

Notas historico-filosóficas sobre Mecánica Cuántica (II)

EL GRAN DEBATE ENTRE EINSTEIN Y BOHR

1920-55/62

-Sobre cómo *miramos el mundo* de distintas
maneras.

(Serie “*La telaraña cuántica*”, 2)



María C. Boscá
Dpto. Física Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad de Granada



Presupuestos

- **Perspectivismo**: “No es posible mirar el mundo sin un punto desde el cual hacerlo”
- **Interrelación**: “La Filosofía y la Física no son disciplinas intelectuales independientes”
- O sea, **no hay neutralidad en ciencia...**
- ¡Ni siquiera existe descontaminación total de **la observación** respecto a las preconcepciones del observador!



¡la “**carga teórica**”!

(**Hanson**, *Patrones del descubrimiento*, **1958**)

Físicos y filosofía

- “A menudo se ha dicho, y no sin cierta justificación por cierto, que el hombre de ciencia es un filósofo de mala calidad. [...] Esto bien puede ser lo correcto en momentos en que el físico cree tener a su disposición un sistema rígido de conceptos y leyes fundamentales, tan bien establecidos que ninguna duda puede tocarlos. Pero puede no serlo en un momento en que las bases mismas de la física se han vuelto tan problemáticas como lo son hoy. [En el presente] **el físico no puede simplemente entregar al filósofo la contemplación crítica de los fundamentos teóricos**, porque nadie mejor que él puede explicar con mayor acierto donde le aprieta el zapato”.
- Cf. A. Einstein, **1936**, “Física y Realidad” (“Mis ideas y opiniones”).

Objetivos

- **Aclarar** -por innecesario que pueda parecer- que **Einstein** es, junto con **Bohr**, uno de los principales **padres fundadores** de la mecánica cuántica: desterrar la imagen de un **Einstein** “mayor” aferrado a un obsoleto **determinismo**...
- **Indagar** qué presupuestos filosóficos operan tras las posturas científicas que adoptaron **Einstein** y **Bohr** en su gran **debate-controversia** respecto a la interpretación de la mecánica cuántica.
- **Narrar** el gran “**debate Einstein-Bohr**”.

Ehrenfest: “*Einstein, I am ashamed of you, you are arguing against the new quantum theory just as your opponents argue about relativity theory*”.



¡DE NINGUNA MANERA!

Física cuántica

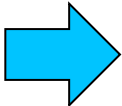
- *“La teoría científica más fructífera y precisa jamás desarrollada”*
- *“La principal y más radical innovación teórica en la física contemporánea, más fundamental y revolucionaria que la relatividad”*
- *“Se mantendrá como rasgo esencial de toda la física básica del futuro”*
 ¡afirmado ya por **Born** y **Heisenberg**
 en **1927**, durante el 5º Congreso Solvay!
- *“Nothing is in nature which cannot be described by this mathematical scheme”* (**Heisenberg**, **1958**)



Una nueva física

- Acumulación de fenómenos experimentales sin justificación en las teorías disponibles:

Necesidad imperiosa de una nueva teoría

 **mecánica de los cuantos**

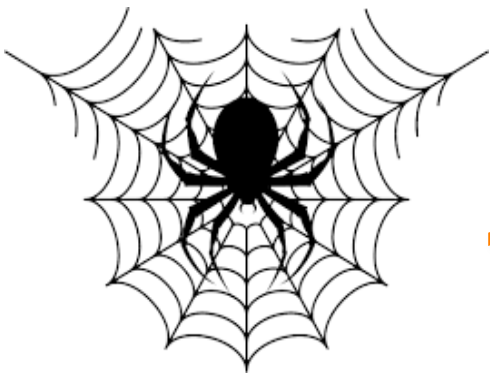
(**“Quantenmechanik”**: Herzfeld, 1921)

*“La Mecánica Cuántica surgió a partir del intento de **romper** con todos los conceptos cinemáticos y mecánicos ordinarios”*

(Heisenberg, 1927)

FÍSICA CUÁNTICA

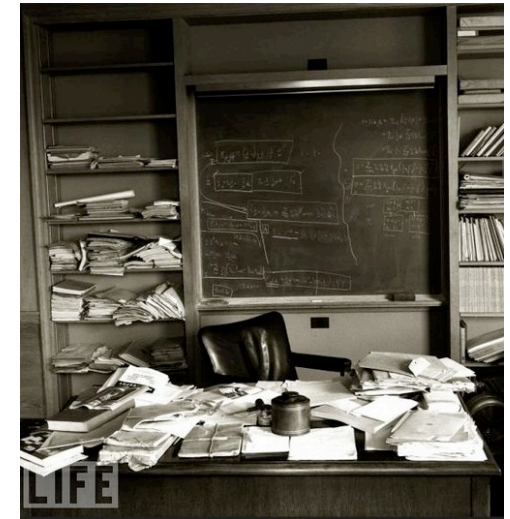
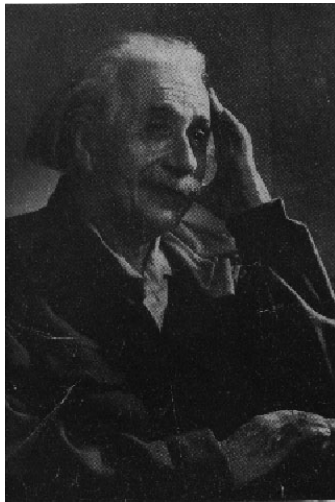
- **M. Jammer, 1974:** *“Nunca en la historia de la ciencia ha existido una teoría con un impacto tan profundo en el pensamiento humano como la mecánica cuántica”.*
- **A.J. Legget, 2002:** *“La Mecánica Cuántica es mucho más que simplemente una teoría; es una forma completamente nueva de mirar el mundo, implicando un cambio de paradigma quizás más radical que ningún otro en la historia del pensamiento”.*



1879-1955

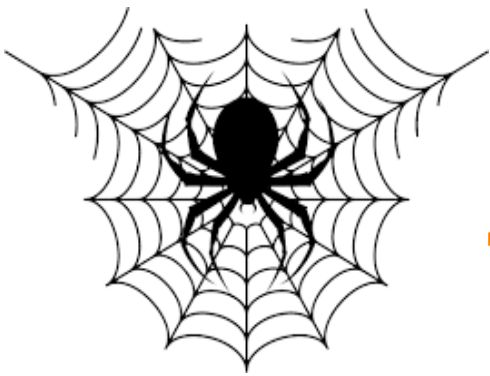


Un gran *padre fundador* de la mecánica cuántica



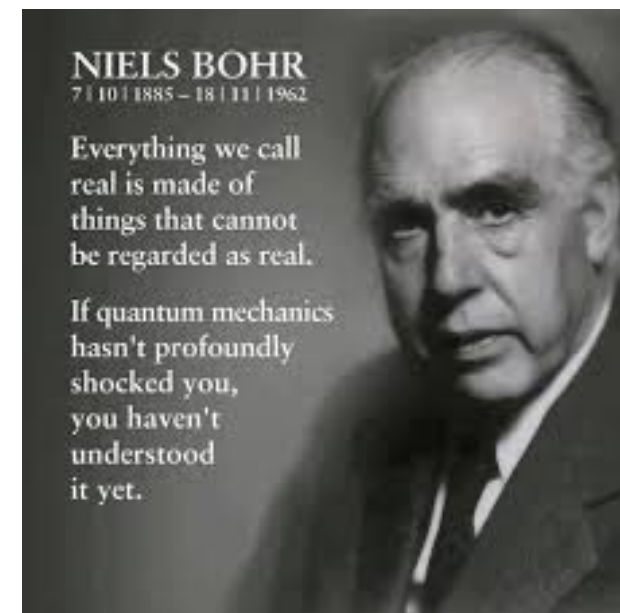
Hitos cuánticos en la biografía de Albert Einstein

- **1905:** (Univ. **Zúrich**, tesis doctoral) (dimensiones moleculares).
- **1905:** (**Berna**) *“Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz”* (el **cuanto de luz**).
- **1909:** *“Sobre el desarrollo de nuestras ideas concernientes a la naturaleza y constitución de la radiación”;*
“Sobre la teoría cuántica de la radiación”.
- **1916:** *“Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario”.*
- **1921:** premio Nobel de Física (**ley efecto fotoeléctrico**).
- **1924:** desarrollo con **Bose** de una estadística cuántica para fotones.
- **1935:** *“¿Puede la descripción cuántica de la Naturaleza considerarse completa?”* (**el entrelazamiento**).
- **1932-1955:** **EE.UU., Princeton:** persiguiendo la unificación de campos.



1885-1962

Un gran *padre fundador* de la mecánica cuántica



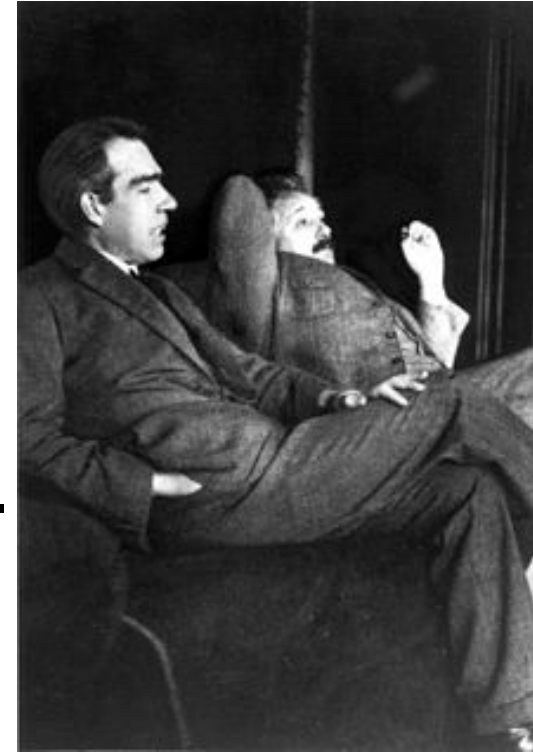
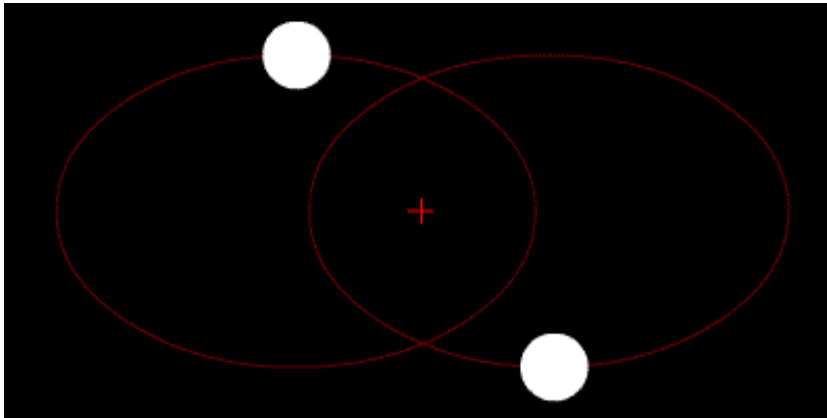
1947

