

宇宙ニュートリノ研究

永塚絢音
内田敦也
大高駿輔
伊藤律
小栗優

目的

- SKのニュートリノ検出方法を模倣した小型検出器を作製
- テスト線源を用いて検出効率の評価
- ニュートリノの観測に挑戦

主なニュートリノ源

- ・ 太陽ニュートリノ：太陽中の核融合により生成
- ・ 大気ニュートリノ：1次宇宙線(陽子)が大気に衝突し生成
- ・ 加速器ニュートリノ：東海村にあるJ-PARCより生成
- ・ **超新星背景ニュートリノ**：超新星爆発により放出
→ 星の進化について知る手掛かりに

SKでのニュートリノ検出

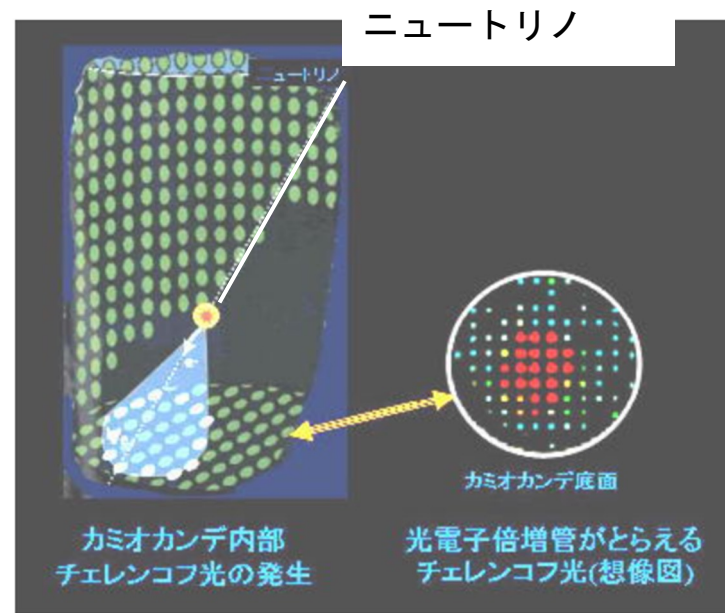
宇宙から降ってきたニュートリノがカミオカンデ内の水中で反応



逆ベータ反応などを起こしチェレンコフ光を複数発生



壁面上の光電子増倍管 (PMT) が感知する



環境放射線の除去

SKは地下1000mに設置

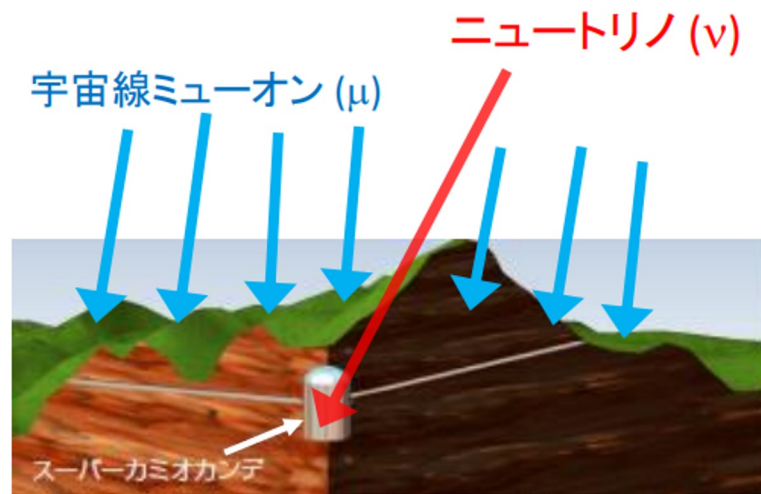
- ノイズとなる宇宙線ミュオンを除去

地上 : 1発 / 100cm² / s

地下1000m : 10⁻⁵ 発 / 100cm² / s

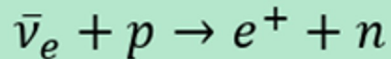
ミュオンは電荷を持つがニュートリノは電荷をもたない

- 岩盤中に含まれるラドン

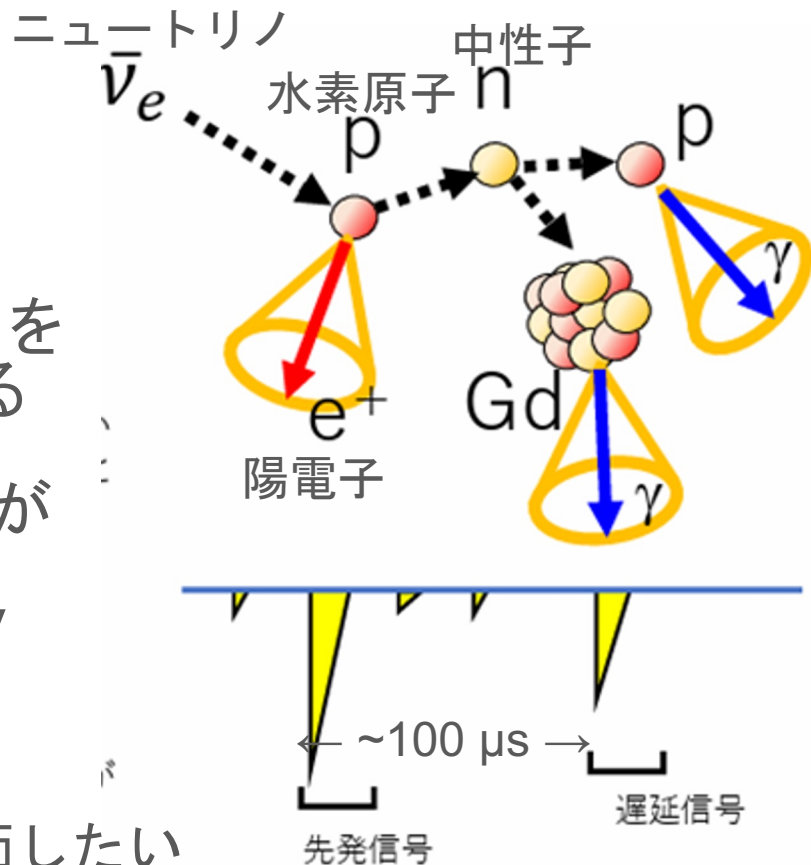


ディレイド・コインシデンス信号

逆ベータ崩壊反応



- ・ ~100 μs 間隔で発生する2個の信号を検出することで、他のノイズとなる事象と区別をつけることができる
- ・ 中性子がHに吸収 \rightarrow 2.2 MeVの γ 線が放出
- ・ 中性子がGdに吸収 \rightarrow 合計 約8 MeVの複数の γ 線が放出



[この反応を再現し、その検出効率を評価したい](#)

