

Physique théorique des particules élémentaires

M. Jacques PRENTKI, professeur

Le cours de cette année était intitulé : *La physique des particules à l'aide des anneaux de collision à électrons*. Depuis bien longtemps déjà, l'étude des processus de collisions électron-électron, électron-positron et de l'annihilation électron-positron en muons ou hadrons avait conduit à des résultats extrêmement intéressants. Des tests de l'électrodynamique quantique ont été effectués montrant un accord parfait entre les prédictions théoriques et les données ; l'étude des propriétés de certaines résonances telles que ρ , ω , φ , etc., s'est avérée importante pour des modèles théoriques tendant à les décrire ; des nouvelles résonances ρ' , ρ'' ... ont pu être observées dans ces réactions ; le comportement des sections efficaces totales de l'annihilation, important pour le modèle des partons ou des quarks, a été examiné. La mise en marche au SLAC et à DESY de nouvelles et plus puissantes machines qui mettent en jeu des énergies notablement plus grandes, a permis d'élargir sensiblement le domaine d'étude des processus électromagnétiques, de pousser plus loin l'examen de la validité à courte distance de l'électrodynamique quantique, d'étudier les processus d'annihilation électron-positron à haute énergie, d'examiner les problèmes de l'invariance d'échelle pour des photons du type temps et, entre autres, le comportement de la section efficace totale en fonction de l'énergie. Le résultat expérimental inattendu concernant le dernier point constitue aujourd'hui encore un défi à toute théorie ou à tout modèle prétendant décrire l'ensemble des phénomènes dus aux interactions électromagnétiques et fortes. A titre d'illustration, mentionnons que la section efficace totale dans la région asymptotique est donnée dans un modèle des partons naïf par la somme des carrés des charges des quarks fondamentaux, ce qui, manifestement, limite le nombre de schémas possibles.

Vers la fin de 1974, une retentissante découverte fut annoncée simultanément à Brookhaven et au SLAC. Il s'agit de la mise en évidence dans les collisions proton-proton et dans l'annihilation électron-positron, respectivement, d'une résonance extrêmement étroite de masse 3.1 GeV se désintégrant en particulier en $\mu^+\mu^-$. Ce résultat fut rapidement confirmé par

d'autres laboratoires, à Frascati, DESY, et au NAL. Quelques temps après, le SLAC fut en mesure d'annoncer deux nouvelles résonances, l'une étroite à 3.7 GeV et l'autre, beaucoup plus large, à 4.1 GeV. Une étude intensive de ces résonances fut immédiatement entreprise, dans laquelle les anneaux de collisions à électrons s'avérèrent un outil exceptionnel. Par un choix adéquat des énergies des faisceaux, on produit directement les résonances en question avec des sections efficaces notables ce qui permet d'étudier en détail leur production et surtout leurs différents modes de désintégration. On dispose aujourd'hui d'un ensemble de données déjà impressionnant, bien qu'encore incomplet. Cette découverte spectaculaire est probablement de toute première importance pour notre compréhension du monde subnucléaire. Il ne faut pas donc s'étonner qu'elle donne lieu à des spéculations théoriques nombreuses car différentes interprétations de ces résonances, qui conduisent à diverses prédictions, sont encore possibles.

Depuis le début de cette année, on assiste à une activité intense dans tous les laboratoires de haute énergie, visant à vérifier certaines de ces prédictions. Il se pourrait, en particulier, que les résonances ψ soient une première manifestation de l'existence d'un nouveau nombre quantique, ou aussi de la présence d'un nouveau quark, exigés par les théories de jauge des interactions faible et électromagnétique. Si cette interprétation devait se confirmer, nous assisterions à l'heure actuelle à une grande synthèse dans la physique des particules élémentaires. De toute manière, il est raisonnable de croire que l'étude de ces nouveaux phénomènes jouera un rôle central dans la physique des hautes énergies des années à venir. Les quelques remarques qui précèdent soulignent le grand intérêt de la physique des anneaux de collisions à électrons. Il faudrait encore ajouter que ces machines sont l'outil idéal pour la mise en évidence des leptons lourds dont certains prévoient l'existence. Il nous a donc semblé intéressant de consacrer à ces problèmes un ensemble de leçons qui s'échelonnent sur deux années et dont le cours de cette année constitue la première partie. Dans ce qui suit, nous en donnons un bref résumé.

