

Diapo 1

La théorie quantique naît en 1900. A cette époque beaucoup de scientifiques pensaient qu'il n'y avait plus grand chose à découvrir en physique. On avait des idées précises sur la constitution de la matière grâce à la classification des éléments de Mendeleïev. L'existence des **atomes** était postulée par certains, très controversée par d'autres. En tout cas personne ne pensait qu'on pouvait détecter ces atomes. Les lois de l'électricité et du magnétisme étaient connues et rassemblées dans une synthèse élégante : l'électromagnétisme de Maxwell. Celui-ci avait prévu l'existence d'ondes se propageant à la vitesse de la lumière. Leur découverte expérimentale fut établie par Hertz. Ces ondes, depuis nommées **hertziennes** étaient de même nature que la lumière, mais de longueur d'onde beaucoup plus grande, de l'ordre du mètre ou du kilomètre au lieu d'une fraction de micromètre.

Juste avant 1900, en 1895 et 1896, trois découvertes expérimentales ont cependant commencé à jeter le trouble :

- l'électron par Thomson
- les rayons X par Röntgen
- la radioactivité par Becquerel

L'électron montre qu'il existe une particule électrisée très légère, présente dans toute matière.

Les rayons X sont un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde beaucoup plus courte que la lumière, pénétrant toute matière.

La radioactivité est une source d'énergie présente dans certains éléments, d'origine non chimique.

Diapo 2

A côté de ces découvertes expérimentales, rien chez les théoriciens. Sauf deux petits problèmes, du côté de la vitesse de la lumière et de la théorie du **corps noir**. Le Diable est souvent dans les détails, car les réponses à ces deux petits problèmes produiront les deux plus importantes révolutions en physique depuis celles de Copernic et Galilée 400 ans plus tôt. Le premier conduira à la Relativité, le second à la Mécanique quantique.

Le problème classique du corps noir consiste à comprendre quantitativement comment un objet solide chauffé à une certaine température émet du rayonnement électromagnétique, en fonction de la longueur d'onde de ce rayonnement. C'est donc un problème intéressant à la fois du point de vue théorique et technologique. A la suite de certains prédécesseurs, qui avait proposé une formule mal adaptée à l'observation, Planck trouve la formule parfaite par un raisonnement semi-empirique. Seul défaut : l'énergie tend vers l'infini pour les hautes fréquences. L'énergie totale aussi, résultat évidemment absurde.

Planck tente alors une manipulation classique en mathématique, introduire dans le calcul une variable h « de secours (en allemand *hilfe*) », qu'il compte faire tendre vers zéro pour faire disparaître la divergence. Physiquement cela correspond à supposer que l'échange d'énergie entre matière et rayonnement ne peut prendre que des valeurs discrètes, produit de h par la fréquence. Mais le projet de la faire tendre vers zéro est un échec : l'infini réapparaît. Par contre la valeur $h = 6,626 \text{ J.s}$ reproduit parfaitement l'expérience. La **constante de Planck** est un quantum (quantum = quantité en latin). Sa

naissance signe l'introduction du **discontinu** dans la physique jusque-là dominée par le continu.

Diapo 3

1905 est une année faste pour Einstein. Il découvre à la fois la relativité restreinte et la quantification du rayonnement. Sur la relativité, je citerai simplement deux résultats utiles dans la suite de mon exposé :

- la vitesse de la lumière dans le vide est une limite indépassable, $c = 300\,000$ km/s, aucun transfert de matière, d'énergie ou d'information ne peut aller plus vite ;
- la célèbre équation $E = m c^2$ montrant que toute masse contient une certaine quantité d'énergie.

La contribution d'Einstein à la théorie quantique est de généraliser le résultat de Planck, en expliquant l'effet photoélectrique. C'est le rayonnement lui-même qui est quantifié et non plus seulement les échanges d'énergie avec la matière. Il y a donc des quanta de rayonnement, d'énergie $E = h \nu$ plus tard appelés **photons**. ν (nu) est la fréquence en hertz ou seconde⁻¹.

Diapo 4

En Angleterre en 1911, Rutherford et son groupe envoient sur de la matière des particules alpha qui venaient juste d'être découvertes dans les études de radioactivité. Cette expérience prouve que les atomes contiennent un centre 100 000 fois plus petit que l'atome lui-même. Ce centre, chargé positivement, contient l'essentiel de la masse. Les électrons gravitent autour. La matière, auparavant considérée comme compacte et pleine, est donc essentiellement vide.

