, on appelle les flèches qui représentent les mouvements, comme la flèche grise ici, des "vecteurs"²³.

Ou bien ils se dirigent vers le bas de la cible comme ici.



Mais ils ne vont jamais au milieu, entre les deux cibles.

États non observés à la sortie de l'expérience

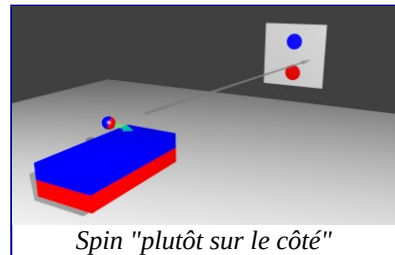
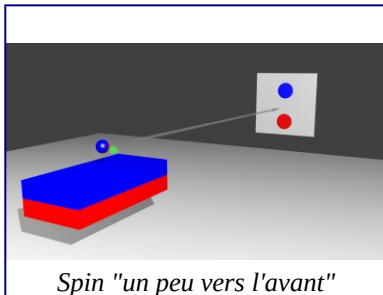
Concentrons-nous un instant sur ce phénomène bizarre qui fait qu'on n'observe que des aimantations d'une certaine force vers le haut, ou d'autres aimantations qui ont exactement la même

23 Il existe beaucoup de sortes différentes de vecteurs et nos flèches vertes et grises ne sont pas tout à fait du même genre. C'est la raison pour laquelle un enseignant comme Leonard Susskind par exemple, appellerait nos flèches grises des « vecteurs 3D » et nos flèches vertes des « pseudo-vecteurs ». On ne va pas approfondir ces différences entre les vecteurs maintenant, mais on va les garder dans un coin de la tête car ça nous resservira dans une autre saison de notre voyage, quand nous serons arrivés beaucoup plus loin dans le monde quantique.

force et qui sont tournées vers le bas. Mais jamais des aimantations qui conduiraient à des positions intermédiaires.

Quelles pourraient être ces autres orientations ?

En voici quelques exemples:



Attention : Ça ne signifie pas que ces orientations n'existent pas dans la nature ! Bien au contraire, nous apprendrons dans la saison 02 comment on peut en préparer au moyen de ce que Richard Feynman appelait un « dispositif de Stern et Gerlach amélioré ».

En revanche, il se trouve qu'on n'en observe jamais dans cette orientation **après que les atomes ont interagi avec les aimants**. Et c'est bien pour cette raison qu'on n'observe jamais d'atomes d'argent qui arriveraient ensuite entre les deux cibles.

États impossibles

Il existe une troisième sorte d'impossibilité pour les spins²⁴ et elle est un peu différente des deux précédentes.

S'il est possible de préparer des spins dans n'importe quelle orientation, il est rigoureusement impossible de préparer des spins qui seraient plus intenses ou moins intenses.

L'intensité du spin²⁵ ne peut prendre qu'une seule valeur. Elle est très petite, puisqu'elle ne vaut que $9.27 \cdot 10^{-24}$ Joules par Tesla dans nos unités de mesure habituelles.

Si on l'exprime dans ce qu'on appelle les « unités atomiques », comme on peut la mesurer dans deux directions et seulement deux, on dit qu'elle peut prendre les valeurs $+1/2$ ou $-1/2$, mais l'idée reste la même: Une seule "intensité" élémentaire permise par la nature, avec seulement deux directions possibles.

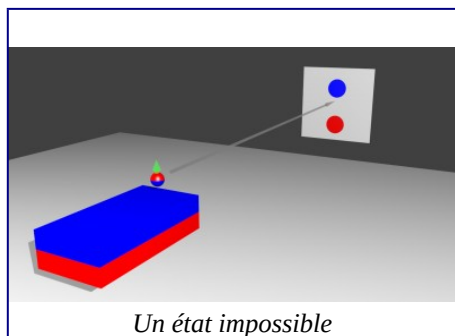
Cette impossibilité d'avoir des valeurs intermédiaires est une caractéristique essentielle des comportements quantiques.

C'est un peu bizarre si on imagine les électrons comme des petites billes. Si c'était le cas, et si leur aimantation venait

24 À partir d'ici, j'emploierai souvent le mot "spin" à la place de "aimantation de l'atome d'argent". Il s'agit de deux notions différentes si on est rigoureux mais dans le cadre de notre marche d'approche, on peut les considérer comme similaires. Nous n'approfondirons ces différences que bien plus loin.

25 C'est de nouveau un abus de langage pour donner l'idée générale. Pour être plus rigoureux, il faudrait parler de la « valeur du moment magnétique intrinsèque » et envisager aussi pour notre atome d'argent son « moment cinétique intrinsèque ».

vraiment du fait qu'ils tournent sur eux-mêmes comme on l'a vu dans un chapitre précédent, ça signifierait qu'ils ne peuvent tourner sur eux-mêmes qu'à une seule vitesse, toujours la même.



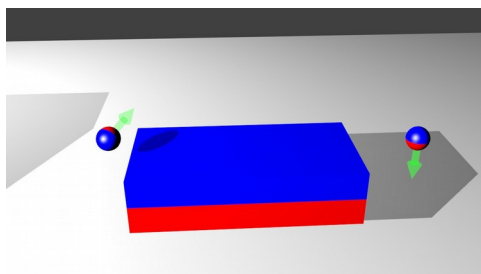
En effet, s'ils tournaient à des vitesses différentes, ils auraient des aimantations différentes, et s'ils tournaient lentement, ils n'auraient presque pas d'aimantation. Or une chose pareille n'a jamais été observée. Le cas représenté sur cette image n'existe donc pas dans la nature.

Dernières tentatives d'explications classiques

Mais laissons pour le moment de côté cette histoire d'intensité de l'aimantation. Après tout, on pourrait imaginer que nos atomes d'argent sont tous chauffés à la même température, et que du coup, il serait normal que leurs électrons tournent tous à la même vitesse et qu'ils aient tous des spins de la même

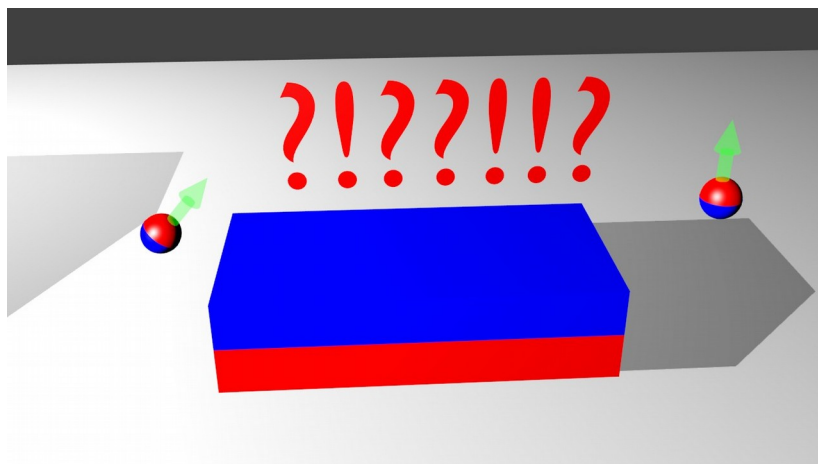
intensité. Il serait facile de démontrer que ce n'est pas le cas avec d'autres expériences, mais laissons cela pour le moment et revenons à l'orientation de nos spins.

Est-ce qu'on pourrait imaginer un mécanisme qui ferait basculer les atomes qui arrivent dans notre appareil penchés en avant, comme ici, jusqu'à ce qu'ils atteignent la position de l'atome de droite ?



Bien sûr que oui! Tous ceux qui ont déjà joué avec des aimants dans leur enfance le savent, un mouvement comme celui-ci est tout à fait courant. Le pôle nord est attiré par le pôle sud et au bout d'un moment le petit aimant finit par s'arrêter dans la position la plus stable, celle qui est à l'inverse du plus gros aimant, les pôles opposés se faisant face.

Oui mais voilà, pour expliquer les résultats de l'expérience de Stern et Gerlach de manière classique, il faudrait aussi trouver un mécanisme qui bascule un atome comme celui-ci vers le haut, comme sur cette image, afin qu'il atteigne la cible du haut.

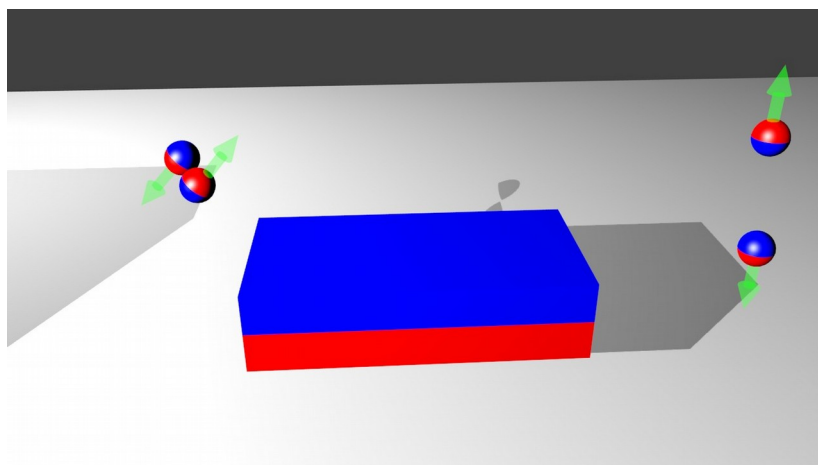


Or un tel mouvement n'a jamais été observé dans le monde classique. Quand on jouait avec des aimants, on a bien vu qu'ils se retournaient toujours avant de s'attirer mutuellement. **Personne n'a jamais vu un aimant penché se redresser dans l'autre sens avant de se retrouver repoussé par l'autre aimant.**

Et d'ailleurs les physiciens expliquent ça très bien avec des histoires de couples. Ce mouvement ne peut pas exister. En tout cas pas dans le monde classique.

Or si nous regardons la photographie historique de l'expérience de Stern et Gerlach, les deux lignes sont aussi marquées l'une que l'autre²⁶. Il y a autant d'atomes qui vont vers le haut qu'il y en a qui vont vers le bas. Notre mécanisme classique n'enverrait vers le haut que l'infime fraction des atomes qui arriveraient très exactement dans l'orientation opposée à celle du gros aimant. Tous les autres, légèrement inclinés, basculeraient vers le bas. Ce mécanisme ne peut donc pas expliquer le résultat.

Essayons encore une dernière idée, un peu plus futée:



On a vu dans un chapitre précédent que les électrons ont tendance à se grouper par paires. Et on sait qu'on peut faire pareil très facilement en faisant des paires d'aimants alignés tête bêche, comme ici à gauche.

26 Aux difficultés expérimentales près.

Alors peut-être que nos atomes d'argent pourraient faire pareil?

En arrivant près du gros aimant, ils pourraient commencer par s'aligner par rapport à lui, avant d'être séparés du fait de leurs positions inversées.

L'idée est bonne, mais elle ne marche pas. On sent bien intuitivement que quelque chose cloche dans ce mouvement. Les physiciens pourraient d'ailleurs expliquer avec des calculs savants pourquoi ça ne marche pas. Mais surtout, on sait désormais qu'on obtiendrait le même résultat même en s'assurant que les atomes (ou les électrons) arrivent bien un par un, et non pas par paires.

Au final, toutes nos tentatives se soldent par un échec, comme on pouvait s'y attendre. Le phénomène observé dans l'expérience de Stern et Gerlach ne peut pas s'expliquer dans le cadre de la physique classique.

Nous voici donc clairement arrivés sur le seuil de l'étrange monde quantique.

Tout ressemble encore plus ou moins à ce qu'on connaissait jusqu'ici, mais on sent bien que le paysage est sur le point de changer radicalement.

Et c'est bien ce que nous commencerons à apercevoir dans le prochain chapitre, qui terminera cette première saison et nous donnera un aperçu de la suivante.

Bienvenue dans le monde quantique !

Nous voici arrivés au terme de la première étape de notre voyage touristique dans le monde quantique.

Elle nous a permis d'approcher rapidement de l'endroit où les choses commencent à devenir vraiment intéressantes, mais c'est peut-être pour vous au prix d'un peu de déception, car nous n'avons pas encore abordé les expériences extraordinaires dont toute la presse parle souvent.

À présent, je vous invite à vérifier rapidement, par un petit quizz, que vous êtes désormais armés pour la saison 02 de notre voyage. Si vous avez suivi attentivement cette première saison, vous vous apercevrez que vous commencez déjà à comprendre nombre de choses qui seront indispensables pour la suite. À bientôt !

Quiz de fin de la saison 01

Êtes-vous assez armés pour passer à la saison 02 ?

À vous d'en juger ! (Les réponses sont en page 97)

Questions

Épisode S01 E01

1. Laquelle de ces questions ne relève pas de la mécanique quantique ?
 1. Les électrons sont-ils à la fois des ondes et des corpuscules ?
 2. Un atome peut-il être à deux endroits en même temps ?
 3. Un atome peut-il être à la fois désintégré et toujours intact ?
 4. La Lune peut-elle dévier des rayons lumineux ?
 5. Deux photons très éloignés l'un de l'autre peuvent-ils continuer à se synchroniser, voire à communiquer entre eux d'une manière mystérieuse ?

2. L'expérience de Stern et Gerlach date de :
 1. 1801.
 2. 1905.
 3. 1922.
3. L'expérience de Stern et Gerlach a mis en évidence :
 1. L'existence du spin.
 2. La dualité onde-corpuscule.
 3. L'effet tunnel.

Épisode S01 E02

1. Qui parle dans ses cours grand public de la véritable expérience de Stern et Gerlach ?
 1. Richard Feynman.
 2. Leonard Susskind.
 3. Aucun des deux.
2. L'intérêt principal d'une expérience de pensée, c'est:
 1. De ne pas prendre le risque d'un échec.
 2. D'économiser de l'argent.
 3. De se concentrer exclusivement sur le phénomène étudié en oubliant les contraintes techniques.

Épisode S01 E03

1. Que représentent les petits aimants sphériques de notre expérience de pensée dans la véritable expérience de Stern et Gerlach ?
 1. Des électrons.
 2. Des atomes d'argent.
 3. Aucun des deux.
2. À quel endroit de la cible ceux de nos aimants sphériques et classiques qui ne sont pas alignés avec le champ magnétique vont-ils arriver ?
 1. Tout à fait en haut.
 2. Tout à fait en bas.
 3. Entre les deux.

Épisode S01 E04

1. Dans un atome, est-ce que les électrons tournent autour du noyau ?
 1. Oui.
 2. Non.
 3. Ça dépend de la structure électronique de l'atome.

2. Quel est l'intérêt de comprendre des modèles obsolètes de l'atome ?
 1. Aucun.
 2. C'est intéressant, mais au seul titre de l'histoire des sciences.
 3. C'est indispensable pour vraiment comprendre ensuite en quoi la physique quantique est différente de la physique classique et comment on passe des lois quantiques aux lois classiques.

Épisode S01 E05

1. Quel est l'intérêt de donner à l'extrémité de l'électroaimant du haut une forme en pointe ?
 1. Avoir un champ magnétique plus précis.
 2. Avoir un champ magnétique plus intense.
 3. Avoir un champ magnétique plus facile à ajuster.
2. Quel est l'intérêt de donner à l'extrémité de l'électroaimant du bas une forme en creux ?
 1. Créer un creux dans le champ magnétique pour guider les atomes.
 2. Avoir un champ magnétique plus symétrique.
 3. Avoir un champ magnétique moins intense.

Épisode S01 E06

1. Dans l'expérience historique, s'il n'y a pas de champ magnétique, on observe sur la cible :
 1. Un trait.
 2. Un point.

3. Un ovale.
2. Combien d'états différents les atomes d'argents prennent-ils en sortant de l'expérience de Stern et Gerlach (par rapport à l'axe vertical) ?
 1. Un seul.
 2. Deux.
 3. Une infinité.

Épisode S01 E07

1. Combien d'états du spin sont observés dans l'expérience de Stern et Gerlach ?
 1. Un seul.
 2. Deux.
 3. Quatre.
 4. Une infinité.
2. D'autres états sont-ils possibles ?
 1. Oui.
 2. Non.
3. Toutes les intensités d'aimantation sont-elles possibles ?
 1. Oui.
 2. Non.

4. L'expérience de Stern et Gerlach peut-elle s'expliquer dans le cadre de la physique classique ?
 1. Oui.
 2. Non.

Épisode S01 E08

1. Quels sujets ne seront **pas** abordés dans les prochaines saisons de notre voyage ?
 1. Les fentes de Young.
 2. Le chat de Schrödinger.
 3. La chromodynamique quantique.
 4. Le principe d'indétermination d'Heisenberg.
 5. L'intrication quantique et la "téléportation" quantique.
 6. La gravitation quantique.
2. Pourquoi serons nous obligés de parler un peu de maths (mais sans en faire) dans la saison 02 et de commencer à en faire un peu dans les saisons 03 et 04 ?
 1. Pour être capable à terme de réaliser des calculs d'ingénieur.
 2. Pour se la péter et avoir l'air sérieux.
 3. Parce que Galilée avait raison de dire que « *le grand livre de la nature est écrit en langage mathématique* ».

Réponses

Épisode S01 E01

1. La lune peut sans aucun doute dévier des rayons lumineux, comme le font tous les objets massifs en courbant l'espace-temps. Mais cet effet relève de la relativité générale et pas de la mécanique quantique.
2. 1927. 1801 est la date de l'expérience des fentes de Young. 1905 celle de la publication de la théorie de la relativité restreinte.
3. L'existence du spin.

Épisode S01 E02

1. Aucun des deux
2. De se concentrer exclusivement sur le phénomène étudié en oubliant les contraintes techniques.

Épisode S01 E03

1. Des atomes d'argent
2. Entre les deux (mais il n'est pas dit que les atomes d'argent fassent pareil!)

Épisode S01 E04

1. Non, cette conception était celle du modèle de Rutherford, complété par Bohr en 1913. Elle était encore plus ou moins « classique ». Elle a été abandonnée en 1926.
2. C'est indispensable pour vraiment comprendre ensuite en quoi la physique quantique est différente de la physique classique et comment on passe des lois quantiques aux lois classiques.

Épisode S01 E05

1. Ça permet d'avoir un champ magnétique plus intense.
2. Ça permet d'avoir un champ magnétique moins intense. La combinaison des deux formes donne un champ magnétique très hétérogène, à même de dévier les atomes. Si les deux pôles avaient la même forme, leurs effets se compenseraient et on n'obtiendrait pas de déviation.

Épisode S01 E06

1. Un trait. Mais dans les présentations pédagogiques, qui ne prennent en compte que la répartition verticale, on le réduit à un point.
2. Deux : Soit totalement déviés vers le haut, soit totalement déviés vers le bas. Il n'y a pas d'atomes qui seraient plus ou moins déviés que ces deux états.

Épisode S01 E07

1. Deux, qu'on appelle classiquement "Up" et "Down"
2. Oui, il est possible de les préparer, mais au moment de l'interaction avec l'appareil de Stern et Gerlach, ils ne resteront pas dans ces orientations différentes. Ils seront "projetés" dans l'une des deux seule orientations possibles vis à vis du détecteur, à savoir "Up" ou "Down".
3. Non. Toutes les orientations sont possibles, mais une seule intensité est autorisée par la nature. Elle est **quantifiée**, de la même manière que la quantité minimale d'électricité qui est portée par un électron.
4. Non. Seule la mécanique quantique peut en rendre compte et elle seule permet de prévoir correctement les résultats.

Épisode S01 E08

1. La chromodynamique quantique et la gravitation quantique : Ce sont des parties de la physique quantique que nous pourrons mieux comprendre de manière approximative après notre voyage touristique, mais qui se situent à des altitudes très supérieures, notamment sur le plan mathématique.
2. Galilée avait raison et nous en aurons très vite la

Selon vos résultats

À vous de juger, vous êtes grands !

- Revenir à la saison 01: Marche d'approche rapide
- Passer à la saison 02: Aperçus de physique quantique

Saison 2 : Aperçus de physique quantique

Toute cette saison 2 est consacrée à un seul objectif: Découvrir autant de choses que possible en physique quantique sans **faire** de mathématiques. Toutefois, « sans **faire** de mathématiques » ne signifie pas « sans **parler** de mathématiques ». Il se trouve en effet que le grand livre de la Nature est écrit en langage mathématique, on n'y peut rien, c'est comme ça. Du coup, il n'est pas possible de dépasser le stade des analogies les plus simplistes (ce que nous avons appelé précédemment l'itinéraire vert) sans parler au moins un peu des mathématiques qui sont à la base de notre sujet. « En parler », c'est donc ce que nous allons faire dans cette saison. Mais ce n'est que dans la saison suivante que nous commencerons à manipuler un peu ces maths.

Enfin, certains concepts sont survolés plusieurs fois au cours de cette saison, pour nous y habituer progressivement.

La Lune existe-t-elle quand je ne la regarde pas ?

Ce chapitre contient une petite histoire imaginaire. J'espère qu'elle vous semblera étrange. Vous trouverez la clé de l'énigme à la fin du chapitre.



(Claude Aslangul conférence au CEA 2013 crédit : FU Youtube)

Hier soir, je regardais des vidéos sur la physique quantique et je suis tombé sur [celle-ci](#), dans laquelle un chercheur renommé pose la question suivante à ses étudiants: « *La Lune existe-t-*

elle encore quand je lui tourne le dos ? » avant de leur dire que la réponse n'est pas évidente du tout, du moins si on la rapporte au domaine de la théorie quantique.

Un peu plus tard, quand je suis sorti promener le chien, la Lune se levait.

Et je me suis dit:

« C'est vrai, ça, elle fait quand même des trucs bizarres la Lune ».

Déjà, quand on se promène, tous les enfants l'ont remarqué, on a l'impression qu'elle nous suit.

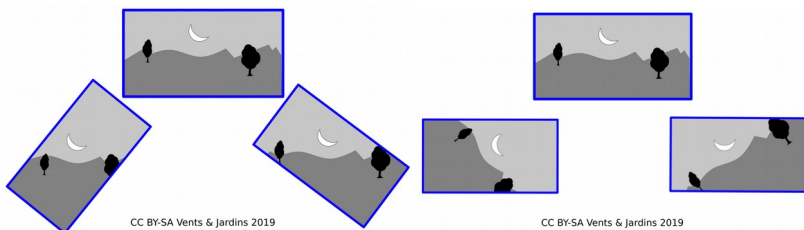


Alors pourquoi, si je tourne la tête, elle ne se met pas à tourner aussi ?



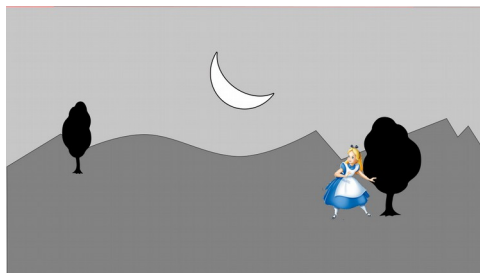
Pris d'un doute, j'ai vérifié. Non, en effet, elle ne tourne pas quand on tourne la tête.

Alors j'ai pris mon téléphone et je l'ai photographiée sous plusieurs angles pour comprendre pourquoi.



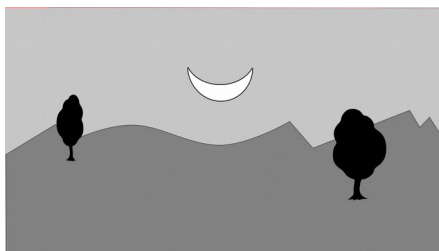
En fait, ça semble évident. Soit on considère qu'elle ne bouge pas quand on tourne l'appareil, soit on considère que le paysage et la Lune tournent tous ensemble par rapport à l'appareil, et ça revient au même à la fin. Sur mes photos tout sera penché, mais la Lune n'aura pas bougé **par rapport au paysage**.

J'en étais là de mes réflexions quand j'ai vu apparaître une étrange petite fille qui a aussitôt disparu derrière un arbre.

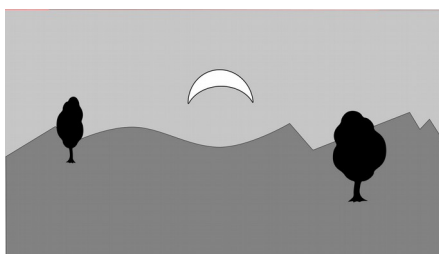


J'ai essayé de me rapprocher, mais comme vous vous en doutez, cette gamine fait le coup à tout le monde, je suis tombé dans un trou, je me suis cogné la tête et je me suis évanoui.

Quand je me suis réveillé, j'ai eu l'impression que la Lune avait basculé !



Je me suis relevé en me frottant les yeux, j'ai regardé de nouveau et là, surprise, elle avait basculé dans l'autre sens.



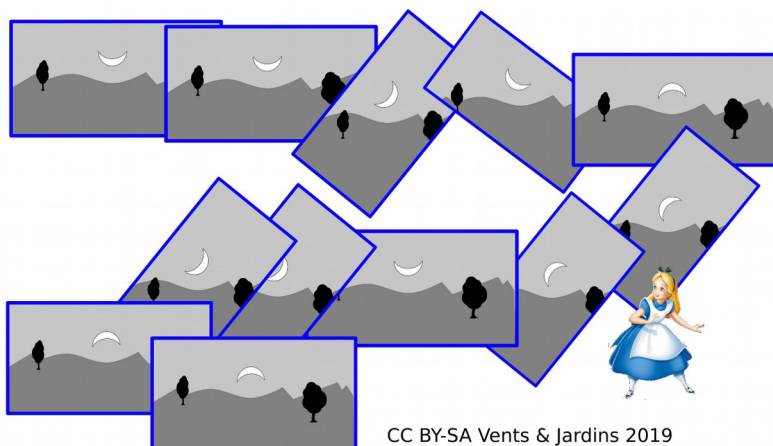
Alors, j'ai tenté un truc :

« J'ai demandé à la Luuune si elle était devenue quantique

Elle m'a dit :

J'ai pas l'habituude de répondre aux gars comme toi ».

Dépité, j'ai repris mon téléphone et j'ai refait une série de photos. Les voici. Le phénomène est vraiment curieux.

