

地下宇宙素粒子実験のための AmBe中性子線源の研究

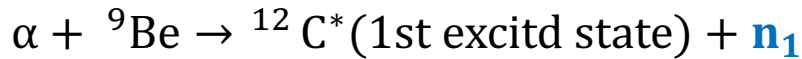
和田航平（横国大）

第2回地下宇宙若手研究会

南野彰宏（横国大）、伊藤博士、石塚正基、
恩村悠河（東京理科大）、矢野孝臣（ICRR）

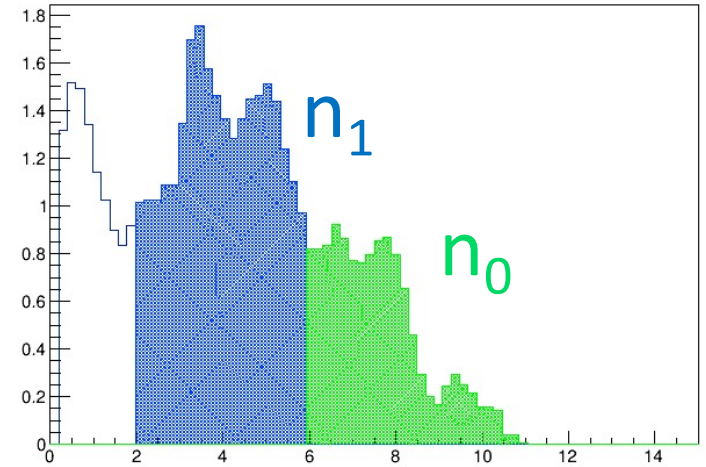
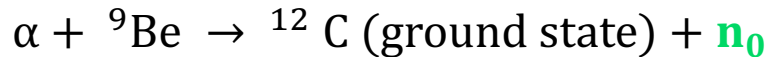
はじめに

- Americium Beryllium (AmBe) 線源
中性子検出効率の較正に用いられる放射線源

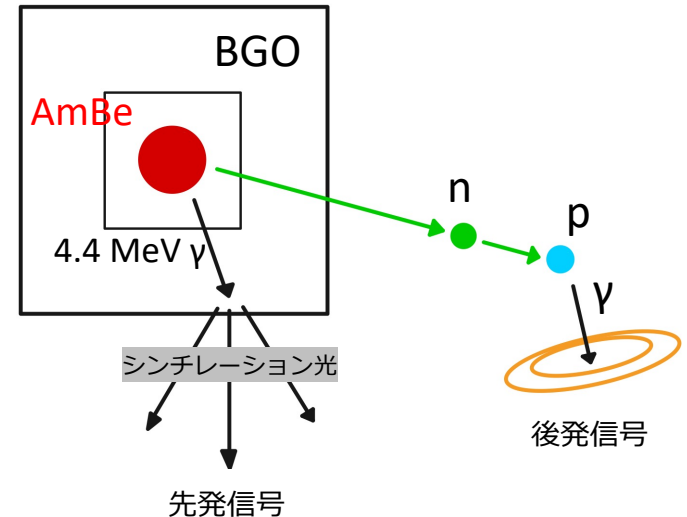


同時に放出される4.4MeVガンマで
中性子をタグ付けできる

直接基底状態の ^{12}C が生成されるチャンネルも存在、
 n_1 よりも大きいエネルギーを持つ中性子 n_0 が放出



AmBe中性子スペクトラム
ISO 8529:1989(E)



AmBe線源はSuper-Kamiokande(SK)の中性子
タグ効率の測定にも用いられている。

SKでのAmBe+BGOシンチレータ
を用いての中性子タグ効率測定

はじめに

測定された中性子タグ効率はMCで得られた値より相対的に10%小さい

- BGOのシンチレーションスペクトルを見ると、4.4 MeV以上の領域に高エネルギーテイル成分がある。

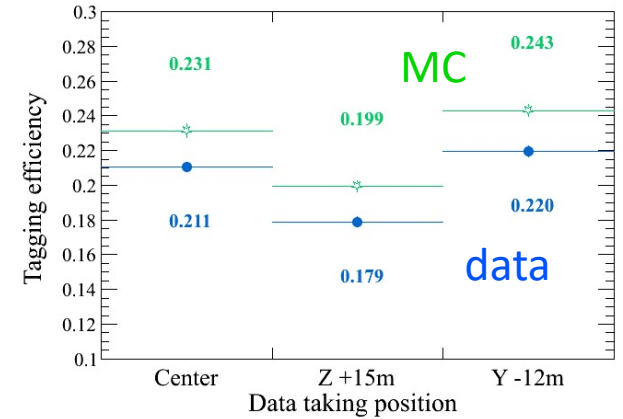
高エネルギーテイル成分の原因

- n_0 による寄与
- 4.4MeV γ + n_1 による寄与? ← 本研究の主な対象

→ 高エネルギーテイル成分が4.4 MeV peak の下に染み込んでいる場合、4.4 MeV γ 事象としてカウントされる。

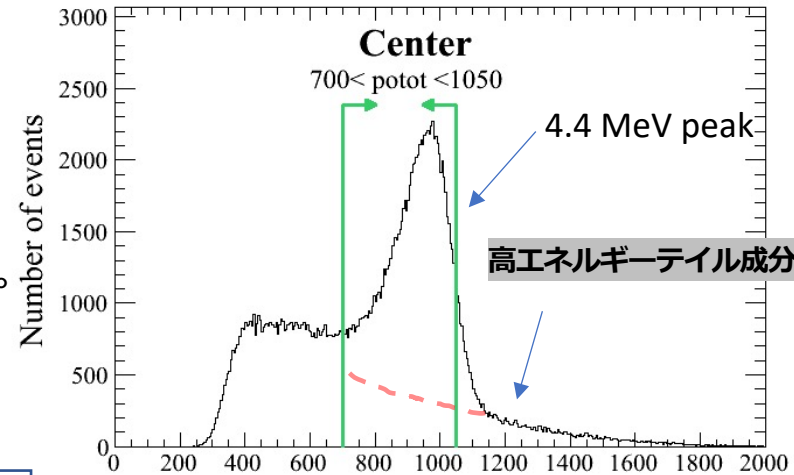


• NaI(Tl)検出器による測定、およびシミュレーションによって高エネルギーテイル成分の組成を理解。
→ 4.4 MeV γ 事象のミスカウントを減らす。



中性子タグ効率(純水)

Ryosuke Akutsu. University of Tokyo, 2019, Ph.D. thesis.



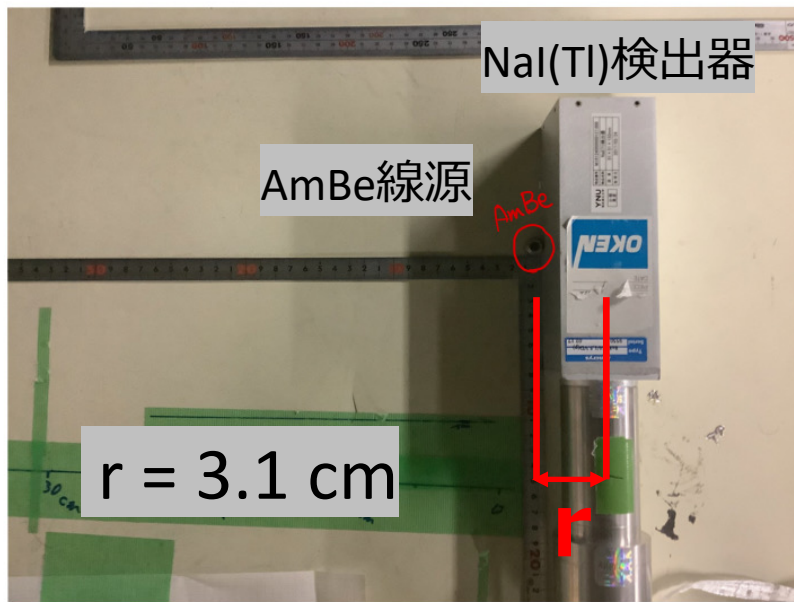
Scintillation spectrum of BGO in SK(p.e)

Ryosuke Akutsu. University of Tokyo, 2019, Ph.D. thesis.

