

50 ans de physique au CERN

Daniel Treille

Je souhaiterais couvrir succinctement les sujets suivants :

Quelle physique fait-on au CERN ?

Avec quels détecteurs ?

Les contributions du CERN à l'établissement du Modèle Standard des interactions électromagnétique et faible, ou électrofaible.

Ses contributions au Modèle Standard de l'interaction forte ou de couleur, la Chromodynamique (Prix Nobel 2004).

Les tests de haute précision de ces modèles.

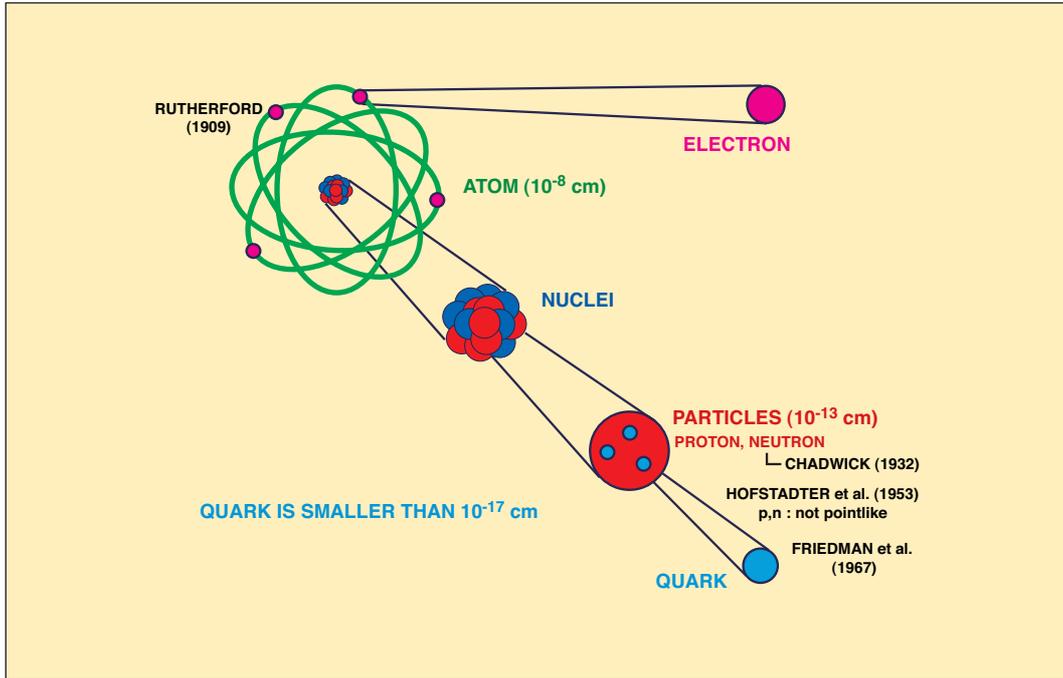
Une brève esquisse du futur possible du CERN.

J'adresse mes remerciements à de nombreux collègues, en particulier aux auteurs du Physics Reports sur les 50 ans du CERN. Je réfère à ce rapport pour plus de détails.

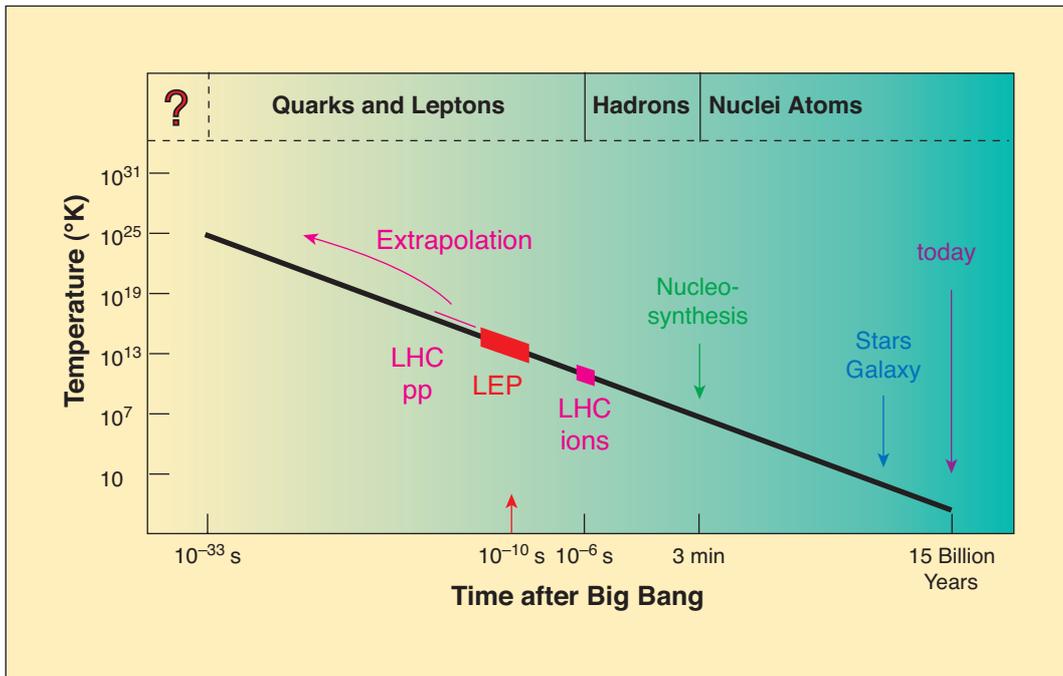
Introduction

La première figure rappelle que les objets de nos études sont les constituants les plus élémentaires de la matière, les leptons, comme l'électron, qui sont libres de leurs mouvements, et les quarks, qui sont au contraire confinés dans les particules à interaction forte, ou hadrons, comme le nucléon (proton et neutron).

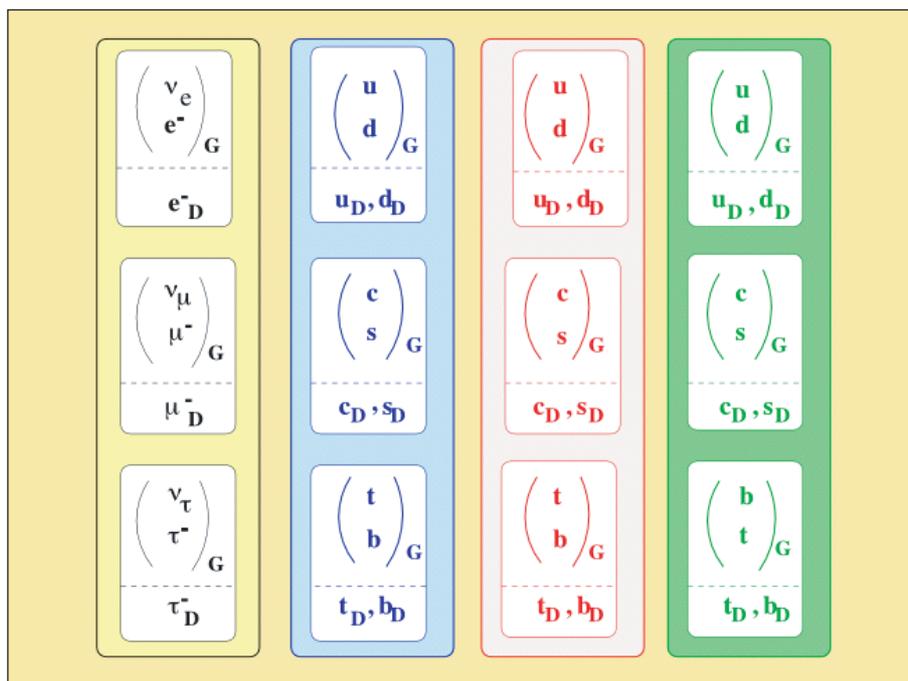
La seconde figure, décrivant en coordonnées logarithmiques l'évolution de l'Univers, montre que la physique faite au CERN est une reconstitution microscopique de celle qui prévalait aux tout premiers instants : quelques microsecondes après le Big Bang dans le cas des collisions d'ions lourds, un centième à un millième de nanoseconde pour le LEP et le LHC. Les premières décrivent à rebours la transition du confinement, c'est-à-dire l'instant où quarks et gluons, libres jusque là, se sont irréversiblement agglutinés en hadrons. Les en libérer à nouveau est illusoire, mais nous verrons qu'existent en collisions d'ions lourds des signes d'un très fugitif changement d'état. Le LEP et le LHC couvrent le domaine d'énergie correspondant à la transition électrofaible, au cours de laquelle l'Univers a subi une transition de phase et les particules ont acquis leurs masses.



Les objets de nos études



Évolution de l'Univers



Les constituants

Les initiales des noms de quarks viennent de l'anglais. Nous utiliserons u = « haut », d = « bas », c = « charme », s = « étrangeté », b = « beauté », t = « top »

La troisième figure présente les constituants élémentaires répertoriés. Élémentaire signifie qu'ils nous apparaissent comme ponctuels à mieux qu'un dix-millième du rayon du proton (le fermi ou 10^{-13} cm), limite actuelle du pouvoir de résolution des collisionneurs. Ce sont des fermions, c'est-à-dire des particules de spin un demi.

Le tableau possède une complexité certaine. D'abord les constituants existent en trois familles, celles de l'électron, du muon et du tau, et le mystère de cette réplication reste entier. On peut seulement dire qu'elle est utile puisque les trois familles sont requises pour assurer la violation de la symétrie CP, clé de l'asymétrie matière-antimatière et donc de notre existence, et dont nous reparlerons.

Tous les fermions vivent dans un espace appelé espace du spin isotopique faible : s'ils sont d'hélicité gauche, ils vivent en couples ou doublets, s'ils sont d'hélicité droite, ils vivent en célibataires ou singlets. Pour les antifermions c'est l'inverse. Cette distinction nette entre les deux chiralités est surprenante mais elle est à la base du Modèle Standard.

Quant aux quarks ils apparaissent trois fois, sous trois couleurs différentes (les trois colonnes). La couleur (terme métaphorique !) représente en fait un nouveau nombre quantique et une charge de type inédit qui leur est propre.

On peut donc dire que les fermions, à part d'exister dans l'espace-temps, « mènent leur vie » dans des espaces appelés internes : l'espace du spin isotopique faible, et, pour les quarks, l'espace de la couleur. Dans ces espaces on peut considérer des « rotations ». Un exemple de rotation dans l'espace de l'isospin faible est de « tourner » un électron en neutrino-électron, ou un quark haut en quark bas (u en d , ou charme en étrangeté, etc.), donc d'échanger les deux composantes d'un doublet. Dans l'espace de la couleur, c'est par exemple de transformer un quark bleu en quark rouge de même « saveur » (i.e. le charme reste charme). Les guillemets,

à l'adresse des puristes, rappellent que si le premier cas est bien une rotation, le second est en fait une transformation unitaire.

