

## De la découverte des Bosons Vecteurs Intermédiaire $W^\pm$ et $Z^0$

par Carlo RUBBIA  
*Prix Nobel de physique 1984*

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler quelques-unes des étapes qui ont conduit à des résultats aussi impressionnants que la mesure de la masse du  $Z^0$  avec une précision de 1/100 000 ou la détermination du nombre de types de neutrinos. Ceci nous aidera à apprécier pleinement le chemin parcouru depuis le temps de la découverte de l'interaction faible dont l'interprétation semblait poser des problèmes conceptuels insurmontables qui contraste avec la simplicité étonnante de la solution choisie par la Nature.

C'est dans les années 30, avec Enrico Fermi, que des physiciens ont fait les premières tentatives sérieuses de construction d'une théorie qui décrive correctement l'interaction faible. A l'époque, il s'agissait d'une théorie «ad hoc» : quatre particules étaient créées simultanément en un même point par l'interaction. Ce qui est vraiment merveilleux, c'est que la solution obtenue quelque cinquante ans plus tard, explique bien entendu l'interaction faible, mais l'englobe dans le cadre d'une théorie unifiée de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible. Un précédent fameux dans l'histoire de la physique est dû à Maxwell, qui unifia la force électrique et la force magnétique. Aujourd'hui, nous ne parlons plus que d'une seule force : la force électro-faible.

On sait que l'interaction électromagnétique se transmet à distance par l'échange d'une particule de champ de masse nulle : le photon. Le photon est donc le «vecteur» de cette interaction dont la portée est infinie. Il était tentant de vouloir décrire l'interaction faible à l'aide d'un modèle similaire. Cependant, cette interaction ayant un très faible rayon d'action, il fallut introduire des particules très lourdes. D'autre part, l'interaction faible présente un double aspect : la désintégration  $\beta$  se produit avec un changement de charge électrique on parle de courants chargés (figure 1a), mais en outre un mode de l'interaction faible (découvert dans les interactions de neutrinos de haute énergie au CERN par la chambre à bulles à liquides lourds Gargamelle) se produit sans modification de charge de la particule : on parle de courants neutres (i.e.  $\nu_\mu + e^- \Rightarrow \nu_\mu + e^-$  dans la figure 1b). Les particules qui transmettent l'interaction faible devront au contraire du photon neutre constituer un triplet de charge. On en arrive donc à ce concept de Boson Vecteur Intermédiaire (BVI), finalisé avec l'apparition du modèle «électro-faible», dont la structure de jauge fut introduite par Glashow en 1961, et dont le processus de brisure

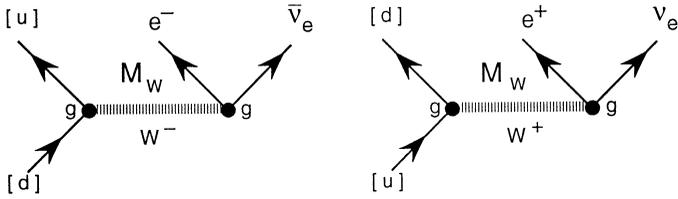


Figure 1a : Désintégration  $\beta$ .

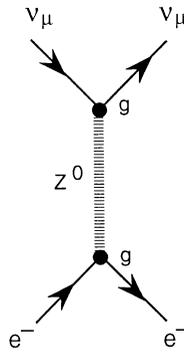


Figure 1b : Courant neutre.

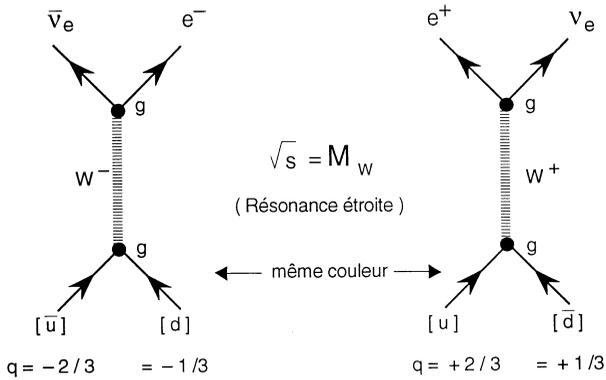


Figure 1c : Annihilation proton-antiproton.

de symétrie et le mécanisme de génération de masse «à la Higgs» furent construits par Weinberg et Salam en 1967.