Il faut attendre 1932 et la découverte du neutron par Chadwick pour établir la composition du noyau en deux particules, proton chargé positivement et neutron neutre. L'atome le plus simple est celui d'hydrogène composé d'un électron et un proton.

Diapo 5

En 1913 au Danemark, Bohr propose que seules certaines orbites des électrons soient occupées et stables. Ce modèle de Bohr permet d'expliquer pourquoi le spectre lumineux émis par des atomes isolés n'est pas continu mais est constitué de raies. C'est une nouvelle quantification, appelée « première théorie des quanta ». Les raies de l'hydrogène sont bien décrites, mais le modèle peine sur les atomes plus complexes. Le terme « théorie » est donc un peu exagéré, il s'agit plutôt à ce stade de recettes de cuisine.

Par la suite Bohr réunira autour de lui de nombreux collaborateurs dans son institut et créera l'École de Copenhague.

Diapo 6 et vidéo

Il faut attendre dix ans pour qu'une nouvelle idée relance le débat. Le Français Louis de Broglie propose en 1923 l'hypothèse hardie de la « dualité onde corpuscule ». Puisque les ondes peuvent avoir une structure quantifiée, pourquoi les électrons, les atomes, ou

tous corps matériels n'auraient-ils pas un comportement ondulatoire ? La longueur d'onde λ étant égale à h divisée par p (impulsion = masse \times vitesse). Pour le prouver il faut réaliser des expériences typiques d'un comportement ondulatoire comme la diffraction ou l'interférence. Par exemple l'interférence à deux fentes découverte en 1803 par Young pour la lumière. Cela a effectivement été réalisé avec des électrons, des atomes de gaz rare et même des molécules.

La vidéo suivante montre une simulation d'une expérience japonaise de 1989. On voit que des électrons sont détectés sur l'écran de façon apparemment aléatoire, puis au fur et à mesure de leur accumulation on voit apparaître des franges d'interférence. Le plus extraordinaire est que les électrons peuvent être envoyés un par un, mais que les franges sont toujours là. Autrement dit chaque particule passe par les deux trous à la fois, elle interfère avec elle-même ! Résultat évidemment impensable en mécanique classique.

Diapo 7

Les années suivantes voient la formulation définitive de la mécanique quantique, du moins sous sa forme non relativiste.

Schrödinger généralise l'idée de de Broglie en inventant la fonction d'onde ψ qui dépend de l'espace et du temps et obéit à une équation différentielle. Cette équation de Schrödinger permet de retrouver tous les résultats de la première théorie des quanta mais s'applique à tout système physique et non plus seulement à l'atome. En 1927 Born donne une interprétation probabiliste de la fonction d'onde : le carré de son module (car elle contient obligatoirement des nombres imaginaires) donne la probabilité de trouver la particule à une position et à un temps donnés. C'est la **mécanique ondulatoire**.

Heisenberg de son côté abandonne toute représentation mécanique et refuse de parler de trajectoire des électrons puisqu'elles ne sont pas observables. Il utilise des tableaux de nombres pour calculer les transitions entre niveaux d'énergie dans l'atome. Pour cela il réinvente un objet mathématique connu depuis le XIX^e siècle, les matrices. En particulier, la non commutativité des matrices permet de tenir compte du fait que deux mesures successives faites sur un système quantique donnent un résultat différent selon l'ordre dans lequel ces mesures sont effectuées. C'est la **mécanique des matrices**. Il en déduit les relations d'incertitude. L'incertitude sur la coordonnée x et celle sur la coordonnée p_x sont liées par une inégalité : leur produit est supérieur à h divisée par 4π . Ceci exprime quantitativement le fait que la mesure sur un système quantique modifie en général le système mesuré.

Les deux conceptions s'affrontent furieusement jusqu'au congrès Solvay à Bruxelles en 1927 qui réunit la fine fleur de la physique de l'époque. On constate alors que les deux conceptions sont deux aspects équivalents d'une seule et même théorie.

