

# L'inici de la discussió Einstein-Bohr: V congrés de Solvay de 1927

Pablo Rivero  
Arnau Riera

Història de la Física  
Juny 2005

# Índex

<b>1. INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. ALGUNS ASPECTES DEL DESENVOLUPAMENT DE LA FÍSICA QUÀNTICA A PRINCIPIS DEL SEGLE XX. ....</b>	<b>4</b>
2.1 <i>BOHR I EINSTEIN</i> .....	8
2.2 <i>LES CONTRIBUCIONS D'EINSTEIN</i> .....	8
2.3 <i>LES CONTRIBUCIONS DE BOHR</i> .....	10
<b>3. EL COMENÇAMENT DEL DEBAT EINSTEIN - BOHR .....</b>	<b>11</b>
3.1 <i>LES CIRCUMSTÀNCIES DEL CONGRÉS</i> .....	11
3.2 <i>LA CONFERÈNCIA DE BOHR</i> .....	12
3.3 <i>LA INTERVENCIÓ D'EINSTEIN</i> .....	20
3.4 <i>RÈPLICA DE BOHR</i> .....	23
<b>4. PRIMER IMPACTE I EVOLUCIÓ DE LA DISCUSSIÓ .....</b>	<b>25</b>
<b>5. EPÍLEG.....</b>	<b>30</b>
<b>6. CONCLUSIÓ.....</b>	<b>32</b>
<b>Apèndix I.....</b>	<b>34</b>
<i>ELS CONGRESSOS SOLVAY</i> .....	34
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>36</b>

# 1. INTRODUCCIÓ

La teoria quàntica ha significat un canvi molt important en el desenvolupament de la física del segle XX, arribant a alterar la concepció filosòfica del món. Qüestions com: quins són els límits del coneixement humà? la percepció que tenim del món influeix en aquest? la natura té elements intrínsecs d'aleatorietat, de manera que no tot està predeterminat? tenen una resposta diferent abans i després de la mecànica quàntica.

És per aquest motiu que vam estar interessats en l'estudi del desenvolupament de la teoria quàntica, o més ben dit, en el canvi de mentalitat que va produir a la comunitat científica.

Per això ens vam plantejar que una bona manera d'abordar aquest objectiu seria l'anàlisi de la discussió entre Einstein i Bohr. Les seves visions del que significava la física quàntica eren totalment diferents: per Bohr aquesta esdevenia una teoria última del món, per Einstein només es podia tractar d'una aproximació i creia en una altra teoria més realista i profunda. L'enfoc de les discussions entre dos dels més grans científics del segle XX ens podia ajudar doncs, a entendre els nous problemes a què s'enfrontava la física.

La discussió entre Einstein i Bohr va durar més de 20 anys (fins la mort del primer), motiu pel qual ens vam veure obligats a centrar el nostre treball en un període més concret del debat. Vam decidir l'inici: el V Congrés Solvay al 1927. En aquest congrés Bohr va fer una conferència sobre els recents desenvolupaments de la teoria quàntica i les conseqüències que aquesta tenia per ell. Einstein el va replicar en el debat posterior donant-li arguments segons els quals la visió del danès era errònia. A partir d'aquí se succeïren tota una sèrie d'arguments i contraarguments entre ells.

Així doncs, analitzar el paper de Bohr i Einstein en la V Conferència Solvay ens permetia per una banda veure la creació i el desenvolupament de la mecànica quàntica a nivell més tècnic a partir de la conferència que fa Bohr, i per l'altra veure com interpretaven a un nivell més filosòfic les novetats de la nova mecànica dues corrents de pensament.

El treball està estructurat en tres grans blocs. Comencem explicant el naixement de la teoria quàntica on introduïm la llei de Planck com el primer pas en el desenvolupament d'aquesta. Es presenta també en aquest apartat les figures d'Einstein i Bohr amb les seves contribucions a diferents aspectes de la teoria.

El nus central del treball es concentra en la V Conferència Solvay, la discussió que hi van mantenir Einstein i Bohr i les repercussions posteriors.

Finalment amb un epíleg i unes conclusions exposem quin és l'estat avui dia d'aquesta qüestió i la nostra visió sobre el tema.

## 2. ALGUNS ASPECTES DEL DESENVOLUPAMENT DE LA FÍSICA QUÀNTICA A PRINCIPIS DEL SEGLE XX.

La física de finals del segle XIX havia aconseguit un elevat nivell de desenvolupament que es podria resumir dient que a la natura hi havia dos tipus de fenòmens: uns 'corpusculars', que es regien per les lleis de Newton, formulades eventualment mitjançant principis de mínim, i altres 'ondulatoris', de naturalesa essencialment diferent dels anteriors. Exemples dels primers són els moviments dels planetes o dels àtoms i les molècules, i dels segons, els fenòmens lluminosos, capaços de produir interferències i figures de difracció, i que no eren més que un tipus de radiacions electromagnètiques regides per les equacions de Maxwell.

Però tot això no era suficient, ja que a finals del segle XIX van aparèixer alguns fets experimentals que no es podien interpretar correctament amb les teories existents i que van conduir al desenvolupament d'una nova teoria (la teoria quàntica). Entre aquests problemes podem destacar la radiació del cos negre, l'efecte fotoelèctric, la calor específica dels sòlids, les desintegracions radioactives de les substàncies, les línies espectrals dels elements, etc.

El primer pas cap a la introducció d'un element de discontinuïtat a la natura el va donar Planck en intentar interpretar la distribució espectral de la radiació del cos negre.

El concepte de 'cos negre' el va introduir Kirchoff com un cos ideal que absorbeix tota la radiació que incideix sobre ell. Els estudis experimentals que es van dur a terme sobre cossos negres (experimentalment, un forat en una cavitat tancada es comporta com un cos negre) van portar el 1879 a Stefan a suposar que la densitat d'energia radiant  $u$  a l'interior d'un cos negre era proporcional a la quarta potència de la temperatura absoluta  $T$ . Aquesta llei la va demostrar Boltzmann el 1884 (d'aquí que se li donés el nom de llei d'Stefan-Boltzmann), però no fa cap referència a quina és la distribució de la densitat d'energia respecte a la seva freqüència. Aquesta distribució va ser estudiada teòricament per Wien, que va demostrar que la densitat d'energia per unitat d'interval de freqüència  $u\nu$ , ve donada per:

$$u_\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^3 F(\nu/T)$$

essent  $F$  una funció desconeguda. Aquesta llei, coneguda com la llei del desplaçament de Wien, té com a conseqüència que, encara que no fixa quina és  $u_\nu$ , donada la distribució espectral d'un cos negre de temperatura  $T$ , permet deduir la distribució corresponent a una altra temperatura; així estableix que si  $\lambda_{\max}$  és la longitud d'ona corresponent al màxim de la distribució espectral, el producte  $\lambda_{\max}T$  és una constant. La llei de Wien va ser comprovada experimentalment per diversos autors.

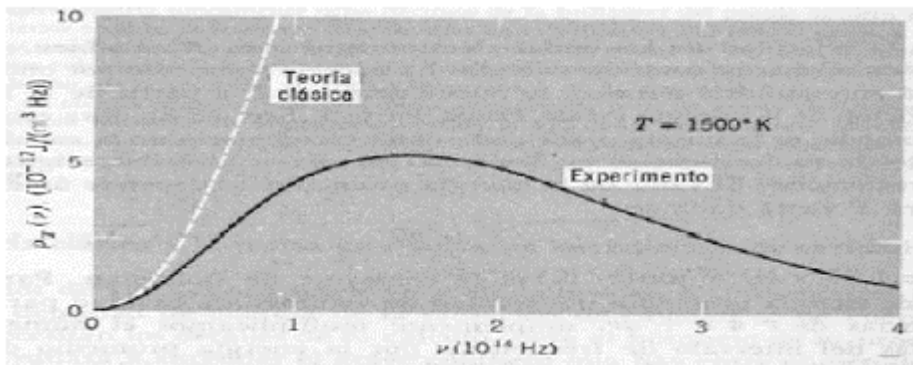
La determinació de la funció  $F$ , en tenir caràcter universal, per ser la mateixa per a tots els cossos negres, va acaparar l'atenció de termòlegs. A partir d'un primer intent de Michaelson, Wien, amb la funció de distribució de Maxwell-Boltzmann, i suposant essencialment que la longitud d'ona i la intensitat de la radiació emesa per una molècula depenen solament de la seva velocitat, va demostrar que aquesta funció era de la forma:

$$F(\nu/T) = k\beta e^{-\beta\nu/T}$$

essent  $k$  la constant de Boltzmann y  $\beta$  una constant a determinar.

Tot i que Wien no va arribar a saber-ho mai, la seva llei va marcar el final de la validesa universal de la física de l'època (teoria clàssica) i el principi d'un gir estrany en la ciència.

Aquesta llei de distribució de Wien semblava estar d'acord amb les mesures experimentals existents a la zona del visible i per temperatures de fins 4000°C. Entre 1897 i 1899 Max Planck va presentar a la Acadèmia de Ciències de Berlín una sèrie de treballs en que tornava a obtenir aquesta llei de manera més rigorosa. Abans d'acabar el segle, Lummer i Pringsheim van obtenir clares desviacions respecte a la llei de Wien a la zona de més baixes freqüències.



**Figura 1: comparació dels espectres de Wien i experimental**

Per un altre lloc, cap a la mateixa època Lord Railegh va aplicar el principi d'equipartició de l'energia a l'estudi de la radiació electromagnètica, obtenint una nova llei de distribució que corregida en un factor 1/8 per Jans, donava per la funció  $F$  la forma:

$$F\left(\frac{\nu}{T}\right) = k \frac{T}{\nu}$$

i que es coneix com llei de Raileigh-Jeans. Aquesta llei, estava d'acord amb les mesures experimentals a la zona de baixes freqüències on fallava la llei de Wien, però fallava a la part alta de l'espectre, i a més tenia el gran defecte per a la densitat total d'energia  $u$  donava una quantitat divergent.

S'havia arribat tan lluny com era possible arribar amb l'ajuda de les lleis de la termodinàmica i de la teoria electromagnètica general, i s'havia assolit el punt en que les teories especials havien de fonamentar-se en idees concretes sobre els mecanismes dels fenòmens.

El desacord entre la llei de Wien i els resultats experimentals van portar a Planck a replantejar-se la derivació de la mateixa i, modificant d'una manera totalment ad hoc l'expressió que havia utilitzat per l'entropia d'un oscil·lador, va obtenir per a  $F$  l'expressió:

$$F(\nu/T) = \frac{k\beta}{e^{\beta\nu/T} - 1}$$

que va presentar a la Societat Alemanya de Física el 19 d'Octubre de 1900, i que es coneix actualment com llei de distribució de Planck. En aquesta, la constant  $\beta$  és un paràmetre que s'ha de determinar a partir de les dades experimentals, i normalment s'utilitza la constant  $h = k\beta$ , anomenada constant de Planck.

El 14 de Desembre del 1900 és la data que se sol agafar com el naixement d'una nova física, la teoria quàntica. Planck va llegir davant la Societat Alemanya de Física el seu treball anomenat: *Zur theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*, on obtenia la llei de distribució mencionada, suposant que l'energia total del sistema consta d'un número d'elements d'energia  $E$  que havien d'identificar-se com el producte de  $h\nu$ , de manera que l'emissió o absorció de l'energia només pot fer-se en quantitats que són múltiples d'aquests elements  $h\nu$ .

La comparació amb les dades experimentals va permetre a Planck el càlcul d' $h$ , que va resultar ser  $6,55 \cdot 10^{-27}$  ergs·s, valor semblant a l'actual. Integrant sobre totes les freqüències, Planck va obtenir la constant de proporcionalitat de la llei d'Stefan-Boltzmann, que també estava d'acord amb les dades experimentals.

