## Physique théorique des particules élémentaires

M. Jacques Prentki, professeur

Le cours de cette année était intitulé : *L'Algèbre des Courants, l'Algèbre des Champs et les Lagrangiens phénoménologiques.*

L'algèbre des courants a été pendant quelques années un des centres principaux de l'activité d'un grand nombre de physiciens travaillant dans le domaine des particules fondamentales. Elle a conduit à des progrès notables dans la compréhension des phénomènes liés tout aussi bien aux intéractions fortes qu'électromagnétiques et faibles. L'idée en revient à Gell Mann qui la formula en 1962 environ. Son développement date de 1965, lorsque l'introduction de nouvelles techniques permit son exploitation complète. Elle fut introduite pour diverses raisons ; citons-en deux. L'application de la théorie des groupes aux symétries internes des particules se heurte depuis plusieurs années à des difficultés qui semblent insurmontables. Après quelques succès retentissants du groupe $SU_6$, les essais de sa généralisation relativiste se sont soldés par un échec. La symétrie $SU_3$ elle-même est une symétrie assez fortement brisée. Il est bien connu cependant qu'elle a conduit à une série de résultats très satisfaisants dans le domaine des intéractions fortes, électromagnétiques et faibles, ceci en appliquant le calcul des perturbations à l'intéraction moyennement forte. Or, il n'y a aucune raison de croire a priori qu'une telle hypothèse soit en fait raisonnable.

Une nouvelle méthode basée sur les propriétés algébriques des opérateurs de charge, de densité de charge ou des courants a donc été introduite ; l'idée en est la suivante. Si $SU_3$, par exemple, était une symétrie exacte, on aurait, par le théorème de Noether, huit courants conservés, donnant lieu à huit charges conservées associées aux générateurs du groupe et obéissant aux règles de commutation de l'algèbre $SU_3$. Dans le cas d'une symétrie, même fortement brisée, il est tout à fait concevable que les règles de commutation de ces charges restent inchangées, même en présence d'un intéraction relativement forte responsable de la brisure de la symétrie. Des modèles ayant cette propriété peuvent être construits et il se pourrait que la réalité physique corresponde à une telle situation. Malgré donc une cassure relativement forte de la symétrie rendant ses prédictions directes inexactes ou franchement mauvaises, il en subsisterait néanmoins un « souvenir » se manifestant dans les règles de commutation des courants ou des charges, propres à l'intéraction très forte conservant le groupe. Si ces courants ou charges sont de plus responsables des intéractions électromagnétiques et faibles, on imagine facilement les grands avantages qu'une telle possibilité peut fournir. La présence du courant axial dans les intéractions faibles conduit à considérer une algèbre de charges plus large que l'algèbre $SU_3$ à savoir l'algèbre $SU_3 \times SU_3$ (ou $SU_2 \times SU_2$ si on se limite au groupe du spin isotopique). Une exploitation systématique, à l'aide de techniques appropriées, de ces règles de commutation conduit à une série de résultats tout à fait impressionnants. L'identification de la divergence du courant axial au champ des mésons $\pi$ (autrement dit l'hypothèse PCAC de la dominance par le pôle du $\pi$ de la divergence du courant axial) permet de relier les éléments de matrice des processus où interviennent des mésons $\pi$ à des éléments de matrice correspondants du courant axial. L'introduction des relations de dispersion où la méthode du repère de moment infini conduit à une série de règles de somme dont la plus fameuse est celle d'Adler-Weisberger reliant la constante de couplage $g_A$ de l'intéraction faible aux sections efficaces totales $\pi$ nucléon. L'utilisation judicieuse de la formule de réduction conduit à une série de théorèmes de basse énergie absolument remarquable. L'identification des courants vectoriels et axiaux aux champs des nonets correspondants donne l'algèbre des champs qui apporte certaines précisions sur les termes dits de Schwinger de l'algèbre des courants. Enfin, il est possible de construire des Lagrangiens qui contiennent les propriétés désirées de l'algèbre des courants et du PCAC et qui, en particulier, permettent de retrouver facilement les théorèmes de basses énergies. On peut espérer que ces « Lagrangiens phénoménologiques » seront utiles pour la construction d'une théorie Lagrangienne plus réaliste des particules élémentaires.