Am/Be線源



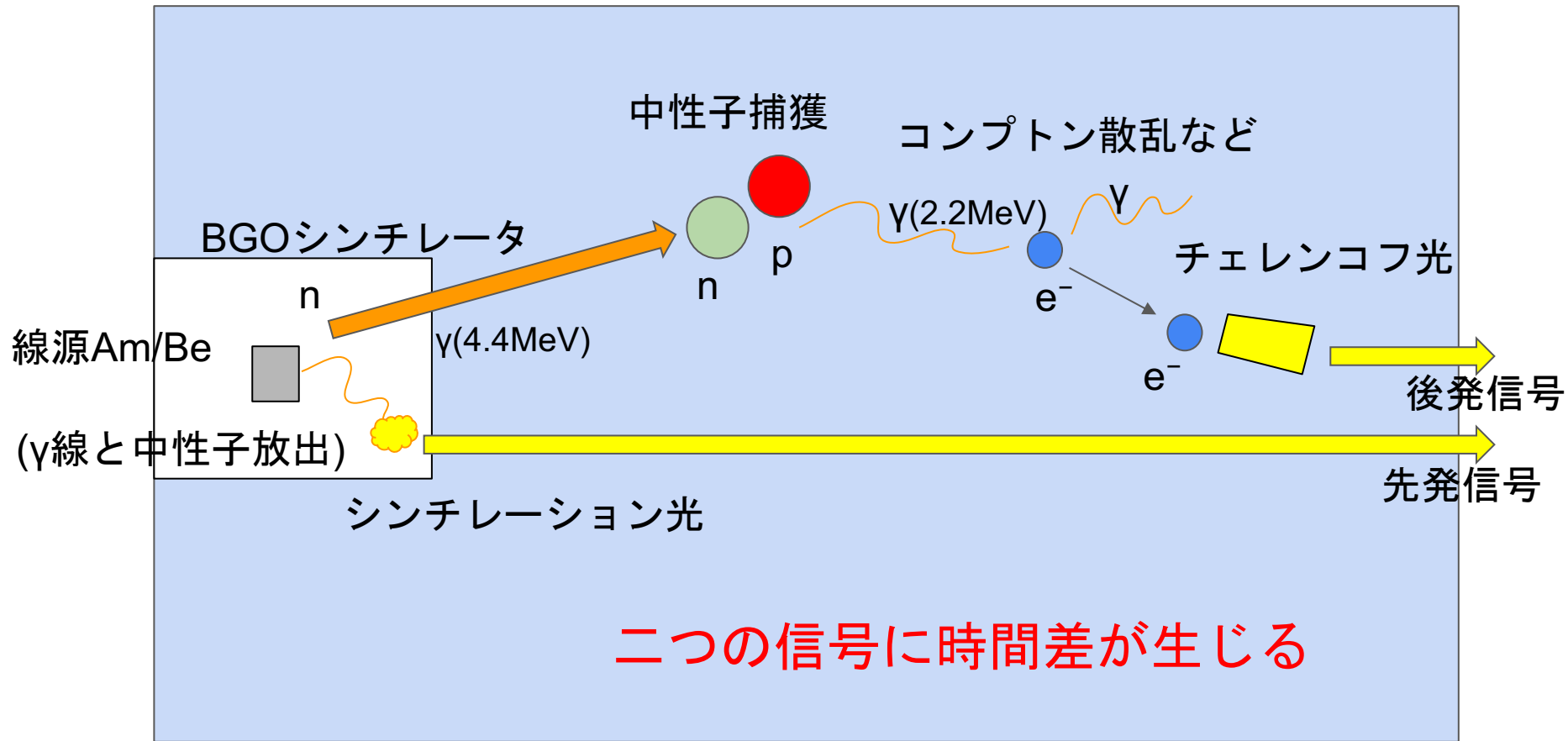
- ・ 中性子→陽子により捕獲→ガンマ線
→コンプトン散乱など
→チェレンコフ光
- ・ ガンマ線→シンチレーション光

逆β反応と同じく先発信号と後発信号を出せる

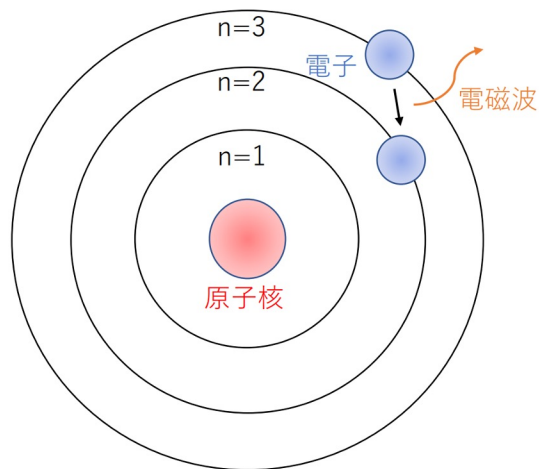
Am/Be線源とBGOシンチレータ



ミニカミオカンデのディレイド・コインシデンス



BGOシンチレータ ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)



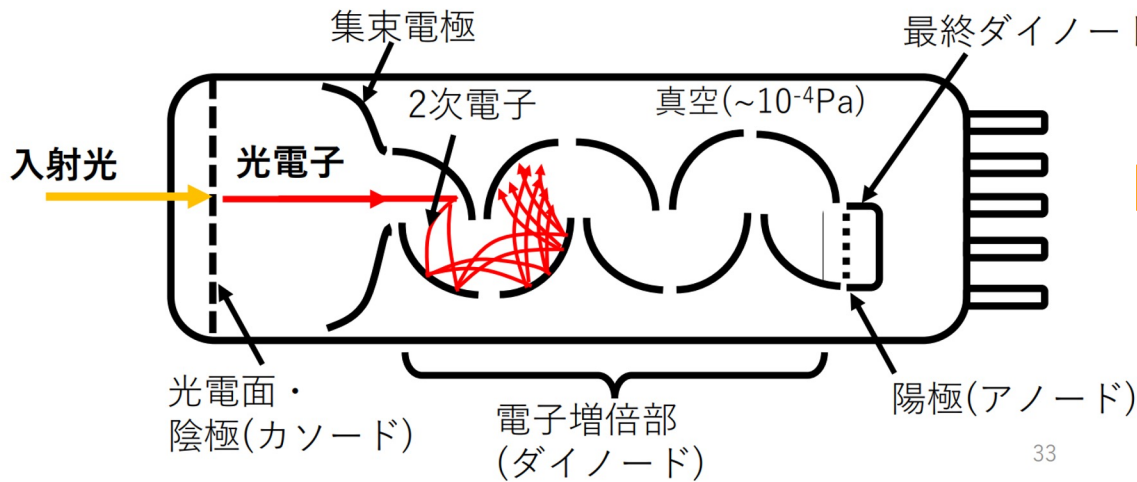
光电吸収で発光 (シンチレーション光)

密度大きい
→反応数多くなる

| 結晶名 | Nal:TI | Csl:TI | Csl:Na | LSO | LYSO:Ce | GSO | BGO |
|------------------------------------|-------------|--------|--------|---------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|
| 化学式 | Nal | Csl | Csl | Lu_2SiO_5 | $\text{Lu}_2(1-x)\text{Y}_2\text{SiO}_5$ | Gd_2SiO_5 | $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ |
| 密度 [g/cm ³] | 3.67 | 4.51 | 4.51 | 7.4 | 7.1 | 6.7 | 7.13 |
| モース 硬度 | 2 | 2 | 2 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5 |
| 屈折率 | 1.85 | 1.78 | 1.78 | 1.81 | 1.81 | 1.85 | 2.15 |
| 結晶系 | 立法晶 | 立法晶 | 立法晶 | 単斜晶 | 単斜晶 | 単斜晶 | 立方晶 |
| 融点 [°C] | 651 | 621 | 621 | 2050 | 2050 | 1950 | 1050 |
| 吸湿性 | 有り | 若干 | 若干 | 無し | 無し | 無し | 無し |
| 熱膨張 係数 [10 ⁻⁶ /K] | 4.75 | 5 | - | - | - | - | 0.7 |
| へき開 | 有り <100> | 無し | 無し | 無し | 無し | 有り | 無し |



PMT (光電子増倍管)



