

^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 粒子物理学研究室
158s113s 帝釋 稜介

- 1) NEWAGE実験**
- 2) 神岡地下における中性子フラックスの測定**
- 3) まとめ**

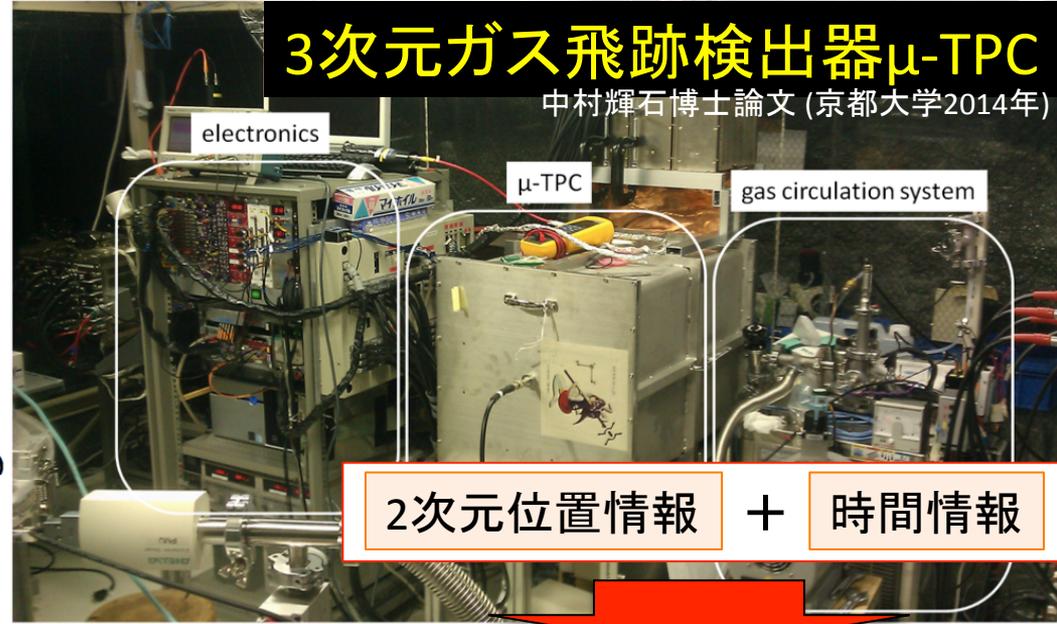
1. NEWAGE実験

方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験

NEWAGE(NEw general WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

神岡地下実験施設LAB-Bで稼働中

- CF_4 ガス 0.1気圧
- 有感領域 $30.72 \times 30.72 \times 41 \text{ cm}^3$
- 2次元画像飛跡検出器 μ -PIC



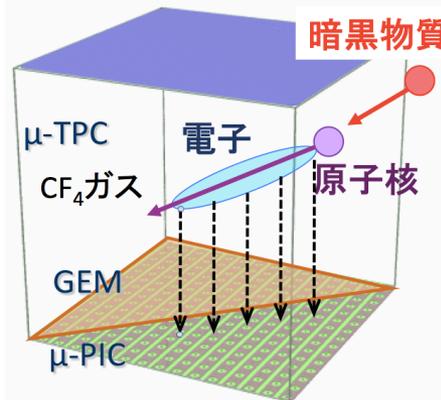
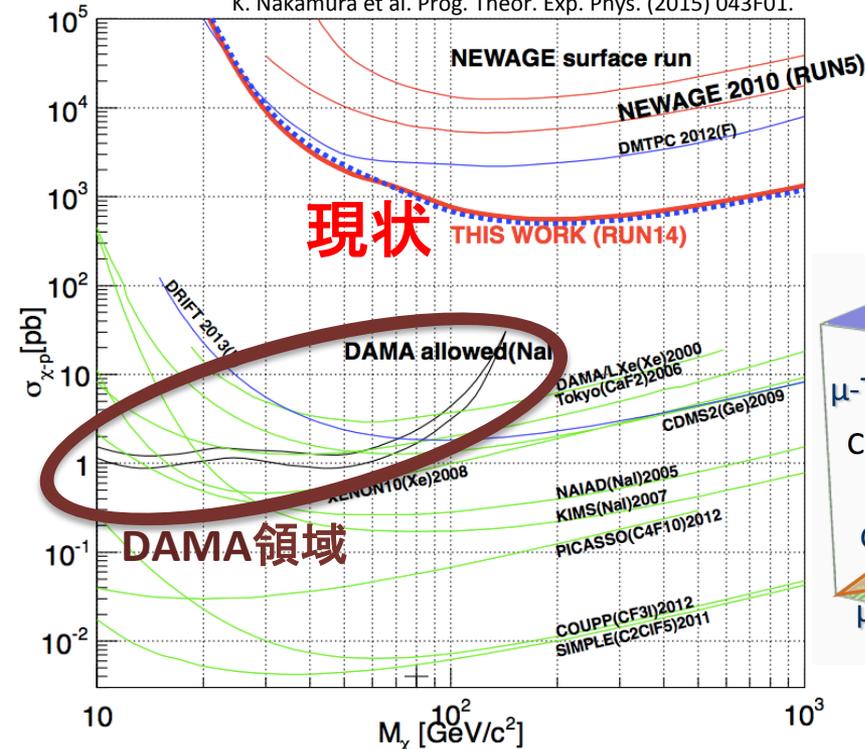
3次元ガス飛跡検出器 μ -TPC

中村輝石博士論文(京都大学2014年)

2次元位置情報 + 時間情報

SD 90% C.L. upper limits and allowed region

K. Nakamura et al. Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043F01.



3次元飛跡検出

NEWAGEの強み

方向感度

従来の暗黒物質探索実験より
決定的な証拠を与えることができる

2. 神岡地下における中性子フラックスの測定

- 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



- 中性子のフラックスの先行研究

フラックス ϕ	熱中性子	熱以外の中性子
南野氏の測定(2004年)		
神岡地下鉱山内 (2700m.w.e)	$8.26(\pm 0.58) \times 10^{-6}$	$1.15(\pm 0.12) \times 10^{-5}$
神岡鉱山内遮蔽体中	$<4.80 \times 10^{-7}$ (95%C.L.)	$<3.42 \times 10^{-6}$ (95.45%C.L.)
大谷氏の測定(1994年)		
地上 (本郷キャンパス)	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}
神岡鉱山内 (2700m.w.e)	1.4×10^{-5}	2.8×10^{-5}

南野彰宏修士論文 (東京大学2004年)

- ^3He 比例計数管で測定

エネルギースペクトル情報も得る

熱中性子(0.5eV以下)を主にターゲットにする

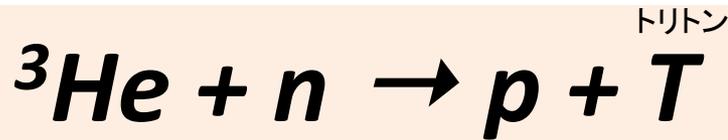
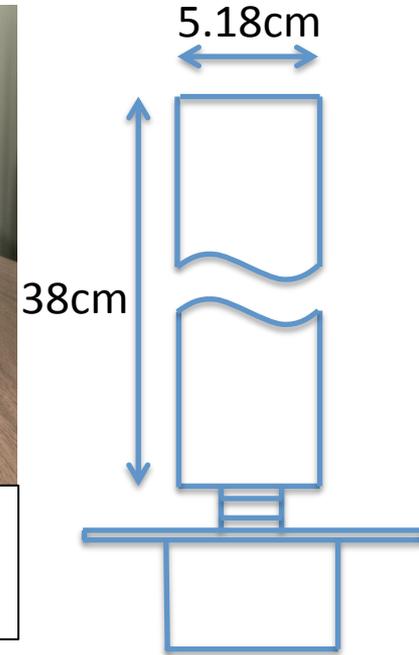
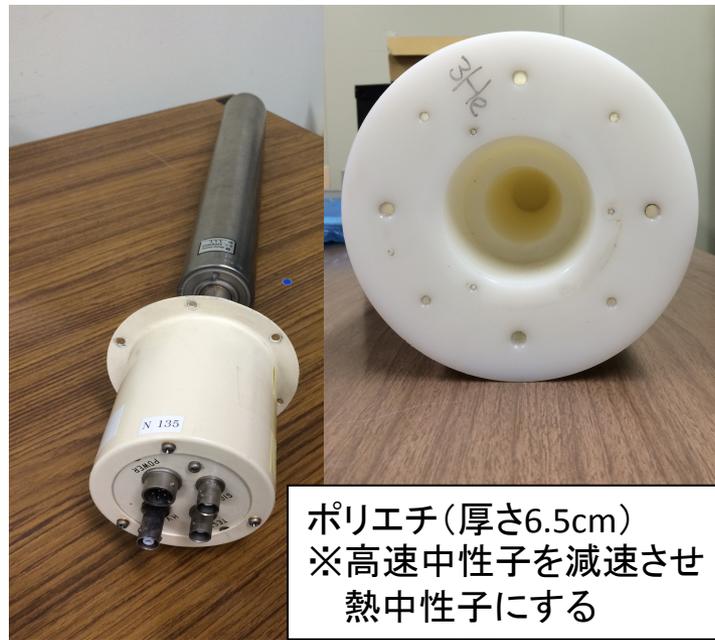
高速中性子(500keV以上)も減速材(ポリエチレン)を用いればターゲットに出来る

本発表では地下実験の結果のみ

^3He 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 ^3He
- 気圧 10atm
- 動作電圧 1300V



