

# 神岡地下における3HE比例計数管を用いた 環境中性子フラックスの測定

神戸大学 粒子物理研究室  
M2 帝釋稜介

身内賢太郎、岸本祐二<sup>A</sup>、関谷洋之<sup>B</sup>、鈴木優飛<sup>C</sup>、菊池崇矩<sup>C</sup>、  
田中雅士<sup>C</sup>、寄田浩平<sup>C</sup>、他中性子測定コンソーシアム

神戸大理、KEK<sup>A</sup>、東大宇宙線研<sup>B</sup>、早大理工<sup>C</sup>

# 目次

- 1) モチベーション
- 2)  $^3\text{He}$ 比例計数管について
- 3) 検出器セットアップ
- 4) 実験データについて
- 5) シミュレーションを用いた解析について
- 6) 課題
- 7) まとめ

# モチベーション

- 暗黒物質探索実験ではWIMPと原子核との弾性散乱事象を見る



- 中性子は原子核と弾性散乱し暗黒物質事象と同じような振る舞いをする  
→中性子のエネルギーやレートを理解することが重要  
→他大学で協力し中性子の測定を行うことを目的として中性子測定コンソーシアム発足



- 中性子のフラックスの先行研究

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

南野さん修論(2004)より引用



- 私は $^3\text{He}$ 比例係数管で測定を行う  
エネルギー情報については、先ほど発表のあった液シンを用いた測定を行う(早稲田、阪大)

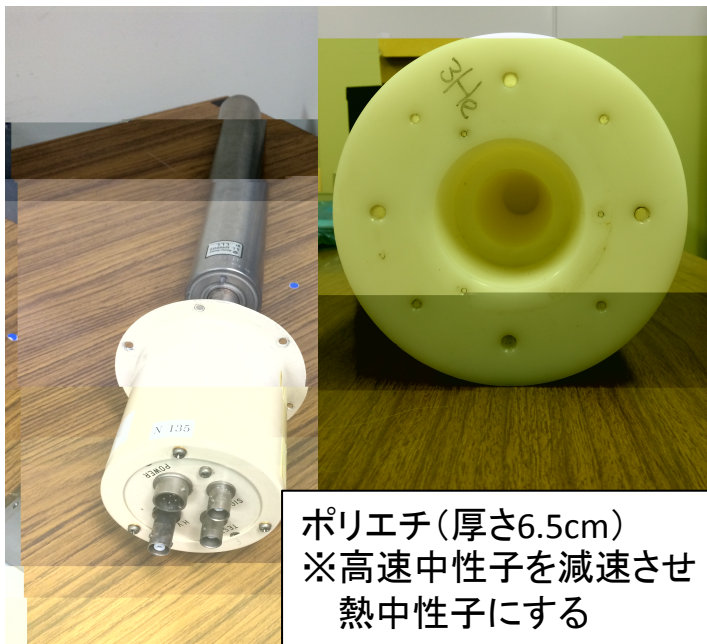


- 熱中性子(0.5eV以下)を主にターゲットにする  
高速中性子(500keV以上)も減速材(ポリエチ)を用いればターゲットに出来る

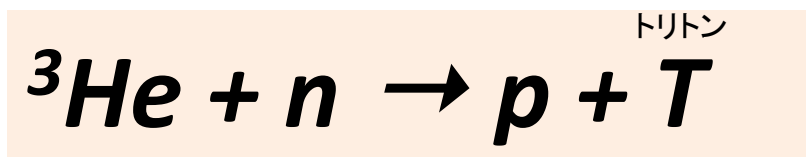
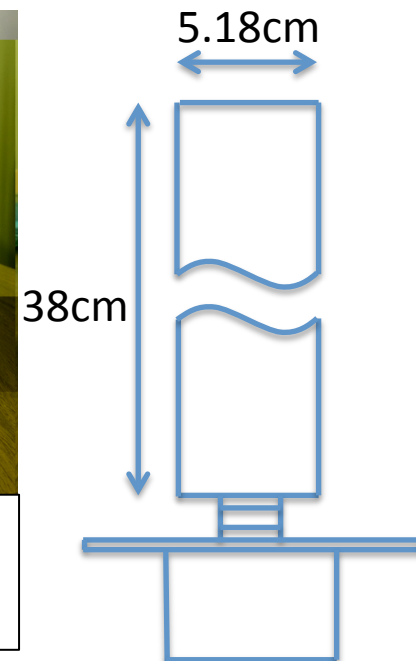
# $^3\text{He}$ 比例計数管

(KEK放射線科学センター所有)

