

## Les casseurs d'atomes

Helenka Przysiezniak

Plus communément appelés *accélérateurs de particules*, les « casseurs d'atomes » permettent de sonder l'infiniment petit avec des particules extrêmement énergétiques. La relation de Broglie

$$E=h/\lambda$$

relie l'énergie  $E$  à la longueur d'onde  $\lambda$  d'une particule (reliée à sa taille). Plus l'énergie des particules incidentes est grande, plus les distances sondées sont petites.

Dans la **figure 1**, l'ordonnée représente l'échelle de temps en secondes allant de  $10^{-43}$  seconde après le Big Bang à  $10^{17}$  secondes ( $10^{10}$  années), l'âge de notre Univers. L'abscisse représente la température : de 0 à  $10^{32}$  Kelvin ( $0^\circ$  Celsius = 273 Kelvin).

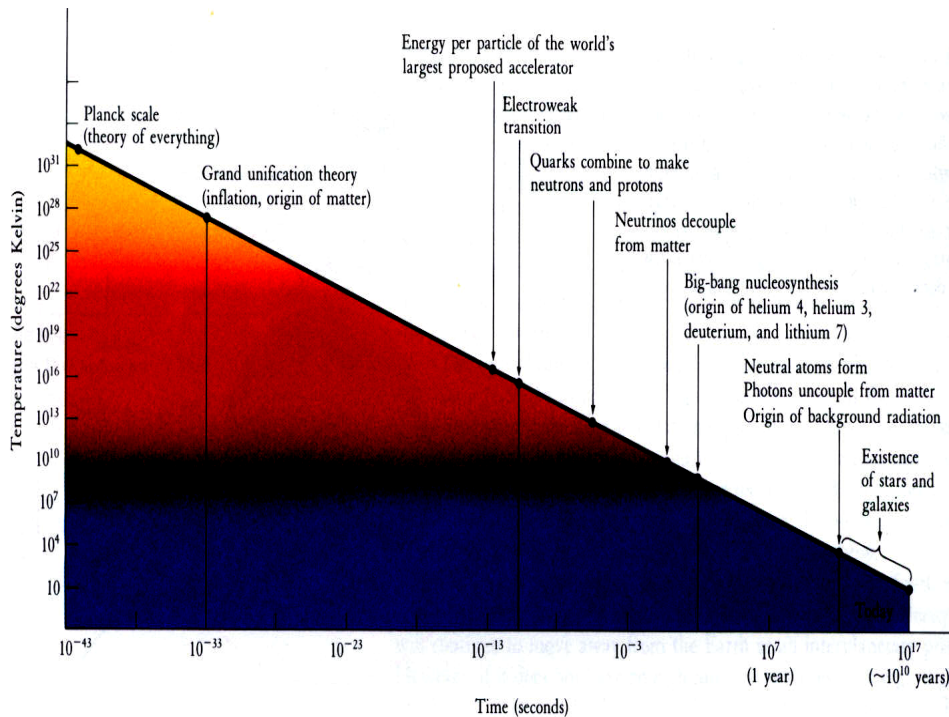


Figure 1

Référence: From *Quarks to the Cosmos* de Lederman et Schramm.

L'Univers aujourd'hui est très froid ( $\sim 10$  Kelvin), alors qu'au moment du Big Bang, sa température est de  $10^{32}$  Kelvin, et il est infiniment petit (il mesure  $10^{-33}$  cm i.e. beaucoup plus petit qu'un noyau d'atome  $10^{-13}$  cm) et lourd. La densité d'énergie atteinte dans les accélérateurs de particules aujourd'hui est semblable à celle dans l'Univers environ  $10^{-13}$  secondes après le Big Bang ( $T \sim 10^{16}$  Kelvin). Comment et pourquoi en sommes nous arrivés à construire de telles machines ?

## Contexte historique

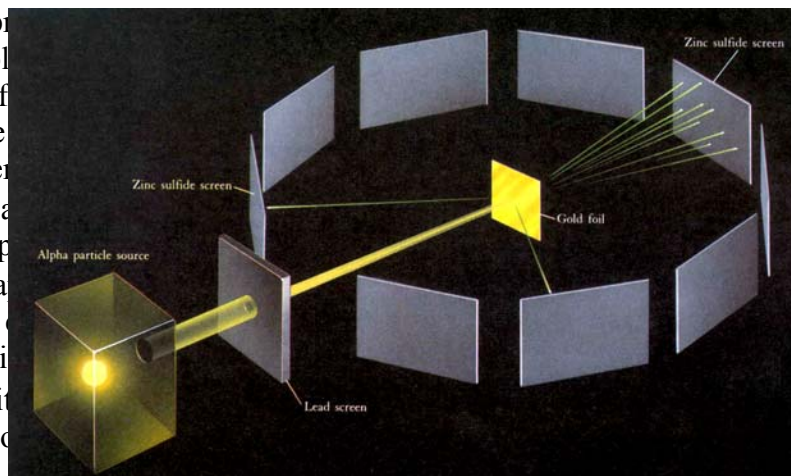
Au 19<sup>ème</sup> siècle, James Maxwell (1831-1879) unifie deux interactions fondamentales, l'électricité et le magnétisme, dans sa théorie de l'*électromagnétisme*. Les deux ne sont que des représentations différentes d'une seule et même interaction. Une conséquence de ses équations est que les ondes doivent de propager à  $3 \times 10^8$  (300 000 000) m/s, ce qui est exactement la vitesse de la lumière.

En 1894 Albert Michelson (prix Nobel de physique 1907 pour ses travaux sur la lumière) déclare, en parlant de la physique, qu'il ne reste plus qu'à mesurer tout ce que l'on connaît déjà jusqu'à la sixième décimale. En fait, la structure entière de la physique sera complètement révolutionnée dans les 20 années qui suivent.

Un premier bouleversement survient en 1896, quand Henri Becquerel (Nobel 1903) découvre accidentellement la radioactivité. Il enveloppe de papier noir des plaques photographiques et les place dans un tiroir avec des sels d'uranium. Quand il les développe, elles sont devenues toutes noires ! Il pense que l'uranium a émis un certain type de radiation. On comprend que cette nouvelle radioactivité est l'émission spontanée de trois types de radiations : les rayons gamma  $\gamma$  (photons), les particules alpha  $\alpha$  chargées (noyau d'atome d'hélium), et les particules beta  $\beta$  (électrons).

Ernest Rutherford (1871-1937 ; Nobel 1908) découvre en 1888 que les particules alpha sont des atomes d'hélium sans leur électron. Les particules alpha sont éjectées des matériaux radioactifs à grande vitesse : 10 000 km/s. En 1910, il reconnaît que ces particules peuvent être utilisées pour sonder les atomes.

Dans ce qui devient le premier test de la structure atomique, Rutherford bombarde une plaque d'une fine couche de sulfure de zinc avec des particules alpha. Les particules alpha perturbent les molécules de sulfure de zinc, ce qui les rend visible à l'œil nu. L'expérience montre que la plupart des particules alpha traversent le sulfure de zinc sans être déviées, mais certaines sont déviées à de petits angles, et quelques-unes sont déviées à de grands angles, voire rebondissent vers l'arrière. La particule  $\alpha$  est donc considérée comme une petite bille solide. Des calculs simples montrent que le noyau d'un atome d'or est d'un diamètre de l'ordre de  $10^{-14}$  m, un volume extrêmement petit par rapport au volume de l'atome. Il décou-



isceau de  
recouverts  
cule alpha  
st à peine  
la validité  
bissant de  
sent vers  
massif. De  
e l'atome  
e dans un  
10-14 du

figure 2  
*Expérience de diffusion sur l'or de Rutherford. Référence: From Quarks to the Cosmos de Lederman et Schramm.*

En 1911, quand Niels Bohr (1885-1962 ; Nobel 1922) arrive au laboratoire de Rutherford, l'atome est considéré comme étant constitué d'un cœur minuscule de charge positive exactement égale à la charge négative des électrons gravitant autour. Pourtant, on ne comprend pas comment les constituants de l'atome tiennent ensemble et pourquoi l'atome est un objet stable. L'électron ne peut rester immobile, sinon il plongerait dans le noyau ; pourtant s'il gravite autour du noyau comme la terre autour du soleil, selon les équations de l'électromagnétisme de Maxwell il émettrait de la *radiation synchrotron* perdant son énergie, et plongerait en spirale dans le noyau. Existe-il d'autres lois dans la nature? Niels Bohr propose une solution révolutionnaire: seules certaines orbites sont permises aux électrons d'un atome et leur énergie est quantifiée. La théorie quantique est née, aussi bouleversante soit-elle ! Une autre théorie révolutionnaire est conçue par Albert Einstein (1879-1955 ; Nobel 1921). Selon lui, notre expérience de l'espace et du temps dépend de notre propre état de mouvement, d'où la relativité de toute observation. La seule exception concerne la vitesse de la lumière ( $=c$ ), qui est constante en toutes circonstances. Einstein reconnaît d'ailleurs la constance de la vitesse de la lumière comme un fondement de sa théorie. Il étend ses idées à la force gravitationnelle, construisant sa fameuse théorie de la relativité générale.

Les découvertes de la radioactivité et du noyau atomique, ainsi que les révolutions théoriques de la mécanique quantique et de la relativité générale, redonnent vie à la physique et notamment à la physique des particules élémentaires.