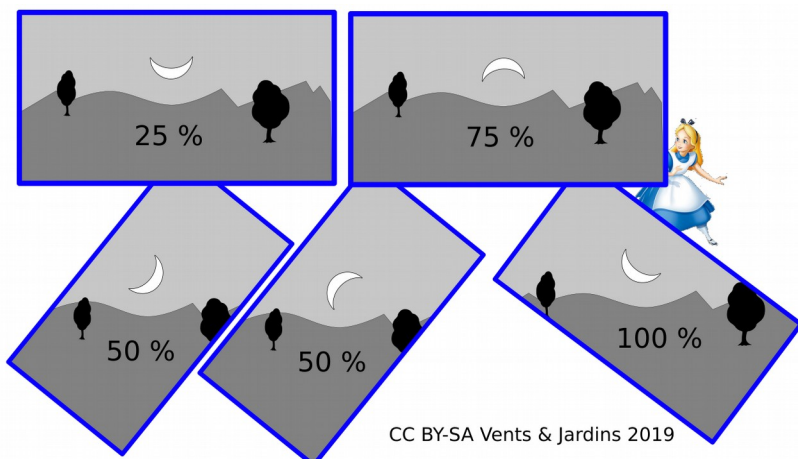


La Lune change de position quand on tourne l'appareil, mais quand on le laisse immobile et qu'on prend deux photos de suite, elle garde la même position.

Et puis aussi, **elle n'a que deux positions possibles** par rapport à l'appareil photo. Soit tournée vers le haut de l'appareil, soit tournée vers le bas de l'appareil, mais jamais penchée **par rapport à l'appareil**.

Tout ça me semblait totalement incohérent, mais j'ai fini par trouver quand même un peu de stabilité quand j'ai regroupé toutes les photos.

Il y avait même un cas, quand l'appareil était tourné vers la droite, où la Lune ne changeait jamais de position.



Curieux, ça !

J'étais en train de vérifier ces statistiques quand j'ai subitement réalisé mon erreur²⁷.

C'est à ce moment là que je me suis réveillé.

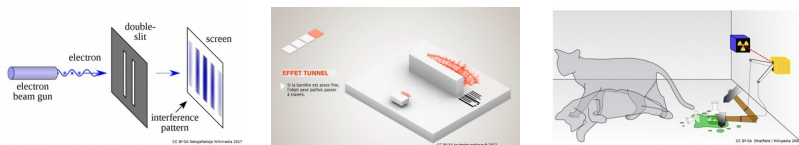
La saison 02 de notre voyage

La saison 02 de notre voyage nous permettra de comprendre précisément en quoi les atomes d'argent se comportent comme la Lune de mon rêve.

27 Ce sont les bonnes probabilités pour la première photo, mais pas les bonnes statistiques pour un ensemble de photos. En effet, à chaque nouvelle photo, la réduction du paquet d'onde modifie l'état de la Lune quantique en le réalignant dans l'axe de l'appareil. Tout ça vous paraît sans doute bien mystérieux pour le moment, mais ça s'éclairera au fil de cette saison et vous pourrez même refaire tous les calculs vous-même à la fin de la saison 03.

Mais donnons dès à présent un indice : La lune et l'appareil photo de mon rêve correspondent respectivement à un électron et à un appareil de détection de son spin. Le comportement étrange de la Lune du rêve correspond donc au comportement étrange du spin quand on essaye de l'observer. Rien ne se passe comme ça dans notre monde habituel et c'est bien ce qui rend le monde quantique tellement étrange. Mais tout ceci s'éclairera si vous revenez ici après avoir terminé le chapitre sur la mesure du spin.

Plus généralement, la saison 02 nous permettra de comprendre beaucoup mieux toute la logique étrange qui se cache derrière les phénomènes quantiques dont on parle souvent, des électrons qui « passent par deux trous à la fois » aux électrons passe-murailles et au célèbre chat de Schrödinger.



Au milieu de cette saison 02, nous jetterons un premier coup d'œil sur les **postulats "officiels" de la mécanique quantique** et vous verrez que vous commencerez déjà à en comprendre les grandes lignes.

Et à la fin de cette saison 02, vous aurez compris à peu près tout ce qu'on peut en comprendre sans faire un minimum de mathématiques.

Car nous *parlerons* un peu de maths ou plutôt nous regarderons de loin à quoi peuvent ressembler une ou deux équations, mais nous ne *ferons* pas de maths dans cette saison. C'est promis !

Deux expériences de pensée

En bref

Nous utiliserons beaucoup par la suite deux dispositifs expérimentaux imaginaires : Le « dispositif de Stern et Gerlach amélioré » imaginé par Richard Feynman et le « détecteur de spin » dont parle Leonard Susskind au début de son cours. Si vous ne les connaissez pas, ce chapitre vous sera utile.

Deux appareils imaginaires

Dans ce chapitre, nous allons aller un peu au delà de l'expérience historique de Stern et Gerlach et nous allons découvrir deux dispositifs imaginaires :

- D'abord, le dispositif imaginé par Richard Feynman et qu'il appelait un "dispositif de Stern et Gerlach amélioré".
- Ensuite une proposition de fonctionnement pour l'appareil imaginaire avec lequel Leonard Susskind mesure les spins dans le célèbre cours qu'il a donné à Stanford en 2012.

Vous allez me dire « mais à quoi ça sert de faire des expériences imaginaires avec des appareils imaginaires »?

Et bien en fait, c'est très pratique, mais ça nécessite de faire un peu confiance à celui qui parle de l'expérience imaginaire.

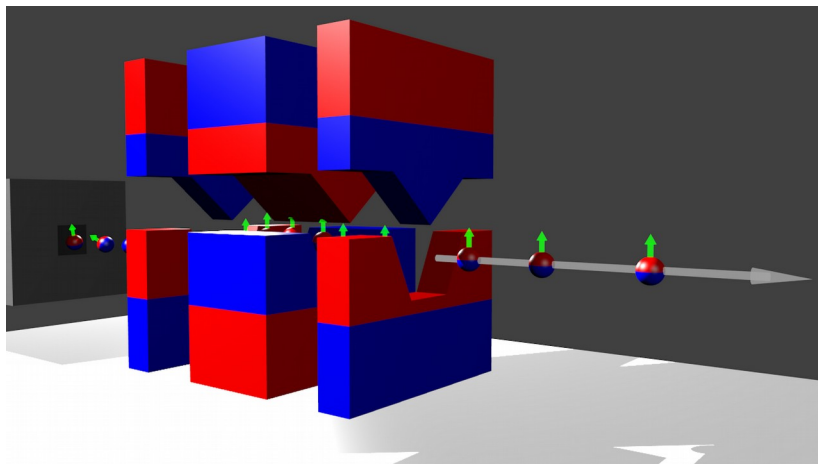
C'est très pratique parce que les expériences imaginaires sont beaucoup plus simples que les expériences du monde réel. On en a vu un exemple évident dans la première saison avec l'expérience de Stern et Gerlach.

Mais la contrepartie, c'est qu'il faut faire confiance à celui qui l'explique. Ce genre d'expérience - qu'on appelle aussi des « expériences de pensée » - ne sert qu'à exposer la logique de quelque chose. Ça montre comment on pourrait la faire en principe. Mais évidemment, ça ne prouve rien physiquement. Seules les vraies expériences disent ce que la nature a décidé.

Dans notre cas, l'expérience de pensée n'a d'intérêt que parce que les physiciens ont fait énormément d'autres expériences, considérablement plus compliquées et qu'ils sont tout à fait certains que si on réussissait à construire un dispositif concret aussi épuré que leur expérience de pensée, on obtiendrait le résultat annoncé.

Contrairement à ce qu'on croit parfois, la science est toujours un sport collectif. Personne ne peut tout vérifier par lui-même et il y a toujours un moment où on est obligé de faire confiance aux copains.

Le dispositif de Stern et Gerlach « amélioré » par Feynman

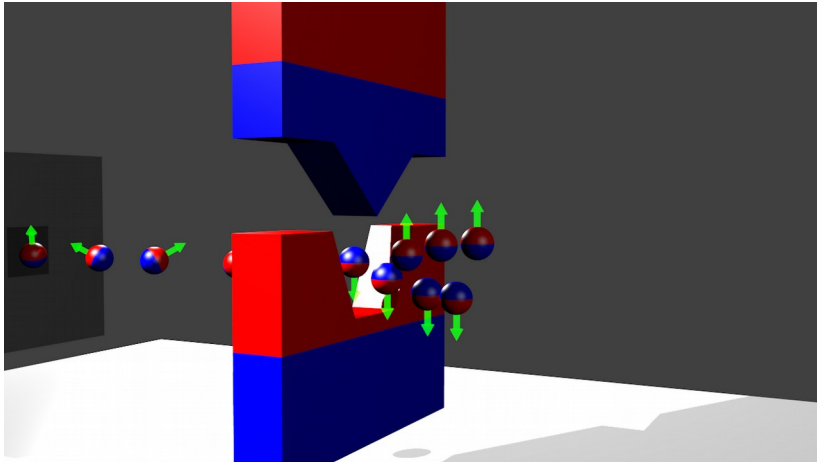


Commençons par le dispositif imaginé par Richard Feynman. Vous reconnaissez à gauche le four d'où sortent les atomes d'argent, avec des spins orientés totalement au hasard²⁸. Vous reconnaissez ensuite les aimants bizarres de l'expérience de Stern et Gerlach, sauf qu'ils sont devenus un peu plus compliqués.

Et surtout à la sortie, vous voyez que tous les atomes se retrouvent avec le même état de spin, orienté vers le haut. C'est retrouvent avec le même état de spin, orienté vers le haut. C'est

28 Bon, déjà là, quelques puristes pourraient trouver à y redire, mais souvenez-vous, ici, on fait de la vulgarisation et on n'approchera la "réalité", quoi que puisse signifier ce mot, que par approximations successives. Donc admettons pour le moment que tout ces atomes aient "réellement", dès la sortie du four, un spin orienté d'une manière bien définie, au hasard.

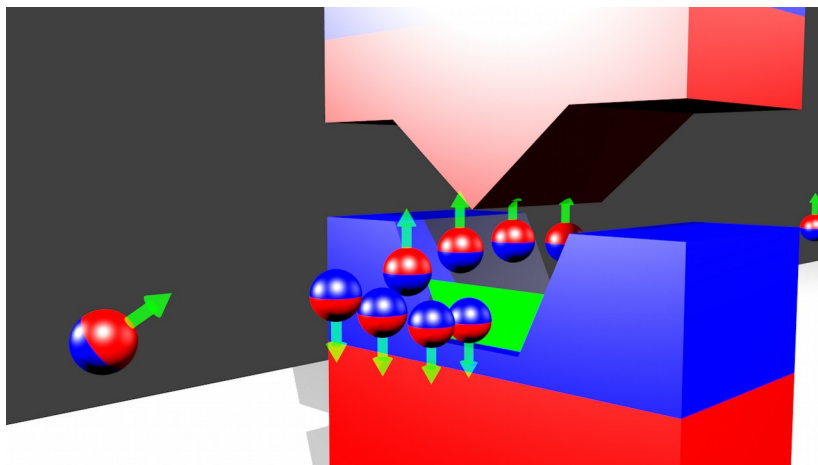
là tout l'intérêt du dispositif "amélioré" de Feynman. Pour en comprendre le principe et vérifier qu'il n'y a pas de loi physique qui nous empêcherait de le réaliser, nous allons maintenant le décortiquer.



Premier élément

Le premier élément du « dispositif amélioré » est en fait un dispositif de Stern et Gerlach tout à fait ordinaire comme nous l'avons étudié dans la première saison.

Cet élément du dispositif sépare le faisceau d'atomes d'argent en deux parties: une dont les spins sont orientés vers le haut et une autre dont les spins sont orientés vers le bas. Là aussi, nous avons simplifié certaines choses, notamment en ce qui concerne la "trajectoire" des faisceaux d'atomes, chaque chose viendra en son temps.



Élément central, avec l'écran

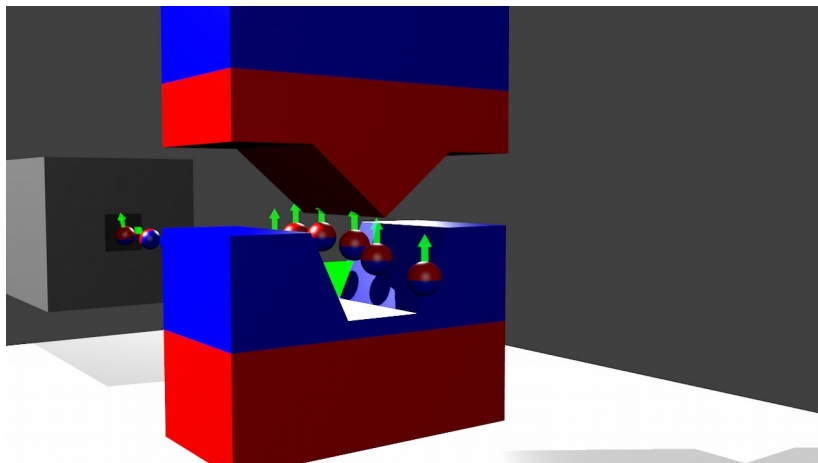
Pour comprendre le fonctionnement du deuxième élément du dispositif, j'ai fait disparaître le premier.

On voit à gauche un atome « penché » qui arrive dans le premier élément, désormais invisible, puis les deux faisceaux d'atomes qui se séparent. Il y a une plaque de métal qui bloque les atomes qui vont vers le bas. Ne passent que ceux dont le spin est tourné vers le haut et qui vont vers le haut.

En regardant bien, on s'aperçoit que les aimants de ce deuxième élément sont inversés par rapport au premier. Résultat, les atomes qui avaient été déviés vers le haut par le premier élément vont maintenant être renvoyés vers le bas.

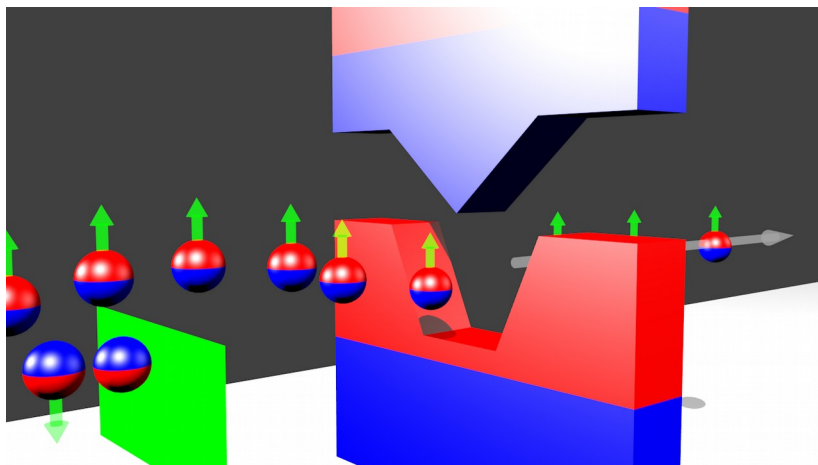
Une chose importante à comprendre ici, c'est que cette interaction avec un deuxième électroaimant ne va pas modifier

la direction des spins. Cette direction reste la même parce que les spins qui sont parfaitement dans l'axe ne « basculent » plus. Pourquoi? Nous reviendrons longuement sur ce sujet plus tard et tout deviendra plus clair. Pour le moment, je vous demande juste de me croire.



Élément central, vue arrière

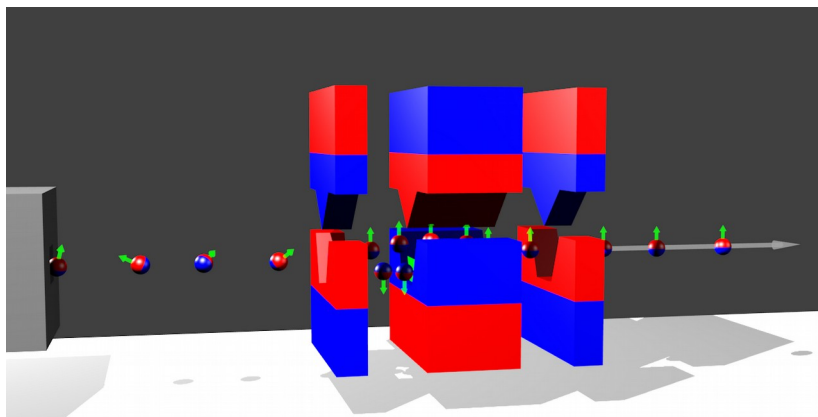
Et voici le même élément vu de derrière, avec son écran qui bloque les atomes dont le spin est tourné vers le bas. Il renvoie vers le bas les atomes qui allaient vers le haut.



Troisième élément du dispositif

Pour terminer, j'ai rendu invisibles les deux premiers éléments et fait apparaître le dernier. C'est un dispositif de Stern et Gerlach tout à fait classique, comme le premier. Il n'agit que sur des atomes qui sont déjà préparés avec des spins tournés vers le haut. Son seul rôle est de corriger une dernière fois leur "trajectoire"²⁹ pour les replacer dans l'axe de départ.

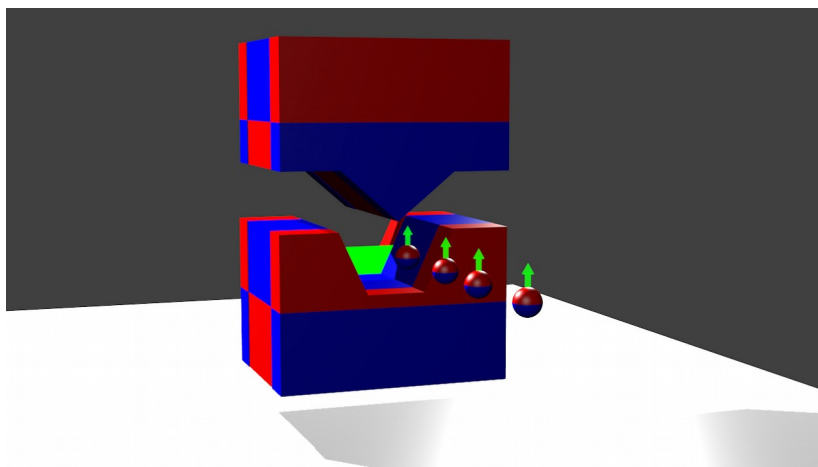
29 Pour autant qu'il y ait encore des "trajectoires" en physique quantique, mais chaque chose en son temps, c'est l'idée générale et on la précisera plus tard.



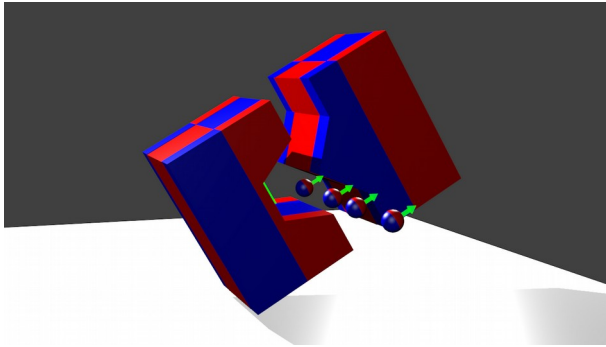
CC BY-SA Vents & Jardins 2019

Vue d'ensemble

Voici maintenant un éclaté d'ensemble du dispositif.

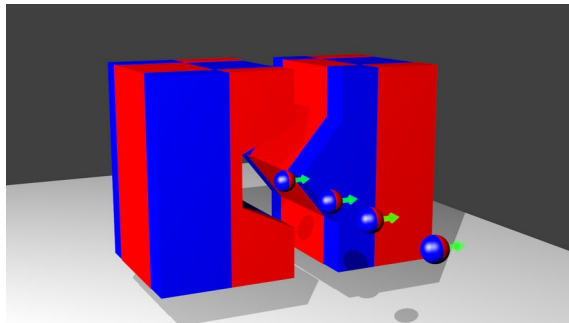


Et voici le dispositif "compacté".



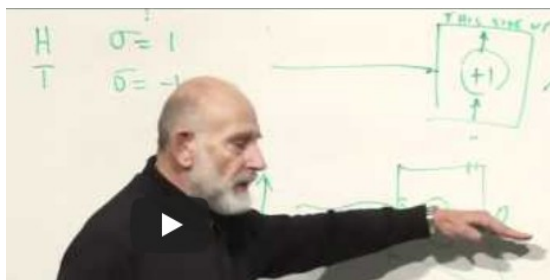
Préparation de spins "penchés"

Un des très gros avantages avec ce dispositif de Stern et Gerlach amélioré par Feynman, c'est que nous pouvons maintenant produire des faisceaux d'atomes dont les spins sont orientés dans la direction que nous voulons. Ici, ils sont tous un peu penchés.



Et là, ils sont tous penchés à 90° , vers la gauche par rapport à la direction du jet, ce qui va s'avérer bien utile pour nos expériences suivantes.

L'appareil « mystérieux » de Leonard Susskind



Leonard Susskind dans le premier cours de physique quantique de sa célèbre série "Theoretical minimum".

Venons-en maintenant à l'appareil « mystérieux » de Leonard Susskind.

Je l'appelle « mystérieux » parce qu'en fait, Leonard Susskind ne dit rien de son fonctionnement interne. Il se contente de postuler l'existence d'un appareil qui mesure le spin en donnant l'un des deux résultats possibles³⁰:

- +1 si l'appareil trouve que le spin est aligné avec l'appareil et orienté vers le haut de l'appareil
- -1 si l'appareil trouve qu'il est orienté dans le sens opposé.

30 Car il n'y a plus que deux états possibles une fois que l'atome a interagit avec l'appareil, voir les chapitres de la saison 1.

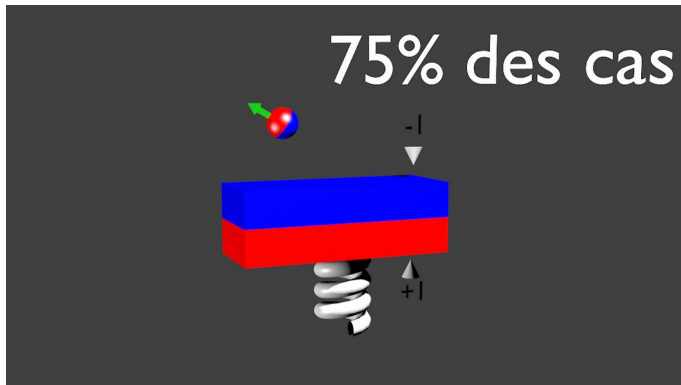
C'est suffisant pour les explications qu'il donne dans la vidéo de son cours.

Toutefois, pour nos explications à nous, qui seront plus détaillées et plus vulgarisées, c'est un peu abstrait.

Alors j'ai imaginé une possibilité de mécanisme interne de cet appareil.

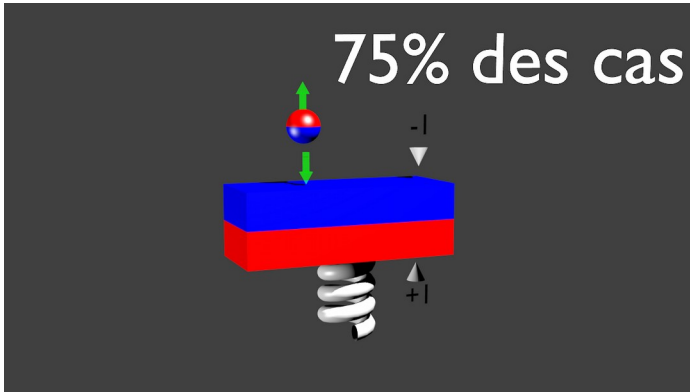
Je le vois composé d'un aimant, d'un ressort et de deux contacts électriques capables d'allumer les indications "+1" ou "-1".

Si l'atome a été préparé comme ici, par un "dispositif amélioré" comme on l'a vu plus haut, il est plus orienté vers le haut et il a 75% de chances de « basculer » dans l'état "up", c'est à dire avec son spin aligné avec l'appareil et pointant vers le haut.

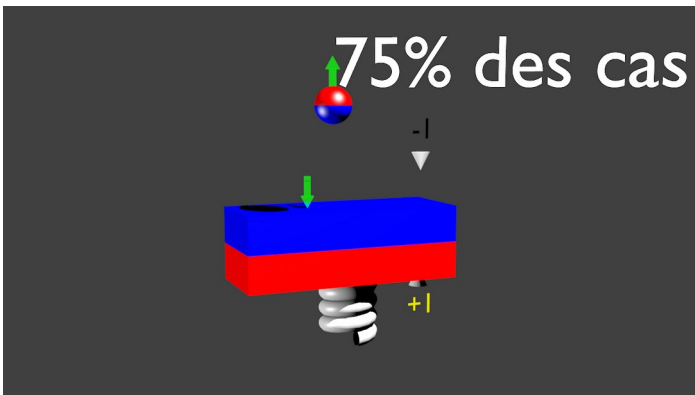


Un atome approche de l'appareil

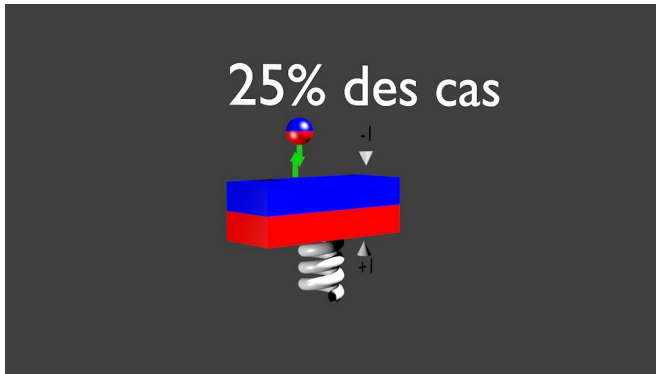
Ce faisant, il se comportera comme un petit aimant dont le pôle sud repousse le pôle sud de l'aimant de l'appareil.



L'atome est donc poussé vers le haut, tandis que l'aimant de l'appareil est poussé vers le bas où il rencontre le contact électrique, ce qui allume la lampe et l'indication "+1".



