

## APLICACIONES EXEMPLARS

A mitjan anys cinquanta es podia considerar que el desenvolupament iniciat el 1947 "with the discovery of the electromagnetic level shifts and the realization that the existing theory, when properly interpreted, was perfectly adequate to explain these effects to an apparently unlimited degree of accuracy" havia assolit una certa conclusió: "for the first time in the checkered history of this field of research it has become possible to give a unified and consistent presentation of radiation theory in full conformity with the principles of relativity and quantum mechanics." Així presentaven J. M. Jauch i F. Rohrlich el seu clàssic *The Theory of Photons and Electrons*, el primer text concebut com una exposició "unificada i consistent" de la nova QED.<sup>18</sup> Els deu primers capítols del llibre estan dedicats a la presentació de la teoria: el camp de radiació, el camp d'electrons, la seva interacció, la matriu  $S$ , renormalització... Després venen les aplicacions, Per que hi hagi interacció hi ha d'haver al menys dues partícules a l'estat inicial (del nombre de partícules a l'estat final no ens podem fer responsables); la teoria tracta de fotons i electrons. Amb una lògica impecable, es tracten doncs successivament els sistemes "fotó-electró", "electró-electró" —on "electró" denota genèricament electrons i positrons— i "fotó-fotó". Les interaccions fotó-electró, electró-electró, i positró-electró hi són considerades com a processos fonamentals d'interès per si mateixos. La discussió del que tot just comença, a conèixer-se com a "Compton scattering", "Møller scattering" i "Bhabha scattering", té lloc a un nivell abstracte i genèric que contrasta amb les discussions fenomenològiques anteriors dels mateixos processos, en què no es deixava de fer referència a l'absorció de raigs  $\gamma$  o el frenat d'electrons relativistes.<sup>19</sup>

<sup>18</sup>Jauch i Rohrlich (1955), p. v.

<sup>19</sup>*Ibid.*, pp. 228 i 252. El de Jauch i Rohrlich no era un cas aïllat, ni la seva una apreciació personal. Heitler, que no havia tractat la col·lisió entre dos electrons a les dues primeres edicions del seu llibre (1936, 1944), li dedicà un paràgraf sencer a la tercera (1954, pp. 231-243). Heitler deduïa primer l'element de matriu de Møller "in a semi-classical way" (a la

La presentació de Jauch i Rohrlich va marcar la pauta d'inclusió dels processos de dispersió en les exposicions de la QED. A Schweber, Bethe i de Hoffmann (1956), "Møller scattering" i "Scattering of positrons by electrons" figuren entre les aplicacions de la teoria de Feynman; "Compton scattering" és el primer exemple d'aplicació de la matriu  $S$ .<sup>20</sup> Kalien (1958) considera entre d'altres aplicacions elementals les dispersions Compton i Møller, com a exemples emblemàtics "de la facilitat amb què la moderna electrodinàmica quàntica permet obtenir resultats que en la majoria de casos ja havien estat deduïts per altres mètodes abans que s'establís la teoria moderna".<sup>21</sup> A Gupta (1977), la teoria s'aplica al càlcul de la secció eficaç "for several scattering processes of experimental interest, which will also serve to illustrate the essential techniques of calculation" —cal que diguem de quins processos es tracta?<sup>22</sup> Itzykson i Zuber (1985) utilitzen el càlcul de la secció eficaç de les dispersions Møller i Bhabha "as an illustration of the diagrammatic machinery", després d'haver considerat prèviament l'efecte Compton com a primer "exemple simple" per il·lustrar els mètodes desenvolupats fins aquell moment.<sup>23</sup>

La llista podria ampliar-se.<sup>24</sup> Podria adduir també la meua modesta experiència com a estudiant de física teòrica per corroborar la funció pedagògica

---

manera de Møller), i després mostrava "that the same result follows by using the methods of this book". A la darrera secció es donava la fórmula de Møller (secció eficaç diferencial) i s'indicava que havia estat contrastada experimentalment "for energies of a few  $mc^2$  and found to be in good agreement with the facts" (*ibid.*, p. 241; Heitler es remetia a Mott i Massey 1948, p. 369). Heitler suprimia en aquesta edició el paràgraf referent a la interacció electró-positró que hem citat més amunt, però no feia referència enlloc a la fórmula de Bhabha.

<sup>20</sup>Schweber, Bethe i de Hoffmann (1956), pp. 82, 85 i 248.

<sup>21</sup>Källén (1958), p. 258: "Die folgenden Rechnungen sind daher nur als Beispiele zu betrachten, wie man mit der modernen Quantenelektrodynamik ziemlich mühelos Ergebnisse erhalten kann, die in der meisten Fällen bereits lange vor der Entstehung der modernen Theorie auf anderem Weg gefunden wurden."

<sup>22</sup>Gupta (1977), p. 111.

<sup>23</sup>Itzykson i Zuber (1985), pp. 224 i 276.

<sup>24</sup>Per exemple amb Akhiezer i Berestetskij (1954; trad. anglesa 1965), Bjorken i Drell (1964), Białynicki-Birula (1975).

del càlcul de les fórmules de dispersió. És més interessant observar que la presentació de les fórmules de dispersió com a aplicacions exemplars de la QED ha transcendit els llibres de text dedicats a la teoria: en la seva provocativa història sociològica de la física de partícules, Pickering utilitza la dispersió electró-electró per il·lustrar els mètodes de la QED.<sup>25</sup>

La prominència de les fórmules de dispersió en les presentacions de la teoria té importants efectes secundaris. La cita dels treballs originals que sol acompanyar la discussió de les fórmules, pot crear la impressió que han estat sempre aplicacions exemplars de la QED. Com s'afirma en un article recent: "Perhaps the most impressive successes of early quantum field theory were the calculations of scattering probabilities for a variety of processes [entre ells els que hem analitzat... ] They were in reasonable agreement with experiment".<sup>26</sup> L'afirmació no és criticable per la manca de rigor històric; en realitat, és valuosa en la mesura que representa la percepció espontània d'un físic teòric en actiu. Un físic amb més consciència històrica ha destacat igualment les fórmules de dispersió com a èxits en primer ordre de l'electrodinàmica quàntica dels anys trenta.<sup>27</sup> La literatura científica és marcadament, potser inevitablement revisionista.<sup>28</sup>

L'existència d'un canvi substancial en la funció de les fórmules de dispersió dins de la QED sembla clara. Què motivà el canvi de status?

#### CAUSES D'UN RECONeixEMENT DIFERIT

L'etapa inicial de la QED es caracteritza per la persistència de greus problemes conceptuals. L'ombra d'aquestes dificultats s'estenia sobre els modestos èxits

---

<sup>25</sup>Pickering (1984), p. 63.

<sup>26</sup>Georgi (1990), p. 449.

<sup>27</sup>Pais (1986), pp. 374-376.

<sup>28</sup>Les reflexions de Kuhn sobre la retòrica dels llibres de text són ja clàssiques (Kuhn 1962). Veure Cantor (1989) per un discussió recent.

de la teoria.<sup>29</sup> Per a Pauli, com hem vist, la divergència de l'energia pròpia de l'electró limitava severament la significació d'un tractament aproximat i la seva no era una apreciació aïllada: Oppenheimer i Breit, entre d'altres, es van expressar en termes molt similars. Quina importància tenia que les prediccions de la teoria fossin correctes en primer ordre, si les aproximacions d'ordre superior divergien? Un problema similar afectaria els intents realitzats a mitjan anys cinquanta per estendre el tractament pertorbatiu característic de la QED a les interaccions fortes, provocant una reacció similar: "In field theories of the strong interaction[...] it made little sense to rely upon a first-order term which was followed by an infinite series of 'perturbations' of increasingly *greater* magnitude".<sup>30</sup>

La introducció de la renormalització altera radicalment aquesta situació. L'eliminació dels infinits va comportar la reconsideració de processos que fins aquell moment havien presentat un interès secundari. Les velles fórmules de dispersió van ser dels primers beneficiaris d'aquesta revalorització. El càlcul de les correccions radiatives i la confirmació experimental de les fórmules van passar a formar part del programa de la QED, en una demostració més de la capacitat predictiva i l'adequació empírica de la teoria. El concepte kuhnian de "ciència normal" s'adapta bé a l'electrodinàmica quàntica dels primers anys cinquanta, immersa en l'activitat de consolidació i desenvolupament propiciada per la recuperació de la teoria. El canvi de status de les fórmules de dispersió apareix així com una de les primeres conseqüències del canvi de status de la QED. Les fórmules existien de feia anys, gairebé els mateixos que s'havia comprovat que eren conseqüència de la QED; però ara no representaven èxits menors d'una teoria problemàtica, sinó exemples d'aplicació d'una teoria modèlica.

---

<sup>29</sup>Una observació que comparteixo amb Rüter: "The few empirical successes of the theory could not outweigh the grave anomalies that it faced" (Rüter 1989, p. i). L'afirmació de Rüter, tanmateix, no es basa en una consideració mínima dels èxits experimentals.

<sup>30</sup>Pickering (1984), p. 72.

El reconeixement tardà de les fórmules de dispersió denota el caràcter contextual i relatiu d'una aplicació. No es pot discutir si una fórmula representa o no una aplicació separadament del context en què és contrastada i avaluada, o al marge de la teoria subjacent. Aquesta dependència explica el fet paradoxal que els processos de dispersió esdevinguessin aplicacions de la QED—és a dir, fossin reconeguts com a tals— no en el moment de ser concebuts, quan la teoria més hauria precisat del seu suport, sinó anys després, quan la necessitat no era urgent i la crisi havia estat superada.

La diversitat de reaccions suscitades per les fórmules a nivell experimental, admet una explicació en termes de dinàmica disciplinar. En els anys trenta, la radioactivitat va anar cedint terreny a disciplines emergents com la física del nucli o de la radiació còsmica.<sup>31</sup> L'estudi per se de les radiacions radioactives se subordinà al del nucli o al de les partícules descobertes al llarg de la dècada. Va ser la significació de les fórmules per l'estudi de la radiació còsmica o el nucli atòmic, i no la seva, condició d'aplicacions de la mecànica quàntica relativista o d'una electrodinàmica quàntica incipient, que determinà el seu destí experimental. Les primeres contrastacions de la fórmula de Klein-Nishina van ser motivades per l'aplicació de la fórmula a l'anàlisi dels raigs còsmics. Abans que aquesta possibilitat s'esvaís completament, un nou fenomen d'absorció havia atret l'atenció dels experimentadors per la seva aparent relació amb el nucli atòmic. L'estructura del nucli justificava una investigació a consciència dels

---

<sup>31</sup>Stuewer (1975), Brown i Hoddeson (1983). Per l'auge de la radiació còsmica veure també de Maria i Russo (1985, 1989). En l'anàlisi dels raigs còsmics no s'estalviaven recursos, ni materials ni humans. H. V. Neher va completar el 1931, a Caltech, una tesi sobre la dispersió nuclear d'electrons d'alta energia. Neher tenia intenció de continuar els seus experiments, però acabaria abandonant-los "because of the press of cosmic-ray work" (Neher 1983). Carl Anderson va sentir també aquesta pressió sobre ell. Anderson s'interessà el 1930 pels experiments de Chao sobre dispersió de raigs  $\gamma$ . Quan ja s'havia decidit a estendre'ls utilitzant una cambra de boira, Millikan l'instà a construir un instrument per mesurar les energies dels electrons presents a la radiació còsmica (Anderson 1983). Al Cavendish, en els primers anys de la dècada de 1930, Blackett va adaptar les seves cambres de boira a l'estudi de la radiació còsmica.

mecanismes d'absorció de la radiació  $\gamma$ , entre ells la dispersió Compton. Cap d'aquests elements no va concórrer en els casos de Møller i Bhabha, i les seves fórmules van ser pràcticament ignorades. Ni tan sols Champion no representa una excepció, perquè el seu era un estudi de la radiació  $\beta$  que estava molt avançat en aparèixer la fórmula de Møller.

