

Physique atomique et moléculaire

M. Francis PERRIN, membre de l'Institut

(Académie des Sciences), professeur

Les atomes mésiques. — Le cours a porté non seulement sur les atomes mésiques, mais plus généralement sur tous les systèmes quasi-stables formés par une quelconque des diverses particules négatives, autres que les électrons, gravitant par attraction coulombienne autour d'un noyau atomique. Ces systèmes, appelés d'une façon générale *atomes exotiques*, comprennent :

- les *atomes muoniques* (lepton μ^- de spin $1/2$) ;
- les *atomes mésiques*, qui comprennent les atomes pioniques et les atomes kaoniques (méson π^- ou méson K^- , tous deux de spin 0) ;
- les *atomes baryoniques*, qui comprennent les atomes hypéroniques (hypéron Σ^- ou Ξ^- de spin $1/2$) et les atomes antiprotoniques (antiproton \bar{p}^- de spin $1/2$).

Des émissions X caractéristiques de tous ces atomes exotiques ont été effectivement observées (sauf dans le cas des atomes ksioniques). Dans la classe des atomes hypéroniques, il faut aussi considérer comme pouvant exister des atomes omégaoniques, dont l'étude serait particulièrement intéressante à cause du spin $3/2$ de l'hypéron Ω^- , mais la rareté de la production de ces hypérons d'étrangeté -2 rend peu probable qu'on puisse réussir à observer leur capture par quelque noyau que ce soit.

L'analyse théorique du mécanisme de capture par un atome d'une particule négative massive, se ralentissant dans la matière, a montré que la capture doit se produire quand l'énergie de cette particule n'est plus que de quelques KeV, qu'elle doit se faire par effet Auger, un électron planétaire de l'atome étant projeté avec l'énergie correspondant à la fixation de la particule massive incidente sur une « orbite » ayant un « rayon » comparable à celui de l'orbite de l'électron arraché, donc de nombre quantique total n élevé (de l'ordre de 12 à 15) et un nombre quantique azimutal l voisin du maximum correspondant. A partir de cette orbite de capture, la désexcitation de l'atome exotique formé, jusqu'à son état fondamental K , par une cascade d'émis-

sions X (ou d'électrons d'Auger) ne doit durer qu'environ 10^{-13} s. Cette durée étant très courte par rapport aux vies moyennes des mésons ou hypérons capturés (de l'ordre de 10^{-10} s à 10^{-8} s et même de 10^{-6} s pour les muons) on comprend pourquoi des atomes exotiques peuvent effectivement se former.

En première approximation non relativiste, l'interaction entre le noyau de charge Ze d'un atome exotique et la particule négative massive capturée, décrite par l'équation de Schrödinger, ne dépend pas de son spin. En négligeant les interactions avec les électrons planétaires de l'atome, cette équation donne par les simples formules primitives de Bohr, l'énergie et le rayon moyen de l'orbitale de nombre quantique total n :

$$E_n = \frac{1}{2} M' c^2 \left(\frac{Z \alpha}{n} \right)^2$$

$$r_n = \frac{\hbar^2}{M' e^2} \frac{n^2}{Z}$$

$\alpha = e^2/\hbar c$ étant la constante de structure fine, et $M' = M/(1 + M/A)$ étant la « masse réduite » du méson ou hypéron de masse M gravitant dans le champ du noyau de masse A . La masse M' étant dans tous les cas des centaines de fois plus grande que la masse de l'électron, on voit que l'énergie E_n est des centaines de fois plus grande, et le rayon r_n des centaines de fois plus petit que les quantités correspondantes pour l'orbitale électronique de même nombre quantique. Ceci montre que l'effet d'écran dû aux électrons planétaires est effectivement négligeable (et pourra être évalué sans qu'une connaissance exacte de la distribution électronique dans l'atome soit nécessaire) et que, même pour des atomes exotiques de Z moyen, les rayonnements X caractéristiques tombent dans le domaine des rayons γ ordinaires.

Depuis 1965 environ, l'emploi de détecteurs γ à semiconducteurs ayant un grand pouvoir séparateur a redonné un vif intérêt à l'étude des atomes exotiques. Il a permis de découvrir les atomes kaoniques, sigmaoniques et antiprotoniques, de mesurer avec une grande précision les fréquences des émissions X caractéristiques de tous les atomes exotiques et même, dans beaucoup de cas, de déterminer la largeur des raies correspondantes.

Les atomes muoniques. — Leur masse seule les distinguant des électrons, les muons obéissent comme eux à l'équation de Dirac. Les niveaux d'énergie des atomes muoniques sont donc donnés par les valeurs propres de cette équation qui ont pour expression rigoureuse (pour un noyau ponctuel de charge Ze)

$$E_{nj} = M'_\mu c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Z^2 \alpha^2}{[n - j - \frac{1}{2} + \sqrt{(j + \frac{1}{2})^2 - Z^2 \alpha^2}]^2}}} - 1 \right] \quad (1)$$

j étant le nombre quantique de moment angulaire total, qui peut prendre toutes les valeurs demi-entières $1/2, 3/2, \dots$, et n le nombre quantique total, qui peut prendre les valeurs $j + 1/2, j + 3/2, \dots$. Le nombre quantique de moment angulaire de circulation $l = j \pm 1/2$ n'intervient pas dans cette formule. Pour l'état fondamental ($1s_{1/2}$ ou K : $n = 1, j = 1/2, l = 0$) la formule générale (1) donne

$$E_{1,1/2} = M'_\mu c^2 [\sqrt{1 - Z^2 \alpha^2} - 1] \quad (2)$$

valeur qui serait imaginaire pour $Z > \frac{1}{\alpha} = 137$, ce qui n'est le cas pour

