

Niels Bohr y la bomba atómica

DANIEL R. BES

Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina*

dbes@telecentro.com.ar

El trabajo intenta correlacionar temporalmente tanto los descubrimientos científicos que permitieron la construcción de la bomba atómica como los acontecimientos políticos y las implementaciones tecnológicas que tuvieron lugar en los países protagonistas. El físico danés Niels Bohr —que había liderado la construcción de la mecánica cuántica— fue el primero en advertir que las armas nucleares eran cualitativamente distintas a las usadas hasta entonces, y que la construcción de una paz estable en la posguerra requería una apertura del tema nuclear entre todos los países aliados, incluida la URSS. Pese a los contactos de Bohr con altos niveles de los gobiernos de Estados Unidos y Gran Bretaña, sus ideas sólo se impusieron gradualmente después de su muerte.

I. Un mínimo de la física detrás de la bomba atómica

A principios del siglo pasado Ernest Rutherford descubrió que los átomos no sólo eran divisibles, sino también espacios casi vacíos. Están formados por un núcleo central, masivo y cargado positivamente, y por electrones, miles de veces más livianos y con carga negativa, que orbitan a una distancia del orden de 100.000 veces el diámetro del núcleo. Sin embargo, este modelo solar en miniatura es incompatible con la física clásica de Newton y de Maxwell, según la cual los electrones deberían tardar alrededor de 10^{-10} segundos en precipitarse sobre el núcleo (y nosotros colapsar simultáneamente). Para explicar la estabilidad de los átomos se desarrolló la mecánica cuántica, una forma totalmente nueva de describir la naturaleza. Los grandes pioneros fueron Max Planck, Albert Einstein y Niels Bohr. Una formalización más definitiva de la misma tuvo lugar en el centro y norte de Europa entre los años 1925 y 1928. El Instituto de Copenhague, dirigido por Bohr, desempeñó un papel preponderante.

* Daniel Bes es físico, investigador emérito de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Ha sido investigador superior del CONICET, decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Favaloro y profesor titular en varias universidades del país y del exterior. Es Doctor honoris causa de la Universidad Nacional de San Martín y ha recibido el premio Bunge y Born, entre otras distinciones.

Una vez aclarado el funcionamiento de los átomos, los físicos se dedicaron a estudiar los núcleos. Sabían que el más sencillo (el de hidrógeno) estaba constituido por una partícula llamada protón. En 1932 James Chadwick descubrió el neutrón, muy parecido al protón por su masa y por otras propiedades, pero sin carga eléctrica. La presencia de protones y neutrones en el núcleo permitió explicar muchas propiedades, entre ellas la existencia de isótopos: átomos cuyos núcleos tienen igual número de protones y distinto número de neutrones. En particular, son protagonistas de nuestra historia dos isótopos del uranio, el ${}_{92}\text{U}_{143}^{235}$ y el ${}_{92}\text{U}_{146}^{238}$, con 143 y 146 neutrones, respectivamente. No hay forma de separar químicamente dos isótopos, porque las propiedades químicas dependen de los electrones periféricos, y hay tantos electrones como protones tiene el núcleo (92 en el caso del uranio).

Los neutrones fueron útiles también como proyectiles, pues podían penetrar en núcleos sin sufrir la repulsión coulombiana. Desde 1935, Enrico Fermi en Roma, Irène Curie y Frédéric Joliot en París y Otto Hahn y Lise Meitner en Berlín, bombardearon núcleos de uranio con neutrones. Se suponía que los neutrones capturados daban origen a nuevos elementos químicos más pesados, llamados transuránicos.

También en 1935 Bohr formuló el modelo de la gota líquida, según el cual los neutrones y protones se comportaban dentro del núcleo como las moléculas en una gota de agua. El modelo permitía sistematizar las energías del estado fundamental de los núcleos de la tabla periódica.