測定原理

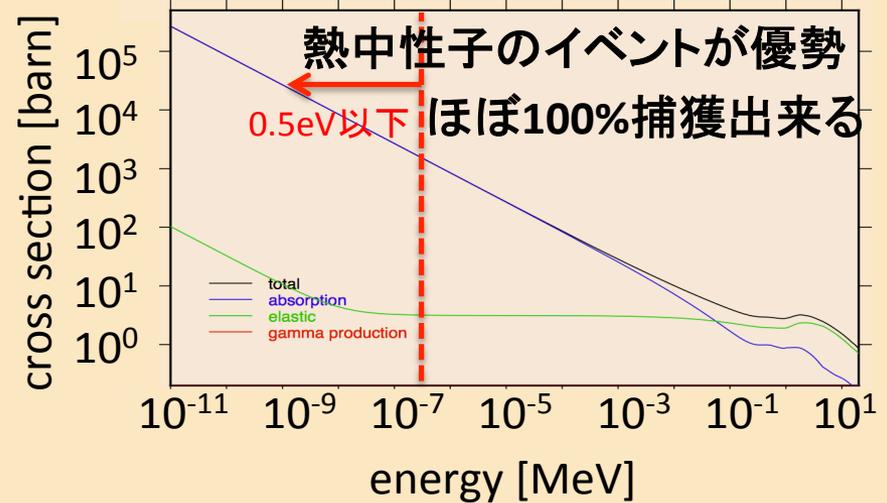
上の反応のQ値(764keV)が運動量保存から
 p と T に分かれる

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

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

p と T はそれぞれ ^3He ガスをイオン化しながら運動
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。

中性子と ^3He の反応断面積(JENDL-4.0)



セットアップ & データ収集系

^3He 比例計数管

^3He counter

プリアンプ

discriminator

Gate & Delay generator

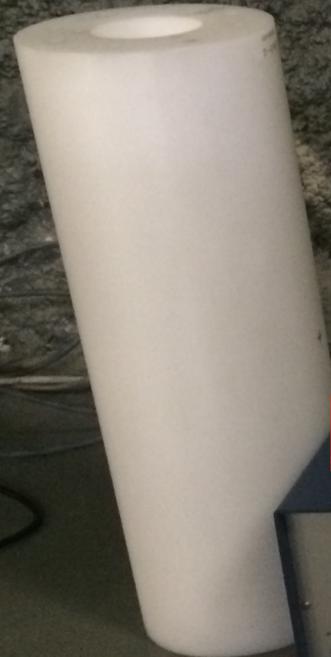
shaper

ADC

PHADC (v006)

GATE

ポリエチ



HV

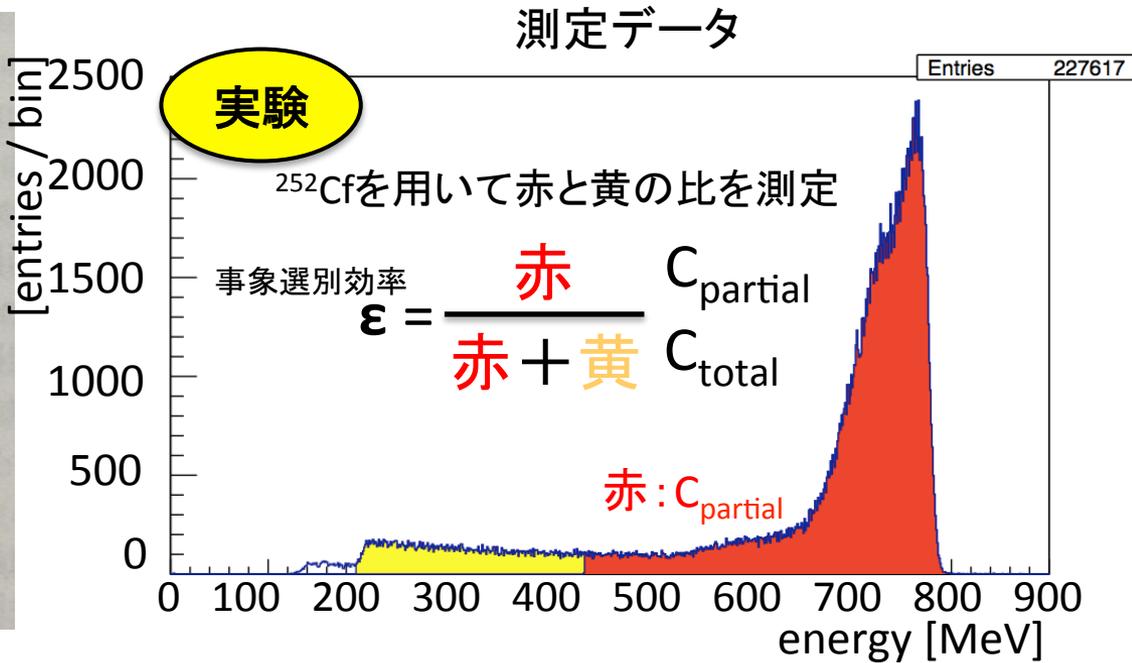
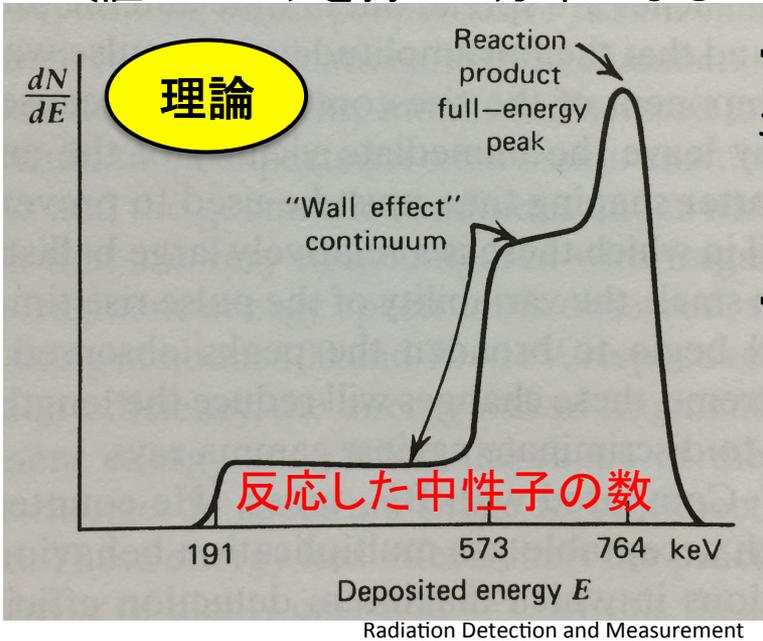
NIM

VME

PC

事象選別効率の見積もり

Q値にピークを持った分布になる



実験で得られるパラメータ

1. 時間 T_{live} [days]
2. 反応粒子数 C_{partial} [counts]
3. 事象選別効率 ϵ

単位時間当たりの反応数

$$R = \frac{C_{\text{partial}}}{T_{\text{live}} \times \epsilon}$$

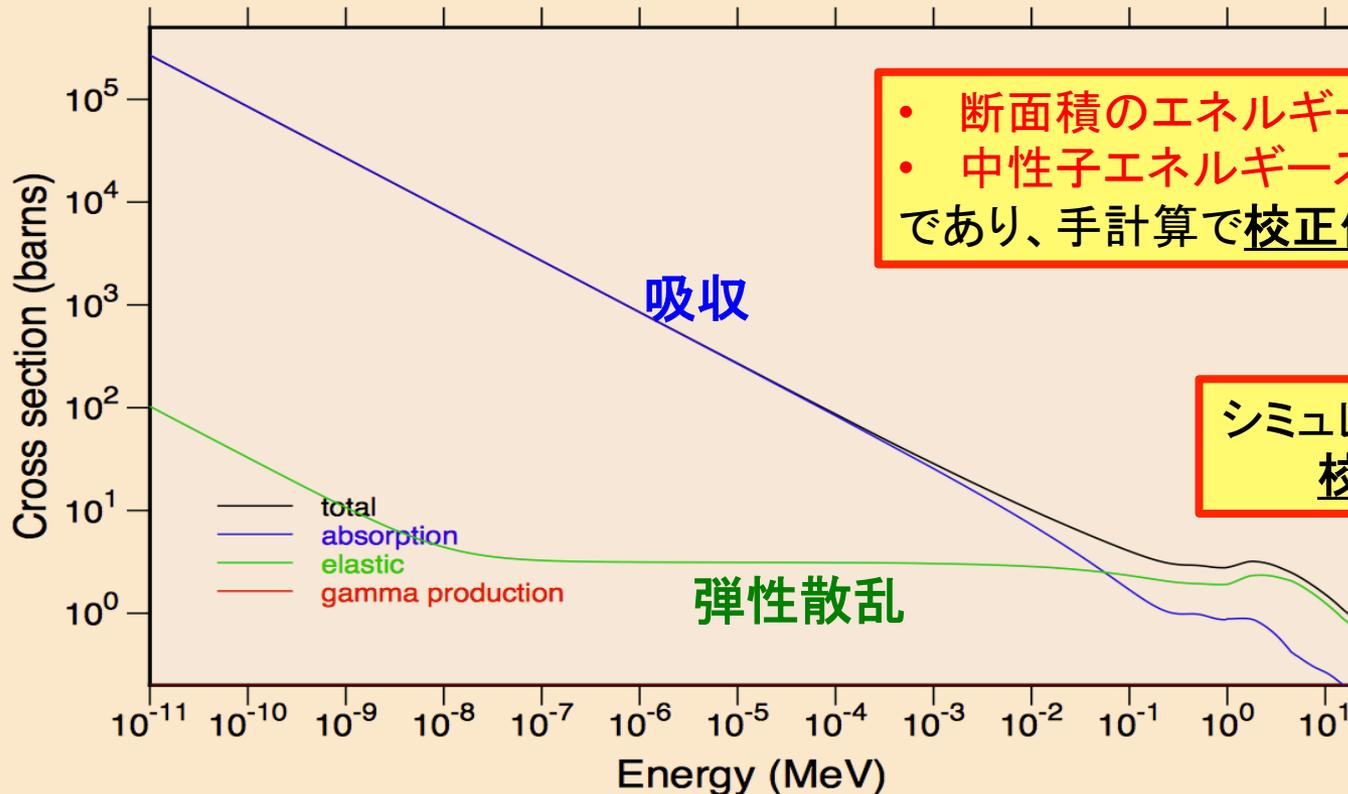
校正係数の見積もり

$$\Phi_m = \text{校正係数 } \alpha \times \text{単位時間当たりの反応数 } R$$

総フラックス

実験から得られる

^3He と中性子との反応断面積 JENDL-4.0



- 断面積のエネルギー依存性
- 中性子エネルギースペクトルが複雑であり、手計算で校正係数を見積もることが困難



シミュレーションソフトを用いて
校正係数を見積もる

シミュレーション

Geant4

- 放射線の粒子反応をシミュレーションするために開発
- 高エネルギー物理学の分野で幅広く用いられている

PHITS

- 多様な放射線の挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コード
- 加速器遮蔽設計、医学物理計算などの幅広い分野で利用されている



