

# 地下の環境中性子測定

YMAP 秋の研究会2017

YMAP秋の研究会 2017.10.17 水越慧太 (大阪大学)

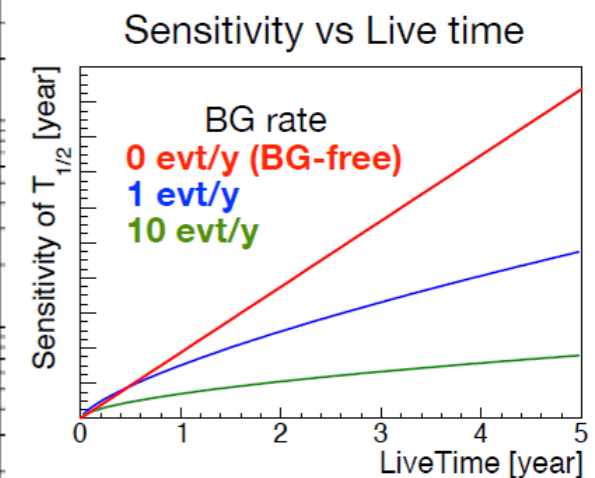
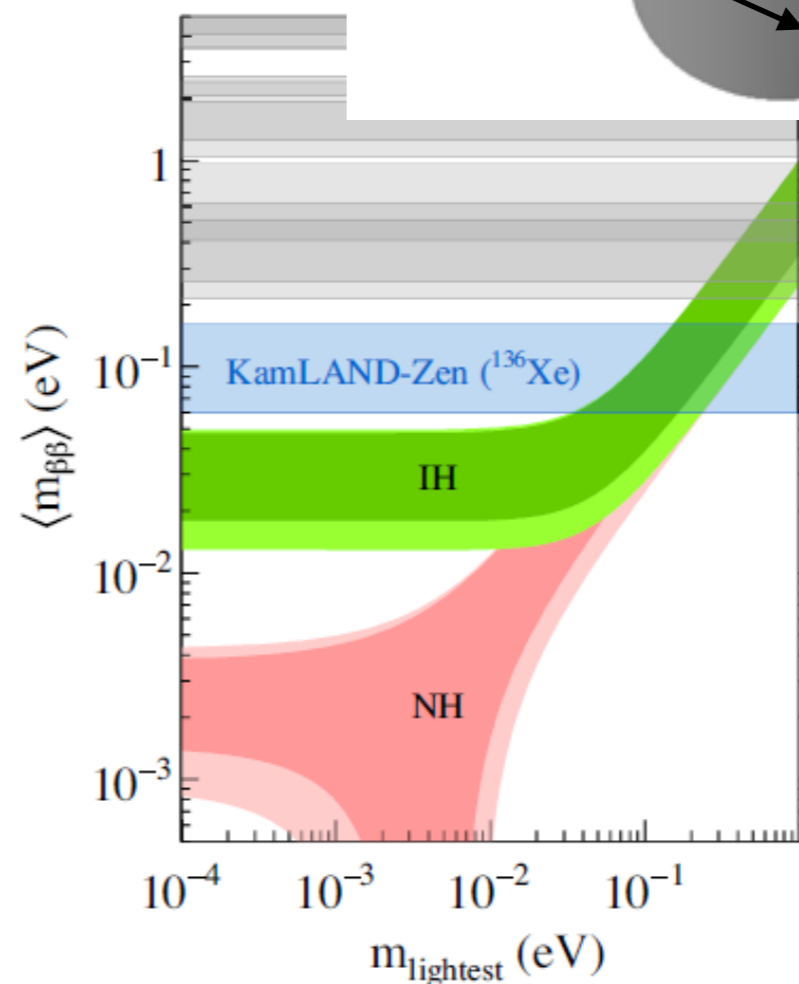
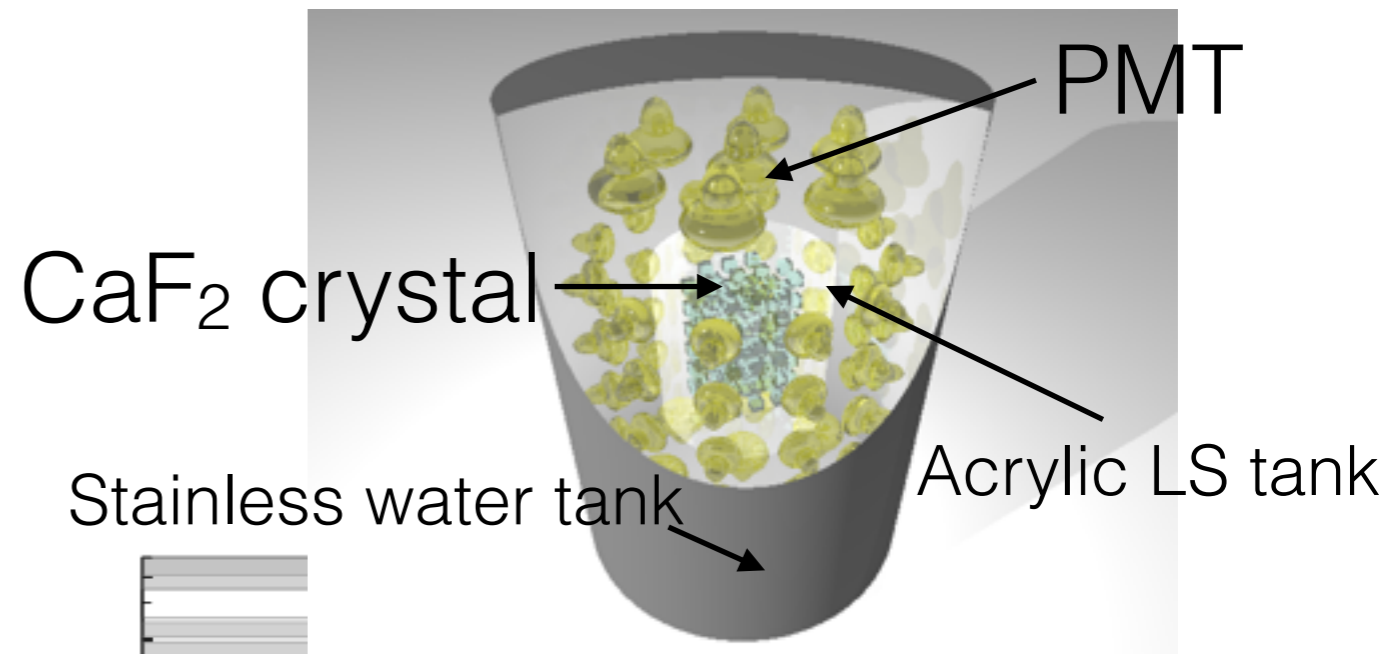
# 自己紹介

- 水越 慧太 (Mizukoshi Keita)
- 神戸大学から大阪大学へ
- CANDLES IIp @神岡
  - 解析, モンテ  
エネルギーキャリアレーション
  - 中性子BG測定
- ← After

Before

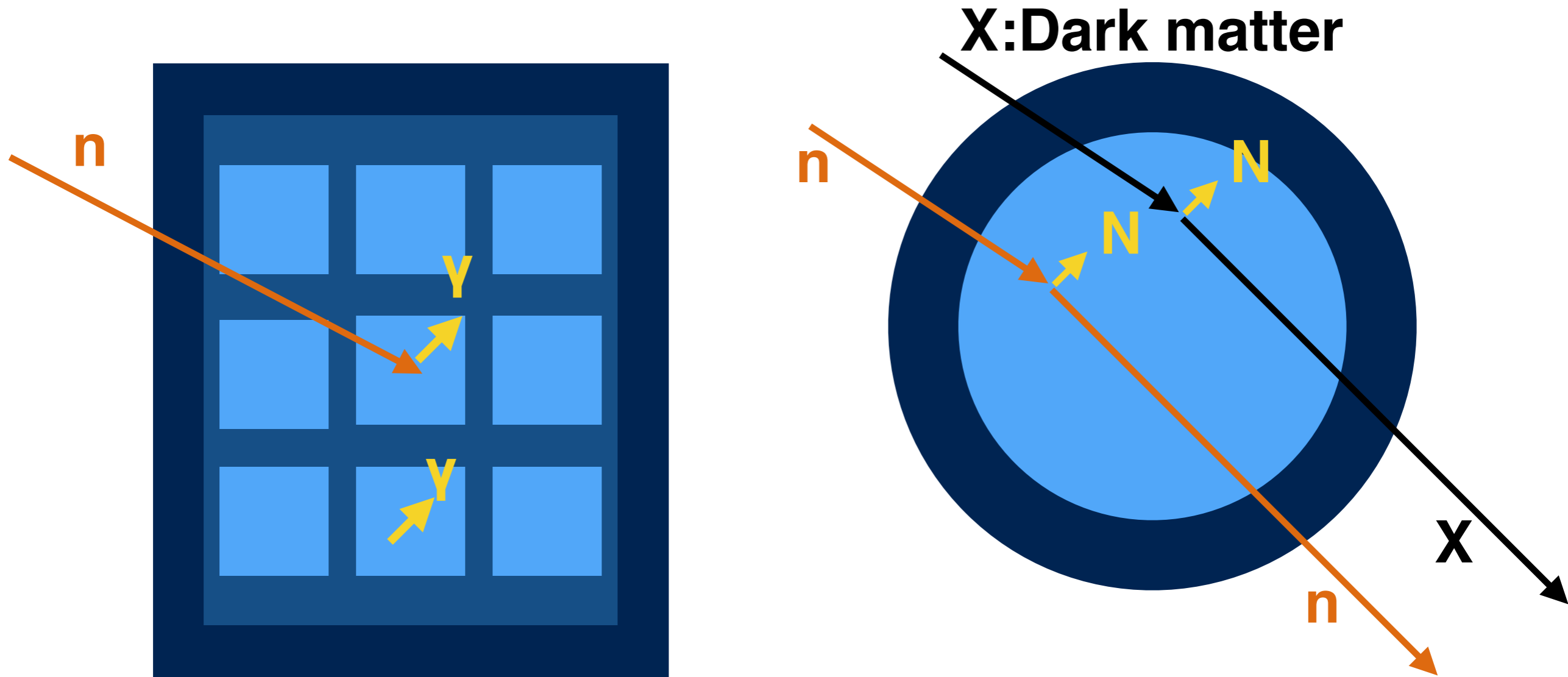
# CANDLES III plus

- CANDLESは $^{48}\text{Ca}$ を標的核としたニュートリノレスダブルベータ崩壊探索実験
- $^{48}\text{Ca}$ はQ値最大(4.3 MeV)
- ゼロバックグラウンド
- 次の目標は $^{48}\text{Ca}$ の濃縮, ボロメーターの導入



Figures by T. Iida

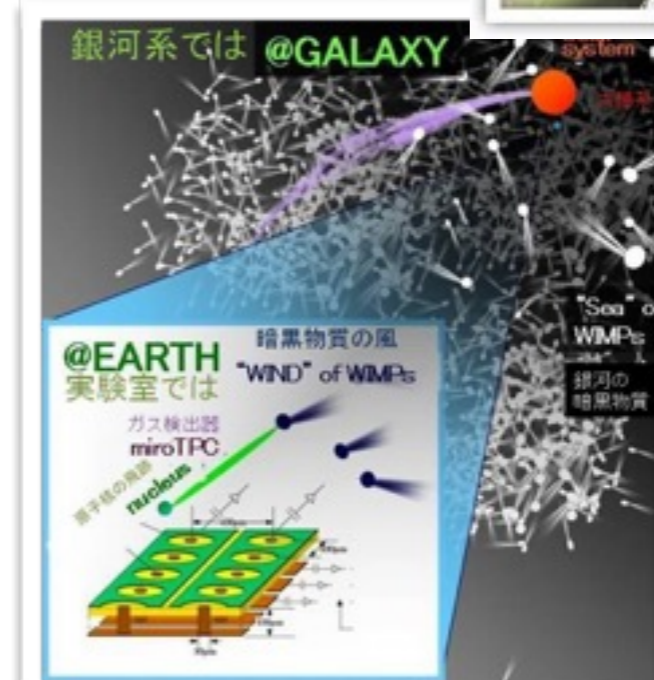
# 地下中性子研究動機



- ニュートリノレスダブルベータ実験やダークマター探索実験などの地下実験で環境中性子が背景事象となりうる.

