

## Physique théorique des particules élémentaires

M. Jacques PRENTKI, professeur

Le cours de ces deux dernières années a porté sur les interactions semileptoniques. C'est un domaine où des progrès très notables ont été effectués récemment, et ceci aussi bien du point de vue expérimental que du point de vue théorique. Il s'agit surtout de la partie haute énergie de ces phénomènes pour laquelle les très belles expériences du SLAC concernant la diffusion profondément inélastique des électrons et ensuite celles du CERN au sujet des processus correspondants de la neutrino-production ont apporté des résultats très surprenants. Ceux-ci ont provoqué des développements importants dans la théorie des particules élémentaires. A titre d'exemple, on peut citer l'algèbre des courants sur le cône de lumière, le modèle des partons ou encore les modèles duaux. Une discussion très détaillée des données et de leurs nombreuses implications théoriques a constitué la première partie de ce cours. Différents modèles ou théories ont été en effet proposés et il nous a semblé important de les présenter, les discuter et les comparer.

Les réactions des neutrinos à énergies moyennes et basses, bien que constituant un domaine plus classique et moins mouvant, sont aussi intéressantes. Elles permettent d'étudier un ensemble de règles de sélection et les prédictions découlant du ou des Lagrangiens phénoménologiques décrivant les interactions faibles. Il en est de même pour les désintégrations semileptoniques. C'est la description de ces phénomènes de la physique du neutrino à moyenne et basse énergie qui a constitué la seconde partie de ce cours.

La troisième partie a été consacrée à certains développements très récents dans le domaine des interactions faibles. Deux résultats expérimentaux, s'ils sont confirmés, pourraient être d'une très grande importance. Le premier concerne la désintégration  $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Le rapport de branchement semble être plus faible que  $1,8 \cdot 10^{-9}$ , violant ainsi une limite déduite de l'unitarité sous l'hypothèse de la conservation de PC. Ce résultat très inattendu a donné lieu à des considérations théoriques intéressantes, comme par exemple l'introduction d'une forte violation de PC ou même d'une violation de PCT ou encore l'introduction de nouvelles particules. Il n'est pas douteux que l'on

se trouve ici en présence d'une énigme qu'il fallait discuter soigneusement. Le deuxième résultat concerne certaines expériences de Wilkinson et coll. indiquant peut-être des effets de courants dits de seconde espèce dans des transitions  $\beta$  des noyaux miroirs. Ce problème est déjà bien ancien et aucun schéma théorique des interactions faibles ne s'accommode facilement de la présence de ces courants. Ceci méritait aussi une analyse détaillée des données expérimentales et des implications théoriques.

Du point de vue purement théorique, on a assisté l'année dernière à un essai d'unification extrêmement élégant et peut-être profond des interactions électromagnétique et faible. Jusqu'à présent, les interactions faibles, contrairement aux interactions électromagnétiques, étaient décrites par des Lagrangiens phénoménologiques et ceci soit en théorie de Fermi, soit en celle du boson intermédiaire. Ces Lagrangiens conduisaient à des théories essentiellement non renormalisables, donc à une impossibilité d'estimation univoque des effets d'ordre supérieur. Il se trouvait que l'ordre le plus bas de la perturbation fournissait des résultats qui se comparaient favorablement aux données. Cette situation cependant était loin d'être satisfaisante. Weinberg et Salam, faisant intervenir la théorie des champs de jauge de Yang et Mills et un mécanisme particulier dû à Higgs fournissant des masses aux particules, ont formulé une théorie des interactions faibles englobant simultanément l'électromagnétisme. T'Hofft, Veltman et B. Lee ont sans doute démontré la renormalisation de cette théorie. Il semble bien que l'on soit en présence d'un progrès très important. Cette théorie et les différents modèles que l'on peut formuler dans son cadre, donnent lieu à des prédictions expérimentalement vérifiables ; citons, à titre d'exemple, l'existence de certains courants neutres, de leptons lourds ou de hadrons super-étranges ou « charmés ». Cette théorie n'est pas encore définitivement formulée, surtout pour l'interaction faible des hadrons. Elle est en pleine évolution. Il nous a semblé indiqué cependant, vu son importance probable pour le futur, d'en donner les traits essentiels, de discuter ses bases et ses prédictions.

