

# AMENAZA NUCLEAR: FISIÓN y FICCIÓN

Por Mario R. Feliz  
[mfeliz@ciudad.com.ar](mailto:mfeliz@ciudad.com.ar)

*“Nothing in life is to be feared,  
It is only to be understood”  
Marie Skłodowska-Curie<sup>1</sup>*

## Introducción

En la costa nordeste de Japón, el fondo marino se precipita abruptamente hacia uno de los abismos más profundos del planeta y, a no más de 150 kilómetros mar adentro, hacia el oriente, la hondura alcanza los 10.000 metros.

A lo largo de la fosa oceánica de Japón, la placa del pacífico se introduce debajo de la norteamericana, sobre la que se encuentra parte del archipiélago, y se hunde en dirección oeste debajo de Asia.

Desde aquellas profundidades, en pleno invierno boreal, emergió un terremoto de magnitud 9<sup>2</sup>, el más grande de la historia de el país Nippon.



A la cercana prefectura de Fukushima llegó con una intensidad de grado 6. Sin embargo, la gran ola -Tsunami- que alcanzó alturas de hasta 10 metros, se abalanzó sobre la tierra arrasando todo a su paso, incluida la usina eléctrica que contaba con 6 reactores nucleares. El terremoto dejó sin electricidad el sistema de enfriamiento de algunos reactores y la ola puso fuera de servicio la refrigeración de emergencia.

El fenómeno natural produjo grandes daños y alrededor de 40 mil víctimas fatales. Sin embargo, ninguna persona fue afectada por la crisis que envolvió a los reactores nucleares. A pesar de ello, la atención de la prensa estuvo focalizada en el “potencial peligro radioactivo” enterrando rápidamente, en el olvido, la verdadera tragedia ocasionada por el seísmo.

No siempre la radioactividad fue mirada con desconfianza y temor. Ciertamente, cuando a fines del siglo XIX y principios del XX, fue descubierta (y estudiada) la radiación ionizante que emitían algunas sustancias naturales, el hallazgo produjo gran entusiasmo. Los trabajos de Marie Curie<sup>3</sup> -entre cuyos resultados estuvo el descubrimiento del radio (**Ra**) y del polonio (**Po**), obtenidos a partir de minerales uraníferos, tuvieron enorme repercusión en el mundo científico y social. Efectivamente, cuando Marie, en 1921, viaja a Estados Unidos es despedida con un multitudinario acto en la Opera de París y, al llegar a New York, recibida en el puerto por una muchedumbre entusiasmada.

Muchos años después comenzó a crecer el mito, alimentado por algunos y aceptado por muchos, que hoy se encuentra fuertemente instalado. Desde luego, existen razones objetivas para sustentarlo pero, como siempre, hay muchas exageraciones y falsedades.

Se ha escrito que: *“Desde cierto punto de vista, mito y ciencia cumplen una misma función. Los dos proporcionan al espíritu humano una representación del mundo y de las fuerzas que lo animan. Los dos delimitan el campo de lo posible”*<sup>4</sup>. En este ejercicio, trataré de llevar a quien lo lea la realidad de los hechos y sus consecuencias, el punto de vista de la ciencia y no el del mito.

## Recuerdos de la bomba

Un día radiante de verano el Enola Gay<sup>5</sup> cruzaba un cielo claro y azul. Transportaba una única bomba. Aquella mañana, apenas pasadas las ocho, Little Boy<sup>6</sup> estallaba cuando aún faltaban 600 metros para tocar el suelo.



Sadako Okuda recuerda esa jornada de agosto: *“Me encontraba en Osaki-shimo, una tranquila isla en el mar interior de Hiroshima. Y aunque estaba a sesenta kilómetros de la ciudad fue claro que algo terrible había sucedido...No importó que estuviera tan lejos del sitio de*

*la devastación –el resplandor enneguecedor dañó mi visión y mi oído”.*

Tiempo después, cuando ya tenía 93 años, sus recuerdos fueron publicados fuera de Japón<sup>7</sup> y en un breve prólogo de aquel libro Sadako decía al lector: *“Quiero que sepas cuanto creo en un mundo en paz...y cuanto lamento que Japón haya comenzado la guerra.”*

Se ha estimado<sup>8</sup> que, hacia fines de 1945, unas 140.000 personas habrían muerto en Hiroshima y otras 70.000 en Nagasaki, como consecuencia de las explosiones atómicas.

Una inmensa bola de fuego vaporizó los cuerpos de aquellos que se encontraban en el hipocentro de la explosión. La vasta mayoría de las muertes se debieron a quemaduras, por el extremo calor producido por la bomba, y a la sofocación originada en la tormenta de fuego que consumió el oxígeno del aire.

Sin embargo, aquel apocalipsis fue sólo el acto final de una guerra cruel – como todas- que costó entre 50 y 70 millones de muertos. De aquellos solamente un tercio formaban parte de las tropas en conflicto. La mayoría de las víctimas fueron niños, mujeres, ancianos, hombres comunes que murieron bajo las bombas o de hambre, por enfermedades o asesinados, dentro y fuera de campos de concentración. Millones sufrieron imperdonables torturas y vejaciones...

Sin duda, *“las grandes tragedias de la historia, con frecuencia, fascinan a la gente por la proximidad del horror. Paralizados, no encuentran que hacer y sólo esperan. Y mientras esperan, un día, el Gorgon<sup>9</sup> los devora. Sin embargo, me gustaría convencerlos... de que la fuerza del corazón, la inteligencia y el coraje son suficientes para detener el destino y revertirlo.”*<sup>10</sup>



Hoy Hiroshima es una ciudad vibrante, una metrópolis moderna. Su determinación para reconstruirse es un testimonio del poder de la vida sobre la destrucción.

## **Invierno nuclear**

La Guerra Fría<sup>11</sup>, surgida de los crecientes enfrentamientos entre Este y Oeste encabezados por la Unión Soviética y los Estados Unidos, tuvo sus puntos calientes. Fueron estos los que recibieron mayor atención en los países del “*tercer mundo*”, donde las batallas tenían lugar (Africa, Indochina, etc). Sin embargo, un gran peligro se cernía sobre la humanidad: la posibilidad de una guerra nuclear, el Armagedón.

