Physique théorique des particules élémentaires

M. Jacques PRENTKI, professeur

Résumé du cours 1969-1970

I. — Le cours de cette année, intitulé : « L'Algèbre des Courants, l'Algèbre des Champs et les Lagrangiens Phénoménologiques, suite », a débuté par un bref rappel de ce qui avait été exposé l'année dernière. Il s'agit essentiellement des idées de base de l'algèbre des courants, de l'algèbre $SU_2 \times SU_2$ et $SU_3 \times SU_3$, du CVC, du PCAC et PDDAC, du formalisme général utilisé et de l'application de ces idées aux processus de basse énergie. Nous avons présenté les points suivants.

1) Théorème de Noether et ses applications. Les courants conservés, les courants partiellement conservés. Les règles de commutation des charges et des courants. Les divergences des courants non conservés. Le modèle des quarks et l'algèbre $SU_3 \times SU_3$ ou $SU_2 \times SU_2$. Discussion préliminaire des termes de Schwinger.

2) L'hypothèse du CVC et ses applications. L'hypothèse du PCAC ou du PDDAC et ses différents aspects. La formule de Goldberg-Treiman et sa généralisation aux transitions $\Delta S = \pm 1$. Le problème de l'universalité dans l'algèbre des courants.

3) Les théorèmes de basse énergie. Les différents formalismes permettant de les obtenir : (a) par l'algèbre des courants, (b) par les conditions sur les divergences. Le cas d'un pion mou. Théorème de l'insertion du vertex du courant axial dans les lignes externes de la réaction $\alpha \to \beta$ pour obtenir $\alpha \to \beta + \pi$ et la condition d'Adler. Applications aux processus de diffusion $\pi\pi$, $K\pi$, $n\pi$ etc. Emission d'un pion mou dans une perturbation externe. La formule de réduction. Le théorème fondamental de basse énergie. Applications aux désintégrations leptoniques des mésons K et la formule de Callan-Treiman, désintégrations non leptoniques des hypérons et le problème des ondes S et P. Désintégrations non leptoniques des K. Le cas du $\eta \to 3\pi$, celui du $\pi^\circ \to 2\gamma$.

4) Théorèmes de basse énergie pour deux ou plusieurs mésons mous. Théorèmes généraux et formule de Weinberg-Tomozawa. Application à la diffusion π N. La règle de somme d'Adler-Weisberger obtenue à partir d'un théorème de basse énergie. Le problème de l'interaction $\pi\ \pi$ dans l'algèbre des courants.

II. — L'algèbre des courants utilise essentiellement l'algèbre $SU_2 \times SU_2$ complémentée par les hypothèses du CVC et du PCAC. Cette dernière est une hypothèse sur le comportement des fonctions décrivant les amplitudes de diffusion, de production et de désintégration. Le formalisme conduit à une série de résultats tout à fait remarquables, en particulier aux théorèmes de basse énergie.

Il a été observé que ces résultats s'obtiennent aussi d'une façon plus compacte et même plus satisfaisante par une méthode Lagrangienne, celle des Lagrangiens phénoménologiques. Ces derniers sont construits de telle manière qu'ils fournissent l'algèbre $SU_2 \times SU_2$ et le PCAC sous sa version théorie des champs. Il est évident qu'un calcul exact basé sur de tels Lagrangiens conduit aux résultats exacts de l'algèbre des courants. Ceci cependant n'est pas encore utile. Il est donc nécessaire de compléter le formalisme Lagrangien par une méthode de calcul perturbative qui, ordre par ordre, fournit les résultats désirés. On prouve qu'un choix judicieux des diagrammes conduit à un tel développement. Les graphes, dits en arbre, correspondent au premier ordre de la perturbation. Dans le calcul on se limitera à ce type de graphes en négligeant ceux d'ordre supérieur et, par là-même, ne donnant pas de signification profonde aux Lagrangiens qui doivent être considérés comme phénoménologiques. La situation est analogue à la description de l'interaction faible par un Hamiltonien du type Fermi.

