

Figura 3. Disposició dels primers experiments de Meitner i Hupfeld (Meitner i Hupfeld 1930c, p. 150).

pel ThC'', una font convenientment homogènia però de feble intensitat, dificultat que van obviar recorrent a un detector de disseny molt recent, el comptador Geiger-Müller. El juliol de 1928 l'aparell havia estat presentat en societat a Kiel, en una reunió d'una de les seccions de la Societat Alemanya de Física; a finals del mateix mes Geiger el presentava a Cambridge, en una conferència sobre les radiacions gamma i beta.³⁴ Rutherford, amfitrió dels radioactius congregats a Cambridge, i Meitner, convidada d'honor, van poder comprovar personalment l'extraordinària sensibilitat del comptador. L'aparell esdevindria un element central dels experiments de Meitner.³⁵

La disposició experimental utilitzada pels físics berlinesos es mostra a la figura 3. Van col·locar una mostra de ThC'' (Q) a l'interior d'un bloc de ferro P, de forma que estès envoltada en totes direccions per un mínim de 20 cm. Una escletxa de secció 1 cm² i un filtre de plom F produïen un feix prim i suposadament homogeni de raigs gamma, que trobaven a la sortida de l'escletxa una placa de material dispersor. El comptador Geiger-Müller,

³⁴Trenn (1986), pp. 111-135. La correspondència entre Meitner i Chadwick (LM 5/3) inclou un programa de la conferència a Cambridge; veure també p. 139.

³⁵Hi ha una altra versió de l'adopció del comptador, que relaciona l'observació accidental per part d'un dels estudiants de Meitner de la sensibilitat de l'aparell als raigs gamma amb l'inici dels experiments: "In 1926 Hans Geiger and W. Muller developed their wire counter, later to become known as the Geiger-Müller counter[...] and Lise Meitner got a student to try it out. When the student complained about trouble from a gamma-ray source next door she immediately saw that the great sensitivity of the new instrument would make it possible to measure the attenuation of well-collimated, narrow beams of gamma-rays. Here was an opportunity to test a recently published formula by Oskar Klein and Y. Nishina relating to the Compton effect[...]" (Frisch 1970, p. 409). Frisch, nebot de Meitner, vivia en aquells moments a Berlin, però a la seva versió s'oposa el fet que Geiger i Muller ja havien destacat la sensibilitat a la radiació gamma en presentar l'aparell.

col·locat a certa distància de la mostra radioativa en la direcció de propagació dels raigs, detectava els fotons que havien travessat el dispersor netament, és a dir, sense ser desviats en absolut.

La simplicitat del plantejament no implicava que l'experiment fos senzill de realitzar. En realitat, les múltiples mesures de control i l'estricta protocol de mesura establert feien que fos molt laboriós. Per determinar el coeficient d'absorció n'hi havia prou de mesurar l'absorció a un cert gruix de material dispersor, però Meitner mesurava l'absorció a diferents gruixos a fi d'obtenir una corba d'absorció completa i guanyar en precisió. Entre mesura i mesura es determinava a més l'efecte de descàrregues naturals, degudes principalment a la radiació còsmica.³⁶

Meitner i Hupfeld van començar investigant nou elements compresos entre l'alumini ($Z=13$) i el plom ($Z=82$). El gener de 1930, vuit mesos després d'haver iniciat els experiments, Meitner estava en condicions d'oferir a Klein uns primers resultats provisionals:³⁷ el coeficient d'absorció per electró era constant per elements relativament lleugers (Al, Fe i Cu), però superior en un 17% al predit per la fórmula de Klein-Nishina (l'error en les mesures no superava un $\pm 5\%$). Meitner considerà la possibilitat que aquesta desviació sistemàtica fos atribuïble a la fórmula i per sortir de dubtes preguntà a Klein si aquesta tenia "una validesa estricta per electrons lliures, o si la dependència amb la longitud d'ona podia ser imprecisa en un 10-15%".³⁸ Klein va assegurar Meitner que els fonaments de la fórmula eren sòlids, i va excloure la possibilitat d'un error de càlcul. Klein semblava disposat a acceptar el veredicta experimental en demanar Meitner si creia que es podia parlar "d'una

³⁶Sobre la determinació de corbes d'absorció veure Meitner a Jacobsen, 22-10-1930 (LM 5/9): "Da wir vollständ- die Absorptionskurven aufnehmen, sind diese Messungen sehr zeitraubend".

³⁷Meitner a Klein, 29-1-30 (LM 5/10).

³⁸*Ibid.*: "Ich möchte nun gern wissen, ob Ihre Formel für freie Elektronen strenge Gültigkeit haben muss, oder ob die Abhängigkeitsfunktion von der Wellenlänge auf 0-15 Proz. noch ungenau sein kann".

contradicció definitiva entre teoria i observació”, o si existia encara la possibilitat "de salvar la teoria". Més endavant, quan les discrepàncies es manifestessin més clarament, la seva actitud no seria tan submissa.³⁹

Meitner no va contestar Klein sinó després de comprovar acuradament totes les fonts d'error i confirmar l'estimació inicial. Pel maig, els resultats preliminars s'havien vist confirmats, però les mesures amb elements pesants havien revelat una anomalia més interessant: el coeficient d'absorció augmentava amb el pes atòmic, especialment entre el zinc ($Z=30$) i la plata ($Z=47$). Part d'aquests resultats, els corresponents a cinc dels elements investigats, van aparèixer a la nota a *Die Naturwissenschaften* amb què Meitner i Hupfeld van donar a conèixer l'existència d'un fenomen d'absorció anòmal. A la nota s'indicava només que hi havia clares diferències entre les prediccions teòriques i els valors experimentals, diferències que augmentaven amb el pes atòmic. Però la carta de Klein havia eliminat de forma efectiva tot dubte sobre la fiabilitat de la fórmula de Klein-Nishina: Meitner i Hupfeld afirmaven contundentment que no s'havia "de dubtar en absolut de la validesa dels fonaments teòrics de la fórmula de Klein-Nishina", abans d'assenyalar la possibilitat, sense entrar en detalls, que el nucli atòmic fos responsable de les divergències.⁴⁰

Les investigacions de Meitner i Hupfeld es centraven en aquells moments en dos punts: l'absorció en elements més lleugers, com el carboni ("per veure si la predicció teòrica és correcta en aquest cas") i l'augment irregular del fenòmen.⁴¹ A finals de juliol, les mesures amb carboni i magnesi havien

³⁹Klein a Meitner, 4-2-1930 (LM 5/10): "Ich ware natürlich sehr dankbar näheres zu hören, ob Sie meinen, dass man schon jetzt auf einen definitiven Widerspruch zwischen Theorie und Beobachtung bei der gamma-Strahlstreuung schliessen kann, oder ob es noch Möglichkeiten gibt, die Theorie zu retten".

⁴⁰Meitner i Hupfeld (1930a), p. 535: "Man muß daher, da an die Richtigkeit der theoretischen Grundlagen der Formel von Klein und Nishina wohl nicht zu zweifeln ist, an die Möglichkeit denken, daß ein bisher noch nicht berücksichtigter Faktor vorhanden ist, wie er z. B. durch eine Streuung der sehr kurzwelligen Strahlung an den Atomkernen selbst gegeben sein könnte".

⁴¹Meitner a Klein, 9-5-1930; 16-6-1930 (LM 5/10): "Wir sind eben dabei, ganz leichte

finalitzat: entre el magnesi ($Z=12$) i l'alumini ($Z=13$), el coeficient d'absorció augmentava bruscament, eclipsant l'augment brusc entre el zinc i la plata que havien detectat abans; entre l'alumini i el zinc, en canvi, el coeficient d'absorció es mantenia pràcticament constant. Aquesta irregularitat representava per a Meitner el tret més sorprenent dels seus resultats.⁴²

Què causava l'absorció anòmala? La variació de l'efecte amb el nombre atòmic assenyalava tan directament el nucli com a responsable de l'excés d'absorció, que tots els experimentadors que van detectar el fenomen van arribar a la mateixa conclusió. El coneixement del nucli era inversament proporcional a les seves dimensions. La hipòtesi més comú sobre la seva constitució era que estava format per protons i electrons, alguns d'ells combinats formant partícules alpha. Però els electrons nuclears lliures (aquells que no formaven part de les partícules alpha) plantejaven greus problemes de confinament i estadística, i s'havia suggerit que l'electró perdia la seva individualitat dins el nucli.⁴³ L'augment brusc del coeficient d'absorció suggeria una variació igualment brusca en l'estructura nuclear... però quina estructura?

A finals de juliol de 1930, Meitner passà la pregunta a Pauli, que s'havia interessat pels experiments d'absorció en una visita recent a Berlin.⁴⁴ Pauli havia considerat la possibilitat d'un efecte d'interferència "de Debye": si la longitud d'ona de la radiació incident fos comparable a la distància entre els

Elemente (C) zu untersuchen um zu sehen, ob sich für diese der theoretische Wert ergibt. Wir wollen auch versuchen festzustellen, ob etwa eine Aenderung des Streukoeffizienten pro Elektron sprungweise eintritt und bei welchen Elementen dies stattfindet".

⁴²Meitner a Pauli, 28-7-1930 (LM 5/13): "Was wir besonders auffallend erscheint, ist der Umstand, dass nach unseren Messungen der Anstieg des Streukoeffizienten sprungweise und nicht kontinuierlich erfolgt"; cf. Meitner a Bohr, 28-7-1930 (LM 5/2).

⁴³Exemples notoris d'aquesta actitud són el text de Gamow sobre el nucli (Gamow 1931) i la intervenció de Bohr al congrés de física nuclear celebrat a Roma el 1931 (Bohr 1932). Veure Stuewer (1979, 1983).

⁴⁴Meitner a Pauli, 28-7-1930 (LM 5/13): "Ich glaube ja, dass die Abweichung von der Formel von Klein und Nishina durch die zusätzliche Streuung des Kerns hervorgerrufen wird. Konnte dann die sprungweise Zunahme vielleicht durch irgend eine sprungweise Strukturänderung des Kerns (aber welche??) bedingt sein?".

electrons atòmics, la intensitat de la radiació dispersada no vindria donada per la suma de la intensitat dispersada per cada un dels electrons, sinó per l'acció conjunta dels electrons dispersors.⁴⁵ Però d'acord amb els càlculs de Pauli, aquest efecte només suposaria una correcció del 2% en el cas del plom, i seria menyspreable en el cas d'elements lleugers. L'efecte l'havia de causar el nucli:⁴⁶

Que la radiació dispersada excedeixi del valor calculat a partir de la fórmula de Klein-Nishina és doncs, clarament, un pur efecte nuclear. Gamow ha estat a Zurich i n'hem parlat extensament. Ell creu —i jo comparteixo plenament la seva opinió— que els electrons lliures del nucli serien els principals responsables de l'efecte.

Pauli suggeria a Meitner representar les desviacions de la fórmula de Klein-Nishina en funció del nombre d'electrons lliures del nucli dispersor, però Meitner ja havia comprovat que no existia una relació senzilla entre ambdues quantitats. Naturalment, això no exculpava els electrons nuclears, "però aleshores, quines propietats té l'electró nuclear lliure?" La seva perplexitat era generalitzada.⁴⁷

En aquells moments, però, altres coses preocupaven més Meitner, que s'havia adonat que el filtre de 1 cm usat des de l'inici dels experiments no eliminava completament les components febles de l'espectre del ThC". La inhomogeneïtat de la radiació, un aspecte tècnic de l'experiment aparentment sota control, minava el treball de varis mesos! L'experiència adquirida va fer que la repetició de les mesures amb un filtre quatre vegades més gruixut

⁴⁵Debye (1922).

⁴⁶Pauli a Meitner, 1-8-1930 [PBII, 248]: "Der Überschuss der Streustrahlung über den aus der Klein-Nishinaschen Formel berechneten ist also wohl ein echter Kerneffekt. Herr Gamow war gerade hier in Zurich und ich habe ausführlich mit ihm darüber gesprochen. Er meint — und ich bin da ganz seiner Ansicht — daß vor allem die freien Elektronen des Kernes für den Effekt verantwortlich zu machen seien".

⁴⁷Meitner a Pauli, 7-8-1930 (LM 5/13): "Aber was für Eigenschaften hat denn das freie Kernelektron?". El 1932, tanmateix, el físic nord-americà A. Bramley pretendria haver trobat una relació d'aquest tipus (Bramley 1932).

procedís ràpidament. El setembre de 1930, Hupfeld va presentar els primers resultats en el "VI Deutsches Physikertages", celebrat a Königsberg. Les noves mesures havien confirmat el brusc augment del coeficient d'absorció, i Hupfeld parlava amb més convicció de l'origen nuclear de les discrepàncies.⁴⁸ Guido Beck, un alumne avantatjat de Heisenberg, assistí a l'exposició de Hupfeld i va suggerir la possibilitat que les partícules alpha nuclears fossin les responsables de l'absorció addicional. Beck presentà poc després un breu càlcul basat en la hipòtesi de dispersió coherent sobre les partícules alpha del nucli, però només quinze dies després que la nota aparegués a *Die Naturwissenschaften*, Lev Landau mostrava que les magnituds nuclears usades per Beck no eren correctes: no es podia responsabilitzar les partícules a ni els protons nuclears del fenomen. Això només era el principi d'una llarga sèrie d'explicacions temptatives de l'absorció addicional.⁴⁹

A Königsberg, Hupfeld només va poder presentar resultats per cinc elements: C, Mg, Al, Zn i Pb.⁵⁰ L'extensió de les mesures a vuit elements més ocupà intensament Meitner i Hupfeld fins el desembre de 1930, quan van enviar a *Zeitschrift für Physik* la primera comunicació detallada dels experiments i els resultats obtinguts.⁵¹ La conclusió més important de la primera sèrie de mesures era clara: el coeficient d'absorció augmentava de forma regular amb el nombre atòmic dels elements dispersors, excepte entre el magnesi i l'alumini, on l'augment era brusc.

Meitner i Hupfeld observaven que "per longituds d'ona suficientment petites, el procés de dispersió no ve donat completament per la fórmula de Klein-Nishina". La discrepància, però, no era conseqüència de la inadequació de la fórmula; al contrari, només la seva consistència teòrica mostrava ine-

⁴⁸Meitner i Hupfeld (1930b).

⁴⁹Beck (1930), signat el 27-9-1930; Landau (1930), signat el 10-11-1930. Discutits a Gamow (1931), p. 81.

⁵⁰Meitner a Klein, 11-12-1930 (LM 5/10).

⁵¹Meitner i Hupfeld (1930c), rebut el 5-12-1930. Cf. Meitner a Ellis, 20-10-1930 (LM 5/4): "Wir sind eifrig beschäftigt mit der Prüfung der Klein-Nishina Formel".

quívocament la presència d'un nou mecanisme d'absorció:⁵²

Com no s'ha de dubtar, però, de la validesa d'aquesta fórmula per electrons lliures —i per les longituds d'ona investigades tots els electrons, fins per angles de dispersió molt petits, poden ser considerats lliures—, i com, a més, un procés d'interferència del tipus de Debye no tindria un influx apreciable, la desviació ha de provenir d'un nou factor que encara no ha estat considerat.

L'argument de Meitner, molt similar al dels altres experimentadors que van detectar l'efecte, es basa en la fiabilitat de la fórmula, requisit essencial per l'observació de l'efecte. La seguretat en la validesa de la nova fórmula es va correspondre amb la certesa en l'existència d'un nou mecanisme d'absorció.

Meitner i Hupfeld no especulaven sobre el tipus d'interacció entre els raigs gamma i el nucli responsable de l'excés d'absorció. La variació de l'efecte amb el nombre atòmic revelava el seu origen nuclear, però donava escasses indicacions sobre la naturalesa de la interacció. Els físics berlinesos esmentaven la suggerència de Beck que la dispersió nuclear consistia en una dispersió coherent sobre les partícules alpha del nucli, però observaven que les seves prediccions no s'adeien qualitativament amb les dades experimentals. "Potser [afegien] s'hauria de recórrer als electrons nuclears per explicar l'absorció addicional". Arribats a aquest punt, la insuficiència del material experimental feia aconsellable guardar silenci.⁵³

Hi ha indicis, tanmateix, que Meitner disposava des de feia mesos d'una noció clara del mecanisme de dispersió nuclear.⁵⁴ La segona sèrie d'ex-

⁵²Meitner i Hupfeld (1930c), p. 161: "Wir schließen hieraus, daß für genügend kleine Wellenlängen, der Streuprozeß nicht mehr völlig durch die Klein-Nishina-Formel erfaßt wird. Da aber an der Richtigkeit dieser Formel für freie Elektronen nicht zu zweifeln ist, da femer für die untersuchte Wellenlänge alle Elektronen bis zu sehr kleinen Streuwinkel herab als frei zu betrachten sind, und auch etwaige Debyesche Interferenzprozessen keinen merklichen Einfluß haben können, muß die Abweichung von einem neuen bisher nicht in Betracht gezogenen Faktor herrühren".

⁵³Meitner i Hupfeld (1930c), p. 164: "Vielleicht müßte man die Kernelektronen für die zusätzliche Streuung heranziehen".

⁵⁴Veure Meitner a Ellis, 26-9-1930 (LM 5/4), on Meitner parla amb aplom de l'existència d'una radiació dispersada pel nucli sense variació en la longitud d'ona.

periments amb Hupfeld s'inicià com una investigació de l'efecte d'absorció addicional, a partir de la radiació dispersada a 90° . Una expectativa teòrica definida havia determinat el canvi de disposició experimental: confirmar que la dispersió nuclear era anàloga a la dispersió Rayleigh de la llum, i que per tant la radiació incident era dispersada sense variació en la longitud d'ona. Aquesta hipòtesi es basava en el fet que la longitud d'ona dels raigs gamma investigats era gran en relació a les dimensions nuclears, de forma que totes les partícules del nucli intervindrien coherentment en la dispersió dels raigs. En aquest cas, la distribució angular de la radiació dispersada seria la derivada per Thomson a partir de la teoria electromagnètica de la llum. Diferent longitud d'ona volia dir diferent coeficient d'absorció, i aquest seria el criteri experimental per distingir els dos tipus de radiació secundària.

Meitner i Hupfeld van decidir comprovar la seva hipòtesi analitzant la corba d'absorció de la radiació dispersada a 90° . L'elecció d'aquest angle no tenia res d'especial; tan o més convenient hauria estat triar un angle superior, en el qual la radiació Compton seria més feble i de major longitud d'ona —més fàcilment distingible, per tant, d'una hipotètica radiació nuclear. Aquesta elecció aparentment intranscendent havia de tenir, com veurem, importants conseqüències.

El març de 1931 els experiments acabaven de començar. "Estem mirant de comprovar [escrivia Meitner a Gamow] mitjançant noves mesures, si la radiació dispersada a 90° conté una component més dura [de menor longitud d'ona] que la corresponent a la radiació Compton. Tanmateix, encara no puc avançar cap resultat; els experiments es troben només en l'estadi inicial".⁵⁵ Per observar la radiació dispersada a 90° , Meitner i Hupfeld van muntar el

⁵⁵Meitner a Gamow, 9-3-1931 (LM 5/6): "Wir haben in neueren Messungen versucht festzustellen, ob die unter 90° gestreute Strahlung noch eine härtere Komponente enthält, als der Comptonstrahlung entspricht. Ich kann aber, über das Resultat noch nichts sicheres sagen, die Versuche sind noch zu sehr im Anfangsstadium". Meitner responia a una carta de Gamow (3-3-1931, LM 5/6).

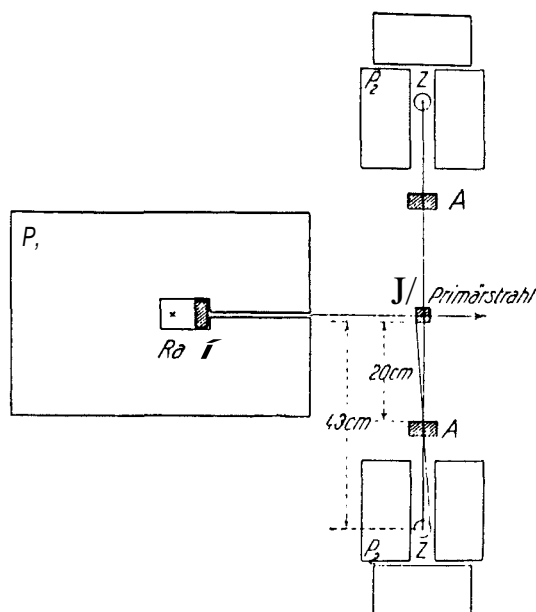


Figura 4. Disposició de la segona sèrie d'experiments de Meitner i Hupfeld. Els raigs emesos per una font de Ra, filtrats per F, incideixen sobre el dispersor *St*. Els comptadors Geiger *Z* mesuren el coeficient d'absorció en les plaques *A* dels raigs dispersats a 90° (Meitner i Hupfeld 1932, p. 707).

dispositiu experimental de la figura 4. Els raigs gamma provinents d'una font de RaC eren filtrats per 3 cm de plom (les mesures de dispersió demanaven més intensitat i havien renunciat al ThC''). Els raigs incidien sobre el material dispersor *St* (*Streustrahler*), i es mesurava el coeficient d'absorció en la placa *A* (*Absorberplatten*) d'aquells que havien estat dispersats a 90° .⁵⁶

L'agost de 1931, Meitner i Hupfeld van publicar els resultats de la investigació de les radiacions dispersades en ferro i plom. En el primer cas, el coeficient d'absorció en coure de la radiació dispersada ($0,77 \text{ cm}^{-1}$) s'adeia bé amb el predit per la fórmula de Klein-Nishina ($0,785 \text{ cm}^{-1}$), "una prova que en aquest cas només apareix radiació Compton i que l'efecte fotoelèctric no intervé en l'absorció en coure" (Meitner no disposava encara d'una predicció

⁵⁶Meitner i Hupfeld (1932), p. 707. Meitner i Hupfeld treballaven inicialment amb un comptador, però la simetria de la disposició els va permetre afegir-ne un altre i doblar el rendiment de la instal·lació, una millora gens menyspreable donada la feblesa dels raigs dispersats.

fiable de la magnitud d'aquest efecte).⁵⁷ El coeficient d'absorció de la radiació dispersada en plom, en canvi, variava amb el gruix de coure travessat, com corresponia a un feix heterogeni. El seu valor mínim ($0'57 \text{ cm}^{-1}$), molt inferior al predit per la fórmula, mostrava "que en el procés de dispersió en plom, a més de la radiació Compton, apareix una component més dura".⁵⁸ Aquest resultat es veia confirmat per mesures d'absorció en plom, sobre les quals treballaven en aquells moments. El coeficient d'absorció en làmines primes de plom era de $2'5 \text{ cm}^{-1}$, i arribava a $0'8 \text{ cm}^{-1}$ si s'augmentava el nombre de làmines absorbents. Meitner i Hupfeld indicaven clarament quines eren les seves expectatives: "De moment preferim deixar oberta la qüestió de si, en cas d'absorció més intensa, s'assolirà el coeficient d'absorció de la radiació incident [...], que és d'uns $0'55 \text{ cm}^{-1}$ ".⁵⁹

La confirmació d'aquesta expectativa i la preparació d'una comunicació detallada ocupà Meitner i Hupfeld fins el març de 1932. Els resultats finals de la seva anàlisi es mostren a la figura 5, que representa la intensitat de la radiació dispersada a 90° en funció del gruix d'absorbent. Les creus (x) corresponen a la radiació dispersada en ferro, els punts (•) a la radiació dispersada en plom. En ambdós casos s'havia mesurat l'absorció en plom. En el cas del ferro, la corba d'absorció era exponencial (lineal en la representació logarítmica), com

⁵⁷Els càlculs de l'absorció per efecte fotoelèctric no eren massa fiables, i es recorria normalment a fórmules empíriques. Que l'efecte anòmal augmentés en disminuir la longitud d'ona dels raigs, era inicialment l'únic argument de Meitner per descartar l'efecte fotoelèctric com a responsable de l'augment d'absorció. Per això, quan Fritz Sauter la informà dels seus càlculs sobre la magnitud d'aquest efecte, avalats per la teoria de l'electró de Dirac, Meitner els considerà "molt valuosos": pel zinc, l'absorció excedia en un 13% el valor predit per la fórmula de Klein-Nishina, mentre la contribució de l'efecte fotoelèctric, segons els càlculs de Sauter, no arribava a un 1%. En articles posteriors, les estimacions de Sauter ocuparien un lloc destacat, al costat de les prediccions de Klein-Nishina, en l'avaluació de la magnitud de l'efecte addicional (Meitner a Sauter, 29-7-1931, LM 5/16; Sauter 1931a, b).

⁵⁸Meitner i Hupfeld (1931), p. 776: "Dieses Resultat zeigt, daß beim Streuprozeß an Pb tatsächlich außer der Compton-Strahlung noch eine härtere Komponente vorhanden ist."

⁵⁹Ibid., p. 776: "Wir möchten es daher vorläufig offen lassen, ob bei noch stärkerer Absorption der Absorptionskoeffizient der unverändert (am Kern) gestreuten Primärstrahlung, der etwa $0'55 \text{ cm}^{-1}$ beträgt, erreicht wird".

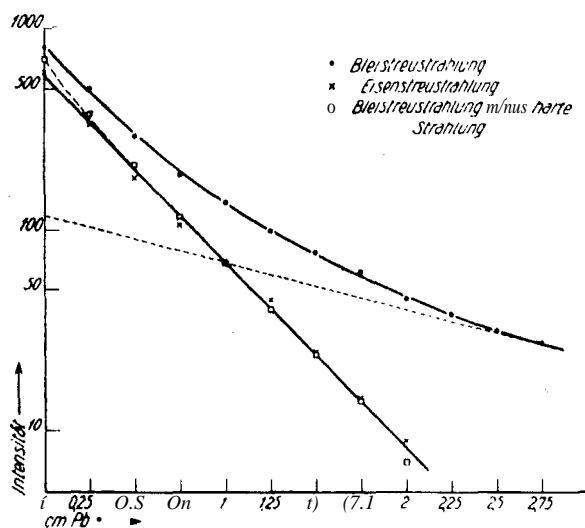


Figura 5. Resultats de Meitner i Hupfeld per l'absorció en plom dels raigs gamma del RaC dispersats a 90° . S'hi representa la intensitat de la radiació dispersada en ferro (\times) i plom (\bullet), en funció del gruix de plom travessat, així com la corba resultant de restar a la de la radiació dispersada en plom, la corresponent a una radiació dispersada sense canvi en la longitud d'ona (\circ). Meitner i Hupfeld (1932), p. 709.

corresponia a una radiació homogènia. La corba d'absorció de la radiació dispersada en plom, en canvi, mostrava "el comportament típic d'una mescla de radiacions [de diferent longitud d'ona]", i la presència d'una component de menor longitud d'ona que la radiació Compton.

Era, però, aquesta radiació addicional de la mateixa longitud d'ona que la radiació primària? Per comprovar-ho, Meitner i Hupfeld van seguir el procediment habitual per analitzar un feix heterogeni. A partir d'un cert gruix de material absorbent, la corba d'absorció esdevé exponencial i se'n pot deduir el coeficient d'absorció de la component de menor longitud d'ona del feix. Restant aquesta contribució de les mesures originals s'obté una nova corba, que es tracta de la mateixa manera; el procés es repeteix fins que la corba experimental s'ha descomposat en una sèrie de corbes exponencials.⁶⁰ Meitner i Hupfeld només van necessitar repetir el procés una vegada. Els dos darrers

⁶⁰Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), p. 455.

punts de la corba d'absorció en plom corresponien pràcticament al coeficient d'absorció de la radiació primària, $\mu_{Pb} = 0'55 \text{ cm}^{-1}$. A través d'ells, Meitner i Hupfeld van traçar la recta corresponent a aquest coeficient d'absorció (línia discontinua de la figura), i van restar-la de la corba experimental. Llevat dels dos primers punts, la corba resultant coincidia amb la corba d'absorció de la radiació dispersada en ferro! Meitner i Hupfeld conclouïen emfàticament: “*Els resultats obtinguts mostren que la radiació dispersada en plom, a més de la radiació de dispersió Compton, conté la radiació primària*”.⁶¹

Meitner i Hupfeld estaven convençuts de la certesa de les seves conclusions, que el procés de dispersió era anàleg a la dispersió Rayleigh i la radiació dispersada era de la mateixa longitud d'ona que la incident: “l'anàlisi de les corbes d'absorció no revela *de cap manera* la presència d'una radiació de longitud d'ona compresa entre les de la radiació primària i la radiació Compton”.⁶² La seva seguretat és sorprenent considerant que la interpretació de corbes d'absorció estava lluny de ser una ciència exacta. Els experts del Cavendish havien subratllat clarament les limitacions del mètode d'anàlisi emprat per Meitner.⁶³

[The method of absorption] can seldom give very definite information and it is unnecessary to push the refinement of the experiment to any great lengths[...]. Too much weight must not be laid on the exact numerical values of the coefficients obtained from measurements with such simple apparatus, since it is found that the absorption curve depends slightly on the size and disposition of the apparatus. The method of analysis is clearly not unique, nor is it possible from the physical standpoint to give an accurate description in terms of three or four absorption coefficients of a radiation containing many components

⁶¹Meitner i Hupfeld (1932), p. 710: “*Die erhaltenen Resultaten zeigen, daß die an Blei gestreute Strahlung neben der Comptonschen Streustrahlung noch die Primärstrahlung enthält*”.

⁶²*Ibid.*, p. 712: “*Die Analyse der Absorptionskurve läßt keinerlei zwischen der Compton- und der Primärwellenlänge gelegene Strahlung erkennen*”.

⁶³Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), p. 455.

La convicció de Meitner, doncs, difícilment podia basar-se en la precisió de l'anàlisi experimental; sens dubte, les expectatives teòriques n'eren un ingredient essencial. Com pot si no un experimentador expert estar tan segur de l'existència d'una radiació inexistent? Coneixem la composició de la radiació analitzada per Meitner: superposades a un fons de radiació Compton d'uns 3.100 fm (0,4 MeV), hi havia una radiació d'anihilació de 2.500 fm (0,5 MeV) i una mescla de radiacions més febles i de menor longitud d'ona (una de les quals havia estat efectivament dispersada sense canvi en la longitud d'ona, però per un procés diferent del concebut per Meitner). La resolució del mètode d'absorció era insuficient per revelar l'existència de la radiació de 2.500 fm, tan similar a la de Compton. Meitner i Hupfeld van analitzar aquest conjunt heterogeni com si la seva composició fos molt simple. Sense una explicació per la presència entre la radiació dispersada d'una component de la mateixa longitud d'ona que la radiació incident, podem dubtar que els experimentadors berlinesos haguessin arribat a detectar-la. Durant l'experiment, les dades i la noció que les hi donava sentit s'havien amalgamat en un cos d'evidència extremadament convincent per a Meitner, que ja no havia de modificar essencialment la seva postura.

L'estada de Hupfeld al laboratori de Meitner tocava a la seva fi. Pels físics de Berlin, després de tres anys de treball, el problema havia arribat a una certa conclusió. El final de la col·laboració entre Meitner i Hupfeld ens permet interrompre aquí l'exposició de les aportacions experimentals del grup de Berlin, i presentar les que s'havien estat produint, simultàniament, a Cambridge.

CAMBRIDGE: RADIACIONS CARACTERÍSTIQUES

Un altre dels laboratoris implicats, el maig de 1930, en l'anunci de l'absorció anòmala de raigs gamma, era el Cavendish. El 1919, Ernst Rutherford havia succeït J. J. Thomson en la direcció del més prestigiós laboratori britànic.

Durant els primers anys de l'era Rutherford, la recerca al Cavendish va estar dominada per l'estudi de la radiació alpha mitjançant un instrument tan simple com a la llarga poc fiable, el comptador d'escintil·lacions (*scintillation counter*). Quan, a la meitat de la dècada, una controvèrsia entre Cambridge i Viena al voltant del mètode de compteig va qüestionar la fiabilitat de l'aparell en què més confiança havien dipositat els experimentadors del Cavendish, Rutherford decidí reorientar la recerca al laboratori. La motivació última seguiria sent la investigació de l'estructura nuclear, però l'estudi es centraria a partir d'aquell moment en les radiacions beta i gamma. Per impulsar el canvi, Rutherford convocà una conferència sobre els problemes de les radiacions beta i gamma, que congregà a Cambridge, a finals de juliol de 1928, la crema i nata dels físics radioactius.⁶⁴

En aquest context de reorientació general, un altre dels estudiants de Rutherford contribuiria decisivament a l'estudi de la dispersió gamma. Gerald Tarrant ingressà al Cavendish un any després que Gray, l'octubre de 1928. El mateix Rutherford o la seva mà dreta, Chadwick, assignaven les tasques de recerca al laboratori, i Tarrant no va ser una excepció. El següent episodi, per l'afinitat amb la intervenció de Rutherford davant la Royal Society citada a la secció anterior, devia tenir lloc a finals de 1928.⁶⁵

At a lecture one day Rutherford said that a gold medal should be given to any one who could produce an *isolated* high energy gamma ray to test the scattering of the Klein-Nishina formula. Chadwick immediately jumped up saying he claimed the gold medal as ThC'' had a gamma ray of 2,65 Mev free of anything else of high energy. Next day I was given the job of measuring the absorption coefficient of that gamma ray to see if the Klein-Nishina formula was correct.

⁶⁴Hughes (1991) oposa convincentment aquesta visió del Cavendish durant els anys vint a la versió mítica de la historiografia tradicional, dominada pels esdeveniments que s'hi produïrien durant els anys trenta.

⁶⁵Tarrant a l'autor, 11-12-1991. Cf. les reminiscències de Ward a Williamson (1987), i les de Blackett a Hendry (1984).

En l'esperit de la conferència de Rutherford, els experiments de Tarrant havien de contribuir a clarificar la situació entre les diferents teories proposades per interpretar les corbes d'absorció de la radiació còsmica.⁶⁶

In many cases, for example, in the case of the penetrating radiation observed in the atmosphere, estimates of the wave-length of a radiation are based on measurements of the absorption coefficients, and very different values are obtained according to which of the theories of scattering is adopted. It was to test the accuracy of these theories of scattering that the experiment described in this paper was commenced.