En 1938 Hahn y Fritz Strassmann encontraron bario (${}_{56}\text{Ba}_{82}^{138}$) entre los productos del bombardeo de uranio con neutrones, pero no pudieron explicar esta presencia. Hahn escribió a su ex colaboradora Meitner, por entonces exiliada en Estocolmo.

Meitner pasó el fin del año junto con su sobrino Otto Frisch (exiliado en Copenhague). Encontraron que el mismo modelo de la gota líquida predecía que el núcleo prefiere dividirse en dos productos de masa semejante cuando el número de protones es grande, y que este proceso libera una energía relativamente pequeña por núcleo fisionado, pero aterradora dado el número de átomos por centímetro cúbico. Frisch regresó a Copenhague el día en que Bohr partía para Estados Unidos Bohr se golpeó fuerte la cabeza, y estuvo completamente de acuerdo con la interpretación de Frisch y Meitner. ¡Los físicos más notables no se habían percatado de que la fisión nuclear era producida desde 1935! Si lo hubiesen hecho, posiblemente la bomba atómica hubiese estado lista para la Segunda Guerra Mundial.

Los Curie-Joliot descubrieron que cada fisión estaba acompañada por la emisión de dos o más neutrones (abril de 1939). Esto hacía posible una reacción en cadena, en la que el neutrón inicial produce dos neutrones;

estos dos, cuatro y así sucesivamente. En fracciones de segundo tiene lugar la multiplicación explosiva.

Mediante consideraciones teóricas, Bohr encontró que el isótopo fisiónable del uranio era el U^{235} , cuya abundancia es sólo de 0,7 por ciento. Para hacer una bomba se necesitaría separar («enriquecer») una masa mínima («masa crítica») de este isótopo en forma casi pura. Dadas las dificultades para separar isótopos, Bohr estimó que se necesitarían todos los esfuerzos de un país para poder producir una bomba. Él y John Wheeler publicaron un clásico sobre la teoría de la fisión en noviembre de 1939.

A comienzos de 1941, tanto en Alemania como en Estados Unidos se estudió otro camino para la producción de la bomba: la captura de neutrones por U^{238} y la posterior separación química de un nuevo elemento químico con 94 protones, llamado después plutonio. El ${}_{94}^{239}\text{Pu}_{145}$ tendría propiedades fisiles semejantes a las del U^{235} . El problema consistía en desarrollar una fuente sustentable de neutrones, es decir, construir un reactor nuclear.

II. Un *racconto* histórico-político de los principales agentes

II.1. Alemania

Adolf Hitler asumió como Canciller del Reich en enero de 1933. En abril se dictó la Ley para la Restauración del Servicio Civil Profesional, según la cual se exigía tener ascendencia aria para ser empleado del Estado. Ya durante la República de Weimar existían sentimientos chauvinísticos y antijudíos en el medio académico. Era difícil para los judíos ser nombrados en las cátedras de física experimental, consideradas como principales. Generalmente accedían a las que hoy llamaríamos de física fundamental (relatividad, cuántica, física nuclear). Como consecuencia de las leyes raciales, un 25 por ciento de los físicos alemanes fue expulsado y, entre ellos, la gran mayoría de los físicos «fundamentales», que hubiesen sido fundamentales para desarrollar una bomba nuclear. A raíz de un pedido de Planck por la reincorporación de un prominente químico expulsado, Hitler contestó: «Si la expulsión de científicos judíos conlleva la aniquilación de la ciencia alemana contemporánea, entonces tendremos que pasarnos sin ciencia durante algunos años». Si esta expulsión no hubiese tenido lugar y la fisión hubiese sido descubierta en 1935, no sólo la bomba atómica hubiese estado lista para la Segunda Guerra, sino que posiblemente lo hubiese estado en manos alemanas. Recordemos que el centro de la investigación en física sólo cruzó el Atlántico a partir de la Segunda Guerra.