Nous n'avons pas épuisé l'ensemble de ce sujet qui sera donc poursuivi l'année prochaine. Nous avons présenté et discuté d'une manière très complète les théorèmes de basse énergie et leurs différents aspects théoriques. Là où c'était possible, une comparaison très détaillée entre les prédictions théoriques et les données expérimentales disponibles a été faite.

Dans ce qui suit, nous donnons le plan schématique de ce qui a été présenté cette année.

1) *Introduction*

Les symétries $SU_3$, $SU_6$. Difficultés liées à la généralisation relativiste de ce dernier groupe. Le problème de l'intéraction moyennement forte en $SU_3$. Idée fondamentale de l'algèbre des courants : malgré une brisure relativement forte de la symétrie, les règles de commutation à temps égaux des charges et des courants restent inchangées. Possibilités de règles de somme. Quelques exemples : le théorème d'Ademolo-Gatto, certains résultats de $SU_6$ retrouvés par l'algèbre de ce groupe et la saturation des commutateurs à l'aide des états intermédiaires les plus bas.

2) *Théorème de Noether et ses applications*

Les courants conservés, les charges et leurs propriétés. Règles de commutation à temps égaux des courants. Les charges et les générateurs du groupe. Les courants non conservés ou partiellement conservés ; les charges correspondantes et leurs règles de commutation. Les divergences des courants non conservés. Quelques exemples : le courant du spin isotopique, le courant axial et sa divergence dans certains modèles Lagrangiens.

3) *Le modèle des quarks et l'algèbre* $SU_3 \times SU_3$

Règles de commutation des charges et des courants. Autres modèles possibles : intéraction $\pi$ nucléon du type pseudo-scalaire, pseudo-vectorielle. Le modèle $\sigma$ et le groupe $SU_2 \times SU_2$. Généralisation du modèle $\sigma$ à l'algèbre $SU_3 \times SU_3$.

4) *Les termes de Schwinger et leur rôle*

5) *L'hypothèse de CVC et ses applications immédiates*

6) *L'hypothèse du PCAC ou PDDAC*

Différents aspects ou formulations de cette hypothèse. La version de la dominance de la divergence du courant axial par le pôle du $\pi$, celle de la théorie des champs, celle de la masse zéro du $\pi$. Quelques applications et résultats en particulier la formule de Goldberger-Treiman. Discussion générale de cette hypothèse et de sa validité. Le problème d'extrapolation. Généralisation de la formule de Goldberger-Treiman aux mésons K. Relations entre les couplages des intéractions faibles semi-leptoniques et ceux des intéractions fortes. Les rapports F/D. Discussion de la validité du PCAC dans le cas des courants $\Delta S = \pm 1$.

7) *L'algèbre des courants et l'universalité*

8) *Théorèmes de basse énergie et l'algèbre des courants dans la physique des mésons*

a) Rappel des théorèmes et des propriétés concernant les photons mous. Diffusion Compton sur proton, théorème de Kroll-Ruderman.

b) Définition d'un pion de basse énergie. Possibilité de calculer un processus $i \rightarrow f + \pi$ à partir de l'élément de matrice de la réaction $i \rightarrow f$ utilisant l'algèbre des courants.

c) Possibilités d'obtenir ces théorèmes à l'aide d'autres méthodes comme l'invariance de jauge généralisée — conditions sur les divergences des courants.

d) Les trois types de théorèmes concernant les pions de basse énergie.

(i) Emission d'un seul pion mou dans un processus fort.

(ii) Emission d'un seul pion mou en présence d'une perturbation extérieure (faible ou électromagnétique).

(iii) Emission de plusieurs pions mous.

