

# Physique quantique : généralités

Jean-Pierre Chabert

## Table des matières

<b>1 Avertissement</b>	<b>2</b>
<b>2 Qu'est-ce que la physique quantique ?</b>	<b>3</b>
<b>3 Domaine de validité de la physique quantique</b>	<b>4</b>
<b>4 La symétrie T</b>	<b>5</b>
<b>5 La flèche du temps</b>	<b>11</b>
<b>6 La non-localité</b>	<b>14</b>
<b>7 L'intrication</b>	<b>15</b>
<b>8 L'"immédiateté"</b>	<b>17</b>
<b>9 Le degré zéro de l'intrication</b>	<b>20</b>
<b>10 Le degré un de l'intrication</b>	<b>23</b>
<b>11 Intrication de degré quelconque</b>	<b>30</b>
<b>12 Théories locales et globales</b>	<b>31</b>
<b>13 La fonction canonique de communication immédiate</b>	<b>33</b>
<b>14 La dualité onde/corpuscule</b>	<b>35</b>
<b>15 La "poignée de mains"</b>	<b>41</b>
<b>16 L'électromagnétisme quantique</b>	<b>43</b>
<b>17 Le problème de la mesure</b>	<b>45</b>
<b>18 Le hasard et le déterminisme</b>	<b>46</b>
<b>19 Quelques expériences classiques</b>	<b>48</b>

<b>20 Les brouillons de la Nature</b>	<b>67</b>
<b>21 Les superpositions d'états</b>	<b>70</b>
<b>22 La cohérence</b>	<b>72</b>
<b>23 La décohérence</b>	<b>74</b>
<b>24 Non-événements et catastrophes</b>	<b>75</b>
<b>25 Les deux niveaux de la physique</b>	<b>77</b>
<b>26 Sur la notion de vide</b>	<b>79</b>
<b>27 "Création" et "annihilation" de particules</b>	<b>81</b>
<b>28 Particules virtuelles ou réelles</b>	<b>84</b>
<b>29 Evanescence et traçabilité</b>	<b>87</b>
<b>30 Mémoire et indétermination</b>	<b>87</b>
<b>31 L'information</b>	<b>88</b>
<b>32 Sur les champs</b>	<b>89</b>
<b>33 Rôle gravitationnel d'une particule individuelle</b>	<b>91</b>
<b>34 Rôle de l'antimatière en gravitation</b>	<b>92</b>
<b>35 Qu'est-ce qu'un choc élastique ?</b>	<b>93</b>

## **1 Avertissement**

Ce document fait partie d'un ensemble centré sur la gravitation, comportant plusieurs volets, dont certains, à première vue, ne sont pas directement liés à la gravitation, mais qui seront supposés connus par la suite :

01) **Gravitation relativiste : introduction**

- Relativité restreinte :

02) **Les vitesses en Relativité restreinte**

- Physique quantique :

- 03) Physique quantique : généralités
- 04) Physique quantique : l'aventure collective
- Gravitation :
- 05) Gravitation et critère de Schild
- 06) Gravitation relativiste : principes fondamentaux
- 07) L'hypothèse du champ d'entraînement
- 08) Métriques et géodésiques
- 09) Tenseur de Ricci
- 10) Potentiel gravitationnel
- 11) Ni ou Schwarzschild ?
- 12) Gravitation et vide quantique
- 13) Etude du système solaire en métrique de Ni
- 14) Etude des systèmes binaires en métrique de Ni
- 15) Trous noirs et trous gris
- 16) Ondes gravitationnelles
- 17) Gravitation et cosmologie

## 2 Qu'est-ce que la physique quantique ?

Prenons l'exemple de l'optique. Pendant des générations, les physiciens ont étudié la propagation des rayons lumineux, et ont énoncé les lois de la réflexion de la lumière, de la réfraction, de la diffraction, etc. Puis un jour un certain Albert Einstein leur a dit que la lumière était constituée d'unités inséquables, qu'on a appelées plus tard les photons. Les physiciens ont alors imaginé, tout naturellement, que ces "unités de lumière" devaient suivre, elles aussi, les lois qu'ils avaient découvertes. Puisqu'ils savaient prédire le comportement d'un faisceau lumineux comprenant des millions de photons, alors il devaient être capables de prévoir, avec les mêmes règles, le comportement d'un photon isolé. Mais lorsque les progrès techniques leur ont permis d'étudier le comportement individuel de

ces photons, ils ont constaté avec stupéfaction qu'il était régi par des lois totalement inconnues.

Dans le paragraphe "Quelques expériences classiques", nous présentons des situations aussi simples et concrètes que possible qui montrent clairement que nos habitudes de pensée basées sur l'observation de foules innombrables de photons (ou d'autres particules) sont prises en défaut lorsque nous focalisons notre attention sur un photon (ou une particule) unique.

La physique classique étudie le comportement de faisceaux lumineux composés d'un grand nombre de photons, ou de corps matériels composés d'un grand nombre de particules. La physique quantique commence lorsqu'on cherche à comprendre le comportement individuel de ces photons ou de ces particules.

Connaissant le comportement individuel des particules, il est en principe possible d'en déduire le comportement d'une foule innombrable, grâce aux lois de la statistique. Mais l'inverse n'est pas vrai : la connaissance du comportement des foules innombrables ne donne que quelques indices sur celui des individus. Entre les deux, il n'y a pas seulement un facteur d'échelle : la différence est beaucoup plus profonde. Et personne n'avait imaginé que le fossé serait aussi grand... La physique quantique a ouvert aux physiciens la porte d'un monde totalement nouveau pour eux. Notre monde. Et les a obligés à revoir de fond en comble les notions de particule, d'onde, de champ.

### **3 Domaine de validité de la physique quantique**

Il est indispensable de rapprocher la gravitation relativiste de la physique quantique : la plupart des physiciens en sont bien conscients.

Dès lors qu'on fait intervenir la physique quantique, il devient indispensable de se familiariser avec ses étranges concepts, et d'essayer de comprendre comment elle dicte le comportement du vide, et donc celui des champs, entre autres celui du champ gravitationnel.

Notre but n'est pas du tout de rechercher à quantifier la gravitation, mais seulement de rappeler un certain nombre d'idées issues de la physique quantique, idées dont certaines n'ont jamais été admises par Einstein, et qui pourtant ont été largement confortées depuis un siècle par les recherches de nombreux physiciens.

La relativité générale est une théorie purement classique, qui ignore totalement la physique quantique. C'est aussi une théorie purement locale. De nos jours, certains physiciens estiment qu'une théorie purement locale ne peut pas être viable. Que faut-il en penser ? Contentons-nous de poser les problèmes, sans

les résoudre.

Vers le milieu du vingtième siècle, beaucoup de physiciens avaient pris l'habitude de considérer que les concepts de la physique quantique ne pouvaient s'appliquer qu'à l'échelle microscopique.

Aujourd'hui, plus personne ne doute qu'une fonction d'onde puisse être étendue dans l'espace, qu'un faisceau laser puisse rester cohérent sur de longues distances, que des particules très éloignées puissent être intriquées; lorsque nous recevons un photon provenant d'une galaxie située à plusieurs milliards d'années-lumière, nous savons qu'un contrat (une "poignée de main", comme on dit en microphysique transactionnelle - un phénomène typiquement quantique!), vient d'être conclu, à grande distance, entre deux atomes.

Mais n'oublions surtout pas la théorie quantique des champs, qui étudie les champs associés à l'électromagnétisme, à l'interaction nucléaire faible, à l'interaction nucléaire forte (électrodynamique quantique, chromodynamique quantique), avec des concepts encore très discutés mais des résultats d'une fertilité et d'une précision inégalées.

Peut-on penser que le champ gravitationnel soit fondamentalement différent des autres? C'est possible, si la gravité n'est pas une force. Dans ce cas, il n'y aura jamais de synthèse entre la théorie de la gravitation et les théories quantiques. Mais c'est loin d'être certain! Si on ne voit pas les parentés de ce champ avec les autres, c'est peut-être parce-qu'on ne veut pas les voir. On ne veut pas les voir parce-qu'on a pris la regrettable habitude de cloisonner la physique : d'un côté le monde microscopique, de l'autre le macroscopique; d'un côté, la physique quantique; de l'autre, la relativité générale...

## 4 La symétrie T

Commençons par parler de la symétrie  $T$ . C'est la symétrie par inversion du sens du temps.

Cette symétrie  $T$  est respectée par toutes les forces fondamentales, y compris par la gravitation de Newton : si nous remplaçons  $dt$  par  $-dt$  dans l'équation permettant de calculer l'orbite d'une planète dans la théorie de Newton, les paramètres de l'orbite ne changent pas; seul le sens de parcours est inversé. Autrement dit, si on nous montre le film passé à l'endroit et le film passé à l'envers, nous n'avons aucun moyen de savoir lequel est le bon.

On pourrait dire que la connaissance parfaite de la situation présente (position et vitesse des planètes par rapport au Soleil, par exemple) permet de calculer comment va évoluer la configuration du système dans l'avenir; mais on

peut aussi bien calculer les configurations passées, avec les mêmes équations. Dans notre vie de tous les jours, nous attribuons une importance majeure à la distinction entre le passé et le futur : les causes précèdent les conséquences ! Pourtant, les équations fondamentales de la physique se moquent de cette distinction.

Observons les équations des géodésiques que nous démontrerons dans la section consacrée à ce sujet, sous leur forme la plus générale :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) \frac{d}{ds} (g_{11} \frac{dt}{ds}) = \frac{1}{2} \left( \frac{dt}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{11}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{22}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{33}}{\partial t} ; \\ 2) \frac{d}{ds} (g_{22} \frac{dr}{ds}) = \frac{1}{2} \left( \frac{dt}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{11}}{\partial r} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{22}}{\partial r} + \frac{1}{2} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{33}}{\partial r} ; \\ 3) \frac{d}{ds} (g_{33} \frac{d\theta}{ds}) = \frac{1}{2} \left( \frac{dt}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{11}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{22}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 \frac{\partial g_{33}}{\partial \theta} . \end{array} \right.$$

Dans l'équation 1), tout changement de signe de  $dt$  change le signe des deux membres, et l'égalité se conserve.

Dans les équations 2) et 3), on voit que  $dt$  est au carré, donc son signe est indifférent.

Nous voyons donc qu'une théorie de la gravitation basée sur les géodésiques respecte la symétrie  $T$ .

En ce qui concerne le potentiel  $\Phi = -\frac{k}{r}$ , nous verrons (cf. document sur le potentiel) qu'en métrique de Ni il respecte (dans le vide) l'égalité :

$$\square \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{c^2 \partial t^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0.$$

Or cette équation est également compatible avec la symétrie  $T$ , puisque  $dt$ , ici encore, est au carré.

Mais l'étude mathématique de l'opérateur  $\square$  (le d'alembertien) montre qu'il possède deux sortes de solutions, qu'on appelle "potentiels retardés" et "potentiels avancés". Le potentiel retardé produit par une source donnée se propage de manière centrifuge, à la vitesse de la lumière, à partir de cette source (conformément à la fonction de Green retardée) ; le potentiel avancé se propage de manière centripète (fonction de Green avancée). Ils se déduisent l'un de l'autre par inversion du sens du temps. Aucun des deux ne respecte la symétrie  $T$ , mais leur demi-somme (fonction de Green symétrique) la respecte.

Cette idée a été appliquée par Fokker, Wheeler et Feynman à la théorie quantique des champs, généralisation de l'électrodynamique quantique, dont on connaît les brillants succès. Rappelons que la théorie de l'électromagnétisme

peut être expliquée intégralement par des échanges de photons virtuels entre particules chargées ; il n'est pas exclu que la gravitation puisse, elle aussi, être modélisée à partir d'une circulation d'information (portée ou non par des gravitons), obéissant à ces règles quantiques, mais personne ne le sait pour le moment.

Que sont les échanges de photons virtuels entre particules chargées ? Voici d'abord ce qu'ils ne sont pas. Imaginons deux particules chargées, chacune émettant, dans toutes les directions, un flux de photons porteurs d'énergie. Lorsque, par hasard, l'un de ces photons atteint l'autre particule, il est capté et son énergie est récupérée. Mais la grande majorité des photons manque la cible et leur énergie se perd dans l'espace.

Il est certain que ce scénario est faux : les deux particules perdraient constamment de l'énergie, dispersée dans l'espace à un rythme effréné. Ceci est contraire à toutes les observations ! En réalité, les photons qui se perdent dans l'espace n'existent pas. Ils sont virtuels, et ne sont pas élus pour devenir réels ! Ce privilège est réservé à ceux qui atteignent leur cible. Ceux-ci ont une trajectoire définie par : leur point de départ, leur point d'arrivée et le temps de parcours. Et quand je dis que ces photons "deviennent réels", ce n'est pas tout à fait vrai : c'est plutôt l'interaction dont ils ont été le vecteur qui devient réelle. On pourrait dire que ces photons virtuels n'ont jamais existé en tant que corpuscules ; ils jouent seulement un rôle de monnaie d'échange virtuelle entre un émetteur et un récepteur (à la manière du bitcoin...). Les deux événements : l'émission et la réception, sont en réalité un seul événement, puisque leur distance d'Univers est :  $\Delta s = 0$ . On ne peut pas les dissocier : il n'y a pas d'émission sans réception ; il y a seulement un échange. On doit résister à la tentation de considérer qu'il existe un événement émission et un événement réception, le premier étant la cause du second, le second l'effet du premier : ce sont les deux faces d'un événement unique appelé interaction.

L'idée de Fokker est hautement exotique pour qui est habitué à la mécanique classique. En effet, la fonction de Green retardée peut s'interpréter tout naturellement comme une propagation d'information du présent vers le futur : l'information provenant d'une particule se propage sur une sphère de rayon croissant, centrée au point où se trouve la particule maintenant ; la fonction de Green avancée peut aussi s'interpréter comme une propagation d'information du passé vers le présent : l'information venue de l'espace est portée par une sphère de rayon décroissant, centrée au point où se trouve la particule maintenant ; mais, au moment de l'émission (donc dans le passé) comment savait-elle où se trouverait sa cible (la particule) "maintenant" ? C'est de la prémonition !

Si on le désire, on peut se représenter aussi, par symétrie temporelle, la fonction de Green avancée comme une propagation d'information du présent vers le passé : l'information provenant d'une particule se propage sur une sphère de rayon croissant, à condition d'inverser le sens du temps. On parle alors d'onde antichrone. Mais cette présentation est aussi anti-intuitive que la précédente !

Ceci ressemble à de la science-fiction ; pourtant l'électrodynamique quantique et la théorie quantique des champs sont de vraies sciences, et d'une grande précision...

Les ondes antichrones peuvent choquer : nous sommes habitués à la notion de causalité, et pour nous les causes doivent précéder les effets. Mais dans le cas de l'émission/réception d'un message (de vitesse  $c$ ), on aurait tort de considérer l'émission comme la cause et la réception comme l'effet ; ce sont plutôt deux aspects d'un seul et même phénomène, l'avant et le revers d'une même pièce de monnaie. Dans notre repère subjectif, la réception est postérieure à l'émission, mais dans l'espace-temps relativiste, leur distance d'Univers est nulle :  $\Delta s = 0$ . Certains physiciens (dont Feynman lui-même) ont tout de même cherché à éliminer les ondes avancées (antichrones), en considérant qu'une onde qui est avancée pour l'émetteur est retardée pour le récepteur, et réciproquement. Mais cette gymnastique ne fait pas disparaître la symétrie fondamentale entre émission et réception, qui constituent deux aspects inséparables du phénomène appelé "interaction" (ou "transaction", pour employer le vocabulaire de la physique transactionnelle - ou encore : "poignée de main"). L'expression "onde antichrone" peut être considérée comme une absurdité si on l'envisage dans notre monde macroscopique réel ; d'un autre côté, elle a le mérite de "mettre le doigt où ça fait mal", en nous rappelant de manière criante que le monde des champs (électromagnétique ou autre) ne fonctionne pas comme le monde des structures matérielles auquel nous sommes habitués.

On peut éclairer la notion d'interaction grâce aux idées de Feynman utilisées en électrodynamique quantique et en théorie quantique des champs.

Nous ne présentons ici que les diagrammes élémentaires faisant intervenir des photons et des électrons, et, pour la symétrie, des positons (en Anglais : positrons - c'est la graphie que nous utiliserons). Le vertex (point d'intersection des trois lignes symbolisant les particules) équivaut à une interaction.

Le temps est représenté en ordonnées ; on lit les diagrammes de bas en haut ; un photon est représenté par une ligne ondulée ; un électron est représenté par une ligne droite en trait plein avec une flèche dirigée vers le haut (sens du temps croissant) ; si la flèche est en sens inverse (dirigée vers le bas, ou "antichrone"), c'est son antiparticule : un positron.

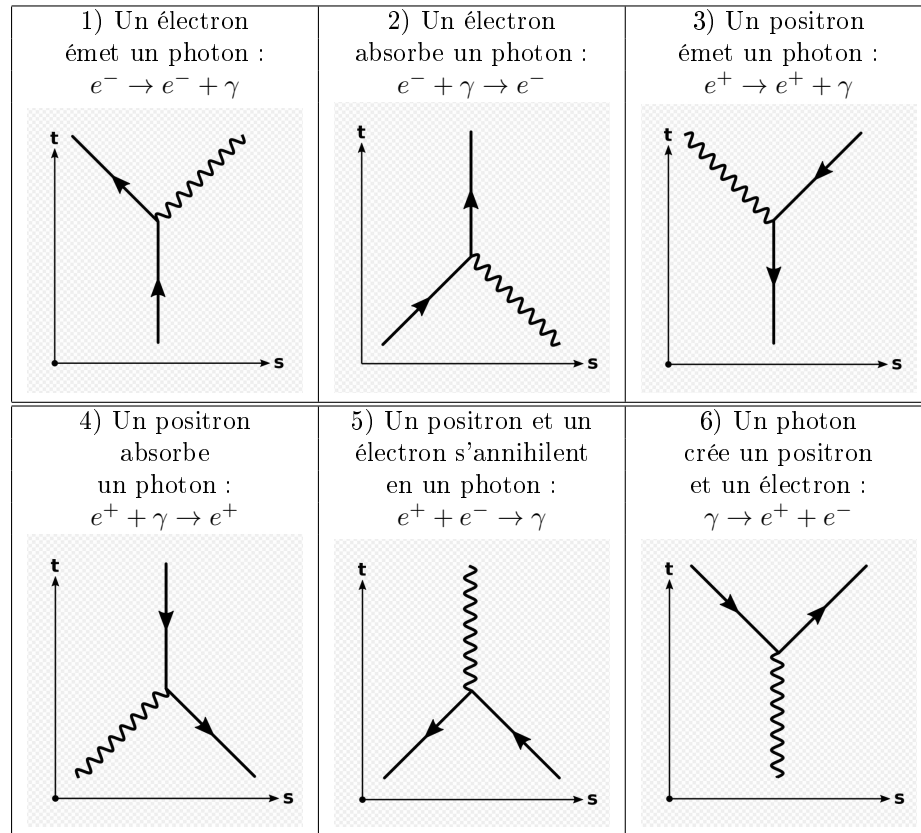
L'un des intérêts de ces six vertex est que les figures se déduisent toutes les unes des autres par rotation ou par changement de sens du temps. Cette symétrie est particulièrement remarquable.

Un diagramme de Feynman complet comporte en général plusieurs vertex. Il peut faire intervenir des particules virtuelles ou réelles. Dans ce second cas, l'énergie-impulsion est toujours conservée. Ce n'est pas le cas pour les particules



virtuelles, qui ne jouent qu'un rôle éphémère d'intermédiaires, et ne respectent pas nécessairement la loi de conservation de l'énergie-impulsion, ni le sens du temps.

Voici les six schémas de base :



En électromagnétisme relativiste, on voit apparaître un potentiel à d'alembertien nul, qui admet donc deux types de solutions : les potentiels retardés et les potentiels avancés. Dans leurs cours, les professeurs disent souvent : "Nous ne prendrons en compte que les potentiels retardés ; nous considérons que les potentiels avancés n'ont pas de signification physique." Ceci se conçoit : ces professeurs n'ont pas envie d'expliquer à leurs étudiants ce que signifie "potentiel avancé" ; il préfèrent cacher la poussière sous le tapis ! Mais en même temps ils sont mal à l'aise, car ils ont l'impression de tricher en ignorant arbitrairement la moitié des solutions de leurs équations. Tout le monde sait que le champ électromagnétique est un champ quantique, et en théorie quantique des champs, il est impossible d'ignorer les potentiels avancés : quelle que soit l'interprétation qu'on en donne, il est indispensable de les faire intervenir dans les calculs. N'ou-

blions pas que la théorie quantique des champs (la théorie la plus fertile et la plus précise dans le domaine de la physique) a pris comme modèle l'électrodynamique quantique ; l'électromagnétisme ne peut pas en être exclu : c'est le socle sur lequel elle est bâtie.

Plutôt que de dire que certains phénomènes physiques sont indifférents au sens du temps, et peuvent donc être l'objet d'une double lecture (dans le sens usuel du temps, ou dans le sens antichrone), on peut dire aussi que, dans une interaction entre deux particules, les rôles de ces particules sont symétriques. Si l'interaction est transmise par un vecteur (photon par exemple), alors il y a nécessairement un émetteur et un récepteur : l'un ne va pas sans l'autre. L'interaction est la fameuse "poignée de main" entre deux ondes, rendue populaire par la physique transactionnelle. Mais cette formulation diffère de la précédente sur la forme, pas sur le fond.

Ces réflexions sont destinées à rappeler que notre perception intuitive du temps est mise en difficulté par la physique, entre autres par la relativité et la physique quantique ; mais c'est surtout notre conception de la causalité qui est à revoir. Nous avons l'habitude de considérer que la cause précède toujours l'effet ; ceci est vrai dans le monde macroscopique où nous vivons. Mais tous les événements que nous observons résultent d'une multitude d'événements minuscules : les interactions élémentaires. Par exemple : un électron émet un photon qui est reçu par un autre électron. Comme nous venons de le dire, cette interaction (émission + réception) est un tout. Dans notre repère, elle est orientée dans le temps (l'émission est antérieure à la réception) ; pour le photon qui sert d'intermédiaire, les deux sont simultanées. En termes de causalité, nous sommes tentés de dire : l'émission est la cause, la réception est l'effet. Mais pour le photon, il n'y a ni cause ni effet. C'est lui qui a raison. Notre conception de la causalité, valable à notre échelle, est construite avec des briques qui l'ignorent.

Voici encore deux remarques concernant la symétrie  $T$ .

Première remarque : L'accélération séculaire des pulsars binaires soulève un problème : dans un système double, les deux étoiles dissipent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles, ce qui fait qu'elles se rapprochent l'une de l'autre, tout en tournant de plus en plus vite. Si nous changeons le sens du temps (ou si nous passons le film à l'envers), nous voyons les étoiles s'éloigner l'une de l'autre au lieu de se rapprocher ! On peut immédiatement différencier le film passé à l'envers du film passé à l'endroit ! Si la gravitation, comme les autres forces, respecte la symétrie  $T$ , alors il est nécessaire d'expliquer cette anomalie... Le fait de baser les interactions gravitationnelles sur la "fonction de Green symétrique" semble bien faire disparaître la structure spiralée du champ produit par un système binaire, ce qui peut sembler, à première vue, difficile à concilier avec ce que nous savons de ces ondes. Nous en reparlerons dans le document sur les ondes gravitationnelles.

Seconde remarque : il est clair que l'existence même des trous noirs, en relativité générale, prouve clairement (s'il en était besoin) que cette théorie ne respecte pas la symétrie  $T$ . Effectivement, le seul fait qu'un mobile puisse pénétrer dans un trou noir, mais ne puisse pas en sortir, en est une preuve évidente.

D'autre part, la vitesse de l'interaction véhiculée par la fonction de Green étant égale à  $c$ , il est clair aussi qu'une particule située à l'intérieur d'un trou noir ne pourra pas interagir gravitationnellement avec le monde extérieur, ce qui signifie qu'un trou noir sera gravitationnellement neutre. Ceci est en contradiction avec la conception actuelle des trous noirs. C'est encore un sujet qui sera développé plus tard.

Il est indispensable de préciser quels sont les phénomènes qui respectent la symétrie  $T$ , quels sont ceux qui ne la respectent pas, et pourquoi.

Mais on peut déjà dire qu'il est très important de bien distinguer d'une part ce que nous appellerons des "corrélations", d'autre part la "vraie causalité". Les corrélations peuvent être lues indifféremment dans le sens du temps ou dans le sens antichrone, tandis que la vraie causalité est "sensible au sens du temps".

## 5 La flèche du temps

Le fait que les équations décrivant les interactions fondamentales (électromagnétisme, interactions forte et faible, gravitation de Newton) soient indifférentes au sens du temps a conduit les physiciens à rechercher l'origine de l'irréversibilité des phénomènes usuels que nous observons tous les jours à l'échelle macroscopique. Une première explication fait intervenir le second principe de la thermodynamique, qu'on résume en disant que dans un système isolé l'entropie (ou le désordre) ne peut que croître. Mais cette explication ne nous suffit pas, car la thermodynamique ne fait intervenir que les lois fondamentales de la physique, traitées de manière probabiliste grâce à la loi des grands nombres. Comme ces lois fondamentales, ainsi que les probabilités, sont déjà présentes en physique quantique, on peut penser que l'orientation du temps existe aussi dans l'infiniment petit. Où se cache-t-il ?

Mais voyons d'abord où il n'est pas.

Imaginons par exemple un premier électron  $A$  tournant autour du noyau d'un premier atome, sur une orbite quantifiée, et un second électron  $B$  tournant autour d'un second noyau. Dans certaines circonstances, le premier électron va pouvoir descendre d'un niveau (passer sur une orbite plus basse, en perdant de l'énergie) ; tandis que le second électron va monter d'un niveau (passer sur une orbite plus haute, en gagnant de l'énergie). La quantité totale d'énergie est alors conservée. On dit qu'il y a eu transfert d'énergie du premier atome (ou du premier électron) vers le second, et la particule-vecteur, selon la théorie, est un

photon. On a l'habitude de considérer que le photon est une particule contenant de l'énergie : cette énergie, prélevée à un instant précis au premier électron, est transportée par le photon, qui l'apporte au second électron, et lui fait la livraison du paquet, comme le ferait le facteur. Mais cette description n'est qu'une façon de décrire l'échange, adaptée d'une part à la conception corpusculaire du photon, d'autre part à un repère particulier : celui de l'observateur. Mais, comme nous le verrons plus en détails dans la section sur le degré zéro de l'intrication, cette image ne tient plus lorsqu'on prend comme référence le repère du photon lui-même : dans ce repère, l'émission et la réception du photon sont simultanées ; le point de départ et le point d'arrivée sont confondus. Le photon ne "sait" pas distinguer son point de départ de son point d'arrivée ! Donc il ne "sait" même pas dans quel sens il s'est déplacé : de  $A$  vers  $B$ , ou de  $B$  vers  $A$  ? Dans son Univers, cette question ne veut rien dire ! Mais allons plus loin : le photon est une "personnification" de l'interaction ; et, dans le monde de l'interaction, il n'y a ni temps, ni orientation spatiale.

Lorsqu'une particule  $A$  interagit avec une particule  $B$  en transférant un quantum quelconque par l'intermédiaire d'une particule-vecteur virtuelle  $C$ , il est impossible de retracer le parcours de cette particule-vecteur. En réalité, il y a eu seulement une mise en relation des particules  $A$  et  $B$ , qui ont procédé directement à un échange, en respectant leurs lois de conservation. Vous pouvez demander à votre facteur où et quand il a récupéré le courrier, où et quand il l'a distribué, par quel chemin il est passé. Mais si vous posez ces questions à une particule-vecteur (une particule qu'on qualifie de "virtuelle"), elle ne comprendra pas, car elle ne sait pas ce qu'est le temps. Elle n'a pas de mémoire. Elle établit le contact entre deux particules et disparaît, c'est tout.

La perte d'énergie de l'électron  $A$  et le gain d'énergie de  $B$  sont bien sûr corrélés, mais est-ce parce que  $A$  a perdu de l'énergie que  $B$  en a gagné ? Est-ce parce que  $B$  en a gagné que  $A$  en a perdu ? Il est très important de comprendre que cette question n'a pas de sens. Une corrélation ne doit pas être interprétée en termes de causalité. C'est un tout.

Dans la théorie mathématique des probabilités, il n'y a pas non plus de causes ni d'effets, ni de temps. Si on observe deux phénomènes  $P_1$  et  $P_2$  corrélés, toute observation portant sur  $P_1$  va donner des indications (probabilistes, calculables) sur  $P_2$  (inférence  $P_1 \rightarrow P_2$ ), et inversement (inférence  $P_2 \rightarrow P_1$ ). On emploie quelquefois abusivement les mots cause et effet (par exemple, si  $P_1$  précède  $P_2$  dans le temps, on aura tendance à qualifier  $P_1$  de cause et  $P_2$  d'effet ; l'inférence  $P_2 \rightarrow P_1$  sera alors qualifiée de "calcul de la probabilité des causes" ; mais en réalité le temps n'intervient absolument pas dans le calcul ; le théorème de Bayes permet d'échanger les rôles de  $P_1$  et  $P_2$ ), mais il est bien clair que la théorie des probabilités ne traite que de corrélations logiques ; la physique quantique, telle que nous la connaissons aujourd'hui, a pour rôle essentiel de mettre en évidence des corrélations physiques entre les phénomènes observés, et non des relations de cause à effet.

Pour bien comprendre les expériences très concrètes qui seront exposées dans les sections "La dualité onde/corpuscule" et "Quelques expériences classiques", une règle d'or est de toujours se rappeler que ce que nous percevons comme une "transmission d'un message à la vitesse de la lumière" est en réalité une simple "corrélation", qui peut être lue aussi bien dans le sens usuel du temps que dans le sens inverse (antichrone). Il faut résister à la tentation d'y voir une forme de causalité : l'habitude est mauvaise conseillère !

En astronomie, la mesure de la position et de la vitesse d'une planète tournant autour du Soleil, à l'instant  $t_1$ , donne accès à sa position et à sa vitesse à l'instant  $t_2 = t_1 + \epsilon$  (du moins en l'absence de perturbation extérieure). Mais le calcul peut se faire aussi bien dans l'autre sens, avec les mêmes équations. On travaille sur des corrélations, et non sur une relation de cause à effet.

Une corrélation, par nature, n'est pas orientée dans le temps, tandis que la causalité est orientée : la cause précède l'effet. En physique quantique, il n'y aurait pas de causes, pas d'effets, pas de temps ?

Pas si vite ! La physique quantique, au contraire, montre comment se fait le passage des phénomènes les plus élémentaires, régis par des corrélations non temporelles, à des phénomènes plus complexes, dans lesquels la matière s'organise dans l'espace et le temps (orienté).

Comment les interactions élémentaires peuvent-elles créer le temps orienté ? En physique quantique, chaque "mesure" appliquée à une particule (onde), chaque interaction, est modélisée par un opérateur. L'ensemble de ces opérateurs possède une structure algébrique. Ces opérateurs commutent-ils ? Autrement dit, si on fait agir un opérateur  $A$  puis un opérateur  $B$  sur une onde, obtient-on le même résultat (statistiquement) qu'en faisant agir d'abord  $B$ , et ensuite  $A$  ? Il se trouve que la commutativité n'est pas toujours respectée, ce qui fait que l'ordre des mesures (ou des interactions) n'est pas indifférent : l'orientation du temps est profondément ancrée en physique quantique.

Une autre façon, moins mathématique et plus intuitive, de voir l'importance de la flèche du temps en physique quantique, se trouve dans le paragraphe sur la décohérence. On peut considérer les états superposés comme des degrés de liberté. Les degrés de liberté d'une particule (ou d'une onde) sont filtrés à chaque interaction avec son environnement : c'est la décohérence, qui est d'ailleurs étroitement liée à l'effondrement de la fonction d'onde ("collapse"). Elle est irréversible : le filtre fonctionne dans un sens seulement. Il s'ensuit que la vie d'une particule est une chaîne d'interactions orientée. Par leurs interactions complexes, les communautés de particules fabriquent leur temps partagé, orienté.

Nous en reparlerons dans les sections sur les superpositions d'états et sur la décohérence.

Nous humains, nous avons l'intuition de la flèche du temps, parce-que notre cerveau possède une mémoire qui enregistre le passé, pas l'avenir ! Et nous avons du mal à comprendre que les phénomènes que nous observons dans notre vie de tous les jours, et qui sont tous soumis à la flèche du temps (un temps irréversible), puissent résulter de l'accumulation de phénomènes élémentaires qui, eux, ne reconnaissent que les corrélations non temporelles.

