

物質研究のための中性子検出器

清水 裕彦

H.M.Shimizu

物質研究のための中性子検出器

覚悟の決め方

物性屋さんの本望は物質研究です。

生物屋さんの本望は生物研究です。

中性子は数ある手段の一つに過ぎません。

本望に至る論理や問題設定そのものにも一意性が確保されません。

手段の性能向上は感謝されますが、本望に至るまでは評価が困難です。

何故なら、手段の妥当性が最後まで断定できないからです。

しかし、

「手段が優れていない限り、データが最高品位になることはない」

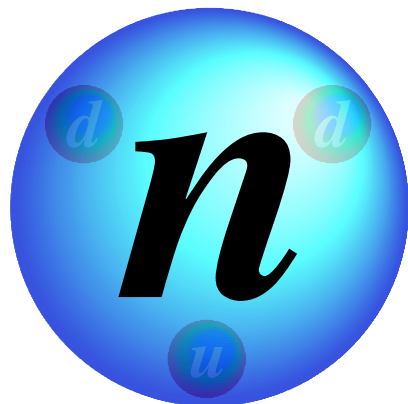
ということだけは確実です。

あとは、良い試料（研究対象）が登場するのを待ちます。

物質研究のための中性子検出器

透過型検出器を実現する手段は見つかっていません

核反応を使って検出することになります

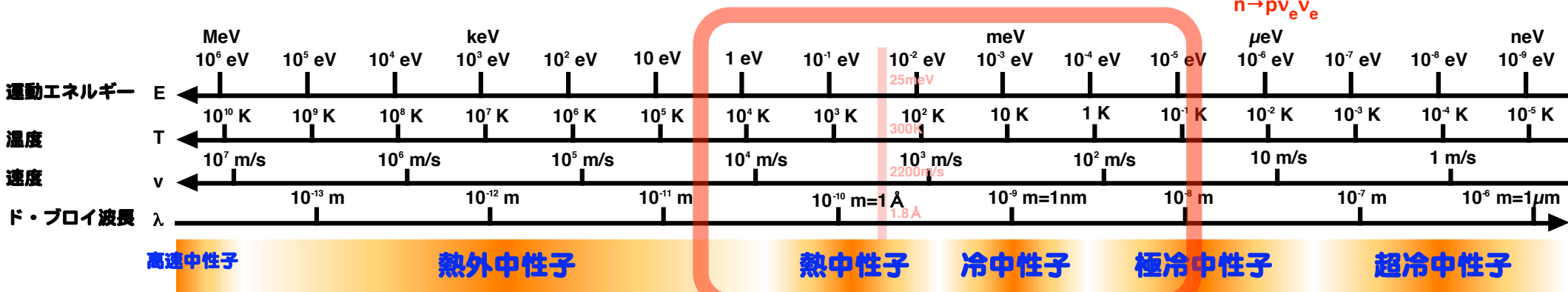


中性子は中性

運動エネルギーのほんの一部だけを確実に電子に与えることが困難。

低エネルギー

運動エネルギーを全部取り出しても、電子を動かすには足りない。



$$I(J^P) = \frac{1}{2} \left(\frac{1+}{2} \right)$$

静止質量 (ref. PDG2004)

$$m = 939.56536 \pm 0.00008 \text{ MeV}$$

平均寿命

$$\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$$

磁気双極子能率

$$\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$$

電気双極子能率

$$d < 0.63 \times 10^{-25} \text{ e cm (CL=90\%)}$$

自乗平均電荷半径

$$\langle r_n^2 \rangle = -0.1161 \pm 0.0022 \text{ fm}^2 \text{ (S=1.3)}$$

電気分極率

$$\alpha = (11.6 \pm 1.5) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

磁気分極率

$$\beta = (3.7 \pm 2.0) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

電荷

$$q = (-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-21} \text{ e}$$

平均中性子反中性子振動時定数

$$\tau_{nn}[\text{free}] > 8.6 \times 10^7 \text{ s (CL=90\%)}$$

$$\tau_{nn}[\text{bound}] > 1.3 \times 10^8 \text{ s (CL=90\%)}$$

崩壊様式

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \text{ 100\%}$$

$$\lambda = g_A/g_V = -1.2695 \pm 0.0029 \text{ (S=2.0)}$$

$$A = -0.1173 \pm 0.0013 \text{ (S=2.3)}$$

$$B = 0.983 \pm 0.004$$

$$a = -0.103 \pm 0.004$$

$$\phi_{AV} = (180.08 \pm 0.10)^\circ$$

$$D = (-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$$

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \gamma < 6.9 \times 10^{-3}$$