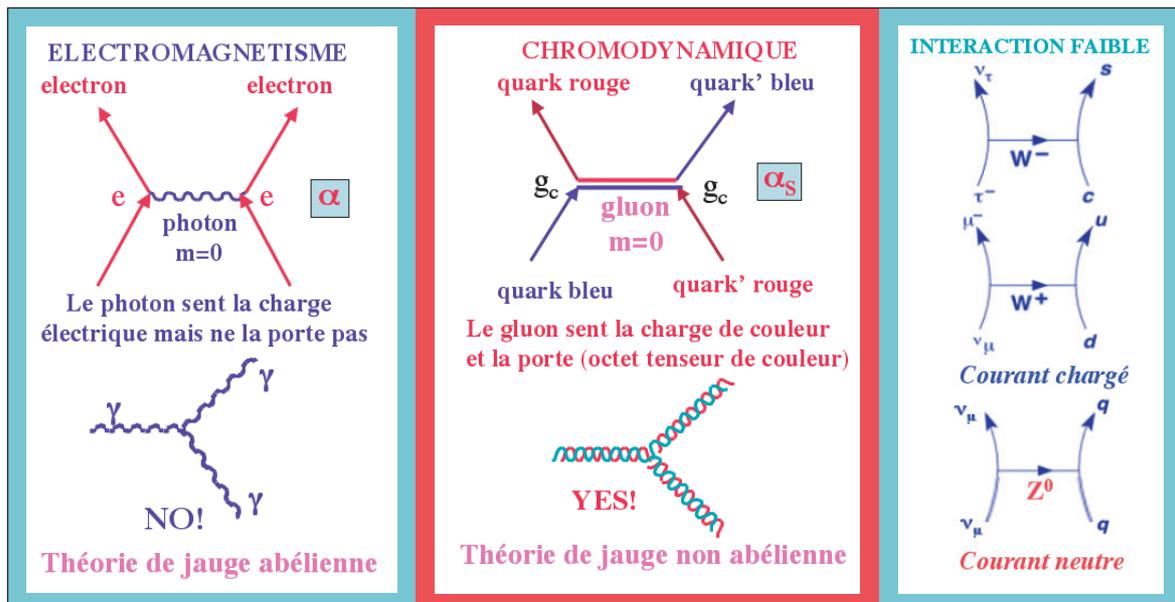
Enfin les masses des constituants s'échelonnent de quelques fraction d'eV pour les neutrinos et de 0.5 MeV pour l'électron à 175 GeV pour le quark top. Pourquoi cette dispersion ? Pourquoi les masses sont-elles dans cette gamme et non par exemple au voisinage de la masse de Planck vers 10^{19} GeV ?

Si le zoo des constituants garde bien des mystères, il semble qu'on ait acquis une vision unifiée et bien comprise de leurs modes d'interaction. Deux fermions interagissent en échangeant un boson (particule de spin entier).

Le cas de l'électromagnétisme et du photon est bien connu (voir quatrième figure à gauche). Notons que le photon «sent» la charge électrique e mais ne la porte pas. Le photon n'a donc pas d'auto-interaction.

Dans le cas de l'interaction de couleur ou Chromodynamique (abrégée en QCD), version moderne de l'interaction forte, deux quarks interagissent par échange d'un gluon qui échange leurs couleurs. Ce boson non seulement sent la charge de couleur g_c mais il la porte (il est un tenseur dans l'espace de la couleur). Il peut donc auto-interagir. Cette propriété confère à l'interaction de couleur des propriétés inédites, menant d'une part au confinement des quarks et gluons, d'autre part au phénomène de liberté asymptotique (le couplage tend vers zéro quand l'énergie augmente, voir plus loin) dont la découverte vient d'être saluée par le Prix Nobel.

Interaction électromagnétique et faible sont regroupées en interaction électrofaible (quatrième figure, à droite), assurée par l'échange des bosons W , chargés W^\pm et neutre W^0 , et d'un boson neutre, B^0 . En fait dans le secteur des courants neutres les particules physiques ne sont pas le B^0 et le W^0 mais leurs combinaisons linéaires, le Z^0 et le photon. L'angle de mélange électrofaible ou angle de Weinberg définit cette combinaison. Un test de cohérence du modèle électrofaible est de montrer que les diverses observables conduisent à la même valeur de cet angle.



Les interactions

En très bref, le Modèle Standard est une formulation invariante sous les « rotations » évoquées. Les équations sont telles qu'on est libre de faire ces rotations indépendamment en tout point de l'espace-temps à condition d'avoir inventé les bosons qui les effectuent. Cette invariance est qualifiée de « locale ».

Mais cela ne marche que pour des particules de masse nulle, les seules pour lesquelles la notion de chiralité sur laquelle le modèle est construit est invariante, et ce n'est visiblement pas notre monde.

Il y a cependant une fin heureuse à l'histoire. Paradoxe, cela vient de ce que cette liberté revendiquée nous est en fait refusée par une circonstance extérieure.

Il est bon de faire ici un détour. En électrodynamique, avons-nous le droit de changer arbitrairement la phase de la fonction d'onde d'un électron en chaque point de l'espace-temps ? En principe oui, à condition d'inventer le photon dont émission et absorption effectuent ce changement.

Cela est vrai sauf si quelque chose s'y oppose ! Tel est le cas dans un supraconducteur où le champ des paires de Cooper interdit de tourner arbitrairement la phase de la fonction d'onde d'un électron. Se produit l'effet Meissner, à savoir l'impossibilité pour un champ magnétique de pénétrer en profondeur dans le supraconducteur : un photon qui ne peut se propager à une distance plus grande que d peut être considéré comme ayant acquis une masse non nulle $\propto 1/d$.

Le mécanisme de Higgs mimique une telle situation. L'hypothèse est que, dans l'espace de l'isospin faible, un champ nouveau, le champ de Higgs, impose une orientation privilégiée et supprime la liberté d'y opérer une rotation arbitraire. Les bosons W et Z réagissent en acquérant une masse :

$$\text{par ex. } M_W = 1/2 g v.$$

v est la valeur attendue dans le vide du champ de Higgs et vaut 246 GeV.

Pour faire son travail, le champ de Higgs doit être un doublet complexe dans l'espace d'isospin faible. De ses quatre composantes réelles, trois sont « mangées » par les bosons qui deviennent massifs. Celle qui reste est le boson de Higgs, un scalaire de Lorentz.

Autre remarque essentielle pour comprendre la subtilité de la physique de précision, par exemple celle du LEP : notre monde est quantique. Cela a deux conséquences :

- 1/ des particules trop lourdes pour être « réellement » produites peuvent néanmoins intervenir comme particules virtuelles et modifier (légèrement) la valeur des observables à basse énergie. Des mesures très précises peuvent donc nous donner des renseignements sur ces particules ;
- 2/ les « constantes » ne sont pas constantes mais elles évoluent avec l'échelle d'énergie.

Je voudrais enfin introduire une théorie à laquelle il sera fait référence de nombreuses fois : la Supersymétrie (SUSY pour les intimes). C'est une variante du MS qui en corrige certains défauts. Elle prédit un partenaire (de 100 GeV à quelques TeV) pour chaque particule du MS : à un boson elle associe un fermion et vice versa. La plus légère de ces nouvelles particules, neutre et stable, est le suspect numéro 1 du mystère de la matière noire de l'Univers. SUSY prédit plusieurs bosons de Higgs. Dans sa version minimale (le MSSM), le plus léger pèse moins de 130 GeV. En attendant la réponse du LHC (ou du Tevatron ?) SUSY n'est encore qu'une hypothèse, mais qui domine notre prospective.

Tableau synoptique de la physique des particules

	Théorie	Expérience	Machines	Détecteurs
1945	46 Gamow	47 π^- 47 Lamb	45 Synchr./McMillan	47-50 Scint.count.
1950	48-49 Feynman, Schwinger, etc..	47-53 Strange particles		53 BC Glaser
1955	53 Gell-Mann (V particles) 54 CPT theorem	51 Λ , K^0 , Ξ^- 53 ν_e Reines 55 antiproton 56 P violation	55 GeV e Stanford	
1960	59 Regge, Prentki, d'Espagnat 61 Goldstone, Salam, Glashow Gell-Mann (8-fold way) 63 Cabibbo 64 quarks: Gell-Mann, Zweig 64 Higgs, ...	63 Σ - Λ parity 64 Ω 64 CP violation	57 SC 58 first g-2 59 PS 61 AGS 63 first muon ring 64 ISOLDE	61 81 cm BC 64 2m BC
1965	66 colour/Greenberg 67 Sakharov conditions 67 Weinberg: ew lagrangian 68 Salam: ew lagrangian 68 Veneziano's model 69 Bjorken scaling, partons	69 DIS	67 Budker e-cool 69 second muon ring	68 MWPC
1970	70 GIM 71-72 't Hooft 73 Asympt.freedom Kobayashi-Maskawa 73 QCD + SM 73 quark counting 73-74 Wess-Zumino	72 hard coll. at ISR 73 Neutral Currents 73 σ_{pp} increases	71 ISR	70 Gargamelle 72 OMEGA
1975	77 Altarelli-Parisi 77 Peccei-Quinn <i>79 LEP Summer St.</i>	74 J/ Ψ 75 -77 τ 75 jets in e^+e^- 76 charm 77 Y 78 PV at SLAC BEBC, ... : scal.viol.	74 stoch.cool. proven in ISR 76 start of SPS 76 $\bar{p}p$ idea 77 ICE	73 Split Field 73 BEBC
1980	Phenomenology of SUSY Super gravity	79 gluon at Petra 81 beauty at CLEO 82 jets in hadr.coll. 83 W, Z discovery 83 EMC effect	81 $\bar{p}p$ collider 82 LHC feas.st.	78 † Gargamelle 78 v beam-dump 81 Si microstrips RCBC
1985	<i>87 La Thuile workshop</i>	86-87 B_s mix. UA1, Argus	83 LEAR 86 AC	84 search for ν osc. 85 end BC
1990	90 Large ED <i>LHC Aachen Workshop</i>	88 p spin crisis 89 3ν	89 LEP 90 low β UA2	89 LEP detectors

Les tableaux ci-dessus sont des compilations qui juxtaposent, de 1945 à 1990, les faits importants concernant la théorie, l'expérience, les machines et les détecteurs.

Le physicien « idéal » est celui qui à un moment donné pense la physique en termes adéquats (par ex. en termes de quarks dès 64, en termes de MS dès 73) et va expérimenter auprès de la meilleure machine en utilisant les détecteurs les plus performants.

La physique théorique au CERN

Cela n'aurait guère de sens de décrire la physique du CERN sans se référer à l'évolution des idées théoriques. Les tableaux synoptiques ci-dessus en résument les grandes dates, de l'après-guerre à 1990, dans leur colonne de gauche.

Parmi les travaux marquants de physiciens du CERN ou liés à lui de près je citerai (en m'excusant pour les omissions) :

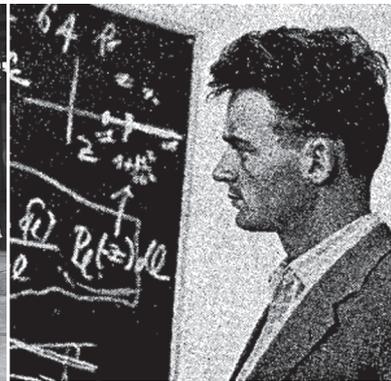
- 1959—Modèle de J. Prentki et B. d'Espagnat
- 1960—R. Hagedorn : approche statistique de l'interaction forte
- 1963—Théorie de N. Cabibbo
- 1964—G. Zweig : hypothèse des ACES, similaires aux quarks
- 1965—S. Fubini et ses contributions à l'algèbre des courants
- 1968—Modèle de G. Veneziano, père des Cordes
- 1970—Modèle de Glashow, Iliopoulos et Maiani
- 1972—M. Veltman et G. 't Hooft : le MS est renormalisable
- 1973—J. Wess et B. Zumino : invention de SUSY
- Puis S. Ferrara : co-invention de SUGRA
- J. Ellis, G. Giudice, etc. : phénoménologie de SUSY
- A. Martin : contributions à la spectroscopie
- 1977—Formules de G. Altarelli et G. Parisi
- L. Alvarez-Gaume, etc. : contributions aux Supercordes
- 1980—I. Antoniadis : possibilité de l'existence de grandes dimensions d'espace supplémentaires.



John Bell



Victor Weisskopf



Julius Wess

La grande proximité de la théorie et de l'expérience, assurée par des acteurs comme M. Jacob, J. Ellis, G. Altarelli, M. Mangano, etc., a été un atout majeur des succès du CERN. Cela a été particulièrement important lors de la prospective et de l'exploitation des grands projets, par exemple LEP et maintenant LHC.