Le fait que le temps soit profondément enraciné dans la physique quantique ne choque pas notre intuition ; même si certaines théories, comme la relativité générale, ne l'admettent pas. Ce qui nous surprend le plus, c'est qu'à un certain niveau (celui des ondes et des champs) notre conception du temps ne semble plus pertinente.

On dit souvent que c'est le troisième principe de la thermodynamique qui crée le temps orienté : statistiquement, dans un système fermé, l'entropie (ou le désordre) ne peut que croître. Ne pourrait-on pas formaliser le lien entre l'entropie et la décohérence ? Ou, si on préfère, avec le "collapse" (réduction de la fonction d'onde) ?

## 6 La non-localité

On sait que l'interprétation de la physique quantique a suscité d'après et mémorables discussions, en particulier entre Bohr et Einstein. Rappelons ici le "paradoxe EPR" formulé dans un article signé par Einstein, Podolsky et Rosen.

Les auteurs imaginent deux électrons  $A$  et  $B$  émis simultanément dans deux directions opposées, avec la même énergie (donc la même vitesse), à partir d'un même point fixe  $O$ . Pour la physique quantique, ces deux électrons sont intriqués : à chaque instant, ils sont à la même distance de  $O$ , et se déplacent à la même vitesse. Ils sont décrits par une fonction d'onde unique. Le principe d'incertitude de Heisenberg ajoute que la distance par rapport à  $O$  et la vitesse ne peuvent pas être connues simultanément avec précision.

Pour mettre en difficulté cet ensemble de postulats, les trois auteurs imaginent la procédure suivante :

- un premier observateur mesure la position du premier électron ( $A$ ), ce qui lui permet d'en déduire celle du second ( $B$ ) ;
- un second observateur mesure la vitesse du second électron ( $B$ ), et en déduit celle du premier ( $A$ ).

Ensuite les deux observateurs vont mettre en commun leurs résultats. Ceci,

semble-t-il, doit permettre de connaître à la fois la position et la vitesse des deux électrons  $A$  et  $B$ , à un même instant, ce qui contredit au moins le principe d'incertitude.

Que peut répondre la physique quantique à un tel argument ? S'il y avait un seul électron, on dirait : le fait de mesurer sa position le perturbe, et modifie sa vitesse, et, réciproquement, le fait de mesurer sa vitesse modifie sa position. Mais avec deux électrons ? C'est pareil : le fait de mesurer la position du premier modifie non seulement sa vitesse, mais aussi celle du second ; et le fait de mesurer la vitesse du second modifie non seulement sa position, mais aussi celle du premier. Et ceci pour une raison très simple : les deux électrons sont décrits par la même fonction d'onde ; ils sont intriqués.

Mais alors l'information portée par la fonction d'onde se trouve-t-elle en  $A$  ou en  $B$  ? Il faut bien admettre qu'elle est partout à la fois (ou nulle part) : elle est non-locale. Les deux particules, quelle que soit leur distance spatiale, sont inséparables.

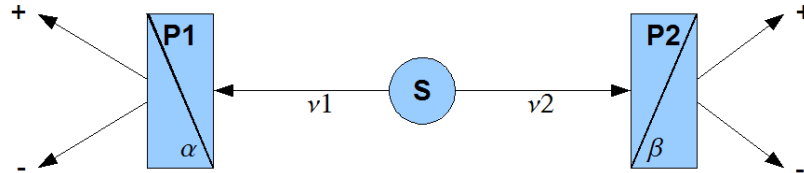
Pour Einstein, la physique devait être déterministe et locale, alors que pour Bohr elle était manifestement probabiliste et non-locale. Les expériences de pensée d'Einstein avaient pour but de résoudre les problèmes en imaginant des variables cachées locales, capables de se transmettre de proche en proche et d'influer sur le résultat des expériences. Ces variables cachées existent-elles ? Non, c'est impossible, comme le prouvent les expériences d'Alain Aspect, utilisant les inégalités de Bell. Nous savons aujourd'hui que la physique est nécessairement non-locale. Quant aux variables cachées, elles peuvent très bien exister, mais alors elles sont certainement non-locales. D'autre part, le fossé entre théories déterministes et théories probabilistes n'est pas admis par tous les physiciens. C'est un tout autre problème.

## 7 L'intrication

Le phénomène d'intrication est aujourd'hui bien connu en physique quantique, et a été très étudié.

Pour introduire la célèbre expérience d'Alain Aspect (dont nous reparlerons dans le document : "Physique quantique : l'aventure collective"), nous allons imaginer un processus permettant de produire deux photons  $\nu_1$  et  $\nu_2$  ayant des vitesses opposées, et la même polarisation (on dit qu'ils sont intriqués en polarisation). Ces deux photons passent dans deux détecteurs de polarité  $P_1$  et  $P_2$  ; les polarisations mesurées se présentent sous la forme  $+$  (le photon sort par le canal supérieur) ou  $-$  (il sort par le canal inférieur). Rien ne permet de prévoir quelle va être la polarité de  $\nu_1$  (qui semble totalement aléatoire), ni celle de  $\nu_2$  (tout aussi aléatoire), mais les deux sont corrélées. Il y a, à priori, quatre

combinaisons de mesures possibles : ++, +-, -+, --. Si les deux polariseurs sont orientés parallèlement, les seules combinaisons possibles seront ++ et --.



On peut proposer plusieurs interprétations de cette expérience.

La première est l'interprétation de la physique classique : les polarisations des deux photons étaient parfaitement déterminées dès le début, à l'instant de leur séparation, mais l'expérimentateur n'en était pas informé. A partir du moment où il prend connaissance de celle du premier photon, il n'a pas à réfléchir beaucoup pour en déduire celle de l'autre... Et si ce n'est pas la polarité elle-même qui était fixée dès le départ, c'était "quelque chose" qui, par un déterminisme classique, devait finalement conduire à un résultat univoque, prévisible. Cette interprétation suppose l'existence de "variables cachées".

La seconde interprétation est celle de la physique quantique : les polarisations des deux photons sont indéterminées (ou déterminées seulement de manière probabiliste) au moment de leur séparation. C'est seulement au moment où l'expérimentateur mesure la polarisation du photon  $\nu_1$  que celle du photon  $\nu_2$  se fixe sur la même valeur, comme si l'information avait été transmise instantanément : au départ, le photon  $\nu_2$  "ne sait pas" quelle est sa propre polarisation ; il l'apprend instantanément quand l'observateur mesure celle de  $\nu_1$ , quelle que soit la distance. Les deux photons sont intriqués : ils forment un tout inséparable.

La contradiction entre ces deux approches constitue le paradoxe EPR. On sait qu'Einstein était un partisan de la première interprétation. Et on sait aussi, aujourd'hui, qu'il avait tort...

A première vue, on pourrait s'imaginer que ces deux interprétations se rejoignent ; mais c'est faux, totalement faux ! D'un point de vue statistique, les deux interprétations ne sont pas équivalentes !

Pour le prouver, l'idée est d'utiliser des polariseurs d'orientations différentes (l'un faisant un angle  $\alpha$  avec la direction du rayon lumineux, l'autre un angle  $\beta$ ). On compile alors de nombreuses observations, en faisant varier les angles  $\alpha$  et  $\beta$ , et on les traite statistiquement. Puis on compare les résultats avec les fameuses inégalités de Bell, établies en prenant pour base la théorie locale à variables cachées. Si les inégalités Bell sont violées, cette théorie est mise en



échec.

Nous reparlerons de la polarisation, du spin et des inégalités de Bell un peu plus loin.

Les remarquables travaux des équipes de John Clauser, d'Alain Aspect et d'Anton Zeilinger ne laissent aucun doute : la théorie des "variables cachées" est tout simplement fautive ! Ce résultat, aujourd'hui indiscuté, donne raison à la physique quantique, sans échappatoire possible. Entre l'événement initial (la production des deux photons  $\nu_1$  et  $\nu_2$ ) et l'événement final (celui qui permet au physicien de mesurer la polarisation de  $\nu_1$ ), les deux photons n'ont pas eu de vie séparée ; ils sont décrits par une fonction d'onde unique ; si on désire les considérer comme deux entités possédant chacune une information, alors on est obligé d'admettre que cette information est partagée, quelle que soit la distance.

La découverte de la notion d'intrication se situe au cœur de la grande révolution scientifique du vingtième siècle : la physique quantique.

L'"erreur d'Einstein" (allusion à un dossier de la revue "La Recherche", n°418, avril 2008) est de ne pas avoir compris, ni admis, certains aspects essentiels de cette révolution. C'est d'ailleurs sa seule erreur fondamentale et indiscutable ; quand il parlait de "la plus grande erreur de sa vie", il voulait parler de l'introduction de la constante cosmologique, ce qui est peut-être une erreur aussi, mais sur ce point les avis sont partagés (voir le document "Gravitation et cosmologie").

Actuellement, beaucoup de physiciens qui travaillent sur la physique quantique estiment que des phénomènes tels que l'intrication se manifestent à toutes les échelles (aussi bien macroscopique que microscopique), et qu'une théorie ignorant cette problématique ne peut pas être viable.

D'autre part, on dit quelquefois que l'intrication est incompatible avec la relativité restreinte. Nous pensons au contraire qu'elles se combinent parfaitement. Examinons donc la notion d'intrication sous l'éclairage de la relativité restreinte.

## 8 L'"immédiateté"

Grâce à la relativité restreinte, nous savons que la simultanéité absolue n'existe pas : si deux événements  $A_1(c.t_1, x_1, y_1, z_1)$  et  $A_2(c.t_2, x_2, y_2, z_2)$  sont simultanés dans un repère, ils ne le seront pas dans un autre repère en mouvement par rapport au premier ; selon la vitesse de ce second repère,  $A_1$  pourra être antérieur ou postérieur à  $A_2$ . La relation  $\Delta t = |t_2 - t_1| = 0$  ne se conserve pas par changement de repère. Si  $\Delta t = |t_2 - t_1|$  est petit dans un repère, il pourra être grand dans un autre.

De même, si on pose  $\Delta l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$  (distance spatiale entre les deux événements), alors la relation  $\Delta l = 0$  n'a pas de signification absolue : si elle est vraie dans un repère, elle ne le sera pas dans d'autres repères.

Mais il y a une relation entre  $A_1$  et  $A_2$  qui se conserve par changement de repère; c'est la relation :

$$\Delta s = \sqrt{|c^2 \cdot (t_2 - t_1)^2 - [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]} = 0 ;$$

$$\Delta s = \sqrt{|(c \cdot \Delta t)^2 - (\Delta l)^2|} = 0.$$

Nous appellerons cette relation l'"immédiateté".

En particulier, deux événements seront liés par un lien d'immédiateté s'ils se trouvent sur le trajet d'un même rayon lumineux.

C'est la distance d'Univers  $\Delta s = \sqrt{|(c \cdot \Delta t)^2 - (\Delta l)^2|}$  qui est cohérente avec la relativité restreinte, et non, comme on aurait pu l'imaginer, la "distance pythagoricienne", qui est la généralisation à l'espace-temps à quatre dimensions du théorème de Pythagore que nous utilisons dans l'espace à deux ou trois dimensions :  $\Delta S = \sqrt{(c \cdot \Delta t)^2 + (\Delta l)^2}$ .

A ces deux types de distances sont associées des topologies différentes de l'espace-temps.

Par exemple, si on veut faire tendre  $A_2$  vers  $A_1$  au sens de la distance pythagoricienne, il faut faire tendre  $\Delta S$  vers 0; pour cela, il faut que  $(c \cdot \Delta t)^2 + (\Delta l)^2$  tende vers 0; on doit donc faire tendre à la fois  $\Delta t$  et  $\Delta l$  vers 0. A la limite, on pourra dire que  $A_2$  est confondu avec  $A_1$  si  $c \cdot \Delta t = \Delta l = 0$ . Les deux événements auront alors les mêmes coordonnées temporelles et spatiales.

Mais si on utilise la distance d'Univers, c'est  $\Delta s$  qui doit tendre vers 0; pour cela, il faut que  $(c \cdot \Delta t)^2 - (\Delta l)^2$  tende vers 0; à la limite, on pourra dire que  $A_2$  est confondu avec  $A_1$  si  $(c \cdot \Delta t)^2 - (\Delta l)^2 = 0$ , autrement dit si  $c \cdot |\Delta t| = \Delta l$ .

Pour éviter tout malentendu, dans ce second cas, nous ne dirons pas que les événements sont confondus, mais qu'ils sont liés par un lien d'immédiateté.

Dans le cadre de la relativité restreinte, la première démarche, qui consiste à faire tendre à la fois  $c \cdot \Delta t$  et  $\Delta l$  vers 0, est peu convaincante, car on manipule deux quantités qui dépendent de l'observateur.

La seconde démarche est plus satisfaisante, puisqu'on fait tendre  $\Delta s$  vers 0,  $\Delta s$  étant une quantité bien définie, indépendante de l'observateur.

Dans le premier cas, nous dirons qu'il s'agit de la topologie pythagoricienne, associée à la distance pythagoricienne ; dans le second cas, nous parlerons de topologie minkowskienne, associée à la distance d'Univers de Minkowski.

On peut remarquer que, lorsque  $\Delta S$  tend vers 0, alors  $\Delta s$  tend aussi vers 0 ; mais la réciproque n'est pas vraie.

La confusion entre ces deux topologies est entretenue par le fait que, par commodité, on a pris l'habitude de représenter schématiquement l'espace-temps de Minkowski dans un repère cartésien, avec la distance spatiale en abscisse et le temps en ordonnée, ce qui illustre en réalité la topologie pythagoricienne. Cette déformation de la topologie minkowskienne s'est incrustée dans les esprits !

Attention : la distance minkowskienne a certains aspects contre-intuitifs. Par exemple, si on a  $\|A_1M\| = \|MA_2\| = 0$ , on ne peut pas en déduire que  $\|A_1A_2\| = 0$  ! On le verra dans l'étude de l'intrication de degré un. D'autre part, il ne faut pas croire qu'on a toujours  $\|\overline{AB}\| + \|\overline{BC}\| \geq \|\overline{AC}\|$  !

La grande question est de savoir quelle est la bonne topologie de l'espace-temps, au sens physique. Nous pensons qu'il existe un bon critère pour les départager : c'est l'intrication, qui est incompréhensible dans le cadre d'une topologie pythagoricienne, mais qui s'éclaire lorsqu'on utilise une topologie minkowskienne. L'intrication serait-elle une conséquence de la relativité restreinte ?

On pourrait nommer "lignes d'immédiateté" les lignes de l'espace-temps correspondant (potentiellement) à des trajets de lumière, c'est-à-dire vérifiant en tout point la condition :  $\Delta s = 0$ . Chaque point de l'espace-temps (disons un point  $P$ , événement au sens mathématique, ou au sens de Minkowski) est relié à une infinité d'autres points par ces lignes d'immédiateté. Ces points se situent sur ce qu'on a l'habitude d'appeler les "cônes de lumière" de sommet  $P$ , mais cette expression est trompeuse, car elle s'appuie sur une représentation de l'espace-temps comportant deux dimensions d'espace et une dimension de temps, cette dernière étant assimilée à une dimension d'espace. Pour être plus exact, on faudrait dire que les points reliés à  $P$  par l'immédiateté sont répartis sur deux familles de sphères de centre  $P$ , les unes en expansion à la vitesse  $c$  (famille divergente), les autres en contraction à la même vitesse  $c$  (famille convergente). On pourrait donc distinguer deux modes d'immédiateté : un point  $P'$  est relié à  $P$  par "immédiateté divergente" si la lumière peut aller de  $P$  à  $P'$  (à la vitesse  $c$ , bien entendu) ; par "immédiateté convergente" si elle peut faire le parcours inverse, de  $P'$  à  $P$ . Attention : rappelons-nous que  $P$  et  $P'$  ne sont pas des points au sens purement spatial, mais des événements spatio-temporels.

Nous appellerons ces sphères les "sphères d'immédiateté" (divergente ou convergente).

Leur importance dans l'étude des champs est fondamentale. Nous les verrons

apparaître dans l'étude du potentiel gravitationnel, et chaque fois que nos équations feront intervenir le d'Alembertien, donc les fonctions de Green retardées, avancées ou symétriques.

Ces sphères sont l'une des clés de la compréhension du fonctionnement de l'espace-temps relativiste.

## 9 Le degré zéro de l'intrication

L'intrication (phénomène dont la réalité est indiscutable) soulève la question de la causalité. En mécanique classique, une cause (au point  $A$ , à l'instant  $t_1$ ) ne peut pas produire un effet instantané à distance (au point  $B$ , au même instant  $t_1$ ) ; il doit exister un intermédiaire (un "messenger") se déplaçant de proche en proche du point  $A$  (à l'instant  $t_1$ ) au point  $B$  (à l'instant  $t_2$ ). L'expression "de proche en proche", en mécanique classique, signifie que le "messenger" suit un parcours spatial continu de  $A$  ( $t_1$ ) jusqu'à  $B$  ( $t_2$ ), décomposable en éléments spatiaux et temporels  $\Delta l$ ,  $\Delta t$  infinitésimaux, à l'image d'une tache d'encre se propageant à la surface d'un buvard. Ce phénomène est typiquement lié à la topologie de l'espace-temps. Dans la logique (incontournable) de la relativité restreinte, il est naturel remplacer les éléments  $\Delta l$  et  $\Delta t$  par la "distance d'Univers" infinitésimale  $\Delta s$ , la seule qui possède une véritable signification physique absolue, indépendante de l'observateur ; et donc d'utiliser la topologie minkowskienne.

De ceci il résulte que deux événements situés sur la trajectoire d'un même photon (ou graviton ?), et vérifiant donc :  $\Delta s = 0$ , sont causalement inséparables, c'est-à-dire qu'ils sont, par nature, nécessairement intriqués (au moins potentiellement). Dans nos repères qui séparent arbitrairement l'espace du temps, ils semblent distants, mais dans la réalité plus profonde qui s'appuie sur la distance d'univers  $\Delta s$ , ils sont en contact direct, sans intermédiaire. On pourrait dire que deux événements vérifiant l'égalité  $\Delta s = 0$  ne sont, en réalité, qu'un seul et même événement.

Entre  $(A, t_1)$  et  $(B, t_2)$  (vérifiant :  $\Delta s = 0$ ), l'échange d'information se fait comme par un "trou de ver" (une notion imaginée par Einstein, dont il avait confié l'étude à ses étudiants) ; mais les longueurs spatiale  $\Delta l$  et temporelle  $\Delta t$  de ce trou de ver nous semblent non nulles, alors que sa véritable longueur  $\Delta s$  est nulle.

Dans la théorie de Newton, la gravité semble se transmettre à une vitesse infinie. Ceci était inconcevable pour Einstein ; c'était déjà un sérieux problème pour Newton lui-même, qui avait constaté cette anomalie sans pouvoir la résoudre. Ce comportement de la gravité peut sembler très étrange ; disons même : extraordinaire.

Il est permis d'imaginer l'existence d'un message gravitationnel transmis à la vitesse de la lumière (par exemple par des gravitons, si on désire donner un nom à ces messagers); ce message transportant une information de type "entraînement" (qu'on peut assimiler à une énergie-impulsion virtuelle), c'est-à-dire des informations sur sa position et son énergie-impulsion (autrement dit sur sa masse et son vecteur vitesse). Pour nous qui séparons arbitrairement (ou subjectivement) l'espace du temps, il est commode de dire que l'information gravitationnelle allant de  $(A, t_1)$  à  $(B, t_2)$  est indéterminée pendant tout son parcours; mais quand l'information arrive en  $B$ , du point de vue d'un observateur distant immobile, elle prend immédiatement une valeur qui est en accord avec la position, la vitesse et l'énergie-impulsion actuelles de  $A$ .

Nous venons d'employer le mot "immédiatement", et non "simultanément": nous savons bien que la simultanéité absolue n'existe pas en relativité. Mais que signifie "immédiatement"? Ce mot signifie: "sans intermédiaire". Est-il justifié dans la situation qui nous intéresse? Pour répondre, examinons le point de vue du photon qui a transporté l'information.

Nous allons essayer de nous mettre dans la peau d'un photon; ou plutôt dans celle d'un observateur de vitesse  $v$ , que nous allons faire tendre vers  $c$ .

Considérons un quadrivecteur de genre lumière:  $\tilde{AB}(x, c.t)$ , avec  $x = c.t$ . Nous avons choisi de ne faire intervenir qu'une coordonnée spatiale. On peut éventuellement imaginer que  $A$  est l'origine du repère, et que  $(x, c.t)$  sont les coordonnées de  $B$ . On a, bien sûr:  $|\tilde{AB}| = \sqrt{|c^2.t^2 - x^2|} = 0$ . Comment apparaît ce quadrivecteur pour l'observateur de vitesse  $v$  (parallèle à  $x$ )?

Notons  $c.T$  et  $X$  les coordonnées de ce quadrivecteur évaluées par l'observateur en question. D'après la transformation de Lorentz, on a:

$$\begin{pmatrix} c.T \\ X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch\frac{w}{c} & -sh\frac{w}{c} \\ -sh\frac{w}{c} & ch\frac{w}{c} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c.t \\ x \end{pmatrix} = ch\frac{w}{c} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{v}{c} \\ -\frac{v}{c} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c.t \\ x \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} c.T \\ X \end{pmatrix} = ch\frac{w}{c} \cdot \begin{pmatrix} c.t - \frac{v.x}{c} \\ -v.t + x \end{pmatrix}.$$

Comme  $t = \frac{x}{c}$ , on obtient:

$$\begin{pmatrix} c.T \\ X \end{pmatrix} = ch\frac{w}{c} \cdot \begin{pmatrix} x - \frac{v}{c}.x \\ -\frac{v}{c}.x + x \end{pmatrix} = ch\frac{w}{c} \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot \begin{pmatrix} x \\ x \end{pmatrix} = \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \begin{pmatrix} x \\ x \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} c.T \\ X \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \cdot \begin{pmatrix} x \\ x \end{pmatrix};$$

$$c.T = X = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \cdot x.$$

Bien entendu, on a toujours  $c^2.T^2 - X^2 = 0$ . Mais ce qui est intéressant c'est que lorsque  $v$  tend vers  $c$  le coefficient  $\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}}$  tend vers 0, donc  $c.T$  et  $X$  tendent tous les deux vers 0. Par passage à la limite, on pourrait exprimer la conclusion ainsi :

Etant donné un quadrivecteur de genre lumière quelconque, alors il existe un photon (de vitesse convenablement orientée) dans le repère duquel ce quadrivecteur apparaît identiquement nul (aussi bien sa partie spatiale que sa partie temporelle).

S'il "apparaît" identiquement nul dans un repère, ne peut-on pas en déduire qu'il "est" identiquement nul, au sens physique du terme ?

Le trajet d'un photon quelconque, de sa naissance (émission) à sa mort (réception), dans le repère propre de ce photon lui-même, se réduit à un point d'espace-temps : spatialement, le point d'arrivée et le point de départ son confondus ; temporellement, la durée du parcours est nulle. Dans ces conditions, parler d'un "sens de parcours" ne veut rien dire. C'est nous qui attribuons au photon un sens de parcours, mais pour le photon lui-même, ce "sens" est un "non-sens" !

Le "degré zéro de l'intrication" est donc une forme d'intrication qui aurait pu être déduite de la relativité restreinte. Nous voyons donc que, mathématiquement, la relativité restreinte et la physique quantique se rejoignent sur ce point. Entre deux vrais événements physiques ("catastrophes"), il peut exister une communication directe, qu'il ne faut pas interpréter comme un message se déplaçant à vitesse infinie, ou en termes de simultanéité, mais en termes d'imédiateté (terme défini plus haut : il signifie seulement que  $\Delta s = 0$ ). Ces deux événements n'en font qu'un.

Reprenons cette problématique avec la notion de fonction d'onde. Pour une onde lumineuse, l'équation de la fonction d'onde est de la forme :

$$\psi(r, t) = \psi_0 \cdot e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (p \cdot r - E \cdot t)}.$$

On note  $r$  la distance parcourue, pendant le temps  $t$ , depuis l'émission ;  $p$  est l'impulsion (dans ce cas :  $p = \frac{h \cdot \nu}{c}$ ) et  $E$  l'énergie ( $E = h \cdot \nu$ ) ; on a donc :

$$p \cdot r - E \cdot t = \frac{h \cdot \nu}{c} \cdot r - h \cdot \nu \cdot t = \frac{h \cdot \nu}{c} \cdot (r - c \cdot t).$$

Si on se représente l'onde lumineuse sur le modèle d'une corde vibrante, et si on imagine un photon comme une particule "pilotee" par cette onde (conformément à la théorie, aujourd'hui abandonnée, de l'onde pilote), on doit penser que le photon est calé (par exemple) sur une crête de l'onde, de sorte que, pour lui, la phase est constante - et pas seulement la phase : dans son repère, toutes les caractéristiques de l'onde (par exemple sa polarisation) sont localement constantes.

Sur le parcours du photon, on a toujours  $r = c.t$ , donc  $e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (p \cdot r - E \cdot t)} = e^0 = 1$ , donc :

$$\psi(r, t) = \psi_0.$$

Oublions ce concept de photon-particule piloté par l'onde, mais retenons qu'entre l'événement "émission" et l'événement "réception", la fonction d'onde du faisceau ne change pas, dans un repère qui suit son mouvement ; ce qui est bien normal, puisque, sur ce parcours, on a toujours  $\Delta s = 0$ . Ceci nous ramène à cette idée : sur le parcours de l'onde, l'émission et la réception sont tout simplement confondues.

Si nous reprenons l'expérience d'Alain Aspect, vue sous cet angle, alors nous devons distinguer trois vrais événements (catastrophes) : l'émission des deux photons  $\nu_1$  et  $\nu_2$  intriqués, la réception de  $\nu_1$  (avec mesure de sa polarisation), la réception de  $\nu_2$  (avec mesure de sa polarisation). De l'événement "émission" à l'événement "réception de  $\nu_1$ ", la "distance d'Univers" est nulle :  $\Delta s_1 = 0$ . De l'événement "émission" à l'événement "réception de  $\nu_2$ ", la "distance d'Univers" est nulle aussi :  $\Delta s_2 = 0$ . Le premier événement est intriqué avec le deuxième au degré zéro, le premier avec le troisième au degré zéro. On ne peut pas s'étonner que le premier et le troisième soient intriqués aussi, mais c'est une intrication au degré un (avec un intermédiaire).

Dans cet exemple, il y a une petite difficulté, qui vient du fait que nous raisonnons sur trois événements et non deux. Il y a donc deux quadrivecteurs de type lumière, et non un seul. Nous allons détailler cette situation.

## 10 Le degré un de l'intrication

Considérons deux points (ou événements) quelconques de l'espace-temps de Minkowski. Notons-les  $A_1(x_1, y_1, z_1, c.t_1)$  et  $A_2(x_2, y_2, z_2, c.t_2)$ . Notons  $A_1 \tilde{A}_2$  l'intervalle spatio-temporel (quadrivectoriel) :

$$A_1 \tilde{A}_2(x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1, c.(t_2 - t_1)).$$

Si ce quadrivecteur est de genre lumière, on a :  $\|A_1 \tilde{A}_2\|^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2.(t_2 - t_1)^2 = 0$  ; les deux événements sont alors potentiellement intriqués au degré zéro (de manière immédiate, c'est-à-dire sans intermédiaire).

S'il n'est pas de genre lumière (donc s'il est de genre espace ou de genre temps), les deux événements ne sont pas intriqués au degré zéro ; mais il est toujours possible de trouver un événement  $M$  (qu'on appellera "événement intermédiaire") tel que :  $A_1 \tilde{A}_2 = A_1 \tilde{M} + M \tilde{A}_2$ , avec  $\|A_1 \tilde{M}\| = 0$  et  $\|M \tilde{A}_2\| = 0$ . Ceci peut s'exprimer ainsi :

### Théorème

Etant donnés deux événements  $A_1$  et  $A_2$  de l'espace-temps de Minkowski, tels que  $||A_1 A_2|| \neq 0$ , il existe un événement  $M$  tel que  $||A_1 M|| = 0$  et  $||M A_2|| = 0$ .

L'événement  $M$  sera alors en relation d'immédiateté avec  $A_1$  et avec  $A_2$ , bien que  $A_1$  et  $A_2$  ne soient pas en relation d'immédiateté entre eux. La relation d'immédiateté n'est pas transitive.

Ceci vient du fait que tout quadrivecteur de genre espace ou de genre temps peut être décomposé en une somme de deux quadrivecteurs de genre lumière. Autrement dit, un quadrivecteur de module non nul peut être décomposé en somme de deux quadrivecteurs de modules nuls.

L'événement  $A_1$  sera alors potentiellement intriqué avec l'événement  $M$ , et  $M$  avec  $A_2$ , au degré zéro; on dira que  $A_1$  est potentiellement intriqué avec  $A_2$ , au degré un (c'est-à-dire avec un intermédiaire).

Dans l'expérience d'Alain Aspect, l'émission des deux photons intriqués correspond à l'événement  $M$ , la réception de  $\nu_1$  (avec mesure de sa polarisation) correspond à  $A_1$ , et celle de  $\nu_2$  à  $A_2$ . Dans ce cas, c'est l'émission qui joue le rôle d'intermédiaire ( $M$ ).

Dans l'espace-temps de Minkowski, deux événements quelconques sont toujours potentiellement intriqués, soit au degré zéro (sans intermédiaire), soit au degré un (avec un intermédiaire).

Attention au mot "événement" : il est employé ici pour désigner les événements au sens de Minkowski, c'est-à-dire les "points" géométriques de l'espace-temps; ce sont des abstractions mathématiques, sans signification physique. Nous avons précédemment utilisé le mot "catastrophes" pour désigner les "vrais événements" au sens physique du terme (avec réduction de la fonction d'onde); nous parlons de "non événements" quand il n'y a pas de réduction de fonction d'onde. Les "événements" de Minkowski seraient donc, plutôt, des non-événements au sens physique (des points spatio-temporels où rien de physique n'est observé)!

On dit quelquefois que l'intrication est difficile à concilier avec la relativité restreinte, car on a tendance à l'interpréter comme une transmission instantanée d'un message à distance (à vitesse infinie), ce qui est interdit par la relativité restreinte. On se pose alors la question : comment la relativité restreinte peut-elle tolérer l'intrication? Le raisonnement qui précède conduit, au contraire, à envisager l'intrication comme une règle et non comme une exception, du moins l'intrication entre non-événements. Et ce raisonnement s'appuie, précisément, sur la relativité restreinte! L'intrication serait alors une propriété fondamentale de l'espace-temps (en l'absence de catastrophe). Lorsque nous étudierons



le potentiel gravitationnel, qui est du domaine du non-événement, nous verrons qu'il se comporte (au moins dans un espace-temps de Minkowski, et probablement aussi dans l'espace-temps courbé par la gravité) comme si chacun de ses points était connecté à tous les autres, aussi bien dans l'espace (quelle que soit la distance, dans toutes les directions) que dans le temps (vers le futur ou le passé). Ceci est sans doute une propriété commune à tous les champs. Les catastrophes, quant à elles, ne semblent pas respecter cette règle de l'intrication généralisée. Ce qui nous amène à inverser la question : pourquoi la relativité restreinte tolère-t-elle la non-intrication ? La principale raison est que les "événements" dont il est question dans notre théorème sont des événements au sens de Minkowski, c'est-à-dire des abstractions mathématiques. Pour qu'il y ait une véritable intrication, on doit avoir de véritables événements physiques, donc des catastrophes. Si nous considérons deux vrais événements physiques  $A_1$  et  $A_2$ , alors nous pouvons démontrer (nous allons le faire ci-dessous) qu'il existe  $M$  tel que  $\|A_1 M\| = \|\tilde{M} A_2\| = 0$ , mais encore faut-il que  $M$  corresponde à un véritable événement physique pour qu'il soit possible d'en déduire que  $A_1$  et  $A_2$  sont intriqués.

Il nous reste à démontrer le théorème ci-dessus. Commençons par raisonner avec une seule dimension spatiale.