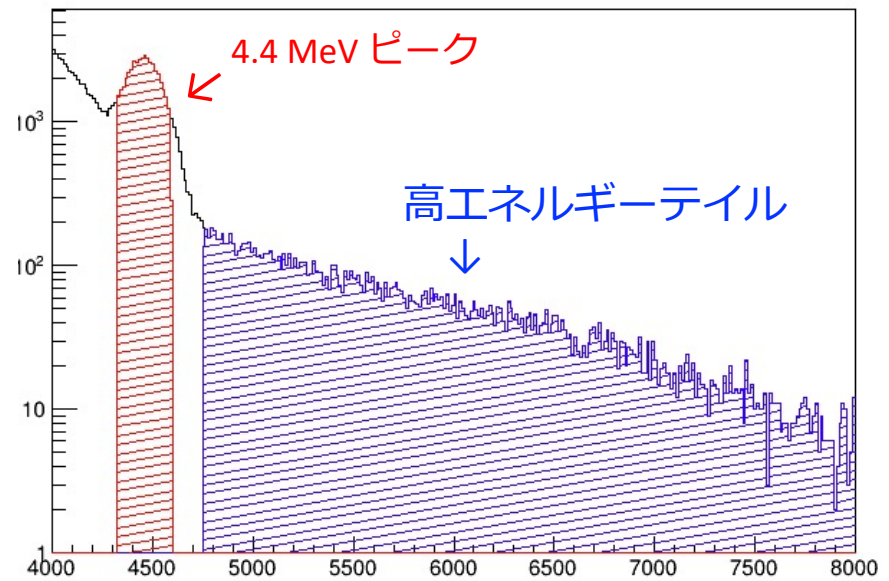
[keV]z

NaI(Tl)検出器による測定

- NaI(Tl)検出器(2"×2"×6") によってAmBeの測定を行った。
→ BGO同様に4.4 MeV以上の領域に高エネルギー成分の存在を確認。
- 高エネルギーテイルが、4.4MeV $\gamma + n_1$ のイベントによってできているかの確認のため、検出器と線源間の距離(=r)を変え、測定を行った。



実験セットアップ



NaI scintillation spectrum [keV]

Nal(Tl)によるAmBe線源の測定

Nal(Tl)検出器とAmBe線源間の距離(=r)を変えて測定

$$\text{ratio} = \frac{\text{高エネルギーテイル成分}}{\text{4.4 MeVピークのカウント} (\propto 1/r^2)}$$

高エネルギーテイルが、

1. n_0 のみ(①)でできている場合

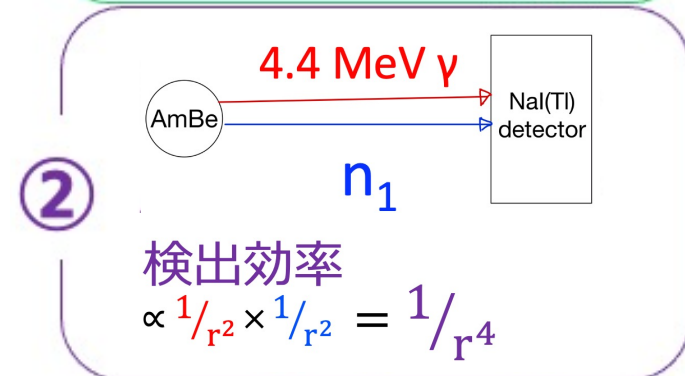
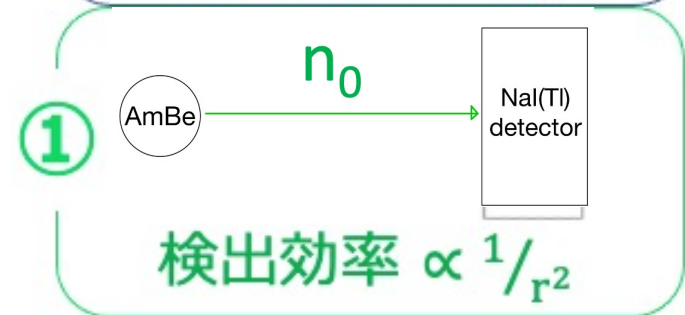
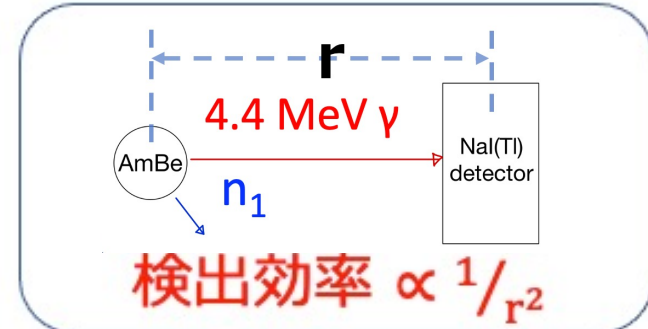
$$\text{Ratio} = \frac{n_0 (\propto 1/r^2)}{4.4 \text{ MeV } \gamma (\propto 1/r^2)}$$