33

光の情報を電気信号に変換



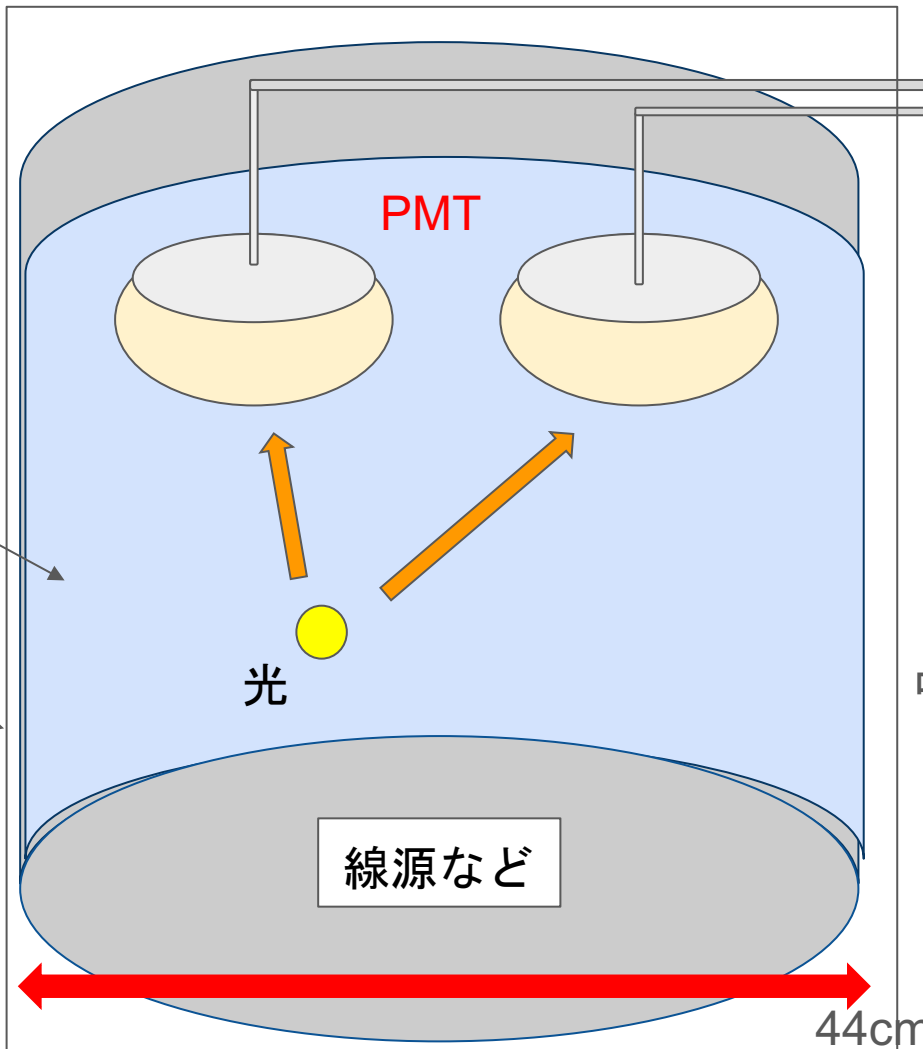
検出器

30cm

内側は
アルミの鏡

環境光を遮断

光をPMTで検出する



PMT

光

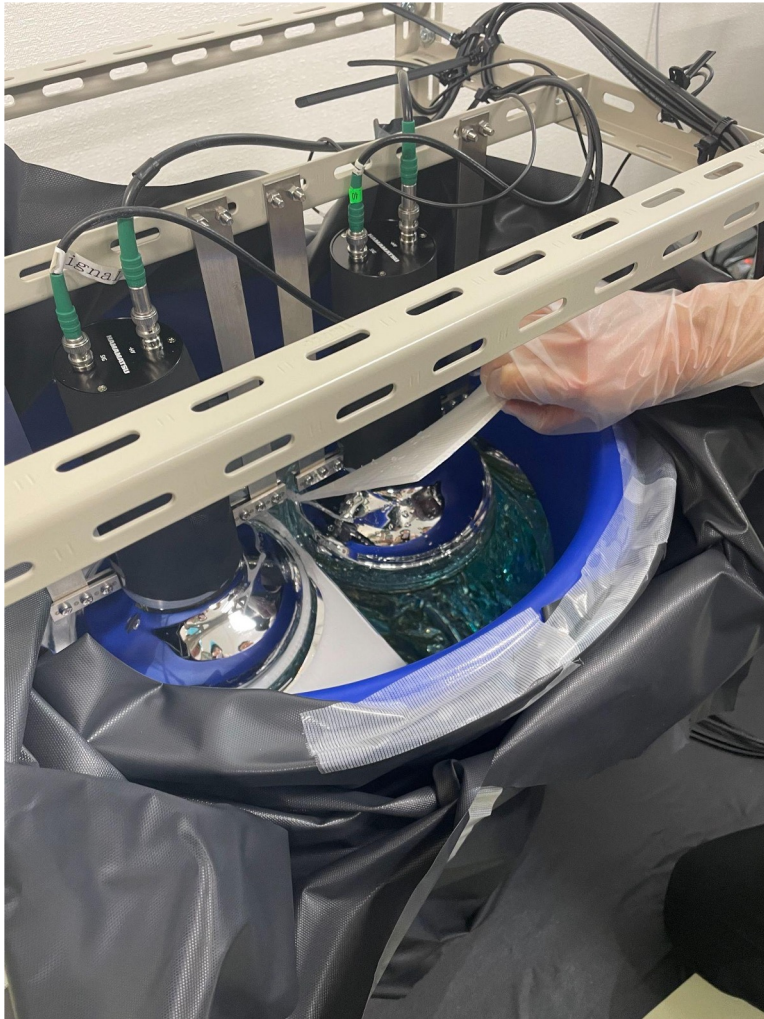
線源など

DAQシステム

中央に置くのは三通り

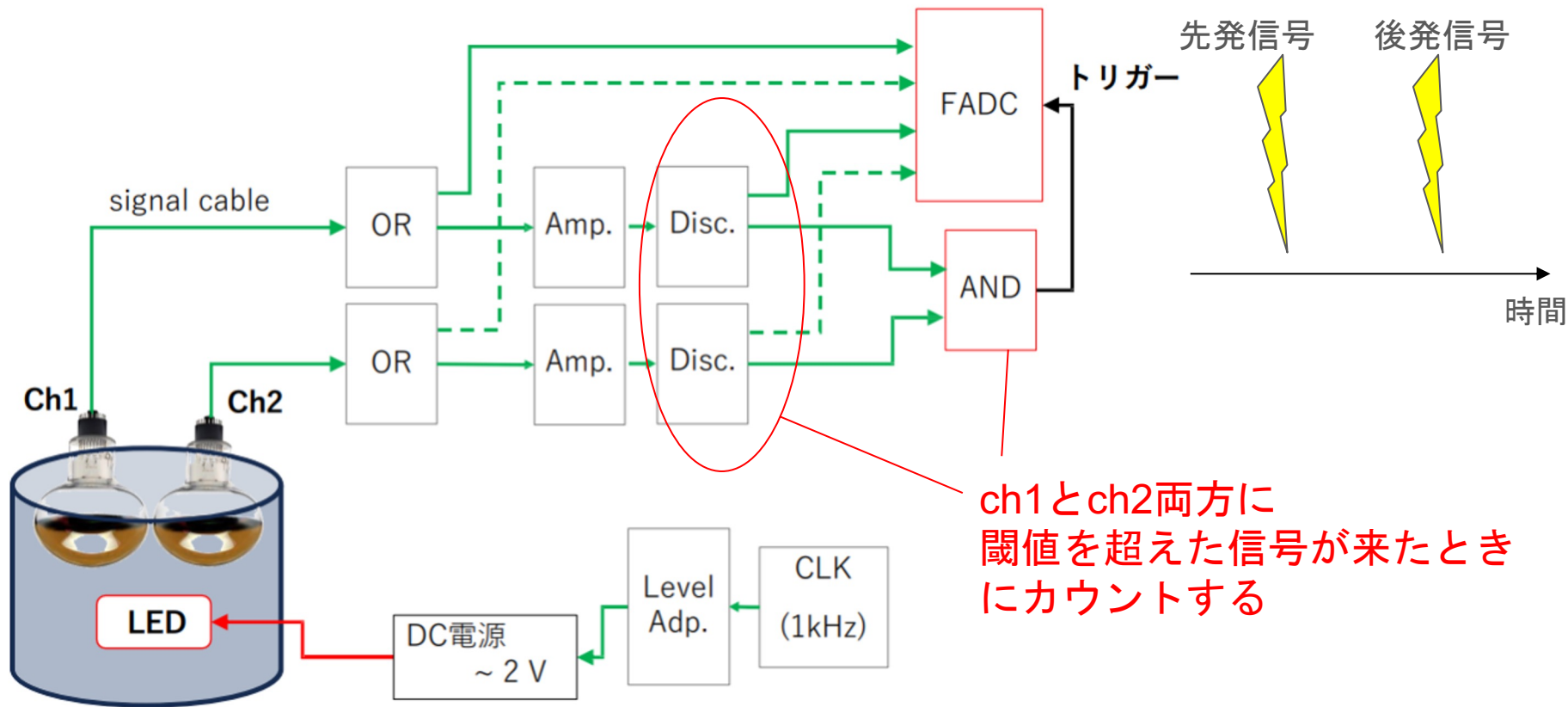
- ・ Am/Beのみ
- ・ BGOのみ
- ・ Am/BeとBGO
- ・ 無し