I. - *DOMAINE DE LA VALIDITÉ DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE*

Deux approches sont possibles pour l'étude de ce problème : i) L'électrodynamique quantique, grâce à la théorie de la renormalisation, permet de calculer à tout ordre de perturbation les quantités observables. La comparaison de certaines grandeurs statiques mesurées à des précisions extrêmes avec les résultats du calcul donne des indications d'une part sur la validité de la théorie des perturbations et de l'autre sur le comportement à courtes

distances. ii) L'utilisation des anneaux de collisions à électron permet de vérifier la validité de l'électrodynamique aux grandes énergies et aux grands transferts du carré des quadrimoments, donc à des distances très courtes. Souvent, des expériences infiniment moins précises que dans le cas i) donnent des limites meilleures, d'où l'intérêt de ces machines pour ce problème.

A) Nous avons discuté les effets suivants constituant les tests de l'électrodynamique quantique à basse énergie.

1) *L'effet Lamb*. L'interaction de l'électron avec le champ électromagnétique quantifié conduit à un déplacement des niveaux $2S_{\frac{1}{2}}$ et $2P_{\frac{1}{2}}$. Les différentes contributions ont été estimées et une comparaison avec l'expérience présentée.

2) *La structure fine*. Elle est due essentiellement au couplage spin orbite dans la théorie de Dirac.

3) *La structure hyperfine* de l'atome d'hydrogène est due à l'interaction du moment magnétique de l'électron et de celui du proton. Une discussion de 2) et 3) a été présentée.

4) *Le positronium*. La structure fine du positronium ainsi que les désintégrations des niveaux 3S_1 et 1S_0 ont été discutées.

5) *Le muonium* et ses propriétés ont été brièvement mentionnés.

6) *Le g-2 pour l'électron et le muon*. Nous avons discuté les résultats du calcul jusqu'au sixième ordre de l'interaction électromagnétique, insistant sur les différences entre $(g-2)_e$ et $(g-2)_\mu$.

7) Nous avons présenté le calcul du $g-2$ aux ordres 2 et 4, insistant particulièrement sur les effets de la polarisation du vide et des corrections du propagateur du photon dues à la section efficace totale d'annihilation électron-positron. Une discussion générale de la sensibilité du $g-2$ aux interactions fortes, à l'introduction de nouvelles particules ou de nouvelles interactions a été donnée.

B) Tests de l'électrodynamique quantique à hautes énergies. Les processus suivants ont été discutés.

1) *Annihilation électron-positron en deux γ* . Cette réaction teste le propagateur du type espace de l'électron et la fonction de vertex de l'électron. Le problème du double rayonnement de freinage a été discuté. Une comparaison avec les données a été faite.

2) *Diffusion élastique électron-positron* (diffusion Bhabha). Ce processus important qui teste les propagateurs des photons du type spatial et temporel ainsi que la fonction de vertex des électrons a été discuté en détail. Le problème des corrections radiatives a été envisagé. Une comparaison avec les données et les conclusions qui en découlent ont été présentées.

3) *Diffusion élastique électron-électron et rayonnement de freinage*. Différents propagateurs et fonctions de structure des vertex sont testés ici. On obtient aussi des limites sur la présence éventuelle d'une catégorie de leptons lourds.

4) *Annihilation électron-positron en paire de muons*. Le processus a été discuté en grand détail.

5) *Recherche des paires électron-muon dans l'annihilation électron-positron*. Ce processus est important car il permet en particulier d'apporter des limites à la présence de leptons lourds.

Pour les paragraphes 1)-5), la comparaison résultats expérimentaux-prédictions théoriques a été faite en utilisant les données provenant de nombreux laboratoires (Orsay, Novosibirsk, Frascati, DESY, SLAC).

II. - ANNIHILATION ELECTRON-POSITRON EN HADRONS

On est en présence d'un large ensemble de réactions extrêmement intéressantes qui ont donné lieu à des études expérimentales et théoriques poussées. Ces processus permettent d'étudier des différents facteurs de forme pour des photons du type temps. Les processus sont dominés (sauf configurations exceptionnelles) par l'échange d'un photon.

