

# LA TEORIA MESÒNICA DE LES FORCES NUCLEARS, ANTECESSORA DEL DESCOBRIMENT DELS $\pi$ -MESONS

Karl von Meyenn

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik

P.O. Box 40 12 12. Munic, Alemanya

## I. INTRODUCCIÓ

Malgrat que pugui semblar el contrari, l'estudi de la història de la física dels anys quaranta presenta majors dificultats, amb diferència, que la dels anys vint o trenta.

Aquest darrer període representa el desenvolupament i l'aplicació de la mecànica quàntica a problemes atòmics i nuclears. Els investigadors d'aquell temps podien, encara, ser localitzats tant en nombre com en lloc de provenença o de treball. La majoria es coneixien entre ells i gairebé, sense excepció, es podien agrupar en les escoles i els centres més destacats de l'època, situats a ciutats com ara Copenhagen, Göttingen, Munich, Berlín, París, Zürich, Leiden o Cambridge.<sup>1</sup> Les publicacions científiques de més renom no superaven la dotzena: recordem els *Zeitschrift für Physik*, els *Proceedings of the Royal Society*, i *Nature* (amb un abast més ample).

Els físics d'aquell temps treballaven en bona harmonia i funcionava, com a regla general, el respecte del terreny del "col.lega" amb el qual es compartia el camp de recerca.

La inclemència posterior de la primera guerra nuclear es deixà notar fortament en l'àmbit de la física atòmica, però contràriament a les conseqüències socials, en l'àmbit de la física atòmica les conseqüències sobre la recerca foren positives.

Amb l'enduriment de les fronteres entre estats, l'època de la postguerra es caracteritzà per un intercanvi científic fortament mermat. Això permeté que l'escola de Copenhagen, tan prestigiosa i alabada per tothom, amb Niels Bohr com a centre, prengué una posició estratègica en l'anomenat obriment al món. Amb poc temps i a causa de l'aparició de molts joves talents, es continuà el treball ja endegat durant la

<sup>1</sup> WEISSKOPF, V.F. (1982) "The places where quantum mechanics was born", *J. Physique* 43 (Suppl.), pp. 325-328.

guerra als països més afectats per ella i es creà allí un centre de recerca atòmica. Això conduí cap a una col·laboració científica molt fructífera, que provocà l'aparició d'una estratègia de recerca unitària que, més endavant, es mostrà força més efectiva. Només així pogué sorgir la concentrada i brillant època dels daurats anys vint.

Gairebé tots els investigadors capaços de l'època podien treballar en problemes interessants que, posteriorment, esdevingueren peces claus de la física. Les seves aportacions eren citades tan contínuament a la literatura científica del moment que esdevingueren ràpidament llibres de text en moltes aules d'ensenyança avançada. Com a conseqüència d'aquest ràpid floriment, la física dels anys vint va poder ser treballada pels historiadors de la ciència de, fins i tot, la mateixa època. Tot i l'inestimable valor de reconstrucció històrica tant dels successos científics com del seu posterior ressò, aquesta primera explicació històrica no es correspon, la majoria de les vegades, amb el criteri objectiu i solidari als mètodes usuals dels historiadors. Per tant resulta susceptible de posteriors anàlisis històriques i crítiques.

L'historiador ha de comprovar les diferents versions sobre un mateix fet i contrastar-les amb documents i fonts de l'època. Des d'aquest punt de vista la correspondència científica de l'època té una gran importància per la història de la ciència.

Per al coneixement i la divulgació de la recerca, generalment, es fa referència únicament a treballs exitosos. Els treballs que acaben en fracàs o que esdevenen intents infructuosos són, per contra, passats per alt. Podem citar, per exemple, Paul Dirac el 1972 a Varenna on va descriure el perfil del científic vist per ell mateix tot oposant-lo a les pautes històriques usuals.<sup>2</sup>

"L'investigador en física, si ha fet un nou descobriment, està concentrat en la contemplació i en el control des de la més avançada i nova posició tot mirant el camp que resta davant d'ell. Llavors les preguntes que se li presenten són: cap on anem a partir d'aquí?, quines són les aplicacions d'aquest nou descobriment?, com ens ajudarà aquest a solucionar problemes que encara són davant nostre?, quins són els problemes més immediats que se'ns presenten ara?"

<sup>2</sup> DIRAC, P.A.M. (1977) "Recollections of an exciting era", dins WEINER, CH. (1977) *History of twentieth century Physics*. Nova York, pp. 109-146.

L'investigador vol oblidar el camí que l'ha dut a elucidar el seu descobriment; que aquest prové, obviament, d'un camí tortuós, ple d'intents que han desembocat en camins sense sortida. Potser se sent una mica avergonyit i disgustat amb ell mateix per haver-hi donat voltes tant de temps. Des d'aquest punt de vista no desitja recordar tot el treball que l'ha dut a fer el descobriment.

Això és tot l'oposat al que vol l'historiador: conèixer les diferents influències sofertes, tots els graons intermedis i, naturalment, tots els intents frustrats que han conduït a un científic a un determinat descobriment. Com veiem, els dos punts de vista estan força confrontats. La major part de la meua vida la he dedicada a fer recerca en física i, com a tal, tinc el seu mateix punt de vista, incloent-hi això d'oblidar, com més aviat millor, tots els graons intermedis."

Les teories del nucli i de les partícules elementals, i també les dades experimentals de rellevància per aquestes, desenvolupades en les dècades següents foren, majoritàriament, de vida més curta i de menys transcendència que les seves antecessores de la dècada dels anys vint. La divulgació de les teories i de les dades experimentals es limità a grups de recerca reduïts i directes. Molt sovint no s'arribaven a publicar. La seva existència es coneix molt poc i, generalment, es limita a figures gràfiques i correspondència intercanviada entre científics.

Aquests resultats provisionals de la recerca formen part sovint de bases, no menyspreables, que ens serveixen per entendre el sorgiment de noves idees. El seu coneixement és d'un gran valor tant per a l'historiador com per al filòsof interessat en la formació i el desenvolupament lògic de les teories físiques.

