

放射線計測学

第7回

中性子検出器

九州大学工学研究院

渡辺 賢一

中性子計測の基礎

中性子と物質の相互作用

中性子とは？

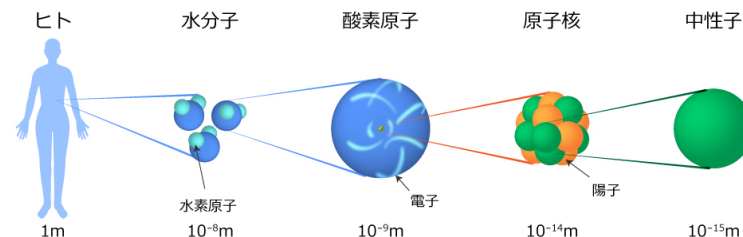
電荷: 0 (中性)

質量: 1.6749×10^{-27} kg (939.573 MeV)、陽子とほぼ等しい。

直径: 約 1×10^{-15} m (原子は約 10^{-10} m)

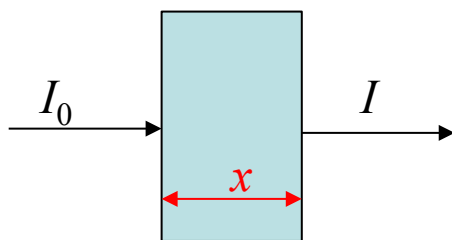
スピン: $1/2$ (フェルミ粒子)

- ・陽子と共に原子核 (Nucleus) を構成 (**核子**: Nucleon)
- ・原子核の外では不安定



出典: J-PARC MLE, <https://mlfinfo.jp/ja/aboutmlf/neutron.html>

単位距離当たりの
相互作用率を $N\sigma$ とすると
(N : 原子数密度)



