

Physique théorique des particules élémentaires

M. Jacques PRENTKI, professeur

Le cours de cette année a été consacré à l'étude des phénomènes semi-leptoniques à haute énergie. Depuis plusieurs années déjà, l'étude de ces processus a retenu l'attention des théoriciens et des expérimentateurs, et elle a conduit à des développements théoriques assez spectaculaires que nous avons présentés ici même il y a trois ans. Il nous a semblé cependant intéressant de reprendre ces problèmes car de nouveaux et importants progrès ont été récemment enregistrés dans ce domaine aussi bien du point de vue expérimental que théorique. Les nouvelles données en électroproduction et en neutrino-production ont permis de préciser notablement les différents modèles et en particulier celui des partons. La découverte des courants neutres faibles a ouvert un nouveau champ d'applications pour ce modèle qui conduit à des résultats dans l'ensemble satisfaisants, tout au moins pour les réactions dans lesquelles le photon virtuel est du type spatial. D'autres processus, comme la création de paires massives de leptons dans les collisions nucléon-nucléon et surtout le problème de l'annihilation électron-positron à haute énergie vers des systèmes hadroniques, ont été récemment étudiés. Les expériences faites à ce sujet au S.L.A.C. ont conduit à des résultats extrêmement intéressants et tout à fait surprenants qui posent d'emblée le problème de la validité de tout un ensemble d'approches théoriques, et en particulier du modèle des partons, pour les processus où des photons virtuels du genre temporel sont mis en jeu.

Nous avons commencé par une mise au point de la situation expérimentale présente concernant l'électroproduction et la neutrino-production hautement inélastiques. Le modèle des partons et ses différentes formulations ont été présentés et une comparaison de ses prédictions avec les données a été faite. Une étude très détaillée du comportement des sections efficaces, des distributions en transfert d'énergie, en quadrimoment transféré, etc., des règles de somme, a été effectuée. Les implications du modèle pour le problème des courants neutres ont été soigneusement examinées. L'existence des courants neutres, prédits par les théories de jauge, unifiant les interactions électro-

magnétique et faible, impliquent l'existence de nouvelles particules sous la forme de leptons lourds et (ou) de hadrons charmés. En particulier, le modèle des partons permet d'estimer les sections efficaces pour les productions de ces nouvelles particules et les modifications apportées aux distributions en énergies, en quadrimoments transférés, aux règles de somme, etc., modifications dues à la présence éventuelle de ces particules. Il est clair que ce genre d'études expérimentales pourrait s'avérer un jour de première importance. Nous avons enfin constaté que le modèle des partons, particulièrement simple et prédictif, du nucléon à trois quarks décrit à l'heure actuelle l'ensemble des données d'une manière qualitative et même quantitative très satisfaisante.

Le problème de l'électroproduction sur cible et avec projectiles polarisés a été également discuté. Cette étude permet la détermination de nouvelles fonctions de structure et fournit des nouvelles et intéressantes règles de somme comme, par exemple, celle de Bjorken pour la constante de couplage du courant axial.

La production de paires massives de leptons dans les collisions nucléon-nucléon est un phénomène intéressant car il met en jeu des photons du type temporel. Plusieurs modèles proposés à ce sujet ont été discutés, les propriétés d'invariance d'échelle des sections efficaces et leur comportement ont été examinés et l'intérêt expérimental et théorique d'une telle étude pour le modèle des partons, en raison de certaines particularités de ces prédictions, a été souligné.