Tarrant adoptà com a detector la cambra d'ionització, l'aparell que es considerava més adient per a la mesura de l'absorció i dispersió dels raigs gamma —no en va la major part dels experiments d'absorció i dispersió de raigs gamma anteriors a l'aparició de la fórmula de Klein-Nishina s'havien realitzat amb cambres d'ionització o electroscopis.⁶⁷ El comptador Geiger-Müller havia estat introduït molt recentment, i al Cavendish se seguia preferint el mètode d'ionització, sobre el qual s'havia consolidat la fama del laboratori en l'època de Thomson. És per això que a Gray se li assignà l'estudi detallat de les possibilitats de la cambra d'ionització per a la mesura de raigs gamma, i que Tarrant donava per suposat que Meitner estava usant un aparell d'aquest tipus.⁶⁸ Un altre dels experimentadors del Cavendish, H. C. Webster, utilitzà ambdós detectors en els seus experiments sobre radioactivitat artificial, però després de comparar-ne els mèrits es quedà amb la cambra d'ionització, "on account of its greater technical convenience and reliability".⁶⁹

⁶⁶Tarrant (1930), p. 346.

⁶⁷Kohlrausch (1927), Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), pp. 469-473. Ellis, que redactà la part corresponent a la radiació gamma, esmentava com a única excepció el treball de Skobelzyn amb la cambra de boira.

⁶⁸Tarrant a Meitner, 8-8-1930 (LM 5/19): "I should like to know the experimental arrangement you are using, in particular, if your chamber contains any nitrogen, the metal and thickness it is made of".

⁶⁹Webster (1932), p. 430. Cf. Hendry (1984), p. 113: "although Chadwick responded to the... invention [of the Geiger-Müller counter] by quickly building several himself for use in the Cavendish the extent of such use, mainly by H. C. Webster, was limited".

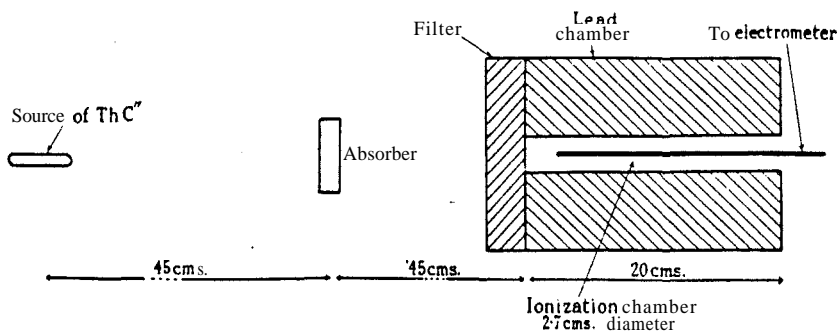


Figura 6. La disposició experimental amb què Tarrant va descobrir l'absorció anòmala de raigs γ . Els raigs emesos per una font de ThC'', després de travessar l'absorbent i un filtre, incideixen en una cambra d'ionització que permetia mesurar-ne la intensitat (Tarrant 1930, p. 348).

La figura 6 mostra la disposició experimental usada per Tarrant. Els raigs provinents d'una font de ThC'' passaven a través d'un bloc de material absorbent, i entraven en la cambra d'ionització a través d'un filtre de plom. Si el filtre era prou gruixut, només la component de major longitud d'ona de l'espectre del ThC'' aconseguia travessar-lo, i el corrent d'ionització permetia calcular-ne el coeficient d'absorció a partir de l'expressió

$$\mu = \frac{1}{a} \ln \frac{I_0 - I_n}{I - I_n},$$

on a és el gruix del material absorbent, i I_n el corrent natural de descàrrega, degut principalment a la radiació còsmica. A diferència de Meitner i Hupfeld, Tarrant calculava el coeficient d'absorció a partir de mesures amb un únic gruix de material dispersor.

Els resultats de Tarrant van mostrar que la fórmula de Klein-Nishina descriu molt bé l'absorció en elements lleugers, però també que en elements pesants es donava un efecte d'absorció addicional que variava de forma *irregular* amb el nombre atòmic. A pesar que la magnitud de l'absorció per efecte fotoelèctric era incerta (Tarrant assumia que variava amb la quarta potència del nombre atòmic), Tarrant considerava que el tipus de variació exclouia una explicació del fenomen a partir d'aquest efecte, i suggeria l'existència d'un mecanisme

d'absorció addicional, presumiblement d'origen nuclear.⁷⁰

L'acord "excel·lent" observat en elements lleugers explica la confiança que Tarrant va depositar, des d'un primer moment, en la fórmula de Klein-Nishina. Tarrant no sembla haver considerat la possibilitat que la fórmula fos incorrecta; les seves mesures mostraven variacions imprevistes en el coeficient d'absorció, però provaven també que la nova fórmula de dispersió era "much more accurate than any hitherto proposed", i la usava sense reticències per calcular una de les correccions que havia d'aplicar als seus resultats.⁷¹ Com en el cas de Meitner i Hupfeld, l'efecte addicional només es posava de manifest en disposar d'una predicció teòrica fiable de la magnitud de l'efecte Compton.

Mentre preparava la publicació dels seus resultats, Tarrant no sospitava que algú estès realitzant mesures molt similars a d'altres laboratoris.⁷² La primera notícia que es va tenir al Cavendish sobre els experiments de Berlin va venir de Blackett, que va passar el primer semestre de 1930 a Berlin. A finals d'abril, Blackett va arranjar una visita al laboratori de Meitner; només podem especular sobre la significació d'aquesta visita per la simultaneïtat de l'anunci de l'absorció anòmala.⁷³ A finals de maig, assabentat a través de Gray que un estudiant de Meitner treballava en l'absorció de raigs gamma, Tarrant va escriure a Meitner descrivint-li detalladament la disposició experimental que havia usat i les correccions que havia fet. La carta incloïa una taula de resultats

⁷⁰Tarrant (1930), p. 355: "This difference cannot be ascribed to a normal photoelectric effect because it varies irregularly with atomic number, so that it appears that there is an additional absorbing mechanism in a number of elements. This irregular variation with atomic number suggests that the additional absorption may be nuclear in origin".

⁷¹Tarrant (1930), pp. 352 i 359. Les reminiscències de Tarrant assenyalen en la mateixa direcció, però el temps transcorregut demana precaució: "All along we felt the Klein-Nishina formula was correct for light elements but that something else was occurring at high atomic numbers" (Tarrant a l'autor, 11-12-1991).

⁷²Referint-se als tres articles sobre absorció anòmala de raigs gamma apareguts el maig de 1930, Tarrant recorda: "...all papers were very close together, and we were surprised to find others were working on the same field" (*ibid*).

⁷³Blackett a Meitner (des de Berlin), 27-4-1930 (LM 5/2). La nota de Meitner i Hupfeld va ser signada el 9 de maig.

a dues columnes (els mateixos de l'article).⁷⁴

Meitner no va donar massa importància a les lleugeres diferències quantitatives entre els seus resultats i els de Tarrant, com tampoc al fet que aquest hagués observat una variació del coeficient d'absorció amb el gruix de l'element dispersor, perquè les seves acurades corbes d'absorció no la posaven de manifest "de cap manera". L'èmfasi tenia un aire d'amonestació professorial. La crítica més important, però, es referia al dispositiu experimental de Tarrant, que evidentment no satisfieia Meitner. La font de raigs gamma estava completament desprotegida, de forma que raigs dispersats a les parets del laboratori podien assolir la cambra d'ionització i afectar les mesures. Probablement Meitner tenia bones raons per qüestionar els resultats de Tarrant, però no és menys cert que la seva valoració estava condicionada per la confiança que havia dipositat en el seu propi disseny experimental.⁷⁵

Tarrant va replicar a Meitner amb nous resultats, obtinguts amb una nova cambra d'ionització. La diferència entre els coeficients d'absorció en magnesi i alumini, que segons els primers resultats era gairebé d'un 10%, havia desaparegut. Podem imaginar com devia rebre Meitner aquesta notícia, quan el brusc augment de l'absorció entre aquests dos elements representava en aquells moments una de les seves principals preocupacions! Tarrant, d'altra banda, havia deixat d'observar una variació irregular de l'efecte addicional amb el nombre atòmic, per trobar una dependència molt aproximada en Z^2 .⁷⁶

El mateix dia que l'article de Tarrant era rebut pels *Proceedings* de la Royal Society, ho era també el segon article de Gray, "The Scattering of Hard Gamma Rays. Part I". Després del seu estudi de la cambra d'ionització i l'absorció dels raigs còsmics, Gray havia passat a ocupar-se de la dispersió dels raigs gamma.

⁷⁴Tarrant a Meitner, 21-5-1930 (LM 5/19).

⁷⁵Meitner a Tarrant, 17-6-1930 (LM 5/19).

⁷⁶Tarrant a Meitner, 8-8-1930 (LM 5/19). La segona carta de Tarrant va arribar a Berlin en període de vacances, i va quedar sense resposta (Meitner a Ellis, 20-10-1931). Meitner demanava Ellis que la disculpés davant de Tarrant, suposant, d'altra banda, "que Blackett ja els haurà explicat alguna cosa dels nostres experiments".

En el moment de publicar l'article, Gray coneixia naturalment els resultats "completament inesperats, tant des del punt de vista teòric com experimental" de Tarrant, i també els de Meitner i Hupfeld. El seu estudi, que apareixia alhora que les primeres notícies de l'existència d'una absorció addicional, representa la primera investigació de la naturalesa del fenomen! Després d'explicar, en termes impersonals, que s'havia observat un efecte d'absorció anòmal dels raigs gamma del ThC'' en elements pesants, i que l'efecte havia estat associat temptativament al nucli, Gray afegia:⁷⁷

Without, however, prejudicing the issue with regard to the origin of the additional absorption, the question naturally arises as to the extent to which the abnormally large absorption coefficients are due to an increase in the true absorption or in the deflection of gamma-ray energy.

La distinció entre absorció i dispersió era comuna en l'anàlisi teòrica del pas de radiació a través de la matèria, i Gray ja l'havia introduïda en el seu estudi de la cambra d'ionització. En l'efecte Compton, per exemple, part de l'energia del fotó incident és absorbida (per l'electró), i la resta dispersada. Per distingir a quin tipus de procés corresponia l'absorció addicional, Gray va comparar la radiació dispersada per un element que presentava absorció addicional (sofre, $Z=16$) i un altre que no (alumini, $Z=13$). La feblesa de les fonts de ThC'' va obligar Gray a utilitzar Ra(B+C). Per evitar tota contaminació, Gray es va fer construir una cambra d'ionització en un taller on mai no s'havia introduït material radioactiu, i els experiments no es van realitzar al Cavendish, sinó al Solar Physics Observatory de Cambridge, un lloc al que van recórrer també altres experimentadors del laboratori.⁷⁸ La cambra, de forma anular, mesurava la intensitat de la radiació dispersada entre 16° i 90° .

⁷⁷Gray (1930), p. 363.

⁷⁸Per exemple H. C. Webster, en els seus experiments sobre la radiació penetrant emesa pel beril·li en ser irradiat amb partícules alpha, que poc després seria identificada amb el neutró.

Gray no va trobar cap diferència apreciable entre la radiació dispersada en alumini i sofre. Aquest resultat negatiu podia ser interpretat de dues maneres: o bé l'energia absorbida no era reemesa en la regió angular examinada, o bé "the new absorbing mechanism is almost entirely inoperative in aluminium in the case of quanta of energy 1,5 MeV, and only becomes of considerable magnitude as the quantum energy approaches close to that of the hard thorium C'' line (2,65 MeV)."⁷⁹ La segona possibilitat portava Gray a considerar l'existència d'un valor llindar (*threshold*) per l'aparició del fenomen d'absorció addicional. Les seves consideracions teòriques eren en aquest punt vagues i inconcluents, però la noció de llindar —estretament lligada a l'existència de nivells d'energia nuclears— acabaria jugant un paper decisiu pels experimentadors del Cavendish.

En el moment de presentar l'article, Gray col·laborava amb Tarrant en el disseny d'una cambra d'ionització d'acer.⁸⁰ L'augment de pressió incrementava considerablement la sensibilitat de l'aparell, ja que multiplicava per seixanta la ionització causada pels raigs beta reduïnt al mateix temps la contaminació deguda a la radiació alpha.⁸¹ La major sensibilitat de la nova cambra va permetre Gray usar ThC'', i investigar un interval angular més reduït. Gray va estudiar la dispersió dels raigs gamma del ThC'' en set elements, compresos entre el magnesi i el plom. L'objecte d'aquests experiments seguia sent determinar si l'efecte anòmal corresponia a una veritable absorció, o es tractava d'un procés de dispersió addicional. Per distingir les dues possibilitats, Gray va examinar la dispersió total entre 10° i 30°, un interval que comprenia gairebé la meitat de la radiació total dispersada pels electrons extranuclears. Gray no va detectar cap variació en el poder dispersor dels electrons. En-

⁷⁹*Ibid.*, p. 375. Veure també *Nature* **126** (July 12, 1930), p. 83.

⁸⁰Gray (1931b), p. 528n.

⁸¹La detecció de radiació gamma en una cambra d'ionització és un fenomen secundari. La ionització es deu als electrons Compton produïts pels raigs gamma en col·lisions amb les parets de l'aparell i el gas contingut en la cambra.

cara que els experiments eren relativament poc sensibles a qualsevol radiació dispersada pel nucli (l'interval angular considerat comprendria només un 6% d'una radiació dispersada de forma isòtropa), Gray acotava l'efecte nuclear i conclouia que "no more than a third of the difference between the absorption coefficients of the thorium C" gamma rays in heavy and light elements can be due to nuclear absorption resulting in the re-emission of approximately isotropic radiation".⁸²

Els experiments de Gray plantejaven la possibilitat que l'energia absorbida pel nucli no fos reemesa. G. Gamow va considerar seriosament aquesta possibilitat, relacionant-la amb la violació del principi de conservació de l'energia dins el nucli: "as the principle of conservation of energy does not seem to be applicable to nuclear processes involving the electrons, it is not impossible that the energy of the γ rays is not scattered but is directly absorbed by the nuclear electrons and disappears without leaving any trace".⁸³

Entretant, Tarrant havia començat a utilitzar una cambra del tipus dissenyat conjuntament amb Gray. L'explosió d'aquesta cambra —un tub cilíndric d'uns 7 cm de longitud i 3 cm de diàmetre interior—, inicialment plena d'oxigen, va retrassar el treball de Tarrant i el va convèncer de la necessi-

⁸²Gray (1931b), p. 541. Gray havia inclòs alguns d'aquests resultats en una *dissertation* amb què havia optat a una beca al Trinity College. A petició d'Ellis, membre del comitè que avaluava els candidats, Meitner va redactar un informe sobre la tesi de Gray (veure la correspondència entre Meitner i Ellis, juliol-setembre 1930, LM 5/4). Alguns dels aspectes del treball que Meitner considerà menys afortunats no van trobar lloc en el seu informe, però sí en la carta a Ellis que l'acompanyava. Si Gray no havia observat cap diferència entre les radiacions dispersades en sofre i alumini, explicava Meitner, era perquè la radiació dispersada per efecte Compton entre 10° i 30° representa un 40% del total, mentre que només el 6% d'una radiació dispersada de forma isòtropa ho seria en el mateix interval angular (Meitner a Ellis, 26-9-1930, LM 5/4). El mateix argument figura en una carta de Meitner a Gamow (9-3-1931, LM 5/6) en què es qualifiquen els experiments de Gray de "poc decisius" (*nicht entscheidend*).

⁸³Gamow (1931), p. 82. Gamow havia expressat la mateixa idea de forma més expressiva en carta a Meitner de 3-3-1931 (LM 5/6): "Nun geht die Energie-Erhaltung-Satz für Kern-elektronen kaput und man muss erwarten dass die Energie wird by Electronen [*sic.*] mit Knochen und Haut gefressen sein."

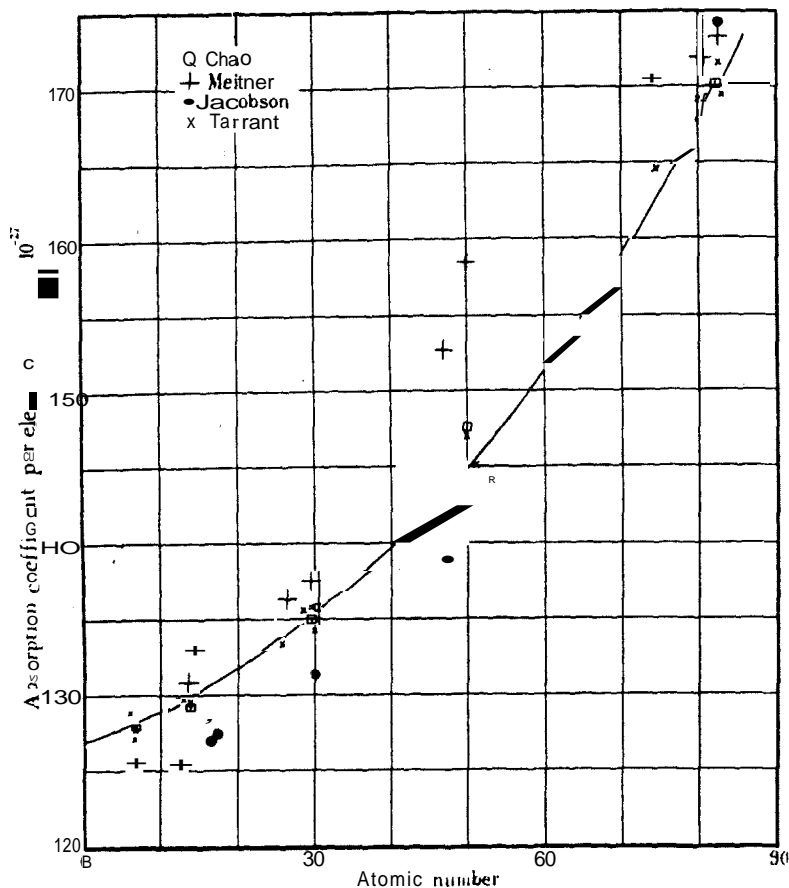


Figura 7. Resultats de Tarrant pel coeficient d'absorció per electró en funció del nombre atòmic, incloent-hi els resultats dels altres investigadors que havien estudiat l'absorció addicional. (Tarrant 1932, p. 234.)

tat d'usar un gas menys perillós, com el nitrogen. Seguint el mètode del seu article anterior, Tarrant va investigar l'absorció dels raigs gamma del ThC'' en dinou elements. L'anàlisi dels resultats va finalitzar l'octubre de 1931, i va mostrar que, per elements lleugers, el coeficient d'absorció superava en un 3% el predit per la fórmula de Klein-Nishina (figura 7).⁸⁴ Per elements pesants, la diferència entre els valor teòric i experimental variava aproximadament segons Z^2 , una variació "molt sorprenent" perquè resultava de la combinació de l'efecte fotoelèctric i la "interacció nuclear". Els experiments, però, no permetien deduir la dependència amb el nombre atòmic de cada un dels efectes. La

⁸⁴Tarrant (1932), p. 236. Tarrant creia probable que la font de raigs gamma emetés un feble espectre continu, o el procés d'absorció nuclear intervingués en elements lleugers.

determinació independent de la llei d'absorció per efecte fotoelèctric apareixia una vegada més com un element essencial en la recerca de l'efecte nuclear.⁸⁵

Tarrant col·laborava ja amb Gray, que havia presentat la seva tesi doctoral el juny, en nous experiments de dispersió.⁸⁶ La radiació còsmica havia deixat de ser el referent més important de les investigacions, que es centaven ara en "la naturalesa de la interacció entre el fotó i el nucli".⁸⁷ Igual que Meitner i Hupfeld, Gray i Tarrant van decidir analitzar la radiació dispersada, però ho van fer a 125° i 145° en lloc de a 90°. L'elecció tenia en ambdós casos el mateix fonament: per angles de dispersió elevats la radiació dispersada per efecte Compton és més feble i de major longitud d'ona, més fàcilment distingible, per tant, d'un altre tipus de radiació. L'elecció d'angles diferents, i l'ús del ThC'' —Meitner i Hupfeld havien usat RaC en la segona sèrie d'experiments— dificultaria la comparació de les mesures dels dos grups d'investigadors, i abonaria el terreny de la polèmica.

Gray i Tarrant van superar la dificultat que representava l'ús del ThC'' usant grans masses de material dispersor a fi de multiplicar l'efecte investigat. Els experiments consistien en analitzar l'absorció en plom de la radiació dispersada per uns radiadors cilíndrics que pesaven de 100 a 200 kg (figura 8); s'entén que el nombre d'elements investigats disminuís dràsticament. Les crítiques de Meitner havien fet efecte, i les mesures d'absorció no es limitaven a un únic gruix de plom. L'absorbent estava format per làmines de plom de 1,5 mm que,

⁸⁵*Ibid.*, p. 233. A finals de 1930, Gray havia proposat una nova fórmula empírica per la variació del coeficient d'absorció fotoelèctrica amb la longitud d'ona, "The need for some law less at variance with experiment than [the $Z^3\lambda^3$ law]", explicava Gray, "was so urgent that it seemed worth while to publish a new formula". Només l'estudi del nou procés d'absorció, que havia ja provocat l'aparició de varis articles, justificava aquesta urgència (Gray 1931a, p. 105). La llei de Gray es va mostrar eficaç i va ser molt utilitzada.

⁸⁶Gray, *The Absorption of Gamma Rays*, tesi doctoral no publicada (ULC, juny 1931). La tesi es basava en el treball que li havia suposat a Gray una beca del Trinity College (tesi de Gray, prefaci, nota 1).

⁸⁷Gray i Tarrant (1932b), p. 663. L'article es titulava "The nature of the interaction between gamma-radiation and the atomic nucleus".

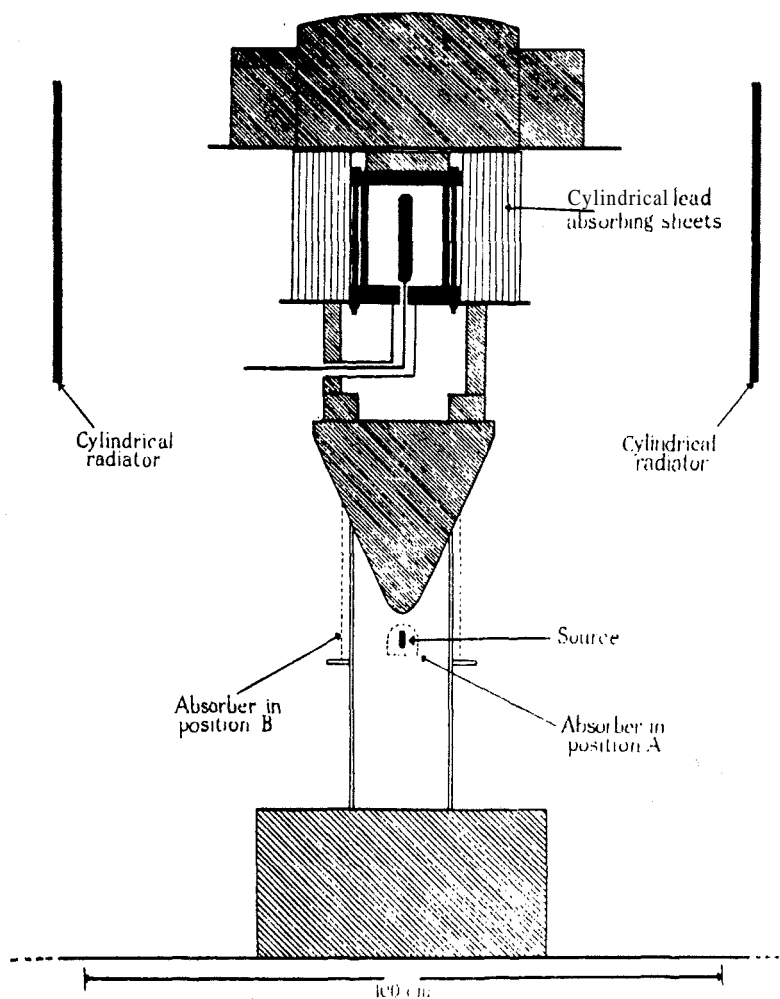


Figura 8. El dispositiu experimental usat per Gray i Tarrant per investigar la dispersió de raigs gamma. La cambra d'ionització, coberta de làmines de plom, mesura la intensitat de la radiació dispersada per un enorme radiador cilíndric. Les dimensions d'aquest dispersor compensaven la feblesa de la font de raigs gamma. (Gray i Tarrant 1932b, p. 665.)

en forma de cilindres, envoltaven la cambra d'ionització.

El primer element dispersor investigat fou el plom. Les corbes d'absorció van mostrar que la radiació dispersada no era monocromàtica. Reconeixent que una anàlisi única no era possible, Gray i Tarrant distingien dues components: "The absorption curve corresponds roughly with that of a mixture of the two radiations of absorption coefficients $0,85 \text{ cm}^{-1}$ and $1,9 \text{ cm}^{-1}$ in the proportion (by energy) of 1:2". La corba d'absorció fotoelèctrica de Gray (i es de suposar que també la fórmula de Klein-Nishina) donaven per les longituds d'ona corresponents 1.350 fm ($0,92 \text{ MeV}$) i 2.700 fm ($0,47 \text{ MeV}$). Les corbes d'absorció a 125° i 145° eren paral·leles, el que mostrava que el caràcter de la radiació secundària no havia variat sensiblement.⁸⁸

La repetició de les mesures amb una font de Ra(B+C) va confirmar les sospites dels experimentadors del Cavendish que es trobaven davant un fenomen característic del nucli dispersor. La corba d'absorció en plom de la radiació dispersada a 125° era molt aproximadament paral·lela a les dues anteriors, és a dir, la radiació dispersada tenia la mateixa longitud d'ona tant si s'usaven els raigs gamma del Ra(B+C) com els del ThC". Les mesures amb Ra.(B+C) no eren definitives i estaven en curs de repetició, donada la importància d'establir amb seguretat la identitat de les corbes. Tanmateix, Gray i Tarrant se sentien prou segurs per concloure: "...it appears that the absorption of the primary radiation in some way leaves the nucleus in an 'excited state', and the radiation which we have been observing is a 'characteristic' radiation emitted when the nucleus returns to the normal state".⁸⁹

Quina part de l'energia de la radiació incident era reemesa en forma de radiació característica? A partir de la intensitat de la radiació dispersada en plom a 125° , i el seu coeficient d'absorció experimental, Gray i Tarrant van

⁸⁸*Ibid.*, p. 666. Això mostrava també que la radiació Compton havia estat efectivament absorbida per les làmines que envoltaven la cambra, perquè si no el seu efecte sobre els coeficients d'absorció hauria estat detectat.

⁸⁹*Ibid.*, p. 669.

calcular el quocient entre l'energia de la radiació dispersada i la de la radiació incident, assumint que les radiacions característiques es distribuïen de forma isotropa. Aquest quocient (0,52) indicava que dels 2,65 MeV de la radiació incident, 1,4 MeV eren reemesos pel nucli. Però aquesta energia igualava la suma de les energies dels quanta de les dues radiacions característiques. Gray i Tarrant interpretaven aquesta coincidència observant que "each excitation is... followed by the emission of one quantum of each component radiation, or three quanta of the softer radiation". Després del plom, es van repetir les mesures amb dispersors de zinc, ferro, i oxigen (en forma d'aigua). La intensitat de les dues radiacions característiques era diferent per cada element, el que indicava que l'emissió de dos fotons de 0,5 MeV, o la d'un fotó de 0,5 MeV i un de 1 MeV, corresponien a modes de desexcitació de diferent probabilitat.

La referència a una radiació característica denota una expectativa teòrica definida, que distingeix aquest article conjunt dels que Gray i Tarrant havien produït abans separatament. Per copsar l'origen i el sentit de les reflexions de Gray i Tarrant sobre el nucli no cal sortir del Cavendish. El 1922, Ellis havia observat l'existència de relacions additives del tipus $\nu = \nu_2 + \nu_3$ entre les freqüències dels raigs gamma del RaB, i suggerit que els raigs gamma, per analogia amb els raigs X, eren emesos en les transicions d'un dels constituents nuclears entre diferents nivells d'energia. Posteriorment, el mateix Ellis havia intentat fixar els nivells d'energia de diferents elements radioactius, i trobat "so many examples of additive relation between the frequencies[...] that there is good reason to believe in the essential correctness of the central idea".⁹⁰ Al voltant de 1930, tot indicava que els raigs gamma s'originaven en les transicions de partícules alpha, i l'estudi de l'espectre dels emissors gamma radioactius era una de les vies d'atac al complex de nivells nuclears.⁹¹ Aquest era el programa

⁹⁰Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), p. 514, que correspon a la part redactada per Ellis (*ibid.*, p. x). Veure Wheaton (1983), pp. 270-274.

⁹¹Veure Gamow (1931), capítol III; les "discussions sobre l'estructura del nucli atòmic"

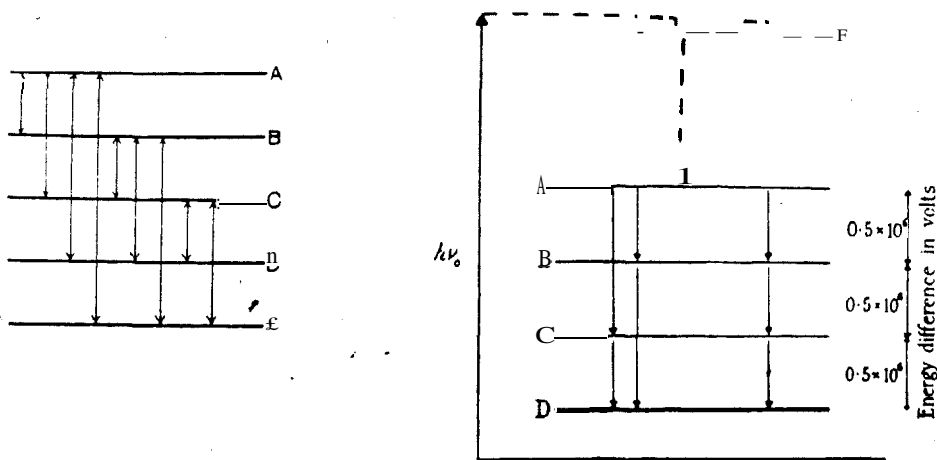


Figura 9. Representacions esquemàtiques dels nivells d'energia nuclears. La de l'esquerra va ser usada per Ellis a Rutherford, Chadwick i Ellis (1930) per il·lustrar l'emissió de raigs gamma pel nucli (p. 515). Gray i Tarrant van explicar amb la de la dreta l'emissió de radiacions característiques de 0,5 MeV i 1 MeV per part del nucli (Gray i Tarrant 1932b, p. 683.)

de recerca d'Ellis, sancionat per Rutherford; Gray i Tarrant reflexionarien en aquests mateixos termes sobre la naturalesa de la interacció entre els raigs gamma i el nucli.

La noció de nivells nuclears estava il·lustrada a la part redactada per Ellis de l'influent *Radiations...* mitjançant el diagrama de l'esquerra de la figura 9. La similitud amb el diagrama de la dreta, corresponent a l'article de Gray i Tarrant, és òbvia. En el diagrama de Gray i Tarrant, el nivell virtual representat per la línia discontinua correspon a l'energia del fotó incident. S'hi representen quatre nivells nuclears, les transicions entre els quals generen les diferents radiacions observades. Les transicions AB, BC, i CD originarien els quanta de 0,5 MeV; les transicions AC i BD, els de 1 MeV. Aquesta estructura explicava,

mantingudes a la Royal Society el febrer de 1929 i l'abril de 1932 (Proc. Roy. Soc. A 123 (1929), pp. 373-390; *ibid.* A 136 (1932), pp. 735-762); i Ellis (1931). En una de les seccions del discurs d'apertura de la segona discussió ("Excitation of nuclei by γ -rays"), Rutherford observava a arrel dels darrers resultats obtinguts per Gray i Tarrant: "The excitation of the nucleus by high frequency radiation is no doubt intimately connected with the processes which give rise to the γ -rays from a radioactive nucleus, and may help to throw further light on this problem".

en termes molt generals, que només s'observessin aquestes radiacions.

Què representaven, però, els diferents nivells? Al paràgraf final del seu article, "Interpretations of the level system", Gray i Tarrant especulaven sense inhibicions. La identitat de les radiacions característiques dels quatre elements que havien investigat suggeria la hipòtesi que no era el nucli sencer el que era excitat, sinó un dels seus elements constituents. Després de identificar provisionalment aquesta "unitat oscil·lant" amb la partícula alpha, Gray i Tarrant reinterpretaven l'estructura de nivells presentada a la figura. Els nivells no representarien els nivells d'excitació d'una única partícula, sinó l'energia total de diverses partícules en un mateix estat excitat (partícules com ara els quatre protons que es creia integraven, junt amb dos electrons, la partícula alpha). L'estat A conté tres partícules en l'únic estat excitat, de 0,5 MeV. En la transició d'una d'aquestes partícules a l'estat fonamental s'emet un fotó de 0,5 MeV, i en la transició simultània de dues d'aquestes partícules, un fotó de 1 MeV. La intensitat relativa de les dues components permet calcular la probabilitat de les transicions "simples" i "duals". L'escassa probabilitat d'una transició triple explica que no s'observin quanta de 1,5 MeV, que no estarien exclosos en principi. Gray i Tarrant resumien així la seva interpretació de la interacció nuclear:⁹²

The balance of evidence thus appears to us to indicate that when gamma radiation of 2 to 3 million volts energy is absorbed by atomic nuclei, the interaction is not with the nucleus as a whole, but with a small group of protons and electrons — such as the alpha particle — which is present as a structural unit in all nuclei. The radiation which is subsequently emitted is the characteristic radiation of the group, and in the case of the alpha particle might result of the independent or simultaneous transition of the four protons to the ground state.

⁹²Gray i Tarrant 1932, p. 685. Rutherford comentava aquesta explicació en la segona discussió sobre l'estructura del nucli (*op. cit.*, p. 740): "[Gray and Tarrant] suggest that the γ -radiation does not excite the nucleus as a whole, but some constituent like the α -particle which is common to all elements. It may be that the characteristic radiations observed represent some of the modes of vibration of the α -particle structure itself".

A primers de març de 1932, Tarrant va enviar a Meitner el seu segon article sobre absorció. Fins aleshores la polèmica entre els experimentadors de Cambridge i Berlin s'havia limitat a l'existència o no d'una radiació dispersada sense variació en la longitud d'ona, i Meitner s'havia sentit prou segura de la superioritat del seu mètode experimental com per criticar obertament els experiments de Tarrant i Gray. La carta de Tarrant, prèvia a l'aparició del darrer article de Meitner i Hupfeld, denota la polarització de les postures dels dos grups d'investigadors. Tarrant avançava alguns dels resultats que estava a punt de publicar amb Gray, que contradeien el resultat més preuat de Meitner:⁹³

We have nearly got our experiment ready for publication now, and I am sure that you will be interested to hear that we have carried out a very sensitive experiment to determine if any radiation is emitted from lead with unchanged wavelength, and found that less than $0,3 \cdot 10^{-27}$ is so emitted (per electron).

