

# Bomba atómica: un juego de billar dentro del átomo y la película

# OPPENHEIMER



$$\nabla^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \phi(t, \mathbf{x}) = 0$$



$$(i \partial_t - m) \psi \equiv (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = 0$$

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$

$$\left[ \frac{1}{i^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right] \phi(t, \mathbf{x}) = 0$$

$$\left[ \frac{1}{2m} (\hat{\sigma} \cdot (\hat{\mathbf{p}} - e\mathbf{A}))^2 + eV \right] \psi = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi \quad \left[ \frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left( \sqrt{-g} g^{\alpha\beta} \frac{\partial \phi}{\partial x^\beta} \right) \right] + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \phi = 0$$



↙ **Alejandro Riveros**  
Dr. en Ciencias mención Física

↙ **Juan Francisco Fuentealba**  
Dr. en Ciencias mención Física

↙ **Felipe Tejo**  
Dr. en Ciencias mención en Física.

*"... En mi mente pensaba en una línea del Bhagavad-Gita en la que Krishna intenta persuadir al Príncipe de que debe cumplir con su deber: 'Me he convertido en la muerte, el destructor de mundos'..."*

Esas fueron las frases que escribió el físico estadounidense J. Robert Oppenheimer, líder del proyecto Manhattan, días antes de que se lanzaran las bombas atómicas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki el 6 y el 9 de agosto de 1945, respectivamente, que causaron la muerte de 246 mil personas. El mundo presenció dos de las explosiones más terroríficas generadas por la humanidad. La bomba atómica pasó de ser un proyecto a ser una realidad y había sido usada contra la población civil. Es difícil tratar de entender cómo se llegó a esto, pero si analizamos el contexto histórico junto con el avance de la física de esa época, aunque no lo logremos entender del todo tal vez tendremos algunos indicios para explicar lo ocurrido.

Nosotros, como científicos, enfocaremos este artículo alrededor de la física detrás de la bomba atómica y como el avance de la ciencia en esos años fue el detonante para generar esta arma. A diferencia de las bombas convencionales basadas en reacciones químicas, como por ejemplo, la dinamita o TNT creada por Alfred Nobel, quien curiosamente creó posteriormente los premios Nobel en arrepentimiento, la bomba atómica como su nombre lo indica es una bomba basada en reacciones dentro del núcleo del átomo. Actualmente sabemos que toda la materia está formada por átomos y que sus núcleos están formados por protones y neutrones los cuales en general son estables gracias a la fuerza nuclear fuerte (una de las cuatro fuerzas fundamentales, las restantes son la fuerza electromagnética, la gravitatoria, y la nuclear débil) logrando evitar la repulsión eléctrica entre protones. Sin embargo, no todos los átomos son estables, algunos de ellos conocidos como átomos pesados son inestables debido a que poseen un exceso considerable de neutrones y protones dificultando que la fuerza nuclear los pueda mantener estables y produciendo actividad dentro del núcleo, lo que se conoce como la radiactividad cuando existe un exceso de neutrones respecto a protones. Es por esto que la bomba atómica fue confeccionada en base a reacciones del núcleo de átomos pesados como el Uranio que es altamente radiactivo o inestable. El Uranio es el elemento más pesado que podemos encontrar en la naturaleza, posee 92 protones y puede contener entre 140 y 146 neutrones, lo que lo convierte en un elemento altamente radiactivo. Aunque recientemente se ha logrado obtener en un laboratorio un átomo aún más pesado, el Ununoctio (actualmente llamado Oganésón) con 118

protones en su núcleo el cual tuvo una duración de apenas 0,9 milésimas de segundos, debido a su alta inestabilidad.

