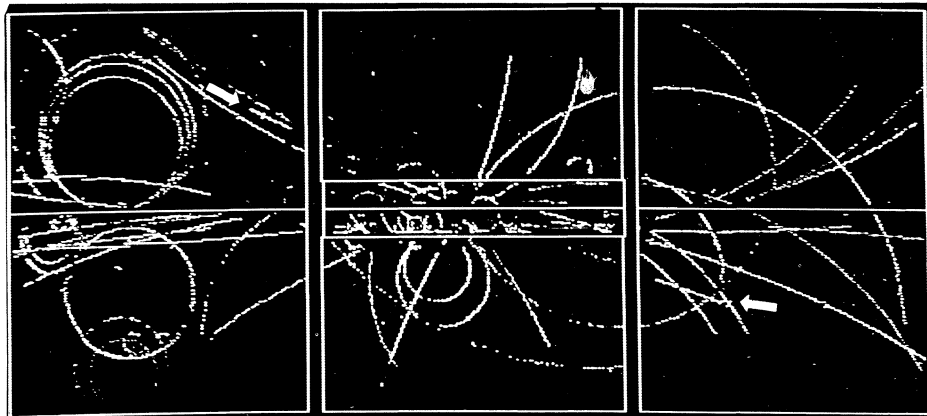


Le modèle standard

par Christine Sutton

En mai 1983, le détecteur central de l'expérience UA1 au collisionneur proton-antiproton du CERN a fait apparaître la signature révélatrice de la particule Z longtemps attendue: sa désintégration en une paire électron-positon (flèche). Porteur électriquement neutre de la force faible, le Z^0 joue un rôle vital dans le modèle standard.

La première preuve fournie par le Laboratoire Fermi (voir article précédent) sur l'existence du sixième quark t attendu depuis longtemps vient encore renforcer la structure déjà solide du modèle standard actuel de la physique. L'analyse des données du détecteur CDF du Laboratoire Fermi donne pour le quark t une masse de 174 GeV à 10% près. Ce résultat tombe dans la fourchette des masses prédite d'après l'ensemble des données mondiales relatives au modèle standard, ce qui souligne la cohérence de notre interprétation de la physique à partir de six quarks et de six leptons. L'écrivain de la physique Christine Sutton explique le modèle standard dans cet article de synthèse écrit spécialement à notre demande.



d'un "modèle standard du Soleil" qui en retrace l'évolution depuis certaines conditions initiales jusqu'à son état actuel.

En physique des particules, le modèle standard englobe toutes les particules élémentaires que nous connaissons actuellement et trois des forces fondamentales. Les briques essentielles appartiennent à deux ensembles ou "familles" de "particules de matière": les quarks et les leptons (voir p. 5). Ces corpuscules agissent les uns sur les autres par échange de porteurs de force ou "messagers". (Ces messagers sont également des particules, mais différentes des particules de matière comme nous le verrons.)

Les trois forces du modèle standard sont la force électromagnétique, qui n'agit que sur les particules chargées; la force forte qui agit seulement sur les quarks, mais qui en fait lie entre eux les protons et les neutrons dans le noyau; et enfin la force faible qui agit sur tous les quarks et leptons — même dépourvus de charge électrique — elle est à la source de la désintégration radioactive bêta. (Une quatrième force, la gravitation, reste à l'écart du modèle standard, mais cela n'invalide pas le modèle car ses effets sur les particules sont largement inférieurs à ceux des autres forces.)

Le modèle standard fait la synthèse de nos connaissances actuelles sur les quarks, les leptons et les forces agissant sur eux. Le mot clé est ici celui de "synthèse", car le modèle n'est pas une théorie élégamment cousue d'où émergeraient les quarks, les leptons et leurs interactions. Au lieu de cela il

s'agit d'un composite formé des meilleures théories dont nous disposons et que nous pouvons combiner parce qu'elles ont suffisamment de points communs pour suggérer une unité plus profonde, même si du fait de notre ignorance son hétérogénéité reste bien visible.

L'ensemble de la structure repose dans un cadre théorique unique appelé la théorie quantique des champs. Celle-ci plonge ses racines dans les tentatives pour comprendre la plus familière des trois forces du modèle standard, la force électromagnétique qui agit sur tout corps portant une charge électrique. La charge est la source du champ électromagnétique et c'est notre interprétation de la façon dont ce champ agit au niveau fondamental qui a mené à la théorie quantique des champs et au concept des particules messagères.

