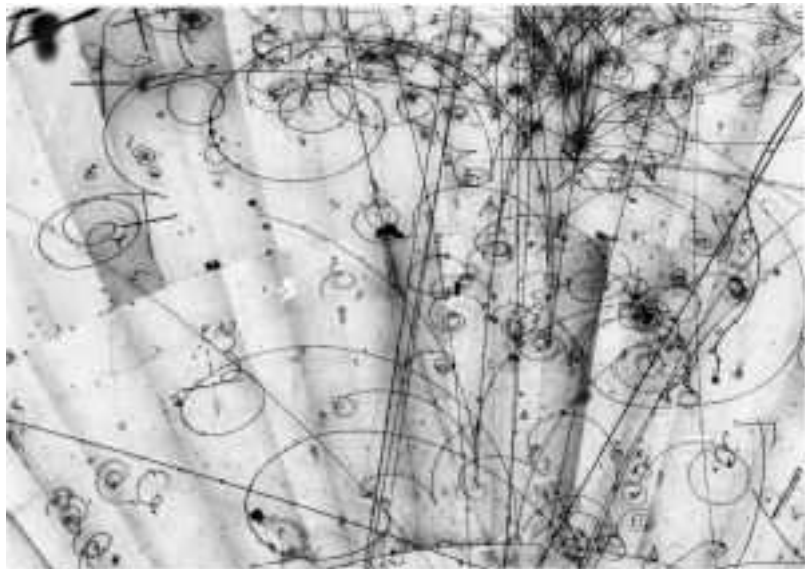


Les dossiers scientifiques
de **ScienceInfuse**

Une incursion dans le monde des particules



scienceinfuse

UCL

Dossier accompagnant l'atelier
"Master Classes en physique"



Introduction

“De quoi le monde est-il fait ?” Telle est la question que l’homme se pose depuis la nuit des temps. Ce questionnement part de la conviction profonde que le monde n’est pas un assemblage d’objets hétéroclites mais qu’il recèle une unité profonde .

Le concept d’atome, postulé deux mille ans auparavant par Démocrite, relevait au départ de la philosophie. Il a changé au cours des siècles pour devenir un sujet d’étude physique. De fil en aiguille, les physiciens ont découvert les atomes, puis les électrons et les noyaux, puis les protons et les neutrons. Aujourd’hui, ce sont les quarks et les leptons que nous considérons comme les particules élémentaires, les briques de base de la matière.

Tout autour de nous et partout dans l’Univers, les particules se lient, se séparent, se dévient, naissent ou se désintègrent. C’est pourquoi la lune tourne autour de la Terre, le soleil brille, les aimants s’attirent ou se repoussent, les objets tombent, ... Les particules et leurs interactions sont à l’origine de notre existence.

Pour expliquer et explorer ce monde, les physiciens ont dû faire appel à des concepts mathématiques de plus en plus élaborés et contruire des instruments à la limite des possibilités technologiques du moment, d’autant plus gigantesques que les particules sont minuscules.

Ce livret vous invite à un voyage au coeur de la matière, à la découverte de ses constituants les plus infimes.

Table des matières

1	Une faune particulière	3
1.1	Qu'est-ce que la physique des particules ?	3
1.2	Un peu d'histoire de la physique	4
1.3	Les unités et ordres de grandeur	6
1.4	Einstein et les hautes énergies	7
1.5	Les interactions fondamentales	9
1.6	Les forces font l'union	11
1.7	Fermions et bosons	11
1.8	L'antimatière	12
1.9	Leptons et quarks	13
1.10	Hadrons, baryons, mésons	16
1.11	Désintégrations et annihilations	18
1.12	La quête du Higgs	20
2	CMS, un colosse pour l'infiniment petit	21
2.1	Des accélérateurs de particules	21
2.2	Le LHC	22
2.3	Description du détecteur CMS	23
2.4	La reconstruction des événements	25
2.5	Données et simulations	26
3	La main à la pâte ...	29
3.1	FROG	29
3.2	QTALEPH	30
3.3	Mesure de la masse et de la largeur du boson Z^0	34
A	Ligne du temps de la physique des particules	37
B	Glossaire	39

Chapitre 1

Une faune particulaire

1.1 Qu'est-ce que la physique des particules et des hautes énergies ?

La physique des particules concerne l'étude des particules élémentaires qui composent toute la matière et la manière dont elles interagissent entre elles. Par "élémentaire" il faut entendre "qui n'a pas de structure interne connue". Ces particules sont donc, à l'heure actuelle, considérées comme ponctuelles.

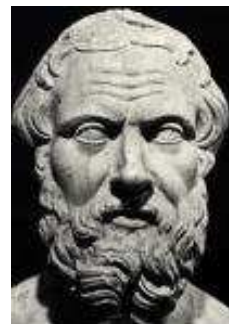
Quand on visite un laboratoire de physique des particules, on peut s'étonner de la taille impressionnante des installations. A titre d'exemple, l'accélérateur LHC au Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN), avec ses 27 km de circonférence, est en ce début de 21^{ème} siècle le plus grand accélérateur du monde. Ses détecteurs, eux aussi, sont immenses. Pour explorer le monde de l'infiniment petit, les physiciens doivent disposer de "microscopes" gigantesques que sont les accélérateurs de particules et leurs détecteurs. N'y a-t-il pas là un paradoxe ?

Pour le résoudre, revenons quelques décennies en arrière. Au début du 20^{ème} siècle, les physiciens constatèrent que les faisceaux de particules avaient des comportements analogues à ceux d'une onde. A rebours, ils en déduisirent que la lumière était, en fait, constituée de particules qu'ils appelèrent des *photons*. Eclairer un objet revient donc à l'exposer à un flux de photons.

Pour étudier une particule, il faut trouver un moyen de l'"éclairer", c'est-à-dire d'envoyer sur elle un faisceau de particules-sondes. Dans le cas d'un microscope, par exemple, ces particules sont des photons mais ce n'est pas toujours le cas. Plus la structure que l'on veut étudier est petite, plus la longueur d'onde associée aux particules-sondes qui les frappent doit l'être aussi. La résolution est donc limitée par la longueur d'onde des particules servant de sonde. Et, comme celle-ci est d'autant plus petite que l'énergie est élevée, il faut donc que les physiciens disposent de très hautes énergies et, par conséquent, de très grandes machines.

1.2 Un peu d'histoire de la physique

Le concept de particule - ou celui d'atome, au sens étymologique du mot - a été une idée philosophique avant d'être un sujet d'étude de la physique. LEUCIPPE et son disciple DÉMOCRITE (-470/-370) prétendaient que la matière était faite de particules éternelles et indestructibles appelés *atomes*. Le mot vient du grec et signifie insécable. Selon les atomistes, il n'y a dans la nature que des atomes et du vide. Les atomes se combinent au hasard pour former les objets qui nous entourent et les êtres vivants. Tous les éléments sont *a priori* différents. Leur forme peut expliquer certaines de leurs propriétés : les aliments sucrés, par exemple, sont formés d'atomes arrondis, alors que les aliments acides contiennent des atomes pointus. Les idées vagues des Grecs à ce sujet ne méritent pas le nom de théorie, elles ne possèdent pas les éléments structurants de la théorie atomique moderne.



C'est l'anglais John DALTON (1766-1844) qui est connu comme le père de la théorie atomique. De ses observations sur les pressions partielles, qui s'expliquent facilement par l'hypothèse que les gaz sont formés de particules agitées, et de la loi des proportions définies, Dalton arriva naturellement à l'hypothèse que les différents éléments sont composés de particules indivisibles, toutes identiques, les **atomes**, et que les composés sont formés aussi de particules microscopiques (les molécules) obtenues en combinant les atomes des éléments correspondants d'une manière fixe et donc dans des proportions toujours identiques.

A standard periodic table of elements, color-coded by groups. It shows the arrangement of elements from hydrogen to oganesson, with gaps representing undiscovered elements.

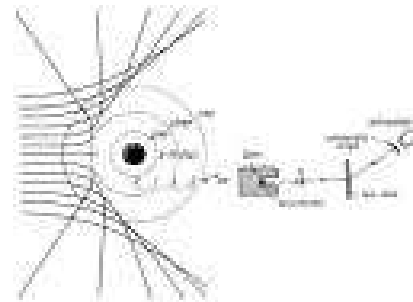
Dans la première moitié du 19^{ème} siècle, la liste des éléments connus s'allonge considérablement et les chimistes essayent d'y trouver une certaine structure pour y mettre un peu d'ordre. Le schéma le plus utile, celui qui s'imposa finalement, était l'œuvre du chimiste russe Dimitri MENDELEÏEV (1834-1907). Celui-ci s'aperçut que certaines propriétés des atomes revenaient de manière périodique quand les éléments étaient arrangés dans l'ordre des poids atomiques croissants. Mendeleïev eut la bonne idée de laisser plusieurs cases vides dans son tableau et les associa à des éléments non encore détectés. Le fait que les éléments puissent être arrangés de manière périodique était une première indication, assez indirecte, que les atomes avaient une structure et n'étaient pas de simples objets indivisibles.

Durant la période 1895-1900, le bestiaire de la physique s'enrichit de divers rayons : rayons cathodiques, rayons X, α , β , γ . C'est l'époque de la découverte de la radioactivité, où l'on s'aperçut que l'atome (dont l'existence était encore mise en doute par une

partie de la communauté scientifique) n'était pas aussi insécable et permanent qu'on le croyait.

Peu de temps après, Joseph John THOMSON (1856-1940) fit l'hypothèse audacieuse que les atomes étaient constitués d'**électrons** emprisonnés dans une sorte de gelée de charge positive. Ce modèle de l'atome est appelé modèle du *plum pudding*, car Thomson comparait les électrons aux raisins du célèbre dessert anglais.

Entre 1908 et 1911, Ernest RUTHERFORD (1871-1937) procéda à une série d'expériences dans lesquelles un faisceau de particules α (des noyaux d'Hélium) était lancé contre une mince feuille d'or. Si le modèle de Thomson était correct, les particules incidentes, beaucoup plus lourdes que les électrons, devaient être faiblement déviées. Or, un certain nombre de particules était dévié considérablement, certaines même vers leur point de départ. Rutherford disait que c'était aussi étonnant que si un obus lancé sur un mouchoir de poche rebondissait vers son point de départ ! La conclusion ne tarda pas : la charge positive n'est pas répartie dans tout le volume de l'atome mais concentrée au centre, dans un noyau dont la charge est un multiple entier de la charge de l'électron. Autour de ce noyau massif et minuscule, les électrons se déplacent sur des orbites analogues à celles des planètes autour du soleil, la force électrique attractive jouant cette fois le rôle de la force gravitationnelle. Ce modèle planétaire de l'atome nucléaire est proposé par Rutherford en 1911. Le noyau de l'atome le plus léger, l'atome d'hydrogène, est appelé **proton**.



En étudiant ainsi la diffusion de particules α sur divers atomes, Rutherford mesura les charges électriques des noyaux et s'aperçut que la classification de Mendeleïev correspondait à la suite des entiers positifs : un noyau dont la charge est Z fois la charge élémentaire (celle de l'électron) contient Z protons. Pour combler la différence entre la masse des Z protons et la masse de l'atome, Rutherford introduisit la notion de protons neutres, de masse voisine mais de charge nulle.

En 1930, des expériences firent apparaître une nouvelle sorte de rayons très pénétrants et impossibles à détecter directement. En 1932, James CHADWICK (1891-1974) émit l'hypothèse que ce rayonnement était constitué de particules neutres, de la masse du proton, et appela cette particule **neutron**. Dès lors, la structure du noyau se clarifia : un noyau de nombre atomique Z et de nombre de masse A devait contenir Z protons et $A - Z$ neutrons.

En 1930, des expériences firent apparaître une nouvelle sorte de rayons très pénétrants et impossibles à détecter directement. En 1932, James CHADWICK (1891-1974) émit l'hypothèse que ce rayonnement était constitué de particules neutres, de la masse du proton, et appela cette particule **neutron**. Dès lors, la structure du noyau se clarifia : un noyau de nombre atomique Z et de nombre de masse A devait contenir Z protons et $A - Z$ neutrons.

Parallèlement, on découvrit avec surprise qu'une certaine dose de radioactivité nous parvenait de l'espace, les rayons cosmiques. En fait, les rayons cosmiques sont des particules stables (protons, photons, électrons) de très haute énergies provenant

de *supernovae* et de trous noirs. Leur incidence sur les molécules de la haute atmosphère terrestre crée une quantité d'autres particules. Les années qui suivirent furent fructueuses en découvertes de nouvelles particules issues des rayons cosmiques, qui constituaient à cette époque la seule source de particules de hautes énergies. Ceci stimula le développement d'accélérateurs de hautes énergies pour révéler la structure de la matière.