Évidemment, comme l'atome est arrivé "penché", il ne "bascule" vers le haut que dans 75% des cas et il bascule vers le bas dans les 25% de cas restants. (Nous apprendrons plus tard comment calculer ces pourcentages)



Les mouvements et le résultat correspondants sont alors bien entendu inversés. L'atome est attiré vers le bas, l'aimant de l'appareil est attiré vers le haut et c'est le témoin "moins 1" qui s'allume.



Projeté dans l'état "down" dans 25% des cas

Vers le prochain chapitre

Nous avons maintenant:

- un dispositif qui produit des atomes dont le spin est orienté comme nous le voulons nous voulons.
- un appareil de mesure qui permet de regarder comment ils interagissent avec un aimant.

Nous pouvons donc passer à l'observation de toutes sortes de mesures, dans toutes sortes de directions différentes, pour essayer d'en apprendre un peu plus sur le comportement de ces atomes et de leurs spins.

C'est ce que nous ferons dans le prochain chapitre.

« Comprendre » la mesure du spin

En bref

Nous voici arrivés au passage le plus important, non seulement de cette saison, mais sans doute même de tout notre voyage dans les territoires quantiques. Sa compréhension conditionnera toute la suite de notre progression. Si après l'avoir lu, il reste des doutes dans votre esprit, si quelque chose n'est pas clair, merci de me contacter, car ça signifie que je dois encore améliorer la rédaction de ce chapitre.

Inversement, si vous trouvez que j'y passe trop de temps, dites-le moi aussi, car ça signifiera que j'approche du point d'équilibre et que je peux simplifier un peu.

Le spin de l'électron est le cas le plus simple qu'on puisse trouver pour parler du monde quantique. Pourquoi ? Parce qu'**il n'a que deux états observables**, ce qui va considérablement simplifier nos expériences de pensée, les concepts qu'elles mettent en évidence et les mathématiques qui les décrivent.

Nous allons commencer, grâce aux deux appareils idéalisés que nous avons vus dans le chapitre précédent, par étudier un cas presque classique. Puis nous passerons peu à peu à une

situation quantique et nous prendrons le temps de comprendre en détails comment on passe de l'un à l'autre.

Nous en profiterons pour commencer à nous familiariser avec la notation de Dirac qui nous accompagnera dans toute la suite de notre voyage.

Un peu de terminologie

Dans ce chapitre, je vais utiliser des termes que je dois expliciter un peu plus avant de commencer³¹.

Spin

Dans tout ce chapitre, je ne parlerai plus d'atomes d'argent comme dans les chapitres précédents, mais de « spins ». Pourquoi ce changement ? Parce que nous allons nous concentrer sur une propriété quantique particulière, qui est celle dite « de spin $1/2$ »³². C'est une propriété qu'avaient nos atomes d'argent, c'est la même propriété que possèdent les électrons. Un proton aurait cette même propriété. Mais toutes les particules élémentaires ne l'ont pas.

En nous concentrant sur le spin et en faisant « comme si » cette propriété existait indépendamment de la particule qui le porte,

31 Un grand merci à B. Bénédicte qui m'a permis de réaliser à quel point la version précédente devait être modifiée en ce sens.

32 Pourquoi « $1/2$ » ? C'est compliqué, nous y reviendrons beaucoup plus tard. Pour le moment, contentons-nous d'utiliser ce vocabulaire. La propriété quantique que nous étudions ici s'appelle le « spin $1/2$ ». Et comme pour le moment nous n'étudierons que celle-ci, je dirai désormais simplement « spin » pour dire « spin $1/2$ ».

nous commençons à faire de la physique, qui est toujours une forme d'abstraction, de généralisation, par rapport au monde réel qui, lui, n'est fait que de cas particuliers.

Les philosophes connaissent déjà cette question. Comme le disaient les nominalistes « *Je vois bien le cheval, mais je ne vois pas la chevalité* ». Ou encore Platon « *Je vois bien les doigts, mais où est le cinq ?* ». Pour faire de la physique, c'est pareil. Il faut un peu d'imagination pour essayer de trouver des lois générales et les séparer des cas particuliers.

Soyons plus explicites :

Il y a des différences importantes entre un atome d'argent, un électron et un proton. Ils ont tous cette même propriété d'avoir un spin $1/2$ certes, mais ils ont des masses et des charges électriques très différentes. Or nous allons nous concentrer ici sur le spin. Nous ferons comme si nous avions des particules qui n'auraient que cette propriété particulière. Ça nous évitera de nous compliquer la vie avec toutes les autres propriétés et leurs conséquences dans les expériences réelles.

Donc, pour que les choses soient parfaitement claires, chaque fois que je dirai « **spin** » dans ce chapitre, il faudra comprendre : « *une particule fictive qui n'aurait comme caractéristique que celle d'avoir un spin un demi, comme c'est le cas pour les électrons, les protons ou les atomes d'argent, mais sans avoir aucune autre propriété susceptible de compliquer les choses* ».

Détecteurs

Dans ce chapitre, je ne parlerai plus non plus d'aimants comme dans l'expérience réelle de Stern et Gerlach. Ici aussi, nous allons idéaliser les choses et nous concentrer sur l'essentiel. Nous parlerons donc de détecteurs. Ces détecteurs peuvent être ceux que nous avons imaginés dans le chapitre précédent, mais ils pourraient tout aussi bien être les détecteurs « magiques » de Susskind ou tout autre détecteur que vous pourriez inventer.

Nous nous concentrons sur leur effet, et cet effet, comme nous allons le voir, sera double :

1. Le détecteur nous dira si un spin est ou n'est pas dans l'état bien défini qu'il est chargé de détecter.
2. Mais faisant son travail de détection, il arrivera souvent (mais pas toujours³³) que le détecteur modifie l'état du spin détecté. Et c'est d'ailleurs là une des caractéristiques fondamentales de la mécanique quantique.

États bien définis

Je parlerai souvent aussi « d'états bien définis ». Il s'agit d'états de mon spin qui sont tout à fait classiques.

Que signifie « classique » ici ? Ça signifie « comme d'habitude ». Précisons un peu :

33 Pour les étudiants qui se seraient hasardés ici, n'écrivez jamais ça sur vos copies ! Il y a ici une subtilité importante, mais nous la gardons pour plus tard.

Si ma voiture est dans le garage, elle est dans le garage et pas ailleurs. Elle n'est pas sur l'autoroute. Elle est dans un « état physique » bien défini, à savoir qu'elle est dans le garage. Et si je vais vérifier qu'elle est dans le garage, ma vérification ne risque pas de la projeter d'une seul coup sur l'autoroute.

Si l'eau dans ma casserole est en train de bouillir, elle est elle aussi dans un état bien défini. Elle est en ébullition et elle n'est pas gelée. Si je met un thermomètre dans l'eau, il indiquera 100°C. Et le thermomètre ne modifiera pas la température de l'eau ou alors de manière parfaitement négligeable.

C'est important de prendre le temps de dire toutes ces évidences car nous allons voir qu'en mécanique quantique, les choses ne se passent pas toujours comme ça.

Up, Down, et Right

Je vais utiliser dans tout ce chapitre les mots anglais *Up*, *Down*, et *Right* qui signifient respectivement Haut, Bas et Droite. Pourquoi ?

Parce que vous les retrouverez partout. Tellement qu'au bout d'un moment, on va utiliser des initiales, puis des notations particulières comme la suivante :

$|D\rangle$ qui signifie « état bien défini *Down* ».

Si j'écris $|D\rangle$ ça voudra donc dire que je parle d'un spin qui est dans l'état bien défini *Down*, autrement dit d'un spin qui pointe verticalement, vers le bas.

Pour être tout à fait complet, si j'utilise les mots anglais, ce n'est pas par effet de mode, c'est aussi pour éviter plus tard des confusions d'écritures qui se produiraient avec les mots français alors qu'on les évite en faisant comme tout le monde, en utilisant les mots anglais.

« Kets » de Dirac

Nous allons aussi utiliser une convention d'écriture inventée par Paul Dirac et que nous retrouverons partout par la suite.

J'utiliserai des **crochets fermants**, ainsi : $|D\rangle$ pour désigner un **l'état bien défini** *Down*. C'est un des états possibles de notre spin. Il peut pointer verticalement vers le bas, donc être dans l'état $|D\rangle$.

À ce stade, vous l'avez compris, j'écrirai :

- $|U\rangle$ pour désigner **l'état d'un spin** dirigé exactement vers le haut (« *up* »).
- $|D\rangle$ pour désigner l'état d'un spin dirigé exactement vers le bas (« *down* »).
- $|R\rangle$ pour désigner l'état d'un spin dirigé exactement vers la droite (« *right* »).

On appelle cette notation des « kets ». Pourquoi des kets ? Je vous le dirai dans un instant.

« Bras » de Dirac

J'utiliserai aussi des **crochets ouvrants** pour désigner mes **détecteurs**. Chaque détecteur est chargé de détecter si le spin est ou n'est pas dans l'état qui lui correspond.

Je pourrais fabriquer plusieurs détecteurs différents ou bien faire des économies en réutilisant le même détecteur et en le basculant dans des positions différentes, ça ne changerait rien.

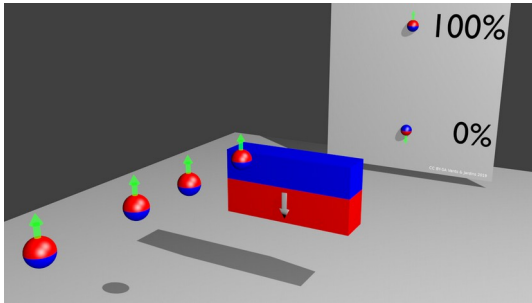
Donc, bien sûr :

- $\langle U|$ désigne **l'état d'un détecteur** chargé de vérifier si le spin est dirigé vers le haut (« *up* »). Si c'est le cas, il affichera « +1 ». Dans le cas contraire, il affichera « -1 ».
- $\langle D|$ désigne l'état d'un détecteur chargé de vérifier si le spin est dirigé vers le bas (« *down* »). Si c'est le cas, il affichera « +1 », sinon, « -1 ».
- $\langle R|$ désigne l'état d'un détecteur chargé de vérifier si le spin est dirigé vers la droite (« *right* »). Si tel est bien le cas, il affichera « +1 », sinon « -1 ».

On appelle ces crochets ouvrants des « bras ». Pourquoi des bras ? Patience, on y vient.

« Brakets » de Dirac

Résumons-nous. Sur l'image suivante, j'ai mis le détecteur dans la position $\langle D|$ (il pointe vers le bas) alors que les spins sont dans l'état $|U\rangle$ (ils pointent vers le haut).



Expérience $\langle D|U\rangle$

Je pourrais donc désigner cette expérience en l'appelant :

$\langle D|U\rangle$

Ces crochets sont complets, il y a un crochet qui ouvre et un autre qui ferme. **Des crochets de ce genre s'appellent « brakets » en anglais. Vous avez maintenant la clé du mystère des bras et des kets.**

Cette convention d'écriture, vous la trouverez partout dans les livres de mécanique quantique. Nous y reviendrons longuement dans les saisons 3 et 4 de notre voyage.

En fait, cette notation $\langle D|U\rangle$ est beaucoup plus qu'une simple abréviation pour décrire une expérience particulière. **Elle a une**

signification mathématique très précise que nous étudierons plus tard.

Détecteurs et mesures

Nous allons bientôt « mesurer » et « détecter » des spins.

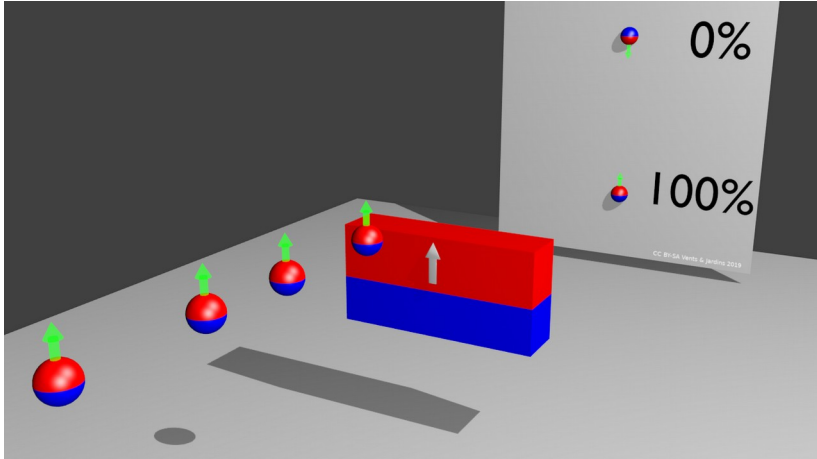
Pour nous, les deux mots seront presque équivalents. Mes détecteurs vérifient si un spin est ou n'est pas dans un état donné. En fait, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, mon **détecteur** « de Susskind » affichera la **mesure** « +1 » si la réponse est oui et il affichera la mesure « -1 » dans le cas contraire³⁴.

Maintenant que nous avons notre vocabulaire et nos concepts de base, passons à l'expérience et à la mesure du spin.

34 Les physiciens préfèrent habituellement les valeurs +1/2 et -1/2 mais ça ne change rien pour nous. C'est une simple question d'unités de mesure.

Exemples d'états bien définis

Spins dans l'état Up, appareil en position Up



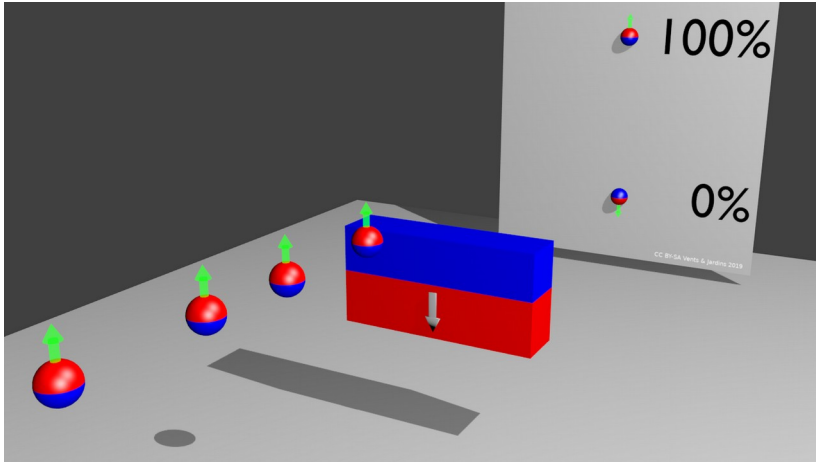
$\langle U|U \rangle$ c'est à dire appareil dans la position $\langle U|$ et spins dans l'état $|U\rangle$

Commençons par la situation la plus simple.

En utilisant le « dispositif amélioré par Feynman » que nous avons vu dans le chapitre précédent, nous allons préparer une série de spins tous identiques, orientés vers le haut.

S'ils passent au dessus d'un détecteur qui a la même orientation, les pôles qui se font face sont les pôles contraires. Le détecteur va attirer les spins. Il affichera la mesure « +1 » pour signifier que les spins sont dans la même direction que lui et les spins descendront tous vers le bas de la cible.

Spins dans l'état Up, appareil en position Down



$\langle D|U\rangle$ c'est à dire appareil dans la position $\langle D|$ et spins dans l'état $|U\rangle$

Évidemment, si on place maintenant le détecteur dans la position inverse, ce sont maintenant les pôles identiques qui se font face. Notre détecteur indiquera que les spins sont dans la position opposée à la sienne et afficheront la mesure « -1 ».

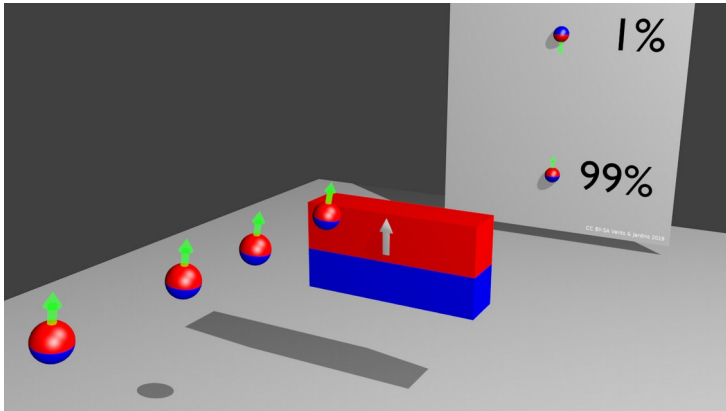
Si on place pour confirmation un écran derrière, on observera que les spins auront été repoussés vers la cible du haut.

Imaginons maintenant que nous remplaçons la cible du haut par un second détecteur, identique au premier. Bien évidemment, il donnerait les mêmes résultats, à savoir que les spins qui étaient dans l'état $|U\rangle$ avant de passer dans le premier détecteur le sont toujours en arrivant dans le second. Le premier détecteur n'a pas modifié leur état, il n'a fait que le

États « sans valeur bien définie »

Spins « légèrement penchés ».

Que se passe-t-il maintenant, si j'essaye de modifier un peu les choses, en envoyant des spins préparés dans l'état « *presque vers le haut, mais pas tout à fait* », dans un appareil positionné « vers le haut » comme ici ?



Spins Up "légèrement penchés"

Si nos spins se comportaient de manière classique, le fait qu'il ne soient pas tout à fait dans l'axe devrait les envoyer légèrement vers les côtés.

Or nous avons vu dans l'expérience de Stern et Gerlach qu'il n'y a que deux états possibles à la sortie du détecteur.

Comme la physique quantique garde quelques points communs avec la physique classique, le fait que nos spins soient maintenant légèrement penchés n'aura qu'une légère conséquence. Mais cette légère conséquence ne sera pas une légère déviation des spins, puisqu'il ne peuvent avoir que deux comportements dans le détecteur: soit totalement repoussés soit totalement attirés.

Au lieu de cela, ce qui se passe va être à la fois légèrement différent mais aussi très différent.

Comme on le voit sur l'image, les spins continueront de faire comme avant, c'est à dire d'être attirés par le détecteur, mais de temps en temps, de manière parfaitement imprévisible, un d'entre eux aura le comportement inverse :

- Il sera repoussé par le détecteur
- Le détecteur affichera la mesure -1
- Et si on le mesure une deuxième fois, avec un deuxième détecteur, on observera de nouveau ces mêmes résultats.

Autrement dit, de temps en temps, un des spins au hasard est **projeté dans l'état bien défini opposé**. C'était un spin « presque Up » comme tous les autres mais le détecteur a eu sur lui un effet radical, en le faisant basculer complètement dans l'état bien défini « Down ».

Prenons le temps de bien comprendre les conséquences de tout ceci :

À leur arrivée dans le détecteur, tous les spins étaient dans un **état qui n'était pas tout à fait l'état bien défini Up**. Ils étaient tous très légèrement penchés.

Dans 99 % des cas, le détecteur a confirmé qu'ils étaient plutôt dans l'état Up en arrivant. Il a affiché « +1 ». MAIS et c'est là un effet tout à fait quantique, **en interagissant avec les spins, il a modifié leur état**. Les spins n'étaient pas tout à fait Up en arrivant, 99 % d'entre eux sont de nouveau totalement Up, autrement dit dans l'état bien défini Up, à la sortie.

Et dans 1 % des cas, l'action du détecteur a été encore plus radicale. 1 % des spins qui sont arrivés « presque Up » ont été projetés par le détecteur dans l'état bien défini opposé.

Nous voyons ici à l'œuvre trois grandes caractéristiques qui rendent la physique quantique si différente de la physique classique :

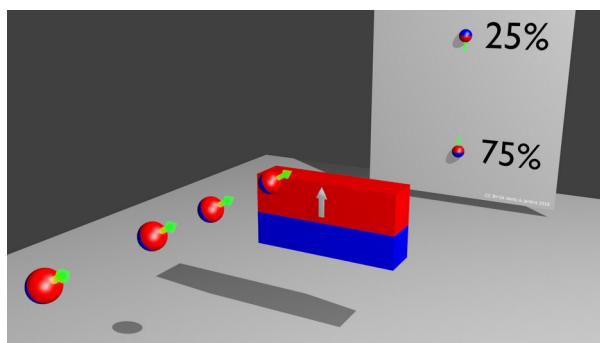
1. Les détecteurs ou les appareils de mesure peuvent avoir un **effet considérable sur les objets** mesurés.
2. Cet effet est **aléatoire**, totalement au hasard. Il est parfaitement impossible de savoir à l'avance dans lequel des deux états possibles un spin donné va être projeté.
3. En revanche, ce qui n'est pas du tout aléatoire, ce sont les **probabilités** des mesures. Dans notre cas, chaque spin a très exactement une chance sur cent d'être projeté dans l'état opposé, ni plus ni moins.

Nous voici confrontés au premier vrai grand défi de la physique quantique, à savoir la **fin du déterminisme**.

Attention, personne, du moins parmi les physiciens, ne s'imagine que les atomes auraient une sorte de libre arbitre qui leur ferait choisir librement, de temps en temps, de se comporter différemment de leurs congénères.

Non, **en physique, ce qui remplace le déterminisme, ce n'est pas le libre arbitre, c'est le hasard**. Mais comme vous vous en doutez, nous aurons l'occasion de revenir très longuement sur toutes ces questions.

Spins « d'avantage penchés »



Faisceau de spins « d'avantage penchés »

Faisons maintenant tourner un peu plus vers la droite notre "dispositif amélioré de Feynman" pour voir ce qui se passe.

Heureusement, même la mécanique quantique donne parfois des résultats auxquels on peut s'attendre intuitivement. En augmentant l'angle, on augmente le pourcentage de spins qui sont projetés dans l'état opposé. Désormais, 75 % de nos spins sont projetés dans l'état bien défini $|U\rangle$ et 25 % sont projetés dans l'état bien défini $|D\rangle$.

Spins dans l'état bien défini $|R\rangle$

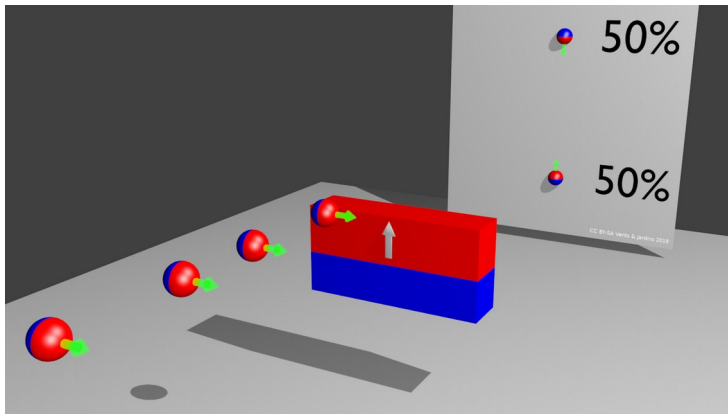
En poursuivant le mouvement de bascule de notre source, nous arrivons dans la situation où tous les spins sont parfaitement orientés vers la droite, que nous noterons $|R\rangle$ comme annoncé plus haut.

Prenons notre temps. Ils ne sont plus du tout dans l'état bien défini $|U\rangle$ puisqu'ils ne sont plus du tout alignés dans cette direction.

Ils ne sont pas non plus dans l'état bien défini $|D\rangle$ puisqu'ils ne sont pas non plus dans cette direction.

En revanche, ils sont désormais tout à fait alignés vers la droite, c'est à dire qu'**ils sont dans l'état bien défini $|R\rangle$** .

Comme notre détecteur est toujours dans la position $\langle U|$, nous pouvons, selon notre convention d'écriture, nommer notre expérience ainsi : $\langle U|R\rangle$.



Expérience $\langle U|R\rangle$

Quel est le résultat de cette expérience ?

Comme on pouvait s'en douter intuitivement, comme les spins qui arrivent sont exactement dans l'état $|R\rangle$ qui est situé très exactement à égale distance des états $|U\rangle$ et $|D\rangle$:

- 50 % d'entre eux sont projetés dans l'état $|U\rangle$
- et 50 % sont projetés dans l'état $|D\rangle$.

Notre première équation quantique

Nous allons en profiter pour écrire notre toute première équation de mécanique quantique :

$$|R\rangle = 50\% |U\rangle + 50\% |D\rangle$$

Bon, cette équation n'est pas encore tout à fait académique, vous vous en doutez. Mais je vous promets qu'elle n'est pas tellement éloignée des vraies équations de mécanique quantique que nous découvrirons plus loin.

Que dit-elle ?

Elle dit tout simplement que si on envoie des spins préparés dans l'état bien défini $|R\rangle$ dans un détecteur qui les mesure selon l'axe vertical³⁵, en les projetant soit dans l'état $|U\rangle$ soit dans l'état vertical $|D\rangle$, il les projettera dans l'état $|U\rangle$ dans 50 % des cas et dans l'état $|D\rangle$ dans tous les autres cas.

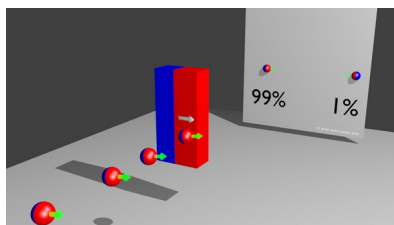
À ce stade, vous pouvez vous demander : « *Mais est-ce que je ne pourrais pas mesurer l'orientation de mes spins $|R\rangle$ sans les projeter dans un autre état ?* »

La réponse est non, vous ne pouvez pas. En mécanique quantique, mesurer un état et le préparer, c'est la même chose. À la sortie de l'expérience le spin sera dans l'état mesuré par votre détecteur, même s'il n'y était pas en arrivant. Il n'est pas possible de faire autrement.

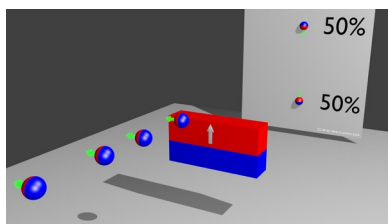
Deux autres configurations « sans état bien défini ».

Et voici pour terminer deux autres expériences de pensée, afin de bien nous familiariser avec la réponse de Dame Nature.

35 Ce détecteur peut être $\langle U|$ ou $\langle D|$, le résultat sera le même, comme vous pourrez le vérifier en refaisant l'expérience de pensée avec un détecteur $\langle D|$.



