

## Lección 4

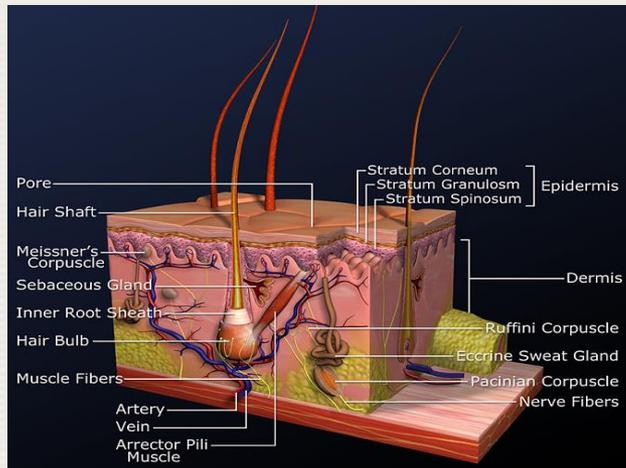
# Monitorización del lugar del trabajo partículas beta y neutrones

# 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

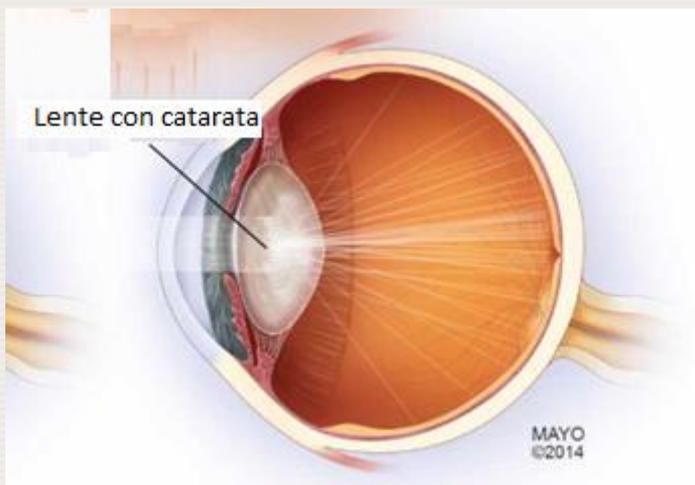
# Importancia de la exposición beta



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  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  son importantes emisores beta e y así son algunos emisores beta-gamma como  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ .

# Elaborando el programa

- En hospitales e instituciones académicas se puede encontrar  $^{32}\text{P}$ ,  $^{90}\text{Y}$  y  $^{35}\text{S}$ .
- 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

