

Jean-Marc Richard

INTRODUCTION À LA PHYSIQUE DES HADRONS

Symétries, structure et dynamique



Jean-Marc Richard

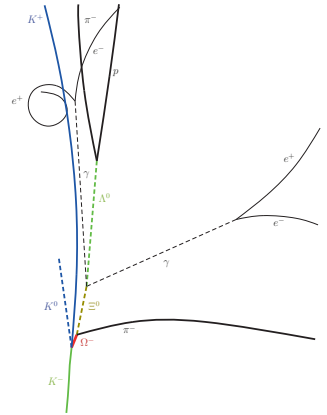
La collection « New frontiers in Nuclear Physics » rassemble des ouvrages traitant de physique nucléaire au sens large, incluant l'astrophysique nucléaire et la physique hadronique, ainsi que les interfaces avec d'autres disciplines aux frontières des connaissances actuelles. Cette collection est conçue pour être accessible aux étudiants de Master, ainsi qu'aux chercheurs désirant acquérir l'état de l'art sur un sujet spécifique. Les sujets sont abordés avec pédagogie, présentant les étapes clefs et les expériences cruciales du domaine, ainsi qu'un développement rigoureux qui mène le lecteur à la pointe des découvertes les plus récentes.

L'ouvrage présente un panorama des particules élémentaires à interactions fortes, comme le proton et le neutron, constituants du noyau, le pion qui assure leur liaison, et toutes leurs excitations. Le modèle des quarks est exposé en détail. Il propose une description unifiée de tous ces hadrons et s'étend aux particules avec étrangeté, charme ou beauté.

La présentation fait une large place à l'histoire, et même à quelques anecdotes piquantes qui ont jalonné les progrès théoriques et expérimentaux. Mais les aspects les plus modernes sont également exposés, comme la chromodynamique quantique et les théories effectives, les fonctions de structure, les propriétés électromagnétiques des hadrons, et enfin leur désintégration par interaction faible. Les spéculations sur les hadrons exotiques permettent de comprendre l'enjeu de certaines expériences sur les collisionneurs actuels, notamment le LHC.

La lecture ne requiert pas d'autre préalable que quelques notions de physique quantique. Ce livre s'adresse aux étudiants de M1 et M2, ainsi qu'aux physiciens et chimistes désirant s'initier au monde des hadrons, que se partagent la physique nucléaire et la physique des particules. La compréhension peut être testée par les dizaines d'exercices qui sont proposés, ainsi qu'une solution pour certains d'entre eux.

Jean-Marc Richard, diplômé de l'École Normale Supérieure, a occupé différents postes d'enseignant-chercheur en France (universités Paris-Sud, Paris-6, Grenoble-1 et Lyon-1) mais aussi à l'étranger (Stony-Brook et Brookhaven · N.Y., Aarhus · Danemark, Heidelberg et Bonn · Allemagne), ainsi que dans des centres internationaux comme l'Institut Laue-Langevin (Grenoble), le CERN (Genève) et ECT* (Trento). Ses travaux ont porté sur les interactions entre hadrons, le modèle des quarks, les systèmes atomiques à petit nombre de charges, les atomes exotiques, la désintégration faible des saveurs lourdes, la violation du nombre baryonique et les propriétés mathématiques des systèmes quantiques à petit nombre de corps.



Reconstruction annotée du cliché de chambre à bulles du 31 janvier 1964 correspondant à la découverte du Ω^- . Le code des couleurs est : noir pour les leptons, photons et hadrons non étrangetés, bleu pour l'étrangeté $S = 1$, vert pour $S = -1$, olive pour $S = -2$ et rouge pour $S = -3$. Les particules en pointillé, neutres, sont invisibles et sont reconstruites sur le schéma par conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement à chaque vertex. Les deux photons viennent de la désintégration immédiate du π^0 après la réaction $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$.

