

Physique

Accélérateurs et détecteurs de particules

Michael Ravedoni 5D

TM 2013



Lycée-Collège de la Planta

Table des matières

1	Introduction	5
2	Notions de base	7
2.1	Champ électrique	7
2.2	Champ magnétique	10
2.3	Mouvement d'une particule dans un champ magnétique uniforme	11
2.4	Quantité de mouvement	12
2.5	Masse et énergie relativistes	12
3	Bref historique des accélérateurs	15
3.1	Tube de Crookes et accélérateurs électrostatiques	16
3.2	Générateurs Van De Graaff	16
3.3	Accélérateurs linéaires	18
3.4	Cyclotrons	18
3.5	Synchrotrons	19
3.6	Diagramme de Livingston	20
4	Complexes d'accélérateurs	23
4.1	La chaîne d'accélération du CERN	24
4.2	Les sources de particules	25
4.3	La supraconductivité	26
4.4	Les cavités accélératrices	27
4.5	Les éléments magnétiques de guidage	31
4.6	Les éléments magnétiques de focalisation	33
4.7	Le système de vide	34
5	Bref historique des détecteurs	37
5.1	Détecteurs à visualisation	37
5.1.1	Chambre à brouillard	37
5.1.2	Chambre à bulles	38
5.2	Détecteurs électriques	39
5.2.1	Compteur Geiger-Müller	40
5.2.2	Compteurs proportionnels à fils	41
5.2.3	Détecteur à scintillation	43
5.3	Détecteurs actuels	44
6	Principes physiques liés à l'identification des particules	45
6.1	Déterminer la quantité de mouvement	45
6.2	Déterminer la vitesse	46
6.2.1	Mesurer l'énergie	46
6.2.2	Mesurer le temps de vol	47
6.2.3	Effet Cherenkov	48
6.3	Déterminer la masse	49
6.4	Identification des particules	49

Table des matières

7	Utilité des accélérateurs et des détecteurs	53
7.1	Applications	53
7.2	Recherche scientifique	54
8	Conclusion	57

1 Introduction

Trou noir, matière noire, énergie sombre, Big Bang, expansionnisme, inflation, supersymétrie, théorie des cordes, théorie du tout, échelle de Planck, chromodynamique quantique, modèle standard, fermion, boson, quark, hadrons, lepton, neutrino sont des termes dont la signification vous est peut-être familière ou dont vous ignorez totalement le sens. Quelle que soit votre connaissance sur les modèles et les théories physiques, l'un de ces termes, j'en suis sûr, vous est familier. Si vous en connaissez l'un ou l'autre (ou tous!), c'est qu'ils ont beaucoup fait parler d'eux lors du dernier siècle et encore plus lors de la dernière décennie. Ils sont tous issus du vocabulaire qu'utilise quotidiennement un physicien étudiant la cosmologie, la physique théorique, la mécanique quantique ou la physique des particules.

Tous ces domaines font partie de la physique fondamentale. Comme son nom l'indique, cette branche de la physique s'occupe de comprendre et d'approfondir les phénomènes naturels en mettant en place des théories et des modèles qui les expliquent. Elle s'oppose alors à la physique appliquée qui elle se concentre sur la mise au point de nouveaux objets et l'amélioration de nouvelles techniques. Si ces innovations sont possibles, c'est généralement toujours grâce aux avancées de la physique fondamentale qui offre la matière scientifique à la recherche appliquée pour permettre un développement des technologies.

Les accélérateurs et les détecteurs de particules dont il est question dans ce document permettent de faire avancer cette physique fondamentale. Ils ne sont pas directement destinés à créer de nouvelles théories et modèles, mais sont capables de les confirmer ou de les infirmer expérimentalement.

Afin de mieux comprendre comment se déroulent ces expériences, nous essayerons de saisir quels sont les phénomènes et les mécanismes de base qui permettent de comprendre le fonctionnement d'un accélérateur et d'un détecteur de particules. Après avoir lu ce document, nous devrions donc être capables de saisir les notions physiques de base utiles à la compréhension de ces outils, de peindre le portrait d'un accélérateur puis d'un détecteur, de présenter un bref historique de chacune des machines et d'en montrer leurs utilités et applications. Acceptez-vous le défi ?

Pour se faire, nous commencerons par décrire, dans le chapitre 2, certaines notions physiques de base utiles afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un accélérateur et d'un détecteur.

Nous aborderons ensuite l'une des parties centrales du document dans le chapitre 3 et 4, à savoir les accélérateurs. Nous tenterons, à la suite d'un bref historique, d'approfondir les composants les plus importants constituant un accélérateur. Nous consacrerons plus d'importance au synchrotron puisque c'est lui qui est le plus adapté aujourd'hui aux expériences contemporaines. Le LHC sera alors de la partie pour illustrer, s'il en est besoin, certains points du chapitre.

Nous dédierons l'autre partie centrale aux détecteurs dans le chapitre 5 et 6. Comme pour les accélérateurs, nous exposerons quelques détecteurs importants que l'Histoire a retenus pour avoir participé à l'évolution technologique de ces derniers dans un bref historique. Nous parlerons ensuite des principes physiques propres à tous les détecteurs qui permettent d'identifier les particules issues des collisions elles-mêmes créées par les accélérateurs.

1 Introduction

Pour finir, dans le chapitre 7, nous parlerons des applications de tels outils dans l'industrie, la médecine et la science. Nous chercherons à savoir si la construction de ces machines se justifie au-delà de leur utilité première.

2 Notions de base

La technologie utilisée dans les accélérateurs s'appuie essentiellement sur l'électromagnétisme¹ et la relativité découverts au XIXe siècle et au XXe siècle. C'est pourquoi il est important de bien saisir certaines notions de base telles que le champ électrique ou magnétique. Lorsque des particules circulant dans un accélérateur atteignent des vitesses proches de celle de la lumière, celles-ci ne se comportent plus de la même façon. Elles adoptent un comportement dit « relativiste » qu'il est également important de saisir.

2.1 Champ électrique

Les particules circulant dans un accélérateur sont chargées soit positivement, soit négativement. C'est grâce à un champ électrique qu'une particule est accélérée. En effet, le champ électrique agit sur les particules chargées, comme le champ gravitationnel agit sur les particules massives en les accélérant. Pour définir le champ électrique en un point de l'espace, on y place une petite charge d'essai q et on regarde la force (appelée force de Coulomb) \vec{F} qui s'exerce sur elle, due à la présence des charges électriques environnantes qui créent le champ électrique. Le champ électrique \vec{E} en ce point est défini comme la force \vec{F} par unité de charge q :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.1)$$

Le champ électrique est une grandeur vectorielle. L'unité SI de champ électrique est le newton par coulomb (N/C). La charge d'essai doit être petite pour qu'on puisse faire l'hypothèse qu'elle ne perturbe pas elle-même le champ électrique environnant. \vec{E} et \vec{F} sont de même direction. Ils ont le même sens si q est positif et un sens contraire si q est négatif (Figure 2.1).

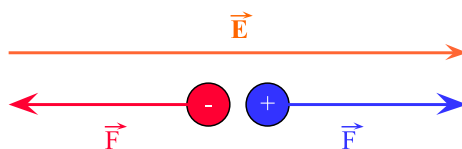


FIGURE 2.1: \vec{F} a le même sens que \vec{E} si la charge d'essai q est positive et un sens inverse si q est négative.

Le champ électrique créé par une charge Q , tout comme la force de Coulomb, est radial. Il s'éloigne de la charge Q si celle-ci est positive et se dirige vers celle-ci si elle est négative. Pour le comprendre, on place une charge d'essai positive q dans le champ. En chaque point

1. Science qui décrit les lois des phénomènes électriques et magnétiques, et plus généralement les phénomènes optiques et chimiques. Elle fut fondée au cours du XIXe siècle. C'est au physicien écossais JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879) que l'on doit la première synthèse théorique de l'électromagnétisme, sous la forme des équations qui portent son nom.

du champ, la charge d'essai q est repoussée par la charge Q , la direction de la force étant la droite reliant les deux charges. Comme le vecteur champ \vec{E} a la même direction et le même sens que la force électrostatique \vec{F} subie par une charge Q positive, les lignes de champ sont des lignes droites issues de la charge Q (Figure 2.2). Si, au contraire, la charge Q est négative, les lignes de champ convergeront vers la charge.

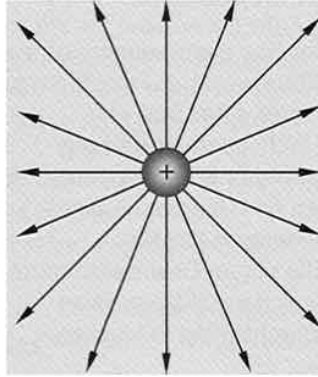


FIGURE 2.2: Champ électrique près d'une charge positive Q . Dans le cas d'une charge Q négative, seule l'orientation des lignes de champ change.

De la définition du champ électrique, il résulte que la force \vec{F} subie par n'importe quelle charge q placée en un point de l'espace où règne un champ électrique \vec{E} , est donnée par :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.2)$$

Lorsqu'on désire étudier le mouvement d'une particule de charge q et de masse m dans un champ électrique \vec{E} , il suffit tout simplement d'appliquer la 2^e loi de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$, et d'exprimer le fait que la force est celle due au champ électrique, $\vec{F} = q\vec{E}$, ce qui donne :

$$q\vec{E} = m\vec{a} \Leftrightarrow \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E} \quad (2.3)$$

Une fois l'accélération déterminée à l'aide de la relation ci-dessus, on est ramené à un problème de cinématique. Remarquons que pour appliquer la 2^e loi de Newton, la force qui y intervient est la force résultante qui s'exerce sur la particule et qu'en toute rigueur il aurait fallu tenir compte du poids de la particule, $m\vec{g}$. Toutefois, les particules chargées ont généralement une masse tellement petite que le poids peut être négligé. C'est le cas pour une charge élémentaire telle que l'électron ou le proton. Pour s'en convaincre, calculons l'intensité des deux forces mises en jeu dans le cas d'un électron, qui a une masse de $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, et est accéléré par un champ de $2 \cdot 10^4$ N/C :

$$\begin{aligned} mg &= (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) \cdot (9,81 \text{ m/s}^2) = 8,9 \cdot 10^{-30} \text{ N} \\ qE &= (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (2 \cdot 10^4 \text{ N/C}) = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ N} \end{aligned}$$

$$\frac{mg}{qE} \approx 3 \cdot 10^{-15}$$

$m\vec{g}$ est donc bien négligeable par rapport à $q\vec{E}$. Ceci reste vrai dans le cas du proton dont la masse est à peu près 2 000 fois plus grande que celle de l'électron.

Nous avons vu, avec l'équation (2.2), que lorsque l'on place une particule de charge q dans un champ électrique \vec{E} , le champ électrique exerce une force \vec{F} . La particule va alors se déplacer. Lorsqu'une force déplace un corps sur une distance r , on dit que cette force effectue un travail. Le travail W d'une force \vec{F} agissant sur une distance \vec{r} d'un point A à un point B s'exprime comme la somme du produit scalaire entre la force et la distance séparant le point A du point B : $W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$ (voir figure 2.3). Ainsi, le travail W de la force électrique \vec{F} qui s'exerce sur une particule de charge q qui se déplace de \vec{r} d'un point A à un point B s'écrit :

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (2.4)$$

On peut démontrer que le travail $W_{A \rightarrow B}$ ne dépend pas du chemin suivi par la particule q pour aller de A à B. Le travail a la même valeur quel que soit le trajet emprunté par la charge q soumise à la force électrique. On dit alors que la force électrique est une force conservative.

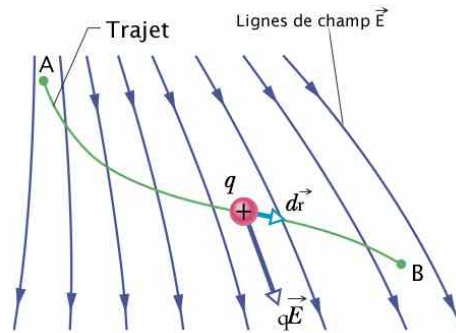


FIGURE 2.3: Une particule de charge q se déplace du point A au point B dans un champ électrique \vec{E} .

On définit la tension électrique U (s'exprimant en Volts) entre les points A et B comme la différence de potentiel entre ces points ($V_B - V_A = \Delta V$). On l'écrit aussi comme la somme du produit scalaire entre un champ électrique \vec{E} et une distance \vec{r} :

$$U = \Delta V = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (2.5)$$

En assemblant l'équation 2.4 et 2.5, on obtient une équation plus générale du travail W d'une particule de charge q dans un champ électrique \vec{E} . Elle s'écrit comme le produit de la charge et la différence de potentiel entre deux points de l'espace :

$$W = \Delta U = qU = q\Delta V \quad (2.6)$$

Considérons à présent un champ électrique \vec{E} uniforme, ce qui veut dire que le champ est constant, créé par une différence de potentiel ΔV entre deux plaques métalliques situées à une distance d l'une de l'autre (voir figure 2.4). L'équation du travail dans un champ uniforme \vec{E} devient :

$$W = q\Delta V = qEd \cos(\varphi) \quad (2.7)$$

Lorsqu'une charge va d'une plaque vers une autre, sa trajectoire est dans la majorité des cas rectiligne. L'angle φ entre sa trajectoire et le champ uniforme est alors nul : $\cos(0) = 1$. L'intensité du champ électrique est donc donnée par :

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (2.8)$$

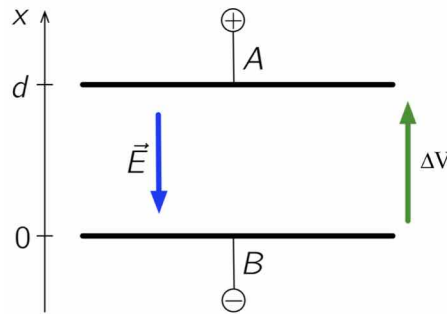


FIGURE 2.4: Tension entre deux plaques métalliques plongées dans un champ uniforme \vec{E}

2.2 Champ magnétique

Si un champ électrique permet d'accélérer une particule, un champ magnétique quant à lui permet de la diriger. Un champ magnétique est créé par un aimant. Il a pour effet de courber la trajectoire d'une particule chargée.

Examinons maintenant un faisceau² d'électrons qui traverse une région baignée par un champ magnétique. Si le faisceau d'électrons entre parallèlement au champ magnétique, on constate qu'il n'est pas dévié ; le mouvement des électrons reste rectiligne et uniforme. Au contraire, s'il entre perpendiculairement au champ magnétique, on constate que la trajectoire du faisceau décrit un cercle. La force \vec{F} qui dévie ces particules s'appelle force de Lorentz. Cette force subie par une particule de charge q se déplaçant avec la vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} s'écrit :

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.9)$$

La force de Lorentz est à tout instant perpendiculaire à la trajectoire de la particule chargée. Son travail est nul et ne contribue pas à la variation de l'énergie cinétique de la particule chargée. Il n'y a pas d'énergie potentielle associée à cette force. Pour illustrer cela d'une autre façon, prenons l'exemple d'un caillou attaché au bout d'une solide corde que nous faisons tourner en rond sur une surface horizontale lisse. La force \vec{F} qui fait changer continuellement la direction du caillou correspond à la tension de la corde qui est toujours dirigée vers le centre du cercle.

2. Un faisceau de particules est un ensemble de particules qui se propagent globalement dans une même direction. Dans un accélérateur, les particules sont groupées en paquets pouvant contenir des milliards de particules. Chaque paquet mesure ordinairement plusieurs centimètres de long et seulement quelques micromètres de large. La physique qui traite de ses propriétés et de son transport est la dynamique des faisceaux.

2.3 Mouvement d'une particule dans un champ magnétique uniforme

Dès qu'une particule chargée pénètre dans une zone où règne un champ magnétique, avec une vitesse initiale, elle est soumise à la force de Lorentz (équation 2.9). Cette force s'exprime sous forme d'un produit vectoriel. Sachant que la norme du produit vectoriel $\vec{a} \times \vec{b}$ peut s'écrire $ab \sin(\phi)$, on peut exprimer l'intensité de la force de Lorentz comme :

$$F = qvB \sin(\phi), \quad (2.10)$$

où ϕ est l'angle entre \vec{v} et \vec{B} .

La force de Lorentz est donc nulle si la vitesse initiale \vec{v}_0 est parallèle au champ magnétique ($\phi = 0^\circ$). Dans ce cas, la direction de la particule de charge q n'est pas modifiée. (Figure 2.5).

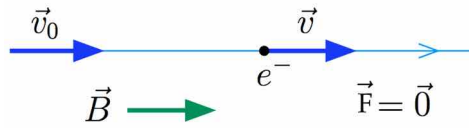


FIGURE 2.5: Le faisceau d'électrons n'est pas dévié si $B = 0$ ou si $\vec{B} \parallel \vec{v}_0$.

Maintenant si \vec{v}_0 est perpendiculaire à \vec{B} ($\phi = 90^\circ$), la particule de charge q aura un mouvement uniforme et circulaire (Figure 2.6). Le sens du mouvement change lorsqu'on inverse le sens du champ magnétique.

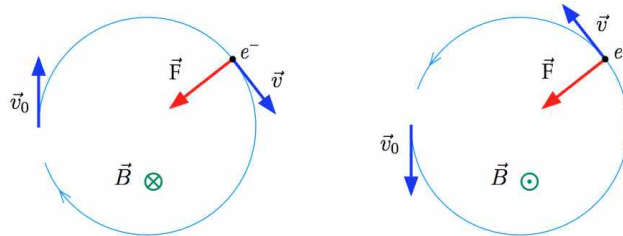


FIGURE 2.6: La trajectoire du faisceau est un cercle si $\vec{B} \perp \vec{v}_0$.

A présent, déterminons les paramètres qui caractérisent le mouvement circulaire d'une particule de charge q et de masse m se déplaçant à une vitesse \vec{v} perpendiculairement à un champ magnétique uniforme \vec{B} . D'après la deuxième loi de Newton, le mouvement circulaire est décrit par $F = m \frac{v^2}{r}$. En remplaçant F par l'équation 2.10, on trouve le rayon r :

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \Leftrightarrow r = \frac{mv}{qB} \quad (2.11)$$

On constate que r diminue si B augmente et r augmente si v augmente.

La période T (durée d'une révolution complète) est déterminée par la circonférence sur la vitesse :

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (2.12)$$

La fréquence f (nombre de révolution par unité de temps) est égale à :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (2.13)$$

On remarque que les quantités T et f ne dépendent pas de la vitesse de la particule (pourvu qu'elle soit bien inférieure à celle de la lumière). Toutefois, toutes les particules ayant le même rapport $\frac{q}{m}$ prennent le même temps pour effectuer une révolution.

2.4 Quantité de mouvement

La quantité de mouvement permet d'évaluer l'état de mouvement d'un objet. Considérons un corps, de masse m , animé d'une vitesse \vec{v} , petite devant celle de la lumière. La quantité \vec{p} de mouvement de l'objet est par définition la grandeur vectorielle :

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (2.14)$$

L'intérêt de cette grandeur est que, contrairement à la masse ou à la vitesse, elle se conserve au cours du temps, pour autant qu'aucune force extérieure n'agit sur le corps.

