

Oppenheimer y los inicios de la era nuclear

José Adolfo de Azcárraga

Oppenheimer fue una personalidad tan compleja como excepcional. Nunca un proyecto como conseguir las bombas nucleares aunó a tantos científicos extraordinarios. Pero el tiempo transcurrido no debe hacer olvidar esta historia ni sus consecuencias: una mejor comprensión del peligro nuclear puede contribuir a evitarlo.

“Physicists need to be talking about nuclear weapons” (Frank N. von Hippel, Princeton Univ., 2023).
<https://physicistscoalition.org>

1. J. Robert Oppenheimer: un perfil

J. Robert Oppenheimer (1904-67) fue hijo de un inmigrante alemán, hombre de negocios, y de una maestra y pintora hija de alemanes, nacida en NY y que estudió en Europa; ambos eran judíos y cultos. Su madre, Ella Friedman, fue probablemente la responsable de la colección artística de los Oppenheimer, que incluía tres van Goghs, un Renoir, dibujos de Picasso y de Édouard Vuillard (uno de los *nabis*) y un grabado de Rembrandt. La *J* del nombre de Oppenheimer, inicial que usaba sin completarla y que intrigó hasta al FBI, corresponde a Julius, el nombre de su padre; Oppenheimer sólo escribía la inicial, e incluso afirmó que la *J* no significaba nada.

Oppenheimer tuvo una juventud privilegiada. Estudió en la *Ethical Culture School* de Manhattan, un elitista colegio privado fundado en 1895 por judíos adinerados insatisfechos con el nivel de las demás escuelas. Allí se graduó en 1921 y de ella recordó especialmente dos buenos profesores, el de ciencias (física y química) y el de inglés. Fue aceptado en Harvard en 1921, justo un año antes de que la universidad introdujera medidas destinadas a limitar en la práctica el número de estudiantes judíos. Se graduó en 1925 —en tres años— *summa cum laude* en química aunque influido por Percy Bridgman (1882-1961, Nobel 1946), el introductor del *operacionalismo* en ciencia, su verdadero interés era la física. Después, Oppenheimer se trasladó a Europa: Cambridge en 1924 (*Christ's Coll.*, el *College* de Darwin), donde fue muy infeliz; Gotinga (Göttingen) y luego Leiden, donde Paul Ehrenfest (1880-1933) lo envió a Zúrich para que Pauli ‘lo metiera en cintura’. Estas estancias le bastaron para dominar los correspondientes idiomas y para traerse de Leiden el apelativo cariñoso *Opje*, *Oppie* en USA. Wolfgang Pauli (1900-58, Nobel 1945) era frecuentemente crítico con los demás; su sarcasmo, para desgracia de sus interlocutores, era legendario. De un científico llegó a decir: “para ser tan joven, ha contribuido bien poco”. Es posible que Pauli contagiara algo de su estilo a Oppenheimer durante su estancia en Zúrich. Por su parte, Oppenheimer dijo de Pauli que era “la única persona que había conocido igual a su propia caricatura”.

En Gotinga coincidió en la misma pensión con Dirac (1902-84, Nobel 1933) y conoció a Werner Heisenberg (1901-76, Nobel 1932), Enrico Fermi (1901-54, Nobel 1938) y Edward Teller (1908-2003). Allí se doctoró en 1927 con Max Born (1882-1970, Nobel 1954), el introductor de la denominación ‘mecánica cuántica’ y creador allí de una gran escuela de física teórica. Ya entonces lamentaba Born que Oppenheimer interrumpiera a los conferenciantes comentando “esto se podría hacer mejor así, etc”. El físico e historiador Jeremy Bernstein considera que la escuela de Born fue el modelo que inspiró a Oppenheimer para crear después la suya propia en California. De hecho, tras regresar a los Estados Unidos y antes de la llegada de los grandes científicos europeos, los estudiantes estadounidenses que deseaban formarse en física cuántica tenían que hacerlo en el departamento de física de la universidad de California-Berkeley o en el *California Institute of Technology* (*CalTech*, en Pasadena) con Oppenheimer, quien era *full professor* en ambas instituciones desde 1936. En opinión de su amigo Hans A. Bethe (1906-2005, Nobel 1967), “Oppenheimer creó la primera y mayor escuela de física teórica que nunca conocieron los Estados Unidos”.

Oppenheimer fue una figura compleja y trágica; no sorprende que prefiriera Dostoievski a Tolstoi. Era excéntrico, culto, carismático, con extraordinario liderazgo, capaz de leer de un tirón los tres volúmenes de *Das Kapital* en alemán o poesía en varios idiomas, griego y sánscrito incluidos. Era



Max Born



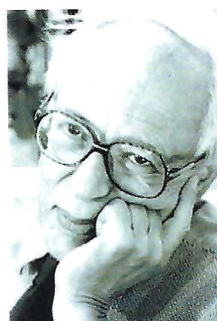
Wolfgang Pauli

“muy superior [en Los Alamos] a todos nosotros” según Bethe y Edward Teller; un genio, en opinión del general Leslie Groves (1896-1970), el jefe militar del Proyecto Manhattan (sec. 5). También, todo hay que decirlo, Oppenheimer tuvo períodos de depresión e inestabilidad en su juventud: en unas vacaciones en Córcega afirmó que debía regresar inmediatamente a Cambridge porque había dejado una manzana envenenada sobre la mesa de su supervisor, Patrick M.S. Blackett (1897-1974, Nobel 1948), algo sorprendente porque, además, el increíble y lamentable episodio había tenido lugar mucho antes. El físico e historiador Abraham Pais (1918-2000) cuenta que en Europa Oppenheimer llegó a consultar a dos psiquiatras que no merecieron su confianza. Oppenheimer no leía prensa ni oía la radio; incluso tardó en enterarse del *crash* del 29-X-1929. Era muy delgado, fumador compulsivo, conductor temerario, aficionado a la comida picante mejicana y a los martinis. Distinguido y apuesto, resultaba cautivador para las mujeres, a las que tampoco él era insensible y, entre los hombres, podía hacer amigos o enemigos con igual facilidad y rapidez. Emilio Segrè (1905-78, Nobel 1959) juzgaba su estilo y modos europeos “ligeramente ridículos”; Molly, la mujer de Ernest Orlando Lawrence (1901-58), inicialmente amigo de Oppenheimer en Berkeley, consideraba que éste era un *poseur*.

Pero, sobre todo, Oppenheimer fue una persona excepcionalmente inteligente y capaz. Podía comprender en el acto cualquier cosa y era, además, un excelente profesor, adorado por sus alumnos: tanto, que muchos seguían su curso de mecánica cuántica varias veces hasta que el propio *Oppie* lo impedía. Sucedió con él en Berkeley y Caltech lo mismo que con Dirac en Cambridge, donde sus alumnos asistían a su curso más de una vez pese a que, en este caso, Dirac seguía su libro *The Principles of Quantum Mechanics* (1ª ed.: 1930) *ad pedem litterae*. Oppenheimer trataba a los estudiantes con familiaridad —podían llamarlo *Oppie*— y éstos adoptaban sus tics inadvertidamente, aunque también temían el ‘*notorious blue glare*’ de sus penetrantes ojos azules ante preguntas estúpidas: *Oppie did not stand fools*. Cortés con los conferenciantes que invitaba a su seminario, podía ser cáustico con el resto, incluyendo a sus propios colaboradores y antiguos discípulos, a quienes no dudaba en interrumpir y rectificar en la pizarra tiza en mano. Las preguntas de Oppenheimer, mezcla de intención clarificadora y de exhibición de sus conocimientos, producían con frecuencia un pánico paralizador. Entre los asistentes que lo sufrieron figuró Leonard Schiff, autor después de un famoso texto de mecánica cuántica (1ª ed.: 1949) inspirado en las clases de Oppenheimer, que muchos estudiantes de mi generación hemos manejado. En 1940 sucedió a Schiff como asistente Julian Schwinger (1918-84); éste soportó sin

pestañear el interrogatorio de Oppenheimer en su primer seminario y ya no volvió a ser interrumpido. Pero Schwinger tenía talla de Nobel: en 1965 recibió uno muy importante —con Richard P. Feynman (1918-88) y Sin-Itiro Tomonaga (1906-79)— “por su trabajo fundamental en la electrodinámica cuántica”. Tras la guerra, siendo ya Oppenheimer director del *Institute of Advanced Study* (IAS) de Princeton, el gran Steven Weinberg (1933-2021, Nobel 1979), entonces un post-doc en la universidad de Columbia, dio un seminario en su presencia de contenido muy matemático. Oppenheimer le interrumpió diciéndole que le recordaba a él mismo cuando tenía su edad. Weinberg, complacido, sólo acertó a responder “gracias”, a lo que Oppenheimer replicó con rostro sombrío: “no lo decía como un cumplido”. Quizá también había en él cierta amargura por no haber llegado más lejos científicamente; Dirac, por ejemplo, no dudaba de la gran capacidad de Oppenheimer para la física, pero estimaba que carecía de la *single-mindedness* necesaria para hacer contribuciones realmente excepcionales (pero véase la sec. 2).

Aunque Oppenheimer se consideraba pacifista, la persecución de los judíos en Alemania —donde tenía familia— y la guerra desatada por Hitler le hicieron cambiar de opinión. A finales de 1942 aceptó ser nombrado director del nuevo laboratorio de Los Alamos (sec. 5), cuya localización geográfica en Nuevo Méjico escogió él mismo (tenía cerca un rancho, *Perro caliente*), creado con el fin de diseñar y construir un explosivo nuclear dentro del gigantesco Proyecto Manhattan. Tras el desarrollo, ensayo y terrible uso de las bombas nucleares (sec. 6), Oppenheimer renunció el 16-oct-1945 como director de Los Alamos donde —allí sí— trató a todo su personal con tacto y amabilidad. Tras pasar por Berkeley, Oppenheimer fue nombrado director del IAS de Princeton en 1947, recomendado por Lewis Strauss, entonces consejero del IAS. Strauss, un millonario judío aficionado a la física que había sido *Rear Admiral* (contralmirante) de la *US Navy*, acabó siendo su gran enemigo. Oppenheimer permaneció en el IAS hasta 1966; bajo su dirección, el IAS alcanzó su época de mayor gloria, albergando a personalidades como Albert Einstein (1879-1955, Nobel 1921), Kurt Gödel (1906-78), John (János) von Neumann (1903-57), Pauli, Hermann Weyl (1885-1995), Abraham Pais o Freeman



Abraham Pais (izqda.)
Hermann Weyl (dcha.)

Einstein y Oppenheimer en el IAS



Dyson (1923-2020). En el IAS había también grandes figuras al margen de la ciencia, como George Kennan o el historiador del arte Erwin Panofsky. Oppenheimer abrió además el IAS a la presencia de jóvenes¹; también a T.S. Eliot, uno de sus poetas favoritos.

En 1953, la persecución del senador Joseph McCarthy (1908-57) a toda persona con simpatías comunistas reales o supuestas alcanzó a Oppenheimer. Por su parte, el Comité de Actividades antiamericanas de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos, el *House of Un-American Activities Committee*, ya investigaba a organizaciones y personas sospechosas de simpatías 'subversivas', comunistas o fascistas. Es cierto que, antes de estar en Los Alamos, el círculo de Oppenheimer en Berkeley incluía a personas próximas al partido comunista o incluso afiliadas al mismo, como su propia esposa Katherine (Kitty) Puening, nacida en Alemania, antigua estudiante radical de Berkeley y con quien se había casado en 1940. Igualmente eran miembros del partido su hermano Frank -físico experimental- y su mujer, así como Jean Tatlock, que había sido amante de Oppenheimer y que sufriendo inestabilidad emocional se suicidó en enero de 1944, lo que le afectó profundamente. También eran conocidas sus simpatías por numerosas causas avanzadas y por su apoyo económico, por ejemplo, a comités en

favor de la República Española; sin embargo, nunca se afilió al partido comunista. Pero, al margen de que esas relaciones hubieran sido irrelevantes sin el macartismo dominante, no existen pruebas de que Oppenheimer —que había sido vigilado incluso en Los Alamos— constituyera 'un riesgo para la seguridad'. De hecho, esas simpatías eran conocidas hasta por Groves, quien había tenido acceso a la documentación del FBI sobre Oppenheimer, sin que ello le impidiera nombrarlo director científico de Los Alamos. Sí es cierto, sin embargo, que tuvo algunas amistades 'peligrosas' como Haakon Chevalier, miembro del partido comunista, en las que también estuvo involucrado su hermano Frank y de las que dio cuenta de forma confusa y poco veraz (y que saldrían de nuevo en la instrucción contra Oppenheimer en 1954 involucrando incluso a Groves). Pero la sospecha de que tuviera alguna relación con el partido comunista motivó que en diciembre de 1953 el presidente Eisenhower deseara aislarlo de todo órgano con responsabilidad nuclear pese a que contemplara con simpatía sus ideas sobre la insensata carrera nuclear. Seis meses antes, McCarthy había pedido al primer director general del FBI, J. Edgar Hoover, la apertura de una investigación sobre Oppenheimer. Para entonces Strauss, próximo a Hoover y ya acérrimo enemigo de Oppenheimer pues éste lo había puesto gravemente en ridículo en público, presidía la poderosa *US Atomic Energy Commission* (AEC) que Truman había establecido el 1-VIII-1946 para transferir al control civil todo lo relacionado con la energía y armas nucleares. Junto con la AEC se había creado su *General Advisory Committee* (GAC): sus miembros eligieron unánimemente a Oppenheimer como presidente, siéndolo hasta 1952.