El treball de Planck va semblar oblidat fins que el 1905, Einstein va publicar (a part del seu famós treball de la relativitat especial) un treball sobre l'efecte fotoelèctric amb el títol "*Sobre un punt heurístic concernint a la producció i transformació de la llum*". En aquest treball d'importància fonamental (va ser pel que va rebre el premi Nobel el 1921) Einstein conclouia que la radiació electromagnètica monocromàtica de petita intensitat es comportava com si estigués formada d'uns petits elements (anomenats quanta) d'energia  $h\nu$ , i a continuació aplicava aquesta interpretació, entre d'altres, a l'efecte fotoelèctric.

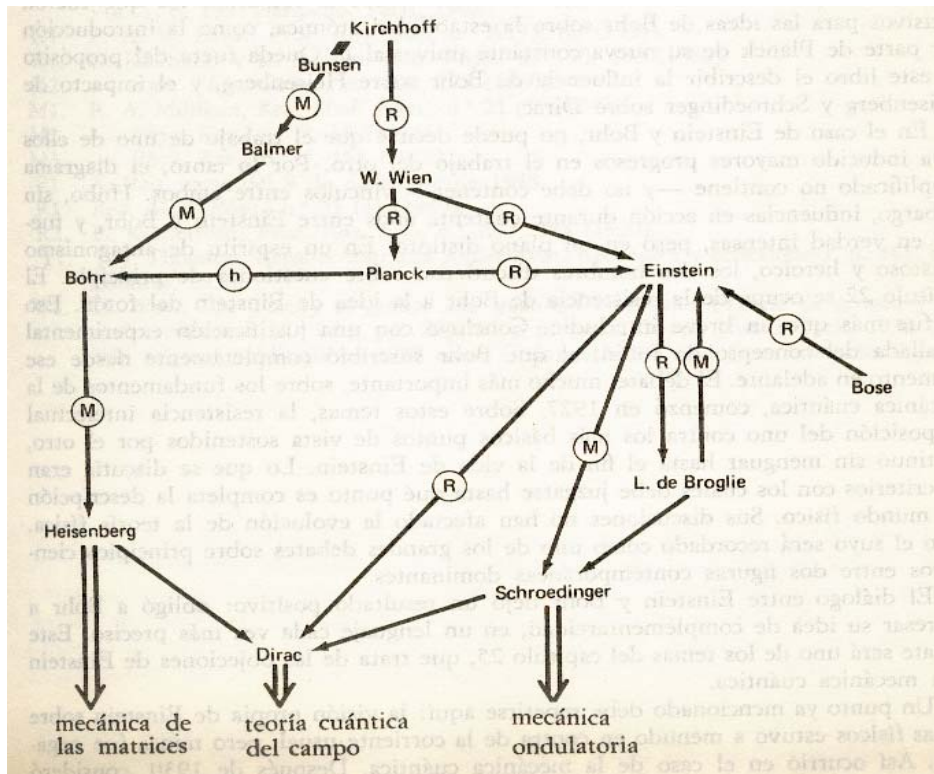
Així doncs, Einstein contradeia les equacions de Maxwell del camp electromagnètic. No és d'estranyar per tant, que inicialment el seu treball no fos acceptat per la majoria dels físics de l'època, fins i tot Planck, que considerava que allò era un pas innecessari.

La identificació entre les idees de Planck i d'Einstein, així com els seus respectius quanta, va ser un problema bàsic que es va plantejar al congrés Solvay de Brussel·les de 1911, al qual hi van assistir eminents físics com Maurice de Broglie, Einstein, Planck, Rutherford, Jans, etc. Després del congrés, Poincaré va demostrar de clarament que l'única manera d'arribar a la llei de distribució de Planck era a partir dels quanta de radiació d'Einstein.

Més endavant, Einstein va aconseguir demostrar l'èxit de la hipòtesi de Planck en un camp diferent al de la radiació electromagnètica, donant, per tant, una categoria superior a la d'una hipòtesi *ad hoc*.

El segle XIX havia vist el naixement de l'espectroscòpia i l'estudi més o menys sistemàtic dels espectres emesos per les diverses substàncies. Era clar que cada cos presentava un espectre discontinu amb unes línies característiques, i això servia, no només com mètode d'anàlisi químic, sinó que es va pensar que també seria útil per a l'estudi de les propietats dels àtoms i les molècules. Però el fet que els espectres presentessin una estructura de línies discontinues no l'explicava cap de les teories existents.

Cap al 1911 l'extraordinari físic experimental britànic d'origen neozelandès Ernest Rutherford (1871-1937) havia arribat a la conclusió que els àtoms tenen una estructura similar a la d'un sistema planetari en miniatura, formats per un nucli petitíssim i els electrons, que es troben girant al seu voltant. Explicar, però, les propietats d'aquests àtoms, va ser una tasca que va demanar l'esforç continuat de molts investigadors durant molts anys. S'inicia el 1913 amb un model molt simple però audaç, proposat pel físic danès Niels Bohr (1885-1962) capaç de predir moltes propietats de l'àtom d'hidrogen, encara que inadequat per anar més lluny. A partir dels treballs de Bohr s'inicia una recerca que culmina en una teoria proposada pel jove físic alemany Werner Heisenberg el 1925.



**Figura 2: Diagrama d'influències en el desenvolupament de la física quàntica.**

El diagrama de la figura 2 és una temptativa de reduir la història de la teoria quàntica al seu esquema més simple. Observem que  $X \rightarrow Y$  significa < el treball de X va servir de mitjà per un avanç de Y >. Les fletxes marcades M i R signifiquen la influència deguda a la teoria de la matèria i de la radiació respectivament.

En el cas de Bohr i Einstein no es pot dir que el treball d'un hagi induït progressos en el de l'altre. Va haver-hi influències durant quaranta anys entre tots dos, i van ser veritablement intenses, però en un altre pla. En un esperit d'antagonisme amistós i heroic, els dos homes van discutir sobre qüestions de principi. Van debatre els criteris amb els quals s'havia de jutjar fins a quin punt és complerta la descripció del món físic, la resistència intel·lectual i oposició d'un, contra els més bàsics punts de vista sostinguts per l'altre. Això va continuar sense minvar fins la mort d'Einstein.

## 2.1 BOHR I EINSTEIN

Bohr i Einstein estaven obsessionats per la física. Tots dos parlaven amb un entusiasme i un optimisme intensos sobre el treball en què estaven involucrats. Ambdós tenien enormes poders de concentració. Bohr es va adonar ben aviat, no tan sols de la importància del descobriment de Planck de la llei de radiació, sinó també de les paradoxes que se'n derivaven. Quan era jove, Einstein tenia un espectre d'activitats científiques més ampli que el de Bohr. També quan eren joves, tots dos mantenien inclinació pels experiments, que Bohr realitzava millor (el seu excel·lent assaig). Bohr va publicar uns dos-cents articles en revistes científiques, i Einstein uns dos-cents setanta. Els dos homes eren treballadors infatigables, que a vegades arribaven a estats d'esgotament que es convertien en malaltia, més seriosament en el cas d'Einstein. Cap d'ells no es va veure aclaparat per les medalles, premis, graus honorífics i altres distincions que els van ploure, i el seu interès principal sempre va ser més aviat allò que no entenien que no pas els triomfs assolits.



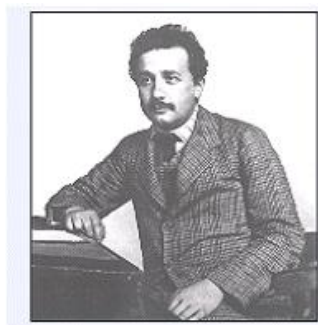
Les durades de les seves vides van ser quasi idèntiques, Bohr va viure setanta-set anys i Einstein setanta-sis. El mateix va passar als seus pares, que van morir relativament joves. Einstein es va mantenir científicament actiu fins el dia en què va morir. Des del punt de vista de la pura ciència, Bohr va ser més espectador que actor durant els darrers anys.

Pel que hem dit fins ara, en conjunt, les similituds superen les diferències. No obstant això, Einstein i Bohr eren extremadament oposats en dos aspectes. Per a Bohr, un i només un sol lloc era casa seva, Dinamarca. Einstein no es va identificar mai plenament amb cap país o nació. Einstein també tenia una necessitat molt forta de pensar independentment (tot i que tenia col·laboradors), mentre a Bohr li agradava treballar en equip, desitjava companyia. Va crear una escola principal.

Tots aquests comentaris potser poden servir d'ajuda per fer-se una idea de les dues personalitats, que més endavant treballarem. Ara però, anomenarem certes contribucions d'ambdós a aquesta nova física que estava apareixent.

## 2.2 LES CONTRIBUCIONS D'EINSTEIN

Einstein mai no va tenir interès per impartir classes ni cursos. Ningú no va obtenir mai un doctorat treballant amb ell, però sempre trobava gust a analitzar problemes de física, fos amb col·legues de la seva edat o amb gent molt més jove. Els seus treballs més importants són personals, però en el transcurs de la seva vida va col·laborar amb altres.



Des dels seus dies d'estudiant fins ben entrats els quaranta, buscava oportunitats per fer experiències. Mentre era estudiant havia volgut mesurar l'èter a través del qual es movia la Terra. Mentre era a l'oficina de patents va fer bricolatge amb un dispositiu per mesurar petites quantitats de voltatge. A Berlín va fer experiments sobre la rotació



induïda per la magnetització, va donar el diàmetre de capil·lars amb membranes, i va estar embolicat amb patents sobre dispositius per a la refrigeració i per ajudar a sords. Però evidentment, la física teòrica era la seva devoció.

Quan es parla d'Einstein sempre es pensa en la relativitat, però aquest no va ser el seu únic camp d'estudi (ni li va valer el Nobel). Einstein va treballar molt amb la física de radiació, la teoria quàntica i es va trobar al capdavant de la física més actual aconseguint contribucions importantíssimes.

Hem dit que el 1900 Planck va descobrir la llei de la radiació sense utilitzar els quanta de llum. Doncs el 1905, Einstein va descobrir els quanta de llum sense la llei de Planck. El març del 1905, Einstein publica el seu primer treball dels quanta de llum *Des d'un punt de vista heurístic referent a la generació de la llum*, on proposa la imatge "més simple" per l'efecte fotoelèctric (observat per Hertz el 1887), on diu que un quant de llum entrega tota la seva energia a un únic electró, i la transferència d'energia per un quant de llum és independent de la presència d'altres quanta.

El 1907 Einstein va pensar que si els oscil·ladors del cos negre es comporten de manera distinta a la clàssica, de manera que l'energia havia de ser un múltiple de  $h\nu$ , no hi havia cap raó per suposar que es àtoms del sòlid no es comportessin també de manera peculiar. Aleshores, aplicant les idees de Planck, suposant que tots els àtoms oscil·len a la mateixa freqüència, va obtenir una expressió de calors específiques que s'ajustava perfectament a tot el rang de temperatures.

La importància d'aquest treball radica en què constitueix el primer èxit de la hipòtesi de Planck en un camp diferent al de la radiació electromagnètica, per a què havia estat formulada.

El 1909 Einstein va publicar dos profunds treballs sobre radiació, no tan àmpliament coneguts perquè s'ocupen de qüestions de principi sense oferir cap conclusió experimental nova o predicció, com els altres. Un d'aquests era 'sobre les fluctuacions de l'energia de la radiació del cos negre', on Einstein aplica la fórmula de les fluctuacions de l'energia (trobadada per física estadística) a la radiació del cos negre. En l'altre, suggereix que els aspectes de la radiació com a partícula i com a ona apareixen lligats. Aquesta fusió es coneix actualment com a principi de complementaritat.