C'est ce que l'on observe lors d'une collision par exemple. Deux boules A et B respectivement de vitesses \vec{v}_A et \vec{v}_B et de masses m_A et m_B se tapent l'une dans l'autre. Si aucune force extérieure n'agit sur le système, la quantité de mouvement totale \vec{P}_{tot} reste la même avant et après le choc (la quantité de mouvement avant le choc étant \vec{P} et celle d'après le choc \vec{P}') :

$$\vec{P} = \vec{P}' \Leftrightarrow \vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{p}_A' + \vec{p}_B' \Leftrightarrow m_A\vec{v}_A + m_B\vec{v}_B = m_A\vec{v}_A' + m_B\vec{v}_B'$$

La quantité de mouvement est une grandeur fondamentale en physique des particules ou en relativité ; deux domaines dans lesquels la masse ne se conserve pas lorsque la vitesse est proche de celle de la lumière (lorsqu'on accélère des particules, par exemple) (voir section 2.5). Nous devons alors modifier l'expression classique de la quantité de mouvement puisqu'elle ne permet pas de préserver la conservation de la quantité de mouvement sous une transformation de Lorentz. Il faut alors lui ajouter le facteur de Lorentz qui n'est autre que $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ où $\beta = \frac{v}{c}$ et où c est la vitesse de la lumière dans le vide. L'expression relativiste de la quantité de mouvement devient alors :

$$\vec{p} = \gamma m\vec{v} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.15)$$

2.5 Masse et énergie relativistes

Selon la théorie de la relativité restreinte³, aucune particule ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. En revanche, l'énergie que peut atteindre une particule est illimitée. Dans un accélérateur, les particules circulent normalement à une vitesse

3. Théorie élaborée par ALBERT EINSTEIN (1879-1955) en 1905, qui introduit le concept d'espace-temps en remplacement des concepts jusqu'alors séparés d'espace et de temps. Elle a comme conséquence l'équivalence de la masse et de l'énergie. Une particule est dite « relativiste » si sa vitesse n'est pas négligeable devant celle de la lumière.

très proche de celle de la lumière (voir figure 2.7). Ainsi, la quantité d'énergie varie beaucoup, alors que la vitesse stagne juste en dessous de celle de la lumière. Dans le LHC par exemple, les particules se déplacent à 0,999997828 fois la vitesse de la lumière au moment de l'injection (énergie = 450 GeV) et à 0,999999991 fois la vitesse de la lumière à énergie maximale (énergie = 7 TeV). Pour se simplifier la vie, en physique des particules, on ne se réfère généralement pas à la vitesse, mais plutôt à l'énergie d'une particule. [15, p.4]

À l'échelle humaine, le kilogramme (kg) et le joule (J) sont des unités bien adaptées pour mesurer des masses et des énergies. Ça n'est cependant pas le cas dans le monde des particules. Par exemple, les masses de l'électron et du proton exprimées en *kg* sont ridiculement faibles, respectivement $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg et $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Cela va de même pour l'énergie.

Qu'est ce qu'un électron-volt ? Pour éviter d'avoir en permanence à gérer des grandeurs aussi petites, il est d'usage d'utiliser d'autres unités basées sur l'électron-volt. Un électron-volt est l'énergie cinétique d'un électron (de charge électrique $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C) accéléré par une différence de potentiel de 1 V :

$$1 \text{ eV} = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Cette définition découle de l'équation 2.6 qui elle-même découle de l'équation 2.2 ($W = q\Delta V$).

D'après la célèbre formule d'Einstein ($E_0 = mc^2$), la masse peut se transformer en énergie et inversement. Une quantité exprimée en $\frac{eV}{c^2}$ est donc une masse. On s'aperçoit cependant qu'une masse exprimée en $\frac{eV}{c^2}$ est très petite par rapport aux masses mesurées expérimentalement ($m_e = 511000 \text{ eV}$). On parlera donc le plus souvent de MeV, (un million d'eV), de GeV, (un milliard d'eV) voire de TeV, (mille milliards d'eV) en divisant ou non par le facteur c^2 selon que l'on parle de masse ou d'énergie. On a donc : $m_e = 0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ et $m_p = 938 \frac{\text{MeV}}{c^2}$. Par convention, on omet généralement d'écrire c^2 dans le cas des masses, qui sont alors exprimées en MeV ou TeV.

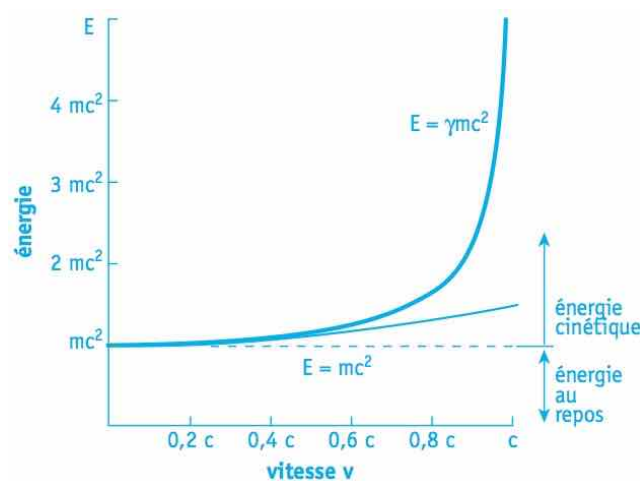


FIGURE 2.7: Rapport entre énergie cinétique et vitesse

2 Notions de base

L'équation $E_0 = mc^2$ donne ce qu'on appelle l'énergie au repos E_0 qui est associée à l'objet de masse m , indépendamment du fait qu'il se déplace ou non. Si l'objet se déplace, on lui ajoute une énergie cinétique E_{cin} . Si l'objet a une énergie potentielle égale à zéro, alors son énergie totale E_{tot} est la somme de l'énergie au repos et de l'énergie cinétique :

$$E_{tot} = E_0 + E_{cin} = mc^2 + E_{cin} \quad (2.16)$$

Bien que nous n'allons pas le prouver, l'énergie totale E_{tot} s'exprime également par :

$$E_{tot} = \gamma mc^2 \quad (2.17)$$

Ainsi, l'énergie cinétique emmagasinée par un corps en mouvement dut aussi être redéfinie. L'expression classique de l'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ étant bien adaptée pour de basses vitesses, trouvons maintenant l'expression de l'énergie cinétique qui est correcte pour toutes les vitesses, y compris des vitesses proches de c . En utilisant les équations 2.16 et 2.17 on peut redéfinir l'expression de l'énergie cinétique comme :

$$E_{cin} = E_{tot} - E_0 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2 \quad (2.18)$$

Pour être plus précis à des vitesses qui s'approchent de celle de la lumière, nous devons prendre en compte les facteurs $\beta = \frac{v}{c}$ et γ . La physique classique constitue une approximation de la physique relativiste lorsque $v \ll c$ (dans ce cas $\beta \rightarrow 0$ et $\gamma \rightarrow 1$). β est donc toujours compris entre 0 et 1 et γ entre 1 et $+\infty$. Une particule est dite relativiste lorsque $\beta > \frac{1}{10}$.

Finalement, l'énergie totale E_{tot} et la quantité de mouvement \vec{p} d'une particule de masse m sont liées par l'équation :

$$E_{tot}^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (2.19)$$

3 Bref historique des accélérateurs

L'accélérateur est une machine complexe et riche en technologies. Il est primordial de saisir qu'il existe plusieurs types d'accélérateurs et que chaque type s'est transformé au fil des années avec la venue de technologies plus avancées. Chaque accélérateur est donc différent de son congénère¹ du même type et/ou de la même époque en fonction des besoins et des possibilités de chaque projet. C'est pourquoi il est difficile de présenter toutes les technologies de chaque type d'accélérateur. Commençons cependant avec un bref historique.

Avant la construction de la première machine capable d'accélérer des particules, les physiciens ont d'abord utilisé les rayons cosmiques² pour sonder la matière. Les rayons cosmiques sont composés de particules à haute énergie³ dont la plupart sont des protons et des atomes d'hydrogène. Le problème avec ces rayons cosmiques est qu'on ne peut les contrôler. On envoyait des ballons contenant des instruments et des filtres photographiques dans les hautes atmosphères en espérant obtenir des résultats viables. Et si l'on voulait étudier un processus donné, à une énergie donnée, il fallait faire le tri parmi beaucoup de photographies pour en trouver quelques-unes contenant l'information souhaitée. Les connaissances théoriques sur le monde des particules avançaient bon train et les physiciens voulurent reproduire les processus engendrés par les rayons cosmiques en laboratoire afin de confirmer la théorie.

1. 105 accélérateurs sont en service à ce jour [50].

2. Particules de haute énergie provenant de l'espace qui produisent de nombreuses particules secondaires en frappant l'atmosphère terrestre.

3. Les plus lentes ont des énergies de 10^9 électronvolts et les plus rapides 10^{20} électronvolts.

3.1 Tube de Crookes et accélérateurs électrostatiques

Historiquement, on considère le tube de Crookes, l'invention de WILLIAM CROOKES, en 1875 comme un accélérateur. On peut schématiser cette invention comme étant une ampoule de verre sous vide contenant une cathode et une anode. Lorsque la tension est suffisamment élevée, une circulation continue d'« éléments » se met en place comme si le circuit était fermé. Plus tard, on modifia un peu l'expérience de Crookes en donnant à l'anode la forme d'un anneau (voir figure 3.1). Ce qui permet aux « éléments » de passer à travers et d'aller taper sur une surface sensible : un point lumineux. Ce principe est à la base de la télévision cathodique ! Ainsi, JOSEPH JOHN THOMPSON découvrit en 1897 que le faisceau émis par la cathode vers l'anode était formé de particules de charges négatives et les baptisa « électrons ».

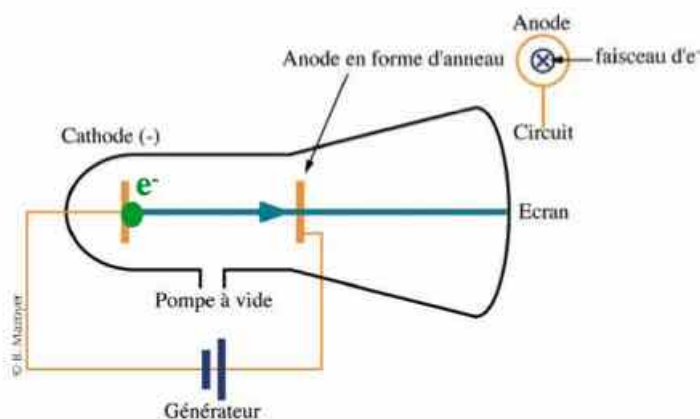


FIGURE 3.1: Tube de Crookes

Cependant, ce n'est qu'en 1931 que l'histoire des accélérateurs commence réellement avec l'invention d'accélérateurs électrostatiques par JOHN DOUGLAS COCKCROFT et ERNEST THOMAS SINTON WALTON. Cette fois-ci, la cathode est chargée par l'intermédiaire d'une chaîne complexe de condensateurs reliés par des systèmes ne permettant le passage du courant que dans un seul sens. Le fait d'avoir plusieurs condensateurs consécutifs permet de multiplier la charge finale de l'accélérateur. Ainsi, en 1932, pour la première fois, un phénomène de transmutation avait eu lieu dans un accélérateur après avoir envoyé un faisceau de protons de 0,125 MeV sur une plaque de lithium dans un tube à vide. La transmutation est la transformation d'un élément chimique en un autre élément chimique par une modification du noyau atomique de l'élément.

3.2 Générateurs Van De Graaff

En 1932, un autre accélérateur électrostatique fut inventé par ROBERT VAN DE GRAAFF : un générateur Van de Graaff mis dans un tube à vide, appelé aussi Statitron. Il consiste à arracher des électrons d'une électrode à l'aide d'un petit peigne et de les amener à une autre électrode accumulant les charges négatives. Les charges sont transportées sur une courroie actionnée par un moteur électrique. Une fois les charges accumulées dans la deuxième électrode en forme de sphère, la différence de potentiel de l'ordre d'une dizaine de mégavolts permet aux particules d'être accélérées avec une énergie de l'ordre du million d'électrons-volts (1MeV) (voir figure 3.2).

Pour pouvoir découvrir de nouveaux phénomènes ou confirmer ceux prédits par la théorie, il fallait alors trouver une solution afin d'explorer une gamme d'énergie plus large. Comme l'énergie fournie est directement proportionnelle à la différence de potentiel électrique, une simple règle de trois nous montre que pour passer d'une énergie de 1 MeV à une énergie de 1 GeV (1 milliard d'électrons-volts) il faudrait disposer d'une différence de potentiel énorme, de l'ordre du milliard de volts ! Une telle différence de potentiel est impossible à créer avec un accélérateur électrostatique créé jusqu'alors. En effet, une telle tension rendrait l'air conducteur et les plaques se déchargeraient instantanément, en créant un arc électrique aussi appelé « claquage ».

Afin d'y remédier, les physiciens ont mis au point dès les années 1930 d'autres modèles d'accélérateurs : les accélérateurs linéaires, puis circulaires. Au lieu d'utiliser un seul champ électrique pour accélérer les particules, ces machines encore utilisées aujourd'hui, en utilisent plusieurs.

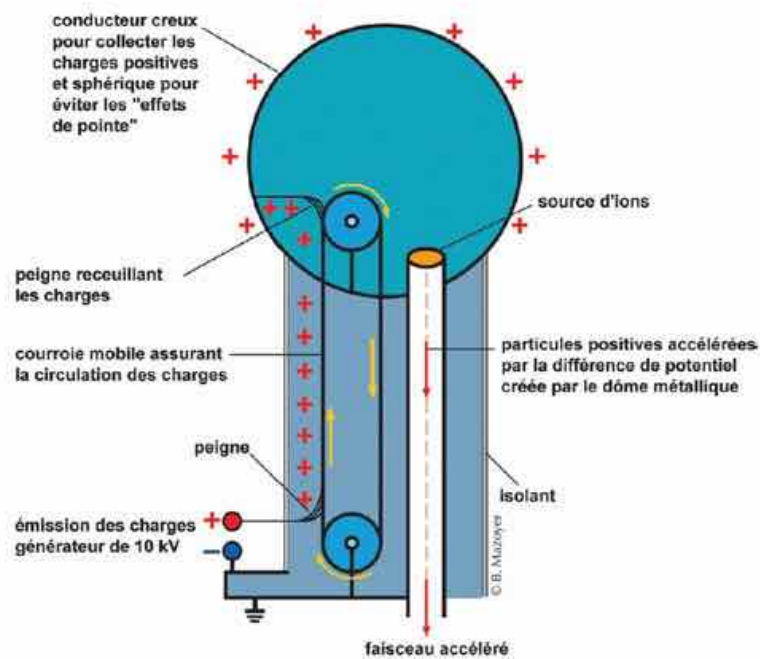


FIGURE 3.2: Générateur Van De Graaff

3.3 Accélérateurs linéaires

Dans un accélérateur linéaire (couramment appelé LINAC), la trajectoire des particules est rectiligne. En pratique, on utilise une succession d'électrodes cylindriques et creuses, connectées à une même source de tension alternative, comme celle que nous avons à la maison, mais nettement plus puissante. Le câblage électrique est réalisé de manière à ce que deux électrodes voisines portent toujours une charge opposée. Ainsi, des différences de potentiel apparaissent et génèrent un champ électrique entre chaque paire de conducteurs, qui sont responsables de l'accélération des particules (voir figure 3.3). Il faut alors vérifier que chaque espace séparant deux électrodes (appelées cavités) est accélérateur. La fréquence du courant alternatif (fixe) est liée aux longueurs des cavités (ajustables). À chaque accélération, les particules gagnent de la vitesse. Pour que le tout soit synchronisé avec la fréquence du champ électrique, on doit progressivement augmenter la taille et l'espacement des électrodes. Cette idée fut celle de l'ingénieur norvégien ROLF WIDERÖE en 1928. Aujourd'hui, les accélérateurs linéaires sont toujours utilisés comme injecteurs dans de très gros complexes d'accélérateurs circulaires.

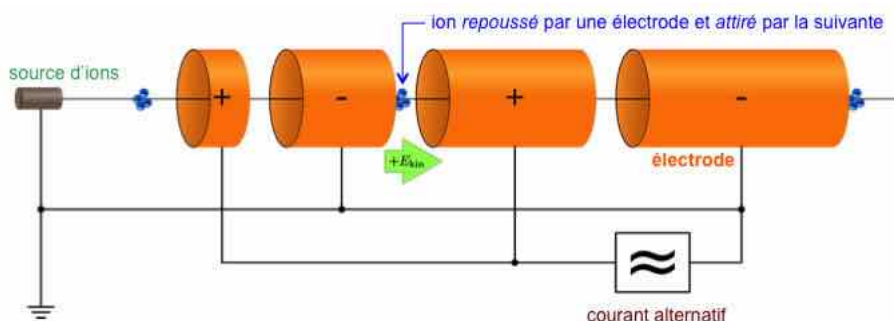


FIGURE 3.3: Principe d'un accélérateur linéaire

3.4 Cyclotrons

Pour augmenter encore l'énergie des particules, sans tomber dans le piège du gigantisme, il suffit de faire parcourir plusieurs fois le même chemin aux particules, en les maintenant sur une trajectoire circulaire à l'aide d'un champ magnétique. Le phénomène est utilisé dans les accélérateurs circulaires, ou cyclotrons. À chaque demi-tour, les particules sont soumises à un champ électrique qui les accélère. Le courant alternatif qui produit ce champ est synchronisé avec la fréquence de rotation des paquets⁴ des particules (voir figure 3.4). On peut calculer le rayon, la période et la fréquence du mouvement circulaire d'une particule respectivement par les équations 2.11, 2.12 et 2.13. La vitesse finale est atteinte lorsque les particules décrivent une trajectoire dont le rayon r est égal à celui du cyclotron R . Elle est donnée par : $v = \frac{qBR}{m}$ et l'énergie cinétique finale vaut $E_{cin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$.

L'inventeur du cyclotron en 1932 est le jeune américain ERNEST ORLANDO LAWRENCE. Le cyclotron se confronta à un problème conceptuel majeur qui limite en pratique l'énergie maximale atteignable à environ 100 MeV. Dès qu'une particule s'approche de la vitesse de la lumière, de nouveaux phénomènes apparaissent. Par exemple, le temps de parcours de l'orbite n'est plus constant ou alors les particules perdent une partie de leur énergie à chaque tour, sous forme de rayonnement lumineux, appelé rayonnement synchrotron.

4. Groupements de particules qui composent un faisceau.

Pour y remédier, on développa, en 1946, le premier *synchrocyclotron* dans lequel le champ magnétique augmente avec la vitesse des particules, les forçant ainsi à rester plus longtemps et plus facilement en orbite. On atteignait alors facilement des énergies de l'ordre de 600 MeV. Une des limitations du synchrocyclotron vient de la quantité de fer nécessaire pour construire l'aimant qui génère le champ magnétique dans tout le volume de l'accélérateur.

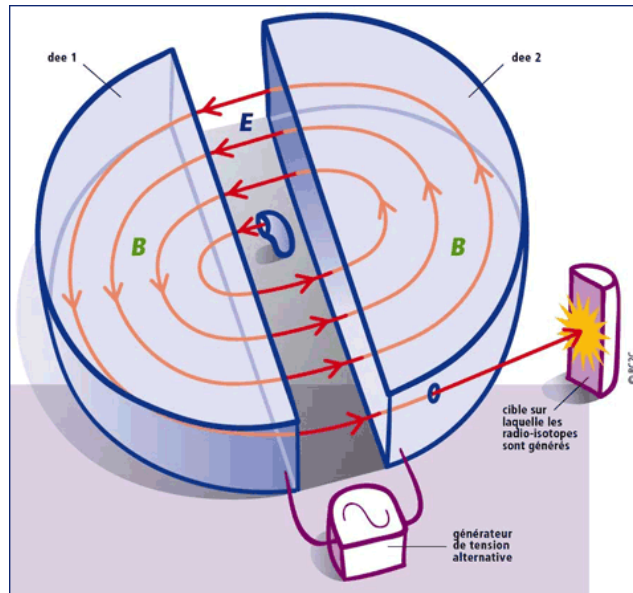


FIGURE 3.4: Fonctionnement d'un cyclotron

3.5 Synchrotrons

On eut alors l'idée de créer des accélérateurs qui ont la forme d'un cercle de rayon fixe afin de limiter l'utilisation de matériau inutile. Le champ magnétique est créé par des aimants disposés uniquement le long des parties courbes de l'accélérateur. Afin de maintenir les particules dans l'anneau, l'intensité du champ magnétique croît à mesure que l'énergie des particules augmente. Le champ électrique, lui, est créé le long des parties rectilignes (voir figure 3.5). Pour que le synchrotron fonctionne de manière optimale, il requiert une énergie minimale des particules entrant dans le dispositif. Il faut donc utiliser un injecteur permettant aux particules d'atteindre cette énergie minimale (par exemple le LINAC). Le premier synchrotron, appelé le Cosmotron, fut construit à Brookhaven en 1952. Il était capable d'accélérer des protons jusqu'à 3 GeV (voir figure 3.6).