La théorie quantique des champs traite le champ magnétique comme une mer de petits grains d'énergie, les photons ou particules de lumière. Dans le rayonnement électromagnétique, la lumière visible par exemple, les photons sont "réels"; en d'autres termes leur émission ou leur absorption conserve l'énergie. Toutefois des photons qui ne conservent pas l'énergie peuvent également exister, bien que de façon seulement temporaire. Leur énergie "d'emprunt" doit être restituée conformément aux conditions imposées par le principe d'incertitude d'Heisenberg, qui limite la durée de l'emprunt — le temps écoulé entre l'émission et l'absorption. De cette manière le déséquilibre n'est pas

P rès d'un siècle s'est écoulé depuis la découverte de la première particule subatomique, l'électron, que nous tenons toujours pour l'une des briques fondamentales de la matière. Depuis la recherche a révélé un riche "micromonde" de particules, des protons et neutrons jusqu'aux quarks, gluons et autres particules W et Z. Ce domaine s'est épanoui particulièrement au cours des quarante dernières années pour atteindre aujourd'hui son apogée dans ce que nous appelons le modèle standard de la physique des particules.

Des modèles standards apparaissent dans de nombreux domaines de la science. Ils servent de base à la compréhension globale d'un système particulier. Dans l'antiquité, les Grecs par exemple avaient leur propre modèle standard de la matière bâti sur quatre "éléments" — la terre, le feu, l'air et l'eau — à partir desquels ils essayaient d'expliquer les divers phénomènes du monde environnant. Aujourd'hui les astrophysiciens parlent

Les particules de matière — quarks et leptons — du modèle standard. La colonne de droite montre les «messagers» ou particules de champ qui portent les différentes forces présentes dans la Nature.

observable, il est masqué par l'incertitude inhérente aux processus qui se produisent au niveau quantique. Ces photons qui existent à partir d'une énergie d'emprunt sont dits "virtuels", ils sont les messagers de l'électromagnétisme. Ce sont eux qui portent la force électromagnétique entre des particules électriquement chargées.

Nous pouvons affirmer sans craindre la contradiction que l'électrodynamique quantique (EDQ), la théorie quantique du champ électromagnétique, est la meilleure théorie dont nous disposons, les effets de la force électromagnétique étant calculables avec une précision dépassant 1 sur 100 millions.

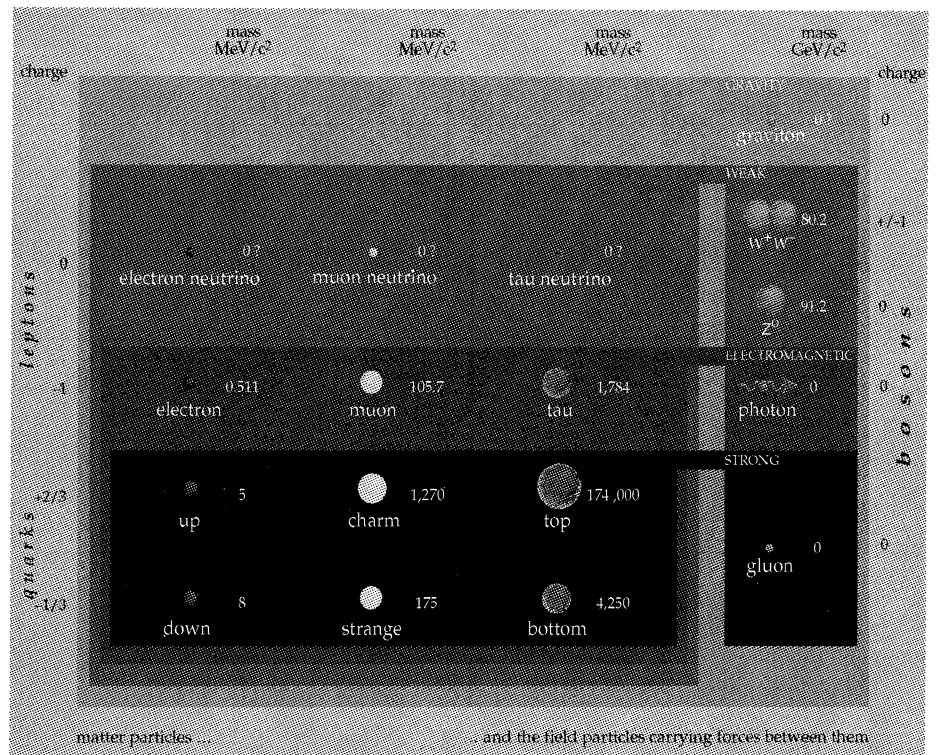
L'un des aspects les plus importants de la théorie est sa "symétrie de jauge" qui signifie que lorsque l'on modifie de façon indépendante les valeurs locales du champ en différents points de l'espace, les équations de l'EDQ ne sont pas modifiées.

