

A black and white portrait of J. Robert Oppenheimer, looking directly at the camera with a serious expression, his hand resting on his forehead.

J. Robert Oppenheimer
*Entre el átomo, la bomba y
las estrellas*

Segunda parte
Pablo D. Sisterna

El nacimiento de los infinitos cuánticos

Inicialmente **Heisenberg** propuso un artículo de a tres con **Pauli** y R.O., luego Pauli propuso un artículo de a dos con R.O., y finalmente, a su regreso a EEUU, terminó en un artículo de a uno:

R. Oppenheimer, *Note on the theory of the interaction of field and matter*, Phys. Rev. **35**, 461, 1930,

en el que descubrió que la **autoenergía** causa **desplazamientos infinitos de los niveles de energía atómica**, problema que recién se entendería 20 años después.

A los pocos meses publicó otro sobre el **Mar de Dirac**:

R.O., *On the theory of electrons and protons*, Phys. Rev. **35**, 562, 1930.

Recién retornaría a Europa 19 años después.

Simetrizando la antisimetría

En el verano de 1930 **Ehrenfest** estaba en **Ann Arbor, Michigan**, y viajó a **California** para trabajar con Oppenheimer. Juntos se plantearon lo siguiente:

¿Cómo demostrar que, si tenemos un compuesto de partículas de las cuales **cada componente** tiene la estadística de Fermi, entonces la **partícula compuesta** podría tener la estadística de Bose si estuviera compuesta de un **número par** de partículas? El resultado fue:

P. Ehrenfest & R.O., *Note on the statistics of nuclei*, *Phys. Rev.* **37**, 333, 1931.

Abstract: Del **principio de exclusión** de Pauli derivamos la regla para la **simetría de las funciones de onda** en las coordenadas del centro de gravedad de dos grupos estables similares de electrones y protones, y justificamos la suposición de que los grupos satisfacen las estadísticas de Einstein-Bose o Fermi-Dirac, según si el número de partículas de cada cúmulo es **par o impar**. Se ha demostrado que la regla deja de ser válida sólo cuando la **interacción entre los grupos es lo suficientemente grande** como para perturbar su movimiento interno.

Los años 30: la vida entre Caltech y Berkeley

Me encontré enteramente en **Berkeley** y casi enteramente en **Caltech** como **el único que entendió** de qué se trataba esto [los recientes desarrollos en física], y el **don para explicar cosas técnicas** que mi profesor de inglés de secundaria había anotado entró en acción. No comencé a hacer escuela; no comencé a buscar estudiantes. Comencé realmente como **propagador de la teoría que amaba**, sobre la cual seguí aprendiendo más, y que no se entendía bien pero que era muy rica.



Oppenheimer en Caltech

Enseñándole a todo el mundo

*El patrón no era el de alguien que se hace cargo de un curso y enseña a los estudiantes que se preparan para una variedad de carreras, si no el de **explicar primero a los profesores, al personal y a los colegas** y luego a cualquiera que quisiera escuchar, **de qué se trataba todo esto**, qué se había aprendido, de cuáles eran los problemas no resueltos.*

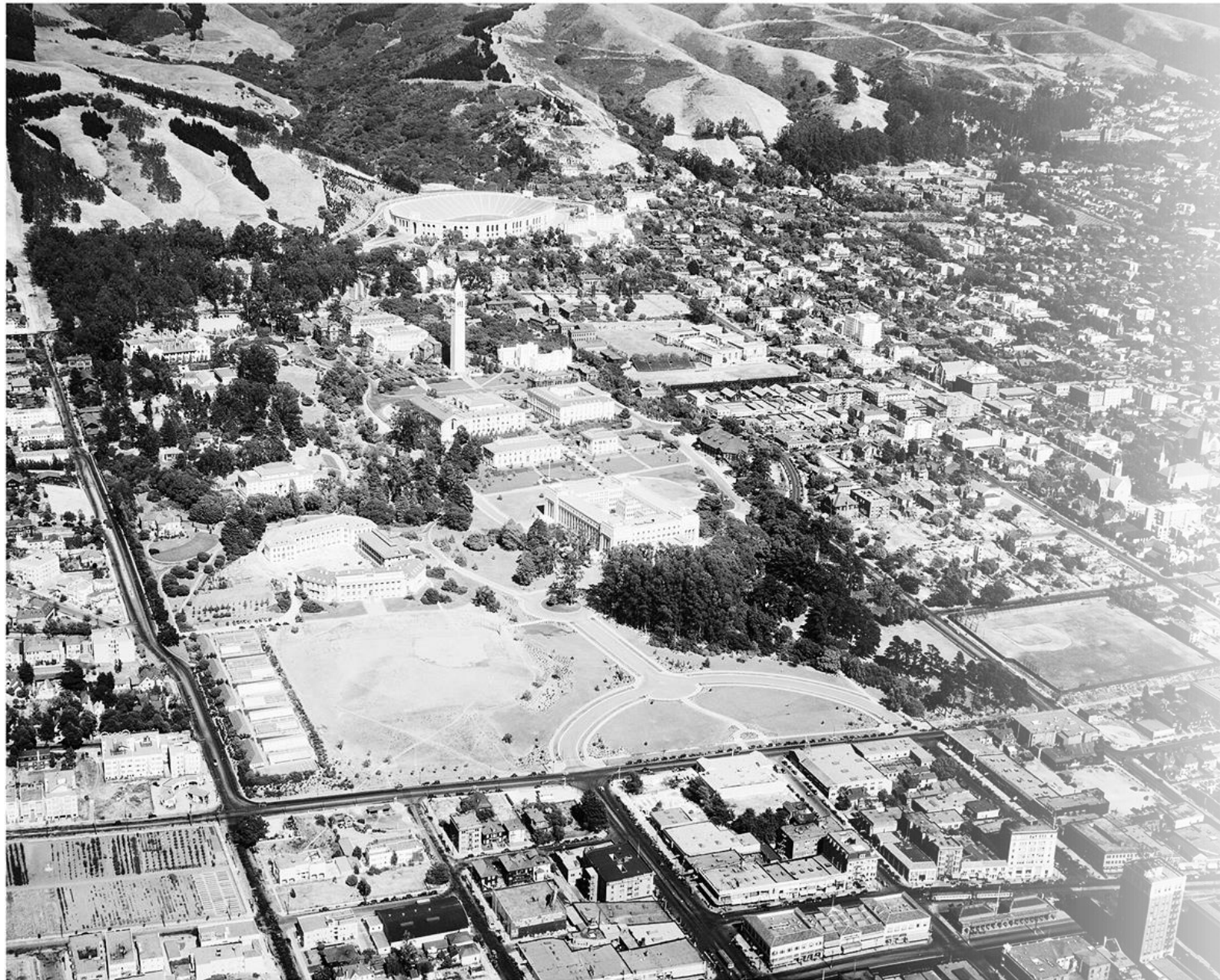
*Creo, por todo lo que escuché, [que] yo era **un profesor muy difícil**, que comencé como un profesor que hacía las cosas muy difíciles. Tuve algo de ayuda; recuerdo el consejo de **Pauling**, casi con certeza en el '28.*