Les physiciens se mirent donc à construire des appareils capables d'accélérer des particules à des énergies de plus en plus élevées et ne dépendirent plus des rayons cosmiques et de la radioactivité naturelle pour produire des projectiles propres à explorer la structure des noyaux. La technologie des accélérateurs de particules (*cyclotron*, *synchro-cyclotron* et ensuite *synchrotron*) s'accompagna d'une technologie également complexe de détection de particules.



Bien vite, une foule de nouvelles particules firent leur apparition : le *muon* en 1937, le *pion* en 1947 et des centaines d'autres dans les années 1950 et 1960. On se trouva rapidement dans le même dilemme que les chimistes avant la classification périodique des éléments. Le physicien américain Murray GELL-MANN émit alors l'hypothèse que la plupart de ces particules, comme les atomes, étaient composées de particules plus élémentaires qu'il appela **quarks**. Ainsi, le proton et le neutron étaient composés chacun de trois quarks. Gell-Mann réussit, comme Mendeleïev avant lui, à prédire l'existence d'une nouvelle particule, avec ses propriétés, à partir d'une place vacante dans son tableau (le Ω^- , découvert en 1964).

Aujourd'hui, les physiciens disposent d'un cadre théorique qui décrit l'organisation des particules élémentaires et comment elles interagissent entre elles par le biais de forces. C'est le Modèle Standard. Pratiquement tous les résultats expérimentaux d'expériences à hautes énergies peuvent être expliqués dans ce cadre.

1.3 Les unités et ordres de grandeur de la physique des hautes énergies

Les unités de base du système international (SI) sont la longueur, la masse et le temps qui s'expriment respectivement en mètres, kilogrammes et secondes. Il apparaît qu'un tel système d'unités n'est pas approprié pour décrire des particules élémentaires.

Les longueurs typiques, en physique des particules, sont de l'ordre de 10^{-15} m (\sim la taille du proton) et les masses de l'ordre de 10^{-27} kg. D'autre part, il s'agit le plus souvent des phénomènes hautement relativistes c'est-à-dire, que les vitesses typiques

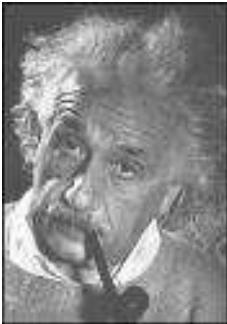
sont de l'ordre de la vitesse de la lumière $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

Finalement, la plupart des expériences consiste à introduire dans un potentiel électrique des particules de charge égale à celle de l'électron. L'électronvolt (eV) et tous ses multiples (keV, MeV, GeV, TeV¹) seront donc des unités d'énergie plus appropriées. Comme son nom l'indique, l'électronvolt est l'énergie que gagne un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt sur une distance de 1 m. Il vaut $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Ce que nous avons expliqué dans la section 1.1 en matière de particules-sondes signifie qu'une particule de quelques keV permet d'"observer" des systèmes de dimensions voisines de l'angström (10^{-10} m , la taille de l'atome), qu'à 100 MeV elle "voit" le femtomètre ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, la taille du proton) et qu'à 10 TeV elle atteint le cent-millième de femtomètre (ce sera le cas du LHC).

En vertu de l'équivalence masse-énergie ($E_0 = mc^2$, pour une particule au repos), on peut mesurer la masse dans des unités d'énergies divisées par le carré de la vitesse de la lumière c , par exemple, en MeV/c^2 . Mais le plus souvent, on l'exprime directement en unités d'énergies (MeV). Cela revient simplement à prendre la vitesse de la lumière comme unité de mesure de vitesses ($c = 1$). Exprimée dans cette unité, toute vitesse de particule est nécessairement inférieure ou égale à 1 puisqu'une particule ne peut pas aller plus vite que la lumière.

1.4 Einstein et les hautes énergies



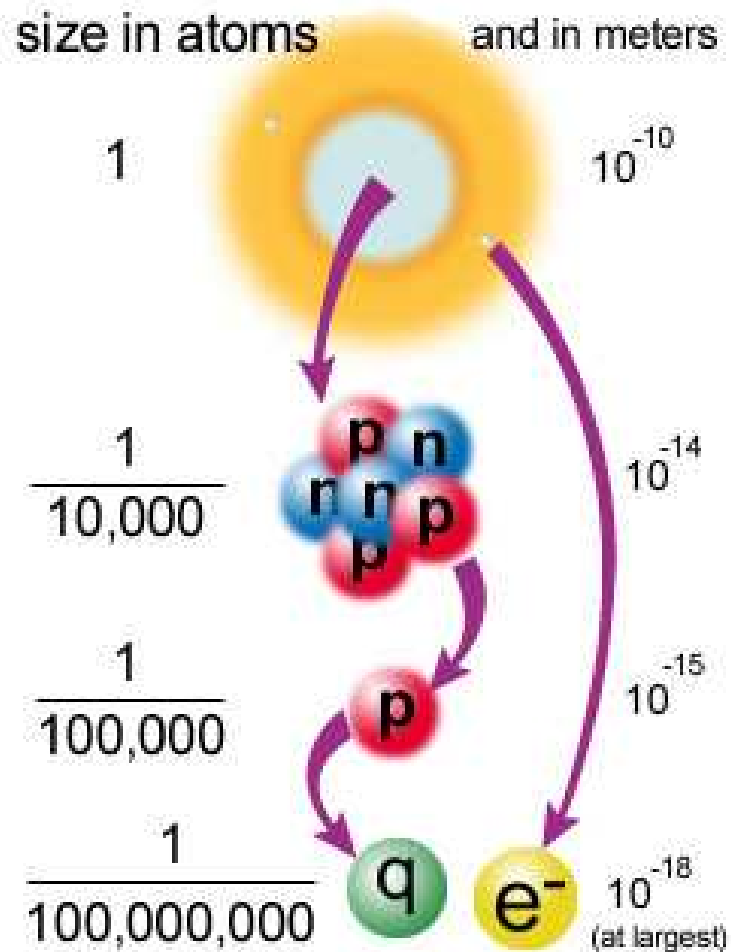
Lors d'une collision entre particules élémentaires, celles-ci ne vont pas éclater comme on l'observe pour des objets macroscopiques. Comme elles est élémentaires, elles ne se brisent pas. C'est plutôt l'énergie du choc qui finit par se transformer en de nouvelles particules, en vertu de l'équivalence masse-énergie. Certaines particules créées sont les constituants ordinaires de la matière (protons, neutrons, électrons, photons, neutrinos), d'autres n'apparaissent que pour un très court instant. Ces dernières sont dites instables et se désintègrent donc en d'autres particules plus légères qui, elle-mêmes, peuvent être à nouveau instables et se désintégrer, etc, jusqu'à l'obtention de particules stables. Ainsi, lors de la collision, l'énergie est transformée en matière.

Si la vitesse d'un objet est petite par rapport à celle de la lumière (la vitesse d'une voiture, par exemple), son énergie cinétique est donnée par la formule classique : $E = \frac{1}{2}mv^2$. Pour un électron possédant une énergie de 100 GeV, la vitesse est alors donnée par $v = (2E/m)^{1/2}$ soit 187683374 km/s, ce qui correspondrait à 625 fois la vitesse c de la lumière dans le vide ! Or, la relativité d'Albert EINSTEIN (1879-1955) nous dit qu'il est impossible d'aller plus vite que la vitesse de la lumière. Où se trouve

¹ 1 keV = 10^3 eV, 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV, 1 TeV = 10^{12} eV

TAB. 1.1 – Unités en physique des hautes énergies.

Quantité	Unité en hautes énergies	Valeur dans le SI
longueur	1 fm	10^{-15} m
énergie	1 GeV = 10^9 eV	$1.602 \cdot 10^{-10}$ J
masse	1 GeV/ c^2	$1.78 \cdot 10^{-27}$ kg
$\hbar = h/2\pi$	$6.588 \cdot 10^{-25}$ GeV s	$1.055 \cdot 10^{-34}$ J s
c	$2.998 \cdot 10^{23}$ fm s $^{-1}$	$2.998 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$
$\hbar c$	0.1975 GeV fm	$3.162 \cdot 10^{-26}$ J m



l'erreur ? Tout simplement dans la formule classique de l'énergie qui n'est plus valide. Il faut plutôt utiliser l'expression relativiste :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

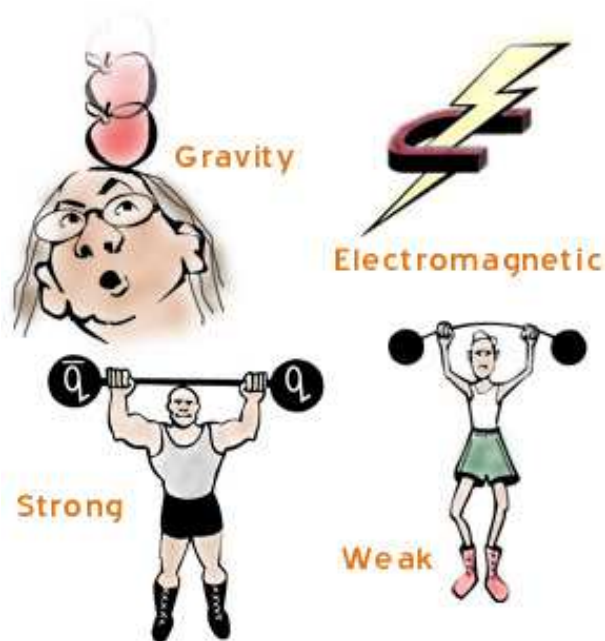
Dans le cas particulier d'une particule au repos ($v = 0$), elle se ramène à l'équation $E_0 = mc^2$. Quand on dit "accélérer une particule dans un accélérateur", il s'agit, en général, plutôt de lui communiquer de l'énergie sans que sa vitesse augmente notablement, puisque cette particule circule déjà presque à la vitesse de la lumière. En somme, plus on lui donne d'énergie, moins on est efficace à l'accélérer.

1.5 Les interactions fondamentales

Toutes les forces présentes dans l'univers peuvent se ramener à quatre interactions fondamentales. L'**interaction gravitationnelle** est sans doute la plus familière. C'est elle qui est responsable de la chute des corps, du mouvement des planètes, etc. Elle est toujours attractive. L'**interaction électromagnétique** est la mieux comprise des quatre interactions. Elle est issue de l'unification faite par Maxwell de l'électricité et du magnétisme. La théorie de l'électromagnétisme appliquée au monde de l'infiniment petit s'appelle l'*électrodynamique quantique*. Cette interaction présente des ressemblances avec l'interaction gravitationnelle mais peut être attractive ou répulsive. L'**interaction forte** assure la cohésion des nucléons (protons et neutrons) à l'intérieur des noyaux et le *confinement* des quarks à l'intérieur des *hadrons*. C'est son intensité qui lui a valu son nom. Elle est responsable de la désintégration de particules hautement instables qu'on appelle *résonances*. L'**interaction faible**, finalement, est souvent présentée comme étant responsable de la radioactivité β , le phénomène par lequel le neutron se désintègre en proton (et d'autres particules). Elle initie les réactions thermonucléaires qui permettent au soleil de produire de l'énergie.

Ces forces agissent à distance, c'est-à-dire sans que les objets ne se "touchent" et, pour ce faire, elles nécessitent l'intervention d'un messenger qu'on appelle *boson de jauge*. Ainsi, le **photon** est le messenger de l'interaction électromagnétique, les **gluons** ceux de l'interaction forte, les **bosons W^\pm et Z^0** ceux de l'interaction faible et le **graviton** celui de l'interaction gravitationnelle.

La portée de l'interaction dépend de la masse de la particule messagère. Le photon, qui a une masse nulle, voyage à la vitesse de la lumière et la portée de la force électromagnétique est infinie. Il en est de même pour l'interaction gravitationnelle. Par contre, l'interaction faible n'agit qu'à très courte portée car les bosons W^\pm et Z^0 ont des masses importantes à l'échelle des particules, respectivement 80 et 91 GeV/c². Le cas de l'interaction forte est un peu plus délicat, car, bien que les gluons aient une



masse nulle, sa portée est très courte, de l'ordre du fermi. Elle n'influence que les particules qui sont à l'intérieur du noyau.

Toutes les particules ne sont pas affectées pareillement par les interactions. Par exemple, le proton et l'électron, qui sont électriquement chargés, sont affectés par le photon, médiateur de l'électromagnétisme. Ils peuvent émettre ou absorber des photons. Par contre, le neutron, qui est neutre, ne ressent pas l'interaction électromagnétique.

Les interactions sont à l'origine de la cohésion de la matière mais elles régissent aussi les processus de transformation de particules en d'autres particules plus légères. Lorsqu'une particule instable se désintègre, c'est sous l'effet de l'une de ces interactions. Plus l'intensité de l'interaction, caractérisée par sa *constante de couplage*, est grande, plus la désintégration devient probable et plus la durée de vie de la particule est courte.