En una carta a Strauss, Oppenheimer rechazó las acusaciones porque aceptarlas "implicaría reconocer que no soy apto para servir a un gobierno tras haberlo hecho una docena de años". La instrucción comenzó en abril de 1954 y duró cuatro semanas. El proceso estuvo prácticamente sentenciado desde el comienzo, a lo que contribuyeron las propias declaraciones de Oppenheimer, no siempre consistentes. Se le interrogó sobre el *affaire Chevalier* (1942) y hasta sobre su relación con Jean Tatlock, incurriendo en numerosas contradicciones. Por si fuera poco, la acusación tenía libre acceso a toda la documentación del 'caso', que se negaba a la defensa 'por razones de seguridad'. Aunque muchos colegas declararon en favor de Oppenheimer y también lo hizo el general Groves, no todos lo apoyaron. Ese grupo incluía a Lawrence, para entonces distanciado de Oppenheimer, a Teller y a Luis Walter Alvarez² (1911-88,

1 Uno de ellos fue C.N. Yang (1922- , Nobel 1957) quien, con R.L. Mills, generalizó en 1954 el principio de *gauge* (de Hermann Weyl) al caso no conmutativo o 'no-abeliano'. Yang contó que en 1953 dio en Princeton un seminario preliminar sobre sus ideas. Pauli, que estaba presente, le preguntó cuál era la masa asociada a un campo que aparecía en sus ecuaciones. Yang respondió que no lo sabía y continuó en la pizarra. Pauli le interrumpió de nuevo con la misma cuestión, a lo que Yang respondió que era un problema difícil. Pauli sentenció: "eso no es suficiente excusa". Yang, abrumado y desconcertado, se sentó interrumpiendo su exposición. Esto produjo una situación embarazosa, que Oppenheimer resolvió rogando a Yang que continuara, lo que hizo ante un Pauli ya silencioso. Con su pregunta, Pauli había puesto el dedo en una llaga crucial de las teorías de Yang-Mills cuya cura llegó mucho más tarde pasando a ser parte esencial del *modelo estándar*.

2 Luis Alvarez, nieto de un asturiano, fue un científico polifacético que merece un comentario. Durante la guerra, Alvarez desarrolló un procedimiento para aterrizar sin visibilidad que resultó esencial durante el bloqueo soviético

Nobel 1968). No obstante, el ya entonces belicoso Lawrence tuvo que regresar a Berkeley sin llegar a declarar, aquejado de un ataque de la colitis crónica que acabaría llevándole a la muerte. El testimonio de Teller, en parte motivado por razones personales pues Oppenheimer no apoyó en Los Alamos el desarrollo de la bomba de hidrógeno, decidió en su contra. Teller no puso nunca en duda la lealtad de Oppenheimer y lo elogió como director de Los Alamos, pero concluyó su testimonio afirmando: “*I would like to see the vital interests of this country in hands which I understand better, and therefore trust more*”. Finalmente, el 29-VI-1954, la AEC retiró a Oppenheimer su *security clearance Q* (credencial de seguridad³), justo un día antes de su caducidad. Sin embargo, mantuvo la dirección del IAS: aunque planteó su dimisión, no fue aceptada. Pero Oppenheimer cayó oficialmente en desgracia y quedó separado de los centros de decisión. Aunque más de 1100 científicos firmaron una carta de protesta y su fama creció tras la sentencia, Oppie ya no volvió a ser el mismo. La condena también afectó su interés por participar activamente en el avance de la física; su último artículo científico fue en 1949, aunque continuó escribiendo sobre ciencia, sociedad y política nuclear. Por su parte, la reputación de Strauss quedó destruida y Teller quedó marginado en círculos académicos.

Concluida la ‘caza de brujas’⁴ (1947-57), con el paso del tiempo creció el sentimiento de la injusticia cometida. El presidente John F. Kennedy (1917-63) concedió a Oppenheimer en 1963 el *Fermi*

Award for Science, el premio más prestigioso de la AEC, dotado con 50.000 dólares, lo que constituyó una tardía rehabilitación (que Strauss rechazó); lo entregó Lyndon B. Johnson (1908-73) tras el asesinato de Kennedy. El premio de 1962 lo había recibido Teller, quien pese a todo recomendó a su antiguo jefe y oponente para el del año siguiente. Siempre acompañado de su *pork-pie sombrero* y de su pipa, Oppenheimer murió de cáncer de garganta cuatro años más tarde; Kitty confió sus cenizas al mar frente a la hoy *Oppenheimer beach* de la isla de St John (Islas Vírgenes), retiro estival de la familia. El inexorable paso del tiempo también rehabilitó a Oppenheimer: el 16-XII-2022 el DOE (*Department of Energy*, sucesor de la AEC) ‘devolvió’ a Oppenheimer su *security clearance*, juzgando ‘defectuoso’ (*flawed*) el ‘proceso’ de 1954. Oppenheimer llevaba muerto 55 años.

2. La física de Oppenheimer

Cuando —tras un desalojo (incompleto) de la población local— Los Alamos abrió en marzo de 1943, Oppenheimer ya había realizado una extraordinaria y variada labor científica. En 1926 había publicado *On the quantum theory of the problem of the two bodies* [Proc. of the Cambr. Phil. Soc. **23**, 422-431 (1926)], antes de llegar a Gotinga. Allí, junto con Max Born, desarrolló la teoría cuántica de las moléculas. La dificultad era resolver exactamente la ecuación de Schrödinger con objeto de encontrar los estados estacionarios de las partículas en interacción, núcleos y electrones. La *aproximación de Born-Oppenheimer* [M. Born y J.R. O., *Zur Quantentheorie der Molekeln*, Annalen der Physik, **389**, 457-484 (1927)] resolvió el problema ignorando el movimiento de los núcleos atómicos, cuya masa es mucho mayor que la de los electrones. La aproximación de B-O es uno de los conceptos básicos en la descripción de los estados cuánticos de las moléculas. Oppenheimer sólo tenía 23 años; entre 1926 y 1930 publicó veinte trabajos. Eherenfest y Oppenheimer colaboraron después en Caltech en una *Note on the Statistics of Nuclei* [P. Ehrenfest y J. R. O., Phys. Rev. **37**, 333-338 (1931)]. En 1935 Oppenheimer y Melba Phillips estudiaron los efectos de bombardear un núcleo con deuterones, lo que da lugar a un *proceso de desgajamiento* por el cual el núcleo arranca un nucleón al deuterón. Si se absorbe el neutrón, el núcleo se transforma en un isótopo más pesado (por ej., el carbono C^{12} pasa a C^{13}). En general, explicitando el número atómico Z y el número de masa A del núclido⁵ ${}_Z^AX^A_1H^2 \rightarrow {}_Z^{A+1}X^A_1H^1$; ${}_1H^2=H^2=D$, deuterio, y ${}_1H^1=H^1=H$, hidrógeno [J.R. O. and M. Phillips, *Note on the Transmutation Function for Deuterons*, Phys. Rev. **48**,

de Berlín de 1948. A finales de los setenta encontró, con su hijo Walter (1940-), geólogo, que la quinta y última gran extinción (en la transición KT Cretácico-Terciario, hace 65 millones de años) fue producida por el impacto de un meteorito en Chicxulub, en la península del Yucatán, que produjo la desaparición del 76% de las especies del planeta y, en particular, la de los dinosaurios. Luis Álvarez ayudó a su hijo Walter a identificar en la capa KT la presencia de iridio, un metal muy escaso en la corteza terrestre pero abundante en los meteoritos (en España la transición KT es visible en Caravaca). También inventó el acelerador lineal de protones (con W. Panofski), e incluso estudió la absorción de rayos cósmicos para concluir que en la pirámide de Kefrén “no había cámaras ocultas” [L. W. Alvarez et al., *Search for Hidden Chambers in the Pyramids*, Science **167**, 832-839 (1970)].

3 Las *clearances* eran P, S y Q. La Q era la máxima, dando acceso “a todo lo que su titular juzgara necesario”.

4 La caza de brujas del senador McCarthy constituyó un período negro de la historia de los Estados Unidos. Incluso la UC-Berkeley estableció en 1949 un ‘*loyalty oath*’ que propició la ‘marcha’ de muchos profesores opuestos a hacer el juramento, finalmente declarado inconstitucional en abril 1951. El 15-V-1953 Einstein escribió: “¿Qué pueden hacer los intelectuales ante la maldad? Francamente, sólo veo el camino revolucionario de la no cooperación en el sentido de Gandhi. Todo intelectual debería rehusar testificar, es decir, debe estar preparado para ir a la cárcel y arruinarse económicamente. En pocas palabras, debe sacrificar su bienestar por el interés del bienestar cultural de su país”.

5 Escribir el número atómico Z de un núcleo ${}_Z^AX^A$ (A es el número de masa) es innecesario, pues Z y X se identifican mutuamente, pero puede resultar cómodo; $A-Z$ es el número de neutrones de X .

Niels Bohr (izqda.)
Werner Heisenberg
(dcha.)



500-502 (1935)]. Phillips sería después coautora con Wolfgang K.H. 'Pief' Panofski (1919-2007) de un famoso texto, *Classical Electricity and Magnetism* (1962). Panofski fue director del *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) desde su creación en 1961 hasta su jubilación en 1984; recibió la Medalla Nacional de Ciencia en 1969 y la de Enrico Fermi en 1979.

Pero, al margen de otros muchos trabajos, procede señalar dos especialmente. El primero, en Caltech, critica uno muy importante de Dirac, [P.A.M. Dirac, *A theory of electrons and protons*, Proc. Royal Soc. A126 #801, 360-365 (1930)] donde relacionaba sus famosos 'huecos' con los protones⁶. En una carta al editor [J. R. O., *On the Theory of Electrons and Protons*, Phys. Rev. 35, 562-563 (1930)], Oppenheimer señaló que eso era imposible: "there are several grave difficulties which arise when one tries to maintain the suggestion that the protons are the gaps of negative energy, and that there are no distinctive particles of positive charge...". Bethe comentaría mucho después: "Oppenheimer mostró, usando argumentos convincentes incluyendo simetría" (que también utilizaría Hermann Weyl), "que las cargas positivas... debían tener la misma masa que el electrón... lo que implícitamente predecía la existencia del positrón. Desgraciadamente no lo predijo por su escepticismo sobre la ecuación de Dirac, consecuencia de otro cálculo [con su estudiante Harvey Hall sobre el efecto fotoeléctrico relativista], que parecía estar en desacuerdo con la observación". Oppenheimer dedicó al 'electrón positivo' media docena de artículos, mostrando en particular que no podía ser el protón por sus consecuencias para el átomo de hidrógeno. En 1934, Oppenheimer inició con Wendell H. Furry la teoría electrón-positrón moderna en tres artículos en el vol. 45 del Physical Review, anticipando aspectos de la teoría de renormalización (más tarde participaría decisivamente en las famosas conferencias de Shelter Island, la primera en junio de 1947).

6 Cuando después le preguntaron a Dirac por qué no había predicho el positrón que Carl Anderson descubrió en 1932 (y que le valió el Nobel de 1936), respondió: "por pura cobardía".

Oppenheimer y G.M. Volkoff escribieron en Berkeley un muy importante artículo sobre estrellas de neutrones [*On Massive Neutron Cores*, Phys. Rev. 55, 374-381 (1939)]. Pero el segundo trabajo al que me refería, también en Berkeley, es el de J.R. O. y Hartland S. Snyder, *On Continued Gravitational Contraction* [Phys. Rev. 56, 455-459 (1939)]. En él, utilizaron las ecuaciones de la relatividad general de Einstein (a quien no citan considerándola de conocimiento común) para predecir la existencia *avant la lettre* de agujeros negros: "cuando se agotan todas las fuentes de energía termonuclear, una estrella suficientemente pesada colapsará [...]". En este artículo estudiamos las soluciones de las ecuaciones del campo gravitatorio que describen este proceso". Este trabajo influyó extraordinariamente sobre John Archibald Wheeler (1911-2008), quien escribió citándolo en 1971: "que una masa suficiente de materia fría colapsa necesariamente a un agujero negro es una de las predicciones más espectaculares de la teoría estándar de la relatividad general de Einstein de 1915" (fue en un seminario de Wheeler donde nació (1967) el nombre de *black hole*⁷). Si Oppenheimer hubiera vuelto sobre los agujeros negros, quizá su trabajo pionero le hubiera valido el Nobel.