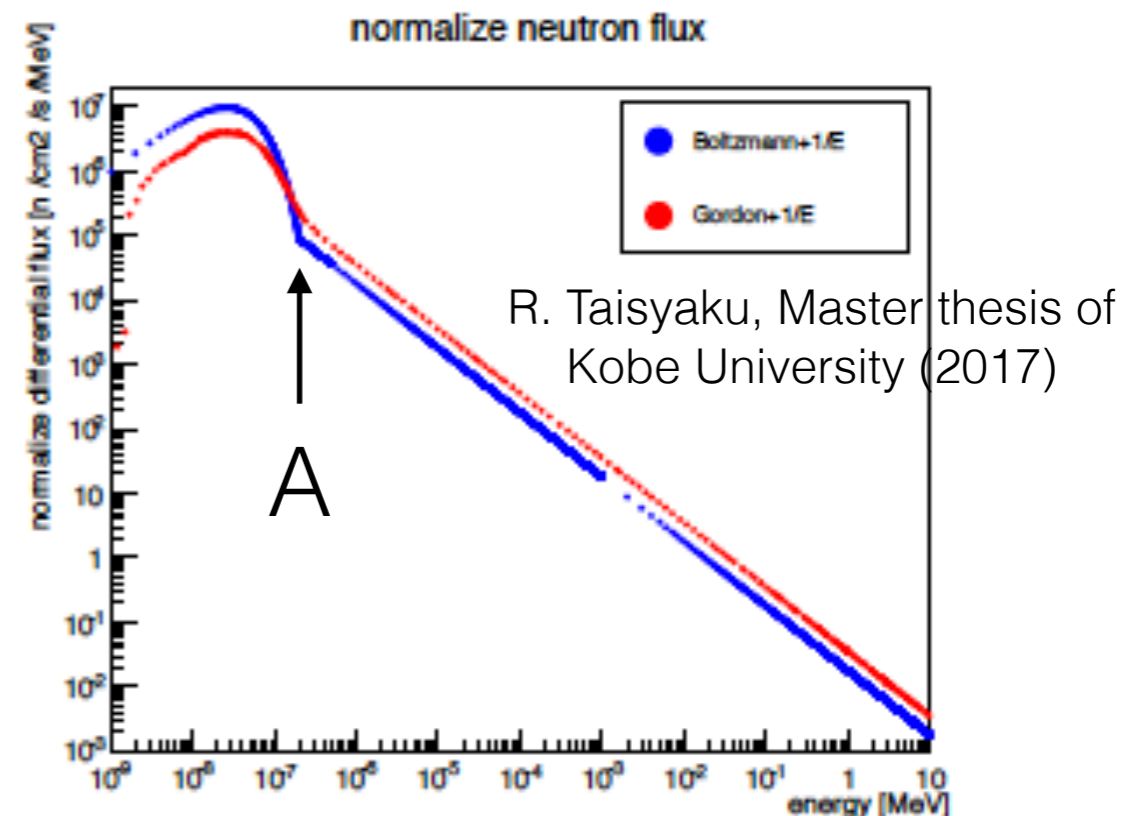
# 中性子測定コンソーシアム

- 実験を超えて技術/機材を共有し、環境中性子の理解を目指す。
- 実験グループ
  - CANDLES, XMASS, NEWAGE, ANKOK, NEWS
- 検出器
  - $^3\text{He}$ 比例計数管, NaIシンチレータ  
液体シンチレータ, 原子核乾板



# 本研究の動機

- 様々な方法で測定が試みられているが、中性子のエネルギー測定は難しい。
- 地下BG研究では**エネルギーが重要**。
- 先行研究ではエネルギースペクトルを経験則から仮定して結果を出している。
  - 先行研究はスペクトルの仮定が結果の解釈に大きな影響を与えることを示している。
- →シミュレーションでスペクトル形を明らかにして、実験結果を評価する。



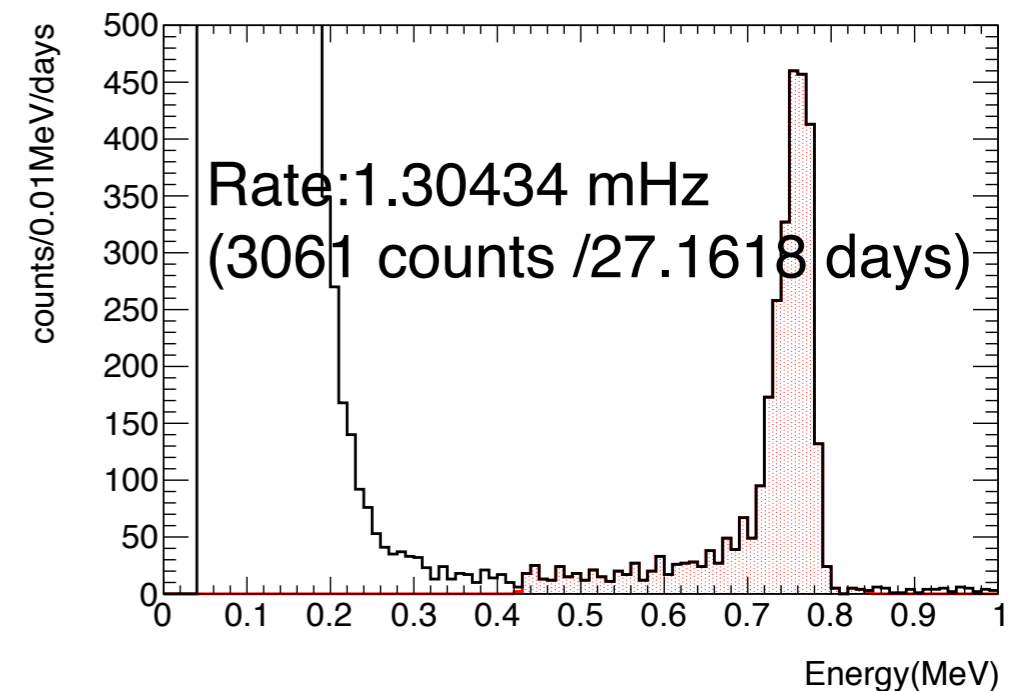
帝釋氏の先行研究では、地下のスペクトルを低エネルギー熱領域は Boltzmann分布、高エネルギー領域は  $1/E$  などと仮定、例えばAの接続点を変えただけで結果が大きく異なる。

# $^3\text{He}$ 比例計数管

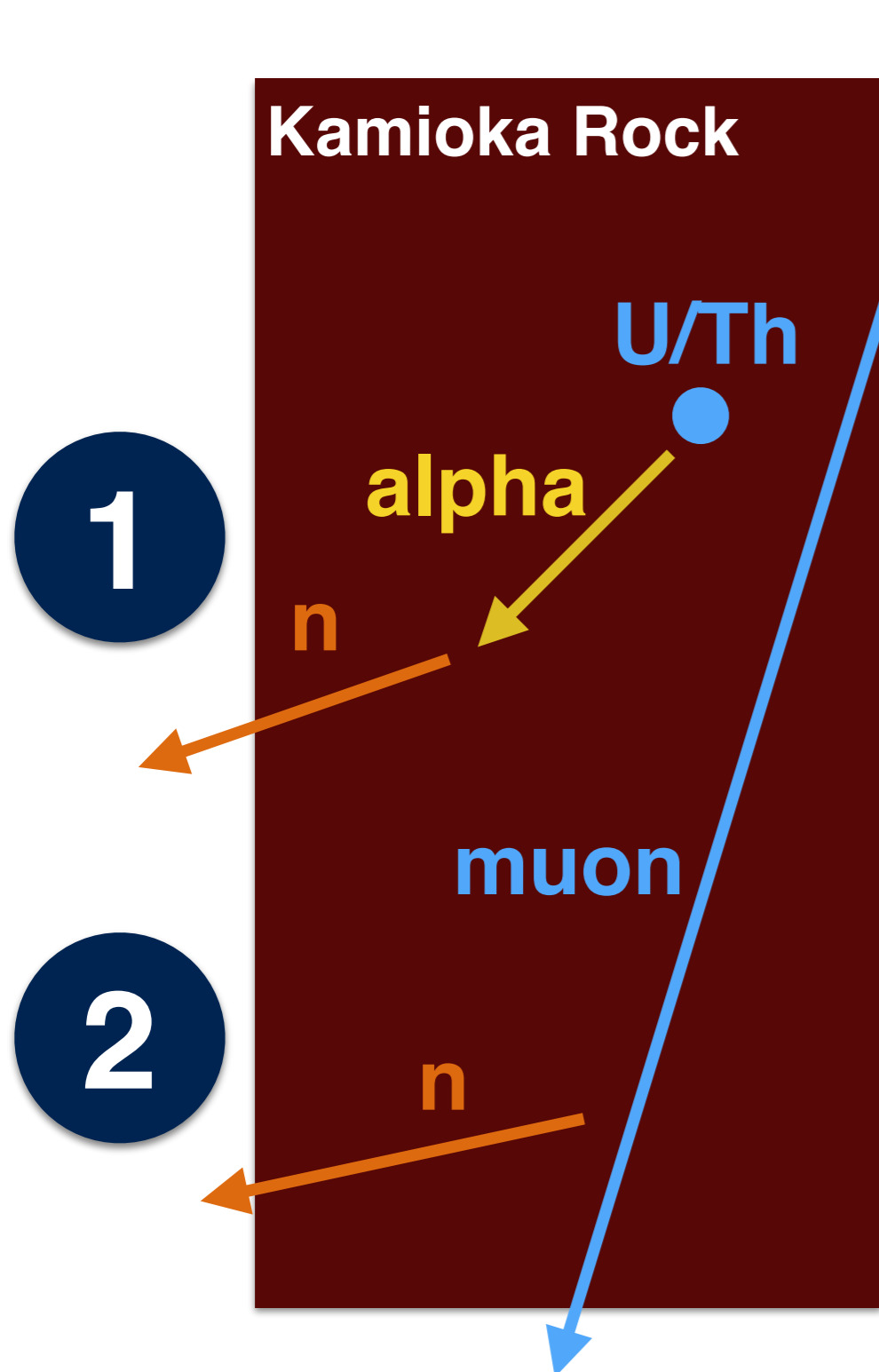
- $^3\text{He}$ 比例計数管は**熱中性子**を測定することに優れた検出器である.
  - $^3\text{He} + \text{n} \rightarrow ^3\text{H} + \text{p} + \underline{\mathbf{0.764\ MeV}}$
  - 5333 barn @ 0.025 eV neutron
- 数keV領域程度の中性子はエネルギー測定が難しく,また実験のBG理解に重要である.



