

ASTRONOMIA

EINSTEIN, PARE DE LA TEORIA RELATIVISTA

Antoni Petit i Deulofeu.

RESUMEN

Albert Einstein en 1915 demostró a todos los científicos de la época, que el espacio-tiempo se curvaba bajo la influencia de la materia y energía que contenía. O sea, que se pasaba de un tiempo dominado por la materia-energía (*concepción clásica*), a un espacio-tiempo sometido a la materia y energía que lo contenía.

El edificio en construcción de la física moderna se basaba en que bajo el efecto de la gravedad, el espacio-tiempo se curvaba. De esta manera la gravitación quedó reducida a un simple problema geométrico: un cuerpo móvil en el universo real, se limitaba a describir una línea geodésica de éste, es decir, que la materia curva el espacio, reduce el tiempo y se transforma en energía.

Por otra parte, la identificación de la materia y la energía le condujo a la idea de la pesantez de ésta y, por consiguiente, aquella luz que recibimos de las estrellas y que pasa junto al Sol, debe desviarse de su trayectoria recta. Sobre la Relatividad restringida puede decirse que se ha incorporado con éxito a la física moderna, y que actualmente se halla impregnada de su espíritu.

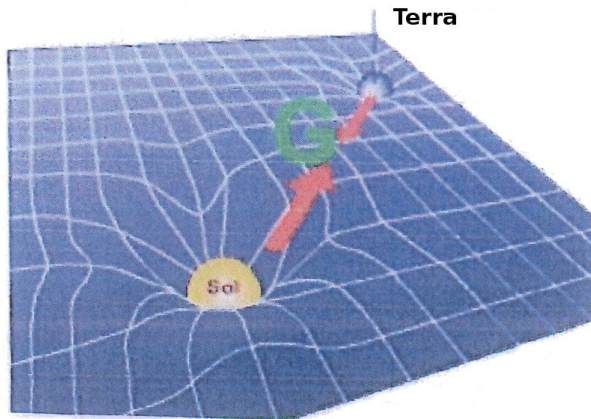
ABSTRAT

Albert Einstein proved in 1915 to all scientists of the time, that space-time is curved under the influence of the matter and the energy contained in itself. In other words, we move from the concept of time dominated by matter-energy (classical concept), to a space-time subdued to the matter and energy it contained.

The under-construction building in what modern physics was based on, held that, under the effects of gravity, causes the space-time to warp. That way, gravity was reduced to a simple geometrical problem: a movable body in the real universe, only describes a geodesical line of it, hence the matter warps the space, time is being reduced and it was transformed in energy.

On the other hand, the identification of matter and energy led him to the idea of its weight and, therefore, the light we receive from the stars which pass next the Sun, may be diverted from its straight path.

1. LA SOBIRANIA DE L'INFINIT



Inicialment el problema que es va trobar Einstein per estudiar la Cosmologia de l'Univers, va ser que a principis del segle XX els estudis estaven a un nivell de caràcter "aristotèlic" (Aristòtil fou el més gran pensador de l'època grega). De fet Einstein va desenvolupar la Teoria de la Relativitat General, paral·lelament amb llur reflexió sobre la inèrcia.

Figura 1. Deformació produïda per la matèria.

Ell va constatar la influència teòrica de la geometria contemporània per una verdadera reflexió. Amb el seu treball central de 1917 va desenvolupar i crear el que seria l'origen de la Cosmologia Moderna. La resolució fou llarga i complexa que de manera esquemàtica es pot resumir en la taula 1.

Primera conseqüència (IV + III + I). L'espai i el temps estan lligats. La velocitat de la llum és màxima i invariant. L'espai resta pla i les geodèsiques (els camins més curts d'una punta a l'altre), resten rectes. La matèria és una forma d'energia:

$$E = m \cdot c^2$$

Segona conseqüència (V + II + I). L'espai està lligat i es corba amb la matèria, encara que de fet en conjunt és pla. Les geodèsiques, poden estar corbades en cercles o en el·lipses planetàries. Sense la força de gravitació els elements mòbils (amb la llum compresa), s'acontenten de seguir el seu impuls pel camí més curt, dins l'espai corbat, amb les geodèsiques.

En l'experiment sobre el periheli de Mercuri, es va poder demostrar que com que les partícules de la llum tenen massa, la potent gravetat del Sol encorba els raigs de llum que procedeixen d'estels que estan darrere del Sol. Així des de la Terra es podien observar estels, que de l'altre manera estarien amagats pel Sol.

No es fàcil poder imaginar-se els casos de curvatura del nostre espai tridimensional real, sabent que la seva forma és plana. Einstein explica una anècdota que li va passar amb el seu fill, quan li va preguntar:

- Pare, com és que ets tan famós? Einstein va riure i li va explicar: Mira fill, quan un escarabat que és cec s'arrossega per la superfície d'una bola, no nota que el camí que fa està corbat, jo vaig tenir la sort de notar-ho.

<i>En el principi</i>	La immobilitat és el principi natural de les coses.
<i>Galileu (I)</i>	Principi d'Inèrcia. Un objecte amb moviment en el buit, resta indefinidament en moviment. "Sistemes inercials." Principi de la Relativitat: El moviment regular no pertorba els fenòmens naturals. Les lleis de la Mecànica es refereixen a tots els cossos materials, en llurs desplaçaments uniformes.
<i>Newton (II)</i>	Gravitació universal – Els cossos materials cauen sobre la superfície de la Terra. Una mateixa llei explica la pesantor i la gravetat.
<i>Maxwell (III)</i>	L'electromagnetisme. La llum és una ona electromagnètica governada per unes equacions específiques, diferents de les equacions de la Mecànica.
<i>Einstein (1905)</i> (IV → III + I)	Relativitat restringida. Les lleis de la física, que concernent amb la llum i la matèria són les mateixes, tant si estan en moviment regular o parades.
<i>Einstein (1915)</i> (V → I + II)	Relativitat general. Les lleis de la física aquí són iguals en tots els punts de referència, tant si estan parats, com en el moviment no regular (accelerat o desaccelerat), on la gravitació n'és un exemple.

Taula 1. Desenvolupament històric de la cosmologia moderna.

Partint de la igualtat de les masses de gravitació i d'inèrcia, Einstein va deduir les equacions comunes de gravitació en un espai curvilini. Així és la dialèctica de la naturalesa: quan més complex és el fenomen, més facilitats els hi dóna als físics per continuar llur investigació. Per exemple, l'estudi dels fenòmens lluminosos no fou solament un avanç, sinó que fou la unió de les branques de la física ja creades, com ara la Mecànica, l'Electrònica i l'Òptica.

En termes matemàtics, el començament de l'Univers no és més que una "singularitat inicial", és a dir, un estat dins el qual unes certes mesures (temperatura, pressió, densitat...), prenen els seus valors infinits. Però la ciència cosmològica es resisteix a donar una resposta absoluta.

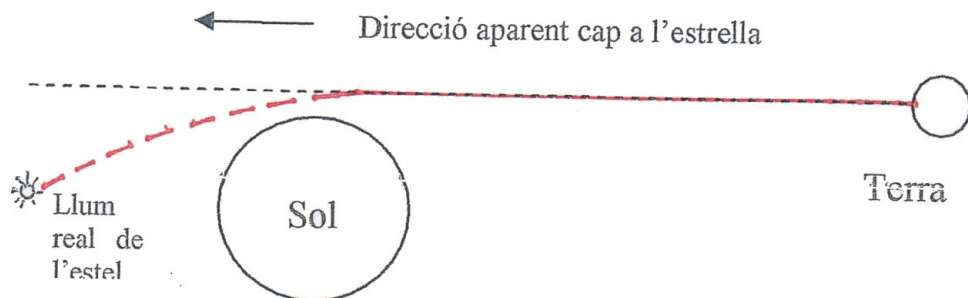


Figura 2. La gravetat del Sol corba els raig de llum.

Amb la teoria de la Relativitat General de 1915, Einstein va anar molt més lluny. En una magistral equació (molt complexa per detallar-la aquí), ens va mostrar com la matèria corba literalment el nostre espai-temps i la massa de la Terra crea al voltant d'ella una espècie de depressió espacio-temporal, la qual accelerarà els moviments.

En suma, la caiguda no és pas una força que l'estira cap avall, de fet és un camp d'acceleració que pertorba els seu desplaçament. És un cas prou complicat !

Tractem, no amb una simple superfície, sinó amb un espai-temps de 4 dimensions en què la seva curvatura depassa completament els nostres coneixements. La descripció necessita conèixer unes matemàtiques que no estan a l'abast d'un profà. La mateixa comunitat de físics han estat una cinquantena d'anys familiaritzant-se amb aquesta teoria.

2. L' UNIVERS I LA MATÈRIA

En principi veurem que algunes de les consideracions derivades de l'aplicació de la llei de Newton, condueixen a resultats bastant desconcertants.

