

神岡地下での中性子測定

南野(京大)

第3回 B02班若手ミニ研究会

2015年5月17日 @ 神戸大

自己紹介

- 南野彰宏
- 大学院: 東大宇宙線研神岡グループ
 - 暗黒物質探索 (XMASS)、(ニュートリノ(SK、K2K))
- 研究員、助教: 京大高エネ
 - ニュートリノ (T2K、SK、Hyper-K、AXEL)

はじめに

- 12年前にやった実験なので、ほとんど忘れてます。
- 2004年に書いた修論を読みながら、スライドを作りました。
- いろいろと説明等が間違ってるかもしれないので、変だと思ったら質問してください。

イントロ

研究の目的と背景

- 目的

- XMASS実験における中性子バックグラウンドの理解

- 背景

- 2003年当時、神岡鉱山内(2700 m.w.e)での環境中性子測定は、東大の大谷氏の1994年の測定を最後になかった。

この発表での中性子の分類

- 運動エネルギーによる分類
 - 熱中性子: $E < 0.5 \text{ eV}$
 - 熱以外の中性子: $E > 0.5 \text{ eV}$
 - 高速中性子: $E > 500 \text{ keV}$
- 発生場所による分類
 - 環境中性子: 検出器(遮蔽体も含む)以外から発生
 - 環境以外の中性子: 検出器(遮蔽体も含む)内部から発生

液体Xe中の熱中性子BG

- Xe同位体による熱中性子捕獲

- $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索、太陽ニュートリノ(pp、 ${}^7\text{Be}$)のBG

表 3.1: Xe の同位体による熱中性子の捕獲 [21]

同位体	存在比	捕獲後	断面積 [b]	半減期	崩壊モード	$E(\text{keV})$
${}^{124}\text{Xe}$	0.10	${}^{125m}\text{Xe}$	28	57.8 sec	IT(Isomeric transition)	140.8(γ) 111.8(γ)
${}^{124}\text{Xe}$	0.10	${}^{125}\text{Xe}$	165	16.9 hour	軌道電子捕獲	243.4(γ) 188.4(γ)
${}^{126}\text{Xe}$	0.09	${}^{127m}\text{Xe}$	0.45	69.2 sec	IT	124.7(γ) 172.4(γ)
${}^{126}\text{Xe}$	0.09	${}^{127}\text{Xe}$	3.5	36.4 day	軌道電子捕獲	375.0(γ) 202.9(γ)
${}^{128}\text{Xe}$	1.91	${}^{129m}\text{Xe}$	0.48	8.88 day	IT	39.58(γ) 196.6(γ)
${}^{130}\text{Xe}$	4.1	${}^{131m}\text{Xe}$	0.45	11.8 day	IT	163.9(γ)
${}^{132}\text{Xe}$	26.9	${}^{133m}\text{Xe}$	0.05	2.19 day	IT	233.2(γ)
${}^{132}\text{Xe}$	26.9	${}^{133}\text{Xe}$	0.45	5.24 day	β^- 崩壊	346.0(β) 81.0(γ)
${}^{134}\text{Xe}$	10.4	${}^{135m}\text{Xe}$	0.003	15.3 min	IT	526.6(γ)
${}^{134}\text{Xe}$	10.4	${}^{135}\text{Xe}$	0.265	9.14 hour	β^- 崩壊	910.0(β) 249.8.0(γ)
${}^{136}\text{Xe}$	8.9	${}^{137}\text{Xe}$	0.26	3.8 min	β^- 崩壊	4170.0(β) 3720.0(β) 455.5(γ)

半減期 < 36.4日

液体Xe中の熱中性子BG

- Xe同位体による熱中性子捕獲
 - $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索、太陽ニュートリノ(pp、 ${}^7\text{Be}$)のBG