John Ellis dans certains de ses travaux

Les détecteurs

Rappelons que les ancêtres des détecteurs modernes ne se situent pas loin dans le passé... Si les émulsions datent d'avant 1900, la Chambre de Wilson de 1912, le compteur Geiger-Muller de 1928, les scintillateurs ne sont apparus que vers 1947–50, la Chambre à Bulles en 1953 seulement, la Chambre Proportionnelle en 1968.

Les deux premières décennies de la vie du CERN ont été le règne des chambres à bulles. Après quelques années d'apprentissage, sont venus les succès des grandes chambres à hydrogène liquide et à liquides lourds. En fin d'existence de ce type de détecteurs les chambres à cyclage rapide ont joué un rôle important en physique du charme. En parallèle avec les détecteurs évoluaient également les techniques d'analyse de leurs clichés (IEP, HPD, etc.) dont l'histoire mériterait un ouvrage à elle seule.

Vinrent ensuite les détecteurs déclenchés. C'est de 1949 à 1959 que furent développées les chambres à étincelles comme chambres à traces. Leur première utilisation massive eut lieu en 1962 à BNL (découverte du deuxième neutrino). Les méthodes de lecture, du film au sans-film, acoustique, par vidicon, par fils évoluèrent également. En 1972 le spectromètre OMEGA optique fut mis en service. Notons aussi le rôle important des chambres à streamer dans certains programmes.

Le mai 68 de G. Charpak constitua une révolution majeure et ouvrit l'ère des chambres proportionnelles multifils (MPWC), chambres à dérive, chambres multi-étage (F. Sauli), culminant avec les chambres à projection temporelle (TPC). Parmi les premiers grands spectromètres à MWPC, citons :

- 1971 : l'expérience CERN-Heidelberg (J. Steinberger *et al.*) au PS sur le problème de la violation de CP
- 1972 : le Split Field Magnet (SFM) avec G. Charpak, A. Minten, P. G. Innocenti, etc., ayant coûté ~23 MSF, malheureusement presque aveugle à 90°.

L'impact des détecteurs Tcherenkov, à seuil, différentiel (DISC) et RICH (Ring Imaging Cherenkov Counter) a été majeur. La technique RICH, exploitée à grande échelle par Delphi, le SLD et des expériences cible fixe, semble promise à un bel avenir et figure dans plusieurs programmes en préparation.

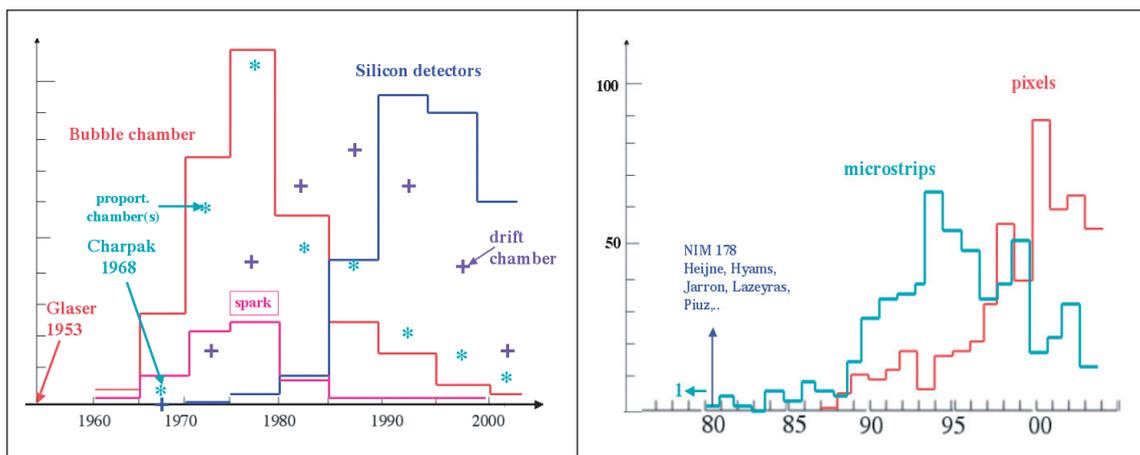
Dans le domaine de la calorimétrie, on peut citer comme étapes importantes le concept de compensation et le passage à des géométries pointantes, du Spaghetti à l'Accordéon d'ATLAS. Les calorimètres à argon et krypton liquide, à cristaux scintillants sont en vogue. Les méthodes de lecture progressent en parallèle.

Les systèmes hybrides, de BEBC au spectromètre EHS, etc., ont joué un rôle important, surtout en physique des saveurs lourdes.

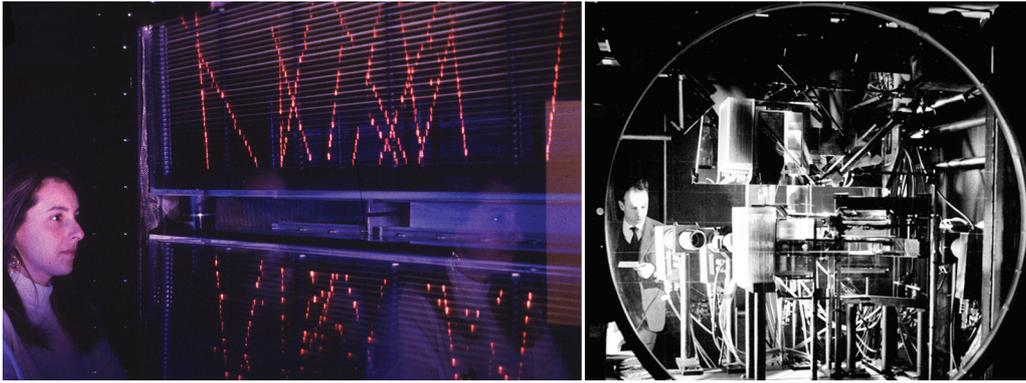
La révolution actuellement en cours est la montée en puissance des détecteurs au silicium. Leur fonction n'est plus seulement le marquage des saveurs lourdes par microvertex, mais s'étend à l'ensemble de la détection de traces. Leur surface passe donc du m² typique du LEP à la centaine de m² au LHC, comme pour le trajectographe de CMS. Cela est rendu possible par l'évolution spectaculaire de la microélectronique. On peut citer à ce propos le rôle décisif joué autrefois par les circuits CMOS haute densité, et actuellement celui des technologies « sous-le-micron » intrinsèquement résistantes aux radiations.

Dans cette évolution spectaculaire le rôle crucial qu'ont joué les R/D en détecteurs (en particulier le puissant DRD réalisé en vue du LHC) est évident. Il est vital de les continuer quel que soit l'objectif physique (Super LHC, ILC, CLIC, cibles fixes futures) car tous ces programmes auront à peu près les mêmes exigences : un tracking 3D (fait de pixels, micro ou macro, plutôt que de microstrips stéréo), peut-être une information vectorielle (position + direction), des détecteurs plus minces, plus rapides, plus résistants aux radiations et moins chers. Quant à la calorimétrie on est encore loin d'un concept vraiment satisfaisant quant à la fragmentation et l'intégration des parties électromagnétique et hadronique.

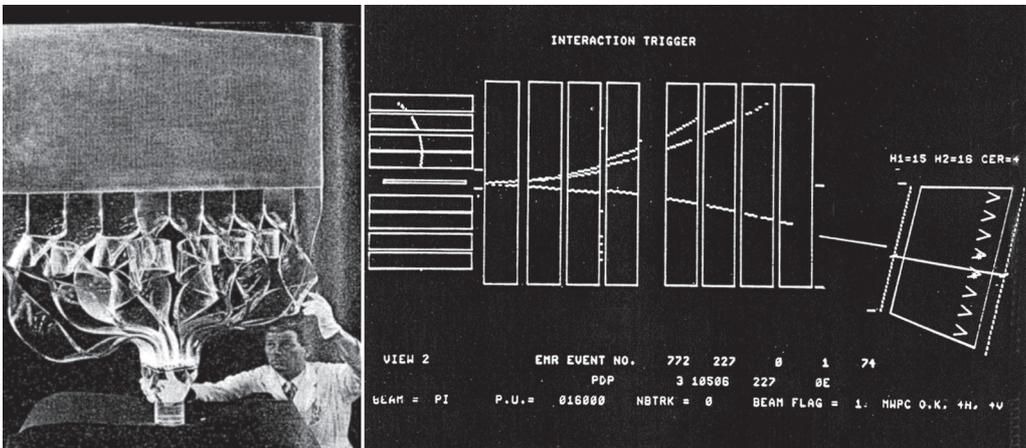
Les figures ci-dessous donnent une idée de l'évolution dans le temps des divers types de détecteur évoqués, à gauche en général, à droite pour les détecteurs au silicium. Leur contenu n'est rien d'autre que le nombre de publications enregistrées par Spire et dont le titre fait référence à chaque technique. La retombée des courbes n'implique pas toujours la disparition de ce type de détecteur mais veut dire qu'il ne fait plus l'objet de publications en tant que tel.



L'évolution des techniques de détection



Chambres à étincelles



*Scintillateur et guides de lumière
(L. Thornhill)*

Le spectromètre Oméga dans sa phase optique



*G. Charpak, F. Sauli
et une de leurs réalisations*

Une grande chambre de l'Oméga

Le règne des chambres à bulles

Après guerre, l'Europe, comparée aux États Unis, se trouvait en état d'infériorité politique et technique. En Europe ce fut d'abord « chacun pour soi ». Europe et CERN durent apprendre les techniques et les façons de collaborer. Ensuite, la maturité atteinte, la communauté européenne fut en mesure de réagir rapidement aux défis et accumula les succès. 1965 vit la mise en opération de la HBC2m (coût de 3 MSF, utilisée jusqu'en 77, 40 millions de clichés), fin 70 la mise en service de Gargamelle. En 1975 BEBC était en action.

Il est donc compréhensible que beaucoup de découvertes initiales aient été faites aux États-Unis, en particulier au Cosmotron de BNL et au Bévatron de Berkeley. Malgré cela il faut souligner la pionnière et féconde activité cosmique « pré-CERN », dans laquelle s'étaient illustrés la plupart des bullistes du CERN, dont R. Armenteros. Citons aussi les importantes contributions du CERN à la spectroscopie des hadrons dans les premières années (1962 : anti Ξ^- , parité relative $\Sigma-\Lambda$). Les succès ultérieurs des grandes chambres, culminant avec la découverte des Courants Neutres, sont bien connus et seront évoqués plus loin. Finalement le rôle des chambres à cyclage rapide pour le charme est à souligner.

Mais plus encore il faut rappeler que les activités en Chambres à Bulles ont bâti les compétences techniques du CERN et des laboratoires européens. Ce sont elles qui ont appris à l'Europe et au CERN à bien collaborer.

Diverses photos nous rappellent quelques grands acteurs et leurs réalisations.