Imaginem dins l'espai una esfera de radi R (immens) i sigui M la massa de tots els astres continguts en ella, admetent a més, que el centre de l'esfera elegida és el centre de gravetat «O» del sistema de masses considerat. Suposant en la superfície de la dita esfera un astre de massa (m), el qual podria sofrir els efectes d'una força dirigida $\rightarrow O$, de valor:

$$F = \frac{f \cdot M \cdot m}{R^2} \quad [1] \quad \text{i realitzant,} \quad \rho = \frac{M}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3},$$

ρ = densitat mitjana de la matèria continguda en l'esfera

Resultarà que: $M = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho$, valor que substituït en [1] donarà:

$$F = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot \rho \cdot R$$

Aquest resultat ens diu que l'astre (m) està sotmès a una força central proporcional al radi (R) de l'esfera suposada. Ara bé, si l'espai i la matèria existent són infinits, qualsevol punt pot considerar-se situat en una esfera de radi infinit i per tant un cos situat en ella, estaria sotmès a una força infinita, cosa completament absurda.

Aquestes dificultats desapareixen amb la teoria d'Einstein, que admet l'existència d'un espai finit il·limitat, en el qual la quantitat de matèria existent és també finita, essent la capacitat de l'espai l'estrictament necessària per albergar la matèria creada.

Einstein admet que l'espai és hiperesfèric o *riemanniano*, de manera que les infinites geodèsiques que passen per un punt són circumferències de radi (R) (*immens*); podent doncs escriure's que: $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R$.

I amb el que es refereix al temps, se suposa que està desproveït de curvatura, de manera que $R_4 = \infty$

Segons aquestes hipòtesis resulta que la curvatura de l'Univers no podria ser superior a:

$$K = \frac{6}{R^2} \quad [2]$$

Però en general els astrònoms no estan gaire d'acord amb aquest resultat. I això ha portat a la conclusió que si és certa la funció [2] ha d'existir necessàriament més matèria que la visible, cosa factible, ja que probablement existiran astres i concentracions materials que no emeten llum i són inobservables.

Cal advertir que essent la matèria la causa de la curvatura de l'espai, segons Einstein, en aquelles regions on la matèria estigui concentrada amb major densitat, la curvatura serà més gran. Podríem dir que, de la mateixa manera que la superfície de la Terra en conjunt pot assimilar-se aproximadament a una esfera, si bé en ella existeixen muntanyes i valls que modifiquen les curvatures locals, l'espai considerat en tota llur immensitat pot ser hiperesfèric, però llurs curvatures locals poden variar en presència de les concentracions materials.

La solució d'Einstein, com entrada de la teoria, sembla molt senzilla: són vàlides tant el principi de la Relativitat, com les lleis de l'electrodinàmica, així com la constància de la velocitat de la llum, que es confirma mitjançant les proves. Einstein va enunciar aquestes dues proposicions en forma de postulats:

1. Tots els processos de la naturalesa transcorren de la mateixa manera en qualsevol sistema inercial.
2. La velocitat de la llum en el buit és la mateixa per a tots els sistemes de referència inercials.

Semblants transformacions les havia trobat un poc abans, el matemàtic Lorentz:

$$x' = \frac{x + v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad , \quad z' = z \quad t' = \frac{t + \left(\frac{v}{c^2} \cdot x\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad [3]$$

Les mateixes transformacions les va obtenir també Einstein, basant-se en els seus postulats. El primer les va calcular com una hipòtesi, sobre la reducció de la grandària dels cossos durant el moviment i Einstein va mostrar que també és una forma d'interpretar el temps.

2.1. - Com explica la Teoria de la Relativitat la dependència entre la massa d'un cos i la seva velocitat?

Partint de la teoria de Einstein, es pot obtenir la relació de dependència de la massa del cos en funció de la velocitat. Els lectors han de conèixer el principi de conservació de l'impuls dels cossos en una interacció: Recordarem que l'impuls d'un cos és el producte de la seva massa (M) per la seva velocitat (v):

$$M_1 \cdot v_1 + M_2 \cdot v_2 = constant \quad [4]$$

Aquest mateix principi en la Mecànica Relativista, s'escriurà de la següent manera :

$$\frac{(M_1)_0 \cdot v_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{c}\right)^2}} + \frac{(M_2)_0 \cdot v_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_2}{c}\right)^2}} = constant \quad [5]$$

On $(M_1)_0$ i $(M_2)_0$ són les masses dels cossos que es consideren constants, segons els conceptes de la Mecànica Clàssica. Però la relació [5] es pot prendre de la forma corrent [4], i llavors si es pren en consideració que circula a grans velocitats, la massa del cos augmentarà, segons la llei:

$$M = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad [6]$$

On M_0 és la massa del cos en repòs. Aquesta equació explica la dependència entre la massa de l'electró i la seva velocitat obtinguda experimentalment (els càlculs d'aquesta explicació superen el nivell tècnic del tema).

2.2. Nou aspecte de la segona llei de Newton

Es fàcil comprovar que si es conserva la forma anterior ($a = F / m$), llavors la força permanent F , en actuar sobre el cos durant un temps prolongat, és capaç d'accelerar-lo fins a velocitats molt grans. Considerant això Einstein, va escriure aquesta llei de la dinàmica en la següent forma:

$$\frac{\partial(m \cdot v)}{\partial t} = F \quad [7]$$

I fou precisament aquesta nova llei de la dinàmica [7] la que va mostrar perquè en la naturalesa no pot existir un moviment amb velocitat superior a la de la llum. Ja que essent ($v \rightarrow c$) la massa de qualsevol cos creix tant, que la seva acceleració posterior es fa impossible. Per exemple, en accelerar l'electró fins a la velocitat de 0,99999992 de (c), obtindrem un increment de massa de 2500 vegades.

Això demostra que la velocitat de la llum en el buit (c), és la velocitat màxima possible en la natura.

Com hem vist en [6], l'augment de la velocitat dels cossos va acompanyada de l'increment de llur massa. Però la variació de la velocitat del cos pot relacionar-se amb la variació de llur energia ($E_c = m \cdot v^2 / 2$), per tant, entre la massa del cos i la energia ha d'existir alguna relació. Anem a establir aquesta dependència:

Essent les velocitats petites, l'equació [6] es pot escriure aproximadament en la forma :

$$M \approx M_0 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) \right]$$

D'aquesta última expressió es desprèn que la variació de l'energia cinètica del cos en la magnitud de ($M_0 \cdot v^2 / 2$) condueix a un canvi de llur massa en:

$$\Delta m = \frac{M_0 \cdot v^2}{2c^2} = \frac{E_c}{c^2}$$

A continuació Einstein va generalitzar àmpliament la relació obtinguda. I va demostrar estrictament que la energia de qualsevol cos pot presentar-se com:

$$E = M \cdot c^2 = \frac{M_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

Per a velocitats petites aquesta equació es pot escriure aproximadament com:

$$E \approx M_0 \cdot c^2 + \frac{M_0 \cdot v^2}{2}$$

El segon terme d'aquesta fórmula és l'energia cinètica del cos a la qual estem acostumats. El primer terme determina la energia del cos essent llur velocitat nul·la.

2.3. Que és l'energia del cos en repòs, introduïda per Einstein:

$$E_0 = M_0 \cdot c^2 \quad [8]$$

Un resultat molt important i extraordinari. Qualsevol cos amb massa en repòs ja posseeix energia solament per la seva existència, com ara l'energia en repòs d'un gram de qualsevol substància que és igual a $9 \cdot 10^{13}$ Joules. L'energia en repòs supera considerablement l'energia de combustió.

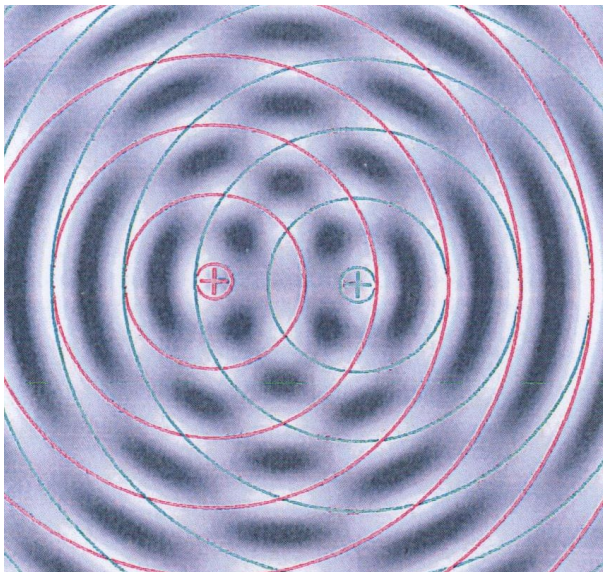
Un exemple: durant la combustió d'1 gram de carbó s'alliberen 29.330 Joules, mentre que l'energia en repòs supera aquest valor $3 \cdot 10^9$ vegades. Així el principi de la conservació de l'energia adquireix un nou enunciat, que és:

El principi d'unificació de conservació de la massa-energia

3. DE LA DISCUSSIÓ CIENTÍFICA ENTRE EINSTEIN I BOHR, VA SORTIR LA LLUM

Isaac Newton creia que un raig de llum era un corrent de minúscules partícules, més o menys com bales disparades per una metralladora. Però cap l'any 1865, el físic escocès James Clerk Maxwell, va desacreditar aquesta teoria balística i va demostrar que la llum era un corrent d'ones electromagnètiques. Maxwell va assenyalar que quan es mou la càrrega elèctrica (o sigui quan vibren els electrons en un cable), la càrrega en moviment crea perturbacions ondulatòries, de forma molt semblant al que es crea en un estany d'aigua quieta, quan agitem amb el dit la superfície de l'aigua (figura3).