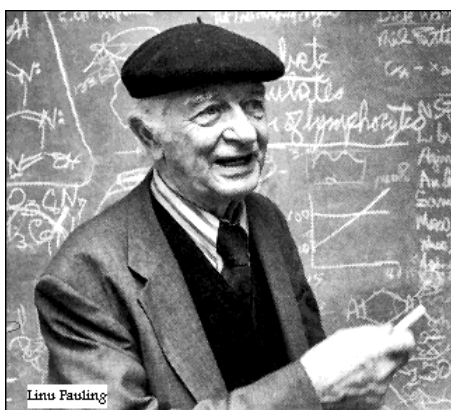
Durante ese período, mientras USA y la URSS<sup>12</sup> acumulaban armas atómicas, otros países se sumaban al club de la bomba: Francia, Gran Bretaña y China. Todos ellos hacían pruebas en diversos lugares del planeta. Un gran número de artefactos nucleares (de *fisión* o *fusión*) fueron detonados sobre la superficie terrestre -en la atmosfera- y debajo de ella -en ensayos subterráneos o submarinos.

Los primeros en alarmarse, por los imaginables resultados de una guerra nuclear, fueron algunos científicos “atómicos”. Entre ellos el mismísimo Einstein quien, en 1939, escribiera una carta al Presidente Roosevelt<sup>13</sup> informándolo de que los alemanes estaban embarcados en la fabricación de una bomba atómica e impulsándolo para que USA se movilizara en un esfuerzo similar. Aquella carta fue, seguramente, el acta de nacimiento del Proyecto Manhattan<sup>14</sup>.

Sin embargo, en el primer semestre de 1946 Einstein y otros académicos formaban el Comité de Emergencia de Científicos Atómicos<sup>15</sup> y su primer acto sería una declaración donde se leía: “*Nuestro mundo enfrenta una crisis aún no percibida por aquellos que poseen el poder de tomar las grandes decisiones, para bien o para mal. La liberación del poder del átomo ha cambiado todo excepto nuestros modos de pensar y así nos dirigimos hacia una catástrofe sin paralelo.*”

*Los científicos que liberamos ese inmenso poder tenemos la abrumadora responsabilidad, ante esta lucha global entre vida y muerte, de dominar el átomo para beneficio de la humanidad y no para su destrucción.”*

El objetivo inicial del Comité, llevar a la ciudadanía el conocimiento de los simples hechos sobre la energía atómica y de sus implicancias para la sociedad, fue posteriormente ampliado. Un protagonista principal de la gesta fue uno de sus miembros. Linus Pauling<sup>16</sup> extendió sus desvelos hasta convertirse en un activista de la lucha por la paz y por la suspensión de todas las pruebas con armas nucleares. De tal forma, en 1958, presentaría ante las Naciones Unidas una petición firmada por 11.000 científicos. Esta y otras acciones condujeron al primer tratado sobre prohibición de tales ensayos acordado, entre Kennedy y Khrushchev,<sup>17</sup> en 1963. Por sus muchas contribuciones a la paz Pauling fue premiado con el Nobel.



A pesar de aquel tratado y otros posteriores, desde la primera prueba en 1945, se realizaron más de 2000 explosiones nucleares experimentales, en una docena de sitios diferentes, alrededor del mundo. El test nuclear más reciente se llevó a cabo en Corea del Norte en mayo de 2009.

El peligro de un holocausto nuclear no ha desaparecido. Tal vez algún día la amenaza se extinga definitivamente. Mientras tanto vale la pena recordar las palabras de Pauling ante el Comité Nobel: *“Trabajando para abolir la guerra, también trabajamos por la libertad del hombre, por los derechos individuales de cada humano. La guerra y el nacionalismo, junto con la explotación económica, han sido los grandes enemigos de cada hombre. Creo que, sin guerra en el mundo, habrá un mejoramiento de los sistemas sociales, políticos y económicos en todas las naciones, para beneficio de toda la humanidad.”*<sup>18</sup>

## Esperando a Godzilla.

El atolón de Mururoa, la isla del gran secreto de la Polinesia Francesa, puede verse desde el cielo como un óvalo irregular formado por una cinta que se extiende a lo largo de 28 kilómetros, encerrando una laguna azul.

Allí se realizaron, entre 1966 y 1974, 41 pruebas nucleares atmosféricas y, desde entonces hasta 1995, 137 ensayos submarinos.

En la actualidad el ejército francés mantiene en el atolón un dispositivo de vigilancia de la evolución geológica y radiológica de la región. ¿Cuáles son los rastros que hoy quedan de aquella actividad?



A pedido del gobierno francés, la Agencia Internacional para la Energía Atómica (IAEA) organizó un estudio de la situación radiológica del atolón. En el trabajo, que se extendió por 2 años, participaron 55 expertos de 21 países y el material recogido en el lugar fue analizado en 18 laboratorios de 12 países.

Las conclusiones finales de aquellas investigaciones, informadas en 1998, permitieron concluir que ninguna acción de remediación es necesaria para proteger los suelos ahora o en el futuro y que no se necesitan más mediciones con el propósito de protección radiológica. En consecuencia, observamos que después de un bombardeo sistemático con artefactos nucleares -de *fisión* y *fusión*- durante 30 años, y luego de transcurridos apenas 15 desde la última explosión, no quedaban rastros de radiación en las playas y las aguas del atolón.

Mururoa pudo ser, quizás, el hogar de Godzilla. Aquel monstruo de apariencia jurásica, nacido de una simpática iguana verde afectada por la radiación nuclear. Un mito, seguramente, porque nadie le ha visto, aún.