Diapo 8

Quelle est l'utilité de cette belle théorie ? La première est de décrire enfin correctement l'atome à plusieurs électrons telle que nous la connaissons aujourd'hui, c'est à dire par son modèle en couches et en sous couches. La première couche comprend deux électrons, la seconde huit, et ainsi de suite. Pour cela il faut introduire une propriété supplémentaire, le principe de Pauli : deux électrons ne peuvent pas se trouver dans le

même état quantique. Les deux électrons de l'atome d'hélium n'y sont pas car il y a un nombre quantique nouveau, le spin introduit aussi par Pauli. C'est un nombre caractérisant l'état de rotation interne de l'électron et qui n'a que deux valeurs possibles. Je n'ai pas le temps de parler beaucoup du spin dans cette conférence, je pourrai répondre à des questions si vous voulez. Par contre il faut dire que le principe de Pauli a été généralisé par Fermi à tous les systèmes physiques qui comprennent plusieurs particules identiques. Toutes les particules qui obéissent au principe de Pauli s'appellent logiquement des **fermions**.

Diapo 9

L'utilité suivante est d'expliquer la liaison chimique, en particulier de prédire la forme spatiale des molécules. La molécule d'ammoniac a la forme d'une pyramide dont les trois atomes d'hydrogène forment la base. Imaginons qu'on pousse l'atome d'azote, elle peut traverser le plan de base et se retrouver dans une position symétrique stable comme un parapluie soufflé par le vent. C'est la description en mécanique classique. En quantique il peut y avoir une fonction d'onde formée par l'addition des deux états. La molécule est en quelque sorte à la fois en haut et en bas, comme les électrons dans les fentes d'Young de tout à l'heure.

C'est en utilisant cette propriété qu'a été construit le premier maser à ammoniac, ancêtre du laser. Le M de maser pour microonde, car les niveaux d'oscillation de la molécule produisent un rayonnement microonde, alors que le laser fonctionne en général dans le domaine lumineux, d'où le L.

Le principe du maser ou laser utilise l'émission stimulée entre deux niveaux d'énergie dans un milieu matériel, ici l'ammoniac gazeux. La propriété importante est que les deux photons produits par émission stimulée sont identiques, ce qui explique les propriétés bien connues des lasers.

Diapo 10

Il y a des lasers partout, dans votre lecteur de DVD, dans les boîtes de nuit, dans les laboratoires, les usines, aux mains des gendarmes qui contrôlent la vitesse, chez votre ophtalmologue, etc. Il y en a de toutes dimensions, submillimétrique ou gigantesque pour la fusion nucléaire.

Ils sont utiles pour alimenter les fibres optiques. Sans les fibres optiques, Internet fonctionnerait à la vitesse du téléphone, c'est à dire pas très vite.

Diapo 11

Les horloges atomiques utilisent comme système de régulation la fréquence de transition entre deux niveaux atomiques. Ceci remplace le balancier des horloges de campagne, le ressort spiral des montres bracelet ou son successeur le cristal de quartz.

Une horloge atomique peut atteindre une précision d'une seconde sur 100 millions d'années. Si vous vous posez la question « à quoi ça sert une précision d'une seconde sur 100 millions d'années » la réponse est simple : ça ne sert à rien. Par contre, ce qui sert c'est une horloge précise à mieux qu'un milliardième de seconde sur plusieurs jours.

Par exemple le transfert d'un fichier informatique entre l'Europe et les Etats-Unis se fait à une vitesse de plus d'un bit par nanoseconde. Il faut des horloges synchronisées. Une horloge atomique peut tenir dans un cube de 20 cm de côté.

Les satellites GPS envoient des informations sur leur position et leur horloge par ondes radios. La distance est calculée par le temps de parcours, une nanoseconde donnant une précision de 33 cm. Chaque satellite, ainsi que les stations terrestres de référence contient une horloge atomique. Il n'y a pas d'horloge atomique dans un récepteur GPS et celui-ci est simplement passif. Il est intéressant de noter que le GPS utilise la physique quantique mais également la physique relativiste. Relativité restreinte pour corriger les horloges à cause de la vitesse du satellite et relativité générale pour corriger à cause du champ de pesanteur terrestre.

Depuis 1967 la définition internationale de la seconde utilise une horloge atomique au césium. Une nouvelle définition du kilogramme, basée sur la constante de Planck, est en cours (voir la conférence précédente de Richard Davis).