$$n \rightarrow p \nu_e \bar{\nu}_e$$

物質研究のための中性子検出器

透過型検出器を実現する手段は見つかっていません

核反応を使って検出することになります

得られる情報は、中性子吸収反応が起こった

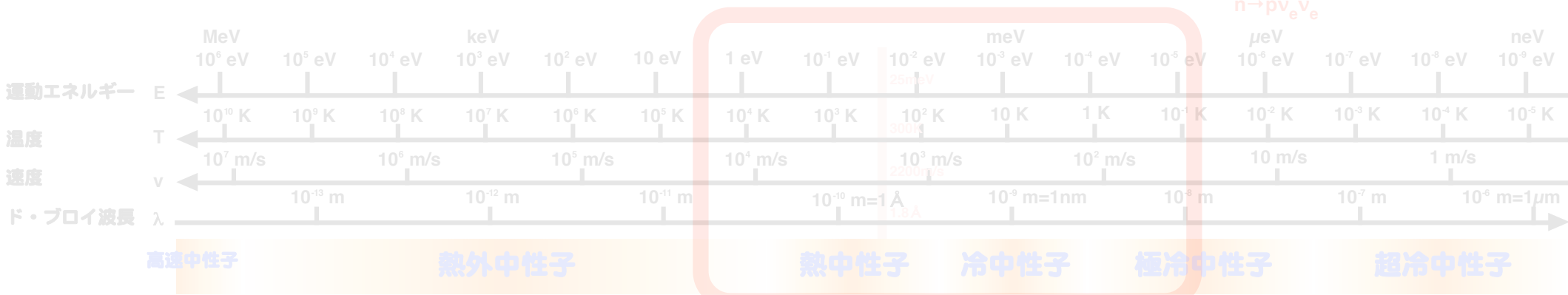
中性子は中性

運動エネルギーのほんの一部だけを確実に電子に与えることが困難。

位置と時間のみ

低エネルギー

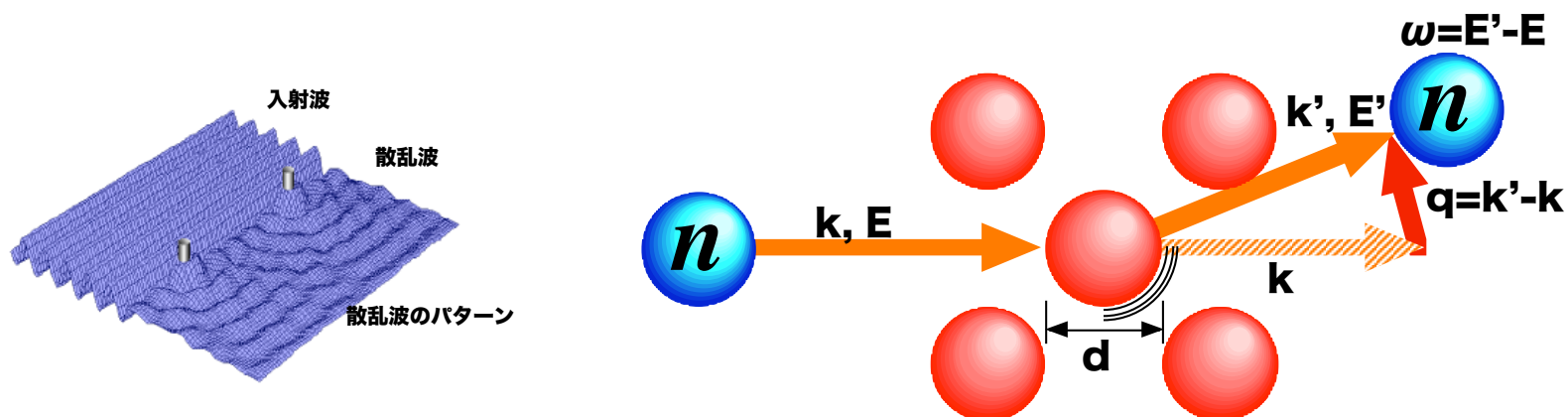
運動エネルギーを全部取り出しても、電子を動かすには足りない。



- $I(J^P) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}^+ \right)$
- 静止質量 $m = 939.56536 \pm 0.00008 \text{ MeV}$ (ref. PDG2004)
- 平均寿命 $\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$
- 磁気双極子能率 $\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$
- 電気双極子能率 $d < 0.63 \times 10^{-25} \text{ e cm}$ (CL=90%)
- 自乗平均電荷半径 $\langle r_n^2 \rangle = -0.1161 \pm 0.0022 \text{ fm}^2$ (S=1.3)
- 電気分極率 $\alpha = (11.6 \pm 1.5) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$
- 磁気分極率 $\beta = (3.7 \pm 2.0) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$
- 電荷 $q = (-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-21} \text{ e}$
- 平均中性子反中性子振動時定数 $\tau_{nn}[\text{free}] > 8.6 \times 10^7 \text{ s}$ (CL=90%)
- $\tau_{nn}[\text{bound}] > 1.3 \times 10^8 \text{ s}$ (CL=90%)
- 崩壊様式 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ 100%
- $\lambda = g_A/g_V = -1.2695 \pm 0.0029$ (S=2.0)
- $A = -0.1173 \pm 0.0013$ (S=2.3)
- $B = 0.983 \pm 0.004$
- $a = -0.103 \pm 0.004$
- $\phi_{AV} = (180.08 \pm 0.10)^\circ$
- $D = (-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$
- $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \gamma < 6.9 \times 10^{-3}$
- $n \rightarrow p \nu_e \bar{\nu}_e$