- Reuter-Stokes社  
モデル番号P4-1618-203
- 気体  $^3\text{He}$
- 気圧 10atm
- 動作電圧 1300V



ポリエチ(厚さ6.5cm)  
※高速中性子を減速させ  
熱中性子にする

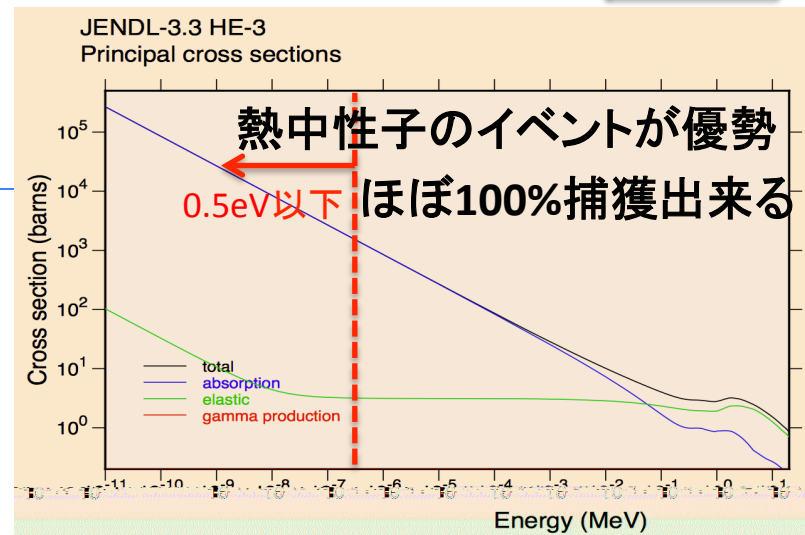


- 測定原理  
上の反応のQ値(764keV)が運動量保存から  
 $p$ と $T$ に分かれる

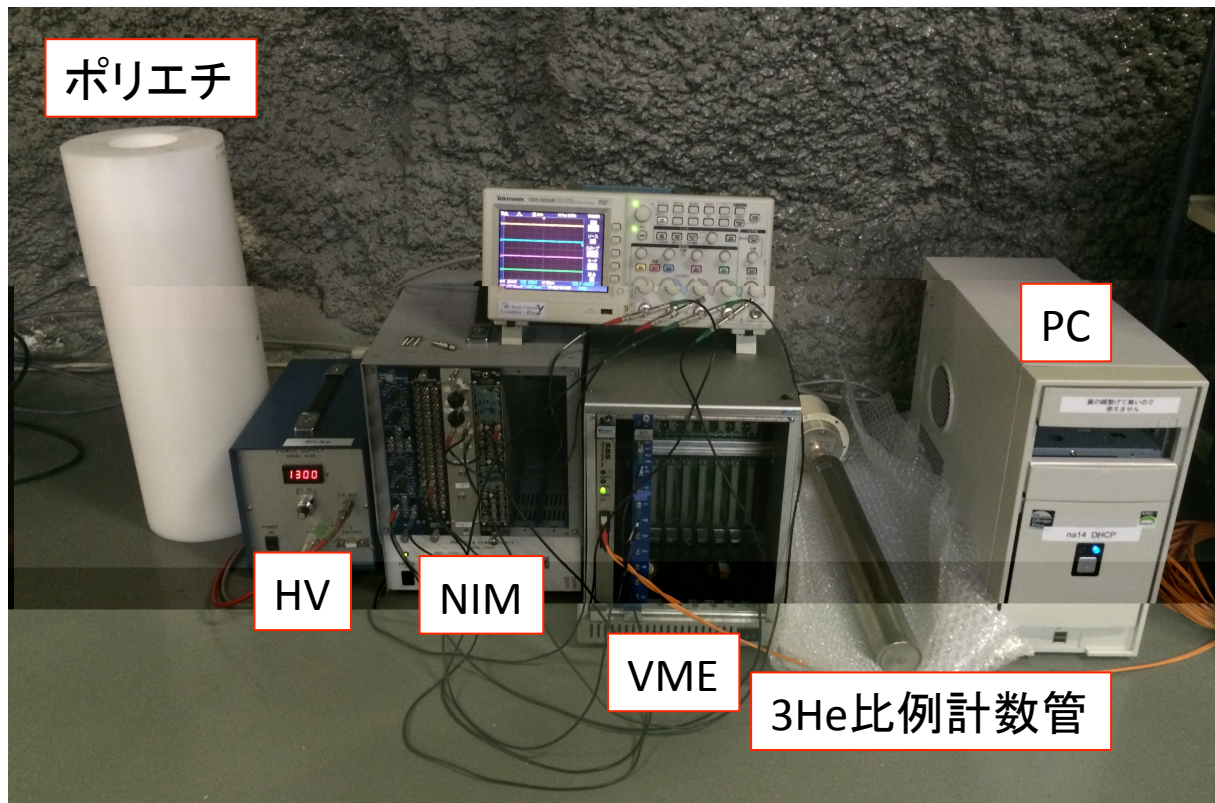
$$E_p = 573\text{keV}$$

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

$p$ と $T$ はそれぞれ $^3\text{He}$ 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ドリフトし、陽極付近の強い電場で増幅し電流として読み出す。



# セットアップ & データ収集系



## $^3\text{He}$ 比例計数管

$^3\text{He}$  counter

プリアンプ

shaper

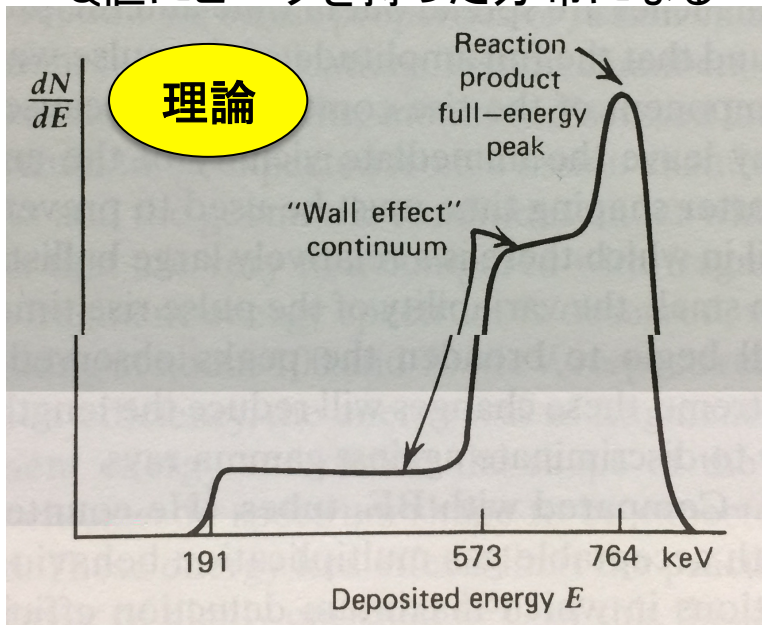
discriminator

Gate & Delay generator

PHADC (v006)