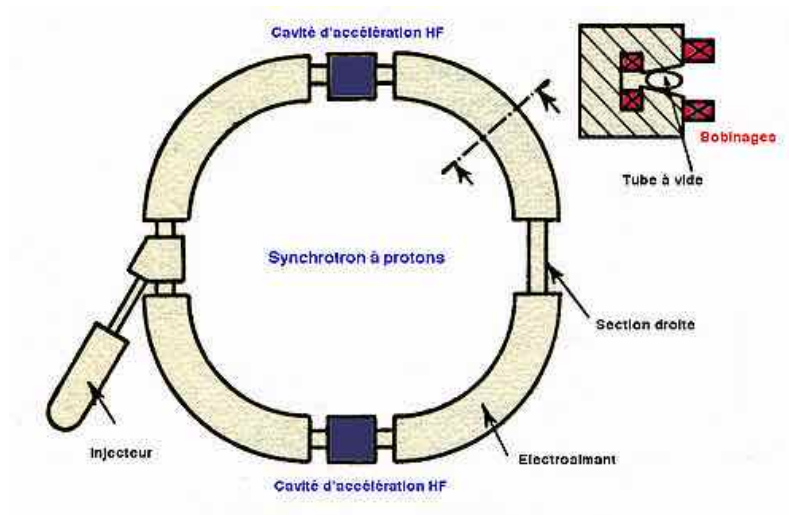


FIGURE 3.5: Schéma représentant la disposition des éléments constituant un synchrotron

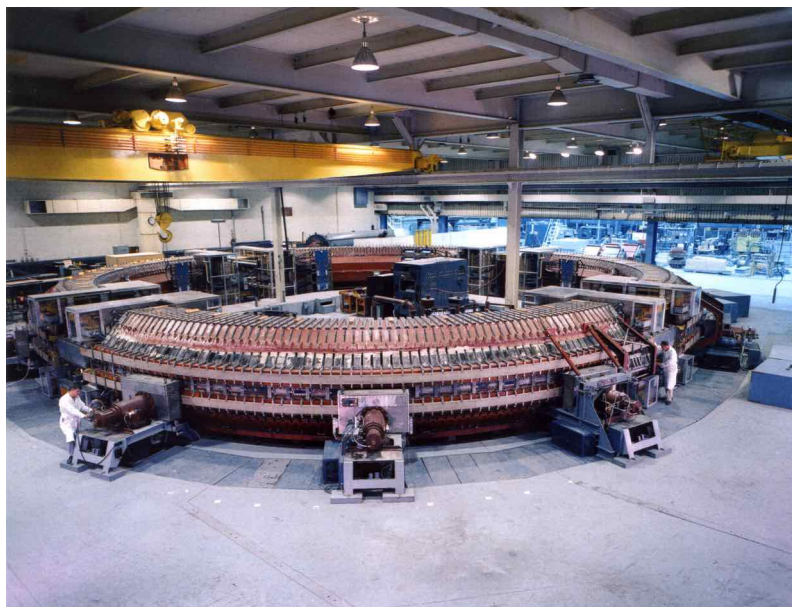


FIGURE 3.6: Premier synchrotron : le Cosmotron

3.6 Diagramme de Livingston

Il est intéressant de constater que si l'on porte l'énergie d'un accélérateur en fonction de son année de construction, sur une échelle semi-logarithmique, on obtient une croissance linéaire. Ce constat fut celui de Stanley Livingston dans les années 1960 (voir figure 3.7). Autrement dit, on gagnait un facteur de 10 tous les sept/huit ans. Ça ne semble plus être le cas aujourd'hui, puisque si l'évolution s'était maintenue, 60 TeV auraient été atteints dès 2005. Or, le LHC (Large Hadron Collider) ne suit pas l'extrapolation avec ses 14 TeV. On remarque donc un fléchissement des performances [33, p.37].

3.6 Diagramme de Livingston

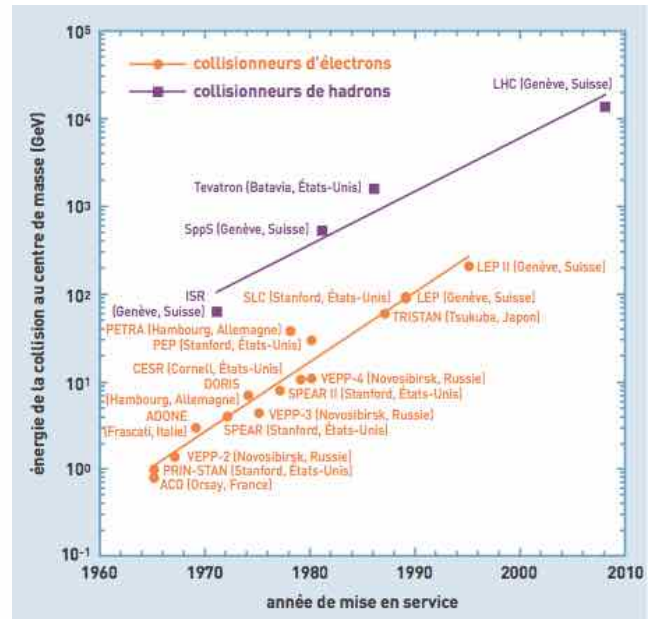
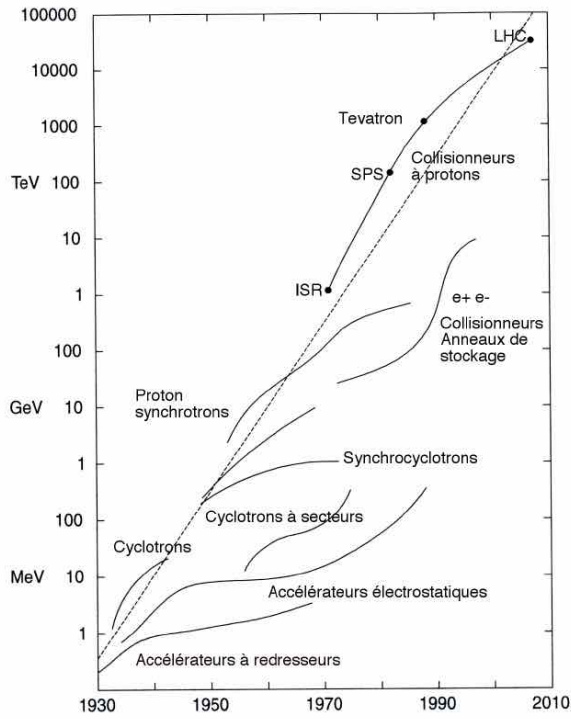


FIGURE 3.7: Diagramme de Livingston

4 Complexes d'accélérateurs

Ce chapitre décrit les notions ainsi que les éléments de base qui concernent un accélérateur. Comme nous l'avons vu, il existe plusieurs types d'accélérateurs. De ce fait, il semble préférable de parler des éléments les plus communs tels que les cavités accélératrices, les éléments magnétiques de guidage et de focalisation ainsi que les systèmes de vide. Sans oublier les phénomènes naturels comme l'ionisation qui permet de créer une source de particules ou la supraconductivité. Vous l'aurez compris, nous parlerons plus spécifiquement du synchrotron. Avant de présenter ces éléments, commençons par se demander ce qu'est un accélérateur.

Qu'est-ce qu'un accélérateur ? Un accélérateur de particules est un instrument qui utilise des champs électromagnétiques pour communiquer, progressivement, à des particules chargées, une grande énergie en les faisant atteindre une vitesse proche de celle de la lumière. C'est donc un lieu de production et d'émission de particules (ions, électrons, protons, etc.), injectées dans un tube vide d'air, où elles sont accélérées par des champs électriques à haute fréquence. Ce procédé est à l'origine de la formation d'un faisceau de particules, destinées à être étudiées ou utilisées. En percutant une cible ou en s'entrechoquant, les particules accélérées produisent d'autres particules et des rayonnements qui renseignent les physiciens sur les propriétés et la structure la plus intime de la matière [53, 44]. Pour voir les particules produites par ces collisions, nous avons ensuite besoin de détecteurs (voir chapitre 5).

Il faut cependant faire attention avec ce que l'on entend par « voir ». Théoriquement, il n'est pas possible de « voir » au sens strict du terme, c'est à dire avec nos yeux et un microscope, des particules. On peut seulement déterminer leur taille, leur forme, en les bombardant avec des faisceaux de particules accélérées. On observe ensuite comment les particules réagissent. Ce processus n'est en fait pas si différent de celui de la vision.

Nous voyons les objets parce qu'ils envoient de la lumière à nos yeux. On voit ainsi la taille et la couleur de ces objets. La lumière est à la fois une suite de grains lumineux, les photons, et une onde électromagnétique. Ces ondes vibrent plus au moins vite en fonction de l'énergie qu'elles véhiculent. Autrement dit, plus elles transportent d'énergie, plus leurs ondulations sont serrées. La distance entre deux crêtes successives s'appelle longueur d'onde. Pour la lumière visible, celles qui nous permettent de voir les objets de la vie courante sont comprises entre 0.4 et 0.8 micromètre. Un micromètre est la taille d'un microbe. C'est pour cette raison que nous pouvons les voir au microscope optique. Maintenant, si nous voulons voir des objets plus petits, nous devons utiliser un microscope électronique qui accélère un faisceau d'électrons jouant ainsi le rôle de la lumière. Sa longueur d'onde est en effet plus petite que celle de la lumière, un nanomètre. Un nanomètre est à peu près la taille d'un atome (10^{-10} m). L'onde électromagnétique d'un électron est 10'000 fois plus énergétique que celle de la lumière visible. Pour « voir » un noyau, il faut atteindre une énergie 100'000 fois plus importante encore. C'est le rôle de l'accélérateur [45].

4.1 La chaîne d'accélération du CERN

Le complexe d'accélérateurs du CERN est un réseau souterrain d'une trentaine de kilomètres construit dans les années 50 et modernisé depuis. Il est composé d'une suite d'accélérateurs permettant aux particules d'augmenter progressivement leurs énergies. Chaque accélérateur augmente ainsi la vitesse d'un faisceau de particules avant de l'injecter dans l'accélérateur suivant. L'infrastructure est capable d'accélérer soit des protons, soit des noyaux d'atomes de plomb appelés, ions de plomb.

Voici les différentes étapes de l'accélération des protons (voir figure 4.1) :

- Source** Le voyage d'un proton dans le LHC commence dans une bouteille d'hydrogène. Les molécules d'hydrogène, formées d'un proton et d'un électron, sont idéales. On arrache les électrons pour ne garder que les protons (voir section 4.2). Soumis à un champ électrique, les protons s'échappent et pénètrent dans une cavité qui les accélère à 100 keV.
- LINAC2** Le LINAC2, long de 34 mètres, accélère les protons jusqu'à une énergie de 50 MeV. A ce stade ils possèdent une vitesse de 240000 km/h, équivalant au tiers de la vitesse de la lumière en moins d'une microseconde ! Il sera bientôt remplacé par le LINAC4¹.
- Synchrotron à protons** Le faisceau est alors injecté dans le Synchrotron injecteur du PS (PS Booster - PSB), qui accélère les protons jusqu'à 1,4 GeV en deux groupes de six paquets de protons. Ensuite, le Synchrotron à protons (PS), d'une circonférence de 628 mètres prend le relais et porte le faisceau jusqu'à une énergie de 25 GeV.
- Supersynchrotron** Les protons atteignent ensuite une énergie de 450 GeV lorsqu'ils sortent du Supersynchrotron à protons (SPS) d'une circonférence de 7 km. Ce synchrotron accumule trois groupes de 81 paquets de protons (espacés de 25 ns).
- LHC** Enfin, les protons sont envoyés dans les deux tubes de faisceau du LHC². Le faisceau circule dans le sens des aiguilles d'une montre dans le premier tube, et dans le sens inverse dans le deuxième. En se collisionnant, deux faisceaux produisent une énergie de 14 TeV (deux fois 7 TeV), soit 70 millions de fois plus qu'à l'entrée du LINAC.

Les ions plomb du LHC subissent le même sort que leurs amis les protons via le PS, le SPS, et le LHC. Mais plutôt que de passer dans le LINAC2 et le PSB, ils passent par le LINAC3 avant d'être accélérés dans l'Anneau d'ions de basse énergie (LEIR). Au cours du voyage, les ions plombs sont progressivement dépouillés de leurs électrons. Il ne restera que des noyaux atomiques « nus » qui atteindront, dans le LHC, une énergie de 574 TeV chacun.

Le complexe d'accélérateurs comprend également le Décélérateur d'antiprotons (AD) et le Séparateur d'isotopes en ligne ISOLDE. Il alimente beaucoup de projets comme le projet Neutrinos du CERN vers le Gran Sasso (CNGS), la zone de test du Collisionneur linéaire compact (CLIC), ainsi que l'Installation de mesure du temps de vol des neutrons (nTOF). [46]

1. [55], installation prévue pour 2017-2018.

2. Le LHC est constitué de deux tubes dans lesquels des faisceaux circulent en sens opposé. Ceci permet de créer des collisions et de doubler l'énergie. Il faut comprendre que les deux tubes font partie de la même machine puisque les deux tubes se rencontrent en certains points pour permettre des collisions entre protons. Cependant chaque tube possède ses propres cavités accélératrices et ses propres aimants à l'image d'un synchrotron.

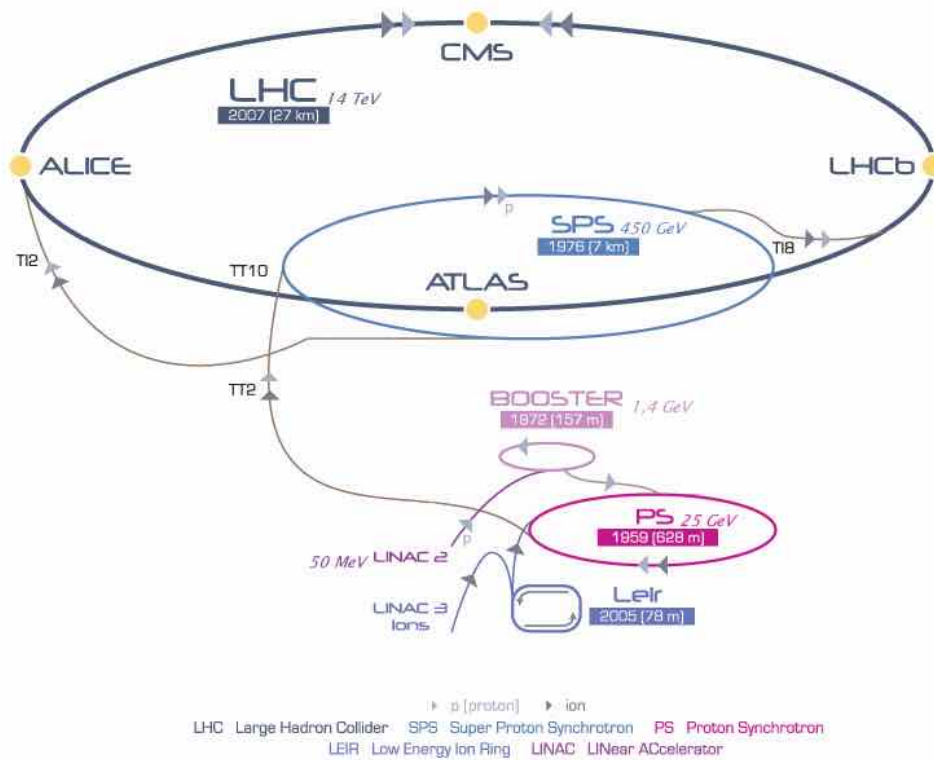


FIGURE 4.1: Complexe d'injection et d'accélération du CERN

4.2 Les sources de particules

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple et son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. C'est pourquoi il est utilisé pour fabriquer un faisceau d'électrons ou de protons. Il "suffit" d'arracher les électrons pour ne garder que les protons, de les concentrer, puis de les accélérer.

Pour pouvoir séparer un électron d'un atome d'hydrogène, il faut l'ioniser. Ioniser un atome ou une molécule signifie enlever une/des charges à un atome ou une molécule. L'atome ou la molécule perdant une/des charges n'étant plus neutre électriquement est alors appelé ion.

Il y a différentes façons d'ioniser un gaz et d'en faire un faisceau : l'émission thermo-ionique, l'émission photoélectrique, l'émission de champ, l'émission ferroélectrique ou l'émission par collision. Le principe reste le même pour toutes les méthodes. Si l'énergie fournie W_f est supérieure à l'énergie d'ionisation W_i , alors l'électron est libéré (W_i est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome). Un atome d'hydrogène peut, de cette manière, être séparé en un électron et en un proton. On peut ainsi créer un faisceau d'électrons ou un faisceau de protons. Nous verrons ici plus précisément le cas du proton.

Au CERN, les protons sont produits à partir d'une source duo-plasmatronique. Elle consiste à introduire de l'hydrogène gazeux dans une chambre à vide (voir figure 4.2). Dans cette chambre, une cathode sous forme de filaments émet des électrons. L'interaction des électrons et du gaz entraîne l'ionisation de l'hydrogène (devenu H^+) et la formation d'un plasma. Les protons sont ensuite extraits par un champ électrique grâce à l'anode (de la même manière que le tube de Crookes). Le faisceau ainsi généré sera étendu avant de former le faisceau de

protons qui sera injecté à 4000 km/h dans l'accélérateur linéaire. Il s'est écoulé moins d'une microseconde ! Seulement 3,3 milligrammes d'hydrogène suffisent à la consommation annuelle du LHC et les autres expériences du CERN.

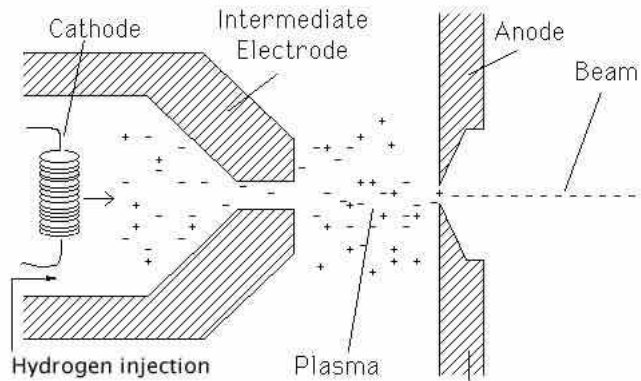


FIGURE 4.2: Schéma d'une source duo-plasmatronique

4.3 La supraconductivité

Le phénomène de supraconductivité a été observé pour la première fois en 1911 par HEIKE KAMERLINGH ONNES. Ce phénomène est observé principalement dans les métaux, les alliages et les céramiques et n'apparaît qu'en dessous d'une certaine température, appelée température critique (T_c). Un supraconducteur est un matériau qui a la propriété de transporter un courant électrique sans aucune perte. Il a une résistivité strictement nulle ($\rho = 0$). Il a également la propriété d'expulser totalement le champ magnétique (voir figure 4.3). C'est ce que l'on appelle l'effet Meissner (découvert en 1933), qui est à l'origine de l'expérience de l'aimant flottant. La supraconductivité est cependant détruite par un trop fort champ magnétique (ou un trop fort courant). C'est ainsi que chaque supraconducteur possède un champ magnétique critique (B_c). La supraconductivité n'existe donc que dans une plage limitée par la température T et le champ magnétique B .