- 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 中性子の方向分布(等方入射)
- ④ 反応数と Φ の校正係数算出

重要

エネルギースペクトルの仮定

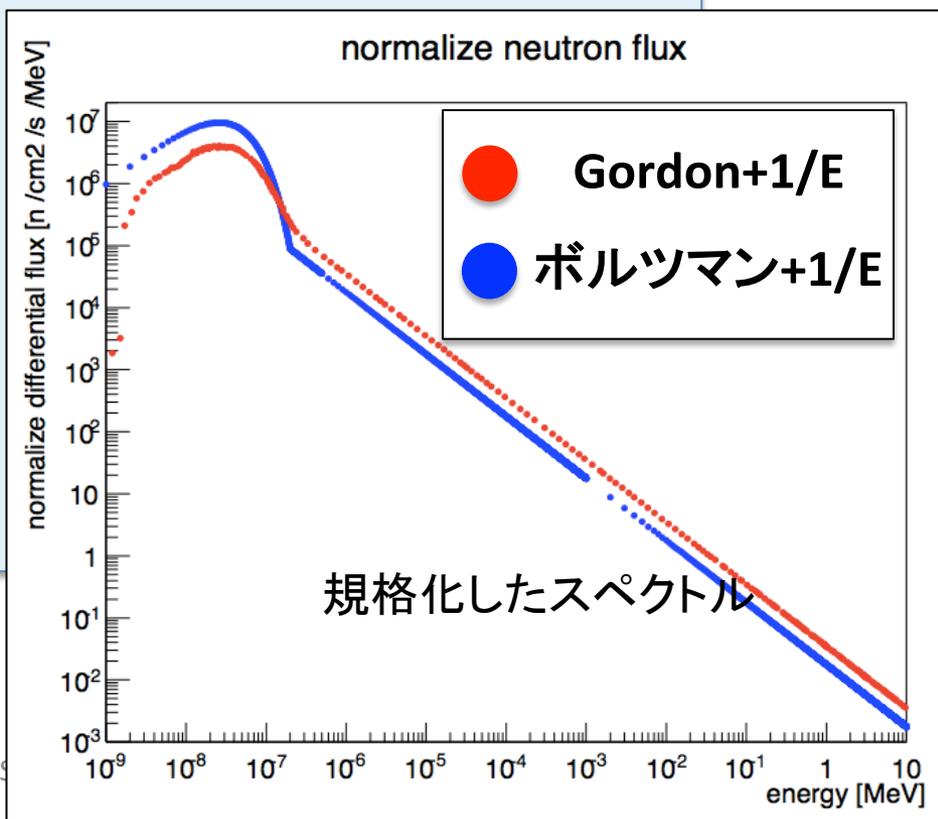
地下

- ✓ 低エネルギー側では**ボルツマン分布**
- ✓ 無限な減速在中に中性子線源が一様分布、および減速在中での吸収は少ない場合は**A/E則** (Aは定数)に従う



仮定したスペクトル

- ① 地上での先行研究結果を参考にした
Gordon+1/E
- ② 理想的な場合を仮定した
ボルツマン分布+1/E



シミュレーション結果

- ジオメトリ
- スペクトル

を変化させシミュレーションを行った

$\alpha [(n \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}) / (n \text{ s}^{-1})]$		減速材なし	減速材あり
Geant4	Gordon+1/E	1.52×10^{-2}	2.72×10^{-2}
	ボルツマン+1/E	9.32×10^{-3}	3.30×10^{-2}
PHITS	Gordon+1/E	1.55×10^{-2}	2.99×10^{-2}
	ボルツマン+1/E	9.38×10^{-3}	3.88×10^{-2}

測定結果(地下)

反応数	減速材なし	減速材あり
T_{live} [days]	15.70	15.88
C_{partial} [counts]	1748	652
ε	0.87	0.87
R [$n\ s^{-1}$]	1.47×10^{-3}	5.34×10^{-4}
シミュレーション	減速材なし	減速材あり
α [$(n\ \text{cm}^{-1}\ \text{s}^{-1})/(n\ \text{s}^{-1})$] Geant4,ボルツマン+1/E	9.32×10^{-3}	3.30×10^{-2}

総フラックス Φ_m 換算式

$$\Phi_m = \alpha \times R$$

測定結果	減速材なし	減速材あり
Φ_m [$n\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}$] Geant4,ボルツマン+1/E	1.37×10^{-5}	1.76×10^{-5}

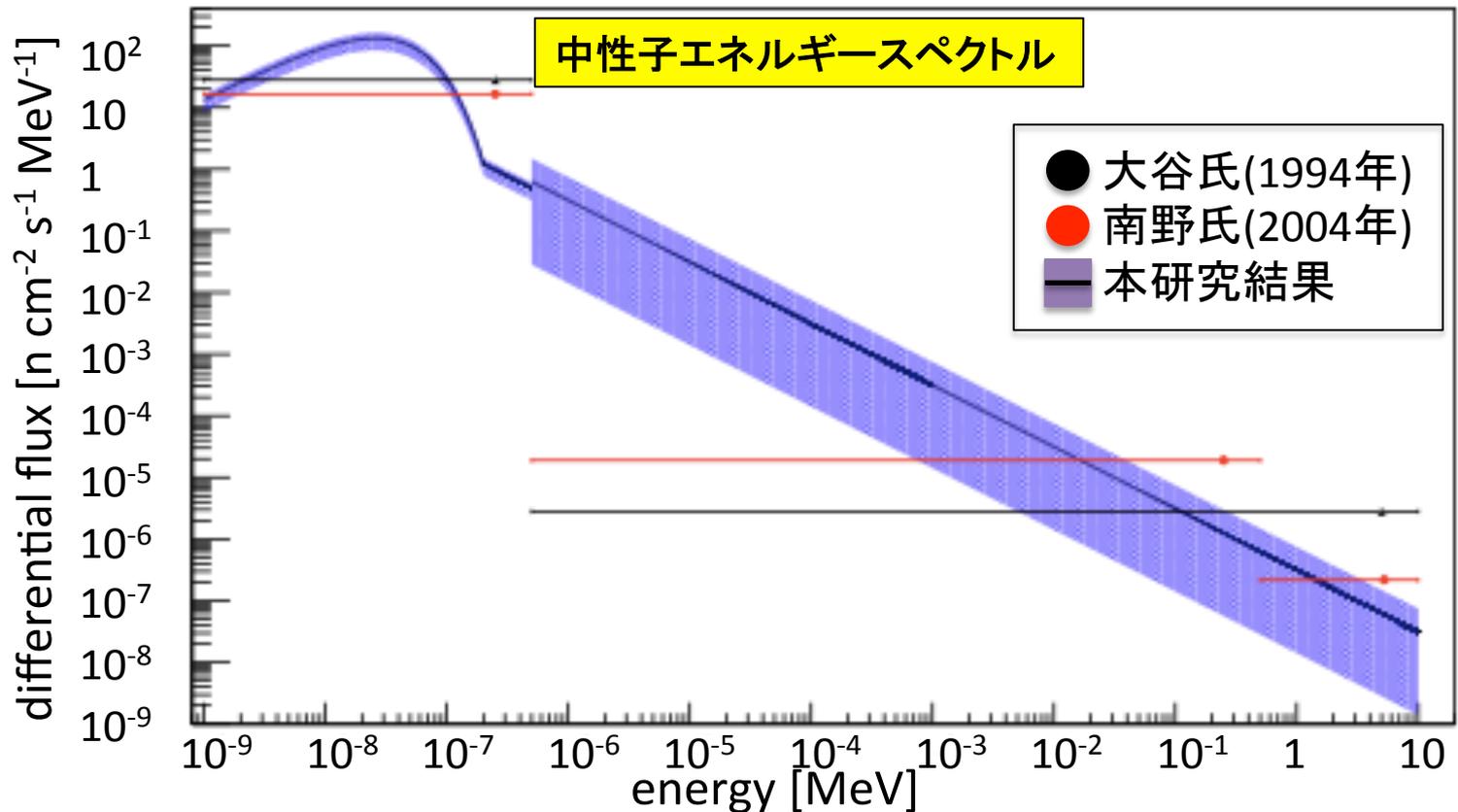
本研究結果

[n cm⁻² s⁻¹]

中性子フラックス	熱中性子	熱以外の中性子
本研究結果	$9.48 (\pm 0.23 \begin{smallmatrix} + 2.03 \\ - 3.20 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$	$5.47 (\pm 0.21 \begin{smallmatrix} + 7.30 \\ - 5.01 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$

誤差 : (第一項)統計

(第二項)系統 (Gain5%の変動、Geant4とPHITSの違い、仮定するスペクトルの違い、減速材ありとなしからの総フラックスの違い、1/Eとの接続による変動)



先行研究との比較

単位 [n cm⁻² s⁻¹]

測定	熱中性子	熱以外の中性子
大谷氏(1994年)	1.4×10^{-5}	2.8×10^{-5}
南野氏(2004年)	$8.26 (\pm 0.58) \times 10^{-6}$ 統計	$1.15 (\pm 0.12) \times 10^{-5}$ 統計
本研究結果	$9.48 (\pm 0.23 \begin{smallmatrix} + 2.03 \\ - 3.20 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$	$5.47 (\pm 0.21 \begin{smallmatrix} + 7.30 \\ - 5.01 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$