ISBN : 978-2-7598-2215-7



9 782759 822157



NEW FRONTIERS IN NUCLEAR PHYSICS

Jean-Marc Richard



INTRODUCTION À LA PHYSIQUE DES HADRONS

Symétries, structure et dynamique

La collection *New frontiers in Nuclear Physics* rassemble des ouvrages traitant de physique nucléaire au sens large, incluant l'astrophysique nucléaire et la physique hadronique, ainsi que les interfaces avec d'autres disciplines aux frontières des connaissances actuelles. Cette collection est conçue pour être accessible aux étudiants de Master, ainsi qu'aux chercheurs désireux d'acquies l'état de l'art sur un sujet spécifique. Les sujets sont abordés avec pédagogie, présentant les étapes clés et les expériences cruciales du domaine, ainsi qu'un développement rigoureux qui mène le lecteur à la pointe des découvertes les plus récentes.

Cet ouvrage a été composé à l'aide de KOMA-Script et de LaTeX en utilisant la classe kaobook. Le code source est disponible à l'adresse : <https://github.com/fmarotta/kaobook>

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2215-7 - ISBN (ebook) : 978-2-7598-2649-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2021

Unfassbare Ideen äußern sich in fassbaren Formen
August Macke

Arx tarpeia Capitoli proxima
Proverbe romain

Va, petit livre, et choisis ton monde ;
car, aux choses folles, qui ne rit pas, bâille ;
qui ne se livre pas, résiste ;
qui raisonne, se méprend ;
et qui veut rester grave, en est maître
Rodolphe Töpffer

Préface

Over several decades, Jean-Marc and his collaborators have made many contributions to Hadron Physics and the book reflects the contribution of Jean-Marc et al., both in the choice of examples and in the material.

One of the many attractive features is the attention to history with many amusing anecdotes: some involving the author. Beyond the contributions of Jean-Marc, the book also covers many European contributions neglected in some of the literature.

For example, the earliest enigma: the measurement of the proton magnetic moment by Otto Stern in the 1930s. It took thirty years to understand the result by the brightest theorists (Murray Gell-Mann, George Zweig) that the proton is a composite system. And another decade until the majority of the field accepted this conclusion, one of the main achievements of twentieth century science, on par with the big bang, double-helix quantum mechanics, etc. But of course some obscurity remains about confinement as with wave-particle duality, etc.

The book is original in many ways. An important one is the restriction to hadrons. Most current books deal with both hadrons and leptons.

I am sure the book will become a classic and will be translated.

Gabriel Karl
Emeritus Professor
University of Guelph (Canada)

Avant-propos

Je remercie EDP Sciences et le directeur de collection d'avoir sollicité la rédaction de cet ouvrage. Le plus difficile a été de limiter le sujet, car des hadrons on glisse facilement vers la chromodynamique et le modèle standard, et de l'interaction nucléon-nucléon vers les noyaux et même aux étoiles à neutrons. Or il n'était pas question d'écrire une encyclopédie de physique sub-atomique.

À regret il a fallu aussi renoncer à des développements trop techniques, et se contenter sur certains sujets d'aiguiser l'appétit des lecteurs qui devront aller chercher des ouvrages ou des articles de revue plus spécialisés.

Enfin, on pardonnera le travers de couper le fil de l'exposé avec des anecdotes parfois trop connues et à l'authenticité douteuse, sauf pour celles dont j'ai été le témoin direct.

Le plan adopté est d'esquisser d'abord l'histoire de la physique des hadrons, puis de présenter la construction des hadrons à partir des quarks, et enfin de discuter des interactions fortes, électromagnétiques et faibles des hadrons.

Des exercices sont proposés dans chaque chapitre et une solution de certains d'entre eux est donnée à la fin de l'ouvrage.

Il est impossible de citer tous les maîtres et collaborateurs qui m'ont inculqué, non sans mal, les notions qui sont présentées ici, mais je leur exprime toute ma gratitude. Une mention spéciale est due à André Martin (1929-2020) qui m'a initié aux méthodes rigoureuses et m'a fait partager certains de ses travaux sur le modèle des quarks et les systèmes de charges.