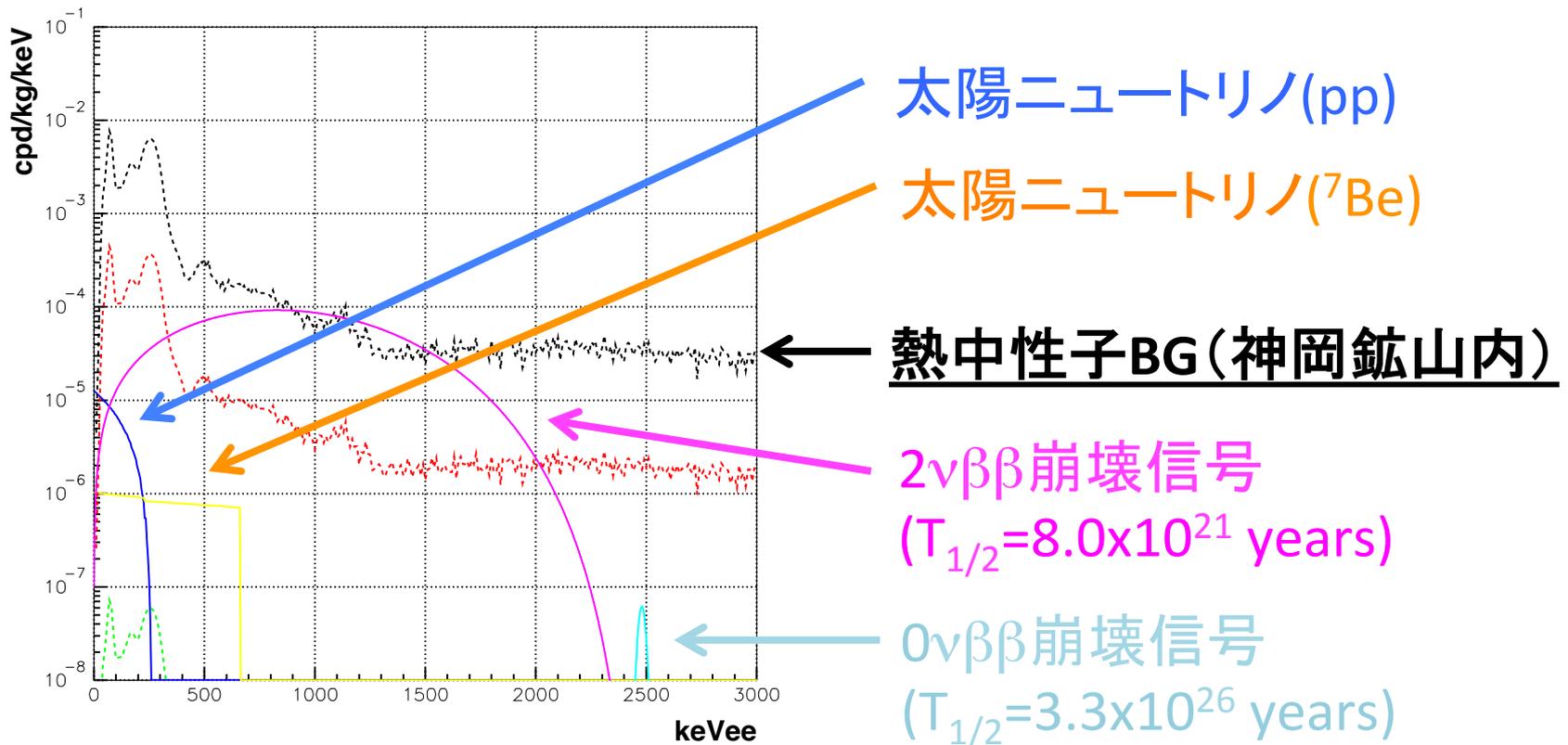


図 4.17: 液体 Xe 中の熱中性子によるバックグラウンド (*) 分解能はp.e.数の統計誤差 8

液体Xe中の高速中性子BG

- Xe原子核と弾性散乱
 - 暗黒物質探索のBG

弾性散乱後のXe原子核の最大の運動エネルギー

中性子の運動エネルギー

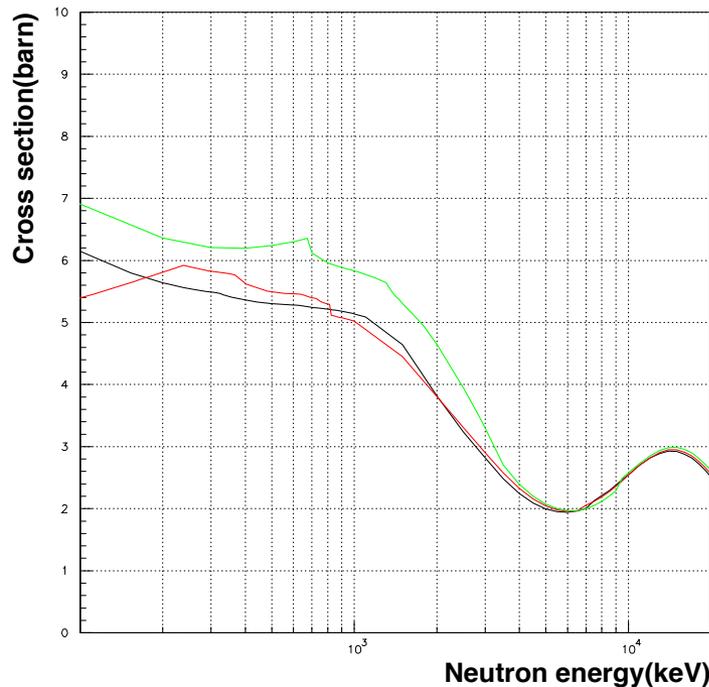
$$\begin{aligned} E_{Xe|\theta=\pi} &= E_n \times \frac{m_{Xe}}{m_n} \frac{4}{\left(\frac{m_{Xe}}{m_n} + 1\right)^2} \\ &= 3.03 \times 10^{-2} E_n \end{aligned}$$

$E_n = 1 \text{ MeV}$ のとき、 $E_{Xe|\theta=\pi} = 30 \text{ keV} = 6 \text{ keVee}$

(Quenching factor = 0.2を仮定)