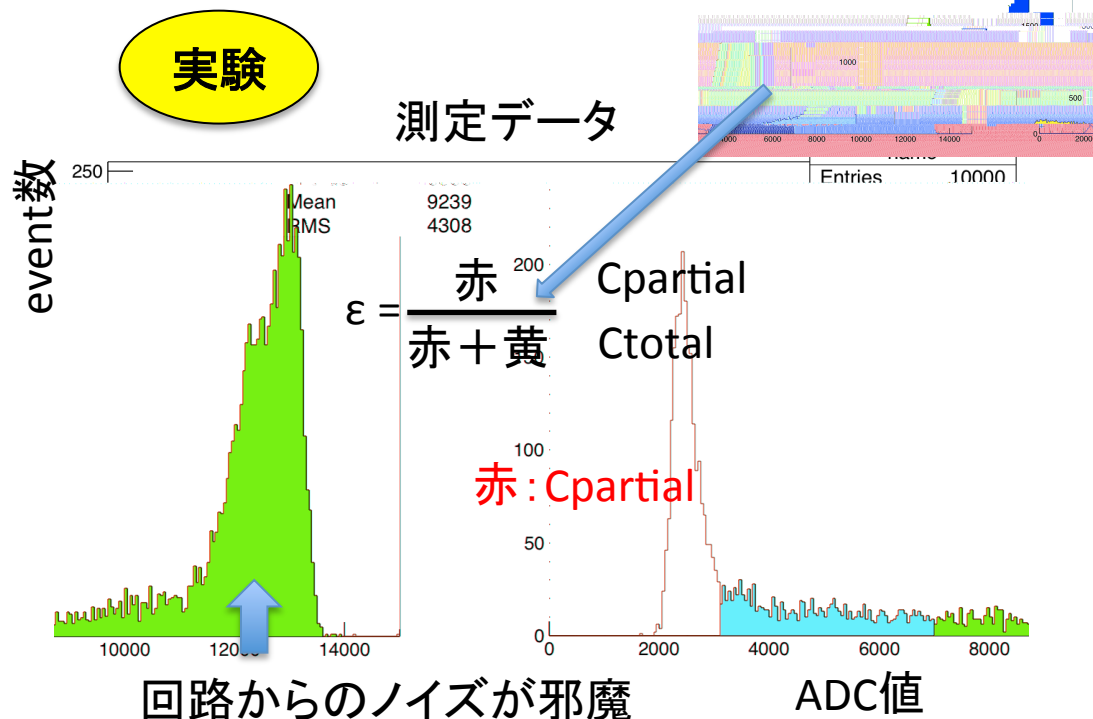
# 実際に取得されるデータ

Q値にピークを持った分布になる



Radiation Detection and Measurement

252Cfを用いて赤と黄の比を測定



回路からのノイズが邪魔

実験で得られるパラメータ

1. 時間 Livetime (sec)
2. 反応粒子数  $C_{\text{partial}}$
3. 比  $\epsilon$

# 得られたパラメータ

	熱中性子 (ポリエチシールド無し)	熱以外の中性子 (ポリエチシールド有り)
地上 (神戸大)	live time 133320 sec	live time 2790060 sec
	Cpartial 14251 event	Cpartial 110617 event
	$\epsilon$ 0.87	$\epsilon$ 0.85
地下 (神岡LAB-B)	live time 1363200 sec	live time 1402392 sec
	Cpartial 467 event	Cpartial 148 event
	$\epsilon$ 0.87	$\epsilon$ 0.88

地上に比べて地下ではレートが低減していることを確認

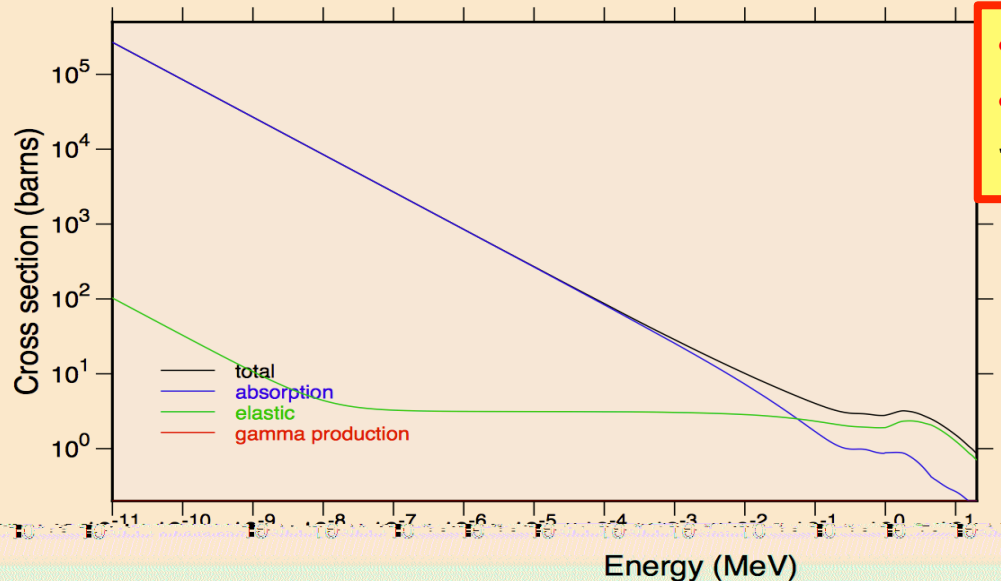
rate	熱中性子	熱以外の中性子
地上(神戸大)	$1.23 \times 10^{-1}$ event/sec	$4.66 \times 10^{-2}$ event/sec
地下(神岡LAB-B)	$3.94 \times 10^{-4}$ event/sec	$1.20 \times 10^{-4}$ event/sec