$$I = I_0 e^{-N\sigma x}$$

中性子数は物質中の
透過距離に対し
指数関数的に減少

平均自由行程

反応せずに進める平均距離

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma}$$

放射線の分類

◎ 直接電離放射線

高エネルギー荷電粒子

電子(ベータ線)、陽子、アルファ粒子(He^{2+} イオン)、
ミューオン 等々

…クーロン力を介して、物質を電離

◎ 間接電離放射線

非荷電粒子

光子(エックス線、ガンマ線)、中性子、
ニュートリノ 等々

…何らかの相互作用により、荷電粒子(直接電離放射線)
を生成し、間接的に電離

中性子検出の簡単な原理

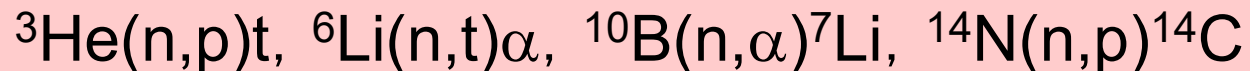
放射線検出器・・・高エネルギー荷電粒子検出器

ガス検出器・半導体検出器・シンチレータ

中性子・・・核反応を介して、何らかの方法で荷電粒子を生成

高速中性子: 検出器構成物質中の原子核と弾性散乱
or しきい反応 (n,p)、(n, α) 反応等

熱中性子: 主として、



※高速中性子: 直接測定に加え、熱中性子に減速して検出の場合もあり

加えて、

- ・核反応で生じた核種が放射性 $\Rightarrow$ 放射化法
- ・核反応の際に放出される即発ガンマ線分析

中性子と物質の相互作用

周辺の物質と熱平衡

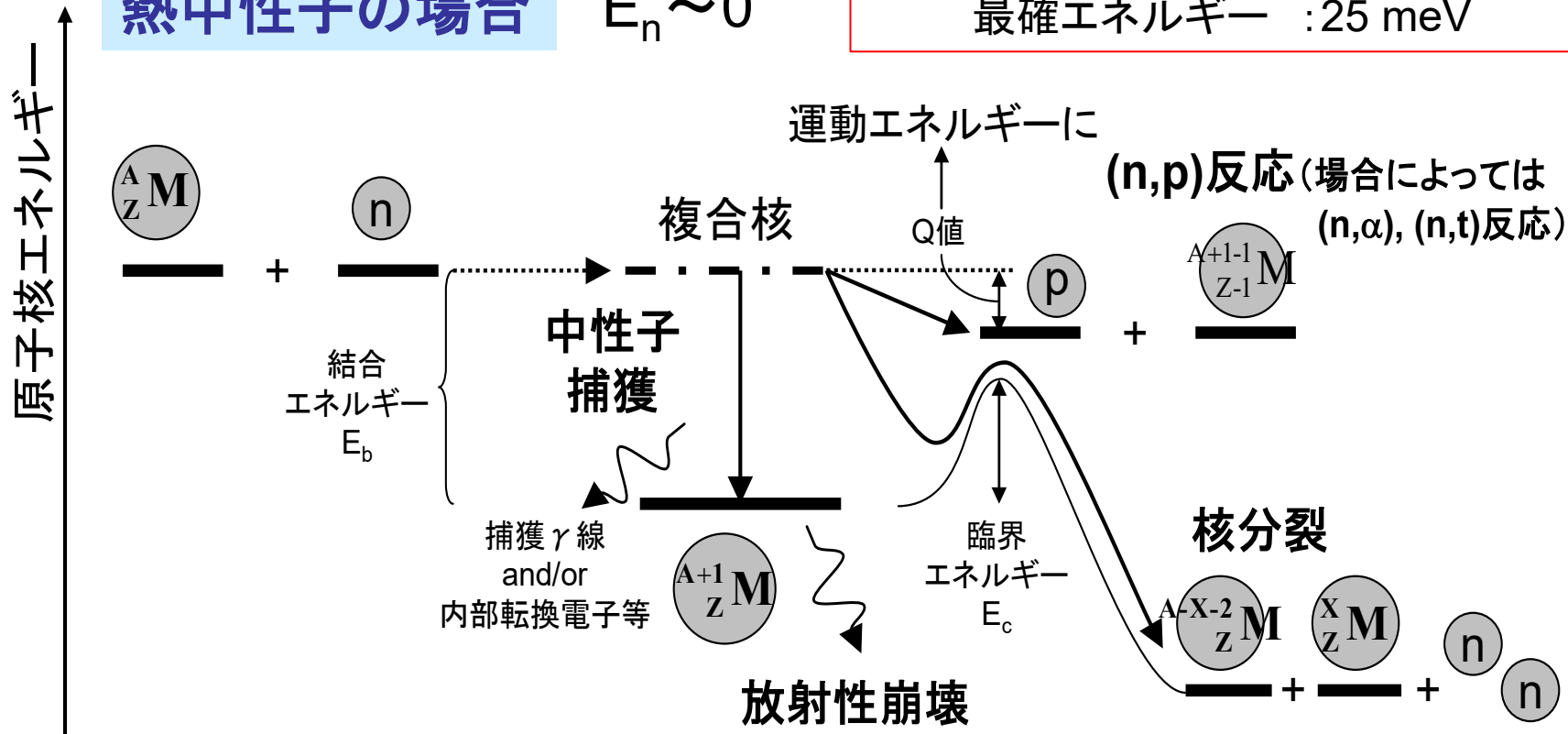
300 K (27°C) のマックスウェル分布

最確速度 : 2,200 m/s

最確エネルギー : 25 meV

熱中性子の場合

$E_n \sim 0$



例) 陽子を放出する反応

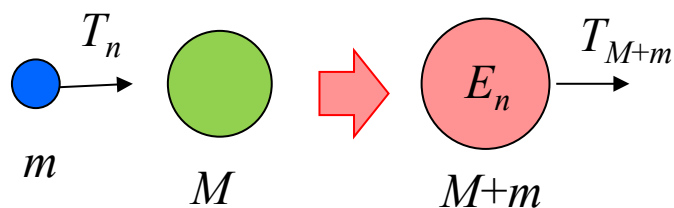
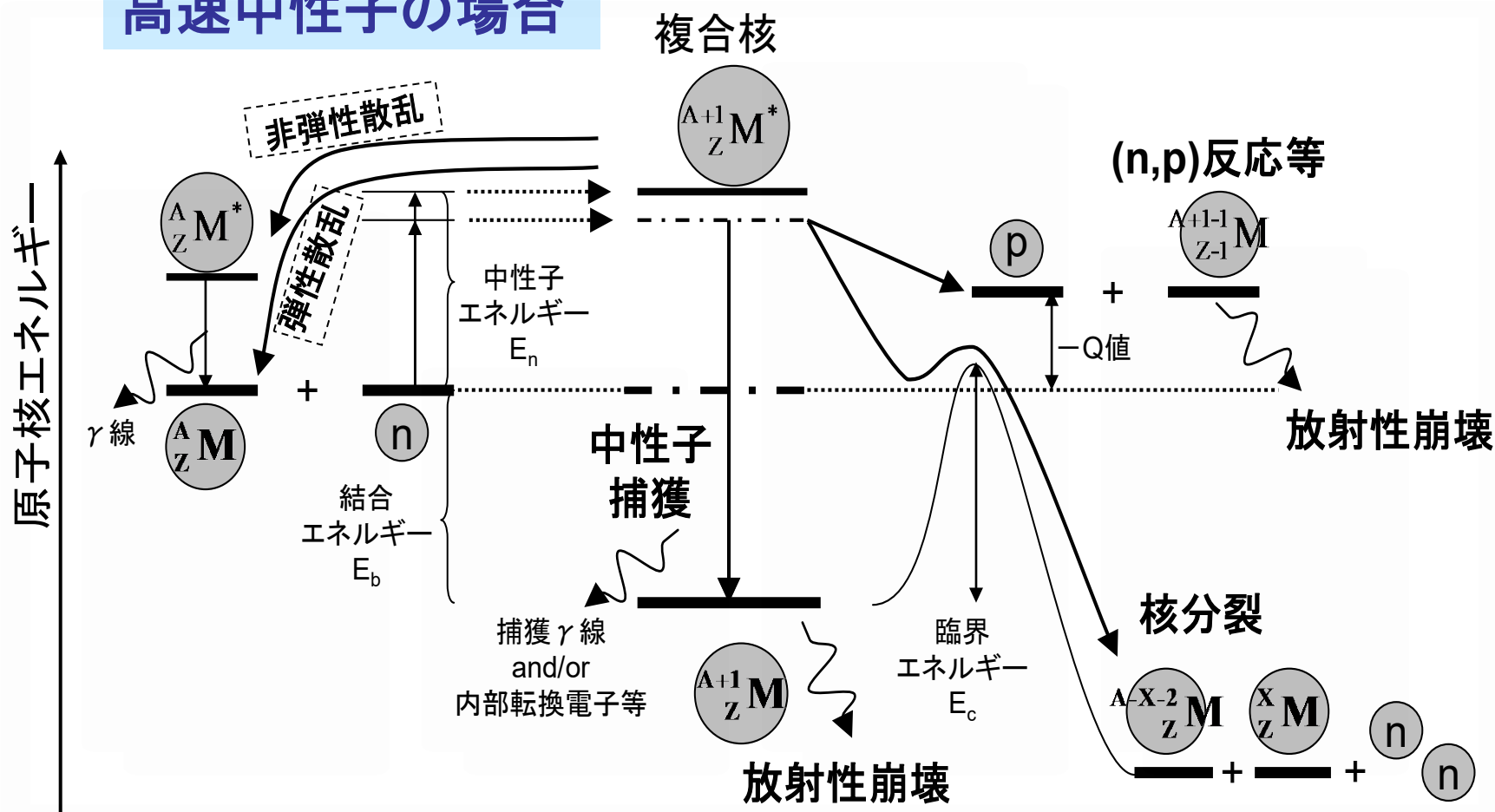


A: 質量数
Z: 原子番号

${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 等

中性子と物質の相互作用

高速中性子の場合

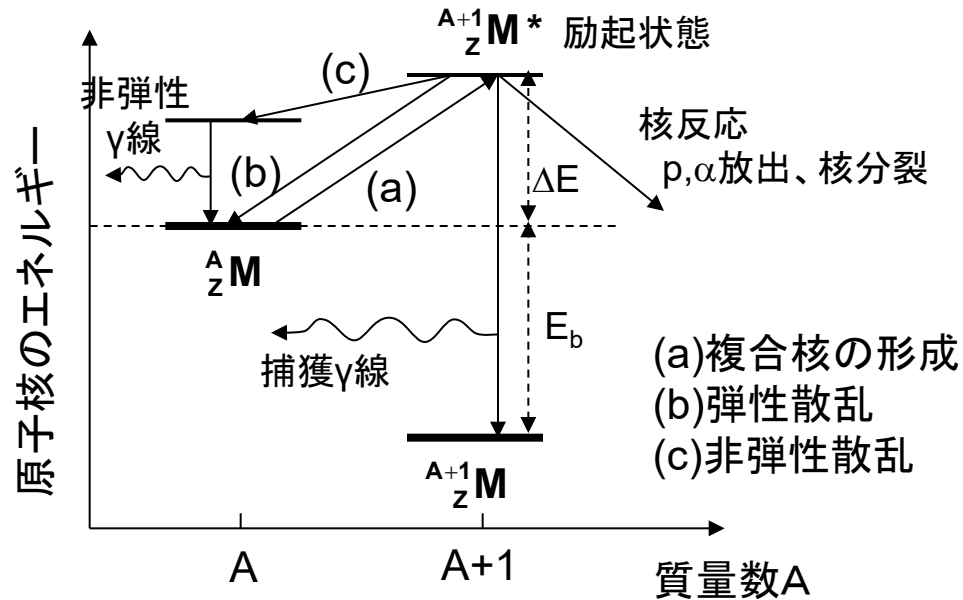


内部エネルギー: E_n

$$E_n = \frac{M}{M+m} T_n \rightarrow T_{threshold} = \frac{M+m}{M} (-Q)$$

中性子と物質の相互作用

①複合核を形成



○複合核励起エネルギーで
断面積に極大値→共鳴

○ ΔE はゼロでも起こりうる
→断面積: $1/v$ 則

元の標的核に戻らない反応は
捕獲反応

②核力のポテンシャル

原子核-中性子間の核力ポテンシャル ⇒ 弾性散乱 (elastic)
(反応断面積) ≡ (原子核の幾何学的な断面積)、エネルギーに依らない

③核子との直接相互作用

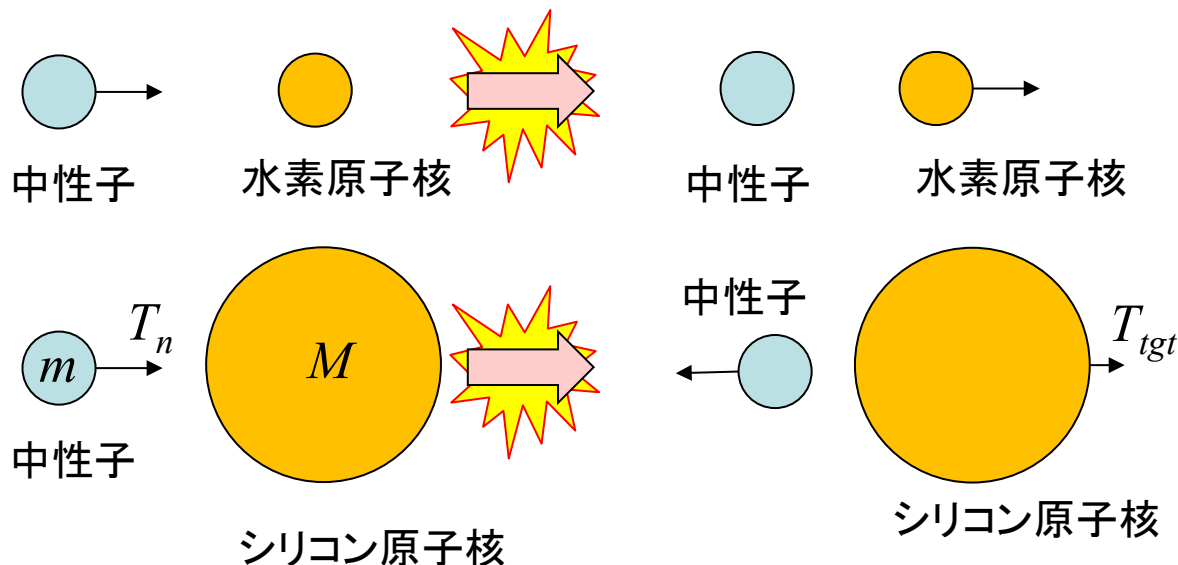
高エネルギー中性子 ⇒ 原子核を構成する核子と直接衝突
⇒ 標的核を励起 (非弾性散乱: inelastic)、核破砕 (spallation) 反応

