

## Les collisions photon-photon

par J.-C. MONTRET,

Université de Clermont II, Aubière.

### Résumé.

La physique des particules élémentaires a connu, ces deux dernières décennies, un essor considérable avec, en particulier, la mise en service d'anneaux de collision électron-positron de haute énergie (quelques dizaines de GeV à Hambourg). Parmi tous les sujets abordés, les collisions photon-photon jouent un rôle privilégié car elles constituent un laboratoire idéal pour tester les principaux aspects et comportements du photon, dans sa nature et ses modes d'interaction.

La quantification du champ électromagnétique impose l'existence d'une particule de masse nulle, se déplaçant à la vitesse de la lumière : le photon. Cette nature corpusculaire du rayonnement électromagnétique, bien testée par les expériences de diffusion Compton et d'effet photoélectrique, a, dès 1935, attiré l'attention des physiciens théoriciens. EULER et KOCKEL avaient, dès cette époque, calculé la diffusion lumière-lumière, interdite par les équations de MAXWELL classiques. Ces calculs furent repris successivement par CALOGERO et ZEMACH en 1960, et par les groupes de théoriciens de P. KESSLER en France et J. BRODSKY aux Etats-Unis aux alentours des années 1970. La motivation était la perspective proche d'anneaux de collisions électron-positron en Europe et aux Etats-Unis, destinés à l'étude d'états hadroniques (1) par annihilation électron-positron. On peut représenter un tel processus à l'aide d'un graphe (fig. 1), qui image l'interaction de

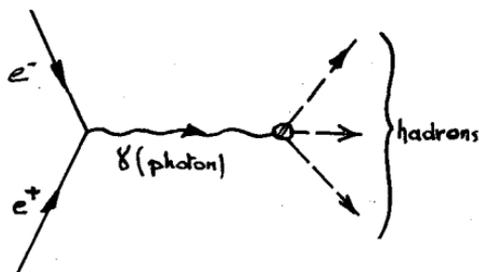


Fig. 1

(1) On appelle hadrons, les particules interagissant essentiellement par interaction forte.

l'électron et du positron et la création de hadrons par l'intermédiaire d'un photon « virtuel ».

Bien que massif, ce dernier possède les caractéristiques quantiques du photon réel et les règles de conservation imposent aux hadrons produits d'être dans un état de moment angulaire 1, de parité et de conjugaison de charge négatives.

Les processus de collisions photon-photon sont d'une nature différente de ceux décrits précédemment. Schématisé fig. 2, le processus peut physiquement être présenté de la manière suivante :

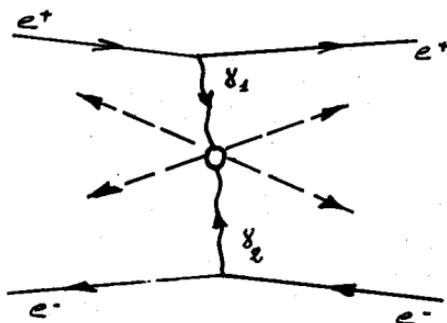


Fig. 2

Dans le collisionneur, les paquets d'électrons et de positrons se croisent avec des vitesses proches de celle de la lumière. Lors du croisement, un électron d'un paquet peut rayonner un photon dans le champ d'un positron qui passe très près. Réciproquement, le positron rayonne un photon dans le champ de l'électron. Ces deux photons émis simultanément peuvent interagir et fournir un état final leptonique ou hadronique dans un état quantique de moment angulaire pair 0, 2, ... de conjugaison de charge positive et de parité positive ou négative.

La mise en fonctionnement des anneaux de collisions d'Orsay et de Hambourg en Europe et de Stanford aux Etats-Unis a permis de mettre en évidence et d'étudier ces collisions photon-photon.

Nous allons présenter les principaux résultats sur l'interaction photon-photon  $\rightarrow$  hadrons.

## 1. SPECTROSCOPIE DES RESONANCES (2).

### 1. Les événements à deux particules dans l'état final.

a)  $\gamma + \gamma \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ .

(La collision des deux photons donne deux mésons  $\pi$ ).

(2) On appelle résonances les particules à durée de vie très courte ( $< 10^{-22}$  sec). Elles sont caractérisées par leur masse, leur spin, leur parité et leur G-parité.

\* *Près du seuil de production*, soit pour une énergie comprise entre 300 MeV et 700 MeV, les résultats d'une expérience faite à Orsay ont montré que les mésons  $\pi$  produits peuvent

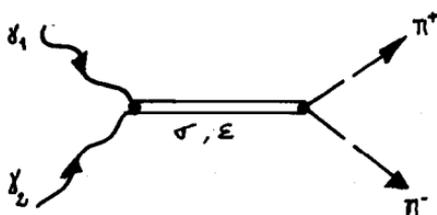


Fig. 3

former un état lié appelé  $\sigma$  ou  $\epsilon$ . Cette résonance est attachée directement au système à deux photons (fig. 3), possède une masse entre 600 et 700 MeV avec une largeur de 200 MeV environ (3).

\* *Au-dessus du seuil.*

Pour une énergie supérieure à 700 MeV, les groupes travaillant à Hambourg (la machine est appelé PETRA) et à Stanford aux Etats-Unis (la machine est appelée SPEAR), ont mis en évidence aussi bien dans le mode chargé ( $\pi^+, \pi^-$ ) que dans le mode neutre ( $\pi^0, \pi^0$ ) un état résonant, de spin 2, parité +, de masse 1 270 MeV, de largeur 170 MeV, appelé  $f$ .

b)  $\gamma + \gamma \rightarrow K^+ + K^-$ .

[La collision des deux photons donne deux mésons K (particules étranges)].

A PETRA, l'existence d'une particule se désintégrant en  $K^+ K^-$  ou  $K^0 \bar{K}^0$  a été confirmée. La masse est 1 520 MeV, le spin 2, la parité + et la largeur 75 MeV).

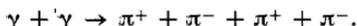
c) Un certain nombre de résonances, couplées directement au système à deux photons, ont été de plus observées. Ce sont :

- le  $\eta'$ , spin 0, parité  $-$ , masse 958 MeV,
- le  $S^*$ , spin 0, parité +, masse 997 MeV,
- le  $\epsilon$ , spin 0, parité +, masse 1 300 MeV,
- le  $A_2$ , spin 2, parité +, masse 1 320 MeV.

(3) La largeur d'une résonance est liée à sa durée de vie par la relation d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta E \cdot \Delta t \simeq \hbar$ .

2) Les événements à quatre particules chargées dans l'état final.  
Comportement hadronique du photon.

Pour l'essentiel, il s'agit de réactions du type :



Les résultats expérimentaux montrent que pour des énergies du système photon-photon comprises entre 1 200 MeV et 2 000 MeV, cette réaction est dominée par le fait suivant : les quatre mésons  $\pi$  produits le sont essentiellement par l'intermédiaire de deux mésons  $\rho^0$  (fig. 4). Chacun de ces mésons  $\rho^0$ , construit lors de l'in-

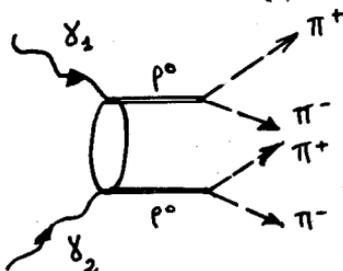


Fig. 4

teraction des deux photons a une masse de 770 MeV, une largeur de 150 MeV et se décompose en une paire  $\pi^+\pi^-$ . De plus, le méson  $\rho^0$  a les mêmes nombres quantiques que le photon, ce qui lui permet de se coupler de manière naturelle à ce dernier. Une part importante de l'interaction décrite par le schéma précédent (fig. 4) peut alors être représentée par le graphe (fig. 5) où les deux photons, avant d'interagir, se sont transformés en mésons  $\rho^0$ , donc en hadrons. Ceci confirme le comportement *hadronique* du photon qui avait été testé dans d'autres expériences de photoproduction et d'annihilation.

