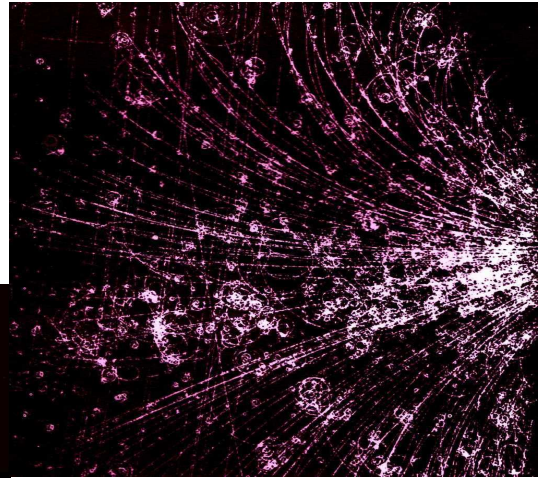
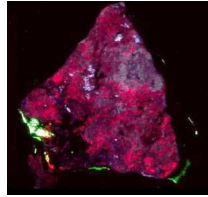


“Je suis de ceux qui pensent que la science a une grande beauté. Un savant dans son laboratoire n'est pas seulement un technicien, c'est aussi un enfant placé en face de phénomènes naturels qui l'impressionnent comme un conte de fées.”

[“Soy de quienes piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico, es también un niño frente a fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas.”]

Maria Salomea Sklodowska-Curie (1929)

PROSPECCIÓN RADIOMÉTRICA



Cuando nació Maria en 1867, Varsovia y gran parte de Polonia pertenecían al Imperio Ruso –mientras que el sur (donde nació **Isidor Rabi**) estaba bajo el Imperio Austrohúngaro y el oeste formaba parte del Reino de Prusia, futuro *Reich*–. Maria era la menor de cinco hermanos. Tenía diez años cuando la tuberculosis le quitó a su madre. Tres años antes el tifus había matado a su hermana mayor. Maria ya tenía pensamiento crítico y le resultó evidente que Dios, si existía, estaba pintado. Se volvió agnóstica.

Hizo el secundario en un colegio de señoritas y luego empezó a ganar unos rublos dando clases particulares. Dado que la universidad oficial estaba prohibida para las mujeres, cursó estudios en una sede universitaria clandestina que tenía el bonus de conservar la lengua y cultura polacas que los sucesivos zares rusos también habían prohibido. (La palabra zar viene de César –latín, *caesar*– y consecuente a esa etimología fue el brutal autoritarismo con que casi siempre gobernaron los monarcas rusos.)

En 1890 **Maria Sklodowska** se mudó a la capital francesa, donde ya vivía una de sus hermanas, y al año siguiente entró a la parisina Universidad de la Sorbona (fundada en 1257) para continuar sus estudios en química, física y matemática. Logró sobrevivir con los escasos francos que recibía de una beca, hasta que pudo



Université de la Sorbonne

empezar a trabajar en un laboratorio. Al año siguiente, 1894, ya laureada, se cambió de laboratorio: fue a colaborar con **Pierre Curie**. Cuando Pierre le propuso matrimonio, Maria le dijo que sí, pero que deseaba regresar a Polonia. Pierre aceptó ir con ella, pese a que profesionalmente no le convenía a ninguno de ambos. Maria fue a averiguar las posibilidades laborales en la Universidad de Cracovia. Le dijeron que las mujeres no tenían nada que hacer allí. Entonces volvió a París, y desde 1895 fue más conocida como Marie Curie –los frenchutes eran menos conservadores, pero el apellido del marido obvio que debía aplicarse–.

La radiactividad fue descubierta por el francés **Henri Becquerel** en 1896: había dejado sales de uranio sobre una placa fotográfica (lámina de vidrio recubierta de emulsión fotosensible) dentro de un cajón a oscuras en un lluvioso día parisino y, *voilà!*, un par de días después notó que en parte se había velado. Becquerel (hijo y nieto de físicos) también descubrió que la emisión radiactiva atacaba los tumores. Años después obtuvo el Nobel.

Maria Sklodowska y **Pierre Curie** en 1899 hallaron otros dos elementos radiactivos: el polonio (así llamado por la patria de Maria) y el radio (del latín *radius*, rayo, y de ahí radiactividad, radiometría y demás).

Marie llegó a ganar dos premios Nobel (física y química), algo que sólo otros tres investigadores han logrado

hasta hoy. Pierre obtuvo el Nobel en física. Y lo mismo conseguiría Irène, la mayor de sus dos hijas, quienes desde temprana edad quedaron huérfanas de su padre: en 1906 Pierre fue atropellado por un carro tirado por caballos –parece que en la París de aquellos años el tráfico ya empezaba a ser un peligro–.

Durante la Primera Guerra Mundial Marie e Irène decidieron ir al frente a sacar radiografías a los heridos. (El alemán **Wilhelm Röntgen** había descubierto en 1895 los rayos X al radiografiar la mano de su esposa, hoy también usados para densitometría ósea.) Marie murió en 1934, a los sesenta y seis años, ya ciega como consecuencia de la leucemia adquirida por su reiterada exposición a las radiaciones. Las palabras arriba citadas, que ella repetía ante sus alumnos, muestran la maravillosa sensibilidad que tenía esta gigante de la ciencia.

Irène dejó Francia tras la invasión nazi, refugiándose en Suiza (país neutral). Otros se fueron a Estados Unidos, tales los casos de **Enrico Fermi** (emigrado de Italia en 1938, luego de recibir el premio Nobel de física por investigaciones sobre irradiación neutrónica, creación de isótopos y reacciones nucleares, debido a la amenaza que significaba el fascismo para su esposa judía), **Niels Bohr** (premio Nobel de física en 1922 por sus descubrimientos sobre la estructura atómica, hijo de madre judía, que huyó en 1943 de su Dinamarca natal tras la ocupación nazi), **Leo Szilard** (judío húngaro que huyó de Berlín en 1933), **Albert Einstein** (premio Nobel de física en 1921, judío alemán que emigró en 1932 ante el inminente ascenso del nazismo y que en 1939 fue convencido por sus colegas de escribir una carta al presidente Roosevelt para promover el proyecto atómico antes que los nazis) y otros (como **Isidor Rabi**, judío polaco emigrado siendo niño) quienes bajo la dirección de **Julius Oppenheimer** (estadounidense, hijo de judío alemán) directa o indirectamente colaboraron con el Proyecto Manhattan para desarrollar las bombas de fisión nuclear de uranio ($^{92}\text{U}^{235}$) y plutonio ($^{94}\text{Pu}^{239}$) que luego serían lanzadas sobre las mujeres, niños y ancianos de Hiroshima y Nagasaki –para aplastar incondicionalmente al insensato régimen enemigo y evitar muertes de soldados norteamericanos–. Todos estos científicos manifestaron luego su pesar ante tanta monstruosidad.

Las posteriores bombas de fusión de hidrógeno y su variante neutrónica afortunadamente no han masacrado gente.



Prueba nuclear estadounidense en el atolón Bikini (islas Marshall, 1946) tras expulsar a sus aborígenes.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La radiactividad es la facultad de emisión de radiaciones (alfa, beta, gamma) que poseen los núcleos de ciertos elementos químicos inestables llamados radiactivos, que al hacerlo transmutan en otros elementos (diferente cantidad de protones o número atómico Z , por lo que también difiere el número másico A) o bien en otros **radionúclidos o isótopos** (del griego *ἴσος*, isos: igual; *τόπος*, topos: lugar) del mismo elemento (igual Z pero distinta cantidad de neutrones, por lo que sólo difiere A), que pueden resultar inestables o estables.

Son radiactivos todos los elementos naturales de número atómico alto, a partir del polonio (Po, $Z=84$), aunque también algunos isótopos del bismuto ($^{83}\text{Bi}^{214}$), del plomo ($^{82}\text{Pb}^{210}$, $^{82}\text{Pb}^{214}$) y muchos otros entre los de menor número atómico, hasta inclusive el tritio ($^1\text{H}^3$).

La **actividad radiactiva** es el número de átomos desintegrados por segundo, una característica propia de cada sustancia. Se cuantifica en **Becquerel (Bq)** o **Curie (Ci)**: $1 \text{ Bq} = 1$ desintegración/segundo, $gr \ 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Las modificaciones de un determinado elemento radiactivo dependen del número de átomos desintegrados y de la proporción entre cantidad de sustancia transformada y existente.

Siendo N_0 el número de átomos de la sustancia radiactiva existentes en un instante t_0 y N los presentes en un instante posterior t la velocidad de desintegración será:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N, \quad \text{donde } \lambda \text{ es la } \mathbf{\text{constante de desintegración}},$$

es decir el descenso de radiactividad por unidad de tiempo

de modo que: $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$, e integrando: $\ln N = -\lambda \cdot t + K$

Podemos calcular el valor de K , dado que en el instante inicial, cuando $N = N_0$ y $t = t_0$ resulta: $K = \ln N_0$

Entonces: $-\lambda \cdot t = \ln N - \ln N_0 = \ln \frac{N}{N_0}$ y tomando el **período de semidesintegración** $t_{1/2}$, o sea el tiempo necesario para que la cantidad de átomos iniciales se reduzca a la mitad,

resulta: $-\lambda \cdot t_{1/2} = \ln \frac{1}{2} = -0,693$ de modo que $t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$

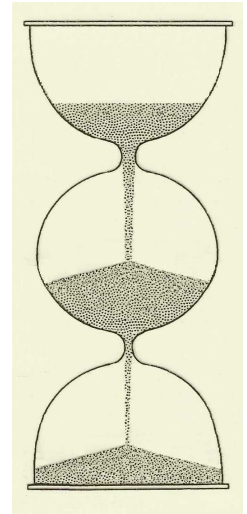
La **vida media** τ es la inversa de la constante λ , es decir que: $t_{1/2} = 0,693 \tau$

En una **serie de isótopos** que van desde un elemento radiactivo inicial a uno estable final puede definirse el equilibrio radiactivo al cabo de un tiempo suficiente para que se hayan llegado a formar los primeros átomos estables.

La cantidad de átomos de un isótopo en una serie que se encuentra en equilibrio radiactivo resulta inversamente proporcional al tiempo de vida media de dicho isótopo:

$$\frac{N_1}{\tau_1} = \frac{N_2}{\tau_2} = \dots = \frac{N_n}{\tau_n}$$

La cantidad de granos de un compartimiento en un reloj de arena múltiple, una vez alcanzado el equilibrio, resulta inversamente proporcional al diámetro del cuello que les permite caer. Lo mismo pasa con la cantidad de automóviles en un cuello de botella del tránsito, aunque no sea la clase de vida media que quisiéramos tener.



DATAACIONES

Ahora bien, dado que, $-\lambda \cdot t = \ln \frac{N}{N_0}$ entonces, $\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$ y $N_0 = N \cdot e^{\lambda t}$

El número de átomos hijo D_c producidos por el decaimiento del elemento padre inicial N_0 será:

$$D_c = N_0 - N \quad \text{por lo que,} \quad D_c = N \cdot e^{\lambda t} - N \quad \text{y} \quad D_c = N(e^{\lambda t} - 1)$$

El número total de átomos hijo en cualquier tiempo es: $D_T = D_0 + D_c$

(siendo D_0 aquellos ya preexistentes en el instante inicial de formación de la roca, por decaimientos previos)

Entonces, $D_T = D_0 + N(e^{\lambda t} - 1)$ –que es la ecuación de una recta–

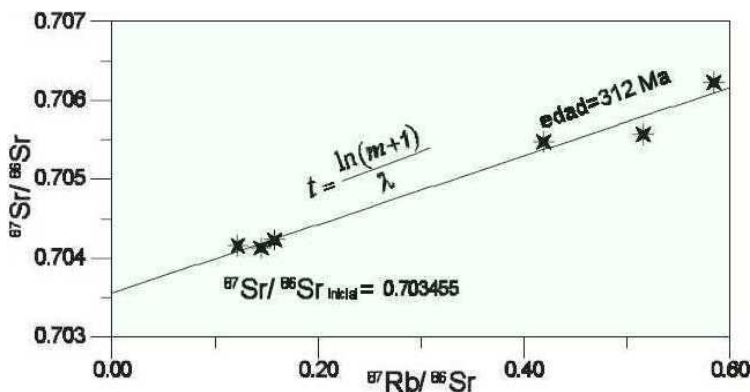
Despejando resulta: $t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D_T - D_0}{N} + 1 \right)$

Por lo tanto, la proporción de isótopos radioactivos transmutados desde la formación de la roca o fósil que los contiene es proporcional al tiempo t transcurrido.

Y este es el fundamento de la **geocronología absoluta** –a diferencia de otros muchos métodos de datación relativa–, a partir de los estudios pioneros de **Bertram Boltwood** en 1907 en Estados Unidos, luego intensamente desarrollados por el inglés **Arthur Holmes**, quien en 1913 calculó en 1,6.10⁹ años la edad de la Tierra (un número muy elevado para la expectativas de la época), la cual fue estirando él mismo con estudios

más ajustados hasta llevarla en 1944 a valores cercanos a los actualmente aceptados.