Dans ce qui suit, nous donnons un résumé bref de ce qui a été présenté.

## I. — *Diffusion profondément inélastique*

### A. — *Electroproduction*

1) Cinématique et sections efficaces de l'électroproduction à haute énergie.

Approximation de l'échange d'un photon. L'élément de matrice leptonique parfaitement déterminé. L'élément de matrice hadronique, sa forme générale

et sa décomposition en termes des fonctions de structure. La section efficace exprimée à l'aide des fonctions de structure. Les conditions de positivité. L'invariance de jauge et ses contraintes. Relations entre les fonctions de structure de l'électroproduction et l'amplitude de la diffusion Compton d'un photon lourd vers l'avant. Les sections efficaces longitudinales et transverses. Conditions sur les fonctions de structure  $W_1$  et  $W_2$ .

2) Résumé des données. Présentation très détaillée des résultats du SLAC.

Comportement dans le domaine des résonances et pour des masses invariantes du système final plus grandes que 2 BeV. Dépendance des sections efficaces en fonction de  $q^2$ . Les fonctions  $W_1$  et  $W_2$ , les sections efficaces longitudinales et transversales et leur rapport. Les différentes limites de hautes énergies. La limite de Bjorken. L'invariance par rapport à l'échelle de  $W_1$  et  $\nu W_2$ . La variable  $\omega$ . Les autres variables possibles. Comportement de  $F_2 = \nu W_2$  pour les grands  $\omega$ . Les différentes régions de  $\omega$  et discussion détaillée de l'invariance qui est précoce. Discussion des données de l'électroproduction sur le neutron et comparaison avec celles sur le proton.

3) Discussion générale des données et de leurs interprétations possibles.

4) Le modèle des partons.

Quelques considérations inspirées par l'analogie avec les processus de diffusion en physique moléculaire et nucléaire. Le nucléon considéré comme un objet essentiellement composé et le modèle des partons. Le rôle de la haute énergie, des grands transferts d'énergie et des grands  $q^2$ . Justification de l'approximation de l'impulsion dans le système du moment infini et discussion de ce système. Hypothèses fondamentales du modèle des partons :

a) le nucléon constitué de  $N$  partons ponctuels et libres dans le système  $p \rightarrow \infty$  ;

b) les moments transverses des partons sont faibles ;

c) dans le système  $p \rightarrow \infty$ , la diffusion inélastique sur le nucléon est décrite par une somme incohérente de diffusion élastique sur tous les partons constituants, les partons restant sur leur couche de masse.

Calcul des fonctions de structure du nucléon en terme de celles des partons. L'invariance d'échelle automatique. Les partons de spin 1/2 favorisés par les résultats du SLAC et la formule de Callan-Gross. Interprétation de  $F_2$  en terme de la valeur moyenne du carré de la charge des partons. Les règles de somme faisant intervenir la valeur moyenne des sommes des carrés des charges des partons et celle de la charge carrée par parton. Comparaison avec l'expérience et le problème de l'introduction des gluons.

Les différents modèles des partons. Le modèle symétrique, le modèle avec les quarks de valence et la mer, le modèle général et leurs prédictions pour l'électroproduction.

5) Modèles des partons dans la théorie des champs. Le modèle de Drell et Yan. Description générale de ce modèle, ses prédictions et ses possibles généralisations aux processus d'annihilation. Comportement des fonctions de structure pour  $\omega = 1$ . Le problème du croisement.

6) Modèle de la dominance vectorielle.

Possibilités d'avoir une invariance d'échelle dans ce modèle. Mauvais comportement des sections efficaces longitudinales. Critique de la dominance vectorielle dans les processus de diffusion hautement inélastique.

7) Les modèles de Regge et diffractifs.

Introduction dans la théorie des processus en question du modèle des pôles de Regge. Les différentes limites de hautes énergies. Regge versus Bjorken. Combinaison de la limite correspondant à la théorie des pôles de Regge avec celle correspondant à l'invariance d'échelle. Implications sur le comportement des fonctions de structure.

