

Chapitre 11: DéTECTEURS de neutrons

Contenu

- Principes de la détection neutrons
- Méthodes de détection des neutrons lents
- Méthodes de détection des neutrons rapides

Introduction

- Les neutrons sont des particules non-chargées → ils ne peuvent pas être détectés directement
- Les neutrons se détectent essentiellement par leurs interactions avec des noyaux atomiques → réactions nucléaires → ces interactions donnent naissance à des particules chargées que l'on peut détecter (proton, α , fragments de fission,...)
- Les sections efficaces d'interaction des neutrons sont très dépendantes de l'énergie du neutron → séparation en deux domaines d'énergie → les neutrons lents ($E < 0.5$ eV) et les neutrons rapides ($E > 0.5$ eV)

Neutrons lents

- Matériaux utilisés pour la détection des neutrons
- Compteur proportionnel neutrons
- Scintillateurs neutrons
- Détecteurs neutrons basés sur la fission
- Détecteurs neutrons pour les réacteurs nucléaires

Détection des neutrons lents: Choix du matériau

- La section efficace d'interaction doit être grande \rightarrow c'est une nécessité pour conserver un détecteur de dimension raisonnable
- Généralement \rightarrow un champ de neutrons est accompagné d'un champ (intense) de γ \rightarrow la discrimination par rapport à ces γ est un critère important dans le choix du matériau détecteur
- Importance de la valeur de Q (E libéré) \rightarrow pour $Q \nearrow \rightarrow E$ cédée aux produits de la réaction $\nearrow \rightarrow$ amélioration de la discrimination par rapport aux γ
- La distance parcourue par les produits de réaction a aussi de l'importance (pour des neutrons lents dans un solide \rightarrow quelques dixièmes de mm; dans un gaz \rightarrow plusieurs cm)

Réactions importantes pour la détection de neutrons (1)

- Réaction du bore: $^{10}\text{B}(n,\alpha) \rightarrow$
 $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow \begin{cases} ^7_3\text{Li} + ^4_2\alpha & Q = 2.792 \text{ MeV (état fondamental)} \\ ^7_3\text{Li}^* + ^4_2\alpha & Q = 2.310 \text{ MeV (état excité)} \end{cases}$
- Pour des neutrons thermiques ($E \approx 0.025 \text{ eV}$) \rightarrow 94% de Li^* et 6% de Li \rightarrow grande valeur de Q \rightarrow évidemment impossible de déterminer l' E du neutron
- La quantité de mouvement totale est nulle \rightarrow pour l'état excité (par exemple) cela donne \rightarrow

$$E_{\text{Li}} + E_{\alpha} = Q$$

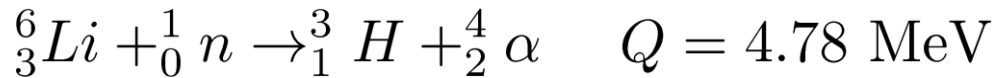
$$m_{\text{Li}}v_{\text{Li}} = m_{\alpha}v_{\alpha}$$



$$E_{\text{Li}} = 0.84 \text{ MeV} \quad \text{et} \quad E_{\alpha} = 1.47 \text{ MeV}$$

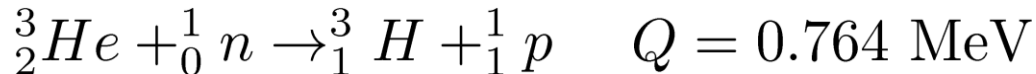
Réactions importantes pour la détection de neutrons (2)

- Réaction du lithium ${}^6\text{Li}(n,\alpha) \rightarrow$



$$E_H = 2.73 \text{ MeV} \quad \text{and} \quad E_\alpha = 2.05 \text{ MeV}$$

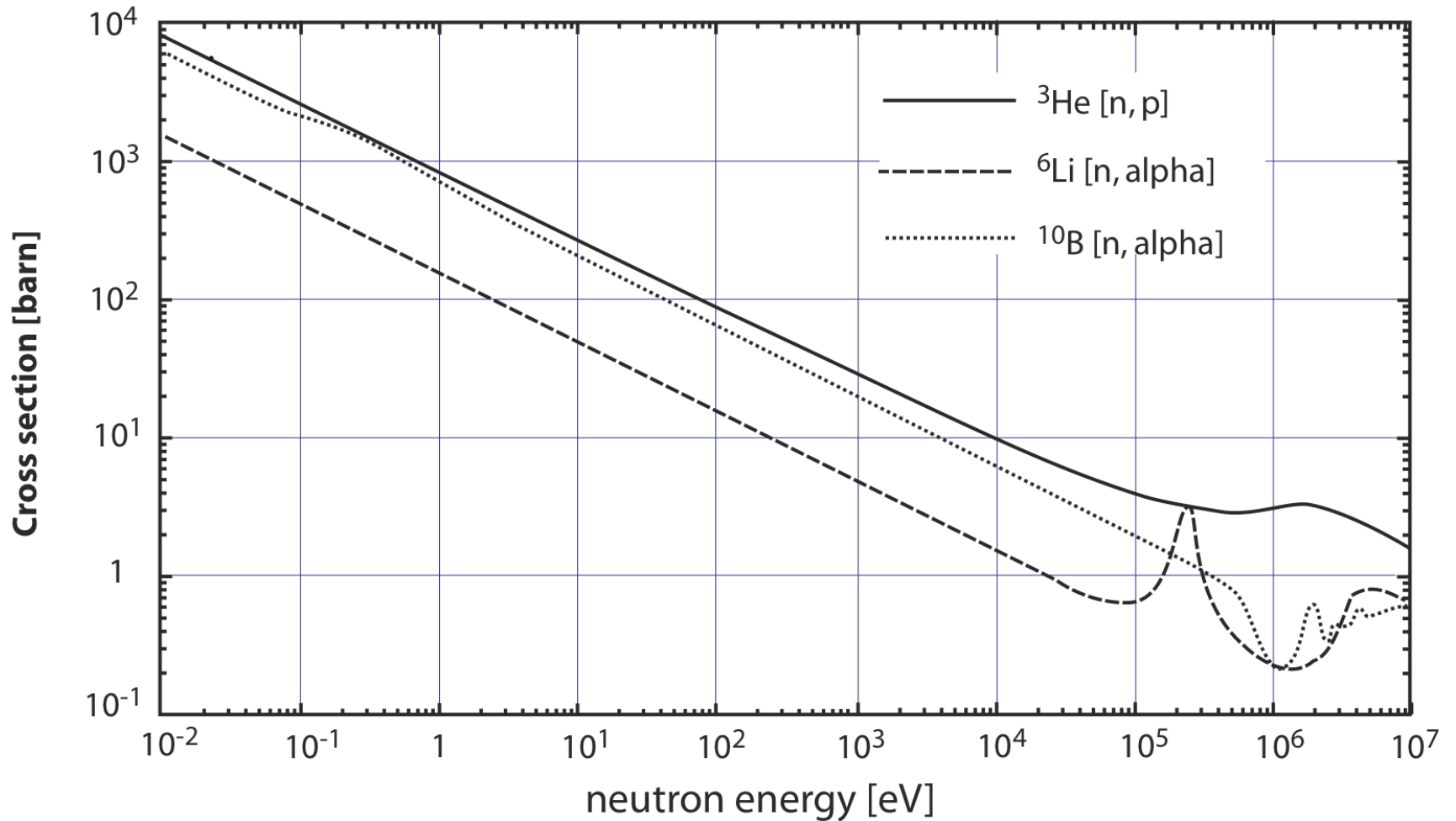
- Réaction de l'hélium ${}^3\text{He}(n,p) \rightarrow$



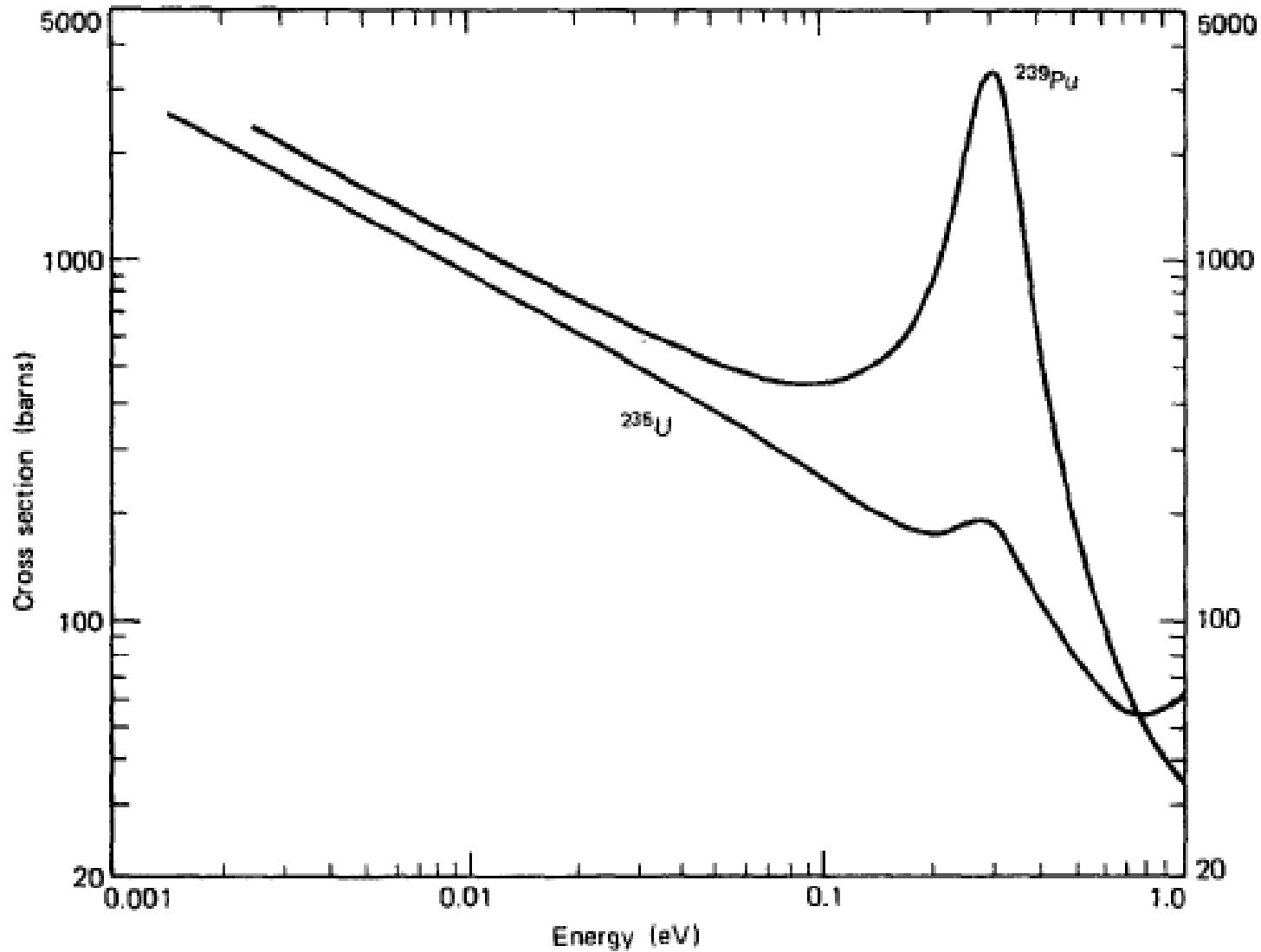
$$E_p = 0.573 \text{ MeV} \quad \text{and} \quad E_H = 0.191 \text{ MeV}$$