L'avantage de la méthode Lagrangienne consiste en ce qu'une fois le Lagrangien et les règles de calcul donnés, il n'y a plus de problème. Les processus à plusieurs pions par exemple, qui sont difficilement abordés du point de vue technique par l'algèbre des courants, se calculent ici sans grande difficulté. Le désavantage de cette méthode est son grand arbitraire dans la construction des Lagrangiens, lié, en particulier, au nombre de champs fondamentaux introduits dans les considérations. Il existe essentiellement deux méthodes de construction des Lagrangiens phénoménologiques. La première « linéaire », conventionnelle, consiste à écrire un Lagrangien manifestement invariant sous les transformations chirales du groupe $SU_2 \times SU_2$. Ceci conduit à l'introduction de nouvelles particules. Le modèle σ en est un exemple. La cassure du groupe s'obtient en ajoutant un terme ayant des propriétés voulues sous $SU_2 \times SU_2$ et conduisant au PCAC. Le fait d'avoir des nouvelles particules non observées est un des défauts de cette théorie. Elles peuvent être éliminées mais on est conduit alors à un formalisme non linéaire.

On remarque que la symétrie $SU_2 \times SU_2$ diffère des autres en reliant des processus concernant n π à ceux où sont mis en jeu (n + 1) π. On définit des transformations chirales qui font intervenir intrinsèquement le champ du π et on exige l'invariance du Lagrangien. De cette manière les représentations non linéaires du groupe sont obtenues et les Lagrangiens eux-mêmes ont une structure non linéaire. Ils seront ensuite développés en polynômes à partir desquels, à l'aide de la technique des graphes en arbre, on est capable de calculer n'importe quel processus concernant les pions mous. La théorie des Lagrangiens phénoménologiques a été présentée pour un système général faisant intervenir le champ du π (traité d'une manière spéciale) et les autres champs. Le cas des mésons vectoriels constitue un problème à part. A l'aide de ce formalisme, nous avons pu discuter d'une façon simple et élégante plusieurs exemples de théorèmes de basse énergie. Les points suivants ont été présentés.

1) Préliminaires sur le formalisme Lagrangien. Quelques propriétés de la matrice S. Possibilité de calcul perturbatif en fonction du nombre de « boucles » dans les diagrammes. Les graphes en arbre et le théorème de Coleman.

2) Les Lagrangiens phénoménologiques linéaires. Le modèle σ et ses variantes. Calcul de la diffusion $\pi\,\pi$ et la condition d'Adler.

3) Le modèle σ non linéaire. Le Lagrangien phénoménologique non linéaire pour les π. La réalisation non linéaire du groupe, les lois générales de transformation du champ π et leurs choix appropriés. Calcul de la diffusion $\pi\,\pi$ et la formule de Weinberg. Introduction des champs K et la diffusion K π. Les désintégrations non leptoniques et leptoniques des mésons K. Comparaison avec les théorèmes de basse énergie obtenus en I.

4) Introduction systématique d'autres champs. Les lois de transformation des champs π, des nucléons, des hypérons, etc. Le problème des lois de transformation des dérivées des champs et l'introduction des dérivées covariantes. Prescription générale pour la construction d'un Lagrangien phénoménologique contenant des mésons π interagissant avec un nombre quelconque d'autres champs. Quelques exemples de théorèmes de basse énergie. Les longueurs de diffusion en onde S du système π N. Les courants des interactions faibles, les formules de Goldberg-Treiman, d'Adler-Weisberger, etc., obtenus ici d'une manière très directe. Le problème de l'émission d'un nombre arbitraire de mésons π dans une réaction et prescriptions permettant d'effectuer les calculs d'une manière relativement simple.

5) Introduction des mésons vectoriels. Le groupe de jauge local et les termes de masse des champs vectoriel et pseudovectoriel. Les champs de Yang et Mills. Cassure du groupe et la proportionnalité champs-courants. Les règles de commutation des courants ainsi définis. Le Lagrangien phénoménologique pour l'ensemble des champs pseudoscalaires, vectoriels et baryoniques, construit à l'aide des champs et de leurs dérivées covariantes. Le pro-

blème de la cassure et de la renormalisation. Les contraintes sur les constantes de couplage. La relation de Weinberg entre les masses du méson vectoriel et pseudovectoriel. Les interactions électromagnétiques et faibles. Déduction des relations de Goldberger-Treiman, d'Adler-Weisberger et quelques autres applications.

