

Explorer l'infiniment petit

(par Isabelle DESIT-RICARD)

DU MICROSCOPE OPTIQUE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE

De manière générale, la précision d'une observation est liée à celle de l'outil utilisé pour observer. Ainsi, un archéologue travaillant sur un champ de fouilles n'emploierait pas un tractopelle pour mettre à nu ses découvertes : la taille des instruments qu'il utilise doit être adaptée à celle de l'objet qu'il est entrain de déterrer.

Lorsqu'il s'agit d'observer la matière, il en va de même : la longueur d'onde utilisée pour « éclairer » l'objet doit être adaptée aux dimensions du corps observé. Si celle-ci est trop grande, il est impossible de discerner les détails. Lorsque, depuis un satellite, on observe un océan en imagerie RADAR (longueurs d'ondes de l'ordre du mètre), il est impossible de visualiser les vagues à sa surface : les longueurs d'ondes utilisées sont, dans ce cas, trop grandes pour distinguer de tels détails.

Ainsi, pour séparer des détails de plus en plus petits, il faut sonder la matière avec des longueurs d'ondes de plus en plus faibles. Avec un microscope optique, qui utilise la lumière visible pour éclairer l'objet étudié, la résolution ne peut guère dépasser 100 nanomètres (un dix-millième de millimètre).

Pour des détails plus fins, il faut utiliser des rayons ultraviolets ou des rayons X .

Pour scruter la matière à des dimensions encore plus faibles, on n'éclaire plus l'objet avec des ondes électromagnétiques. Depuis les travaux de Louis de Broglie on connaît en effet la nature ondulatoire des électrons. Or, si ces derniers sont accélérés sous plus de 10 000 volts, leur longueur d'onde est plus faible que celle des rayons X. La microscopie électronique utilise, ainsi, non pas de la lumière mais un faisceau d'électrons accélérés pour éclairer l'objet.

Les recherches dans ce domaine débutent à Berlin dès 1920 mais la première image ne sont obtenues qu'en 1931. Grâce à ce type de microscope, dont la technique a été constamment améliorée, on peut observer des détails cent fois plus petits que ceux qui sont visibles avec les microscopes optiques.

Enfin, depuis 1982 et les travaux de Gerd Binnig et Heinrich Rohmer, on parvient désormais à visualiser des structures de quelques dixièmes de nanomètres. Le microscope à balayage à effet tunnel qu'ils ont mis au point permet enfin de « voir » des atomes).

En 1986, le jury Nobel décide de récompenser les travaux effectués dans le domaine de la microscopie. Ainsi, les Suisses Gerd Binnig et Heinrich Rohrer sont-ils récompensés pour leur « conception de leur microscope à balayage à effet tunnel », tandis que l'Allemand Ernst Ruska partage avec eux ce prix pour « ses travaux fondamentaux en optique électronique et en particulier la conception du premier microscope électronique. »

LES ACCELERATEURS DE PARTICULES

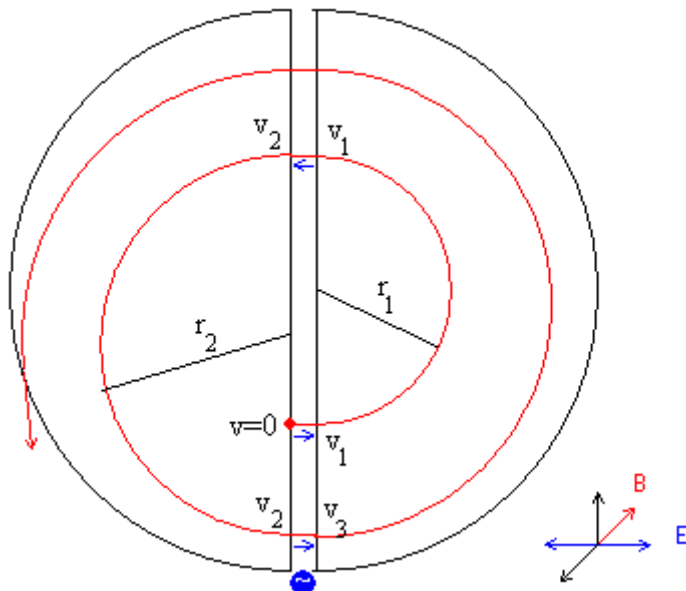
Pour performante qu'elle soit, la microscopie reste toutefois incapable de sonder la matière au niveau du noyau atomique et en deçà.

