

Les lignes de champs magnétiques forment toujours des boucles. Sauf pour un monopôle, qui fuit les détecteurs.

Physique. **Le mystère n° 1 du magnétisme refait surface**

Monopôles, les aimants terribles

Plus d'un siècle que les physiciens courent après un inconnu, le monopôle magnétique. Deux expériences, en Russie et au Japon, apportent de nouveaux espoirs. Et révèlent des choses encore plus étonnantes.

Les Ecossais ont le monstre du Loch Ness, les Provençaux l'Arlésienne, et les physiciens le monopôle magnétique. Une insaisissable particule que personne n'a jamais vue et qui refait surface au gré des théories ou des expériences : en 1894, 1931, 1975, 1982... et maintenant au XXI^e siècle, au Japon et en Russie. Dans deux laboratoires menant des travaux remarquables mais tout aussi spéculatifs que les précédents. Le premier, à Tsukuba, a saisi « l'empreinte » du mystérieux monopôle dans un cristal métallique bien connu de tous les microélectroniciens, qui n'avaient rien vu jusqu'alors. Le second, à Moscou, suspecte la main invisible de la fantomatique particule dans de mini-

explosions, tenant plus de l'alchimie que de la chimie classique. Problème, dans les deux cas, le monopôle pose plus de questions qu'il n'est censé en résoudre.

C'est le désir profond d'harmonie qui crée chez les physiciens cette attirance pour l'étrange bestiole. Sans elle, disent-ils, la nature est difforme. Et ils font

remarquer que l'électricité et le magnétisme, pourtant unis par les équations de Maxwell depuis le XIX^e siècle, ne se comportent pas tout à fait de la même manière. Certes, ce sont tous les deux des champs. Certes, l'intensité de ces deux champs varie selon l'inverse du carré de la distance. Certes, l'un est la >>

Dipôle robuste !
Casser un aimant en deux donne 2 aimants et non 2 monopôles ! L'aimantation est due à une orientation privilégiée des domaines magnétiques (flèches sur le schéma). C'est une propriété microscopique du matériau. Le casser n'y change rien.

INFODIAPHE : SYLVIE DAUDAL

» source de l'autre et réciproquement. Le courant circulant dans une bobine crée un champ magnétique. Et inversement, dans une dynamo, la variation d'un champ magnétique crée un courant électrique. Mais, alors qu'il existe des charges électriques libres, les électrons, personne n'a jamais observé une charge magnétique libre, un monopôle. Rien à faire, les pôles sont toujours des dipôles, qui vont par deux, un nord et un sud, comme dans les aimants ou les boussoles. Cassez un aimant en deux, vous aurez deux aimants et jamais deux monopôles séparés (voir le schéma p. 91) ! Même en cassant jusqu'aux atomes, le champ reste dipolaire et ne devient pas monopolaire.

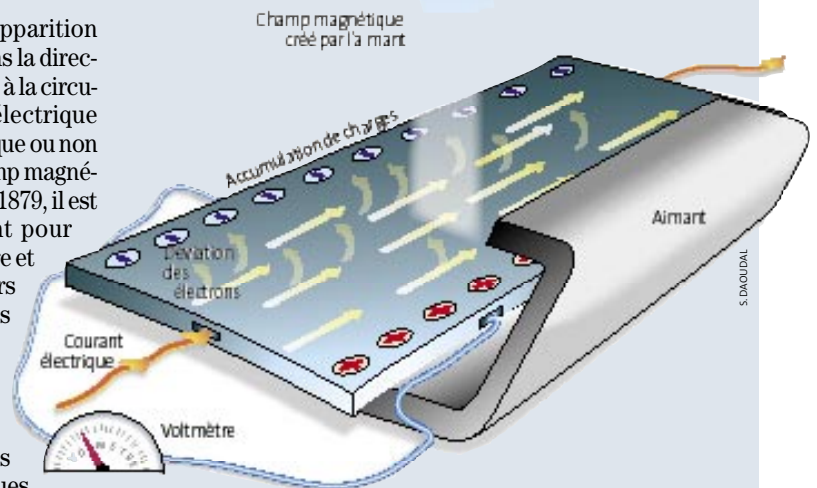
« Quand vous regardez les équations de Maxwell, vous n'avez qu'une envie, c'est de les symétriser », lance Georges Lochak, fils spirituel de Louis de Broglie, aujourd'hui à la retraite, et à l'origine d'une théorie controversée du monopôle (lire l'encadré ci-dessous). « Maxwell s'y serait attaqué, s'il n'avait eu déjà assez de soucis avec le volet électronique de ses équations », s'amuse le physicien. Pierre Curie, Paul Dirac, Gerardus 't Hooft (prix Nobel de physique en 1999) se sont essayés, entre autres grands esprits, au rétablissement de l'harmonie (lire l'encadré p. 93).