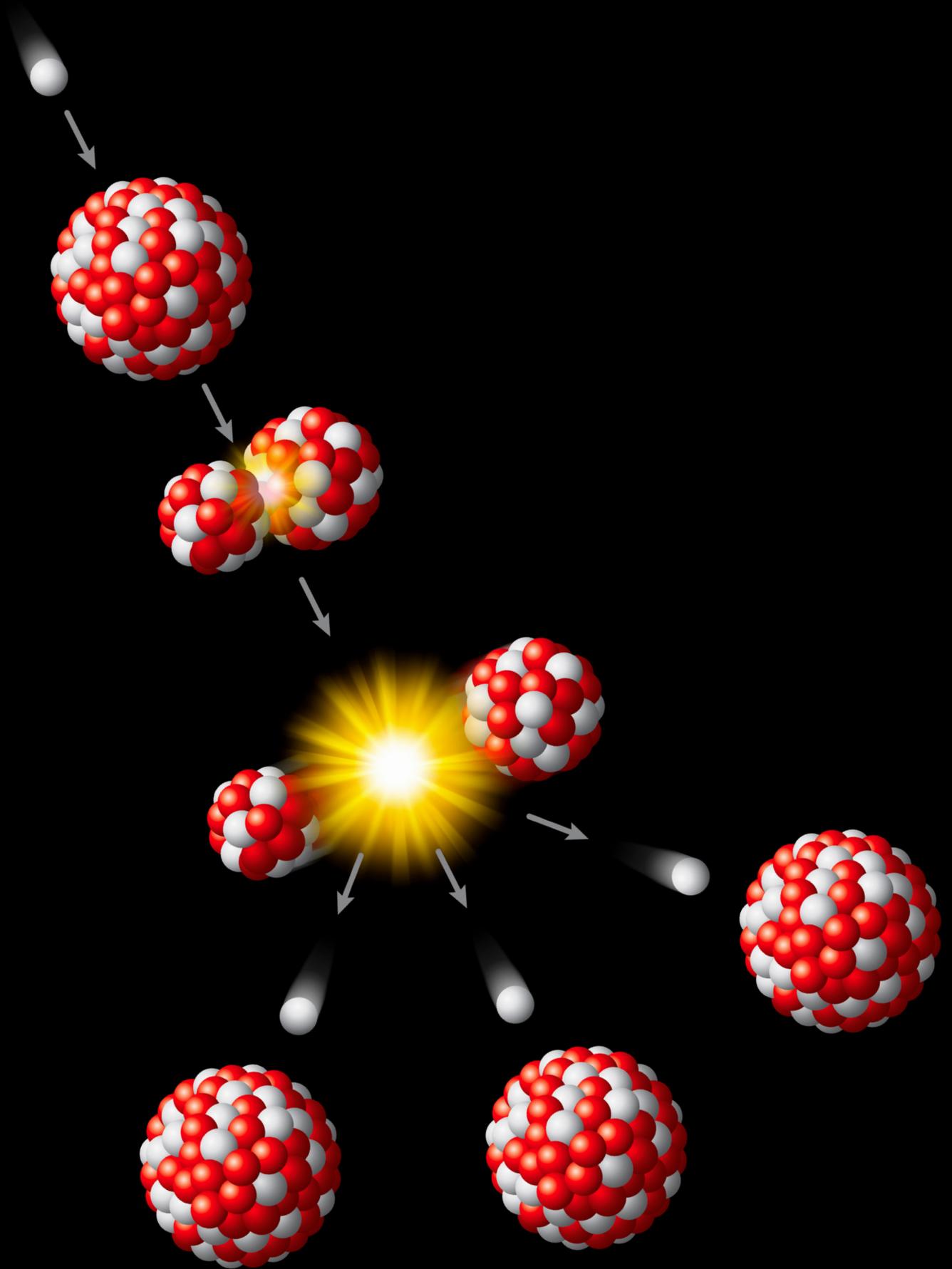
Por lo tanto, vamos encontrando algunos indicios, "la radiactividad", descubierta por el científico francés Henri Becquerel en 1896, 49 años antes del lanzamiento de la bomba atómica. Sin embargo, la desintegración espontánea de estos núcleos inestables, si bien es perjudicial para la salud bajo exposición continua, no es suficiente para generar la energía destructiva de una bomba atómica. Además, al ser un proceso espontáneo, no es posible predecir cuándo ocurrirá y menos aún poder controlarlo. Al respecto, el físico Ernest Rutherford, considerado el padre de la física nuclear, mencionaba "cualquiera que espere una fuente de energía en la transformación de los átomos está en la Luna", refiriéndose a la imposibilidad de conseguirlo. Sin embargo, Rutherford en ese momento no contaba con la posibilidad de generar una ruptura del núcleo debido a un agente externo y no por procesos espontáneos dentro del átomo inestable. Al respecto, Albert Einstein mencionaba "el átomo debería ser destruido a voluntad". En palabras simples si se golpea el núcleo de un átomo pesado se generaría la ruptura del núcleo. Esto sería como "jugar billar" dentro del átomo, haciendo la analogía con el juego de billar, a diferencia que en este juego las bolas no se rompen ya que son firmes en cambio el núcleo de un átomo radiactivo es inestable, generando su desintegración o rompimiento cuando es impactado. Por otro lado, considerando que en el átomo la distancia entre la nube electrónica y el núcleo es muy grande, y que las partículas subatómicas son muy pequeñas, el lector podría pensar "tener la precisión para impactar un núcleo es imposible", sin embargo, gracias al avance de la mecánica cuántica, que curiosamente en esos años estaba en su pleno apogeo, en los estudios de los fenómenos a escalas atómicas esto podría ser posible. En efecto, otro indicio fundamental es el apogeo de la mecánica cuántica, 25 años antes del lanzamiento, con los estudios de destacados físicos como Einstein, Schrödinger, Born, Heisenberg entre otros, el "juego de billar" a escala atómica ya no era una utopía y podría ser una realidad.

