



Les accélérateurs de particules

LES « CATHÉDRALES » DE LA PHYSIQUE

Véritable révolution dans l'histoire de la physique nucléaire, l'invention et la mise au point des accélérateurs de particules ont profondément bouleversé les méthodes de recherche des physiciens. Ces instruments ont permis d'obtenir des résultats concrets et décisifs dans le domaine de la physique des particules. Ces gigantesques machines ont permis de scruter plus profondément la matière. Et leurs applications ont été élargies à de nombreux domaines scientifiques comme industriels.

DE LA RADIOACTIVITÉ AUX ACCÉLÉRATEURS

A partir de la découverte de la radioactivité naturelle par **Henri Becquerel** en 1896, la recherche physique sur les rayonnements et sur les particules fondamentales de la matière, n'a cessé de se développer. Les expériences dans le but d'étudier l'impact du rayonnement de ces particules sur les noyaux atomiques jalonnent l'histoire de la physique au xx^e siècle. Le besoin de disposer de faisceaux de particules d'énergies de plus en plus élevées se fait alors sentir.

LES PREMIERS TRAVAUX SUR L'INTERACTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Cette quête fait naître l'idée de fabriquer une machine qui aurait pour rôle d'accélérer les particules afin d'en augmenter l'énergie. Équipement matériel très lourd, l'accélérateur de particules est un appareil qui permet d'accélérer un faisceau de particules élémentaires chargées en électricité (électrons, positrons, protons, antiprotons ou ions), c'est-à-dire d'augmenter sensiblement leur énergie cinétique (relative au mouvement) afin qu'elles deviennent des projectiles et percutent la matière, le but étant alors d'engendrer, grâce à ces collisions, de nouvelles particules ou encore une réaction nucléaire. Les vitesses atteintes dans les accélérateurs de particules s'approchent parfois de la vitesse de la lumière. L'énergie cinétique des particules accélérées se mesure en électronvolts (eV), l'électronvolt étant l'énergie acquise par une particule de charge égale à celle de l'électron qui subit une différence de potentiel électrique de 1 volt. Cette unité vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joules.

C'est dans les années 1930 que sont construits les premiers accélérateurs de particules. Les progrès sont relativement rapides et les énergies atteignent assez vite le mégaelectronvolt (MeV, million d'eV). Après la Seconde Guerre mondiale, les recherches reprennent et les premiers synchrotrons font leur apparition, enregistrant des énergies supérieures au gigaelectronvolt (GeV, milliard d'eV). Aux États-Unis puis en Europe, des laboratoires spécialisés dans la recherche nucléaire et de grands accélérateurs voient le jour et, en 1952, le Centre européen pour la recherche nucléaire est créé. Les constructions d'accélérateurs se succèdent, chacun apportant son lot d'observations, de résultats et de découvertes expérimentales. La course vers des énergies de plus en plus élevées continue et, afin d'accroître encore cette énergie, les collisionneurs sont inventés.

LE MODÈLE STANDARD DES PARTICULES ET DES INTERACTIONS

L'énergie atteinte par les collisionneurs permet de découvrir de nouvelles particules et de confirmer notamment l'hypothèse, émise en 1964, de l'existence des quarks, particules constitutives du proton et du neutron. Bientôt, l'usage des accélérateurs de particules dépasse le domaine de la recherche en physique nucléaire ; la médecine (pour le traitement de certains cancers), la biologie, la pharmacologie, l'optique ou l'archéologie sont autant de disciplines scientifiques qui s'y intéressent de près. Cette tendance à la diversification des applications se poursuit encore aujourd'hui tandis que, parallèlement, la taille et la puissance de ces accélérateurs ne cessent d'augmenter. Le CERN abrite actuellement le plus grand complexe d'accélérateurs utilisés en physique nucléaire et en physique des particules. Le fleuron en sera le LHC (Large Hadron Collider ou Grand collisionneur de hadrons), qui remplacera le LEP (Large Electron Positron Collider ou Grand collisionneur électron positron).

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX

La composition d'un accélérateur de particules est, en théorie, relativement simple. Ses 4 constituants sont :

- une source de particules chargées ;
- des accélérateurs ;
- des éléments pour guider et focaliser ces particules (sur une cible) ;
- des détecteurs de particules.