Considérons deux "événements" (au sens de Minkowski) :  $A_1(c.t_1, x_1)$  et  $A_2(c.t_2, x_2)$ , non potentiellement intriqués au degré zéro. On a :

$$\|A_1 \tilde{A}_2\|^2 = c^2.(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 \neq 0.$$

Nous recherchons un "événement"  $M(c.t, x)$  tel que  $\|A_1 \tilde{M}\| = \|\tilde{M} A_2\| = 0$ . On doit avoir :

$$\|A_1 \tilde{M}\|^2 = c^2.(t - t_1)^2 - (x - x_1)^2 = 0, \quad \text{donc : } x - x_1 = \pm c.(t - t_1) ;$$

$$\|\tilde{M} A_2\|^2 = c^2.(t_2 - t)^2 - (x_2 - x)^2 = 0, \quad \text{donc : } x_2 - x = \pm c.(t_2 - t).$$

On obtient quatre équations qu'on peut représenter, dans un repère cartésien rapporté aux coordonnées  $(t, x)$ , par quatre droites de pentes  $\pm c$ . Les droites de même pente étant parallèles, nous obtiendrons des points d'intersection en choisissant des droites de pentes différentes ( $+c$  et  $-c$  ou  $-c$  et  $+c$ ). Nous allons donc résoudre deux systèmes d'équations linéaires du premier degré.

Premier système :

$$\begin{cases} x - x_1 = c.(t - t_1) ; \\ x_2 - x = -c.(t_2 - t) ; \\ x = c.t + x_1 - c.t_1 ; \\ -x = c.t - x_2 - c.t_2. \end{cases}$$

En additionnant membre à membre, on obtient :

$$0 = 2.c.t - (x_2 - x_1) - c.(t_2 + t_1), \quad \text{donc : } c.t = \frac{x_2 - x_1}{2} + c.\frac{t_2 + t_1}{2}.$$

Donc, par substitution :

$$x = c.t + x_1 - c.t_1 = \frac{x_2 - x_1}{2} + c.\frac{t_2 + t_1}{2} + x_1 - c.t_1 = \frac{x_2 + x_1}{2} + c.\frac{t_2 - t_1}{2}.$$

Le second système s'obtient en inversant les rôles de  $A_1$  et  $A_2$ .

En définitive, notre problème a deux solutions :

$$M_1 \left( \frac{x_2 - x_1}{2} + c.\frac{t_2 + t_1}{2}, \frac{x_2 + x_1}{2} + c.\frac{t_2 - t_1}{2} \right) ;$$

$$M_2 \left( \frac{x_1 + x_2}{2} + c.\frac{t_1 - t_2}{2}, \frac{x_1 - x_2}{2} + c.\frac{t_1 + t_2}{2} \right).$$

Rétablissons maintenant les trois dimensions spatiales. Le quadrivecteur  $A_1\tilde{A}_2$  n'étant pas de type lumière, il est soit de genre espace, soit de genre temps.

S'il est de genre espace, il existe un référentiel dans lequel les deux premières coordonnées spatiales et la coordonnée temporelle s'annulent. On se place dans ce référentiel grâce à la transformation de Lorentz. On a alors :

$$A_1\tilde{A}_2(0, 0, 0, Z) \quad (\text{avec } Z \neq 0).$$

On choisit  $A_1$  comme origine ; ses coordonnées sont donc :  $(0, 0, 0, 0)$  et celle de  $A_2$  sont :  $(0, 0, 0, Z)$ .

On peut choisir l'orientation de l'axe  $Oz$  de manière à avoir :  $Z > 0$ . Dans ce cas, on aura :  $Z = \|A_1\tilde{A}_2\|$ .

Nous cherchons  $M(x, y, z, c.t)$  tel que :

$$\begin{cases} \|A_1\tilde{M}\|^2 = (c.t - 0)^2 - (x - 0)^2 - (y - 0)^2 - (z - 0)^2 = 0 ; \\ \|\tilde{M}A_2\|^2 = (0 - c.t)^2 - (0 - x)^2 - (0 - y)^2 - (Z - z)^2 = 0 ; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \|A_1\tilde{M}\|^2 = c^2.t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0 ; \\ \|\tilde{M}A_2\|^2 = c^2.t^2 - x^2 - y^2 - (Z - z)^2 = 0. \end{cases}$$

On peut remarquer que ces équations sont celles de deux cônes de lumière, l'un de sommet  $A_1$ , l'autre de sommet  $A_2$ , dans l'espace-temps de Minkowski.

En combinant ces deux équations (par soustraction), on obtient :

$$(Z - z)^2 - z^2 = 0 ;$$

$$(Z - z + z).(Z - z - z) = 0 ;$$

$$Z.(Z - 2.z) = 0.$$

Comme  $Z \neq 0$ , ceci équivaut à  $z = \frac{Z}{2}$  ; on a donc  $Z - z = z = \frac{Z}{2} = \frac{\|A_1 \tilde{A}_2\|}{2}$ .  
En reportant dans l'une ou l'autre des équations ci-dessus, on obtient :

$$c^2.t^2 - x^2 - y^2 - \frac{Z^2}{4} = 0.$$

Pour  $Z$  fixé ( $Z = \|A_1 \tilde{A}_2\|$ ), il existe une infinité d'événements vérifiant :  $z = \frac{Z}{2}$  et  $c^2.t^2 - x^2 - y^2 - \frac{Z^2}{4} = 0$ . On peut se représenter l'ensemble des solutions comme un cône dans un espace-temps à trois dimensions  $(x, y, c.t)$ , ou, si on préfère, comme la section d'un cône de lumière de l'espace-temps de Minkowski à quatre dimensions  $(x, y, z, c.t)$  par le plan  $z = \frac{Z}{2}$ , ou encore comme l'intersection des deux cônes de lumière de sommets  $A_1$  et  $A_2$  (l'un de ces deux cônes de lumière étant inversé, c'est-à-dire antichrone).

Récapitulons les coordonnées :

$$A_1(0, 0, 0, 0) ;$$

$$A_2(0, 0, 0, Z) ;$$

$$M(c.t, x, y, \frac{Z}{2}) ;$$

$$A_1 \tilde{M}(c.t, x, y, \frac{Z}{2}) ;$$

$$\tilde{M}A_2(-c.t, -x, -y, \frac{Z}{2}).$$

Remarquons que l'un de ces quadrivecteurs est "antichrone" : si  $c.t > 0$ , alors  $-c.t < 0$ , et réciproquement.

Reprenons le calcul avec un quadrivecteur  $A_1 \tilde{A}_2$  de genre temps. Il existe alors un référentiel dans lequel les trois coordonnées spatiales s'annulent, seule la coordonnée temporelle étant non nulle. On se place dans ce référentiel grâce à la transformation de Lorentz. On a alors :

$$A_1 \tilde{A}_2(c.T, 0, 0, 0), \text{ avec : } T \neq 0.$$

On choisit  $A_1$  comme origine ; ses coordonnées sont donc :  $(0, 0, 0, 0)$  et celle de  $A_2$  sont :  $(c.T, 0, 0, 0)$ .

Nous cherchons  $M(x, y, z, c.t)$  tel que :

$$\begin{cases} \|A_1\tilde{M}\|^2 = (c.t - 0)^2 - (x - 0)^2 - (y - 0)^2 - (z - 0)^2 = 0 ; \\ \|M\tilde{A}_2\|^2 = (c.T - c.t)^2 - (0 - x)^2 - (0 - y)^2 - (0 - z)^2 = 0 ; \\ \\ \begin{cases} \|A_1\tilde{M}\|^2 = c^2.t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0 ; \\ \|M\tilde{A}_2\|^2 = c^2.(T - t)^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0. \end{cases} \end{cases}$$

On peut remarquer, comme précédemment, que ces équations sont celles de deux cônes de lumière, l'un de sommet  $A_1$ , l'autre de sommet  $A_2$ , dans l'espace-temps de Minkowski.

En combinant ces deux équations (par soustraction), on obtient :

$$\begin{aligned} c^2.(T - t)^2 &= c^2.t^2 ; \\ (T - t)^2 - t^2 &= 0 ; \\ (T - t + t).(T - t - t) &= 0 ; \\ T.(T - 2.t) &= 0. \end{aligned}$$

Comme  $T \neq 0$ , ceci équivaut à  $t = \frac{T}{2}$  ; on a donc  $T - t = t = \frac{T}{2}$ . En reportant dans l'une ou l'autre des équations ci-dessus, on obtient :

$$\left(\frac{c.T}{2}\right)^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0.$$

Pour  $T$  fixé ( $c.|T| = \|A_1\tilde{A}_2\|$ ), il existe une infinité d'événements vérifiant :  $t = \frac{T}{2}$  et  $\left(\frac{c.T}{2}\right)^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0$ . On peut se représenter l'ensemble des solutions comme une sphère dans un espace à trois dimensions  $(x, y, z)$ , ou, si on préfère, comme la section d'un cône de lumière de l'espace-temps de Minkowski à quatre dimensions  $(x, y, z, c.t)$  par le plan  $t = \frac{T}{2}$ .

Comment interpréter cette conclusion ? Imaginons un voyageur de Langevin désirant voyager dans le temps. Peut-il aller d'un point ("événement")  $A_1(x_1, y_1, z_1, c.t_1)$  à un autre  $A_2(x_2, y_2, z_2, c.t_2)$ , dans l'espace-temps de Minkowski ?

Si le quadrivecteur  $A_1\tilde{A}_2(c.(t_2 - t_1), x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$  est de genre temps, autrement dit :  $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 < c^2.(t_2 - t_1)^2$ , alors il pourra, en principe, faire le voyage à une vitesse inférieure à celle de la lumière.

Si le quadrivecteur  $A_1\tilde{A}_2$  est de genre lumière, c'est-à-dire :  $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 = c^2.(t_2 - t_1)^2$ , alors il pourra, en principe, faire le voyage à la vitesse de la lumière, mais dans un sens seulement. Effectivement, si nous

posons  $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ , l'égalité ci-dessus s'écrit :  $d = \pm c.(t_2 - t_1)$ . Si le signe est +, il pourra aller de  $A_1$  à  $A_2$  en un temps fini positif :  $t_2 - t_1 > 0$ . Si le signe est -, il pourra aller de  $A_1$  à  $A_2$  en un temps fini négatif :  $t_2 - t_1 < 0$  (voyage dans le passé, ou "antichrone"), ou, si on préfère, de  $A_2$  à  $A_1$  en un temps fini positif :  $t_1 - t_2 > 0$ . Attention : le temps dont il s'agit ici est le temps évalué par un observateur extérieur. Pour le voyageur, le temps propre est :  $\Delta s = 0$ . Son horloge ne tourne pas, il ne vieillit pas pendant le voyage.

Si le quadrivecteur  $A_1 \tilde{A}_2(c.(t_2 - t_1), x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$  est de genre espace, autrement dit :  $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 > c^2.(t_2 - t_1)^2$ , alors le voyageur ne pourra pas faire le voyage à une vitesse inférieure à celle de la lumière, ni même à la vitesse de la lumière, à moins de passer par un point (événement)  $M$  tel que  $\|A_1 \tilde{M}\| = \|\tilde{M} A_2\| = 0$ . Nous avons vu que de tels points existent toujours. Son parcours pourra être décomposé en deux étapes, parcourues à la vitesse de la lumière; mais l'une des deux sera nécessairement parcourue de manière antichrone.

Que va en déduire notre voyageur? Si  $\|A_1 \tilde{A}_2\| < 0$  (quadrivecteur de genre temps), le voyage ne pose pas de problème de principe, seulement, peut-être, des difficultés techniques.

Si  $\|A_1 \tilde{A}_2\| = 0$  (quadrivecteur de genre lumière), le voyage va être impossible, parce-qu'il faudrait se déplacer à la vitesse de la lumière, ce qui, pour un mobile de masse au repos non nulle, nécessiterait une énergie infinie.

Si  $\|A_1 \tilde{A}_2\| > 0$  (quadrivecteur de genre espace), le voyage pourra être décomposé en deux étapes  $A_1 \tilde{M}$  et  $\tilde{M} A_2$  de genre lumière, la première étant antichrone; pour notre voyageur, ce voyage en deux étapes cumule les impossibilités : d'abord la vitesse de la lumière est inatteignable, ensuite le mot "antichrone" n'a aucune signification dans notre monde (il faudrait être arrivé avant d'être parti!).

Mais pour un voyageur imaginaire (disons un photon) se déplaçant à la vitesse de la lumière, cette discussion basée sur la notion de temps serait totalement dépourvue de sens : le mot "temps" n'a aucune signification dans son monde, où le temps propre  $\Delta s$  est toujours nul, et où les horloges ne tournent pas. D'ailleurs on pourrait dire que le photon, en tant que corpuscule, n'existe pas; mais le concept d'"information se déplaçant à la vitesse de la lumière" est extrêmement instructif, car il éclaire la nature profonde de l'espace-temps, en poussant la relativité restreinte à sa limite; il nous oblige à réfléchir sur la notion d'"immédiateté", qui n'a rien à voir avec la simultanéité.

## 11 Intrication de degré quelconque

Imaginons un rayon lumineux traversant par exemple un cube de verre. En raison de l'indice de réfraction du verre, la vitesse du rayon lumineux pendant cette traversée semblera inférieure à  $c$ . En réalité, à l'intérieur du bloc de verre, entre les atomes rencontrés successivement, ce rayon lumineux a pour vitesse  $c$ , mais son parcours est une ligne brisée, comme s'il voyageait dans une forêt de miroirs. Il est clair que, sur le parcours d'un photon parcourant une telle ligne brisée, on a toujours  $\Delta s = 0$ ; donc ce qui a été dit sur l'immédiateté s'applique toujours, même si la vitesse apparente est inférieure à  $c$ .

Considérons maintenant une particule de masse non nulle, de vitesse inférieure à  $c$ ; par exemple un électron. A priori, nous ne sommes pas autorisés à lui appliquer les conclusions précédentes sans précaution.

Cependant, nous savons que les interactions entre électrons sont de nature électromagnétique, donc qu'elles sont transmises par des "photons" (ondes électromagnétiques) de vitesse égale à  $c$ . On peut penser que chaque onde électronique communique également avec elle-même par des échanges de photons. Il est probable (mais pas certain) qu'entre deux interactions l'onde associée à un électron soit totalement intriquée avec elle-même, et forme un tout dont chaque point est relié à tous les autres de manière immédiate. Rappelons-nous que dans un conducteur (un fil électrique par exemple) parcouru par un courant électrique, les électrons se déplacent généralement à une vitesse relativement faible; ce qui n'empêche pas que le courant lui-même (l'interaction qui met les électrons en mouvement) se déplace à la vitesse  $c$ .

On peut également invoquer une hypothèse qui sera développée plus tard : celle que toute particule de masse au repos non nulle puisse être assimilée à un assemblage de particules ayant chacune une masse au repos nulle et une vitesse égale à  $c$ .

Sur ce sujet, on pourra se reporter aux paragraphes "Masse au repos et masse maupertuisienne" (dans le document sur les vitesses en relativité restreinte) et "Sur la notion de masse en relativité restreinte" (dans le document sur le champ d'entraînement).

Cette hypothèse peut être formulée d'une autre manière, que nous retrouverons lorsque nous parlerons des fonctions d'onde de Schrödinger : toute fonction d'onde d'une particule quelconque (un électron par exemple) doit pouvoir être décomposée en une somme de fonctions d'ondes élémentaires, c'est-à-dire associées à des "particules" de masse nulle et de vitesse égale à  $c$ .

De ceci il résulte cette conjecture : une particule "réelle" (ne parlons pas des particules virtuelles...) reste intriquée avec elle-même entre deux interactions successives.

Ce qu'on pourrait formuler, de préférence, ainsi : lorsqu'une même particule subit deux interactions successives, alors ces deux interactions sont intriquées entre elles (liées par un lien semblable à l'immédiateté).

Remarquons bien que nous parlons d'intrication d'interactions plutôt que d'intrication de particules : ce n'est pas une erreur !

Ceci sous-entend que ces deux interactions successives sont liées par une "corrélation" non temporelle (c'est-à-dire qu'aucune des deux n'est la cause de l'autre : elles sont liées comme les deux faces d'une même pièce de monnaie). De plus, le comportement de la particule entre deux interactions est probablement toujours une superposition intemporelle d'états (voir plus loin).

On aura bien noté que nous sommes ici dans le domaine des hypothèses ; mais il s'agit d'hypothèses assez raisonnables, qui seront peut-être bientôt vérifiables, si l'étude fine des ondes de de Broglie et des fonctions d'onde de Schrödinger progresse comme on peut l'espérer.

Reprenons l'expérience d'Alain Aspect, et remplaçons les photons  $\nu_1$  et  $\nu_2$  par deux électrons  $e_1$  et  $e_2$ . Ces deux électrons sont intriqués entre eux à l'émission, chacun reste intriqué avec lui-même au cours de son parcours, ils sont donc encore intriqués entre eux en atteignant les polariseurs (s'ils n'ont pas subi d'interaction entre-temps). Ceci laisse penser que l'expérience doit marcher aussi bien avec des électrons qu'avec des photons. De même pour l'expérience des fentes de Young, appliquée à des électrons (voir plus loin).

## 12 Théories locales et globales

La relativité générale est une théorie locale de la gravitation : toutes les quantités mesurables se transmettent "de proche en proche" (au sens classique) à vitesse finie, inférieure ou égale à la vitesse de la lumière. Le mot "local" est pris ici dans son sens usuel, basé sur une supposée topologie pythagoricienne de l'espace-temps. Les corrélations à distance par intrication sont exclues. En ce sens, c'est une théorie purement classique. Les lois de conservation (énergie, impulsion, moment cinétique...) n'ont qu'une signification locale ; on ne peut pas les étendre à un niveau global à cause de la relativité de l'espace et du temps.

Une théorie globale est une théorie dans laquelle les lois de conservation concernent, globalement, des systèmes étendus dans l'espace. Dans un contexte relativiste (contexte établi par la relativité restreinte) ceci n'est possible que si on admet l'intrication comme élément incontournable de la théorie. La gravitation de Newton était, d'une certaine manière, une théorie globale, puisqu'elle admettait l'interaction instantanée entre les corps. Newton avait bien perçu

qu'une vitesse finie de la gravité risquait de ruiner sa théorie, en sapant les lois de conservation sur lesquelles elle était construite.

Certains physiciens ont proposé un principe, baptisé principe holographique, selon lequel toute l'information contenue dans un volume quelconque, limité par une surface, serait présente sous forme codée sur cette surface. L'origine de cette réflexion provient de l'étude des trous noirs de Schwarzschild : lorsqu'un corps est englouti par un tel trou noir, il y a, selon la théorie, une perte d'information. Selon le principe holographique, cette information ne serait pas perdue, puisque toujours présente (donc récupérable) à la surface du trou noir (son horizon). Ceci résout aussi le problème de la transmission de l'information de l'intérieur du trou noir vers l'extérieur : comment un corps gravitant autour d'un trou noir peut-il ressentir l'influence de la matière contenue dans celui-ci, si aucune information, quelle que soit sa vitesse, ne peut en sortir ? Le principe holographique répond que l'information n'a pas besoin de sortir du trou noir, puisqu'elle est entièrement codée sur son horizon, ou sur toute autre surface contenant le trou noir.

La théorie de la gravitation d'Eric Verlinde se base sur le principe holographique. Comme nous l'avons vu dans la section sur les ondes gravitationnelles en métrique de Ni, s'il n'est pas très difficile de modifier la théorie de Newton pour la rendre relativiste, il est au contraire très difficile d'y intégrer une transmission de l'information à vitesse finie, à moins de faire appel à des notions issues de la physique quantique, comme l'intrication. Rappelons que, selon la théorie de Newton, toute surface fermée est traversée à chaque instant par un flux vectoriel proportionnel à la masse totale située dans le volume emprisonné par cette surface. Le principe holographique fait de même (en remplaçant éventuellement la masse par l'énergie-impulsion). L'information gravitationnelle n'a pas besoin d'être transmise : elle est non-locale (ou, si on préfère, multi-locale). Elle est disponible partout, à tout moment. Le principe holographique résout à la fois les problèmes soulevés par les trous noirs de Schwarzschild, et ceux qui résulteraient d'une transmission de la gravité à vitesse finie.

Le principe holographique peut être considéré comme une tentative pour intégrer les idées de la physique quantique (intrication, non-localité) dans les théories classiques (locales) comme la relativité générale, tout en essayant de préserver la notion de trou noir de Schwarzschild, qui concentre les critiques de la physique quantique. Mais il reste cantonné dans le domaine de la spéculation.

L'événement *GW170817* a été détecté à la fois dans le domaine gravitationnel et dans le domaine électromagnétique, avec un décalage temporel négligeable, compte-tenu de la distance (plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière au moins). Ceci est compatible avec une transmission de l'information gravitationnelle à la vitesse de la lumière (avec une marge d'erreur très faible), mais sûrement pas avec une transmission instantanée. Comme nous l'avons vu, une vitesse finie du message gravitationnel (vitesse égale à  $c$ ) n'est pas en contradic-



tion avec la notion d'intrication, bien au contraire : c'est précisément le degré zéro de l'intrication.

Une autre idée très à la mode, destinée à rapprocher la relativité générale de la physique quantique, est connue sous le nom "ER=EPR". Cette formule résume l'hypothèse selon laquelle les trous de vers postulés par Einstein et Rosen ne seraient rien d'autre que l'intrication de la physique quantique. Bien entendu, les trous de vers n'ont jamais été observés, mais Einstein s'est intéressé à la géométrie possible d'un espace-temps courbe (comme le faisait Pointcarré à la même époque), et il a confié l'étude des trous de vers (ces tunnels reliant directement des points de l'espace-temps apparemment éloignés les uns des autres) à ses étudiants. Avec le recul, on se rend compte que ces trous de vers, s'ils existaient, pourraient injecter un peu de non-localité dans la relativité générale, qui est fondamentalement une théorie purement locale. Mais pour le moment les trous de vers sont du domaine de l'hypothèse et de la théorie pure, tandis que l'intrication est un phénomène parfaitement réel et de mieux en mieux étudié.

Les physiciens cherchent actuellement à généraliser les principes de la physique quantique à l'ensemble de la physique, aussi bien macroscopique que microscopique; en même temps, ils essaient de trouver des compromis pour préserver la relativité générale; car ils ont bien compris que, s'il devait y avoir un jour une confrontation entre relativité générale et physique quantique, c'est la première qui devrait céder la place.

Comme nous l'avons déjà dit, certains théoriciens habitués à la physique quantique estiment qu'une théorie locale ne peut pas être viable.

C'est pour cette raison que j'ai choisi d'explorer ici certaines idées allant dans le sens d'une théorie globale de la gravitation. L'"information gravitationnelle intriquée" est une avancée dans ce sens. Cette idée, sans contredire l'existence des ondes gravitationnelles, conduit à les réinterpréter.

On estime souvent que la relativité générale est correcte à l'échelle macroscopique, mais qu'à l'échelle microscopique elle devra nécessairement être modifiée pour assurer sa compatibilité avec la physique quantique. Mais il se pourrait que l'incompatibilité soit plus fondamentale, et se manifeste également au niveau macroscopique.

## 13 La fonction canonique de communication immédiate

Lorsqu'un message est transmis par un "photon" (ou plutôt une onde électromagnétique) à la vitesse de la lumière, on est amené à utiliser une fonction

du type suivant :

$$f(\vec{r}, t) = f(\vec{0}, 0).e^{i.(\vec{k}.\vec{r}-\omega.t)},$$

où  $\vec{r}$  est la distance spatiale entre le point d'émission et le point de réception,  $t$  l'intervalle temporel,  $\nu$  la fréquence,  $\vec{k}$  le vecteur d'onde (de module  $k = \frac{2.\pi}{\lambda} = \frac{2.\pi}{c.T} = \frac{2.\pi.\nu}{c}$ , sa direction étant celle de la propagation),  $T$  la période ( $T = \frac{1}{\nu}$ ),  $\omega$  la pulsation ( $\omega = \frac{2.\pi}{T} = 2.\pi.\nu$ ).

Cette équation décrit une onde plane élémentaire progressive monochromatique, solution élémentaire de l'équation  $\square f = 0$ . La solution générale s'obtient en additionnant des solutions élémentaires.

En projection sur la direction de propagation, la formule devient :

$$f(r, t) = f(0, 0).e^{i.(k.r-\omega.t)} = f(0, 0).e^{i.(\frac{2.\pi}{\lambda}.r-\frac{2.\pi}{T}.t)} ;$$

$$f(r, t) = f(0, 0).e^{2.\pi.i.(\frac{r}{\lambda}-\frac{t}{T})}.$$

Cette onde est susceptible de transmettre (virtuellement) une énergie  $E = h.\nu = \frac{h}{T}$  et une impulsion  $p = \frac{h.\nu}{c} = \frac{h}{c.T} = \frac{h}{\lambda}$  ; on a donc :  $\frac{1}{\lambda} = \frac{p}{h}$  et  $\frac{1}{T} = \nu = \frac{E}{h}$ . L'équation précédente peut donc s'écrire :

$$f(r, t) = f(0, 0).e^{2.\pi.i.(\frac{p.r}{h}-\frac{E.t}{h})} = f(0, 0).e^{\frac{2.\pi}{h}.i.(p.r-E.t)},$$

ou, en posant  $\hbar = \frac{h}{2.\pi}$  :

$$f(r, t) = f(0, 0).e^{\frac{i}{\hbar}.(p.r-E.t)}.$$

Dans le cas d'une onde sphérique (de centre  $O$ ), la formule devient :

$$f(\vec{r}, t) = \frac{1}{r}.f(\vec{0}, 0).e^{\frac{i}{\hbar}.(p.\vec{r}-E.t)}.$$

Dans ce cas, l'onde a une symétrie sphérique; on désigne par  $\vec{r}$  la distance radiale (distance par rapport au point d'émission).

Cette formule est censée exprimer de quelle façon une information de type énergie-impulsion (virtuelle) peut être transmise à distance, de manière non pas instantanée, mais "immédiate" (donc à la vitesse de la lumière), par le champ électromagnétique, ou tout autre champ ayant la même vitesse de propagation : *c*. Nous en reparlerons au sujet de la fonction d'onde de Schrödinger.

Remarquons que, s'il y a au point  $O$  deux particules, l'une d'impulsion  $\vec{p}_1$  et d'énergie  $E_1$ , l'autre d'impulsion  $\vec{p}_2$  et d'énergie  $E_2$ , alors le système formé par ces deux particules a pour impulsion  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$  et pour énergie  $E = E_1 + E_2$ . Les équations d'onde associées aux deux particules et au système sont alors (pour une même valeur de  $\vec{r}$  et une même valeur de  $t$ ) :

$$f_1(\vec{r}, t) = \frac{1}{r}.f_1(\vec{0}, 0).e^{\frac{i}{\hbar}.(p_1.\vec{r}-E_1.t)} ;$$

$$f_2(\vec{r}, t) = \frac{1}{r} \cdot f_2(\vec{0}, 0) \cdot e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (\vec{p}_2 \cdot \vec{r} - E_2 \cdot t)} ;$$

$$f(\vec{r}, t) = \frac{1}{r} \cdot f(\vec{0}, 0) \cdot e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (\vec{p} \cdot \vec{r} - E \cdot t)}.$$

Comme  $\vec{p} \cdot \vec{r} - E \cdot t = \vec{p}_1 \cdot \vec{r} - E_1 \cdot t + \vec{p}_2 \cdot \vec{r} - E_2 \cdot t$ , on a nécessairement :

$$e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (\vec{p} \cdot \vec{r} - E \cdot t)} = e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (\vec{p}_1 \cdot \vec{r} - E_1 \cdot t)} \cdot e^{\frac{i}{\hbar} \cdot (\vec{p}_2 \cdot \vec{r} - E_2 \cdot t)},$$

ce qui n'est possible que si on a :

$$f(\vec{r}, t) = f_1(\vec{r}, t) \cdot f_2(\vec{r}, t).$$

La fonction associée à un système est égale au produit des fonctions associées aux parties de ce système.

Cette propriété de la fonction  $f$  est analogue à la propriété bien connue des probabilités :  $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$ , où  $A$  et  $B$  sont deux événements indépendants.

Nous verrons que, selon l'interprétation donnée par Max Born à l'équation de Schrödinger, ce n'est probablement pas la fonction  $f$  elle-même, mais plutôt le carré de sa norme :  $\|f\|^2$ , qui pourrait bien exprimer une probabilité...

Cette fonction  $f$  est en quelque sorte le trait d'union (le socle commun) entre la fonction d'onde de Schrödinger (dont nous reparlerons dans le document "Physique quantique : l'aventure collective") et le champ quadrivectoriel d'énergie-impulsion virtuelle, qui sera traité dans le document "L'hypothèse du champ d'entraînement". Elle se situe au point de rencontre de la physique quantique et de la gravitation.

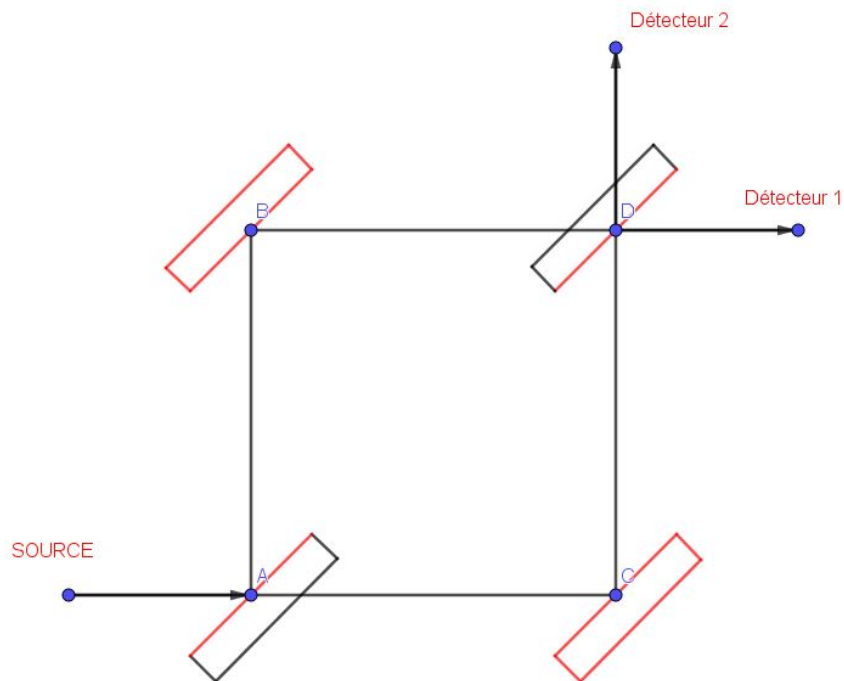
On peut penser que cette équation n'est pas liée spécifiquement à un type particulier de force (de particule, d'onde), mais exprime la transmission dite "immédiate" de tout type de message à la vitesse  $c$ . Elle serait donc une expression générale de la structure de l'espace-temps, et plus précisément de sa topologie minkowskienne.

## 14 La dualité onde/corpuscule

De nombreuses expériences (parfois très simples) montrent clairement qu'on ne peut pas considérer les photons (ou autres particules) comme des corpuscules se déplaçant sur des trajectoires déterminées, comme des balles de fusil. Le recours aux ondes est inévitable.

Première expérience (expérience de Wheeler, utilisant un interféromètre de Mach-Zehnder) :

Cette expérience utilise deux miroirs totalement réfléchissants (en  $B$  et  $C$ ) et deux miroirs semi-réfléchissants (en  $A$  et  $D$ ). Lorsqu'un rayon lumineux frappe un miroir totalement réfléchissant, il est réfléchi par la surface antérieure de celui-ci, selon la loi de Descartes (angle d'incidence = angle de réflexion). L'onde subit un déphasage égal à  $\pi$ . Dans le cas d'un miroir semi-réfléchissant, l'onde est divisée en deux composantes d'égale amplitude : l'une traverse l'épaisseur de verre et continue en ligne droite, l'autre est réfléchi par la face réfléchissante selon la même loi de Descartes. Attention : ces miroirs semi-réfléchissants ont une seule face réfléchissante (en rouge sur la figure). Si une onde tombe sur la face antérieure réfléchissante (comme c'est le cas en  $A$ ), elle est réfléchi comme par un miroir normal, avec un déphasage égal à  $\pi$ . Mais si c'est la face postérieure qui est réfléchissante (comme c'est le cas en  $D$ ), l'onde réfléchi doit traverser deux fois l'épaisseur du verre et n'est pas déphasée. Le déphasage est lié à l'indice de réfraction du milieu, juste avant et juste après la surface réfléchissante : si l'indice est plus élevé après qu'avant, il y a un déphasage de  $\pi$  ; dans le cas contraire, il n'y a pas de déphasage.