Bohr desde Copenhague y Leo Szilard desde Londres fueron especialmente activos en la ubicación de los científicos desplazados. Una vez atenuada la crisis económica del '30, muchos pasaron a Estados Unidos. En 1933 tuvo lugar un congreso en Londres sobre este tema. Allí Bohr conoció a un abogado norteamericano, Felix Frankfurter, muy cercano al presidente Franklin Roosevelt. Veremos más adelante las consecuencias de este encuentro.

La Segunda Guerra Mundial comenzó en noviembre de 1939. La fisión no pasó inadvertida en Alemania. En el verano de 1941, Fritz Houtermans produjo un informe en el que calculaba la masa crítica de U^{235} y sugería el camino del Pu^{239} para la bomba atómica.

Durante el año 1941 los ejércitos alemanes arrollaron casi toda Europa y el norte de África. En junio de ese año Hitler invadió la URSS. Pero a fines del mismo Estados Unidos entró en guerra, y el frente oriental se detuvo durante el invierno. Fue evidente para los alemanes la necesidad de desarrollar nuevas armas.

Hacia junio de 1942 Werner Heisenberg, otra figura clave en la creación de la mecánica cuántica, había asumido la responsabilidad principal en el programa nuclear. Pero no por ello abandonó sus propias investigaciones, sus viajes y la recepción de honores. Los alemanes, con un presupuesto moderado, siguieron el camino del reactor. Primero en Berlín y después, a raíz de los bombardeos, en Haigerloch (NE del Jura). La guerra finalizó en mayo de 1945, sin que el reactor hubiese llegado al estado crítico. Así terminó el programa nuclear alemán, que comenzó adelantado respecto del de los aliados. Los alemanes mostraron más eficiencia en el desarrollo de las bombas V2.

II.2. Gran Bretaña

Winston Churchill fue Primer Ministro del Reino Unido durante casi toda la Segunda Guerra (1940-1945). Se rodeó de un grupo de asesores científicos capaces, Lord Cherwell y John Anderson (Canciller del Exchequer) entre ellos. Las investigaciones británicas priorizaron el radar y la criptografía. Los emigrados europeos no podían participar directamente en estas tareas clasificadas. Fue así como Frisch y Rudolf Peierls desarrollaron un método para producir una bomba atómica usable durante la guerra (noviembre de 1941). Basándose en el trabajo teórico de Bohr y Wheeler de 1939, recalcularon la masa crítica de U^{235} en unos pocos kilogramos (previamente se había hablado hasta de toneladas). También diseñaron un procedimiento basado en la difusión a través de materiales porosos¹ para enriquecer el U^{235} .

A raíz del informe Frisch-Peierls se creó el comité MAUD para las investigaciones nucleares, dependiente de la empresa Tube Alloys, presidida por el

¹ Un procedimiento semejante sería usado por Invap en la Argentina (1983).

mismo Anderson. Se incorporaron también científicos franceses escapados. Sin embargo, el programa nuclear británico seguía siendo modesto. Una vez lanzado el proyecto Manhattan en Estados Unidos y frente a la posibilidad de que el Reino Unido quedara excluido, Churchill convenció a Roosevelt de firmar el primer Acuerdo de Quebec (agosto de 1943), en el que se establecía: el no uso de esta «agencia» en contra del otro; ii) el no uso contra terceros sin mutuo acuerdo; iii) ninguna información a terceros sin mutuo acuerdo.

Después del Acuerdo se desarrolló una cooperación efectiva en materia nuclear entre los dos países. Con este motivo, los científicos de Tube Alloys se trasladaron a Estados Unidos (noviembre y diciembre de 1943).