中性子と物質の相互作用

弾性散乱(減速)

質量の等しい水素原子核との散乱で効率よくエネルギー移動

正面衝突 $T_{tgt} = \frac{4mM}{(m+M)^2} T_n$ $\frac{\partial T_{tgt}}{\partial M} = \frac{4m(m-M)}{(m+M)^4} T_n = 0 \quad \begin{cases} M < m \\ M = m \\ m < M \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{増加} \\ \text{最大} \\ \text{減少} \end{matrix}$



多くの反応は、中性子の速度(運動エネルギー)が小さい方が反応しやすい
 →弾性散乱で速度を落とし(減速し)反応しやすくする
 減速材: 水、ポリエチレン等の水素含有物

熱中性子の計測

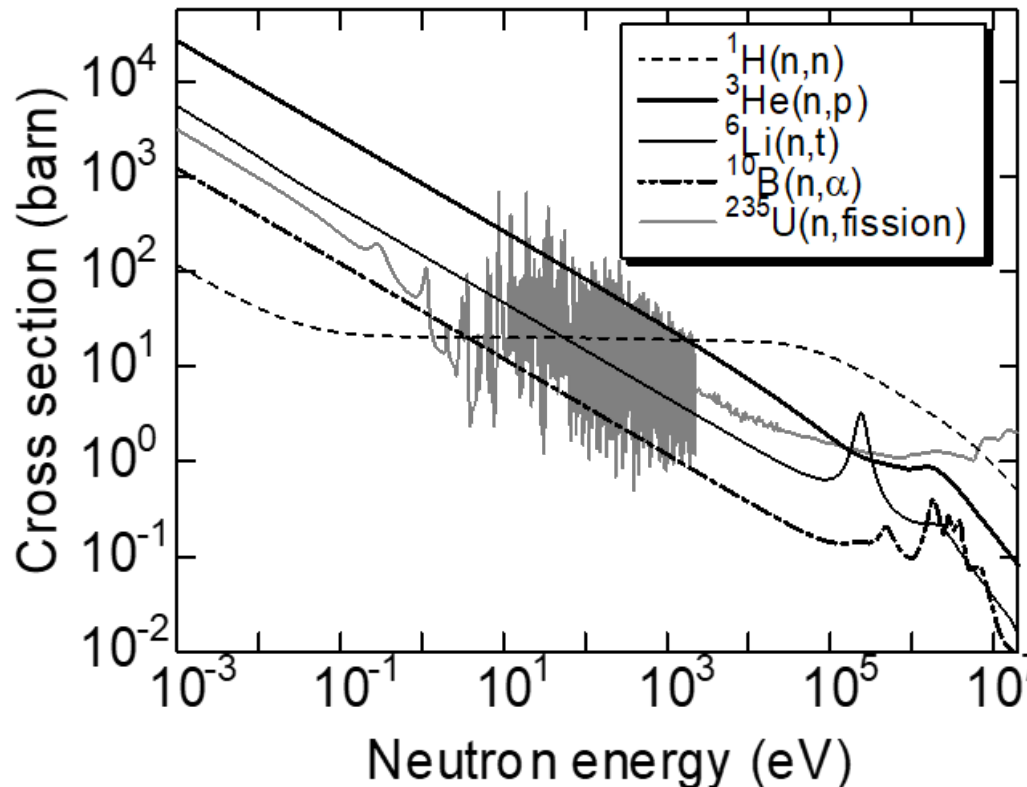
中性子反応断面積

リアルタイム計測する熱中性子検出器 ○: (n,p)、(n,α) ×: (n,γ)

○: 即時 高エネルギー荷電粒子を発生する反応

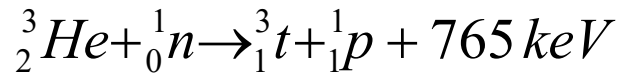
×: ガンマ線を放出=効率 低、放射性同位体(荷電粒子放出)に
...崩壊まで時間がかかる

利用できる反応: ${}^3\text{He}(n,p)$, ${}^6\text{Li}(n,t)$, ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$, ${}^{14}\text{N}(n,p)$, ${}^{35}\text{Cl}(n,p)$
 ${}^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 核分裂



エネルギー2桁減少
断面積1桁増加
1/v則

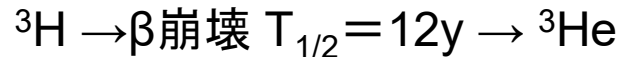
^3He を用いた検出器



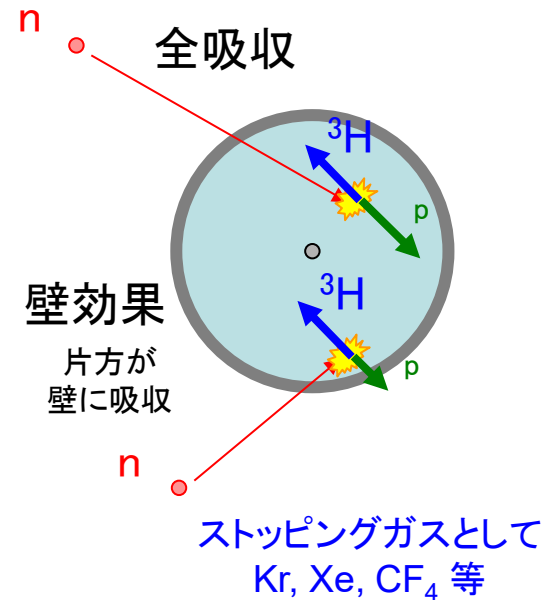
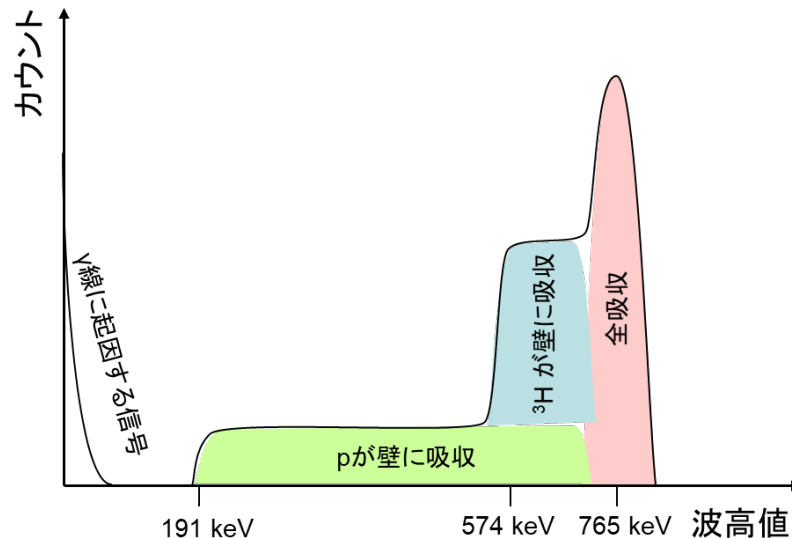
断面積: 5330 barn@25 meV
(10 keV程度まできれいな1/v則)

Q値

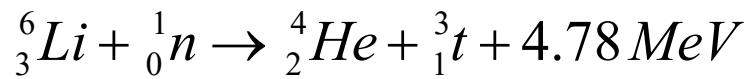
- 希ガス ⇒ ガス検出器に限られる
- 同位体存在比: $1.37 \times 10^{-4} \%$ ほとんど存在しない