Hist. **Hitos en la biografía de Niels Bohr**

- **1911**: Univ. de **Copenhague**, tesis doctoral (teoría electrónica metales).
- **1911-16**: **Manchester**, equipo de **Rutherford**.
- **1913**: **modelo atómico** pre-cuántico.
- **1916**: profesor en la Univ. de **Copenhague**.
- **1920**: Director Insto. Física Teórica **Copenhague**.
- **1922**: premio Nobel de Física (**teoría atómica**).
- **1934**: "*La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*".
- **1935-39**: **Bohr-Wheeler-Weizsäcker**: modelo nuclear de la **gota líquida**.
- **1943**: **EE.UU.**, colaboración con el proyecto Manhattan.
- **1955**: conferencia "*Átomos para la paz*" en **Ginebra**.
- **1958**: "*La teoría atómica y el conocimiento humano*".

Selección de temas

1. El cuanto de luz y la dualidad onda-corpúsculo.
2. El indeterminismo.
3. La realidad local/no-separable.



Einstein

El cuanto de luz y la dualidad onda-corpúsculo

Bohr

- El **cuanto de luz**; efecto fotoeléctrico; tamaño moléculas (tesis).
- Partículas en suspensión: aceptación hipótesis atómico-molecular!.
- Calor específico de los sólidos.

- El campo electromagnético continuo se compone de gran número de cuantos de luz, que afloran colectivamente la conducta ondulatoria.

- Los **heurísticos** cuantos de radiación de 1905 se erigen en **auténticas partículas de luz**, al aplicarse a obtener la fórmula de Planck:

“No dudo ya de la realidad de los cuantos de radiación, aunque todavía permanezco bastante solo en esta convicción”

← 1905

← 1906

← 1907

1913→

1914→

← 1916

← 1916

1920

- En su **modelo atómico** de **1913**, asume el fallo de la electrodinámica clásica, pero nunca menciona el “cuanto de luz”, solo el “cuanto de energía”.
- Pero en **1914**, **Principio de Correspondencia** y abandono de ambos presupuestos.
- **1914-1920**: asunción de la **electrodinámica clásica** y **rechazo tajante** al cuanto de luz de Einstein o naturaleza corpuscular de la radiación.

1905: el cuanto de luz *heurístico*

- La observación de que la diferencia entre los conceptos de energía discreta y continua lleva a contradicciones con la experiencia en la interacción radiación-materia lleva a Einstein a introducir el “**cuanto de luz**”:
- *“La energía de un rayo de luz [...] no está distribuida de forma continua sobre un espacio creciente, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía que se localizan en puntos del espacio, se mueven sin dividirse, y pueden ser sólo producidos y absorbidos como unidades completas”*
- *“Concluimos que la radiación monocromática de baja densidad (**dentro del rango de validez de la fórmula de Wien para la radiación**) se comporta termodinámicamente **como si** consistiese de un número de cuantos de energía independientes”.*
- Cf. Einstein, “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y la transformación de la luz”, Ann. Phys. 17, **1905**, 132-148.
- *“Insisto en **el carácter provisional de este concepto** (**quanta de luz**) que no parece reconciliable con las consecuencias experimentales verificadas de la teoría ondulatoria.”*
- Cf. Einstein, I Congreso Solvay, **1911**.

1909: Ni “fotón” (hasta 1926), ni *real*

- I must have expressed myself unclearly in regard to the light quanta. That is to say, **I am not at all of the opinion that one should think of light as being composed of mutually independent quanta localized in relatively small spaces.** This would be the most convenient explanation of the Wien end of the radiation formula. But already the division of a light ray at the surface of refractive media absolutely prohibits this view. A light ray divides, but a light quantum indeed cannot divide without change of frequency.
- As I already said, **in my opinion one should not think about constructing light out of discrete, mutually independent points.** I imagine the situation somewhat as follows: [...] I conceive of the light quantum as a point that is surrounded by a greatly extended vector field, that somehow diminishes with distance. Whether or not when several light quanta are present with mutually overlapping fields one must imagine a simple superposition of the vector fields, that I cannot say. **In any case, for the determination of events, one must have equations of motion for the singular points in addition to the differential equations for the vector field.**

• Cf. Einstein, carta a Lorentz, mayo de 1909.

1916: el cuanto de luz *real*

- *“He tenido una idea brillante a propósito de la absorción y la emisión de radiación; esto te interesará. Una demostración completamente sorprendente de la fórmula de Planck, yo incluso diría la demostración. Y todo completamente cuántico. Estoy preparando la redacción de este resultado.”*

- Cf. Carta de Einstein a M. Besso, 1916.

- Einstein sustituye los resonadores de Planck, asociados a la materia, por moléculas, que sólo pueden existir en un conjunto discreto de estados.
- Establece que **el cuanto de luz posee momento** (ivectorial!), y tres procesos elementales para describir la interacción materia-radiación:
 - uno espontáneo (*Ausstrahlung*), en el que las moléculas emiten sin estímulo exterior, y dos inducidos por la radiación (*Einstrahlung*): uno de emisión estimulada (germen del láser) y otro de absorción, en ambos casos con probabilidad proporcional a la densidad de radiación presente.(Probabilidades de transición espontáneas: **al azar**)

- Cf. Einstein, “Sobre la teoría cuántica de la radiación”, Mitt. Phys. Ges. Zürich 18, 1916.

- *“No dudo ya de la realidad de los cuantos de radiación, aunque todavía **permanezco bastante solo en esta convicción.**”*

- Cf. Einstein, carta a M. Besso, 1918.

Razones para una oposición general al cuanto de luz

- **Einstein** era un completo desconocido en la Física de **1905**. Y su *hipótesis heurística* introducía una oscura noción que sugería, nada más y nada menos, reconsiderar las **ecuaciones de Maxwell**.
- **Poincaré**, primer Congreso Solvay, **1911**: *“la implantación del cuanto de luz podría significar el fin de las ecuaciones diferenciales como herramienta matemática para expresar las leyes de la física. El cálculo con diferencias finitas ocuparía su lugar, tal vez”*.
- **Planck**, **1913**: *“En suma, puede afirmarse que entre los problemas importantes, tan abundantes en la física moderna, no existe alguno ante el que Einstein no adoptara una posición de forma notable. Que, a veces, errara en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis acerca del quantum de luz, no puede esgrimirse realmente demasiado en su contra. Porque sin correr un riesgo de vez en cuando es imposible, incluso en la ciencia natural de mayor exactitud, introducir verdaderas innovaciones”*.
- Así que la oposición al cuanto de luz era casi unánime por aquellos años, y ni siquiera los resultados experimentales del **efecto Compton** (**1923-25**) lograron constituirse como una justificación suficiente para su aceptación unánime.

Rechazo al cuanto de luz

- R. Millikan, 1916: “La ecuación fotoeléctrica de Einstein parece predecir exactamente en todos los casos los resultados observados. Pero **la teoría semicorpuscular mediante la cual Einstein llegó a su ecuación parece hoy completamente insostenible.** [...] A pesar del éxito aparentemente completo de la ecuación de Einstein [para el efecto fotoeléctrico], la teoría física, de la que estaba destinada a ser expresión simbólica, **se halló tan insostenible que el mismo Einstein, según creo, ya no la mantiene**”.
- R. Millikan, 1924 (discurso recepción Nobel): “**La concepción de los cuantos de luz localizados, a partir de la cual Einstein obtuvo su ecuación [efecto fotoeléctrico] debe considerarse todavía lejos de estar establecida**”.

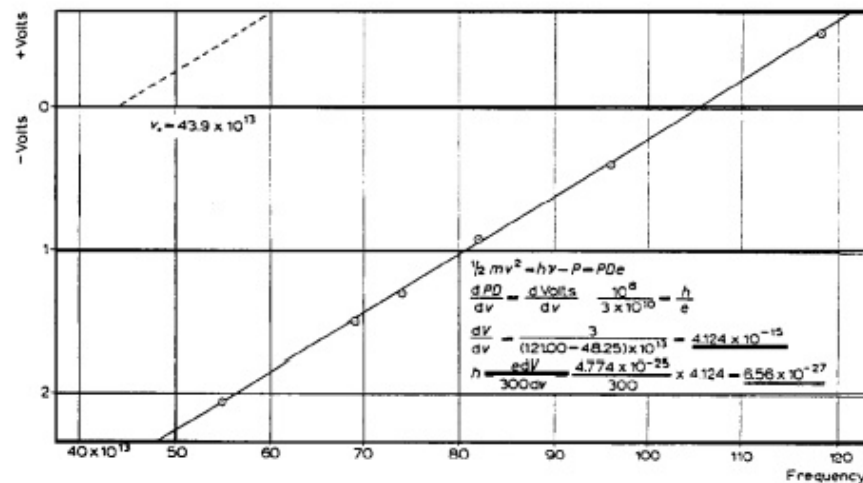


Fig. 4.

Bohr: rechazo frontal al cuanto de luz: ¡hasta 1924-25!