El que havia començat com una discrepància menor causada, segons Meitner, per un mètode experimental deficient, es complicava; la professora no devia digerir fàcilment que un parell d'estudiants desafuessin les seves conclusions amb experiments mal dissenyats. La resposta de Meitner no deixava lloc a dubtes: els seus resultats s'oposaven frontalment als obtinguts per Gray i Tarrant:⁹⁴

Els seus resultats m'interessen molt, però no coincideixen amb els nostres en absolut. Nosaltres hem confirmat —crec que amb seguretat— la presència de la longitud d'ona primària en la radiació dispersada, a través d'experiments de dispersió en plom que estan en premsa.

⁹³Tarrant a Meitner, 6-3-1932 (LM 5/19). Gray i Tarrant dedicaven un apèndix de l'article que estaven a punt de publicar a "la possible existència de radiació gamma no modificada en l'emissió secundària del plom", amb resultats negatius.

⁹⁴Meitner a Tarrant, 24-3-1932 (LM 5/19): "Ihre Resultate interessieren mich sehr, aber sie stimmen mit unseren Befunden nicht überein. Wir haben durch Streuversuche an Blei, die jetzt gerade im Drück sind, die primäre Wellenlänge in der Streustrahlung, wie ich glaube, mit Sicherheit festgestellt".

Dues setmanes després, l'article de Gray i Tarrant estava també en premsa. En vista de les discrepàncies, Gray i Tarrant van decidir repetir i estendre les mesures abans de discutir amb Meitner els darrers resultats.⁹⁵ A finals d'agost, en una carta conciliadora de quatre pàgines, Gray i Tarrant manifestaven l'opinió que el desacord entre ells era en gran part un problema d'interpretació, "arising principally through the fact that the softer component of nuclear radiation has approximately the same wave-length as the hard radium C gamma-rays increased in wave-length by scattering through 90°".⁹⁶ En una nota a peu de pàgina del seu darrer article, Gray i Tarrant havien culpat de forma més explícita la disposició experimental usada pels experimentadors de Berlin de la divergència dels resultats:⁹⁷ "The wave-length of the soft component is thus equal to that of hard RaC gamma radiation scattered through about 90°, and, therefore, *could not have been detected by the experimental arrangement employed by Meitner and Hupfeld*".

Pel que fa a la component dura (de major longitud d'ona), Gray i Tarrant reconeixien que la seva "constitució exacta" era "difícil de determinar", i que la seva disposició experimental "is not well suited to an exact determination of absolute absorption coefficients". Tanmateix, també en aquest cas l'assimilació de la component tova de la radiació nuclear amb la radiació Compton dispersada a 90°, podia haver jugat una mala passada a Meitner i Hupfeld. Els físics de Berlin havien assumit que la radiació dispersada en ferro constava només de radiació Compton, i l'havien identificada amb la més tova de les radiacions dispersades en plom. Gray i Tarrant observaven que si aquesta radiació era en realitat una mescla de radiació nuclear tova i radiació Compton, el valor

⁹⁵Chadwick a Meitner, 5-6-1932 (LM 5/3).

⁹⁶Gray i Tarrant a Meitner, 23-8-1932 (LM 5/6). Meitner va marcar aquesta frase amb una ratlla al marge.

⁹⁷Gray i Tarrant (1932b), p. 667n (èmfasi afegit). CL Rutherford a Bohr, 19-10-1932 (BSC-25): "Gray and Tarrant are quite convinced that Meitner's experiments are inconclusive since they were made at the wrong angle to distinguish between Compton and nuclear scattering."

deduït per Meitner i Hupfeld per la radiació dura seria incorrecte. "It seems quite possible", proposaven "that both our estimates of the absorption coefficient of the hard component are somewhat in error in opposite senses, and that agreement will soon be reached regarding the experimental result".

Meitner, absent de Berlin, no va replicar fins l'octubre. Per a ella, les discrepàncies no podien ser només "aparents", i va insistir en la "extraordinària" diferència entre els resultats. Admetia, però, que només es podria decidir "si la radiació dispersada consta només de radiació Compton i radiació primària dispersada coherentment", quan el seu grup hagués repetit les mesures usant ThC'' . Aquests experiments, que havien hagut de ser posposats "per diverses raons", tot just començaven.⁹⁸

CHAO: L'EXCITACIÓ O DESINTEGRACIÓ DEL NUCLI

El tercer laboratori implicat, el maig de 1930, en el descobriment de l'absorció anòmala de raigs gamma, no tenia la solera del Cavendish o el Kaiser-Wilhelm-Institut de Berlin, però tampoc gaire a envejar-los. La perseverància de George E. Hale, un astrofísic convençut de la importància de la recerca bàsica, i la magnificència del capital californià, havien possibilitat la transformació d'una modesta escola tècnica en un centre de recerca ambiciós, el Califòrnia Institute of Technology (Caltech). Batejat el 1920, l'institut féu de Pasadena un oasi en mig del desert institucional de la ciència a la costa Oest. En menys d'una dècada, la recerca a Caltech assoliria el nivell dels centres més prestigiosos d'Europa, als quals sorprendria el 1932 amb l'anunci de l'existència de l'electró positiu."

Robert A. Millikan havia estat un dels membres destacats del professorat original. A finals dels anys vint, Millikan i el seu programa d'investigació de la radiació còsmica dominaven la recerca al Norman Bridge Laboratory de

⁹⁸Meitner a Gray, 5-10-1932 (LM 5/6).

⁹⁹Kevles (1976), pp. 155 i 169; Goodstein (1991).

Caltech.¹⁰⁰ El gran poder penetrant de la radiació, i el fet que no havia pogut detectar cap variació amb la latitud en la intensitat dels raigs, havien convençut Millikan que els raigs còsmics eren fotons de molt alta energia. Aquesta era la hipòtesi més comuna fins el 1928, quan W. Kohlhörster i W. Bothe van argumentar que només una radiació corpuscular podia causar les coincidències que havien observat mitjançant el nou comptador de Geiger i Muller, obrint un agitat debat sobre la naturalesa de la radiació. Millikan hi va participar molt activament, fent de la naturalesa electromagnètica dels raigs el seu cavall de batalla.

L'estudi de les corbes d'absorció de la radiació era la principal eina d'anàlisi de Millikan i el seu grup. Utilitzant les mesures de masses atòmiques d'Aston, la relació entre massa i energia d'Einstein, i extrapolant la fórmula de Dirac-Gordon, Millikan va arribar el 1928 a la conclusió que els fotons incidents podien ser agrupats en tres bandes monocromàtiques, la freqüència de les quals es corresponia amb l'energia alliberada en la formació dels elements més abundants en l'univers a excepció de l'hidrogen. Malgrat la dificultat d'analitzar inequívocament corbes d'absorció, Millikan trobava en aquesta coincidència "evidència definitiva" per a una teoria molt personal sobre l'origen dels raigs còsmics a l'espai interestel·lar, l'anomenada "teoria de formació d'àtoms" (*atom building theory*).¹⁰¹

Els experiments d'absorció de raigs gamma que l'estudiant xinès Chung-Yao Chao inicià a principi de 1929, formaven part del vast programa de recerca de Millikan. Chao, becari de The China Foundation for the Promotion of Education and Culture, havia arribat a Caltech el setembre de 1927.¹⁰² El 1935,

¹⁰⁰Millikan s'havia interessat pels raigs còsmics després de la Primera Guerra Mundial, i les seves contribucions al coneixement del fenomen van ser tan decisives com polèmiques. Millikan va difondre els seus resultats caracteritzant en forma ambigua les aportacions dels físics alemanys, especialment V. Hess i W. Kohlhörster, que havien establert la naturalesa extraterrestre del fenomen entre 1912 i 1914 (de Maria, Ianello i Russo 1991).

¹⁰¹Galison (1987), de Maria i Russo (1989), Kargon (1982).

¹⁰²CaltechArchives.

Millikan diria dels experiments de Chao que s'havien originat en la seva observació (de Millikan) que el nucli de l'àtom de plom intervenia en l'absorció dels raigs còsmics:¹⁰³ És més plausible, tanmateix, que la motivació immediata dels experiments de Chao es trobés en una carta d'Oppenheimer que Millikan va rebre el febrer de 1929.¹⁰⁴ Oppenheimer avisava Millikan que la nova fórmula de Klein i Nishina modificava essencialment les prediccions teòriques:¹⁰⁵

Last year, when you were working on the interpretation of the absorption curves of the cosmic radiation, you asked me with what certainty the formulae of Dirac could be accepted. I answered, I think, that they could be taken as reliable, and that they could not be appreciably altered except by a fundamental change in the equations of physics. As you surely know, I was wrong to insist upon this reliability; the fundamental equations of the theory have in fact been altered; and there is a corresponding change for the absorption coefficient of hard radiation. The new formulae have been worked out by Klein and Nishina, and shown, in the region in which you are interested, to give an absorption differing by as much as fifty percent from that calculated on the older basis.

Millikan es va sentir decebut que la fórmula de Dirac "which actually fits so well, has not the credentials which we thought it had a year ago". La seva resposta suggereix que fins aquell moment no havia dubtat de la validesa d'aquesta fórmula; però també que havia decidit ja comprovar per si mateix la validesa de la nova fórmula d'absorció: "I quite agree with you that we

¹⁰³Millikan (1935), 2a edició (1947), p. 355: "before it was known that positrons were produced by the more energetic of the gamma rays, Bowen, Cameron and I had obtained and presented to the National Academy of Sciences in November, 1929, convincing evidence that the nucleus of the atom of lead plays an appreciable role in the absorption of cosmic rays, and very early in 1929 we asked Mr Chao to test this point carefully with respect to the rays from ThC", using a much narrower and more sharply defined beam than had before been employed, for we wished to improve the accuracy in the measurement of scattering, secondary radiation, and absorption."

¹⁰⁴Tota precaució és poca davant les reconstruccions de Millikan, que podia ser parcial i partidista fins a extrems enutjosos o ridículs. Veure els nombrosos exemples de la idiosincràsia de Millikan que donen de Maria i Russo (1989).

¹⁰⁵Oppenheimer a Millikan, 12-2-1929 (RAM).

need most of all at the present time experimental evidence as to what kind of a scattering formula actually holds, and we are bending every energy here to increase our experimental knowledge of this situation".¹⁰⁶ En el seu estil grandiloqüent, el comentari de Millikan podria significar simplement que havia encarregat un dels seus estudiants de recerca la comparació experimental de les fórmules de Dirac i Klein-Nishina.

La reacció de Millikan va ser característica en un altre sentit. D'entrada, va relativitzar la importància de l'acord numèric dels seus resultats amb les prediccions teòriques;¹⁰⁷ però no es va estar de neutralitzar l'amenaça potencial representada per la nova fórmula de dispersió. Un any després de l'avís d'Oppenheimer, Millikan afirmava que *"the development of the Klein-Nishina formula has strengthened rather than weakened the evidence for the atom-building interpretation of the cosmic rays"*.¹⁰⁸ Els resultats obtinguts recentment per Chao, que mostraven l'existència d'una absorció addicional, conferien certa "lleugera incertesa" a l'extrapolació de la fórmula als raigs còsmics, però aquest punt feble de l'argument no tenia massa importància.¹⁰⁹ La teoria de formació d'àtoms comptava amb un nou fonament teòric.

Com els experimentadors de Cambridge i Berlin, Chao havia detectat el nou fenomen d'absorció mitjançant els raigs gamma del ThC". La seva disposició

¹⁰⁶Millikan a Oppenheimer, 11-3-1929 (RAM).

¹⁰⁷*Ibid.*: "The quantitative fit, however, is only a part of the agreement, so that I do not think that the interpretations which I have given are as yet ready for the discard. There is no other interpretation that I can see for the sequence of frequencies which we observe quite independently of whether there is an exact quantitative fit as to the numerical values or not".

¹⁰⁸Millikan i Bowen (1930), p. 422. La fórmula predeia també prou bé els valors observats per Millikan i Bowen durant l'estiu de 1929, a Arrowhead Lake.

¹⁰⁹*Ibid.*, p. 422: "The weakness in the foregoing argument is that there is some little uncertainty about the legitimacy of extrapolating by means of the Klein-Nishina formula from ThC" rays to rays five times as penetrating. This Klein-Nishina formula is certainly only an approximation, for it assumes that absorption is **proportional** to the number of external electrons and Mr. Chao's results obtained in the Norman Bridge Laboratory show that this is not true even for the ThC" rays, the heavy elements like lead showing an absorption that is greater than that given by the atomic number (or external-electron) law, or even by the mass-absorption law".

experimental era l'habitual en experiments d'absorció:¹¹⁰ "The radioactive source is put in the center of a lead cylinder which is 32 cm long and 32 cm in diameter. A conical beam of semi-angle $2,5^\circ$ is led out for observation. Lead filters of different thickness are used to cut off the soft gamma-rays". La concepció de l'experiment era molt similar a l'adoptada per Meitner i Hupfeld, a excepció del detector. Chao havia usat instruments de mesura de la ionització: un electroscopi dels desenvolupats per Millikan en les seves investigacions de la radiació còsmica, i una cambra d'ionització connectada a un electròmetre de gran sensibilitat.

La primera comunicació de Chao, tres pàgines als *Proceedings* de la National Academy of Science, està datada el 15 de maig de 1930 —deu dies després que l'article de Tarrant, i encara no una setmana després que la nota de Meitner i Hupfeld. Una investigació preliminar del filtre necessari per disposar d'un feix homogeni va convencer Chao que 6,8 cm de plom garantien l'absorció de les components més febles de l'espectre del ThC". Aplicant aquest filtre, Chao estudià l'absorció dels raigs gamma en diferents elements (Al, Cu, Zn, Sn i Pb) i en aigua, mesurant el corrent iònic generat pels raigs abans i després de travessar el material dispersor.¹¹¹

Les mesures de Chao van revelar un augment regular del coeficient d'absorció per electró amb el nombre atòmic contrari a totes les expectatives teòriques. Chao no discutia de forma explícita la validesa de la fórmula de Klein-Nishina, però era l'única amb què comparava els seus resultats, i l'havia usada a discreció en l'anàlisi de les dades. A diferència dels experimentadors de Cambridge

¹¹⁰Chao (1930a), p. 431.

¹¹¹Chao (1930a). Cada material, llevat del plom, va ser investigat a un gruix equivalent a 0,682 cm de plom. Això, juntament amb l'obertura angular del feix de raigs gamma preparat per Chao, motivaria la crítica de Meitner que els resultats de Chao no eren "d'una gran precisió" (Meitner i Hupfeld 1930, p. 165: "Da er für die einzelnen Elemente nicht wie wir, vollständige Absorptionskurven aufgenommen hat, sondern (abgesehen vom Pb) nur je einen Punkt gemessen hat und seine Ausblendung weniger scharf war wie die unsrige, dürften seine absoluten Zahlenwerte, die von den unsrigen etwas abweichen, keine sehr große Genauigkeit besitzen").

i Berlin, Chao es preguntava explícitament per les causes de la discrepància, entre les que destacava, a part de la influència de l'energia de lligam dels electrons extranuclears o l'efecte fotoelèctric, la possibilitat que part de la dispersió es degués als electrons nuclears, "as suggested by Professor Millikan in a report made to the National Academy in Nov., 1929, in which cosmic rays were shown to exhibit this same effect in still greater degree".¹¹²

Per aclarir la naturalesa del fenomen d'absorció anòmal, Chao va iniciar experiments de dispersió. En els mesos següents a l'anunci de l'anomalia, Chao investigà la radiació dispersada per un element lleuger (l'alumini) i un de pesant (el plom), mesurant la intensitat de la radiació dispersada a diferents angles compresos entre $22,5^\circ$ i 135° . La feblesa d'aquesta radiació l'obligà a reduir el gruix del filtre de plom a 2,7 cm. Els resultats dels nous experiments van aparèixer en el número de novembre de *The Physical Review*. Pel que fa a la intensitat de la radiació dispersada per l'alumini, l'acord amb la distribució teòrica donada per la fórmula de Klein-Nishina (secció eficaç diferencial) era "prou bó" (*fairly good*), el que descartava la possibilitat que la fórmula fos incorrecta. Tanmateix, la comparació del quocient entre els corrents d'ionització generats per les radiacions dispersades en plom i alumini, i_{Pb}/i_{Al} , amb la predicció teòrica pel quocient entre les seves energies, E_{Pb}/E_{Al} , mostrava l'existència d'un fenomen de *dispersió* addicional. Si la longitud d'ona de la radiació dispersada fos la mateixa en ambdós casos, la intensitat del corrent d'ionització seria proporcional a l'energia i els dos quocients serien iguals. Per angles inferiors a 90° , i_{Pb}/i_{Al} i E_{Pb}/E_{Al} coincidien dins els marges d'error; per angles més grans, el primer quocient podia ser el triple del segon. Chao conclouïa que "in the case of Pb, beside the normal Compton scattering there is still a kind of anomalous scattering".¹¹³

¹¹²Chao (1930a), p. 433.

¹¹³Chao (1930b), sotmès el 13-10-1930. Chao havia inclòs els primers resultats dels experiments de dispersió en la seva tesi doctoral (Chao, *The absorption coefficient of hard gamma-rays*, tesi doctoral no publicada, Millikan Library, Caltech), acceptada el juny de

Chao no es limita a mesurar la intensitat de la radiació dispersada, sinó també el seu coeficient d'absorció en plom. Novament, l'acord amb la fórmula de Klein-Nishina era molt bó per la radiació dispersada en alumini, mentre que la radiació dispersada en plom presentava un coeficient d'absorció superior al predit per la fórmula. D'acord amb les mesures de *Chao*, aquest coeficient era pràcticament constant ($1,5 \text{ cm}^{-1}$), el que mostrava que la radiació anòmala era monocromàtica. *Chao* xifrava la longitud d'ona d'aquesta radiació en 2.250 fm (0,55 MeV), i a partir de les mesures d'intensitat argumentava que era aproximadament isòtropa.¹¹⁴

Per a *Chao*, aquests resultats mostraven de forma evident que l'anomalia era d'origen nuclear. La "hipòtesi nuclear", per analogia als processos d'absorció extranuclear, admetia dues possibilitats: que l'efecte addicional consistís en un procés de dispersió, o bé en una mena d'absorció fotoelèctrica o excitació nuclear. *Chao* adduïa la isotropia de la radiació addicional per inclinar-se per la segona possibilitat.

Chao va continuar els seus experiments de dispersió a l'Institut de Física de

1930 (Caltech Archives). La tesi és més clara que els primers articles pel que fa a les maniobres experimentals i teòriques de *Chao*. Les mesures de dispersió no admetien una comparació tan immediata amb les prediccions teòriques com les mesures d'absorció. D'una banda, els raigs incident i dispersat eren absorbits en el material dispersor i en la paret frontal de la cambra d'ionització. Aquesta correcció, sense ser molt problemàtica, implicava l'ús d'una fórmula d'absorció, i *Chao* usava la de Klein-Nishina. D'altra banda, la sensibilitat de la cambra d'ionització depenia de la longitud d'ona de la radiació ionitzant, i la imperfecta comprensió teòrica del funcionament de l'aparell feia inevitable la introducció de hipòtesis sobre el tipus de dependència. Gray, enfrontat a problemes similars i a la necessitat de fer nombroses correccions i aproximacions en els seus càlculs, havia acabat reconeixent la feblesa de les seves conclusions. *Chao* indicava vagament, en el seu article, que havia tingut en compte l'absorció dels raigs primaris i secundaris dins el material absorbent, i la diferent capacitat ionitzant dels raigs de diferent longitud d'ona. Indicava també que havia calculat l'energia dispersada en base a dues hipòtesis diferents, assumint que la intensitat dispersada a un cert angle era proporcional "to the number of the extranuclear electrons per cc, i.e. the value predicted by the Klein-Nishina formula", o bé "to the absorption coefficient at the scatterer". *Chao* admetia a la seva tesi que el càlcul era "molt bast" (*very rough*).

¹¹⁴El càlcul de la longitud d'ona no devia diferir massa del presentat a *Chao* (1932), un càlcul elaborat basat en la fórmula de Klein-Nishina.

la Universitat de Halle, Alemanya. La hipòtesi d'una excitació o desintegració nuclear guiava les seves investigacions:¹¹⁵ "És possible assumir una excitació nuclear —que podria estar també relacionada amb una desintegració— amb la consegüent emissió d'un o varis quanta". Aquesta hipòtesi, estretament relacionada amb l'existència d'un valor llindar a partir del qual es posaria de manifest l'efecte, suggeria l'interès d'investigar un rang continu de longituds d'ona. El 1926, el director de l'institut de Halle, G. Hoffmann —el dissenyador de l'electròmetre de gran sensibilitat usat per Chao a Caltech—, havia realitzat mesures d'absorció de la radiació dispersada en carboni a diferents angles. Com Hoffmann, Chao va aprofitar la variació en la longitud d'ona que es dona en l'efecte Compton per investigar l'absorció de raigs gamma de diferents longituds d'ona. Els raigs gamma del ThC'' dispersats a 0, 18, 23, 30 i 36° posseeixen longituds d'ona compreses entre 470 i 5.320 fm (0,26 a 2,33 MeV). Chao en va mesurar el coeficient d'absorció en alumini i plom. La diferència entre els coeficients d'absorció (per electró) en aquests elements, $\Delta\mu = \mu_{Pb} - \mu_{Al}$, disminueix bruscament entre 600 i 700 fm, irregularitat que per a Chao revelava l'existència d'un potencial d'excitació o desintegració nuclears (*Kernanregungspotential oder Zertrümmerungspotential*).¹¹⁶

Chao redactà la comunicació detallada dels experiments a Cambridge, última etapa del seu periple per Occident. Allí va poder discutir els seus resultats i la seva interpretació del fenomen amb Gray i Tarrant abans de sotmetre l'article a publicació, a finals d'octubre. L'article aportava pocs detalls sobre el mecanisme d'absorció nuclear proposat. "La variació en la longitud d'ona [de la radiació anòmala dispersada]", explicava Chao,¹¹⁷

suggests immediately that the nucleus is perhaps first left in an excited state

¹¹⁵Chao (1931), p. 752: "Es liegt nahe, für den Kern eine Anregung anzunehmen, —die auch mit einer Zertrümmerung verbunden sein kann— mit darauffolgender Emission von einem oder mehreren Quanten".

¹¹⁶Chao (1931), nota signada el 25-7-1931. Veure Hofmann (1926).

¹¹⁷Chao (1932a), rebut el 23-10-1931, p. 206.

by the interaction, which might be a disintegration or merely an excitation, and then the emission of one or more new quanta follows. Should such a mechanism exist we should also expect the existence of a nuclear excitation potential or a disintegration potential.

Chao proseguí a Xina el seu estudi de l'absorció anòmala de raigs gamma, però la distància l'aïllà efectivament de les discussions del fenomen que es donaren posteriorment a Europa i els Estats Units. La revista de la Universitat Nacional Tsing Hua, a Peiping, publicà el juliol de 1932 un article extens en què Chao feia balanç de la seva llarga estada de recerca. El caràcter marginal de la publicació pot haver decidit Chao a incloure en l'article fragments de la seva tesi, especialment detalls de la problemàtica anàlisi teòrica. L'única novetat provenia de Cambridge, on Gray i Tarrant havien observat que l'energia total de la radiació dispersada era menor que l'energia de la radiació incident. "Hence", concloïa Chao, "a part of the energy might be lost in some way other than merely exciting the nucleus".¹¹⁸ Un any després, aquestes consideracions havien prèns cos al voltant de la hipòtesi de desintegració nuclear, el mecanisme que Chao proposava en una carta a *Nature* de setembre de 1933, per explicar la interacció dels raigs gamma amb el nucli. Però aquesta proposta arribava fora d'hora, en un moment que la creació i anihilació de parelles electró-positró es perfilava ja com la causa de la radiació dispersada; com Rutherford es va sentir obligat a comentar: "The experiments that [Chao and Kung] describe provide valuable additional evidence of this phenomenon, and would doubtless have been interpreted by them in this way rather than as a nuclear disintegration".¹¹⁹

LA CRÍTICA AÏLLADA DE SKOBELZYN

A París, Skobelzyn analitzava un tipus d'anomalia molt diferent de la detectada a Cambridge, Berlin o Pasadena. El setembre de 1930, Skobelzyn

¹¹⁸Chao 1932, p. 175.

¹¹⁹Comentari afegit per Rutherford a Chao i Kung (1933).

envià finalment a *Zeitschrift für Physik* l'article anunciat un any abans (veure p. 125), un article marcat per una disparitat similar a la de les comunicacions sobre l'absorció anòmala que l'havien precedit el maig. S'hi reportaven "coincidències qualitatives notables" entre la distribució espectral dels electrons secundaris emesos en l'efecte Compton, i les prediccions de la fórmula de Klein-Nishina, més notables encara donada la "contradicció flagrant" (*schroffer Widerspruch*) entre les mateixes dades i les prediccions de la fórmula de Dirac-Gordon. Però s'hi reportava, també l'existència de desviacions sistemàtiques no previstes per la teoria, direccions privilegiades d'emissió dels electrons secundaris, que es manifestaven en forma de màxims i mínims en la seva distribució angular. La fórmula posseïa, d'acord amb els resultats de Skobelzyn, un valor referencial: la intensitat de la radiació secundària oscil·lava "amb amplitud considerable" al voltant del valor predit per Klein i Nishina, el que explicava que en alguns casos —en els punts d'amplitud nul·la— les coincidències quantitatives amb les prediccions de la fórmula fossin tan notables. En general, però, la fórmula tenia només la validesa aproximada d'un promig.¹²⁰

Skobelzyn tornà a Leningrad l'agost de 1931, fent escala a Berlin per visitar el laboratori de Meitner.¹²¹ La major part dels dos anys que havia passat a París s'havia esmunyit en la preparació dels experiments i l'obtenció de clixés; el no menys feixuc treball d'anàlisi va quedar per Leningrad.¹²² Les mesures s'havien realitzat amb els raigs gamma del RaTh (Th²²⁸, un element anterior al ThC'' en la sèrie de desintegració del tori), i un examen provisional va confirmar els resultats obtinguts amb els raigs gamma del radi:

¹²⁰Skobelzyn (1930), sotmès el 27-9-1930. L'article es basava en les dades que Skobelzyn havia obtingut a Leningrad (Skobelzyn a Mme. Curie, 15-7-1930, FJC).

¹²¹Skobelzyn a Meitner, 21-7-1932 (LM 5/16).

¹²²La correspondència de Skobelzyn conservada a l'arxiu de Frédéric i Irene Joliot-Curie conté nombrosos exemples de les dificultats materials i econòmiques que van plantejar les mesures, des del muntatge dels aparells fins a l'adquisició de les fonts de radi necessàries. Les quatre caixes que contenien els clixés, el resultat final d'aquests dos anys de treball, van ser trameses a través de l'ambaixada de l'URRS a París (Curie a Dovgalewsky, 1-7-1931, FJC).

La concordance avec la formula de Klein-Nishina est encore plus nette (le fait qui me semble assez important). Mais cette serie fait apparaitre elle aussi les mêmes écarts certainement systematic que j'ai remarqué dans les quatre series precedantes de Ra(B+C).

Skobelzyn esperava així mateix confirmar la seva nova estimació de la longitud mitjana dels raigs del RaTh, un punt especialment important "en connection avec la question de validité rigoureuse de la formula de Klein-Nishina".¹²³

Les obligacions docents de Skobelzyn van ralentitzar l'anàlisi dels negatius. A primers de març de 1932, Skobelzyn va enviar finalment a Mme. Curie tres manuscrits destinats als *Comtes Rendus* de l'Acadèmia de Ciències de París, que incloïen aproximadament una tercera part de les dades obtingudes durant l'estada a l'Institut du Radium.¹²⁴ Aquestes notes van ser publicades, amb l'interval de temps mínim exigit per l'Acadèmia, entre abril i maig de 1932. La primera d'elles contenia una nova determinació de l'espectre dels raigs gamma del ThC"; les implicacions del nou espectre per a la contrastació de la fórmula de Klein-Nishina eren l'objecte de la segona, on es replantejava el problema de la homogeneïtat dels raigs gamma del ThC".¹²⁵ A la tercera nota es tractava de les anomalies detectades en la distribució angular dels electrons secundaris. La comparació de la freqüència teòrica de distribució dels electrons, donada per

¹²³Skobelzyn a F. Joliot, 17-10-1931 (FJC).

¹²⁴Skobelzyn a Curie, 5-3-1932 (FJC). Als mateixos clixés apareixien raigs còsmics i Skobelzyn va publicar dues notes basades sobre aquest fenomen.

¹²⁵Tant Meitner i Hupfeld com Tarrant o Chao, havien coincidit que un filtre de pocs centímetres de plom produïa un feix monocromàtic. Skobelzyn assegurava que un filtre de 4 cm de plom, com el de Meitner i Hupfeld, deixava passar un 30% de raigs "tous", que els físics de Berlin no havien observat perquè el mètode d'anàlisi de les corbes d'absorció era certament "très peu sensible et peu efficace" per revelar-ne l'existència. D'acord amb les observacions i els càlculs de Skobelzyn, la longitud d'ona mitjana dels raigs del ThC" filtrats per 4 cm de plom seria de 5,1 fm (2,43 MeV), lleugerament superior als 4,7 fm de la component principal. Introduint aquesta correcció, en lloc de l'acord exacte observat per Meitner i Hupfeld pel coeficient d'absorció en elements lleugers (C, O), apareixia una divergència d'un 5%: "L'éventualité des écarts à partir de la formule théorique, dans les limites de cette precision, doit, par consequent, être prise en consideration" (Skobelzyn (1932a, b).

la fórmula de Klein-Nishina, i les corbes experimentals, seguia sent tan satisfactòria com indubtable l'existència de diferències sistemàtiques que superaven els marges d'error. Skobelzyn arribava a una conclusió “definitiva”:¹²⁶

Il subsiste une complication plus ou moins importante dont la théorie ne tient pas compte dans son état actuel... Cet état de choses est à retenir quand il s'agit de l'interprétation des anomalies récemment découvertes dans le cas de l'interaction des rayons très durs avec les atomes lourds.

L'anunci d'aquesta anomalia no va tenir ressonància. Ningú no sembla haver intentat reproduir l'efecte, ni haver-hi parat esment, inclosos els físics que estudiaven l'efecte d'absorció anòmal. Si la detecció d'aquest efecte depenia essencialment, com hem argumentat, de la confiança dels experimentadors en la validesa de la fórmula de Klein-Nishina, podem començar a entendre el per què d'aquesta indiferència. L'excés d'absorció s'associà ràpidament a un fenomen nuclear desconegut; les dades de Skobelzyn es referien a la dispersió dels raigs gamma en electrons, i la seva interpretació exclouïa tota intervenció del nucli (l'única explicació suggerida pel físic rus apuntava a l'acció conjunta dels electrons extranuclears). El mètode d'anàlisi de Skobelzyn posava al seu abast una àrea fenomenològica vetada a la resta d'investigadors, més interessats per les indicacions que el nou fenomen donava de l'estructura nuclear.

La singularitat del mètode de Skobelzyn va fer que els seus dubtes sobre la validesa de la fórmula fossin igualment singulars, dubtes com els que expressà obertament a Meitner (després que aquesta hagués replicat a les crítiques al seu treball amb Hupfeld): "Per què ha de ser absolutament impossible que la teoria estigui equivocada?".¹²⁷ Però Meitner —i es pot assumir que en

¹²⁶Skobelzyn (1932c), p. 1917. En la carta a Curie que acompanyava el manuscrit d'aquesta comunicació, Skobelzyn admetia que les dades referides a angles de dispersió elevats no bastaven per provar irrecusablement l'existència de les desviacions sistemàtiques, i afegia: "Cette histoire reste toujours mysterieuse, mais sans aucun doute il y a quelques chose la dedans!" (Skobelzyn a Curie, 5-3-1932, FJC).

¹²⁷Meitner a Skobelzyn, 5-7-1932; Skobelzyn a Meitner, 21-7-1932 (LM 5/16): "Ist es aber so absolut unmöglich dass die Théorie sich etwas irrt?".

aquest cas la seva actitud era generalitzada— s'havia convençut temps enrera de la validesa de la fórmula: “Bohr m'ha assegurat, després que li ho preguntés directament, que la fórmula de Klein-Nishina és exacta i que les simplificacions necessàries pel càlcul només podrien representar un error d'una fracció de punt com a màxim”. La crítica aïllada de Skobelzyn no va commoure una fórmula avalada no només per Bohr, sinó també per l'experiència.¹²⁸

Skobelzyn no es veia amb cor de publicar un article final resumint els seus resultats, com l'havia instat Mme. Curie; les ocupacions i l'esgotament li feien dubtar que arribés a completar l'anàlisi dels clixés. Skobelzyn acabaria cedint a les pressions acadèmiques per iniciar un nou projecte de recerca sense haver culminat el precedent, un final "deplorable" i "absurd" que el desolà en un moment que d'altres investigadors explotaven algunes de les conclusions que ell havia entrevist.¹²⁹

INCREdulITAT A COPENHAGUEN

Encara que no participés en el descobriment de l'absorció anòmala, un altre físic experimental intervindria de forma recurrent en la discussió del fenomen aportant noves dades experimentals. La posició privilegiada de Jacob C. Jacobsen, membre veterà de la plantilla de l'institut de Bohr, va fer que s'assabentés de la possible existència d'un nou fenomen d'absorció el gener de

¹²⁸Meitner a Skobelzyn, 5-8-1932 (LM 5/16): "Bohr hat mich auf meine direkte Anfrage gesagt, dass die Klein-Nishina-Formel exakt richtig ist und dass die der Rechnung zugrundeliegenden Vereinfachungen höchstens Fehler vom Bruchteil von Prozenten bedingen könnten".

¹²⁹Skobelzyn a Curie, [febrer 1933], Curie a Skobelzyn, 8-3-1933, Skobelzyn a Curie, 24-3-1933 (FJC). En la darrera carta, Skobelzyn es referia amb entusiasme al descobriment del neutró, l'electró positiu, i les *showers* de Blackett ("Ils arrivent le temps dernier des grands événements scientifiques!"), i afegia: "D'après mes propres observations j'ai en le pressentiment de pareils phénomènes (j'ai le droit de le dire)... De mon point de vue tout à fait personnel j'ai seulement à regretter que maintenant je suis tellement en retard avec mon travail". Cf. Skobelzyn a Hanson, 24-10-1960 (citat a Hanson 1963, p. 183): "It is true that as early as in 1931 (but not earlier as you suggested) I, prior to others, observed electron-positron pairs not being able to identify them, however".