Un extraño buen consejo

*Él (Pauling) dijo: “Cuando quieras dar un seminario o conferencia, decide de qué quieres hablar y luego encuentra algún tema agradable de contemplación que **no está ni remotamente relacionado con tu conferencia** y luego interrumpe aquello de vez en cuando para decir **algunas palabras**.” De modo que puedes ver lo malo que debe haber sido.*

Entrevista de R.O. con T. S. Kuhn, 20 de noviembre de 1963.

El campus de Berkeley en 1930



La llegada de un físico experimental clave

En 1928, **Ernest O. Lawrence** fue nombrado profesor asociado en Berkeley, y en 1930 construyó los dos primeros modelos de los luego llamados **ciclotrones**, cuyos sucesivos modelos serían claves para el trabajo de Oppenheimer, con quien desarrollaría una amistad.

R.O. y Lawrence de vacaciones a principios de la década de 1930 en **Perro Caliente**, el “rancho” de seis acres con un arroyo de Oppenheimer, ubicado en una pradera montañosa al noreste de Santa Fe, Nuevo México. Su nombre se debía a la exclamación de Oppenheimer cuando supo que podía arrendar la propiedad: ***¡hot dog!***

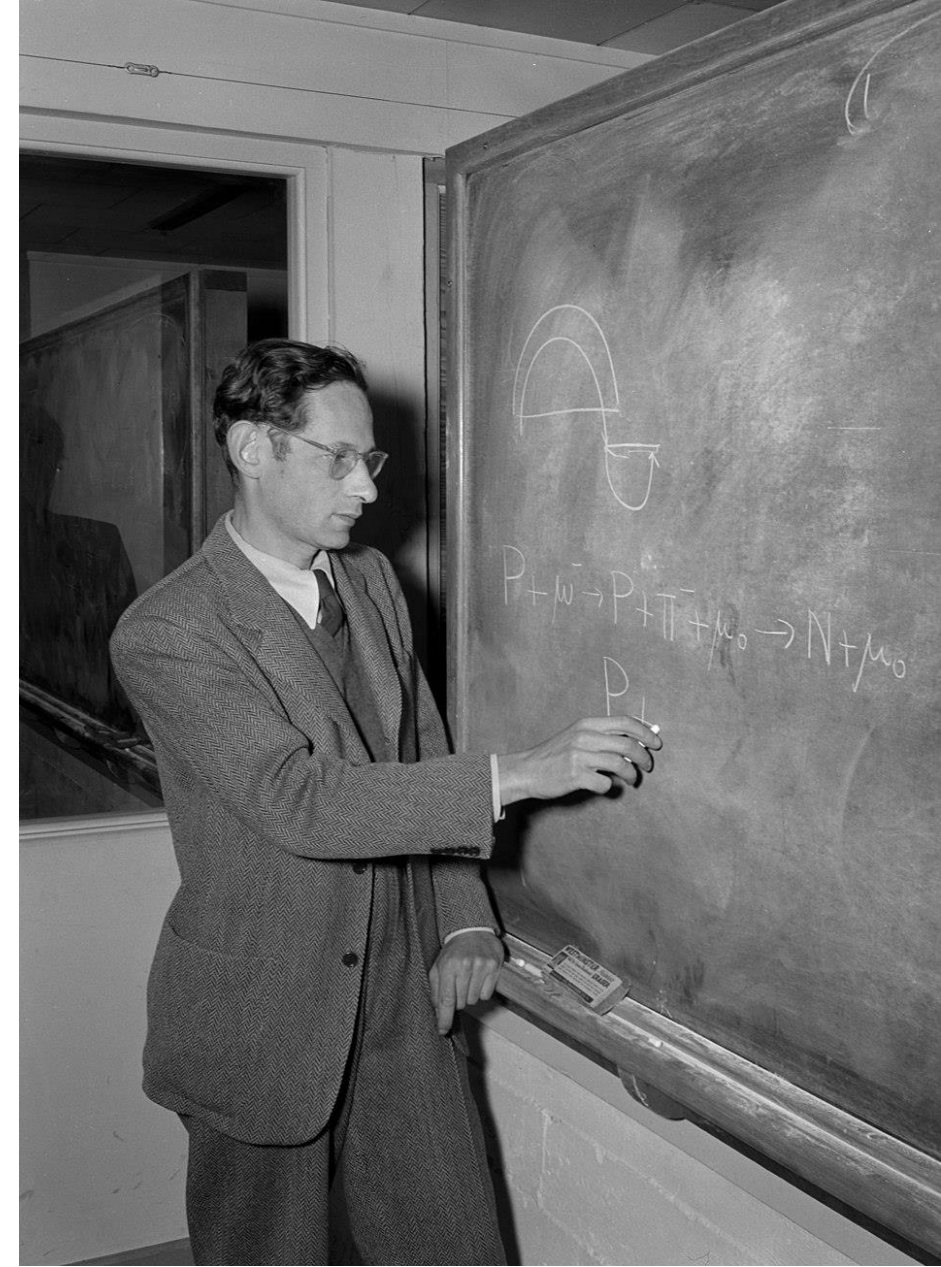


Ernest Orlando Lawrence:
Canton, Dakota del Sur,
1901 - Palo Alto, California,
1958; Premio Nobel de
Física 1939 “por la creación
y el desarrollo del ciclotrón”

Del terror a la popularidad

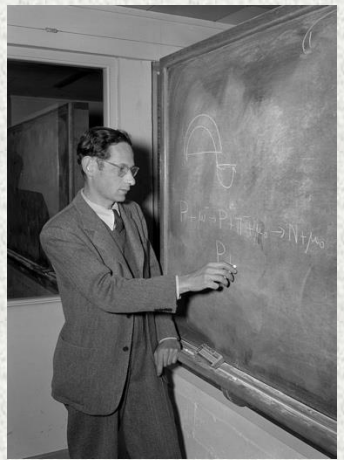
En 1934, **Robert Serber** llegó a Berkeley como asistente de investigación postdoctoral de Oppenheimer. Ya mayor recordaba lo siguiente:

*Cuando llegué a Berkeley, el curso de mecánica cuántica de Oppie estaba bien establecido. **Oppie era rápido, impaciente y tenía una lengua afilada.** Se decía que en los primeros días de su enseñanza había aterrorizado a los estudiantes. Ahora, después de cinco años de experiencia, se había **suavizado**, si sus primeros alumnos eran de creer.*