II.3. Estados Unidos

Roosevelt fue elegido presidente de Estados Unidos en 1932. Cuando Bohr llegó a Estados Unidos en 1939, se conoció allí la noticia de la fisión. En abril, el *New York Times* publicó un artículo sobre fisión, neutrones y reacciones en cadena. Esto alarmó a Szilard quien, al contrario que Bohr, creía en la posibilidad de una bomba y su desarrollo por los alemanes. Propuso mantener en secreto las investigaciones nucleares, cosa que fue rechazada por otros científicos, especialmente por Bohr, quien concebía la ciencia como un emprendimiento internacional (el continuo flujo de visitantes por el Instituto de Copenhague fue testimonio de esta convicción). Finalmente Szilard convenció a Einstein para que enviase una carta a Roosevelt advirtiéndole la posibilidad de que Hitler construyera la bomba (julio de 1939). Sin embargo, esta carta no tuvo los efectos que se le atribuyen generalmente. Si bien Roosevelt creó el Comité del Uranio, nombró al frente del mismo a Lyman Briggs, director del *Bureau of Standards*, quien «cajoneó» muchos proyectos. Durante el período siguiente hubo sólo avances aislados, fruto del empuje personal más que del apoyo oficial. Glenn Seaborg desarrolló en Berkeley un procedimiento para separar químicamente el plutonio del uranio (marzo de 1941). Pero fueron negados a Fermi y a Szilard 100.000 dólares para empezar a construir un reactor nuclear. A pesar de eso, la primera reacción nuclear sustentable en cadena tuvo lugar en Chicago en diciembre de 1942. Los primeros tramos del camino del plutonio quedaron así recorridos.

En octubre de 1941 Vannevar Bush (presidente de la Fundación Carnegie) llevó a Roosevelt el informe de Frisch y Peierls. Roosevelt creó un Comité de Política Militar, presidido por Bush, e integrado por pocas y altas personalidades. Desde ese momento (julio de 1942) las consideraciones políticas fueron restringidas a este grupo, que debía su autoridad al presidente. En particular, los científicos quedaron excluidos de las decisiones políticas.

Proyecto Manhattan

En noviembre de 1942 el general Leslie Groves fue nombrado al frente del proyecto. Anteriormente había dirigido la construcción del Pentágono. Desde ese momento hubo un cambio de escala en el esfuerzo por construir la bomba. Todos los involucrados en el proyecto se concentraron en ganar la carrera a los alemanes.

Los desarrollos nucleares tuvieron lugar principalmente en tres ubicaciones:

- a) Laboratorio Nacional de Los Álamos (Estado de Nuevo Mexico), donde se centró la dirección del proyecto y el diseño de la bomba. Robert Oppenheimer fue designado Director del mismo en septiembre de 1943.
- b) Hardford Site (2.600 km², Estado de Washington). Producción de Pu²³⁹ en reactores y su posterior separación química.
- c) Laboratorio Nacional de Oak Ridge (243 km², Estado de Tennessee). Enriquecimiento de U²³⁵. Se desarrollaron dos procedimientos de difusión y un tercero basado en la separación electromagnética. Da una idea del tamaño de las instalaciones el hecho de que el cableado para el último método hubiera requerido todo el cobre usado por año en Estados Unidos. Esta imposibilidad fue subsanada usando conductores de plata, material que salió de la Reserva Federal de Estados Unidos.

En junio de 1945 el Proyecto Manhattan empleaba 130.000 personas. Hasta esa fecha llevaba gastados 2×10^9 dólares, equivalentes a 24×10^9 dólares actuales. Roosevelt murió en abril de 1945. Asumió Harry Truman, quien no estaba enterado del proyecto nuclear. Truman designó un Comité Interino, presidido por el secretario de Guerra Henry Stimson (miembro del anterior Comité de Política Militar). Debajo del mismo había un panel científico, integrado por Oppenheimer, Fermi, Karl Compton y Ernest Lawrence. El Comité Interino concluyó: «... la bomba no debería ser empleada sobre un área civil (...) el blanco más deseable sería el de una planta vital de guerra que emplease un gran número de trabajadores y densamente rodeada por casas de trabajadores». Aparentemente nadie discutió la contradicción.