Je suis très reconnaissant à Élie Aslanides, Claude Fayard et Jérôme Margueron d'avoir relu la première version de cet ouvrage. Ils ont prodigué des critiques très constructives et corrigé nombre de coquilles. Des remerciements sont dus également à Federico Marotta qui a mis à notre disposition son style de composition « kaobook » et y a apporté les adaptations nécessaires.

Last but not least, je remercie chaleureusement mon ami de longue date Gabriel Karl d'avoir accepté d'écrire une préface. Son sens physique, sa culture scientifique pluridisciplinaire, son enthousiasme communicatif et son humour parfois décapant ont accompagné plusieurs générations de physiciens et inspiré bien des vocations.

Table des matières

Préface	v
Avant-propos	vii
1 Histoire	1
1.1 Les premiers hadrons	2
1.2 Les résonances	3
1.3 Le moment magnétique du proton	4
1.4 La découverte de l'antiproton	5
1.5 Étrangeté	6
1.6 Le modèle des quarks	8
La voie de l'octet	8
La règle de Zweig	10
1.7 Le charme et la beauté	11
1.8 Radiographie des nucléons	13
1.9 Chromodynamique quantique	13
Exercices	15
Références	15
2 Classification	21
2.1 Quarks et leptons	21
2.2 Les bosons de jauge	22
2.3 Les hadrons ordinaires	23
Mésons	24
Baryons	26
2.4 Hadrons exotiques	27
Exercices	29
Références	29
3 Les instruments et les méthodes	31
3.1 Les rayons cosmiques	31
3.2 Les accélérateurs hadroniques	31
3.3 Les machines à électrons	35
Les collisionneurs électron-positon	35
Rayonnement synchrotron et Compton inverse	35
Collisions électron-proton et électron-noyau	36
3.4 Cibles fixes ou collisionneurs ?	36
3.5 Les détecteurs	37
3.6 Les outils de l'analyse	38
Cinématique	38

Espace de phase	39
Masse invariante	40
Désintégration en deux corps	40
Désintégration en trois corps. Diagramme de Dalitz	43
Exercices	47
Références	49
4 Symétries	51
4.1 Isospin des hadrons	51
4.2 Conjugaison de charge	53
4.3 Parité isotopique ou G-parité	55
4.4 Isospin des antiparticules	56
4.5 La symétrie de saveur $SU(3)_F$	57
4.6 La symétrie $SU(6)$	59
4.7 Le charme et $SU(4)$	59
4.8 Le nombre baryonique	60
Annexe 4.A $SU(2)$ et $SU(3)$	62
Rotations	62
Le groupe $SU(3)$	65
Exercices	67
Références	69
5 Le quarkonium	71
5.1 Le spectre expérimental	71
5.2 Le modèle non relativiste	72
5.3 Rappels sur l'équation de Schrödinger	74
5.4 Conséquences de l'indépendance de saveur	76
5.5 Ordre des niveaux	77
5.6 Fonction d'onde à l'origine	78
5.7 Corrections dépendant du spin	79
États S	79
États P	81
Mélange orbital	82
5.8 Production et désintégration	83
5.9 Le quarkonium par les règles de somme de QCD	85
5.10 Quarkonium par la QCD sur réseaux	86
Exercices	88
Références	91
6 Les baryons	95
6.1 Le cas de trois quarks identiques	96
Mouvement intrinsèque	96
État fondamental	96
Premier état excité	98