Et à chaque fois, de nouveaux problèmes apparaissent. Ainsi, le monopôle de Dirac, qui explique la quantification de l'électron, contredit les équations de Maxwell. Celles-ci imposent qu'à

L'ORIGINE DE L'EFFET HALL

L'effet Hall est l'apparition d'une tension dans la direction perpendiculaire à la circulation du courant électrique dans un film métallique ou non plongé dans un champ magnétique. Connue depuis 1879, il est utilisé couramment pour déterminer le nombre et la nature des porteurs de charges dans les composants micro-électroniques. Il sert aussi à mesurer des champs magnétiques et à cartographier les domaines magnétiques de toutes sortes d'objets.

L'effet Hall anormal, ou extraordinaire, apparaît pour les matériaux présentant une aimantation propre. Comme le fer ou bien l'oxyde SrRuO_3 , uti-



lisé par l'équipe japonaise pour observer un monopôle magnétique. Depuis 50 ans, les physiciens hésitent sur l'origine exacte de cet effet. Est-il dû à la structure interne du matériau

ou bien est-il influencé par les défauts du cristal ? Les chercheurs de l'université de Tsukuba font désormais pencher la balance pour la première solution. □

travers toute surface fermée, il rentre autant de lignes de champs qu'il n'en sort. Or, dans l'hypothèse de Dirac, apparemment, tout sort ou tout rentre... Quant à un second modèle de mono-

Enfin une empreinte de monopôle... dans du cristal !

pôle, introduit par les théories de Grande Unification, visant à réconcilier les forces fondamentales, c'est une particule bien envahissante : trop lourde, en trop grand nombre (lire l'encadré ci-dessous), d'une densité supérieure à celle... de l'Univers, ce qui semble plutôt fâcheux. Heureusement, les théoriciens

ne manquent pas de ressources. En 1973, le paradoxe du monopôle de Dirac a été réglé mathématiquement par Tai Tsun Wu et Chen Ning Yang. Quant au second, l'hypothèse de l'inflation lui a sauvé la mise : la phase d'expansion très rapide qu'aurait connue l'Univers juste après le Big Bang a dilué la matière et les monopôles avec !

Si le monopôle a fait phosphorer les théoriciens, les expérimentateurs n'ont pas cessé de le chercher. Partout. Sur terre, sous l'eau, dans l'air pour capter ses traces dans les rayons cosmiques. Mais aussi dans les accélérateurs de particules et leurs grandes énergies. Et même dans

les roches terrestres magnétisées qui auraient pu le piéger. Giorgio Giacomelli, de l'université de Bologne en Italie, a même évalué à 331 kilos la quantité de roches terrestres ou météoritiques testées ! En vain. Aucune trace. Le monopôle échappe toujours à ses créateurs. Jusqu'aux deux expériences suivantes.

Le monopôle était devant leur nez et ils ne l'avaient pas vu ! L'équipe dirigée par Tokura Yoshinori, à l'Institut national de science et technologie avancées de Tsukuba (Japon), a épaté son monde en annonçant en octobre 2003 la découverte d'une empreinte de monopôle dans un cristal. Plus précisément, un cristal métallique magnétique baptisé oxyde de strontium-ruthénium (SrRuO_3), connu pour son côté pratique en tant qu'électrode dans les microcomposants électroniques. Dorénavant, il sert aussi de terrain d'observation privilégié de l'Arlésienne des physiciens. C'est en calculant précisément la structure énergétique interne du fameux SrRuO_3 que l'équipe japonaise l'a « vu » et surtout a mesuré son effet. Le comportement anormal du cristal observé expérimentalement est en parfait accord avec leur théorie, dans laquelle intervient le monopôle. Inversement, si d'une manière ou d'une autre