## Radiante universo

Recuerdo alguna noche de verano, en la quinta de Jonte<sup>19</sup>, alejada convenientemente de la ciudad de forma que el resplandor de sus luces era imperceptible. Allí me veo, recostado en una reposera, bajo un cielo sin nubes y sin luna, envuelto en la oscuridad. Oscuridad que el infinito manto de estrellas, que me cubría, impedía que fuese completa. Así, desde este rincón de sus arrabales, disfrutaba de la vista de la Vía Láctea<sup>20</sup>. Mientras tanto, desde ella y otras galaxias, remotas e invisibles a los ojos, llegaba la lluvia cósmica<sup>21</sup>.

Los rayos cósmicos, que bañan continuamente nuestro planeta, incluyen esencialmente iones de todos los elementos de la tabla periódica. Alrededor del **89%** son núcleos de hidrógeno (*protones*), **10%** núcleos de helio (*partículas alfa*), y el restante **1%** está constituido por elementos más pesados. Los más abundantes son *iones* de *carbono (C)*, *oxígeno (O)*, *magnesio (Mg)*, *silicio (Si)* e *hierro (Fe)*. Esas partículas llegan a la tierra, día y noche, con energías tan altas que son proyectiles capaces de producir gran daño a las moléculas de la vida. Sin embargo, vivimos bajo el cielo sin advertir su presencia y sin que nadie nos atemorice con los terribles efectos de la radiación... cósmica.

Al llegar a las capas superiores de la atmosfera la mayor parte de las partículas provenientes del cosmos colisionan con los átomos (en realidad, con sus núcleos, donde se concentra su masa), de los gases que componen la atmosfera (nitrógeno y oxígeno), y en esos choques ceden buena parte de su energía originando una lluvia de nuevas partículas y radiación *electromagnética* (*fotones gamma*). Algunas de tales partículas (y/o radiaciones) secundarias llegan a la superficie de la tierra con energías muy inferiores a las originarias. Más del **70%** -de las partículas que alcanzan el nivel del mar- son *muones*<sup>22</sup>, alrededor del **9%** *neutrones* y el resto *fotones*. La atmósfera cumple, así, el rol de escudo protector. Pero, no es el único. El *campo magnético* terrestre hace lo suyo, también.

## La danza de los espíritus

Las valquirias montadas en sus caballos y armadas con lanzas brillantes, transportan su carga hasta el Valhalla. Los guerreros, recogidos en el campo de batalla y convertidos en *einherjar*<sup>23</sup>, servirán en el ejército de *Odin* que afrontará el *Ragnarök*, la batalla final<sup>24</sup>, donde casi todo el universo será destruido.



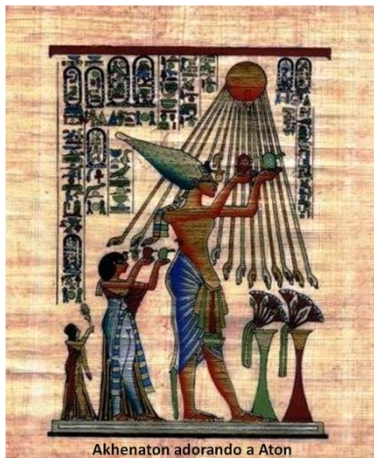
Durante el viaje, los extraños destellos luminosos multicolores que desprenden sus armaduras cubren el cielo boreal y forman lo que los hombres conocen como *aurora*.

En realidad todos los pueblos que viven en las proximidades del círculo polar cuentan historias sobre el origen de las *luces del norte*. Los habitantes del ártico, *Inuits* y *Saamis*<sup>25</sup>, tienen diversas explicaciones para el fenómeno. Algunas atribuyen las luces a los espíritus de sus antepasados. Una visión que es compartida por la nación *Cree*<sup>26</sup>, cuyos miembros consideran a la *aurora* como la danza de los espíritus.

Lo cierto es que los rayos cósmicos antes de llegar a la atmosfera se topan con el *campo magnético* terrestre y, debido a su carga eléctrica, son desviados por este hacia los polos y aún fuera de la tierra. Algunas partículas, de alta energía, chocan con los núcleos de los átomos de la atmósfera terrestre y producen los rayos secundarios. Unas pocas llegan hasta la superficie terrestre. La mayoría son desviadas a lo largo de las *líneas de fuerza* del *campo magnético*. En consecuencia, el número partículas cósmicas que alcanzan la alta atmósfera en latitudes próximas al círculo polar ártico es mucho mayor que las que llegan al ecuador.

Por otra parte, los rayos cósmicos, de baja energía, que chocan con las moléculas (o átomos) de oxígeno y nitrógeno, de la atmósfera, las *excitan* (les entregan energía) o las *ionizan* (les arrancan un electrón) y cuando retornan a su estado original (o fundamental) emiten luz de diversos colores según la energía adquirida en la interacción con los rayos cósmicos.

## El viento de Atón

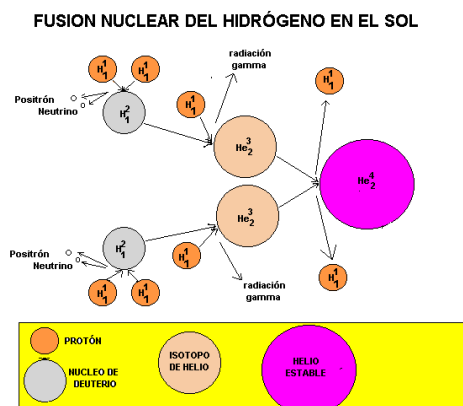


El *hidrógeno* y el *helio* son, sin dudas, los elementos más comunes en el universo y juntos dan cuenta de alrededor del **98%** de toda la materia conocida. Sin embargo, en la Tierra (en Marte o Venus) no hay cantidades significativas de estos dos gases. Esto se debe a que la *gravedad* es muy débil en esos pequeños planetas como para retener aquellos elementos tan livianos, ellos simplemente escapan hacia el espacio exterior<sup>27</sup>.

Sin embargo, el Sol, cuya gravedad es mucho más grande está constituido casi enteramente por *hidrógeno* cuyo núcleo tiene solamente un *protón* (*partícula positiva*). En el centro del Sol la presión gravitacional y la temperatura son tan grandes que es posible *fusionar protones* para obtener núcleos de *helio*.