誤差：(第一項)統計

(第二項)系統 (Gain5%の変動、Geant4とPHITSの違い、仮定するスペクトルの違い、減速材ありとなしからの総フラックスの違い、1/Eとの接続による変動)

誤差の範囲で南野氏(2004年)の先行研究と一致

3.まとめ

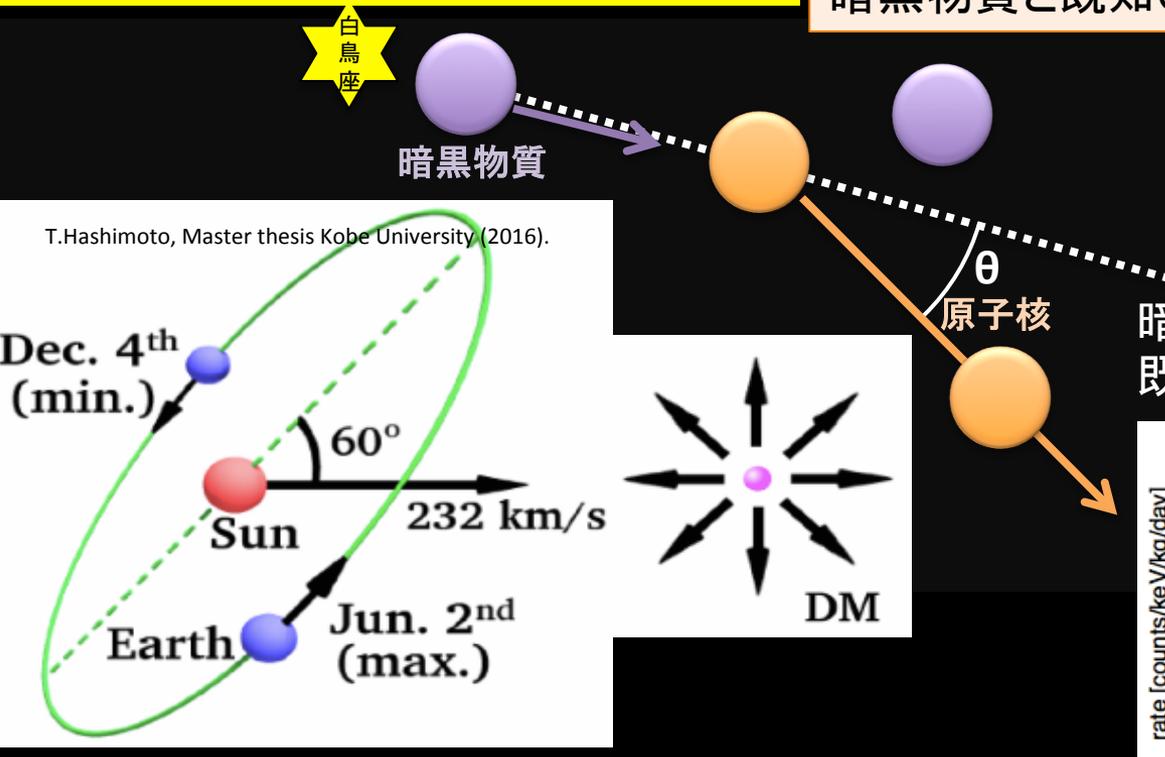
神岡地下における中性子フラックスの測定

- ^3He 比例計数管を用いて神岡地下実験室LAB-Bで測定
- 誤差の範囲内で南野氏測定結果(2004年)と一致
- 仮定するエネルギースペクトルによる影響を系統誤差に入れ評価
- 詳細な中性子エネルギースペクトルの測定には液体シンチレーターなどを用いた測定が必要であることがわかった

Back up

暗黒物質直接探索実験

太陽系は銀河系内で白鳥座方向に向かって運動
白鳥座方向から多く来るように見える

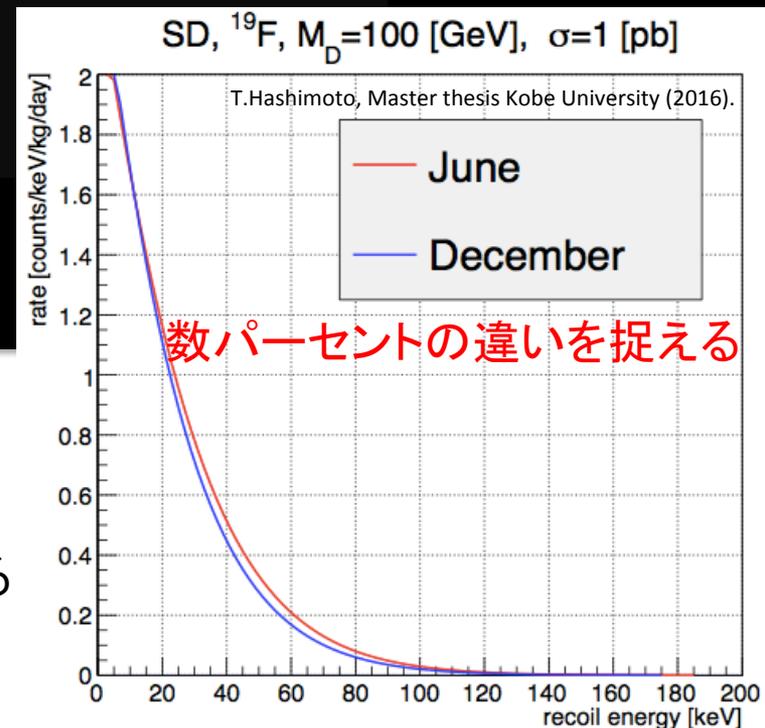


暗黒物質直接探索実験とは.....
暗黒物質と既知の物質との直接反応を捉える実験

ここでは
WIMPと原子核の弾性散乱

Weakly Interactive Massive Particle

暗黒物質と弾性散乱した
既知の物質を見る

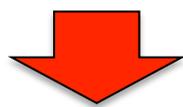
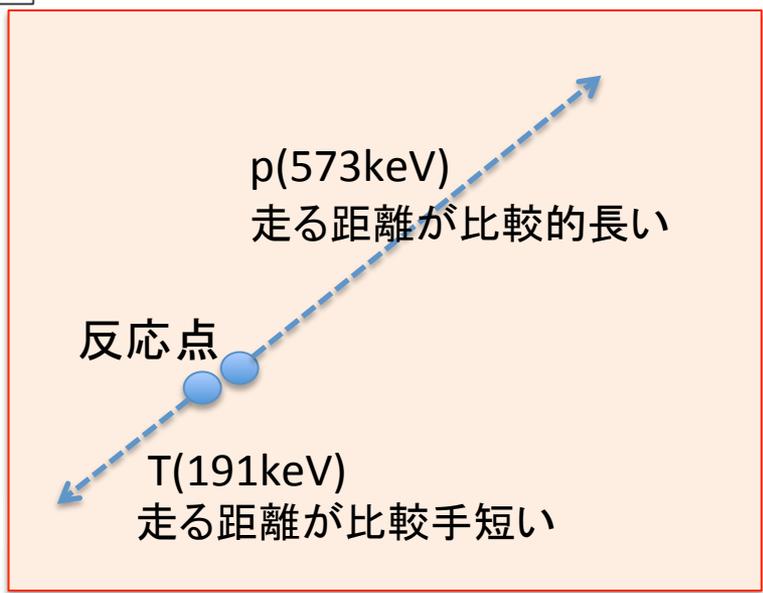
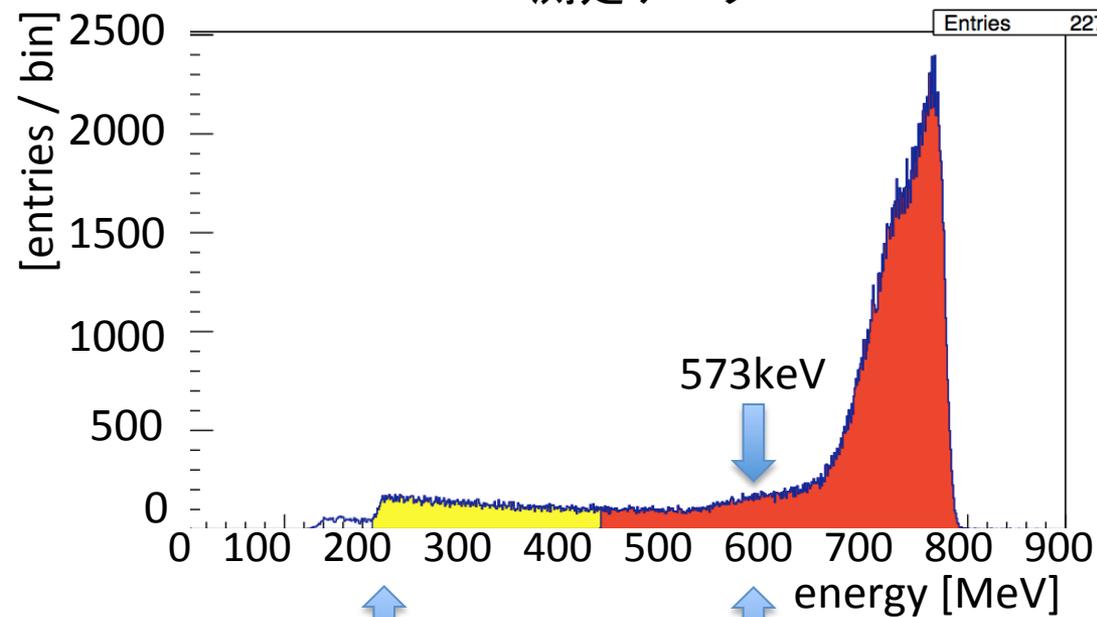