→ ratioはrに対して一定

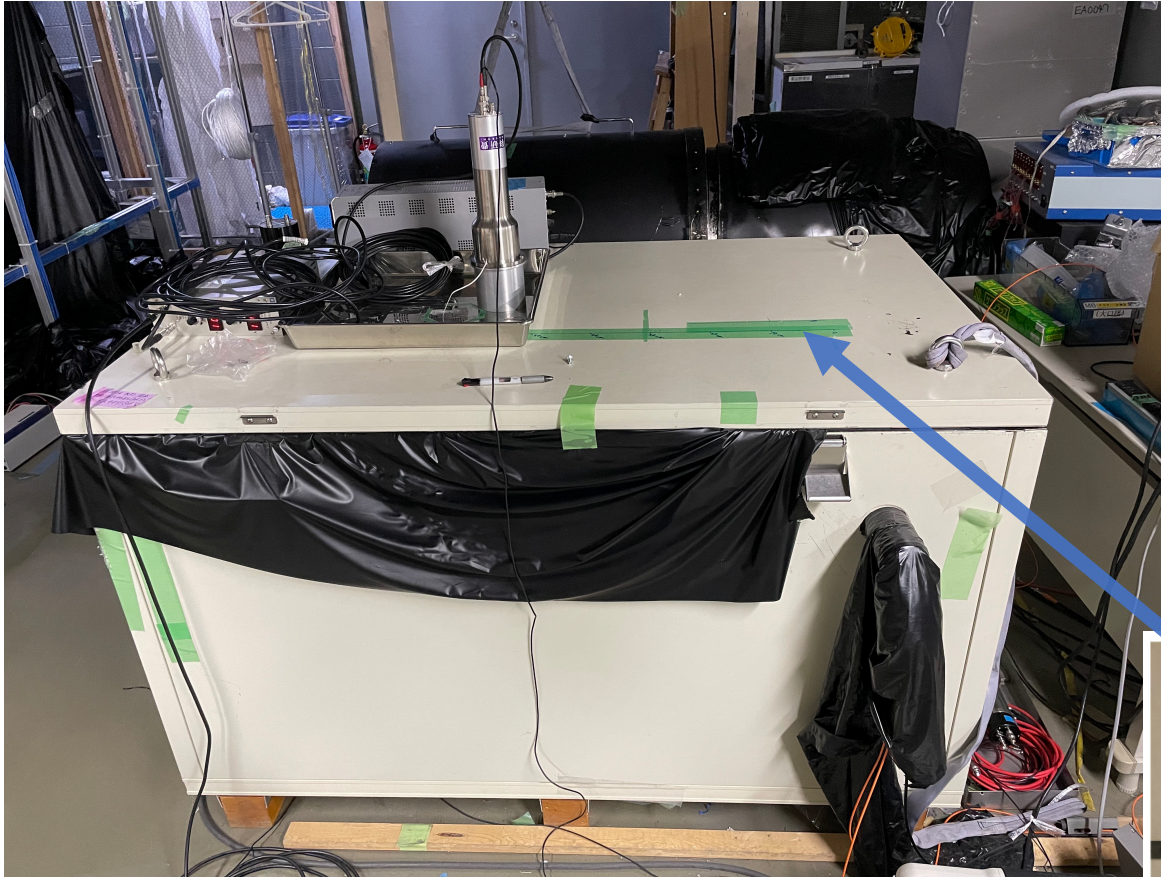
2. n_0 (①)、 $\gamma + n_1$ (②)でできている場合

$$\text{Ratio} = \frac{n_0 (\propto 1/r^2) + \text{simltaneous } \gamma + n_1 (\propto 1/r^4)}{4.4 \text{ MeV } \gamma (\propto 1/r^2)}$$

→ ratioはrに対して一定成分 + $1/r^2$ で減少する成分がある。



NaI(Tl)によるAmBe線源の測定

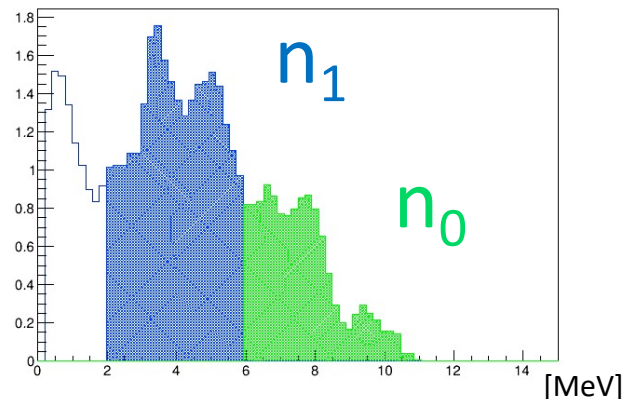


lab B 内にある鉄製 (?)
の机上で測定を行った

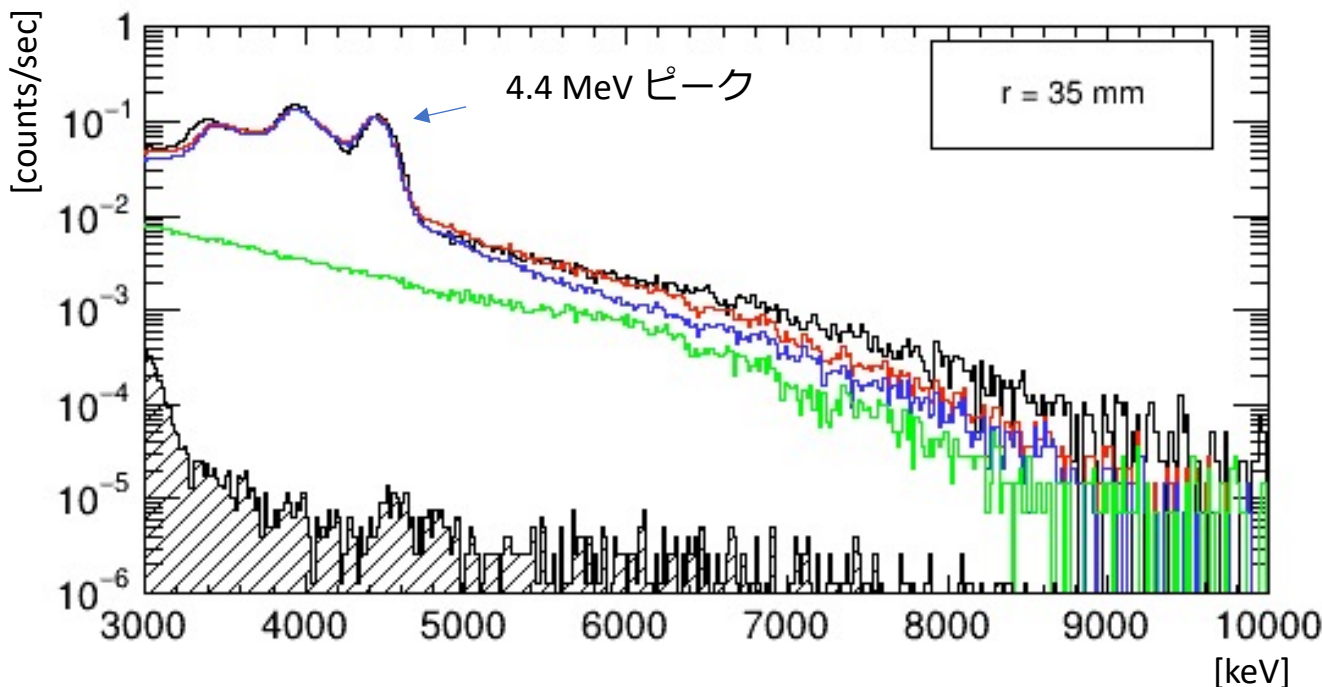


結果：エネルギースペクトラム

- 実験より得られたスペクトラムを geant 4 による MCシミュレーションと比較した。
- おおよそのスペクトラムの形は再現できている。
- 中性子がNaI中で非弾性散乱を起こすことで 4.4 MeV高エネルギーテイル成分を作る。



