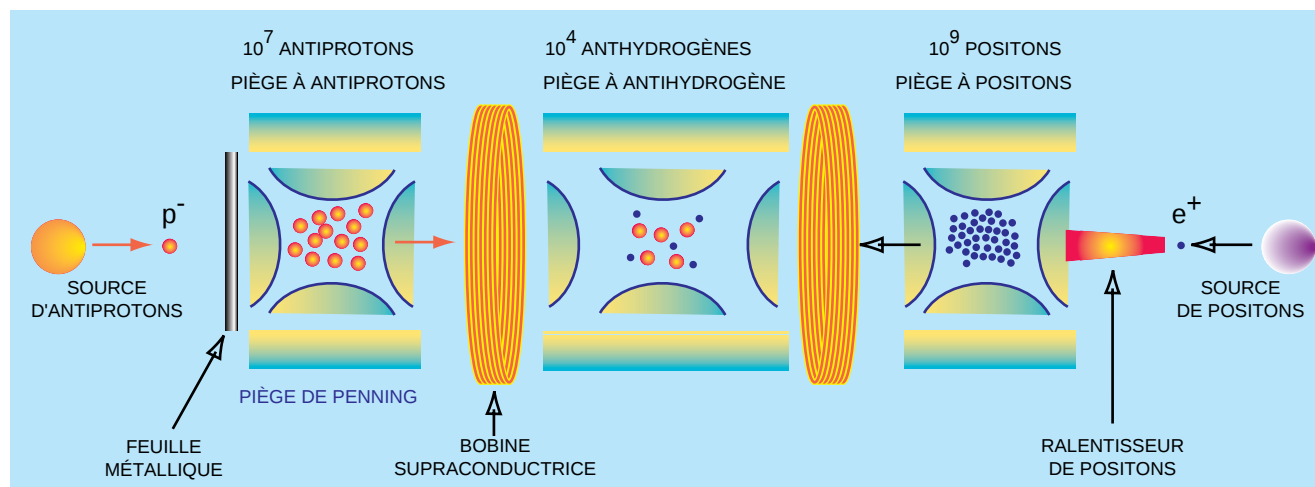




Pour déceler les différences spectroscopiques entre la matière et l'antimatière, les physiciens du CERN proposent de stocker dans un piège à anti-hydrogène environ 10 000 atomes d'anti-hydrogène. Grâce aux techniques optiques ultrafines, les niveaux d'énergie du positon

en orbite autour de l'antiproton seraient mesurés à une précision de 10^{-18} , effet d'une éventuelle disparité matière-antimatière. Ces mesures, à la frontière du possible, élucideraient peut-être les énigmes liées à l'omniprésence de la matière dans l'Univers.

En est-il de même des lois de l'électromagnétisme ? Dans les atomes, des électrons orbitent autour du noyau. L'atome le plus simple, c'est l'atome d'hydrogène, avec un proton et un électron. Pouvait-on créer un anti-atome d'hydrogène fait d'un antiproton et d'un anti-électron ? La difficulté est qu'on ne sait fabriquer ces antiparticules qu'en très petit nombre, et la réalisation de neuf anti-atomes n'a été possible que grâce à toute la machinerie qui existe au CERN.

Cet exploit n'est-il qu'un premier pas vers la réalisation d'antimatière ? Un gramme d'antimatière correspond à 6.10^{23} atomes et le saut quantitatif est considérable, peut-être impossible. Les physiciens espèrent produire suffisamment d'anti-atomes d'hydrogène, quelques milliers, et les piéger dans des puits électromagnétiques avec des faisceaux laser pour étudier en détail les niveaux d'énergie de ces atomes d'anti-hydrogène. Alors nous verrons si les niveaux d'énergie des anti-atomes d'hydrogène sont les mêmes que ceux des atomes d'hydrogène.

L'énigme de l'antimatière créée au début de l'Univers est persistante : c'est une des plus importantes questions cosmologiques. Si dans l'Univers, il y a des anti-étoiles ou de la matière interstellaire faite d'antimatière, il y aurait des annihilations caractéristiques et on verrait les produits de ces annihilations ; on ne les a jamais observés.

Certains astrophysiciens pensent qu'il pourrait exister des antigalaxies «quelque part», totalement isolées des autres galaxies. Un satellite va être lancé : il verra si, dans les rayons cosmiques, il existe des traces d'anticarbone ou d'anti-oxygène. Comme ce sont les étoiles qui fabri-

quent le carbone et l'oxygène, ni le Big Bang ni les rayons cosmiques n'ont engendré de quantités appréciables de carbone et d'oxygène. Donc si l'on observait des rayons cosmiques faits d'anticarbone ou d'anti-oxygène, on saurait qu'ils ont été fabriqués par des anti-étoiles et cela serait la preuve de l'existence d'anti-étoiles.