La lumière émise par la source peut suivre quatre chemins distincts, selon qu'elle est transmise (t) ou réfléchi (r) par le premier miroir semi-réfléchissant, puis par le second. Notons tt, tr, rt, rr ces quatre parcours. Les quatre faisceaux

obtenus sont d'égale amplitude (le quart de celle du faisceau initial). Pour chacun de ces parcours, comptons le nombre d'épaisseur de verre traversées, ainsi que le déphasage, et notons le détecteur concerné ( $D_1$  ou  $D_2$ ) :

1) Parcours tt (Source  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  C  $\rightarrow$  D  $\rightarrow$  Détecteur 2) :

Épaisseurs de verre traversées :  $1 + 0 + 1 = 2$ ; déphasage :  $0 + \pi + 0 = \pi$  ;

2) Parcours tr (Source  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  C  $\rightarrow$  D  $\rightarrow$  Détecteur 1) :

Épaisseur de verre traversée :  $1 + 0 + 0 = 1$ ; déphasage :  $0 + \pi + \pi = 2\pi$  ;

3) Parcours rt (Source  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  D  $\rightarrow$  Détecteur 1) :

Épaisseur de verre traversée :  $0 + 0 + 1 = 1$ ; déphasage :  $\pi + \pi + 0 = 2\pi$  ;

4) Parcours rr (Source  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  D  $\rightarrow$  Détecteur 2) :

Épaisseurs de verre traversées :  $0 + 0 + 2 = 2$ ; déphasage :  $\pi + \pi + 0 = 2\pi$ .

Le détecteur  $D_1$  récupère les faisceaux tr et rt recombines. Ils ont tous les deux traversé une épaisseur de verre, et subi le même déphasage :  $2\pi$ . Ils arrivent en concordance de phase; leurs amplitudes s'additionnent.

Le détecteur  $D_2$  récupère les faisceaux tt et rr recombines. Ils ont tous les deux traversé deux épaisseurs de verre, mais n'ont pas subi le même déphasage :  $\pi$  pour le premier,  $2\pi$  pour le second. Ils arrivent en opposition de phase; leurs amplitudes s'annulent.

On obtient un résultat très frappant : le détecteur  $D_2$  n'enregistre rien! En termes d'énergie, toute l'énergie émise par la source est récupérée par le détecteur  $D_1$ .

Il est possible d'obtenir un résultat encore plus frappant, en réduisant l'intensité de la source, de telle sorte que les photons soient émis un par un.

Si on imagine un photon comme un corpuscule possédant à chaque instant une position bien déterminée, alors il devrait suivre un chemin unique, parmi les quatre chemins possibles; il y aurait alors une chance sur deux pour qu'il soit détecté par  $D_1$ , et une chance sur deux pour qu'il soit détecté par  $D_2$ . Mais non : il est toujours détecté par  $D_1$ . Ce résultat est incompréhensible!

Il est au contraire parfaitement compréhensible si on se représente les photons comme des ondes, sur tout leur parcours entre la source et les détecteurs. Ces ondes arrivent en concordance de phase en  $D_1$ , en opposition de phase en  $D_2$ . Mais, s'il y a un photon unique dans le circuit, il faut bien admettre qu'il se propage sous la forme d'une onde qui emprunte à la fois plusieurs parcours,

puis interfère avec elle-même. On dira qu'il y a une superposition d'états.

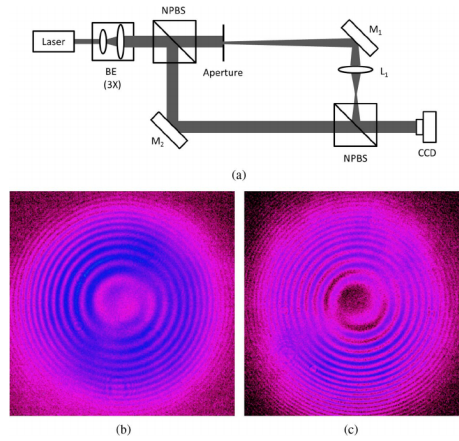
Une chose reste difficile à expliquer, même en raisonnant sur des ondes : on pourrait penser que chaque onde transporte une certaine quantité d'énergie ; quand une onde est partagée en deux parties par un miroir semi-réfléchissant, il serait naturel d'imaginer que chaque moitié de l'onde va emporter avec elle la moitié de l'énergie ; réciproquement, deux ondes qui fusionnent devraient toujours additionner leurs énergies. Si c'était le cas, les deux détecteurs détecteraient la même quantité d'énergie. Ce n'est clairement pas le cas. D'ailleurs ce raisonnement n'est une façon détournée de revenir à la conception corpusculaire, en imaginant une énergie localisée (peut-être diluée) dans l'espace, à chaque instant. En réalité, il est impossible de retracer le parcours spatio-temporel de l'énergie. Tout ce qu'on sait, c'est que l'énergie totale se conserve : l'énergie captée par les détecteurs est égale à l'énergie émise par la source ; et, dans la configuration de cette expérience, c'est le détecteur 1 qui capte la totalité de cette énergie. On pourrait dire qu'il y a eu un transfert d'un quantum d'énergie ; ce transfert concerne la source et les deux détecteurs (qui sont liés chacun à la source par un lien d'immédiateté, ou d'intrication de degré 1) ; mais chercher où était localisée cette énergie entre l'émission et la réception n'a tout simplement aucun sens ! Son transfert de la source au détecteur 1 est "immédiate", au sens précisé plus haut. Quant aux ondes, c'est l'outil qui nous a permis de prévoir que seul le détecteur 1 allait capter toute l'énergie.

Variante de l'expérience 1 :

On peut modifier cette expérience pour faire apparaître des franges d'interférence. Pour cela, on utilise une lumière monochromatique. On place, sur le parcours de l'un des sous-faisceaux séparés par le premier miroir semi-réfléchissant (ou sur ces deux parcours) un plan opaque percé d'un trou pour obliger le faisceau à diffracter. Il faudra remplacer les détecteurs par des écrans sur lesquels vont se dessiner les franges d'interférence. On peut utiliser une plaque photographique argentique ou un capteur CCD.

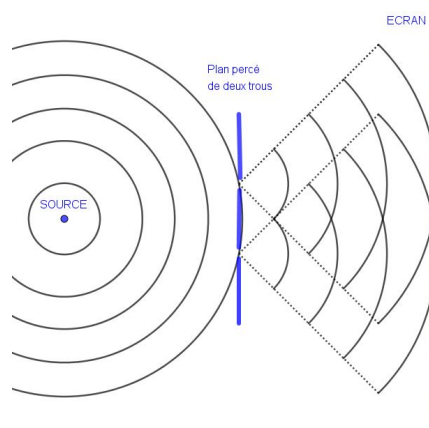
Si on reprend le montage précédent (avec deux détecteurs  $D_1$  et  $D_2$ , qu'on remplace, pour l'occasion, par deux écrans  $E_1$  et  $E_2$ ), on verra apparaître des figures d'interférence semblables mais inversées, en ce sens que l'éclairement sera maximal au centre pour  $E_1$ , minimal au centre pour  $E_2$ .

Ci-après, la figure obtenue avec un écran unique.



Il est possible de faire une seconde modification : sur l'un des parcours (par exemple entre *A* et *B*), on place un obstacle qui peut être une lame de verre, ou un récipient contenant un gaz à pression réglable, ou une déviation qui allonge le parcours à volonté, grâce à des miroirs ; ce dispositif introduit un déphasage entre le faisceau passant par *B* et le faisceau passant par *C*. Pour un déphasage égal à la demi-longueur d'onde du faisceau lumineux, les rôles des deux détecteurs (ou écrans) sont inversés.

Seconde expérience (expérience de Young) :



Il s'agit de la célèbre expérience des fentes de Young. Un faisceau de lumière monochromatique, émis par une source, rencontre un plan opaque percé de deux fentes, ou deux trous minuscules. Nous choisirons le second montage. De l'autre côté du plan opaque, on place un écran (plaque photographique, détecteur CCD...).

Si les photons se comportaient comme des corpuscules sur tout leur parcours, ceux qui passent par le premier trou formeraient une petite tache sur l'écran, les autres une autre tache bien distincte. Mais ce n'est pas ainsi que les choses se passent. Le faisceau traverse le plan opaque à la fois par les deux trous, formant deux sous-faisceaux, qui subissent une diffraction. De l'autre côté du plan opaque, ces deux sous-faisceaux interfèrent, avant d'être réceptionnés sur l'écran où vont se dessiner les franges d'interférence.

Cette expérience entre dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel, du moins lorsque le faisceau comporte un grand nombre de photons émis simultanément. Que se passe-t-il si les photons sont émis un par un ? On peut vérifier que les franges d'interférence se forment encore dans ce cas (elles apparaissent progressivement : un point pour un photon ; il faut donc du temps pour qu'elles se matérialisent de manière bien visible). On est conduit à dire qu'à chaque photon correspond une onde qui passe à la fois par les deux fentes ! Chaque photon serait-il, en définitive, une onde macroscopique s'étendant de la source jusqu'à l'écran (ou à la plaque photographique) où se matérialisent les franges d'interférence ? Et, dans ce cas, comment expliquer que ces franges se dessinent point par point comme s'il y avait des impacts successifs sur les molécules photosensibles de la plaque photographique (sulfure d'argent par exemple) ? Ces "impacts" évoquent, bien sûr, l'effet photoélectrique, étudié par Einstein, et interprété par lui en termes de corpuscules de lumière. En réalité, ce comportement corpusculaire du photon n'apparaît qu'au moment des interactions (émission ou réception d'un photon), jamais sur le parcours entre deux interactions successives. Le parcours est essentiellement ondulatoire, mais les interactions sont quantifiées. Comment des ondes peuvent-elles agir de manière quantifiée ? Il faut supposer que la totalité de l'énergie contenue dans une onde, quelle que soit son étendue spatiale, et même si une partie de l'onde est passée par une fente et l'autre par l'autre, peut être transmise "instantanément" à une molécule de sulfure d'argent, qui est presque ponctuelle en comparaison. Ceci signifie qu'à l'"instant" où le transfert d'énergie de l'onde vers la molécule est acté, toute l'énergie de l'onde est "aussitôt" réquisitionnée. On pourrait imaginer un message reçu instantanément en chaque point de l'onde, quelle que soit sa distance, et, en retour, toute l'énergie locale immédiatement transférée à la molécule. Mais il est inutile de chercher par où est passé le message et quel chemin l'énergie a utilisé pour rejoindre la molécule : il faut plutôt considérer l'onde comme un tout inséparable, totalement intriqué avec lui-même, quelle que soit son étendue dans l'espace et dans le temps. L'onde ne connaît ni l'espace, ni le temps au sens usuel. Elle ne possède en propre aucune énergie, mais elle est le médiateur d'un échange. Par conséquent, les mots que nous avons placés entre guillemets : "instantanément", "instant", "aussitôt", sont mal choisis, car ils ont une connotation temporelle. Le mot "immédiatement", au contraire, tel qu'il a été défini plus haut, n'a pas cette connotation : il signifie seulement "sans intermédiaire", ce qui est bien le cas.

Quand nous disons que l'énergie du photon (qui est une onde) est transmise



à une molécule (supposée "matérielle"), ce n'est pas parfaitement exact : il faudrait dire plutôt qu'elle est transmise à l'un des électrons tournant autour de l'un des atomes composant cette molécule ; et, comme nous savons que les électrons peuvent produire, comme les photons, des phénomènes d'interférences, nous devons les considérer, eux aussi, comme des ondes. Donc l'interaction que nous venons de décrire est une interaction entre deux ondes, avec transfert d'énergie de l'une à l'autre. C'est ce transfert qui est quantifié, et qui donne l'illusion d'un choc de corpuscules.

La problématique soulevée par l'expérience des fentes de Young se retrouve dans d'autres expériences bien différentes, par exemple celles qu'on peut faire avec un interféromètre de Mach-Zehnder, dont nous avons parlé précédemment : il apparaît très clairement que le comportement des faisceaux, sur tout leur parcours, est purement ondulatoire ; seules l'émission et la réception peuvent faire penser à des phénomènes que nous avons l'habitude d'attribuer à des corpuscules.

## 15 La "poignée de mains"

En mécanique transactionnelle, il est d'usage d'attribuer une signification physique aux ondes, et non aux corpuscules ; seule l'interaction (la "poignée de main") entre deux ondes offre une ressemblance avec le comportement de corpuscules, tels que nous avons l'habitude de les imaginer, à partir de notre expérience de tous les jours.

Dans les expériences décrites ci-dessus, on peut considérer qu'il y a interaction entre une source et un récepteur par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique. Plus précisément, il y a interaction entre un électron appartenant à la source et un électron appartenant au récepteur. Par exemple, si la source est un laser (comme c'est généralement le cas, puisqu'on désire utiliser une onde monochromatique), des atomes ont été placés dans un état excité bien contrôlé par pompage optique. Ceci permet de connaître, dans chaque atome, l'énergie de l'électron externe (qu'on peut considérer comme une onde de De Broglie stationnaire, ou comme une fonction d'onde de Schrödinger), et de prévoir l'énergie libérée s'il descend "spontanément" vers une orbite plus basse (cette chute "spontanée" étant une "catastrophe" - le saut d'un état stationnaire à un autre). De même, du côté du récepteur, on peut imaginer des atomes avec leurs cortèges électroniques quantifiés (ondes stationnaires ici aussi), et on sait quelle est l'énergie minimale nécessaire pour arracher un électron à l'un de ces atomes, par effet photoélectrique (l'arrachage d'un électron étant, lui aussi, une "catastrophe"). Le photon (onde lumineuse) est le trait d'union entre ces deux catastrophes subies par deux ondes électroniques. Il y a eu une "poignée de mains" entre ces deux ondes électroniques, avec transfert d'énergie.

Le premier grand problème est de comprendre comment se passe cette prise de contact à distance entre les deux ondes électroniques. Voici une façon de se la représenter.

Tout se passe comme si chacun des électrons était informé à distance de la présence de l'autre, et de ses attentes. On pourrait imaginer une circulation d'information : chaque électron signalant sa présence au reste de l'Univers par un flux divergent d'information se déplaçant à la vitesse de la lumière, et recevant en même temps du reste de l'Univers un flux convergent d'information, ces flux ne transmettant aucune énergie, mais permettant seulement une prise de contact en vue d'un échange d'énergie éventuel. Si cet échange est acté, la monnaie d'échange est un photon.

Dans le cas présent, l'information en question est de nature électromagnétique : c'est un champ électromagnétique.

Selon la conception du champ proposée ici (qui peut bien sûr être discutée), le champ électromagnétique en lui-même ne transporte aucune énergie (ou seulement une énergie virtuelle), mais il transporte une information qui peut être à l'origine d'un transfert d'énergie qui, elle, est bien réelle. D'autre part, cette information se répartit en deux flux, l'un convergent, l'autre divergent, les deux étant nécessaires à la transaction (de même qu'il doit y avoir simultanément une offre et une demande dans le cas d'une transaction commerciale).

Le flux divergent doit pouvoir s'interpréter en termes de probabilité de transmettre de l'énergie, et le flux convergent en termes de probabilité de recevoir de l'énergie. Attention : ce flux convergent peut être vu comme un flux divergent antichrone ; ce qui nous ramène au problème de la symétrie  $T$ .

Si on a bien lu ce qui précède, on aura compris que ces flux ne sont pas matériels en ce sens qu'ils ne transportent aucune énergie ; ils sont seulement informationnels. Ils établissent une communication entre les corps matériels, qui est de l'ordre de la corrélation, pas de la causalité. La corrélation n'est pas orientée dans le temps ; elle peut être lue indifféremment dans les deux sens du temps.

Le second grand problème est de comprendre pourquoi, et d'après quels critères, un échange va être acté, alors que d'autres ne le seront pas. Par exemple, dans l'expérience des fentes de Young, nous pouvons calculer la répartition statistique des "impacts" de photons sur l'écran ; mais nous ne savons pas pourquoi tel ou tel atome de la plaque photographique va être touché, ni quand il va être touché, alors que tel autre ne le sera pas. Il est possible que ceci soit en rapport avec un phénomène de résonance entre l'onde lumineuse et une onde électronique, mais cette étude reste à faire. Les progrès de la physique attoseconde (voir les travaux d'Anne l'Huillier et de Pierre Agostini) commencent à ouvrir la voie, mais aujourd'hui le recours aux probabilités est encore incontournable. Ceci ne signifie pas que la physique quantique soit fondamentalement, définitivement,

probabiliste. Nous n'en savons rien. Il n'est pas exclu que la fonction d'onde décrite par Schrödinger ne soit qu'une simplification de la réalité; on peut penser que la poignée de mains entre deux fonctions d'onde nécessite une concordance de phase, mais il existe peut-être d'autres conditions qui nous échappent.

## 16 L'électromagnétisme quantique

On sait que les équations de Maxwell résument l'électromagnétisme relativiste (elles sont parfaitement Lorentz-invariantes); mais elles ne sont pas quantiques, en ce sens qu'elles ne sont pas adaptées au calcul du comportement d'un photon isolé.

On peut tout de même essayer de les utiliser pour calculer le champ produit par une particule chargée; on applique alors les formules de Maxwell comme si la particule devait se comporter à la manière d'un corps macroscopique. On voit alors que son champ se compose de deux termes: le premier (en  $\frac{1}{r^2}$ ) prend en compte la vitesse de la particule, supposée constante; le second (en  $\frac{1}{r}$ ) est lié à son accélération.

Si la particule n'est pas accélérée, donc si elle n'interagit pas, seul le premier terme intervient. Il décrit une onde électromagnétique à d'Alembertien nul, donc quelque chose qui se comporte un peu comme le potentiel gravitationnel qui sera étudié dans le document dédié (même si le champ électromagnétique est à priori plus complexe, puisqu'il possède une composante vectorielle). C'est une onde (à rapprocher de la fonction d'onde au sens de Schrödinger) qui permet de calculer, de manière probabiliste, où et quand peut se faire un éventuel échange (la "poignée de main"), mais on ne sait pas exactement où, quand, comment et avec quelle autre particule s'effectuera cet échange hypothétique. En l'absence d'échange, cette onde ne transporte aucune énergie.

On dit quelquefois, de manière imagée, que c'est "une onde qui cherche".

Le second terme (en  $\frac{1}{r}$ ) est considéré comme un terme de rayonnement: la particule chargée étant accélérée (c'est l'hypothèse sur laquelle se base le calcul), il est certain qu'elle échange de l'énergie avec le monde extérieur (sinon elle serait inertielle et non accélérée); ce second terme est censé décrire ce transfert. Il exprime un rayonnement transportant de l'énergie; il est conservatif, en ce sens que son vecteur de Poynting est en  $\frac{1}{r^2}$ . Nous ne savons pas avec quelle autre particule se fait l'échange, mais nous savons qu'il est "en train de se faire". Nous savons qu'il y a un échange (une "poignée de mains") en cours, même si nous ne connaissons pas l'autre main.

On dit quelquefois que c'est "une onde qui trouve".

En réalité, au niveau quantique (donc au niveau d'une particule individuelle), un échange ne peut pas être "en train de se faire" : une poignée de main, jusqu'à preuve du contraire, ne dure pas dans le temps, elle doit être considérée comme instantanée, ou plutôt immédiate, indécomposable. La vitesse d'une particule n'est pas une fonction continue du temps : elle fait des sauts, au gré des interactions. L'accélération continue, au sens mathématique du terme, n'existe pas dans le monde quantique. On pourrait dire que chaque particule, entre deux interactions, est inertielle, c'est-à-dire liée à un repère inertiel ("galiléen"), non accéléré. L'"onde qui trouve" n'existe pas au niveau microscopique : il n'y a que des "poignées de mains" ponctuelles, quantifiées, correspondant à des effondrements de la fonction d'onde. Si une particule chargée subit une modification de sa vitesse (un saut quantifié, en aucun cas une variation continue), c'est qu'un échange vient d'être acté avec une autre particule.

On a pris l'habitude de se représenter l'"équation des ondes" (solution élémentaire d'une équation de la forme  $\square f = 0$ , qu'on visualise sous la forme d'une onde sinusoïdale provenant d'un émetteur, ou captée par un récepteur) comme un transport d'énergie électromagnétique. Mais ce n'est en fait qu'une "onde qui cherche". C'est le mode de communication entre particules chargées en mouvement. Encore faut-il qu'un échange soit acté pour qu'il y ait un réel transfert d'énergie. L'onde, par elle-même, ne transmet qu'une information, et aucune énergie. Ce n'est qu'une prise de contact. Le transfert d'énergie se fait par la poignée de mains.

Au niveau macroscopique, c'est un peu différent, puisque l'onde permet de définir une probabilité d'interaction. Un raisonnement statistique basé sur un grand nombre de photons permet de définir une densité de probabilité de transfert d'énergie, donc d'attribuer, si on le désire, une densité d'énergie à l'onde. Mais on doit garder à l'esprit que c'est un abus de langage : ce n'est pas "son" énergie. Cette erreur est tolérable à notre échelle, inacceptable au niveau quantique.

On se représente trop souvent l'onde électromagnétique sur le modèle des vagues dans la mer, dans lesquelles les molécules d'eau seraient remplacées par des photons, chacun d'eux ayant à chaque instant une position, une vitesse ( $c$ ) et une énergie ( $h\nu$ ) déterminées. Ceci n'a aucun sens : il suffit de penser à l'expérience de Young pour comprendre qu'il est impossible d'attribuer à un photon une position déterminée à chaque instant. Il est plus juste de dire qu'un photon est partout à la fois, ou nulle part. De même, l'énergie qu'on associe à une onde électromagnétique est partout, ou nulle part. Elle n'est pas localisée.

Le champ électromagnétique (l'"onde qui cherche") doit plutôt être comparé à une petite annonce ("particule chargée cherche partenaire pour faire échange électromagnétique"), mais si aucun échange n'est acté, on reste dans le virtuel. L'"onde qui cherche", c'est-à-dire l'onde sinusoïdale figurée dans nos manuels, est purement virtuelle ! Quant à l'"onde qui trouve", elle n'existe tout simple-

ment pas. La poignée de main se fait, ou ne se fait pas.

Quant aux fonctions d'onde de Schrödinger, on peut se les représenter, elles aussi, comme des petites annonces, c'est-à-dire comme le mode de communication entre les particules. Ceci signifie que la fonction d'onde, par elle-même, ne possède pas d'énergie, mais qu'elle est le support nécessaire aux échanges d'énergie. La fonction d'onde n'est définie qu'entre deux interactions successives. Dans cet intervalle, elle est stationnaire. Sa description mathématique peut faire intervenir la variable temps (c'est nécessaire à la Lorentz-invariance) mais aucune accélération continue.

A ce sujet, évoquons encore l'effet Unruh. D'après les calculs de ce physicien, basés sur la physique quantique, un observateur uniformément accéléré verra apparaître un rayonnement de corps noir, qu'un observateur non accéléré ne verra pas. Un rayonnement qui existe ou qui n'existe pas, selon l'observateur choisi? Impensable! Mais ne soyons pas si surpris : toute la physique est basée sur les référentiels inertiels. On n'est pas libre d'inventer un référentiel accéléré abstrait; surtout en physique quantique, où l'accélération continue n'a aucun sens. Il n'existe que des accélérations discrètes liées à des transferts d'énergie-impulsion, sinon instantanés, du moins "immédiats". L'accélération telle que nous nous la représentons dans notre vie de tous les jours (accélération continue) n'existe pas en physique quantique.

## 17 Le problème de la mesure

En physique quantique, on étudie le comportement d'une particule isolée, ou d'un petit nombre de particules. Pour cela, il faut en principe pouvoir observer une particule individuelle. On ne peut le faire qu'en lui prélevant une quantum d'information, au minimum un photon. Ceci modifie nécessairement l'énergie-impulsion de la particule. Pire : pour observer un objet de petite taille, il faut utiliser des photons de faible longueur d'onde, et ce sont les plus énergétiques, donc les plus perturbants! Alors qu'en physique classique, l'observateur perturbe très peu les objets qu'il étudie, en physique quantique, il les perturbe nécessairement de manière non négligeable, de sorte qu'il n'étudie pas la matière telle qu'elle est, mais le système "matière + observateur".

Mais il y a encore une seconde difficulté. Si on considère qu'une particule ne doit pas être décrite comme un corpuscule mais comme une fonction d'onde de Schrödinger (un "paquet d'ondes"), alors on se heurte à un problème que Werner Heisenberg résume ainsi : "En faisant une mesure, on réduit le paquet d'ondes d'une particule; les nombreuses issues potentielles sont instantanément réduites à une seule : le résultat observé." Autrement dit, l'observation (comme d'ailleurs toute autre interaction) provoque le "collapse", l'effondrement de la fonction d'onde. Une fonction d'onde est par nature inobservable : elle est du

domaine du virtuel, de l'évanescent. Elle s'évanouit quand on la regarde. Ce qui ne lui retire en rien sa valeur prédictive, au moins dans le domaine des interférences, mais ses prédictions ne peuvent avoir qu'une valeur statistique.

Certains commentateurs ont voulu en déduire que c'est uniquement l'observateur (ou même la "conscience" de l'observateur) qui crée la mesure, en imposant le collapse. Ils ont même parfois essayé de démontrer qu'une réalité objective (indépendante de l'observateur) ne peut pas exister. Les raisonnements proposés font intervenir plusieurs observateurs (Alice, Bob, l'ami d'Alice, l'amie de Bob...) et mélangent allègrement l'incertitude objective imposée par les limites de la physique quantique, et les incertitudes subjectives dues à une mauvaise transmission des informations entre les différents protagonistes. Ceci permet de mettre en évidence, sinon des contradictions internes de la théorie, du moins des malentendus entre des personnages informés de manière biaisée.

A l'opposé, la plupart des physiciens, comme Cyril Branciard, considèrent que "tout système qui interagit avec un autre, qui extrait de l'information de celui-ci, et qui est capable d'enregistrer cette information dans un système physique servant de mémoire, peut être considéré comme un observateur" (ou, du moins, joue un rôle identique). Nous y reviendrons dans le paragraphe sur le passage du niveau quantique au niveau macroscopique (ce qu'on appelle parfois la décohérence).

Enfin, mentionnons ici un troisième problème, qui n'est pas lié directement à la mesure, mais plutôt au déterminisme. A l'échelle macroscopique, en physique classique, on considère qu'un système peut être isolé, et qu'il est théoriquement possible de mesurer à chaque instant toutes ses caractéristiques, et de calculer leur évolution grâce aux lois de conservation. Dans le domaine microscopique, non seulement on ne peut pas mesurer toutes les caractéristiques d'un système avec la précision souhaitée (elles sont fuyantes), mais en plus on ne peut pas s'assurer qu'il soit vraiment isolé, car des liens peuvent s'établir à distance par intrication. Les systèmes isolés n'existent pas !

## 18 Le hasard et le déterminisme

Lors de son élaboration au cours des siècles, la physique classique s'est appuyée sur une certaine conception du déterminisme. Poussée à l'extrême, cette conception nous dit que tous les événements sont liés entre eux, et que leur succession est régie par des lois rigoureuses, qui sont à notre portée. Si on pouvait connaître tous les événements passés, si on pouvait connaître la situation présente (position, vitesse de chaque particule...) dans ses moindres détails, on pourrait, en principe, prédire tous les événements futurs. Dieu sait tout du passé, du présent et de l'avenir : il est omniscient. Mais ceci lui ôte tout libre-arbitre : il n'a aucun pouvoir de décision ; il n'a pas la possibilité d'agir sur la marche du

monde. Le rôle du physicien est de se rapprocher autant que possible de cette omniscience idéalisée qui doit lui permettre de tout prévoir.

La physique quantique a jeté un pavé dans la mare. Pour l'école de Copenhague, dont l'interprétation est dominante, il n'est pas possible de faire des prévisions autres que probabilistes. Le hasard joue un rôle central, fondamental, irréductible. Par exemple, si un photon rencontre un miroir semi-réfléchissant, il y a une chance sur deux qu'il soit transmis (qu'il traverse le miroir), et une chance sur deux qu'il soit réfléchi ; l'observateur reste dans l'incertitude tant que l'expérience n'a pas donné la réponse. On peut aller jusqu'à dire que le résultat de l'expérience est indéterminé tant que le photon n'a pas rencontré le miroir. Indéterminé ? Ceci signifie que personne (pas même Dieu) ne sait ce qu'il va se passer. Puis intervient un tirage au sort, ou un choix, dont les raisons nous échappent, et nous échapperont toujours. Dieu ne sait pas à l'avance ce qui va se produire, mais il décide au dernier moment, de manière purement arbitraire. Il n'est plus omniscient (il ignore tout de l'avenir) mais il exerce à chaque instant son libre-arbitre (son bon vouloir) sans justification.

Pour le physicien qui ne fait pas de philosophie, mais qui s'efforce modestement de comprendre et de contrôler les phénomènes qu'il observe, et de prédire le résultat de ses expériences, la conception du déterminisme absolu est un idéal inaccessible. Cependant, au niveau macroscopique, on admet généralement (c'est la facilité) que les difficultés viennent principalement d'un manque d'information de l'observateur. Dans une situation où les contingences fortuites (rencontre imprévue de deux chaînes déterministes) sont, autant que possible, éliminées, les erreurs de prédiction peuvent être réduites. Mais jusqu'où ? Si nous jouons à pile ou face, aucun physicien n'est capable de prédire à coup sûr de quel côté la pièce va tomber ; dire que les courants d'air ou la manière de lancer la pièce, si on pouvait les analyser très précisément, pourraient nous permettre de faire une prévision sûre, est une affirmation invérifiable, donc non scientifique. Si nous pouvions faire tendre vers zéro les incertitudes sur la situation présente, les incertitudes sur l'avenir tendraient-elles vers zéro ? Il faudrait être bien prétentieux pour l'affirmer !

Quant au hasard, il a bon dos : il est facile de lui attribuer tout ce qu'on ne sait pas prévoir. Mais, lorsque, par exemple, un photon traverse un miroir semi-réfléchissant, qui nous dit qu'il n'y a pas un déterminisme sous-jacent (disposition des atomes sur le parcours du photon, interactions complexes faisant intervenir des contingences impossibles à analyser, concordance ou opposition de phase des ondes...) qui décide du résultat de l'expérience, selon des lois physiques rigoureuses ?

Tout ceci doit inciter à beaucoup de modestie dans la manipulation des concepts de déterminisme et de hasard.

Par commodité, on a l'habitude de faire comme si la physique classique était

fondamentalement déterministe (on s'efforce de limiter autant que possible la place des contingences dans les expériences), et la physique quantique fondamentalement probabiliste (car on ne sait pas faire autrement). On distingue donc, d'une part, les probabilités usuelles, subjectives, liées au niveau d'information de l'observateur, et d'autre part les probabilités quantiques fondamentales, irréductibles, qui se présentent comme un mur infranchissable (pour le moment ?). Mais nous ne savons pas si ce fossé est réel ou imaginaire.

N'en déduisons pas que toute tentative de prévision de l'évolution d'un système est perdue d'avance. Nous allons voir sur quelques exemples comment on gère concrètement ces difficultés dans des situations simples.

## 19 Quelques expériences classiques

Pour essayer d'introduire les problématiques qui seront développées ensuite, concernant le temps, la causalité, l'intrication, les superpositions d'états, on peut se référer à de nombreuses expériences simples, qui sont régulièrement proposées et mises en œuvre depuis quelques années. En voici quelques-unes.

Première expérience :

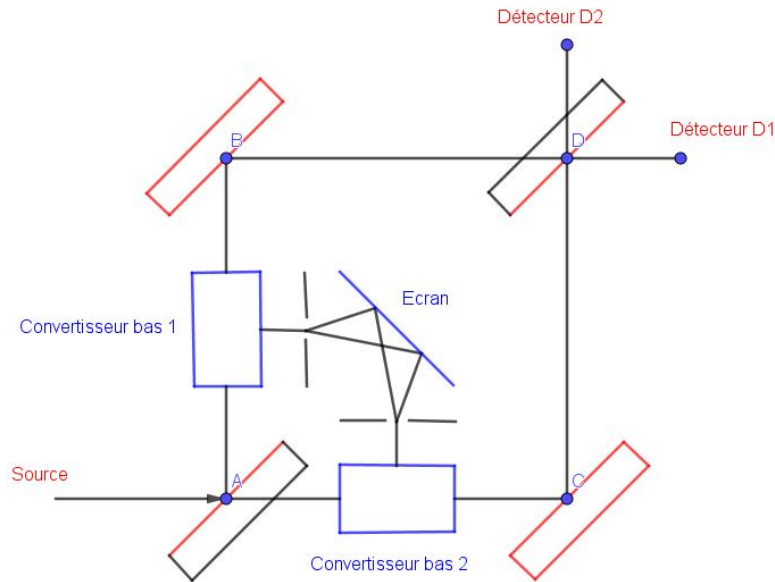
Nous reprenons l'expérience de Wheeler, utilisant l'interféromètre de Mach-Zehnder, en compliquant un peu le montage, pour expliquer le principe de la gomme quantique à choix retardé de Marlan-Scully.