44cm



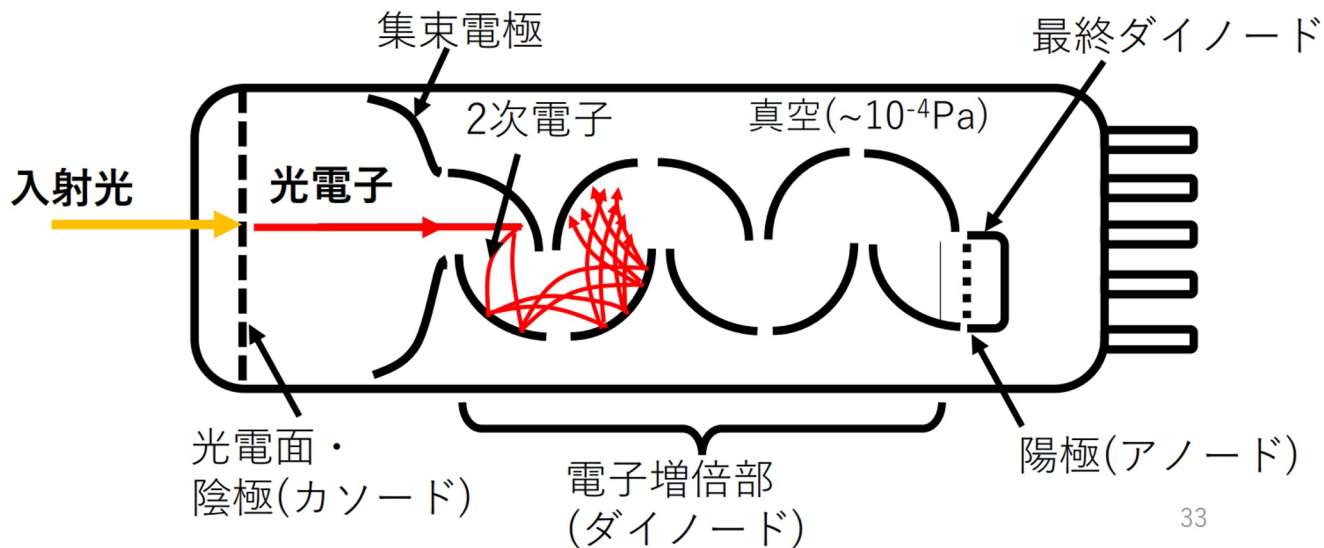
ミニカミオカンデの実際の写真

DAQシステム



電荷量から光電子数に変換する

得られたデータは電荷量(C)で表される
これを検出された光電子数(PEs)に直す
→PMTの**増幅率**を求めれば変換できる

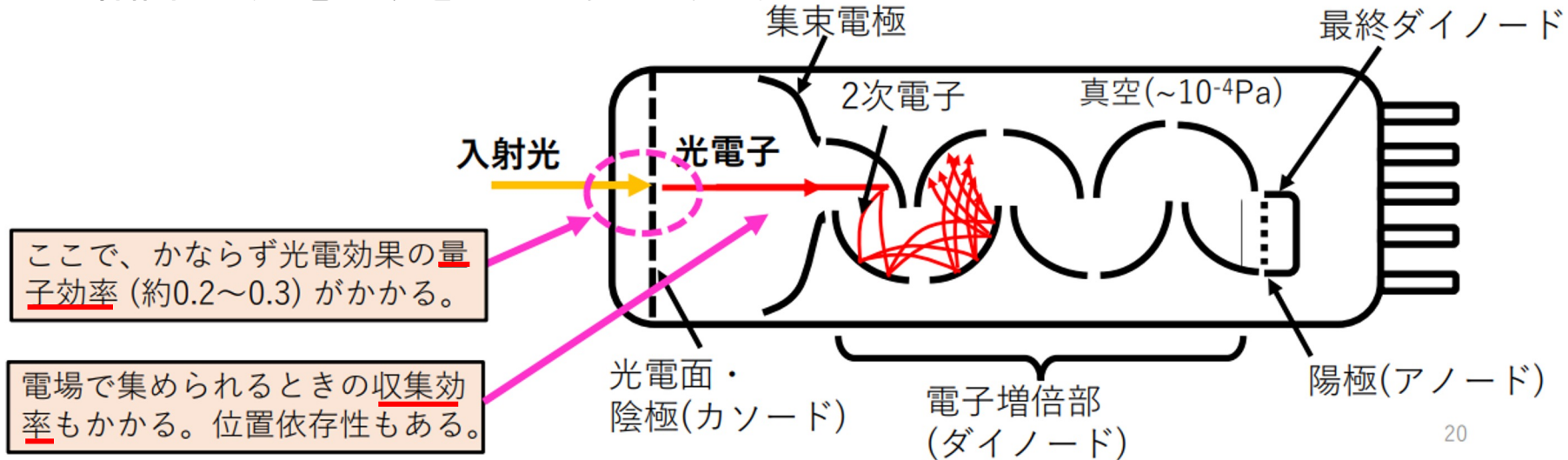


PMTのゲイン(増幅率G)

PMTによって増幅率が異なる。

複数のPMTが観測した光電子数を扱いたい。

増幅前の光電子数を知る必要がある。



PMTのゲイン(増幅率G)を求める

PMTで測定されたLEDの電荷量[pC]をガウス関数でフィッティング

N(>20)を観測する電子数とすると

$$(\text{Mean}) = GN \times 1.602e-19 \text{ [C]}$$

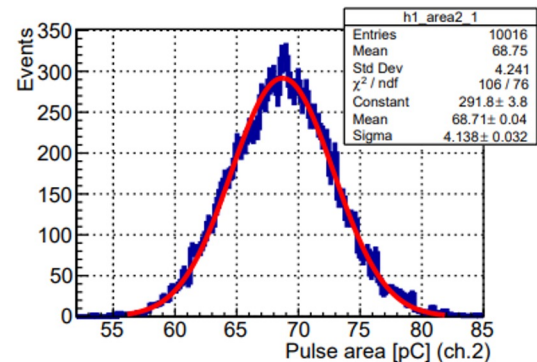
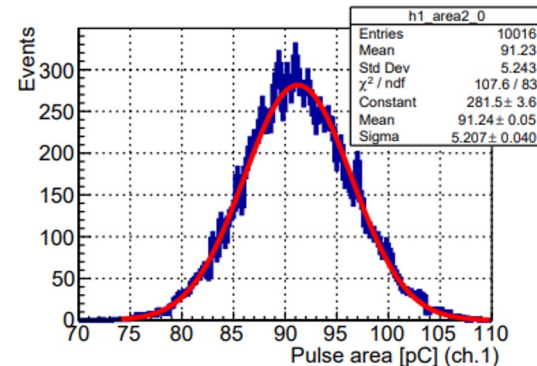
$$(\text{Sigma}) = G\sqrt{N} \times 1.602e-19 \text{ [C]}$$

$$G = (\text{Sigma})^2 \div (\text{Mean}) \div 1.602e-19$$

ゲインの較正結果

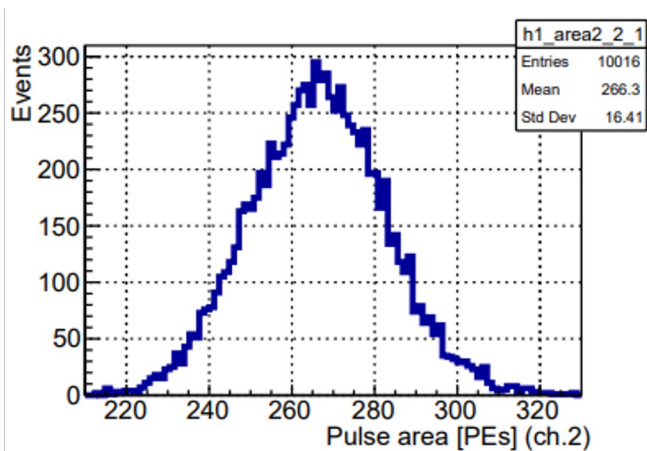
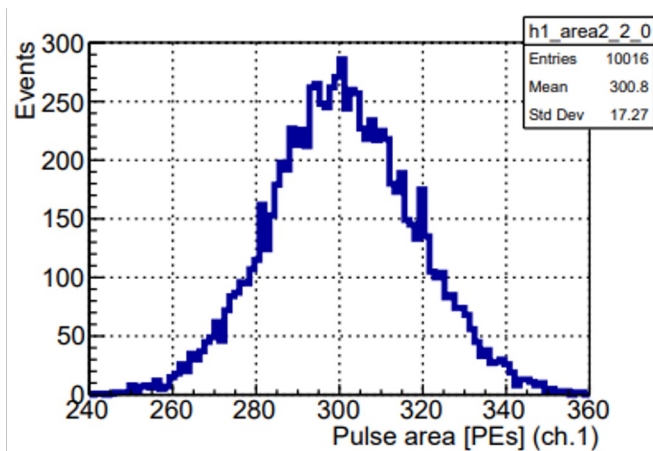
PMT1 : $G \sim 1.9 \times 10^6$