Il n'y avait pas unanimité sur l'existence des Bosons Vecteurs Intermédiaires, même après la découverte, dans la chambre à bulles Gargamelle, en 1973, des courants neutres (dont on sait aujourd'hui qu'ils sont effectivement dus aux interactions du  $Z^0$ ). Les premières recherches expérimentales, dans les années 60, n'étaient sensibles qu'à des masses du W de l'ordre de la masse du proton ( $\sim 1$  GeV). Certains physiciens se sont même demandés en 1974, si la particule  $J/\Psi$  qui venait d'être découverte, n'était pas en fait le  $Z^0$  lui-même ! Même si toutes ces péripéties peuvent aujourd'hui prêter à sourire, nous pouvons apprécier combien il fut difficile de construire ce qui nous apparaît désormais comme une évidence : le Modèle Standard.

Un élément important du Modèle Standard est le fait qu'il prédisait les valeurs des masses des Bosons Vecteurs Intermédiaires, de l'ordre de cent fois la masse du proton, à une époque où la particule la plus lourde connue était le  $J/\Psi$  avec une masse de 3.1 GeV. Le  $J/\Psi$  pouvait encore être formé dans une expérience où un accélérateur (le synchrotron à protons AGS de 30 GeV de Brookhaven) envoyait des protons sur une cible fixe. Dans ces conditions, la plus grande partie de l'énergie cinétique est gaspillée dans le recul de la cible et seule une faible partie (10 %) est utile pour former la particule. La situation empire considérablement aux énergies supérieures, à cause de la cinématique relativiste. Par contre dans un collisionneur, toute l'énergie est disponible dans le centre de masse. Pour espérer atteindre les énergies nécessaires de l'ordre de 100 GeV, il fallait donc à tout prix disposer d'un collisionneur de particules. En 1976, dans une contribution à la Conférence Neutrino d'Aix-la-Chapelle, en collaboration avec P. McIntyre et D. Cline, j'ai proposé de transformer, soit au Laboratoire Fermi aux États-Unis, soit au CERN à Genève, un accélérateur existant en un collisionneur proton-antiproton. C'était une époque où les collisionneurs  $e^+e^-$  étaient à la mode et où le CERN pensait déjà au LEP (le grand collisionneur à électrons et positons). Notre idée était d'opérer une rotation du diagramme de Feynman représentant la désintégration  $\beta$  (figure 1a), le W pouvant ainsi être produit dans l'annihilation d'un quark avec un antiquark, et ensuite se désintégrer en un électron et un neutrino (figure 1c).

Notre proposition ne fut pas accueillie avec grand enthousiasme. En fait, la revue américaine *Physical Review Letters*, refusa de publier notre article. Beaucoup pensaient que, même si l'accélérateur était construit et fonctionnait comme prévu, il serait impossible d'extirper un signal d'un bruit de fond formidable provenant de l'interaction forte. Le grand souci du CERN était aussi qu'il fallait consentir pour cela un arrêt impératif de plus d'un an du SPS, alors que ce dernier venait juste d'être mis

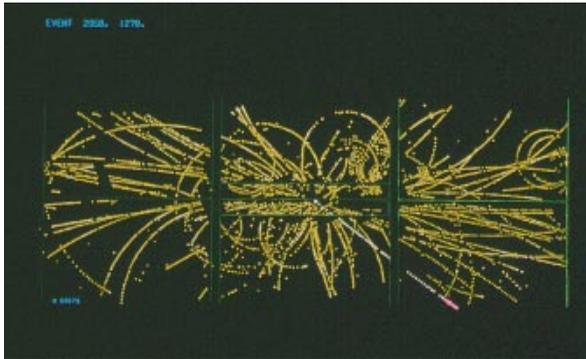
en service. En fait, l'arrêt ne fut que de onze mois, et les physiciens qui y faisaient leurs premières expériences furent tous contents de pouvoir bénéficier d'un peu de répit afin d'analyser leurs données et d'améliorer leurs détecteurs.

Un anneau de stockage n'accepte qu'une petite partie des quantités de mouvement des particules autour d'une valeur nominale. Les antiprotons produits initialement par la réaction  $pp \rightarrow ppp\bar{p}$  ont une grande dispersion de leurs quantités de mouvement. Pour pouvoir faire fonctionner un anneau de stockage avec une haute intensité d'antiprotons, une méthode doit être développée qui permette de réduire la dispersion initiale des quantités de mouvement des antiprotons. Les premières tentatives de ce «refroidissement» de faisceau sont à attribuer aux travaux de Gersh Budker. En 1974, le refroidissement par électrons était démontré par A. N. Skrinsky, à Novosibirsk, mais c'est la méthode inventée dès 1968 par Simon Van der Meer et que l'on appelle refroidissement stochastique, que nous avons décidé d'utiliser. Le test en grandeur réelle de la technique eut lieu au CERN avec l'expérience ICE (Initial Cooling Experiment) en 1977-1978.