Deuxième niveau d'excitation	100
6.2 Les autres baryons légers	100
6.3 Le $[20, 1^+]$, enfin	101
6.4 La résonance de Roper	103
6.5 Les baryons étranges, charmés ou beaux	104
6.6 Les baryons à double saveur lourde	106
6.7 Les baryons à triple saveur lourde	107
6.8 Le confinement de trois quarks	108
6.A Formalisme hypersphérique	111
6.B Méthode variationnelle	112
Exercices	115
Références	117
7 Sacs	121
7.1 Introduction	121
7.2 Le modèle	121
7.3 Résultats	123
7.4 Corrections et développements divers	124
Mouvement du centre de masse	124
Excitations	125
Hadrons très excités	125
Multiquarks	125
Sacs et forces nucléaires	127
7.5 Modèle des sacs pour les quarks lourds	128
7.6 Conclusion	129
Exercices	130
Références	130
8 Chromodynamique quantique	133
8.1 La QCD	133
Le lagrangien de la QCD	133
La liberté asymptotique	134
Le confinement	135
8.2 Simulations sur réseaux	136
8.3 La méthode des règles de somme	137
8.4 Théories effectives	137
Considérations générales	137
Développement en portée	138
Théorie effective en présence d'un quark lourd	141
Symétrie pour les hadrons doublement lourds	142
Symétrie entre quark lourd et diquark lourd	142
Exercices	143
Références	143

9	Hadrons exotiques	145
9.1	Introduction	145
9.2	Revue des résultats	146
	Remarques préliminaires	146
	Dibaryons et multibaryons	147
	Baryons exotiques	150
	Mésons exotiques	152
	Résonances très lourdes	156
9.3	Modèles “moléculaires” pour les hadrons exotiques	157
	Généralités	157
	Noyaux légers	157
	Hypernoyaux légers	158
	Hypernoyaux charmés	159
	Baryonium	160
	Molécules méson-baryon	160
	Molécules méson-méson	161
9.4	Les multiquarks dans les modèles de quarks constituants	162
	Liaison chromomagnétique	162
	Liaison chromoélectrique	165
	Exotiques très lourds	166
9.5	Cordes et dualité	167
9.6	Hybrides	169
9.7	Les exotiques sur réseaux	171
9.8	Les exotiques à partir des règles de somme	172
	Exercices	173
	Références	174
10	La structure du nucléon	183
10.1	Introduction	183
10.2	Cinématique de la diffusion d’électrons	184
10.3	Facteurs de forme	184
10.4	Modèles pour les facteurs de forme	186
10.5	Autres facteurs de forme électromagnétiques	188
10.6	Autres facteurs de forme	189
10.7	Diffusion profondément inélastique et autres processus	189
10.8	Cinématique de la diffusion profondément inélastique	190
10.9	Analyse de la diffusion profondément inélastique	191
10.10	Loi d’échelle de Bjorken et relation de Callan-Gross	192
10.11	Fonctions de structure	194
10.12	Fonctions de structure généralisées	197
10.13	Dépendance en impulsion transverse	198
	Exercices	199
	Références	199

11 Le spin des quarks et des hadrons	203
11.1 Introduction	203
11.2 Cibles ou faisceaux polarisés	203
11.3 Effets de spin dans la diffusion hadron-hadron	204
Diffusion élastique pion-nucléon	205
Annihilation en deux mésons pseudoscalaires	207
Diffusion nucléon-nucléon	208
Diffusion antinucléon-nucléon	209
Formation d'une paire hypéron -antihypéron	210
11.4 Le rôle du spin des quarks	213
Écart hyperfins	213
Fonctions de structure dépendant du spin	215
Exercices	216
Références	219
12 Interactions électromagnétiques	221
12.1 Pseudoscalaires	221
12.2 Effet Primakoff	223
12.3 Les moments magnétiques des baryons	223
12.4 Le rayon de charge du neutron	225
12.5 L'hydrogène muonique et le rayon du proton	226
12.6 Moment quadrupolaire du Ω^-	226
12.7 Les atomes exotiques	227
Capture et cascade	227
Le décalage et l'élargissement des niveaux	228
Exercices	232
Références	234
13 Les désintégrations faibles	237
13.1 Aperçu des interactions faibles	237
13.2 Des hadrons aux quarks	238
13.3 La matrice CKM	239
13.4 Désintégration des hadrons ordinaires	242
13.5 Désintégration des hadrons étranges	243
Désintégration des hyperons	244
Désintégration et oscillation des mésons étranges	244
13.6 Désintégration du charme	250
13.7 Désintégration de la beauté	253
13.8 Désintégration des mésons B_c	254
13.9 Désintégration du top	255
Exercices	256
Références	257
14 Perspectives	261