Els anys trenta, amb successos polítics decisius a l'Europa central, també van portar novetats en el desenvolupament científic. Es modificaren tant l'estil com la localització (distribució geogràfica) i, fins i tot, els mateixos temes de recerca. Molts dels protagonistes del rebrotament, juntament amb els investigadors d'elit d'Europa, foren desplaçats a l'altre cantó de l'Atlàntic a causa de les poques perspectives de les polítiques de recerca dels sistemes polítics dels quals provenien.<sup>3</sup> Per aquest motiu floriren allfuna gran quantitat de centres de recerca, els quals en pocs anys s'establiren

<sup>3</sup> Vegeu, sobretot, BEYERCHEN, A.D. (1977) *Scientists under Hitler. Politics and the physics community in the Third Reich*. New Haven i London.

al capdavant de la majoria dels camps de la física.

El tema central de recerca va traslladar-se, durant aquells anys, de la física atòmica cap a la nuclear. El desenvolupament paral·lel de noves i més complicades tècniques experimentals va provocar la desaparició de la individualitat i l'aparició de la recerca col·lectiva.<sup>4</sup> El gran creixement de la distribució geogràfica dels investigadors i l'especialització creixent conduïren a un mètode experimental cada cop més sofisticat i costós, i també a una proliferació, incontrolable per una única persona, de diverses teories.

Això no obstant, la recerca en física a Europa durant els anys trenta va tenir èxits experimentals i teòrics remarcables. Al 1932 James Chadwick descobrí el neutró; poc després Otto Robert Frisch i Otto Stern van determinar el moment magnètic anòmal del protó. El 1934 es va produir la radioactivitat artificial gràcies a Irène Curie i Frédéric Joliot. Enrico Fermi i els seus estudiants a Roma descobriren la transformació artificial d'elements mitjançant neutrons i, finalment, el 1939, el descobriment de la fissió nuclear per Otto Hahn i Fritz Strassmann. A més, els treballs teòrics que mantenien personalitats com Niels Bohr (Copenhagen), Werner Heisenberg (Leipzig), Wolfgang Pauli i Gregor Wentzel (Zürich), Paul Dirac (Cambridge) i Enrico Fermi (Roma) foren també d'una gran rellevància per al desenvolupament posterior de la ciència.

Amb el començament de la Segona Guerra Mundial es va produir un canvi en els temes de recerca en la ciència en general i, naturalment, en la física. La recerca en física adquirí una cara totalment nova. Una gran part dels físics a ambdós costats de l'oceà fou sol·licitada a treballar en temes de recerca militar. En lloc d'investigació pura, n'hagueren de fer d'aplicada, si més no, orientada a l'aplicació. Fins i tot el principi consagrat de la lliure investigació fou, durant molts anys, restringit per mor d'altíssims secrets d'estat.

Tot i aquestes barreres, l'anomenada recerca de base, que en aquell temps havia passat d'estar en mans de la física nuclear cap a les de la física de les partícules elementals, pogué sobreviure. Un grup d'investigadors d'Europa, Índia i Amèrica

<sup>4</sup> Vegeu: GENTNER, W. (1965) "Individuelle und kollektive Erkenntnissuche in der modernen Naturwissenschaft", *Phys.Bl.*, vol.21, pp. 541-548. GOLDWASSER, E.L. (1982) "How little science became big science in the U.S.A.", *J.Physique*, vol. 43, (Suppl.) pp. 345-355.

aconseguien fer recerca "pura" d'un nivell considerable.<sup>5</sup> A la tardor del 1947 Max von Laue comentava:

"Els mètodes experimentals més nous, les idees teòriques més agosarades, truquen aquí a problemes estretament relacionats amb la física nuclear, de la radiació còsmica i de les partícules elementals. Què se'n faran dels resultats que resten en mans dels científics? no se sabrà mai tota la certesa. Se succeeixen massa ràpid, un darrere l'altre, els experiments de gran complicitat i envergadura i amb un alt grau d'elucubració. Massa ràpid es casen entre elles les diferents idees. Per això, la física no ha ofert mai una oportunitat com aquesta per contemplar l'obra de l'important reconeixement teòric del seu propi ser.

Les observacions del futur seran possibles únicament amb aparells molt complicats i costosos, i per això, realitzables per molt pocs. De la mateixa manera que amb la teoria, el creixement en coneixements de la física continuarà en tots els àmbits.

Per a la història de la física aquesta època, quan s'hagi conclòs, passarà a ser un dels capítols més interessants."

Als països de parla anglesa, eren principalment els científics immigrants els que estaven implicats en aquest tipus de recerca, atès que, pel seu estatus polític, no els era permès de participar en la recerca militar. Juntament amb aquests científics, cal afegir els dels països envaïts o els refugiats de guerra, entre els quals hem d'assenyalar els procedents dels Països Baixos i de Suïssa. Entre aquests petits i, algun cop, forçats grups internacionals de recerca es donaren, durant la guerra, unes condicions semblants a les dels anys vint. Fruit d'això resultaren una sèrie molt interessant d'intercanvis i de treballs coordinats entre els diferents científics.

## II. EL PRINCIPI DE LA FÍSICA DELS MESONS

La física dels mesons fou, al principi dels anys quaranta, una de les branques

<sup>5</sup> Els resultats dels investigadors alemanys durant els anys de guerra van passar a mans dels aliats en l'anomenat *FIAT Review of German science*. El 1948 aparegué una versió d'aquests resultats, en alemany. La citació de Von Laue és treteta del pròleg del volum 13 de l'edició alemanya que tracta de *Kernphysik und kosmische Strahlen* (Física nuclear i radiació còsmica).

de recerca en física més febrils i interessants. Un grup de recerca al voltant de Wolfgang Pauli, que treballà, durant la guerra, a l'*Institute for Advanced Study* de Princeton, fou d'una rellevància especial per al desenvolupament teòric del qual ens ocupem més endavant. La majoria dels científics que el componien, a causa de la seva nacionalitat, tenia vetat l'accés a la recerca militar. Aquest grup, com d'altres de diferents universitats i centres americans no involucrats en recerca militar, pogué continuar estudiant molts problemes, alguns dels quals ja havien estat iniciats per altres científics.

Al principi del 1937, els mesons descoberts a la radiació còsmica provocaren una gran efervescència en aquest camp de la física. El mateix descobriment ja havia estat anticipat mitjançant un gran nombre d'especulacions teòriques. Així, per exemple, en els seus primers treballs sobre el nucli de 1932, Heisenberg ja mencionava l'existència d'una partícula sense spin portadora de la força nuclear entre protó i neutró.<sup>6</sup>

La teoria sobre l'existència d'aquesta partícula amb massa però sense spin es pogué trobar, a partir de llavors, en diversos llocs més, però ningú no la va poder demostrar experimentalment. El 1934, Pauli i el seu jove ajudant Viktor Weisskopf establiren una teoria quàntica de camp per l'equació d'ona relativista dels mesons (la pertinent equació de Klein-Gordon). Anomenada pel mateix Pauli com la teoria anti-Dirac, explicava la generació de parelles partícula-antipartícula, i també els processos d'anihilació sense necessitat d'utilitzar la idea de Dirac dels forats.