À partir d'une source à basse énergie (source d'ions ou canon à électrons), les particules chargées à accélérer sont injectées dans une chambre,

à l'intérieur de laquelle on a effectué un vide poussé où la pression est environ 10 milliards de fois plus faible que la pression atmosphérique. Elles sont alors accélérées par un champ électrique, produit par une source de haute tension ou par des tubes de radiofréquence, et guidées et focalisées par des champs magnétiques. En fin d'accélération, le faisceau de particules est dirigé sur une cible à bombarder. Celle-ci est placée à l'intérieur de l'accélérateur ou à l'extérieur. Dans ce dernier cas, un système d'extraction, généralement



magnétique, éjecte le faisceau de l'accélérateur. Le choc permet de créer d'autres particules qui sont alors observées et analysées par un **détecteur de particules**.

• Selon le rôle joué par le champ électrique et le champ magnétique, les accélérateurs de particules ne fonctionnent pas de la même façon. Il existe des accélérateurs dits « linéaires » où les particules accélérées se déplacent en ligne droite et des accélérateurs circulaires où la trajectoire des particules est courbée par un champ magnétique.

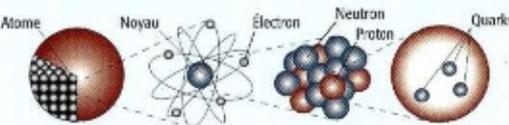
LES ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES

CONSTITUTION
Les accélérateurs linéaires sont constitués d'une succession de tubes sous vide, disposés en ligne droite et portés à des potentiels alternativement positifs ou négatifs. En passant d'un tube au suivant, une particule chargée est ainsi soumise à un champ électrique produit par une source de haute tension ou par des tubes de radiofréquence.

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Au cours d'une période, le champ électrique, qui est alternatif, est d'abord accélérateur puis s'inverse. Pour que l'accélération se poursuive, les particules doivent passer dans les cavités au moment où le champ est accélérateur. Le synchronisme avec le champ est obtenu quand les particules parcourent la distance entre les cavités en un temps égal à une période du champ. La condition est ainsi que le potentiel des tubes soit inversé à une fréquence synchrone avec le passage des particules. C'est le rôle du générateur de haute fréquence de fournir ce mode synchrone. Au fur et à mesure que la vitesse des particules augmente, la distance entre les cavités diminue afin que

DE L'ATOME AUX QUARKS



le temps de parcours reste égal à une période. L'énergie maximum des accélérateurs linéaires est ainsi limitée par la longueur de l'accélérateur.

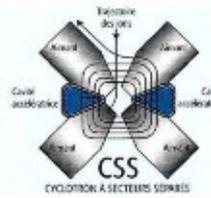
C'est une des raisons pour lesquelles les accélérateurs linéaires sont surtout utilisés comme injecteurs d'accélérateurs circulaires : c'est ainsi que le LINAC (Accélérateur linéaire d'électrons) du SLAC (Centre d'accélérateur linéaire de Stanford) permet d'atteindre, pour les électrons, des énergies de 50 GeV sur une distance de 3 km. Par ailleurs dans un éventuel collisionneur constitué de 2 accélérateurs linéaires, une même particule ne peut entrer en collision qu'une seule fois. C'est pour cela qu'on leur préfère les anneaux de stockage. Ainsi, au SLAC de Stanford, le Linac accélère des électrons vers différents cibles, et vers deux anneaux de stockage d'électrons et de positrons.

LES ACCÉLÉRATEURS CIRCULAIRES

Dans les accélérateurs circulaires, les trajectoires sont courbées par le champ magnétique d'électroaimants, appelés aimants de courbure. Le faisceau de particules peut ainsi accomplir plusieurs tours à l'intérieur des cavités et ainsi subir, lors de chaque passage une nouvelle accélération. L'énergie engendrée dans un tel accélérateur ne pourrait être obtenue à des valeurs semblables que dans un accélérateur linéaire extrêmement long. Les principaux accélérateurs circulaires sont les cyclotrons et les synchrotrons. Dans les premiers, les trajectoires des particules sont des spirales, dans les seconds, des courbes quasi circulaires refermées sur elles-mêmes.

LES CYCLOTRONS

Inventé en 1932 par Ernest Orlando Lawrence (prix Nobel de physique en 1939), le **cyclotron** est aujourd'hui l'accélérateur de particules le plus fréquemment utilisé.



CONSTITUTION

Accélérateur circulaire, le cyclotron est caractérisé par son principal constituant : l'électroaimant (bobine de fils métalliques cylindrique qui renferme un noyau ferreux).

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

L'électroaimant crée, à l'intérieur de l'accélérateur, un fort champ magnétique. Les particules (protons ou ions) qui sont injectées (souvent par le biais d'un accélérateur linéaire) dans la chambre à vide située entre les deux pôles magnétiques décrivent des trajectoires courbes de rayon de plus en plus grand – c'est-à-dire des spirales – quand leur énergie augmente.