$^3\text{He}$ 比例計数管はKEK放射線科学センター  
岸本氏に貸していただいた.



# シミュレーション概要

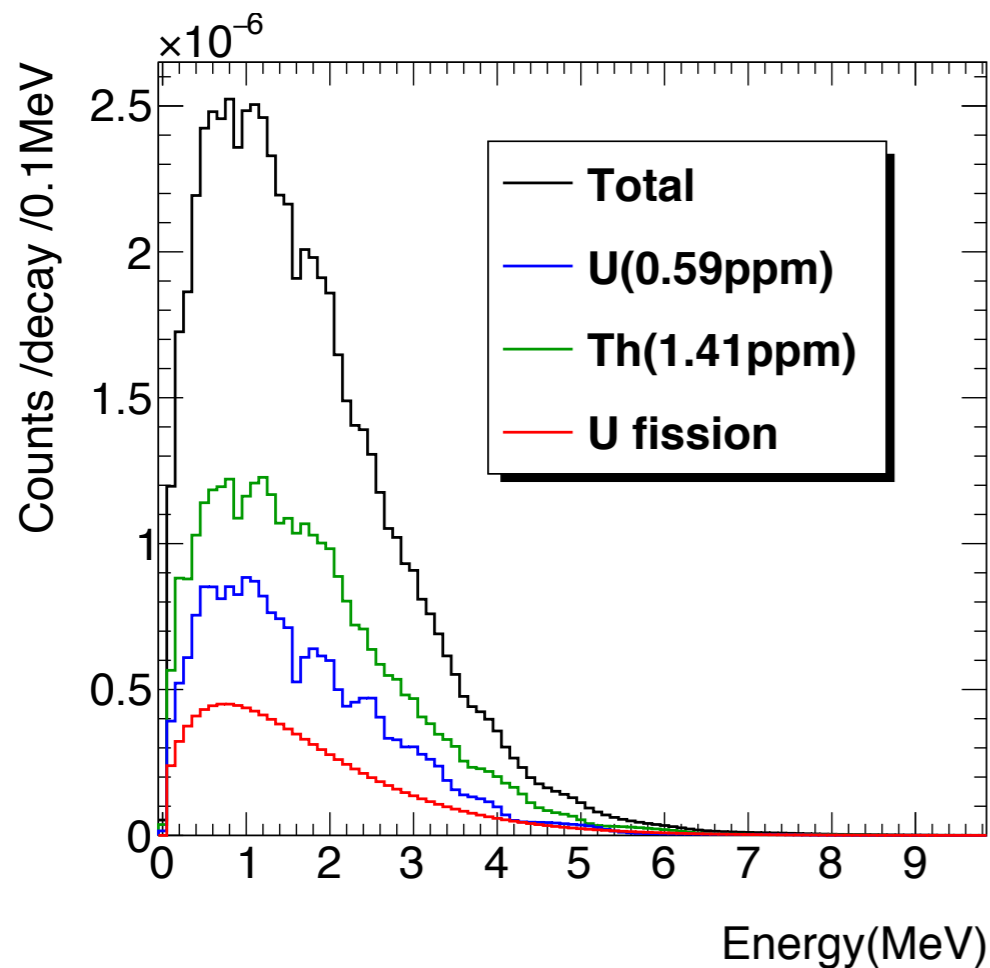


- 岩石組成測定 不定性大
  - 粉末試料を用いたXRF半定量分析
- ミューオンフラックス
  - **SK/KamLand/Chooz simulation** ○
    - Alfred Tang et al. (Phys.Rev.D74:053007,2006)
  - 宇宙線由来の中性子
    - **Geant4** (QGSP\_BERT\_HP + muon-nuclear + gamma-nuclear) ○
- U/Th 系列含有量 不定性大
  - Ge detector & Geant4
- (Alpha,n) cross-section
  - NeuCBOT(TALYS database) ○
    - Author: Shawn Westerdale
    - <https://github.com/shawest/neucbot>
- 中性子輸送 - **Geant4** 不定性有



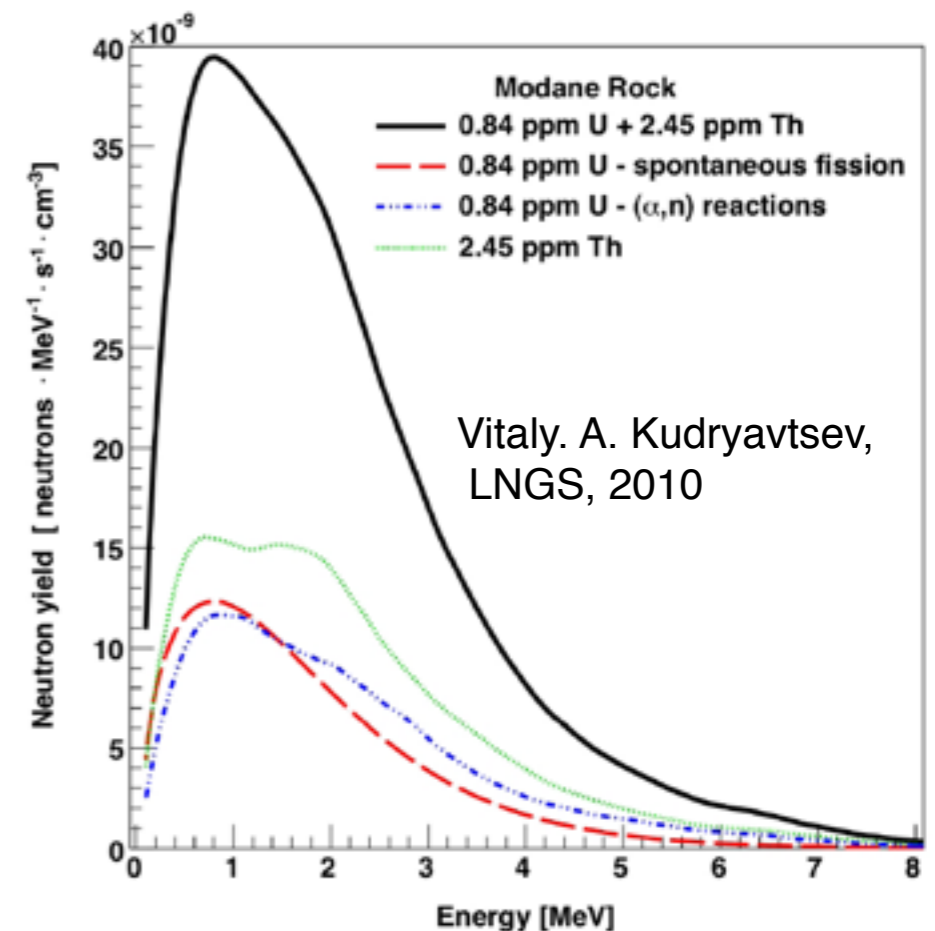
# I. U/Th 系列由来中性子

- U/Th系列の崩壊からの(alpha,n)反応で生成される中性子のエネルギースペクトルの形が他の地下実験室でのシミュレーションと一致。
- $^{238}\text{U}$ の自発核分裂(赤)は未実装→今後の課題,Geant4で可能。



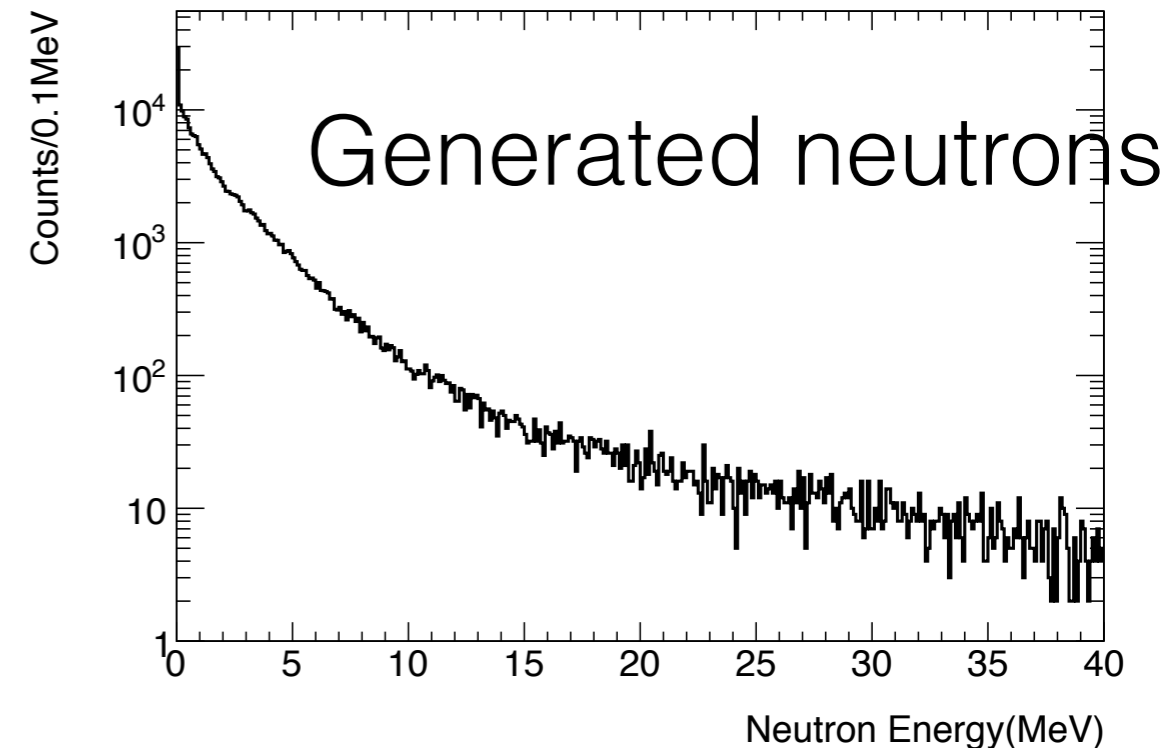
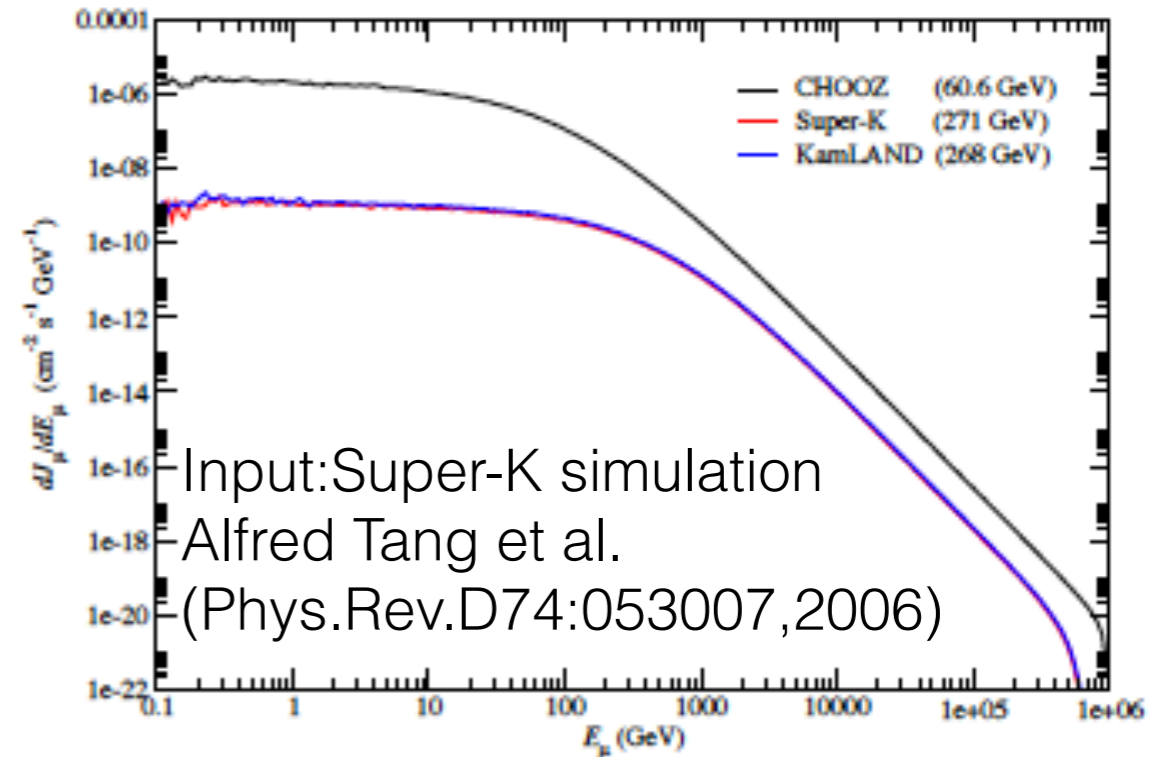
← NeuCBOTを用いて求めた,神岡でのU/Th由来の中性子のスペクトル