15	Solution de certains exercices	263
15.1	Exercices du chapitre 1	263
15.2	Exercices du chapitre 2	264
15.3	Exercices du chapitre 3	265
15.4	Exercices du chapitre 4	272
15.5	Exercices du chapitre 5	273
15.6	Exercices du chapitre 6	275
15.7	Exercices du chapitre 7	278
15.8	Exercices du chapitre 9	280
15.9	Exercices du chapitre 10	283
15.10	Exercices du chapitre 11	283
15.11	Exercices du chapitre 12	285
15.12	Exercices du chapitre 13	288
16	Glossaire	291
	Références	305
	Index des sujets	307
	Index des noms	311

Plusieurs livres retracent l'histoire de la physique nucléaire et de la physique des particules. Nous ne tenterons pas de les concurrencer ni même de les résumer, mais seulement de rappeler quelques épisodes notoires pour la physique des hadrons, soit des étapes majeures, comme la découverte du méson de Yukawa ou celle du charmonium, soit des illustrations de notre difficulté à remettre en cause les concepts acquis ou à rendre justice à certains des précurseurs. Le livre de Segrè [1] contient des anecdotes savoureuses, comme celle de Pierre Curie refusant la Légion d'honneur et demandant plutôt un laboratoire digne de ce nom. Attitude dont hériteront sa fille et son gendre, qui feront comprendre aux autorités que s'ils avaient disposé de plus de moyens, le neutron aurait été français ! Le livre de Pais [2] est impressionnant de concision et de précision, avec, en quelques lignes, les explications d'un brillant théoricien pour commenter chaque étape importante. Plus récente, la compilation de quelques piliers du Particle Data Group [3] est très rigoureuse et exhaustive, et nous le verrons à propos des kaons, rétablit quelques paternités. Ce Particle Data Group (PDG), fondé par Rosenfeld, recense et compile régulièrement les données sur la physique des particules. Leur tâche n'est pas toujours facile, nous le verrons en particulier à propos des hadrons exotiques. Il arrive qu'un restaurant étoilé disparaisse du Guide Michelin [4], et aussi qu'un « candidat » soit rayé des tables de PDG. La première édition de PDG date de 1957 [5], la dernière de 2020 [6]. Noter aussi qu'en marge de la Conférence de Paris de physique des hautes énergies, s'est tenu en 1982 un colloque sur l'histoire de cette discipline, avec quelques-uns des grands pionniers [7]. Citons enfin le livre édité par Gordon Fraser [8], plus récemment celui de Donnelly et al. [9], et encore les ouvrages de Ericson et Weise [10], Donoghue et al. [11], etc.

Secrétaire d'État dans le gouvernement du Front populaire à une époque où les femmes n'avaient pas le droit de vote, Irène Joliot-Curie contribua à la création du CNRS.

On s'y réfère souvent par l'acronyme PDG.

L'histoire de la découverte du neutron et de l'émulation entre les équipes est racontée de façon très détaillée par Jules Six dans [13]. Jules Six était un physicien du Laboratoire de l'Accélérateur linéaire d'Orsay. Avec Xavier Artru, il a écrit une chronologie des faits marquants de physique des particules des origines à 1965 [14]. On raconte que son questionnement à propos de l'évolution des paires $K^0\bar{K}^0$ produites par annihilation est à l'origine des réflexions profondes de B. Despnagnat sur l'interprétation de la mécanique quantique [15]. Pour plus de références sur l'histoire de la physique nucléaire, voir, par exemple, [16].

Dans la suite, nous adopterons souvent des unités simplifiées où $\hbar = c = 1$, avec en particulier les longueurs en GeV^{-1} et les paramètres de portée en GeV .

On cite souvent un mot de Rabi "*who ordered the muon?*". Rabi est le père ou le grand-père de la RMN et tout le monde a transpiré un peu dans les cours de mécanique quantique pour démontrer la formule de Rabi qui donne la réponse d'un système à deux niveaux soumis à une excitation sinusoïdale. Il y a quelques années, une équipe de Nantes a utilisé la RMN pour distinguer de manière non invasive le sucre naturel du sucre artificiel dans le Muscadet et permettre de traquer les fraudes à la chaptalisation, preuve que la physique quantique est parfois utile.