Snyder hizo después una interesante contribución influido por Werner Heisenberg vía Oppenheimer. Es sabido que Dirac consideraba que la no conmutatividad cuántica era la idea más importante introducida por Heisenberg, quien pensó incluso en la posibilidad de que las propias coordenadas no conmutaran. Las matemáticas de la *geometría no conmutativa* no estaban desarrolladas aún, aunque el gran Bernhard Riemann (1826-1866), en su famosa conferencia inaugural de 1854 en Gotinga, consideraba que "era bien posible que en lo infinitamente pequeño las relaciones métricas espaciales no se ajustasen a las hipótesis de la geometría, lo que debería asumirse si permitiera una forma más sencilla de explicar los fenómenos". Heisenberg creía que quizá Rudolf Peierls (1907-95) y Pauli podrían considerar su idea. Oppenheimer habló con Pauli en Zúrich sobre ella y a su regreso a California propuso a Snyder estudiar las consecuencias físicas de esa no conmutatividad. Así lo hizo Snyder en *Quantized Space-Time* [Phys. Rev. 71, 38-41 (1947)] introduciendo un espaciotiempo discreto invariante Lorentz con una unidad natural de longitud, agradeciendo correspondencia con Pauli.

Oppenheimer ya no volvió sobre los agujeros negros. Su fundamental trabajo con Snyder se publicó el 1-IX-1939. Ese día fatídico, una semana después de la firma del vergonzoso pacto Molotov-

7 Es curioso recordar que Einstein fue decididamente contrario a los agujeros negros, llegando a escribir un trabajo para probar su inexistencia; también cuestionó las ondas gravitatorias.

Ribbentrop (que afectó profundamente las simpatías comunistas de Oppenheimer), Hitler invadió Polonia. Dos días después, UK y Francia declararon la guerra a Alemania. Súbitamente todas las prioridades cambiaron y nada se mantuvo igual.

3. La física de las bombas nucleares (mal llamadas atómicas)

Todo comenzó con los experimentos de Otto Hahn y Fritz Strassmann en el Instituto Kaiser Guillermo de Berlín-Dahlem a finales de 1938, en los que bombardearon uranio con neutrones lentos. Publicaron sus resultados en *Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle*, *Die Naturwissenschaften* **27**, p. 11-15 (Jan. 1939, *Sobre la identificación y el comportamiento de los metales alcalinotérreos producidos por irradiación de uranio mediante neutrones*); también p. 89, 163 (1939)]. Hahn acabaría recibiendo el Nobel de química de 1944 por el “descubrimiento de la fisión de núcleos pesados”. La vienesa Lise Meitner (1878-1968) se doctoró en Viena en 1906 y colaboró muchos años con Hahn en Berlín-Dahlem, por ejemplo en L.M., O.H., y F.S. *Künstliche Umwandlungsprozesse bei Bestrahlung des Thoriums mit Neutronen; Auftreten isomerer Reihen durch Abspaltung von α -Strahlen* (*Procesos artificiales de transmutación por irradiación de torio con neutrones; aparición de series isómeras por disociación con rayos α*) [*Z. Physik* **109**, 538-552 (1938)]. Su condición de mujer la había relegado a trabajar en condiciones humillantes, pero había sobrevivido a la persecución antisemita por ser austríaca. Pero el *Anschluss* la convirtió repentinamente en súbdita del tercer Reich y tuvo que huir a Suecia prácticamente sin nada; su amigo Hahn le dio un anillo con un brillante que había heredado de su madre para prever emergencias. Meitner se instaló en el Instituto Nobel de Estocolmo invitada por su director, el Nobel (1924) Karl Manne Siegbahn (quien visitó la RSEFQ en 1928, por cierto). Allí colaboró con su sobrino Otto Frisch (1904-79), también vienés que, tras 1933, había huido y estaba en Copenhague. Tía y sobrino fueron los primeros en comprender cómo Hahn y Strassmann habían dividido el núcleo, de lo que dieron cuenta en dos comunicaciones fundamentales: L. Meitner y O. R. Frisch, *Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reactions*, [Letter to Nature, **143**, feb. 11, 239-240 (1939)] y *Products of the Fission of the Uranium Nucleus* [Letter to Nature **143**, march 18, 471-472 (1939)]. Frisch tomó el término ‘fisión’ para este “nuevo tipo de reacción nuclear” de la división celular en biología, pues usaban un modelo que trataba el núcleo de uranio como una *gota líquida* que se dividía —fisionaba— en dos más pequeñas. Pese a la trascendencia de sus hallazgos, el comité Nobel se olvidó de Meitner —la Marie Curie ale-



mana según Einstein (también compartía con ella el cumpleaños)— injusta y sistemáticamente: fue propuesta 48 veces, 18 para el Nobel de química y 30 para el de física.

Bohr consideró esos resultados de “excepcional importancia”, comentándolos en dos breves cartas desde el IAS, la primera el 20-I-1939 a Nature. En la segunda, del 7-II, *Resonance in Uranium and Thorium Disintegrations and the Phenomenon of Nuclear Fission* [Phys. Rev. **55**, 418-419 (1939)], comenzó a preocuparse por las propiedades de fisión del uranio bombardeado por neutrones, anunciando un análisis detallado con Wheeler. Así lo hicieron Bohr y Wheeler en *The mechanism of nuclear fission* [Phys. Rev. **56**, 426-450 (1939)] atribuyendo la fisión del uranio sobre todo a neutrones térmicos sobre ${}_{92}\text{U}^{235}$ (el isótopo ${}_{92}\text{U}^{235}$ es fisionable por neutrones de cualquier energía mientras que el ${}_{92}\text{U}^{238}$ sólo por neutrones de alta energía). Así pues, el efecto de la radiación con neutrones era asunto de la máxima actualidad e importancia. Enrico Fermi también había experimentado antes con neutrones con ‘*i ragazzi di Via Panisperna*’ en Roma⁸, en 1934; su trabajo mereció el Nobel de 1938 “por probar la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por irradiación con neutrones, y por su descubrimiento relacionado de reacciones nucleares producidas por neutrones lentos”. Sin embargo, Fermi tuvo que modificar el discurso de aceptación del Nobel del 12-XII-1938 añadiendo a la versión impresa una nota crucial a pie de página: “el descubrimiento de Hahn y Strassmann... en el que el uranio se divide en dos partes aproximadamente iguales, hace necesario revisar el problema de los elementos transuránidos [más allá de $Z=92$], ya que muchos de ellos podrían ser resultado de la fisión del uranio”.

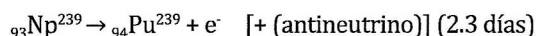
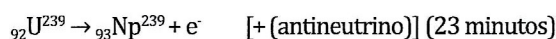
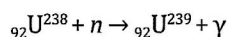
Delegados en la celebración del 25 aniversario (1928) de la RSEFQ en el Senado. K. M. Siegbahn es el cuarto por la izquierda.

8 Los ‘*ragazzi*’ incluían a Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rosetti y Bruno Pontecorvo.

Oppenheimer, Seaborg y Lawrence a los controles del electroimán del ciclotrón de 184 pulgadas a comienzos de 1946 (foto LBNL).

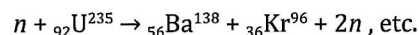
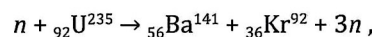


En 1930 Lawrence había desarrollado en Berkeley el ciclotrón, que acelera partículas en circunferencias por medio de un campo magnético; recibió el Nobel de 1939. El primer ciclotrón cabía sobre la palma de su mano, pero fueron creciendo en tamaño, peso (por los electroimanes) y energía: el Bevatrón, un sincrotrón de protones, llegó (1954) a más de 6 GeV (1 GeV = 10^9 eV, 'Giga o Ginebra eV', o BeV, 'Billón [USA] o Berkeley eV'). En los ciclotrones se aceleraban deuterones y partículas alfa dando vueltas hasta ser lanzados como en una honda contra el blanco. El *Radiation Laboratory*—el Rad Lab— se creó en el campus de Berkeley el 26-VIII-1931. Allí, el 14-XII-1940, el químico Glenn T. Seaborg (1912-97) y sus colegas usaron el ciclotrón de 60 pulgadas (y electroimán de 220 toneladas) para bombardear uranio con deuterones. La reacción produjo neptunio-239, así bautizado por Edwin M. McMillan (1907-91). El ${}_{93}\text{Np}^{239}$ tiene una semivida de dos días dando lugar a un nuevo elemento con 94 protones, que llamaron plutonio por Plutón, el dios griego de los infiernos; inmediatamente sospecharon que el ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ era fisionado por neutrones lentos. Las reacciones nucleares que conducen a la producción del plutonio-239 (${}_{94}\text{Pu}^{239}$) a partir de la captura de neutrones lentos por uranio ${}_{92}\text{U}^{238}$ y a través de la obtención del isótopo ${}_{92}\text{U}^{239}$ y del neptunio ${}_{93}\text{Np}^{239}$ (entonces aún 'no había' neutrones) son:



McMillan y Seaborg recibieron el Nobel de química de 1951 "por sus descubrimientos en la química de los elementos transuránicos". El ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ cambiaría el curso de los acontecimientos; en particular, como el plutonio es químicamente diferente del uranio, la separación química de ambos soslaya las dificultades de la separación isotópica del ${}_{92}\text{U}^{235}$ y ${}_{92}\text{U}^{238}$.

Por otra parte, Irène y Frédéric Joliot-Curie (Nobeles de Química en 1935 "por la síntesis de nuevos elementos radioactivos") descubrieron en 1939 que la fisión del uranio producía a su vez nuevos neutrones. La reacción en cadena podía ser posible: todo dependía del número de neutrones emitidos en la fisión, como había advertido el polifacético científico (e inventor) Leo Szilard (1898-1964) en 1933. Según contó después, paseando por Londres se le "ocurrió de repente que si se pudiera encontrar algún elemento que se dividiera bajo el bombardeo por neutrones y que emitiera otros dos por cada uno absorbido, una cantidad suficiente de ese elemento podría mantener una reacción en cadena". Fermi y Szilard observaron al mismo tiempo que Joliot-Curie que la fisión producía una *media v* de cerca de 2.5 neutrones: la reacción en cadena era posible. Szilard escribió a los Joliot-Curie pidiendo que no hicieran públicos sus resultados, pero von Halban, F. Joliot y L. Kowarski publicaron sendas cartas en *Nature*, *Liberation of Neutrons in the Nuclear Explosion of Uranium* [18-III, *Nature* **143**, 470-471 (1939)] y *Number of neutrons liberated in the nuclear fission of uranium* [22-IV, *Nature* **143**, 680 (1939)], casi simultáneas con las de Meitner y Frisch. Modos de fisión del U^{235} por el impacto de un neutrón n ($n = {}_0\text{n}^1$) son



La diferencia de masa entre ambos miembros se traduce en una enorme liberación de energía ($E=mc^2$); la fisión completa de un kilo de ${}_{92}\text{U}^{235}$ produciría unos 20 kilotones (1kt = 10^6 kilos de TNT).

Los experimentos de fisión tampoco habían pasado inadvertidos para los físicos del *Cavendish* de Cambridge, que ya había acogido a Halban y Kowarski, ni a Paul Harteck en Hamburgo, quien había leído el artículo de Joliot-Curie *et al.* en *Nature*. Incluso el *New York Times* del 30-IV-1939—antes de la carta de Einstein (sec. 4)—ya mencionaba el U^{235} , los neutrones, la reacción en cadena y la posibilidad de una explosión atómica con referencias a Bohr y Einstein. La fisión del uranio era ya de dominio público: las bombas nucleares eran posibles. En el clima bélico reinante, cuatro cartas de científicos alertaron a sus respectivos gobiernos del peligro nuclear.

4. Las cartas de alerta

4a. La carta alemana (1939), el Uranverein y los científicos alemanes

La primera alarma se produjo el 24-IV-1939, tres meses antes de la carta de Einstein. Los científicos de Hamburgo Paul Harteck y Wilhelm Groth habían escrito a la oficina de investigación de armamento del *Reichskriegsministerium*, el Ministerio de la Guerra, un mensaje que incluía este párra-

fo: “En nuestra opinión, es probable que los más recientes desarrollos de la física nuclear hagan posible la producción de un explosivo más poderoso que los convencionales en muchos órdenes de magnitud... El país que lo consiga primero tendrá una ventaja insuperable sobre los demás”. El programa nuclear alemán —el proyecto *Uranverein* (club de uranio)— estuvo a cargo de Heisenberg. Sin embargo, y al contrario que Oppenheimer, quien concentraría en Los Álamos su formidable capacidad y energía, Heisenberg mantuvo una actividad mucho más dispersa. Heisenberg proponía la construcción de un reactor nuclear con agua pesada que, basado en unos cálculos erróneos sobre la difusión de neutrones, nunca llegaría a funcionar. No obstante, a instancias del general Groves y por si acaso, un equipo noruego de sabotaje destruyó en febrero de 1943 la única fábrica de agua pesada del mundo, la *Norsk Hydro* en Vemork, al sur de Noruega, que estaba en poder de los nazis. Groves incluso consideró raptar o asesinar a Heisenberg.