- En su teoría atómica de 1913, Bohr pareció aceptar el fallo de la electrodinámica clásica y la emisión/absorción de energía en cuantos discretos (¡que no es lo mismo que integrar en su modelo el cuanto de luz!).
- Pero en 1914, tras establecer el **principio de correspondencia**, recupera el convencimiento de que el electromagnetismo clásico debe prevalecer, y la cuantización limitarse a la materia; **descarta entonces el concepto de cuanto de luz**:

- **Bohr, 1918**: *“La descripción proporcionada por Einstein [...] es incapaz de proporcionar cualquier clase de explicación para los fenómenos de interferencia”*.
- **Bohr, 1921**: *“La radiación debe ser descrita en términos de la teoría electromagnética clásica”*. • Cf. Bohr, *Collected works*, Vols. I y III, pp. 229 y 234.



Notes for the 1923 Second Silliman Lecture

Einstein's ... **suggestion** that the transmission of light does not take place by waves but is atomic in nature **cannot however be considered as a serious theory of light transmission.**

(Bohr to Slater, 28 January 1926).

“I believe that Einstein agrees with us in the general ideas, and that especially he has given up any hope of proving the correctness of the light quantum theory by establishing contradictions with the wave theory description of optical phenomena”

Víctimas colaterales

- Era tan fuerte su oposición a la hipótesis del cuanto de luz que forzó a **abjurar** de ella a dos físicos ilustres:
- 1. **1921**: **H.A. Kramers**, colaborador de **Bohr**, había analizado la situación Compton con éxito, vía la hipótesis de **Einstein**. Pero tras un debate intenso con *su jefe* fue forzado/convencido a abandonar y no publicar sus resultados, convirtiéndose en un radical opositor a ella. Nos ha quedado el testimonio de **Haar** (“The old quantum theory”, 1967, p. 68):

“Debye desarrolló la teoría del efecto Compton como lo había hecho Kramers, quien fue persuadido por Bohr para que no lo publicase”

*-Kramers, 1923: “La teoría del cuanto de luz puede compararse con una medicina que hará desaparecer la enfermedad, **pero matando al paciente**”*

- 2. **1923**: **J.C. Slater**: concibió una teoría que conciliaba las propiedades ondulatorias de la luz con la hipótesis corpuscular de **Einstein**, en la que unos campos “virtuales” determinaban la emisión de los cuantos de luz por los átomos... para descubrir “con consternación” que **Bohr** y **Kramers** “*rehusaban por completo admitir la existencia real de los fotones... **Nunca hubiera pensado que objetarían algo que parecía una deducción tan obvia a partir de muchos tipos de experimentos***”. El caso fue que “se opusieron con tal vigor al punto de vista del cuanto de luz que vi que la única manera de mantener la paz y conservar y publicar parte de mis ideas fue...” *iescribir a **Nature** indicando que **aunque en su original había incluido la existencia real de los cuantos de luz, había abandonado esa presunción!***”.

1909: la dualidad onda-corpúsculo

- Aunque no desarrollara una formulación matemática, ya en 1909 Einstein argumentó que las descripciones corpuscular y ondulatoria podían ser compatibles:
- *“Todo lo que yo quería era señalar [...] es que **las dos propiedades estructurales (la ondulatoria y la corpuscular) desplegadas simultáneamente por la radiación** de acuerdo a la fórmula de Planck **no deberían ser consideradas como mutuamente incompatibles**”.*
- *“Resulta innegable que existe un amplio conjunto de hechos ... que muestran que la luz tiene ciertas propiedades fundamentales que pueden ser entendidas mucho más apropiadamente a partir del punto de vista newtoniano de la teoría de la emisión, que desde el punto de vista de la teoría ondulatoria. Es mi opinión, por ello, **que la próxima fase del desarrollo de la física teórica nos aportará una teoría de la luz que pueda ser interpretada como una especie de fusión de las teorías ondulatoria y de emisión**”.*
- Cf. Einstein, “Sobre el desarrollo de nuestras opiniones concernientes a la naturaleza y la constitución de la radiación”, Phys. Zeit. 10, 1909, 817-825.

La complementariedad de Bohr

- Dualidad onda-corpúsculo.
- Complementaridad descripciones espacio-temporal / momento-energía (**ortodoxa**)
- Complementaridad entre dos observables ligados por una relación de conmutación no nula (**ortodoxa**).
- Complementaridad filosófica (**Hoffding, James**).
- **Bohr**: lo importante: **el lenguaje** en que nos comunicamos; **sólo el clásico es no ambiguo**.
- Presentación original: Congreso Volta en **Como, 1927**:
➔ **exclusión mutua + compleción conjunta** para dos descripciones clásicas.

*“No tiene ningún sentido preguntar si la luz es en ‘realidad’ onda o partícula. No debemos olvidar nunca que ‘realidad’ es también una palabra del lenguaje humano, como lo son ‘onda’ o ‘partícula’. Nuestra tarea es aprender a **usar estas palabras correctamente**, es decir, sin ambigüedad y consistentemente”.*

- Cf. Bohr, **1967**.

Influencias filosóficas en la complementariedad

- Respecto a las influencias filosóficas que se pueden señalar en la **concepción bohriana de complementariedad**, se han destacado dos:
 1. La del filósofo danés **Høffding**, partidario de una epistemología neokantiana, con cuyas enseñanzas hay constancia de que **Bohr** estaba familiarizado y de quien, incluso, fue amigo personal. Su influencia parece ser reconocible en **Bohr**, especialmente en **la consideración de la continuidad-discontinuidad**, que se descubre como **raíz, en su dualidad fundamental, de todos los grandes problemas filosóficos**, y también en el **rechazo explícito de la causalidad**.
 2. La del psicólogo norteamericano **James**, integrante con **Høffding** de un movimiento filosófico a finales del **s. XIX**. En James se encuentran afirmaciones tales como la de que *"la conciencia total se desdobra en partes que coexisten, pero mutuamente se ignoran, y, compartiendo los objetos de conocimiento, son complementarias"*. Está atestiguado el conocimiento por **Bohr** de sus obras con anterioridad a **1913**.

No todos eran complementaristas...

- **Heisenberg** no creía imprescindible emplear términos como “**partícula**” u “**onda**” para abordar los fenómenos cuánticos, y prefería **suponer a la teoría como meramente proveedora de un esquema matemático consistente que nos diga todo lo que puede ser observado**... algo que le llevaría a la **confrontación** con **Bohr**, defensor de la **dualidad onda-corpúsculo**; **Born** y **Jordan** defendían también el mantenimiento del concepto de partícula como fundamental:
“Me disgusta el enfoque de Bohr. [...] Querría comenzar a partir del hecho de que la mecánica cuántica ya impone una única interpretación física” (**Heisenberg**, cf. **Pais**).
- Pero Bohr, quien ya en **1923** declaraba que *“cada descripción de los procesos naturales debe basarse en ideas que hayan sido introducidas y definidas en la teoría clásica”*, trató de impedir a **Heisenberg** en **1927** que publicara su versión del principio de indeterminación (inclusión de una “**addition in proof**”), y en **1933** seguía manteniendo que se debe procurar *“obtener una descripción de los fenómenos atómicos que surja como una racionalización general de las teorías de la física clásica”*.
- **Einstein**: *“Jamás comprendí lo que Bohr entendía por principio de complementaridad, a pesar de haberlo estudiado cuidadosamente”*.

Finalmente: Continuidad y teoría de campos

*“No creo que los quanta de luz tengan **realidad** en el mismo sentido inmediato que los corpúsculos de electricidad. Tampoco creo que las ondas-partículas tengan realidad en parecido sentido a las mismas partículas. **El carácter ondulatorio de las partículas y el carácter corpuscular de la luz**, en mi opinión, deben ser entendidos de una manera más indirecta, no como realidad física inmediata”.*

- Cf. Einstein, 1939, carta a Paul Bonofield.

- Finalmente, Einstein concluiría que **tanto la electrodinámica clásica como la teoría de los cuantos de luz eran teorías incompletas**, optando por primar en su ontología el concepto de “**campo**”, lo que excluía tanto el concepto de partícula clásica como el de un cuanto de luz como entidad independiente del campo. La electrodinámica clásica era **una teoría fundamental**, que acabaría integrada en una nueva, definitiva y completa teoría de la radiación; **la teoría de los cuantos era para él provisional**, destinada a ser reemplazada, probablemente, en su totalidad:

“la realidad física debe ser descrita en términos de funciones continuas”.

- Cf. Einstein, 1950, Sc. American, 182.

- Pero en su empeño culminó desalentado:

*“I tend more and more to the opinion that one cannot come further with a continuum theory”; “I consider quite possible that physics cannot be based on the field concept. [...] In this case, **nothing remains on my entire castle in the air, gravitation theory included**”.*

- Cf. Einstein, carta a Infeld; 1941, Schilpp vol. , 1949.

Finalmente: complementariedad como característica de las respuestas de la Naturaleza a nuestra investigaciones:

"Within the scope of classical physics, all characteristic properties of a given object can in principle be ascertained by a single experimental arrangement, although in practice various arrangements are often convenient for the study of different aspects of the phenomena. In fact, data obtained in such a way simply supplement each other and can be combined into a consistent picture of the behaviour of the object under investigation. In quantum mechanics, however, evidence about atomic objects obtained by different experimental arrangements exhibits a novel kind of complementary relationship. Indeed, it must be recognized that such evidence which appears contradictory when combination into a single picture is attempted, exhaust all conceivable knowledge about the object. Far from restricting our efforts to put questions to nature in the form of experiments, the notion of complementarity simply characterizes the answers we can receive by such inquiry, whenever the interaction between the measuring instruments and the objects form an integral part of the phenomena."

- Cf. Bohr, 1958, "Quantum Physics and Philosophy: Causality and Complementarity".