## Les particules élémentaires

Le terme *particule élémentaire* désigne une particule indivisible, fondamentale et constituante de la matière environnante. En cette fin du 19<sup>ème</sup>, début du 20<sup>ème</sup> siècle, on commence à observer de nouveaux phénomènes qui indiquent que nous n'avons pas encore tout compris. Plusieurs découvertes vont permettre par la suite de poser les bases du *Modèle Standard* des particules élémentaires tel qu'il est connu aujourd'hui.

### *Les rayons cosmiques*

En août 1912, Victor Hess (1883-1963) envoie dans l'atmosphère un ballon rempli d'hydrogène équipé d'un compteur à ionisation. Cet appareil mesure l'intensité de l'ionisation qui résulte quand des particules énergétiques séparent les atomes normalement neutres d'un gaz en électrons libres et un résidu chargé. Les charges sont récupérées et la quantité de charges est une mesure d'intensité de l'ionisation. Hess observe d'abord un certain taux d'ionisation sur terre, puis plus le ballon s'élève, plus le taux augmente. Il effectue l'expérience de jour comme de nuit, et n'observe aucune différence entre les deux mesures. Il a donc la preuve que le soleil n'en est pas la source. Comme le taux d'ionisation augmente au fur et à mesure que le ballon s'élève, il sait aussi que cela ne peut provenir de la radioactivité naturelle de la terre. Hess argumente que les particules viennent de l'espace, mais 15 années s'écoulent avant que leur origine extra-terrestre ne soit acceptée : Hess a découvert les *rayons cosmiques*.

*Unités* Pour décrire ces nouveaux rayonnements et particules microscopiques, on utilise des unités adaptées. L'énergie et la masse sont reliées par la relation  $E=mc^2$  où  $m = m_0/[1-(v^2/c^2)]^{1/2}$ . L'unité utilisée pour l'énergie ou la masse d'une particule est l'électron-Volt, qui équivaut à l'énergie acquise par un électron lorsqu'il traverse la brèche entre deux électrodes connectées à une pile d'un Volt. En comparaison, un joule, l'énergie potentielle d'une masse de 1kg élevée à une hauteur de 1m, équivaut à  $6 \times 10^{18}$  eV, et un kilowatt-heure, ce par quoi notre facture d'électricité est calculée, équivaut à 3,600,000 joules !

Aux accélérateurs, les particules peuvent atteindre des énergies de l'ordre du MeV (1 Mégaélectron-Volt =  $10^6$  eV), du GeV (=  $10^9$  eV) et même du TeV (=  $10^{12}$  eV). Toutefois, les particules

les plus énergétiques que l'on connaisse sont les rayons cosmiques, dont l'énergie peut atteindre  $10^{20}$  eV, c'est à dire l'énergie d'une balle de tennis au service, ou encore 100 millions de fois l'énergie des particules dans le plus grand des accélérateurs.

#### *La découverte du neutrino*

James Chadwick (1891-1974) est l'étudiant le plus productif de Rutherford. Son premier travail significatif concerne l'étude de l'émission des particules  $\beta$  (électrons) par des noyaux radioactifs. Il veut savoir si les particules  $\beta$  ont toutes la même énergie ou si leur énergie a une certaine distribution. Chadwick utilise un type de compteur Geiger pour mesurer l'énergie et l'impulsion d'électrons émergeant du radium. Il voit que les électrons ont un spectre d'énergie continu, ce qui semble violer la loi de la conservation de l'énergie pour une désintégration en deux particules. Une particule invisible est-elle émise? En 1929, l'expérience a déjà été répétée plusieurs fois et les résultats sont très gênants. Niels Bohr suggère que la loi de la conservation de l'énergie ne s'applique peut-être pas aux noyaux ! Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) est un brillant théoricien suisse qui fait sa réputation à l'âge de 19 ans lorsqu'il écrit une revue de la théorie de la relativité générale. Il est aussi l'auteur, à 25 ans, du fameux principe d'exclusion de Pauli qui explique la structure en orbites des électrons dans l'atome et le tableau périodique. Pauli ne peut accepter l'idée de Bohr de la non-conservation de l'énergie, et il propose en 1930 l'existence d'une nouvelle particule qui s'échappe, ne laissant aucune trace et ne déposant aucune énergie dans les détecteurs. Cette particule doit être neutre, très pénétrante, et de très petite masse. Pauli prédit ainsi le neutrino, comme Enrico Fermi devait la surnommer plus tard. Le neutrino n'est observé directement qu'en 1959. Néanmoins, cette évidence indirecte, déduite à partir des lois de conservation, mène à l'acceptation générale de l'idée du neutrino.

#### *La découverte du neutron*

Durant la période de la course effrénée mondiale pour comprendre la radioactivité, plusieurs substances radioactives sont découvertes et utilisées comme des sources de radiation. En 1928 en Allemagne, des particules  $\alpha$  issues du polonium sont dirigées sur du béryllium. Une radiation pénétrante sans charge électrique est observée. Cette radiation est aussi observée à Paris. Tout ceci attire l'attention de Rutherford et de Chadwick. Ce dernier utilise un mélange de polonium et de béryllium, puis parvient à mesurer la masse de la nouvelle radiation, à peu près égale à la masse du proton. Il découvre ainsi le neutron.

*La force forte* Cette dernière découverte permet de clarifier la structure du noyau atomique, qu'on conçoit rapidement comme composé de neutrons et de protons. La force qui lie les neutrons et protons entre eux doit être très forte et de très courte portée, sinon la force électrique poussant les charges positives hors du noyau feraient exploser le noyau. Graduellement, suite à plusieurs expériences, on parvient à décrire quantitativement cette nouvelle force qu'on appelle la *force forte*.

#### *Le positron et l'antimatière*

En 1927, un théoricien de Cambridge Paul Dirac tente de marier la relativité restreinte à la mécanique quantique. Il étudie l'électron sujet aux champs électromagnétiques. Avant Dirac, ces deux théories sont considérées comme des révolutions séparées. La mécanique quantique a été appliquée à des électrons circulant lentement dans l'atome. La relativité restreinte s'applique au contraire à des particules circulant à la vitesse de la lumière. Personne n'a encore réussi à rendre les équations du mouvement de l'électron en accord avec la relativité. Les efforts de Dirac mènent à une nouvelle équation gouvernant le comportement de l'électron en présence de champs. Une fois résolue, elle donne quelques prédictions saisissantes : l'électron a un spin (moment angulaire quantifié ; mesure de l'activité de rotation d'un objet) de  $\frac{1}{2}$ . L'autre

prédiction est complètement inattendue: une particule de charge positive doit exister, avec la même masse et le même spin que l'électron. Dirac prédit ainsi l'existence de l'antimatière. Il faut attendre 1933 pour que Carl Anderson découvre le positron expérimentalement.

### *La force faible*

Enrico Fermi (1901-1954) est considéré comme un des génies du siècle. Il contribue autant à la physique expérimentale qu'à la physique théorique. Il donne une interprétation du principe d'exclusion de Pauli en termes de la nature statistique des électrons. Les particules de spin  $\frac{1}{2}$  sont surnommées *fermions* et se comportent selon la statistique de Fermi. Les particules de spin entier (photons de spin 1 ; particules  $\alpha$  de spin 0), que l'on surnomme *bosons*, obéissent à un ensemble de règles complètement différentes : la statistique de Bose Einstein.

En 1931, Pauli suggère que la désintégration  $\beta$  (i.e.  $n \rightarrow p^+ + \beta$ ) soit associée à l'émission d'électrons et de neutrinos (i.e.  $n \rightarrow p^+ + \beta \rightarrow p^+ + e^- + \nu$ ). En mécanique quantique, les champs des forces classiques sont remplacés par des particules qui transportent l'influence des champs d'un point à l'autre, dans l'espace et le temps. Dans le cas du champ électromagnétique, le *transmetteur* est le photon, le *quantum d'énergie* de la lumière (Einstein). La force entre deux particules chargées survient à cause de l'échange de photons. En 1933, Fermi adopte cette idée pour la désintégration  $\beta$ . Il est le premier à formuler clairement l'existence d'une nouvelle force fondamentale. Certains appellent la nouvelle interaction de Fermi la *force faible*.

En 1933, Fermi décrit correctement les distributions en énergie des électrons émergeant des désintégrations  $\beta$ , mais prédit aussi les temps de vie et autres caractéristiques de noyaux radioactifs. L'interaction de Fermi est la composante clef du Modèle Standard des particules des années 1980.

### *Le muon $\mu$ et le pion $\pi$*

En 1935, Hideki Yukawa prédit l'existence d'une particule ayant 200 fois la masse de l'électron qui expliquerait à la fois la force forte entre les protons et neutrons et la force faible induisant les désintégrations radioactives. Il pense que cette nouvelle particule serait le transmetteur de la force forte. Quand en 1937, Carl Anderson découvre le muon en détectant des rayons cosmiques, beaucoup pensent que c'est la particule prédite par Yukawa. Bruno Rossi en mesure le temps de vie,  $2 \times 10^{-6}$  s, ce qui est trop long pour être une particule de Yukawa *forte*, dont le temps de vie doit être de l'ordre de  $10^{-8}$  s. De plus, une particule forte interagit fortement avec la matière qu'elle traverse, alors que le muon ne laisse presque aucune trace.