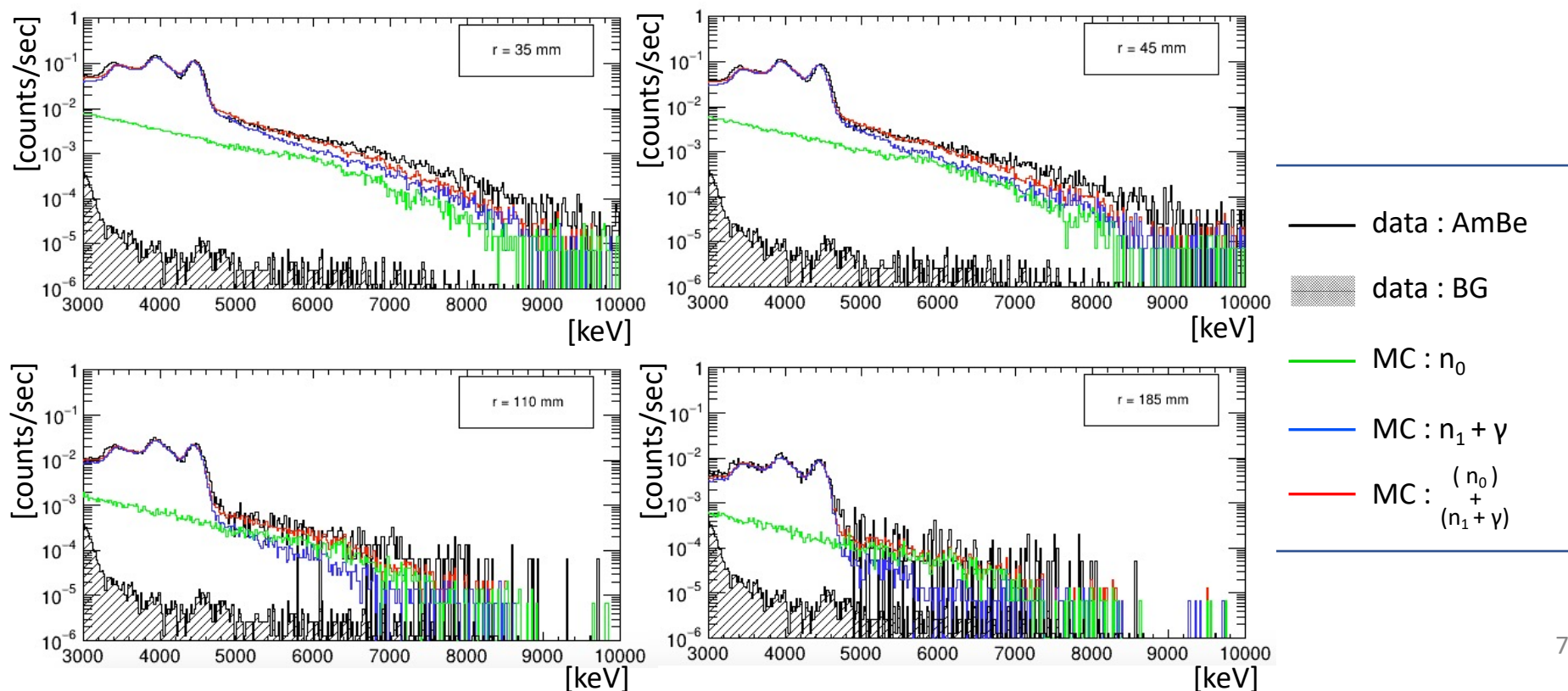
AmBe中性子スペクトラム
ISO 8529:1989(E)



物理モデル
Geant4.9.6.p04 + G4NDL4.2

結果：線源からの距離 r のNaI(Tl)のエネルギースペクトラム

- $n_1 + \gamma$ による高エネルギーテイル成分は r が小さい領域ではその寄与は大きい。
- 距離が離れていくにつれその寄与は小さくなり、 n_0 の方が大きくなる。

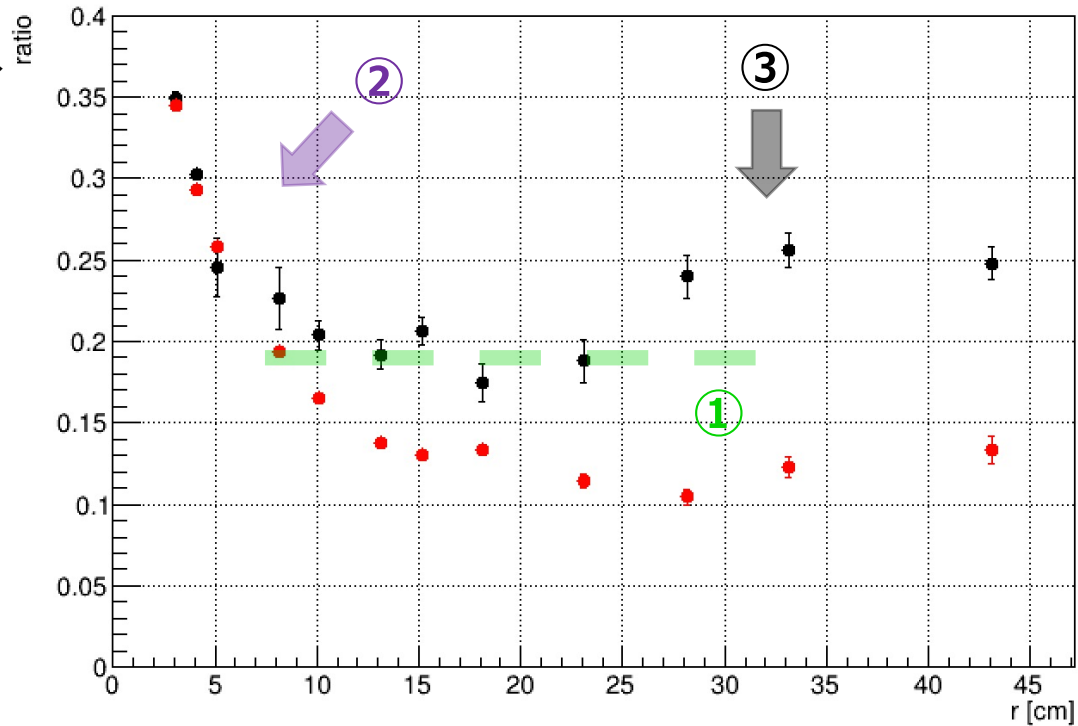
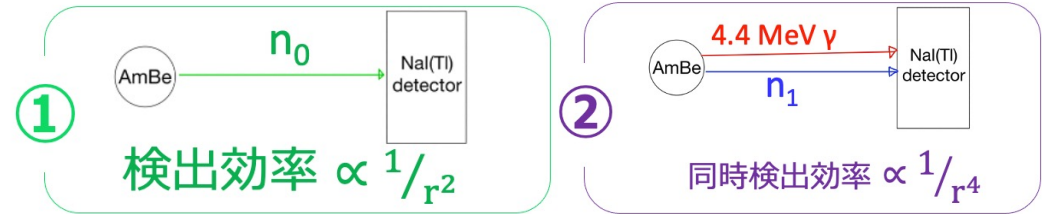


