

ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS
Y NATURALES DE ZARAGOZA

CIEN AÑOS DE RADIATIVIDAD

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. RAFAEL NÚÑEZ-LAGOS ROGLÁ

EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 22 DE ENERO DE 1997.

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. JOSE MARÍA SAVIRÓN DE CIDÓN

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA 1997

ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS
Y NATURALES DE ZARAGOZA

CIEN AÑOS DE RADIOACTIVIDAD

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. RAFAEL NÚÑEZ-LAGOS ROGLÁ

EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 22 DE ENERO DE 1997.

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. JOSE MARÍA SAVIRÓN DE CIDÓN

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA 1997



Depósito legal: Z. 51 – 1997

Imprime:

Sdad. Coop. de Artes Gráficas
LIBRERIA GENERAL
Pedro Cerbuna, 23
50009 Zaragoza

CIEN AÑOS DE RADIATIVIDAD

POR EL

Ilmo. Sr. D. RAFAEL NÚÑEZ-LAGOS ROGLÁ

ÍNDICE

PREÁMBULO

LA RADIATIVIDAD HASTA EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN

CAPÍTULO 1.- EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD NATURAL

- 1.1.- Introducción
- 1.2.- El descubrimiento de la radiactividad. Henri Antoine Becquerel
- 1.3.- El descubrimiento del Radio y el Polonio. Pierre y Marie Curie
- 1.4.- La naturaleza de los rayos emitidos por las sustancias radiactivas. Series radiactivas
- 1.5.- El fotón
- 1.6.- El núcleo y la estructura del átomo

CAPÍTULO 2.- EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

- 2.1.- Reacciones nucleares y radiactividad artificial
- 2.2.- El Neutrón
- 2.3.- Los aceleradores de partículas

EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN Y LA ENERGÍA NUCLEAR

CAPÍTULO 3.- EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN. ENRICO FERMI

CAPÍTULO 4.- LA ENERGÍA NUCLEAR Y EL PROYECTO MANHATTAN

CAPÍTULO 5.- LA ENERGÍA NUCLEAR DESPUÉS DE 1.945. SUS USOS MILITARES Y CIVILES

LA RADIATIVIDAD EN LA TIERRA

CAPÍTULO 6.- LA RADIATIVIDAD EN LA TIERRA PRIMITIVA

- 6.1.- La tierra primitiva
- 6.2.- Atmósfera y corteza
- 6.3.- Calor radiogénico
- 6.4.- Reactores nucleares naturales. El fenómeno de OKLO
- 6.5.- Isótopos extinguidos y anomalías isotópicas

CAPÍTULO 7.- LA RADIATIVIDAD EN LA TIERRA ACTUAL

- 7.1.- Radionuclidos naturales
- 7.1.1.- El Uranio

- 7.1.2.- El Torio
- 7.1.3.- Otros elementos radiactivos naturales
- 7.2.- La radiación cósmica. Radionuclidos de origen cosmogénico
- 7.3.- Radionuclidos artificiales
- 7.3.1.- Consecuencias de las pruebas nucleares
- 7.3.2.- Los accidentes nucleares
- 7.3.3.- El problema de los residuos radiactivos. Los cementerios nucleares. La incineración
- 7.4.- Dosis radiactivas

A modo de epílogo

BIBLIOGRAFÍA

TABLAS

- Tabla 1.1.- Radiactividad de los compuestos de Uranio medida por Marie Curie
- Tabla 1.2.- Esquema de análisis químico cualitativo usado por Pierre y Marie Curie
- Tabla 1.3.- Primer esquema coherentes de cadenas naturales radiactivas según F. Soddy
- Tabla 5.1.- Reactores nucleares en el mundo (Finales de 1.995)
- Tabla 6.1.- Acontecimientos más importantes de la tierra primitiva
- Tabla 6.2.- Características de los elementos de largo periodo con cierta abundancia en la corteza
- Tabla 7.1.- Cantidades de nucleidos existentes, en equilibrio radiactivo, en una Tonelada de Uranio natural.
- Tabla 7.2.- Familia radiactiva del U^{235}
- Tabla 7.3.- Familia radiactiva del U^{238}
- Tabla 7.4.- Familia radiactiva del Torio
- Tabla 7.5.- Características de las partículas más comunes envueltas en la radiación cósmica
- Tabla 7.6.- Propiedades de la radiación cósmica al nivel del mar
- Tabla 7.7.- Radionuclidos cosmogénicos más abundantes
- Tabla 7.7.- Radionuclidos cosmogénicos más abundantes
- Tabla 7.8.- Distribución por países de pruebas nucleares conocidas hasta 1.985
- Tabla 7.9.- Radionucleidos liberados en una explosión nuclear
- Tabla 7.10.- Contribuciones de diversas fuentes a la dosis equivalente anual

CIENT AÑOS DE RADIATIVIDAD

Las mentes de muchas personas están hoy día afectadas por varias creencias irracionales, que varían desde supersticiones relativamente inocuas, como la astrología, hasta las más variadas clases de ideologías. El hecho de que las leyes fundamentales de la naturaleza permanezcan oscuras hace mucho más fácil a la gente el esperar que un día sus propias irracionalidades favoritas encuentren un lugar respetable en la estructura de la Ciencia.

S. Weinberg "Dreams of a Fiel Theory"

Preámbulo.

Permítanme comenzar por agradecer a esta Docta corporación el haberme propuesto como Académico de Número. La invitación a formar parte de la más alta Institución Científica de nuestra Comunidad no podía ser respondida por mí más que con gratitud, alegría, satisfacción y deseo de corresponder con creces a la confianza que en mi han depositado. Espero no defraudarles y colaborar lealmente, en la medida de mis posibilidades, a las nobles tareas de esta Academia. Deseo expresar muy particularmente mi gratitud al Presidente de la Academia, Profesor D. Horacio Marco y al Profesor D. Justiniano Casas Peláez por sus intervenciones en la elección de mi persona, a todos los Académicos por su beneplácito a la propuesta y muy especialmente a mi entrañable amigo el Profesor D. José María Savirón de Cidón que, además, ha aceptado gustoso la tarea de escribir el discurso de contestación.

Es para mí un honor y un motivo de orgullo aprovechar mi disertación ante ustedes, en esta sesión solemne de la Academia, para conmemorar el centenario de la Radiactividad, uno de los descubrimientos más trascendentales para la física del siglo XX y origen de lo que cuatro décadas después supuso el nacimiento de una nueva era para la humanidad.

LA RADIATIVIDAD HASTA EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN.

CAPÍTULO 1.- EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD NATURAL.

1.1- Introducción.

Se ha cumplido este año el centenario del descubrimiento de la Radiactividad. Llevamos cien años sabiendo que somos radiactivos, que el mundo que nos rodea es radiactivo y que el universo en el que estamos también lo es. No nos hemos acostumbrado, sin embargo, a esta nueva realidad y la ignorancia y la incultura científica de nuestra sociedad ha hecho que la actitud colectiva hacia el fenómeno radiactivo haya pasado de una total aceptación a unos sentimientos encontrados entre los que predomina el miedo y el rechazo a priori de todo lo relacionado con el tema. En 1921 Madame Curie, la mujer científica más respetada de su tiempo y sin duda de todo el siglo XX, viajó a los Estados Unidos donde recibió del Presidente Harding el regalo de 1 gramo de Radio, comprado por suscripción pública por las mujeres Norteamericanas, para que lo trajese a Europa para su utilización en tratamientos médicos. El donativo representaba la quincuagésima parte de la cantidad total de Radio producida hasta entonces en los Estados Unidos y su valor ascendía a 100.000 dólares de la época. En la caja de madera de Mahogany y Plomo que lo contiene puede leerse una inscripción que dice *"Ofrecido por el Presidente de los Estados Unidos, en representación de las mujeres Americanas, a María Sklodowska Curie en reconocimiento a sus trascendentales servicios a la ciencia y a la humanidad por el descubrimiento del Radio"*.

¿Se podría hoy día hacer y decir lo mismo?. El temor y la creencia de que es algo dañino predominaría, probablemente, sobre un análisis objetivo. Sin embargo no era ignorancia lo que había en antiguos tiempos. El conocimiento de los daños que puede causar la radiactividad, mal utilizada, es muy temprano y la producción de eritemas en la piel y quemaduras producidas por rayos X es anterior a los comienzos de nuestro siglo. Lo que sucedió es que pronto se vió, también, que las virtudes de las radiaciones eran muy superiores a sus peligros y que estos podían evitarse con las debidas precauciones.

La segunda guerra mundial fué sin duda el factor determinante de la actual postura de la sociedad ante el fenómeno nuclear. El miedo a las armas nucleares, que sin embargo ha evitado una tercera conflagración mundial, y su asociación provocada, intencionadamente, con cualquier

fenómeno relacionado con lo radiactivo o nuclear es sin duda el origen del cambio de opinión. "Todo lo radiactivo es malo" podría ser, en el escueto lenguaje publicitario, la frase que resumiese el pensamiento o creencia de muchas personas de nuestra sociedad actual. Entre ellas estarían seguramente incluidas algunas a las que se les ha curado un tumor gracias a la radiación, pero que probablemente no saben que es lo que le han aplicado, y es evidente que prácticamente a todas ellas se les habrá hecho más de una radiografía. Sin duda el miedo y la desconfianza proceden de la intangibilidad del fenómeno y de la múltiple confusión que existe entre los diversos campos que se engloban en el mundo radiactivo.

Permítanme esbozarles, a lo largo de esta conferencia, lo que la radiactividad y las radiaciones significan y han significado para nuestro planeta y sus habitantes, junto con una breve historia del esfuerzo que los científicos han realizado para descubrir, comprender y utilizar los mecanismos y la energía que el propio universo utiliza para su devenir.

1.2.- El Descubrimiento de la Radiactividad. Henri Antoine Becquerel

La radiactividad natural fué descubierta , en Febrero de 1.896, por Henri Becquerel, profesor de Física en la Escuela Politécnica de París, pocos meses después de que Wilhelm Conrad Roentgen descubriera los Rayos X (Roentgen 1.895). Muchos científicos del momento asociaron la producción de los Rayos X con el fenómeno de la fluorescencia o fosforescencia, pues en aquellos tiempos no se distinguían bien, ya que ésta se producía en el cristal de los tubos de Crookes que se utilizaban para producir los misteriosos rayos. Nada más natural que investigar si sustancias fluorescentes o fosforescentes emitían rayos X. La excitación del fenómeno de la fluorescencia se producía con facilidad exponiendo determinadas sustancias a la luz y particularmente a la luz solar. Becquerel había iniciado este tipo de estudio y se dedicó a exponer a la luz solar sustancias, de fluorescencia conocida, colocadas sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro opaco. El resultado que esperaba era que los rayos X producidos en la sustancia impresionasen la placa fotográfica. La realidad confirmó la previsión y las placas de Becquerel estaban impresionadas con la silueta del trozo de mineral utilizado.

Una vez más el azar y la intuición se combinaron en un doble acuerdo. El primero, que entre los cristales que Becquerel estaba estudiando se encontraba el Bisulfato de Uranio y Potasio y el segundo, no tan casual,

que en Febrero, en París, en plena sistemática de su experimento no luciese sol. Según él mismo nos cuenta los días 26 y 27 de Febrero el sol sólo apareció intermitentemente, de forma que paró sus experimentos pues los realizaba con una exposición constante. Becquerel guardó en un cajón de su mesa de trabajo una placa fotográfica envuelta en el papel negro y el mineral de Uranio encima de ella. Durante los días siguientes no apareció el sol y tuvo que esperar hasta el 3 de Marzo, día en el que en vez de exponer su sistema al sol decidió revelar la placa. Yo no creo que fuese suerte, aprovechó la circunstancia para probar que en efecto era el sol el causante primario de la emisión de los rayos que ennegrecían la placa y por tanto al revelarla sin haber estado expuesta debería estar inmaculada. Ante su sorpresa se encontró con la imagen del mineral más intensa que en todas las ocasiones anteriores. Como buen científico se dió cuenta inmediatamente que ni el sol, ni la fluorescencia, ni la fosforescencia eran necesarias para el ennegrecimiento y que era su mineral el que emitía rayos misteriosos capaces de ennegrecer placas. Unas pocas pruebas más le convencieron de que el efecto era intrínseco del mineral sin necesidad de estimulación alguna y presentó sus resultados en la sesión científica ordinaria de la Academia de Ciencias del lunes siguiente. Diez días después sus resultados aparecieron publicados en los Anales de la Academia de Ciencias de París (Becquerel 1.896). Del 3 de Marzo al 3 de Mayo tuvo las sales en una caja con paredes de plomo en total oscuridad, pero las sales de Uranio continuaban emitiendo radiación. Cualquier compuesto de Uranio conducía a resultados similares. Becquerel obviamente atribuyó el efecto a la presencia del Uranio.

Anecdóticamente, permítanme decir que la celeridad en comunicar sus resultados y publicarlos es la causa de que hoy día la unidad de actividad radiactiva sea el Becquerelio y no el Thomsenio o algo similar, pues una vez más dos científicos descubrieron lo mismo, simultánea e independientemente. En Londres, Sylvanus Thomson estaba trabajando con Nitrato de Uranio y encontró que cuando se exponían las sales sobre una placa al sol el oscurecimiento ocurría justo debajo de la sal de Uranio, hecho que él atribuyó a una emisión de la sal. Hay una carta del presidente de la Royal Society dirigida a Thomson el 29 de Febrero urgiéndole a publicar su descubrimiento, pero fué superado por la celeridad de Becquerel en la comunicación y publicación del suyo.

Becquerel continuó estudiando la radiactividad durante los años siguientes y posteriormente colaboró con el matrimonio Curie (Becquerel 1.901). Recibió conjuntamente con ellos el Premio Nobel de Física en 1.903. Murió en 1.908 a los 55 años de edad.

1.3.- El Descubrimiento del Radio y el Polonio. Pierre y Marie Curie

Pocos matrimonios de científicos han tenido ocasión de entrar en la leyenda y ninguna mujer científica ha gozado del respeto, el prestigio y la admiración de sus colegas, así como de la fama y popularidad en la sociedad de su tiempo, como Madame Curie. La historia de la radiactividad está íntimamente ligada a dos generaciones del apellido Curie.

Pierre Curie, junto con su hermano Jacques, había descubierto en 1.882 el fenómeno de la piezoelectricidad, que consiste, esencialmente, en la aparición de cargas eléctricas en algunos cristales ante la presión mecánica. Juntos habían utilizado el efecto en el cuarzo para diseñar y construir un instrumento, conocido como el electrómetro de Curie, capaz de medir pequeñísimas cantidades de carga eléctrica.

María Sklodowska había llegado a París en 1.891 procedente de su ciudad natal Varsovia y como graduada en Química trabajaba en el Laboratorio de la Escuela de Física y Química de París. Con el tiempo también se graduó en Física y Matemáticas. Su estado civil cambió en 1.895 al contraer matrimonio con Pierre Curie profesor de Física de la Sorbona. Junto a él comenzó a trabajar completando alguna investigación en magnetismo.

El descubrimiento de Becquerel estimuló la curiosidad de los Curie y pronto se dieron cuenta de que la ionización que producía en el aire la nueva radiación podía ser utilizada para su propia detección, de una forma mucho más precisa y sensible que con las placas fotográficas. Construyeron lo que hoy día llamaríamos una cámara de ionización, un aparato que estaba formado por dos electrodos de metal en forma de discos horizontales de unos 8 cm. de diámetro separados 3 cm. y sometidos a una diferencia de potencial. La ionización que las sustancias radiactivas colocadas sobre el electrodo inferior podían llegar a producir entre las placas originaba una corriente eléctrica del orden de 10^{-11} amperios. Una cienmilésima de microamperio!. Su medida era impensable en aquel tiempo y fué posible utilizando sabiamente el electrómetro de Pierre Curie. Armados con el instrumento más sensible de su tiempo pudieron emprender la tarea de descubrir qué elementos eran radiactivos, empezando por averiguar cual o cuales eran los que originaban los rayos descubiertos por Becquerel. Realizaron un estudio de todos los elementos químicos entonces conocidos y sólomente encontraron actividad en el Uranio y en el Torio. En su primer artículo, Marie, (Curie M.1.898) publicó los resultados que

reproducimos en la Tabla 1.1, característico de las medidas y experimentos de la época. En él también señaló que en los compuestos de Torio se detectaban radiaciones similares, observación que también fué realizada independientemente por G.C. Schmidt (Schmidt 1.898).

Su primer descubrimiento fué que la radiactividad procedente de un compuesto de Uranio puro era aproximadamente proporcional a su contenido en Uranio, es decir, era una propiedad atómica y no química de la materia. La excepción era una forma bruta de óxido de Uranio llamada Pechblenda, obtenida en una mina de Joachimsthal, actualmente Jáchymov, en Bohemia. Estos yacimientos ya eran explotados en el siglo XVI por sus depósitos de plata. María Curie comentaba sobre el comportamiento excepcional de la Pechblenda *“Este hecho es muy notable conduce a creer que estos minerales contienen un elemento mucho más activo que el Uranio”*.

Tabla 1.1
Radiactividad de los compuestos de Uranio medida por Marie Curie

Muestra de unos 20 cm ³	Intensidad de Ionización (A)
Metal Uranio	2×10^{-12}
U ₂ O ₅	27×10^{-12}
U ₃ O ₈	18×10^{-12}
(NH ₄) ₂ U ₂ O ₅	12×10^{-12}
UO ₂ (NO ₃) ₂ .6H ₂ O	7×10^{-12}
Pechblenda de Joachimsthal	67×10^{-12}

Tomando esta creencia como hipótesis de trabajo, el matrimonio Curie inició un análisis químico sistemático de la Pechblenda. Una vez más la suerte se alió a la ciencia, pues es una casualidad que la pechblenda analizada contuviese impurezas de Plomo, Bismuto, Cobre, Hierro y Bario en cantidades suficientes como para obtener precipitados visibles en cada uno de los cinco grupos que en aquel entonces se utilizaban en el análisis de cationes. Brevemente lo indicamos en la Tabla 1.2.

La Pechblenda se disolvía en ácido nítrico diluido y la solución se trataba con el reactivo adecuado. Cada precipitado se desecaba y extendido sobre una cubeta poco profunda se ponía sobre el electrodo inferior de la cámara de ionización y se medía la corriente eléctrica. En

un principio sólo se observó actividad en el precipitado del grupo II, posteriormente también lo midieron en el V.

Tabla 1.2
Esquema de Análisis Químico Cualitativo usado por Pierre y Marie Curie

Grupo	Precipitado por:	Ejemplo:
I	Ácido clorhídrico diluido	Plomo
II	Sulfuro de hidrogeno	Bismuto
III	Cloruro amónico y Amoniaco	Hierro
IV	Sulfuro amónico	Zinc
V	Carbonato amónico	Bario

Tras largas y tediosas separaciones, tratando grandes cantidades de mineral los Curie anunciaron en Julio de 1.898 *"Creemos que la sustancia que hemos extraído de la Pechblenda contiene un metal desconocido hasta ahora, similar al Bismuto en sus propiedades analíticas. Si la existencia de este nuevo metal se confirma nos proponemos llamarle Polonio"*, (Curie-Curie 1.898). Más tarde reconocieron una segunda sustancia de la que dicen *"Es completamente distinta a la primera, fuertemente radiactiva y no precipita por la acción del Sulfuro de hidrógeno, ni por la del Sulfuro de amoniaco, ni por la del Amoniaco; el Sulfato no es soluble en agua ni ácidos, el Carbonato es insoluble en agua; el Cloruro aunque muy soluble en agua, es insoluble en ácido clorhídrico concentrado y en alcohol - hemos obtenido cloruros cuya actividad es novecientas veces la del Uranio - varias razones nos conducen a creer que la nueva sustancia radiactiva contiene un nuevo elemento, al que nos proponemos dar el nombre de Radio"*. Radium en la nomenclatura Francesa e Inglesa, tomado del Latín "radius", que significa rayo. El anuncio del descubrimiento del Radio se hizo público en París el 26 de Diciembre de 1.898 (Curie P, Curie M & Bemont MG 1898). Una idea de las dificultades que tuvieron que superar para aislar el Radio en la Pechblenda es que la cantidad de Radio que obtuvieron inicialmente fué de un décimo de grano es decir 6.5 mg. partiendo de dos toneladas de mineral.

A finales de siglo hubo una larga serie de anuncios de descubrimientos de elementos químicos, unos respondían a la realidad y otros no. Para evitar falsas expectativas se decidió, por la comunidad científica, que era necesario aportar al menos 100 mg (15 granos) del nuevo elemento

para ser considerado como tal. Después de 4 años de esfuerzos consiguieron obtener , en 1.901, 0.1g de Radio puro a partir de una tonelada de residuos de Pechblenda. Las líneas espectrales eran características, pero la prueba final de la existencia de un nuevo elemento fué la determinación de su masa atómica que resultó ser 225 (valor actual 226.0254). En 1.899, un buen amigo del matrimonio Curie, A. Debierne, que trabajaba en la Sorbona había descubierto un tercer elemento radiactivo, el Actinio, también en el análisis detallado de la Pechblenda.

La importancia de la radiactividad y en particular del Radio para aplicaciones médicas se vió muy pronto (Becquerel Curie 1.901) y ya en 1.902 se había descubierto el efecto que la radiación del Radio producía sobre las células cancerosas. La radiactividad se consideró un bien para la humanidad, lo que provocó la búsqueda de minerales ricos en Uranio y el perfeccionamiento de los métodos de extracción del Radio. En la primera década del siglo se necesitaba media tonelada de Pechblenda para obtener 100mg de Radio. El proceso fué mejorándose pero cuando se logró el rendimiento de 1g. por tonelada el procedimiento era todavía tan complejo que requería 5 toneladas de diversos compuestos químicos y 50 toneladas de agua. Hasta 1.921 las minas de Joachimsthal fueron las mayores suministradoras de Radio.

Después de la primera guerra mundial la Unión Minera del Alto Katanga comenzó la explotación de depósitos de mineral rico en Uranio que habían sido descubiertos en 1.913 en el Congo Belga, en la mina de Chinkolobwe en Katanga. El mineral se procesaba en Oolen (Bélgica) cerca de Amberes, lo que convirtió a Bélgica en el primer productor mundial de Radio. (Union Minière 1.929). En los Estados Unidos se encontró Carnotita en Utah y en Colorado y en 1.922, antes de que las minas de Katanga estuviesen en plena producción, los Estados Unidos producían la cuatro quintas partes del Radio mundial (Landa 1982), aunque sóloamente se obtenía 1 g. de Radio por cada 500 toneladas de mineral. Francia obtenía algo de Radio de minas en Portugal y Madagascar. El Reino Unido lo obtenía ya en 1.904 de depósitos en Redruth en Cornwall y posteriormente también se encontró en Bath y en Buxton al lado de las aguas termales.

El matrimonio Curie se hizo rápidamente famoso y el Radio se consideró por la sociedad de la época algo parecido a la piedra filosofal. Como hemos mencionado anteriormente recibieron, junto con Becquerel, el Premio Nobel de Física en 1.903 por el descubrimiento de la Radiactividad. En 1.906 Pierre Curie murió, en París, atropellado por un coche de caballos. En 1.910 Marie Curie consiguió obtener Radio puro en

estado metálico lo que le valió en 1.911 su segundo Premio Nobel, esta vez de Química por el descubrimiento de los nuevos elementos Radio y Polonio. Fué la primera persona que obtuvo dos premios Nobel. Marie murió el 4 de Julio de 1.934, a los 67 años, de anemia aplástica producida, según su propia hija, por su larga exposición al Radio mientras realizaba sus experimentos sin tomar las debidas precauciones aunque ella insistía mucho en que los demás las tomaran y lo exigía a sus colaboradores. Hay también quien atribuye su anemia a las sobreexposiciones a los Rayos X que recibió durante la primera guerra mundial en la unidad móvil que ella misma diseñó, equipó y operó en campaña.

1.4.- La naturaleza de los Rayos emitidos por las sustancias radiactivas. Series radiactivas.

La facultad de los rayos emitidos por las sustancias radiactivas, así como de los rayos X, de producir ionización en los gases llevó a Ernest Rutherford, en 1.899, a pensar que interactuaban electromagnéticamente y a emprender un estudio sistemático de la radiación emitida por el Uranio analizándola en diversas condiciones. En ese mismo año Giesel (Giesel 1899), e independientemente Meyer y von Schweidler (Meyer 1899), habían puesto de manifiesto que la radiación se podía desviar por la aplicación de campos magnéticos intensos. Pronto descubrió que la radiación estaba constituida por dos tipos de partículas que denominó alfa y beta. Los rayos alfa producían un gran número de iones pero se detenían por una simple hoja de papel, aluminio o cristal. La radiación beta producía muy pocos iones pero era mucho más penetrante. Ambas radiaciones eran afectadas por campos magnéticos, la alfa estaba cargada positivamente mientras que la beta lo estaba negativamente. Poco más tarde, en 1.900, el francés Villard (Villard 1.900) descubrió una tercera radiación mucho más penetrante que la beta, que no se desviaba por campos magnéticos, a la que Rutherford, en 1.903, denominó radiación gamma. Los años que siguieron al descubrimiento del Radio produjeron muchos resultados contradictorios, sin duda debido a la falta de instrumentos de medida precisos y adecuados así como al desconocimiento del fenómeno en si.

En 1.895 el químico William Ramsay había descubierto el Helio (precisamente a partir de un mineral de Uranio), posteriormente Ramsay y Soddy en 1.903 demostraron que el Helio se produce en la radiactividad y finalmente entre 1.907 y 1.908 Rutherford y Royds, en Manchester, demostraron que los rayos alfa eran núcleos de Helio, al identificar el espectro del gas formado por las partículas alfa con el

que se conocía del Helio en el espectro solar. Los trabajos de Rutherford en el Cavendish Laboratory de Cambridge, junto a los de los Curie, de Becquerel y de Villard en París, permitieron esclarecer, además de que los rayos alfa eran átomos de Helio ionizado, que los beta eran electrones. Respecto a la tercera clase de radiactividad, mucho más penetrante que los rayos beta o X y que no se desviaba ante campos magnéticos o eléctricos muy intensos, el propio Rutherford intuyó que eran una luz de longitud de onda muy corta, igual que los rayos X, pero no lo pudo probar hasta 1.914 en un experimento con E. N. da Costa Andrade en el que pudieron medir la longitud de onda de los Rayos Gamma observando su dispersión por cristales.