El *hidrógeno* en el centro del sol es comprimido hasta alcanzar densidades 10 veces más grandes que la del plomo sólido. No obstante, allí no existe sólido alguno sino que, debido a la alta temperatura, la materia es un *plasma* formado por partículas positivas y negativas.

En el proceso de *fusión* una porción de la masa se convierte en energía ( $E = mc^2$ )<sup>28</sup> y buena parte de ella nos llega en forma de radiación electromagnética (luz *ultravioleta*, *visible* e *infrarroja*). Además, el infierno del sol, también expulsa materia en forma de viento solar. Este es un flujo de partículas cargadas, principalmente protones, electrones y partículas alfa. Al expandirse el viento solar arrastra el campo magnético del sol formando lo que se llama campo *magnético interplanetario*<sup>29</sup>. Este campo magnético interactúa con el



terrestre y produce efectos apreciables sobre las actividades electromagnéticas del planeta y, por otra parte, las partículas del viento solar chocan con las moléculas de la atmosfera terrestre, principalmente en las inmediaciones del círculo polar, contribuyendo a las auroras.

Por otra parte, el viento solar no es constante. Depende de la actividad del sol, que se percibe a través de las manchas que aparecen sobre la superficie de nuestra estrella. Este es un proceso cíclico y de intensidad variable. El campo magnético asociado al viento solar interactúa con los rayos cósmicos desviándolos de la tierra y disminuyendo la cantidad que de ellos llegan a la atmosfera. La consecuencia de este efecto tiene influencia sobre el clima terrestre. Efectivamente, los rayos cósmicos afectan la cubierta de nubes bajas la que juega un importante rol en el balance de radiación electromagnética que escapa o ingresa a la Tierra.<sup>30</sup>

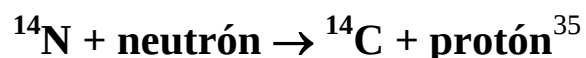
Como hemos visto, la cantidad de radiación cósmica que nos alcanza depende de los ciclos del sol, de la altitud y de la latitud.

En efecto, a nivel del mar, la porción que recibimos (ubicados a **55°** de latitud) es de **0.05  $\mu\text{Sv}$ <sup>31</sup>** por hora, mientras que un viajero en un avión de línea (a 10.000 m de altitud) recibe una dosis de alrededor de **4  $\mu\text{Sv/hora}$ <sup>32</sup>**. Un valor que es del orden de la radiación medida en las zonas aledañas a la planta nuclear de Fukushima, durante los días posteriores al accidente<sup>33</sup>.

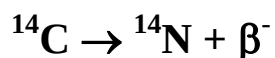
### La radiación interior<sup>34</sup>



Hemos visto que cuando los rayos cósmicos impactan con los núcleos de los gases de la atmósfera se producen partículas secundarias. Los *neutrones* generados en esos choques pueden a su vez colisionar con átomos de nitrógeno y convertirlos en átomos de carbono.



Lo interesante, además, es que el  $^{14}\text{C}$  es inestable y decae emitiendo radiación beta ( $\beta^-$ , electrón acelerado).



Sin embargo, tiene una vida media larga (**5730 años**). Ello significa que para que una cierta cantidad de  $^{14}\text{C}$  se reduzca a la mitad deben pasar **5730 años**.

Esos átomos de carbono se oxidan en la atmósfera y se convierten en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este gas, a su vez, es absorbido por las plantas verdes (*fotosintéticas*) y transformado en azúcares. A partir de allí se distribuye por todo el mundo biológico, incluidos nosotros. En todo nuestro cuerpo tenemos átomos de carbono radioactivo emitiendo partículas beta.

En nuestras vísceras, además, encontramos muchos elementos radioactivos: *plomo*, *torio*, etc. Todos en pequeñísimas cantidades. No obstante hay un elemento al que debería mirarse con interés.

Un hombre de **70 kg** tiene en su organismo unos **140 g** de *potasio* (en forma de iones  $\text{K}^+$ ). Este elemento es imprescindible para la vida y se acumula dentro de las células. En la naturaleza, del total de **potasio** existente el **0.0118%** es  $^{40}\text{K}$  que emite partículas beta, decayendo con una vida media muy larga. Sin embargo, aunque no se le presta atención a sus efectos sobre el material genético (**ADN**), cada minuto que pasa el  $^{40}\text{K}$  bombardea el interior de nuestras células con más de **260.000** partículas beta.

En definitiva, debido a todos los elementos radioactivos que forman parte de nuestro cuerpo, recibimos una dosis de radiación aproximada de **0.5  $\mu\text{Sv/hora}$** , durante todas las horas de nuestra vida.

La radioactividad es parte de nuestro mundo y ha existido desde sus orígenes. Materiales radioactivos naturales están presentes en la corteza terrestre, en los pisos y en las paredes de nuestras casas, de las escuelas u oficinas y en los alimentos y bebidas. En definitiva, el hombre ha estado siempre expuesto a la radiación natural surgida de la tierra o proveniente del espacio exterior. De tal forma, nuestra exposición a la radiación originada en fuentes naturales es de alrededor de otros **0.3  $\mu\text{Sv/hora}$** .<sup>36</sup>

La radiación ionizante -de ella hemos estado hablando- en altas cantidades produce daños que se conocen bien. Una dosis muy grande recibida en todo el

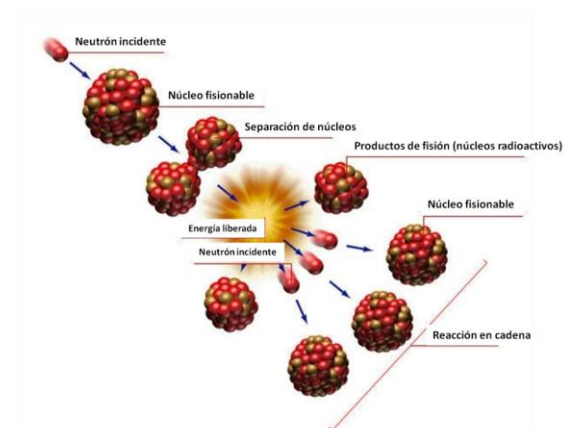
cuerpo, durante un corto tiempo, producirá la muerte en pocos días. Sobre tales efectos, mucho se aprendió del estudio de los registros de sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki. Por ello se sabe que algunas de las consecuencias posibles debidas a la exposición a la radiación no aparecen, a menos que se absorba una cierta dosis bastante alta. Sin embargo, muchos otros efectos, especialmente cánceres fácilmente detectables, se producen con frecuencia con dosis moderadas. Cuando las dosis son bajas y de lenta aplicación las células y los tejidos pueden recuperarse.

La mayoría de los estudios realizados no han sido capaces de detectar un aumento del riesgo de cáncer entre las personas expuestas a bajos niveles de radiación. No obstante, científicos y entes reguladores acuerdan sobre que la radiación aumenta el riesgo aún a bajas dosis.<sup>37</sup>

Por otra parte, la radiación ionizante es una forma eficiente de tratar ciertos tipos de cáncer. Efectivamente, durante la irradiación terapéutica, altas dosis de radiación son dirigidas hacia el cáncer produciendo la muerte de las células cancerosas. En principio, este proceso podría producir alteraciones del material genético (mutaciones del **ADN**) en las células normales que sobreviven a la irradiación y conducir al desarrollo de un cáncer secundario. Sin embargo, la experiencia muestra que la terapia radioactiva no parece ser una causa importante de cánceres secundarios.

## La energía nuclear

Hemos visto como en las estrellas, incluido nuestro sol, la *fusión nuclear* produce una enorme cantidad de energía. Como sabemos, se han fabricado bombas de *hidrógeno* basadas en ese principio. Por otra parte, desde hace mucho tiempo, se llevan a cabo diversos programas de investigación y desarrollo para lograr un uso controlado de la *fusión*. Sin embargo, aún hoy la posibilidad de lograrlo parece lejana<sup>38</sup>.



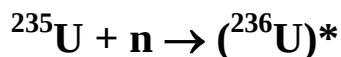
¿Cómo se obtiene energía en las plantas nucleares?

El origen de la energía nuclear controlable y aplicada a la generación de energía eléctrica proviene de un fenómeno denominado *fisión nuclear*.

En párrafos precedentes vimos como un *neutrón* puede ser absorbido por el núcleo de un átomo de *nitrógeno* produciendo un átomo de *carbono* y un *protón*. Sin embargo, la mayoría de los *isótopos* cuando capturan un *neutrón* liberan la energía en exceso como radiación gamma.

No obstante, para ciertos elementos pesados, notablemente *uranio (U)* y *plutonio (Pu)*<sup>39</sup>, se observa un camino alternativo: la división del núcleo en dos fragmentos masivos en un proceso de *fisión*.

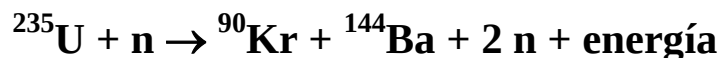
Si un neutrón colisiona con  $^{235}\text{U}$  aquel es capturado y se forma otro isótopo del uranio<sup>40</sup> ( $^{236}\text{U}$ ). Si se compara la masa del  $^{236}\text{U}$  formado, con la suma de las masas del neutrón y el  $^{235}\text{U}$  iniciales, se ve que esta suma es mayor. La pequeñísima cantidad de masa desaparecida en el proceso se ha convertido en energía ( $E = mc^2$ ) y el  $^{236}\text{U}$  que se forma está, entonces, excitado<sup>41</sup>.



Esa cantidad de energía en exceso es suficiente para causar la *fisión*. Lo que tenemos en ese momento son dos núcleos cargados positivamente a una distancia muy pequeña. La fuerte repulsión electrostática dispara ambos fragmentos con gran energía cinética<sup>42</sup>. Los fragmentos separados pierden los electrones atómicos y se convierten en iones que se desplazan a altas velocidades. Estos perderán su energía por interacción con los átomos y moléculas del medio circundante. La energía térmica resultante es recuperable si la fisión se produce en un reactor nuclear. Durante la fisión, además se producen *neutrones* y *rayos gamma* ( $\gamma$ ).

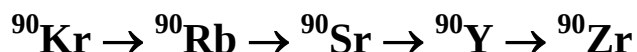
Vale la pena aclarar que material fisionable es aquel que sufre *fisión* con *neutrones lentos* (baja energía) y el único *isótopo* natural que puede ser fisionado por tales *neutrones* es el  $^{235}\text{U}$ .

Los productos de *fisión* pueden ser varios. Un ejemplo es:



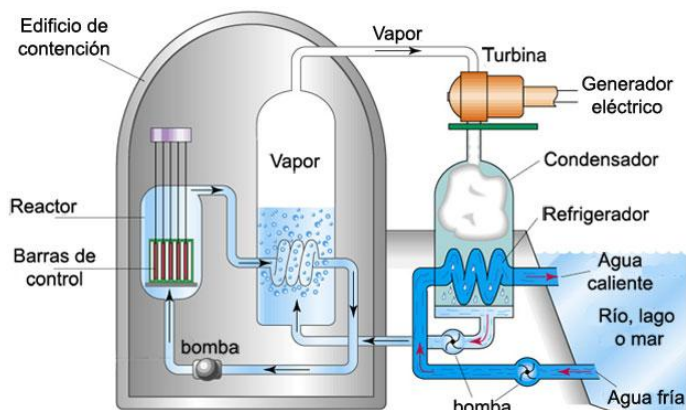
donde el *uranio-235* captura un *neutrón* y genera *kriptón-90* y *bario-144*. Además se liberan dos *neutrones* y energía.

Entre los productos de *fisión* se encuentra muchos que no son estables. En nuestro ejemplo el  $^{90}\text{Kr}$  es altamente inestable y decae en pocos segundos iniciando una serie de transformaciones:



En cada etapa se emite una partícula beta ( $\beta^-$ ) debido a la conversión de un *neutrón* en un *protón* mientras se mantiene constante la suma total de ambos e igual a **90**. Después de un par de minutos los dos primeros miembros de la serie (*kriptón* y *rubidio*) habrán desaparecido. Sin embargo, el *estroncio-90* tiene un tiempo medio de vida de casi 30 años, en tanto que el *ytrio-90* vivirá unos pocos días.

En definitiva un reactor nuclear aprovechará la energía liberada en forma de calor para vaporizar agua y usar ese vapor para impulsar una turbina que generará, a su vez, energía eléctrica.



En una planta nucleoelectrica se debe asegurar la contención del material radioactivo, el control de la reacción en cadena y de la temperatura.

La mayoría de los neutrones que se liberan en la *fisión* son rápidos y su captura tiene baja eficacia, siendo mucho más eficaces los *neutrones lentos*. Para corregir esta situación se introduce en el sistema una sustancia que contenga átomos livianos. De tal forma, se logra que los neutrones rápidos pierdan energía por sucesivas colisiones con los átomos livianos, logrando una mayor cantidad de neutrones lentos. Ese papel de moderador de *neutrones* lo cumple muy bien el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) que, además, disipa el calor producido en el reactor.

Desde luego, la posibilidad de la reacción en cadena involucrando *neutrones* en una masa de combustible nuclear (óxido de uranio:  $^{235}\text{UO}_2$ )<sup>43</sup> no sólo depende de la eficacia en la captura neutrónica. Adicionalmente, deben tenerse en cuenta el tamaño, la forma y la disposición de los materiales.

## La gran amenaza

Para alcanzar una reacción en cadena *auto-sostenida*, sin requerir el suministro de *neutrones* desde el exterior, es necesario tener una “*masa crítica*” de *uranio-235*.

Supongamos que tenemos una esfera de unos pocos gramos de  $^{235}\text{U}$ . La introducción de un *neutrón* inicia una cadena de varias reacciones, produciendo más neutrones. No obstante, la mayoría de ellos escapará a través de la superficie de la esfera y la reacción se detendrá. Una tal cantidad de combustible se dice que es “*subcrítica*”. Si ahora, hacemos crecer la masa de combustible hasta los **50 kg** de  $^{235}\text{U}$ , estamos en el caso donde la producción de neutrones compensa las pérdidas y el sistema se *auto-sostiene* sin agregados posteriores. El tamaño de esta esfera es el volumen crítico y la cantidad de combustible la “*masa crítica*”. En todos los casos la reacción se inicia con el agregado de *neutrones* externos y, si la masa es crítica, aquella continúa con los producidos en el sistema.

Cuando la cantidad de masa sobrepasa el valor crítico se convierte en “*supercrítica*” y en esa situación se producen más *neutrones* que los que se pierden. En consecuencia, tenemos una creciente generación de *neutrones* que produce un aumento de la velocidad de la reacción en cadena hasta que se produce la explosión atómica.

En los reactores nucleares se trabaja en condiciones críticas y por lo tanto tal riesgo está excluido.

Además, el combustible –en forma de pellets- se introduce en el reactor dentro de cilindros, contruidos con una aleación metálica<sup>44</sup>, como si fueran un atado de varillas. En los huecos que dejan los tubos con combustible se introducen otros que contienen, por ejemplo, una aleación de *cadmio*, *plata* e *indio* que es capaz de absorber neutrones con lo que se puede controlar la actividad del reactor hasta detenerlo.

El agua que refrigera del núcleo del reactor puede contener ácido bórico,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Esta sustancia tiene la particularidad de absorber neutrones fuertemente, en forma proporcional a la cantidad de átomos de boro (**B**) y de esa forma se inhibe la multiplicación de neutrones.

La generación de energía a partir de combustible nuclear es única en el sentido de que cantidades grandes de combustible deben estar presentes todo el tiempo, para que la reacción en cadena continúe.

Por el contrario, un automóvil funciona aún cuando el tanque de gasolina este casi vacío. En un reactor nuclear existe una sutil relación entre el combustible y otros factores como el consumo, la potencia, el flujo de neutrones, la criticalidad y el control.

La posibilidad de que una planta nucleoelectrica se convierta en una bomba atómica está descartada. Además, para el público en general, la exposición a radiación proveniente de este tipo de plantas es despreciable en comparación con la existencia de otro tipo de riesgos cotidianos. Sin embargo, pueden ocurrir accidentes como el de Fukushima.

Conviene señalar que las explosiones, observadas en la central de Fukushima durante el incidente, tuvieron una causa química. Al fallar la refrigeración la temperatura del reactor aumentó tanto que el vapor de agua, muy caliente y a presión, reaccionó con los metales circundantes y generó *hidrógeno* que al ponerse en contacto con el aire fue el causante de las detonaciones.

## **Accidentes en plantas nucleoelectricas**

La primera central nuclear fue puesta en funcionamiento en Inglaterra en el año 1956 y desde entonces el uso de la energía nuclear se ha propagado hasta contar hoy con alrededor de 450 centrales distribuidas por todo el globo.

Lo que hemos visto aquí, en una escueta síntesis, y la experiencia existente sugieren que la causa más común de accidentes está relacionada con los sistemas de refrigeración.

En estos casi sesenta años de la industria se han conocido sólo tres accidentes notables. El primero de ellos ocurrió en 1979 en el reactor Three Mile Island, ubicado en Pensylvania (USA). Durante ese episodio una pequeña

cantidad de radioactividad fue liberada y un cierto número de personas fueron evacuadas o dejaron el lugar voluntariamente por un corto lapso.

El problema, en ese caso, fue una falla en la refrigeración con una secuencia de hechos que se pareció a la sucesión de acontecimientos ocurridos en el reciente episodio de Japón. El resultado final fue que la planta quedo fuera de uso y que las consecuencias del accidente sobre la salud de la población de la región fueron indetectables.

Años después, en 1986, ocurre otro accidente muy serio en el reactor de Chernobyl. Este estaba ubicado próximo a la ciudad de Kiev, en la URSS. Allí se produjo una explosión que abrió un gran hueco en el techo del edificio que contenía el reactor y el grafito, que se usaba como moderador, se prendió fuego. Estos sucesos provocaron que una gran cantidad de material radioactivo fuera liberado a la atmósfera. El grave incidente ocasionó la muerte de un cierto número de trabajadores de la planta y fue causa de que las localidades vecinas resultaran fuertemente contaminadas.

En Three Mile Island todo empezó con una válvula cerrada por error, en tanto que en Chernobyl el origen del desastre fue una violación a las reglas por parte de los operadores durante un ejercicio de prueba. Además, aquí deficiencias de diseño del reactor contribuyeron a aumentar la magnitud del accidente. Además, las autoridades ocultaron el problema y, en lugar de actuar rápidamente, demoraron varios días en atender a la población afectada.

En este caso las consecuencias sobre la salud de la gente fueron notables. Especialmente la aparición de cáncer y leucemia entre la población infantil. Ello fue debido, probablemente, a la ingestión de <sup>131</sup>I. Aunque, en ningún caso los hechos avalan los pronósticos apocalípticos que se hicieran.<sup>45</sup>

*El iodo-131* se acumula en la tiroides. Eso permite que se lo use para hacer estudios radiológicos de la glándula o su aplicación en el tratamiento del cáncer. Sin embargo, si la cantidad de iodo radioactivo acumulado es muy grande puede producir un tumor. Ese posible efecto es controlable administrando, a la población, iodo normal que impide la absorción del radioactivo. Este procedimiento fue utilizado en el caso de Fukushima. Como hemos dicho al principio, allí no se

registraron consecuencias perceptibles en la salud de la población. Por otra parte, la vida media del iodo radioactivo es de unos pocos días y ello significa que en pocas semanas su concentración, en el ambiente, decae a niveles no peligrosos.

### **Basurero nuclear, paraíso natural**

Hemos visto que años de explosiones nucleares no han dejado sobre el planeta mayores consecuencias. Este hecho también fue considerado por James Lovelock<sup>46</sup> quién concluía que *“hay varias e interesantes consecuencias de aquellas vastas explosiones. Ellas liberaron en la atmosfera global tanta radioactividad como la que provendría de dos desastres de Chernobyl cada semana durante un año entero. Los vientos estratosféricos llevaron los desechos radioactivos alrededor del mundo y nosotros todos respiramos, o tragamos aquellos productos de fisión como cesio-137 y estroncio-90 y el plutonio no consumido en las explosiones. Muy pronto fue posible demostrar la presencia del isotopo de estroncio en los huesos de cualquier habitante del globo. Cualquiera que sea el daño producido por esos test nucleares y sus consecuencias, no existe evidencia o conclusiones teóricas que sugieran que se haya reducido, por ello, nuestra creciente expectativa de vida....”*



Caballos casi extintos se reproducen en Chernobyl

Por otra parte, una de las cosas sorprendentes sobre los lugares contaminados por elementos radioactivos es la riqueza de la vida salvaje que allí se desarrolla. Esto es evidente también en los alrededores de Chernobyl. Aquel lugar se ha convertido en un destino turístico muy

visitado por viajeros de todo el mundo. La zona de exclusión se ha transformado y es hoy una enorme reserva natural de gran valor. Allí no es posible detectar efectos visibles de la radiación<sup>47</sup> sobre la flora y la fauna.

No sólo animales viven en aquel lugar, un grupo de antiguos habitantes han regresado a su hogar y se alimentan con vegetales que cultivan en sus quintas.

Una consecuencia importante de estas observaciones es que desmienten a quienes afirman que los residuos nucleares constituyan un tenebroso legado. Por el contrario, si los repositorios se establecieran en zonas de exclusión, se estaría dando a la naturaleza la oportunidad de generar santuarios donde la vida silvestre prosperaría vigorosa sin intromisión humana.

Nadie excepto nosotros mismos puede liberar nuestras mentes  
No tengas miedo de la energía atómica  
Porque ninguno de ellos puede detener el tiempo  
**Redemption Song, Bob Marley, 1979**

## Referencias

- 
- <sup>1</sup> Marie Curie, física de origen polaco. Se casó con el científico francés Pierre Curie.
- <sup>2</sup> La información sobre el terremoto fue obtenida en <http://earthquake.usgs.gov>
- <sup>3</sup> El descubridor de la radioactividad fue H.Becquerel. Este junto con el matrimonio Curie recibieron el premio Nobel de Física en 1903 y Marie Curie recibió un segundo premio Nobel, esta vez de Química, en 1910.
- <sup>4</sup> François Jacob en El Juego de lo Posible, Ed.Fondo de la Cultura Económica.(1989)
- <sup>5</sup> Enola Gay era el nombre del bombardero B29 que arrojó la bomba sobre Hiroshima. Así se llamaba la madre del piloto, coronel Paul Tibbets.
- <sup>6</sup> Little Boy, nombre que los tripulantes habían puesto a la primera bomba atómica
- <sup>7</sup> A DIMLY BURNIG WICK – Memoir from the ruins of Hisoshima. Sadako Teiko Okuda with Pamela Bea Wilson Vergun. ALGORA PUBLISHING (2008).
- <sup>8</sup> Ver ref.7
- <sup>9</sup> Gorgon: personajes femeninos de la mitología griega. Medusa era una de ellos.
- <sup>10</sup> Albert Camus, 1956, durante la guerra de Argelia trata de convencer a los contendientes de que preserven su inocencia y llama a un cese del fuego.
- <sup>11</sup> Se extendió desde el fin de la II Guerra hasta la disolución de la URSS.
- <sup>12</sup> URSS es el acrónimo de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.
- <sup>13</sup> Franklin D. Roosevelt, presidente de USA.
- <sup>14</sup> El Proyecto Manhattan dirigido científicamente por el físico Julius R. Oppenheimer condujo a la fabricación de la primera bomba atómica.
- <sup>15</sup> Albert Einstein fue el presidente del Comité. Otros miembros fueron: Prof. Hans A. Bethe de la Universidad de Cornell; Dr. Leo Szilard de la Universidad de Chicago; Prof. Harold C. Urey de la Universidad de Chicago, premio nobel; Prof. T.R. Hogness de la Universidad de Chicago; Prof. Victor Weisskof del MIT; Prof.Philip M. Morse del MIT; Prof. Linus Pauling de CALTECH; Dr. Edward U. Condon, presidente de la American Physical Society. La mitad de ellos trabajaron en el Proyecto Manhattan.
- <sup>16</sup> Prof.Linus Pauling recibió el Premio Nobel de Química en 1954.
- <sup>17</sup> John F. Kennedy presidente de los Estados Unidos y Nikita Krushchev primer ministro de la URSS.
- <sup>18</sup> Discurso pronunciado por Linus Pauling al recibir el Premio Nobel de la Paz en 1963.
- <sup>19</sup> Alvarez Jonte, pequeño pueblo del partido de Punta Indio (antes Partido de Magdalena), cuando aún no había llegado la energía eléctrica.
- <sup>20</sup> El sistema solar se encuentra en los bordes de la Vía Láctea.
- <sup>21</sup> A THIN COSMIC RAIN. Particles from outer space. Michel W. Friedlander. Harvard University Press.
- <sup>22</sup> Partícula sub-atómica de carga negativa y masa 200 veces la del electrón.