9) *Emission d'un pion dans un processus fort*

Le rôle du PCAC. Les différents graphes et leur pôle. Le passage à la limite $q_\mu \to 0$. La règle d'Adler permettant de calculer $\alpha \to \beta + \pi$ en fonction de $\alpha \to \beta$ en attachant à chaque ligne extérieure le pion avec couplage gradient. Ceci signifie que le calcul des perturbations à l'ordre le plus bas en théorie pseudo-vectorielle du méson est exacte pour l'émission d'un pion mou. Quelques applications : la diffusion $\pi\pi$ ; le calcul de l'amplitude de diffusion $\pi N$ à basse énergie ; la condition de self-consistence d'Adler. Discussion du problème de l'extrapolation à la région physique. Les processus de production d'un pion mou tels que $NN \to NN\pi$ ou $NN \to D + \pi$ dans le cadre des théorèmes de basse énergie.

10) *Emission d'un pion dans une perturbation externe*

Formalisme général. Les produits ordonnés dans le temps. La formule de réduction. Le rôle du PCAC et l'intervention des commutateurs. Passage à la limite $q_\mu \to 0$. Formule fondamentale reliant l'élément de matrice du processus $\alpha \to \beta + \pi$ à celui du commutateur de la charge axiale avec l'opérateur représentant la perturbation évalué entre les états $\alpha$ et $\beta$. Discussion des problèmes liés à l'extrapolation de $q_\mu \sim 0$ vers la région physique.

11) *La chaîne des désintégrations $K \to l\nu$, $K \to \pi l\nu$, $K \to \pi\pi l\nu$*

Relations entre ces processus qui découlent des théorèmes de basse énergie. Formule de Callan-Treiman exprimant la somme des facteurs de forme $f_+$ et $f_-$ de la désintégration $K_{l3}$ en fonction de $f_K$ caractérisant $K_{l2}$. Introduction de $SU_3$. Comparaison avec les données expérimentales. Difficultés liées à l'extrapolation en énergie. Le processus $K_{l4}$ et ses facteurs de forme $F_1$ et $F_2$ donnés par ceux de la désintégration $K_{l3}$. Le facteur de forme $F_3$ et sa variation rapide en fonction de l'énergie. Le rôle du pôle présent dans l'expression de ce facteur de forme et l'évaluation de sa contribution à l'aide de l'intéraction $K\pi K\pi$. Remarques sur l'intéraction $\pi\pi$. Comparaison avec les résultats expérimentaux.

12) *Désintégrations non leptoniques des hypérons*

Le Lagrangien fondamental, son caractère chiral et ses propriétés de commutation avec les charges. Absence de pôle ou pôles lointains pour l'onde S de la désintégration $B \to B\pi$ d'où situation favorable à l'application des théorèmes de basse énergie. Discussion de l'onde S. La règle $\Delta I = 1/2$ pour $\Lambda \to N\pi$ et $\Xi \to \Lambda\pi$. Le problème de cette dernière dans le cas du $\Sigma$, à savoir mauvais signe de l'amplitude S, $\Sigma_{++}$. Différentes possibilités : ou bien $\Sigma_{++}$ est accidentellement zéro, ce qui est compatible avec l'expérience ; l'algèbre des courants entraîne dans ce cas la règle $\Delta I = 1/2$ ; ou encore, la règle $\Delta I = 1/2$ est postulée, et on prouve que $\Sigma_{++} = 0$. Introduction de $SU_3$. Problème similaire avec la formule de Lee-Sugawara et l'apparence de l'intéraction à un octet. Analyse quantitative de l'onde S en supposant que le Lagrangien faible est membre d'un octet. Toutes les ondes S des désintégrations $B \to B + \pi$ s'expriment en fonction de deux paramètres qui sont les couplages F et D du spurion (ou Lagrangien faible) aux baryons. Comparaison extrêmement satisfaisante des prédictions théoriques aux données. Possibilité de relier l'onde S de $B \to B\pi$ à la différence des masses dans l'octet, ce qui ne va pas sans difficultés.

Le problème de l'onde P. La présence de pôles proches rend ici les prédictions de l'algèbre des courants très suspectes. Ceci est lié à la variation extrêmement rapide de l'amplitude lors de l'extrapolation du point $q_\mu = 0$ à la couche de masse. Des modèles spécifiques doivent être introduits. Discussion de certains de ces modèles et de leurs prédictions. Justification, par l'algèbre des courants, de l'approximation de Born pour l'onde P. Essais, pas tout à fait satisfaisants, de la description simultanée des ondes S et P dans les désintégrations $B \to B\pi$.