1930, a través de la primera carta de Meitner a Klein. Un avantatge que, aparentment, no va aprofitar: només el juliol de 1930, coneguts els resultats de Tarrant, decidí Jacobsen comprovar “*whether the anomalies in the scattering of various elements for hard radiation found by English and German physicists are real*”, segons va descriure Bohr a Nishina l'objecte dels experiments.¹³⁰

La preocupació de Jacobsen i Bohr per la *realitat* de les anomalies denota que, a Copenhaguen, no s'havia efectuat la important distinció entre contrastar la fórmula de Klein-Nishina i posar de manifest un fenomen d'absorció addicional. A l'institut de Bohr es considerà que l'excés d'absorció qüestionava la validesa de la fórmula, i aquesta actitud es reflexa en un disseny experimental peculiar, concebut per comprovar si l'afebliment de la radiació depenia del nombre d'electrons extranuclears, "al marge de tota contrastació de les fórmules teòriques de l'efecte Compton".¹³¹ La peculiaritat era que els materials dispersors es trobaven dissolts. Raigs gamma del RaC, filtrats per 4 cm de plom, incidien sobre un recipient que contenia una dissolució (de CuCl_2 , AgNO_3 , FeCl_3 ...), i es mesurava amb un electròmetre de fulles d'or el corrent iònic generat pels raigs que la travessaven. La igualtat dels corrents de dues dissolucions s'interpretava com una igualtat en el seu poder dispersor, i l'anàlisi química mostrava després si el nombre d'electrons per cm^3 era el mateix en ambdós casos.

En poques setmanes, Jacobsen analitzà divuit dissolucions. El seu mètode només permetia comparar-ne el poder absorbent, però això bastava per mostrar que "l'afebliment de la radiació està clarament determinat pel nombre d'electrons".¹³² Els seus experiments no revelaven, de moment, la presència de cap efecte Meitner-Hupfeld. L'única excepció era la dissolució de plom, en forma

¹³⁰Bohr a Nishina, 4-8-1930 (NMF 1984, p. 17; èmfasi afegit). Bohr a Meitner, 8-8-1930 (LM 5/2): "Seit einigen Wochen sind die Versuchen von Jacobsen[...] im Gange".

¹³¹Jacobsen (1930), p. 951: "ganz abgesehen von einer etwaigen Prüfung der theoretischen Formeln für den Comptoneffekt".

¹³²*Ibid.*, p. 952: "die Schwächung der Strahlung eindeutig durch die Zahl von Elektronen bestimmt wird".

de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, que presentava una absorció per electro entre un 10 i un 15% superior a la de la resta de solucions. A primers d'octubre, Jacobsen envià una nota a *Die Naturwissenschaften* amb aquests resultats provisionals, i quinze dies després envià el manuscrit a Meitner, junt amb un esbós de la disposició experimental.¹³³ Les dades de Meitner referents a l'absorció en carboni i alumini dels raigs del RaC s'adeien amb els resultats de Jacobsen, però l'acord va durar poc, el temps que va necessitar Meitner per mesurar l'absorció dels raigs en plom, i obtenir un valor molt superior al de Jacobsen.

Per a Meitner, l'origen de la discrepància es trobava clarament en el mètode de Jacobsen, especialment en l'ús de dissolucions. Per exemple: de cada 100 electrons dispersors en la solució de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, la més densa utilitzada per Jacobsen, només 16 corresponien a l'àtom de plom; si l'absorció en aquest element augmentés un 40%, l'augment del poder absorbent de la dissolució seria només del 6%. Jacobsen, a més, havia proporcionat inadvertidament a Meitner un altre argument, en reconèixer en una de les cartes que havien intercanviat que les mesures depenien enormement de la disposició geomètrica de l'experiment.¹³⁴ Per a Meitner les conclusions de Jacobsen, de les que se seguia que els seus propis experiments eren "falsos", no estaven en absolut justificades.

Meitner exposà aquestes crítiques a Bohr, a qui, després d'una visita a Berlin el juliol, creia darrera els experiments de Jacobsen. La confiança de Meitner en la seva disposició experimental, que garantia "una mesura immillorable", nodria la seva certesa que la dispersió no venia donada en tots els casos per la fórmula de Klein-Nishina.¹³⁵ La resposta de Klein (per Bohr) denota l'escepticisme amb què van ser seguits a Copenhaguen els experiments dels

¹³³Jacobsen a Meitner, 14-10-1930; Meitner a Jacobsen, 22-10-1930 (LM 5/9).

¹³⁴Jacobsen a Meitner, 3-11-1930 (LM 5/9).

¹³⁵Meitner a Bohr, 24-11-1930 (LM 5/2): "Ich glaube wirklich, dass unsere Anordnung[...] ein sehr einwandfreie Messung garantiert. Aus unseren Resultaten ergibt sich aber dann sicher, dass die Streuung nicht unter alien Umständen durch die Klein-Nishina Formel dargestellt wird".

físics berlinesos. Descartada la possibilitat que el fenomen fos característic dels raigs gamma del ThC", Klein adduïa els resultats de Jacobsen amb el RaC per subratllar el caràcter anòmal, "completament inesperat del del punt de vista teòric", de l'absorció addicional detectada per Meitner. Mentre les mesures de Jacobsen mostraven un augment regular de l'absorció, "del tipus que caldria esperar a causa de l'influx en els elements pesants de l'efecte fotoelèctric habitual", la corba de Meitner mostrava una acció ressonant, "que no augmenta de forma senzilla amb el nombre atòmic, sinò que és més accentuada per certes substàncies de pes atòmic medi; una acció l'explicació teòrica de la qual és molt obscura." A Copenhaguen es resistien a admetre l'existència d'un nou fenomen d'absorció.¹³⁶

Vuit mesos van transcórrer abans que Jacobsen publicés una descripció detallada dels seus experiments. Les crítiques de Meitner, i la necessitat de comparar els seus resultats amb els dels físics de Berlin, motivaren noves investigacions amb ThC" que van modificar substancialment la posició del físic danès. Pel maig de 1931, Jacobsen havia reconegut l'existència de l'efecte Meitner-Hupfeld, l'augment del coeficient d'absorció per electró amb el nombre atòmic. Però no es tractava exactament de l'efecte descrit per Meitner i Hupfeld. L'augment era regular i no presentava les variacions brusques que tan preocupaven el grup de Berlin —encara que el mètode de Jacobsen no li permetés investigar l'alumini, l'element crític per a Meitner. Jacobsen guardava silenci sobre l'explicació del fenomen.¹³⁷

Bohr va acceptar finalment la inadequació de la fórmula com un senyal més

¹³⁶Klein a Meitner, 3-12-1930 (LM, 5/10): "Während es sich bei Jacobsen um einen regelmässigen Anstieg handelt etwa von den Art wie man ihn wegen des Einflusses des gewöhnlichen Photoeffekts bei den schwereren Elementen erwarten könnte, deuten Ihre Punkte auf das Vorhandensein einer resonanzartigen Wirkung hin, die nicht einfach mit der Atomnummer ansteigt, sondern für gewisse Stoffe mittleren Atomgewichts besonders ausgeprägt ist, eine Wirkung deren theoretische Erklärung ja noch ganz dunkel ist".

¹³⁷Jacobsen (1931), p. 158: "Über den Ursprung der gefundenen Abweichungen von der reinen Elektronenstreuung geben die Resultate zunächst keinen Aufschluß."

dels límits d'aplicabilitat de la mecànica quàntica relativista. D'acord amb les idees que havia exposat en el congrés de Roma (octubre 1931), no era la dispersió de fotons per electrons lliures que presentava problemes, sinó la dispersió en electrons lligats, ja que en aquest cas era possible la transició als ominosos estats d'energia negativa.¹³⁸ Pauli va treballar sobre la hipòtesi que l'efecte addicional fos conseqüència de l'energia de lligam dels electrons, i exposà les seves reflexions a Bohr. Només en aquest sentit s'ha d'entendre la rèplica d'aquest: "Veig que t'has adonat que n'és de difícil extreure alguna conclusió definida sobre la validesa de la fórmula de Klein-Nishina a partir dels experiments de *Fräulein* Meitner; l'escàs nombre d'electrons *K* fa que les desviacions de la fórmula siguin molt petites fins i tot per elements pesants".¹³⁹

La significació del seu treball per la investigació dels raigs còsmics representava, com hem vist, una de les motivacions més importants dels experimentadors que van estudiar l'absorció anòmala dels raigs gamma, d'acord amb l'interès despertat pel fenomen a finals dels anys vint. La fórmula de dispersió de Klein i Nishina va generar expectatives d'una anàlisi precisa i fiable de la radiació còsmica, però aquesta possibilitat s'esvaï ràpidament. L'absorció addicional invalidava el càlcul de l'absorció total per energies de l'ordre de 1 MeV; si la fórmula ja no permetia deduir la longitud d'ona dels raigs gamma a partir de mesures d'absorció, com podia ser emprada per calcular la longitud d'ona de raigs d'energia molt superior? L'extrapolació necessària semblava difícilment justificable, i només partidaris entusiastes de la hipòtesi ondulatoria de la na-

¹³⁸Bohr (1932), p. 125.

¹³⁹Bohr a Pauli, 8-12-1931, [PB II, 285, original en danès]: "Nach Deinem letzten Nachtrag entnehme ich ja auch, daß Du eingesehen hast, wie schwierig es ist, aus Fraulein Meitners Versuch etwas bestimmtes über die Gültigkeit der Klein-Nishina-Formel zu schließen; die geringe Anzahl der *K*-Elektronen bewirkt ja, daß die Abweichung von der Formel selbst für schwere Stoffe sehr klein bleiben muß." Veure el comentari a aquesta carta (*ibid.*, p. 96) i Rueger (1992) per una comparació de les reaccions de Bohr i Pauli als problemes de l'electrodinàmica quàntica.

turalesa dels raigs, com Eric Regener o Millikan, van seguir aplicant la fórmula a pesar de l'absorció nuclear.¹⁴⁰

Però descartat el que unànimament havia estat considerat, des de la seva aparició, com el camp d'aplicació més prometedor de la fórmula, els experimentadors no van tardar a trobar una motivació tan o més poderosa. No estava el nou fenomen d'absorció, segons tots els indicis, causat pel nucli? La investigació detallada del nou fenomen, de la seva variació amb el nombre atòmic, amb l'energia dels raigs incidents o el nombre d'electrons nuclears lliures, obria noves vistes sobre l'estructura nuclear, i la fórmula de Klein-Nishina era tan essencial a aquesta recerca com una font intensa de raigs gamma o un detector sensible, perquè permetia suprimir un dels sorolls de fons més importants de les mesures d'absorció. El nucli substituï els raigs còsmics en l'horitzó dels físics experimentals interessats en la dispersió dels raigs gamma.

EL DESVETLLAMENT DELS MECANISMES D'ABSORCIÓ

El setembre de 1932, Carl D. Anderson va anunciar l'existència d'una partícula de càrrega positiva amb la massa de l'electró. Pocs mesos després, Blackett i Occhialini aportaven evidència massiva de l'existència de l'electró positiu i l'identificaven amb l'antielectró de Dirac.¹⁴¹ El positró seria la clau per la clarificació dels processos d'absorció i dispersió dels raigs γ ; Blackett i Occhialini assenyalaven ja la possible incidència de la creació i anihilació de parelles en l'absorció de raigs gamma, i relacionaven aquest procés amb les radiacions secundàries detectades per Gray i Tarrant.¹⁴²

¹⁴⁰Veure Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), p. 492; "Discussion on ultra-penetrating rays", Proc. Roy. Soc.A **132** (1931), 331-352; Hoffmann (1932), p. 655: "Der Schluß von den Absorptionskoeffizienten der Komponenten auf Wellenlangen der Strahlung macht dann Gebrauch von eine Extrapolation der schon auf dem Gebiet der harten gamma-Strahlen wegen der Kerneffekt nicht vollgültigen Formel von Klein-Nishina." I això si es tractava realment d'una radiació de tipus gamma.

¹⁴¹Veure Maria i Russo (1985) pel descobriment del positró i la bibliografia rellevant.

¹⁴²Blackett i Occhialini (1933), p. 716.

Perhaps the anomalous absorption of gamma radiation by heavy nuclei may be connected with the formation of positive electrons and the re-emitted radiation with their disappearance. The re-emitted radiation is, in fact, found experimentally to have an energy of the same order as that to be expected for the annihilation spectrum.

Però l'impacte d'aquesta connexió explícita no fou immediat, ni tan sols sobre els investigadors del Cavendish. La lenta incorporació del positró a la imatge del procés d'absorció constitueix el tema de fons més important de la darrera etapa de la contrastació experimental de la fórmula de Klein-Nishina, la més controvertida i polèmica. Als investigadors que havien descobert l'absorció anòmala s'afegiren d'altres atrets per les discrepàncies, i físics de la vèlua d'Oppenheimer, Fermi o Heisenberg van intentar explicar l'excés d'absorció. A finals de l'estiu de 1932, els dos grups que més s'havien implicat en la comprensió del fenomen van intercanviar les armes pel duel final.

BERLÍN

La darrera sèrie d'experiments amb Hupfeld havia convençut Meitner que el nucli atòmic era capaç de dispersar els raigs gamma sense variació en la longitud d'ona. Un disseny experimental simple i un detector extremadament sensible constituïen els seus millors arguments. Però els resultats d'aquests experiments, en què s'havia usat una font de radi, diferien dels obtinguts pels físics del Cavendish, que havien usat una font de ThC'' . Per a Meitner, l'aclariment de la qüestió passava per repetir les mesures amb ThC'' . L'octubre de 1932, Meitner començà a preparar els experiments amb l'ajut d'un nou col·laborador, Heinz Kösters.

Aprofitant el muntatge experimental i l'experiència adquirits en els experiments amb Hupfeld, el treball progressà ràpidament; abans de cap d'any les mesures havien finalitzat.¹⁴³ L'anàlisi dels resultats va ser més problemàtica. A finals de març, després de tres setmanes de càlculs, Meitner començava a

¹⁴³Meitner a Dessauer, 10-1-1933 (LM 5/4): "Die von Herrn Hupfeld und mir ausgeführten

dubtar que les mesures fossin correctes.¹⁴⁴ Però poc després descobria un error en els càlculs de Kösters i, per la seva satisfacció, confirmava les conclusions a què havia arribat amb Hupfeld.¹⁴⁵ Meitner esperava dels raigs gamma del ThC", més energètics que els del RaC, que induïssin la radiació nuclear en elements més lleugers que el plom, i els nous resultats van confirmar les seves expectatives: la corba d'absorció a 90° de la radiació dispersada en ferro era ara molt similar a la del plom, i mostrava la presència d'una radiació de la mateixa longitud d'ona que la radiació incident.¹⁴⁶

Durant la primera etapa dels experiments, la noció de dispersió nuclear à la Rayleigh havia actuat per a Meitner com a hipòtesi teòrica de caràcter molt general. L'article amb Kösters incloïa dues consideracions més específiques sobre el mecanisme de dispersió addicional. La primera incorporava el neutró —descobert per Chadwick a principi d'aquell mateix any. En qüestió de setmanes seguint l'anunci de Chadwick, Heisenberg va concebir un nucli format per protons i neutrons a base de "rellegar les dificultats més importants al neutró, i procedir al nucli mitjançant la mecànica quàntica".¹⁴⁷ Heisenberg el·laborà el seu model en una sèrie de tres articles, "Sobre la constitució dels nuclis atòmics", completats entre juny i desembre de 1932.¹⁴⁸

Streuerexperimente sind inzwischen unter Mithilfe eines anderen Mitarbeiters fortgesetzt und bis zu einem gewissen Abschluss gebracht worden und daher momentan nicht im Gange."

¹⁴⁴Meitner a Hahn, 21-3-1933 (OH): "Ich bin über die Streumessungen von Kösters ziemlich unglücklich; nachdem ich 3 Wochen daran herumgerechnet habe, bin ich jetzt zweifelhaft geworden, ob die Messungen in Ordnung sind."

¹⁴⁵Meitner a Hahn, 2-4-1933 (OH): "Ich bin eben dabei die ganzen Köster'schen Messungen nachzurechnen, was eine ziemliche Arbeit ist. Er hat sich, wie ich schon festgestellt habe, mehrmals verrechnet, was den Charakter seiner Kurve recht erheblich ändert und befriedigenderweise in bessere Übereinstimmung mit den früheren Hupfeld'schen Messungen bringt."

¹⁴⁶Meitner i Kösters (1933).

¹⁴⁷Heisenberg a Bohr, 20-6-1932 (BSC-20): "Die Grundidee ist: alle prinzipiellen Schwierigkeiten auf das Neutron abzuschieben und in Kern Quantenmechanik zu treiben." Els problemes plantejats pels electrons nuclears havien fet proclamar Bohr la inaplicabilitat de la mecànica quàntica al nucli.

¹⁴⁸Heisenberg (1932b, c, 1933). Veure Bromberg (1971), Brown i Rechenberg (1989),

La segona part de la trilogia contenia una secció dedicada a la dispersió de raigs gamma pel nucli. A partir de la dependència aproximada de l'absorció addicional amb el nombre de neutrons nuclears al quadrat (n^2), Heisenberg justificava la hipòtesi que el procés de dispersió era anàleg a la dispersió Rayleigh —que depèn d'aquesta manera del nombre d'unitats dispersores. Això afavoria "la tesi defensada per Meitner i Hupfeld, que la radiació dispersada té la mateixa freqüència que la incident".¹⁴⁹

Heisenberg va modificar el seu raonament, però no la seva conclusió, en el tercer article de la trilogia. El que determinava el tipus d'interacció de la radiació incident amb els neutrons no era la proporcionalitat amb n^2 —que no exclouia la possibilitat d'una dispersió Raman, amb canvi de freqüència—, sinó l'estat de moviment dels neutrons.¹⁵⁰ A primers de novembre, Heisenberg explicà Bohr la solució del problema.¹⁵¹

Cassidy (1991).

¹⁴⁹Heisenberg (1932c), p. 161: "Die Experimente lassen sich durch die Gleichung [$\sigma_{\text{nucli}} \propto n^2$] einigermaßen befriedigend darstellen und sprechen daher zugunsten der von Meitner und Hupfeld vertretenen These, daß die gestreute Strahlung die gleiche Frequenz hat, wie die einfallende." Heisenberg no deixava de referir-se als experiments, contraris a aquesta hipòtesi, de Gray i Tarrant. En privat, Heisenberg reconeixia la incertesa de la situació (Heisenberg a Bohr, 18-7-1932, BSC 20, èmfasi afegit): "Mit den Experimenten ist die erste Annahme $\sigma_{\text{Kem}} = \sigma_{\text{Neutr}} \propto n^2$ gut verträglich, die Messungen sind ja sehr unsicher, wenn man vorher den Photoeffekt abzieht. Ich möchte also mit Frl. Meitner glauben, dass die Streuung kohärent ist."

¹⁵⁰La intensitat de la radiació dispersada depèn del moment dipolar del neutró, la partícula dispersora. El moment dipolar del neutró depèn al seu torn de les forces electromagnètiques i nuclears que exerceixen la resta de partícules del nucli. Si els protons i neutrons del nucli estan en repòs, els moments dipolars són constants i la radiació dispersada pel nucli es de tipus Rayleigh. Si els neutrons i protons oscil·len, l'amplitud d'aquesta radiació dispersada varia periòdicament amb la posició de les partícules, i la radiació dispersada es descomposa en varies freqüències, "en total analogia a l'espectre Raman de les molècules".

¹⁵¹Heisenberg a Bohr, 5-11-1932, BSC-20: "Die kohärente Streustrahlung der Neutronen, die für die Streuexperimente (Tarrant u.s.w.) nach meiner Ansicht massgebend ist, hat nur, wenn die Neutronen als ruhend angenommen werden, die gleiche Frequenz wie die einfallenden Strahlung. Schwingen aber die Neutronen, so spaltet diese kohärente Strahlung à la Raman in verschiedene Frequenzen auf; die Gesamtintensität verhält sich aber noch, wie bei ruhenden Kernen, geht also insbesondere mit n^2 . Ich glaube, dass man damit die Experimente sehr gut darstellen kann".

La radiació coherent dispersada pels neutrons, que crec que és decisiva pels experiments de dispersió (Tarrant, etc.), té la mateixa freqüència que la radiació incident si se suposa que els neutrons estan en repòs. Si els neutrons oscil·len, en canvi, aquesta radiació coherent a la Raman es descomposa en vàries freqüències; però la intensitat total varia de la mateixa manera que per nuclis en repòs, és a dir, segons n^2 . Crec que d'aquesta manera es poden explicar molt bé els experiments.

A pesar que li eren favorables, Meitner no acollí amb entusiasme les explicacions de Heisenberg. Part de les seves reticències tenien a veure amb la inadequació quantitativa d'algunes de les prediccions de Heisenberg.¹⁵² Però la seva causa més aparent era que l'article incloïa una explicació teòrica alternativa de l'efecte Meitner-Hupfeld.

La proposta provenia del físic teòric que assessorava en aquells moments els investigadors del Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie. Les profundes innovacions teòriques i conceptuals dels darrers anys havien fet que Meitner procurés tenir a mà un "consiliari teòric", capaç d'orientar els seus col·laboradors en el laberint de la teoria quàntica o la física del nucli. L'abril de 1932, Meitner havia consultat Bohr sobre la conveniència que Max Delbrück ocupés el càrrec. També Pauli hi havia pensat com a assistent, però Delbrück, més interessat ja per la biologia que per la física, va acceptar "Lise Meitner's offer to go to Dahlem as her 'family-theoreticist' [...] largely because of the neighbourhood of the very fine Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, to which I am entertaining friendly relations".¹⁵³ En un breu apèndix a l'article de Meitner i Kösters,

¹⁵²La raó entre les intensitats de la radiació dispersada en Pb i Fe era 3:1, el que atenent al nombre de neutrons (82 i 26, respectivament) donava una variació lineal, i no quadràtica. Heisenberg havia donat també una llei $1/\lambda^4$ per la variació de la intensitat de la radiació dispersada amb la longitud d'ona de la radiació incident. Però els resultats de Meitner indicaven que la intensitat corresponent a una radiació incident de 470 fm era només el doble de la corresponent a una radiació incident de 670 fm, i no quatre vegades més gran (Meitner i Kösters 1933, p. 143).

¹⁵³"Theoretischer Berater", Meitner a Pauli, 24-5-1932 (LM 5/13). Cf. Pauli a Meitner, 29-5-1932 [PBII 291] i el comentari precedent. La saga dels *Haustheoretiker* de Meitner

Delbrück atacava la concepció de Gray i Tarrant afirmant que la dispersió addicional no podia "en absolut" (*überhaupt nicht*) venir donada per l'estructura nuclear, sinó només per la càrrega del nucli i la freqüència de la radiació incident. Delbrück va recórrer a la teoria del positró de Dirac per descriure el fenomen com un "efecte *fotoelèctric* sobre un dels infinits electrons que[...] omplen l'espai amb una densitat infinita". Com tots els estats d'energia negativa estan ocupats, l'electró només podia tornar al seu estat inicial, i en fer-ho emetia un fotó de la mateixa freqüència que l'incident.¹⁵⁴

La hipòtesi de Delbrück va ser discutida a la *Physikalische Woche* de Zurich, el juny de 1933. La seva era una de les primeres aplicacions que trobava la teoria del positró de Dirac, i va aconseguir modificar l'actitud de Pauli vers la teoria. Com escrivia a Heisenberg després de la conferència:¹⁵⁵

La "teoria dels forats" és especialment interessant en relació a la dispersió anòmala dels raigs γ . Delbrück i Peierls han observat independentment que la teoria podria proporcionar una explicació simple d'aquest fenomen, sense haver de recórrer a l'estructura del nucli, ni a la possibilitat que el neutró es desintegri en electró i protó —la teva idea favorita, que detesto.

s'inicia el 1930 amb J. Kudar (PB II, p. 200). Meitner s'interessà després per G. Beck (Meitner a Heisenberg, 21-2-1931, Heisenberg a Meitner, 23-2-31, LM 5/7). Abans de Delbrück, Casimir passà dos mesos a Berlin cobrint específicament aquesta posició a l'espera de convertir-se en assistent de Pauli (PBII, p. 113). Delbrück abandonaria Berlin i la física el 1937 (Meitner a Heisenberg, 17-2-1937, LM 5/7; Hayes 1982; Fischer 1985, p. 56).

¹⁵⁴Veure p. 93. Aquest tipus d'interacció entre el fotó i el nucli es coneix avui com a *dispersió Delbrück*. És la dispersió de llum per llum quan un fotó incident i un fotó secundari són reals, i la resta virtuals (Pais 1986, Jauch i Rohrlich 1955). Cf. Wheeler (1979), p. 246: "Could not the incoming γ -ray, quite apart from creating a real electron pair in the electric field of force of the nucleus, create there temporarily a virtual electron pair? Could not that pair, upon annihilating, send off a γ -ray of the original energy into a new direction?". Delbrück va desenvolupar el model de dispersió coherent a la seva *Habilitationschrift*, presentada el febrer de 1934 (Meitner a Jacobsen, 2-2-1934, LM 5/9).

¹⁵⁵Pauli a Heisenberg, 14-7-1933 [PBII 314]: "Von besonderem Interesse ist aber die Löchertheorie im Hinblick auf die anomale Kernstreuung der γ -Strahlen. Delbrück und Peierls haben nämlich unabhängig voneinander darauf hingewiesen, daß diese vielleicht eine einfache Erklärung für diese liefern kann. Dabei kommt weder die Struktur des Kernes im allgemeinen, noch Deine mir verhaßte Lieblingsidee, daß das Neutron in Elektron und Protón zerlegt werden kann, als Erklärungsgrund vor."

Meitner, que acabava de completar l'article amb Kòsters, va aprofitar l'ocasió per defensar convincentment la conclusió principal del treball dels darrers quatre anys:¹⁵⁶ "Meitner ha parlat d'experiments que mostren sense cap mena de dubte l'existència d'una radiació dispersada de la mateixa longitud d'ona que la incident, en tots els nuclis que presenten la dispersió anòmala. (El muntatge de Gray i Tarrant té defectes experimentals)." La seva defensa no va quedar incontestada; en una altra sessió de la conferència, Blackett considerava molt probable "that the main part of the anomalous absorption of gamma rays by heavy elements is due to the creation of positive electrons and the main part of the scattered radiation to their annihilation". Per a Meitner, tanmateix, la creació de positrons (reals) només representava una correcció menor al coeficient d'absorció per efecte fotoelèctric.¹⁵⁷

L'actitud de Meitner respecte el positró revela el poder de les seves conviccions. Meitner havia estat un dels primers investigadors de mostrar que els positrons eren creats en el pas dels raigs gamma del ThC'' a través de la matèria, però no reconeixia la seva presència en un dels processos que estava contribuint a l'acceptació general de la nova partícula.¹⁵⁸ La convicció que el fenomen d'absorció addicional era una dispersió coherent en el nucli podia més que l'evidència creixent que la creació de parelles electró-positró *reals*, no virtuals, era el principal responsable del fenomen.¹⁵⁹

¹⁵⁶*Ibid.*: "Zunächst muß ich bemerken, daß Frl. Meitner über Versuche berichtete, aus denen unzweifelhaft die Existenz einer zusätzlichen Streustrahlung von unveränderter Wellenlänge bei alien anòmal streuenden Kernen hervorgeht. (Die Anordnung von Gray und Tarrant enthält experimentelle Fehler)."

¹⁵⁷Meitner (1933), p. 450. La correcció es podia avaluar, a partir del número de positrons observats, en un 5%. "Das ist aber fast genau der Betrag, um den der Wert von τ zu gross erhalten wurde".

¹⁵⁸Meitner i Philipp (1933b); veure p. 94. Meitner i Philipp no feien referència a la creació de parelles electró-positró, sinó a la creació de positrons en la interacció dels raigs gamma amb el nucli.

¹⁵⁹Veure Frisch (1970), p. 414: "[Meitner] was convinced of the power of the human mind to arrive at correct conclusions from the great laws of nature. When that conviction misled her[...] the recognition that she had been wrong was a shock as if nature had been unfait to

El treball de Meitner no va acabar amb la col·laboració amb Kösters. Una de les crítiques de Gray i Tarrant (que a 90° una radiació d'anihilació de 2.500 fm difícilment es podria distingir d'una radiació Compton de 2.800 fm) va propiciar mesures a 60° . Aquests experiments, a càrrec de G. F. v. Droste, van confirmar la visió de Meitner, però els resultats no van arribar a ser publicats: una imatge completament diferent del procés d'absorció s'havia ja imposat.¹⁶⁰

CAMBRIDGE

Gray i Tarrant van continuar amb els seus experiments durant la segona meitat de 1932 i la major part de 1933. La intensitat de la seva dedicació disminuï. Gray s'havia doctorat el 1931, i la beca de Trinity li havia permès seguir amb la recerca al Cavendish; però poc després va respondre a la demanda d'un hospital de Londres que buscava un físic per la investigació del tractament del càncer.¹⁶¹ Gray va ocupar la plaça a condició de poder continuar amb la recerca al Cavendish, però Tarrant va haver de responsabilitzar-se de fet de completar la investigació.¹⁶² Tarrant, per la seva banda, va llegir la seva tesi un any i mig després que Gray, el desembre de 1932.¹⁶³ Finalitzada l'estada al Cavendish, les perspectives de continuar la recerca en física semblen haver estat

her devoted work," Cf. Frisch a Stuewer (1979), p. 75: "he sometimes was very convinced of what would be the outcome of an experiment[. . .] I am sure that [her] conviction sometimes held her back".

¹⁶⁰Meitner a Frisch, [octubre 1934] (ORF A179): "Droste hat jetzt endlich der Streukurve für Streustrahlung unter 60° fertig, die unveränderte Wellenlänge hat erhebliche stärkere Intensität als unter 90° ."

¹⁶¹Les creences religioses de Gray (membre d'un actiu grup metodista) poden haver estat tan decisives com la crisi a l'hora de decantar la carrera de Gray cap a la radiobiologia: "[Gray] was becoming aware that there were perhaps things the world needed more urgently than nuclear physics" (Loutit i Scott 1966, p. 199).

¹⁶²Tarrant a l'autor (8-3-1992): "Once [Gray] knew what his future work was to be he spent time preparing for it. This left me to do much of the work of analysing the results of the scattering measurements"; cf. Tarrant a Wynchank, 19-8-1989 (AIP): "I seem to remember that I was responsible for the main part of the work of analysing the absorption curves and developing the necessary corrections."

¹⁶³Tarrant, *The Interaction of High-Energy Gamma Radiation with Atomic Nuclei*, tesi doctoral no publicada, desembre 1932 (ULC).

escasses, i Tarrant acceptà una plaça de mestre a Manchester sense esperar que es concretessin.¹⁶⁴

L'article completat per Gray i Tarrant l'abril de 1932 contradeia la conclusió més important de Meitner. Si les discrepàncies havien decidit Meitner a repetir les mesures amb ThC'' , els físics del Cavendish van decidir repetir-les amb RaC . Gray i Tarrant concebien la interacció amb el nucli com l'excitació d'un dels seus constituents, la partícula alpha, seguida de l'emissió de radiacions característiques. La tesi de Tarrant mostra que, a finals de 1932, aquesta seguia sent pels investigadors anglesos la hipòtesi més plausible.¹⁶⁵ Aquest mecanisme de dispersió nuclear marcava la línia a seguir en properes investigacions:¹⁶⁶

There remains, therefore, for the future two main problems. The first being to discover what happens to that portion of the incident gamma radiation which is greater than the excitation potential of atomic nuclei, while the second is to ascertain the manner in which the nucleus gets rid of that part of the minimum quantum energy which is not re-radiated as characteristic nuclear radiations.

¹⁶⁴Tarrant a l'autor (8-3-1992): "When my time came to leave the Cavendish the only job which appeared suitable for me in University work was in Soil physics but the Professor involved was in Irinedad and was not due to return till a month after my money ran out. If I had had £50 I would have relied on Rutherford's influence and waited. But I did not and had a wife and a child. So I accepted a post teaching physics at Manchester Grammar School." Ward, que s'havia doctorat al Cavendish dos anys abans, constata l'escassetat de llocs de treball i afegeix: "in 1933[...] the Depression was in full swing" (Ward 1987, p. 81).

¹⁶⁵Tarrant, tesi doctoral, p. 119: "Since the nuclear characteristic radiations are the same from all elements, and since the whole phenomenon varies smoothly as the square of the atomic weight, it is likely that this incident gamma radiation is exciting some constituent of all nuclei which contains at least three particles. As a provisional hypothesis we may therefore assume that the associated group is the alpha particle inside the nucleus, and that the excited particles are the protons from which these alpha particles are built. If all four of the protons inside the alpha particle have to be given the same energy simultaneously the excitation can only be performed by radiation having a higher energy than $2 \cdot 10^6$ e-volts; but, in agreement with experiment we could then only expect to observe three of the corresponding scattered quanta, because the last transition to ground level of the alpha particle would produce radiation of exactly the correct energy to resonate with all other particles in all atomic nuclei."

¹⁶⁶*Ibid.*, p. 119.

La investigació d'aquestes questions acabaria amb la hipòtesi que les havia suggerides. Però entre la presentació de la tesi de Tarrant i novembre de 1933 (quan Gray i Tarrant van enviar a la Royal Society el seu darrer article conjunt), la interpretació del fenomen seria revolucionada per l'entrada en escena del positró i l'extensió de la controvèrsia.

L'EXTENSIÓ DE LA CONTROVÈRSIA

La suggerència de Blackett i Occhialini ("Perhaps the anomalous absorption of gamma radiation by heavy nuclei may be connected with the formation of positive electrons and the re-emitted radiation with their disappearance") va ser quantificada per Oppenheimer i Plesset el juny de 1933, que van mostrar que l'anihilació a dos fotons en presència del nucli bastava per explicar la radiació de 0,5 MeV. Pel que fa a la component de 1 MeV, Oppenheimer i Plesset afirmaven amb cautela que el seu origen "is not altogether clear. It is possible that it arises by the annihilation of a positive in a process in which only one quantum is radiated, and an electron or nucleus takes up a small recoil momentum".¹⁶⁷ Poc després, Fermi i Uhlenbeck mostraven tanmateix que aquest procés no podia explicar de cap manera els resultats de Gray i Tarrant. D'acord als seus càlculs, la secció eficaç d'anihilació a un fotó era massa petita en un factor 10^{13} (!) per donar compte de la intensitat observada per Gray i Tarrant.¹⁶⁸ Oppenheimer va suscriure el resultat: "With your general conclusion we are also absolutely in agreement, in that we too can see no way of accounting for the hard scattered radiation[...] Plesset and I wrote so conservatively of it because we were not sure how relativistic calculations would fall out".¹⁶⁹

Al llarg de 1933, la confusió en torn de la radiació dispersada va anar creixent. Les discrepàncies entre Berlin i Cambridge havien atret d'altres ex-

¹⁶⁷Oppenheimer i Plesset (1933), p. 54; Blackett i Occhialini (1933), p. 716.