- Capture neutron par du Gadolinium (${}^{157}\text{Gd}$): 255000 barns \rightarrow émission d' e^-
- Réactions de fission induites par les neutrons (${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$) \rightarrow grande valeur de Q ($\approx 200 \text{ MeV}$)

Sections efficaces de ces réactions (1)

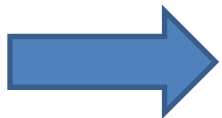


Sections efficaces de ces réactions (2)



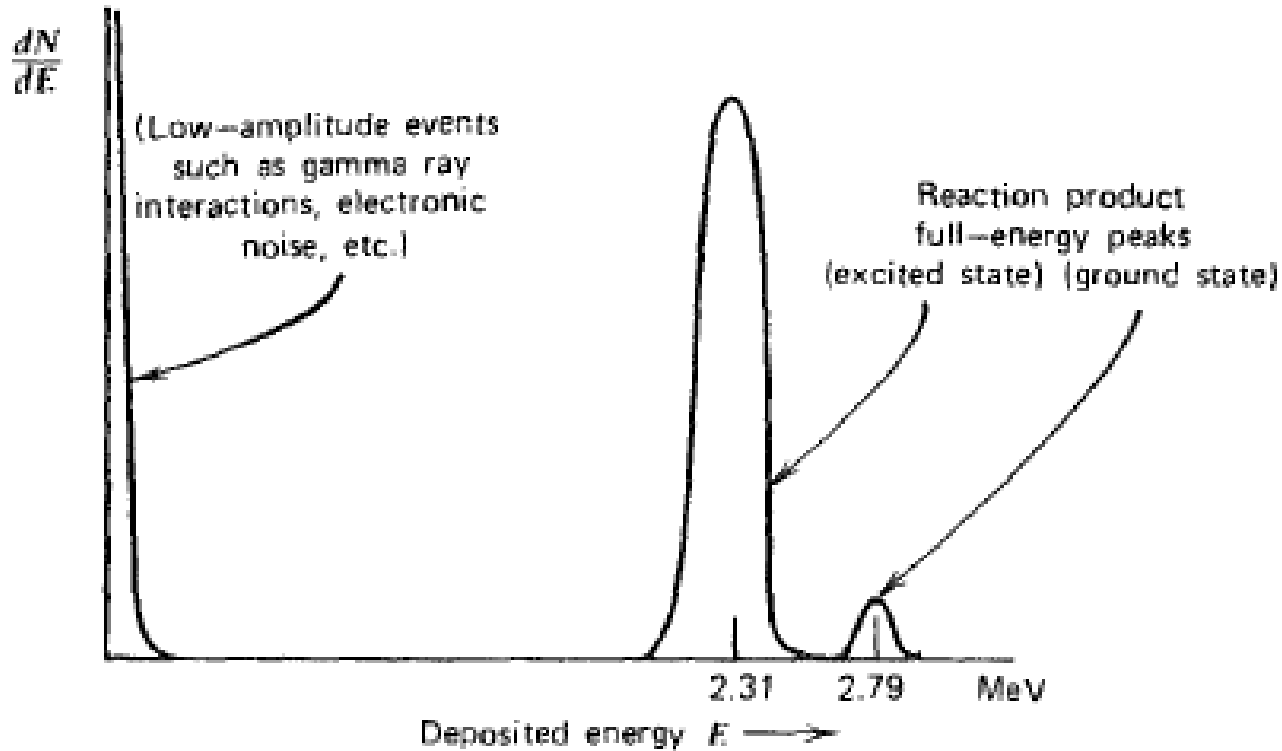
Compteur proportionnel pour la détection de neutrons

- Généralement → utilisation de BF_3 ou ^3He (gazeux)
- Il n'existe pas de gaz stable à base de lithium → pas d'utilisation
- Les 2 gaz présentent une bonne discrimination aux γ (meilleure pour BF_3 dû au Q élevé de la réaction du B) \leftrightarrow les γ interagissent avec les parois → production d' e^- → cependant les pertes d' E des e^- dans un gaz sont faibles ($\approx 2\text{keV/cm}$) → les impulsions produites $<$ que celles des neutrons
- Résolution temporelle mauvaise → temps de vol des produits de réaction
- BF_3 est hautement toxique, très corrosif et électronégatif → chambre à gaz médiocre; de plus dégradation significative après 10^{10} - 10^{11} coups due à la contamination des électrodes par les produits de dissociation moléculaires
- Les compteurs à base de ^3He sont bien meilleurs (pouvant fonctionner à une pression de pls bars) et présentent un temps de vie long; cependant **très chers**



Jusqu'il y a qqes années → utilisation de ^3He →
mais tellement cher à produire que \searrow de l'offre
→ \nearrow du BF_3

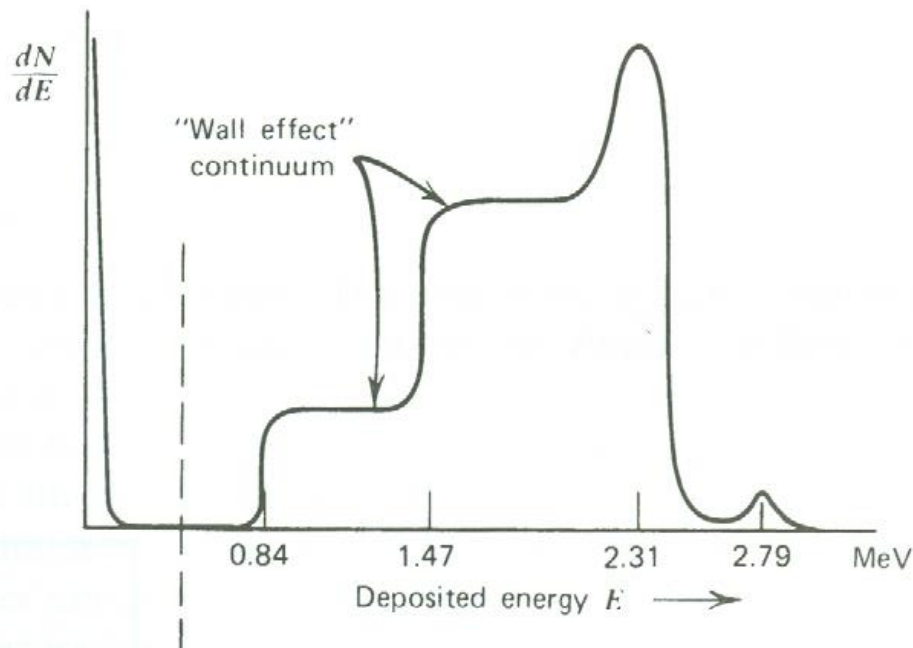
Spectre idéal pour un compteur au BF_3



- Pour un compteur de grandes dimensions \rightarrow les produits de la réaction sont créés loin des parois et déposent toute leur énergie dans le gaz du compteur
- Rapport entre les 2 pics \rightarrow 94:6

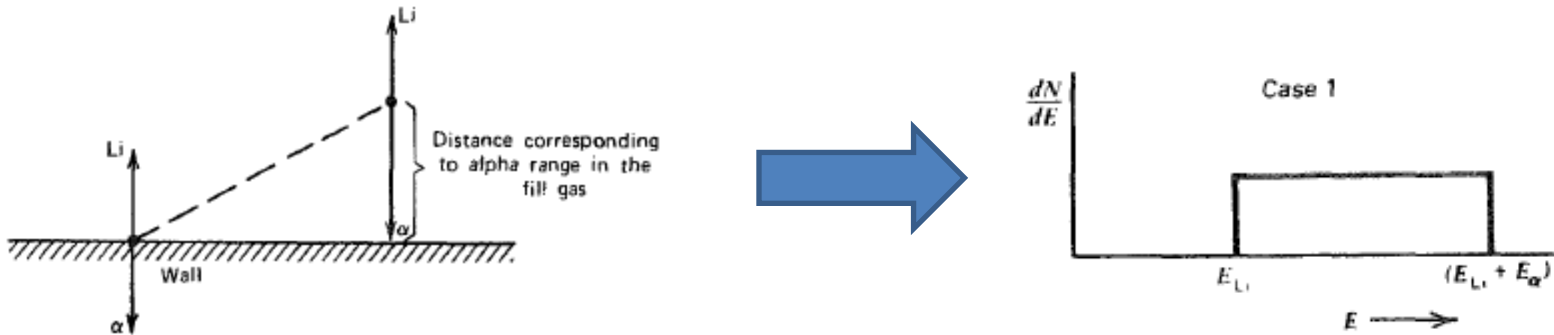
Effet de paroi pour un BF₃ (1)

- Si la taille du détecteur n'est pas beaucoup plus grande que le range du α et du Li (range typique du α dans un BF₃: 1 cm) \rightarrow interactions avec les parois du détecteur
- Une partie de l'énergie disponible est déposée dans les parois \rightarrow modification du spectre \rightarrow « effet de paroi »

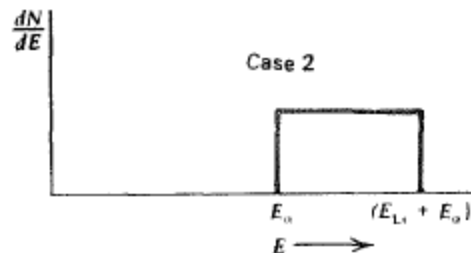


Effet de paroi pour un BF_3 (2)

1. Le α et le Li sont émis dans des directions opposées \rightarrow si le α interagit avec une paroi (une partie seulement de son énergie est déposée - uniformément - dans le détecteur) \rightarrow le Li dépose toute son énergie dans le gaz \rightarrow l'énergie déposée varie entre E_{Li} et $E_{Li} + E_{\alpha}$

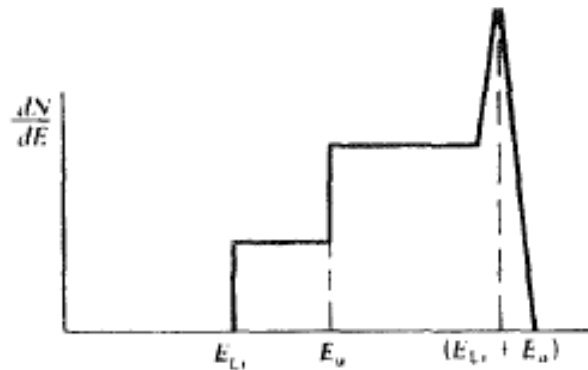


2. Si inversement le Li interagit avec une paroi \rightarrow le α dépose toute son énergie dans le gaz \rightarrow l'énergie déposée varie entre E_{α} et $E_{\alpha} + E_{Li}$