Toutefois, cette symétrie n'est garantie que si la description quantique d'une particule chargée contient un champ électromagnétique et sa particule messagère; en d'autres termes, la symétrie de jauge exige l'existence de la force électromagnétique et du photon! De plus, la symétrie est intimement liée à la possibilité de "renormaliser" l'EDQ de manière à ce qu'elle donne des résultats finis ayant un sens.

La particule messagère doit posséder un moment cinétique intrinsèque, ou spin, d'une unité, exactement comme le photon. Les particules dont le spin a une valeur entière sont appelées des bosons, de sorte que le photon qui garantit la symétrie de jauge de l'EDQ est qualifié de "boson de jauge".

Ce spin caractéristique distingue le photon (et les autres messagers) des particules de matière (quarks et leptons) qui possèdent un spin demi-entier et sont appelées des "fermions".

L'EDQ semble être bien plus qu'une théorie satisfaisante mais arbitraire. Elle a donc à juste titre servi de calque pour des théories des autres forces agissant sur les particules matérielles: la force forte et la force faible. Bien que l'EDQ traite spécifiquement des interactions des particules chargées, sa structure de base sert de guide pour arriver à l'essence même d'une théorie



Quarks et leptons

La recherche en physique des particules a révélé l'existence d'une grande variété de particules subatomiques, depuis les protons et électrons «éternels» jusqu'aux résonances qui ne durent qu'environ 10^{-23} seconde, seulement le temps que met la lumière à les traverser. Cependant, ce monde foisonnant repose sur une simplicité plus profonde car nous avons découvert qu'il est construit à partir de seulement deux types de briques fondamentales — les quarks et les leptons.

Les quarks se distinguent par le fait qu'ils subissent la force forte et qu'ils portent une charge électrique «fractionnaire», soit $-2/3$, soit $1/3$ de celle de l'électron négatif. La force forte lie les quarks entre eux à l'intérieur d'assemblages plus grands que nous observons comme particules. Trois quarks forment un baryon, comme le proton familier, tandis que le couplage d'un quark et d'un antiquark donne un méson, par exemple le pion ou le kaon omniprésents dans les rayons cosmiques et les expériences aux accélérateurs.

Pour former tous les baryons et mésons connus, il faut cinq quarks — u, d, c (charme), s (étrange) et b (beauté) — le sixième quark t complète un motif à six paires. Seuls les quarks les plus légers de l'une et l'autre charges, u ($2/3$) et d ($-1/3$), sont

nécessaires pour constituer les protons et neutrons de la matière ordinaire. La nature cependant semble exiger l'existence de deux familles supplémentaires, plus massives, de paires de quarks — c et s, t et b.

La famille des leptons comprend également six membres, mais dans ce cas ils peuvent être regroupés en paires de charges -1 et 0 . Le lepton le plus familier est aussi le lepton chargé le plus léger, l'électron. Il apparaît dans la matière stable, tandis que son partenaire neutre, le neutrino de l'électron, est émis naturellement dans la désintégration bêta lorsqu'un noyau radioactif se transforme en une matière plus stable. Comme dans le cas des quarks, cette paire de leptons se répète dans deux familles supplémentaires dont les membres chargés sont de masse croissante. Les membres neutres de ces familles — les neutrinos — n'ont que des masses très faibles par comparaison, et il se peut en fait qu'elles soient nulles.

