

Lección 4

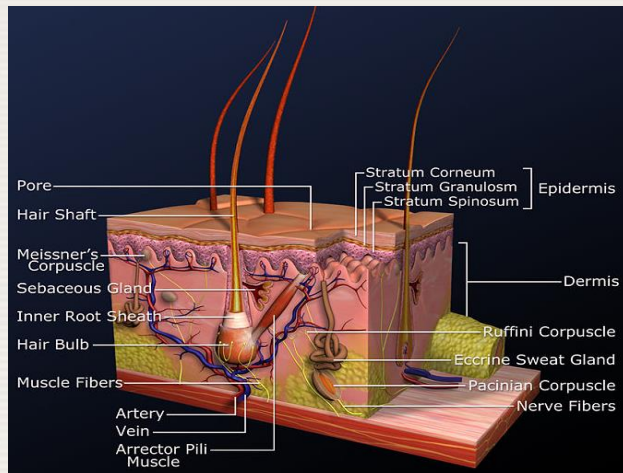
Monitorización del lugar del trabajo partículas beta y neutrones

Monitorización de partículas beta

Monitorización de la tasa de dosis beta

- Objetivos
- La técnica
- Características de los equipos
- Calibración y pruebas de aptitud (*type tests*)
- Medición en la práctica
- Análisis de los resultados

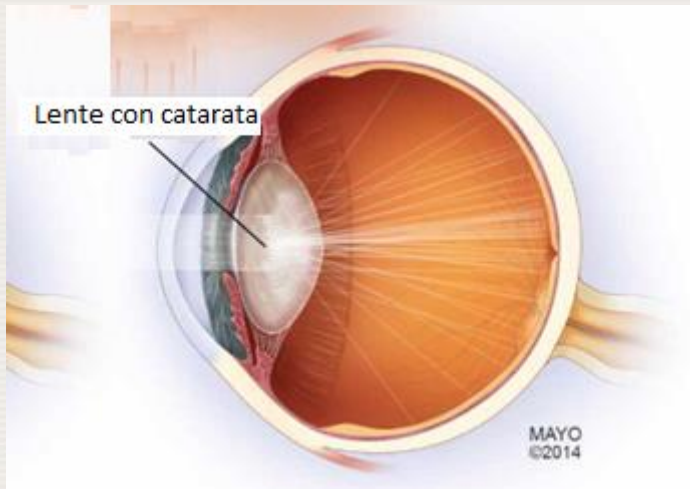
Importancia de la exposición beta



La monitorización beta es importante debido al potencial de las partículas beta para causar exposición de la piel a la profundidad de las células madre (0,07 mm).

La magnitud de la medición es el equivalente de dosis direccional, H' (0,07).

Importancia de la exposición beta



- Las partículas beta también pueden contribuir a la exposición del cristalino a la profundidad de 3 mm.
- La magnitud es el equivalente de dosis direccional, $H'(3)$.
- La reciente reducción (*) del límite de dosis al cristalino por el ICRP y el OIEA requiere una monitorización más detallada.

Monitorización de la tasa de dosis beta

Objetivos:

- identificar las áreas donde existen tasas de dosis beta para limitar las exposiciones;
- medir la tasa de dosis beta, $H'(0,07)$ por hora, con el fin de confirmar que las tasas de equivalente de dosis a la piel son ALARA, y
- confirmar que la tasa de dosis $H'(3)$ al cristalino se mantiene dentro del límite.

Elaborando el programa

- La definición del “vector de radionucleidos” revelará los radionucleidos que emiten partículas beta.
- En un área controlada en un reactor nuclear ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{85}Kr son importantes emisores beta e y así son algunos emisores beta-gamma como ^{137}Cs , ^{60}Co .

Elaborando el programa

- En hospitales e instituciones académicas se puede encontrar ^{32}P , ^{90}Y y ^{35}S .
- Las fuentes radiactivas de emisión beta y la contaminación superficial con emisores beta pueden causar un importante riesgo de radiación externa, especialmente para la piel y el cristalino.

La técnica

La técnica

- Los monitores para $H'(0,07)$ son:
 - ventana final delgada;
 - cámaras de ionización, y
 - centelladores de plástico.

