

LA SYMETRIE DES PARTICULES ELEMENTAIRES ET DES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Louis MICHEL

Institut des Hautes Etudes Scientifiques
35, route de Chartres
91440 Bures-sur-Yvette (France)

Février 1980

IHES/P/80/05

Louis MICHEL

Nous vivons actuellement une période de progrès très rapide de la physique. Lors de la décennie qui vient de s'écouler nos vues sur les interactions fondamentales se sont complètement modifiées. Nous sommes maintenant à la recherche de leur symétrie interne. La seule période où l'évolution de la physique fut plus rapide, c'est de 1925 à 1930. Avec deux interactions fondamentales : la gravitation et l'électromagnétisme et trois particules élémentaires : le proton p^+ , l'électron e^- et le photon γ on expliquait tous les phénomènes connus de la physique et de la chimie. Une expérience cruciale, faite il y a cinquante ans, détruisit complètement cet édifice.

Le premier article d'Heisenberg sur la mécanique quantique fut écrit en 1925. Dans le second, par une considération simple de symétrie, il explique un puzzle alors fantastique : il existait deux types d'hélium, l'ortho et le para, chacun avec leur spectre, et coexistant en proportion constante : $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$. Dans l'intégrale d'une fonction de deux variables \vec{x}_1, \vec{x}_2 (les coordonnées des deux électrons de l'atome d'hélium) sur un domaine symétrique $D(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = D(\vec{x}_2, \vec{x}_1)$, seule la partie symétrique de l'intégrand contribue. Cela implique que l'émission ou l'absorption de photon - ce qui donne les raies spectrales - ne se fait qu'entre les états à fonction d'onde symétrique (ortho) ou antisymétrique (para) pour l'échange des deux électrons. Le spin, le principe d'exclusion de Pauli, les statistiques quantiques de Bose-Einstein et de Fermi-Dirac venaient d'être découverts. Les électrons ayant spin $\frac{1}{2}$, sont des Fermions. Les états de spin des deux électrons de l'orthohélium et du parahélium sont respectivement antisymétriques (singulet) et symétriques (triplet) d'où les abondances relatives de 1 à 3.

Ce simple raisonnement pour le groupe de deux éléments fut rapidement généralisé au groupe des rotations $SO(3)$, des rotations et réflexions, $O(3)$, pour tous les spectres atomiques (Wigner, Von Neumann, Weyl) et aux groupes de symétrie des molécules (Hund, Wigner, Jahn, Teller). L'invariance par rapport à un groupe de symétrie implique une loi de conservation. Par exemple l'invariance

par rapport aux rotations se traduit par la conservation du moment cinétique, en ajoutant l'invariance par réflexion P , on obtient la conservation de la parité. En appliquant deux fois de suite la même réflexion on revient à l'état initial, donc $P^2 = I$. Bien qu'on vous ait probablement enseigné le contraire avec le bonhomme d'Ampère contemplant ses trois doigts de la main droite ou s'aidant du tire bouchon de Maxwell, rappelons que les interactions électromagnétiques (responsables de la structure des atomes, molécules, cristaux...) ne permettent de distinguer la droite de la gauche. Curie s'expliquait remarquablement dans son article "Sur la symétrie des phénomènes physiques" publié en 1894 (Journal de Physique). Il insistait qu'il ne fallait pas représenter les pseudovecteurs champ magnétique H ou moment cinétique L par une flèche, mais utiliser plutôt un cercle orienté; celui-ci représente par exemple la spire de courant créant H , et le plan de cette spire est le seul plan de symétrie de H tandis que tous les plans qui contiennent le vecteur champ électrique E sont des plans de symétrie pour lui. Il faut aussi ajouter une remarque hélas trop technique pour l'étude du spin, le groupe des rotations $SO(3)$ est remplacé par son recouvrement $SU(2)$ (voir l'encart). En effet la mécanique quantique n'est pas un simple raffinement de la mécanique classique; elle introduit des concepts entièrement nouveaux.