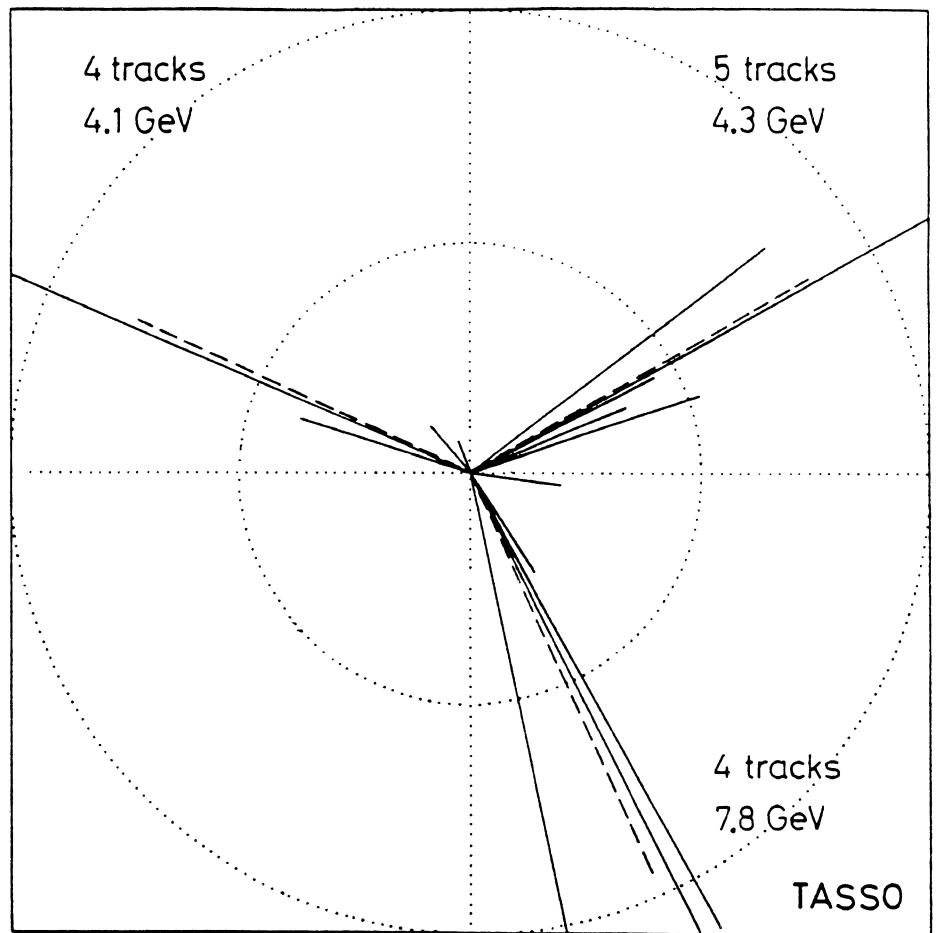
En 1989 certains des premiers résultats des tout nouveaux collisionneurs électron-positon SLD et LEP, respectivement à Stanford (SLAC) et au CERN, ont montré qu'il n'existe pas d'autres types de ces neutrinos légers à découvrir, et par suite pas non plus d'autres générations de quarks et de leptons similaires à celles déjà connues. Pourquoi il existe trois familles et pas davantage est un mystère qui reste à résoudre.

calculable de toute force agissant entre des particules.

La portée du champ électromagnétique étant infinie, il donne naissance à des phénomènes à grande échelle; l'influence des forces faible et forte semble par contre limitée aux distances subnucléaires. Il peut donc paraître naturel de placer les forces faible et forte dans une même théorie, comme effectivement a tenté de le faire Hideki Yukawa dans sa théorie du méson des années 30. Cependant, il s'est avéré que le grand pas en avant dans la compréhension de la force faible est venu de son rattachement intime avec la force électromagnétique à longue portée. De façon surprenante, les phénomènes de l'électrostatique et du magnétisme partagent la même origine que les processus faibles de la désintégration radioactive bêta et de la fusion proton-proton dans le Soleil.

Le lien entre les forces électromagnétique et faible paraît étonnant quand on considère que la courte portée de la force faible signifie que sa particule messagère doit être lourde, contrairement au photon dépourvu de masse. La durée pendant laquelle il est possible d'emprunter l'énergie d'une particule massive est courte, de sorte qu'elle ne peut se déplacer très loin, même à la vitesse de la lumière; par contre, le photon sans masse peut prélever une quantité infinitésimale d'énergie et parcourir une distance illimitée.