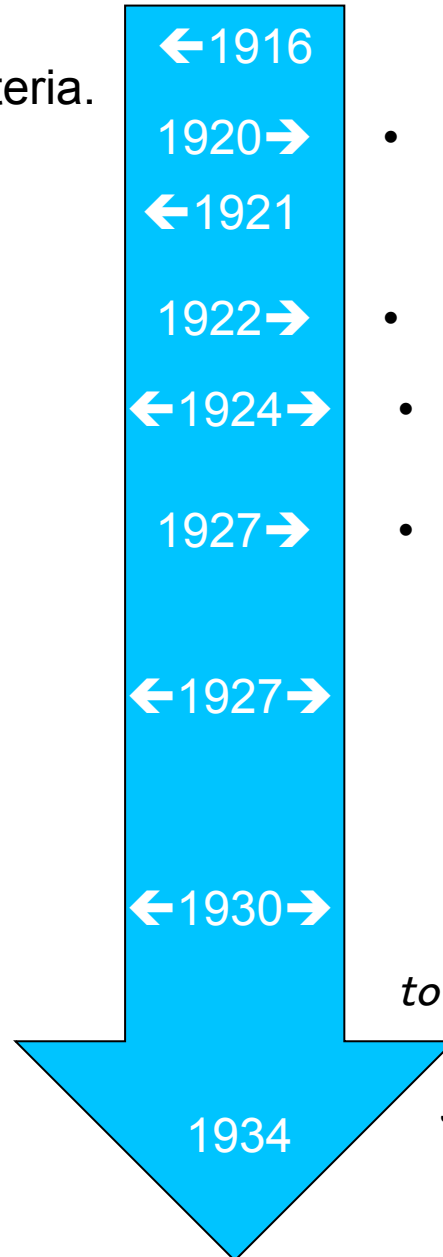
-**Nota:** !fuerte oposición de Bohr al Premio Nobel a la Electrodinámica cuántica de Feynman, Schwinger y Tomonaga!, concedido sólo tras su muerte (1962), en 1965...

Einstein

El indeterminismo

Bohr

- Leyes estadísticas en la interacción radiación-materia.
- Premio Nobel: **ley** efecto fotoeléctrico.
- Estadística cuántica de Bose-Einstein.
- V Congreso Solvay: “las interpretaciones de Ψ ”
- VI Congreso Solvay: “la caja de fotones”



- Conferencia de Bohr en Berlín: primer encuentro personal E-B.
- Premio Nobel: teoría atómica.
- Artículo Bohr-Kramers-Slater.
- Heisenberg: las relaciones, inspiradas en Einstein: “*Es la teoría la que decide lo que podemos observar*”, pero “*Puede que en algún momento haya utilizado esa filosofía y que incluso haya escrito sobre ella, pero no deja de ser un absurdo*”.
 - “*Addition in proof*”: “Bohr has brought to my attention that I have overlooked essential points in the course of several discussions in this paper”

El azar ontológico (“Zufall”)

- **1916**: Einstein deriva expresiones para las probabilidades de transición entre estados atómicos, predice la existencia de la “emisión estimulada” y establece que la teoría cuántica genera en sí misma un **azar**.
 - La teoría no puede predecir cuando y en qué dirección un átomo emitirá un cuanto de luz (¡ahora ya, **1916**, **sí dotado de momento!**).
 - Puesto que la emisión espontánea **es un proceso estadístico**, no admite descripción clásica.
- “*Si una molécula sufre una pérdida de energía de magnitud $h\nu$ sin excitación externa, emitiendo esta energía en forma de radiación saliente, entonces **este proceso es direccional**. Radiación saliente en forma de onda esférica no existe. Durante el proceso elemental de pérdida por radiación, la molécula sufre un retroceso que está **determinado sólo por azar**, de acuerdo con el estado actual de la teoría. [...] **Es una debilidad en la teoría** [...], que deja el momento y la dirección de los **procesos elementales al azar**”.*
- Cf. Einstein, “Sobre la teoría cuántica de la radiación”, Mitt. Phys. Ges. Zürich 18, **1916**.
 - “*La cuestión de **la causalidad** me preocupa muchísimo. [...] ¿Pueden la absorción y emisión de cuantos de luz ser entendidas como un requisito de la causalidad o seguirán siendo un residuo estadístico? [...] **Si me viese obligado a renunciar completamente a la causalidad, sería mucho más feliz**”.*
 - Cf. Einstein, carta a Born, **1920**.

1920: Primer encuentro personal

- El primer encuentro personal entre Einstein y Bohr se produjo en 1920: Planck invitó a Bohr a dar una conferencia en Berlín sobre su modelo atómico, y allí estaba Einstein desde 1914.
 - Según Bohr, el tiempo que estuvo allí transcurrió “hablando de física teórica desde la mañana hasta la noche”.
 - En su conferencia, Bohr afirmó que nunca sería posible superar la descripción probabilística presente en la emisión de radiación atómica:
“la causalidad no se restauraría en la física del átomo”.
- Einstein, cartas a Ehrenfest y Lorentz: “Bohr ha pasado por aquí y me ha dejado tan impresionado como a Ud. Es como un niño hipersensible hablando de su mundo en un estado de hipnosis”, “Es un hombre con un talento extraordinario y una persona excelente”.
- Bohr: “Conocerle y tener la oportunidad de hablar con Ud. Ha sido para mí una de las experiencias más importantes de mi vida. No puede imaginarse la gran inspiración que para mí ha supuesto escucharle exponer directamente sus puntos de vista”.
- Premios Nobel respectivos en 1921 (“ley del” efecto fotoeléctrico) y 1922 (teoría atómica): Bohr manifestó su alivio por haber sido premiado después.

El campo fantasmal (“*Gespenster-feld*”, no publicado)

- Como una forma de reconciliar las propiedades ondulatorias de la radiación electromagnética con los cuantos de luz, **Einstein** introdujo la idea (también **heurística**) de un **campo fantasmal**, que no llegó a publicar nunca, pero a la cual refirió en su correspondencia:
 - *“Podemos imaginar que la radiación consiste de ondas electromagnéticas ordinarias, pero con **amplitudes evanescentes**. Como consecuencia, **no pueden ser observadas**, sólo sirven para preparar el camino para la radiación de energía. Es como un camino muerto, que emerge a la vida por la energía de radiación”.*
 - *“**Los diferentes quanta se distribuyen entonces estadísticamente sobre el patrón**, en el sentido que el número medio de ellos en cada punto de la pantalla es proporcional a la intensidad de la radiación de interferencia que alcanza el punto”.*
- **Lorentz**: “La idea del campo fantasmal de **Einstein** abrió el camino a la interpretación probabilística de la función de onda de Schrödinger”.
- **Born**: “Mi idea de concebir el campo de ondas de Schrödinger en el sentido de su [de **Einstein**] campo fantasmal está probando ser la mejor”
 - Cf. Correspondencia entre Lorentz y Born, y Einstein, **1921**.
- **Bohr**: “La hipótesis del cuanto de luz es tan formal, que incluso el mismo Einstein la rodea de misticismo, hablando de un **campo fantasma** que guía los cuantos de luz”.

La tozudez puede conducir al error

- **1924:** Artículo **BKS** (**Bohr-Kramers-Slater**):
 - *“La Teoría Cuántica de la Radiación”*, Zeit. Physik 24, **1924**, pp. 69-87.
- Una teoría cuántica de la radiación que **concilia la naturaleza continua del campo electromagnético con la discontinua** de las transiciones atómicas, introduciendo unos **campos virtuales no causales** que inducen las transiciones.
- Postulaba un **sentido sólo estadístico para los principios de conservación de la energía y el momento**, admitiéndose **violaciones** en los procesos individuales; introducía una **acausalidad** necesaria para **desterrar la hipótesis del cuanto de luz** sin perder por completo la conservación de la energía.
- Descartada pronto, en **1925**, tras las medidas cuidadosas de **Bothe, Geiger, Compton** y **Simon**, en un contexto experimental de **efecto Compton**. Y **Bohr** empieza a aceptar el cuanto de luz... Pero quizás no del todo: no hasta que lo integrara, a su manera, en su concepción de la **“complementariedad”**.

Reacción de Einstein

- *“Bohr’s opinion of radiation interests me very much. But I don’t want to let myself be driven to a renunciation of strict causality before there has been a much stronger resistance against it than up to now. I cannot bear the thought that an electron exposed to a ray should by its own free decision choose the moment and the direction in which it wants to jump away. If so, I’d rather be a cobbler or even an employee in a gambling-house than a physicist. It is true, my attempts to give the quanta palpable shape have failed again and again, but I’m not going up hope for a long time yet”.*
- *“A final abandonment of strict causality is very hard to me to tolerate”.*
 - Cf. Einstein, cartas a Born y Eherenfest, 1924.
- Born ,1949: “Creo que estas investigaciones de Einstein [movimiento browniano] **han hecho más que cualquier otro trabajo para convencer a los físicos de la realidad de los átomos y de las moléculas**, de la teoría cinética del calor [es decir, de la mecánica estadística], **y del papel fundamental de la probabilidad en las leyes de la naturaleza”.**

$|\Psi|^2$ como densidad de probabilidad

- En un estudio sobre las colisiones atómicas, realizado con el formalismo de la **MO**, **Born** propuso una interpretación probabilista para ψ :

”Mecánica Cuántica de los procesos de colisión”

(Zeitschrift für Physik 37, **1926**, pp. 863-867; 38, **1926**, pp. 803-827)

*“La mecánica cuántica de Schrödinger proporciona por tanto una respuesta definitiva a la cuestión del efecto de la colisión; pero **no establece ningún tipo de descripción causal**. Uno no obtiene respuesta a la pregunta ¿cuál es el estado después de la colisión?, sino tan sólo a la pregunta, **‘¿cuán probable es un resultado específico de la colisión?’** [...] El movimiento de las partículas responde a las leyes de la probabilidad, pero la probabilidad en sí se propaga de acuerdo con la ley de la causalidad”*

- **¡Inspirado en Einstein!** (en su “**campo fantasmal**”, y en una intensidad de la onda electromagnética proporcional a la densidad de fotones).
- ➔ Por ello conseguiría el Premio Nobel de **1954**: por un trabajo que “*no contiene descubrimiento alguno de un nuevo fenómeno natural, sino **las bases de una nueva forma de pensar en relación a los fenómenos naturales***” (discurso de aceptación).