Però si la radiació còsmica i la física del nucli van condicionar la contrastació experimental de les fórmules de dispersió, no és menys cert que l'anàlisi es centrà gairebé exclusivament en les radiacions radioactives. Aquesta circumstància, que passa sovint inadvertida, proporciona un element de continuïtat entre la física dels anys vint i la dels anys trenta, i mostra que la radioactivitat natural no va ser simplement desplaçada pels primers acceleradors en l'estudi del nucli. D'altra banda, que les fórmules es verificuessin amb radiacions radioactives era escassament rellevant quan es creia que el límit de validesa de la teoria es trobava a energies molt superiors, com les que es donaven en la radiació còsmica.

La reconsideració dels processos de dispersió obeeix, finalment, a la importància fonamental d'aquest tipus de procés físic en la formulació més suggerent rebuda per la QED. Abans de la renormalització, els processos de dispersió són descrits típicament com a part d'un fenomen físic més genèric, com el frenat o l'absorció de partícules relativistes (l'excepció de l'efecte Compton es justifica per la seva pròpia singularitat).<sup>32</sup> Møller calcula la dispersió d'un electró relativista per un electró lliure com a part del càlcul del frenat d'electrons d'alta energia, pensant en els electrons presents en la radiació còsmica; Bhabha arriba a la interacció positró-electró a través de la radiació còsmica, i aplica immediatament la seva fórmula a la descripció de l'absorció

---

<sup>32</sup>Veure per exemple la presentació de la dispersió Compton en Heitler (1936): "Scattering by free electrons is of fundamental importance in all phenomena connected with the absorption of  $\gamma$ -rays, cosmic radiation, etc." (p. 146); cf. la introducció de la fórmula de Klein-Nishina a Beck (1933): "Wir gehen nun dazu über, den Durchgang von kurzweilliger elektromagnetischer Wellenstrahlung durch Materie zu besprechen" (p. 407).

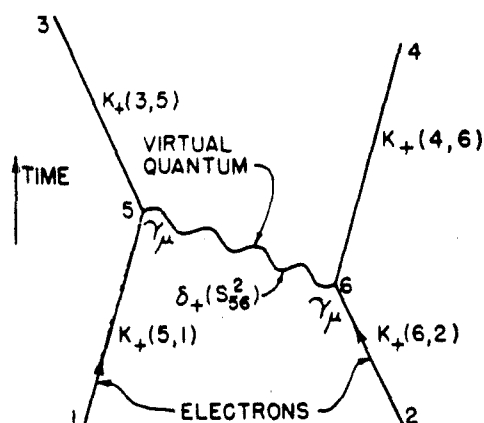


Figura 1. La dispersió Møller, primer diagrama de Feynman. Així va representar Feynman la seva "equació fonamental de l'electrodinàmica", que descrivia l'intercanvi d'un fotó entre dos electrons (Feynman 1949, p. 772).

de positrons.

En l'electrodinàmica quàntica de Feynman, la dispersió esdevé el procés físic elemental sobre el que es basteix la teoria. A finals dels anys quaranta, com explica Schwinger, "the fundamental viewpoint was that of scattering".<sup>33</sup> Al segon dels articles en què Feynman va oposar la seva aproximació "overall space-time" a la formulació hamiltoniana usual, la interacció de dos electrons lliures exemplificava les seves consideracions.<sup>34</sup> L'"equació fonamental de l'electrodinàmica" que proposava Feynman descrivia l'intercanvi d'un fotó entre dos electrons, i tenia una clara funció heurística: "It will serve as a prototype enabling us to write down the corresponding quantities involving the exchange of two or more quanta between two electrons or the interaction of an

<sup>33</sup>Schwinger (1958), p. xiii. *Cf.* el comentari de Dyson després d'haver mostrat l'equivalència de l'electrodinàmica quàntica de Schwinger i Tomonaga amb la de Feynman: "The Feynman method[...] can be applied with directness to all kinds of scattering problems. The Schwinger method[...] is suited especially to bound-state problems" (Dyson 1949, p. 1736).

<sup>34</sup>Feynman (1949), p. 769: "We begin by discussing the solution in space and time of the Schrödinger equation for particles interacting instantaneously. The results are immediately generalizable to delayed interactions of relativistic electrons and we represent in that way the laws of quantum electrodynamics." Veure Schweber (1986).

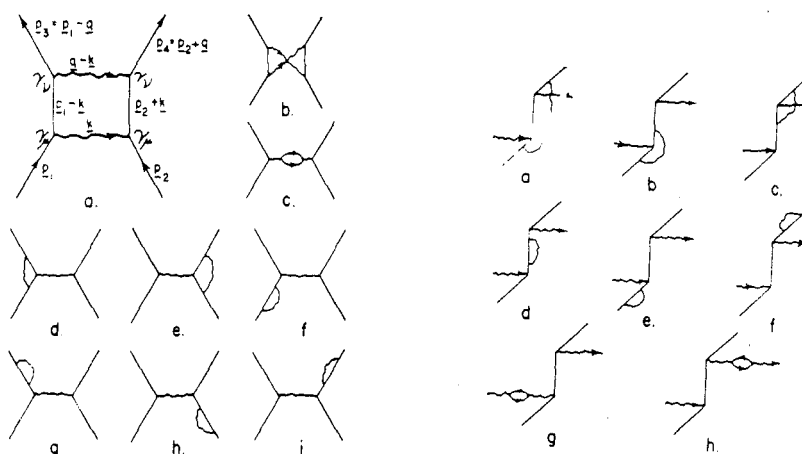


Figura 2. La primera representació diagramàtica d'algunes de les correccions radiatives a les dispersions Møller i Compton. Feynman va mostrar amb aquests exemples l'utilitat dels seus diagrames en el plantejament de problemes complexos (Feynman 1949, pp. 787 i 788).

electron with itself".<sup>35</sup> La relació de la fórmula de Møller amb la nova versió de la teoria s'establia immediatament: "The calculation, from [our fundamental equation for electrodynamics], of the transition element between positive energy free electron states gives the Møller scattering, when account is taken of the Pauli principle".<sup>36</sup>

Feynman va interpretar gràficament la seva equació fonamental, i la dispersió Møller esdevingué d'aquesta manera el primer diagrama de Feynman (figura 1). Els diagrames corresponents a la dispersió Compton el seguien quatre figures després. Però l'utilització exemplar dels processos de dispersió no acabava aquí. En un dels apèndixs de l'article, Feynman exhibia la capacitat dels diagrames per abordar problemes més complexos mitjançant les correccions radiatives a les dispersions Møller i Compton (figura 2).<sup>37</sup>

La reestructuració de la teoria al voltant dels fenòmens de dispersió no

<sup>35</sup>Feynman (1949), p. 772.

<sup>36</sup>*Ibid.*, p. 773.

<sup>37</sup>Feynman (1949); p. 787.



seria l'únic element aglutinador de les fórmules de dispersió. A finals dels anys cinquanta, la proliferació de noves partícules i la clarificació dels diferents tipus d'interaccions els diferenciaria de processos de dispersió més complexos:<sup>38</sup>

Many experiments have been suggested to test whether the electron has any finite size or if quantum electrodynamics is valid at small distances[. . .] Among them the interactions  $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$ ,  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$ , and  $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$  are pure quantum electrodynamical or, in other words, they do not involve the structures of other particles whose effects are often difficult to distinguish from the effect due to the breakdown of QED at small distances.

Tot estava a punt per incorporar les formules de dispersió a les reconstruccions formals i didàctiques de la teoria, i reconstruir al mateix temps la seva història.

---

<sup>38</sup>Tsai (1960), p. 269.

## Conclusions

*1. Les formules de Klein-Nishina, Møller i Bhabha van ser originalment deduïdes mitjançant un tractament semiclàssic basat en la noció de correspondència, que evitava el recurs a les formulacions existents de la QED. Lluny d'haver-se diluït en la nova mecànica quàntica, els arguments de correspondència van seguir jugant una important funció heurística durant la primera meitat dels anys trenta.*

El principi de correspondència va jugar un paper cabdal en el desenvolupament de la teoria quàntica fins que va ser incorporat a la mecànica matricial (1925). El 1927, O. Klein va renovar la significació del principi en mostrar que l'avaluació quàntica de l'electrodinàmica podia basar-se en les expressions per les densitats de càrrega i corrent. L'estiu de 1928, Klein i Nishina van solucionar el "problema de la intensitat" de l'efecte Compton a través de l'aplicació *korrespondenzmäßig* (segons el principi de correspondència) de l'equació de l'electró de Dirac (Capítol 1).

La noció de correspondència va permetre C. Møller elaborar, tres anys després, un mètode per tractar la col·lisió de dues partícules relativistes. Møller, format a Copenhaguen, va evitar així la consideració dels greus problemes que afectaven en aquells moments l'electrodinàmica quàntica. La comparació del seu tractament de la interacció entre dos electrons amb el de Breit —basat en la teoria dels camps d'ona de Heisenberg i Pauli— mostra que Møller no s'equivocà en optar pel vell mètode de correspondència (Capítol 2).

El 1935, H. Bhabha va adaptar el tractament de Møller al càlcul de la dispersió d'un positró per un electró. L'adaptació només era possible des de la peculiar concepció del positró de Dirac, i l'ús imaginatiu d'aquesta teoria

controvertida esdevindria l'element més característic de la deducció de Bhabha (Capítol 3).

2. Les fórmules de *dispersió van ser recuperades sense demora a partir de la QED. Però la constatació que eren conseqüència de la teoria va exercir en el seu moment escassa influència, a jutjar pel tracte donat a les fórmules en els textos sobre mecànica quàntica, el nucli, o l'electrodinàmica quàntica publicats en les dècades de 1930 i 1940.*

El 1930, en dos articles apareguts en un interval de pocs mesos, I. Waller i I. Tamm van posar de manifest les connexions de la fórmula de Klein-Nishina amb els intents més prominents realitzats fins aquell moment per elaborar una electrodinàmica quàntica. Tamm i Waller van mostrar que la fórmula es podia deduir a partir de les formulacions existents de la QED, legitimant-la com a aplicació de la teoria. La fórmula d'interacció de Møller va ser assimilada de forma immediata: encara no un mes després que Møller presentés el seu article definitiu, Bethe i Fermi aclarien la relació de la fórmula amb l'electrodinàmica quàntica. La proximitat del càlcul de Bhabha amb el de Møller faria supèrflua la comprovació que la fórmula era conseqüència de la QED (Capítols 1, 2 i 3).