El 1909, als 30 anys, Einstein estava preparat per una teoria fusionada. Estava sol en això, Planck no recolzava el seu punt de vista i Bohr encara no havia entrat en escena. Cal dir que al 1925 va arribar la teoria fusionada, i aquí no va poder acceptar la dualitat de les ones i les partícules. Einstein Va passar de ser una figura molt avançada per la seva època a quedar arraconat.

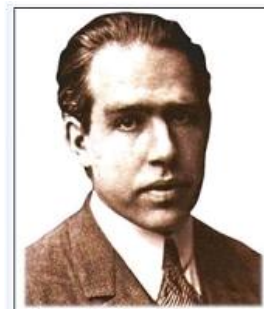
El 1925, amb el seu treball de la 'condensació Bose-Einstein', demostra amb el físic indi Satyendra Bose (1894-1974) que els sistemes quàntics, com el gasos, no s'han de descriure utilitzant mètodes estadístics clàssics, sinó amb l'ajuda d'una nova estadística de tipus quàntic.

Einstein també, finalment, va contribuir en la elaboració d'una teoria quàntica més sòlida, anomenada mecànica quàntica.

## 2.3 LES CONTRIBUCIONS DE BOHR

La inestabilitat del model de Rutherford (company de Bohr a Manchester) va ser la base de l'estudi de Bohr, que va postular que existien unes òrbites discretes o estacionàries en les quals l'electró, encara estant accelerat, no emetia radiació. D'aquesta manera aconseguia 'explicar' l'estabilitat de l'àtom i fixar el radi d'aquestes òrbites a base de violar les idees clàssiques. A fi d'explicar l'estabilitat de les òrbites estacionàries, Bohr va aplicar la hipòtesi de Planck, aconseguint el febrer de 1913 la fórmula de Balmer, així com la constant de Rydberg en funció de  $h$  de la càrrega i de la massa de l'electró.

Per a Bohr, l'emissió (o absorció) de radiació es realitza quan els electrons passen d'un estat estacionari a un altre, de manera que si passen d'una energia major (menor) a una altre menor (major) emeten (absorbeixen) un quantum de llum amb freqüència igual a la diferència d'energies dividida per la constant de Planck.



El següent problema que es va plantejar Bohr va ser quines eren les energies dels estats estacionaris. A partir de la fórmula de Balmer, Bohr va postular que les transicions des d'una òrbita molt gran (poca energia) fins a una de més interna havien de produir l'emissió d'un fotó de freqüència igual a la freqüència de rotació de l'electró en l'òrbita gran, calculada clàssicament per la llei de Kepler. La identificació va portar immediatament a un valor de la constant de Rydberg que estava d'acord amb les dades experimentals, així com als valors de l'energia dels estats estacionaris, que a la vegada, aplicant lleis clàssiques, condueixen al valor dels radis de les òrbites.

Posteriorment va marxar als EUA per treballar a l'Institut d'Estudis Avançats de Princeton (Nova Jersey) on, amb la col·laboració de J. A. Wheeler, va enunciar una teoria sobre la fissió nuclear que va donar lloc a una investigació que va portar a la realització de la primera bomba atòmica.

Considerat per alguns com el segon millor científic del segle XX darrere d'Einstein, Bohr és sense dubte una figura essencial en el desenvolupament de la física d'àtoms i molècules.

### 3. EL COMENÇAMENT DEL DEBAT EINSTEIN - BOHR

#### 3.1 LES CIRCUMSATÀNCIES DEL CONGRÉS

El cinquè Congrés de Solvay per físics, es va desenvolupar a Brussel·les del 24 al 29 d'Octubre de 1927, on el tema principal era: "Electrons i fotons". Com en les altres conferències, Lorentz n'era el president (però aquesta seria la seva última conferència abans de la seva mort al Febrer de 1928).



**Fotografia 1: V Congrés Solvay, Brussel·les (1927).**

Els participants d'aquesta cinquena Conferència eren: N. Bohr (Copenhage), M. Born (Göttingen), W. L. Bragg (Manchester), L. Brillouin (Paris), A. H. Compton (Chicago), L. De Broglie (Paris), P. Debye (Leipzig), P. A. M. Dirac (Cambridge), W. Heisenberg (Copenhage), H. A. Kramers (Utrecht), I. Langmuir (Schenectady, N.Y., U.S.A.), W. Pauli (Hamburg), M. Planck (Berlin), E. Schrödinger (Zurich), C. T. R. Wilson (Cambridge). Y el comité científic consistia en: H. A. Lorentz (President), W. H. Bragg (London), Madame M. Curie (Paris), A. Einstein (Berlin), C. E. Guye (Geneva), M. Knudsen (Copenhage), Secretari, P. Langevin (Paris), O. W. Richardson (London), i E. Van Aubel (Ghent). També trobem a E. Herzen com a representant de la família Solvay.

La física, havia patit un gran avenç des de l'últim Congrés de Solvay al 1924. Born i Jordan presenten al 1925 la mecànica de matrius; Dirac, al mateix any parla dels espais de Hilbert, operadors i parèntesis de Poisson; Al 1926, Dirac juntament amb Pauli exposen l'àtom d'hidrogen; Schrödinger introdueix l'equació que porta el seu nom com una equivalència entre les formulacions matricial i diferencial; Born dona una interpretació probabilística de  $|\psi(x,t)|^2$  on  $\psi(x,t)$  és l'equació d' Schrödinger. Heisenberg uns quants mesos abans del Congrés formula el principi d'incertesa, en el qual explica el contingut físic de la mecànica quàntica més que cap altre consideració. I al Setembre de 1927, Bohr determina el seu principi de complementarietat en una lectura al congrés de Como.

Tot aquest desenvolupament revolucionari va formar el fons de la cinquena Conferència Solvay, que comença amb la intervenció de Lorentz presentant les qüestions que més l'inquieten de la nova teoria quàntica d'una manera especialment clara i lúcida.

*Nosaltres ens volem fer una representació dels fenòmens, ens en volem formar una imatge en el nostre esperit. Fins aquí, hem volgut sempre formar aquestes imatges mitjançant les nocions immediates d'espai i temps. Aquestes nocions són potser innates; en tot cas, són desenvolupades per la nostra experiència personal, per les nostres observacions diàries. Per mi, aquestes nocions són clares i confesso que sóc incapaç de fer-me una idea de la física sense aquestes nocions. La imatge que em vull formar dels fenòmens ha de ser absolutament neta i definida i em sembla que no ens en podem formar una imatge igual sinó és dins aquest sistema d'espai i de temps.*

Per ell, com per Einstein, no és possible renunciar a aquesta concepció de la física, i les aparents violacions respecte aquesta imatge que faria la mecànica quàntica només serien qüestió de temps.

Pensa que aquesta noció de probabilitat hauria d'aparèixer al final com a conclusió de les consideracions teòriques, i no com un axioma a priori.

*Podria guardar-me sempre el determinisme per els fenòmens fonamentals de què no he parlat. És que un esperit més profund no podria adonar-se dels moviments d'aquests electrons?. No podríem guardar el determinisme fent l'objecte d'una creença? Cal necessàriament erigir l'indeterminisme en principi?*

És després d'aquesta intervenció que Niels Bohr entrarà en escena.

### 3.2 LA CONFERÈNCIA DE BOHR

En un inici Bohr es va mostrar reticent a acceptar algunes noves idees quàntiques, com la dualitat ona-partícula. Recordem que el 1924, juntament amb Kramers i Slater, va presentar una explicació alternativa a l'efecte Compton per no admetre la proposta d'Einstein que el quanta d'energia tenia moment i podia ser tractat com una partícula (el fotó). La seva teoria alternativa, però, tenia estranyes propietats entre la radiació i la matèria, com la no conservació de l'energia i el moment en els processos elementals, de manera que aviat es va demostrar la seva falsedat.

No obstant, al 1927 fa una conferència al Congrés de Solvay en què es veu clarament el seu domini de les novetats més transcendents sobre el tema, així com la seva lucidesa en la proposta de com ell creu que s'han d'interpretar aquestes novetats.

A les actes del Congrés Solvay, però, no hi trobem la seva intervenció literal sinó la traducció d'una nota publicada a les revistes “*Naturwissenschaften*” (t. 16,1928, p. 245) i “*Nature*” l'abril de 1928, que és la reproducció d'una altra conferència impartida a la ciutat italiana de Como el 16 de setembre de 1927, al congrés internacional de físics amb motiu del centenari de la mort de Volta. No obstant això, el poc temps que hi ha entre la conferència de Como i el Congrés Solvay (un mes i 9 dies), i el fet que aquesta substitució a les actes del congrés va ser una demanda d'ell mateix, ens fa pensar que el

contingut d'ambdues havia de ser molt semblant. La conferència comentada a continuació és doncs la de Combe, ja que ens ha estat impossible localitzar la seva intervenció original del Congrés de Solvay .

L'article rep el nom de *El postulat dels quanta i el nou desenvolupament de la física atòmica*<sup>1</sup> i ens ajuda a fer-nos una idea de la concepció de Bohr de la nova mecànica quàntica, en quin moment del seu desenvolupament es trobava aquesta, etc.

El seu objectiu és fer una discussió sobre la significació física dels mètodes de la teoria quàntica desenvolupada durant els anys abans del congrés. Tal com diu ell mateix en el pròleg:

*“vull presentar les coses més remarcables dels nous principis que són a la base de la descripció dels fenòmens atòmics, amb l'esperança que contribueixin a conciliar les diferents maneres de veure aquest nou domini de la física”.*

La conferència està dividida en set punts. A continuació exposem les idees que hem considerat més transcendents de cadascun, així com les paraules del mateix Bohr que ho corroboren.

### **Postulat dels quanta i causalitat.**

És en aquest primer apartat on Bohr toca tots els temes més transcendents pel nostre treball, ja que és on introdueix el caràcter subjectivista, aleatori de la teoria, i descarta la possibilitat de tenir una descripció causal en l'espai temps (és a dir tot allò que Einstein no pot acceptar de cap de les maneres). Fa èmfasi en què la mecànica quàntica és una teoria diferent a un nivell més profund que les teories clàssiques.

Comença introduint el postulat dels quanta o postulat quàntic.

*Un caràcter de la teoria quàntica és que reconeix una limitació fonamental de les nocions físiques quan són aplicades als fenòmens atòmics. L'estat de coses que en resulta és de naturalesa especial, ja que la nostra interpretació de les dades proveïdes per l'experiència es basa essencialment en les nocions clàssiques. Abstracció feta de les dificultats que s'oposen a una formulació del contingut de la teoria quàntica, sembla, com veurem, que el sentit de la teoria pot ser expressat pel que anomenem el postulat dels quanta segons el qual tot procés atòmic conté un tret de discontinuïtat o d'individualitat que manca totalment a les teories clàssiques i que es caracteritza pel quantum d'acció de Planck.*

A continuació explica d'una manera més clara les implicacions d'aquest postulat. Senyala la impossibilitat de conèixer sense pertorbar allò que volem observar, i com a conseqüència d'això, tenir una descripció en l'espai-temps en forma de trajectòries.

*Aquest postulat té com a conseqüència la renúncia a la descripció causal dels fenòmens atòmics dins el temps i l'espai. En realitat, la nostra descripció dels fenòmens naturals reposa en la suposició que aquests poden ser observats sense que els hi influenciem sensiblement.[...]*

---

<sup>1</sup> Traduït del francès *Le postulat des quanta et le nouveau développement de l'atomistique*.