## 1. LA TEORIA DE FERMI DE LA DESINTEGRACIÓ- $\beta$ I LES SEVES PRIMERES APLICACIONS AL PROBLEMA DE LES FORCES NUCLEARS

Després d'una incitació feta per Pauli durant la tardor al congrés Solvay de Brusel·les, Fermi va desenvolupar, gairebé simultàniament amb Pauli i Weisskopf, una teoria de camp de la desintegració- $\beta$ , on un neutró es convertia en un protó i en una parella electró-neutrino. Una magnitud introduïda empíricament (l'anomenada força de Fermi) regulava amb quina freqüència es produïa la desintegració. Per primera vegada s'havia formulat formalment una descripció dels processos de desintegració de

<sup>6</sup> Vegeu HEISENBERG, W. (1932) "Über den Bau der Atomkerne. I", *Z. Phys.*, vol. 77, pp. 1-11; a la pàgina 2 hi diu: "Aquest canvi de lloc (de les càrregues negatives) es pot visualitzar un altre cop mitjançant la imatge dels electrons sense spin i que segueixen l'estadística de Bose".

les partícules elementals que, a més, també podia ser utilitzada per a altres processos elementals.

Heisenberg reconegué immediatament la importància de la teoria de Fermi per al problema de les forces nuclears i va calcular la  $f_0^D \hat{T} R^D \hat{D} j(H)$  parella electró-neutrino com a portadors d'una força d'interacció. Una primera aproximació li indicà que un mecanisme d'aquest tipus conduïa a uns  $1.0^{12}$  ordres de magnitud per sota de la força nuclear feble.<sup>7</sup> Per aquest motiu no va donar a la llum pública el seu resultat. Altres científics, com, per exemple, Igor Tamm i Dimitri Iwanenko, per mencionar els més coneguts, sí que ho van donar a conèixer, tot i la poca correspondència obtinguda en el camp experimental.<sup>8</sup> La possibilitat que la força responsable de la desintegració- $\beta$  (interacció feble) fos d'una naturalesa completament diferent a la interacció forta estava només en la perspectiva de molt pocs.<sup>9</sup>

Aquest intent de descriure les forces nuclears mitjançant una teoria de camp, impulsà substancialment la recerca. Els anys següents es publicaren nombrosos possibles milloraments per intentar fer encaixar el model amb les dades empíriques de les forces nuclears.

<sup>7</sup> Vegeu: Heisenberg a Pauli, 18 gener 1934. Heisenberg va presentar aquest fet un altre cop el 1935 en el seu treball "Bemerkungen zur Theorie des Atomkerns" que va aparèixer com a contribució a l'escrit de Zeeman. El seu alumne de llavors ho va tractar en la seva dissertació a Leipzig: WEIZSACKER, C.F.von (1936) "Über die Spinabhängigkeit der Kernkräfte", *Z.Phys.* pp. 102, 572-602. Vegeu també la presentació de BROWN, L.M.; RECHENBERG, H. (1987) "The Fermi field theory of nuclear forces (1933-1937)", *Proceedings of the Utah Conference on the History of Gauge Fields*. Singapur.

<sup>8</sup> TAMM, I. (1934) "Exchange forces between neutrons and protons, and Fermi's theory", *Nature*, vol. 133, p.981; IWANENKO, D. (1934) "Interaction of neutrons and protons", *Nature*, vol. 133, pp. 981-982.

<sup>9</sup> Vegeu: MUKHERJI, V. (1974) "A History of the meson theory of nuclear forces from 1935 to 1952", *AHES*, vol. 13, pp. 27-102, especialment p. 56.

## 2. LA TEORIA DE YUKAWA DELS QUANTA-U I LES SEVES SUCCESSORES

L'intent amb més èxit sorgí l'any 1935 de les mans de Yukawa.<sup>10</sup> Un quantum de camp amb càrrega i massa, anomenat quantum U, que complia l'equació d'ones:

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2\right)U=0 \quad (1)$$

en lloc de l'equació d'ona electromagnètica

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)U=0$$

fou postulat com a portador de la força nuclear.<sup>11</sup> Aquest produí, anàlogament a la teoria de Fermi de la desintegració- $\beta$ , que pogués ser desenvolupada una teoria de camps per les forces nuclears.

Per a ser compatible amb els fets i amb els càlculs de la física nuclear, la

<sup>10</sup> YUKAWA, H. (1935) "On the interaction of elementary particles." *I.Proc.Phys.-Math.Soc.Japan*, vol. 17, pp. 48-57.

<sup>11</sup> Vegueu els estudis històrics de BROWN, L.M. (1981) "Yukawa's prediction of the meson", *Centaurus*, vol. 25, pp. 71-132; (1985) "How Yukawa arrived at the meson theory", *Progr. Theor. Phys.*, Supl. núm. 85, pp. 13-19; RECHENBERG, H.; BROWN, L.M. (1990) "Yukawa's heavy quantum and the mesotron (1935-1937)", *Centaurus*, vol. 33, pp. 214-252.



nova partícula havia de tenir una càrrega positiva o negativa i un spin sencer.<sup>12</sup> Yukawa prengué, en el seu primer treball, un spin nul i, per tant, era com si treballés amb les components escalars d'un camp vectorial.<sup>13</sup>

Per al cas estacionari, com a anàleg al camp electroestàtic de Coulomb, Yukawa trobà el potencial nuclear:

$$V(r) = \pm \frac{g^2}{r} \exp(-\lambda r) \quad (2)$$

on  $\lambda$  és un paràmetre que ens informa sobre l'abast del potencial<sup>14</sup> i  $g$  la intensitat de la força nuclear. La relació que surt d'aquesta teoria entre l'abast i la massa del quantum  $\lambda = \hbar/\mu c$  ens imposa una massa  $\mu$  d'unes 100 a 200 masses electròniques.<sup>15</sup>

Quan, dos anys més tard, Andersson i Neddermeyer descobriren partícules de masses semblants en la radiació còsmica, Yukawa cregué, per primera vegada, que la teoria desenvolupada per ell podia ser viable.