Le mystère de la particule de Yukawa est résolu avec la découverte du pion en 1947. Il a toutes les bonnes propriétés. Il est découvert accidentellement en détectant des rayons cosmiques avec des émulsions photographiques. Cecil Powell et Giuseppe Occhialini. apportent au pic du Midi dans les Pyrénées de toutes nouvelles émulsions fabriquées par Illford à leur demande. Le taux des rayons cosmiques est dix fois plus élevé à 3000m qu'au niveau de la mer. Les plaques révèlent un foisonnement d'activité jamais vue auparavant. Une particule d'une masse *intermédiaire* de 140 MeV et d'un temps de vie *fort* de  $10^{-8}$ s est observée. Elle se désintègre en un muon et un neutrino. On l'appelle le pion.

### *En bref*

Les découvertes et théories issues de cette période changent radicalement le paysage de la physique des particules élémentaires. Les interactions fondamentales se résument à quatre forces : gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte. Le transmetteur de la force électromagnétique est le photon  $\gamma$  alors que celui de la force forte est relié d'une certaine manière au pion  $\pi$ . Quant aux deux autres forces (faible et gravitationnelle), aucun candidat transmetteur n'a encore été identifié. Les *leptons* sont définis comme des particules qui

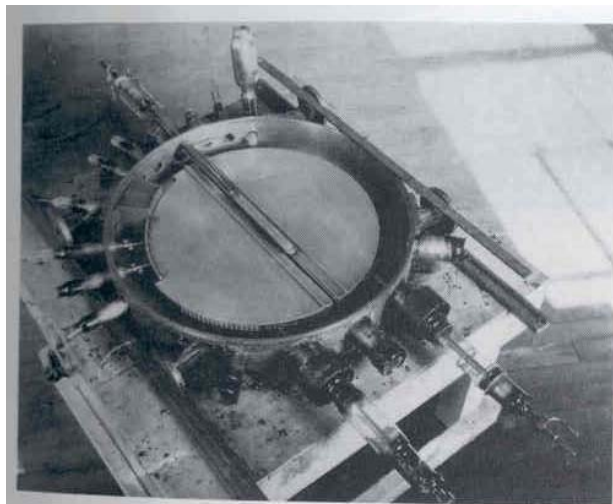
ne subissent pas la force forte : on connaît l'électron  $e^-$ , son anti-particule le positron  $e^+$ , le muon  $\mu^\pm$  et le neutrino  $\nu$ . Les *fermions* ont un spin demi-entier, et les *bosons* ont un spin entier. Finalement, à chaque particule est associée son anti-particule.

Pour sonder en profondeur les propriétés de la matière, on comprend qu'il faut utiliser des particules plus énergétiques et abondantes que celles produites dans la nature. Les accélérateurs de particules vont grandement contribuer à compléter le tableau des particules élémentaires tel que nous le connaissons aujourd'hui.

### Les accélérateurs de particules

En 1919 Rutherford démontre que le noyau de nitrogène se désintègre si on le bombarde de particules  $\alpha$ . Ceci marque le début d'un tout nouveau champ, la physique nucléaire, et d'un *niveau* d'observation plus profond. L'habileté des particules de grande vitesse à provoquer des désintégrations nucléaires mène à des tentatives de produire des particules encore plus énergétiques que celles émergeant naturellement de substances radioactives. Un appareil pouvant générer un *faisceau* intense de particules très énergétiques permettrait de sonder les propriétés de la matière.

Pour accélérer une particule chargée, un simple champ électrique suffit. L'accélération a lieu quand la particule en mouvement traverse une brèche où une tension électrique est appliquée : la particule est tirée vers l'avant par une charge de signe opposé, et poussée par derrière par une charge de même signe. Chaque fois qu'elle traverse la brèche, elle est accélérée par l'élan électrique qu'elle reçoit. En partant de ce principe très simple, les tout petits accélérateurs de particules des années 1920 (d'une dizaine de cm de diamètre ; **figure 3**), se muent en machines gigantesques dans les années 1980 (de plusieurs km de diamètre ; **figure 4**), des millions de fois l'énergie des particules  $\alpha$  de Rutherford.



Chambre accélératrice de 28cm de diamètre du cyclotron construit en 1937 au Laboratoire Lawrence Berkeley. Référence: *From Quarks to the Cosmos* de Lederman et Schramm.



*figure 4*

*Large Electron Positron Collider (LEP) de 27km de circonférence au CERN (France-Suisse) construit de 1983 à 1989. Référence : CERN.*

Un accélérateur de particules est caractérisé par l'énergie  $E$  des particules circulant à des vitesses frôlant celle de la lumière, par l'intensité  $I$ , le nombre de particules passant en un point donné par seconde, et par la luminosité  $L$ , le nombre de particules passant en un point donné par seconde et par unité de surface. Il existe aujourd'hui deux conceptions différentes d'accélérateurs: ceux à cible fixe et ceux dits collisionneurs. Dans le premier cas, les particules sont accélérées et entrent en collision avec une cible fixe. Quelques particules vont frapper les atomes de la cible et vont, s'ils sont assez énergétiques, libérer un jet de neutrons, protons, et autres particules, toutes pouvant être identifiées correctement par des détecteurs placés adéquatement. En compilant les résultats de milliers voire de millions de telles collisions, on acquiert des connaissances sur la structure du noyau.

Dans le cas des collisionneurs, deux paquets de particules circulent en sens opposé. Chaque paquet est accéléré au maximum des possibilités de la machine, puis on les fait entrer en collision frontale. Le gain en énergie par rapport à une collision sur cible fixe est important. En effet, l'énergie dans le *centre de masse*  $E_{cm}$ , (en quelque sorte l'énergie utile) pour un proton de 1000 GeV qui entre en collision avec une cible fixe est de 42 GeV, alors que l'énergie dans le centre de masse pour deux faisceaux de protons de 1000 GeV qui entrent en collision l'un avec l'autre est de 2000 GeV !

*Le tube cathodique et la découverte de l'électron*

Le tout premier appareil ayant accéléré des particules est le tube cathodique. Le principe est le suivant : une tension est appliquée à un gaz raréfié en scellant des fils, appelés électrodes, aux deux bouts d'un tube en verre. L'électrode connectée à la source négative d'électricité est la *cathode* et le terminal positif est l'*anode*. Des décharges électriques lumineuses spectaculaires sont observées. Elles émanent de la cathode et foudroient le verre autour de l'anode, illuminant le verre. Les rayons des cathodes sont en fait des faisceaux d'électrons accélérés, découverts par J.J.Thomson (1856-1940) en 1896.

*Accélérateur électrostatique*

En 1932, John D.Cockroft et Ernest T.S.Watson réussissent pour la première fois à accélérer des protons jusqu'à 770 KeV ( $770 \cdot 10^3 \text{eV}$ ) d'énergie, dans une machine électrostatique (champ électrique accélérateur) faisant usage d'une tension fixe et stable. La machine électrostatique la plus réussie est développée par Robert Van de Graaff en 1931 et atteint 1.5 MeV d'énergie.

*Le cyclotron* La percée technologique donnant naissance aux accélérateurs modernes vient grâce à Ernest O.Lawrence (1901-1958) de Berkeley en Californie, aux environs de 1930. Il reçoit d'ailleurs le prix Nobel en 1957 pour la mise en application de ce tout nouveau principe d'accélération. En 1929, il tombe sur l'article d'un Norvégien autodidacte Rolf Wideroe. Celui-ci imagine à 21 ans un accélérateur atteignant 100 MeV d'énergie. L'idée est d'utiliser plus qu'une brèche accélératrice, ou d'utiliser la même brèche plusieurs fois.

Lawrence ajoute au concept de Wideroe l'idée de confiner le mouvement des particules accélérées avec un champ magnétique. Dans un champ vertical, une particule chargée en

mouvement horizontal trace un cercle et le temps du circuit est indépendant de la vitesse de la particule. Plus la vitesse augmente, plus le rayon de sa trajectoire circulaire augmente, et le parcours plus long compense exactement la vitesse plus élevée. Ainsi, une tension électrique oscillante (champ alternatif), de *radio-fréquence* (RF ; haute fréquence) exactement égale à la fréquence de rotation de la particule, donne l'élan dans la brèche. La tension radio fréquence est simplement une tension qui alterne entre tension positive et négative de manière synchrone avec le parcours circulaire de la particule. Chaque passage de la particule dans la brèche donne un nouvel élan à la particule. La particule gagne en énergie, et le rayon augmente, mais la période de l'orbite est constante.

Le premier modèle de Lawrence construit avec son étudiant Stanley Livingston a un aimant dont les pièces circulaires mesurent quelques cm de diamètre. Des protons y sont accélérés jusqu'à 80 KeV. Son deuxième modèle atteint 1.2 MeV et les particules produisent des désintégrations nucléaires. La tension de radio-fréquence n'est que de 1000 Volts, mais les protons effectuent plus de 1000 tours en effectuant des spirales de plus en plus grandes. Il appelle ses machines des *cyclotrons* (**figure 5**).