液体Xe中の高速中性子BG

- Xe原子核と弾性散乱
– 暗黒物質探索のBG



どの同位体の反応断面積も似ている。

<http://www.nndc.bnl.gov/nndc/endl>

図 3.1: Xe の中性子に対する弾性散乱の反応断面積 [46]

黒: ^{129}Xe 、赤: ^{131}Xe 、緑: ^{132}Xe

液体Xe中の高速中性子BG

- Xe原子核と弾性散乱
– 暗黒物質探索のBG

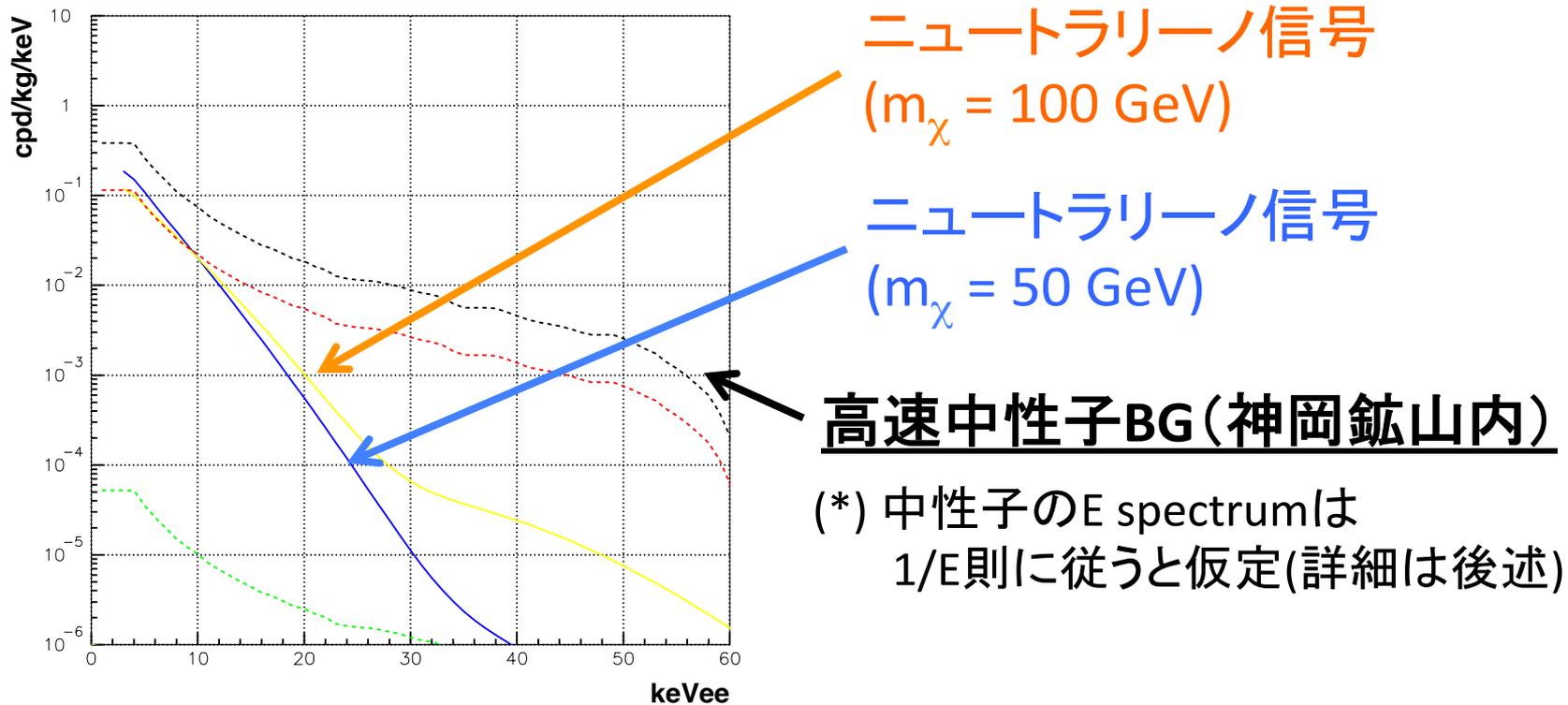
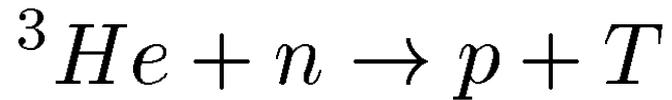