L'utilisation d'énergies encore plus grandes s'avère alors nécessaire.

Les rayons cosmiques (provenant de l'espace et heurtant notre atmosphère) possèdent ces énergies. Ils ont d'ailleurs permis de découvrir certaines particules. Mais ces rayons sont malheureusement trop rares pour que les expériences auxquelles ils donnent lieu soient bien reproductibles. Aussi, pour procéder de façon plus rigoureuse faut-il pouvoir atteindre en laboratoire et de façon contrôlée les énergies nécessaires.

C'est en 1929 que l'Américain Ernest Orlando Lawrence a l'idée d'accélérer des particules chargées à l'aide d'un champ électrique et d'incurver leur faisceau à l'aide d'un champ magnétique : il vient alors de concevoir le cyclotron qu'il fabriquera avec succès quelques années plus tard

Le cyclotron de Lawrence



Dans les zones où règne le champ magnétique (ces zones sont appelées « dés », ou « dees » en anglais, car elles ont la forme de la lettre D), l'électron n'est pas accéléré mais son trajet est incurvé suivant une trajectoire circulaire

Entre les deux Dees est appliqué un champ électrique accélérateur. (bleu sur le schéma) dont le sens change à chaque passage entre les dés.

Le cyclotron que Lawrence construit en 1932 a un rayon de 14 cm et la différence de potentiel au moment du passage du faisceau entre les dés vaut 4000 V.

A la sortie du cyclotron, les électrons possèdent une énergie cinétique de 1,2MeV.

Rappelons qu'un électronvolt correspond à l'énergie acquise par un électron soumis à une tension de 1 volt. Ainsi, pour obtenir une telle énergie dans un accélérateur linéaire, aurait-il fallu disposer d'une différence de potentiel de 1,2MV (soit 1,2 millions de Volt) !

Grâce au cyclotron, on parvient à accélérer des électrons jusqu'à des énergies cinétiques de plusieurs dizaines de millions d'eV (électronvolts). Mais pour pouvoir sonder le noyau atomique, il faut des énergies dix fois plus grandes...

LES NOUVEAUX ACCELERATEURS

Après la Deuxième Guerre mondiale, la taille et les performances des accélérateurs de particules ne cessent d'augmenter.

En 1948 est construit à l'université de Berkeley aux Etats-Unis le premier synchrotron. Dans ce type d'accélérateur, le champ magnétique n'est pas appliqué sur toute la surface de l'accélérateur. Les énergies atteintes sont plus élevées : on dépasse alors le GeV (1 Gigaélectronvolt=1 milliard d'électronvolt).

Les Européens décident d'unir leurs efforts pour concevoir eux-aussi un synchrotron et créent en 1952, un Centre Européen pour la Recherche Nucléaire, le CERN.

Dès 1959, le synchrotron à protons du CERN, à Genève, atteint 24 GeV, mais, dès 1970, il est supplanté par le synchrotron à protons de Brookhaven (USA) qui permet d'atteindre des énergies plus élevées. Toujours à Genève, est construit entre 1983 et 1989 un grand collisionneur baptisé LEP (Large Electron-Positron Collidar). Abrisé par un tunnel dont la circonférence mesure près de 27 km, il permet alors d'obtenir des énergies de plusieurs centaines de milliards d'électronvolts. Le LEP sera finalement remplacé par le LHC (Large Hadron Collidar) dont la construction a débuté en 2000 et qui a été mis en service le 10 septembre 2008. Les énergies désormais en jeu sont de 14000 GeV !

Ainsi est-on aujourd'hui capable de sonder la matière sur des dimensions de 10^{-18} m...

DE NOMBREUSES PARTICULES

Grâce aux accélérateurs, on a pu, dès les années 50, mettre en évidence, au cours des collisions, de nouvelles particules. Dans un accélérateur, une partie de l'énergie des particules incidentes peut, en effet, se transformer en matière : l'énergie E peut ainsi donner naissance à une particule de masse $m=E/c^2$.