El 16 de julio de 1945 la bomba de plutonio «Trinity» fue explotada en Alamogordo. Ocho días después, Truman comunicó la existencia de la bomba a Joseph Stalin. Una bomba de uranio fue arrojada el 6 de agosto sobre Hiroshima y, tres días después, otra de plutonio sobre Nagasaki.

III. Niels Bohr

Bohr volvió a Copenhague y allí permaneció aislado a partir de la ocupación alemana (abril de 1940). En octubre de 1941 tuvo la visita de Heisenberg, recreada por Michael Frayn en la pieza teatral «Copenhague». Cualesquiera hayan sido los motivos de Heisenberg, Bohr quedó con la impresión de que en Alemania se daba importancia al desarrollo nuclear. En enero de 1943 recibió un mensaje secreto de Chadwick (jefe científico de Tube Alloys), invitándolo a pasar a Inglaterra, adonde «su cooperación podría significar una ayuda considerable en problemas especiales». A pesar de que Bohr siempre se sintió cercano a Inglaterra (allí había hecho su primera contribución importante a la mecánica cuántica, integrando el grupo de Rutherford), contestó que era su deber permanecer al frente de su instituto, y que seguía convencido de la inaplicabilidad de los últimos conocimientos nucleares. Pero en noviembre de 1943 se filtró la noticia de que los nazis se llevarían a todos los judíos daneses. La gran mayoría pudo pasar a Suecia, Bohr y familia incluidos, con ayuda de la flota pesquera danesa. Poco después Bohr fue transportado a Inglaterra en el compartimento de bombas de un avión. Lo siguió su hijo Aage², entonces estudiante de física.

Bohr fue nombrado consultor de Tube Alloys y trabó una estrecha amistad con Cherwell y con Anderson. Viajó a Estados Unidos con el equipo británico y, después de una breve estadía en Washington, pasó a Los Álamos. Allí revisó todas las fases del proceso, llegando a la conclusión de que «no necesitaban mi ayuda para hacer la bomba». Además de un elogio para el personal del laboratorio, esta opinión justificaba su dedicación a un problema hasta entonces no discutido: el de las consecuencias de la existencia de la bomba en el mundo de la posguerra.

Bohr concluyó lo siguiente:

- i. Las armas atómicas eran cualitativamente distintas a sus predecesoras convencionales. Se abría una era en la cual sería imposible resolver conflictos mediante guerras. Esta era una consecuencia positiva de la existencia de bombas atómicas.
- ii. El Proyecto Manhattan era sólo el comienzo. Ya Edward Teller quería desarrollar una bomba de hidrógeno.
- iii. Las armas nucleares se diseminaban por otros países. Cada arma nuclear sumada disminuiría la seguridad en lugar de aumentarla.
- iv. Era previsible una tensión entre Occidente y Rusia en la posguerra. El único medio de evitar una carrera armamentista era tener un mundo abierto.

² Aage Bohr fue también Premio Nobel (1975), falleció en septiembre de 2009.

Bohr volvió a Washington, adonde reanudó dos contactos importantes. Uno, con Lord Edward Halifax, embajador británico en Washington, y a través de Halifax mantuvo un canal con Andersen. El otro consistió en reencontrarse con Frankfurter, por entonces miembro de la Suprema Corte. Frankfurter pudo así comunicar a Roosevelt las ideas de Bohr. Como Bohr formaba parte del equipo británico, posiblemente Roosevelt interpretó que Bohr transmitía ideas generadas en Londres. La respuesta fue que «Bohr estaba autorizado a decir a nuestros amigos de Londres que el Presidente está ansioso de explorar las salvaguardias apropiadas en relación con X».