13) *La désintégration $K \to 2\pi$*

Le formalisme permet de relier l'amplitude de ce processus à celle de la transition $K \to$ vide. La règle $\Delta I = 1/2$ est donc obtenue. Une analyse plus détaillée montre la présence d'un pôle qui ne contribue cependant qu'à $A_{1/2}$. Au cours de l'extrapolation, $A_{3/2}$ varie peu, reste donc faible, ce qui donne une règle $\Delta I = 1/2$ approchée en accord avec les données.

14) *La désintégration $K \to 3\pi$*

La technique de l'algèbre des courants relie les processus $K \to 3\pi$ et $K \to 2\pi$. La règle $\Delta I = 1/2$ prouvée précédemment est donc ici aussi valable en première approximation. Le théorème de basse énergie n'est appliqué qu'à un des $\pi$, les deux autres étant maintenus sur leur couche de masse. Dans l'esprit du PCAC, la dépendance de l'élément de matrice en $q_3^2$ est négligée. Celui-ci est cependant une fonction linéaire des énergies totales des pions $E_i$. Le Lagrangien de l'intéraction faible est chiral. Sous ces hypothèses et tenant compte de la statistique de Bose pour les mésons $\pi$ les paramètres décrivant les éléments de matrice $K \rightarrow 3\pi$ sont entièrement donnés par celui qui caractérise la désintégration $K \rightarrow 2\pi$. Plus précisément, l'algèbre des courants détermine la valeur de l'élément de matrice $K \rightarrow 3\pi$ d'une manière unique au point $E_3 = 0$. La linéarité de cet élément matrice permet d'extrapoler vers la région physique du diagramme de Dalitz. Non seulement les valeurs des éléments de matrice au centre de ce diagramme liés à la vie moyenne du mode $K \rightarrow 3\pi$ sont déterminées, mais aussi les pentes. Ces prédictions, absolument remarquables, se comparent d'une manière extrêmement satisfaisante aux résultats expérimentaux. Le problème de l'intéraction $\pi\pi$ concernant ce processus a été discuté.

15) La règle $\Delta I = 1/2$ n'est pas exacte, elle est violée de 5 % environ dans $K \rightarrow 2\pi$. L'algèbre des courants permet de relier cette violation à celle présente dans le mode $K \rightarrow 3\pi$. Par des méthodes analogues à celles discutées dans le Ph. 12, on peut alors prédire les déviations pour les rapports de branchement et surtout pour les pentes découlant de la présence d'une amplitude $\Delta I = 3/2$ dans les désintégrations $K \rightarrow 3\pi$. Ces déviations peuvent être notables, et il est extrêmement intéressant de mieux les connaître expérimentalement.

16) *Remarques sur la localité des Lagrangiens responsables des désintégrations faibles et électromagnétiques*

Il a été montré que le fait que le lagrangien effectif ne soit pas local ne conduit pas à des difficultés dans l'application de l'algèbre des courants.

17) *La désintégration* $\eta \rightarrow 3\pi$

Elle constitue une difficulté majeure pour les théorèmes de basse énergie. Le problème est analogue à celui de $K \rightarrow 3\pi$, l'intéraction faible étant remplacée par une intéraction électromagnétique effective non locale, ce qui, en vue du Ph. 16, n'est pas essentiel. L'hypothèse d'une variation linéaire en $E_i$ de l'élément de matrice et la statistique de Bose conduisent à l'interdiction de ce mode. Or, expérimentalement, il est relativement important. Une discussion très détaillée de cette difficulté a été présentée. Entre autre, les possibilités d'une intéraction électromagnétique d'ordre supérieur, d'une modification du PCAC formulé d'une manière moins restrictive, d'une admission de non linéarité dans l'élément de matrice ont été examinées. Jusqu'à présent, aucune solution valable n'a pu être trouvée à ce paradoxe. L'abandon du PCAC exact fournit des bonnes pentes mais les taux de désintégration restent absolument incompréhensibles.