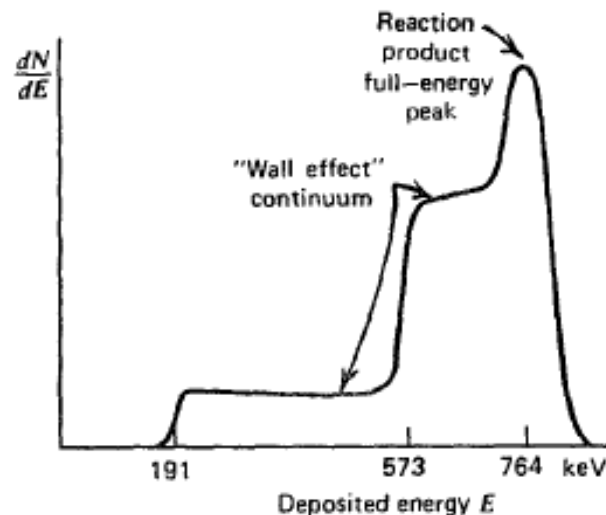
Effet de paroi pour un BF_3 (3)

3. Si le et le Li sont créés « loin » des parois \rightarrow pas d'échappement \rightarrow pic d'absorption totale en $E_\alpha + E_{Li}$
4. La combinaison de ces \neq processus donne le spectre final



Compteur au ^3He

- Exactement le même principe que pour un BF_3
- Cependant \rightarrow Z plus faible que le $\text{BF}_3 \rightarrow$ les ranges du tritium et du proton sont importants \rightarrow effet de paroi plus important à une pression et une taille identiques



Scintillateurs neutrons (1)

- Utilisation du Li comme scintillateur → iodure de lithium dopé à l'euporium - LiI(Eu) → après réaction du neutron avec le lithium → le tritium et le α interagissent « classiquement » avec le scintillateur
- LiI similaire chimiquement à NaI
- Avec un dopage de 0.1% de Eu comme activateur → efficacité intrinsèque $\approx 35\%$ de celle du NaI(Tl)
- La durée de vie des centres de luminescence $\approx 0.3 \mu s$ (pour NaI(Tl): $\approx 0.23 \mu s$) → bonne résolution temporelle
- Cristaux de grande taille → pas d'effet de paroi → pic d'absorption totale
- Désavantage → le cristal scintillant est sensible aux γ qui déposeront toute leur E → discrimination peu efficace

Scintillateurs neutrons (2)

- D'autres matériaux scintillants existent
- Li dispersé dans une matrice scintillante de sulfure de zinc dopé à l'argent - ZnS(Ag) - de faible épaisseur ≈ 0.6 mm (matériau uniquement disponible sous forme polycristalline \rightarrow à cause des interfaces \rightarrow auto-absorption de la sa lumière de luminescence \rightarrow taille limitée \rightarrow uniquement valable pour la détection de particules lourdes) \rightarrow à cause de la faible épaisseur \rightarrow bonne discrimination aux γ
- Plastics chargés au B
- Scintillateurs liquides contenant du Li ou du Gd \rightarrow discrimination entre neutrons et γ en fonction de la forme de l'impulsion
- ...

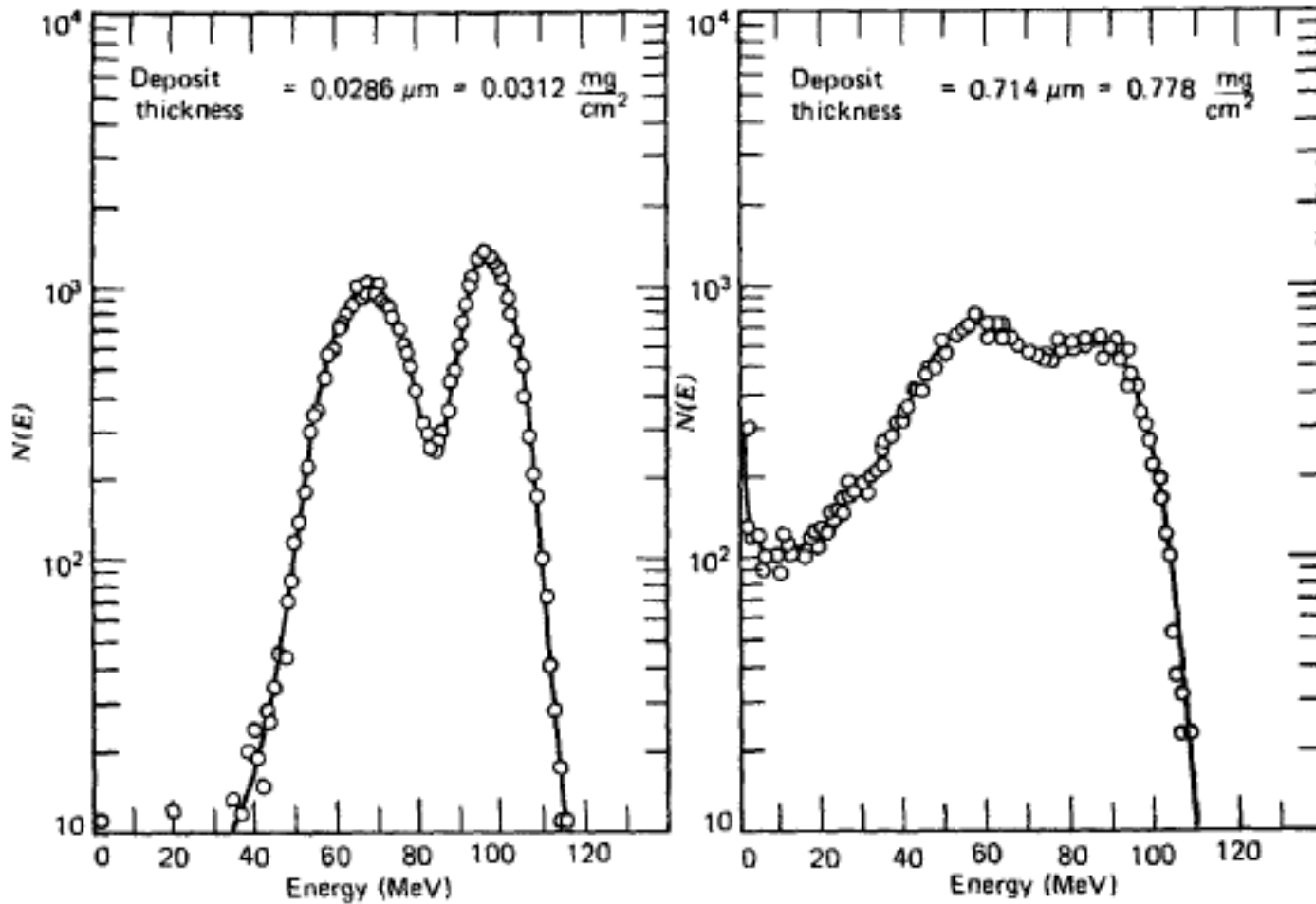
Détecteurs neutrons basés sur la fission

- Les réactions de fission convertissent les neutrons lents en produits de réaction ionisants → détectés de manière conventionnelle → une énergie de ≈ 200 MeV est disponible → une E de ≈ 160 MeV est communiquée aux fragments de fission
- Énergie déposée élevée → bruit de fonds négligeable
- À cause de propriétés physico-chimiques défavorables → impossible d'incorporer des matières fissiles dans un gaz
- Solution → recouvrir l'enceinte interne d'un détecteur à gaz de matières fissiles

Chambre d'ionisation avec dépôt fissile

- Détecteur le plus populaire → chambre d'ionisation « classique » dont l'enceinte interne est recouverte de matière fissile → possibilité d'utilisation en mode courant ou impulsion
- En mode impulsion → le spectre mesuré dépendra de l'épaisseur du dépôt fissile
- Grossièrement → les fragments légers et lourds ont des distributions centrées en 100 MeV et 70 MeV
- Pour une épaisseur de matière fissile fine → on observe bien un spectre à double bosses en 70 et 100 MeV
- Pour une épaisseur de matière fissile importante → ↗ de l'efficacité de détection mais absorption énergétique dans le dépôt lui-même → distorsion du spectre

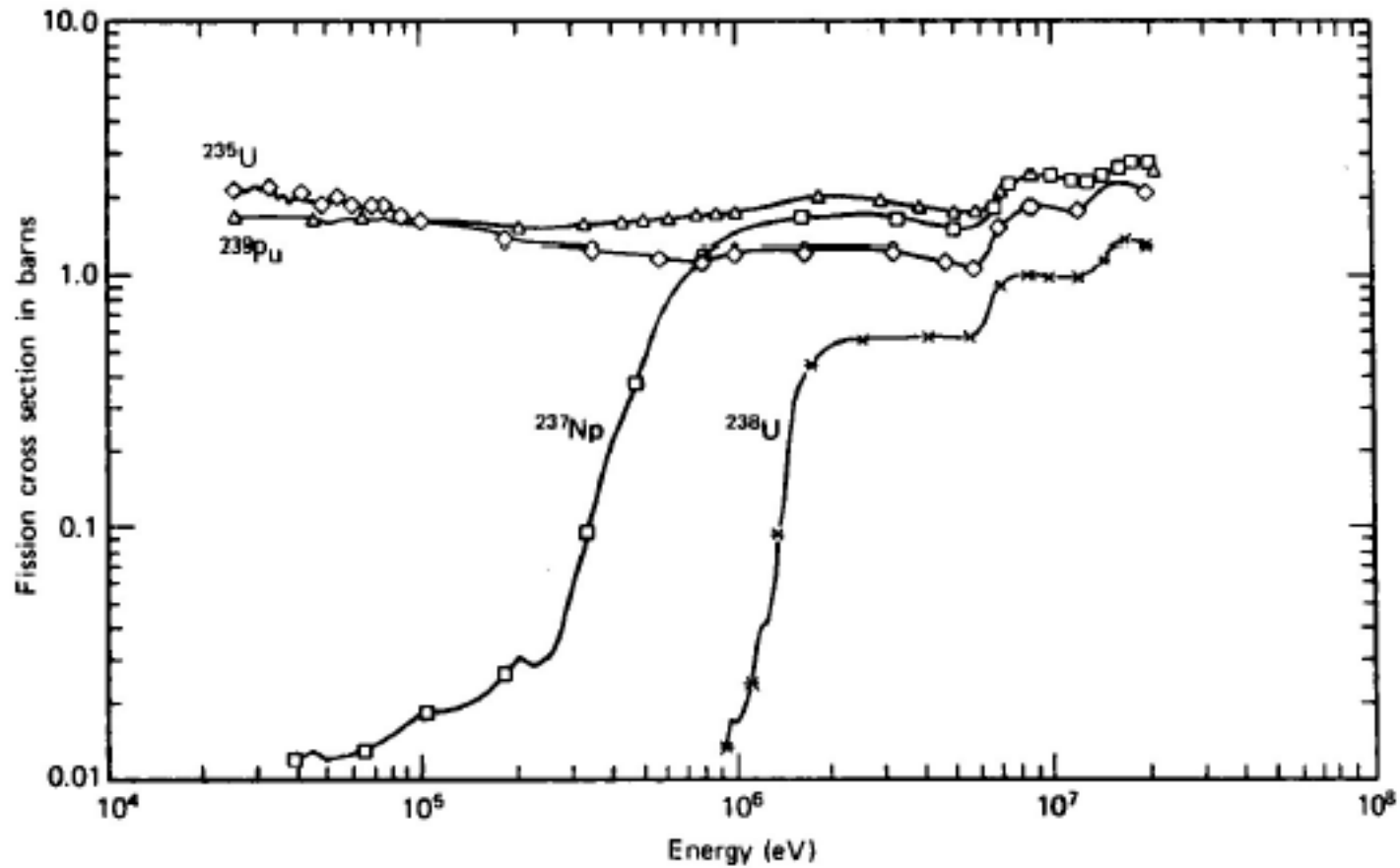
Chambre d'ionisation avec dépôt de UO_2



Autres détecteurs basés sur la fission

- Détecteur proportionnel dont l'enceinte interne est recouverte de matière fissile (^{235}U ou ^{239}Pu)
- Remarque \rightarrow avec du ^{238}U ou ^{237}Np \rightarrow mesure de neutrons rapides
- Scintillateurs contenant un matériau fissile