Bohr regresó a Inglaterra en abril de 1944. Allí le esperaba una carta de Peter Kapitza (también ex integrante del grupo de Rutherford) invitándolo a pasar a la URSS. Bohr tuvo la precaución de clarificar su situación con el servicio secreto británico. Anderson escribió un memorándum a Churchill instando a hacer una comunicación a los rusos sobre el tema nuclear como condición necesaria para un entendimiento en la posguerra. La contestación de Churchill fue terminante: «de ninguna manera». En mayo de 1944 fue igualmente desastrosa la entrevista entre Bohr y Churchill (Cherwell presente).

De regreso a Washington, Bohr se entrevistó con Frankfurter y éste a su vez con Roosevelt. El físico danés quedó encargado de escribir un memorándum³. Durante julio y agosto volvió a Los Álamos, adonde colaboró en el problema de la detonación de la bomba de plutonio. El 26 de agosto Roosevelt recibió a Bohr; quien salió de la entrevista completamente satisfecho, creyendo en la posibilidad de ser encargado de una misión exploratoria en la URSS. Pero en noviembre tuvo lugar una segunda entrevista en Quebec entre Churchill y Roosevelt. Roosevelt se plegó completamente a la obstinación de Churchill. Un memorándum a Cherwell sugería que Bohr era un espía ruso (conexión Kapitza), y la conveniencia de internarlo. Una contestación enérgica de Cherwell detuvo esta acción.

Después de otra visita infructuosa a Londres, Bohr volvió a Washington. Escribió un segundo memorándum a Roosevelt, pero Roosevelt murió en abril de 1945. Hubo una entrevista más entre Frankfurter y Stimson, que no varió las recomendaciones del Comité Interino. Bohr se reencontró con su familia en Londres y todos regresaron a Copenhague en agosto de 1945. Si bien siguió entrevistándose con políticos importantes, Bohr fue cada vez menos escuchado a medida que crecía la intensidad de la Guerra Fría. Su carta abierta a la ONU, subrayando el concepto de apertura, no tuvo repercusión fuera de Escandinavia (1950). Siguiendo su concepto central de apertura, Bohr consagró su instituto a la reunión de físicos de un lado y del otro

³ El contenido de este memorándum, así como el de abril de 1945, forma parte de la carta de Bohr a las Naciones Unidas de 1950.

de la cortina de hierro⁴. Por medio del tema común de la ciencia, intentó construir una sociedad supranacional de seres humanos racionales. Bohr falleció en noviembre de 1962.

IV. Opiniones sobre los esfuerzos de Bohr

Evidentemente Bohr fracasó en sus intentos. Pero podemos preguntarnos acerca de la racionalidad de su postura. Existe una posición que sostiene que las ideas de Bohr constituyeron un vuelo hacia un misticismo más elevado, alejado del mundo desagradable e inaceptable del mundo de la política (por ejemplo D. C. Watt, citado por Gowing, 1986). El otro punto de vista se basa en la inevitabilidad del desarrollo atómico de la URSS. El hecho de no consultar con la URSS antes de usar la bomba hizo inevitable el fracaso de los intentos para establecer un control internacional en la posguerra. Entre las dos posiciones, ¿cuál fue la más práctica? ¿Cuál la más ilusa? Describamos brevemente la carrera armamentista.

Ya durante la guerra, los físicos rusos habían reconocido la existencia del esfuerzo de Estados Unidos, al constatar la desaparición del *Physical Review* de publicaciones sobre física nuclear. Además, hubo por lo menos tres espías formando parte del proyecto Manhattan. El más conocido fue Klaus Fuchs, un emigrado que trabajó en Birmingham en el tema de la difusión del uranio y en Los Álamos en el detonador de la bomba de plutonio. El programa nuclear de la URSS, bajo la dirección de Igor Kurchatov, terminó en 1949 con el monopolio nuclear de Estados Unidos. Estados Unidos explotó su primer artefacto termonuclear en noviembre de 1952 (equivalente a 700 Hiroshimas). La URSS hacía lo propio menos de un año después.