ratio(高エネルギーテイル/4.4MeVピーク) 分布

結果

• $r < 25$ cm の領域
rに依らず一定な成分① (~ 0.2)
rの増加に伴い減少する成分②
の両方を確認できた。

→ ①と②が高エネルギーテイル成分
を作っていることを示唆。



r vs ratio

黒 : data 赤 : MC

ratio(高エネルギーテイル/4.4MeVピーク) 分布

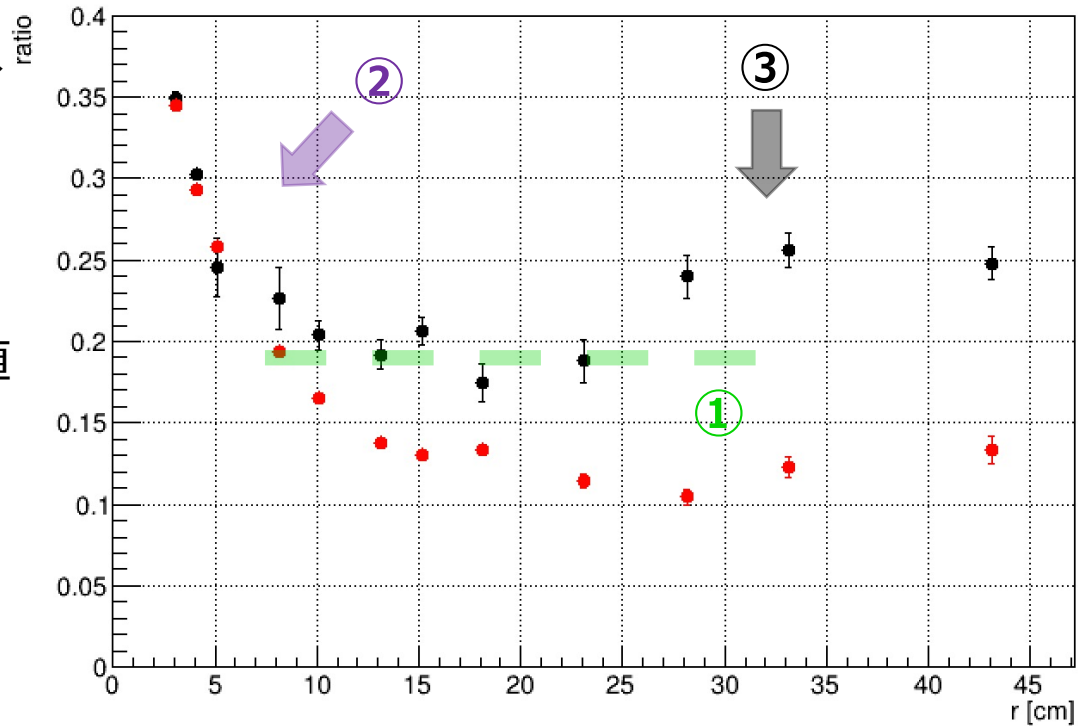
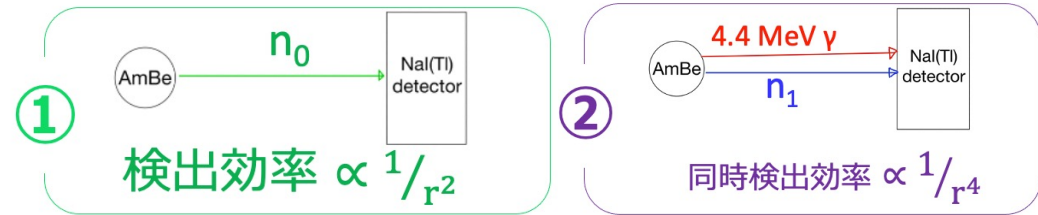
結果

- $r < 25$ cm の領域
 r に依らず一定な成分① (~ 0.2)
 r の増加に伴い減少する成分②
 の両方を確認できた。

→ ①と②が高エネルギーテイル成分
 を作っていることを示唆。

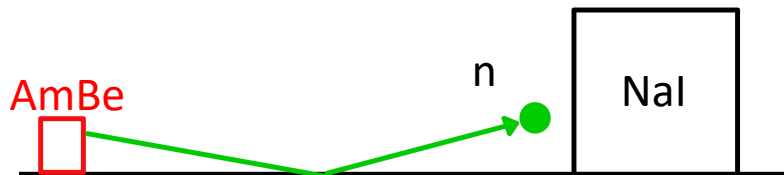
考察

- ratioもスペクトラムもMCと絶対値
 が合っていない。
- $r > 25$ cm の領域で
 増加する第③の成分が存在する。
 - 周りの環境による影響?
 セットアップを置いている机など



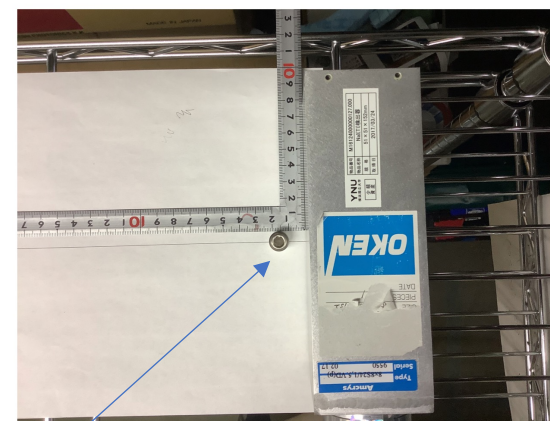
r vs ratio

黒 : data 赤 : MC



新セットアップでの測定

Nal(Tl)検出器



AmBe
(A4紙の上に設置)