約3/100

約1/400

# $^3\text{He}$ と中性子の反応数とFLUXの関係

JENDL-3.3 HE-3  
Principal cross sections



- 断面積のエネルギー依存性
  - 中性子スペクトルが複雑
- であり、手計算でfluxに焼き直すことが困難



シミュレーションソフトを用いて  
**反応数  $\propto$  flux**  
の関係を導き、焼き直す

ただ。。。。

中性子の熱化の過程は再現が非常に難しい

複数のシミュレーションソフトを用いて系統誤差を見積もる  
今回はGeant4とPHITSを用いて系統誤差を見積もろうと考えた



# 解析

Geant4とPHITSそれぞれを用いてfluxを換算する

## 手法

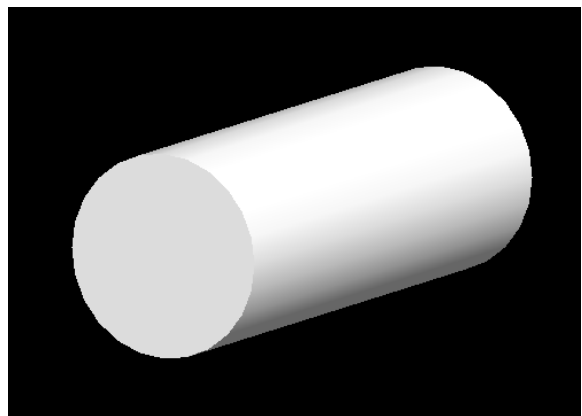
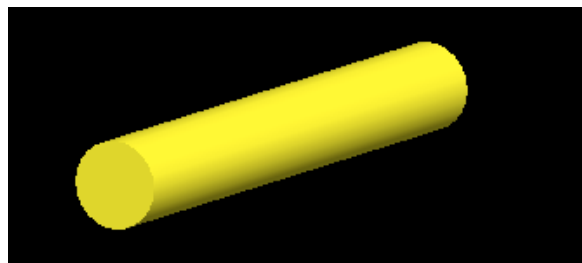
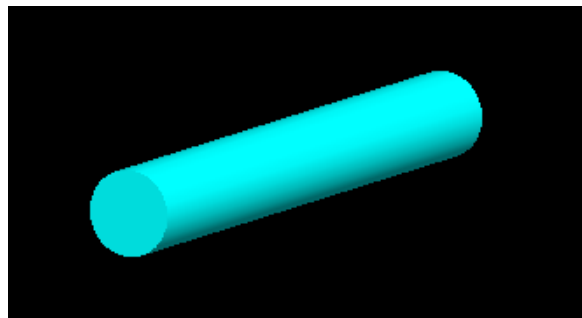
- ① 検出器のジオメトリを組む
- ② 中性子エネルギースペクトルを仮定
- ③ 全方向から等方的入射するように発生させる
- ④ 反応数とfluxの比例定数算出
- ⑤ 中性子フラックスを算出

シミュレーションで得られるパラメータ

1. 反応数  $N_0$
2. 入射中性子 flux ( $n \text{ cm}^{-2}$ )