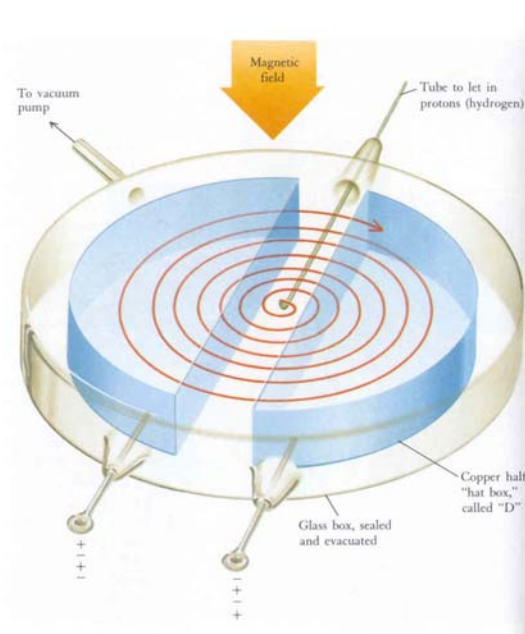


Figure 5

Schéma de cyclotron. Référence: *From Quarks to the Cosmos* de Lederman et Schramm

### Focalisation

Lawrence a beaucoup de chance. Une condition connue sous le nom de *focalisation* (*focusing*) est nécessaire pour empêcher les particules de se disperser loin des orbites circulaires propres. Toute petite déviation d'un tir parfait augmente graduellement au cours des centaines de milliers de tours, donnant un faisceau de particules complètement dispersés dans le cyclotron. Mais, et voici la chance de Lawrence, la convergence nécessaire est naturellement donnée par le fait que le champ magnétique est plus faible vers l'extérieur de l'orbite, proche du bord de l'aimant. Une analyse mathématique par un autre jeune étudiant, R.R.Wilson, montre que cet affaiblissement du champ magnétique, plus tard connu sous le nom de *gradient du champ magnétique*, fournit une force qui rétablit les particules déviées sur l'orbite idéale.

### Synchrocyclotron



Hans Bethe (1906-) se rend compte, en ce qui concerne le cyclotron de Lawrence, que quand la masse des particules accélérées augmente, tel que décrit dans la théorie de la relativité, la période de l'orbite change et la particule n'est plus synchronisée avec la radio-fréquence dans la brèche accélératrice. Ceci pose une limite supérieure sur l'énergie à laquelle les particules peuvent être accélérées dans un cyclotron. L'obstacle soulevé par Bethe donne lieu à une nouvelle invention, *le synchrocyclotron*, dans lequel la radio-fréquence varie pour tenir compte de l'augmentation de la masse. Après la deuxième guerre mondiale, des synchrocyclotrons de diverses énergies sont construits, et opèrent dans le domaine de quelques centaines de MeV, le plus puissant a 600 MeV. Il faut construire des aimants de plus en plus grands, de 60 à 500 cm de diamètre, en fer et pesant plusieurs milliers de tonnes. Ces aimants deviennent de plus en plus difficile à construire, et pour atteindre des énergies plus élevées, il faut imaginer une approche différente.

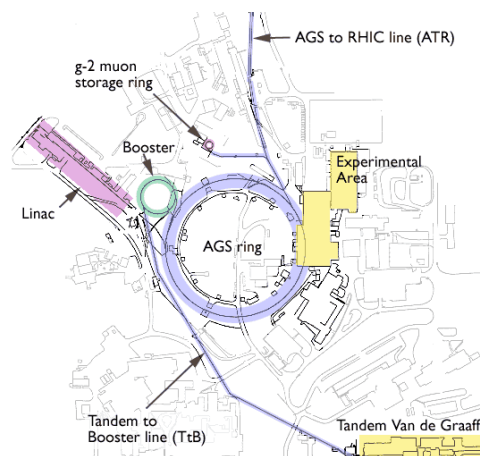
### *Synchrotron*

La solution vient avec *le synchrotron*. Le rayon de l'orbite est maintenu constant, et le champ magnétique est augmenté en synchronisant avec le gain en impulsion. La radio-fréquence est variée aussi puisque les orbites sont complétées de plus en plus rapidement. Puisque l'orbite est fixe, un champ magnétique est requis seulement autour de l'orbite, nécessitant un volume d'aimant beaucoup plus petit. Les synchrotrons à protons et à électrons construits dans les années 1950 atteignent le GeV ( $10^9$  eV) et ainsi débute l'ère moderne des grands accélérateurs !

### *Focalisation forte*

Dans les accélérateurs circulaires, les particules tournent des dizaines de milliers de fois durant le cycle d'accélération. La stabilité des orbites est un facteur crucial. Toute petite déviation de la trajectoire, par exemple due à une collision avec un atome de gaz résiduel, augmenterait en taille avec chaque tour effectué et mènerait éventuellement à la perte de la particule, à moins que des forces convergentes soient utilisées. En 1952, une découverte sur la convergence magnétique est faite au laboratoire de BNL (Brookhaven National Laboratory). Stanley Livingston, Ernest Courant, Hartland Snyder et d'autres découvrent que si le champ magnétique est ajusté pour alternativement focaliser et dé-focaliser le faisceau (principe du *gradient alternatif*; se dit *alternating gradient* en anglais), la stabilité des orbites augmente. L'effet net est une focalisation qu'ils surnommeront la *focalisation forte*. Les variations autour de l'orbite circulaire idéale sont ainsi minimisées, réduisant aussi l'ouverture requise des aimants, leur taille et leur coût. La focalisation et la dé-focalisation peut être induite en façonnant des aimants dipôles, ou grâce à une nouvelle invention de BNL, les aimants quadropoles : deux pôles nord et deux pôles sud sont arrangés de manière à générer des forces perpendiculaires à la trajectoire, poussant les particules vers ou loin du centre de l'axe de mouvement. Un PS (Proton Synchrotron) de 25 GeV est construit au CERN en 1959, puis BNL construit le leur de 30 GeV en 1960 (AGS : Alternating Gradient Synchrotron ; **figure 6**).

Les deux plus grands synchrotrons à protons construits sont le SPS (Super PS) de 450 GeV du CERN et le PS de 1000 GeV de Fermilab, de 6.9km et 6.3km de circonférence respectivement, datant du milieu des années 1970.



### figure 6

*Schéma de l'AGS, le synchrotron à protons à Brookhaven National Laboratory. Référence: BNL.*

#### *Accélérateur linéaire*

Les accélérateurs linéaires utilisent le même principe d'accélération que les synchrotrons, c'est à dire un champ électrique alternatif de haute fréquence (RF). Celui-ci est établi dans l'axe d'un long tube rectiligne. Des sources puissantes de haute fréquence n'apparaissent qu'après la Seconde Guerre mondiale. Dès le lendemain de la guerre, un accélérateur à protons de 32 MeV entre en service aux États Unis. L'accélérateur à protons de Los Alamos au Nouveau Mexique atteint 800 MeV d'énergie. Le plus grand accélérateur linéaire à électrons est construit à l'Université de Stanford en Californie, mesure 3km de long et atteint 30 GeV d'énergie!

#### *Collisionneurs*

Dans les années 1960, des *anneaux de stockage* sont conçus. Des paquets de particules (électrons et positrons ; protons et anti-protons) circulent autour d'un anneau magnétique en directions opposées. Les paquets se rencontrent à des endroits précis. Aux points de rencontre, deux particules entrent occasionnellement en collision, et une variété de particules sont créées: photons, pions, kaons, protons, anti-protons, etc... On appelle aussi ces anneaux de stockage des *collisionneurs*. La collision frontale entre deux paquets de particules permet d'atteindre des énergies dans le centre de masse plus élevées que si un seul faisceau entre en collision avec une cible fixe. Au fur et à mesure que la technique mûrit, la densité des paquets et les taux de collisions augmentent.

#### *En bref*

L'évolution des accélérateurs est spectaculaire. Tout commence avec Rutherford qui sonde l'atome d'or avec des particules  $\alpha$  de 5 MeV ( $5 \cdot 10^6 \text{eV}$ ). Cent années plus tard, des électrons d'énergie 10000 fois supérieure sont produits. Évidemment, les découvertes en physique des particules ponctuent, voire même motivent le développement des accélérateurs, et permettent de mettre en place le Modèle Standard des particules élémentaires.

## **La construction du Modèle Standard**

Le tableau périodique des éléments est une liste ordonnée des atomes et ses mystérieuses régularités ne sont comprises que lorsque l'électron est découvert et la théorie quantique construite. Dans les années 80, l'organisation correspondante des particules de base est appelée le *Modèle Standard* des particules élémentaires.

#### *Découverte du neutrino muonique*

La première découverte majeure au synchrotron à protons de BNL, l'AGS, arrive avec l'expérience *aux deux neutrinos*, menée en 1961 par trois physiciens (prix Nobel 1988) Jack Steinberger, Leon Lederman et Melvin Schwartz. Ils cherchent à étudier la force faible, la seule qui affecte les neutrinos. Mais les neutrinos interagissent très peu avec la matière : un neutrino passant dans 100 millions de km d'acier a une chance sur deux d'être arrêté ou défléchi. À l'Université de Columbia (ville de New York), Schwartz suggère de créer des faisceaux de neutrinos énergétiques. Des protons de 15 GeV sont précipités sur une cible de béryllium, produisant ainsi des protons, neutrons, et pions. Ces derniers se désintègrent presque tout le temps en muon et neutrino. Toutes ces particules fuient vers l'avant dans la même direction que

le faisceau de protons incidents. Pour filtrer tout sauf les neutrinos, ils mettent un obstacle : une barrière d'acier d'une dizaine de mètres d'épaisseur. L'acier arrête presque toutes les particules, permettant aux neutrinos seulement de passer. Le résultat est le premier faisceau de neutrinos énergétiques ! Même si la probabilité d'interaction des neutrinos est extrêmement faible, il y en a tellement qu'ils arrivent à observer, en 8 mois de prises de données, 56 interactions dans leur détecteur de 10 tonnes.

