

Physique théorique des particules élémentaires

M. Jacques PRENTKI, professeur

Le cours de cette année était intitulé : « *La Physique des particules élémentaires des anneaux de collision à électrons. Suite* ». Dans le résumé du cours de l'année dernière, nous avons souligné et discuté d'une manière détaillée l'intérêt que cette physique présente pour l'étude des particules et celle de leurs interactions, pour les tests de l'électrodynamique quantique, pour l'étude des propriétés électromagnétiques des hadrons, pour les découvertes éventuelles de nouvelles particules, etc. Nous ne reviendrons donc pas sur une présentation générale de l'ensemble des problèmes impliqués. Dans ce résumé nous nous bornerons à une brève énumération des sujets que nous avons traités cette année.

I. - Le cours a débuté par un rappel concernant les tests de l'électrodynamique quantique. Les résultats au sujet de l'effet Lamb, de la structure fine et hyperfine, du positronium et du muonium ont été passés en revue. Les nouvelles expériences concernant le $g-2$ du muon et les atomes mésiques, ainsi que leurs implications théoriques, ont été plus particulièrement discutées. Dans le domaine des tests de l'électrodynamique quantique à haute énergie, nous avons considéré l'annihilation électron-positron en deux photons, la diffusion élastique électron-électron et électron-positron, l'annihilation électron-positron en une paire de muons et surtout l'annihilation électron-positron en électron-muon. L'étude de ce dernier processus s'est avérée très importante car elle a conduit à la découverte d'un lepton lourd qui sera discutée ultérieurement.

II. - Plusieurs leçons ont été consacrées aux processus électromagnétiques qui font intervenir l'échange de deux photons dans les réactions du type $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^- + \text{hadrons}$. Ces processus sont *a priori* de l'ordre α par rapport aux phénomènes où un photon virtuel est uniquement présent. Cependant, à haute énergie et pour des configurations particulières pour lesquelles les photons sont quasi-réels (genre espace), le propagateur du photon peut compenser le facteur α de l'ordre supérieur de l'interaction élec-

tromagnétique. Les sections efficaces peuvent donc devenir importantes et même dominer celles qui proviennent de l'échange d'un photon. Ceci est manifestement important pour l'étude du bruit de fond des processus à un photon échangé et pour la nouvelle physique à laquelle les processus à deux photons virtuels donnent lieu. On peut ainsi, par exemple, créer des résonances avec le nombre quantique de conjugaison de charge $C = +1$ qui sont inaccessibles par les processus à un photon. Cette physique est difficile du point de vue expérimental. On assiste à ses premiers essais mais elle est probablement promise, elle aussi, à de grands développements. Nous avons discuté en détail la théorie des réactions avec échange de deux photons. La cinématique et l'approximation des photons quasi-réels ont été présentées, les relations entre les sections efficaces $\gamma + \gamma \rightarrow X$ et $e + e \rightarrow e + e + X$ ont été données, la validité de cette approximation a été discutée. Les sections efficaces pour $X = \mu^+\mu^-, \pi^+\pi^-, K^+K^-, \dots$ ainsi que pour $X =$ résonance avec $C = +1$ ($X = \pi_0, \eta_0, \eta'_0, \dots$) ont été explicitement calculées. Les distributions angulaires et en moment transversal des particules observées ont été présentées. L'étude des processus de ce genre conduit potentiellement à la détermination des vies moyennes des résonances, des facteurs de forme, à certains tests de l'algèbre des courants, du PCAC, etc. Si l'un des photons échangés est hautement virtuel et que l'on n'observe qu'un des hadrons émis, on se trouve en présence d'une diffusion hautement inélastique d'un photon sur une « cible » photon ce qui, en principe, permet la détermination des fonctions de structure correspondantes, l'étude de la diffusion (sous certaines hypothèses) des photons sur des « cibles » mésoniques, donc des tests supplémentaires de l'algèbre des courants. Les sections efficaces sont malheureusement faibles. Nous avons examiné l'ensemble des processus dans lesquels deux photons interviennent, sans ou avec annihilation des électrons-positrons mis en jeu. Certaines de ces réactions pourraient devenir importantes à haute énergie.

III. - La majeure partie du cours de cette année était consacrée aux nouvelles particules découvertes au SLAC et au NAL. Des progrès absolument remarquables ont été effectués du côté expérimental l'année dernière. Toute une nouvelle spectroscopie des particules ψ, χ a été mise en évidence dans le domaine des masses de trois à cinq GeV environ. Nous avons présenté une mise au point extrêmement détaillée de ces très beaux résultats expérimentaux en nous attachant particulièrement à la description des désintégrations du ψ en hadrons, du ψ' en hadrons et en $\psi + 2\pi$, et surtout aux désintégrations radiatives du ψ et du ψ' qui ont conduit à la découverte d'une série de nouvelles résonances (de $C = +1$) dans le domaine des masses entre 3 et 4 GeV. De plus des résonances relativement larges entre 4 et 5 GeV ont été établies. Il semble clair à l'heure actuelle que l'on a affaire à un

système lié de fermion-antifermion dont on observe les différents états, probablement à un système de quark-antiquark peut-être confinés. Une telle possibilité trouve une explication naturelle dans le modèle du charme introduit déjà il y a un certain temps dans le cadre des théories de jauge des interactions électromagnétiques et faibles, le confinement pouvant résulter de la validité absolue de l'invariance de jauge de l'interaction forte agissant sur la couleur des quarks.