Le tableau ci-dessous donne une idée des intensités relatives des différentes interactions pour deux protons juxtaposés.

interaction	forte	électromagnétique	faible	gravitationnelle
intensité relative	1	10^{-2}	10^{-7}	10^{-39}

Le temps de vie pour la désintégration des particules instables par le biais de l'une des interactions sont donc également très différents. Typiquement, le temps de vie moyen pour une désintégration faible est de l'ordre de 10^{-10} s alors que celui pour une désintégration forte avoisine les 10^{-23} s.

1.6 “L'union fait la force” ou plutôt “les forces font l'union”

Le désir d'expliquer de façon synthétique les phénomènes est un principe moteur de la physique. Cette volonté d'unification a traversé les siècles, nombreux sont ceux qui s'y sont attelés. NEWTON, le premier, a compris que la chute des corps et le mouvement de la lune autour de la Terre sont régis par la même force. MAXWELL unifia l'électricité et le magnétisme. EINSTEIN, dans sa célèbre théorie de la relativité restreinte, établit un cadre propice à l'unification des descriptions de l'espace et du temps ainsi que celles de l'énergie et de la masse.

Avoir pu réduire la description du monde physique connu à un jeu de seulement quatre forces constitue déjà une prouesse en soi. Mais les physiciens ne se sont pas arrêtés là. Les constantes de couplage, traduisant l'intensité des interactions, varient avec l'énergie mise en jeu (et oui, le nom est assez mal choisi), de sorte qu'il existe une échelle d'énergie, de l'ordre de 10^{15} GeV, où elles deviennent comparables. D'où l'espoir de construire une théorie qui ne ferait appel qu'à une seule force. L'unification électrofaible (interactions électromagnétique et faible), opérée par SALAM, GLASHOW et WEINBERG en 1967, fut un premier stade décisif, mais se sont maintenant trois des quatre interactions fondamentales qui peuvent être fondues dans un même moule théorique. Seule la gravitation s'obstine encore à faire bande à part.



1.7 Fermions et bosons

Les particules (prises au sens large : atomes, particules composites ou élémentaires,...) peuvent être de deux types : de spin² entier ou demi-entier. Les premiers sont appelés **bosons** alors que les seconds portent le nom de **fermions**.

Les fermions obéissent au principe d'exclusion de Pauli qui stipule que deux fermions identiques ne peuvent exister dans le même état quantique. Ceci explique pourquoi les électrons sont disposés en couches autour du noyau et ne tombent pas tous dans l'état fondamental. Par contre, il n'y a aucune restriction sur le nombre de bosons dans le même état quantique. Ainsi, le phénomène laser est dû à un ensemble de photons dans le même état quantique.

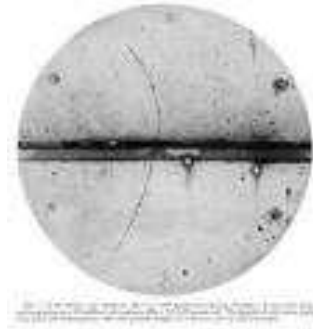
²Le spin est une propriété intrinsèque des particules qui est analogue mais pas identique au concept de “rotation sur soi-même” et qui lui confère des propriétés semblables à celle d'un petit aimant.

Les fermions fondamentaux sont les véritables constituants de la matière. Ce sont d'un côté les **quarks** (sensibles à l'interaction forte), de l'autre les **leptons** (insensibles à l'interaction forte). Les bosons fondamentaux sont, quant à eux, les messagers associés aux quatre forces fondamentales. Ainsi en est-il, par exemple, du photon qui est associé à la force électromagnétique.

1.8 L'antimatière

La notion d'antiparticule date de 1931. Il s'agit d'un objet de même masse, de même spin et de même temps de vie que la particule correspondante mais avec une charge électrique, un moment magnétique et électrique opposés. L'idée, quelque peu audacieuse pour l'époque, émane du physicien Paul DIRAC (1902-1984) qui cherchait l'équation capable de rendre compte du comportement d'un électron de haute énergie.

Le positron, l'antiparticule de l'électron, a été découvert expérimentalement par Carl ANDERSON (1905-1991) en 1932. Des antiparticules existent ainsi pour tous les fermions et les bosons. Elles forment l'antimatière, qui peut être créée en même temps que la matière pour peu que l'on dispose de suffisamment d'énergie. L'antiproton, de charge négative, fut découvert en 1955 et l'antineutron en 1956.



La notation retenue pour les antiparticules est d'inverser le signe de la charge si elle est indiquée (e^+ , μ^+). Dans le cas contraire, on utilise une barre au-dessus du nom de la particule (\bar{n} , \bar{p})

Parfois, une particule peut être sa propre antiparticule. C'est le cas du photon et du pion neutre π^0 . On peut s'étonner que le neutron, qui est neutre, lui aussi, ne soit pas identique à l'antineutron. Cela vient du fait que les particules sont caractérisées par ce qu'on appelle des *nombres quantiques* correspondant à des "charges" généralisées. La charge électrique en est une mais il en existe d'autres : le *nombre baryonique*, le *nombre leptonique*, la *couleur*, ... Les antiparticules ont des nombres quantiques opposés à ceux de leur particule.

Revenons-en au neutron. Celui-ci porte une charge baryonique +1 alors que son homologue dans le monde de l'antimatière porte une charge baryonique -1. Par conséquent, le neutron et l'antineutron ne sont pas identiques. Ce résultat a des conséquences pratiques : lorsqu'un neutron de basse énergie rencontre l'un de ses semblables, on assiste à une collision ordinaire, chacun d'eux repart dans une direction différente de sa direction incidente :

$$n + n \rightarrow n + n.$$

Mais lorsqu'un neutron rencontre un antineutron, ils s'annihilent pour donner, par exemple, deux photons :

$$n + \bar{n} \rightarrow \gamma + \gamma.$$

1.9 Leptons et quarks

Parmi les fermions, on distingue deux familles : les **quarks**, qui ressentent l'interaction forte, et les **leptons**, qui y sont insensibles.

Les leptons

Les leptons sont dotés d'une charge électrique entière. L'**électron** e^- avec une charge électrique négative est le plus connu. Le **muon** μ^- (découvert en 1937) et le **tau** τ^- (découvert en 1975) ont la même charge que l'électron mais constituent des versions plus lourdes de celui-ci. On parle de trois *saveurs* leptoniques (e , μ et τ). La saveur est le nombre quantique qui permet de déterminer comment les fermions fondamentaux réagissent à l'interaction faible.

A chacune de ces saveurs est associé un **neutrino**, dénoté par la lettre grecque ν (ν_e , ν_μ et ν_τ). Les neutrinos ont une charge électrique nulle et une très petite masse.

Le muon et le tau ne se trouvent pas dans la matière ordinaire car ils sont instables, c'est-à-dire qu'ils se désintègrent spontanément en d'autres particules plus légères comme l'électron et les neutrinos :

$$\begin{aligned}\tau^- &\rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau, \\ \mu^- &\rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu.\end{aligned}$$

Le temps de vie moyen du muon est $2.2\mu\text{s}$ ($2.2 \times 10^{-6}\text{s}$) alors que celui du tau est encore beaucoup plus petit, 0.29ps ($0.29 \times 10^{-12}\text{s}$). L'électron et les trois types de neutrinos, par contre, sont stables.

L'existence des neutrinos a été postulée par Wolfgang PAULI (1900-1958) en 1930 dans le but de rendre compte de l'énergie manquante dans les désintégrations β du neutron :

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e.$$

Cependant, ils interagissent si faiblement avec le reste de la matière qu'ils n'ont pas été détectés avant la fin des années 1950.

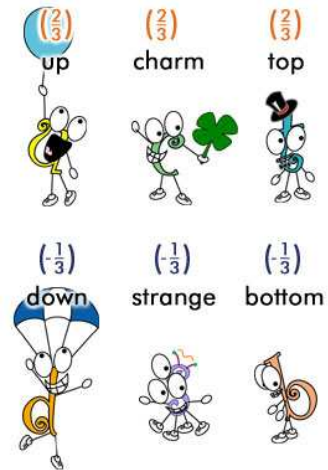
Les quarks

Le terme de "quarks" date de 1964 quand Murray GELL-MANN et George ZWEIG suggérèrent que les centaines de particules connues à l'époque pouvaient être expliquées comme des combinaisons de trois particules fondamentales qu'ils choisirent

d'appeler "quarks". Le mot provenait du roman *Finnigan's Wake* de James Joyce : "Three quarks for Muster Mark". Pour que l'hypothèse des quarks tienne la route, il fallait leur attribuer des charges fractionnaires $2/3$ et $-1/3$. De telles charges n'avaient encore jamais été observées. Les quarks étaient donc considérés comme des abstractions mathématiques. L'expérience a prouvé que non seulement ces trois quarks existaient mais qu'il en existait d'autres.

On recense actuellement six saveurs de quarks : **up** (u), **down** (d), **charm** (c), **strange** (s), **top** (t), **bottom** (b). Les quarks b , c , s et t , beaucoup plus lourds que leurs confrères u et d , se désintègrent rapidement en ces derniers. On ne les retrouve donc pas dans les structures stables connues.

En plus de leur charge électrique et de leur saveur, les quarks portent une charge dite de "couleur" qui les rend sensibles à l'interaction forte. Il existe trois couleurs, disons rouge, vert et bleu. Mais attention, dire que les quarks portent une charge de couleur ne veut pas nécessairement dire qu'ils sont colorés. C'est simplement une manière analogique de désigner une sorte d'étiquette quantique qu'ils portent et que l'on a convenu d'appeler couleur. Les antiquarks, quant à eux, portent une anti-couleur.

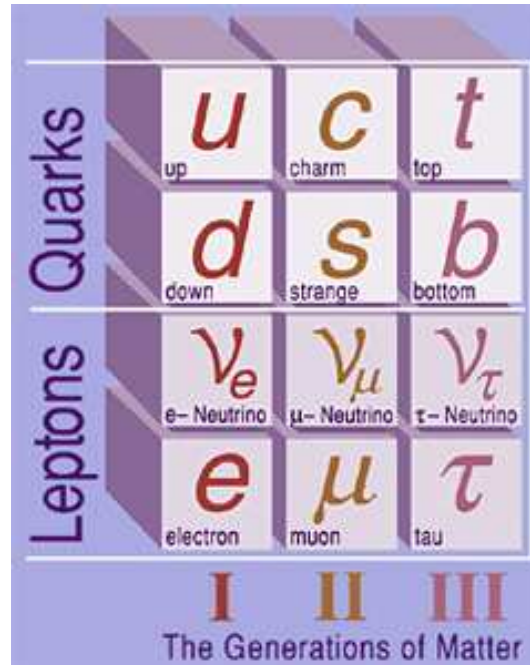


Etant donné que l'absorption et l'émission d'un gluon change la couleur des quarks mais que celle-ci est une quantité conservée lors de l'interaction, on peut considérer que les gluons sont porteurs d'une couleur et d'une anti-couleur. La séquence ci-dessous illustre l'émission d'un gluon par un quark provoquant un changement de couleur de ce dernier.



Les neuf combinaisons de couleurs possibles laissent à penser qu'il doit exister neuf gluons mais les mathématiques font en sorte qu'il n'en existe que huit.

FIG. 1.1 – Les fermions du Modèle Standard.



TAB. 1.2 – Tableau des fermions élémentaires.

	charge	famille 1	famille 2	famille 3
Leptons	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
	-1	e^-	μ^-	τ^-
Quarks	$\frac{2}{3}$	u	c	t
	$-\frac{1}{3}$	d	s	b

TAB. 1.3 – Tableau des interactions fondamentales et des bosons associés.

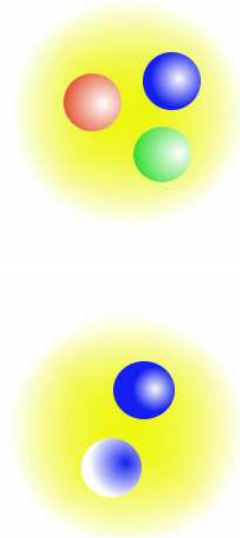
Interaction	bosons associés	charge
électromagnétique	photon (γ)	0
faible	W^\pm, Z^0	$\pm 1, 0$
forte	8 gluons (g)	0
gravitationnelle	graviton	0

1.10 Hadrons, baryons, mésons

Seules les particules sans couleur sont observées et, par conséquent, les quarks et les gluons ne s’observent jamais seuls. Ils s’arrangent toujours pour former des combinaisons de charge électrique entière et de couleur neutre qu’on appelle des **hadrons**. On dit que les quarks sont “confinés” à l’intérieur des hadrons.

On distingue deux types de hadrons. D’une part, les **baryons**, qui sont des fermions, sont composés de trois quarks (qqq) de couleurs différentes. Les protons, composés de deux quarks u et d’un quark d , et les neutrons, composés de deux quarks u et un quark u , sont de ceux-là. D’autre part, les **mésons** qui sont des bosons, quant à eux, sont composés d’un quark d’une couleur et d’un antiquark de l’anti-couleur ($q\bar{q}$). Parmi eux, on compte, par exemple, les pions (π^+ , π^0 , π^-).