En menos de una década tuvo lugar la doble revolución técnica que llenó los arsenales con misiles intercontinentales llevando ojivas termonucleares, estableciendo una vulnerabilidad mutua sin precedentes históricos. Definimos como 1 WW2 al total del poder explosivo usado durante la Segunda Guerra Mundial, incluidas las dos bombas atómicas. Se necesitan unos pocos cientos de WW2 para destruir todas las ciudades del planeta. En 1985, el poder explosivo acumulado por las dos superpotencias era de 6.000 WW2 (equivalentes a 2×10^9 toneladas de TNT). Si bien Estados Unidos conservó un liderazgo tecnológico (adelantos tanto en ojivas nucleares como

⁴ Esta apertura tuvo también consecuencias para la física argentina. Solamente habiéndose tenido en cuenta también al Sur puede explicarse que quien escribe este artículo (por entonces sin doctorado u otros antecedentes) hubiese sido aceptado en el Instituto de Bohr en 1956. Me tocó hacer el papel de intermediario en el proceso de introducción de una cultura científica más profunda en nuestro país.

en sistemas de transporte), las innovaciones fueron duplicadas por la URSS al cabo de pocos años. En cambio, la URSS alcanzó ventajas cuantitativas (más armas), sobre todo después de la crisis cubana.

Los excesos de los complejos militar-industriales de ambas potencias no sólo se debieron a peligros externos. También influyeron rivalidades entre las ramas militares, la ganancia de capital político con denuncias exageradas de peligro, el aumento de la capacidad tecnológica del complejo productivo, etcétera. Finalmente las armas nucleares dejaron de ser consideradas instrumentos aptos para destruir al adversario. En las dos superpotencias muchos entendieron que sólo se necesitaba una capacidad nuclear suficiente como para hacer inaceptable a la «otra» el riesgo de una guerra nuclear. La disuasión comenzó siendo un hecho para después erigirse en una política. La necesidad de discutir medidas de control armamental creó un canal importante de diálogo entre Estados Unidos y la URSS. Las ideas de Bohr empezaron a imponerse, aunque éste ya no estaba para impulsarlas.

El PTBT (1963) estableció una prohibición parcial de ensayos nucleares en la atmósfera que acalló las protestas debidas a la contaminación ambiental radioactiva. El OST (1967) prohibió la colocación de armas nucleares en el espacio exterior. También en 1967 se firmó el Tratado de Tlatelolco, que declaró libre de armas nucleares a Latinoamérica y partes del Caribe. Después de desarrollar sofisticados sistemas de vigilancia, las superpotencias acordaron sistemas de inspección. El más general está asociado con el NPT (1968), a cargo de la Organización Internacional de Energía Atómica. Trata asimétricamente a los signatarios no poseedores de bombas nucleares respecto de los cinco países que oficialmente las tienen.

La búsqueda de defensas antimisilísticas ha sido permanente, a pesar de que siempre aparecieron contramedidas. Como estos desarrollos resultaban antiestabilizantes, se firmó el ABM (1972), que garantizó la disponibilidad de ambas fuerzas de disuasión y, con ello, ahorró a ambos lados una carrera costosísima en tecnologías ofensivas y defensivas. En 1972 (1979) se firmó el SALT I (II) que limita el crecimiento de arsenales misilísticos.

Pero, a pesar de sus méritos, ninguno de estos acuerdos limitó la carrera armamentista entre las dos superpotencias. Finalmente, en Ginebra (1985) y Reykjavik (1986), se reunieron dos jefes de Estado convencidos de la necesidad de eliminar las armas nucleares. Si bien las negociaciones fracasaron en Reykjavik (debido al proyecto SDI, del cual no se habló más a partir de 1993), Ronald Reagan y Mijaíl Gorbachov firmaron en diciembre de 1987 el primer tratado (IMF) que eliminaba armas nucleares. Suprimía las armas de alcance intermedio y corto del escenario europeo. Complementado con el tratado CFE, que limitaba el armamento convencional en Europa (no-

viembre de 1990) y con iniciativas unilaterales durante el otoño de 1991, significó el fin de la Guerra Fría.

