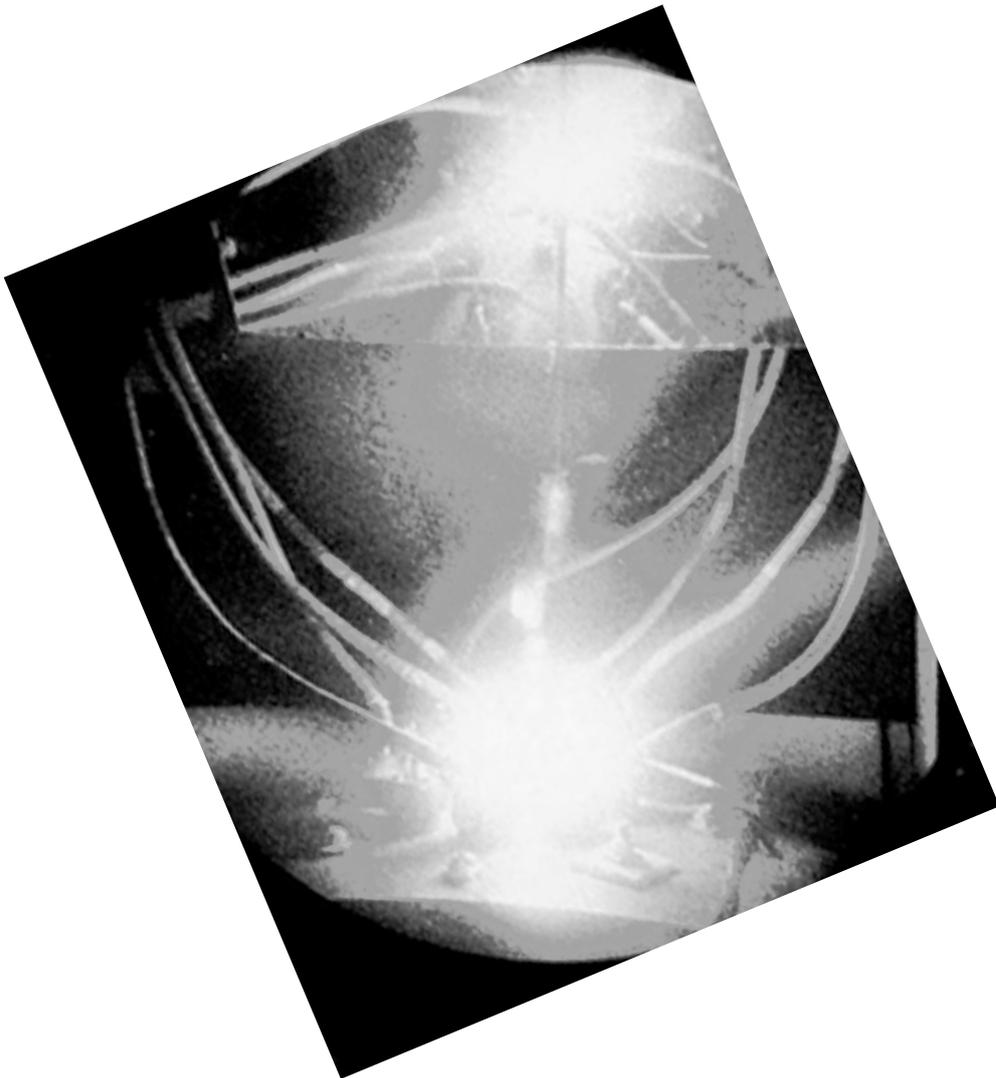


# Rayonnement « étrange », transmutations chimiques et monopôles magnétiques

**Des monopôles magnétiques légers, directement issus du principe de symétrie et de la géométrisation de la physique, sont prévus depuis une vingtaine d'années par le physicien français Georges Lochak. Les expériences décrites dans l'article en page 8 pourraient bien en apporter une première confirmation expérimentale. Les conséquences scientifiques, technologiques et stratégiques seraient alors impressionnantes.**