図 4.18: 液体 Xe 中の高速中性子によるバックグラウンド

測定

^3He 比例計数管

- ^3He は熱中性子捕獲に大きな断面積



^3He では熱中性子の検出が優勢。
以下の解析では ^3He 検出器で検出された
全事象を熱中性子起源と仮定。

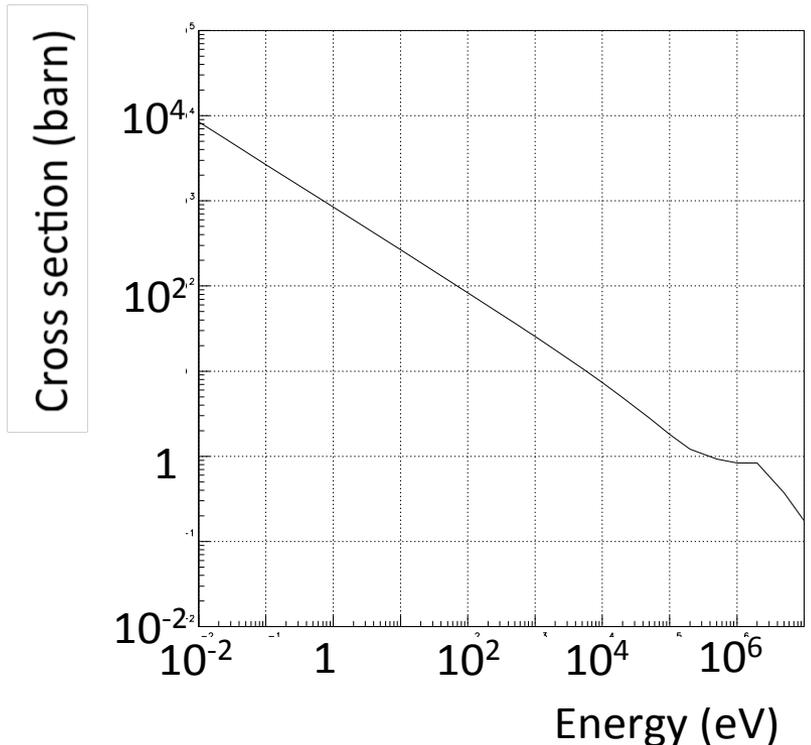
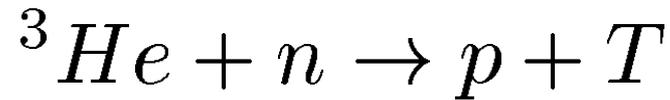


図 4.1: $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積 [46]

^3He 比例計数管

- 測定原理



Q値(764 keV)を、運動量保存則から以下のように分け合う。

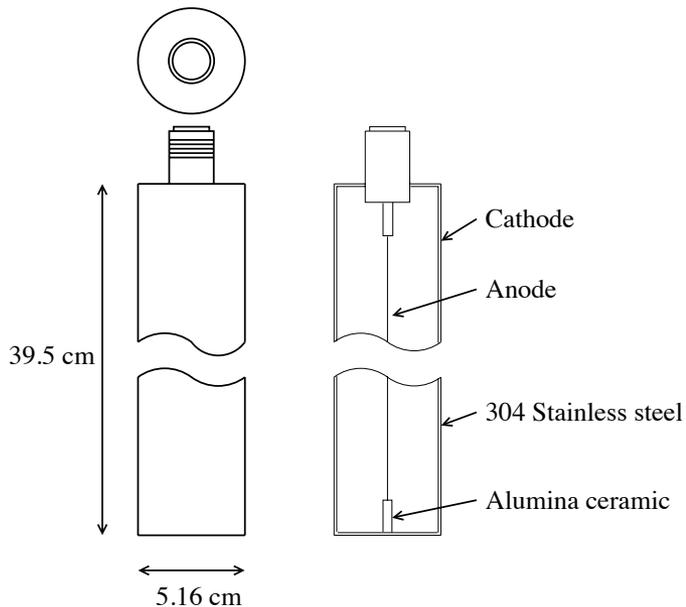
$$E_p = 573 \text{ keV}$$

$$E_T = 191 \text{ keV}$$

pとTは、 ^3He ガスをイオン化しながら運動エネルギーを失う。その時に生成された電子を電場で陽極線までドリフトし、陽極線付近の強電場で増幅し電流として読みだす。