El START I (Tratado sobre la Reducción de Armas Estratégicas) fue firmado en 1991, cinco meses antes del derrumbe de la URSS. Los dos signatarios se comprometieron a un tope de 6.000 cabezas nucleares (por encima de misiles balísticos intercontinentales, misiles lanzados desde submarinos y bombarderos). La implementación final (2001) resultó en una reducción del 80 por ciento de las armas nucleares en existencia. No se hizo público el destino de las ojivas descartadas.

En abril de 2010 los presidentes Barack Obama y Dimitry Medvedev firmaron el START II, por el cual se comprometen a reducir a 1550 el número de sus ojivas nucleares. Esta firma se produjo en un momento clave del esfuerzo para frenar la proliferación nuclear en el planeta. En 1996 se firmó el CTBT, que prohíbe completamente todos los ensayos nucleares. Todavía faltan algunas ratificaciones.

Otra preocupación ha sido el control de materiales fisibles (U^{235} enriquecido y Pu^{239}). A pesar de que la mayoría de los estados con armamento nuclear ha detenido su producción, un tratado al respecto no ha sido concluido. Desde el punto de vista de Bohr, el problema de las armas nucleares y de la guerra *tenía que ser resuelto*: la amenaza para la supervivencia de la humanidad simplemente no dejaba otra alternativa.

Bibliografía

- Barfoed, Niels et al. (eds.) (1989). *The Challenge of an Open World*, Copenhagen, Munksgaard.
- Bohr, Aage (1967). «The War Years and the Prospects Raised by the Atomic Weapons», en Rozental, Stefan (ed.), *Niels Bohr*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co.
- Boserup, Andres, Leif Christensen y Ove Nathan (eds.) (1986). *The Challenge of Nuclear Armaments*, Copenhagen, Rhodos.
- Bundy, McGeorge (1986). «Nuclear Truth and Soviet-American Co-Existence», en Boserup, Andres, Leif Christensen y Ove Nathan (eds.), *The Challenge of Nuclear Armaments*, Copenhagen, Rhodos.
- Glaser, Alexander y Zia Mian (2008). «Resource Letter PSNAC-1: Physics and Society: Nuclear Arms Control», en *American Journal of Physics*, Vol. 76, N° 1, enero.
- Gowing, Margaret (1986). «Niels Bohr and Nuclear Weapons», en Boserup, Andres, Leif Christensen y Ove Nathan (eds.), *The Challenge of Nuclear Armaments*, Copenhagen, Rhodos.
- Pais, Abraham (1991). *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity*, Oxford, Clarendon Press.

Rhodes, Richard (1986). *The Making of the Atomic Bomb*, Nueva York, Simon & Schuster Inc.

Rhodes, Richard (2008). *Arsenals of Folly. The Making of the Nuclear Arms Race*, Nueva York, Vintage Books.

Abstract

The aim of this work is to temporarily correlate the scientific discoveries that allowed the construction of the atomic bomb, with the political events and technological implementations that took place at the relevant countries. The Danish physicist Niels Bohr—who had been the senior leader in the construction of quantum mechanics—was the first to realize that nuclear arms were qualitatively different from any other weapon used so far, and that the construction of a stable postwar peace required an opening on the nuclear subject between the allied countries, including the USSR. In spite of Bohr's high level contacts within the USA and Great Britain governments, Bohr's ideas took over gradually, only after his death.

Palabras clave

Descubrimientos científicos - bomba atómica – Bohr – Segunda Guerra Mundial – tratados internacionales

Key words

Scientific discoveries - atomic bomb – Bohr – World War II – international treaties