Par rapport à l'expérience de l'interféromètre de Mach-Zehnder décrite précédemment, on fait intervenir ici, en plus, deux convertisseurs bas. Il s'agit de dispositifs qui ont la propriété, chaque fois qu'ils reçoivent, en entrée, un photon quelconque de longueur d'onde  $\lambda$ , de le convertir en une paire de photons de longueur d'onde  $2\lambda$  (ce qui conserve l'énergie totale, en la partageant également entre les deux photons sortants). Ces deux photons sortants sont envoyés dans deux directions prédéterminées. Mais, surtout, ils sont intriqués entre eux. Ces deux photons seront dits "photon signal" et "photon témoin". Toute observation portant sur l'un d'eux (en l'occurrence le photon témoin) nous informe instantanément sur l'autre (le photon signal). Ce sont deux jumeaux inséparables.

Un faisceau lumineux monochromatique, de longueur d'onde  $\lambda$ , est émis par la source; il rencontre un miroir semi-réfléchissant ( $A$ ); il est divisé en deux faisceaux (de même longueur d'onde  $\lambda$ , mais dont l'intensité a été divisée par deux) qui sont dirigés vers les convertisseurs bas 1 et 2. Chacun de ces convertisseurs transforme le faisceau reçu entrant en deux faisceaux sortants intriqués, de longueur d'onde  $2\lambda$ , l'un d'eux (le faisceau signal) étant dirigé vers un écran, l'autre (faisceau témoin) vers un miroir totalement réfléchissant ( $B$  ou  $C$ ). Les deux faisceaux signaux traversent chacun un plan opaque percé d'un trou qui



les fait diffracter, puis ils se rencontrent et produisent (ou non) des interférences sur un écran. D'autre part, les faisceaux témoins, par le jeu de deux miroirs totalement réfléchissants ( $B$  et  $C$ ), puis d'un miroir semi-réfléchissant ( $D$ ), sont dirigés vers des détecteurs  $D_1$  ou  $D_2$ .



Dans l'expérience de Mach-Zehnder, nous avons vu que les miroirs semi-réfléchissants ont une seule face semi-réfléchissante; leur orientation n'est pas indifférente, car elle joue sur le déphasage des faisceaux. Nous supposons ici que le miroir  $A$  a sa face semi-réfléchissante ("face avant") du côté gauche (haut), et le miroir  $D$  du côté droit (bas).

Quel est le but de l'expérience? On va injecter des photons un par un dans le circuit; pour chaque photon émis, un photon signal est détecté sur l'écran, et son point d'impact est enregistré; un photon témoin est reçu par l'un des détecteurs ( $D_1$  ou  $D_2$ ); on note quel est le détecteur concerné. Après un grand nombre de photons émis, on analyse les points d'impact des photons signaux sur l'écran, associés à un photon témoin sortant en  $D_1$ ; on observe si leur répartition dessine des franges d'interférence. On fait de même pour  $D_2$ .

Ceci permet de comprendre pourquoi on utilise des convertisseurs bas plutôt que des miroirs semi-réfléchissants: on veut étudier les corrélations entre un photon signal (récupéré sur l'écran d'interférence) et un photon témoin récupéré par l'un des détecteurs ( $D_1$  ou  $D_2$ ). Il doit donc y avoir simultanément deux photons (un signal, un témoin) dans le circuit. Avec des miroirs semi-réfléchissants,

il n'y en aurait qu'un.

On peut distinguer trois "catastrophes" : 1) l'émission du photon initial, 2) la récupération du photon signal sur l'écran, 3) la récupération du photon témoin (en  $D_1$  ou  $D_2$ ). Entre les catastrophes 1 et 2, en suivant la trajectoire du faisceau lumineux, l'intervalle d'Univers  $\Delta s$  est nul ; de même entre 1 et 3 ; ne nous étonnons pas si les catastrophes 1 et 3 sont étroitement corrélées, de manière intemporelle !

Lorsque le photon témoin est détecté en  $D_1$  ou  $D_2$ , on ne sait pas s'il provient du convertisseur 1 ou du convertisseur 2 ; il y a deux rayons signaux qui convergent vers l'écran, et deux rayons témoins qui convergent en  $D$ . Mais "deux rayons" ne signifie pas "deux photons" ! En termes de superposition d'états et d'intrication, on pourrait dire : il existe un seul photon signal qui arrive sur l'écran, mais il a pu passer par le convertisseur 1 ou par le convertisseur 2 ; il est donc dans deux états superposés. Attention : ils sont dits "superposés", mais pas dans l'espace, puisqu'ils ne suivent pas le même chemin ! D'autre part, il existe un seul photon témoin qui arrive en  $D$ , et qui est récupéré soit par  $D_1$ , soit par  $D_2$ . Lui aussi peut provenir soit du convertisseur 1, soit du convertisseur 2.

Examinons les parcours possibles des ondes associées aux photons témoins.

1) Si le photon témoin provient du convertisseur 1 et est détecté en  $D_1$  : il a été réfléchi par  $B$  (déphasage :  $\pi$ ) puis transmis par  $D$  (pas de déphasage) ; déphasage total :  $\pi$  ;

2) Si le photon témoin provient du convertisseur 1 et est détecté en  $D_2$  : il a été réfléchi par  $B$  (déphasage :  $\pi$ ) puis réfléchi par  $D$ , face arrière (pas de déphasage) ; déphasage total :  $\pi$  ;

3) Si le photon témoin provient du convertisseur 2 et est détecté en  $D_1$  : il a été réfléchi par  $C$  (déphasage :  $\pi$ ) puis réfléchi par  $D$ , face avant (déphasage :  $\pi$ ) ; déphasage total :  $2.\pi$  ;

4) Si le photon témoin provient du convertisseur 2 et est détecté en  $D_2$  : il a été réfléchi par  $C$  (déphasage :  $\pi$ ) puis transmis par  $D$  (pas de déphasage) ; déphasage total :  $\pi$ .

Donc si le photon témoin est détecté par  $D_2$ , il a certainement subi le même déphasage ( $\pi$ ) depuis son émission, qu'il provienne du convertisseur 1 ou du convertisseur 2 ; s'il est détecté par  $D_1$ , au contraire, il n'a pas subi le même déphasage selon qu'il provient du premier convertisseur (déphasage :  $\pi$ ) ou du second (déphasage :  $2.\pi$ , autrement dit 0).

Il reste la grande inconnue : les ondes émises par les deux convertisseurs 1

et 2 étaient-elles en concordance de phase? En opposition de phase? Quel était leur déphasage? On n'en sait rien! Toutes les possibilités sont à priori équiprobables, donc on n'observe aucune frange d'interférence. Les impacts des photons sur l'écran sont uniformément répartis. Nous savons que les photons signal et témoin émis par un même convertisseur sont intriqués, donc nécessairement en phase, mais il n'y a pas de corrélation entre les photons émis par des convertisseurs différents.

Imaginons maintenant (ce n'est qu'une hypothèse de travail purement théorique) que ces ondes aient été en phase à l'émission (comme dans l'expérience de Mach-Zehnder décrite précédemment). Alors, d'après ce qui vient d'être dit, ces ondes vont arriver en concordance de phase en  $D_2$ , en opposition de phase en  $D_1$ , donc le photon témoin est nécessairement détecté en  $D_2$  et non en  $D_1$ .

Si, au contraire, les deux ondes étaient en opposition de phase à l'émission, alors elles vont arriver en opposition de phase en  $D_2$ , en concordance de phase en  $D_1$ , donc le photon témoin est nécessairement détecté en  $D_1$  et non en  $D_2$ .

En pratique, on ne sait pas quel est le déphasage entre les deux faisceaux au moment de leur émission par les deux convertisseurs; il est toujours compris entre 0 et  $\pi$  (modulo  $\pi$ ); il change aléatoirement pour chaque nouveau photon injecté dans le circuit. Mais on sait que si ce déphasage est proche de 0, il est plus probable que le photon témoin soit détecté en  $D_2$  qu'en  $D_1$ ; si ce déphasage est plus proche de  $\pi$ , il est plus probable que le photon témoin soit détecté en  $D_1$  qu'en  $D_2$ .

Mais le calcul des probabilités est une théorie mathématique à double sens (intemporelle): connaissant la probabilité de la cause, on peut calculer la probabilité de l'effet; inversement, connaissant la probabilité de l'effet, on peut calculer la probabilité de la cause: c'est l'inférence bayésienne. Les mots "cause" et "effet" étant d'ailleurs mal choisis dans le cas présent: il s'agit en fait de corrélations non ordonnées dans le temps.

On peut donc retourner l'explication précédente, et la formuler ainsi: sachant que la photon témoin a été détecté en  $D_2$ , il est plus probable que le déphasage entre les faisceaux émis par les deux convertisseurs bas soit proche de 0 que de  $\pi$ ; inversement, si le photon témoin est détecté en  $D_1$ , il est plus probable que ce déphasage soit proche de  $\pi$  que de 0.

Si le déphasage entre les deux faisceaux témoins, à l'émission, est proche de 0, alors il en est de même des faisceaux signaux, puisqu'ils sont intriqués, chacun, avec un faisceau témoin; ils arrivent (presque) en phase sur l'écran et interfèrent, en donnant des franges d'interférence circulaires avec une intensité maximale au centre.

Si ce déphasage est proche de  $\pi$ , alors il en est de même pour les faisceaux

signaux, qui arrivent (presque) en opposition de phase sur l'écran, et donnent des franges d'interférence avec une intensité minimale au centre.

Pour observer ces franges d'interférence, il faut former deux images séparées, l'une obtenue en sélectionnant, sur l'écran, les points d'impact des photons signaux associés à des photons témoins captés en  $D_2$ , l'autre en sélectionnant les points d'impact des photons signaux associés à des photons témoins captés en  $D_1$ . Ces deux images sont complémentaires : si on les superpose, les franges disparaissent. Supposons que, par un procédé informatique, on puisse colorer, sur l'écran, en rouge par exemple, les impacts de photons signaux corrélés à des photons témoins enregistrés en  $D_1$ , et en bleu ceux qui sont corrélés à des photons témoins enregistrés en  $D_2$ . Globalement, la densité d'impacts sera uniformément répartie, mais formera des couronnes alternativement rouges et bleues (avec des dégradés), avec du bleu au centre.

Remarquons que lorsque nous parlons de l'interférence entre les deux faisceaux signaux, nous évitons de dire "les deux photons signaux", puisqu'il n'y a, en réalité, qu'un photon signal ! Mais ce photon est à la fois dans deux états : l'un qui vient de l'un des convertisseurs, l'autre de l'autre. On dit qu'il interfère avec lui-même. Il y a deux possibilités : le photon provient du convertisseur 1 ou du convertisseur 2, et ces deux possibilités interfèrent entre elles. Si ces possibilités étaient seulement des probabilités au sens usuel, elles ne pourraient pas interférer entre elles : la théorie mathématique des probabilités ne prévoit aucune interférence ! Mais en microphysique, les "possibles" interfèrent entre eux comme s'ils étaient réels ! Les particules (ou les ondes) possèdent des degrés de liberté qui s'effacent à l'échelle macroscopique.

Dans notre monde macroscopique, l'indétermination est synonyme d'information incomplète : si l'observateur est incapable de faire des prévisions fiables, c'est parce-qu'il lui manque des éléments. En microphysique, l'indétermination apparente est inhérente à la nature elle-même : elle résulte de la multiplicité des possibles. Mais nous ne savons pas si le tri entre ces possibles, qui s'effectue à chaque interaction (catastrophe), obéit à des règles que nous ignorons, ou s'il est fondamentalement probabiliste.

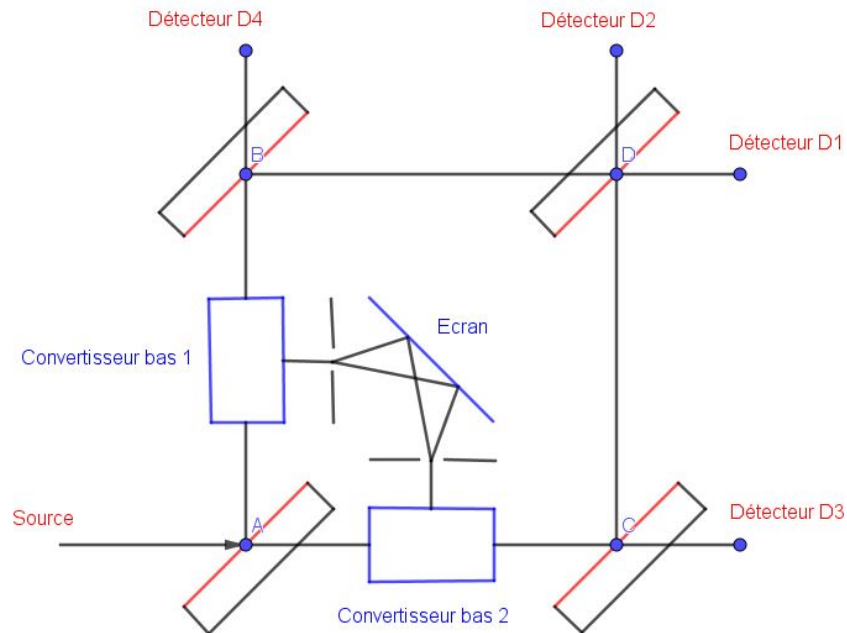
Mais venons-en au problème du temps. Dans le montage ci-dessus, il est possible de jouer sur les longueurs des côtés des polygones ; on peut faire en sorte que les deux convertisseurs et l'écran soient très proches de la source, et que les récepteurs  $D_1$  et  $D_2$  soient au contraire très loin. Dans ce cas, on pourra être tenté de dire : lorsqu'un photon témoin est reçu en  $D_1$  ou en  $D_2$ , cet événement (considéré comme une cause) va avoir une conséquence (un effet) sur le photon signal, qui va être incité à percuter l'écran préférentiellement dans certaines couronnes qu'il est possible de matérialiser sur l'écran. Mais l'arrivée du photon signal sur l'écran précède la détection du photon témoin ; la cause a un effet rétroactif dans le temps !

Ce raisonnement n'est pas correct, car il n'y a aucune raison d'attribuer le rang de "cause" à la réception du photon témoin, et celui d'"effet" à la réception du photon signal ; on peut aussi bien inverser les rôles ! Mais si on les inverse, on peut aussi jouer sur le montage (c'est un peu moins évident, mais possible) pour que les détecteurs  $D_1$  et  $D_2$  soient proches de la source, et que les deux convertisseurs et l'écran soient beaucoup plus loin. Ce qui ne fait qu'inverser le problème.

En définitive, vouloir distribuer les rôles de cause et d'effet à ces événements (la réception du photon signal et celle du photon témoin) n'a tout simplement aucun sens. Ces événements sont statistiquement corrélés, mais n'ont rien à faire de la causalité, concept créé pour un monde dans lequel existe un temps orienté.

Variante de la première expérience :

La version que nous venons de discuter est une version simplifiée ; à l'origine, dans l'expérience de Marlan-Scully (voir ci-après), il y a, en  $B$  et  $C$ , des miroirs semi-réfléchissants ; les rayons qui sont transmis (et non réfléchis) par ces miroirs sont captés par des détecteurs  $D_3$  et  $D_4$ .



Si un photon est injecté dans le circuit, en provenance de la source, il a une chance sur deux d'être réfléchi ou transmis par chaque miroir semi-réfléchissant

rencontré ; la probabilité de recevoir le photon témoin en  $D_3$  est  $1/4$  (en provenance du convertisseur 2 ; un seul parcours possible) ; en  $D_4$  : probabilité  $1/4$  (en provenance du convertisseur 1 ; un seul parcours possible) ; en  $D_1$  : probabilité  $1/4$  aussi, mais avec deux parcours possibles (en provenance du convertisseur 1, probabilité  $1/8$ , ou du convertisseur 2, probabilité  $1/8$ ) ; en  $D_2$  : comme pour  $D_1$ .

Faisons la lecture à l'envers, en partant des récepteurs :

- Si un photon témoin est détecté en  $D_3$  : il arrive nécessairement du convertisseur 2 ; donc le photon initial n'a pas été réfléchi par  $A$  : il a été transmis. Le convertisseur 1 n'a rien reçu, donc rien émis. Le convertisseur 2 a reçu le photon initial, il a émis le photon témoin reçu en  $D_3$ , et un photon signal qui a nécessairement atteint l'écran sans interférer ;

- Si un photon témoin est détecté en  $D_4$  : il arrive nécessairement du convertisseur 1 ; donc le photon initial a été réfléchi par  $A$ . Le convertisseur 2 n'a rien reçu, donc rien émis. Le convertisseur 1 a reçu le photon initial, il a émis le photon témoin reçu en  $D_4$ , et un photon signal qui a nécessairement atteint l'écran sans interférer ;

- Si le photon témoin est détecté en  $D_1$  ou  $D_2$  : comme dans le montage précédent, des franges d'interférence apparaissent progressivement sur l'écran, selon la modalité expliquée précédemment.

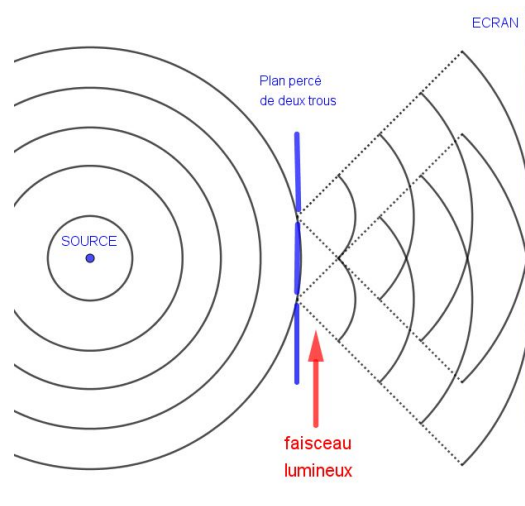
Lorsqu'un photon témoin est détecté en  $D_3$  ou en  $D_4$ , le photon signal correspondant ne contribue pas à dessiner des franges, contrairement à ceux qui sont détectés en  $D_1$  ou  $D_2$ . On dit quelquefois que ces détections (ces catastrophes) entraînent un effondrement de la fonction d'onde. On dit aussi que c'est parce que l'observateur a effectué une mesure (ici une détection) que la fonction d'onde s'est instantanément effondrée. Cette façon de s'exprimer est compréhensible. Mais évitons de dire : "C'est parce que l'observateur a pris conscience que le photon est arrivé en  $D_3$  que la fonction d'onde s'est effondrée" ! Il est vrai que les probabilités, au sens mathématique, dépendent de la subjectivité du sujet qui les évalue ("Tiens, je trouve que le favori a les yeux cernés, je vais optimiser mon espérance de gain en misant sur l'outsider"), mais ici nous parlons de phénomènes physiques qui n'ont rien à faire de la subjectivité (de la conscience) de l'observateur. Si celui-ci s'est endormi, s'il est en voyage, s'il a confié le travail à un étudiant, s'il a oublié d'allumer le détecteur 3, si ce détecteur est en réparation, de sorte que les photons qu'il aurait dû détecter vont percuter directement le mur du laboratoire, tout ceci ne change rien aux statistiques - du moins celles qui restent disponibles !

Deuxième expérience :

Reprenons maintenant le dispositif des fentes de Young appliqué à un faisceau d'électrons (car l'expérience marche aussi bien avec des électrons qu'avec

des photons : on obtient des franges d'interférence, comme avec la lumière) : on peut considérer que l'électron se comporte comme un corpuscule à l'émission et à la réception, et comme une onde entre les deux, puisqu'il est capable d'interférer avec lui-même, en donnant des franges d'interférence. Ceci signifie qu'entre l'émission et la réception, il ne sait pas où il est. Un corpuscule, tel que nous l'imaginons, ne peut pas passer par les deux fentes à la fois ! Le corpuscule existe-t-il entre l'instant de l'émission et celui de la réception ?

La source émet donc un faisceau d'électrons. Le but est de perturber ces électrons, après leur passage par les deux fentes mais avant leur arrivée sur l'écran où ils sont détectés. Pour cela, on place, juste derrière l'écran, un projecteur qui émet un faisceau lumineux. On sait que des photons peuvent interagir avec des électrons (phénomène de diffusion, cf. effet Compton).



En l'absence de ce faisceau lumineux, les électrons émis par la source "passent par les deux trous à la fois" (même s'ils sont émis un par un) et forment des franges d'interférence sur l'écran. Ils se comportent comme des ondes. En présence du faisceau lumineux (supposé convenablement réglé pour que les diffusions se produisent), les franges d'interférence disparaissent ! Les électrons se comportent comme des corpuscules !

A priori, il semble que la diffusion soit un phénomène explicable par des chocs de particules (ici : photon/électron) ; comment une onde (lumineuse) pourrait-elle produire une diffusion avec une autre onde (électronique) ? Pourtant, la diffusion se produit. Le photon ne sait pas où il est, l'électron non plus, mais ils se rencontrent ! Il y a bien, quelque part, un échange qui a lieu entre les deux ondes. On dit que ce dispositif a obligé les électrons à se manifester en tant que particules (ce qui n'est qu'une façon de parler). Le faisceau lumineux oblige

l'électron à "décider" par quelle fente il est passé! Autrement dit, il provoque l'effondrement de sa fonction d'onde. Dès lors, on peut dire par où est passé l'électron. Selon le vocabulaire de la physique quantique, l'électron a été l'objet d'une "mesure" (ou simplement d'une interaction); cette interaction a précisé sa position (sa fonction d'onde a été modifiée par l'opérateur "position"); mais cette position était "indéterminée" (ou plutôt, c'était une superposition d'états) avant l'interaction.

Mais au moment où il est passé par cette fente, pouvait-il savoir qu'il allait subir une diffusion, et où? Tout se passe comme si la diffusion imposait à l'électron, de manière rétroactive, d'être passé par une fente déterminée. Essayons de retracer la chronologie entre les interactions. Un électron est émis par la source; il devient une onde et passe par les deux fentes à la fois; de l'autre côté, il subit une diffusion par un rayon lumineux; il redevient corpuscule et, rétroactivement, il décide qu'il n'a jamais été une onde, et qu'il est passé par une seule fente... Non, décidément, ce scénario ne tient pas debout! Où est l'erreur?

Ce scénario absurde est une tentative pour décrire la situation par une chaîne de causes et d'effets se succédant dans le temps. Il cherche à replacer les événements selon la frise du temps, en plaçant toujours la cause avant l'effet. Mais rappelons-nous que, sur la trajet d'un rayon lumineux (ou d'un photon), deux événements sont toujours liés par l'"immédiateté" ( $\Delta s = 0$ ), donc par l'intrication, quel que soit leur ordre temporel. Evitons donc de penser à la fois en termes de succession dans le temps (ordre chronologique) et de causalité (en l'occurrence, il serait mieux de parler de "corrélacion immédiate").

Relisons le scénario ci-dessus. Il commence par : "au moment où il est passé par la fente, l'électron savait-il qu'il allait subir une diffusion, et où?"; à cette question, on doit probablement répondre : "oui". L'émission du photon et la "collision" avec l'électron sont deux événements intriqués (intrication de degré zéro); mais l'émission de l'électron et la "collision" avec le photon sont probablement intriqués aussi (cf. intrication de degré quelconque). Quand l'électron et le photons sont partis, ils savaient déjà qu'ils allaient se rencontrer! Cette proposition serait absurde dans notre monde macroscopique; elle ne l'est pas dans le monde des interactions élémentaires, qui sont liées par l'intrication. Les trois événements (émission de l'électron, émission du photon, diffusion) sont inséparables, liés par une corrélacion immédiate.

Un mot peut choquer dans ce scénario : c'est le mot "rétroactivement". Comment la diffusion pourrait-elle imposer à l'électron, de manière rétroactive, d'être passé par une fente donnée? Est-ce une causalité antichrone? Pas tout à fait : comme l'émission de l'électron et sa "collision" avec le photon sont deux événements immédiatement intriqués, toute la trajectoire de l'électron entre ces deux événements est totalement intriquée avec elle-même, du début à la fin. Il n'y a pas de causalité. Ce qui est antichrone, c'est notre raisonnement : "sachant que l'électron a subi une diffusion à tel endroit, j'en déduis qu'il est passé par



telle fente". Mais évitons de dire : "c'est parce qu'il a subi cette diffusion qu'il est passé par cette fente" ; ce serait maladroit, car la locution "parce que" incite à penser qu'il existe une relation de cause à effet au sens physique du terme. Dans le cas où il n'y a ni cause, ni effet, mais des "corrélations immédiates", quel vocabulaire faut-il employer ? Si on emploie le vocabulaire de la causalité pour décrire des corrélations immédiates, ou des intrications, alors il faut admettre que l'effet puisse précéder la cause. Mais il faut bien comprendre que ce n'est pas la causalité qui intervient ici, mais la corrélation immédiate.

Une autre chose qui mériterait d'être corrigée, c'est l'idée d'un effondrement de la fonction d'onde, qui se serait produit à un instant déterminé. Nous parlons ici de la fonction d'onde de l'électron, entre l'événement "émission" et l'événement "diffusion". Notre scénario laisse penser que l'électron est parti avec une certaine fonction d'onde, et que cette fonction d'onde a été modifiée rétroactivement au moment où s'est produite la diffusion. Mais si nous admettons que, dès l'émission, l'électron "savait" déjà où il allait, alors il n'a pas pu changer d'avis en cours de route ; il n'a pas changé de fonction d'onde. Sa fonction d'onde est restée identique à elle-même de l'émission jusqu'à la diffusion ! La fonction d'onde est en quelque sorte un champ d'information qui relie deux événements successifs. Ceci dit, la fonction d'onde de l'électron, entre la diffusion et la réception sur l'écran, peut être différente de ce qu'elle était entre l'émission et la diffusion. En termes intuitifs (donc criticables !) on pourrait dire : entre deux interactions successives  $I_1$  et  $I_2$ , l'électron sait d'où il vient et où il va, il sait quelle est sa fonction d'onde, et il ne change pas d'avis. Mais entre les interactions  $I_2$  et  $I_3$ , il aura une autre fonction d'onde. A chaque interaction, il est transformé. La vie de l'électron est quantifiée, et les quanta sont les interactions.

Nous devons admettre qu'entre deux interactions, il est impossible de retracer le cours des événements, de manière chronologique. Ce sont les interactions elles-mêmes qui constituent l'armature de la chronologie. Entre deux interactions successives, il n'y a pas de chronologie, pas de temps (ou alors un temps réversible, non orienté). Ici, les événements (interactions) sont l'émission de l'électron par la source, l'émission du photon, et la diffusion de l'électron par le photon. Tout se passe comme si ces événements étaient inséparables, intriqués. Vouloir les ordonner dans le temps, attribuer à l'un le rôle de "cause", à un autre celui d'"effet", est tout simplement hors sujet.

Ce qu'il faut surtout retenir, c'est que cette diffusion a pour effet de faire disparaître les franges d'interférence : les électrons semblent se comporter comme des corpuscules, et vont former deux taches bien nettes sur l'écran.

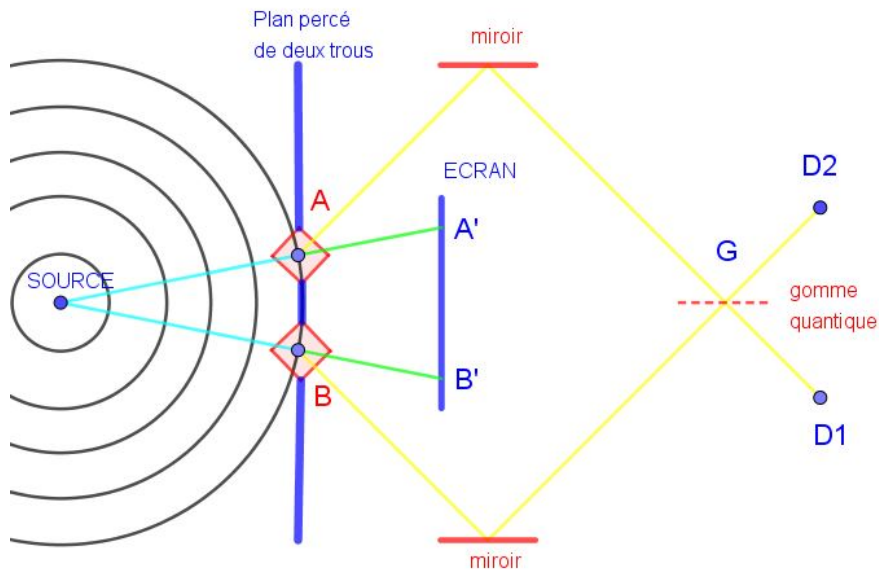
Troisième expérience :

L'idée est de placer, au niveau des trous, des convertisseurs bas.

Par rapport à l'expérience de Young classique, on fait intervenir ici deux

convertisseurs bas (cristaux BBO de  $\beta$ -borate de baryum). Il s'agit de dispositifs qui ont la propriété, chaque fois qu'ils reçoivent, en entrée, un photon quelconque de longueur d'onde  $\lambda$ , de le convertir en une paire de photons de longueur d'onde  $2\lambda$  (ce qui conserve l'énergie totale, en la partageant également entre les deux photons sortants). Ces deux photons sortants sont envoyés dans deux directions prédéterminées. Mais, surtout, ils sont intriqués entre eux. Ces deux photons seront dits "photon signal" et "photon témoin". Toute observation portant sur l'un d'eux (en l'occurrence le photon témoin) nous informe instantanément sur l'autre (le photon signal). Ce sont deux jumeaux inséparables.

Dans cette expérience, les deux convertisseurs bas (en  $A$  et  $B$ ) remplacent les trous de l'expérience de Young. Plaçons-nous dans le cas où la source n'émet qu'un photon à la fois. Ce photon unique (de longueur d'onde  $\lambda$ ) est représenté par deux lignes bleu clair (ce sont deux "possibilités de parcours", ou deux "avatars") qui atteignent les convertisseurs bas. Là, chaque "avatar" est converti en une paire de photons intriqués, de longueur d'onde  $2\lambda$ . L'un (le photon signal, représenté en vert) continue sa route vers l'écran, l'autre (le photon témoin, représenté en jaune) est dirigé vers un miroir (en trait plein rouge) qui le renvoie vers un détecteur ( $D_1$  ou  $D_2$ ). Au point d'intersection des trajectoires supposées de ces deux photons témoins, on peut placer, ou non, un miroir semi-réfléchissant (trait pointillé rouge) qui constitue ce qu'on appelle une gomme quantique ( $G$ ).



Pour commencer, supposons que la "gomme quantique" n'ait pas été mise en place.

Si on raisonne d'après la mécanique classique, en considérant les photons comme des corpuscules, le photon initial (unique) injecté dans le circuit peut passer soit par  $A$ , soit par  $B$  (parcours bleu clair). Dans chacun de ces cas de figure, il est transformé en une paire de photons intriqués; le photon signal (en vert) arrive sur l'écran, et le photon témoin (en jaune) arrive sur l'un des détecteurs  $D_1$  ou  $D_2$ . Il y a donc simultanément un photon signal et un photon témoin dans le circuit (et pas deux!). A priori, si le photon initial est passé par  $A$ , on s'attendrait à observer l'impact du photon signal en  $A'$ , et à détecter le photon témoin en  $D_1$ ; s'il est passé par  $B$ , on attend le photon signal en  $B'$  et le photon témoin en  $D_2$ .

Mais en réalité, que se passe-t-il? Eh bien... exactement ce que nous venons de dire! Après de nombreuses répétitions de l'expérience, les impacts de photons signaux constatés sur l'écran s'accumulent en  $A'$  et  $B'$ , corrélés avec la détection des photons témoins en  $D_1$  et  $D_2$ . Contrairement à ce qu'on observe dans l'expérience de Young sous sa forme classique, il ne se forme ici aucune frange d'interférence. Les photons se comportent comme des corpuscules!

Maintenant, mettons en place la gomme quantique (le miroir semi-réfléchissant représenté en trait pointillé rouge, en  $G$ ).