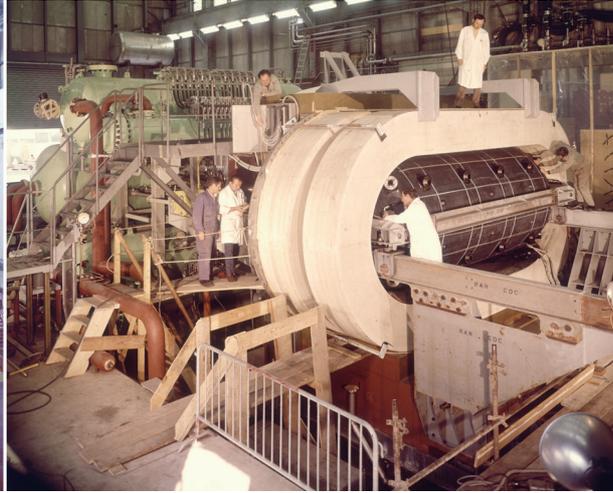
Charles Peyrou



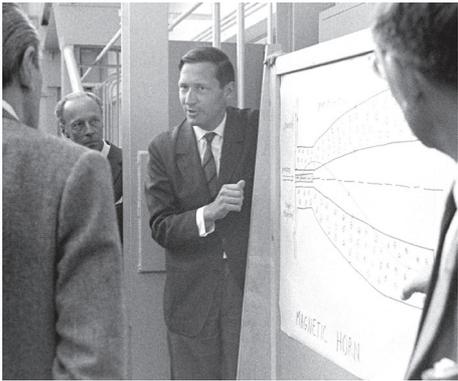
André Lagarrigue



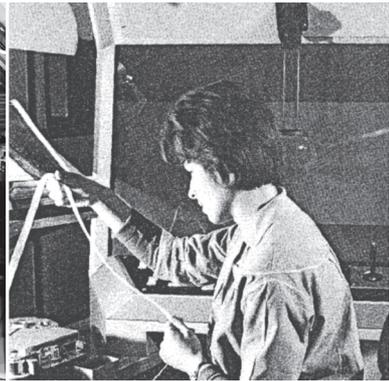
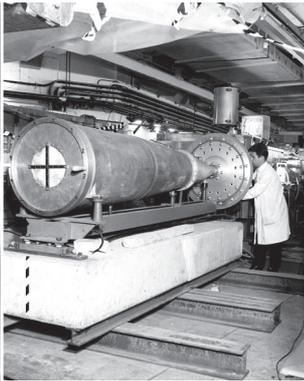
Vue de BEBC



Vue de Gargamelle



S. van der Meer et sa corne à neutrinos



Travail sur IEP



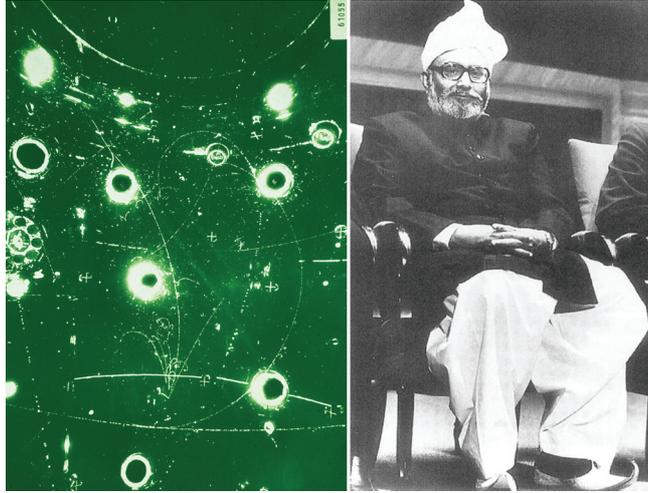
Courant neutre sur électron



A. Lagarrigue



A. Salam et P. Musset



*Courant neutre
hadronique*

*A. Salam
recevant le prix Nobel*

Les courants neutres

L'histoire, quelque peu mouvementée, des Courants Neutres (CN) est bien répertoriée. Nous la rappelons brièvement et l'illustrons par quelques photographies. Cette découverte capitale a marqué le début du Modèle Standard. Il est regrettable que les disparitions prématurées de son maître d'oeuvre, André Lagarrigue, et celle de Paul Musset aient sans doute privé le CERN et l'Europe de la récompense suprême méritée par une avancée de cette importance.

De la chambre à liquides lourds de 1.2 m existait une limite sur le rapport des Courants Neutres aux Courants Chargés élastiques (<0.03) publiée en 64. C'était en fait une erreur découverte par M. Paty en 1965.

Après Sienna 63, A. Lagarrigue, A. Rousset, P. Musset travaillèrent à la proposition d'un détecteur de neutrinos visant à accroître le taux d'évènements d'un ordre de grandeur. L. Leprince-Ringuet le baptisa Gargamelle. L'équipe était composée de physiciens de l'X et d'Orsay et d'anciens membres de la chambre NPA d'un mètre. Elle incluait 7 labos européens et un labo invité.

En 71-72 une théorie viable des interactions faibles existait et la question était posée : y a-t-il ou non des Courants Neutres ? Les compétiteurs étaient Gargamelle et l'expérience de compteurs HPWF à NAL.

En novembre 68 encore, lors d'une réunion Gargamelle à Milan, le mot CN ne fut pas prononcé. Ce problème avait une faible priorité et la diffusion dure (DIS) intéressait davantage les physiciens...

Mais en 71 tout était prêt. Une classification soignée des types d'évènements fut établie. Les CN ressemblaient à des étoiles de neutrons sans muon. L'enjeu était de séparer les étoiles dues aux neutrinos de celles des neutrons.

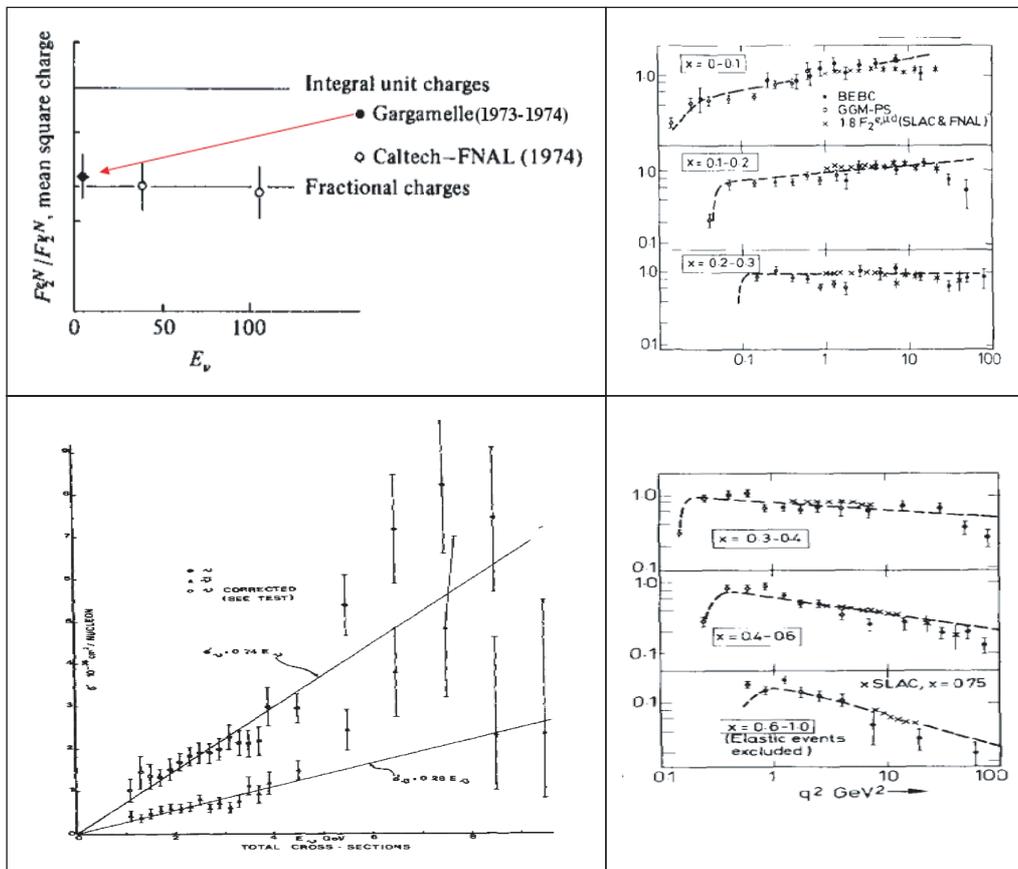
En décembre 1972 un événement électron fut trouvé à Aachen. La recherche de CN hadroniques fut lancée. On observa des candidats avec une distribution spatiale plate et cela généra beaucoup d'excitation. Cependant des contre-arguments furent avancés et on réalisa que la seule issue consistait à prouver que le nombre d'événements induits par des neutrons était faible. La simulation par Monte Carlo montra sa puissance : un programme de bruit de fond de neutrons sans paramètre libre fut utilisé, appuyé par d'autres approches. La conclusion fut que le lot de candidats CN n'était pas dominé par les étoiles de neutrons (W. F. Fry et D. Haidt Cern rapport 75-01). À Bonn en 73 C. N. Yang annonça la découverte des CN.

Cependant le signal de l'expérience HPWF avait disparu. Cela jeta le trouble et le doute sur le sujet, et il fallut une année supplémentaire de travail pour conclure. Finalement à Londres en 74 l'évidence de l'existence des CN fut confirmée par Gargamelle et HPWF.

Cette découverte majeure établit la similarité de structure des interactions faible et électromagnétique. Le terme électrofaible entra dans les mœurs. Elle marqua le début du MS sur le plan expérimental. La masse du boson W fut alors prédite aux environs de 70 GeV.

Autres résultats

Les figures ci-dessous montrent que les grandes chambres à bulles ont apporté d'autres résultats majeurs : preuve du caractère fractionnaire des charges de quarks, croissance linéaire de la section efficace neutrino-nucléon. Enfin les données combinées de BEBC et Gargamelle ont démontré pour la première fois la violation de l'invariance d'échelle des fonctions de structure du nucléon, c'est-à-dire leur évolution avec le pouvoir de résolution de l'observation (Fig. de droite).



Physique précoce au SC

Cependant une physique précoce hors chambre à bulles s'est développée dès le Synchrocyclotron (SC). Je me réfère à la description qu'en a donné L. di Lella.

Un exemple important concerne le canal $\pi \rightarrow e\nu$. En 1955 des limites supérieures avaient été placées sur son rapport de branchement (par ex. en 1955 J. Steinberger à Nevis : $<0.6 \cdot 10^{-4}$) et cela devenait embarrassant pour la compréhension de l'interaction V – A. Mais en 1958 G. Fidencaro *et al.* ont identifié le canal et mesuré son rapport : $R_e = 1.22 \pm 0.30 \cdot 10^{-4}$, apportant ainsi un élément crucial dans la marche vers le MS.

Citons aussi la première observation de la désintégration bêta $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$.

Quant à la réaction $\mu \rightarrow e \gamma$, ce fut l'inverse. On croyait avoir des évidences de son existence. Mais en 1962, Conversi, di Lella, Rubbia, etc., ont montré que le processus est interdit, que le g soit réel ou virtuel. L'idée de la conservation de la saveur leptonique était introduite.

D'autres faits marquants furent le début du programme $g-2$ du muon au SC en 1958 et la mesure de l'hélicité du muon de $\pi \rightarrow \mu \nu$ au PS.

Les ISR

Suivant M. Jacob, on peut identifier : « un départ brillant » (71–74) marqué par d'importantes découvertes, comme la croissance de la section efficace totale proton-proton et la mise en évidence en 73 de particules émises à grande impulsion transverse, prouvant que les partons sont ponctuels pour l'interaction forte également.

Puis vint « une période quelque peu difficile » (75–77) au cours de laquelle plusieurs découvertes importantes, potentiellement accessibles aux ISR, comme J/ψ , charme et beauté, furent faites aux États-Unis (voir tableau synoptique).