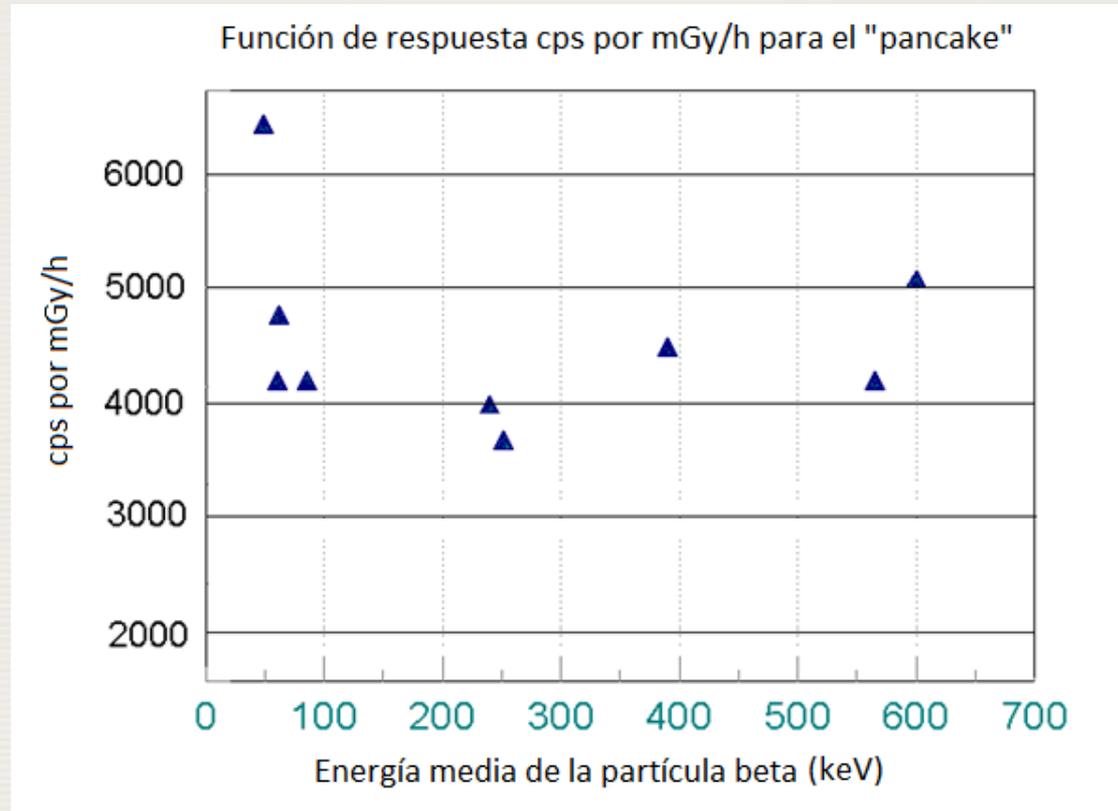
- Los tubos G-M de ventanas finales delgadas (1 a 3 mg/cm<sup>2</sup>) pueden detectar partículas beta y tienen una respuesta beta razonable en H'(0,07).
- El equipo es más pequeño y más fácil de posicionar
- El detector, sin embargo, sobreestima la respuesta para bremsstrahlung, si el equipo se calibra en H\*(10) con la radiación gamma de <sup>137</sup>Cs, 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<sup>2</sup>.
- Los detectores "pancake" tienen típicamente un área de ventana de 15 cm<sup>2</sup>.
- 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  $^{137}\text{Cs}$  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
$^{85}\text{Kr}$	0,69	0,5 - 0,7
$^{204}\text{Tl}$	0,76	0,5 - 0,7
$^{147}\text{Pm}$	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
$^{85}\text{Kr}$	0,69	0,7
$^{204}\text{Tl}$	0,76	0,7
$^{147}\text{Pm}$	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 cm<sup>2</sup> 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 ( $\alpha,n$ ) y ( $\gamma,n$ );
  - en el reactor nuclear, y
  - en la fisión espontánea de los combustibles gastados ( $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  y  $^{238}\text{Pu}$  a  $^{242}\text{Pu}$ ).

# Campos neutrónicos

- Neutrones producidos a partir de aceleradores de iones.
- Los neutrones son emitidos de radionucleidos a través de reacciones ( $\alpha,n$ ) y ( $\gamma,n$ ). 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  $^{252}\text{Cf}$ .