**EMMANUEL GRENIER**

**C**omme Louis Pasteur, Pierre Curie est issu de la grande école française de cristallographie (voir *Fusion* n°45). Le génie de Curie a été de tirer de cette science assez particulière des conclusions très profondes atteignant à l'universalité dans son article fameux sur le principe de symétrie. C'est dans un appendice d'une page à cet article qu'il aborde le sujet des monopôles magnétiques : à partir des lois de symétrie qu'il a découvertes sur le magnétisme, il a inféré les lois de symétrie que devrait avoir un pôle magnétique. Il essaya ensuite de reproduire ce qui lui avait si bien réussi avec la piézo-électricité. En réfléchissant à la symétrie des cristaux, il avait trouvé que si un cristal possède un défaut de symétrie particulier (défaut de centre), il était alors possible de faire apparaître un champ électrique en exerçant une pression ou une traction sur ce cristal. Il fit un raisonnement du même ordre pour le magnétisme et tenta de faire apparaître une charge magnétique sur un cristal. Sans succès, comme on le sait. Il explique dans ce papier que l'on pourrait faire des choses remarquables si l'on possédait le courant magnétique, telles qu'un transformateur à courant continu.

L'idée de Curie ne fut pas perdue pour tout le monde, même si elle sembla oubliée pendant quelque temps. Jusqu'en 1930, lorsque Dirac écrivit un article basé sur les idées générales de la mécanique quantique où il montrait que, s'il existait des charges magnétiques dans la

nature, le produit de la charge magnétique par la charge électrique élémentaire devrait avoir l'expression :  $eg/hc = N/2$ .

C'était la première fois que l'on avait une formule pour le monopôle magnétique, donc quelque chose de plus « tangible » que le principe général de Curie. Selon cette formule, la charge magnétique doit être au moins 68,5 fois plus grande que la charge électrique, et même, selon toute probabilité, 137 fois plus grande (notons au passage que 137 est l'inverse de la constante de structure fine). Dirac tirait cela d'un principe d'invariance de jauge et ce fut sans doute le premier raisonnement d'invariance de jauge aboutissant à un résultat concret.

Il y eut ensuite des centaines d'articles sur le thème du monopôle magnétique, qui tentaient de comprendre ce que l'on verrait s'il en existait vraiment, de deviner les traces qu'il pourrait laisser sur une émulsion photographique, de savoir quel serait son mouvement dans un champ électrique coulombien, etc.

## Deux théories du monopôle

Aujourd'hui, il n'existe que deux théories qui donnent des équations dans lesquelles apparaît le monopôle magnétique. L'une vient du monde officiel des particules élémentaires ; c'est celle de Toft et Poliakov. Elle se base sur l'équation non linéaire qui est à l'origine du boson de Higgs. Le problème le plus grave du monopôle de Toft et Poliakov est que sa masse devrait être  $10^{16}$  fois celle du proton. Il s'agit là d'une masse extravagante dans la mesure où elle appartient au monde macroscopique plutôt qu'au monde des particules : cela correspond à un micron cube de gaz parfait !

Il est évidemment impossible de fabriquer un tel élément avec les moyens techniques actuellement à notre disposition : c'est largement hors de portée des plus puissants accélérateurs. Les auteurs ont eu alors recours au procédé classique des adeptes du crime parfait en physique : le Big Bang. Lorsque l'on affirme que cette charge magnétique n'a pu exister qu'au moment du Big

Bang, personne ne peut y aller et en revenir pour vous dire que c'est faux.

