

INSTRUMENTS D'ÉTUDE DE LA MATIÈRE

DES ACCÉLÉRATEURS POUR VOIR L'INFINIMENT PETIT

IL Y A SEULEMENT une cinquantaine d'années, la physique des particules se faisait en laboratoire avec de tout petits moyens. La découverte du neutron, réalisée en 1932, n'a coûté que quelques milliers de francs. Aujourd'hui, l'accélérateur SSC (Superconducting Super Collider) en projet aux États-Unis représente un investissement d'environ 6 milliards de dollars.

Pourquoi accélérer les particules ? Cette course au gigantisme découle d'un principe physique simple : un objet de dimension donnée n'est observable que s'il est « éclairé » par une lumière dont la longueur d'onde est de dimension comparable. Pour aller plus loin dans l'étude de la matière, pour « voir » les protons, et plus encore les quarks, il faut réaliser des lumières de longueurs d'onde de plus en plus courtes, c'est-à-dire d'énergies de plus en plus grandes. On y parvient en accélérant dans le vide des faisceaux de particules chargées (électrons ou protons) à des vitesses voisines de celle de la lumière.

Principe de l'accélération. Il consiste à relier deux plaques métalliques à une source de tension, une pile de 4,5 volts par exemple. Dans le vide, un électron négatif, attiré par la plaque positive, prendra une énergie de 4,5 eV (l'électronvolt est l'unité d'énergie la plus commode en physique des particules). Accélérées sous haute tension et un grand nombre de fois, les particules peuvent atteindre des énergies de 100 GeV (100 gigaélectronvolts, soit 100 milliards d'électronvolts), ce qui permet d'observer des détails de l'ordre du milliardième de milliardième de mètre... Les accélérateurs de particules sont donc de gros consommateurs d'énergie électrique : le Cern est ainsi directement alimenté par la centrale hydroélectrique de Génissiat.

QUAND L'ÉNERGIE DEVIENT MATIÈRE

LE FONCTIONNEMENT d'un accélérateur fait appel à la force électromagnétique sous toutes ses formes. Des générateurs électrostatiques fournissent les particules chargées ; des électrodes portées à des tensions de plusieurs millions de volts et des champs radioélectriques de haute fréquence leur communiquent de l'énergie ; elles sont maintenues sur leur trajectoire enfin, à l'intérieur d'un tube à vide de quelques centimètres de diamètre, grâce à un chapelet d'électroaimants alignés au dixième de millimètre.

Si le premier *cyclotron*, construit en 1930, avait 2 m de diamètre, le futur SSC américain fera 84 km de circonférence... de quoi encercler Paris et sa grande banlieue. Jusque dans les années 70, les faisceaux produits par les accélérateurs étaient dirigés sur une *cible fixe* entourée de divers détecteurs qui analysaient les résultats du choc. L'énergie libérée se matérialise sous forme de particules, en accord avec l'équivalence masse-énergie postulée par Einstein. Il s'agit d'une conséquence directe de la célèbre formule $E = mc^2$. Mais, dans ce dispositif, une bonne partie de l'énergie sert à communiquer du mouvement à la cible, ce qui n'est pas le but recherché. L'idée est donc venue d'accélérer deux faisceaux de particules en sens contraire, dans le même tube à vide, et d'installer les détecteurs à l'endroit de leur croisement. Cette technique du *collisionneur* est aujourd'hui la plus employée, que ce soit pour organiser des chocs entre protons et antiprotons ou entre électrons et positrons.

Si le choc matière contre antimatière, à des vitesses voisines de celle de la lumière, est la recette idéale pour créer de l'énergie, aucun projectile n'est exempt d'inconvénients. Les électrons présentent l'avantage d'être plus élémentaires que les protons, qui sont constitués de quarks ; contrairement à ces derniers, l'énergie qui leur est communiquée est donc intégralement restituée lors du choc, mais ils possèdent la désagréable propriété de perdre de l'énergie par « rayonnement de freinage » lorsqu'ils circulent sur une trajectoire courbée.