Sources4Aを用いて求められた,ModaneでのU/Th由来の中性子スペクトル→



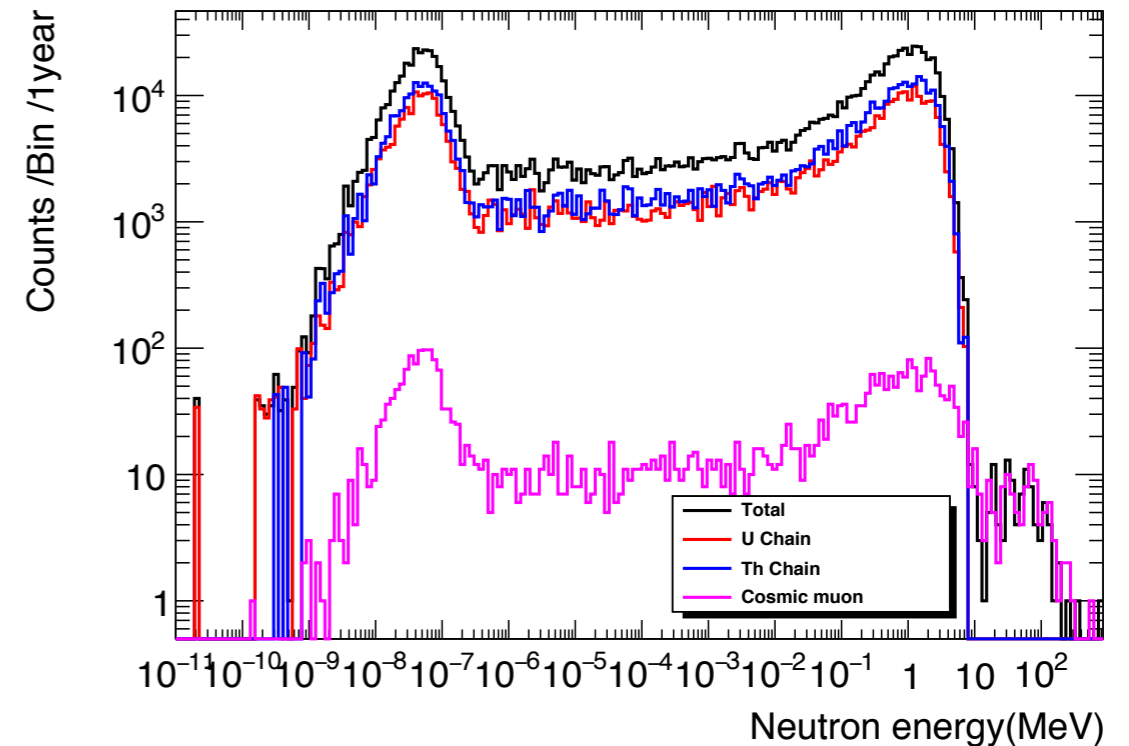
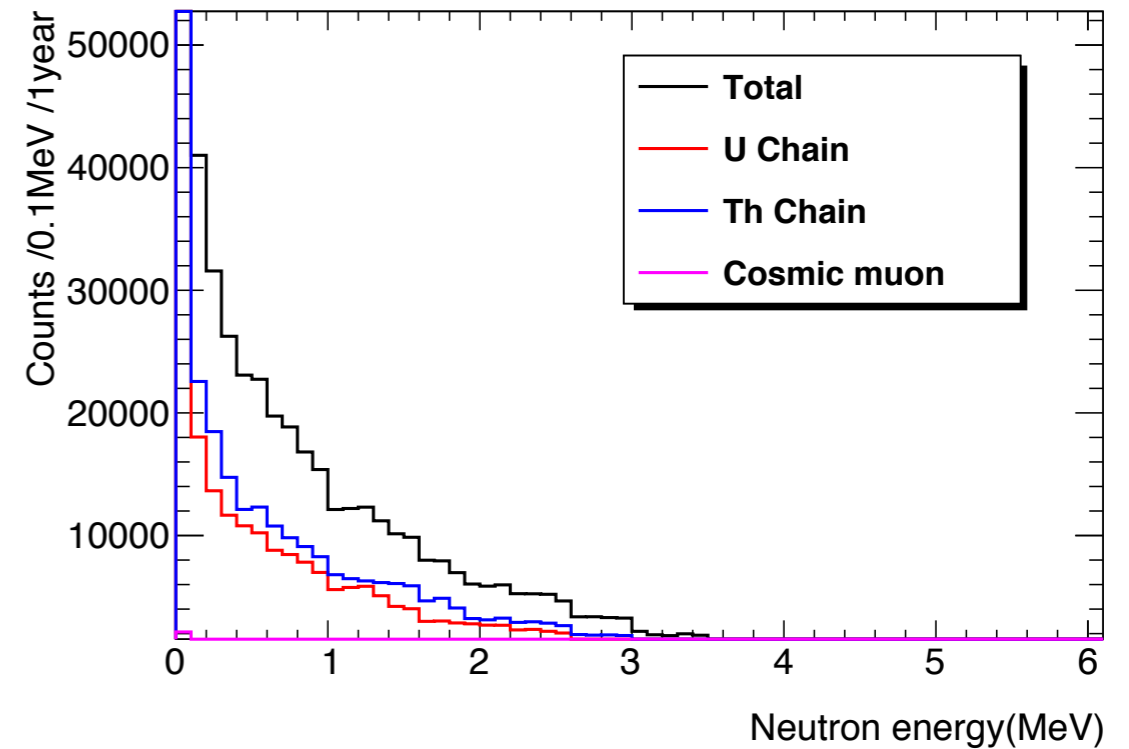
# 2. ミューオン由来中性子

- Geant4を用いてミューオンが生成する中性子を評価した.
- Physics list: QGSP\_BERT\_HP +muon-Nuclear + gamma-Nuclear
- ミューオン由来の中性子は地下実験室ではU/Th由来の中性子の**100分の1**程度の量である.
- U/Thの崩壊からは生成され得ない**高エネルギー**の中性子が生成される.



# 総中性子スペクトル

- 前述の起源からの中性子らが岩盤中で減速,輸送される.  
(右:軸が異なる同じ総中性子スペクトル)
- ※上図:低エネルギー領域は縦軸範囲外
- ※下図:縦軸横軸LOG
- 熱中性子領域はBoltzmann分布,高速中性子領域は $1/E$ になるという経験則と矛盾しない.
- 数keVの領域の中性子が少ないことがシミュレーションによって示唆される.  
→スペクトル形についての**新結果**



# 結果

フラックス ( $n \times 10^{-6}$   
 $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

熱以外の中性子  
> 0.5 eV

本結果 (2017)

神岡坑内Lab-D

シミュレーションより  
求めたスペクトル

**$4.34 \pm 0.08$**

系統誤差は未評価だが、スペクトルの仮定が小さい分、小さくなると予想される。

帝釈氏 神戸大修論 (2017)

神岡坑内Lab-B

Boltzmann + 1/E スペクトル

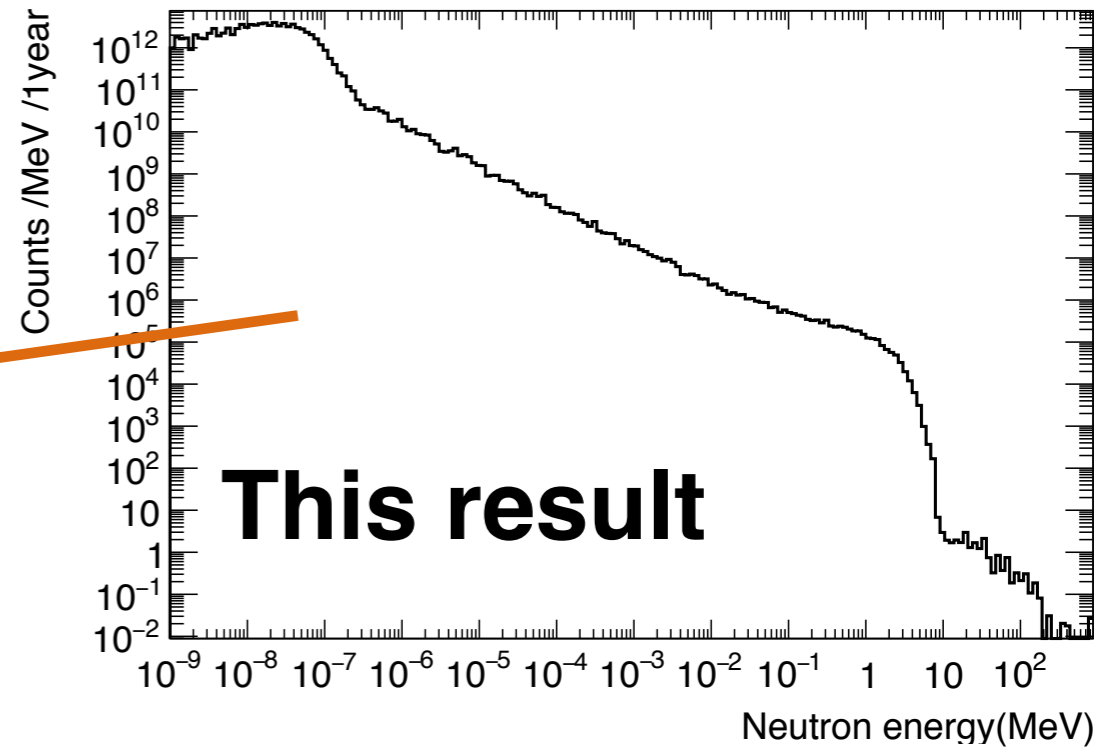
**$5.74 \pm 0.21$  +7.30  
-5.01**

南野氏 修論(2004)

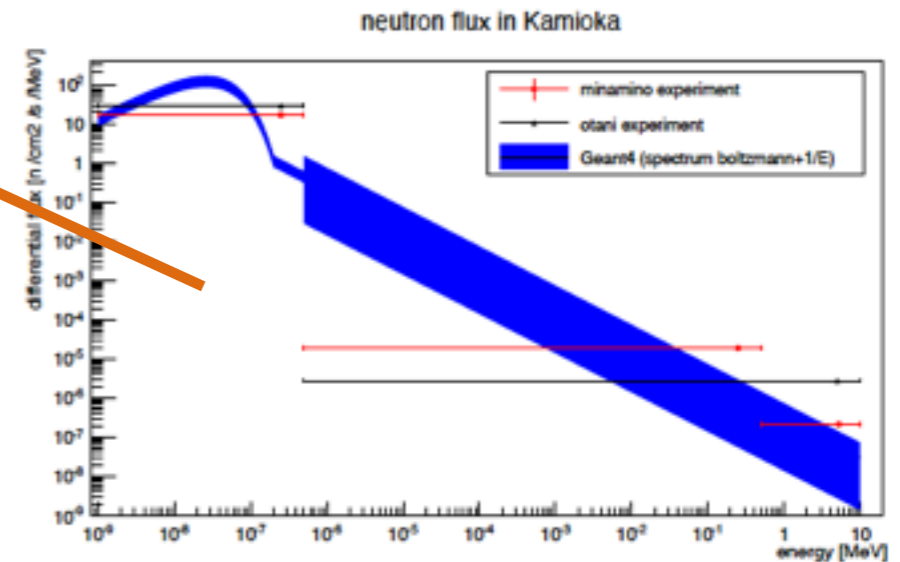
神岡坑内

メーカー付属の変換係数使用

**< 3.42 (95.45%  
C.L.)**



**This result**



R. Taisyaku, Master thesis of  
Kobe University (2017)

- シミュレーションでのスペクトルを用いた初めての結果
- 先行研究の仮定スペクトルと矛盾しない

# まとめと今後

- シミュレーションにより神岡地下での中性子のスペクトルを仮定した最初の結果を得た.
- 系統誤差を評価して論文をかく.
- 次の目標
  - 年次変動, 坑内場所依存, 飛来方向,...など
  - 仲間(+資金)を増やして網羅的な理解を目指す

# Backup

# 結論と今後の課題/展望

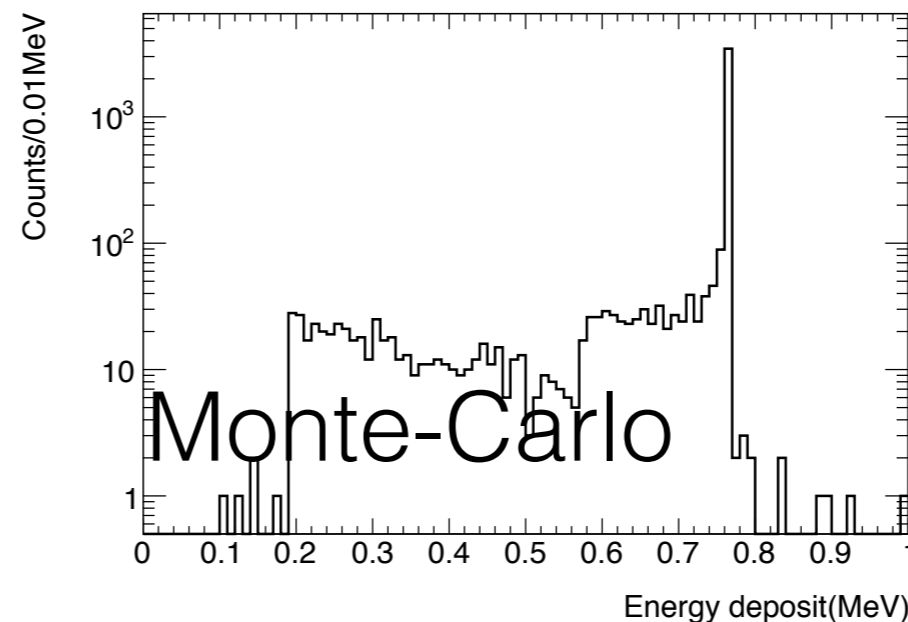
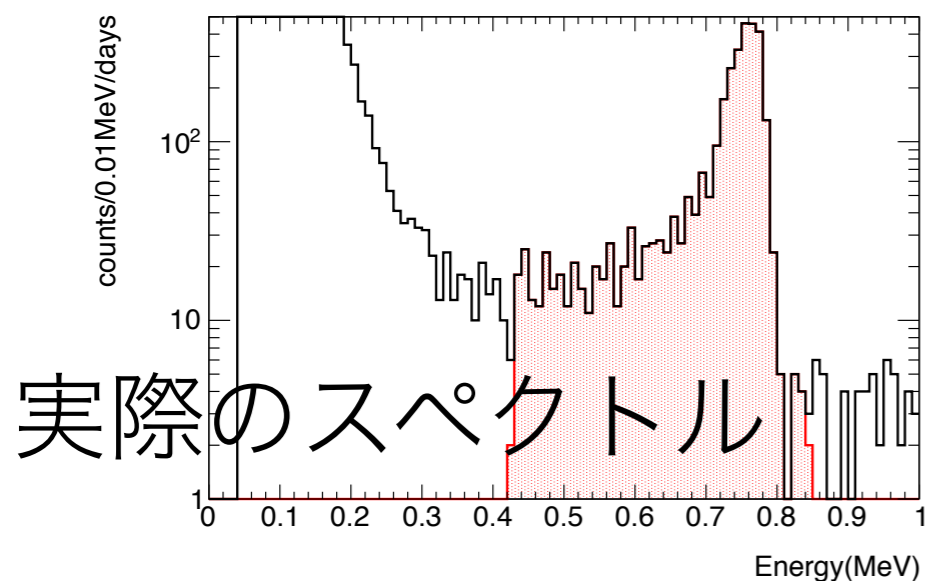
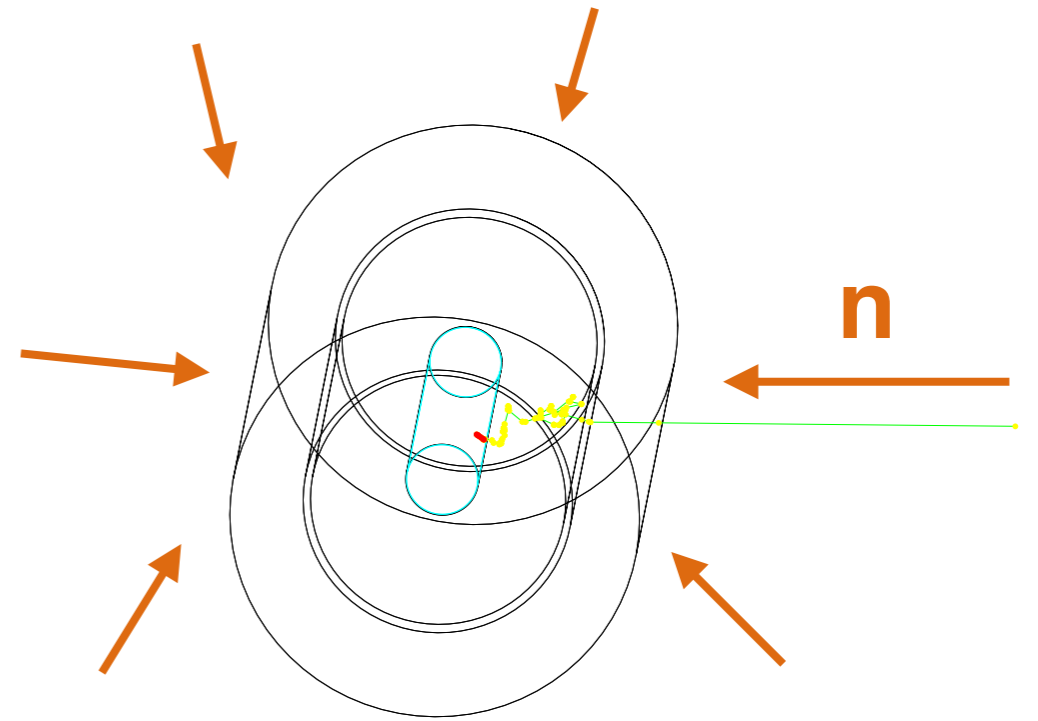
- シミュレーションにより神岡地下での中性子のスペクトルを仮定した最初の結果を得た。
- 課題
  - 系統誤差の評価
    - 岩の組成の違い,中性子輸送の不定性
  - 仮定したHの量の妥当性の評価
    - 減速材あり/なしで検出数が実験に合うようにHの量を推定する。
- 数keV領域の中性子が少ないスペクトルを本研究は主張する。
- この主張を確かめるために,ポリエチレンShieldを利用したセットアップを用いて,中性子スペクトルについてさらに詳しく調べたい。

Counts /1M events	0.025eV	1eV	1keV	1MeV
Poly+B	9	<b>2498</b>	15330	34290
+Shield	3	<b>5</b>	182	8494

各エネルギーでの中性子検出数(相対値)