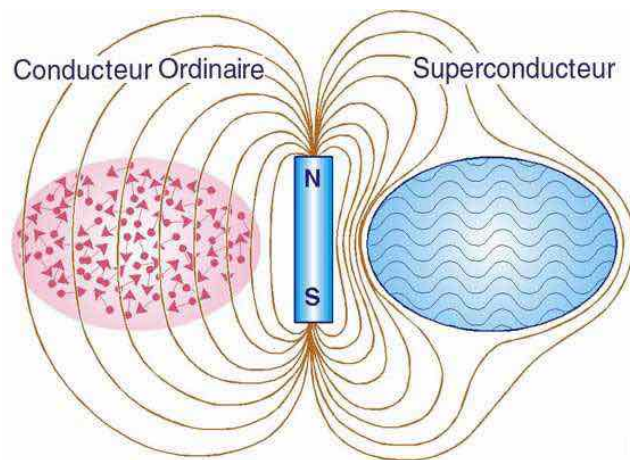


FIGURE 4.3: Différence entre un conducteur ordinaire et un supraconducteur

On utilise le phénomène de supraconductivité dans plusieurs éléments d'un accélérateur. On l'utilise dans les cavités accélératrices (voir section 4.4) car la dissipation du champ électrique sur les parois est quasi-négligeable lorsque celles-ci sont supraconductrices. Ainsi, la quasi-totalité de la puissance radiofréquence est transmise au faisceau. On l'utilise aussi dans les aimants de focalisation (voir section 4.6) afin que ceux-ci n'offrent plus aucune résistance au passage du courant électrique.

Le choix du matériau est très important puisque c'est lui qui déterminera jusqu'à quelle température il faudra refroidir les éléments de l'accélérateur pour qu'ils deviennent supraconducteurs. A titre d'exemple, le LHC utilise des câbles en niobium-titane (NbTi), qui deviennent supraconducteurs à une température inférieure à 10 K ($-263,2^\circ\text{C}$). Le niobium est très utilisé au vu de sa température et de son champ magnétique critique assez élevés, soit 23 K (-250°C), de sa faible résistance de surface et de son comportement facilement utilisable. Pour pouvoir atteindre de telles températures, le LHC utilise de l'hélium superfluide à 1,9 K ($-271,3^\circ\text{C}$) pour refroidir ses aimants et à 4,5 K ($-268,7^\circ\text{C}$) pour refroidir ses cavités accélératrices.

Le choix de la température de fonctionnement du LHC est autant lié aux « superpropriétés » de l'hélium qu'à celles de l'alliage supraconducteur du niobium-titane dans les bobines des aimants. L'hélium gazeux se liquéfie à environ 4,2 K (-269°C), mais si on le refroidit davantage, il subit un deuxième changement de phase autour de 2,17 K (-271°C) et passe à l'état superfluide (voir figure 4.4). L'hélium superfluide possède de nombreuses propriétés remarquables, notamment une conductivité thermique très élevée qui en fait un réfrigérant de choix pour refroidir et stabiliser de grands systèmes supraconducteurs [15].

En utilisant la supraconductivité, on épargne beaucoup d'énergie. En effet, l'onde radiofréquence n'est quasiment pas dissipée dans les parois de la cavité accélératrice et le courant électrique n'offre plus aucune résistance lorsqu'il passe dans les bobines produisant un champ magnétique.

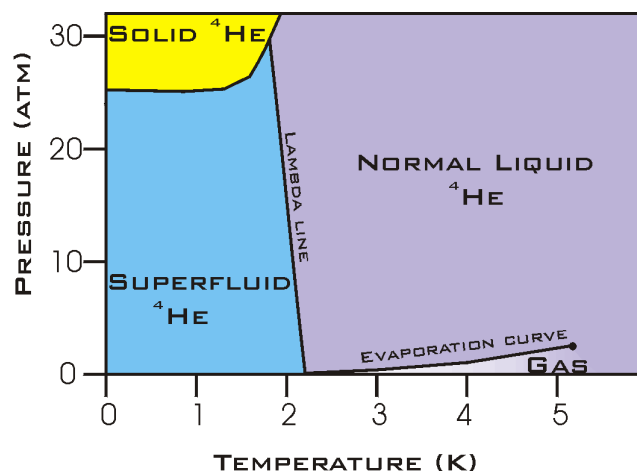


FIGURE 4.4: Différentes phases de l'hélium

4.4 Les cavités accélératrices

Une cavité accélératrice est une structure résonante qui permet de stocker et d'amplifier le champ électrique destiné à accélérer le faisceau de particules chargées. C'est un espace entouré de parois conductrices ou supraconductrices et rempli d'un milieu diélectrique (le

vide généralement), dans lequel est injectée une onde électromagnétique. Elle est très souvent composée de plusieurs cellules (voir figure 4.5). On les trouve tout au long des accélérateurs linéaires et dans les parties rectilignes des synchrotrons (voir figure 3.5).



FIGURE 4.5: Une cavité accélératrice radiofréquence

Comme nous l'avons déjà dit à la section 2.1, l'accélération de particules se fait grâce à un champ électrique. Le champ électrique est créé grâce à l'injection d'une onde électromagnétique dans la cavité accélératrice. En effet, le mouvement d'une particule soumise à un champ électromagnétique est décrit par l'équation 2.3. Pour que l'accélération soit optimale, l'application d'un champ électrique se doit d'être parallèle, et de même sens (si la particule est de charge positive et de sens opposé si la particule est de charge négative), à la direction de propagation et donc au vecteur vitesse de la particule.

On utilise la supraconductivité afin d'améliorer les performances de la cavité. De forts courants circulent sur la surface interne de la cavité et chauffent les parois. Avec un conducteur normal, on ne pourrait pas obtenir de champs élevés en continu car les parois se mettraient à fondre ! Heureusement, grâce aux propriétés d'un supraconducteur, comme nous l'avons déjà expliqué à la section 4.3, sa résistance est 100'000 fois plus faible que celle d'un conducteur normal comme le cuivre.

Afin de mieux se représenter ce qu'il se passe dans une cavité accélératrice (appelée aussi cavité radiofréquence), prenons l'image d'un surfeur sur sa vague (voir figure 4.6). L'onde électromagnétique joue le rôle de la vague et la particule celui du surfeur. Lorsqu'une vague arrive vers le rivage et qu'un surfeur s'y trouve, ce dernier va être transporté par la vague. Comme poussé par celle-ci. Le surfeur va se déplacer dans la direction d'approche de la vague et donc vers le rivage. La situation est similaire dans une cavité accélératrice. Lorsque l'on y envoie une onde électromagnétique, la particule se déplace dans la direction de propagation de l'onde. Cette onde est une onde radiofréquence (comprise entre 9 kHz et 3000 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde de 33 km à 0,1 mm).

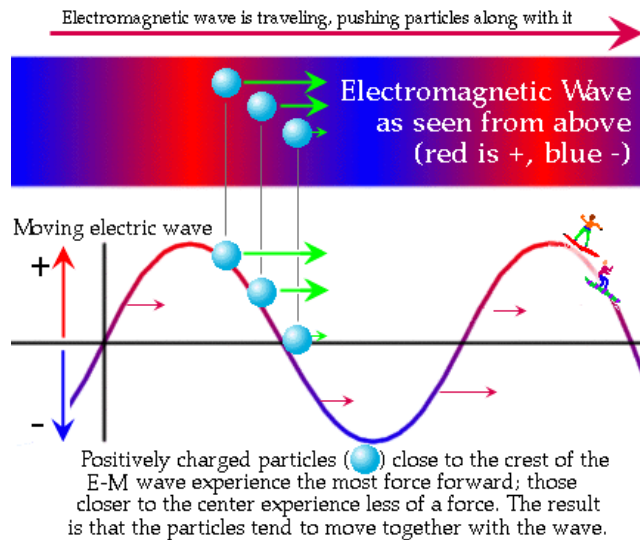


FIGURE 4.6: L'onde électromagnétique pousse les électrons comme un surfeur sur une vague

Les paquets sont accélérés successivement par chaque cellule mise bout à bout. Chacune d'entre elles génère un champ électrique qui apporte de l'énergie aux paquets qui la traversent. Ces paquets seront donc successivement accélérés jusqu'à atteindre l'énergie voulue. Afin de mieux comprendre ce qu'il s'y passe, prenons l'exemple d'un paquet d'électrons (voir figure 4.7). (1) Le paquet d'électrons se trouve entre la première et la deuxième cavité. La première cavité porte une charge négative et la seconde une charge positive. Ce qui a pour but de créer un champ accélérateur entre les deux cavités. Les charges de chaque cavité étant alternées, la troisième est alors négative. (2) Le paquet se trouve à présent à l'intérieur de la deuxième cavité où ne règne aucun champ électrique. Il continue donc sa route en ligne droite à vitesse constante. (3) Lorsque le paquet sort de la seconde cavité, les charges de chaque cavité basculent. Ainsi, le nouveau champ créé entre les cavités deux et trois est à nouveau accélérateur. Le même phénomène se répète tout au long de l'accélérateur linéaire dans chaque cavité [40].

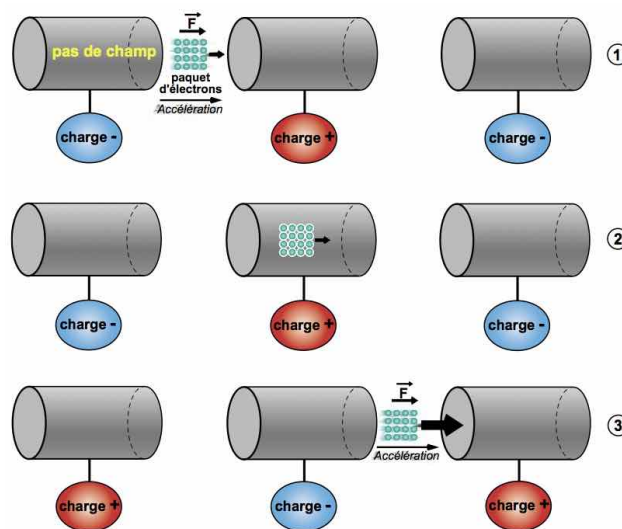


FIGURE 4.7: Fonctionnement de la synchronisation d'une cavité accélératrice étape par étape

À chaque fois que le paquet est accéléré, sa vitesse augmente. Il faut alors augmenter la taille des cellules en fonction de la vitesse que gagne le paquet à chaque passage dans une cavité. La taille des cavités augmente alors proportionnellement à la vitesse des paquets pour assurer la synchronisation des champs électriques avec le passage des particules. Si la synchronisation n'est pas assurée, il se peut que le champ n'ait pas la bonne polarité à un moment ou à un autre, ce qui aura pour effet de ralentir les particules [40]. Pour éviter ce phénomène, la longueur de chaque cavité doit être égale à :

$$L_{cell} = \frac{v}{2f} = \frac{Tv}{2}, \quad (4.1)$$

où T et f sont la période et la fréquence de l'onde radiofréquence. Ainsi, chaque cavité accélère les particules pendant une demi-période de l'onde RF. Lorsque les particules accélérées sont ultra-relativistes (lorsque leur vitesse est très proche de celle de la lumière), le gain d'énergie ne s'accompagne plus d'une variation notable de la vitesse. Le problème de la longueur de cavités ne se pose donc plus. Les cavités ont alors une taille constante, dépendant uniquement de la fréquence de l'onde RF.

La deuxième fonction des cavités est d'organiser les particules en paquets (composés de 10^{11} particules) les plus denses possible. Les paquets sont des groupes de particules séparés les uns des autres au sein d'un accélérateur. Ils sont utiles afin d'assurer une forte luminosité aux points de collision et d'augmenter ainsi au maximum le nombre de collisions. Le fonctionnement du système radiofréquence est synchronisé avec le mouvement des paquets afin que les cavités apportent l'énergie appropriée aux particules au bon moment (lorsque celles-ci les traversent). En dehors de ces périodes, le champ qu'elles délivrent n'est pas adapté aux caractéristiques des faisceaux et les particules isolées s'égareront.

Pour grouper les particules en paquet de façon optimale, il faut que la période T des ondes radiofréquences accélératrices soit synchronisée avec la période de révolution T_{rev} de l'accélérateur :

$$T = n \cdot T_{rev} \quad , \quad (4.2)$$

où n est un nombre entier et indique le nombre de paquets que l'on peut créer dans l'accélérateur. Le temps entre deux paquets doit donc être égal à une période T (ou à un nombre entier de périodes T). Cette synchronisation est nécessaire lorsque l'accélérateur est un synchrotron. En effet, dans le cas d'un synchrotron, les paquets transitent périodiquement à chaque tour à travers les cavités accélératrices. Ainsi, un synchrotron de diamètre R possède une période de révolution $T_{rev} = \frac{2\pi R}{v}$. Dans le cas d'un accélérateur linéaire, c'est l'injection des particules en début de chaîne qui doit être synchronisée avec les ondes radiofréquences.

Entre l'entrée et la sortie de la cavité, la particule gagne une énergie exprimée par l'équation 2.6 lorsque le champ électrique est uniforme :

$$\Delta U = qEd$$

4.5 Les éléments magnétiques de guidage

Nous avons dit, à la section 2.2, que le champ magnétique courbait la trajectoire d'une particule. Sur un synchrotron, les particules décrivent un cercle. C'est pourquoi nous devons utiliser un champ magnétique tout au long du synchrotron pour permettre aux particules de décrire ce cercle. Afin de créer un champ magnétique, on utilise un électroaimant supraconducteur. Un électroaimant est un solénoïde dans lequel on a placé un noyau de fer et qui est parcouru par un courant électrique (voir figure 4.8). Cette bobine est constituée de câbles supraconducteurs enroulés régulièrement en hélice (un tour de bobine est appelé spire). L'électroaimant fonctionne sur le même principe que ceux que l'on trouve dans les moteurs électriques. Lorsqu'il est parcouru par un courant, il produit un champ magnétique. Dans un synchrotron (nul besoin de guider les particules dans un accélérateur linéaire ou un cyclotron), ce type d'aimant a la forme d'un fer à cheval. De cette façon, il exerce une force transversale sur les particules pour les maintenir en orbite sur l'anneau du synchrotron (voir figure 4.9).

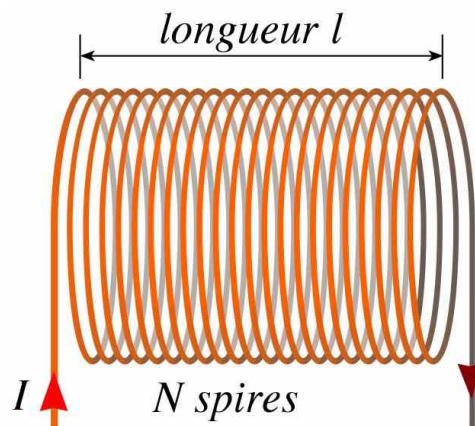


FIGURE 4.8: Schéma représentant un solénoïde

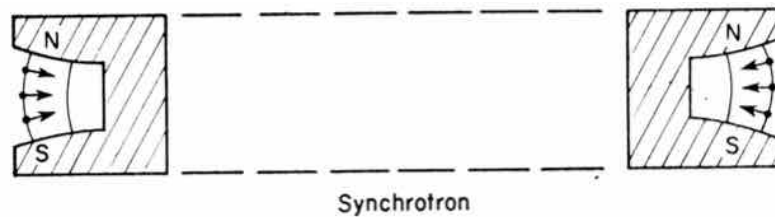


FIGURE 4.9: Coupe d'un synchrotron représentant deux dipôles

Ces dipôles contiennent généralement une chambre à vide dans laquelle passe le faisceau de particules. Le champ magnétique qui y est produit engendre de puissantes forces et le tout doit solidement être maintenu par des colliers non magnétiques (voir figure 4.10). Les câbles utilisés pour produire les bobines sont supraconducteurs et (comme déjà expliqué à la section 4.3) n'offrent ainsi plus aucune résistance au passage du courant électrique. Ce qui permet d'augmenter considérablement le champ magnétique ainsi créé. Pour illustrer cela, le LHC produirait un champ magnétique de 6,8 T (tesla) alors qu'avec des dipôles supraconducteurs, il produit un champ magnétique de 8,33 T. Pour assurer la même énergie de collision, la circonférence du LHC passe ainsi de 120 km à 27 km avec des aimants supraconducteurs et consomme 40 fois moins d'électricité [42].

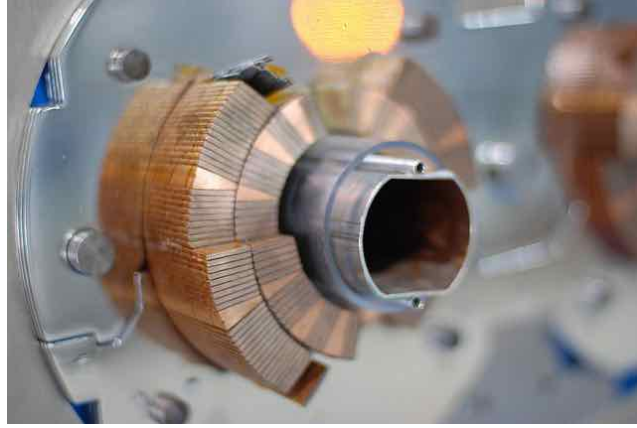


FIGURE 4.10: Vue transversale d'un dipôle du LHC

L'avantage de l'électroaimant est qu'à l'intérieur de l'hélice, le champ magnétique est quasiment uniforme et que l'intensité du champ est bien supérieure à un simple aimant. Son intensité peut être calculée par l'équation suivante :

$$B = \mu \frac{N}{l} I \quad , \quad (4.3)$$

où μ est la perméabilité (faculté propre à chaque matériau de modifier les lignes de flux d'un champ magnétique), N le nombre de spires, l la longueur de la bobine et I l'intensité du courant parcourant la bobine.

Pour augmenter la focalisation (c'est-à-dire la chance de trouver les particules à l'endroit voulu et ainsi éviter la dispersion des particules), on utilise des aimants à gradients alternés. Pour se faire, on place deux aimants autour de la même chambre à vide. L'un est appelé aimant à section fermée et l'autre à section ouverte (voir figure 4.11 (a) et (b)). L'alternance de ces deux types d'aimants, tout autour de l'accélérateur, permet de focaliser fortement le faisceau dans la direction radiale. Les champs magnétiques créés sont opposés mais convergent dans la même direction. Pour se faire, il suffit simplement d'inverser le courant dans l'un des deux aimants.

Au LHC, au lieu de disposer alternativement un aimant à section fermée, puis ouverte, chaque tube est en permanence³ entouré de deux aimants : l'un fermé et l'autre ouvert (voir figure 4.11 (c)).

3. La chambre à vide est en réalité entourée d'éléments magnétiques de guidage uniquement sur les parties courbe de l'accélérateur. Nous savons en effet qu'un synchrotron est composé de parties rectilignes (pour l'accélération) et de parties courbes (pour diriger le faisceau).