$\Delta x \Delta p \gtrsim h$ La concepción de 1927 de Heisenberg

- **Heisenberg**, “Sobre el contenido [¿”claro”, “real”, “ideológico”...?] de la *Cinemática y Mecánica cuánticas*” (Zeitschrift für Physik 43, 1927, pp. 172-198)
- **Heisenberg** ha narrado como en su desarrollo sería fundamental una observación de **Einstein**:

“Es la teoría la que decide lo que podemos observar”

- **Einstein**, posteriormente, se sorprendió de haber hecho tal afirmación:

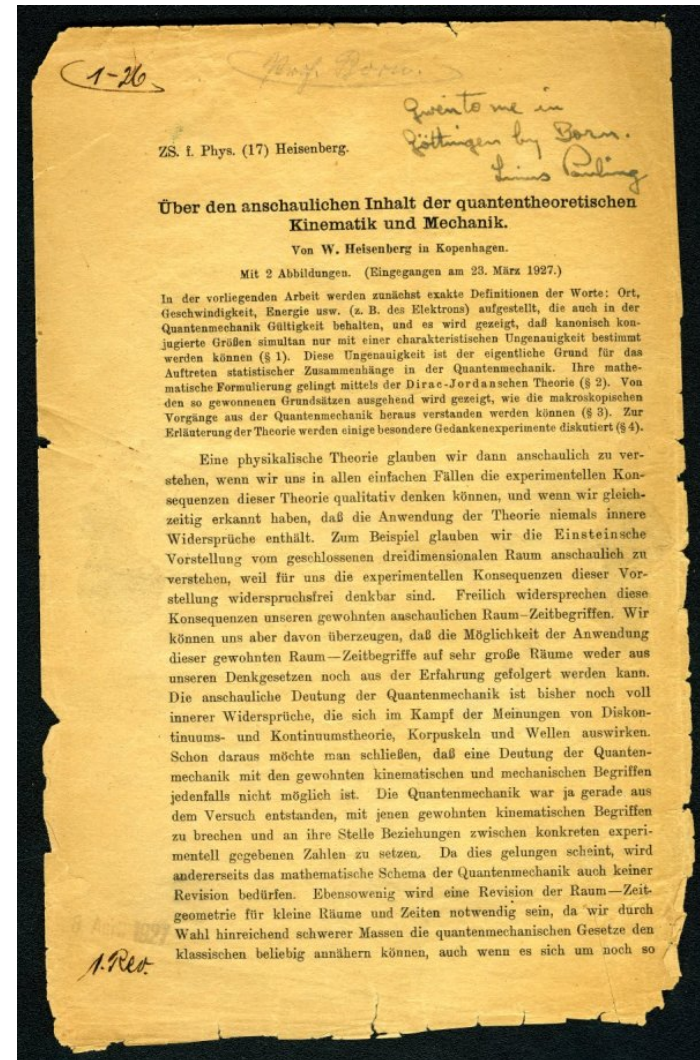
*“Puede que en algún momento haya utilizado esa filosofía
y que incluso haya escrito sobre ella, pero
no deja de ser un absurdo”*

- “La Mecánica Cuántica conduce a resultados precisos en lo que concierne a los valores medios, pero no da ninguna información sobre los detalles de cada proceso individual. **El determinismo, hasta hoy considerado como la base de las ciencias exactas, debe ser abandonado”**

(Cf. **Born** y **Heisenberg**, V Congreso Solvay, 1927)

Heisenberg, 1927: sometido a una “addition in proof”.

- “After the conclusion of the foregoing paper, more recent investigations of Bohr have led to a point of view which permits an essential deepening and sharpening of the analysis of quantum-mechanical correlation attempted in this work. In this connection Bohr has brought to my attention that I have overlooked essential points in the course of several discussions in this paper. Above all, the uncertainty in our observation does not arise exclusively from the occurrence of discontinuities, but is tied directly to the demand that we ascribe equal validity to the quite different experiments which show up in the corpuscular theory on one hand, and in the wave theory on the other hand.(...) I owe great thanks to Professor Bohr for sharing with me at an early stage the results of these more recent investigations of his-to appear soon in a paper on the conceptual structure of quantum theory- and for discussing them with me”.



La concepción de Bohr

- Para Bohr, **el indeterminismo cuántico es consecuencia de la complementaridad**, versión onda-corpúsculo, que se asume como un principio fundamental basado en una tesis epistemológica: **no necesitamos nuevos conceptos para comunicar los resultados de nuestras observaciones y experimentos**, sólo los de la física clásica son inambiguos.

La insoportable pérdida del determinismo

- Muchos físicos encontraron difícil aceptar el abandono de la causalidad clásica.

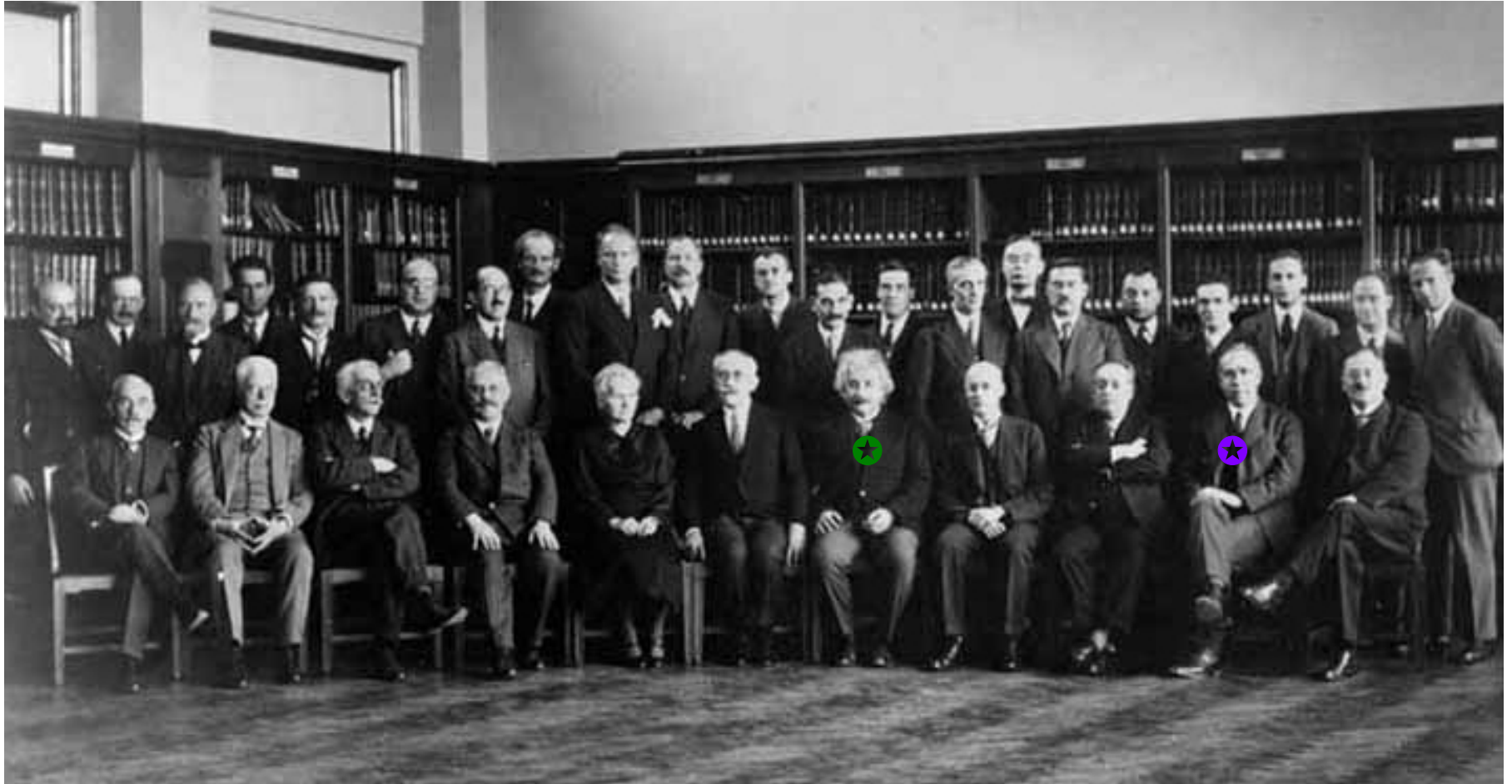
-Entre ellos, **Einstein**:

“La Mecánica Cuántica es muy impresionante. Pero una voz interna me dice que no es todavía la teoría real (“the real thing”). La teoría hace un buen trabajo, pero difícilmente nos acerca al secreto del Viejo (“the Old One”). En todo caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados”

(**Einstein**, en carta a **Born**, diciembre **1926**)

- “*Mantenemos que la Mecánica Cuántica es una **teoría completa**, cuyas hipótesis fundamentales, físicas y matemáticas, no son susceptibles de modificación*” (**Born** y **Heisenberg**, **V Congreso Solvay**, **1927**)

1930: 6° Congreso Solvay: “Le Magnétisme”

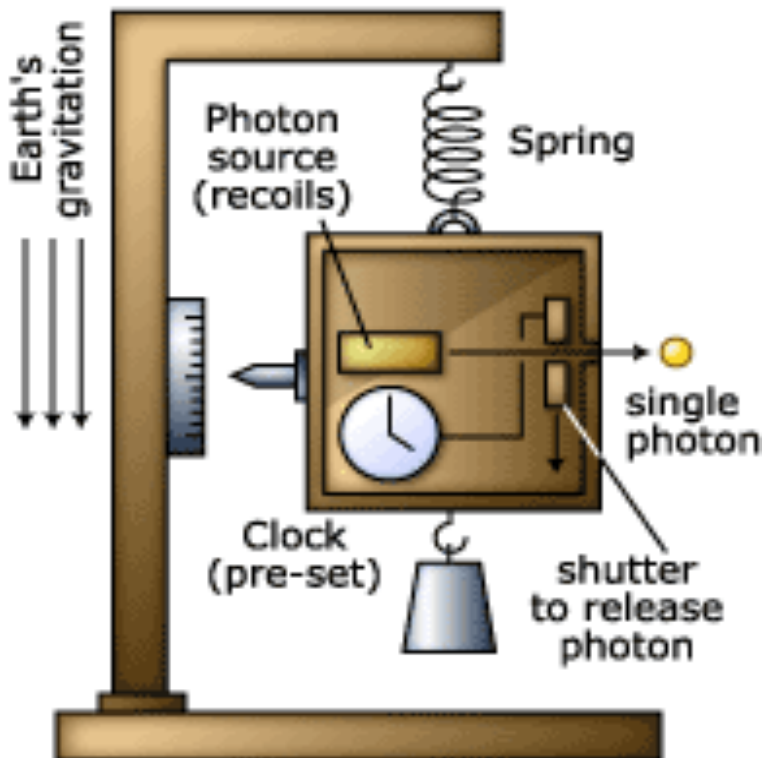


VI Solvay Congress, 1930, Bruselas: Niels Henrik David Bohr, Leon Brillouin, Aime Auguste Cotton, Marie Curie, Charles Galton Darwin, Peter Josef William Debye, Paul Adrien Maurice Dirac, Albert Einstein, Enrico Fermi, Walther Gerlach, Petr Leonidovich Kapitza, Paul Langevin, Wolfgang Pauli, Owen Williams Richardson, Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld, Otto Stern, Pieter Zeeman.