Se ha especulado mucho sobre si el programa nuclear alemán fracasó por falta de recursos y errores de planteamiento —se dieron ambas circunstancias— o porque Heisenberg no deseaba poner armas nucleares en manos de los nazis. Heisenberg —ante todo un teórico— carecía de la mentalidad práctica que requiere la compleja marcha de un laboratorio que investiga áreas desconocidas, llenas de sorpresas. La operación *épsilon* o grabaciones secretas de *Farm Hall* (a quince kilómetros al oeste de Cambridge), han zanjado la polémica. En esa casa, entonces propiedad del MI6, los británicos confinaron a un selecto grupo de científicos alemanes capturados: Otto Hahn, Max von Laue, Erich Bagge, Walter Gerlach, Kurt Diebner, Paul Harteck, Karl Wirtz, Horst Korsching, Carl Friedrich von Weizsäcker y Heisenberg. Allí estuvieron recluidos durante medio año en 1945, aislados pero con acceso a prensa y radio, con el objetivo de grabar sus conversaciones. Diebner se preguntó si habría micrófonos ocultos, a lo que respondió Heisenberg, “no, no son tan listos. No creo que conozcan los métodos de la Gestapo”. Las grabaciones, ya *desclasificadas*, muestran que los científicos alemanes no tenían los conocimientos necesarios para construir la bomba y, también, que trataban de distanciarse de toda vinculación al régimen nazi. En una de ellas, von Weizsäcker afirma: “Creo que la razón por la que no hicimos la bomba es porque realmente los físicos no queríamos hacerla. Si todos hubiéramos querido que Alemania ganara la guerra, habríamos tenido éxito”. Hahn responde: “yo no lo creo así, pero me satisface que no lo tuviéramos”. En otro momento, Hahn había dicho al conocer las noticias sobre Hiroshima: “si los americanos tienen la bomba atómica, entonces sois todos [unos científicos] de segunda fila”. Heisenberg llegó a dar un seminario en *Farm Hall* sobre un explosivo nuclear el 14-VIII-



Farm Hall, West Street, Godmanchester

1945, días después de Hiroshima y Nagasaki. En opinión de J. Bernstein, el seminario demostró que la idea de que “Heisenberg sabía cómo construir una bomba, pero que se guardó el secreto para sí, es absurda”.

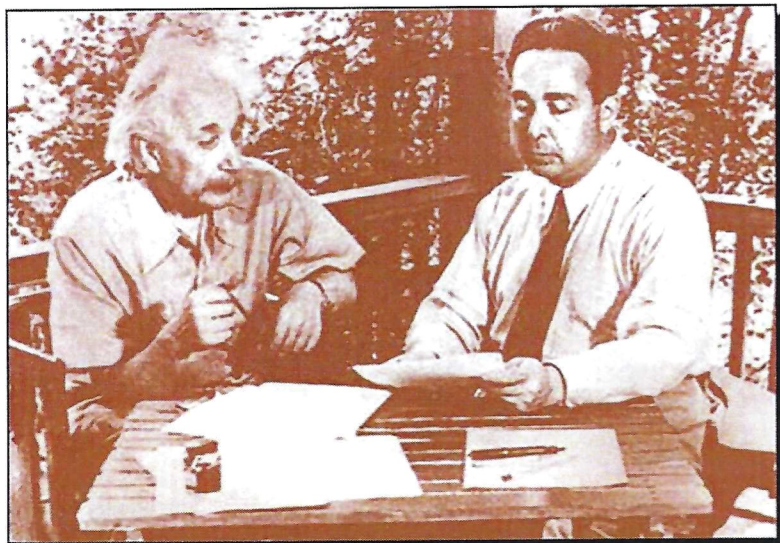
4b. La carta estadounidense (1939)

La famosa carta de Einstein a Roosevelt, escrita por Szilard tras contactos con Eugene P. Wigner (1902-95, Nobel 1963) es del 2-VIII-1939. Ésta es su parte esencial: “trabajo reciente de E. Fermi y L. Szilard ... me hace esperar que el elemento uranio puede convertirse en una nueva e importante forma de energía en el futuro inmediato. Ciertos aspectos de la situación requieren vigilancia y, si fuera necesario, rápida actuación por parte de la Administración. Creo, por tanto, que es mi deber llamar su atención sobre los hechos y recomendaciones que siguen. En el transcurso de los cuatro últimos meses se ha hecho probable —gracias al trabajo de Joliot en Francia y Szilard en América— la posibilidad de desatar reacciones en cadena en una gran masa de uranio, por lo que se generarían vastas cantidades de energía... Este nuevo fenómeno conduciría también a la construcción de bombas... Una sola bomba de ese tipo... podría muy bien destruir un puerto entero junto con parte del territorio circundante...”.

4c. La carta ‘inglesa’ (Peierls-Frisch, marzo de 1940)

Rudolf Peierls (1907-95), un alemán que tras 1933 decidió permanecer en UK por ser judío, jugó un importante papel. El informe de Peierls y Frisch fue el primero detallado. Peierls comentó que “habían leído y entendido el artículo de Bohr y Wheeler, lo que les convenció... de que la sección eficaz del U^{235} para neutrones estaría dominada por la fisión”. He aquí algunos extractos del muy preciso memorándum Frisch-Peierls, que no traduciré:

“The attached detailed report concerns the possibility of constructing a “super-bomb”



Albert Einstein
Old Grove 20,
Haston Point,
Parsippany, New Jersey
August 2nd, 1939

J.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House,
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. It is apparent almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very small ores of uranium in moderate quantities. There is some coal ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgium Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve as an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and get forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budget of University laboratories, by increasing funds. If such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Emperor, the Prince of Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

Recreación, acabada la guerra y por los propios protagonistas, Albert Einstein y Leo Szilard, de la firma de la carta de Einstein del 2-VIII-1939 al presidente Roosevelt alertándole del peligro de que Alemania consiguiera la bomba 'atómica'.

which utilises the energy stored in atomic nuclei as a source of energy. The energy liberated in the explosion of such a super-bomb is about the same as that produced by the explosion of 1,000 tons of dynamite. This energy is liberated in a small volume, in which it will, for an instant, produce a temperature comparable to that in the interior of the sun. The blast from such an explosion would destroy life in a wide area [...] In addition, some part of the energy set free by the bomb goes to produce radioactive substances, and these will emit very powerful and dangerous radiations.[...] It is a property of these super-bombs that there exists a "critical size" of about one pound⁹. A quantity of the separated uranium isotope that exceeds the critical amount is explosive, yet a

9 Esta cifra era muy 'optimista'; la realidad es que es mayor. Aunque para una esfera 'desnuda' de U^{235} es de 56 kg, para otras geometrías, densidades y configuraciones 'vestidas' que retienen más neutrones de fisión, la masa crítica se reduce mucho. En cualquier caso, el orden de magnitud era 'manejable' (en Los Alamos, Oppenheimer la estimó en 5 kg).

quantity less than the critical amount is absolutely safe. [...]

We do not feel competent to discuss the strategic value of such a bomb, but the following conclusions seem certain:

1. As a weapon, the super-bomb would be practically irresistible. [...] it should be kept in mind that the radioactive radiations will prevent anyone from approaching the affected area for several days [...].

2. Owing to the spread of radioactive substances with the wind, the bomb could probably not be used without killing large numbers of civilians, and this may make it unsuitable as a weapon for use by this country [...].

3. We have no information that the same idea has also occurred to other scientists but since all the theoretical data bearing on this problem are published, it is quite conceivable that Germany is, in fact, developing this weapon.... At the same time it is quite possible that nobody in Germany has yet realized that the separation of the uranium isotopes would make the construction of a super-bomb possible. Hence it is of extreme importance to keep this report secret [...].

4. If one works on the assumption that Germany is, or will be, in the possession of this weapon, it must be realized that no shelters are available that would be effective and that could be used on a large scale. The most effective reply would be a counter-threat with a similar bomb. Therefore it seems to us important to start production as soon and as rapidly as possible, even if it is not intended to use the bomb as a means of attack [...]"

4d. La carta soviética (1942)

Pese a la devastación de la guerra, la URSS también estaba intentado desarrollar su propio programa nuclear, ayudado por una amplia red de espionaje. El espía más 'eficaz' fue el excelente físico Klaus Fuchs (1911-1988), un miembro del partido comunista alemán que había huido a Inglaterra en 1933. Allí estuvo en Bristol con Nevill Mott (1905-96, Nobel 1977), en Edimburgo con Max Born y finalmente en Birmingham con Peierls —cuyo gran apoyo y confianza traicionaría— antes de trasladarse a Los Alamos en 1944. Regresó a Inglaterra en 1946 para incorporarse al centro nuclear de Harwell, desde donde continuó enviando información a los soviéticos hasta su detención en 1950. Fuchs fue condenado a catorce años de cárcel y liberado en 1959; despojado de la ciudadanía británica se trasladó a la RDA, donde continuó trabajando en Dresde como profesor de física hasta su muerte en 1988. Pese a las medidas de seguridad en Los Alamos, Fuchs pasó a agentes soviéticos información desde el principio, incluyendo una descripción completa de la bomba de implosión de plutonio *Fat Man* y algún diseño de la 'Super' de Teller, así como datos

de la producción estadounidense de materiales fibrosos, U^{235} y Pu^{239} . La información de Fuchs —cuyo apellido significa ‘zorro’— facilitó que el programa nuclear soviético ganara al menos un par de años y favoreciera el plutonio en detrimento del U^{235} , de complicada y costosísima obtención. En general, el espionaje de la URSS permitió omitir numerosas fases experimentales en la búsqueda de un explosivo nuclear al resultar innecesarias.

Tras detectar la súbita desaparición de artículos sobre fisión en las revistas científicas de UK, Alemania y US, el joven físico Georgi Flerov (1913-90) escribió a Stalin en abril de 1942 una carta personal (“querido Iósif Vissariónovich”) urgiendo a desarrollar la bomba ‘atómica’ (después de la guerra, Flerov fue director del *Instituto Unido de Investigación Nuclear*, JINR, en Dubna, que incluye otros países, de ahí lo de ‘Unido’). La carta motivó que Stalin diera instrucciones al ministro soviético de educación superior, Sergei Kaftanov (1905-1978), para iniciar el programa. Igor V. Kurchatov (1903-60) fue elegido por Kaftanov por “su competencia, energía, capacidad organizativa y devoción por la causa”, por delante de otros físicos más ilustres, pero menos colaboradores, como los académicos Abram Ioffe (1880-1960) y Peter Kapitza (1894-1984, Nobel 1978), que detestaba a Beria. Kurchatov era cariñosamente conocido como *boroda*, la barba, porque había prometido no cortársela hasta el éxito del programa, aunque luego la mantuvo. Kurchatov era ya miembro del *Comité de Uranio* constituido para la construcción de un reactor nuclear, y permaneció como director científico del programa nuclear de la URSS (sec. 7) hasta su muerte.

5. Los Alamos (Proyecto Y) y el Proyecto Manhattan

En septiembre de 1942 el Secretario de Guerra Henry Stimson escogió para dirigir la estructura

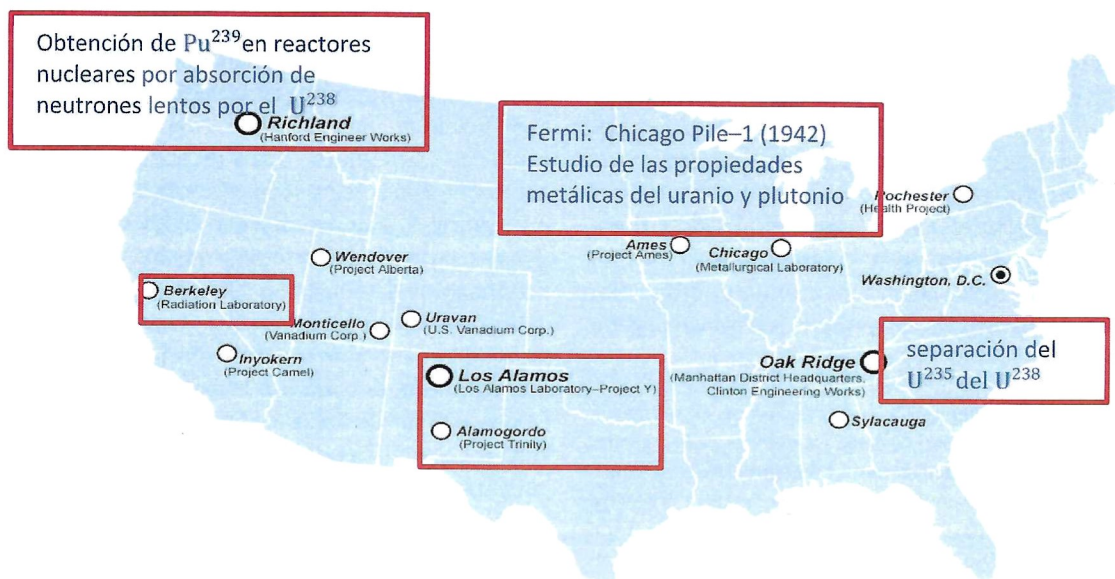


Georgi Nikoláievich Flórov.