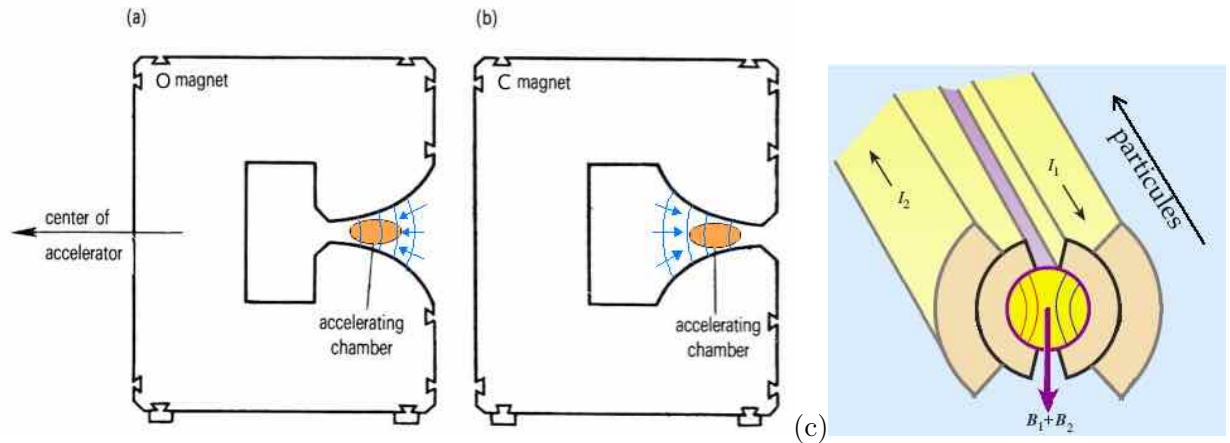


FIGURE 4.11: Aimants à gradient alterné. (a) section ouverte (b) section fermée (c) aimant deux en un du LHC

4.6 Les éléments magnétiques de focalisation

Nous venons de voir comment les particules étaient guidées sur un plan horizontal grâce à la configuration des aimants magnétiques de guidage. Cependant, le rayon de la trajectoire ne reste pas régulier, les particules peuvent « tanguer » d'un bout à l'autre de la chambre à vide et balayer une large couronne sur le plan horizontal (voire figure 4.12). La chambre à vide dans laquelle elles circulent doit donc être volumineuse (20 x 60 cm de section pour le cosmotron)[39]. Un autre effet perturbe le faisceau. Les particules se repoussent entre elles à cause de la force de Coulomb et viennent alors frapper la paroi de la chambre à vide. Afin d'éviter ce phénomène, de réduire la taille des chambres à vide et de concentrer au maximum le faisceau de particules, ERNEST COURANT, MILTON STANLEY LIVINGSTONE et HARTLAND SWEET SNYDER inventent, en 1952, le principe de focalisation forte.

La focalisation forte est créée à partir d'électroaimants supraconducteurs qui réduisent chaque dimension transverse des paquets et constituent un élément clé pour obtenir une haute luminosité (valeur qui détermine la qualité d'un faisceau).

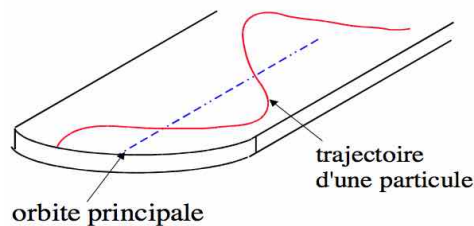


FIGURE 4.12: Schéma montrant la trajectoire oscillante des particules sur un plan horizontal dans la chambre à vide

Ces électroaimants s'appellent des quadripôles et sont donc composés de quatre aimants disposés en croix (voir figure 4.13). Un quadripôle est focalisant dans une direction et défocalisant dans l'autre. Cependant l'utilisation de deux quadripôles, comme avec les dipôles du LHC, permet d'obtenir une focalisation dans les deux directions perpendiculaires à la direction du

faisceau. Les quadripôles utilisent le même principe que la lumière passant à travers des lentilles convergentes et divergentes. L'expérience montre qu'en combinant ces systèmes on peut obtenir un effet résultant focalisant (voir figure 4.14). Dans les accélérateurs, l'ensemble des aimants est d'ailleurs appelé système de lentilles magnétiques[15, 39].

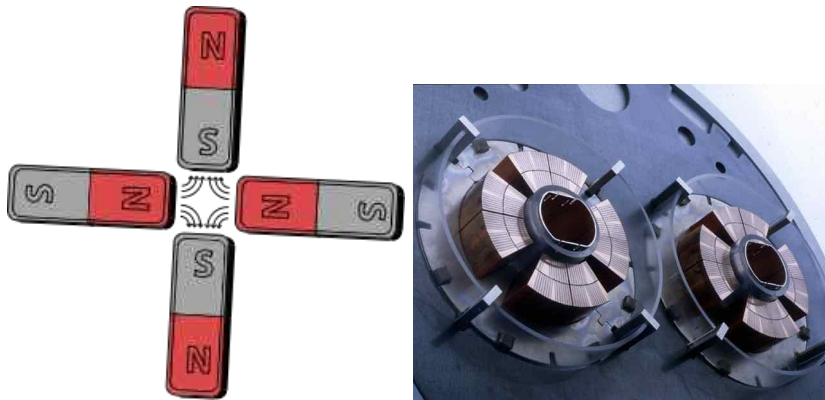


FIGURE 4.13: Disposition des aimants dans un quadripôle

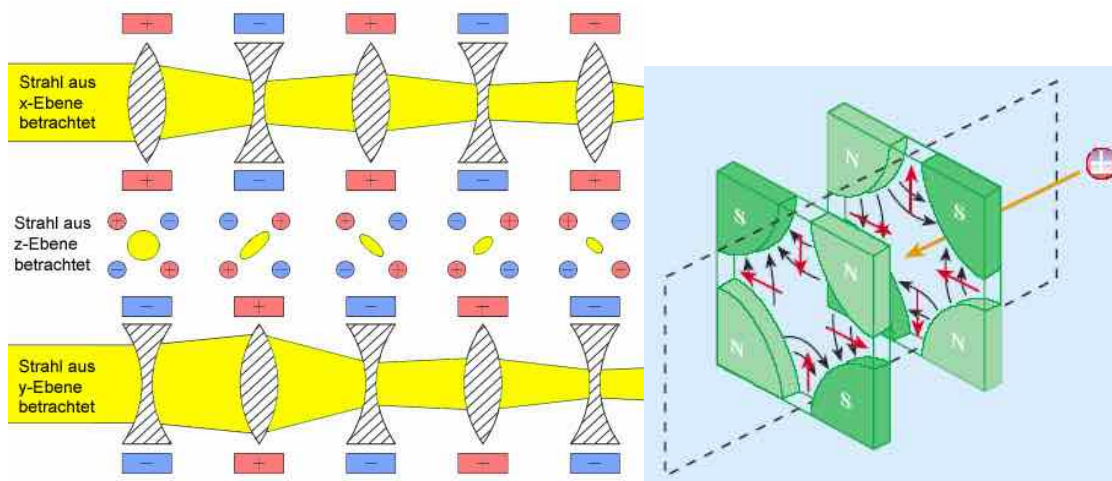


FIGURE 4.14: Schémas représentant le principe des lentilles convergentes et divergentes

Grâce à la focalisation forte on put ainsi réduire la taille des chambres à vide où circulent les faisceaux et épargner de l'énergie puisqu'il faut beaucoup d'énergie pour créer des chambres à vide (voir section §4.7).

4.7 Le système de vide

Le vide est un élément primordial à prendre en compte lorsque l'on projette de construire un accélérateur. Enfants, lorsque notre papa nous amenait en voiture sur l'autoroute, nous avons tous essayé de mettre la main hors de la fenêtre. Nous nous sommes vite rendu compte que cela n'était pas une bonne idée et l'avons rentrée. En effet, notre main avait été projetée vers l'arrière de la voiture. Le même principe s'applique au faisceau dans un accélérateur. Le but d'une particule est d'arriver sans encombre à destination. Si par malheur elle croise une autre particule qui ne devrait pas être là, elle la collisionnera et perdra son cours. Le but d'un

accélérateur est d'amener le plus de particules possible à destination pour que l'expérience en cours ait des probabilités de succès plus grandes. C'est pour cette raison qu'il est impératif de vider la chambre où passe le faisceau de toutes les particules indésirables. Le vide sert aussi à d'autres fins. Il est utile pour isoler les accélérateurs et les détecteurs de l'extérieur afin d'y maintenir une température très basse pour permettre la supraconductivité.

L'air que nous respirons est rempli de molécules de gaz qui bougent dans tous les sens. Lorsqu'on les enferme dans un récipient, elles exercent une force sur les parois de celui-ci que l'on appelle pression. Si l'on retire de l'air d'un récipient, on abaisse par conséquent la pression à l'intérieur puisque moins de molécules d'air tapant sur les parois s'y trouvent. Pour faire le vide, il suffit donc de diminuer la pression. Le vide est créé par différentes pompes à vide plus ou moins sophistiquées selon les besoins.

Un autre élément joue un rôle important pour éliminer les molécules restantes : la température. Grâce au froid, les molécules se condensent et se collent sur les parois refroidies. Lorsque l'accélérateur est à température ambiante, en plus des pompes, on utilise un revêtement spécial tapissant l'intérieur des chambres à vide qui, une fois chauffé, a la faculté de piéger les molécules résiduelles.

Au LHC, la pression est abaissée de dix millions de millions de fois, pour atteindre ($1 \cdot 10^{-10}$ millibar), presque la pression qui règne sur la Lune. Un proton doit ainsi effectuer quatre milliards de tours d'anneau avant de percuter une molécule oubliée. Un faisceau circulant le long d'un cercle émet des photons (appelé rayonnement synchrotron) qui peuvent arracher des molécules restées sur la paroi et perturber le faisceau. Des trous parsemés sur la paroi ont été installés pour permettre aux molécules restantes de s'échapper (voir figure 4.15).[14]

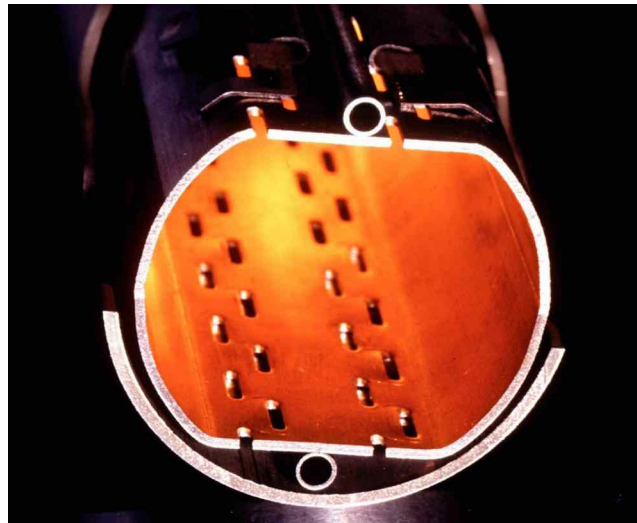


FIGURE 4.15: Fentes dans une paroi du tube du LHC ©CERN

5 Bref historique des détecteurs

L'histoire de la physique subatomique est intimement liée à l'évolution des détecteurs de particules [7]. Ils jouent un rôle décisif dans l'avancée des découvertes et c'est pour cette raison qu'ils sont si importants dans cette branche de la physique. Il faut d'abord savoir que les détecteurs sont tous basés sur le même principe : le transfert de l'énergie de la particule à la matière du détecteur. Pour que l'être humain puisse voir ce transfert d'énergie, il faut la convertir sous une forme plus accessible aux sens humains. Voilà le rôle d'un détecteur. Il existe autant de détecteurs qu'il existe de projets dans lesquels ils sont utilisés. C'est pourquoi il n'est pas possible de tous les décrire ici. On peut séparer les détecteurs de différentes façons. Par rapport à leurs époques : les détecteurs à visualisation (non électriques) et électriques ; par rapport à la technologie : les détecteurs gazeux, liquides et solides (dont nous ne parlerons pas) ; et par rapport à leurs fonctions : trajectographes, calorimètres et compteurs.

5.1 Détecteurs à visualisation

Les détecteurs à visualisation sont des détecteurs capables de matérialiser les trajectoires des particules chargées dans un gaz. On les photographie ensuite afin de procéder à un examen visuel du résultat. Cependant, seules les particules chargées peuvent directement être observées. Les particules neutres, elles, ne sont détectées qu'indirectement.

5.1.1 Chambre à brouillard

Le premier détecteur de particules mis au point en 1911 est ce que l'on appelle, une chambre à brouillard. Son inventeur est le physicien anglais CHARLES THOMSON REES WILSON. Il reçut le prix Nobel pour cette invention. La chambre à brouillard fonctionne grâce aux propriétés des gaz. On enferme un gaz non condensable (par exemple l'air ou l'argon) et de la vapeur saturante (par exemple de l'eau ou de l'alcool) dans une enceinte munie d'un piston sur l'une de ses parois à température ambiante (voir figure 5.1). Si l'on déplace rapidement le piston vers l'extérieur de l'enceinte de façon à diminuer violemment la pression, le volume gazeux se refroidira et tendra à se condenser en gouttelettes liquides. Cette condensation intervient principalement autour des "poussières" présentes dans l'air. Dans la chambre à brouillard, de telles poussières sont créées au passage de particules porteuses d'une charge électrique. En effet, lorsqu'une particule chargée entre dans l'enceinte, elle percute les molécules de gaz déjà présentes. En les percutant, elle "arrachera" des électrons aux molécules de gaz et la vapeur se condensera autour d'eux. C'est un phénomène qui peut être observé lorsqu'un avion passe à haute altitude et que derrière lui la vapeur se condense sur les ions contenus dans les gaz d'échappement des moteurs. L'illumination des gouttelettes permet ainsi de photographier les traces laissées par les particules.

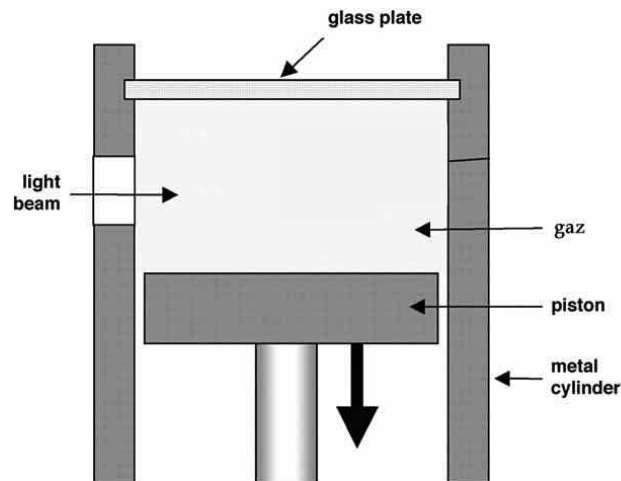


FIGURE 5.1: Schéma d'une chambre à brouillard

Si l'on place un champ magnétique à l'intérieur de la chambre à brouillard, la courbure de la trajectoire d'une particule permettra de déterminer le signe de la charge positive ou négative de la particule et sa quantité de mouvement. Une recompression ramène la chambre dans son état initial.

Il faut cependant une minute pour que l'équilibre thermique se rétablisse. Cette limitation en a supprimé l'emploi auprès des accélérateurs de particules. Les accélérateurs de particules auxquels ces appareils étaient associés avaient des cadences de 10 à 20 cycles par minute au moins. La chambre à brouillard pouvait jouer le rôle d'une cible pour permettre l'étude des interactions. Mais comme la densité du gaz est très faible, la probabilité d'une collision entre une particule et un noyau cible est extrêmement petite et les détails de l'interaction au voisinage immédiat du point d'interaction ne sont pas visibles. Cependant, le rôle joué par les chambres à brouillard a été important. Parmi les découvertes, faites avec cet instrument, il faut citer celle du neutron en 1932 par JAMES CHADWICK, celle du positron aussi en 1932 par CARL DAVID ANDERSON, ainsi que les premières particules "étranges" en 1949.

5.1.2 Chambre à bulles

Inventée en 1952 par le physicien américain DONALD ARTHUR GLASER, la chambre à bulles a été l'un des détecteurs les plus employés entre les années 1955 et 1970. Cette invention a permis de partiellement corriger les défauts de la chambre à brouillard. Le milieu sensible n'est cette fois-ci plus un gaz, mais un liquide. Il est maintenu à une pression légèrement supérieure à celle qui, à la température choisie, permet son ébullition. Quelques millièmes de seconde avant que le faisceau de particules atteigne le liquide, on déplace le piston vers l'extérieur de l'enceinte (de la même manière que la chambre à brouillard). Le liquide se met alors à bouillir. Cependant, l'ébullition commence avec un petit retard et, comme dans la chambre à brouillard, elle se forme de préférence autour des "poussières" laissées par le faisceau. Pour éviter que l'ébullition ne se généralise à tout le liquide, les trajectoires laissées sont très rapidement photographiées (voir figure 5.2) et, quelques millisecondes après la photographie, le liquide est rapidement recomprimé pour ramener le détecteur dans l'état initial.

Une chambre à bulles peut être utilisée une fois par seconde, soit 60 fois plus qu'avec la chambre à brouillard. Elle ne peut cependant pas être déclenchée pour uniquement détecter les événements rares et ne peut pas tolérer plus de 20 particules par photographies. La chambre à bulles est une avancée technologique remarquable, mais ne rivalisera pas avec les détecteurs gazeux (chambre à fil, à dérive...) offrant une probabilité de voir un événement rare par seconde.[7, 43]

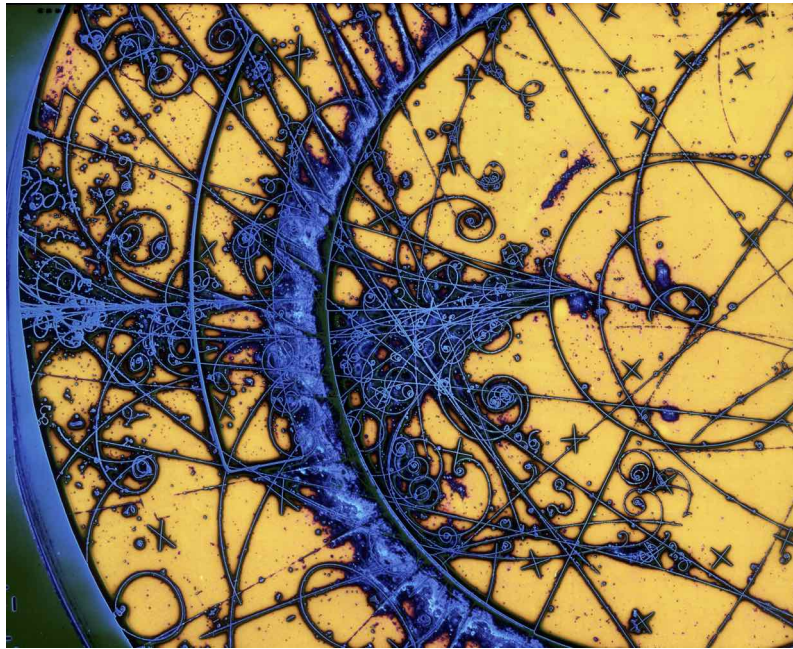


FIGURE 5.2: Traces de particules laissées dans une chambre à bulles

5.2 Détecteurs électriques

Jusque dans les années 1970, tout détecteur était de nature optique et chaque événement était alors analysé cliché par cliché. L'arrivée de détecteurs électriques était donc la bienvenue. Aujourd'hui, les détecteurs modernes sont essentiellement de nature électronique. Ils convertissent alors l'énergie des particules cédée au détecteur en signaux électriques. L'évolution des détecteurs électriques s'appuie donc principalement sur les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique et de l'informatique [35].

5.2.1 Compteur Geiger-Müller

Le compteur Geiger-Müller a été inventé en 1913 d'une collaboration entre JOHANNES HANS WILHELM GENGAR GEIGER et WALTHER MÜLLER. Le compteur est constitué d'un tube Geiger-Müller, d'un système d'amplification et d'un système d'enregistrement du signal. Le tube Geiger-Müller lui-même est une chambre métallique cylindrique remplie d'un gaz sous faible pression à travers lequel passe un fil métallique. La paroi du cylindre fait office de cathode et le fil d'anode. On crée alors une différence de potentiel entre la cathode et l'anode (voir figure 5.3).