8) Le modèle de Harari.

Introduction dans les considérations des règles de somme à énergies finies. Le rôle des résonances et du Poméron dans le processus considéré. Analyse critique de ce modèle.

9) Le modèle dual de Bloom et Gilman.

Traitement correct des FESR et du Poméron dans le contexte de l'électroproduction. Les résonances ne sont pas des entités séparées, mais constituent une partie essentielle du comportement invariant d'échelle de  $\nu W_2$  et une partie substantielle de cette invariance dans la diffusion inélastique est de nature non diffractive. Discussion de ce modèle et de ses prédictions.

10) Application du modèle de Veneziano aux processus de diffusion inélastique des électrons.

11) Comparaison des prédictions et des propriétés des différents modèles discutés.

## B. — *La neutrino production*

Le plan général de cette section est très semblable à celui de I.A. Nous indiquons donc seulement les points essentiellement nouveaux.

1) Les sections efficaces. Les fonctions de structure. L'absence de l'invariance de jauge et la violation de la parité conduisent à six fonctions de structure qui se réduisent à trois si la masse des leptons est négligée. Les sections efficaces pour neutrinos et antineutrinos sur protons et neutrons. Les relations dues au spin isotopique.

2) Modèle des partons.

Assez analogue à I.A. Les réactions neutrinos testent les nombres moyens des partons. Calcul des  $W_1$  des protons et des neutrons en terme de celles des partons. Relations et possibilités de règles de somme. Relations entre les fonctions de structure de l'électroproduction et de la neutrino production. Le rôle de la charge des partons. Le modèle des quarks. Les règles de somme d'Adler, de Bjorken, de Gross-Llewellyn Smith déduites de ce modèle. Les autres règles de somme pour les fonctions de structure. Possibilités de nombreux tests expérimentaux. Les règles de somme pour les premiers moments des fonctions de structure et les sections efficaces totales. L'invariance d'échelle et le comportement en énergie de la section efficace totale. Les différents modèles de partons et leurs implications sur l'électroproduction et la neutrino production. Comparaison avec l'expérience. La présence des gluons. Prédications du modèle quant aux expériences futures.

Formulation du modèle des partons due à Nachtmann et son utilité pour une comparaison avec les résultats déduits de l'algèbre des courants ou de l'algèbre sur le cône de lumière.

3) Le modèle des partons dans la théorie des champs, celui de la dominance vectorielle, les modèles diffractifs, de Harari, de Veneziano et la neutrino production.

4) Dédution des règles de somme dans le cadre de l'algèbre des courants.

Rappel sur l'algèbre des courants à temps égaux. Dédution de la règle de somme d'Adler dans le cadre du système du moment infini. La formule d'Adler reliant la section efficace des neutrinos vers l'avant avec la section efficace totale  $\pi$  nucléon. Les inégalités de Bjorken pour la photoproduction. Dédution de la règle de somme d'Adler à l'aide des relations de dispersion. La règle de somme de Gell-Mann, Dashen, Fubini. La règle de somme d'Adler-Weisberger et de Cabibbo-Radicati comme cas particuliers de celle d'Adler. Approche formelle aux règles de somme par l'algèbre des courants. La formule asymptotique de Bjorken exprimant le commutateur de deux courants à l'aide des commutateurs de ces courants à temps égaux et de leurs dérivées. Méthode générale permettant d'obtenir des règles de somme. Les relations et la règle de somme de Callan-Gross, les règles de somme de

Bjorken, de Llewellyn Smith, résultant de l'algèbre des courants. Les règles de somme pour les différents moments des fonctions de structure et la possibilité de tester les commutateurs des courants et de leurs dérivées par les expériences d'électro et de neutrino production. Comparaison des résultats du modèle des partons avec ceux découlant de l'algèbre des courants. Discussion de la sensibilité des règles de somme aux modèles des interactions fortes comme celui du gluon par exemple.