LES MACHINES LES PLUS COMPLEXES

LA PLUPART DES PARTICULES produites dans les accélérateurs ont une durée de vie extrêmement courte et ne sont décelables que grâce aux traces de leur désintégration. Les énormes *détecteurs* employés pour cela (les plus gros pèsent 2 000 t) sont probablement les machines les plus complexes jamais construites par l'homme. Il s'agit des *chambres à bulles*, réservoirs remplis d'un liquide sous faible pression où les particules chargées laissent une traînée de bulles gazeuses ; des *chambres à dérive* et à *plasma*, constituées d'un gaz placé entre deux électrodes sous tension, qui réagissent au passage d'une particule en donnant une décharge électrique ; des *calorimètres*, qui mesurent directement l'énergie des particules... et la liste est loin d'être close.

Ces divers systèmes, associés à de puissants électroaimants, sont disposés en couches concentriques autour du lieu de la collision et fonctionnent en continu puisqu'il se produit en moyenne mille collisions par seconde. Rien d'étonnant dès lors à ce qu'un seul détecteur mobilise une bonne centaine de spécialistes.

Bien que toutes les collisions ne donnent pas des résultats intéressants, les détecteurs récoltent suffisamment d'informations chaque seconde pour remplir un annuaire téléphonique. Le triage des « événements » est confié à des micro-ordinateurs, l'ordinateur principal du centre de calcul n'analysant dans le détail que les plus remarquables, qui sont ensuite stockés sur bande magnétique. Malgré cette sévère sélection, il s'écoule généralement 4 à 5 ans entre le démarrage d'une expérience et l'analyse complète de ses résultats.

LINÉAIRE OU CIRCULAIRE ?

Diverses géométries ont été testées pour les accélérateurs. L'anneau permet une accélération progressive, les paquets de particules pouvant y tourner plusieurs millions de fois avant d'interagir. Malheureusement, les particules chargées perdent de l'énergie par rayonnement lorsqu'elles suivent une trajectoire courbe. L'analogie, en quelque sorte, des pneus d'une voiture qui crissent dans un virage. Pour minimiser cet effet parasite, il faut donc construire des virages à grand rayon de courbure : 5, voire 15 km !

La ligne droite supprime cet inconvénient mais implique des techniques d'accélération plus énergiques que dans les accélérateurs circulaires puisque les particules ne passent qu'une seule fois dans le dispositif.

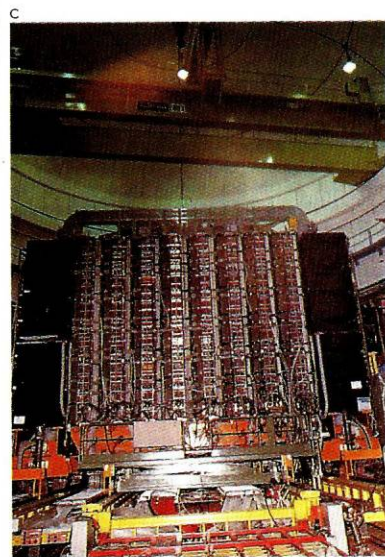


A - Le seigneur des anneaux.

Une portion du LEP, accélérateur circulaire de 27 km de circonférence, montre les aimants qui maintiennent les particules sur leur trajectoire.

B - 3 km à la vitesse de la lumière.

Avec ses 3 km, l'accélérateur linéaire de Stanford (Californie), est le plus long du monde.



C - 2 000 tonnes d'électronique.