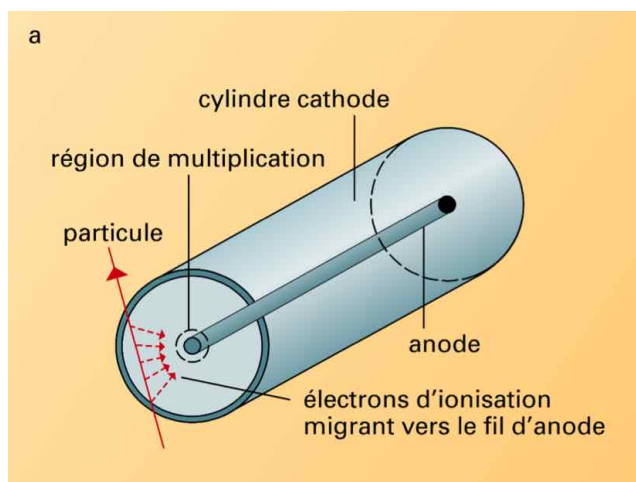


FIGURE 5.3: Schéma représentant le déplacement des électrons au passage d'une particule dans le tube Geiger-Müller

Lorsqu'une particule ou un rayonnement possédant suffisamment d'énergie entre à l'intérieur du tube, elle ionise le gaz : elle arrache des électrons aux molécules de gaz présentes dans le tube. Puisqu'il règne un champ électrique dans le tube, les électrons ont alors tendance à se déplacer vers le fil central (anode). Lorsqu'un électron est accéléré vers l'intérieur du tube, il va percuter d'autres électrons qui à leur tour vont percuter d'autres électrons. Les électrons se multiplient alors très vite¹. On appelle ce phénomène, avalanche électronique ou de Townsend (voir figure 5.4). La création de plusieurs avalanches est due à la production de photons UV dans l'avalanche initiale. Les photons UV ne sont pas affectés par le champ électrique et se déplacent alors latéralement à l'axe de l'anode. Ils produisent ainsi d'autres événements ionisants qui conduisent à la création d'autres avalanches, qui à leur tour produisent plus de photons UV. Un signal électrique est créé lorsque l'avalanche d'électrons atteint le fil.

1. Un seul électron ne suffit pas à déclencher un signal électrique sur le fil. C'est pourquoi il faut beaucoup d'électrons (des millions) pour que le signal soit perceptible.

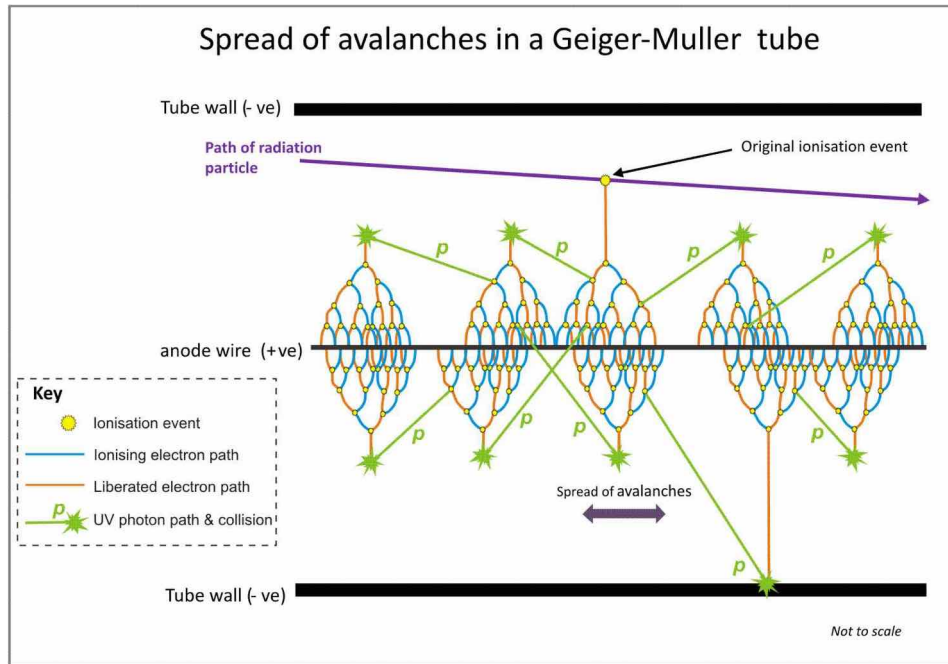


FIGURE 5.4: Schéma représentant une avalanche d'électrons dans un tube Geiger-Müller

Grâce à ce signal électrique, on sait en quelques microsecondes qu'une particule est passée par là. Ce mécanisme permet alors de déclencher à coup sûr, et non plus au hasard, la détente d'une chambre à brouillard lorsqu'une particule la traverse.

5.2.2 Compteurs proportionnels à fils

La *chambre à fils* ou *chambre proportionnelle multifilaire* a été inventée en 1968 par GEORGES CHARPAK ce qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1992. Ce détecteur fonctionne sur le même principe que le compteur Geiger-Müller. Cependant au lieu d'un seul fil, GEORGES CHARPAK eut l'idée d'en disposer plusieurs dans la même enceinte (voir figure 5.5). Ce dispositif fut possible grâce à l'amélioration des circuits électroniques et des transistors où chaque fil avait son propre amplificateur.

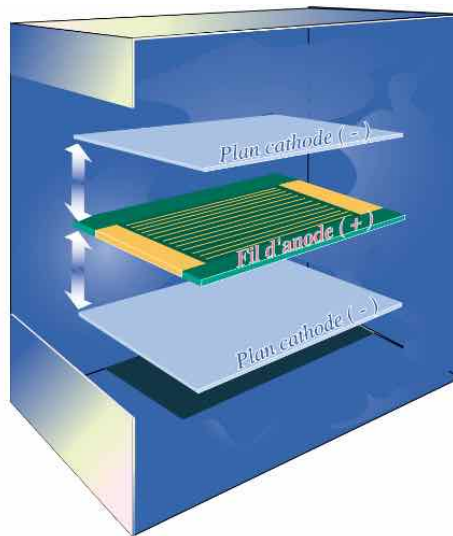


FIGURE 5.5: Schéma représentant un chambre proportionnelle multifilaire

Ce dispositif est alors capable de garder en mémoire la trajectoire de chaque événement pendant quelques microsecondes. De cette façon, des compteurs auxiliaires très rapides peuvent prendre la décision (en moins d'un dix millionième de seconde) de sélectionner ou non l'une des milliers de particules traversant la chambre en fonction de sa rareté. Cet exploit est possible car le temps de réponse des compteurs est inférieur à la durée de vie des électrons dans le gaz. Les chambres multifils offrent ainsi une bonne précision spatiale et temporelle grâce à leur rapidité. Encore une fois, grâce au progrès électronique, on put, pour la première fois, connecter le dispositif à un ordinateur afin de voir encore plus précisément les événements [56, 35].

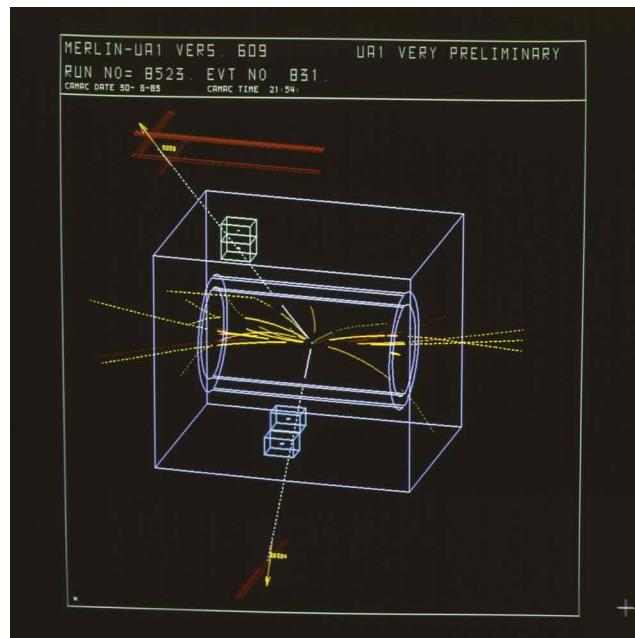


FIGURE 5.6: Image d'ordinateur montrant le fameux boson Z_0 dans les années 1980 créé à partir d'une chambre à fils © Cern

La *chambre à dérive* est une soeur jumelle de la chambre proportionnelle multifilaire. Elle permet cependant de détecter plus précisément les trajectoires des particules. Et ceci grâce à la mesure du temps que met un électron pour dériver jusqu'à un fil présent dans la chambre. Cette mesure se réalise en considérant l'instant où la particule entre dans la chambre (mesuré par des détecteurs auxiliaires) et celui où apparaît le signal sur le fil. À chaque temps mesuré est associée une position. La relation entre le temps et la distance est calculée au préalable par calibration du détecteur [35].

Les accélérateurs portent les particules à des énergies de plus en plus grandes et les détecteurs précédents devenaient trop petits pour lire toute la trajectoire d'une particule ainsi accélérée. C'est pourquoi on en construisit de plus en plus grands. Les chambres à dérive offrent ainsi une plus grande précision et nécessitent beaucoup moins de fils que les chambres à fils classiques [43].

Ces types de détecteurs sont qualifiés de proportionnels puisque l'intensité du signal électrique sur le fil est proportionnel à l'énergie de la particule incidente.

5.2.3 Détecteur à scintillation

Le détecteur à scintillation est un détecteur inventé en 1944 par le physicien anglais SAMUEL CROWE CURRAN. Il est composé d'un scintillateur et d'un photomultiplicateur (voir figure 5.7). Le scintillateur est un matériau qui émet de la lumière lorsqu'un faisceau de particules le traverse. Le faisceau excite les atomes présents dans le scintillateur qui émettent ensuite des photons². Le photomultiplicateur, lui, est un dispositif permettant de détecter les photons et, par effet photoélectrique, d'arracher des électrons d'un métal à une photocathode.

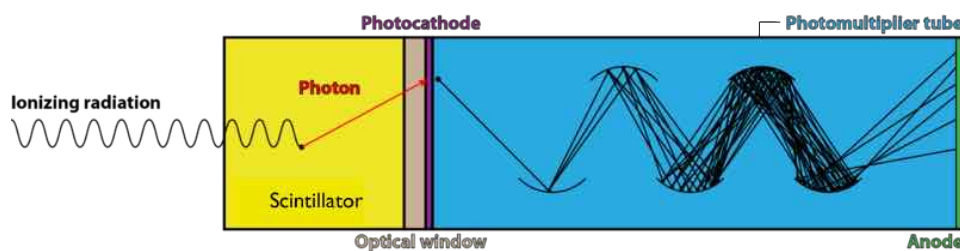


FIGURE 5.7: Schéma explicatif d'un détecteur à scintillation

Après le passage du faisceau dans le scintillateur, les photons émis sont directement dirigés vers le photomultiplicateur et plus précisément sur un photo-détecteur ou photo-cathode (une mince couche métallique) qui émet à son tour des photoélectrons par effet photoélectrique³. Les photoélectrons sont ensuite focalisés sur un électro-multiplicateur, constitué d'une série de dynodes⁴ (entre dix et quatorze). La première dynode, arrache deux à cinq électrons par

2. Grain élémentaire de lumière, et plus généralement de rayonnement électromagnétique, la lumière visible n'étant qu'une des formes de ce dernier. Sa masse est nulle. Le photon véhicule l'interaction électromagnétique au niveau élémentaire.

3. L'effet photoélectrique est le phénomène par lequel un ou plusieurs électrons quittent le nuage électronique dans lequel ils étaient (autour de l'atome) et acquièrent une certaine énergie cinétique sous l'influence d'une onde électromagnétique. (tiré de Wikipedia)

4. Une dynode est une électrode servant de support à un matériau sélectionné pour ses capacités d'émission secondaire. L'émission secondaire est un processus ressemblant à l'effet photoélectrique, mais utilisant des électrons comme particule incidente. L'électron qui arrive ainsi avec quelques centaines d'eV sur un matériau favorisant le processus, va générer quelques dizaines d'électrons de beaucoup plus faible énergie, qui, par la différence de potentiel entre la première dynode et la seconde, iront, en accélérant, vers la seconde dynode pour provoquer à nouveau le même mécanisme. (tiré de Wikipedia)

photoélectron, amplifiant ainsi le signal électrique. Le même mécanisme d'amplification est appliqué sur les dynodes successives, dont le but est de transformer le photoélectron initial en un paquet d'électrons suffisamment grand pour constituer un signal électrique mesurable (voir figure 5.7).

5.3 Détecteurs actuels

Une multitude d'autres types de détecteurs ont vu le jour comme l'émulsion nucléaire, la chambre à étincelles, le détecteur à semi-conducteur, le détecteur Tcherenkov, le détecteur à transition de radiation ou la chambre à micro-piste. Ils utilisent tous plus ou moins les mêmes principes que ceux déjà présentés, mais nous n'en parlerons pas ici.

Ce bref historique avait pour but de présenter les principaux détecteurs et les principes de base pour comprendre leurs fonctionnements. Dans les détecteurs modernes, les mêmes principes sont appliqués pour permettre de " voir " les particules et leurs trajectoires. Quant à l'identification des particules, qui est la tâche principale des détecteurs, elle constitue un problème primordial et assez complexe dans la physique des hautes énergies. C'est pour cela qu'à la différence des anciens détecteurs, les détecteurs modernes ont la faculté de pouvoir " voir " pratiquement tous les évènements et leurs réactions aussi complexes soient-elles. Pour se faire, on utilise plusieurs détecteurs simultanément (voir figure 5.8) en plus d'un réseau en ligne d'ordinateurs et de serveurs capables de travailler conjointement. Le rôle joué par les détecteurs gazeux présenté jusqu'ici est toujours d'actualité, à la seule différence qu'ils sont couplés à des moyens informatiques plus performants.

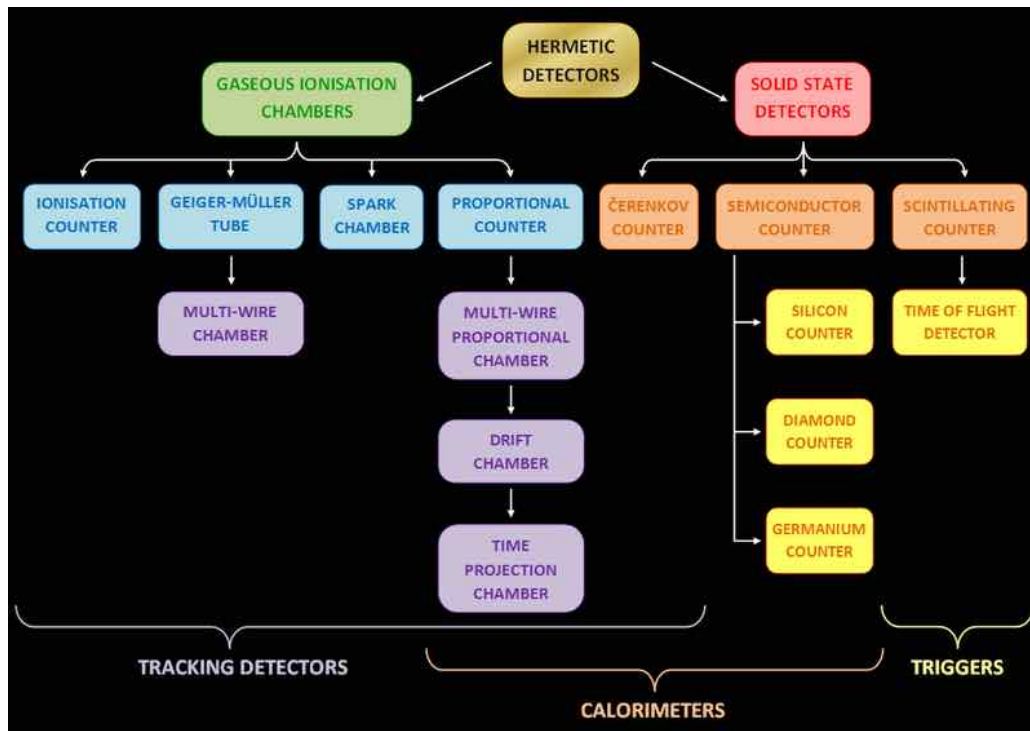


FIGURE 5.8: Diagramme montrant les différents composants pouvant paraître dans un détecteur moderne

6 Principes physiques liés à l'identification des particules

Maintenant que nous avons vu un éventail des types de détecteurs qu'il existe, intéressons nous de plus près aux principes physiques présents dans ces détecteurs qui permettent d'identifier les particules présentes dans les collisions créées par les accélérateurs. Les particules et les radiations qu'elles peuvent produire sont détectées uniquement par leurs interactions avec la matière (ionisation). En effet, on détecte une particule uniquement parce qu'elle interagit avec la matière du détecteur. Il faut savoir aussi que la masse et la charge associées à une particule suffisent à l'identifier.

Nous avons vu que lorsqu'une particule traverse un trajectographe (compteur proportionnel à fils), elle laisse derrière elle des indices qui permettent de déterminer sa trajectoire. Un des éléments qui fait varier la trajectoire de la particule est sa charge. Grâce à la trajectoire, nous pouvons alors avoir des indices sur la charge de la particule. Si elle est chargée (la plupart des particules), elle réagira aux champs magnétiques présents dans les détecteurs et ionisera la matière (gaz ou semi-conducteurs). Si elle n'est pas chargée (neutrons, photons, neutrinos), elle mettra en mouvement des particules chargées en collisionnant d'autres particules qui, elles, seront détectées. Dans le cas d'un photon, il mettra en mouvement des électrons par effet photoélectrique ou effet Compton. Grâce à la trajectoire laissée par la particule nous pouvons aussi déterminer la quantité de mouvement de celle-ci.

Dans un détecteur, on se renseigne également sur la vitesse des particules. Cette fois-ci en plus des trajectographes, on utilise des calorimètres, des détecteurs à semi-conducteur, des détecteurs Tcherenkov ou des détecteurs à transition de radiation. Mais à quoi sert la vitesse d'une particule pour l'identifier ? Et bien en liant la mesure de la vitesse et l'expression de la quantité de mouvement, on peut déterminer la masse d'une particule.

Vous l'aurez compris, pour identifier une particule, en plus des principes physiques présents dans les détecteurs qui nous renseignent sur la trajectoire et sur la vitesse des particules, il est préférable de savoir prédire quelles particules seront présentes dans le détecteur en s'appuyant sur la théorie quantique¹ et la physique des particules. Certains détecteurs sont capables d'effectuer toutes les techniques en même temps alors que d'autres seront plus sélectifs.

6.1 Déterminer la quantité de mouvement

Pour que la trajectoire d'une particule nous permette de déterminer la quantité de mouvement d'une particule, il faut être capable de la lire à l'aide d'un détecteur. Les détecteurs à gaz (chambre à brouillard, à fils ou à dérive) ou liquide (chambre à bulles) sont capables de la lire grâce à l'ionisation du gaz/liquide au passage de la particule. Une trajectoire droite ne nous dit rien de plus que sa présence dans le détecteur. C'est pour cette raison qu'on courbe la trajectoire des particules chargées à l'aide d'un champ magnétique pour qu'elle nous révèle ses caractéristiques (voir figure 6.1).