Tanmateix, la constatació que les fórmules podien ser considerades com a aplicacions de la QED no sembla haver tingut majors conseqüències: ningú no va adduir-les en suport de la teoria durant el període anterior a la renormalització (Epíleg).

3. *La fórmula de Klein-Nishina s'imposà fàcilment sobre les fórmules de dispersió anteriors, i va ser àmpliament utilitzada en l'anàlisi de l'absorció dels raigs gamma. A mitjan anys trenta, la fórmula era un element essencial de la imatge del procés d'absorció.*

La fórmula de Klein-Nishina s'imposà sense resistència sobre les fórmules de dispersió anteriors, tant per la superioritat de la seva base teòrica com per l'acord amb les dades experimentals disponibles. La controvèrsia suscitada

en torn de l'absorció anòmala dels raigs  $\gamma$  no afectà la fórmula; ben al contrari, només l'existència d'una predicció teòrica fiable va permetre reconèixer l'existència d'un nou procés d'absorció. A mitjan anys trenta, el nou fenomen havia estat adscrit a la creació de parelles electró-positró i es disposava d'una imatge contrastada dels diferents mecanismes d'absorció. La fórmula de Klein-Nishina n'era un element essencial (Capítol 4).

4. *Les fórmules de Møller i Bhabha no van arribar a ser contrastades experimentalment durant els anys trenta. Els experiments de Champion, l'única excepció que es podria considerar, van ser concebuts quan la fórmula de Møller encara no existia.*

La física experimental dels anys trenta va ignorar les fórmules de Møller i Bhabha. Si el de Champion és l'únic intent realitzat per contrastar la fórmula de Møller durant els anys trenta, ningú no intentaria contrastar la fórmula de Bhabha fins el 1943 (Capítol 6).

Els experiments de Champion, presentats sovint com si haguessin estat motivats per l'aparició de la fórmula de Møller, s'havien iniciat el 1929, quan la fórmula no existia. En els seus primers informes de recerca, Champion exagerava els defectes de les teories existents de la interacció entre dos electrons per justificar un interès genuí, aliè a tota consideració teòrica, pel problema. En aparèixer la fórmula de Møller, Champion disposava de la majoria de fotografies que utilitzaria per contrastar-la, que en aquells moments analitzava amb altres intencions (Capítol 5).

5. *La significació de les fórmules de dispersió per a la física del nucli i la radiació còsmica —disciplines puixants de la física dels anys trenta— va condicionar decisivament el seu destí experimental. Però serien les radiacions radioactives les que jugarien el paper més important en la seva contrastació experimental.*

Va ser la seva rellevància per disciplines emergents, i no la seva condició d'aplicació d'una incipient electrodinàmica quàntica, el que determinà la ca-

rrera experimental de les fórmules de dispersió. La radiació còsmica primer, i el nucli després, van estimular la contrastació i la utilització de la fórmula de Klein-Nishina. La irrellevància de les fórmules de Møller i Bhabha en l'anàlisi de la radiació còsmica explica que passessin pràcticament desapercebudes.

La radiació còsmica, tanmateix, representà tan sols un camp d'aplicació; la incertesa sobre la seva constitució no permetia utilitzar-la per contrastar les fórmules. La fórmula de Klein-Nishina va ser repetidament contrastada en els nombrosos experiments d'absorció dels raigs gamma realitzats en els primers anys de la dècada de 1930. L'únic intent de contrastació de la fórmula de Møller realitzat durant la mateixa dècada es produí en el context de la investigació de la radiació  $\beta$ . Aquesta circumstància, que passa sovint inadvertida, proporciona un element de continuïtat entre la física dels anys vint i la dels anys trenta, i mostra que la radioactivitat natural no va ser simplement desplaçada pels primers acceleradors en l'estudi del nucli. La contrastació de les fórmules de dispersió il·lustra d'aquesta manera la dinàmica disciplinar de la física dels anys trenta (Capítols 4 i 5, Epíleg),

6. *Les fórmules de dispersió només van esdevenir aplicacions exemplars de la QED després de la introducció del procés de renormalització. Els processos de dispersió només van assolir la seva condició actual de forma retrospectiva, quan la teoria no requeria vitalment del seu suport.*

La insignificància de les fórmules per a l'electrodinàmica quàntica dels anys trenta contrasta amb la seva funció paradigmàtica en les presentacions actuals de la teoria. El canvi de status es produí en els anys immediatament posteriors al final de la guerra, un dels primers efectes de la introducció del procés de renormalització. Al voltant de 1950 es constata fàcilment un augment d'interès pels processos de dispersió, que afecta tant l'aspecte teòric com l'experimental. Eliminats els infinits, tenia sentit calcular les aproximacions d'ordre superior a les fórmules de dispersió. Però a més del càlcul de les correccions radia-

tives, en aquells moments estaven en marxa més intents de contrastació de les fórmules de Møller i Bhabha que els realitzats durant les dues dècades precedents —entre ells el que encara es considera el test clàssic d'ambdues fórmules a baixes energies. La conseqüència indeleble d'aquesta transformació seria la incorporació de les fórmules de dispersió a les presentacions de la teoria (Capítols 5 i 6, Epíleg).

*7. El pas d'aplicacions marginals a paradigmes va ser conseqüència del canvi de status de la QED i de la importància fonamental dels processos de dispersió en l'electrodinàmica quàntica de Feynman*

L'etapa inicial de la QED es caracteritza per la persistència de greus problemes conceptuals, que estenien la seva ombra sobre els modestos èxits de la teoria. Quina importància tenia que les prediccions de la teoria fossin correctes en primer ordre, si les aproximacions d'ordre superior divergien? La introducció de la renormalització alterà radicalment aquesta situació. L'eliminació dels infinits va comportar la reconsideració de processos que fins aquell moment havien presentat un interès secundari, i les fórmules de dispersió van ser beneficiaris directes d'aquesta revalorització. El canvi de status de les fórmules de dispersió apareix així com una de les primeres conseqüències del canvi de status de la QED. Les fórmules no representaven ja èxits menors d'una teoria problemàtica, sinó exemples d'aplicació d'una teoria modèlica.

*Scattering*, d'altra banda, va esdevenir el procés físic talismà de l'electrodinàmica quàntica de Feynman. L'equació fonamental de la QED proposada per Feynman descrivia la interacció entre dos electrons, i conduïa directament a la fórmula de Møller. Feynman va representar gràficament la seva equació fonamental, i la dispersió Møller va esdevenir d'aquesta manera el primer diagrama de Feynman. Les correccions radiatives a les dispersions Møller i Compton exhibien la capacitat dels diagrames per abordar problemes més complexos.

## Bibliografia primària\*

- AKHIEZER, A. I. i V. B. BERESTETSKIJ (1954). *Kvantovaja Elektrodinamika*. Moscou. Trad. anglesa: *Quantum Electrodynamics*, New York/ London: Interscience 1964.
- ANDERSON (1933). "The positive electron", *Phys. Rev.* 43, 491-494 [28-2-1933].
- ANDERSON, C. D. i SETH H. NEDDERMEYER (1933). "Positrons from  $\gamma$ -rays", *Phys. Rev.* 43, 1034 [18-5-1933].
- ARAKATSU, B. (1932). "Anomalous absorption of  $\gamma$ -rays", *Mem. Sci. Taihoku Imp. Univ.* 5, 163.
- ASHKIN, A. i W. M. WOODWARD (1952). "Positron-Electron Scattering", *Phys. Rev.* 87, 236 [12-4-1952].
- ASHKIN, A., L. A. PAGE i W. M. WOODWARD (1954). "Electron-Electron and Positron-Electron Scattering Measurements", *Phys. Rev.* 94, 357-362 [27-11-1953].
- BARBER, W. C., C. E. BECKER i E. L. CHU (1953). "Electron-electron scattering at 6.1 MeV", *Phys. Rev.* 89, 950-957.
- BARKAS, W. H., R. W. DEUTSCH, F. C. GILBERT i C. E. VIOLET (1952). "High energy electron-electron scattering", *Phys. Rev.* 86, 59-63 [10-12-1951].
- BECK, GUIDO (1926). "Comptoneffekt und Quantenmechanik", *Zs. Phys.* 38, 144-148.  
——(1930). "Bemerkung zur Zerstreung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 18, 896 [27-9-1930].  
——(1933a). "Kernbau und Quantenmechanik", a *Handbuch der Radiologie*, E. Marx (ed.), Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.  
——(1933b). "Hat das negative Energiespektrum einen Einfluß an Kernphänomene?", *Zs. Phys.* 83, 498-511 [2-5-1933].
- BECK, G. i KURT SITTE (1933). "Zur Theorie des  $\beta$ -Zerfalls", *Zs. Phys.* 86, 105-119.
- BETHE, HANS (1930). "Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie", *Ann. Physik* 5, 325-400 [3-4-1930].  
——(1932). "Bremsformel für Elektronen relativistischer Geschwindigkeit", *Zs. Phys.* 76, 293-299 [4-5-1932].  
——(1933). "Quantenmechanik der Ein- und Zwei-Elektronenprobleme", a *Hdb. Phys.* XXIV/1 (2a ed.), pp. 273-560. Berlin: Springer.  
——(1935). "On the annihilation radiation of positrons", *Proc. Roy. Soc.* A150, 129-141 [18-12-1934].
- BETHE, HANS i ENRICO FERMI (1932). "Über die Wechselwirkung von zwei Elektronen", *Zs. Phys.* 77, 296-306 [9-6-1932].

---

\*Entre parèntesis quadrats s'indica la data de recepció o signatura dels articles.