PMT2 : $G \sim 1.6 \times 10^6$



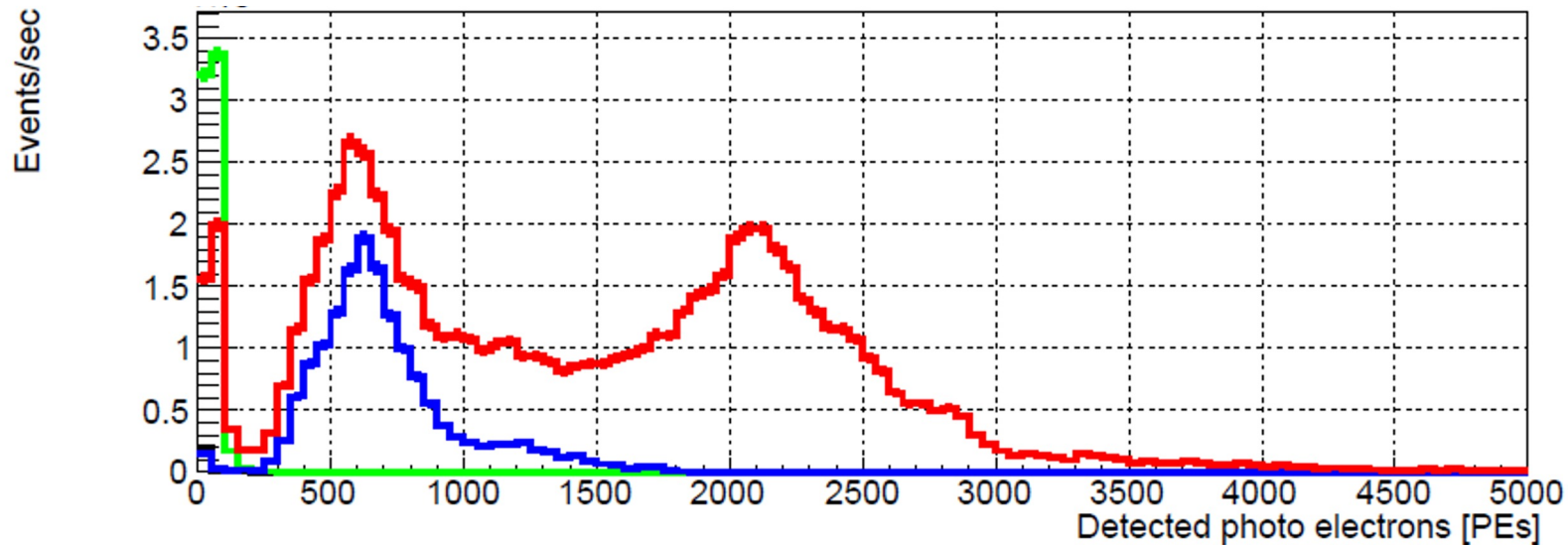
グラフの変換

グラフの横軸を電荷量[pC]から光電子数[PEs]に変換する



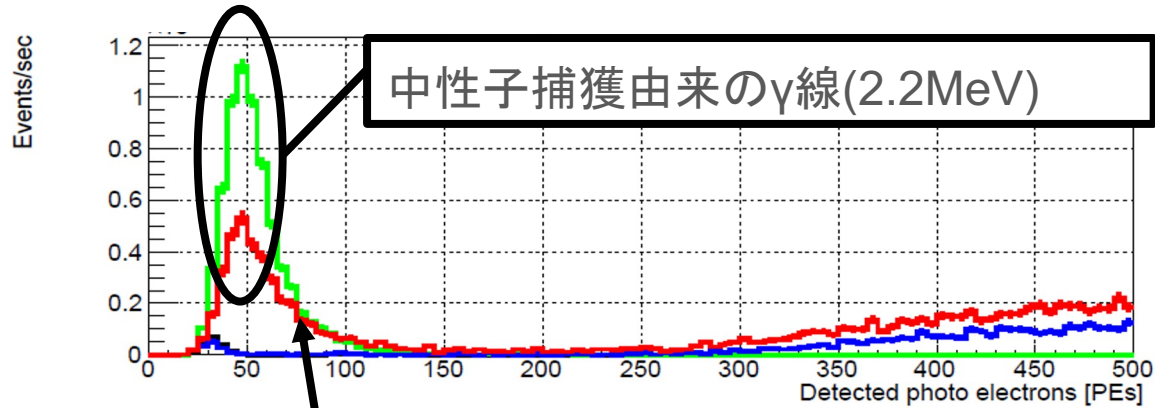
2つのPMTで観測した光電子を足し合わせて考えることができる

測定結果



3つの測定結果を重ねたもの(0~5000PEs)
Red:Am/Be+BGO Green:Am/Be Blue:BGO

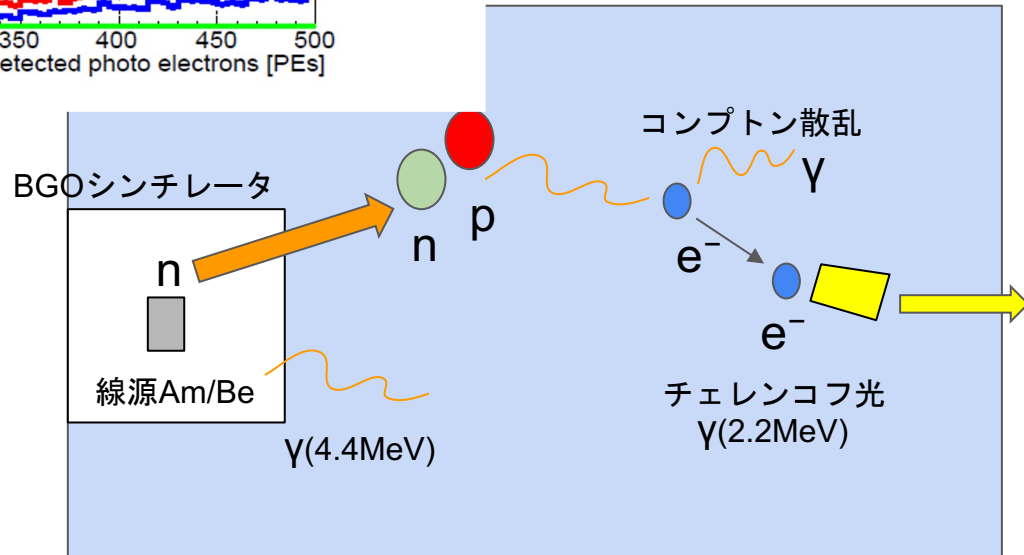
50PEs付近のピークについて



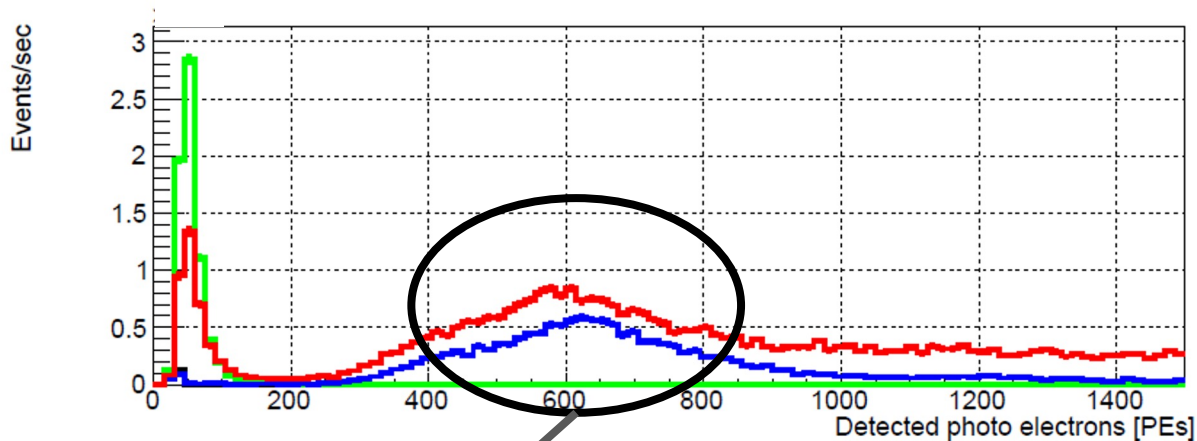
Tailの理由→ガウシアン足しあわせ

中性子捕獲による γ 線 (2.2 MeV) と Am/Beからの γ 線 (4.4 MeV) を起因とする水中でのチェレンコフ光

Red:Am/Be+BGO Green:Am/Be Blue:BGO



600PEs付近のピークについて



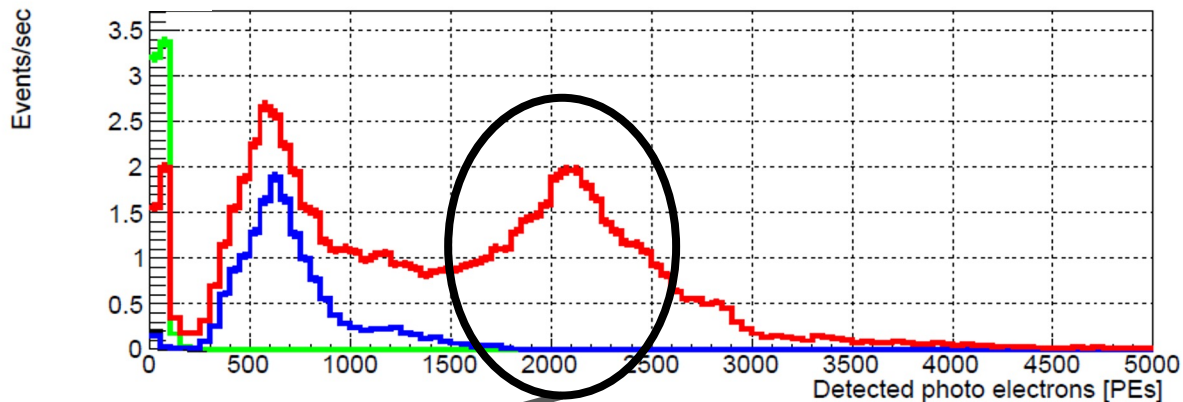
BGOと外部環境からくる放射線による
シンチレーション光？

Red:Am/Be+BGO Green:Am/Be Blue:BGO

考えられる候補

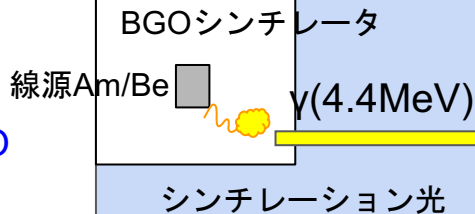
- ・ BGO中の ^{207}Bi からの放射線(1.06MeV)
- ・ 岩盤中に含まれる不純物 (^{40}K)
(1.46MeV)
からのガンマ線
など (詳しくはバックアップに)

2000PEs付近のピークについて



Am/Be線源からの γ 線によるシンチレーション光(4.4MeV)

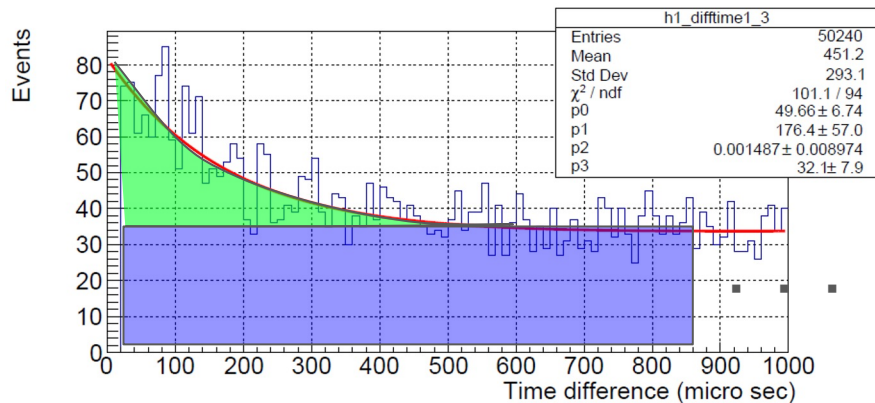
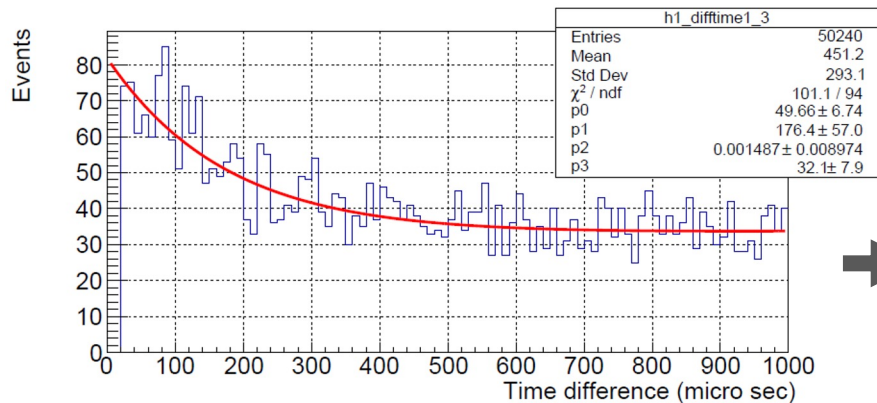
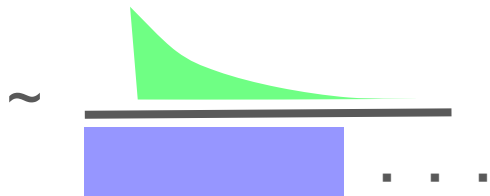
Red:Am/Be+BGO Green:Am/Be Blue:BGO



検出効率について

$$\text{検出効率} = \frac{\text{観測されたイベントの数}}{\text{実際に起きたイベント数}}$$

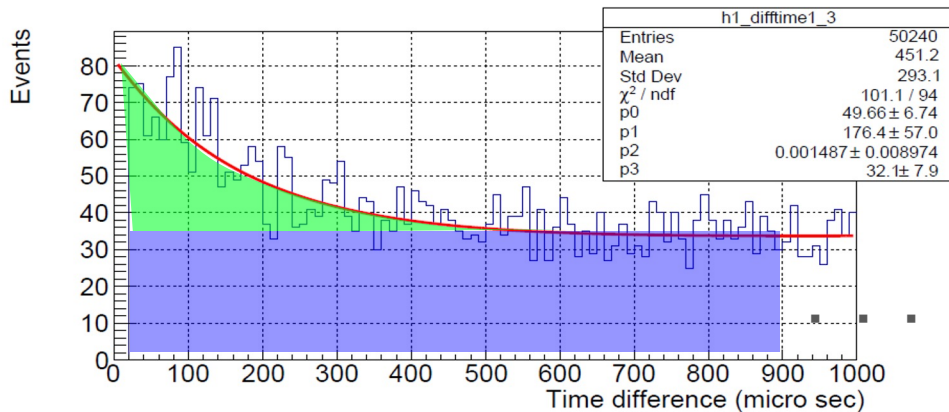
(イベント : Am/Be \rightarrow ny)



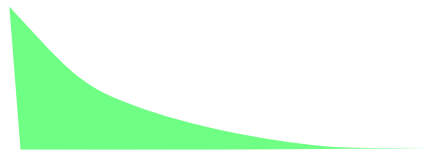
検出効率

Fitting関数

$$y = 49.66 \exp\left(-\frac{x}{176.4}\right) - 0.001487x + 32.1$$



検出効率 =



$$= 0.0176\dots$$

$$\sim \mathbf{1.8\%}$$

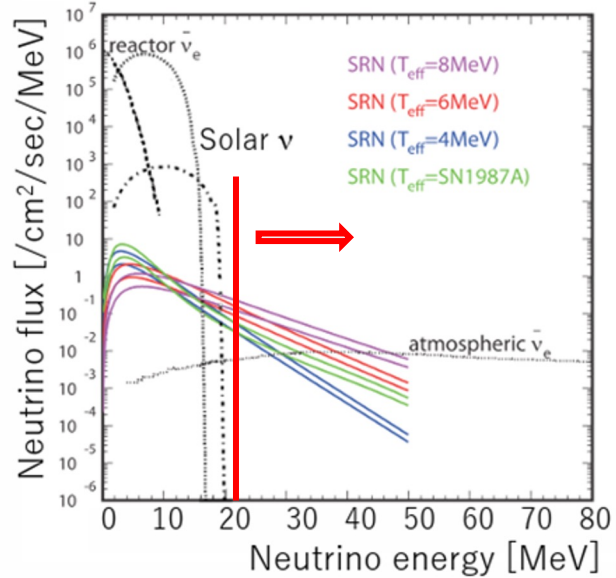
$$= \frac{1}{10} \times \int_0^{1000} 49.66 \times \exp\left(-\frac{x}{176.4}\right) dx = 872.979$$

詳細はbackupに

$$\dots = 50240 - 872.979 = 49367.021$$

超新星背景ニュートリノは観測できたか

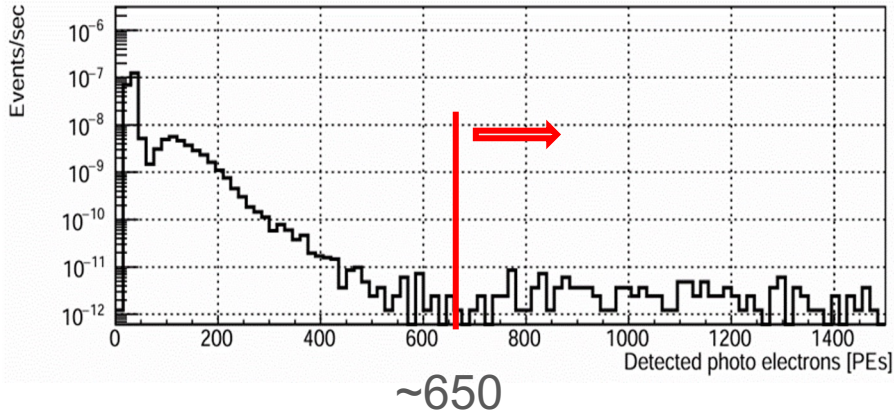
他ニュートリノ（原子炉や太陽などによる）の影響が少ない領域



結果のピークから2.2MeVで
~50PEs

⇒20MeVで~650PEs (※1)

光電子分布

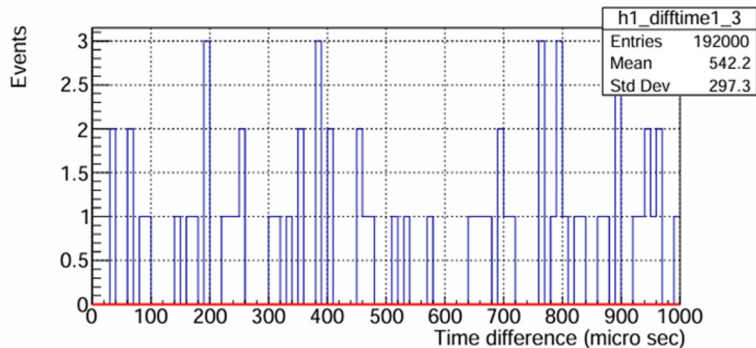
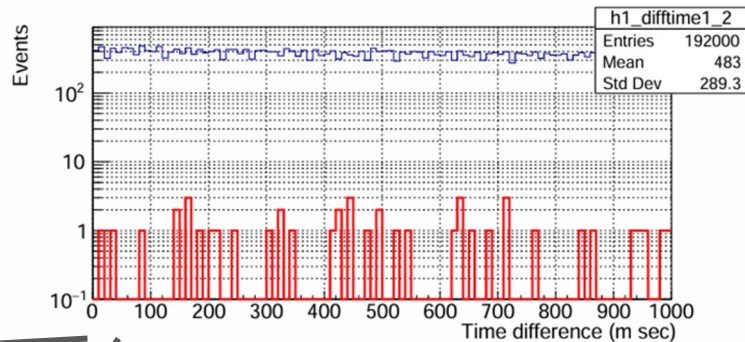


絞った範囲を赤色にすると . . .

時間差分布

(青：バックグラウンドの全計測数)

拡大



左図より、0~500 μ s (今回観測された Am/Be \rightarrow nyの区間) では Eventsが計測されなかった



超新星背景ニュートリノ候補事象は確認できず

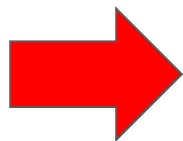
flux上限の計算

$$N_{exp} = (\tau \times N_P) \times \int_{30\text{MeV}}^{31\text{MeV}} \sigma(E_\nu) \phi(E_\nu) dE_\nu$$

- N_{exp} : 検出器内で発生すると期待される事象数
- τ : 測定時間 [sec]
- N_P : 検出器内の陽子数
- $\sigma(E_\nu)$: 反応断面積 [cm^2]
- $\phi(E_\nu)$: フラックス [$/\text{cm}^2/\text{sec}$]

$$N_{expected} \times \text{efficiency} = 2.3$$

ミニカミオカンデは
efficiency~0.018

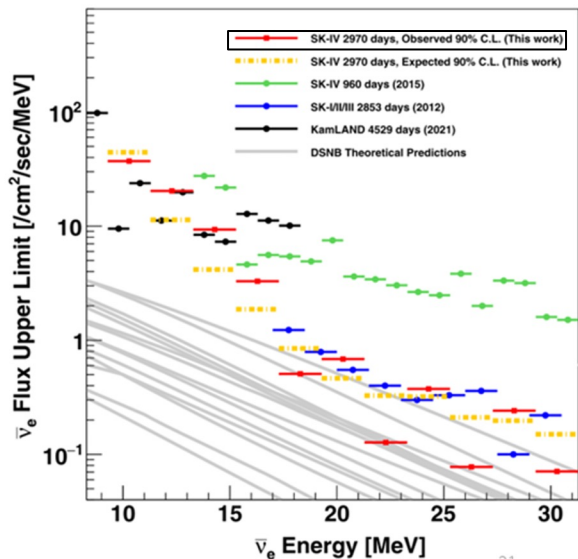


$$\underline{\Phi \sim 3.44 \times 10^9 \text{ [}/\text{cm}^2/\text{sec}]}$$

SKのFlux上限と比較すると . . .

10^9 3.44×10^9

←大きく離れている



今回の検出器

検出効率 : ~1.8%
測定日数 : 7日間
水の体積 : ~40 kg

SK-IV

検出効率 : 20%
測定日数 : 3000日間
水の体積 : 22.5 kt

SKのFlux上限に近づけるには？

➡ 同じ検出器のままだと、およそ1000万年かかる

現実的には検出器自体の改善が必要

- ・ 水の体積を多くするためバケツを大きくする
- ・ γ 、 n 線を逃がさない工夫 (バケツ内側の反射率、カバーのかぶせ方、Gd水溶液に)
- ・ PMTの検出効率 (量子効率、収集率) の向上

まとめ

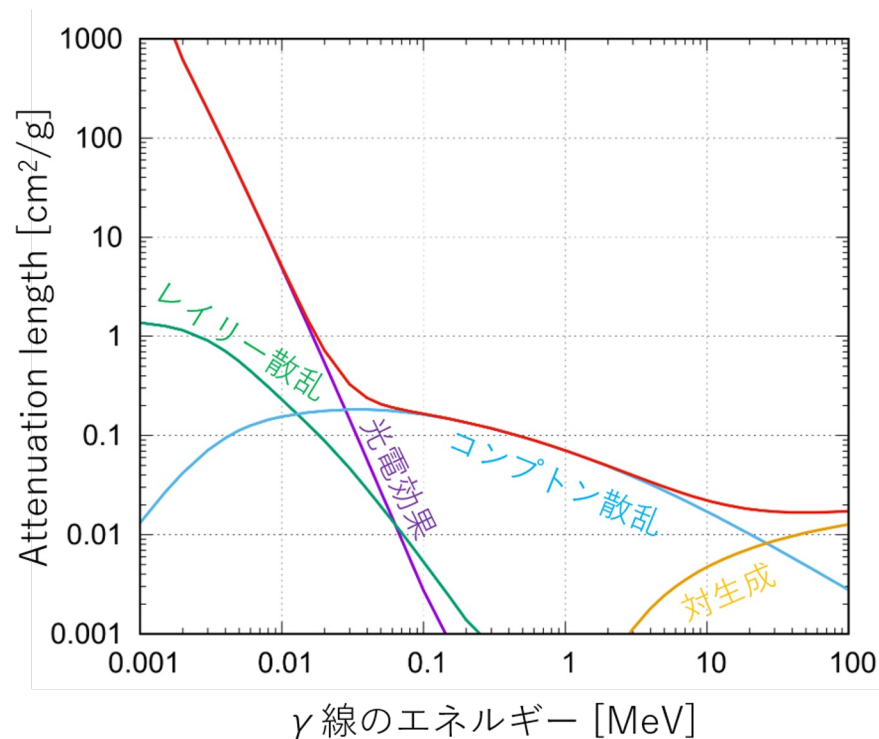
- ・ ミニカミオカンデを作り、超新星背景ニュートリノの探索を行った
- ・ 逆ベータ反応を再現した検出器を用いて、Am/Beについての検出効率を求めた
- ・ 超新星背景ニュートリノ候補は観測されなかった
- ・ Fluxの上限値を求めた
- ・ SKに近づけるには検出器の改善が必要