1. Formalisme mathématique qui sous-tend toute la physique contemporaine, à l'exception de la théorie de la gravitation.

La trajectoire courbe d'une particule, nous donne, rien qu'en la regardant, plusieurs indications préliminaires. En fonction du sens de la courbe de la trajectoire, on peut savoir le signe de la charge électrique de la particule, par exemple. Parfois, la courbe devient hélice. Ce qui est caractéristique de ralentissements, puis d'arrêts d'un électron ou d'un positron. Cependant, le but principale, est de déterminer la quantité de mouvement de la particule à partir de laquelle on pourra déduire sa masse (voir section 6.3). Pour se faire, on utilise l'équation 2.11 du mouvement circulaire de la particule dans un champ magnétique. On l'écrit ensuite en fonction de p :

$$r = \frac{mv}{qB} \Leftrightarrow mv = rqB \Leftrightarrow p = rqB$$

La quantité de mouvement devient alors le produit entre le rayon, la charge et le champ magnétique. Nous pouvons facilement calculer la quantité de mouvement p car nous connaissons le champ magnétique B et le rayon r de la trajectoire. Nous ne connaissons à ce moment certes pas encore la charge de la particule, mais nous pouvons toutefois nous permettre d'émettre des hypothèses. En effet, une particule a toujours une charge de $1; -1; 0; -1/3; 2/3$. En plus d'une théorie qui permet de prédire ce qui peut se passer lors d'une collision, les indications présentes dans la trajectoire nous permettent aisément de déterminer la charge à attribuer à chaque particule.

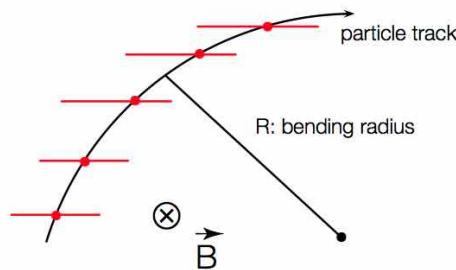


FIGURE 6.1: Trajectoire courbe d'une particule dans un champ magnétique \vec{B}

6.2 Déterminer la vitesse

Pour connaître quelle méthode adopter pour déterminer la vitesse d'une particule, il faut d'abord estimer la vitesse d'approche de celle-ci. Si la vitesse d'une particule est bien inférieure à la vitesse de la lumière c ($\beta \ll 1$), on préfère déterminer sa vitesse avec la mesure de l'énergie (voir section 6.2.1) ou celle du temps de vol (voir section 6.2.2). Lorsque la vitesse de la particule est proche de c ($\beta \cong 1$), l'étude des radiations laissées par la particule est plus appropriée. On utilisera alors l'effet Cherenkov (voir section 6.2.3) ou encore la radiation de transition qui, elle, dépend directement du facteur γ (bien qu'elle soit très utilisée, nous ne présenterons cependant pas cette méthode).

6.2.1 Mesurer l'énergie

L'une des façons de déterminer la vitesse d'une particule est de mesurer son énergie. Afin de mesurer l'énergie d'une particule et d'en déduire sa vitesse, on utilise des détecteurs appelés calorimètres. Il en existe deux types. Les calorimètres électromagnétiques qui arrêtent les électrons, les positrons et les photons et les calorimètres hadroniques qui arrêtent les autres particules, sauf les muons et les neutrinos.

Prenons l'exemple d'un calorimètre électromagnétique. Lorsqu'une particule traverse un milieu rempli d'un gaz ou d'un liquide, elle va interagir avec celui-ci par ionisation et donc libérer des électrons. Il existe deux sortes de processus d'interaction. Le premier est appelé Bremsstrahlung² : lorsqu'un électron est ralenti, il émet un rayonnement de freinage sous la forme d'un photon. Le deuxième est la création de paires : lorsqu'un photon traverse un milieu dense, il peut interagir avec les atomes et produire une paire d'électron-positron. Lorsque les deux processus s'enchaînent, cela donne lieu à une gerbe électromagnétique (voir figure 6.2). La gerbe s'arrête lorsque les particules n'ont plus assez d'énergie pour poursuivre leur course. Selon le milieu traversé, la gerbe ira plus ou moins loin. Contrairement à un trajectographe, un calorimètre doit alors interagir au maximum pour arrêter la particule afin de recueillir toute son énergie. Pour se faire, on doit mettre suffisamment de matière pour arrêter la gerbe électromagnétique. Vu que nous connaissons la quantité et les propriétés de la matière présente dans le détecteur, nous pouvons déduire, une fois calibré, l'énergie de chaque particule qui interagit avec le milieu.

En ralentissant, les particules ionisent le milieu dans lequel elles arrivent et perdent ainsi de l'énergie que l'on peut calculer. Ce ralentissement se traduit comme la quantité d'énergie E perdue par unité de longueur x (tiré de la formule de Bethe-Bloch étant plus complexe) :

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2) \quad (6.1)$$

Les valeurs $\beta = \frac{v}{c}$ et $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ dépendent directement de la vitesse. On peut ainsi estimer la vitesse v de la particule, bien que les calculs à faire dépassent le cadre théorique de ce document.

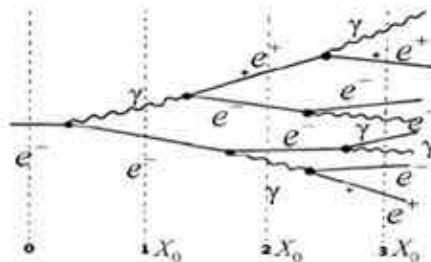


FIGURE 6.2: Schéma présentant la perte d'énergie d'un électron en gerbes électromagnétiques

6.2.2 Mesurer le temps de vol

Une autre façon de déterminer la vitesse d'une particule n'étant pas trop relativiste et dont l'énergie est comprise entre 0,1 et 5 $\frac{GeV}{c}$ est de mesurer le temps de vol (TOF, pour Time Of Flight) de cette particule. Le temps de vol est le temps que met une particule pour se déplacer entre deux points. La distance entre deux points est prédéfinie à l'avance par le détecteur. C'est la distance entre deux fils d'une chambre à fil ou d'une chambre à dérive, par exemple. Le temps de vol t est déterminé comme le rapport entre la distance prédéfinie L parcourue par la particule et sa vitesse v :

$$t = \frac{L}{v}$$

2. Le rayonnement de freinage ou "Bremsstrahlung" en allemand est le mécanisme d'émission de photon associé au freinage ressenti par une particule chargée lors de son passage près du noyau d'une autre particule.

Grâce au temps de vol, nous pouvons alors déterminer la vitesse de la particule :

$$v = \frac{L}{t} \quad (6.2)$$

6.2.3 Effet Cherenkov

Une troisième façon de mesurer la vitesse d'une particule est d'utiliser l'effet Cherenkov, pouvant être orthographié Tcherenkov ou encore Čerenkov. Il a été décrit entre 1934 et 1937 par SERGUEÏ IVANOVITCH VAVILOV et PAVEL ALEKSEÏEVITCH TCHERENKOV. Si ce sont les recherches de Tcherenkov qui établissaient les propriétés générales de la radiation, ce sont ILIA MIKHAÏLOVITCH FRANK et IGOR IEVGENIEVITCH TAMM qui décrivent cet effet de façon plus rigoureuse en 1937. Cherenkov, Frank et Tamm se partagent alors le prix Nobel de physique en 1958. C'est cet effet qui provoque la lumière bleue de l'eau entourant le cœur d'un réacteur nucléaire.

Il y a effet Cherenkov lorsqu'une particule de vitesse v_p se propage plus rapidement que la vitesse de la lumière v_c dans le même milieu. Si $v_p > v_c$, il y a émission de lumière. Si $v_p < v_c$, il n'y a pas d'émission. Comme pour tout phénomène lié à la lumière, le milieu qu'elle traverse possède un indice de réfraction $n = \frac{c}{v_c}$. Nous définissons le rapport entre la vitesse de la particule v_p et la vitesse de la lumière c comme $\beta = \frac{v_p}{c}$. Les ondes lumineuses émises (flèches bleues sur la figure 6.3) se déplacent à la vitesse $v_{em} = \frac{c}{n}$. La flèche rouge représente l'emplacement de la particule superluminal à l'instant $t = 0$. Le coin droit du triangle est l'emplacement de la particule après un certain temps t . En un temps t donné, la particule se déplace de la distance :

$$x_p = v_p t = \beta c t$$

, alors que les ondes lumineuses émises parcourent la distance :

$$x_{em} = v_{em} t = \frac{c}{n} t$$

Ainsi l'angle θ entre la trajectoire de la particule et le front d'onde est décrit par :

$$\cos(\theta) = \frac{ct}{n \beta ct} = \frac{1}{\beta n} = \frac{v_{em}}{v_p}$$

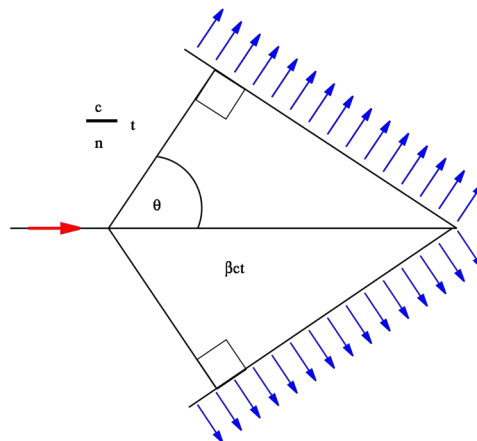


FIGURE 6.3: Schéma représentant le front d'onde produit par l'effet Cherenkov

La particule entrant dans un milieu à la vitesse v_p , crée des perturbations qui se propagent à la vitesse v_{em} (voir figure 6.4). Sachant la vitesse $v_c = v_{em}$ de la lumière dans le milieu du détecteur et connaissant l'angle θ créé par le front d'onde, on peut aisément déterminer la vitesse v_p de la particule entrante :

$$v_p = \frac{v_c}{\cos(\theta)} \quad (6.3)$$

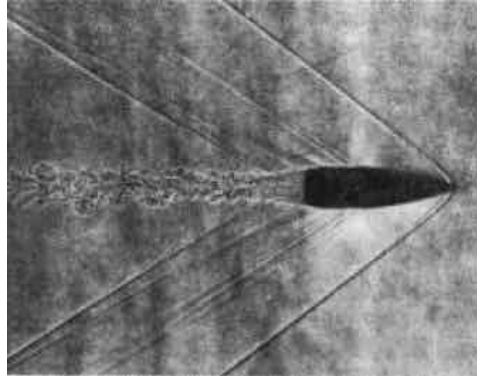


FIGURE 6.4: Photographie d'une radiation Cherenkov

6.3 Déterminer la masse

Jusqu'ici, nous avons déterminé la quantité de mouvement de la particule en étudiant sa trajectoire et déterminé sa vitesse avec l'une des différentes méthodes présentée précédemment. Il ne reste à présent plus qu'à déterminer sa masse afin de l'identifier. Il suffit de transformer l'expression de la quantité de mouvement en fonction de la masse. Puis, en liant la mesure de la vitesse [Bethe-Bloch (équation 6.1), du temps de vol (équation 6.2), de l'effet Cherenkov (équation 6.3) ou de la radiation de transition] et celle de la quantité de mouvement (équation 2.15), on peut déterminer la masse de la particule. La masse m est égale au rapport entre la quantité de mouvement p et le produit entre la vitesse $v = \beta c$ et le facteur γ :

$$p = \gamma m v \Leftrightarrow m = \frac{p}{\gamma v} = \frac{p}{\gamma \beta c}$$

6.4 Identification des particules

Lorsque la masse m aura été déterminée (en liant la mesure de la vitesse et l'expression de la quantité de mouvement), il suffira alors de comparer la valeur obtenue avec un tableau représentant toutes les particules. On pourra ainsi identifier la particule dont on ne connaissait, au départ, que la quantité de mouvement et la vitesse.

Prenons comme exemple la chambre à bulles (voir figure 6.5). Nous possédons au départ uniquement la photographie d'une collision. Nous mesurons ensuite la courbure des trajectoires de chaque particule issues de la collision ainsi que leurs vitesses. Après cela nous lions chacune des mesures à l'expression de la quantité de mouvement afin d'obtenir la masse de chaque particule. En connaissant leurs masses, nous pouvons déterminer de quelles particules il s'agit et ainsi dessiner un schéma global de la collision. Grâce aux détecteurs modernes et à l'informatique, tout le processus est pratiquement automatisé et devient alors plus rapide.

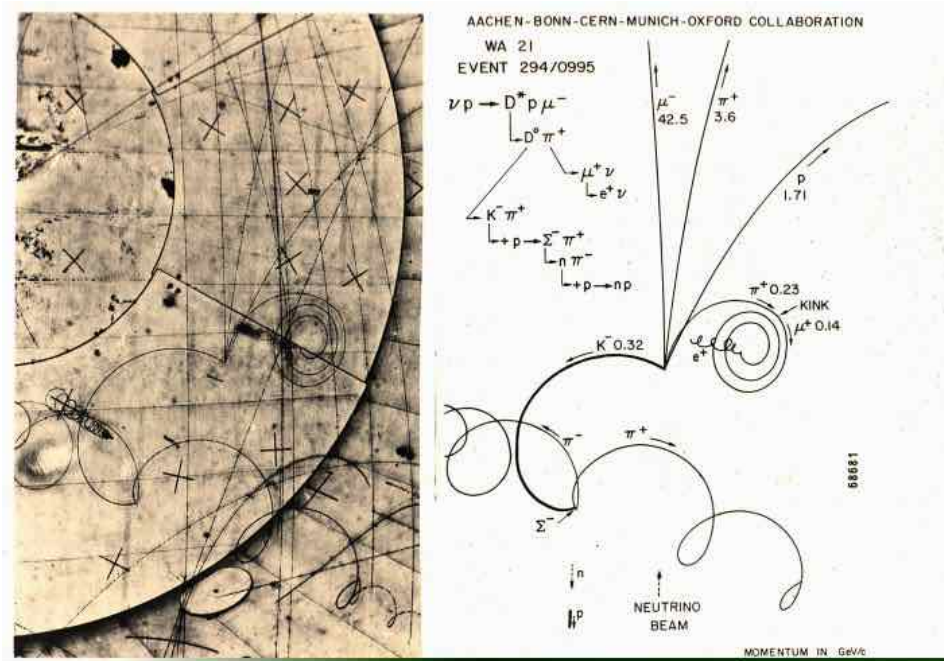


FIGURE 6.5: Un proton de 300 GeV produisant 26 particules chargées dans une chambre à bulle au Fermilab

Les particules subatomiques sont les composants de la matière. Elles sont de taille inférieure à un atome³. On distingue les particules élémentaires et composites.

Les particules élémentaires se répartissent en deux groupes, les quarks et les leptons. Il y a six types de quarks : les quarks u et d, les quarks c (charmés) et s (étranges), et enfin les quarks t (top) et b (beauté). La catégorie des leptons, qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte, regroupe l'électron et le neutrino de l'électron, le muon et le neutrino du muon, le tau et le neutrino du tau.

Quatre forces fondamentales assurent la cohésion des particules. Elles sont portées par des particules spéciales appelées bosons. La force électromagnétique est portée par le photon ; la force faible par les bosons W et Z ; la force forte par le gluon ; la gravité est probablement portée par le graviton qui n'a pas encore été découvert [14] (voir figure 6.6).

3. Si les protons et les neutrons avaient un diamètre de 10 cm, les quarks et les électrons mesureraient environ 0,1 mm et un atome entier ferait environ 10 km de diamètre. Ainsi, un atome est constitué à plus de 99,99 % de vide [15].

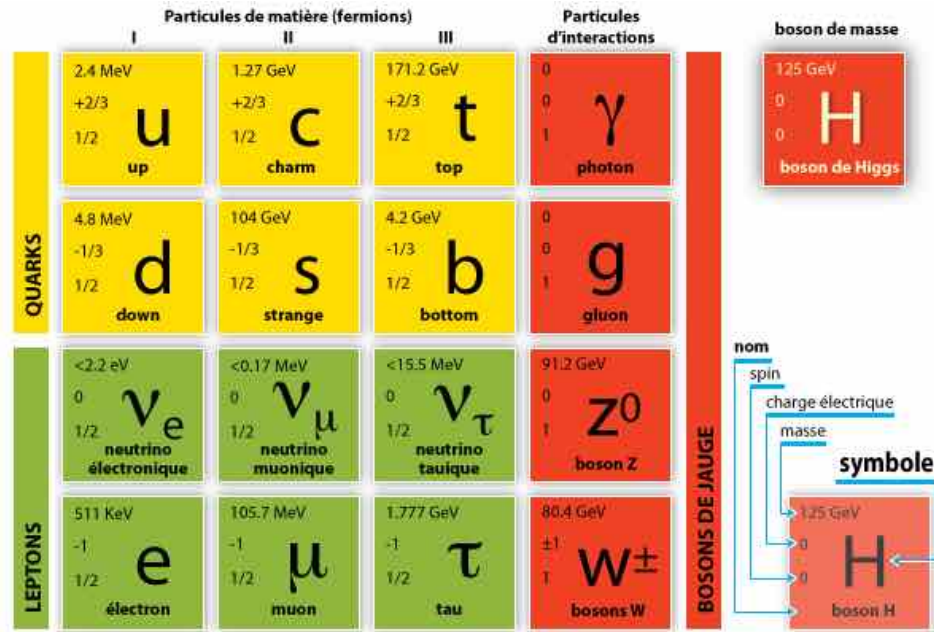


FIGURE 6.6: Tableau des particules élémentaires et leurs caractéristiques

Nous devons savoir que nous ne trouverons jamais un quark seul dans des conditions normales. Les quarks interagissent entre eux grâce à l'interaction forte et donc grâce aux gluons. Lorsqu'ils s'assemblent, les quarks ou anti-quark forment des particules appelées composites ou hadrons. Ainsi, les neutrons et les protons sont composés de quarks et sont sensibles à la force forte. Les neutrons contiennent un quark u et deux quarks d ; les protons contiennent deux quarks u et un quark d. Une multitude d'autres particules composites peuvent exister (voir figure 6.7).

	Nom (saveur)	Symbole	Constitution (en quarks)	Masse (MeV/c ²)	Spin	Charge électrique (e)	Temps de vie (s)	
Hadrons	proton	p	uud	938	$\frac{1}{2}$	1	stable	
	Baryons qqq	anti-proton	\bar{p}	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$		938	-1	
		Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$	neutron	n		udd	940	0
	lambda		Λ	uds		1116	0	$2 \cdot 10^{-10}$
			sigma	Σ^+		uus	1189	+1
	Σ^0	uds		1192		0	$5,8 \cdot 10^{-20}$	
	Σ^-	dds		1197		-1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	
	xi	Ξ^0	uss	1315		0	$2,9 \cdot 10^{-10}$	
		Ξ^-	dss	1321		-1	$1,64 \cdot 10^{-10}$	
omega	Ω^-	sss	1672	$\frac{3}{2}$	-1	$0,8 \cdot 10^{-10}$		
Mésons $q\bar{q}$	pion	π^+	$u\bar{d}$	140	0	+1	$3 \cdot 10^{-8}$	
	kaon	K^-	$s\bar{u}$	494	0	-1	10^{-8}	
	rho	ρ^+	$u\bar{d}$	770	1	+1		
	B-zéro	B^0	$d\bar{b}$	5279	0	0		
	eta-c	η_c	$c\bar{c}$	2980	0	0		

FIGURE 6.7: Tableau de quelques particules composites

7 Utilité des accélérateurs et des détecteurs

Pourquoi le monde des accélérateurs et des détecteurs intéresse-t-il le monde de la recherche scientifique depuis le début du XXe siècle ? Pourquoi cette branche qu'est la physique des particules est-elle devenue si importante ? Ces machines ont-elles d'autres applications ? Il est intéressant de se demander à quelles fins elles sont utilisées.

7.1 Applications

On pourrait croire que les accélérateurs et les détecteurs de particules sont uniquement développés pour étudier les lois fondamentales de la nature. Pourtant ils sont également employés dans les secteurs industriels et médicaux. Leur impact est conséquent mais passe souvent inaperçu dans notre vie quotidienne.