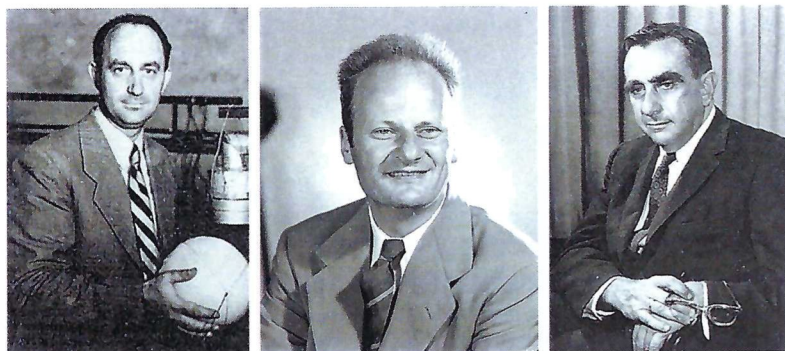


Ulitsa (calle) Flerova en Dubna, a 131 kms. al norte de Moscú, a orillas del Volga.

militar del Proyecto Manhattan al antiguo constructor del Pentágono, el coronel Groves, oportunamente ascendido a Brigadier General; la estructura científica mantuvo su carácter civil. Oppenheimer acabó teniendo a su cargo en Los Alamos a más de tres mil personas, científicos y técnicos. El historiador Gerald Holton escribió sobre Oppenheimer: “ningún otro podía haber dirigido tan bien el considerable y selecto grupo de *prime donne* de la ciencia reunido en Los Alamos bajo las difíciles y aterradoras condiciones de la guerra”. Steven



Principales centros del Proyecto Manhattan.



Enrico Fermi (izqda.),
Hans A. Bethe (centro)
(foto LANL), Edward
Teller (dcha.) (foto
LLNL)

Weinberg consideró que una de las razones por las que los Estados Unidos consiguieron la bomba frente a Alemania fue que en USA estaba Oppenheimer, que no trató de influenciar a los demás para que siguieran siempre sus ideas, mientras que en Alemania estaba Heisenberg quien, pese a ser mejor físico, sí ejercía presión científica sobre su entorno (algo que continuó haciendo tras la guerra).

El Proyecto Manhattan incluía, además de Los Alamos (que estaba dividido en secciones: teórica (dirigida por Bethe), experimental, construcción, ingeniería, explosivos, etc.), el laboratorio de Oak Ridge (Tennessee), los reactores nucleares de Hanford (Washington), el 'laboratorio metalúrgico' (el *Met Lab*) de la universidad de Chicago y otros centros. Fue en una cancha de *squash* de esa universidad donde Enrico Fermi construyó el primer reactor nuclear, Pile-1, un apilamiento de grafito con uranio y control adicional por barras de cadmio; se hizo crítico el 2-XII-1942, hito que todos celebraron brindando con *chianti* (el reactor soviético para producir plutonio, F-1, se consiguió en Moscú el 25-XII-1946 y se mantuvo secreto). En el Proyecto Manhattan no sólo participaron científicos, sino también grandes empresas estadounidenses con experiencia de producción en masa y, especialmente, la gran compañía química Du Pont de Nemours (inventora y productora del *nylon*). Pese a sus reticencias iniciales por no tener experiencia en el campo nuclear, Du Pont aceptó participar en diciembre de 1942 bajo presiones 'patrióticas', con la condición de no obtener más beneficios que un simbólico dólar al año, haciéndose cargo de las operaciones industriales de producción (también colaboraron otras empresas, como Westinghouse y General Electric). Esta situación contrasta con la que se dio en la URSS, donde los científicos (los físicos Igor Kurchatov y Yuli B. Khariton, el Oppenheimer soviético, sec. 7) también dirigieron las operaciones industriales de su programa nuclear.

En Oak Ridge se separaba el isótopo de uranio más fisionable U^{235} del mucho más abundante U^{238} , en clave 'P' (precioso) y 'Q' ('*grap*' o *crap*, porquería). Ambos poseen un núcleo con $Z=92$ protones, el número atómico que los caracteriza como uranio; el U^{235} tiene un núcleo con 143 neutrones y el U^{238} con 146. El U^{235} constituye sólo el 0'72% del uranio natural y el U^{238} el 99'275%

(el minúsculo 0'005% restante corresponde a otro isótopo, el U^{234}). La fisión nuclear se produce por el impacto de neutrones sobre los núcleos (sec. 3), que al fisionarse liberan energía y más neutrones, produciéndose una explosión nuclear cuando la masa del material fisionable supera la *masa crítica* (ver nota 9). Para la extracción del U^{235} del mineral de uranio se empleaban en Oak Ridge unos aparatos basados en la separación electromagnética de masas (el U^{238} es más pesado que el U^{235}) desarrollados por Lawrence en el *Rad Lab* y que llamó *calutrones* (por *California Univ. Cyclotron*). El 'uranio enriquecido' (con mayor proporción de U^{235}) se enviaba a Nuevo México en ambulancias y trenes, y en maletas custodiadas por militares de paisano¹⁰. Para darse cuenta de la envergadura del proceso de separación, basta decir que el gigantesco complejo de Oak Ridge llegó a tener 22000 trabajadores y que, dada la escasez de cobre durante la guerra, el Departamento del Tesoro envió 12300 toneladas de plata —aún mejor conductor— para el cableado de los electroimanes. La superación de las dificultades técnicas que presentaba la separación electromagnética de isótopos (que disuadieron a los científicos alemanes y japoneses a usar ese método) permite hoy la separación de isótopos de prácticamente todos los elementos de la tabla periódica, con innumerables aplicaciones a muchas ramas de la ciencia, incluidas la geología, la biología y la medicina. Por lo que se refiere al uranio, la difusión gaseosa del hexafluoruro de uranio acabó resultando un medio de separación más barato. La *idea* era sencilla: el isótopo U^{235} pasa más rápidamente a través de una barrera porosa por ser más ligero que el U^{238} (el *teflon*, material muy estable, se desarrolló para sellar los conductos del sistema en ese proceso). En los reactores nucleares de Hanford se obtenía plutonio-239 por la absorción de neutrones lentos por el U^{238} (sec. 3). En conjunto, el ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ produce más neutrones por fisión ($\nu = 2'8$) que el U^{235} . Por ejemplo, $n + {}_{94}\text{Pu}^{239} \rightarrow {}_{54}\text{Xe}^{134} + {}_{40}\text{Zr}^{103} + 3n$; *Fat Man* (Nagasaki) fue una bomba de implosión de plutonio. En Chicago se estudiaban las propiedades metálicas del uranio y del plutonio; también colaboró en el Proyecto Manhattan la planta canadiense de *Chalk River*, en Ottawa, que estaba bajo la dirección del futuro Nobel (1951) J. D. Cockcroft, que producía agua pesada.

Una de las claves del éxito de Los Alamos fue la organización democrática que Oppenheimer supo imprimirle. Su andadura comenzó con el

10 A pesar de los precedentes del radio, ni el proceso de preparación de las bombas ni el transporte fue realizado con todas las precauciones debidas. Hubo numerosas exposiciones a la radiación y accidentes, alguno mortal, motivados por la urgencia, el entusiasmo o los descuidos. Los efectos de la radiación consecuencia de las pruebas tampoco se consideraron suficientemente. En la URSS los percances fueron mucho más numerosos y graves, afectando también a la población civil.

establecimiento de objetivos en un informe (el 'Los Alamos Primer') en abril de 1943, y culminó con éxito la construcción de las primeras bombas nucleares veintisiete meses después. En sólo dos años y tres meses Los Alamos pasó de la nada a alcanzar su meta bajo la extraordinaria dirección de Oppenheimer, quien sólo tenía 39 años al inicio del proyecto. Recordando esa época comentó: "nosotros [los estadounidenses] no tenemos el monopolio de las ideas, pero sí las administramos mejor que los demás". Lo más florido de la física americana y europea emigrada trabajó en Los Alamos y otros laboratorios asociados al proyecto Manhattan. La lista de premios Nobel de Los Alamos, ya entonces o futuros, incluyó a Luis Walter Alvarez (1968), Aage Bohr (1975), Niels Bohr (1922), Felix Bloch (1952), Hans Bethe (1967), James Chadwick (1935), Emilio Segrè (1959), Owen Chamberlain (1959), Enrico Fermi (1938), Richard Feynman (1935), Val Fitch (1980), Roy Glauber (2005), Maria Goeppert-Mayer (1963), Edwin McMillan (1951), Norman Ramsey (1969), Fred Reines (1995), Joseph Rotblat¹¹ (hasta 1941), Maurice Wilkins (1962). Otros lo hicieron fuera de Los Alamos, como James Frank (1925), Luis Alvarez (1968) y Glenn Seaborg (1951) en el Met Lab de Chicago, Eugene P. Wigner (1963) en Hanford, Isidor Isaac Rabi (1944) en el Rad. Lab. del MIT (también estuvo en *Trinity*) o J.D. Cockcroft (1951) en Canadá. Muchos otros científicos participaron en el esfuerzo bélico de otra forma: Schwinger, por ejemplo, que había rechazado la invitación de Oppenheimer para no estar bajo su antiguo jefe, contribuyó al desarrollo del radar (por *Radio Detection And Ranging*, detección por radio y alcance). El radar ocupó a muchos físicos ilustres; en UK, por ejemplo, a Martin Ryle (1918-84, Nobel 1971) y Fred Hoyle (1915-2001).

El Proyecto Manhattan dejó de existir el 31-XII-1946 absorbido por la AEC, estableciéndose el control civil de todas las infraestructuras. Groves se despidió así de todos sus trabajadores: "Five years ago, the idea of Atomic Power was only a dream. You have made that dream a reality. You have seized upon the most nebulous of ideas and translated them into actualities. You have built cities where none were known before. You have constructed industrial plants of a magnitude and to a precision heretofore deemed impossible. You built the weapon which ended the War and thereby saved countless American lives. With regard



Entrada a Los Alamos, 1943 (foto LANL)

to peacetime applications, you have raised the curtain on vistas of a new world". Tras Hiroshima y Nagasaki, en un último discurso al personal de Los Alamos al cesar como director el 16-X-1945, Oppenheimer pasó revista a los distintos motivos que impulsaron a los científicos a participar en el Proyecto Manhattan. A otros *porqués* que se verán más adelante añadió uno sobre el que vale la pena meditar y que quizá justificaría la alusión de Freeman Dyson al mito de Fausto, quien vendió su alma a cambio de sabiduría y poder. Dijo Oppenheimer: "... pero, cuando llegas al fondo del asunto, la razón por la que hicimos este trabajo es que era una necesidad vital. Si eres un científico no puedes detener algo así. Si eres un científico crees que es bueno averiguar cómo funciona el mundo; crees que es bueno dar a la humanidad en su conjunto el mayor poder posible para controlar y manejar el mundo de acuerdo con las luces y los valores que ella posee". Pero añadió: "la bomba atómica... ha hecho insoportable el futuro de la guerra. Nos ha conducido al filo del puerto de la montaña; más allá, el panorama es diferente". En 1946, Truman

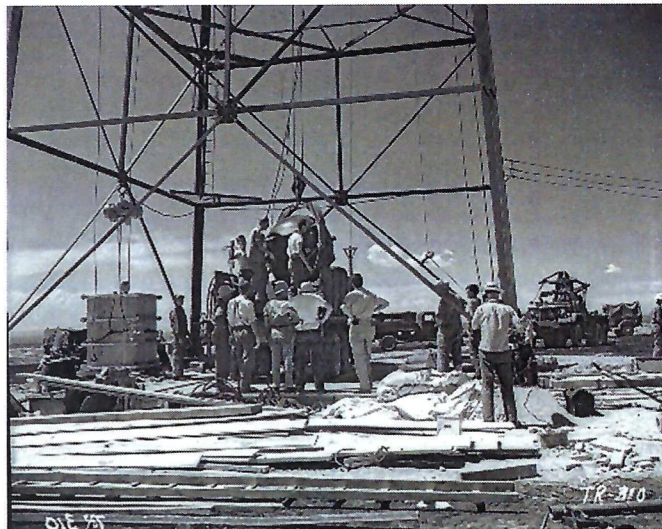
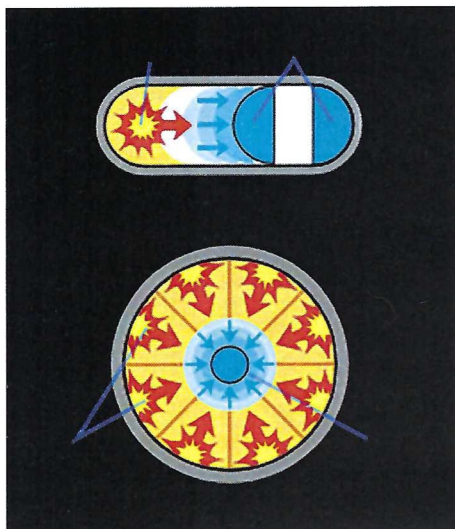


Luis W. Alvarez (foto LBNL)

11 Rotblat y Bertrand Russell (1872-1970, Nobel de Literatura 1950) fundaron en 1957 las *Conferencias de Pugwash por la Paz* con el patrocinio del filántropo estadounidense Cyrus Eaton; Rotblat y las conferencias de Pugwash recibieron conjuntamente el Nobel de la Paz de 1995 por sus esfuerzos en contra de las armas nucleares. Antonio Fernández-Rañada (1939-2022), antiguo presidente de la RSEF, fue miembro del Movimiento Pugwash.