## II. — *Les réactions des neutrinos à basse et moyenne énergie*

### *Introduction*

Les interactions purement leptoniques et le caractère phénoménologique de la théorie. Les effets d'ordre supérieur et le problème des coupures. Propriétés des courants leptoniques et des courants hadroniques et les règles de sélection. Les hypothèses du courant conservé et de l'isotriplet du courant, généralisation à  $SU_3$  et les courants de Cabibbo, les courants axiaux et le PCAC, l'algèbre des courants. Discussion approfondie des données concernant les propriétés générales des courants.

### A. — *Les désintégrations leptoniques des hypérons*

1) L'élément de matrice général pour les transitions  $\beta$ . Les différents facteurs de forme. Introduction de la théorie de Cabibbo et les relations entre les facteurs de forme correspondants des différentes transitions. Les facteurs de forme F et D et leurs propriétés.

2) Les facteurs de forme du courant vectoriel. Les facteurs de forme de Dirac, le magnétique et le scalaire induit. Les propriétés des courants du point de vue de la parité G et du renversement du temps. Les courants de 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> espèce. Implications sur les facteurs de forme de l'invariance sous T, G et la symétrie de charge dans le cadre de la théorie de Cabibbo. La cassure de  $SU_3$  et discussion de ces effets.

3) Les facteurs de forme pseudovectoriels.

Rôle des courants de 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> espèce. Les facteurs de forme axial et pseudo-scalaire induit. Le PCAC et la formule de Goldberger-Treiman. Discussion détaillée des propriétés du facteur de forme pseudoscalaire induit et de la situation expérimentale.

4) Etude détaillée des différents aspects des désintégrations baryoniques et la détermination des facteurs de forme.  $f_1^2 + 3g_1^2$  est déterminé par

les taux de désintégration,  $|g_1/f_1|$  par la corrélation électron-neutrino et la polarisation moyenne du baryon émis dans la direction de la polarisation du baryon initial. Le signe (et la phase) de  $g_1/f_1$  sont mesurés par exemple à partir du spectre en énergie des leptons ou des asymétries des produits de la désintégration provenant d'un baryon polarisé et ainsi de suite.

5) Applications de ce qui précède aux désintégrations des baryons. Discussion détaillée des résultats expérimentaux. Ajustement des paramètres de la théorie de Cabibbo aux données. Détermination de l'angle de Cabibbo et du rapport F/D dans les cas d'ajustement à un ou deux angles. Excellent accord entre la théorie et l'expérience. Discussion du problème important des différences de masse des baryons ou, autrement dit, de la cassure de  $SU_3$ , permettant des ajustements différents, tout aussi valables, et impliquant une faible sensibilité de la théorie de Cabibbo aux différences des masses.

## B. — Les réactions neutrinos

1) Propriétés générales des réactions neutrinos. Tests des règles de sélection du type  $|\Delta S| \leq 1$ ,  $\Delta S = \Delta Q$ ,  $|\Delta \vec{I}| = 1/2 \Delta S = 1$ ,  $\Delta I = 1/2$ ,  $s_S = 0$ , de l'hypothèse courant-courant, de la localité, etc. Discussion des résultats expérimentaux concernant ces propriétés.

2) Forme générale des sections efficaces et les fonctions de structure.

Les polarisations du lepton final et le problème de l'invariance sous le renversement du temps. Discussion des tests possibles. Le CVC et PCAC dans les réactions neutrinos et les théorèmes d'Adler.

3) Les réactions neutrinos purement leptoniques. Les interactions « diagonales », l'universalité de Fermi, possibilité de tests de la théorie en V-A allant au delà de l'évidence provenant de la désintégration du  $\mu$ . Interactions des neutrinos dans le champ Coulombien d'un noyau.

4) Les réactions quasi-élastiques semileptoniques. Le rôle des invariances sous le renversement du temps, de la symétrie de charge, du CVC, etc., sur les facteurs de forme. Importance et détermination de ces derniers dans les réactions neutrinos. Le problème des polarisations du nucléon final et celui des polarisations du lepton final. Intérêt et difficultés d'une telle étude. Les réactions neutrinos avec  $\Delta S = \pm 1$ . Comparaison avec les résultats expérimentaux disponibles. Description des faisceaux futurs et du programme concernant l'étude de la physique du neutrino au NAL (300 GeV).