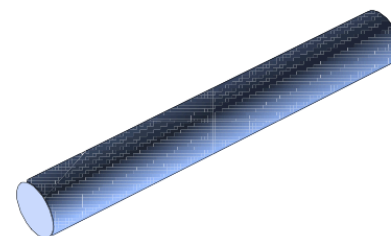
# ジオメトリ

## Geant4

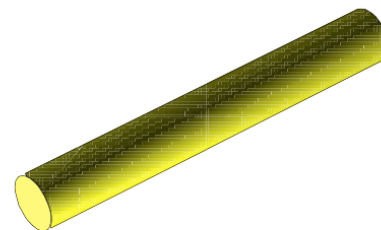


## PHITS

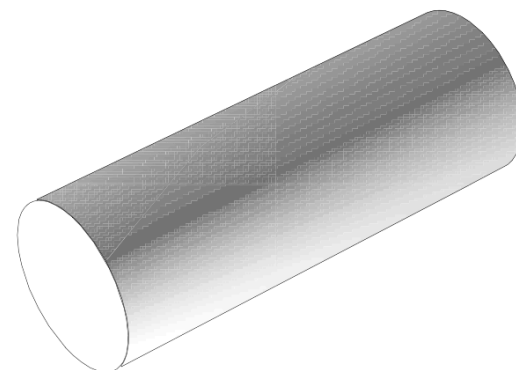
3He



SUS

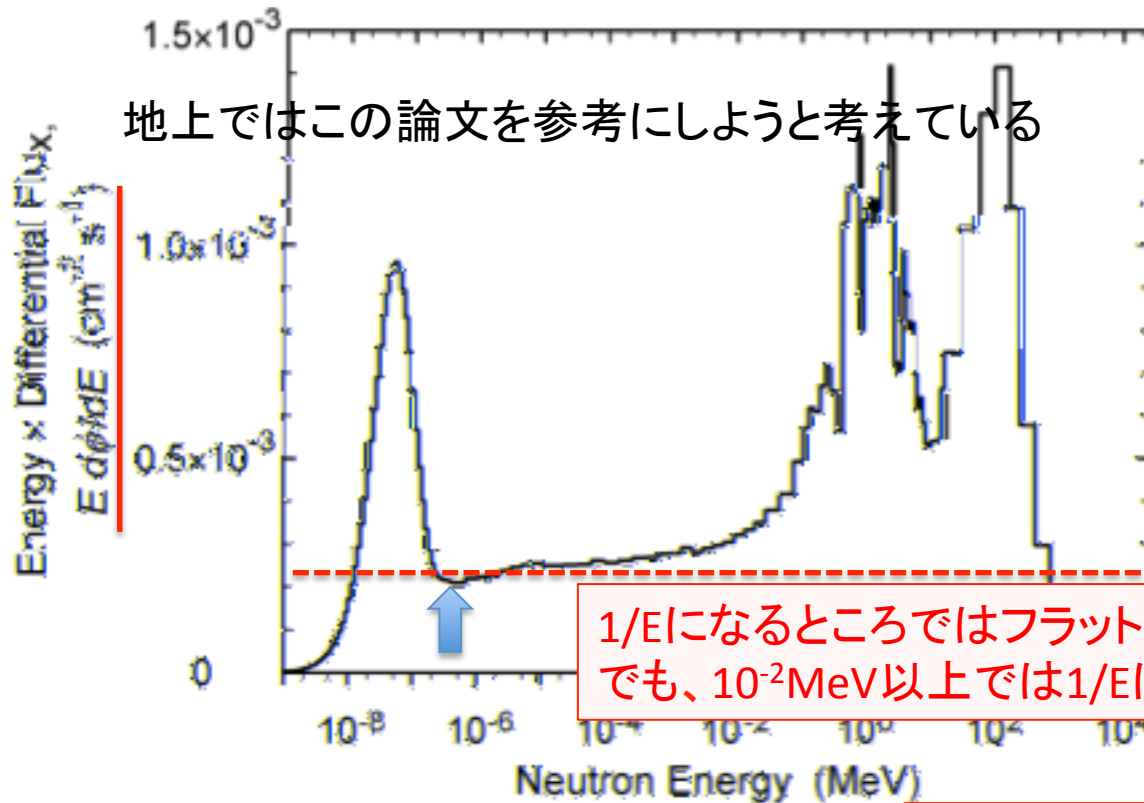


Polyethy



## Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground

M. S. Gordon, P. Goldhagen, K. P. Radtke, T. H. Zabel, H. H. K. Tsang, J. M. Clem, and B. Pooley



地上ではこの論文を参考にしようと考えている

1/Eになるところではフラットになる  
でも、 $10^{-2}$  MeV以上では1/Eにはならなさそう(地上)