$\langle R | \text{presque } R \rangle$



$\langle U | L \rangle$

« Bien définis » par rapport à quelle observation ?

Je me permets d'insister sur une chose : Faire la distinction entre les états bien définis et ceux qui ne le sont pas ne signifie pas que certains spins seraient dans un état bien défini par rapport à toutes les observations et que d'autres ne seraient dans un état bien défini pour aucune³⁶.

Tous nos spins ont été préparés par notre "dispositif amélioré de Feynman" dans un état bien défini pour les observations qui se font très exactement dans le même axe que celui du dispositif de préparation.

Un spin qui est dans un état bien défini pour une direction ne l'est donc pas pour toutes les autres.

36 En tout cas dans les expériences que nous étudions en ce moment.

À la suite de quelques échanges sur Quora fin 2019³⁷, je me suis rendu compte qu'il est peut-être nécessaire d'insister encore un peu plus lourdement (bein oui, désolé mais c'est vraiment important!) sur ce dernier point, et c'est ce que nous allons faire maintenant.

« **Superposition** » et « **décohérence** »

On parle souvent, dans la littérature scientifique, des états qui ne sont pas bien définis par rapport à une direction donnée en disant qu'ils sont dans un état « de superposition quantique ».

Ainsi l'état $|R\rangle$ que nous avons vu toute à l'heure et pour lequel nous avons écrit l'équation :

$$|R\rangle = 50 \% |U\rangle + 50 \% |D\rangle$$

sera appelé un état de « **superposition quantique** ».

Et le processus par lequel il va passer, au hasard, de cet état à l'un des deux états bien définis $|U\rangle$ ou bien $|D\rangle$, s'appelle « **décohérence** ».

Mais est-ce que la décohérence fait passer une particule, comme nos spins, d'un état parfaitement quantique à un état parfaitement classique ?

C'était la question posée sur Quora et la réponse est « non ».

Notre spin est dans un état qui n'est pas bien défini (certains préfèrent dire qu'il est dans un état « superposé ») **par rapport**

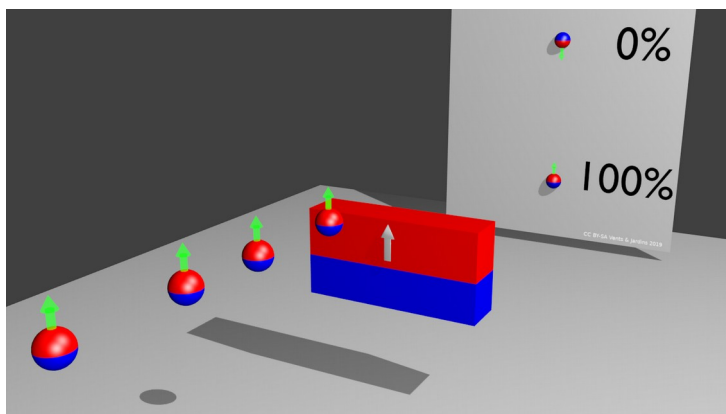
37 Quora est un forum de questions-réponses. J'en profite pour remercier ici Pierre Von Berg pour ses questions et ses encouragements.

à un détecteur donné, selon un axe donné. Mais le même spin est dans un état bien défini par rapport à un autre détecteur, selon un autre axe.

Prenons le temps d'approfondir un peu tout ceci, car les échanges sur Quora ont montré que c'est important.

Spins dans l'état "Up"

Imaginons que je prépare de nouveau une série de spins dans l'état bien défini "Up", noté $|U\rangle$, comme ceci:



Ils sont tous dans l'état bien défini "Up". Aucune "superposition quantique" ici. je peux remesurer chacun d'entre eux cents fois, je vérifierai cent fois qu'ils sont bien dans l'état "Up".

Je pourrais même en profiter pour écrire ma seconde équation de mécanique quantique :

$$|U\rangle = |U\rangle$$

ou encore :

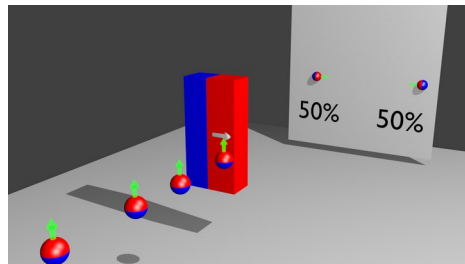
$$|U\rangle = 100\% |U\rangle$$

Bref, l'état $|U\rangle$ est l'état $|U\rangle$ tel que le mesurent les détecteurs $\langle U|$ et puis c'est tout !

Basculement du détecteur

Maintenant, je ne touche pas à mes spins, qui sont donc toujours dans l'état bien défini "Up", mais je fais tourner mon appareil de mesure afin de mesurer leur composante horizontale, dans l'axe "gauche-droite", ainsi:

Mes spins sont toujours dans l'état bien défini "Up", mais ils sont dans une superposition d'états **pour ce qui est de leur composante horizontale.**



Comme nous l'avons vu, on peut noter cette superposition d'états de la manière suivante:

$$|U\rangle = 50\% |L\rangle + 50\% |R\rangle$$

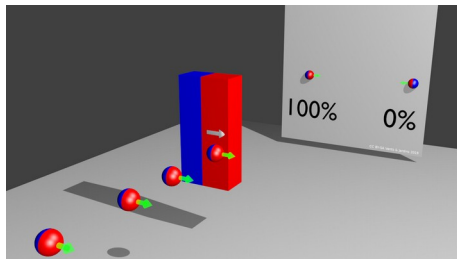
Autrement dit, chacun des spins a une chance sur deux d'être projeté par le détecteur dans l'état aligné vers la gauche et une chance sur deux d'être projeté aligné vers la droite.

La manière dont ils seront ainsi projetés dans un autre état que leur état initial et la vitesse à laquelle ils le feront est calculée par la **théorie de la décohérence** dont on parlera dans une autre saison de notre voyage. Mais **la théorie de la décohérence ne supprime pas le hasard. Il n'existe aucun moyen de prévoir à l'avance si un spin donné va basculer vers la droite ou vers la gauche.**

Sélection des spins orientés vers la droite

Bien, imaginons maintenant qu'à l'aide de mon "dispositif de Stern et Gerlach amélioré", **je ne garde que les spins qui ont basculé vers la droite.**

Je leur fais faire un petit tour de piste et je les réinjecte dans le détecteur. La situation est maintenant la suivante:



Tous mes spins sont désormais dans un **autre** état bien défini qu'au début. Ils ne sont plus du tout dans une superposition d'états **vis à vis de l'axe horizontal**. Ils sont désormais tous tournés vers la droite et je peux le vérifier cent fois, ils le resteront. Ils sont dans l'état bien défini $|R\rangle$.

Et je pourrais écrire :

$$|R\rangle = |R\rangle = 100\% |R\rangle$$

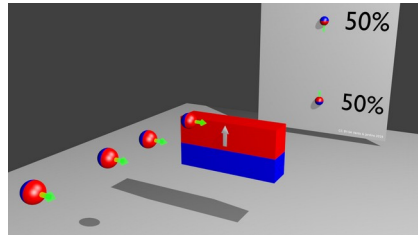
Autrement dit l'état $|R\rangle$ est un état classique, il est l'état $|R\rangle$ que mesurent les détecteurs $\langle R|$ et puis c'est tout.

Retour du détecteur à sa position initiale

Replaçons à présent le détecteur dans sa position du début, celle qui permet de mesurer la composante verticale:

Ça n'est plus du tout la même configuration qu'au début !

Mes spins qui sont désormais dans l'état bien défini $|R\rangle$ ne sont plus du



tout dans un état bien défini **par rapport à l'axe vertical**. Au contraire, ils sont désormais dans une **nouvelle** superposition d'états par rapport à cet axe, que je peux noter ainsi:

$$|R\rangle = 50\% |U\rangle + 50\% |D\rangle$$

Autrement dit, contrairement à ce qu'on peut lire parfois, **la décohérence n'a pas transformé ma particule quantique en une particule classique**. Elle ne l'a fait que pour **une seule composante** du spin, et en le faisant, elle a projeté la particule dans un **nouvel état superposé par rapport à une autre composante**.

En fait, comme on peut s'en convaincre en manipulant un peu les exemples, lorsque la mesure du spin intervient, elle

supprime la superposition pour une direction, celle de la mesure, mais elle la rétablit ipso-facto pour toutes les autres directions.

On pourrait presque parler de « recohérence » bien que ce terme n'existe pas à ma connaissance dans le vocabulaire physique. Ce serait d'ailleurs un terme un peu maladroit, au moins ici, parce que ce n'est pas quelque chose de plus qui se passerait **après** la décohérence. C'est le **même** phénomène.

Indétermination, hasard et incertitude

Attention pour finir à une autre confusion fréquente: Dire qu'on ne peut pas prévoir le résultat d'une mesure donnée ne signifie pas qu'on ne peut rien prévoir du tout.

Si mon spin est tourné vers la droite et mon appareil vers le haut, je ne peux certes pas prévoir le résultat de la mesure du spin suivant, mais je peux affirmer de manière extrêmement précise qu'il y a très exactement une chance sur deux qu'il soit projeté vers le haut, une chance sur deux qu'il soit projeté vers le bas et absolument aucune chance qu'il fasse autre chose.

Insistons sur ce point. Cette affirmation est extrêmement précise. Il n'y a pas "à peu près" une chance sur deux, il y a **très exactement une chance sur deux**. Contrairement à ce qu'on entend dire parfois, il n'y a absolument aucune incertitude à ce sujet. La mécanique quantique est même à l'heure actuelle la théorie scientifique la plus précise qu'on ait jamais vue. On vérifie ses prédictions avec une précision de

plus de dix décimales, c'est à dire qu'elles sont exactes à au moins 99,99999999%.

Le mot « incertitude » qui est souvent associé à la mécanique quantique pour des raisons historiques est donc trompeur. Les physiciens préfèrent d'ailleurs utiliser le mot « indétermination » pour bien montrer qu'il ne s'agit pas d'un manque de précision, mais d'un **hasard fondamental³⁸ dont on peut prévoir très exactement les probabilités.**

« Comprendre » les lois de la Nature ?

On entend souvent dire, y compris parmi les plus grands physiciens, que « *personne ne comprend vraiment la physique quantique* ».

Cette phrase célèbre est assez juste et éclairante, bien sûr, mais encore faut-il bien s'entendre sur ce qu'on appelle « comprendre » les lois de la Nature.

Ce que démontre la physique quantique, c'est que les lois fondamentales de la Nature, celles qui déterminent le comportement des particules élémentaires, sont extrêmement différentes de celles qui permettent de prévoir le comportement des objets qui nous sont familiers.

Aucun aimant de taille macroscopique, c'est à dire aucun aimant qui soit à notre taille, ne se comporte comme cette « quantité élémentaire d'aimantation » qu'est le spin. Plus

38 Pour contredire une phrase célèbre d'Einstein, on pourrait dire que Dieu, ou en tout cas la Nature, joue bel et bien aux dés.

généralement aucune particule élémentaire ne se comporte ni comme une bille de billard ni comme une vague à la surface d'un lac. Leur comportement ne ressemble à rien de ce que nous connaissons à notre échelle³⁹.

Nos cerveaux sont le résultat de milliards d'années d'évolution. Ils sont extrêmement bien adaptés pour prévoir assez précisément, quoi qu'avec un peu d'incertitude, l'endroit où se trouvera un lapin une seconde après le moment où on s'est lancé à sa poursuite. En revanche, nous ne sommes pas faits pour observer des champs quantiques ni pour prévoir le comportement des particules élémentaires. Nous ne pouvons donc pas en avoir d'intuition. Tout ce que nous pouvons faire, c'est les prévoir, et cela avec une précision inégalée, au moyen de raisonnements mathématiques parfois très abstraits.

Quant à la question de comprendre pourquoi les lois de la nature sont celles que nous observons et pas autrement, c'est encore une autre affaire. Certaines lois peuvent être déduites d'autres, qui sont plus "fondamentales". Mais les lois fondamentales, par définition, ne peuvent être déduites de rien d'autre. Pourquoi la Nature est-elle faite comme elle l'est et n'aurait-elle pas pu être autrement? D'autres Univers, avec des lois différentes, sont-ils possibles? C'est encore une autre question, mais elle n'est pas spécifique à la physique quantique.

Alors peut-on « comprendre » la physique quantique ? Tout dépend de ce qu'on appelle « comprendre » !

39 Même si certains phénomènes quantiques sont observables à notre échelle mais on reparlera de tout ça dans un autre épisode.

États classiques et états quantiques

En bref

Maintenant que nous avons compris la mesure du spin, nous allons pouvoir généraliser à d'autres situations quantiques.

Nous en profiterons pour approfondir le concept d'état physique. Nous regarderons aussi d'un peu plus près à quoi peuvent ressembler certaines équations simples, mais toujours sans « faire des maths » pour le moment.

États classiques

Le mot « état » a plusieurs significations en physique. Il y a d'abord les états de la matière auxquels tout le monde pense : solide, liquide, gazeux. Il faudrait y ajouter d'autres états de la matière, un peu moins fréquents, du moins dans notre quotidien, mais ce n'est pas de cela que nous allons parler ici. **L'autre sens du mot « état » en physique correspond à l'ensemble des caractéristiques du système physique qu'on étudie.**



Prenons un exemple. Ma chienne s'appelle "Cédille". Elle est blanche, beige et noire, elle pèse 7 kg, elle se repose en ce moment dans son panier et elle a une température interne de 38°.

Ni sa couleur, ni son poids, ni sa position, ni sa vitesse, ni sa température, rien de tout cela ne change de manière importante d'une fraction de seconde à l'autre. Et quand il y a un changement au fil du temps, il s'agit toujours d'un changement progressif. Par "progressif", je veux dire que si une deuxième mesure intervient après un milliardième de seconde, elle donnera un résultat très proche du premier. Ou alors ce sera signe que l'appareil de mesure ne fonctionne pas correctement.

Je vais insister un peu, car il s'agit là d'apparentes évidences que la physique quantique va un peu (et même beaucoup !) bousculer.

Imaginons que ma chienne soit un peu malade et que je prenne sa température. Imaginons que je mesure une température de 38°C. Pour plus de sécurité, je reprends sa température une minute plus tard. Imaginons que le résultat soit 42°C. Je me dirais que je me suis trompé quelque part. Je reprends sa température immédiatement et j'obtiens 40°C. A coup sûr, je me dirais que le thermomètre ne fonctionne pas !

Pourquoi ? Parce que la température des animaux n'est pas supposée varier avec une telle vitesse et de manière aussi aléatoire.

Imaginons maintenant que le poids de ma chienne change d'un kg, de manière aléatoire, à chaque fois que je prends sa température ! Si ça se produit, quelle sera ma réaction ?

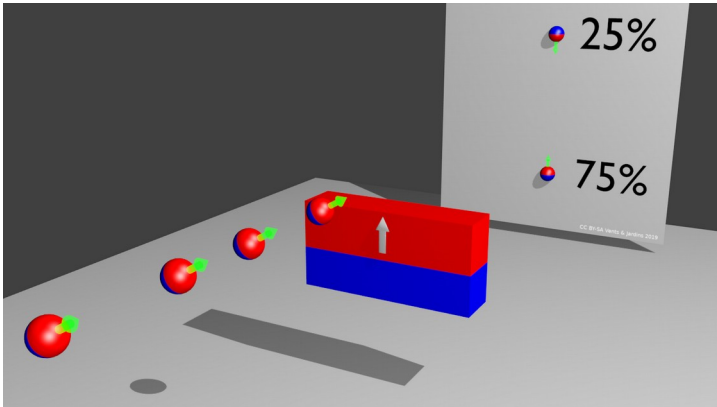
Je me dirais que je rêve, car les choses ne se passent pas du tout comme ça d'habitude. Les choses dont nous avons l'habitude gardent sensiblement le même état au fil du temps, avec des variations très progressives, négligeables si elles se produisent dans un temps très court, et elles ne doivent habituellement rien au hasard.

La température, la couleur, le poids, la position et la vitesse de ma chienne, voilà ce qu'on appelle des états physiques classiques. Ils correspondent à ce que nous avons appelé en mécanique quantique des « états bien défini » au chapitre précédent.

États quantiques

À l'échelle des particules élémentaires et des systèmes quantiques, les choses se passent d'une manière très différente comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents.

Reprenons un des exemples du chapitre précédent. Il va beaucoup nous servir par la suite, car nous allons bientôt généraliser ce cas particulier à d'autres cas similaires.



$$|\psi\rangle = 75\% |U\rangle + 25\% |D\rangle$$

Un peu plus de terminologie

J'ai écrit sous le dessin la formule :

$$|\psi\rangle = 75\% |U\rangle + 25\% |D\rangle$$

Si vous vous souvenez de ce que nous avons vu au chapitre précédent, elle ne devrait pas vous effrayer. Elle signifie que dans cette situation, mes spins sont dans un état qui n'est pas parfaitement aligné ni vers le haut ni vers le bas.

Cet état, je le note $|\psi\rangle$, dans lequel la lettre grecque ψ (psy) est d'usage traditionnel pour désigner « l'état quantique que j'étudie en ce moment »

La formule signifie que si je fais passer les spins qui sont dans cet état dans un détecteur conçu pour savoir s'ils sont ou pas orientés vers le haut, ce détecteur :

- affichera « oui » (ou +1) dans 75 % des cas **et projettera du même coup les spins correspondants dans l'état $|U\rangle$.**
- affichera « non » (ou -1) dans 25 % des cas **et projettera du même coup les spins correspondants dans l'état opposé $|D\rangle$.**

En fait, comme je l'ai dit dans le chapitre précédent, j'utilise ici une notation « maison » qui n'est pas très académique. Je le fais parce que j'ai promis de ne pas faire de maths au delà du CM2 dans les deux premières saisons et que j'entends bien tenir ma promesse.

Mais ça ne doit pas nous empêcher de regarder un peu plus loin dès à présent.

En fait, si j'avais voulu écrire mon équation d'une manière plus académique, j'aurais dû écrire quelque chose comme ceci :

$$|\psi\rangle = \sqrt{\frac{3}{4}}|U\rangle - i\sqrt{\frac{1}{4}}|D\rangle$$

Cette équation est plus compliquée car elle est plus générale. Nous la comprendrons dans la saison 3 de notre voyage.

Pour le moment, l'équation simplifiée :

$$|\psi\rangle = 75\% |U\rangle + 25\% |D\rangle$$

dit exactement la même chose dans le cas particulier qui nous intéresse ici, et elle nous évitera de nous perdre dans des questions que nous n'étudierons que plus tard.

Cet état particulier du spin, comme nous l'avons vu précédemment, n'est pas un « **état bien défini** » pour une mesure verticale. Plutôt que dire que ce serait un « **état mal défini** », on dit généralement que c'est un « **état superposé** », parce qu'il est composé de deux parties.

Le mot « superposé » est mal choisi, il prête à confusion mais il est d'usage courant et il faut donc le connaître. Quand quelqu'un vous parlera de « **superposition quantique** », vous saurez donc désormais ce que ça signifie.

Certains professeurs de physique⁴⁰ préfèrent parler « **d'état combiné** ». C'est la même chose mais c'est plus clair, parce que les équations comme celles que nous avons écrites portent en mathématiques le nom de « combinaisons linéaires ». Peu importe pour le moment ce que ça signifie, nous y reviendrons plus tard.

Ce qui fait la différence entre les états classiques et les états quantiques, c'est que **les états quantiques sont presque toujours des états combinés**. Les cas dans lesquels on peut prévoir le résultat d'une mesure avec certitude sont exceptionnels. La plupart du temps, on ne peut connaître que la probabilité que la mesure donne tel ou tel résultat.

40 Notamment Etienne Parizot, de Paris-Diderot.

Un dernier point de vocabulaire qu'il peut être bon de connaître dès à présent pour le cas où vous iriez approfondir tout ça sur le web ou ailleurs :

Vous entendrez aussi souvent l'expression « **vecteur d'état** » pour désigner des choses comme l'état $|\psi\rangle$. Maintenant, quand vous entendrez cette expression, vous saurez ce qu'elle signifie, mais pourquoi « vecteur d'état » ?

En physique, on utilise souvent des sortes de petites flèches qu'on ajoute entre elles et qu'on appelle des vecteurs. On les note de diverses manières. Souvent, on les note en écrivant une petite flèche au dessus d'une lettre latine.

Il se trouve que les états de la physique quantique peuvent eux aussi être décrits par des petites flèches, mais des petites flèches, des « vecteurs », un peu différents de ceux qu'on apprend au lycée. Pour ne pas les mélanger, on les note différemment en mettant un « ket » autour d'une lettre grecque.

Donc, pour nous résumer, et comme un petit dessin vaut souvent mieux qu'un long discours :

\vec{v} Un vecteur ordinaire

$|\psi\rangle$ Un vecteur d'état de la physique quantique

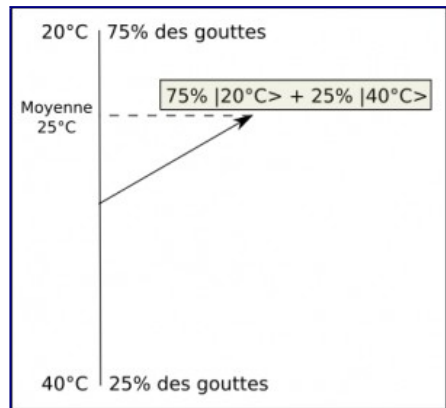
Voilà. Maintenant, quand on vous parlera d'un « vecteur d'état » vous saurez ce que c'est. C'est un objet mathématique, qui permet de représenter un état quantique et qu'on peut représenter aussi par une sorte de flèche. Nous en verrons d'autres exemples dans un instant.

Car il est temps maintenant de généraliser ce que nous avons appris à d'autres situations quantiques que celle du spin.

Températures

Certains systèmes quantiques peuvent avoir une température qui est une combinaison de deux températures.

Ainsi par exemple :



$$|T\rangle = 75\% |20^\circ\text{C}\rangle + 25\% |40^\circ\text{C}\rangle$$

signifiera que notre thermomètre a 75% de chances d'afficher 20°C et 25% de chances d'afficher 40°C.

A ce stade, vous l'avez compris, il ne s'agit pas d'un défaut du thermomètre. **Une fois la mesure effectuée, on pourra refaire la mesure plusieurs fois, on obtiendra toujours la même confirmation.** Aussi longtemps en tout cas que le système n'évoluera pas pour d'autres raisons vers une autre température. Parce que bien sûr, si quelqu'un d'extérieur décide de faire quelque chose qui réchauffera ou refroidira le système, sa

température va changer. Mais si on se contente de mesurer et remesurer sa température sans la changer, elle ne changera plus.

Maintenant, imaginons que nous ayons énormément de gouttelettes dans cet état quantique de température. Au moment de la mesure, 75% d'entre elles se positionneraient sur une température de 20°C et 25% d'entre elles se positionneraient sur 40°C. Un calcul de niveau collège montre que la température moyenne de notre échantillon serait de 25°C. Je n'ai pas dessiné mon vecteur d'état au hasard. Je lui ai donné l'angle qui correspond à cette valeur.

Positions

Certains systèmes quantiques peuvent avoir une position qui est une combinaison de deux positions de base. C'est le cas par exemple des particules dans les célèbres expériences du type « fentes de Young » dont nous aurons l'occasion de reparler plus tard. Ainsi par exemple

$$|P\rangle = 75\% |Gauche\rangle + 25\% |Droite\rangle$$

signifiera que notre particule a 75% de chances d'être observée à gauche et 25% de chances d'être observée à droite.

Là encore, une fois qu'une interaction avec l'environnement a eu lieu, le vecteur d'état change. Si la particule est enregistrée à gauche par exemple, l'état après la mesure deviendra

$$|P\rangle = 100\% |Gauche\rangle + 0\% |Droite\rangle$$

Puisqu'une fois que l'observation est faite, elle est faite. Si la particule est arrivée à gauche et que rien ne l'envoie ailleurs, on pourra vérifier 100 fois, on la trouvera toujours à gauche.

Et si on place un deuxième détecteur à gauche, il enregistrera toujours la même chose que le premier, à savoir que la particule est bien dans la position de gauche.

Et si on installe un autre détecteur à droite, il enregistrera qu'elle n'y est pas.

L'état qui était un état combiné, un état de « superposition quantique », avant la détection :

$$|P\rangle = 75\% |Gauche\rangle + 25\% |Droite\rangle$$

est devenu un état bien défini, un état « classique », après la détection :

$$|P\rangle = 100\% |Gauche\rangle + 0\% |Droite\rangle$$

Vitesses et positions

Bon, je ne vais pas vous faire le même coup pour les vitesses. A ce stade vous avez certainement compris ce que peut signifier un vecteur d'état du genre:

$$|P\rangle = 75\% |20\text{km/h}\rangle + 25\% |40\text{km/h}\rangle$$

Mais dans le cas particulier des vitesses et des positions, il y a quelque chose de plus, à savoir qu'il y a un rapport très direct entre les vitesses et les positions. Ce que je veux dire par là, c'est que la vitesse, c'est une mesure du changement de

position. Les deux quantités sont très liées. Du coup, la mesure de la position change les probabilités pour la vitesse. Et inversement, si je mesure la vitesse, je vais obtenir une des deux vitesses possibles. Mais du coup, je ne pourrai plus savoir où se trouve la particule.

Cette idée est derrière le célèbre « **principe d'indétermination** » **d'Heisenberg** que nous étudierons plus tard, avec les maths qui vont bien pour ça.

Réfléchissons encore un peu plus sur cet exemple. Si je mesure d'abord la vitesse puis immédiatement après la position, j'ai toutes les chances d'obtenir des résultats très différents de ceux que j'obtiendrais en faisant le contraire, puisque la première mesure change les probabilités pour l'autre⁴¹. Ça arrive souvent en physique quantique.

Polarisation d'un photon

Un photon, c'est à dire une quantité élémentaire de lumière, peut se retrouver dans un état dit "polarisé" qui ressemble beaucoup au spin.

Choisissons deux états de base pour la polarisation: Verticale et Horizontale.