Diapo 12

La mécanique quantique permet de comprendre la conduction électrique dans les cristaux. Au lieu de niveaux d'énergie discrets comme dans l'atome isolé, les électrons se répartissent dans des bandes d'énergie séparées par des bandes interdites. Le principe de Pauli s'applique ici aussi et les électrons remplissent les bandes jusqu'à une valeur appelée niveau de Fermi. Selon la position de ce niveau de Fermi, dans la bande de conduction ou dans une bande interdite, le matériau est conducteur ou isolant. Les semi-conducteurs, à bande interdite étroite comme le silicium, ont permis de construire les transistors, puis de les intégrer dans des circuits jusqu'à contenir l'unité centrale d'un ordinateur. Inutile de mentionner l'importance de cette application de la physique quantique dans notre vie quotidienne.

Diapo 13

Revenons à la théorie, et en particulier au principe de Pauli. L'exemple du laser montre que les photons n'obéissent pas à ce principe. Le laser produit de la lumière monochromatique, suivant un faisceau très parallèle. C'est donc que tous les photons émis sont dans le même état quantique.

En 1924, Bose, un jeune maître assistant à l'université de Dacca, alors dans l'empire des Indes et aujourd'hui au Bangladesh, écrivit un article décrivant les photons comme une assemblée de particules qui pouvaient occuper le même état quantique. Son article fut refusé par une revue scientifique anglaise prestigieuse. Dépité, il écrivit à Einstein qui fut enthousiasmé, traduisit l'article en allemand et le fit paraître dans la meilleure revue allemande. Bose resta en Europe deux ans, rencontra Marie Curie et Einstein, puis rentra à Dacca où il continua à travailler en physique et à la promotion de sa langue, le bengali.

Depuis, les particules suivant la statistique de Bose-Einstein s'appellent les **bosons**.

Un article de physique de trois pages peut vous rendre célèbre et vous faire entrer comme nom commun dans le dictionnaire.

Illustration des bosons et fermions à énergie thermique minimum. A haute température le comportement devient similaire.

Diapo 14

Dirac est certainement le plus grand physicien du XX^e siècle, après Einstein. Dès 1928 il s'attaque au problème de rendre la mécanique quantique compatible avec la relativité restreinte, de façon à pouvoir traiter les problèmes où une vitesse n'est pas négligeable par rapport à celle de la lumière, ou lorsque l'énergie de masse ne domine pas toutes les autres. Il y parvient en inventant une nouvelle équation, remplaçant celle de Schrödinger. Mais cette équation réserve des surprises, entre autres des solutions d'énergie négative infinie. Dirac résout la difficulté en postulant qu'il existe un électron ayant la même masse et toutes les autres propriétés de l'électron, sauf que sa charge électrique est exactement l'opposée. C'est un **antiélectron**, ou **positron**.

Cette particule est effectivement détectée l'année suivante : en enregistrant des rayons cosmiques, Anderson (un physicien qui ne connaissait pas la prédiction de Dirac) observe la trace d'un électron positif.

D'après $E = mc^2$ il est possible de créer des particules massives si l'on dispose de suffisamment d'énergie. Mais la charge électrique doit toujours être conservée, on crée donc obligatoirement en même temps un électron et un antiélectron. Inversement une paire électron-antiélectron peut s'annihiler en deux photons.

Diapo 15

Toutes les particules ont leur antiparticule, de charge opposée. L'antiproton a été découvert en 1955, date à laquelle un accélérateur de particules suffisamment puissant est entré en service.

Aujourd'hui on produit des antiparticules tous les jours dans de grandes machines comme celle du Tevatron près de Chicago, qui fonctionné jusqu'en 2011 pour produire des collisions proton-antiproton.

Lorsqu'une particule est neutre, elle peut avoir son antiparticule, c'est le cas du neutron. Elle peut aussi être confondue avec son antiparticule, c'est le cas du photon.

Diapo 16

Le positron ne sert pas uniquement à la recherche fondamentale. Il est aussi utilisé en médecine car il est émis par certains isotopes radioactifs. Un patient reçoit une injection contenant cet émetteur radioactif, par exemple le fluor 18. Les positrons s'annihilent avec les électrons de la matière organique en émettant deux photons de haute énergie détectés simultanément. Un algorithme permet de reconstruire une image en trois dimensions de la zone où s'est accumulé le composé radioactif.

Ce système d'imagerie médicale s'appelle la tomographie par émission de positrons TEP. Dans l'exemple, le fluorodesoxyglucose indique l'activité cérébrale du patient selon qu'il lit ou écoute. Il existe plusieurs milliers d'appareils de TEP dans le monde.