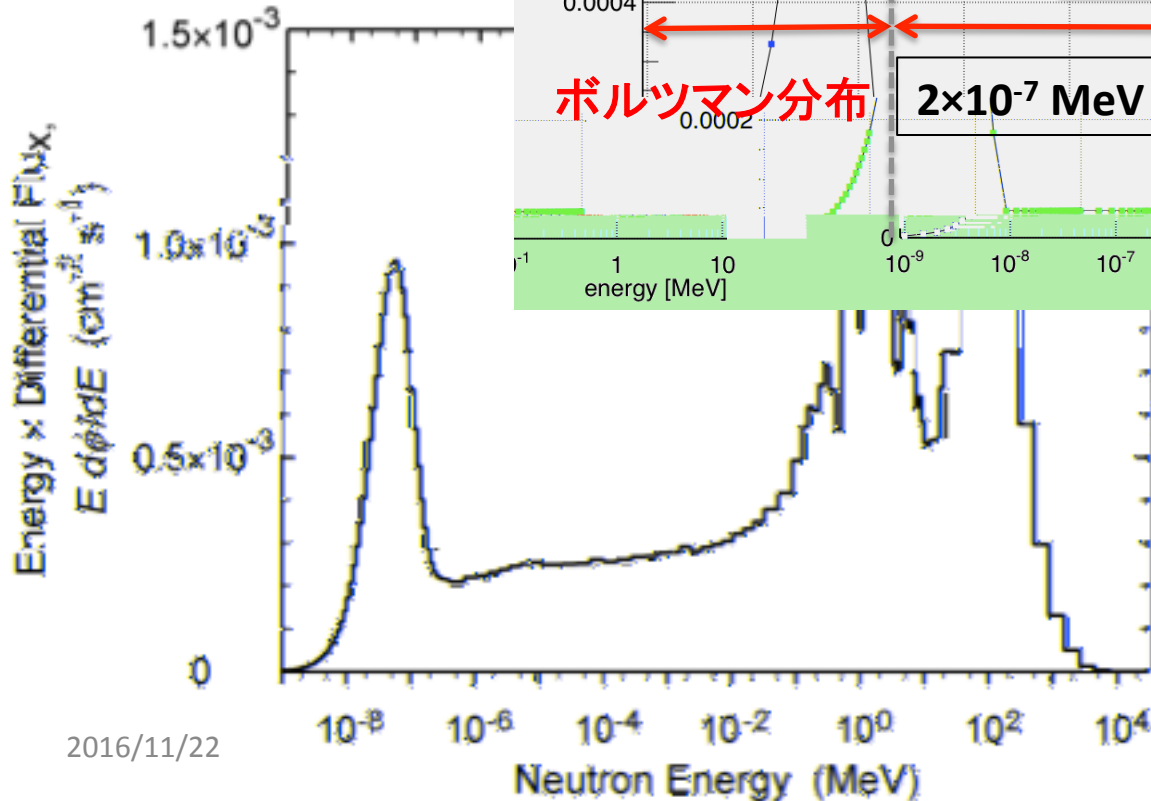
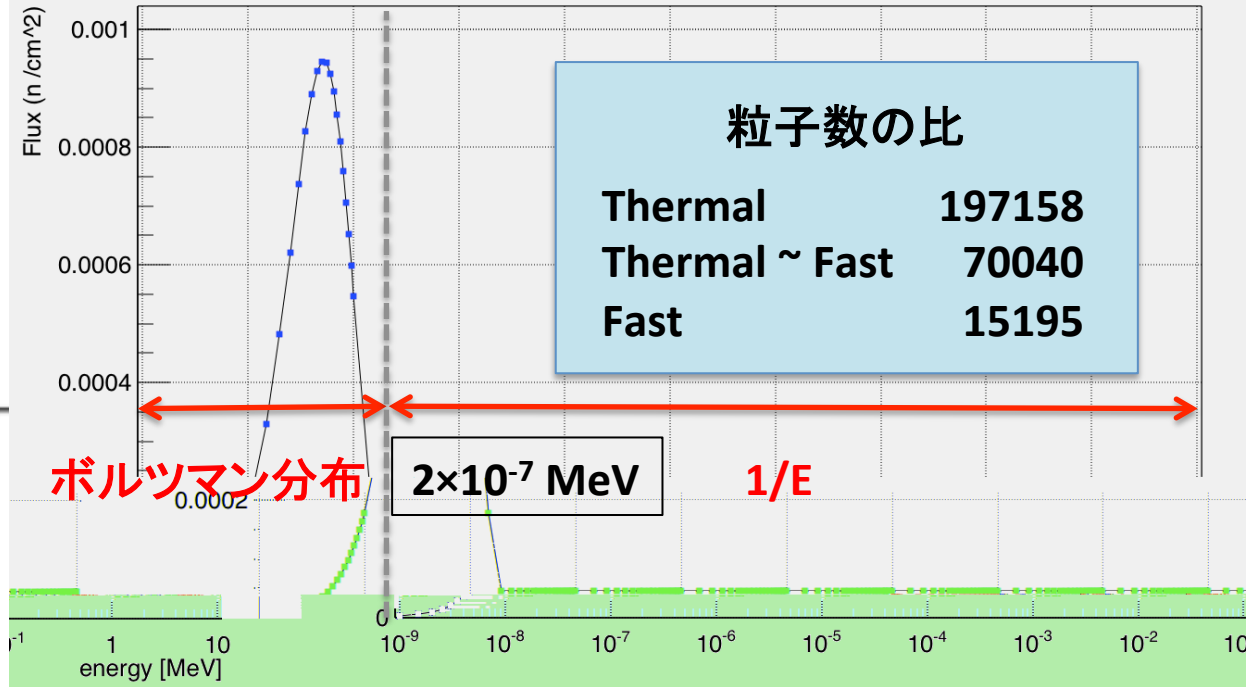
Fig. 4. Neutron spectrum measured on the roof of the I Research Center in Yorktown Heights, NY

地上と地下では  
仮定するスペクトルを変えるべき  
(神戸大のミーティングで指摘)

# 仮定したエネルギースペクトル

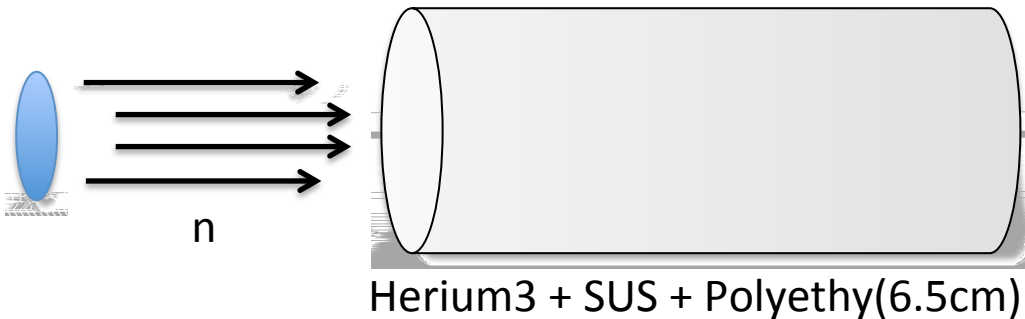
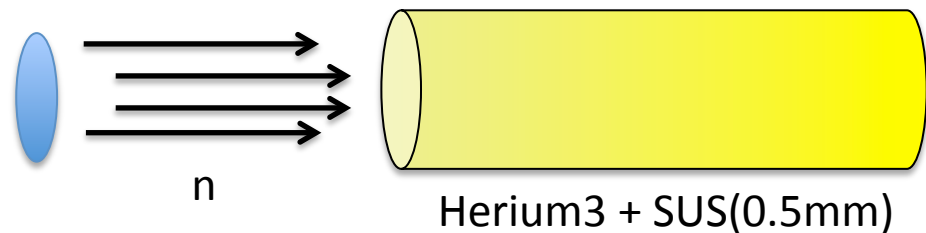
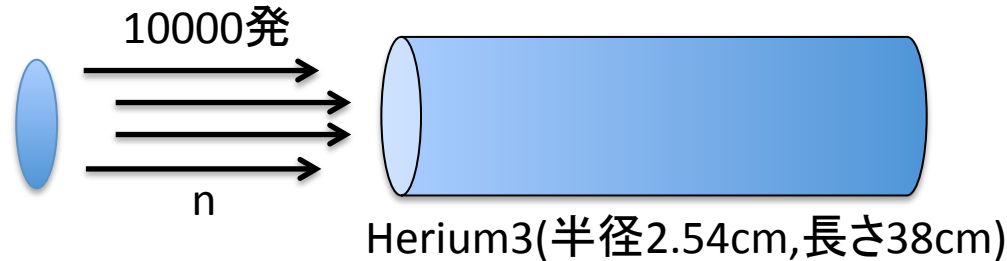
Neutron Energy Spectrum

X軸をLog表示 →



# 問題(秋学会)

スペクトルは先ほどのもの



	Geant4	PHITS
データベース	NeutronHP G4NDL3.13	JENDL-4.0

	Geant4	PHITS
3Heへの入射	10000	10000
3Heとの反応	7519	8117

	Geant4	PHITS
3Heへの入射	9686	1476
3Heとの反応	6828	16

	Geant4	PHITS
3Heへの入射	888	415
3Heとの反応	376	1

PHITSでは遮蔽され過ぎ?

## 考えられる原因

- ① ジオメトリのミス
- ② Materialの定義ミス
- ③ データベースの違い

# PHITSに組み込まれた物理モデル

	中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	重イオン	μ粒子	電子・ 陽電子	光子
高エネルギー	1 TeV		1 TeV/n	1 TeV	EGS5	EGS5
	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM		量子分子 動力学模型 JQMD	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD	or	or
	核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM		JQMD			光 核反応 JAM/ JQMD
低エネルギー	20 MeV		GEM	200 MeV	EEDL / ITS3.0 / EPDL97 (~10GeV)	JENDL-4.0 / EPDL97 (~100GeV)
	核データ ライブラリ JENDL-4.0 10 <sup>-5</sup> eV				1 keV	JENDL + JENDL 2 MeV

①このデフォルトではこのエネルギー領域がモデル計算されるようになっていた

②dmax = 20MeV  
file7 = ~/phits285/data/xsdir.jnd  
で断面積ライブラリを使うように変更

→ イベントジェネレータモード:

核反応による2次粒子を特定可能!

③低エネルギー中性子からの生成物質を出力させるため  
emode = 1  
とした

範囲\*

PHITSに組



# 結果と比較

大谷さんによる測定

単位 (n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

場所	熱中性子	熱以外の中性子
地上(本郷キャンパス)	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-2}$
神岡鉱山内	$1.4 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$

南野さんによる測定

場所	熱中性子	熱以外の中性子
神岡鉱山内	$8.26 (\pm 0.58) \times 10^{-6}$	$1.15 (\pm 0.12) \times 10^{-5}$

統計

南野さん修論(2004)より引用

今回の測定

	熱中性子		熱以外の中性子	
	地上	地下	地上	地下
Geant4	$2.69 (\pm 0.08 \begin{smallmatrix} +0.03 \\ -0.82 \end{smallmatrix}) \times 10^{-3}$	$8.62 (\pm 0.47 \begin{smallmatrix} +0.18 \\ -2.62 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$	$7.14 (\pm 0.33 \begin{smallmatrix} +7.66 \\ -6.50 \end{smallmatrix}) \times 10^{-4}$	$1.84 (\pm 0.17 \begin{smallmatrix} +1.98 \\ -1.68 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$
PHITS	$7.91 (\pm 0.25 \begin{smallmatrix} +0.50 \\ -1.99 \end{smallmatrix}) \times 10^{-4}$	$2.54 (\pm 0.24 \begin{smallmatrix} +0.16 \\ -0.64 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$	$5.42 (\pm 0.14 \begin{smallmatrix} +4.24 \\ -1.28 \end{smallmatrix}) \times 10^{-4}$	$1.39 (\pm 0.13 \begin{smallmatrix} +1.09 \\ -0.32 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$

約3倍

約1.3倍

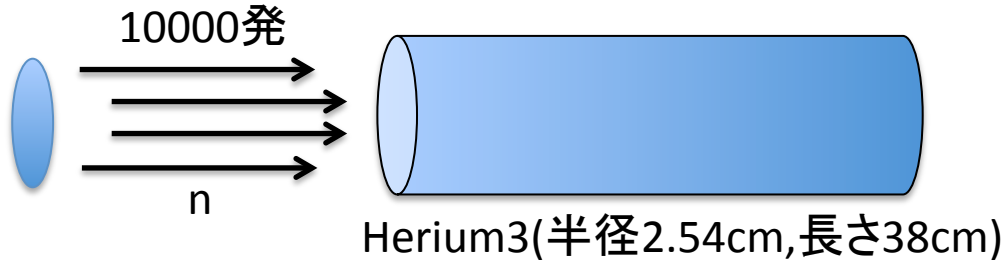
誤差: 統計, 系統 (Gain5%の変動、1/Eとの接続による変動)