Nal(Tl)
検出器

1.2 m × 0.5 m × 1.5 m のメッシュラック(鉄製)
の最上段に同様のセットアップを組み立て測定

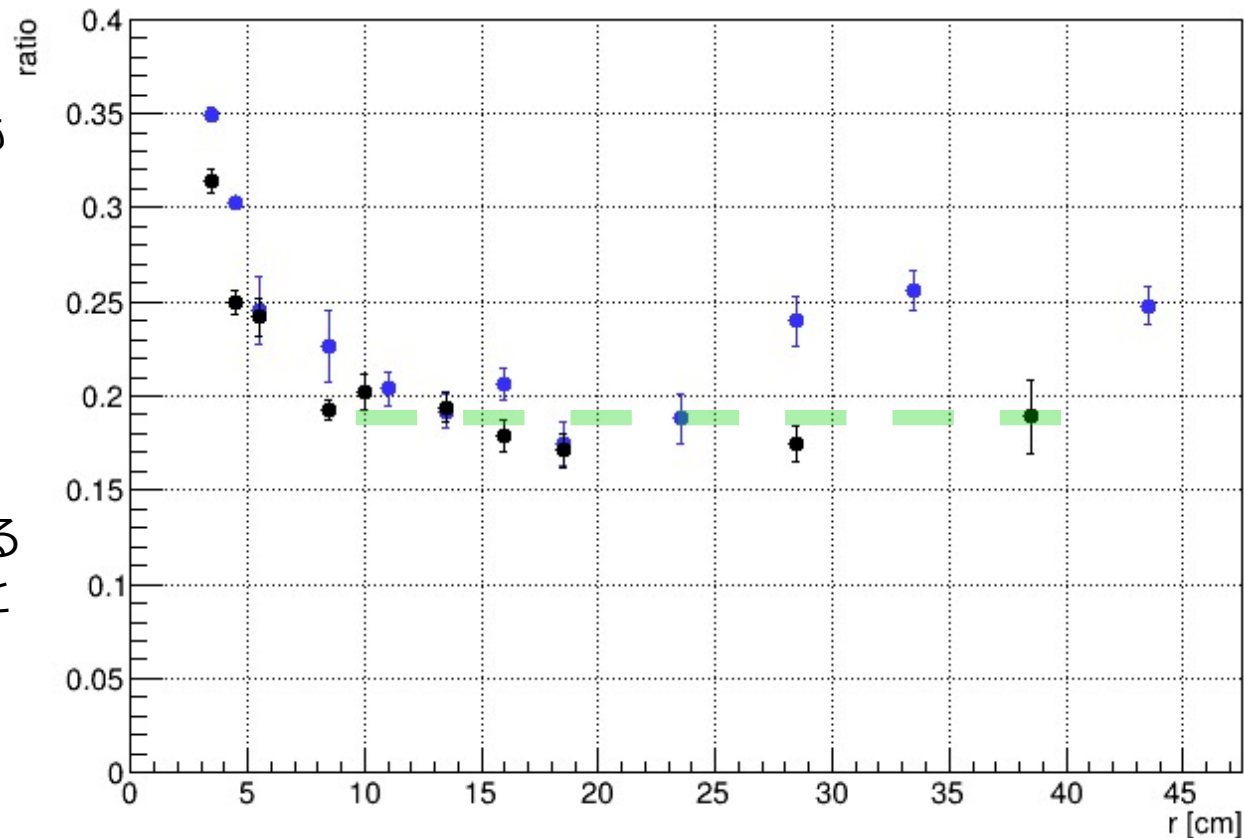
ratio分布 : 新セットアップ

結果

$r < 10$ cm の領域において ratio の値は前回測定よりも小さい値をとった。

$r > 25$ cm における ratio の増加成分が消失。

n_0 が支配的となる、 $10 \text{ cm} < r < 25 \text{ cm}$ に見られるベースラインは前回測定と同等の値をとった。



黒 : ラック上での測定 , 青 : 机上での測定

ratio分布 : 新セットアップ

結果

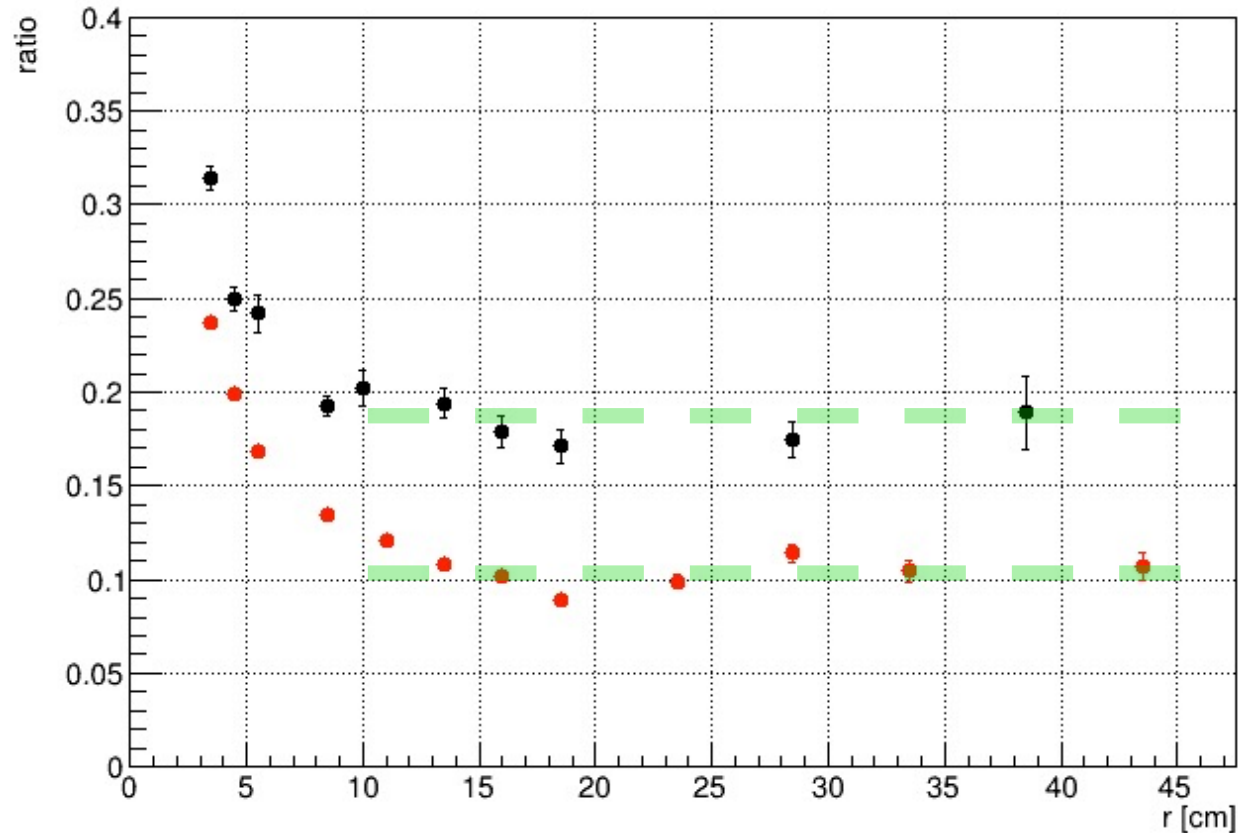
$r < 10$ cm の領域において ratio の値は前回測定よりも小さい値をとった。

$r > 25$ cm における ratio の増加成分が消失。

n_0 が支配的となる、 $10 \text{ cm} < r < 25 \text{ cm}$ に見られるベースラインは前回測定と同等の値をとった。

MC との data で ratio の差が 2 倍ほどある。

→ 非弾性散乱の断面積が違う？
 $n_0 : n_1$ の比が違う？



黒 : ラック上での測定, 赤 : MC

まとめ

無機シンチレータを用いてのAmBe測定で見られる4.4 MeV以上の高エネルギー成分の理解のため、NaI(Tl)検出器を用いて実験を行った。

結果

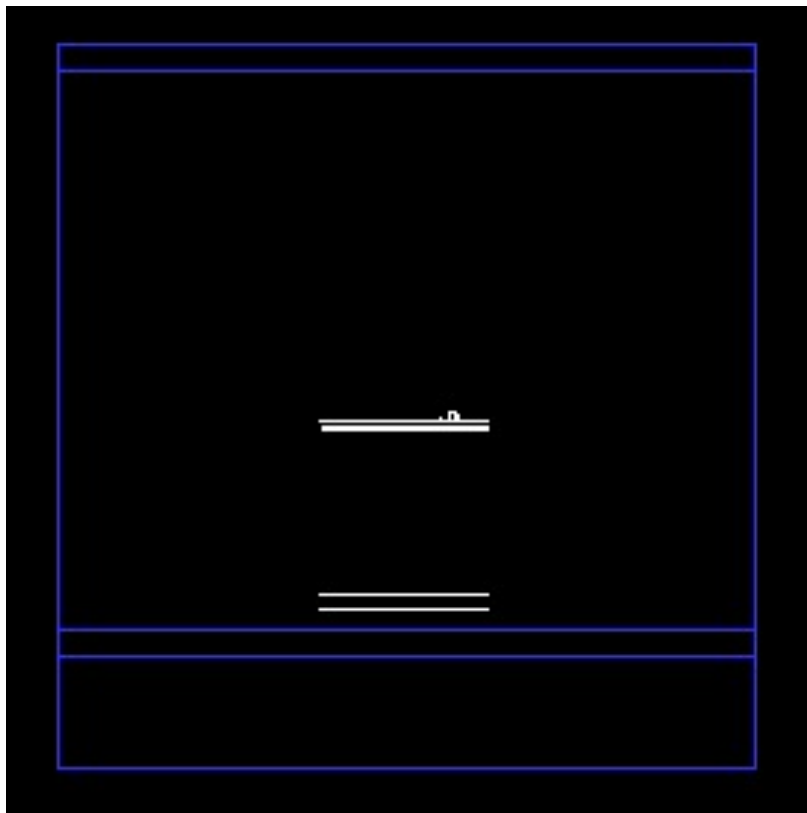
- AmBe線源の中性子の非弾性散乱のイベント（単一で放出される中性子 n_0 のイベント、4.4 MeVの γ 線及びそれと同時に放出される中性子 n_1 が同時検出されるイベント）によって高エネルギーテイル成分が作られる。
- 新セットアップでの実験によって、遠距離($r > 25\text{cm}$)でのratioの上昇が抑えられた。

今後の展望

- ratio分布におけるdataとmcの不一致の原因を明らかにする。
- BGOシンチレータを用いて同様の測定を行う。

Back up

Wall + rack



白 : ラック仮想板 青 : labB壁面

片側 370cm離れた場所、260 cm上方、150cm下方に
5m×5m×厚さ20cmの岩盤 (sample1)

+

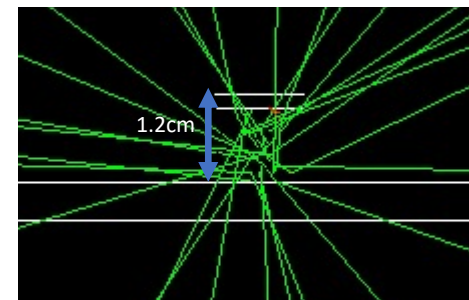
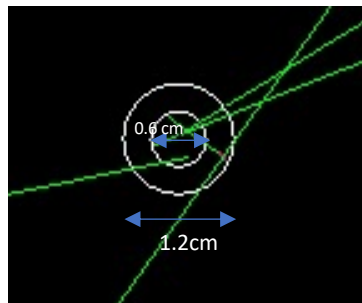
ラック (0.5cm厚さの仮装板に密度1.29g/cm³を付与) 板を
4枚実装

表 5.1: 神岡坑内における岩盤成分の重量比 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ZnO
Sample 1	35.75	11.35	10.95	1.09	0.99	39.37	0.02	0.35	0.10	0.03
Sample 2	33.74	0.74	23.94	4.63	1.92	34.35	0.32	0.02	0.17	0.17
Sample 3	25.62	0.25	19.32	3.73	1.16	41.54	0.00	0.02	3.01	5.35

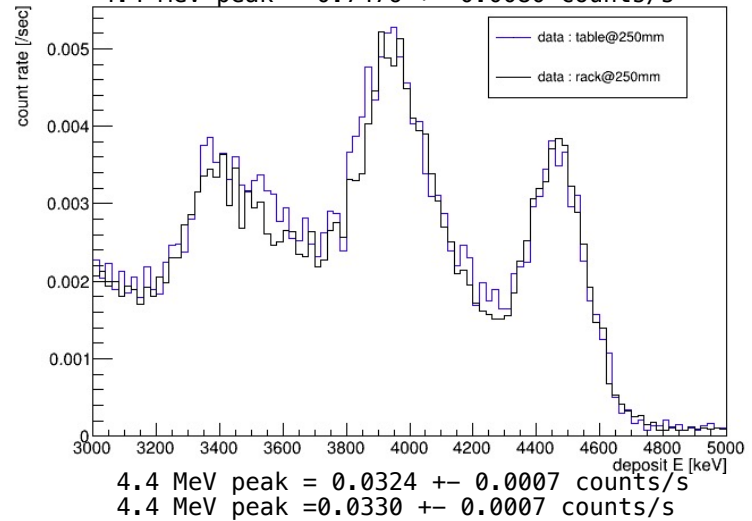
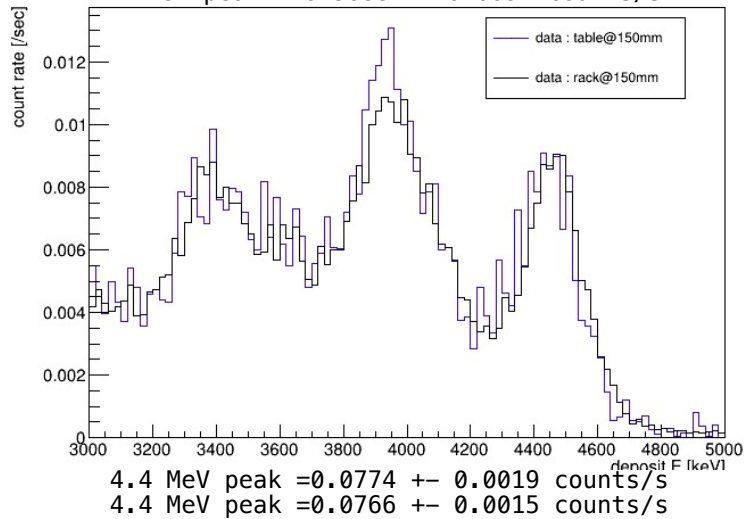
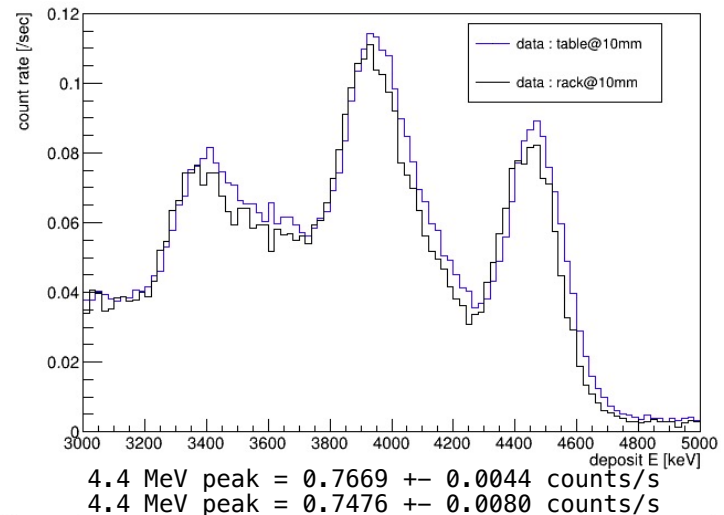
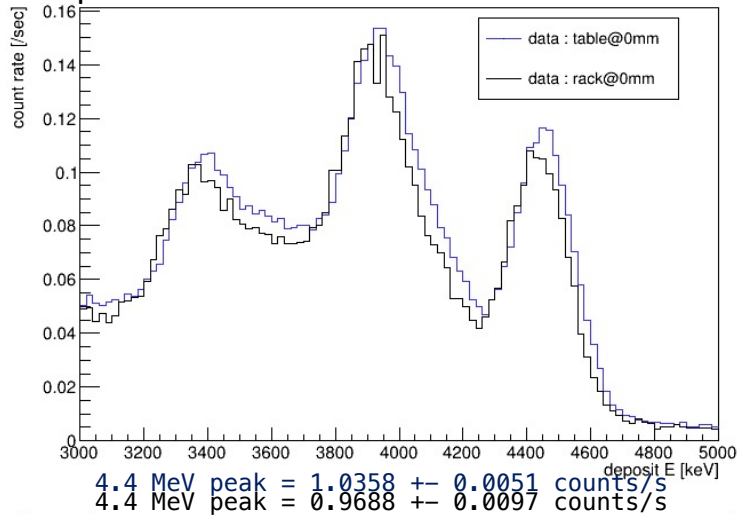
/disk02/usr6/kwada333/simulation/
AmBeNeutronSimulator_newsetup_ver2/src/NNCDetectorCpnstruction.cc