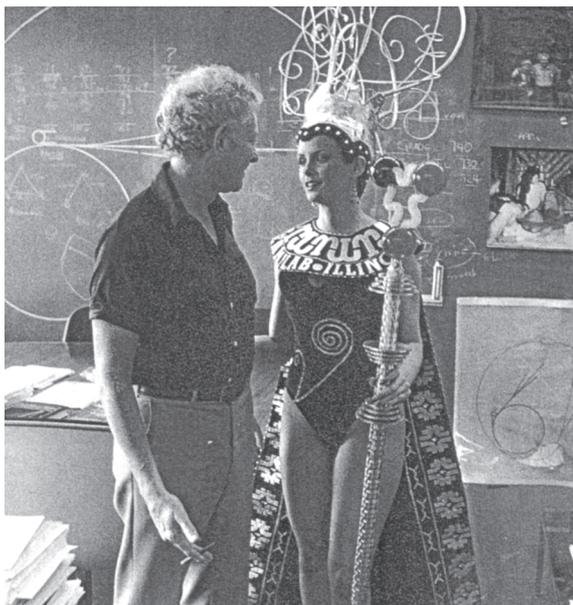
Enfin les dernières années des ISR donnèrent lieu à « un programme très actif et intéressant » (78–83), avec en particulier la découverte et l'étude des photons directs, fournissant une information « de première main » sur la collision dure, et offrant une comparaison de choix aux prédictions de QCD. Concernant la mise en évidence tardive des jets hadroniques aux ISR, il est clair que le Collisionneur proton-antiproton déjà en service et bénéficiant de son énergie bien supérieure leur a volé la vedette.

Quels que soient les aléas de la physique, la machine a fonctionné de façon magnifique : les ISR, premier collisionneur proton-proton, ont constitué un très utile laboratoire de R/D en physique des accélérateurs, permettant en particulier de tester le refroidissement stochastique, clé du succès ultérieur du Collisionneur antiproton-proton.

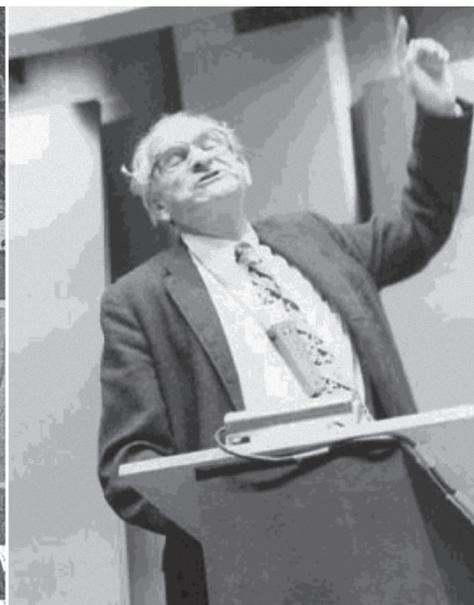
Ainsi à la cérémonie de clôture des ISR en 83, citant Marc Antoine, dans le Jules César de Shakespeare, M. Jacob déclara : « *I come to bury Caesar not to praise him* ».

V. Weisskopf exprima quant à lui que : « *... it does not matter where discoveries are made* ».

Mais il ne fait pas de doute que le moral du CERN n'était pas au beau fixe, d'où le recours, fort œcuménique, à diverses instances supérieures.



L. Lederman et la Beauté



Exhortation de V. Weisskopf



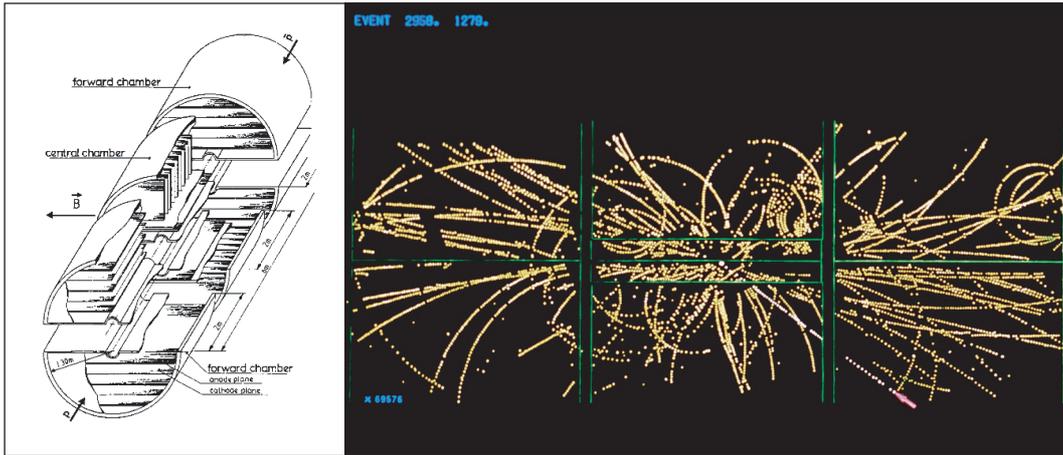
Visite du Pape



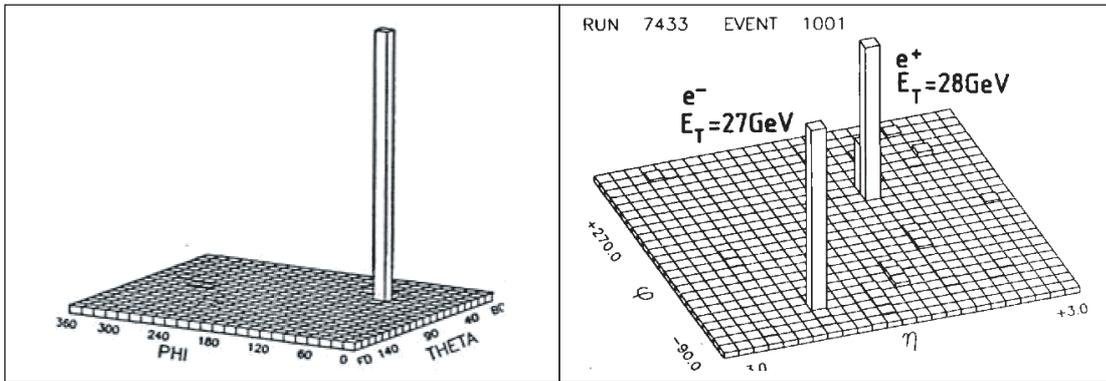
Visite du Dalai Lama

Le collisionneur proton-antiproton

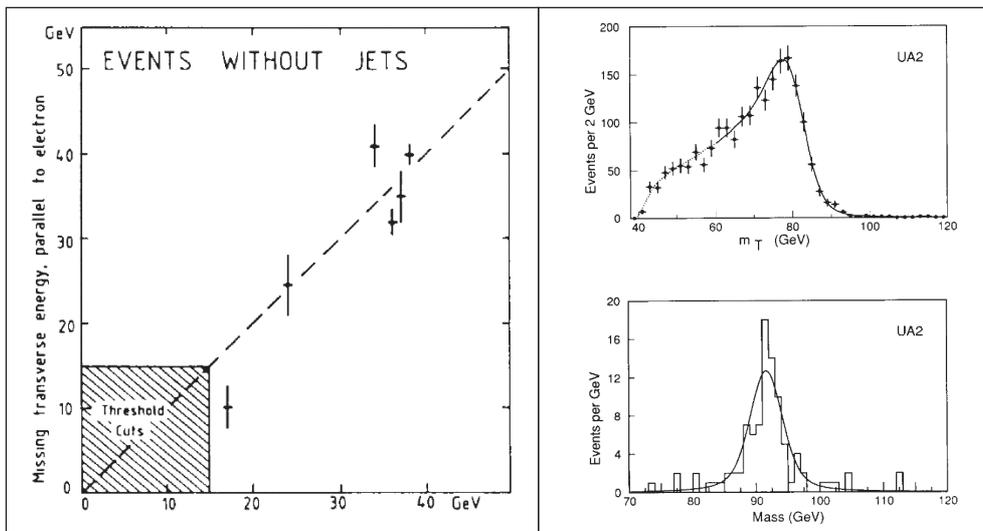
La véritable guérison vint en fait des succès du collisionneur antiproton-proton. On ne peut qu'admirer, une fois l'idée lancée, la rapidité des décisions et de la réalisation du programme illustrée par le tableau synoptique. Grâce surtout au refroidissement stochastique, le collisionneur fut une grande machine, qu'utilisèrent d'excellents détecteurs faisant appel à des techniques innovantes. Pour la première fois les notions d'herméticité, de redondance des procédures, etc., étaient fortement prises en considération. On le sait, la physique fut au rendez-vous : jets hadroniques, et bien sûr découverte des W et Z.



Le trajectographe de UA1 et une vue d'un des premiers W



Lego plots d'évènements W et Z



Les progrès, de la découverte du W aux résultats finaux d'UA2

La physique du SPS

Il y aurait là toute une moisson de résultats à décrire et je ne le ferai que très partiellement.

Neutrinos

La physique des Neutrinos a été un des phares de l'activité du CERN avec les chambres à bulles BEBC et Gargamelle, déjà illustrées, et les grands spectromètres, CDHS et CHARM, puis CHORUS et NOMAD, alimentés par des faisceaux de grande qualité à bande large et à bande étroite.

Cette physique s'est d'abord consacrée aux études détaillées des fonctions de structure du nucléon, d'autant plus intéressantes que le neutrino distingue quarks et antiquarks, et à la mesure précise de la constante de couplage forte α_s .

Elle s'est ensuite tournée vers des programmes de beam-dump, espérant y découvrir des phénomènes nouveaux, puis vers la recherche d'oscillations de neutrinos, couvrant malheureusement un domaine de paramètres où celles-ci, on le sait maintenant, ne peuvent pas se manifester.

Actuellement le CERN construit un faisceau de neutrinos dirigé vers le Gran Sasso d'Italie qui permettra de vérifier que l'oscillation du neutrino de muon se fait bien en neutrino de tau.

Muons

La physique des muons est un autre programme de grande ampleur mené de 1978 à maintenant. Le très performant faisceau de muons du SPS (R. Clift, N. Doble) a d'abord alimenté les expériences NA2 (EMC) et NA4 (BCDMS), en prise de données de 78 à 85.

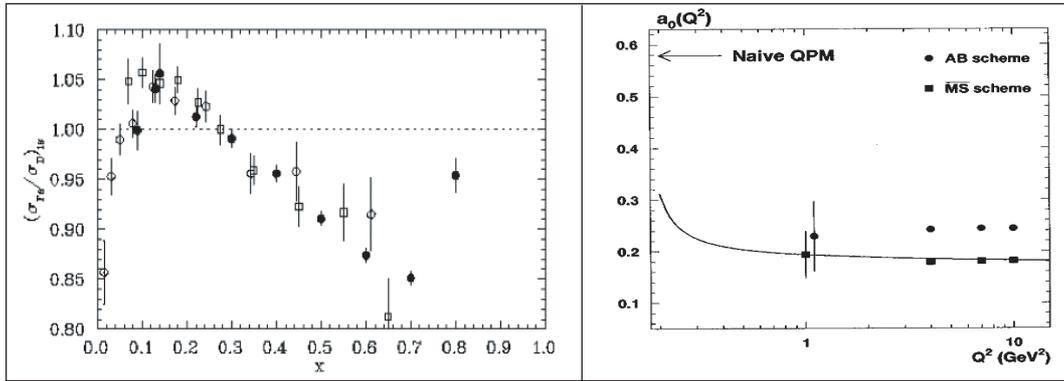
EMC est devenu ensuite New(Nuclear)MC (de 86 à 89) puis SpinMC (92–96). À présent c'est l'expérience COMPASS, démarrée en 2002, qui porte le flambeau.

Cette physique a fourni des études précises des violations de l'invariance d'échelle, utilisant le formalisme développé entre autres par Altarelli et Parisi en 1977, divers tests de QCD perturbatif et une excellente mesure de α_s .

En 1983 une première surprise fut l'observation de l'effet EMC : les fonctions de structure du nucléon dépendent du noyau dans lequel il est immergé.

En 1988 survint la crise du spin du proton : contrairement aux attentes le spin total des quarks de valence n'est qu'une petite fraction de celui du nucléon.