物質研究のための中性子検出器

ほとんど全ての中性子がTrue Signalです。

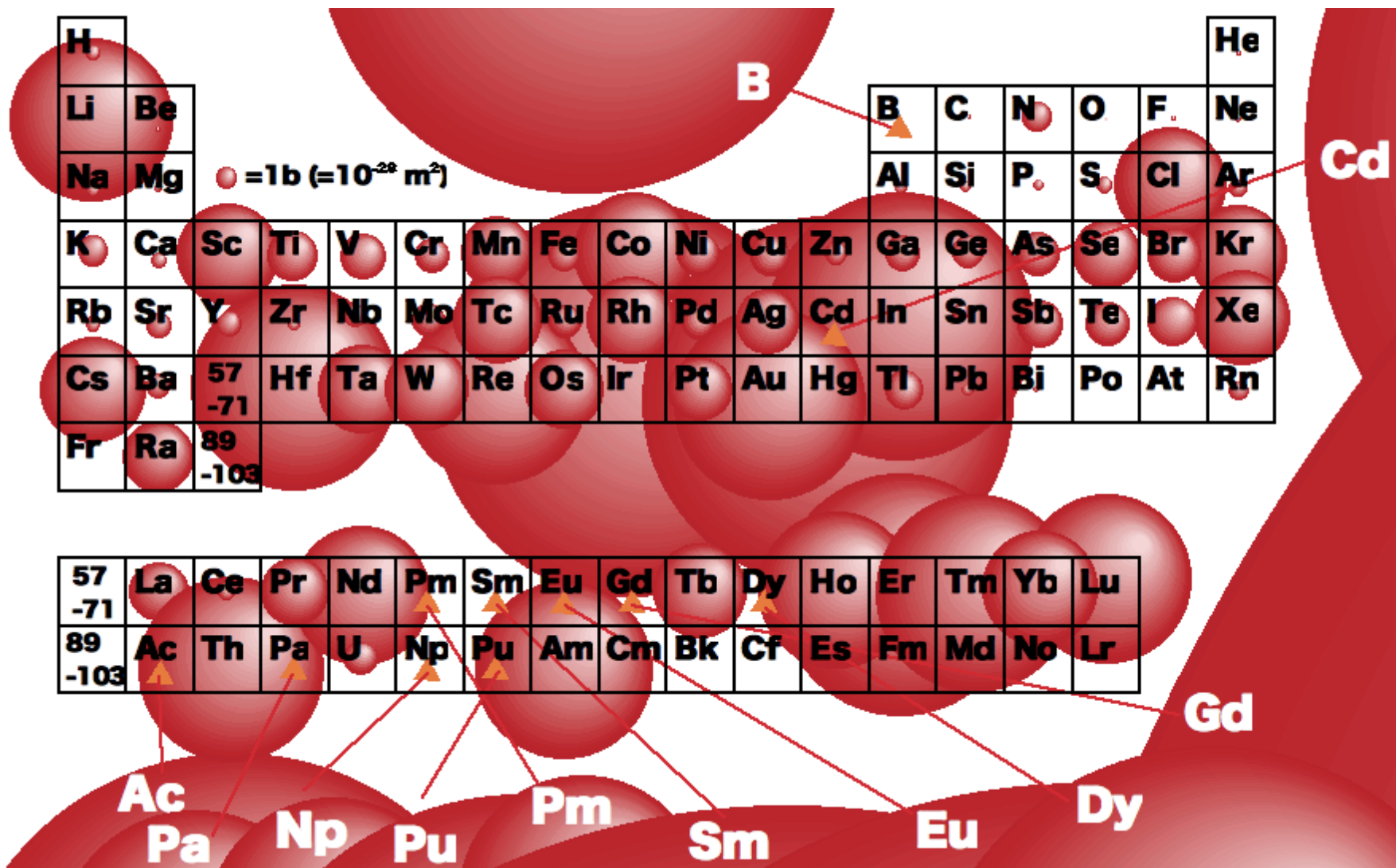


数え落しを嫌います

物質研究のための中性子検出器

中性子を吸収すると、大抵は γ 線を放出します。

図は、熱中性子($T=25\text{meV}$)に対する吸収断面積です。吸収断面積は $1/v$ に比例します。



物質研究のための中性子検出器

中性子を吸収すると、大抵は γ 線を放出します。

図は、熱中性子($T=25\text{meV}$)に対する吸収断面積です。吸収断面積は $1/v$ に比例します。

中性子ビームの周りは γ 線だらけです。

H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	● = 1b (=10 ⁻²⁸ m ²)														Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	57 -71	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				

γ 線に鈍感なものが良い