En 1939 los químicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann habían conseguido por primera vez en un laboratorio la ruptura del núcleo de un átomo por impacto de neutrones, el juego de billar en el átomo había comenzado y el neutrón jugaba el rol de la bola blanca, ¡La amenaza de una bomba atómica era latente! Ese mismo año, mientras comenzaba la Segunda Guerra Mundial, Albert Einstein, junto con su colega el físico Leó Szilárd, escribieron una carta al presidente de Estados Unidos, Franklin D. Roosevelt, advirtiéndole sobre

la posibilidad de que "en un futuro inmediato", parte de la comunidad científica fuera capaz de generar una reacción nuclear en cadena. En dicha carta, los físicos expusieron que era concebible que "bombas de un nuevo tipo, extremadamente poderosas, pudiesen ser así creadas". En reacción a esta carta se creó el Consejo de Investigación de la Defensa Nacional en junio de 1940 y en noviembre de 1941, el Consejo de Investigación confirmaba al presidente: "si aplicamos todo el esfuerzo posible en el programa, creemos que las bombas de fisión nuclear estarían disponibles en cantidades significativas dentro de 3 o 4 años". Un mes después, el 6 de diciembre, el gobierno de Estados Unidos decidió dedicar un esfuerzo "supremo" para el desarrollo de una bomba atómica. Así, la física atómica entraba en la primera línea de la Guerra Mundial.

Los esfuerzos del gobierno de Estados Unidos se materializaron en el proyecto de Ciencia Aplicada más ambicioso que, hasta entonces, el mundo haya conocido, El proyecto Manhattan formado por más de 120 mil trabajadores dedicados a diversas tareas y utilizando la séptima parte de toda la energía producida por Estados Unidos en la fabricación de la materia prima de la bomba atómica, el Uranio 235. En este contexto, algunos de los físicos nucleares más importantes de la época, se embarcaron en la misión de crear por primera vez una reacción nuclear controlada, es decir, una reacción en cadena que fuese lenta y autosostenida. El desarrollo de este experimento se realizó en una pista de squash debajo el estadio de la Universidad de Chicago y dio origen a "El Chicago Pile-1 (CP-1)", el primer reactor nuclear artificial del mundo. Al encontrarse debajo de las instalaciones de la universidad, la construcción del "El Chicago Pile-1" suponía un reto adicional, ya que si perdían el control del experimento, la reacción en cadena no solo destruiría el improvisado laboratorio, sino gran parte de la universidad.

Alrededor de las 15 horas del 2 de diciembre de 1942, el grupo de investigación liderado por el prestigioso físico italiano Enrico Fermi, informaba a sus colegas científicos que habían conseguido la primera reacción en cadena controlada de la historia. Fue el físico y premio Nobel Arthur Compton quien realizó la llamada al presidente del Consejo de Investigación de la Defensa Nacional para notificarlo de tal hito histórico: "¡El navegante italiano ha llegado al nuevo mundo!", exclamó. El éxito de este experimento quedó confirmado cuando el presidente del Consejo le preguntó: "¿si es así... ¿fueron los nativos amistosos?", a lo que Compton respondió: "todos desembarcaron seguros y felices". Fueron descritos los dos últimos indicios para que la bomba atómica fuera una rea-



lidad: masa crítica y reacción en cadena. Si bien la ruptura de un solo núcleo por bombardeo de neutrones no genera la energía necesaria para una bomba atómica, una cadena de estas reacciones si lo haría en una cantidad suficiente y particular de materia radiactiva, conocida como masa crítica. Esto se aprecia en la película *Oppenheimer*, recientemente estrenada en cines ¡Cuidado! ¡Alerta de Spoiler! Cuando J. Robert Oppenheimer va colocando pelotitas en un bowl durante las reuniones que mantenía junto a los científicos miembros del proyecto Manhattan, escenas que fueron mostradas en diferentes momentos de la película. La idea era mostrar una analogía a través de la aglomeración de las pelotitas en el bowl para poder alcanzar la masa crítica del uranio 235, la cual es equivalente a la masa de una esfera de 17 centímetros de diámetro de uranio 235, misma dimensión del bowl en la película de *Oppenheimer*. El Uranio 235 (con 94 protones y 141 neutrones) es un isótopo del Uranio altamente fisiónable el cual una vez alcanzado su masa crítica permite que luego de que se produzca una primera fisión de su núcleo por impacto de neutrones los restos de la separación del núcleo se vuelven a fisiónar (dividir) por impactos de otros neutrones y así sucesivamente se generan una serie de procesos de fisión nuclear dentro del uranio 235, lo que se conoce como reacción en cadena generando la energía suficiente de una bomba atómica, análogo a cuando un jugador de billar, gracias a su destreza, logra golpear varias bolas en un solo golpe de taco, debido a impactos sucesivos entre diferentes bolas.