La cavité accélératrice est constituée de deux parties électriquement indépendantes auxquelles est appliquée une tension alternative haute fréquence de sorte qu'à chaque demi-tour, la particule subisse un champ accélérateur en traversant l'espace qui sépare les deux parties du cyclotron. Toutefois, l'accroissement du rayon de la trajectoire à chaque accélération demande, au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse, de plus en plus d'espace afin que la particule puisse se mouvoir et l'énergie atteinte est limitée par la taille de l'aimant. D'autre part, au fur et à mesure que croît l'accélération des particules, la fréquence de leur rotation diminue, si bien que le nombre de tours que peuvent effectuer les particules au sein d'un cyclotron est limité. Ce sont là les inconvénients majeurs de ce type d'accélérateur. Les énergies accessibles dans les cyclotrons de type Lawrence ne peuvent guère dépasser quelques centaines de MeV. Cette limitation en énergie a cependant pu être dépassée dans les cyclotrons isochrones par l'utilisation d'un champ magnétique non uniforme.

Le GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), installé à Caen, est constitué de deux cyclotrons isochrones. D'autre part, dans les synchrotrons, la fréquence du champ de radiofréquence varie afin de maintenir le synchronisme au cours du cycle d'accélération.

DOMAINES D'APPLICATION

Le cyclotron a déjà plusieurs fois, apporté les preuves de son utilité et

Quarks, Bosons, Neutrinos...

Le corps humain

émet 3-4 millions de neutrinos par jour. La Terre en reçoit plus de 40 milliards par seconde et par cm².

Le 2 mars 1995

le quark top, le dernier des six quarks prédits, est découvert par le Fermilab. Le cinquième (le quark bottom) l'avait été en 1977.



Le LHC

sera l'accélérateur de particules le plus puissant jamais construit avec des collisions de protons à une énergie de 14 TeV (14 mille milliards d'électronvolts).

La plus grande part de la matière dont est fait l'Univers est invisible.



Le Quark top



200 fois plus lourd qu'un proton

Le LEP du CERN



27 km

La particule la plus massive

L'accélérateur le plus grand

de son efficacité. Outre ses principaux apports en recherche fondamentale (travaux sur la structure de la matière réalisés notamment au GANIL, en astrophysique comme au Centre de Recherches du Cyclotron de l'UCL, à Louvain-la-Neuve) ou dans le domaine de la physique nucléaire (projet de « systèmes hybrides » associant accélérateur de particules et réacteur nucléaire en vue de l'incinération des déchets ou de la production d'énergie) le cyclotron est utilisé en recherche médicale (pour le traitement de certains tumeurs cancéreuses par exemple) en neurologie, en pharmacologie... et même en histoire de l'art. **AGLAE**, l'accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire, est ainsi utilisé depuis 1989 afin d'identifier ou d'authentifier différents objets artistiques sans même avoir besoin de les toucher.



LES SYNCHROTRONS

CONSTITUTION

Un **synchrotron** est essentiellement un accélérateur de forme annulaire qui permet d'accélérer les électrons jusqu'à une vitesse proche de celle de la lumière. Cyclotron amélioré, il diffère de son prédécesseur par le fait que le champ magnétique qui le traverse croît au fur et à mesure qu'il augmente l'énergie des particules qui y circule.

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Tandis que dans un cyclotron, le rayon de la trajectoire des particules augmente au fur et à mesure de l'accélération, le synchrotron permet d'adapter le champ magnétique à l'énergie cinétique des particules afin que leur trajectoire circulaire soit toujours la même. Cette capacité du synchrotron à « maintenir » la trajectoire des particules permet d'éviter les inconvénients du cyclotron. Ainsi, alors que dans ce dernier, la fréquence des rotations diminue avec l'accroissement de l'énergie, le synchrotron permet aux particules chargées d'être soumises à des forces accélératrices sans que ne varie leur trajectoire circulaire. Les synchrotrons peuvent accélérer toutes les particules chargées (protons, ions ou électrons). Ils ne sont limités en énergie que par leur taille et leur coût. Enfin, dans les synchrotrons, et dans tous les accélérateurs où les particules

parcourent des distances très grandes, il faut focaliser le faisceau pour éviter son grossissement et sa perte dans les parois de la chambre à vide. C'est le rôle des **aimants quadrupôles**.

LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON

La vocation spécifique des synchrotrons est la production d'un rayonnement électromagnétique particulier appelé rayonnement synchrotron qui permet d'explorer la matière et de découvrir sa structure.