Cependant, pendant les années 60, les tentatives de découvrir une théorie de la force faible présentant une symétrie de jauge ont suggéré que la bonne théorie devait effectivement inclure également l'interaction électromagnétique. Une telle théorie "électrofaible" exige quatre particules messagères sans masse de spin 1, ou bosons de jauge, deux chargés (+, -) et deux neutres. Les deux messagers chargés expliquent les réactions faibles telles que la désintégration bêta dans laquelle la charge change de support (un neutron se désintègre en un proton, par exemple). Cependant les messagers doivent être lourds pour expliquer la courte portée de la force faible et de prime abord il avait semblé que le fait de leur attribuer une masse détruirait la symétrie de jauge! En ce



Le gluon, le porteur de la force forte entre les quarks, s'est manifesté en 1979 quand l'expérience TASSO au laboratoire DESY, Hambourg, a observé trois giclées bien nettes, ou "jets", de particules issues de collisions

électron-positon dans le collisionneur PETRA. Deux de ces jets proviennent directement du quark et de l'antiquark produits, tandis que le troisième est issu d'un gluon rayonné par le quark ou l'antiquark.

qui concerne les messagers neutres, si l'un pouvait être le photon sans masse, qu'en était-il de l'autre?

La solution du problème posé par des particules messagères massives est venue de l'introduction d'un nouveau champ — que nous appelons maintenant le champ de Higgs — doté de sa propre particule messagère, le boson de Higgs. Les porteurs chargés de la théorie électrofaible — les particules appelées W^+ et W^- — paraissent massives dans les expériences du fait de leurs interactions avec ce champ de Higgs. Les états neutres de la théorie sous-jacente se comportent de façon un peu plus compliquée pour produire un porteur neutre qui reste sans masse, le photon, et un autre dont la masse est du même ordre que celle des porteurs chargés. Ce messager massif et neutre devrait donner lieu à un "courant neutre" faible — une interaction faible sans modification de la charge. La particule est maintenant bien connue comme étant le Z^0 , cependant à la fin des années 60 il n'existait toujours aucune preuve de l'existence des courants neutres faibles qu'elle devait porter.