1) Nous avons commencé la discussion en présentant des remarques générales : a) sur l'interférence entre les processus à un et deux photons échangés, b) sur les états finals possibles et leurs nombres quantiques, c) sur les distributions angulaires lorsqu'une particule est observée, d) sur les limites dues à l'unitarité, e) sur la présence de résonances dans l'état intermédiaire.

2) La formule générale pour l'annihilation en hadrons a été déduite.

3) Les annihilations en deux mésons pseudoscalaires, un méson pseudo-scalaire et un photon, en deux baryons, en deux mésons vectoriels, etc., ont été discutées et les différents facteurs de forme définis.

4) Le modèle de la dominance vectorielle a été présenté et le domaine de sa validité discuté en détail. Il a été appliqué à l'étude des facteurs de forme définis en 3). Les perfectionnements apportés à ce modèle du genre

correction de la largeur finie, ou modèle de Sakurai-Gounaris, etc., ont été présentés. Une analyse phénoménologique en terme de ce modèle et une comparaison avec les données permettant d'extraire les paramètres importants, à savoir certaines constantes de couplages électromagnétiques et fortes, etc., ont été effectuées. Le problème de la validité des prédictions de SU_3 et de ses généralisations a été envisagé dans ce contexte.

5) Pour des énergies dans le centre de masse supérieures à 1 GeV, on observe une importante production multiple de hadrons ($n \geq 4$). L'analyse des réactions avec de tels états finals est loin d'être aisée et univoque. Différents modèles ont été proposés et nous les avons passés en revue. Nous avons décrit en particulier un modèle dans lequel on suppose que les états à plusieurs particules proviennent de la production en paire de bosons lourds qui se désintègrent par cascade vers l'état final. Admettant la validité du modèle de la dominance vectorielle, limitant le nombre de constantes de couplage par des arguments tirés de SU_3 , SU_6 , de l'algèbre des courants, etc., il devient possible de décrire ces phénomènes compliqués d'une manière plus ou moins satisfaisante. Cette analyse n'en est qu'à son début. Il semble cependant que l'étude de ces réactions, bien que très difficile à cause de la complexité des états finals, donnera un jour des indications précieuses sur l'existence des bosons supérieurs et de leurs interactions.

6) Les interactions fortes apportent, en principe, des corrections à l'électrodynamique quantique par l'intermédiaire d'une modification du propagateur du photon. Ces effets sont faibles sauf cependant si l'on se trouve au voisinage d'une résonance hadronique ayant les nombres quantiques du photon. Nous avons étudié ce phénomène important très en détail sur l'exemple du φ , ceci pour la section efficace totale de l'annihilation et aussi pour l'interférence qui a lieu entre la contribution du photon et celle due au φ pour le système final de deux muons. Une comparaison avec les résultats expérimentaux d'Orsay a été présentée.

III. - LES NOUVELLES PARTICULES

Nous aurions dû continuer cet exposé par la discussion des processus d'annihilation électron-positron à très haute énergie et des réactions découlant de l'échange de deux photons. La découverte des nouvelles particules et l'énorme intérêt qu'elle a suscité nous a cependant conduit à aborder les problèmes de cette nouvelle physique. Comme nous l'avons déjà mentionné, une des interprétations possible, probablement la plus élégante sinon la plus profonde, est liée à l'existence d'un nouveau nombre quantique — le charme — contenu dans une théorie des interactions fortes.

A) *Le groupe SU_4 et le nombre quantique du charme*

Les théories de jauge unifiant les interactions électromagnétique et faible impliquent l'existence d'un groupe de symétrie plus large que SU_3 pour les interactions fortes. L'observation des nouvelles particules ψ indique peut-être que ces idées ne sont pas dénuées de sens. Il devient essentiel alors d'examiner les prédictions théoriques découlant de la présence d'un tel groupe. La généralisation la plus immédiate est SU_4 . Nous oublions en attendant le problème du groupe de la couleur que nous supposons exactement conservée.