Ces effets sont loin d'être expliqués et ce sera le rôle de programmes comme COMPASS, HERA polarisé, HERMES, RHIC p-p polarisé de continuer à faire la lumière.



L'effet EMC

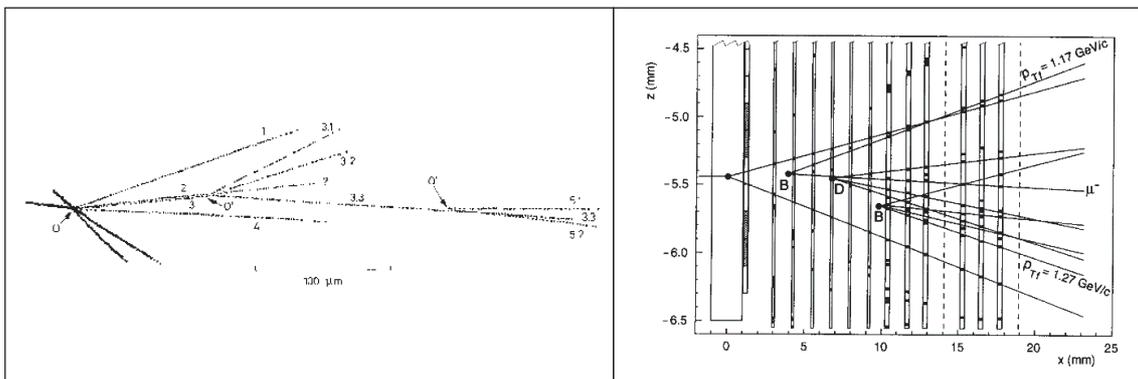
La crise du spin du proton

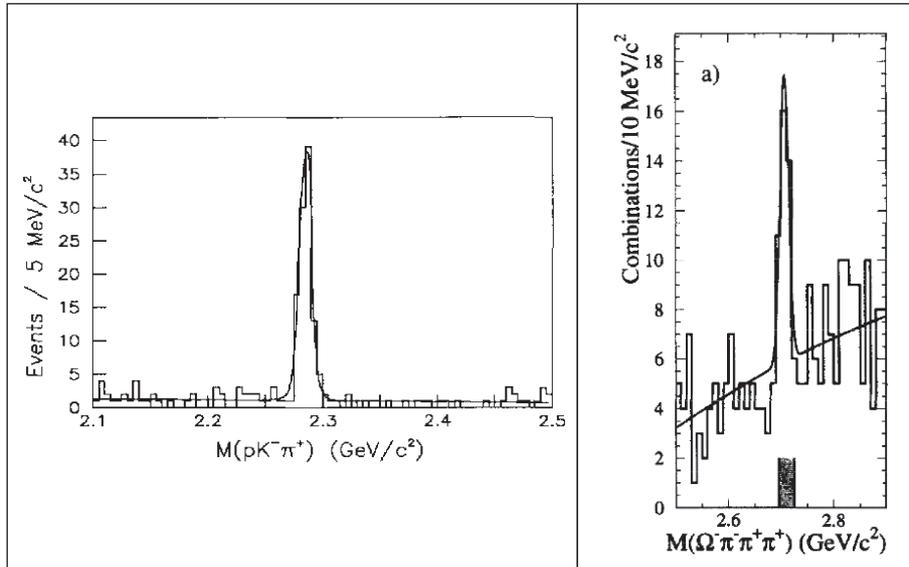
Hadrons et photons

La physique obtenue à partir de faisceaux de hadrons et de photons est également d'une grande richesse. ~70 expériences se déployant sur 25 ans ont étudié les phénomènes de diffusion dure : citons en particulier la production de dileptons massifs (mécanisme de Drell-Yan) et la découverte du facteur K, c'est-à-dire la mise en évidence des corrections QCD d'ordres supérieurs. L'étude détaillée des fonctions de structure, en particulier de particules instables, comme pions et kaons, la mesure des effets Compton, QED et QCD, des photons sur les quarks, celle de la production hadronique de photons directs et diverses études de spectroscopie hadronique sont d'autres sujets majeurs de ce vaste domaine.

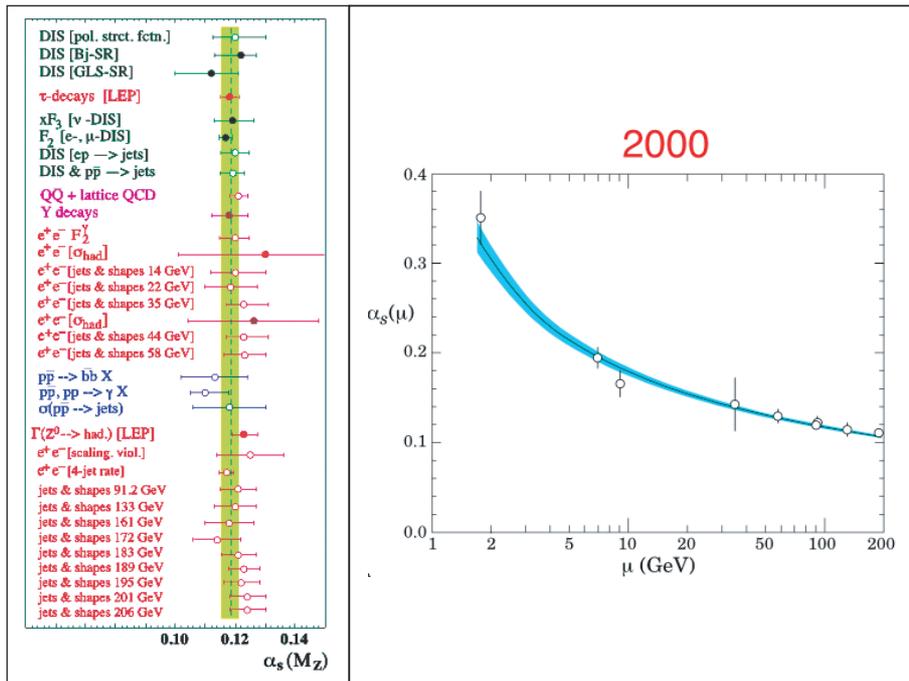
J'insisterai un peu plus sur la production de saveurs lourdes au SPS, domaine très actif (~20 expériences), ayant eu un fort impact sur les tests de QCD, mais également très innovant en termes de détecteurs. Ces programmes ont introduit l'usage de détecteurs au Si à haute résolution spatiale comme les micropistes, les cibles actives, les détecteurs CCD. Ils ont aussi su faire usage d'émulsions, couplées à de grands spectromètres, à des chambres à bulles de haute résolution à cyclage rapide. Ils ont exploité tous les types de faisceaux : hadrons, photons (offrant dans l'état final une fraction de charme 10 fois plus élevée), hyperons. Ils ont surtout enrichi la physique du charme (spectroscopie, durée de vie, production), mais apporté aussi quelques résultats sur la beauté, physique évidemment plus difficile et réclamant plus d'énergie.

Les figures ci-dessous illustrent quelques aspects : production associée de charme en émulsions (WA58) et de beauté dans un ensemble de micropistes (WA92), signal très pur de Λ_c en $pK\pi$ grâce aux CCD de NA32, signal de Ω_c^0 dans WA89, la particule ayant la plus courte durée de vie jamais mesurée ainsi ($\sim 5 \times 10^{-14}$ s).





La chromodynamique quantique (QCD)



Le CERN a fortement contribué à établir et valider QCD. Cela est visible sur la figure de gauche décrivant les diverses mesures de α_s , données ici à l'échelle d'énergie du Z^0 et très cohérentes : l'impact des programmes du CERN, muons et neutrinos, LEP, etc., y est évident.

D'autre part l'évolution de cette « constante de couplage » avec l'énergie est maintenant manifeste, en particulier grâce aux mesures du LEP. À grande énergie le couplage tend vers zéro : c'est la « liberté asymptotique » dont les inventeurs ont reçu le Prix Nobel 2004. À basse énergie (~ 1 GeV) il devient fort et cela conduit au confinement. QCD est une remarquable théorie : voir les écrits de F. Wilczek, comme « la masse sans masse ».

Les tests de précision de la théorie électrofaible

Le facteur $g-2$ du muon

Comme l'a dit un jour John Adams en plaisantant : « $g-2$ is not an experiment: it is a way of life ».

Ce programme magnifique, initié au CERN, s'est en effet déployé sur près de 40 ans, certains des acteurs restant les mêmes.

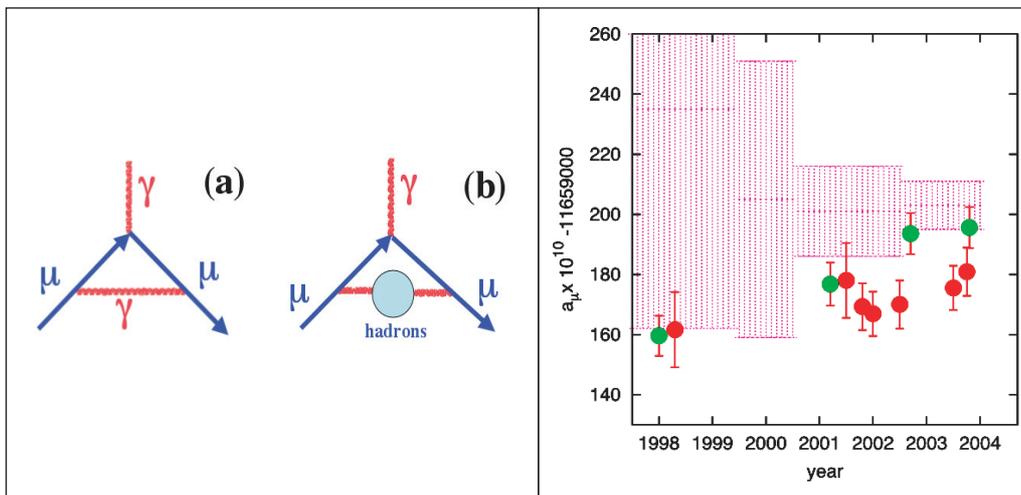
L'équation de Dirac prédit que g vaut 2, mais les corrections radiatives modifient légèrement cette valeur et l'amènent à

$$2.0023318416 \pm 0.0000000012$$

Au premier ordre $(g-2)/2$ vaut $\alpha/2\pi \approx 0.00116$, donnant $g = 2.00232$. Il existe 7 diagrammes à 2 boucles, 72 à 3 boucles (<1 ppm, 1995), 891 à 4 boucles, 12 672 à 5 boucles.

Les expériences ont commencé au CERN, puis se sont portées à Brookhaven. Côté théorie, on doit citer le nom de Kinoshita *et al.* Pour g la confrontation théorie-expérience est actuellement au milliardième.

Les figures ci-dessous montrent le type de diagrammes qui interviennent et la situation actuelle, la bande donnant le résultat expérimental et les points deux versions, malheureusement peu en accord, de l'interprétation théorique.