Les ones lluminoses també estan compostes de camps elèctrics i magnètics, els



mateixos camps que rodegen les partícules carregades elèctricament, els corrents elèctrics en els cables i en els imants ordinaris. Quan les dites càrregues i corrents vibren, emeten ones que es dispersen a través de l'espai buit a la velocitat de la llum. De fet quan hom projecta un raig de llum a través d'una minúscula esclatxa es pot veure una figura d'interferència característica, formada per les ones que se superposen (figura 3).

Figura 3. Pertorbacions ondulatòries creades per la vibració dels electrons.

La teoria de Maxwell explicava com la llum podia donar-se en la forma de diferents colors. Ja que depenia de la seva longitud d'ona (λ_1), la qual era la longitud entre dues crestes successives. En la figura 5, veiem dues ones que es mouen a la velocitat de la llum. La primera té una longitud d'ona més gran que la segona (on A és la seva amplitud). Oscil·len d'un màxim a un mínim i retornen. Quan més curta és la longitud d'ona, més ràpida és llur oscil·lació.

Entre 1900 i 1905 una sorpresa que fou molt perturbadora va trastornar els fenòmens de la física i va deixar l'assignatura en un estat de completa confusió

durant més de 20 anys. (Ara alguns podran dir que la confusió encara dura). Però a partir de l'Obra de Max Planck, Einstein ens va subvertir el paradigma dominant, tot i que no tenim ni temps ni espai per contar la història de com va fer-ho. Ja en 1905 Einstein estava convençut que la llum estava composta de partícules que ell va anomenar “*quants*”. (Més endavant la partícula seria coneguda per fotó).

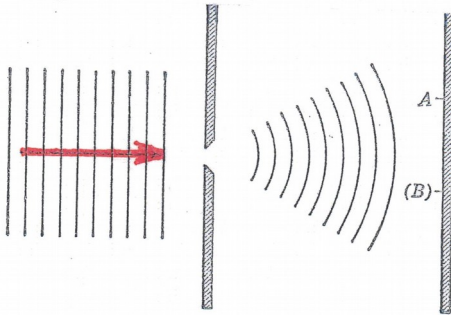


Figura 4. Superposició d'ones

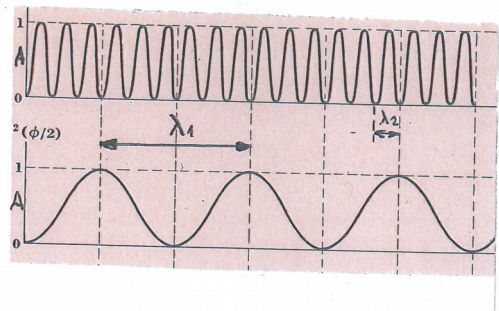


Figura 5. Longitud d'ona

En la figura 4 podem observar que una partícula que travessa l'escletxa d'un diafragma incideix en una placa fotogràfica en el punt A, però no té cap possibilitat d'incidir en un altre punt B de la placa.

En el curs de les sessions del V Consell Solvay (Paris 1923), Einstein va plantejar l'exemple de la figura 4. L'actitud d'Einstein va originar discussions aferrades, però en un cercle restringit mantenia que l'anàlisi sobre el tema de la Mecànica Quàntica podia anar molt més enllà i especialment si hom podia obtenir una descripció més completa dels fenòmens, fent entrar en consideració el balanç detallat de l'energia i de l'impuls en els processos individuals.

Amb una intuïció infal·lible Einstein va arribar pas a pas a la conclusió que qualsevol procés de radiació implica l'absorció o l'emissió de quàntums de llum individual (fotons), amb una energia i impuls, respectivament iguals a:

$$E = h \cdot \nu \quad \text{i} \quad P = h \cdot \sigma \quad [9]$$

On (h) és la constant de Planck, mentre que (σ), és el nombre de vibracions per unitat de temps i (ν) el nombre d'ones per unitat de longitud.

En la mateixa època, Heisenberg el 1925, posava els fonaments d'una Mecànica Quàntica racional, que es desenvolupà ràpidament gràcies a les contribucions de Borh, Jordan i Dirac. Encara que hom renunciï a la imatge de les òrbites, les equacions canòniques de Hamilton de la M. C. no queden modificades i la constant de Planck entra només en les regles de Commutació:

$$q \cdot p - p \cdot q = \sqrt{-1} \cdot \frac{h}{2\pi} \quad [10]$$

Que seran vàlides per qualsevol parella de variables conjugades (q i p).

Per aquesta finalitat, examinarem el cas simple d'una partícula que travessa el forat d'un diafragma proveït o no d'un obturador i que ens serveix per obrir o tancar el pas de la partícula (figures 6a i 6b).

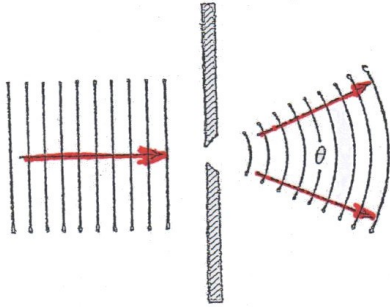


Figura 6a.

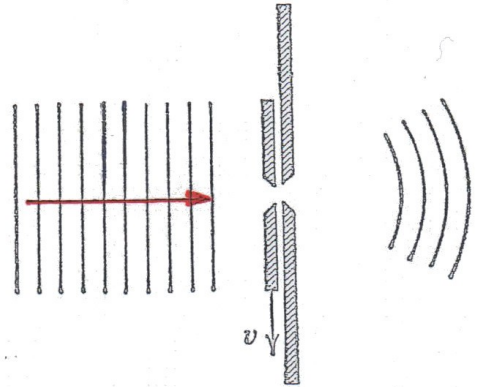


Figura 6b

El tren d'ones creuada per una fletxa, abans d'arribar al diafragma, ve carregada per l'impuls (P) que està relacionat amb el nombre d'ones o per la segona de les equacions [9]. A conseqüència de la difracció de les ones que travessen el forat, l'estat del moviment de la partícula a la dreta del diafragma ve representat per un tren d'ones esfèriques d'una obertura angular definida convenientment (θ), que en el cas de la figura 6b, té a més una extensió radial limitada.

Ja que el radi (a) del forat mesura la incertitud (Δq) sobre la posició de la partícula en el pla del diafragma, i com que $\theta \approx \frac{1}{\sigma \cdot a}$, obtindrem amb l'ajuda de [9]

$$\Delta p \approx \theta \cdot P \approx \frac{h}{\Delta q}, \text{ d'acord amb la relació d'indeterminació.}$$

Aquest resultat podria, evidentment, ésser obtingut directament fent remarcar que a causa de l'extensió limitada de l'ona en la zona de l'escletxa, el component del nombre d'ones paral·lel al pla del diafragma haurà de presentar una incertitud:

$$\Delta \sigma \approx \frac{1}{a} \approx \frac{1}{\Delta q}$$

A partir de la fórmula [9] podem obtenir: $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$ [11]

En les figures 6a i 6b, l'obturador que deixa obert el forat durant un temps Δt , es mou amb una velocitat considerable $v \approx \frac{a}{\Delta t}$, i una transferència d'impuls Δp implicaria com a conseqüència un intercanvi d'energia amb la partícula de l'ordre de :

$$v \cdot \Delta p \approx \frac{\Delta q \cdot \Delta p}{\Delta t} \approx \frac{h}{\Delta t}$$

No podem negar que en la física estudiem dues classes d'objectes: els cossos que obeeixen a les lleis de la mecànica i la termodinàmica, i les ones que estan regides per les lleis de l'electromagnetisme. Però ja en 1905, Einstein ens va dir que la llum coneguda com ona, està de fet constituïda per corpuscles (*els fotons*), i en 1924 De Broglie estén el concepte a tota la matèria. Per tant, totes les partícules també es poden comportar com ones. Vegem ara llur aplicació i funcionament.

3.1. Experiència sobre ones utilitzant l'aparell de doble escletxa, amb pantalla.

En el món clàssic		En el món quàntic
Per un cos	Per una ona	
Quan les boles surten llençades en la direcció de dues escletxes, reboten sobre les parets i s'acumulen preferentment cap el centre de la pantalla.	Quan una ona lluminosa travessa dues escletxes surt desdoblada. Aquest parell d'ones interfereixen i llavors la llum penetra en forma de franges.	Quan la font emet els electrons vers les escletxes, els electrons formen una pantalla d'impactes com les boles. Però la repartició dels impactes, forma varies franges, exactament com les ones lluminoses.