La técnica

- Los monitores beta se hacen de materiales de Z bajo para reducir la producción de bremsstrahlung.
- Las tasas de dosis medidas sólo son confiables si la distancia del detector a la fuente es al menos tres veces la dimensión máxima del detector.

Características de los equipos

Características de los equipos

Elegir un medidor de tasa de dosis beta es más difícil que elegir un medidor de tasa de dosis de fotones debido a:

- las características de partículas beta y el “bremsstrahlung” asociado (rayos X);
- la necesidad de hacer mediciones relativamente cercanas a la fuente, y
- la absorción de partículas beta en la ventana.

Características de los equipos

- El espectro de energía beta es mejor medido utilizando cámaras de ionización (baja dependencia de energía).
- No obstante, cuanto más cerca esté el detector de la fuente, mayor será la subestimación de la tasa de dosis beta en el punto de referencia de la cámara.
- Usando una cámara de ionización con una ventana deslizante, la tasa de dosis beta se puede medir en un campo beta/gamma. Las tasas de dosis beta y gamma se pueden medir por separado.

Características de los equipos

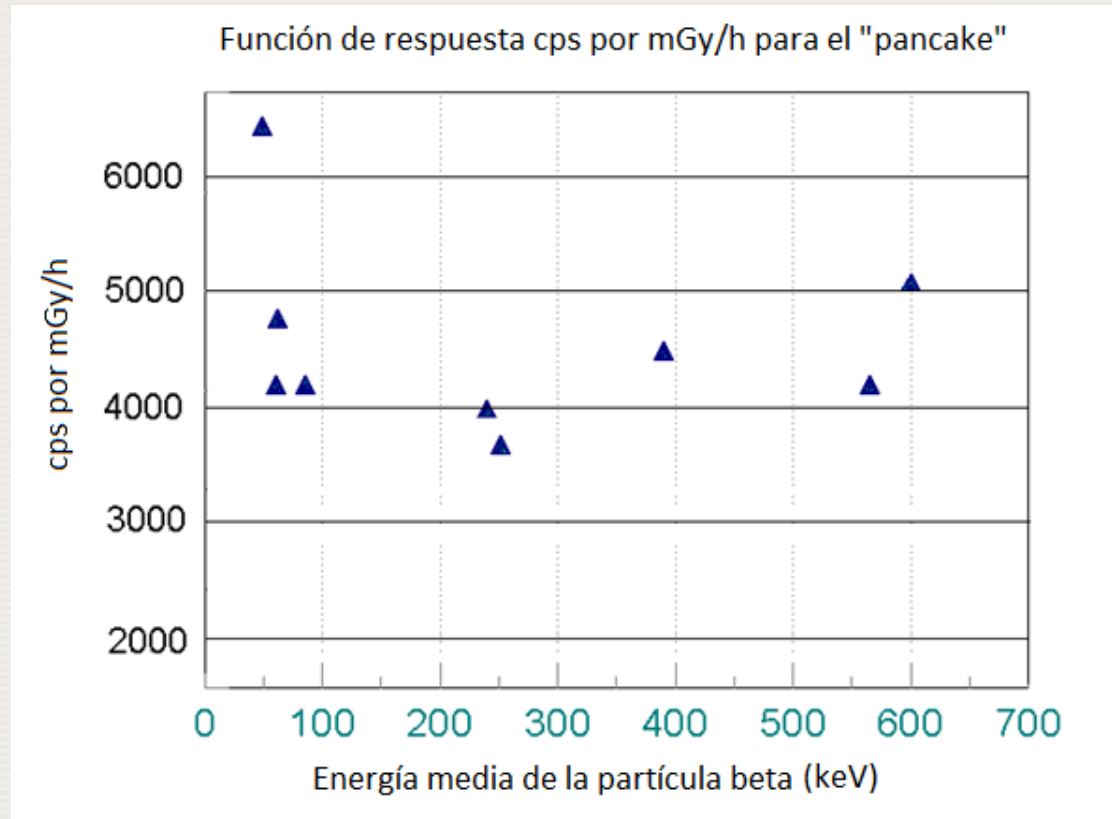
- Los tubos G-M de ventanas finales delgadas (1 a 3 mg/cm²) pueden detectar partículas beta y tienen una respuesta beta razonable en H'(0,07).
- El equipo es más pequeño y más fácil de posicionar
- El detector, sin embargo, sobreestima la respuesta para bremsstrahlung, si el equipo se calibra en H*(10) con la radiación gamma de ¹³⁷Cs, ver Lección 3.