Si le photon témoin arrive de  $A$ , il a une chance sur deux d'être réfléchi par la gomme quantique et d'être détecté en  $D_2$ , et une chance sur deux d'être transmis, et détecté en  $D_1$ . Et c'est exactement pareil s'il arrive de  $B$ . Donc la détection du photon témoin en  $D_1$  (ou  $D_2$ ) n'est plus corrélée avec le passage du photon initial par  $A$  (ou par  $B$ ). Les photons témoins ne transportent plus aucune information: c'est comme s'ils n'existaient plus. Et les impacts des photons signaux, sur l'écran, vont alors s'organiser, progressivement, en franges d'interférence, comme dans l'expérience de Young classique! Les photons se comportent de nouveau comme des ondes!

Selon l'expression de Niels Bohr, le photon peut se comporter comme un corpuscule ou comme une onde, selon le protocole de l'expérience; jamais les deux à la fois! C'est ce qu'on appelle le principe de complémentarité.

Pour interpréter cette expérience, on a l'habitude de faire intervenir la notion de superposition d'états: le photon initial passe à la fois par  $A$  et par  $B$ ; il y a deux "avatars", mais un seul photon! Mais ces "avatars" sont plus que des "possibilités": ce sont deux états qui sont aussi réels l'un que l'autre. La fonction d'onde du photon initial est la somme de deux fonctions d'onde partielles, correspondant chacune à l'un des états superposés. Lorsque la gomme quantique n'est pas en place, la détection du photon témoin en  $D_1$  ou en  $D_2$  apporte une information (elle nous indique sans ambiguïté par où est passé le photon initial), et "cette information provoque l'effondrement de la fonction d'onde": l'un des deux avatars disparaît instantanément. Lorsque la gomme quantique est en

place, l'information sur le parcours du photon initial n'est plus disponible, donc la fonction d'onde ne s'effondre pas, les deux avatars sont toujours vivants, et produisent des interférences.

En pratique, cette explication est suffisante : les résultats de beaucoup d'expériences peuvent être prévus (statistiquement) grâce à de tels raisonnements. Mais sur le fond il y a beaucoup à dire !

Il y a du flou dans les concepts utilisés, ce qui ouvre la voie à toutes sortes d'interprétations. En introduisant une bonne dose de naïveté pour bien faire ressortir les problèmes, on peut faire un compte-rendu de l'expérience plus ou moins discutable.

Par exemple, dans le cas où le photon témoin est détecté en  $D_1$ , et où la gomme est présente, on pourrait dire :

"La détection du photon témoin en  $D_1$  ne me permet pas de savoir s'il provient de  $A$  ou de  $B$  ; ces deux hypothèses sont équiprobables, donc, ne sachant pas laquelle est la bonne, j'ai choisi de conserver les deux ; nous allons imaginer un avatar passant par  $A$ , qui doit en principe produire un photon signal qui atteint l'écran en  $A'$ , et un autre avatar passant par  $B$ , qui doit produire un photon signal qui atteint l'écran en  $B'$ . Chose curieuse, l'expérience, reproduite un grand nombre de fois, montre que les points d'impacts des photons signaux, au lieu de s'accumuler en  $A'$  et  $B'$ , forment des franges d'interférence. J'en déduis que les deux avatars que j'ai imaginés étaient réels tous les deux, et qu'ils ont interféré entre eux. Je crois pouvoir en déduire que c'est mon imagination qui a créé ces franges, bien réelles."

Nous voyons ici à l'œuvre le "syndrome du petit chien qui faisait lever le soleil" (faisait, ou croyait faire..).

Dans le cas où le photon témoin est détecté en  $D_1$ , et où la gomme est absente :

"La détection du photon témoin en  $D_1$  prouve qu'il provient de  $A$ , donc le photon initial est arrivé en  $A$ , le photon signal est parti de  $A$  et il est arrivé en  $A'$  ; il n'y a pas d'interférence."

Pas de problème ici.

Dans le cas où le photon témoin est toujours détecté en  $D_1$ , mais où on ne sait pas si la gomme est présente ou absente (le physicien est parti en vacances, c'est son assistant qui relève les impacts sur l'écran et les enregistrements des détecteurs, mais on ne lui a pas dit si la gomme est en place) :

"Sachant que le photon témoin a été détecté en  $D_1$ , je peux envisager deux

possibilités : soit la gomme est absente, alors ce photon témoin arrive de  $A$ , et le photon signal atteint l'écran en  $A'$  ; il n'y a pas d'interférence ; soit la gomme est présente, alors le photon témoin peut provenir aussi bien de  $A$  que de  $B$ , il est donc représenté par deux avatars (états superposés), et le photon signal est représenté lui aussi par deux avatars, qui vont participer à la construction de franges d'interférence sur l'écran. Mais il y a une chose que je ne comprends pas : lorsque le photon initial a été émis par la source, il ne savait pas encore si la gomme quantique était en place, donc il ne savait pas encore s'il allait contribuer à l'accumulation d'impacts en  $A'$  sur l'écran, ou à la formation de franges d'interférence. Autrement dit, il ne savait pas s'il était un corpuscule ou une onde. Il ne savait pas s'il était constitué de deux avatars ou d'un seul. Il ne savait pas si sa fonction d'onde était ou non dans une superposition d'états. Et il n'a pas pu le savoir avant d'être informé de la présence ou de l'absence de la gomme ; cette information a pu lui être transmise par le photon témoin lorsqu'il est arrivé à proximité de la gomme ; mais, à ce moment-là, le photon signal était déjà arrivé sur l'écran (car l'écran est plus proche de la source que la gomme) ! Le photon signal a-t-il reçu des directives venues du futur ?"

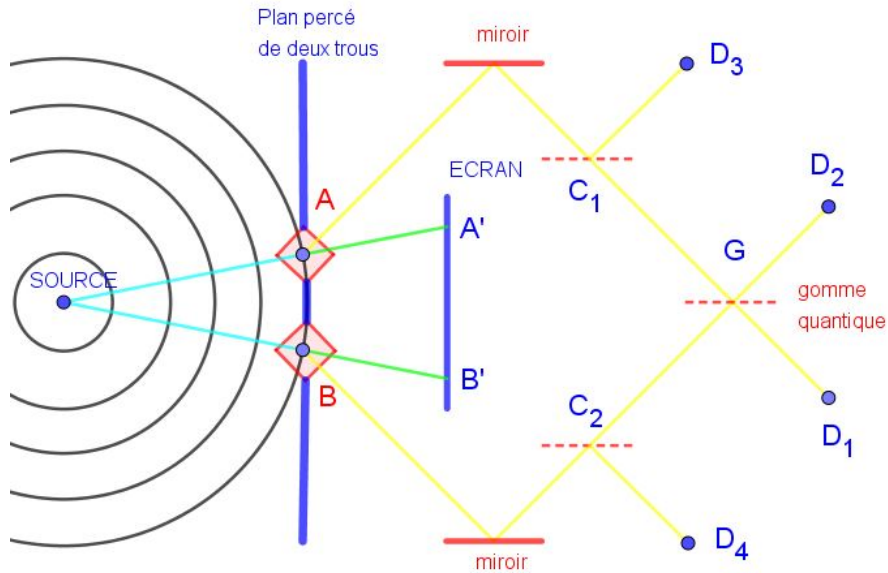
Pour éviter certaines interprétations divergentes, il semble important de souligner quelques points, sur lesquels il peut y avoir des malentendus.

Il y a d'abord le mot "information" qui peut être l'objet d'interprétations différentes. Ne confondons pas l'information subjective, qui est dans notre tête, ou dans celle de l'observateur (c'est ce qu'il sait sur les particules et les ondes en jeu dans le cadre de l'expérience), avec l'information au sens physique, qui résume les rapports que ces entités physiques nouent entre elles, indépendamment de la présence (et de la conscience) de l'observateur. Par exemple lorsqu'on dit que "le photon passe à la fois par  $A$  et par  $B$ ", on parle d'une réalité physique (une superposition d'états) ; ce n'est pas un paravent pour cacher notre ignorance ! D'autre part, quand on dit que "l'information sur la détection du photon témoin provoque l'effondrement de la fonction d'onde", c'est une maladresse, car on pourrait s'imaginer que c'est l'information subjective qui est dans la tête de l'observateur qui agit sur la fonction d'onde et provoque son effondrement ! Comme si l'observateur, par la force de l'esprit, pouvait faire apparaître ou disparaître les franges d'interférence ! En réalité, le photon témoin et le photon signal étant intriqués, on peut dire : "si je sais que le photon témoin a été capté en  $D_1$ , j'en déduis que le photon initial est passé par  $A$  et que le photon signal a atteint l'écran en  $A'$ " ; ce n'est rien d'autre qu'un raisonnement déductif. Dans cette expérience, l'observateur n'est qu'observateur, il n'est pas acteur (même s'il l'a été quand il a conçu l'expérience et réalisé le montage).

Un autre problème est que nous avons tendance à décrire la scène comme une suite d'événements se déroulant dans le temps, en distribuant les rôles de causes et d'effets selon notre bon plaisir. Mais on doit se rappeler que, lorsque deux événements sont intriqués, ou seulement corrélés, aucun ne doit être considéré comme la cause (ou l'effet) de l'autre. Dans cette expérience, en suivant

le trajet des rayons lumineux, on peut identifier des couples d'événements intriqués au degré zéro. Dans le cas où la gomme n'a pas été mise en place, ce sont : 1) l'émission du photon initial par la source et son arrivée en  $A$  (ou  $B$ ); 2) l'émission du photon signal en  $A$  (ou  $B$ ) et sa réception en  $A'$  (ou  $B'$ ); 3) l'émission du photon témoin en  $A$  (ou  $B$ ) et sa réception en  $D_1$  (ou  $D_2$ ). Ceci fait en tout six segments (ou lignes brisées) joignant sept points (événements) de l'espace-temps de Minkowski; comme ces segments (ou lignes brisées) sont des parcours de lumière, ils sont tous de longueur nulle ( $\Delta s = 0$ ). Les extrémités de chacun de ces segments sont des catastrophes intriquées au degré zéro.

Variante de la troisième expérience :



Par rapport à la version précédente, on ajoute ici deux miroirs en  $C_1$  et  $C_2$  (miroirs semi-réfléchissants; traits rouges, en pointillé) et deux détecteurs supplémentaires en  $D_3$  et  $D_4$ . Lorsque le photon témoin, venu de  $A$ , arrive en  $C_1$ , il a une chance sur deux d'être transmis vers  $G$  (la gomme quantique) et une chance sur deux d'être réfléchi vers le détecteur  $D_3$ . De même, lorsque le photon témoin, venu de  $B$ , arrive en  $C_2$ , il a une chance sur deux d'être transmis vers  $G$  et une chance sur deux d'être réfléchi vers le détecteur  $D_4$ .

Les photons sont émis un par un par la source; il ne peut y avoir simultanément dans le circuit qu'un photon signal et un photon témoin.

Si le photon témoin est détecté en  $D_3$ , on peut être certain qu'il provient de  $A$ , donc le photon signal provient aussi de  $A$ ; il arrive donc en  $A'$ . Il n'y a aucun autre "avatar" avec lequel interférer. Si le photon témoin est détecté en  $D_4$ , on peut être certain qu'il provient de  $B$ , donc le photon signal provient aussi de  $B$ , et arrive donc en  $B'$ . On répète l'expérience un grand nombre de fois; chaque fois qu'un photon témoin capté en  $D_3$ , on repère (par un système de colorisation par exemple) le point d'impact du photon signal sur l'écran. Ces points s'accumulent en  $A'$ . De même, les points d'impact corrélés avec une détection en  $D_4$  s'accumulent en  $B'$ .

Si le photon témoin est détecté en  $D_1$  ou  $D_2$ , le photon témoin peut provenir de  $A$  (dans ce cas, il a été transmis, et non réfléchi, par  $C_1$ ), ou bien de  $B$  (dans ce cas, il a été transmis, et non réfléchi, par  $C_2$ ); c'est exactement comme si ces miroirs  $C_1$  et  $C_2$  n'avaient pas été mis en place, et tout se passe comme dans la version précédente : soit la gomme quantique est en place, et le photon témoin (unique) est alors représenté par deux avatars, donc le photon signal (unique) est aussi représenté par deux avatars, l'un provenant de  $A$ , l'autre de  $B$ , ce qui produit des interférences sur l'écran; soit la gomme quantique est absente, et l'arrivée du photon témoin en  $D_1$  (resp.  $D_2$ ) est alors corrélée avec une arrivée du photon signal en  $A'$  (resp.  $B'$ ).

Quatrième expérience :

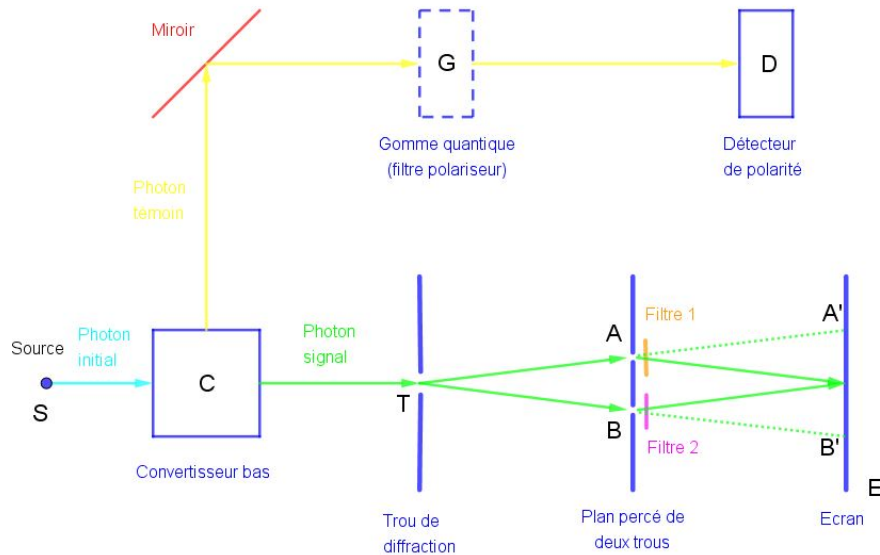
Dans l'expérience des trous de Young, on peut faire disparaître les franges d'interférence en forçant le photon ou l'électron émis par la source à "avouer" par quel trou il est passé. Cet "aveu" est ce qu'on appelle une information "which way". Dans l'une de ces expériences, elle a été obtenue grâce à un rayon laser faisant diffuser l'électron. Dans l'autre, on a utilisé deux convertisseurs bas, ce qui permet de disposer de deux "avatars" de chaque photon émis par la source : un photon signal et un photon témoin, intriqués, qu'on fait "parler" par des recouvrements. Une autre idée est de placer, derrière chaque trou, un filtre polarisant, de manière à "marquer" les photons à leur passage.

Un photon initial émis par la source (trait bleu clair) atteint le convertisseur bas (C) qui le convertit en une paire de deux photons intriqués : le photon signal (en vert) qui est dirigé vers l'écran (E) en passant par un dispositif de Young, et le photon témoin (en jaune) qui est dirigé vers un détecteur de polarité (D), en passant éventuellement par une "gomme quantique" (G).

Ces deux photons sont "intriqués en polarisation" : si l'un d'eux a, par exemple, une polarisation verticale (polarisation 1), l'autre aura une polarisation horizontale (polarisation 2). Nous précisons ce que nous entendons par là dans la section suivante.

Sur le parcours du photon signal, le dispositif de Young (plan percé de deux trous A et B) est équipé de deux filtres polarisants : le filtre 1 sélectionne la

polarité 1 pour les photons sortant du trou A, et le filtre 2 sélectionne la polarité 2 pour les photons sortant du trou B. Le trou de diffraction (T) est destiné à favoriser le passage des photons par les trous A et B, et la formation (éventuelle) de franges d'interférence sur l'écran E.



Sur le parcours du photon témoin, la gomme quantique est un autre filtre polarisant, destiné à sélectionner une polarité pré-déterminée pour le photon sortant. Cette gomme peut être présente ou absente.

Quant au miroir (en rouge), il a un rôle... dans la mise en page! On n'en tiendra pas compte dans l'expérience.

Supposons tout d'abord que la gomme quantique soit absente. Le détecteur D mesure la polarité du photon témoin (polarité 1 ou polarité 2). Si c'est la polarité 1 qui est détectée, alors le photon signal doit arriver sur l'écran avec la polarité opposée (polarité 2), puisque les deux photons sont intriqués. Ceci permet de dire par quel trou est passé le photon signal. Pour être précis : sachant que le détecteur D a détecté un photon témoin de polarité 1, on peut en déduire que le photon signal est passé par le trou B ; inversement, si le détecteur D a détecté un photon témoin de polarité 2, on peut en déduire que le photon signal est passé par le trou A. La mesure effectuée sur le photon témoin nous renseigne sur le parcours du photon signal.

Intuitivement, on pourrait penser que le photon signal "choisit" de passer par le trou A ou par le trou B (par tirage au sort), ce qui sélectionne une certaine



polarité qu'il conserve ensuite; l'information est transmise au convertisseur bas (C) en suivant le parcours vert de manière antichrone (retour vers le passé), puis de là au détecteur D en suivant le parcours jaune. Dans ce raisonnement, le photon signal décide et le photon témoin obéit. Mais on peut aussi bien inverser les rôles... Un de ces deux points de vue est-il plus adapté que l'autre? Si le photon signal atteint l'écran avant que le photon témoin ne soit arrivé en D, on est tenté de dire que c'est le photon signal qui "décide", selon le principe qui dit que la cause précède l'effet. Mais si c'est le photon témoin qui arrive en D avant que le photon signal n'ait atteint les deux trous, on sera plutôt tenté de dire que c'est la mesure du photon témoin qui impose au photon signal de passer par tel ou tel trou! Mais en jouant sur la longueur des deux parcours (vert et jaune), on peut facilement inverser l'ordre temporel des deux événements! Aucun des deux n'est la cause de l'autre. Ils sont corrélés, c'est tout.

Ces paradoxes proviennent du fait qu'on veut imposer à l'espace-temps (et à la causalité) une topologie pythagoricienne; ils disparaissent si on se fie à la topologie minkowskienne: l'événement C (émission des deux photons intriqués) et l'événement E (réception du photon signal sur l'écran), étant reliés par le parcours de lumière vert, sont liés par une relation d'immédiateté ( $\Delta s = 0$ ); de même, C (émission) et D (détection du photon signal), étant reliés par le parcours de lumière jaune, sont liés eux aussi par la relation d'immédiateté. Nous sommes dans le cas typique d'intrication d'ordre un. L'information n'a pas besoin de circuler entre C et D, ni entre C et E, en raison de l'immédiateté. Et, surtout, elle a encore moins besoin de circuler de manière "antichrone".

Mais au fait, qu'observe-t-on sur l'écran? Aucune frange d'interférence! Si un photon témoin est détecté avec la polarité 1, le photon signal est certainement passé par A, et il atteint l'écran en A'; inversement, si c'est la polarité 2, il l'atteint en B'. On obtient deux taches bien délimitées.

Faisons maintenant intervenir la gomme quantique G. Elle va sélectionner une polarité du photon témoin (par exemple la polarité 1) exactement comme le font les filtres placés derrière les trous A et B. Ceci n'est pas une mesure: ce n'est qu'une sélection d'une composante de l'onde. Que devient l'autre composante? Pour se fixer les idées, on pourrait dire qu'elle est envoyée vers un autre détecteur D' (ou qu'elle se perd hors du montage de l'expérience). L'onde sortante qui va de G à D n'est plus celle du photon témoin, mais seulement une composante de celle-ci. Si on connaissait les résultats des mesures effectuées par D et D', on pourrait essayer de reconstituer la fonction d'onde du photon témoin pour en déduire celle du photon signal. Mais le protocole de l'expérience fait que le détecteur D va toujours conclure: "polarité 1", ce qui correspond à l'onde sortante, mais pas à l'onde témoin. L'information a été perdue. Les événements D et E ne sont plus intriqués, ni même corrélés. La gomme a mis hors jeu le détecteur D, ainsi que toute la partie du montage concernant le photon témoin. Dans ce cas, le photon signal se comporte comme dans l'expérience de Young standard: il donne deux "avatars" qui interfèrent et donnent des franges

d'interférence.

L'utilisation de filtres polarisants, dans cette expérience, n'est pas neutre. Par rapport aux miroirs semi-réfléchissants ou aux convertisseurs bas, les filtres polarisants ont une action destructive sur les états superposés.

Lorsqu'un rayon lumineux non polarisé traverse un polariseur, seule la composante de l'onde parallèle à l'axe du polariseur (la moitié de l'énergie) est transmise ; la composante perpendiculaire est absorbée. Ceci signifie que la moitié de l'énergie de l'onde incidente va contribuer à alimenter l'agitation des électrons dans le polariseur ; cette énergie va se diluer d'abord à l'intérieur du polariseur, ensuite, de proche en proche, dans les corps macroscopiques qui sont en contact avec lui. On peut dire que la moitié de l'énergie de l'onde a été récupérée par le monde macroscopique.

Si, à la place du rayon lumineux, nous considérons un photon unique, alors il a une chance sur deux d'être transmis (il prend alors la polarité imposée par le polariseur), et une chance sur deux d'être "récupéré par le monde macroscopique".

Ce phénomène doit être considéré comme une authentique "catastrophe". A la sortie du polariseur, le photon est différent de ce qu'il était à l'entrée, et cette transformation n'est pas réversible : si on "inverse le sens du temps", le photon (polarisé) va revenir vers le polariseur, il va le traverser dans l'autre sens, mais, selon les lois physiques, il ne va pas retrouver sa polarisation (ou absence de polarisation) initiale. Nous sommes passés à un autre niveau de la physique : celui du temps orienté. A partir du moment où les particules (ou ondes) qui nous intéressent échangent de l'énergie avec le monde extérieur (macroscopique), des phénomènes irréversibles se produisent. Le mot "macroscopique" ne signifie pas "étendu dans l'espace", mais "composé d'un grand nombre de particules qui échappent au cadre de l'expérience", ou encore : "complexe".

Mais la polarisation est un phénomène qui soulève des questions bien particulières, liées à cette "observable" typiquement quantique qu'on appelle le spin ; les réflexions sur ce sujet ont conduit aux inégalités de Bell. Nous en reparlerons un peu plus loin.

L'intérêt des expériences que nous venons de décrire est de montrer comment se combinent les aspects ondulatoires et corpusculaires des photons, leur intrication (qui s'interprète bien dans le cadre de la topologie minkowskienne de l'espace-temps), et les superpositions d'états (qui sont tout simplement des ondes superposées, comme on en trouve dans les problèmes de cordes vibrantes, mais qu'on peut interpréter aussi en termes de degrés de liberté).

Tous ces exemples montrent surtout qu'entre deux "catastrophes", il n'y a pas de véritables événements pouvant être situés dans l'espace et replacés chro-

nologiquement dans la frise du temps ; il n'y a que des "non-événements". Il en ressort cette idée : l'espace et le temps tels que nous les connaissons n'existent pas entre les catastrophes, qui sont les seuls vrais événements (les vraies interactions) ; et ce sont elles qui définissent la flèche du temps.

Toutes les expériences que nous venons de décrire s'expliquent simplement à partir de ces trois idées :

- les objets que nous appelons particules sont de nature essentiellement ondulatoire, mais leurs interactions (les catastrophes) sont des phénomènes discrets, quantifiés ;

- une même particule (une onde, donc) peut se trouver simultanément dans deux ou plusieurs états superposés, qu'on peut considérer comme des degrés de liberté de l'onde, et qui sont bien réels, puisque susceptibles de produire des interférences ;

- deux interactions reliées par un trajet de lumière vérifient :  $\Delta s = 0$  ; elles sont alors intriquées, reliées par une relation d'immédiateté, intemporelle et acausale, comme s'il s'agissait d'une interaction unique ; ceci étant probablement lié à la topologie minkowskienne de l'espace-temps.

Au milieu du vingtième siècle, ces trois idées ont beaucoup troublé les esprits habitués à la mécanique classique. Mais on comprend mieux aujourd'hui qu'elles n'ont rien de "métaphysique" : ce sont bien des lois physiques, qui s'intègrent parfaitement dans l'ensemble de nos connaissances sur la matière et sur le monde, même si certaines interprétations sont encore discutées.

On peut remarquer aussi que les dispositifs de ces expériences sont étendus dans l'espace : faut-il les considérer comme des expériences de "microphysique" ? Oui, si on entend par là qu'on y observe le comportement d'un petit nombre de particules ou ondes ; non, si on estime que la microphysique doit se cantonner à l'étude de ce qui est "très petit". Mais les lois de la physique quantique ont de droit de s'exprimer à toutes les échelles.

## 20 Les brouillons de la Nature

Lorsqu'un écrivain écrit un roman, il fait un brouillon ; il s'autorise à revenir en arrière, à faire des modifications, à changer d'avis, à sélectionner, raturer, couper, ajouter, valider, à jouer sur les possibles... tant que le roman n'est pas publié. De la même façon, pour interpréter les expériences qui viennent d'être décrites, nous avons été amenés à "jouer sur les possibles", à mettre en concurrence plusieurs "avatars", dont un seul sera "élu" pour devenir réel, les autres étant définitivement écartés, rejetés dans le néant.

On pourrait penser que seul celui qui est élu est réel, et que les autres sont purement imaginaires (c'est-à-dire qu'ils ont été inventés par le théoricien qui cherche à expliquer l'expérience).

On est donc un peu déconcerté de constater que ces possibilités imaginaires peuvent produire des interférences bien réelles...

Mais ces possibilités sont-elles vraiment imaginaires? Ce mot n'est pas satisfaisant, car il fait référence à des inventions du cerveau humain; il vaudrait mieux parler de "virtuel".

Le virtuel est partout en physique. Par exemple, pour définir une géodésique allant d'un point  $A$  à un point  $B$ , on calcule une "intégrale de chemins", c'est-à-dire qu'on envisage une infinité de parcours possibles, pour sélectionner celui qui minimise la distance parcourue, ou qui maximise le temps propre. On met en concurrence des possibles, dont un seul sera élu. On traduit ensuite le résultat par une équation. Bien entendu, la Nature ne connaît pas les équations; mais peut-être connaît-elle la "concurrence des possibles"? C'est une question qu'on doit se poser, chaque fois qu'une loi physique s'appuie sur le formalisme lagrangien ou hamiltonien...

Peut-on se représenter le réel comme une écume flottant sur l'immensité de l'océan des possibles?

Quand il sera question du rayonnement du corps noir ou de l'effet Casimir, nous verrons que les calculs consistent essentiellement à dénombrer des possibilités virtuelles. Peut-on tirer des conclusions sur le réel en raisonnant sur le virtuel? Comme on le verra, la réponse est clairement : oui.

Ces "possibilités" que nous qualifions de "virtuelles" ne peuvent pas être observées directement : elles sont évanescentes. On pourrait considérer qu'elles sont hors du domaine d'étude de la Science. Pourtant, elles se combinent selon des règles précises, et ont des conséquences (en premier lieu, les figures d'interférences) qui sont à la fois calculables et observables.

Dans l'expérience des trous de Young, on peut dire que chaque photon passe "virtuellement" par les deux trous à la fois; on peut dire aussi que c'est une onde électromagnétique qui est passée par les deux trous : c'est à première vue plus satisfaisant, car la notion d'onde permet de justifier les figures d'interférence. Mais comment définir la nature de cette onde? Dans le cas de la houle à la surface de la mer, ou du son dans l'atmosphère terrestre, on explique la nature des ondes par le mouvement des atomes. Dans le cas d'une onde électromagnétique, à l'échelle macroscopique (onde produite par un grand nombre de particules chargées en mouvement, impliquant de nombreux photons), le modèle en vigueur fait intervenir un champ à deux composantes vectorielles : un champ

électrique et un champ magnétique combinés. Ce champ électromagnétique peut être étudié expérimentalement. On est dans le domaine de la physique ondulatoire classique.

Mais lorsqu'on parle de l'onde associée à un photon unique (ce qu'on pourrait appeler une onde élémentaire), on entre dans le domaine de la physique quantique. On est tenté d'étendre la description macroscopique d'une onde complexe au cas d'une onde élémentaire, en faisant tendre le nombre de photons vers 1. Mais cette démarche se heurte à un très sérieux obstacle. Supposons qu'on veuille étudier expérimentalement cette onde élémentaire : tout dispositif expérimental destiné à recueillir une information sur cette onde va prélever, au minimum, un quantum d'information, c'est-à-dire un photon ; comme l'onde élémentaire ne contient qu'un photon, elle va être totalement vidée de son contenu. Observer une onde élémentaire, c'est la faire disparaître ; c'est provoquer l'effondrement, le collapse. En ce sens, on peut dire qu'une onde élémentaire est inobservable, ou, si on préfère, évanescence : si elle se manifeste dans une interaction, l'ensemble de l'information portée par elle se réduit immédiatement à cette interaction (le mot "immédiatement" devant être pris ici dans le sens qui a été défini pour l'"immédiateté"). Dans l'interprétation de Copenhague, on dit que l'amplitude de l'onde est liée à la probabilité de présence du photon. Ceci est satisfaisant, d'une certaine manière : les probabilités sont, elles aussi, évanescences (si je sais que le photon est passé par le trou  $A$ , alors il n'a pas pu passer par le trou  $B$  : la seconde possibilité - ou le second avatar - se volatilise "immédiatement") ; mais les probabilités ne connaissent pas les interférences, donc il existe "quelque chose" qui est capable de produire des interférences, et qui ne se réduit pas à une probabilité. Ce "quelque chose" étant une onde élémentaire, évanescence.

Une autre option serait de décrire l'onde électromagnétique élémentaire comme une multitude de photons virtuels. Ces photons virtuels étant, bien entendu, évanescents : si l'un d'eux est validé par une interaction, tous les autres se volatilisent immédiatement. A la corbeille ! Ce n'étaient que des brouillons...

Validé ? Que veut dire ce mot ? Il signifie qu'une interaction a transmis les propriétés (par exemple l'énergie) d'une particule (ou d'un système) à une autre particule (ou à un autre système), selon certaines lois de conservation, de sorte que cette particule (ce système) d'origine va continuer son existence ailleurs, dans un autre cadre, dans une autre peau. Ne pas être validé, c'est s'engager dans une impasse, et tomber dans l'oubli. Seuls les privilégiés sortent du labyrinthe. Comment sont-ils choisis ? Pour le moment, la physique n'a pas la réponse.

## 21 Les superpositions d'états

Dans les expériences décrites précédemment dans la section sur la dualité onde/corpuscule (expérience de Wheeler, expérience de Young), on peut considérer qu'un même photon a suivi à la fois deux chemins différents. Pour décrire ce photon, on utilise une fonction d'onde, qui est la superposition de deux fonctions d'onde partielles bien distinctes, l'une correspondant à l'un des parcours, l'autre à l'autre. On pourrait penser que chacune de ces fonctions d'onde partielles correspond à un parcours possible, dans un sens probabiliste : l'un des deux parcours étant le "vrai" parcours de l'onde, au sens physique, et l'autre étant imaginaire. Mais c'est faux, puisque ces deux ondes partielles interfèrent entre elles. Le réel n'interfère pas avec l'imaginaire ! Ces deux ondes partielles sont aussi réelles l'une que l'autre. Les possibles se comportent comme s'ils étaient réels ! ... donc ils sont, d'une certaine manière, réels.

La fonction d'onde est censée nous permettre de prévoir, de manière probabiliste, le résultat d'une mesure. On peut mesurer l'énergie d'une particule, son impulsion, son spin, etc., mais aussi sa position, qui fait partie des "observables". Dans les exemples précédents, l'observable "position" peut prendre plusieurs valeurs, puisque le photon (considéré comme une particule, ou comme une onde) peut se trouver simultanément à plusieurs endroits différents. L'observable "position" est dans un état superposé. Mais si on effectue une mesure, ou si une interaction a lieu, l'observable "position" va se fixer sur l'une des valeurs possibles. Cette position est "élue", les autres passent aux oubliettes. C'est l'effondrement de la fonction d'onde (qu'on peut appeler "catastrophe"). Sur les critères de ce "choix", qui donne l'impression d'être arbitraire, la physique quantique, jusqu'à présent, ne nous dit rien : elle nous propose seulement des probabilités. Si des causes déterministes (résonances ?) existent, elles restent à trouver.

Les autres quantités observables peuvent être, elles aussi, dans des états de superposition. Par exemple la polarisation d'une onde, le spin d'une particule...