A l’intérieur des hadrons, il arrive que l’énergie des **quarks de valence** (constituants “officiels” des baryons et des mésons) se transforme en matière. Quarks et antiquarks apparaissent, se rencontrent, s’annihilent continuellement. On les appelle les **quarks de la mer**. Par l’échange incessant de gluons qui sont colorés, la couleur des quarks à l’intérieur des hadrons est changée.



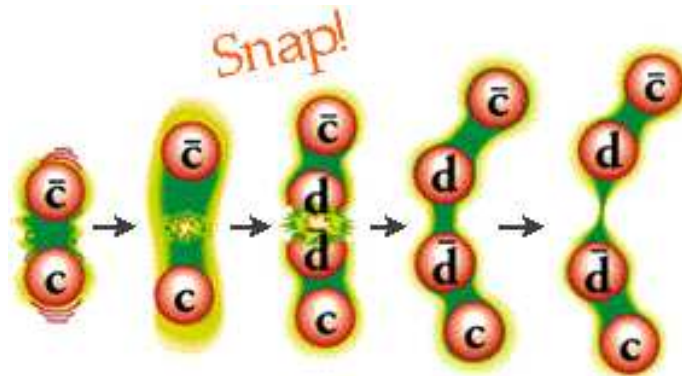
TAB. 1.4 – Composition en quarks de quelques hadrons.

méson	composition	hadron	composition
π^+	$u\bar{d}$	p	uud
K^0	$d\bar{s}$	Λ	uds
K^-	$\bar{u}s$	Ξ^0	uss
ρ^-	$\bar{u}d$	Σ^+	uus
ω^0	$u\bar{u}$	Ω^-	sss

Des jets de hadrons

L’intensité de l’interaction entre deux objets colorés augmente à mesure qu’ils s’éloignent l’un de l’autre, ce qui explique que les objets colorés doivent rester *confinés* à l’intérieur des hadrons et ne peuvent exister librement. Au fur et à mesure que deux quarks s’éloignent l’un de l’autre, la création d’une paire quark-antiquark devient énergétiquement plus favorable. C’est ce qu’on appelle la *fragmentation*. Les

quarks résultant se combinent pour former des hadrons. Ce processus est celui de l'*hadronisation*. Les quarks se manifestent donc par des *jets* de hadrons.



Un jet peut également provenir de l'émission d'un gluon par un quark. L'image 1.2 représente par exemple un événement avec deux jets.

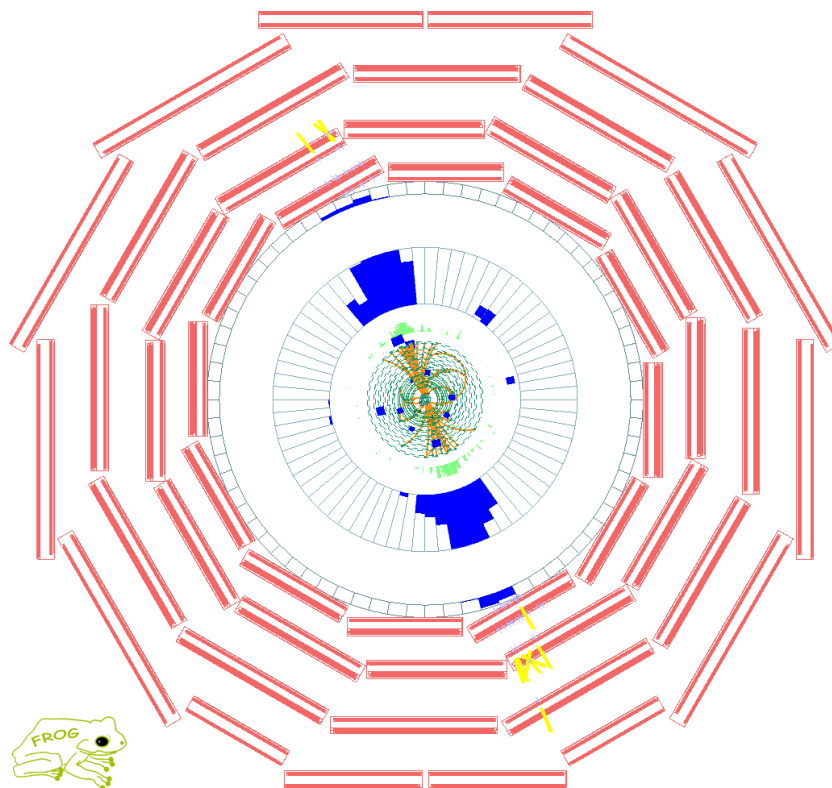
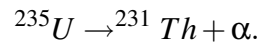


FIG. 1.2 – Visualisation d'un événement à deux jets.

1.11 Désintégrations et annihilations

Désintégrations

Quand, en physique nucléaire, on parle de désintégration d'un noyau, il s'agit d'une scission de celui-ci en des noyaux plus petits. Par exemple,



En physique des particules, il n'en est pas de même. La désintégration d'une particule élémentaire fait référence à la transformation de cette particule en d'autres particules fondamentales. Nous avons évoqué précédemment quelques exemples de désintégration (désintégration du μ et du τ , désintégration β du neutron). Celles-ci sont occasionnées par l'interaction **faible**, seule capable de modifier la saveur d'un lepton. Ainsi, par exemple, dans la désintégration β du neutron, un quark d se transforme en un quark u en émettant un boson W (figure 1.3).

Les interactions électromagnétique et forte peuvent également être responsables de désintégrations. Le pion neutre π^0 est un mélange de $u\bar{u}$ et de $d\bar{d}$. Le quark et l'antiquark peuvent s'annihiler et donner lieu à l'émission de deux photons. C'est un exemple d'une désintégration **électromagnétique**. La particule η_c est un méson $c\bar{c}$. Elle peut subir une désintégration **forte** en deux gluons.

Annihilations

D'autre part, les particules peuvent s'annihiler entre elles, convertissant leur énergie pour donner naissance à un boson intermédiaire, messenger de l'une des interactions fondamentales. Celui-ci, à son tour, convertit son énergie pour donner naissance à d'autres particules. Au LEP, les physiciens provoquaient des collisions entre des électrons et des positrons de manière à faire apparaître d'autres particules, par exemple, une paire de mésons D^+D^- comme illustrée à la figure 1.4. Dans le LHC (collisionneur proton-proton), ce sont les quarks et antiquarks, constitutifs des nucléons initiaux, qui s'annihilent, par exemple, comme à la figure 1.5.

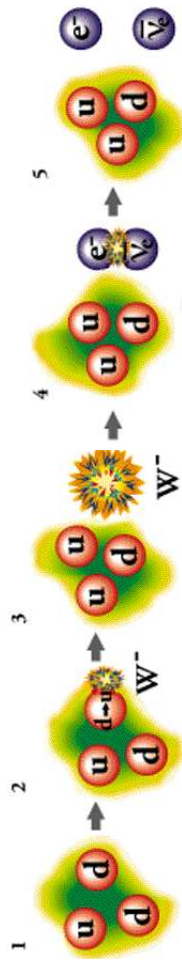


FIG. 1.3 – Schéma explicatif de la désintégration β du neutron.

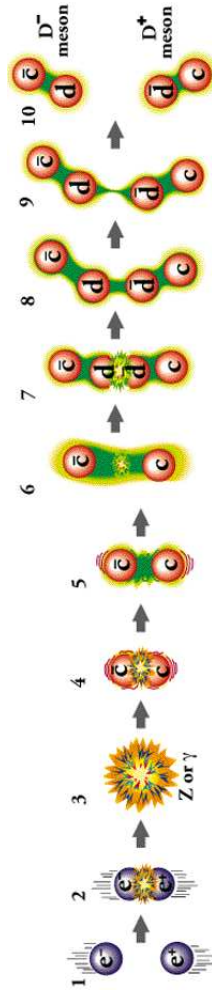


FIG. 1.4 – Schéma explicatif de l'annihilation e^+e^- en une paire $q\bar{q}$ suivie de l'hadronisation en D^+D^- .

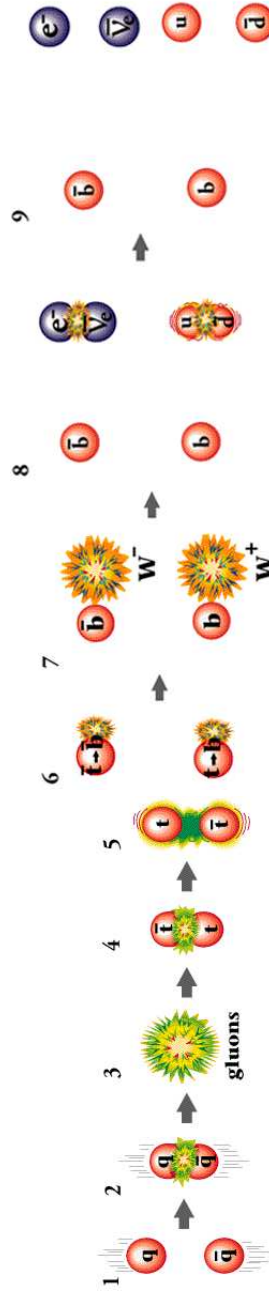


FIG. 1.5 – Schéma explicatif d'une annihilation $q\bar{q}$ par le biais d'un gluon intermédiaire et de la désintégration de la paire $t\bar{t}$ produite.

1.12 La quête du Higgs

La théorie électrofaible réunit, comme son nom l'indique, l'électromagnétisme et l'interaction faible. On pourrait se demander comment il se fait que les trois médiateurs de l'interaction faible (W^+ , W^- et Z^0) aient une masse alors que le médiateur de l'interaction électromagnétique, le photon, n'en a pas. Cette différenciation est attribuée à un mécanisme énigmatique, le *mécanisme de Higgs*, par lequel on prétend interpréter l'origine des masses des particules en "brisant la symétrie" entre les bosons de l'interaction électrofaible. Il nécessite l'introduction d'une nouvelle particule (de spin 0) que l'on appelle **boson de Higgs**. La théorie électrofaible ne demande au boson de Higgs que d'exister, elle ne dit rien sur sa masse, sinon qu'elle peut difficilement excéder 1 TeV sans remettre en cause tout l'édifice. Alors, depuis plus de 20 ans, les physiciens traquent cette particule. En 2000, le LEP (voir section 2.2) a été poussé au bout de ses limites pour tenter de la mettre en évidence. Jusqu'à présent, la quête est restée infructueuse dans l'intervalle entre 0 et $115 \text{ GeV}/c^2$. D'autre part, la masse du Higgs ne devrait pas se situer dans la zone de $160 \text{ GeV}/c^2$ à $170 \text{ GeV}/c^2$ car c'est une zone que le Tevatron a explorée et exclue. La traque se précise. On compte maintenant sur le LHC (*Large Hadron Collider*), démarré en Novembre 2009 au CERN, pour poursuivre les recherches.

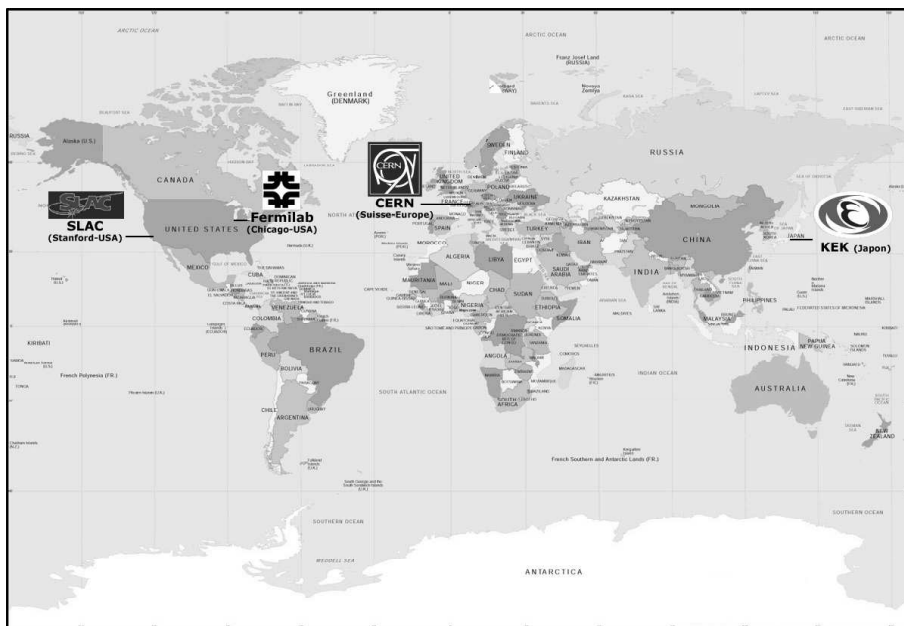
Reste la possibilité que le fameux boson ne soit pas au rendez-vous ! Ne pas trouver le Higgs reviendrait à prouver qu'il n'existe pas. Et, dans ce cas, quelque chose d'autre doit exister, particule ou phénomène nouveau que le LHC donnera à voir. Ce ne serait pas la première fois qu'un accélérateur apporte de l'imprévu !