Les récents résultats du S.L.A.C. concernant l'annihilation électron-positron en hadrons ont constitué la grande surprise de l'année dernière. Toutes les théories, ou presque, s'accordaient à prédire pour la section efficace totale de ce processus une décroissance proportionnelle au carré de l'énergie initiale. On observe plutôt une section efficace constante, ce qui contredit l'invariance d'échelle et rend caducs les arguments simples découlant d'une analyse purement dimensionnelle. De même, les sections efficaces inclusives (un hadron observé dans l'état final) ne suivent pas l'invariance sous la dilatation. Enfin, le rapport du nombre des hadrons neutres sur celui des hadrons chargés n'est pas conforme aux prévisions. Il y a ici une difficulté — peut-être provisoire — non seulement pour le modèle des partons, mais aussi pour toute une catégorie de modèles ou théories traitant des comportements des sections efficaces dans des conditions, à première vue, asymptotiques de l'énergie. Il se pourrait que les énergies du S.L.A.C. ne correspondent pas aux conditions asymptotiques pour les processus d'annihilation et plus généralement pour les processus mettant en jeu des photons du type temporel. Mais pourquoi alors observe-t-on une invariance d'échelle précoce dans l'électroproduction ou la neutrino-production où les particules virtuelles (photons, bosons intermédiaires) sont du type spatial ? Cette question n'a pas trouvé encore de réponse satisfaisante.

Néanmoins, les résultats du S.L.A.C. ont provoqué une importante activité théorique et il nous a semblé indiqué de discuter d'une manière critique les travaux récents et nombreux consacrés à ce sujet et à ses implications.

La seconde et majeure partie de ce cours a été centrée sur les développements théoriques formels dans l'étude des processus semi-leptoniques à haute énergie. Il est facile de s'apercevoir que, dans la limite asymptotique de Bjorken (grand transfert d'énergie, grand transfert du quadrimoment carré avec rapport de ces deux quantités fixé), la section efficace inclusive est dominée par le comportement, et plus précisément par les singularités dominantes, sur le cône de lumière et de son environnement immédiat des produits ou des commutateurs des courants faibles ou électromagnétiques. L'étude de ces processus fournit donc des indications sur la structure même de ces courants, ce qui est d'une importance capitale pour toute théorie de champs réaliste prétendant décrire les interactions fondamentales, et en particulier les interactions fortes, auxquelles sont sensibles les éléments de matrice des courants mentionnés ci-dessus.

Il n'est pas question de donner ici un aperçu, même incomplet, de ce formalisme car ceci nous entraînerait trop loin. Mentionnons seulement qu'un outil de choix pour l'étude formelle des phénomènes est le développement à courtes distances et sur le cône de lumière de produits d'opérateurs proposé par Wilson. Ce développement est par ailleurs de grande importance pour l'étude de toute une série de phénomènes dans d'autres branches de la physique. Nous l'avons discuté en détail et nous avons examiné les conditions de sa validité. Nous avons montré comment l'étude des fonctions de structure de l'électro et de la neutrino productions et de leurs moments permet de déterminer les coefficients de ce développement. Nous avons aussi introduit la notion de courants bilocaux et examiné les relations entre leurs éléments de matrice et les fonctions de structure. Nous avons enfin décrit l'algèbre des courants bilocaux sur le cône de lumière, algèbre inspirée par le modèle des quarks libres. Il est intéressant, sinon fondamental, de constater que l'invariance d'échelle de Bjorken découle de commutateur des courants de champs libres. La question importante est de savoir alors si une théorie perturbative des champs conduit à une telle invariance, problème que nous avons discuté. Dans ce contexte, nous avons mentionné, mais malheureusement par manque de temps nous n'avons pas pu approfondir comme ceci le méritait, les nouveaux et importants développements de la théorie dite de « liberté asymptotique ». Nous y reviendrons assurément un jour. Toujours dans le formalisme du cône de lumière, nous avons examiné aussi les autres processus semi-leptoniques mentionnés il y a quelques instants. Il nous a semblé intéressant de comparer les prédictions du modèle général des partons avec celles de l'analyse sur le cône de lumière et de montrer que, dans les cas de l'électroproduction et de la neutrino production, il y a équivalence totale entre

ces deux approches, ce qui n'est pas exact pour l'annihilation et pour la production de paires massives de leptons dans les collisions nucléon-nucléon.

Il est clair que l'étude des processus semi-leptoniques a marqué profondément la physique des hautes énergies et que cette étude continuera à jouer dans ce domaine un rôle prépondérant dans les quelques années à venir.