« UA1 » (underground area 1) est un des détecteurs de l'accélérateur SPS du Cern. Ce gigantesque cerveau électronique sert à déterminer les caractéristiques des particules intervenant dans les collisions. Il mesure l'énergie, la vitesse et la direction de particules extrêmement fugitives is-

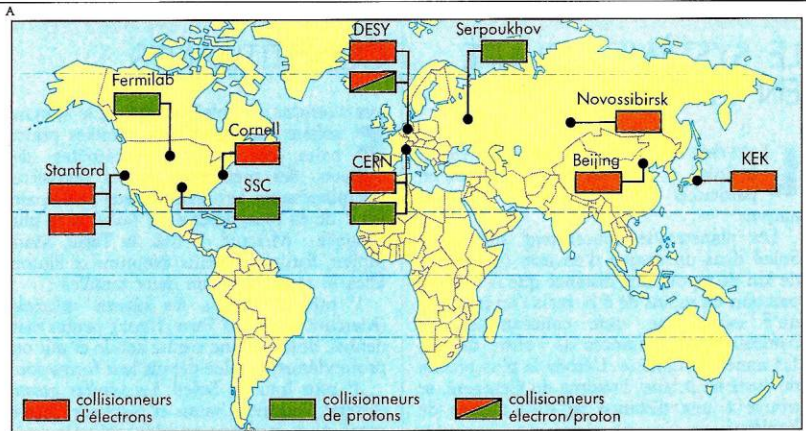
suées des collisions proton-antiproton à haute énergie : certaines sont si instables qu'elles se désintègrent en un milliardième de seconde...

TECHNOLOGIES DU FUTUR

A FIN DE LUTTER contre le gigantisme des accélérateurs circulaires, la recherche porte actuellement sur le développement des accélérateurs linéaires. De nouvelles techniques d'accélération et de focalisation des faisceaux sont à l'étude, tels les lasers, les aimants supraconducteurs qui fournissent des champs magnétiques très élevés, ou le « champ de sillage » engendré par certains faisceaux, qui semble capable de découpler les accélérations obtenues aujourd'hui.

Quand toutes ces voies auront été explorées, il restera la possibilité de se tourner vers le plus grand laboratoire existant : l'Univers. Les énergies libérées par les étoiles à neutrons ou les quasars sont en effet incomparablement plus élevées que celles des accélérateurs de particules. L'astrophysique tend de plus en plus à rejoindre la physique des particules dans sa quête des secrets de la matière.

Trois domaines technologiques essentiels sont directement impliqués dans l'évolution des accélérateurs : l'électronique, pour créer les nouveaux composants nécessaires aux détecteurs et permettre d'automatiser les machines ; le vide, qui doit atteindre, dans le tube d'accélération, le milliardième de millibar ; la supraconductivité, enfin, phénomène se produisant à très basse température et permettant de faire passer des courants intenses dans les fils conducteurs, c'est-à-dire d'obtenir des champs électrostatiques et magnétiques très élevés.

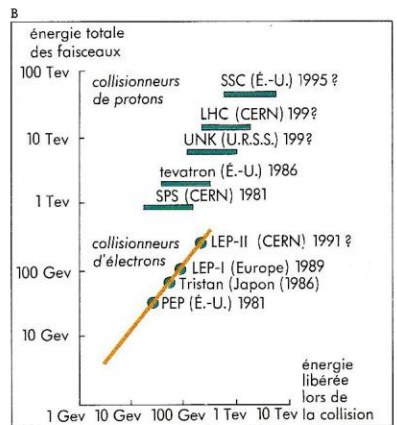


A - Le monde des hautes énergies.

S'il n'existe guère qu'une dizaine de très grands accélérateurs, les instituts de recherche et les laboratoires de physique des hautes énergies sont disséminés dans tous les pays industrialisés. Les machines les plus puissantes sont actuellement le Tevatron du Fermilab de Chicago, le LEP du Cern à Genève et l'UNK de Serpoukhov en U.R.S.S. Le plus grand de tous, le SSC, sera installé à Waxahachie, au sud de Dallas (Texas).

B - Une course effrénée.

Depuis une trentaine d'années, l'énergie des accélérateurs a régulièrement été augmentée d'un facteur 10 tous les dix ans. Les électrons et les positrons étant des particules élémentaires, l'énergie libérée au cours du choc (en abscisse) est égale à la somme des énergies des deux faisceaux (en ordonnée). Les protons, constitués de quarks, libèrent une énergie inférieure à cette somme ; ils permettent cependant d'atteindre des gammes d'énergie pour l'instant inaccessibles aux électrons.