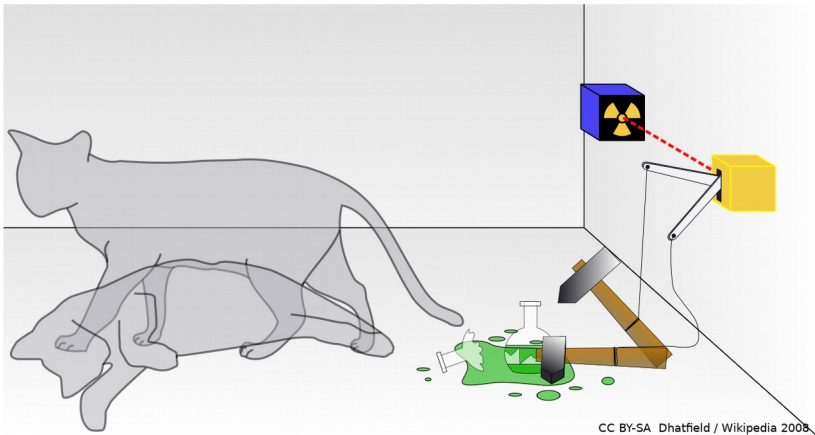
A ce stade, vous ne devriez avoir aucun problème pour comprendre une écriture de ce genre:

41 Dans le jargon, on dit que « *ces deux observables ne commutent pas* ». Nous reviendrons en détail sur cette question dans une autre saison de notre voyage.

$$|P\rangle = 75\% |V\rangle + 25\% |H\rangle$$

Pour des raisons pratiques, beaucoup d'expériences de physique quantique se font avec des photons plutôt qu'avec des électrons ou avec des atomes d'argent. Comme vous vous en doutez, nous aurons l'occasion d'y revenir longuement.

Et enfin, le célèbre chat !



Vous avez sans doute déjà entendu parler du célèbre **chat de Schrödinger**, qui serait lui aussi dans un état combiné ou "superposé", à moitié mort et à moitié vivant, quelque chose du genre⁴²:

42 Souvenez-vous que nous utilisons ici une écriture simplifiée. Il n'y a aucune chance que le chat de Schrödinger soit dans un état aussi simplifié. Les états quantiques sont des choses très abstraites et éloignées des états classiques que nous avons l'habitude de fréquenter. Le célèbre matou peut tout aussi bien être dans un état du genre :

$$|\text{Chat}\rangle = 50\% |\text{ChatVivant}\rangle + 50\% |\text{ChatMort}\rangle$$

Il est temps de vous dire enfin l'horrible vérité à ce sujet.

Ce pauvre matou imaginaire a été enfermé dans la boîte imaginaire de Schrödinger en 1935. Essayez de calculer son âge pour voir. Quelles que puissent être les spéculations quantiques, je crois pouvoir affirmer qu'il est mort, maintenant !

(Blague à part, nous reviendrons longuement sur son cas, et à plusieurs reprises, dans d'autres chapitres, quand nous en saurons suffisamment pour aller plus loin).

Un détour par le supermarché quantique

A ce stade et avant de terminer ce chapitre, je voudrais revenir rapidement sur une erreur très fréquente et presque inévitable dans les vulgarisations de la physique quantique.

Dans tout ce chapitre, nous avons simplifié considérablement les choses en écrivant des pourcentages classiques du genre 70%. Et dans les vulgarisations de la physique quantique, on trouve souvent des expressions du type:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{ChatVivant}\rangle - \frac{i}{\sqrt{2}} |\text{ChatMort}\rangle!$$

Comment interpréter ce genre d'état ? Quant à l'expression mathématique complète qui se cache derrière l'écriture condensée du vecteur d'état $|\text{ChatVivant}\rangle$ bien malin celui qui saurait la développer en entier !

- L'électron est passé à moitié par la fente de gauche et à moitié par celle de droite.
- Le chat de Schrödinger est dans un état combiné composé pour moitié de l'état "chat mort" et pour moitié de l'état "chat vivant".

etc.

Toutes ces expressions négligent l'essentiel du problème, à savoir que les "pourcentages" des différents états ne sont pas des pourcentages ordinaires. Les quantités de chacun des deux états sont exprimées par des **nombres complexes**.

Autrement dit et pour ceux qui connaissent déjà ces choses là, il faudrait remplacer toutes les expressions du genre

70% |gauche>

par des choses du genre

70% + 5i |gauche>⁴³

Qu'est-ce qu'un nombre complexe ?

On a promis qu'on ne ferait pas de maths dans cette deuxième saison, donc on n'ira pas dans les détails maintenant, mais pour le dire vite, un nombre complexe est un nombre qui n'a pas seulement une certaine quantité, comme les nombres

43 Bien sûr et pour ceux qui connaissent déjà ces choses, on pourrait imaginer que le nombre de "i" est à zéro, mais ce serait tricher et pour deux raisons: D'abord on cacherait ainsi la nature profonde des quantités quantiques qui est d'être des quantités complexes. Ensuite on traiterait par le mépris l'évolution du système. Si le nombre de "i" est momentanément à zéro, ça ne durera qu'une fraction de seconde.

ordinaires, il a en plus un angle, que les mathématiciens appellent un "argument" et les physiciens une "**phase**".

Inutile d'essayer de nous le représenter avec des images habituelles. Nous n'expérimentons jamais ce genre de quantités complexes à notre échelle. Des quantités comme « trois kilos de pommes de terre » ou « vingt-cinq euros » n'ont pas d'angle. Dans le monde quantique, non seulement les quantités de base viennent par paquets entiers, non seulement elles se combinent entre elles, mais en plus elles se combinent avec des angles.

Imaginez que vous pesez vos tomates au supermarché quantique. La balance quantique ne vous dira pas que vous en avez pris 750 grammes. Elle vous dira:

1. Qu'il est impossible d'en prendre 750 grammes et qu'on ne peut en prendre que des multiples de 500 grammes.
2. Que vous en avez pris très exactement une fois 500 grammes, avec un angle de 48 degrés plus une fois 1Kg, avec un angle de 12 degrés⁴⁴.
3. Que quand vous passerez à la caisse, tout ça va se simplifier d'un seul coup et que vous aurez une chance sur deux d'en récupérer 500 grammes et une chance sur deux d'en avoir un kilo.

Voilà, je vous l'avais dit, le monde quantique n'est pas si compliqué que ça, mais il est complètement différent du monde dans lequel nous vivons habituellement. C'est pour cette raison

44 OK, pour les étudiants qui passeraient par ici, mon analogie a un défaut car 1kg ne serait pas un état de base. Je ferai mieux dès que j'aurai trouvé mieux.

que nous devons avancer très progressivement, en nous y habituant doucement, par approximations successives.

Revenez ici à la fin de la saison en cours, ça commencera à s'éclaircir. Et si vous repassez par ici après la saison 4, ça devrait être tout à fait clair. Mais les brumes ne se dissiperont que peu à peu et il nous faudra faire un peu de maths dans les saisons 3 et 4 pour les dissiper tout à fait.

Le cœur du « mystère quantique » en un seul chapitre

En bref

Ce chapitre est en quelque sorte une synthèse des deux précédents. Il résume l'essentiel de la relation entre le mystère quantique et les mathématiques qui le décrivent, à travers une première approche de l'expérience des fentes de Young, que nous approfondirons plus tard et dont Richard Feynman disait qu'elle contient à elle seule « tout le mystère de la physique quantique ».

La quantique et les maths

Les mathématiques qui sont à la base des postulats de la physique quantique ne sont pas très difficiles. C'est Leonard Susskind qui le dit. Elles sont très abstraites, assez inhabituelles, mais vraiment pas difficiles.

Attention, je ne suis pas en train de vous dire qu'on peut devenir chercheur en physique quantique sans être très bon en maths. Ce n'est pas le cas. Pourquoi ? Parce que dans la plupart des cas, les mathématiques nécessaires pour avancer se

compliquent très vite et peuvent devenir horriblement difficiles.

Mais les mathématiques qui sont à la base des postulats de la mécanique quantique ne sont pas difficiles.

C'est déjà la même chose au fond en physique classique. La loi de base de la mécanique classique n'est pas difficile du tout. Si je sais quelle force s'exerce sur une bille et que je connais la masse de la bille, je peux calculer très facilement où se trouvera la bille une seconde plus tard. Tous les élèves de seconde le font.

La même loi permet de calculer la position de la Terre par rapport au Soleil de jour en jour. Ça devient alors un peu plus compliqué mathématiquement mais ça reste accessible.

La même loi s'applique encore si on doit calculer l'évolution d'un système stellaire composé de deux étoiles et d'une planète géante. Sauf que là, ça devient très vite horriblement compliqué. La loi de base de la mécanique de Newton est très simple, mais son application dans des cas réels peut rapidement devenir très compliquée.

C'est exactement la même chose pour la mécanique quantique. Les lois de base des postulats sont simples. Un peu plus compliquées quand même que celles de Newton, mais ça reste simple. Leur application dans les cas concrets peut devenir très compliquée, mais en ce qui nous concerne, nous laisserons ça aux ingénieurs et aux chercheurs et nous nous contenterons de leur faire confiance.

Nous ferons également confiance, par moments, aux logiciels de calcul. Notamment lorsque nous aurons besoin de calculer certaines choses avec des matrices. Plutôt que de le faire nous-mêmes, nous demanderons la réponse à un logiciel de calcul en ligne et nous ferons confiance à celui qui l'a programmé. La science est un sport collectif, personne ne peut tout faire tout seul.

Un photon et deux boîtes

Richard Feynman disait que tout le mystère de la mécanique quantique était résumé dans l'expérience des "fentes de Young". Nous lui consacrerons une saison toute entière mais nous allons dès à présent la résumer à l'extrême dans la petite expérience de pensée suivante.

Imaginons que j'aie sur mon bureau deux boîtes, une que je place à gauche de mon bureau et une autre que je place à droite.

Mon ami physicien, dans son laboratoire, de l'autre côté du mur, à préparé un appareil très futé capable d'envoyer des photons⁴⁵ un par un. Son appareil est réglé de telle manière que le prochain photon qu'il va envoyer aura une chance sur deux de terminer son voyage dans la boîte de gauche et une chance sur deux de le terminer dans celle de droite. Ça ressemble donc

45 Qu'est-ce au juste qu'un photon ? Nous reparlerons de cela dans un prochain épisode mais pour le moment contentons-nous de l'image mentale qu'on en a tous, à savoir celle d'une toute petite quantité de lumière.

beaucoup à l'expérience de Stern et Gerlach à laquelle nous avons consacré beaucoup de temps depuis le début, mais avec des photons envoyés un par un.

Très peu de maths

Dans le formalisme mathématique, il y a toutes sortes d'états différents qui correspondent à cette réalité d'un photon qui a une chance sur deux d'arriver dans chacune des boîtes. Je vais choisir celui-ci :

$$|\psi\rangle = \frac{\sqrt{1}}{2} |Gauche\rangle - i\sqrt{\frac{1}{2}} |Droite\rangle$$

Peu importe à ce stade ce que ça signifie. Regardez ça comme une œuvre d'art abstrait. Ça veut dire un état abstrait.

Il y a toutes sortes d'autres équations qui pourraient donner le même résultat. Je choisis celle-ci parce qu'elle est d'un niveau de complexité mathématique intermédiaire. Pas outrageusement simplifiée comme dans mes approximations précédentes, mais pas trop compliquée non plus.

Par exemple :

$$|\psi\rangle = \left(\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} + \frac{i}{2\sqrt{2}} \right) |Gauche\rangle - i\sqrt{\frac{1}{2}} |Droite\rangle$$

donnerait le même résultat à la fin. Vous pouvez me faire confiance, mais comme la confiance n'empêche pas le contrôle, vous pourrez le vérifier vous-même si vous savez faire ces

choses là, ou demander à un copain, ou encore le faire vérifier par un logiciel de calcul en ligne.

Il existe donc plein d'états du photon envoyé par mon ami qui donneraient le même résultat à la fin, à savoir une chance sur deux qu'il arrive à gauche et une chance sur deux qu'il arrive à droite. D'ailleurs, l'état de ce photon change sans aucun doute au fil du temps, d'une manière que nous verrons plus tard. Mais tant qu'il n'est perturbé par rien, il restera dans un des innombrables états qui donnent le même résultat, « une chance sur deux », à la fin.

En revanche et sans aucun doute, dès que le photon aura touché le fond d'une des boîtes, il sera perturbé. Il laissera alors par exemple une trace sur une plaque photographique ou que sais-je. À ce moment-là, on pourra donc savoir de manière indiscutable s'il est arrivé dans la boîte de gauche ou dans celle de droite. Contrairement à ce qu'on entend dire parfois, l'observateur que je suis ne joue aucun rôle particulier là-dedans. Si mon ami regarde la plaque photographique et pas moi, ou si je la développe seulement dans 10 ans, ça ne change rien au fait que le photon aura désormais été enregistré dans une boîte et pas dans l'autre.

Mais, et c'est là tout le « mystère » de la quantique, un centième de milliardième de seconde avant, il sera toujours dans un des états quantiques combinés dont nous avons parlé, avec toujours une chance sur deux d'être détecté dans la boîte de gauche et une chance sur deux d'être détecté dans celle de droite.

Si on y réfléchit bien, ça signifie clairement que le photon, tant qu'il est dans un état combiné, n'est ni dans la boîte de gauche, ni dans celle de droite, et encore moins dans les deux à la fois. Il n'est nulle part, en fait.

Tant qu'il n'est détecté nulle part, il n'y a plus de photon du tout, du moins si on imagine qu'un photon est un corpuscule. Il n'y a que des formules mathématiques⁴⁶ qui donnent la probabilité qu'il se manifeste à gauche ou à droite.

Calcul de la probabilité

Nous allons maintenant découvrir un avant goût de la procédure bizarre qui permet de calculer les probabilités. Encore une fois, tout ceci est facultatif pour suivre la saison 2 de notre voyage et nous y reviendrons de manière beaucoup plus approfondie dans les saisons suivantes.

Imaginons donc que notre photon, un milliardième de seconde avant de toucher le détecteur ou le fond de la boîte, soit dans l'état suivant:

$$|\psi\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} |Gauche\rangle - i\sqrt{\frac{1}{2}} |Droite\rangle$$

46 Certains scientifiques sont d'avis que ces formules mathématiques constituent la seule "réalité" ultime. D'autres pensent qu'elles décrivent l'état d'un "objet" étrange appelé "champ quantique". D'autres parlent d'un "réel voilé". D'autres encore disent « *contentons-nous de calculer et ne faisons pas de philosophie* ». D'autres enfin ont des opinions encore plus originales. Nous reparlerons de tout ça dans un prochain épisode.

Comment calcule-t-on ses chances d'être détecté dans la boîte de gauche?

Nous consacrerons toute la saison 3 à la procédure exacte mais dans le cas présent, que j'ai choisi exprès pour cela, elle est extrêmement simple puisqu'il suffit de multiplier par lui-même le nombre de gauche, à savoir « racine de un demi ». On obtient donc tout naturellement $1/2$, donc une chance sur deux de détecter notre photon dans la boîte de gauche.

Je laisse ceux qui ont fait un peu de maths de niveau lycée vérifier que c'est pareil pour la boîte de droite, avec le nombre de droite⁴⁷.

Encore une fois, excusez-moi d'insister lourdement, les maths ne sont pas si difficiles. Ce qui est très difficile, car c'est complètement inhabituel à notre échelle, c'est d'admettre qu'un centième de milliardième de seconde avant de toucher le fond de la boîte de gauche, le photon n'était toujours pas davantage dans la boîte de gauche que dans celle de droite.

Qu'est-ce qui me permet d'affirmer une chose pareille ?

Je ne peux pas encore l'expliquer pour le moment, il va donc falloir me faire confiance et surtout faire confiance aux scientifiques. Il existe des expériences, que nous étudierons plus tard, qui permettent d'en être sûr.

47 Pour ceux qui savent manipuler les nombres complexes, il faut multiplier le nombre par son *conjugué*, autrement dit prendre le carré du module plutôt que le carré du nombre.

En résumé :

Jusqu'au moment où le photon interagit avec l'environnement quelque part, il n'est nulle part. Il n'existe que des probabilités qu'il se manifeste ici ou là. Et qui plus est, comme nous l'avons vu rapidement dans le chapitre précédent, ces probabilités quantiques ne sont pas des probabilités ordinaires, comme celles que nous connaissons dans le monde ordinaire. Elles se mesurent avec des nombres complexes, qu'on peut visualiser comme ayant un angle. Enfin, dès que le photon se manifeste quelque part, toutes les probabilités qu'il se manifeste ailleurs disparaissent.

C'est là tout le « mystère » de la mécanique quantique. Richard Feynman disait qu'il n'y avait rien d'autre à comprendre et que tout le reste n'était au fond que des calculs d'application.

Et avec de la matière ?

À ce stade, vous vous dites sans doute quelque chose comme : *« OK, avec de la lumière, ça se passe comme ça, parce que la lumière c'est plus une onde que des corpuscules, mais avec des atomes, qui sont de la vraie matière et qui sont beaucoup plus des corpuscules que des ondes, ça serait une autre paire de manches ! ».*

Et bien, oui et non. Avec des atomes, comme les atomes d'argent de l'expérience de Stern et Gerlach, ça serait un peu différent mais pas tant que ça. Les atomes ne sont pas

fondamentalement différents des "particules" qui les composent. En revanche, ils sont beaucoup plus gros et du coup, ils font beaucoup plus de rencontres avec d'autres "particules" et ça, ça peut changer pas mal de choses.

Mais nous approfondirons tout ceci dans les prochains chapitres.

L'effet tunnel sous forme de jeu

En bref

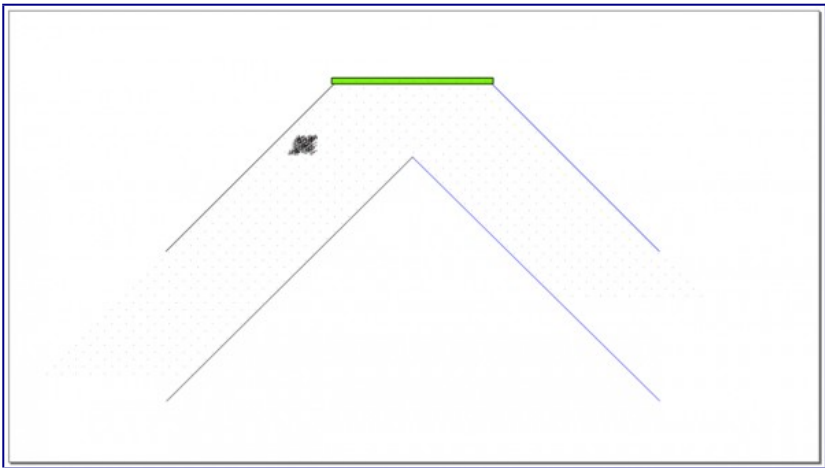
L' « effet tunnel » n'est sans doute pas l'effet quantique le plus connu du grand public. Nous allons néanmoins l'étudier dès à présent dans ses grandes lignes, car il va nous permettre de nous familiariser avec des notions importantes que nous retrouverons souvent.

Merci de ne pas paniquer si vous voyez des expressions mathématiques dans les dessins qui suivent. Nous ne ferons pas de mathématiques dans cette saison. Ici, nous nous contenterons de regarder comment les objets mathématiques évoluent. Pour le moment considérons les comme de l'art abstrait.

Une version plus détaillée de ce chapitre est disponible sur le site web. Si celle-ci vous a paru incompréhensible, n'hésitez pas à me le dire, ça sera signe de la nécessité de la modifier encore un peu.

Démocrite, la gentille particule

Voici Démocrite la gentille particule⁴⁸. Ses parents l'ont appelée Démocrite en l'honneur d'un philosophe antique qui a fait beaucoup pour leur famille.

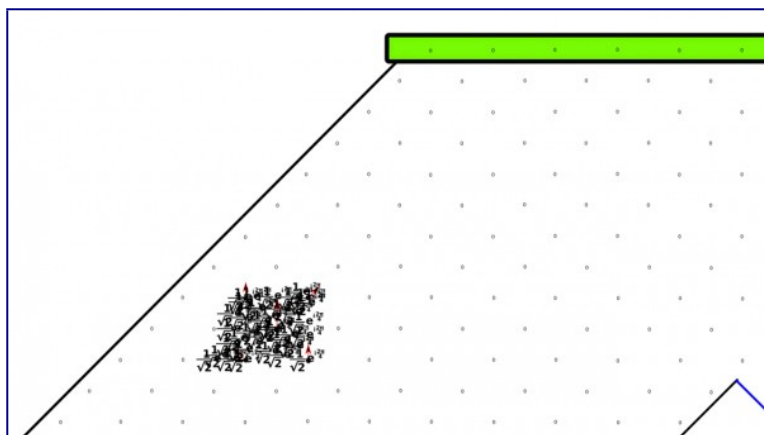


Cette photo de Démocrite est prise de loin. On ne la voit pas bien. Le paysage représente une expérience que nous étudierons plus tard et dans laquelle Démocrite s'est rendue célèbre.

48 A quelle famille de particules appartient-elle? Après pas mal d'hésitations, j'ai préféré ne pas le préciser, afin d'éviter de devoir traiter des complications liées à des caractéristiques plus particulières. Dans le cas de l'effet tunnel, on utilise habituellement des électrons comme exemples.

Vu d'ici, Démocrite, c'est la petite tache un peu floue en haut à gauche. Démocrite est une particule élémentaire, c'est à dire une toute petite quantité, indivisible, de quelque chose. Être indivisible ne l'empêche pas de s'étaler. Démocrite a la bougeotte, elle ne sait pas rester en place. Et elle ne parvient jamais à ne pas s'étaler du tout. Les physiciens ont des mots compliqués pour dire tout ça.

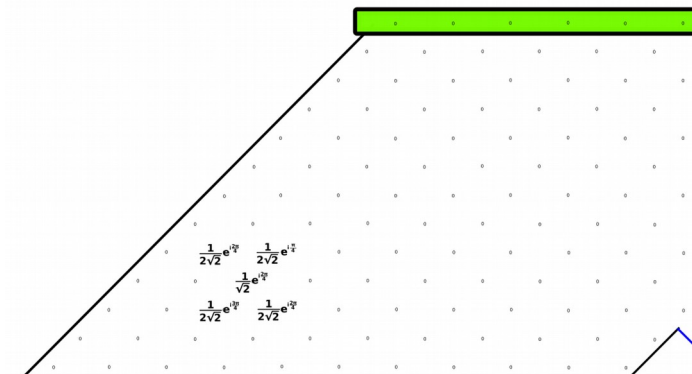
Le paysage dans lequel évolue Démocrite est composé de deux chemins qui convergent vers une plaque photographique. Démocrite adore qu'on la prenne en photo. Pour le moment, elle est dans la branche de gauche et elle se dirige vers la plaque photographique. Approchons-nous pour la voir de plus près.



La voici en gros plan. Elle est toujours aussi floue, mais on commence à visualiser quelques détails. On se croirait dans le

film "Matrix". Démocrite est en fait un être mathématique. Certains savants pensent que derrière cet être mathématique se cache une réalité physique ou métaphysique. Mais nous remettons ces questions métaphysiques à plus tard. Pour l'instant, contentons-nous de ce que nous pourrions vérifier par l'expérience, à savoir que Démocrite est avant tout constituée de propriétés mathématiques.

Pour mieux comprendre la nature et le comportement de Démocrite, nous allons maintenant en quelque sorte « l'aplatir » et la « simplifier ». Voici le résultat :

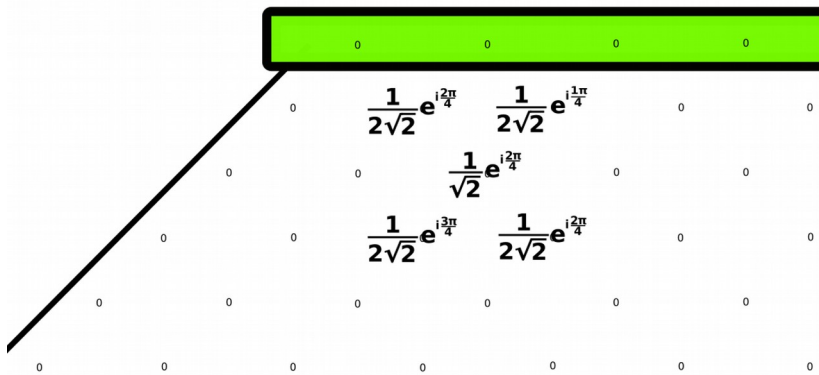


Non, non, ne vous enfuyez pas tout de suite ! Promis, on ne va pas faire de maths, seulement les regarder de loin.

De la même manière que vous et moi sommes composés de cellules vivantes, Démocrite est composée de nombres. Il y en a cinq sur cette image. Ce sont ces nombres un peu particuliers

qu'on appelle des « nombres complexes » en mathématiques. Et ici, dans le cadre de la théorie quantique, ces nombres ont un nom encore plus bizarre, puisqu'on les appelle des « amplitudes de probabilités ».

Rapprochons-nous encore un peu et en même temps, laissons Démocrite se rapprocher un peu plus de la plaque photographique.



Si vous êtes vraiment très attentif, vous avez peut-être remarqué que Démocrite évolue au fur et à mesure de sa progression. Les petits nombres qui sont tout à fait en haut et à droite, à côté du symbole "pi", changent à chaque étape. Nous comprendrons pourquoi plus tard, quand nous ferons des maths. Pour le moment, on se contente d'observer.

Seul ce petit détail change, le reste ne change pas d'une étape à l'autre.