Section efficaces de fission

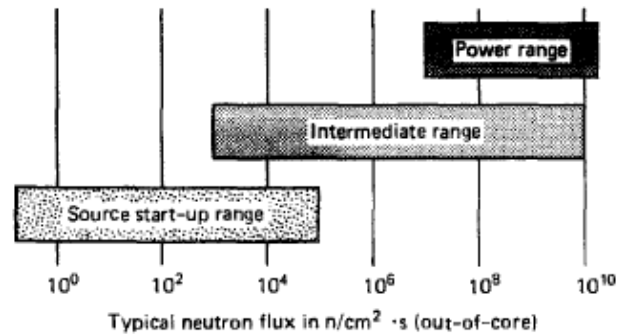


Détecteurs neutrons pour les réacteurs nucléaires (1)

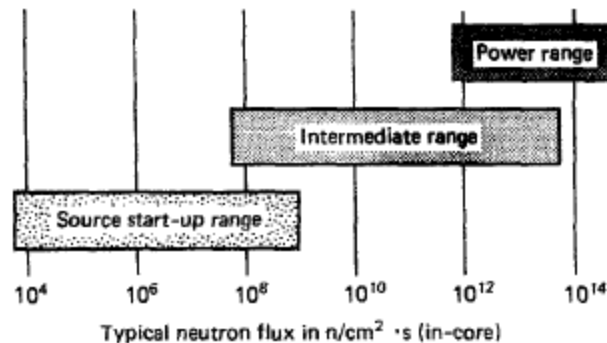
- Dans un réacteur nucléaire classique → la fission est induite par les neutrons lents → les systèmes de contrôle et de sauvegarde du réacteur sont basés sur la détection des neutrons lents
- Conditions extrêmes → détecteurs spécifiques sont requis
- La majorité des détecteurs neutrons pour centrale nucléaire sont à gaz → avantages: discrimination des γ , stabilité à long terme, résistance aux dégâts radiatifs
- Les détecteurs à scintillation sont moins utilisés: fortement sensibles aux γ et faux événements induits dans le PM
- Les semiconducteurs sont très sensibles aux dégâts radiatifs → jamais utilisés dans une centrale nucléaire

Détecteurs neutrons pour les réacteurs nucléaires (2)

- Deux catégories de détecteurs en fonction des flux à mesurer
- Détecteurs in-core (flux de 10^4 - 10^{14} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) et détecteurs out-of-core (0 - 10^{10} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Les détecteurs out-of-core sont utilisés en-dehors du cœur des PWR



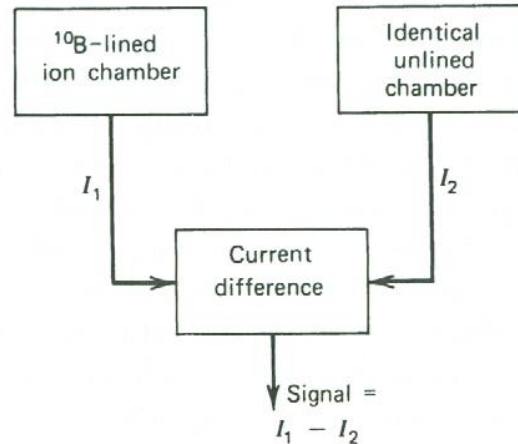
- Les détecteurs in-core sont utilisés dans le cœur des BWR et des PWR



Détecteurs out-of-core

- Les détecteurs à gaz vus précédemment peuvent être utilisés comme détecteurs out-of-core
- Le mode impulsion est limité à des taux de 10^7 événements par seconde \rightarrow pour des flux plus élevés (réacteur à plein rendement) \rightarrow le mode courant est utilisé \rightarrow problème: pas de discrimination γ
- Une possibilité: l'utilisation du mode fluctuation \rightarrow signal $\propto \overline{\sigma_I^2(t)}$
 \rightarrow permet la discrimination
- Autre solution \rightarrow l'utilisation des chambres d'ionisation compensées

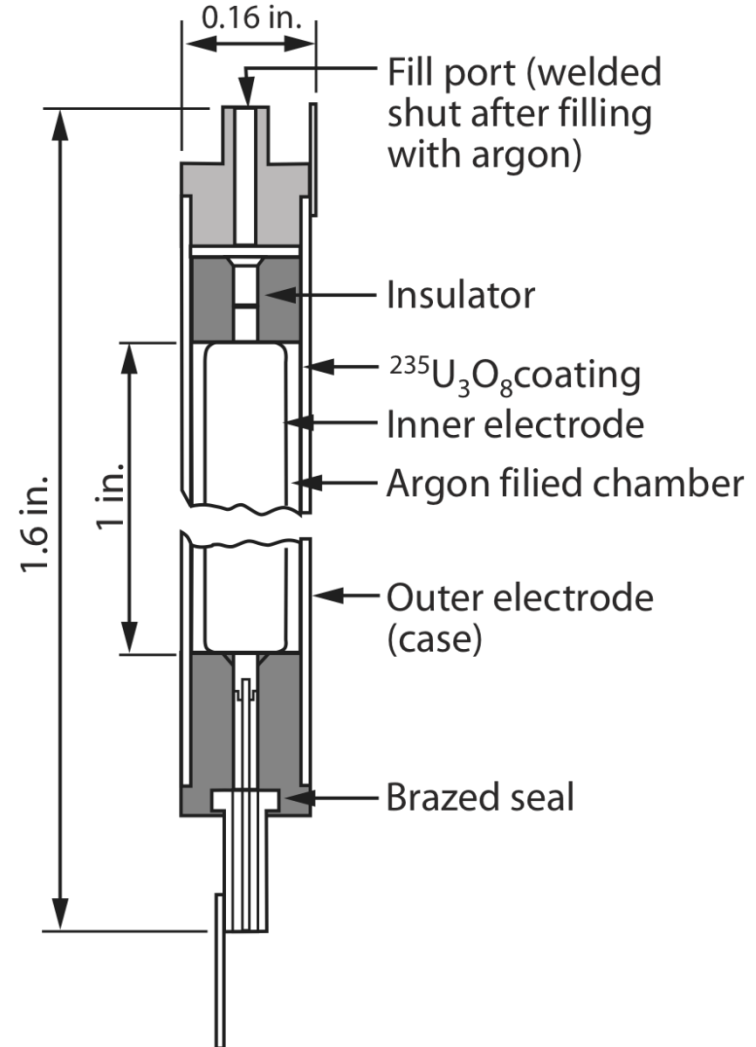
Chambres d'ionisation compensée (CIC)



- On considère d'une part → une chambre d'ionisation dont la paroi interne est recouverte de bore opérant en mode courant → le courant mesuré (I_1) consiste en la somme du courant dû aux interactions des neutrons dans le B et des γ dans les parois et le gaz
- D'autre on mesure le courant I_2 dans une chambre « normale » dû aux interactions des γ dans les parois et le gaz
- La \neq des 2 courants donne le courant dû aux neutrons

Détecteurs in-core: Chambre à fission

- Exemple de chambre à fission → chambre d'ionisation avec un dépôt de ^{235}U → utilisé dans les BWR
- Généralement utilisé en mode courant
- Argon à haute pression → le range des produits de fission < à la dimension de la chambre
- Le matériau fissile se consomme → diminution de la sensibilité dans le temps (après 1 an: réduction de $\approx 50\%$)
- Pour compenser cet effet → utilisation d'un mélange d'isotopes fissile et fertile qui se convertit en matière fissile (^{238}U et ^{239}Pu) ou (^{234}U et ^{235}U)



Détecteurs in-core: Détecteurs auto-alimentés (1)

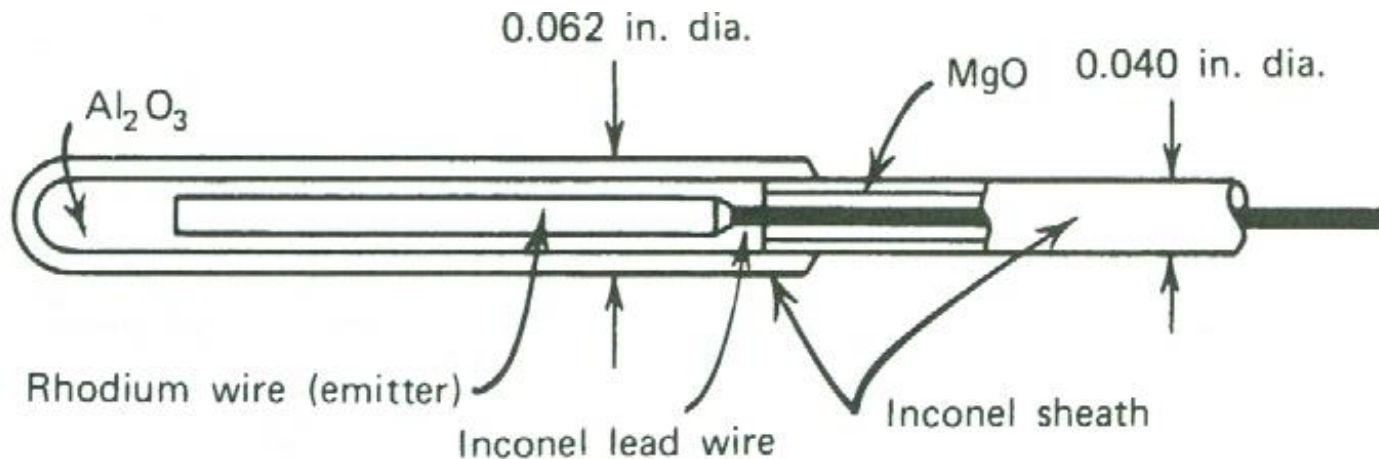
- Détecteur contenant un matériau possédant une section efficace de capture neutronique élevée impliquant un processus d'émission de β ou de γ
- Si β émis \rightarrow le courant d' e^- est mesuré directement (sans tension appliquée \rightarrow détecteur auto-alimenté) \rightarrow courant \propto au taux de capture des neutrons
- Si γ émis \rightarrow les γ interagissent par effet photoélectrique, Compton ou création de paire \rightarrow création d' e^- secondaires \rightarrow courant
- \neq noms existent \rightarrow détecteur de Hilborn (inventeur en 1964), détecteur à émission β , collectron, détecteur PENA (« Primary Emission, Neutron Activation »)