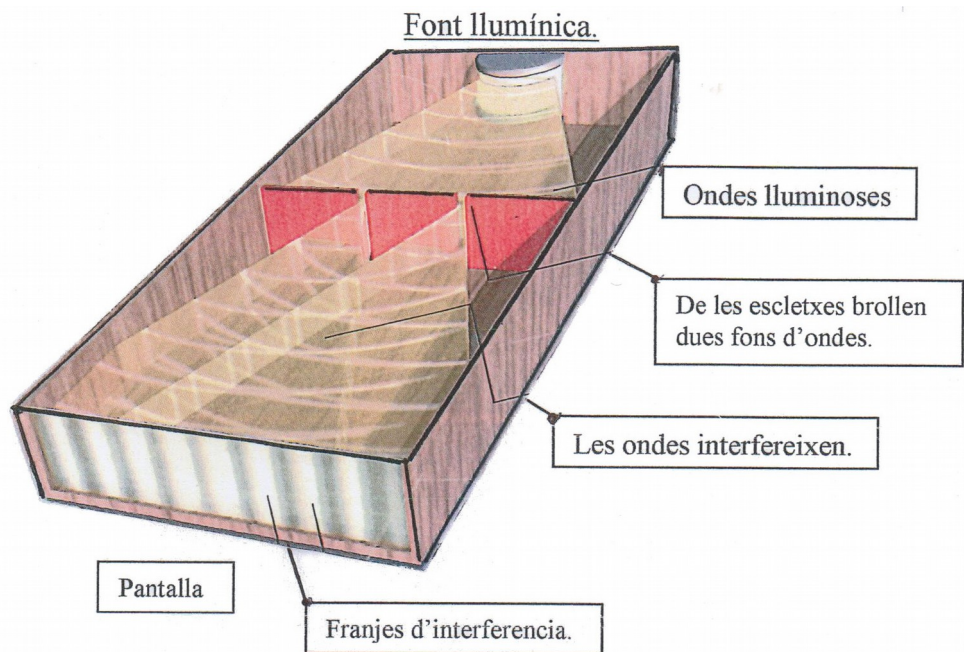


Figura 7 a. Franges d'interferència

A continuació plantejarem l'esquema de l'últim cas, per ajudar a comprendre'l.

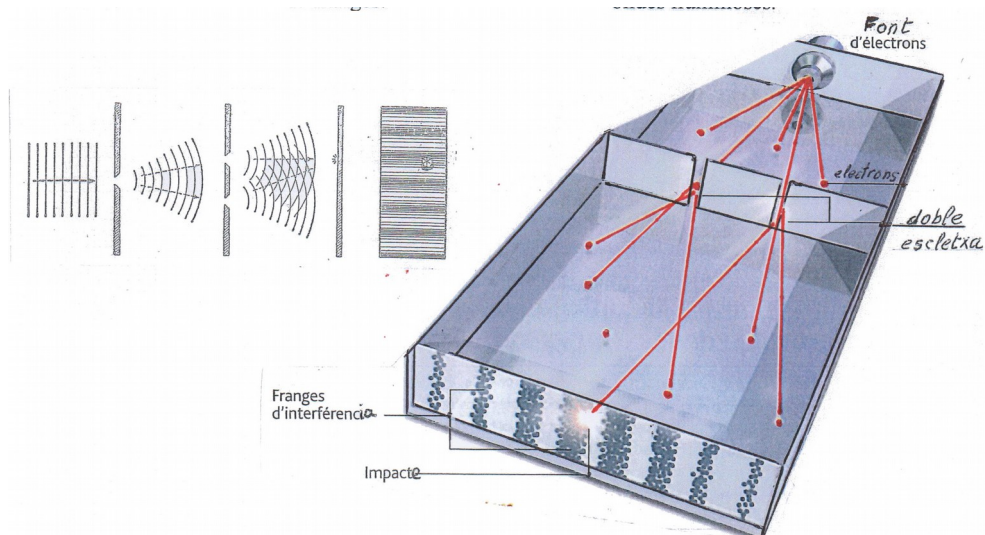


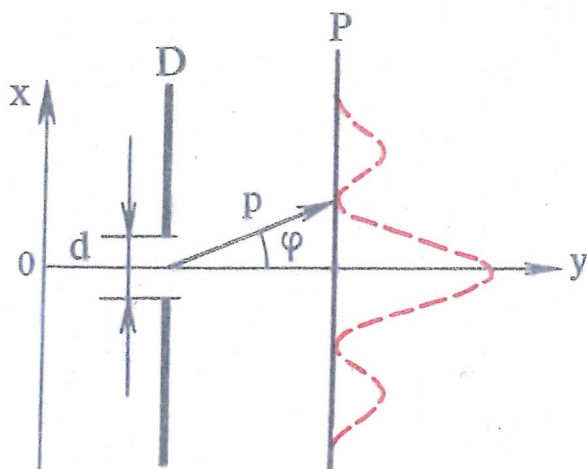
Figura 7 b. Esquema de franges d'interferència

3.2. Sobre la mesura de la indeterminació

Partint de la base que la ciència mai imposa res, sinó que solament estableix idees, els punts d'un estudi només poden establir dues coses: la veritat i la sinceritat pròpia. I ho ha de fer per sobre del seu intel·lecte i de vegades per sobre d'altres científics.

La reacció del físics respecte el concepte del *Principi d'indeterminació*, va ser inicialment deixar córrer el temps i poc a poc anar compronent el que representaven les propietats corpusculars i ondulatòries de les micropartícules. Però les coses comencen a canviar, els investigadors actuals tenen la consciència de no restar en un estadi d'incomprensió i s'afanyen a trobar una teoria que faci tornar la física envers el sentit comú, i deixar caduca l'afirmació del Premi Nobel de Física Richard Feynman que va dir: "No hi ha persona que compregui la Mecànica Quàntica."

La figura 8 mostra esquemàticament el quadre de difracció dels electrons en una de les esclatxes (en un aparell de doble esclatxa), quan un feix d'electrons que va per l'eix (y), després de travessar el diafragma D (d'amplada d) cau sobre la pantalla P.



Segons el pronòstic de la teoria de De Broglie, la distribució dels electrons en la pantalla es descriurà mitjançant una línia de traços, que serà el màxim d'intensitat dels electrons dispersats i que es troba en l'eix (y), essent,

$$\sin(\phi) = \frac{\lambda}{d}$$

el primer mínim de la intensitat dels electrons.

Figura 8. Difracció dels electrons

Aquest mateix quadre es pot descriure, aplicant la representació de l'electró com una partícula. En arribar a l'esclatxa, en direcció del eix (x), els electrons tenen una tolerància igual a l'amplada (d) de l'esclatxa ($\Delta x = d$). Durant la difracció, la direcció de la velocitat de les partícules varia, i la projecció (p_x) de l'impuls de

l'electró sobre la direcció (\mathbf{x}), que abans de la difracció era nul·la, ara, pels electrons que cauen en el punt màxim principal, es trobaran en els límits:

$$0 < p_x < p \cdot \sin \phi$$

I tenint en compte que:

$$\sin(\phi) = \frac{\lambda}{d}$$

la tolerància (Δp_x) serà igual a $\Delta p_x \approx \frac{h}{d}$, així resultarà:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \quad [12]$$

Aquesta relació es pot escriure també per a les altres coordenades:

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \approx h \quad \text{i} \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \approx h$$

El eminent físic alemany W. Heisenberg fou el primer que va deduir la teoria, per això s'anomena: *Relacions d'indeterminació de Heisenberg*.

Examinant l'efecte del procés seguit en la figura 8, veiem que durant la difracció de l'electró en l'esclatxa, aquest es comporta com una **ona**, mentre que quan cau sobre la pantalla es comporta com una **partícula**.

A partir de la relació [12], si volem descriure l'estat de la micropartícula amb l'ajuda de les magnituds, només podem fer-ho amb una certa aproximació. I com més gran sigui la precisió amb que determinem la coordenada de la micropartícula, tant menor serà la precisió amb que es determina l'impuls (p_x), o sigui la velocitat de la partícula:

$$\Delta v_x \approx \frac{h}{m \cdot \Delta x}$$

O sigui, la relació d'indeterminació restringeix els límits del coneixement del moviment de les partícules.

El novembre de 1926 el grup format per Einstein, Bohr i Ehrenfest, van tenir contactes de caràcter epistolar sobre l'actitud a prendre davant una situació talment novella sobre l'anàlisi i la síntesi de l'experiència quàntica fins al moment. Malgrat la divergència dels punts de vista i d'opinions, els animà sempre un gran sentit de l'amistat i del humor. En una carta a Niels Bohr, Einstein es preguntava irònicament *ob der liebe Gott würfeld ...* (és que Déu juga als daus?). La resposta de Bohr fou tallant: *Albert no li diguis a Déu el que ha de fer*.

En aquest cas ambdós van demostrar que estaven molt a la vora d'esser ateus, ja que semblava poc probable que qualsevol d'ells contemples una deïtat assentada en

un núvol jugant als daus. En aquest punt intervingué Ehrenfest i en el moment àlgid de la discussió, amb la seva manera afectuosa i irònica de parlar amb els seus amics, remarcà jocosament l'aparent semblança entre l'actitud d'Einstein i la dels adversaris a la Teoria de la Relativitat i, a l'instant, va afegir que ell sempre recolzaria la posició de Einstein.