Robert Serber (Filadelfia, 1909 – Manhattan, 1997), poco después del anuncio del descubrimiento de mesones fabricados a máquina por **Gardner y Lattes** en febrero de 1948.

Un curso de mecánica cuántica para regresar



*Su curso fue un logro inspirador tanto como educativo. Transmitió a sus alumnos un **sentimiento de la belleza de la estructura lógica de la física** y un entusiasmo en el desarrollo de la ciencia. Casi todos escucharon el curso más de una vez, y Oppie ocasionalmente tenía dificultad para evitar que los estudiantes vengan por tercera vez. Una mujer rusa **intentó volver por cuarta vez**, y venció los esfuerzos de Oppie por disuadirla, iniciando una huelga de hambre. [Sus alumnos] llevaron [el curso], cada uno en su propia versión, a muchos campus.*

Recuerdos de reuniones memorables

La forma de trabajar de Oppie con sus estudiantes de investigación también fue original. Su grupo estaba formado por **ocho o diez estudiantes de posgrado y alrededor de media docena becarios posdoctorales**. Se reunía con el grupo una vez al día en su oficina. Un poco antes de la hora señalada, sus miembros llegaban y se disponían en las mesas y en las paredes. **Oppie entraba y hablaba con uno tras otro** el estado del problema de investigación del estudiante, mientras los demás escuchaban y ofrecían comentarios. Todos estuvieron expuestos a una amplia gama de temas. Oppenheimer estaba interesado en todo, y un tema tras otro era introducido y coexistía con todos los demás. En una tarde podríamos discutir **electrodinámica, rayos cósmicos, astrofísica y física nuclear**.

R. Serber con R. Crease, *Peace and War*, p. 42, Columbia University Press, New York, 1998.

Bailando y leyendo a Platón en griego

*... Los ferries de vuelta a Berkeley no solían funcionar muy a menudo tarde a la noche, y esto requería **pasar el tiempo esperándolos en los bares y discotecas** cerca del muelle del ferry. Frecuentemente perdimos varios ferries.*