Le neutrino de Pauli, né avec un électron, peut produire des électrons. La désintégration d'un pion en un muon et un neutrino signifie que ce neutrino peut produire des muons dans une collision. Mais ces deux neutrinos sont-ils identiques ? S'ils l'avaient été, l'expérience aurait produit autant d'électrons que de muons. Cependant, seuls des muons sont observés. Ainsi, le groupe de Columbia découvre un nouveau type de neutrino, ce qui aura des conséquences profondes sur la structure du Modèle Standard.

Avant l'expérience *aux deux neutrinos*, le seul neutrino connu est celui produit par les désintégrations  $\beta^- \rightarrow e^- \nu$ . Les neutrinos produits par l'expérience de Columbia sont qualifiés de *muoniques*. On suggère, de manière pas tout à fait sérieuse, qu'ils diffèrent de *saveur* : l'un est de saveur électronique, l'autre de saveur muonique. Ce concept de saveur devient finalement crucial pour l'élaboration du Modèle Standard. Dans cette généralisation, nous verrons qu'il existe 6 saveurs de quarks (i.e. composants des protons, neutrons, pions), et de manière équivalente, 6 saveurs de leptons (particules qui n'interagissent pas fortement). À chaque membre expérimentalement distinct d'une classe de particules (quarks ou leptons) est assigné une saveur. L'idée simple de saveur est reconnue dans le cas des deux saveurs de neutrinos, où la distinction est subtile.

### *Gell-Mann et la classification des nouvelles particules*

Au début des années 1960, une centaine de nouvelles particules ont été découvertes dans les accélérateurs. La plupart sont des produits de la force forte, et on les surnomme des *hadrons*, du mot grec pour « fort ». En 1962, un faisceau de kaons chargés négativement (nouvelles particules de type *fortes* découvertes) est produit par l'AGS. Le but de l'expérience est de tester une hypothèse de Murray Gell-Mann (1929-), de CalTech (California Institute of Technology).

Gell-Mann parvient à organiser tous les hadrons connus par groupe de 8 (octets) ou de 10 (décuplets) particules. Il surnomme son modèle *L'Octuple Sentier* en se référant au terme bouddhiste. Dans le cadre d'un de ces décuplets, neuf particules ont été découvertes et ordonnées. La symétrie de la théorie exige l'existence d'une 10<sup>ème</sup> particule, qu'on surnomme  $\Omega^-$  (*oméga moins*). Le but de l'expérience est de découvrir cette particule. En décembre 1963, l'expérience prend ses premières données, elles sont défrichées, et le comble, l' $\Omega^-$  est découvert ! Cette organisation des nouvelles particules nous rappelle celle du tableau périodique. Celui-ci n'acquiert tout son sens que lorsqu'on comprend la sous-structure de l'atome : un noyau composé de protons et de neutrons entouré d'électrons. Existe-t-il donc une physique sous-jacente à cette nouvelle classification ? Gell-Mann et George Zweig (de CalTech) proposent de manière indépendante une structure fondamentale et sous-jacente : un triplet de particules qui composeraient tous les hadrons. Bien que ce triplet explique les octets et décuplets, il a des conséquences plutôt farfelues : les particules du triplet ont des charges fractionnelles de celle de l'électron, et transportent 1/3 des propriétés du neutron ou du proton. Gell-Mann surnomme ces nouvelles particules des *quarks*, ce qui signifie *absurdité* en argot allemand.

Il existerait trois saveurs de quarks : up (u), down (d), strange (s) de charges +2/3, -1/3 et -1/3 respectivement. Les baryons (i.e. neutron, proton) sont constitués de trois quarks (i.e. neutron : udd, proton : uud,  $\Omega^- = sss$ ). Les mésons, qui ont d'abord été proposés comme des particules d'échange pour tenir les nucléons ensemble, sont constitués d'un quark et d'un anti-quark (i.e. pions  $\pi^- = \text{anti-u d}$ ,  $\pi^+ = \text{u anti-d}$ ,  $\pi^0 = (\text{u anti-u} + \text{d anti-d})/\sqrt{2}$ , kaons  $K^- = \text{anti-u s}$ ,  $K^+ = \text{u anti-s}$ ).

Il est important de noter que l'hypothèse de l'existence des quarks est motivée par l'existence des baryons et mésons qui s'arrangent parfaitement selon l'octuplet. Le fait que les trois saveurs de quarks reproduisent bien tous les baryons et mésons connus est un point très favorable à leur hypothèse, mais il manque l'évidence expérimentale.

#### *La vérification expérimentale des quarks, une longue histoire*

On imagine alors des expériences pour sonder le proton, en quelque sorte des versions modernes de l'expérience de Rutherford. En 1953, lors d'expériences de diffusion d'électrons d'environ 100 MeV sur des protons (atomes d'hydrogène), Robert Hofstadter (Nobel 1961) comprend que la charge est distribuée uniformément à l'intérieur du proton.

En 1961, l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) est construit. Il mesure 3km de long, et accélère des électrons jusqu'à 20 GeV. Dans les années 1960 et 1970, on y reprend des expériences de diffusion d'électrons sur des protons, et les résultats sont époustouffants et apparemment contradictoires avec les résultats de Hofstadter. On ne comprend plus rien ! Kendall et Friedman (Nobel avec Taylor en 1990) mènent une des expériences (1968). Deux théoriciens jouent un rôle déterminant dans l'interprétation des résultats : James Bjorken (de SLAC) et Richard Feynman (de CalTech ; Nobel 1965). Ils suggèrent que le proton est composé d'objets ponctuels qui diffusent les électrons. Feynman appelle ces objets des *partons* (*partie du proton*). Pourquoi pas des quarks ? Feynman est convaincu que quelque chose d'autre accompagne les quarks dans le proton.

#### *Quarks et gluons*

L'intuition de Feynman lui donne raison. De nouvelles expériences au milieu des années 1970 confirment les résultats observés à SLAC et confirment l'idée de l'existence d'autres constituants que l'on nomme les *gluons*, dont le rôle est de transmettre la force forte. Au bout de quelques années, il devient clair que les partons de Feynman sont effectivement les quarks et gluons.

Les quarks ont une nature ponctuelle et sont apparemment indivisibles. Un nombre infini de quarks peuvent entrer dans un volume limité, tel un trou noir. Cette nature ponctuelle est en fait essentielle pour expliquer les densités incroyablement élevées au début de l'Univers.

De plus, les quarks semblent confinés dans les protons et neutrons. La notion de confinement est inventée par des théoriciens après que les expérimentateurs aient échoué de nombreuses fois à observer des quarks de charge  $1/3$ . Les quarks sont donc confinés en permanence dans les hadrons et il n'est pas plus possible d'isoler un quark que de séparer les pôles nord et sud d'un aimant. Le confinement nous apprend quelque chose de fondamental sur la force entre les quarks.

#### *Charge de couleur*

En 1971 à l'anneau de stockage ADONE, dans des collisions d'électrons avec des positrons, le taux de production des pions est trois fois plus élevé que prédit. Un nouveau nombre quantique est proposé, analogue à la charge électrique pour la force électromagnétique, mais dans ce cas-ci relié à la force forte. La nouvelle charge doit avoir trois états, et Gell-Mann choisit la couleur pour les définir : rouge, bleu, vert. Chaque couleur de quark peut produire un pion, ce qui multiplie par un facteur trois la probabilité qu'un pion soit produit !

L'idée de la couleur est acceptée assez rapidement, puisqu'elle donne une réponse à plusieurs questions restées en suspens i.e. pourquoi les quarks ne se combinent qu'en mésons (quark et anti-quark) et baryons (trois quarks) ? En fait, ils se combinent en objets incolores, de manière à annuler la charge de couleur: soit couleur-anti-couleur, soit les trois couleurs en un même objet. La force forte entre les quarks est donc liée à la propriété de couleur, d'où l'appellation de la théorie de la *Chromo Dynamique Quantique*.

#### *Révolution de Novembre 1974*

Une véritable révolution se trame au collisionneur électron-positron SPEAR (Stanford Positron Electron Asymmetric Ring). Burton Richter joue un rôle important dans la construction de la machine entre 1970 et 1973. Les résultats obtenus à des énergies de centre de masse entre 2.5 et 4 GeV sont intrigants.

Les 9 et 10 novembre, le groupe décide de répéter des mesures pour explorer une anomalie vers 3.1 GeV (2 X 1.55 GeV). L'énergie de SPEAR peut être ajustée très précisément, et un balayage par pas de 0.001 GeV est effectué. Ce qui est observé est impressionnant. Le nombre de collisions augmente d'un facteur 100 entre 3.100 GeV et 3.105 GeV, puis chute très rapidement à 3.120 GeV. On se rend vite compte que plusieurs expériences par le passé ont raté de peu ce pic de masse lourd mais étroit, qui correspondrait à une nouvelle particule.