L'autre théorie est due au Français Georges Lochak, le plus illustre des disciples de Louis de Broglie. En 1957, alors qu'il vient d'arriver dans le laboratoire de Louis de Broglie, il écrivit la théorie de Dirac dans un langage rotationnel en représentant le spineur de Dirac par un scalaire d'univers, un pseudo-angle (un angle qui change de signe lorsque l'on change de sens de rotation de l'espace) et six angles d'Euler : trois représentent la rotation dans l'espace à trois dimensions et trois autres qui représentent des rotations imaginaires de l'espace de Minkowski (ces rotations entre une direction imaginaire et la direction du temps représentent en fait des vitesses). Comme tout tourne dans le monde de la mécanique quantique (tout est basé sur le spin), Lochak avait voulu représenter l'équation de Dirac par des grandeurs qui représentent des rotations. Il obtint ainsi une représentation de l'équation de Dirac, assez compliquée, mais qui comportait deux formules remarquables : l'une reliait le courant électrique à la rotation du spin tandis que l'autre reliait deux objets inconnus. L'un de ces objets était un pseudo-angle, l'autre était une grandeur bizarre, la quatrième composante de la rotation du vecteur de spin. Ces deux formules étaient d'un parallélisme saisissant et très simples, alors qu'elles venaient d'un calcul fort compliqué. Lochak les publia et y repensa de temps à autre, mais sans avancer davantage.

En 1982, lors d'un colloque en l'honneur de René Thom, Georges Lochak avait pris comme sujet de son intervention « la géométrisation de la physique ». Il cherchait à montrer que cette méthode était extraordinairement puissante et avait donné des résultats remarquables. Dirac s'était ainsi retrouvé en face du mystère qu'était l'antiparticule, directement issue de la géométrisation de la physique (l'antiparticule découle de la loi d'invariance de l'équation de Dirac). Pour illustrer son propos, Lochak ressort ses deux équations pour les montrer à René Thom et, en un éclair, il comprend ce qu'il cherchait depuis vingt-cinq ans : la première équation dit qu'il y a un lien entre la conservation de

l'électricité et une certaine rotation, la seconde exprime la conservation du magnétisme reliée à un autre angle de rotation.

Dans l'équation de Dirac, il y a une propriété d'invariance de jauge, que l'on retrouve dans toutes les équations de la mécanique quantique : si l'on ajoute une phase à la fonction d'onde de Dirac, l'équation ne change pas. On peut trouver une loi d'interaction avec l'électromagnétisme qui fait apparaître l'électron. Cependant, en repensant à ses deux formules, Lochak se rend compte que, à part la loi d'invariance que Dirac lui-même avait vue, on peut en trouver une autre à laquelle personne n'avait prêté attention. Il démontre aussitôt que c'est la seule autre loi : en tout, il n'y a que deux lois possibles.

## Invariance de jauge

Cette deuxième équation avait pour particularité d'imposer une particule de masse nulle, comme la plupart des théories de jauge (à l'exception de l'électromagnétisme).<sup>1</sup> La théorie de jauge donnait une nouvelle manière dont l'objet « particule de Dirac » pouvait interagir avec le champ électromagnétique. En l'étudiant, on s'aperçoit que le nouvel objet défini par cette théorie satisfait toutes les conditions énoncées par Pierre Curie.

Les antiparticules furent découvertes par Dirac parce qu'il y avait des solutions à énergie négative dans son équation et qu'il détestait cela. En cherchant à transformer son équation pour rendre de nouveau positive son énergie, il se rendit compte que l'on ne pouvait le faire qu'avec une charge positive. Ce qui était beaucoup moins révoltant qu'une énergie négative ! Feynman raconta plus tard la même histoire de façon différente lorsqu'il affirma qu'une antiparticule était une particule qui remontait le cours du temps. Lochak montra lui que l'antimonopôle magnétique n'est pas une antiparticule, mais plutôt l'image-miroir du monopôle. Autrement dit, le monopôle magnétique est un objet chiral, c'est-à-dire un objet dont l'image dans un miroir est différente de lui-même. Ensuite, il s'est aperçu qu'il y avait dans ces équations un courant

↗ magnétique qui se conservait. A première vue, c'était catastrophique car il s'agissait d'un courant du genre espace. Autrement dit, d'un courant qui correspondrait à une particule allant plus vite que la lumière. <sup>2</sup> Il s'aperçut bientôt que ce n'était pas si grave : il s'agissait, en effet, non pas d'un courant magnétique en tant que tel mais de la différence entre le courant magnétique Nord et le courant magnétique Sud. C'est cette différence qui était du genre espace et les différences ont le droit de faire ce qu'elles veulent !