1) La première question est celle de la classification des particules. Dans SU_4 , en plus des trois quarks de SU_3 (p, n, λ), on introduit un quatrième quark c qui porte le nombre quantique du charme comme le quark λ porte celui de l'étrangeté. Les baryons sont des systèmes de trois quarks qqq appartenant aux représentations 20 et 20' de SU_4 . De nouveaux baryons charmés sont donc prédits. Les bosons sont des systèmes $q\bar{q}$ appartenant aux représentations 1 et 15 de SU_4 . A part le nonet SU_3 , on prédit donc six nouveaux mésons proprement charmés et un méson avec un charme caché ($c\bar{c}$) tout comme le φ est un méson $\lambda\bar{\lambda}$ avec une étrangeté cachée. Ceci aussi bien pour les mésons vectoriels que pseudoscalaires. Le ψ pourrait bien être un état $c\bar{c}$.

2) Le groupe SU_4 est évidemment fortement cassé. Tout comme dans le cas de SU_3 , des formules de masse peuvent être déduites d'autant plus restrictives que les théories de jauge limitent les possibilités de cassure. Des mélanges entre les états mésoniques de charge, étrangeté, charme et spin isotopiques nuls peuvent intervenir. La connaissance des masses des mésons habituels et de leurs compositions en quarks laisse essentiellement un paramètre libre (la masse du quark c) pour les masses des mésons supplémentaires. Si le ψ (masse 3.1 GeV) est le méson ($c\bar{c}$), on prédit l'existence de mésons vectoriels et pseudo-scalaires charmés dans la région des 2 BeV. Les baryons charmés auraient des masses de l'ordre de 3 BeV ou plus. Les points 1) et 2) ont été discutés en grand détail.

3) Les particules charmées seraient des particules quasi-stables, de vie moyenne de l'ordre de 10^{-12} - 10^{-13} sec. se désintégrant par interactions faibles, lesquelles sont déterminées par les théories de jauge. Il est donc possible de prédire dans une certaine mesure les propriétés et les modes de désintégration de ces particules. Ceci est évidemment essentiel pour un programme expérimental de recherche de ces nouveaux objets. Nous avons discuté très en détail les désintégrations semi-leptoniques et non leptoniques des mésons et des baryons charmés, les règles de sélection impliquées, les différents

rapports de branchement attendus, le problème de la généralisation du renforcement de l'octet, connu déjà en SU_3 , au groupe SU_4 , ce qui est en relation directe avec le rapport de branchement, expérimentalement important, des désintégrations semi-leptoniques - non leptoniques.

4) Si les prédictions de la théorie sont correctes, on sait en principe où et comment rechercher les nouvelles particules. Cependant, on s'aperçoit qu'il ne sera pas aisé de les observer en raison de leurs vies moyennes relativement courtes et de leurs modes de désintégration en des systèmes à multiplicités importantes.

a) Le charme est conservé dans les interactions fortes. Ces particules sont donc ici créées en paires. Il est difficile d'estimer les sections efficaces de leurs productions. En fonction des modèles utilisés, elles diffèrent par des ordres de grandeur et sont, en raison des masses élevées mises en jeu, probablement très faibles. Il est néanmoins intéressant d'examiner ce problème et nous avons décrit les différents modèles théoriques et les premiers essais expérimentaux dans cette direction.

b) Des remarques similaires s'appliquent à la photoproduction bien que la situation soit probablement meilleure.

c) L'annihilation positron-électron donne également lieu à une production d'une paire de particules charmées lorsque l'énergie le permet. Les sections efficaces peuvent être estimées plus sérieusement. La difficulté se trouve dans l'analyse du système final à multiplicité importante. On s'attend à la présence de pics dans les distributions des masses invariantes de certains systèmes de particules. La recherche de paires électron-muon est évidemment très intéressante.

d) Les réactions neutrinos semblent les plus prometteuses pour une telle recherche. La production de ces particules est ici une production simple (l'interaction faible viole le charme) et elle peut être estimée très raisonnablement dans un modèle de partons par exemple pour les réactions inclusives ou par des considérations basées sur SU_4 pour les productions quasi-élastiques. Nous avons discuté ce point en détail.

B) Les particules $\psi(3.1)$, $\psi'(3.7)$, $\psi''(4.1)$

La description de la physique de ces nouvelles particules et de leur interprétation théorique a constitué une partie importante de ce cours.

1) Nous avons déduit les formules générales concernant, en présence d'une résonance, la diffusion Bhabha et l'annihilation électron-positron en deux

muons et en hadrons. Ces formules permettent d'extraire des données les paramètres importants théoriquement comme les largeurs partielles des résonances étroites, c'est-à-dire les constantes de couplage.