La brisure de symétrie, une petite fluctuation initiale, qui aurait fait basculer l'Univers à sa création dans le camp de la matière, est inconnue. C'est pour cela qu'il est important de fabriquer des milliers et des milliers d'atomes d'anti-hydrogène ou d'anti-atomes pour voir s'il n'y a pas une petite différence dans les lois de physique entre l'antimatière et la matière ? Un tel écart constituerait une piste pour éclairer pourquoi l'Univers est fait de matière et non pas d'antimatière.

Il suffirait d'une toute petite dissymétrie, de l'ordre du milliardième, entre les quantités de matière et d'antimatière formées lors du Big Bang pour expliquer à la fois l'absence d'antimatière et la faible abondance de la matière par rapport au rayonnement. La majeure partie des protons et des antiprotons se seraient annihilés, donnant cet excès de photons et il ne resterait qu'un petit résidu de matière. Nous serions un résidu. S'il n'y avait pas ce tout petit excès de matière par rapport à l'antimatière, toute la matière et l'antimatière se seraient annihilées, et il n'y aurait que des photons dans l'Univers.

QU'EST-CE QUE VOIR UNE PARTICULE ?

Une particule élémentaire est une particule qui résiste à toute analyse en termes de sous-structures : même avec les micro-

scopes géants que sont les accélérateurs de particules, on ne distingue pas de sous-structures à l'intérieur. Les microscopes géants, au lieu d'utiliser des photons, utilisent des électrons ou d'autres particules ; ils ont permis dans les 30 dernières années de mettre en évidence les quarks au sein des protons et d'étudier leurs interactions. L'accélérateur d'électrons de 27 kilomètres de circonférence au CERN permettra de sonder les protons et leur intérieur, les quarks ; un jour ou l'autre on trouvera peut-être une sous-structure à ces quarks.

Le sens du mot «voir», en physique des particules, prend une extension à mesure que l'on diminue la longueur d'onde des particules, massives ou non, qui permettent d'éclairer la structure interne de la matière. On ne peut voir une particule que si on la sonde par une longueur d'onde de l'ordre de grandeur de sa taille. C'est ainsi que l'on voit les quarks à l'intérieur des protons : les électrons très énergétiques, produits dans les accélérateurs de particules, pénètrent à l'intérieur des protons et sont diffusés par les quarks. Cette diffusion dénote la présence de ces particules.

On ne voit pas les objets par eux-mêmes, mais ce qu'ils produisent lors de certains types d'impact. Les quarks peuvent être tellement secoués par les particules incidentes qu'ils produisent des jets de particules et «voir les quarks» signifie alors mesurer l'émission de particules issues de ces quarks. Le sens du mot «voir» devient plus abstrait.

L'idéal pour voir les quarks serait de constituer des jets de quarks et les précipiter sur d'autres quarks. Hélas cela semble impossible avec les théories actuelles de confinement des quarks : selon la chromodynamique quantique,

plus vous tirez sur un quark pour le faire sortir du proton, plus la force de rappel est grande. Mais à des énergies extrêmes ou dans les conditions de densité ou de température très grandes, il se pourrait que les quarks soient libérés. Au début de l'Univers, les quarks et les gluons n'étaient pas confinés à l'intérieur des protons.

Toutefois, pour qu'une particule existe, pour qu'on puisse la voir, il faut qu'elle interagisse. Si des particules n'interagissent pas, ou très peu, elles peuvent échapper à toute observation et le sens du mot «exister» devient très compliqué. Ainsi les propriétés des neutrinos, qui n'interagissent que très peu avec la matière, nous sont inconnues. Voir une particule, c'est aussi déterminer ses propriétés...

LA MASSE MANQUANTE

Une énigme de l'Univers est liée à cette observation de particules. Les mouvements des objets les uns par rapport aux autres dans l'Univers obéissent à la loi de la gravitation universelle ; à partir de la dynamique des objets, elle détermine la quantité de masse nécessaire pour que les objets restent liés. Ainsi, dans notre Galaxie, les étoiles tournent autour du centre de la galaxie ; en utilisant les lois de Newton et de Kepler, on calcule la masse totale de notre Galaxie. Or dans notre Galaxie, la masse visible des étoiles et de la poussière interstellaire n'est que dix pour cent de la masse qu'il faut pour maintenir les objets ensemble : 90 pour cent de la masse de notre Galaxie échappe à toute détection.

Peut-être cette masse n'interagit-elle pas, mais alors elle ne permettrait pas d'expliquer pourquoi les objets stellaires sont liés. Il se pourrait que la masse manquante soit constituée de planètes encore invisibles. Il n'est pas exclu non plus que la masse manquante soit le fait de particules élémentaires qui n'interagissent essentiellement que par les forces gravitationnelles. Ce pourraient être les neutrinos s'ils ont une masse, ou des particules que l'on n'a pas encore découvertes dans les accélérateurs... Les trous noirs, une autre possibilité, ne sont détectables que par des effets indirects, par exemple un effet de lentille gravitationnelle, c'est-à-dire de courbure des rayons lumineux. Tout ce qui pourrait avoir une masse est un candidat.