18) *Problème du* $\pi^\circ \to 2\gamma$ *ou* $\eta \to 2\gamma$

Ils sont interdits eux aussi par les théorèmes de basse énergie et l'invariance de jauge. La difficulté est moins grave que dans le cas $\eta \to 3\pi$. Une modification du PCAC en présence de l'intéraction électromagnétique permet d'obtenir un résultat satisfaisant.

19) *Le problème de la photoproduction dans le cadre des théorèmes de basse énergie*

20) *Théorèmes de basse énergie pour deux pions mous*

Formalisme général, formule de réduction, PCAC et l'algèbre des charges ou des densités de charge. Les différents termes. Discussion des contributions éventuelles des pôles, du terme $\sigma$, et du terme provenant du commutateur.

21) *Cas où la masse du* $\pi$ *est faible devant celle de la cible*

Formule de Weinberg-Tomozawa. Calcul des longueurs de diffusion de l'onde S — $\pi$ nucléon pour $I = 1/2$ et $I = 3/2$. Comparaison avec l'expérience. Le processus de diffusion K — $\pi$. Généralisation du formalisme aux processus de diffusion des mésons $K^+$ sur des cibles diverses à l'aide du PCAC appliqué aux particules étranges. Difficultés de l'extrapolation. Problèmes avec les $K^-$ dus à la présence de pôles et de coupures proches.

22) *La règle de somme d'Adler-Weissberger*

Cette règle est obtenue à partir du théorème de basse énergie et de la relation de dispersion de Goldberger-Miyazawa pour l'amplitude de diffusion $\pi$ — N antisymétrique en spin isotopique. Ceci illustre une méthode générale qui permet d'obtenir certaines règles de somme (i) en utilisant le PCAC et l'algèbre des courants afin de dériver un théorème de basse énergie pour une amplitude ; (ii) en postulant que cette amplitude obéit à une relation de dispersion non soustraite qui relie la valeur à basse énergie de l'amplitude à une intégrale sur sa partie imaginaire. En combinant le théorème de basse énergie et la relation de dispersion, on obtient la règle de somme désirée.

23) *Discussion de la règle de somme d'Adler-Weissberger*

Sa généralisation aux processus faisant intervenir les sections efficaces des mésons K, et les transitions $\Delta S = \pm 1$. Comparaison avec les données.

24) *Le problème de la diffusion* $\pi\pi$

Impossibilité d'application de la formule de Weinberg-Tomozawa. Méthode de Weinberg permettant d'obtenir dans ce cas le théorème de basse énergie par une exploitation systématique de la symétrie de Bose, de la symétrie du croisement et des relations de commutation. Les termes $\sigma$, leurs propriétés et leur rôle. Les longueurs de diffusion $a_0$ et $a_2$. Discussion de l'intéraction $\pi - \pi$ du point de vue de l'algèbre des courants. Comparaison avec les maigres résultats expérimentaux. Le problème de la détermination expérimentale de l'intéraction $\pi\pi$ à partir des collisions périphériques et surtout de la désintégration $K_{14}$.

25) *Les théorèmes de basse énergie pour les systèmes à plusieurs pions*

Formalisme général et discussion des résultats.

26) *Les désintégrations des particules dans le cadre de l'algèbre des courants*

La désintégration $\varrho \to 2\pi$ et la formule de Kawarabayashi-Suzuki. Analyse critique de cette dernière. La désintégration $\varphi \to K\ \bar{K}$, etc. Le problème de $SU_3$ et de sa cassure. Autres exemples.

27) Remarques sur certaines classes de processus dans lesquels interviennent par exemple un nombre impair de particules $0^-$ et un méson $1^-$. Il a été montré que dans ces cas et dans des cas similaires l'algèbre des courants ne donne pas de théorèmes de basse énergie. Afin d'obtenir des résultats, des hypothèses supplémentaires dépendant des modèles doivent être introduites.

28) *Conclusion*

Discussion des succès et des difficultés des théorèmes de basse énergie appliqués aux mésons $\pi$ et plus généralement aux particules $0^-$.