Diapo 17

La TEP est complémentaire d'autres systèmes d'imagerie médicale en 3D. Il est moins précis en position que le scanner à rayons X ou l'IRM, mais a l'avantage de donner une information physiologique alors que les deux autres systèmes ne donnent qu'une information anatomique.

L'IRM utilise le phénomène de résonance magnétique. Dans un champ magnétique intense les noyaux d'hydrogène entrent en résonance sous l'action d'un champ électrique alternatif. La fréquence de résonance dépend légèrement de l'environnement proche de l'atome d'hydrogène. Cette méthode était initialement utilisée en chimie pour identifier un composé organique sans contact. Comme les inhomogénéités du champ magnétique étaient gênantes, on a eu l'idée d'utiliser cet inconvénient pour établir une carte de l'échantillon. Dans l'IRM, l'échantillon en question est le corps humain. C'est aussi une application de la mécanique quantique.

Diapo 18

Après les premiers résultats impressionnants de Dirac, le projet de construire une mécanique quantique relativiste rencontre beaucoup de difficultés d'ordre mathématique. Il faut attendre 20 ans pour que des phénomènes simples puissent être calculables. Plusieurs théoriciens participent à cette avancée, en particulier Feynman.

Celui-ci est connu en particulier pour avoir inventé des diagrammes d'espace-temps extrêmement pratiques pour représenter des calculs complexes. Une ligne ondulée représente un photon, une ligne droite un électron, ou bien un antiélectron lorsque le sens de la flèche est inversé. Dans le diagramme présenté, un photon se transforme en une paire électron-positron, qui s'annihile ensuite en un photon. En physique classique un tel processus est impossible quelle que soit l'énergie du photon puisque celui-ci est de masse nulle, alors que la paire électron-positron est massive. Mais nous sommes en physique quantique et il existe une relation d'incertitude de Heisenberg, analogue à celle reliant position et impulsion, qui relie énergie et temps. Autrement dit, on peut s'affranchir de la loi de conservation de l'énergie (et donc de la masse puisque nous sommes en physique relativiste) à condition de le faire dans un temps suffisamment court. Les particules produites et détruites ainsi sont appelées **virtuelles**.

On voit dès lors la difficulté pour construire la mécanique quantique relativiste : dans tout processus physique peuvent apparaître des particules virtuelles, qui évidemment vont compliquer le calcul. Il faut abandonner l'espoir de travailler avec un nombre fixe d'objets, d'où le nom nouveau : théorie quantique des champs. Photon et électron individuels ne sont plus utilisables, on raisonne sur un champ de photons et un champ d'électrons, comme sur un champ électrique en physique classique.

Une dernière remarque : malgré leur simplicité les diagrammes de Feynman ne représentent par des trajectoires de particules car elles n'existent pas en physique quantique. Ce sont des symboles d'éléments de calcul extraordinairement utiles.

Diapo 19

A partir des années 1960, les physiciens s'intéressent aux deux composants du noyau atomique, le neutron et le proton et à la force qui les lie entre eux. Cette force nucléaire, qui est au moins 100 fois plus forte que l'électromagnétisme, doit être comprise dans le

cadre de la théorie quantique des champs. Sur le plan expérimental, l'étude des rayons cosmiques puis l'utilisation des accélérateurs de particules d'énergie de plus en plus élevée montre qu'il existe de nouvelles particules, plus ou moins instables.

Des considérations de symétrie permettent de classer ces particules et conduisent Gell-Mann à proposer que le neutron et le proton soient composés de trois objets plus petits qu'il baptise quarks. Propriété remarquable : les quarks qui sont de deux types, u et d, ont une charge électrique fractionnaire, $2/3$ ou $1/3$ de celle du proton. Des expériences analogues à celle de Rutherford en 1911, mais de plus haute énergie, confirment l'existence de ces quarks comme composants du proton et du neutron.

Diapo 20

Aujourd'hui on connaît trois familles composées chacune de deux quarks, de masse croissante. Seule la première famille est stable. On ne peut pas isoler un quark ; si l'on fait entrer en collision deux protons, comme dans cette vue d'un événement au LHC du CERN, deux quarks constituants peuvent être éjectés mais ils reforment d'autres particules composées qui constituent un jet bien identifiable. Le diagramme de Feynman à droite symbolise une partie de cet événement, sans les jets finals. Les ellipses grises représentent les deux protons, les traits colorés représentent les quarks.