Nous avons essayé d'interpréter l'ensemble des résultats expérimentaux dans le cadre du modèle du charme. La généralisation de SU_3 à SU_4 a été présentée. Les formules de masse découlant de SU_4 , ainsi que celles provenant des modèles des quarks, ont été données. La règle de Zweig, nécessaire à la compréhension de la stabilité des ψ , ψ' et χ et de la largeur des ψ'' , ψ''' ..., a été discutée, ce qui nous a conduit à introduire la notion de la liberté asymptotique. Le spectre observé des ψ et des χ s'explique assez bien, tout du moins qualitativement, et même quantitativement (bien que certaines difficultés soient présentes) par le modèle du charmonium. Dans ce schéma, un quark et un antiquark charmés se trouvent liés par un potentiel de type coulombien agissant à courte distance (liberté asymptotique) et un potentiel, linéaire par exemple, responsable de l'interaction à longue distance (confinement). Les calculs sont faits en approximation non-relativiste pour commencer. Le schéma fournit aussi les ordres de grandeur des transitions radiatives. Nous avons discuté en détail ce modèle ainsi que les perfectionnements que l'on doit lui apporter (corrections relativistes, effets dus à la proximité des seuils, etc.). La présence de résonances ψ , ψ' étroites et des ψ'' , ψ''' larges conduit inéluctablement à la prédiction de l'existence de particules proprement charmées dont les masses pour les mésons doivent être autour de 1.9 GeV, et que l'on devra voir un jour dans l'annihilation électron-positron vers les énergies 4-4.5 GeV. Nous avons rediscuté le problème des particules charmées, de leurs masses, de leurs interactions, de leurs désintégrations semi-leptoniques et non-leptoniques, de leurs implications dans les phénomènes de l'annihilation e^+e^- , de leurs modes de production dans les réactions hadroniques, en photo-production et en neutrino-production. En ce qui concerne ces dernières réactions, une attention spéciale a été apportée aux résultats de Gargamelle au C.E.R.N. et du N.A.L. au sujet de la production des dimuons et des paires électron-muon associées avec des particules étranges qui pourraient être les premières manifestations des particules charmées. Dans le contexte de la physique des neutrinos, il nous a semblé intéressant de présenter, dans le cadre des théories de jauge, les différents modèles faisant intervenir les quarks charmés, celui de Salam-Weinberg et ses différentes généralisations vers des modèles à 5-6 quarks, ceci en raison des anomalies possibles dans les réactions antineutrino. Le problème des courants $V + A$ qui pourraient être présents, leurs implications pour les réactions neutrinos à haute énergie, le problème des courants neutres dans de telles

théories, celui de la violation de PC dans les théories de jauge ont été également discutés. Une image assez complète de la physique actuelle du nouveau nombre quantique du charme a pu être ainsi dégagée.

IV. - La mise en évidence des leptons lourds constitue une autre découverte importante effectuée l'année dernière au S.L.A.C. C'est l'étude de l'annihilation e^+e^- en $\mu + e + X$ qui en est à l'origine. On est très probablement en présence de la production d'une paire de leptons lourds (et non de deux particules charmées) se désintégrant l'un en électron, l'autre en muon et leurs neutrinos correspondants. En effet, les électrons et les muons qui ont des énergies supérieures à 650 MeV ne sont associés à aucune trace visible. Cette découverte surprenante a probablement des implications importantes dans la théorie des particules hadroniques en raison des anomalies d'Adler d'origine leptonique et hadronique et qui, dans une théorie de jauge renormalisable, doivent se compenser mutuellement. Entraîne-t-elle l'existence de plus de quatre « saveurs » de quarks ? Il est difficile encore d'y répondre. Pour ceci, une étude détaillée des propriétés des leptons lourds est nécessaire. Nous avons étudié la production des leptons lourds, leurs désintégrations leptoniques, les spectres des leptons produits, les corrélations possibles entre ces leptons dont certaines dépendent de la forme de l'interaction responsable de la désintégration. Nous avons examiné la question des désintégrations semi-leptoniques et des corrélations possibles entre les hadrons produits. Nous nous sommes attachés à la détermination des rapports de branchement des différents modes de désintégration possibles des leptons lourds, lesquels peuvent être raisonnablement estimés dans le cadre des théories courantes. L'existence de leptons lourds dont le seuil de production coïncide plus ou moins avec le seuil des particules charmées influence l'analyse de l'annihilation électron-positron en hadrons. On s'aperçoit que, sans la présence des leptons lourds, l'interprétation de ces phénomènes en termes de particules ordinaires et charmées uniquement ne serait pas aisée et qu'elle conduirait à des résultats difficilement compatibles avec les données, ceci aussi bien dans le domaine des énergies de 4-5 GeV que pour des énergies plus élevées. Nous avons discuté en assez grand détail cet aspect de la question.

Pour conclure, il semble approprié de remarquer que les anneaux de collision électron-positron ont contribué, au delà de toute espérance, à la physique des particules élémentaires. Il est raisonnable de s'attendre à ce que les machines plus puissantes du même type qui seront mises en marche dans les années à venir apporteront des résultats tout aussi surprenants et fondamentaux.