aucun élément connu. Les fonctions d'onde spinorielles (à 4 composantes complexes) correspondant aux valeurs propres (1) sont les mêmes pour le muon que pour l'électron d'un atome hydrogénoïde, mais avec une contraction radiale par un facteur d'environ 200. Cette contraction donne une importance relative beaucoup plus grande aux corrections résultant, d'une part, du fait que les noyaux atomiques ne sont pas ponctuels, leur charge électrique Ze étant distribuée d'une façon assez bien connue autour de leur centre, et, d'autre part, de la polarisation du vide au voisinage du noyau, polarisation qui résulte essentiellement de la création virtuelle de paires d'électrons et qui est par suite la même quelle que soit la masse de la particule ponctuelle, électron ou muon, gravitant dans le champ du noyau. Au contraire, les corrections radiatives qui résultent de la création virtuelle de photons au voisinage de la particule négative circulant autour du noyau sont beaucoup moins importantes pour un muon que pour un électron.

C'est justement l'importance relative des corrections d'extension spatiale des noyaux et de polarisation du vide, qui a donné aux mesures précises des fréquences des rayonnements X caractéristiques des atomes muoniques un grand intérêt. Ces mesures ont en effet permis, d'une part, de préciser la distribution de la densité électrique $\rho(r)$ à l'intérieur de nombreux noyaux en mettant en évidence notamment un effet isotopique très marqué, et, d'autre part, et ceci est beaucoup plus important, de vérifier avec une précision très supérieure à celle qu'avait permis l'étude de l'effet Lamb, les formules de l'électrodynamique quantique relatives à la polarisation du vide.

Signalons aussi que les mesures des rayonnements X muoniques ont conduit à une valeur de la masse du muon plus précise que les déterminations directes ; elles ont donné

$$M^\mu = (206,76 \pm 0,02) m_e.$$

Mais, depuis, la détermination extrêmement précise du facteur de Landé du muon a donné pour sa masse une valeur encore 4 fois plus précise.

Les atomes pioniques. — Les pions ayant un spin nul, leur équation d'onde relativiste n'est pas l'équation de Dirac mais c'est l'équation de Klein-Gordon, qui, pour un état stationnaire d'énergie totale $(E + Mc^2)$ de fonction d'onde scalaire complexe

$$\psi(\vec{r}, t) = \varphi(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar}(E + Mc^2)t}$$

s'écrit

$$\left\{ \frac{\hbar^2}{2m} \Delta + [E - V(\vec{r})] + \frac{1}{2Mc^2} [E - V(\vec{r})]^2 \right\} \varphi(\vec{r}) = 0$$

$V(\vec{r})$ étant le potentiel du champ statique agissant sur la particule de masse M . Dans le champ d'un noyau ponctuel $V(\vec{r}) = -Ze^2/r$, la fonction d'onde $\varphi(\vec{r})$ est le produit d'une fonction angulaire de Laplace, — qui introduit le nombre quantique de moment angulaire l , pouvant prendre les valeurs 0, 1, 2, ..., et le nombre quantique d'orientation m , pouvant prendre les valeurs $-l, -l + 1, \dots, l$, et d'une fonction radiale $u(r)$ qui doit satisfaire à l'équation différentielle du second ordre

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{du}{dr} + \frac{1}{\hbar^2 c^2} \left[E(E + 2Mc^2) + 2(E + Mc^2) \cdot \hbar c \frac{Z\alpha}{r} + \hbar^2 c^2 \frac{Z^2 \alpha^2 - l(l+1)}{r^2} \right] u(r) = 0$$

dont les valeurs propres se trouvent être données par la formule (1) déduite de l'équation de Dirac, mais en y remplaçant le nombre quantique demi-entier j par le nombre quantique entier l . En particulier le niveau d'énergie de l'état fondamental $1s_0$ ($n = 1, l = 0$) est

$$E_{1,0} = M' c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - 4Z^2 \alpha^2}} - 1 \right]$$

Cette expression est imaginaire si $2 Z \alpha$ est plus grand que 1, donc si $Z > 68$, nombre atomique de l'erbium, mais elle cesse d'être valable pour des valeurs de Z très inférieures à cause des corrections d'extension finie du noyau et de polarisation du vide. En fait les émissions correspondant à la transition $2 p \rightarrow 1 s$ qui permettent de déterminer la valeur du niveau fondamental $1 s$ n'ont été observées que pour les éléments légers de nombre atomique Z inférieur à 12 (magnésium) et l'on peut alors se borner à utiliser la formule de première approximation pour la correction relativiste

$$E_{1,0} = -\frac{1}{2} M' c^2 Z^2 \alpha^2 \left[1 + \frac{5}{4} Z^2 \alpha^2 \right]$$

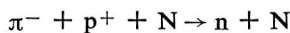
et pour des nombres quantiques n et l quelconques :

$$E_{nl} = -\frac{1}{2} M' c^2 Z^2 \alpha^2 \left[1 + \left(\frac{Z \alpha}{n} \right)^2 \left(\frac{2n}{2l+1} - \frac{3}{4} \right) \right]$$

formule qui, pour les niveaux de moment angulaire maximum ($l = n - 1$) principalement impliqués dans les émissions observées, donne

$$E_{n,n-1} = -\frac{1}{2} M' c^2 Z^2 \alpha^2 \left[1 + \left(\frac{Z \alpha}{n} \right)^2 \frac{1}{4} \frac{2n+3}{2n-1} \right]$$