Bien qu'une preuve complète n'en fut donnée que plus de vingt ans après, on savait très bien en 1930 que les états de spin demi entier (c'est-à-dire ceux composés d'un nombre impair de p^+ et e^- , ces particules ayant spin $\frac{1}{2}$) obéissaient à la statistique de Fermi-Dirac tandis que les états composés de γ (spin 1) et d'un nombre total de p^+ et e^- pair, obéissaient à la statistique de Bose-Einstein puisqu'ils avaient spin entier. Par exemple le noyau d'un atome de nombre atomique Z (nombre d'électrons autour du noyau) et de masse atomique A , étant composé de $A p^+$ et de $(A-Z) e^-$; le noyau d'azote N_{14} ($A = 14$, $Z = 7$) était un fermion. Rasetti, par l'étude du spectre de vibration rotation de la molécule diatomique N_{14}^2 montre que le noyau N_{14} était un boson de spin 1 ! La construction de l'Univers à partir de p^+ , e^- , γ s'écroulait !

En deux ans le nombre de particules prédites fut plus que doublé ! Dès 1931 Dirac prédisait l'existence des antiélectrons e^+ (découverts dès 1932) et des antiprotons p^- (découverts en 1955) et Pauli prédisait l'existence de particules neutres, très légères, de masse probablement nulle, de spin $\frac{1}{2}$; les neutrinos ν . Enfin en 1932 Chadwick découvrit le neutron n , attendu

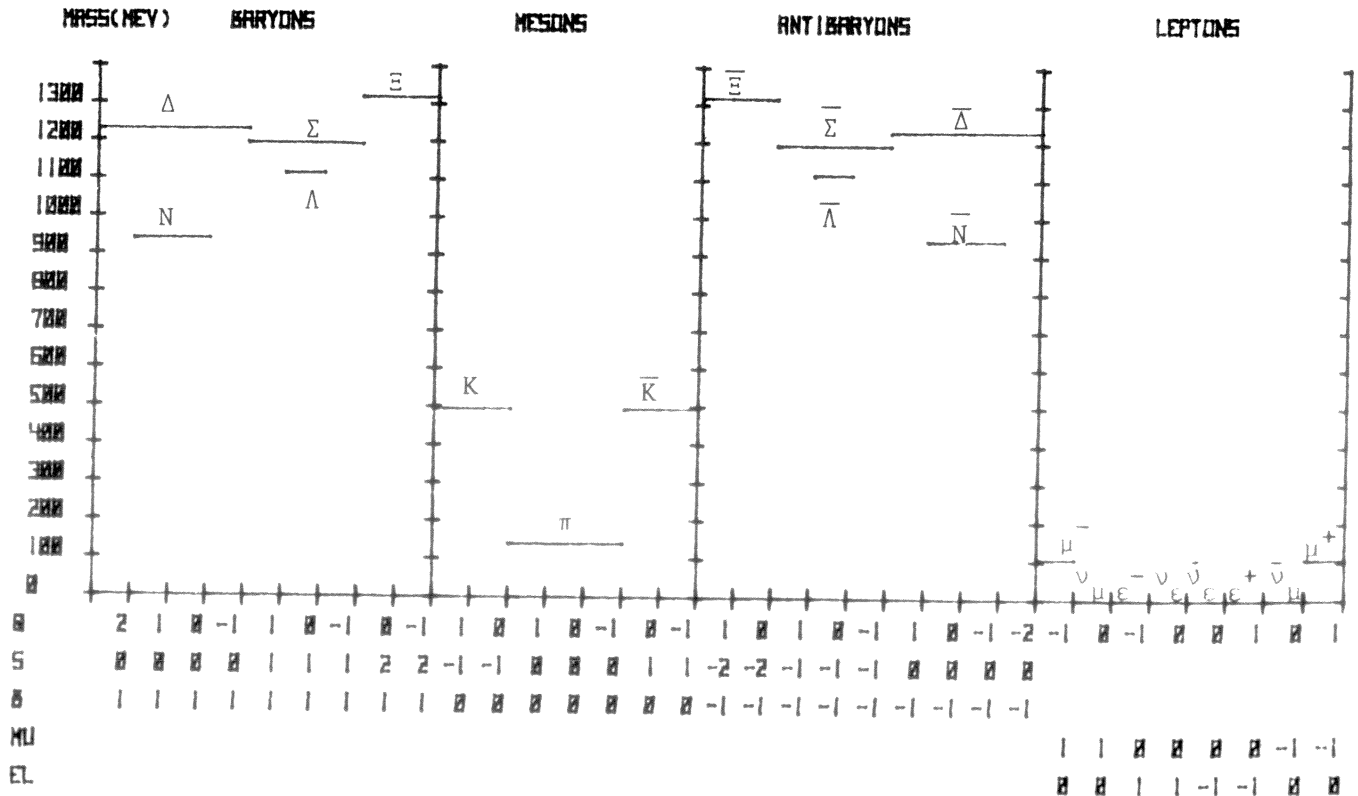
Encart : Les groupes de Lie simple.