En mécanique quantique, un pic étroit correspond à une particule dont le temps de vie est long, alors qu'une particule massive possède en général un temps de vie court. Mais la nouvelle particule découverte, qu'on surnomme *psi*  $\psi$ , est massive (trois fois la masse du proton), ce qui semble incompatible avec le fait qu'elle possède un pic étroit. La seule explication plausible est que cette nouvelle particule soit constituée de nouvelle matière, attribuée à un nouveau type de quark, élégamment surnommé le quark *charmé*.

Une partie de l'excitation vient du fait que la découverte a lieu simultanément et indépendamment à deux endroits : à SLAC (côte ouest des États Unis) par l'équipe de Burt Richter, et à BNL (côte est des États Unis) par Sam Ting et son équipe qui étudient les paires électron-positron sortantes dans les collisions protons sur noyaux. Finalement on surnomme la particule  $J/\psi$  (J dans certains dialectes chinois se prononce *ting* ; les traces laissées dans le détecteur à SLAC ont la forme d'un  $\psi$ ).

En fait, le quark charmé est prédit par J.D.Bjorken et Sheldon Glashow dès 1964, puis par Glashow, Iliopoulos et Maiani en 1970. A ce moment là, un triplet de quarks est connu (u,d,s), mais l'expérience aux deux neutrinos a établi un schéma à quatre leptons: (e, $\nu_e$ ) et ( $\mu$ , $\nu_\mu$ ). La découverte du quark charmé établit le schéma correspondant pour les quarks : (u,d) et (c,s), et aussi la forme du Modèle Standard. Ainsi, les quarks et leptons viennent par paires : la première, et plus légère, génération constituée de (u,d) et (e, $\nu_e$ ), puis la deuxième génération plus lourde (c,s) et ( $\mu$ , $\nu_\mu$ ). La troisième génération ne se fera pas attendre.

*Le Modèle Standard à trois générations* On observe les premiers candidats à la troisième génération peu de temps après. En 1976, à SPEAR, le cinquième lepton, le tau  $\tau$ , est découvert. Puis en 1978 à Fermilab, dans un accélérateur à protons de 400 GeV, du même type que l'expérience de Ting, un cinquième quark est découvert. Trois pics rapprochés sont observés. C'est l'upsilon  $Y$  à 10 GeV et ses états excités. Ce sont des états liés d'un quark et d'un anti-quark que l'on surnomme *beauté*. Le sixième quark, le *top*, n'est observé qu'en 1994, et le sixième lepton, le neutrino associé au  $\tau$ , en 2000.

Ainsi, à la fin des années 1970, le Modèle Standard des particules à trois générations, avec ses paires de quarks et de leptons, est presque complètement dévoilé, puisque cinq (sur six) des quarks et des leptons ont été observés. Combien de générations y aura-t-il encore ? Il faut attendre les résultats du LEP (Large Electron Positron Collider) et du SLC (Stanford Linear Collider) dans les années 1990 pour avoir la réponse.

#### *Gluons et la force forte*

Feynman a vu juste en suggérant la notion de partons qui englobe les quarks et cet *autre chose* que sont les gluons. L'évidence directe pour les gluons vient en 1978, à l'anneau de stockage d'électrons et de positrons PETRA de 30 GeV, au laboratoire de DESY (Deutsches Elektron Synkrotron) à Hambourg.

Les interactions dues aux forces fondamentales ont lieu via des échanges de particules de spin entier qu'on surnomme les bosons. La particule d'échange de la force électromagnétique est le

photon (la lumière) et celle de la force forte est le gluon. Les gluons et les photons sont des bosons de spin 1 et ont une masse nulle. Les gluons diffèrent des photons par le fait qu'ils transportent la charge forte de couleur, alors que le photon a une charge électrique nulle. C'est ce qui explique que la force entre les quarks augmente au fur et à mesure qu'on les sépare : la densité de gluons, et donc de charges fortes, augmente, avec pour conséquence une augmentation de l'intensité de la force forte, ce qui provoque une augmentation de la densité de gluons ! Les gluons viennent en 8 *saveurs* qui diffèrent par la charge de couleur transportée : chaque gluon est caractérisé par une couleur et une anti-couleur.

### *L'unification électrofaible*

De 1916 (fin de ses travaux sur la Relativité Générale) jusqu'à sa mort en 1955, Einstein fut obsédé par l'idée d'une théorie des champs unifiée, en vain. Il faut attendre la théorie électrofaible de Sheldon Glashow (1961), Abdus Salam (1968) et Steven Weinberg (1967), qui leur valut un prix Nobel en 1979, dans laquelle deux des quatre forces fondamentales sont unifiées : les interactions électromagnétique et nucléaire faible.

La force électromagnétique et la force nucléaire faible semblent à première vue assez dissemblables. La première a une portée infinie alors que la seconde a une portée si courte qu'elle n'agit pas en dehors du noyau atomique. Celle-ci interagit avec tous les fermions (quarks et les leptons) de spin  $\frac{1}{2}$ . Elle peut convertir une saveur de quark en une autre, et peut donc transformer des neutrons en protons, ou vice versa. Elle est responsable des désintégrations nucléaires associées à la radioactivité (i.e. désintégration  $\beta$ ).

Alors que les photons et les gluons (tous les deux des bosons de spin 1) sont les transmetteurs de la force électromagnétique et de la force nucléaire forte respectivement, qui sont au juste les transmetteurs de la force nucléaire faible ? La réponse vient en 1967 quand Weinberg et Salam reprennent un concept développé plus tôt par Glashow et l'appliquent aux interactions faible et électromagnétique. Les deux forces sont une seule et même interaction, qui diffèrent par le fait que le boson transmetteur de la force électromagnétique (le photon) a une masse nulle alors que celui de la force faible est massif.

La théorie d'unification électrofaible prédit l'existence de bosons transmetteurs chargés et neutre, les  $W^\pm$  et le  $Z^0$  respectivement, ayant des masses de l'ordre de 100 fois la masse du proton. Le photon ( $\gamma$ ) est le transmetteur neutre associé à l'interaction électromagnétique. Quand une interaction implique un changement de charge, on dit qu'il y a un courant chargé, et quand la charge est conservée, un courant neutre. Les courants associés au boson neutre massif ( $Z^0$ ) tout comme les bosons  $W^\pm$  n'ont encore jamais été observés.

### *Gargamelle et la découverte des courants neutres*

En 1972 au CERN, un événement historique est capturé par Gargamelle, une grande chambre à bulles remplie de fréon. Elle détecte le processus suivant :  $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ , qui ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire d'un  $Z^0$  (les neutrinos n'interagissent que par la force faible) et est donc la première preuve de l'existence des courants neutres faibles.

Gargamelle est initialement conçue pour la détection des neutrinos. Une chambre à bulles contient un liquide sous pression qui révèle les traces de particules chargées comme des traînées de petites bulles quand la pression est réduite. Les neutrinos n'ont pas de charge et ne laissent pas de traces, mais le but est de les voir en rendant visible toute particule chargée mise en mouvement par l'interaction de neutrinos dans le liquide. Comme les neutrinos interagissent très rarement, la chambre doit être la plus grande possible et fonctionner avec un liquide très dense i.e. le fréon, dans lequel les neutrinos ont le plus de chance d'interagir. Gargamelle mesure finalement 4.8m de long et 1.85m de large, constitue un volume de  $12 \text{ m}^3$ , et contient 18 tonnes de fréon. Le faisceau de neutrinos provient du PS (Proton Synchrotron) du CERN.

*Le SPS (Super Proton Synchrotron) du CERN et la découverte du W*

À la fin des années 1970, le CERN lance le projet de convertir un synchrotron de 400 GeV en un anneau de stockage pouvant accélérer, stocker et faire entrer en collision des faisceaux de protons et d'anti-protons. Ce projet est motivé par Carlo Rubbia, impressionné par les ISR (Intersecting Storage Rings au CERN ; construit en 1971 ; 31 GeV par faisceau) où des protons entrent en collision avec des protons. Il est aussi stimulé par l'idée de découvrir le boson W prédit par la théorie électrofaible. Un accélérateur suffisamment puissant doit être construit. Un faisceau de protons de 400 GeV sur cible fixe ne suffit pas pour produire le W dont la masse est prédite aux environs de 100 GeV.

Les problèmes techniques sont formidables. Il faut produire des anti-protons (considérés il y a peu comme des particules exotiques !) en nombre sans précédent, les injecter dans le complexe accélérateur, les accélérer soigneusement, et tout cela en même temps que les protons. Les faisceaux ont finalement 260 GeV d'énergie, ce qui est suffisant pour produire une nouvelle particule massive de 100 GeV. Il ne faut que quatre années à Carlo Rubbia, Simon Van der Meer et leur équipe pour construire le nouvel accélérateur !

En 1983, les premiers  $W^+$  et  $Z^0$  sont observés ! Les expériences UA1 et UA2 (Underground Area 1 et 2) mesurent la masse des bosons, respectivement 83 GeV et 92 GeV, en accord avec les prédictions de la théorie électrofaible. Une année plus tard, Rubbia et Van der Meer se partagent le prix Nobel.