A partir des fonctions d'onde connues correspondant à ces valeurs propres relatives au potentiel coulombien non modifié par la polarisation du vide et l'extension finie du noyau, on peut calculer, comme dans le cas des muons, les corrections des valeurs propres résultant de la modification du potentiel électrique par ces deux perturbations. Mais dans le cas des atomes pioniques, il faut y ajouter une correction qui résulte des interactions fortes entre le π^- et les nucléons, interactions à faible rayon d'action d'autant plus importante que la fonction d'onde de première approximation pénètre davantage dans le noyau. Cette dernière correction peut être approximativement calculée en introduisant un « potentiel optique » dont la partie réelle peut être déduite des mesures de dispersion des π^- de faible énergie par les protons, mais dont la partie imaginaire est plus difficile à évaluer car elle correspond à l'absorption du π^- par le noyau suivant un processus d'interaction triple



N étant un nucléon (p^+ ou n) dont l'intervention est nécessaire à la conservation de l'impulsion. Cette absorption du π^- devient très importante dès

que le nombre quantique n est assez petit pour que la fonction d'onde pénètre notablement la périphérie du noyau ; la vie moyenne du niveau correspondant est très réduite ce qui l'élargit en proportion et rend négligeable la probabilité de transition vers un niveau plus profond. Effectivement, l'émission X de plus grande énergie observée pour les atomes pioniques formés dans les divers éléments correspond à la transition $2p \rightarrow 1s$ jusqu'au magnésium ($Z = 12$), à la transition $3d \rightarrow 2p$ de l'aluminium ($Z = 13$) au zinc ($Z = 30$), ensuite à la transition $4f \rightarrow 3d$ jusqu'au praséodyme ($Z = 60$), puis à la transition $5g \rightarrow 4f$ jusqu'au plutonium ($Z = 94$) dernier élément étudié. Les largeurs des niveaux inférieurs correspondants ont pu être déterminées avec une précision d'environ 10 %.

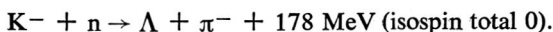
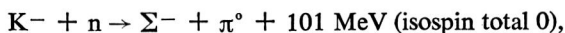
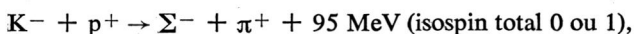
Les déplacements des niveaux dus à l'interaction forte des π^- avec les noyaux, calculés à partir d'un potentiel optique déduit des mesures de dispersion des π^- de faible énergie par les protons et les deutons, sont en bon accord avec les mesures, mais les largeurs des niveaux ainsi calculées diffèrent considérablement des valeurs expérimentales (par un facteur atteignant 2,5) ce qui montre qu'un effort théorique important est encore à faire, surtout pour mieux tenir compte de l'absorption des π^- par interaction avec une paire de nucléons.

Par ailleurs, la mesure précise de la fréquence des transitions pour lesquelles les corrections d'interaction forte entre le π^- et le noyau sont négligeables, a conduit à la meilleure détermination obtenue jusqu'ici de la masse du méson chargé. La plus grande précision a été obtenue dans le cas des transitions $4f \rightarrow 3d$ dans le calcium ($Z = 20$) et le titane ($Z = 22$), qui, en tenant compte des diverses corrections, la seule importante étant celle de polarisation du vide, ont conduit pour la masse du méson π^- à la valeur

$$M_{\pi^-} = (139,58 \pm 0,02) \text{ MeV}$$

Atomes kaoniques. Des émissions X caractéristiques d'atomes kaoniques ont été observées pour plusieurs éléments ; des mesures précises de la fréquence et de la largeur de quelques-unes de ces raies d'émission ont été faites, notamment dans le cas du soufre ($Z = 16$).

L'absorption d'un méson K^- par un noyau peut résulter d'une interaction forte, conservant l'étrangeté, avec un seul nucléon :



Cette possibilité simplifie beaucoup le calcul des modifications des raies d'émission résultant des interactions fortes du K^- avec les nucléons, et l'on

peut trouver un potentiel optique, dépendant seulement de 2 constantes complexes, qui conduit à un assez bon accord avec les mesures, tant pour le déplacement des raies que pour leur élargissement. Cependant une meilleure précision, tant dans les calculs que dans les mesures, est souhaitable et paraît possible.

Atomes baryoniques. Des rayons X caractéristiques d'atomes sigmaoniques sont émis par les cibles où se forment des atomes kaoniques, les deux premières réactions d'absorption des K^- par les noyaux, indiquées ci-dessus, donnant naissance à des hyperons Σ^- projetés avec une énergie d'environ 20 MeV, qui peuvent s'arrêter dans les cibles d'assez grande dimension utilisées et y être à leur tour capturés par des atomes de l'élément qui les constitue. Six raies X d'atomes sigmaoniques ont ainsi pu être identifiées, et leurs fréquences mesurées avec une grande précision, dans le soufre ($Z = 16$), le chlore ($Z = 17$) et le zinc ($Z = 30$). Mais les mesures de largeur de raie qui donneraient des informations sur l'interaction à basse énergie entre les hyperons Σ^- et les nucléons, interaction sur laquelle on ne sait presque rien, n'ont pas encore été faites. On peut espérer que la mesure de la structure fine des raies X d'atomes sigmaoniques de Z grand, qui doit pouvoir être faite, permettra de déterminer le moment magnétique anormal de l'hyperon Σ^- .

Enfin, on a observé de façon certaine des raies d'émission X d'atomes antiprotoniques pour une série d'éléments de Z compris entre 15 (phosphore) et 81 (thallium). Notamment dans le cas du thallium les fréquences de 5 raies ont été mesurées avec précision et sont en accord à mieux de 1 % près avec les fréquences calculées.

TRAVAUX DU LABORATOIRE

Le Laboratoire de Physique atomique et moléculaire comprend une centaine de personnes qui, outre les services généraux, sont partagées entre deux groupes de physique théorique, trois de physique expérimentale, et quelques petites équipes spécialisées.