Einstein, 6° Solvay, 1930

- **Bohr**: intento por **Einstein** de demoler las relaciones de indeterminación: experimento conceptual (*gedanken*) de la “caja” de fotones.

Einstein's Light Box
(after a drawing by Bohr)



- **Einstein**: Es posible medir la energía de un fotón emitido y el momento de su emisión, con precisión más allá del principio de indeterminación,

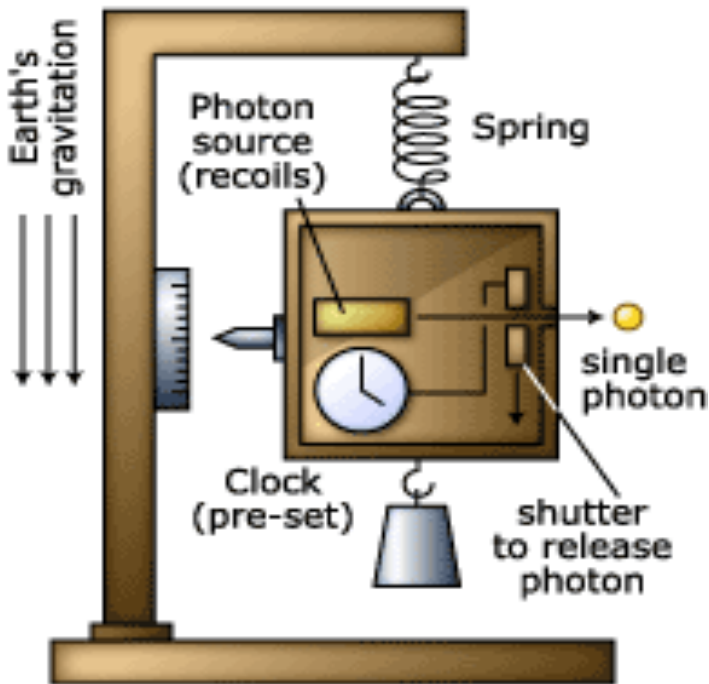
$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h / 2$$

- La caja se pesa; después, un solo fotón escapa de ella a través de una trampilla, cuyo instante de apertura es determinado por un reloj en su interior.
- La caja vuelve a pesarse y se determina así la masa m perdida; la energía E del fotón es $E=mc^2$.
- ¡Pueden determinarse la energía del fotón y el instante de su emisión...

➡ **¡violando el principio de indeterminación!**

La caja de fotones (1930) (relato bohriano!)

Einstein's Light Box
(after a drawing by Bohr)



- **Bohr** reaccionó con desesperación (**Rosenfeld**):
"During the whole evening he was extremely unhappy, going from one to the other and trying to persuade them that it couldn't be true, that it would be the end of physics if Einstein were right; but he couldn't produce any refutation".
- Desestimado por **Bohr**, a la mañana siguiente, vía la apelación a la teoría de la **relatividad general** de **Einstein**:
- Cuando el fotón se emite, la caja retrocede, por conservación del momento, y la posición de la caja en el campo gravitacional está indeterminada.
- Según la relatividad general, esto generará una indeterminación en el tiempo registrado por el reloj.

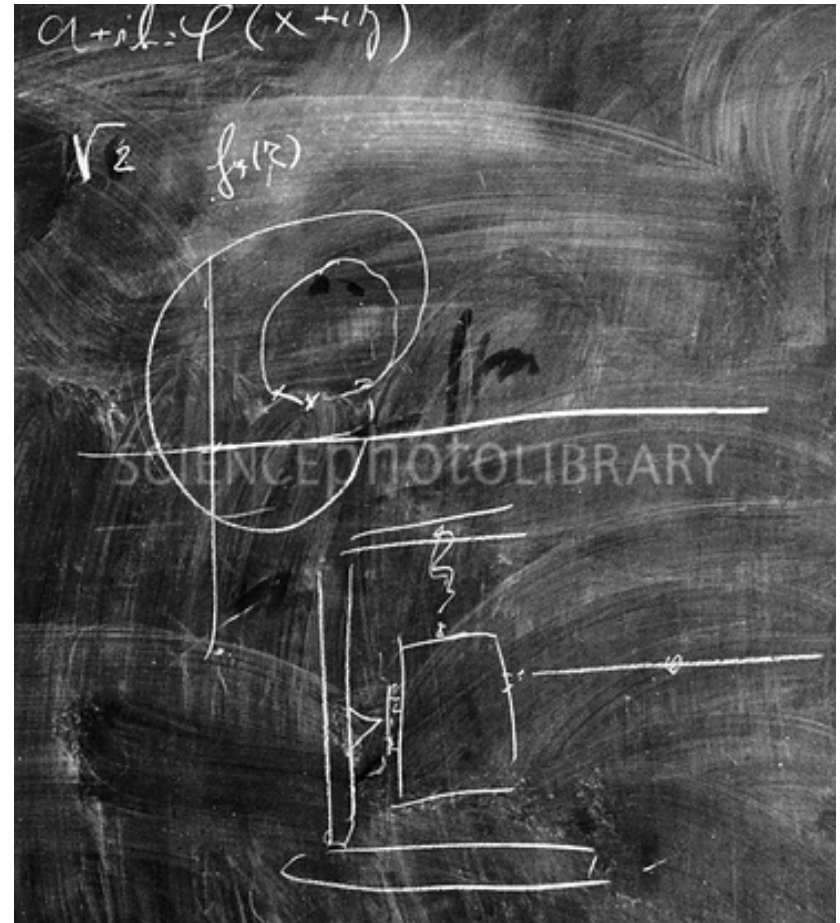
- **Einstein** había sido "vencido con sus propias armas". Compelido a aceptar la argumentación de **Bohr**, abandonó el propósito de refutar la **consistencia** de la mecánica cuántica... y dirigió sus esfuerzos a establecer la **incompletitud** de la misma.

Última postura de Einstein

- “[La **corrección** de la relación de indeterminación de Heisenberg] debe, desde mi punto de vista, considerarse que ha sido finalmente demostrada”.
- “Yo estoy, de hecho, firmemente convencido de que **el carácter esencialmente estadístico de la física cuántica contemporánea** debe adscribirse al hecho de que esta teoría opera con **una descripción incompleta** de los sistemas físicos”.
- “Reconozco por completo el muy **importante progreso** que la teoría cuántica estadística ha traído a la física”.

• Cf. Einstein, “Reply to criticisms”, A. Einstein: Philosopher-Scientist, **1949**.

Última pizarra de Bohr



- Pizarra que dejó escrita **Bohr**, a su muerte (**1962**), en el despacho de su casa.

Einstein

La “no separabilidad”

Bohr

- V Congreso Solvay: *Las interpretaciones de Ψ ; acción a distancia*, conflicto con la relatividad...
- VI Congreso Solvay: *“la caja de fotones”*.
- Artículo Einstein-Tolman-Podolsky en Phys. Review: *“Conocimiento del pasado y el futuro en MC”*.
- Artículo Einstein-Podolsky-Rosen en Phys. Review: *“¿Puede la descripción mecánico-cuántica de la realidad física considerarse completa?”*.

←1927→

←1930→

←1931
1933-35→

←1935→

1955/1962

- Conferencia de Bohr en Como: primera exposición pública sobre su complementaridad.
- VI Congreso Solvay: *“la caja de fotones”*.
- Bohr-Wheeler-Weizsäcker : analogía/hipótesis nuclear de la gota líquida.
- Respuesta de Bohr en Phys. Review: *“¿Puede la descripción mecánico-cuántica de la realidad física considerarse completa?”*.