Pour les "réalistes" (comme Einstein), une particule doit posséder des propriétés bien définies, même entre deux observations ; l'utilisation des probabilités n'est alors qu'un aveu d'ignorance : il existerait une réalité sous-jacente, déterminée de manière univoque, bien qu'encore (provisoirement ?) inaccessible. Pour d'autres, le recours aux probabilités est nécessaire, de par la nature même du monde quantique. Certains pensent que les "états superposés" décrivent la réalité telle qu'elle est vraiment ; ce qui signifie que les systèmes quantiques possèdent des degrés de liberté (dans leur position, leur vitesse, leur énergie...) qui sont impensables dans notre monde macroscopique. D'autres encore estiment que la physique quantique n'étudie pas le monde tel qu'il est, mais la connaissance que l'observateur en a ; les probabilités n'exprimeraient alors que les informations que possède le physicien sur le système qu'il étudie, et la science ne pourrait pas aller au-delà d'une étude de cette information.

Nous savons maintenant que l'interprétation "locale/réaliste" est erronée.

D'autre part, réduire la physique quantique aux probabilités (subjectives) nous semble réducteur, pour une raison précise : deux états superposés se révèlent par leurs interférences ; or la théorie mathématique des probabilités, à elle seule, ne génère jamais d'interférence.

Il nous semble donc, tout simplement, que la superposition des états mérite d'être considérée comme une réalité physique.

Ceci nous oblige à revoir la conception du temps et de la causalité que nous voyons à l'œuvre dans le monde macroscopique : nous avons l'habitude de nous représenter le cours des événements de manière linéaire et continue, alors qu'en microphysique ce serait plutôt une tresse formée d'un grand nombre de fils (les "possibles") qui se divisent, se séparent, s'excluent, se rejoignent...

On peut imaginer qu'une même particule (un électron tournant autour du noyau d'un atome par exemple) puisse se trouver simultanément en de nombreux endroits, sur des orbites différentes... Mais il ne suffit pas d'imaginer : il faut disposer d'un critère pour séparer le réel de l'imaginaire. Et ce critère existe : il se base sur l'existence d'interférences.

Prenons un exemple tiré des travaux de Serge Haroche : dans certains atomes (atomes de Rydberg, à électron externe isolé sur une orbite particulièrement grande), on peut placer cet électron externe dans une superposition de deux états notés "e" et "g". Dans l'un des états, l'électron est représenté par une orbite de De Broglie stationnaire dont la longueur d'onde est une fraction entière de la longueur de l'orbite (par exemple  $1/50$ ) ; dans l'autre état, ce sera par exemple  $1/51$ . Dans chacun de ces états, la probabilité de trouver l'électron en un point de l'orbite est globalement identique sur toute sa circonférence : la distribution est symétrique. Mais les deux ondes interfèrent entre elles : si elles sont en concordance de phase en un point de l'orbite, elles seront en opposition de phase à l'opposé. La distribution de la probabilité de présence de l'électron n'est plus symétrique, donc la densité de charge n'est plus répartie de manière homogène, et l'atome va se comporter comme un petit dipôle. Le but de l'expérience est ailleurs, puisque Serge Haroche n'utilise pas des photons pour étudier ces atomes, mais il utilise ces atomes pour étudier des photons. Contentons-nous de tirer la conclusion qui nous intéresse : les deux états de l'atome existent bien simultanément, et non comme deux configurations qui se succèdent dans le temps ou alternent, ni comme deux possibilités entre lesquelles nous ne savons pas choisir par manque d'informations, puisque c'est l'interférence des deux ondes qui est exploitée par le physicien. Les deux états possèdent le même poids :  $1/2$ . Si on mesure l'état de l'atome, on va trouver soit "e", soit "g", avec la même probabilité :  $1/2$ . Mais entre deux mesures, les deux états sont bien présents simultanément, puisqu'ils produisent des interférences, prouvées

par le fait que l'atome se comporte en dipôle! L'électron externe est réellement dans deux états en même temps! Et il s'agit bien d'un seul électron, et non de deux demi-électrons!

L'idée qu'un corpuscule puisse être à la fois dans plusieurs états différents choque notre intuition. Peut-être, mais nous avons dit plus haut que ce que nous appelons "particules" s'interprète mieux en termes d'ondes que de corpuscules. Et l'idée qu'une vibration complexe puisse être la superposition de plusieurs vibrations simples (ondes stationnaires par exemple) ne choque personne! Le fait que les entités étudiées par la microphysique puissent avoir plus de degrés de liberté que les corps étudiés en macrophysique ne soulève pas, en soi, des questions métaphysiques... Mais il soulève une question très "physique" : comment se fait-il que ces degrés de liberté disparaissent à notre échelle? Nous allons bientôt revenir sur cette question.

## 22 La cohérence

Pour illustrer le phénomène de cohérence, prenons l'exemple d'un faisceau laser. Pour l'obtenir, on place un ensemble d'atomes dans un état excité soigneusement calculé, par la technique du pompage optique : un électron de chaque atome va se placer sur une orbite externe d'énergie élevée. Ces atomes se trouvent alors dans un état d'équilibre instable : l'électron externe peut à tout moment retomber vers l'orbite basse (niveau fondamental). Puis on laisse ce château de cartes s'écrouler (ou on l'incite à le faire). Chaque électron désexcité retombe à son niveau fondamental en émettant un photon qui entraîne la désexcitation d'un autre atome, enclenchant une réaction en chaîne. L'ensemble des photons ainsi émis forme une onde cohérente : tous les photons sont émis (presque) simultanément, en phase.

On dit que le faisceau est cohérent, mais on pourrait dire aussi que c'est le phénomène de désexcitation qui s'est produit de manière cohérente. La cohérence des photons est d'abord une cohérence des atomes émetteurs.

Une chose essentielle en physique quantique est celle-ci : pour décrire le comportement de ces photons cohérents (ou de ces atomes cohérents), on utilise une fonction d'onde unique.

En physique classique, on peut en principe étudier séparément les différents éléments d'un système, et en déduire le comportement du système entier. Le rôle de chaque élément peut être analysé et clairement défini. On peut, en principe, reconstruire le scénario. En tout cas, on est convaincu qu'il n'existe qu'un scénario possible, le seul authentique. En physique quantique, on n'arrive pas à séparer les éléments. Par exemple, on ne peut pas dire : "C'est l'atome  $A$  qui s'est désexcité le premier, il a émis un photon qui a désexcité l'atome  $B$ , etc."



On peut dire : "C'est peut-être l'atome  $A$  qui s'est désexcité le premier." Mais on peut dire la même chose de chacun des autres atomes, avec une probabilité identique. On reste dans l'incertitude. On a un grand nombre de "possibles", d'"avatars" de scénario.

La grande question est de savoir si cette incertitude est fondamentale. Autrement dit : est-ce qu'on arrivera un jour, par des observations plus fines, à faire le tri entre tous ces possibles ? A identifier le vrai scénario ? Ou bien la nature même de la physique quantique nous interdit-elle d'accéder à cette vérité, peut-être parce-qu'elle n'existe pas ?

Il se trouve qu'on a plusieurs raisons de penser que c'est une incertitude fondamentale. En voici quelques-unes.

La première raison se trouve dans le paragraphe précédent, sur les états superposés. Chacun des atomes peut être à la fois dans plusieurs états : il peut, en même temps, être et ne pas être le premier à s'être désexcité ; il peut donc exister simultanément plusieurs scénarios aussi vrais les uns que les autres, mais non départagés.

Une deuxième raison réside dans la fonction d'onde de Schrödinger, dont nous parlerons plus longuement dans le document suivant. A une particule  $A$  on associe une fonction d'onde  $\Psi_A(ct, x, y, z)$  ; selon l'interprétation de l'école de Copenhague, le carré de la norme de cette fonction exprime la probabilité  $P_A(ct, x, y, z)$  de trouver la particule  $A$  au point  $(ct, x, y, z)$  (ou plus précisément dans un voisinage convenablement calibré). De même, le carré de la norme de  $\Psi_B(ct, x, y, z)$  exprime la probabilité  $P_B(ct, x, y, z)$  de trouver la particule  $B$  au point  $(ct, x, y, z)$ . En supposant que ces deux probabilités soient indépendantes, alors, pour des raisons purement mathématiques, la probabilité de trouver à la fois  $A$  et  $B$  au point  $(ct, x, y, z)$  est :  $P_{AB} = P_A.P_B$ . Les probabilités se multiplient, donc les fonctions d'onde  $\Psi_A$  et  $\Psi_B$  se multiplient aussi, et on doit donc avoir :

$$\Psi_{AB} = \Psi_A.\Psi_B.$$

La fonction d'onde associée au système  $AB$  est égale au produit des deux fonctions d'onde individuelles.

Mais dans certaines situations on s'aperçoit que la fonction d'onde  $\Psi_{AB}$ , pour des raisons purement mathématiques, ne peut pas être factorisée en un produit de deux fonctions  $\Psi_A$  et  $\Psi_B$ , l'une ne dépendant que de  $A$  et l'autre de  $B$ . Dans ce cas, il y a intrication entre les particules  $A$  et  $B$ . Elles ne sont pas séparables.

Dans notre exemple sur le laser, les fonctions d'ondes des atomes à l'origine d'un faisceau ne sont pas séparables.

La troisième raison, c'est le principe d'incertitude de Heisenberg. Pour pouvoir retracer de manière rigoureuse la chute du château de cartes, il faudrait pouvoir retracer précisément l'histoire de chaque atome, de chaque électron, et selon le principe d'incertitude on ne peut pas connaître avec la précision nécessaire à la fois la position et la vitesse de chaque particule. Nous ne pouvons pas séparer efficacement les comportements de ces particules, non pas parce que nous manquons d'informations, mais parce-que les particules elles-mêmes en sont incapables. Elles sont inséparables. Elles ne possèdent pas de propriétés individuelles, mais seulement des propriétés partagées. La seule possibilité, pour la physicien, est de les envisager comme un tout, avec une seule fonction d'onde.

## 23 La décohérence

Il y a une très grande parenté entre les deux phénomènes que nous venons d'évoquer : les états superposés et la cohérence. Les deux sont dus au fait que les particules sont en réalité des ondes. Mais dans le cas de la superposition d'états, il s'agit d'une particule unique se comportant comme si elle était formée de plusieurs particules indépendantes (des "possibles") ; dans le cas de la cohérence, il s'agit au contraire d'un système formé de plusieurs particules, mais ce système se comporte comme une particule unique, gérée par une seule fonction d'onde.

Ces notions embarrassaient non seulement Einstein, mais aussi des physiciens comme Schrödinger. En microphysique, on est confronté régulièrement à ces problèmes de superposition d'états ou de cohérence, alors que dans notre monde macroscopique ils semblent absents. Pourquoi ?

Des recherches sur cette question (le problème de la transition du quantique au classique) ont été effectuées, et ont conduit à la "théorie de la décohérence", qui cherche à expliquer pourquoi les états superposés ou, au contraire, cohérents, sont (toujours ?) éliminés à l'échelle macroscopique. Le point central est qu'il est facile de placer des particules (ou plutôt des ondes) dans des états superposés, mais plus difficile de les y maintenir de manière durable. Ce sont, semble-t-il, les interactions avec l'environnement qui les obligent à "choisir". Plutôt que de "choix", on pourrait parler de tri, ou de sélection. A chaque interaction, l'éventail des états possibles se referme. En même temps, la particule (l'onde) noue des liens d'intrication avec son environnement. Elle perd des degrés de liberté. C'est par des interactions avec son environnement que la particule devient elle-même : ses propriétés potentielles sont sélectionnées à chaque interaction. Une particule isolée resterait dans une superposition d'états, ce qui, de notre point de vue, correspond à de l'indétermination. Le tissu des liens qui s'établissent entre les particules a plus de réalité que les particules elles-mêmes. Les structures qu'elles contribuent à construire sont mieux déterminées, plus stables, et ont, en quelque sorte, une meilleure mémoire.

On peut rappeler ici la parabole du chat de Schrödinger : ce chat (macroscopique) est enfermé dans un local où se trouvent un atome radioactif et une fiole contenant un gaz toxique. La désintégration de l'atome radioactif est censée briser la fiole et asphyxier le chat. L'intérêt de cette parabole est de montrer que le passage du niveau quantique (la désintégration ou non de l'atome) au niveau macroscopique (le chat mort ou vivant) peut conduire à une absurdité. Si on traite l'atome à la manière de la physique quantique, on est amené à admettre qu'il peut être dans un état superposé (à la fois désintégré et non désintégré), ce qui suggère que le chat peut, lui aussi, par voie de conséquence, être dans un état superposé : à la fois mort et vivant.

A cela, les physiciens répondent : l'atome peut effectivement être dans un état superposé, mais pendant très peu de temps, car sa désintégration possible a des conséquences immédiates sur son entourage, qui va acter ou non la désintégration. Si elle est actée, ce n'est pas par un témoin unique (une particule, un atome), mais par une communauté de témoins (une structure d'atomes), cette communauté étant liée par des liens d'intrication qui font qu'un témoin ne peut pas estimer qu'il y a eu désintégration quand les autres disent que non. De même que, dans un vol d'étourneaux, un oiseau ne sait pas virer à droite quand tous les autres virent à gauche. Intriqués, les étourneaux ?

L'expression "chat de Schrödinger" est passée dans le langage courant des physiciens : il désigne un ensemble d'atomes, aussi important que possible, manifestant des propriétés quantiques (superposition d'états, ou bien cohérence). Cette course met en jeu des technologies sophistiquées.

## 24 Non-événements et catastrophes

L'étude des orbites planétaires ou du champ gravitationnel fait intervenir des fonctions trigonométriques (sin, cos, tan...), exponentielles (exp), hyperboliques (ch, sh, th...). Toutes ces fonctions sont analytiques : leurs développements en série de Taylor convergent en tout point où elles sont définies. Il en résulte que chacune d'entre elles peut être identifiée à sa série de Taylor. De plus, la convergence de la série, en un point, s'étend à un voisinage ouvert de ce point, et, de là, à tout son domaine de définition. Il en résulte que la connaissance exacte des valeurs prises par la fonction à l'intérieur d'un ouvert, aussi petit soit-il, permet de retrouver les valeurs de la fonction dans la totalité de son domaine de définition. On pourrait dire que toute l'information sur la fonction est contenue dans chacune de ses parties (dans un domaine ouvert, aussi petit soit-il). Par exemple, la connaissance parfaite d'une portion, même très petite, d'une orbite, permet (en principe, car en réalité c'est très difficile) de reconstituer l'orbite entière. De telles fonctions servent à étudier ce qu'on pourrait appeler des "non-événements".

Si on veut étudier la trajectoire d'une astre subissant des forces gravitationnelles, on a besoin d'exprimer cette trajectoire par une fonction analytique ; pour cela, on a besoin de connaître sa position initiale (premier terme de la série de Taylor), sa vitesse initiale (second terme de la série, ou dérivée d'ordre un), son accélération initiale (troisième terme de la série, ou dérivée d'ordre deux), et ainsi de suite. Connaissant tous les termes de la série, on peut en principe reconstituer la trajectoire. La position, la vitesse et l'accélération initiales ne sont suffisantes que dans des cas très particuliers. L'idée selon laquelle les dérivées d'ordre un et deux (vitesse et accélération) seraient suffisantes est une hypothèse souvent admise (à juste titre ?) pour de nombreux phénomènes physiques et astronomiques. En réalité, mathématiquement, l'étude d'un non-événement fait intervenir, potentiellement, toutes les dérivées, à l'infini. Et la connaissance de toutes les dérivées en un point donné, à un instant donné, donne accès à toutes les valeurs de la fonction et de toutes ses dérivées en tout autre point, à tout autre instant. La totalité de l'information est présente en tout lieu, en tout temps. Mais cette "information" n'est pas une véritable information, puisqu'elle ne décrit que des "non-événements".

Supposons maintenant que deux planètes entrent en collision. C'est ce qu'on appelle une catastrophe. C'est même une grande catastrophe, mais de petites catastrophes se produisent régulièrement : collisions d'atomes, désintégration de particules, etc. Ce sont ces catastrophes qui structurent le vécu de l'Univers, ou si on préfère sa mémoire. Cette succession de catastrophes (au sens de la "théorie des catastrophes") est orientée dans le temps.

Les non-événements, au contraire, semblent bien respecter scrupuleusement la symétrie T ; ils ne reconnaissent pas la flèche du temps.

Dans le domaine de la physique quantique, en l'absence d'interaction, c'est l'indétermination qui règne (ou, plus précisément, les états superposés). Les interactions (qui sont de petites catastrophes) obligent les particules à "faire des choix".

Les fonctions d'onde décrivent des non-événements, d'une manière que nous interprétons comme probabiliste, intemporelle. C'est l'effondrement de la fonction d'onde qui représente le véritable événement (la "catastrophe"). La grande étrangeté de la physique quantique provient du fait que les "non-événements" (disons les fonctions d'onde) possèdent une réalité physique. Ceci est vrai aussi bien à l'échelle macroscopique qu'à l'échelle microscopique. Dans le domaine de la gravitation, le champ semble bien être du domaine du "non-événement", de même que tous les autres champs et les fonctions d'onde : apparemment, il respecterait la symétrie T et ignorerait le temps orienté tel que nous le connaissons, de la même façon que la fonction de Green symétrique et les diagrammes de Feynman.

Ceci est à mettre en relation avec ce que j'appelle le "degré zéro de l'in-

trication" : les particules-vecteurs dont la vitesse est égale à  $c$  (photons, gravitons?) établissent naturellement des liens d'intrication qui n'obéissent pas à notre conception subjective du temps. Cette conception ne devient pertinente que pour la matière usuelle, à masse au repos non nulle, participant à la mémoire collective orientée dans le temps.

Dans le document sur le champ d'entraînement, section sur la notion de masse, nous serons amenés à distinguer deux catégories de particules : d'une part les particules de masse nulle (photons, éventuellement "gravitons" ?), d'autre part les particules massives, qui sont (ou se comportent comme si elles étaient) des constructions composites formées de particules sans masse. Ces deux catégories obéissent à des physiques différentes, à des logiques différentes : la physique de premier niveau décrit les non-événements, elle est sans mémoire, elle ignore le temps tel que nous le connaissons, c'est le domaine de la mécanique ondulatoire, souvent interprétée en termes probabilistes, basée sur l'indétermination, obéissant à la fonction de Green symétrique, dans laquelle le "degré zéro de l'intrication" est la règle; la physique de second niveau a une mémoire (comme le disque dur d'un ordinateur), et, de catastrophe en catastrophe (où "catastrophe" peut être traduit par "réduction de la fonction d'onde") elle s'oriente progressivement dans le temps, et, avec l'appui de la loi des grands nombres, construit progressivement la physique que nous connaissons.

Comme on peut le voir dans l'expérience des fentes de Young, la physique de premier niveau n'est pas cantonnée au domaine microscopique; les ondes et les champs, bien entendu, sont étendus dans l'espace.

Le mot "catastrophe" que j'emploie ici doit être considéré comme l'équivalent de la "réduction" ou de l'"effondrement" de la fonction d'onde, ou de l'"interaction", ou de la "transaction" (terme utilisé en microphysique transactionnelle), ou encore du "collapse".

## 25 Les deux niveaux de la physique

Pour résumer les idées qui viennent d'être développées, on pourrait dire que les phénomènes physiques se répartissent sur deux niveaux.

Le premier niveau est celui des particules de masse au repos nulle, se déplaçant à la vitesse de la lumière (donc sur les cônes de lumière de Minkowski). Sur leurs parcours, on a toujours  $\Delta s = 0$ . Ceci signifie que chacune de leurs trajectoires se comporte, d'une certaine façon, comme s'il s'agissait d'un point unique dans l'espace-temps de Minkowski de la relativité restreinte, ou dans l'espace-temps courbe de la gravitation relativiste (considérés comme des espaces métriques). Dans le diagramme des rapidités, elles correspondent aux points à l'infini. Cette physique ne distingue pas le passé du futur, et respecte la symé-

trie  $T$ . Elle ignore les notions de distance et de durée. Elle n'a pas de mémoire. Elle décrit ce que j'ai appelé les "non-événements". L'outil privilégié pour les étudier est la fonction d'onde. La mécanique ondulatoire, les champs quantiques (électromagnétique, gravitationnel, etc.) entrent dans cette physique de premier niveau. Il est permis de se référer à la notion de particule pour modéliser cette physique, à condition de préciser qu'il s'agit ici de particules "virtuelles", évanescentes, dont les propriétés individuelles sont essentiellement indéterminées.

Nous commençons à passer au second niveau avec les particules de masse au repos non nulle. Nous avons vu que toute particule de masse au repos non nulle peut être modélisée comme un assemblage de particules de masses au repos nulles : ce sont des "systèmes". Nous avons vu aussi que la vitesse d'un tel système est inférieure à  $c$ ; dans le diagramme des rapidités, le point correspondant n'est pas situé à l'infini. Le mot "système" sous-entend qu'il y a interaction entre ses parties (ces interactions que j'ai appelées "catastrophes"). La plus petite des catastrophes (ou l'interaction minimale) suppose une réduction de fonction d'onde. Or les réductions de fonctions d'onde ne commutent pas; elles forment un maillage ordonné, orienté dans le temps. C'est à partir du moment où les particules interagissent et s'associent pour former des corps plus complexes qu'elles fabriquent l'espace, et surtout le temps orienté. Ce sont les systèmes (ou les corps complexes) qui nous font accéder au niveau deux de la physique, dont le cadre naturel est l'espace-temps de la physique classique. Paradoxalement, ces corps complexes ont des propriétés mieux définies que celles de particules qui les composent (en tout cas pour nous humains qui vivons dans un monde macroscopique).

Ce second niveau ne se réalise complètement qu'avec les corps macroscopiques, qui sont des structures faisant intervenir un grand nombre de particules en interaction. Un électron, par exemple, bien qu'ayant une masse au repos non nulle et une vitesse inférieure à  $c$ , reste très proche du premier niveau : la fonction d'onde est le meilleur outil pour étudier son comportement. Un atome est plus proche du second niveau : c'est une structure comprenant des protons, neutrons et électrons en interaction complexe, possédant plusieurs niveaux d'énergie quantifiés; on peut, par pompage optique, faire passer les électrons au niveau d'énergie le plus élevé, dans le but d'émettre un rayon laser par exemple; on sait que cet état excité se conserve tant qu'il n'y a pas émission d'un photon, qui peut être capté par un dispositif adapté. Entre deux observations (mesures, intractions) on a une meilleure information sur l'état de l'atome que sur l'état d'un électron. Mais un atome est encore un objet partiellement quantique, en ce sens qu'il peut être placé dans un état superposé, et donner lieu à des interférences.

Historiquement, dès que la théorie des quanta a été ébauchée, la théorie ondulatoire s'est présentée comme une rivale; mais les physiciens ont vite compris que ces deux théories ne sont que deux pans complémentaires d'une même théorie, dans laquelle la dualité ondes/corpuscules est essentielle. Pour être plus

exact, il faudrait remplacer le terme "corpuscule" par "interaction" ou "transaction", car le mot "corpuscule" nous renvoie à la "très petite bille ayant des caractéristiques bien définies" qui n'a rien à faire en microphysique. Depuis cette époque, cette dualité n'a cessé de revenir sur le devant de la scène, sous différentes formes, de manière insistante. On peut parler aussi de dualité virtuel/réel, ou non-événement/catastrophe, ou champ/structure. Il existe bien deux niveaux de lecture de la physique.

## 26 Sur la notion de vide

Dans une portion bien délimitée de l'espace, retirez tout ce qui est matériel : corps solides, liquides, gaz, plasma, atomes et particules... Il reste le vide. Mais qu'est-ce que le vide ?

La première réponse correspond à l'option du "vide vide" : il ne reste rien. Le vide n'existe pas en lui-même. Seule la matière existe, et le vide, l'espace, le temps, ne sont qu'un cadre mathématique abstrait imaginé pour décrire les rapports entre les corps matériels, de même qu'un repère cartésien est un cadre imaginé pour décrire avec précision des figures géométriques ou le déplacement de corps mobiles.

La première mesure de la vitesse de la lumière dans le vide, basée sur les éclipses des satellites de Jupiter, est réalisée par Ole Rømer, en 1676. Elle pose des questions, mais n'est pas assez précise pour apporter des réponses.

Dans la théorie de Newton (1687), le vide semble vraiment vide. On peut cependant se demander pourquoi certains repères (les repères galiléens, animés d'un mouvement de translation uniforme... mais par rapport à quoi ?) ont un rôle privilégié.

La théorie ondulatoire de la lumière, due à Fresnel (1808), conduit les physiciens à considérer le vide comme un milieu physique à part entière, capable de transmettre des vibrations. Il serait donc rempli d'un fluide appelé éther, ni solide, ni liquide, ni gazeux. Cet éther peut être considéré comme immatériel (puisqu'il ne correspond à aucune des formes de matière connues) ou comme une autre réalité matérielle (car il interagit, au moins, avec la lumière, à laquelle il offre un support). Cette option est celle du "vide plein".

L'expérience de Michelson et Morley (1881, 1887) montre que la vitesse de la lumière est constante par rapport à la Terre, comme si la Terre était immobile par rapport à l'éther, quelle que soit sa position sur son orbite, ce qui, à première vue, semble absurde !

Einstein résout ce paradoxe grâce à la théorie de la relativité restreinte

(1905), qui tord le cou à la notion d'éther. L'espace-temps redevient un cadre mathématique abstrait, qui se transforme selon les règles de l'algèbre linéaire quand on change de repère. On revient au vide vide. L'espace-temps est relatif, le vide n'a pas de réalité physique.

Dans la théorie de la relativité générale, élaborée de 1907 à 1915, on constate une curieuse évolution. Au départ, comme l'indique le nom de cette théorie, Einstein a souhaité faire de la gravité une entité relative, sans réalité physique : la force gravitationnelle doit apparaître ou disparaître au gré des changements de repère, comme il l'explique dans ses expériences de pensée (l'ascenseur, la plateforme tournante). Pour mettre en œuvre ce projet, il a utilisé les outils purement mathématiques élaborés par Riemann pour l'étude des espaces non euclidiens. Le vide est vide. Mais ses équations font apparaître des ondes gravitationnelles. La question se pose alors : ces ondes sont-elles, elles aussi, des abstractions mathématiques, ou bien sont-elles capables de réaliser des transferts d'énergie ? Suivant sa logique, Einstein opte d'abord pour la première interprétation, mais la communauté des physiciens accumule des arguments allant dans le sens opposé, et Einstein se laisse convaincre : les ondes gravitationnelles, qui sont une simple déformation de l'espace-temps, transportent de l'énergie, donc le vide est plein.

De 1920 à 1950 environ, plusieurs physiciens (Dirac, Pauli, Feynman, et bien d'autres) élaborent la théorie quantique des champs. Ils décrivent le vide comme un milieu animé d'une intense activité : des paires de particules/antiparticules virtuelles entrent en collision et s'annihilent en donnant des photons, tandis que d'autres photons disparaissent en donnant naissance à des paires particule/antiparticule. Le vide est redevenu plein.

Rappelons que la théorie quantique des champs est, parmi toutes les théories physiques imaginées par l'Homme, celle dont les prévisions sont vérifiées avec la plus grande précision.

Cependant, cette notion de "vide plein" est loin d'être claire. Plein de quoi ? De particules virtuelles ? Si elles sont virtuelles, diront certains, alors elles n'existent pas ! Mais ce n'est pas si simple...

Plutôt que de chercher à définir ce qu'est le vide, on pourrait s'intéresser plutôt à ce qu'il sait faire. Un astronaute, dans une navette spatiale tournant autour de la Terre, dans le vide, peut communiquer avec sa base à l'aide d'ondes radio ou de signaux lumineux ; il ne pourra jamais communiquer à l'aide d'un porte-voix ! D'autre part, l'orbite de la navette est courbée par la présence de la Terre : il y a bien un "message gravitationnel" qui s'est propagé dans le vide. On pourrait se dire : l'information électromagnétique sait se déplacer dans le vide, l'information gravitationnelle aussi, tandis que le son ne sait pas. Mais il serait sans doute plus judicieux d'inverser les rôles, et de dire : le vide sait transmettre des informations de type électromagnétique ou gravitationnel ; il ne sait pas



transmettre le son. L'air, la membrane d'un tambour, le tympan, savent transmettre le son. La transmission des ondes électromagnétiques se ramène à une fonction élémentaire : celle qui décrit une onde progressive monochromatique (voir le paragraphe sur la fonction canonique de communication immédiate). On peut penser que c'est cette fonction qui décrit le mieux la nature profonde du vide : c'est un milieu qui "vibre" d'une manière très spécifique, à la fois très simple et très sophistiquée; ou plutôt un milieu qui sait transmettre certains types d'informations d'une particule à une autre, ou d'un système à un autre, de manière immédiate.

En tout cas, il est dommage qu'Einstein n'ait pas connu ces débats au moment où il a travaillé sur la relativité générale : au lieu de partir d'un vide vide tiré de son intuition, pour arriver finalement à un vide plein, il aurait pu s'inspirer du vide défini (d'une manière qui ne fait pas encore l'unanimité) par la physique quantique.

## 27 "Création" et "annihilation" de particules

En physique des particules, on parle souvent de "création" d'une paire particule/antiparticule, ou de son "annihilation". Ces mots ont une connotation presque religieuse, et pourraient faire croire qu'une paire (disons par exemple une paire électron/positron,  $e^-/e^+$ ) peut être créée à partir de rien (ex nihilo), ou qu'elle peut disparaître corps et biens, sans laisser de trace. Mais, en physique, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme... On devrait plutôt dire qu'une paire de photons se transforme en paire  $e^-/e^+$ , ou l'inverse.

Ce type de réaction doit respecter certaines lois de conservation : la conservation de l'énergie-impulsion, de la charge électrique totale, du spin, de l'étrangeté, etc.

Mais il n'existe aucune loi imposant, par exemple, la conservation du nombre de particules, ou de la somme des masses au repos.

C'est surtout la masse au repos qui est à l'origine de malentendus. On a trop tendance à se représenter l'apparition d'une paire  $e^-/e^+$  comme une création de masse au repos, et, par conséquent (puisque la masse équivaut à de l'énergie, d'après la formule  $E = m.c^2$ ), comme une création d'énergie. Ce qui est, bien sûr, totalement faux.

Examinons de plus près la réaction :  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$ , où  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  sont deux photons. On pourrait croire qu'il y a nécessairement une perte de masse au repos, puisque celle d'un photon est toujours nulle. Ce serait vrai si la masse au repos de chaque particule était évaluée dans son propre repère (ce qui nous obligerait à travailler simultanément dans plusieurs repères différents); mais

pour appliquer les lois de conservation, il faut faire un bilan, en se ramenant à un repère unique. N'oublions pas que la masse au repos d'un système est égale à la norme de son énergie-impulsion, divisée par  $c^2$ . S'il y a conservation de l'énergie-impulsion globale, il y a nécessairement conservation de la masse au repos globale du système. Rappelons le calcul.

Pour simplifier, supposons que, pour l'observateur de référence, les deux particules se déplacent sur une même droite et entrent en collision frontale, et que les deux photons s'échappent en directions opposées sur cette même droite. On note  $m_0$  la masse au repos de chaque particule,  $v_1$  et  $-v_2$  leurs vitesses ( $v_1 > 0$ ,  $v_2 > 0$ ),  $m_1 = m_0 \cdot ch \frac{w_1}{c}$  et  $m_2 = m_0 \cdot ch \frac{w_2}{c}$  leurs masses maupertuisiennes,  $m_1 \cdot v_1$  et  $-m_2 \cdot v_2$  leurs impulsions. Le premier photon a pour fréquence  $\nu_1$  et se déplace dans le sens positif, le second a pour fréquence  $\nu_2$  et se déplace dans le sens négatif.