I. — PHYSIQUE THÉORIQUE

a) Groupe animé par M. B. JOUVET

Les activités du groupe sont axées sur la théorie quantique des champs et des particules. Cette année elles ont porté principalement sur les points

suivants : différences de masses électromagnétiques, facteurs de forme des nucléons, interactions non polynômiales, interaction pion-pion à basse énergie, théorie de perturbation, formalisme fonctionnel.

M^{lle} G. BORDES a terminé le travail entrepris sur la dépendance en transfert des facteurs de forme des nucléons. En introduisant dans un traitement lagrangien les interactions des mésons vectoriels et du photon avec les hadrons, le calcul des corrections d'habillage dues aux boucles hadroniques a permis d'obtenir un bon accord avec les données expérimentales ¹.

M. Ch. CHAHINE a terminé sa thèse de Doctorat dont la soutenance est prévue pour le mois de septembre 1972 ². Un ensemble de publications correspondant aux résultats obtenus est en cours de rédaction. Il s'agit essentiellement de l'étude de l'influence de l'hypothèse de particule composée sur la self-énergie et d'une méthode dispersive faisant le lien entre l'approche de matrice S et celle de théorie des champs.

M. G. CLÉMENT poursuit l'étude de la comparaison des diverses définitions de la matrice S en théorie des champs, notamment celle de Dyson et celle de Feynman. Par des méthodes rigoureuses il a pu mettre en évidence les propriétés de covariance et d'invariance de jauge de certains modèles en théorie de perturbation.

Dans l'étude des interactions non polynômiales en théorie des champs, M. J.-C. HOUARD et M^{me} M. IRAC-ASTAUD ont proposé une nouvelle formule de sommation généralisant, dans le cas de lagrangiens rationnels, les résultats admis couramment mais de portée trop restreinte ⁴. Ils étudient actuellement la possibilité de l'introduction d'une nouvelle définition du produit normal, notamment à l'aide du formalisme fonctionnel.

En collaboration avec M. J.-L. TEFFO, M. J.-C. HOUARD a étudié la justification rigoureuse du formalisme de Efimov et Fradkin dans les théories de champ de dimension zéro. Ce travail aboutit à une justification complète dans le cas des interactions représentées par des fonctions entières et à une nouvelle définition du produit normal dans le cas des fonctions rationnelles.

M. J.-C. LE GUILLOU a étudié, en collaboration avec MM. BASDEVANT et NAVELET (CERN), les implications du croisement et de l'analyticité sur les ondes partielles dans la région physique. Les équations qui résultent de cette étude pour la diffusion pion-pion fournissent une méthode pour construire les amplitudes à basse énergie et tester la cohérence des résultats expérimentaux. En collaboration avec M. B. BASDEVANT, M. LE GUILLOU termine ainsi un premier test de croisement des ajustements expérimentaux, ce qui permet de discuter des longueurs de diffusion possibles en liaison avec les

expériences Ke4 et avec les prédictions de Weinberg. Un autre travail en cours, en collaboration avec M. SOUZA (Saclay), consiste en une amélioration du modèle pion-pion par l'introduction de l'échange asymptotique du Pomeron.

b) *Groupe animé par M. P. KESSLER*

Ce groupe (MM. KESSLER, PARISI, ARTEAGA-ROMERO) a continué à étudier sur le plan des prédictions théoriques, les processus de collision photon-photon dans les anneaux de stockage électron-positron, processus sur lesquels il avait attiré l'attention depuis 1969 ; une étude particulièrement approfondie (effets de coupures expérimentales, problèmes de bruit de fond) a été consacrée aux processus $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+ X$ ($X = \pi^0, \eta, \eta'$), en vue de futures expériences qui pourraient permettre de déterminer les constantes de couplage et facteurs de forme des vertex $\gamma\gamma X$.

MM. COCHARD, KARATCHENTZEFF, ROEHNER et KESSLER ont étudié divers processus d'électrodynamique et d'interactions faibles (électroproduction, neutrino-production, électroproduction inverse) dans la région de la résonance Δ (1236).

M. CALVA a étudié les effets des corrections radiatives sur les distributions angulaires dans les réactions $e^- e^+ \rightarrow e^- e^+$ et $\mu^- \mu^+$, en relation avec des expériences récemment effectuées à Frascati, auprès de l'anneau de stockage $e^- e^+$.

MM. CARIMALO, PARISI et KESSLER ont entrepris une série d'études sur l'électrodynamique à très haute énergie (diffusion de particules ultrarelativistes par le champ électrique des noyaux), en vue de fournir notamment des prédictions théoriques pour de futures expériences auprès des accélérateurs de plusieurs centaines de GeV (NAL, Super-CERN).

c) *Autres activités en physique théorique*

MM. BENAYOUN, KARATCHENTZEFF, LERUSTE et STRACHMAN ont poursuivi un travail antérieur sur le formalisme de Le Couteur-Newton en s'orientant principalement vers des applications. Ils ont étudié les effets de l'indétermination résultant de l'absence de certains faisceaux ou cibles, recherché des tests d'élémentarité au sens de la théorie des champs (dans le cadre du modèle de Lee), examiné un accident dans les courbes de production du Δ (au seuil de production d'un pion supplémentaire), comparé différents modèles concernant la diffusion $\bar{K}N$ à basse énergie.

MM. KELLER, LEFIEVRE et MALAMANT poursuivent leurs travaux sur la généralisation de la construction de Von Neumann à des treillis orthomodulaires. Ces travaux suivent actuellement deux voies indépendantes :

1) Dans la première voie on considère un treillis orthomodulaire atomique et vérifiant la loi de couverture. On considère toutes les familles finies d'atomes indépendants, chacune d'elles engendre un treillis modulaire auquel la construction est applicable.