Pour un espace vectoriel de dimension n , les groupes d'invariance d'un produit scalaire

| | sont notés | et appelés | leur dimension |
|--|------------|--------------|--------------------|
| symétrique $(x,y) = (y,x)$ | $O(n)$ | orthogonal | $\frac{n(n-1)}{2}$ |
| antisymétrique $(x,y) = -(y,x)$, n pair, | $Sp(n)$ | symplectique | $\frac{(n+1)n}{2}$ |
| hermitien $(x,y) = \overline{(y,x)}$ (complexe conjugué) | $U(n)$ | unitaires | n^2 |

Si de plus on exige des matrices représentant les transformations de ces groupes d'avoir déterminant un, on obtient les sous groupes $SO(n)$ et $SU(n)$ (ce dernier de dimension n^2-1). Notons que $SO(n)$ est lui-même le sous groupe des matrices réelles de $SU(n)$. Pour avoir la liste complète des groupes de Lie simples, avec lesquels on peut construire tous les autres, il suffit d'ajouter aux trois séries $SO(n)$, $Sp(n)$, $SU(n)$ les cinq groupes exceptionnels G_2 , F_4 , E_5 , E_6 , E_7 de dimension respective 14, 52, 78, 133, 248.

Table des hadrons connus en 1960.



S=ETRAINGETE

CHARGES S=ELECTRIQUE, B=BARYONIQUE, MU=MUONIQUE, EL=ELECTRONIQUE

Rappelons qu'une particule de masse non nulle et de spin j a $2j+1$ états de spin indépendants. Si son isospin est t , elle a $2t+1$ états indépendants de symétrie interne.

par l'école anglaise : avec les protons, les neutrons sont les constituants des noyaux. Le neutron lui-même a une vie moyenne d'un millier de secondes, se désintégrant suivant le schéma $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$ ($\bar{\nu}$ pour antineutrino).

La découverte de Dirac n'était pas formulée de façon symétrique. Il fallut bien dix ans pour comprendre qu'il existait un nouveau type de symétrie dans la physique des particules, la conjugaison de charge C échangeant toutes les particules en antiparticules et vice versa (le photon est transformé en lui-même, simplement multiplié par -1). Evidemment $C^2 = I$. Il fallut ainsi presque une vingtaine d'années aux physiciens pour assimiler un article de 1932 de Wigner : les équations de la physique quantique sont invariantes quand on remplace le temps t en $-t$ et qu'on prend leur complexe conjuguées ($i \rightarrow -i$). Appelons T cette transformation ! Elle est la correspondante quantique du renversement du mouvement en physique classique : dans un système sans dissipation d'énergie, si on garde les positions des corps tout en renversant leur vitesse, ils gardent les mêmes trajectoires mais en les parcourant en sens inverse.