Au XIX<sup>e</sup> siècle, lorsque l'on étudiait les « rayons cathodiques » auxquels on n'avait pas encore donné le nom d'électrons, le physicien norvégien Birkeland montra que si l'on mettait un pôle d'aimant dans un tube

de Crookes et que l'on interceptait ainsi le courant cathodique, celui-ci se concentrait fortement, au point de fondre la paroi en verre du tube de Crookes. Cet effet arriva aux oreilles de Poincaré, qui eut la curiosité d'en étudier la théorie. Il écrivit les interactions entre le pôle magnétique et les particules électriques chargées négativement, au moyen de la théorie classique de l'électromagnétisme. L'équation à laquelle il parvint permettait d'expliquer parfaitement les effets observés. Or l'équation de Poincaré décrit aussi bien le mouvement de charges électriques dans un monopôle magnétique macroscopique. Lochak décrit quant à lui un monopôle magnétique en mouvement très rapide. Si l'on place sur son

chemin un champ électrique coulombien (une charge électrique), le monopôle magnétique devrait suivre la même trajectoire. En utilisant l'approximation classique de l'optique géométrique plutôt que les équations de la mécanique quantique (c'est-à-dire en se plaçant dans le cas où la longueur des courbes ne permet pas de faire apparaître la longueur d'onde associée), Lochak a réussi à faire resurgir l'équation de Poincaré, ce qui représente un argument très fort en faveur de sa théorie.

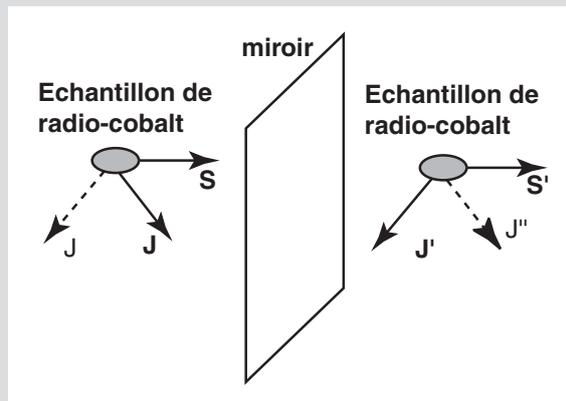
## Quantification de la charge magnétique

Du fait de la relation de Dirac citée plus haut, il y a une quantification de la charge magnétique : la charge magnétique ne peut prendre que des valeurs bien particulières. Cette quantification est due à l'interaction entre l'électricité et le magnétisme. Dirac avait montré que si une charge magnétique interagissait avec une charge électrique, on devait avoir nécessairement cette relation quantique entre les deux charges. Nous connaissons la charge élémentaire électrique et nous savons qu'il doit y avoir le rapport  $eg/hc = N/2$ . S'il n'y a pas interaction, les lois de la mécanique quantique imposent à une charge magnétique libre venant à tomber sur une particule électrique d'arriver avec la valeur correcte de la charge. Si cela n'était pas, ce serait une faille très importante dans la théorie de l'électromagnétisme ou dans la mécanique quantique, voire dans les deux à la fois. Or il y a de nombreux arguments pour penser que ces théories sont solides, même si elles ne sont bien sûr pas sacrées.

Pourtant, au moins deux physiciens estiment avoir observé des monopôles magnétiques qui ne respectaient pas la loi de Dirac. Le premier est l'Autrichien Ehrenraft, un excellent expérimentateur ayant inventé ce que l'on appellera plus tard les expériences de Millikan, qui donnèrent la mesure de la charge de l'électron. On ne voit pas du tout où il aurait pu se tromper. Le second est un Russe du Kazakhstan qui a fait des expériences dans des conditions dif-

## La radioactivité $\beta$ est un phénomène chiral

Une illustration récente du principe de symétrie est la *non conservation de la parité dans les interactions faibles*, qui prouve l'importance dans la nature de cette chiralité chère à Pasteur et à Curie. Autrement dit, le phénomène de la radioactivité  $\beta$  n'est pas identique à son image dans un miroir. L'expérience de Mme C.S. Wu (1957) représentée ici consiste à mesurer la radioactivité  $\beta$  du cobalt 60.