Cependant, tout ne peut pas être décrit pour ces états finaux à quatre mésons  $\pi$  chargés, par l'image précédente. Le nombre très important de ces réactions observées (on dit que la section

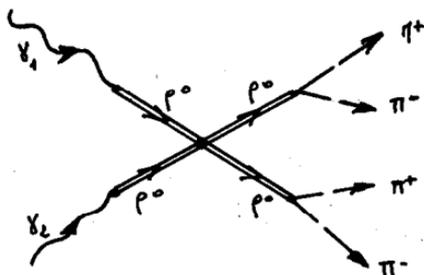


Fig. 5

efficace est grande) laisse entrevoir, avec environ une masse de 1 600 MeV, une possible résonance très particulière appelée « gluonium ». Cette idée nouvelle et excitante prend sa place dans la description moderne que l'on fait des particules élémentaires en termes de particules ponctuelles, les quarks, attachés les uns aux autres par des gluons, ces derniers portant l'interaction forte liant les quarks entre eux. Cette image est à rapprocher de celle de l'atome où les électrons sont liés au noyau par des photons.

## II. LA DIFFUSION PROFONDEMENT INELASTIQUE ELECTRON-PHOTON. UN TEST DE LA STRUCTURE EN QUARKS DE CE DERNIER.

Dans certains cas, un des deux photons, par exemple  $\gamma_1$ , peut, lorsque sa longueur d'onde est très petite, aller « voir » à l'intérieur du deuxième photon  $\gamma_2$  et tester de ce fait sa nature intime.

Le comportement hadronique vu précédemment, laisse supposer que le photon, sous certaines conditions, peut être regardé comme un état lié quark-antiquark ( $q, \bar{q}$ ). La fig. 6 schématise la

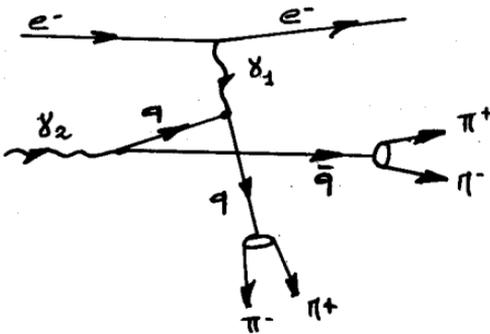


Fig. 6

diffusion du photon  $\gamma_1$  par le quark  $q$  constituant en partie le photon  $\gamma_2$ . Les résultats spectaculaires d'expériences faites à Hambourg sur l'anneau de collision PETRA ont montré que les « fonctions de structure du photon » nécessitent, pour être comprises, l'introduction des quarks et de leur mécanique quantique particulière : la chromodynamique quantique.

C'est une nouvelle image physique du photon qui nous est offerte, complétant le caractère « corpusculaire » de ce dernier.

## CONCLUSION.

Les collisions photon-photon constituent un « laboratoire » de grand intérêt pour la physique actuelle car elles permettent :

- d'atteindre, en l'absence de hadrons dans l'état initial, des résonances dans des configurations uniques de spin, parité et conjugaison de charge ;
- de tester le comportement hadronique et le caractère composite du photon ainsi que la validité de la chromodynamique quantique.

La perspective au Centre Européen de Recherche Nucléaire (C.E.R.N.) des anneaux de collisions  $e^+e^-$  (L.E.P.), d'énergie de l'ordre de 100 GeV, devrait permettre d'approfondir les questions qui se posent avec l'ouverture de cette nouvelle voie de la physique.

#### BIBLIOGRAPHIE

---

Un lecteur intéressé trouvera des renseignements complémentaires dans :

- «  $\gamma \cdot \gamma$  collisions », Proc. International Workshop, Amiens, 1980. Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag Editor.
  - « *Photon-photon interactions 1981* », Proc. International Workshop, Paris, 1981. World Scientific Publishing, Singapore Editor.
-