Chapitre 2

CMS, un colosse pour l'infiniment petit

2.1 Des accélérateurs de particules

La physique des particules est, avant tout, une science expérimentale. Observer de minuscules particules demandent de bien gros microscopes : les accélérateurs de particules. Ceux-ci provoquent des collisions, particule contre particule, afin d'en faire apparaître d'autres et d'étudier leurs propriétés. Depuis le cyclotron jusqu'au LHC au CERN, les énergies accessibles ont augmenté de quelques MeV à quelques TeV. Pour ce faire, les accélérateurs sont devenus de plus en plus grands, donc de plus en plus chers et, en conséquence, de moins en moins nombreux : un en Europe, deux aux Etats-Unis et un au Japon.



Les accélérateurs de particules sont construits en tenant compte de certaines idées simples. Premièrement, nous ne savons accélérer, à l'aide d'une succession de différences de potentiel, que des particules chargées, parce qu'elles sont sensibles aux champs électriques et magnétiques que nous savons produire et utiliser. Deuxièmement, les particules accélérées doivent être assez stables pour ne pas disparaître en cours de route par désintégration. Cela limite considérablement les possibilités : seuls l'électron, le proton et leurs antiparticules répondent à ces conditions. Enfin, ces particules doivent circuler dans un vide suffisant pour ne pas risquer de heurter malencontreusement une molécule de gaz susceptible de perturber leur trajectoire.

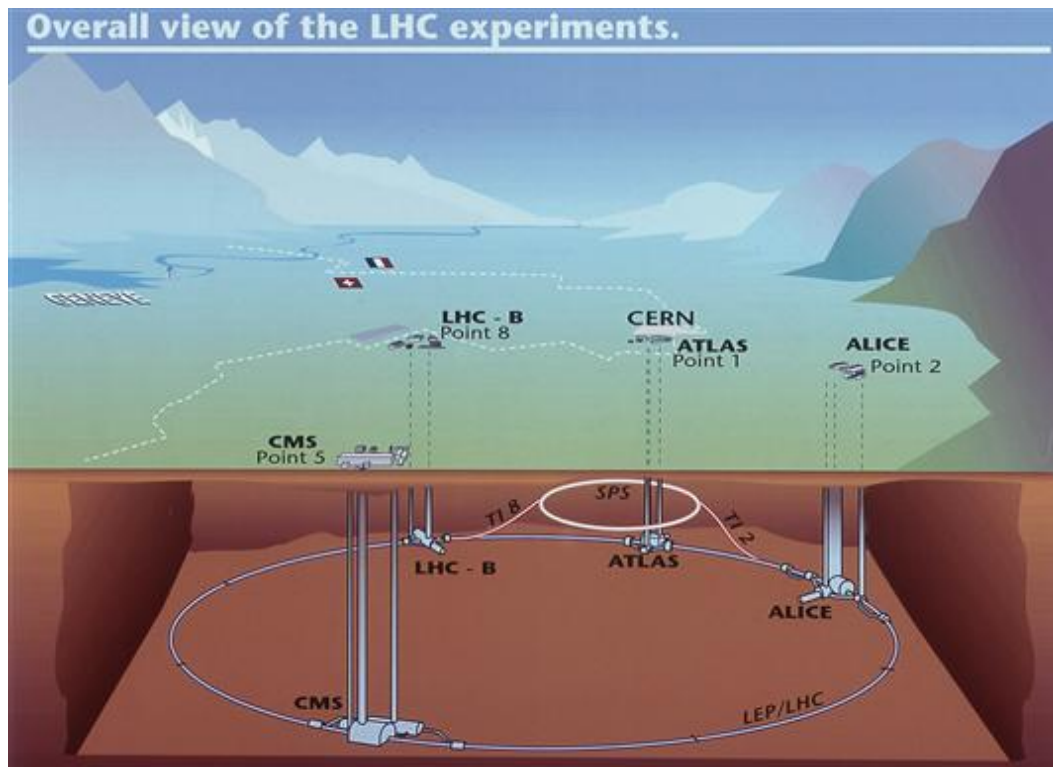
Dans un collisionneur, deux faisceaux de particules circulent en sens inverse dans un mince tube où règne un vide très poussé. Ils entrent en collision en divers endroits du circuit où sont placés d'immenses détecteurs. Plus l'énergie du collisionneur croît, plus le nombre de particules produites dans chaque collision croît lui aussi, ainsi que l'énergie de chacune d'entre elles.

A des énergies élevées, une même collision peut produire un grand nombre de réactions différentes. Chaque réaction se traduit par l'émission de nombreuses particules de différentes espèces dans divers directions *a priori* imprévisibles. Ce n'est qu'après avoir déterminé la nature, l'énergie, l'impulsion, la direction et, le cas échéant, la désintégration de chaque particule détectable qu'il est possible de reconstituer l'événement et d'identifier la réaction qui a eu lieu. Les détecteurs sont destinés à observer chaque événement et devraient, idéalement, permettre d'identifier toutes les sortes de particules existantes (cela n'est évidemment pas exactement le cas dans la réalité). A cette fin, ils ont le plus souvent une forme cylindrique complétée par des bouchons.

Les particules sont détectées par leurs interactions avec la matière : excitation et ionisation.

2.2 Le LHC

Le LHC (*Large Hadron Collider*) est le collisionneur circulaire proton-proton du CERN. L'anneau du LHC a une circonférence de 27 km et est enfoui à une centaine de mètres sous terre. Le projet LHC a été approuvé en 1994 pour succéder au LEP (*Large Electron-Positron collider*). Le tunnel du LHC est le même que celui du LEP, sa construction ayant débuté en 1983. Le LHC a été mis en fonctionnement en Novembre 2009. Ses objectifs principaux sont d'expliquer la masse des particules élémentaires, étudier la matière noire et reproduire les conditions des premiers instants après le Big Bang afin d'expliquer l'asymétrie matière-antimatière. L'accélérateur devrait permettre de découvrir des particules plus lourdes non encore observées dans les autres accélérateurs et d'obtenir des données expérimentales à analyser pour les dizaines d'années à venir.



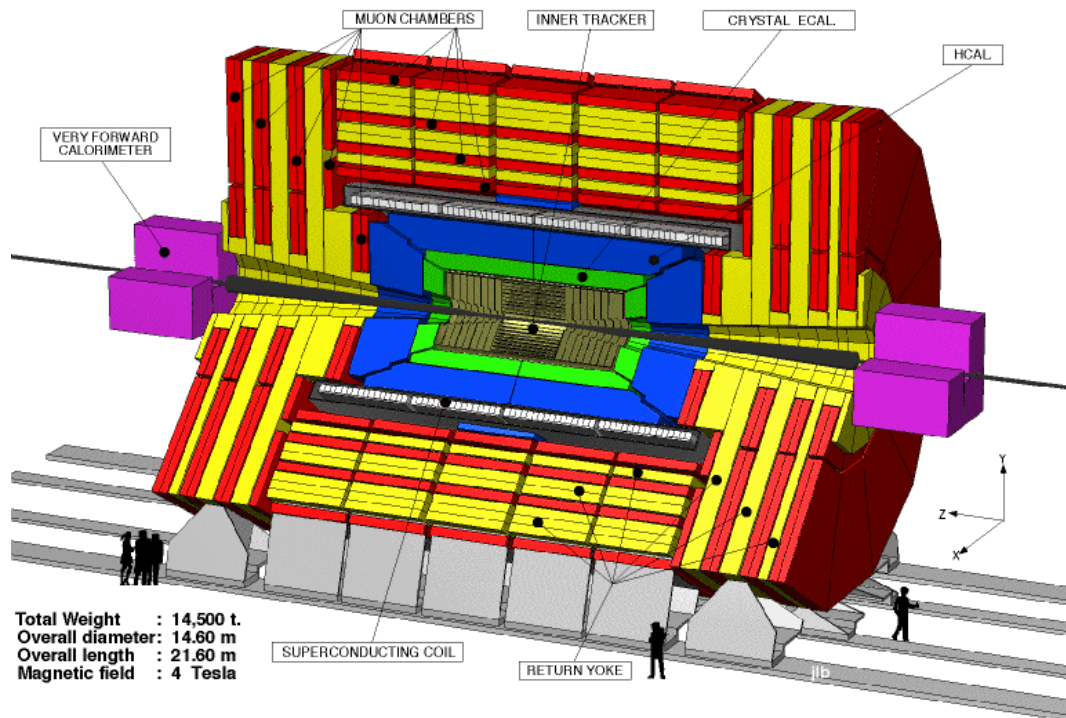
Des faisceaux de protons sont accélérés dans des directions opposées et entrent en collision toutes les 25 ns en quatre points sur l'anneau. Les quatre détecteurs, situés en ces points, sont ATLAS, ALICE, CMS et LHCb.

Durant la première phase d'exploitation du LHC, démarrée en 2010 et prévue pour 2 ans, le LHC devrait travailler à une énergie dans le centre de masse¹ de 7 TeV afin d'emmagasiner de premières données. Ensuite, après quelques adaptations pour supporter de plus hautes énergies, il devrait fonctionner à 14 TeV. Il effectuera également quelques collisions spécifiques avec des ions lourds (Plomb-Plomb).

2.3 Description du détecteur CMS

Le détecteur CMS (*Compact Muon Solenoid*) a été conçu afin de mesurer des événements créés par collision proton-proton au LHC et accumuler, à chaque événement, un maximum d'information. Le détecteur a un diamètre de 15 m et une longueur de 21 m, le tout pour une masse de 12 500 tonnes ! Il est structuré en couches cylindriques concentriques autour du tube à faisceaux et de deux bouchons. Un champ magnétique de 4 Tesla (40 000 fois la valeur du champ magnétique terrestre), engendré par un aimant supraconducteur, courbe les trajectoires des particules chargées.

¹Le centre de masse est un repère utilisé pour décrire les collisions entre particules. L'énergie centre de masse est l'énergie disponible dans ce repère particulier.



La structure de CMS, comme celle de tous les autres détecteurs, est étudiée en fonction de toute une série d'impératifs liés aux propriétés des particules, à celles des instruments de mesure utilisés et aux contraintes budgétaires. Il s'agit de n'interposer sur les traces sortant du tube à vide que le moins de matière possible afin de bien mesurer les directions et les impulsions sans perturber les trajectoires. Derrière ces premières couches de détecteurs, il faut disposer des instruments pouvant aider à l'identification (pions, kaons, protons, ...). Ensuite, viennent les instruments présentant des grandes épaisseurs de matière, qui dégradent rapidement les trajectoires des particules mais permettent de mesurer leur énergie (calorimètres électromagnétiques pour les photons et les électrons, suivis de calorimètres hadroniques pour les pions, les neutrons, les protons,...). Finalement, le tout est entouré de chambres qui permettent de détecter les muons.

Les sous-détecteurs qui composent CMS sont décrits plus en détails ci-dessous en commençant par les plus proches de l'endroit de la collision, le vertex primaire.

Le trajectographe

Le trajectographe permet de déterminer la direction et l'impulsion des particules chargées (et donc reconstruire leur trajectoire) ainsi que d'identifier les particules au

moyen des pertes d'énergie par ionisation. Le trajectographe de CMS se compose de deux parties. La première, le **détecteur à pixels**, est la plus proche du point d'interaction, là où les faisceaux se croisent. Il a une très grande résolution ce qui lui permet de reconstruire précisément la trajectoire des particules provenant des vertex secondaires². Cependant, il est très coûteux. C'est pourquoi la seconde partie est composée d'un détecteur moins cher mais donc aussi un peu moins précis, le **détecteur à micro pistes de Silicium**. Il permet, une fois les traces reconstruites, de calculer de l'impulsion des particules chargées à partir de leur courbure due au champs magnétique.

Les calorimètres

Les calorimètres sont des détecteurs de type solide qui servent à mesurer l'énergie, par absorption totale ou partielle de la particule à détecter. Il est important de noter que cette technique est destructive, la particule incidente est absorbée. Les calorimètres sont les seuls sous-détecteurs capables de fournir des informations sur les particules neutres. Ils fournissent, par ailleurs, des mesures d'énergie pour les hadrons chargés.

Le **calorimètre électromagnétique** (ECAL) mesure l'énergie des électrons et des photons et n'arrête pas les autres particules. Le **calorimètre hadronique** (HCAL) est utilisé pour mesurer l'énergie des hadrons. Pour les arrêter, il faut une grande quantité de matière, ce qui explique les tailles impressionnantes de ces détecteurs.

Les chambres à muons

Les muons ont la propriété de n'interagir que très faiblement avec la matière. Ils traversent donc les couches internes du détecteur sans être absorbés et sont détectés dans les chambres à muons.