Tot i la reticència inicial, la teoria de Yukawa fou presa seriosament per la comunitat dels físics. En veure que una gran quantitat de fets de la física nuclear, de les partícules elementals i de la radiació còsmica es deixaven descriure unitàriament,

<sup>12</sup> Aquestes condicions s'acompleixen donats tant el caràcter d'interacció com la propietat de les forces nuclears de saturar-se.

<sup>13</sup> En el seu primer treball, Yukawa no va discutir la possibilitat d'un spin. En realitat, va treballar amb la component potencial escalar del camp vectorial de Proca!

<sup>14</sup> L'abast de la força nuclear fou llavors establert en  $3 \cdot 10^{-13}$  cm. Tenint present el valor de la intensitat  $g$  de la "càrrega mesònica", es troba a partir de l'energia d'enllaç dels deuterons un valor d'unes 5 a 7 càrregues electròniques.

<sup>15</sup> La desintegració  $\beta$  fou entesa per Yukawa com un procés en dos temps, on el quantum  $U$  emès pel nucleó no era apte per a l'absorció, sinó que dequia radioactivament en dues partícules més lleugeres.

els investigadors es veieren induïts a identificar el mesotró (de les radiacions altes) i el mesó de Yukawa com la mateixa partícula. Com que la determinació experimental de la massa i del temps de desintegració dels mesons encara era força imprecisa, no es van considerar amb gaire atenció els resultats certament contradictoris que s'obtenien.<sup>16</sup>

Una altra qüestió d'importància era la pregunta de si la forma inicial de la teoria de Yukawa permetia o no una presentació tancada (completa) dels fets de la física nuclear.

La quantificació del camp electromagnètic condueix, com és sabut, als fotons com a quanta d'aquest camp, sense massa i amb spin 1. De la mateixa manera es va obtenir el nou quantum U del camp de Yukawa<sup>17</sup> en quantificar la ja anomenada teoria de Pauli-Weisskopf. Així doncs, aquesta teoria conduïa a resultats erronis tant per la força nuclear com pel moment magnètic del protó i del neutró.<sup>18</sup>

A més de la força nuclear i del seu abast, mitjançant la teoria s'havia de poder reproduir el principi d'independència de la càrrega de la força nuclear que s'exigia des del 1936 quan Tuve, Heydenburg i Hafstad feren els seus experiments de *scattering*. Com que els quanta de Yukawa transportaven només una càrrega elemental, les forces atractives entre nucleons del mateix tipus únicament es poden donar mitjançant una interacció quàntica doble.<sup>19</sup> Llavors, però, no era possible entendre per què la força entre nucleons iguals (pp i nn) era idèntica que entre nucleons diferents (np).

<sup>16</sup> La discrepància entre els temps de desintegració fou força rellevant: mentre que de la intensitat de la força nuclear s'arribava a un temps de desintegració de  $10^{-8}$  s, les partícules de les radiacions còsmiques es desintegraven en només  $10^{-6}$  s en mitjana, segons els mesuraments de l'any 1939 de Bruno Rossi.

<sup>17</sup> YUKAWA, H.; SAKATA, S. (1935) "On the interaction of elementary particles. II", *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan*, vol. 19, pp. 1.084-1.093.

<sup>18</sup> Compareu aquí la teoria del parell d'electrons, que descrivim més endavant.

<sup>19</sup> Una argumentació del moment magnètic del protó i del neutró a partir de la teoria de Fermi de la desintegració- $\beta$  fou proposada per primera vegada per WICK, G.C. (1935) "Teoria dei raggi  $\beta$  e momento magnetico del protone", *C.R. Accad. Lincei*, vol. 21, pp. 170-173.

De la mateixa manera, la teoria havia de permetre calcular el moment magnètic anòmal dels protons i neutrons,<sup>20</sup> l'energia d'enllaç<sup>21</sup> i el moment quadrupolar dels deuterons, que indicava una part no central de la força nuclear,<sup>22</sup> i les seccions eficaces per *scattering* entre mesons i nucleons. Aconseguir cobrir sota un mateix sostre aquesta gran quantitat de fets experimentals no era, ni de bon troç, fàcil, i obligà a fer diverses modificacions de la teoria.

### 3. TEORIA DE WENTZEL DELS "ESTATS INTERMEDIS" DELS NUCLEONS

Per aquell temps es produí, també, un altre intent, de vida molt breu, de descriure les forces nuclears amb una teoria de camps. Gregor Wentzel en fou l'autor. Aquesta teoria era compatible amb el principi d'independència de la càrrega.<sup>23</sup>

Mitjançant l'absorció i l'emissió de partícules lleugeres (electró i neutrino), els nucleons passaven a un estat "intermedi" que era inestable (per exemple, singulet-neutró o singulet-protó), amb diferent massa, càrrega i spin, de tal manera que es donessin així valors del moment magnètic i de les seccions eficaces d'aquestes partícules que fossin concordants en ordre de magnitud amb els valors empírics.

Tot i que aquesta teoria, amb les seves artificioses suposicions i la seva poca

<sup>20</sup> El 1939, Kellogg, Rabi, Ramsey i Zacharias, de la Universitat Columbia de Nova York, van obtenir el valor  $m_p = 2.78$  magnetons nuclears per al moment magnètic del protó. El valor corresponent  $m_n = -1.94$  magnetons nuclears per al neutró fou determinat per Alvarez i Bloch, el 1940. Vegeu: ALVAREZ, L.; BLOCH, F. (1940) "A quantitative determination of the neutron moment in absolute nuclear magnetons", *Phys. Rev.*, vol. 57, pp. 111-112. Per explicar aquesta anomalia, G.C. Wick va proposar, el 1935, una teoria basada en la de Fermi del decaïment- $\beta$ .

<sup>21</sup> La teoria es complia per una interacció de barrera per l'estat  $^3s$  del deuteró, tot i que, experimentalment, aquest semblava ser el nivell principal més fortament lligat.

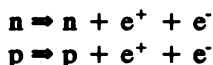
<sup>22</sup> El moment quadrupolar elèctric dels deuterons va ser determinat al mateix temps i pel mateix grup de treball que Rabi de la universitat Columbia. Vegeu: KELLOGG, J.M.B.; RABI, I.I.; RAMSEY, N.F.; ZACHARIAS, J.R. (1939) "An electrical quadrupole moment of the deuteron", *Phys.Rev.*, vol. 55, pp. 318-319.