- BETHE, HANS A. I WALTHER HEITLER (1934). "On the stopping of fast particles and the creation of positive electrons", *Proc. Roy. Soc.* **A146**, 83-112 [27-2-1934].
- BHABHA, HOMI JEANGIR (1933). "Zur Absorption der Höhenstrahlung", *Zs. Phys.* 86, 120-130 [12-8-1933].
- (1934). "Passage of very fast protons through matter", *Nature* 134, 934 [10-11-1934].
- (1935a). "On the calculation of pair creation by fast charged particles and the effect of screening", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 31, 394-406 [6-5-1935].
- (1935b). "The creation of electron pairs by fast charged particles", *Proc. Roy. Soc. A* 152, 559-586 [29-4-1935].
- (1936). "The scattering of positrons by electrons with exchange on Dirac's theory of the positron", *Proc. Roy. Soc. A* 154, 195-206 [20-10-1935].
- BHABHA, H. J. I W. HEITLER (1936). "Passage of Fast Electrons through Matter", *Nature* 138, 401 [29-7-1936].
- (1937). "The Passage of Fast Electrons and the Theory of Cosmic Showers", *Proc. Roy. Soc. A* 159, 432-458 [11-12-1936].
- BHABHA, H. J. I H. R. HULME (1934). "The annihilation of fast positrons by electrons in the K-Shell", *Proc. Roy. Soc. A* 146, 723-736 [4-5-1934].
- BIALINICHI-BIRULA, IVO I ZOFIA (1975). *Quantum Electrodynamics*. Oxford/Varsòvia: Pergamon Press/PWN.
- BJORKEN, JAMES D. I SYDNEY D. DRELL (1964). *Relativistic Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- BLACKETT, PATRICK M. S. (1929). "On the design and use of a double camera for photographing artificial disintegrations", *Proc. Roy. Soc. A* 123, 613-629 [21-2-1929].
- BLACKETT, PATRICK M. S. I GIUSEPPE P. S. OCCHIALINI (1933). "Some photographs of the tracks of penetrating radiation", *Proc. Roy. Soc.* A139, 699-726 [7-2-1933].
- BLACKETT, P. M. S., J. CHADWICK I G. P. S. OCCHIALINI (1933). "New evidence for the positive electron", *Nature* 131, 473 [27-3-1933].
- (1934). "Some experiments on the production of positive electrons", *Proc. Roy. Soc.* A144, 235-249 [10-2-1934].
- BOHR, NIELS (1913). "On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter", *Phil. Mag.* 25, 10-31.
- (1915). "On the decrease of velocity of swiftly moving electrified particles in passing through matter", *Phil. Mag.* 30, 581-612.
- (1932). "Atomic stability and conservation laws", a *Convegno di fisica nucleare* (Roma: Reale Accademia d'Italia), pp. 119-130.
- (1948). "The penetration of atomic particles through matter", *Kgl. danske Vid. Selsk., mat.-fys. Medd.* 18, (114 pàgs.).
- BOthe, WALTER (1922). "Untersuchungen an  $\beta$ -Strahlenbahnen", *Zs. Phys.* 12, 117-127 [23-10-1922].
- BOTHE, WALTHER I WOLFGANG GENTNER (1936). "Die Streu- und Sekundärstrahlung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 24, 171-172 [28-1-1936].
- BOTHE, W. I ZAH-WEI Ho (1946). "Die Einzelstreuung und die Vernichtung schneller Positronen", *Nadir. Akad. Wiss. Göttingen, math.-physik. Kl.*, 59-61 [5-4-1946].



- BOTHE, W. I W. HORN (1934a). "Die Sekundärstrahlung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 22, 106-107 [10-1-1934].
- (1934b). "Die Sekundärstrahlung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Zs. Phys.* 88, 683-698 [Heidelberg 6-3-1934].
- BOTHE, WALTHER I W. KIRCHNER (1933). "Zerstreuung von Röntgenstrahlen", a *Hdb. Phys.* (2a ed.) vol. 23/2, cap. 2, pp. 85-141; Berlin: Julius Springer.
- BRAMLEY, ARTHUR (1932). "Absorption of  $\gamma$ -rays", *Phys. Rev.* 39, 378-379 [18-12-1931].
- BREIT, GREGORY (1926). "A correspondence principle in the Compton effect", *Phys. Rev.* 27, 362-372 [31-5-1929].
- (1928). "An interpretation of Dirac's theory of the electron", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 14, 553.
- (1929a). "The effect of retardation on the interaction of two electrons", *Phys. Rev.* 34, 375 [1-7-1929].
- (1929b). "The effect of retardation on the interaction of two electrons", *Phys. Rev.* 34, 553-573 [31-5-1929].
- (1930). "The fine structure of He as a test of the spin interactions of two electrons", *Phys. Rev.* 39, 616-624 [6-1-1932].
- (1932a). "Dirac's equation and the spin-spin interactions of two electrons", *Phys. Rev.* 36, 383-397 [16-6-1930].
- (1932b). "Quantum theory of dispersion, Parts I-V", *Rev. Mod. Phys.* 4, 504-576.
- (1933). "Quantum theory of dispersion. Parts VI and VII", *Rev. Mod. Phys.* 5, 91-140.
- (1955). "Relativistic corrections for high-energy  $p$ - $p$  scattering", *Phys. Rev.* 99, 1581-1596 [9-5-1955].
- BRETSCHER, EGON (1933). "Bericht über die physikalische Vortragswoche der Eidg. Technischen Hochschule Zurich", *Helv. Phys. Acta* 6, 411-413.
- CHADWICK, J. I P. H. MERCIER (1925). "The scattering of  $\beta$ -rays", *Phil. Mag.* 50, 208-224.
- CHAMPION, F. CLIVE (1932a). "The distribution of energy in the  $\beta$ -ray spectrum of radium E", *Proc. Roy. Soc. A* 134, 672-681 [15-10-1931].
- (1932b). "On some close collisions of fast  $\beta$ -particles with electrons, photographed by the expansion method", *Proc. Roy. Soc. A* 136, 630-637 [23-2-1932].
- (1932c). "The scattering of fast  $\beta$ -particles by electrons", *Proc. Roy. Soc. A* 137, 688-695 [25-6-1932].
- (1936). "The scattering of fast  $\beta$ -particles by nitrogen nucleus", *Proc. Roy. Soc. A* 153, 353-358 [23-7-1935].
- CHAMPION, F. CLIVE I PATRICK M. S. BLACKETT (1931). "The scattering of slow  $\alpha$ -particles by helium", *Proc. Roy. Soc. A* 130, 380-388 [3-11-1930].
- CHAO, CHUNG-YAO (1930a). "The absorption coefficient of hard  $\gamma$ -rays", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 16, 431-433 [15-5-1930].
- (1930b). "Scattering of hard  $\gamma$ -rays", *Phys. Rev.* 36, 1519-1522 [13-10-1930].
- (1931). "Zur Kernabsorption harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 19, 752 [25-7-1931].
- (1932a). "The abnormal absorption of heavy elements for hard  $\gamma$ -rays", *Proc. Roy. Soc. A* 135, 206-213 [23-10-1931].

- (1932b). "The absorption and scattering of hard  $\gamma$  rays", *The Science Reports of National Tsing Hua Univ.* A 1, 195-176.
- CHAO, CHUNG-YAO I T. T. KUNG (1933). "Interaction of Hard  $\gamma$ -Rays with Atomic Nuclei", *Nature* 132, 709 [4-9-1933].
- COMPTON, ARTHUR H. (1923). "A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements", *Phys. Rev.* 21, 483-502 [13-12-1922].
- (1926). *X-Rays and Electrons. An Outline of Recent X-Ray Theory.* New York: Van Nostrand.
- COMPTON, ARTHUR H. I SAMUEL K. ALLISON (1935). *X-Rays in Theory and Experiment.* London: MacMillan.
- CURIE, IRENE I FREDERIC JOLIOT (1933). "Sur l'origine des electrons positifs", *C. R. Acad. Sci.* 196, 1581-1583 [22-5-1933].
- DARWIN, CHARLES GALTON (1920). "The dynamical motions of charged particles", *Phil. Mag.* 39, 537-551.
- DEBYE, PETER (1922). "Laue-Interferenzen und Atombau", *Natw.* 10, 384-391.
- DIRAC, PAUL A. M. (1926a). "Relativity quantum mechanics with an application to Compton scattering", *Proc. Roy. Soc. A* 111, 405-423 [29-4-1926].
- (1926b). "The Compton effect in wave mechanics", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 23, 500-507 [8-11-1926].
- (1927). "The quantum theory of the emission and absorption of radiation", *Proc. Roy. Soc. A* 114, 243-265 [4-4-1927].
- (1928a). "The quantum theory of the electron", *Proc. Roy. Soc. A* 117, 610-624 [2-1-1928].
- (1928b). "The quantum theory of the electron, part II", *Proc. Roy. Soc. A* 118, 351-361 [2-2-1928].
- (1930a). "A theory of electrons and protons", *Proc. Roy. Soc. A* 126, 360-365 [6-12-1929].
- (1930b). "On the annihilation of electrons and protons", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 26, 361-375 [26-3-1930].
- (1930c). *The Principles of Quantum Mechanics.* Oxford: Clarendon Press.
- (1931). "Quantised singularities in the electromagnetic field", *Proc. Roy. Soc. A* 133, 60-72 [29-5-1931].
- (1932). "Relativistic quantum mechanics", *Proc. Roy. Soc. A* 136, 453-464 [24-3-1932].
- (1934). "Discussion of the infinite distribution of electrons in the theory of the positron", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 30, 150-163.
- (1936). "Does conservation of energy hold in atomic processes?", *Nature* 137, 298-299 [22-2-1936].
- DYSON, FREEMAN J. (1949). "The *S* matrix in quantum electrodynamics", *Phys. Rev.* 75, 1736-1755.
- EDDINGTON, ARTHUR (1929). "The charge of an electron", *Proc. Roy. Soc. A*, 122, 358-369.
- ELLIS, CHARLES D. (1931). "New aspects of radioactivity", *Nature* 127, 275-278.

- FERMI, ENRICO (1930). "Sopra l'elettrodinamica quantistica", *Atti della Reale Accademia Nazionale dei Lincei* 12, 431-435.
- (1932). "Quantum theory of radiation", *Rev. Mod. Phys.* 4, 87-132.
- FERMI, ENRICO I GEORGE E. UHLENBECK (1933). «On the recombination of electrons and positrons», *Phys. Rev.* 44, 510-511 [18-8-1933].
- FEYNMAN, RICHARD P. (1949). "Space-Time approach to quantum electrodynamics", *Phys. Rev.* 76, 769-788 [9-5-1949].
- FLÜGGE, S. I A. KREBS (1936). *Experimentelle Grundlagen der Wellenmechanik*. Dresden/Leipzig: Theodor Steinkopff.
- FOCK, VLADIMIR I BORIS PODOLSKY (1932a). "Zur Diracschen Quantenelektrodynamik", *Phys. Zs. Sowietunion* 1, 798-800.
- (1932b). "On the quantization of electromagnetic waves and the interaction of charges on Dirac's theory", *Phys. Zs. Sowietunion* 1, 801-817.
- FURRY, W. H. I J. FRANKLIN CARLSON (1933). "On the production of positive electrons by electrons", *Phys. Rev.* 44, 237-238 [1-7-1933].
- GAMOW, GEORGE (1931). *Constitution of atomic nuclei and radioactivity*. Oxford: Clarendon Press.
- (1933). "Mechanism of  $\gamma$ -excitation by  $\beta$ -disintegration", *Nature* 131, 57-58 [14-1-1933].
- GAUNT, J. A. (1929a). "The triplets of helium", *Proc. Roy. Soc. A* 122, 513-532 [6-11-1928].
- (1929b). "The triplets of helium", *Phil. Trans. Roy. Soc.* 228, 151-196 [6-11-1928].
- GENTNER, WOLFGANG (1933). "Sur l'absorption des rayons  $\gamma$  très pénétrants", *C. R. Acad. Sci.* 197, 403-405 [17-7-1933].
- (1934a). "Sur l'absorption des rayons  $\gamma$  pénétrants", *J. Phys.* 5, 49-53 [30-11-1933].
- (1934b). "Zur Wellenlänge und Intensität der Sekundärstrahlung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 22, 435 [15-5-1934].
- (1935a). "L'absorption des rayons gamma dans les éléments lourds en relation avec la longueur d'onde", *J. Phys.* 6, 274-280 [17-4-1935].
- (1935b). "Zur Größe und Zusammensetzung des Absorptionskoeffizienten harter  $\gamma$ -Strahlen", *Zeitschr. f. techn. Physik* 89, 416-418 [5-10-1935].
- (1936). "Die Größe der Streu- und Sekundärstrahlung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Zs. Phys.* 100, 445-455 [16-3-1936].
- (1937). "Die Absorption, Streuung und Sekundärstrahlung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Phys. Zs.* 38, 836-853.
- GENTNER, WOLFGANG I J. STARKIEWICZ (1935). "La variation du coefficient d'absorption des rayons  $\gamma$  durs en fonction du numéro atomique", *J. Phys.* 6, 340-346 [17-4-1935].
- GORDON, WALTHER (1927). "Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie", *Zs. Phys.* 40, 117-133 [29-9-1926].
- GRAY, Louis HAROLD (1929). "The absorption of penetrating radiation", *Proc. Roy. Soc. A* 122, 647-668 [21-12-1928].