Mecanismos de cañón (uranio) y de implosión (plutonio) para alcanzar la masa crítica (izqda.).

Levantando *Gadget* en *Trinity* (dcha.)



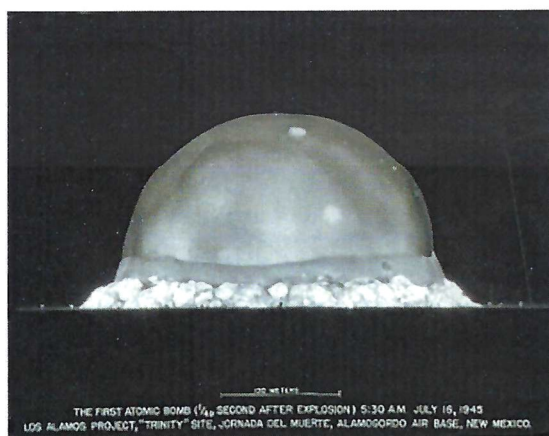
concedió a Oppenheimer la Medalla al Mérito. Pero en 1945, en una reunión con el presidente, Oppenheimer le había dicho que “tenía sangre en las manos”. Esto motivó la irritación de Truman: “no me vuelvan a traer aquí a ese insensato. Él no hizo estallar la bomba; lo hice yo. Esa forma de lloriquear me enferma”.

El legado del Proyecto Manhattan incluyó una considerable red de laboratorios nacionales en USA, como el Lawrence Berkeley National Lab., Los Alamos Nat. Lab., el Lawrence Livermore Nat. Lab. (donde, por cierto, la *Nat. Ignition Facility* ha conseguido ya reacciones de fusión con balance energético positivo) o el Argonne Nat. Lab. Otros se crearon después, como el Brookhaven Nat. Lab.

en Brookhaven (NY), los Sandia Nat. Labs. en Albuquerque, New Mexico o el Fermi National Accelerator Laboratory (FANL, Fermilab) en Batavia, Ill. Había nacido la *Big Science*.

6. Trinity, Hiroshima y Nagasaki

Había dos formas de alcanzar la masa crítica uniendo íntimamente partes subcríticas (en azul) por medio de potentes explosivos (rojo). La bomba de cañón de uranio se utilizó, sin ensayo previo, sobre Hiroshima. La primera de implosión, de cinco kilos de plutonio y bautizada *Gadget*, se ensayó previamente el 16-VII-1945 en *Trinity* (nombre caprichoso que puso Oppenheimer) en un lugar casi simbólico: en la *Jornada del Muerto* (a 100 km de Alamogordo) al sur de la *cordillera Sangre de Cristo*. Oppenheimer recordó así el ensayo: “todos esperamos a que pasara la onda explosiva para salir del refugio [a unos 9 kms. de la torre] y, de pronto, todo adquirió un aspecto solemne. Sabíamos que el mundo ya no sería igual. Unos cuantos rieron, unos pocos lloraron; la mayoría permaneció silenciosa. Yo recordé unas líneas del Bhagavad Gita, cuando Visnú... exclama ‘ahora me he convertido en la Muerte, en el destructor de mundos’. Me imagino que entonces todos pensamos algo así, de una u otra forma”. Pero es posible que Oppenheimer dramatizara *a posteriori* la impresión que le había causado la explosión de *Gadget*. Su hermano Frank recordó que comentó “ha funcionado”, e I. I. Rabi—amigo de Oppenheimer— lo describiría después volviendo del ensayo de *Trinity* con un pavoneo semejante al de Gary Cooper en *Sólo ante el peligro* (*High noon*, 1952). El sentir de Feynman, a quien Wigner consideraba “un segundo Dirac, sólo que humano”, podría representar el de la mayoría de los científicos de Los Alamos tras el éxito de *Trinity*. Con su sinceridad y crudeza características, Feynman comentó que la explosión de *Gadget* le produjo “una especie de elación, porque durante todo ese tiempo habíamos trabajado mucho para que esa cosa funcionase y no estábamos seguros de cómo



Trinity, 3 centésimas de segundo y 8 segundos después de la explosión (foto LANL)

iría. Yo había tenido siempre una cierta desconfianza de los cálculos teóricos aunque me dedique a ese negocio, y nunca he estado realmente seguro de que la naturaleza acabe haciendo lo que has calculado que debería hacer. Pero ahí estaba, haciendo lo que habíamos calculado". Antes de *Trinity* se habían cruzado apuestas: Teller avanzó que *Gadget* alcanzaría 45 kilotones; Bethe, 8; Fermi, observando el desplazamiento de tiritas de papel, estimó que 10 y Rabi, 18. La explosión fue de 18'6 kilotones.

Se discutía ya si la bomba debía 'exhibirse' ante representantes políticos o usarse directamente sobre un objetivo militar. El famoso *Franck report* del 11-VI-1945, redactado por un comité secreto presidido por James Franck (Nobel 1925) —otro judío emigrado— y que incluía a Szilard y Seaborg, consideraba "que podrían lograrse condiciones mucho más favorables para un eventual acuerdo [de paz] si las bombas nucleares fueran primero mostradas al mundo en una zona inhabitada adecuadamente escogida", concluyendo que "el uso de bombas nucleares debía ser tratado en la política nacional como un problema de largo alcance, más que como una cuestión de inmediata conveniencia militar, que sobre todo debía dirigirse a conseguir un acuerdo que permitiese el control internacional de los medios nucleares de guerra". Sin embargo, el *Advisory Scientists Panel* formado por Oppenheimer, Lawrence, Fermi y Arthur Compton (1892-1962, Nobel 1927) nombrado por el *Interim Committee*¹² que presidía Stimson, aunque sensible a los muchos argumentos en favor del 'ensayo público', acabó concluyendo: "*we see no acceptable alternative to military use*".

El 6-VIII-1945 la *superfortaleza* B-29 *Enola Gay* pilotada por el coronel Paul Tibbets despegó de la enorme base aérea en la diminuta isla de Tinian (Buenavista) en las Marianas con la bomba de uranio *Little Boy* en la bodega del Boeing. Estalló sobre Hiroshima a los 600 metros de altura calculados por von Neumann para conseguir el mayor efecto; otros '*B-san*' habían observado previamente el tiempo. Tras el *Enola Gay* y a bordo del B-29 *Great Artiste* iba Luis Alvarez como observador científico. Alvarez buscó "en vano la ciudad que había constituido nuestro blanco. La nube parecía elevarse de una zona no poblada". Truman recibió este frío despacho tras la explosión: "*Results clear cut successful in all respects. Visible effects greater than any tests...*" Después, a bordo del *Augusta* y de regreso de la reunión con Churchill y Stalin en Potsdam, se dice que Truman comentó: "esto es estupendo, es hora de volver a casa". Por su parte, Alvarez escribió: "Los remordimientos que tengo por haber participado esta mañana en la muerte



Oppenheimer (con su típico *pork-pie sombrero*) y Groves en *Trinity*, junto a los restos de la torre que sostenía *Gadget*.



"Trinity site, where the world's first nuclear device was exploded on July 16, 1945"

y mutilación de miles de civiles japoneses están atemperados por la esperanza de que esta terrible arma que hemos creado sirva para acercar los países entre sí y prevenir otras guerras. Alfred Nobel [1833-96] creyó que su invención de potentes explosivos podía tener ese efecto al hacer las guerras demasiado terribles, pero desgraciadamente tuvo el contrario. Nuestra nueva fuerza destructiva es tantos miles de veces peor, que puede conseguir los sueños de Nobel". Yoshio Nishina (1890-2051), padre de la física moderna japonesa y director del laboratorio del *Riken* en Tokio, confirmó la naturaleza nuclear del explosivo. Su laboratorio había sido arrasado por los B-29 de Curtis LeMay el 13-IV-1945, desapareciendo así el modesto programa nuclear japonés.

Se conoce el diálogo que mantuvieron el general Groves y Oppenheimer ese 6 de agosto, cuando aquél le llamó para informarle tras Hiroshima:

Groves: *Estoy muy orgulloso de usted y de su gente*

Oppenheimer: *¿Fue todo bien?*

G.: *Por lo visto estalló con un tremendo 'bang'*

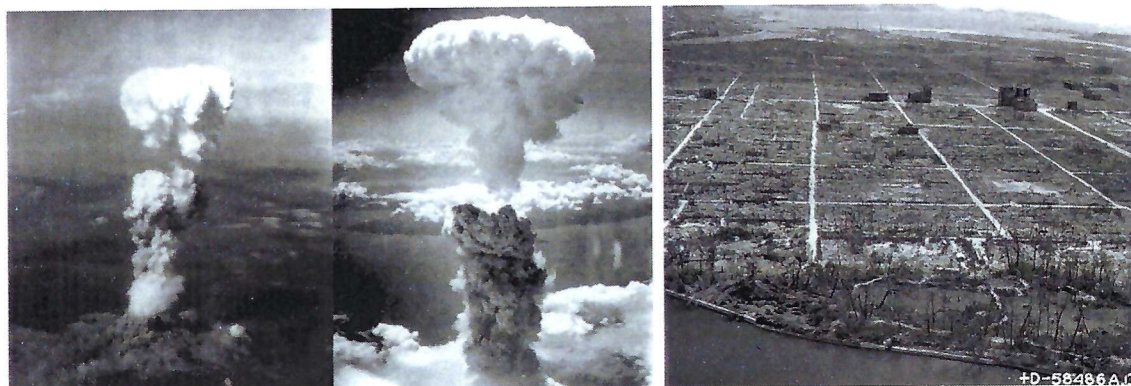
O.: *¿Cuándo fue, después de ponerse el sol?*

12 Tras la muerte de Roosevelt, el Secretario de Guerra Henri Stimson formó y presidió un comité asesor del presidente y del Congreso. Se llamó *Interim Committee* porque se constituyó al margen del Congreso.

Hiroshima, 6-VIII-1945, 12'5 kt, ~80.000 muertos (izqda.).

Nagasaki, 9-VIII-1945 22 kt, ~40.000 muertos (centro) (y muchos más heridos y muertos después en ambas ciudades).

Hiroshima (dcha.)



G.: No, desgraciadamente tuvo que ser a la luz del día por la seguridad del avión [...]

O.: Bien. Todo el mundo se siente razonablemente bien y extendiendo mi más sincera enhorabuena. Ha sido un largo camino

G.: Sí, ha sido un largo camino y creo que una de las cosas más sensatas que hice nunca fue escoger al director de Los Alamos [se refiere a Oppenheimer]

O.: Bueno, tengo mis dudas, general Groves

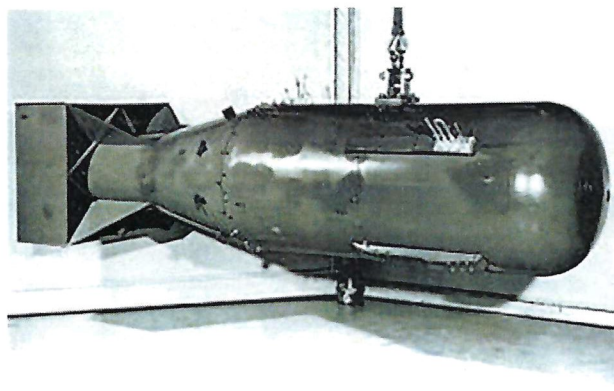
G.: Bien, ya sabe que no las he compartido en ningún momento

Tres días después, el 9-VIII-1945, el B-29 *Bockscar* (Bock's car) pilotado por el mayor Charles W. Sweeney arrojó sobre Nagasaki la bomba de plutonio *Fat Man* (nombre de un personaje de la película *El halcón maltés*, 1941). Al contrario que Hiroshima, esta segunda misión estuvo a punto de ser militarmente un completo desastre: el objetivo previsto era Kokura (centro de producción de municiones), y el regreso se hizo casi sin combustible aterrizando en Okinawa, a 2250 kms. de Tinian. Pero el emperador Hirohito (1901-89) proclamó por radio la rendición incondicional del Japón el 14-VIII, firmada el 2-IX-1945 ante el general Douglas MacArthur (1880-1964) sobre la cubierta del *Missouri*, anclado simbólicamente en la rada de Tokio. Tras indicar a la delegación japonesa "to sign the instruments of surrender at the places indicated", MacArthur cerró los 23 min. de ceremonia con un seco "these proceedings are closed". La URSS solicitó, pero no obtuvo, ser potencia ocupante del Japón; acabar enseguida la guerra para

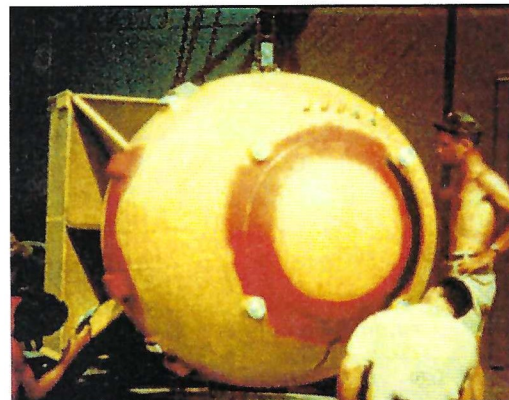
detener las ambiciones de la URSS sobre el Japón pesaría también en los bombardeos nucleares.