<sup>23</sup> WENTZEL, G. (1936) "Zur theorie de b-Umwandlung und der Kernkräfte. I", *Z. Phys.*, vol. 104, pp. 34-47.

eficàcia, tingué poc ressò, va provocar que els físics comencessin a introduir hipotètiques partícules i no menys hipotètics estats d'aquestes.

#### 4. LA TEORIA DEL PARELL D'ELECTRONS DE GAMOW I TELLER

La primera proposta de continuació de la teoria de Fermi de les forces nuclears prèvia a la teoria de Yukawa, fou, a part d'un intent de Wentzel (1937), la ben coneguda de Gamow i Teller de l'any 1937.<sup>24</sup> En lloc d'un parell electró-neutrino com a portador de la força nuclear es considera un electró-positró i, eventualment, un neutrino-antineutrino i neutrino-electró. Amb aquesta variant es pot explicar el principi d'independència de la càrrega. Pels respectius processos de transformació es donaven els diagrames següents:



A part d'això, per l'acoblament entre camp i nucleó no es necessitava utilitzar la constant de Fermi de la desintegració- $\beta$  que havia produït l'error en l'ordre de magnitud en la deducció de la força nuclear. En lloc d'això, aquest acoblament es podia escollir independentment per obtenir finalment la magnitud correcta. Un inconvenient de la teoria fou que es perdia la sistemàtica i la intuïció d'una naturalesa d'interacció o d'intercanvi en les forces nuclears i, a més, les discordances es continuaven mantenint.

Tot i que aquesta teoria quedà cada cop més arraconada després de l'aparició de la de Yukawa, alguns investigadors la mantingueren en vida mitjançant noves contribucions que s'allargaren fins al principi dels anys 40.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> WENTZEL, G. (1937) "Zur Frage de b-Wechselwirkung", *HPA*, vol. 10, pp. 107-111; GAMOW, G.; TELLER, E. (1937) "Some generalizations of the b transformation theory", *Phys. Rev.*, vol. 51, p. 289.

<sup>25</sup> Vegeu CRITCHFIELD, Ch.L.; TELLER, E.; WIGNER, E.P. (1939) "The electron-positron field of nuclear forces", *Phys. Rev.*, vol. 56, pp. 530-539; CRITCHFIELD, Ch.L. (1939) "Spin dependence in the dependence in the electron-positron theory of nuclear forces", *Phys. Rev.*, vol. 56, pp. 540-547.

## 5. LA TEORIA VECTORIAL BOSÒNICA

Poc després de fer-se pública la teoria dels parells d'electrons de Wentzel a Zürich, a l'Imperial College de Londres, Nicholas Kemmer, que havia esdevingut un dels seus alumnes més actius i brillants, va emprendre l'intent de generalitzar el camp de Fermi on, naturalment, es complís el principi d'independència de la càrrega.

Durant la seva estància a Zürich, Kemmer va viure el naixement de la teoria de Pauli-Weisskopf per a bosons sense spin i, ja llavors, féu una ampliació per a les partícules de spin 1, encara que no ho publicà.<sup>26</sup> Un camp d'ona com aquest presenta fortes analogies amb el camp electromagnètic, únicament que el quantum de camp té una massa finita en aquest cas i que en lloc de produir-se únicament ones transversals també se'n poden donar de longitudinals.

Primerament es féu pública la teoria vectorial dels bosons; poc després la d'Alexandre Proca i Paul Dirac (1936).<sup>27</sup> Kemmer trobà que, pel cas on la paritat de les partícules de Bose hi jugava un paper, també entra en consideració la teoria pseudo-escalar i la pseudo-vectorial.

En lloc del potencial de Yukawa (2) aquí hi intervé el potencial:

$$V(r) = (A + B(\sigma_n \sigma_p) + C\lambda^2(\sigma_n \nabla)(\sigma_p \nabla)) \frac{\exp(-\kappa r)}{r} \quad (3)$$

on  $\lambda$  és la longitud d'ona Compton pel bosó vectorial, i  $\sigma_n$  i  $\sigma_p$ , els operadors de spin del neutró i del protó, respectivament. La  $r$  representa la distància entre aquestes dues partícules. A, B i C són constants escollides lliurement i adaptades als valors empírics.

<sup>26</sup> Vegueu l'escrit de KEMMER (1983) "Die Anfänge der Mesonenphysik un des verallgemeinerten Isospins", *Phys. Bl.*, vol. 39, pp. 170-175.

<sup>27</sup> PROCA, A. (1936) "Sur la théorie ondulatoire des électrons positifs et négatifs", *J. Phys. Radium*, vol. 7, pp. 347-353. DIRAC, P.A.M. (1936) "Relativistic wave equation", *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 155, pp. 447-459.

Kemmer va tenir a Londres l'oportunitat de discutir les seves idees sobre el camp vectorial amb Walter Heitler i Herbert Frölich, quan aquests estigueren, per uns dies, a Bristol per seguir uns seminaris a la Royal Society.<sup>28</sup> Així nasqué el treball comú dels tres investigadors de 1938,<sup>29</sup> en el qual calcularen per primera vegada el moment nuclear magnètic a partir de la suposició del nucli "despullat" envoltat d'un núvol carregat de mesons. Fins i tot, l'anomalia del moment magnètic dels protons i dels neutrons es podia calcular, amb aquesta teoria, amb el signe correcte.<sup>30</sup> D'altra banda, en aquesta teoria es donaven els coneguts problemes de l'energia pròpia dels protons i dels neutrons.

Aproximadament en el mateix temps, encara que independentment, Bhabha, Yukawa, Sakata i Taketoni arribaren als mateixos resultats.<sup>31</sup>

## 6. LA SISTEMÀTICA DE KEMMER I LA TEORIA SIMÈTRICA DELS MESONS

Per mantenir la igualtat necessària entre les forces protó-protó i neutró-neutró sense introduir conceptes artificiosos, cosa requerida pels resultats empírics i que hom anomenà "principi d'independència de la càrrega", la teoria fou ampliada per Kemmer

<sup>28</sup> Vegeu l'escrit de Kemmer a MURKHERJI (1974), pp. 98-100, i la carta núm. 572 a MEYENN, K. von ed. (1985) *Wolfgang Pauli. Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg and others. Volume II: 1930-1939*. Springer Verlag.