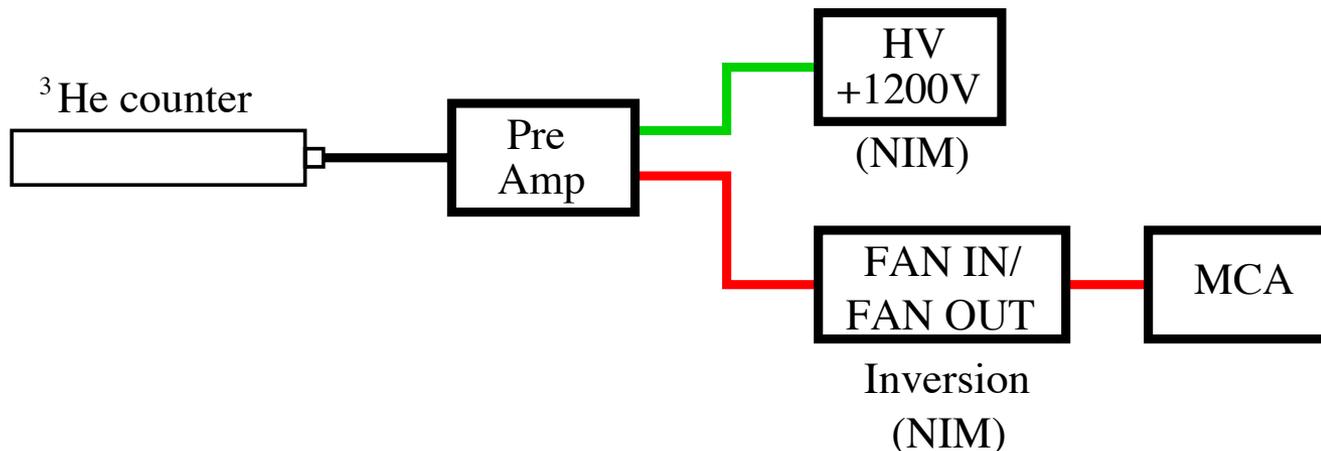
^3He 比例計数管

- 測定に用いた比例計数管
 - Reuter-Stokes社のモデル番号P4-1614-204
 - SEIKO EG&Gが代理店
 - スペック(メーカーで較正した値)
 - 熱中性子感度: $102.0 \text{ cps/n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 陽極電圧のプラトー領域: $1150\text{V} - 1500\text{V}$

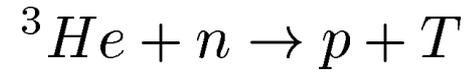


^3He 検出器のデータ収集系

- Preamplifier: ORTEC 142PC
 - 使用した比例計数管に最適なものとして購入(まだ神岡にあるはず)
- Multi Channel Analyzer: SEIKO EG&G MCA7700
 - SKの備品(まだある?)
 - Shaping Amplifierの設定: 時定数 $6\mu\text{s}$



${}^3\text{He}$ 検出器の信号



$$E_p = 573 \text{ keV}$$

$$E_T = 191 \text{ keV}$$

• 壁際効果

- 壁際で ${}^3\text{He}(n,p)$ 反応が起こると、 p と T はすべての運動エネルギーを失う前に検出器外に飛び出す。
- この効果のため、 ${}^3\text{He}$ 検出器の信号は764 keVのピークから低いエネルギーまで尾をひく。

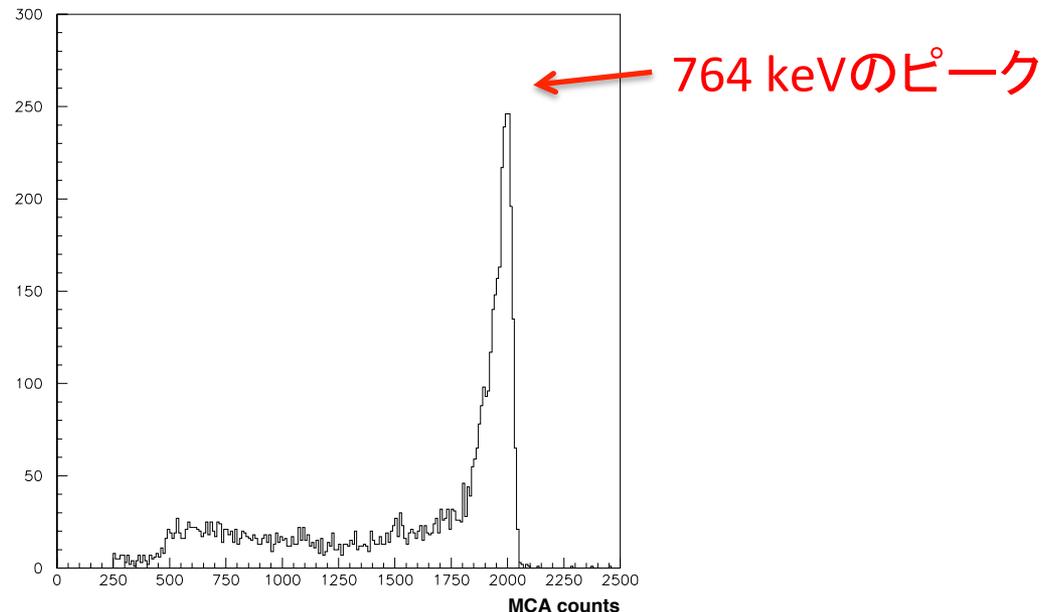
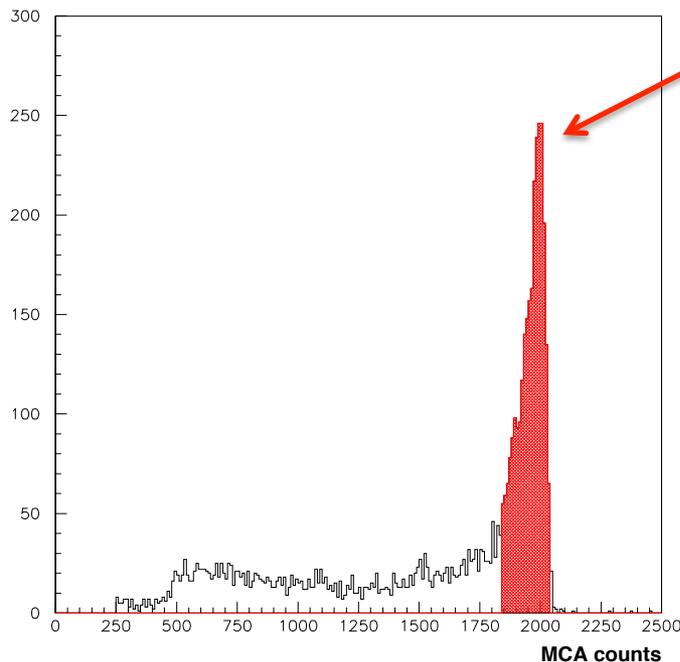