¹⁶⁸Fermi i Uhlenbeck (1933).

¹⁶⁹Oppenheimer a Uhlenbeck, [tardor 1933], Kimball Smith i Weiner (1980), p. 167.

perimentadors a l'estudi de l'absorció de raigs gamma, però la concurrència de noves dades no va contribuir inicialment a resoldre el problema. A Brussel·les, amb la intenció explícita de comprovar els resultats apareguts fins aleshores, E. Stahel i H. Ketelaar havien combinat la font radioactiva de Meitner (RaC) amb el detector de Gray i Tarrant (la cambra d'ionització). Els seus resultats, més favorables inicialment als investigadors anglesos que als alemanys, van acabar essent desconcertants: la radiació dispersada en Pb presentava dues components equiparables a les detectades al Cavendish; la radiació dispersada en Sn i Fe només presentava la component de 0,5 MeV; la radiació dispersada en Al, cap de les dues!¹⁷⁰

Poc després, l'agost de 1933, T. Heiting avançava els resultats d'un nou estudi de la dispersió dels raigs gamma del ThC". Heiting, que havia realitzat els experiments a Halle, havia assumit l'explicació de Chao que l'efecte d'absorció addicional era una excitació nuclear.¹⁷¹ Heiting no havia detectat cap traça d'una radiació dispersada sense variació en la longitud d'ona. Les seves mesures de la radiació dispersada en Al, Fe i Cu només van revelar la presència d'una component d'uns 0,5 MeV; la radiació dispersada en Pb incloïa dues components, una de 0,46 MeV i una de 1,87 MeV. En menys de dos mesos, tanmateix, Heiting va abandonar tota noció d'excitació nuclear per parlar simplement d'absorció nuclear. En una segona (i atípica) comunicació preliminar, Heiting va presentar només els resultats corresponents a la component de 0,5 MeV interpretant-la a partir de l'anihilació electró-positró.¹⁷²

Els resultats de Heiting van acabar de desesperar Jacobsen, que a mitjan

¹⁷⁰Stahel i Ketelaar (1933a). Veure també Stahel i Ketelaar (1933b, c). La primera comunicació d'aquests resultats (Stahel i Ketelaar 1932a) va alentar els físics del Cavendish: "You will be interested to see from the enclosed statement by Gray that their main results have been confirmed by experiments in Brussels" (Rutherford a Bohr, 19-10-1932, BSC-25). El grup de Brussel·les mantindria el seu interès pel problema, veure Stahel, Ketelaar i Piccard (1934), i Stahel i Ketelaar (1934).

¹⁷¹Heiting (1933a), p. 674: "Die Elemente Al, Fe, Cu, Pb wurden durch die ThC"- γ -Linie $\lambda = 470 \text{ fm}$ zu einer Kern- γ -Strahlung angeregt."

¹⁷²Heiting (1933b, 1934).

octubre escrivia a Meitner: "L'aparició de la comunicació de Heiting no fa sinó complicar encara més la qüestió; si realment cada ú obté el seu resultat particular, s'hauria de canviar de mètode."¹⁷³ Jacobsen escrivia aquestes paraules dies abans que s'iniciés el VII congrés Solvay, que representa el punt àlgid de la controvèrsia sobre la constitució de la radiació anòmala. La component de 0,5 MeV observada per Gray i Tarrant i confirmada per d'altres experimentadors, semblava explicada, però sobre la component de 1 MeV "res de bien certain ne peut[...] être dit".¹⁷⁴ Les actes del congrés inclouen una llarga discussió de Chadwick sobre els experiments de Gray i Tarrant. Acceptant la conclusió dels físics del Cavendish que dels 2,62 MeV de la radiació incident només 1 MeV era reemès, Chadwick conclouïa: "Une partie au moins de l'absorption et de la diffusion anòmales des rayons γ doit être due à la creation et à l'annihilation ultérieure d'electrons positifs, mais il est possible, soit que ce processus ne se présente pas exactement comme nous de supposons, soit que quelque autre phénomène se produiré également."¹⁷⁵

Al mateix congrés, Heisenberg va referir-se als resultats de Heiting per aduir que la component dura ho era més que no s'havia pensat, gairebé de l'ordre de la radiació primària; Meitner va refermar-se en les seves conclusions; Gamow va insistir en els nivells nuclears; i Peierls va avançar la conclusió final de Gray i Tarrant, que l'anihilació no bastava per explicar la composició de la radiació dispersada.¹⁷⁶ Els experimentadors del Cavendish es trobaven completant el seu darrer article, que, en consonància amb la confusió regnant, consta de dues parts clarament diferenciades. A la primera, la discussió teòrica era mínima i

¹⁷³Jacobsen a Meitner, 19-10-1933 (LM 5/9): "Die ganze Sache ist ja übrigens nach der Erscheinung der Mitteilung von Heiting noch mehr verwickelt als früher; wenn es wirklich so ist, dass jedermann sein eigenes Resultat bekommt, muss man wohl zu anderen Methoden übergehen."

¹⁷⁴Blackett a Solvay (1934), p. 173.

¹⁷⁵Solvay (1934), p. 185.

¹⁷⁶Solvay (1934). Les explicacions alternatives de la radiació anòmala dispersada aparegudes abans del congrés Solvay inclouen Arakatsu (1932), Gamow (1933) i Beck (1933a, b).

no es feia referència a la nova partícula. Gray i Tarrant lamentaven que "no adequate theoretical account of the nature of the [new atomic] interaction has so far been given" i adoptaven un to positivista: "our first concern has been to ascertain as accurately as is possible by absorption methods the nature of the secondary radiation emitted by different elements when excited by the 7-rays from both radiothorium and radon sources". Per primera vegada des de l'inici de les investigacions, dubtaven de la naturalesa nuclear del fenomen:¹⁷⁷

We do not wish to prejudice the issue by referring to the phenomenon as "nuclear" absorption[...] The term "secondary nuclear radiation", which has been used previously, is still employed for convenience, but without implying that the radiation can be related to any known nuclear process.

La idea de radiacions característiques havia estat abandonada a causa de la diferència entre les radiacions dispersades del RaC i el ThC".¹⁷⁸ La radiació dispersada pel RaC contenia una component de 0,3 MeV anormalment intensa. Aquest resultat va estranyar tant Gray i Tarrant que "in view of the inadequacy of any theoretical interpretation of the phenomenon" van voler assegurar-se que la radiació secundària era realment una radiació gamma!

Per quan van haver completat l'anàlisi, el desenvolupament de la hipòtesi d'anihilació va obligar Gray i Tarrant a prendre partit. La darrera secció del seu article estava dedicada a la "possible relació [de la radiació 7 secundària] amb l'electró positiu". El que sorprèn més d'aquesta secció és l'escepticisme amb què hi és tractada la idea que la radiació dispersada és una radiació

¹⁷⁷Gray i Tarrant (1934), pp. 682 i 683. CL Tarrant a l'autor (11-12-1991): "We should have called [the additional absorption] 'the high Z effect' to emphasise that this was all we knew of it. Actually we call it a nuclear effect which somehow gave us a bad name when the idea of the positive electron came along."

¹⁷⁸Gray i Tarrant (1934), p. 706: "Since we can find no real ground for doubting that the experimental curves correctly represent the difference between the secondary radiations excited by the RaC and ThC" 7-rays, it appears necessary to abandon any hypothesis which implies that the major portion of the emission is a 'characteristic radiation' of the absorption system."

d'anihilació. Aquesta hipòtesi s'enfrontava, pels físics anglesos, a una sèrie de dificultats. Quan s'irradiava amb raigs γ del ThC'' una làmina de plom, deu de cada cent partícules secundàries eren positrons. En els experiments d'absorció, per cada fotó que era absorbit anòmalament quatre eren dispersats per efecte Compton: *vingt* de cada cent partícules secundàries haurien de ser positrons. L'energia promig dels fotons d'anihilació, d'altra banda, hauria de ser 0,5 MeV; però de cada cent fotons dispersats (Fe, RaC), un tenia una energia de 1,1 MeV i la resta, d'uns 0,38 MeV. Gray i Tarrant no podien entendre-ho, i acabarien abandonant els experiments sense aclarir-ho.¹⁷⁹

EL DESENLLAC

Oppenheimer no es va deixar convèncer per les "depressing proclamations" de Gray i Tarrant. "From a careful study", explicava a Uhlenbeck el març de 1934, en aparèixer l'article de Gray i Tarrant "we have decided that the point that they hold against the theory rest on experiments inadequately precise to indicate a real discrepancy. Only one thing it is hard to discount: the existence, in heavy elements, of a hard scattered component".¹⁸⁰ El juny d'aquell any, Oppenheimer i C. C. Lauritsen afirmaven explícitament que la complexitat de la radiació dispersada explicava les discrepàncies dels diferents experimentadors, i que a més de la radiació Compton i la radiació d'anihilació de 0,5 MeV, calia comptar amb la presència d'una radiació coherent pràcticament insignificant, i una radiació X emesa pels electrons i positrons secundaris, complexa en ella mateixa. Aquesta radiació podia explicar la component dura de Gray

¹⁷⁹Sobre la decepció de Gray, veure Tarrant a Wynchank, 19-8-1989 (AIP): "[...] am fairly sure that on the few occasions that I saw [Gray] after 1934 he seemed unenthusiastic about talking about the scattering experiment. I guess he had partially given in to the people who asserted that there could NOT be any 1 MeV secondary radiation and so felt we had been wrong." Cf. Tarrant a l'autor, 8-3-1992: "I always felt that Gray could not fault the work but always felt uneasy".

¹⁸⁰Oppenheimer a Uhlenbeck, [març 1934], Kimball Smith i Weiner (1980), p. 175.

i Tarrant.¹⁸¹

Només en la segona meitat de 1934 —dos anys després del descobriment del positró— començaria a formar-se una imatge coherent dels processos d'absorció. A finals d'aquell any, Bethe explicava la confusió sobre la radiació dispersada a partir de la complexitat de la seva composició:¹⁸²

It seems very difficult to decide experimentally between a pure exponential absorption law for the 'scattered' γ -rays and a more complicated law which would correspond to the continuous spectrum to be expected. . . The wide divergence of the results of various experimenters is, we think, just due to the fact that the hard component of the 'scattered γ -radiation' was always assumed to be homogeneous in frequency, whereas actually it is not.

En la clarificació dels mecanismes d'absorció, W. Bothe i Wolfgang Gentner jugarien papers destacats.¹⁸³ Entre 1933 i 1936, primer a París i després a Heidelberg, Gentner revisà els experiments realitzats i comprovà les hipòtesis teòriques que s'havien plantejat. Gentner es trobava en una posició immillorable quan, el 1937, preparà com a *Habilitationschriftun* article de compendi sobre l'absorció de raigs gamma. L'efecte fotoelèctric, la dispersió Compton, i la creació de parelles, havien permès finalment interpretar les mesures d'absorció:¹⁸⁴

¹⁸¹Oppenheimer i Lauritsen (1934). *CL* Oppenheimer a Frank Oppenheimer, 4-6-1934 (Smith i Weiner 1980, p. 181): "By the way, the evidence of Gray and Tarrant for nuclear levels seems to me completely vile; in fact Lauritsen and I are just writing a paper, trying to show how one can understand all the discordant results on gamma ray scattering by taking into account only Compton effect, annihilation radiation, and the continuous x-ray spectrum from the secondaries."

¹⁸²Bethe (1935), p. 141. Veure també Williams (1935), Wheeler i Plesset (1935). Cf. Heitler (1936), p. 209: "Since[. . .] the probability of annihilation of a positive electron while in motion is by no means negligible, we should also obtain a continuous spectrum of some harder radiation. This continuous spectrum is probably responsible for the 'harder components' of the excess scattering observed by several authors[. . .] A certain portion of these harder components may also be due to *Bremsstrahlung* emitted by the positive and negative electron before being stopped."

¹⁸³Bothe i Horn (1934a, b); Gentner (1933, 1934a, b, 1935a, b, 1936).

¹⁸⁴Gentner (1937), p. 845: "Nach allem ist jetzt nich mehr daran zu zweifeln, daß die

No hi haja cap dubte, en conclusió, que els coeficients d'absorció observats poden ser descrits completament a partir de l'efecte Compton, la formació de parelles, i l'efecte fotoelèctric.

CONSIDERACIONS FINALS

La controvèrsia sobre l'absorció anòmala planteja la qüestió de la naturalesa de l'evidència experimental. Què va fer que Meitner es convencés de l'existència d'una radiació inexistent? Què se'n va fer, de l'anomalia de Skobelzyn? Com és que Gray i Tarrant no van convèncer pràcticament ningú de la presència d'una component de 1 MeV? La convicció d'aquests físics en la certesa de conclusions que sabem errònies qüestiona l'objectivitat i neutralitat de la pràctica experimental. Aquesta convicció estava condicionada en la majoria de casos a l'ús d'un cert instrument. Per a Skobelzyn, el mètode basat en la cambra de boira presentava "essential advantages" i representava "la méthode la plus fructueuse pour examiner le mecanisme du phénomène".¹⁸⁵ Meitner i Hupfeld consideraven que la mesura dels coeficients d'absorció requeria "un instrument de mesura molt sensible, i el comptador Geiger-Müller es revela summament adient";¹⁸⁶ en privat, Meitner es mostrava més segura encara de l'eficàcia del seu muntatge: la combinació ThC''-comptador Geiger feia de les seves condicions experimentals "les més lliures de limitacions que s'ha usat fins ara".¹⁸⁷ Gray i Tarrant estaven convençuts que els experiments de Meitner havien estat realitzats a l'angle erroni per distingir entre la radiació Compton i la radiació nuclear, però Meitner criticava la dispersió angular dels feixos

beobachteten Absorptionskoeffizienten vollkommen durch den Compton-effekt, die Paarbildung und den Photoeffekt beschrieben werden können."

¹⁸⁵Skobelzyn (1929a), p. 411; (1932c), p. 1915.

¹⁸⁶Meitner i Hupfeld (1930c), p. 149: "Man muß daher ein sehr empfindliches Meßinstrument verwenden, und das Geiger-Müller-Zählrohr erweist sich hierfür als besonders geeignet."

¹⁸⁷Meitner a Klein, 29-1-1930 (LM 5/10): "Unsere Versuchsbedingungen scheinen mir die einwandfreiesten, die bisher angewendet werden konnten." Cf. Meitner a Pauli, 28-7-1930 (LM 5/13), Meitner a Bohr, 24-11-1930 (LM 5/2).

utilitzats pels investigadors del Cavendish.¹⁸⁸ L'observació de Schaffer és pertinent: "The acceptance of a matter of fact on the basis of an experimental report involves conceding authority to the reporter and to the instruments used in the experiment".¹⁸⁹ Inicialment, ningú no va associar les discrepàncies dels resultats a les peculiaritats dels detectors o les fonts emprades, com tampoc al desconeixement dels mecanismes d'absorció; els resultats discordants indicaven només les deficiències metodològiques o instrumentals dels dispositius usats per altres experimentadors.

La magnitud i persistència de les discrepàncies, però, obligaria a adoptar explicacions menys partidistes. Les crítiques de Meitner van fer que Chao plantegés la possibilitat que els instruments de mesura fossin responsables de les divergències; les mesures realitzades amb una cambra d'ionització "might lead to somewhat different results from measurements made with a counter owing to a difference in the relative response of the chamber and the counter to radiations of different hardness."¹⁹⁰ A finals de 1931, aquesta possibilitat no va ser considerada seriosament, però Meitner arribaria a una conclusió molt similar quan les discrepàncies s'aguditzessin. A l'article amb Kösters, Meitner feia referència a les diferències entre el seu dispositiu experimental i el dels físics del Cavendish a l'hora de justificar els resultats discordants. Això no impedia a Meitner refermar-se en les seves conclusions, però a diferència de posicionaments previs, denota que finalment es prenia de forma seriosa la discrepància.¹⁹¹ Stahel i Ketelaar s'hi havien referit ja en termes molt similars: "No disposem encara d'una explicació d'aquesta discrepància; però potser s'hauria de buscar en el fet que en un cas s'hagi realitzat comptatges, i en l'altre mesures de la ionització."¹⁹²

¹⁸⁸Rutherford a Bohr, 19-10-1932 (BSC-25).

¹⁸⁹Schaffer (1989), p. 67.

¹⁹⁰Chao (1932a), p. 213.

¹⁹¹Meitner i Kösters (1933), p. 144.

¹⁹²Stahel i Ketelaar (1932), p. 300: "Eine Erklärung dieser Diskrepanz steht noch aus; vielleicht ist sie darin zu suchen, dass in einem Fall Zählungen, im andern Fall Ionisations-

Les discrepàncies van motivar la repetició dels experiments i la comprovació dels resultats obtinguts per altres experimentadors. Aquesta era la motivació principal dels físics que es van incorporar a l'estudi del fenomen un cop establerta la controvèrsia. El de Jacobsen és un cas prematur; si el 1930 havia decidit comprovar "whether the anomalies[...] found by English and German physicists are real", a finals de 1932 preparava "a new arrangement by which he hopes to be able to test the results of Gray and Tarrant and of Meitner".¹⁹³ Stahel i Ketelaar observaven a mitjan 1933 que "le désaccord entre ces resultats [els de Meitner i Hupfeld, Gray i Tarrant] nous a incités à reprendre les recherches"; i un any després: "Leurs mesures, qui datent de 1931, ont été les premières dans ce domaine et ont donné l'impulsion à toutes ces recherches".¹⁹⁴ Heiting havia iniciat les seves investigacions perquè els experiments de Chao, Meitner i Hupfeld, i Gray i Tarrant, havien conduït a resultats "molt contradictoris".¹⁹⁵ Els experiments de Bothe i Horn responen a idèntica motivació.

La comprovació dels resultats d'altres experimentadors va adoptar diverses formes. Les fonts radioactives van ser un problema recurrent. El desacord va fer que els experimentadors de Cambridge i Berlin les intercanviassin en una segona sèrie d'experiments. Stahel i Ketelaar van combinar la font utilitzada per Meitner amb el detector de Gray i Tarrant. En algun cas la comprovació mútua va arribar a l'extrem d'usar la mateixa font: l'agost de 1933 van arribar a Copenhaguen les fonts de radi emprades per Meitner en la seva primera sèrie d'experiments, amb les quals repetí Jacobsen els experiments de Meitner abans de tornar-les-hi al setembre.¹⁹⁶ En cada cas, la reproductibilitat dels resultats

messungen ausgeführt wurden."

¹⁹³Bohr a Nishina, 4-8-1930 (NMF 1984, p. 17); Bohr a Rutherford, 4-11-1932, (BSC-25); veure també Bohr a Rutherford, 1-2-1934, *ibid*.

¹⁹⁴Stahel i Ketelaar (1933b), p. 461; (1934), p. 522.

¹⁹⁵Heiting (1934), "sehr widersprechenden Ergebnissen", p. 129.

¹⁹⁶Jacobsen a Meitner, 30-8-1933 (LM 5/9); Hahn a Bohr, 24-8-1933, Bohr a Hahn, 30-8-1933 (BSC-20). Cf. Oppenheimer a Uhlenbeck, [tardor 1933] (Kimball Smith i Weiner 1980,

va ser considerada crucial.

Una consideració detallada d'aquestes qüestions ens portaria massa lluny. Però aquestes anotacions potser bastin per notar que la controvèrsia no es deu a errors trivials de naturalesa *experimental*. Els físics implicats, i especialment Meitner, eren massa competents perquè una explicació així sigui plausible. La lentitud amb què el positró s'incorpora a la imatge del procés d'absorció denota, així mateix, que els problemes no venien només donats pel desconeixement de l'existència d'aquesta partícula. En la seva complexitat i incertesa, en la influència de preconcepcions teòriques i preferències instrumentals, la controvèrsia sobre l'absorció anòmala posa de manifest la cara oculta de la recerca científica. Les discrepàncies serien finalment minimitzades i la controvèrsia oblidada, en un procés al que no van ser aliens els seus protagonistes.¹⁹⁷

The interaction of γ -radiation with atomic nuclei, first recorded by Tarrant, was investigated at the same time by Meitner and Hupfeld and by Chao. More complete papers have also appeared[...] and have shown *fair agreement over the experimental facts*.

p. 167): "Now just recently I have heard from Plesset that Jacobsen has repeated with Miss Meitner's strong source the experiments on lead". Jacobsen no va poder reproduir els resultats de Meitner.

¹⁹⁷Gray i Tarrant (1934), p. 722 (èmfasi afegit).

CAPÍTOL 5

La contrastació experimental de la fórmula de Møller

Els experiments d'Ashkin, Page i Woodward publicats el 1954 són sovint citats quan es tracta de justificar la fiabilitat de la fórmula de Møller.¹ Aquest és el més decisiu dels nombrosos intents realitzats al voltant de 1950 —la majoria en equip i amb acceleradors de recent factura— per distingir la fórmula de Møller d'altres fórmules de dispersió. Aquest brot d'interès contrasta marcadament amb la indiferència dels físics experimentals cap a la fórmula durant l'etapa inicial de la teoria. Juntament amb els d'Ashkin, Page i Woodward, es citen també sovint els experiments que el físic anglès F. C. Champion va realitzar el 1932. Una caracterització típica diria: "After the theory of Møller indicated that deviations from the Mott formula might be expected for relativistic collisions, efforts were made to measure the scattering of fast beta-particles. Champion found good agreement with the Møller theory for 250 collisions of radium E beta-particles in nitrogen found in cloud chamber pictures".² El problema amb aquesta versió causal és que els experiments de Champion no només van ser concebuts quan encara no existia la fórmula, sinó que van ser els únics realitzats en la dècada de 1930 per contrastar-la. En aquest capítol,

¹Ashkin, Page i Woodward (1954). Per posar dos exemples significatius: Jauch i Rohrlich (1955) afirmen que els resultats de Møller "are found to be in excellent agreement with observations", referint-se a "the beautiful experiments by Ashkin, Page and Woodward" (p. 261); segons Mott i Massey (1933), "confirmation of [the Møller formula] for incident electrons in the energy range 0.6 to 1.2 MeV has been provided by the coincidence counter experiments of Ashkin, Page and Woodward" (³1965, p. 818). Aquests experiments segueixen constituint el test clàssic de les fórmules de Møller i Bhabha a baixes energies (Itzykson i Zuber 1985, p. 281).

²Scott, Hanson i Lyman (1951), p. 638.

que es centra en el primer intent de contrastació de la fórmula de Møller, s'examina i documenta el canvi d'apreciació de la fórmula des del punt de vista experimental.

Mentre treballava en la seva tesi, Møller no sembla haver-se interessat excessivament per la contrastació dels seus resultats. És possible, com assenyalava anys després, que dubtés de la significació dels seus càlculs:³

Of course, my confidence was not so big, that I was really very surprised when Champion experimentally could show that my formula was obviously in better agreement with the experiments he had done than the non-relativistic formula... I was rather surprised that one could by such a formal generalization get to something which was really there in nature.

Però la seva actitud pot haver tingut una altra justificació: al voltant de 1930, els experiments sobre dispersió d'electrons relativistes eren escassos i poc decisius. És per això que comencem examinant la situació experimental a principi dels anys trenta, quan tant Champion com Møller es disposaven a iniciar el seu treball.

LA DISPERSIÓ D'ELECTRONS AL VOLTANT DE 1930

Des del seu descobriment i posterior identificació amb l'electró, a principi de segle, la radiació β va constituir una font única d'electrons d'alta energia. Amb energies de l'ordre d'1 MeV, els raigs β superaven àmpliament l'energia dels electrons emesos per efecte fotoelèctric o per incandescència (10^2 eV), mentre la presència d'electrons en la font natural de partícules de més alta energia, la radiació còsmica, era molt discutida en iniciar-se la dècada de 1930. Les primeres anàlisis de la dispersió d'electrons relativistes van ser realitzades amb partícules β , que amb una velocitat propera a la de la llum ($0,9c$), mostraven suficientment efectes relativistes.

³Entrevista de C. Weiner a Møller, 25 i 26-8-1971 (AIP), p. 13.

La radiació β era més problemàtica que un altre producte de la desintegració radioactiva millor conegut, la radiació α . La radiació β no només era inhomogènia, sinó que en la majoria de casos era emesa junt amb una radiació γ intensa, el que complicava la seva detecció, ja que no existia per la radiació β cap detector tan simple com el comptador d'escintil·lacions per les partícules α . A més, era difícil distingir entre les dispersions simple i múltiple —és a dir, si la desviació final d'una partícula era deguda a una única col·lisió, o era el resultat de vàries col·lisions successives—, així com entre les dispersions electrònica i nuclear.⁴ Aquests problemes feien difícil obtenir dades significatives sobre la *dispersió simple electrònica* de partícules β , l'única que descriu la fórmula de Møller.

La cambra de boira, tanmateix, permetia obviar la major part d'aquestes dificultats. En les traces que deixava la radiació β en atravesar el gas contingut en la cambra, les escasses col·lisions particularment violentes d'una partícula (β amb un electró atòmic es podien reconèixer per la ramificació de la traça. El 1922, W. Bothe va observar la dispersió simple de raigs β mitjançant una cambra de boira "construïda, fins als detalls menys essencials, segons les prescripcions de Wilson".⁵ En 20 fotografies, que incloïen 10 m de traça, Bothe va detectar clarament vuit ramificacions, i tres més de dubtoses. L'anàlisi de la dinàmica de la col·lisió es basava en "la investigació estadística de la freqüència de les ramificacions de diferents graus".⁶ El nombre de fotografies era clarament insuficient per fer una anàlisi estadística, però Bothe considerava que una primera estimació era possible.

La comparació amb la teoria es basava en un model d'interacció elec-

⁴Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), p. 215.

⁵Bothe (1922), p. 117: "Der Nebelapparat war bis auf Unwesentliches nach den Vorschriften Wilsons konstruiert".

⁶*Ibid.*, p. 121: "Will man Einzelheiten über den Stoßvorgang selbst erfahren, so ist dies nur durch statistische Untersuchungen über die Häufigkeit der Verzweigungen verschiedenen Grades möglich". La longitud total de traça és necessària per calcular la freqüència de les ramificacions, i supleix el coneixement de l'espectre de la radiació incident (veure p. 226).

trostàtica i en la hipòtesi que la partícula incident no era pràcticament desviada. El 1912, J. J. Thomson havia utilitzat les mateixes premisses per calcular la ionització produïda per una càrrega elèctrica en moviment. La anàlisi clàssica de Thomson, per bé que simple, era molt efectiva, i convenientment ampliada per Bohr es convertiria en referència essencial pel càlcul del pas de partícules carregades a través de la matèria.⁷ Negligint el potencial d'ionització, la teoria donava per la secció eficaç de col·lisió en cas que la partícula incident perdés una energia cinètica Q

$$\frac{da}{dQ} = \frac{2\pi e^4}{mv_0^2} \frac{1}{Q^2}. \quad (1)$$

Utilitzant una expressió equivalent a aquesta i els valors estimats per la velocitat dels electrons, Bothe obtenia pel nombre de ramificacions en 10 m de traça un valor esperat de 12, en un acord que qualificava de "satisfactori" amb el valor experimental (de 8 a 11), "considerant l'escàs nombre de casos observats".⁸

El 1923, el mateix creador de la cambra va publicar un estudi detallat dels raigs X i β que no anava gaire més lluny en les seves conclusions. Entre d'altres fenòmens, Wilson analitzava les "traces ramificades" de la radiació β . Els valors experimentals de Wilson, encara que correctes en ordre de magnitud, eren menors que els predits per la teoria de Thomson; a les conclusions es parlava només d'un "acord general" amb la teoria.⁹ L'escassa significació dels resultats de Bothe i Wilson no és atribuïble al seu mètode experimental, que havia de possibilitar comparacions més precises i conclusives amb la teoria, sinó

⁷Thomson (1912), Bohr (1913, 1915).

⁸Bothe (1922), p. 121: "die übereinstimmung mit der gefundenen Zahl (8 bis 11) ist befriedigend in Anbetracht der geringen Zahl beobachteter Fälle". Bothe determinava la velocitat dels electrons de l'única manera possible, a partir de la relació aproximada de proporcionalitat entre el rang (longitud de la traça) i la potència quarta de la velocitat.

⁹Wilson (1923), p. 201: "The chance of occurrence of a branch track exceeding a given length may, on Thomson's theory, be calculated if we know the energy of a β -particle of given range".

a l'escàs nombre de fotografies analitzades i a la imprecisió de les estimacions de la velocitat dels electrons.

La investigació de la dispersió de raigs (β mitjançant la cambra de boira trobaria al Cavendish —el laboratori on Wilson havia desenvolupat els seus prototips, i que primer l'havia adoptada com a instrument de recerca— terreny abonat. Però al laboratori de Rutherford es donaria també un intent, excepcional, d'observar el fenomen mitjançant l'altre detector de radiació (β disponible en les primeres dècades d'aquest segle, la cambra d'ionització. A diferència de la cambra de boira, la d'ionització no enregistrava esdeveniments individuals, sinó el corrent d'ionització generat al seu interior, i no permetia doncs distingir la dispersió nuclear de l'electrònica.¹⁰

Un dels estudiants de recerca del laboratori, Malcolm C. Henderson, aplicà tanmateix la cambra d'ionització a l'estudi de la dispersió dels raigs (β del RaE (Bi²¹⁰), un emisor convenient per l'absència de radiació γ i l'elevada energia del seu espectre. Henderson publicà el 1929 un article basat en la seva tesi doctoral, on havia considerat el problema.¹¹ Henderson no pretenia contrastar la teoria clàssica de dispersió de Darwin —amb la qual va comparar els seus resultats experimentals—, sinó posar de manifest els efectes del spin en la col·lisió entre una partícula (β i un electró.¹² Per això va comparar la dispersió en elements lleugers (hidrogen i heli), on la dispersió electrònica és més pronunciada, amb la dispersió en elements més pesants (nitrogen i argó).

Henderson va mesurar el corrent d'ionització en diferents gasos, per valors de la pressió tals que el quocient de les dues quantitats es mantenia constant (el que considerava com un indicatiu del predomini de la dispersió simple). El quocient d'aquestes constants entre si mesurava la "capacitat de dispersió" relativa

¹⁰Només en elements dispersors pesants el predomini de la dispersió nuclear permetia utilitzar la cambra d'ionització (Rutherford, Chadwick i Ellis 1930, pp. 227-234).

¹¹Henderson (1929); cf. *The scattering of β -particles and the heating effects of Radium and Thorium*, tesi doctoral no publicada, juny 1928 (ULC).

¹²El 1913, C. G. Darwin va estendre a la radiació (β l'anàlisi clàssica de Rutherford de la dispersió d'una partícula a per un nucli, considerant la variació de la massa amb la velocitat.

dels diferents gasos. Els seus resultats van mostrar que la dispersió electrònica era tres vegades superior al valor teòric. Per a Henderson, però, l'excés de dispersió no mostrava inequívocament l'existència d'un moment magnètic, el que argumentava en base a la magnitud relativa de les forces elèctrica i magnètica.¹³ Henderson creia improbable que l'electró pogués tenir un moment magnètic "tan gran com un magneto de Bohr".¹⁴

Entretant, l'eficàcia de la cambra de boira s'havia vist sensiblement incrementada amb la incorporació d'un camp magnètic, que corbava la trajectòria de les partícules i permetia determinar-ne l'energia.¹⁵ La innovació crucial de Skobelzyn va ser adoptada immediatament al Cavendish, on dos estudiants de doctorat, E. J. Williams i F. R. Terroux, van investigar la dispersió de partícules β en oxigen i hidrogen mitjançant una cambra de boira dotada de camp magnètic. L'extensió de les observacions a l'hidrogen es considerava essencial per a la comparació amb la teoria, donada la magnitud de la dispersió electrònica en aquest cas. En aparèixer els primers resultats de les seves investigacions, el gener de 1930, Williams i Terroux destacaven la superioritat de la cambra de boira davant altres mètodes per la possibilitat que oferia de distingir directament entre les dispersions electrònica i nuclear, evitant "tota hipòtesi teòrica".¹⁶

¹³Si el moment magnètic de l'electró fos d'un magneto de Bohr, les forces magnètiques determinarien gairebé exclusivament la desviació final de la partícula incident, ja que el paràmetre d'impacte era unes seixanta vegades inferior a la distància en què les forces elèctrica i magnètica són iguals. Un càlcul elemental mostrava que en aquest cas la dispersió addicional seria molt superior a l'observada (Henderson 1929, p. 855).

¹⁴*Ibid.*, p. 856. Sense oferir una explicació alternativa a aquestes anomalies, Henderson objectava al model de l'electró magnètic la seva "relativa complexitat" en front l'electró puntual, i caracteritzava la teoria de l'electró de Dirac com una alternativa, abans que una justificació, d'aquest model: "Dirac has shown how to avoid the necessity for a magnetic electron by a more complete solution of the fundamental equations" (*ibid.*, p. 856). Henderson confiava que un càlcul de l'efecte en base a la teoria de Dirac explicaria els seus resultats.

¹⁵Veure p. 124.

¹⁶Williams i Terroux (1930), pp. 289 i 291. Evans James Williams es va doctorar a Cam-

Williams i Terroux van analitzar, com Henderson, els raigs β procedents del RaE amb l'objecte, entre d'altres, d'observar la freqüència de producció de branques.¹⁷ Els dos estudiants van detectar 100 branques en el prop de mig miler de traces que van examinar, l'anàlisi de les quals va mostrar que el nombre de ramificacions observat era "al menys el doble" del predit per la teoria de Thomson. La diferència, que excedia àmpliament el marge d'error experimental i estadístic, estava d'acord amb l'anàlisi de la ionització primària que havien realitzat simultàniament, i amb els resultats de Henderson.