1.1 Les premiers hadrons

Nous ne reviendrons pas sur la préhistoire, avec la découverte de la radioactivité par Becquerel en 1896, puis l'étude de cette radioactivité par plusieurs physiciens dont les Curie et Rutherford. La physique nucléaire s'est développée au début du 20^e siècle. La charge du noyau est exactement un nombre entier, Z , de fois la charge du proton, et la masse approximativement un nombre entier, A , de fois la masse du proton. S'est imposée assez vite l'idée de noyaux composés de Z protons et $N = A - Z$ « neutrons », avec pratiquement la même masse m pour chacun des deux « nucléons », proton et neutron, si bien que la masse des noyaux est à peu près $A m$, un peu diminuée par l'énergie de liaison. Restait à trouver le neutron : soupçonné dans des expériences de Walter Bothe et Herbert Becker [12], ainsi que d'Irène et Frédéric Joliot-Curie, il a été identifié par Chadwick.

Des forces nucléaires sont nécessaires pour vaincre la répulsion électrostatique entre les protons et assembler les protons et les neutrons. Yukawa proposa un modèle analogue à l'échange du photon en QED, à savoir l'échange d'un boson massif, ce qui correspond à un potentiel $-g \exp(-a r)/r$, une forme fonctionnelle que l'on retrouve par exemple dans l'écrantage de Debye des charges plongées dans un milieu [17]. Ici, le paramètre de portée a est relié à la masse m de la particule échangée, $a = (m c^2)/(\hbar c)$, avec $\hbar c \approx 0,2 \text{ GeV fm}$. Pour une paire proton-proton, le potentiel de Yukawa domine le terme électrostatique aux faibles valeurs de la distance r , mais décroît très rapidement quand r augmente.

Avant la guerre, on a cru découvrir le pion dans les rayons cosmiques. Mais la particule détectée traversait facilement la matière, alors que le pion de Yukawa doit interagir fortement avec les noyaux. En fait, on avait découvert les muons, μ^+ et μ^- , sorte de version lourde des électrons. Ces muons, tout à fait inattendus, sont les produits de la désintégration faible des pions. La particule de Yukawa, le pion, fut découverte dans les rayons cosmiques, par une équipe travaillant à Bristol (GB), en 1947 [18]. Et la physique des hadrons commença, avec les nucléons et les pions.

1.2 Les résonances

Déjà un peu avant la guerre, puis plus franchement dans les années cinquante, des accélérateurs prirent le relais des rayons cosmiques. Ce fut particulièrement le cas pour la physique des pions. Quelques propriétés des pions furent mesurées, comme leur parité, et des réactions comme $\pi + d \rightarrow N + N$ furent observées. Avec la montée en énergie, motivée particulièrement par la production d'antiprotons qui sera décrite dans la section suivante, on commença à étudier la production simultanée de plusieurs pions et l'interaction des pions et des nucléons, et des résonances firent leur apparition.

d désigne ici le deutéron

C'est un concept compliqué que celui de résonance quand on cherche à être rigoureux, mais au stade qualitatif, on peut se contenter de définir une résonance comme un pic dans la distribution de masse. En mécanique quantique, imaginons un potentiel $g V(r)$, où V est attractif, tel qu'on ait un état lié pour $g \geq g_0 > 0$, de moment orbital $\ell > 0$. Pour $g < g_0$ mais pas trop éloigné de g_0 , on aura une augmentation assez marquée de la section efficace autour d'une certaine énergie, et on pourra estimer la *largeur* à mi-hauteur du pic. S'il s'agit d'une onde S ($\ell = 0$), le pic est moins prononcé, et il est plus délicat d'identifier une résonance.