LA NAISSANCE DE LA MASSE

Les masses des particules restent un grand mystère : pourquoi les particules ont-elles une masse ? Et comment la pré-

voir ? La théorie la plus satisfaisante actuellement, le modèle standard, rend compte de toutes les propriétés observées des particules : leurs interactions et leur comportement lorsqu'elles entrent en collision.

Toutefois on ne sait pas calculer leur masse. La solution viendra peut-être d'un chaînon manquant, prévu par le modèle standard, qui s'appelle la particule de Higgs, du nom du physicien anglais Peter Higgs. Aux tout premiers instants de l'Univers, les particules sont sans masse et c'est lorsque leur énergie décroît en dessous d'une valeur liée à la masse de la particule de Higgs (probablement une centaine de giga-électronvolts), un dixième de seconde après la création de l'Univers, que les particules acquièrent leur masse. Le modèle standard prévoit aussi comment cette particule de Higgs doit se désintégrer en des particules connues, par exemple les bosons Z et W. L'étude de ces désintégrations permettra à la fois de se convaincre de l'existence de cette particule et de mesurer sa masse.

Il n'est pas certain que le modèle standard soit l'explication définitive. Il se pourrait que la structure des particules de Higgs soit un peu plus complexe que celle prévue dans le modèle standard minimal, et qu'il existe plusieurs particules de Higgs, mais dans l'ensemble, on sait assez bien comment on doit les rechercher. Heureusement qu'on le sait assez bien parce qu'on s'attend à ce que sur les milliards de collisions que produira le futur collisionneur à hadrons du CERN on puisse n'extraire que quelques particules de Higgs : une aiguille dans une meule de foin. Pour cette recherche, quelques deux à trois mille physiciens travaillent sur la détection de la particule de Higgs dans un effort mondial sans précédent.

LA GRANDE UNIFICATION, AVEC LA MASSE

Un vrai impossible actuel est l'unification de la gravitation aux trois autres forces d'interaction. Le médiateur de la gravitation est le graviton que l'on n'a pas trouvé ; peut-être ne le trouvera-t-on jamais. On essaie actuellement de voir les ondes gravitationnelles. Un projet franco-italien, Virgo, devrait voir le jour vers l'an 2000 pour détecter des ondes gravitationnelles qui viendraient de catastrophes dans l'espace, de collisions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons par exemple.

Une onde gravitationnelle induit des changements des longueurs dans l'espace. La longueur d'un objet varie légè-

rement, très légèrement, quand passe une onde gravitationnelle. Imaginez un objet d'une longueur égale à la distance entre la Terre et la Lune : la variation de la longueur au passage de l'onde de gravitation sera inférieure à la taille d'un atome...

Cette notion de masse d'une particule ne traduit que notre ignorance de ce qui se passe à l'intérieur. Pour la charge électrique il n'en est pas autrement. La théorie de la renormalisation montre qu'à chaque niveau de complexité, on arrive à dégager des lois physiques pratiquement indépendamment de ce qui se passe en dessous. On sait bien que derrière cette complexité, il y a des constituants plus élémentaires, mais on arrive à se débarrasser de cette physique en prenant un petit nombre de paramètres, dégagés des lois, qui résument ce qui se passe à des échelles plus petites. Ainsi la température et la pression intègrent notre connaissance des lois qui régissent les collisions entre atomes. Similairement la masse, la charge électrique d'une particule élémentaire, cache notre ignorance des phénomènes à une échelle plus petite.

LA DÉRAISONNABLE EFFICACITÉ DES MATHÉMATIQUES

Nos connaissances sur les particules élémentaires reposent sur des modèles mathématiques d'une grande finesse. Yang, prix Nobel de Physique, a écrit : «On ne sait pas comment, mais la Nature choisit un petit sous-ensemble des magnifiques mathématiques créées par l'Homme. C'est ce sous-ensemble que les théoriciens de la physique essaient d'exploiter».

Plus les siècles passent, plus l'efficacité conjointe de la physique et des mathématiques semble se consolider à travers des expériences dont on prévoit le résultat et qui font apparaître d'autres choses, lesquelles ouvrent des pistes pour aller encore plus loin dans la recherche mathématique. La déraisonnable efficacité des mathématiques reste une énigme, un mystère, du domaine de la métaphysique.

Michel SPIRO est Chef du service de physique des particules au Commissariat à l'Énergie Atomique à Saclay.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 10 avril 1996, à 9 heures.