Rutherford descubrió que el Torio emitía un gas radiactivo que llamó "Emanación" - (hoy sabemos que es un isótopo del Radón conocido también como Torón) - que le permitió enunciar, junto con Frederick Soddy a comienzos de 1.903, las leyes de las desintegraciones radiactivas. Ambos descubrieron que la desintegración radiactiva es un proceso en el que un átomo se transforma espontáneamente en otro, es decir cambia su identidad química y se transmuta en otro elemento. Que el ritmo con que sucede la transmutación es constante para cada elemento pero característico de él. Que el poder radiactivo de determinados elementos persiste durante largo tiempo; Que el Polonio perdió la mitad de su intensidad en aproximadamente cinco meses pero que el Uranio, el Torio y el Radio no sufrieron pérdida medible en ese periodo.

Descubierta la naturaleza de los rayos que emitían las sustancias radiactivas se produjeron nuevos enigmas. La emisión de rayos alfa, beta y gamma corresponde a una generación continua de energía, lo que producía problemas serios a los científicos de la época, ¿de donde provenía esa energía?. Se pensó tanto en la modificación de la termodinámica como en la falsedad de las medidas, pero era patente que los cuerpos radiactivos estaban más calientes que su entorno. Se comenzó a pensar en el aprovechamiento comercial de esta energía, aparentemente inagotable, sin embargo su aprovechamiento militar no se planteó. No obstante es interesante recordar aquí la frase que Pierre Curie mencionó en su discurso de recepción del Premio Nobel en 1.904 "*Es posible imaginar que en manos criminales el Radio podría resultar muy peligroso y por ello debemos preguntarnos si la humanidad tiene algo que ganar descubriendo los secretos de la naturaleza, si está lo suficientemente preparada para sacar provecho de ellos o si, por el contrario, este descubrimiento no resultará nocivo*". Casi un siglo después todavía sigue teniendo plena vigencia la pregunta de Pierre Curie. A pesar de que todos los enigmas científicos y los secretos de la

naturaleza en este campo se han resuelto, la preparación de la sociedad deja mucho que desear.

A finales de 1.911 se habían identificado claramente tres docenas de emisores radiactivos pero existía una gran confusión sobre el lugar que debían ocupar en la tabla periódica de los elementos. Tras bastantes dudas, rectificaciones y controversia, el rompecabezas comenzó a resolverse cuando se pudo colocar a todos los emisores en tres familias radiactivas distintas cuyos orígenes estaban, dos en el Uranio y una en el Torio. El producto final en todos los casos era el Plomo. El problema para acomodarlos en la tabla periódica era que había varios candidatos, con diferentes características radiactivas, para el mismo lugar. Kasimir Fajans en 1.912 anunció sus Leyes de desplazamiento, según las cuales una emisión alfa llevaba aparejado un cambio de dos lugares hacia la izquierda en la tabla periódica mientras que una emisión beta llevaba aparejado el desplazamiento de un lugar hacia la derecha. Al año siguiente Fajans y Frederick Soddy sugirieron que los diversos Plomos finales de las cadenas radiactivas y el plomo ordinario, todos con diferente peso atómico, deberían ocupar el mismo lugar en la tabla periódica. Soddy introdujo el concepto y la palabra "isótopo", concepto que no fué plenamente aceptado hasta 1.913. Todos los elementos radiactivos encontraron su lugar en la tabla y los problemas de los distintos Radios y de las tres emanaciones gaseosas quedaron resueltos. Frederick Soddy en su famoso libro sobre la interpretación del Radio, que recoge conferencias impartidas en Glasgow en 1.908 y sus trabajos con Rutherford (Soddy 1922), propone el esquema de la Tabla 1.3 para las tres cadenas radiactivas naturales. El libro proporcionó las claves para entender la naturaleza del átomo. Soddy recibió el Premio Nobel de Química en 1.921.

Soddy descubrió con Rutherford las Leyes de la desintegración radiactiva poniendo claramente de manifiesto la desintegración exponencial del número de átomos, el crecimiento de los átomos hijos e introduciendo el concepto de constante de desintegración y de periodo. En su excelente libro Soddy continua diciendo: *" La ciencia de la radiactividad engloba ahora treinta y seis ejemplos de elementos que cambian espontáneamente, con periodos que varían desde decenas de miles de millones de años a unas pocas mil millonésimas de segundo. Es poco probable que falte por descubrir algún otro elemento inestable a no ser que se encuentre alguna fuente completamente desconocida e insospechada de materiales radiactivos. ... Permanece sin embargo por resolver el problema más fundamental e inaccesible, que al mismo tiempo parece ser además el problema de mayor transcendencia práctica, la naturaleza interna real de la materia. ¿Como está un átomo*

de materia constituido y como se puede dividir?. Estas son cuestiones prácticas que el descubrimiento de la radiactividad ha sacado a la luz acuciantemente sin mostrar por ahora un resquicio por donde responder”.

Tabla 1.3. Primer esquema coherentes de cadenas naturales radiactivas según F. Soddy

SERIE PRINCIPAL				
Elemento	Peso Atómico	Radiación	Periodo (Promedio de vida)	Carácter químico
Uranium I	238	alfa	8.000.000.000a	Uranium
Uranium X ₁	234	beta	35,5 días	Thorium
Uranium X ₂	234	beta	1,65 minutos	Ektantalum
Uranium II	234	alfa	3.000.000 años	Uranium
Ionium	230	alfa	100.000 años	Thorium
Radium	226	alfa	2.440 años	Radium
Ra. Emanation	222	alfa	5,55 días	Emanation
Radium A	218	alfa	4,3 minutos	Polonium
Radium B	214	beta	38,5 minutos	Lead
Radium C	214	beta	1/1.000.000	Bismuth
Radium C'	214	alfa	seg?	Polonium
Radium D	210	beta	24 años	Lead
Radium E	210	beta	7,2 días	Bismuth
Radium F	210	alfa	196 días	Polonium
End Product	206		Lead

SERIE DEL TORIO				
Elemento	Peso Atómico	Radiación	Periodo (Promedio de vida)	Carácter químico
Thorium	232	alfa	25.000.000.000	Thorium
Mesothorium I	228	beta	a 9,67 años	Radium
Mesothorium II	228	beta	8,9 horas	Actinium
Radiothorium	228	alfa	2,75 años	Thorium
Thorium X	224	alfa	5,25 días	Radium
Th. Emanation	220	alfa	78 segundos	Emanation
Thorium A	216	alfa	0,2 segundos	Polonium
Thorium B	212	beta	15,4 horas	Lead
Thorium C	212	beta (65%)	87 minutos	Bismuth
Thorium C'	212	...	1/100.000.000. 000 seg. ?	Polonium
End Product	208	...		Lead

SERIE RAMIFICADA				
Elemento	Peso Atómico	Radiación	Periodo (Promedio de vida)	Carácter químico
En el Uranio I o en el Uranio II la serie se ramifica y el 8% del número total de átomos que se desintegran siguen la serie de la rama del Actinio.				
Uranium Y	...	beta	2,2 días	Thorium
Ekatantalum	...	alfa	1.000 a 10.000 años	Ekatantalum
Actinium	...	beta?	?	Actinium
Radioactinium	...	alfa	?	Thorium
Actinium X	...	alfa	28,1 días	Radium
Ac. Emanation	...	alfa	16,4 días	Emanation
Actinium A	...	alfa	5,6 segundos	Polonium
Actinium B	...	beta	0,003 segundos	Lead
Actinium C	...	alfa	52,1 minutos	Bismuth
Actinium D	...	beta	3,1 minutos	Thallium
End Product	o 206 o 210	...	6,83 minutos	Lead
En el Radium C, 0.03% de los átomos siguen la serie ramificada				
Radium C	214	alfa (0.03%)	28,1 minutos	Bismuth
Radium C ₂	210	beta	1,9 minutos	Thallium
End Product	210	...		Lead
En el Thorium C, 35% de los átomos siguen la serie ramificada				
Thorium C	212	alfa (35%)	87 minutos	Lead
Thorium D	208	beta	4,5 minutos	Thallium
End Product	208	...		Lead

Soddy tuvo que esperar hasta 1.926 para que la Mecánica Cuántica pudiese explicar la estructura atómica, hasta 1.933 en que se descubrió el neutrón para que se pudiese explicar la constitución del núcleo atómico y hasta 1.934 en que se descubrió la radiactividad artificial para poder comenzar la producción y el estudio de nuevos núcleos. Hoy día el número de nucleidos inestables sobrepasa el millar. Afortunadamente para él, vivió hasta verlo todo aclarado y falleció en 1.956 a los 79 años.

1.5.- El Fotón.

Los problemas que la radiactividad planteaba tenían que encontrar su solución en el esquema teórico de la Física y nada más acabado,

completo y cerrado que la Física en los años finales del siglo XIX. La Física Clásica podía explicar prácticamente todos los fenómenos conocidos. Estaba formada por la mecánica que, formulada en términos de Lagrangianos o Hamiltonianos, se había llevado hasta el límite de la simplicidad y abstracción y era capaz de explicar el mundo terrestre y el celeste. La termodinámica gozaba de la total generalidad y corrección y finalmente con Maxwell se había cerrado la distinción entre electricidad, magnetismo y óptica. Sólo la radiactividad con su secuela de tener que conocer la estructura profunda de la materia y del átomo venía a perturbar el esquema general. La Física clásica no podía ni sabía dar razón de ello y cuando trataba de explicar algún fenómeno "moderno" sus predicciones no se ajustaban en absoluto a los hechos experimentales.

Una serie de avances teóricos, aparentemente disjuntos, fueron necesarios para que a finales del primer cuarto del siglo XX quedara establecido un nuevo esquema conceptual capaz de resolver los problemas nuevos sin alterar lo útil y acertado de la ciencia anterior.

El año 1.900, Max Planck, desarrolló la hipótesis de que las cargas eléctricas de las paredes de un cuerpo negro eran osciladores armónicos cuya energía era un múltiplo de su frecuencia multiplicada por una constante, la hoy célebre constante de Planck. A decir verdad, la radiación térmica de los cuerpos negros no era un problema fundamental para la Física de finales del siglo XIX, aunque la explicación teórica del espectro de emisión no se correspondía con los datos experimentales. Hay que decir, no obstante, que estos datos eran pocos, con errores considerables y cubrían sólo una parte del espectro de frecuencias. Planck, sin duda, no se atrevió a establecer una relación entre la amplitud y la frecuencia de una onda pues son dos variables independientes, máxime aplicado a las recientemente propuestas ondas electromagnéticas que se suponía que existían dentro de la cavidad del cuerpo negro, por eso lo exigió a los osciladores armónicos de las paredes del cuerpo, cuya dinámica no era conocida y cuya consecuencia es que las ondas electromagnéticas que generan tienen una amplitud relacionada con la frecuencia.

La hipótesis de Planck tuvo poca trascendencia, parecía "ad hoc" y sin consecuencias para otros sistemas y quedó en el olvido hasta 1.905, año en que Albert Einstein logró explicar el efecto fotoeléctrico, fundamento de la fotografía, los fotómetros y la fotosíntesis. El fenómeno se había descubierto algunos años antes por Philipp Lenard (1.862-1.947), que recibió el Premio Nobel en 1.905, y consistía en que la luz visible y más aún la luz ultravioleta era capaz de arrancar

electrones de ciertas sustancias. Las medidas, también escasas y no muy buenas, eran suficientes para demostrar que las teorías conocidas hasta entonces eran incapaces de explicarlas. Las dependencias de las variables eran sorprendentes, por ejemplo, la intensidad de la luz utilizada para iluminar la sustancia, en vez de estar relacionada con la energía con que salían los electrones desprendidos de la misma, como predecía la teoría, lo estaba con su número, mientras que su energía cinética de lo que dependía era de la frecuencia de la luz que según la teoría no debería jugar ningún papel. Ni una sola de las predicciones teóricas de la Física clásica era seguida por los hechos experimentales en este curioso efecto.

Einstein, en 1.905, escribió uno de los artículos más importantes de la historia de la Física "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" (Einstein 1.905) y en él a la par que introdujo la relatividad especial destruyó la hipótesis del éter. Las ondas electromagnéticas no necesitan soporte alguno para su propagación. Un campo eléctrico y uno magnético perpendiculares son suficientes para propagarse en el vacío con una velocidad, c , constante e independiente de la velocidad del emisor y del receptor. Una de las consecuencias más importantes de la relatividad especial es la equivalencia entre masa y energía, la célebre y conocida fórmula $E = mc^2$ base esencial de toda la física contemporánea y clave en el mundo de la radiactividad.

El extraordinario conocimiento que Einstein tenía del electromagnetismo y de la mecánica estadística le llevó a postular que las ondas electromagnéticas no eran más que haces de corpúsculos, a los que denominó fotones, cuya energía estaba fijada por la frecuencia de la onda y la constante de Planck y cuya masa era nula. La relación entre su energía y su momento necesariamente estaba regida por las fórmulas de la mecánica relativista. Clásicamente no pueden existir partículas sin masa, pero con los fotones la explicación del efecto fotoeléctrico era obvia. Se trata simplemente del choque y absorción de un fotón por un electrón del material. Este recibe más energía cuanto mayor sea la frecuencia del fotón y la energía cinética con que sale despedido es la del fotón menos la de ligadura del electrón a la sustancia. La intensidad de una onda electromagnética está relacionada con el número de fotones; a mayor intensidad de la luz más fotones y por tanto más electrones se desprenden.

Más tarde Einstein explicó el espectro del cuerpo negro utilizando la estadística de un gas de fotones. La teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico fué confirmada por las minuciosas medidas de Millikan realizadas entre 1.914 -16. Albert Einstein (1.879-1.955) recibió en

1.921 el Premio Nobel de Física por su explicación del efecto fotoeléctrico y no por la relatividad como frecuentemente se cree.

El concepto de fotón fué recibido con escepticismo por los físicos de la época, era demasiado revolucionario. La dicotomía corpúsculo-onda para la luz, caballo de batalla de conceptos contrapuestos desde la época de Newton, no podía borrarse de la mentalidad de los físicos de un plumazo y convertirse de la noche a la mañana en una dualidad. La explicación de las ondas electromagnéticas en términos estadísticos tenía aún que esperar. Las medidas de Millikan sobre el efecto fotoeléctrico habían aportado argumentos bastante incontrovertibles sobre la existencia de los fotones, pero faltaba aún otra prueba independiente y categórica que avalase de forma total la hipótesis de Einstein. Los rayos X vinieron a ser la herramienta clave para aportar el argumento final y jugaron, por tanto, un papel primordial en la aceptación universal del concepto de fotón y con él el de las ideas cuánticas.

El trabajo se debe a Arthur Holly Compton (1.892-1.962) que durante 1.922 y 1.923 realizó una serie minuciosa de investigaciones sobre la dispersión de rayos X por cristales. Compton no sólo efectuó las medidas sino que dió una explicación teórica completa y detallada del fenómeno, conocido desde entonces como efecto Compton. Descubrió la dispersión de los rayos X por los electrones de los átomos. La única hipótesis, y además sencilla, que efectuó fué suponer que el fenómeno no era más que el simple choque de un fotón del haz de rayos X incidente con un electrón del cristal, análogo al clásico fenómeno del choque mecánico de dos partículas, o bolas de billar. El fotón dispersado, obviamente, era otro distinto al inicial. Los fotones se emiten y absorben enteros. La energía del fotón dispersado tenía que ser necesariamente menor, puesto que algo de la energía inicial tenía que haber sido transmitida al electrón que sufría un retroceso. Un fotón menos energético supone, en términos ondulatorios, una longitud de onda mayor. El electrón puede suponerse libre pues la energía con que está ligado es muy pequeña frente a la del fotón inicial. El cálculo, atribuyendo a los fotones masa cero y obviamente utilizando relatividad, es sencillo y conduce al resultado de Compton. El aumento de longitud de onda en el rayo dispersado es sólo función del ángulo y no de la longitud de onda inicial. La simple fórmula de Compton es:

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$

donde λ_c es una función de constantes universales conocida como longitud de onda de Compton y cuyo valor es aproximadamente medio Angstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).



Los rayos X fueron aquí esenciales porque la energía de sus fotones es la adecuada para observar el efecto. La variación en la longitud de onda es del orden de medio Angstrom y por tanto es apreciable cuando se utilizan ondas iniciales cuya longitud de onda sea del orden del Angstrom que son típicas de rayos X. Prescindiendo del valor de la sección eficaz, o en otras palabras, de la probabilidad de que la dispersión suceda que también es dominante para las longitudes de onda de los rayos X, si se utilizase luz visible, por ejemplo amarilla de 4.000\AA , un aumento de medio \AA sería inapreciable.

Todos los "rayos" no materiales quedaron unificados en su naturaleza. No eran más que fotones. La única diferencia entre unos rayos y otros era su energía, o si se prefiere, todos eran ondas electromagnéticas de distintas frecuencias o longitudes de onda. La luz visible, los rayos X y los rayos gamma eran todos de la misma naturaleza y no se diferenciaban más que en su frecuencia desde el punto de vista ondulatorio o en su energía desde el punto de vista corpuscular. Sus efectos y sus interacciones con la materia son, sin embargo, aparentemente diferentes pero sólo aparentemente, de nuevo es sólo una cuestión de la energía con que se pregunta a un sistema cuyos componentes están ligados a su vez con otra distinta. Las consecuencias de un choque dependen obviamente de la relación entre ambas energías.

1.6.- El Núcleo y la Estructura del Átomo

Se sabía a principios de siglo que las ondas electromagnéticas se producían cuando una carga eléctrica se sometía a una aceleración negativa y se absorbían cuando la carga se aceleraba. A la luz de las nuevas ideas el proceso podía imaginarse como la emisión o absorción de fotones. La partícula cargada más ligera, el electrón, es la que sufre procesos de aceleración más fuertes y es esencialmente la que origina la mayoría de los procesos electromagnéticos. Pero para comprender como se emitían y absorbían los fotones por los átomos se requería el conocimiento de la estructura atómica y ello no fué posible hasta el descubrimiento del núcleo atómico por Ernest Rutherford en la Universidad de Manchester. Los modelos propuestos hasta entonces, como el de Thomson, no sobrevivieron a la confrontación experimental.

Rutherford nació en 1871 en Brightwater, Nueva Zelanda. En 1895 ganó una beca por sus brillantes estudios en física que le permitió ir al Laboratorio Cavendish de Cambridge donde estaba Thomson. Allí vivió el descubrimiento de los rayos X, del electrón y de la radiactividad. En 1898, después de estar trabajando con Thomson en el efecto de los

rayos X sobre la conductividad de los gases, demostró que los rayos X y la radiactividad se comportan de forma similar. En Septiembre de ese mismo año fué a la Universidad MacGill en Canadá donde formó equipo con el químico de Oxford, Frederick Soddy (1877-1956). En 1906 pasó a ser profesor en Manchester que, junto con Cambridge, era uno de los centros más importantes en física en aquellos años y en 1919 sucedió a Thomson como profesor de Física Experimental en Cambridge. Recibió el premio Nobel de Química en 1908 por sus trabajos en la radiactividad. El que fuese en Química parece que no le agradó demasiado. En su discurso de recepción del premio comentó que, él que había descubierto la transmutación de los elementos, pocas veces había visto una transmutación tan radical como su conversión de Físico en Químico por la Academia Sueca.

Poco después de su llegada a Manchester fué a trabajar con él un joven investigador alemán, Hans William Geiger (1882-1945), y ambos continuaron con un estudio, que Rutherford había comenzado en Canadá, sobre la dispersión de partículas alfa por la materia utilizando láminas muy finas de metal. Un haz fino colimado de partículas alfa se hacía incidir sobre una lámina de oro y se estudiaba el número de partículas transmitidas en función del ángulo. El 99% de las partículas salían hacia adelante dentro de un ángulo de 3° . No había sorpresas ni fenómenos extraños. En 1909, Rutherford, por razones no conocidas tuvo la idea de comprobar si había dispersiones de partículas a gran ángulo. Él mismo nos lo cuenta en una de sus conferencias *"Un día Geiger vino a verme y me dijo: ¿No cree Vd. que el joven Marsden, al que estoy enseñando métodos radiactivos, debería realizar algún pequeño experimento?. Después de pensar un poco le dije: ¿Por qué no le dejamos ver si alguna partícula alfa se dispersa con un gran ángulo?. Le tengo que decir confidencialmente que no creo que sea posible porque sabemos que la partícula alfa es masiva y muy energética y se puede demostrar que si la dispersión fuese debida a un efecto acumulativo de pequeñas dispersiones la probabilidad de que una sea dispersada hacia atrás es muy pequeña"*. (De hecho menor que 10^{-3600} para las láminas de Oro que él utilizaba con un espesor de 10^4 átomos). El relato continúa *"Recuerdo que dos o tres días después Geiger vino a verme muy excitado diciendo: Hemos sido capaces de ver algunas partículas alfa dispersadas hacia atrás.... Fué el hecho más increíble que me haya sucedido en mi vida. Era tan increíble como si Vd. disparase con un cañón un proyectil de 15 pulgadas (38 cm) contra una hoja de papel y este volviese hacia atrás y le alcanzase"*.

Una partícula de cada 20.000 sufría una dispersión mayor de 90° . Hay quien dice que Geiger inventó su célebre contador para no tener que contar uno a uno con un microscopio los destellos fosforescentes de las partículas alfa en un cristal de Sulfuro de Zinc. Rutherford concluyó en 1911 la existencia del núcleo de los átomos y postuló el modelo actual de un átomo compuesto por un núcleo rodeado de electrones. De 1911 a 1913 Geiger y Marsden hicieron un estudio sistemático y preciso de la dispersión alfa confirmando las fórmulas de Rutherford. En 1913 el modelo se había aceptado de forma total en los medios científicos.

El modelo de Rutherford suscitó nuevos interrogantes tan formidables como los que ya había respondido. ¿Qué determina los tamaños de los átomos y las energías de los electrones en el átomo? ¿Por qué no se colapsan en el núcleo emitiendo radiación electromagnética?. La respuesta la dió el Danés Niels Hendrick David Bohr (1885-1962), que visitó a Rutherford en Manchester en 1912 y publicó su modelo de átomo en 1913 utilizando las ideas cuánticas. Los electrones giran alrededor del núcleo en un sistema planetario en órbitas circulares fijadas por la cuantificación de su momento angular orbital. Los fotones se emiten o absorben al saltar de órbita los electrones excitados.

En lo concerniente a los rayos X, Bohr fué capaz de derivar una fórmula que relacionaba la longitud de onda de los fotones emitidos cuando un electrón ocupaba una de las órbitas más profundas del átomo en función de constantes y de la carga del núcleo, magnitud desconocida en la época. Precisamente la medida de estas longitudes de onda podía utilizarse para determinar con precisión las desconocidas cargas de los núcleos atómicos, dato esencial en la teoría. Un joven físico en Manchester, H.G.J. Moseley (1887-1915) estaba en aquellos años aprendiendo a medir longitudes de onda de rayos X utilizando cristales. Después de la aparición del modelo de Bohr se propuso la medida sistemática de las cargas de los núcleos de peso atómico intermedio que emitían rayos X en un rango de frecuencias conveniente para sus equipos de medida. Sus resultados aparecieron en 1913. La sorpresa, inesperada, fué que por primera vez se puso de manifiesto que las cargas del núcleo aumentaban en una unidad al pasar de un elemento químico al siguiente en la tabla periódica. Este hecho, trivial hoy, no se pudo comprender hasta el descubrimiento del neutrón, por Chadwick en 1932, que permitió explicar el núcleo como constituido por protones y neutrones.

Las inconsistencias del modelo de Bohr y en general de toda la teoría cuántica de la época, conocida hoy día como "antigua teoría cuántica", junto con la hipótesis de Luis de Broglie sobre la dualidad corpúsculo-

onda en 1.924 condujeron, en tan sólo dos años 1.925 y 1.926, a Erwin Schrödinger con su mecánica ondulatoria e independientemente a Werner Heisenberg con su mecánica de matrices, al establecimiento de la actual mecánica cuántica. Partículas y ondas no son más que dos aspectos de una misma realidad y a cada partícula se le puede asociar una onda que rige toda su dinámica. Las características básicas del simple modelo de Bohr se reproducen, sorprendentemente, bastante bien en el nuevo esquema. La teoría cuántica recibió su forma actual en los trabajos de P.A. Dirac quien además la hizo compatible con la relatividad. A partir de ese momento, 1.929, la Física dispuso de la herramienta teórica necesaria para abordar el estudio del mundo atómico y nuclear.

CAPÍTULO 2.- EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

2.1.- Reacciones Nucleares y Radiactividad Artificial

La radiactividad natural se descubrió y estudió como una propiedad asociada al Uranio y al Torio. Ambos elementos eran familiares para los químicos pues se utilizaban industrialmente, el óxido de Uranio como colorante amarillo en la industria cerámica y el óxido de Torio como constituyente de las mallas incandescentes utilizadas en las lámparas de gas.