6) Généralisation du formalisme des Lagrangiens phénoménologiques du groupe chiral $SU_3 \times SU_3$.

III. — Dans le formalisme de l'algèbre des courants interviennent, dans l'expression des commutateurs entre les composantes des densités des courants, certains termes assez mal définis. Ce sont les termes de Schwinger. Ces quantités dépendent fortement des modèles et peuvent être soit des nombres c soit des opérateurs. Heureusement dans la majorité des applications ils peuvent être simplement oubliés. Il est cependant tentant de construire un formalisme dans lequel ces termes sont explicitement donnés. C'est celui de l'algèbre des champs. Comme il a été mentionné dans II, il est possible d'identifier les champs vectoriels et les courants, à un facteur de proportionnalité près. Plusieurs avantages en découlent. A partir des règles canoniques de commutation des champs vectoriels on trouve les règles de commutation des courants d'une manière univoque, déterminant les termes de Schwinger qui sont ici des nombres c. Ces règles de commutation sont identiques à celles de l'algèbre des courants en ce qui concerne les charges et les densités genre temps des courants. Elles en diffèrent pour les commutateurs des densités genre espace ce qui est intéressant car ceci peut en principe être vérifié expérimentalement. En outre, le formalisme de l'algèbre des courants est probablement la meilleure manière de formuler l'hypothèse de la dominance vectorielle qui a remporté quelques succès significatifs.

IV. — C'est à partir de cette théorie que nous avons démontré les règles de somme spectrales de Weinberg qui imposent des restrictions sur les intégrales des fonctions spectrales des commutateurs ou des produits ordonnés dans le temps et qui conduisent à une série de résultats extrêmement intéressants. A ce sujet, nous avons discuté les points suivants.

1) Présentation et discussion de la théorie de l'algèbre des champs.

2) Etude de la représentation spectrale des commutateurs des courants et de leurs produits ordonnés dans le temps.

3) Preuve de la première règle de somme spectrale de Weinberg dans le cadre de l'algèbre des champs et celui de l'algèbre des courants. Le rôle des termes de Schwinger.

4) La deuxième règle de somme spectrale.

5) Les règles de somme spectrales obtenues par une condition de symétrie asymptotique (Okubo et al.). Le problème de la cassure de la symétrie SU_3 et les modifications qu'elle entraîne pour les règles de somme spectrales.

6) Application des règles de somme spectrales. Leur saturation par les états à une particule de faibles masses. La formule de Weinberg pour les masses du ρ et du A. La règle de somme pour les désintégrations leptoniques des mésons vectoriels et discussion générale de ce problème. Relations entre les masses des mésons et certaines de leurs constantes de couplage. Comparaison avec l'expérience et discussion de la validité de la 1re et 2e règles spectrales. Le problème des différences de masse d'origine électromagnétique. Le cas du π traité par l'algèbre des courants et les règles de somme spectrales ainsi que par la méthode des Lagrangiens phénoménologiques. Succès illusoire pour $m_\pi = 0$ et difficulté pour $m_\pi \neq 0$. Remarques au sujet de l'annihilation $l + \bar{l}$ à haute énergie dans le cadre des règles de somme spectrales et de l'algèbre des champs. Quelques autres applications.

V. — Le problème des corrections radiatives à la désintégration β est étudié depuis longtemps. Il est bien connu que celles liées à la désintégration du méson μ sont finies, non négligeables et essentielles pour l'étude des spectres. Par contre, les corrections radiatives pour la désintégration β sont divergentes dans l'approximation des particules ponctuelles. Il a été suggéré que les interactions fortes et les facteurs de forme qu'elles engendrent pourraient remédier à cette situation. L'algèbre des courants permet de traiter le problème de l'interaction forte d'une manière en principe exacte, tout au moins pour la partie la plus divergente. On prouve sous certaines hypothèses de comportement asymptotique que les corrections radiatives sont logarithmiquement divergentes, et que la divergence est inhérente à l'interaction faible. Cette propriété est importante car elle pose le problème de l'origine de la coupure de la divergence de l'interaction faible. Nous avons discuté en détail ce sujet.