William i Terroux consideraven, com Henderson, la possibilitat d'atribuir la diferència al spin de l'electró, però segons les seves estimacions l'influx del moment magnètic de l'electró hauria estat molt superior. Més que la seva conclusió negativa ("the electron regarded as a particle does not behave as if it had a magnetic moment equal to a Bohr magneton"), és remarcable el fet que Williams i Terroux no fessin la menor referència a la mecànica quàntica o la teoria de l'electró de Dirac a l'hora d'explicar la discrepància. L'omissió no deixa de ser sorprenent quan es considera que Williams sabia dels intents de N. Mott per elaborar una teoria de la interacció entre dos electrons considerant la seva indistingibilitat, un problema que ja havia tingut intenció d'abordar al Cavendish, a principi de 1929. Introduïnt funcions d'ona antisimètriques, Mott calcularia finalment a Manchester l'efecte de la indistingibilitat en la col·lisió de dos electrons. L'article on exposava el seu càlcul va ser rebut als *Proceedings* de la Royal Society el 7 de novembre de 1929, només un dia després que l'article de Williams i Terroux.¹⁸

bridge el 1929 amb una tesi sobre el pas de raigs β a través de la matèria, un tema recurrent en les seves publicacions subsegüents (Williams, *Passage of β Particles Through Matter*, tesi doctoral no publicada, setembre 1929, ULC). Ferdinand Richard Terroux completaria la seva tesi el 1931 (*Applications of the Expansion Chamber to the Study of Fast β Rays*, tesi no publicada, novembre 1931, ULC).

¹⁷Williams i Terroux estudiaven també la ionització primària i la conservació del moment en les col·lisions.

¹⁸Mott (1930). Veure també Mott (1929).

Mott devia molt probablement a Williams la suggerència que la dispersió anòmala que havia calculat podia ser detectada "by observing collisions between fast electrons and atoms in which an electron is ejected from the atom, e.g., the forked β -ray tracks in a Wilson chamber".¹⁹ Les úniques dades experimentals amb què Mott comparava la seva predicció teòrica corresponien de fet a un article que Williams havia de publicar en breu. Aquest article, que aparegué pocs mesos després, estava dedicat exclusivament a l'observació de branques. A la llum de la nova teoria quàntica, Williams va tornar a examinar les fotografies de partícules β lentes (fotoelectrons de 20 KeV d'energia) que ja havia usat a la seva tesi, obtenint "evidence in support of the new quantum theory and in particular of the extension of the exclusion principle to aperiodic, or open, systems".²⁰

Fins aquí l'evidència existent sobre dispersió simple de radiació β cap el 1930. Les dades experimentals eren escasses i poc significatives, i una veu autoritzada no podia sinó reconèixer que "the experiments on the scattering of β rays leave much to be desired", especialment si se'ls comparava amb els relatius als raigs α .²¹ Al Cavendish, tanmateix, hi havia experiments en marxa que havien de proporcionar una primera contrastació de la fórmula de Møller.

ELS EXPERIMENTS DE CHAMPION

Aquesta situació no havia canviat substancialment quan el 14 de octubre de 1931 Møller va rebre una carta sense signar procedent del Cavendish. El remitent havia llegit amb molt d'interès el primer article de dispersió de Møller, però observava que només s'hi donaven els casos límit de la fórmula de dispersió. El desconegut explicava que havia pres recentment "un gran nombre de

¹⁹Mott (1930), p. 264.

²⁰Williams (1930), p. 465.

²¹Rutherford, Chadwick i Ellis (1930), p. 215.

fotografies de traces de raigs β ràpids en una càmera d'expansió automàtica", i que havia començat a analitzar "les col·lisions amb electrons estacionaris". En un diagrama adjunt li mostrava la distribució dels 50 punts que havia determinat fins el moment, corresponents a partícules incidents de velocitat compresa entre $0'8$ i $0'9c$. L'autor demanava a Møller la fórmula de dispersió per aquests valors de β , ja que estava "molt ansiós" per saber com diferiria la distribució de punts de la predita per l'expressió clàssica.²²

Naturalment, la carta va intrigar Møller, que el mateix dia va preguntar a Max Delbrück qui fotografiava traces de raigs β ràpids mitjançant una càmera d'expansió al Cavendish, després que a l'Institut tots s'haguessin "trencat el cap inútilment amb aquesta pregunta":²³

Els fets empírics són els següents: el 14 d'octubre de 1931 pel matí, al voltant de les 11, Vaig rebre una carta escrita amb una màquina d'escriure (probablement marca Remington). Del contingut de la carta es dedueix que el remitent investiga la dispersió de raigs [β] en electrons lliures mitjançant fotografies de Wilson. Em demana algunes indicacions relatives a la meua fórmula per la dispersió d'electrons ràpids, però com s'ha 'oblidat' de signar la carta, difícilment les hi puc donar. Si vostè no em pogués ajudar, recorreria a Scotland Yard. Jo diria que el culpable és Blackett, què li sembla?

Delbrück acabava de participar en el congrés dedicat a la física del nucli que s'havia celebrat a Roma entre l'11 i el 18 d'octubre.²⁴ En lloc de Blackett,

²²Champion a Møller, 10-10-1931 (AHQP-59).

²³Møller a Delbrück, 14 octubre 1931 (AHQP-59): "Mit dieser interessanten Frage haben wir uns hier im Institut vergeblich den Kopfzerbrochen". La carta segueix: "Die empirischen Tatsachen sind die folgende: Am 14.Okt.1931. Vormittags ca.11 Uhr erhielt ich einen mit einer Schreibmaschine (wahrscheinlich Marke Remington) geschriebene Brief. Aus dem Inhalt des Briefes geht hervor, daß der Absender sich damit beschäftigt mittels Wilsonaufnahmen die Streuung von [β]-Strahlen bei freien Elektronen zu untersuchen. Er bittet mich um einige Angaben bezüglich meiner Formel für die Streuung Schneller Elektronen, da er aber 'vergessen' hat seinen Brief zu unterschreiben ist dies natürlich schwierig. Wenn Sie mir nicht helfen können, werde ich mich an Schotland Yard wenden. Ich möchte glauben, daß Blackett der Täter ist, was meinen Sie?".

²⁴Delbrück a Møller, [octubre 1931], (AHQP-59).

que havia pres part en el congrés, Delbrück suggeria com a remitent a un jove col·laborador italià de Blackett, referint-se mol' probablement a Giuseppe Occhialini.²⁵ Però l'autor de la carta no era Occhialini, sinó un altre jove doctorand del Cavendish, F. C. Champion.

Frank Clive Champion s'havia incorporat al Cavendish el juliol de 1929, després de superar brillantment els *Natural Science Tripos*.²⁶ La cambra de boira s'usava ja a discreció al laboratori, on hi havia varis experts en la seva construcció, entre ells Patrick Blackett, "the leading exponent of cloud chambers in the world".²⁷ Durant l'estiu de 1929, Champion es familiaritzà amb una cambra dissenyada recentment per Blackett, i durant el seu primer trimestre al laboratori treballà en la seva adaptació a la investigació de la radiació β .²⁸ Però només iniciar-se l'any següent, aquest treball es va veure inesperadament alterat.

El nombre de l'1 de gener de 1930 dels *Proceedings* de la Royal Society, contenia l'article de Mott on es considerava la interacció entre dues partícules idèntiques tenint en compte la seva indistingibilitat.²⁹ El 2 de gener, segons el seu informe de recerca, Champion va suspendre temporalment el treball sobre radiació (β per comprovar la fórmula de Mott amb partícules α). A finals de març disposava de més de 3.000 fotografies, l'anàlisi provisional de les quals "had shown itself to be definitely in favour of Mott's theory". L'anàlisi final, que Champion completa amb l'ajut de Blackett l'octubre d'aquell any, confirmà l'acord excel·lent de les dades experimentals amb la fórmula de Mott.³⁰

²⁵Occhialini acabava d'arribar al Cavendish amb la intenció de passar-hi unes setmanes aprenent a construir cambres de boira, però esdevingué col·laborador de Blackett i s'hi va estar tres anys (Hendry 1984, p. 24; Rossi 1981, p. 41).

²⁶Arxiu del Departament de Física, ULC. Champion, nascut el 1907 a Esher, Surrey, va estudiar física al St. John's College, que en conserva una *Tutorial File* (FCC) i una nota biogràfica amb el seu obituari a *The Times* (5-3-1976).

²⁷Hendry (1984), p. 22.

²⁸"Research Report 1929-1930" (FCC).

²⁹Mott (1930). Veure p. 199.

³⁰"Research Report 1929-1930" (FCC). Veure Champion i Blackett (1931).

L'adaptació de la cambra a l'ús amb electrons ocupà gran part del curs 1930-1931. El maig de 1931, Champion disposava d'unes 3.000 traces (aproximadament 400 fotografies), una dècima part de les necessàries segons les seves estimacions. Champion era conscient que el mètode d'anàlisi estadístic que es proposava aplicar requeria un gran nombre de fotografies. Però en iniciar els seus experiments no tenia una idea molt definida dels resultats teòrics que volia comprovar, d'aquí la seva reacció immediata a l'aparició de la fórmula de Mott. El maig de 1930, Champion encara afirmava vagament del seu treball que consistia "en la investigació de processos atòmics" mitjançant la cambra de boira.³¹

El maig de 1931, després de gairebé dos anys de treball al Cavendish, els objectius de Champion eren més clars. En un segon informe de recerca, després de comentar el treball sobre la dispersió de partícules α , Champion afegia:³²

These particles, however, are not the fundamental particles of matter which are the proton and the electron. *Dirac* has calculated, using relativity theory, the expected properties of a *single* electron and deduced theoretically the experimentally known property of electron spin. *Breit*, *Gaunt* and others have tried to apply *Dirac's* methods to the *theoretical* determination of the laws governing the interaction of two electrons i. e. the 'simplest' of the two-body problems. All these attempts have been unsuccessful predicting physically inconceivable events and agreeing badly with doubtful experimental data obtained from the hyperfine structure of spectral lines. *A direct experimental determination* of the behaviour of two electrons on interaction would therefore be invaluable.

Champion exagera aquí els defectes de les teories de Gaunt i Breit per justificar un interès genuí pel problema, al marge de tota consideració teòrica; consideracions teòriques que, d'altra banda, figuraven explícitament en l'enunciat de la resta de "problemes fonamentals" que Champion es proposava estudiar.³³

³¹ "Research Report 1929-1930" (FCC).

³² "Research Report 1930-1931", 8-5-1931 (FCC).

³³ *Ibid.*

- (1) The only purely terrestrial proof of the theory of relativity as applied to individual electrons. *Theoretical* work on the problem, based on simple conservation principles, has been carried out by the writer; this will be published later when more copious data is available. On the data already available approximate measurements shew beautiful agreement with the theoretical predictions.
- (2) The intensity-velocity distribution in the β ray spectrum of Radium E, for which there is at present conflicting evidence. (Radium E is the source of the fast electrons in the other problems).
- (3) The experimental investigation of nuclear scattering; this will afford tests of some applications of wave mechanical theory.

La inclusió del segon punt, el primer que Champion va considerar, era circumstancial. Des de les primeres investigacions de l'espectre del RaE, realitzades al voltant de 1910, s'havia cregut que aquest espectre era continu i presentava un límit superior ben marcat per 5.500 Hp (una energia de l'ordre d'1 MeV).³⁴ Quan Champion redactà el seu informe, F. R. Terroux acabava de publicar el resultat d'un estudi que contradeia les observacions anteriors. Segons Terroux, l'espectre s'estenia fins a energies molt superiors a 1 MeV seguint aproximadament una distribució maxwelliana, i el nombre de partícules emeses amb una energia superior a 5.000 Hp arribava a un 4% del total.³⁵

Terroux va realitzar els seus experiments al Cavendish, de manera que Champion devia conèixer els seus resultats de primera mà. L'anàlisi d'un miler de traces li va bastar a Champion per confirmar l'existència del límit superior, i acotar la part de l'espectre que l'excedia en un 0,05%, d'acord amb els resultats anteriors. Champion va completar la redacció de l'article que contenia aquestes observacions a mitjan octubre de 1931, gairebé al mateix temps que es rebia a Copenhaguen la seva primera carta.³⁶ Champion ja

³⁴L'energia d'una partícula β que travessa un camp magnètic ve donada pel producte de la intensitat del camp (H) i el radi de curvatura (p) de la seva trajectòria (en Gauss i cm, respectivament, pel valor numèric donat). Veure p. 124.

³⁵Terroux (1931).

³⁶Champion (1932a), rebut el 15-10-1931.

devia disposar en aquests moments de la majoria de fotografies, i dedicà els mesos següents a la seva anàlisi.

En el seu primer informe, Champion indicava que el seu treball consistia en l'aplicació de la cambra de boira, "especially in the modified form due to P. M. S. Blackett", a la investigació dels processos atòmics, i que "a new chamber was devised for taking (β ray photographs)".³⁷ En l'article sobre l'espectre del RaE, indicava així mateix que la càmera que havia usat era "a modification of that previously employed by Blackett and the writer".³⁸ Havia Champion construït un nou aparell, o simplement modificat el de Blackett? L'informe sobre la tesi de Champion que Blackett redactà el 1934, confirma que Champion havia usat la seva cambra: "Since Mr Champion left Cambridge he has built a new automatic cloud chamber following in the main the design of the one he used during his time in the Cavendish, and which was built by me six years ago. He does not appear to have made any material or very original changes in this design".³⁹

La cambra de Blackett (figura 1) es basava en un model estàndard subministrat per la Cambridge Scientific Instruments Company.⁴⁰ Més que d'una nova cambra, es tractava en realitat d'una nova disposició de la cambra de boira i les cambres fotogràfiques que optimitzava el nombre d'esdeveniments fotografiats. La cambra es trobava dins d'una caixa, de fusta amb pantalles d'il·luminació tubulars, de forma que no era necessari usar l'aparell en una habitació a les fosques. Segons la descripció del mateix Blackett, "an aluminium casting has two faces at its ends making angles of 45° with the top. To these two faces

³⁷"Research Report 1929-1930" (FCC).

³⁸Champion (1932a), p. 672, referint-se a Champion i Blackett (1931).

³⁹"Report by Professor P. M. S. Blackett on the dissertation of F. C. Champion" (FCC). Cf. l'informe redactat per J. Cockcroft amb la mateixa ocasió: "The apparatus used [by Champion] was taken over with slight modifications from previous experiments of Mr. Blackett so that no technical contributions of importance were made by Mr. Champion" (FCC).

⁴⁰Aquesta empresa incloïa cambres de boira al seu catàleg des del 1913, i construïa models especials per encàrrec (Cattermole i Wolfe 1987, p. 78).

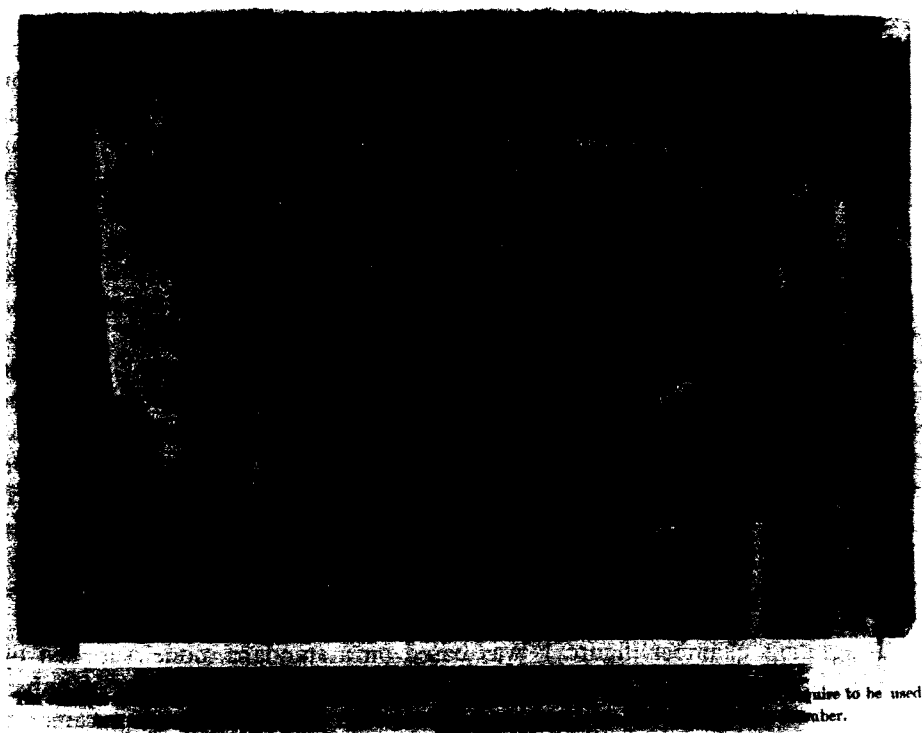


Figura 1. La disposició de cambra de boira i cambres fotogràfiques dissenyada per Blackett el 1929. Amb aquest aparell, adaptat a l'ús amb electrons, realitzà Champion els seus experiments sobre dispersió de partícules β , en el context dels quals contrastaria la fórmula de Møller (Blackett 1929; la figura és la número 20 del volum).

are attached standard Ensign ciné-cameras[...] Each lens is carried on a brass bush, the two faces of which are inclined at an angle of $8\frac{1}{2}^\circ$.⁴¹ La inclinació de les lents, calculada per incrementar l'àrea fotografiada, era una de les innovacions de Blackett respecte dissenys anteriors.

A primers de novembre Champion va escriure a Møller per segona vegada, requalificant el seu treball com “an experimental test of your formula for the scattering”.⁴² Com hem vist, Møller va contestar-li immediatament en rebre la carta dos dies després, interessant-se pel seu treball i mostrant-se optimista respecte la fórmula general de dispersió.⁴³ El 8 de novembre, Champion va

⁴¹Blackett (1929), p. 622.

⁴²Champion a Møller, 2-11-1931 (AHQP-59).

⁴³Møller a Champion, 4-11-1931 (AHQP-59); veure p. 71. A la mateixa carta, Møller feia

donar a M01ler alguns detalls dels experiments. La cambra contenia nitrogen, i les col·lisions es produïen entre les partícules (β i els electrons "en la estructura extra-nuclear de l'àtom de nitrogen" (els models nuclears jugaven encara amb l'existència d'electrons al nucli). Champion cercava en aquells moments una prova directa de la cinemàtica relativista, d'acord amb el primer punt del seu projecte:⁴⁴ "I am preparing a paper for publication at the moment on some accurate measurements of the angles between the directions of motion of the two electrons after collision taking into account the relativity change of mass". L'article resultant, "On some close collisions of fast β -particles with electrons, photographed by the expansion method", estava completat a mitjan febrer de 1932.

Champion esmentava en aquest article observacions prèvies de col·lisions de raigs β amb electrons que havien evidenciat qualitativament la variació de l'angle entre les direccions de les dues partícules després de la col·lisió, però assegurava que "up to the present no quantitative study has been made of the general relation between the whole angle after the collision, the angle of scattering, and the velocity of the incident particle".⁴⁵ Champion va haver d'analitzar moltes fotografies (unes 4.000), ja que la probabilitat de les col·lisions que l'interessaven era molt petita.⁴⁶ Els criteris que una traça havia

una observació que la cambra de Wilson feia innecessària: "Have you taken into account, that my formula gives only the scattering from the electrons and not from the nucleus of the atoms?"

⁴⁴Champion a M01ler, 8-11-1931 (AHQP-59).

⁴⁵Champion (1932b), p. 630. En la mecànica clàssica, si una partícula xoca elàsticament amb una altra de la mateixa massa inicialment en repòs, l'angle entre les direccions de moviment de les dues partícules després de la col·lisió és sempre 90° , independentment de l'angle de dispersió de la partícula incident. En la mecànica relativista, aquest angle depèn de l'angle de dispersió i de la velocitat de la partícula incident, i disminueix a mida que aquesta velocitat s'apropa a la de la llum. Entre les observacions anteriors Champion destacava les de Bothe i Wilson.

⁴⁶Champion (1932c), p. 691: "The present results are from the analysis of 4.000 photographs, giving about 30.000 tracks of fast β -particles in nitrogen". A l'article que estem considerant s'indicava també que el nombre de traces investigades era d'unes 30.000.

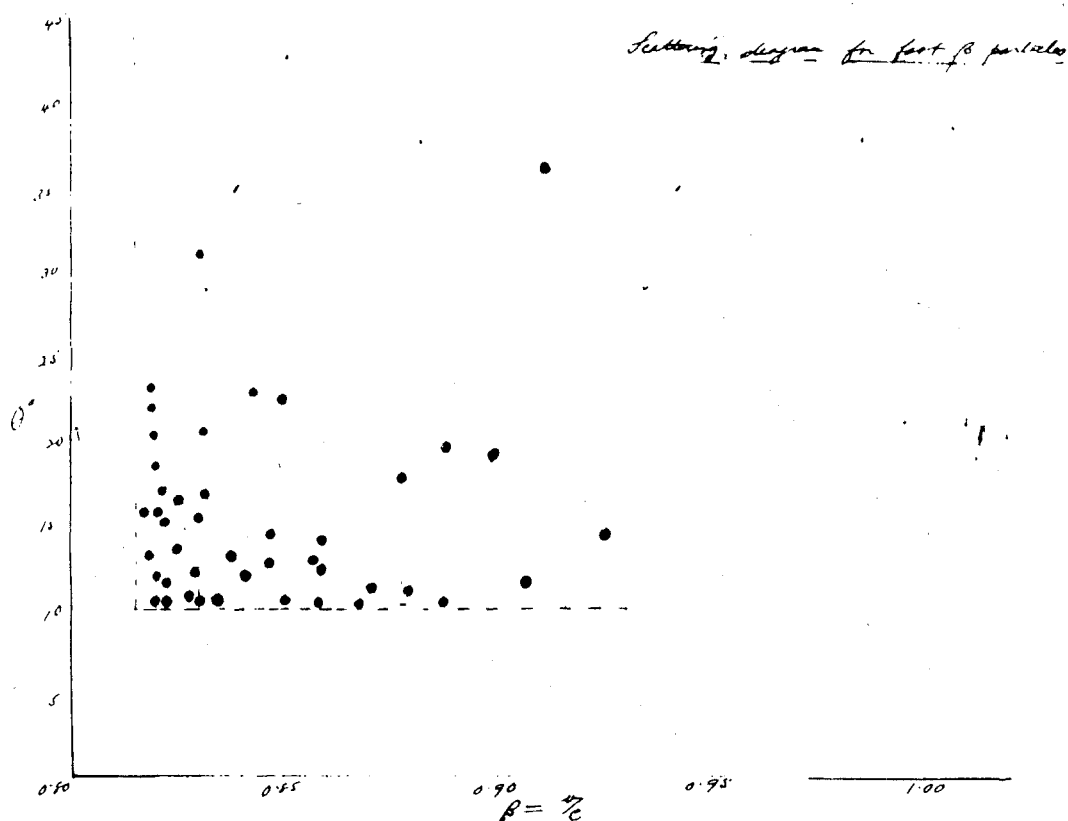


Figura 2. Els primers resultats de Champion per a l'angle de dispersió O en funció de la velocitat de l'electró incident, $\beta = v/c$ (Champion a Møller, 10-10-1931, AHQP-59).

de satisfer per possibilitar una mesura fiable reduïen dràsticament el nombre de col·lisions observables: l'examen de 30.000 traces només va proporcionar a Champion 50 "close collisions", 14 de les quals satisfien completament els criteris experimentals. Champion va basar la seva anàlisi en aquestes col·lisions, obtenint un acord "excel·lent" entre els valors observats i els teòrics.

Champion analitzava alhora les mateixes fotografies amb la intenció de contrastar la fórmula de Møller. En la primera carta a Møller havia ja inclòs algunes dades, 50 punts en un diagrama 6 (angle de dispersió) - $(\beta (v/c))$, (figura 2). Un diagrama similar ampliat a 250 punts seria la primera figura del següent article de Champion, "The scattering of fast β -particles by electrons", acabat el juny de 1932, abans que la fórmula de Møller hagués estat publicada

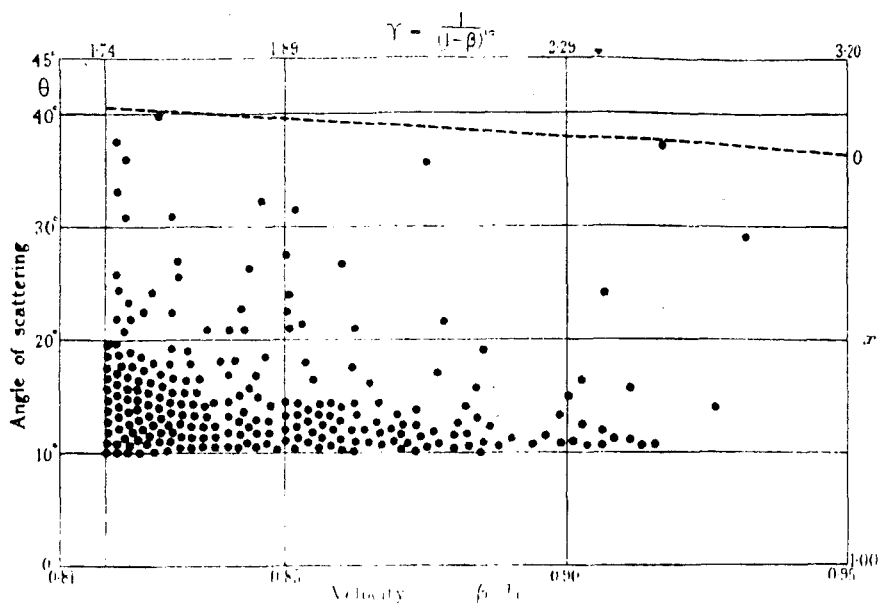


Figura 3. Resultats finals de Champion per a l'angle de dispersió θ en funció de la velocitat de l'electró incident, $\beta = v/c$ (Champion 1932c, p. 692).

(figura 3).⁴⁷ Poc abans Champion havia presentat la seva tesi doctoral, on arribava a les mateixes conclusions a partir de l'estudi de 131 col·lisions.⁴⁸

En les traces aptes per a la mesura, que totalitzaven uns 650 m, Champion va observar 250 col·lisions amb angles de dispersió superiors a 10° , amb valors de β compresos entre 0,8 i 0,9. Champion no va considerar col·lisions amb un angle de dispersió inferior perquè eren massa freqüents i perquè haurien incrementat molt el marge d'error. Les mesures s'havien estès fins l'angle màxim de dispersió, aproximadament 40° , representat a la figura 3 per la línia discontinua.

A l'hora de comparar els valors experimentals amb les prediccions teòriques,

⁴⁷Champion (1932c), rebut el 25 de juny de 1932. Champion només podia citar Møller (1931), però naturalment agràia a Møller la comunicació dels seus resultats.

⁴⁸Champion, *On some applications of an automatic expansion chamber to the investigation of the collisions of a particles with Helium, and of fast β particles with electrons*, tesi doctoral no publicada, maig 1932 (ULC). A la seva tesi, Champion aplica la fórmula que Møller li havia comunicat el 5 de gener (veure p. 74).

Champion seguia els consells de Møller, que en comunicar-li la primera versió, incorrecta, de la fórmula de dispersió, li havia suggerit introduir $x = \cos \theta_{cm}$ i γ com a variables independents, en lloc de O i v : "If you then plot your data in a (x, γ) diagram this formula should directly give the density of the dots".⁴⁹ Champion donava al seu article la fórmula de Møller en la forma

$$d\sigma(\theta) = 4\pi \left(\frac{e^2}{m v^2} \right)^2 \frac{\gamma + 1}{\gamma^2} dx \cdot \left(\frac{4}{(1-x^2)^2} - \frac{3}{1-x^2} + \frac{(\gamma-1)^2}{4\gamma^2} \left(1 + \frac{4}{1-x^2} \right) \right), \quad (2)$$

on

$$x = \cos \theta_{cm} = \frac{2 - (\gamma + 3) \sin^2 \theta}{2 + (\gamma - 1) \sin^2 \theta}. \quad (3)$$

Integrant aquesta expressió sobre l'espectre de la radiació incident —l'espectre del RaE, que Champion havia determinat anteriorment— i els intervals angulars considerats, s'obtenia el nombre esperat de col·lisions. Champion va representar en una única taula la comparació dels seus resultats amb les prediccions teòriques (taula 1). Els resultats mostraven que la fórmula de Møller "gives the best account of the scattering of electrons by electrons", però Champion no deixava d'observar que per angles superiors a 20° les fórmules no relativistes corregides eren també satisfactòries.⁵⁰

Els experiments de Champion van ser concebuts quan la fórmula de Møller encara no existia. Com hem vist, Champion tenia la intenció d'estudiar experimentalment la interacció entre dos electrons, però en un context genèric d'anàlisi de la radiació (3 i prescindint explícitament de les prediccions teòriques. A l'article que acabem d'examinar, la fórmula de Møller era considerada com "the most satisfactory theoretically" de les fórmules proposades per la interacció entre dos electrons, però era simplement caracteritzada com una fórmula "basada en la mecànica quàntica".⁵¹ Quan el 1934 J. Cockcroft i

⁴⁹Møller a Champion, 7-12-1931 (AHQP-59).

⁵⁰Champion (1932c), p. 695.

⁵¹*Ibid.*, pp. 688 i 695.

1	2	3	4	5	6	7	8
0°	Observed	MØLLER	C	M (MOTT)	M (1 - β^2)	C (1 - β^2)	C/T ²
30-max.	10	13	57	28	7	15	9
20-30	26	30	148	105	26	37	21
10-20	214	230	761	650	162	190	108
Total	250	273	966	783	195	242	138

Taula 1. La comparació dels resultats de Champion amb les prediccions teòriques. Les columnes contenen: 1, les tres regions angulars considerades; 2, el nombre de punts observats a cada una d'elles; 3, 4 i 5, els valors predits per les teories de Møller, clàssica, i Mott respectivament; 6, els valors obtinguts segons la teoria de Mott substituint m per $m/(1 - \beta^2)^{1/2}$; 7, els valors obtinguts segons la teoria clàssica fent la mateixa substitució; i 8, la predicció de la fórmula clàssica substituïnt en el denominador $(\frac{1}{2}mv^2)^2$ per T^2 , on T és l'energia cinètica de la partícula incident (segons Champion 1932c, p. 693).

P. Blackett van informar sobre el treball de Champion, que aspirava al càrrec de *Lecturer* al King's College de Londres, cap dels dos no esmentava la comprovació de la fórmula de Møller entre els seus mèrits. Cockcroft valorava en termes molt genèrics l'aportació de Champion: "The problem attacked is one of considerable importance, being a study of the close collisions of atomic particles; a study which allows a direct test of some of the fundamental results of the theory of relativity and of the wave theory of matter".⁵² Blackett deia simplement dels seus resultats que eren "de considerable interès i importància", però es compren que critiques la seva manca d'originalitat.⁵³

Champion es doctorà l'estiu de 1932, i deixà el Cavendish per incorporar-se com a *assistant Lecturer* al University College de Nottingham. Allí va continuar amb l'anàlisi de les seves fotografies, que no completaria fins el 1935.⁵⁴ El 1934 va ser nomenat *Lecturer* al King's College de Londres, on desenvoluparia

⁵²"Report by Dr Cockcroft on the dissertation of F. C. Champion" (FCC).

⁵³"Report by Professor P. M. S. Blackett on the dissertation of F. C. Champion" (FCC).

⁵⁴Champion(1936).

la resta de la seva carrera.⁵⁵

ELS EXPERIMENTS DE RUARK

El de Champion és l'únic article dedicat a la contrastació de les fórmules de dispersió de dos electrons publicat en els anys trenta: fins el 1941 no n'apareixeria un altre. Els experiments posteriors semblen haver estat motivats per les discrepàncies entre els resultats de Champion i Williams. El mateix Williams va intentar aclarir la qüestió el 1933, però els experiments que realitzà en col·laboració amb un assistent no van arribar a ser publicats. Aquest és el resum que en va fer a Arthur E. Ruark set anys després:⁵⁶

In view of the discrepancy with theory of the number of secondaries produced by fast electrons observed by Terroux and myself at Cambridge, I made further observations later at Manchester (1933) with the help of an assistant — Mr. Cameron. We did not find the earlier large discrepancies but a rate of about 1.2 to 1 of observed to theoretical [values]. This second work was also done using RaE electrons and at the time I decided to extend the observations to faster electrons but that was never done and the results with RaE were not published. The details are in a PhD thesis presented by Cameron.

Ruark dirigia el departament de física de la Universitat de North Carolina des del 1934. L'octubre de 1940 havia demanat a Williams separades d'alguns dels seus articles, ja que havia estat treballant "on nuclear radiative scattering and on energy distribution of side branches produced in electron-electron collisions".⁵⁷ Des de principi d'any, Ruark havia dedicat una part substancial

⁵⁵El 1948 Champion va ser nomenat *Reader*, i el 1959 va obtenir la càtedra de física experimental. Després del seu interès inicial per la física atòmica i nuclear, la carrera de Champion s'orientà cap a l'estat sòlid. Champion va viure a Espanya des que es va retirar, el 1970, fins a la seva mort a Màlaga el 1976 ("Obituary. Professor Champion. Noted physicist" *The Times*, 5-3-1976, p. 17).

⁵⁶Williams a Ruark, 13-11-1940 (AER). Aquestes observacions i la carta de Williams són esmentades en Hornbeck i Howell (1941), p. 51.

⁵⁷Ruark a Williams, 3-10-1940 (AER).

del seu temps a l'estudi de la dispersió d'electrons mitjançant la cambra de boira, i dos dels seus estudiants treballaven "en la producció de secundaris".⁵⁸

Ruark i els seus estudiants van escollir el mètode usat per Williams i Terroux. La comparació amb la teoria es basava en la determinació del nombre de partícules secundàries d'energia superior a un cert valor T_0 , i en el càlcul de R , el quocient entre el nombre observat i el valor predit per la fórmula de Møller. El setembre de 1940, Ruark va descriure en una llarga carta a Breit l'estat de la qüestió:⁵⁹

The present situation is this. Champion had tested formula 74 of Møller which gives the angular distribution which should correspond to the energy distribution we are studying. He got agreement to about 10 per cent for electrons with energy below 1.3 MeV. Williams and Terroux made cross-section measurements by the same method we are using, up to 1.6 MeV. Their results deviated from theory by a factor which was sometimes larger than 2, comparison being made with a formula which is gotten by dropping out the entire second line of Møller's formula 76. This corresponds in fact to the use of the old formula employed by J. J. Thomson and by Bohr prior to 1920. If comparison were made with Møller's formula, the values of R would be even higher, for the experiments with Williams and Terroux, than the values given in their paper.

Els resultats obtinguts fins aquell moment, tanmateix, no confirmaven la discrepància observada per Williams, sinó l'acord de Champion:

Calling [the ratio of the observed number to the number calculated from Møller's formula] R , the revised results are as follows:

TO, lower limit of energy of secondaries considered, in KeV	Observed No. of collisions	Expected No. of collisions	R
20	107	88.3	1.21 ± 0.12
30	63	56.4	1.12 ± 0.14
40	35	40.9	0.86 ± 0.15

⁵⁸Ruark a Breit, 5-3-1940 (GB).