1927: 5º Congreso Solvay

Congreso de Solvay en 1927: electrones y fotones



SOLVAY CONFERENCE 1927

coloured by pastelcolour.com

1 DEBYE	4 PICARD	7 HENRIOT	8 EHRENFEST	11 HERSEN	13 DE DONDER	16 SCHRÖDINGER	18 VERSCHAFFELT	22 PAULI	23 HEISENBERG	26 FOWLER	27 BRELOUIN
2 I. LANGMUIR	3 KNUDSEN	6 BRAGG	10 KRAMERS	14 DIRAC	17 COMPTON	20 de BROGLIE	24 M. BORN	28 N. BOHR			
	5 M. PLANCK	9 Mme CURIE	12 H.A. LORENTZ	15 A. EINSTEIN	19 P. LANGEVIN	21 CH.E. GUYE	25 C.T.R. WILSON	29 RICHARDSON			

¡17 premios Nobel! *



 tuveras.com

Solvay Physics Conference 1927



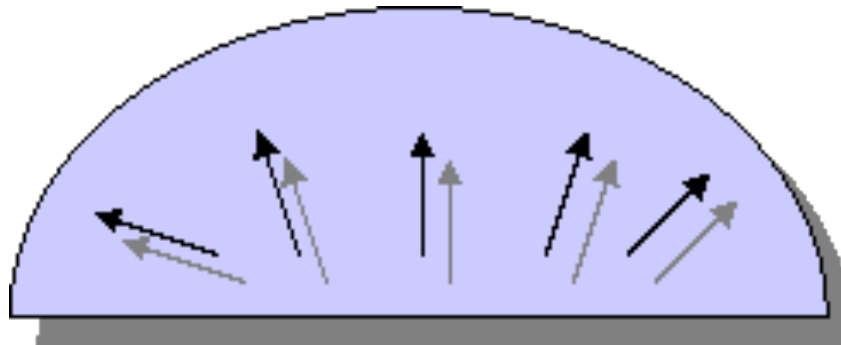
<https://youtu.be/8GZdZUouzBY>

www.FreeScienceLectures.com

<iframe width="500" height="405" src="https://www.youtube.com/embed/8GZdZUouzBY" frameborder="0" allowfullscreen></iframe>

1927: 5º Congreso Solvay

- *“Debo disculparme por no haber profundizado en mecánica cuántica. No obstante, desearía hacer algunos comentarios generales...”*
- *“...Sea una pantalla en la que se practica una pequeña abertura O y sea P una película fotográfica con forma semiesférica de gran radio. Supongamos que los electrones caen sobre S según la dirección de las flechas. Una parte de esos electrones pasa por O y, debido a la pequeñez de la abertura y de la velocidad de las partículas, se reparten de manera uniforme en todas las direcciones para actuar después sobre la película...”*



1927: 5º Congreso Solvay

- Dos posibles interpretaciones para Ψ :
 - 1) **Interpretación estadística**: representa una colectividad de sistemas iguales e igualmente preparados (sin pretensión de describir el sistema individual).
 - 2) **Interpretación individual (ortodoxia)**: la teoría postula también que “representa” al sistema individual.
- “... Si $|\Psi|^2$ fuera simplemente la probabilidad de que en un lugar considerado se encontrase una partícula determinada en un instante dado, podría ocurrir que, en un instante dado, un mismo proceso elemental produjese una acción en dos o muchos lugares de la pantalla. Pero la interpretación según la cual $|\Psi|^2$ expresa la probabilidad de que esta partícula se encuentre en un lugar determinado, **supone un mecanismo de acción a distancia del todo particular**, que impide que la onda repartida continuamente en el espacio produzca una acción en dos lugares de la pantalla”. [...] **La interpretación 2) de $|\Psi|^2$ implica según yo lo veo una contradicción con el postulado de la relatividad**”.

1935: *Argumento EPR*

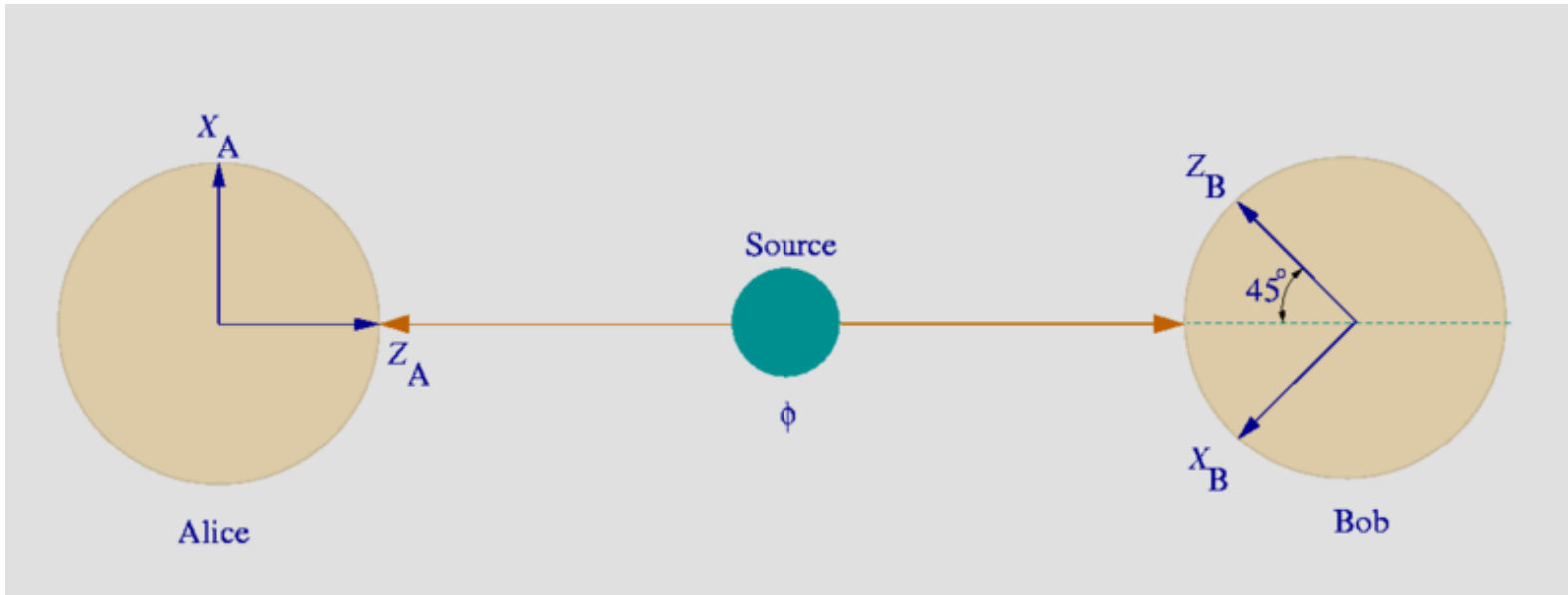
- **Artículo EPR:** “*¿Puede la descripción mecánico-cuántica de la realidad física considerarse completa?*”.

Cf. **A. Einstein**, **B. Podolsky** y **N. Rosen**, “*Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?*”,

Physical Review 47, **1935**, 777-780.

Reacción de Bohr

- Rosenfeld, tras la publicación EPR:
 - ” *This onslaught came down upon us as a bolt from the blue. **Its effect on Bohr was remarkable***”.
 - ” *As soon as Bohr had heard my report of Einstein’s argument, everything else was abandoned: **we had to clear up such a misunderstanding at once***”.
- Respuesta de Bohr: “*¿Puede la descripción mecánico-cuántica de la realidad física considerarse completa?*”, Physical Review 48, **1935**, 696-702.



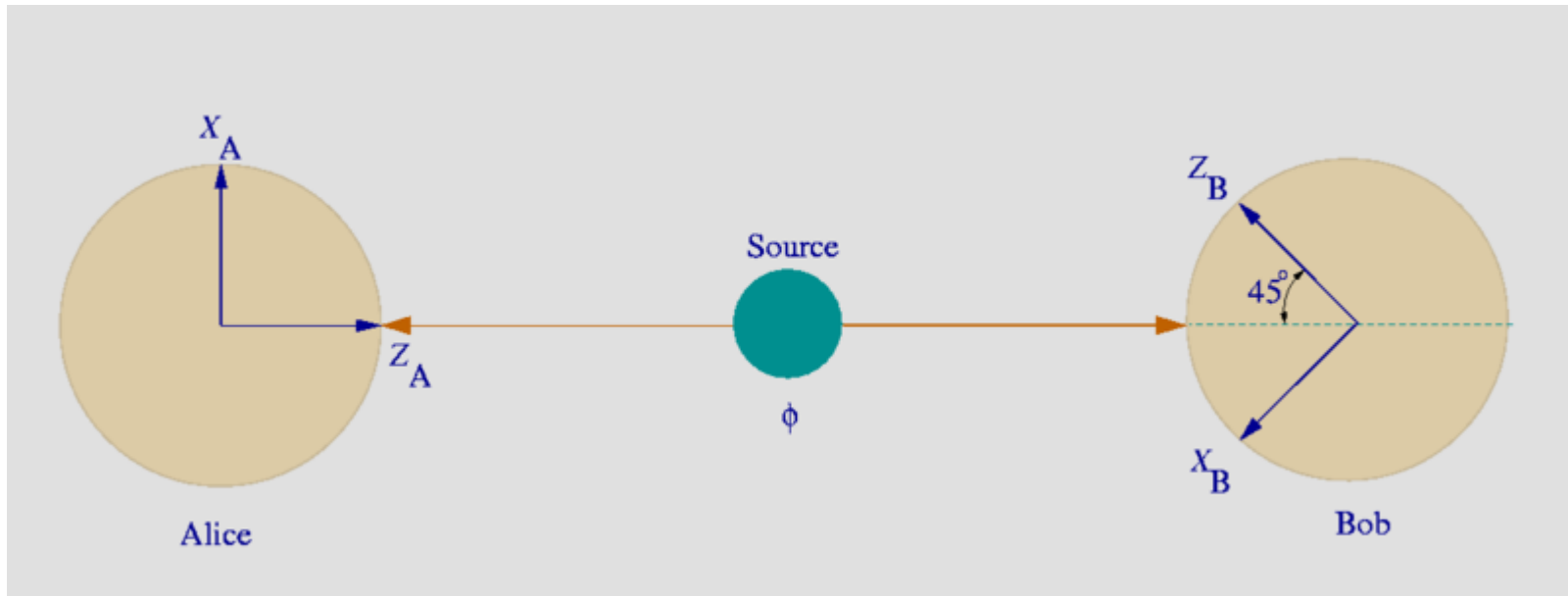
- Forma de **Bohm** (1951): Sean dos partículas de espín $\frac{1}{2}$, que se preparan en un estado singlete de espín, un estado **entrelazado** (“entangled”):

$$|\Psi(1,2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle \right) \neq |\Psi\rangle_{(1)} \otimes |\Psi\rangle_{(2)}$$

“Elementos de realidad” locales

ER EPR:

- Si, sin de ninguna manera perturbar un sistema, podemos predecir con certeza el valor resultante de la medida de uno de sus observables, entonces **existe un elemento de realidad física** [“ER EPR”] correspondiente a esa magnitud física.



- Los elementos de realidad EPR's (asumidos como **objetivos** (*reales*), **pre-existent**s en una región del espacio), responsables de que los resultados de los experimentos sean los que son, son **locales**: no pueden ser afectados por sucesos que tengan lugar en **regiones EPR separadas** ($\Delta s^2 < 0$) de aquélla en la que existen.