Le méson ρ a été vu comme une résonance dans la distribution de la masse de deux mésons π , sous trois états de charge ρ^+ , ρ^0 , ρ^- . Le pic correspond à une masse $m \simeq 0,77 \text{ GeV}$ et une largeur $\Gamma \simeq 0,150 \text{ GeV}$. Un autre méson, baptisé ω , a été vu dans l'état neutre seulement, avec une masse similaire $0,78 \text{ GeV}$, et une largeur plus faible $0,008 \text{ GeV}$, dans la distribution de masse $\pi^+ \pi^- \pi^0$. Et beaucoup d'autres résonances mésoniques ont suivi, avec aussi de nouvelles méthodes de production : annihilation proton-antiproton, désintégration de particules lourdes, etc.

La masse carrée du système est calculée à partir des quadri-impulsions comme $M^2 = (\sum \vec{p}_i)^2$.

Dans la diffusion de pions sur nucléons, des résultats très importants ont été obtenus et ont occupé les physiciens pendant des années. Fermi (communication privée à Pais, voir [2]) a observé une nette augmentation des

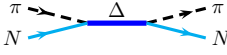


FIGURE 1.1 : Résonance Δ dans la diffusion pion-nucléon.

Schématiquement, quand un pion se propage dans un noyau, il est absorbé par un nucléon et forme un Δ , puis il réapparaît lors de la désintégration de ce Δ .

À cette époque, on avait aussi l'obsession de rendre justice aux collègues en citant scrupuleusement les publications antérieures, et en les remerciant pour les discussions de vive voix ou par correspondance. Aujourd'hui, c'est parfois la jungle en comparaison, surtout chez les théoriciens.

$\mu_N = (e/m)(\hbar/2)$, où e est la charge du proton, m sa masse, et \hbar la constante de Planck divisée par 2π .

La valeur précise actuelle est $2,79285 \mu_N$.

sections efficaces près de l'énergie dans le centre de masse $\sqrt{s} \sim 1,2 \text{ GeV}$, avec des rapports

$$\begin{aligned} \sigma(\pi^- p \rightarrow \pi^- p) &= \frac{1}{9} \sigma(\pi^+ p \rightarrow \pi^+ p), \\ \sigma(\pi^- p \rightarrow \pi^0 n) &= \frac{2}{9} \sigma(\pi^+ p \rightarrow \pi^+ p). \end{aligned} \quad (1.1)$$

entre les probabilités de réaction que nous analyserons dans le chapitre 4 et qui caractérisent le passage par un état unique pour les voies $\pi^- p$ et $\pi^0 n$, la résonance Δ , première étape de la spectroscopie baryonique au-delà des simples nucléons. Voir Fig. 1.1. Cette résonance joue également un rôle dans la physique des noyaux, comme l'ont souligné par exemple Brown et Jackson [19], ou le groupe de Helsinki [20].

Des grands noms de la physique hadronique sont associés à ces résonances. Les témoins de cette époque ont toujours souligné la passion de ces pionniers pour leur métier, et leur acharnement à vérifier et à re-vérifier tous les résultats avant publication, une manie qui a malheureusement tendance à disparaître.

1.3 Le moment magnétique du proton

Nous reviendrons au chapitre 12 sur les interactions électromagnétiques des hadrons. Signalons ici une expérience particulièrement intéressante. Vers 1933, Otto Stern et ses collaborateurs ont réussi à déterminer le moment magnétique du proton avec une assez bonne précision. On a beaucoup raconté d'histoires sur cette mesure [21]. Par exemple, nombre de collègues éminents, dont Pauli, découragèrent Stern de se lancer dans la mesure, car selon eux, le résultat était connu d'avance, comme étant μ_N . Une variante est qu'ayant déjà le résultat dans ses tablettes, Stern aurait questionné par écrit des physiciens pour leur demander leur prédiction. Bref, la valeur proche de $3 \mu_N$ fut une grande surprise. C'est la preuve que le proton n'est pas une simple particule de Dirac, l'équivalent lourd d'un électron. L'explication