図 4.2: ${}^3\text{He}$ 比例計数管のスペクトル

^3He 検出器の較正

- 熱中性子感度: $102.0 \text{ cps/n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (メーカー較正值)
- スペクトルの形
 - 中性子線源 ^{252}Cf からの中性子をポリエチレンブロックで減速させ熱中性子化し、検出器に入射



測定に利用

イベント数 (赤の領域)/イベント数(全領域)
= 0.508

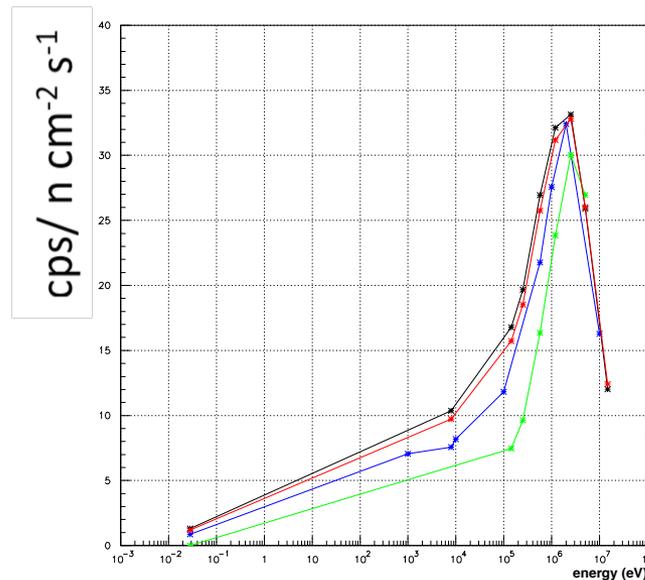
赤の領域を用いた時の熱中性子感度

$$S_{\text{thermal}} = 102 \times 0.508 \\ = 51.8 \text{ cps / n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

図 4.6: 中性子線源 ^{252}Cf を用いた ^3He 比例計数管の較正

^3He 検出器の熱以外の中性子測定

- 熱以外の中性子を減速させて測定
 - 中性子のエネルギースペクトラムを直接測定できない
- ^3He 検出器を減速材で包んだときの感度(*)
 - ポリエチレン球で包んだときの応答関数 (NIM A321 (1992) 298)



(*) p.18の赤の領域を用いたときの感度

図 4.9: 様々な厚さのポリエチレンで包んだときの ^3He 比例計数管 (P4-1614-204) の各エネルギーの中性子に対する感度 (ポリエチレンの厚さ: 黒=9.71cm、赤=10.0cm、青=11.0cm、緑=12.25cm)

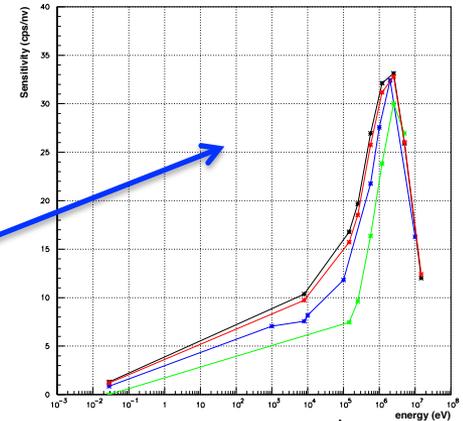
^3He 検出器の熱以外の中性子測定

- 神岡地下実験室での主な中性子発生源
 - 岩盤中の $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 系列が核分裂
 - 岩盤中の $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 系列の崩壊に伴う (α, n) 反応
 - 宇宙線 μ による原子核破砕
- 神岡地下実験室の中性子のエネルギースペクトル
 - 無限の減速材中に中性子源が一様に分布
 - 減速材中での吸収は少ない(岩盤中の水は少量)という条件が満たされるので、 **$1/E$ 則(*)に従うと仮定。**
(さらに中性子のエネルギーの上限を10MeVと仮定。)

$$N(E) = \frac{A}{E} \quad (*) \text{ NIM A 357 (1995) 524}$$

^3He 検出器の熱以外の中性子測定

- 厚さ10cmのポリエチレンで包んだ時
 - 熱以外の中性子の測定感度@神岡地下



$$\begin{aligned}
 S_{non\ thermal} &= \frac{\int_{0.5 \times 10^{-6}}^{10} N(E) F(E) dE}{\int_{0.5 \times 10^{-6}}^{10} N(E) dE} \\
 &= 9.41 \text{ cps/n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}
 \end{aligned}$$