Avec la découverte de ces particules en 1931-32, deux nouvelles interactions devaient être ajoutées aux interactions électromagnétiques et gravitationnelles; ces deux nouvelles interactions ont une portée qui ne dépasse pas la dimension des noyaux atomiques (10^{-15} mètres) et il faut donc réaliser certaines conditions spéciales pour qu'elles aient des effets macroscopiques. C'est par exemple le cas des étoiles. L'une de ces interactions est la nucléaire, cent fois plus forte que l'électromagnétique à l'échelle des noyaux; dès 1935 Yukawa conçut le méson, quantum du champ nucléaire. L'autre interaction est 10^5 fois plus faible; elle est responsable de la plupart des désintégrations de particules dont celle du neutron. Dès 1934 Fermi en donna une théorie assez bonne pour l'époque. On crut découvrir en 1937 dans les rayons cosmiques le meson de Yukawa et l'on mit dix ans à réaliser qu'il s'agissait d'une méprise d'identité, le μ n'étant qu'un électron lourd, de masse ($m_\mu = 206 m_e$) se désintégrant en 2 microsecondes $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}$.

Dès 1932 Heisenberg proposait de considérer p et n comme deux états internes de la particule "nucléon" en analogie avec les états de spin. D'où le nom de "spin isotopique"; on dit maintenant isospin. Cela devint vite plus qu'une analogie. Lorsqu'on oublie la charge du proton (dans les noyaux l'interaction électromagnétique est le centième de l'intégration nucléaire) et qu'on néglige la différence de masse (un pour mille) entre p et n , la

physique nucléaire est invariante par le groupe $SU(2)$ et l'isospin est conservé. Et quand en 1947-1950 on découvrit enfin les mésons de Yukawa, il s'agissait d'un triplet π^+, π^0, π^- d'isospin 1. Dès 1951 Fermi découvrait même les Δ , états excités du nucléon N ; se désintégrant en $N+\pi$, les Δ ont spin $\frac{3}{2}$ et isospin $\frac{3}{2}$ (puisqu'ils ont quatre états de charge électrique $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$).

Dès 1937, en combinant spin et isospin, Wigner avait même introduit le groupe de symétrie $SU(4)$ pour les forces nucléaires (il s'agissait cependant d'une approximation plus grossière); elle convenait parfaitement à la meilleure théorie des forces nucléaires qu'on possédait alors et expliquait bien le Δ , mais on ne s'en aperçut que bien plus tard ! (1964).

On pouvait alors dire que la symétrie permettait de comprendre qualitativement les propriétés des atomes et des noyaux. Puisque les électrons ont spin $\frac{1}{2}$ et satisfont à la statistique de Fermi, chaque couche d'énergie ne peut contenir qu'un nombre donné d'électrons. Pour obtenir l'état fondamental on remplit d'abord les couches d'énergie les plus basses; pour la couche extérieure incomplète, tenant compte de la répulsion électrostatique des électrons entre eux, la partie d'espace de la fonction d'onde des électrons doit être le plus antisymétrique possible, ce qui impose à la partie de spin d'être le plus symétrique possible, ce qui donne la plus grande valeur $S\hbar$ du moment cinétique du spin et $2S$ pour la valence chimique de l'atome, et l'on comprend aussi la périodicité de la table de Mendeleev. Le premier état excité forme aussi facilement des molécules, obtenu en renversant le spin d'un électron apparié, S augmente d'une unité et la valence chimique de deux. Il y a aussi une structure en couche pour les protons et les neutrons des noyaux, les couches se complétant pour 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 protons ou neutrons. Les forces résiduelles entre nucléons étant attractives, la fonction d'onde de la couche incomplète est la plus symétrique possible d'espace et la plus anti-symétrique possible pour le spin et l'isospin. Ainsi la majorité des noyaux connus ont un nombre pair de proton et un nombre pair de neutrons et leur spin est nul.