*... Celebramos periódicamente seminarios conjuntos con **Felix Bloch** (1905-1983, futuro Premio Nobel de Física por el desarrollo de nuevos métodos en la medición precisa de efectos magnéticos nucleares; conocido por las “ondas de Bloch” para describir electrones en sólidos) y sus estudiantes de Stanford. Después, Oppie frecuentemente invitaba a todo el séquito a **cenar en Jack's en San Francisco**. Estos eran días posteriores a la depresión, y los estudiantes eran pobres. El mundo de la buena comida y buenos vinos y una vida elegante estaba lejos de la experiencia de muchos de ellos, y Oppie les estaba presentando **una forma de vida desconocida**. Adquirimos algo de su gusto. Ibamos juntos a conciertos y escuchábamos música de cámara. Oppie y Arnold Nordsieck (1911-1971, postdoctorando) **leían a Platón en el griego original**. Hubo muchas fiestas nocturnas donde **bebimos y hablamos y bailamos hasta tarde**, y donde, cuando Oppie estaba suministrando la comida, los novicios padecieron el **chile picante** que el ejemplo social les exigía comer.*

R. Server en *Oppenheimer*, p. 4, (Scribner's, New York 1969).

Personal del Laboratorio de Radiación de la Universidad de California (incluidos **Robert R. Wilson** y los premios Nobel **Ernest Lawrence**, **Edwin McMillan** y **Luis Alvarez**) sobre el yugo magnético del ciclotrón de 60 pulgadas (152 cm), 1938.

Oppenheimer sostiene una pipa en la fila superior, justo a la derecha del centro.



Quantum electrodynamics blues

Oppenheimer publicó 73 artículos de física, 51 de ellos durante sus años en California, 1929-1942, sobre temas de **teoría cuántica de campos, física de partículas y teoría de rayos cósmicos, física nuclear y cosmología**.

A partir de sus resultados de 1930 antes citados y lo largo de toda la década de 1930 R.O. pensó que la **QED estaba mal**, no sólo en sus infinitos sino también en sus predicciones finitas. Como comentó Serber:

*Esta visión influyó en nuestro trabajo... Difícilmente podía escribir un artículo **sin un lamento**... Una fe ingenua podría habernos hecho más decididos en tratar de **comprender los problemas reales** de la QED.*

Un mar para solucionar un problema cuántico

En su artículo de 1928 Dirac planteó el problema de la estabilidad de un electrón que, al interactuar con radiación, podría saltar a **niveles de energía negativos**.

En **P. A. M. Dirac**, *A theory of electrons and protons*, *Proc. Roy. Soc.* **A126**, 360 (1930) y *On the annihilation of electrons and protons*, *Proc. Camb. Phil. Soc.* **26**, 361 (1930), propuso que los electrones con energía positiva no pueden caer a niveles negativos porque **todos los estados con energía negativa están ocupados**, excepto quizá unos pocos con velocidad pequeña (agujeros).



1930 y el nacimiento de las antipartículas

Estos agujeros se comportan como **partículas con números cuánticos opuestos**, en particular energía y carga positivas.

En ese entonces sólo se conocía el protón como partícula con carga positiva y Dirac recuerda que **no había buena predisposición para nuevas partículas fundamentales**, de ahí los títulos de los artículos de 1930.

Dos mares de Dirac para Oppenheimer

J. R. Oppenheimer, *Phys. Rev.* **35**, 562 (1930), comentó que las dificultades desaparecen si se hace:

*la suposición de **dos partículas elementales independientes** de carga opuesta y **masa diferente** (electrones y protones) y se mantiene la hipótesis de que la razón por la cual las transiciones a estados de energía negativa no ocurren, ya sea para el electrón o para el protón, es que todos esos estados están ocupados.*

Vemos aquí que Oppenheimer fue **el primero en predecir implícitamente la existencia del positrón**, explícitamente predicho por Dirac en 1931 y descubierto en 1932, y del **antiprotón**, ¡descubierto en 1955!

El positrón, ¿un “agujero cósmico”?

I. Tamm, *Z.f.Phys.* **62**, 545 (1930): la aniquilación electrón-protón en los átomos se produciría a una velocidad **demasiado rápida** como para que sea consistente con la estabilidad observada de la materia ordinaria.

Por ende, en 1931 Dirac cambió de opinión y propuso que los agujeros tendrían que aparecer como **un nuevo tipo de partícula cargada** con la misma masa que el electrón.

C. D. Anderson, *Science* **76**, 238 (1932); *Phys. Rev.* **43**, 491 (1933): el 2 de agosto de 1932 se observó una trayectoria de **rayos cósmicos** en una cámara de niebla de Wilson con un campo magnético de 15 kG, con la particularidad de que se curvaba en una dirección compatible con una carga positiva, pero con un rango diez veces mayor al esperado para un protón, compatible con el no-electrón (agujero, o **positrón**) positivo de Dirac.

El espín se acerca a la estadística

En 1931, R.O. intentó obtener una ecuación (diferencial de primer orden) para la luz, similar en algunos aspectos a la ecuación de Dirac para el electrón: *Note on Light Quanta and the Electromagnetic Field*, *Phys. Rev.* **38**, 725, 1931.

No lo pudo lograr, pero en el proceso reconoció la **diferencia fundamental** entre partículas con espín semi entero y aquellas con espín entero, una idea que conduciría a la teoría de las **relaciones entre el espín y la estadística**.

Una historia de dos partículas neutras

R.O. & F. Carlson, *On the Range of Fast Electrons and Neutrons*, *Phys. Rev.* **38**, 1787, 1931.

R.O. & F. Carlson, *The Impacts of Fast Electrons and Magnetic Neutrons*, *Phys. Rev.* **41**, 763, 1932.