2020年 YNU 佐々木さん 修士論文より

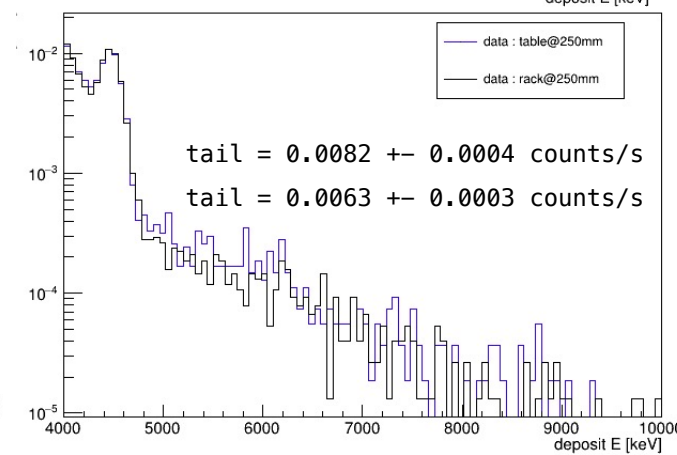
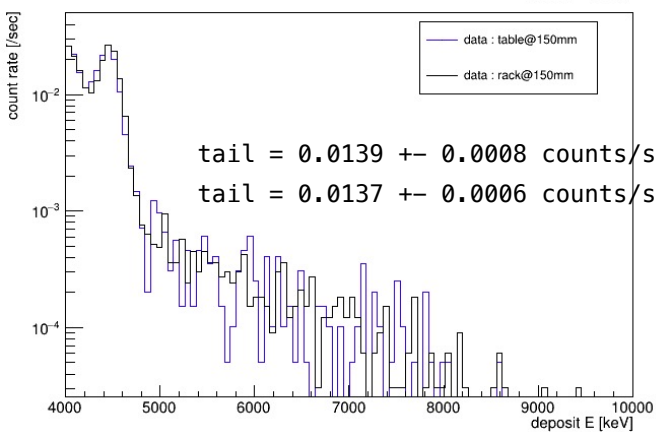
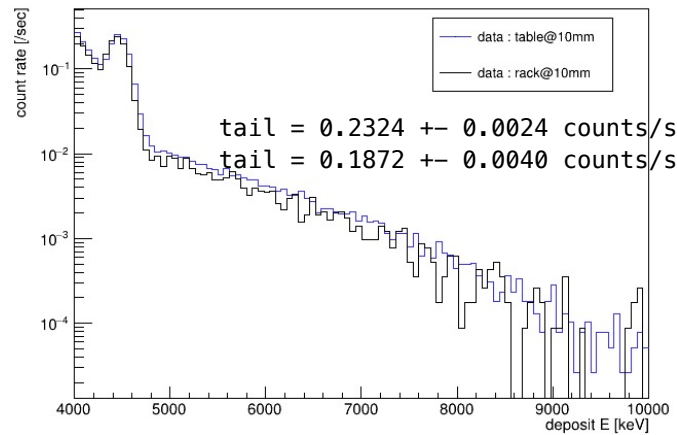
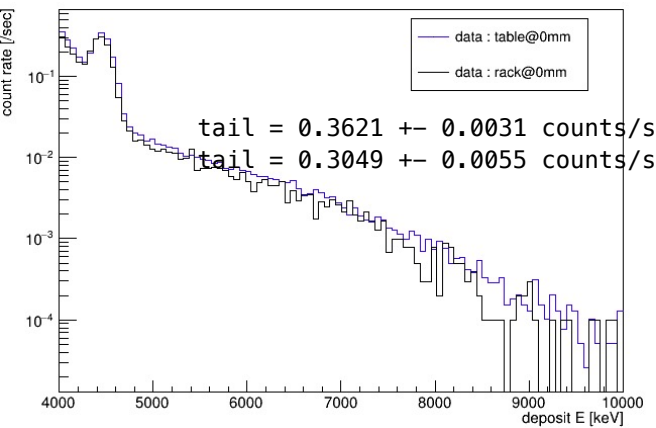


線源 + sus container

4.4 MeV peak 付近



テール成分



d = 0, 10 cm

Table → rackで
4.4 MeV peak, tail
共に減少するが
tailの減少の割合が大きい
近距離でのratioの減少

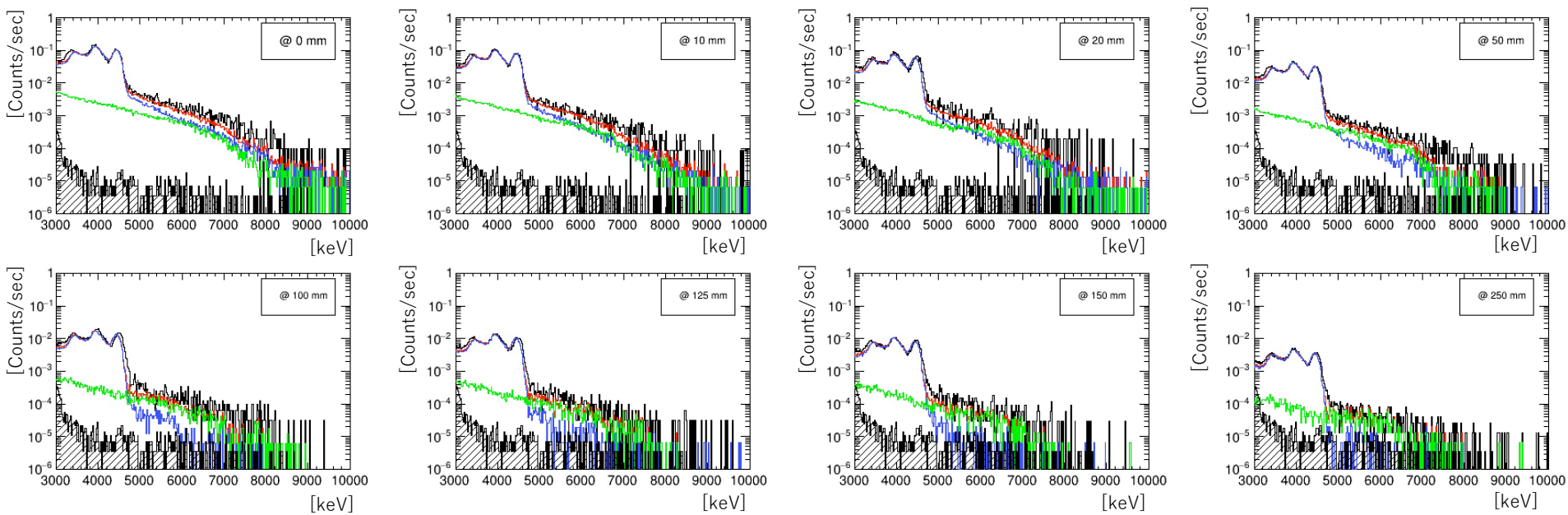
d = 15 cm

Table → rackで
4.4 MeV peak, tail共に
同程度のカウント
ratio: ベースラインの一致

d = 25 cm

Table → rackで
4.4 MeV peakは同程度
tailが減少

ラック上での測定



— data : AmBe

▨ data : BG

— MC : n_0

— MC : $n_1 + \gamma$

— MC : $\begin{pmatrix} n_0 \\ + \\ (n_1 + \gamma) \end{pmatrix}$