2) Nous avons décrit en détail les distributions angulaires et le problème d'interférence entre les contributions du photon virtuel et de la résonance pour la diffusion Bhabha et l'annihilation en muons. Cette étude donne des indications sur le spin de la résonance.

3) Les données disponibles à l'époque, provenant de Frascati, DESY, Brookhaven, du SLAC et NAL ont été présentées et discutées. La production des ψ dans les collisions proton-proton et par la photoproduction indique que très probablement la particule ψ interagit fortement.

4) Nous avons présenté une analyse phénoménologique des données qui permet d'évaluer les couplages des nouvelles particules avec les habituelles et montre que la situation est complexe et, en fait, intéressante en raison de l'extrême étroitesse des deux premières résonances et de la largeur importante de la troisième. D'énormes suppressions doivent intervenir si les ψ ont des interactions fortes. Dans une théorie où les ψ seraient des systèmes $c\bar{c}$, la règle de Zweig — introduite pour décrire certaines propriétés du φ — doit être généralisée et renforcée.

5) La découverte des nouvelles particules a provoqué une intense activité théorique. Plusieurs catégories de modèles ont été proposées.

a) Les ψ seraient des mésons scalaires de Higgs. Ceci est exclu par les distributions angulaires.

b) De nouveaux nombres quantiques spécifiques aux ψ ont été introduits. Ceci, bien que possible, est absolument arbitraire.

c) Les ψ seraient des bosons vectoriels intermédiaires responsables des interactions faibles. Cette possibilité, présentant certains avantages, semble exclue aujourd'hui par les expériences de photoproduction des ψ .

d) Modèles hadroniques. Les nombres quantiques nécessaires viennent des propriétés de l'interaction forte. Plusieurs possibilités peuvent être envisagées. Deux modèles jouissent d'une certaine popularité. Le modèle SU_4 avec le nombre quantique du charme et la couleur strictement conservée et les modèles avec la couleur cassée.

6) Nous avons discuté très en détail le modèle où le ψ est considéré comme le système ${}^3S_1 c\bar{c}$ du modèle des quarks, les ψ' et ψ'' étant des états radialement excités de ce système. Les ψ et ψ' étant très étroits doivent

être des états $\bar{c}c$ purs et la règle de Zweig fournit les suppressions nécessaires dans l'interaction particules nouvelles - particules ordinaires. La large résonance ψ'' doit se désintégrer en deux mésons proprement charmés d'où la prédiction assez stricte du modèle affirmant que ces particules ont des masses comprises entre 1.85 et 2.1 BeV. Les propriétés générales observées des ψ sont, en tous les cas, qualitativement et même quantitativement décrites d'une manière satisfaisante par le modèle.

7) Un modèle particulier dans le cadre de la théorie SU_4 des nouvelles particules est celui du charmonium. On admet que le système quark-antiquark charmés est faiblement lié. Le potentiel de liaison découle de l'échange de gluons colorés de masse nulle. A part un terme responsable du confinement des quarks, on a affaire à un potentiel du type coulombien ou du type Fermi-Breit, et une approximation non relativiste est appliquée. La description de ce système est très analogue à celle du positronium. Des considérations empruntées à l'hypothèse de la liberté asymptotique justifient dans une certaine mesure le modèle et permettent aussi de comprendre pourquoi la règle de Zweig est si bien satisfaite pour les mésons vectoriels ψ . Elle ne le serait que dans une moindre mesure pour les mésons pseudo-scalaires. Tout comme pour le positronium, le modèle prédit par exemple la séparation des niveaux 1S_0 et 3S_1 due à la structure fine, et la solution des équations permet d'obtenir l'ensemble des niveaux du système charmonium et d'estimer leurs désintégrations. Ceci conduit à des prédictions propres à ce modèle qu'il sera très intéressant de vérifier expérimentalement. Nous avons présenté en assez grand détail ce modèle attrayant.

8) Il ne nous a pas été possible, par manque de temps, de discuter l'interprétation des nouvelles résonances dans le cadre des modèles avec le groupe de couleur brisé. L'arbitraire est ici plus grand que dans le cas du charme et plusieurs schémas ont été proposés. Nous les avons passés rapidement en revue. En fonction de la situation expérimentale, nous y reviendrons peut-être l'année prochaine.