Aunque a los científicos de Los Alamos les guiara más de un motivo, el deseo de contribuir al final de la guerra era compartido por todos. La realidad es que una buena parte de los grandes físicos (y no sólo físicos) de la época participaron en el desarrollo de una bomba nuclear de una u otra forma y que, después, muchos de ellos lamentaron haberlo hecho. Y no es menos cierto también que numerosas decenas de miles de soldados del ejército del Pacífico se alegraron al alejar de sí el espectro de la invasión del Japón 'continental' y de la terrible mortandad prevista, que incluiría centenares de miles de vidas japonesas dado el código del *bushido*. Había tres bombas más listas, F-101, F-102 y F-103, que ya no se enviaron a Tinian.

Tras la rendición japonesa, Oppenheimer insistió en el control internacional antes de continuar con más investigaciones. En una carta del 17-VIII-1945 que Oppenheimer dirigió a Henry Stimson reflejando las deliberaciones del *Advisory Scientists Panel*, Oppenheimer incluyó este párrafo, que Lawrence dejó que escribiera Oppenheimer y que no traduciré: "we believe that the safety of this nation—as opposed to its ability to inflict damage on an enemy power—cannot lie wholly or even primarily in its scientific or technical prowess. It can be based on making future wars imposible. It is our unanimous and urgent recommendation to you that... all steps be taken, all necessary arrangements be made, to this one end". Tras el éxito de la bomba soviética



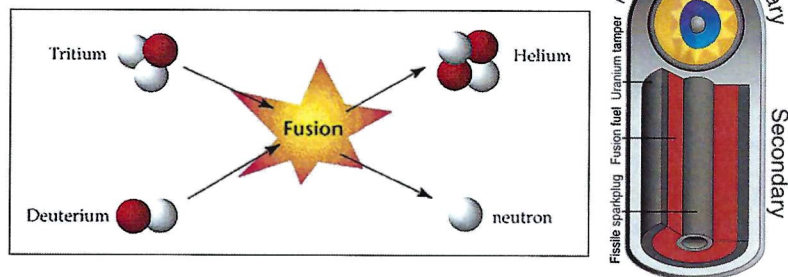
Little Boy (izqda.).
Fat Man (dcha.).



Joe-1 el 29-VII-1949 (sec. 7), creció la presión para conseguir la bomba de hidrógeno que apoyaban Teller y Lawrence. Sin embargo, un comité de seis miembros incluyendo a Oppenheimer concluyó el 30-X-1949 que “if superbombs will work at all, there is no inherent limit in the destructive power that may be attached. *Therefore, a superbomb might become an act of genocide*” [mis cursivas]. Pero la detención de Fuchs en Londres por espionaje contribuyó a aumentar el clima de desconfianza, incluso entre UK y US. Finalmente, el 31-I-1950 el presidente Truman ordenó a la AEC que “continuara sus investigaciones... *incluyendo la bomba de hidrógeno*”. Oppenheimer pensó en dimitir de la presidencia del GAC, pero su renuncia no fue aceptada. La guerra de Corea (1950-53) empezó poco después; acabada ésta, el presidente Eisenhower pronunció el 8-XII-1953 un famoso discurso ante la ONU tras el que comenzó a hablarse de *Átomos para la Paz*. Pero la guerra fría había comenzado mucho antes (el discurso de Churchill del telón de acero es del 5-III-1946) y no concluyó hasta la caída del muro de Berlín el 9-XI-1989 y el colapso y división de la URSS en quince estados independientes el 26-XI-1991.

7. La bomba de hidrógeno y el programa nuclear soviético

Ya en Los Alamos, Teller buscaba la bomba H. Teller y Stanislaw Ulam (1909-84) concibieron un mecanismo (1951) para una bomba nuclear de fusión iniciada por una bomba de fisión. Al contrario que la *fisión*, que requiere núcleos *pesados* para que la reacción sea exotérmica (sec. 3), la *fusión* de núcleos *ligeros* produce grandes cantidades de energía: por ej., la de deuterio ($D = {}_1^2\text{H}$) y tritio ($T = {}_1^3\text{H}$) —figura— produce ${}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ y 17.6 MeV en 10^{-6} s, superando en eficacia y energía liberada a la de $D+D$ (pero ésta también produce tritio pues ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + n$ y además ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_1^3\text{H} + p$, $p = {}_1^1\text{H}$, reacciones de baja sección eficaz que liberan algo más de 3 y 4 MeV respectivamente). La fusión requiere una elevadísima temperatura para superar la repulsión entre los núcleos positivamente cargados, de ahí el primario de fisión cuya radiación comprime y calienta el material fusionable y el calificativo de ‘termonuclear’ para la bomba H. La enorme potencia destructiva de una bomba de fusión procede de que, en principio, no hay límite para el material fusionable: no hay ‘masa crítica’. La primera bomba de fusión, *Ivy-Mike*, cuyo diseño práctico Teller encargó a un doctor de Fermi de sólo 23 años, Richard Garwin (1928-), estalló a las 07:15h del 1-XI-1952 (31-X en USA) volatilizandole la isla de Elugelab en el atolón de Eniwetok con sus 10^4 Megatones (unas 850 Hiroshimas). La prueba era secreta pero Teller, en Berkeley, esperó a detectar la onda sísmica para telegrafiar a Los Alamos: *it's a boy!* Mike era



un complejo de 74 toneladas con un gran equipo criogénico para mantener el deuterio y tritio líquidos. La primera bomba de la serie *Castle*, la *Castle Bravo* diseñada en Los Alamos, utilizaba ya un compuesto de litio-6 y deuterio, Li^6D , un polvo a temperatura ambiente, para producir tritio¹³; era ya una bomba ‘seca’ y por tanto ligera. Su detonación el 1-III-54 en el atolón de Bikini produjo 15 Mt. Un error en las propiedades del litio produjo más potencia de la esperada, poniendo en riesgo a los observadores y afectando gravemente a los

Esquema (Teller-Ulam) de una bomba de fusión iniciada por un primario de fisión (diseño ‘salchicha’)

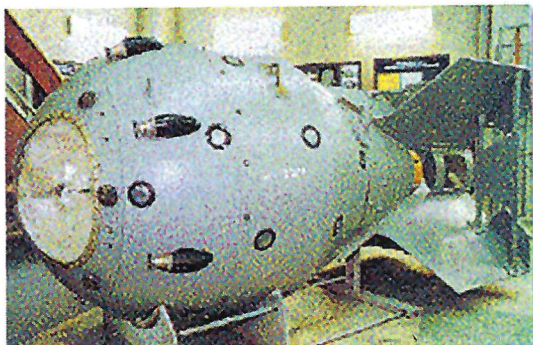
El polígono de pruebas Semipalatinsk-21 (en rojo en el mapa).

Ciudad y monumento a Kurchatov (abajo).

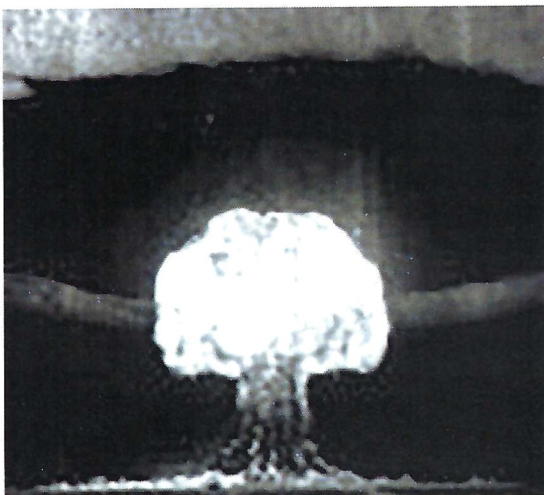


13 El litio-6 constituye el 7.4% del litio natural, pero se puede separar fácilmente, y el compuesto Li^6D permite producir el necesario material de fusión a partir de los neutrones de fisión del explosivo primario: como $n + {}_3^6\text{Li} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He}$, se tiene $n + {}_3^6\text{Li}^6\text{D} \rightarrow {}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He}$.

Joe1



Joe 4 (RDS-6), 12-VIII-1953.



tripulantes del atunero japonés *Fukuryū* (dragón afortunado) *Maru*, causando múltiples protestas. Para entonces otro laboratorio a 65 kms. de Berkeley, el de Livermore abierto el 2-IX-1952, comenzaba a competir con Los Alamos en la fabricación de bombas. Teller abandonó Los Alamos y acabó trabajando en Livermore hasta 1975, actuando *de facto* como director.

El dominio nuclear estadounidense fue breve. El equivalente soviético de Los Alamos fue un laboratorio situado en Sarov, a unos cuatrocientos kilómetros al este de Moscú. Como Los Alamos, Sarov fue escogido por un físico teórico, Yuli Borisovich Khariton (1904-96). Las tropas de Lavrenti Beria (1899-1953), el brutal y temido jefe de la NKVD (predecesora de la KGB), aislaron el pueblo en 1946 que, con varios nombres (Arzamás-16 fue uno de ellos; hoy es de nuevo Sarov), desapareció de los mapas de la URSS (Sarov alberga el *Instituto de física experimental de toda Rusia* y el *Museo de Armas Nucleares*; está hermanada con... Los Alamos). Curiosamente, la biblioteca de Arzamás-16 tenía una suscripción al *Bulletin of the Atomic Scientists*, creado por los científicos 'atómicos' de USA el 10-XII-1945. La primera bomba nuclear soviética RDS-1 (por *Reaktivnyi dvigatel Stalina*, 'motor cohete de Stalin', copia de *Fat Man*), o 'primer relámpago', estalló el 29-VIII-1949 en el polígono de pruebas de Semipalatinsk en Kazajistán, cerca de la ciudad de igual nombre (hoy Semey, ver mapa), lugar que había sido seleccionado por Beria en 1947 pretendiendo que esa estepa estaba

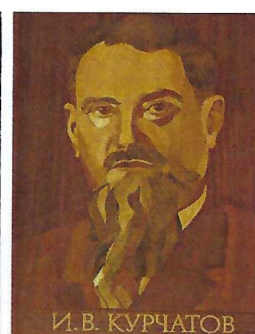
deshabitada. Tras el éxito del ensayo, Beria abrazó a Khariton y a Kurchatov, quienes respiraron aliviados al alejar de sí el *castigo* que Beria les habría impuesto si hubieran fracasado (como lo haría Beria temeroso de Stalin); asegurar ese éxito fue una razón importante para copiar el diseño de *Fat Man*. El nombre clave de las sucesivas bombas soviéticas, RDS-1,2,... tenía algo en común con el que recibieron en Estados Unidos, *Joe* 1,2,... por *Joseph*, alusivo a Stalin.

En Arzamás-16, los físicos teóricos Andrei Dimitrievich Sakharov (1921-89) y Yakov B. Zel'dovich (1914-87) diseñaron la bomba de hidrógeno soviética; también tuvieron acceso, de nuevo a través de Fuchs, a algún diseño de la primitiva 'Super' de Teller. No obstante Khariton y el físico Yuri Smirnov, en un artículo (1993) en el *Bulletin of the Atomic Scientists*, minimizaron la influencia del espionaje soviético en el desarrollo del programa nuclear de la URSS. Sakharov había llegado a Arzamás-16 en mayo de 1950 con su mentor Igor Y. Tamm (1895-1971, Nobel 1958). Los científicos de Sarov contaban con el apoyo del brillante matemático Nicolai N. Bogolyubov (1909-1992), cuyo apellido significa amor (*lyubov*) a Dios (*Bog*), después un importante físico teórico. Inicialmente la compresión del material de fusión se realizó con un diseño original de Sakharov de 'pastel de capas' (*sloika*, hojaldre), alternando capas del material fusionable (deuterio, tritio y compuestos) y del fisiónable (uranio), no por el sistema de compresión por radiación de Teller-Ulam. Tras 1950 el programa RDS-6 (nombre clave para la bomba H) se centró en dos modelos de bomba: RDS-6s (por *sloika*) y RDS-6t (por *truba*, tubo). La RDS-6s, de un tamaño reducido, estalló el 12-VIII-1953 en Semipalatinsk tras una evacuación forzosa más amplia que las anteriores. La explosión de *Joe* 4 (RDS-6s) produjo 400 kilotones, aunque buena parte procedía de la fisión y no de la fusión. Stalin había fallecido en marzo; Beria fue ejecutado en diciembre por Khrushchev, acusado de traición y numerosos crímenes.