2) Dans un treillis modulaire ortho-complémenté, les perspectivités sur lesquelles repose la construction forment une classe d'hémimorphismes réguliers.

On cherche à obtenir une construction analogue à celle de Von Neuman à partir d'une classe quelconque d'hémimorphismes irréguliers.

II. — PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Ce groupe a terminé une série de mesures à basse énergie à l'aide de neutrons polarisés et commence une expérience de physique nucléaire à haute énergie.

a) *Physique des neutrons polarisés*

L'analyse des mesures d'asymétrie dans la diffusion de neutrons polarisés sur ^{12}C , ^{16}O et ^2D , ainsi que l'interprétation des mesures de corrélation à deux nucléons $n(d,n p)n$, s'est poursuivie cette année.

Les résultats concernant le ^{12}C ont fait l'objet de la thèse de doctorat de M. R. SENE.

Une analyse phénoménologique en déphasage, à partir des valeurs calculées à l'aide des équations de Faddeev est en cours pour la diffusion sur le deutérium. Cette étude est menée en liaison avec un travail similaire concernant la diffusion proton-deuton qui se fait actuellement à Grenoble (M. P. DELPIERRE).

Pour l'analyse de la corrélation neutron-proton au voisinage de 0° dans la réaction de break-up $n(d,n + p)n$, il est fait appel au modèle d'Amado à potentiel séparable (M. J. KAHANE).

b) *Physique nucléaire à haute énergie*

D'autre part, le groupe procède à la mise en place d'une expérience qui doit permettre de mettre en évidence la présence de quartets de nucléons dans les noyaux et de mesurer leurs énergies de liaison en utilisant comme projectile des protons de 600 MeV éjecté par le synchrotron de Saclay (MM. DELPIERRE, KAHANE, RAOUX, SAGET, SAIGNE, SENE et SOKOLSKY) ; ce travail se fait sous la direction de M. VALLADAS, au sein de l'équipe associée ERA. 255.

c) *Instrumentation*

On peut signaler les réalisations suivantes :

— un multiplexeur permettant la transmission à un petit calculateur des informations provenant de chambres proportionnelles et de convertisseurs analogiques est en construction (M. A. SOKOLSKY) ;

— un détecteur à scintillation permettant de mesurer la perte d'énergie de particules alpha de 40 à 120 MeV sans les absorber (épaisseur 0,25 mm) et dans une grande surface (260 × 240 mm) a été construit. Il est en cours d'essais à Saclay (MM. JOURDAIN, SAGET et SAIGNE) ;

— l'équipement complet électronique rapide de l'expérience sur les quartets est en construction au laboratoire (MM. RAOUX et VERGNE).

III. — PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES. CHAMBRES A BULLES

a) *Interaction K^+p entre 2 et 3 GeV/c* (MM. J.-M. BRUNET, J.-L. NARJOUX)

L'analyse des différents canaux avec la statistique complète est maintenant terminée.

Les sections efficaces pour les canaux à 2, 3, 4 et 5 particules dans l'état final ont été déterminées et publiées en même temps que les détails de l'expérience [24]. Les résultats obtenus dans le canal élastique 25 ont été comparés avec les prédictions de différents modèles d'échange de pôles de Regge.

La production de résonances dans les états finals à 3 corps (N K π) ainsi que dans ceux à 4 et 5 corps (N K π π) et (N K π π π) a été étudiée. En particulier les états à 3 corps sont dominés par la production du K^*_{892} et du Δ_{1231} [27]. Les états finals dans lesquels 2 ou 3 π sont produits, ont fait l'objet d'investigations détaillées [27], [28].

Les sections efficaces de production du K^*_{892} , du Δ_{1231} , du η^0 , du ω^0 , du ρ ont été mesurées. La production non diffractive du Q_{1260} a été également observée. Il est confirmé que l'abondante double production de K^*_{892} et Δ_{1231} est dominée par l'échange d'un méson pseudoscalaire. Dans ce dernier canal, une dépendance encore mal comprise de la forme et de la position du pic du Δ , en fonction du transfert a été observée. Des études sont en cours pour essayer d'expliquer ce phénomène.

b) MM. BACCARI et J.-L. NARJOUX participent avec un groupe du laboratoire de Physique nucléaire aux études portant sur :

— la calibration optique de la chambre Mirabelle ;

— la calibration hors ligne de l'appareil de mesure Coccinelle ;

— la connexion à une calculatrice scientifique (C I I.90-80) de la petite calculatrice de contrôle qui pilote l'appareil ;

— la préparation de l'expérience de dissociation diffractive en $\pi^\pm p$ à 50 GeV/c. Les premières photos devraient être prises prochainement à Protvino (URSS).

Une communication a été présentée à la conférence de Dubna (octobre 1971) sur le traitement de données de chambres à trace [29].

c) *Interactions K^-p*

1) L'étude de l'interaction K^-p entre 1,26 et 1,84 GeV/c se poursuit encore. Si l'analyse en ondes partielles de la réaction $K^-p \rightarrow \Lambda\omega$ est achevée depuis le premier trimestre, en revanche l'examen de la production de résonances dans les canaux à 3 corps ainsi que l'analyse de la réaction $K^-p \rightarrow \Sigma\pi$ ne devraient se terminer qu'aux environs de la fin de l'année (MM. BERTHON, TRISTRAM et VRANA).