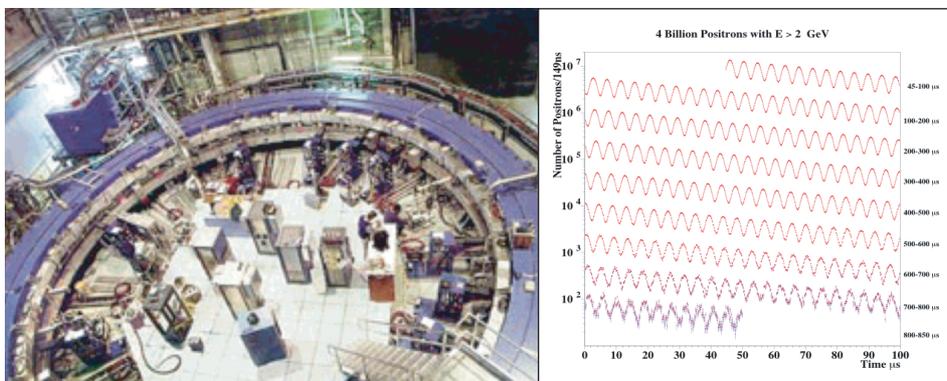
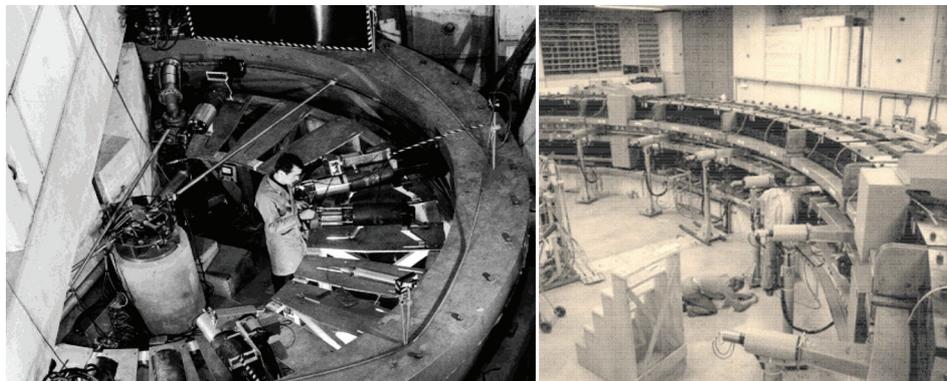
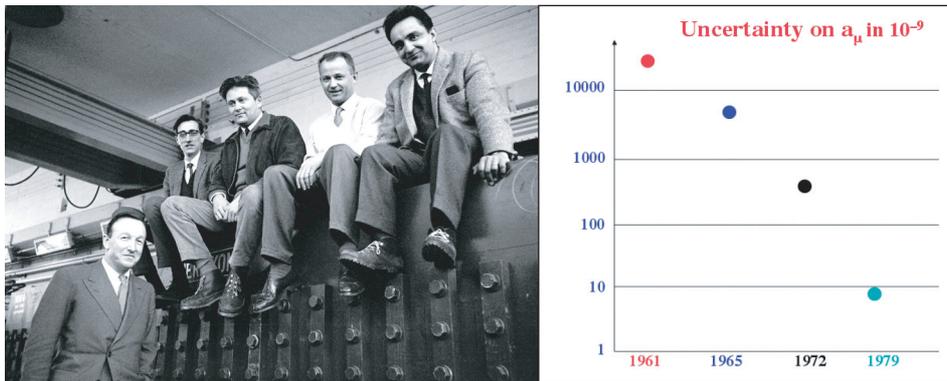


L'équation qui régit le mouvement du spin est celle de Bargmann, Michel et Telegdi. La mesure de $g-2$ résulte de celle d'un battement entre rotation des muons dans un anneau et rotation de leur spin.

En 1958 fut lancée la première expérience au SC dont les acteurs figurent sur la photo ci-dessous. En 1963 naquit l'idée d'une nouvelle expérience au PS avec des μ de 1.2 GeV (F. Farley, E. Picasso, S. van der Meer, D. Bailey, F. Krienen, G. Petrucci, W. Flegel, etc.). Le signal γ était observé pendant $\sim 130 \mu\text{s}$. On trouva un désaccord expérience-théorie de 1.7σ , ce qui conduisit à corriger une erreur dans la théorie.

En 1969 démarra une expérience meilleure : on y exploitait le facteur γ magique à 3.1 GeV, valeur à laquelle le champ électrique n'affecte pas la précession $g-2$. Cela permet l'usage de quadrupôles électriques et d'un champ magnétique uniforme. Le signal était observé sur 534 μs , l'accord avec la prédiction théorique excellent. Le progrès rapide de la précision de ces expériences successives est spectaculaire (figure).

Francis Farley, dans son hommage à Emilio Picasso « g minus 2 plus Emilio », n'a pas manqué de souligner l'excellente ambiance qui régnait dans ce groupe : « no wars, no clashes ».



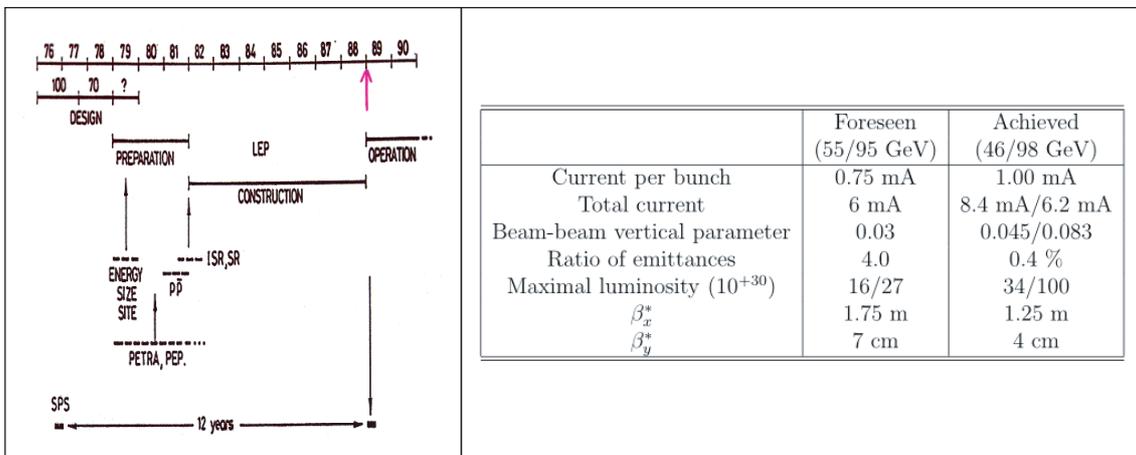
*Diverses vues des anneaux successifs. Le dernier est l'actuel de Brookhaven.
Le signal de battement dont on extrait $g-2$ est également montré.*

Le LEP

Le collisionneur e^+e^- LEP a été une superbe machine, avec quatre détecteurs performants. Il a fourni une physique propre et subtile, et en particulier validé le MS au niveau des boucles.

En tous points le LEP, planifié avec exactitude, a fait mieux, parfois beaucoup mieux qu'attendu. C'est vrai de la machine comme le montre la table de ses performances. Les cavités radiofréquences supraconductrices, à l'issue d'un travail soigneux de conditionnement et d'équilibrage, ont dépassé largement le champ accélérateur nominal. Le vide du LEP, grâce à l'utilisation à grande échelle du pompage getter, a également atteint des records, ce qui a conduit à des conditions expérimentales très favorables.

Côté physique la table compare, pour diverses observables-clé, les précisions attendues et finalement obtenues.



Le planning du LEP

Les performances du LEP



Une cavité RF du LEP

Le pompage getter

	attendu	final
M_Z (MeV)	$\pm 10-15$ (stat) ± 17 (syst)	± 2.1
Γ_Z (MeV)	± 50	± 2.3
Normalisation	3%	$< 1\text{‰}$
M_W (MeV)	50-60 (stat) > 100 (syst)	ADLO: 42
A_{FB}^{μ}	deux fois mieux	
τ polar.	2.5 fois mieux	
R_b	3 à 6 fois mieux	
A_{FB}^b	3 fois mieux	

Comparaison entre mesures et prédictions

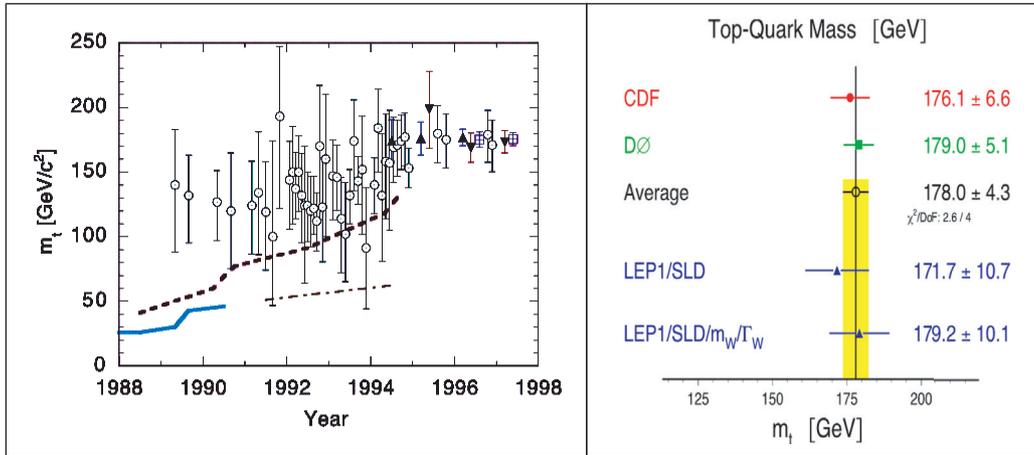


Quelques acteurs du LEP

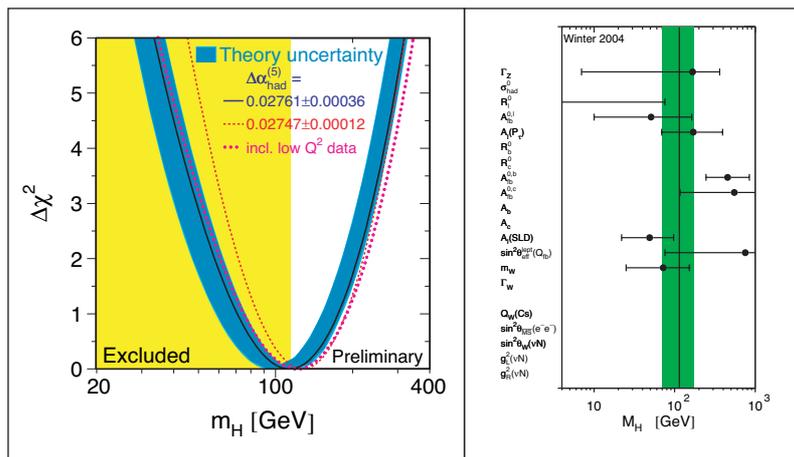
Les messages du LEP

Comme je l'ai souligné plus haut, un effet potentiel des particules virtuelles est de modifier légèrement la valeur numérique de certaines observables physiques. Une précision suffisante peut alors fournir indirectement de l'information sur ces particules, même si elles sont trop lourdes pour être « réellement » produites dans la réaction. Au LEP deux au moins étaient dans ce cas : le quark top, pesant 178 GeV environ et donc trop lourd pour être produit en paire top-antitop, mais dont l'existence ne faisait guère de doute, et le toujours hypothétique boson de Higgs. Les effets indirects attendus de ces objets sont toutefois bien différents : fort pour le top (quelques pour cents) et quadratique en fonction de sa masse, très petit pour le boson de Higgs et ne dépendant que logarithmiquement de sa masse. Pour reprendre une image due à G. Altarelli, le chercheur du LEP était comme un chasseur de brousse, l'oreille collée au sol et voulant détecter le pas feutré d'un tigre alors qu'un éléphant piétinait le sol non loin.

Le LEP s'est vite trouvé en mesure de « sentir » l'effet du top et d'évaluer sa masse (voir figure), qui s'est révélée être en parfait accord avec la valeur « directe » obtenue plus tard par le Tevatron de Fermilab quand il a découvert le top en 1995. L'éléphant ainsi calmé, il a été possible d'entendre le tigre, ou du moins un bruit ressemblant à son pas.



À gauche, en fonction de l'année, la masse du top trouvée indirectement par le LEP (cercles ouverts) et la masse mesurée directement par le Tevatron (triangles) après sa découverte. À droite la situation actuelle.