Características de los equipos

- Un G-M tipo “pancake” dará una indicación de la tasa de dosis a la piel promediada sobre 1 cm^2 .
- Los detectores "pancake" tienen típicamente un área de ventana de 15 cm^2 .
- Las estimaciones de la tasa de dosis se pueden hacer utilizando la eficiencia del detector junto con factores de conversión publicados.

Características de los equipos

El gráfico muestra la tasa de conteo esperada (cps) por tasa de dosis (mGy/h) en función de la energía beta media para un detector de "pancake" G-M típico.



Calibración y pruebas de aptitud (*type tests*)

Calibración y pruebas de aptitud

- Las pruebas de aptitud implican irradiar un equipo con una serie de fuentes beta.
- Al seleccionar un equipo de tasa de dosis beta, es necesario que el equipo cumpla con los estándares reconocidos por la industria, tales como IEC 60846, IEC 60325, ANSI N323, etc.

Medición en la práctica

Medición en la práctica

- Debe colocarse el detector con su punto de referencia (para una cámara de ionización) o el centro de la ventana (para un tubo G-M de ventana fina) en el punto de medición.
- Los puntos de medición para radiación beta son la posición de las manos y la posición de los ojos, especialmente cuando la cabeza esté más expuesta que el cuerpo
- Debe girarse el detector para maximizar la indicación, ya que la indicación puede depender significativamente de cómo el detector esté alineado con el campo de radiación.

Medición en la práctica

- En muchos casos, incluso cuando se utiliza una cámara de ionización para la medición final, una búsqueda con un detector G-M de ventana fina delgada identificará áreas de tasa de dosis significativa de forma rápida y eficiente, generalmente mediante el uso de la salida de audio.
- La aplicación de esta técnica puede estar limitada por el alto ruido de fondo o de zonas con altas tasas de dosis de radiación gamma.

Medición en la práctica

Cámara de ionización



Cortesía: Thermoscientific

Medición en la práctica

Detector G-M tipo “pancake”



Cortesía: Thermoscientific

Análisis de los resultados

Análisis de los resultados

- La interpretación es generalmente más difícil para radiación beta que para radiación gamma o rayos X.
- La respuesta del equipo es más dependiente de la energía.
- Las cámaras de ionización tienen respuestas para H' (0,07) dentro de los intervalos de energía mostrados en la diapositiva siguiente, cuando se calibra el equipo correctamente para la radiación gamma de ^{137}Cs en la magnitud $H^*(10)$.

Análisis de los resultados

Respuesta de una cámara de ionización típica:

Radionucleido	E_{\max} (MeV)	Respuesta
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	0,54 + 2,27	0,9 - 1,1
^{85}Kr	0,69	0,5 - 0,7
^{204}Tl	0,76	0,5 - 0,7
^{147}Pm	0,227	0,5 - 1,2

Análisis de los resultados

Respuesta de un detector G-M de ventana final típico:

Radionucleido	E_{\max} (MeV)	Respuesta
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	0,54 + 2,27	1,0
^{85}Kr	0,69	0,7
^{204}Tl	0,76	0,7
^{147}Pm	0,227	0,7

Análisis de los resultados

- Para los detectores G-M de ventana final, la respuesta al bremsstrahlung tiende a aumentar a medida que la energía de rayos X disminuye.
- La sobre respuesta típica máxima se encuentra dentro del rango de 400% a 800% en la magnitud de tasa de dosis equivalente direccional. La incertidumbre podría ser de hasta un factor 10.

Análisis de los resultados

- Una solución parcial a este problema es identificar por separado la tasa de dosis beta y de “bremsstrahlung”.
- Hacer dos mediciones en la misma posición, una con la ventana abierta y otra con la ventana cubierta por unos 12 mm de plástico.
- La medición con la ventana cubierta es la contribución del “bremsstrahlung”.
- La diferencia entre los valores de ventana abierta y cubierta se debe a las partículas beta.

Análisis de los resultados

- La mayor incertidumbre es debida al efecto de la distancia fuente-detector, especialmente para cámaras de ionización.
- Si el detector está a una distancia inferior a tres veces la dimensión máxima del detector, para evaluar la tasa de dosis a 1 cm² de piel, se debe:
 - multiplicar la tasa de dosis por un factor 5 para una extensa contaminación de superficie, y
 - multiplicar por un factor 100 para una fuente puntual.

Análisis de los resultados

- La tasa de dosis verdadera debida a las partículas beta es difícil de medir debido a las grandes variaciones en su corto alcance en aire.
- La tasa de dosis beta verdadera se mide con TLDs.

Es más fácil blindar las partículas beta que medir su tasa de dosis

El desafío de monitorización de la tasa de dosis beta

- La tasa de dosis beta pura es difícil de medir con los equipos de monitoreo.
- La distancia de medición es pequeña y, por lo tanto, la distancia es un factor importante debido a la rápida absorción de betas en el aire.
- La necesidad de hacer mediciones cerca de la fuente

El desafío de monitorización de la tasa de dosis beta

- Alta tasa de dosis por Bq en comparación con la radiación gamma
- Un espectro complejo, a menudo una mezcla de partículas beta, bremsstrahlung y radiación gamma.

Consecuentemente....

Recomendaciones generales en centrales nucleares:

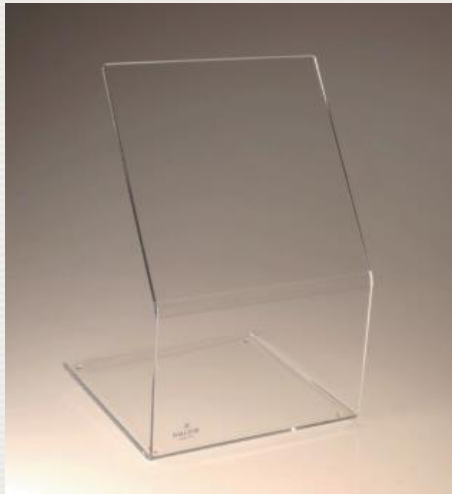
- Utilizar monitores de tasa de dosis beta para identificar la existencia de campos de radiación beta, pero no para su cuantificación.
- **Protegerse contra la radiación beta en lugar de medir.**

Reducción de la exposición beta

- Las fuentes beta pueden ser blindadas para reducir la exposición beta. 4 mm de metal absorberán todas las partículas beta.
- Los emisores beta de energía más alta deberían ser protegidos con materiales con número atómico bajo para reducir la producción de bremsstrahlung.

Reducción de la exposición beta

- Vale la pena utilizar la distancia para reducir la exposición, por ejemplo, manejar la fuente al final de una varilla o con una pinza.



Blindajes para partículas beta de plástico



Fuente beta con varilla

Monitorización de neutrones

Monitorización de neutrones

- Objetivos
- Elaborando el programa
- La técnica
- Características de los equipos
- Medición en la práctica
- Calibración y medición
- Análisis de los resultados

Objetivo de la monitorización de neutrones

Monitorización de neutrones - objetivo

- MLT para neutrones ayuda a controlar la exposición y mejorar la monitorización individual.
- También ayuda a mantener las dosis ALARA optimizando el blindaje.

Campos neutrónicos

- Los neutrones son emitidos:
 - De radionucleidos a través de reacciones (α,n) y (γ,n);
 - en el reactor nuclear, y
 - en la fisión espontánea de los combustibles gastados (^{242}Cm , ^{244}Cm y ^{238}Pu a ^{242}Pu).

Campos neutrónicos

- Neutrones producidos a partir de aceleradores de iones.
- Los neutrones son emitidos de radionucleidos a través de reacciones (α,n) y (γ,n). Por ejemplo, fuentes de neutrones utilizadas para fines de calibración y medición industrial como $^{241}\text{Am-Be}$.
- Fuentes de neutrones usadas para calibración y en mediciones industriales tal como ^{252}Cf .

Elaborando el programa

Elaborando el programa

- Para las fuentes selladas, las ubicaciones son evidentes y las energías son bien conocidas.
- Para otras fuentes, se debe trazar el campo, identificar los puntos de monitorización y evaluar las energías.
- El OIEA ha publicado un compendio de espectros de neutrones en el lugar de trabajo (informe técnico serie-403).

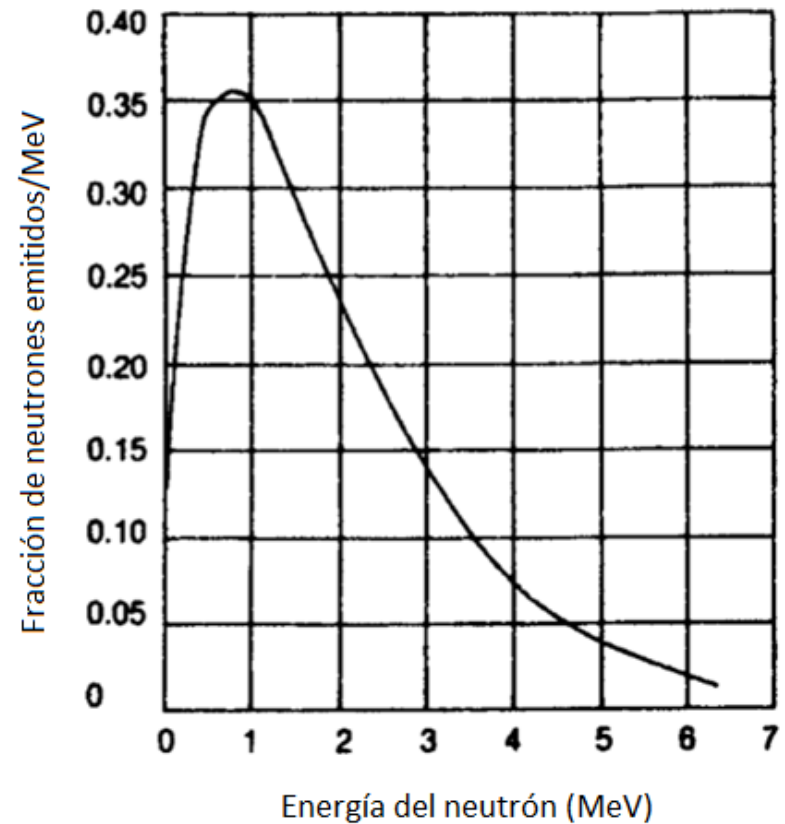
Elaborando el programa

- La dispersión causa una amplia gama de energías de neutrones.
- Casi siempre hay radiación gamma junto con neutrones.
- Los puntos típicos para monitorización son los lugares de almacenamiento para las fuentes, los contenedores de combustible nuclear, las áreas donde se generan los neutrones, etc.
- La tasa de dosis de neutrones se mide en $H^*(10)$ por hora.

Espectro de neutrones de la fisión de ^{235}U

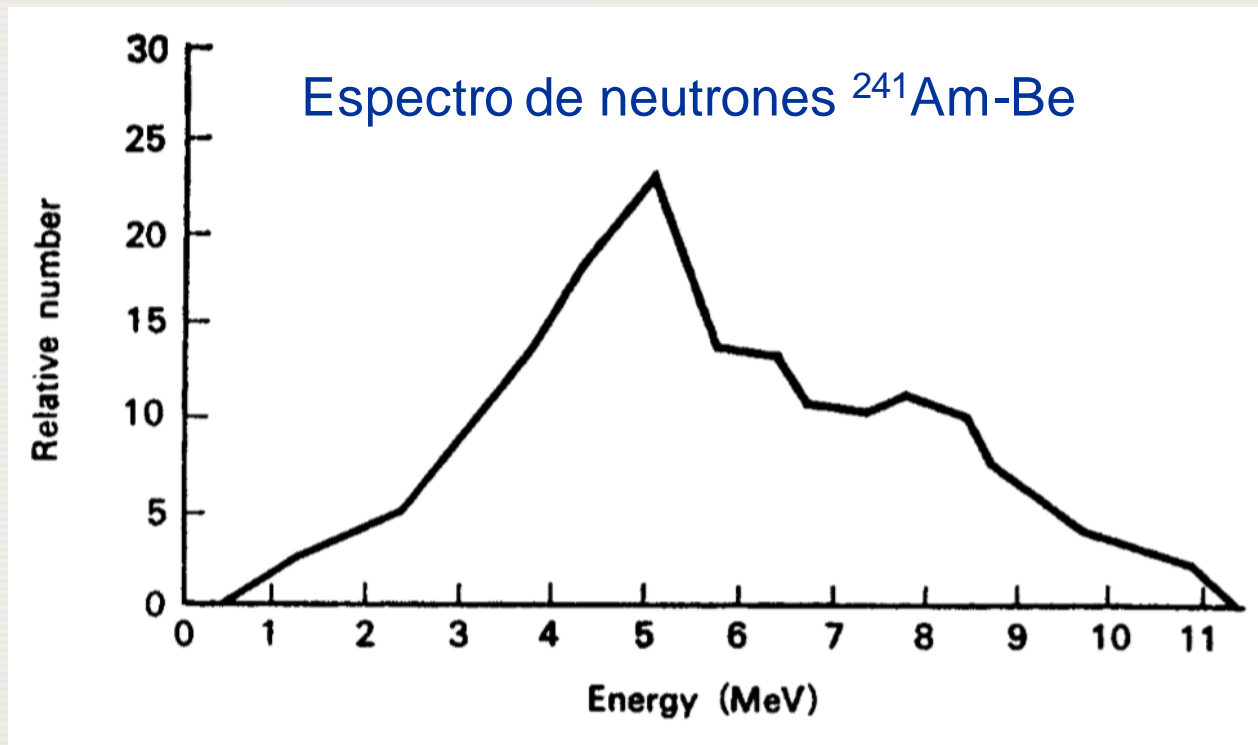
- Los neutrones provenientes de la fisión tienen una amplia gama de energías. La energía máxima es 7 MeV y la energía media es 2 MeV.
- ^{252}Cf sufre una fisión espontánea con una amplia gama de energías de neutrones. La energía más probable es 1 MeV y la energía media 2,3 MeV.

Espectro de neutrones de la fisión de ^{235}U



Espectro de neutrones de $^{241}\text{Am-Be}$

- Los neutrones provenientes de reacciones nucleares son de alta energía. La energía promedio de $^{241}\text{Am-Be}$ es 4,2 MeV.



Clasificación de neutrones

- Los neutrones se clasifican según su energía:

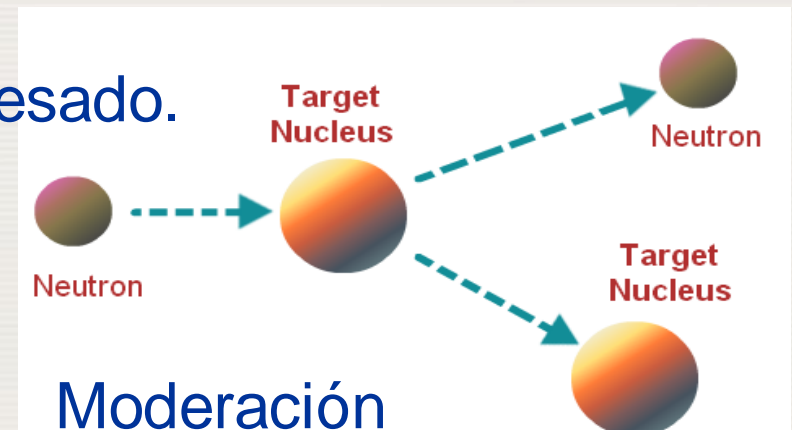
Energía	Clasificación
• Energía > 100 keV	Alta energía
• $0,025$ eV - 100 keV	Intermedios
• $E < 0,025$ eV	Térmicos

Los neutrones pierden energía a través de interacciones en su ambiente.

La técnica

Moderación neutrónica

- La mayoría de los monitores se basan en la detección de neutrones térmicos. Los neutrones de alta energía sufren moderación para reducir su energía.
- Por lo general, la moderación se realiza rodeando el detector con un material rico en hidrógeno (moderador), como el polietileno de alta densidad.
- Esto hace que el equipo sea pesado.



La técnica

- El detector convierte neutrones en partículas cargadas a través de reacciones con ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}$ y ${}^{10}\text{B}$.
- Un monitor de neutrones se diseña para tener una respuesta “equivalente al tejido” sobre un amplio rango de energías
- Los detectores de neutrones tienen una sensibilidad menor en comparación con los detectores de fotones o de beta.

La técnica

- El equipo utilizado debe tener una respuesta adecuada para el espectro energético de neutrones encontrado en el lugar de trabajo.
- Cuando el espectro no se conoce completamente, se pueden hacer mediciones espectrales adicionales.
- En la práctica, el espectro de la mayoría de los campos de neutrones es bien conocido.

La técnica

- La monitorización se realiza en $H^*(10)$ por hora.
- La sensibilidad es baja y necesita tiempos de integración largos.
- Los equipos miden generalmente a partir de $10 \mu\text{Sv/h}$ a 50 mSv/h , para energías del neutrón a partir de $0,025 \text{ eV}$ hasta aproximadamente 10 MeV .

La técnica

- Colocar el equipo con el centro del moderador en el punto de interés e integrar la medición durante un tiempo suficiente para obtener una alta precisión.
- Sostener el monitor cerca del cuerpo puede aumentar la tasa de dosis. Por lo tanto, se debe utilizar un soporte metálico de un metro de altura y dejar el equipo solo durante la medición.
- Los neutrones están acompañados por radiación gamma que también tiene que ser medida.

El equipo

Equipos para la monitorización de neutrones

- No es posible tener una buena dependencia de la energía en todo el rango de energía – las energías intermedias siempre son sobreestimadas.
- También se deben considerar factores prácticos como el peso del equipo y la coexistencia del campo gamma con el campo de neutrones.
- La insensibilidad a gamma es deseable, pero contribuye a una menor sensibilidad a los neutrones.

Contadores proporcionales

- Los contadores proporcionales son ampliamente empleados.
- El método utiliza reacciones nucleares, por ejemplo, $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ o $^6\text{Li}(n,^3\text{H})^4\text{He}$.
- Las partículas alfa, protones y ^3H pueden distinguirse fácilmente para que el rechazo gamma sea alto.
- Es posible diseñar contadores proporcionales que tengan una respuesta razonable de equivalente al tejido.

Contadores proporcionales

- La altura del pulso es proporcional al número de iones resultantes de la interacción de partículas cargadas.
- El discriminador de altura del pulso rechaza la ionización causada por los fotones, lo que permite que el monitor de neutrones sea relativamente insensible a los fotones.

Otros equipos para la monitorización de neutrones

- Un desarrollo más reciente utiliza la combinación de la detección rápida del neutrón usando colisiones n-p en plástico seguida por la detección de protones usando el centellador de yoduro de Li(Eu).
- Es un equipo de peso ligero con buena respuesta energética y alta sensibilidad.
- Desventaja: rechazo gamma ineficiente.
- Útil para indicar la presencia o ausencia de neutrones pero no para mediciones de tasa de dosis.