1) Problème des particules ponctuelles. Cas général et celui du méson μ. L'interaction en V-A et propriété de convergence des corrections radiatives dans cette théorie.

2) Les corrections radiatives en présence d'interactions fortes. Les différents types de graphes. Application du formalisme de l'algèbre des courants.

3) Les termes les plus divergents. Condition asymptotique et la formule de Bjorken. Preuve que la contribution des corrections radiatives à la partie vectorielle de l'interaction est essentiellement divergente et qu'elle ne dépend pas du modèle. Ceci n'est pas le cas pour la partie axiale où elle dépend essentiellement de la théorie des interactions fortes utilisées.

4) Les différentes coupures et comparaison avec les données.

5) Les corrections radiatives dans le cadre de la théorie du boson intermédiaire.

VI. — Les interactions faibles sont décrites par un Lagrangien qui donne à l'ordre le plus bas des résultats satisfaisants. Si on admet que ce Lagrangien possède une signification fondamentale, comme celui de l'électrodynamique quantique par exemple, le problème des effets d'ordres supérieurs se pose immédiatement. Or ceux-ci détruisent en particulier l'ensemble des règles de sélection qui régissent l'interaction faible comme les règles $\Delta S / \Delta Q = 1$, $\Delta S < 2$, $\Delta I = \frac{1}{2}$, l'absence des courants neutres, etc. Ces contributions sont divergentes quadratiquement et même quartiquement et les techniques de l'algèbre des courants, par des arguments similaires à ceux présentés en V, montrent que ces divergences ne sont pas atténuées par la présence des interactions fortes et les facteurs de forme et qu'elles dépendent peu, sinon pas, des modèles. Elles sont dues à la structure même de l'interaction faible. Il est nécessaire d'introduire une coupure, et la comparaison avec les données indique que celle-ci est de l'ordre de 30 BeV et même de quelques BeV en fonction des processus considérés. Elle est donc largement inférieure à la coupure unitaire, de l'ordre de 300 BeV, pour l'interaction faible. Ce résultat surprenant et important pose le problème de l'origine d'une telle coupure, de la manière d'atténuer ou même d'éliminer cette difficulté par une reformulation de la théorie. Une série de travaux a été récemment consacrée à ces questions et il nous a semblé intéressant de les présenter.

1) Les interactions faibles à haute énergie et la coupure unitaire.

2) Les courants neutres considérés comme effets de second ordre. Application des techniques de l'algèbre des courants. Cas de l'interaction de Fermi et celui du boson intermédiaire. Divergences quadratiques largement indépendantes des modèles et coupures pour les processus neutrino et la désintégration $K^\circ \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

3) Le problème de la différence de masse $K_{10} - K_{20}$.

4) Discussion de quelques modèles des interactions faibles permettant d'éliminer partiellement la difficulté comme, par exemple, celui de Gell-Mann, Goldberger, Kroll et Low. Aperçu de la théorie à métrique indéfinie de Lee.

5) Modèle de cassure du groupe $SU_3 \times SU_3$ permettant d'éliminer les divergences les plus fortes en supposant que le terme brisant la symétrie appartient à la représentation $(3\ \bar{3}) + (\bar{3}\ 3)$. Cas des réactions $\Delta S \neq 0$ et celui de $\Delta S = 0$ $\Delta I \neq 0$.

6) Le problème des divergences pour $\Delta S = 0$, $\Delta I = 0$. Possibilité de la détermination de l'angle de Cabibbo en exigeant un coefficient nul pour le terme le plus divergent et les différents modèles proposés à ce sujet.

7) Considérations sur la cassure de $SU_3 \times SU_3$ vers SU_2 via $SU_2 \times SU_2$ ou SU_3 et sur la hiérarchie des symétries.