5) La production de  $\pi$  dans les réactions neutrinos. Ces réactions ont été discutées en détail, surtout la production d'un  $\pi$  par l'intermédiaire du  $N^*$

dans le cadre du modèle statique et par la méthode dispersive due à Adler. Le rôle du PCAC a été examiné. Le sujet étant cependant assez technique, nous nous bornons à ces quelques remarques.

### III. — *Quelques aspects récents de la physique des interactions faibles*

#### 1) *Le problème des courants de seconde espèce*

Les courants de seconde espèce et les différentes classes de ces courants en fonction de leurs propriétés de transformation. Différences observées entre les valeurs de  $ft$  des noyaux miroirs émetteurs  $\beta^+$  et  $\beta^-$ . Etude de la dépendance en fonction des énergies de transitions de la différence de  $(ft)^+$  et  $(ft)^-$ . Le système  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2 \alpha$ . Implications d'un terme pseudotensoriel induit et les ambiguïtés présentes du fait que les nucléons ne sont pas sur leurs couches de masse. Les courants de seconde espèce conservé, les courants d'échange semblent exclus par l'expérience concernant le système avec  $A = 8$ . Discussion des autres possibilités théoriques en général peu attrayantes et surtout étude des effets nucléaires. Nécessité de nouvelles expériences dans ce domaine.

#### 2) *Le problème de la désintégration $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$*

Le résultat de Berkeley concernant le rapport de branchement de cette transition. Limite sur les courants neutres  $\Delta S = \pm 1$ . Les relations de l'unitarité et l'existence d'une borne inférieure pour le rapport en question. Calcul de celle-ci en supposant la conservation de PC et la domination de l'état intermédiaire  $2 \gamma$ . Incompatibilité entre les résultats expérimentaux et la théorie. Discussion des contributions des autres états comme  $3 \pi$ ,  $\pi\pi\gamma$ , etc., qui se trouvent très faibles. Introduction de la violation de PC dans les considérations, les contributions des états intermédiaires à  $2 \pi$ ,  $3 \pi$ ,  $\pi\pi\gamma$ ,  $2 \gamma$  dans les relations de l'unitarité. Dédution des limites pour la désintégration  $K_S \rightarrow \mu\mu$ , et intérêt d'une mesure précise du rapport de branchement de cette réaction. Le  $K_S \rightarrow 2 \gamma$  et l'impossibilité d'une théorie superfaible (le résultat de Berkeley étant admis). Implication d'une violation relativement forte de PC, probablement dans l'interaction électromagnétique, et les difficultés qu'elle entraîne. Possibilité d'interprétation du processus  $K_L \rightarrow 2 \mu$  à l'aide d'une faible violation de PCT. Introduction de nouvelles interactions ou de nouvelles particules; les modèles de Wolfenstein, Segal, Alles et Pati, etc. Comparaison des prédictions, des difficultés et des mérites respectifs des schémas proposés pour l'explication de ce résultat expérimental bien étrange et bien surprenant.

3) *Une théorie renormalisable des interactions faibles*

Le Lagrangien phénoménologique et les infinis dans la théorie. Discussion de certains schémas proposés précédemment. Le Lagrangien des interactions électromagnétiques et le rôle de la conservation du courant et de l'invariance de jauge dans la renormalisation. La théorie des champs de Yang et Mills et le problème des masses. Le groupe de jauge, sa cassure. Le mécanisme de Higgs. Le modèle de Weinberg-Salam pour les interactions électromagnétique et faible purement leptonique. Le groupe  $SU_2 \times U_1$ . La présence de courants neutres et leurs effets sur les sections efficaces leptoniques. Possibilités de tests expérimentaux. Essai de généralisations aux interactions faibles des hadrons. Le problème du courant neutre  $\Delta S = 1$  et nécessité d'introduction, dans le cadre de cette théorie, d'un groupe de symétrie des interactions fortes plus larges que  $SU_3$  — par exemple de  $SU_4$  — impliquant l'existence d'une nouvelle famille de hadrons. Présence d'un courant neutre  $\Delta S = 0$ . Importance des expériences neutrinos dans le contexte des prédictions du modèle de Weinberg ou d'autres modèles depuis lors proposés.