La conservation de l'énergie s'écrit :

$$m_1 \cdot c^2 + m_2 \cdot c^2 = h \cdot \nu_1 + h \cdot \nu_2 ;$$

$$\nu_1 + \nu_2 = \frac{c^2}{h} \cdot (m_1 + m_2) = \frac{m_0 \cdot c^2}{h} \cdot \left( ch \frac{w_1}{c} + ch \frac{w_2}{c} \right).$$

La conservation de l'impulsion s'écrit :

$$m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2 = \frac{h \cdot \nu_1}{c} - \frac{h \cdot \nu_2}{c} ;$$

$$\nu_1 - \nu_2 = \frac{c}{h} \cdot (m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2) = \frac{m_0 \cdot c^2}{h} \cdot \left( sh \frac{w_1}{c} - sh \frac{w_2}{c} \right).$$

En additionnant (ou en retranchant) membre à membre les deux égalités obtenues, il vient :

$$\nu_1 = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot \left( ch \frac{w_1}{c} + ch \frac{w_2}{c} + sh \frac{w_1}{c} - sh \frac{w_2}{c} \right) ;$$

$$\nu_2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot \left( ch \frac{w_1}{c} + ch \frac{w_2}{c} - sh \frac{w_1}{c} + sh \frac{w_2}{c} \right).$$

Dans le repère particulier lié au centre de gravité, on a  $v_1 = v_2 = v$ ,  $w_1 = w_2 = w$ ,  $ch \frac{w_1}{c} = ch \frac{w_2}{c} = ch \frac{w}{c}$ ,  $sh \frac{w_1}{c} = sh \frac{w_2}{c} = sh \frac{w}{c}$ ,  $m_1 = m_2 = m = m_0 \cdot ch \frac{w}{c}$ ; les égalités ci-dessus se simplifient alors de la façon suivante :

$$\nu_1 = \nu_2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot 2 \cdot ch \frac{w}{c} = \frac{m \cdot c^2}{h}.$$

La masse au repos de l'ensemble du système est donc :

$$\frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot \nu_1 + h \cdot \nu_2}{c^2} = 2 \cdot m = 2 \cdot m_0 \cdot ch \frac{w}{c}.$$

A titre indicatif, continuons le calcul précédent, même si ce n'est pas utile à notre propos :

$$\nu_1 = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot \left( \frac{1 + \frac{v_1}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{1 - \frac{v_2}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} \right) = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot \left( \sqrt{\frac{1 + \frac{v_1}{c}}{1 - \frac{v_1}{c}}} + \sqrt{\frac{1 - \frac{v_2}{c}}{1 + \frac{v_2}{c}}} \right) ;$$

$$\nu_2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot \left( \frac{1 - \frac{v_1}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{1 + \frac{v_2}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} \right) = \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot h} \cdot \left( \sqrt{\frac{1 - \frac{v_1}{c}}{1 + \frac{v_1}{c}}} + \sqrt{\frac{1 + \frac{v_2}{c}}{1 - \frac{v_2}{c}}} \right).$$

Remarquons que le problème tel que nous l'avons posé (avec deux photons) possède une solution et une seule ; mais avec un photon unique il n'y a pas de solution en général, et avec plus de deux photons il y en a une infinité.

Dans notre calcul, l'électron et le positron jouent le même rôle, parce-qu'ils ont la même masse ; mais bien sûr le raisonnement n'est pas transposable à deux électrons : la réaction  $e^- + e^- \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$  n'est pas valide car elle ne respecte pas la conservation de la charge.

Un couple particule/antiparticule peut se transmuter en une paire de photons avec conservation de l'énergie-impulsion globale, donc aussi de la "masse au repos globale" (qui s'évalue impérativement dans le repère du centre de gravité). N'oublions pas que la "masse au repos globale" d'un système n'est pas égale, en général, à la somme des masses au repos individuelles de ses constituants.

Tout ceci ne doit pas nous surprendre, puisque le "principe de conservation de la masse" (sous-entendu : de la somme des masses au repos individuelles) n'existe pas : c'est le quadrivecteur énergie-impulsion qui se conserve ! Nous rappellerons les liens entre énergie-impulsion et masse au repos dans le document sur le champ d'entraînement. Les collisions électron/positron respectent parfaitement la loi de conservation de l'énergie-impulsion, qui est au cœur de la relativité restreinte ! Il est d'usage de dire que l'électron et le positron s'"annihilent" lors d'une collision, ce qui laisse penser, à tort, qu'il n'en reste "rien". En réalité, nous savons bien que l'énergie-impulsion est intégralement conservée.

Le concept de vraie annihilation (qui suppose que, quand une particule rencontre son antiparticule, elles disparaissent corps et biens, et qu'il n'en reste rien) n'existe pas en physique quantique. De même, la création d'une paire particule/antiparticule, à partir de rien, est un phénomène purement imaginaire, qui n'a pas sa place en physique. Une telle paire peut apparaître, mais toujours à partir de quelque chose, au moins à partir d'un photon (ou plutôt deux photons), ou encore d'un photon et d'un noyau atomique (cas le plus fréquemment observé dans les accélérateurs de particules).

Une autre erreur consiste à vouloir résoudre le "problème" (problème imaginaire !) en faisant intervenir le vide quantique à mauvais escient, par exemple en

imaginant que les photons qui se transmutent en paire  $e^-/e^+$  n'ont fait qu'arracher au vide ces particules qui s'y trouvaient déjà. Il est vrai qu'on est en droit de penser qu'avant l'événement préexistait un champ qui a été excité par les photons, ce qui a fait apparaître deux charges opposées. C'est une façon de parler. Le champ en lui-même n'est qu'une information virtuelle sans énergie; dire qu'on l'"excite" signifie qu'on injecte de l'énergie, et le champ est habilité à décider ce que cette énergie va devenir; mais ce n'est pas la sienne! Il ne faudrait pas croire que les deux particules et leurs charges électriques existaient déjà auparavant, et possédaient une énergie minimale: l'énergie du point zéro... Non: toute l'énergie a été apportée par les photons, conformément aux diagrammes de Feynman, qui respectent toujours rigoureusement la conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie (l'avant et l'après).

Que deux charges électriques opposées puissent apparaître ou disparaître lors de ces processus n'a rien de très étonnant. On pourra penser au sketch de Raymond Devos: il prend un bâton qui a deux bouts, il le casse en deux, et il obtient quatre bouts. D'où viennent les deux bouts qu'il a "créés"? Du vide quantique?

La plupart des propriétés des particules sont relatives et quantifiées, comme la charge électrique, qui peut être aussi bien positive que négative. Dans ce cas, la loi de conservation globale paraît très naturelle. La masse fait exception, puisqu'elle est toujours positive. La loi de conservation de l'énergie (ou plutôt du quadrivecteur énergie-impulsion) est donc la plus difficile à comprendre; mais on sait qu'elle joue un rôle fondamental aussi bien en physique quantique qu'en relativité restreinte.

## 28 Particules virtuelles ou réelles

En théorie quantique des champs, il est d'usage de dire que des paires de particules/antiparticules sont créées ou annihilées de manière continue dans le vide quantique; on les qualifie de "virtuelles". Ceci signifie qu'elles disparaissent avant d'avoir été observées, avant d'avoir interagi, ce qui fait que leur existence reste, presque toujours, hypothétique et invérifiable.

Il y a plusieurs façons de concevoir ces particules virtuelles.

On peut penser que les particules virtuelles sont aussi réelles que, par exemple, les atomes d'azote ou d'oxygène de notre atmosphère, que nous ne sommes pas capables d'observer tous individuellement, mais dont nous connaissons les propriétés, que nous pouvons exploiter de manière statistique (en thermodynamique ou en météorologie, par exemple). Si nous avons des difficultés à observer les particules virtuelles, c'est peut-être parce que le vide quantique contient des particules et antiparticules en quantité presque égale, et que les annihilations se produisent très facilement, limitant leur durée de vie.

On peut penser, inversement, que ces particules virtuelles ne sont qu'une invention de physiciens, destinée à permettre une meilleure représentation du champ quantique, par analogie avec le monde concret usuel. Si on suit une particule virtuelle sur un diagramme de Feynman, on voit sa naissance, sa mort, et entre les deux, la plupart du temps, elle n'a pas interagi, donc on n'a pas la preuve qu'elle ait existé. La notion de "particule virtuelle" serait alors un concept abstrait utilisé pour décrire un "champ", avec des mots analogues à ceux qu'on utilise pour décrire les particules ; car il existe des liens très étroits entre les particules et les champs. Ces derniers sont du domaine du non-événement, comme la fonction d'onde de Schrödinger. Le terme de "particules" est plus adapté lorsque, par des effondrement de fonctions d'onde, des liens se tissent entre ces unités quantiques, créant des structures de base sur lesquelles se fonde la matière que nous connaissons. L'expression "particules virtuelles" serait alors un détournement de vocabulaire.

Enfin, d'après ce que nous avons dit précédemment, on peut considérer ces particules virtuelles comme des possibilités évanescentes. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe intitulé "Quelques expériences classiques", ces "possibilités évanescentes" (que nous avons appelées des "avatars") ne sont pas imaginaires, puisqu'elles sont à l'origine de phénomènes d'interférence. Mais elles ne sont pas non plus réelles au sens où nous l'entendons habituellement, en ce sens que le déroulement des événements (succession de "catastrophes") peut les envoyer directement à la corbeille, avec les autres brouillons refusés. Si on considère une onde comme une multitude d'avatars, alors, sachant que l'onde est capable de transmettre un message qui peut être à l'origine d'un transfert d'énergie, on peut dire que cette multitude d'avatars, collectivement, possède la capacité transférer de l'énergie ; mais c'est bien une propriété collective : si l'un des avatars établit le contact qui permet ce transfert, alors tous les autres sont aussitôt aiguillés vers la corbeille. A lui tout seul, un avatar (ou une particule virtuelle) ne possède aucune énergie. Mais il peut contribuer à un ensemble (une onde ou une structure) qui, collectivement, peut jouer un rôle dans l'aiguillage de l'énergie.

Ce qui distingue le "réel" du "virtuel", c'est la traçabilité. Les particules réelles existent par leurs interactions avec des ensembles structurés qui en gardent la trace. Chaque interaction a des conséquences, directes et indirectes. Il y a des témoins, directs et indirects. L'histoire peut être retracée.

Une particule virtuelle disparaît sans avoir interagi. A-t-elle seulement existé ? Il n'y a aucun témoin pour l'affirmer.

Décrire un champ quantique en termes de "particules virtuelles" est un choix qui a du sens, et qui peut nous aider à faire des prévisions efficaces. Mais c'est un choix dangereux, plein de pièges. Pour les éviter, il est indispensable de se débarrasser de certains préjugés concernant les entités que nous nommons ainsi.

En particulier, à un instant donné, une particule virtuelle donnée ne se trouve pas en un point donné, défini de manière univoque : sa présence est diluée dans l'espace de manière probabiliste. Ce dont nous parlons se rapproche davantage d'une fonction d'onde au sens de Schrödinger ; mais ces ondes possèdent des propriétés quantifiées que nous attribuons habituellement aux particules, propriétés qu'elles peuvent transmettre en respectant des lois de conservation.

Prenons un exemple. Considérons deux électrons initiaux "réels" (faisant partie des cortèges électroniques de deux atomes différents). Dire qu'ils sont réels signifie qu'ils contribuent à des structures (les atomes) dans lesquelles ils sont liés par des liens d'intrication, et dans lesquelles un rôle leur est attribué et unanimement reconnu. Leur présence est indispensable : s'ils disparaissaient, la structure des atomes serait immédiatement révisée par effondrement de la fonction d'onde. Ces deux électrons communiquent entre eux par la fonction canonique de communication immédiate (onde électromagnétique sans échange d'énergie, seulement d'information), qu'on est en droit de se représenter comme un échange de photons virtuels. Un tel photon peut, pour une raison encore inconnue, établir une poignée de mains, c'est-à-dire faire passer un quantum d'énergie d'un électron à l'autre. On pourrait dire que ce photon s'est réalisé (qu'il a accédé à la réalité) en envoyant à la corbeille les avatars concurrents. Plus exactement, c'est l'onde qui a accédé à la réalité et a transmis cette énergie directement d'un électron à l'autre. Dans ce cas, l'équilibre interne des deux atomes est modifié : les électrons changent d'orbite.

Compliquons légèrement la situation. Selon la théorie quantique des champs, le photon virtuel peut se transmuter en paire électron/positron (paire virtuelle), avec une certaine probabilité. Cette paire peut être considérée comme un avatar, un brouillon, qui, le plus souvent, va finir à la corbeille. Mais dans certains cas elle peut devenir réelle, si, par interaction avec d'autres particules ou structures, son existence est validée (elle est "prise dans l'équipe"). Dans ce cas, l'électron et le positron ainsi "créés" vont hériter de l'énergie du photon (dont l'existence est donc validée aussi), et cette énergie, comme précédemment, a été prélevée aux deux électrons initiaux, donc aux deux atomes initiaux, dont l'équilibre interne se trouve ainsi modifié par effondrement de la fonction d'onde. On peut retracer le circuit emprunté par l'énergie : elle ne vient jamais du vide.

Encore une petite remarque : dans le paragraphe sur la création et l'annihilation de paires particule/antiparticule, nous avons dit qu'une paire  $e^-/e^+$  pouvait se transformer en paire de photons, mais pas en un photon unique, en raison de la loi de conservation de l'énergie-impulsion ; nous avons même écrit le calcul complet. Inversement, un photon unique ne peut pas donner naissance à une paire  $e^-/e^+$  en respectant cette loi. Or dans l'exemple que nous venons de présenter ci-dessus, il y a bien un photon (virtuel) unique qui est à l'origine de la paire  $e^-/e^+$ . Est-ce une erreur ? Faut-il la corriger en faisant intervenir plusieurs photons ? On pourrait le faire, mais pour les spécialistes de la physique des particules et des diagrammes de Feynman, le fait que des particules

virtuelles ne respectent pas la conservation de l'énergie-impulsion n'est pas une anomalie; l'important étant que la réaction dans son ensemble (des particules réelles entrantes aux particules réelles sortantes) respecte cette conservation. Les étapes qui s'intercalent sont du domaine du virtuel, de l'inobservable, de sorte que certains physiciens disent parfois qu'il s'agit seulement d'intermédiaires de calcul abstraits. D'autres estiment que c'est le recours aux diagrammes de Feynman qui introduit cette anomalie, et ils cherchent à la corriger en développant un autre formalisme pour expliquer les réactions observées. Ce travail serait, dit-on, en bonne voie.

## 29 Evanescence et traçabilité

L'évanescence nous surprend : dans notre monde macroscopique, nous sommes habitués aux phénomènes traçables. Un corps macroscopique peut emmagasiner de l'énergie, de la chaleur, etc. Nous savons que nous pouvons retrouver cette énergie, ou cette chaleur, où nous l'avons laissée, identique à elle-même ou transformée selon une loi connue. Il faut admettre que cette énergie, ou cette chaleur, sont mémorisées par le corps qui en est porteur. Mais il s'agit d'un corps complexe, formé d'une multitude de particules organisées selon une certaine structure. Une particule isolée a-t-elle les moyens de mémoriser ce type d'information? Ou un autre type d'information? Possède-t-elle, par exemple, un compteur de vitesse? Si oui, où se trouve-t-il? Sous quelle forme l'information est-elle codée? Comment est-elle lue, et par qui? Par habitude, ou par paresse, on imagine volontiers que les particules les plus élémentaires "savent tout d'elles-mêmes". Pourtant, on comprend bien que ce n'est pas possible, car il leur manque une mémoire pour inscrire, conserver, retrouver les données. Une particule isolée "ne sait rien d'elle-même", elle est dans l'indétermination, elle n'est pas traçable. Pour qu'il y ait traçabilité, il faut qu'il y ait une mémoire, portée par une structure organisée.

## 30 Mémoire et indétermination

Ceci nous conduit à une définition plus précise des termes "virtuel" et "réel" : on pourrait dire qu'une particule est "réelle" si elle contribue à une structure interactive relativement stable. C'est ce qui lui confère des propriétés mesurables, vérifiables, qui pourront être retrouvées par des mesures futures. Ceci suppose l'existence d'une forme de mémoire.

Qu'est-ce que la mémoire en physique? Les informaticiens ont beaucoup travaillé sur ce sujet. On connaît des réponses telles que les disques durs, les clés USB... Une mémoire est toujours une structure à laquelle on peut apporter des modifications qui pourront être retrouvées plus tard. La photographie a utilisé

pendant longtemps la pellicule argentique (avant de passer au numérique). Le principe est basé sur les réactions des ions  $Ag^+$  et  $Br^-$  ou  $I^-$  en présence de lumière. Les molécules d'halogénure d'argent sont des structures qui peuvent être modifiées par la lumière. Mais il existe des mémoires encore plus élémentaires : les atomes. Leurs cortèges électroniques possèdent un nombre fini de niveaux d'énergie possibles. C'est l'interaction entre le noyau et les électrons qui génère cette structure dans laquelle il est possible d'ajouter ou de retrancher des quanta d'énergie. Si on oblige des atomes à se placer dans un état excité, on sait que l'énergie fournie pourra être récupérée plus tard. Les atomes, en tant que structures, ont stocké une information ; ils ont mémorisé un apport d'énergie. On pourra les retrouver à l'endroit où on les a laissés, avec l'énergie qu'on leur a fournie. Ceci est utilisé, par exemple, dans la technologie Laser. D'autre part, deux atomes pourront échanger de l'énergie sous forme de photons.

Le cas du photon est bien différent : il n'a pas de structure, donc pas de moyen, par lui-même, de stocker une information. Il peut servir seulement de "monnaie d'échange" dans les transferts d'information entre atomes.

Les particules virtuelles du vide quantique ne participent à aucune structure. On pourrait dire qu'elles ne sont pas aptes à effectuer des échanges, parce-qu'elles ne peuvent pas stocker d'information. On pourrait dire aussi, au contraire, qu'elles échangent continuellement avec leurs voisines, de telle sorte que leur état ne se fixe jamais : il est toujours dans l'indétermination (superposition d'états). Ces deux points de vue ne sont d'ailleurs pas opposés, mais complémentaires.

Nous ne savons pas si les particules virtuelles existent, mais elles nous aident à définir le vide quantique et les champs quantiques.

La physique classique est essentiellement basée sur des lois de conservation. Pour qu'on puisse parler de "conservation", il faut que "quelque chose" soit mémorisé, et puisse être confronté à l'épreuve du temps ; il faut donc une mémoire. Le virtuel n'a pas de mémoire : il est évanescent. De là à dire qu'il n'existe pas, il n'y a qu'un pas, que nous ne franchirons pas. En effet, il existe, d'une certaine manière, puisque c'est grâce à lui que s'établissent certaines corrélations non temporelles, en particulier celles qui sont à l'origine des interférences.

## 31 L'information

Le terme d'"information" est souvent employé en physique quantique, mais pas toujours avec la même connotation. Pour certains physiciens, il fait référence à la conscience de l'observateur. Nous ne l'employons pas dans ce sens ici.

Imaginons, par exemple, un électron et un proton passant à proximité l'un



de l'autre. La trajectoire de chacune des particules va être influencée par la présence de l'autre; elle ne se comporte pas comme si l'autre n'existait pas. Elle a été "informée", d'une manière ou d'une autre, de la présence de l'autre, de sa charge électrique, de sa distance... Cette information peut être transmise par un champ électromagnétique, par une force, par un échange de photons, par une interaction, mais elle est transmise.

Imaginons maintenant un astronome observant la trajectoire d'une étoile autour d'un "trou noir" (qu'il ne voit pas). En étudiant cette trajectoire, il va en déduire la masse du trou noir. On conviendra que c'est l'étoile qui a été informée la première, directement, de la présence (et de la masse) du trou noir, et que l'astronome n'en a été informé qu'ensuite, indirectement. Le fait que l'astronome soit conscient, et pas l'étoile, n'est pas notre problème. Ce qui nous intéresse le plus est de comprendre comment l'étoile a pu être informée : par une force, une accélération, un champ gravitationnel, une courbure de l'espace-temps? A moins que ce soit l'espace-temps qui ait été informé, et pas l'étoile? Mais une information est bien passée, puisque l'étoile ne se comporte pas comme si le trou noir n'existait pas.

Dans les paragraphes sur les non-événements et catastrophes, ou sur la mémoire et l'indétermination, la notion d'information est omniprésente. Lorsqu'un véritable événement a lieu, il a une influence sur l'avenir du monde (même si c'est à une échelle très modeste) : on ne peut pas faire comme s'il n'avait pas eu lieu. Il est mémorisé, et l'information est passée. Comment? C'est un objectif central de la physique de répondre à cette question.

## 32 Sur les champs

Ce paragraphe pourra éventuellement être modifié dans l'avenir : ce sujet étant débattu, nous pourrions tenir compte de l'évolution des idées.

C'est le champ magnétique qui a, le premier, frappé les esprits grâce à la limaille de fer qui permet de visualiser les lignes de champ. Cette "action à distance" a soulevé la perplexité. Mais les autres champs (électrique, gravitationnel, etc.), même s'il est moins facile de les visualiser, sont tout aussi réels du point de vue des physiciens : on peut les mesurer, les comprendre, prévoir leurs effets.

Comment la limaille de fer est-elle informée, à distance, de la présence d'un aimant? Il y a sans doute une "information" quelque part, mais où? Et comment se propage-t-elle? Sur quel support?

On sait que les lignes du champ magnétique du Soleil, par exemple, peuvent se développer dans le vide interplanétaire; ce champ n'a pas besoin d'un support

matériel : le vide lui suffit.

Examinons d'abord le cas du champ électromagnétique. On pourrait dire qu'il est associé à la circulation d'une "information" électromagnétique dans le vide quantique. Cette information reste virtuelle tant qu'aucun effondrement de fonction d'onde n'est venu la valider. Certaines particules sont directement concernées par cette information (ce sont les particules chargées positivement ou négativement), d'autres ne le sont pas (ce sont les particules neutres). On peut donc penser que, dans le vide quantique, ce sont les particules virtuelles chargées qui assurent la transmission de cette information. Mais elles ne le font pas directement : elles communiquent entre elles en échangeant des photons virtuels, le photon étant le médiateur de l'électromagnétisme. Quelle est la nature de l'information transmise ? On pourrait se la représenter comme un mouvement des particules virtuelles chargées se transmettant de proche en proche selon les lois de l'électromagnétisme. De même que, dans le monde réel, deux particules chargées en mouvement exercent l'une sur l'autre des forces électriques et magnétiques (selon les lois de l'électromagnétisme résumées par les équations de Maxwell), dans le monde virtuel, les particules virtuelles chargées se transmettent de proche en proche un mouvement qu'on pourrait considérer comme un courant électrique virtuel. De cette façon, nous nous forçons une image du monde virtuel calquée sur celle du monde réel. Comment faire autrement ? Les particules que nous qualifions de "réelles" n'existent que par leurs interactions avec le monde qui les entoure, donc par les messages qu'elles envoient ou reçoivent, c'est-à-dire par leur champ, qui contient toute l'information les concernant. Et ce champ appartient au vide : ce n'est pas une propriété des particules, mais du vide. Les particules ne sont que la "monnaie d'échange" du champ ; car le champ ne sait effectuer les échanges que de manière quantifiée. Finalement, étudier la matière, c'est étudier les propriétés des champs, autrement dit les propriétés du vide.

Nous avons employé l'expression "de proche en proche" : ici, elle ne fait pas référence à une hypothétique topologie pythagoricienne de l'espace-temps, puisque les communications dans le vide quantique sont certainement basées sur l'immédiateté.

Il y a une autre correction qui peut être envisagée : nous avons dit que nous nous forçons une image du monde virtuel calquée sur celle du monde réel (ou sur ce que nous croyons en connaître), mais on pourrait aussi bien dire que nous nous faisons une image du monde "réel" basée sur les propriétés du vide, qui est essentiellement virtuel.

Passons au champ gravitationnel. Comme toutes les particules sont concernées par la gravitation, on peut admettre que toutes les particules virtuelles contribuent à la transmission du message gravitationnel. Comme on le sait, c'est la masse des particules, et non leur charge, qui intervient dans la gravitation ; plus exactement, c'est leur énergie, selon la loi d'équivalence de la masse et

de l'énergie ; plus précisément encore, c'est leur quadrivecteur énergie-impulsion qui doit intervenir, puisque lui seul est rigoureusement conservatif. On peut donc considérer que l'information qui va être transmise par le champ gravitationnel est de l'énergie-impulsion virtuelle. Le champ gravitationnel serait pour ainsi dire le "père" de tous les champs, puisque lui seul met en jeu la totalité des particules virtuelles du vide quantique, qui vont transmettre la seule propriété qui soit commune à toutes : l'énergie-impulsion.

On peut se demander s'il existe une particule-vecteur (le "médiateur") de ce processus, qu'on appellerait le graviton. C'est possible, mais pas nécessaire, puisque, selon la théorie quantique des champs, toutes les interactions entre particules virtuelles respectent déjà la conservation de l'énergie-impulsion. Voir le paragraphe sur le choc élastique.

Le concept de particule virtuelle a été créé sur mesure pour modéliser les champs. Que les particules virtuelles existent ou non, les champs, eux, existent bien... à condition de bien s'entendre sur ce mot : "exister". Car tout ce qu'on peut dire c'est qu'une particule située en un point donné, à un instant donné, dans un champ donné, a une certaine probabilité d'interaction, de tel où tel type, avec d'autres particules situées ailleurs, par effet "immédiat". En ce sens, le champ est un champ de probabilités. Mais les champs physiques sont capables d'interférer entre eux, alors que les pures probabilités mathématiques n'ont pas cette capacité. Les probabilités, au sens de la physique quantique, sont déjà des ébauches de véritables événements, des brouillons non encore validés.

On pourra y réfléchir en observant la limaille de fer orientée dans le champ magnétique d'un aimant...

### 33 Rôle gravitationnel d'une particule individuelle

Dans le document sur le champ d'entraînement, nous verrons que la "masse au repos" d'un système est supérieure à la somme des masses au repos de ses différentes parties. On peut même pousser le raisonnement à l'extrême : en assemblant des éléments de masse au repos nulle (par exemple des photons), on peut, en principe, reconstituer un corps de masse quelconque. Effectivement, ce ne sont pas les masses au repos des différentes parties qui s'additionnent, mais leurs quadrivecteurs énergie-impulsion. Pourrait-on alors reconstituer l'ensemble des phénomènes gravitationnels à partir de ces briques élémentaires : les photons ?

Pour comprendre le problème que pose cette démarche, il suffit de penser à l'expérience des fentes de Young : une source émet des photons, qui traversent un écran par deux trous, et sont réceptionnés sur une plaque photographique. On ne peut pas savoir par quel trou passe chaque photon, donc il est impossible

de calculer son rôle gravitationnel au cours de son trajet (entre son émission et sa réception). C'est pourquoi on estime parfois que le photon n'existe pas en tant que particule individualisée, mais seulement en tant que "monnaie d'échange". Le photon en lui-même n'a aucun rôle en gravitation ? Mais alors qu'en est-il d'un assemblage d'un nombre quelconque de photons ? Faut-il en déduire que n'importe quel corps massif, de masse quelconque, ne peut avoir aucun effet gravitationnel ?

Le problème est évidemment mal posé. Si on considère le photon comme une simple "monnaie d'échange" entre l'émetteur et le récepteur, alors son énergie-impulsion appartient au système "émetteur + récepteur". La gravitation ne concerne pas les particules individuelles, comme le photon, dont l'existence est seulement virtuelle ; elle concerne les systèmes réels, c'est-à-dire les systèmes dont les parties sont liées par des propriétés partagées et mémorisées, mises en place par des interactions, des réductions de fonctions d'onde.

La gravitation est bien définie au niveau macroscopique, mais il ne faut pas croire qu'elle peut l'être au niveau des particules. Le but de la gravitation quantique ne peut pas être de définir les interactions entre particules individuelles : on peut seulement définir les interactions entre systèmes. On pourrait oser cette boutade : la gravitation est une interaction entre interactions (ou en tout cas entre systèmes interactifs).

On peut se demander quelle est la propriété qui confère à un système un pouvoir gravitationnel. C'est bien sûr son énergie-impulsion, supposée mémorisée par un réseau d'interactions ; mais cette énergie-impulsion est aussi, en même temps, une capacité d'interaction (ou d'échange). Un photon n'est qu'une monnaie d'échange, tandis qu'un système interactif possède de la monnaie d'échange.

Une particule virtuelle ne contribue à aucun ensemble structuré, et ne peut donc avoir aucune action gravitationnelle. Le vide quantique, le champ électromagnétique, le champ gravitationnel, ne possèdent ni structure durable, ni masse, ni énergie propre. Ils appartiennent à un monde évanescent, sans mémoire. Ils ne peuvent jouer qu'un rôle d'intermédiaires.

On pourrait considérer le champ gravitationnel d'un corps comme une petite annonce : "Structure possédant énergie-impulsion est prête à faire échange"...

## 34 Rôle de l'antimatière en gravitation

Historiquement, le concept d'antimatière est né d'une réflexion de Paul Dirac sur l'énergie négative. C'est en travaillant sur l'équation de Schrödinger, dans le but de la rendre relativiste, qu'il a été confronté à cette possibilité. Par la suite, la découverte des antiparticules (d'abord l'électron positif, ou positron,

puis bien d'autres) a confirmé son intuition, d'une certaine manière.

Dès lors, la porte était ouverte au raisonnement suivant : si, comme le pensait Dirac, le positron possède une énergie négative, donc une masse négative, opposée à celle de l'électron, alors il semble naturel de penser que la rencontre d'un positron et d'un électron doit aboutir à une masse nulle, selon le "principe de conservation de la masse".

Et, justement, les observations ont alors montré qu'un électron et un positron, en entrant en collision, pouvaient s'"annihiler" (voir le paragraphe sur la création et l'annihilation des paires particule/antiparticule), ne laissant subsister que des photons, de masse au repos nulle.

L'autre idée qui a été débattue est la suivante : les antiparticules ont-elles un comportement opposé à celui des particules vis-à-vis de la gravitation ? Par exemple, si on étudie la trajectoire d'un faisceau horizontal d'antiparticules (par exemple des positrons) dans le champ gravitationnel de la Terre, va-t-on observer une déviation vers le haut ou vers le bas ?

L'expérience est très délicate, car l'effet est très faible ; elle a pu être réalisée récemment (2023) : les antiparticules "tombent" exactement comme les particules. Elles suivent les mêmes géodésiques.

D'autre part, c'est l'énergie-impulsion qui est responsable de la courbure de l'espace-temps, et l'énergie-impulsion de l'antimatière est de même nature que celle de la matière, et joue un rôle semblable.

En résumé, nous dirons que la masse d'un positron est identique à celle d'un électron, donc positive. Jusqu'à nouvel ordre, la notion de masse négative (ou d'énergie négative) n'a pas sa place en physique. L'antimatière existe bien, mais ce n'est pas ce que croyait Dirac.

## 35 Qu'est-ce qu'un choc élastique ?

Analysons la notion de choc élastique selon la théorie quantique des champs. Considérons donc deux particules réelles de types  $A$  et  $B$  qui interagissent (c'est l'"entrée" de l'interaction). Une cascade, courte ou longue, de réactions (fission de chaque particule en deux ou plusieurs particules ou antiparticules virtuelles, annihilation de paires particule/antiparticule donnant un photon, création de nouvelles paires particule/antiparticule à partir d'un photon, etc.) va se produire (cascade qui peut être représentée à l'aide d'un diagramme de Feynman) et, à la "sortie" de l'interaction, nous retrouvons deux particules des mêmes types  $A$  et  $B$ , et rien d'autre (c'est la définition du choc élastique). Selon la théorie quantique des champs, on doit toujours retrouver à la sortie de l'in-

teraction la totalité de l'énergie-impulsion qui a été introduite à l'entrée; mais cette énergie-impulsion n'est conservée que de manière globale : les particules virtuelles peuvent s'exonérer de cette règle, pourvu que ce soit pendant un temps très court! Ce qui nous importe, c'est que l'énergie-impulsion globale soit conservée au cours du choc élastique : propriété fondamentale bien connue. Il en résulte qu'en théorie quantique des champs, on n'a pas besoin de conjecturer l'existence du graviton pour expliquer la circulation de l'énergie-impulsion dans le vide : toutes les réactions connues, représentables par des diagrammes de Feynman, conservent l'énergie-impulsion quadrivectorielle. Nous n'avons pas besoin de savoir quelles réactions ont eu lieu : ce qui nous intéresse, c'est de savoir que nous retrouvons les mêmes particules à la sortie qu'à l'entrée, et que l'énergie-impulsion totale n'a pas changé. Nous connaissons bien la notion de choc élastique à l'échelle macroscopique (sur le modèle des boules de billard), et nous savons qu'elle se manifeste aussi à l'échelle microscopique; elle peut être modélisée sans faire intervenir une particule dédiée. Le choc élastique transmet un flux d'énergie-impulsion.

Que les particules virtuelles existent ou non, elles nous aident à comprendre comment le vide quantique permet la circulation de l'énergie-impulsion virtuelle, qui est elle-même le mode de communication entre les corps réels et structurés qui contribuent au phénomène gravitationnel.