I torna a fer èmfasi en la noció d'observació

*El postulat dels quanta fa un incís precisament en què cada observació de fenòmens atòmics exigeix una acció recíproca, gens negligible, entre l'objecte observat i l'instrument de mesura, de manera que no podem atribuir ni als fenòmens ni als mitjans d'observació una realitat física independent en sentit ordinari. La noció d'observació conté, de fet, alguna cosa arbitrària, en aquest sentit, que es basa essencialment sobre en la tria dels objectes que es considera que pertanyen al sistema observat.[...]La circumstància que, dins la interpretació de les observacions, hem de recórrer sempre a les representacions teòriques, fa que per cada cas sigui una qüestió d'utilitat saber on introduïm la noció d'observació i el tret "irracional" de la descripció, la qual va lligada al postulat dels quanta.*

Relaciona aquesta impossibilitat de conèixer sense pertorbar amb el concepte de causalitat<sup>2</sup>. Així, si en observar dos sistemes veiem que són idèntics, el fet d'haver-los pertorbat en la mesura fa que no puguem garantir que en mesurar-los al cap d'un temps ho continuïn sent. Bohr parla d'una complementarietat entre descripció en l'espai-temps i causalitat. Com més vulguem aconseguir-ne una més haurem de renunciar a l'altra.

*Això té grans conseqüències. D'una banda, la definició de l'estat d'un sistema físic, tal com el concebem ordinàriament, exigeix l'exclusió de totes les influències externes; cosa que exclou també, tenint en compte el postulat dels quanta, tota possibilitat d'observació, i abans que res les nocions de temps i espai perden el seu sentit immediat. D'altra banda, si volem fer possibles les observacions, hem de permetre les interaccions eventuais amb els aparells de mesura exteriors al sistema, amb la qual cosa una definició inequívoca de l'estat del sistema no pot ser donada ni pot ser qüestió de causalitat en el sentit ordinari. Segons l'essència de la teoria quàntica, ens hem doncs d'acontentar en considerar la representació dins l'espai-temps i el principi de causalitat, la combinació dels quals és característica de les teories clàssiques, com dels trets complementaris, però s'exclouen mutuament de la descripció de l'experiència que simbolitzen la idealització de les possibilitats d'observació i de definició.*

A continuació explica que no ens hem d'estranyar que aquestes idees (de la pèrdua d'una descripció espacio-temporal o la no causalitat) no coincideixin amb el sentit comú, ja que les accions de la vida diària són molt més grans que les de Planck. Fa una analogia amb la relativitat i la mecànica clàssica. La relativitat també desafia el sentit comú, tot i que a velocitats molt menors a  $c$  verifica el límit clàssic.

Introdueix després la dualitat ona-corpúscle

*Aquest punt de vista es presenta ja dins la qüestió força controvertida de la natura de la llum i dels elements constitutius de la matèria. Per qui miri la llum, la seva propagació en l'espai i el temps es representa lògicament com sabem, per la teoria electromagnètica de la llum. En particular, els fenòmens d'interferències dins l'espai buit com les propietats òptiques dels medis materials són regits d'una manera completa pel principi de superposició de la teoria ondulatoria. D'altra banda, el principi de la*

---

<sup>2</sup> El principi de causalitat requereix que tot efecte sigui precedit d'una única causa. Així en mecànica clàssica, conegudes les condicions inicials d'un sistema, la física ens permetia dir quina seria la seva evolució.

*conservació de l'energia i la quantitat de moviment dins les accions recíproques entre la radiació i la matèria, com es manifesta en l'efecte fotoelèctric i l'efecte Compton, és expressat lògicament per la idea dels quanta de llum, desenvolupada per Einstein. El dubte oposat, d'una banda a una aplicació rigorosa del principi de superposició, i de l'altra a la validació dels principis de conservació, als quals aquesta contradicció aparent ha donat lloc, són refusats, com sabem, d'una manera decisiva per l'experiència.*

Atribueix a aquesta dualitat la conseqüència de la impossibilitat de donar una descripció causal als fenòmens lluminosos dins l'espai temps. I continua dient:

*Les dues concepcions de la natura de la llum representen més aviat dues temptatives d'adaptació dels fets experimentals a la nostra manera ordinària de concebre el món, per la qual la limitació de les nocions clàssiques és expressada d'una manera complementària.*

Tot seguit diu que les consideracions fetes per la llum són idèntiques per la matèria. I per ell, no es tracta de concepcions contradictòries dels fenòmens, sinó de concepcions complementàries que ens proveeixen juntes d'una generalització natural del mode de descripció clàssica.

Finalment enuncia que dins la teoria quàntica, les dificultats que s'oposen a una descripció causal en l'espai-temps, i que des de ja fa molt temps han estat objecte de discussions, han despertat últimament l'interès pel desenvolupament de nous mètodes simbòlics. Referint-se a la contribució de Heisenberg, que va mostrar la incertesa recíproca característica que afecta tota mesura de magnituds atòmiques.

### **Quantum d'acció i cinemàtica**

En aquest apartat exposa les idees que hi ha darrere del principi d'incertesa. Recordem que Einstein intentarà moltes vegades esfondrar aquest principi, totes amb cap tipus d'èxit fins que ho donarà per impossible.

Presenta les fórmules que constitueixen la base comuna de la teoria quàntica de la llum i de la teoria ondulatoria de les partícules materials:

$$E\tau = I\lambda = h \quad [1]$$

I explica,

*E i I representen l'energia i l'impuls, i  $\lambda$  i  $\tau$  el període de les oscil·lacions i la longitud d'ona que hi són associats. Dins aquestes expressions, les dues concepcions corpuscular i ondulatoria hi apareixen oposades l'una a l'altra. L'energia i l'impuls pertanyen a la nocions de partícula i poden per tant, d'acord amb la concepció clàssica, ser caracteritzades per les coordenades d'espai i temps. El període i la longitud d'ona es refereixen a un tren d'ones planes harmòniques, il·limitat sota la relació de temps i espai. No és més que invocant el principi de superposició que és possible obtenir una limitació en l'extensió dels camps d'ones dins l'espai-temps, per interferències d'ones harmòniques elementals.*

Així doncs ell és conscient de la dualitat on a partícula i fins i tot arriba a interpretar la velocitat de grup amb la velocitat de les partícules,

[...]la velocitat de translació de les partícules associades a les ondes es deixa representar per el que s'anomena la velocitat de grup (la velocitat del paquet d'ones)[...] Aquesta associació de velocitat de grup amb velocitat de les partícules dona una indicació del domini d'aplicació de representacions dins el temps i l'espai. També senyala el caràcter complementari d'aquesta descripció, ja que la utilització de grups d'ones implica una imprecisió dins les definicions de període i longitud d'ona, i en conseqüència també d'energies i d'impuls segons l'expressió [1].

A continuació explica que un camp ondulatori limitat en l'espai haurà de ser representat per una multitud d'ones elementals. De tal manera que en la condició més favorables, la diferència mitjana entre les freqüències és:

$$\Delta t \Delta \nu = \Delta x \Delta \sigma_x = \Delta y \Delta \sigma_y = \Delta z \Delta \sigma_z = 1$$

On  $\Delta t$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  donen l'extensió del camp ondulatori dins el temps i dins l'espai. A més a més senyala que aquesta relació és ben coneguda de la teoria dels instruments d'òptica.

De la fórmula [1] i l'anterior és immediat que,

$$\Delta t \Delta E = \Delta x \Delta I_x = \Delta y \Delta I_y = \Delta z \Delta I_z = h \quad [2]$$

Equació que interpreta com:

*...és l'expressió de la màxima precisió que podem tenir dins la definició de l'energia i de impuls de les partícules associades al camp ondulatori. Naturalment en general la situació serà encara menys favorable. Fins i tot un grup d'ones que satisfaci la condició [2], en el transcurs del temps canviarà tal que estarà cada vegada més i més difús.[...] la limitació de les nocions clàssiques expressades per la relació [2] està estretament lligada a la validació limitada de la mecànica clàssica, que dins la teoria ondulatoria de la matèria correspon a l'òptica geomètrica. És en aquest cas límit en que energia i impuls es deixen definir sense ambigüïtat, de manera que es puguin vincular a les imatges dins l'espai-temps.*

Relaciona ara l'equació anterior amb la relativitat i exposa el següent,

*Dins el llenguatge de la teoria de la relativitat, el contingut de les relacions [2] pot ser resumit dins la tesi que existeix una relació recíproca general entre la màxima netedat de definició dels vector espai-temps i energia-impuls corresponent a les partícules. Aquest estat de les coses el podríem considerar com una expressió simbòlica senzilla de la natura complementària de la descripció en l'espai-temps i de l'exigència de causalitat. Al mateix temps el caràcter general d'aquesta relació ens permet fusionar fins a cert punt, els principis de conservació amb la representació de les observacions dins l'espai temps, en aquest sentit no es tracta d'esdeveniments ben definits coincidents en un mateix punt de l'espai-temps, sinó de retrobament de partícules de manera imprecisa dins una regió finita de l'espai-temps.*



Segons ell aquesta circumstància permet evitar les paradoxes que caracteritzen la descripció de la difusió de la radiació per partícules lliures carregades i de les col·lisions entre dues partícules.

### **Mesures dins la teoria quàntica.**

En aquest apartat Bohr fa èmfasi en aquest caràcter complementari de la teoria i de que la observació modifica el sistema observat. Posa exemples quantitius de la interacció de llum amb partícules i de resolució de microscopis per demostrar que és impossible escapar-se d'això.

*Dins la teoria quàntica, s'afegeix a cada observació, a causa de la interacció no negligible amb l'aparell de mesura, un element nou, del que és impossible estimar el tamany. La mesura de la posició d'una partícula no està lligada només a un canvi finit de les variables dinàmiques, sinó a que la fixació de la seva situació implica una interrupció completa dins la descripció causal del seu comportament dinàmic. [...]És precisament aquesta circumstància que fa aparèixer netament el caràcter complementari de la teoria quàntica, caràcter que ha de ser considerat com una conseqüència immediata de l'antagonisme entre el postulat dels quanta i la distinció entre objecte i aparell de mesura, característica per la observació.*

### **Principi de correspondència i teoria de matrius.**

Fins aquí Bohr ha considerat els trets generals del problema dels quanta. Ara es centra en la formulació d'una nova mecànica, concretament diu: *l'important és naturalment abans que res formular les lleis d'interacció entre els objectes simbolitzats per les abstraccions de les partícules aïllades i la radiació.*

En aquest apartat explicarà el desenvolupament de la mecànica matricial de Heisenberg i en el següent la de Schrödinger. Diu que les lleis de la nova mecànica s'han d'extreure del problema de la estructura atòmica, del qual n'hi ha molts experiments:

*Els experiments de l'excitació d'espectres per xoc electrònic o radiació, són explicats lògicament admetent els estats estacionaris separats i els processos de transformació individuals.*

Presenta a continuació el principi de correspondència segons el qual la mecànica clàssica seria un límit de la teoria quàntica a escales on les accions rellevants són molt més grans que  $h$ .

*Els esforços fets per veure dins la teoria quàntica una generalització lògica de les teories clàssiques van conduir a l'establiment de l'anomenat principi de correspondència. La utilització d'aquest principi dins la interpretació de les dades espectrals reposa en un ús simbòlic de l'electrodinàmica clàssica, dins la qual els processos de transició individuals són associats a una de les components de vibració harmònica del moviment de les partícules atòmiques el qual ens podem esperar segons la mecànica ordinària.*

I elogia i exposa a grans trets com Heisenberg desenvolupa la mecànica matricial. Nosaltres només destaquem el comentari en que manifesta el canvi de concepció de moviment clàssic com una superació i no com un drama.