Els dubtes i les crítiques d'aquest constituïren pel grup, un incentiu poderós per reexaminar els diversos aspectes de la situació que es van presentar en la descripció dels fenòmens quàntics. Fou una bona ocasió per aclarir encara més, el paper que juguen els instruments de mesura i a la fi poder posar en relleu el caràcter d'exclusió mútua de les condicions experimentals sota les quals apareixen els fenòmens *complementaris*. Va ser llavors que van intentar, en un estil pseudorealista, crear diversos aparells de caràcter mecànic per poder estudiar, per exemple, fenòmens d'interferència com els de la figura 9.

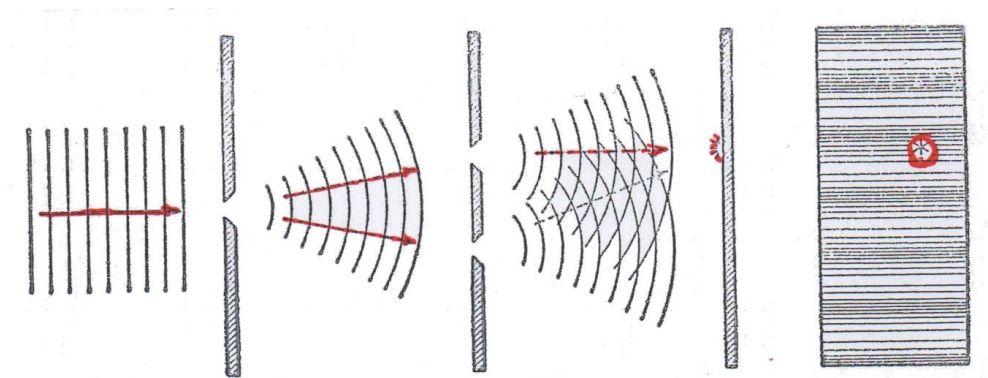


Figura 9. Model d'interferència

La importància de les consideracions realitzades en el curs de les discussions del grup, va ser posada clarament en evidència en l'estudi del dispositiu, en el qual a més del primer diafragma, se n'ha inserit un altre amb dues escletxes paral·leles.

Si un feix paral·lel d'electrons (o de fotons) cau sobre el primer diafragma, hom observarà en la placa una figura d'interferència, presentada per l'ombregat de la placa fotogràfica. Aquí Einstein suggerí que el control de la transferència de l'impuls, permetria una anàlisi més a fons del fenomen i en particular, permetria decidir a través de quina de les dues escletxes havia passat l'electró abans d'arribar a la placa fotogràfica.

Però un examen més profund mostra, que el control suggerit de la transparència de l'impuls implicaria una incertitud sobre el coneixement de la posició del diafragma, que exclouria l'aparició dels fenòmens d'interferència en qüestió. En efecte, si ω és

el petit angle que formen les dues trajectòries hipotètiques de la partícula passant a través de l'esclatxa superior o de la inferior, la diferència del transferiment d'impuls en els dos casos serà igual a $(h \cdot \sigma \omega)$ i qualsevol control de l'impuls del diafragma amb una precisió suficient per a mesurar aquesta diferència comportarà, a causa de la relació d'indeterminació, una incertitud mínima de la posició del diafragma, de l'ordre de $\frac{1}{\sigma \cdot \omega}$.

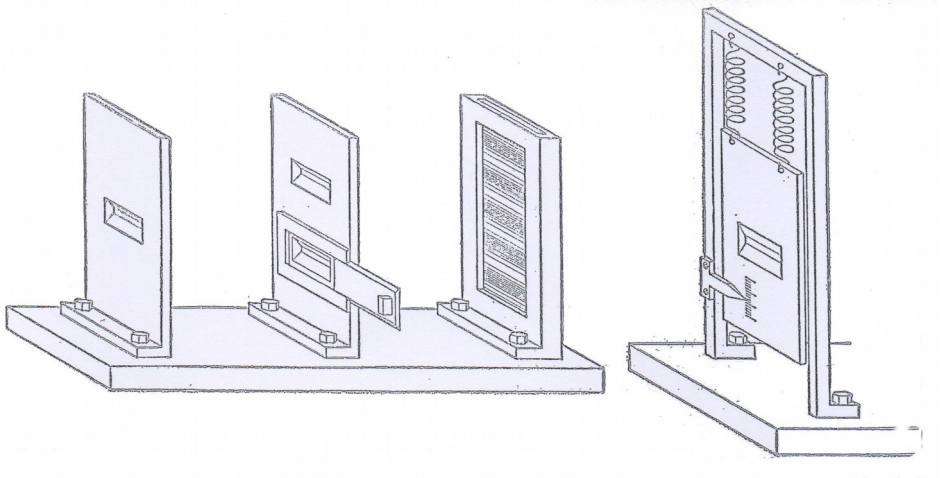
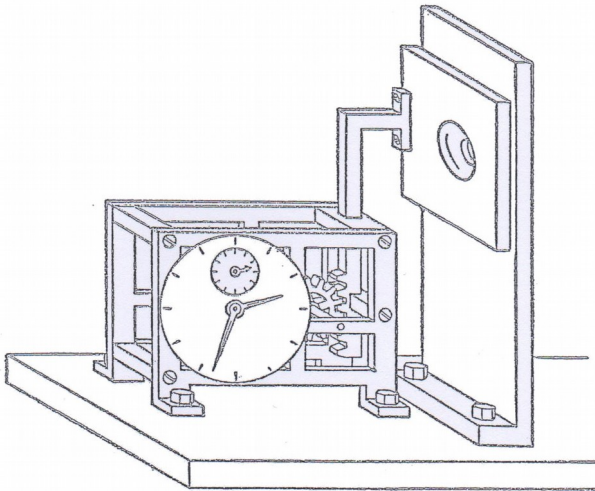


Figura 10. Aparell ideal (no real) per estudiar fenòmens d'interferència.

En l'estudi de fenòmens, la descripció dels quals comportava un balanç exacte dels impulsos, calia evidentment que certes parts del dispositiu seguessin lliures de moure's independentment dels altres. Un aparell d'aquesta mena, esbossat en la figura 10, on un diafragma amb una esclatxa queda penjat per molles molt fines, en un quadre rígid cargolat en un suport i en el qual hi ha fixades les altres parts immòbils del dispositiu. L'escala dibuixada sobre el diafragma, així com l'agulla fixada en un muntant del quadre, serveixen per observar el moviment del diafragma, de manera que pugui ésser estimat l'impuls que li ha estat transferit i que hom pugui deduir-ne una avaluació de la deflexió soferta per la partícula al passar a través de l'esclatxa.

En el mateix sentit semiseriós, la figura 11, representa una part d'un dispositiu destinat a l'estudi dels fenòmens que, en contrast amb aquells que acabem d'examinar, impliquen explícitament la determinació de la coordenada temps. El dispositiu consisteix en un obturador rígidament connectat amb un robust rellotge que reposa sobre el suport del diafragma, suport sobre el qual estan fixades igualment altres parts de l'aparell regulades pel mateix rellotge, o per altres rellotges sincronitzats amb ell.

La finalitat de la figura és subratllar que el rellotge és un conjunt mecànic, el funcionament del qual pot ésser explicat completament per la mecànica ordinària i per tant no ve pertorbat ni per la lectura de la posició de les agulles, ni per la interacció entre els seus accessoris i qualsevol partícula atòmica. Calgué



especialment tenir en compte la relació entre el ritme de un rellotge i la seva posició en un camp de gravitació (relació que es ben coneguda pel desplaçament devers el roig de les ratlles de l'espectre solar), i que resulta del principi d'equivalència d'Einstein entre els efectes de la gravetat i els fenòmens observats en els sistemes de referència accelerats.

Figura 11. Aparell ideal (no real) per estudiar fenòmens d'interferència.

Llavors la discussió, que durà uns quants dies, es concentrà sobre l'aplicació possible d'un aparell, ja més complicat, que compregués tot el dispositiu proposat per Einstein i que es representa en la figura 12, en el mateix estil pseudo-realista, com algunes de les figures precedents. En aquest dispositiu la capsa, de la qual es mostra una secció per a representar l'interior, va penjada en una balança de ressort la qual porta adossada una agulla que serveix per llegir llur posició sobre una escala fixada en el suport de la balança.