Détecteurs in-core: Détecteurs auto-alimentés (2)

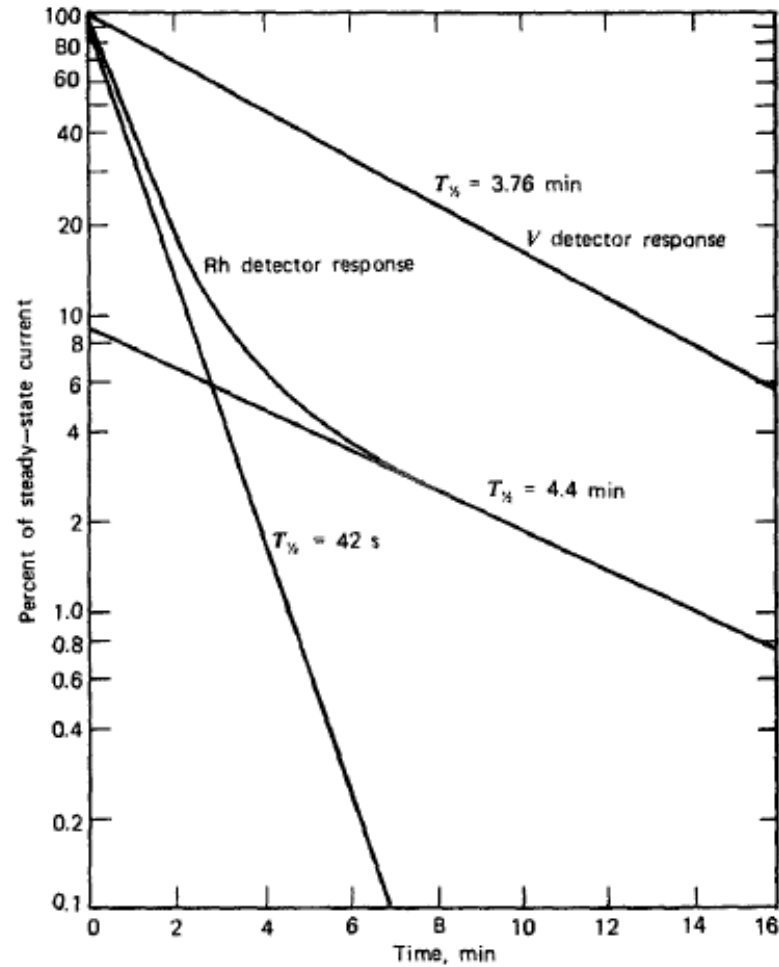
- Avantages des détecteurs auto-alimentés → petite taille, faible coût et électronique en aval simple
- Désavantages → faible courant de sortie, utilisation en mode courant obligatoire, réponse temporelle lente
- Pour l'émission directe de β → on choisit un matériau avec une section efficace de capture électronique pas trop faible (pour éviter une sensibilité trop faible) et pas trop élevée (pour éviter une consommation trop rapide du matériau), avec des β émis d'une énergie élevée (pour éviter l'auto-absorption dans le matériau) et avec un temps de vie de l'élément activé aussi faible que possible (pour avoir une réponse rapide) → rhodium ou vanadium (choisi préférentiellement pour sa consommation plus lente)
- Pour l'émission d' e^- via les γ → utilisation du ^{59}Co ($\sigma_{cap} = 37$ barn) → signal plus rapide mais sensibilité plus faible que pour une émission directe de β

Détecteurs in-core: Détecteurs auto-alimentés (3)

Emitter		σ thermal neutrons [barns]	T 1/2 [s]	beta end point energy [MeV]	Typical sensitivity $A/(n/cm^2 \cdot s)$
Vanadium	$^{51}_{23}\text{V}$	4.9	225	2.47	$5 \cdot 10^{-23}$
Rhodium	$^{103}_{45}\text{Rh}$	139 11	44 265	2.44	$2.44 \cdot 10^{-21}$



Détecteurs in-core: Détecteurs auto-alimentés (4)



Désintégration du ^{52}V et du ^{104}Rh

Détection des neutrons rapides

- Détection après modération
- Détection basée sur les réactions des neutrons rapides et spectrométrie neutronique

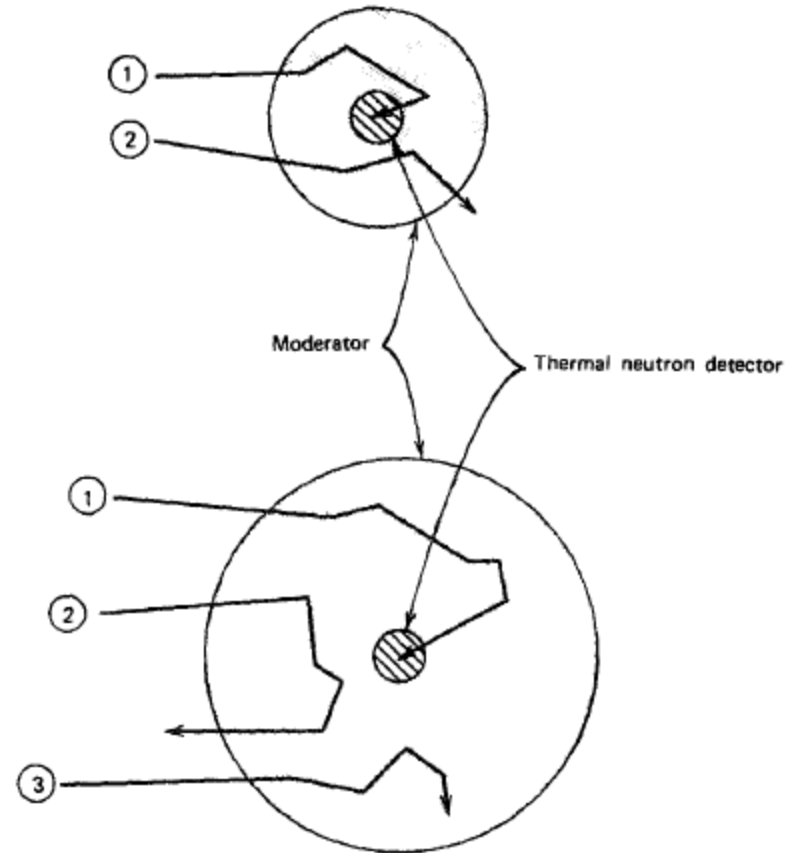
Détection après modération (1)

- Le détecteur est entouré par un modérateur → quelques cm à quelques dizaines de cm d'un matériau contenant de l'hydrogène (polyéthylène ou paraffine généralement)
- Les neutrons perdent une part importante de leur énergie cinétique avant d'atteindre un détecteur sensible aux neutrons lents (voir avant)
- L'épaisseur optimale de modérateur dépend de l'énergie du flux de neutrons →
 - pour des neutrons de faible énergie (keV) → si le modérateur est trop épais → absorption des neutrons thermalisés dans le modérateur → perte de signal
 - pour des neutrons d'énergie élevée (MeV) → si le modérateur est trop mince → les neutrons ne sont pas assez modérés → ne sont pas détectés
 - pour des neutrons d'énergie > 10 MeV → la réponse du détecteur \searrow fortement → difficilement utilisable tel quel

Détection après modération (2)

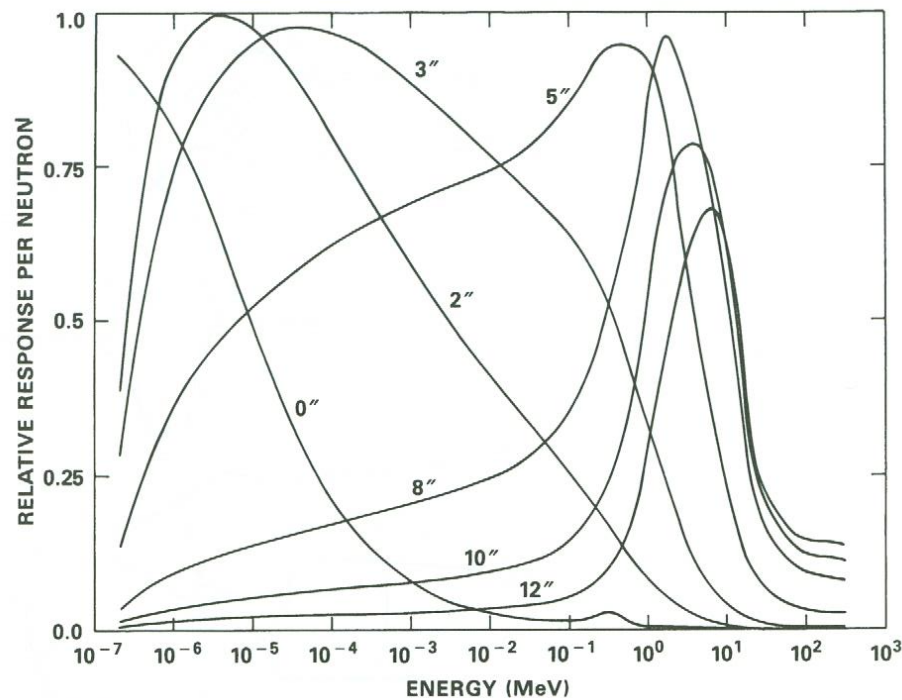
1. Neutrons modérés et détectés
2. Neutrons partiellement modérés et qui s'échappent sans atteindre le détecteur
3. Neutrons capturés par le modérateur

Une \nearrow de la taille du modérateur \rightarrow \searrow du processus 2 mais \nearrow du processus 3



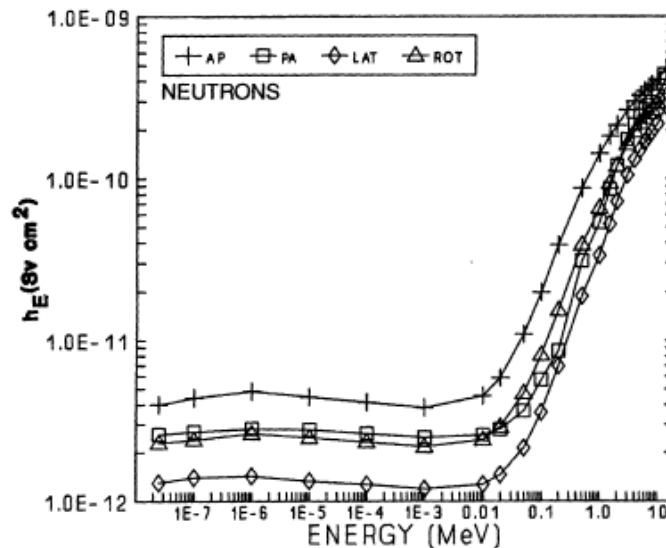
Sphère de Bonner (1)

- Détecteur sphérique constitué d'un petit scintillateur LiI placé au centre d'une sphère modératrice de polyéthylène
- En fonction de la taille du détecteur → réponse variable