*Sabem que aquest nou desenvolupament de la teoria va ser introduït per Heisenberg dins un treball fonamental on exitosament va alliberar-se completament de la noció clàssica de moviment, substituint des del principi les variables cinemàtiques i mecàniques per els símbols, que es relacionarien directament als processos individuals exigits pel postulat dels quanta.*

Explica que per la col·laboració de Born i Jordan, així com de Dirac, la teoria va prendre una forma que, des del punt de vista de la coherència i la generalitat, pot competir amb la mecànica clàssica. I presenta la relació de commutació entre les variables  $p$  i  $q$  (les variables canòniques en el sentit de Hamilton) que ara seran matrius:

$$pq - qp = \sqrt{-1} \frac{h}{2\pi} \quad [3]$$

De la que fa el comentari:

*Una relació que expressa d'una manera flagrant el caràcter simbòlic de la teoria. Hem considerat sovint la teoria de matrius com un càlcul amb les variables directament observables. Hem de somiar que el procediment descrit és precisament limitat als problemes on, podem renunciar en forta mesura a una descripció dins l'espai i el temps i on en conseqüència, la qüestió de l'observació és relegada a un segon pla.*

Finalment torna a exposar la relació d'incertesa tenint aquesta ara com a origen la relació [3]:

$$\Delta p \Delta q \sim h \quad [4]$$

I explica que aquesta relació aclareix diverses paradoxes que es presentaven dins l'aplicació del postulat dels quanta, mostrant d'una manera detallada la manca de contradicció dins el mètode simbòlic.

### **Mecànica ondulatoria i postulat dels quanta.**

Bohr comença explicant les excel·lències del mètode de Schrödinger:

*Schrödinger ha tingut èxit al elaborar un mètode ondulatori que obre de nou horitzons i que ha estat de gran importància pel progrés de la teoria atòmica els darrers temps.*

Estem però més interessats en veure com passa per la interpretació de Born de la funció d'ona, del que diu:

*Una aplicació nova del mètode de Schrödinger, important pel desenvolupament de la teoria, va ser donat per Born dins el seu estudi del problema del retrobament d'àtoms i partícules lliures carregades. Va ser exitós el seu propòsit de donar, a les funcions ondulatories una interpretació estadística que permet de calcular la probabilitat dels processos de transició individuals entre estats estacionaris, exigint pel postulat dels quanta.*

No li dóna doncs una importància capdal i troba del tot natural que els processos de transició individuals entre estats siguin regits per probabilitats. Per altra banda també comprovem que Schrödinger advoca d'alguna manera per recuperar una concepció clàssica:

*Vistos aquest resultat, Schrödinger ha expressat l'esperança que un desenvolupament consegüent de la teoria ondulatoria permetria evitar la irracionalitat continguda dins el postulat dels quanta i desenvolupar mica en mica una descripció dels fenòmens atòmics seguint les línies directrius de les teories clàssiques. En base a aquest punt de vista Schrödinger ha avançat en un treball recent, el fet que segons la teoria de les ones ens les tenim amb un simple problema de ressonància, quan es tracta, segons el postulat dels quanta, d'un intercanvi discontinu d'energia entre àtoms.*

Segons aquesta concepció, la mecànica ondulatoria, com la teoria de les matrius, han de ser considerades com una descripció simbòlica del problema corresponen al moviment de la mecànica clàssica, descripció que és conforme a les exigències de la teoria quàntica i que no pot ser interpretada més que invocant explícitament el postulat dels quanta. Les dues maneres de formular el problema de la interacció –ondulatoria o corpuscular de individus lliures- han de ser qualificades de complementàries. A això tenim també la contradicció aparent que es presenta en utilitzar la noció d'energia en les dues teories.

A continuació presenta el moment lineal com un operador diferencial, ja que fent aquesta identificació és possible fer un ús immediat del concepte d'energia en relació a la representació clàssica de l'energia potencial del sistema.

$$p = \sqrt{-1} \frac{h}{2\pi} \frac{\partial}{\partial q} \quad [5]$$

on  $p$  és una component del moment generalitzat i  $q$  la coordenada canònica associada.

No obstant Bohr explica detalladament de perquè tampoc és possible donar una interpretació intuïtiva de les solucions de la mecànica ondulatoria a no ser que puguin ser descrites mitjançant la noció de partícules lliures.

*El mitjà d'introduir les nocions clàssiques d'una manera general i sense contradiccions dins la teoria quàntica és donat per la teoria de les transformacions de Dirac-Jordan, per la qual Heisenberg ha formulat la seva relació general d'incertesa. És dins aquest teoria que l'equació ondulatoria que Schrödinger a igualment trobat una aplicació instructiva.*

### **La realitat dels estats estacionaris**

En aquest apartat tracta qüestions anteriors al cas dels estats estacionaris, que per ell vénen a ser estats lligats que no canvien amb el temps, o més ben dit que tenen una fase temporal que és inobservable. Concretament es preocupa pel cas dels àtoms.

*Segons la hipòtesi de la estabilitat supramecànica dels estats estacionaris l'àtom es troben, abans o després d'una acció exterior, dins un estat estacionari netament definit.*

Fa un anàlisi de les possibilitats de descripció d'aquests estats arribant a les mateixes conclusions que anteriorment. El principi d'incertesa, la no causalitat i la impossibilitat d'una descripció en l'espai temps es segueixen verificant.

*En resum, podem dir que les nocions d'estats estacionaris i de processos de transició individuals tenen, dins el seu domini d'aplicació, tan o tan poc de realitat com les partícules individuals elles mateixes. Tan en un cas com en l'altre, hem expressat la condició de causalitat complementària del mode de descripció dins l'espai i el temps, condició, l'aplicació lògica de la qual, no és limitada més que per les possibilitats de definició de les nocions corresponents.*

### **El problema de les partícules elementals**

En aquest últim apartat Bohr dona les pinzellades de quin és el límit del coneixement en aquell moment.

Així, parla per primera vegada del que es coneix avui dia per spin,

[...] *hem d'atribuir a les partícules elementals, al costat de la seva massa i de la seva càrrega, un moment magnètic originat per un moment d'impulsió<sup>3</sup> fixat pel quantum d'acció.* [...]

Explica que considerar-lo en l'electró ha resolt el problema de l'efecte Zeeman anòmal, i en el protó l'explicació del calor específic de l'hidrogen.

També cita entre d'altres l'èxit de Dirac que ha aconseguit una extensió del mètode simbòlic que, conservant la correspondència amb els fenòmens espectrals té en compte la condició de relativitat.

Però potser el més interessant d'aquesta última part és la seva reflexió final:

*Ens trobem aquí, en efecte, sobre la via, seguida per Einstein, de l'adaptació de les nostres formes d'intuïció, que hem agafat dels sentits, al coneixement cada vegada més i més profund de les lleis de la natura. Els obstacles que trobem en aquesta via venen abans que res pel fet que per dir-ho així, cada terme del nostre llenguatge està lligat a aquestes formes de representació. Dins la teoria quàntica, aquesta dificultat es presenta immediatament dins la qüestió de la impossibilitat d'evitar el caràcter d'irracionalitat que és inherent al postulat dels quanta. Però espero que la noció de complementarietat serà convenient per caracteritzar l'estat actual de les coses, que mostra una profunda analogia amb les dificultats generals de la formació de les nocions humanes, basades en la separació entre subjecte i objecte.*

### **3.3 LA INTERVENCIÓ D'EINSTEIN**

Einstein és fins el 1925 un dels puntals del desenvolupament de la teoria quàntica, any en que presenta la extensió del treball de Bose al gas de molècules. A principis de 1926, Schrödinger prenent les idees d'Einstein i De Broglie, en que les partícules havien de tenir associada una ona, va formular la mecànica ondulatoria. En principi aquest nou

---

<sup>3</sup> Pel context, avui dia l'anomenaríem moment angular.

formalisme és gratament acceptat per Einstein fins que Born a mitjans del mateix any dóna la interpretació probabilística de la funció d'ona.

Només un any més tard, a mitjans del 1927, ja es considera fora del grup de científics que desenvoluparien la mecànica quàntica. I quan Lorentz li proposa participar com a ponent en el congrés de Solvay, Einstein el contesta uns mesos després amb unes pessimistes paraules:

*“Recordo haver-me compromès amb vostè a fer un informe sobre l'estadística quàntica en el congrés de Solvay. Després de reflexionar molt en el sí i el no, he arribat al convenciment que no sóc competent per fer aquest informe d'una manera que correspongui realment a l'estat actual de les coses. La raó cau en que no he pogut participar en el desenvolupament modern de la teoria quàntica tan intensament com hauria estat necessari per aquest propòsit. Això es deu, en part a que tinc molt poc talent receptiu per seguir per complet els turmentosos desenvolupaments i, en part també, perquè no aprovo la forma de pensar purament estadística sobre la que estan basades les noves teories... Li demano que no es disgusti amb mi; no m'ho vaig prendre a la lleugera, sinó que ho vaig provar amb totes les meves forces.”*

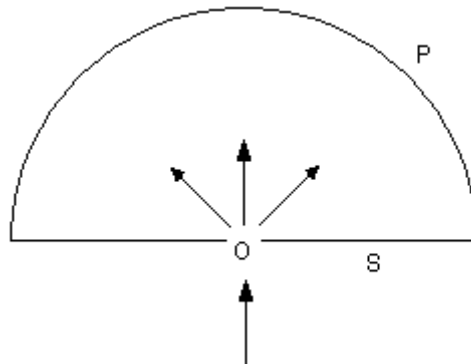
Així doncs no ens ha d'estranyar que Einstein comenci la seva intervenció al cinquè Congrés de Solvay de la manera següent:

*Primer m'he d'excusar de no haver aprofundit en la mecànica quàntica. No obstant, voldria fer algunes objeccions generals.*

A continuació Einstein exposa,

*Podem posicionar-nos en dos punts de vista diferents respecte del postulat del domini de validació, que m'agradaria caracteritzar amb l'ajuda d'un exemple simple.*

*Sigui S una pantalla dins la qual hi hem practicat una petita obertura O, i sigui P una pel·lícula fotogràfica en forma de semiesfera de radi gran. Suposem que els electrons cauen sobre S en la direcció de les fletxes. Una part dels electrons passa per O; a causa de la mida de la obertura i la velocitat de les partícules, es reparteixen uniformement en totes les direccions i van a impactar sobre la pel·lícula.*



**Figura 3: Reproducció de l'esquema que Einstein utilitza en la seva intervenció. Copiat de les actes del congrés de Solvay.**

*Les consideracions següents són comunes a les dues maneres de concebre la teoria. Hi ha les ones de de Broglie que cauen sobre S i són difractades en O. A partir d'O tenim*

ones esfèriques que impactaran a la pantalla, on la intensitat en  $P$  dona la mesura de que passa en aquest punt.

#### *Concepció I*

*Les ones de Broglie-Schrödinger no corresponen pas a un sol electró, sinó a un núvol d'electrons estès a l'espai. La teoria no dona cap informació sobre els processos individuals, sinó solament sobre el conjunt d'una infinitat de processos elementals.*

#### *Concepció II*

*La teoria té la pretensió de ser una teoria completa dels processos individuals. Cada partícula que es dirigeix cap a la pantalla, per tant que puguem determinar per la seva situació i velocitat, és descrita per una paquet d'ones de Broglie-Schrödinger de petita longitud i de petita obertura angular. Aquest paquet d'ones és difractat i, després de la difracció, arriba en part a la pel·lícula  $P$  dins un estat de resolució.*

Veiem en aquestes dues concepcions les dues interpretacions més comunes de la mecànica quàntica. La primera correspondria a la interpretació estadística i la segona a l'anomenada interpretació de Copenhaguen. Einstein continua el seu argument i defensa la primera interpretació en detriment de la segona.

*Segons el primer punt de vista, purament estadístic,  $|\psi|^2$  expressa la probabilitat que existeixi en l'indret considerat un certa partícula del núvol, per exemple en un punt determinat de la pantalla.*

*Segons la segona,  $|\psi|^2$  expressa la probabilitat que en un instant considerat la mateixa partícula es trobi en un indret determinat. La teoria es refereix als processos individuals i pretén fer conèixer tot el que és regit per les lleis.*

De moment només s'ha limitat ha fer un plantejament de la situació i ha escriure explícitament la interpretació de Born de la funció d'ona.