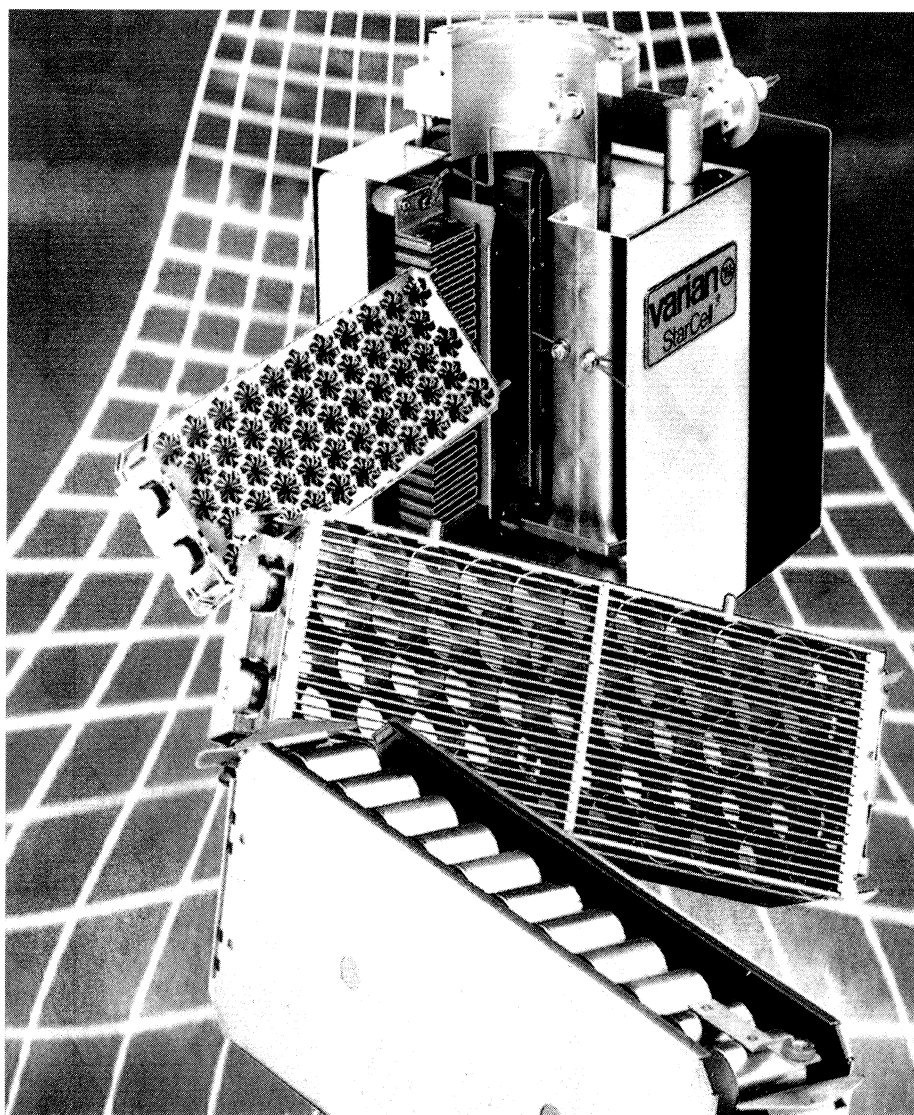
L'introduction du champ de Higgs

dans la théorie électrofaible résoud le problème de la symétrie de jauge car dans la théorie de base les particules messagères n'ont pas de masse, de sorte que la symétrie n'est pas brisée. C'est seulement aux énergies relativement basses de nos expériences que la symétrie sous-jacente paraît brisée parce qu'à faible énergie le champ de Higgs n'est pas nul. Aux énergies plus élevées, le champ de Higgs tend vers zéro (un peu comme le champ d'un aimant disparaît au-dessus de la température de Curie) et la symétrie devient flagrante!

Une question restait sans réponse à la fin des années 60, celle de la renormalisabilité de la théorie électrofaible unifiée, en d'autres termes, les infinis gênants qui se présentent de façon naturelle dans la théorie allaient-ils s'annuler entre eux pour que comme l'EDQ elle permette des calculs raisonnables? En 1971, le jeune Gerard 't Hooft trouvait l'ouverture et prouvait que c'était effectivement le cas. Deux ans plus tard, le dernier élément de preuve manquant expérimentalement trouvait sa place.

L'équipe Gargamelle au CERN découvrait les premiers événements

Vous avez vraiment le choix



Les pompes VacIon Plus peuvent être modifiées et adaptées à toute application avec un large choix d'éléments de pompage interchangeables et d'alimentations conçues pour convenir à vos besoins spécifiques de pompage ionique.

Avec les pompes ioniques VacIon Plus

Les pompes ioniques VacIon Plus sont disponibles avec des éléments de pompage diode, noble diode, triode et StarCell, chacun d'entre eux étant optimisé pour des gaz spécifiques. Vous pouvez ainsi facilement choisir l'élément de pompage qui correspond à votre application présente.

Les pompes VacIon Plus satisfont aux applications UHV les plus exigeantes et sont les pompes les plus compactes à débit/volume équivalent.

Les unités de contrôle VacIon Plus comprennent l'alimentation MultiVac qui peut piloter jusqu'à deux pompes ioniques simultanément et indépendamment quel que soit leur type, ainsi que l'unité MiniVac conçue pour alimenter toute pompe de façon très économique.

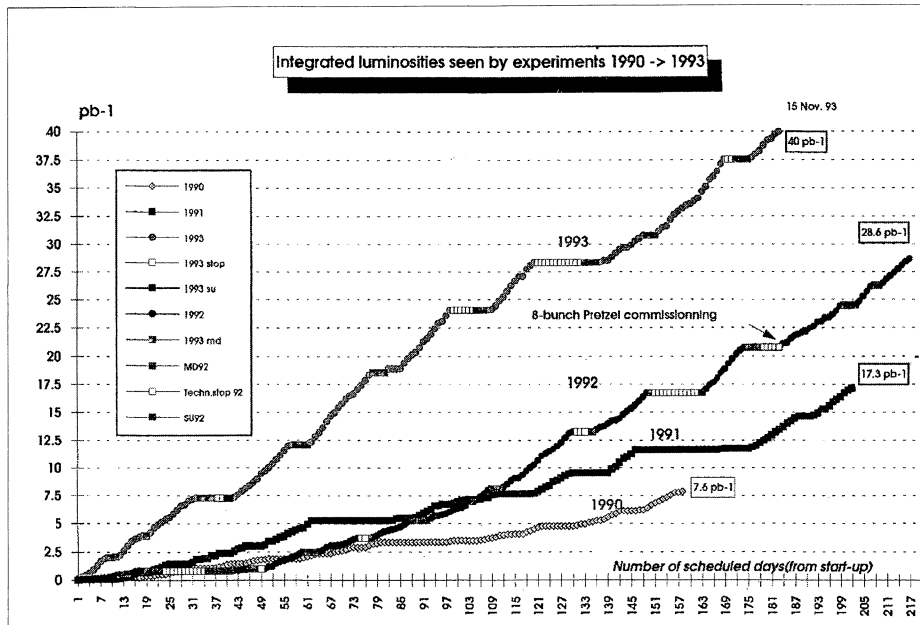
Les pompes ioniques et contrôleurs VacIon Plus offrent une solution complète à vos besoins de pompage ionique quels qu'ils soient.