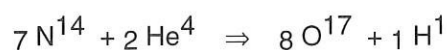
Durante el transcurso de las investigaciones se encontraron nuevos elementos químicos, primeramente tres, el Polonio, el Radio y el Actinio y posteriormente el Bismuto, el Radón y el Talio así como isótopos del Plomo, pero no se encontró ningún proceso de Laboratorio capaz de alterar la radiactividad de un elemento (compuesto químico, reacción química, fuerzas eléctricas o magnéticas, calor) ni inducir la radiactividad en un elemento, o mejor, en un isótopo, que fuese estable de forma natural. Son de destacar los experimentos laboriosos para determinar posibles variaciones de la constante de desintegración del Radio en distintos compuestos químicos sometidos a su vez a las más variadas condiciones, incluso extremas para la época, de temperatura y presión. No se pudo observar variación significativa fuera de los márgenes de error experimental.

El año 1.919 se descubrió la posibilidad de iniciar desintegraciones nucleares a partir de operaciones de Laboratorio. Rutherford, que había utilizado partículas alfa naturales para investigar la estructura del átomo y descubrir el núcleo atómico, estudió sistemáticamente los efectos de un haz de partículas alfa sobre gases, en particular

Hidrógeno y Nitrógeno. Se sabía que se producía una cierta ionización en el gas y se liberaban, por tanto, electrones. En el caso del Hidrógeno la ionización de la molécula requiere 35 eV, sin embargo con cierta frecuencia absorbía más de los 35 eV y la energía sobrante se manifestaba en forma de energía cinética. Rutherford había detectado iones Hidrógeno -protones- que se desplazaban a gran velocidad y escapaban a su cámara de ionización. En 1.919 Rutherford publicó los resultados que había obtenido con Nitrógeno en vez de con Hidrógeno. En ellos comunica que había detectado la presencia de protones rápidos, a pesar de que había tomado todas las precauciones para evitar la presencia de Hidrógeno en su cámara, textualmente dice: “ *Resulta difícil evitar la conclusión de que los átomos de largo alcance que surgen como consecuencia de la colisión de las partículas alfa con el Nitrógeno no son átomos de Nitrógeno sino probablemente átomos de Hidrógeno... Si esto resultara cierto habría que concluir que, como consecuencia de las intensas fuerzas producidas por la íntima colisión de una partícula alfa rápida, el átomo de Nitrógeno se habría desintegrado*”.

El bombardeo de Nitrógeno con partículas alfa había liberado no sólo iones Nitrógeno, cargados positivamente, sino también un pequeño número de iones más ligeros con una carga positiva. Estas partículas, que él llamó protones, eran escasas y su número se podía estimar en una por cada cien mil partículas alfa. El proceso era tan poco probable que no era posible su estudio detallado.

Hasta los estudios posteriores de Blackett, que utilizó una cámara de niebla y pudo ver y medir las trayectorias, no se pudo comprobar como la mayor parte de los sucesos que ocurrían en la reacción de las partículas alfa con el Nitrógeno eran dispersiones elásticas. Se observaba una desviación brusca de la trayectoria de la partícula alfa y una traza densa debida al retroceso del núcleo golpeado. Raras veces se podía ver el otro tipo de colisión en el que la traza de la partícula alfa desaparecía por completo y en su lugar aparecía una traza densa de retroceso acompañada de otra fina y extensa. A partir de las fotografías y su comportamiento bajo campos magnéticos se pudo deducir que lo que ocurría era una reacción nuclear



El Nitrógeno se había transformado en un isótopo estable y poco abundante del Oxígeno natural, el ${}_8\text{O}^{17}$.

La composición del Oxígeno atmosférico es:

$${}^8\text{O}^{16} \Rightarrow 99.756 \%$$

$${}^8\text{O}^{17} \Rightarrow 0.039 \%$$

$${}^8\text{O}^{18} \Rightarrow 0.205 \%$$

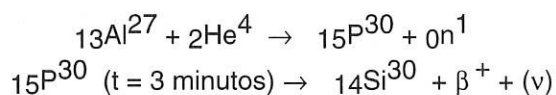
Posteriormente, Rutherford y Chadwick descubrieron catorce elementos ligeros que liberaban protones rápidos cuando se bombardeaban con partículas alfa. Rutherford fué perfectamente consciente de la enorme importancia y trascendencia de su descubrimiento y en 1.918 en plena guerra mundial puso como excusa por no haber asistido a una reunión sobre guerra submarina lo siguiente " *Si, como tengo razones para creer, he conseguido desintegrar el núcleo de un átomo, es de mucha mayor importancia y trascendencia que la guerra*".

Por primera vez el hombre había sido capaz de producir en el Laboratorio la transmutación de los elementos aunque el ritmo de producción era muy bajo y los núcleos finales eran estables. Los únicos proyectiles energéticos de que se disponía eran las partículas alfa procedentes de radionucleidos naturales y la necesidad de fuentes alfa intensas se hizo patente para proseguir las investigaciones. Los aceleradores de partículas se desarrollaron con posterioridad, como más adelante veremos, y tardaron tiempo en alcanzar las energías de las partículas alfa naturales.

De los radionucleidos emisores alfa conocidos, el más adecuado para la fabricación de fuentes intensas era el Polonio, su extracción química no era complicada y su periodo de 138,39 días hacía que 1mg de Polonio emitiese tantas partículas alfa como 5 g^l. de Radio lo que compensaba su escasez, pues su abundancia es tan sólo el 0.2% de la del Radio. Las partículas alfa que emite son, además, más energéticas ya que poseen una energía cinética de 5,304 MeV frente a 4,784 MeV para las del Radio. Por último y de la máxima importancia, el Polonio emite rayos alfa puros, no acompañados de emisión gamma.

El lugar más idóneo para la fabricación de una fuente intensa de Polonio era sin duda el Instituto del Radio en París y en 1.925 Marie Curie encargó a su nuevo ayudante Frédéric Joliot (1.900-1.958) su fabricación. Al año siguiente Joliot se casó con Irene Curie (1.897-1.956) estrecha colaboradora de su madre en el Laboratorio. Después de que Frédéric terminase su tesis doctoral sobre la electroquímica del Polonio, Frédéric e Irene se dedicaron a la fabricación de la fuente de Polonio más intensa de su tiempo. Con este nuevo instrumento

comenzaron una investigación sistemática de los efectos de las partículas alfa sobre los elementos ligeros. En Enero de 1.934 se encontraban estudiando la acción de las partículas alfa sobre el Berilio y para ello hacían incidir sobre él, a través de una ventana de Aluminio muy fino, las partículas alfa procedentes de su fuente de Polonio. Para su sorpresa descubrieron que el Aluminio se convertía en radiactivo y que esta radiactividad no provenía, como en el caso del Radio, de una emanación gaseosa. Inmediatamente después de que el Aluminio dejaba de exponerse a los rayos alfa se desintegraba con un periodo de tres minutos. Realizaron separaciones químicas y lograron demostrar que la radiactividad no estaba asociada al Aluminio sino al Fósforo. La radiactividad que emitía el Fósforo era también nueva, ya que se trataba de partículas ligeras, cargadas positivamente, que se identificaron como positrones. La existencia de estos antielectrones había sido conjeturada por Dirac en 1.929 y se habían logrado detectar, en la radiación cósmica, por Anderson y Blackett en 1.932. Esta nueva radiactividad se denominó β^+ (beta positiva) y había sido creada por el hombre. La reacción nuclear que se había producido era:



No sólo el Aluminio sino también el Boro y el Magnesio se transmutaban por las partículas alfa en isótopos radiactivos artificiales de Nitrógeno (${}_{7}\text{N}^{13}$, t = 10 minutos) y Silicio (${}_{14}\text{Si}^{27}$, t = 4 s) respectivamente. En todos los casos los elementos radiactivos resultaban ser emisores de positrones y se desintegraban en elementos estables cuyo número atómico era inferior en una unidad. El matrimonio Joliot-Curie adquirió pronto fama mundial y ambos recibieron el Premio Nobel de Química en 1.935 por su descubrimiento de la Radiactividad artificial.

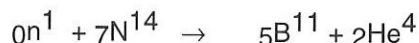
2.2.- El Neutrón

En 1.930 Bothe y Becker investigaron minuciosamente la acción de las partículas alfa sobre el Berilio y detectaron la emisión de una radiación cuyo poder de penetración era muy superior a la de los protones rápidos que Rutherford había detectado en sus experimentos sobre Nitrógeno. Esta nueva radiación no era absorbida ni tan siquiera por gruesas láminas de Plomo. Su intensidad se reducía tan sólo a la mitad con 2.5 cm de Plomo. Bothe y Becker, erróneamente, concluyeron que se trataba de rayos gamma de gran energía, puesto que los de 1 MeV se reducían a la mitad con 0.9 cm de espesor de Plomo. Frédéric e Irene Joliot-Curie

descubrieron que estas radiaciones de poder de penetración tan elevado se absorbían fácilmente con parafina o con agua y correctamente concluyeron que la absorción estaba relacionada con la presencia de átomos de Hidrógeno en el absorbente. Posteriormente se demostró que, en el proceso de absorción, se liberaban protones rápidos cuya energía máxima era de 4.5 MeV, lo que hacía difícil que la radiación, de fuerte poder de penetración, fuese de tipo gamma. El equipo Joliot-Curie publicó sus resultados en Enero de 1.932 y el impacto que tuvieron en el Laboratorio de Rutherford fué enorme.

James Chadwick, que había trabajado con Rutherford antes de la primera guerra mundial, había vuelto a Cambridge de nuevo en 1.919 y tenía su mente preparada para aceptar el neutrón, partícula que rondaba el Laboratorio desde hacía tiempo. Chadwick se dió cuenta, nada más leer el artículo de Joliot-Curie, de que la radiación penetrante no podían ser fotones. Propuso que los hechos podían explicarse fácilmente si se consideraba esta radiación como debida a partículas de masa prácticamente igual a la del protón y sin carga eléctrica neta, sugiriendo para ellas el nombre de "Neutrón". Este tipo de partícula había sido sugerida en 1.920 por W.D. Harkins en los Estados Unidos, por O. Mason en Australia y por el propio Rutherford en Cambridge, pero ninguno de ellos había logrado detectarla experimentalmente.

La detección de neutrones no era fácil pues por tratarse de partículas sin carga eléctrica no producen ionización y los sistemas conocidos hasta entonces no eran directamente utilizables. Chadwick hizo uso de una cámara de Wilson para su detección indirecta. Los neutrones no dejaban trayectoria alguna pero cuando interaccionaban con el núcleo de un elemento ligero se producían dos trazas, una gruesa debida a un núcleo de retroceso y otra más fina de una partícula alfa. Chadwick, trabajando con Nitrógeno en la cámara, interpretó correctamente el proceso como:

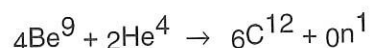


El descubrimiento del neutrón en 1932 permitió el conocimiento de la estructura nuclear y se pudo comprender la radiactividad y la emisión de los rayos gamma. El conocimiento de la física nuclear permitió además la comprensión de la estructura estelar y dió origen a la astrofísica y a la cosmología.

El núcleo atómico estaba constituido simplemente por protones y neutrones. El número de protones Z especifica la carga nuclear y por

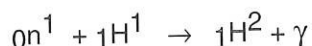
tanto el elemento químico, el número de neutrones N puede variar para cada elemento constituyendo los distintos isótopos, el número másico A no es más que el número total de partículas del núcleo, $A = Z + N$ protones y neutrones. El paso de un elemento al siguiente no es más que añadir al núcleo un protón con independencia de que su masa (o el número de neutrones) sea mayor o menor. Las leyes de desplazamiento eran obvias pues una desintegración alfa al restar dos protones y dos neutrones daba lugar a un núcleo hijo desplazado dos lugares a la izquierda en la tabla periódica y con un masa inferior en cuatro unidades mientras que un proceso beta no era más que la conversión de un neutrón en un protón y un electrón manteniendo el número másico y aumentando la carga del núcleo en una unidad o creando un núcleo hijo desplazado un lugar a la derecha.

La reacción que habían producido Bothe y Becker quedaba explicada como



Hoy día se sabe que esta reacción produce neutrones de al menos 5,5 MeV y es muy utilizada en las fuentes de neutrones. Las partículas alfa que hasta muy recientemente estaban producidas por Radio (Fuentes de Radio-Berilio) hoy día son generadas por el Americio, que tiene la ventaja de no emitir rayos gamma. (Fuentes de Americio-Berilio).

La razón por la que los materiales que contienen Hidrógeno absorben bien los neutrones es porque la sección eficaz de absorción es por lo general grande para neutrones térmicos, es decir neutrones que se mueven con muy poca energía cinética, del orden de 0,02 eV. Los neutrones que se originan en las reacciones con partículas alfa son muy energéticos y una forma eficiente de frenarlos, o moderarlos en la terminología actual, es hacerles chocar con núcleos de una masa comparable a la suya. En general cualquier núcleo ligero es buen moderador, pero sin duda el Hidrógeno es el más adecuado. A su vez el Hidrógeno absorbe los neutrones térmicos (con energías comparables a la energía térmica ambiente) y se produce un núcleo de Deuterio o Hidrógeno pesado, isótopo del Hidrógeno de número másico 2 con la emisión de un fotón:



La masa del neutrón ($1.008665 \text{ u.m.a} = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg.} = 939.6 \text{ MeV}$) es ligeramente superior a la suma de la de un protón ($1.00797 \text{ u.m.a} = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg.} = 938.3 \text{ MeV}$) y un electrón ($5.485 \times 10^{-4} \text{ u.m.a} =$

9.109×10^{-31} kg. = 0.511 MeV) y de hecho el neutrón libre es inestable con periodo de unos 12 minutos. Dentro de un núcleo el neutrón está fuertemente ligado y el sistema puede ser completamente estable.

2.3.- Los Aceleradores de Partículas

Hasta 1.932 no fué posible prescindir de las fuentes radiactivas naturales para producir proyectiles energéticos. El acelerar una partícula cargada, como el Hidrógeno (protones) o un átomo de Helio (partículas alfa), hasta velocidades suficientemente altas para competir con las fuentes naturales (de 4 a 9 MeV) requería la utilización de campos eléctricos producidos por diferencias de potencial de varios millones de voltios y la tecnología necesaria no estaba suficientemente desarrollada.

John Cockcroft se había graduado en ingeniería eléctrica en Manchester y en Matemáticas en Cambridge y era colaborador de Rutherford desde 1.924. Fué este último quien descubrió que las partículas alfa de fuentes naturales, que él utilizaba en sus experiencias, apenas eran capaces de penetrar en los núcleos ligeros y no lo hacían en los pesados. Las más energéticas eran, además, más penetrantes que las más lentas. El potencial nuclear repelía las partículas positivas que se le acercaban. Rutherford se interesó, por tanto, en la posibilidad de acelerar partículas alfa o mejor aún protones que tenían menor carga eléctrica.

En 1.928 con una beca de 1.000 libras de la Universidad respaldada por Rutherford, Cockcroft y un joven graduado Irlandés, Ernest Walton, investigaron el tema. Se dieron cuenta que el problema de los estudios nucleares no sólo residía en la energía sino también en la intensidad de los haces y en la carga de las partículas disponibles como proyectiles. Decidieron utilizar protones, de menor carga y masa que las partículas alfa, y por tanto de más fácil aceleración y penetración en los núcleos. Tras sucesivos intentos, lograron diseñar y construir un acelerador de protones de 300 kV. Sin embargo no consiguieron demostrar la existencia de reacciones nucleares cuando dirigieron su haz de protones a una gran variedad de blancos.

En 1.932 Cockcroft inventó un ingenioso sistema de multiplicación de voltaje, conocido hoy día con su nombre, con el que consiguió acelerar protones a 800 kV y provocar con éxito reacciones nucleares en el Litio. De esta forma se inició una nueva era en la investigación del núcleo a través de sistemas de aceleración cada vez más energéticos y de mayor

intensidad originando el nacimiento de cientos de partículas elementales y de la actual física subnuclear. El desarrollo de nuevos aceleradores pasó a Berkeley, en California, donde Ernest O. Lawrence inventó el ciclotrón y construyó toda una serie de aceleradores cada vez mayores y más potentes. En 1.939 construyó uno de 60 pulgadas de diámetro con el que conseguía fabricar isótopos radiactivos. Berkeley fué durante muchos años la cuna de la física y tecnología de aceleradores y allí se formaron quienes diseñaron y construyeron la siguiente generación de aparatos, Livigston, Alvarez, etc.

No es el propósito de esta conferencia el entrar en este capítulo porque se escapa del tema estricto de la radiactividad, más circunscrito a los radioisótopos, pero si es conveniente señalar, en este contexto, que los aceleradores hasta 1 GeV de energía tanto de electrones como de protones e iones, son una fuente de elementos radiactivos y una excelente fuente de radiación gamma. Hoy día son ampliamente utilizados en el mundo científico y médico.

EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN Y LA ENERGÍA NUCLEAR

CAPÍTULO 3.- EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN. ENRICO FERMI.

Uno de los capítulos más fascinantes de la historia de la Física del siglo XX es sin duda el descubrimiento de la fisión y los principios de la era nuclear. Los hechos se produjeron en un momento de la historia política europea de una gran tensión que presagiaba el inevitable conflicto de la Segunda Guerra mundial. En este capítulo de la física se entremezclan los descubrimientos científicos, sus aplicaciones civiles y militares, el desarrollo de una guerra mundial sin precedentes, con el inevitable secreto de muchos de los hallazgos de los investigadores y finalmente la puesta a disposición de la humanidad de una nueva forma de obtención de energía.

La fisión nuclear está unida a un conjunto impresionante de científicos ilustres pero entre ellos destaca la figura del Italiano Enrico Fermi, que quizá fuese el físico más completo de su época, pues dominaba tanto la teoría como las técnicas experimentales.

Enrico Fermi nació en Roma el 29 de Septiembre de 1.901. Su padre trabajaba como administrativo en los Ferrocarriles Italianos y su madre era maestra. Comenzó sus estudios en Roma donde ya destacó como uno de los alumnos más brillantes del Liceo. Su formación universitaria la

realizó en la Scuola Normale Superiore de Pisa que era el centro de mayor prestigio de Italia en aquella época y al se accedía mediante un duro examen de ingreso. Ya en esa prueba, que se conserva en los archivos de Pisa, demostró Fermi su excepcional valía y formación. Se trataba del tema "Las características del sonido" y en la prueba, después de una breve introducción, el candidato tenía que desarrollar un ejemplo. Fermi desarrolló toda la teoría de las barras vibrantes a partir de la ecuación diferencial correspondiente, de los valores propios y del análisis de Fourier. El trabajo es completo y no contiene un sólo error. Pocos físicos candidatos al doctorado podrían hacerlo hoy día partiendo de una hoja de papel en blanco sin ayuda de ningún libro y menos aún algún participante en las pruebas de selectividad.

Fermi era un hombre bastante solitario y fundamentalmente se formó en la biblioteca de Pisa. Al cabo de un año ya era reconocido por todos como la autoridad suprema de Pisa en Relatividad y Teoría Cuántica. Se doctoró allí en 1.922, cuando sólo tenía 20 años y volvió a Roma al Instituto de Física de la Universidad. Con una beca del Gobierno Italiano y posteriormente de la Fundación Rockefeller, Fermi fué a Alemania y a Holanda y entró en contacto con la élite de la física de la época. En Alemania trabajó con Born en Göttingen y conoció a Heisenberg y Pauli, sin embargo su estancia parece que fué poco provechosa debido a su aislamiento. En Leyden, Ehrenfest se percató de su extraordinaria habilidad experimental y le orientó en esa dirección. Su estancia le resultó más fructífera y reconfortante.

Terminada su formación postdoctoral volvió a Italia como profesor en Florencia donde publicó, en 1.927, su "Estadística Cuántica", conocida hoy con su nombre y aplicable a conjuntos de partículas de espín semientero. Este trabajo supuso su salto a la fama y a un reconocimiento mundial. Pronto volvió a Roma esta vez como catedrático de Física Teórica donde comenzó a realizar investigación en el nuevo campo de la radiactividad. El descubrimiento del neutrón en 1.932 le indujo a un doble trabajo, de una parte resolvió el problema teórico de la desintegración beta, que publicó en 1.933, desarrollando una teoría de las interacciones débiles. La teoría de Fermi con ligeras correcciones en 1.957, debido al descubrimiento de la no conservación de la paridad, sigue vigente hoy día. Por otra se dedicó al estudio de las interacciones de los neutrones.

Fermi pensó con acierto que al ser los neutrones partículas sin carga eléctrica no sufrían repulsión coulombiana al acercarse al núcleo y por tanto eran capaces de penetrar en él con mayor facilidad que las partículas alfa, únicos proyectiles utilizados en la época. Joliot y Curie

habían descubierto la radiactividad artificial, es decir habían sido capaces de producir artificialmente un isótopo radiactivo utilizando partículas alfa para bombardear Aluminio, pero el proceso sólo ocurría una vez por cada millón de partículas alfa. Fermi intuyó que los neutrones serían unos proyectiles mucho más eficaces, sobre todo si se quería bombardear núcleos con Z mayor que 10. Se rodeó, de un grupo de colaboradores, entre los que se encontraban nada menos que Majorana, Amaldi, Rasetti, D'Agostino, Pontecorvo y Segrè, de una fuente de neutrones de Radio-Berilio y comenzó a irradiar sistemáticamente, con neutrones, todos los elementos a los que tuvo acceso.

Al principio no tuvo ningún éxito, pues comenzó con los elementos ligeros, y fracasó con el Hidrógeno, el Litio, el Berilio el Boro, el Carbono, el Nitrógeno y el Oxígeno, pero su constancia se vio recompensada con el Flúor que se convirtió, tras el bombardeo, en un elemento radiactivo. A lo largo de los tres años siguientes hubo en el Laboratorio un trabajo muy intenso descubriendo varias sustancias radiactivas nuevas lo que supuso un avance teórico y práctico importante en la Física Nuclear, abriendo el camino de la fabricación de isótopos y radionucleidos.

En 1.934 irradiaron los elementos más pesados y culminaron con el Uranio. Al estudiar los resultados comprobaron la existencia de las reacciones (n,α) , (n,p) y (n,γ) y demostraron, por métodos químicos, que ninguno de los nuevos elementos radiactivos que habían producido podía adscribirse a elementos de peso atómico superior al Plomo, por tanto comprendidos entre el Plomo $Z=82$ y el Uranio $Z=92$. Fermi creyó haber descubierto elementos transuránidos pues la existencia de reacciones (n,γ) demostraba la producción de U^{239} que por desintegración beta podría originar el elemento $Z=93$, sin embargo los resultados experimentales no eran fácilmente explicables. Sus experiencias las repitieron Curie y Joliot en París y Hahn y Meitner en Berlín. Los resultados confirmaron los de Fermi pero la interpretación seguía sin estar clara.

En el otoño de 1.934 Fermi realizó un descubrimiento de trascendental importancia, se dió cuenta, como siempre por casualidad y extraordinaria observación, de que los neutrones filtrados por una placa de parafina eran mucho más eficientes en la producción de radionucleidos que los neutrones que procedían directamente de la fuente. Fermi pensó inmediatamente en la moderación de neutrones, en pocas horas comprobaron la hipótesis, moderando los neutrones con agua en un estanque del jardín de la Universidad de Roma y en el mismo día publicaron una nota con los hechos y la interpretación. Fermi

desarrolló con posterioridad toda la teoría de la difusión y moderación de neutrones válida hoy día en los cálculos de reactores nucleares.

En 1.935 la situación interna de Europa y de Italia en particular era muy difícil y estaba claro para la gente culta e informada que se caminaba hacia una catástrofe. El grupo se dispersó y sólo se vieron forzados a permanecer en Roma Fermi y Amaldi. En 1.938 Bohr informó a Fermi, confidencialmente, que le habían otorgado el Premio Nobel de Física y planificó en secreto con él su abandono de Italia. Fermi se desplazó con su mujer y sus hijos a Estocolmo para recoger el Premio y al regreso "se equivocó" y en vez de ir a Roma tomó un barco para Nueva York donde era esperado en la Universidad de Columbia.

Poco después de su establecimiento en América llegó también N. Bohr de camino a Princeton para dar unas conferencias. Bohr le comunicó el inesperado e increíble descubrimiento que Hahn y Strassmann habían realizado precisamente el mismo día que Fermi recibía su Premio Nobel en Estocolmo. Habían demostrado la presencia de núcleos intermedios entre los producidos por el bombardeo del Uranio con neutrones. Fermi inmediatamente se dió cuenta de la existencia de la fisión nuclear y su trascendencia.

O. Hahn y Strassmann habían podido demostrar la existencia de Bario, Lantano y Cerio entre lo que hoy llamamos productos de fisión. Al principio no podían creer en su descubrimiento pero estaban en lo cierto. En su publicación en *Naturwissenschaften* (Hahn 1.939) dice: *"Como resultado de estas investigaciones tenemos que cambiar los nombres de los elementos químicos mencionados en nuestra anterior publicación. Lo que allí llamamos Radio, Actinio y Torio deben ser llamados ahora Bario, Lantano y Cerio. Como químicos nucleares nos encontramos muy cerca de los físicos y somos reacios a dar este paso en contradicción con todas las experiencias anteriores en Física Nuclear."*

Otto Hahn había trabajado con Rutherford en Canadá y era uno de los más prestigiosos radioquímicos de su época, tenía 59 años cuando realizó su descubrimiento. La situación en Alemania había hecho que su más estrecha colaboradora, desde hacía muchos años, Lisa Meitner se hubiese tenido que refugiar en Suecia. Hahn le escribió una carta nada más estuvo seguro del resultado de sus experimentos. Lisa Meitner mostró la carta a su sobrino Otto Frisch, refugiado a su vez en Copenhague, que estaba pasando las Navidades con ella. Ambos pensaron que los experimentos de Hahn podían explicarse si el núcleo de Uranio se hubiese partido en dos grandes fragmentos. La idea de la fisión nuclear

no era sin embargo nueva pues ya había sido sugerida y publicada en 1.935 por Idda Noddak en un artículo en el que criticaba algunos de los experimentos que estaba realizando Fermi en Roma. Noddak no se preocupó de comprobar su hipótesis y aunque su artículo era conocido por Hahn, Meitner, Fermi, Curie y Joliot nadie le dió la menor importancia.

Frisch, de vuelta a Copenhague en Enero de 1.939, buscó y detectó los enormes pulsos que tenían que producirse en una cámara de ionización por los fragmentos de fisión. No había pues duda alguna sobre su interpretación con Lisa Meitner del fenómeno de la fisión nuclear. Inmediatamente después de hacer pública su interpretación al menos cinco grupos más confirmaron el descubrimiento. Si Fermi y sus colaboradores no la habían descubierto bastante antes fué debido a una simple causa. En su estudio de los efectos de los neutrones en Uranio supusieron que las partículas alfa de los posibles nuevos radionucleidos formados tenían que ser energéticas y para quitar el fondo y las partículas alfa poco energéticas que emitía el Uranio espontáneamente, sin bombardearlo, envolvían las muestras de Uranio en papel de Aluminio. La hipótesis de Fermi era correcta pero impedía la detección de los enormes pulsos de los productos de fisión que quedaban también retenidos en el papel de Aluminio. *"Habíamos oído que en otros laboratorios habían realizado el experimento sin papel pero la conclusión había sido que había algo mal en los detectores"* cuenta Segrè (Segrè 1.980). Si hubiesen realizado tan sólo un experimento sin papel nadie duda de que habrían descubierto la fisión.

La fisión del Uranio libera una enorme cantidad de energía, alrededor de 200 MeV por núcleo, mientras que una reacción química libera, como máximo, decenas de electronvoltios por átomo. La energía proviene de que la suma de las masas de los núcleos y partículas finales es menor que la de los iniciales. La diferencia de masas es la que se ha transformado en energía validando la célebre ecuación de Einstein. Con este descubrimiento comenzó, para la humanidad, la era nuclear.

CAPÍTULO 4.- LA ENERGÍA NUCLEAR Y EL PROYECTO MANHATTAN

Los pasos que hay que dar desde la fisión a una reacción en cadena son, en principio, muy simples. Los fragmentos de fisión son núcleos con un gran exceso de neutrones que tienen que eliminar y que se añaden a los que se liberan instantáneamente en el proceso de fragmentación. Neutrones primarios y secundarios pueden utilizarse para inducir

nuevas fisiones que a su vez pueden llegar a producir más neutrones que la generación anterior. La reacción puede ser divergente e incontrolada, en cuyo caso puede ocurrir una explosión, o controlada y estable en cuyo caso se dispone de una fuente de energía. En ambos casos las energías en juego son varios millones de veces mayores que las que hay en las reacciones químicas ordinarias.

Fermi decidió investigar la fisión, desde el punto de vista experimental, para dilucidar si una reacción en cadena era o no posible y comenzó en Columbia una serie de experimentos. El problema, que no sabía Fermi, es que una reacción en cadena con Uranio natural, sin ningún enriquecimiento, es un proceso casi imposible. Fué Niels Bohr quien calculó teóricamente que el U^{238} sólo podía sufrir fisión con neutrones de energía superior a 1 MeV, neutrones rápidos en la nomenclatura actual, mientras que en el U^{235} sólo podían producirla los neutrones lentos. La hipótesis se confirmó poco después experimentalmente.

En 1.940, en Berkeley, Mac Millan y Abelson identificaron el primer elemento transuránico, el Np^{239} y conjeturaron la plausibilidad de que se desintegrara en un isótopo de vida larga de $Z=94$, el bien conocido hoy día Pu^{239} . En una visita de Segrè, que estaba en Berkeley, a Fermi, en Nueva York, discutieron sobre la posibilidad de que el hipotético Plutonio fuese un elemento de vida larga y además un buen combustible nuclear. Segrè volvió a Berkeley y, a principios de 1.941, fué capaz de producir 1 microgramo de Plutonio y probar no sólo su existencia, sino medir su periodo, 26.000 años y comprobar que era un excelente combustible nuclear.

Mientras tanto la guerra en Europa estaba en su apogeo y muchos científicos europeos habían logrado refugiarse en los Estados Unidos dónde participaban en este tipo de investigaciones. Se habían formado espontánea tres grupos de investigación, uno en Nueva York, otro en Berkeley y un tercero en Chicago. Entre ellos existía, de forma autoimpuesta, un cierto grado de confidencialidad pues todos eran perfectamente conscientes de las posibilidades que se iban abriendo al paso de sus investigaciones. Tres físicos Húngaros que por su raza y religión habían tenido que abandonar su país, Leo Szilard, Eugen Wigner y Edward Teller, más activos y motivados desde el punto de vista político que el resto de sus colegas, estaban preocupados por la lentitud y falta de financiación que tenían estas investigaciones y se habían movido en los círculos gubernamentales. Lograron el apoyo de Einstein y en una célebre carta del 2 de Agosto de 1.939, éste informaba al



Presidente de los Estados Unidos sobre la importancia de las investigaciones y la posibilidad de que permitieran la construcción de fuentes de energía y de una posible bomba nuclear. Textualmente entre otros detalles dice: *"Recientemente, trabajos de E. Fermi que me han comunicado en manuscrito, me hacen suponer que el elemento Uranio puede convertirse en una nueva e importante fuente de energía en el futuro inmediato... Este fenómeno conduciría a la fabricación de motores, y es concebible - aunque mucho menos seguro- que se pudiese fabricar bombas extremadamente poderosas.... En vista de esta situación usted puede juzgar conveniente mantener cierto contacto permanente entre la Administración y el grupo de físicos que trabajan sobre reacciones en cadena.... Acelerar el trabajo experimental que se lleva a cabo actualmente dentro de los límites de los presupuestos de los laboratorios de las universidades , mediante la provisión de fondos... Alemania ha detenido actualmente la venta de Uranio de las minas checoslovacas, de las que se ha apoderado. Que haya tomado tal acción podría entenderse..."*. Fermi había informado con anterioridad, de forma particular, a autoridades de la Marina. En Europa se estaban realizando investigaciones similares en Alemania, Francia y Gran Bretaña y también hubo alguna en Japón.

A lo largo de 1.940 y 1.941 el Gobierno Americano creó una serie de Comités que siguieron y subvencionaron, parcamente, las investigaciones que se realizaban en Nueva York, Chicago y Berkeley. La realidad es que hasta que se puso en pié el proyecto Manhattan las investigaciones se hicieron por y al ritmo de los científicos y estuvieron encaminadas al entendimiento de la fisión y de las reacciones en cadena, al diseño y la construcción de un reactor nuclear de Uranio natural y grafito y a la investigación de elementos transuránidos.

El proyecto Manhattan se inició en Septiembre de 1.942 y es sin duda el esfuerzo científico, tecnológico e industrial más importante de la historia de la humanidad hasta la fecha. Más de cien mil personas se vieron envueltas en él y contó con la colaboración de los científicos más prestigiosos del momento. No es este el lugar ni el momento para describir con detalle lo que se realizó en unos pocos años. Gran parte del éxito se debe a la excelente planificación y desarrollo que supo realizar el General R.L. Grooves que se adaptó perfectamente a la mentalidad de los científicos y les facilitó el desarrollo de su trabajo. Para la dirección científica se designó a Robert Oppenheimer que supo poner, al lado de los científicos reconocidos, el mayor conjunto de jóvenes sobresalientes en el punto culminante de sus posibilidades,

muchos de ellos recibieron con posterioridad el Premio Nobel. Nunca antes ni después ha sucedido nada igual.

Había dos caminos posibles a seguir para poder producir un ingenio nuclear. Uno utilizar U^{235} en cuyo caso había que inventar, diseñar, y construir plantas industriales de enriquecimiento de Uranio. Una aventura totalmente nueva que, o bien se hacía a partir de los espectrómetros de masas, o por difusión gaseosa. Ambas técnicas sólo se conocían en el laboratorio. El segundo camino era utilizar el recién descubierto Pu^{239} y producirlo en cantidades suficientes. El método seguido por Segrè, mediante un acelerador, era imposible pues con él no se podía pasar de la producción de unos pocos microgramos y se necesitaban kilogramos. La construcción de aceleradores miles de millones más potentes estaba tecnológicamente descartada. La única posibilidad era disponer de grandes cantidades de neutrones e irradiar con ellos el U^{238} , que tras dos procesos de desintegración beta produciría el Pu^{239} . El único camino para producir neutrones en cantidad suficiente era seguir las ideas de Fermi y construir un reactor nuclear de Uranio natural y utilizar el posible exceso de neutrones para irradiar más U^{238} . Fermi tenía muy adelantados los cálculos, el diseño y los experimentos. El problema era que nadie sabía, por una parte si se produciría una reacción en cadena sostenida y controlada y por otra como extraer el Plutonio que se habría formado en los elementos combustibles y en el posible Uranio irradiado.

A todo ello había que añadir que una vez tenido el hipotético combustible tampoco se sabía como construir una bomba con ello, como era posible mantener sin disgregarse una masa de U^{235} o Pu^{239} hasta que sus núcleos se hubiesen fisionado. No se sabía tan siquiera si era realmente posible una reacción divergente en cadena.

El proyecto Manhattan siguió simultáneamente todos los caminos. En circunstancias normales un proyecto semejante habría necesitado muchos años, sin embargo tan sólo transcurrieron cuatro años desde el descubrimiento de la fisión y el día en que el primer reactor nuclear construido por el hombre, se hizo crítico el 2 de Diciembre de 1.942, tan sólo unos meses después de iniciado el proyecto. Cuatro años pasaron también entre el descubrimiento del Plutonio y la explosión de la primera bomba nuclear. El esfuerzo de planificación fué perfecto. En los diversos laboratorios se crearon grupos de investigadores que tenían programas muy concretos. Una vez efectuados los equipos se disolvían y el personal se redistribuía en otros grupos. Hubo participación de grandes empresas de los Estados Unidos que colaboraron en el proyecto

de forma esencial, todas ellas lo hicieron sin ningún beneficio económico. Para fines específicos se crearon laboratorios nuevos como Los Álamos, cerca de Santa Fé, en Nuevo México, en donde materialmente se construyeron las tres primeras bombas atómicas, Oak Ridge en Tennessee en donde se realizó el esfuerzo de enriquecimiento del Uranio y la extracción del Plutonio formado en el Uranio irradiado y Hanford cerca de Argonne en Illinois donde se concentró el desarrollo de los reactores. El costo total de todo el proyecto fué sin embargo modesto, tres mil millones de dólares de 1.940.

El conjunto de científicos involucrados en el proyecto Manhattan es impresionante, no sólo todos los Premios Nobel y prestigiosos científicos del momento sino jóvenes brillantes que lo recibieron después. Tan sólo a título ilustrativo por citar algunos nombres mencionaremos que en los Álamos que dirigía Oppenheimer, estaban Bohr, Bethe, Teller, Wigner, Feynman, Chadwick, von Neumann, Marshall, y Seaborg, en Oak Ridge bajo J.R. Dunning y H. Urey estaban, además de sus colaboradores, los ingenieros y técnicos de las compañías Carbide and Carbon Chemicals Corporation, Eastman, Dupont y la corporación Kellex. En Hanford y Chicago se encontraban Fermi, Anderson y sus colaboradores y finalmente en Berkeley estaban Segrè, Lawrence, Weisskopf, los ingenieros de Union Carbide y parte de los de Dupont, etc. Todos con una enorme movilidad ya que sus ubicaciones variaban según el trabajo que desarrollasen en ese momento.

En el desarrollo de las investigaciones hubo momentos de crisis que incluso llegaron a poner en duda la viabilidad del proyecto. Según nos cuenta uno de sus protagonistas, Emilio Segrè, (Segrè 1.980) una de ellas ocurrió cuando su grupo, que estaba investigando la fisión espontánea del Plutonio, descubrió que el isótopo Pu^{240} , que se forma en el Uranio a la vez que el Pu^{239} , tenía un ritmo de fisiones espontáneas tan elevado que hacía imposible la construcción de la bomba, ya que habría predetonado y se habría deshecho. Se encontró una solución al problema pero tras mucho trabajo e ingenio. En la otra línea también hubo problemas. Fermi se encontró con que algunos productos de fisión tenían una sección eficaz tan alta para la captura de neutrones que envenenaban el reactor parando la reacción en cadena. Al cabo de un tiempo cuando estos productos habían decaído lo suficiente la absorción de neutrones disminuía y la reacción se restablecía, pero sólo para volver a pararse poco después. El problema también se solucionó logrando tener un exceso de reactividad que, por cierto, Fermi y sus ingenieros habían previsto en su diseño por si algo inesperado lo hacía necesario. Esto aumentó el costo pero no introdujo un gran retraso.

Por casualidad la bomba atómica de Uranio y la de Plutonio estuvieron listas prácticamente a la vez dos años y medio después de que el primer reactor nuclear hubiese alcanzado la criticidad. La primera bomba atómica hizo explosión en un paraje desértico conocido como Jornada del Muerto cerca de Alamogordo en Nuevo México, el 16 de Julio de 1.945. Constaba de dos masas de U^{235} , inferiores a la crítica, que eran proyectadas una contra otra con un explosivo convencional. La segunda explosión, que tuvo lugar poco tiempo después, era una esfera hueca de Plutonio que colapsaba sobre su centro. Las dos primeras, y afortunadamente únicas, bombas que se utilizaron en la guerra se bautizaron como Little Boy y Fat Mann y siguieron esta misma tecnología. La primera, Little Boy, de U^{235} se arrojó sobre Hiroshima la madrugada del 7 de Agosto de 1.945 por el bombardero Enola Gay. Fat Mann, de Pu^{239} , cayó sobre Nagasaki dos días después. Analizaremos más adelante las consecuencias, desde el punto de vista radiactivo, de las pruebas nucleares que siguieron, durante años, a estas experiencias militares.

CAPÍTULO 5.- LA ENERGÍA NUCLEAR DESPUÉS DE 1.945. SUS USOS MILITARES Y CIVILES

En Europa hubo también investigaciones nucleares pero su ritmo fué mucho más lento. Según el informe de la comisión Alsos, encargada del estudio inmediatamente después de la invasión aliada, los alemanes, no habían llegado a producir una reacción en cadena, ni logrado separar isótopos, ni producir Plutonio en cantidades apreciables. Los Franceses bajo Joliot iniciaron sus investigaciones muy pronto, pero su trabajo se interrumpió con la invasión alemana. Aunque Joliot se quedó en Francia sus colaboradores se marcharon a Gran Bretaña llevándose, además, con ellos toda el agua pesada francesa. Allí se unieron a los investigadores Ingleses. El esfuerzo Británico sirvió de estímulo y acicate a las autoridades americanas que aceleraron el proyecto Manhattan. El esfuerzo de los Estados Unidos absorbió muy pronto a los investigadores Franco-Británicos y también incorporó al Canadá.

La información que se tiene de la Unión Soviética es escasa. Parece que se realizó un esfuerzo importante aunque la guerra impuso condiciones de trabajo muy difíciles a los científicos. Durante los años de conflicto no parece que se realizasen grandes progresos. El desarrollo posterior fue más rápido debido a un total apoyo del gobierno Soviético y a un eficaz sistema de obtención y aprovechamiento de la información secreta, que les aportó el detalle de lo que habían logrado los

americanos. El primer reactor nuclear, análogo a la pila CP-1 de Fermi, se puso en marcha, bajo la dirección de Kurchatov, el día de Navidad de 1.947. La explosión de la primera bomba nuclear Soviética fué detectada por los Estados Unidos el 29 de Agosto de 1.949 y tuvo lugar cerca de Semipalatinsk en Asia.

En muchos medios científicos americanos se generó, desde 1.945, un cierto sentido de culpabilidad por haber desarrollado las bombas nucleares pero, muy poco después, la guerra fría vino a sustituir un enemigo, Hitler, por otro, Stalin y a los Nazis por los Comunistas. La realización de una bomba termonuclear estaba en la cabeza de muchos militares y científicos pero había una cierta resistencia ética. Einstein, que se consideraba entre los responsables del desarrollo del armamento nuclear, escribió al Presidente Truman una carta oponiéndose al proyecto. En su carta puede leerse: *"El envenenamiento de la atmósfera por la radiactividad y, como consecuencia, la destrucción de toda la vida sobre la tierra ha entrado dentro del campo de las posibilidades técnicas. Todo parece encuadrarse en esta siniestra marcha de acontecimientos. Cada paso es la consecuencia del anterior. Al final de este camino se perfila, cada vez más claramente, el espectro de la aniquilación general"*. Sin embargo el presidente Truman unos días después de que fuese detenido el espía Soviético Klaus Fuchs, zanjó las discusiones y ordenó en 1.950 la fabricación de la bomba termonuclear, o de Hidrógeno como se la denomina más coloquialmente.

La primera explosión termonuclear fué de un artefacto de Deuterio, concebido esencialmente en Los Álamos por Ulam y Teller, y para el que von Neumann había desarrollado la calculadora electrónica MANIAC (Mathematical Analyzer Numerical Integrator and Computer) que junto con su antecesora, más pequeña, ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) marcó el comienzo de la informática. La explosión tuvo lugar en la isla de Elugelab en el océano pacífico, en 1.952, con un potencia de 10 megatones, unas 800 veces la de Hiroshima, y fué seguida de una serie de pruebas con diversas potencias. En Agosto de 1.953 realizaron una prueba similar los Soviéticos y este acontecimiento desencadenó totalmente la carrera de armamentos.

Esta escalada de construcción de bombas ha seguido hasta muy recientemente y a ella no han sido ajenos países más pequeños. En la primavera de 1.944 el grupo anglocanadiense que dirigía el entonces futuro premio Nobel Sir John Cockroft decidió la construcción del primer reactor de Uranio natural y agua pesada en Chalk River (Canadá) que se hizo crítico en 1.945. En 1.947 lo hacía el primer reactor Británico y en 1.948 lo hacía Zoe el primer reactor Francés. En 1.952

tuvo lugar en Montebello (Australia) la explosión de la primera bomba atómica inglesa y en 1.957, en la isla de Christmas, la de su primera bomba de Hidrógeno. En Febrero de 1.960 en Reggan, en el Sahara, los franceses experimentaron su primera bomba atómica y en 1.966 en las islas Tuamoto en el pacífico su primera de Hidrógeno. La República China realizó lo mismo en 1.964 y 1.967 en el desierto de Sing Kiang y algunos años después la India se incorporó también al club nuclear. Actualmente se sospecha que una docena de países poseen armamento nuclear.

El desarrollo civil de la energía nuclear se vió en sus comienzos seriamente frenado por el secreto y el control militar de todo lo relacionado con el tema. Al terminar la segunda guerra mundial los países occidentales se dieron cuenta de la necesidad de regular legalmente tanto nacional como internacionalmente las aplicaciones civiles de la energía nuclear. Los Estados Unidos presentaron, en 1.946, en las Naciones Unidas un plan de liberación gradual de todo el tema nuclear. En él cedían a la ONU secretos, fábricas e incluso bombas y exigían a cambio un efectivo control e inspección internacional en todos los países. Los Soviéticos se opusieron al proyecto y tras dos años de discusiones se dió por fracasado el plan. Entre tanto muchas naciones comenzaron la búsqueda de yacimientos de Uranio y se contemplaba cada vez más seriamente la posibilidad de la utilización práctica de la energía nuclear. La marina de los Estados Unidos había decidido la construcción de reactores nucleares para la propulsión naval y este esfuerzo sería el origen de la supremacía americana en el campo de los reactores comerciales. El primer submarino nuclear, el Nautilus, se botó en 1.953 y el prototipo de reactor era muy fácilmente adaptable a la producción industrial de electricidad. Los ingleses construyeron, en un aeródromo abandonado en Harnwell, cerca de Oxford, un gran centro de investigación donde se ubicaron los primeros reactores para producción de energía. El mismo año, 1.949, los Franceses crearon el Comisariado de la Energía Atómica - CEA- y un gran centro en Saclay cerca de París.

En 1.954 los Estados Unidos propusieron, en las Naciones Unidas, la celebración de una Conferencia Mundial, de tipo técnico, sobre los usos pacíficos de la Energía Nuclear. La Conferencia se celebró en Ginebra en 1.958 y fué el primer éxito internacional en el tema. En ella se hizo pública una gran cantidad de información técnica y en particular los Rusos hicieron saber que disponían de una central de producción eléctrica en Obninsk a unos 100 km. de Moscú. Los Estados Unidos lanzaron un programa de ayuda internacional conocido como "Átomos para la Paz". Con anterioridad, en Octubre de 1.956, se había hecho realidad una propuesta americana, realizada tres años antes y se había

creado, en Viena, el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) encargado del control de todas las actividades nucleares en el mundo y dependiente de las Naciones Unidas.

En 1.954 se decidió el final del régimen de ocupación de Alemania y simultáneamente su rearme, su adhesión a la NATO y la autorización para acceder al uso pacífico de la energía nuclear. En el mismo año se creó en Gran Bretaña la "United Kindom Atomic Energy Authority (UKAEA)" y se anunció, poco después, un ambicioso plan energético de construcción de centrales de grafito. La crisis de Suez vino a incidir favorablemente en el desarrollo pacífico de la energía nuclear y los Británicos, en 1.957, triplicaron el presupuesto dedicado a este fin. La actitud del Reino Unido espoleó a los demás países occidentales y comenzó un vasto plan de construcción de centrales en todo el mundo. La incipiente Europa de los seis reunida en Mesina, en Junio de 1.955, sentaba las bases para la integración de las telecomunicaciones, los transportes, la energía clásica y nuclear y el mercado común. Euratom fué el nombre que se dió a la empresa nuclear comunitaria cuyos fines según el tratado de Roma de 1.957 eran entre otros " *Desarrollar la investigación y los intercambios de informaciones, crear las instalaciones comunes necesarias, garantizar a las industrias el aprovisionamiento de minerales y combustibles nucleares, permitir la libre circulación de especialistas..*".

El primer reactor estrictamente comercial, construido por empresas civiles, fué encargado en Diciembre de 1.963 a General Electric por la compañía Jersey Central Power and Light. Se trataba de un reactor de agua en ebullición. Desde entonces la energía eléctrica de origen nuclear se ha desarrollado constantemente. En la actualidad hay en funcionamiento en el mundo 437 centrales nucleares comerciales y 39 más se encuentran en construcción con una potencia instalada que suministra 335.457 MW(e), casi la cuarta parte de la energía eléctrica producida en el planeta. (IAEA 1.995)(Nuclear 96). En la Tabla 5.1 resumimos los datos más relevantes de las plantas nucleares existentes en los distintos países. En ella puede verse que en Lituania y Francia más del 75% de la energía eléctrica es de origen nuclear, que en Bélgica y Suecia lo es más del 50% y que en 13 países más sobrepasa el 25%, Bulgaria, Hungría, República Eslovaca, Eslovenia, Ucrania, Alemania, España, Finlandia, Reino Unido, Suiza, Japón, Corea del Sur y Taiwan. Los Estados Unidos producen el 22% por este sistema.

Tabla 5.1 Reactores Nucleares en el Mundo (Finales de 1.995)
(IAEA 1.995)

PAÍS	En Operación		En Construcción		Electricidad Suministrada	
	Unidades	MW(e)	Unidades	MW(e)	TW.h	%
América del Norte						
Canadá	21	15.755			92,3	17,3
Estados Unidos	109	98.784	1	1.165	673,4	22,5
Total	130	114.539	1	1.165	765,7	21,9
América Latina						
Argentina	1	626	1	1.245	2,5	1,0
Brasil	2	1.308			8,5	6,0
México	5	2.869	2	1.937	18,1	7,6
Total						
Europa Occidental						
Alemania	20	22.657			154,1	29,1
Bélgica	7	5.527			39,2	55,5
España	9	7.105			53,1	34,1
Finlandia	4	2.310			18,3	29,9
Francia	56	58.493	4	5.810	358,6	76,2
Holanda	2	504			3,7	4,9
Reino Unido	35	12.908			77,6	25,0
Suecia	12	10.002			70,2	51,1
Suiza	5	2.985			23,5	40,0
Total	150	122.491	4	5.810	798,3	53,6
Europa Oriental						
Bulgaria	6	3.538			17,3	46,4
Hungría	4	1.729			13,2	42,3
Kazakhstan	1	70			0,1	0,1
Lituania	2	2.370			10,6	85,6
República Checa	4	1.648	2	1.824	12,2	20,1
Rep. Eslovaca	4	1.632	4	1.552	11,4	44,1
Rumania			2	1.300		
Rusia	29	19.843	4	3.375	99,4	11,8
Slovenia	1	632			4,6	39,5
Ucrania	16	13.819	5	4.560	65,7	37,8
Total	67	45.281	17	12.611	234,5	29,2

PAÍS	En Operación		En Construcción		Electricidad Suministrada	
	Unidades	MW(e)	Unidades	MW(e)	TW.h	%
África						
Suráfrica	2	1.842			11,3	6,5
Total	2	1.842			11,3	6,5
Oriente Medio y Surasia						
Armenia	1					
India	10	1.695	4	808	6,5	1,9
Irán			2	2.146		
Pakistán	1	125	1	300	0,5	0,8
Total	12	1.820	7	3.254	7,0	1,8
Extremo Oriente						
China	3	2.100			12,4	1,3
Japón	51	38.875	3	2.880	286,9	33,4
Korea del Sur	11	8.974	5	4.020	63,7	36,1
Taiwan	6	4.920			33,9	28,8
Total	71	54.065	8	9.619	396,9	32,4
Total Mundial	437	340.377	39	38.876	2.227,9	35,7

Puede verse también, en contra de lo que nos hacen creer sobre un parón nuclear en el mundo, que hay 39 centrales en construcción, casi el 10% de las que existen en funcionamiento, con una potencia estimada superior al 10% de la actual, de ellas algo más de la mitad, 21, se ubican en Europa.

Por lo que respecta a España la primera disposición administrativa relativa al dominio nuclear se realizó en 1.945. En ella se reservaba a favor del Estado todos los yacimientos de minerales de Uranio, que se conocían en 14 provincias, dada su excepcional importancia para la economía y defensa nacionales. En 1.948 se creó la llamada Junta de Investigaciones Atómicas, formada por José María Otero (Ingeniero de Armas Navales), Armando Durán (Físico), Manuel Lora (Químico) y José Ramón Sobredo (Diplomático y de la Intendencia Militar) a la que se unió enseguida Ramón Ortiz Fornaguera (Físico) (Caro 1.995). Su propósito fué la planificación y ejecución de un plan de formación de personal, el estudio y la explotación de los yacimientos de Uranio existentes en España y la aplicación y el desarrollo de la extracción, metalurgia y tecnología del Uranio.

Para darle una cobertura, ya que era imposible mantener en secreto estas investigaciones, y facilitar la contratación de personal se creó una empresa, la "Sociedad de Estudios y Proyectos de Aleaciones Especiales", EPALE, que durante tres años realizó los trabajos que después pasaron a la Junta de Energía Nuclear. Se envió al extranjero a científicos y se realizó un enorme esfuerzo en todos los aspectos relacionados con el tema nuclear no sólo en Física sino en Química, Metalurgia, Materiales y Geología.

Las actividades de EPALE eran un absurdo secreto a voces y el 22 de Octubre de 1.951 se creó la Junta de Energía Nuclear. Las investigaciones realizadas se hicieron públicas, se crearon laboratorios y plantas piloto en Madrid y plantas de explotación en diversos yacimientos de Uranio, como por ejemplo en Andújar. La industria española participó plenamente en el desarrollo nuclear español y se establecieron colaboraciones internacionales. Científicos de gran prestigio como Heisenberg, Scherrer y Allison vinieron sistemáticamente a España a dar conferencias y supervisar algunas investigaciones. En pocos años se creó un plantel de ingenieros y científicos que poco tenían que envidiar a los existentes en otros países vecinos.

En la Junta de Energía Nuclear se construyeron reactores experimentales tanto lentos como rápidos, se desarrolló toda la tecnología del Uranio, la de fabricación de elementos combustibles, la del tratamiento de combustibles irradiados y la de separación del Plutonio. Se implementó toda la tecnología de celdas calientes y con ella comenzó la fabricación de isótopos para la investigación y usos médicos. La última generación de centrales nucleares en nuestro país estaba diseñada y construida en un 80% por ingenieros y científicos españoles. La Junta de Energía Nuclear, a través de sus programas de investigación extramural, fomentó la investigación de grupos universitarios, entre los que cabe mencionar el del Profesor Justiniano Casas, aquí en Zaragoza, donde se desarrolló una parte de la técnica de separación de isótopos, con espectrómetros de masas y columnas de difusión.

Afortunadamente para la humanidad la locura de las armas nucleares comenzó a entrar poco a poco en razón por parte de las grandes potencias. No obstante hasta muy recientemente se habían realizado más de 1.500 pruebas nucleares, en la atmósfera, subterráneas y submarinas. Aunque en 1.958 comenzaron en Ginebra conversaciones para llegar a un tratado internacional sobre pruebas nucleares fueron un

fracaso. Fué necesaria la crisis de los misiles de Cuba para que se reanudara el diálogo que condujo, en una reunión en Viena en 1.963, a la consecución de un acuerdo, que se firmó solemnemente en Moscú en Diciembre de ese mismo año, entre los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña. En él se decidió la suspensión de las pruebas nucleares en la atmósfera y la instalación del célebre teléfono rojo. A este tratado se adhirieron posteriormente más de cien países entre los que no se encontraban ni China, ni Francia.

La IAEA se enfrentaba a un serio problema pues la expansión de la energía nuclear en muchos países llevaba consigo la producción de Plutonio en los elementos combustibles que, con tecnología ya bien conocida, se podía utilizar con fines bélicos. El peligro de proliferación nuclear era obvio y la necesidad de un acuerdo mundial evidente. La organización creó un grupo de trabajo para la elaboración de un tratado de no proliferación de armas nucleares que por fin entró en vigor en Noviembre de 1.972. En esencia el tratado compromete a los firmantes con armas nucleares a no transferirlas a otros países ni colaborar en su fabricación. Los países no nucleares se comprometen a no construir ni adquirir dichas armas y se establece un sistema de salvaguardias y verificaciones, encargándose la IAEA de la inspección y control de todas las instalaciones.

El tratado se firmó por las tres potencias nucleares y 40 países no nucleares. Con el tiempo se fueron adhiriendo más países, aunque hasta muy recientemente no había sido firmado por Francia y China como potencias nucleares y por Argentina, Brasil, Chile, India, Israel, Corea del Norte, Paquistán, Sudáfrica y España. En la actualidad está ratificado por más de 140 países. La existencia del tratado no ha impedido sin embargo que en 1.974 explosionase la primera bomba atómica India, que Irak estuviese a punto de poner en marcha, en 1.981, un reactor dedicado a la producción de Plutonio que fué destruido por Israel. Que al estallar la guerra del golfo, a mediados de los 90, Irak estuviese a punto de alcanzar su objetivo de poseer armas nucleares. En ese conflicto se destruyeron todas sus instalaciones nucleares militares. Tampoco evitó que Sudáfrica admitiese, en 1.992, que había fabricado varias bombas atómicas en los años 70 pero que posteriormente las había desmatelado y que Israel, aún hoy, no haya confirmado ni desmentido si tiene armas nucleares.

El tratado que prohíbe las pruebas nucleares atmosféricas se ha cumplido, afortunadamente, estrictamente por todos los países y la radiactividad ambiental que ello producía va desapareciendo poco a poco de nuestro planeta. Hoy día ya quedan muy pocos rastros de ella y la

radiactividad atmosférica es prácticamente la que había en la era prenuclear.

LA RADIATIVIDAD EN LA TIERRA

CAPÍTULO 6.- LA RADIATIVIDAD EN LA TIERRA PRIMITIVA

6.1.- La tierra primitiva

La radiactividad que tenemos hoy día en nuestro planeta no es la que hubo en los primeros tiempos, no debemos olvidar que los radionucleidos se desintegran con periodos bien definidos y si bien generan a su vez en muchas ocasiones nuevos núcleos radiactivos es bien cierto que las familias terminan en elementos estables.

La formación de nuestro planeta se produjo hace unos 4.600 millones de años, dato que concuerda con las determinaciones de la edad de meteoritos primitivos y de las rocas lunares. Las rocas terrestres no son tan antiguas, la más primitiva tiene una edad de unos 3.800 millones de años y se encuentra en Isua, (Groenlandia). Sin embargo la determinación de la edad de algunos minerales, con independencia de la formación de la roca en que se encuentran, refleja tiempos del orden de los 4.300 millones de años. Para realizar este tipo de estudios son de gran utilidad los relojes radiactivos proporcionados por la desintegración de nucleidos de muy largo periodo. Los más usuales son: el ^{87}Rb ($T_{1/2} = 4.9 \times 10^{10}$ a), el ^{147}Sm ($T_{1/2} = 1.8 \times 10^{11}$ a), el ^{238}U ($T_{1/2} = 4.46 \times 10^9$ a), y el ^{235}U ($T_{1/2} = 7.04 \times 10^8$ a). Los contenidos de Uranio, Torio y Plomo radiogénico, junto con los cocientes $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ y $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ son los métodos más precisos para determinaciones de edades muy primitivas. A pesar de las dificultades y la bajísima actividad a medir las estimaciones son a menudo coincidentes, por ejemplo, en la roca de Isua antes mencionada los distintos métodos han conducido a las siguientes edades: Isótopos de Plomo 3.760 millones de años, cociente $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ 3.770 millones de años y cociente $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ 3.750 millones de años.

En la tierra se encuentran todos los elementos químicos estables y la causa de esta variedad se debe a nuestro origen. La hipótesis más aceptada, si bien no unánimemente, es que el lugar del sol estuvo



ocupado por otra estrella, más masiva, que se convirtió en supernova. En los restos de la estrella se formó una nebulosa que dió origen por una parte a la formación de una nueva estrella, nuestro sol, en la que por cierto también hay elementos pesados, y por otra a un disco de acreción del que procede el sistema solar y en particular la tierra. En la explosión de una supernova se forman prácticamente todos los nucleidos en proporciones dictadas por las secciones eficaces de captura de neutrones.

Una supernova es el acto final de la vida de una estrella que tenga una masa equivalente a varias masas solares. Nuestro Sol tuvo que nacer de una supernova de tipo II, análoga a la más recientemente estudiada conocida como SN1987A. Las supernovas de tipo I no contienen Hidrógeno. La estrella original, estaba compuesta esencialmente por Hidrógeno y durante millones de años lo utilizó formar Helio con una liberación energética de 26,72 MeV por cada 4 núcleos de Hidrógeno que forman uno de Helio. Nuestro Sol utiliza este mismo mecanismo para generar su energía. Prácticamente el 90% de la vida de una estrella transcurre utilizando este mecanismo. Cuando el Hidrógeno del núcleo central se consumió cesó la producción de energía y la gravedad se convirtió en la fuerza dominante. El núcleo se contrajo, se calentó y consecuentemente las capas exteriores de la estrella se expandieron. Así será el fin de nuestro planeta, pues nuestro Sol se expandirá, dentro de unos 4.000 millones de años, hasta alcanzar la órbita de Marte convirtiéndose en una estrella gigante roja. Lo mismo, pero a mayor escala, le sucedió a su antecesora.

Cuando el núcleo alcanzó la densidad y temperatura suficiente, unos 100 millones de grados, comenzó la fusión del Helio dando origen a Carbono y Oxígeno. La estrella adquirió una estructura parecida a la de una cebolla con un núcleo denso y caliente, rodeado exteriormente por una capa de Helio que a su vez estaba rodeada por otra capa de Hidrógeno. En este estadio la estrella pudo perder una parte de su envoltura exterior, formando una gran nube de gas, fundamentalmente Hidrógeno y Helio. Cuando la temperatura de la estrella no pudo mantener el resto de la envoltura ésta comenzó a contraerse y a caer sobre el interior. La estrella se hizo mucho más pequeña y se calentó en el exterior, pasando de roja a azul con una temperatura exterior de unos 20.000 grados. El Sol tiene en su superficie unos 6.000 grados. El núcleo, denso y caliente comenzó a formar Neón, Sodio y Magnesio.

El proceso es acelerado y cada ciclo tiene una duración mucho más corta que el anterior. El progreso tan rápido se debe a una extraordinaria producción de rayos X y gamma cuando el núcleo alcanza, con el quemado

del Carbono, unos 500 millones de grados. Finalmente se formaron el Silicio y el Azufre que dieron origen al Hierro, elemento en que se acaba la fusión nuclear exoenergética. Una vez que el núcleo de Hierro alcanzó su masa crítica de aproximadamente 1,4 veces la masa solar y su diámetro era aproximadamente la mitad del terrestre ocurrió la catástrofe. En unas décimas de segundo el núcleo de Hierro se colapsó y en la implosión se produjo una inimaginable onda de choque que expandió todo el resto de la estrella que junto con un efecto de retroceso contribuyó a la desintegración de todo el sistema. Durante el corto periodo de tiempo en que todo esto sucedió se produjeron enormes cantidades de neutrones que dieron origen, al interaccionar con los núcleos existentes, a todos los elementos posteriores al Hierro. En este proceso de nucleosíntesis se originaron todos los nucleidos posibles. La mayor parte de ellos eran de vidas muy cortas y los estables y de vida larga son los que tenemos en nuestro entorno. La actividad radiactiva en ese periodo es inimaginable pues la energía que hay en juego fué de uno o dos órdenes de magnitud superior a la que el Sol liberará en toda su existencia. En esa nube de desechos, rica en todos los elementos químicos, es donde se formó nuestro Sol y su sistema solar.

Durante el periodo de acreción presolar, los radionucleidos se incorporaron a los cuerpos planetarios y con la separación de los planetas pasaron a formar parte de ellos. Para la tierra sólo los radionucleidos con periodos superiores al millón de años son de interés y representan el 1% del número total de los nucleidos sintetizados. En la actualidad todavía podemos encontrar 15 radionucleidos de largo periodo descendientes de los formados en la explosión de la supernova o incluso formados en la propia explosión. El análisis isotópico de meteoritos indica un exceso de Xe^{129} que podría deberse a la desintegración del I^{129} que, con un periodo de 17 millones de años, prácticamente ha desaparecido. Esto indica también que la incorporación del I^{129} a los cuerpos planetarios fué muy primitiva, tuvo que ocurrir durante los primeros 160 millones de años a contar desde la explosión pues de otra forma no habría anomalía del Xe^{129} .

6.2.- Atmósfera y Corteza

En la atmósfera primitiva tuvo lugar una formación copiosa y continua de radionucleidos que se dispersaron por todo el planeta. Entre ellos se encontrarían los que existen hoy día, muchos de los que producimos en los laboratorios y los elementos transuránidos. A lo largo de los 4.500

millones de años de existencia de la tierra la radiactividad ha disminuido drásticamente y muchos radionucleidos han desaparecido.

La composición de la atmósfera primitiva no se conoce y las rocas no sirven de ayuda para saber la química de la superficie del planeta primitivo. El conocimiento actual de las atmósferas de Júpiter y Saturno pueden indicarnos como podría haber sido nuestra atmósfera. Lo más probable es que fuese en su mayor parte Hidrógeno tanto en forma molecular H_2 como combinado con los elementos químicos más abundantes, Carbono formando metano CH_4 , oxígeno formando agua H_2O y Nitrógeno formando amoníaco NH_3 .

Este tipo de atmósfera pudo haber existido ya en las épocas finales de la condensación de la nebulosa presolar y durante el periodo de formación del manto y la corteza. Debido a la pequeña masa terrestre y como consecuencia a su débil gravedad esta atmósfera primitiva se perdió pronto debido a un proceso de degasificación. A este proceso en que los gases ligeros no se podían retener había que añadir que durante este periodo y hasta hace unos 3.900 millones de años hubo una intensa actividad meteórica y volcánica que aportó nuevos elementos y nuevos gases.

La nueva atmósfera que surgió contenía una pequeña cantidad de Hidrógeno, aproximadamente un 1% en forma molecular H_2 , Nitrógeno N_2 , Monóxido de Carbono CO y Sulfuro de Hidrógeno H_2S . A efectos de formación cosmogénica de nucleidos, existían los mismos núcleos blancos que en la actualidad, Hidrógeno, Carbono, Oxígeno y Nitrógeno y por tanto existían entonces los mismos nucleidos radiactivos que en la actualidad que analizaremos en la sección correspondiente. Sus abundancias, sin embargo, no eran las mismas por varias razones. En primer lugar el flujo de radiación cósmica era antiguamente más intenso que en la actualidad, porque hace 4.500 millones de años el número de explosiones de supernovas en nuestra galaxia era probablemente mayor que ahora. Por otra parte nuestro conocimiento de las estrellas jóvenes confirma que todo tipo de radiaciones tanto electromagnéticas como corpusculares son mucho más intensas en las primeras etapas de la vida estelar.

En la Tabla 6.1 resumimos algunos de los acontecimientos más importantes ocurridos en la tierra primitiva.

Tabla 6.1.- Acontecimientos más importantes de la tierra primitiva

Tiempo (Millones de años)	Proceso
antes de 4.600	Nebulosa solar
	Formación del sistema solar
4.600-4.500	Edad de los meteoritos y la Luna
4.500	Acreción de la tierra. Formación del núcleo y el manto
4.500-4.250	Formación de la corteza primitiva, hidrosfera y atmósfera
4.500-3.900	Impactos de meteoritos y actividad volcánica
3.700	Edad de las rocas de Isua
3.500	Trazas de vida (Estromatolitos)
2.000	Fenómeno de Oklo (Reactores Nucleares Naturales)

6.3.- Calor Radiogénico

Las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas se absorben en los materiales que las rodean y su energía termina degradándose en calor. Este calor radiogénico jugó y sigue teniendo hoy día, un papel importante en el balance energético terrestre. Durante el periodo de acreción, los radioelementos pesados se desplazaron hacia el centro del planeta y sus desintegraciones junto con la energía gravitacional fueron, durante los 100 primeros millones de años, la fuente principal de calor que dió origen al núcleo fundido.

El Uranio, el Torio y el Potasio 40 no están confinados en el interior del planeta y se encuentran repartidos por todas partes en la corteza. Parece ser que emigraron a la superficie en épocas muy primitivas debido a su forma cristalina y a sus propiedades químicas. Al parecer podrían haber sido muy solubles en el material fundido lo que hizo posible su desplazamiento del centro líquido a la superficie. De hecho si esta migración no hubiese ocurrido y hubieran permanecido en el núcleo el comportamiento geológico del planeta habría sido otro. El calor adicional que se habría generado habría supuesto un incremento de temperatura tanto en el núcleo como en el manto y por tanto la

actividad tectónica en la corteza habría sido mayor, con un aumento en la frecuencia e intensidad de los terremotos. No obstante se cree que la mayor parte del calor generado en el núcleo terrestre se debe a la presencia de Uranio y Torio en el interior.

El Uranio existente es una mezcla de tres isótopos todos ellos radiactivos, emisores alfa, el U^{234} con un periodo de 2.45×10^5 años, el U^{235} con un periodo de 7.04×10^8 años y el U^{238} con un periodo de 4.46×10^9 años. El Torio es tres veces más abundante que el Uranio y es un isótopo único, radiactivo alfa, Th^{232} con un periodo de 1.41×10^{10} años. El Potasio constituye el 2.4% en peso de la corteza terrestre, de los tres isótopos que lo constituyen el K^{40} tiene actualmente una abundancia de tan sólo el 0.0118% del potasio natural. Es un emisor beta con un periodo de 1.28×10^9 años. Su importancia reside en su gran abundancia, 283 gr. por tonelada de corteza terrestre y en ser un elemento esencial tanto en la dieta humana como en la alimentación vegetal.

Existen otros radionucleidos con largos periodos que contribuyen a la generación de calor, aunque su radiactividad es menor. Entre ellos se encuentra: El Rb^{87} que representa el 28% del Rubidio existente en la naturaleza. Es relativamente abundante, en la actualidad hay unos 78 gramos por tonelada de corteza terrestre. Es un emisor beta con un periodo de 4.88×10^{10} años. El Indio, menos abundante, 0.2 gramos por tonelada, es prácticamente radiactivo en su totalidad, el 96% de este elemento es In^{115} , un emisor beta que tiene un periodo nada menos que de 5×10^{14} años (cien mil veces la vida de la tierra). Visto con otros ojos se puede considerar estable. El Samario tiene una abundancia de unos 7 gramos por tonelada y el 40% del mismo es una mezcla de tres isótopos radiactivos, emisores alfa: Sm^{147} con 1.08×10^{11} años, Sm^{148} con 7.0×10^{15} años y Sm^{149} con 1.0×10^{16} años.

La energía total con que contribuyen los radioelementos de la corteza terrestre, considerando los presentes en una capa de un kilómetro de espesor, se estima en la actualidad en 33.4 kilojulios por metro cuadrado y año que en la tierra primitiva pudo llegar a ser de unos 117 kJ/m².año. Esta no es sin embargo toda la energía procedente de la radiactividad, en la tierra primitiva funcionaron reactores nucleares de fisión con gran profusión y eficiencia.

En la tabla 6.2 resumimos algunas características de los elementos de largo periodo, con cierta abundancia en la corteza, que contribuyen, incluso hoy día, a la generación de calor.

Tabla 6.2. Características de los elementos de largo periodo con cierta abundancia en la corteza

Nucleido	Periodo (años)	Abundancia Isotópica relativa %		Abundancia actual del elemento gr/Tm
		Hace 4.500 millones de años	Actualidad	
Uranio 238	4.46×10^9	74.02	99.274	3
Uranio 235	7.04×10^8	25.990	0.72	0.2
Rubidio 87	4.88×10^{10}	29.19	27.83	78
Potasio 40	1.28×10^9	0.145	0.017	24000
Indio 115	5×10^{14}		96	0.2
Samario 147	1.08×10^{11}		15	7
Samario 148	7×10^{15}		11.3	7
Samario 149	10^{16}		13.8	7
Torio 232	1.4×10^{10}		100	10

6.4.- Reactores Nucleares Naturales. El fenómeno de OKLO

Durante 30 años se creyó que el primer reactor nuclear sobre la tierra fué la Pila CP-1 que funcionó en Chicago en 1.942 y se sigue creyendo hoy día por mucha gente, que la energía de fisión es una invención humana y no es un proceso natural. No se pensaba que fuese posible que un sistema técnicamente tan complejo como un reactor nuclear se pudiese construir naturalmente. Sin embargo en 1.972 se descubrieron los restos del primer reactor nuclear natural de fisión en Oklo (Gabón). Un equipo Francés puso de manifiesto que, hace unos 2.000 millones de años, funcionaron allí al menos seis reactores. Se trata de zonas en las que hay una alta concentración de Uranio y agua en las que tuvo lugar un proceso de reacción en cadena sostenida al igual que en nuestros reactores nucleares actuales. En aquellos tiempos la abundancia del U^{235} era muy superior a la actual y la criticidad se podía obtener con

relativa facilidad si la concentración de Uranio era suficientemente elevada.

El descubrimiento tuvo lugar, como tantas veces en la ciencia, por una mezcla de suerte y buen hacer científico. En una factoría francesa para enriquecimiento de Uranio se procedió a efectuar una medida rutinaria de la concentración de U^{235} en una muestra de Uranio natural. El valor medido fué de 0.7171% en vez del estándar 0.7202 aceptado hoy día. La diferencia 0.0031% es verdaderamente pequeña pero estaba fuera de los errores experimentales y de la variación natural aceptada de 0.0006%. Los datos se tomaron en serio y se procedió a una investigación detallada puesto que una reducción en el contenido de U^{235} era lógicamente atribuible a una mezcla no controlada de Uranio natural con Uranio utilizado en un reactor nuclear. Al seguir la historia del material que llegó a la factoría se comprobó que no había posible mezcla con elementos combustibles y condujo hasta las minas de Oklo en Gabón, un pequeño país en el Oeste del África Ecuatorial.

El estudio de muestras de las minas fué más sorprendente aún, cuanto mayor era el contenido de Uranio en el mineral menor era el porcentaje de U^{235} . Un análisis posterior más detallado detectó la presencia de Tierras Raras y demás elementos característicos de los productos de fisión. Se concluyó que en esas minas había tenido lugar un cierto grado de fisión nuclear natural y se presentó una comunicación a la Academia de Ciencias Francesa que fué publicada en 1.972.

El fenómeno descubierto causó un gran impacto en los ambientes científicos, se realizaron múltiples investigaciones e incluso dos congresos monotemáticos organizados por el Organismo Internacional de la Energía Atómica de Viena (IAEA 1.975, IAEA 1.978) en donde quedaron claramente establecidos los hechos ocurridos geológica, geoquímica y físicamente. Se ha podido establecer el mecanismo de formación de los depósitos de Uranio, las características que deben reunir para que el fenómeno pueda tener lugar y como han podido preservarse hasta hoy día. El análisis isotópico ha permitido calcular además la energía liberada por el fenómeno.

La idea de que podían haber existido procesos de fisión en cadena de forma natural se debe al científico Japonés P.K. Kuroda que, en 1.956, sugirió que en la tierra primitiva podrían haber existido depósitos de Uranio Natural en los que la concentración de U^{235} podría permitir un proceso de reacción nuclear de fisión. Él mismo sugirió que depósitos de Uranio de 2.000 millones de años de antigüedad eran el lugar idóneo para

comprobarlo. Hasta el descubrimiento del reactor de Oklo nadie consideró seriamente sus ideas. A decir verdad el fenómeno de Oklo es bastante impensable pues se tienen que dar una serie de felices circunstancias para que la reacción nuclear ocurra de forma natural y además podamos haberlo descubierto hoy día nada menos que 2.000 millones de años después. Tiene que existir un depósito rico en Uranio, tiene que haber agua y el mineral puede contener muy pocas impurezas nucleares, es decir elementos con alta sección eficaz de absorción de neutrones. Los depósitos tienen que tener una antigüedad en su formación tal que la concentración de U^{235} sea suficientemente elevada y además con características geoquímicas que hagan posible procesos de oxidación y reducción que faciliten la concentración de Uranio. Por último el lugar ha tenido que sobrevivir a los casi increíbles y drásticos cambios que ha sufrido la corteza terrestre hasta nuestros días. Es sobre todo esta última condición la que hacía impensable cualquier descubrimiento del fenómeno.

El fenómeno de Oklo ha permitido realizar un estudio detallado de la existencia de reactores en la tierra primitiva. (IAEA 1.978). La época en que los reactores pudieron ocurrir es bastante dilatada pues se extiende desde hace unos 4.100 millones de años en que se formó la primera corteza terrestre hasta unos 1.100 millones de años en que las concentraciones de U^{235} , debido a su desintegración natural, ya no son las adecuadas. Durante unos 3.000 millones de años, es decir dos terceras partes de la existencia de la tierra, el fenómeno ha podido ocurrir.

Las simulaciones realizadas en ordenador predicen que la criticidad se pudo alcanzar fácilmente en minerales con concentraciones de Uranio tan bajas como entre el 3.5% y el 6% lo que sucedió entre los 4.100 y 3.500 millones de años. Esto fue posible porque la concentración de U^{235} era entonces entre el 20% y el 10% y esto a su vez hacía que la reacción pudiese tener lugar incluso con la presencia de concentraciones significativas de núcleos absorbentes de neutrones. En pasados más recientes la criticidad requiere depósitos de Uranio más ricos. Entre 3.000 millones y 1.800 millones de años un reactor natural requiere una formación geológica con una concentración de Uranio entre el 10% y el 30% respectivamente. Para tiempos más recientes, del orden de 1.000 millones de años, se necesitarían concentraciones del orden del 50% y una ausencia total de impurezas que absorban neutrones.