*Récapitulatif*

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2			force électrofaible spin = 1			interaction forte spin = 1		
SAVEUR	masse GeV/c <sup>2</sup>	Charge électriq.	SAVEUR	masse GeV/c <sup>2</sup>	Charge électriq.	Nom	Masse GeV/c <sup>2</sup>	charge électriq.	Nom	Masse GeV/c <sup>2</sup>	charge électriq.
$\nu_e$ neutrino électron.	$<1 \times 10^{-8}$	0	<b>u</b> up	0.003	2/3	$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
<b>e</b> électron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3	<b>W<sup>-</sup></b>	80.4	-1			
$\nu_\mu$ neutrino muon	$<0.0002$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3	<b>W<sup>+</sup></b>	80.4	+1			
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3	<b>Z<sup>0</sup></b>	91.187	0			
$\nu_\tau$ neutrino tau	$<0.02$	0	<b>t</b> top	175	2/3						
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3						

*figure 7*

Au fil des découvertes effectuées aux accélérateurs de particules, le Modèle Standard se met en place. Les particules élémentaires qui le composent sont résumées dans les tableaux ci-dessus (**figure 7**), tout comme les quantités (masse, charge électrique) qui les définissent. Le Modèle n'est toutefois pas encore complet. Il manque même quelque chose de fondamental, qui concerne l'origine de la masse.

## Le boson de Higgs et l'origine de la masse

Quel mécanisme, dans la théorie électrofaible, génère la masse des bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  ? Pourquoi le photon n'acquiert pas de masse ? Les masses des fermions sont-elles reliées à ce mécanisme ? Pourquoi les masses des quarks sont-elles si différentes les unes des autres ? Pour tenter de répondre à ces questions, on doit introduire la notion de symétrie, et de sa brisure, dans la théorie électrofaible.

### *Les symétries*

Les régularités dans le comportement des particules sont appelées symétries et elles sont étroitement reliées aux lois de conservation. Par exemple, la loi de conservation de la charge électrique a été vérifiée dans plusieurs expériences depuis fort longtemps. La symétrie associée, appliquée aux équations de l'électromagnétisme est appelée une *symétrie de jauge*. La symétrie est aussi reliée au concept de l'invariance : si un changement effectué dans un système physique ne produit aucun effet observable, le système est dit invariant au changement, impliquant une symétrie. En électromagnétisme, lorsqu'on impose la symétrie de jauge, la théorie prédit correctement la conservation de la charge. En fait, toutes les équations électromagnétiques (équations de Maxwell) peuvent être dérivées de la symétrie de jauge. L'idée de la symétrie est si profonde que nous croyons aujourd'hui que toutes les forces dans la nature obéissent à une forme de symétrie de jauge.

### *La brisure de la symétrie électrofaible et le champ de Higgs*

L'unification électrofaible est basée sur le concept que les forces sont générées par l'échange de bosons. Lorsqu'on dit qu'il existe une force entre deux fermions (spin 1/2), c'est aussi dire qu'ils sont en train d'échanger des bosons. Il faut maintenant comprendre comment les bosons transmetteurs des forces fondamentales acquièrent une masse. Dans le cas de l'unification électrofaible, comment les bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  acquièrent-ils une masse alors que ce n'est pas le cas pour le photon ?

Les symétries de jauge requièrent que les transmetteurs de force (bosons de jauge) soient de masse nulle. Pour contourner le problème de la masse des bosons, Salam, Glashow et Weinberg ont dû inventer un mécanisme pour briser la symétrie de jauge permettant aux  $W^\pm$  et  $Z^0$  d'acquérir une masse. De tels mécanismes avaient été développés dans d'autres contextes par divers théoriciens : Yoshiro Nambu, Jeffrey Goldstone, Glashow, Peter Higgs et Phillip Anderson. L'idée est de postuler l'existence d'un nouveau champ, qu'on surnomme *champ de Higgs*.

Le champ de Higgs est différent des autres champs puisque à basse température (énergie), l'espace préfère être rempli de particules de Higgs que de ne pas l'être. Les bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  interagissent avec ce champ (contrairement au photon), et avancent à travers l'espace comme s'ils se mouvaient dans une mélasse épaisse. De cette manière, ils acquièrent une masse *effective*. A haute température (énergie), les interactions dans le champ de Higgs sont telles que l'espace n'est plus rempli de cette mélasse Higgsienne, les  $W^\pm$  et  $Z^0$  perdent leur masse et la symétrie entre les  $W^\pm$ ,  $Z^0$  et le photon n'est plus brisée, elle est restaurée. On dit qu'elle est *manifeste*.

Le champ de Higgs permet de préserver la symétrie à haute énergie et d'expliquer la brisure de la symétrie à basse énergie. Il est responsable de la masse des bosons électrofaibles, mais interagit aussi avec les fermions (quarks et leptons). Ils acquièrent ainsi une masse. Les plus légers sont les neutrinos (jusqu'à récemment, nous les croyions de masse nulle), vient ensuite l'électron avec une masse de 0.511 MeV (MeV : 1 million d'eV). Tout en haut de l'échelle vient le quark top, qui est de loin la particule élémentaire la plus lourde avec ses 175 GeV (GeV : 1000 millions d'eV) !



Les particules (bosons, fermions) acquièrent une masse à cause du champ de Higgs, mais pourquoi chaque particule acquiert une masse différente, ou n'acquiert pas de masse du tout comme dans le cas du photon ? Pourquoi la force de l'affinité des particules avec le champ de Higgs, ce qu'on appelle le couplage, est-elle si différente d'une particule à l'autre, et donc comment expliquer cette hiérarchie des masses ? Aujourd'hui, on ne connaît pas les réponses à ces questions.

### *La recherche du boson de Higgs*

Évidemment, l'expérience déterminante sera celle qui permettra de produire un champ de Higgs, ou son équivalent quantique, le boson de Higgs. Celui-ci est traqué dans nos accélérateurs modernes, mais aucune expérience ne l'a observé, du moins pas de manière convaincante (une observation a été faite au LEP en 2000, mais peu convaincante : la *signification statistique* était trop faible). Néanmoins, si on le découvre, ceci permettrait de vérifier les concepts d'unification et de les étendre à un domaine d'énergie plus élevé. S'il n'est pas découvert, ceci révolutionnera aussi la physique !

### **L'ère des GRANDS accélérateurs**

Dans les années 1980 et 1990, plusieurs accélérateurs sont construits et les mesures effectuées permettent de tester le Modèle Standard avec une très grande précision. Le boson de Higgs reste inobservé. Les masses des bosons faibles  $W^\pm$  et  $Z^0$  sont mesurées avec une très grande précision, le quark top est observé pour la première fois en 1994, et le neutrino  $\tau$  en 2000. On reproduit dans les accélérateurs de particules des densités d'énergie comparables à celles dans l'Univers  $10^{-13}$  seconde après le Big Bang, à un moment où la brisure de la symétrie électrofaible aurait eu lieu !

Les énergies des accélérateurs modernes ont atteint le GeV et le TeV ! Les luminosités permettent de produire des millions de Z, des dizaines de milliers de W, des milliers de quarks top, et s'il existe et dépendamment de sa masse, des bosons de Higgs.

### *Le LEP au CERN*

Le LEP (Large Electron Positron Collider) au CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) a été un collisionneur électron-positron de 27km de circonférence, construit en moyenne 100m sous terre à cheval sur la frontière franco-suisse, près de Genève. La prise de données a duré de 1989 à 2000 à des énergies de centre de masse allant de 91.2 GeV (la masse du boson Z) à 209.2 GeV (le maximum pouvant être atteint avec la machine). Quatre expériences situées à distances égales le long de l'anneau ont pris des données : ALEPH, DELPHI, L3, OPAL.

L'histoire du LEP débute dans les années 1970, quand les physiciens des états membres du CERN se réunissent pour discuter du futur à long terme de la physique des hautes énergies en Europe. Après une histoire bâtie sur des machines à protons, l'idée d'un collisionneur électron-positron brise avec la tradition du CERN. Mais comme les électrons sont des particules ponctuelles, les collisions sont beaucoup plus faciles à interpréter que celles entre protons en anti-protons. L'idée vient entre autre de Burton Richter (prix Nobel pour la découverte du  $J/\psi$ ) dans une note écrite en 1976 quand il est visiteur au CERN.

En 1982, le projet du LEP obtient l'autorisation de construction et le soutien inconditionnel de tous les pays membres. En 1983, les bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  sont découverts au SPS : une centaine de  $W^\pm$  et une vingtaine de  $Z^0$  sont observés, ce qui est suffisant pour annoncer une découverte, mais trop peu pour effectuer des mesures de précision, notamment de leur masse. Le LEP sera une véritable usine à  $W^\pm$  et à  $Z^0$ .

Les premières collisions ont lieu le 13 août 1989, 5 années et 11 mois après le début de la construction du tunnel. Au total, 1.4 millions de  $m^3$  de terre auront été excavés ! Le premier

résultat de physique sort en novembre 1989. Il est fondamental : les expériences démontrent qu'il n'existe que trois familles de neutrinos, et donc trois et seulement trois générations de particules. Dans le Modèle Standard des particules élémentaires, il n'y aura que six quarks et six leptons. De 1989 à 1995, l'énergie de centre de masse est ajustée à la masse du  $Z^0$ , pour la phase dénommée LEPI. Plus de 16 millions de  $Z^0$  sont identifiés par les quatre expériences, permettant d'effectuer des mesures d'une extrême précision des paramètres du Modèle Standard. Pour la phase LEPII, qui s'étend de 1996 à 2000, l'énergie maximale atteinte est de 209 GeV ! Le LEP peut alors produire des paires de  $W^\pm$  en grandes quantités et les recherches pour le boson de Higgs sont poussées.