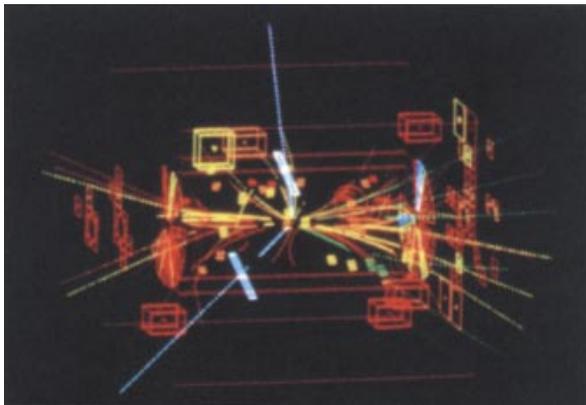
Le feu vert pour le programme  $p\bar{p}$  et l'expérience UA1 a été donné à la 27<sup>e</sup> réunion du «Research Board» du CERN, le 29 juin 1978. Les premières collisions  $p\bar{p}$  ont été observées dans UA1 dès juillet 1981. Je voudrais souligner que UA1 a été la première expérience de physique des particules à couvrir la totalité de l'angle solide autour du point d'interaction. Pour la première fois, des neutrinos ou des pseudo-neutrinos pouvaient être détectés grâce au déséquilibre en énergie des événements dans un plan perpendiculaire à la direction du faisceau, la fameuse énergie transversale «manquante». Le neutrino n'interagissant généralement pas dans le détecteur, les événements W seraient caractérisés par une énergie «manquante» : celle du neutrino.

La première campagne de prises de données pour la recherche des bosons W et Z a eu lieu d'octobre à décembre 1982. La luminosité du collisionneur a atteint la valeur confortable de  $5 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Les premiers candidats W se désintégrant en un électron et un neutrino ( $W \rightarrow e\nu$ ) furent découverts dans UA1 avec un échantillon de données correspondant seulement à  $20 \text{ nb}^{-1}$ . La signature du W était un électron de haute impulsion transversale accompagné d'une importante énergie «manquante». En janvier 1983, les collaborations UA1 et UA2 présentaient toutes deux la preuve de l'existence du W avec respectivement six et quatre candidats W dans le canal  $W \rightarrow e\nu$ . Le bruit de fond était extrêmement bas et les événements avaient une signature non ambiguë. Le W, dont certains pensaient qu'il serait plus difficile à découvrir que le  $Z^0$ , fut en fait découvert en premier, grâce à sa spectaculaire signature et aussi parce que le produit de la section efficace de production par le taux d'embranchement du canal de désintégration utile était dix fois supérieur à celui du  $Z^0$ .

La campagne de recherche du  $Z^0$  dura d'avril à juillet 1983. Le premier événement  $Z^0$  a été enregistré par UA1 le 30 avril 1983. Le 27 mai, j'ai eu le plaisir d'annoncer au CERN, que la collaboration UA1 avait observé deux événements spectaculaires, une paire de muons et une paire d'électrons, chacune dans une région de masse où le bruit de fond était négligeable. En juillet 1983, UA1 avait collecté quatorze événements  $W \rightarrow \mu\nu$ , 43  $W \rightarrow e\nu$ , 5  $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  et 4  $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Les figures 2 et 3 représentent respectivement un exemple d'un candidat W et un exemple d'un candidat  $Z^0$  tels qu'ils ont été enregistrés par le détecteur UA1.



**Figure 2** : Exemple d'un événement W enregistré par le détecteur UA1. Le détail des traces enregistrées par la chambre à fils, montre la trajectoire très rectiligne de l'électron de haute impulsion émis dans la désintégration de ce W (*Photo CERN, X 63576*).



**Figure 3** : Exemple d'un événement  $Z^0$  enregistré par le détecteur UA1. Cette photo montre à la fois la reconstruction dans la chambre centrale et dans le calorimètre qui l'entoure, de la paire  $e^+e^-$  créée dans la désintégration de ce  $Z^0$  (*Photo CERN, X 168-4-87*).

Aujourd'hui, l'aventure de la physique des particules continue car le Modèle Standard est encore incomplet. Le mécanisme générateur de la masse des particules est encore à découvrir, peut-être grâce au futur grand collisionneur à hadrons du CERN, le LHC. La violation de l'invariance dans la transformation définie comme le produit de la conjugaison de charge par la parité d'espace, connue sous le nom de violation de CP, est toujours un mystère complet. Le domaine des neutrinos est encore très peu connu. Un projet ambitieux est en préparation pour envoyer depuis le CERN un faisceau de neutrinos en direction du Laboratoire Souterrain du Gran Sasso où se construit ICARUS, détecteur d'une sensibilité sans précédent. Découvrons-nous enfin si les neutrinos ont une masse ? Il se pourrait bien que ces développements démontrent que le Modèle Standard n'était en fait qu'une bonne approximation d'une réalité encore plus complexe.