Medición en la práctica

Medición en la práctica



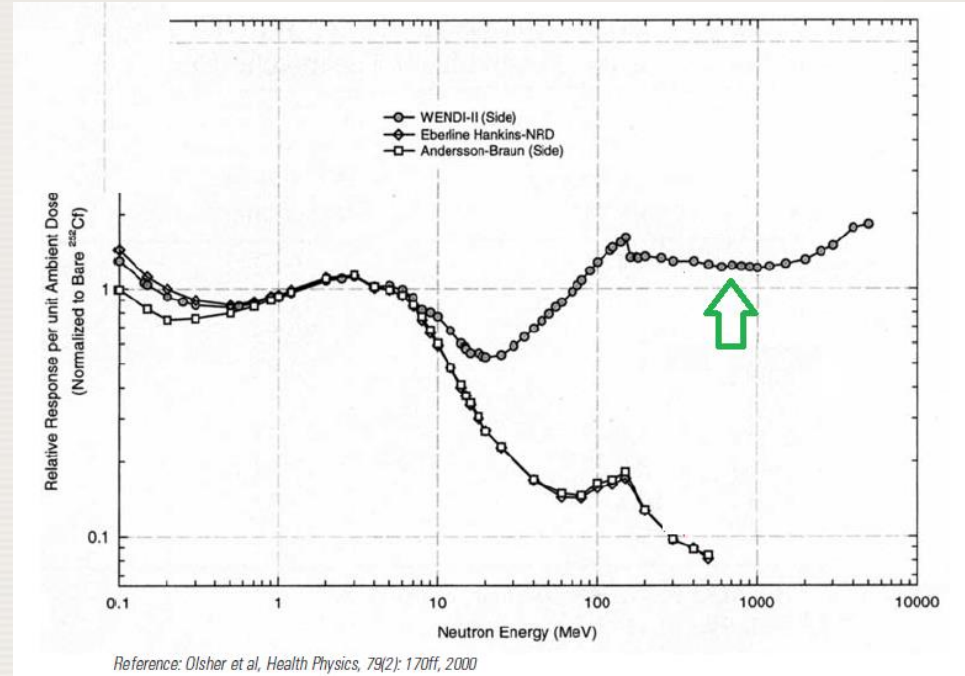
Detector ^3He

Cortesía: Thermo

Rango: $1 \mu\text{Sv/h}$ a 100 mSv/h .

Magnitud: $H^*(10) / \text{h}$

Dependencia energética: $\pm 30\%$ de 25 meV a 9 MeV



Medición en la práctica



Detector BF₃

Monitor de neutrones	Detector BF ₃
Rango de energía	Térmica a 10 MeV
Rango de medición	10 μSv/h a 100 mSv/h
Rechazo gamma	1 Sv/h gamma

PRECAUCIÓN: monitores de neutrones llenos de gas perderán presión. Pruebas de funcionamiento periódicos son obligatorias.

Medición en la práctica

El error causado por la influencia del cuerpo del operario puede reducirse montando el equipo en un soporte para apoyarlo a la altura deseada.



Medición en la práctica

- Esto también permitirá que la medición se realice durante un período más largo y es el método preferido en áreas de tasa de dosis baja.
- La proporción de la dosis de neutrones a la dosis gamma es aproximadamente constante para el mismo lugar de trabajo.
- Si se conoce esta relación, la dosis de neutrones se puede estimar midiendo la tasa de dosis gamma.

Calibración, pruebas y verificación

Calibración

- Para la calibración del monitor de neutrones se debe utilizar la cantidad de fluencia y el coeficiente de conversión para la fluencia a la dosis ambiente equivalente $H^*(10)$.
- La calibración del monitor de neutrones se realiza en el aire.
- La nueva norma ISO 12789-1 especifica campos realistas.

Calibración

- Las fuentes isotópicas proporcionan los campos de neutrones más convenientes para propósitos de calibración.
- Los neutrones producidos por la fisión espontánea (^{252}Cf) o por reacciones (α, n : $^{241}\text{Am}-\text{Be}$, $^{241}\text{Am}-\text{B}$, $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$, etc.) son recomendados en la norma IEC 1005.

Prueba de aptitud (*type test*)

- La prueba de aptitud debe basarse en la publicación IEC 61005.
- La prueba es difícil porque se dispone de un número limitado de energías, incluso en los laboratorios bien equipados.
- La modelización por ordenador (p. ej. MCNP) puede ser usada en el diseño de equipos apoyada por mediciones reales.

Prueba de aptitud (*type test*)

- La respuesta del equipo debe ser probada en presencia de fuentes $^{241}\text{Am-Be}$ y ^{137}Cs simultáneamente.
- Las mediciones de la tasa de dosis de neutrones no deben aumentar 10% en la presencia de una alta tasa de dosis gamma.

Pruebas de funcionamiento

- La prueba incluye: la batería, la indicación de fondo, el ajuste de cero y la respuesta a una fuente de p. ej., ^{252}Cf o $^{241}\text{Am-Be}$.

Análisis de los resultados

Interpretación

- Los equipos tienden a sobrestimar la tasa de dosis de neutrones de energía intermedia. Se debe decidir si un factor de corrección (reducción) es apropiado (o no).
- La principal contribución a las incertidumbres es el desconocimiento del espectro energético.
- Para tasas de dosis bajas, hasta unos pocos $\mu\text{Sv/h}$, la incertidumbre estadística es grande.