# 検出器応答シミュレーション

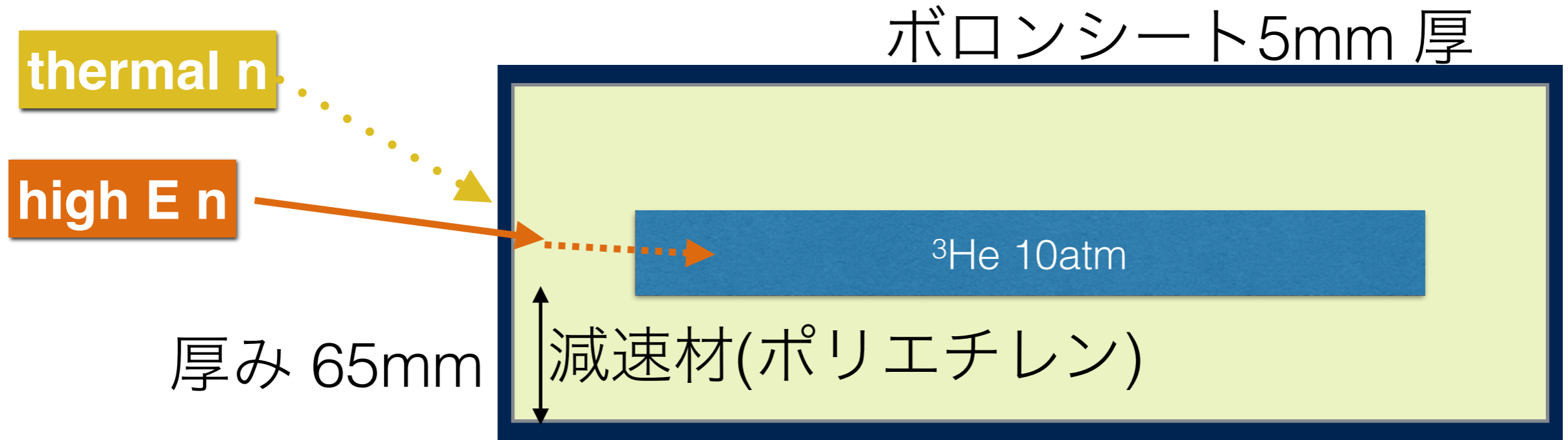
- 前頁のスペクトルでシミュレーションを行い,検出器の応答を調べる.
- フラックスと検出数の変換係数を導出する.



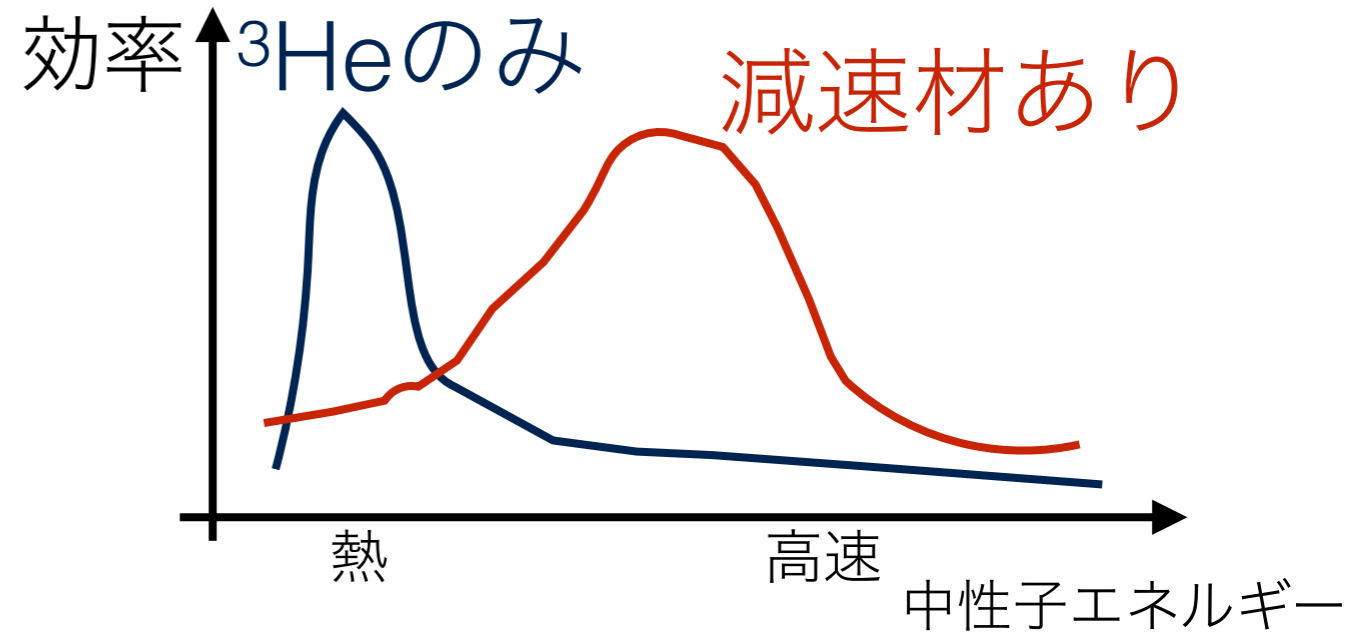
適当な分解能のもとでスペクトル形が正しい



# 減速材ありセットアップ



- より高エネルギーの中性子測定のために減速材と吸収材を使用する.
- 結果の解釈にはスペクトルの形が必要.

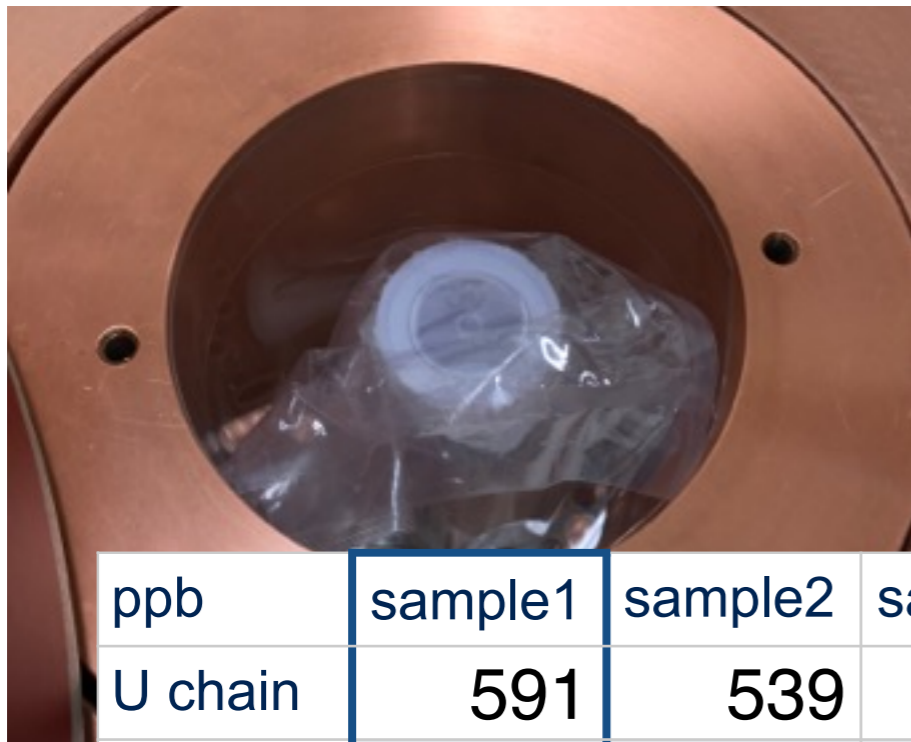


# 岩石組成測定

- Lab-Bの岩石(Sample 1-3)を測定した。
- 主要元素の割合をXRFで,U/Thの含有量をGe検出器とGeant4による効率見積もりで算出した。

(wt. %)	sample1	sample2	sample3
O	40.5	37.9	35.6
Ca	28.0	24.3	29.7
Si	16.6	15.6	12.0
Fe	7.6	16.6	13.5
Al	5.2	0.3	0.1
Mn	0.8	3.5	2.9