Il existe aussi trois familles de particules insensibles à la force nucléaire, comme l'électron. La première famille comprend l'électron lui-même et une particule neutre le neutrino. L'ensemble de ces douze particules, et de leurs antiparticules, sont les constituants fondamentaux de la matière, telle qu'elle est connue en 2017.

Diapo 21

Pour comprendre la matière, il faut deux choses : connaître ses constituants d'une part, et avoir une description des interactions entre ces constituants d'autre part. On utilise plutôt le terme d'interaction, qui est plus général que celui de force qui a un sens très précis en physique.

Le rêve des physiciens est toujours de simplifier la théorie et de chercher la généralité. En 1687 Newton a réussi à unifier la mécanique céleste et la mécanique terrestre dans la théorie de la gravitation. En 1873 Maxwell a unifié électricité et magnétisme dans l'électromagnétisme.

De la même façon on cherche à unifier les deux types d'interaction nucléaire forte (celle qui concerne les quarks) et nucléaire faible (qui concerne surtout les électrons et neutrinos) avec le reste. Un premier succès a été obtenu en 1967 par Weinberg et Salam en unifiant nucléaire faible et électromagnétisme dans l'interaction électrofaible. En pointillé est indiqué ce qui reste à faire pour réaliser le rêve des physiciens, s'il est possible.

Diapo 22

Le prix Nobel 1979 a été attribué à Glashow, Weinberg et Salam pour l'interaction électrofaible.

Une théorie de l'interaction forte a été élaborée en 1974, la particule de champ qui transmet cette interaction entre les quarks s'appelle le gluon. Elle joue le même rôle que

le photon qui transmet l'interaction électromagnétique entre les particules chargées. Comme le photon, c'est un boson, alors que les particules de matière sont des fermions. L'ensemble constitue ce qu'on appelle le Modèle Standard.

Diapo 23

Ce tableau résume le Modèle Standard tel qu'il était connu en 1995. Il y a différents niveaux d'organisation de la matière, du cristal jusqu'aux quarks et leptons (nom commun aux électrons et neutrinos).

J'ai déjà décrit les douze particules de matière. Les particules de champ sont le photon, le gluon ; il y a aussi deux bosons chargés et un neutre pour l'interaction faible. Ils ont été prédits théoriquement en 1967 et découverts expérimentalement en 1983 à la masse prévue. Puissance prédictive de la théorie quantique !

Le graviton est une particule hypothétique qui devrait exister si l'on arrivait à concilier la gravitation relativiste et la théorie quantique des champs.

Diapo 24

Sommes-nous satisfaits par le Modèle Standard ? S'il fallait énoncer deux mots qui ont guidé avec succès la construction de ce modèle, ce serait : **élémentarité** et **symétrie**. La première propriété est parfaitement satisfaite, mais la seconde laisse encore à désirer. En effet la théorie des interactions entre particules de matière et particules de champ serait parfaitement symétrique si toutes les particules étaient de masse nulle. Ce qui est évidemment faux pour tous les fermions de matière et pour les bosons d'interaction faible.

Dès 1964, deux Belges, Brout et Englert, et un Écossais, Higgs, proposent un mécanisme subtil, appelé « brisure spontanée de symétrie ». On peut en avoir une idée simple par une expérience de mécanique pratique. Poussons une barre cylindrique flexible : le système est complètement symétrique de révolution. Mais si l'on pousse trop fort se produit un phénomène que les mécaniciens connaissent bien : le flambage d'une poutre. La tige se plie au lieu de subir une compression. La symétrie de révolution devient instable, elle disparaît et fait place à un état moins symétrique, mais qui demande moins d'énergie.

Le même phénomène, purement abstrait, apparaît en théorie quantique des champs. Il suppose qu'il existe dans tout l'espace un « champ de Higgs » tel que les masses des particules soient nulles si la symétrie est conservée, non nulles si la symétrie est brisée.

Diapo 25

Une analogie du champ de Higgs avec un champ de neige, évidemment plus concret. Une skieuse est très rapide, c'est l'analogie d'une particule légère. Un homme chaussé de raquettes, c'est l'analogue d'une particule plus lourde. Un troisième chaussé de bottes, possède une plus grande inertie, c'est une particule très lourde. Tous sont sensibles au même champ de neige.