El pes de la capsa es pot obtenir en qualsevol posició (Δm) ajustant la balança a la posició zero, per mitjà dels pesos adequats. El punt essencial és que tota determinació d'aquesta posició donada (Δq) comporta en la mesura de l'impuls de la capsa una incertitud mínima (Δp), connectada a (Δq) per la relació [9]. Aquesta incertitud ha d'ésser evidentment inferior a l'impuls total que, durant tot el temps T de pesada, pot ésser donat pel camp gravitacional a un cos de massa (Δm), que operant:

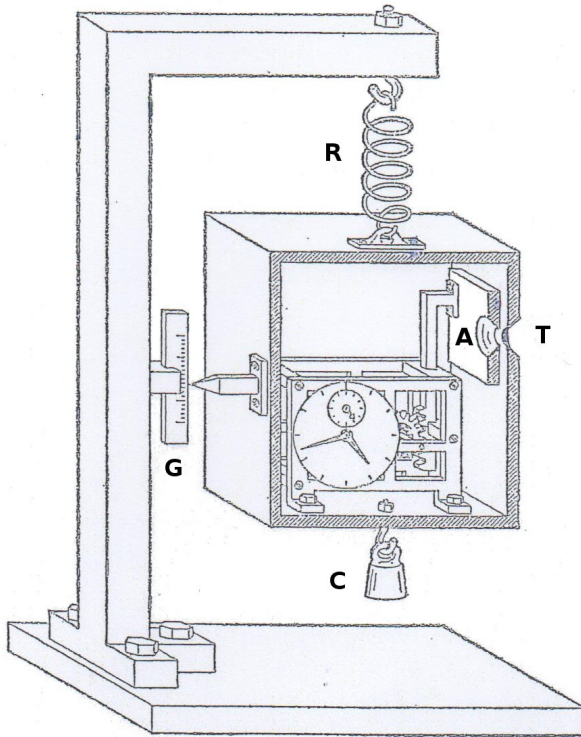
$$\Delta p \approx \frac{h}{\Delta q} < T \cdot g \cdot \Delta m \quad [14] \quad (\text{On } g = \text{constant de la Gravetat})$$

Com més gran sigui la precisió de la lectura (q) de la posició de l'agulla, més gran

haurà d'èsser, per tant, el temps de pesada T , si és que s'ha d'obtenir una precisió fixada Δm en el pes de la capsa i del seu contingut.

Ara bé, segons la teoria de la Relativitat Generalitzada, un rellotge que es desplaça

en la direcció de la força gravitacional una quantitat (Δq), canviarà de ritme de manera tal, que en el curs d'un interval de temps T la seva lectura diferirà en una quantitat ΔT donada per la relació :



$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{c^2} g \cdot \Delta g \quad [15]$$

Comparant [14] i [15] veiem que després de la pesada hi haurà una incertesa en el nostre coneixement del temps, que serà:

$$\Delta T > \frac{h}{c^2 \cdot \Delta m}$$

Figura 12. Aparell ideal (no real) per estudiar fenòmens d'interferència.

Amb l'ajuda de l'equació [8] aquesta relació ens porta novament a:

$$\Delta T \cdot \Delta E > h$$

Que està d'acord amb el principi d'indeterminació.

De totes maneres, si el nostre aparell s'utilitza per a mesurar acuradament l'energia del fotó, no podrà determinar el moment precís en el qual l'energia s'escapa. Aquesta discussió tan il·lustrativa del poder i de la coherència lògica dels arguments relativistes, subratlla una vegada més la necessitat de distingir, en l'estudi dels fenòmens atòmics, entre els instruments de mesura pròpiament dits, que serveixen per definir el sistema de referència i aquelles parts de l'aparell que han d'èsser considerades com a objectes d'investigació i per les quals hom no pot negligir els efectes quàntics.

Malgrat aquesta molt suggestiva conformació de la solidesa i gran abast del mètode de descripció quàntica, Einstein expressa en el transcurs de converses posteriors amb el grup, el seu sentiment d'inquietud que experimentava davant la manca aparent d'uns principis naturals que donessin l'explicació ja establerta, perquè aquests principis poguessin ser generals.

El Congrés Solvay de 1930 fou la darrera ocasió que el grup es va poder mantenir. La influència medidora i estimulador d'Ehrenfest era imprescindible, però aquest va faltar.

4. APUNTS SOBRE EL DESTÍ DEL NOSTRE UNIVERS

Einstein tenia raó quan va dir que ell preveia una força capaç de combatre la gravitació i de dispersar les estrelles. En canvi es va equivocar quan va creure que l'Univers era estàtic. L'astrofísic Hubble l'any 1929 va demostrar, gràcies a les seves observacions, que l'Univers estava en expansió.

Es pot dir que van haver de passar 80 anys perquè es verificuessin les prediccions d'Einstein sobre l'existència d'una constant Cosmològica. No solament existeix aquesta constant, sinó que de fet governa el destí de l'Univers.

Les conclusions de la Cosmogonia Relativista té un caràcter revolucionari radical i l'interrogant sobre el grau de llur veracitat presenta un gran interès científic per la concepció del món. El valor més important correspon a les conclusions tocant al caràcter no estacionari de l'expansió de l'Univers, sobre els elevats valors de la densitat i la temperatura al començament de l'expansió (Univers calent), i sobre la curvatura de l'espai-temps, un caràcter quelcom més particular pertany als problemes del signe de la curvatura de l'espai tridimensional del món circumdant, així com del grau d'homogeneïtat i isotropia de l'Univers.

Equació de la Relativitat general

$$\frac{R'^2}{R^2} - \frac{k}{R^2} = \frac{8 \cdot \pi \cdot G}{3} \cdot \rho + \frac{\lambda}{3}$$

Curvatura de l'Univers

Matèria

Energia del buit

G = Constant de gravitació.

R = Factor d'escala (per exemple: distància entre dues galàxies).

ρ = Densitat de la matèria.

λ = Constant Cosmològica.

k = Coeficient del signe de la curvatura.

Com que $\lambda > 0$, vol dir que l'Univers està en expansió accelerada.

La conclusió sobre la no estacionarietat va ser confirmada pel *redshift* (desplaçament cap al roig) cosmològic. La regió que s'observa de l'Univers amb dimensions lineals de l'ordre de varis milers de milions de parsecs, s'expandeix i aquesta dilatació dura almenys mils de milions d'anys. Aquests objectes els veiem com eren fa uns 3 mil milions d'anys i la curvatura de l'espai tridimensional fins avui en dia no s'ha pogut mesurar.

Es podria determinar si es conegués la densitat mitjana de la massa de l'Univers o si es pogués definir amb major exactitud la dependència entre el *redshift* i la distància. Les observacions astronòmiques condueixen a valors de la densitat mitjana de la substàncies que componen les galàxies visibles, d'uns $3 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$.

5. EL COSTAT FOSC DE LA LLUM

En el moment que les dues grans construccions de la física del segle XX, la Relativitat i la Mecànica Quàntica, van haver d'enfrontar-se amb l'*establishment* de la Ciència (la qual no estava molt d'acord amb les especulacions de les noves teories), Einstein deia:

... el meu estat és com el d'un austruç que enterra el cap en l'arena relativista, per a no enfrontar-se amb els dolents quàntums ...

I aquí fou el moment que Einstein es va aventurar en la recerca del costat més fosc de la llum: l'estat quàntic.



Però enfront de l'escepticisme general de l'època, Einstein es va implicar amb les noves teories. I ja el 1916 va plasmar la idea que les partícules posseïen moment (una magnitud vectorial, que es correspon amb el producte de la massa d'un cos per llur velocitat). Oh sigui que els fotons de llum es comportaven com projectils d'energia, xocant amb els electrons i desviant-los de la seva trajectòria. Set anys després la seva hipòtesi fou confirmada per Arthur Compton (veure efecte Compton, pàgina 31).

Figura 13. Einstein debatent amb el seu amic Niels Bohr, a casa de Paul Ehrenfest. Leiden (Holanda), desembre 1925.

Einstein va expressar en privat i en públic, la seva incomoditat davant la nova doctrina i es va embolicar amb Bohr amb una polèmica cordial, però la més enfrontada que es recorda en la història de la física. Ells es queien molt bé i intel·lectualment es respectaven, però discrepaven en la interpretació de la teoria.

De fet per la Ciència, el determinisme de Newton ja s'havia acabat i en la pràctica la Nova Ciència representava operar amb un mecanisme tan complicat en tot l'Univers, que era humanament impossible manejar el nou nivell científic d'un tal calibre.

Per Einstein, la descripció quàntica va resultar ser sempre incompleta, a l'haver de recórrer a una descripció estadística. Segons el criteri de Bohr, no existia un nivell més profund de la realitat per recuperar el determinisme. Així en l'acte de mesurar, l'elecció d'una magnitud observable (una decisió que condicionava el disseny de l'experiment), es desfeia la incertitud i es concretava un dels aspectes: **la posició**, però no **el moment**. És a dir, es desfeia la incertitud, però concretant un sol aspecte: **el temps**, però no **l'energia**.



Quelcom semblant passa en 'estudiar sistemes extremadament complexos com el clima, amb els quals sempre hem de recórrer a una descripció estadística. En gran mesura, el desconcert davant del món quàntic, sorgeix al tractar d'emplenar els intersticis que deixa l'experimentació en escales atòmiques amb el sentit comú que hem importat del món macroscòpic. Amb Bohr, Heisenberg i Born la descripció de la realitat podia resultar desconcertant però per fi, la Teoria s'havia tornat lògicament més coherent.

Figura 14. Einstein al saló de l'Escola Industrial de Barcelona.

En 1921 a Einstein li concediren el Premi Nobel de Física en un moment que la posició política i econòmica d'Alemanya s'estava degradant. Assabentant-se en el vaixell de tornada de Califòrnia que Hitler havia pres el poder, va decidir quedar-se temporalment a Bèlgica posant-se sota la protecció de la família real belga, amb la qual els unia una amistat generada en anteriors viatges.

A Alemanya Einstein fou objecte de una violenta campanya de calumnies, les seves propietats van ser confiscades i les seves obres cremades a la plaça pública. En aquesta difícil tessitura, Einstein va rebre invitacions de diversos Instituts Científics i en el retorn de les universitats del Japó, fou convidat pel doctor Esteva Terrades, catedràtic de la Universitat de Barcelona, entre el 22 i el 28 de Febrer de 1923.