従来の暗黒物質直接探索実験

- 反跳原子核のエネルギーを測定
- 季節によるイベント数の変化(季節変動)を捉える

Wall-effectで573keVのピークが見えない理由

測定データ

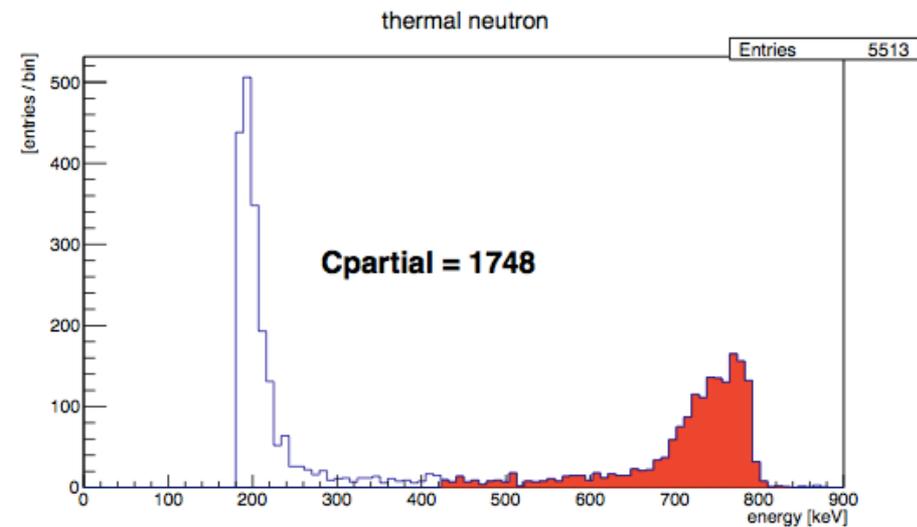


検出器が大きいとwall-effectは見えにくい

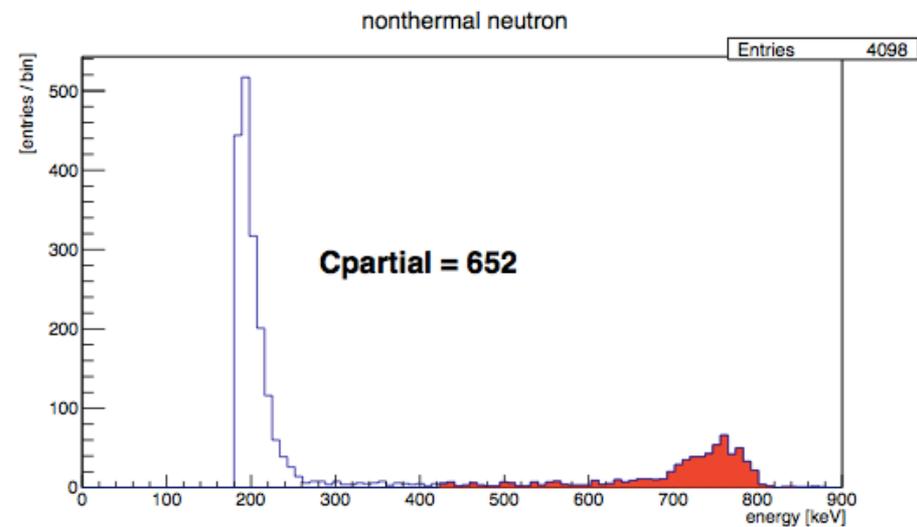
p(573keV)が検出器外に出て行く時に生成される

T(191keV)が検出器外に出て行く時に生成される

測定から得られるエネルギーヒストグラム

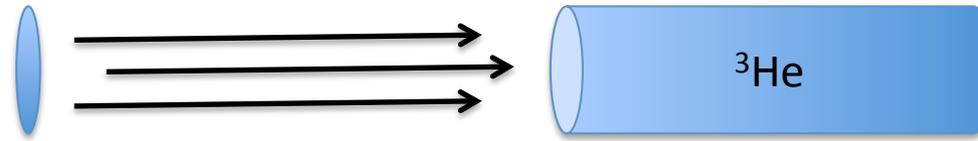


(a) 減速材無し



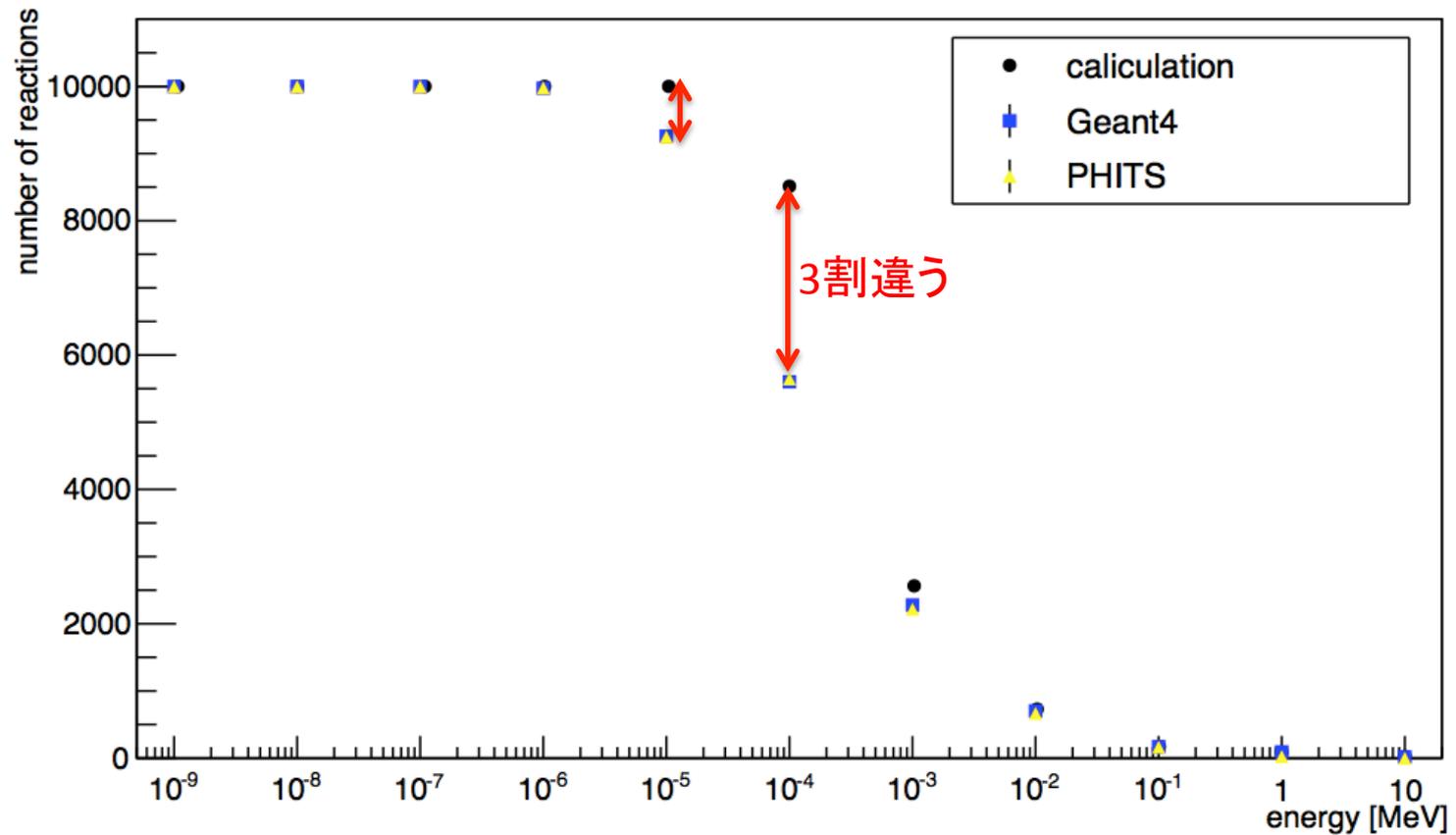
(b) 減速材あり

Geant4とPHITSの挙動確認①

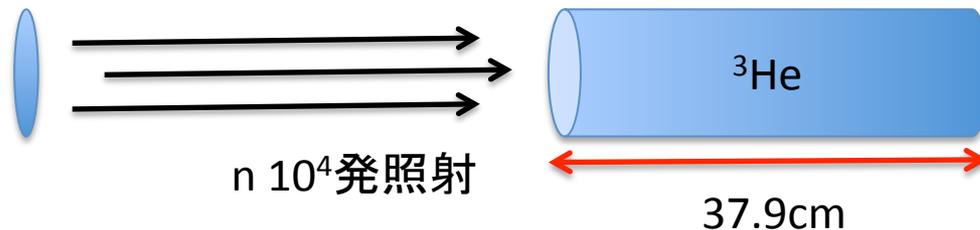


n 10^4 発照射

number of incident neutron 10000

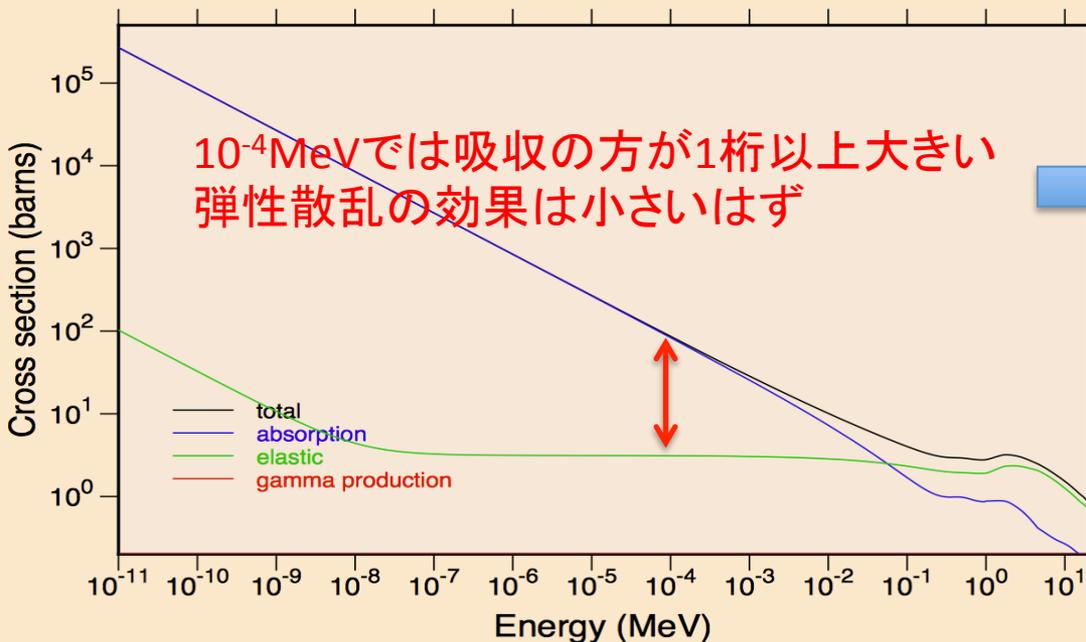


Geant4とPHITSの挙動確認②