A la izquierda puede verse el diagrama de una isócrona (línea que une puntos de igual edad) a partir de datos de Rb/Sr. Se puede observar el arreglo lineal de puntos que representan a varias rocas cogenéticas, en donde la edad de la roca es directamente proporcional a la pendiente de la recta y la ordenada al origen proporciona el valor inicial de Sr⁸⁷/Sr⁸⁶. Obsérvese que tanto en las abscisas como en las ordenadas los isótopos padre (Rb⁸⁷) e hijo (Sr⁸⁷) han sido divididos por



un isótopo estable y bastante abundante del elemento hijo (Sr⁸⁶), hecho que no altera el resultado de los cálculos antes vistos y permite obtener la cantidad del isótopo hijo inicial D_0 llevando la recta hasta la ordenada al origen, es decir el cociente isotópico Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ para el caso de no existir Rb⁸⁷ a partir del cual pudiera crearse Sr⁸⁷ por desintegración radiactiva, o sea que en esa instancia de tiempo inicial el Sr⁸⁷ preexistente (cantidad D_0) pudo derivar de cualquier otro origen (incluso seguramente de una cierta porción de Rb⁸⁷ anterior a este suceso), pero no de la cantidad de isótopo padre N_0 que a partir de la formación de esa roca ha ido generando por decaimiento la cantidad D_c .

Si los puntos de la isócrona corresponden a distintos minerales, se trata de una edad de enfriamiento promedio, pero si corresponden a la roca total, la edad se refiere a la última homogenización isotópica de la roca sin importar eventuales procesos metamórficos.

Existen otras series isotópicas empleadas para hacer dataciones (Sm-Nd, Lu-Hf, K-Ar, U-Pb; tabla en página 6), así como otros métodos de cálculo y diversas técnicas de cuantificación isotópica de muestras en laboratorio.

Las concentraciones de isótopos radiactivos han variado a lo largo de la historia terrestre, hecho que ha sido documentado, como así también las diferencias composicionales entre la Tierra y el sistema Solar original: el CHUR (*chondritic uniform reservoir* o reservorio condritico uniforme), cuya denominación obedece a que los meteoritos denominados condritas son representativos de la materia original del sistema Solar, a su vez muy similar al manto terrestre primigenio. También se ha ido ajustando un modelo sobre las variaciones entre distintas porciones de nuestro planeta, por ejemplo la mayor abundancia relativa de plomo en el núcleo (por la marcada tendencia de éste a formar sulfuros) y en cambio la escasez de uranio, que fue mayormente segregado hacia el manto y la corteza. Otras muchas consideraciones geoquímicas exceden el tema aquí abordado.

Termoluminiscencia: El término luminiscencia (de *lumen*, lumbre en latín) fue acuñado por el alemán **Eilhard Wiedemann** en 1888 y la hay de distintos tipos. (Luz viene de *lux* y recuérdese que lux, lumen y candela son unidades de iluminación del S.I.) La luminiscencia térmica, descubierta ya en 1663 por el inglés **Robert Boyle** (el de la ley de presión del gas, etc.) es una propiedad eléctrica de muchos minerales: la emisión de luz de un sólido aislante o semiconductor al ser calentado –aparte de la incandescencia al quemarse–.

La radiación ionizante (cósmica, α , β , γ , así como rayos X y catódicos) al incidir sobre un material hace que los electrones y sus huecos queden retenidos en imperfecciones de la red cristalina (trampas) entre las bandas de conducción y valencia. A mayor tiempo de exposición a la radiación, mayor cantidad de electrones y huecos que podrán quedar así retenidos. Al calentar el material, los electrones y huecos se liberan, deshaciéndose el sólido del exceso de energía adquirida y emitiendo los fotones que visualizamos. Esto sucede en la fluorita, apatita, calcita y otros minerales.



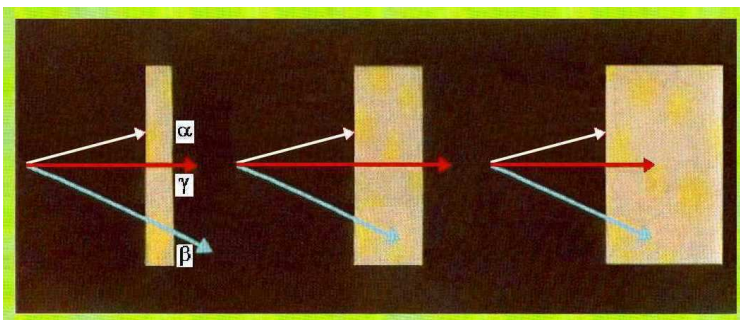
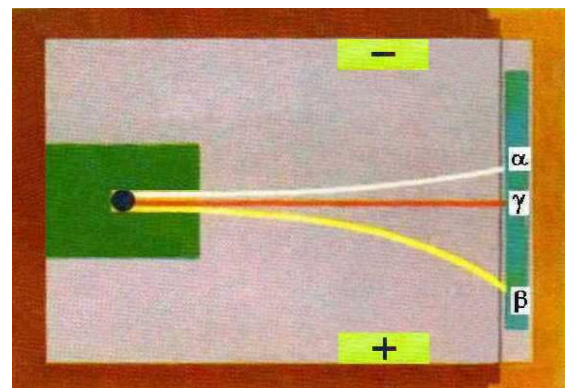
Termoluminiscencia en fluorita y otro mineral sin respuesta.

La termoluminiscencia se emplea para dataciones absolutas, dado que la cantidad de luz emitida aumenta en función del período de tiempo que la muestra dispuso para absorber y producir huecos. El

inglés **Martín Aitken** en 1964 comenzó con su aplicación para arqueología (hogares, cerámicas) y luego otros lo han hecho para sedimentos, lavas, depósitos carbonáticos, etc. Las muestras deben tener edades de entre 1.000 y 500.000 años; no aplica más que al Pleistoceno superior y Holoceno. El mineral más utilizado para datar es el cuarzo por su abundancia y porque los rayos cósmicos que llegan constantemente a la superficie terrestre producen cambios acumulativos en su estructura cristalina. La unidad empleada para cuantificarlo es el gray, igual a un joule de radiación absorbida por cada kg de materia. (**Louis Gray** fue un inglés pionero en el estudio de los rayos X.) Entonces, al calentar una muestra a temperatura superior a 500°C, ésta emite una luz tanto más intensa cuanto mayor ha sido la radiación recibida –o sea mayor el tiempo transcurrido– para que los granos de cuarzo vuelvan a la normalidad energética. Se calibra la escala temporal por comparación con otras dataciones previas y debe tenerse presente que también influirán las emisiones α , β y γ –que ahora describiremos– de los posibles minerales radiactivos de la propia muestra.

TIPOS DE RADIACIONES

El neocelandés **Ernest Rutherford** (gran jugador de rugby, como debía ser) descubrió en Cambridge en 1900 los tres tipos básicos de radiación **emitidas por el núcleo atómico** (y logró el premio Nobel), por la experiencia de desviación dada por un imán entre la placa fotográfica y el bloque de plomo taladrado donde se situaba el elemento radiactivo (figura a la derecha),



viendo la distinta desviación de las partículas. El gráfico de la izquierda ilustra la capacidad de penetración relativa de las radiaciones a causa de su distinta naturaleza: máxima en las γ , media en las β , mínima en las α .

Alfa (α): Núcleos de helio, ${}^2\text{He}^4$ (2 protones, 2 neutrones: carácter corpuscular y carga positiva) lanzadas a una velocidad del 5 al 20% de la luz en el vacío (**c**) por fisión espontánea, escapando a la fuerza nuclear fuerte. Por su masa, su poder de penetración es bajo (no atraviesan una hoja de papel), y por lo mismo su poder de ionización es alto (100 veces más que las β y 10.000 más que las γ), se andan chocando fácilmente con los átomos y les arrancan un electrón, son como un elefante en un bazar.

Beta (β): Electrones, $-1e^0$ (carga negativa, masa reducida, carácter corpuscular), emitidos a una velocidad del 40 al 99,9% de **c** por la disociación de un protón del núcleo, mutándolo a neutrón y eyectando también un antineutrino (masa similar al electrón, sin carga y con espín levógiro), escapando a la fuerza nuclear débil. Por su pequeño tamaño poseen mayor poder de penetración que la radiación α (para detener la β se requiere, por ejemplo, de una madera de algunos cm de espesor) pero es menor su poder de ionización. (En la radiación β^+ un neutrón da protón+positrón+neutrino. Y en la **captura electrónica** electrón+protón dan neutrón+neutrino.)

Gamma (γ): De tipo electromagnético (fotones, sin carga ni masa, viajando a la velocidad de la luz), su poder ionizante es más reducido, pero no nulo, y la capacidad de penetración es muy elevada (son detenidas por varios cm de plomo). Su emisión es el resultado de un reajuste energético del núcleo de isótopos inestables. Su frecuencia ($f > 10^{19}\text{Hz}$, $\lambda < 10^{-11}\text{m}$), y por tanto su energía, son muy altas.

Radiación de Neutrones (${}^0n^1$): El neutrón y su radiación fueron descubiertos en 1932 por el inglés **James Chadwick** a partir de los experimentos del alemán **Walther Bothe** (premios Nobel ambos) y las inferencias del italiano **Ettore Majorana** (joven genio desaparecido misteriosamente en 1938, suicidado o quizá fugado hacia Buenos Aires). Rara en la naturaleza, la radiación neutrónica se da en el proceso de fisión espontánea como el caso del ${}^{87}\text{Br}^{35} \Rightarrow {}^{87}\text{Kr}^{36} + {}^0n^1 + \beta$. También se la puede inducir artificialmente, lo cual se aplica a herramientas de perfilaje de pozo (Tema 09b). Para altos números atómicos los neutrones tienen mayor capacidad de penetración que los rayos γ y sólo puede detenerlos una gruesa barrera de compuestos ricos en hidrógeno.

Rayos Cósmicos: En 1909 el jesuita y físico alemán **Theodor Wulf** inventó el primer electrómetro (aparato para medir la tasa de producción de iones dentro de un contenedor herméticamente sellado) y al emplearlo en la parisina torre Eiffel descubrió que los niveles de radiación ionizante arriba eran mayores que abajo. Dos años

después, el italiano **Domenico Pacini** observó variaciones simultáneas de la tasa de ionización en la superficie de un lago y del mar, así como a 3 metros bajo la superficie. De la disminución verificada bajo el agua, Pacini razonó que una parte de la ionización se debe a fuentes independientes de la radiactividad terrestre.

Posteriormente el austríaco **Víctor Hess** halló que la radiación aumentaba con la altura, tras enviar detectores sobre globos-sonda desde los Alpes tiroleses en 1912, por lo que dedujo que ésta provenía del cielo. Consiguió el Nobel, al igual que el estadounidense **Robert Millikan**, quien años después los llamó rayos cósmicos al registrar que en su mayor parte provenían de fuera del sistema Solar. La densidad de la atmósfera hace que su decaimiento suceda predominantemente a una altura de unos 20 km, creando un estrato de partículas cargadas conocido como Máximo de Pfozter, por el físico alemán **Georg Pfozter** que lo descubrió en 1936.



Victor Hess,
1912,
aterrijaje
del globo.

Uno de los
tanques con
detectores
de rayos
cósmicos en
Malargüe
(fotografía
Observatorio
Pierre
Auguer).



En Malargüe desde 2004 funciona el Observatorio Internacional de Rayos Cósmicos **Pierre Auger**, bautizado en honor al físico francés que en 1938 elaboró la teoría de las lluvias cósmicas. Son 1.600 tanques de agua que tienen sistemas de espejos y detectores fotomultiplicadores, pero además detectores de la radiación azul de Cherenkov (**Pavel Cherenkov** fue el físico ruso que descubrió el fenómeno y obtuvo el Nobel en 1958) que ocurre cuando una partícula se mueve en medios transparentes a una velocidad mayor que la que corresponde a la luz en dicho medio. Allí se descubrió que gran parte de los rayos de más alta energía provienen de fuera de la Vía Láctea y una buena porción quizá de la ergósfera exterior al agujero negro del núcleo de una galaxia de la constelación del Centauro. Rayos de menor energía proceden de las tormentas solares y de otras estrellas. En conjunto se trata de partículas subatómicas de dos tipos: rayos primarios (protones, partículas α y en menor medida electrones y otras) y secundarios, resultantes de la interacción de los primarios con la atmósfera (muones –electrones pesados inestables– neutrones y fotones).

(**Los rayos X son de origen extranuclear**, a diferencia de los anteriores, originados por el frenado de un haz de electrones, por ejemplo contra un blanco metálico, produciendo fotones a partir de la energía cinética, con una frecuencia entre el UV y los rayos γ .)

SERIES RADIATIVAS

A la derecha, algunas de las series radiactivas más útiles para prospección (caso de las tres primeras) o para geocronología (todas, aunque no es tan usada la del $^{90}\text{Th}^{232}$). Se indica la radiación emitida en cada etapa.

Además del $^{92}\text{U}^{238}$, también el $^{92}\text{U}^{235}$ es radiactivo y tiene una serie con diversos isótopos intermedios, pero existe menos del 1% respecto al primero, por lo cual no suele ser importante en actividades exploratorias.

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES

Son tres, que aquí se describen.

Producción de Pares de Iones: cuando una partícula radiactiva penetra en un medio gaseoso puede chocar con alguno de los átomos que lo componen, generándose entonces un par de iones primarios de signo contrario: el electrón arrancado (anión) y el resto del átomo (catión, con una carga positiva que ahora no está compensada).

Con dos electrodos, con una diferencia de potencial a fin de otorgarles suficiente energía cinética, se produce una avalancha de pares de iones secundarios, que será acusada en los receptores. **Marie Curie** entendió cabalmente esto que antes había observado **Henri Becquerel**.

Como quedó dicho, la radiación α es la más efectiva para producir ionización, siendo bastante menor la producción de pares de iones en el caso de las β y muchísimo menor en el caso de las γ .

Efecto Fotoeléctrico: el alemán **Heinrich Hertz** descubrió imprevistamente este efecto que llevaría a cuestionar la teoría ondulatoria en la que él creía. Le resultó desconcertante que la chispa entre dos esferas de metal se volviera más brillante por aumento de descarga eléctrica (fotoelectricidad) cuando una de ellas era iluminada con luz ultravioleta. Hertz enfermó y murió a los treinta y seis años, antes de que se descubriese el

SERIES RADIATIVAS NATURALES (Hollander et al., 1953; Ahrens, 1956; Aldrich et al., 1956; Senftle, 1956.)				
Elemento	Núm. de masa	Número atómico	Periodo de semidesintegración	Radiación
Serie del uranio 238				
U	238	92	$4,5 \times 10^9$ años	α
Th	234	90	24 días	β
Pa	234	91	6,7 h, 1,2 min (2 isómeros)	β
U	234	92	$2,5 \times 10^5$ años	α
Th	230	90	8×10^4 años	α
Ra	226	88	1 620 años	α
Rn	222	86	3,8 días	α
Po	218	84	3 minutos	99,97 % α , 0,03 % β
Pb	214	82	26,8 minutos	β
At	218	85	2 segundos	α
Bi	214	83	20 minutos	99,96 % β , 0,04 % α
Po	214	84	$1,6 \times 10^{-4}$ segundos	α
Tl	210	81	1,3 minutos	β
Pb	210	82	22 años	β
Bi	210	83	5 días	β
Po	210	84	138 días	α
Pb	206	82		$8\alpha + 6\beta$
Serie del torio 232				
Th	232	90	$1,4 \times 10^{10}$ años	α
Ra	228	88	6,7 años	β
Ac	228	89	6,1 hora	β
Th	228	90	1,9 años	α
Ra	224	88	3,64 días	α
Rn	220	86	54,5 segundos	α
Po	216	84	0,16 segundos	α (alternativamente un poco de β)
Pb	212	82	10,6 horas	β
Bi	212	83	1 hora	63 % β , 37 % α
Po	212	84	3×10^{-7} segundos	α
Tl	208	81	3,1 minutos	β
Pb	208	82		$6\alpha, 4\beta$
Serie del potasio 40				
K	40	19	$1,2 \times 10^9$ años	β (90 %) o captura de electrón de órbita K
Ca	40	20		
o Ar	40	18		
Serie del samario 147				
Sm	147	62	$1,4 \times 10^{11}$ años	α
Nd	143	60		
Serie del rubidio 87				
Rb	87	37	6×10^{10} años	β
Sr	87	38		
Serie del carbono 14				
C	14	6	5 600 años	β
N	14	7		

electrón, cosa que en 1899 hizo el inglés **Joseph Thomson** a partir del estudio de los rayos catódicos, concluyendo que la luz UV provocaba la emisión de electrones –cuya carga fue medida por **Robert Millikan** en 1909 en U.S.A. mediante el ingenioso experimento de las gotas de aceite–. En 1902 el húngaro **Philipp Lenard** descubrió que también ocurría efecto fotoeléctrico entre dos placas metálicas dentro de un tubo de vidrio en vacío, porque la luz UV aporta a los electrones la energía necesaria para vencer el potencial de contacto con el metal (trabajo de extracción) y atravesar el espacio que los separa de la otra placa, completando el circuito. Se dedujo entonces la existencia de una frecuencia umbral de la luz incidente por debajo de la cual no hay emisión de fotoelectrones, cualquiera sea la intensidad de la luz y el tiempo de exposición. Superado ese umbral, los electrones se emiten instantáneamente con independencia de lo débil que sea el haz luminoso, en contra de lo años antes planteado por el escocés **James Maxwell**. La energía de los fotoelectrones aumenta con la frecuencia de la luz incidente. En 1905 el alemán **Albert Einstein** abordó el efecto fotoeléctrico proponiendo la teoría cuántica: la energía lumínica no está distribuida de forma continua como en una onda, sino de manera discreta, en cuantos indivisibles de energía, o sea que generalizó la cuantificación que su compatriota **Max Planck** (Nobel en 1918) ya había planteado en 1900. Según Planck, la energía E_f de un fotón está dada por: $E_f = h \cdot f$

(siendo f la frecuencia ondulatoria y h la constante de Planck, igual a $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s ó $4,135 \cdot 10^{-15}$ eV.s)

Einstein postuló que en las interacciones entre luz y masa, la energía se intercambia mediante la absorción o emisión de un cuanto luminoso que luego el estadounidense **Gilbert Lewis** llamaría fotón. Cuando un rayo γ (fotón) incide sobre la superficie de un metal o fibra de carbono puede transmitirle íntegramente su energía a los electrones de dicha superficie. Estos electrones podrán escapar atravesando la energía potencial que poseían.

Como la energía del fotón depende de la frecuencia, existirá un valor límite de ésta (el umbral de frecuencia fotoeléctrico) a partir del cual con frecuencias inferiores no habrá emisión de electrones.

A partir de Max Planck, **Albert Einstein** estableció que también podemos expresar que: $E_f = \phi + \frac{1}{2} m_f \cdot v_f^2$

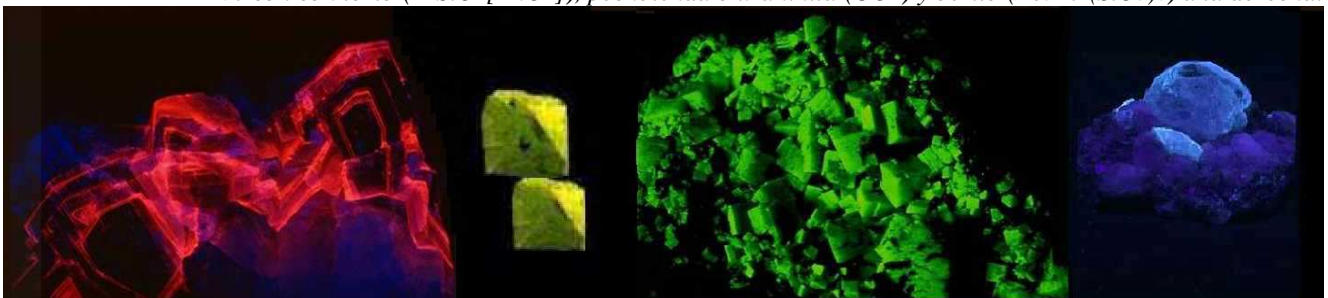
(donde m_f y v_f son la masa y la velocidad del fotón incidente –considerándose nula la m_f dado su carácter ondulatorio– y ϕ es el trabajo de extracción, es decir, la energía disponible para intentar extraer un electrón de la superficie a impactar)

Desde la fórmula y los conceptos antedichos, puede expresarse matemáticamente que: $\phi = h \cdot f_0$

(siendo f_0 el umbral de frecuencia fotoeléctrico, esto es, la frecuencia mínima para conseguir la extracción de un electrón, o sea producir efecto fotoeléctrico)

Entretanto, **Ernest Rutherford**, ya Nobel y gran promotor de la ciencia en su Nueva Zelanda natal, descubrió el protón en 1918, que en verdad ya había sido inferido por el alemán **Eugen Goldstein** por experiencias y deducciones hechas entre 1886 y 1899. Indemne a la radiactividad, Rutherford murió en Cambridge a los sesenta y seis, tras operarse una hernia que se le abrió podando los árboles de su casa.

Imágenes de minerales fluorescentes: desde la izquierda, calcita (CO_3Ca , no radiactiva), zircón con torio ($ZrSiO_4[ThO_2]$), pechblenda o uraninita (UO_2) y berilo ($Be_3Al_2(SiO_3)_6$) a la derecha.



Efecto Compton: es el responsable de la **fluorescencia**, que ocurre cuando se hace incidir un haz de rayos UV (fuera del espectro visible), cuyo choque genera radiaciones de menor frecuencia que en muchas sustancias son visibles. La **fosforescencia** es una emisión similar, pero diferida en el tiempo. Ambas son **fololuminiscencias**.

Este efecto fue descubierto por el estadounidense **Arthur Compton** en 1923 cuando, haciendo incidir un haz de rayos X sobre la superficie de materiales como grafito y parafina, comprobó la dispersión de éstos, resultando la frecuencia emergente menor que la del haz incidente, otra contradicción con la teoría ondulatoria. Adoptó entonces una explicación cuántica del fenómeno, interpretando la modificación de la frecuencia en los rayos difundidos como un choque elástico entre el electrón y el fotón (con un comportamiento corpuscular para el cual puede plantearse una m_f no nula). Ocurre que en el choque el fotón pierde una cantidad de energía, queda

medio rango, pero no palma, sino que se reinventa como otro de menor frecuencia.

Volviendo a la fórmula de Albert Einstein, puede escribirse ahora que: $E_f = \phi + \frac{1}{2} m_f \cdot v_f^2 = h \cdot f_0 + h \cdot f'$

El término $h \cdot f'$ representa la energía del nuevo fotón que emerge, siendo $f' < f_0$

En ese 1923 el francés **Louis de Broglie** (otro Nobel, al igual que Compton) cerró la teoría generalizando la dualidad onda-corpúsculo al caso de las partículas como los electrones, asignándoles una onda asociada ficticia, poniendo así el moño a este nuevo paquete conceptual.

Otros Cuantos Sucesos

El concepto de ἄτομοι (átomos: indivisible) como unidad material lo debemos al griego **Demócrito de Abdera** (circa 420 a.C.). Más de dos milenios después, entre 1803 y 1807, el inglés **John Dalton** (que nada tuvo que ver con las invasiones a Buenos Aires) retomó el concepto pero atando el átomo a datos modernos de la física. Un siglo después, en 1902, el estadounidense **Gilbert Lewis** propuso un átomo cúbico y en 1904 el inglés **Joseph Thomson** planteó un sabroso modelo tipo budín con pasas (que eran los electrones incrustados entre la nube de harina positiva). En 1911, ya con mucha más data, el kiwi **Ernest Rutherford** propuso el modelo atómico base que ha seguido hasta hoy, que fue sucesivamente ajustado y mejorado por el danés **Niels Bohr** en 1913 (primer modelo cuántico, con los números n que definen el tamaño de cada orbital) y por el alemán **Arnold Sommerfeld** en 1916, quien planteó que el momento angular, L , del átomo de hidrógeno está cuantizado y sólo puede tomar los valores $|L| = \hbar[l(l+1)]^{1/2}$ (siendo $l = 1, 2, \dots, n-1$ con la constante reducida de Planck $\hbar = h / 2\pi$) y la componente vertical del momento, L_z , también está cuantizada según $L_z = \hbar \cdot m$ (siendo el número cuántico magnético $m = -l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$). En 1924 el austríaco **Erwin Schrödinger** asoció a cada nivel de energía varias posibles funciones de onda, lo que implica que puede haber distintos tipos de orbitales con sus niveles y subniveles energéticos. Eran años vertiginosos en la investigación física básica.

El inglés **Paul Dirac** fue un gran genio, humilde, humanista, ateo y de lenguaje escueto y preciso. Una vez le preguntaron sobre poesía y contestó: "en ciencia uno intenta decir a la gente, de una manera en que todos lo puedan entender, algo que nunca nadie supo antes. La poesía es exactamente lo contrario". Sus colegas acuñaron una unidad, el *dirac*, para la cantidad mínima de palabras que se podían decir en una conversación. Paul halló en 1926 que la mecánica de funciones de onda propuesta por **Erwin Schrödinger** y la mecánica matricial planteada por los alemanes **Max Born** y **Werner Heisenberg** eran formalmente equivalentes y podían unificarse en una única teoría general para explicar la dualidad onda-corpúsculo. Born había descubierto que el cuadrado del valor de la función de onda define la probabilidad de encontrar a la partícula en un punto e instante dados, porque basta conocer esa función para estimar con un margen de error estadístico la posición particular y no hace falta saber la historia previa del sistema. De ahí la **interpretación de Copenhague** que dio en 1927 Bohr (nativo de dicha capital danesa) en una conferencia en Como (Italia).

La interpretación de Copenhague plantea que la dinámica determinista de Newton (la posibilidad concreta de conocer simultáneamente posición y velocidad de una partícula para saber cómo seguirá su camino) no aplica a escalas subatómicas, algo que Einstein se resistía a creer: "Dios no juega a los dados". Pero Heisenberg demostró que en el marco de la física cuántica no podemos prever cómo caerán los dados.

El **principio de incertidumbre o indeterminación de Heisenberg** sostiene que, si x es una coordenada de posición de la partícula y p_x es su momento lineal en x , el producto de su indeterminación es mayor o igual que la constante reducida de Planck dividida dos. Es decir: $|\Delta x| \cdot |\Delta p_x| \geq \hbar / 2$ O sea que si se pudiera determinar con exactitud, por ejemplo, la posición, aumentaría la indeterminación del momento lineal (y por tanto de la velocidad) hasta igualar o superar la magnitud límite indicada ($5,27 \cdot 10^{-33}$ J.s ó $3,29 \cdot 10^{-14}$ eV.s). La fórmula anterior es equivalente a: $|\Delta E| \cdot |\Delta t| \geq \hbar / 2$ Significa que no es posible determinar simultáneamente y sin errores el valor exacto de la energía de un proceso y el momento en que éste ocurrirá.

El principio de incertidumbre determina, entre otras minucias fundamentales, la **corta vida de los bosones masivos** W y Z , cuyo intercambio da origen a la **fuerza nuclear débil**, y ésta es la razón por la cual **el alcance de esta fuerza física básica no va más allá del núcleo atómico**: las partículas se evaporan tan rapidísimo que, incluso disparadas a la velocidad c , no pueden llegar más lejos que 10^{-18} m (aunque el proceso también le sucede a los leptones pesados, como el muón, igual de rápido estando fuera del núcleo). Y, por el mismo principio, la **fuerza nuclear fuerte** –la que evita que el núcleo se desparrame a causa del rechazo eléctrico entre los protones y más fundamentalmente mantiene unidos a los tres quarks que conforman cada neutrón o cada protón–, si bien su alcance en este caso es mayor, **también está limitada al perímetro nuclear**, debido a que las partículas mediadoras entre los quarks (**gluones**) **expiran en cortísimos lapsos de tiempo**, no pudiendo llegar

con vida más allá de 10^{-15} m (por suerte, porque, si no, todos los núcleos atómicos del cosmos se habrían enredado en un único hipermaxisupermegagigánucleo universal y entonces el Barba ¡otra que 6 días para confeccionar todo!: ¡aún estaría viendo cómo miércoles desanudar semejante madeja enmarañada!

El modelo atómico fue completado por la **electrodinámica cuántica**, llamada “la joya de la física” por su gran poder predictivo. Fue desarrollada desde 1948 por el japonés **Shin'ichirō Tomonaga** en Tokio y por los estadounidenses **Julian Schwinger** en Harvard y el brillantísimo **Richard Feynman** en California.

APARATOS DETECTORES

➤ Los primeros aparatos usados en prospección fueron:

- **Electroscopio:** luego del primero de aguja de **William Gilbert** (1600), fue diseñado con láminas de oro por el francés **Jean Nollet** (1748) y otros. Se descarga tanto más rápido cuanto mayor es la radiación ambiente que ioniza el aire.

- **Placas Fotográficas:** en las que la emulsión de bromuro de plata (AgBr) se reduce a plata negra según la intensidad de la radiación. (El esloveno **Janez Puhar** en 1841 y otros iniciaron el desarrollo de la fotografía –obvio que para otro fin– que reemplazaría al daguerrotipo de **Louis Daguerre**.)

- **Spintariscopio** (*σπινθήρ*, spintír: destello; *σκοπέω*, scopéo: mirar en griego): ideado por el inglés **William Crookes** (1903), caja cerrada con una placa de cristales de blenda (ZnS) donde se ponía la muestra, que si era radiactiva hacía que la blenda emitiera destellos visibles desde el ocular.

- **Cámara de Ionización:** desarrollada desde 1896 por **Wilhelm Röntgen**, **Henri Becquerel** y otros, usada en prospección desde 1913. Es un tubo de vidrio o metal con gas en su interior (aire, metano, argón u otro) donde, si entra radiación ionizante, ocurre desplazamiento de iones creando un camino conductor entre el ánodo y el cátodo. El pulso eléctrico puede oírse como chasquido en los auriculares. Opera con tensión de 100 a 500 V.

➤ Los siguientes son los aparatos más modernos:

- **Contador Geiger-Müller:** desarrollado en 1928 por los alemanes **Hans Geiger** y **Walther Müller** a partir de la cámara de ionización, pero, a diferencia de ésta, trabaja con tensiones más altas, de entre 800 y 1.000 V (comparación abajo y figura a la derecha). Tiene una entrada de radiaciones al tubo (semejante al de la cámara)

las cuales colisionan con los átomos del gas allí contenido (metano y argón). Esto genera la

expulsión de electrones en avalancha, que son

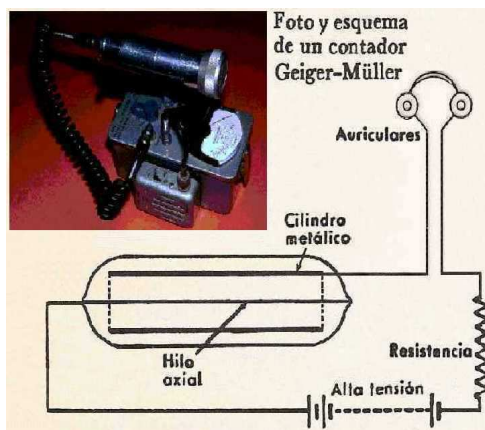
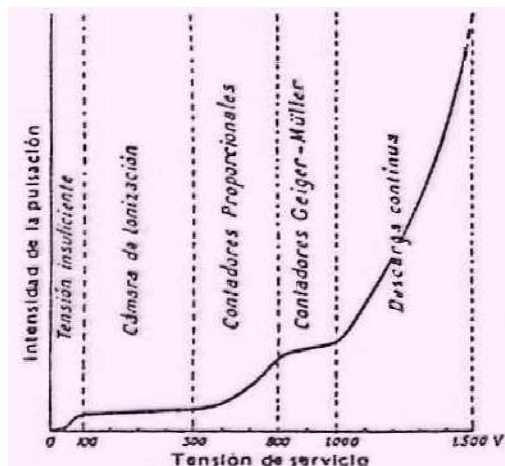
ahí registrados como una única pulsación, independientemente de la cantidad de energía inicial de la radiación, no siendo posible la distinción de distintas clases de emisión. Asegura respuestas en presencia de niveles bajos de radiación.

- **Contador Proporcional:** similar al anterior, trabaja a menor voltaje (500 a 800 V), por lo cual se produce un **menor efecto multiplicador de electrones**. La producción de pares de iones depende esencialmente de la energía de la radiación captada, por lo que puede distinguir tipos variables de emisión, siempre que no sean de muy baja intensidad. La ventana de ingreso de las radiaciones consiste en una interfaz que permite entrar sólo la radiación deseada, sea α , β ó γ . Si, por ejemplo, se desea prospectar radiación beta, se impide la entrada de las otras dos al tubo y el aparato recibe el nombre de **betámetro**.

- **Centellómetro o destellómetro** (*scintillation counter*): inspirado en el spintariscopio de Crookes, fue inventado por el irlandés **Samuel Curran** en 1944 como parte del Proyecto Manhattan. Posee un fotocátodo, un



Canada: explorent pour de l'uranium au T.N.O. en 1944 à l'aide d'une chambre d'ionisation.



tubo fotomultiplicador, una cámara de destellos y un registrador electrónico. El fotocátodo consiste de cristales de moléculas de cierta sustancia llamada fósforo, que puede ser inorgánico como yoduros (NaI, CsI u otros, casi siempre activados con Tl), u orgánico como antraceno, naftaleno, etc. En algunos átomos de estas moléculas, al llegar una cierta radiación, se excitan algunos de sus electrones, ceden energía para volver a su estado normal y entonces emiten radiación EM en la frecuencia de la luz visible: los **destellos característicos del efecto Compton**, que pueden visualizarse en la cámara de destellos (figura a la derecha). Pero además **el fotocátodo emite electrones** (por efecto fotoeléctrico) **hacia el interior del tubo fotomultiplicador**. Éste es un sistema amplificador de señal que consiste en una sucesión de ánodos con potencial eléctrico creciente, en cada uno de los cuales, ante la llegada de cada electrón, se emiten múltiples electrones secundarios, lo cual desencadena un efecto en cascada, hasta el último ánodo (colector), desde donde se realiza el **registro electrónico de la pulsación resultante**, proporcional a la radiación total detectada.

Al igual que en los contadores proporcionales, también en los centellómetros una interfaz absorbente a la entrada del dispositivo permite seleccionar el tipo de radiaciones a prospectar; por ejemplo para detectar radiación γ se filtran las α y β .

Los centellómetros comenzaron a utilizarse en **prospección aérea** en la década de 1950, sobre todo en Canadá, junto con magnetómetros y a veces con dispositivos EM de emisor y receptor móviles.

- **Emanómetro**: es un centellómetro modificado para la detección del gas radón y sus isótopos, utiliza un fósforo, que suele ser SZn activado con Ag . Tiene una trampa neumática para la captura de los gases emanados del suelo, canalizados por un pequeño tubo que manualmente se hinca en el terreno.

- **Berilómetro**: consta de un centellómetro y un emisor de antimonio radioactivo ($^{124}_{51}Sb$) cuyos rayos γ , en caso de alcanzar berilo $-Be_3Al_2(SiO_3)_6-$ u otros minerales con berilio (Be), los excitan y producen la emisión de neutrones que entonces se detectan:

$\gamma \gg {}_4^9Be + {}_2^4He \rightarrow {}_6^{12}C + n^1$ (El Be fue lo más cocido que salió del horno del Big Bang.)

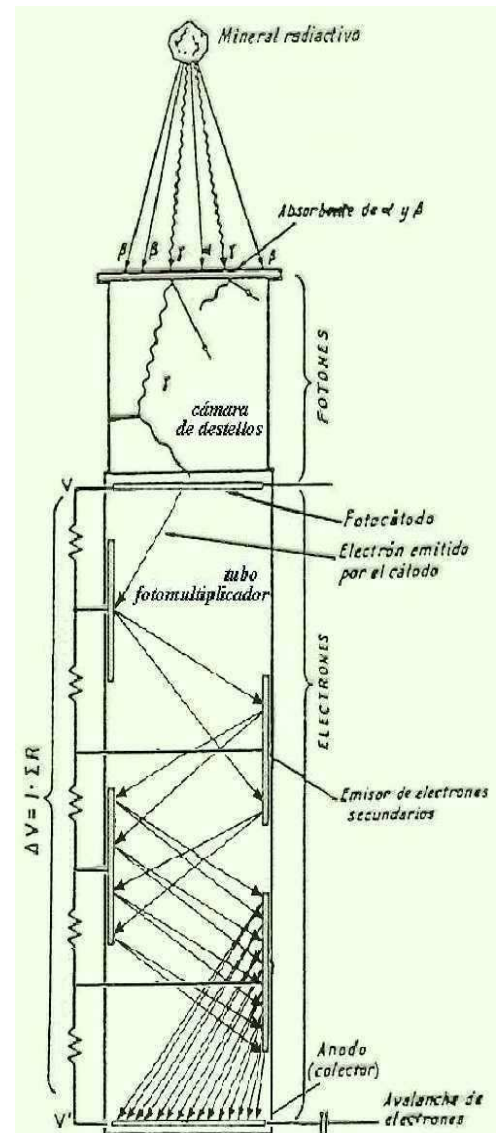
- **Espectrómetro de rayos γ** : ideado por **Robert Pringle, Kenneth Roulston y George Brownell** en 1949 en Canadá, fue efectivamente desarrollado hacia 1960 en ese mismo país. Permite identificar los isótopos emisores de los rayos γ midiendo la energía con que éstos arriban al aparato. Actualmente existen dos tipos principales:

Los más **convencionales** (fotografía adjunta) están contruidos sobre la base de un centellómetro de NaI (Tl) al que se ha acoplado un sistema electrónico de analizador multicanal que formatea la sucesión de pulsos arribados



según el número de cuentas/segundo en ordenadas y canales o ventanas W_n de muestreo (que se corresponde con energía en MeV) en abscisas (primera figura de la página siguiente).

Los de **mayor resolución** –y mayor costo– poseen un detector de un material semiconductor, también llamado de estado sólido (alguna aleación de cadmio o preferentemente germanio puro). Con la llegada de rayos γ al detector (que allí pueden producir efecto fotoeléctrico, efecto Compton o ionización) se provoca un movimiento de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción del semiconductor, lo que en presencia de un campo eléctrico genera un desplazamiento hacia el ánodo, resultando en una variación de tensión que es registrada y formateada por el



analizador multicanal.

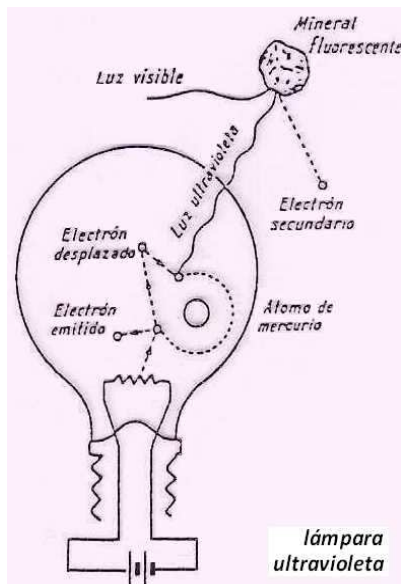
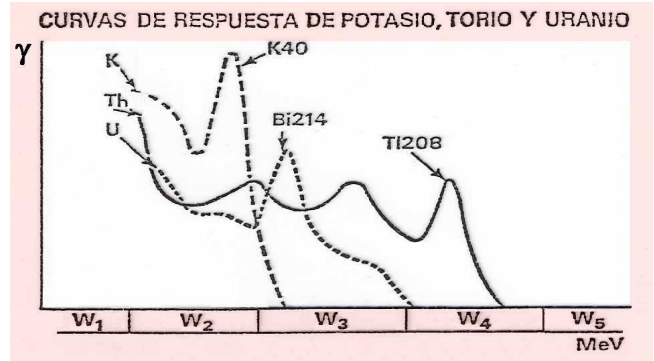
Los canales de muestreo pueden ser 512, 1.024,... hasta 16.384, según sea la capacidad de resolución del aparato. Así, visualizando los picos en el espectro, se consigue identificar a los tres elementos radiactivos comúnmente prospectados por su abundancia, a través de la radiación del isótopo más fácilmente identificable en su correspondiente serie, esto es, su “equivalente”.

Tenemos entonces:
- $^{92}\text{U}^{238}$, a través del $^{83}\text{Bi}^{214}$, con una ventana energética situada entre 1,66 y 1,86 MeV

- $^{90}\text{Th}^{232}$ a través del $^{81}\text{Tl}^{208}$, con una energía que va de 2,41 a 2,81 MeV

- $^{19}\text{K}^{40}$, a través de sí mismo ya que es el único isótopo radiactivo de su serie, 1,37 a 1,57 MeV

Además, como ruido pueden detectarse los rayos cósmicos en valores superiores a 3 MeV, aunque siempre se intenta minimizarlos a través de pantallas de plomo arriba, especialmente cuando se hace adquisición aérea.



- **Lámpara Ultravioleta:** A partir de una idea de **H. Becquerel** (1859) y pasando por un prototipo de **W. Crookes** (1870), fue **Thomas Edison** quien la patentó en 1893 en Estados Unidos. Consta de un electrodo caliente, usualmente de tungsteno, que por emisión termoiónica desprende electrones a gran velocidad, que en su trayectoria alcanzan electrones corticales de átomos de mercurio presentes, desplazándolos de sus órbitas, como se ve a la izquierda. Cuando éstos regresan a su posición, emiten radiaciones ultravioleta que alcanzan los átomos del mineral fluorescente, los que por efecto Compton emiten ondas de frecuencias dentro del espectro visible.

UNIDADES DE CONTEO

En honor a **Wilhelm Röntgen** se usa el **miliroentgen** (10^{-3}R):

$$\text{mR} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ golpes o cuentas/hora} = 2,58 \cdot 10^{-7} \text{ C/kg en el aire}$$

La “dosis equivalente” es el **sievert**: $1\text{Sv} = 1\text{J/kg} = 10^5\text{mR}$

en honor al sueco **Rolf Sievert**, pionero en estudios médicos de la radiación entre 1945 y 1965, inventor de aparatos de medida y muy activo en la ONU. Una exposición mayor a 0,25 Sv diarios es perjudicial para la salud (son 0,05 en una radiografía o un vuelo). No hay riesgo en sitios geológicos naturales.

RADIATIVIDAD DE LAS ROCAS (AQUENDE Y ALLENDE LA TIERRA)

Pese a su escaso espesor, la **corteza** se estima genera el 17% de la radiactividad terrestre total, porque es la envoltura con mayor proporción de radioisótopos (sobre todo en sus rocas graníticas). El **núcleo**, pese a su masa mucho mayor, sólo alcanzaría cerca del 18%. El restante 65% correspondería a la emisión del enorme **manto**. La cuantía y distribución de las radiaciones es variable por estar en relación con la mayor o menor distribución de los elementos que las emiten, lo cual va a depender de la composición mineralógica de las rocas aflorantes (o, si fuera el caso, atravesadas por una calicata, una galería o un sondeo).

Sobre los cuerpos de agua la detección radiactiva se hace mínima, casi nula, y por esto se miden allí los valores de fondo (*background*) en cada región a prospectar.

Como se mencionó, los isótopos más abundantes, con períodos de semidesintegración del orden de la edad de la Tierra, son el $^{92}\text{U}^{238}$ ($4,5 \cdot 10^9$ años), el $^{90}\text{Th}^{232}$ ($1,4 \cdot 10^{10}$ años) y $^{19}\text{K}^{40}$ ($1,2 \cdot 10^9$ años). Los tres, pero sobre todo el **U** y el **Th** (frecuentemente como óxidos), **son generalmente más abundantes en las rocas ígneas y bastante más en graníticas que en basálticas**, variables en las metamórficas y más escasos en las sedimentarias (las arenas de monacita, con ThO_2 , son una de las excepciones). El $^{92}\text{U}^{238}$ constituye el 99,28% del total del U en la Tierra, el $^{90}\text{Th}^{232}$ es el 100% del torio y el $^{19}\text{K}^{40}$ representa sólo el 0,01% del total del potasio. En continentes la media es K 1,15%, Th 4,20ppm y U 1,09ppm. En corteza oceánica K 0,65%, Th 0,22ppm y U 0,07ppm.

Las **rocas calcáreas tienen niveles radiactivos normalmente muy bajos** (salvo en fracturas con depósitos de sales de uranio u otros casos excepcionales). En cambio se registra una radiactividad habitualmente **mayor entre las rocas clásticas debido al potasio**, que es normalmente más abundante en arcillitas (o en areniscas feldespáticas), así como por la presencia minoritaria de torio, **variando la relación Th/K según los distintos**

minerales de arcilla (se indica K_{total} , no sólo el $^{19}K^{40}$). En ambientes depositacionales reductores precipita el ión uranilo (UO_2^{++} , soluble en entornos oxidantes) y a la vez se preserva la materia orgánica, que luego podrá eventualmente mutar en hidrocarburos o carbón. De modo que **el uranio es indicador de roca madre o de combustibles fósiles**, que en el caso del petróleo puede luego migrar a reservorios de ambiente oxidante. (Ver cuadro de U y Th en sedimentos, rocas y fluidos.)

Otros elementos radiactivos pueden registrar una importante participación en casos particulares.

Los demás planetas y sus lunas obvio que también tienen radioisótopos, aunque se conoce poco de Venus y otros. En la Luna, Marte y Mercurio se ha verificado la predominancia de K, U y Th en valores comparables a nuestra corteza oceánica. (Luna, K 0,10%, Th 0,23 ppm y U 0,06 ppm; Mercurio, 0,12%, 0,22 y 0,08 ppm; Marte, 0,38%, 0,59 y 0,16 ppm, respectivamente.)

La corteza granítica terrestre es única en el sistema Solar, resultado del agua y la tectónica de placas.

El saturniano Titán quizá tenga mucho UO_2^{++} en su ambiente anóxico con lagos de hidrocarburos.

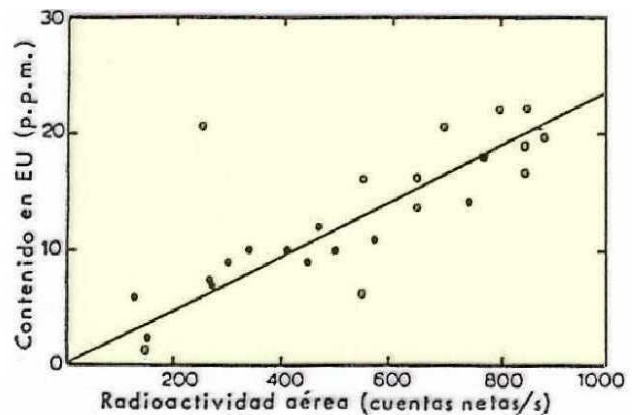
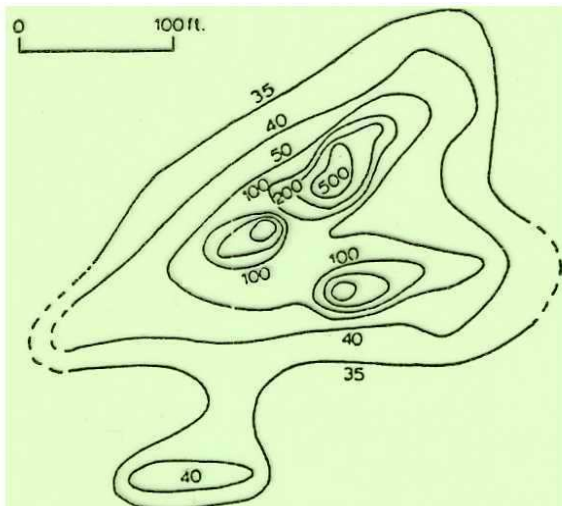
Contenidos medios de U y Th en rocas y sustancias naturales

SUSTANCIA	URANIO g/tm	TORIO g/tm
Agua del mar	0,00015 a 0,0016	
Fosfatos marinos	0,001 a 0,065	
Humus y cenizas de carbón	0,005	
Sedimentos marinos	0,65 a 1,07	
Cenizas vegetales	7	
Aguas de los campos petrolíferos	10	
Carbón kolm de las pizarras arcillo-aluminosas	50 a 100	
Petróleo	100	
Asfaltita de Utah (U.S.A.)	2880	
Rocas ígneas básicas	0,96	3,9
Rocas ígneas intermedias	2,61	9,97
Rocas graníticas	3 a 5	13,4
Diabasas	0,83	2
Basaltos	0,83	5
Calizas	1,3	1,1
Rocas sedimentarias en general	1,2	
Rocas de origen arenoso		5,4
Rocas de origen arcilloso		12
Arcillas pizarrosas		10,1

APLICACIONES PROSPECTIVAS

Las actividades de cateo por métodos radiactivos utilizando alguno de los aparatos detectores arriba referidos puede realizarse en la modalidad más antigua, terrestre, con un mallado acorde a las dimensiones del objetivo, ya sea éste regional o local. Pero también es posible hacerlo desde aviones o helicópteros (**aerorradiometría**), algo que se inició durante la década de 1950, eficaz por la rapidez de cobertura de grandes áreas. **Arthur Brant** desde 1940 perfeccionó aplicaciones del contador Geiger-Müller para propección aérea en el noroeste canadiense. Otros científicos siguieron su vuelo. Los recaudos en aerorradiometría son similares a los de otras metodologías aéreas (aerogravimetría, aeromagnetometría, aerelectromagnetismo y otras), es decir, habrán de procurarse altitudes de vuelo constantes y tan bajas como se pueda –desde aviones generalmente un mínimo de 100 metros, según el tipo de avión, relieves y regulaciones aéreas locales–, seguir líneas rectas paralelas, otras perpendiculares para vinculación, y velocidades de vuelo lentas para un mejor muestreo –en aviones no es posible menos de 100 km/hora–. En la pag.11 del Tema 3 hay un **ejemplo aéreo en Canadá** junto a otros métodos. En ciertos casos los dispositivos de registro también pueden ser llevados por globos o drones.

La figura siguiente a la izquierda muestra un mapeo terrestre a escala de detalle también en Canadá. Y hacia la derecha datos de radiometría aérea de dos regiones que permiten ver la correlación de las ppm de equivalente U (de muestras) en relación al conteo radiométrico de campo.



Equivalente en uranio de muestras de suelo del condado de Washington y de la llanura costera de Tejas en función de la radiactividad aérea.

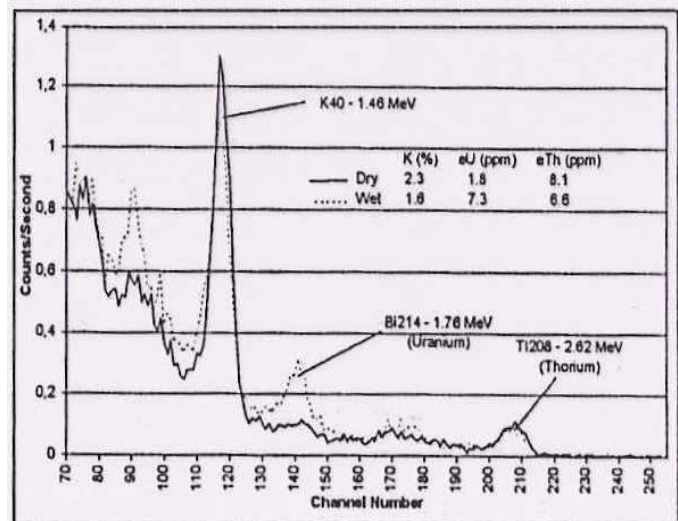
○ = Muestras del condado de Washington (eU calculada)
 ● = Muestras de la llanura Costera de Tejas (eU por análisis radiométrico). (Según MOXHAM, 1963.)

Mapa de radiactividad de una denuncia en la zona de Goldfields (Canadá); cuentas de destellómetro (EVE and KEYS, 1956, p. 317.)

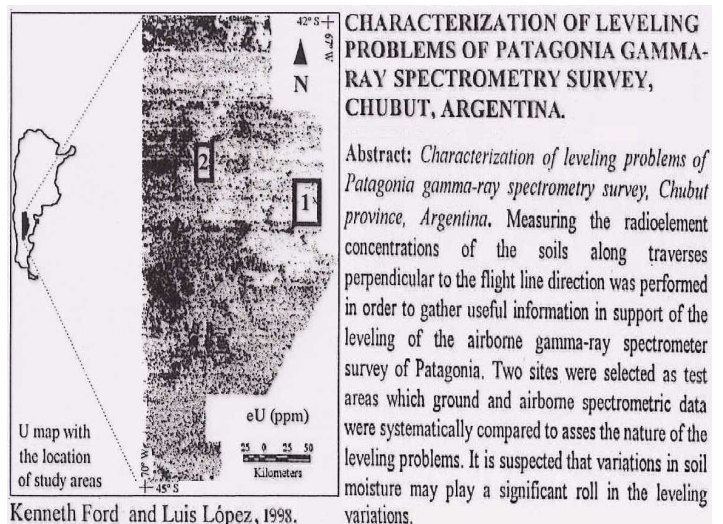
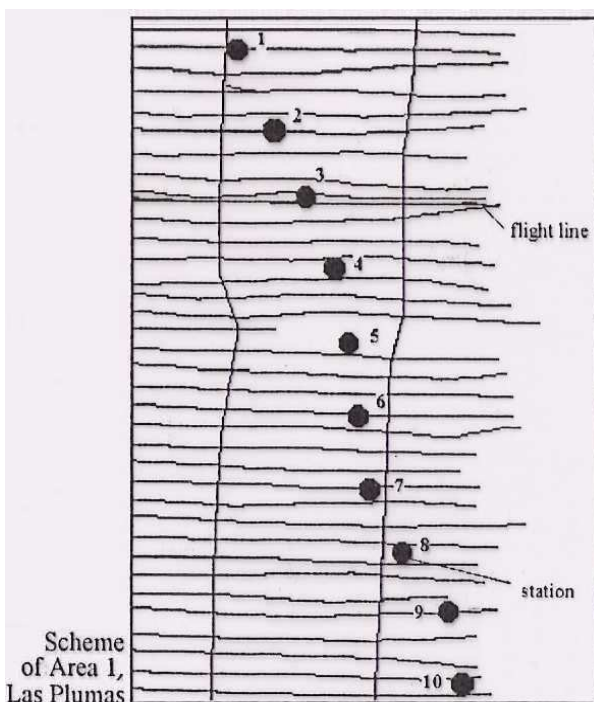
DETECCION	DETECTADOS
1) Criaderos de minerales radiactivos	a) Uranio b) Torio c) Especies uranotoríferas
2) Criaderos de minerales asociados con radiactivos	a) Monacitas b) Tierras raras c) Tántalo-niobitas y sus paragenéticos (Sn, W, Ti) d) Berilio e) Vanadio (carmotita, tyuyamunita, francevillita) f) Potásicos (silvinita, carnalita, alunita) g) Feldespatos potásicos h) Muscovita i) Petróleos j) Ciertos carbones k) Ciertos asfaltos
3) Rocas con diversos grados de radiactividad	a) Areniscas b) Pizarras bituminosas c) Hipogénicas y volcánicas d) Sedimentarias e) Metamórficas f) Aluviones y placeres
4) Estructuras y dataciones geológicas	a) Fallas b) Diques pegmatíticos c) Límites formativos
5) Testificación geofísica	a) Minerales y rocas aflorantes b) Sondeos

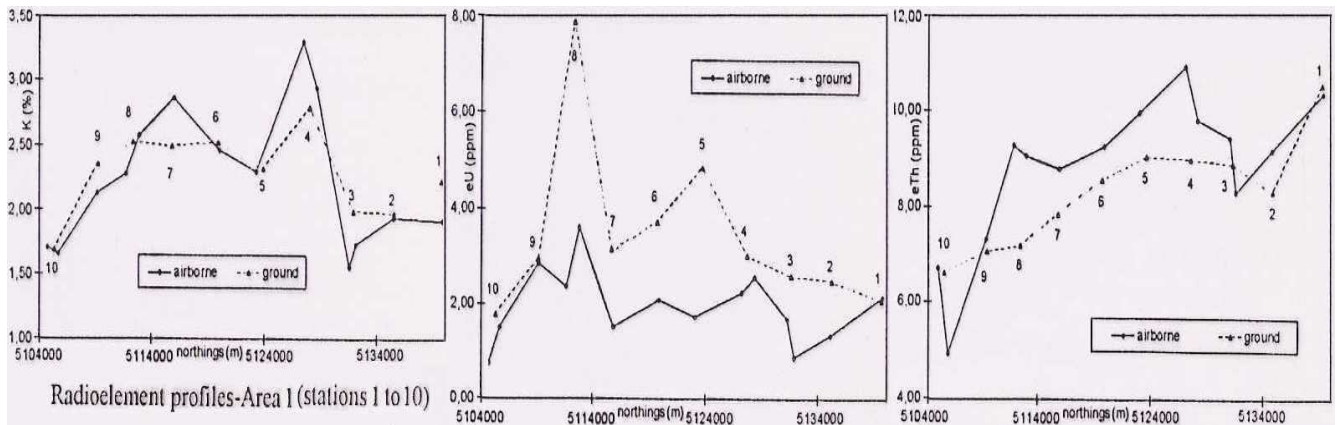
Los objetivos de este método, además de la propia búsqueda de yacimientos de elementos radiactivos, pueden referirse a la **prospección de otros elementos no radiactivos de interés económico pero que se encuentren asociados paragenéticamente** con los que sí lo son (véase el cuadro adjunto), aunque en la determinación de los sectores de interés a partir del mapeo de valores debe tenerse presente la posible dispersión de elementos radiactivos en un área mayor a la del yacimiento considerado.

Las siguientes figuras de esta página y primeras de la siguiente resumen una aplicación aérea en la provincia de Chubut, en la que se coteja con datos espectrométricos terrestres y además se presenta una curva que manifiesta la detección variable de uranio (mediante Bi radiactivo) según que el suelo esté húmedo o seco, en función del clima. Esto se debe a que **el terreno húmedo impide el normal escape del radón**, que forma parte de la serie del ^{238}U , el cual se acumula dando una señal de ^{214}Bi que lleva a sobrevaluar el contenido en U del área cateada.

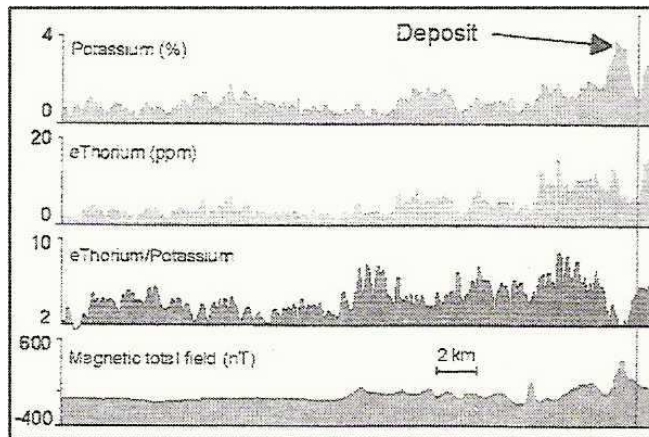


Moisture effects on gamma ray activity (stations 15 and 18)

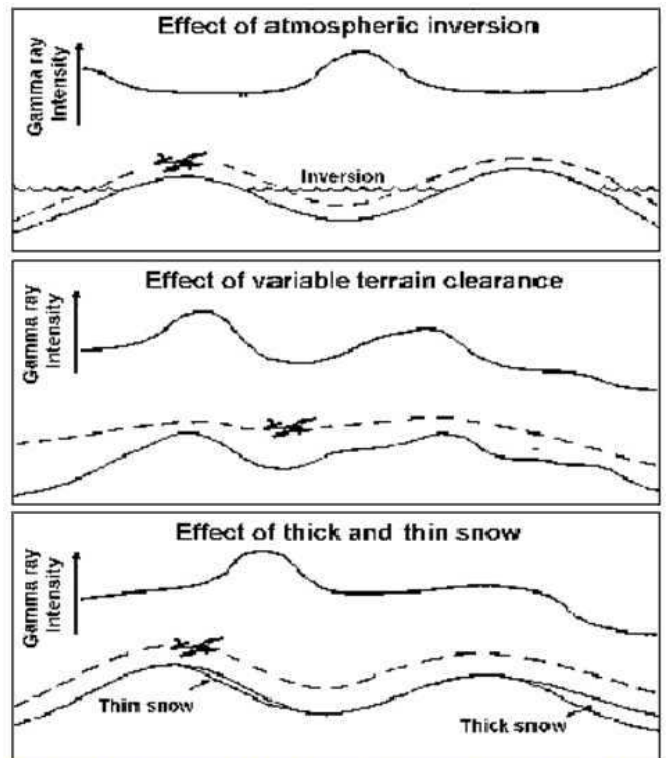




Al igual que la humedad variable del terreno, otros factores naturales pueden generar ruidos, como la inversión térmica atmosférica (*temperatura en altura mayor que a nivel del suelo*), la fluctuación marcada de la *altura de vuelo* respecto al nivel del terreno, *acumulaciones nievales delgadas que atrapan radón* (y hacen sobrevaluar el U), la *presencia de lagunas, ríos o nieve espesa* que hacen de pantalla (reduciendo la emisión γ) y la *contaminación humana*.

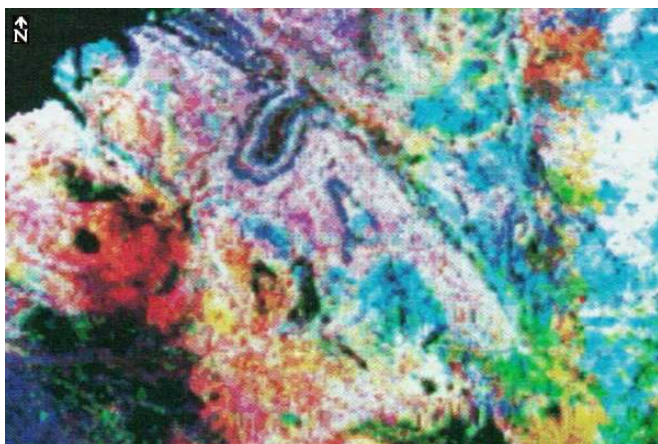


Stacked profile over the Casino deposit

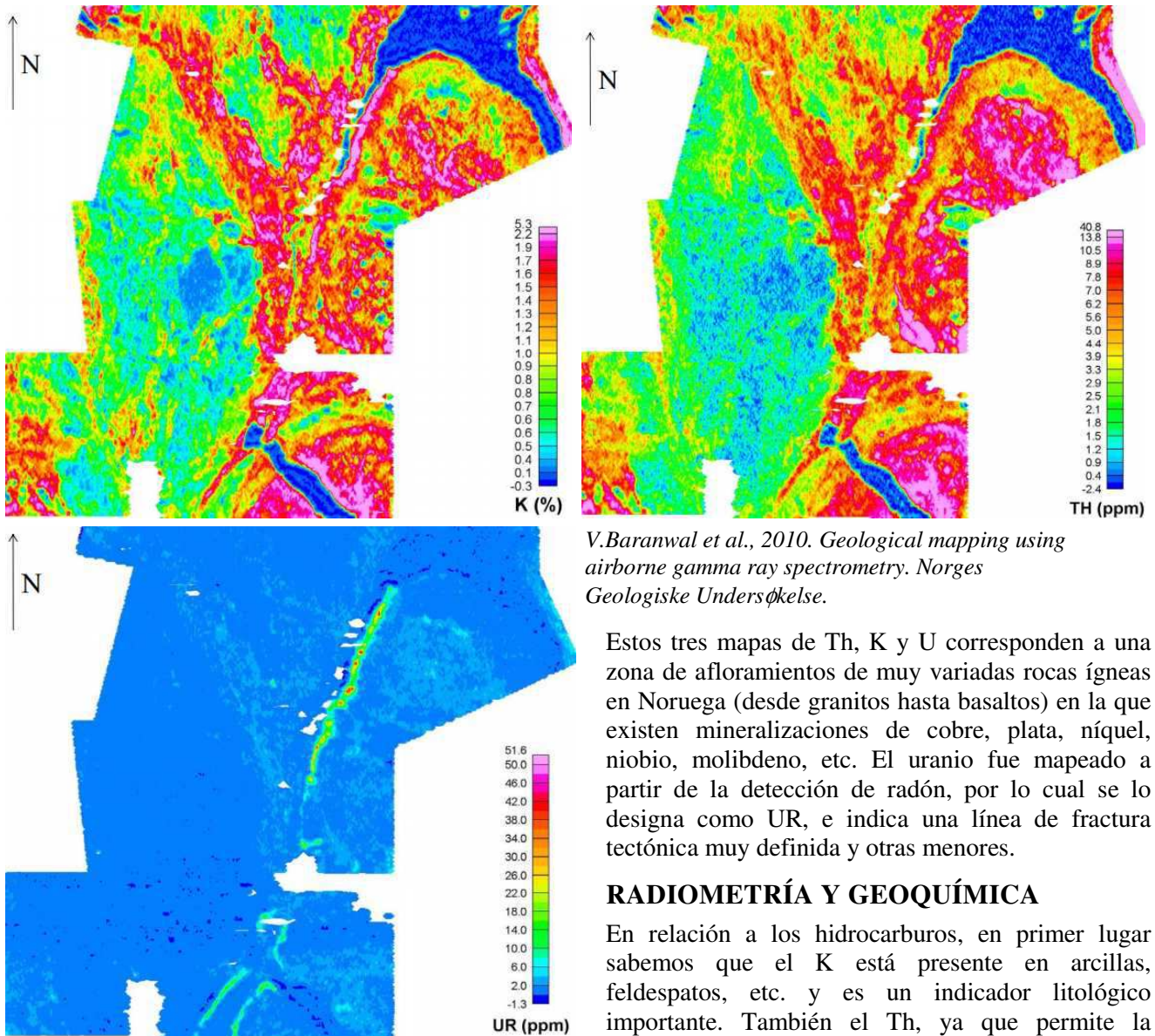


Non-geologic causes of radiometric anomalies (Hansen 1980)

Es común representar cortes o mapas con relaciones Th/K para identificar distintos minerales arcillosos u otras litologías, como el caso de arriba en la mineralización Casino en British Columbia (Canadá). Igualmente puede graficarse la relación U/Th y otras que pudiesen considerarse útiles para la interpretación.



La figura de la izquierda es un **mapa ternario espectrométrico** de otra área de Canadá. Es un tipo de presentación que asigna un color a cada serie isotópica registrada (torio en rojo, uranio en verde y potasio en azul) cuya intensidad varía en función del conteo total de cada uno, que correspondería al 100% (color más intenso) hasta 0% (blanco) y sustrayendo los respectivos tres colores en cada punto de modo tal que si se acerca al negro es porque la radiactividad de las tres series es muy alta. En general se busca dar cierta semejanza entre el color real de las rocas y el resultante de estos mapas, aunque en otros relevamientos se ha optado por otras paletas de color para los mapas ternarios.



V.Baranwal et al., 2010. Geological mapping using airborne gamma ray spectrometry. Norges Geologiske Undersøkelse.

Estos tres mapas de Th, K y U corresponden a una zona de afloramientos de muy variadas rocas ígneas en Noruega (desde granitos hasta basaltos) en la que existen mineralizaciones de cobre, plata, níquel, niobio, molibdeno, etc. El uranio fue mapeado a partir de la detección de radón, por lo cual se lo designa como UR, e indica una línea de fractura tectónica muy definida y otras menores.

RADIOMETRÍA Y GEOQUÍMICA

En relación a los hidrocarburos, en primer lugar sabemos que el K está presente en arcillas, feldespatos, etc. y es un indicador litológico importante. También el Th, ya que permite la identificación de tipos de arcillas, tal como se hace

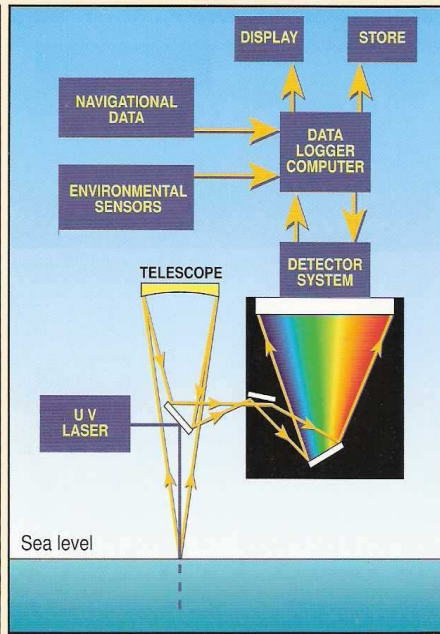
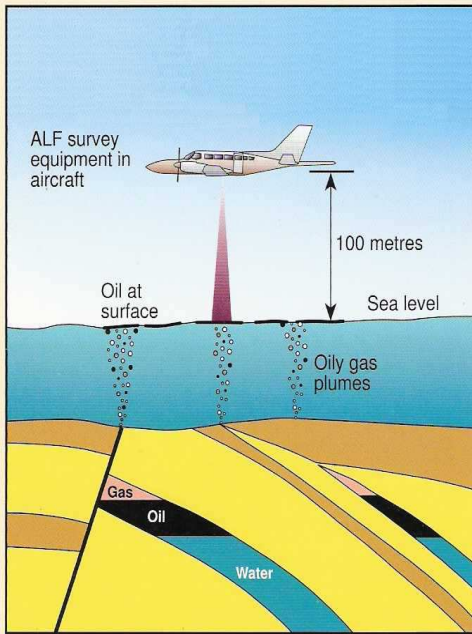
en los perfiles radiactivos de pozos. Pero además el U, como se explicó, está asociado al petróleo y a su roca madre. Siempre que hay hidrocarburos ocurre aumento de radiactividad debida al uranio, la cual suele magnificarse en zonas de falla o áreas de **microfugas de hidrocarburos** hacia la superficie. El mapeo de este tipo de anomalías (por **micromanaderos**) suele ser una interesante herramienta prospectiva, muchas veces complementada con **metodologías geoquímicas**:

- muestreo microbiológico en general para cuantificar sus variaciones
- determinación específica de bacterias de la biodegradación
- detección de gases: helio producido por el decaimiento radiactivo del uranio y otros elementos, radón, que como vimos es un isótopo de la serie del uranio, cromatografía de metano, etano, propano y butano escapados de reservorios
- evaluación de las alteraciones del suelo (caolinita, carbonatos, yoduros, pirita, magnetita, etc.)
- estimación de cambios geobotánicos, y otros, **también con la ayuda de imágenes aéreas o satelitales en distintos rangos del espectro EM, visible, UV, de radar, etc.**

Ya hemos visto que distintos métodos permiten detectar en forma indirecta algunas de estas alteraciones: micromagnetometría, inyección de corriente, electromagnetismo, polarización inducida.

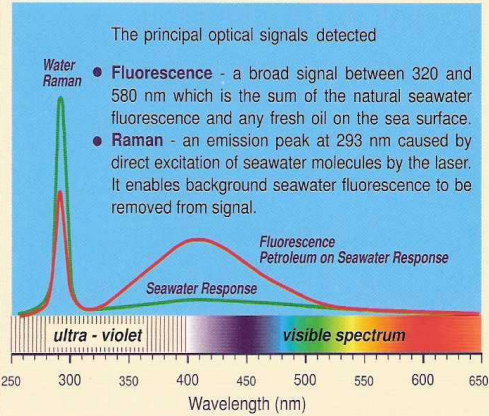
Otros registros, como la **detección de gases**, que se puede hacer indirectamente con la prospección radiométrica, en forma aérea o terrestre, por ejemplo con un emanómetro.

Las siguientes figuras refieren a una técnica moderna que permite **detectar fluorescencia desde el aire**, tanto en

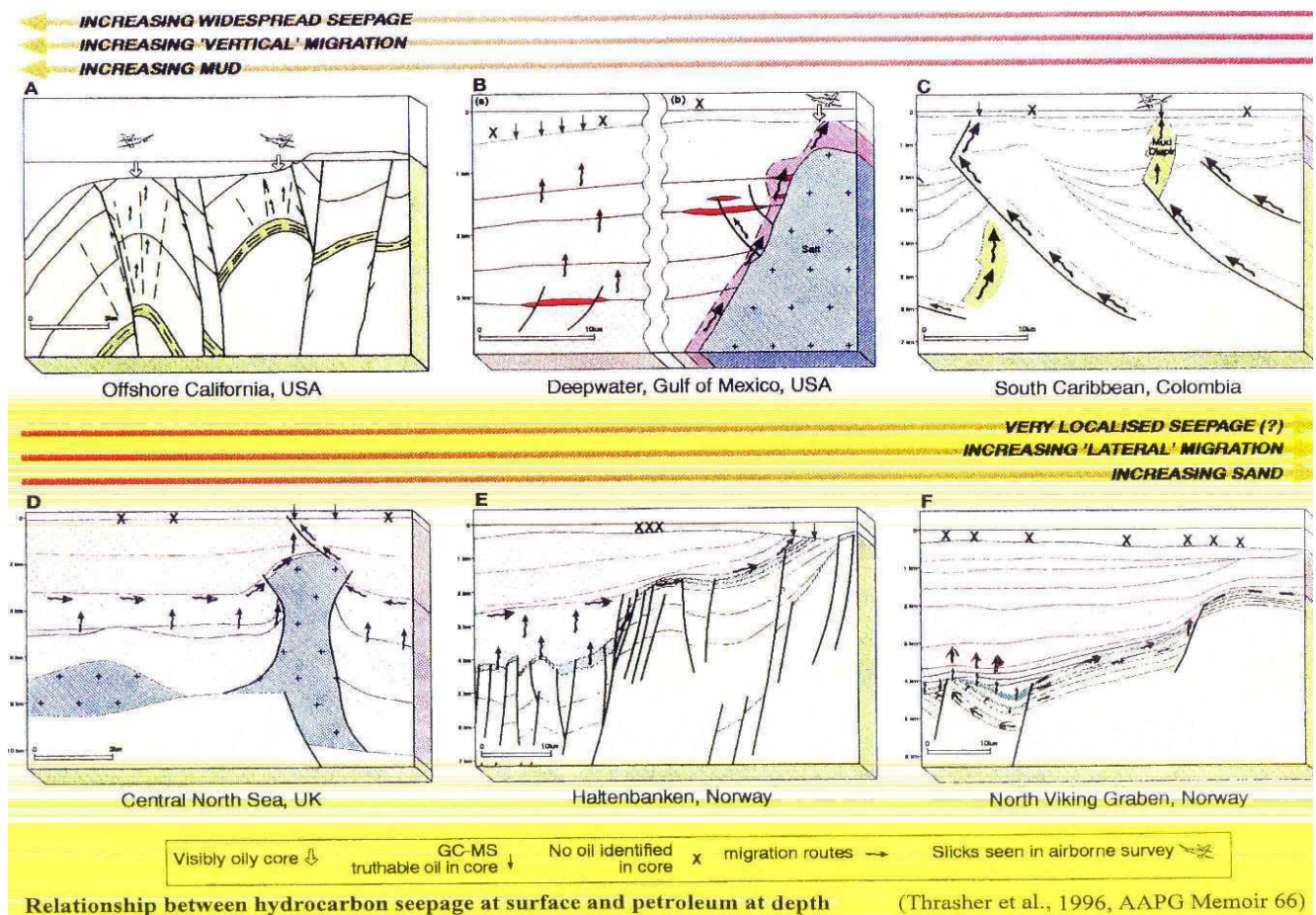


ALF can be used in both the early and later stages of exploration which include:

- **Frontier basins** - As a regional tool to detect evidence for oil generation in a new basin.
- **Mature basins** - As a play - fairway tool to map the limits of the generating source kitchens.
- **Producing basins** - In order to explore deep water extensions of known play fairways.

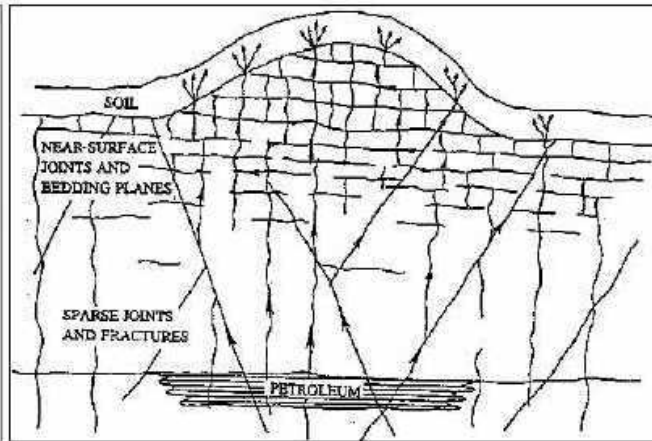
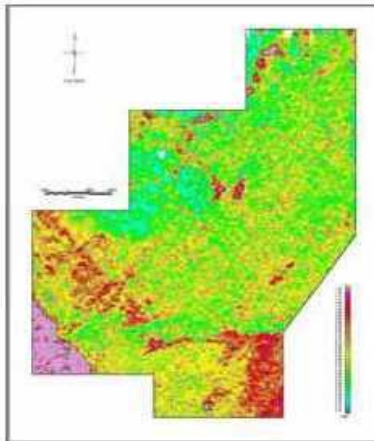


tierra como sobre cuerpos de agua, caso especial donde la radiometría sí funciona sobre lagos o mares. Requiere de la **eliminación de ruidos culturales** (contaminación), así como los causados por la posible presencia de algas fluorescentes y otros. Lo que intenta detectarse es la respuesta de hidrocarburos microfugados desde reservorios profundos bajo el lecho y llevados en forma de burbujas hasta la superficie ácuca. Si las corrientes son fuertes estas burbujas también podrían aparecer muy desplazadas de la zona submarina de la cual proceden. A continuación se esquematizan algunas posibles vías de microfuga y **filtración ascendente de gas y petróleo**.