Un escenario terrorífico, pero interesante del punto de vista de la física, que resalta la película *Oppenheimer* al respecto del proceso de reacción en cadena que genera una bomba atómica, es el sugerido por los cálculos de Edward Teller, miembro del

proyecto Manhattan, de una eventual posibilidad de que esta reacción en cadena que se genera en la bomba atómica no termine y continúe sucesivamente reaccionando además en los átomos de toda la atmósfera y sin detenerse. Escena que se ve reflejada en la película con una cadena sucesiva de explosiones en la atmósfera generando la destrucción del Planeta. Sin embargo, tal como se menciona en la película, la probabilidad de que ocurriera ese fenómeno era prácticamente imposible ya que el aire no es radiactivo, al contrario está formado por elementos livianos como el hidrógeno y además debido a la disipación de la energía liberada luego de la explosión de la bomba atómica, no se podría generar una explosión de toda la atmósfera del planeta Tierra.

Si bien la bomba atómica no podría causar la incineración de toda la atmósfera, sí generó la incineración de una región en torno al punto de explosión de la bomba, la cual alcanzó aproximadamente 1,2 kilómetros de diámetro para el caso de la bomba de Hiroshima provocando la muerte instantánea de 70.000 personas aproximadamente, debido a que la temperatura alcanzó un valor cercano a los 5.000 grados centígrados, temperatura similar a la superficie del Sol. Para tener una estimación de esta distancia consideremos que 1,2 kilómetros es similar a la distancia entre la Universidad Central y el palacio presidencial La Moneda. Además, esta bola de fuego, se extendió también hacia arriba generando esa forma de hongo tan característica, el hongo atómico, que alcanzó una altura de 13 km por lo que gran parte de las partículas radiactivas en el hongo atómico quedaron depositadas en la troposfera provocando la lluvia radiactiva por deposición de estas partículas. Así es, el día de la explosión ocurrió además este fenómeno al cual los sobrevivientes le llamaron lluvia negra, esta lluvia negra fue una especie de

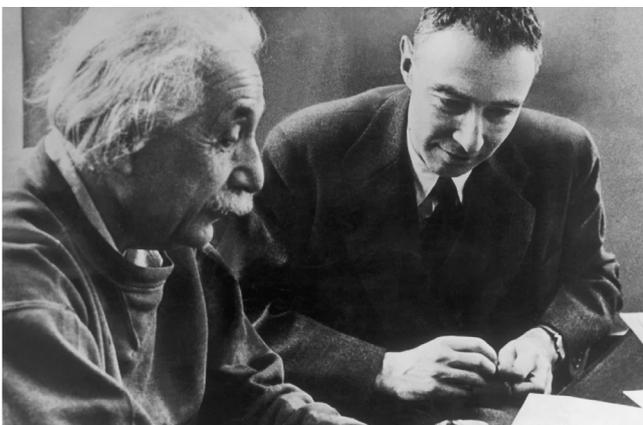
mezcla entre lluvia radioactiva generando la muerte de aproximadamente 80.000 personas más durante los meses siguientes de la explosión en Hiroshima por quemaduras y radiación... y esta tragedia se repitió 3 días después con la bomba de Nagasaki con similares características...

... A pesar de lo evidente que resulta en este caso el cómo el avance científico cambió el curso de la guerra, también es innegable notar el peligro de la ciencia aplicada al uso militar o poder bélico. Si bien el avance de la ciencia es importante para la sociedad y permite el avance de la tecnología que nos facilita por ejemplo nuestra vida cotidiana, este avance también repercute en la tecnología militar y poder bélico de los países actualmente. A modo de reflexión, pensamos que es importante que los países inviertan en ciencia pero hay que tener cuidado con el peligro que conlleva cuando se mezcla con intereses militares. En efecto, actualmente 9 países cuentan con armamento nuclear, con capacidades destructivas mucho mayores que las bombas atómicas que fueron lanzadas en Hiroshima y Nagasaki, por lo que un eventual lanzamiento de algunas de estas armas nucleares en la actualidad sería de consecuencias inimaginablemente catastróficas. Al respecto, es difícil no pensar en la célebre frase que Albert Einstein habría pronunciado después de la Segunda Guerra Mundial "... No sé con qué armas se peleará la tercera guerra mundial, pero la cuarta será con palos y piedras...".

[1] Why Oppenheimer deserves his own movie?, An element of truth, Veritasium. <https://www.veritasium.com>

[2] Museo Memorial por la paz de Hiroshima, <https://hpmmuseum.jp>

[3] Ununoctium (Uuo)-Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications of Ununoctium, Azo materials.



Albert Einstein y J. Robert Oppenheimer, 1947.



Cúpula Genbaku en el Parque Memorial de la Paz de Hiroshima, Japón