En el caso de Oklo se han encontrado seis reactores nucleares en una veta de roca sedimentaria de un grosor comprendido entre 4 y 10 metros

que contiene concentraciones de Uranio comprendidas entre el 20% y el 60% mientras que la matriz que la rodea contiene sólo entre el 0.2% y el 0.5%. Los reactores tienen una forma lenticular de 1m. de grueso y entre 10 y 20m de largo. La reacción ocurrió hace unos 2.000 millones de años y estuvieron en funcionamiento durante unos 600.000 a 800.000 años. En aquel tiempo la veta estaba situada bajo el mar a unos 5.000m. de profundidad lo que permitió su buen funcionamiento. A esa profundidad el agua necesaria en el proceso se encuentra a unas 200 atmósferas y la temperatura del agua puede alcanzar los 350 grados sin llegar a la ebullición. La temperatura del agua ejerció un control efectivo de la reacción. La moderación de neutrones depende de la densidad del agua, al funcionar el reactor la energía producida calienta el agua y la densidad de la fase acuosa disminuye. La temperatura puede llegar incluso al punto de ebullición y comenzar un proceso de evaporación incrementando la disminución de la densidad. La moderación de neutrones es menos eficiente a menor densidad y el ritmo de fisiones disminuye reduciéndose la producción de energía. Algún reactor pudo hasta parar su reacción en cadena. Con la disminución de temperatura la densidad de la fase acuosa se incrementa, la eficiencia de la moderación lo hace también y el proceso se reinicia.

No está claro como pudo iniciarse la puesta en marcha del proceso, si bien, en los reactores de mayor concentración de Uranio, o de menor concentración de absorbentes de neutrones, bastan unos pocos neutrones que podrían haberse generado a partir de radiación cósmica o por fisión espontánea del propio Uranio. Una vez iniciada la reacción en cadena en un reactor sus neutrones son más que suficientes para haber iniciado la reacción en los restantes.

La cantidad total de energía liberada por el fenómeno de Oklo se puede estimar bastante bien a partir del Uranio consumido y arroja la impresionante cifra de 500 millones de gigajulios, aproximadamente la producción durante un año de unas veinte plantas nucleares de última generación de una potencia de 1.000 megawatios eléctricos. (3.000 megawatios térmicos). Sin embargo en Oklo esta energía se produjo a lo largo de mucho tiempo, la potencia media de cada uno de los reactores era tan sólo de 2.6 kilowatios que podemos comparar con los tres millones de kilowatios de una planta nuclear.

¿Cuántos reactores nucleares pudieron haber existido en la tierra primitiva?. La mayor abundancia del U^{235} en el Uranio natural permitiría la existencia de reacciones en cadena durante todo el periodo precámbrico en depósitos con relativamente poca concentración de Uranio en cuyo caso los reactores nucleares naturales pudieron ser muy

abundantes en nuestro planeta. No hubo sin embargo, en el último congreso en 1.978, unanimidad en este punto y muchos científicos se inclinaron a pensar que el fenómeno de Oklo fué un caso único y singular. Su argumento residía en que la acumulación de Uranio necesaria es muy poco probable. Hoy día se tiene una mejor información sobre el posible mecanismo geoquímico que produce la acumulación de Uranio y se puede hacer una estimación del número de reactores que pudo haber en nuestro planeta.

El Uranio se encuentra muy uniformemente distribuido en la corteza terrestre con concentraciones muy bajas. Los depósitos de Uranio se cree que se deben a un proceso de oxidación y reducción. El Uranio tetravalente (U^{4+}) se oxida a Uranio hexavalente (U^{6+}) que forma compuestos solubles en agua que pueden ser transportados con facilidad a otros lugares. Para que ocurra la precipitación, el Uranio hexavalente tiene que ser reducido de nuevo a tetravalente y esto puede ocurrir en presencia de materia orgánica. La idea de un periodo precámbrico desprovisto de Oxígeno y materia orgánica está cambiando en la actualidad puesto que estudios recientes indican que la materia orgánica de origen abiótico comenzó a acumularse tan pronto como las condiciones de la corteza terrestre permitieron la formación de compuestos orgánicos. Estos compuestos se pudieron formar en la atmósfera primitiva por la acción de descargas eléctricas, la radiación ultravioleta o por la acción de radiaciones ionizantes. La actividad volcánica, muy abundante en tiempos pretéritos, produjo también gran cantidad de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) que es fuertemente reductor.

La aparición de materia orgánica de origen biótico también es muy anterior a lo que tradicionalmente se pensaba. La composición isotópica del Carbono en las rocas de Isua indica que posiblemente, hace ya 3800 millones de años, existía una actividad fotosintética y se han identificado restos fósiles de cierta microbiota compleja en rocas con edades entre 3000 y 3500 millones de años de antigüedad. También parece que en estos tiempos existía Oxígeno en cantidades no insignificantes, esto se deduce a partir de investigaciones muy precisas de las concentraciones de Uranio y Torio en rocas de datación bien conocida. Ambos elementos aparecieron muy pronto en la parte superior del manto primitivo y en la corteza aproximadamente unos 100 millones de años después de la formación del núcleo terrestre.

Su concentración debería ser constante e independiente de la edad de la roca suponiendo que el comportamiento químico no haya cambiado a lo largo del tiempo. La constancia es falsa. El cociente Uranio/Torio aumenta desde 3 para las rocas más primitivas conocidas (3800

millones de años en Groenlandia) hasta 6 para las más jóvenes (300 millones de años en Australia).

Una posible explicación de estos datos podría ser que el Uranio se ha perdido durante los procesos de disolución y sedimentación en el pasado y además que estos procesos tuvieron lugar en épocas muy primitivas. La explicación más plausible es la presencia de Oxígeno. El estado tetravalente del Torio no cambia y es muy poco soluble por lo que permanece en la roca. El Uranio se oxida con facilidad cambiando el estado a exavalente que es fácilmente soluble en agua. Hay también un proceso basado en una erosión química y mecánica que no requiere ni oxígeno ni materia orgánica para la acumulación de Uranio, que pudo ser muy efectivo en la tierra primitiva, debido a la presencia de gases ácidos en la atmósfera y una superficie terrestre desprovista de vegetación. Las rocas de Isua son un ejemplo de este proceso ya que son sedimentos precipitados químicamente depositados por agua.

El proceso completo es un ciclo de disolución, erosión, transporte y sedimentación. Suponiendo una zona de unos 40 km. cuadrados con un depósito con una concentración de Uranio tan baja como 0.4gr/Tm y una erosión de 1mm al año, como sucede actualmente en los Alpes, bastaría erosionar una profundidad de 10 cm., lo que ocurriría en tan sólo unos 100 años, para poder formar un reactor nuclear, hace unos 3.100 a 4.100 millones de años, que consistiría en una esfera de 2m de radio de mineral de Uranio. En las condiciones climatológicas de aquellas épocas el tiempo habría sido probablemente muy inferior.

Un reactor primitivo podría estar formado por una tonelada de Oxido de Uranio y agua en cantidad suficiente para moderar neutrones y actuar de refrigerante. Los más primitivos podrían ser esferas de 0.5m de radio con algo menos de 2 Tm. de Oxido de Uranio y medio metro cúbico de agua. Si el mineral fuese menos rico en Uranio se requeriría más cantidad. Las condiciones del lugar juegan un papel importante. En rocas sedimentarias porosas o bajo poca profundidad de agua las condiciones de temperatura y presión en el reactor no pueden diferir mucho de las de los alrededores y la potencia máxima sería tan sólo de unos pocos vatios. A mayores profundidades la potencia puede ser considerablemente mayor y 1 kW podría ser una potencia media estandar con episodios de potencias muy superiores.

Hasta hoy día sólo se han encontrado los reactores de Oklo, tampoco se ha realizado una búsqueda sistemática que es difícil y costosa. Los lugares más idóneos son depósitos de edad superior a 1.000 millones de años con altas concentraciones de Uranio. Es posible también que los

reactores se autodestruyeran durante su funcionamiento, no debido a una explosión nuclear sino a un aumento considerable de la actividad química y geológica en su entorno dispersando y disolviendo el Uranio, las anomalías isotópicas y los productos de fisión. Se puede hacer, no obstante, una estimación del número de reactores naturales que pudieron existir en nuestro pasado basándose en el cociente U^{235} / U^{238} medido en distintos depósitos terrestres que es constante con un margen de variación entre 0.001 y 0.002. Esto indica que sólomente 1/1000 a 1/2000 del contenido del Uranio se ha podido consumir en reactores nucleares. Si se considera una capa de 1 km. de profundidad de la corteza terrestre, una concentración de Uranio de 3 gramos por Tonelada y un cociente medio de Uranio fisible de 0.1 se obtiene que unos 100 millones de reactores, tipo Oklo, han podido estar activos en el pasado.

Supuesta una concentración de cinco reactores por lugar y una potencia media de 1 kW durante 1 millón de años, la energía liberada resulta ser de unos 500.000 Terawatios-año. Esta energía supone toda la que consumiría la humanidad durante 45.000 años al ritmo actual. Esta impresionante cantidad de energía refleja sin embargo una potencia modesta frente a otras fuentes debido a su gran extensión temporal.

Las radiaciones ionizantes también pudieron jugar un papel importante, como fuentes energéticas, en los procesos químicos y bioquímicos primitivos. (Ozima 1.981). La contribución energética de la radiactividad en la tierra primitiva es equivalente a la de otras fuentes, como las descargas eléctricas y la radiación ultravioleta con longitudes de onda inferiores a 150 nanómetros. Aunque la contribución de los reactores nucleares naturales es sin embargo menor, un reactor situado en un fondo marino pudo ser un lugar de abundante actividad química. Además de la mayor temperatura la radiación que escapa del núcleo produce radicales libres y nuevos compuestos químicos que se difunden en el agua del océano. Si el agua hubiese llegado a circular por el interior del núcleo la irradiación habría sido superior.

La composición química de los océanos se estableció probablemente hace unos 4.100 millones de años y el papel del K^{40} en la química del océano primitivo es importante ya que este elemento se encuentra disuelto homogéneamente en el agua y al desintegrarse libera 0.5 MeV de energía. Como su periodo es de 1.28×10^9 años, su abundancia en el pasado era unas 10 veces mayor que el porcentaje actual que es de 0.01% del potasio natural. El océano primitivo contenía unos 380 gramos de Potasio por tonelada de los que 0.38 gr eran de K^{40} , dado que el

agua marina existente es de unos 1.7×10^{18} Tm, el contenido total de K^{40} es de 6.5×10^{14} kg. Considerando un periodo de tan sólo 1.000 años la energía liberada en su desintegración habría sido de 2.5×10^{39} eV. Si para sintetizar una molécula orgánica simple se requieren unos 1.000 eV y el peso molecular medio de los productos radiolíticos es de unas 100 unidades de masa atómica, se podrían haber sintetizado 1×10^{12} Kg. (mil millones de toneladas) de materia en tan sólo 1.000 años. Las radiaciones ionizantes jugaron también muy probablemente un papel muy importante en los primeros pasos de la evolución biológica. Una buena indicación de ello es que los primeros cambios evolutivos fueron debidos no a cambios morfológicos sino a cambios bioquímicos y a innovaciones metabólicas, que pudieron ser inducidas por mutaciones y radicales libres producidos por radiaciones ionizantes.

6.5.- Isótopos Extinguidos y Anomalías Isotópicas

La composición isotópica de los elementos en la naturaleza, los meteoritos y la luna es muy uniforme lo que indica que todos se formaron a partir del mismo proceso de nucleosíntesis. Lo más lógico es pensar que los demás planetas y el sol también se formaron en el mismo proceso. Hay algunas excepciones menores debidas a los procesos radiactivos ocurridos naturalmente. El más característico es el Plomo que se encuentra en minerales que fueron ricos en Uranio y Torio. Las cantidades de Pb^{206} , Pb^{207} y Pb^{208} fueron incrementándose lentamente como subproductos finales estables de las familias radiactivas correspondientes y por tanto la composición isotópica actual es función del contenido primario de Uranio y Torio. Lo mismo ocurre con el Argón y el Estroncio cuya composición isotópica depende de la abundancia inicial de sus padres Potasio y Rubidio en el momento de formación de la roca o depósito mineral.

Los elementos de la tabla periódica están clasificados por orden creciente del número atómico que coincide con un orden creciente de pesos atómicos y por columnas que responden a propiedades químicas análogas. Sin embargo para poder preservar esta última propiedad hay que admitir algunas inversiones en el orden de pesos atómicos entre dos elementos vecinos. Un ejemplo es el Argón con número atómico $Z = 18$ y un peso atómico de 39,948 mientras que el de su elemento vecino siguiente, el Potasio, es 39.098 que es menor a pesar de tener mayor número atómico, $Z=19$. La anomalía se debe a la existencia del K^{40} que es radiactivo con un Periodo de 1.280 millones de años y que se

desintegra en el Ar^{40} que es estable. La abundancia actual del K^{40} es tan sólo de 0.01% del Potasio natural pero cuando la tierra se formó era 12 veces más abundante. Una gran cantidad de Ar^{40} procedente del potasio se ha ido añadiendo al Argón primordial que es una mezcla de isótopos con números másicos 36 y 38 incrementando su peso atómico hasta su valor actual que supera el del Potasio, cuya composición primordial era una mezcla de isótopos de número másico 39 con algo de 41 y bastante de 40, que hoy día ha perdido en su mayor parte, disminuyendo el peso atómico del elemento.

Otro caso ocurre con el Telurio, de peso atómico 127,60 y número atómico $Z=53$ y el Iodo, peso atómico 126.904 y $Z= 53$. El Iodo tiene hoy día un sólo isótopo el I^{127} , pero el Iodo primordial tenía una cantidad similar de I^{129} que es radiactivo con un periodo de 17 millones de años. Hoy día el I^{129} ha desaparecido por completo y se ha transformado en el isótopo Xe^{129} , lo que ha contribuido a la disminución del peso atómico del Iodo y a un incremento del peso del Xenón.

El I^{129} es un ejemplo de radionucleidos extinguidos. Muchos de los isótopos de vida larga que hoy día producimos artificialmente existieron en la tierra primitiva. Prácticamente todos los isótopos inestables de periodos inferiores a los 100 millones de años se pueden considerar extinguidos, algunos ejemplos pueden ser el Cl^{36} con un periodo de 300.000 años, el Al^{26} con un periodo de 720.000 años y el Mn^{53} con un periodo de 3.7 millones de años, así como todos los transuránidos cuyos isótopos de mayor periodo son el Np^{237} con 2.14 millones de años y el Pu^{242} con 376.000 años. El tristemente célebre Pu^{239} vive sólo 24.110 años. Los actínidos siguientes son de vidas mucho más cortas.

CAPÍTULO 7.- LA RADIATIVIDAD EN LA TIERRA ACTUAL

La radiactividad existente actualmente en la tierra tiene su origen en tres fuentes: los radionucleidos naturales, la radiación cósmica y los radionucleidos que ella origina y desde hace medio siglo los radionucleidos producidos artificialmente por el hombre.

Los radionucleidos naturales actuales proceden de los que existieron en el momento de la formación de la tierra. Hoy día se han detectado 15 especies de radionucleidos primordiales pero, con la mejora de la

sensibilidad de los métodos de detección, es posible que se puedan encontrar trazas de algunos más. Sus periodos varían entre los 704 millones de años del U^{235} a los 10^{16} años del Sm^{149} . Su actividad es, en todos los casos, muy pequeña y por tanto son muy difíciles de medir. De todos los radionucleidos naturales tres son de especial relevancia porque se encuentran repartidos muy uniformemente por todo el planeta. Se trata del Uranio y el Torio porque originan familias radiactivas muy largas y el Potasio que forma parte de la sal del agua marina y de todos los seres vivos.

La radiación cósmica es, además de una fuente radiactiva natural, una productora de nuevos elementos radiactivos como el C^{14} . Por último, el hombre ha logrado producir más de un millar de isótopos radiactivos, unos se utilizan con fines científicos y comerciales, otros son subproductos de pruebas y accidentes nucleares.

7.1 Radionucleidos naturales

7.1.1.- El Uranio

Los nombres de los que se creía que eran los tres últimos elementos químicos de la tabla periódica recibieron el nombre de los tres últimos planetas del sistema solar. El Uranio debe su nombre al del Planeta Urano. Hoy día hay más planetas tras Plutón y más elementos químicos tras el Plutonio. El Uranio natural actual es una mezcla de dos isótopos que primordialmente eran igualmente abundantes. El 0.72% es U^{235} que tiene un periodo de 704 millones de años y el 99.28% restante es U^{238} que vive 4.460 millones de años. Ambos originan familias radiactivas que están detalladas en las tablas 7.2 y 7.3 y en los minerales se encuentran en equilibrio radiactivo con sus descendientes como indicamos en la tabla 7.1

Tabla 7.1.- Cantidades de Nucleidos existentes, en equilibrio radiactivo, en una Tonelada de Uranio natural.

Nucleido	Abundancia	Nucleido	Abundancia
U-238	992.9 kg.	Ac-227	0.21 mg.
U-235	7.1 Kg.	Ra-226	340 mg.
U-234	54 g.	Pb-210	3.77mg.
Pa-231	334mg	Po-210	7.4 mg.
Th-230	16 g.	Fr-223	4.7 pg.

Tabla 7.2. Familia radiactiva del U²³⁵

Cadena Principal			Cadena Secundaria		
Elemento	Desintegración	Periodo	Elemento	Desintegración	Periodo
U-235	alfa	7,04 x 10 ⁸ años			
Th-231	beta	25,2 horas			
Pa-231	alfa	32700 años			
Ac-227	beta	21,77 años	Ac-227	alfa	21,77 años
Th-227	alfa	18,72 días	Fr-223	alfa	21,8 s.
Ra-223	alfa	11,43 días	At-219	alfa	54 s.
Rn-219	alfa	3,96 s.	Bi-215	beta	7,4 min.
Po-215	alfa	1,78ms.	Po-215	beta	1,78 ms.
Pb-211	beta	36,1 min.	At-215	alfa	100 ms.
Bi-211	alfa	2,14 min.	Bi-211	beta	2,14 min.
Tl-207	beta	4,77 min.	Po-211	alfa	0,52 s.
Pb-207		Estable	Pb-207		Estable

El U²³⁵ es fisible, de ahí la importancia estratégica del Uranio. Hay un isótopo, producido artificialmente a partir del Torio como veremos más adelante, el U²³³ que también es un buen combustible nuclear.

En promedio hay 5 partes por millón de Uranio en la corteza terrestre y las reservas conocidas que contienen una concentración superior a 1 Kg. por Tonelada se calcula que albergan unos 5 millones de Toneladas. Las estimaciones más optimistas aumentan estas reservas en un factor 3 o 4. En los océanos la acumulación de Uranio se estima en unos 4.000 millones de Toneladas aunque su posible explotación no está a la vista dada su extrema dilución. La radiactividad de 1 gramo de Uranio en equilibrio con sus descendientes libera una potencia de 0.95 erg./s. La fisión de un gramo de U²³⁵ produce en cambio 8.21x10¹⁷ ergios. Si este proceso se efectuase también en un segundo la energía liberada sería un factor casi 10¹⁸ veces mayor que la debida a su actividad, lo que equivaldría a una potencia de 820 millones de kilowatios.

Tabla 7.3. Familia radiactiva del U²³⁸

Cadena Principal			Cadena Secundaria		
Elemento	Desintegración	Periodo	Elemento	Desintegración	Periodo
U-238	alfa	4,47 x 10 ⁹ años			
Th-234	beta	24,1 días			
Pa-234	beta	6.70 horas			
U-234	alfa	245.000 años			
Th-230	alfa	75.400 años			
Ra-226	alfa	1.600 años			
Rn-222	alfa	3,82 días			
Po-218	alfa	3,11 min.	Po-218	beta	3,11min.
Pb-214	beta	26,9 min.	At-218	alfa	1,6 s.
Bi-214	beta	19,9 min.	Bi-214	alfa	19,9 min.
Po-214	alfa	163 ms.	Tl-210	beta	1,30 min.
Pb-210	beta	22,3 años	Pb-210	alfa	22,3 años
Bi-210	beta	5,01 días	Hg-206	beta	8,5 min.
Po-210	alfa	138,4 días	Tl-206	beta	4,20 min.
Pb-206		Estable	Pb-206		Estable

En el organismo humano el Uranio se encuentra principalmente concentrado en el cerebro y en el corazón. La cantidad total que contiene un ser humano es de unos 100 microgramos, aunque varía de unos individuos a otros según su alimentación, o más precisamente, varía con la composición del suelo y los fertilizantes usados en la producción de los alimentos agrícolas que las personas consumen. Algunos fertilizantes químicos contienen cantidades apreciables de Uranio proveniente de los fosfatos utilizados en su fabricación.

Desde el punto de vista de la radiactividad natural, dada su escasa abundancia, el U²³⁵ y sus descendientes juegan un papel muy poco importante frente al que desempeñan el U²³⁸ y los suyos. Entre los descendientes del U²³⁸ se encuentran dos nucleidos de especial

importancia para la humanidad el Ra^{226} y el Rn^{222} . El Radio Ra^{226} fue el descubierto por el Matrimonio Curie y es el único isótopo, de los 16 que se conocen, que tiene larga vida, 1.600 años. Hasta el advenimiento de la energía nuclear, el Uranio se extraía fundamentalmente para la producción de Radio para usos médicos y de investigación. Sin embargo durante toda la primera mitad de este siglo tan sólo se habían extraído unos pocos kilogramos Ra^{226} y es sorprendente que, tan pequeña cantidad de un elemento químico, causase el enorme impacto que produjo en multitud de campos y actividades de la humanidad. El Radio se encuentra prácticamente en todas las rocas, suelos y aguas de cualquier origen. Químicamente es similar al Calcio por lo que es absorbido por las plantas y transferido al organismo humano y animal a través de la cadena alimentaria. En promedio la radiactividad que un ser humano produce debida a su contenido en Radio y sus descendientes es 1 Becquerelio, es decir una desintegración por segundo.

El Ra^{226} es radiactivo alfa y ha servido hasta muy recientemente para definir la unidad de actividad radiactiva. 1 g. de Radio tiene una actividad de 1 Ci (Curio) que son 3.7×10^{10} Bq. o desintegraciones por segundo (treinta y siete mil millones de desintegraciones por segundo).

Su hijo es el Rn^{222} , un gas noble, radiactivo alfa, con un periodo de 3.8 días, que hasta muy recientemente no se ha tenido apenas en cuenta desde el punto de vista ambiental. No existe en nuestro planeta un lugar en el que no exista Radón. Como gas químicamente inactivo escapa con facilidad del lugar de su nacimiento y se difunde por la atmósfera. Como su padre, el Ra^{226} es soluble, móvil y se encuentra uniformemente repartido por toda la corteza terrestre, el Radón se origina, prácticamente, en todos los lugares.

En nuestra vida ordinaria el Radón se encuentra en el aire que respiramos y es emanado por la tierra, los materiales de construcción y las aguas. Los lugares poco ventilados pueden tener importantes concentraciones de Radón en el aire, sobre todo si sus paredes son ricas en Uranio y llegar a convertirse en un peligro para la salud. Un estudio realizado ya en los años 40, en los trabajadores de las minas de Uranio de Bohemia y Babarúa, puso de manifiesto que hasta un 75% de ellos sufrieron cáncer de pulmón probablemente debido a la respiración de Radón.

En las grietas que se forman en los terremotos y en las erupciones volcánicas suele tener lugar una liberación importante del Radón retenido entre las rocas. En la erupción del Volcán Santa Elena, en

1.980, en los Estados Unidos, se estima que se liberaron unos 3 millones de Curios (1.1×10^{17} Bq) en forma de Radón. Las zonas graníticas y los edificios basados en este material producen más Radón que los construidos con otros materiales. El gas penetra en el organismo humano a través de dos caminos bastante eficientes y peligrosos, el aire que respiramos y el agua que bebemos. El Radón en si mismo es químicamente inocuo y se expulsa de nuevo con facilidad pero su desintegración es alfa y sus productos de desintegración son sólidos y de vida corta. Entre ellos el Polonio es especialmente perjudicial por ser a su vez, también, un emisor de partículas alfa bastante energéticas.

7.1.2.- El Torio

El Torio debe su nombre al Dios de la guerra escandinavo Thor y es el que le impuso, en 1.828, su descubridor el científico Sueco Berzelius. El Torio natural es un isótopo único, el Th^{232} . Hoy día se conocen 12 isótopos radiactivos del Torio. Es un elemento con un comportamiento geológico y una distribución en nuestro planeta muy similar a la del Uranio, aunque es mucho más abundante, casi tres veces más. En promedio, la concentración de Torio en la corteza terrestre es de algo más de 1 parte por cien mil. Se conocen varios depósitos importantes de mineral, en Brasil y la India, aunque están prácticamente sin explotar. Su mayor utilización, hasta ahora, se ha limitado a la fabricación de las mallas incandescentes de las lamparas de gas, hoy día en desuso. Las reservas conocidas se estiman en una cantidad similar a la existente de Plomo.

El Torio no es un elemento fisible pero a partir de él, por bombardeo de neutrones, se puede producir el U^{233} que es un excelente combustible nuclear. Esta tecnología todavía no está comercialmente explotada aunque se estima que la energía extraíble a partir de las reservas existentes de Torio es superior a la del Uranio sumada a la de todos los combustibles fósiles juntos (Carbón, Petróleo y Gas). El proyecto del amplificador de energía, que propugna el Premio Nobel de Física Carlo Rubbia, está basado en la utilización del U^{233} como combustible, generado a partir de Torio. Si finalmente este proyecto se convierte en un sistema industrial puede llegar a ser una de las principales fuentes de producción de energía en la tierra. Entre sus ventajas cuenta, además de la abundancia del combustible, con la no producción de Actínidos, eliminando uno de los mayores inconvenientes de la energía nuclear basada en el Uranio.