^3He 内を通る仮定で弾性散乱している可能性

JENDL-3.3 HE-3
Principal cross sections

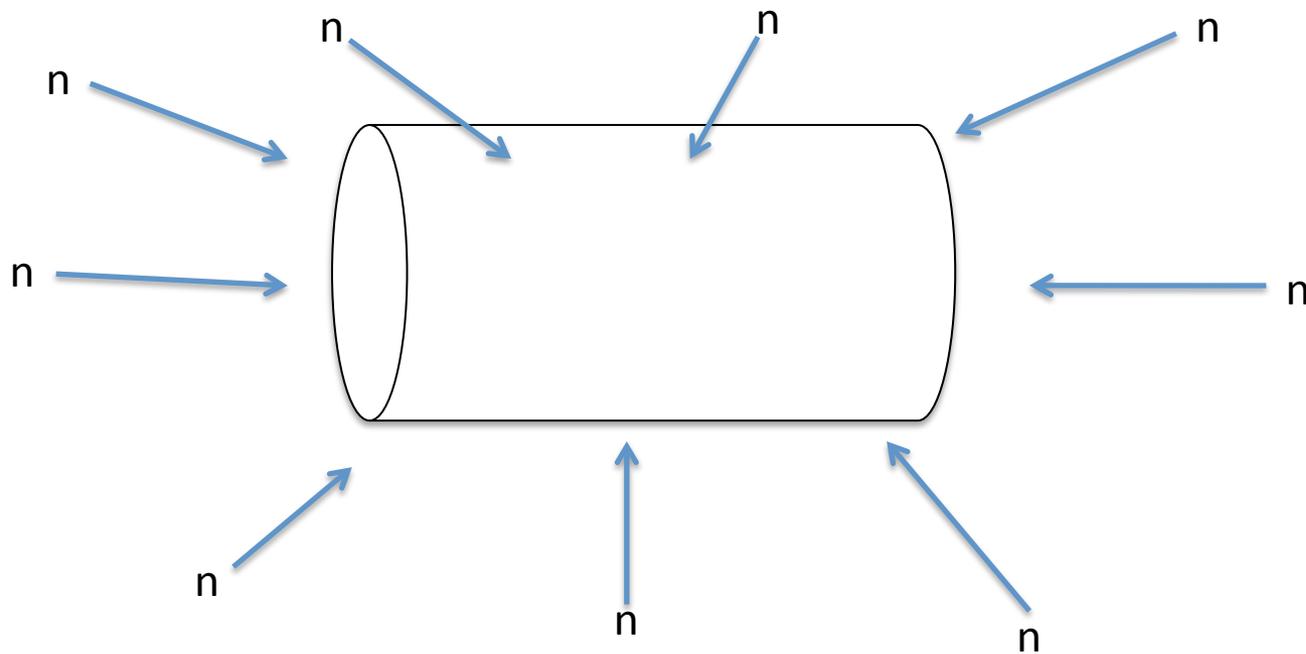


では何が原因か？
-> 現在わからない

対応策

- ① ^3He 以外の物質で反応断面積の確認を行う
- ② 長さを変えてみる
- ③ 気圧を変えてみる

本実験の応答関数①



$$\text{応答関数} = \frac{\text{反応した時の入射中性子}}{\text{入射中性子全体}}$$

本実験の応答関数②

Evaluation and test of the response matrix of a multisphere neutron spectrometer in a wide energy range Part 11. Simulation

A. Aroua

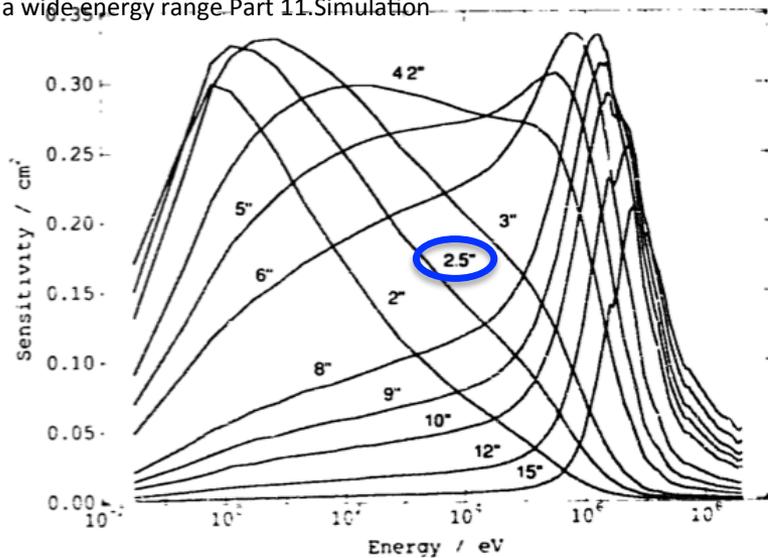
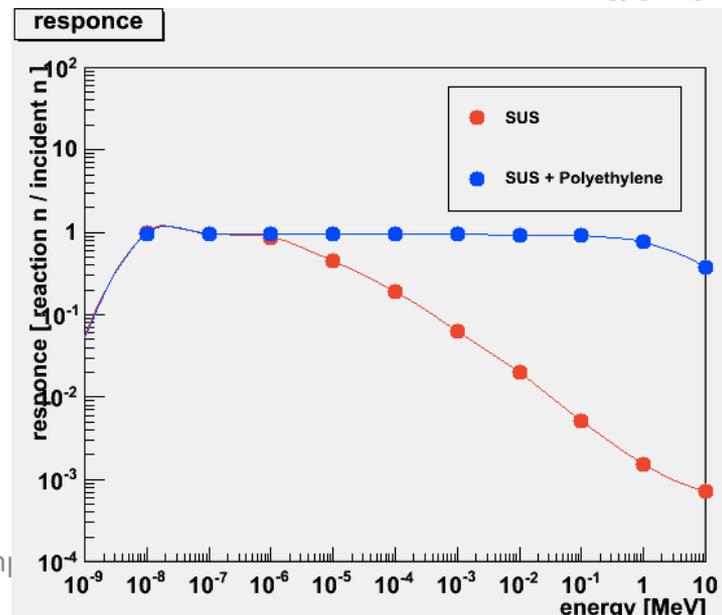
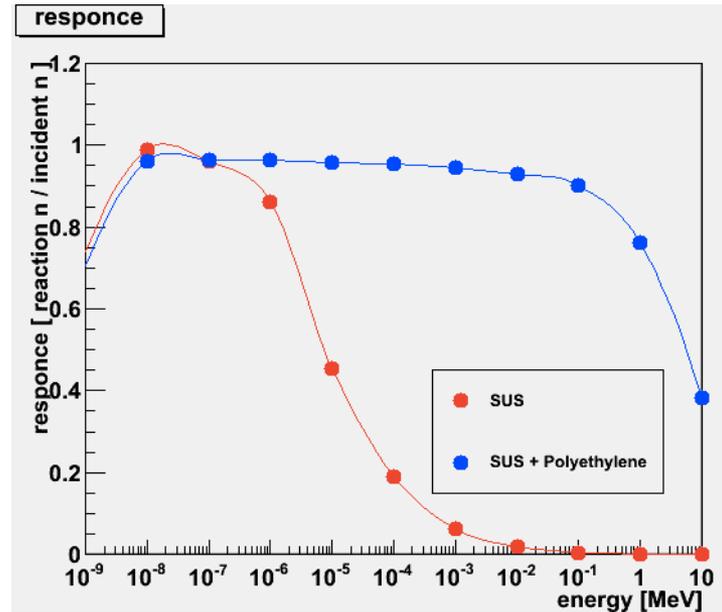
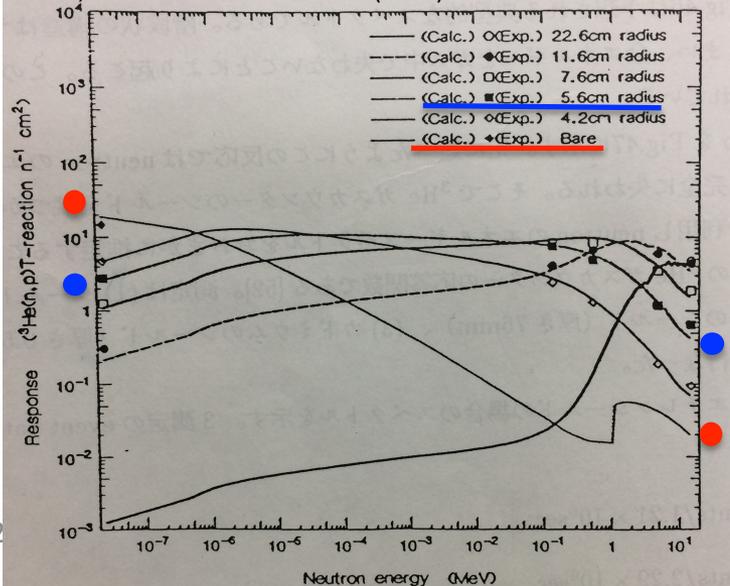