Les accélérateurs de particules jouent un rôle clé dans la recherche en science des matériaux. Nous l'avons vu, un faisceau circulant le long d'un cercle émet des photons, appelé "rayonnement synchrotron". Dans un premier temps, ce rayonnement était problématique puisqu'il faisait perdre de l'énergie aux particules circulant dans un accélérateur circulaire. A la fin des années 1950, les chercheurs ont cependant commencé à se rendre compte du fort potentiel que présentait son utilisation notamment pour la spectroscopie et la diffraction. A partir des années 1960, on a construit des accélérateurs dans le seul but de produire un rayonnement synchrotron. Ce rayonnement se trouve dans la gamme du rayon X et sa brillance est 100 millions de fois plus grande que celle des tubes à rayons X ordinaires. C'est pour cette raison qu'il est utilisé par de nombreux scientifiques dans leurs travaux [19]. L'un des domaines d'application est la radiocristallographie. Grâce à la diffraction des rayons, on peut déterminer la structure et la composition d'un matériau et examiner ses états de surfaces. Les historiens s'en servent notamment pour étudier la structure des matériaux constituant des objets historiques. En biologie, les chercheurs l'utilisent pour étudier la structure en trois dimensions des protéines. On peut ainsi déterminer complètement la structure des ribosomes. Le rayonnement synchrotron est également utilisé en radiothérapie.

L'un des domaines ayant le plus d'impact sur notre vie quotidienne est la médecine. Avec le progrès fait pour développer des accélérateurs plus performants, on peut mettre en place de nouvelles techniques pour traiter le cancer, diagnostiquer plus facilement les maladies et stériliser le matériel médical.

Grâce à la radiothérapie, on peut détruire les cellules cancéreuses en bloquant leur capacité à se multiplier tout en épargnant les tissus sains périphériques. En envoyant des rayons X provenant d'un rayonnement synchrotron, par exemple, sur une zone cancéreuse, on endommage l'ADN des cellules cancéreuses qui mourront ensuite. Malheureusement, les rayons X ne font pas qu'endommager les cellules cancéreuses, ils endommagent aussi les cellules saines aux alentours de la zone cancéreuse. La protonthérapie évite au maximum ce type de dégâts. Son avantage est que les particules s'arrêtent lorsqu'elles atteignent une certaine profondeur dans le corps. Les rayons X, eux, ne s'arrêtent pas et traversent l'ensemble du corps.

L'imagerie médicale est un domaine de la médecine étant capital dans le diagnostic des pathologies et autres maladies. La tomographie par émission de positons (TEP) permet de mesurer en trois dimensions l'activité métabolique d'un organe grâce aux émissions produites par des positrons. Les premières images de TEP ont été prises au CERN, en 1977, alors que la découverte de positrons date de 1932 par CARL DAVID ANDERSON. Dans les années 1970 également, l'imagerie par résonance magnétique (IRM), permettant d'obtenir des vues 2D ou 3D de l'intérieur du corps, a pu être développée grâce aux principes physiques de base découverts en physique des particules dans les années 1930. Plus tard, le développement des aimants supraconducteurs dans les accélérateurs a également contribué à la hausse des performances d'acquisition des IRM.

Dans le domaine industriel où plus de 24 000 accélérateurs ont été construits lors de ces 60 dernières années dont 15 000¹ sont en service encore aujourd'hui, les accélérateurs sont utilisés pour un large éventail d'applications. On les utilise notamment pour la fabrication de membranes microporeuses, la radiographie industrielle, la gravure au micron dans le silicium et l'implantation d'ions pour l'élaboration de semi-conducteurs.

Les détecteurs, eux, sont beaucoup moins utilisés en dehors de la physique des hautes énergies. Les détecteurs gazeux fondés sur le concept Micromegas, issus du développement des chambres à fils en 1992, prennent cependant position depuis quelques années en dehors du domaine de la physique des particules. Ils présentent un fort potentiel pour l'instrumentation nucléaire, biomédicale et industrielle [54].

Voilà quelques applications des accélérateurs et des détecteurs de particules dans les domaines médicaux, industriels et scientifiques.

7.2 Recherche scientifique

Maintenant que l'on a vu certaines des applications des accélérateurs et des détecteurs dans les domaines médicaux et industriels, nous pouvons nous demander à quoi ils servent dans le domaine scientifique. Ces instruments permettent, à première vue, simplement de répondre à des questions d'ordre philosophique que tout le monde s'est déjà posées une fois : d'où je viens, quel est l'élément fondamental de la matière, comment l'univers a-t-il été créé, quelle est la grandeur de l'univers, y'a-t-il d'autres mondes que celui-ci, y a-t-il d'autres dimensions, ce que je vois est-il vraiment la réalité ? Il permet aussi de répondre à des questions plus liées à la physique : qu'est-ce que la masse, de quoi est constitué l'univers, pourquoi n'y a-t-il plus d'antimatière, à quoi ressemblait le Big Bang, qu'est-ce que la matière noire, la supersymétrie est-elle vraie, d'où provient l'accélération de l'expansion de l'univers, la « théorie des supercordes » est-elle exacte ?

Un accélérateur et un détecteur de particules ne répondent, certes, pas directement à ce genre de questions fondamentales. C'est plutôt le questionnement de l'homme sur le monde qui l'entoure qui permet d'y répondre. L'homme essaye de comprendre et de se représenter le monde dans lequel il vit en élaborant des théories qui collent le plus possible à ce qu'il voit, entend et ressent. Il essayera donc, par l'expérience, de confirmer ou d'infirmer son intuition. Plus il aura répondu aux questions qu'il se posait, plus il se questionnera sur ce qu'il ne connaît pas encore. Ce qui aura simplement comme conséquence de faire avancer la recherche. C'est pour cette raison qu'il existe un lien très fort entre la physique et la philosophie qui étaient d'ailleurs, au départ, la même discipline. C'est ce que l'on appelle, la recherche fondamentale.

1. En 2004. Le chiffre doit sensiblement être le même aujourd'hui. [20]

La recherche fondamentale a pour principal objectif la compréhension des phénomènes naturels, la mise en place de théories ou de modèles explicatifs. D'un autre côté, la recherche appliquée s'occupe de la mise au point de nouveaux objets ou de l'amélioration de techniques existantes [2]. Si les objets que nous utilisons au quotidien ont pu être mis au point par la recherche appliquée, c'est pratiquement toujours grâce à la recherche fondamentale. Elle est toujours à l'origine des découvertes réellement innovantes pour l'industrie. Nombre d'exemples tirés de l'histoire des sciences permettent de donner raison à cette affirmation.

Comme nous l'avons vu avec l'application médicale et industrielle des accélérateurs, une multitude d'autres inventions issues de la recherche appliquée ont vu le jour grâce à la recherche fondamentale. On peut alors citer le laser (lecteurs CD/DVD, codes-bar), le GPS, le microprocesseur, la télévision, les cartes à puces, etc. Ces inventions que l'on trouve dans pratiquement tous les appareils électroniques d'aujourd'hui sont des conséquences de la miniaturisation des composants électroniques suite à l'invention du transistor en 1947. Ces inventions résultent toutes des découvertes de la physique quantique des années 1930 élaborée dans la même foulée que la physique des particules.

Une découverte majeure qui n'a pour l'instant pas encore porté ses fruits est celle du boson de Higgs. Le boson de Higgs est une particule élémentaire dont l'existence a été postulée par plusieurs physiciens, dont PETER WARE HIGGS, dans les années 1960. C'est grâce à la construction du LHC que cette particule a été découverte en 2012, soit 52 ans plus tard que sa prédiction. Cette découverte confirme la théorie décrite par PETER WARE HIGGS. Elle permet d'expliquer pourquoi certaines particules ont une masse et d'autres n'en ont pas. Selon cette théorie, chaque particule acquiert une masse en interagissant avec un champ omniprésent (le champ de Higgs) porté par le boson de Higgs. C'est lui qui confère des masses à toutes les autres particules, ainsi qu'à lui même [49]. La masse d'une particule dépend ainsi de l'intensité avec laquelle elle interagit avec le boson de Higgs. Détecter cette particule constituait la clé de voûte du modèle standard.

Cette découverte qui, aujourd'hui, fait avancer uniquement la recherche fondamentale permettra peut-être dans plusieurs années de servir de support à la recherche appliquée pour développer de nouvelles technologies et applications utiles dans la vie courante. Sa découverte reste tout de même un triomphe pour la physique et le modèle standard qui n'a jusqu'ici pas encore été mis en défaut.

Voilà la tâche d'un accélérateur et d'un détecteur : permettre la confirmation d'une théorie, la faire évoluer, en découvrir de nouvelles afin de répondre aux interrogations de l'être humain par le biais de la recherche fondamentale pour ensuite permettre à la recherche appliquée, à partir de ces découvertes, de les faire fructifier afin de développer de nouvelles applications utiles à la société. D'un point de vue plus général, il n'y a pas de sciences qui ne servent à rien. Toutes les branches de la science ont pour vocation de se rejoindre au sommet d'une pyramide en partant chacune de son côté. Le but de la science est donc de réunir les connaissances liées aux phénomènes présents de ce monde en une théorie ultime.

8 Conclusion

Depuis leur invention il y a 100 ans, les accélérateurs et les détecteurs de particules ont envahi notre monde que ce soit au niveau de la recherche scientifique, du domaine médical, du domaine industriel et même dans la littérature et les films de science-fiction où l'on peut citer Iron Man 2 et Anges et Démons. Cet engouement pour ces technologies est compréhensible puisqu'outre leurs coûts colossaux, leurs caractéristiques le sont aussi. La salle contenant un détecteur comme ATLAS, un des détecteurs du CERN, peut atteindre une hauteur de 40 mètres, une longueur de 55 mètres et une largeur de 35 mètres. De la même façon, le LHC du CERN a une circonférence de 26,659 kilomètres. Au-delà de ces chiffres étonnants pour des outils scientifiques, chaque machine peut desservir une quarantaine d'expériences simultanément 24 heures sur 24. Au total, dans le projet global du LHC, plus de 7 000 scientifiques, soit la moitié des physiciens qualifiés dans le domaine des particules venant du monde entier, utilisent ces outils chaque année. Afin de traiter toutes les données issues des collisions, la grille de calcul du LHC, nommée WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) est composée de plusieurs dizaines de milliers d'ordinateurs. Ce centre de toutes les grandeurs est devenu, en quelque sorte, le laboratoire des laboratoires.

C'est pour cette raison que nous avons tenté de saisir les phénomènes et les mécanismes de base qui permettent de comprendre le fonctionnement d'un accélérateur et d'un détecteur de particules. J'espère, après avoir accepté le défi qui vous était proposé en introduction, que vos interrogations antérieures sur les accélérateurs et les détecteurs de particules se soient transformées en connaissances riches et variées. Après lecture, les idées essentielles à retenir sont simples. Pour fonctionner de façon optimale, les accélérateurs et les détecteurs de particules utilisent les lois électromagnétiques et relativistes. En additionnant ces deux théories avec celles de la physique des hautes énergies et de la théorie quantique ainsi qu'à l'arrivée de l'ère informatique, le XXe siècle est, au niveau scientifique, l'un des siècles le plus fécond. De plus, la course effrénée, riche en émotions et frénétique vers la découverte de nouvelles particules et de nouveaux phénomènes a contribué au perfectionnement de ces outils emplis de savoirs et d'ingéniosité. Mais c'est surtout grâce à l'enthousiasme pour la recherche fondamentale des physiciens et à l'interrogation philosophique qu'ils apportent, que ces machines sont aujourd'hui employées quotidiennement, pour le bien de beaucoup, dans des domaines extérieurs à celui de la physique.

Nous pouvons à présent nous demander quelles seront les prochaines innovations que l'on apportera à ces bijoux de technologie. Fruit de dix ans d'études, la prochaine machine qu'a présentée le Conseil du Comité international du CERN le 12 juin 2013 est le Collisionneur linéaire international (International Linear Collider). Il collisionnera des électrons et des positrons. À la différence du LEP, prédécesseur du LHC, cette nouvelle machine de titans pourra atteindre jusqu'à 1 000 GeV et promettre une plus grande netteté des collisions. Pour reprendre l'image d'un physicien japonais, le LHC envoie les unes contre les autres des tranches de tartes aux cerises. La collision produit une bouillie de pâte, de sucre et de cerises. L'on a alors parfois la chance d'observer le choc de deux noyaux de cerises. L'ILC, lui, ne fera se heurter que des noyaux de cerises! On aura ainsi peut-être la chance d'observer la désintégration du boson de Higgs en particules invisibles : la matière noire.

Bibliographie

Ouvrages sur la physique des particules

- [1] M. Crozon. *L'univers des particules*. Collection Points. Série Sciences. Éd. du Seuil, 1999.
- [2] René Bimbot et Isabelle Martelly. *La recherche fondamentale, source de tout progrès*. La revue pour l'histoire du CNRS, 2009.
- [3] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker. *Fundamentals of Physics*. John Wiley and Sons, 2010.
- [4] E. Klein. *Petit voyage dans le monde des quanta*. Champs. Sciences. Flammarion, 2009.
- [5] Yoram Kirsh Yuval Nééman. *Les chasseurs de particules*. Editions Odile Jacob, 1999.

Cours et présentations concernant les accélérateurs

- [6] Patrick Ausset. *Panorama des accélérateurs de particules*. Institut de Physique Nucléaire.
- [7] Pierre Bareyre, Jean-Pierre Baton, Georges Charpak, Monique Neveu, and Bernard Pire. *Particules élémentaires-détecteurs de particules*. *Universalis*, 2013.
- [8] Eric Baron. *Panorama des accélérateurs et de leurs utilisations (GANIL)*. Ecole Accélérateur IN2P3, 2006.
- [9] Jean-Luc Biarrotte. *Cavités accélératrices RF*. CNRS / IPN Orsay, 2009.
- [10] Johann Collot. *Accélérateurs de particules-Principes et limitations*. Ecole doctorale de physique de Grenoble et du DESA de Casablanca, 2006.
- [11] Jean-Marie De Conto. *Accélérateurs de particules une introduction*. Université Joseph Fourier LPSC - Grenoble, 2011.
- [12] Lyndon Evans. *The Cern Large Hadron Collider : Accelerator And Experiments*. European Organization for Nuclear Research, 2008.
- [13] Philippe Lebrun. *La supraconductivité, technologie-clé des accélérateurs de particules*. CERN, 2011.
- [14] C Lefevre. *Destination universe : The incredible journey of a proton in the large hadron collider*. destination univers : Le fabuleux voyage d'un proton dans le grand collisionneur de hadrons. Jan 2008.
- [15] C Lefevre. *Lhc guide book (french version)*. Feb 2009.
- [16] L. Marleau. *Introduction à la physique des particules*. Université Laval, 2013.
- [17] H. Monard. *Les Sources d'électrons*. Ecole Accélérateur IN2P3, 2009.
- [18] Alex C. Mueller. *Utilité des accélérateurs, types de machines, physique nucléaire et des particules associées*. IN2P3, 2009.
- [19] J.-M. Ortega. *Qu'est ce qu'un accélérateur de particules ?* Université Paris-Sud, Orsay.

- [20] Hellborg R. Ragnar. *Electrostatic Accelerators : Fundamentals and Applications*. Springer, 2005.
- [21] C. A. Ramon. Considérations sur l'électro-aimant d'un synchrotron à gradient alterné. 1956.
- [22] Xavier Rouby. *Les accélérateurs en physique des particules*. Université libre de Bruxelles, 2007.
- [23] A. Tilmatine. *Phénomènes d'ionisation dans les gaz*.
- [24] Lancaster University. *Charged Particle Motion in a Magnetic Field*. Lancaster University, 1996.

Ouvrages, cours et présentations concernant les détecteurs

- [25] Chevalier. *Conception d'un détecteur*. IN2P3, 2011.
- [26] C. Grupen, B. Shwartz, and H. Spieler. *Particle Detectors*. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge University Press, 2008.
- [27] H.-C. Schultz-Coulon J. Stachel. *Particle ID*. Heidelberg Universität, 2011.
- [28] Andrey Korytov. *Particle Detectors*. University of Florida, 2008.
- [29] Sandro Palestini. *Introduction aux détecteurs de particules*. CERN, 2009.
- [30] Joël Pouthas. *Principes et techniques de la détection*. Ecole Accélérateur IN2P3, 2013.
- [31] Patrick Puzo. *Principes et techniques de détection à haute énergie*. Université Paris-Sud.
- [32] Divic Rapin. *Effet Cherenkov et radiation de transition*. Université de Genève, 2006.
- [33] F. Vannucci. *Atlas, le nouveau défi des particules élémentaires*. L'Esprit des sciences. Ellipses Marketing, 2007.
- [34] Pascal Vincent. *Techniques de base du détecteur*. Université Pierre et Marie Curie.

Thèses de doctorat

- [35] Gilles Barouch. *Analyse des phénomènes physiques liés au fonctionnement du détecteur gazeux à micropistes micromegas*. PhD thesis, Université de Paris-Sud UFR scientifique d'Orsay, 2001.
- [36] Nicolas Beaupere. *Etude du système électronique pour le projet du HL-LHC et recherche de nouvelle physique dans le spectre de masse invariante top anti-top au sein de l'expérience CMS du LHC*. PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [37] Guillaume Olry. *Etude d'une cavité accélératrice supraconductrice Spoke pour les accélérateurs de protons de forte intensité*. PhD thesis, Université Paris 7, 2003.
- [38] Aurélien Ponton. *Étude de la dynamique des faisceaux dans l'accélérateur primaire d'EURISOL et de ses cavités supraconductrices de type "triple spoke"*. PhD thesis, Université Paris Sud XI, 2009.

Revue scientifique

- [39] Nicolas Arnaud. Du cyclotron au synchrotron. *Élémentaire*, n°3, pages 39–42, novembre 2005.

- [40] Nicolas Arnaud. Les débuts des accélérateurs linéaires et circulaires. *Élémentaire*, n° 2 : *le neutron*, pages 33–38, 2005.
- [41] Nicolas Arnaud. Les premiers accélérateurs électrostatiques. *Elementaire*, n° 1, pages 36–41, 2005.
- [42] Jean-Michel Rifflet Chantal Meuris. Les aimants supraconducteurs au service du lhc. *CLEFS CEA*, n° 56, page 5, 2008.
- [43] Georges Charpak. Détection des particules. *La recherche*, n.99, page 78, 2000.

Ressources internet

- [44] Accélérateur de particules. *La recherche (larecherche.fr/ressources/mot-du-jour/)*, février 2009 (consulté le 18.08.13).
- [45] CEA. Comment "voir" des noyaux et des particules? *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (cea.fr/jeunes/themes/la-radioactivite/l-atome)*, 2012.
- [46] CERN. Le complexe d'accélérateurs. *home.web.cern.ch*, 2013 (consulté le 18.06.2013).
- [47] Wikipedia : EdC. Spectromètre de masse à temps de vol. *Wikipedia*, 2009.
- [48] Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Site internet du cern (<http://home.web.cern.ch/>). 2013.
- [49] Sophie Fleury. Pourquoi les physiciens traquent tant le boson de higgs? *L'internaute*, 2006 (consulté le 28.10.13).
- [50] F. Frommberger. Particle accelerators around the world. *elsa.physik.uni-bonn.de*, 2013 (consulté le 28.10.2013).
- [51] lhc closer. (<http://www.lhc-closer.es/>). 2013 (consulté le 13.08.2013).
- [52] lhc facts. (<http://www.lhc-facts.ch/>). 2013 (consulté le : 13.08.2013).
- [53] Maxisciences. Accélérateur. *maxisciences.com*, 2013 (consulté le 18.08.13).
- [54] Michel Mur. Une foison d'applications pour les nouveaux détecteurs micromegas. *irfu.cea.fr*, 2010 (consulté le 28.10.2013).
- [55] Cian O'Luanaigh. Le linac 4 accélère son premier faisceau. *home.web.cern.ch*, mars 2013 (consulté le 18.06.2013).
- [56] Laurent Sacco. Georges charpak et la chambre proportionnelle multifils. *Futura-Sciences (knowtex.com)*, 2010 (consulté le 10.09.2013).