Au début des années cinquante on découvrit des particules si inattendues $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$, qu'on les qualifia d'étranges; mais il suffit alors d'étendre le groupe de symétrie interne de $SU(2)$ à $U(2)$ pour les comprendre (Gell-Mann), une nouvelle loi de conservation apparaissant, celle de l'hypercharge. A la fin de la décennie on vérifia qu'il existait deux types de neutrinos et antineutrinos, les uns associés à l'électron, les autres au μ . En 1960, en plus du γ (photon) et des 8 leptons : $e^-, \mu^-, \nu_e, \nu_\mu, e^+, \mu^+, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$, qui n'ont

pas d'interaction nucléaire, on connaissait sept hadrons, cinq baryons $N \Lambda Z \Xi \Delta$ et deux mesons π, κ dont les $24 + 7$ états internes sont donnés dans la table 1. Trente et un états c'est déjà beaucoup, mais on en connaît maintenant près d'un millier ! Avant de voir comment l'avalanche de nouvelles particules découvertes nous fit douter qu'elles soient élémentaires, revenons de quelques années en arrière.

Avant 1956 des physiciens avaient été amenés à douter de la conservation de la parité; ce fut le grand mérite de Lee et Yang de proposer des expériences tests. En janvier 1957 trois expériences établirent que P et C séparément n'étaient pas des symétries des interactions faibles mais que le produit PC l'était. En 1964 on observait la violation de PC dans un mode rare de désintégration du K^0 et il fut plus tard établi que T aussi était violé, le produit PCT restant par contre une symétrie fondamentale de la physique : si on observait expérimentalement le contraire, un grand pan de la construction des physiciens s'écroulerait ! Faut-il en conclure qu'il existe une cinquième interaction, superfaible, n'ayant pas les symétries PC et T ? Il faut être plus prudent. C'est le moment d'ouvrir une parenthèse pour faire la distinction entre les symétries des états physiques, dont s'occupa magistralement Pierre Curie, et les symétries des lois de la physique qui, grâce à l'exemple donné par Einstein, sont l'objet des recherches actuelles des physiciens des interactions fondamentales. Remarquons que la symétrie des lois de la physique n'est pas nécessairement préservée dans les états physiques de la nature. Par exemple, trois atomes identiques d'oxygène O_{16} dans une molécule d'Ozone $(O_{16})^3$ ne forment pas un triangle équilatéral, mais un triangle isocèle de $58^\circ 30'$ d'angle au sommet (il s'agit bien sûr de leur position moyenne pour les vibrations de la molécule). De même, bien que les forces entre atomes soient invariantes par rotations et translations (disons en simplifiant qu'elles ne dépendent que de leur distance), un très grand nombre d'atomes soumis à ces forces peuvent former un cristal qui a des directions privilégiées; en fait si on néglige les effets de bord du cristal, son groupe de symétrie ne contient que les rotations et translations qui envoient ses atomes sur des atomes identiques. C'est donc un des problèmes de la physique d'expliquer et de prévoir l'existence d'états physiques qui ont moins de symétrie que les lois de la physique. En tous cas on sait depuis 1932 que les neutrinos n'ont que la moitié des états des électrons : un seul état de spin orienté à gauche pour ν , et à droite pour $\bar{\nu}$. Et c'est un tout autre problème, plus difficile encore, mais combien fascinant de déduire, de l'observation des états physiques avec une

certaine symétrie naturelle, la formulation de lois physiques ayant une symétrie bien plus grande et, parfois, jamais réalisée dans notre univers !