En la fotografia es veu en un Saló de l'Escola Industrial de Barcelona, al seu costat està el doctor Terrades, amb el qual van tenir unes converses molt profitoses i que complagueren molt al savi alemany.

Terrades era un dels enginyers més entesos en la Teoria de la Relativitat a Espanya. Se'l van emportar a Madrid i allí i morí als 66 anys. La seva tomba està en el cementiri de Montjuïc.

L'Institut d'Estudis avançats de Princeton (Nova Jersey) va proposar a Einstein ser el Mestre de la Nova Acadèmia, Einstein va acceptar i es va instal·lar a Princeton en l'Octubre de 1933. Allí passarà la resta de la seva vida, consagrat a la investigació.

Poc després de la seva arribada a Princeton, Einstein publica amb la col·laboració dels seus alumnes Boris Podolsky i Natham Rosen, un article sobre la Mecànica Quàntica, que en principi no se li va donar cap atenció. Es va anomenar "La paradoxa EPR (o paradoxa Einstein-Podolsky-Rosen).

El títol de l'article deia: *La descripció de la realitat física per la mecànica quàntica pot considerar-se completa?* L'efecte EPR desenvoluparia una llarga discussió que es va prolongar fins els nostres dies. Segons la Mecànica Quàntica no es pot atribuir, a priori, cap valor a una magnitud física abans de mesurar-la, és a dir, l'experiment no pertorba els valors preexistents, ja que el valor d'una magnitud no existeix mentre la magnitud no hagi estat mesurada. És aquesta teoria quàntica contrària a la intuïció?

En 1964, el físic irlandès John Bell, va descobrir un medi de dirimir experimentalment entre els punt de vista de la Mecànica Quàntica i el del realisme local, demostrant que existeixen situacions concretes, realitzables experimentalment, en las que les prediccions de la Mecànica Quàntica contradiuen a les de qualsevol teoria realista local.

Carta escrita a Schrödinger el 8 d'Agost de 1935

Apreciat Schrödinger:

Tu ets de fet el sol home amb qui m'agrada tenir discussions. Gairebé tota la gent que investiga, no van pas de l'estat dels fets a la teoria, sinó de la teoria a l'estat dels fets, llavors són incapaços de sortir del filet dels conceptes admesos i no saben bellugar-se amb les dades de la teoria de manera adequada. Tu, per exemple, observes les coses tant des de l'interior com de l'exterior amb gran voluntat i a continuació ens introduïm de forma agosarada sobre la matèria, per aconseguir almenys el camí a seguir.

La meua solució a la paradoxa que exposo en el nostre article, és la següent: La funció (φ) no descriu pas l'estat d'un sistema únic, sinó de forma estadística, un conjunt de sistemes amb relació a una (φ), una combinació lineal tal com ($c_1 \cdot \varphi_1 + c_2 \cdot \varphi_2$), representa un allargament del conjunt dels sistemes. En el nostre cas caldrà fer una modificació perquè el sistema es constitueixi en dues parts A i B, això afectarà a la funció (φ) en la que si faig una observació en A, la qual representarà la inversa de l'extracció d'un subconjunt del conjunt total.

Aquesta extracció es produirà diferentment a partir de la mesura escollida de la magnitud sobre A, que afectarà també a la mesura de B, en el conjunt que dependrà igualment de la tria a fer. Naturalment aquesta interpretació de la Mecànica Quàntica (MQ), fa ressortir de forma particularment clara, que un observador en aquell punt, al preu d'una limitació a les dades estadístiques, doni una possibilitat de representació incompleta dels estats i processos reals.

Però tu, respecte a les dificultats internes, ho veus tot d'una altra manera, i igualment en la representació del món real tu voldries simplificar o suprimir el lligam amb els conceptes de la mecànica habitual. És solament així, segons tu, que la Teoria es pot realment mantenir sobre les dues cames. Aquest punt de vista és segurament lògic, però jo no crec pas que sigui apropiat per eliminar la complicada gestació matemàtica, en la qual ens trobem ara. Jo voldria justificar aquesta afirmació presentant aquest exemple, grollerament macroscòpic, que donem a continuació :

Suposem que el sistema sigui una substància en equilibri químic inestable: un barril de pólvora, i per exemple que en una seqüència de llurs forces internes es pugui inflamar i que llur durada de vida mitjana sigui de l'ordre d'un any. El sistema pot en principi ser fàcilment representat en (MQ). Inicialment la funció (φ) caracteritzarà un estat macroscòpic bastant ben definit, però la pròpia equació s'encarrega de donar facilitats perquè la pólvora no s'inflami. La funció (φ) descriu llavors primer una espècie de barreja que conté al sistema que encara no ha explotat i també el sistema que ja ha explotat. Cap sistema d'interpretació no podrà transformar aquesta funció (φ) en una descripció adequada a un estat de coses reals. En realitat no hi ha res entre *explotar* i *no explotar*. Aquesta equació no pot, doncs, donar una descripció d'un procés efectiu – ***és doncs, el que has més o menys ideat.***

Contràriament, (φ) pot ésser restituïda correctament, en el sentit estadístic, amb les modificacions d'un conjunt de sistemes. El que jo vull suggerir amb l'ajuda d'aquest exemple, és que la temptativa d'interpretació no marxa pas dins el cas que nosaltres

sabem a partir de la nostra experiència macroscòpica. Observa el petit article que jo he publicat recentment amb M. Rosen en la *Physical Review*, sobre una interpretació relativista possible de la matèria.

Aquesta teoria podria arreglar alguna cosa, si hom arribés a sobrepassar les dificultats matemàtiques. Estaria molt content de poder-te veure a Princeton. Jo mateix me'n cuidaria de solucionar els possibles obstacles "diplomàtics".

Mentrestant, rep les meves salutacions cordials.

El teu A. E.

La resposta de Schrödinger no fou molt aclaridora. I encara que sempre va mantenir un respectuós contacte amb Einstein, tenia una idea oposada. El 19 d'Agost de 1935, Schrödinger va respondre a la carta d'Albert Einstein. La resposta resumida deia:

... Fa molt de temps que he depassat l'estadi en el que dic que la Funció d'ona (ψ) pot ésser considerada, més o menys, com una descripció directa de la realitat ...

I en contestació sobre l'argument del barril de pólvora Schrödinger va desenvolupar la cèlebre paradoxa del *gat de Schrödinger*. Alguns anys més tard, Einstein se'n va servir d'ella per mostrar el caràcter incomplet de la Teoria Quàntica.

- És Einstein passejant solitari en el camp de les idees qui sembla que dona l'esquena als seus contemporanis? No fou la cosa així : Einstein va prosseguir el seu treball fins a la fi dels seus dies.

En el 1945 va publicar la seva última obra: *The meaning of Relativity* (El significat de la Relativitat). L'obra va sortir a partir d'una sèrie de cursos que havia donat en la Universitat de Princeton el 1921. També en aquesta Universitat, el seu col·laborador Leopold Infeld el va convèncer perquè redactés una història de les idees fonamentals de la física. (L'evolució de les idees de la Física), basada en el principi que cap científic pensa en fórmules, per tant les idees de la Física es poden expressar en un llenguatge ordinari.

.. En el fons no hi ha pas un sol concepte que jo n'estigui totalment convençut de la seva realitat.

Pensament que ens diu, que qualsevol quina sigui la identitat de les seves teories, sempre va tenir en compte la humilitat de l'intel·lecte humà:

... L'ésser humà ha d'acceptar amb humilitat que no està creat amb cap finalitat especial, ni que forma part de cap disseny universal.

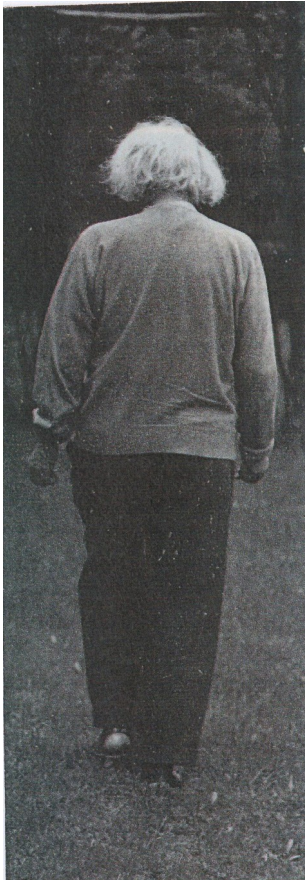
La Mecànica Quàntica i la Relativitat, combinades amb el descobriment que l'Univers s'expandia, van portar als físics a reprendre el terme cosmològic (Δ) que Einstein havia introduït per compensar la gravetat i que més endavant va repudiar. Llavors Einstein es va preguntar si la gravetat adquiriria intensitat suficient per

detenir l'expansió i obligar l'Univers a contraure's o si pel contrari, el Cosmos s'expandiria per sempre. A partir d'aquí Einstein es va dedicar a estudiar a fons el complicat tema de la Gravitació.