2) Dans la collaboration avec le D.Ph.P.E. (Saclay) qui doit permettre la suite de l'exploration précédente, le premier lot d'événements correspondant à 200 000 photos prises dans la chambre à bulles de 2 m du CERN entre 1.95 et 2.35 GeV/c est totalement mesuré en ce qui concerne la mesure non automatique ; quant au deuxième lot de 100 000 photos pour des impulsions comprises entre 2.35 et 2.85 GeV/c la mesure a débuté à Saclay et le scanning au Collège de France, essentiellement pour les 5 premières énergies. Nous pensons être en mesure de fournir des résultats préliminaires avant la fin de cette année (MM. MERIC DE BELLEFON, BRUNET, TRISTRAM, VRANA).

d) *Hautes énergies (ECFA - BEBC)*

Dans le cadre des groupes de travail ECFA, quatre physiciens du groupe de chambre à bulles appartiennent à une équipe chargée de la simulation d'événements à haute énergie dans la grande chambre européenne BEBC et plus spécialement il s'agit d'étudier des réactions avec K^- incidents (MM. BRUNET, MERIC DE BELLEFON, TRISTRAM, VRANA).

IV. — PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES. TECHNIQUES ÉLECTRONIQUES

La poursuite de l'exploitation de mesures faites à Saturne à l'aide de chambres à étincelles a permis d'étudier la diffusion élastique $\pi^\pm p$ vers l'avant, jusqu'à $\cos \theta^* = 0,99$. Les conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont les suivantes :

— la diffusion $\pi^- p$ obéit bien aux relations de dispersion. La mesure de la pente à 0° montre que les extrapolations antérieures sont loin de la réalité ;

— les relations de dispersion sont moins en accord avec les mesures en $\pi^+ p$. Etant données les difficultés expérimentales ce résultat demande une confirmation. Cette nouvelle mesure est en cours ;

— à l'extrême avant, la section efficace différentielle présente une inflexion qui pourrait bien correspondre à un « zéro » dans la trajectoire de l'amplitude π -nucléon.

b) Interaction $\bar{P} P$

Pendant l'année 1971 nous avons mené à bien, au PS du CERN, la mesure des répartitions angulaires des voies suivantes :

$$\bar{P} P \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$\bar{P} P \rightarrow \pi^- \pi^+$$

$$\bar{P} P \rightarrow K^- K^+$$

$$\bar{P} P \rightarrow K^+ K^-$$

$$\pi^- P \rightarrow P\pi^-$$

à 3 et 4 GeV/c. Les 200 000 événements enregistrés devraient fournir 5 000 à 6 000 événements utiles. Les données recueillies dont l'exploitation s'achève montrent une structure complexe. Cette expérience a été effectuée en collaboration avec l'Université de Padoue.

c) Interaction $\pi \pi$

Pour étudier la réaction $\pi^- P \rightarrow \pi^+ \pi^- n$, une expérience est en cours à SATURNE, qui utilise des π^- de 2.5 GeV/c. Cette expérience comporte des chambres à fils (environ 60 000 fils) disposés autour de l'aimant à grande ouverture « VÉNUS ». Elle devrait se terminer au cours de l'année 1973.

d) Un projet d'expérience sur les interactions $K_L^0 p \rightarrow K^0 S p$ et $K_L^0 p \rightarrow K_L^0 p$ est en cours de rédaction.

Participant à ces expériences MM. ABILLON, BREVAUX, BRUERE-DAWSON, BROSKIEWICZ, CAMBERLIN, CHAVANON, CROZON, DIACZEK, DUNEAU, LERAY, MARQUESTE, MENDIBURU, PAIRAT, PATIOU, POUTOT, SAJOT, SIDWELL, SOTIRAS, STERN, TOCQUEVILLE, TURLLOT, VALENTIN et VEY.

V. — PHYSIQUE ATOMIQUE

M^{me} M. SPITZER-ARONSON et M. P. SOLEILLET.

Extension de la région fluorescente en dehors de la région excitée dans de la vapeur de Zn, éclairée par la radiation $3\,076\text{ \AA}$, du fait du déplacement des atomes pendant la durée de leur vie à l'état excité.

La radiation $3\,076\text{ \AA}$ correspond au passage de l'état normal, un état de singulets 1S_0 à un état de triplets 3P_1 . C'est un passage interdit si l'on applique strictement les règles de sélection. En fait il n'est pas strictement interdit, mais la durée de vie à l'état excité est particulièrement longue 2.10^{-5} sec. (même comparée à celle du Hg pour la raie homologue $2\,537\text{ \AA}$ qui est 200 fois plus courte).

Tenant compte du fait que la vitesse des atomes dans la vapeur aux températures où se fait l'expérience est de l'ordre de 5.10^4 cm sec., on en déduit une distance entre le lieu de l'excitation d'un atome et celui de son émission de l'ordre du centimètre.

La région d'émission dans le tube contenant la vapeur de Zn traversée par le faisceau excitateur de radiation $3\,076\text{ \AA}$ doit donc largement s'étendre au delà de la région excitée.

C'est bien ce qui a été observé, mais la photométrie des prises photographiques indique une décroissance beaucoup plus rapide que prévu quand on s'éloigne de la région excitée.

Aussi, pour s'assurer qu'il s'agit bien du phénomène recherché, on va faire la même expérience avec la vapeur de Cd et la raie $3\,261\text{ \AA}$ où la distance moyenne entre le lieu d'excitation de l'atome et le lieu de l'émission est de l'ordre du millimètre, et on va comparer les résultats.

De toutes façons on a pu vérifier qu'il ne s'agit pas de résonance secondaire comme on l'avait craint un moment.

VI. — GROUPE DE CALCUL

Les principales activités de ce groupe, outre l'assistance apportée aux utilisateurs, ont porté sur :

— l'écriture d'un programme établissant une liste de concordance à partir d'un texte latin ;

— la collaboration avec l'équipe de Physique nucléaire qui construit l'appareil Coccinelle ;

— l'écriture d'un programme d'acquisition de données au moyen d'un calculateur Hewlett-Packard HP 2 114 dans une expérience de physique nucléaire.