# 新たな問題

エネルギーを変えて入射



Protonでトリガー

2e-7で接続したスペクトルを入れたとき

	Geant4	PHITS
3Heへの入射	10000	10000
3Heとの反応	7519 7130	8104

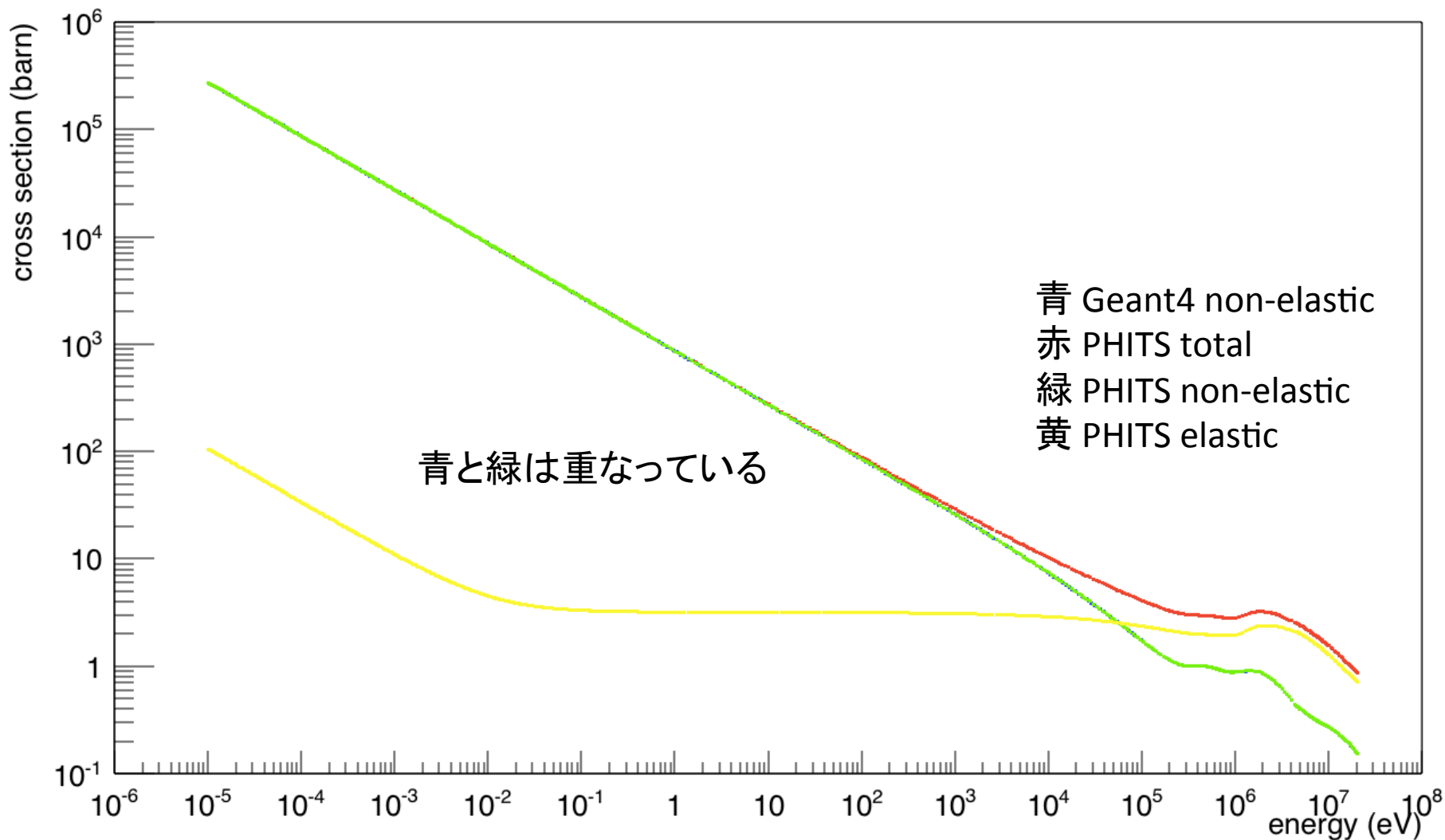
	Geant4	PHITS
データベース	NeutronHP G4NDL3.13	JENDL-4.0

エネルギー	Geant4	PHITS
10MeV	0	0
1MeV	8	26
1e-1MeV	17	166
1e-2MeV	81	670
1e-3MeV	268	2220
1e-4MeV	824	5647
1e-5MeV	2466	9249
1e-6MeV	5875	9981
1e-7MeV	9392	9999
1e-8MeV	9996	9999
1e-9MeV	9998	9999

**PHITSの方が全体的に反応数が多い**

# Geant4とPHITSで使われている断面積を書き出した

## G4NDL3.13 & JENDL4.0



# まとめ

- 現在、Geant4とPHITSとで結果が一致していない
- consistencyが取ればsystematicエラーを見積もる

Back up

# ラズパイでのデータ取得

4.7kΩに変更

per5