Comment mettre en évidence le champ de Higgs plus concrètement ? Envoyons deux skieurs à grande vitesse l'un vers l'autre ; dans certains cas leur énergie se transforme en masse et donne le résultat visible sur la figure de gauche : une nouvelle particule qui

possède elle-même une masse propre grâce au champ de Higgs. Cette particule prévue par la théorie, devrait être détectée dans des collisions de deux protons à haute énergie. Malheureusement la traque est difficile car la théorie ne prédit la masse de ce boson de Higgs.

Diapo 26

En juillet 2012 deux expériences du CERN découvrent indépendamment le boson de Higgs et mesurent sa masse.

Diapo 27

A droite, vue de l'expérience ATLAS en cours de construction.

On peut dire que la physique quantique est une des grandes aventures intellectuelles de l'humanité. On ne compte plus les prix Nobel, à peu près 120, y compris celui d'Einstein en 1921 pour le photon. D'ailleurs Einstein n'a jamais reçu de Nobel ni pour la relativité restreinte ni pour la relativité générale. Seul le prix Nobel de 1993 pour le pulsar double récompense une observation de relativité générale.

Une grande partie des nouvelles technologies sont issues directement de la théorie quantique. On a vu les masers et lasers, les horloges atomiques, le GPS, les semi-conducteurs et tous leurs développements dans l'électronique, l'informatique et les télécommunications, l'analyse chimique et l'imagerie médicale. Je n'ai pas cité aussi la supraconductivité et les différents types de microscopes électroniques qui ont permis des avancées énormes en biologie.

Diapo 28

Pourtant la mécanique quantique continue à susciter des paradoxes et des controverses. Le premier est celui du chat de Schrödinger. Ceci est une pure expérience de pensée, que les amis des bêtes se rassurent ! Une source radioactive envoie aléatoirement des électrons avec une probabilité de $\frac{1}{2}$ par heure, qui déclenchent un compteur, lequel actionne un marteau qui brise une ampoule de cyanure, poison mortel pour le chat enfermé. Quelle est la fonction d'onde du chat ? En l'absence d'observation, c'est une superposition d'un état chat vivant et chat mort. Le chat est-il mort ou vivant au bout d'une heure ? Seule l'observation peut le dire. Mais si un appareil automatique prend une photo que l'on regarde un an plus tard, la fonction d'onde reste en superposition pendant un an ?

La même année Einstein, Podolsky et Rosen proposent un autre paradoxe où deux observateurs mesurent des produits de désintégration d'une source. Comme les observateurs peuvent être très éloignés et qu'aucune information ne peut voyager entre eux plus vite que la lumière, EPR concluent à une contradiction entre la mécanique quantique et la relativité.

Déjà au congrès Solvay de 1927 Einstein et d'autres s'opposaient à l'interprétation aujourd'hui largement majoritaire, celle de Bohr et de l'école de Copenhague.

Diapo 29

Certains ont proposé que la théorie quantique soit incomplète et qu'il existe des « variables cachées ». Si on pouvait mesurer ces variables, les paradoxes tomberaient.

Or en 1964 le théoricien irlandais Bell imagine un test qui permet de trancher entre les deux positions : si une certaine inégalité est violée dans des mesures d'une expérience de type EPR, les variables cachées n'existent pas. Après plusieurs tentatives, une expérience probante est réalisée par l'équipe d'Aspect à Orsay : l'inégalité est bien violée. La physique quantique résiste.

Ces travaux ont d'ailleurs donné lieu à des applications intéressantes en cryptographie quantique. Puisqu'une mesure perturbe un système quantique, deux interlocuteurs peuvent détecter si un espion intercepte leur message.

Diapo 30

Quelques citations pour finir (sur la diapo)

Planck

Einstein, souvent cité « Dieu ... » en fait il a bien dit « Le Vieux ... » avec un V majuscule

Bohr ne se laissait jamais impressionner par Einstein, on a des volumes entiers de leurs controverses

Dirac, lui était réservé et timide, les résultats imprévus de son équation relativiste sont effectivement fascinants

Feynman, le physicien génial de la seconde moitié du XX^e siècle, génial à double titre, pour la théorie quantique des champs, et comme pédagogue pour son cours connu dans le monde entier qui a révolutionné l'enseignement de la physique. Mais aussi un sacré farceur car si quelqu'un comprenait la mécanique quantique, c'était bien lui !

Hawking, rajoute après Einstein et Bohr