- La física nuclear se encontraba en un estado de **gran confusión** con los espines nucleares y las estadísticas.
- **Energías faltantes** en los espectros de decaimiento β llevaron a Pauli en diciembre de 1930 a proponer una nueva partícula, a la que entonces llamó **neutrón**, pero que en realidad **era otra cosa**.

Quizá... demasiado pocas partículas fundamentales

- Inicialmente Pauli creía erróneamente que los núcleos estaban formados por protones, electrones y *sus* neutrones (o sea *nuestros* futuros neutrinos).
- Los *neutrones magnéticos* en el artículo de Oppenheimer-Carlson se referían al neutrón de Pauli (futuro *neutrino*), del que Oppenheimer había oído hablar a Pauli en la escuela de verano de Ann Arbor de 1931.

¿Neutrinos dentro del núcleo? (pregunta anacrónica)

J. Chadwick, *Possible Existence of a Neutron*, *Nature* **129**, 312, 1932, anunció el “moderno” neutrón después del primero y antes del segundo de los artículos de Oppenheimer & Carlson. En el segundo de ellos leemos:

*Pauli supuso que tales neutrones podrían formar un **tercer elemento en la construcción de núcleos**, además de los electrones y protones; de esta manera **se podrían entender el espín anómalo y las estadísticas de ciertos núcleos**, y el aparente fracaso de la conservación de la energía en la desintegración de partículas beta...*

*Sin embargo, se puede suponer que **el neutrón tiene una masa muy cercana a la del protón**...*

Y... ¿dónde está la conservación de la energía?

*Tales neutrones ayudarían a explicar el espín anómalo y las estadísticas de los núcleos, aunque **no arrojarían luz sobre las desintegraciones de los rayos beta**. La evidencia experimental sobre la penetrante radiación de berilio (bombardeo de partículas α por el cual $\text{Be}^8 \rightarrow \text{C}^{12} + n$) sugiere que los neutrones de masa casi protónica sí existen; y dado que nuestros cálculos pueden llevarse a cabo **sin especificar la masa o el momento magnético del neutrón**, consideraremos la partícula más general que satisface la ecuación de onda propuesta por Pauli.*

Probablemente esta haya sido la **primera vez** que se hay afirmado que el neutrón resuelve el problema del espín y la estadística nuclear, pero que la conservación de la energía en el decaimiento β es **un tema a resolver por separado**.

Carl D. Anderson y el descubrimiento del positrón

SCIENCE NEWS LETTER for February 25, 1933

115

PHYSICS

"Positron" Confirmed As New Particle of Matter

Discovery of California Physicist Proved Reality As Positive Electron Is Found at Cavendish Laboratory

THE EXISTENCE of a positive electron has been confirmed and it will be christened the "positron."

The discovery of this fourth fundamental particle and atomic building block was made last fall by the American physicist, Dr. Carl D. Anderson, (SNL, Sept. 24, 1932, p. 197) and now physicists at famous Cavendish Laboratory, Cambridge, England, have announced confirmation.

Positive electrons were found in cosmic rays by Dr. P. M. S. Blackett, working with G. Occhialini. Their method makes the new positive electron rays photograph themselves. It has a life of only a fraction of a second and meets

Rutherford of Nelson has come the demonstration of the reality of the positive electron, confirming the discovery by Dr. Anderson.

The fundamental corpuscles or particles of matter may be listed as follows:

Electrons—Units of electricity, negatively charged, discovered by Sir J. J. Thomson in 1897, widely recognized in all electrical phenomena, considered to make up the "outer shell" of atoms or to revolve about atomic hearts like satellites about a sun, in the last few years proved to have many of the properties of light and partake of the nature of a wave motion, called beta rays when issued from radioactive substances.

urged by the hospital authorities, but was undertaken on the express wish of the patients and their relatives. The nine patients successfully operated on ceased to discharge typhoid or paratyphoid bacilli after the operation.

The lot of the typhoid carrier today is little better than that of the leper in the past. The typhoid or paratyphoid bacilli lurking in the gall-bladder of the carrier are constantly being discharged, and if she handles food in any way (the carrier is nearly always a woman for some unknown reason) the odds are she will sooner or later infect her neighbors and kill some of them.

Science News Letter, February 25, 1933

ARCHAEOLOGY

History Pushed Back In America and Asia

RECORDS in American history are being made and broken fast, just now.

Not long ago, Dr. Harold S. Colton of the Museum of Northern Arizona reported that his museum had set United States history back 76 years by

Primeros pasos para entender los rayos cósmicos

J. Oppenheimer & **Milton Spinoza Plesset**, *On the Production of the Positive Electron*, Phys. Rev. **44**, 53, 1933, primeros en calcular la producción de **pares electrón-positrón** “cerca del umbral” y a altas energías. Escribieron:

*Si permitimos a rayos gamma de energía γ caer sobre un núcleo, deberíamos esperar que aparezcan pares; la energía cinética de los pares sería $\gamma - 2mc^2$; y el efecto podría ser interpretado como una **absorción fotoeléctrica del rayo gamma por el par** (léase, absorción del γ por el electrón del mar de energía negativa); en el proceso el núcleo necesariamente adquiere un pequeño impulso de retroceso.*

Aunque observaron discrepancias entre sus cálculos y las observaciones de rayos cósmicos, **sentaron ideas** que poco después serían desarrolladas por ellos y otros, como por ejemplo la siguiente **cadena**:

Electrones de alta energía que atraviesan la materia $\rightarrow$ fotones $\rightarrow$ pares $e^- - e^+ \rightarrow$ más fotones $\rightarrow$ más pares...