- ^3H に $m_p/(m_T + m_p) \times 765 \text{ keV} = 191 \text{ keV}$
 - p に $m_T/(m_T + m_p) \times 765 \text{ keV} = 574 \text{ keV}$
- Q値分のエネルギーは
Pと ^3H の運動エネルギー
として分配



${}^6\text{Li}$ を用いた検出器



断面積: 940 barn@25 meV
(10 keV程度まできれいな1/v則)

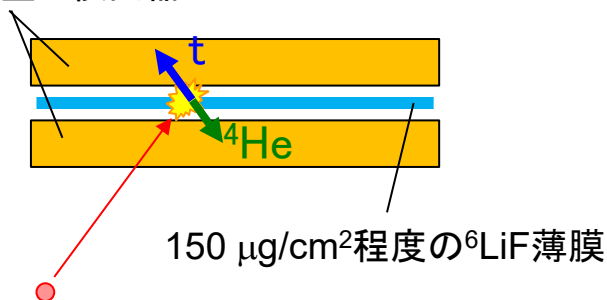
Q値

- 同位体存在比: 7.6% → 濃縮Li(95%)が用いられることも
 - 安定な計数管用ガスが存在せず、固体検出器媒体
 - ${}^4\text{He}$ に $m_{\text{t}}/(m_{{}^4\text{He}} + m_{\text{t}}) \times 4.78\text{ MeV} = 2.05\text{ MeV}$
 - t に $m_{{}^4\text{He}}/(m_{{}^4\text{He}} + m_{\text{t}}) \times 4.78\text{ MeV} = 2.73\text{ MeV}$
 - ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p})$ 反応に比べ大きなQ値
- } Q値分のエネルギーは
tと ${}^4\text{He}$ の運動エネルギー
として分配

${}^6\text{Li}$ サンドイッチスペクトロメータ

${}^6\text{Li}$ 含有シンチレータ

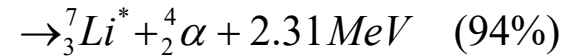
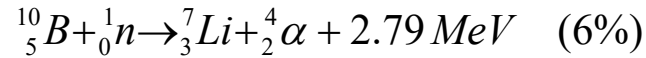
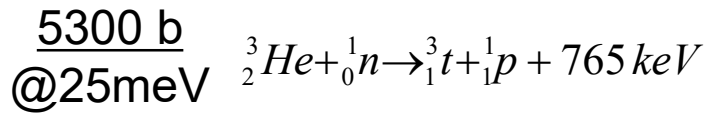
表面障壁型Si検出器



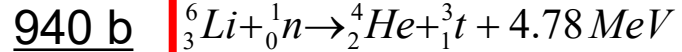
- Q値が高いため、高い発光量を示す
- ガンマ線にも感度があるため、
如何にガンマ線感度を抑えるかが重要

- Siの代わりにダイヤモンド半導体
検出器を用いたものも

^6Li 含有シンチレータ



$\frac{3840 \text{ b}}$



Scintillator	Light yield (photons/n)	Density (g/cm ³)	Li content (Li atoms /cm ³)	Emission wavelength (nm)	Decay time (ns)	α/β ratio	Trans- parency	Hygro- scopicity	Pulse shape Discri.
Li glass	6,000	2.5	$\sim 1.6 \times 10^{22}$	395	75	0.23	Yes	No	-
Lil	49,500	4.06	1.8×10^{22}	470	1,400	0.9	Yes	Yes	-
LiF-ZnS	-	2.6/4.0	$\sim 2.0 \times 10^{22} \text{ ※}$	450	200	-	Opaque	No	-
LiCaAlF ₆ (Ce)	5,000	2.99	9.6×10^{21}	285	40	0.4	Yes	No	Yes
LiCaAlF ₆ (Eu)	40,000	2.99	9.6×10^{21}	375	1,600	0.2	Yes	No	No
Cs ₂ LiYCl ₆ (Ce)	64,000	3.31	3.5×10^{21}	370	1/50/1,000	0.67	Yes	Yes	Yes
LiF/Eu:CaF ₂	$\sim 10,000$	2.85	3.6×10^{22}	428	~ 700	-	Yes	No	-

※ LiF : ZnS = 2 : 1 (weight ratio), Grain packing ratio: 75%

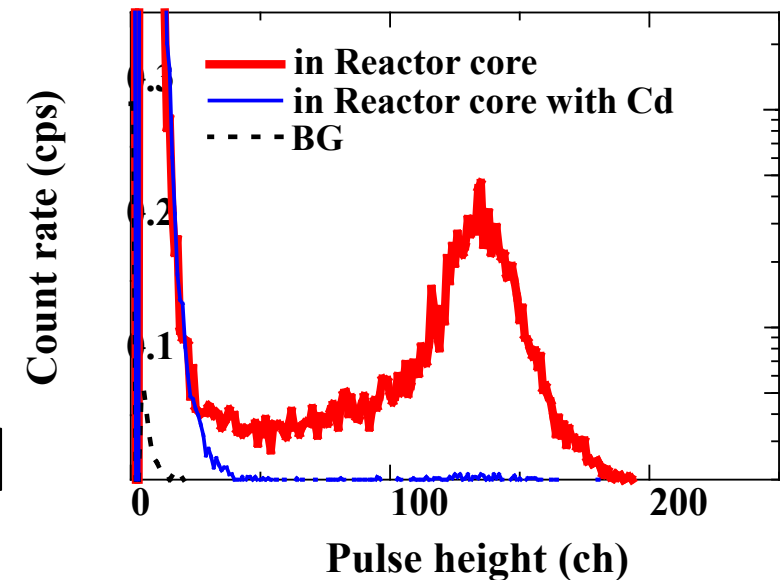
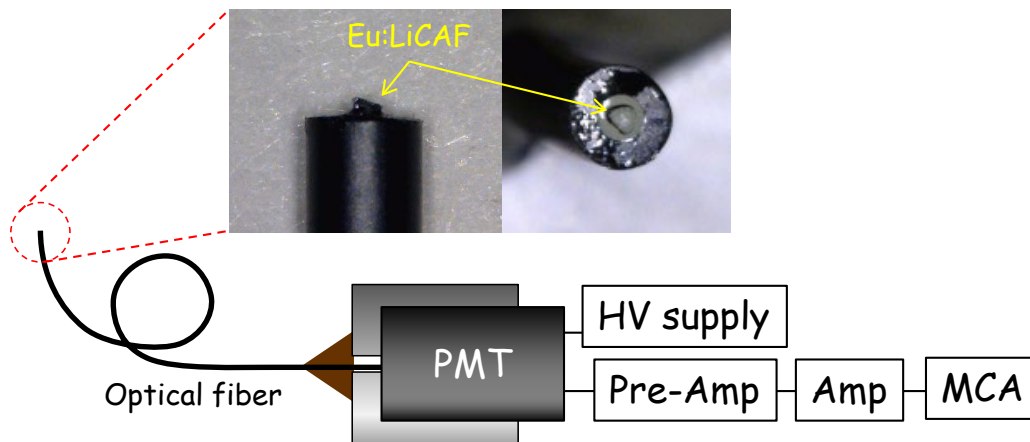
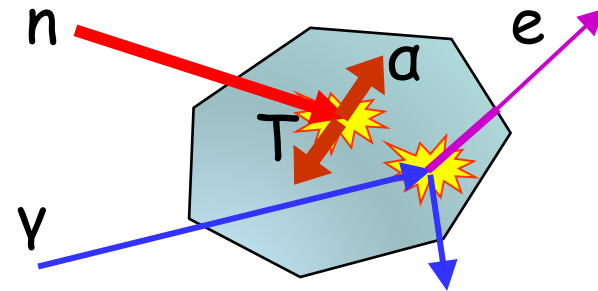
- 高い発光量 ○程よい発光波長 ○速い発光 ○取り扱いのしやすさ(潮解性)
○波形弁別 ○高い α/β (発光効率のLET依存性)

光ファイバ型検出器

シンチレータ検出器は
ガンマ線の抑制が鍵

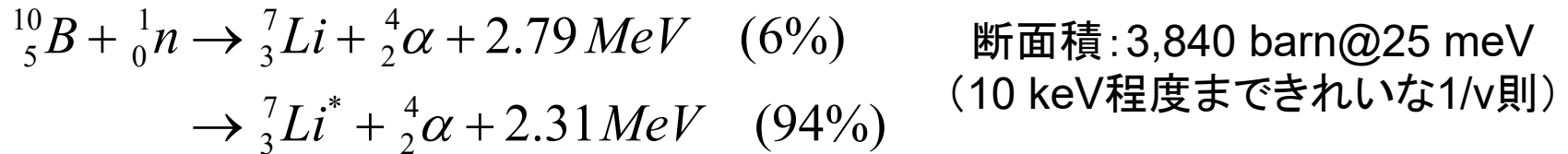
α 、 t の飛程 $\ll$ シンチレータサイズ
 $\ll$ 高速電子の飛程

シンチレータサイズを制御することでガンマ線起因の
信号波高を抑制可能



○小片シンチレータ ○低ガンマ線感度 ○中性子ピーク形成

^{10}B を用いた検出器



- 同位体存在比: 19.9% → 濃縮Bが用いられることも
 - 94%が励起準位の ${}^7\text{Li}^*$ を生成し、6%が基底準位の ${}^7\text{Li}$ を生成
- ${}^7\text{Li}^*$ を生成

- ${}^7\text{Li}^*$ に $m_\alpha / (m_{{}^7\text{Li}^*} + m_\alpha) \times 2.31 \text{ MeV} = 0.84 \text{ MeV}$
- α に $m_{{}^7\text{Li}^*} / (m_{{}^7\text{Li}^*} + m_\alpha) \times 2.31 \text{ MeV} = 1.47 \text{ MeV}$
- ${}^7\text{Li}^*$ は脱励起する際、0.48 MeVのガンマ線を放出

※動いている ${}^7\text{Li}^*$ から放出されるのでドップラー効果を受ける

${}^7\text{Li}$ を生成

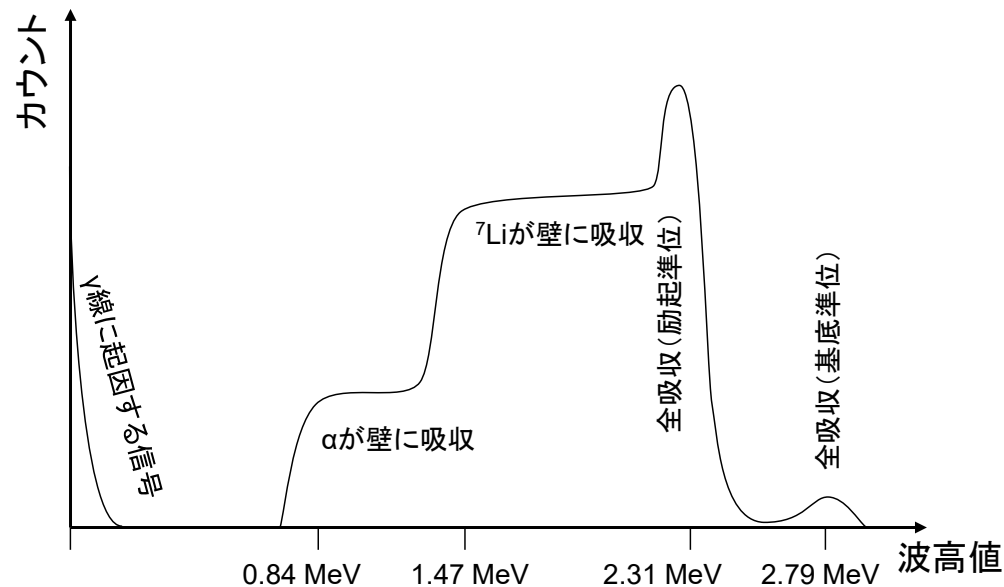
- ${}^7\text{Li}$ に $m_\alpha / (m_{{}^7\text{Li}} + m_\alpha) \times 2.79 \text{ MeV} = 1.01 \text{ MeV}$
- α に $m_{{}^7\text{Li}} / (m_{{}^7\text{Li}} + m_\alpha) \times 2.79 \text{ MeV} = 1.78 \text{ MeV}$

- ① BF_3 ガス比例計数管
- ② ホウ素被覆検出器

がある

BF₃ガス比例計数管

- BF₃ガスを媒体とした検出器 → 壁効果が問題に
- ガス圧を高くできない
(電子・イオン対の再結合→電荷収集効率:減)

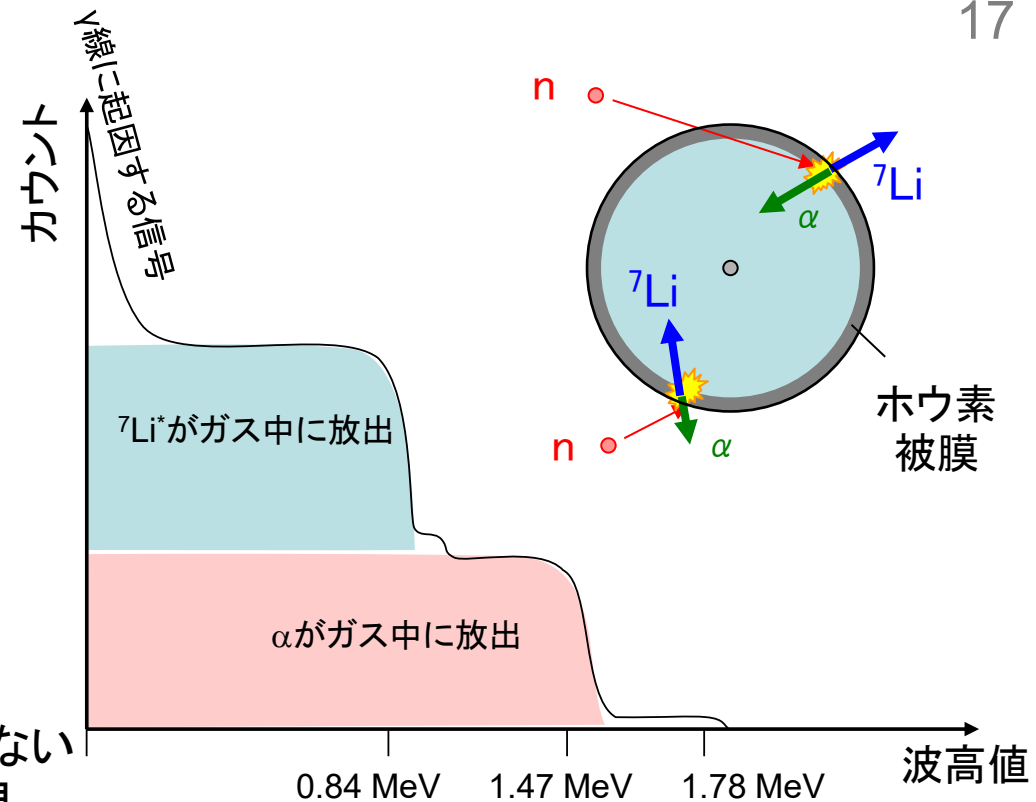


比較的高いガンマ線弁別性能:

中性子の信号波高が高い=¹⁰B(n,α)反応のQ値が大きい → 壁効果の最低840keV
 ガンマ線の信号波高低い=ガス圧が低い→電子の封入ガス中での阻止能小さい

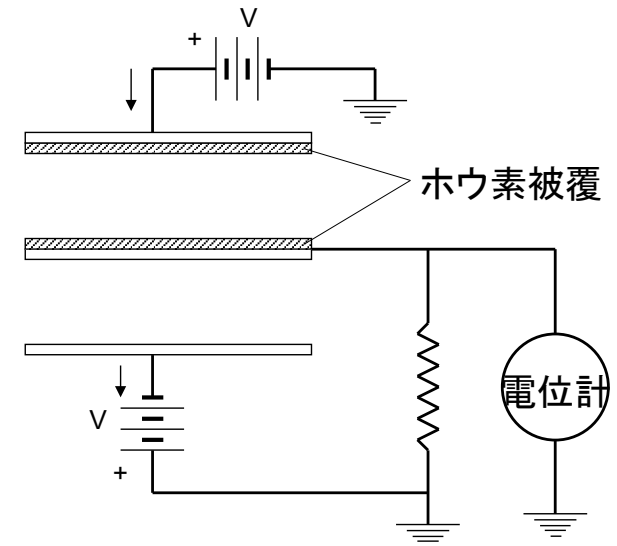
ホウ素被覆検出器

- BF_3 ガス: 高強度ガンマ線で解離
- ホウ素を計数管の内面に被覆
- 被覆されたホウ素層内で $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反応を起こす
- ホウ素層の厚みにより
検出効率は変化
- ※ 1.78 MeV の α 粒子の飛程は
 $1 \text{ mg/cm}^2 (4 \mu\text{m})$
- これ以上、厚くしても効率は上がらない
逆に熱中性子が吸収されて逆効果

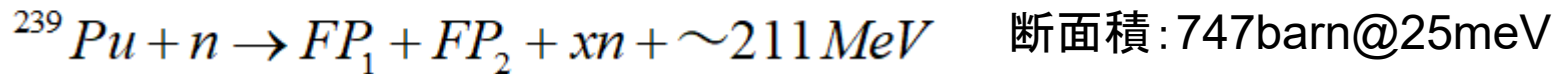
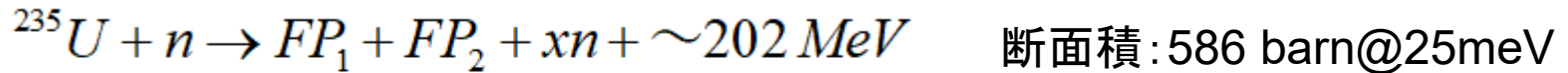


γ線補償型電離箱:

- 電流モードで動作
- 中性子は上部のホウ素被覆あり領域で
- ガンマ線は上下の領域で
- 上部のガンマ線起因の電流を、
下部の電流で相殺



核分裂を用いた検出器



FP:核分裂片 (Fission Product)

- **非常に大きなQ値** → 大きな信号 & ガンマ線の弁別が容易
- 高速中性子であれば ^{238}U や ^{232}Th も核分裂可能
- ^{235}U & ^{239}Pu の断面積: 基本的には $1/v$ 則に従うものの
比較的低いエネルギーから多数の共鳴ピーク
- **ガス検出器**: ガス状化合物の負イオン形成が問題で**用いられない**
- ホウ素被覆検出器のような構造が多い
※核分裂片の電荷が15~20と大きい → 阻止能が高く飛程が短い
→ 膜厚を厚くしても検出効率は上がらない
→ 膜厚の限界は $2 \sim 3 \text{ mg/cm}^2$ 程度 = 熱中性子検出効率: 0.5%
→ 多層構造も存在
- 阻止能が非常に高い & 電子ピックアップ → 非直線性 & 波高値減少
しかしQ値 $\sim 200 \text{ MeV} \gg$ ガンマ線 $\sim 1 \text{ MeV}$ で
ガンマ線弁別能力は非常に高い

核分裂を用いた検出器

事象率を r 、1事象で生成される電荷量を Q

核分裂計数管 特有の計測モード



信号の揺らぎの大きさ $\propto$ 計数率

事象率を r 、1事象で生成される電荷量を Q

電流 I : $I = rQ$

時間 T の間に起こる平均の事象数 n :

$$n = rT$$

n の標準偏差 σ_n : $\sigma_n = \sqrt{n} = \sqrt{rT}$

検出器に流れる電流 I の分散 σ_I :

$$\overline{\sigma_I^2} = \left(\frac{\sigma_n}{T} Q \right)^2 = \frac{rQ^2}{T}$$

電流の分散の定義は

$$\overline{\sigma_I^2} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [I(t) - I_0]^2 dt$$

電流の交流成分 $[I(t) - I_0]$ の2乗の時間平均

$\propto$ 反応の事象率 $\times$ 生成される電荷の2乗

ガンマ線による信号の事象率、電荷量 : r_γ, Q_γ
 中性子による信号の事象率、電荷量 : r_n, Q_n

電流 I : $I = r_\gamma Q_\gamma + r_n Q_n$

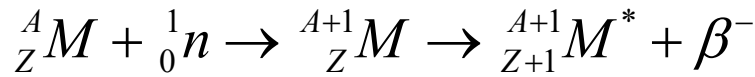
I の分散 : $\overline{\sigma_I^2} = \frac{r_\gamma Q_\gamma^2}{T} + \frac{r_n Q_n^2}{T}$

それぞれのガンマ線と中性子の比

$$R_I = \frac{r_\gamma Q_\gamma}{r_n Q_n} \quad R_{\sigma_I^2} = \frac{r_\gamma Q_\gamma^2}{r_n Q_n^2}$$

$Q_n \gg Q_\gamma$ であるので、
 キャンベルモード ($\overline{\sigma_I^2}$) により
 ガンマ線の寄与を小さくできる

放射化反応に基づく中性子検出法



エネルギーにより
親核種を同定可

箔 or ワイヤ

- ・場を乱さない
- ・自己遮蔽が小

半減期に従い
放射性崩壊

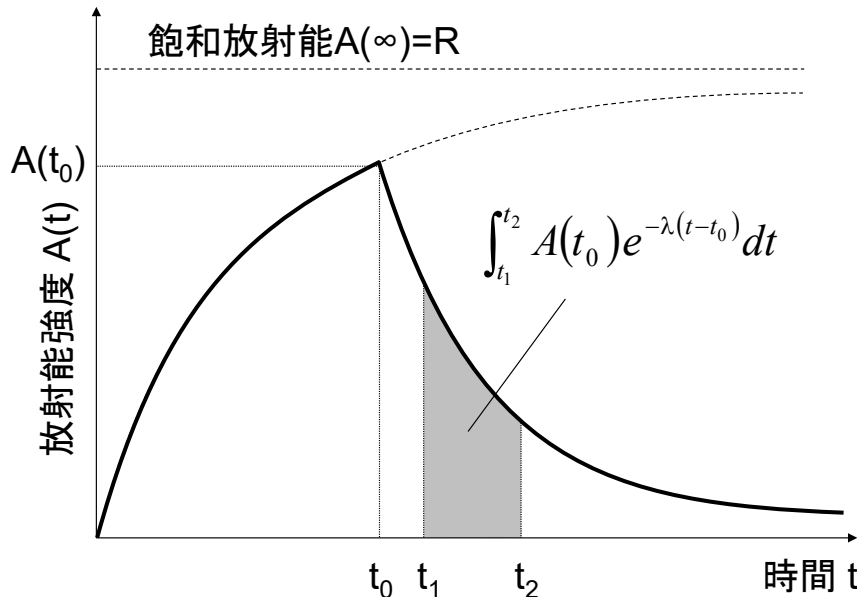
$T_{1/2}$

脱励起時にガンマ線放出

(多くは)放出されるガンマ線を計測することで
間接的に中性子を計測

箔の選択:

反応断面積、生成される放射性核種の半減期、放出されるガンマ線の測定しやすさ、
物理的な取り扱いやすさ等 を考慮して行われる



中性子反応率: $R = \phi \sigma_{abs} N_{tgt}$
フラックス × 断面積 × 原子数

生成核種の
時間変化率: $\frac{dN(t)}{dt} = R - \lambda N(t)$
Rで生成、崩壊定数 λ で減少

照射中放射能: $A(t) = R(1 - e^{-\lambda t})$ $A = \lambda N$

照射後放射能: $A(t) = A(t_0)e^{-\lambda(t-t_0)}$

ガンマ線カウント数: C

$$C = \varepsilon \int_{t_1}^{t_2} A(t_0) e^{-\lambda(t-t_0)} dt = \frac{\varepsilon R (1 - e^{-\lambda t_0}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})}{\lambda}$$

ε : 検出効率

放射化反応に基づく中性子検出法

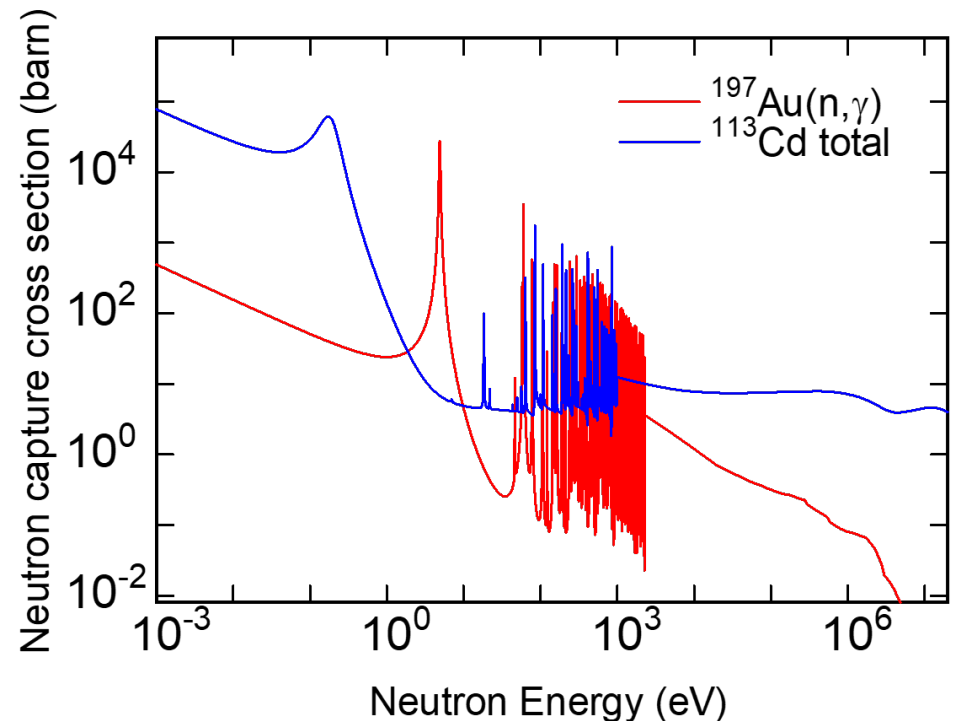
元素	標的原子核		生成される放射性同位体		
	同位体 存在度(%)	熱中性子吸収 断面積* (barn= 10^{-24}cm^2)	核種	半減期	主な放射線
$_{23}\text{V}$	^{51}V (99.75)	5.05	^{52}V	3.74分	β^- (2.54 MeV) γ (1.434 MeV)
$_{25}\text{Mn}$	^{55}Mn (100)	13.4	^{56}Mn	2.58時間	β^- (2.85 MeV) γ (0.846 MeV)
$_{27}\text{Co}$	^{59}Co (100)	37.2	^{60}Co	5.27年	β^- (0.318 MeV) γ (1.173, 1.333 MeV)
$_{29}\text{Cu}$	^{63}Cu (69.2)	4.51	^{64}Cu	12.7時間	β^- (0.578 MeV) β^+ (0.653 MeV) γ (0.511 MeV)
	^{65}Cu (30.8)	2.17	^{66}Cu	5.12分	β^- (2.64 MeV) γ (1.039 MeV)
$_{47}\text{Ag}$	^{107}Ag (51.8)	38.6	^{108}Ag	2.37分	β^- (1.65 MeV) γ (0.633 MeV)
	^{109}Ag (48.2)	4.98	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	250日	β^- (0.531 MeV) γ (0.658, 0.884 MeV他)
$_{49}\text{In}$	^{115}In (95.71)	163	$^{116\text{m}}\text{In}$	54.29分	β^- (3.29 MeV) γ (1.293, 1.097 MeV他)
$_{66}\text{Dy}$	^{164}Dy (28.2)	2000	$^{165\text{m}}\text{Dy}$	1.26分	β^- (0.878 MeV) γ (0.108, 0.515 MeV)
		800	^{165}Dy	2.33時間	β^- (1.28 MeV) γ (0.094, 0.361 MeV)
$_{79}\text{Au}$	^{197}Au (100)	98.7	^{198}Au	2.7日	β^- (0.961 MeV) γ (0.411 MeV)

放射化反応に基づく中性子検出法

カドミウム差分法

- ^{113}Cd : 0.5 eV以下の熱中性子の反応断面積が大
→ 熱中性子は完全シャットアウト
 - 0.5 mm程度のCd板で熱中性子はほぼすべて吸収
 - ◎ カドミウム差分法
 - ・Cdカバーで覆った放射化箔
熱外中性子による反応
 - ・Cdカバー無しの放射化箔
熱＋熱外中性子による反応
- ⇒ (熱中性子) = (Cd無) − (Cd有)

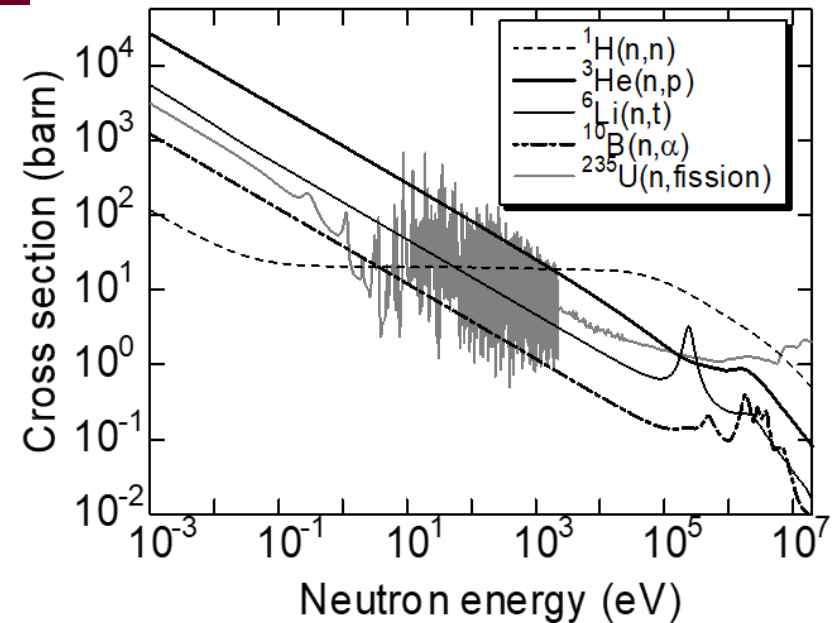
^{113}Cd の全反応 & $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 断面積 (JENDL4.0より引用)



高速中性子の計測

高速中性子検出の基礎事項

- 中性子吸収反応は $1/v$ 則 に従うものが多く、高エネルギー中性子で断面積: 小
- 弾性散乱の断面積はエネルギー依存: 小
特に水素の弾性散乱断面積: 比較的大きい
- 中性子エネルギーが高く、弾性散乱により反跳される原子核のエネルギー也大
- しきい反応(吸熱反応)も利用可能



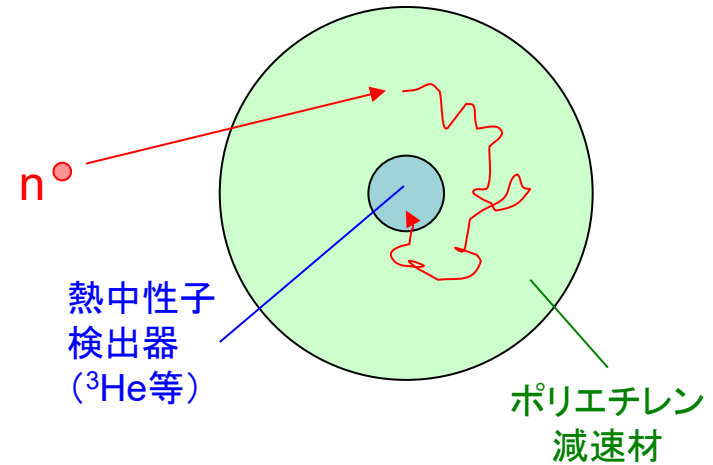
選択肢は2つ

- I. 中性子を検出しやすい熱中性子に減速する方法
→ 中性子減速型検出器
- II. 高速中性子でのみ信号生成が可能な反応を利用する方法
→ ①反跳陽子検出器
→ ②しきい反応(放射化・核分裂)を用いた検出器

中性子減速型検出法

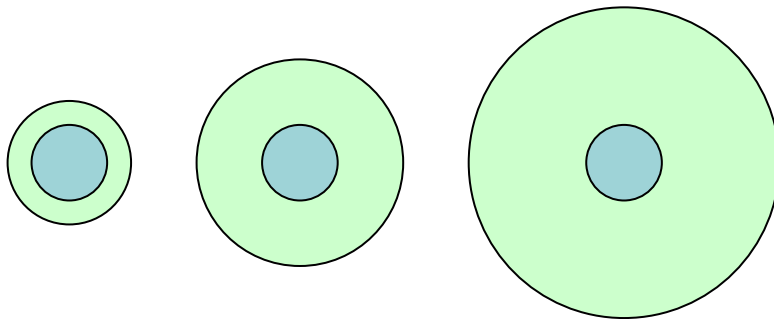
- 中性子吸収反応は $1/v$ 則 に従うものが多い
→ エネルギーの低い熱中性子の断面積大
- 水素との弾性散乱断面積: 比較的大
& 水素(陽子)は中性子とおなじ質量で、
散乱によるエネルギー移動効率が高い
→ 水素との弾性散乱により中性子の
エネルギーは効率よく減少(減速)
- 減速材に使われる材料
水(原子炉)、ポリエチレン(CH_2)_n 等

ボナーボール検出器

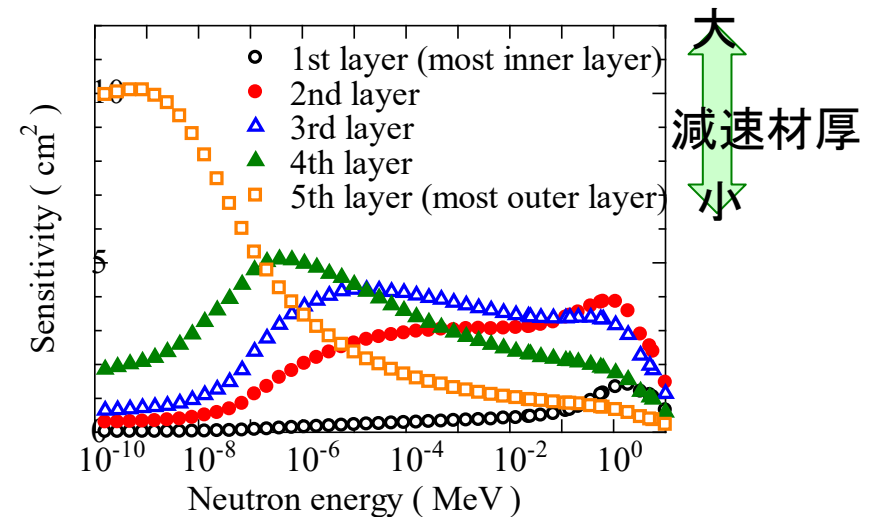


減速材で中性子を減速し
熱中性子検出器で検出

異なる減速材厚
→ 異なる中性子エネルギー感度



小 ← 減速能力 → 大
小 ← 高速中性子感度 → 大



中性子エネルギー感度の異なる検出器出力
→ 中性子エネルギーを推定可能

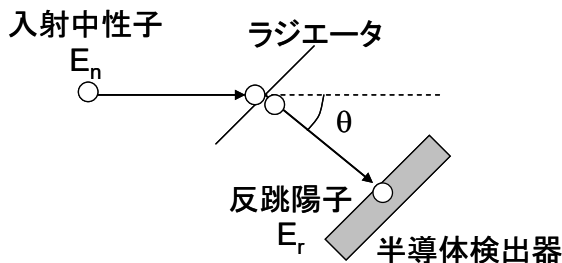
反跳陽子検出法

- 中性子のエネルギーが高い
- 陽子(水素原子核)との散乱
エネルギー移動効率が高い
- 反跳陽子は比較的高いエネルギー
＝直接電離放射線
- 反跳陽子のエネルギーを測定
→ 入射中性子のエネルギー推定

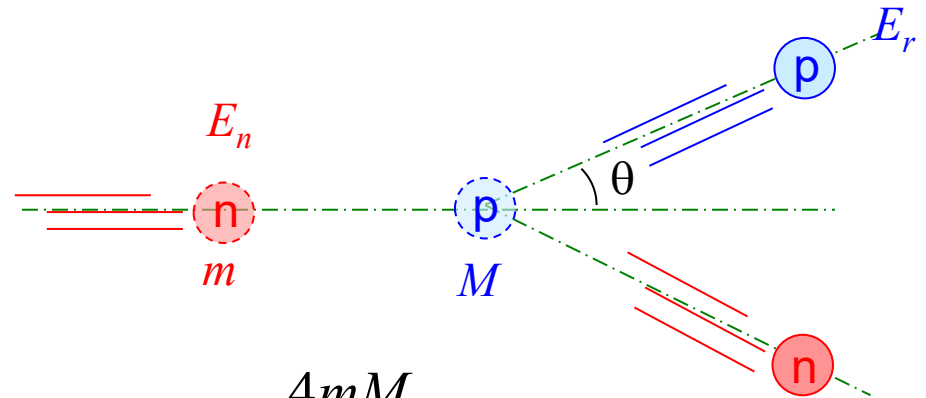
反跳陽子検出器

- ・水素含有ガス検出器
- ・有機シンチレータ(液体・プラスチック)
- ・ラジエータ(陽子放出)・検出器分離型

① 陽子の反跳方向を限定する方法



$$E_n = \frac{E_r}{\cos^2 \theta}$$

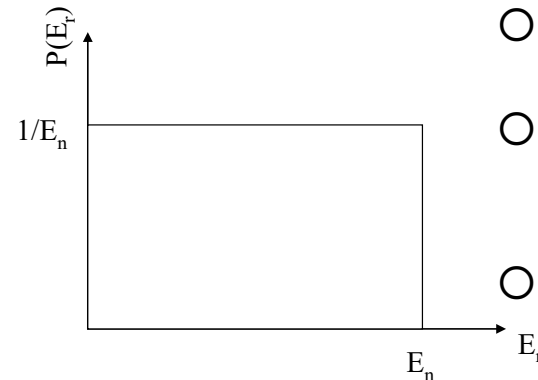


$$E_r = \frac{4mM}{(m+M)^2} (\cos^2 \theta) E_n$$

↓ $M = m$ で最大

$$E_r = \cos^2 \theta E_n$$

② 陽子の反跳方向を限定しない方法



- 陽子は重心系で等方に散乱
- 散乱方向により陽子エネルギー連続分布
- この分布より入射中性子エネルギーを逆推定

しきい反応を用いた高速中性子検出法

○ 熱中性子の場合

Q値がプラスの発熱反応でないと直接電離放射線である
高エネルギー荷電粒子が発生しない

○ 高速中性子の場合

Q値がマイナス(しきい反応)でも、十分なエネルギーを中性子が有していれば、高エネルギー荷電粒子発生

○ 高エネルギー荷電粒子が発生すれば、いろいろな放射線検出器(方式)で計測可能

○ 中性子の運動エネルギーの一部は、反応を起こすための内部エネルギーには使われず、中性子吸収後の複合核の運動エネルギーに使われる

→Q値より少し高い「しきいエネルギー」が存在
$$T_{threshold} = \frac{M + m}{M}(-Q)$$

○ ^{232}Th や ^{238}U といった核分裂可能な原子核も しきい反応・・・核分裂比例計数管

○ しきい反応の結果、放射性核種ができる場合 →放射化箔、放射化検出器

ここまで。
お疲れさまでした。