- (1930). "The scattering of hard gamma rays. Part I", *Proc. Roy. Soc. A* 128, 361-375 [5-5-1930].
- (1931a). "The photoelectric absorption of gamma rays", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 27, 103-112 [23-11-1930].
- (1931b). "The scattering of hard gamma rays. Part II", *Proc. Roy. Soc. A* 130, 524-541 [9-12-1930].
- (1931c). "The nature and origin of ultra-penetrating rays", *Nature* 127, 859-861 [6-6-1931].
- (1934). "Anomalous scattering of gamma rays", a Proc. 1st *All Union Nuclear Conf. Leningrad, 1934*, pp. 119-128.
- GRAY, Louis H. I GERALD T. P. TARRANT (1932a). "An attempt to detect the spontaneous transformation of helium into penetrating radiation", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 28, 124-127 [26-11-1931].
- (1932b). "The nature of the interaction between gamma-radiation and the atomic nucleus", *Proc. Roy. Soc. A* 136, 662-691 [14-4-1932].
- (1934). "Phenomena associated with the anomalous absorption of high energy gamma radiation. Parts II & III", *Proc. Roy. Soc. A* 143, 681-724 [7-11-1933].
- GROETZINGER, G. et al, (1950). "Study of electron-electron scattering", *Phys. Rev.* 79, 454-458.
- GUPTA, S. N. (1977). *Quantum Electrodynamics*. New York: Gordon and Breach.
- HEISENBERG, WERNER (1931). "Bemerkungen zur Strahlungstheorie", *Ann. Physik* 9, 338-346.
- (1932a). "Theoretische Überlegungen zur Höhenstrahlung", *Ann. Physik* 13, 430-452 [13-2-1932].
- (1932b). "Über den Bau der Atomkerne. I", *Zs. Phys.* 77, 1-11 [7-6-1932].
- (1932c). "Über den Bau der Atomkerne. II", *Zs. Phys.* 78, 156-164 (160-163) [30-7-1932].
- (1933). "Über den Bau der Atomkerne. III", *Zs. Phys.* 80, 587-596 (592-594) [22-12-1932].
- (1934). "Bemerkungen zur Diracschen Theorie des Positrons", *Zs. Phys.* 90, 209-231.
- HEISENBERG, WERNER I WOLFGANG PAULI (1929). "Zur Quantendynamik der Wellenfelder", *Zs. Phys.* 56, 1-61 [19-3-1929].
- (1930). "Zur Quantentheorie der Wellenfelder II", *Zs. Phys.* 59, 168-190 [7-9-1929].
- HEITING (1933a). "Kernanregung durch harte  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 21, 674 [7-8-1933].
- (1933b). "Zur Kern- $\gamma$ -Absorption", *Natw.* 21, 800 [28-9-1933].
- (1934). "Untersuchungen über die durch harte  $\gamma$ -Strahlung hervorgerufene Sekundärstrahlung", *Zs. Phys.* 87, 127-138.
- HEITLER, WALTHER (1936). *The quantum theory of radiation*. Oxford: Clarendon Press, <sup>2</sup>1944, <sup>3</sup>1954.
- HENDERSON, MALCOLM. C. (1929). "The scattering of beta-particles by light gases and the magnetic moment of the electron", *Phil. Mag.* 8, 847-857.
- HO, ZAH-WEI (1946a). "Sur les collisions des positons avec les négatons", *C. R. Acad. Sci.* 222, 1168-1170 [15-4-1946].

- (1946b). "Single Scattering and Annihilation of Positrons", *Phys. Rev.* 70, 224-225 [26-7-1946].
- (1948). "Sur les collisions élastiques des positons avec les négatons (II)", *C. R. Acad. Sci.* 226, 1083-1085 [31-3-1948].
- HOFFMANN, G. (1926). "Über den Comptoneffekt bei  $\gamma$ -Strahlen", *Zs. Phys.* 36, 251-258 [1-2-1926].
- (1932). "Probleme der Ultrastrahlung", *Phys. Zs.* 33, 633-662 [1-9-1932].
- HOKE, G. R. (1952). "Positron-Electron Scattering in Helium", *Phys. Rev.* 87, 285-289 [25-3-1952].
- HORNBECK, GEORGE I IRL HOWELL (1941). "Production of secondary electrons by electrons of energy between 0.7 and 2.6 MeV", *Proc. Amer. Phil. Soc.* 84, 33-51.
- HOWE, H. A. I K. R. MACKENZIE (1953). "Positron-electron scattering at 1.3 MeV", *Phys. Rev.* 90, 678-682 [15-12-1952].
- INGLIS, DAVID R. (1931). "Hyperfine structure as a test of a linear wave equation in the two-body problem", *Phys. Rev.* 37, 795-799.
- JACOBSEN, JACOB C. (1930). "Über die Streuung von  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 18, 951-952 [1-10-1930].
- (1931). "Über Absorption und Streuung von  $\gamma$ -Strahlen", *Zs. Phys.* 70, 145-158 [2-5-1931].
- (1936). "Absorption von harten  $\gamma$ -Strahlen in leichten Elementen", *Zs. Phys.* 103, 747-755.
- JAUCH, J. M. I ROHRLICH, FRITZ (1955). *The Theory of Photons and Electrons. The Relativistic Quantum Field Theory of Charged Particles with Spin One-Half*. Reading: Addison-Wesley.
- JORDAN, PASCUAL I EUGENE WIGNER (1928). "Über das Paulische Äquivalenzverbot", *Zs. Phys.* 47, 631-651 [26-1-1928].
- KÄLLÉN, A. O. GUNNAR (1958). "Quantenelektrodynamik", a S. Flügge (ed.) *Encyclopedia of Physics/Handbuch der Physik V/1*, Berlin: Springer.
- KALLMANN, H. I H. MARK (1926). "Der Comptonsche Streuprozess", *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften* 5, 267-325.
- KATZENSTEIN, J. (1950). "The radiative collisions of positrons and electrons", *Phys. Rev.* 78, 161-169.
- KIKUCHI, SEISHI (1931). "Zur Theorie des Comptoneffektes", *Zs. Phys.* 68, 803-812 [31-1-1931].
- KLEIN, OSKAR (1927). "Elektrodynamik und Wellenmechanik vom Standpunkt des Korrespondenzprinzips", *Zs. Phys.* 41, 407-442 [6-12-1926].
- (1929). "Die Reflexion von Elektronen an einem Potentialsprung nach der relativistischen Dynamik von Dirac", *Zs. Phys.* 53, 157-165 [24-12-1928].
- KLEIN, OSKAR I YOSHIO NISHINA (1928). "The scattering of light by free electrons according to Dirac's new relativistic dynamics", *Nature* 122, 398-399 [3-8-1928].
- (1929). "Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac", *Zs. Phys.* 52, 853-868 [30-10-1928].

- KOHLRAUSCH, K. W. FRITZ (1927). *Probleme der gamma-Strahlung*. Braunschweig: Vieweg fe Sohn.
- KRAMERS, HEINRIK A. (1938). "Quantentheorie des Elektrons und der Strahlung", a *Hand- und Jahrbuch der chemischen Physik*, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
- LANDAU, LEV (1930). "Bemerkung zur Streuung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 18, 1112 [10-11-1930].
- MEITNER, LISE (1929). "Die Höhenstrahlung und ihre Beziehung zu physikalischen und kosmischen Vorgängen", *Zs. f. angewandte Chemie* 42, 345-351 [11-3-1929].
- (1933a). "Kernstruktur", a *Hdb. Phys.* XXII/1 (2a ed.), pp. 83-272. Berlin: Springer [octubre 1932].
- (1933b). "Über die Streuung kurzwelliger  $\gamma$ -Strahlen", *He/v. Phys. Acta* 6, 445-450 [juny 1933].
- (1934). "Die Streuung harter  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 22, 174 [23-2-1934].
- MEITNER, LISE I HANS H. HUPFELD (1930a). "Über die Prüfung der Streuungsformel von Klein und Nishina an kurzwelliger  $\gamma$ -Strahlung", *Natw.* 18, 534-535 [9-5-1930].
- (1930b). "Prüfung der Streuungsformel von Klein und Nishina an kurzwelliger  $\gamma$ -Strahlung", *Phys. Zs.* 31, 947-948 [setembre 1930].
- (1930c). "Über das Absorptionsgesetz für kurzwellige  $\gamma$ -Strahlung", *Zs. Phys.* 67, 147-168 [5-12-1930].
- (1931). "Über das Streugesetz kurzwelliger  $\gamma$ -Strahlen", *Natw.* 19, 775-776 [28-8-1931].
- (1932). "Über die Streuung kurzwelliger  $\gamma$ -Strahlung an schweren Elementen", *Zs. Phys.* 75, 705-715 [24-3-1932].
- MEITNER, LISE I H. KÖSTERS (1933). "Über die Streuung kurzwelliger  $\gamma$  Strahlen", *Zs. Phys.* 84, 137-144 [17-5-1933].
- MEITNER, L. I K. PHILIPP (1933a). "Die bei Neutronenanregung auftretenden Elektronenbahnen", *Natw.* 21, 286-287 [25-3-1933].
- (1933b). "Die Anregung positiver Elektronen durch  $\gamma$ -Strahlen von ThC'", *Natw.* 21, 468 [18-5-1933].
- MILLIKAN, ROBERT A. (1935). *Electrons (+ and -), protons, photons, neutrons, mesotrons and cosmic rays*. Chicago: The University of Chicago Press, <sup>2</sup>1947.
- MILLIKAN, ROBERT A. I CARL D. ANDERSON (1932). "Cosmic-ray energies and their bearing on the photon and neutron hypotheses", *Phys. Rev.* 40, 325-328 [12-4-1932].
- MILLIKAN, R. A., I I. S. BOWEN (1930). "The significance of recent cosmic-ray experiments", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 16, 421-425 [29-4-1930].
- MILLIKAN, R. A., I. S. BOWEN I H. V. NEHER (1933). "New high-altitude study of cosmic-ray bands and a new determination of their total energy content", *Phys. Rev.* 44, 246-252 [19-6-1933].
- MILLIKAN, R. A. I G. H. CAMERON (1928). "The origin of the cosmic rays", *Phys. Rev.* 32, 533-557 [9-7-1928].
- (1931). "A more accurate and more extended cosmic-ray ionization-depth curve and the present evidence for atom-building", *Phys. Rev.* 37, 235-252 [9-12-1930].