2.4 La reconstruction des événements et l'identification des particules

Un événement désigne l'ensemble des réactions et particules produites lors d'une collision. Il s'agit de reconstituer au mieux les événements à l'aide des informations fournies par l'ensemble des sous-détecteurs. Les deux étapes importantes dans cette reconstitution sont la reconstruction des traces et la recherche des dépôts calorimétriques. L'association de ces informations permet de mesurer l'énergie et d'identifier les particules neutres et chargées.

Les particules ne sont pas observables à l'oeil. Nous ne pouvons voir que les "empreintes" qu'elles laissent dans les détecteurs. Chaque particule signe différemment

²Lieux de la désintégration des particules ayant un temps de vie très bref.

son passage à travers le détecteur, c'est ce qu'illustre la figure 2.1. Ainsi, par exemple, les muons laissent une trace dans tous les sous-détecteurs alors que les photons sont absorbés par le calorimètre électromagnétique sans laisser de trace dans le trajectographe. Les particules sont identifiées en combinant les informations des différents sous-détecteurs.

Seules sont détectables directement les particules pouvant parcourir une certaine longueur avant leur désintégration. Les neutrinos, neutres et de très petite masse, ne peuvent, quant à eux, être détectés car ils traversent tous les sous-détecteurs sans interagir. Ainsi, les particules à la vie trop brève et les neutrinos ne peuvent être connus que par déduction ou combinaisons diverses. Les premières peuvent être identifiées grâce à la détection de vertex secondaires par le trajectographe alors que les neutrinos sont identifiés à l'aide de l'énergie manquante.

- A l'issue de cette étape de reconstruction, on dispose d'informations telles que :
- le nombre de particules dans l'événement,
 - la topologie de l'événement (la disposition des trajectoires des particules dans l'espace),
 - l'énergie et l'impulsion des particules stables,
 - l'identité des particules,
 - l'énergie manquante (pour l'identification des neutrinos)
 - ...

2.5 Données et simulations

Jusqu'ici, nous avons principalement parlé de la partie détecteurs et comment obtenir des données réelles. Cependant, une grande partie du travail de physicien des particules est également la simulation. En effet, il est intéressant de confronter les données réelles à des simulations d'événements, c'est-à-dire à ce que nous nous attendons à voir. Ceci permettra de tester la validité de nos théories ou de mettre en évidence de nouvelles particules.

La simulation des événements se fait en trois temps : tout d'abord, la description physique de la collision et la génération de l'énergie et l'impulsion des particules produites pour le type de processus désiré, ensuite, la simulation de la propagation de ces particules à travers le détecteur et, enfin, la simulation de la réponse du détecteur.

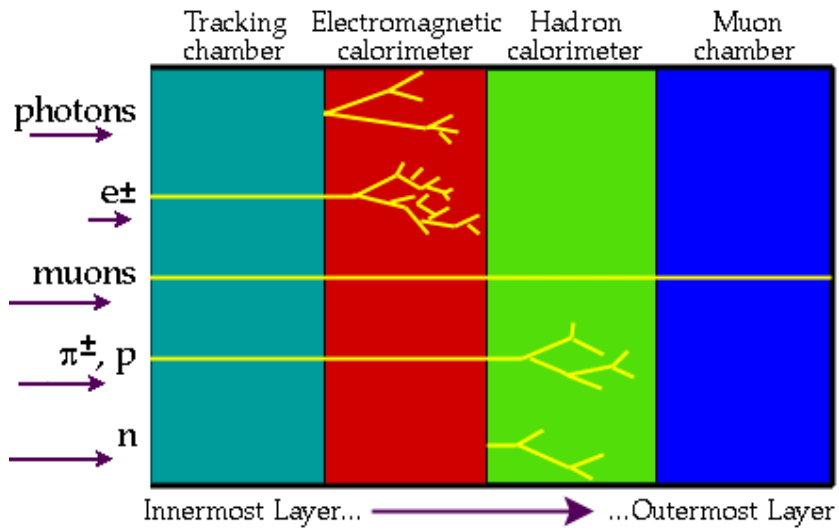


FIG. 2.1 – Représentation schématique du passage des particules à travers un détecteur standard.

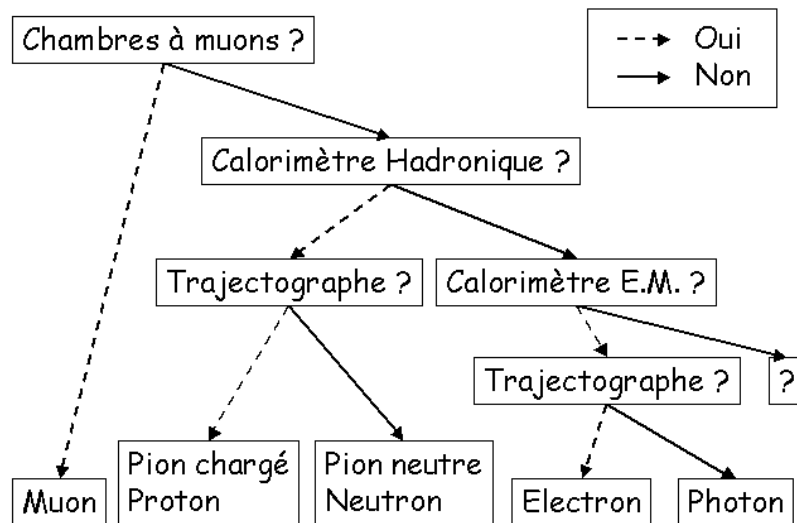


FIG. 2.2 – Organigramme aidant à l'identification d'une particule dans un détecteur.

Chapitre 3

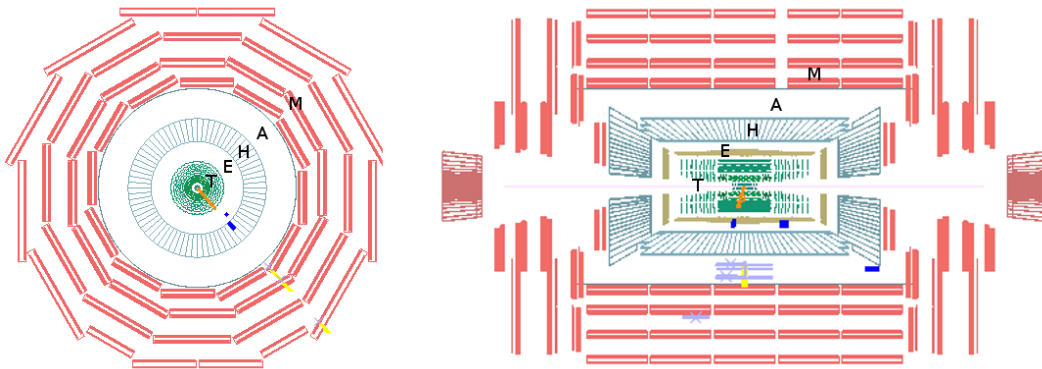
La main à la pâte ...

L'objectif de ce chapitre est de se familiariser un temps soit peu avec l'analyse des données collectées par le détecteur ALEPH. Comme un petit exemple vaut mieux qu'un long discours, nous allons nous attacher à un cas pratique qu'est celui de la mesure de la masse et du temps de vie du boson Z^0 . Pour ce faire, nous détaillons quelque peu l'utilisation du programme de visualisation des événements FROG [12] ainsi que le programme d'analyse QTALEPH. Un cahier de laboratoire se trouve en fin de chapitre pour vous permettre de noter et de conserver les résultats de vos mesures.

3.1 FROG

En raison de la complexité des événements issus de collisions à hautes énergies, une représentation graphique des traces et des dépôts calorimétriques à l'intérieur du détecteur peut s'avérer instructive et nécessaire. Ainsi, FROG est un programme permettant de visualiser les interactions dans le détecteur.

Des coupes transverse et longitudinale du détecteur sont accessibles ainsi que diverses projections. Elles présentent les différents sous-détecteurs : le trajectographe (T), le calorimètre électromagnétique (E), le calorimètre hadronique (H), l'aimant (A) et la chambre à muons (M).



Vous pouvez voir dans la partie haute de la fenêtre le numéro de l'évènement. Pour les débutants, voici quelques commandes simples :

- <F2> = Menu d'affichage
- <F5> = Affiche les Traces Simulées
- <F6> = Affiche les Vertex Simulés
- <F7> = Affiche les dépôts d'énergie Simulés
- <F8> = Affiche les Traces reconstruites
- <F9> = Affiche les Hits du Tracker reconstruites
- <F10> = Affiche les Hits ECAL reconstruites
- <F11> = Affiche les Hits HCAL reconstruites
- <F12> = Affiche les Hits Muons reconstruites
- <LEFT> = evenement précédent
- <RIGHT> = evenement suivant

Les figures 3.2(a),3.2(b) et 3.2(c) illustrent deux événements issus de collisions proton-proton dans le détecteur CMS. L'identification des processus impliqués est immédiate. Sur la première, on distingue clairement un muons, qui atteint les chambres à muons. La seconde présente un Pion avec son dépôts d'énergie dans le calorimètre hadronique et la dernière une gerbe électronique issue d'un électron.

3.2 QTALEPH

Les expérimentateurs font appel, dans leurs analyses, à des millions d'événements. Bien entendu, il est impossible d'étudier à l'oeil avec FROG un tel nombre d'événements. Ils font donc appel à des programmes d'analyse de données. QTALEPH en est un, très simplifié. Dans l'analyse avec QTALEPH, les données utilisées sont des données réelles provenant de l'expérience LEP, vous travaillerez donc avec le même type de données que les physiciens du CERN !

Nous observons 3 distributions d'événements simulés à la figure 3.3(a). Celle du bas est l'énergie mesurée par le calorimètre électromagnétique (EWI). A gauche se trouve la somme de la norme de l'impulsion des traces chargées reconstruites dans le détecteur (PCH). La distribution bidimensionnelle au centre est une combinaison des deux précédentes. Les points rouges correspondent au signal choisi (muons en l'occurrence) tandis que les noirs correspondent aux processus de bruit de fond, c'est-à-dire tous les processus qui sont différents du processus de signal choisi.

L'objectif est maintenant de sélectionner un maximum de signal tout en éliminant un maximum de bruit de fond. Ceci se fait par le biais de coupures sur des variables de sélection (NCH, PCH, EWI, EHA, ...). Ces coupures sont représentées par des lignes bleues. Il est possible de changer leur valeur en déplaçant la ligne à l'aide de la souris.

Une fois les coupures déterminées, la touche *Write* fait apparaître un carré bleu sur

la figure centrale. Il représente la région sélectionnée par les coupures. La touche *Read Data* permet d'accéder aux données réelles observées précédemment avec FROG. Deux graphes apparaissent (figure 3.3(b)). Ils représentent respectivement le nombre de muons et le nombre de hadrons observés en fonction de l'énergie disponible. Les points correspondent aux données, les courbes aux simulations.

Afin de reproduire les données réelles, les courbes théoriques doivent être ajustées en modifiant les valeurs des paramètres, c'est-à-dire la masse et la largeur¹ du Z^0 . Le maximum de la distribution correspond alors à la masse du boson Z^0 . La touche *Try*, fait apparaître la courbe théorique pour les valeurs des paramètres indiquées.

L'ajustement est optimisé à l'aide de la variable χ^2 . Sa valeur est d'autant plus petite que les valeurs choisies pour les paramètres font correspondre la courbe théorique aux données.

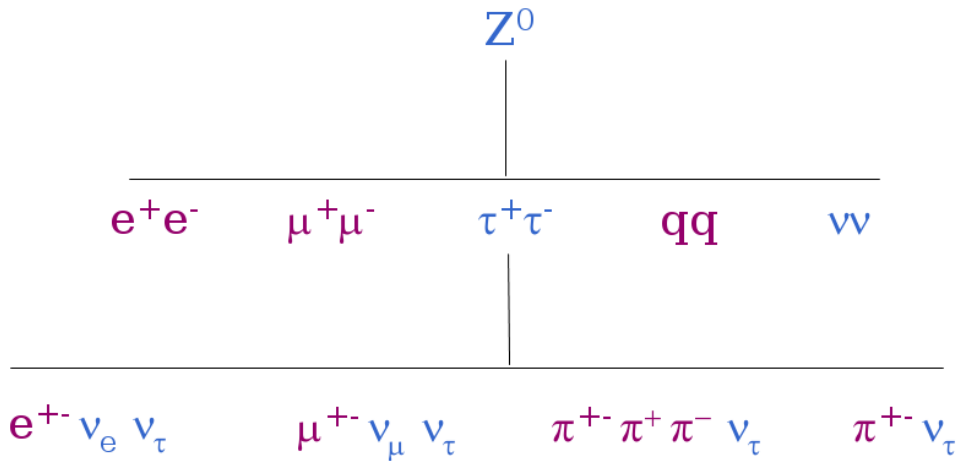


FIG. 3.1 – Modes de désintégration du Z^0

¹La largeur, notée Γ , est proportionnelle à l'inverse du temps de vie moyen τ : $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$.

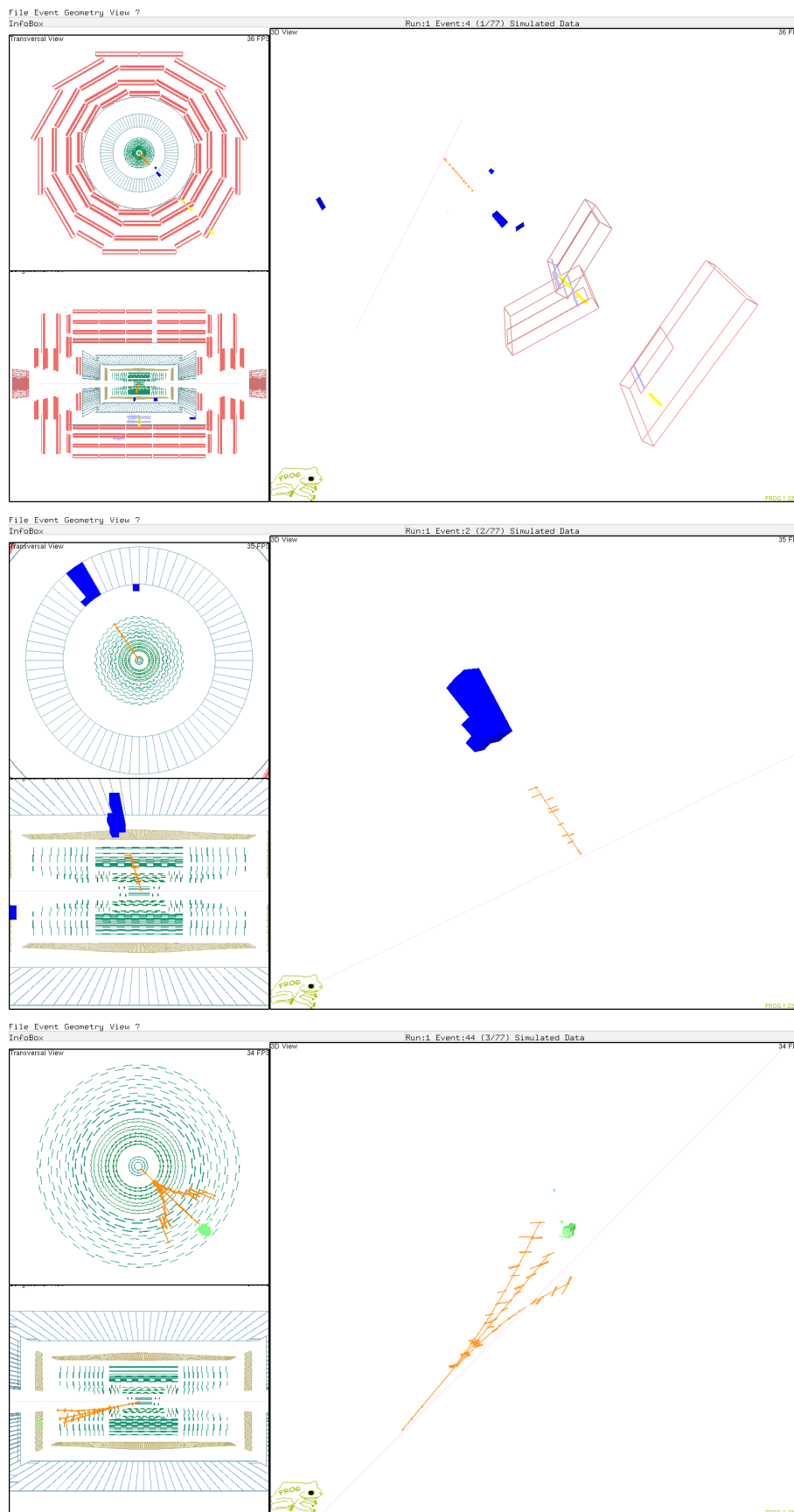
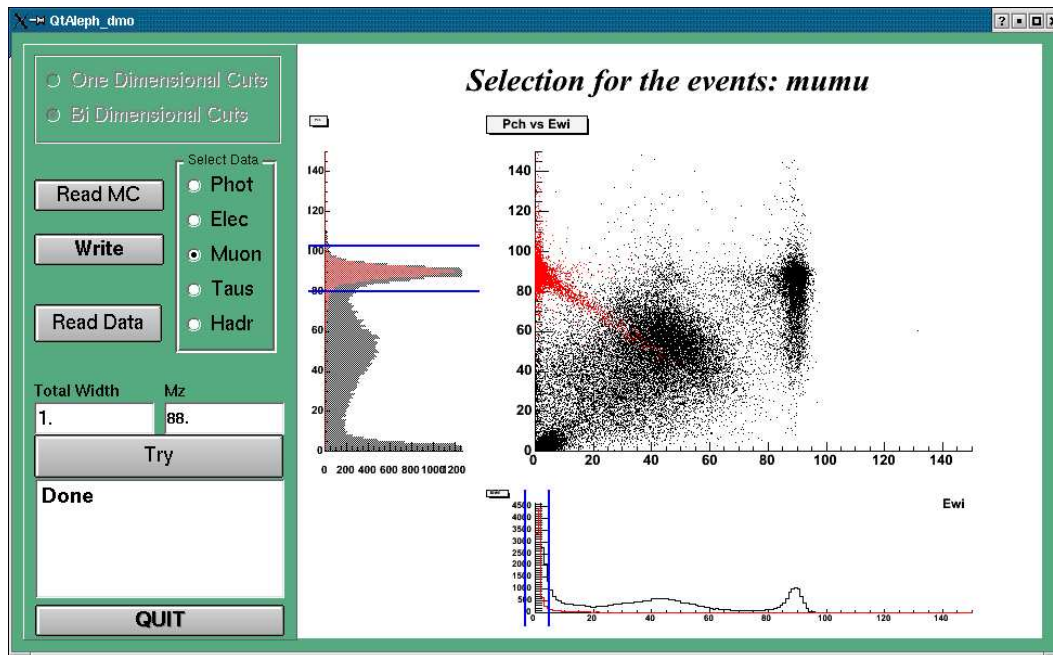
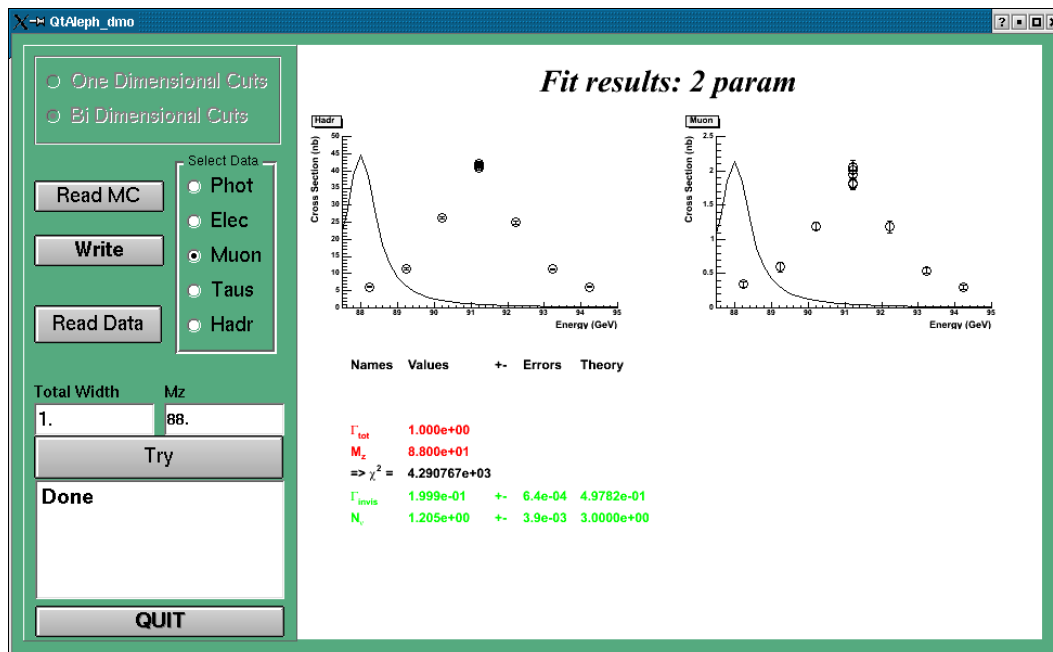


FIG. 3.2 – Visualisation de trois événements avec FROG.



(a) Sélection des événements.



(b) Ajustement des paramètres.

FIG. 3.3 – Utilisation de QTALEPH.

3.3 Mesure de la masse et de la largeur du boson Z^0

Caractérisation des événements

Les fichiers contiennent des simulations d'évènements dans le détecteur CMS (single particle : évènement à une particule ; real data : simulations de collisions). L'objectif est d'identifier les événements qu'ils contiennent à l'aide des informations issues des différents sous-détecteurs. Le tableau de la page suivante est à votre disposition pour noter les valeurs des diverses quantités observées dans FROG.

Mesures

Le programme d'analyse QTALEPH vous fournit la masse et la largeur du boson Z^0 selon la procédure décrite dans la section précédente. Utilisez le tableau ci-dessous pour noter les valeurs obtenues. Comparez celles-ci aux valeurs tabulées.

Canal	NCH	PCH	EWI	EHA
e^+e^-				
$\mu^+\mu^-$				
$\tau^+\tau^-$				
$q\bar{q}$				

	m_Z (en GeV/c^2)	Γ_Z (en GeV/c^2)	χ^2
vos mesures			
valeurs tabulées			-

Remarque

La première mesure de la masse du Z^0 réalisée en 1989 à l'aide des données d'ALEPH avait une incertitude bien plus large que celle que vous avez obtenue. Pour vous rendre compte de la précision de vos mesures, essayez de mesurer à l'aide d'une règle la longueur d'une feuille de papier A4. Votre mesure de la feuille de papier est bien moins précise que celle de la masse du boson Z^0 !

N° evt	# Track	#ECAL/HCAL	# Muons	Type
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				

29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				

Annexe A

Ligne du temps de la physique des particules

- 1873 MAXWELL : unification de l'électricité et du magnétisme (électromagnétisme)
- 1895 ROENTGEN : découverte des rayons X (photons de hautes énergies)
- 1898 THOMSON : découverte de l'électron et mesure de sa masse
- 1900 PLANCK : quantification de la radiation (\hbar)
- 1905 EINSTEIN : les quanta de lumière sont des particules (photons) se propageant à la vitesse c
- 1911 RUTHERFORD : déduction de la présence de noyaux à partir de diffusion α
- 1913 BOHR : modèle planétaire de l'atome
- 1919 RUTHERFORD : évidence d'un proton isolé
- 1923 COMPTON : théorie des photons comme particules
- 1924 DE BROGLIE : comportement ondulatoire de l'électron
- 1926 SHRÖDINGER : équation d'onde quantique
- 1928 DIRAC : combinaison de la mécanique quantique et de la relativité pour décrire l'électron
- 1930 PAULI : suggestion de la présence du neutrino pour expliquer le déficit d'énergie dans les désintégrations β
- 1932 ANDERSON : découverte du positron
- 1937 observation d'une particule d'une masse de $200m_e$ dans les rayons cosmiques (muon)
- 1947 BERKELEY : synchro-cyclotron produit les premiers pions
- 1949 découverte du méson K^+
- 1951 observation du Λ^0 et du K^0 dans les rayons cosmiques
- 1952 GLASER : chambre à bulles à Brookhaven \rightarrow particules étranges
- 1954 YANG et MILLS : théories de jauge
- 1957-59 SCHWINGER, BLUDMAN, GLASHOW : proposent l'existence des bosons W^\pm
- 1962 LEDERMAN, STEINBERGER, SCHWARTZ : isolent le ν_e du ν_μ
- 1964 GELL-MANN, ZWEIG : proposent l'existence des 3 quarks pour expliquer les hadrons (up, down, strange)
- 1964 CRONIN, FITCH : observation d'une violation de CP dans la désintégration du K^0

- 1967 GLASHOW, WEINBERG et SALAM : unification des interactions faible et électromagnétique (théorie électrofaible)
- 1968 FRIEDMANN, KENDALL, TAYLOR : observation d'une sous-structure dans le proton (quarks ?)
- 1970 GLASHOW, ILIOPOULOS, MAIANI : reconnaissent l'importance d'un 4ème quark (charm)
- 1973 théorie de jauge pour l'interaction forte (QCD)
- 1973 KOBAYASHI, MASKAWA : mélange des quarks → matrice CKM → explication possible d'une violation de CP
- 1974 RICHTER, TING : découverte du J/ψ (état lié $c\bar{c}$)
- 1976 PERL : découverte du τ au SLAC
- 1977 LEDERMAN : découverte du Υ (état lié $b\bar{b}$) au SLAC
- 1979 évidence de l'existence des gluons à DESY
- 1983 RUBBIA, VAN DER MEER : observation des bosons W^\pm et Z^0 au CERN
- 1989 LEP et SLC : mesure de la largeur de $Z^0 \rightarrow 3$ générations de neutrinos légers
- 1995 CDF et D0 (Fermilab) : découverte du quark top
- 1998 SuperKamiokaNDE : observation d'oscillations de neutrinos
- 2000 DONUT (Fermilab) : confirmation directe de l'existence du ν_τ , SNO : confirmation du déficit de neutrinos solaires dû aux oscillations → masse des neutrinos
- 2001 Belle et BaBar : observent une violation de CP dans la désintégration du B^0
- 2009 Démarrage du LHC au CERN

Annexe B

Glossaire

accélération : taux auquel la vitesse d'un objet se modifie au cours du temps, soit en direction, soit en intensité.