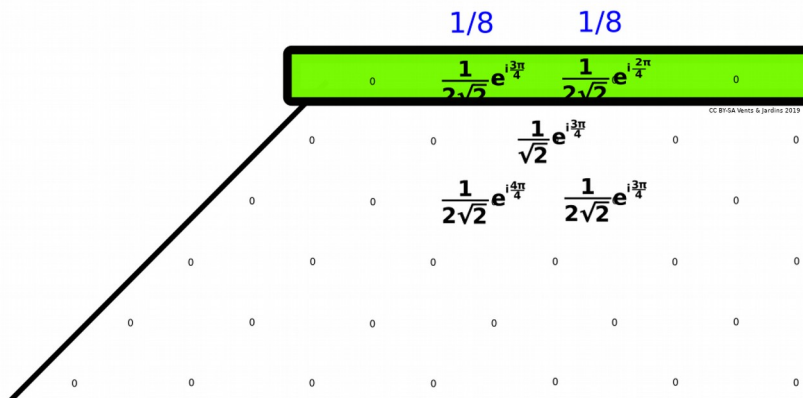
Comme vous le voyez, Démocrite vient d'arriver juste à proximité de la plaque photographique. C'est maintenant que le jeu va commencer.

Le jeu de l'effet tunnel

Pour le moment, faites un pari. Démocrite sera-t-elle arrêtée par la plaque photographique ?

Oui ? Non ? Ça y est, vous avez parié ?

Moi, je parie qu'elle va être arrêtée.



Voici comment nous allons procéder pour savoir qui a gagné:

La « tête » et le « bras gauche » de Démocrite viennent d'entrer dans la plaque photographique. Chacun d'entre eux a une

chance sur huit d'être arrêté par la plaque (j'expliquerai dans la saison trois comment on calcule ça).

Je vais donc prendre un dé à huit faces que j'ai acheté dans une boutique de jeux de société et le lancer une première fois pour la tête de Démocrite. **Si je tombe sur le "huit", elle s'arrêtera** dans la plaque.

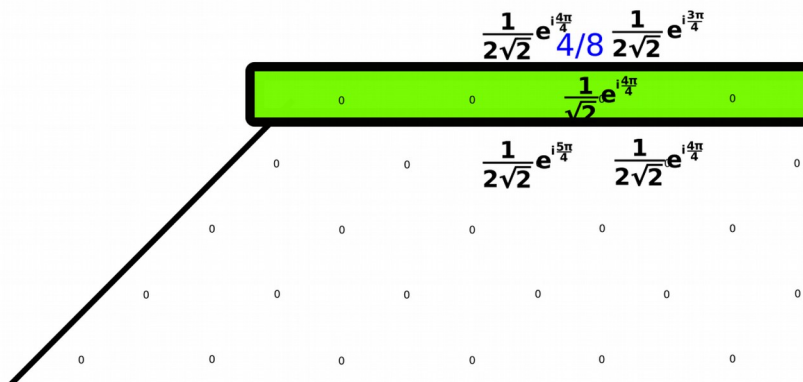
- "Six !"

La tête continue son chemin, mais je relance immédiatement le dé pour le bras gauche.



- "Trois !"

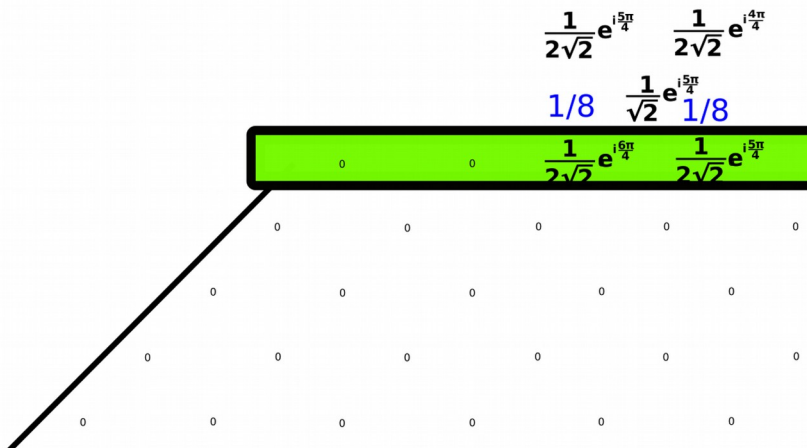
Bon, le bras gauche aussi passe son chemin, et Démocrite peut avancer d'un cran de plus.



Cette fois-ci, c'est le corps de Démocrite qui essaye de traverser la plaque. Il est plus ramassé mais aussi plus lourd. Il a quatre chances sur huit d'être arrêté par la plaque. Je vais donc lancer le dé quatre fois. J'obtiens :

- "Un", "Cinq", "Trois", "Cinq" !

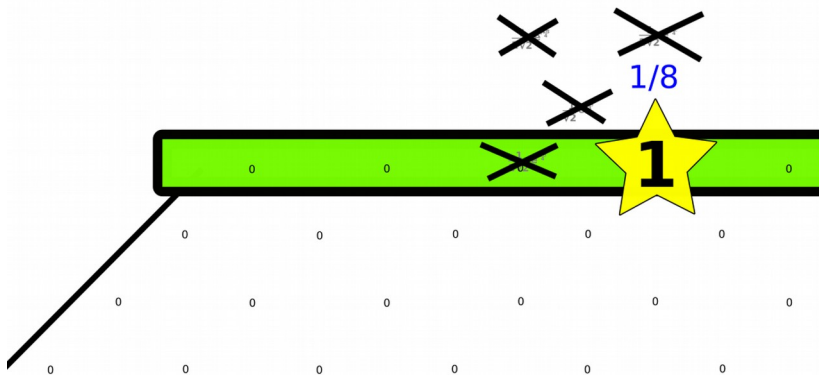
Le corps de Démocrite va pouvoir passer aussi et elle avance encore d'un cran.



Cette fois-ci il ne reste plus que le bras droit et les jambes qui peuvent être bloqués.

- "Trois!" Les jambes sont passées !
- "**HUIT !**"

Ouf ! D'extrême justesse, le bras droit a été arrêté ! Je gagne mon pari !



La toute dernière des huit chances a été la bonne ! Démocrite a été arrêtée par la plaque photographique. Du coup, **toutes ses autres parties sont elles aussi arrêtées**. Et Démocrite est d'un seul coup rassemblée en un seul endroit, parce que, souvenez-vous, **Démocrite s'étale quand elle bouge, mais elle est indivisible et elle se rassemble en un seul point quand elle interagit avec quelque chose**. Les physiciens ont des mots très compliqués pour dire ça, des mots comme « *réduction du paquet d'onde* », voire parfois même « *collapsus du psy*⁴⁹ ».

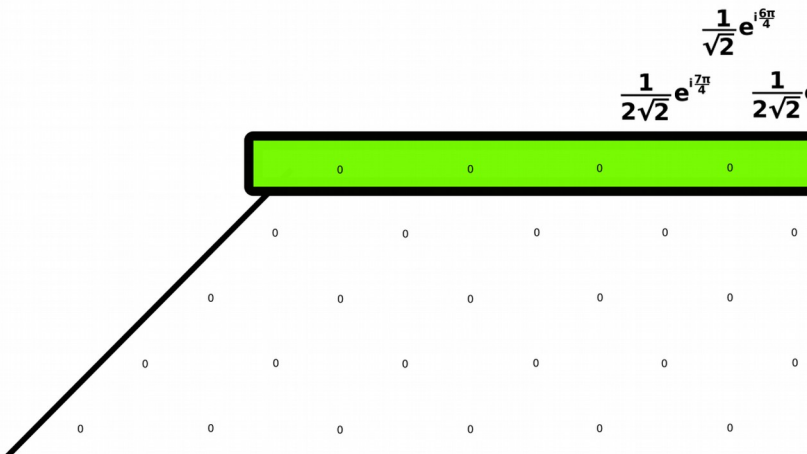
Les chances de trouver Démocrite à l'emplacement de l'étoile, qui étaient de $1/8$, c'est à dire une chance sur huit, avant que je lance le dé, passent donc à 1, c'est à dire à une certitude, maintenant que le résultat est connu.

49 Les adeptes du quantox préfèrent cette expression là, tant elle est riche de connotations mystérieuses.

Et si elle était passée ?

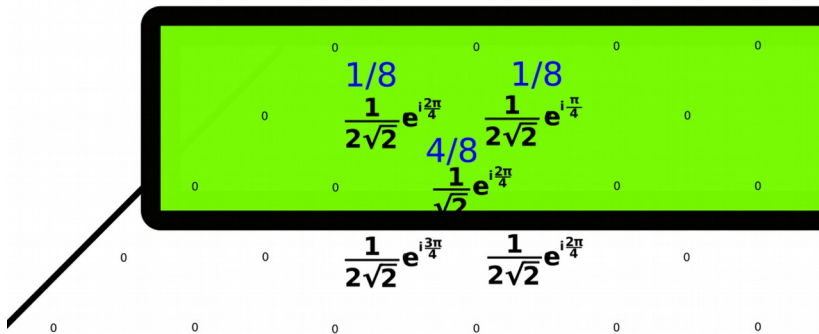
Que se serait-il passé si le dernier lancer de dé avait lui aussi échoué ?

Et bien tout simplement, Démocrite aurait continué son chemin. Elle aurait traversé la plaque photographique sans encombre, sans y laisser de trace, sans interagir avec elle. Comme si elle avait emprunté un tunnel, d'où le nom d' « effet tunnel ».



Et si la plaque avait été plus épaisse ?

Très bonne question ! Chaque épaisseur supplémentaire dans la plaque photographique oblige à relancer les dés. Les chances que Démocrite réussisse à passer diminuent donc d'autant.



Le téléphérique des postulats

En bref

Les postulats de la mécanique quantique sont écrits dans le langage de la nature, à savoir le langage mathématique. Ce passage est le plus escarpé de tout notre voyage. Le parcourir à pied nous prendrait toute une saison. Nous allons donc le survoler en prenant le téléphérique, ce qui nous permettra d'observer ses difficultés d'en haut.

Nous y retrouverons évidemment des choses que nous avons déjà vues et nous les compléterons par un coup d'œil rapide sur celles qui nous restent à étudier.

La « déraisonnable efficacité des mathématiques »

L'abstraction mathématique est au cœur des innombrables discussions qui entourent la physique quantique. Ces discussions illustrent très bien ce qu'une expression désormais célèbre appelle la « *déraisonnable efficacité des mathématiques* ». Prenons quelques minutes pour comprendre de quoi il s'agit.

L'idée selon laquelle « *Les lois de la nature sont écrites dans le langage des mathématiques* » est attribuée à Galilée mais elle existait bien avant lui. Pythagore déjà aurait dit « *Le nombre est la mesure de toutes choses* ».

Toutefois, jusqu'à ce que les anglophones appellent parfois la « nouvelle théorie quantique », l'idée la plus générale était que le monde est constitué d'objets réels, se comportant globalement de manière familière, et que les mathématiques permettent de mieux comprendre leur comportement.

Cette idée était encore au cœur de la « première théorie quantique » (1890-1925), celle dans laquelle les particules élémentaires (à l'époque ça se limitait aux électrons, aux protons et aux photons) étaient encore imaginées comme des petits corpuscules vibrants.

Tout change à partir de 1925, quand apparaît un formalisme mathématique extraordinairement efficace, celui que nous allons observer maintenant.

Ce formalisme mathématique est incroyablement efficace puisqu'il permet non seulement de prévoir le résultat des expériences de physique avec une précision jamais vue jusqu'ici, mais qu'en plus il a permis de décrire de très nombreux phénomènes qui n'avaient encore jamais été observés.

Bien sûr, lorsque la planète Neptune fut découverte, en 1846, ce fut déjà par déduction à partir de calculs. Mais dans le cas de Neptune, tout le monde savait déjà ce qu'était une planète. On

cherchait donc un nouvel objet dont on avait déjà quelques exemples.

Un autre exemple de la déraisonnable efficacité des mathématiques en astronomie est celui des trous noirs. Cette fois-ci, les mathématiques de l'astrophysique ont permis d'annoncer dès la fin du 18ème siècle l'existence d'un astre d'un nouveau type qui ne sera vu pour la première fois, au prix d'efforts considérables, qu'en 2019.

Mais dans le cas de la physique quantique, ça va beaucoup plus loin. L'un des exemples les plus anciens et les plus frappants est celui de la découverte du positron et de l'antimatière par Paul Dirac. Ce sont les équations mathématiques qui indiquent à Dirac qu'il doit exister, si les mathématiques sont exactes, une particule d'un type totalement inconnu jusqu'ici. L'existence de cette nouvelle particule sera confirmée peu de temps après. Plus encore, les mathématiques de la physique quantique indiquent qu'une « particule quantique » peut se trouver dans des états qui n'existent pas dans notre monde habituel. En particulier qu'elle peut n'avoir aucune température bien définie ou aucune position bien définie.

Ce genre d'affirmation amène parfois à dire des choses comme « *un électron peut se trouver à deux endroits en même temps* », ce qui est tout à fait faux, comme nous le verrons le moment venu. L'électron n'est pas « *à deux endroits en même temps* » ce qui resterait encore plus ou moins classique (il paraît que les sorciers savent faire ce genre de choses, bien que ce ne soit pas prouvé), il est dans un état encore bien plus abstrait que cela (et

là, pour le coup, il y a des preuves, que nous étudierons plus tard).

Nous devons donc séparer deux choses:

- Les **postulats** de la mécanique quantique, qui décrivent la procédure à suivre pour prévoir correctement ce que va faire la nature dans telle ou telle situation. À quelques rares exceptions près, tous les physiciens sont d'accord sur ces procédures, même s'ils ne les expliquent pas toujours de la même façon, parce qu'elles marchent exceptionnellement bien.
- Les **interprétations** de la mécanique quantique, qui relèvent jusqu'à présent de la philosophie et pas de la physique, et qui cherchent à deviner s'il existe une réalité, connaissable ou non, qui serait décrite par les mathématiques ou si au contraire les mathématiques sont en elles-mêmes cette réalité ultime.

Autant il existe un consensus⁵⁰ entre les scientifiques sur les postulats, autant les débats restent ouverts en ce qui concerne les interprétations.

On embarque pour la montée !

Le téléphérique nous attend. Nous allons bientôt passer rapidement au-dessus de toutes les abstractions mathématiques

50 Un consensus n'est pas une unanimité, laquelle n'existe jamais dans les sciences.

dont nous venons de parler. Approchez-vous des fenêtres pour les observer de haut.

La plupart du temps, les postulats sont mentionnés comme étant au nombre de six et présentés d'une manière proche de la manière suivante:

1) Principe de combinaison

Les physiciens préfèrent de plus en plus parler de « principe de combinaison » plutôt que de « principe de superposition » mais il faut connaître les deux termes car on les rencontre souvent.

Ce principe dit que l'état d'un système quantique (un atome d'argent, un électron, un photon, voire une molécule) est décrit par une combinaison d'états de base. Plus précisément, par un objet mathématique qui ressemble à ceux que nous avons vus dans un chapitre précédent.

$$|\psi\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} |Gauche\rangle - i\sqrt{\frac{1}{2}} |Droite\rangle \quad (1)$$

La partie gauche de cette équation est la notation la plus fréquent pour un état quantique. Ça peut par exemple être la position d'une particule. On utilise souvent la lettre grecque ψ (psi), mais ça n'a rien à voir avec la psychologie et encore moins avec la parapsychologie.

Les signes qui entourent la lettre ψ forment ce qu'on appelle un **ket**. C'est un **vecteur d'état** et comme les vecteurs qui représentent les états quantiques ne sont plus des vecteurs

ordinaires, on les représente différemment. Nous en avons déjà parlé.

\vec{v} Un vecteur ordinaire

$|\psi\rangle$ Un vecteur d'état de la physique quantique

La partie droite de l'expression mathématique (1) "développe" le vecteur d'état. Autrement dit, elle dit de quoi il est fait et en quelles proportions. Ici, c'est une position qui est faite d'un petit peu de "gauche" et d'un petit peu de "droite". Ça ne veut pas dire qu'elle soit entre les deux. Ça ne veut pas dire non plus qu'elle soit une simple "superposition" des deux. C'est une certaine **combinaison** mathématique des deux, bien plus abstraite qu'une simple superposition. Nous l'étudierons dans une autre saison de notre voyage.

Les vecteurs d'états ne sont pas nécessairement des combinaisons de seulement deux états de base. La plupart du temps, il y a **beaucoup** plus d'états de base. Et par beaucoup plus, je veux dire **vraiment** beaucoup plus. Ce qui du même coup peut rendre les maths beaucoup plus compliquées aussi. Mais le principe général, lui, restera le même. Il est très abstrait mais finalement assez simple: Un état quantique est une certaine combinaison mathématique d'états de base comme nous en avons déjà vu beaucoup d'exemples dans les chapitres précédents.

Autant la plupart des états quantiques sont des états très abstraits, autant les **états de base** sont, eux, toujours des états

classiques⁵¹. Je veux dire par là des états qu'on peut mesurer de manière classique. Par exemple :

$|P\rangle = |\text{boîte de gauche}\rangle$

ou $|T\rangle = |22^\circ\text{C}\rangle$

ou pour une énergie $|E\rangle = |6 \times 10^{-34}\text{Joules}\rangle$

J'énoncerai donc à ce stade le premier postulat de la mécanique quantique ainsi :

1) Un état quantique est une certaine combinaison mathématique abstraite d'états ordinaires.

2) Principe de correspondance

Le second postulat s'appelle le « principe de correspondance ».

Je l'énoncerai ainsi:

2) Les choses qu'on mesure sont représentées par un certain opérateur mathématique.

Ces « choses qu'on mesure », les physiciens les appellent des **observables**. Ça peut être par exemple une température ou une position ou une énergie. Pour des raisons de simplicité ou

51 Pour les étudiants qui se seraient égarés ici, votre prof de maths ou de physique risque de sauter au plafond si vous lui dites un truc pareil ! Alors précisons un peu: Si on veut mesurer un truc à la fin, alors il vaut mieux partir avec des trucs mesurables au début.

parfois aussi pour des raisons philosophiques, ils appellent aussi **observables** les opérateurs mathématiques correspondants.

Ce qui nous ramène au questionnement philosophique que nous avons vu plus haut. Est-ce que ces "observables" **représentent** les choses qu'on mesure ou est-ce qu'ils **sont** eux-mêmes les choses qu'on mesure ? Personne n'en sait trop rien en fait.

Mais peu importe à ce stade, si on fait les calculs comme ça, ça marche parfaitement. Alors à quoi peut ressembler un de ces opérateurs ? En voici un très simple que nous étudierons dans la saison 4 de notre voyage:

$$\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

Comment ça marche ?

Ce genre d'opérateur ressemble à une machine. Quand on rentre dedans un vecteur, il en ressort un autre vecteur.

3) Principe de quantification

3) Les mesures ne peuvent pas donner d'autres résultats que ceux qui correspondent à des valeurs propres de ces opérateurs mathématiques.

Qu'est-ce que ça veut dire ? Ça signifie qu'en physique quantique, tous les résultats ne sont pas possibles pour une mesure. C'est même de là que vient le mot "quantique". Par exemple, si vous mesurez l'aimantation (ou plus exactement le moment magnétique de spin) dans une expérience comme celles que nous avons vues dans les deux premières saisons, vous savez maintenant qu'il n'y a que deux valeurs possibles, vous n'obtiendrez jamais de valeurs intermédiaires, elles n'existent pas dans la nature.

Comment savoir quelles sont ces valeurs possibles ?

En calculant une certaine quantité mathématique qu'on appelle les **valeurs propres** de l'opérateur. Autre solution, que nous emploierons plus souvent: En demandant à un logiciel de faire le calcul à notre place.

4) Règle de Born

4) Les calculs mathématiques fournissent la probabilité d'observer tel ou tel résultat.

Il s'agit ici du caractère fondamentalement probabiliste de la mécanique quantique. Sauf cas exceptionnels qui aboutissent à une probabilité égale à 1, c'est à dire à une certitude, ou à 0, c'est à dire une impossibilité, il n'est pas possible de savoir à l'avance quel sera le résultat d'une mesure. On ne peut connaître que la probabilité de l'obtenir. Mais nous avons vu suffisamment d'exemples de tout ceci dans les chapitres précédents pour que je n'insiste plus sur ce point.

Maintenant, comment fait-on ces calculs mathématiques pour obtenir les bonnes probabilités ?

Comme j'ai promis que nous ne ferions pas de calculs au cours de cette saison, nous remettrons cette question aux saisons 3 et 4 de notre voyage, qui lui seront entièrement dédiées.

5) Réduction du paquet d'ondes

Ce postulat est probablement celui qui donne le plus de fil à retordre aux philosophes tant il est contraire à l'habitude que nous avons des choses réelles.

Dans le monde réel, un nuage ne disparaît pas si je mesure sa température à un endroit donné. Et si je mesure la température

à Lille, ça n'aura aucune influence sur les mesures de température à Marseille.

Dans le monde quantique en revanche, les choses ne sont pas si simples. Nous en avons eu un exemple dans notre explication de l'effet tunnel au chapitre précédent. La particule est en quelque sorte "étalée" dans l'espace. Mais dès qu'elle interagit avec son environnement à un endroit donné, tout cet étalement disparaît instantanément.

Autre exemple que nous avons vu précédemment: Si je prépare un spin "penché" et que je le mesure verticalement, je le ferai basculer totalement vers le haut ou totalement vers le bas, il ne restera pas "penché".

Dernier exemple que nous avons vu aussi: Tant que le photon n'a pas touché le fond de l'une des boîtes, il n'est ni dans l'une ni dans l'autre, il n'existe plus vraiment du moins si on considère qu'un photon doit être localisé quelque part. En revanche, ses « amplitudes de probabilités » elles, sont dans les deux boîtes. Par contre, dès qu'il interagira avec le fond d'une des boîtes, toutes les amplitudes de probabilité disparaîtront immédiatement. Il n'y aura plus qu'un fait, à savoir que le photon aura interagi avec le fond d'une des boîtes à un endroit précis.

C'est ce fonctionnement très particulier qu'on appelle « Réduction du paquet d'ondes ». De quel « paquet d'ondes » parle-t-on ? Nous aurons l'occasion d'en reparler, mais il se trouve que mathématiquement, le paquet de nombres bizarres

que nous avons vu dans le chapitre sur l'effet tunnel peut être représenté visuellement de la même manière qu'un assemblage de vibrations, ou de vagues, ou d'ondes.

Et donc quand tous ces nombres bizarres qu'on appelle des « amplitudes de probabilités » s'évanouissent pour laisser place à une mesure bien localisée, on parle de « réduction du paquet d'ondes ».

Toutefois, ce phénomène est encore plus précis mathématiquement que cela, comme nous le verrons plus tard. C'est pourquoi nous allons pour le moment formuler le cinquième postulat ainsi:

5) La mesure modifie l'état du système quantique mesuré de manière à faire disparaître les probabilités qui ne se sont pas réalisées.

6) Evolution du système quantique dans le temps

Nous ne discuterons pas le dernier postulat pour le moment, ni non plus dans les deux saisons suivantes. Il concerne la manière dont les systèmes quantiques évoluent au fil de temps. Pour en donner une idée rapide, il concerne l'équation de Schrödinger, qui précise par exemple à quelle vitesse changent les petits nombres à côté de la lettre pi dans le chapitre sur l'effet tunnel.

Nous formulerons donc le sixième postulat ainsi:

6) L'évolution dans le temps du système quantique est fixée par l'équation de Schrödinger.

Attention à la descente !

Voilà, notre montée rapide est terminée. Pour ceux qui seraient intéressés, notre *tour operator* propose une excursion facultative et beaucoup plus détaillée à travers les postulats. Elle fera l'objet de la saison 4 de notre voyage.

Mais pour le moment, nous allons continuer notre progression en faisant le tour des principales métaphores habituellement utilisées pour évoquer par analogies ce que nous venons de survoler.

Corpuscules, ondes, champs et particules

En bref

De quoi sont faites les particules élémentaires ? Sont-elles des corpuscules, des ondes, un mélange des deux ? Ou alors des champs ? Voire de l'information pure ? Voire même des objets purement mathématiques ?

Ce chapitre va essayer de nous aider à nous y retrouver.



Trois exemples

Il y a quelques mois, j'ai entendu à la radio une physicienne dont je n'ai hélas pas relevé le nom déclarer quelque chose comme :

« À mes débuts, je réfléchissais en termes de particules. Plus tard, je ne pensais plus qu'en termes de champs quantiques. Maintenant, je crois que tout n'est qu'information. »

En mai 2019, des médias scientifiques titraient sur une découverte récente à propos de la « forme de l'électron » qui aurait été parfaitement sphérique. Chose curieuse puisque l'électron au mieux est ponctuel, donc sans forme, et qu'il n'est plus probablement même pas ponctuel et vraiment sans forme propre. Ce qui était mesuré comme étant parfaitement sphérique, la publication d'origine des chercheurs le disait clairement, ce n'était pas la forme de l'électron mais la symétrie de son orbitale dans certaines conditions particulières.

Dans une conférence de juillet 2013, Étienne Klein⁵² raconte comme il s'était réjoui d'apprendre que les rudiments de la quantique venaient de faire leur entrée dans certaines classes prépas, avant de déchanter en découvrant qu'on parlait encore dans les programmes officiels de « dualité onde-corpuscule », comme si la recherche s'était arrêtée avec Louis de Broglie en 1923. À la décharge de l'Éducation nationale française, on peut relever que l'expression « dualité onde-corpuscule » est

52 Le lien est sur notre site web.

toujours très présente dans la littérature, même si tous les chercheurs conviennent désormais qu'il ne s'agit que d'une métaphore et qu'il n'y a en fait pas de corpuscule et pas non plus d'onde au sens habituel du mot.

Que penser de tout cela ?

Comment conceptualiser l'abstraction en physique ?

Il n'y a pas que les vulgarisateurs qui rencontrent des difficultés pour exprimer par des images les abstractions mathématiques que nous avons vues au chapitre précédent. Un chercheur du CERN relevait récemment que lui-même, comme la plupart de ses collègues, lorsqu'il pensait à un proton en train de circuler dans le LHC⁵³, ne pouvait pas s'empêcher de l'imaginer comme une sorte de petite boule microscopique.

Comme le dit Leonard Susskind et comme le disait avant lui Niels Bohr⁵⁴, 3 millions d'années d'évolution du cerveau humain - et beaucoup plus si on tient compte de nos plus lointains ancêtres - nous ont préparés à penser le monde en termes d'objets massifs dotés d'une forme et d'une position, pas en termes d'abstractions mathématiques.

53 Le LHC (Large Hadron Collider) du CERN (Conseil européen pour la recherche nucléaire) est le plus grand accélérateur de particules jamais construit à ce jour.