Varian SpA
Via Fratelli Varian 54
10040 Leini (Torino)
Italie
Tel: 011 - 9979 - 111
Fax: 011 - 9979 - 350

GC . GC/MS . GC/MS/MS . HPLC . AAS . ICP-AES . ICP-MS . UV-Vis-NIR . NMR . LIMS . Sample Preparation . Vacuum Products

varian

Dix ans exactement après la découverte du Z^0 au CERN, le collisionneur électron-positon LEP les produit maintenant "à la pelle". En 1993 les quatre expériences réunies ont observé trois millions de Z , portant le total à quelque huit millions depuis le début de l'exploitation du LEP en 1989. Cette quantité considérable de données de précision a joué un rôle vital pour cerner au plus près les paramètres du modèle standard.



survenant par courant neutre: des interactions de neutrinos qui ne pouvaient être expliquées que par l'existence de la particule messagère massive neutre prédite, le Z^0 .

En 1979, l'accumulation des preuves vérifiant la théorie électrofaible la rendait "inéluçtable" et le comité Nobel attribuait comme il se doit le prix Nobel de physique à ses auteurs principaux, Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg. Puis en 1983 le collisionneur proton-antiproton du CERN atteignait une énergie et une intensité suffisantes pour décrocher une poignée de particules W et Z bien réelles (et pas seulement virtuelles).

Le prix Nobel devait suivre rapidement pour Carlo Rubbia et Simon van der Meer du CERN et la théorie électrofaible, l'un des piliers du modèle standard, faisait son entrée de façon définitive.

La deuxième partie importante dans la structure du modèle standard se rapporte à la troisième des forces, la force forte. Comme la théorie électrofaible (et l'EDQ qu'elle contient), la théorie de la force forte est une théorie quantique de champ à symétrie de jauge. Dans ce cas la théorie doit de nouveau traiter d'une force qui agit à

courte portée, mais cette fois sur les seuls quarks et d'une manière qui interdit leur existence à l'état libre.

Les quarks se rencontrent toujours liés à l'intérieur de particules plus grosses: des assemblages de trois quarks forment les baryons, comme le proton et le neutron, tandis que les paires constituées d'un quark et d'un anti-quark forment les diverses variétés de mésons. Si vous tentez d'expulser un quark d'un proton en frappant celui-ci, par exemple avec un autre proton de haute énergie, vous réussirez seulement à créer de nouveaux quarks et antiquarks, c'est-à-dire de nouveaux mésons.

Cependant, l'étude de la force forte à haute énergie, c'est-à-dire l'observation du monde quantique des distances courtes, apporte des indices sur la force forte (plus l'énergie d'une particule est élevée et plus la longueur d'onde associée est courte).

La force entre des quarks est plus faible s'ils sont adjacents que s'ils sont situés de part et d'autre d'un proton. Cette dépendance est en opposition totale avec celle de la force électromagnétique qui diminue lorsque la distance entre les charges augmente.

Il est donc surprenant qu'une théorie

très similaire à l'EDQ ait été élaborée pour expliquer la force forte. Au lieu d'être bâtie sur la propriété de charge électrique, la nouvelle théorie est construite sur une "charge forte" qui se trouve sur les quarks (mais pas sur les leptons insensibles à la force forte). Cette charge forte est très différente de la charge électrique en ce sens qu'elle doit se présenter sous trois formes auxquelles correspondent trois "anticharges" opposées. (Par contraste les charges électriques positive et négative ne sont qu'une forme de charge et l'anticharge correspondante.) Parce qu'elle apparaît sous trois variétés, la charge forte a reçu le nom de "couleur", par analogie avec les trois couleurs primaires de la lumière.

Des quarks de chacune des trois couleurs existent, mais il semble que la nature ne leur permet de se réunir que pour former des particules neutres de couleur ou "blanches". Les baryons sont formés de trois quarks de chacune de ces couleurs tandis que les mésons contiennent une paire quark-antiquark avec des couleurs et anticouleurs opposées.

Cette théorie, dans laquelle la charge de couleur remplace la charge électrique, est appelée chromodynamique quantique, ou CDQ, pour souligner les similarités de structure avec l'EDQ, bien que l'origine plus compliquée de la force forte conduise à une formulation naturellement plus complexe. Au lieu d'une seule particule porteuse comme en EDQ, la CDQ en contient huit — les gluons — qui sont des particules sans masse, comme le photon, dotées d'un spin unité. A première vue cela peut paraître invraisemblable, étant donné que la force forte est à courte portée et n'agit qu'à des distances subnucléaires.