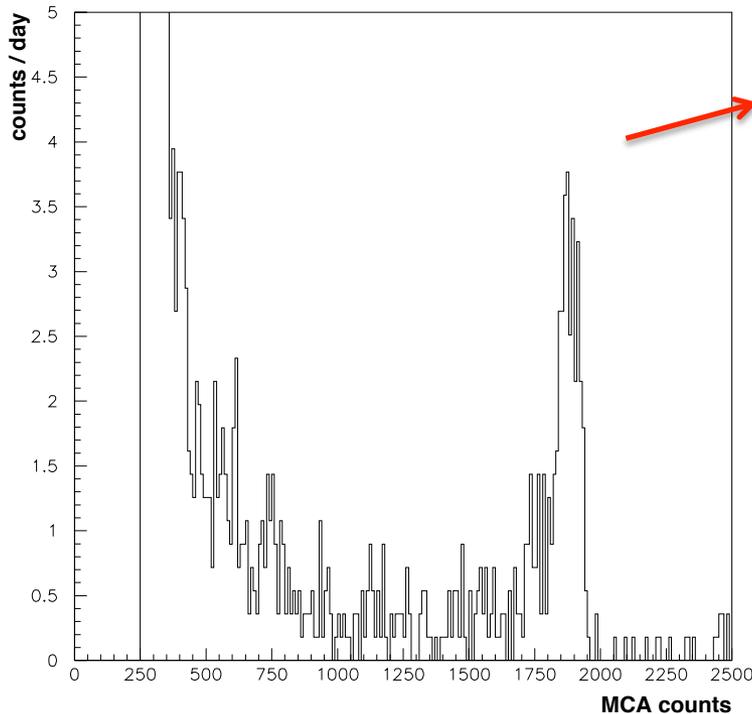
$N(E) = \frac{A}{E}$

- 熱中性子の測定感度@神岡地下(この測定のBG)

$$S_{thermal} = 1.20 \text{ cps/n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

神岡地下での中性子測定

- 場所: Super-Kから約50mのクリーンルーム
- 熱中性子フラックスの測定
 - 装置: ^3He 検出器
 - 測定期間: 5.6日



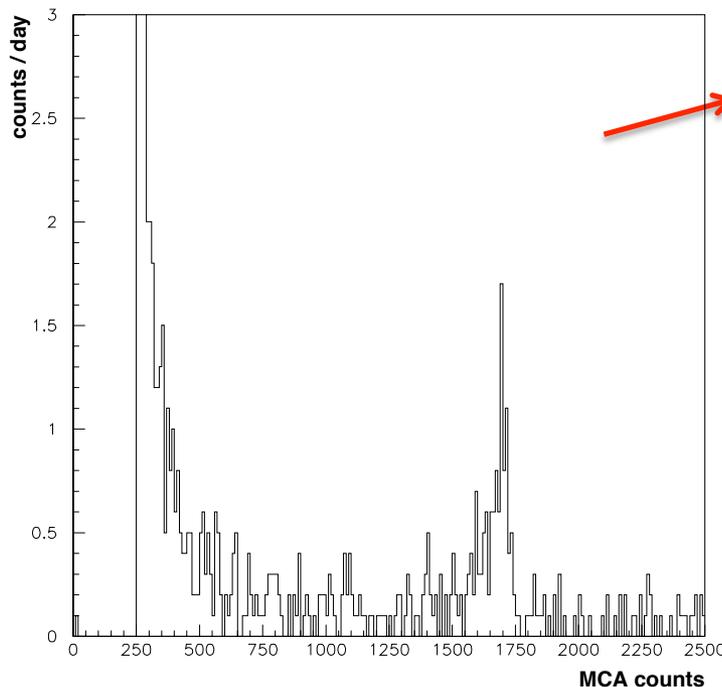
熱中性子のフラックス

$$8.26(\pm 0.58) \times 10^{-6} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

(*) 誤差は統計誤差

神岡地下での中性子測定

- 場所: Super-Kから約50mのクリーンルーム
- 熱以外の中性子フラックスの測定
 - 装置: ^3He 検出器 + 10cm厚のポリエチレン
 - 測定期間: 10.0日



熱以外の中性子のフラックス

$$1.15(\pm 0.12) \times 10^{-5} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