Dans un synchrotron, les particules chargées sont émises par un canon à électrons puis accélérées dans un accélérateur linéaire. Elles sont ensuite transférées dans un accélérateur circulaire, le synchrotron (qui donne son nom à l'ensemble du dispositif), lequel augmente leur énergie, puis injectées dans l'anneau de stockage où elles tournent pendant des heures à énergie constante. La durée de vie du faisceau stocké peut atteindre quelques heures. Dans les aimants de courbure d'un anneau, les électrons ou les positrons stockés émettent le rayonnement synchrotron qui à haute énergie (supérieure à 100 MeV au moins), est très intense et très directif. Ce sont les qualités exceptionnelles de cette lumière émise qui permettent d'étudier différents matériaux dans les cabines expérimentales. En effet, il s'agit d'une lumière blanche qui comprend toutes les longueurs d'onde depuis l'infrarouge jusqu'aux rayons X en passant par le visible et l'ultraviolet. Elle se propage dans des lignes de lumière d'une vingtaine de mètres de long et des systèmes optiques sélectionnent une des longueurs d'onde, puis la concentrent sur l'échantillon que l'on souhaite étudier, avec des dimensions qui peuvent être de l'ordre du micromètre.

DOMAINES D'APPLICATION

Les retombées des expériences réalisées grâce aux synchrotrons concernent des domaines aussi variés que la médecine, avec la reconnaissance, atome par atome, de la structure de certaines protéines, la physique des solides, avec l'amélioration de certains supraconducteurs, ou la construction des premiers microscopes à rayons X mous. Utilisés en physique, en chimie, en géologie, en sciences des matériaux, en sciences de la vie et de l'environnement ou dans l'étude des semi-conducteurs, les synchrotrons ont notamment permis de déterminer la structure entière de certains virus. D'autre part, leur rôle est important lors de l'étude de l'hydrogène et de la glace à très haute pression. Les synchrotrons ont notamment joué un rôle essentiel et majeur lors de l'élaboration de médicaments visant à lutter contre la grippe, l'hypertension, le glaucome, le cancer ou encore de la trithérapie dans le cas du traitement du sida. Les appareils dits de « troisième génération » (comme l'ERSF, European synchrotron research facility, près de Grenoble ; le synchrotron Soleil à Gif-sur-Yvette, en cours de réalisation) sont encore plus prometteurs.

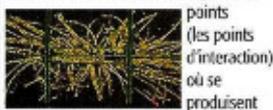
LES COLLISIONNEURS

Il existe enfin une dernière grande catégorie d'accélérateurs de particules : ce sont ce que l'on appelle les collisionneurs. C'est en 1956 que le physicien américain **Donald William Kerst**

(découvreur du béta-tron en 1940) a eu l'idée de créer des collisions frontales directement entre des faisceaux de particules afin de ne pas perdre d'énergie. Dès lors, les premiers accélérateurs de ce type furent élaborés.

CONSTITUTION

Dans ces anneaux de collision, les faisceaux de particules circulent en sens inverse et se rencontrent en plusieurs points (les points d'interaction) où se produisent des **collisions de particules**.

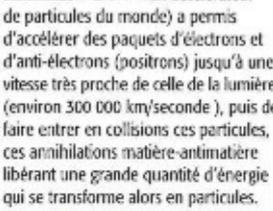


PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Aux points d'interaction sont reliés des détecteurs et des appareils d'observations qui permettent d'analyser les énergies en présence, les caractéristiques du phénomène physique engendré par la collision ainsi que les produits issus de la rencontre entre les faisceaux de particules stables et chargées. Ces particules opposées sont soit des couples particule-antiparticule (électron-positron ou proton-antiproton) voyageant sur la même orbite en sens inverse, soit des couples de particules identiques (proton-proton) circulant sur des orbites séparées en dehors des points de collisions et dans des aimants de courbure différents dont les champs magnétiques sont opposés.

Avant la décision récente de fermer le **collisionneur électron-positron**

(LEP) du CERN, situé sur la frontière franco-suisse (le plus grand accélérateur de particules du monde) a permis d'accélérer des paquets d'électrons et d'anti-électrons (positrons) jusqu'à une vitesse très proche de celle de la lumière (environ 300 000 km/seconde), puis de faire entrer en collisions ces particules, ces annihilations matière-antimatière libérant une grande quantité d'énergie qui se transforme alors en particules.



Le **tévatron**, collisionneur protons-anti-protons est l'accélérateur principal du Fermilab. Avec une énergie de 1 000 GeV, il est entièrement supraconducteur. Les faisceaux de protons et d'anti-protons sont accélérés dans des directions opposées et entrent en collision au centre de deux détecteurs.