Il faut d'abord deviner ces symétries. Au début des années soixante le nombre de particules dites élémentaires s'accrut très rapidement. Pour les classer il suffit d'agrandir le groupe de symétrie interne de $U(2)$ à $SU(3)$. Cela fut fait dès 1961 par Gell-Mann, ainsi que Ne'eman et aussi Speiser et Tarski. Bien qu'il ne s'agisse que d'une approximation grossière, la classification par $SU(3)$ permit de prédire de nouvelles particules qui furent toutes trouvées avec les propriétés voulues. Alors on pouvait encore utiliser l'idée de Wigner de 1937 et, ajoutant le spin, passer de $SU(3)$ à $SU(6)$! Ce fut fait par Gürsey et Radicati et aussi par Sakita. Il était alors naturel de chercher les relations entre la symétrie interne et celle de l'espace temps; il y eut plusieurs idées fécondes; celle qui triompha remonte à H. Weyl (1920) et O. Klein (1939) : c'est l'idée de jauge. Pour chaque point de l'espace temps il faut définir le groupe de symétrie interne; ces groupes définis pour chaque point sont semblables mais ils agissent indépendamment sur les variables internes des particules. Cela existe à l'état rudimentaire en électrodynamique : le groupe de jauge est $U(1)$; la phase qu'il introduit pour le champ de Dirac de l'électron, ainsi que la "jauge" du champ des photons γ sont inobservables sauf dans les états où cette symétrie de jauge est brisée, comme c'est le cas des états superconducteurs que possèdent certains matériaux à très basse température.

Voici comment fut faite cette découverte d'une nouvelle symétrie de jauge, ce qui vient de valoir le dernier prix Nobel à Glashow, Salam et Weinberg. Depuis Yukawa l'idée qu'il devait y avoir aussi des quanta pour les interactions faibles s'était peu à peu affirmée. Au début des années soixante on savait déjà qu'ils devaient avoir spin 1, être beaucoup plus lourds que les nucléons et avoir au moins trois états de charge W^+ , W^- , Z^0 . En 1962, en se restreignant aux interactions électromagnétiques et faibles des leptons $e\nu_e$ et $\mu\nu_\mu$ Glashow proposait un modèle qui introduisait une symétrie formelle entre ces deux types d'interactions. Weinberg montrait en 1967 qu'on pouvait donner à ce modèle une symétrie de jauge $U(2)$, cette symétrie étant toujours brisée dans notre univers. En effet n'y a-t-il rien de plus différent que cette interaction électromagnétique à portée macroscopique et préservant la parité P et la conjugaison de charge C , et cette interaction faible de portée microscopique (10^{-18} m) et violant P et C . Pourtant en 1971 un très jeune hollandais, t'Hooft

faisait de la théorie de Weinberg une théorie aussi solide que l'électromagnétisme et pour la première fois depuis cent ans - lorsque Maxwell unifia en une seule théorie celle de la lumière et l'électromagnétisme - était achevée une unification de deux interactions fondamentales de la physique. Cette théorie unifiée permet de prévoir en détail les propriétés des W^+ , W^- , Z^0 (de masse respectivement comparables aux atomes de krypton et de molybdène) leur vie moyenne ($< 10^{-12}$) leurs modes de désintégrations, le mécanisme détaillé de leur production par annihilation e^+e^- . C'est pour tester cette théorie que les physiciens européens étudient le projet de construire un accélérateur de dix kilomètres de diamètre qui consommerait autant d'électricité qu'un département français pour fournir aux électrons et antiélectrons une énergie de cent milliards d'électron volts.