- MØLLER, CHRISTIAN (1929). "Der Vorgang des radioaktiven Zerfalls unter Berücksichtigung der Relativitätstheorie", *Zs. Phys.* 55, 451-466 [26-4-1929].
- (1930a). "Scattering of  $\alpha$ -particles by light atoms", *Nature* 125, sup., p. 459 [21-2-1930].
- (1930b). "Zur Theorie der anomalen Zerstreuung von  $\alpha$ -Teilchen beim Durchgang durch leichtere Elemente", *Zs. Phys.* 62, 54-70 [15-3-1930].
- (1930c). "Über die höheren Näherungen der Bornschen Stoßmethode", *Zs. Phys.* 66, 513-532 [24-10-1930].
- (1931). "Über den Stoß zweier Teilchen unter Berücksichtigung der Retardation der Kräfte", *Zs. Phys.* 70, 786-795 [21-5-1931].
- (1932). "Zur Theorie des Durchgangs schneller Elektronen durch Materie", *Ann. Physik* 14, 531-585 [3-5-1932].
- MOTT, NEVILLE F. (1929). "The exclusion principle and aperiodic systems", *Proc. Roy. Soc. A* 125, 222-230.
- (1930). "The collision between two electrons", *Proc. Roy. Soc. A* 126, 259-267 [7-11-1929].
- MOTT, NEVILLE F. I H. S. W. MASSEY (1933). *The theory of atomic collisions*. Oxford: Oxford University Press, <sup>2</sup>1949, <sup>3</sup>1965.
- MOTT, N. F. I I. N. SNEDDON (1948). *Wave Mechanics and its Applications*. New York: Dover.
- NIKOLSKY, K. (1932). "The interaction of charges in Dirac's theory", *Phys. Zs. Sowiet-union* 2, 447-452.
- NISHINA, YOSHIO (1928). "The polarisation of Compton scattering according to Dirac's new relativistic dynamics", *Nature* 122, 843 [29-9-1928].
- (1929a). "Die Polarisation der Comptonstreuung nach der Diracschen Theorie des Elektrons", *Zs. Phys.* 52, 869-877 [30-10-1928].
- (1929b). "Polarisation of Compton scattering according to Dirac's new relativistic dynamics", *Nature* 123, 349.
- OPPENHEIMER, J. ROBERT (1928). "On the quantum theory of electronic impacts", *Phys. Rev.* 32, 361-376 [May 1928].
- (1929). "Note on the theory of the interaction of field and matter", *Phys. Rev.* 35, 461-477.
- OPPENHEIMER, J. ROBERT I J. FRANKLIN CARLSON (1931). "On the range of fast electrons and neutrons", *Phys. Rev.* 38, 1787-1788.
- (1932a). "On the range of fast electrons and neutrons", *Phys. Rev.* 39, 864-865.
- (1932b). "The impacts of fast electrons and magnetic neutrons", *Phys. Rev.* 41, 763-792.
- (1937). "On multiplicative showers", *Phys. Rev.* 51, 220-231 [8-12-1936].
- OPPENHEIMER, J. R., I H. HALL (1931). "Relativistic theory of the photoelectric effect. Part II: Photoelectric absorption of ultragamma radiation", *Phys. Rev.* 38, 71-79 [7-5-1931].
- OPPENHEIMER J. ROBERT I CHARLES C. LAURITSEN (1934). "On the scattering of the Th C'' $\gamma$ -rays", *Phys. Rev.* 46, 80-81 [12-6-1934].

- OPPENHEIMER, J. ROBERT I M. S. PLESSET (1933). "On the production of the positive electron", *Phys. Rev.* 44, 53-55 [9-6-1933].
- PAGE, LORNE A. (1951). "Electron-Electron scattering from 0.6 to 1.7 MeV", *Phys. Rev.* 81, 1062-1063 [11-1-1951].
- PAULI, WOLFGANG (1933). "Die allgemeinen Prinzipien der *Wellenmechanik*", a *Hdb. Phys.* XXIV/1 (2a ed.), pp. 83-272. Berlin: Springer.
- (1941). "Relativistic field theories of elementary particles", *Rev. Mod. Phys.* 13, 203-232.
- PAULI, WOLFGANG I VICTOR F. WEISSKOPF (1934). "Über die Quantisierung der skalaren relativistischen Wellengleichung", *Helv. Phys. Acta* 7, 709-731 [27-7-1934].
- PLESSET, MILTON S. I JOHN A. WHEELER (1935). "Inelastic scattering of quanta with production of pairs", *Phys. Rev.* 48, 302-306 [12-6-1935].
- RASETTI, FRANCO (1936a). *Il nucleo atomico*. Bologna: Nicola Zanichelli.
- (1936b). *Elements of Nuclear Physics*. New York: Prentice Hall.
- READ, J. I C. C. LAURITSEN (1934). "An investigation of the Klein-Nishina formula for X-ray scattering, in the wave-length region 50 to 20 x-units", *Phys. Rev.* 45, 433-436 [15-12-1933].
- RITTER, O. V., C. LIESEBERG, H. MAIER-LEIBNITZ, A. PAPKOW, K. SCHMEISER I W. BOTHE (1951). "Untersuchung der Streuung von Positronen an Elektronen in der Wilsonschen Nebelkammer", *Zs. Naturforschg.* 6a, 243-249 [31-3-1951].
- ROGERS, J. S. (1932). "The photographic measurement of the absorption coefficients of gamma-rays from Radium (B + C)", *Proc. Phys. Soc.* 44, 349-367 [30-1-1932].
- ROSENFELD, LÉON (1931). "Bemerkung zur korrespondenzmässigen Behandlung des relativistischen Mehrkörperproblems", *Zs. Phys.* 71, 253-259 [24-10-1931].
- RUTHERFORD, ERNST (1929). "Address of the President, Sir Ernest Rutherford, O.M., at the Anniversary Meeting, November 30, 1928", *Proc. Roy. Soc. A* 122, 1-23.
- RUTHERFORD, ERNST, JAMES CHADWICK I CHARLES ELLIS (1930). *Radiations from radioactive substances*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SAUTER, F. (1931a). "Über den atomaren Photoeffekt bei großer Harte der anregenden Strahlung", *Ann. Physik* 9, 217-248 [19-2-1931].
- (1931b). "Über den atomaren Photoeffekt in der K-Schale nach der relativistischen Wellenmechanik Diracs", *Ann. Physik* 11, 454-488.
- SCHRÖDINGER, ERWIN (1926). "Quantisierung als Eigenwertproblem (Vierte Mitteilung)", *Ann. Physik* 81, 109-139 [21-6-1926].
- (1927). "Über den Comptoneffekt", *Ann. Physik* 82, 257-264 [30-11-1926].
- SCHWEBER, S. S., H. A. BETHE I F. DE HOFFMANN (1956). *Mesons and Fields. Volume I. Fields*. New York: Row fc Peterson,
- SCHWINGER, JULIAN (1949). "On radiative corrections to electron scattering", *Phys. Rev.* 75, 898-899.
- SCOTT, M. B., A. O. HANSON I E. M. LYMAN (1951). "Electron-electron scattering at 15.7 MeV", *Phys. Rev.* 84, 638-643 [3-7-1951].



- SHEARIN, PAUL E. I T, EUGENE PARDUE (1942). "Electron-electron collisions in the primary energy range from 1.3 to 2.6 million electron volts", *Proc Amer Phil Soc.* 85, 243-249.
- SKOBELZYN, DMITRY (1924). "Über den Rückstoßeffect der zerstreuten  $\gamma$ -Strahlen", *Zs. Phys.* 28, 278-286.
- (1929a). "The angular distribution of Compton recoil electrons", *Nature* 123 411-412 [22-1-1929].
- (1929b). "Die spektrale Verteilung und die mittlere Wellenlänge der Ra- $\gamma$ -Strahlen", *Zs. Phys.* 58, 595-612 [23-9-1929].
- (1930). "Die Richtungsverteilung der von gestreuten  $\gamma$ -Strahlen erzeugten Rückstoßstrahlen", *Zs. Phys.* 65, 773-798 [27-9-1930].
- (1932a). "Sur le spectre des rayons  $\gamma$  des dérivés du radiothorium", *C. R. Acad. Sci.* 194, 1486-1488 [11-4-1932].
- (1932b). "Sur le degré d'homogénéité des rayons  $\gamma$  filtrés de ThC" et la vérification de la formule de Klein-Nishina", *C. R. Acad. Sci.* 194, 1568-1571 [25-4-1932].
- (1932c). "Sur l'effet Compton de rayons très durs du ThC", *C. R. Acad. Sci.* 194, 1914-1917 [23-5-1932].
- SOLVAY (1934). *Structures et Propriétés des noyaux atomiques (VII Congrès Solvay)*. Paris: Gauthier-Villars.
- STAHEL, E. (1936). "Quantitative Interpretation der Gammastreustrahlung in Blei", *Helv. Phys. Acta* 9, 641 [29-8-1936].
- STAHEL, E. I H. KETELAAR (1932). "Wechselwirkung von Gammastrahlen und Atomkernen", *Helv. Phys. Acta* 5, 299-300 [7-8-1932].
- (1933a). "Diffusion nucléaire des rayons gamma", *C. fi. Acad. Sci.* 196, 1664-1666 [22-5-1933].
- (1933b). "Interaction entre les rayons gamma et les noyaux atomiques", *J. Phys.* 4, 460-485 [6-6-1933].
- (1933c). "Kernstreuung der Gammastrahlen", *Helv. Phys. Acta* 6, 478-479 [2-9-1933].
- (1934). "Difussion des rayons gamma", *J. Phys.* 5, 512-522 [7-8-1934].
- (1936). "Sur la diffusion des rayons gamma sans changement de longueur d'onde", *J. Phys.* 7, 389-390 [10-7-1936].
- STAHEL, E., H. KETELAAR I P. KIPFER (1936). "Interpretation quantitative du rayonnement gamma difussé par des radiateurs en plomb", *J. Phys.* 7, 379-388 [10-7-1936].
- STAHEL, E., H. KETELAAR I A. PICCARD (1934). "Coefficients d'absorption des rayons gamma du radium C'", *J. Phys.* 5, 385-388 [15-5-1934].
- STONER, EDMUND C. (1929). "The absorption of high-frequency radiation", *Phil. Mag.* 7, 841-858 [gener 1929].
- TAMM, IGOR E. (1930). "Über die Wechselwirkung der freien Elektronen mit der Strahlung nach der Diracschen Theorie des Elektrons und nach der Quantenelektrodynamik", *Zs. Phys.* 62, 545-568 [7-4-1930].
- TARRANT, GERALD T. P. (1930). "The absorption of hard monochromatic  $\gamma$ -radiation", *Proc. Roy. Soc. A* 128, 345-59 [5-5-1930].
- (1932a). "The absorption of hard monochromatic  $\gamma$  radiation. Part II", *Proc. Roy. Soc. A* 135, 223-237 [27-10-1931].