¿Una revolución ontológica?

Wendel Furry & R. Oppenheimer, *On the Theory of the Electron and Positive*, Phys. Rev. **45**, 343, 1934; *On the Limitations of the Theory of the Positron*, *Íbid.* **45**, 903, 1934.

De acuerdo con las ideas de **segunda cuantización** o el procedimiento de **cuantización canónico** de Heisenberg y Pauli, el valor de expectación del **Hamiltoniano** (energía del sistema) no es definido positivo.

Para *curar* este problema, Furry y Oppenheimer retomaron la idea de Dirac de que el positrón es la **ausencia de un electrón** de energía negativa.

Definieron la (operación de) **creación de un positrón** con energía positiva como equivalente a la (operación de) **aniquilación de un electrón** de energía negativa.

Derivaciones de la teoría electrón-positrón...

- C. Lauritsen & R.O., *On the Scattering of the Th C'' γ -Rays*, *Phys. Rev.* **46**, 80, 1934: análisis de la radiación de aniquilación de **positrones absorbidos en la materia**.
- R.O., *Note on Charge and Field Fluctuations*, *Phys. Rev.* **47**, 144, 1935: cálculo de las **fluctuaciones de campo** que surgen de la posibilidad de crear pares positrón-electrón.

Th C'' es una nomenclatura antigua para denotar el sexto eslabón en la cadena de desintegración del Torio 232, que consiste en el ^{220}Rn (radón-220).

... y la existencia de algún miembro misterioso de los rayos cósmicos

- R.O., *Note on the Production of Pairs by Charged Particles*, *Phys. Rev.* **47**, 146, 1935: cálculo de la conversión interna por producción de pares de la **radiación emitida en el impacto de partículas cargadas**.
- R. O., *Are the formulae for the absorption of high energy radiations valid?*, *Phys. Rev.* **47**, 44, 1935: análisis de las discrepancias entre la predicción teórica y el experimento para la **absorción de electrones de rayos cósmicos** y rayos gamma. Volvió a señalar que el mecanismo *shower* provocaría una rápida degradación de partículas de alta energía, y concluyó que, o bien las fórmulas estaban mal o había **algún otro componente menos absorbible**.

Las lluvias de e^- y e^+ , los rayos cósmicos suaves, y los duros, o sea, el futuro muón

J. F. Carlson & J. R. Oppenheimer, On **Multiplicative Showers**, Phys. Rev. **51**, 220, 1937:

*Uno puede concluir, o bien que las estimaciones teóricas de la probabilidad de estos procesos sean inaplicables en el dominio de las energías de radiación cósmica, o que la penetración real de estos rayos debe atribuirse a la presencia de un **componente distinto** de electrones y fotones. La segunda alternativa es **necesariamente radical**; dado que los experimentos de cámara de niebla y contadores muestran que partículas con la misma carga que el electrón negativo pertenecen al **componente penetrante de la radiación**; y si estos no son electrones, son **partículas desconocidas hasta ahora para la física**.*

Mesones

- S. Neddermeyer & C. D. Anderson, *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*, *Phys. Rev.* **51**, 884, 1937: primeros anuncios de observaciones de mesones en rayos cósmicos.
- **Un mes después**: R.O. & R. Serber, *Note on the Nature of Cosmic-ray Particles* (mismo título que el anterior), *Phys. Rev.* **51**, 1113, 1937, sugirieron que estas partículas eran las sugeridas por **Hideki Yukawa** (primera mención en Occidente) para explicar las fuerzas nucleares (aunque eran conscientes de la **paradoja** de que una componente **penetrante** de los rayos cósmicos fuera la responsable de las interacciones nucleares).

Observaron que las nuevas partículas **no son rayos cósmicos primarios**, sino que son producido por rayos gamma en colisiones nucleares, así como por producción de pares en la atmósfera superior, conformando el **componente duro** y penetrante.

- Ver H. Yukawa, *On the Interaction of Elementary Particles. I*, *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan* **17**, 48, 1935.

Rayos cósmicos con espín incierto

*Aunque el artículo de Yukawa apareció en 1935, **nunca habíamos visto una referencia a él** y sólo sabíamos de él porque Yukawa había enviado a Oppenheimer una reimpresión. Un propósito de nuestra nota (“letter” en el original) era llamar la atención sobre ello.*

Recuerdo de Serber en **R. Serber con R. Crease**, *Peace and War*, Columbia University Press, New York, 1998.

R. Oppenheimer, H. Snyder & R. Serber, *The Production of Soft Secondaries by Mesotrons*, Phys. Rev. **57**, 75, 1940, volvieron a la cuestión de las lluvias de rayos cósmicos producidas por el componente duro. Se creía que los “mesones cósmicos” tenían espín 1, pero señalaron que en ese caso los mesones **irradiarían más rápido de lo observado**.

Algunos hechos más sobre la prehistoria de muones y piones

Estudios más detallados, realizados por los alumnos de Oppenheimer **Robert Christy** y **Shuichi Kusaka** (1916-1947), confirmaron esta conclusión.