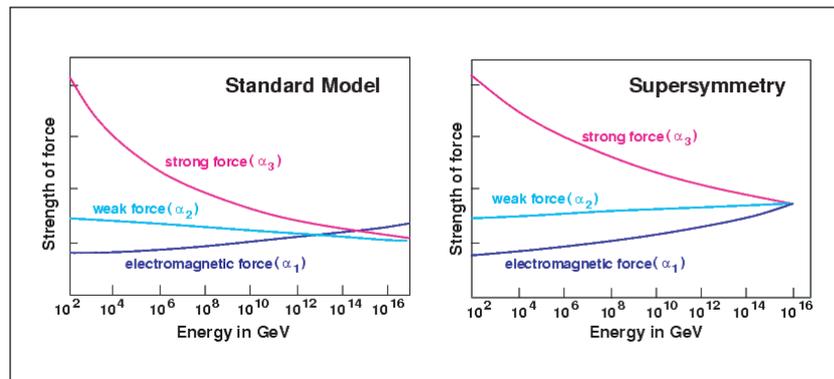


Indications sur la masse du boson de Higgs. Celui-ci doit se trouver vers le bas de la courbe en forme de parabole. La région en jaune est exclue par la recherche directe. La figure de droite montre un certain désaccord entre les indications des observables.

La figure ci-dessus montre la masse attribuée au boson de Higgs à partir des mesures des quantités électrofaibles du LEP/SLC, interprétées dans le cadre strict du MS, où ce boson est l'unique objet manquant. On trouve qu'il est léger, de masse inférieure à 220 (280) GeV pour une masse de top de 175 (180) GeV. Ce résultat est en fait une moyenne qui masque un certain désaccord (2.7σ) entre les deux mesures les plus précises. La recherche directe infructueuse du boson de Higgs au LEP2 l'exclut jusqu'à une masse de 114 GeV (avec toutefois une légère indication positive vers 115 GeV, voir plus loin), ce qui est parfaitement compatible avec l'indication indirecte. Il est certes possible, surtout si l'on sort du cadre du MS, d'imaginer des conspirations d'effets simulant celui d'un boson léger. Mais ces modèles sont plus ou moins « tirés par les cheveux » : avant de chercher midi à quatorze heures, il faut tester en priorité l'existence d'un tel boson en allant y voir, et telle est la première mission du LHC.

Malheureusement on n'obtient pas d'information indirecte significative sur SUSY à partir des mesures électrofaibles de précision. Elle peut encore être « derrière la porte » ou bien ne pas exister.

Le meilleur indice reste, grâce à leur mesure ultraprécise au LEP, la démonstration d'une convergence exacte des couplages de jauge dans le MSSM visible sur la figure ci-dessous.



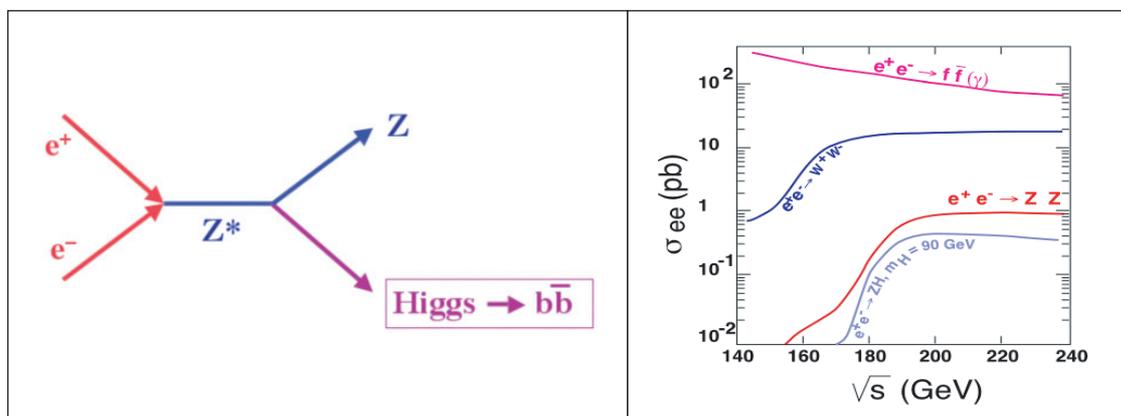
La convergence des constantes de couplage des interactions électromagnétique, faible et forte, approximative dans le MS, exacte dans sa variante supersymétrique.

On notera l'échelle horizontale logarithmique en énergie.

Cette évolution des couplages ne doit pas être confondue avec celle de l'intensité des forces.

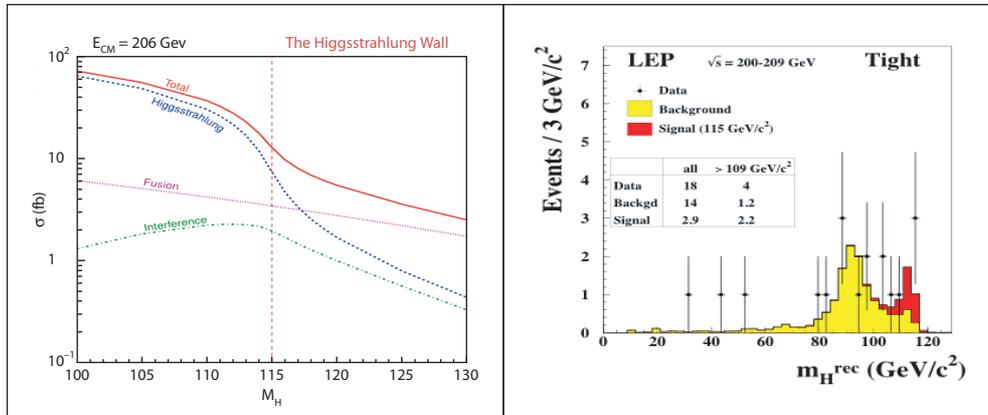
La recherche directe du boson de Higgs à LEP2 :

La recherche directe du boson de Higgs au LEP consistait à identifier l'existence du processus représenté ci-dessous, la production d'un boson, tenu dans cette région de masse à se désintégrer en beauté-antibéauté, en association avec un Z^0 . Il est donc évident que pour une masse M_H il faut une énergie d'au moins $M_H + M_Z$ et que la réaction est un processus « à seuil ».



Production du Higgs au LEP: diagramme et section efficace

En 2000, s'est produit le « crash » prévisible contre la limite cinématique à $M_H = 206 - 91 = 115$ GeV.

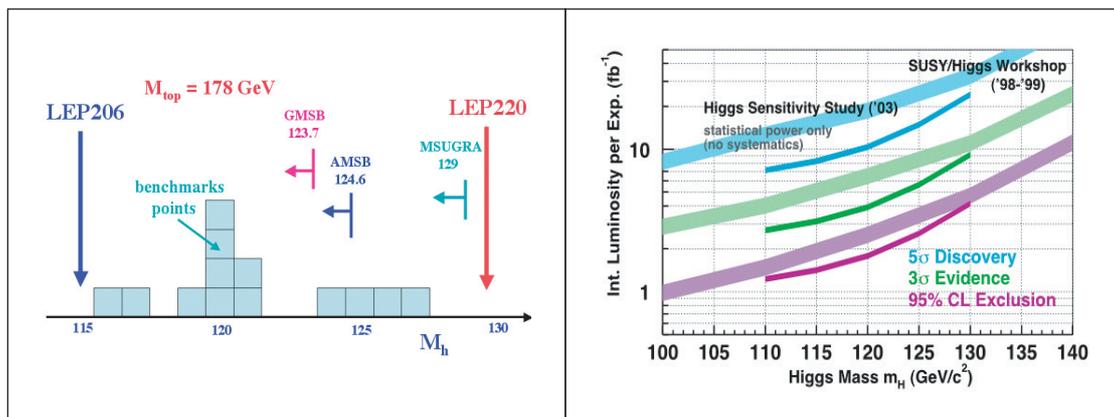


Section efficace de production

Le spectre en masse final

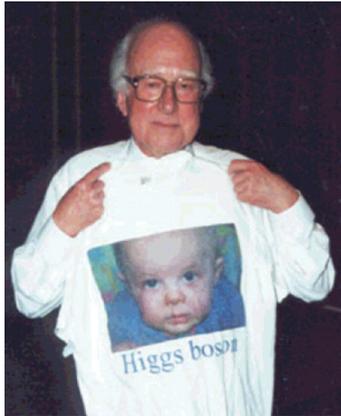
Quelques évènements, apparus à cette masse, ont fait grand bruit. Malheureusement il n'était plus possible d'augmenter l'énergie et la décision d'arrêter le LEP a été maintenue.

On peut regretter amèrement que les choses se soient passées ainsi sachant que le MSSM, modèle le plus étudié au-delà du MS, prédit l'existence d'un boson en dessous de 130 GeV environ. Il aura donc manqué 15 GeV au LEP pour conclure, soit 100 cavités RF supplémentaires (384 au lieu des 288 installées). La réponse attendra dix ans de plus et viendra soit du LHC soit, s'il fait des progrès substantiels en luminosité, du Tévatron. En attendant, souhaitons à P. Higgs, inventeur avec R. Brout, F. Englert et d'autres du mécanisme qui porte son nom, de cultiver agréablement l'art d'être grand-père.



L'impact d'une montée en énergie du LEP

Le potentiel du Tévatron en recherche du Higgs



Peter Higgs

Les miroirs brisés

La découverte de la violation de la symétrie de miroir P par l'interaction faible fut un choc en 1957. On se rabattit sur la symétrie CP, produit de P par la conjugaison de charge C (passage de particule à antiparticule) qui semblait respectée. Mais en 1974 vint l'évidence de sa violation en interaction faible par l'observation du mode « interdit » $K_L^0 \rightarrow 2\pi$.

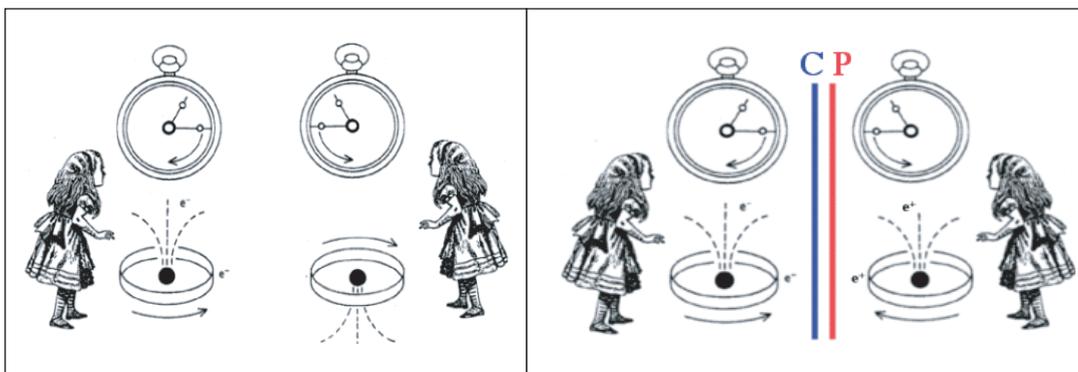
En fait cette brisure est de la plus haute importance car elle détient sans doute la clé de l'asymétrie matière-antimatière, donc de notre propre existence (conditions de Sakharov).

Vers 1970 on pensait que l'explication du mode observé tenait à une légère « impureté » du K_L^0

$$K_L^0 = K_2^0 + \epsilon K_1^0$$

le K_1^0 , état propre de CP = 1, pouvant aller en 2π .

Mais en 1973 on réalisa que le MS à trois générations offre la possibilité d'une désintégration directe $K_2^0 \rightarrow 2\pi$, régie par un paramètre appelé ϵ' et non nul. Bien que le CERN ait déjà accompli une longue suite d'expériences antérieures sur la violation de CP, nous commencerons l'histoire à ce stade.



La violation de la parité

La symétrie CP