- (1932b). "Calculation of a scattering correction of  $\gamma$ -rays", *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 28, 475-489 [octubre 1932].
- TERROUX, FERDINAND RICHARD (1931). "The upper limit of energy in the spectrum of radium E", *Proc. Roy. Soc. A* 131, 90-99.
- THOMSON, J. J. (1903). *Conduction of Electricity Through Gases*. Londres, <sup>2</sup>1906; <sup>3</sup>1928, <sup>4</sup>1933 (amb G. P. Thomson).
- (1912). "Ionization by moving electrified particles", *Phil. Mag.* 23, 449-457.
- TSAI, YUNG TSU (1960). "High-energy electron-electron scattering", *Phys. Rev.* 120, 269-286.
- WALLER, IVAR (1928). "Über eine verallgemeinerte Streuungsformel", *Zs. Phys.* 51, 213-231 [9-7-1928].
- (1929). "Die Streuung kurzwelliger Strahlung durch Atóme nach der Diracschen Strahlungstheorie", *Zs. Phys.* 58, 75-94 [21-7-1929].
- (1930). "Die Streuung von Strahlung durch gebundene und freie Elektronen nach der Diracschen relativistischen Mechanik", *Zs. Phys.* 61, 837-851 [12-2-1930].
- WEBSTER, H. G. (1932). "The artificial production of nuclear gamma radiation", *Proc. Hoy. Soc. A* 136, 428-453.
- WENTZEL, GREGOR (1925). "Die Theorien des Compton-effektes. I", *Phys. Zs.* 26, 436-454 [22-5-1925].
- (1927a). "Zur Theorie des Comptoneffekts", *Zs. Phys.* 43, 1-8 [3-4-1927].
- (1927b). "Zur Theorie des Comptoneffekts. II", *Zs. Phys.* 43, 779-787 [26-5-1927].
- (1933). "Wellenmechanik der Stoß- und Strahlungsvorgänge", a *Hdb. Phys.* XXIV/1 (2a ed.), pp. 695-784. Berlin: Springer.
- WICK, G. C. (1934). "Induced radioactivity", *Rendiconti Lincei* 19, 319-324.
- WILLIAMS, EVAN J. (1930). "Passage of slow  $\beta$ -particles through matter. Production of branches", *Proc. Roy. Soc. A* 128, 459-468 [6-5-1930].
- (1935). "Scattering of hard  $\gamma$ -rays and annihilation radiation", *Nature* 135, 266 [12-1-1935].
- WILLIAMS, EVAN J. i TERROUX, F. R. (1930). "Investigation of the passage of 'fast'  $\beta$ -particles through gases", *Proc. Roy. Soc. A* 126, 289-310 [6-11-1929].
- WILSON, CHARLES THOMSON REES (1923). "Investigation of X-rays and  $\beta$  rays by the cloud method", *Proc. Roy. Soc. A* 104, "Part I. X-rays", 1-24; "Part II.  $\beta$ -rays", 192-212 [23-6-1923].
- WOLFE, HUGH C. (1931). "Scattering of high velocity electrons in hydrogen as a test of the interaction energy of two electrons", *Phys. Rev.* 37, 591-601 [26-1-1931].

## Bibliografia secundària

- AASERUD, FINN (1990). *Redirecting Science, Niels Bohr, Philanthropy, and the Rise of Nuclear Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ANDERSON, C. D. (1983). "Unraveling the Particle Content of Cosmic Rays", a Brown i Hoddeson (1983a), pp. 131-154.
- BERNSTEIN, JEREMY (1979). *Hans Bethe, Prophet of Energy*. New York: Basic Books.
- BLANPIED, WILLIAM A. (1981). "Bhabha, Homi Jehangir", a C. Gillispie ed. *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 15, pp. 25-28.
- BROMBERG, JOAN (1971). "The Impact of the Neutron: Bohr and Heisenberg", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 3, 307-341.
- BROWN, LAURIE, MAX DRESDEN I LILLIAN HODDESON EDS. (1989). "Pions to quarks: particle physics in the 1950s", a Pions to Quarks. *Particle Physics in the 1950s* (introducció dels editors), Cambridge: Cambridge University Press, pp. 3-39.
- BROWN, L. I L. HODDESON EDS. (1983a). *The Birth of Particle Physics*. III International Symposium on the History of Particle Physics (Fermilab 1980). Cambridge: Cambridge University Press.
- (1983b). "The Birth of Elementary Particle Physics: 1930-1950", a Brown i Hoddeson (1983a), pp. 3-36.
- BROWN, L. M., I D. F. MOYER (1984). "Lady or Tiger? The Meitner-Hupfeld Effect and Heisenberg's Neutron Theory", *Am. J. Phys.* 52, 130-136.
- BROWN, L. M., HELMUT RECHENBERG (1988). "Nuclear structure and beta decay (1932-1933)", *Am. J. Phys.* 56, 982-988.
- CANTOR, GEOFFREY (1989). "The Rethoric of Experiment", a Gooding, Pinch i Schaffer (1989), pp. 159-180.
- CASIMIR, HENDRIK B. G. (1984). *Haphazard Reality*. New York: Harper & Row.
- CASSIDY, DAVID C. (1981). "Cosmic-ray Showers, High Energy Physics, and Quantum Field Theories: Programmatic Interactions in the 1930s", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 12, 1-39.
- (1991). *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*. New York: Freeman and Company.
- CATTERMOLE, M. J. G. I A. F. WOLFE (1987). *Horace Darwin's Shop. A History of the Cambridge Scientific Instruments Company, 1878-1968*. Bristol/Boston: Adam Hilger.
- CINI, MARCELLO (1982). "Cultural traditions and environmental factors in the development of quantum electrodynamics (1925-1933)", *Fundamenta Scientiae* 3, 229-253.

- COCKCROFT, JOHN (1967). "Homi Jehangir Bhabha, 1909-1966", *Proc. Roy. Inst. Great Britain* **188**, 411-422.
- DARRIGOL, OLIVIER (1982). *Les debuts de la théorie quantique des champs, 1925-1948*. tesi doctoral, Université de Paris.
- (1984). "La genèse du concept de champ quantique", *Ann. Physique* **9**, 433-501.
- (1986). "The Origin of Quantized Matter Waves", *Hist. Stud. Phys. Sci.* **16**, 197-253.
- (1988). "The Quantum Electrodynamical Analogy in Early Nuclear Theory or the Roots of Yukawa's Theory", *Rev. Hist. Sci.* **41**, 225-297.
- (1992). *From c-numbers to q-numbers. The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*. Berkeley: University of California Press.
- DONCEL, MANUEL GARCÍA (1982). *Partículas, campos y simetrías. Historia de la física de altas energías de los años 30 a los 60*, Bellaterra: Publicacions UAB.
- (1987). "Quantum Electrodynamics Settles in America: The Oppenheimer School", a L. Navarro (ed.) *Historia de la física. Trobades Científiques de la Mediterrània. Maó, Menorca 1987* (Barcelona: CIRIT), pp. 143-154.
- (1993a). "Beiträge zur frühesten Quantenelektrodynamik", a B. Geyer, H. Gerwig i H. Rechenberg (eds.) *Werner Heisenberg. Physiker und Philosoph*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, pp. 105-112.
- (1993b). Edició crítica de "Bericht über die allgemeinen Eigenschaften der Elementarteilchen", a Pauli (1993), "Anhang I".
- DRESDEN, MAX (1987). *H. A. Kramers. Between Tradition and Revolution*. New York: Springer.
- EPSKONG, G. (1991). "Oskar Klein i Yoshio Nishina", a Suzuki i Kubo (1991), pp. 25-34.
- EVANS, ROBLEY D. (1958). "Compton Effect", a *Handbuch der Physik / Handbook of Physics*, vol. 34, pp. 218-298.
- FISCHER, PETER (1985). *Licht und Leben. Ein Bericht über Max Delbrück, den Wegbereiter der Molekularbiologie*. Konstanz: Universitätsverlag Konstanz.
- FRANKLIN, ALLAN (1986). *The Neglect of Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- FRISCH, OTTO ROBERT (1970). "Lise Meitner", *Bio. Mem. Fell. Roy. Soc.* **16**, 405-420.
- (1977). "Lise Meitner", a C. Gillispie (ed.) *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 9, pp. 260-263.
- GALISON, PETER (1983). "The Discovery of the Muon and the Failed Revolution against Quantum Electrodynamics", *Centaurus* **26**, 262-316.
- (1987). *How Experiments End*. Chicago: University of Chicago Press.
- GALISON, PETER i ALEXI ASSMUS (1989). "Artificial Clouds, Real Particles", a Gooding, Pinch i Schaffer (1989), pp. 225-274.
- GEORGI, H. M. (1990). "Effective Quantum Field Theories", a Paul Davies ed. *The New Physics*, Cambridge: Cambridge University Press.
- GOENNER, HUBERT (1980). "Christian Möller, 1904-1980", *Phys. Bl.* **36**, p. 341.
- GOODING, DAVID, TREVOR PINCH i SIMON SCHAFFER EDS. (1989). *The Uses of Experiment: Studies in the Natural Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.

- GOODSTEIN, JUDITH (1991). *Millikan's School: A History of the California Institute of Technology*. New York/London: Norton.
- GOUDSMIT, S. A. (1947). *Alsos*. New York: Schuman.
- GREENSTEIN, GEORGE (1992). "A Gentleman of the Old School. Homi Bhabha and the Development of Science in India", *The American Scholar* **61**, 409-419.
- HACKING, IAN (1983). *Representing and Intervening*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HANSON, NORWOOD RUSSELL (1963). *The Concept of the Positron*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HAYES, WILLIAM (1982). "Max Ludwig Henning Delbrück", *Bio. Mem. Fell. Roy. Soc.* **28**, 59-90.
- HEILBRON, JOHN L. (1967). "The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles and Rutherford's Atom", *Arch. Hist. Ex. Sci.* **4**, 247-307.
- (1986). *The Dilemmas of an Upright Man. Max Planck as Spokesman for German Science*. Berkeley: University of California Press.
- HENDRY, JOHN ED. (1984). *Cambridge Physics in the Thirties*. Bristol: Adam Hilger.
- HEY, TONY I PATRICK WALTERS (1987). *The Quantum Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HUGHES, JEFF (1991). "Accounting for Stability: Facts and Fables at Rutherford's Cavendish Laboratory, 1919-1937". No publicat.
- ITZYKSON, C. I J. ZUBER (1985). *Quantum Field Theory*. New York: McGraw-Hill.
- JAMMER, MAX (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw Hill.
- KARGON, ROBERT (1982). *The Rise of Robert Millikan*. Ithaca/Londres: Cornell University Press.
- KERNER, CHARLOTTE (1986). *Lise, Atomphysikerin. Die Lebensgeschichte der Lise Meitner*. Weinheim und Basel: Beltz Verlag.
- KEVLES, DANIEL (1977). *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*. New York: Knopf.
- KIMBALL SMITH, ALICE I CHARLES WEINER EDS. (1980). *Robert Oppenheimer. Letters and Recollections*. Cambridge (MA): Harvard University Press.
- KLEIN, OSKAR (1989). "From my life of physics", a Bethe *et al.*, *From a Life of Physics*, Singapur: World Scientific, pp. 69-84.
- KOZHEVNIKOV, ALEXEI B. I V. YA. FRENKEL (1988). *P. Dirac and I. E. Tamm Correspondence, 1928-1932*. Moscou.
- KRAFT, FRITZ (1988). "An der Schwelle zum Atomzeitalter. Die Vorgeschichte der Entdeckung der Kernspaltung im Dezember 1938", *Ber. z. Wissenschaftsgeschichte* **11**, 227-251.
- KRAGH, HELGE (1981). "The Genesis of Dirac's Relativistic Theory of Electrons", *Arch. Hist. Ex. Sci.* **24**, 31-67.