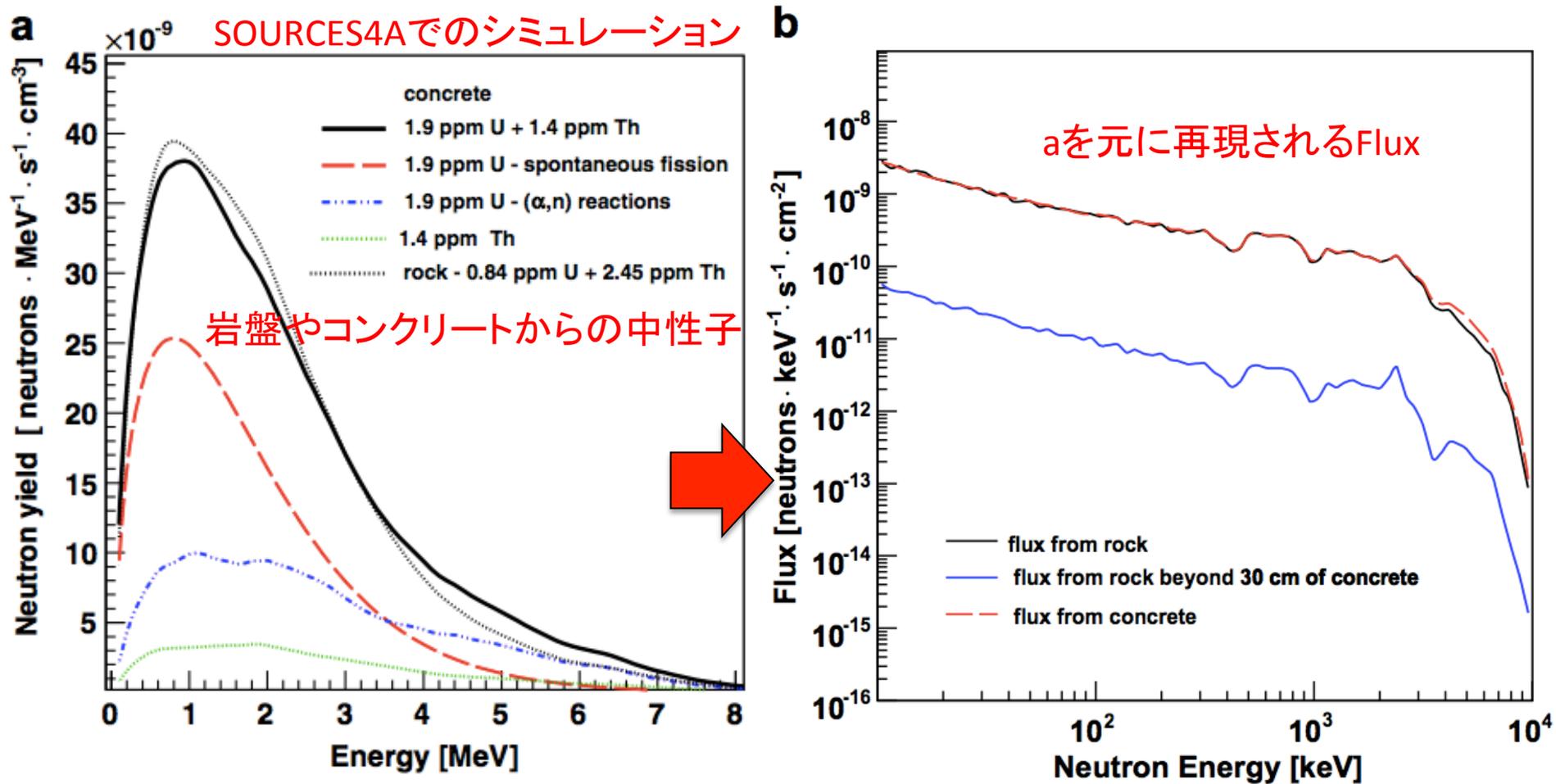
Fig. 5. Response matrix of the multisphere spectrometer.

Y. Uwamino and T. Nakamura, Nucl. Instr. and Meth. A 239(1985)299.



地下の中性子スペクトル

Radioactive background in a cryogenic dark matter experiment V. Tomasello *, M. Robinson, V.A. Kudryavtsev
 Department of Physics and Astronomy, University of Sheffield, Hounsfield Road, Sheffield S3 7RH, UK



今後同じシミュレーションを行い、仮定しているスペクトルの妥当性を評価したい

議論

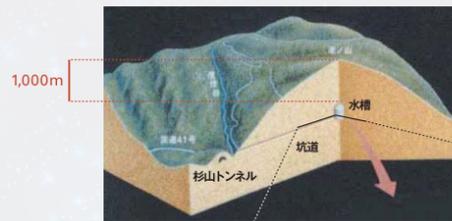
- 本研究は誤差の範囲で南野氏(2004年)と一致する結果が得られた
- 系統誤差として
 - ボルツマン分布と $1/E$ との接続点の影響
 - 仮定するスペクトル(Gordon+ $1/E$ or ボルツマン+ $1/E$)の影響
 - ポリエチレン中での熱化の影響(α の見積もり)
 - が大きく関わることがわかった
- さらに詳細なエネルギースペクトルの情報を取得するためには、中性子のエネルギーを直接測定出来る液体シンチレーターなどを用いた測定を行う必要がある

過去の測定

施設周辺坑道図と 共同利用実験 Facility Map and Experiments of the Kamioka Underground Laboratory

神岡の地下施設では、本施設が中心となって推進しているスーパーカミオカンデ実験、XMASS実験の他に、CLIO、NEWAGE実験、CANDLES実験などが地下施設共同利用実験として宇宙、素粒子物理や地球物理の研究を行っています。

施設周辺坑道図



- 東京大学宇宙線研究所
ICRR
- 神岡宇宙素粒子研究施設
Kamioka Observatory
- 地下施設共同利用実験
Kamioka Underground Laboratory

A Super-Kamiokande実験
An experiment to search for neutrinos

スーパーカミオカンデの内部。水入れを開始したSK
Inside of the Superkamiokande. The SK detector when water filling started

→ 詳細はP10-19

CLIO実験
研究推進機関: 東京大学宇宙線研究所 / Lead Institute: ICRR, UTokyo

径10cmを積み込んだ基準長100mのレーザー干渉計プロトタイプCLIOと地球物理観測のためのレーザー伸縮計。
The cryogenic laser interferometer prototype CLIO and the laser strainmeter for geophysical research.

→ 詳細はP24

1994 ^3He
衰輪研DM

2004 ^3He
XMASS

2002 LS
衰輪研DM

CANDLES実験
研究推進機関: 大阪大学 / Lead Institute: The University of Osaka

CANDLES detector (left). Signals from the detector are sent to the PMTs (right).
CANDLES detector with PMTs mounting

→ 詳細はP24

XMASS実験 ダークマター直接探索実験
Direct dark matter search experiment

光電子増倍管の取り付けが完了した検出器
XMASS detector with PMTs mounting

→ 詳細はP20-23

2016 ^3He /LS
NEWAGE

2016 LS/
 ^3He
XMASS

東北大カムランド
(旧カミオカンデ)



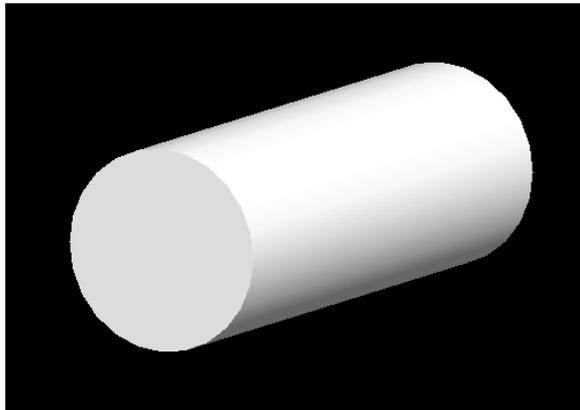
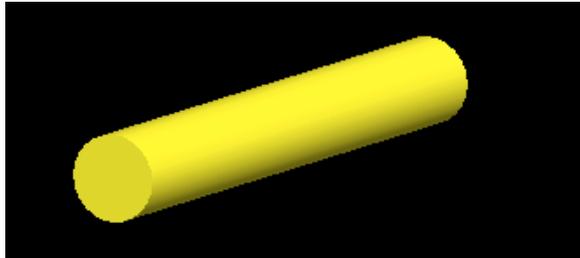
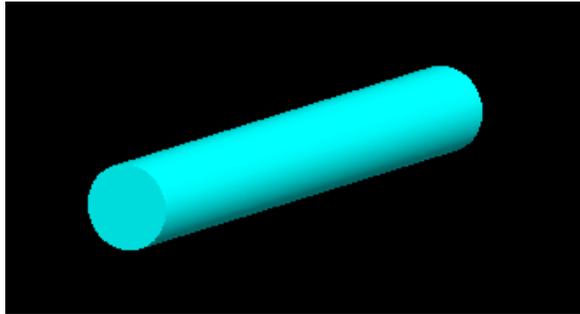
2016 ^3He /LS
XMASS

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)	$T_{\text{live}} \quad 1.54 \text{ [days]}$	$T_{\text{live}} \quad 32.29 \text{ [days]}$
	$C_{\text{partial}} \quad 14251 \text{ [counts]}$	$C_{\text{partial}} \quad 110617 \text{ [counts]}$
	$\epsilon \quad 0.87$	$\epsilon \quad 0.85$
	$R \quad 1.23 \times 10^{-1} \text{ [n/s]}$	$R \quad 4.67 \times 10^{-2} \text{ [n/s]}$
地下 (神岡LAB-B)	$T_{\text{live}} \quad 15.70 \text{ [days]}$	$T_{\text{live}} \quad 15.88 \text{ [days]}$
	$C_{\text{partial}} \quad 1748 \text{ [counts]}$	$C_{\text{partial}} \quad 652 \text{ [counts]}$
	$\epsilon \quad 0.87$	$\epsilon \quad 0.87$
	$R \quad 1.47 \times 10^{-3} \text{ [n/s]}$	$R \quad 5.34 \times 10^{-4} \text{ [n/s]}$