Cet atome possède un spin : il est comme un aimant qui s'oriente dans un champ magnétique et se caractérise par un vecteur axial  $S$  analogue à celui qui représente un champ magnétique : ce vecteur est identique à son image dans un miroir perpendiculaire. On oriente donc un échantillon de radio-cobalt dans un champ et l'on mesure l'intensité de la radioactivité dans toutes les directions : cette intensité directionnelle se représente par un vecteur polaire  $J$  analogue à celui du champ électrique. On sait que l'ensemble de deux tels vecteurs, respectivement axial et polaire, est un objet chiral.

Pour que le phénomène tout entier soit identique à son image dans le miroir, il faudrait que, sur l'échantillon, l'intensité du rayonnement soit la même dans les deux directions  $J$  et  $J'$ , or *les intensités mesurées sont nettement différentes*. La radioactivité  $\beta$  n'est donc pas identique à son image dans un miroir et l'interaction faible est un phénomène chiral ou, comme on dit, il ne conserve pas la parité. En son temps, cette découverte fit l'effet d'une bombe. Les physiciens n'avaient jamais pensé qu'une loi fondamentale de la nature, l'une des quatre grandes forces que nous connaissons, puisse être chirale. On raconte que Pauli s'exclama, quand il apprit l'hypothèse de Lee et Yang : « *Je ne peux pas croire que Dieu soit gaucher...* »

**Emmanuel Grenier**, d'après Georges Lochak.

férentes de celles d'Ehrenraft et qui aboutit aux mêmes conclusions. Les physiciens ne savent pas vraiment quoi leur répondre.

Cette charge magnétique a donc une série de valeurs possibles, déterminées par les lois générales de l'électromagnétisme et de la mécanique quantique. Pour retrouver la loi de Dirac à partir de l'équation de Lochak, il suffit de supposer que la fonction d'onde du monopôle magnétique est continue lorsque l'on tourne autour de n'importe quel point de l'espace, ce qui est toujours supposé en mécanique quantique. Il n'est besoin d'aucun raisonnement supplémentaire. Cela provient du fait que le nombre entier figurant dans la relation de Dirac est un quantum de moment cinétique. C'est un quantum qui gouverne la valeur de la force de rotation du monopôle autour du centre électrique. La loi de jauge très abstraite de Dirac prend donc chez Lochak une signification géométrique élémentaire. L'ensemble formé par un monopôle magnétique et une charge électrique possède la symétrie d'une toupie en rotation. Le monopôle suit un mouvement de Poincaré.<sup>3</sup> La charge magnétique est donc reliée à une rotation caractéristique du monopôle. Un monopôle sans charge correspond alors à un neutrino. Dans la vision de Lochak, un neutrino est donc un cas particulier de monopôle magnétique, sans charge, mais doté d'une rotation. Une autre façon de le dire est que le monopôle magnétique est un neutrino magnétiquement excité.

Le monopôle pourrait alors intervenir non seulement dans les phénomènes électromagnétiques, mais aussi dans les phénomènes d'interaction faible, comme par exemple la radioactivité  $\beta$ . Ce serait alors un moyen possible de détecter ces monopôles. Inversement, l'apparition de monopôles magnétiques pourrait signer la présence de phénomènes nucléaires. Les monopôles pourraient par exemple être responsables de radioactivité  $\beta$  inverse : lorsqu'un monopôle magnétique est envoyé sur un noyau, et qu'il est capturé en même temps qu'un électron, cela correspond à l'émission d'une charge électrique positive, donc à une descente d'un échelon dans la classification de Mendeleïev.