<sup>29</sup> FOHLICH, H.; HEITLER, W.; KEMMER, N. (1938) "On the nuclear forces and the magnetic moments of the neutron and the proton", *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 166, pp. 154-177.

<sup>30</sup> L'anomalia del moment magnètic dels nucleons fou aclarida en aquesta teoria tal com segueix: Un protó que emet un bosó vectorial ( $\text{spin}=1$ ) es transforma en un neutró. Per conservar el spin, aquest neutró ha de tenir un estat amb spin contrari al protó originari. Pel fet que el bosó vectorial té una massa 12 vegades inferior, té aquest bosó vectorial dissociat un moment 12 vegades més gran. Per l'estimació de la duració d'un estat dissociat d'aquest, es pot deduir el moment del protó resultant. Pel neutró amb arguments semblants i amb concordància amb l'experiència s'arriba al moment negatiu (vegeu els valors experimentals donats a la nota 20). De la mateixa manera, amb aquesta teoria s'arriba a una disminució pel potencial de Coulomb (vegeu la carta núm. 547 a MEYENN (1985)).

<sup>31</sup> BHABHA, H. (1938) "Theory of heavy electrons and nuclear forces", *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 166, pp. 501-528; YUKAWA, H.; SAKATA, S.; TAKETANI, M.T (1938) "On the interaction of elementary particles III", *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan*, vol. 20, pp. 319-340.

i convertida en una "teoria simètrica". Va introduir un bosó sense càrrega que llavors anomenà "neutretto", de tal manera que, també en aquest cas, la força pogués ser interpretada com un procés d'interacció i d'intercanvi.<sup>32</sup>

Kemmer, en un treball previ, va publicar una anàlisi general i sistemàtica dels possibles camps de bosons amb partícules de spin 0 i 1, amb les dues menes de paritat que són compatibles amb una densitat d'energia positiva i amb les exigències d'invariància relativista.<sup>33</sup> Com a conseqüència d'això, foren possibles quatre tipus diferents de camps equiprobables de bosons: l'escalar, el vectorial, el pseudo-escalar i el pseudo-vectorial.<sup>34</sup> El camp que havia estat treballat per Fröhlich, Heitler i Kemmer era un d'aquests. El fet que Kemmer veiés la possibilitat d'explicar la dependència del spin de les forces nuclears mitjançant partícules amb spin 0 va ser qualificat per Pauli com "merly as an historical accident".<sup>35</sup>

La qüestió del spin dels mesons mantingué ocupats els investigadors encara durant força temps. Després que al començament del 1941 Christy i Kusaka fessin públic el seu resultat sobre la producció de parells de mesons mitjançant raig- $\gamma$ <sup>36</sup>, on hagueren d'excloure els mesons amb spin 1 per la seva secció eficaç massa gran, Pauli

<sup>32</sup> KEMMER, N. (1938) "The charge-dependence of nuclear forces", *Proc. Cambr. Phil. Soc.*, vol. 34, pp. 354-364. Vegeu també la carta núm. 570 a MEYBNN (1985).

<sup>33</sup> KEMMER, N. (1938) "Quantum theory of Bose-Einstein particles and nuclear interaction", *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 166, pp. 127-153.

<sup>34</sup> Pauli i Fierz arribaren independentment al mateix resultat amb els seus experiments amb equacions de camp per a partícules de spin qualsevol: "the non-existence of particles with spin > 1" semblava molt probable. Vegeu la carta de Pauli a Kemmer el 24 de novembre de 1939. Posteriorment, Pauli no es mostrà tan convençut d'aquest parer tal i com li comentava en una carta a Kemmer el febrer del 1940.

<sup>35</sup> Carta de Pauli a Kemmer, 20 d'abril de 1941. Tot i que, d'entrada, no és possible donar cap preferència a cap de les quatre teories (escalar, vectorial, pseudo-escalar i pseudo-vectorial), Kemmer es decantà, per raons empíriques, per la vectorial. Després del descobriment del pió sense spin, es demostrà que la teoria pseudo-escalar era l'única capaç de descriure correctament els fets experimentals de la física nuclear.

<sup>36</sup> CHRISTY, R.F.; KUSAKA, S. (1941) "The interaction of  $\gamma$ -rays with mesotrons", *Phys. Rev.*, vol. 59, pp. 404-414.

va comentar en una carta a Kemmer:

"Per aquest motiu, el valor 1 per al spin dels mesons ha de ser exclòs definitivament. A la costa est d'aquest país hom es decanta pel valor de spin  $1/2$ , a la costa oest pel valor 0. Tot i estar a Princeton, jo em decanto més pel valor de spin 0."

No fou fins al principi dels anys cinquanta quan es comprovà definitivament que únicament la teoria pseudo-escalar podia ser sotmesa a una redefinició i ser suficient per descriure les forces nuclears, amb la pertinent ajuda dels  $\Pi$ -mesons.

## 7. LA TEORIA CLÀSSICA DE BHABHA DELS MESONS NEUTRES

A diferència de la "teoria simètrica" de Kemmer, Bhabha va utilitzar a la seva nova teoria del 1939 un mesó neutre com a únic portador de les forces nuclears.<sup>37</sup> Mitjançant el suport de la presentació de Dirac de l'electró puntual, ell va descriure les diverses propietats del camp del nucli amb una teoria clàssica del camp dels mesons. Un dels resultats amb més ressò de la seva teoria foren les seccions eficaces enormement creixents i irrealistes que s'obtenien en el *scattering* de mesons en nucleons a mesura que es feia créixer l'energia dels mesons. En un principi, Bhabha cregué poder solucionar-ho contemplant el frenat per radiació. Quan veié que això tampoc no solucionava el problema, deixà morir la teoria.

## 8. LA TEORIA MESÒNICA DE BETHE

En els experiments de l'any 1938 que hem mencionat, Kemmer indicà que només eren possibles quatre tipus de camp per als mesons de spin 0 i 1: l'escalar, el pseudo-escalar, el vectorial i el pseudo-vectorial. Per tant, el problema de les forces nuclears s'havia de poder tractar dins del marc de l'anomenada "sistemàtica" de Kemmer.