Et maintenant on entrevoit d'englober dans une plus grande unification cette interaction électromagnétique - faible et l'interaction nucléaire ! Expliquons d'abord comment nos idées sur les forces nucléaires se sont radicalement transformées en dix ans. Si depuis 1960 on a découvert qu'un nouveau groupe de lepton τ^- , τ^+ , $\bar{\nu}_\tau$ vers 1975 c'est par centaines que des nouveaux hadrons (baryons et mesons) ont été créés avec les grands accélérateurs. Ils ne peuvent être élémentaires ! Gell-Mann et aussi Zweig postulèrent très tôt l'existence de constituants fondamentaux baptisés quarks par Gell-Mann (le nom a été créé par J. Joyce dans Ulysse). Ils ont spin $\frac{1}{2}$ mais ils ont des propriétés assez paradoxales. Leur charge électrique est une fraction de celle de p^+ ou e^- (qui sont égales en valeur absolue); elle est de $\frac{2}{3}$ et $-\frac{1}{3}$ pour les quarks, q , $-\frac{2}{3}$ et $\frac{1}{3}$ pour les antiquarks \bar{q} . Les baryons sont formés de $3q$, les anti-baryons de $3\bar{q}$ et les mesons de $q\bar{q}$. Cette structure fut observé expérimentalement dans les nucléons, pour les collisions très inélastiques et à haute énergie avec un faisceau de γ de e^- ou de ν_μ , sans qu'on puisse d'ailleurs extraire les quarks des nucléons car les forces d'attraction qui les lient augmente avec la distance si bien que leur extraction exigerait une énergie infinie. On expliqua alors aisément la symétrie approchée SU(3) et son extension à SU(6) en donnant aux quarks un nouveau degré de liberté : la "saveur" qui a trois valeurs u, d, s ; par exemple $p^+ = (uud)$, $n = (\bar{u}dd)$, $\Lambda^0 = (uns)$, $\Sigma^+ = (uus)$, $\Xi^0 = (u,s,s)$, $\Omega^- = (sss)$; Δ^+ est un état excité au proton tandis que $\Delta^{++} = (uuu)$.

Cependant certains phénomènes fins, dont un mode très rare (10^{-9}) de désintégration $K^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ amenèrent Glashow-Iliopoulos et Maiani à postuler un nouvel état de quark, c (charme) qui fut observé indirectement et de façon

inattendue par la découverte d'un nouveau type de méson en novembre 1974. Depuis on a découvert beaucoup des mesons "charmés" qui avaient été prédit et aussi un autre état de saveur, b (beauté) des quarks et on en attend un autre, t, incessamment.

Il y eut bien d'autres difficultés pour comprendre les quarks. Ils semblaient être des bosons de spin $\frac{1}{2}$. Diverses tentatives furent faites pour corriger cette mauvaise connection entre spin et statistique, mais c'est la plus traditionnelle qui réussit : Les quarks sont bien des fermions car ils ont encore un autre type de degré de liberté interne (comme le proposèrent Han et Nambu) la "couleur" qui a trois valeurs possibles pouvant être transformées les unes dans les autres par un nouveau groupe SU(3). La théorie de l'interaction entre les quarks s'appelle chromodynamique. Elle est identique à l'électrodynamique, excepté que le groupe de jauge U(1) de dimension 1 est remplacé par SU(3) de dimension 8. Il y a donc 8 quanta du champ chromodynamique, les 8 gluons de masse nulle et spin un, qui, comme les quarks, sont colorés. Cette symétrie de jauge SU(3) conserve la couleur et les seuls états qu'on peut séparer les uns des autres sont les états invariants (disons les états blancs, superposition en quantité égale des trois couleurs fondamentales). Les forces nucléaires entre hadrons s'obtiennent de l'interaction chromodynamique de la même façon que les forces chimiques entre atomes sont expliquées par le constitution de ceux-ci : liaison électromagnétique des électrons et du noyau.

Voici donc le nouveau tableau des particules fondamentales comme on peut le présenter en 1980, avec leur états de spin et, pour les quarks de couleur :

| | quarks | lepton | |
|-------------------|---------------------------------|------------|----------------|
| charge électrique | $\frac{2}{3}$ et $-\frac{1}{3}$ | -1 | 0 |
| | u(2×3) d(2×3) | e(2) | ν_e (1) |
| | c(2×3) s(2×3) | μ (2) | ν_μ (1) |
| | t(2×3) b(2×3) | τ (2) | ν_τ (1) |

il faut doubler pour ajouter les antiparticules. Rappelons que la chromodynamique préserve la symétrie C entre particules et antiparticules. Bien que dans notre univers nous n'avions pas encore observé de l'antimatière

"naturelle" plusieurs physiciens pensent en avoir décelé les indices l'année

écoulée et J.M. Souriau pense même que l'univers a la symétrie C . D'après lui l'univers serait une sphère S_3 et nous serions à 8 milliards d'années-lumière de l'équateur frontière entre la matière et l'antimatière. Il faut encore ajouter à la table les bosons élémentaires de masse zéro, non colorés, c'est-à-dire le photon de spin 1, et le quantum de la gravitation, le graviton de spin 2. La grande unification de la physique qui est en cours devra bien un jour englober l'interaction gravitationnelle !