6. ÚLTIMA ETAPA D'EINSTEIN

Einstein va tractar d'unificar la seva Teoria General de la Gravitació i l'Electromagnetisme, però no ho va aconseguir, com tampoc cap dels físics que ho van intentar més tard.

En aquest context, al parlar de camp ens referim a una funció que descriu una certa propietat, com per exemple, la intensitat de la gravitació (en qualsevol punt de l'espai i en qualsevol espai de temps). Podem dir que el que buscava Einstein consistia en trobar un únic camp que descrivís la gravitació.



L'home modern, immers en la societat humana del seu temps, està condicionat pels costums i lleis de la seva època. Sobre aquest aspecte Einstein una vegada va comentar:

... No solament actua cadascú sotmès a les condicions externes, sinó també en funció d'una necessitat interior.

Aquesta circumstància el va omplir enterament i vitalment des de la seva joventut i sempre va ser per ell un consol i una font inesgotable de ciència i tolerància. També procurava que la seva consciència suavitzés llur sentiment de responsabilitat, i això feia que llur concepció de la vida deixés pas també, a l'humor.

Aquesta circumstància el va omplir enterament i vitalment des de la seva joventut i sempre va ser per ell un consol i una font inesgotable de ciència i tolerància. També procurava que la seva consciència suavitzés llur sentiment de responsabilitat, i això feia que llur concepció de la vida deixés pas també, a l'humor.

Figura 15. Einstein passejant per Princeton.

El març de 1955, Einstein es va assabentar de la mort d'un dels seus amics i col·laborador. Va escriure a la família del seu amic:

... El meu amic se m'ha avançat en la partida d'aquest món estrany. Per nosaltres els físics, quan algú ha estat vençut per l'edat, la mort vindrà com una alliberació. És quelcom que sento amb intensitat, ara que jo mateix he envellit. He acabat considerant la mort com un vell deute, que al final cal pagar.

En Princeton, Einstein es consagrà amb la Relativitat, encara que mai va abandonar l'esperança de trobar una alternativa a la Mecànica Quàntica. Einstein conscient de la seva pèrdua de facultats, va continuar treballant en la geometrització de la física. Cada matí entrava en el seu despatx de Princeton amb un grapat d'equacions a la butxaca, que havia calculat la nit anterior.

La tarda del 13 d'abril de 1955 es va sentir indisposat. Un aneurisma d'aorta, s'havia esqueixat originant una hemorràgia interna. Ell es va oposar que l'operessin i els va dir:

... Si ha arribat la meua hora, em sembla de mal gust prolongar la vida d'una manera artificial. Jo ja he complert i ja ha arribat l'hora que me'n vagi.

El van ingressar de seguida a l'Hospital de Princeton. Al·lèrgic a qualsevol solemnitat o pompa, Einstein va prohibir que es fes cap funeral, va demanar ésser incinerat i que les seves cendres es dispersessin al vent.

Albert Einstein va morir la matinada del 18 d'abril de 1955. A la tauleta de nit va deixar incompletes les equacions que havia gargotejat a llapis, abans de deixar-se vèncer per la son eterna.

7. EFECTE COMPTON

S'anomena així a la variació de la longitud d'onda d'una radiació electromagnètica al ser dispersada. Aquest fenomen el va observar per primera vegada el físic Compton en 1923, estudiant la dispersió de raigs X ($\lambda = 0,1 \text{ nm}$). L'esquema de l'experiment es presenta en la figura 15.

Els raigs X generats passen pel filtre F_1 , el qual separa una radiació de longitud d'onda (λ_0). Aquesta radiació es dispersa en la mostra O i es registra per mitjà d'un detector col·locat de manera que forma l'angle (φ) amb el feix incident. En la figura es representa com detector, un espectròmetre de difracció de cristall per raigs X. Les parts principals del qual són: el cristall C, que oscil·la durant l'experiment i la placa fotogràfica P. Al reflectir en el cristall, els raigs X interfereixen i formen màxims de difracció en les direccions que determina la fórmula de Bragg¹.

1 Veure més endavant les explicacions sobre la llei de Bragg.

$$2d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda \quad [16]$$

en la que (d) és la distància entre els plans atòmics en el cristall; (λ) la longitud d'ona dels raigs X; (ϑ) l'angle de lliscament i (n) l'ordre del màxim dels raigs reflectits: (n = 1, 2, 3,...). L'angle de lliscament (ϑ) es determina per la posició de la línia d'ennegrim fotogràfic sobre la placa P, i la longitud d'ona dels raigs X es troba per la fórmula [16].

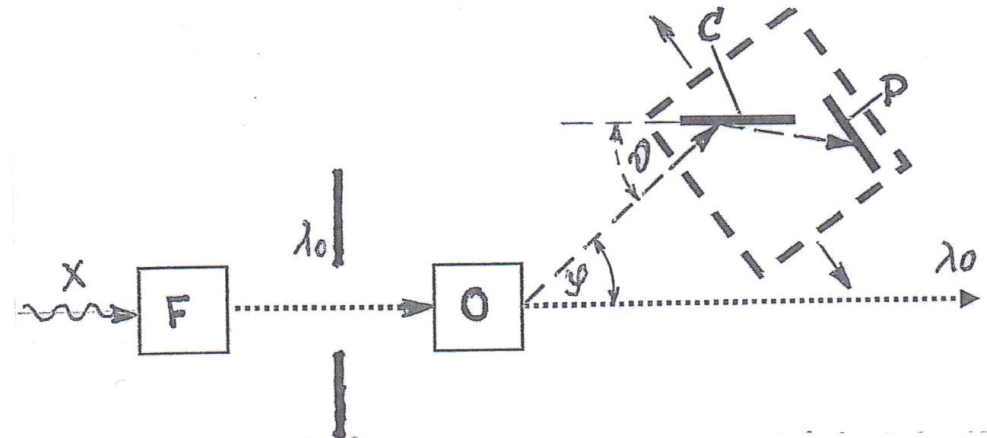


Figura 16. Efecte Compton

Estudiant la dispersió dels raigs X, Compton va establir que en la radiació dispersa, a més dels raigs amb longitud d'ona inicial (λ_0), hi ha una radiació, la longitud d'ona de la qual és major que la inicial, i que l'augment d'aquesta longitud és més important quan més gran és l'angle de dispersió (ϕ), i a més no depèn de la substància del dispersor. Així va quedar establert que la variació de la longitud d'ona ($\Delta\lambda$) està relacionada amb l'angle de dispersió (ϕ) i en aquest cas la fórmula [16] prendrà la forma :

$$\Delta \lambda_c = 2 \pi \chi_c (1 - \cos \phi) \quad [17]$$

La constant λ_c que figura en aquesta fórmula, resulta que és igual a $3,86 \cdot 10^{-11}$ cm.

El valor teòric de (λ_c) ha estat definitivament acceptat amb el nom de *Longitud d'ona de Compton de l'electró*:

$$\lambda_e = 2 \cdot \pi \cdot \chi_e$$

Com podem veure en la fórmula [17], no entren les característiques de la substància en què es produeix la dispersió dels raigs X. Això ens revela que la dispersió es deu a la interacció amb els electrons lliures (o quasi lliures) de la substància.

Des del punt de vista de la física clàssica, el camp electromagnètic ha de fer vibrar els electrons amb la mateixa freqüència que ell disposa. Però així i tot, l'experiència ens ha indicat, en canvi, que en la dispersió es produeix un augment de longitud d'ona i per consegüent, una disminució de la freqüència de la radiació.

BIBLIOGRAFIA.-

- BEISER, ARTHUR (1973). Conceptos de la Física Moderna. Ed. del Castillo S.A. Madrid.
- BELDA VILLENA, E (1961). Teoría de la Relatividad. Propiedad del autor. Bilbao.
- BOHR, NIELS (1967). Física atómica. Ediciones 62, Barcelona.
- EINSTEIN, ALBERT & L. INFELD. (1968). L'evolució de la Física. Editorial 62. Barcelona.
- FRISCH, O. R. et al.(1975). Modern Physics. Ed. Penguin Books, Ltd. Middlesex Inglaterra.
- IKONICOFF, R. et. al. (2012). Física quàntica. Rev.Sciencie et Vie. Hors-serie nº 260. Paris.
- IRODOV. E. (1981). Leyes fundamentales de la Mecànica. Editorial MIR. Moscou.
- LAPIEDRA. RAMON (2008). Las carencias de la Realidad. Ed. Tusquets. Barcelona.
- PAGELS, HEINZ R. (1988). La búsqueda del principio del tiempo. Ed. Bosch. Barcelona.
- PENROSE, ROGER (2007). El camino de la realidad. Editorial Debate. Madrid.
- PETIT, A (2000). Introducció a la Cosmologia Quàntica. Butlletí Centre d'Estudis de la Natura del Barcelonès Nord, Volum V: 1. Santa Coloma de Gramenet.
- SPIRIDONOV, O (1986), Constantes físiques Universales. Ed. MIR. Moscou.
- VV.AA. (2004). Lo que debemos a *Einstein*. Rev. Investigación y Ciencia. Núm.: 338. (noviembre 2004). Barcelona.
- VV.AA. (2005). *Einstein*. Rev. Investigación y Ciencia. Temas 40. (abril/junio 2005). Barcelona.