# 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).

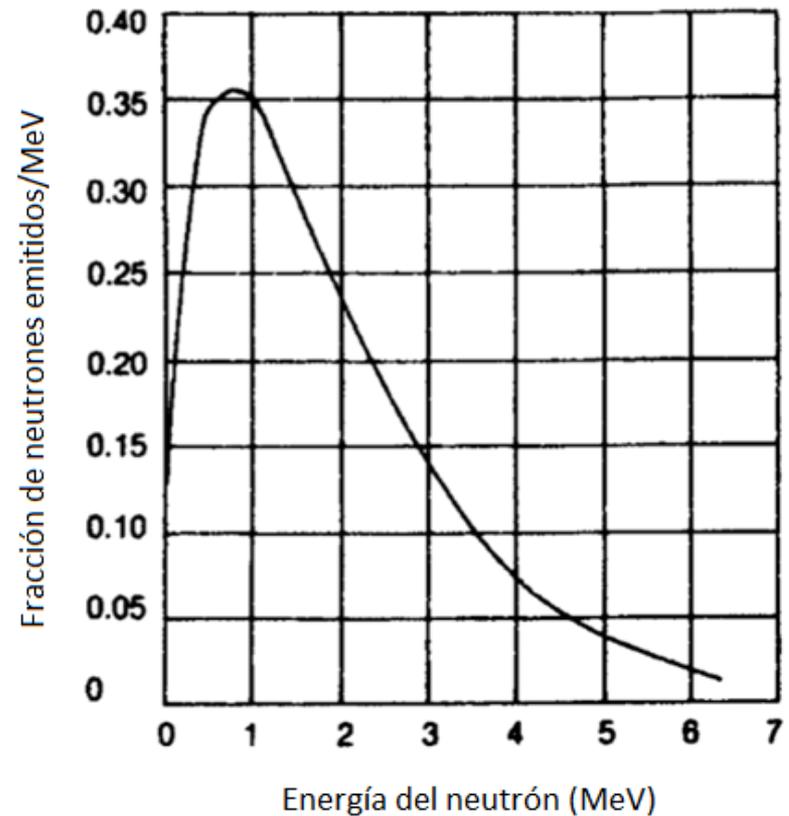
# Elaborando el programa

- 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 $^{235}\text{U}$

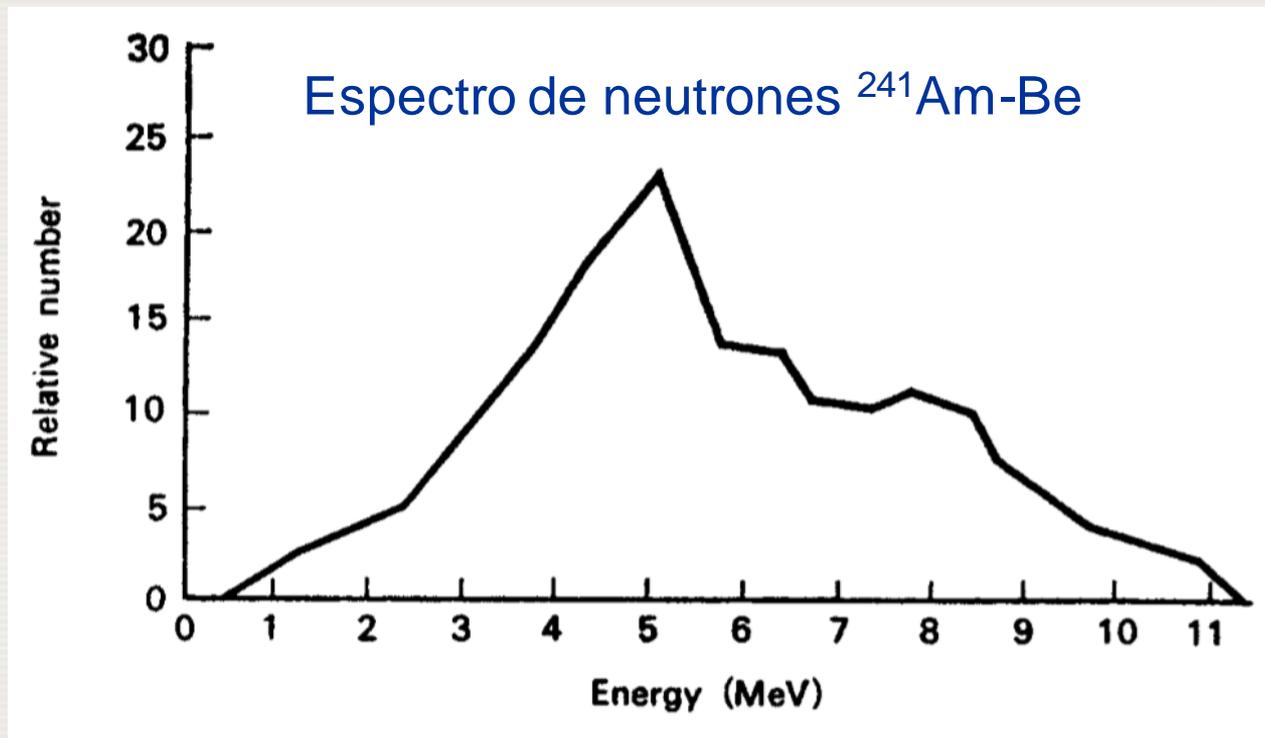
- Los neutrones provenientes de la fisión tienen una amplia gama de energías. La energía máxima es 7 MeV y la energía media es 2 MeV.
- $^{252}\text{Cf}$  sufre una fisión espontánea con una amplia gama de energías de neutrones. La energía más probable es 1 MeV y la energía media 2,3 MeV.