その他主要15元素を測定した。



ppb	sample1	sample2	sample3
U chain	591	539	585
Th chain	1408	1304	1420

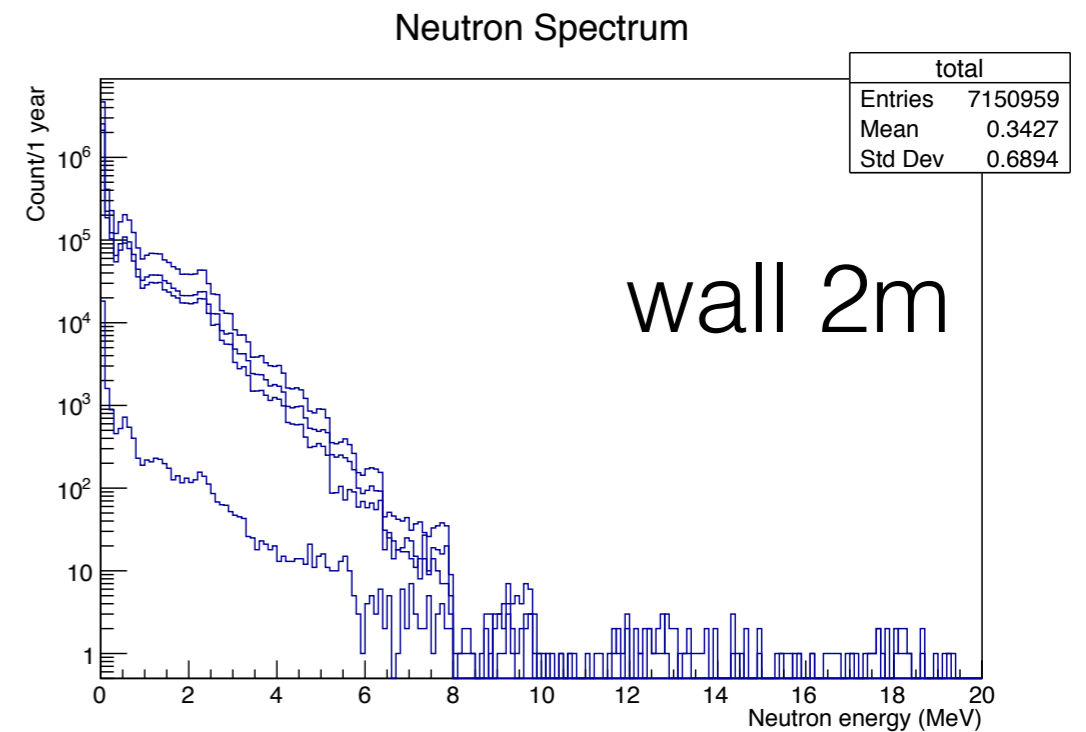
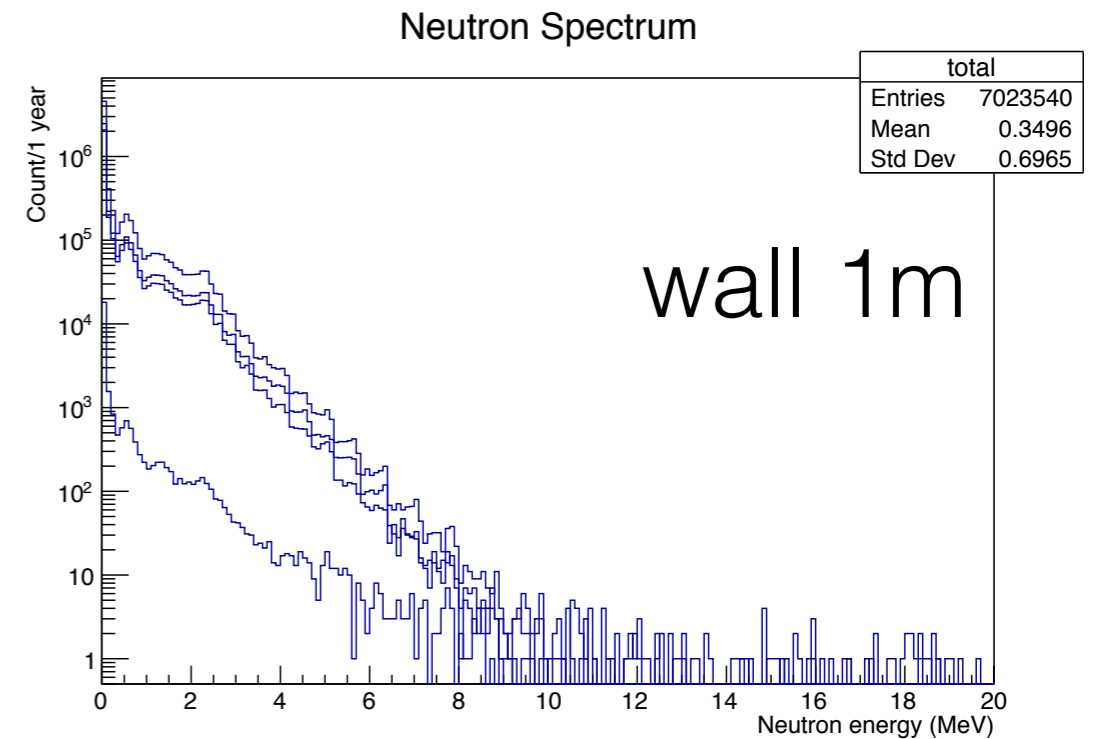
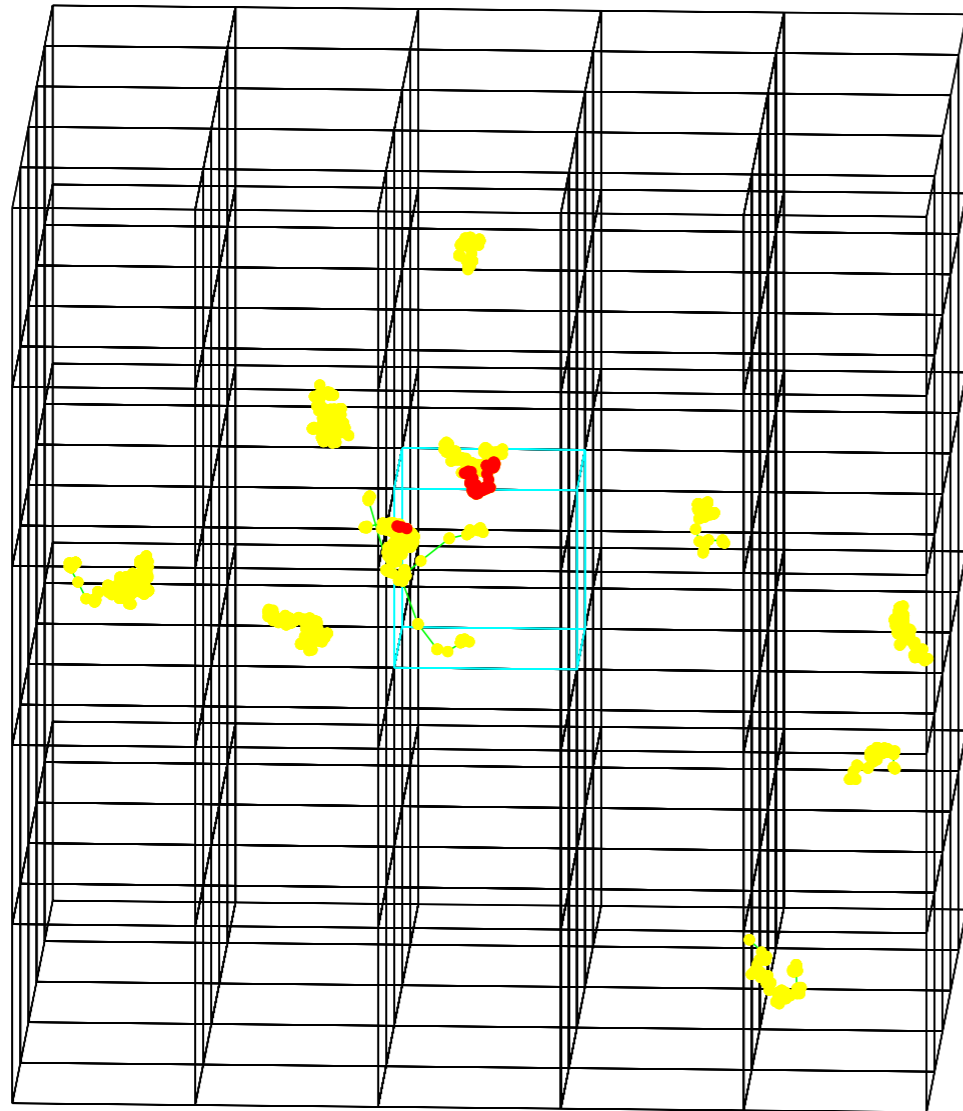
- 今回はSample 1について考える。
- 水素の量の測定は難しいが、水素は中性子減速に非常に重要である。
- 今回は岩石に水素が3%含まれているという仮定で議論する。

# NeuCBOT

- TALYS ← general nuclear reaction program
- ENSDF ← nuclear decay info
- SRIM ← stopping power info

# Wall thickness

- 1m wall is enough for Neutron transport simulation

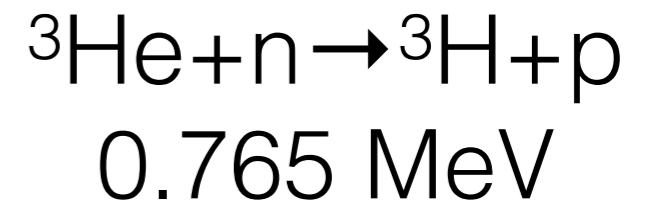
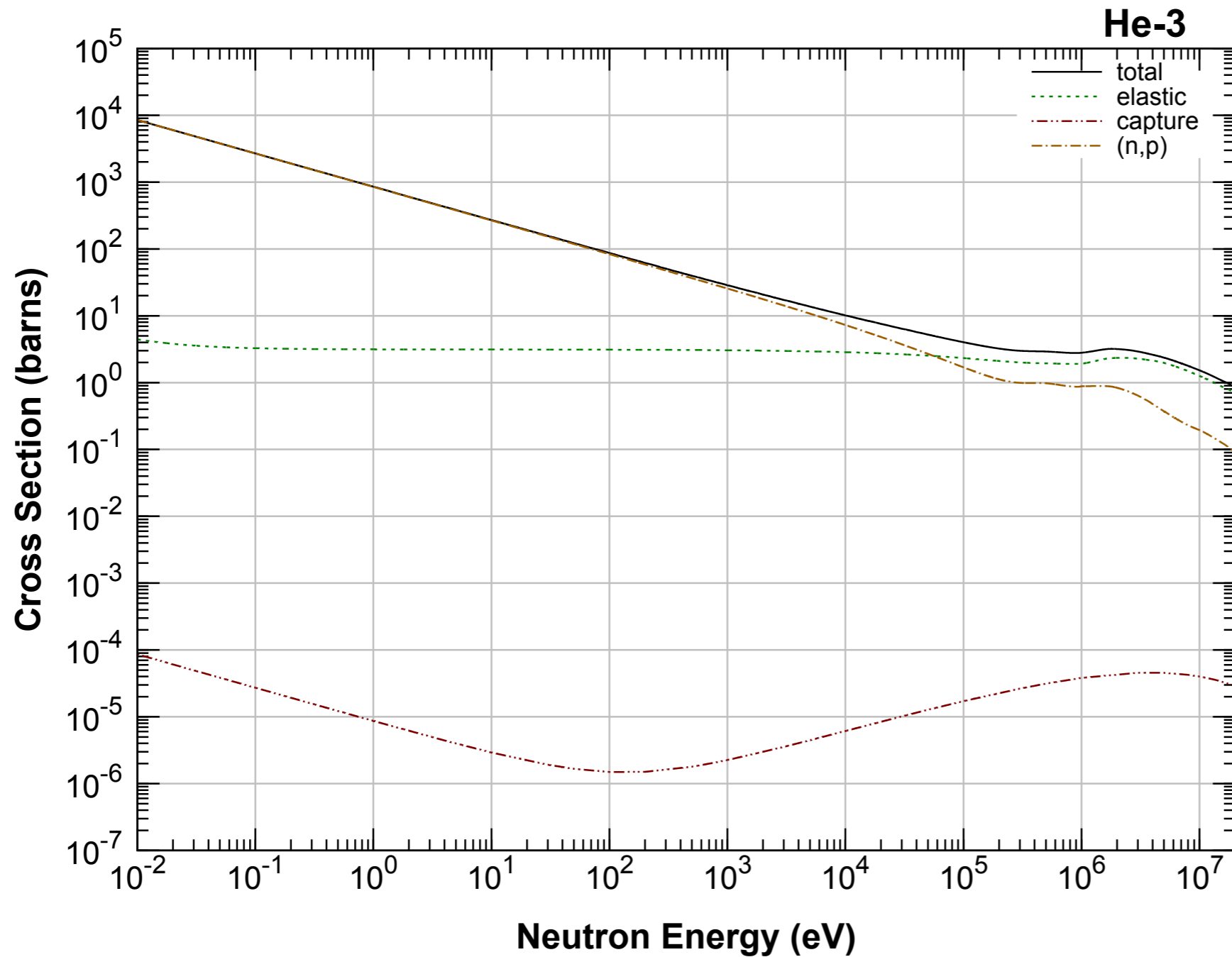


# 水素量不定性評価

counts /100k n	Sample1	+H1%	+H2%	+H3%	+H4%	+H5%	+H6%
Only He	1963	3680	4254	4641	4752	4872	4995
Poly+B	1876	1739	1771	1553	1613	1637	1476

- 水素を増やせば熱領域が多くなり,実験値に近づく.
- 総量は+H6%で中性子フラックスは半分程度.