- 
- <sup>23</sup> Espiritu del guerrero. Mitología Nórdica.
- <sup>24</sup> Bulfinch's Mythology. Project Gutenberg.
- <sup>25</sup> Los Inuits son llamados esquimales y los Saamis lapones.
- <sup>26</sup> Pueblo del norte de América.
- <sup>27</sup> FUSION, the energy of the Universe. G. Mc Cracken and P. Stoff. Elsevier Academic Press.
- <sup>28</sup>  $E = mc^2$  es la conocida ecuación debida a Einstein, que relaciona masa y energía. Aquí  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.
- <sup>29</sup> EL SOL. Marta Rovira. EUDEBA
- <sup>30</sup> Cosmic Rays, Clouds, and Climate. N. Marsh and H. Svensmark. SPACE SCIENCE REVIEWS 100 [2000] 1-16
- <sup>31</sup> Radiación medida en micro Sievert. Un Sievert es la unidad de la dosis biológica efectiva. Un micro Sievert es un millón de veces menor que el Sievert y es una exposición a radiación muy pequeña.
- <sup>32</sup> Cosmic Ray implications for human health. M.A. Shea and D.F. Smart. SPACE SCIENCE REVIEWS 93[2000]187-205
- <sup>33</sup> Los datos sobre Fukushima pueden verse en la [www.iaea.org](http://www.iaea.org), página de la International Atomic Energy Agency.
- <sup>34</sup> Un átomo tiene un núcleo formado por protones (cargados positivamente) y neutrones (sin carga). Alrededor de ese núcleo se encuentran los electrones (con carga negativa). La masa del electrón es 1836 veces menor que la del protón y la de este es ligeramente menor que la del neutrón. Ello implica que la masa del átomo se halla concentrada en el núcleo. El número de electrones es igual al de protones y el átomo es eléctricamente neutro. Si el átomo pierde electrones se convierte un ión cargado positivamente. Lo que define al átomo es el número de protones. Por ejemplo, el hidrógeno tiene un protón. Sin embargo, puede tener además un neutrón y sigue siendo hidrógeno, pero más pesado (deuterio) o dos protones y se lo llama tritio. Los tres son isótopos del hidrógeno, todos tienen un protón y difieren en el número de neutrones. Esto ocurre con todos los elementos. En la naturaleza, generalmente, uno de los isótopos es el más abundante. En muchos casos, alguno de los isótopos suele ser radioactivo. Por ejemplo, el tritio es el isótopo radioactivo del hidrógeno.
- <sup>35</sup> <sup>14</sup>N indica que es un átomo de nitrógeno, cuyo símbolo es N, en el cual la suma de neutrones + protones es igual a 14. El nitrógeno tiene 7 protones. El <sup>14</sup>C es un isótopo radioactivo del carbono cuyo isótopo más abundante es el <sup>12</sup>C, el carbono tiene 6 protones en su núcleo.
- <sup>36</sup> ATSDR. Agency for toxic substances and disease registry(USA).
- <sup>37</sup> AMERICAN CANCER SOCIETY ([www.cancer.org](http://www.cancer.org)) .
- <sup>38</sup> FUSION. The energy of the Universe. G. Mc Cracken and P. Stoff. Elsevier Academic Press.
- <sup>39</sup> NUCLEAR ENERGY. An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes. Raymon L. Murray. Ed. Butterworth-Heinemann.
- <sup>40</sup> El uranio en la naturaleza es una mezcla de tres isótopos: <sup>238</sup>U (99,284%), <sup>235</sup>U (0.711%) y el resto es <sup>234</sup>U. Como el fisionable es el <sup>235</sup>U, el mineral debe someterse a un enriquecimiento previo a su uso como combustible nuclear. El uranio tiene 92 protones en su núcleo. El átomo se completa con igual cantidad de electrones que compensan la carga positiva de los protones.
- <sup>41</sup> El asterisco en la ecuación indica la condición de especie excitada
- <sup>42</sup> La energía cinética es la que se atribuye a un cuerpo que se desliza con una cierta velocidad.
- <sup>43</sup> La sustancia que contiene el uranio es el óxido de uranio.
- <sup>44</sup> Es una aleación a base de zirconio denominada zircaloy.
- <sup>45</sup> Para tener una información detallada sobre el accidente de Chernobyl y sus consecuencias puede verse la página web de la IAEA: [www.iaea.org](http://www.iaea.org)
- <sup>46</sup> The Revenge of Gaia. Earth's climate crisis and the fate of humanity. Ed. Basic Books.
- <sup>47</sup> Declaraciones de Sergey Gaschak, del Laboratorio Internacional de Radioecología de Chernobyl.