*La segona concepció va més lluny que la primera, en aquest sentit que totes les informacions que resulten de II resulten també de la teoria en virtut de I, però la recíproca no és certa.*

*No és més en virtut de II que la teoria conté la conseqüència que les lleis de conservació són vàlides per els processos elementals; no és de II que la teoria pot deduir el resultat de l'experiència de Geiger i Bothe i que pot explicar el fet que dins la cambra de Wilson les gotetes provenints d'una partícula  $\alpha$  es troben poc properes sobre les línies contínues.*

*Però, d'altra banda, tinc objeccions a fer a la segona concepció. L'ona difosa dirigida cap a  $P$  no ofereix cap direcció privilegiada. Si  $|\psi|^2$  era simplement considerada com la probabilitat que en un punt dona s'hi trobés una partícula determinada en un instant determinat, seria possible que un mateix procés elemental produís una acció en dos o més indrets de la pantalla. Però la interpretació segons la qual  $|\psi|^2$  expressa la probabilitat que aquesta partícula es trobi en un indret determinat, suposa un mecanisme d'acció a distància del tot particular, que impedeix que l'ona, contínuament repartida dins l'espai, produeixi una acció en dos punts de la pantalla.*

Einstein s'ha adonat doncs que la teoria quàntica és no local.

*Des del meu punt de vista, no podem treure aquesta objecció que d'aquesta manera, que no descrivim només el procés per l'ona de Schrödinger, sinó que al mateix temps localitzem la partícula durant la propagació. Jo penso que de Broglie té raó al buscar en aquesta direcció. Si operem únicament amb les ones de Schrödinger, la interpretació II de  $|\psi|^2$  implica una contradicció amb el postulat de la relativitat.*

Observem que ell creu que la no localitat de la teoria quàntica implica la violació del principi de relativitat. Cosa que no té perquè ser així, si entenem pel principi de relativitat que no és possible propagar informació més de pressa que la velocitat de la llum.

Finalment dóna dos arguments més en contra de la interpretació de Bohr que no tindran gaire rellevància en la història.

*Jo voldria encara senyalar breument dos arguments que em semblen defensar contra la segona concepció. Aquesta és essencialment lligada a una representació polidimensional (espai de configuració), ja que només aquest mode de representació fa possible la interpretació de  $|\psi|^2$  pròpia de la concepció II. Em sembla que les objeccions de principi s'oposen a aquesta representació polidimensional. Dins aquesta representació, en efecte, dues configuracions d'un sistema, que no es distingeixen per la permutació de dues partícules de la mateixa espècie, són figurades per dos punts diferents (de l'espai de configuració), el que no està d'acord amb els nous resultats de la estadística. Per altra banda, la particularitat de les forces de procedir només a petites distàncies espacials troba en l'espai de configuracions una expressió menys natural que dins l'espai a tres o quatre dimensions.*

El primer que ens sorprèn després de llegir la intervenció d'Einstein és que tot i que el que el molesta més de la teoria quàntica són els problemes de causalitat, o la impossibilitat a fer una descripció completa en l'espai temps. Recordem la seva frase de “*Déu no juga a daus*”. Ell ataca la visió de Bohr per un punt que aquest ni ha anomenat en cap moment durant la seva conferència, la no localitat.

### 3.4 RÈPLICA DE BOHR

Tot i que a les actes del Congrés Solvay no apareix cap més intervenció de Bohr per respondre Einstein, en els seus Collected Works sí que apareix una resposta. La següent intervenció és extreta de la carpeta “Notes de la Conferència Solvay, 1927” que conté notes preses durant les discussions posteriors a la conferència. Hi ha 12 pàgines escrites en lletra de J.E. Verschaffelt, que comprenen les contribucions de Bohr a la discussió de l'informe de Compton i a la discussió general. Aquestes pàgines són bastant incompletes amb molts buits. A continuació presentem la part més comprensible de les respostes de Bohr, a Einstein i Dirac. Entre parèntesis quadrats es troben les paraules amb que s'han intentat interpolar aquests forats.

*Em sento en una difícil posició ja que no entenc quin és el punt en que precisament Einstein [vol fer èmfasi]. No dubto que la culpa és meva.*

...

*M'agradaria posar el problema en un altre sentit. No sé què és la mecànica quàntica. Penso que estem tractant amb alguns mètodes matemàtics que són adequats per*

*descriure els nostres experiments. Utilitzant una rigorosa teoria ondulatoria estem demanant alguna cosa que la teoria no ens pot donar. [Ens hem d'adonar] que som lluny d'aquell estat on podríem esperar descriure les coses amb teories clàssiques. La mateixa visió és tinguda per Born i Heisenberg. Penso que de fet només hem d'intentar conèixer, com en totes les altres teories, alguns requisits de la natura, però difícilment hem d'utilitzar paraules que provinguin de les antigues teories. La sencera fundació per una descripció espacio-temporal és treta per la teoria quàntica, per això està basada en assumptió de les observacions sense interferències. ... excloent interferències vol dir excloure de l'experiment i del significat sencer de l'espai i el temps les observacions.. ja que [tenim] interaccions [entre objectes i instruments de mesura] i ens posem sobre una perspectiva en que pensàvem que podríem prendre les teories clàssiques. Si parlem d'observacions juguem amb un problema estadístic. Hi ha certes característiques complementàries a la imatge ondulatoria (existència d'individuals). ...*

...

*Dir que l'espai-temps és una abstracció pot semblar una trivialitat filosòfica però la natura ens recorda que estem tractant amb alguna cosa d'interès pràctic. Depèn de com consideri la teoria. Puc no haver-ho entès, però penso que la cosa sencera lliga [allà dins on la] teoria no és res més que una eina per conèixer els nostres requisits, i penso que ho és.*

Veiem doncs en aquesta intervenció la cara més positivista de Bohr. Expressa la seva concepció de la ciència com un seguit de regles que prediuen els experiments sense cap necessitat de fer-nos-en una imatge mental. Així doncs el poder visualitzar la successió de fenòmens en l'espai-temps<sup>4</sup> no era altra cosa que “paraules que provenen d'altres teories”.

---

<sup>4</sup> Aquest concepte de visualització o representació en l'espai temps, és el que Schrödinger va anomenar *Anschaulichkeit*.



## 4. PRIMER IMPACTE I EVOLUCIÓ DE LA DISCUSSIÓ

La discussió entre Bohr i Einstein sobre la interpretació de la teoria del quàntum va començar el 1927, al V congrés de Solvay, i va acabar amb la mort d'Einstein el 1955. La fase més activa de la discussió va funcionar entre el 1927 i el 1936, quan Bohr va contestar al *paper* EPR escrit per Einstein i dos companys més.

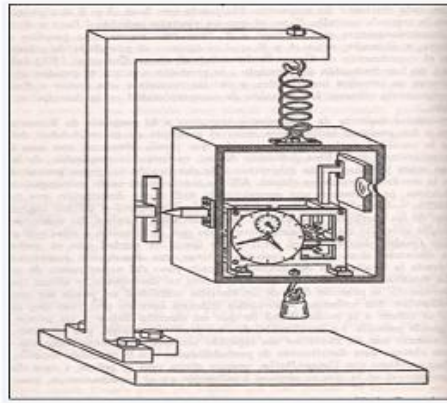
La discussió va prendre la forma de diversos experiments del pensament inventats per Einstein on buscava teòricament la possibilitat de mesurar les característiques complementàries de posició i moment d'una partícula o la seva energia en un determinat punt en el temps. Si aquestes mesures fossin possibles, aconseguiria que el principi de la idea de Bohr de la complementarietat i de la incertesa de Heisenberg fossin incorrectes i que la teoria del quàntum proposada per Bohr (anomenada interpretació de Copenhaguen) fos incorrecta.

Des del principi Einstein mostra el seu descontentament amb la mecànica que acaba d'emergir. Aviat es convenç de la correcció lògica d'aquesta teoria, però manté les seves crítiques, en base al fet que la nova teoria conté elements que la fan inacceptable, des de un punt de vista filosòfic. a) La teoria en la seva forma actual no permet una descripció realista (que correspondria a un món objectivament existent), sinó que reconeix la intervenció d'un hipotètic observador; b) Tampoc dóna una descripció completa d'un esdeveniment individual, sinó merament estadístic, i c) Assigna un paper fonamental a l'atzar. Einstein considera com una qüestió de principi el fet que sigui possible donar una descripció completa i acabada – i per tant no estadística – i en termes objectius, de qualsevol fenomen físic i posa aquest principi per davant del coneixement físic específic. La seva conclusió és així de natural: *“La teoria quàntica és molt impressionant. Però una veu interna em diu que això no es encara allò autèntic. La teoria dóna molt, però difícilment ens apropa al secret. De totes maneres, estic convençut que Deu no juga als daus”*.

Després d'aquest V congrés de Solvay, Bohr inicia una sèrie de conferències, el 1929, on es discuteixen diverses qüestions científiques. No es van aconseguir respostes unànimes, però s'intentaven resoldre. És una època de grans conferències científiques. Però alguns científics com Schrodinger, igual que Einstein, rebutgen la teoria quàntica. Schrodinger ataca l'enfoc probabilístic de la predicció en la quàntica a través del seu exemple conegut com “el gat de Schrodinger”.

Bohr aplica el seu principi de complementarietat a altres camps del coneixement, com la filosofia. Ningú, però, no el considera dotat per això.

Va ser a la VI Conferència Solvay de 1930 (sobre magnetisme) on Einstein va presentar a Bohr un argument que va semblar donar-li la raó i que expliquem breument. El debat va continuar entre corredors, i aquest cop Einstein va creure que havia aconseguit un contraexemple al principi d'incertesa. L'argument era enginyós: Consideri una caixa on en una de les seves parets, es pot obrir y tancar un forat mitjançant un obturador controlat per un rellotge dins la caixa. Es deixa obert l'obturador per un breu interval durant el qual escapa només un electró. Es torna a pesar la caixa un temps després. Així, s'han trobat (en principi) tant l'energia del fotó com el seu instant de passatge, amb precisió arbitrària en contra del principi d'incertesa energia temps.



**Figura 4: Esquema del dispositiu que permetria violar el principi d'incertesa segons Einstein.**

*Va ser tot un xoc per a Bohr... No trobava de seguida la solució. Durant tota la nit es va mantenir extremadament molest, anant de l'un a l'altre, i mirant de persuadir-los que no podia ser veritat, que, si Einstein tenia raó, significaria la fi de la física; però no podia presentar cap refutació. L'escena de la proposició d'Einstein va ser d'allò més espectacular, l'alta figura d'Einstein caminant reposadament, amb un somriure irònic, i Bohr trotant al seu costat, molt excitat mentre sortien del club (de la Fondation Universitaire), el matí següent va arribar el triomf de Bohr.*

Bohr va il·lustrar després els seus arguments amb l'ajuda de la disposició experimental reproduïda a dalt. La pesada inicial es fa registrant la posició del punter unit a la caixa, respecte a l'escala agafada al suport fix. La pèrdua de pes, deguda a la fugida del fotó, es compensa mitjançant una càrrega (que penja sota la caixa), que fa tornar el punter a la posició inicial, amb una tolerància  $\Delta q$ . Per la seva banda, la mesura del pes té una incertesa  $\Delta m$ . La càrrega agregada li dóna un impuls que es pot mesurar amb precisió  $\Delta p$ , delimitada per:

$$\Delta p \Delta q \cong h, \quad \text{obviament} \quad \Delta p < tg \Delta m$$

on  $t$  és el temps necessari per reajustar el punter i  $g$  l'acceleració de la gravetat. Així,  $tg \Delta m \Delta q > h$ . A continuació, Bohr utilitzà la fórmula del desplaçament al vermell: la incertesa en la posició  $\Delta q$  del relloge en el camp gravitatori, implica una incertesa  $\Delta t = gt \Delta q / c^2$  a la determinació de  $t$ . Per tant,  $c^2 \Delta m \Delta t = \Delta E \Delta t > h$ . Així, la precisió amb què es mesura l'energia del fotó restringeix la precisió en que es pot determinar el seu impuls d'escapament, d'acord amb les relacions d'incertesa per energia i temps.