LOURD CONTRE LÉGER : DEUX THÉORIES SUR LE RING

Lourd. Dans les années 1970, pour les physiciens travaillant à l'unification des forces, les monopôles magnétiques sont tout bonnement nécessaires à la théorie. Selon eux, ils sont très lourds, dix millions de milliards de fois plus qu'un proton, soit un centième de microgramme environ. Leur densité est même supérieure à celle de l'Univers... ce qui paraît déraison-

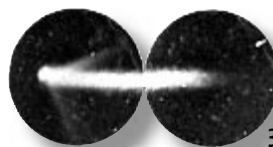
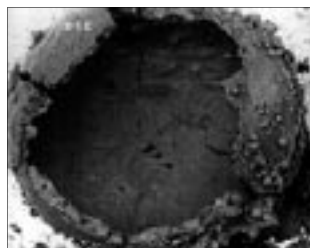
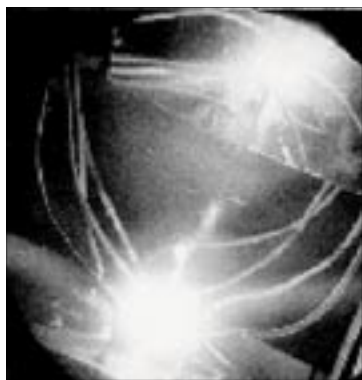
nable. Il y a trop de monopôles, de quoi faire s'effondrer l'Univers. Heureusement, grâce à l'hypothèse de l'inflation, brutale expansion de l'Univers post-Big Bang, les monopôles sont plus dilués et l'Univers est sauf. Aujourd'hui, le problème est qu'il y a autant de modèles de monopôles que de modèles d'unification. Et autant de masses différentes.

Léger. Une autre théorie,

proposée par Georges Lochak, est loin de faire l'unanimité. Elle décrit un monopôle très léger, voire de masse nulle. Il découle non pas des théories d'unification mais de l'équation de Dirac. Celle-là même qui décrit l'électron et a fait découvrir l'antimatière. Le monopôle de Lochak rétablit une certaine symétrie dans les équations sans abolir toutes les différences. □

Triple effet

Dans l'expérience russe, une boule de foudre (1) apparaît au-dessus des électrodes, après l'impulsion électrique de 500 volts. Suite à l'explosion, les électrodes sont en mauvais état (2) : de nouveaux isotopes sont créés. Enfin, un étrange rayonnement, affecté par un champ magnétique est également détecté (3).



la structure cristalline est modifiée, alors l'effet du monopôle change. En outre, les chercheurs ont fait d'une pierre deux coups avec leur cristal magique ! Non seulement, ils sont parvenus à exhiber un objet traqué depuis un siècle, mais leur étude a le bon goût d'arbitrer une controverse sur l'origine du phénomène d'« effet Hall anormal », qui n'a que 50 ans d'âge (*lire l'encadré p. 92*). Belle prise !

Un monopôle a failli faire exploser l'un des laboratoires de l'institut Kourtchatov, dans la banlieue de Moscou. Ce n'est encore qu'une hypothèse, mais les chercheurs n'ont pas trouvé d'autre explication pour interpréter une multitude de résultats étranges. Depuis environ cinq ans, ils pulvérisent de petites électrodes en titane grâce à des impulsions électriques de 5000 volts envoyées durant une centaine de microsecondes. A chaque fois, une mini-boule de foudre apparaît au-dessus des « réacteurs ». Autre surprise, à l'intérieur des éprouvettes, une étrange alchimie intervient : l'isotope naturel du titane (à 48 nucléons) baisse d'environ 10 % en quantité, quand augmen-

te celle des isotopes plus rares (à 47, 49 ou 50 nucléons). Des impuretés, d'aluminium et de fer notamment, sont détectées... Le tout sans émission de neutrons ou de rayons gamma. Il s'agirait bien de transmutation... Dernière (?) bizarrerie, un rayonnement inconnu des physiciens a strié des sortes de plaques pho-