Sphère de Bonner (2)

- Il se fait que la courbe en réponse pour un diamètre de 12 pouces a une forme similaire à celle de la dose équivalente (donc dans un milieu biologique) délivrée par des neutrons en fonction de leur énergie → pure coïncidence mais très utile



- L'efficacité du détecteur est grande pour les neutrons ayant une grande importance biologique et petite pour ceux ayant une faible importance → pondération biologique automatiquement incluse

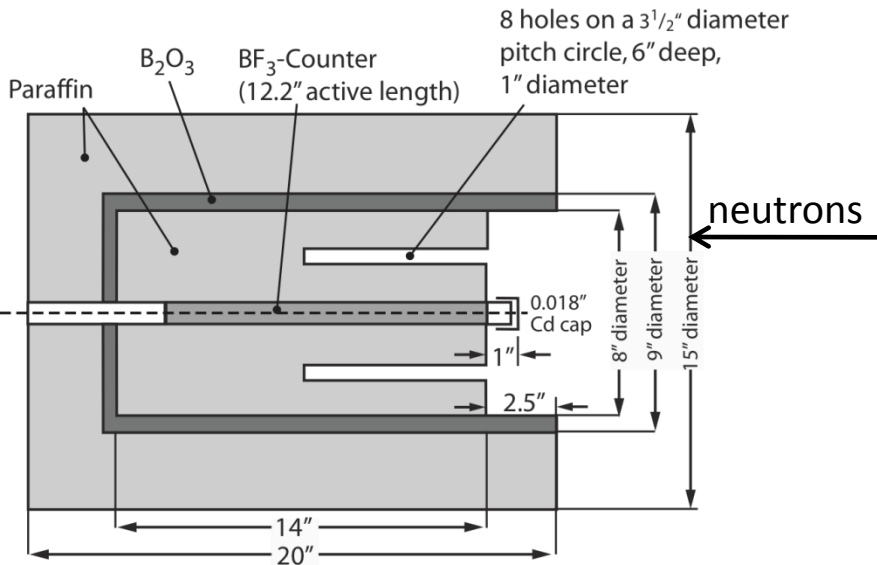
Exemple de sphère de Bonner



Dosimètre neutron *Fuji Electric NSN10014*

Compteur long (1)

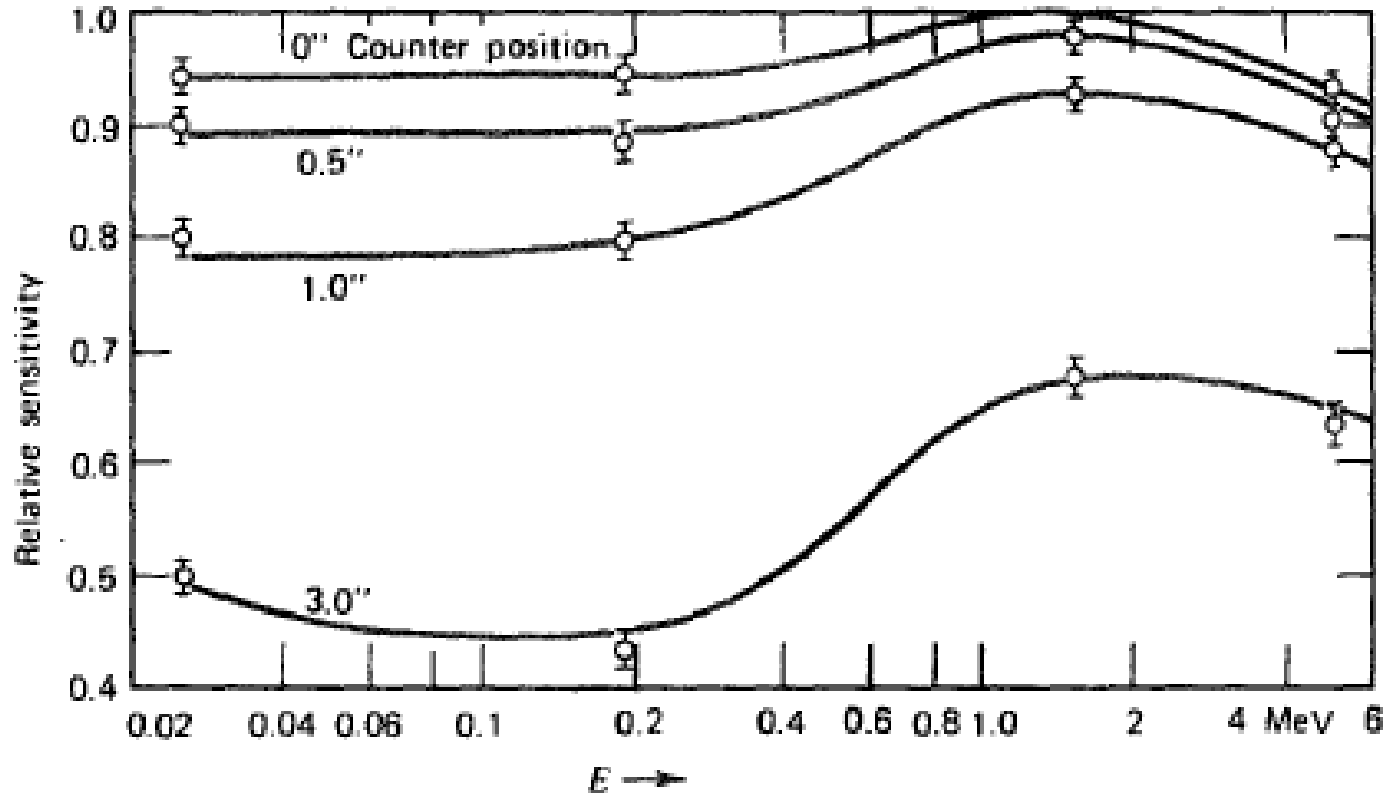
Efficacité de détection \sim indépendante de l' E des neutrons pour une géométrie donnée \rightarrow uniquement sensible aux neutrons incidents sur la face de droite (sur le schéma)



Les neutrons \parallel à l'axe parcourent une certaine distance avant modération \rightarrow la distance \nearrow quand $E \nearrow$ \rightarrow si le tube est assez long \rightarrow taux de comptage indépendant de l' E des neutrons \rightarrow un certain nombre de neutrons modérés atteignent le détecteur

Les neutrons non \parallel sont modérés dans la paroi annulaire de paraffine \rightarrow ensuite capturés dans le B_2O_3 \rightarrow pas comptés

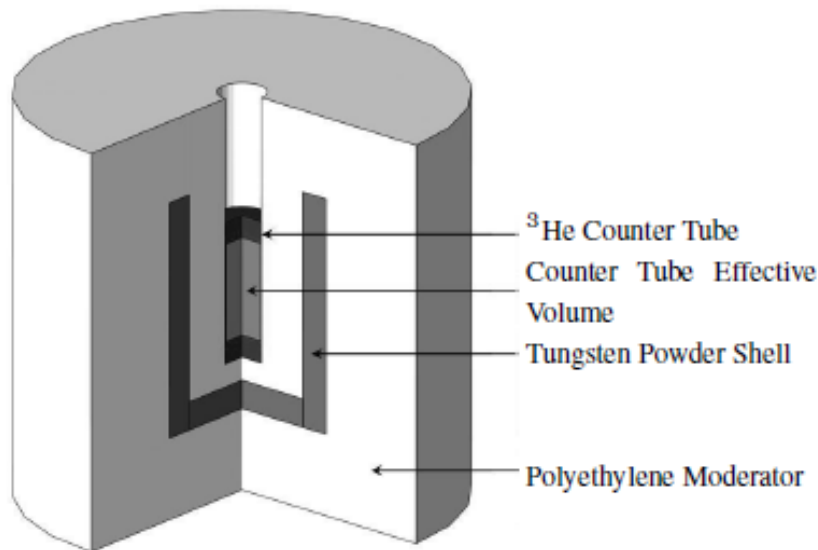
Compteur long (2)



Paramètre: déplacement du détecteur par rapport à la face d'entrée

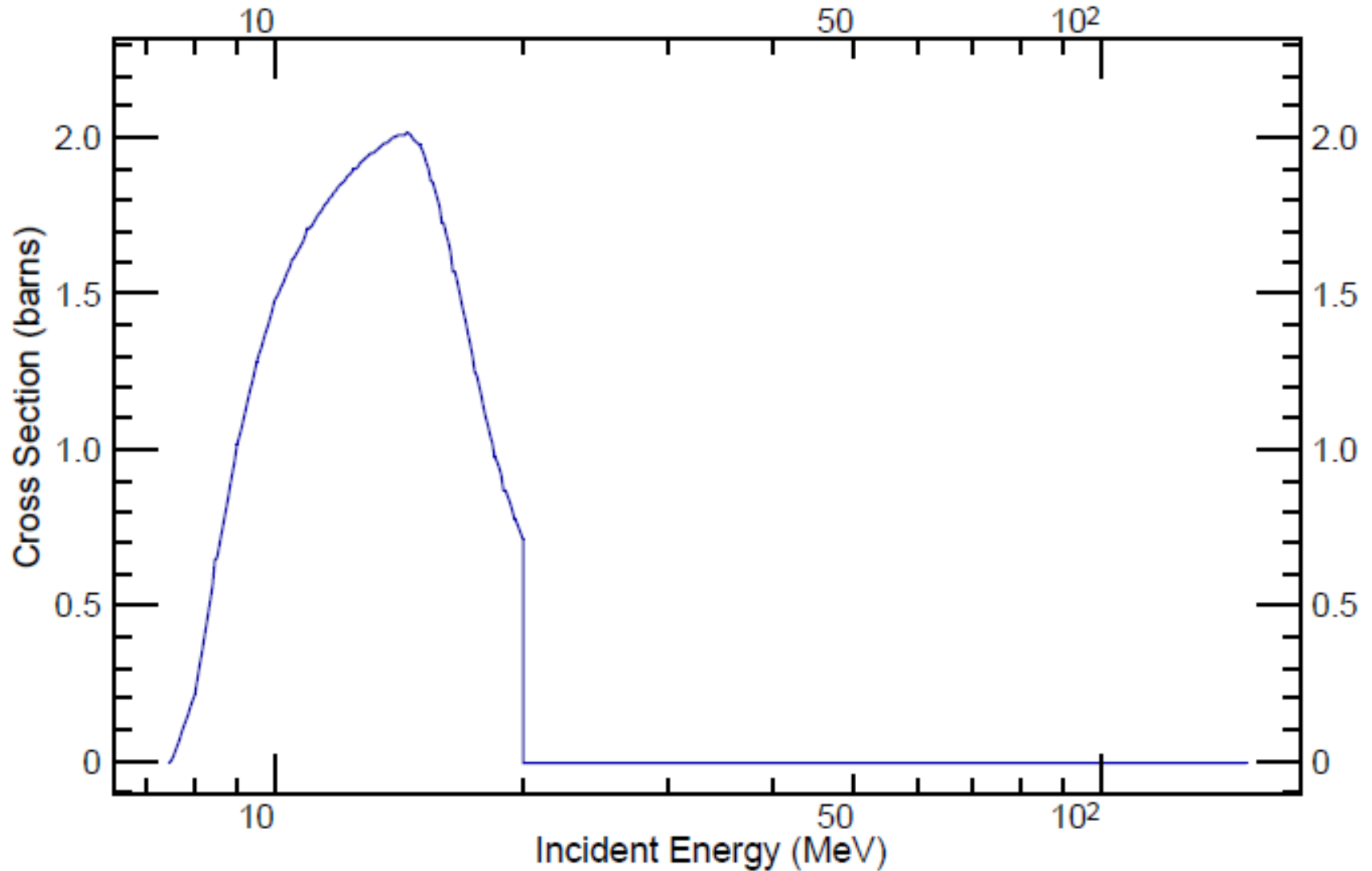
Détection des neutrons rapides (avec $E > 10$ MeV)