- (1984). "Equation with the Many Fathers. The Klein-Gordon Equation in 1926", *Am. J. Phys.* 52, 1024-1033.
- (1990). *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1992). "Relativistic Collisions: The Work of Christian Möller in the Early 1930s", *Arch. Hist. Ex. Sci.* 43, 299-328.
- KUBO, R. (1991). "Yoshio Nishina, the Pioneer of Modern Physics in Japan", a Suzuki i Kubo (1991), pp. 3-11.
- KUHN, THOMAS S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago/Londres: Chicago University Press. Trad. cast.: *La estructura de las revoluciones científicas*, México: Fondo de Cultura Económica, 1971.
- KUHN, THOMAS S., JOHN L. HEILBRON, PAUL FORMAN I LINI ALLEN (1967). *Sources for History of Quantum Physics. An inventory and report*. Philadelphia: The American Philosophical Society.
- LOUTIT, J. F. I O. C. A. SCOTT (1966). "Louis Harold Gray (1905-1965)", *Bio. Mem. Fell. Roy. Soc.* 12, 195-217.
- DE MARIA, MICHELANGELO I ARTURO Russo (1985). "The Discovery of the Positron", *Riv. Stor. Sci.* 2, 237-286.
- (1989). "Cosmic Ray Romancing: The Discovery of the Lattitude Effect and the Compton-Millikan Controversy", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 19, 211-266.
- DE MARIA, M., M. G. IANELLO I A. Russo (1991). "The Discovery of Cosmic Rays: Rivalries and Controversies between Europe and the United States", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 22, 165-192.
- MENON, M. G. K. (1967). "Homi Jehangir Bhabha, 1909-1966", *Proc. Roy. Inst. Great Britain* 188, 423-438.
- MEITNER, LISE (1954). "Einige Erinnerungen an das Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin-Dahlem", *Natw.* 41, 97-99.
- MEYENN, KARL VON (1989). "Physics in the Making in Pauli's Zurich", a *Physics in the making*, A. Sarlemijn i M. J. Sparnaay (eds.), North-Holland.
- MEYER-ABICH, K. M. (1965). *Korrespondenz, Individualität und Komplementarität: Eine Studie zur Geistesgeschichte der Quantentheorie in den Beiträgen Niels Bohr*. Wiesbaden: Franz Steiner.
- MORRISON, MARGARET (1986). "More on the relationship between technically good and conceptually important experiments: A case study", *Brit. J. Phil. Sci.* 37, 101-122.
- MOYER, DONALD FRANKLIN (1981a). "Origins of Dirac's Electron, 1925-1928", *Am. J. Phys.* 49, 944-949.
- (1981b). "Evaluations of Dirac's Electron, 1928-1932", *Am. J. Phys.* 49, 1055-1062.
- (1981c). "Vindications of Dirac's Electron, 1932-1934", *Am. J. Phys.* 49, 1120-1125.
- NEHER, H. VICTOR (1983). "Some Reminiscences of the Early Days of Cosmic Rays", a Brown i Hoddeson (1983a), pp. 120-130.
- NMF (1983). *G. Hevesy-Y. Nishina. Correspondence, 1928-1949*. Nishina Memorial Foundation, publication no. 17.

- (1984). *Y. Nishina's Correspondence with N. Bohr and Copenhagengers, 1928-1949*. Nishina Memorial Foundation, publication no. 20.
- (1985). *Y. Nishina Letters to N. Bohr, G. Hevesy and others, 1923-1928*. Nishina Memorial Foundation, publication no. 21.
- (1986). *Supplement to the Publications no. 17, 20, 21*. Nishina Memorial Foundation, publication no. 27.
- (1990). *P. A. M. Dirac-Y. Nishina. Correspondence, 1928-1948*. Nishina Memorial Foundation, publication no. 33.
- PAULI, WOLFGANG (1979). *Wissenschaftliche Briefwechsel*. Vol. 1. A. Hermann, K. von Meyenn i V. Weisskopf (eds.), Berlin: Springer.
- (1985). *Wissenschaftlicher Briefwechsel*. Vol. 2. K. von Meyenn (ed.), Berlin: Springer.
- (1993). *Wissenschaftliche Briefwechsel*. Vol. 3. K. von Meyenn (ed.), Berlin: Springer (en premsa).
- PAIS, ABRAHAM (1986). *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford/New York: Oxford University Press.
- PENNEY (1967). "Homi Jehangir Bhabha", *Bio. Mem. Fell. Roy. Soc.* 13, 35-52.
- PICKERING, ANDREW (1984). *Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics*. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- ROBERTSON, PETER (1979). *The Early Years: The Niels Bohr Institute 1921-1930*. Copenhagen: Akademisk Forlag.
- ROQUE, XAVIER (1991). "La dispersió Møller i els inicis de l'electrodinàmica quàntica". No publicat, Bellaterra, maig 1991.
- (1992). "Møller Scattering: a Neglected Application of Early Quantum Electrodynamics", *Arch. Hist. Ex. Sci.* 44, 197-264.
- Rossi, BRUNO (1981). "Early days in cosmic rays", *Phys. Today* 34, 34-41.
- ROZENTAL, S. ED. (1968). *Niels Bohr: His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues*. Amsterdam: North-Holland.
- RUD NIELSEN, J. (1976). "Introduction to part I: The correspondence principle", a L. Rosenfeld (ed. gen), J. Rud Nielsen (ed.) *Niels Bohr, Collected Works. Vol. 3, The Correspondence Principle (1918-1923)*, pp. [3]-[46].
- RÜGER, ALEXANDER (1989). *Historical and Methodological Studies in the Development of Quantum Field Theory*. Tesi doctoral, Universitat Konstanz.
- (1992). "Attitudes towards Infinities: Responses to Anomalies in Quantum Electrodynamics, 1927-1947", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 22, 309-337.
- SCHAFFER, SIMON (1989). "Glass Works: Newton's Prisms and the Uses of Experiment", a Gooding, Pinch i Schaffer (1989), pp. 67-104.
- SCHWEBER, SYLVAN S. (1984). "Some Chapters for a History of Quantum Field Theory, 1938-1952", a B. S. De-Witt i R. Stora (eds.), *Relativity, Groups and Topology II*, New York: North Holland.
- (1986). "Feynman and the Visualization of Space-Time Processes", *Rev. Mod. Phys.* 58, 449-508.

- (1989). "Molecular beam experiments, the Lamb shift, and the relation between experiments and theory", *Am. J. Phys.* 57, 299-308.
- SCHWINGER, JULIAN (ED.) (1958). *Selected Papers on Quantum Electrodynamics*. New York: Dover.
- SEGRE, EMILIO (1964). *Nuclei and Particles*. New York: Benjamin.
- SEKIDO, YÁTARO i HARRY ELLIOT (EDS.) (1985). *Early History of Cosmic Ray Studies*. Dordrecht: Reidel.
- SHEA, WILLIAM R. (1983). *Otto Hahn and the Rise of Nuclear Physics*. Boston: Reidel.
- SKOBELZYN, DMITRY (1983). "The Early Stage of Cosmic-ray Particle Research", a Brown i Hoddeson (1983a), pp. 111-119.
- STUDY TEAM FOR CERN HISTORY (1987). *History of CERN, I*. North-Holland.
- STUEWER, ROGER (1975). *The Compton Effect*. New York: Science History Publications.
- (1979). *Nuclear Physics in Retrospect: Proceedings of a Symposium on the 1930s*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- SUZUKI, M. I R. KUBO (EDS.) (1991). *Evolutionary Trends in the Physical Sciences. Proceedings of the Yoshio Nishina Centennial Symposium, Tokyo, Japan, December 5-7, 1990*. Berlin: Springer.
- TRENN, THADEUS J. (1986). "The Geiger-Müller Counter of 1928", *Ann. Sci.* 43, 111-135.
- WARD, F. A. B. (1987). "Physics in Cambridge in the late 1920s", a Williamson (1987), pp. 77-85.
- WEINBERG, STEVEN (1977). "The Search for Unity: Notes for a History of Quantum Field Theory", *Daedalus* 106, 17-35.
- WHEATON, BRUCE (1983). *The Tiger and the Shark. Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- WHEELER, JOHN A. (1979). "Some Men and Moments in the History of Nuclear Physics", a Stuewer (1979), pp. 213-306.
- WILLIAMSON, RAJKUMARI ED. (1987). *The Making of Physicists*. Bristol: Adam Hilger.
- ZIEGLER, CHARLES A. (1989). "Technology and the Process of Scientific Discovery: The Case of Cosmic Rays", *Tech. & Cult.* 30, 939-963.



## Abreviatures

- AER A. E. Ruark Papers. Hoover Institution Archives, Stanford University.
- AHQP Archive for the History of Quantum Physics.
- BSC Bohr Scientific Correspondence (AHQP).
- CM C. Møller Papers, Niels Bohr Archive, Copenhagen.
- EHR Ehrenfest Archive (AHQP).
- ER E. Rutherford Papers, ULC.
- FCC F. C. Champion's Tutorial File, St. John's College, Cambridge.
- FJC Manuscrits de F. Joliot-Curie, Institut Curie, Paris.
- GB G. Breit Papers, Beinecke Rare Book and Manuscript Library, Yale University (còpia en microfilm al Center for History of Physics, AIP).
- IEB International Education Board Archives, Rockefeller Archive Center, N. Tarrytown, New York.
- LHG L. H. Gray Papers, University of Tennessee Libraries, Knoxville.
- LM L. Meitner Papers. Churchill Archive Centre, Churchill College, Cambridge.
- NMF Nishina Memorial Foundation, Tokyo.
- OH O. Hahn Nachlaß, Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin.
- OHI Oral History Interviews (AHQP).
- ORF O. R. Frisch Papers, Trinity College Library, Cambridge.
- PAMD P. A. M. Dirac Papers. Churchill Archives Centre, Churchill College, Cambridge.
- PBI *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel*, vol. I (Pauli 1979). Entre parèntesis quadrats [ ] s'indica el número de carta.
- PBII *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel*, vol. II (Pauli 1985).
- RAM R. A. Millikan Papers, California Institute of Technology Archives, Pasadena.
- ULC University Library, Cambridge.
- WB W. Bothe Nachlaß, Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin.