

EFFECTOS DE LOS NEUTRONES EN LA MATERIA VIVA

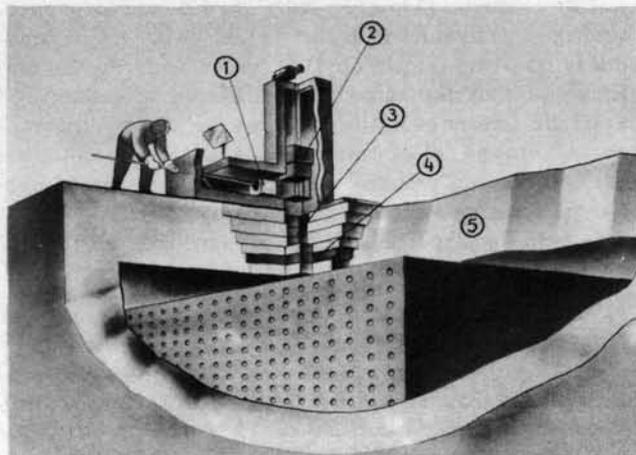
En los últimos años, a medida que ha ido progresando la tecnología de las aplicaciones de la energía atómica con fines pacíficos, se ha acentuado el interés científico por los neutrones y los protones, dos partículas fundamentales del núcleo atómico, interés estimulado a su vez por la presencia de esas partículas en el espacio extraterrestre. Ahora bien, sólo desde hace poco resulta posible estudiar a fondo los efectos biológicos de los neutrones y de los protones, gracias a los progresos realizados en la medición de la dosis de radiación absorbida por sistemas biológicos vegetales y animales. De los trabajos efectuados en este terreno se dio cuenta en diciembre de 1962, fecha en que el OIEA patrocinó en el Laboratorio de Harwell (Reino Unido) el primer Simposio internacional sobre detección y dosimetría de neutrones y calibración de fuentes neutrónicas.

Al Simposio de Harwell siguió, en octubre de 1963, la primera reunión científica patrocinada por el OIEA en los Estados Unidos, que tuvo lugar en el Laboratorio Nacional de Brookhaven (Long Island, Nueva York). Con el título de "Efectos biológicos de la irradiación neutrónica", este Simposio prosiguió el estudio de los problemas que plantea la medición de las radiaciones absorbidas por la materia viva, presentándose además varias memorias acerca de los efectos de las radiaciones en las plantas, los animales y el hombre y de las consecuencias retardadas de la exposición a las radiaciones, tales como: alteración de la duración de la vida, incidencia de enfermedades tumorales y alteración de la fecundidad. Dieciocho países estuvieron representados en esa reunión.

Si bien se ha profundizado mucho en el estudio de los efectos de los rayos X y gamma, los conocimientos acerca de los efectos biológicos de los neutrones son aún relativamente escasos y, en consecuencia, muchas de las memorias presentadas en el Simposio versaron sobre los diferentes aspectos de la investigación neutrónica. Análogamente, en razón del creciente interés que despiertan los efectos biológicos de los protones, se examinaron memorias sobre este tema afín.

Problemas de dosimetría

La principal cuestión tratada en el Simposio fue la de los distintos métodos existentes para comparar la absorción de diferentes tipos de radiación en un tejido. Parece que los participantes convinieron en general en que el enfoque más comúnmente utilizado en años recientes, a saber, el de la eficacia biológica relativa (EBR), difícilmente puede considerarse por sí solo como un método adecuado. El término EBR se define como la razón existente entre una dosis "pa-



Columna para experimentos biológicos, instalada sobre un reactor nuclear en Brookhaven. Introducción de un recipiente con semillas hasta un montacargas que lo desciende hasta la base de la columna, es decir, hasta la mitad del blindaje de hormigón de cinco pies de espesor que rodea al reactor. Parte de los neutrones lentos penetran en el blindaje; el paso de los rayos gamma es impedido por una placa de bismuto que actúa de filtro.

1. Recipiente con semillas; 2. montacargas; 3. cavidad de exposición neutrónica; 4. placa de bismuto; 5. blindaje (foto Brookhaven National Laboratory)

trón" de rayos X y la dosis experimental de radiación necesaria para producir un efecto biológico equivalente. La dosis patrón es la cantidad de energía transmitida por los rayos X incidentes a una masa determinada de células vegetales o animales. La dosis experimental es la cantidad de energía cedida por los neutrones incidentes. Por ejemplo, si una dosis experimental de un rad* de neutrones produce el mismo efecto biológico en las células de que se trate que una dosis patrón de 3 rad de rayos X, la EBR de los neutrones es igual a tres.

En muchas de las memorias presentadas en el Simposio se indicaron los valores de la EBR en el caso de exposición a los neutrones. Estos valores fueron también estudiados a fondo por un Grupo de expertos en los aspectos biológicos de la experimentación neutrónica. J.S. Krebs y R.W. Brauer (U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, San Francisco) describieron la plena recuperación de la función reproductora en células de ratón después de irradiarlas con neutrones a breves intervalos; los investigadores señalaron que la recuperación a raíz de una exposición a los rayos X es parcial.

* rad: Unidad de cantidad de energía absorbida por la materia expuesta a las radiaciones.

Explicaron que las células destruidas son reemplazadas por nuevas células formadas a raíz de la división de las restantes cuando entre las irradiaciones median intervalos largos. Afirmaron, en conclusión, que es más difícil conocer la velocidad de restablecimiento después de aplicar elevadas dosis neutrónicas que cuando se trata de cualquier otra forma de radiación, pero ese conocimiento es esencial para interpretar correctamente las diferencias existentes entre los efectos causados por los neutrones y los rayos X. Llegaron a la conclusión de que:

Los descubrimientos efectuados en los últimos años, referentes a la cinética de la acumulación de radiolesiones en cultivos de células de mamíferos, permiten formarse un concepto más unificado del proceso de acumulación de lesiones en los mamíferos, así como armonizar muchos puntos de vista experimentales que antes eran divergentes. Esta nueva uniformidad de concepto permite ir comprendiendo en forma más cabal el proceso de acumulación y restablecimiento de las radiolesiones en los mamíferos.

Interacción de las partículas

Otro concepto metodológico examinado en detalle fue el de la transmisión lineal de energía (TLE). Este término se refiere a la modalidad de distribución de la energía al ser absorbida por una materia determinada, tal como células animales. El término proviene de los primeros trabajos de los físicos que estudiaron las líneas o trazas que dejan las partículas nucleares al penetrar en emulsiones fotográficas. Una vez revelada la película, esas trazas identifican partículas incidentes que interactúan con los átomos componentes de la emulsión. Las partículas nucleares que penetran en la célula producen partículas secundarias, que se desplazan según una trayectoria tridimensional y no rectilínea, penetrando en varias partes de la célula. La interacción de las partículas nucleares incidentes (neutrones o protones) con las partículas que constituyen la célula exige que las mediciones sean realizadas por biólogos, con la asistencia de físicos. Los datos así obtenidos ayudan a determinar el efecto de las radiaciones en los procesos vitales que se verifican en las células vivas. Análogamente, se ejecutan experimentos conexos que proporcionan datos sobre tejidos u órganos y, en menor medida, sobre sistemas biológicos, tales como el sistema nervioso, endocrino, etc.

Los participantes tacharon de "unidimensional" el concepto de TLE. Por ejemplo, el Dr. H. H. Rossi, del Departamento de Radiología de la Universidad de Columbia, dijo que los investigadores pueden sin dudar identificar la traza dejada en una célula por una partícula nuclear incidente, pero subsiste la dificultad de interpretar las contradicciones cuantitativas, que resultan, en parte al menos, de las frecuentes variaciones que se observan entre diferentes células

del mismo tipo fundamental. En realidad, a causa de la dificultad de "delinear" las trazas marcadas en el complejo fenómeno de transmisión de energías, las mediciones suelen llevarse a cabo en gases contenidos en esferas metálicas de diferentes tamaños. Esas esferas sirven como modelos a escala de masas correspondientes de tejido. El orden de magnitud de la densidad de un gas es, por lo general, unas mil veces inferior al de la densidad de un tejido animal o humano. Así, la mayor parte de los datos referentes a la TLE son el resultado de una multiplicación de valores que en realidad se han medido en gases y no en células vivas, humanas o animales, en las que el control tecnológico es difícil. Algunos de los participantes señalaron que la medición de la dosis de irradiación necesaria para matar una célula viva aislada sólo tiene escaso valor científico. Se insistió en la importancia de planear experimentos que permitan acopiar nuevos datos sobre los efectos de las radiaciones en los diferentes procesos vitales que se desarrollan al nivel celular. J. C. Moskalev, del Instituto de Biofísica de la Academia de Medicina de Moscú, preconizó una investigación aún más extensa de los órganos y sistemas biológicos. Dijo que, a su juicio, el funcionamiento conjunto de las células para ejecutar una función biológica es más importante para conocer los efectos de las radiaciones que el funcionamiento de una célula como entidad aislada.

Medición de la TLE

S. Snyder (Oak Ridge) describió, como parte de un estudio de la distribución según la TLE de dosis neutrónicas, el empleo de "modelos" o materiales que contengan elementos químicos idénticos a los presentes en los seres humanos, ratones, perros y cobayos. Cuando los "modelos" cilíndricos se irradian con neutrones, éstos desplazan núcleos de los átomos contenidos en el cilindro o interactúan con esos núcleos para dar origen a neutrones y protones secundarios. Con ayuda de una calculadora electrónica se ha analizado, para neutrones de varias energías, la TLE correspondiente a estas partículas de retroceso y secundarias, y se han comparado diferentes tipos de "modelos".

V. I. Ivanov (Instituto de Tecnología y Ciencias Físicas de la Unión Soviética, Moscú), puso de manifiesto la utilidad de una nueva unidad universal de dosis de radiación para la labor de normalización que se efectúa en los diferentes países, y dio cuenta de los trabajos realizados por los investigadores del Instituto Central de Investigaciones Nucleares de Dubna, quienes utilizan un sincrotrón para producir un haz de protones apto para la irradiación de animales de laboratorio y de "modelos".

Un grupo de científicos de la Biophysics Branch of the Kirtland Base of the U.S. Air Force (Nuevo Méjico), describió una serie de experimentos cuyo objeto es medir la energía neutrónica absorbida por el tejido de ovinos, esto es, por la masa de tejido



Maniqué representando el cuerpo humano, utilizado en el Laboratorio de Brookhaven para medir la penetración neutrónica en distintas partes del cuerpo. Los neutrones entran por la cabeza, situado cerca del portillo del reactor de Investigaciones médicas (foto Naciones Unidas)

comprendida entre la piel y la cavidad abdominal. Los investigadores introdujeron en dicha cavidad una pequeña esfera que contenía tiras metálicas, algunos de cuyos átomos se tornaron radiactivos por efecto de los haces neutrónicos a que los animales fueron expuestos. La medición de la radiactividad del metal permitió determinar la energía de los neutrones que habían penetrado hasta ese punto, energía que pudo entonces compararse con la de los neutrones que habían penetrado en la piel en la fase inicial del experimento.

Seguridad en el laboratorio y en el espacio extraterrestre

Si bien la mayor parte de las memorias presentadas en el Simposio versaron sobre experimentos encaminados a dilucidar los mecanismos fundamentales de los efectos que los neutrones y protones ejercen en la materia viva, también se señaló en ocasiones la utilidad que podrían tener esos trabajos para el establecimiento de normas de seguridad y protección de la salud en los laboratorios y otras instalaciones donde se generan estas dos partículas nucleares fundamentales. Por ejemplo, en gran número de universidades y de centros de investigación de diferentes partes del mundo, se utilizan ciclotrones para acelerar protones, así como otros tipos de aceleradores de partículas de elevada energía. Actualmente se encuentran en funcionamiento más de 400 reactores nucleares cuyos neutrones se utilizan con fines experimentales. Asimismo, el control de los neutrones en condiciones de seguridad en los grandes reactores destinados a generar electricidad constituye un problema en un número creciente de centrales.

Otro campo de aplicación práctica de los nuevos conocimientos sobre los efectos biológicos de los neutrones y de los protones es el relacionado con la conquista del espacio extraterrestre por el hombre. Como se señala en una memoria presentada por J. F. Spalding y colaboradores, del Laboratorio de Los Alamos (Nuevo México) de la Universidad de California:

El desacostumbrado ambiente radiatorio que el hombre puede encontrar durante futuras empresas espaciales, cuyo origen pueden ser tanto los rayos cósmicos primarios como las erupciones cromosféricas*, las cinturas naturales de radiación que rodean la tierra y los dispositivos de propulsión nuclear utilizados para los grandes vuelos espaciales, es causa de preocupación y exige un conocimiento más completo de los efectos de las radiaciones y, en particular, de los efectos del índice de dosis de agentes ionizantes de diferentes tipos.

Dichos autores añadieron que, en los ratones, la EBR de los neutrones de fisión (tales como los que pudiera encontrar un astronauta en su viaje) no varía con el índice de dosis, sino que oscila entre 3, 5 y 4, 5. En otras palabras, la magnitud de la lesión permanece inalterada aunque la dosis de radiación se administrase durante períodos relativamente breves o largos. Estos experimentos indican que el factor primordial es la dosis total de irradiación neutrónica que recibe un astronauta, lo cual corrobora la experiencia adquirida durante años con otros tipos de radiación.

El Dr. J. Schaefer (U.S. Naval School of Aviation, Pensacola, Florida), describió los efectos biológicos de protones generados en laboratorio, de energía equiparable a la de los que se originan en las erupciones cromosféricas. Los astronautas que explorasen las regiones cósmicas situadas más allá de las cinturas de Van Allen, en las que el hombre no ha penetrado aún, estarían expuestos a partículas nucleares de tan elevada energía. El Dr. Schaefer dijo que en vista de los elevados costos y dificultades que entraña la experimentación biológica con protones en el espacio, se plantea la cuestión de construir el instrumental adecuado para medir la absorción de protones que penetren en tejidos. Se refirió también a la cuestión de los efectos biológicos suplementarios de los protones y neutrones desplazados dentro del propio tejido. A estos "productos derivados" o partículas secundarias les denominó "terminales" -esto es, partículas que quedan inmovilizadas en una masa dada de tejido. Dijo que a su juicio las distribuciones de densidad de las partículas "terminales" permiten hacer ciertas deducciones sobre la variedad de las energías presentes en un haz de protones utilizado para bombardear un tejido. Las mediciones preliminares de estos efectos, por él realizadas, se basaron en los

* Radiaciones generadas en las erupciones cósmicas del sol.

trabajos ejecutados anteriormente por físicos que se dedican al estudio de los rayos cósmicos para analizar la dispersión de protones en las emulsiones fotográficas expuestas a partículas de elevada energía en la atmósfera superior.

S.C. Rexford-Welch (Royal Air Force) hizo un estudio de la magnitud de las lesiones producidas en los tejidos oculares de monos por protones de hasta 730 MeV de energía. Expuso los trabajos realizados en la U.S. Air Force School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base, San Antonio, Texas. Manifestó que es corriente la formación de cataratas para el nivel energético de los protones, pero no para energías inferiores. Hizo observar que la iniciación de las cataratas y de otras lesiones a niveles específicos de energía tal vez permita deducir, por observaciones clínicas, la energía de las radiaciones a que ha estado expuesto un organismo.

J.I. Moskalev, del Instituto de Biofísica de la Academia de Medicina de Moscú, dio cuenta de experimentos realizados con dos colegas, I.K. Petrovich y V. N. Streltsova. Expuso los resultados de experimentos comparados sobre los efectos de protones de 500 MeV en 490 ratas blancas, así como de experimentos análogos realizados con neutrones en otra colonia de mayor población. Una de las conclusiones es que la esperanza media de vida de las ratas irradiadas con neutrones rápidos es independiente del sexo. También se observó que la incidencia global de tumores en las hembras es de dos a tres veces mayor que en los machos. En el informe se señala que:

"La dosis tumorigénica mínima en las glándulas mamarias, para el caso de la irradiación neutrónica, parece ser algo inferior a 42,5 rads. La incidencia máxima de los tumores hipofisarios se observa después de aplicar una dosis de 42,5 rads.

"En la irradiación protónica, la dosis tumorigénica mínima es del orden de 250 rads para los tejidos hematopoyéticos y la tiroides, de 300 rads para los testículos, y de 100 rads para la próstata, el páncreas y el tejido hipodérmico. Después de la irradiación con neutrones rápidos, la incidencia de tumores en los testículos, el intestino grueso, los riñones y el hígado, presenta un aumento para dosis comprendidas entre 42,5 y 85 rads; en la piel y el tejido hipodérmico, ocurre lo mismo para dosis de 85 rads. En el caso de la irradiación con neutrones rápidos, los tumores aparecen con dosis de tres a cinco veces inferiores a las dosis protónicas."

C.A. Tobias comunicó, en nombre propio y en el de varios colegas, que el Lawrence Radiation Laboratory de la Universidad de California (Berkeley), ejecutó experimentos en los que se irradiaron ratones blancos con protones de 730 MeV, comparando los efectos con los de otros experimentos de exposición a los rayos X. Parte de los trabajos descritos

en la memoria presentada por el Dr. C. A. Sondhaus y colaboradores, consistirá en medir la distribución de la dosis de irradiación debida a protones emitidos por un ciclotrón de 184 pulgadas, dispersados y de energía degradada para simular las radiaciones de las erupciones cromosféricas.

Se utilizaron procedimientos matemáticos para expresar la dispersión de las radiaciones en "modelos" o sustancias que contienen los mismos elementos químicos que integran el cuerpo humano. Los datos resultantes de estas operaciones se analizaron con ayuda de una calculadora electrónica.

Además, el Dr. Tobias expuso brevemente los estudios realizados por el Dr. J.K. Ashikawa y colaboradores, sobre las lesiones sufridas por ratones expuestos a protones de elevada energía. Estos investigadores señalaron que los neutrones provocan lesiones más graves en los intestinos y causan la muerte más rápidamente que los rayos X. Estimaron que esas variaciones en los efectos biológicos pueden atribuirse a diferencias de distribución de la dosis de irradiación en el tejido, y que la exposición a rayos X causa lesiones más graves en la médula ósea.

Patología de las lesiones causadas por neutrones

Los participantes examinaron la patología de las lesiones causadas por los neutrones y los protones, y compararon dichas lesiones con las provocadas por los rayos X. El capitán M. A. Quaife (Kirtland Base) expuso los resultados de un estudio clínico de ovejas irradiadas con neutrones y rayos X. Se utilizaron ovejas porque su volumen tisular es aproximadamente igual al del hombre. La irradiación con neutrones causó la muerte más rápidamente, por lesión del tracto gastrointestinal, que la exposición a los rayos X, pero en experimentos análogos ejecutados con perros se observó que la aplicación de rayos X causaba en éstos mayores trastornos del metabolismo del hierro sanguíneo que la irradiación con neutrones.

El Dr. E. J. Ainsworth y colaboradores, del U.S. Naval Radiological Defense Laboratory de San Francisco, utilizaron neutrones emitidos por un reactor de investigación para irradiar ratones, ratas y perros. Luego de comparar los efectos de esas exposiciones con efectos análogos producidos por rayos X y gamma, los investigadores dedujeron que los animales irradiados con neutrones se restablecen más rápidamente durante los 5 primeros días consecutivos a la irradiación que los animales expuestos a los rayos X y gamma. Señalaron que este hecho no está en contradicción con anteriores observaciones efectuadas por otros investigadores, quienes estimaron que el restablecimiento de ratones irradiados con neutrones era más lento que el de los irradiados con rayos gamma. Explicaron como sigue la necesidad

de llevar a cabo nuevos trabajos para aclarar esta contradicción:

"Es, pues, evidente que no existe una opinión unánime en lo que se refiere a los procesos relativos de restablecimiento de ratones irradiados con neutrones, rayos X y rayos gamma. Por otra parte, los datos obtenidos a los 9 y 14 días de administrar una dosis neutrónica condicionante, indican lesiones considerablemente más importantes que las detectadas a los 5 días, siendo característico un incremento aparente de la lesión a los 9 días, seguido de ulterior restablecimiento a los 14 días.

"Esta bimodalidad no tiene precedentes, al menos para los intervalos de que se trata, y es particularmente difícil de comprender. Tenemos el propósito de estudiar esos procesos de restablecimiento más a fondo, investigando nuevos puntos intermedios de recuperación y tratando de hallar una base funcional de la bimodalidad observada en los animales irradiados con neutrones. La cuestión fundamental es la de determinar el tipo de lesión, la forma de restablecimiento, o más simplemente, saber lo que se mide."

El Dr. H. J. Curtis, Director del Brookhaven Biology Department, y dos de sus colegas, expusieron datos obtenidos por diferentes laboratorios sobre la diferencia de los efectos de la irradiación neutrónica y gamma en el acortamiento de la vida del ratón. Señalaron que los datos acopiados indican que, en lo que se refiere a irradiaciones crónicas, las dosis neutrónicas muy pequeñas son proporcionalmente tan efectivas como las dosis elevadas, mientras que en el caso de los rayos gamma, las dosis pequeñas son en proporción cuatro veces menos efectivas que las grandes. Afirmaron también, basándose en el estu-

dio de aberraciones cromosómicas de células hepáticas irradiadas y en proceso de regeneración que, para dosis relativamente grandes, los neutrones provocan aproximadamente el doble de aberraciones cromosómicas que los rayos gamma.

El Dr. L. J. Cole (U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, San Francisco) dio cuenta de los experimentos sobre ratones que ha realizado con el Dr. P. C. Nowell, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pensilvania. Llegaron a la conclusión de que los neutrones provocan en las células lesiones mayores que los rayos X, y que la tendencia a la formación de tumores por irradiación neutrónica puede disminuir al aumentar la magnitud de la lesión. Según ellos, la explicación de este último fenómeno es que, probablemente, tales dosis matan o esterilizan permanentemente una gran parte de las células que constituyen un tejido determinado. Señalaron que este "efecto terapéutico" de las elevadas dosis de irradiación en lo que respecta a la incidencia de la leucemia y a los tumores pulmonares ya había sido observado por otros investigadores.

El Dr. D. K. Bewley (Medical Research Council, Cyclotron Unit del Hammersmith Hospital) dio cuenta de los trabajos por él realizados en colaboración con el Dr. S. Hornsey, radiopatólogo del Hospital de Hammersmith. Los datos confirmaron la sensibilidad de los intestinos a los neutrones. En consecuencia, ambos investigadores destacaron las "lesiones irreparables" que los neutrones de ciertos niveles energéticos provocan en los intestinos, y aconsejaron proceder con suma prudencia al aplicar la radioterapia neutrónica en regiones del cuerpo próximas a los intestinos.