⁵⁹Ruark a Breit, 2-9-1940 (GB). Cf. Ruark a Williams, 3-10-1940.

These data refer to secondary electrons produced on 190 meters of primary electron track within the limits 0.67 to 2.6 MeV. After the work had progressed for a while, we decided to limit our attention to primaries of higher energy than 1.3 MeV. The work was done by Irl Howell and George Hornbeck.

Ruark afegia: "The important point at the present stage is not the deviation from the predictions of Møller's formula, but rather the closeness of the numbers to his formula". Com s'ha d'interpretar aquesta afirmació? Podria indicar l'existència de dubtes inicials sobre la validesa de la fórmula, que haurien estat dissipats per l'èxit dels experiments —com ho suggereix un dels comentaris finals de Ruark: "To summarize: Ours are the only data on this important subject, covering the range above about 1.3 MeV. *They agree with Møller's formula much better than we hoped for when the work began*". Però l'afirmació ambigua de Ruark podria també estar relacionada amb el fet que els experiments eren "really complicated". "Even with good viewing and measuring facilities", explicava a Breit, "it is difficult to measure absolute cross-sections with the cloud chamber". Algunes de les nombroses fonts d'error sistemàtic no havien estat previstes en iniciar el treball, i només podrien ser eliminades "in future experimental work": "The whole thing boils down to eliminating little errors and troubles, each of which acting separately can cause an error from 1 to 5 per cent".

L'optimització del mètode de mesura i la reducció dels marges d'error es trobaven en mans d'un segon parell d'estudiants, Paul E. Shearin and Eugene Pardue. L'esforç era imprescindible si s'havia de distingir clarament la fórmula de Møller de la resta de fórmules de dispersió:

At the present time the data available do not distinguish sharply between the requirements of Møller's formula and the requirements of the older formulas like that of Thomson and Bohr. The difference between the two is small for secondaries having energies which we can deal with. Obviously, we ought to push out into the region of higher secondary energies; that is, we should study "closer" collisions. However, the infrequency of close collisions limits our efforts

$T_0(\text{KeV}) :$	20	30	40
$R :$	$1'18 \pm 0'14$	$1'09 \pm 0'16$	$0'84 \pm 0'15$

Taula 2. Resultats de Hornbeck i Howell per al quocient R entre el valor experimental de la secció eficaç, i el seu valor teòric segons la fórmula de Møller. T_0 , límit inferior per l'energia dels electrons secundaris (Hornbeck i Howell 1941, p. 33).

in this direction, so we are going to try to do a thorough job on secondaries of relatively low energy. Photographs in a larger chamber are needed before we can attack the problem of the closer collisions effectively. I think that even at the present stage, the observations are interesting, because so far they do not indicate the necessity of including in the theory any terms higher than v^2/c^2 .

Els resultats avançats per Ruark no difereixen massa dels publicats per Hornbeck i Howell l'abril de 1941. Hornbeck i Howell destacaven la necessitat d'obtenir dades experimentals de la secció eficaç per la dispersió d'electrons d'alta energia, molt més escasses que les relatives al frenat o la ionització, i presentaven els seus experiments com motivats per les discrepàncies en les dades experimentals existents. A partir de les dades de Williams i Terroux, Hornbeck i Howell deduïen una secció eficaç que era $2,1 \pm 0'25$ vegades superior al valor predit per Møller, "in sharp contradiction with the results of Champion, and with our own", el que els portava a concloure: "More extensive cloud chamber observations are needed, both to clear up the discrepancy and to extend the results to higher primary energy".⁶⁰

L'anàlisi de Hornbeck i Howell es basava en les fotografies que havia pres un altre professor de la mateixa universitat, Creighton C. Jones, i s'havia realitzat mitjançant un visor estereoscòpic desenvolupat pel mateix Jones i Ruark. Els electrons primaris eren electrons produïts a les parets d'una cambra de nitrogen pels raigs γ d'una font de mesotori. L'energia dels electrons primaris venia

⁶⁰Hornbeck i Howell (1941), pp. 38 i 39.

$T_0(KeV)$:	20	30	40
R :	$1'07 \pm 0'09$	$0'99 \pm 0'11$	$1'04 \pm 0'12$

Taula 3. Resultats de Shearin i Pardue per al quocient R entre els valors experimental i teòric de la secció eficaç; interpretar com la taula 2 (Shearin i Pardue 1942, p. 243).

donada per la curvatura de la seva traça; la dels electrons secundaris, pel seu rang. Hornbeck i Howell havien calculat la secció eficaç de producció d'un electró secundari d'energia cinètica T , superior a T_0 , però inferior a $T_p/2$ (on T_p és l'energia cinètica de l'electró primari) integrant la fórmula de Møller entre T_0 i T_p , i promitjant sobre l'energia primària. El seus resultats (taula 2) complementaven els obtinguts per Champion en l'àmbit d'energies primàries de 0,4 a 0,9 MeV. "Both investigations", conclouïen, "support each other in demonstrating the essential correctness of Møller's theory of secondary energy distribution in the domain of primary energy from 0,4 to 2,6 MeV"⁶¹

El treball de Shearin i Pardue va aparèixer el febrer de 1942 als *Proceedings* de la institució que havia subvencionat la investigació, l'American Philosophical Society. Shearin i Pardue havien millorat l'acord entre les observacions experimentals i la fórmula de Møller modificant els criteris de selecció de traces i mesurant més acuradament els rangs. Segons els seus resultats (taula 3) "the Møller formula is essentially correct for the primary and secondary energy ranges considered here".⁶²

El que diferencia més clarament aquests intents del de Champion és el treball en equip i la intenció explícita en iniciar els experiments de contrastar la fórmula de Møller. A finals dels anys quaranta, es qüestionaria el caràcter decisiu i la significació d'aquests experiments. Deixant momentàniament de banda aquestes qüestions, veiem com era valorada la fórmula en els articles

⁶¹*Ibid.*, p. 51.

⁶²Shearin i Pardue (1942), p. 243.

que acabem de considerar. Hornbeck i Howell caracteritzaven sense precisió les aportacions de Bethe, Breit i Wolfe, per afegir simplement que “[Møller’s] final formulas giving the cross-section for production of a branch with energy in the range T to $T + dT$, are presumably the most accurate ones available”.⁶³ Shearin i Pardue parlaven d’una “teoria relativista de la secció eficaç electró-electro”: “This theory, due to M011er, includes the effects of exchange and retardation of potentials, to terms in $(v_p/c)^2$ inclusive, v_p being the velocity of the incident electron”.⁶⁴ Al final de l’article eren més explícits encara que, significativament, relacionaven el tractament de M011er amb el de Breit: “We wish to emphasize the importance of thorough tests of this formula, the only one in which the interaction of two similar fundamental particles has been calculated with perfect symmetry, in accordance with the spirit of Breit’s considerations”. En cap cas s’esmentaven explícitament elements més fonamentals del treball de M011er, com el recurs a l’equació de l’electró de Dirac, per no dir la relació de la fórmula amb l’electrodinàmica quàntica.

ELS EXPERIMENTS CONCLUSIUS

El 1950, un equip del Institute for Nuclear Studies de la Universitat de Chicago va publicar una anàlisi de 98 col·lisions electró-electró obtingudes “as a by-product of several cloud-chamber investigations carried out in this laboratory”. Els autors justificaven l’estudi per l’escassa evidència experimental existent sobre aquest tipus de col·lisió. A l’article es comparaven la teoria de M011er, versions relativistes de les teories de Mott i Rutherford, i la teoria clàssica de Rutherford. Els resultats, un cop més, no eren del tot conclusius: “Our data discriminate definitely only against the latter theory. When combined with 122 electron-electron collisions observed by Champion, they are consistent only with the first two theories, but are insufficient to discriminate

⁶³Hornbeck i Howell (1941), p. 40.

⁶⁴Shearin i Pardue (1942), p. 243.

decisively between them". De la fórmula de Møller es deia que era la teoria de la dispersió electró-electró "now generally accepted".⁶⁵ S'havia ja establert la base teòrica de la fórmula amb tanta claredat que els autors de l'article no necessitaven esmentar l'electrodinàmica quàntica? O era la fórmula "acceptada" tal com havia estat deduïda, al marge de la teoria genèrica de les interaccions electromagnètiques?

En qualsevol cas, a partir d'aquest moment es constata fàcilment, especialment als Estats Units, un increment de l'interès per la dispersió electró-electró. El 1951, un grup de la Universitat d'Illinois va analitzar aquest procés utilitzant un feix d'electrons de 15,7 MeV, procedents d'un bevatró de 22 MeV.⁶⁶ A finals del mateix any, un equip del Radiation Laboratory de Berkeley considerava aquesta interacció a altes energies, mitjançant electrons de 200 MeV procedents del sincrotó de Berkeley.⁶⁷ Al Microwave Laboratory de la Universitat de Stanford, un altre grup de físics experimentals va estudiar la dispersió d'electrons de 6,1 MeV procedents d'un accelerador lineal.⁶⁸ En tots els casos els electrons incidents procedien d'un accelerador, i la dispersió havia estat enregistrada amb una cambra de boira. Però els trets distintius de la fórmula de Møller comencen a ser apreciables quan l'electró incident cedeix una fracció important de la seva energia a l'electró impactat, i aquest tipus de col·lisió, poc freqüent, rarament era fotografiada. Per això, encara que en la majoria dels articles resultants es constatés la correcció de la fórmula de Møller, la simplicitat i originalitat de l'article publicat per Ashkin, Page i Woodward el 1954 van fer que fos unànimament considerat —i ho segueixi essent— com el més convincent d'aquesta sèrie.⁶⁹ La llista, que no pretén ser exhaustiva, il·lustra la proliferació d'experiments al voltant de 1950. En cap dels articles citats no

⁶⁵Groetzinger, Leder, Ribe i Berger (1950), pp. 454 i 455.

⁶⁶Scott, Hanson i Lyman (1951).

⁶⁷Barkas, Deutsch, Gilbert i Violet (1952).

⁶⁸Barber, Becker i Chu (1953).

⁶⁹Ashkin, Page i Woodward (1954).

es relaciona directament la fórmula de Møller amb l'electrodinàmica quàntica; en tots ells la fórmula és considerada com la més satisfactòria teòricament, però no s'indiquen les raons. La caracterització més precisa que es fa de la fórmula és que es basa en la teoria de Dirac.

Considerem finalment amb més detall els experiments decisius, ja que en realitat no representen la culminació sinó un dels primers exemples de l'augment d'interès per la dispersió Møller. Els experiments s'havien desenvolupat en un dels nous laboratoris creats després de la guerra, el Laboratory of Nuclear Studies de la Universitat de Cornell. El setembre de 1950, Lome Albert Page va defensar-hi la seva tesi doctoral. Els seus resultats no diferien essencialment dels que serien publicats, quatre anys després, en l'article conjunt amb Ashkin i Woodward.⁷⁰ Donat que Page havia iniciat els seus estudis de doctorat el 1945, sota la direcció de M. Woodward, l'origen dels experiments es troba en el període immediatament posterior al final de la guerra.⁷¹

Page va observar la col·lisió electró-electró mitjançant la cambra de dispersió representada esquemàticament a la figura 4. Els electrons (3 emesos per una font radioactiva (Sr^{90} - Y^{90}), situada a 0° , recorrien 270° abans d'incidir sobre una làmina dispersora F . La cambra es trobava situada dins d'un camp magnètic uniforme que, juntament amb les esclatxes situades a 90 , 180 i 270° , permetia fixar l'energia del feix d'electrons incident en un valor comprès entre $0,6$ i $1,7$ MeV. Els electrons secundaris eren detectats per dos comptadors Geiger (A i B) connectats a un circuit que enregistrava la seva reacció simultània. La distància entre els comptadors i la làmina dispersora determinava l'energia de les partícules detectades. L'aplicació del conegut mètode de coincidència representava una innovació decisiva respecte els experiments anteriors i els que simultàniament s'estaven desenvolupant, basats en l'observació

⁷⁰Page, *A measurement of electron-electron scattering*, tesi doctoral no publicada (Cornell University Libraries, Ithaca). Veure també Page (1951).

⁷¹Page, nascut el 1921, es matriculà a Cornell el novembre de 1945, després d'haver servit a l'exèrcit (tesi de Page, "Biographical sketch").

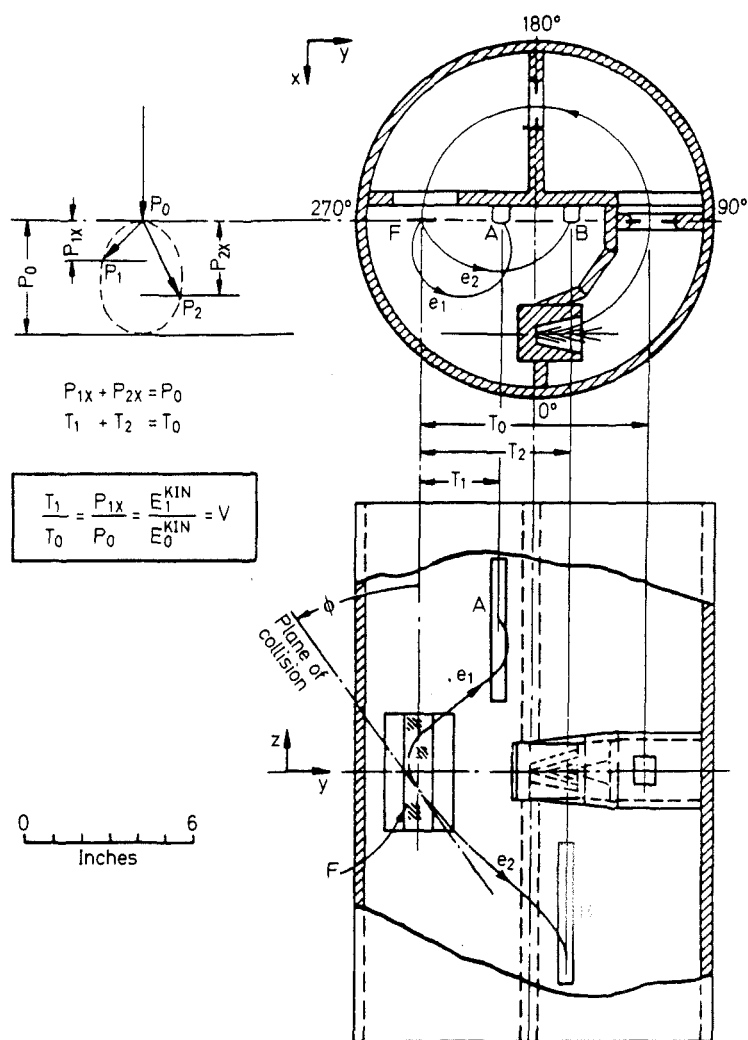


Figura 4. La cambra de dispersió a 270° usada per Page en les seves mesures de la dispersió electró-electró, segons la figura 1 de la seva tesi doctoral. S'hi representa una trajectòria típica d'una partícula β des de la font, a 0° , fins a la làmina dispersora F, a 270° (camp magnètic segons l'eix z). Dos electrons, e_1 i e_2 , emergeixen de la làmina i són detectats pels comptadors Geiger A i B, connectats en coincidència. El diagrama superior esquerra representa els moments en el pla de col·lisió, per una energia cinètica incident de 1 MeV i una transferència fraccional d'energia $e = 0,35$. La mateixa figura seria reproduïda quatre anys després en l'article conjunt amb Ashkin i Woodward (Ashkin, Page i Woodward 1954, p. 358).

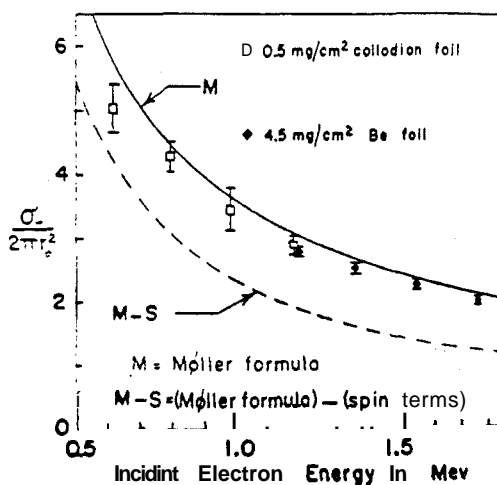


Figura 5. Resultats de Page per la secció eficaç diferencial $e^- - e^-$ per $e = 0,5$, en funció de l'energia cinètica de l'electró incident (Ashkin, Page i Woodward 1954, p. 360).

de traces ramificades mitjançant la cambra de boira.

Els experiments de Page es centraven en l'observació de les col·lisions en què la transferència d'energia e era gran, aquelles en què els efectes de spin són més pronunciats i la fórmula de Møller es distingeix més clarament de les altres fórmules de dispersió. La simetria de l'estat final limita la transferència d'energia màxima a $e = 0,5$. Els resultats de Page per la secció eficaç diferencial corresponent a aquest valor de e es mostren a la figura 5. Com es comentaria a l'article conjunt amb Ashkin i Woodward, "the preference of the data for the Møller formula is apparent".⁷²

Els experiments de Page no només suposaven la confirmació la fórmula de Møller; Page afirmava complagut a les seves conclusions que "the formula is rather 'necessary', in that all the the essential features of the formula must be included for a reasonable agreement with experiment—thus it is not merely some degenerate form which applies for the range of E [incident energy] and ν [fractional energy transfer] investigated here".⁷³ Al mateix temps, descartava

⁷²Ashkin, Page i Woodward (1954), p. 361.

⁷³*Ibid.*, p. 20.

la possibilitat que una teoria més avançada modifiqués les prediccions de Møller en el rang d'energies que havia considerat.

A la seva tesi, Page qualificava breument la fórmula de Møller com una fórmula "basada en la teoria de l'electró de Dirac", i afegia:⁷⁴ "Careful measurements of the differential cross-section in the relativistic energy region as a function of incident energy should provide verification or denial of the Møller formula, and by implication *the present theory of the electron*". Enlloc apareix una referència directa a l'electrodinàmica quàntica, encara que podem preguntar-nos si era necessària. Page no deixava d'esmentar desenvolupaments teòrics més recents en què es tenia en compte l'emissió de radiació, i havia tingut un interlocutor d'excepció, Richard P. Feynman, a qui agraiïa "helpful discussions of the process being studied".⁷⁵ Aquest reconeixement suggereix que l'augment d'interès per la dispersió Møller en el període de postguerra va afectar alhora els aspectes teòric i experimental.

⁷⁴Tesi de Page, p. 1 (el subratllat és meu).

⁷⁵Page citava Schwinger (1949) i Katzenstein (1950), així com una tesi doctoral llegida al mateix departament, Lomanitz, *Second order effects in the electron-electron interaction*, Cornell University 1950 (tesi de Page, p. 25; veure p. 58 per la referència a Feynman).

CAPÍTOL 6

La contrastació experimental de la fórmula de Bhabha

La carrera experimental de la fórmula de Bhabha és breu i irregular. Mentre ningú no sembla haver-se interessat per la contrastació de la fórmula en els pocs anys transcorreguts entre la seva aparició i l'esclat de la Segona Guerra Mundial, després de la guerra es constata fàcilment un cert augment d'interès que en pocs anys condueix a experiments conclusius. És aparent que aquest canvi d'actitud forma part del procés que transformà un resultat tècnic que havia passat gairebé desapercebut, en una de les aplicacions fonamentals de l'electrodinàmica quàntica que va néixer després de la guerra. En aquest capítol s'analitzen les circumstàncies experimentals d'aquesta transformació.

Els paral·lelismes amb la contrastació experimental de la fórmula de Møller no es limiten a la successió de períodes d'indiferència i atenció. L'estreta relació entre les dues deduccions teòriques es traduirà, a nivell experimental, en la similitud de les tècniques, instruments i dispositius utilitzats per contrastar ambdues fórmules. Com en el capítol anterior, els experimentadors *observaran* primer la dispersió d'un positró per un electró de la forma més literal possible: a través dels centenars d'imatges de la col·lisió que subministra la cambra de boira. L'evidència decisiva a favor de la fórmula s'obtindrà, paradoxalment, a través d'un mètode menys immediat, però d'una simplicitat i "bellesa" sumament convincents.¹

¹Jauch i Rohrlich (1955), p. 261.

PRIMERS INTENTS

Els primers experiments amb implicacions directes per la fórmula de Bhabha van ser realitzats per la física xinesa Zah-Wei Ho en l'institut de Bothe a Heidelberg, durant els últims mesos de la guerra. Ho arribà a Heidelberg fugint de Berlín l'octubre de 1943, i a pesar que el laboratori de Bothe formava part de l'aparell bèlic del *Reich*, va poder dedicar-se a l'estudi experimental de la col·lisió positró-electró —fins el març de 1944, quan l'institut va ser ocupat.² L'interès d'aquest procés es trobava en la possibilitat que oferia d'observar la distribució de l'energia de la partícula incident entre les partícules dispersades. En la col·lisió entre dos electrons no es podien distingir les col·lisions en què l'energia cedida per l'electró incident era gran, d'aquelles en què era petita, perquè les partícules secundàries eren indistingibles. Per a Ho i Bothe, que col·laborà en els experiments, els casos en què el positró cedia una fracció important de la seva energia eren especialment interessants, perquè corresponien a paràmetres d'impacte reduïts, que permetrien observar desviacions de la llei d'interacció coulombiana (fórmula de Rutherford).³

La justificació negativa dels experiments (per què no observar l'acord amb les prediccions d'una teoria de la interacció que inclogués efectes relativistes i de spin?) suggereix que la referència primordial de Ho i Bothe era la fórmula de Rutherford, i no una fórmula més completa. I en efecte, el més sorprenent del seu treball és que aparentment ni Ho ni Bothe no sabien del treball de Bhabha en iniciar els experiments! Bothe va deduir una fórmula idèntica a la

²La correspondència entre Ho i Bothe relativa a l'arribada a Heidelberg es conserva a l'arxiu de Bothe, però aquesta és tota la informació referent a l'estada de Ho que conté (WB 4-10). Goudsmit (1947) descriu l'ocupació i la seva sorpresa "at the large amount of pure physics which was done during the war" (p. 79). Cf. Flammersfeld a Meitner, 27-10-1948 (LM 5/5): "Dann aber kam der Krieg mit seinen Kriegsarbeiten" (A. Flammersfeld treballava a l'institut de Heidelberg en esclatar la guerra).

³Referint-se a aquest tipus de col·lisions observen Bothe i Ho: "Der zweite, klassisch viel seltener Fall ware besonders interessant, weil er an besonders kleine Stoßabstände gebundent ist, bei denen schließlich einmal die Gültigkeit des Coulomb-Gesetzes zweifelhaft wird" (Bothe i Ho 1946, p. 59).

de Bhabha seguint el seu mateix procediment, i només durant la correcció de proves de l'article que elaboraria amb Ho es va assabentar que Bhabha havia ja deduït la mateixa fórmula uns anys abans:⁴

Un de nosaltres ha deduït una fórmula [per la col·lisió electró-positró] a partir de la teoria dels "forats" de Dirac. Segons aquesta representació, el positró és un estat electrònic desocupat d'energia negativa, i el procés en qüestió es pot considerar com la transició d'un electró d'energia negativa a aquest estat lliure. El càlcul s'ha realitzat seguint el mètode de Møller[. . .]

Sembla clar que els físics alemanys no sospitaven de l'existència d'una fórmula com la de Bhabha en iniciar els seus experiments; el seu desconeixement podria indicar manca de familiaritat amb la literatura teòrica, però tractant-se de Bothe seria més apropiat considerar-lo com una indicació que el treball de Bhabha havia passat relativament desapercebut. En qualsevol cas, la similitud del tractament de Bothe amb el de Bhabha era prou completa perquè Bothe desistís finalment de publicar-lo separatament, com era la seva intenció.

L'anàlisi experimental de Ho es basava en l'observació de les col·lisions mitjançant una cambra de boira, que havia muntat amb l'ajut d'un dels físics alemanys més experts en la construcció d'aquests aparells, H. Maier-Leibnitz. Una font radioactiva (Mn^{52}) proporcionava positrons d'energies compreses entre 25 i 800 keV. La mesura de la curvatura o el rang de les traces fotografiades donava l'energia de les partícules implicades en la col·lisió, i per tant, el nombre de col·lisions en què un positró incident d'energia γ (en unitats mc^2) cedia una fracció ϵ d'aquesta a l'electró dispersat. Tanmateix, per determinar la secció eficaç diferencial no n'hi havia prou amb aquest nombre, perquè no tots els positrons d'energia γ havien xocat amb un electró. Per obtenir la secció eficaç

⁴Bothe i Ho (1946), p. 59: "Eine theoretische Streuformel für diesen Fall hat der eine von uns aus der Diracschen "Loch"-Vorstellung abgeleitet. Hiernach ist das Positron ein unbesetzter Elektronenzustand negativer Energie. Der in Frage stehende Prozeß ist dann so aufzufassen, daß ein Elektron negativer Energie in diesen freien Zustand hineingestreut wird. Die Rechnung, die nach der Methode von Møller durchgeführt wurde[. . .]".

corresponent era necessari conèixer el flux incident de positrons d'energia γ ; i si el que es volia era agrupar les dades procedents de totes les col·lisions observades (que implicaven positrons de diferents energies) era necessari conèixer l'espectre dels positrons incidents, que s'havia de determinar empíricament. Per fer-ho es podia partir de les mateixes fotografies analitzades per obtenir el nombre de col·lisions, en base al següent raonament.⁵

La secció eficaç diferencial $d\sigma(\gamma)$ es defineix com el nombre de col·lisions (per segon, per electró, i per unitat de flux incident de positrons d'energia γ) en què la fracció d'energia cedida està compresa en l'interval $\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon$. El flux incident de positrons γ és $N_\gamma v$, on N_γ és el nombre de positrons incidents amb velocitat v , fixada per γ . Si n_e és el nombre d'electrons per unitat de volum que conté el gas de la cambra, el nombre de col·lisions en què es veuen implicats positrons γ , en el rang $(\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon)$, vindrà donat per

$$N(\gamma, \varepsilon) = d\sigma n_e N_\gamma v \Delta t,$$

on Δt és el temps d'exposició de les fotografies. Però $v\Delta t = AL$, on L és una longitud de traça, i per tant

$$N(\gamma, \varepsilon) = d\sigma n_e N_\gamma AL.$$

$N_\gamma AL$ és la magnitud que es pot determinar experimentalment medint la longitud de totes les traces corresponents a positrons d'energia γ , hagin col·lisionat o no. Aquesta mesura es realitzava normalment en un nombre representatiu de fotografies, i els resultats s'extrapolaven al conjunt. La suma d'aquestes traces, $L(\gamma)$, supleix el desconeixement de N_γ . El nombre de col·lisions en què positrons γ cedeixen una fracció e de la seva energia és

$$N(\gamma, \varepsilon) = d\sigma n_e L(\gamma),$$

⁵L'argument, el mateix utilitzat implícitament per Ho, està inspirat en Hoke (1952), un dels articles que analitzem més endavant.

i el nombre total de col·lisions amb una transferència d'energia e resulta finalment

$$N(\varepsilon) = \sum_{\gamma=1}^{\gamma_{\text{màx}}} N(\gamma, \varepsilon).$$

A principi de 1946, Ho estava en condicions d'oferir els primers resultats i conclusions, que van aparèixer gairebé simultàniament en alemany i en francès.⁶ En aquells moments, Ho treballava al Laboratoire de Chimie Nucleaire del College de France, amb Frederic Joliot. Els resultats, basats en l'anàlisi d'encara no dues-centes col·lisions (l'examen d'uns 170 m de traça), es podien representar en una única figura, que donava el nombre de col·lisions en funció de la transferència d'energia ε (figura 1).⁷ En general, l'acord amb les prediccions teòriques era tan bó com l'escàs nombre d'esdeveniments ho permetia; però en els casos que la transferència d'energia era superior al 50% —aquells que podien ser mesurats amb major precisió, i els més apropiats per distingir les peculiaritats de la fórmula de Bhabha — els valors experimentals excedien clarament els teòrics.⁸

⁶Bothe i Ho (1946), Ho (1946a). Amb l'article en alemany sembla que es vulgui deixar constància, amb una primera comunicació, que les investigacions s'havien iniciat a Alemanya, encara que haguessin hagut de continuar a França: "Da jedoch die Untersuchung nicht fortgeführt werden kann, mögen die bisherigen Ergebnisse kurz mitgeteilt und diskutiert werden" (Bothe i Ho 1946, p. 59).

⁷Una de les fotografies de Ho va ser presentada com una "curiositat científica" per un dels seus col·legues a París, San-Tsiang Tsien, en una de les primeres reunions científiques celebrades després de la guerra, la "Anglo-French Conference on Cosmic Rays" (Bristol, setembre de 1945): "The photograph, taken in a magnetic field, shows a positive electron colliding with an ordinary electron without annihilation in the process; the positron recoils, having given most of its energy to the recoiling negatron" (*Nature*, November 3, 1945, p. 543). Ho esdevindria Mme. Tsien.

⁸Ho (1946a), p. 1170: "on remarque que les valeurs experimentales sont nettement supérieures aux valeurs calculées pour les cas de fort échange d'énergie[...] dans lesquels les mesures experimentales sont plus précises". A la comunicació en alemany, presentada per Bothe a la Academia de Ciències de Göttingen dies abans que Joliot fes el mateix a la de París, l'avaluació era igualment concisa i poc entusiasta: "Die Übereinstimmung, auch in den Absolutwerten, ist vielleicht nicht viel schlechter als man erwarten kann. Auffällig sind aber besonders die zahlreichen Fälle starker Energieabgabe[...] Gerade diese Fälle können experimentell recht sicher erfaßt werden".

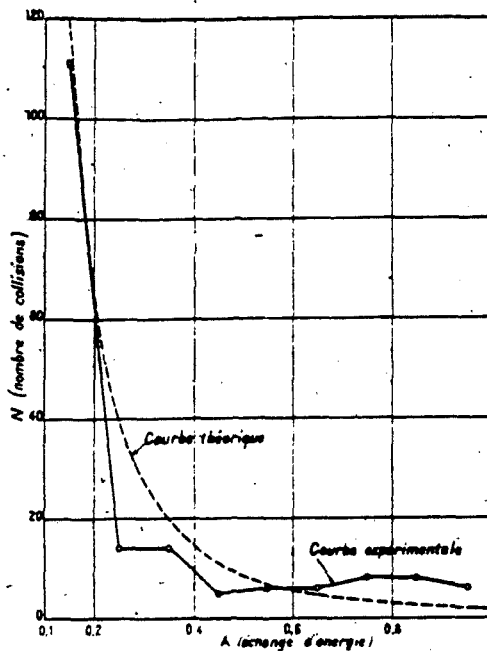


Figura 1. Resultats de Ho pel nombre de col·lisions en funció de la transferència d'energia ($A - \epsilon$). La cambra de boira enregistra totes les col·lisions, i les més freqüents corresponen a valors de ϵ reduïts (Ho 1946a, p. 1168).

L'agost de 1946, Ho va completar la difusió dels seus resultats amb la publicació d'una carta a *The Physical Review* que, a part de qualificar explícitament els seus resultats d'"anòmals", no aportava cap novetat respecte les comunicacions anteriors. Durant els dos anys següents, Ho va completar una segona sèrie d'experiments, analitzà 150 col·lisions més, i preparà una nova comunicació a l'Acadèmia de Ciències de París. La física xinesa havia canviat de cambra de boira (n'utilitzava una de dissenyada per Joliot) i de font radioactiva (F^{18} en lloc de Mn^{52}); però els nous resultats, que confirmaven l'anomalia detectada en la sèrie d'experiments anterior, seguien sense donar cap indicació sobre les seves causes:⁹

Dans l'ensemble, la courbe expérimentale ressemble beaucoup à celle obtenue précédemment et l'accord entre la théorie et l'expérience est assez satisfaisant.

⁹Ho (1948), p. 1085.

Cependant il semble que les anomalies constatées dans nos premières expériences existent toujours, bien qu'on ait double le nombre d'observations.

Els experiments de Ho no van anar més enllà, però van servir de precedent a un grup de sis experimentadors de Heidelberg —von O. Ritter, C. Lieseberg, H. Maier-Leibnitz, A. Papkow, K. Schmeiser i W. Bothe— que el 1951 va publicar els resultats d'una nova investigació de la dispersió electró-positró mitjançant la cambra de boira.¹⁰ Com en el cas de Ho, aquests experiments es centraven en l'observació de les col·lisions amb una elevada transferència d'energia, aquelles en què qualsevol possible desviació de les prediccions teòriques es manifestaria més clarament. Però aquest cop els experimentadors tenien molt present quina teoria es veia més directament afectada pel resultat de les seves mesures: "A través d'experiments de dispersió com aquests es pot contrastar, especialment, la teoria de forats del positró de Dirac".¹¹

La diferència més significativa entre l'anàlisi del grup de físics alemanys i el de Ho es troba en el nombre de mesures, que s'havia incrementat considerablement. Les seves conclusions es basaven en l'estudi d'unes vuit-centes col·lisions, que totalitzaven 2.900 m de traça; l'energia dels positrons emprats anava dels 100 als 400 keV. La contrastació es basava en comptar el nombre de col·lisions amb una certa transferència d'energia. La comparació entre les prediccions de la fórmula de Bhabha i les dades experimentals era satisfactòria tenint en compte el marge d'error sistemàtic, que s'estimava en un 15%, i les fluctuacions estadístiques, Ritter i companyia conclouien que dins d'aquests generosos límits "la dispersió de positrons per electrons concorda amb la teoria per energies compreses entre 100 i 400 keV".¹²

¹⁰Ritter et al. 1951, p. 243: "Die einzige experimentelle Untersuchung stammt von Bothe und Ho, Sie ist der Vorläufer der jetztigen, in der versucht werden sollte, mit einem größeren experimentellen Material und bei etwas höheren Energien diese Wirkungsquerschnitte zu bestimmen".

¹¹Ibid., p. 243: "Insbesondere kann durch solche Streuversuche die Diracsche Lochtheorie des Positrons geprüft werden".

