

«habillés» sont les seuls qui soient observables en pratique. Ainsi, l'électrodynamique quantique suppose des électrons infiniment petits, mais elle prédit aussi qu'ils ne peuvent être observés!

Quand les calculs mènent à un résultat infini

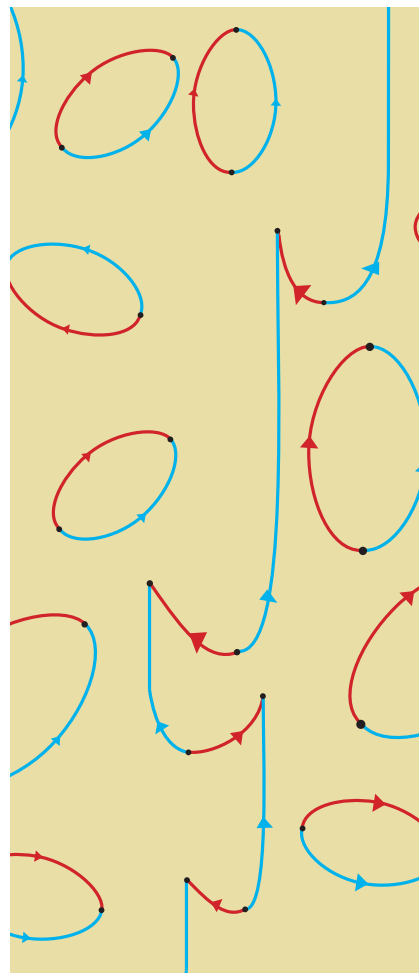
À la fin des années 1940, les physiciens ont calculé la charge de l'électron nu en prenant en compte les effets de la polarisation du vide. Ils ont eu une mauvaise surprise : les calculs mènent à un résultat infini. Ce n'est pas tout : par cette méthode, la masse de l'électron nu est également infinie! Manifestement, ces résultats absurdes sont engendrés par le caractère ponctuel, donc infiniment petit, de l'électron nu. Rappelons que l'équivalence entre l'énergie et la masse nécessite que le champ électrique d'un électron contribue à la masse, puisque la présence d'un champ électrique dans l'espace implique celle d'une densité d'énergie. Puisque, dans le cadre de l'électrodynamique quantique, l'électron est ponctuel, le champ électrique devient très intense aux très courtes distances (il varie comme l'inverse du carré de la distance). À tel point que les calculs le montrent, sa contribution à la masse est infinie.

L'électrodynamique quantique fondée sur l'hypothèse d'électrons nus ponctuels et en interaction locale aboutit à un paradoxe. Cette hypothèse est-elle erronée? L'électron nu présente-t-il une structure interne, laquelle ne devient perceptible que pour de très petites distances, 10^{-20} mètre par exemple. S'il en est ainsi, cette particule n'est pas infiniment petite, mais a un rayon fini. Les calculs montrent alors que les valeurs infinies disparaissent. Toutefois, malgré d'intenses efforts, les physiciens n'ont jamais décelé de preuve expérimentale de l'existence d'une sous-structure électronique. Seul résultat obtenu : si le rayon de l'électron n'est pas nul, il est nécessairement inférieur au centième de la taille des nucléons.

Dans les années 1950, la situation restait paradoxale. L'hypothèse de l'électron nu ponctuel faisait vaciller une théorie par ailleurs prometteuse. Certains des résultats obtenus étaient précis, d'autres infinis. La description globale des interactions électromagnétiques donnée par l'électrodynamique quantique était correcte. Les physiciens ont alors tenté de séparer

le bon grain de l'ivraie, c'est-à-dire d'éliminer les résultats infinis des calculs. Pour ce faire, ils ont ajusté la charge de l'électron habillé au résultat trouvé expérimentalement, en ignorant tout simplement la charge de l'électron nu. Ils firent de même pour la masse de l'électron habillé, imposant ainsi la masse mesurée. Nommée renormalisation, cette méthode est d'une étonnante efficacité : les quantités infinies sont éliminées et les résultats obtenus pour les grandeurs physiques mesurables sont les plus précises jamais obtenues.

L'un des pères de la renormalisation fut le physicien américain Richard Feyn-



5. LE VIDE aussi a une nature quantique, ce qui se manifeste notamment par la création permanente de paires particule-antiparticule. Constituées d'un électron et d'un positon, elles sont dites virtuelles parce qu'on ne peut les observer directement. Conséquence : un électron qui se propage à travers le vide s'annihile souvent avec un positon issu d'une paire virtuelle. Il semble alors réapparaître là où l'électron issu de la paire virtuelle se trouve et y poursuivre sa trajectoire. Son parcours apparaît donc flou à un observateur extérieur supposé assez petit pour l'examiner de près. Il s'agit là de l'une des manifestations de l'incertitude quantique sur la position.

mann. Lors d'un congrès aux États-Unis, il montra pour la première fois comment la méthode élimine les infinis qui apparaissent dans les calculs de la théorie de l'électrodynamique quantique. Ce progrès fit de l'électrodynamique quantique la plus précise des théories.

Les problèmes d'infinis dans les théories locales (interactions ponctuelles mettant en jeu des particules ponctuelles) se rencontrent dans d'autres théories que l'électrodynamique quantique. Ainsi, les interactions entre quarks sont décrites dans le cadre d'une théorie similaire à l'électrodynamique : la chromodynamique quantique. Cette théorie décrit l'interaction forte, laquelle provoque, notamment, l'assemblage des quarks par groupes de trois. Elle tire son nom du grec *chromos* qui signifie couleur, car on attribue aux quarks, par exemple au quark *u*, un nouveau type de charge, dénommée couleur, qui ne peut prendre que trois valeurs : rouge, vert ou bleu. Il y a ainsi un quark *u* rouge, un vert et un bleu, comme il y a des quarks *d* rouges, verts ou bleus. Le fait qu'il y ait trois couleurs signifie que les nucléons sont composés de trois quarks. Nous avons déjà souligné que les interactions entre quarks sont véhiculées par des particules d'énergie nommées gluons, les «médiatrices» de l'interaction forte (si intense qu'il est impossible de séparer les quarks). Pour observer les quarks et les gluons, les physiciens ont été obligés de recourir à des méthodes indirectes : ils les ont bombardés avec des particules insensibles aux interactions fortes, des électrons, des neutrinos ou des photons. L'existence des gluons a été prouvée pour la première fois au synchrotron allemand de Hambourg (DESY), à la fin des années 1970.

Pas de structure interne dans les quarks

Dans la théorie actuelle, les quarks et les électrons sont des particules élémentaires, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de structures internes. Comme dans le cas des électrons, les physiciens ont essayé de trouver une sous-structure pour les quarks, mais sans succès jusqu'à aujourd'hui. Une limite supérieure pour le rayon d'une éventuelle sous-structure de quarks a été obtenue au grand accélérateur de particules LEP du CERN, à Genève, mais aussi avec le synchrotron DESY et le