Le LEP a mesuré les masses des bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  avec des précisions bien meilleures que celles espérées initialement :  $m_Z = 91.1871$  GeV avec une précision de 2.1 MeV alors qu'on espérait 20 MeV,

$m_W = 80.412$  GeV avec une précision de 42 MeV alors qu'on espérait 60 MeV. Le nombre de familles de neutrinos mesuré est de 2.9841 avec une précision de 0.0083. Bien sûr, un grand nombre d'autres mesures de précision ont été effectuées qui ont permis de tester la cohérence du Modèle Standard.

#### Le SLC à SLAC

Le SLC (Stanford Linear Collider) à SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) a été un collisionneur linéaire électron-positron de 3km de long, situé à Stanford en Californie. L'énergie maximale par faisceau était de 50 GeV donnant une énergie de centre de masse de l'ordre de la masse du  $Z^0$  (**figure 8**).

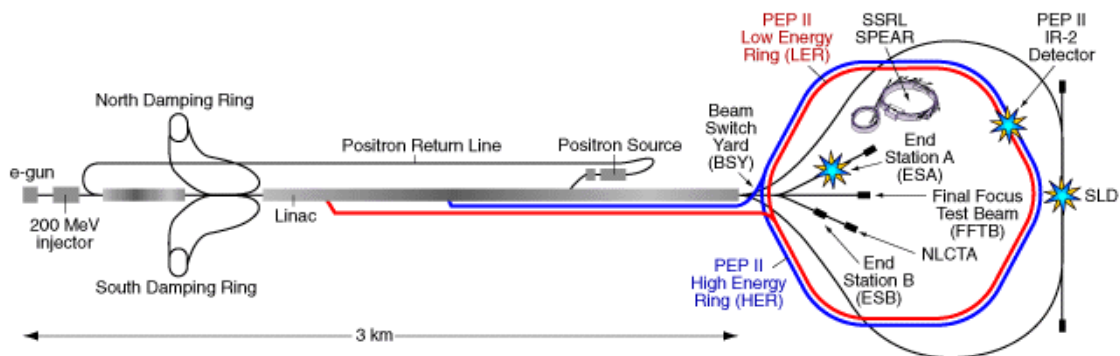


figure 7

Schéma de l'accélérateur linéaire de SLAC et des collisions dans le détecteur SLD. Référence : SLAC.

La construction du SLC débute en 1983 et est complétée en 1989 (comme pour le LEP). Le programme de physique est entamé avec le détecteur MarkII qui démontre, un mois après le LEP, l'évidence des trois familles de neutrinos. Par la suite, le détecteur SLD observe plus d'un demi million de  $Z^0$  et effectue une des plus belles mesures électrofaibles vérifiant le Modèle Standard grâce au faisceau d'électrons polarisés : la mesure de l'angle de mélange électrofaible  $\sin^2\theta_W = 1 - (m_W^2 / m_Z^2)$ , liée au rapport des masses des bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$ .

#### Le Tevatron à Fermilab

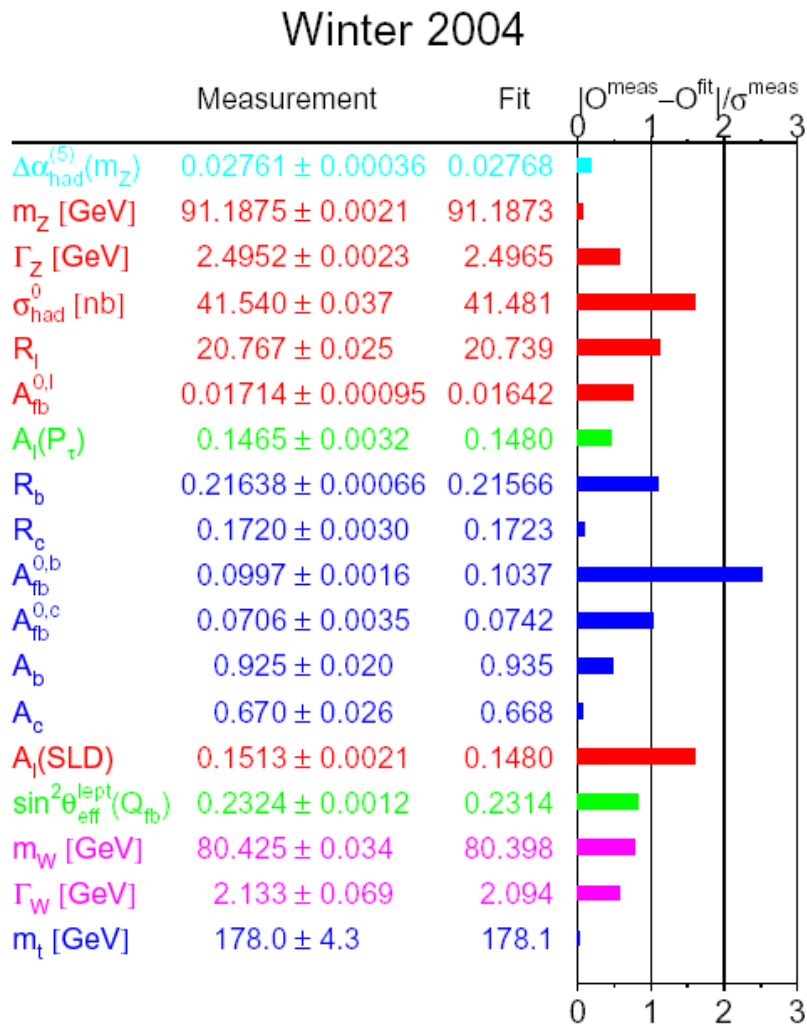
Le Tevatron est un collisionneur proton-anti-proton de 6.4km de circonférence, d'énergie de centre de masse de 2TeV. Il est situé à Fermilab, le plus grand laboratoire américain pour la physique des particules, dans l'état de l'Illinois, près de la ville de Chicago. En 1994, le quark top, particule élémentaire la plus lourde de toutes (175 GeV), est observé par les expériences CDF et D0. Il est aussi lourd que l'atome d'or, toutefois sa masse est confinée dans un volume

beaucoup plus petit qu'un proton. Les expériences au Tevatron sont présentement en train de prendre des données.

*Le mesures de précision*

Au LEP, au SLC, au Tevatron, et dans une longue liste d'autres expériences, des mesures de précision testant la cohérence du Modèle Standard ont été effectuées (voir la **figure 9**). Ces mesures ont aussi permis de contraindre la masse du quark top (même avant qu'il ne soit observé) et la masse du boson de Higgs.

La mesure de l'angle de mélange électrofaible à SLC est la contrainte unique la plus forte sur la masse du Higgs, de même que les recherches *directes* de ce dernier à LEP II ont permis de poser une limite inférieure sur sa masse ( $m_H > 114$  GeV). Vers 1990, il devient pratique commune de combiner les résultats des 4 expériences du LEP, mais aussi avec ceux de SLD au SLC et de CDF et D0 au Tevatron.



Liste de mesures de précision effectuées à divers endroits, qui testent la validité du Modèle Standard et qui permettent de contraindre les masses du quark top et du boson de Higgs.  
Référence : LEP Electroweak Working Group.

*Le LHC*

Déjà vers le milieu des années 80, des idées concernant le LHC (Large Hadron Collider) émergent. Ce collisionneur proton-proton de 14 TeV est en construction, situé dans le même tunnel que le LEP (qui a été démonté depuis) mais faisant usage d'aimants et de cavités accélératrices nettement plus puissants. Le LHC représente un grand pas pour la physique et pour les accélérateurs (aimants et cavités accélératrices), mais aussi pour l'électronique, l'informatique, etc...

L'énergie de centre de masse (14 TeV) sera un ordre de grandeur plus grand que le plus puissant accélérateur aujourd'hui, le Tevatron (2 TeV) ; de même que pour la luminosité, qui sera deux ordres de grandeur plus élevée que le LEP ou le Tevatron. Le début de la prise de données est prévu pour 2007. Deux grandes expériences, ATLAS et CMS, étudieront de près les collisions proton-proton. Le potentiel de physique est énorme : des mesures de précision permettront d'améliorer la mesure des masses du quark top et du boson W d'un facteur 2 à 3, la contrainte sur la masse du Higgs sera améliorée aussi d'un facteur 2 à 3, le Higgs sera définitivement découvert s'il existe, et le mystère du mécanisme de brisure de symétrie électrofaible a de fortes chances d'être dévoilé.

### **Envol**

La physique des particules a subi une évolution fabuleuse depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Entre les prédictions de Michelson, et la découverte du quark top au Tevatron, il y a un monde, un univers. Du plus petit accélérateur au plus grand, les découvertes ont foisonné et ont permis de construire un Modèle Standard des particules élémentaires cohérent, à la fois compatible avec les observations et prédictif. Dans les années à venir, plusieurs accélérateurs prendront des données et permettront peut être de percer le mystère de la brisure de la symétrie électrofaible, intimement liée à l'origine des masses des particules et à l'observation d'un boson de Higgs. Le prochain grand accélérateur de particules, le LHC, promet de révéler tout cela, ou de confirmer l'inexistence de ce nouvel éther qu'est le champ de Higgs.