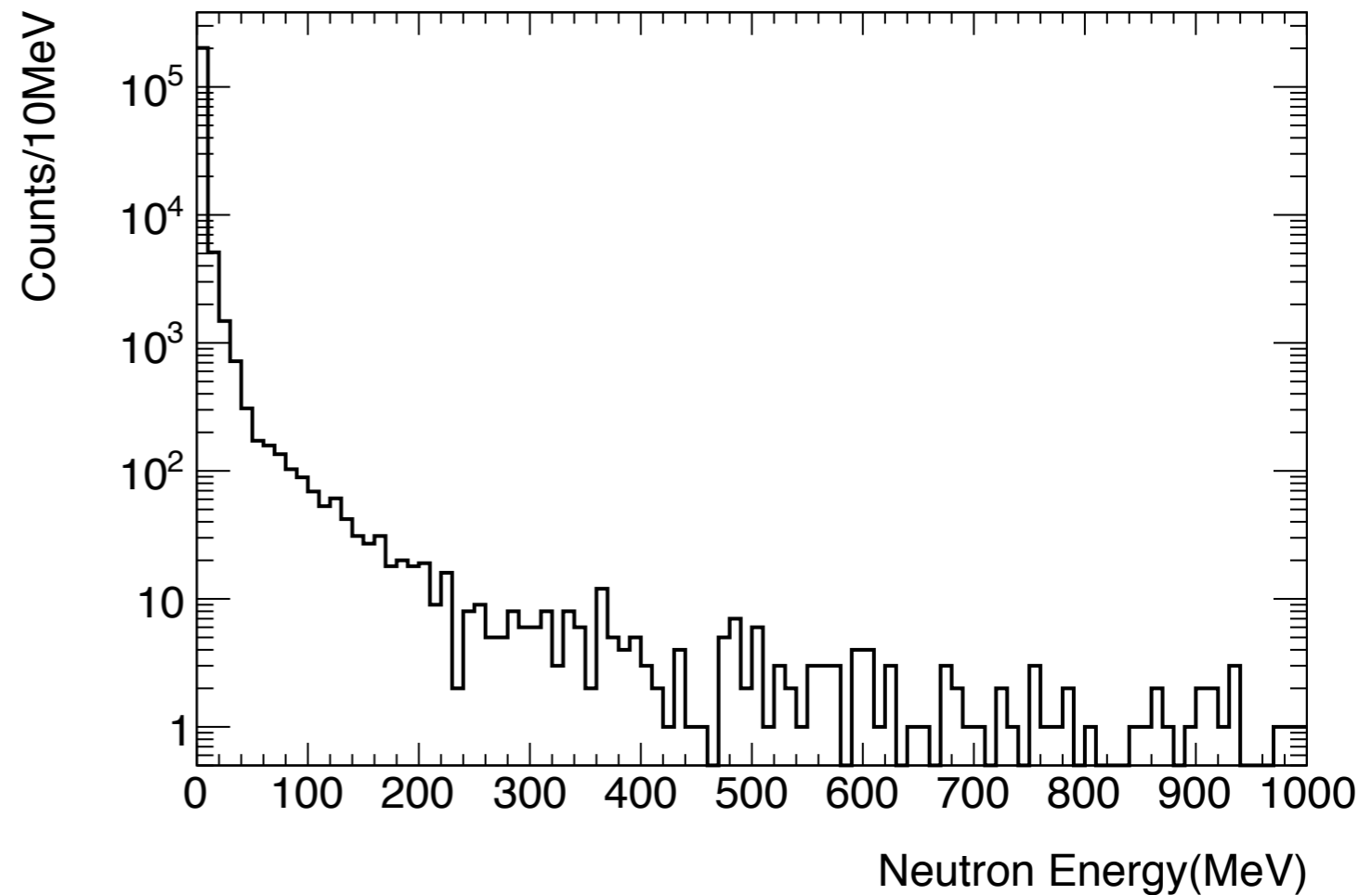
# $^3\text{He}$ cross section



- JENDL 4.0 database

# ミューオン由来中性子

- 高エネルギー領域まで発生しうる.
- 9頁の図広範囲版



# Analysis

- R. Taisyaku's works
  - Measuring environment neutrons in UG, yellow area is hidden by noise; only red area events can be detected. He measured the ratio(Red:Yellow) using Cf.
  - Number of Events can convert to Number of Neutrons.

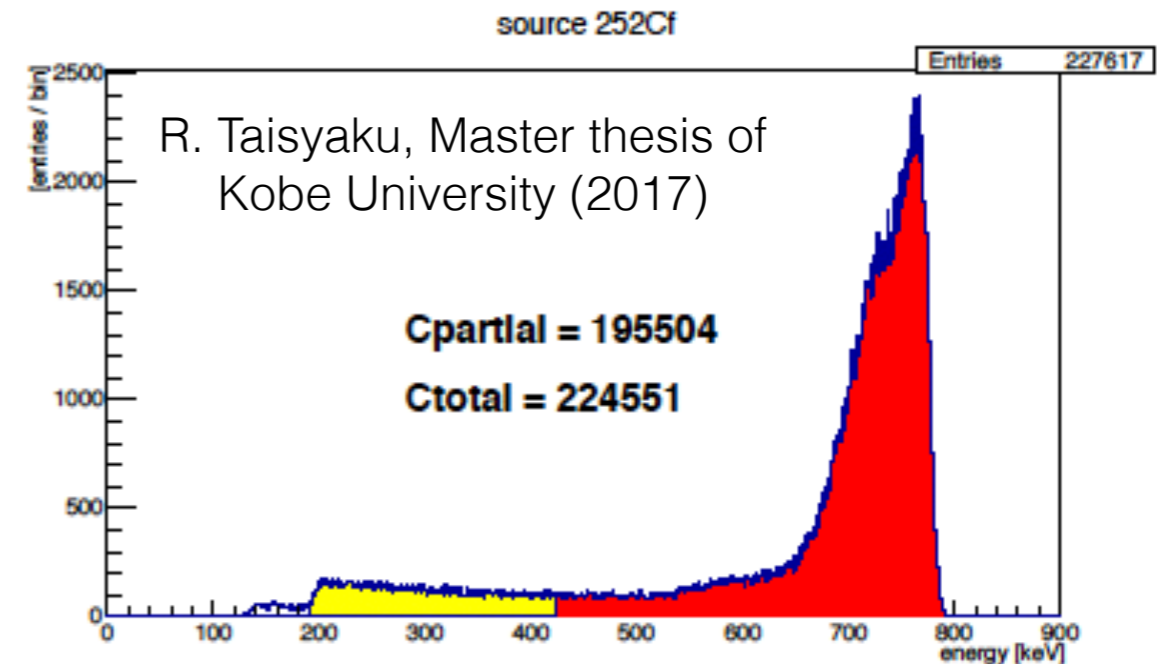


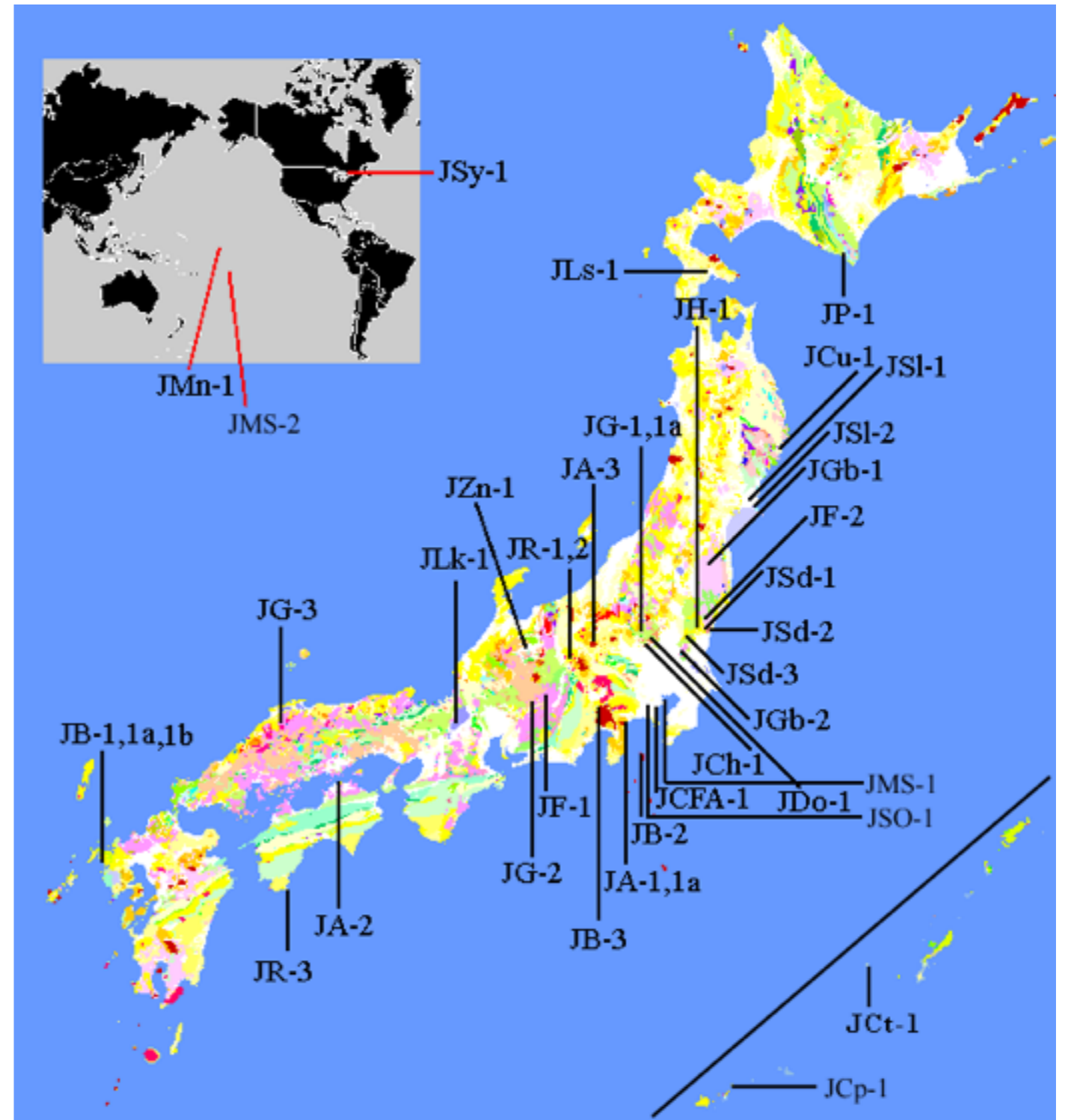
図 5.7:  $^{252}\text{Cf}$  線源を用いて取得したエネルギースペクトル

- Using this ratio and the factor to flux, **total neutron** flux can be gained.
- Thermal and other neutron flux are given by total spectrum



# Standard rock map

- Concerning the JZn-1 component



# 全測定元素量

(wt. %)	sample1	sample2	sample3
O	40.5	37.9	35.6
Ca	28.0	24.3	29.7
Si	16.6	15.6	12.0
Fe	7.6	16.6	13.5
Al	5.2	0.3	0.1
Ti	0.2	0.0	0.0
Mn	0.8	3.5	2.9
Mg	0.6	1.1	0.7
Na	0.0	0.2	0.0
K	0.0	0.1	0.0
P	0.2	0.0	0.0
S	0.0	0.1	1.2
Zn	0.0	0.1	4.3
Sr	0.1	0.0	0.0
Nb	0.0	0.0	0.0
Sn	0.1	0.0	0.0
Pb	0.0	0.0	0.0