DES OUTILS TRÈS PERFORMANTS

LES AVANÇÉES

DE LA RECHERCHE SUR LA MATIÈRE
Ces puissants accélérateurs ont été à l'origine de grandes avancées en physique des particules, confirmant expérimentalement le « modèle standard » qui décrit les constituants élémentaires de la matière et les interactions fondamentales auxquelles ils participent (gravitationnelle, faible, électromagnétique, forte). Le tévatron a notamment permis la découverte du quark-top et du quark bottom, le SLAC celle du quark charmé ; les bosons intermédiaire de l'interaction faible (W^+ , W^- , Z) ont pu être étudiés grâce au LEP, les gluons (particules cimentant les quarks entre eux) ont été découverts à la suite d'une expérience sur le collisionneur Petra du Laboratoire Desy (Hambourg).

DE VASTES FAISCEAUX D'UTILISATION

De nouveaux états de la matière ont ainsi été mis en évidence et en cosmologie, la théorie du Big Bang a pu être précisée. Au CERN, le collisionneur proton-proton de très haute énergie LHC (Large Hadron Collider), en cours de construction, prendra la succession du LEP. Il permettra la recherche du boson de Higgs et d'éventuelles autres forces et particules élémentaires. Muni d'un champ magnétique 100 000 fois supérieur à celui de la Terre, il sera capable de recréer les conditions subatomiques qui prévalaient dans la première picoseconde de l'univers (10^{-12} secondes). Les accélérateurs de particules ont également provoqué des avancées concrètes et pratiques. Utilisés en médecine (stérilisation ou encore création d'une couche de matière biologique sur les hanches artificielles afin de les rendre compatibles avec les articulations), les collisionneurs servent aussi à améliorer la résistance de certaines matières, à réduire la taille des composants informatiques, à protéger de l'usure les moteurs d'automobiles ou d'avions ou encore à fabriquer des outils destinés à percer des tunnels.

DES PERSPECTIVES PROMETTEUSES

Sortis largement de leur domaine d'origine, la physique nucléaire, les accélérateurs de particules sont aujourd'hui utilisés dans de très nombreux secteurs industriels, environnementaux ou scientifiques et les perspectives offertes par les accélérateurs de particules sont des plus attractives.

LA RECHERCHE MÉDICALE

Il est fortement probable que ces instruments joueront, dans un avenir assez proche, un rôle très important dans la recherche sur le cancer. De plus, ils permettront d'élaborer des marqueurs pharmaceutiques. Le domaine de la chirurgie pourrait, lui aussi, profiter (dès que les accélérateurs sauront préserver les tissus) de l'exactitude offerte par ces différents instruments ainsi que de leur capacité à diriger avec une précision quasi-parfaite un rayon laser.

EN MATIÈRE D'ENVIRONNEMENT

Les accélérateurs de particules participeront très certainement et avec efficacité à la protection de l'environnement dans la mesure où ils seront bientôt capables de transmuter des déchets lourds, c'est-à-dire de leur ôter leur caractère polluant et de les rendre inoffensifs. De la même façon, les accélérateurs contribueront à la transformation et à l'assainissement des gaz d'usines ou encore, permettront de traiter et de stériliser les eaux polluées.

LA RECHERCHE EN ASTROPHYSIQUE

Les accélérateurs de particules vont désormais jouer un rôle essentiel dans les recherches en astrophysique et donc contribuer activement à l'amélioration de nos connaissances et de notre compréhension de l'Univers.

LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

Un secteur particulièrement sensible est celui de l'énergie nucléaire : le projet de « **réacteur hybride** » associant accélérateur et réacteur proposé par le prix Nobel de physique Carlo Rubbia en 1993 est pour le moment expérimental et rencontre des réserves et des critiques. Le premier objectif est la transmutation des déchets nucléaires à vie longue, le second la production d'énergie électronucléaire associant un accélérateur de protons et un réacteur à neutrons rapides utilisant comme combustible du thorium et comme fluide caloporteur du plomb fondu. Le système serait plus sûr que certaines centrales actuelles – car il permettrait de contrôler la réaction en chaîne –, plus économe et plus propre.

LE FINANCEMENT

Malgré tous les espoirs placés dans ces impressionnantes machines, un écueil de taille pourrait entraver les progrès déjà atteints : le financement. En effet, la quête de nouvelles particules ou d'énergies élevées demande de plus en plus de puissance et donc des accélérateurs de plus en plus grands et de plus en plus chers. Un problème qui rebient les investisseurs et qui a déjà provoqué l'interruption ou la cessation de plusieurs programmes de recherche.

PROJET DE RÉACTEUR HYBRIDE ACCÉLÉRATEUR 200 MeV 50 MA