Noteu que a la figura cadascun dels molts detalls obeeix a un propòsit experimental: els cargols fixen la posició de l'escala sobre la qual es mou el punter, la molla garanteix la mobilitat de la caixa en el camp gravitatori, el pes afegit a la caixa serveix per reajustar la seva posició, i així successivament. No hi havia res capritxós en la insistència de Bohr en aquest detalls. Els havia dibuixat més bé per il·lustrar que, ja que els resultats de totes les mesures físiques s'expressen en llenguatge clàssic, cal especificar amb detall, també amb aquest llenguatge, les eines de la mesura.

El congrés Solvay de 1930 va ser l'última ocasió en que, Einstein i Bohr van aprofitar l'estimulant i medidora influència d'Ehrenfest en les seves discussions (va morir al 1933).

Després d'aquesta refutació de Bohr, Einstein va deixar de buscar incoexistències. Cap al 1932, la seva posició respecte la mecànica quàntica havia patit un marcat canvi.

Abans de res, la seva comunicació següent sobre la mecànica quàntica, presentat el febrer de 1932, mostra que havia acceptat la crítica de Bohr. Mira també de buscar altres variants d'aquest experiment mental, però sense conclusions clares. I Einstein havia arribat a acceptar que la mecànica quàntica no era una aberració, si no una contribució veritablement professional a la física.

No es que des d'aleshores desistís de criticar la mecànica quàntica. Havia reconegut que era una part de la veritat, però aleshores i sempre, es va mantenir profundament convençut que no era tota la veritat. Des de 1932 en endavant, el tema per ell ja no va ser la consistència de la mecànica quàntica, sinó més aviat la seva completesa.

La polèmica va continuar, però va canviar de forma, ja que Einstein aviat es va veure obligat a abandonar Alemanya. El 1932, l'Institut d'Estudis Avançats que s'estava creant a Princeton (New Jersey, EUA), li va oferir un lloc de professor, per compartir el seu temps en parts iguals entre Berlín i Princeton. Einstein acceptà i el desembre d'aquell any se'n va cap a la seva primera estada a Princeton. Setmanes després, el 30 de Gener de 1933, Hitler pren el poder a Alemanya (Einstein mai més no tornarà a trepitjar terra alemanya).

El 1933, Einstein havia comunicat explícitament la seva convicció que la mecànica quàntica no conté contradiccions lògiques. A la seva conferència Spencer, va dir de les funcions d'ona de Schrödinger: *Se suposa que aquestes funcions determinen de manera matemàtica només les probabilitats de trobar aquells objectes en un lloc particular, o en un particular estat de moviment, si fem una mesura. Aquesta concepció és lògicament inobjectable, i ha conduït a importants èxits.*

El Congrés Solvay següent, d'aquell any, es va dedicar als problemes de l'estructura i propietats dels nuclis atòmics, on s'acabaven de fer grans progressos en aquest camp, degut tant als descobriments experimentals com a les noves i fructíferes aplicacions de la mecànica quàntica. Einstein no va assistir al congrés, que es va celebrar en moments enfosquits pels tràgics successos de la política mundial i com hem dit abans, es trobava als EUA.

Una mica abans i a Princeton, Bohr, amb motiu d'una visita, va parlar amb Einstein sobre aspectes epistemològics de la física atòmica, però les diferències entre els seus punts de vista i formes d'expressió eren encara obstacles per arribar a un mutu acord. Fins aleshores poques persones havien pres part en les discussions referides a aquest article; però la posició crítica d'Einstein cap a les idees de la teoria quàntica, que havien estat adoptades per tants físics, va ser exposada a l'atenció pública en un treball titulat *¿Pot considerar-se completa la descripció de la realitat física per la mecànica quàntica?* publicat el 4 de Març de 1935 al New York Times per Einstein, Boris Podolsky i el seu jove ajudant Nathan Rosen. Aquest treball (conegut per les inicials dels seus autors com el treball EPR), que demostra que si s'adopta un punt de vista

objectiu clarament definit sobre la realitat física, aleshores la mecànica quàntica és una teoria física incompleta, ja que no pot contenir tots els elements de la realitat d'interès per a la descripció del sistema. Bohr es va sentir obligat a respondre a aquest embat i, deixant de banda les investigacions sobre física nuclear que l'ocupaven, elabora una llarga i detallada resposta, encaminada a mostrar que el punt de vista sobre la realitat física defensat per EPR és inacceptable des del punt de vista de la mecànica quàntica.

L'article expressava la següent frase: *Si, sense pertorbar de cap manera un sistema donat, podem predir amb certesa (és a dir, amb probabilitat igual a 1) el valor d'una magnitud física, existeix un element de realitat física corresponent a aquesta magnitud.*

Considerant a continuació un sistema constituït per dues parts que han actuat una sobre l'altra durant un temps limitat, els autors exposen amb elegància la descripció que fa la mecànica quàntica i les conseqüències que en resulten; després en dedueixen que magnituds a les quals no se'ls pot donar un valor determinat en la descripció d'un dels sistemes parcials podem predir, mitjançant una mesura efectuada sobre l'altre sistema.

Aplicant aleshores el seu criteri, els autors dedueixen que la mecànica quàntica “no proporciona una descripció completa de la realitat física” i expressen la seva creença que deu ser possible desenvolupar una representació més adequada dels fenòmens.

Degut a una brillantor i caràcter aparentment incontrovertible del seu argument, el treball d'Einstein, Podolsky i Rosen va produir una commoció entre els físics i va desenvolupar un gran paper a la discussió filosòfica general. Certament, la qüestió debatuda és d'un caràcter molt subtil i adequada per destacar quant s'ha sobrepassat en física atòmica el domini accessible a les representacions intuïtives.

Els autors d'EPR consideraven aleshores el següent problema. Dues partícules, les variables d'impuls i posició de les quals són  $(p_1, q_1)$  i  $(p_2, q_2)$  estan en un estat amb impuls total definit:  $P = p_1 + p_2$ , i distància relativa definida  $Q = q_1 - q_2$ . Això és possible, naturalment, perquè  $P$  i  $Q$  commuten. Es deixa que les partícules interactuin. Es fan observacions sobre la partícula 1 molt després que hi hagi tingut lloc la interacció. Si es mesura  $p_1$ , i es coneix  $p_2$  sense haver pertorbat la partícula 2. Per tant,  $p_2$  es (en el seu llenguatge) un element de la realitat. Ara, si es mesura  $q_1$ , i es coneix també  $q_2$  es per tant un element de la realitat. Però la mecànica quàntica ens diu que  $p_2$  i  $q_2$  no poden ser simultàniament elements de la realitat, a causa de la no-commutativitat dels operadors d'impuls i posició d'una partícula donada. En conseqüència, la mecànica quàntica és incompleta.

Bohr va mirar de demostrar uns mesos després que des del punt de vista de la complementarietat, les aparents contradiccions quedaven totalment eliminades.

En un cert nombre de comunicacions posteriors, Einstein va tornar al seu criteri de realitat objectiva, repetint l'argument EPR en diverses ocasions. En aquestes comunicacions, no afegeix res substancialment nou.

Bohr no va ser, evidentment, l'únic en expressar oposició a la realitat objectiva; ni Einstein l'únic crític de la interpretació de la complementarietat. Però les idees d'Einstein apareixen més juxtaposades a les de Bohr. Cal destacar, però, que hi ha altres físics teòrics i matemàtics que han fet contribucions importants en aquesta àrea de

problemes. Els experimentadors hi han participat activament. S'ha fet un cert nombre d'experiències per provar la mecànica quàntica en general, i també les prediccions d'esquemes alternatius específics. Això no ha conduït a sorpreses.

Les discussions de Bohr amb Einstein es van prolongar molts anys, durant els quals s'han fet grans progressos en el camp de la física atòmica. Les entrevistes entre els dos, fossin de curta o llarga durada, van deixar una 'profunda empremta' en Einstein.

El 1949, Bohr va redactar un llibre titulat "*Física atòmica i coneixement humà*" on resumeix set assaigs que reflecteixen les seves opinions sobre la naturalesa de l'home i la imatge que aquesta es fa del món físic.

En un dels assaigs diu: *he tingut el privilegi de discutir amb Einstein els problemes epistemològics plantejats pel modern desenvolupament de la física atòmica (...). Aquestes discussions van ser per mi de molt valor i estímulo.*

## 5. EPÍLEG

Tal com hem vist, Einstein creu que la interpretació de Copenhaguen té la pretensió de fer de la teoria una teoria completa i última. Ell aposta per una interpretació estadística que estableix que aquestes noves propietats quàntiques són efectes col·lectius, i la natura a nivell fonamental (individual) no té perquè ser així. Segons aquesta interpretació, per exemple, un electró movent-se per l'espai no tindria cap ona associada sinó que hauríem de tenir un feix d'electrons.

La tecnologia actual, però, està permetent posar de manifest efectes quàntics amb nombres molt petits de processos. Són d'aquest estil les noves tècniques de teletransportació, la criptografia, computació quàntiques i altres. Sembla doncs que la interpretació estadística queda descartada.

No obstant això, són molts els físics i els filòsofs que no es donen per vençuts i que com Einstein no poden acceptar una mecànica quàntica que ens impedeix conèixer la natura en última instància i fa que no ens en puguem fer una imatge mental. Però el que planteja per molts un problema filosòfic encara més gran és que segons la mecànica quàntica, la natura en sí mateixa no està totalment definida, i és quan mesuram, quan hi ha un subjecte observador, que fem que es defineixi (l'anomenat col·lapse de la funció d'ona). Aquesta visió que la observació modifica l'objecte observat i que la realitat és diferent segons si la mirem o no, és una conseqüència massa forta de la teoria per deixar tranquils físics i filòsofs.

Einstein creia que la descripció mecànic-quàntica de la natura resultava incompleta o aproximada, i per tant es va posar en la recerca d'una teoria anomenada de variables amagades que no tingués tots els problemes metafísics esmentats abans. Un nom més adequat potser seria teories realistes-locales. Aquestes són teories que intenten fer una descripció de la natura sense aquest subjectivisme de la mecànica quàntica ni la seva no localitat. Es basen en tres axiomes: realisme, inferència inductiva i separabilitat d'Einstein.

- El realisme és la doctrina que estableix que les regularitats apreciades en els fenòmens observats són causades per alguna realitat física, la existència de la qual és independent de l'observador.
- El segon postulat estableix que la inferència inductiva és una forma vàlida de raonament que pot aplicar-se lliurement. És a dir que si tinc una poma agafada i la deixo anar sé que caurà amb acceleració constant perquè sempre ho ha fet així. És aquesta premissa la que ens permet deduir conclusions legítimes dels experiments.
- La separabilitat o localitat d'Einstein estableix que cap tipus d'influència pot propagar-se més de pressa que la velocitat de la llum.

Les teories realistes locals i la mecànica quàntica no poden ser certes alhora, ja que les prediccions que fan unes i l'altra d'alguns resultats experimentals són diferents. Concretament es tracta de la desigualtat de Bell. És una desigualtat formulada per J. S.

Bell en base als tres postulats anteriors. El més sorprenent és que en unes circumstàncies, les prediccions de la mecànica quàntica la violen.