## Les « jambes glabres »

Dans les expériences d'Oroutskoïev, répétées des centaines de fois par lui-même et d'autres laboratoires, on obtient des transmutations nucléaires à faible énergie grâce à une étincelle électrique dont l'énergie est très faible (quelques keV). Des raisonnements de physique nucléaire montrent qu'il est possible, en principe, de se promener sur l'ensemble de la table de Mendeleïev, à partir de n'importe quel élément, grâce à la radioactivité  $\beta^+$  ou  $\beta^-$ . L'énergie du Soleil provient essentiellement de la radioactivité  $\beta$ . C'est d'ailleurs de là que viennent les neutrinos solaires que nous recevons massivement. On sait qu'il manque environ 30 % des neutrinos prévus par la théorie de l'interaction faible. De très nombreuses hypothèses ont été émises pour expliquer ce manque. Lochak propose lui de l'expliquer par le fait que les neutrinos manquants correspondent à des monopôles, le phénomène de radioactivité restant strictement le même. Ces monopôles resteraient englués dans le champ électrique solaire et ne pourraient donc être observés.

Revenons au cas de ce qu'Oroutskoïev appelle prudemment le « rayonnement étrange ». Dès qu'on lui impose un champ magnétique, on en change le comportement de façon radicale. Là où l'on voyait une trace fine sur une émulsion photographique, on observe une « comète » dont les mesures de densité montrent qu'elle correspond à la même quantité de charges, mais « étalées » dans l'espace. Les traces laissées par ces rayonnements ne correspondent à rien de connu et sont étonnantes pour tous les spécialistes de l'observation des particules élémentaires. Ainsi, l'empatement des traces est si grand qu'il faudrait admettre que les particules ont une énergie de l'ordre du GeV. Or on n'a mis en jeu dans l'expérience que des énergies beaucoup plus basses. On n'imagine donc pas comment on aurait créé une particule d'une telle énergie. Il y a aussi une objection massive : des particules aussi énergétiques ont l'habitude de bousculer sur leur passage des électrons atomiques. Ceux-ci sont alors propulsés hors des orbites et laissent à leur tour

des traces. Il est courant de dire que la trace d'une particule électrique comme étant une « jambe velue », avec de très nombreux « poils » correspondant aux traces électroniques. Or, dans les observations d'Oroutskoïev, elles n'y sont pas. On ne voit qu'une « jambe glabre » !

D'autres mesures beaucoup plus fines ont permis d'observer l'effet Mössbauer.

Un atome susceptible d'émettre un rayon  $\gamma$ , coincé dans un réseau cristallin. Il ne peut donc reculer au cours de l'émission. L'effet Mössbauer, c'est la finesse extraordinaire des raies  $\gamma$ , qui permet de mesurer la fréquence avec une grande précision. On peut montrer par l'effet Mössbauer que le « rayonnement étrange » transporte des charges magnétiques. Il a fait bouger, par interaction magnétique, les raies spectrales du  $^{57}\text{Fe}$ .

La théorie de Georges Lochak sur les monopôles ne peut sans doute pas encore être considérée comme prouvée, mais c'est la seule disponible pour expliquer les phénomènes très troublants rapportés par Oroutskoïev et ses collègues, dont le cadre théorique dominant est incapable de rendre compte. ■

### Notes

1. Une phase, pour une fonction circulaire, est équivalente à un angle. La jauge correspond au choix de l'origine de l'angle. Quand on parle d'invariance de jauge, cela revient à affirmer qu'il n'existe pas dans l'espace de point à partir duquel on est tenu de mesurer les angles. La physique moderne a emprunté aux mathématiciens la capacité de raisonner sur des espaces de plus en plus compliqués. Une théorie de jauge est une théorie dans laquelle il existe un analogue géométrique, parfois extrêmement complexe, de cette invariance de jauge.

2. Dans la relativité, il y a un cône de propagation de la lumière. Les mouvements du genre temps sont à l'intérieur de ce cône. Les mouvements de genre espace sont à l'extérieur.

3. Le mouvement de Poincaré est le mouvement d'un solide dont le moment des forces extérieures agissant sur lui, calculé en son centre d'inertie, est constamment nul. Un satellite tournant autour de son astre suit un mouvement de Poincaré. Un corps en chute libre à faible vitesse (permettant de négliger les forces aérodynamiques) suit aussi un mouvement de Poincaré.