Los manaderos pueden ocurrir en forma directamente vertical o más compleja, a través de las propias rocas reservorio, cuando éstas inclinan, por zonas de falla o bordes de cuerpos emplazados que resultan permeables, o simplemente atravesando las rocas sello, que muy frecuentemente no son perfectamente sellantes. Téngase presente que **los domos salinos dan respuesta radiactiva casi nula**.

Abajo, un plano resultante de una prospección aerospectrométrica sobre rocas con hidrocarburos escapados de los reservorios, en Sudán del Sur (país escindido de Sudán desde 2005 por antiguas razones étnicas que fueron severamente agravadas por la injerencia occidental motivada por sus reservas petrolíferas y las potenciales ganancias para las multinacionales).



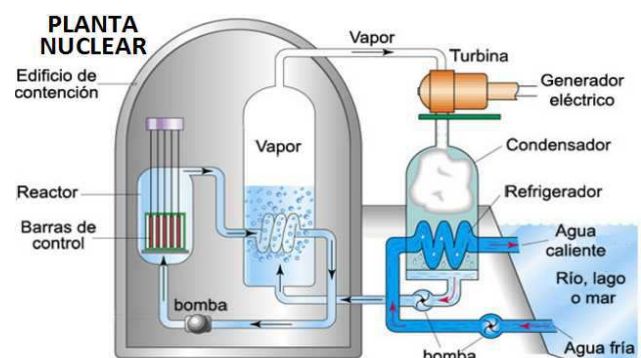
La detección del $^{83}\text{Bi}^{214}$ (ventana energética de 1,66 a 1,86 MeV) es indicación clara de la presencia de uranio, en este caso asociado al ambiente anóxico en el que el ión uranilo fue precipitado, o sea la cocina del petróleo.

UTILIZACION DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS

Aunque es un ítem fuera de nuestra asignatura, mencionaremos brevemente que existen numerosas aplicaciones, muchas de las cuales se realizan con isótopos sintetizados artificialmente (sobre todo de los que están al final de la tabla periódica). Reactores de investigación y producción de radioisótopos han sido exportados desde Argentina por la asociación CNEA-INVAP (desfinanciada en el período 2016-2019).

Entre los beneficios debe citarse todo lo relacionado con la medicina: radioterapia, radiografías nucleares, etc., incluyendo las imágenes *PET* (*Positron Emission Tomography*). Asimismo con la esterilización de materiales desechables (de origen quirúrgico, biológico diverso o químico), la desinsectación con rayos γ , la radio-desinfectación y la preservación de alimentos. También **los trazadores** en procesos físicos, químicos, biológicos o médicos. La centellografía se usa para el diagnóstico y seguimiento de una afección: se traga o inyecta una cantidad mínima de radioisótopo que se desplaza por el torrente sanguíneo hasta los diferentes órganos, lo cual es detectado por su emisión γ para así crear imágenes sobre alteraciones óseas, tiroideas, mamarias, etc. Análogamente en la explotación petrolera, marcando algunas sustancias para estudiar sus desplazamientos y **monitorear el movimiento de fluidos entre pozos inyectoros y productores** en un proyecto de recuperación secundaria o terciaria. También hay aplicaciones industriales variadas (control de espesor de hojas y láminas de distintos materiales, control de llenado de envases de productos diversos, imágenes de dispositivos, etc.). Y se realizan análisis por activación radiactiva (como la utilizada en los fósforos de los centellómetros), es decir, irradiar un elemento con neutrones u otro tipo de radiación que consigue activarlo (transformarlo parcialmente en un isótopo radiactivo) permitiendo luego con un detector llegar a calcular su concentración con una precisión de hasta centésimas de partes por millón.

La producción de energía puede hacerse mediante generadores termoeléctricos de radioisótopos. Igualmente con pilas atómicas (como la pionera de **Enrico Fermi** en 1942 en la universidad de Chicago, de 4 metros de altura) y con reactores de fisión de baja o alta potencia –cuyo calor vaporiza el agua que luego hace andar turbinas–. Las grandes centrales nucleoelectricas lo hacen con uranio natural (cada vez menos) o bien enriquecido en el isótopo ^{235}U , el único fisible por absorción de neutrones lentos o termales –en Argentina en 2015 se comenzó a realizar enriquecimiento en Pilcaniyeu, Río Negro, por difusión gaseosa–, en tanto que el ^{238}U es muy difícilmente fisible.



Las centrales por fusión a partir de deuterio ($1H^2$) o tritio ($1H^3$) todavía no son completamente viables, aunque está en progresivo desarrollo en Cadarache (sudeste de Francia) el proyecto *ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)* a partir del *tokamak* (acrónimo de *тороидальная камера с магнитными катушками*, *toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*), cámara toroidal con bobinas magnéticas, cuyo prototipo fue diseñado en 1956 en la Unión Soviética por los rusos **Andrej Sacharov** e **Igor' Tamm**, hacedores de otros valiosos aportes y luego ambos premio Nobel, aunque Sacharov de la paz y Tamm de física.

De la emisión radiactiva terrestre total sólo el 1% es obra nuestra, pera está concentrada en puntos críticos.

En el norte de Ucrania, a 16 km de la frontera con Bielorrusia, a las 01:24 a.m. del 26 de abril de 1986 ocurrió el desastre del reactor nuclear 4 de la central Vladímir Lenin (a 18 km de Chernóbil y 3 km de Prípiat, el pueblo de los trabajadores, hoy fantasmal) que no reunía todos los recaudos de seguridad. Ocurrió por groseros errores de prueba y sólo fue informado dos días después por el criminal régimen soviético, cuando los suecos ya habían detectado la radiación a 2.000 km llevada por los vientos del sudeste. Fallecieron al menos 31 operarios (2 por la explosión, 29 liquidadores en días, 19 en años después), 15 niños (por cáncer de tiroides) y la Organización Mundial de la Salud estima que en total unas 4.000 personas han muerto o morirán por distintos tipos de cáncer y malformaciones genéticas debidas a la radiación. Las organizaciones ambientalistas estiman cifras muchísimo más altas de fallecimientos probables. Y, en todo caso, es seguro que han quedado muchos miles de personas con problemas de salud moderados o graves, además del daño y muerte en la flora y fauna. Se ha construido un nuevo sarcófago sobre el anterior, que se estaba deteriorando, porque el monstruo radiactivo no ha muerto.

Otro grave accidente nuclear había ocurrido también en la Unión Soviética en 1957 en la central de Mayak cerca de Cheliábinsk (al este de los montes Urales) por la explosión de un tanque de desechos radiactivos. Unas 10.000 personas fueron evacuadas y al menos 200 fallecieron. Se pudo mantener en secreto por casi veinte años. Como comparación, el mayor derrumbe de una represa, entre muchos otros, ocurrió en Henan, China, en 1975 y produjo 26.000 muertes inmediatas y otras 145.000 por las epidemias y hambruna subsiguientes. Así como la peor tragedia minera ocurrió en una explotación de carbón en Benxi, Manchuria, en 1942 por explosión de gas grisú (durante la ocupación japonesa de China), con 1.549 fallecidos. Y en 1984 en Bhopal, India central, el escape de gas tóxico (uno entre tantísimos más) de una fábrica de pesticidas de la estadounidense Union Carbide causó unas 20.000 muertes, además de los sobrevivientes afectados y el desastre ambiental.

Otros accidentes nucleares en centrales y radioterapia han provocado relativamente pocas o ninguna víctima fatal. En Fukujima, Japón, durante el tsunami de 2011, reactores situados sobre la costa fueron afectados por fallos en la construcción (corrupción de la empresa Tepco, mal controlada por el gobierno) y la principal imprevisión de haber hecho un muro de sólo 6 m de altura cuando en la zona había antecedentes de tsunamis ¡de hasta 38 m! Hubo 21 operarios afectados por la radiación, aunque no de gravedad, y se estableció un radio de evacuación de 30 km. Se hallaron mutantes en una especie de mariposas.

Pero, desde luego, el mayor riesgo de la energía nuclear es el de las bombas atómicas. Las más antiguas de fisión, las posteriores de fusión (que en verdad son detonadas por fisión, que representa cerca del 50% de la energía total) y las más recientes llamadas neutrónicas (en las que el porcentaje de fisión se ha reducido a casi el 5%, haciéndola de menor rendimiento destructivo pero con 7 veces mayor proporción de radiación ionizante por neutrones rápidos, lo cual es letal para todo yuyo o bicho, cualquiera sea su número de ramas o patas)... Y lo peor es que tan inconmensurable potencial bélico está en manos de una especie cuyos líderes y seguidores de tanto en tanto pierden toda racionalidad y compasión.

(¿Todo hecho en sólo 6 días?... ¿Qué apuro tenía el Barba?..)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué son el período de semidesintegración y la vida media?
- ¿En qué consiste esencialmente la geocronología a partir de la radiactividad?
- ¿Qué tipos de radiaciones pueden medirse en prospección como señal o como ruido y qué efectos pueden producir?
- Describir los tres tipos de efectos de las radiaciones.
- Citar los tres elementos radiactivos más usados en prospección y los isótopos de sus respectivas series que son medidos en la práctica.

- ¿Qué aparatos detectores son utilizados en exploración?
- ¿En qué tipos de rocas podemos medir valores altos de los distintos elementos radiactivos?
- Comentar las aplicaciones petroleras del método.
- ¿Qué ruidos pueden aparecer en la aplicación de las diversas variantes prospectivas?
- ¿Cómo se complementa la radiometría con la geoquímica?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Anderson, D., 1992. The Earth's interior. En Understanding the Earth (p 45-66); Brown, G., Hawkesworth, C. y Wilson, C. editores. Cambridge University Press.
- Baranwal, V., Watson, R., Smethust, M. y Rønning, J., 2010. Geological mapping using airborne gamma ray spectrometry. Norges Geologiske Undersøkelse, presentation (22 p).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 447-470). Librería de Ciencia e Industria.
- Coppens, R., 1963. La radiactividad de las rocas (56 p). EUdeBA.
- De Paoli, L., 2011. L'energia nucleare; costi e benefici di una tecnologia controversa (142 p). Edizioni Il Mulino.
- Ford, K. y López, L., 1998. Characterization of leveling problems of Patagonia gamma-ray spectrometry survey, Chubut province, Argentina. X Congreso Latinoamericano de Geología, V.3 (p 448-452).
- Forte, S. y Rottoli, L., 2019. Fisica quantistica (368 p). Zanichelli Editore.
- Fowler, C., 1990. The solid Earth (p 191-217). Cambridge University Press.
- Hawkesworth, C., 1992. Geological time. En Understanding the Earth (p 133-144); Brown, G., Hawkesworth, C. y Wilson, C. editors. Cambridge University Press.
- Hernández-Bernal, M., Tolson, G. y Solís-Pichardo, G., 2000. Geoquímica de elementos traza y su relación con la petrogénesis de rocas ígneas: modelado de sistemas isotópicos. GEOS (p107-118) Unión Geof. Mexicana A.C.
- Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 42-60). Ediciones Omega.
- Logan, G., Jones, A., Ryan, G., Wettle, M., Thankappan, M., Grosjean, E., Rollet, N. y Kennard, J., 2008. Review of Australian offshore natural hydrocarbon seepage studies. Geoscience Australia, N°17 (246 p).
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics (p 169-177). Cambridge University Press.
- Lunine, J., 1999. Evolution of a habitable world (p 47-53). Cambridge University Press.
- Parasnis, D., 1971. Geofísica minera (p 296-303). Editorial Paraninfo.
- Ross Taylor, S., 1992. The origin of the Earth. En Understanding the Earth (p 25-43); Brown, G., Hawkesworth, C. y Wilson, C. editores. Cambridge University Press.
- Schumacher, D. and Abrams, M., 1996. Hydrocarbon migration and its near-surface expression (446 p). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 66.
- Sharma, P., 1976. Geophysical methods in geology (p 295-318). Elsevier Scientific and Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. y Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 736-770). Cambridge University Press.
- Udías, A. y Mezcuá, J., 1997. Fundamentos de geofísica (p 401-415). Alianza Editorial.
- Walker, M., 2005. Quaternary dating methods (304 p). John Wiley and Sons.
- Williams, A., 1996. Detecting leaking oilfields with ALF, the Airborne Laser Fluorosensor: case histories and latest developments. Geological Society of Malaysia Bulletin, V.39 (p 123-129).

Las figuras han sido tomadas y en muchos casos modificadas de los citados textos o en otros casos de Wikipedia, Petropedia u otras páginas de libre acceso en la Red.

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.