54 D'une manière un peu différente.

Les corpuscules

C'est avec John Dalton, physicien et chimiste anglais, que la théorie atomiste moderne voit le jour dans les années 1800.

Bien sûr, depuis l'antiquité, des idées du même genre avaient vu le jour. Mais au cours du siècle suivant et surtout au début du 20ème siècle, on va s'apercevoir que les atomes de la science moderne n'ont pas grand chose à voir avec ceux de Démocrite ni avec ceux des anciens sages de l'Inde.

En effet, dans toutes ces écoles anciennes, les atomes ne peuvent pas être découpés en parties plus petites. C'est d'ailleurs l'étymologie du mot "atome", « qui ne peut pas être coupé ».

Dans la théorie scientifique moderne, au contraire, non seulement ils sont sensés pouvoir être découpés en parties plus petites, mais de plus on le vérifie dans les faits en les découpant effectivement en parties plus petites dans toutes sortes d'expériences.

Pourquoi continuer à les appeler des « atomes », alors ?

Prenons l'exemple d'un atome de Radium, le métal découvert par Pierre et Marie Curie en 1898. Pas besoin de faire des efforts pour le découper, il peut se diviser spontanément. Mais les deux morceaux qui résultent de cette division ne sont plus du Radium. Ce sont d'un côté un atome de Radon, qui est un gaz et de l'autre un atome d'Hélium, un autre gaz⁵⁵.

55 Si on étudie la radioactivité de plus près, on s'aperçoit vite qu'il existe plusieurs sortes de Radium et que sa désintégration se produit d'une

Dans la théorie atomiste moderne, un atome peut donc encore être coupé. En revanche, **un atome, c'est la plus petite quantité possible d'un élément chimique. On peut le couper, mais si on le fait, les morceaux ne sont plus cet élément chimique.**

Tout ça colle très bien avec la mécanique quantique, dans laquelle on observe qu'il y a aussi de plus petites quantités possibles de toutes sortes de choses. On ne peut pas voir moins de lumière bleue, par exemple, que la quantité de lumière bleue qui correspond à un photon de lumière bleue. On ne peut pas avoir moins d'électricité que la quantité d'électricité qui est contenue dans un électron. On ne peut pas avoir moins d'« aimantation » que celle qui est portée par un électron⁵⁶, etc.

Est-ce à dire que la matière est composée de corpuscules, c'est à dire de petits objets microscopiques semblables à des petites billes, ayant à chaque instant une certaine forme, une certaine position et une certaine vitesse ? C'est ce que la plupart des scientifiques pensaient à l'époque de ce que les anglophones appellent la « première théorie quantique », c'est à dire en gros de 1900 à 1925.

Mais comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents et comme nous l'approfondirons dans les saisons suivantes, il a fallu renoncer à cette idée. Les électrons, par exemple, n'ont

manière plus complexe et ne s'arrête pas là. Mais l'idée centrale, à savoir que les deux parties issues de la division du Radium ne sont plus du Radium, est exacte.

56 Là aussi, il y a quelques subtilités, mais qui ne retirent rien à l'idée générale.

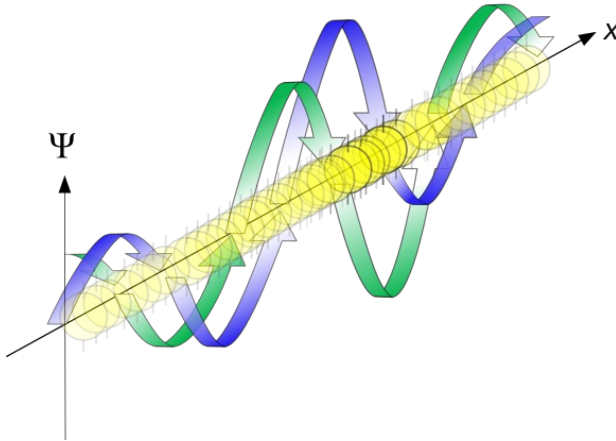
pas en général de positions précises. Du coup, les atomes n'ont pas non plus de positions précises, même si, étant plus gros, ils se comportent de manière plus ordinaire. Comme le disait Feynman avec son humour habituel: « *Vous êtes toujours libres de penser aux particules élémentaires comme si elles étaient des sortes de petites billes, mais à condition de n'en tirer absolument aucune déduction* ». Autant abandonner l'idée.

Pas complètement toutefois. **Les particules élémentaires gardent ceci de commun avec les corpuscules que lorsqu'elles interagissent avec leur environnement, elles le font toujours à un endroit très précis et à un moment très précis⁵⁷.**

Les ondes

57 Pour ceux de nos amis touristes qui auraient déjà étudié un peu la relativité, je veux dire à un moment très précis dans un référentiel donné. Il se peut que ce soit un moment différent dans un autre référentiel, mais ça restera quand même un moment précis.

$$\Psi = \sum_n A_n e^{i(p_n x - \omega_n t)}$$



*Représentation d'un paquet d'ondes
(à regarder comme de l'art abstrait
jusqu'à la fin de la saison 4)*

L'autre analogie fréquente, qui vient elle aussi de l'histoire des sciences, consiste à considérer les particules élémentaires comme des ondes.

Sauf qu'on parle alors d'ondes de quoi ?

Lorsqu'on parle d'ondes, normalement, on imagine des vagues à la surface de l'eau. Ou si on a fait un peu plus de physique, on pense à des ondes sonores, qui sont des vibrations de l'air. Ou encore, en géophysique, à des ondes sismiques, qui correspondent à des vibrations du sol.

Mais dans le cas de l'effet tunnel que nous avons étudié dans un chapitre précédent, où sont ces vibrations ? Comme le dit

Susskind dans son ouvrage de vulgarisation de la mécanique quantique, dans ce que la physique quantique appelle des « fonctions d'onde », il n'y a le plus souvent pas d'ondes du tout⁵⁸. Sauf dans quelques cas particuliers, les ondes dont on parle en mécanique quantique correspondent à des vibrations abstraites de vecteurs abstraits dans des espaces mathématiques abstraits. Pour être plus précis, elles correspondent en général à l'évolution des petits nombres que nous avons vus dans les chapitres précédents coincés entre le nombre "e" et le nombre "pi".

Il se trouve qu'on utilise le même genre de mathématiques, avec des petits "e" et des petits "hippies" i pi, lorsqu'on calcule la propagation des ondes sonores ou celle des vagues.

Donc, à la suite de Susskind et pour paraphraser Feynman, on peut dire qu'**il n'y a pas plus d'ondes (au sens classique) que de corpuscules.**

Et du coup, comme le recommande parmi d'autres Etienne Klein, on devrait sans doute aussi abandonner la métaphore de la « dualité onde-corpuscules » qui date de Louis de Broglie. Elle fut utile en son temps, mais de nos jours, elle induit plus d'erreurs qu'elle ne permet de mieux comprendre les phénomènes.

Cependant, il reste vrai que **les mathématiques qui permettent de calculer des probabilités quantiques**

58 *Quantum Mechanics*, L. Susskind & A. Friedman, Basic Books, 2014, 978-0-465-06290-4, p. 235-236

ressemblent beaucoup à celles qui permettent de calculer la propagation des ondes.

Les champs

Le concept de "champ" doit beaucoup au physicien britannique Maxwell et à ses travaux sur l'électromagnétisme. Mais qu'est-ce qu'un champ?

Prenons quelques exemples que tout le monde connaît.

En météo, on parle souvent de « champs de pression ». Qu'est ce que ça veut dire? Ça signifie qu'à chaque point de la carte de France, on associe une certaine quantité, qui est la pression atmosphérique mesurée à cette endroit.

Mais quelle est la réalité d'un tel champ ? Regardons les choses de plus près.

Y-a-t-il vraiment une certaine pression en chaque point de la carte ?

Évidemment non! On reporte sur la carte des mesures qui ont été réalisées sur le terrain. La pression atmosphérique en chaque point de la carte est très exactement celle qui règne dans le studio où se trouve cette carte, pour autant encore qu'il s'agisse d'une vraie carte et pas d'une image informatique.

C'est tout ?

Non. Sur le terrain on ne mesure pas la pression atmosphérique partout. On la mesure à certains endroits, puis on corrige les données pour « faire comme si » on l'avait mesurée partout.

Au total, le « champ de pression » n'est pas une réalité physique. C'est une abstraction mathématique qui permet de faire des calculs.

Il existe d'autres sortes de champs en météo, comme par exemple ceux qui représentent les vents. La aussi et pour les mêmes raisons, il s'agit en fait d'abstractions mathématiques.

Que dire des « champs magnétiques » que nous avons tous expérimentés en jouant avec les aimants ?

Qui a déjà vu un champ magnétique ? Personne.

Qui a déjà touché ou entendu un champ magnétique ? Personne.

Où se trouvent les bords, les limites qui définissent la forme d'un champ magnétique ? Il n'y en a pas, les champs s'étendent à l'infini. En un certain sens, on peut donc estimer qu'il n'existe finalement qu'un seul et unique champ magnétique dans tout l'Univers et qu'on ne peut connaître que son intensité et sa direction à un endroit donné à un moment donné.

C'est bien là tout le mystère des champs magnétiques. Ils semblent bien exister car il y a bien quelque chose qui repousse ou attire les aimants, mais c'est comme si ce quelque chose n'existait que lorsque j'approche vraiment un aimant. Nous

pourrions philosopher longuement sur ce que peut signifier « exister » pour un champ, mais nous ne le ferons pas ici. Quoiqu'il en soit, si les champs existent, ils n'existent pas de la même manière que les objets.

Au point que certains physiciens ne se posent même plus ce genre de question. Le concept de champ est un concept mathématique abstrait, qui leur permet de calculer avec beaucoup de précision le comportement des objets matériels, et ça suffit amplement à leur bonheur.

Copenhague et le réel

Tout ceci nous amène à ce qui rend la théorie quantique si populaire dans des domaines qui ne sont pourtant pas en prise directe avec la physique mais qui relèvent bien plus de la philosophie et de la métaphysique. La question est la suivante: « **Qu'est-ce que la réalité ?** »

Bien sûr, nous n'allons pas trancher dans cette série d'articles un débat philosophique vieux de plusieurs millénaires.

Mais nous pouvons en revanche constater que la physique quantique nous y renvoie avec force et vigueur, avec toute une série de questions sans réponses jusqu'à présent:



- Comment penser les phénomènes qui se produisent à l'échelle sub-atomique ?
- Comment penser les "particules élémentaires" ?
- Que font ces "particules élémentaires" lorsqu'elles n'interagissent avec rien ?
- Existent-elles encore ou n'existent-elles qu'au moment où elles interagissent avec leur environnement ?
- Et plus généralement, quel degré de réalité pouvons-nous attribuer à des entités que nous ne pourrions jamais observer et dont nous ne pourrions jamais observer autre chose que leurs effets ?

À toutes ces questions, différents courants de pensée répondent différemment et cela depuis des siècles. La physique, elle, n'y répond pas, du moins jusqu'à présent.

La plupart des physiciens, à l'heure actuelle, se contentent de l'approche prudente qu'on appelle habituellement « école de Copenhague ». Elle consiste (en caricaturant un peu) à se contenter de calculer ce que fait la nature sans chercher à décrire un « réel » qui se cacherait au-delà de toute possibilité d'observation.

Mais d'autres interprétations et d'autres conceptions philosophiques existent. Le débat est très loin d'être tranché et il risque de continuer pendant encore quelques siècles. Vous trouverez dans les liens externes de cet article⁵⁹ de nombreuses pistes de recherche pour approfondir ces questions si vous le souhaitez.

59 Sur notre site web.

Mais ces questions métaphysiques que la physique ne résout pas ne doivent pas occulter pour autant l'immense succès qui a été celui de la physique du 20ème siècle. En effet:

1. **La physique n'a jamais**, dans toute l'histoire de l'Humanité, **atteint un tel niveau de réussite** qu'en ce qui concerne la prédiction du comportement des systèmes physiques. Nous ne savons pas dire avec certitude de quelle substance sont faites les particules élémentaires et certains scientifiques commencent même à penser qu'elles ne sont au fond que des nombres ou de l'information pure. Nous sommes tout aussi incapables de prévoir à l'avance leur comportement individuel. Mais la science est en revanche capable de prévoir leur comportement statistique avec une précision de plus de 13 décimales.
2. **La science** ne sait pas encore ce que sont vraiment les particules élémentaires, mais elle **sait en revanche très bien ce qu'elles ne sont pas. Elles ne sont ni des corpuscules, ni non plus des ondes**⁶⁰. Lorsqu'on emploie des mots comme "corpuscules" ou "ondes", **ce ne sont que des métaphores** qui s'appuient sur des phénomènes qui se produisent à notre échelle. Comme les corpuscules, lorsqu'elles se manifestent, c'est toujours à un instant donné à un endroit donné. Et

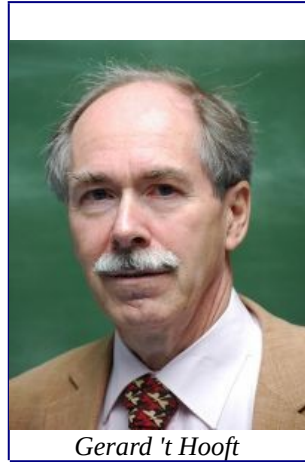
60 Si on veut être tout à fait complets, un petit nombre de physiciens, à la suite de David Bohm (1917-1992) continuent de penser que les particules élémentaires pourraient être des corpuscules guidés par des ondes, mais même dans ce cas, il s'agirait d'ondes très abstraites et extrêmement différentes de celles que nous observons à notre échelle.

comme les ondes, entre deux interactions avec leur environnement, elles sont décrites mathématiquement par des combinaisons de nombres complexes dans des espaces abstraits.

Le principe holographique

Pour terminer ce chapitre, je voudrais attirer rapidement votre attention sur un sujet un peu à la mode en ce moment, à savoir le principe holographique.

Nous avons vu que si nous ne savons pas dire de quelle "substance" sont faites les particules élémentaires, nous avons des mathématiques qui décrivent extrêmement bien leur comportement. De là à imaginer



Gerard 't Hooft

qu'au fond il n'est pas nécessaire d'aller plus loin et que le monde sub-atomique serait constitué de nombre complexes et de structures mathématiques abstraites, il n'y a qu'un pas que de plus en plus de physiciens franchissent.

Le « principe holographique » est au nombre de ces recherches récentes. Il s'agit d'une métaphore pour exprimer une théorie dans laquelle l'Univers à trois dimensions, tel que nous le percevons au quotidien, ne serait finalement qu'une illusion. La réalité ultime serait, selon cette hypothèse, une immense

quantité d'informations abstraites à la surface de la frontière externe de notre univers.

Attention toutefois. La mode qui entoure les recherches autour du principe holographique amène beaucoup d'auteurs non physiciens à s'autoproclamer savants dans ce domaine. La vérité est très différente. Il s'agit d'une conjecture spéculative d'un très haut niveau d'abstraction mathématique et bien rares sont ceux qui sont capables d'y travailler. Quiconque prétendrait faire des recherches dans ce domaine sans dominer au préalable les recherches en cours sur la gravitation quantique, dans toute leur complexité, ne peut que bluffer.

Toutes les autres hypothèses qui prétendent partir du même principe ne doivent être prises que pour ce qu'elles sont: Des hypothèses métaphysiques ou religieuses souvent audacieuses et originales, mais qui n'ont strictement aucun rapport avec le principe holographique issu des recherches sur la gravitation quantique.

Bien sûr, il n'y a aucun droit d'auteur sur les métaphores et chacun de nous a parfaitement le droit d'inventer ses propres métaphores à partir des hologrammes et de l'Univers. Mais le principe holographique proposé par Gerard 't Hooft puis développé par Leonard Susskind n'a strictement rien à voir avec ça.

Du microcosme quantique au macrocosme classique

En bref

Le monde quantique est à l'évidence très différent de celui dont nous avons l'habitude. Mais pourtant, notre monde habituel est bien constitué d'une multitude d'objets quantiques. Alors comment passe-t-on de l'un à l'autre ?

C'est ce que nous allons commencer à étudier dans ce chapitre.

La « table d'émeraude »

La Table d'émeraude est un des textes les plus célèbres de la littérature alchimique et hermétique. Elle contient la fameuse correspondance entre le macrocosme et le microcosme :



Tabula Smaragdina Hermetis

« Ce qui est en bas est comme ce qui est en haut, et ce qui est en haut est comme ce qui est en bas ».

Ces notions de « macrocosme » et de « microcosme » remontent au moins jusqu'à l'Antiquité grecque et égyptienne. Le concept de « macrocosme » faisait référence à ce que nous appellerions aujourd'hui l'Univers, même si l'Univers connu à cette époque ne s'étendait guère au-delà des étoiles visibles à l'œil nu. Le concept de « microcosme » désignait l'homme et ce qui se situe à son échelle: Les plantes, les animaux, les

minéraux relevaient également du « microcosme » qui n'allait lui non plus pas plus loin vers l'infiniment petit que les très hypothétiques « atomes » de Démocrite, dont nous avons vu qu'ils étaient fort différents du concept actuel d'atome.

Or ce que nous apprend la physique moderne, c'est non seulement que l'Univers est beaucoup plus vaste qu'on ne le pensait jusqu'ici, que ce soit vers l'infiniment grand ou vers l'infiniment petit, mais aussi que s'y produisent des phénomènes qui n'ont aucun équivalent à notre échelle.

À très grande échelle, il s'agit de phénomènes relatifs à la naissances de l'Univers observable et qui seront l'objet pour nous d'un voyage complètement différent, du moins dans sa plus grande partie.

À très petite échelle, il s'agit du monde quantique, qui est presque exclusivement celui de l'infiniment petit, ou plus exactement de l'extrêmement petit. Typiquement l'échelle atomique et sub-atomique, même si quelques rares phénomènes quantiques restent, dans certaines conditions, observables à notre échelle⁶¹. Donc, **non, à l'échelle atomique tout au moins, il n'est plus vrai que « ce qui est en bas est comme ce qui est en haut ».**

Mais puisque notre monde quotidien est composé d'un très grand nombre d'éléments microscopiques, comment expliquer ces différences ?

61 Notamment parmi ceux qui relèvent des très basses températures et de la supraconductivité.

La science ne le comprend pas encore entièrement. Il reste beaucoup de questions qui ne sont toujours pas résolues, ou qui ne le sont que de manière partielle, et qui sont toujours l'objet d'intenses recherches. Mais il y a aussi un assez grand nombre de choses qui semblent désormais assez bien comprises.

C'est ce que nous allons passer en revue maintenant.

Questions de taille

En physique, aucun doute, « la taille, ça compte ! »

Prenons trois exemples simples :

Le blé

Si vous allez au silo à blé qui est à côté de chez moi, vous pouvez avoir l'impression que vous pourriez en prélever exactement n'importe quelle quantité. Un train, un wagon, un sac ou un kilo. Mais évidemment, vous ne pourrez jamais avoir moins de grains de blé qu'un seul grain de blé. Éventuellement, vous pourriez couper un grain en deux, mais ça ne serait déjà plus vraiment du blé, ce serait un peu de farine et un peu de son.

C'est la même chose en physique quantique.

La quantité de lumière

Nous l'avons précédemment, à l'échelle atomique, il n'est pas possible de produire moins de lumière bleue qu'une certaine quantité de lumière bleue.

Il est temps à ce stade de préciser un peu cette affirmation, toujours sans faire des maths avancées, pour respecter notre promesse, mais en parlant un peu de nombres quand même.

Il y a toutes sortes de bleus différents. Celui qui est le plus utilisé dans l'industrie des écrans d'ordinateurs par exemple est celui qui a une longueur d'onde de 466 nm. La plus petite quantité possible de lumière de cette couleur est d'environ un demi milliardième de milliardième de Joule.

A notre échelle, cette quantité d'énergie est absolument insignifiante. Elle suffirait à peine à déplacer un millionième de millionième d'une micro gouttelette d'eau sur quelques centimètres.

A l'échelle atomique en revanche, ça devient considérable. Il y a là assez d'énergie pour envoyer valser une molécule d'eau au-dessus du Mont Blanc.

La lumière ne nous arrive donc que par paquets entiers, qu'on appelle des photons. Chacun de ces photons est tellement minuscule qu'à notre échelle, on a l'impression qu'on peut en avoir exactement la quantité qu'on veut, mais ce n'est plus vrai à l'échelle des atomes.

L'électricité

En 1909, à Chicago, un physicien nommé Robert Millikan mit en évidence l'existence d'une quantité minimale d'électricité. Il travaillait avec des gouttelettes d'huile et un microscope. Il s'aperçut qu'il pouvait charger électriquement ses gouttelettes

d'huile de telle sorte qu'elles se déplacent plus ou moins vite sous son microscope. Mais il ne pouvait obtenir que des multiples entiers d'une certaine vitesse de base.

Cette vitesse de base correspondait à celle qui était produite par la charge électrique d'un électron. Si la gouttelette est chargée de deux électrons, elle ira deux fois plus vite. Avec trois électrons, elle ira trois fois plus vite⁶².

Et bien plus encore

L'électricité, comme la lumière, comme le blé, arrive donc par paquets entiers. Ces paquets sont tellement petits qu'il faut monter des expériences extrêmement précises pour les observer. Ils sont à l'origine des termes "*quantum*", "*quanta*" et "*quantique*", qui désignent l'idée d'une quantité minimale.

Cette idée de quantités minimales de toutes choses ou presque a été très fructueuse. Il y a une quantité minimale d'aimantation⁶³, comme nous l'avons vu, mais aussi et c'est plus surprenant encore, une quantité minimale de vitesse de rotation, etc.

Les scientifiques cherchent même, depuis des années, à mettre en évidence des quantités minimales d'espace et de temps, quantités qu'ils nomment respectivement la "longueur de Plank" et "le temps de Planck". Peut-on avoir moins de temps que le temps de Planck? Moins de distance que la distance de

62 A quelques paramètres près dans l'expérience réelle, mais c'est le principe général qui nous occupe ici.

63 Ou, pour être plus rigoureux, de « moment magnétique ».

Planck? Ce sont là des questions compliquées et encore mal connues, qui font l'objet de recherches intenses depuis plus d'un siècle maintenant.

Questions de moyennes

Si en physique, « la taille, ça compte », nous allons voir avec deux exemples que « la moyenne, ça compte tout autant ».

Température moyenne

Nous avons vu que certains systèmes quantiques peuvent avoir une température qui est une combinaison de deux températures de base.

Laissons tomber pour le moment les nombres complexes et formons un état quantique à partir de nombres "normaux".

Imaginons une poignée de molécules d'eau et imaginons qu'elles se trouvent toutes dans l'état quantique suivant:

$$|T\rangle = 75\% |20^\circ\text{C}\rangle + 25\% |30^\circ\text{C}\rangle$$

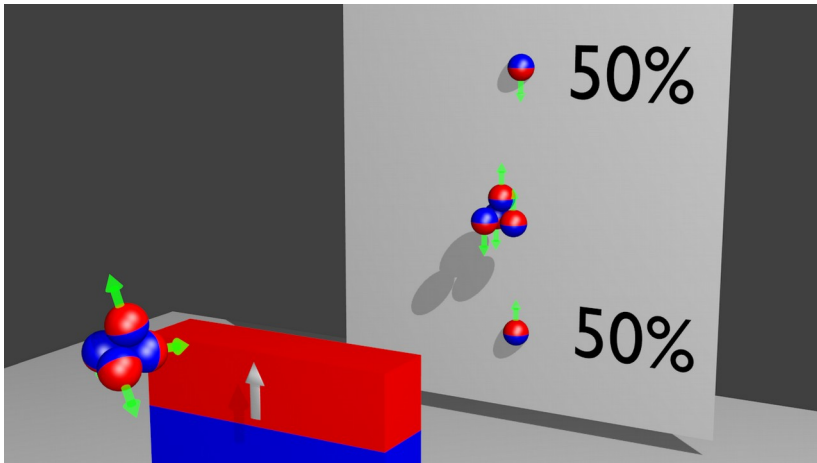
ce qui signifie que si je mesure leur température, chacune d'entre elle a 75% de chances de basculer dans l'état 20°C et 25% de chances de basculer à 30°C.

Que se passera-t-il si je mesure la température d'une micro gouttelette d'eau composée de 400 milliards de milliards de molécules d'eau préparées de cette manière. Je ne prends pas ce nombre au hasard, c'est à peu près le nombre de molécules

d'eau qui composait la plus petite micro gouttelette d'eau jamais analysée à ce jour. Quelle température vais-je mesurer ?

La réponse est simple, j'obtiendrai au moment de la mesure une gouttelette composée d'environ 300 milliards de milliards de molécules à 20°C et d'environ 100 milliards de milliards de molécules à 30°C. Même s'il y a quelques milliards de gouttelettes de plus que 300 milliards de milliards d'un côté et autant de moins de l'autre, ça ne changera rien au résultat final. Mon thermomètre indiquera la **température moyenne** de la gouttelette, c'est à dire 25°C.

Aimantation moyenne



"Aimantation" moyenne

Revenons maintenant à l'expérience de Stern et Gerlach de nos débuts.

Imaginons que les atomes d'argent, au lieu de se présenter individuellement, se présentent par paquets de quatre comme sur la figure suivante. Un calcul rapide montre que, si chacun d'entre eux a une chance sur deux de basculer dans la position "up" et une chance sur deux de basculer dans l'état "down", on obtiendra la statistique suivante :

- Il y a 1 seule manière d'obtenir 4 spins up, c'est quand tous les spins sans exceptions sont dans cet état, donc $|UUUU\rangle$
- Il y a 4 manière d'obtenir seulement 3 up : à savoir $|UUUD\rangle$ $|UUDU\rangle$ $|UDUU\rangle$ et $|DUUU\rangle$
- 6 manières pour 2 fois up : $|Uudd\rangle$ $|UDDU\rangle$ $|DDUU\rangle$ $|DUUD\rangle$ $|DUDU\rangle$ et $|UDUD\rangle$
- 4 manières d'obtenir seulement un up : $|DDDU\rangle$ $|DDUD\rangle$ $|DUDD\rangle$ et $|UDDD$
- et Il y a 1 seule manière d'obtenir 4 spins down ; $|DDDD\rangle$

Résumons-nous, il y a donc $1+4+6+4+1=16$ configurations possibles et on obtiendra :

- 4 up -> 1 fois sur 16
- 3 up 1 down -> 4 fois sur 16
- 2 up 2 down -> 6 fois sur 16
- 1 up 3 down -> 4 fois sur 16
- 4 down -> 1 fois sur 16

On le voit, les état intermédiaires, qui n'existent pas avec des particules indépendantes, apparaissent très vite dès qu'on a des agrégats de plusieurs particules. Si par exemple on se retrouve dans la configuration avec 2 spins up et deux spins down, l'aimantation moyenne sera nulle et le paquet de 4 spins ne sera pas dévié.