ALEPH (Apparatus for LEP PHysics) : un des quatre détecteurs du LEP au CERN.

alpha (α) : noyau d'hélium, composé de deux protons et deux neutrons.

antiparticule : à toute particule est associée une particule de même masse, de même spin mais de charge électrique et autres nombres quantiques opposés. Exemples : positron, antiproton, antineutron, antiquark.

baryon (du grec *barus*, lourd, pesant) : particule hadronique de spin demi-entier composée de trois quarks. Les protons et les neutrons sont les plus légers des baryons.

bêta (β) (désintégration β) : désintégration d'une particule par émission d'un électron et d'un antineutrino.

boson : particule (élémentaire ou composite) de spin entier (0,1,2,...), n'obéissant pas au principe d'exclusion de Pauli. Les messagers des quatre interactions fondamentales (graviton, photon, gluons, W^\pm , Z^0) sont des bosons élémentaires, appelés **bosons de jauge**. Le Higgs est un boson élémentaire de spin 0.

bottom, beauty, beauté (b) : quark de charge $-1/3$ appartenant à la troisième génération de fermions.

calorimètre : dispositif servant à mesurer l'énergie totale des particules par dissipation de celles-ci dans la matière dense.

centre de masse : référentiel utilisé pour décrire les collisions entre particules.

CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) : laboratoire européen de physique des particules, proche de Genève, où ont été construits plusieurs accélérateurs et collisionneurs de particules.

chambre à bulles : instrument permettant de photographier les trajectoires des particules grâce aux bulles qu'elles engendrent dans un liquide ayant subi une brusque détente.

chambre proportionnelle multifils : instrument utilisé pour mesurer des coordonnées des trajectoires des particules.

champ : une théorie des champs sert à décrire l'organisation, dans l'espace et le temps, des forces agissant entre des objets matériels. Les particules relèvent de théories des champs quantiques.

charge : nombre spécifiant une propriété d'une particule, sa sensibilité à une interaction. On l'exprime en général par un nombre quantique. Exemples : la charge électrique, le nombre baryonique, le nombre leptonique, l'isospin, l'étrangeté.

charme (c) : quark de charge $2/3$, appartenant à la deuxième génération de fermions.

chromodynamique quantique (QCD) : théorie des champs décrivant l'interaction de couleur s'exerçant entre les quarks.

CMS (Compact Muon Solenoid) : un des 4 détecteurs du LHC au CERN, avec lequel l'UCL collabore.

collisionneur : instrument faisant interagir deux faisceaux de particules circulant en sens inverse. Un collisionneur peut être soit linéaire, soit circulaire.

confinement : mécanisme qui enferme les quarks et les gluons au sein des hadrons.

constante de couplage : nombre caractérisant l'intensité d'une interaction.

couleur : "charge généralisée" portée par un quark et assurant sa liaison avec d'autres quarks.

cyclotron : accélérateur circulaire de particules.

DESY (Deutsches Elektron SYnchrotron) : laboratoire, situé à Hambourg (Allemagne) possédant plusieurs accélérateurs et collisionneurs.

down (d) : quark de charge $-1/3$ de la première génération de fermions.

électrodynamique quantique (QED) : théorie des champs décrivant les interactions électrique et magnétique.

électrofaible (théorie) : la théorie électrofaible rassemble l'électrodynamique quantique et la théorie de l'interaction faible.

électronvolt (eV) : unité d'énergie correspondant à l'énergie d'un électron initialement au repos et ayant traversé un champ électrique de 1 volt ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

étrangeté : saveur du quark s . L'étrangeté vaut -1 pour une particule contenant un quark s et $+1$ si elle contient un antiquark \bar{s} . Dire d'une particule qu'elle est étrange revient à dire qu'elle a une étrangeté non nulle.

événement : ensemble des données collectées dans un détecteur lors d'une collision.

faible (interaction) : forme d'interaction concernant tous les fermions et caractérisée par l'échange de bosons W^\pm ou Z^0 . Elle se manifeste notamment dans la désintégration β .

fermion : particule de spin demi-entier ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) obéissant au principe d'exclusion de Pauli. Les quarks et les leptons sont des fermions fondamentaux.

forte (interaction) : elle assure la liaison entre quarks et maintient ensemble les protons et les neutrons à l'intérieur du noyau. Elle concerne tous les hadrons et est liée à la couleur.

gerbe électromagnétique : processus par lequel un électron ou un photon dissipe toute son énergie dans la matière sous forme d'électrons et de positrons.

gluon : boson médiateur de l'interaction forte, de masse nulle. Il en existe huit espèces.

gravitation : interaction toujours attractive, de longue portée mais d'intensité très faible. Elle concerne toutes les particules.

graviton : boson médiateur de l'interaction gravitationnelle.

GUT (Grand Unified Theory) : théorie de grande unification censée rassembler les trois interactions fondamentales, forte, faible et électromagnétique.

- hadron** : particule composée de quarks et sensible à l'interaction forte.
- hadronisation** : manifestation de la force de couleur qui empêche un quark ou un gluon d'apparaître de façon isolée mais plutôt sous la forme de hadrons.
- Higgs** (boson de) : particule hypothétique issue d'un mécanisme censé engendrer la masse des particules élémentaires, le mécanisme de Higgs.
- ion** : atome ayant acquis ou perdu un ou plusieurs électrons.
- ionisation** : mécanisme de formation des ions, notamment par l'action d'une particule en mouvement.
- isospin** : nombre quantique associé à une symétrie entre les hadrons et qui permet de les classer en multiplets. Par exemple, le proton et le neutron appartiennent à un doublet d'isospin.
- jet** : giclée de particules presque parallèles produites par l'hadronisation d'un quark ou d'un gluon.
- largeur** (Γ) : $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$ où τ est le temps de vie moyen. Par conséquent, les particules stables ont une largeur nulle.
- LEP** (Large Electron-Positron collider) : collisionneur électron-positron du CERN en fonctionnement entre 1989 et 2000.
- lepton** (du grec *leptos*, mince, grêle) : fermion insensible à l'interaction forte. Il existe des leptons chargés (électron, muon, tau) et des leptons neutres (neutrinos).
- LHC** (Large Hadron Collider) : collisionneur proton-proton du CERN et mis en fonctionnement en 2009.
- méson** : particule composée d'un quark et d'un antiquark de spin nul ou entier.
- Modèle Standard** : théorie décrivant les interactions entre particules à l'exception de la gravitation.
- moment magnétique** : caractéristique magnétique qui rend une particule semblable à un petit aimant.
- multiplet** : ensemble de particules liées par des propriétés de symétrie communes.
- muon** (μ) : lepton chargé, sorte d'électron de masse plus élevée ($m_\mu = 105 \text{ MeV}$) ayant un temps de vie de $2.2 \mu\text{s}$.
- neutrino** (ν) : lepton neutre, sensible seulement à l'interaction faible. Il existe un neutrino par saveur leptonique : ν_e , ν_μ et ν_τ .
- neutron** (n) : baryon neutre composé de deux quark d et d'un quark u . L'un des deux constituants du noyau atomique.
- nombre baryonique** : nombre quantique associé aux quarks et aux baryons. Le nombre baryonique vaut $+1/3$ pour un quark et $-1/3$ pour un antiquark. Par conséquent, un baryon possède un nombre baryonique de $+1$ alors qu'un méson possède un nombre baryonique nul.
- nombre leptonique** : charge "généralisée" traduisant la sensibilité à l'interaction faible. Un lepton porte une charge leptonique $+1$ alors qu'un antilepton porte une charge leptonique -1 . Toutes les autres particules portent une charge leptonique nulle.
- nombre quantique** : nombre caractérisant une propriété quantique. Exemples : charge électrique, spin, étrangeté.

noyau : partie centrale et massive de l'atome, de charge positive et constituée de protons et de neutrons.

nucléon : constituant du noyau, proton ou neutron.

parton : constituant des hadrons, quark ou gluon.

photon (γ) : médiateur de l'interaction électromagnétique, de masse et charge électrique nulles.

pion (π) : le pion est un méson de spin 0. Il existe sous les formes π^+ , π^- et π^0 .

positron (e^+) : antiparticule de l'électron.

principe d'exclusion de Pauli : principe spécifiant que deux fermions ne peuvent se trouver dans le même état quantique.

proton (p) : baryon chargé composé de deux quarks u et un quark d . Un des constituants du noyau atomique.

quantité de mouvement (ou **impulsion**) : $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

Pour des vitesses faibles comparées à celle de la lumière, la quantité de mouvement est égale au produit de la masse de l'objet et de sa vitesse.

quark (q) : fermion sensible à l'interaction forte, faible et électromagnétique, de charge $+2/3$ ou $-1/3$.

saveur : **saveur des quarks** : propriété des quarks permettant de distinguer les six catégories (u, d, s, c, t, b); **saveur des leptons** : propriété des leptons permettant de distinguer les trois familles : e, μ, τ .

spin : moment angulaire intrinsèque des particules. Propriété interne des particules, analogue mais non identique au concept habituel de "rotation sur soi-même".

tau (τ^-) : lepton chargé, sorte d'électron de masse beaucoup plus élevée ($m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$) ayant un temps de vie de 0.29 ps.

Tevatron : collisionneur proton-antiproton du Fermilab (États-Unis).

top, thruth (t) : quark de charge $+2/3$ appartenant à la troisième génération de fermions.

up (u) : quark de charge $+2/3$ appartenant à la première génération de fermions.

vertex : expérimentalement, le **vertex primaire** désigne le lieu de la collision dans un collisionneur de particules alors que le **vertex secondaire** est le point de désintégration d'une particule à temps de vie très bref.

Bibliographie

Documents pédagogiques

- [1] Sous l'atome les particules, E. Klein, Flammarion poche (1993).
- [2] L'univers des particules, M. Crozon, Seuil Point Sciences 134 (1999).
- [3] The particle adventure, A. Erzberger, M. Barnett et H. Quinn, Lawrence Berkeley Laboratory, <http://particleadventure.org>.
- [4] L'aventure des particules, A. Erzberger, M. Barnett et H. Quinn, Lawrence Berkeley Laboratory (traduit de l'anglais par C. Augier, H. Kérec et C. Helft (LAL, France)), <http://www.lal.in2p3.fr/CPEP/adventure.html>.
- [5] Hands on Particle Physics, European Masterclasses for High School Students, <http://lxsa.physik.uni-bonn.de/outreach/wyp/index.htm>

Laboratoires et organisations

- [6] CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire), Genève, Suisse, <http://www.cern.ch>
- [7] DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), Hambourg, Allemagne, <http://www.desy.de>
- [8] Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory), Chicago, USA, <http://www.fnal.gov>
- [9] SLAC (Stanford Linear Accelerator Laboratory), Californie, USA, <http://www.slac.stanford.edu>
- [10] Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov>
- [11] Nobel *e*-museum, <http://www.nobel.se>

Programme

- [12] FROG (the Fast and Realistic OpenGL Displayer), Quertenmont L. and Roberfroid V., 2009, arXiv :hep-ex/09012718v1 , CMS Note 2009/007
<http://projects.hepforge.org/frog/>

Une partie des illustrations de ce dossier a été réalisée par les auteurs eux-mêmes et par des collègues coopérants. D'autres ont été adaptées à partir d'images et de graphiques issus des divers sites internet repris ci-dessus.

Les auteurs souhaitent remercier tous ceux qui ont consacré une partie de leur temps à la relecture de ce dossier.

Ce dossier a été réalisé par le
Centre de Physique de Particules et Phénoménologie (CP3)
de la faculté des sciences de l'UCL :

<http://cp3.phys.ucl.ac.be>

et accompagne l'atelier
“*Master Classes en physique*”
présenté lors du Printemps des Sciences,
organisé à l'UCL par l'antenne

ScienceInfuse :

<http://www.uclouvain.be/scienceinfuse.html>

Réalisation du dossier (Mars 2004) : Gwendoline de Hemptinne et
Guillaume Leibenguth
Mise à jour : Lockman Dany et
Nuttens Claude

Mars 2010