高速中性子のフラックス

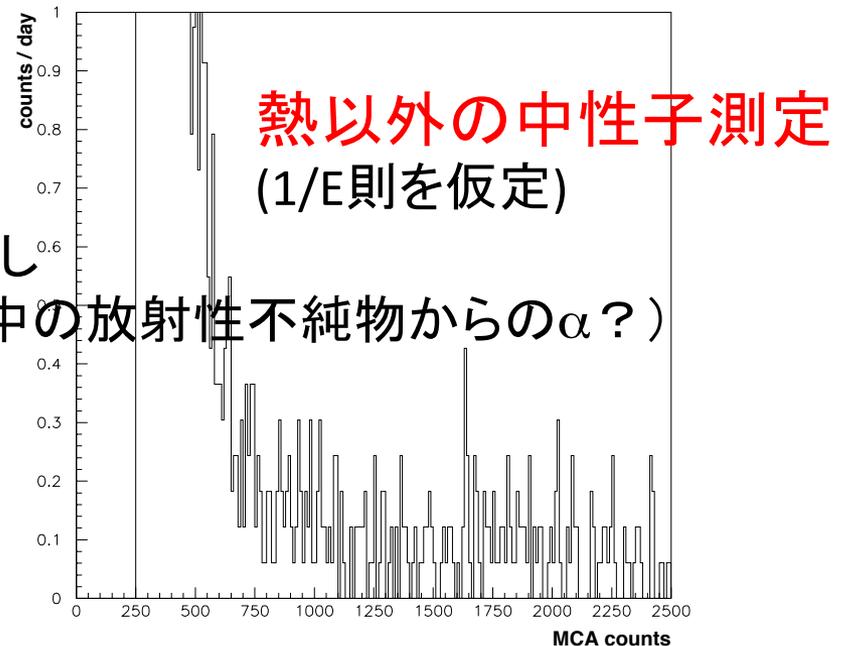
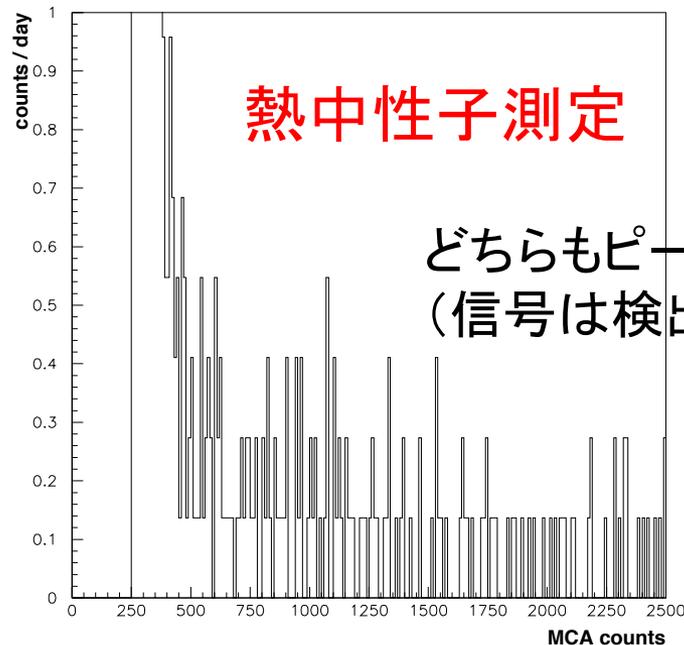
$$2.06(\pm 0.21) \times 10^{-6} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

(*) 誤差は統計誤差

神岡地下での中性子測定

- 遮蔽体中での測定

- ポリエチレン15cm、ホウ酸5cm、鉛15cm、無酸素銅5cm



熱 $< 4.80 \times 10^{-7} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

熱以外 $< 3.42 \times 10^{-6} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

高速 $< 8.24 \times 10^{-7} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

神岡地下での中性子測定

• まとめ

表 4.1: 中性子フラックス (単位: $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、誤差は統計誤差

場所	熱中性子	熱以外の中性子
<u>神岡鉱山内 (2700 <i>m.w.e.</i>)</u> 神岡鉱山内遮蔽体中	<u>$8.26(\pm 0.58) \times 10^{-6}$</u> < 4.80×10^{-7} (95% <i>C.L.</i>)	<u>$1.15(\pm 0.12) \times 10^{-5}$</u> < 3.42×10^{-6} (95.45% <i>C.L.</i>)
大谷氏の測定		
<u>地上 (本郷キャンパス)[48]</u> <u>神岡鉱山内 (2700 <i>m.w.e.</i>)[48]</u>	<u>1.4×10^{-3}</u> <u>1.4×10^{-5}</u>	<u>1.2×10^{-2}</u> <u>2.8×10^{-5}</u>
地上 [49] Gran Sasso(3950 <i>m.w.e.</i>)[49]	1.4×10^{-3} $2.05(\pm 0.06) \times 10^{-6}$	1.2×10^{-2} $3.84(\pm 0.58) \times 10^{-6}$

神岡地下実験室

- 熱中性子フラックスは地上の~1/100
- 熱以外のフラックスは地上の~1/1000
- 大谷氏の測定結果(1994年)とオーダーで一致

まとめ

やり残し

- ^3He 検出器起源のBGの理解
- 神岡地下の他の場所でのフラックス測定
- 遮蔽体中での有限値でのフラックス測定
- 液体シンチ検出器を用いた測定
 - 検出器を作って、波形弁別による中性子と γ の弁別能力の評価までを行ったが、液シンの熱膨張で検出器を壊してしまった。。。
- 系統誤差の見積り

まとめ

- 2003年に神岡地下実験施設で中性子フラックスの測定を行った。
- 1994年 -> 2003年 -> ???