Teorema Einstein-Podolsky-Rosen

Hipótesis:

- 1) La MC es una teoría **correcta**.
- 2) Criterio suficiente para un **elemento de realidad local** EPR:

*“If, without in any way disturbing a system, we can predict with **certainty** (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then **there exists an element of physics reality** corresponding to this physical quantity”*

- 3) **Criterio necesario de compleción EPR** para una teoría:
“Every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory”
- 4) **Separabilidad** einsteiniana (**ER locales**):
-se introducen regiones espacio-temporales einsteinianamente separadas, o EPR separadas, ($\Delta s^2 < 0$), en las que "**la situación fáctica real**" dentro de una de ellas es independiente de lo que ocurra en la otra.
- 5) **Libre albedrío**: las decisiones de qué dirección se elige en cada medida son libres.

Teorema EPR

- **Conclusión EPR:**
“La Mecánica Cuántica es una teoría incompleta”
- Análisis formal:
 - el teorema es correcto.
- O asumimos que la MC es incompleta,
o abandonamos alguna(s) premisas.

La respuesta de Bohr (1935)

*“The wording of the above mentioned criterion of reality proposed by Einstein, Podolsky and Rosen **contains an ambiguity** as regards the meaning of the expression ‘without in any way disturbing a system’.[...] there is essentially the question of **an influence on the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behaviour of the system.** Since **these conditions constitute an inherent element of description of any phenomenon to which the term ‘physical reality’ can be properly attached,** we see that **the argumentation of the mentioned authors does not justify their conclusion that quantum-mechanical description is essentially incomplete**”*

- Cf. Bohr, Nature, 1935.

La respuesta de Bohr (1935)

- No se cuestiona esencialmente la validez o corrección del razonamiento EPR, sino que, simplemente, no se aceptan **sus premisas, que se declaran inválidas como conjunto**.
- **Bohr** rebate el criterio de realidad física EPR y su hipótesis implícita de separabilidad: el objeto bajo observación y el aparato de medida forman un todo indivisible no sujeto a análisis por separado (**concepción relacional del estado del sistema**).

La respuesta de Bohr

- **Concepción relacional:**
 - el sistema bajo observación y el aparato de medida forman **un todo indivisible no sujeto a análisis por separado**.
 - si dos experimentos son incompatibles, por ser complementarios entre sí los observables que miden, entonces, puesto que **un elemento de realidad sólo puede estar asociado con un montaje experimental de medición concreto**, no está justificado (“*es esencialmente ambiguo*”) considerar que esos dos observables corresponden a dos elementos de realidad existentes simultáneamente.

La respuesta ortodoxa:

NO al realismo separable (“local”)

- Importante: **Realismo + Separabilidad** van juntos:
 - se cuestiona, preferentemente, su conjunción.
- Pero no olvidemos que, *especialmente si no eres físico*, hay **otras posibilidades**:
 - inducción
 - no existe libre decisión alguna (afecta ER débiles)
 - idealismo epistemológico
 - violación de la causalidad relativista...

Así, ¡NO!

- “La medida en A influye en la medida en B, derivándose la correlación perfecta”
 - “Instantáneamente y a distancia, la medida en A *colapsa* el estado y cambia adecuadamente el espín de la partícula (¡error: suposición de un ER pre-existente!) en B” (¡relación causal con $v > c$!)
- ~~“La MC viola la localidad o causalidad relativista”~~



¡Conformes con la Relatividad!

La MC no viola la causalidad relativista

- **La MC es una teoría LOCAL**

IMPORTANTE: las correlaciones en un estado entrelazado

¡no conllevan señales $v > c$!

Bohr vs. Einstein

- **Bohr-Copenhagen:** Una realidad, en su caso, **dependiente de la observación y no-separable.**
- **Einstein, Podolsky, Rosen, Schrödinger:**
“**No reasonable definition of reality could be expected to permit this.**”

Elección de bando (por aquel entonces):

 ¡cuestión de preferencias filosóficas!

Bohr vs. Einstein

- Lo que a **Einstein** le preocupaba: el dilema entre **separabilidad-localidad** y **completitud**.
- El argumento nos fuerza a renunciar a una de las dos afirmaciones siguientes:
 1. La descripción a través de la función Ψ es **incompleta**.
 2. El **estado real** de **objetos espacialmente separados** es independiente de cada uno de los otros.

1964: Teorema de Bell

- En **1964** (9 años después de la muerte de **Einstein**), **J.S. Bell** va a establecer que los **ER EPR (locales)** **conducen a predicciones empíricas distintas a las de la MC:**

“Ninguna teoría de V.O. locales es predictivamente equivalente a la MC”

Hasta 1964

A elegir por **razones metafísicas** entre dos posiciones:

1. Sí al realismo local y NO a la **compleción** de la M.C.
2. Sí a la M.C., proclamada **completa**, con una realidad, en su caso, NO separable.

Desde 1964

A elegir por **razones empíricas^(*)** entre dos posiciones:

1. Sí al realismo local y **NO** a la **validez** de la **M.C.**
2. Sí a la M.C., proclamada completa, con **una realidad NO separable**; NO a la validez del realismo local.

(*) Pero los datos empíricos no estarían disponibles hasta los 1990s...

Epílogo 1: lo crucial para cada autor

- *“Quiero explicar el significado que le doy a mi requerimiento de mantener la realidad. [...] Lo que concebimos como existente (“real”) debiera de alguna forma estar localizado en el tiempo y en el espacio. Esto es, lo que es real en una parte del espacio, A, debiera (en teoría), ‘existir’ con independencia de lo que es creído como real en otra parte del espacio, B”*

- A. Einstein, 1948.

- *“No es nada probable que los conceptos fundamentales de las teorías clásicas deriven algún día en superfluos para la descripción de la experiencia física”*

“Las desacostumbradas características de la situación con las que nos enfrentamos en la Teoría Cuántica precisan de la mayor cautela respecto a todas las cuestiones de terminología. Hablar como si a menudo se hiciera la perturbación de un fenómeno por la observación, o incluso de la creación de atributos físicos a objetos mediante procesos de medida es propenso a confundir, dado que todas las afirmaciones implican una partida desde convenciones del lenguaje básico que aunque puede pensarse incluso que sean prácticos en pro de la brevedad, nunca pueden ser inequívocos”.

- - N. Bohr, 1958 y 1939.

Epílogo 2: sus predicciones...

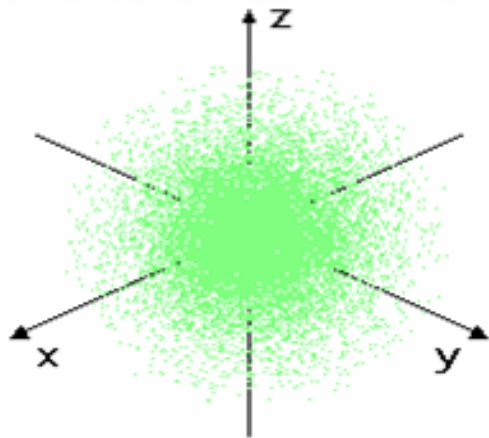
- *“Sigo creyendo en la posibilidad de construir un modelo de **la realidad**, es decir, de una teoría que represente todas **las cosas en sí mismas** y no sólo la **probabilidad de su ocurrencia**”* - **A. Einstein**
- *“No es nada probable que los **conceptos fundamentales de las teorías clásicas** deriven algún día en superfluos para la descripción de **la experiencia física**”* - **N. Bohr**
- *“The concept of complementarity introduced by Bohr into the interpretation of quantum theory has encouraged the physicists to use an ambiguous rather than an unambiguous language, to use the classical concepts in a somehow vague manner [...] When this vague and unsystematic use of the language leads into difficulties, **the physicist has to withdraw into the mathematical scheme and its unambiguous correlation with the experimental facts**”* - **Heisenberg (1958)**
- *“La mecánica cuántica: una gran dama que no ha cambiado sus principios en 80 [92] años”* - **F. Lalöe**

Epílogo 3: más opiniones...

- “*Einstein* fue un testarudo defensor del **principio de separabilidad**, que contemplaba como fundamental para las teorías de campo como la relatividad general. [...] *Bohr* fue un testarudo defensor de la integridad de la teoría cuántica, viendo en **el entrelazamiento** no una fuente de incoherencias sino la clave profunda de su complementaridad”.
“*Theirs was not a clash between a dogmatic bully and a senile old man. Theirs was a clash between two determined seekers after truth*”.
-D. Howard
- “El enfrentamiento entre *Einstein* y *Bohr* habría sido sólo la consecuencia de **un ‘gran malentendido’**”: *Einstein* oponiéndose a lo que creía, y no era, un intento por parte de *Bohr* de **eliminar la noción de realidad física**, siendo así que **sólo pretendía modificarla** en el sentido de **rechazar la separación absoluta entre objeto y sujeto**, característica de la física clásica.
-Von Weizsäcker
- “[The debate] also had (in my opinion) **one disastrous consequence**: because *Einstein* phrased his objections in purely classical terms, *Bohr* was compelled to reply in nearly classical terms, **giving the impression that in quantum mechanics, an electron is ‘really classical’**. [...] **This is a misconception**: the reason we cannot measure simultaneously the exact position and speed of an electron is because an electron does not have simultaneously an exact position and speed”.
-D. Styer

Bibliografía

- Icaza**, J.J.; *La construcción de la Mecánica Cuántica*, Univ. del País Vasco, Bilbao, 1991.
- Jammer**, M.; *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, Wiley-Interscience, 1974; *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, Nueva York, 1966.
- Kumar**, M.; *Quántum. Einstein, Bohr y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad*. Kairós, Barcelona, 2004.
- Mehra**, J., **Rechenberg**, H.; *The Historical Development of Quantum Mechanics*, 6 vol., Springer-Verlag, Nueva York, 1982.
- Waerden**, B.L. van der; *Sources of Quantum Mechanics*, Dover, Nueva York, 1967.
- Wheeler**, J.A. y Zurek, W.H., ed.; *Quantum Theory and measurement*, Princeton Univ., Princeton, 1983.



λαθε βιωσας



María C. Boscá