¹²Ibid., p. 248: "Innerhalb dieser Grenzen[...] stimmt also die Streuung von Positronen

El treball de Ritter et. *al.* suposa una primera contrastació de la fórmula de Bhabha en el sentit que s'hi discuteix la necessitat dels dos darrers termes de la fórmula, associats a l'efecte d'intercanvi. La distinció entre la fórmula de Bhabha "amb intercanvi" i la fórmula de Bhabha "sense intercanvi" serà comú a tots els experimentadors que intentaran contrastar la fórmula —Ho és la primera i única excepció. Els resultats de Ritter et. *al.* mostraven que tots els termes de la fórmula eren necessaris per garantir l'acord amb les dades experimentals, però el valor d'aquesta conclusió favorable estava limitat seriosament per les deficiències del seu mètode experimental. Dues d'aquestes limitacions estan clarament representades en l'article del grup alemany: la dificultat d'obtenir la quantitat de dades necessària per sostenir una anàlisi estadística convincent; i l'error introduït en la mesura de l'energia de les partícules a partir de la curvatura de les traces o el rang, complicada per la presència de dispersió múltiple, difícilment evitable i distingible de la dispersió simple.¹³ Podríem encara afegir-ne una altra de més significativa, notada pels proponents d'un mètode de mesura més selectiu: les característiques relativistes de les fórmules de Møller i Bhabha comencen a ser apreciables quan la transferència d'energia és elevada, i aquest tipus de col·lisió, menys freqüent, rarament s'observa amb una cambra de boira. Aquests problemes no podien deixar d'afectar el treball de G. Robert Hoke, un estudiant de doctorat que a finals dels anys cinquanta va escollir com a tema de tesi la dispersió electró-positró. El seu és un darrer intent, infructuós, d'arribar a conclusions definitives mitjançant la cambra de boira.

Hoke va realitzar els seus experiments a la Universitat de North Carolina, sota la direcció de Paul E. Shearin —un dels estudiants que, a principi dels

an Elektronen im Energiebereich 100-400 keV mit der Theorie überein".

¹³En la dispersió múltiple la desviació final és el resultat de petites desviacions successives. Per a Ritter et. *al.* aquesta era "la dificultat principal en la mesura de la curvatura de les traces" (*ibid.*, p. 245). També G. R. Hoke, els experiments del qual examinarem tot seguit, considerava la dispersió múltiple "quite troublesome", perquè podia provocar deflexions aparents importants (Hoke, tesi doctoral, p. 4).

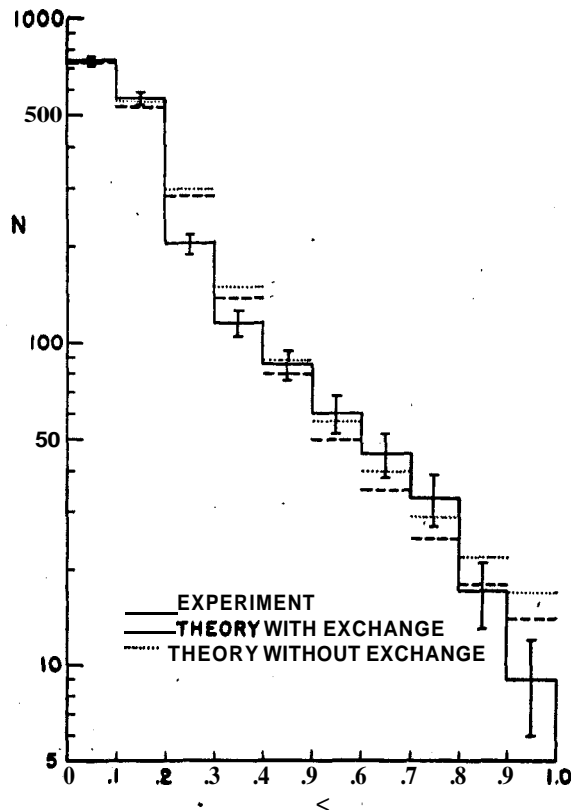


Figura 2. Resultats de Hoke pel nombre de col·lisions en funció de la transferència fraccional d'energia ξ (Hoke 1952, p. 288).

anys quaranta, hi havia estudiat la dispersió M011er. L'anomalia detectada per Ho i l'experiència del seu director de tesi van proporcionar la motivació necessària per iniciar els experiments:¹⁴

The first work on [the single scattering of positrons by electrons] indicated a discrepancy between theory and experiment. As this sort of discrepancy was observed in the early work on electron-electron scattering and was resolved by later more precise work, it is hoped that such may prove to be the case for positron-electron scattering.

Hoke va estudiar la dispersió dels positrons emesos per una font radioactiva (Na_7^{22}) mitjançant una cambra de boira convencional. L'energia dels positrons

¹⁴Hoke (1952), p. 285. La tesi de Hoke, *Positron-electron scattering in Helium* (tesi doctoral no publicada, University of North-Carolina Libraries, 1951) començava amb les mateixes paraules, però en un excés de zel s'afegia "for otherwise the theory will have to be reconsidered".

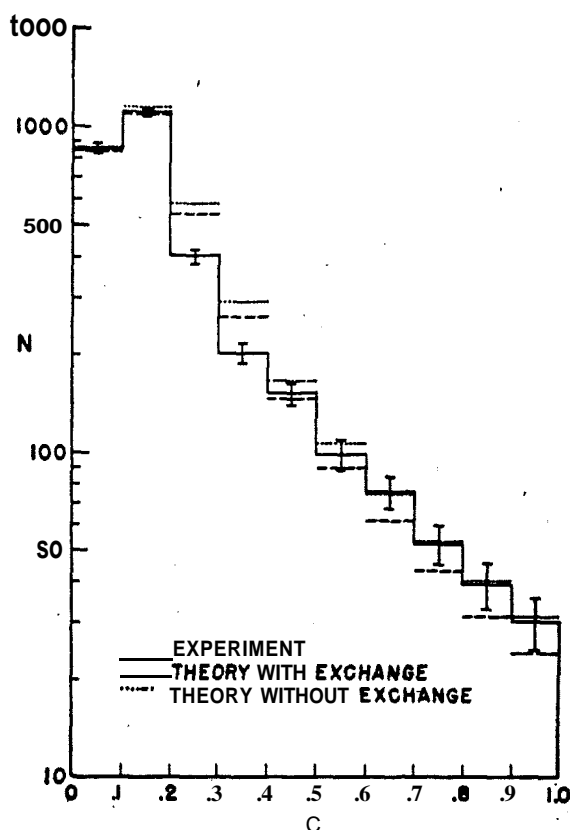


Figura 3. Representació conjunta dels resultats de Ho, Ritter et. *al.* i Hoke pel nombre de col·lisions en funció de la transferència fraccional d'energia e (Hoke 1952, p. 289).

anava dels 20 als 600 keV. El mètode experimental no diferia en cap aspecte essencial del de Ho, i Ritter et. *al.*; es basava, com aquells, en determinar quantes col·lisions corresponien a una transferència d'energia determinada.

Hoke examinà un total de 1.129 col·lisions, amb una transferència d'energia superior al 10%. El resultat es mostra a la figura 2. L'anàlisi de les dades es basava en la comparació de les prediccions de la teoria de Bhabha "tenint en compte l'efecte d'intercanvi i la teoria sense intercanvi". Els resultats no eren favorables a la teoria en cap dels dos casos, ni permetien discriminar-los clarament entre sí. Tanmateix, si es consideraven conjuntament tots els experiments realitzats fins aquell moment (2.156 col·lisions), les dades es decantaven de forma clara i inequívoca a favor de la teoria sense intercanvi (figura 3).

L'exposició de resultats tan adversos no podia ser més reveladora. Hoke observava que "the *agreement* between theory and the results of this experiment is not close enough to determine whether the exchange effect should be included", i conclouïa que "the number of positron-electron scattering events observed for positron energies up to 600 keV is in good agreement with the theory of Bhabha".¹⁵ Aquesta valoració excessiva mostra que els experiments de Hoke, més que una contrastació, representaven una verificació de la fórmula de Bhabha, ja que l'existència de l'efecte d'intercanvi era irrecusable des del punt de vista teòric. Només així es pot entendre l'observació final de Hoke que són necessaris més experiments per determinar "whether the exchange theory is *completely correct*".¹⁶

L'anàlisi teòrica continguda en la tesi de Hoke, d'altra banda, és molt simple: es limita a la transcripció amb alteracions mínimes d'alguns paràgrafs de l'article de Bhabha, i no inclou cap referència a desenvolupaments més moderns de la teoria, ni a la seva significació més àmplia. La fórmula hi és representada com una entitat aïllada que Bhabha ha obtingut basant-se en el treball de Møller.¹⁷ El tractament original de Bhabha exerceix una forta influència sobre les representacions teòriques dels físics experimentals que intenten contrastar la fórmula, influx que es manifesta especialment en la identificació de l'efecte d'intercanvi amb la creació i anihilació d'una parella electró-positró. Seguint Bhabha, ambdós processos seran en la majoria dels casos assimilats sense atendre a les diferències conceptuals que els separen. L'article de Ritter et. al. era un primer exemple d'aquesta identificació; s'hi parlava de "l'efecte d'intercanvi, és a dir, l'anihilació i nova formació d'una parella".¹⁸ La confusió persisteix en els experiments que examinem a continuació.

¹⁵Hoke (1952), p. 289 (èmfasi afegit). A la seva tesi, Hoke arribava a qualificar l'acord de "extremely good" (p. 54).

¹⁶*Ibid.*, p. 289 (èmfasi afegit).

¹⁷*Ibid.*, p. 289. Cf. tesi de Hoke, pp. 12-18.

¹⁸*Ibid.*, p. 248: "der Austauschprozeß, nämlich die Vernichtung und erneute Bildung eines Paares".

EXPERIMENTS CONCLUSIUS

Els experiments descrits a la secció anterior tenen en comú l'ús de la cambra de boira i un marge d'error, sistemàtic o estadístic, que limita severament la seva significació. Problemes similars havien afectat, com hem vist, la contrastació de la fórmula de Møller, i en aquell cas la solució més enginyosa i efectiva havia estat l'utilització de comptadors Geiger connectats en un dispositiu de coincidència. El director d'aquell projecte, W. M. Woodward, proposà a un altre estudiant del Laboratory of Nuclear Studies de Cornell, Arthur Ashkin, d'aplicar el mateix mètode d'anàlisi a la col·lisió positró-electró, amb idèntics bons resultats.

Ashkin va construir una cambra de dispersió molt similar a la de Page, però en la qual els positrons emesos per un font S recorrien 180° , en lloc de 270° , abans d'incidir sobre la làmina dispersora F (figura 4). Una font de 1 mc de Co^{56} proporcionava positrons d'energia entre $0,6$ i 1 MeV . El mètode experimental era el mateix utilitzat per Page. Dues esletxes definien l'energia E del feix de positrons incident; la distància entre els comptadors Geiger (C_1 i C_2) i la làmina F definia l'energia de les partícules secundàries.

Els primers resultats d'aquests experiments van ser presentats l'abril de 1952 a Raleigh, North Carolina, en la reunió anual d'una de les seccions de l'American Physical Society. Ashkin havia mesurat en primer lloc el quocient entre la secció eficaç diferenciació] electró-electró i electró-positró, per certs valors de E i ϵ . La fórmula de Møller, contrastada per Page, servia de referència. A Raleigh, Ashkin va adelantar un únic resultat: per $E = 600\text{ keV}$ i $\epsilon = 0,5$, el quocient experimental ($3,09 \pm 0,22$) no podia adir-se millor amb el valor predit per les fórmules de Møller i Bhabha ($3,07$).¹⁹

En aquells moments les mesures ja devien estar molt avançades, perquè Ashkin defensaria al setembre la seva tesi, *A measurement of positron-electron*

¹⁹Ashkin i Woodward (1952).

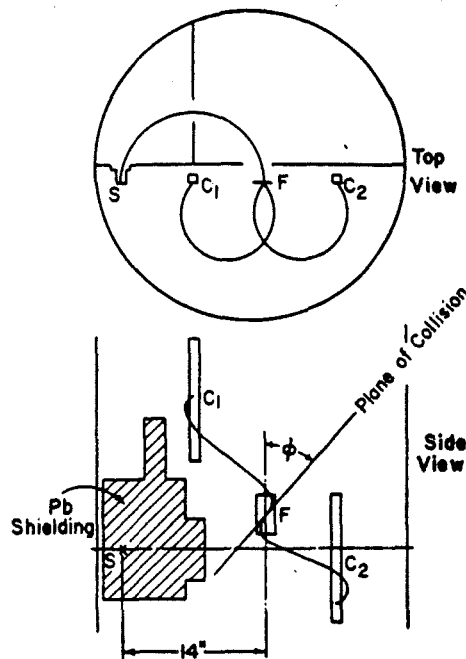


Figura 4. Esquema de la cambra de dispersió usada per Ashkin per mesurar la secció eficaç de les dispersions Moller i Bhabha. La cambra estava sotmesa a un camp magnètic uniforme que corbava la trajectòria dels electrons o positrons emesos per la font 5, que incidien sobre la làmina dispersora F . Les partícules secundàries eren detectades pels comptadors C_1 i C_2 . S'hi representa esquemàticament una col·lisió positró-electró (Ashkin, Page i Woodward 1952, p. 359).

*scattering and electron-electron scattering.*²⁰ La figura 5 mostra els resultats d'Ashkin per la secció eficaç diferencial en funció de l'energia del positró incident, amb els comptadors ajustats a $e = 0,5$. A la figura es representen les prediccions de la fórmula de Bhabha (B), i les de la fórmula de Bhabha sense els termes associats a l'anihilació i creació virtual d'una parella electró-positró ($B - A$). La figura prové directament de la tesi d'Ashkin, igual que el comentari concís que l'acompanyava en l'article conjunt dels físics de Cornell: "there seems to be little doubt that the measurements fit the Bhabha curve much

²⁰Ashkin, tesi doctoral no publicada, setembre 1952 (Cornell University Libraries). Ashkin s'havia incorporat al seu departament el 1947.

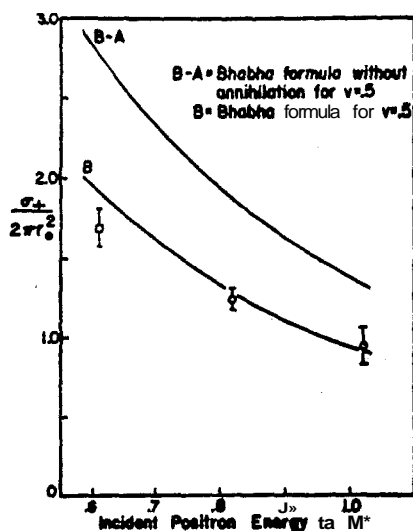


Figura 5. Resultats d'Ashkin per la secció eficaç diferencial positró-electró en funció de l'energia del positró incident, per $e = 0,5$. S'hi representen les prediccions de la fórmula de Bhabha (B) i de la fórmula de Bhabha sense els termes d'anihilació ($B - A$). (Ashkin, Page i Woodward (1954), p. 361).

better than the $B - A$ curve".²¹

A la seva tesi, Ashkintenia molt poca cosa a dir sobre la base teòrica de la fórmula de Bhabha: "The theory for [$p - e$ scattering] has been worked out by Bhabha using the Dirac equation". Les diferències respecte les prediccions de la fórmula de Rutherford venien donades per la interacció de spin, com en el cas de la fórmula de Møller, però eren també conseqüència d'un nou procés "peculiar to positron scattering called 'virtual annihilation': This is a contribution to the scattering cross section arising from the virtual annihilation of the interacting positron and electron giving rise to a γ -ray. This γ -ray can then create a positron-electron pair which goes off in some new direction. The net result is a scattering".²² A l'article conjunt amb Page i Woodward es parlaria indistintament del procés d'anihilació virtual i de "exchange interaction", encara que la imatge dominant seria la d'anihilació-creació, descrita

²¹ Ashkin, Page i Woodward (1954), p. 361. La discrepància a 0,6 MeV es devia a col·lisions múltiples, i desapareixia en les mesures relatives.

²² Tesi d'Ashkin, pp. 2-3.

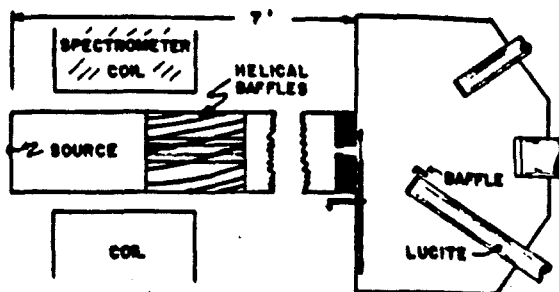


Figura 6. La disposició experimental utilitzada per Howe i MacKenzie per mesurar el quocient entre les dispersions electró-positró i electró-electró. Els detectors, de forma tubular, detecten les partícules dispersades a 35° ($e = 0,5$). (Howe i Mackenzie 1953, p. 679).

en els mateixos termes utilitzats per Ashkin.²³ De les fórmules de Møller i Bhabha es diria, simplement, que estaven basades en la teoria de Dirac.

Entre la presentació de la tesi d'Ashkin i la publicació, l'abril de 1954, de l'article final amb Page i Woodward, l'aparició d'un altre article experimental va amenaçar lleugerament l'hegemonia del grup de Corneli. El desembre de 1952, dos experimentadors de la universitat de California, Los Angeles, Horace A. Howe i K. R. MacKenzie, van presentar un estudi de la dispersió electró-positró que, com el d'Ashkin, no estava basat en la cambra de boira sinó en un dispositiu de coincidència. El detector, tanmateix, era el vell comptador d'escintil·lacions, revifat per la introducció del fotomultiplicador —un dispositiu que convertia el feble senyal lluminós que en els temps de Rutherford s'havia d'observar i comptar a ull, en un pols elèctric fàcilment detectable.²⁴ Howe i MacKenzie havien examinat la dispersió d'un feix de positrons de 1,3 MeV mitjançant el dispositiu de la figura 6. Els comptadors, connectats a un circuit electrònic d'amplificació i enregistrament, estaven disposats de manera que detectessin els electrons i positrons emesos en les col·lisions amb $e = 0,5$, corresponents a un angle de dispersió θ d'uns 35° (recordi's que hi ha una relació definida, entre e i θ). Un tercer comptador mesurava el flux incident

²³Ashkin, Page i Woodward (1954), p. 358.

²⁴Howe i MacKenzie (1953).

d'electrons o positrons.

La contrastació es basava en la mesura del quocient entre les dispersions electró-positró i electró-electró. Un dels problemes que afectava el mètode de Howe i MacKenzie era la dimensió dels comptadors, que feia que la imprecisió en l'angle de dispersió de les partícules detectades arribés als 16° . D'altra banda, les característiques del sistema d'amplificació i enregistrament feien pràcticament inviable la determinació de la secció eficaç absoluta. El quocient mesurat experimentalment era de $1,82 \pm 0,11$; els valors teòrics a $33,5^\circ$ eren 1,83 (amb intercanvi) i 1,36 (sense intercanvi), de forma que la fórmula de Bhabha era "very definitely favored". Tanmateix, el nombre de coincidències era només el 35% del predit per la teoria, i no es podia treure cap conclusió sobre la magnitud absoluta de la secció eficaç.

En comparació amb els d'Ashkin, Page i Woodward, la resta d'experiments pal·lideixen. Aquest va ser, si més no, el judici de la comunitat de físics, que s'inclinà sense dubtar-ho pels experiments de Cornell a l'hora d'adquirir evidència experimental favorable a la fórmula de Bhabha. En què es basa aquesta unanimitat? Si s'hagués de destacar un element particularment convincent d'aquests experiments potser seria la seva simplicitat, encara que possiblement només sigui aparent. La immediatesa del dispositiu experimental i els resultats d'Ashkin et, *al.* és d'una naturalesa diferent de la que ofereix la cambra de boira. En aquest cas, la col·lisió no pot ser més evident, però el mètode d'anàlisi de les fotografies és laboriós i relativament imprecís, el que afecta, com hem vist, la seva significació. En el cas del mètode de coincidència, a la reducció del marge d'error s'afegeix la possibilitat de seleccionar el tipus de col·lisió a observar. La distribució de l'energia entre les partícules dispersades es constata immediatament per la disposició dels comptadors.

Encara que els experiments no s'haguessin pronunciat clarament a favor de la fórmula, al voltant de 1950 ningú no tenia cap raó per qüestionar-ne seriosament la validesa. En aquest sentit, el cas més representatiu és el de

Hoke: la valoració optimista dels seus experiments no té una altra explicació que la seva certesa de l'existència d'un efecte d'intercanvi.

Epíleg: d'aplicacions marginals a paradigmes

Al llarg de les pàgines precedents s'ha examinat la deducció original i els primers intents de contrastació de tres dels processos fonamentals de la QED, processos que actualment constitueixen aplicacions exemplars d'aquesta teoria. A la part I hem vist que Klein i Nishina, Møller, i Bhabha no van recórrer a les formulacions existents de la QED per deduir les seves fórmules, sinó a elements teòrics més consolidats i eficaços, especialment el principi de correspondència i l'equació de l'electró de Dirac. Això no vol dir que la relació dels seus tractaments amb la QED fos remota o inexistent. Al contrari, no es va tardar a comprovar que la teoria de radiació de Dirac, la teoria dels camps d'ona de Heisenberg-Pauli, o l'*elettrodinamica quantistica* de Fermi, permetien recuperar les fórmules de dispersió. Aquesta comprovació —doble en el cas de Klein i Nishina, immediata en el de Møller, innecessària en el de Bhabha— era tan important per a la QED com per les mateixes fórmules: en moments incerts per a la teoria, confirmava que el seu poder predictiu era si més no equiparable al dels tractaments semiclàssics. Però més enllà d'aquesta legitimació mútua, la constatació no sembla haver tingut majors conseqüències: ningú no va adduir les fórmules en suport de la QED durant el període anterior a la renormalització.

A la part II s'ha complementat aquesta apreciació amb l'examen dels intents realitzats durant els anys trenta per verificar experimentalment les fórmules de dispersió. Només la de Klein-Nishina va ser contrastada, en aquest període, a pesar que existien els recursos necessaris per verificar també les altres. Des de la perspectiva actual, aquesta diferència de tracte és difícilment comprensible: tan elemental i potencialment interessant és la col·lisió entre un fotó i un electró

com la col·lisió entre dos electrons, o entre un positró i un electro. Què va fer que els experimentadors s'interessessin per una fórmula i deixessin de banda les altres? Res en la condició actual dels processos de dispersió no suggereix una resposta.

La insignificancia de les formules 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 radiatives, 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.

La conclusió més immediata d'aquest estudi, doncs, es podria resumir així: les fórmules de Klein-Nishina, Møller i Bhabha, encara que deduïdes i (en alguns cas) contrastades abans de la Segona Guerra Mundial, només van esdevenir aplicacions de la QED després de la guerra, un cop superats els problemes que havien afligit la teoria durant prop de vint anys. Els processos de dispersió només van assolir la seva condició actual de forma retrospectiva, en un moment que la teoria no requeria vitalment del seu suport. L'únic element essencial d'aquesta conclusió que ens manca considerar és el canvi de status de les fórmules.

APLICACIONES NEGLIGIDES

L'article sobre "Els principis generals de la mecànica quàntica" que Wolfgang Pauli redactà el 1932 per la segona edició del monumental *Handbuch der Physik* conté una de les primeres exposicions sistemàtiques de la QED. La segona part de l'article, dedicada a la mecànica quàntica relativista, s'obria amb una exposició de la teoria de l'electró de Dirac. Pauli presentava la fórmula de Klein-Nishina com una de les "aplicacions més importants" d'aquesta teoria, una de les seves conseqüències "característiques, contrastables empíricament".¹ A la nota a peu de pàgina corresponent, es citava l'article de Waller sense cap qualificació. Més endavant descrivia Pauli la interacció del camp de radiació quantificat amb la matèria, i dedicava una breu secció a les aplicacions del formalisme. La fórmula de Klein-Nishina no hi era esmentada.²

En presentar la fórmula de Klein-Nishina com a aplicació de l'equació de Dirac, Pauli identificava el que, des de l'aparició de la fórmula, s'havia considerat el seu fonament més important. La distinció entre teoria de l'electró de Dirac i QED pot semblar avui artificiosa o irrellevant —no hi ha electrons lliures—, però no ho era fa seixanta anys. Si bé tota teoria que aspirés a descriure el camp electromagnètic en la seva interacció amb la matèria havia d'incorporar necessàriament l'equació de Dirac, aquesta va tenir des d'un primer moment vida pròpia. El destí de l'equació de Dirac no estava lligat al de "l'anomenada electrodinàmica quàntica".³

¹Pauli (1933), p. 234: "Die wichtigsten Anwendungen der Diracschen Theorie, die zu für diese Theorie charakteristischen, empirisch prüfbaren Folgerungen führen, sind[...] zweitens die Formel von Klein und Nishina für die Intensität der Streuung von Strahlung kurzer Wellenlänge durch freie Elektronen." L'article de Pauli no inclou referències experimentals.

²*Ibid.*, pp. 268-269. És molt significatiu que després de remetre a capítols més fenomenològics del *Handbuch*, Pauli es dediqués a justificar les dues hipòtesis *ad hoc* necessàries per salvar els fenòmens mitjançant el principi de correspondència.

³El 1936, com a reacció a experiments recents de R. S. Shankland, Dirac es manifestà disposat a eliminar "the so-called quantum electrodynamics", excloent tanmateix l'equació de Dirac —i la fórmula de Klein-Nishina— de la crema (Dirac 1936, p. 299; per una anàlisi penetrant d'aquest episodi, veure Kragh 1990, pp. 169-173). Aquesta és una de les ex-

Durant els anys trenta i quaranta, l'equació de l'electró de Dirac dominaria absolutament les referències als fonaments de la fórmula. Expressions com "la teoria mecànico-quàntica de l'efecte Compton ha estat desenvolupada en detall per Klein i Nishina a partir de [la teoria de] l'electró de Dirac",⁴ o "una formula quantistica definitiva si è quindi potuta calcolare soltanto in seguito alla teoria dell'elettrone relativistico di Dirac",⁵ són comunes en els textos sobre el nucli, la mecànica quàntica, o l'electrodinàmica quàntica dels anys trenta. Parafraçant Pauli, H. Kramers afirmava a finals de la dècada —en un text igualment ambiciós en la seva cobertura però menys difòs— que "els fonaments experimentals més importants de la teoria de l'electró de Dirac són la fórmula pels nivells d'energia en un camp de Coulomb[...] i la fórmula de Klein-Nishina".⁶ El 1948, en un llibre de text de mecànica quàntica, s'observava encara que "the Klein-Nishina formula may be regarded as proved, at least for energies in the range considered, and its exactness considered as direct evidence in favour of the Dirac theory of the electron".⁷

Aquest és també el cas del clàssic de l'electrodinàmica quàntica anterior a la renormalització, *The Quantum Theory of Radiation* de Walter Heitler (1936). La dispersió de fotons per electrons lliures hi era considerada com a exemple de procés de segon ordre (amb absorció o emissió de dos fotons). Heitler oferia una deducció detallada de la fórmula de Klein-Nishina, perfectament reconei-

pressions més clares de la distinció entre equació de Dirac i QED, però n'hi ha d'altres tan o més significatives, com la de Bohr al VII Congrés Solvay: "ces paradoxes [les de QED] ne touchent pas à proprement parler la théorie de correspondance de l'electron [de Dirac]" (Solvay 1934, p. 222).

⁴Beck (1933), p. 407: "Die quantenmechanische Théorie des Compton-Effekts an freien Elektronen wurde eingehend von Klein und Nishina unter Zugrundelegung des Diracschen Elektrons entwickelt".

⁵Rasetti (1936 a), p. 68. En la traducció anglesa, "definitiva" es quedava en "satisfactòria" (Rasetti 1936b, p. 82).

⁶Kramers (1938), p. 486: "Die wichtigsten experimentellen Stützen für die Dirac-Theorie des Elektrons sind die Formel für die Energieniveaus im Coulomb-Feld[...] und die Klein-Nishina-Formel".

⁷Mott i Sneddon (1948), p. 317.

xible pel físic actual; deducció que era fins i tot paradigmàtica de la teoria de radiació (en sentit literal: "We have discussed in detail the computation of the matrix elements because the method used here will serve as a model for similar calculations in many other quantum processes"). Però Heitler considerava l'evidència experimental existent, del tot favorable a la fórmula, "as decisive evidence for Dirac's wave equation and against, for instance, the Klein-Gordon equation".⁸

La referència obligada a l'article de Klein i Nishina es podia completar o no amb la dels articles de Waller o Tamm. Rarament eren citats plegats, o es reconeixia degudament la seva aportació.⁹ La imatge del procés de dispersió quàntic com un procés "doble" en el que intervé un estat intermedi va ser assimilada ràpidament; aquesta representació és implícita, per exemple, en la classificació de Heitler de la dispersió Compton com a procés de segon ordre. Però en general no se la va relacionar amb les anàlisis de Waller i Tamm — minsa compensació al seu esforç per oferir una deducció més coherent, i de validesa més general, de la fórmula.¹⁰

Pel que fa a la fórmula de Møller, Pauli hi feia referència a la darrera pàgina del seu article, en una nota a l'afirmació que "el fet que l'energia pròpia [de

⁸Heitler (1936), pp. 154 i 159. Cf. "§16. Scattering by free electrons".

⁹L'única excepció que he trobat és la primera exposició assequible de la QED, el conegut article de Fermi a *Review of Modern Physics*. Fermi hi discutia l'efecte Compton entre d'altres aplicacions de la teoria de radiació de Dirac. La discussió, tanmateix, es limitava al cas no-relativista i no s'arribava a donar la fórmula de Klein-Nishina. En la bibliografia final d'articles de QED, Fermi no citava l'article de Klein i Nishina però sí els de Tamm i Waller, la influència dels quals era patent: "The theory of scattering of light from free electrons has some interest[...] because it shows in a very striking way the actual importance of the states with negative energy even for real phenomena where these mysterious states do not explicitly appear" (Fermi 1932, p. 119).

¹⁰Heitler observava simplement de la fórmula de Klein-Nishina que havia estat també deduïda per Tamm (Heitler 1936, p. 154). Cf. Rasetti (1936a), p. 68, (1936b), p. 82; Mott i Sneddon (1948), p. 316. A la segona edició del conegut *X-Rays and Electrons*, A. H. Compton i S. K. Allison deien simplement que Waller havia deduït la fórmula de Klein-Nishina "in a different manner" (Compton i Allison 1935, p. 237).

l'electró] resulti infinita segons la teoria, impedeix un tractament relativista conseqüent del problema de varis cossos".¹¹ És evident que per a Pauli el problema de l'energia pròpia de l'electró desmereixia qualsevol aproximació al problema de la interacció entre dos electrons. Heitler dedicava una secció del seu llibre a la interacció retardada entre dues partícules, i hi derivava l'element de matriu de Møller. Però no discutia en detall la col·lisió entre dos electrons, ni donava la fórmula.¹² Tampoc no la donava Kramers, que es limitava a citar el mètode de Møller com a exemple de "com en el cas d'interacció feble entre electrons ràpids es pot calcular de forma rigorosament relativista".¹³

Els casos de Pauli, Heitler i Kramers són indicatius de l'escassa significació del treball de Møller per l'electrodinàmica quàntica dels anys trenta. En altres capítols del mateix volum del *Handbuch* que incloïa l'article de Pauli —capítols d'orientació més fenomenològica—, rebia el treball de Møller un tracte més considerat. H. Bethe l'esmentava en el seu capítol sobre sistemes d'un i dos electrons, i G. Wentzel en el capítol dedicat a processos de dispersió i radiació. En ambdós casos, els articles de Møller eren citats com a extensió relativista del mètode de pertorbacions de Born; ni tan sols Bethe no esmentava la relació del tractament de Møller amb la QED.¹⁴

Tampoc Bethe ni Wentzel no transcrivien la fórmula de Møller. En els anys trenta, l'únic que sembla haver-la considerat prou rellevant per fer-ho és G. Beck, i tot i així a peu de pàgina, ja que el que interessava Beck eren les fórmules de frenat relativistes.¹⁵ Però si la fórmula va passar pràcticament desapercebuda, absorbida per les fórmules d'absorció, no així el mètode, que

¹¹Pauli (1933), p. 272: "Der Umstand, daß die Selbstenergie nach der Theorie unendlich groß resultiert, verhindert auch eine konsequente relativistische Behandlung des Mehrkörperproblems." Pauli citava Breit a la mateixa nota.

¹²Heitler (1936), pp. 98–102.

¹³Kramers (1938), p. 301: "Wie man im Falle von *schwacher Wechselwirkung* zwischen schnellen Elektronen streng relativistischen rechnen kann, hat Chr. Møller gezeigt".

¹⁴Wentzel (1933), p. 708; Bethe (1933), pp. 377, 495 i 506s.

¹⁵Beck (1933), p. 402.

va ser molt usat. Al capítol 2 hem vist que el mètode va ser acollit molt favorablement. Als usos assenyalats allí i als que esmenta Kragh, podríem afegir el cas de Pauli, que el 1941, en un article sobre "teories de camp de partícules elementals" per a *Review of Modern Physics*, va utilitzar "the well-known method of Møller" per calcular la secció eficaç corresponent a diversos processos de dispersió.¹⁶

El cas de Bhabha és simptomàtic de la indiferència amb què van ser acollides les fórmules de dispersió: dels textos citats cap no l'esmenta. És cert que en la majoria de casos la fórmula, simplement, encara no existia; però alguna d'aquestes omissions, com la de Kramers (1938), és significativa. La fórmula sembla haver patit les conseqüències d'estar relacionada amb la teoria del positró de Dirac. Kramers reconeixia l'èxit de la teoria dels forats en la interpretació dels fenòmens de creació i anihilació, però es mostrava escèptic respecte el seu futur. La teoria del positró no rebia un tractament detallat al seu llibre, el que pot haver determinat l'exclusió de la fórmula de Bhabha. Heitler dedicava al seu llibre un capítol a "processos de radiació connectats amb els electrons positius", on es discutia la *hole theory* i algunes aplicacions. Heitler repetia un argument contingut en l'article amb Bethe sobre frenat de partícules relativistes per justificar l'exclusió de la interacció electró-positró, que "in the present theory of the positive electron[...] is not included in a satisfactory way". La segona edició del llibre, realitzada en plena guerra, aporta pocs canvis respecte la primera, cap d'ells en el paràgraf anterior.¹⁷

¹⁶Kragh (1992), p. 325; Pauli (1941), p. 229. Pauli aplicava el mètode al càlcul de la dispersió de "mesotrons" ("particles, of charge e , to which various values of the spin and the magnetic moment are attributed") per un camp de Coulomb, per un electro, etc. Per calcular la dispersió de fotons (efecte Compton inclòs) tampoc no calia quantificar el camp electromagnètic: "As is well known, the results may be derived from ordinary wave mechanics with the aid of certain formal postulates, in accordance with the general correspondence with classical theory" (*ibid.*, p. 231). Veure Doncel (1993b).

¹⁷Heitler (1936), p. 198; Bethe i Heitler (1934).