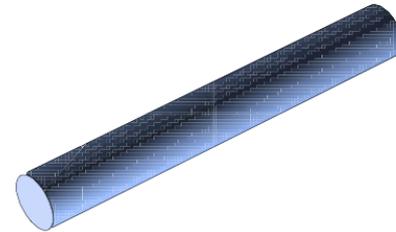
ジオメトリ

Geant4

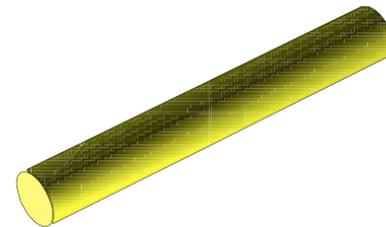


PHITS

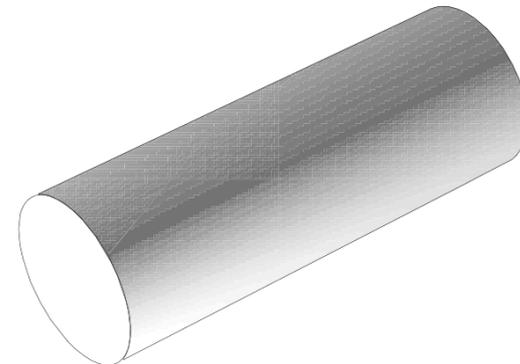
^3He



SUS



Polyethylene



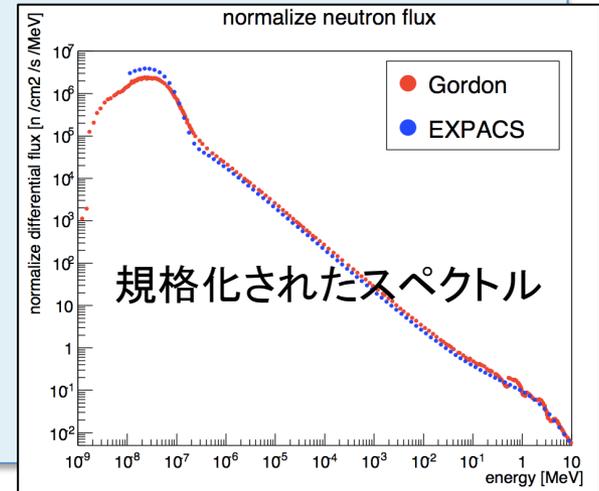
エネルギースペクトルの仮定

考える中性子のエネルギーは1meV~10MeV

地上

- 先行研究の測定結果 **Gordon**測定
- 大気中の宇宙線フラックス計算ソフト **EXPACS**

スペクトル形状	f_{th}	f_{non_th}
スペクトル (Gordon)	0.219	0.781
スペクトル (EXPACS)	0.304	0.696

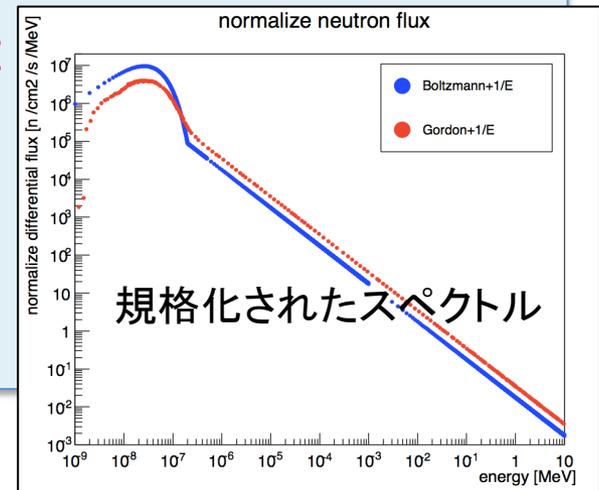


地下

- ✓ 低エネルギー側では**ボルツマン分布**
- ✓ 無限な減速在中に中性子線源が一様分布、および減速在中での吸収は少ない場合は**A/E則** (Aは定数)に従う

- 地上での先行研究結果を参考にした **Gordon+1/E**
- 理想的な場合を仮定した **ボルツマン分布+1/E**

スペクトル形状	f_{th}	f_{non_th}
スペクトル (Gordon+ $\frac{1}{E}$)	0.366	0.634
スペクトル (ボルツマン+ $\frac{1}{E}$)	0.690	0.310

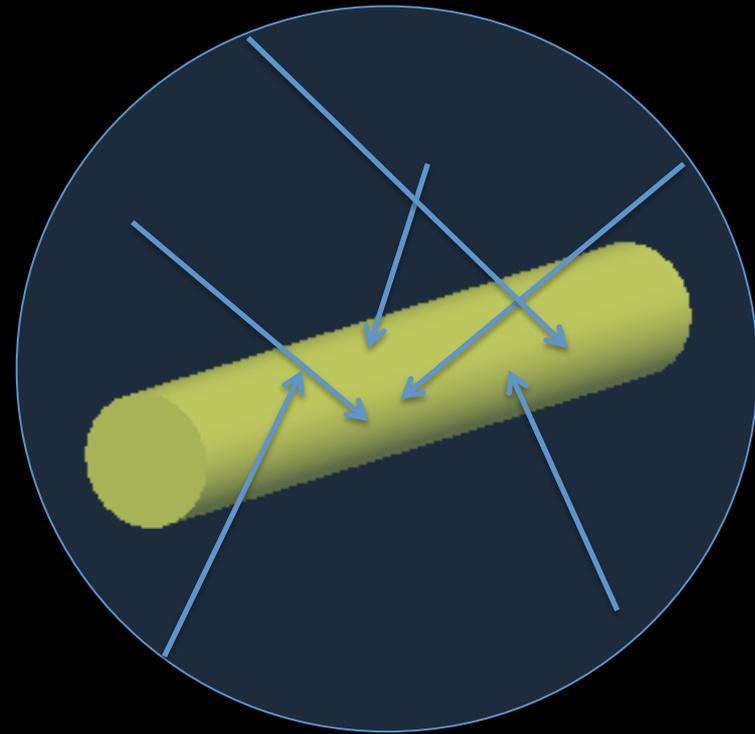


中性子方向分布の仮定

半径 r の球殻表面から
内側方向に $\cos\theta$ で重み付けして N 発照射
この時球殻内部で得られる
フラックス Φ は次の式で
与えられる

$$\Phi_s = \frac{N}{\pi \times r^2}$$

検出器の外の球殻表面から
内側 $\cos\theta$ で重み付けして照射



ランダム方向の中性子を再現

結果と比較

単位 [$n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

大谷氏(1994年)

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

南野氏(2004年)

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

今回の測定

	熱中性子	熱以外の中性子
地上(神戸大)	$7.21 (\pm 0.06 \begin{smallmatrix} +0.55 \\ -0.55 \end{smallmatrix}) \times 10^{-4}$	$7.70 (\pm 0.02 \begin{smallmatrix} +9.81 \\ -4.33 \end{smallmatrix}) \times 10^{-4}$
神岡地下実験施設LAB-B	$9.48 (\pm 0.23 \begin{smallmatrix} +2.03 \\ -3.20 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$	$5.47 (\pm 0.21 \begin{smallmatrix} +7.30 \\ -5.01 \end{smallmatrix}) \times 10^{-6}$

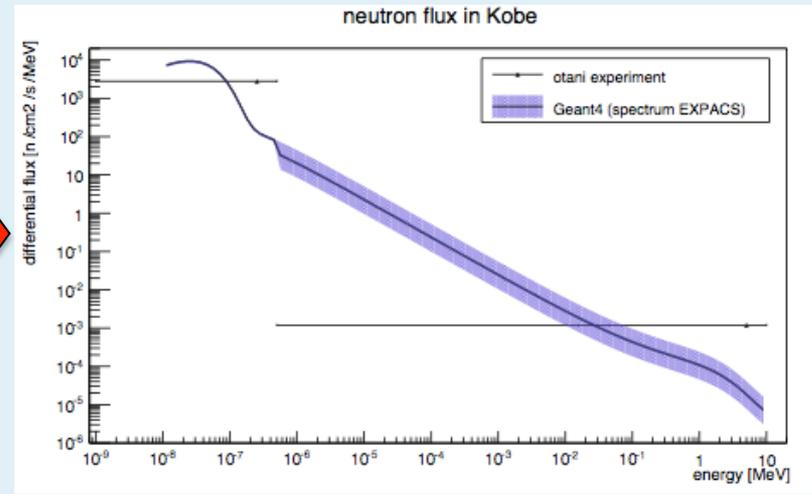
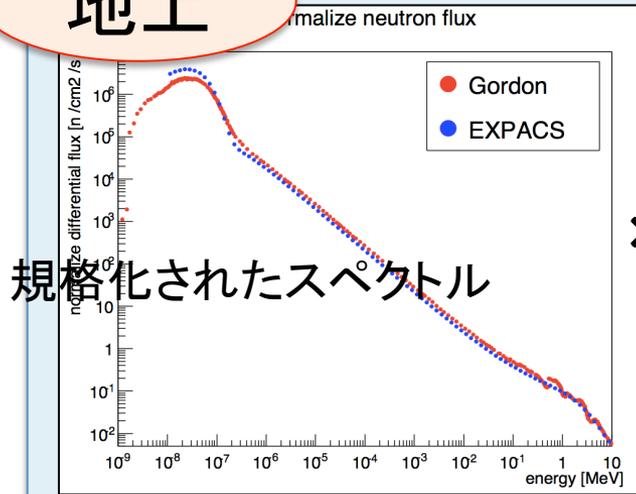
誤差: 統計

系統(地上: Gain5%の変動、Geant4とPHITSの違い、仮定するスペクトルの違い、減速材ありとなしからの総フラックスの違い)

(地下: Gain5%の変動、Geant4とPHITSの違い、仮定するスペクトルの違い、減速材ありとなしからの総フラックスの違い、1/Eとの接続による変動)

中性子エネルギースペクトルへの換算

地上



地下