Bethe estudià tres tipus diferents d'aquests camps de cara a poder descriure els fets empírics de la física nuclear. Ell va considerar tres casos: una teoria únicament amb mesons neutres (teoria "neutral"); una, només amb mesons carregats; i una amb mesons neutres i carregats (la teoria "simètrica"). Tal i com també

<sup>37</sup> BHABHA, H. (1939) "Classical theory of mesons", *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 172, pp. 384-404. Vegeu també la carta núm. 551 a MEYENN (1985).



puntualitzà Pauli, li va semblar anar a l'encontre del camp "pseudo-escalar" dins del marc de Kemmer.

A causa del principi d'independència de la càrrega de les forces nuclears, primer només semblaven de rellevància pràctica la teoria "simètrica" i la neutral. Després que Bethe separés el potencial d'interacció en una part independent del spin i una altra que només depèn d'aquest, va poder mostrar que la part dependent del spin, ella sola, era suficient per explicar els resultats empírics de la física nuclear.

Per evitar termes divergents en el potencial d'interacció, Bethe es veié forçat a introduir una prescripció de tall per separar comportaments diferents a petites distàncies entre nucleons que, naturalment, no eren permeses per principis teòrics.

Només la teoria "neutral" donava el valor i el signe correcte per al moment magnètic quadrupolar dels deuterons, mesurat l'any 1939 per Kellog, Rabi, Ramsey i Zacharias.<sup>38</sup> D'altra banda, únicament la teoria "simètrica" permetia explicar la desintegració- $\beta$  i les anomalies del moment magnètic dels protons i neutrons.

## 9. LA "MIXED MESON THEORY" DE MØLLER-ROSENFELD

Un altre intent de trobar solucions al problema abans esmentat fou l'empres per Møller i Rosenfeld. En lloc d'utilitzar un camp, ells n'utilitzaren dos que es corresponien amb el mesó pseudo-escalar i el vectorial. Gràcies a una elecció brillant, anomenada per Pauli com "poció patentable", dels parametres d'acoblament, aconseguiren una compensació de les divergències que s'havien donat a totes les teories nuclears anteriors. D'aquesta manera caigueren les hipòtesis i prescripcions artificials i personals que s'havien fet fins llavors com, per exemple, les de la teoria de Bethe.

La teoria de Møller i Rosenfeld podia explicar també la paradoxa dels diferents temps de desintegració dels mesons. Per als mesons vectorials s'obtenia un temps de desintegració de  $10^{-8}$ s, així que aquests, després del seu naixement, es desintegren a les capes altes de l'atmosfera mentre que els que tenen un temps de desintegració de  $10^{-6}$ , els mesons pseudo-escalars, es poden trobar a les capes interiors. Per un altre cantó, mitjançant aquesta teoria, s'obtenia una secció eficaç pel *scattering* de mesons sobre nucleons molt més gran.

<sup>38</sup> Vegeu *Ann.* 20.

Lamek Hulthén va treballar durant l'any 1943 amb *scattering* de protons i neutrons i utilitzà la interacció dels nucleons descrita per la teoria de Møller-Rosenfeld. En aquesta teoria s'agafaven les constants d'acoblament dels camps dels dos mesons diferents com idèntiques. Això provocà l'anul·lació de les forces tensorials divergents que s'havien originat a petites distàncies entre nuclis. De tota manera, això implicava una contradicció sobre l'existència del moment quadrupolar elèctric dels deuterons. Tot i considerar forces no elàstiques, no s'aconseguí salvar aquesta contradicció. Posteriorment, i gràcies a una indicació de Pauli, Hulthén provà d'ampliar la teoria en el sentit d'introduir diferent massa per al mesó vectorial que per al pseudo-escalar, l'anomenada variant oscil·lant de l'enunciat.

Els resultats de Hulthén sobre la distribució angular de *scattering* entre neutrons i protons foren comparats amb els més nous resultats experimentals de *scattering* realitzats per Amaldi *et al.*, i Champion i Powell.<sup>39</sup> Aquests mostraren, per a neutrons ràpids (14 MeV) sobre protons, una distribució primordialment en el sentit incident, contràriament als experiments de Hulthén.

Totes les teories simètriques, que tractaven de forma idèntica tant els mesons neutres com els carregats, donaven, per contra, una distribució de *scattering* primordialment en el sentit contrari al predit per Hulthén. Aquest resultat fou de més pes o de més transcendència que no el fet que la teoria simètrica fos l'única que permetia una descripció unitària del principi d'independència de la càrrega i l'existència de mesons carregats en la radiació còsmica.

Hulthén cregué que aquesta discrepància era deguda a la part simètrica de la teoria i provà de substituir-la per una pseudo-escalar antisimètrica, on introduïa mesons escalars neutres i mesons pseudo-escalars carregats. A Pauli, aquesta possibilitat li semblà massa capritxosa, ja que encara hi havia moltes altres possibilitats per formar camps de mesons i, al seu parer, no tenia cap justificació clara.

En estreta relació amb els treballs de Hulthén, aparegueren els treballs de

<sup>39</sup> AMALDI, E.; BOCCIARELLI, D.; FERRETI, B.; TRABACCHI, G.C. (1942) "Treuung von 14MV-Neutronen an Protonen", *Naturwiss.*, vol. 30, pp. 582-584; CHAMPION, F.C.; POWELL, C.F. (1944) "Application of the photographic method to problems of nuclear Physics II. The scattering of 8.8 and 13 MeV neutrons by protons", *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 183, pp. 64-87.

Jauch, on s'indicava que la teoria mesònica mixta de Schwinger predeia igualment una distribució angular de *scattering* concordant amb el trobat experimentalment. A Princeton, sota la seva direcció i la de Pauli, també treballaren sobre el tema l'estudiant brasiler José Leite Lopes i el xinès, Ning Hu.

Fou després de la guerra, durant la conferència de física de Cambridge, quan Powell, Champion i Amaldi pogueren corregir els seus resultats. Mitjançant una disposició experimental millorada, els transformaren en una distribució angular de *scattering* n-p d'alta energia pràcticament isòtropa.<sup>40</sup> Això permeté de rebatre les objeccions més fermes en contra de la teoria mesònica simètrica de les forces nuclears.

## 10. EL PROBLEMA AMB EL SPIN MESÒNIC I LA TEORIA PSEUDO-ESCALAR SIMÈTRICA

Sota la influència d'Oppenheimer, els interessos de Pauli sobre la física dels mesons va anar en augment. Oppenheimer, llavors, estava rodejat d'un grup de físics molt competents (com eren, R. Serber, R. Christy, J. Schwinger, W. Lamb, G. Volkoff, H. Shyder, P. Morrison, S. Dancoff i L. Schiff), dels quals posteriorment Lúís Alvarez diria, reflectint una opinió estesa, que probablement s'havia juntat allà el millor grup del món de físics teòrics joves.