Un monopôle a failli faire exploser un laboratoire de l'institut Kourtchatov

tographiques, destinées à détecter le passage de particules à deux mètres de l'expérience. Sans oublier qu'un jour, alors que l'équipe avait remplacé l'eau dans laquelle plongent les électrodes par de l'huile, l'explosion fut si violente qu'elle faillit être fatale... Comme si cela ne suffisait pas, lors d'une autre expérience, le remplacement du titane par un sel d'uranium a provoqué une nouvelle surprise : l'isotope 235, très rare, a augmenté de près de 20 % ! Cela frise l'hérésie. Sauf que l'équipe de Léonid Ouroutskoïev n'est pas la seule à avoir fait ces étonnantes observations. En Russie, trois équipes ont obtenu des résultats similaires.

Et le monopôle dans tout ça ? Selon les physiciens, il serait au

cœur du mystère : ce serait lui le responsable des forts champs magnétiques nécessaires aux réactions de transmutation. Pour les théoriciens du groupe russe, la frontière entre physique nucléaire et électronique est plus mince qu'on ne le croit. Des changements violents, provoqués par exemple par un grand champ magnétique, au sein du cortège électronique de l'atome pourraient influencer jusqu'à son cœur de protons et de neutrons et modifier sa radioactivité. Nous ne sommes plus à une spéculation près. Le champ magnétique en question friserait les 100 000 teslas, soit 10 000 fois plus que les aimants supraconducteurs du futur accélérateur de particules LHC, à Genève. Seul un monopôle pourrait jouer dans cette catégorie.

Au début, les chercheurs russes ont invoqué les monopôles lourds, même si les énergies mises en jeu leur semblaient incompatibles avec leur énorme masse. C'est alors qu'ils sont tombés dans la littérature sur un autre monopôle, beaucoup plus léger et surtout moins conventionnel, proposé par Georges Lochak en 1956 (*lire l'encadré p. 92*).

« Les Russes y croient plus que moi maintenant ! », sourit le physicien français qui a assisté à ces expériences et reste impressionné par les résultats. Monopôle magnétique, théorie non classique, transmutation à basse énergie, enrichissement de l'uranium... la liste des « révolutions » – ou des hérésies –, est longue. Reste une impressionnante quantité de données et au moins autant de questions. Pendant ce temps, le monopôle court toujours... **David Larousserie**

Du quartz au ballon

1864 James Maxwell propose ses célèbres équations reliant le champ électrique au champ magnétique.

1894 Pierre Curie, avant de découvrir la radioactivité avec sa femme Marie, rédige un mémoire sur l'importance de la symétrie en physique. Armé de ses théories, il prédit l'existence de la piézo-électricité, qu'il met en évidence dans le quartz : une déformation crée un courant électrique et réciproquement.

Par ailleurs, il s'attaque expérimentalement au problème du « magnétisme libre », sans succès.

1931 Paul Dirac, postulant l'existence du monopôle magnétique, en déduit qu'il en suffirait d'un seul pour expliquer l'un des grands mystères de la physique, la quantification de la charge de l'électron. Ou pourquoi tous les électrons ont la même charge, 1.6.10⁻¹⁹ coulomb. « Son » monopôle est 137 fois plus chargé que l'électron. Pour expliquer l'inobservation de cette particule, il lui donne une masse énorme.

Années 1970 Les théories de « grande unification », destinées à réconcilier l'ensemble des forces fondamentales, nécessitent des monopôles ultralourds.

1975 Un ballon américain détecte la trace du passage d'un monopôle dans un rayon cosmique. L'annonce sera retirée quelques années plus tard.

1982 L'équipe de Blas Cabrera, de l'université de Stanford (Californie), aperçoit un événement suspect dans un détecteur utilisant des boucles supraconductrices. Le résultat fait long feu, le « tressaillement » des détecteurs aurait en fait une cause moins spectaculaire que le passage d'un monopôle. □

Au Japon, le monopôle est vu comme un défaut très étroit (le pic central) dans la répartition des énergies du cristal.

T. YOSHIMORI, INSTITUT NATIONAL DE SCIENCE ET TECHNOLOGIE DE TSUKUBA