Le calculateur C I I - 90.80 a fonctionné de façon satisfaisante et est maintenant couplé à l'ordinateur C I I - 90.10 de Physique nucléaire, lui-même relié à l'appareil Coccinelle. Cette liaison entre ordinateur ne devrait pas perturber l'exploitation du calculateur C I I - 90.80.

PUBLICATIONS

1. — G. BORDES, *t-dependence of the form factors of the nucleons and the compositeness of the ρ -meson* (*Lettere al Nuovo Cimento*, à paraître).

2. — Ch. CHAHINE, *Problèmes de Self-énergie et de différence de masse électromagnétiques* (Thèse de doctorat).

3. — Ch. CHAHINE, I. *Renormalisation, electromagnetic Self-energies and mass difference in an elementary or composite multiplet model* (Rapport interne PAM - 7 206).

4. — J.-C. HOUARD et M. IRAC-ASTAUD, *Mellin transformation method for nonpolynomial interactions* (*Il Nuovo Cimento*, 8 B, p. 461, 1972).

5. — B. JOUVET (avec la collaboration de M. WHIPPMAN), *Infinitely composite particles and the condition $Z = 0$* (*Phys. Rev.*, D 4, p. 3222, 1971).

6. — J.-C. LE GUILLOU (avec la collaboration de J.-L. BASDEVANT et H. NAVELET), *Crossing and Physical Partial-Wave Amplitudes* (*Il Nuovo Cimento*, 7 A, p. 363, 1972).

7. — J. PARISI, N. ARTEAGA-ROMERO, A. JACCARINI et P. KESSLER, *Experimental conditions for photon-photon collisions with almost real photons* (*Lettere al Nuovo Cimento*, 1, p. 935, 1971).

8. — J. PARISI et P. KESSLER, *Study of the vertices $\pi^0\gamma\gamma$, $\eta\gamma\gamma$ and $\eta'\gamma\gamma$ with almost real photons* (*Lettere al Nuovo Cimento*, 2, p. 755, 1971).

9. — J. PARISI et P. KESSLER, *Study of the vertices $\pi^0\gamma\gamma$, $\eta\gamma\gamma$ and $\eta'\gamma\gamma$ with one almost real and one highly virtual photon* (*Lettere al Nuovo Cimento*, 2, p. 760, 1971).

10. — J. PARISI, N. ARTEAGA-ROMERO, A. JACCARINI et P. KESSLER, *Comment on the experimental investigation of photon collisions in electron-positron storage rings* (*Phys. Rev.*, D 4, p. 2927, 1971).

11. — J. PARISI et P. KESSLER, *Investigation of the vertices $\pi^0\gamma\gamma$, $\eta\gamma\gamma$ and $\eta'\gamma\gamma$ with electron-positron storage rings* (*Phys. Rev.*, D, du 1-5-1972).
12. — J. PARISI et P. KESSLER, *Investigation of the vertices $\pi^0\gamma\gamma$, $\eta\gamma\gamma$ and $\eta'\gamma\gamma$ with electron-positron storage rings. II* (*Phys. Rev.*, D, du 1-5-1972).
13. — B. ROEHNER, G. COCHARD, M. KARATCHENTZEFF et P. KESSLER, *Neutrino-production of pions near the first resonance* (*Nuclear Physics*, B, 31, p. 349, 1971).
14. — M. KARATCHENTZEFF, G. COCHARD, B. ROEHNER et P. KESSLER, *Inverse electroproduction at the N^* (1236)* (Rapport interne, PAM - 7105).
15. — G. COCHARD, M. KARATCHENTZEFF, P. KESSLER et B. ROEHNER, *Electro-production at the N^* (1236)* (Rapport interne, PAM - 7201).
16. — N. ARTEAGA-ROMERO, *Photon-photon collisions, a new field in high energy physics - Concepts in hadron physics* (*Springer Verlag*, Vienne, 1971, p. 380).
17. — E. CALVA-TELLEZ, P. KESSLER et J. PARISI, *Acoplanarity and radiative corrections in Bhabha scattering* (A paraître dans *Lettere al Nuovo Cimento*).
18. — Collaboration M. BENAYOUN et Ph. LERUSTE,
 - a) *Local models for manychannel low energy KN scattering* (*Nuovo Cimento*, 5 A, p. 513, 1971).
 - b) *Some criticisms of phenomenological models* (*Nuovo Cimento*, 6 A, p. 441, 1971).
 - c) *Sur les problèmes d'indétermination en théorie des collisions à plusieurs voies* (Rapport interne, PAM - 7104).
19. — Ph. LERUSTE, Z. STRACHMAN, *The KN low energy region and the Y^* (1405) coupling constants* (Prétirage — Laboratoire de Physique générale, Faculté des Sciences — Paris).
20. — SENE, DELPIERRE, KAHANE et DE CRESPIN DE BILLY,
— *Scattering of 14 MeV polarized neutrons by C^{12} O^{16} and D*.
— *Polarized neutrons sources using a compression ionizer* (3^e International Symposium on polarisation phenomena of nucleon, Maddison, 1970).
21. — A. DE BELLEFON, A. BERTHON, K. RANGAN, J. VRANA (en collaboration avec : R.h.e.l. — Chilton Didcot ; D.Ph.P.E. — Saclay et C.R.N. — Strasbourg), *Channel Cross Sections of K^-p Reactions from 1.26 to 1.84 GeV/c* (*Nuovo Cimento*, 7 A, n^o 3, p. 567, 1972).

22. — A. BERTHON, J. VRANA et al., *The reaction $K^-p \rightarrow \omega\Lambda$ in the CM energy Range 1915 - 2168 MeV* (Nucl. Phys., B 39, 1-4-1972).

23. — A. BERTHON et al., *Dual Feature of $\bar{K}N$ elastic scattering amplitudes* (à paraître).