LE CERN

3 500 chercheurs et techniciens permanents, 3 000 physiciens invités chaque année et environ 600 millions de francs suisses de budget annuel. Situé à proximité de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse, le Cern (laboratoire européen de physique des particules) est le résultat de 35 ans de collaboration entre 14 pays européens.

Lors de la naissance du Cern, dans les années 50, les États-Unis possèdent une avance incontestable en physique des hautes énergies. Pendant vingt ans encore, la qualité et l'expérience des physiciens américains assurent cette domination. Mais tout change dans les années 80. L'école européenne de physique et le lent perfectionnement des machines hissent le Cern à la première place mondiale, comme en témoigne le prix Nobel attribué en 1984 à deux de ses chercheurs.

La croissance de la taille des accélérateurs est révélatrice de cet essor. Le *synchrotron à protons* (PS), achevé en 1959, a un diamètre de 200 m et atteint une énergie de 28 GeV (28 milliards d'électronvolts). Il sert aujourd'hui à alimenter le *supersynchrotron à protons* (SPS) [en bleu sur le schéma] de 2,2 km de diamètre et de 450 GeV. Sa conversion en collisionneur proton-antiproton, en 1983, a permis de découvrir les « bosons » médiateurs de l'interaction faible comme le Z⁰, dont la désintégration se traduit par les deux traces jaunes visibles sur cette reconstitution par

ordinateur (ci-contre). Le SPS, à son tour, servira à alimenter le LEP (Large Electron Positron collider, de 8,5 km de diamètre et de 100 GeV), qui a été inauguré en 1989.

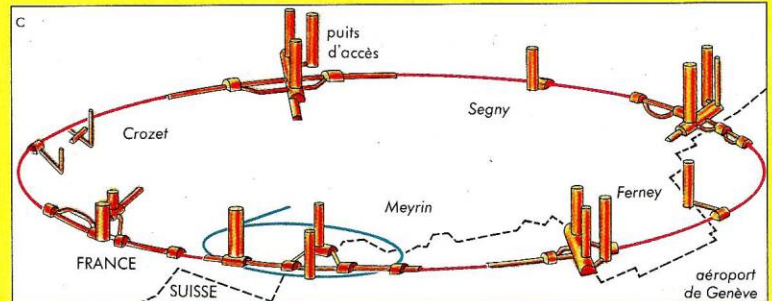
Au Cern, on songe déjà au futur LHC (Large Hadron Collider), qui sera installé dans le même tunnel que le LEP mais permettra d'atteindre des énergies dix fois plus élevées. Les physiciens du Cern, comme leurs collègues américains et soviétiques, sont cependant conscients que des machines plus puissantes encore ne pourront être construites que par des collaborations au niveau mondial... à moins que des technologies radicalement nouvelles n'apparaissent d'ici là.



D - Voir l'invisible.

Reproduite sur ordinateur, voici la collision qui a permis d'observer, au Cern, en 1983, la première désintégration d'un boson Z⁰. Cette particule ne laisse pas de trace dans le

détecteur, mais l'électron et le positron auxquels elle donne naissance produisent deux traces jaunes s'éloignant dans deux directions opposées.



C - Le LEP.

Un million et demi de mètres cubes. C'est le volume de roches qu'il a fallu excaver, à 50 m sous les contreforts du Jura, pour réaliser le tunnel de 27 km qui

abrite le LEP. Ce collisionneur d'électrons et de positrons comporte 3 400 aimants de courbure et 1 300 aimants de focalisation. Observées par quatre détec-

teurs, les collisions fournissent une énergie de 50 GeV dans un premier temps, de 100 GeV ensuite. Près de 1 200 physiciens travailleront aux di-

verses expériences, qui consisteront surtout à étudier dans le détail les implications de la théorie « électrofaible ».