*Espectro de neutrones de la fisión de  $^{235}\text{U}$*



# 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:

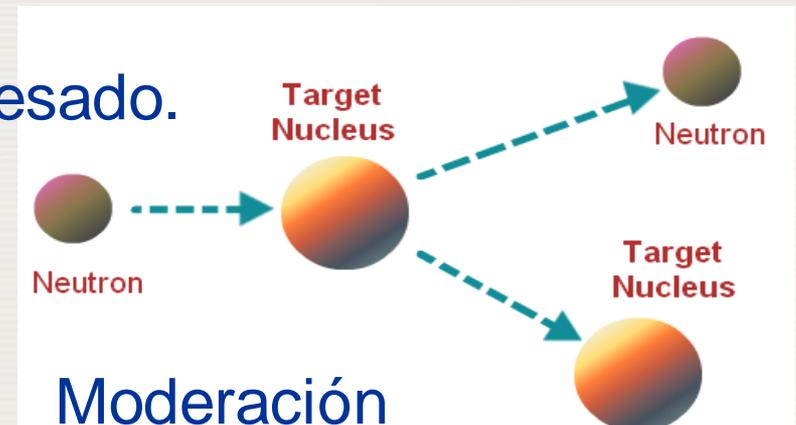
Energía	Clasificación
• Energía $> 100$ keV	Alta energía
• $0,025$ eV - $100$ keV	Intermedios
• $E < 0,025$ eV	Térmicos

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  $50 \text{ mSv/h}$ , para energías del neutrón a partir de  $0,025 \text{ eV}$  hasta aproximadamente  $10 \text{ MeV}$ .

# 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  $^3\text{H}$  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



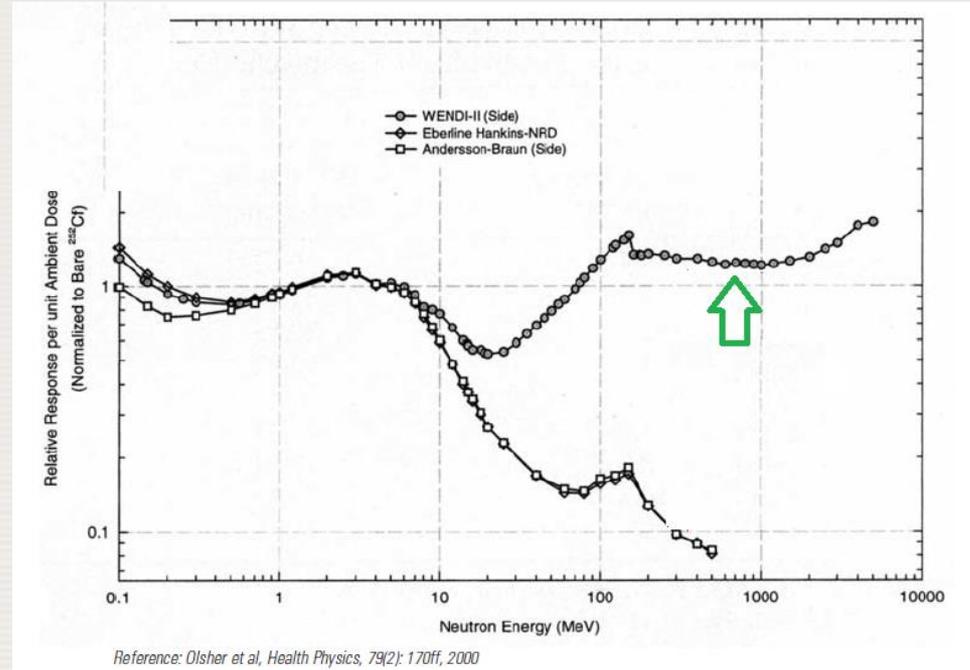
## Detector $^3\text{He}$

Cortesía: Thermo

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

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

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



# Medición en la práctica



Detector  $\text{BF}_3$

Monitor de neutrones	Detector $\text{BF}_3$
Rango de energía	Térmica a 10 MeV
Rango de medición	10 $\mu\text{Sv/h}$ 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 ( $^{252}\text{Cf}$ ) o por reacciones ( $\alpha$ , 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  $^{137}\text{Cs}$  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.,  $^{252}\text{Cf}$  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.