24. — J.-L. NARJOUX, J.-M. BRUNET, *K^+p cross sections between 2.1 and 2.7 GeV/c :*

a) RHEL preprint, R P P-H-74 ;

b) Nucl. Phys., B 36, 1972, 45.

25. — J.-L. NARJOUX, J.-M. BRUNET, *K^+p elastic scattering between 2.11 and 2.72 GeV/c* (RHEL preprint, R P P-H-83).

26. — J.-L. NARJOUX, J.-M. BRUNET, *Resonance production in the reactions $K^+p \rightarrow K N \pi$ in the intermediate energy range* (Nucl. Phys., B 37, 1972, p. 114).

27. — J.-L. NARJOUX, J.-M. BRUNET, *Resonance production in four and five bodies K^+p interactions at 2.11, 2.31, 2.53 and 2.72 GeV/c* (Communication à la conférence d'Oxford, 1972).

28. — J.-L. NARJOUX, J.-M. BRUNET, *Four and five bodies K^+p interactions at 2.11, 2.31 and 2.72 GeV/c* (Article soumis à Nucl. Physics B).

29. — J.-L. NARJOUX, *The film transfert and programming system of Coccinelle and its application to the processing of Mirabelle pictures* (International Symposium on data handling of bubble and spark chambers, Dubna, 12-16 octobre 1971).

30. — J.-M. ABILLON, A. BORG, M. CROZON, Th. LERAY, J.-P. MENDIBURU, J. TOCQUEVILLE, *π -p forward elastic scattering* (à paraître dans Nuclear Physics).

31. — J.-M. ABILLON, Ph. CHAVANON, M. CROZON, A. DIACZECK, Th. LERAY, J.-P. MENDIBURU, J. TOCQUEVILLE, J. VALENTIN (en collaboration avec l'Université de Padoue — Italie), *Letter of intention — Study of the reaction $K_L^0 p \rightarrow K_S^0 p$ in the momentum interval $4 P_{K^0} \leq 16$ GeV/c — PH. I/ Comm. 71/35* (CERN, juillet 1971).

THÈSES

1. — B. BACCARI, Doctorat de 3^e cycle, 30 septembre 1971, Paris : *Interaction K^-p à 2 GeV/c.*

2. — Ph. CHAVANON, Doctorat d'état, 21 octobre 1971, Paris : *Contribution à l'étude de la réaction $p\pi^+ \rightarrow p\pi^+\pi^0$ entre 1,6 et 2 GeV.*

3. — J. TOCQUEVILLE, Doctorat d'état, 18 février 1972, Paris : *Mesure des sections efficaces différentielles élastiques π - p à 180° entre 0,875 et 1,58 GeV/c.*

4. — M. DE CRESPIN DE BILLY, Doctorat de 3^e cycle, Paris, 1972 : *Méthode du recul scintillant appliquée à la spectrométrie par temps de vol des neutrons. Etude de la diffusion élastique des neutrons de 14 MeV sur le deutérium aux petits angles.*

SÉMINAIRES

Un séminaire hebdomadaire a été organisé par l'équipe de Physique théorique du Laboratoire, avec l'équipe de M. G. RIDEAU (Paris VII).

Séminaires organisés sous la présidence de M. F. PERRIN

G. BACKENSTOSS (CERN, Genève), 13 mars 1972, *Some topics on exotic atoms* ;

F. MULLER (CERN, Genève), 20 mars 1972, *Etude expérimentale des diffusions $K\pi$ et $\pi\pi$* ;

G. FONTAINE (Collège de France, Laboratoire de Physique nucléaire), 10 avril 1972, *Etude de certaines réactions multineutres dans l'hydrogène* ;

B. EQUER (Collège de France, Laboratoire de Physique nucléaire), 17 avril 1972, *Dépouillement automatique des clichés de grandes chambres à bulles* ;

L. GOLDZAHN (CEN, Saclay), 24 avril 1972, *Utilisation des deutons accélérés dans Saturne* ;

A. BERTHON (Collège de France, Laboratoire de Physique atomique), 8 mai 1972, *La réaction $K^-p \rightarrow \omega\Lambda$ près du seuil* ;

C. CHARPAK (CERN, Genève), 9 juin 1972 ; *Progrès récents des techniques expérimentales en physique des hautes énergies.*

CONGRÈS ET MISSIONS

G. BORDES a assisté à l'Ecole d'été d'Ettore Majorana, Trapani (Italie) du 7 au 17 juillet 1971.

A. BERTHON, J.-M. BRUNET, J.-C. LE GUILLOU et J. VRANA ont assisté à la Conférence internationale sur les particules élémentaires du 29 juin au 7 juillet 1971, à Amsterdam.

J.-C. LE GUILLOU a assisté à l'Ecole d'été des Houches du 7 juillet au 29 août 1971.

A. MERIC DE BELLEFON et P. KESSLER ont assisté à la Conférence internationale sur les collisions à haute énergie du 5 au 7 avril 1971.

G. BORDES a assisté à l'Ecole d'été de Erice du 31 août au 15 septembre 1971.

A. BERTHON a participé à un séminaire d'étude sur l'ECFA à Tirrenia du 12 au 19 septembre 1971.

P. KESSLER et A. COURAU ont assisté à la Conférence internationale de Cornell sur les interactions des électrons et des photons à haute énergie, à Ithaca du 22 au 28 août 1971.

P. KESSLER a participé à la Conférence sur interactions électromagnétiques à Frascati du 30 avril au 3 mai 1972.

J. KAHANE a assisté à l'Ecole d'été de Varenne, été 1971.

DISTINCTION

M. Francis PERRIN a été nommé membre de l'Académie des Sciences de Belgrade.