Segons els darrers experiments és la mecànica quàntica qui té la raó i per tant una de les premisses de les teories realistes locals seria falsa. La comunitat científica obligada a conservar els principis de realisme i inferència inductiva no té altre remei que descartar el postulat de separabilitat i començar a acceptar que la natura en última instància és no local.

Finalment ens agradaria presentar la teoria de Bohm. Aquesta és una teoria realista alternativa a la mecànica quàntica per tal d'escapar-se de la concepció probabilista i subjectivista d'aquesta. La teoria de Bohm descriu un procés físic real, concret i determinista i explica els comportaments dels electrons amb la mateixa precisió que la interpretació estàndard de la mecànica quàntica essent lliure dels embolics metafísics associats a aquesta. Així estipula que les posicions de les partícules tenen una naturalesa fàctica i estan sempre definides. També nega la superposició de diferents estats.

Seria una bona alternativa tot i que li falta una generalització a altes energies (relativista).

Com la mecànica quàntica, és una teoria no local, però després del que acabem de veure això és inevitable.

## 6. CONCLUSIÓ

Hem observat que la discussió entre Einstein i Bohr al cinquè congrés de Solvay és un tema molt citat a molts llibres d'història de la ciència i filosofia, així com en multitud de pàgines web sobre filosofia de la ciència i interpretacions de la física quàntica. Això ens demostra doncs, que per molts historiadors aquesta discussió és considerada un episodi històric en el desenvolupament de la mecànica quàntica.

Aquestes fonts secundàries consultades no parlen del cinquè congrés com una trobada de la que la comunitat científica internacional per analitzar les interpretacions i conseqüències de la nova teoria quàntica, sinó com el congrés de la discussió entre Einstein i Bohr.

D'altra banda quan agafem les fonts primàries (les actes del congrés i els Bohr's Collected Works) observem dues coses:

- Hi va haver molts altres participants que van fer moltes intervencions en els dos sentits de la discussió (Lorentz, Heisenberg, Dirac, Pauli, Schrödinger, Born, Kramers...).
- El reduït nombre d'intervencions que fan Einstein i Bohr. A les actes del congrés només apareix una vegada Bohr exposant el tema i una altra Einstein explicant el seu punt de vista. Si bé és veritat que en els Collected Works hem trobat una altra rèplica de Bohr no té aparentment més pes que els seus companys.

Ens plantegem doncs el per què Einstein i Bohr han eclipsat tots els altres protagonistes del debat, si el debat va ser molt més obert i hi van intervenir molts més científics en els dos sentits. En aquest sentit tenim dues hipòtesis:

- La cinquena conferència de Solvay és tan popular perquè va ser allà on va començar el debat que posteriorment s'allargaria i tindria més repercussions. És a dir la cinquena conferència Solvay seria el germen d'un llarg diàleg públic i per això que és tan anomenat.
- Hi va haver realment una forta dialèctica entre Einstein i Bohr que devia tenir lloc en passadissos, converses de cafè i altres, de manera que no n'ha quedat un registre que es pugui consultar.

La nostra opinió és que han passat una mica les dues coses. Creiem que la discussió va ser més intensa que el que es reflexa a les actes del congrés. D'altra banda també creiem que moltes vegades s'ha assignat una excessiva rellevància al paper que juguen Einstein i Bohr en el congrés, relegant a la resta de participants a mers espectadors. Entenem també que és una conseqüència natural de la discussió que es generaria a partir d'aquest.

Aquest últim punt ens porta a adonar-nos de la difícil tasca que és la reconstrucció del passat, ja que el nombre de documents és molt limitat i la majoria de converses, pensaments etc. no queden registrats.



Si en un capítol històric tan popular com la discussió Einstein-Bohr ja tenim alguns problemes de falta de fonts, imaginem-nos la tasca de l'historiador en altres esdeveniments més desconeguts.

L'estudi de la discussió entre Einstein i Bohr però, ens dóna una altra lliçó en un altre sentit ben diferent. Ens ensenya que la diversitat d'idees i punts de vista és molt positiva i permet en el seu intercanvi, un enriquiment personal de les dues parts. Un diàleg que Einstein i Bohr van fer amb respecte i que els va portar a reafirmar-se més en la seva posició a la vegada que comprenien la de l'altre. Finalment voldríem acabar amb el següent comentari de Bohr:

*”Confio en que aquesta explicació serveixi per transmetre a més amplis cercles el paper essencial del lliure intercanvi d'idees en el progrés d'una ciència en la qual les noves experiències ens han obligat sense parar a una reconsideració dels nostres punts de vista”.*

## Apèndix I

### ELS CONGRESSOS SOLVAY

Els orígens dels instituts i consells internacionals de física i química Solvay daten de la primera meitat de 1910, i tenen a Walther Nernst, ja en aquell moment molt interessat pel nou món quàntic, com el seu gran valedor. En el curs d'un dels seus viatges, Nernst va passar per Brussel·les, coincidint allà (a casa de Robert Goldschmidt, professor de química-física a la Universitat Lliure de Brussel·les) amb Ernest Solvay, un químic belga que havia fet fortuna desenvolupant un procés de fabricació del bicarbonat sòdic. Nernst li va comentar que seria interessant organitzar una reunió d'especialistes en aquest nou món científic, i Solvay va mostrar la seva disposició per subvencionar-la.

El 26 de juliol de 1910, des de Berlín, Nernst va enviar una proposta més detallada a Solvay on intentava explicar-li la situació actual:

*Sembla que ens trobem actualment al mig d'una nova revolució dels principis en els quals es basa la teoria cinètica de la matèria. D'una banda, aquesta teoria ... condueix a una fórmula per a la radiació que es troba en conflicte amb tots els resultats experimentals, una situació que ningú nega; de l'altra, d'aquesta mateixa teoria se'n dedueixen tesis sobre la calor específica ... que també son refutades absolutament per nombroses mesures. Com s'ha demostrat, especialment per Einstein i Planck, aquestes contradiccions són eliminades si s'imposen certs límits (el postulat dels quanta d'energia) al moviment d'electrons i àtoms pel cas de l'oscil·lació al voltant d'un punt fix. Però aquesta interpretació representa una ruptura tal respecte les equacions del moviment de partícules materials a les que estem acostumats, que acceptar-la significarà necessària i inqüestionablement una reforma radical de les actuals teories fonamentals.*

Un més abans però, ja havia escrit a Planck informant-lo de les seves intencions. Aquest, no estava tan convençut de l'oportunitat com el seu col·lega, i preferí esperar un o dos anys per què es fes més evident la carència teòrica que començava a notar-se.

Van haver-hi altres cartes entre Nernst i Solvay per acordar participats i detalls de la discussió que es voldria dur a terme. També, Solvay va escriure el març de 1911 a Goldschmidt on discutia sobre els convidats i les seves nacions representatives. Les invitacions van ser enviades entre el 9 i el 15 de Juny d'aquest mateix any i van oferir a Lorentz el càrrec de la presidència del congrés.

La reunió, es va celebrar a Brussel·les entre el 30 d'Octubre i el 3 de Novembre de 1911, i va estar dedicada a "La teoria de la radiació i els quanta". Aquest primer congrés Solvay, és un episodi rellevant de la història de la física, no tant pels resultats que se'n van obtenir, sinó per la singularitat de la majoria dels participants, per la naturalesa del tema debatut – que ocupava una posició central en la física del moment –, així com perquè fins aleshores hi havia hagut poques reunions d'aquests tipus (autènticament internacionals i dedicades específicament a problemes oberts de física). La única que s'havia celebrat anteriorment havia estat el congrés internacional de Física, que havia mirat més cap enrera que cap al futur.

Donat l'èxit de la primera reunió, Solvay es va decidir de continuar-les, i ampliar la iniciativa en l'àmbit de la química, que celebraria els seus congressos per separat, així com establir uns instituts internacionals de Física i Química – que portarien el nom Solvay – i s'ocuparien de promoure investigacions.

El primer institut en crear-se va ser el de Física, fundat a la primavera del 1912. L'institut de Química es va crear després, al maig de 1913. Mentre que l'institut de física funcionava independentment de qualsevol organització, la direcció del de Química estava confinada a la Associació Internacional de Químiques, establerta l'any 1911.

Pel que fa als congressos de Química Solvay, el primer es va celebrar a l'abril de 1922; no va estar dedicat –de la mateixa manera que el tercer celebrat el 1928- a cap tema específic, però hi van predominar les discussions quimico-físiques. El segon congrés va tenir lloc el 1925 amb el tema de “l'estructura i l'activitat”. Presos com a conjunt, constitueixen una mostra magnífica del canvi experimentat per la química: mentre que el segle XIX aquesta havia estat dedicada sobretot a l'anàlisi dels compostos químics, a determinar la seva composició i estructura funcional, a començaments del nou segle les qüestions de dinàmica molecular, és a dir la química-física, van passar a figurar al nucli de la disciplina.

Per la seva banda, els congressos de física Solvay van estar dedicats durant molts anys a temes relacionats amb el món quàntic. El primer consell Solvay, es va discutir sobre “la teoria de radiació i els quanta” (al 1911), el segon (27-31 d'Octubre de 1913) va estar dedicat a “la estructura de la matèria”, el tercer (1-6 d'Abril de 1921) a “àtoms i electrons”, el quart (24-29 d'Abril de 1924) a “conductivitat elèctrica dels metalls i problemes relacionats”, el sisè (25-29 d'Octubre de 1930) al “magnetisme”, i el setè (22-29 d'Octubre de 1933) a “l'estructura i propietats dels nuclis atòmics”.

Ens podem adonar del dilatat interval de temps que es va produir entre la celebració del segon i el tercer congrés. El motiu n'és la primera guerra mundial. De fet, la història dels Instituts i Consells Solvay constitueix un excel·lent mirall en el que es poden contemplar els dramàtics esdeveniments que es produïren durant aquells anys.

Les activitats de l'Institut Solvay i dels Consells es van paraitzar pràcticament durant la guerra. Es van tornar a realitzar el 1921, però no seria fins al cinquè congrés (octubre de 1927) on tornarien a participar científics de les potències centrals. Més endavant, la segona guerra mundial torna a fer-se evident en aquests congressos, que són paraitzats durant un interval de temps encara major (entre el setè i el vuitè).

Els congressos Solvay es van celebrar vint vegades entre 1911 i 1991.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Mehra, Jagdish. Solvay Conferences on Physics. D. Reidel Publishing Company. Boston, 1975.
- [2] Electrons et Photons, Rapports et discussion du cinquième conseil de physique. Gautier-Villars et C<sup>le</sup>, Editeurs. Paris, 1928.
- [3] Pais, Abraham. El señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein. Ariel methods. Barcelona, 1984.
- [4] Pais Abraham. Niels Bohr's times. In Physics, Philosophi and Polity. Clarendon Press. Oxford, 1991.
- [5] Diversos autors. Historia de la ciencia. Edad contemporanea. Volum IV. Barcelona 1982.
- [6] Bohr, Niels. Collected Works, Volume 6, Foundations of quantum physics I. Elsevier Science Publishers B. V., Netherlands, 1985.
- [7] Bohr, Niels. Atomic Physics and Human Knowledge. J.Wiley & Sons. New York, 1958.
- [8] Abner Shimony, Realidad del mundo cuántico. Investigación y Ciencia, Temas 10. Barcelona, 1997.
- [9] Bernard d'Espagnat, Teoría cuántica y realidad. Investigación y Ciencia, Temas 10. Barcelona, 1997.
- [10] David Bohm, A suggested Interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. Physical Review, January 1952.
- [11] Luis de la Peña. Einstein Navegante Solitario. México, 1987.
- [12] Eliezer Braun. Una faceta desconocida de Einstein. México, 1997.
- [13] Jorge Croissier i Albert Solé. Camí cap a les relacions d'incertesa (treball d'història de la física). Barcelona, 2000.