A final del 1939, Oppenheimer junt amb Hartland Snyder i Robert Serber havia examinat la formació d'eclipsis en l'anomenada component dura o forta de la radiació còsmica. Dels mesuraments fets fins aleshores es coneixia que una part mesurable de l'energia dels mesons era transmesa a la part tova de la radiació còsmica, o sigui, als electrons (l'anomenat *knock-on* dels electrons) i a la radiació- $\gamma$ . La formació d'aquests electrons secundaris amb energies inferiors a  $10^{10}$  eV podia ser descrita mitjançant una interacció coulombiana entre mesons de spin 1/2 i electrons. Per energies tals que  $E > \mu c^2$  ( $\mu$  és la massa dels mesons) s'obtenia com la part més contribuent a aquests processos, la part corresponent d'un parametre de xoc petit ( $b < r_0$ , on  $r_0$  és el radi nuclear). En aquest cas hom pensà en una interacció electromagnètica del tipus de la força nuclear entre mesons i partícules nuclears, la qual podia ser tractada amb el potencial de Yukawa. El càlcul donava, per aquest cas, una emissió massa gran de la radiació de frenat. Els autors pensaren en un primer moment que aquesta discrepància provenia d'un error en l'aproximació de Born.

<sup>40</sup> Vegeu aquí el núms. 757, 809 i 827.

Durant les trobades de Philadelphia el desembre de 1940, Pauli, per mitjà de Serber, fou informat de tots aquests resultats. Tal i com li va fer saber a Fierz, va quedar molt impressionat. Llavors s'adherí al grup dels que pensaven que els mesons tenien un spin 0: recordem la seva facècia en una carta a Kemmer sobre el fet que ell, tot i viure a Princeton, compartia l'opinió de la "costa oest". Ja llavors Pauli començà a dubtar si els mesons de la radiació còsmica tenien alguna cosa a veure amb la força nuclear.

En un experiment detallat i curós, els alumnes d'Oppenheimer, Robert Christy i Shuichi Kusaka (1940/41), estudiaren el frenat dels mesons en un camp de Coulomb d'un nucli atòmic, utilitzant el formalisme de Proca-Kemmer. Calcularen les seccions eficaces per la formació de parells i pel *bremstrahlung* i ho feren per a tres models diferents de mesons, corresponents a spins 1/2, 0 i 1. Els resultats indicaren que únicament els mesons amb spin 0 i 1/2 s'ajustaven a les prediccions teòriques. Als mateixos resultats arribaren Herbert Corben i Julian Schwinger el 1940.

Després dels resultats obtinguts per Christy i Kusaka, l'any 1941, sobre la formació de mesons mitjançant radiació- $\gamma$  i la seva concordança amb els experiments de Schein i Gill, la teoria del spin 1 dels mesons perdé tot el seu suport. Per aquesta raó, Pauli i altres preferiren la teoria pseudo-escalar simètrica per a partícules amb spin 0. S. Dancoff, que a la tardor del 1941 va anar a Princeton, i Pauli començaren a treballar en una teoria pel cas de l'acoblament fort.

## 11. TEORIA DE WENTZEL DE L'ACOBLEMENT FORT

Mentre semblava que el naixement de la radiació còsmica feia preveure només una interacció feble entre mesons i nucleons, difícilment s'obtenien magnituds de la física nuclear deduïdes de la teoria de camps dels mesons. De gran pes fou el resultat massa gran obtingut en calcular la secció eficaç en el *scattering* de mesons i nucleons, i la discordança entre la teoria i el comportament mesurat de les forces nuclears.

Com que en tots els càlculs s'havien utilitzat processos aproximats vàlids únicament per a l'acoblament feble entre mesons i nucleons, s'esperà, en un principi, que l'origen de la desavinencesa entre teoria i experiment es podia explicar. Wentzel, per aquest motiu, provà d'abordar el problema de les forces nuclears des de l'altre extrem, el de l'acoblament fort. Havia de ser possible que els nucleons s'unissin amb els mesons de tal manera que es poguessin donar estats amb valors de càrrega i de spin molt alts, les anomenades isòbares dels protons. Per aquest camí, Wentzel esperava guanyar experiència per al cas realitzat a la pràctica amb un acoblament

intermedi.

El mètode de Wentzel fou reprès i treballat posteriorment per Oppenheimer i Schwinger. Juntament amb altres, mostraren l'equivalència entre els estats dels nucleons introduïts per Heitler i Bhabha en el cas de l'acoplament fort (estats amb alts valors de càrrega i de spin, que provocaven així una disminució de la secció eficaç dels mesons que s'havia obtingut massa gran) i l'anterior idea introduïda per Heisenberg de la inèrcia del spin. La força nuclear deduïda per aquest plantejament no mostrava, però, el caràcter d'interacció o d'intercanvi que tant es volia. Robert Serber i Sydney Dancoff van tractar finalment el cas del camp de mesons escalar carregat i el pseudo-escalar neutre sota la *strong coupling approximation*. Per esgotar totes les possibilitats de la sistemàtica de Kemmer, Pauli i Dancoff calcularen el mateix problema per al camp pseudo-escalar simètric carregat. En tots els càlculs s'assolien resultats per la secció eficaç contrastables amb les dades i amb els valors experimentals, però no es podia obtenir, amb aquests camps, la dependència del spin de les forces nuclears ni el valor del moment magnètic dels nucleons.

La veritable solució de tots aquests problemes provingué per un camí llavors totalment inesperat. L'abril del 1947, el descobriment fet per Lattes, Muirhead, Occhialini i Powell de la impressió en una placa fotogràfica del rastre d'una partícula sense spin representà una dada d'una ajuda inestimable des de tots els punts de vista per explicar el problema de les forces nuclears. I, finalment, quan es pogueren produir artificialment pions neutres i carregats en ciclotrons, el problema de les forces nuclears quedà pràcticament aclarit. La renormalització de l'electrodinàmica quàntica feta per Schwinger, Tomonaga, Dyson i Feynmann impulsava l'establiment d'un nou ordre per classificar els fets en un nou marc teòric general. Quan aquesta nova teoria fou aplicada als mesons pseudo-escalars i es calculà el moment dels nucleons, s'anaren obtenint tots els valors experimentals prèviament obtinguts.