Faisons le point actuel sur la symétrie de l'unification des interactions électromagnétique, faible, et forte (= de couleur). Le plus petit groupe de jauge possible pour cette grande unification est $SU(5)$ de dimension 24. Il explique assez bien toutes les données actuelles de l'expérience : Parmi ses prédictions, une des plus révolutionnaires (et qui dépend peu de la nature du groupe de jauge de la grande unification) c'est l'instabilité du proton ! Il se désintègre spontanément en leptons et/ou π^+ (qui donne des leptons) ou π^0 (qui donne deux γ). Mais la vie moyenne du p^+ est de l'ordre de 10^{32} ans; or les protons ont été produits pour la plupart au "big bang" il y a 10^{18} ans environ; disons encore que pour la majorité des humains pas un seul proton de notre corps se désintègre au cours de notre vie. Cependant des physiciens espèrent faire dans les années qui viennent des expériences assez précises pour tester cette prédiction de la théorie. D'autres prédictions sont aussi inéluctables, mais quand pourront elles être vérifiées ? En plus du γ , des 8 gluons, des $W^+ W^- Z^0$ il doit y avoir encore d'autres quanta de très haute masse (peut-être 10^{10} fois plus lourds). C'est d'ailleurs $SU(5)$ le plus économe puisqu'il n'en prédit que 12 autres. Il est moins économe en bosons de Higgs, puis qu'il en requiert 19 dont on prévoit assez mal les propriétés; sont-ils vraiment des particules existantes ? On peut aussi penser que la théorie actuelle n'est que dans un état imparfait et provisoire et que ces "deus ex machina" pour le mécanisme de brisure de la symétrie de $SU(5)$ à $U(3)$ disparaîtront dans la théorie future. A quoi ressemblera cette théorie future et quel rôle y jouera la symétrie ? Peut-on se hasarder à répondre à ces questions ?

Certainement on n'oubliera pas d'englober la gravitation dans une unification complète; on sait déjà la "jauger" et des physiciens travaillent à l'unifier. Enfin il faut comprendre pourquoi la table des quarks et leptons a trois lignes alors que pratiquement toute la matière de l'Univers n'est composée que des constituants de la 1^e ligne. Quel est le rôle des deux autres ? $SU(5)$ ne mélange pas les lignes. Il se contente de transformer simultanément

les 15 états de chaque ligne. Est-on en face d'un nouveau type de degré de liberté, lui aussi à 3 valeurs ou bien la table des constituants élémentaires va-t-elle se mettre encore à croître. Les leptons et les quarks sont-ils faits de "larks" (alouettes) ? Je préférerais penser que les quarks sont si différents par rapport à notre concept de particules qu'il faudra modifier la théorie par des concepts tout nouveaux. Par exemple Gürsey propose de prendre une structure mathématique non associative, les octonions de Cayley (qui ont déjà cent ans) et le groupe de symétrie qu'il obtient pour la grande unification est un des groupes exceptionnels (E_6 ou E_7). Les physiciens ont aussi inventé des êtres mathématiques nouveaux pour décrire les symétries : les supergroupes; on peut les construire à partir des algèbres de Lie gradués simples dont les mathématiciens viennent juste d'établir la classification. Et personne ne peut prédire les autres concepts nouveaux qui peuvent éclore, surtout si les expérimentateurs nous font la surprise d'une découverte complètement inattendue et qui semble détruire l'échafaudage actuel. En général de telles circonstances rendent encore plus rapides et plus fascinants les progrès de la physique.