L'insertion d'une couche de métal lourd (W) dans le modérateur étend la fonction de réponse jusqu'au GeV (réactions (n,2n) pour les neutrons de grande E dans cette couche) → détecteur Wendi-II

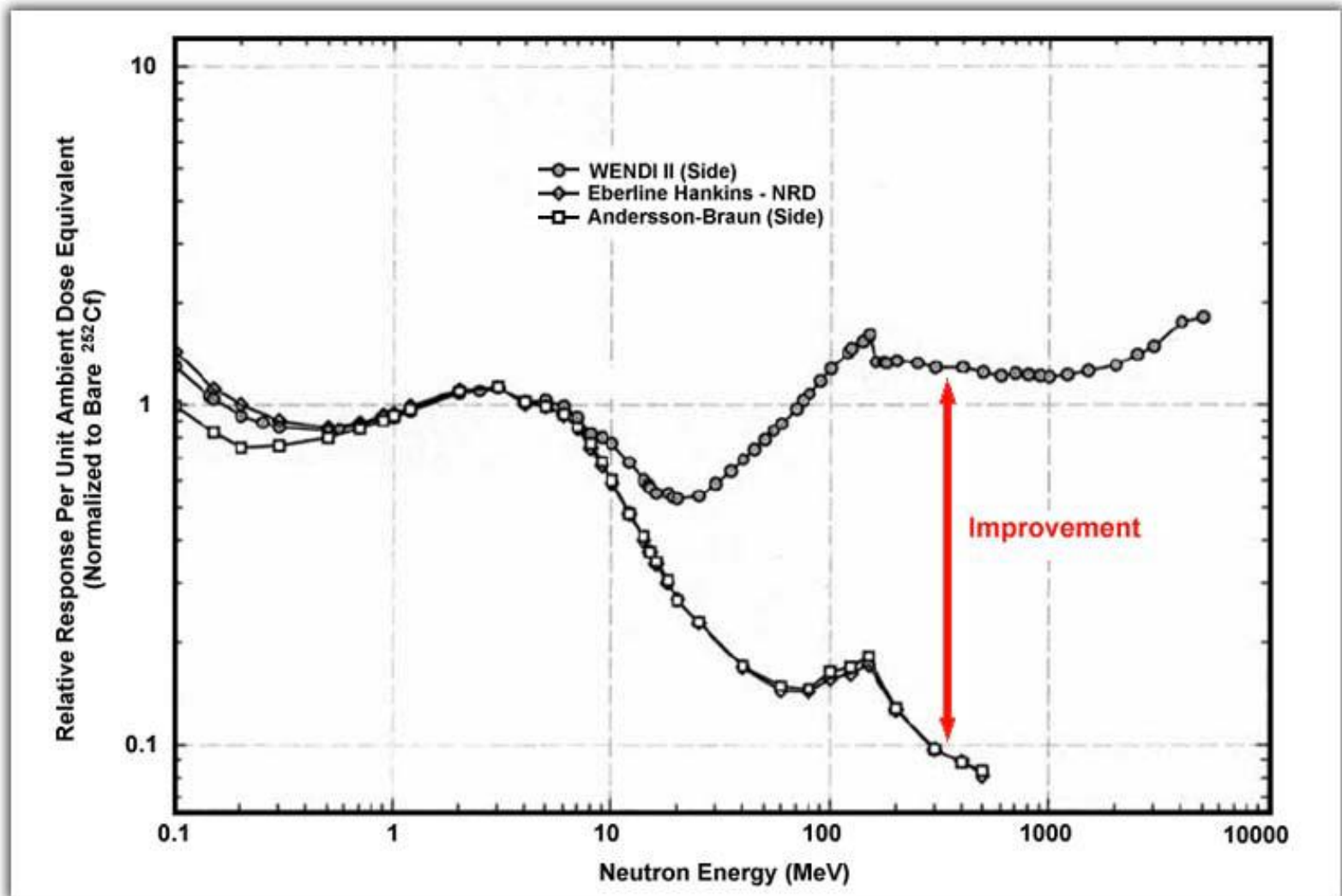


FHT 762 Wendi-II de Thermo Fisher Scientific

Réaction (n,2n) du tungstène (^{184}W)

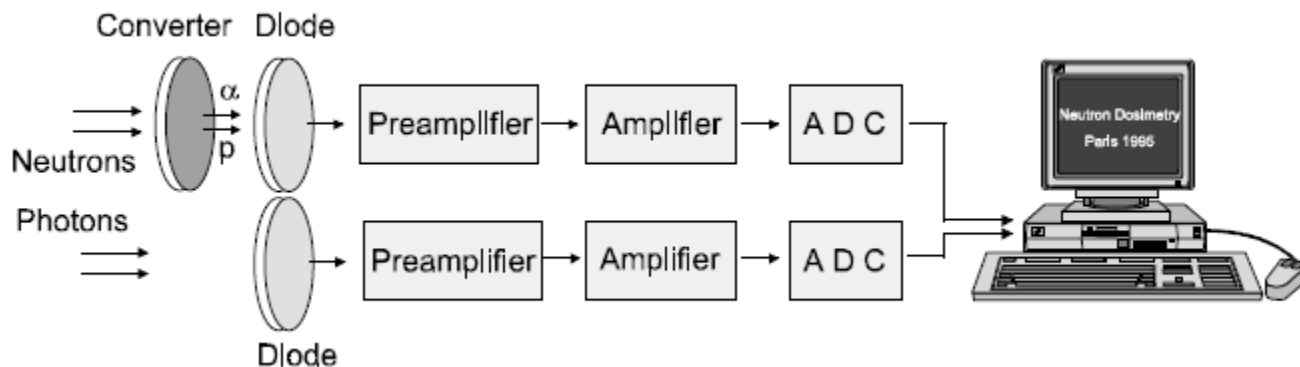


Réponse du Wendi-II



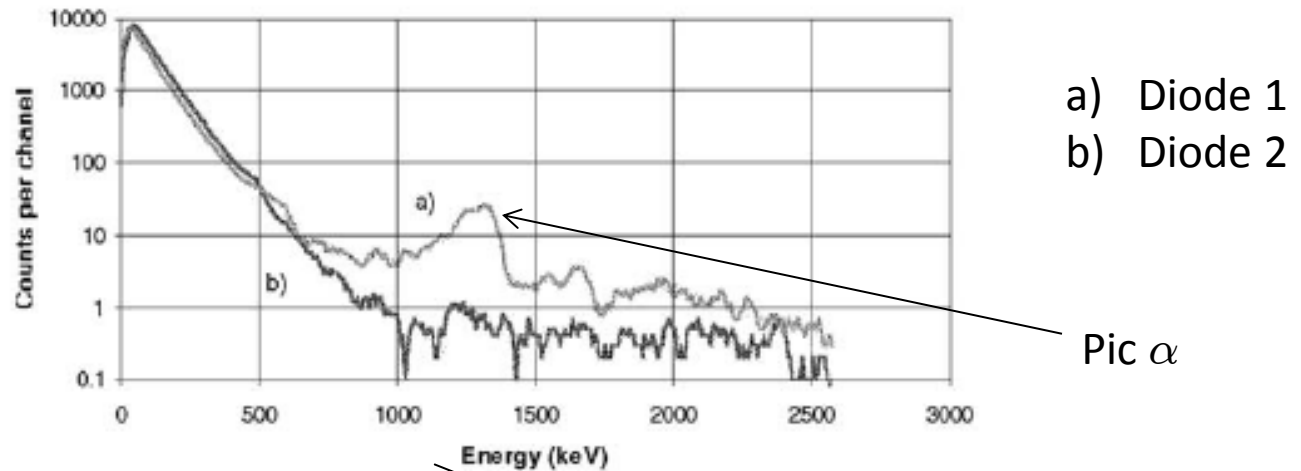
Détecteur neutrons avec diodes (1)

- Détecteur neutrons basé sur l'utilisation de 2 diodes
- Diode 1 (appelée diode neutron): couverte d'un matériau organique (plastique: PE,...) enrichi au ^{10}B ($\approx 10^{13}/\text{cm}^3$ atomes de B) \rightarrow sensible aux neutrons et aux γ
- Diode 2 (appelée diode γ): nue \rightarrow peu sensible aux neutrons et sensible aux γ
- Les 2 diodes sont placées côte à côte et \perp aux rayonnements ionisants (neutrons + γ)



Détecteur neutrons avec diodes (2)

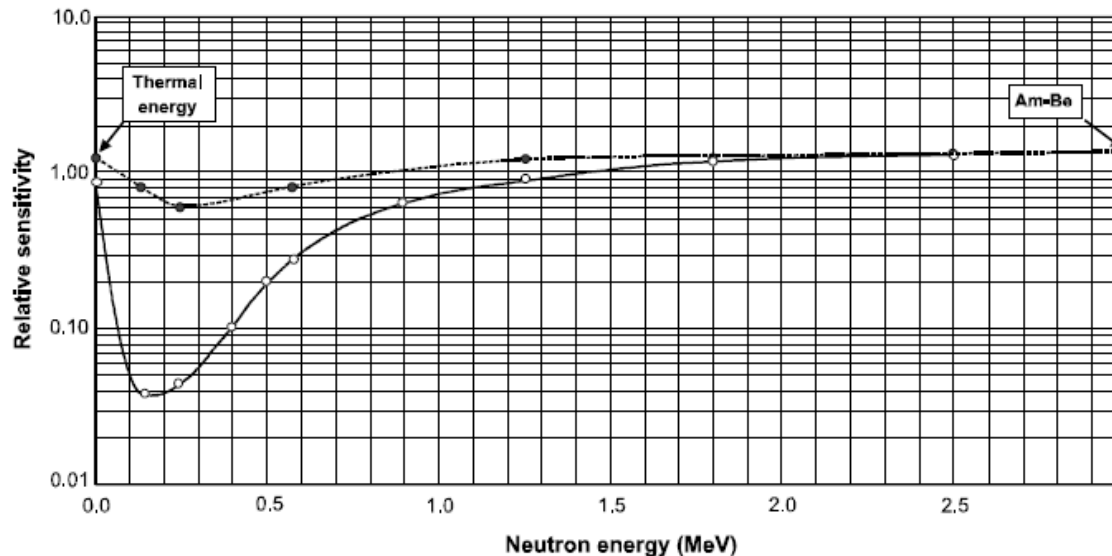
- Les n thermiques interagissent avec la diode 1 de 2 manières →
 1. $H(n,n)p \rightarrow$ émission de protons
 2. $^{10}B(n,\alpha)^7Li \rightarrow$ émission de α
- La \neq entre les signaux des diodes 1 et 2 permet de discriminer la composante due aux γ de celle due aux neutrons