La URSS hizo estallar una auténtica bomba termonuclear de 1'6 megatones el 22-XI-1955 en Semipalatinsk, sólo tres años después del ensayo de Estados Unidos; fue la primera lanzada desde el aire, por un Tupolev-16. La bomba RDS-37 usaba un diseño de Sakharov ya basado en la compresión por radiación; su potencia se redujo a la mitad para mayor seguridad de la población (aunque causó algunos muertos), pero aún en el dominio de megatones; Sakharov tenía 34 años. La antigua URSS tiene el siniestro récord para una bomba H: el 3-X-1961, la explosión de *Gran Iván* (*Tsar Bomba*) sobre la isla ártica de Nueva Zemla produjo 50 megatones (unas 4000 *Hiroshimas*). Sin embargo, Sakharov se distanció de las autoridades, realizando investigaciones importantes en física: en 1967 argumentó por primera vez sobre la dominancia

de la materia sobre la antimateria en el universo. Sakharov llevó a cabo una intensa campaña a favor de la no proliferación del armamento nuclear, llegando a recibir en 1975 el premio Nobel de la Paz, “por su lucha por los derechos humanos en la Unión Soviética, por el desarme y la cooperación entre todas las naciones” que las autoridades soviéticas le impidieron recoger. Su prominencia en el movimiento de los disidentes, y su oposición a la invasión de Afganistán por la URSS en 1979, motivó que fuera exiliado a Gorki (la antigua y actual Nizhni Novgorod). Sakharov fue liberado por Mikhaíl Gorbachov (1931-2022) en 1986 y llegó a ser miembro del Congreso de los Diputados del Pueblo de la URSS en 1989; por su parte, Kurchatov trabajó en sus últimos años en aceleradores de partículas y en el proyecto de un reactor de fusión como fuente de energía. Tras su muerte, Kurchatov fue enterrado con todos los honores en la muralla del Kremlin.

UK, Francia, China, y más tarde otras naciones, desarrollaron también sus propios programas nucleares. Por ejemplo, la primera bomba nuclear china, impulsada por Mao Zedong y de nombre 596 (fecha alusiva al agravio del cese de la colaboración URSS-China), corrió a cargo de Sanqiang Qian, quizá instruido por Fuchs en la RDA en julio de 1959. Como resultado, y pese a los desastres del *Gran Salto Adelante*, otra *Fat Man* estalló en una torre el 16-X-1964. China se convirtió en auténtica potencia termonuclear bajo la dirección de Min Yu el 17-VI-1967, lanzando desde un bombardero una bomba H de 3'3 megatones. La caja nuclear de Pandora se había abierto definitivamente; los científicos habían perdido su inocencia para siempre. Antes, en 1957 y en un discurso en el MIT, Oppenheimer había declarado: “los físicos han conocido el pecado, y éste es un pensamiento que no pueden alejar”. El recuerdo de Hiroshima y Nagasaki persiguió a Oppenheimer hasta su muerte. Por su parte, el físico soviético German A. Goncharov (1928-2009), que desde 1952 había trabajado en Arzamas-16, escribió tras una conferencia en Dubna en 1966 dedicada al desarrollo del programa nuclear de la URSS con más de 300 participantes: “indiscutiblemente, la posesión de armas nucleares por las mayores potencias ha hecho imposible la guerra entre ellas. Y las armas nucleares que permanecen en su posesión tras drásticas reducciones [se refiere a los tratados de no proliferación] deberían garantizar la estabilidad global y la seguridad en el mundo”. Esta afirmación, que recuerda la citada de Oppenheimer y, sobre todo, el comentario de Luis Alvarez tras Hiroshima, es ya difícil de sostener. Hoy —e incluso descartando un trágico error— el *equilibrio de terror* es muy inestable, y mucho más tras la proliferación de ‘países nucleares’ que incluyen alguna dictadura. Las armas nucleares, hoy miniaturizadas, pueden acabar además en manos de fanáticos de todo pe-



laje a quienes no les importe la destrucción de sus semejantes ni la suya propia.

Andrei Sakharov con Igor Kurchatov, ‘la barba’.

Retrato de Igor Kurchatov en láminas de madera en el *Instituto de Física y Tecnología* de Kharkov, KIPT.

8. Sobre la responsabilidad moral de los científicos

¿Ha progresado la ciencia mucho más que nuestra conciencia? Ante la devastación de las bombas nucleares resulta difícil no considerar la responsabilidad moral de los científicos que las hicieron posibles. Muchos, como Bethe, se preguntaron angustiados “¿qué hemos hecho?”¹⁴. Pero la pregunta adecuada no era *qué* habían hecho sino *por qué*. Muchos trabajaron en las bombas nucleares movidos por la lucha contra el nazismo y, cuando Alemania ya estaba perdida (se rindió el 8-V-1945), continuaron haciéndolo atrapados por su propia dinámica. Pero las ‘cartas de alarma’ citadas (sec. 4) muestran que *todos* sus redactores trataban de conseguir que su bando tuviera la hegemonía. También Einstein alentó la búsqueda de un explosivo nuclear por los Estados Unidos, aunque después trató de justificarse. En general, la opinión de los científicos no fue constante ni uniforme, pero tras Hiroshima y Nagasaki el panorama cambió. Aunque Lawrence, Alvarez y por supuesto Teller apoyaron la búsqueda de la bomba H, muchos más, como Oppenheimer, Fermi o Rabi se opusieron radicalmente a ella. Sakharov, el padre de la bomba H soviética, fue después muy crítico.

Por otra parte, las bombas nucleares utilizaron nuevos conocimientos fundamentales de física cuántica y nuclear, es decir, de ciencia *básica*. Ante ésta y otras situaciones parecidas, cabría preguntarse: ¿tienen una componente moral las *leyes* científicas? Las leyes fundamentales de la Naturaleza

14 Un buen ejemplo de los complejos sentimientos de los científicos es el de Bethe que, aunque contribuyó al desarrollo de la bomba H ante el temor de que la URSS la obtuviera antes, la calificó como “la mayor amenaza para la civilización”. En 1968 Bethe lo explicó así: “si no hubiera trabajado sobre la bomba lo hubiera hecho otro, y pensaba que si permanecía en Los Alamos podía ser una fuerza en favor del desarme. Así que acepté unirme para desarrollar la bomba H. Parecía lo lógico. Pero a veces desearía haber sido un idealista más consistente”. Tras la decisión de Truman del 31-I-1950, Bethe declaró después: “ninguna nación tiene derecho a usar semejante bomba por justa que sea su causa. No es un arma de guerra, sino de exterminio de poblaciones enteras”.

son éticamente neutras, simplemente *son*. Más aún: no cabe censurar moralmente a Newton porque las trayectorias de los proyectiles obedezcan sus leyes o a Einstein por desvelar que $E=mc^2$, ni responsabilizar a la física cuántica por determinar la valencia, base de la química, porque ésta lo sea también de todos los explosivos convencionales. Tampoco la doble hélice tiene componente moral alguna aunque la manipulación genética y el CRISPR-Cas9 planteen serios dilemas. Pero *la Naturaleza simplemente es, y seguiría siéndolo aunque la evolución no hubiera dado lugar a la especie humana*. Por el contrario, las *aplicaciones* de las leyes naturales *no son: se buscan*, y no todo lo que se puede hacer es permisible. Así pues, una cosa es la ciencia básica, y una muy otra sus aplicaciones y la tecnología.

Por otra parte, el tiempo que media entre la formulación de las leyes fundamentales y sus aplicaciones es ya reducido: sólo 45 años desde el nacimiento de la física cuántica a las bombas nucleares, medio siglo entre los primeros ordenadores personales y la aparición de la inteligencia artificial y el ChatGPT o menos de 60 años desde la doble hélice a las técnicas de manipulación genética. Por supuesto, las aplicaciones tecnológicas y su uso están movidas por el interés y en muchos casos decididas por grandes corporaciones o por los gobernantes: recuérdese el comentario de Truman sobre quién lanzó la bomba o cómo se le asignaron ingentes recursos, lo que implica establecer prioridades morales. Las aplicaciones militares de la ciencia pueden acabar al servicio de la aniquilación, incluso fortuita, y buena parte de las enormes sumas que se gastan en ella estarían mejor invertidas en educación y desarrollo.

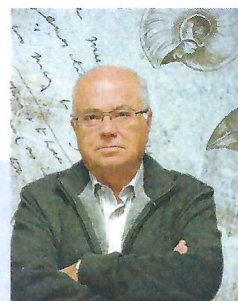
Por supuesto, en el ámbito nuclear son necesarios los tratados de no proliferación y la reducción drástica de las 12600 cabezas nucleares hoy almacenadas; no en vano la doctrina de la *mutual assured destruction* se abrevia MAD. Sería igualmente oportuno establecer moratorias en otras aplicaciones tecnológicas en más de un campo como ya se ha pedido, por ejemplo, ante la edición genética o incluso la IA. Sin embargo, no cabe gran optimismo si se ignora un aspecto que se prefiere olvidar. Pues, dicho a grandes rasgos, los seres vivos están evolutivamente ‘programados’ para una misión fundamental: sobrevivir hasta que su reproducción sea efectiva, ya que el fracaso implica la desaparición de la especie. Este objetivo, tan básico como inconsciente, dificulta que los seres humanos hagan consideraciones al necesario largo plazo. Resulta difícil aceptar hoy de buen grado medidas y restricciones destinadas a garantizar un *mañana* en el que ya no se podrá participar. Se requieren consideraciones éticas en favor de las futuras generaciones que eviten la natural y evolutivamente egoísta conducta de las actuales (que la Tierra albergue hoy 8000 millones de personas —11000 para el próximo siglo— agrava, y mucho,

el problema). Así pues, la verdadera dificultad es el desconocimiento de nuestra propia naturaleza que, por escondida, es nuestro mayor enemigo. *Conócete a ti mismo*, ordenaba el templo de Apolo en Delfos; esa amonestación sigue vigente.

Hay que alejar el horror nuclear del mundo; por eso conviene recordar cómo y por qué se llegó a él. Pues, como dijo Jorge Ruiz de Santayana (1863-1952), “quien desconoce la historia se arriesga a repetirla” (y también, por cierto: “sólo los muertos ven el fin de la guerra”). Paralelamente, es preciso entender las implicaciones del gigantesco desfase actual entre la velocísima evolución tecnológico-cultural y la *lentísima evolución biológica que sigue condicionando cómo pensamos y determinando lo que todavía somos*, algo imprescindible para buscar soluciones a los problemas actuales. Ello requiere un mayor acceso al conocimiento por medio de una mejor y más extendida educación: como dijo un presidente de Harvard, Derek C. Bok, “nada es más rentable que la educación; su coste es despreciable frente al de la ignorancia”. Pues, de otra forma y como reflejó Tácito (c. 55-120), existe el grave riesgo de “crear un desierto y llamarlo paz”.

Bibliografía

- O. R. FRISCH, *What little I remember* (CUP, 1980).
- R. RHODES, *The making of the atomic bomb* (Penguin, 1986); *Dark sun, the making of the hydrogen bomb* (Simon & Schuster, 1996).
- T. POWERS, *Heisenberg's bomb: the secret history of the German bomb* (Da Capo, 2000).
- S. S. SCHWEBER, *In the shadow of the bomb: Oppenheimer, Bethe, and the moral responsibility of the scientist* (Princeton Univ. Press, 2000).
- G. HERKEN, *Broderhood of the bomb* (Owl Books, 2002).
- S. WEINBERG, *Glory and terror. The growing nuclear danger* (NY Review of Books, 2004).
- J. BERNSTEIN, *Oppenheimer, portrait of an enigma* (Duckworth, 2004).
- K. BIRD y M. J. SHERWIN, *American Prometheus* (Vintage, 2006).
- A. PAIS, *J. Robert Oppenheimer, a life* (OUP, 2006).
- J. A. de Azcárraga, *En torno a Albert Einstein, su ciencia y su tiempo*, cap. V (Pub. de la Univ. de Valencia, 2006).
- F. CLOSE, *Trinity: The treachery and pursuit of the most dangerous spy in history* (Allen Lane, 2019).
- Physics Today, Bulletin of Atomic Scientists, Atomic Heritage Foundation.



J. Adolfo de Azcárraga
Catedrático emérito de la
Universidad de Valencia y
miembro del IFIC (CSIC-UV)