Cependant la force forte et la force électromagnétique présentent une différence cruciale dans le fait que contrairement au photon qui ne porte pas lui-même de charge électrique, les gluons portent la charge de couleur. Cela signifie que les gluons agissent les uns sur les autres avec des conséquences fascinantes pour la force forte.

Un photon virtuel émis par un électron peut en principe se propager jusqu'à l'infini sans être affecté par d'autres photons voisins. Un gluon,

Le développement de la science au cours de ce siècle

2 - de 1946 à 1970
par Victor F. Weisskopf

cependant, est sensible à l'influence de ses semblables et ses interactions peuvent en fait créer d'autres gluons. Aussi un gluon virtuel émis par un quark, par exemple, ne peut se déplacer loin avant d'être en fait englué dans le piège créé par ses interactions avec les autres gluons. Il en résulte que la force forte est à courte portée.

En résumé, le modèle standard décrit un monde bâti sur deux ensembles de particules, les quarks et les leptons, dont les interactions sont décrites par deux théories similaires, la théorie électrofaible et la CDQ. Dans ces théories, les forces sont transmises par des particules messagères — les bosons de jauge — dont certaines acquièrent une masse par interaction avec un champ complémentaire, le champ de Higgs.

Ce modèle est un amalgame curieux qui s'est développé au fil des ans après bien des fausses pistes et des impasses. Jusqu'à présent il a donné satisfaction bien au-delà de ce qu'il était raisonnable d'espérer.

Voici le second volet d'une série de trois articles qui ensemble forment une version légèrement retouchée d'un discours prononcé à la réunion de Boston du 14 février 1993 de l'American Association for the Advancement of science (Association Américaine pour la promotion de la science) ainsi qu'au CERN, le 5 août 1993, lors d'un colloque intitulé: "La Science - hier, aujourd'hui et demain". Cette série dépeint le fulgurant développement des connaissances scientifiques et de la compréhension depuis le début de ce siècle. Un article précédent du Courrier CERN ("Le point de vue de Weisskopf"; octobre 1993, page 22), avait présenté plusieurs de ces idées sous une forme très condensée. La limite de la place disponible dans un seul numéro du Courrier CERN nous oblige à découper le texte en trois articles, chacun couvrant une période historique bien identifiable. Le premier, allant de 1900 à la seconde guerre mondiale, a été publié dans le numéro de mai. Le troisième traitera de la période qui débute en 1970 et s'achève à la fin du siècle.

nement du MIT, le projet Manhattan et la fusée radar. Des scientifiques initialement voués à la physique fondamentale ont conçu et fabriqué la bombe nucléaire, sous la direction de l'une des figures les plus "ésotériques", J.R. Oppenheimer. E. Fermi réalisa la première pile nucléaire, E. Wigner joua un rôle essentiel dans l'étude des réacteurs qui produisaient le plutonium, et J. Schwinger élaborait une théorie des guides d'ondes, indispensable pour le radar.

Mais de plus, certains de ces personnages furent les excellents organisateurs de programmes de recherche et développement de grande envergure, tels que les projets militaires cités plus haut, entretenant de bonnes relations avec l'industrie.

Au sortir de la seconde guerre mondiale, l'opinion publique tenait les physiciens pour les artisans de la victoire. Evidemment c'était très exagéré, mais il est vrai que le radar a sauvé le Royaume-Uni et réduit la menace sous marine sur les convois transatlantiques, de même que la bombe atomique provoqua l'arrêt immédiat de la guerre avec le Japon. La physique et la science en général avaient acquis un grand prestige, ce qui entraîna une hausse des salaires, le soutien financier généreux du gouvernement — par exemple à

La période de 1946 jusque vers 1970 a été exceptionnelle pour toutes les sciences. Les événements de la seconde guerre mondiale ont eu d'énormes conséquences, surtout pour la physique. Au grand étonnement des politiques, les physiciens se sont transformés en brillants ingénieurs dans de vastes entreprises militaires de recherche et développement comme celles du laboratoire du rayon-

*Eugène Wigner: un rôle essentiel après-guerre dans l'étude des réacteurs de production du plutonium.
(Photo Kathleen Blumenfeld)*