Aunque el Torio es un elemento más abundante que el Uranio las actividades globales de ambos son equivalentes porque su periodo es mayor, 1.41×10^{10} años y por tanto menor su actividad específica. La radiactividad de 1 g. de Torio en equilibrio con sus descendientes produce 0.27 erg./s (frente a 0.95 erg./s en el Uranio). La familia del Torio contiene un buen número de elementos radiactivos cuyas características principales se encuentran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Familia Radiactiva del Torio

Rama Principal			Rama Secundaria		
Nucleido	Desintegración	Periodo	Nucleido	Desintegración	Periodo
Th-232	alfa	$1,4 \times 10^{10}$ años			
Ra-228	beta	5,75 años			
Ac-228	beta	6,13 horas			
Th-228	alfa	1,91 años			
Ra-224	alfa	3,66 días			
Rn-220	alfa	55,6 s			
Po-216	alfa	0,15 s	Po-216	beta	0,15 s
Pb-212	beta	10,64 horas	At-216	alfa	300 ms
Bi-212	alfa	1,009 horas	Bi-212	beta	1,009 horas
Tl-208	beta	3,052 min.	Po-212	alfa	0,3 ms
Pb-208		Estable	Pb-208		Estable

Entre los descendientes del Torio también se encuentra un isótopo del Radio, el Ra^{224} , no utilizable en la práctica puesto que su periodo es de tan sólo de 3,66 días. El hijo del Ra^{224} es también un isótopo del Radón el Rn^{220} , conocido también como Torón, que hasta hace pocos años no se ha tenido en cuenta en estudios medioambientales por su cortísima semivida, 55,6 s., lo que dificulta su difusión desde el punto de producción. No obstante dada la abundancia del Torio existe también una abundante producción de Torón que, en determinadas circunstancias, puede llegar a ser peligroso como en minas y locales muy poco ventilados.

7.1.3.- Otros elementos radiactivos naturales

Existen en la naturaleza otros elementos radiactivos naturales aunque no originan largas familias radiactivas. Entre los más relevantes se encuentran el K^{40} ($T_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años), el Rb^{87} ($T_{1/2} = 4.9 \times 10^{10}$ años), el Lu^{176} ($T_{1/2} = 3.6 \times 10^{10}$ años), el Sm^{147} ($T_{1/2} = 1.08 \times 10^{11}$ años), el Sm^{148} ($T_{1/2} = 7 \times 10^{15}$ años), el Sm^{149} ($T_{1/2} = 1 \times 10^{16}$ años) y el Re^{187} ($T_{1/2} = 4.5 \times 10^{10}$ años).

De todos ellos el K^{40} es el que juega un papel más importante en el ambiente radiactivo natural y en la vida humana. Actualmente es tan sólo el 0.0117% del Potasio natural pero hay que tener en cuenta que este elemento es muy abundante. Hay unos 10 kg. de Potasio en una Tonelada de arenisca y 35 kg. en una de granito. En el agua del mar hay 380 gramos de Potasio por Tonelada. La energía producida por la desintegración beta del K^{40} es la mayor contribución al calor generado por las sustancias radiactivas en la corteza terrestre y, a lo largo de la historia de la tierra, la contribución total a la energía suministrada a los océanos por este elemento ha sido considerable. El cuerpo humano contiene un promedio de 140 gramos de Potasio, de los que unos 17 mg son de K^{40} . Es la sustancia radiactiva predominante en nuestro organismo y produce una actividad de unos 3.900 Bq. (desintegraciones por segundo).

7.2.- La Radiación Cósmica. Radionucleidos de Origen Cosmogénico

La radiación cósmica consiste fundamentalmente en un bombardeo de protones, o núcleos de Hidrógeno, de alta energía, procedentes del espacio exterior. En ella se encuentra también una cierta proporción de electrones y núcleos más pesados, como Helio, e incluso se ha llegado a detectar núcleos con número másico superior a 100. Su origen es exterior al sistema solar y en su mayor parte proceden del centro de nuestra galaxia aunque algunos pueden ser de origen extragaláctico. Se conoce poco sobre el origen de esta radiación y los mecanismos que pueden acelerar las partículas a velocidades próximas a la de la luz. Se supone que se producen en las explosiones de las supernovas y en los pulsares y adquieren energía también en ondas de choque en el medio interestelar. La energía de estas partículas es muy elevada y se ha llegado a detectar partículas con 10^{11} GeV (10^{20} eV). Su flujo

disminuye con la energía y hoy día 20 años después de haberse detectado por primera vez una partícula con una energía de 10^{11} GeV sólo se han detectado 10 más. Lo más abundante en la radiación cósmica primaria son protones con una energía de unos 2 GeV y los que poseen una energía 1.000 veces mayor tienen un flujo 10 millones de veces menor.

El sol emite en algunas ocasiones, en las llamadas erupciones solares, enormes cantidades de protones que llegan a la tierra con un flujo varios ordenes de magnitud superior al de la radiación cósmica primaria. Sin embargo sus energías promedio son muy inferiores, se encuentran en el rango de los miles de eV, la máxima puede llegar a 100 MeV, son, pues, protones que se mueven despacio en el mundo subnuclear.

La frecuencia de estos sucesos está ligada al ciclo de 11 años de las manchas solares. Las llamaradas son ópticamente visibles durante una hora aproximadamente pero el flujo de radiación energética se detecta en la tierra durante unas 48 horas. Estos protones no tienen suficiente energía para penetrar en la atmósfera y alcanzar la superficie terrestre quedando normalmente atrapados en el campo magnético terrestre formando el llamado cinturón exterior de Van Allen. Los más energéticos alcanzan la alta atmósfera y se acumulan en regiones muy estrechas alrededor de los polos magnéticos produciendo las conocidas auroras boreales.

Los protones de la radiación cósmica galáctica al incidir con la alta atmósfera, constituida fundamentalmente por núcleos de Hidrógeno y Helio, producen reacciones nucleares con la formación de otros núcleos y varios piones. Los nuevos núcleos suelen tener altas energías y a su vez producen nuevas reacciones. Los piones son partículas inestables, con una masa de unas doscientas setenta veces la del electrón, pueden ser neutros o cargadas eléctricamente tanto positiva como negativamente. En la atmósfera se producen, predominantemente, en dirección hacia la superficie terrestre. Una interacción protón - núcleo puede dar lugar a varios piones. Los piones no llegan a la superficie terrestre, muchos inducen nuevas reacciones nucleares y el resto se desintegra en vuelo en muones y neutrinos excepto los piones neutros que lo hacen en dos rayos gamma.

Los muones son partículas cargadas muy similares al electrón, aunque pueden tener también carga eléctrica positiva, pero con una masa de unas doscientas seis veces la de éste. Estos muones son también inestables y se desintegran, en vuelo, en electrones y neutrinos. Sin

embargo muchos de ellos llegan a la superficie terrestre y producen reacciones nucleares al interactuar con los constituyentes de la superficie. En muchas de estas reacciones se producen neutrones que, a su vez, originan nuevas reacciones nucleares. Los electrones producidos en la atmósfera también son energéticos y producen nuevos electrones y fotones al ionizar los átomos del aire. El número de partículas que pueden llegar a la tierra procedentes de un único protón cósmico depende de la energía del mismo. Un protón de 6 GeV puede llegar a producir un chaparrón de más de 10.000 millones de partículas en la superficie terrestre.

Las características más sobresalientes de las partículas elementales envueltas en la radiación cósmica se encuentran en la tabla 7.5 y las de los flujos de la radiación cósmica en la superficie terrestre en la tabla 7.6 en la que se representan valores promedio de partículas cargadas.

Tabla 7.5.- Características de las partículas más comunes envueltas en la Radiación Cósmica

Partícula	Símbolo	Masa (MeV)	Es-pín	Carga	Periodo	Desintegración
Protón	p	938,3	1/2	+1	Estable	
Neutrón	n	939,6	1/2	0	1114 s.	p+e+v _e
PiÓN cargado	π^{\pm}	139,57	0	+1, -1	2.60x10 ⁻⁸ s.	$\mu + \nu_{\mu}$
PiÓN neutro	π^0	134,96	0	0	0.87x10 ⁻¹⁶ s.	$\gamma + \gamma$
Muón	μ^{\pm}	105,6	1/2	+1,-1	2.197x10 ⁻⁶ s.	e+v _e + ν_{μ}
Neutrino e	ν_e	0	1/2	0	Estable	
Neutrino μ	ν_{μ}	0	1/2	0	Estable	
Electrón	e^{\pm}	0,511	1/2	+1, -1	Estable	
Fotón	γ	0	1	1	Estable	

Aproximadamente el 75% de las partículas de la Radiación Cósmica al nivel del mar son penetrantes y en su mayoría son muones, de ambos signos, que constituyen la parte fundamental de la llamada componente dura. En ella también hay entre un 3 y un 4% de protones si bien las proporciones dependen de la energía de las partículas. El flujo medio de muones al nivel del mar tiene una energía de unos 2 GeV con un espectro diferencial que varía con la energía desde E⁻² hasta E^{-3.6} a unos pocos

TeV. La distribución angular varía como $\cos^2 q$, siendo q el ángulo azimutal y el número de partículas de carga eléctrica positiva es 1.25 veces superior al de las de carga negativa. La energía media de los muones que se originan en la atmósfera es de unos 300 GeV y llegan a penetrar unos cientos de metros en la superficie terrestre. A profundidades mayores de unos 10 km. equivalentes de agua los muones existentes se deben a las interacciones de neutrinos con la materia. Los muones de esta procedencia tienen una energía media de 20 GeV y un flujo de unos $2 \times 10^{-9} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$ en la dirección vertical y el doble en la horizontal.

En la Tabla 7.6 se indica por I_n el flujo de partículas cargadas en la dirección vertical por unidad de ángulo sólido y por unidad de superficie horizontal. J_1 indica el flujo total que cruza una superficie horizontal desde arriba y J_2 el flujo que incide desde arriba en una esfera cuya sección es la unidad de área. $I_n = j(q=0, f)$ $J_1 = \int j(q, f) \cos q \, dW$ ($q \in [0, \pi/2]$), $J_2 = \int j(q, f) \, dW$ ($q \in [0, \pi/2]$).

Tabla 7.6.- Propiedades de la Radiación Cósmica al nivel del mar

Flujo	Intensidad Total	Componente Dura	Componente Blanda
$I_n \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$	1.1×10^2	0.8×10^2	0.3×10^2
$J_1 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.8×10^2	1.3×10^2	0.5×10^2
$J_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	2.4×10^2	1.7×10^2	0.7×10^2

Desde un punto de vista estrictamente radiactivo la radiación cósmica produce, con un ritmo constante, unos 20 radionucleidos diferentes, debido a la interacción de la radiación secundaria con los núcleos de los elementos constituyentes de la baja atmósfera en la que los más abundantes son el Nitrógeno, el Oxígeno y el Argón. Los elementos producidos más relevantes se encuentran en la tabla 7.7. Tanto la producción como la desintegración de estos radionucleidos cosmogénicos son constantes y por lo tanto su acumulación en la superficie terrestre también lo es. Hay muchos otros con periodos muy cortos como el Cl^{39} , con 56 minutos, que tienen una menor importancia.

Tabla 7.7.- Radionucleidos cosmogénicos más abundantes

Nucleido Producido	Periodo (años)	Producción media Átomos/m ² .año	Cantidad total en la Superficie Terrestre
H ³ Tritio	12,33	1.6 x 10 ¹¹	7 kg.
Be ¹⁰	1,6 x 10 ⁶	1.26 x 10 ¹⁰	430 Toneladas
C ¹⁴	5.730	7 x 10 ¹¹	75 Toneladas
Al ²⁶	7,2 x 10 ⁵	4.8 x 10 ⁷	1.1 Toneladas
Si ³²	104	5 x 10 ⁷	2 kg.
S ³⁵	0,24	4.8 x 10 ⁸	4.5 gr.
Cl ³⁶	3,01 x 10 ⁵	5 x 10 ⁸	15 Toneladas
Ar ³⁹	269	4.2 x 10 ¹¹	

Para los seres vivos el más importante de los radionucleidos cosmogénicos es el C¹⁴ que se produce al interaccionar neutrones térmicos con núcleos de Nitrógeno y liberarse un protón N¹⁴ (n,p) C¹⁴. Como su periodo es muy largo, 5.730 años, el C¹⁴ se mezcla con todo el Carbono contenido en la atmósfera y la biosfera. Los seres vivos al asimilar el Carbono natural también incorporan la parte correspondiente del Carbono radiactivo. La radiactividad del cuerpo humano debida a este radioisótopo es de unos 3.700 Bq. comparable por tanto a la del Potasio. Sin embargo la energía emitida por el C¹⁴ al desintegrarse, mediante un proceso beta, es muy pequeña y su contribución energética es unas 10 veces inferior a la del Potasio.

La proporción de C¹⁴ radiactivo en el Carbono total que contiene un ser vivo es constante mientras vive, pero la incorporación del mismo cesa con la muerte. La materia orgánica muerta va perdiendo el Carbono radiactivo por desintegración natural y midiendo su proporción se puede calcular el tiempo que ha transcurrido desde su muerte. Esta es la esencia del llamado método del C¹⁴ para la determinación de la edad, que fué uno de los primeros métodos radiactivos que se utilizó para ese fin y uno de los más exitosos en escalas de tiempo del orden del milenio.

El Tritio se forma en la alta atmósfera y una parte de él se combina con el Oxígeno formando agua que alcanza la superficie terrestre y se incorpora a las cadenas biológicas. La energía de sus partículas beta es de las menores que se conoce, tan sólo 19 KeV y su contribución a las dosis totales para el organismo humano es muy pequeña comparada con la del Carbono. Globalmente, aunque su producción es relativamente escasa, 0.5 átomos por centímetro cuadrado y segundo, contribuye con más de 80 millones de Curios (3×10^{18} Bq) a la radiactividad natural de la tierra.

La radiación cósmica directa no supone un riesgo para los seres vivos en la superficie terrestre pues los campos magnéticos terrestres y la atmósfera proporcionan un blindaje suficiente. La dosis anual media recibida al nivel del mar es de 0.0003 Sieverts. Sin embargo no ocurre lo mismo en la alta atmósfera o el espacio exterior. Durante una erupción solar, como la ocurrida en 1.972 se podrían haber alcanzado dosis letales (10 Sieverts) en tan sólo 24 horas de exposición en la alta atmósfera.

Aunque la experiencia habida hasta la fecha con los cosmonautas en el espacio exterior, en el que han llegado a permanecer hasta 1 año, no indica problemas debidos a la radiación cósmica directa, hay una dependencia con la altura a que se encuentran las estaciones espaciales. Su inclinación respecto al eje magnético terrestre Norte - Sur es importante para determinar el grado de protección que puede suministrar el campo magnético terrestre. En un satélite a 400 km. de altura la dosis media puede llegar a ser de unos 0.32 Sievert o sea 1000 veces superior a la del nivel del mar. La protección de las naves espaciales fuera de la magnetosfera requiere un blindaje de 7 a 9 cm. de Aluminio o equivalente. Un blindaje de mayor espesor es pesado e inútil ya que un grosor añadido de 20 cm. tan sólo reduce la dosis en algo menos del 20%.

Los vuelos de aviones entre 10 y 20 km. de altura suponen también un incremento de la dosis recibida, que puede llegar a los 10 o 20 microSievert (1 a 2 miliRem) por hora de vuelo si no hay erupciones solares, que podrían incrementarla en factores 1.000 a 10.000. La normativa de protección radiológica actual considera a las tripulaciones de los aviones como profesionalmente expuesto a las radiaciones ya que el personal de los vuelos transatlánticos puede llegar a acumular dosis anuales superiores a los 5 miliSieverts (500 miliRem) al año que son las máximas permitidas para el público en general. Un vuelo España - Estados Unidos de 7 horas supone unos 35

mSv y uno supersónico de 3 horas pero a mayor altura unos 39 mSv. Un mes en la playa supone unos 11 mSv y uno en la alta montaña 36 mSv.

7.3.- Radionucleidos artificiales

El hombre ha sido capaz de producir más de un millar de nucleidos artificiales, la mayoría en cantidades muy pequeñas exclusivamente para investigación científica. Casi todos son de periodos muy cortos y su utilidad, por ahora, es muy limitada. No existe ningún elemento químico del que no se conozcan al menos tres isótopos y algunos, como el Cesio, llegan a tener 33. Los isótopos de mayor producción son los que encuentran una aplicación práctica en la ciencia, la medicina o la industria y no sobrepasan las dos docenas.

El problema más importante de la utilización de los radionucleidos es su control y su almacenamiento una vez utilizados. El control está a cargo de organismos nacionales que efectúan un seguimiento desde la producción hasta su almacenamiento final. En el caso de España el organismo encargado es el Consejo de Seguridad Nuclear. Lo más difícil es sin duda el control durante la utilización del radioisótopo que, inspecciones aparte, tiene que basarse esencialmente en la formación y el buen hacer del usuario.

Hay tres fuentes importantes de radioisótopos que merecen mención especial. La primera la constituyen los radionucleidos artificiales procedentes de pruebas nucleares en la atmósfera y accidentes nucleares, que podemos medir pero obviamente no podemos controlar. La segunda es la de los radionucleidos procedentes de la actividad humana en hospitales, laboratorios e industria que podemos medir y controlar y la tercera la de los elementos combustibles irradiados de las plantas nucleares que es quizá la mejor controlada aunque la decisión sobre su almacenamiento o tratamiento final está aún por ser tomada.

7.3.1.- Consecuencias de las pruebas nucleares

Hasta la fecha se han efectuado algo más de 1.570 pruebas nucleares. Las primeras explosiones en la atmósfera tenían una potencia media de unos 20 kilotones y emitían aproximadamente 1 kg. de productos de fisión y unos pocos kilogramos de Plutonio. Estos productos, en forma aerosoles o pequeñas partículas de polvo, se difunden con bastante rapidez por el hemisferio correspondiente, fundamentalmente el norte y posteriormente pasan a través del ecuador al hemisferio opuesto y se

pueden detectar en el agua de lluvia y en forma de depósito seco o en otras palabras polvo. La actividad fué aumentando con el número de pruebas en la atmósfera hasta 1.962 año en el que los Estados Unidos en el Pacífico y los Soviéticos en el Ártico llevaron a cabo una serie de explosiones de potentísimos ingenios que liberaron 217 megatones. En ellas se emitió a la atmósfera más radiactividad, productos de fisión y Plutonio que en todas las pruebas anteriores juntas y produjeron un incremento sustancial de los niveles de radiación ambiental en nuestro planeta.

La preocupación mundial, incluida la de los propios causantes, fué el origen del ya mencionado tratado de prohibición de pruebas nucleares en la atmósfera de 1.963. Gracias a él los niveles actuales de radiación ambiental han llegado a ser prácticamente los que existían antes de que se efectuase ninguna prueba nuclear. La disminución en la atmósfera se debe a la precipitación y a la desintegración. La distribución por países de las 1.570 explosiones habidas hasta 1.985 se encuentra en la tabla 7.8. Con posterioridad a esta fecha las pruebas efectuadas han sido muy pocas y todas subterráneas sin liberación de radionucleidos.

Tabla 7.8. Distribución por países de pruebas nucleares conocidas hasta 1.985.

País	Número de Pruebas
Estados Unidos	805
Unión Soviética	562
Francia	134
Gran Bretaña	39
China	29
India	1

El número total de kilotones se estima en unos 750.000, que han liberado una radiactividad de 2.77×10^{24} Bq o 7.5×10^{13} Ci (75 billones de Curios). Esta cifra hay que compararla con la actividad total estimada de la litosfera que es sólo 4 veces mayor, 3.0×10^{14} Ci, con la de los océanos que es 166 veces menor, 4.5×10^{11} Ci y con toda la existente para usos pacíficos incluidas las centrales nucleares que es unos 4.5×10^{12} Ci o sea 16 veces inferior. A pesar de todo las dosis totales que las pruebas nucleares han producido en la población se estiman en unos 150 mRem para los habitantes del hemisferio norte y

unos 100 mRem para la población mundial en su conjunto. Es decir la dosis máxima recomendada para los trabajadores profesionalmente expuestos en una semana.

Los principales radionucleidos que se liberan en una explosión nuclear en la atmósfera son depositados en lugares cercanos al lugar. Los que se difunden por la troposfera tienen un periodo de residencia media de 1 mes, mientras que los que alcanzan la estratosfera, a una altura de 10 a 15 km., permanecen durante meses e incluso años. Los radionucleidos más importantes son los que figuran en la Tabla 7.9

Tabla 7.9.- Radionucleidos liberados en una explosión nuclear

Radionucleido	Periodo
I ¹³¹	8 días
Zr ⁹⁰	64 días
Ce ¹⁴⁴	284 días
Ru ¹⁰³	40 días
Ru ¹⁰⁶	1 año
Cs ¹³⁷	30.17 años
Sr ⁹⁰	29 años
C ¹⁴	5.730 años

La actividad principal de los productos de fisión procede del Cs¹³⁷ y del Sr⁹⁰.

Las pruebas nucleares subterráneas no liberan productos radiactivos al ambiente. La explosión produce una cavidad de escasos metros de diámetro y la alta temperatura origina la vitrificación total de una gruesa capa en toda la superficie interior de roca, dejando encerrados en ella todos los productos producidos en la explosión e impidiendo la salida de la radiactividad. Fuera de esta esfera no hay ningún efecto radiactivo detectable pues el blindaje de la pared vítrea es prácticamente total para todos los tipos de radiación.

7.3.2.- Los accidentes nucleares

Ha habido dos accidentes importantes en centrales nucleares en el más del medio siglo que llevan de existencia. El primero en la central de la

isla de las tres millas en Estados Unidos no liberó a la atmósfera ninguna radiactividad ni produjo irradiación a personas incluido el personal propio de la central. El segundo fué el de la central de Chernobyl en Ucrania en el que se produjo una explosión, no nuclear, que evaporó parte del núcleo del reactor y produjo una importante liberación a la atmósfera de productos de fisión y daños a personas.

El origen de la explosión fué la acumulación de Hidrógeno producida por la reacción del agua de refrigeración con el Circonio de la vainas de los elementos combustibles cuando la temperatura de éstos, por falta de refrigeración, alcanzó los 900 grados centígrados. En el caso de la central de la isla de las tres millas hubo un fallo en la refrigeración que unido a fallos humanos terminó provocando la fusión de algunos elementos combustibles. Se formó también hidrógeno pero el sistema de seguridad de la central lo retuvo y lo fué liberado poco a poco sin producirse explosión alguna. La alarma que se produjo se debió a las medidas precautorias que se tomaron, de evacuación de los habitantes la zona cercana, por si por alguna causa el hidrógeno explosionase. Afortunadamente el tipo de central de agua a presión y su diseño con arreglo a las normas occidentales impidieron una catástrofe. El accidente aunque con una probabilidad de frecuencia inferior a 1 en un millón por año sirvió para revisar todos los sistemas de diseño y seguridad occidentales y a partir de él todas las centrales se modificaron para ser aún más seguras. Hoy día las centrales nucleares occidentales son las instalaciones humanas que gozan de mayor coeficiente de seguridad.

El caso de Chernobyl merece un comentario algo más detallado. La central, de diseño Soviético, es un reactor tipo RBMK, de grafito-agua, estandarizado, de 1000 MW(e) de potencia del que existen en la antigua Unión Soviética y países socialistas 14 unidades (contando Chernobyl 4) más otras 4 en construcción. Existe también una planta del mismo tipo en Ignalino (Rusia) de 1500 MW(e) que se considera prototipo para las de la siguiente generación. Los reactores comercializados en occidente tienen sólo un tipo de moderador o bien agua en la inmensa mayoría o bien grafito en unos pocos. Una de las características más significativas de los reactores RBMK es la existencia de dos moderadores agua y grafito, aunque el agua tiene como misión fundamental la refrigeración. Como consecuencia el RBMK es más reactivo sin agua o con vapor que con agua líquida, lo que induce una inestabilidad nuclear - termodinámica cuyo control está confiado, por la tecnología soviética, al propio del reactor y sus operadores.

El reactor es un apilamiento de bloques prismáticos de grafito de 25 cm de lado y 7 m de altura que conforman un quasicilindro de dicha altura y 11.8 m de diámetro. De las 2.448 columnas, 1.661 contienen canales verticales de 8 cm de diámetro para alojar el combustible y el paso de agua y 222 para barras de control e instrumentación. El combustible está en barras de Zircaloy de 1,35 cm de diámetro. El agua asciende por los tubos con una presión de unos 70 bares y un 15% aproximadamente se convierte en vapor a 280 °C que es separado a la salida para ser utilizado en turbinas y tras condensarlo reincorporado al circuito.

En Hanford, en los Estados Unidos, hay 6 reactores de grafito para la producción de Plutonio y aunque uno de ellos de 860 MW(e) suministra vapor a una turbina nunca se ha considerado la posibilidad de comercializar este tipo de reactores debido a sus inestabilidades intrínsecas. La inmensa mayoría de los pocos reactores de grafito existentes en occidente (EE.UU., UK y Francia) están dedicados a la producción de Plutonio para uso militar. Son reactores de grafito - gas, sin agua excepto los Canadienses tipo CANDU que son de grafito y agua pesada. Los criterios de seguridad occidentales exigen que los reactores de moderador líquido (prácticamente todos los comerciales que existen actualmente en el mundo occidental) estén submoderados, lo que implica una realimentación negativa de reactividad y asegura una total estabilidad en el reactor. Esto imposibilita la existencia de inestabilidades tipo Chernobyl. Por otra parte todas las centrales occidentales tienen un recinto de contención de acero a prueba de impactos exteriores (deben soportar el impacto de un avión tipo Jumbo) y explosiones interiores, vasija que se ubica dentro del edificio de hormigón exterior. En las centrales Soviéticas nada de esto existe.