Spectre mesuré

Détecteur neutrons avec diodes (3)

- En considérant une taille importante pour la couverture plastique → modération importante des neutrons de haute E → on peut étudier des neutrons de haute E
- La quantité de ^{10}B est choisie de manière à obtenir une réponse aux neutrons thermiques égales à celle aux neutrons rapides



Détecteur neutrons avec diodes (4)

- Pour les très hautes E ($E > 10$ MEV) \rightarrow ajout de Pb \rightarrow réaction (n,2n)
- Pour améliorer la précision pour une plage d' E importante \rightarrow système à 3 ou 4 diodes avec \neq recouvrements \rightarrow détecteur multi-éléments (détecteur Saphydose)



Détecteur Saphydose de Saphymo

Détecteurs basés sur les réactions des neutrons rapides (1)

- Problèmes des détecteurs basés sur la modération → aucune information sur l'énergie des neutrons et processus de détection lent (d'abord thermalisation par collisions multiples et ensuite diffusion des neutrons thermalisés)
- Solution → utilisation directe des réactions nucléaires des neutrons rapides qui induisent des produits de réactions chargés pouvant être détectés
- L'énergie cinétique du produit de réaction = $Q +$ énergie cinétique du neutron incident → en considérant que l'énergie du neutron incident $>$ qu'une fraction de Q → on obtient l'énergie du neutron
- Avantage: processus de détection rapide
- Désavantage: sections efficaces faibles → efficacité faible

Détecteurs basés sur les réactions des neutrons rapides (2)

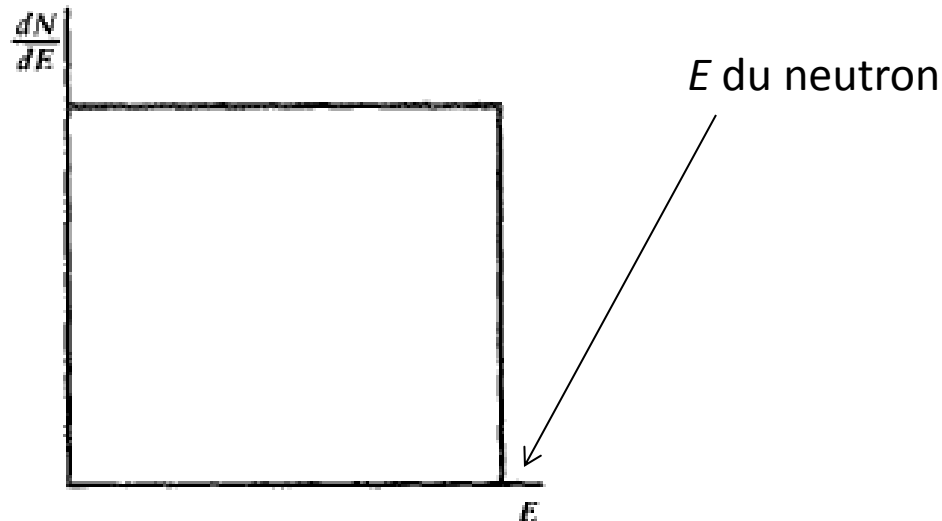
- Deux « familles » de détecteurs basés sur les réactions directes des neutrons rapides →
 1. Utilisation des réactions ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ ou ${}^3\text{He}(n,p)$ → mêmes types de détecteurs que vus précédemment pour lesquels l'énergie du α ou du proton doit être précisément mesurée
 2. Utilisation de la réaction de diffusion élastique → mesure de l'énergie de recul du noyau impliqué dans la réaction neutron-noyau

Détecteurs basés sur la diffusion élastique

- Pour maximiser le transfert d'énergie → diffusion avec des éléments légers → hydrogène, deutérium, hélium
- L'hydrogène est le plus populaire → proton de recul → détecteurs appelés les détecteurs à proton de recul
- Par définition de la diffusion élastique → $Q = 0$ → l'énergie du proton de recul peut être égale à celle du neutron incident
- En pratique →
 - Scintillateurs organiques
 - Compteurs proportionnels
 - Télescope à proton de recul

Scintillateurs organiques pour la détection des neutrons (1)

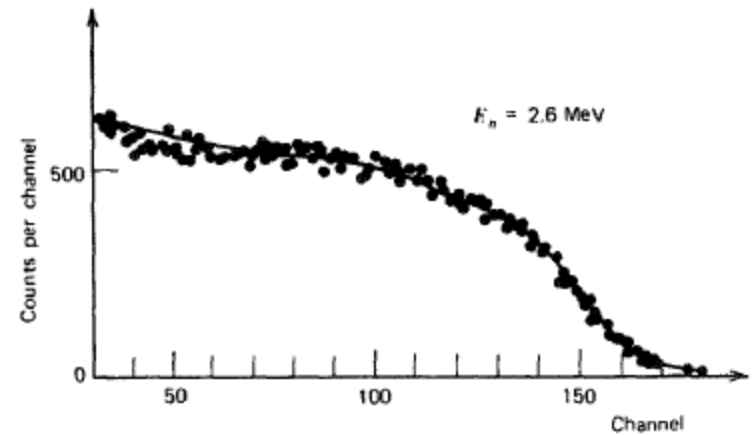
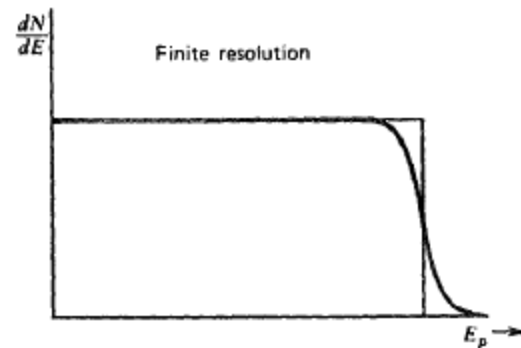
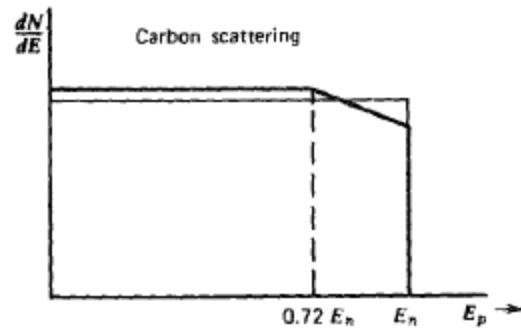
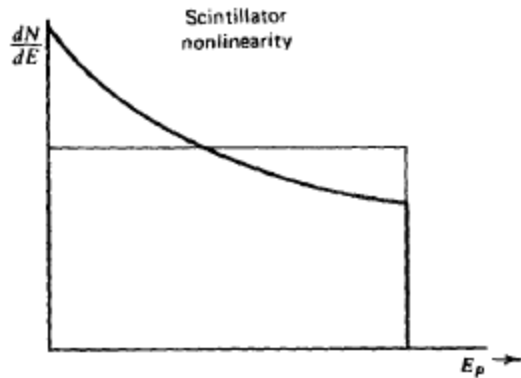
- Les scintillateurs organiques contiennent de l'hydrogène → grand choix possible → utilisation par exemple du stilbène qui permet une bonne discrimination aux γ
- En première approximation → toutes les énergies cédées au proton sont équiprobables (en réalité → $T_c = E \cos^2 \theta_r$) → le spectre en énergie mesuré des protons est considéré rectangulaire



Scintillateurs organiques pour la détection des neutrons (2)

- Écarts par rapport à un spectre rectangulaire:
 - Non-linéarités de la réponse lumineuse du scintillateur
 - Effets de paroi si le scintillateur est petit par rapport au range des protons
 - Diffusions multiples pour le neutron incident si le scintillateur n'est pas petit
 - Diffusion avec le carbone du scintillateur → un neutron peut perdre entre 0 et 28 % de son E à cause d'une diffusion élastique avec un C → effet direct faible dû à la mauvaise réponse d'un scintillateur pour les dE/dx élevés mais un neutron ayant eu une collision avec un C et ayant ensuite une collision avec un H ne possède plus que entre 72 et 100% de son E initiale
 - Résolution du détecteur (statistique des photoélectrons,...)

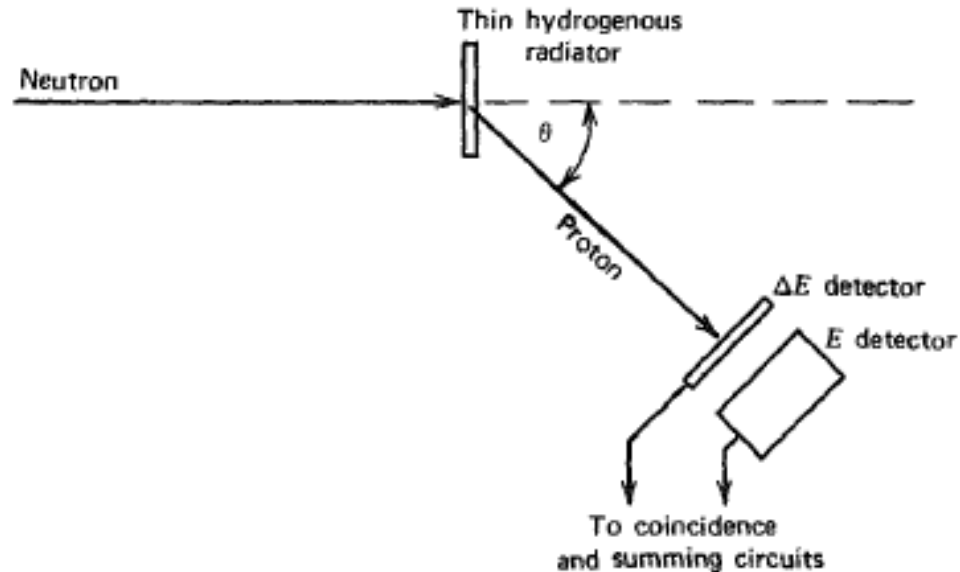
Scintillateurs organiques pour la détection des neutrons (3)



Compteurs proportionnels pour la détection des neutrons

- Compteurs proportionnels contenant de l'hydrogène, un gaz riche en hydrogène comme du méthane (CH_4) ou de l'hélium
- Gaz \rightarrow faible densité \rightarrow efficacité faible
- Effets de paroi important
- La pureté du gaz est très importante \rightarrow si impur \rightarrow peut amener des distorsions importantes
- Utilisation moins pratique que celle des scintillateurs

Télescope à proton de recul



- Les neutrons incidents monoénergétiques diffusent dans un film mince (\ll au range des protons) riche en H
- Comme $T_c = E \cos^2 \theta_r \rightarrow$ énergie précise du proton pour un angle donné \rightarrow pic en énergie
- Efficacité extrêmement faible (1 coup pour 10^5 neutrons)