Oppenheimer, en *On the Spin of the Mesotron*, Phys. Rev. **59**, 462, 1941, donde comenta los trabajos de Christy y Kusaka, dedujo que los mesones **deberían ser pseudoescalares** (cosa que los piones son).

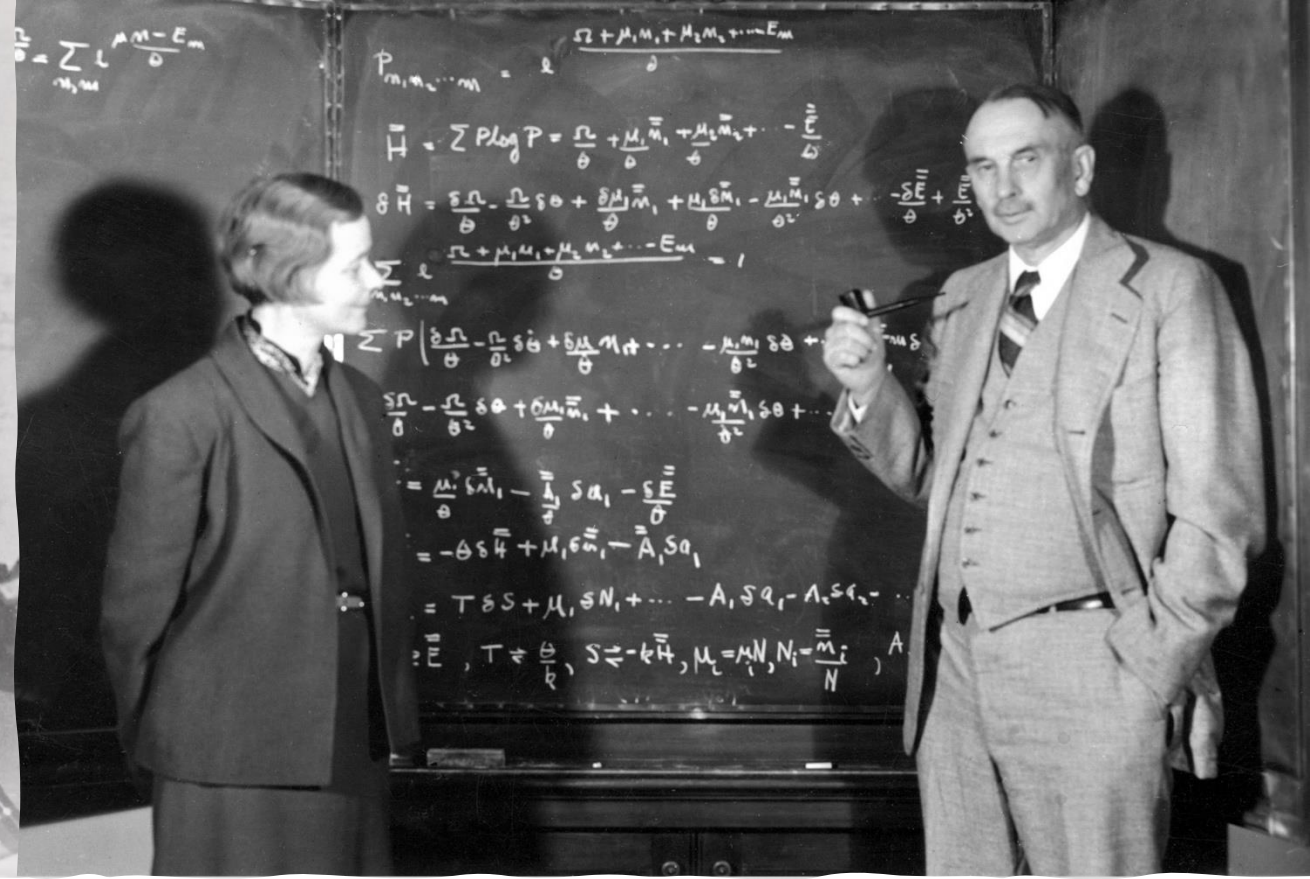
En mismo año, Oppenheimer y Christy sugirieron que el componente blando a gran altitud podría explicarse suponiendo que, además de los mesones penetrantes, había aproximadamente el mismo número de **mesones neutros** (los futuros π^0), que se desintegran rápidamente en electrones y positrones.

En R.O., *On the Selection Rules in Beta-Decay*, Phys. Rev. **59**, 908, 1941, especuló sobre una **posible pequeña masa en reposo del neutrino**.



Richard Chace Tolman (West Newton, EEUU, 1881 – Pasadena, 1948)