C'est ce qui se produit lorsque deux protons ayant une énergie suffisante donnent naissance à un pion π suivant l'équation :

$$p+p = p+p+\pi$$

Le pion π a une masse égale à $273,3 m_e$, où m_e est la masse de l'électron. On peut aussi dire que sa masse vaut $139,7 \text{ MeV}/c^2$. Aussi, pour que la collision de deux protons donne naissance à un pion, il faut que leur énergie cinétique soit supérieure à $139,7 \text{ MeV}$.

On l'aura compris : plus une particule est lourde, plus il faut d'énergie pour la produire. Ainsi, le boson Z^0 qui a une masse de $91 \text{ GeV}/c^2$, a-t-il nécessité, pour voir le jour, une énergie voisine de

100 GeV. C'est, entre autre, pour produire le Z^0 que le LEP (accélérateur du CERN) avait été construit. Ce fut un succès puisque les premiers Z^0 y ont été détectés en 1989.

DETECTER LES PARTICULES PRODUITES DANS LES ACCELERATEURS

Il ne suffit pas de produire des particules nouvelles. Encore faut-il être capable de s'apercevoir qu'on a réussi à les produire !

Au cours du siècle précédent, cinq prix Nobel ont récompensé des physiciens qui ont conçu des dispositifs de détections de particules.

Le Britannique Charles Wilson, le premier, obtient son prix en 1927 « pour la découverte de sa méthode qui, par condensation de vapeur, permet d'observer la course des particules chargées d'électricité. » Les chambres de Wilson ont, il est vrai, été très utilisées dans les premières générations d'accélérateurs de particules. Blackett en 1948, sera, lui aussi primé pour son « amélioration de la chambre de Wilson » ; Les Américains Glaser en 1960 et Alvarez en 1968 recevront quant à eux leurs prix, respectivement pour leur invention et leur technique d'utilisation de la chambre à bulle.

Enfin, le Français Georges Charpak est primé en 1992 pour « ses travaux sur les détecteurs de particules élémentaires, notamment de la chambre proportionnelle multifils. ».

Les accélérateurs de particules

Lorsque Rutherford a découvert le noyau atomique, il ne l'a pas « vu » : il s'est contenté de réaliser des collisions, c'est à dire des chocs entre particules et d'interpréter les résultats obtenus en étant particulièrement ingénieux. Aujourd'hui encore, pour explorer l'infiniment petit, on réalise des collisions de particules dans des accélérateurs. Ces machines, que les Anglo-saxons appellent des « écraseurs d'atomes », sont gigantesques et fort coûteuses

« Le contenu d'une encyclopédie gravé sur une tête d'épingle » ?

Richard Feynman était convaincu que, un jour ou l'autre, on pourrait retranscrire le contenu de l'Encyclopedia Britannica - la plus complète des encyclopédies anglophones - en utilisant des atomes. Il pensait que, alors, cette encyclopédie pourrait être gravée sur une minuscule tête d'épingle.

En 1989, Don Eigler, chercheur chez IBM commence à lui donner raison : il parvient, en effet, à écrire le nom de l'entreprise qui l'emploie avec une trentaine d'atomes. Pour cela, il utilise la pointe d'un microscope à effet tunnel comme s'il s'agissait d'une véritable pince à atomes. Même si, pour l'instant, le rêve de Feynman est loin d'avoir été réalisé et même si seules trois lettres ont ainsi été écrites, l'exploit technologique réalisé par Eigler est impressionnant

Les microscopes à effet tunnel

Dans un microscope à effet tunnel, une pointe métallique très fine, appelée « *sonde* » balaie de long en large la surface du matériau à étudier. La sonde est très proche du matériau étudié et elle attire des électrons provenant des atomes observés. Ces électrons traversent alors le vide en direction de la sonde comme s'ils étaient guidés à travers un tunnel. Ce déplacement d'électrons crée alors un courant électrique qui est ensuite étudié par des ordinateurs. C'est l'analyse de ce courant qui permet de restituer une cartographie en trois dimensions de la surface observée : on peut dès lors visualiser chacun des atomes qui la constituent. Grâce au microscope à effet tunnel, l'atome est enfin devenu visible pour les hommes !