Chaque nouvelle particule rajoute une possibilité intermédiaire selon une formule mathématique dite "triangle de Pascal"

1
1 1 → pour un atome, deux états possibles
1 2 1
1 3 3 1
1 4 6 4 1 → probabilités pour 4 atomes
1 5 10 10 5 1
1 6 15 20 15 6 1
1 7 21 35 35 21 7 1
1 8 28 56 70 56 28 8 1 → pour 8 atomes

Avec des "micro gouttelettes" d'atomes d'argent, composées chacune de milliards de milliards d'atomes, la presque totalité d'entre elles se disperseraient aux alentours de la position médiane, donnant pour l'expérience de Stern et Gerlach le résultat dont nous avons vu lors de la saison 1 qu'il était le résultat prévu par la physique classique, très différent du résultat quantique observé. Si avec un atome individuel on obtient un résultat typiquement quantique, avec un groupe d'atomes, **la moyenne des comportements quantiques** de chacun d'eux **nous ramène au résultat classique**.

Questions de durées

Il faut encore tenir compte d'un autre phénomène lorsqu'on réfléchit au passage du monde quantique au monde classique. Ce phénomène se nomme « **décohérence quantique** ».

De quoi s'agit-il ?

Les états quantiques « combinés », du genre :

$$|T\rangle = 75\% |20^\circ\text{C}\rangle + 25\% |30^\circ\text{C}\rangle$$

pour la température d'un groupe de particules sont extrêmement fragiles. Ils disparaissent dès qu'ils interagissent avec leur environnement et cela, très, très vite.

Et par très très vite, je veux dire ***vraiment*** très vite !

A quel point ?

La vitesse de décohérence dépend de deux facteurs principaux:

- la taille de l'objet
- la densité de son environnement

Notre micro gouttelette d'eau de tout à l'heure, dans un excellent vide de laboratoire, resterait dans un état combiné environ **un millionième de milliardième de milliardième de seconde**. Autant dire que notre expérience de tout à l'heure n'était qu'une expérience de pensée!

Quant au célèbre "Chat de Schrödinger", sensé être dans un état du genre:

$$|\text{Chat}\rangle = 50\% |\text{Vivant}\rangle + 50\% |\text{Mort}\rangle$$

Il ne pourrait pas rester dans cet état combiné assez longtemps pour que ça puisse avoir une quelconque signification.

En revanche, un atome seul, dans l'obscurité, dans un vide de laboratoire poussé, à une température proche du zéro absolu, peut rester dans un état combiné plus de trente minutes⁶⁴.

Nombres complexes

Il y a encore une autre différence capitale entre notre monde habituel et le monde quantique. C'est la possibilité de combiner des états de base avec des coefficients complexes.

De quoi s'agit-il plus précisément ?

Nous n'approfondirons l'aspect mathématique de cette question que pendant la prochaine saison mais on peut dès à présent la résumer par une comparaison.

Si je règle mon four à micro-ondes, je peux le régler sur 750 watts ou sur 900 watts. Je n'ai aucune possibilité de le régler sur des valeurs intermédiaires. Ce sont ses états de base.

En revanche, je peux décider de le faire fonctionner pendant 30 secondes à 900 watts, puis pendant 10 secondes à 750 watts. C'est une combinaison des deux états de base.

Dans le monde quantique, je pourrais faire encore mieux. Je pourrais par exemple de faire fonctionner à « $(30 + 2i)$ fois 900 watts plus $(10 + 5i)$ fois 750 watts ». **Des quantités comme « $(30 + 2i)$ watts » sont des quantités « complexes ». Elles ne correspondent absolument à rien dans notre monde habituel.**

64 <http://science.sciencemag.org/content/342/6160/830>

Trois pistes et un postulat

Taille des objets, comportement statistique et durée de la plupart des phénomènes quantiques, voilà donc trois grandes pistes pour expliquer comment on passe des lois du monde quantique à celles du monde classique.

Il faudra ensuite y rajouter une explication pour la disparition de ces fichus nombres complexes, omniprésents dans les états quantiques mais que personne n'observe jamais dans les états classiques. Ce mécanisme est inscrit dans les « postulats de la mécanique quantique » que nous avons déjà évoqués et nous en reparlerons dans la saison 4 de notre voyage.

On le voit, il nous reste encore beaucoup de travail avant que tout soit parfaitement clair.

Fentes, chats, intrications et Qbits

En bref

Nous voici arrivés presque au terme de cette deuxième saison. Comme dans un tableau, le paysage s'éclaircit peu à peu, au fur et à mesure des touches successives.

Avant de clore cette deuxième saison, qui sera allée aussi loin qu'il est possible d'aller sans recourir ni à des analogies trop grossières ni non plus à la pratique des mathématiques, nous allons détailler un peu quatre sujets très célèbres, dont deux que nous avons déjà croisés et que nous allons maintenant approfondir un peu :

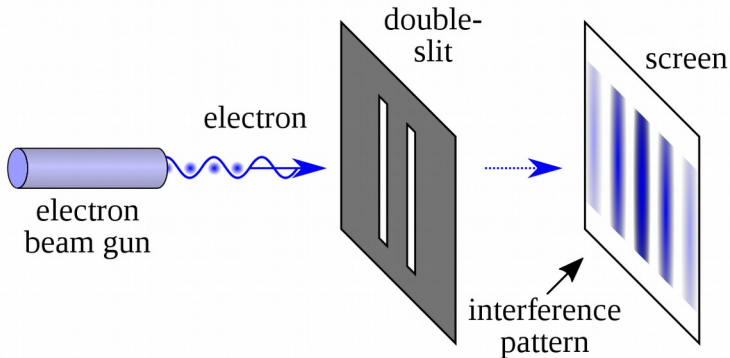
- Les **fentes de Young** avec leurs électrons dont on dit souvent de manière abusive qu'ils passeraient par deux trous en même temps.
- Le céléberrissime **chat de Schrödinger**, dont on dit de manière tout aussi abusive, bien que très pédagogique, qu'il pourrait être à la fois mort et vivant
- L'**intrication quantique** et ce qu'Einstein appelait une « fantomatique action à distance⁶⁵.

65 « *Spooky action at a distance* »

- L'**informatique quantique** supposée détrôner à court terme tous nos ordinateurs actuels.

Les fentes de Young

L'expérience des fentes de Young a été réalisée en 1801 avec de la lumière par le physicien Thomas Young. Personne ne parlait de physique quantique à l'époque. Elle a permis de démontrer que la lumière se comporte comme une onde. La physique quantique, par la suite, a permis d'obtenir les mêmes résultats avec des électrons, puis des atomes et, depuis quelques temps, avec des molécules.



CC BY-SA NekojaNekoja Wikimedia 2017

Que peut-on en dire dès à présent, en attendant de rentrer plus avant dans les concepts mathématiques indispensables à une compréhension beaucoup plus fine ?

Qu'à l'échelle atomique, les objets ne se comportent pas du tout comme des corpuscules. Entre deux interactions avec

leur environnement, ils n'ont pas de position bien définie et donc pas de trajectoire⁶⁶.

On peut seulement calculer la probabilité qu'ils interagissent avec l'écran à tel ou tel endroit. Il y a des endroits où il est probable qu'ils interagissent et d'autres endroits où ce n'est pas possible. Ce calcul ressemble aux calculs qu'on fait avec des ondes et il doit prendre en compte tous les chemins possibles.

Le physicien Richard Feynman a élargi en 1942 la compréhension de ce phénomène en proposant une méthode de calcul beaucoup plus puissante et générale, dite « intégrale de chemin ».

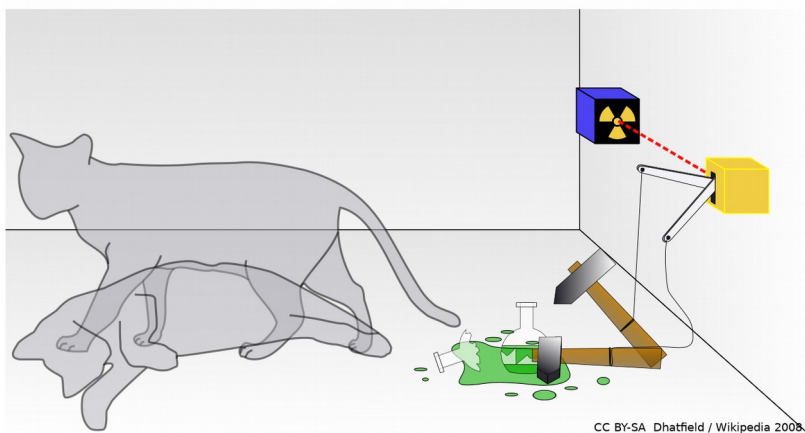
Ça n'a donc pas vraiment de sens de dire que « *l'électron est passé par les deux fentes à la fois* ». En fait, quand il n'interagit pas avec son environnement, l'électron n'est nulle part, il ne "passe" nulle part mais ses probabilités de présence, elles, sont (presque) partout. En revanche, chaque fois qu'il interagit avec son environnement, il est à un seul endroit, jamais plus.

Nous reviendrons sur tout ceci quand nous disposerons des outils mathématiques nécessaires, dans la saison 5 de notre voyage.

66 Telle est du moins la manière dont la très grande majorité des physiciens modernes comprend les choses. Il reste toutefois quelques physiciens qui continuent de travailler sur une théorie alternative, dite « de De Broglie-Bohm », qui conserverait le concept de trajectoire, mais au prix de suppositions encore plus surprenantes.

Le chat de Schrödinger

Le **chat de Schrödinger** est une très célèbre expérience de pensée imaginée en 1935 par le physicien Erwin Schrödinger que nous avons évoquée rapidement déjà deux fois cette saison. Il est temps d'y revenir un peu.



Le chat de Schrödinger

Elle met en évidence la bizarrerie des phénomènes quantiques lorsqu'on les imagine à notre échelle. L'idée est « d'amplifier » un état combiné d'un phénomène quantique par une chaîne de conséquences.

Un atome radioactif dans un état quantique combiné (désintégré **et** non désintégré) est mesuré par un détecteur. D'après le formalisme quantique, ce détecteur passe alors lui aussi dans un état combiné (activé **et** non activé). Le détecteur

agit à son tour sur un marteau (relâché **et** maintenu), qui agit sur une fiole de poison (brisée **et** non brisée), qui agit sur un chat (mort **et** vivant) enfermé dans une boîte.

Toujours d'après les équations de la mécanique quantique, l'expérimentateur lui-même, dès qu'il ouvrira la boîte pour voir le résultat de l'expérience, devrait se retrouver lui aussi dans un état combiné (« je vois le chat mort » **et** « je vois le chat vivant »).

Or bien, sûr, personne n'a jamais vu de chat à la fois mort et vivant !

Comment expliquer ce paradoxe ?

C'est toute la question du passage des lois quantiques, qui prédominent à l'échelle atomique, aux lois classiques, qui prédominent à notre échelle. Nous avons commencé à étudier cette question précédemment. Le chat de Schrödinger n'est qu'une manière particulièrement frappante de présenter ce qu'on appelle le « problème de la mesure ».

Il n'y a pas à l'heure actuelle d'explication unique et consensuelle pour résoudre ce paradoxe. Mais ça ne signifie pas que le mystère soit total, comme on l'entend parfois.

Il est par exemple déjà assuré que le détecteur, dans cette expérience de pensée, ne resterait pas dans un état combiné plus d'un milliardième de milliardième de milliardième de seconde. Le marteau ensuite, ne sera plus dans un état de superposition en tout cas, il ne le sera plus au moment où il pourrait casser la fiole. Ou bien il la cassera ou bien il ne la

cassera pas, de manière tout à fait classique. La fiole de poison à son tour ne sera donc jamais « **à la fois brisée et intacte** », elle sera de manière tout à fait classique « **ou bien brisée ou bien intacte** » Ce qui exclut au bout de la chaîne toute possibilité d'existence d'un chat "mort-vivant".

Toutefois, au niveau des systèmes quantiques, l'étrangeté du problème de la mesure reste réelle et elle continue de faire l'objet de recherches actives et de perspectives étonnantes ayant des implications philosophiques profondes. Sur l'unicité de l'Univers par exemple. Nous y reviendrons quand nous en saurons plus sur les mathématiques qui permettent de les comprendre.

Mais d'ici là, restons conscients que lorsque la presse parle de recherches en cours sur le « chat de Schrödinger », il ne s'agit que d'une métaphore pour parler de recherches sur le comportement d'atomes placés dans des petites boîtes très froides. Ce qui arrive souvent aux atomes n'arrive jamais aux chats.

Spins intriqués

Le phénomène qu'on appelle « **intrication quantique** » fait actuellement l'objet de beaucoup de recherches.

Ce n'est pas un phénomène totalement différent de celui des fentes de Young ou de celui représenté par la métaphore du Chat de Schrödinger. Ce n'est au fond qu'une autre conséquence des postulats de la mécanique quantique. Ce

phénomène présente souvent des aspects extrêmement complexes, mais il peut parfois aussi se présenter de manière beaucoup plus simple et c'est ce que nous allons voir maintenant.

Une analogie

Imaginons qu'Alice et Bob aient chacun une pièce de monnaie et que leurs pièces soient "intriquées" comme peuvent l'être des particules quantiques.

Regardons ce phénomène de « l'intrication quantique » de plus près :

Alice et Bob se séparent très loin l'un de l'autre et ils commencent à tirer à pile ou face, à différents moments de la journée:

Alice obtient: face à 2h, pile à 3h, face à 4h, face à 5h et pile à 6h

Bob est moins rigoureux question timing.

Bob obtient: pile à 2h, face à 3h10, pile à 3h55, pile à 5h et face à 8h

Autrement dit, à chaque lancer, **Alice obtient toujours exactement le contraire de ce qu'obtient Bob.**

Et **ce n'est pas l'un des résultats qui influence l'autre** puisque ça ne dépend pas de qui lance le premier.

Ça ne peut pas non plus servir à communiquer instantanément quoi que ce soit, puisque ni Alice ni Bob ne peuvent prévoir le résultat du prochain lancer, encore moins l'influencer.

La chose étonnante, c'est que si par exemple Alice obtient "pile" à son troisième lancer, **elle sait immédiatement que Bob a obtenu (ou obtiendra plus tard) le contraire**, donc "face", à son troisième lancer. Et pareil pour tous les lancers.

À quoi cela pourrait-il servir ?

Ça peut avoir certains avantages techniques, par exemple pour sécuriser des communications en **cryptographie quantique**.

Imaginons par exemple que la séquence obtenue par Alice soit PFFPFPPF⁶⁷. La séquence obtenue par Bob est donc l'opposé, soit FPPFPFFP.

Mais les lois de la mécanique quantique font que cela, seuls Alice et Bob peuvent le savoir car les corrélations quantiques ne peuvent pas être interceptées.

Alice et Bob sont donc maintenant en possession d'une série de valeurs totalement aléatoires, qu'eux seuls peuvent connaître.

C'est la situation idéale pour se transmettre un message codé par la technique dite du « masque jetable », réputée être inviolable.

67 Avec évidemment P pour Pile et F pour face.

Comment cela fonctionne-t-il ?

Alice et Bob peuvent convenir à l'avance du code suivant :

P=0 et F=1

Comme Alice a obtenu, au tirage aléatoire des pièces, la série suivante :

PFFPFPPF

Elle sait que Bob a obtenu quantiquement la série opposée, à savoir :

FPPFPFFP

Munie de leur convention, elle traduit en binaire la série de Bob, ce qui lui donne la clé de chiffrement de Bob :

10010110

Imaginons maintenant qu'Alice veuille transmettre la lettre « A » majuscule à Bob.

En binaire, la lettre « A » s'écrit : 01000001

Combinons les deux⁶⁸ :

01000001 (lettre A)

10010110 (clé de Bob)

donne

11010110 (message chiffré)

68 La fonction utilisée pour cette combinaison s'appelle « ou exclusif ».

Ce message, Alice doit l'envoyer de manière classique, **il n'ira donc pas plus vite que la lumière** contrairement à ce qu'on lit parfois dans la presse.

Quand il le recevra, Bob va pouvoir le déchiffrer avec sa clé :

11010110 (message chiffré)

10010110 (clé de Bob)

01000001 (message déchiffré, lettre A)

Pour aller plus loin

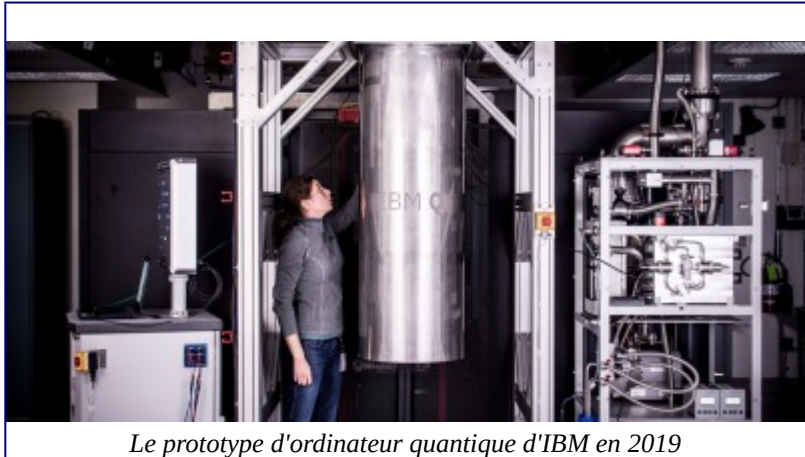
Tout ceci n'est qu'une image assez simplifiée du cas le plus simple d'intrication quantique, pour donner l'idée générale. Dans la plupart des cas, c'est beaucoup plus complexe et subtil que ça et il est difficile d'aller plus loin que des analogies tant que nous n'avons pas un peu plus l'habitude de manipuler les objets mathématiques de la mécanique quantique.

Nous ne reviendrons donc sur ces questions difficiles que lorsque nous serons beaucoup plus avancés dans notre voyage.

Toutefois, vous trouverez sur notre site web une [ébauche du futur article sur ce sujet](#). À vous de voir si elle vous apporte quelque chose.

Qbits et informatique quantique

On parle beaucoup aussi, depuis quelques années, des progrès de l'informatique quantique. De quoi s'agit-il ?



C'est un sujet extrêmement vaste et complexe dans sa technologie et ses mathématiques, que très peu de gens maîtrisent vraiment à l'heure actuelle, mais nous pouvons en dire quelques mots.

L'informatique que nous connaissons à l'heure actuelle est fondée sur des informations codées en bits, octets, kilooctets, mégaoctets, etc...

L'unité de base, le bit, est la plus petite quantité possible d'information. "Oui" ou "non", le courant passe ou il ne passe pas, 0 ou 1.

Dans le monde quantique, le spin, comme nous l'avons vu, peut prendre seulement deux valeurs au moment où il est détecté. Traditionnellement, on les appelle "Up" et "Down" par rapport à un détecteur qui serait placé verticalement. Mais c'est juste une convention, comme nous l'avons vu déjà longuement. Quelle que soit la position de notre détecteur, au moment où il interagit avec le détecteur, le spin sera "projeté" dans un état tel qu'il sera soit attiré soit repoussé.

Ces deux états de base, nous les avons appelés jusqu'ici $|U\rangle$ et $|D\rangle$, mais d'autres peuvent les appeler $|0\rangle$ et $|1\rangle$, peu importe.

On peut donc utiliser des spins pour faire de l'informatique. Ce sont des bits quantiques, des « Qbits »

Par rapport aux bits ordinaires, ces spins, portés par des électrons ou par d'autres particules, ont deux propriétés quantiques que nous connaissons bien maintenant :

1) Les Qbits ne sont pas limités à leurs deux états de base, puisqu'ils peuvent les combiner en dehors du moment où on les mesure.

Nous avons déjà vu ça de nombreuses fois. Des états comme:

$$72\% |U\rangle + 28\% |D\rangle$$

sont possibles pour les qbits alors qu'ils ne le sont pas pour les bits ordinaires qui ne peuvent être que $|U\rangle$ ou $|D\rangle$

Et ce n'est pas tout. Nous avons entrevu aussi, et nous le développerons dans la prochaine saison, que les coefficients de ce genre de combinaisons peuvent être des nombres

complexes, c'est à dire des nombres très différents de toutes les sortes de nombres qu'on apprend au collège.

D'un certaine manière, un qbit, **tant qu'on ne le mesure pas**, peut donc contenir une quantité d'information beaucoup plus grande qu'un bit ordinaire.

2) **Les Qbits peuvent « s'intriquer »** pour "travailler ensemble", comme nous l'avons aperçu dans le chapitre précédent.

Ces deux propriétés nouvelles laissent entrevoir la possibilité de construire des ordinateurs très différents de ceux que nous avons actuellement sur nos bureaux. Ces ordinateurs "quantiques" auraient des capacités très supérieures aux ordinateurs traditionnels pour certaines sortes d'applications.

Toutefois, cette technologie nouvelle et en plein essor a encore d'énormes défis à relever. Le principal tient à la difficulté technique de maintenir des qbits dans un état de combinaison quantique. Car nous l'avons vu, dès qu'ils interagissent avec leur environnement, ils perdent très vite leurs propriétés quantiques.

Les Qbits et les ordinateurs quantiques n'existent donc pour le moment que sous la forme de prototypes extrêmement complexes et délicats, nécessitant le plus souvent de fonctionner à des températures proches du zéro absolu.

On trouvera sur notre site web, dans la section "Pour aller plus loin" (sur notre site web), une conférence de Gérard Berry, un des plus grands spécialistes du domaine. Il confirme qu'en

2019, on est encore très loin de pouvoir réaliser les exploits qui sont pourtant d'ores et déjà revendiqués par certaines firmes et vantés par avance sur les réseaux sociaux.

Conclusion de la saison 02

Nous voici arrivés au terme de la saison 02. Il n'est pas possible d'aller beaucoup plus loin dans tous ces domaines sans faire un minimum de mathématiques et c'est à cela que nous allons consacrer les deux prochaines saisons.

Les mathématiques de la physique quantique peuvent être très impressionnantes et très complexes. Elles ne doivent pourtant pas trop nous inquiéter. En effet, dans quelques cas particuliers, il est possible de les découvrir dans leur principe sans être obligés de leur consacrer des années d'études et c'est ce que nous allons faire. Notre voyage dans le monde quantique n'est qu'un voyage touristique. Nous n'avons pas la prétention de nous prendre pour des chercheurs ni de réaliser des calculs d'ingénieurs.

À condition de garder ces réserves en tête, découvrir les mathématiques de la physique quantique peut être une expérience très agréable et enrichissante. Vous vous apercevrez vite que vous êtes capables de comprendre au moins dans leurs grandes lignes quelques-unes des équations les plus célèbres de la physique quantique. Ce sera d'autant plus agréable que personne ne vous demandera de les appliquer à des cas complexes.

Nous découvrirons ainsi la vraie physique quantique en amateurs, de la même manière que les astronomes amateurs découvrent les vraies étoiles, mais en amateurs.

Ça vous intéresse toujours ?

Alors à bientôt pour la suite de notre voyage !

Les saisons 3 et 4 de notre voyage sont en préparation sur le site web <http://www.ventsetjardins.fr>

La saison 3 nous permettra de commencer à manipuler les bras et les kets de Dirac pour calculer des amplitudes de probabilité, puis les probabilités elles-mêmes, dans des cas très simples.

La saison 4 permettra de comprendre les postulats de la mécanique quantique et de les utiliser dans des cas très simples, alors que nous n'avons fait que les survoler dans cette saison.

La publication de la saison 3 est prévue sous forme de livre numérique pour le courant de l'année 2021.

Pour celle de la saison 4, aucune date n'est encore prévue, mais les chapitres seront publiés sur le site web au fur et à mesure de leur rédaction.

Bibliographie

Georges Lochack, *La géométrisation de la physique*, Flammarion, 1994

Richard Feynman, *La nature de la Physique*, Points, 1980

Richard Feynman, *Lumière et matière*, Points, 1992

Richard Feynman, *Mécanique quantique*, Dunod, 1997

Roger Penrose, *À la découverte des lois de l'Univers*, Odile Jacob, 2004

Erwin Schrödinger, *Ma Conception du Monde. Le Veda d'un physicien*, Mercure de France, 1982

Leonard Susskin et Art Friedman, *Mécanique quantique*, Presses polytechniques romandes, 2015

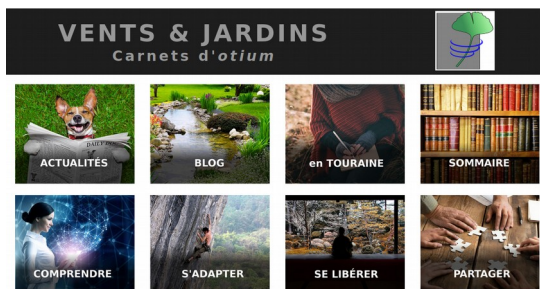
Ce livre est diffusé sous licence CC-BY-ND



Christophe Dioux 2020

Vous trouverez sur notre site web, pour l'accompagner :

- des compléments trop volumineux ou trop détaillés pour figurer dans cet ouvrage.
- des liens vers des ressources extérieures et des actualités scientifiques
- et même un lien vers notre chaîne Youtube.



Mentions légales | Crédits images

Ce site respecte votre vie privée, ne vous prête pas et n'utilise aucun cookie qui nécessiterait votre consentement préalable.

<https://www.ventsetjardins.fr>