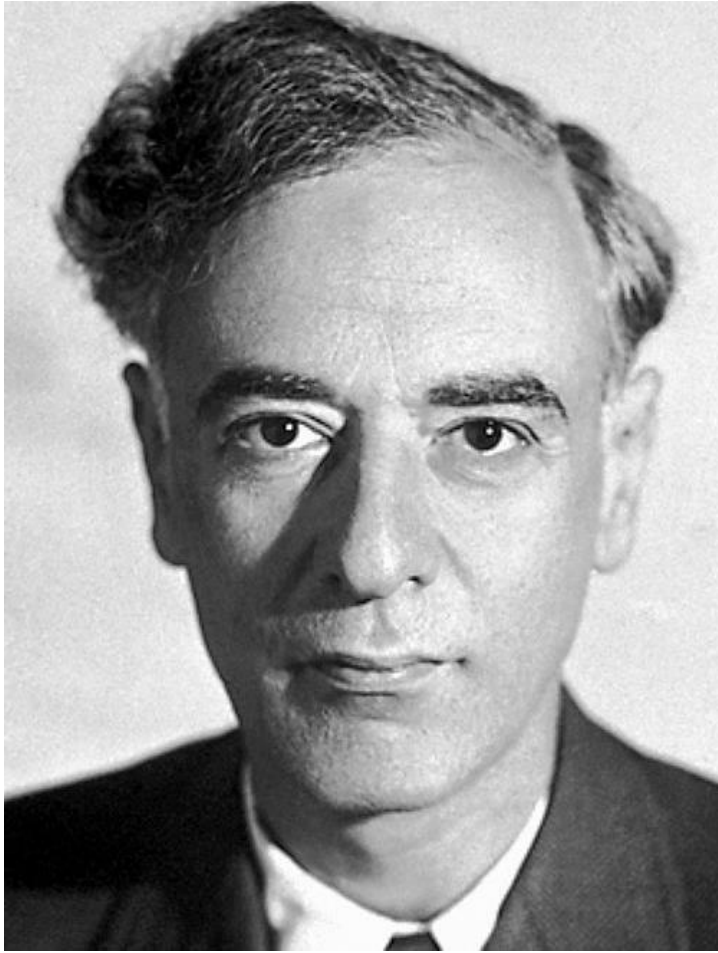
Nuevos intereses gravitacionales



R. Tolman y su esposa, la psicóloga **Ruth Sherman Tolman**, c. 1925

Las relaciones de Oppenheimer en Pasadena con el personal del **Observatorio de Monte Wilson**, y con **Richard Tolman** en particular, despertó su interés por la astrofísica y la Relatividad General.

La estrellas de neutrones entran en escena



Origin of Stellar Energy

It is well known that matter consists of atoms. Nevertheless it can be shown that if a body of very large mass, this usual 'atomic' matter can become unstable. This is in the fact that the 'electronic' matter does not lead to extremely great densities. At such densities electrons form a degenerate gas of immense pressure. On the other hand, it is to be seen that matter can go into a state which is much more compressible—the nuclei and electrons have become neutrons.¹ Even if we assume that the repulsion between neutrons is of the order of magnitude that is, 10^{14} gm./cm.³, and the pressure of a gas consisting of neutrons is much smaller than that of an electronic gas of the same density, the mass of the neutrons.

L. D. Landau, *Origin of Stellar Energy*, *Nature* **141**, 333, 1938: primera estimación de la **masa límite de una estrella de neutrones** en $M_{NS} < 0,001 M_{\odot}$; sugerencia de que cada estrella tiene un núcleo interior de neutrones.



Lev Davidovich Landau

Bakú, Azerbaiyán, Imperio Ruso, 1908 - Moscú, Unión Soviética, 1968

Foto en prisión, 1938-9

La estrellas de neutrones se agrandan

- **R.O. & R. Serber**, *On the Stability of Stellar Neutron Cores*, *Phys. Rev.* **54**, 540, 1938: estudio preliminar acerca de la **influencia relativa de las fuerzas nuclear y gravitacional** en las estrellas de neutrones, donde mejoraron el tratamiento de Landau y obtuvieron $M_{NS} < 1/6 M_{\odot}$.

Resultado de las discusiones entre Tolman y Oppenheimer y sus colaboradores:

- **R. Tolman**, *Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid*, *Phys. Rev.* **55**, 364, 1939.

La ecuación de Tolman-Oppenheimer-Volkoff

$$\frac{dP}{dr} = -(P + \rho) \frac{m(r) + 4\pi r^3 P}{r[r - 2m(r)]}$$

- **R.O. & George Volkoff**, *On Massive Neutron Cores*, *Phys. Rev.* **55**, 374, 1939, sientan las bases de una **teoría relativista general de la estructura estelar** (notar que aparece en el mismo número del PR que el artículo de R.O. & Volkoff; de hecho, los autores se citan mutuamente).
- Modelo: **estrella esférica estática** que consta de un gas ideal de Fermi de neutrones.
- La estrella es estable para $M_{NS} < 1/6 M_{\odot}$.
- La estimación actual para el límite es de entre $1,5$ y $3 M_{\odot}$, y se llama **Límite de Oppenheimer-Volkoff**.

1939: El nacimiento de la física de los agujeros negros

Medio año después se publica **R.O. & Hartland Snyder**, *On Continued Gravitational Contraction*, *Phys. Rev.* **56**, 455, 1939. La primera línea de su resumen dice:

*Cuando **todas las fuentes termonucleares de energía se agotan**, una estrella suficientemente pesada colapsará. A menos que una fisión debida a la rotación, o la radiación de masa, o la expulsión de masa por radiación, reduzca la masa de la estrella al orden de la del Sol, **esta contracción continuará indefinidamente**.*

“Agujeros negros” sería un nombre que propondría **John Archibald Wheeler** en una conferencia celebrada en el otoño de 1967 en el **Instituto Goddard de Estudios Espaciales de Nueva York** (J. Wheeler, *Am. Scholar* **37**, 248, 1968; *Am. Scientist* **56**, 1, 1968).

En aquella época los **púlsares** acababan de ser descubiertos, y las estrellas de neutrones y los agujeros negros **dejarían poco a poco de ser curiosidades meramente teóricas**.