57 -71	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89 -103	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Ac Pa Np Pu Pm Sm Eu Dy Gd

物質研究のための中性子検出器

位置と時間のみ



数え落しを嫌う



γ 線に鈍感なものが良い



二つの信号を関連づける必要は無いが高速であるものが望ましい

パイプライン処理が適当

Recoveryが速いのが良い

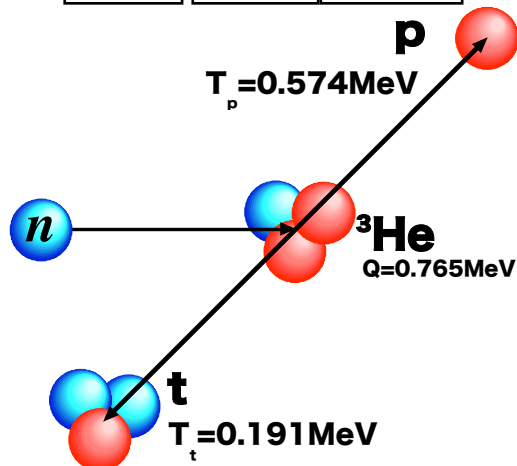
検出体に強い制限

検出体は軽元素系物質か物質量が少ないものが良い
できれば荷電粒子が出てほしい

中性子検出に使える核反応

① $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + t$

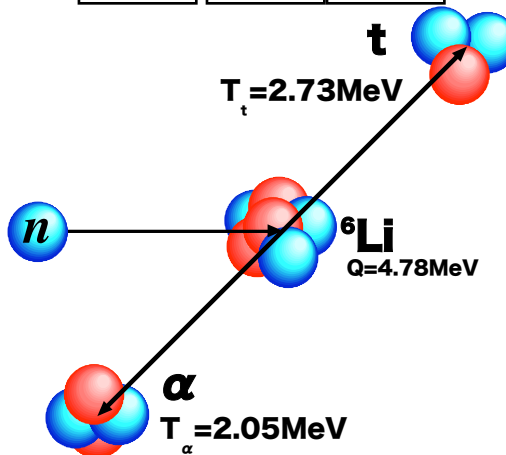
He	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
2	0.000138%	99.999862%
0.007b	5333b	0.0b



$\sigma = 5333\text{b}$

② $n + {}^6\text{Li} \rightarrow t + \alpha$

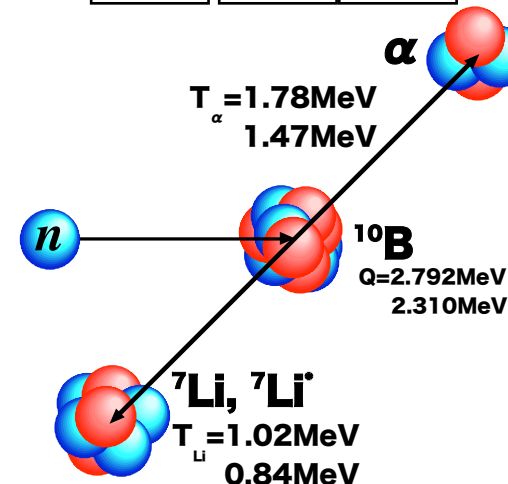
Li	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$
3	7.5%	92.5%
70.5b	940b	0.0454b



$\sigma = 940\text{b}$

③ $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$

B	${}^{10}\text{B}$	${}^{11}\text{B}$
5	20.0%	80.0%
767b	3837b	0.0055b



$\sigma = 3837\text{b}$

Single Wire Proportional Chamber + resistance-division readout
 Multi Wire Proportional Chamber

LiF/ZnS
 Lithium Glass Scintillator

BF_3 Scintillator

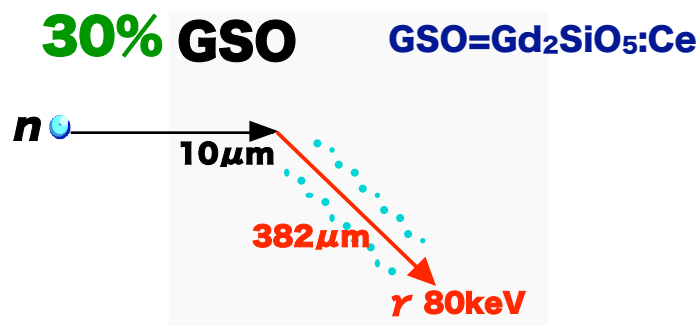
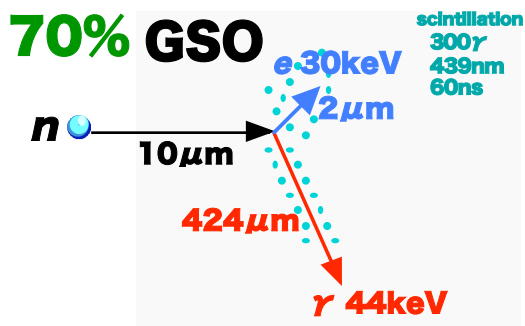
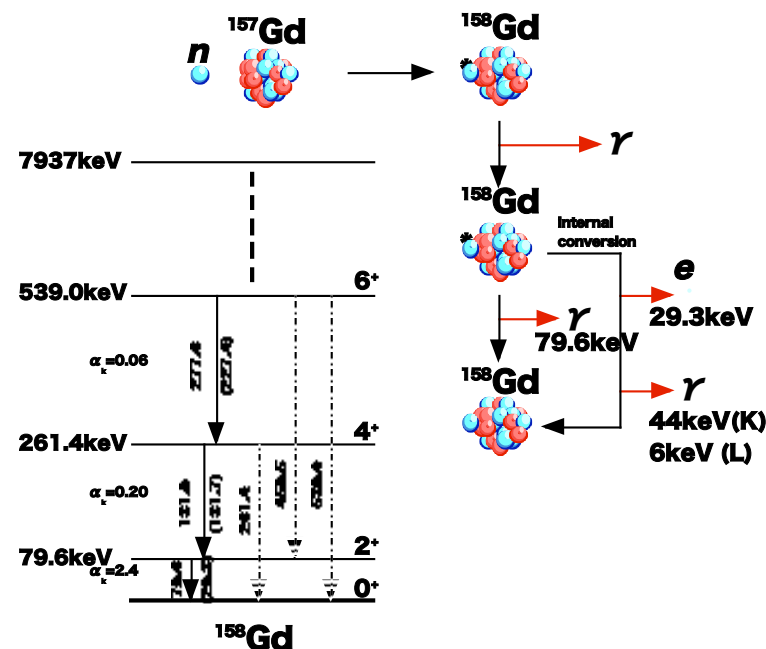
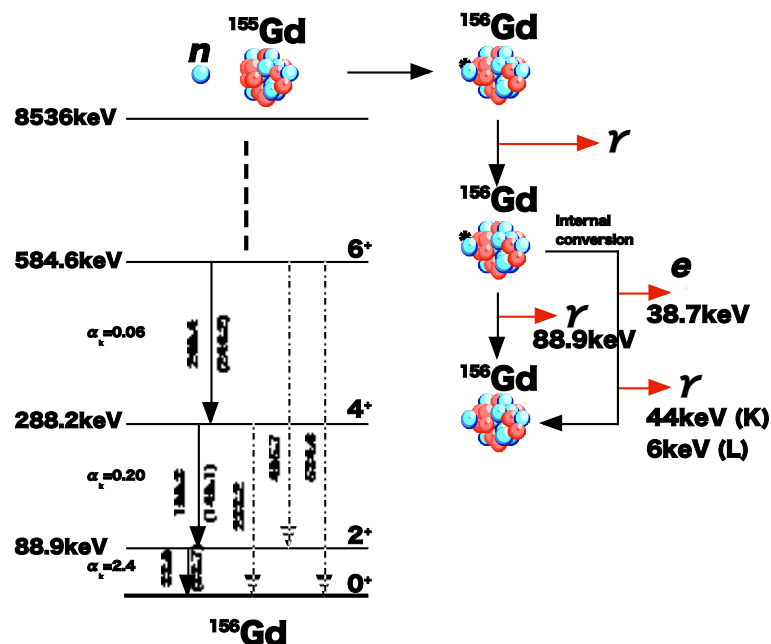
- ◎ 長期安定性の実績
- ◎ 低い γ 線感度
- × 遅い
- × 位置分解能が悪い

- × γ 線感度
- × 遅い?

中性子検出に使える核反応

④ n+Gd

Gd	¹⁵² Gd	¹⁵⁴ Gd	¹⁵⁵ Gd	¹⁵⁶ Gd	¹⁵⁷ Gd	¹⁵⁸ Gd	¹⁶⁰ Gd
64	0.2%	2.1%	14.8%	20.6%	15.7%	24.8%	21.8%
48890b	735b	85b	60900b	1.5b	254000b	2.2b	0.77b



中性子検出器の開発の方向性

ガス(^3He)

高計数率化 → MSGCなど

位置分解能 → 多チャンネル化

シンチレータ

γ 線感度低減 → 材料探索

光量増大

高計数率化 → 多チャンネル化

位置分解能 → マルチアノード

システム化

多チャンネル信号処理

システム化

多ユニットのシステム化

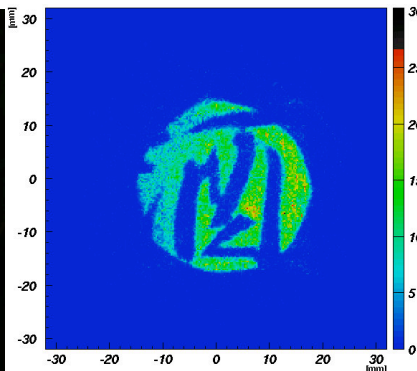
Host	Dopant (conc. mol%)	Density ρ (g/cm ³)	ρZ_{eff}^4 ($\times 10^{-6}$)	Abs. Length @ $\lambda=1.8\text{\AA}$ (mm)	Light Yield (photons/neutron)	Light Yield (photons/MeV γ)	α/β Ratio	λ_{em} (nm)	τ (ns)
^6Li -glass	Ce	2.5		0.52	~6,000	~4,000	0.3	395	75
^6LiI	Eu	4.1	31	0.54	50,000	12,000	0.87	470	1400
$^6\text{LiF/ZnS}$	Ag	2.6	1.2	0.8	160,000	75,000	0.44	450	>1000
LiBaF_3	Ce, K	5.3	35		3,500	5,000	0.14	190-330	1/34/2100
LiBaF_3	Ce, Rb	5.3	35		3,600	4,500	0.17	190-330	1/34/2400
$^6\text{Li}_6^{\text{dep}}\text{Gd}(\text{}^{11}\text{BO}_3)_3$	Ce	3.5	25	0.35	40,000	25,000	0.32	385, 415	200/800
$^6\text{Li}_6^{\text{dep}}\text{Gd}(\text{}^{11}\text{BO}_3)_3 + \text{Y}_2\text{SiO}_5$	Ce Ce	3.9		1	40,000 -	30,000		420 420	200/800 70
$\text{Cs}_2^6\text{LiYCl}_6$	Ce (0.1)	3.3		3.2	70,000 -	22,000 700	0.66	380 255-470	~1000 3
$\text{Cs}_2^6\text{LiYBr}_6$	Ce (1)	4.1		3.7	88,000	23,000	0.76	389,423	89/2500

C.W.E van Eijk, Nucl. Instrum. Methods A529 (2004) 260

KENS-RIKEN

回路

検出器本体部分



陽極抵抗分割読出型画像
検出システム

1mm以下の位置分解能を手軽に実現
できます。検出システムとして出来上
がっているのので、簡便に使用できます。



光直結読出型アンダーカメラ

シンチレーション光を直接マルチアノード光電子増倍管で検出するアンダー方式の画像検出器です。波長変換クロスファイバーを利用するのに比べて、発光量が少ないシンチレータ素材でも高計数率動作し、バックグラウンドに強い動作をします。

位置分解能1mm程度
→発光の重心計算が必要
ASICを伴う
システム化が必須



波長変換クロスファイバー読出

交差する波長変換ファイバーでシンチレーション光をマルチアノード光電子増倍管に導くタイプです。位置分解能450 μ mが達成されています。

概ねのスペック

チャンネル数：10k-1M channel

計数率：10kcps-1Mcps (10Mcps)

密度：1-400 channel/cm²

← できれば面充填配列可能であること

	粉末結晶解析		超高分解能粉末結晶解析	生物用単結晶回折	反射率計	小角散乱		全散乱		高分解能チョッパー
検出器バンク	背面	小角・中角				極小角	小角・広角			
全有感面積	5.0m ²		15.5m ²	1.1m ²	0.04m ²	0.4×0.4m ²	2.2+3m ²	7.0m ²		40.0m ²
ピクセル数	33,000		13,000	1,100,000	40,000	640,000	88,000 +120,000	280,000		40.0m ²
ピクセルサイズ	0.3×5.0cm ²	0.3×20cm ²	0.1×0.1cm ²	0.1×0.1cm ²	0.1×0.1cm ²	0.05×0.05cm ²	0.5×0.5cm ²	0.5×0.5cm ²	0.5×16cm ²	1.2×1.2cm ²
最高中性子エネルギー	1.0eV		0.5eV	0.17eV	0.013eV	0.33eV	0.33eV	5.0eV		2.0eV
中性子波長領域	0.28-8.0Å		0.4-8.0Å	0.7-3.85Å	2.5-9.0Å	0.5-9.0Å	0.5-9.0Å	0.12-8.8Å		
中性子検出効率	90%@λ=1Å		90%@λ=1Å	20%@λ=1Å		80%@λ=1Å	80%@λ=1Å	90%@λ=1Å		80%@λ=1Å
ピクセル最大計数率	1.0×10 ⁴ n/s		1.0×10 ⁴ n/s	1.0×10 ³ n/s	1.0×10 ⁷ n/s (直接ビーム)	1.0×10 ⁶ n/s		1.0×10 ⁶ n/s	本来はもっと必要	1.0×10 ⁶ n/s (Brg)
検出器計数率				3.0×10 ³ n/s/cm ²	1.0×10 ⁹ n/s (直接ビーム)		1.0×10 ⁶ n/s			1.0×10 ⁶ n/s (ブラッグ測定)
データ転送率	62.8 GB/h		26.6 GB/h	0.1 GB/h	3.5 GB/h	0.1 GB/h		11.5 GB/h		1.8 GB/h
優先項目	低予算(3000万円/m ² データ転送率)、信頼度		低予算(3000万円/m ² データ転送率)、信頼度	大立体角カバー、不感領域極小、球形・円筒形配置	広い計数ダイナミックレンジ、γ線識別能力	広い計数ダイナミックレンジ、高位置分解能、(高計数能力)	5mm程度の位置分解能、低価格	計数長期安定度、計数能力、検出効率		低ノイズ、安定度、低予算3000万円/m ² 、γ線識別能力

何が難しいのか

物性屋さんの本望は物質研究です。
生物屋さんの本望は生物研究です。
中性子は数ある手段の一つに過ぎません。

きっと検出器が悪いのだと判断できると期待してはいけない。

信号をオシロで見ようとはしない。

信号をオシロで見ても理解できない。

Calibrationは頻繁にはしたくない。

一時的に調子が狂って元に戻るなどということは命取りです。

極端に高価だと買えない。

一度入れたら定年まで手間要らずで動いてほしい。

故障した場合、簡単に取り替えられるのが良い。

研究者がメンテナンスする手間は無いことを切望する。