- Lhéritier, M., 6, 299
 Lipkin, H., 163
 Liu, K., 127
 Lorentz, H., 39, 183, 185, 198, 199
 Lévy, M., 239
 Lévy-Leblond, J.-M., 173
- Maglich, B., 152
 Maiani, L., 11, 298
 Mandelstam, S., 38, 39, 42, 184
 Markum, H., 171
 Martin, A., vii, 71, 77, 86, 88, 90, 95
 Maskawa, T., 240, 294
 Merkuriev, S., 297
 Michel, L., 55
 Miller, G., 128
 Mills, A., 231
 Mills, R., 14, 133
 Montanet, L., 34, 301
- Nachtmann, O., 195
 Nakano, T., 150
 Napoléon, 277
 Narison, S., 172
 Navarra, F., 172
 N'eeaman, Y., 9
 Newton, I., 55
 Nielsen, H., 128
 Nielsen, M., 172
 Nussinov, S., 90
- Okubo, S., 57, 68, 69
 Okun, L., 245
 Oliver, L., 166
 Ore, A., 173
- Pais, A., 1, 3
 Pati, J., 228
 Pauli, W., 4, 23, 52, 63, 205, 223, 237
 Pène, O., 166
 Perl, M., 12
 Podolsky, B., 248
 Poisson, S., 78
- Politzer, D., 134
 Post, H.R., 173
 Povh, B., 149
 Predazzi, E., 184
 Primakoff, H., 223
 Ptolémée, C., 277
- Queuille, H., 147
 Quigg, C., 71, 77
- Rabi, I., 2
 Rarita, W., 82
 Raynal, J.-C., 166
 Reinders, L., 85
 Richard, J.-M., 166
 Rider, Alan H., 12
 Riska, D., 128
 Rochester, G., 7
 Roper, L.D., 100, 101, 103, 107, 115, 137
 Rosen, N., 248
 Rosenfeld, A., 1, 301
 Rosenfeld, L., 301
 Rosner, J., 71, 77
 Ross, M., 301
 Rossini, G., 151
 Rubinstein, H., 85
 Ruelle, M.E., 173
 Rujula [de], A., 214
 Rutherford, E., 2, 13, 31
- Sakharov, A., 54
 Sakurai, J., 186
 Samios, N., 9
 Sandhas, W., 297
 Schmid, C., 167
 Schrödinger, E., 64, 74, 107, 112
 Schwinger, J., 78, 79, 82, 89
 Segrè, E., 1, 5
 Shapiro, I., 160, 163, 230
 Shifman, M., 85
 Six, J., 2
 Skyrme, T., 138
 Snow, G.E., 228

- Soffer, J., 215
Stancu, F., 163
Steiner, J., 110
Sterbini, C., 151
Stern, O., 4, 223, 247
Sternheimer, R., 226, 287
Sucher, J., 228
- Taxil, P., 111, 166
Taylor, B., 140
Taylor, R., 13
Telegdi, V., 245
Teresi, D., 245
Thomas, A., 128
Thorn, Ch., 125
Todd, A.R., 245
Torricelli, E., 110, 129
Trueman, L., 229, 232, 233
Turlay, R., 7, 248, 301
- Urey, H., 147
- Vainshtein, A., 85
Viviani, V., 38, 43, 110, 267
- Watson, K., 203
- Weinberg, S., 139
Weise, W., 1
Weisskopf, V., 273
Wheeler, J., 173
Wick, G.C., 207
Wilczek, F., 134
Wilson, Ch., 37
Wilson, K., 86
Wilson, R.R., 12
Wolfenstein, L., 242
Wong, C., 127
Wu, C.S., 42, 245, 246, 296, 301
- Yakubovsky, O., 297
Yan, T.M., 189
Yang, C.N., 14, 55, 68, 133, 160, 223,
245, 301
Yazaki, K., 85
Yazaki, S., 85
Yukawa, H., 1, 2, 31, 68, 128, 140, 261,
302
- Zakharov, V., 85
Zel'dovich, Ya., 230
Zhu, S.L., 164, 172
Zweig, G., 10, 11, 72, 76, 84, 128