En Chernobyl el accidente se produjo cuando se decidió realizar un ejercicio para tratar de estudiar mejoras en los dispositivos de seguridad del reactor. De nuevo hay profundas diferencias de metodología entre ambos mundos. En occidente cuando se efectúa cualquier intervención en un reactor se sigue la norma de seguridad a ultranza y antes de ejecutar un protocolo, muy bien definido en todos sus pasos, se realiza un estudio exageradamente exhaustivo de todas las implicaciones que cada paso conlleva en todos y cada uno de los parámetros de funcionamiento.

En Chernobyl la paradoja sarcástica es que se quiso realizar un ejercicio de seguridad sin los necesarios requisitos de seguridad. Los especialistas Rusos de Chernobyl querían demostrar que la energía eléctrica decreciente, producida por el alternador a partir de la inercia de la aletas de la turbina, ya sin vapor, podía ser utilizada para

alimentar determinados componentes del sistema de refrigeración de emergencia, durante periodos cortos hasta la entrada en funcionamiento de los generadores diesel auxiliares. Nunca se ha oído ni pensado un experimento igual en occidente. El experimento no necesitaba, ni tan siquiera, el funcionamiento del reactor, ni la exigencia de violar ninguna prescripción de funcionamiento. Sin embargo, tanto en el protocolo de la prueba que después, ante la presión occidental, entregaron a la IAEA las autoridades Soviéticas, como en la actuación de los operadores, se prefirió reducir los márgenes de seguridad de la central a mínimos inimaginables e inaceptables para la mentalidad occidental.

El resumen podría ser que para suprimir el vapor de la turbina se disminuyó paulatinamente la potencia del reactor y se suprimieron los sistemas automáticos de control y seguridad pasando a control manual. Hubo una serie de pequeñas inestabilidades y errores de operación y según cálculos occidentales cuando se encontraba funcionando a unos 200 MW(t) se produjo una inestabilidad transitoria, de menos de 3 segundos de duración, en la que la potencia pasó a 530 MW(t) con un desprendimiento de energía de unos 200 Megajulios. El informe Soviético se limita a decir que la violencia del transitorio elevó la losa soporte del reactor, una estructura cilíndrica de mil toneladas y rasgó todos los canales combustibles y de control a ella soldados. La realidad es que como consecuencia del transitorio se produjo una elevación de temperatura en los elementos combustibles y la consiguiente formación de hidrógeno que hizo explosión produciendo la dispersión de parte del grafito, el derrumbamiento y voladura del único edificio que contiene el reactor así como la ignición del grafito. Durante unos diez días estuvo ardiendo el sistema abierto al aire, con la consiguiente liberación de elementos radiactivos a la atmósfera. El grafito es una de las sustancias cuya combustión produce mayor temperatura, por ello es muy difícil conseguir su ignición pero una vez lograda resulta muy difícil apagarlo. La mayoría de los materiales que pueden utilizarse se volatilizan antes de hacer algún efecto.

Afortunadamente la removida, pero no destruida, losa superior evitó la salida a la atmósfera de muchos fragmentos de grafito y de elementos combustibles pero a pesar de todo se dispersó aproximadamente el 2% del combustible en forma de partículas submicroscópicas entre un micrón y algunas decenas de micrones que se depositaron, en su mayoría, en las propias instalaciones y el resto hasta un radio de unos 20 km, alrededor de la central. El incendio consumió unas 250 toneladas de grafito, aproximadamente el 15% del total. La tasa de salida de productos radiactivos a la atmósfera fué variable durante esos días,

pues se produjeron esporádicamente varias explosiones más, debido probablemente a que el UO_2 se oxidó a U_3O_8 y se formaron Carburos que a las temperaturas reinantes se desintegraron en forma explosiva. La tasa total llegó a alcanzar los 50 millones de Curios en 10 días. Una vez controlado el incendio la tasa descendió a algunos Curios diarios y poco después a unas décimas de Curio al día. En los escapes hubo una primera fase, de tipo explosivo, en la que la composición isotópica de los productos liberados coincide con la de los elementos combustibles irradiados, pero en las fases siguientes predominaron los escapes térmicos y aparece un claro enriquecimiento de los productos más volátiles como Cesio, Yodo y Telurio.

El accidente de Chernobyl ha servido para poner de manifiesto el lamentable estado en que se encuentra la tecnología Soviética en el campo nuclear, la falta de control y seguridad que ha habido en todo su desarrollo y lo que es peor la escasa formación del personal y la consiguiente ausencia de preocupación por la seguridad de las instalaciones y las personas.

El propio accidente se detectó en la central Sueca de Forsmark a 150 km. al Norte de Estocolmo a orillas del Báltico en la que funcionan tres reactores y existe además, bajo el mar, el sistema Sueco de almacenamiento de residuos de media y baja actividad. Los sistemas internos de control de la central detectaron a las 7 de la mañana del día 27 de Abril contaminación radiactiva en las ropas y zapatos de un empleado que acababa de incorporarse al trabajo. Tras comprobar de que se trataba de un escape de productos de fisión y pasada la alarma de que no eran debidos a la propia central, que como medida precautoria había sido inmediatamente evacuada, permaneciendo sólo los equipos de emergencia, se comprobó que todos los bosques cercanos tenían el mismo tipo de contaminación.

La investigación meteorológica subsiguiente llevó a la conclusión de que la nube radiactiva procedía de la Unión Soviética probablemente de la región de Ucrania. A las 10 de la mañana se pidieron explicaciones a la Unión Soviética que tardó más de 10 horas en contestar y lo hizo cuando se la presión y evidencia de los países de Europa occidental y de la IAEA se hizo insostenible. La nube, que procedente de Ucrania había llegado a Suecia, se había desplazado hacia el Oeste suministrando evidencia incontrovertible a más países occidentales. Desde la explosión a la detección en Suecia habían pasado 33 horas y 43 hasta que las autoridades de Moscú reconocieron el accidente.

Los trabajadores de la central de Chernobyl, los que contribuyeron a apagar el incendio y los habitantes en un radio de unos 20 km. recibieron dosis de radiación elevadas.

Todavía se está efectuando un seguimiento médico detallado de la población pero la infraestructura Soviética y posteriormente Ucraniana hace bastante difícil el trabajo. Todo lo ocurrido en los primeros días e incluso meses es bastante confuso y ha habido una oposición y reluctancia a suministrar información y aceptar ayuda técnica occidental por parte de las autoridades responsables. Las consecuencias del accidente se han podido detectar en la lluvia y depósito seco en muchos países del centro y occidente de Europa. Las diversas redes de vigilancia radiactiva lo pusieron de manifiesto sin dificultad y hay que insistir en que, en ningún caso, ha habido problemas para las poblaciones de estos países aunque si ha habido exageraciones de todo tipo y alarmas sin fundamento.

Un aumento de la radiactividad ambiental en unos pocos tantos por ciento, incluso podría llegar a ser al doble, triple o el decuplo, no significa riesgo alguno y el accidente de Chernobyl liberó cantidades de radiación pequeñas comparadas con una sola prueba nuclear en la atmósfera. Tan sólo el año 1.962 se hicieron decenas y no ha habido consecuencias para la población, si entonces no hubo alarma fué simplemente porque la sensibilidad de la población era menor y los sistemas de detección y alerta radiactiva también. Sólomente la zona mencionada anteriormente, de unos 20 km. de radio que rodea la central, es donde ha habido un aumento de la radiactividad peligroso para la salud debido al depósito de partículas de productos de fisión.

Respecto al diseño y al estado de las centrales de tecnología Soviética, que funcionan actualmente, se ha elaborado y está llevándose a cabo un programa occidental, coordinado por la IAEA, de modificación y mejora de las condiciones de seguridad de las centrales, ante la imposibilidad de clausurar la mayoría de ellas por ser su energía insustituible por otras fuentes en los países en donde se encuentran. Con arreglo a la normativa occidental ninguna de estas centrales podría haber sido diseñada, construida, ni desde luego podría ser operativa.

7.3.3.- El problema de los Residuos radiactivos. Los cementerios nucleares.

Como toda actividad humana la radiactiva genera una serie de residuos que deben ser controlados, retirados y almacenados o tratados.

Curiosamente la clasificación de los residuos radiactivos se hace sólo por su actividad y no por su periodo. En general todos son de actividad media o baja excepto los elementos combustibles irradiados de centrales que se consideran de alta actividad. Los residuos de baja y media actividad proceden de tratamientos médicos, industriales, científicos y de las propias centrales y consisten en los propios isótopos no utilizados o eliminados después de su uso, guantes, ropas, utensilios, jeringuillas, material de limpieza y de laboratorio, etc.

Los residuos siempre se guardan en forma sólida y se suelen embalar en bidones de acero y/u hormigón y almacenar en un depósito en edificios o en excavaciones subterráneas. Se calcula que en unos 500 años la actividad de los residuos sea la ambiental y aquí juega también el periodo de los distintos elementos contenidos en los residuos. En España este depósito se encuentra en El Cabril, en la provincia de Córdoba, y pertenece a ENRESA, empresa encargada del control y almacenamiento de productos radiactivos.

Los elementos combustibles irradiados se consideran residuos de alta actividad y se almacenan en piscinas de agua situadas en las propias centrales hasta que pierden una buena parte de su actividad y pueden ser manejados sin grandes problemas. En algunos países los elementos combustibles se transportan a plantas de tratamiento, que existen hoy día tan sólo en Francia, los Estados Unidos, Rusia y Gran Bretaña. En las plantas se extrae el Plutonio, el Uranio no quemado y algunos isótopos útiles como el Co^{60} y el resto se solidifica y se embala en contenedores para su almacenamiento.

Ningún país ha decidido aún como y donde almacenar los residuos finales. En ellos existen actínidos y algunos productos de fisión de vida larga y aunque su actividad sea muy baja la sensibilidad de la sociedad hace difícil su almacenamiento en un lugar en el que, si se desea que su actividad desaparezca, deberían de permanecer algunos millones de años. La idea que ha ganado muchos adeptos es realizar un depósito subterráneo muy profundo, en una zona sísmicamente estable y de composición rocosa impermeable y depositar allí los residuos vitrificados en contenedores adecuados sellando la salida. Una central de 1.300 MW(e) produce anualmente 5 Tm de residuos de alta actividad que suponen unos 25 bidones de residuos vitrificados si no se efectuara con ellos ningún otro tipo de tratamiento. Un bidón es un cilindro de aproximadamente 1 metro de altura y 60 cm. de diámetro.

Una central térmica de Carbón de igual potencia produce 500.000 Tm. de residuos sólidos, que contienen 400 Tm de Arsénico, Cadmio, Mercurio y

Plomo. Aparte habría que contabilizar los 7 millones de toneladas de CO₂ que expulsa a la atmósfera junto con las correspondientes 50.000 Tm de SO₂ , 25.000 Tm de NO_x y otros componentes del Carbón que también son volatilizados y expulsados por la chimenea. El CO₂ que expulsa a la atmósfera una central de gasoil es similar a una de Carbón y para una de gas es aproximadamente la mitad 3.5 millones de toneladas. Los elementos radiactivos contenidos en miles de toneladas de combustible también son en su mayoría volatilizados y expulsados a la atmosfera. Una central térmica también efectúa vertidos radiactivos al ambiente.

Recientemente se están realizando experiencias en Estados Unidos, Francia, Ginebra y Japón para desintegrar los actínidos y productos de fisión de periodos largos mediante un bombardeo muy intenso de neutrones. El fenómeno conocido como "transmutación" se había realizado a escala de laboratorio desde los años 60, pero era impensable, a escala industrial hasta hace muy pocos años, por la imposibilidad de tener grandes flujos de neutrones en sistemas que no fuesen un reactor nuclear. Sin embargo un reactor no es utilizable porque, por ser un sistema crítico es poco flexible, no dispone de un exceso de neutrones para realizar el proceso.

La idea actual, cuyo mayor exponente es el Premio Nobel de Física Carlo Rubbia, consiste en utilizar un acelerador de protones de alta intensidad y de alrededor de 1 GeV de energía para producir neutrones en una fuente de espalación de Plomo. El rendimiento es unos 40 neutrones por protón. Estos neutrones se utilizan para hacer funcionar un conjunto subcrítico de Torio. El reactor funciona mientras lo haga el acelerador y por ser subcrítico no pueden ocurrir excursiones de potencia ni inestabilidades. El Th-232 no es combustible pero genera Uranio-233 por el mismo mecanismo que el U-238 genera el Pu-239 con la diferencia que con el Torio, por ser de número másico 232, no hay producción apreciable de actínidos. No hay interés militar en el tema pues no hay Plutonio y por tanto no hay riesgo de proliferación nuclear.

Los únicos isótopos de vida larga son ciertos productos de fisión, como Tecnecio que también podrían transmutarse en el propio sistema. El conjunto subcrítico permite la utilización de neutrones para transmutar elementos indeseables. En el caso del Plutonio se puede obtener además más energía. El sistema puede así eliminar sus propios residuos. Como resultado de todo ello queda una producción de energía y residuos de media y baja actividad. A cambio se ha utilizado como combustible Torio que es, como ya hemos mencionado, un isótopo único mucho más abundante que el Uranio y cuyas reservas conocidas suponen una



duplicación de toda la energía disponible actualmente en todas sus formas.

El conseguir eliminar el Plutonio existente en el mundo, tanto en armas nucleares como en elementos combustibles, supondría un gran alivio para la humanidad. La producción anual se estima en unas 20 Tm. lo que en volumen no llega a 1 m^3 . La cantidad acumulada se estima en unas 300 Toneladas. La energía que podría suministrar una tonelada de Plutonio es equivalente a la del petróleo que se extrae en un día de Arabia Saudita. La eliminación de los productos de fisión de vida larga supondría una alternativa al tratamiento de los residuos de alta actividad, haciendo mucho más fácil el almacenamiento de los residuos finales ya que prácticamente serían semejantes a los actuales de media y baja actividad.

7.4.- Dosis radiactivas

La radiactividad presente en nuestro entorno es la consecuencia de diversos factores naturales con la adición, en tiempos recientes, de pequeñas contribuciones producidas por el hombre. La radiactividad ambiental se estudia desde dos puntos de vista. El primero es la medida de la actividad de los distintos nucleidos y fuentes radiactivas, sus concentraciones y su distribución. El segundo es la determinación de las dosis que reciben las personas o cosas debido a la existencia de cierta actividad radiactiva.

Las dosis recomendadas como máximas permisibles están en constante revisión y no hay un acuerdo universal que sea seguido por todos los países. El origen del problema reside en que los efectos de la radiación, en dosis moderadas, es integral durante un cierto tiempo. Los efectos parecen ser los mismos si se recibe una determinada dosis durante un tiempo que si se recibe la mitad de la dosis en el doble de tiempo o el doble de dosis en la mitad. Pero la afirmación no es correcta en intervalos largos de tiempo y se discute su corrección cuando se trata de dosis equivalente que no produzcan efectos biológicos detectables a corto, medio o largo plazo. Por otra parte es difícil de asegurar que un determinado efecto se debió a una dosis recibida mucho tiempo atrás. La mayoría de los efectos que se buscan son distintos tipos de cáncer y dada la dificultad de saber la etiología del tumor es muy difícil y dudosa su adscripción a una pequeña dosis de radiación recibida muchos años antes. La polémica aumenta cuando se trata de dosis muy pequeñas. Una escuela de pensamiento, que ha dominado hasta muy recientemente, se inclina por la extrapolación a cero de la hipótesis lineal (puesta en

duda desde los años 70) que afirma que los efectos biológicos son linealmente dependientes de la dosis. A ello se añade la hipótesis de inexistencia de umbral mínimo (puesta en duda desde principios de los años 90) que afirma que cualquier dosis, por pequeña que sea, es nociva.

La mayor parte de los argumentos se basan en el estudio médico detallado que se ha venido realizando a los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki desde el año 1.945 a la actualidad y su comparación con personas que no recibieron radiación. Los últimos datos parecen indicar que los supervivientes que recibieron pequeñas dosis, ligeramente superiores a la natural, están teniendo mayor longevidad y menores problemas de salud que los que no recibieron nada. Lo mismo sucede con los experimentos que se han realizado con ratones alimentados con dietas sin K^{40} que se desarrollaron poco y débilmente, situación que se solucionó al añadir el potasio radiactivo a la dieta. Parece ser que estamos hechos para vivir en un ambiente con una cierta radiactividad, que sirve para mantener activo y preparado el sistema biológico de reparación genética y celular. Este es el segundo punto de vista que se va imponiendo lentamente en los ambientes de protección radiológica. Hoy día está apoyado en los datos existentes sobre población ocupacional y profesionalmente expuesta, incluidos médicos, cirujanos, personal sanitario, trabajadores de centrales nucleares e instalaciones radiactivas, etc., pacientes con tratamientos médicos, poblaciones que trabajaron con Radio (incluidos los que fabricaban esferas luminosas de relojes), trabajadores relacionados con la industria militar (incluidos observadores de pruebas nucleares), población expuesta a alta radiación ambiental natural (habitantes de ciertas zonas del planeta, pilotos y personal de vuelo, mineros, etc.), habitantes de la región de Chernobyl, además de los ya mencionados supervivientes de Hiroshima y Nagasaki.

La dosis máxima recomendada, más común, para personal profesionalmente expuesto (que está bien controlado) es de 50 mSv/año o 5 Rem/año, que puede dividirse para medirla por semanas o incluso por horas o integrarse a varios años. A efectos de calcular blindajes, la dosis máxima que podría recibir el público en general cuando puede estar expuesto a radiación se admite que sea una dosis 10 veces inferior. La dosis recibida en todo el cuerpo que resulta en 50% de mortalidad dentro de los 30 días siguientes, supuesto que no se ha recibido ningún tratamiento médico, se admite que es de 2.5 a 3 Gy o 250 a 300 Rads, recibida de golpe en una sola irradiación. Las dosis locales, que puede recibir una parte del cuerpo sin sufrir daños, pueden ser mucho más elevadas y varían con el órgano o parte del cuerpo.

Las contribuciones de distintas fuentes a la dosis equivalente anual que recibe una población se encuentra detallada en la tabla 8.1. Los datos son promedios y se refieren al Reino Unido (NPR 1.989) pero son muy similares a los de España e indicativos para cualquier otro país europeo occidental.

Tabla 7.10.- Contribuciones de diversas fuentes a la dosis equivalente anual

Fuente Radiactiva	Proporción del total	Dosis Promedio mSv
Fuentes Naturales		
Radón	47 %	1.200
Interna	12 %	300
Gamma	14 %	350
Cósmica	10 %	250
Torón	4 %	100
Total Fuentes Naturales	87 %	2.200
Fuentes Artificiales		
Tratamientos Médicos	12 %	300
Depósitos Radiactivos (Lluvia, Polvo)	0.4 %	10
Miscelánea	0.4 %	10
Ocupacional	0.2 %	5
Tormentas y descargas	inferior al 0.1 %	< 1
Energía Nuclear	inferior al 0.02%	<0.1
Total Fuentes Artificiales	13 %	325
Total Todas las fuentes	100 %	2.525

La contribución más importante que recibe la población procede de fuentes naturales, el 87 %, mientras que las radiaciones artificiales contribuyen tan sólo con el 13 %.

La dosis anual que recibimos de fuentes naturales es, en promedio, de 0.4 a 4 mSv (40 a 400 mRem), pero hay regiones del mundo con dosis

mucho más elevadas. La playa de Guarapari en Brasil, que triplica su población en verano, situada a 100 km. de Río es rica en Torio y la dosis llega fácilmente a los 175 mSv /año. (Cuatro veces la máxima permitida para personal profesional). Lo mismo sucede en el pueblo pesquero de Meaipe con una dosis 50 veces la media. En las costas de Keirala en la India, con más de 90.000 habitantes, las dosis alcanzan los 400 mSv/año (8 veces la máxima permitida) y lo mismo sucede en Ramsar en Irán en donde es superior a los 50 mSv (5 Rem) es decir superior a la máxima recomendada. En ninguno de los casos anteriores se ha detectado efecto nocivo alguno en las poblaciones ni mayor incidencia de dolencias o enfermedades.

Entre las fuentes naturales la fuente más importante es el Radón del aire que, por si solo, alcanza casi al 50 % de la dosis equivalente total y si se le añade el Torón lo sobrepasa con creces. El problema del Radón se ha incrementado recientemente con los programas de ahorro energético que ha aumentado el aislamiento y disminuido la ventilación de las viviendas. Este efecto se ha hecho patente en los países nórdicos y en Suecia existe bastante preocupación al respecto. Nuestra radiactividad interna contribuye casi tanto como la procedente del resto de radionucleidos naturales, algo menos del 15 %. La radiación cósmica contribuye con el 10%. Entre las fuentes artificiales la gran mayoría se debe a los tratamientos médicos sobre todo radiografías. En contra de lo que se cree las pruebas nucleares en la atmósfera, los accidentes nucleares, fundamentalmente Chernobyl, y los vertidos de las instalaciones radiactivas sólo contribuyen con el 0.4 % de la dosis total. La actividad de las centrales nucleares repercute en un factor 20 veces inferior. En el apartado de miscelánea se incluyen las estimaciones de dosis procedentes de los detectores de humos, fuentes luminosas, televisión y los viajes aéreos.

En las decisiones que afectan a la radiactividad y la protección radiológica se sigue siempre el criterio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) aceptado universalmente en el mundo occidental y que queda reflejado en la bajísima dosis que la población recibe procedente de fuentes artificiales, sobre todo si se excluyen las médicas. Una reducción aún mayor de estas dosis requeriría unas inversiones económicas muy elevadas para obtener unos beneficios para la salud muy dudosos, suponiendo que hubiese alguno.

A modo de epílogo

Permítanme por último hacer una breve referencia a la medalla que vengo a ocupar en ésta Ilustre Corporación. Es bastante insólita la situación de sustituir a un compañero que afortunadamente goza de excelente salud. La Academia me ha asignado la medalla número 7, cuyo último poseedor fué el Profesor D. Eusebio Bernabeu Martínez. Formado en nuestra Universidad y bien conocido de todos ustedes, decidió hace algún tiempo impartir su ciencia y realizar su buen hacer, en el dominio de la óptica cuántica, en la Universidad Complutense de Madrid. Excelente Físico ha sabido crear en su torno un equipo de investigadores que cultivan, con gran acierto, prestigio y notoriedad, el difícil campo existente entre la óptica y la física atómica. Desde aquí hago votos por que prosiga, durante mucho tiempo, obteniendo los mayores éxitos en su trabajo.

Muchas gracias Sr. Presidente, muchas gracias Sres. Académicos, muchas gracias a todos Vds. señoras y señores por su atención.

Bibliografía

Becquerel 1.896. ↔ Becquerel H. "Emission de radiations nouvelles par l'Uranium métallique" *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris **122**, 1086, 1896.

Becquerel Curie 1.901. ↔ Becquerel H. & Curie P. "Action physiologique des rayons au radium" *Comptes Rendus* **132**, 1289, (1901).

Caro 1.995 ↔ R. Caro et Al. *Historia Nuclear de España*. Ed. Sociedad Nuclear Española Madrid 1.995

Curie M. 1.898. ↔ Curie M. "Rayons émis par les composés de l'Uranium et du Thorium". *Comptes Rendus* **126**, 1101, (1.898).

Curie-Curie 1.898 ↔ P. Curie & M. Sklodowska-Curie *Comptes Rendus* **127**, 175, (1.898).

Curie P, Curie M & Bemont MG 1898 ↔ Curie P, Curie M & Bemont MG.
"Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la
pechblende" *Comptes Rendus* **132**, 1289, (1.901).

Drganic 1.993 ↔ Y. G. Draganic, Z. D. Draganic, J-P Adloff Radiation and
Radioactivity on Earth and Beyond. CRC Press Ann Arbor 1.993

Einstein 1.905A . ↔ A. Einstein *Annalen der Physik* **17**,132, (1905).

Einstein 1.905B ↔ A. Einstein "Zur Electrodynamik bewegter Körper".
Annalen der Physik **17**, 891, (1.905).

Giesel 1899 ↔ F.O. Giesel *Ann. Phys. Chem.* **69**, 834, (1.899).

Hahn 1.939 ↔ O. Hahn , F. Strassmann *Naturwissenschaften* **27**, 11,
(1.939)

IAEA 1.975 ↔ "The Oklo Phenomenon". International Atomic Energy
Agency .Vienna 1.975

IAEA 1.978 ↔ "The Natural Fission Reactors". International Atomic
Energy Agency .Vienna 1.978

IAEA 1.995 ↔ International Atomic Energy Agency , " Energy,
Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2.015" .
I.A.E.A. Reference Data Series no. 1. July 1.995 Edition. Vienna 1.995

Landa 1.982 ↔ Landa E.R. "The first nuclear industry " *Scientific
American* **247**, 180, (1.982).

Meyer 1899 ↔ S. Meyer and E. von Schweidler *Phys. Zets.* **1**, 90, (1.899).

NPR 1.989 ↔ National Radiological Protection Board, " Living with
Radiation" National Radiological Protection Board 1.989

Ozima 1.981 ↔ M. Ozima. "The Earth, Its Birth and Growth", Cambridge
University Press, New York 1.981.

Particle 1.996 ↔ Particle Data Group. Particle Physics Data American
Institute of Physics Washington
Review of Particle Physics *Physical Review* **D54**, 1, (1.996)

Schmidt 1.898 ↔ G.C. Schmidt *Annal. Phys. Chem.*, **65.1**, 141, (1.898).

Segrè 1.980 ↔ E. Segrè "From X-Rays to Quarks" W.H. Freeman and Co. New York 1.980 pag. 208

Rutherford 1.903 E. Rutherford *Phil. Mag.* **5**, 177, (1.903)

Soddy 1.922 ↔ Soddy F. "The interpretation of Radium and the structure of the atom" J.Murray, Albemarle St. London 4th edition. reprinted 1.922. (1st edition 1.909)

Unión Minera 1.929 ↔ Union Minière du Haut Katanga "Radium: production, general properties, its applications in therapeutics" Union Minière du Haut Katanga: Brussels, (1.929).

Villard 1.900 ↔ P. Villard, *Comptes Rendus* **130**, 1178, (1.900)