Backup

水中での光子の attenuation length

<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>

| γ 線エネルギー [MeV] | cm ² /g | cm |
|--------------------------|--------------------|------|
| 0.5 | 9.69e-2 | 10.3 |
| 1 | 7.07e-2 | 14.1 |
| 2.2 | 4.03e-2 | 24.8 |
| 4.4 | 3.22e-2 | 31.1 |
| 10 | 2.22e-2 | 45.5 |



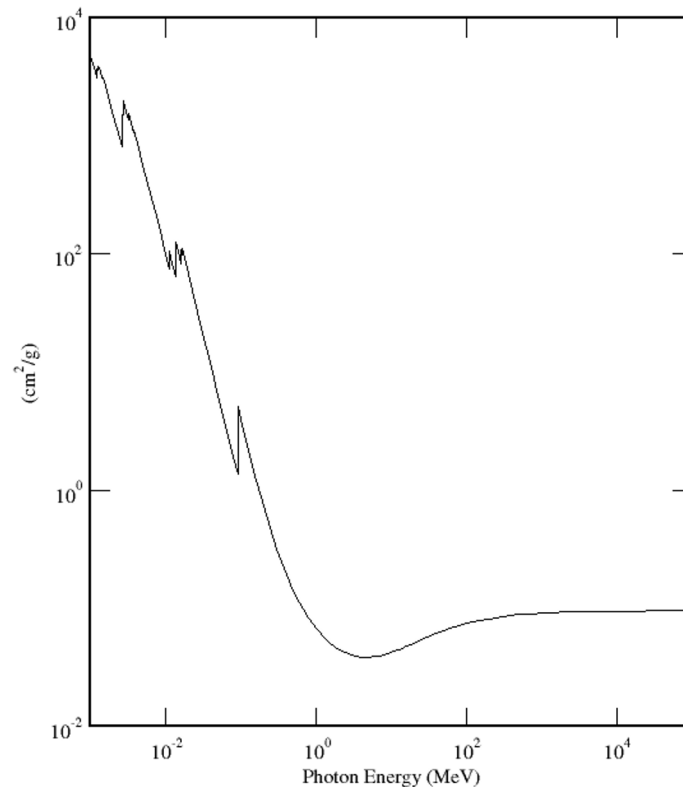
BGO 内での光子の attenuation length

BGO: Bi₄Ge₃O₁₂

密度: 7.13 g/cm³

| γ線エネルギー [MeV] | cm ² /g | cm |
|------------------|--------------------|------|
| 0.5 | 1.39e-1 | 1.01 |
| 1 | 6.82e-2 | 2.06 |
| 4.4 | 3.89e-2 | 3.61 |
| 10 | 4.25e-2 | 3.30 |

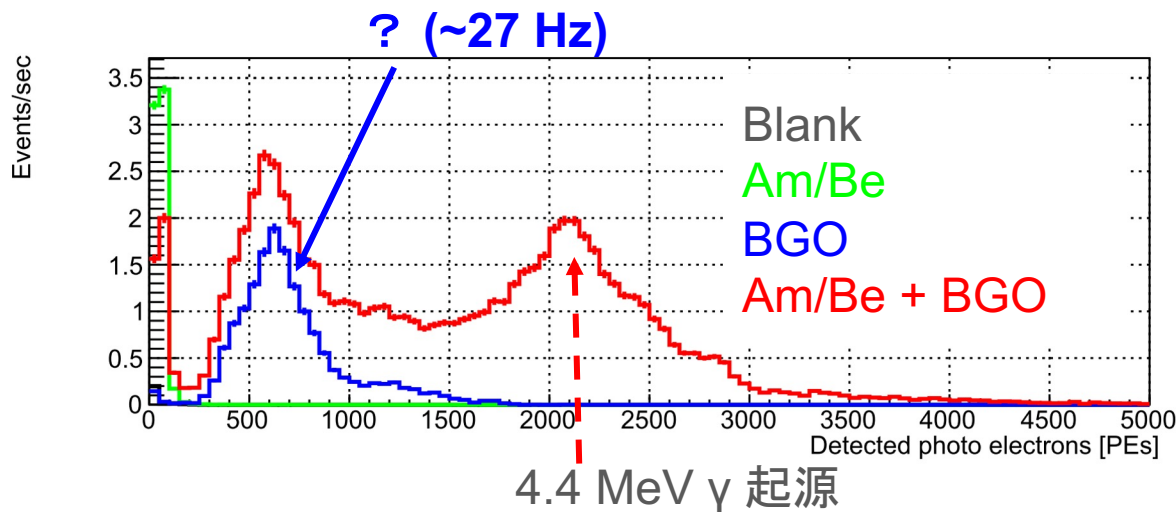
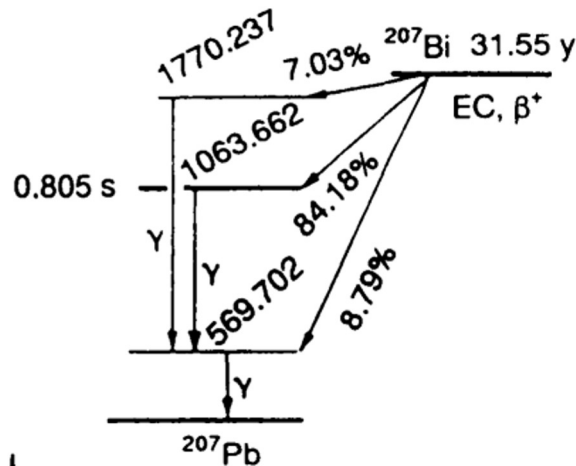
<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>



BGOのみのデータで見られた peak の起源 (1/2)

BGOのみを検出器内において取得したデータ (線源等は何も置かれて無い) で、 ~ 600 PEs (~ 1 MeV相当) に peak が見られた (~ 27 Hz)。

その起源の候補として、BGO中の Bi に含まれる同位体 ^{207}Bi ($T_{1/2}=31.55\text{y}$) から放出される 1.06 MeV のガンマ線 (分岐比 84.1%) が考えられる。

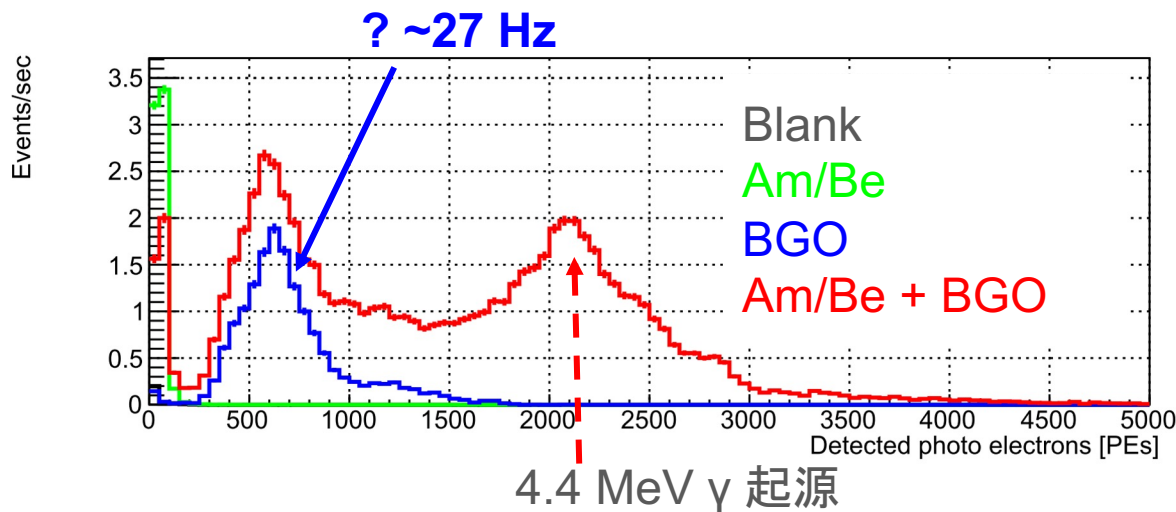
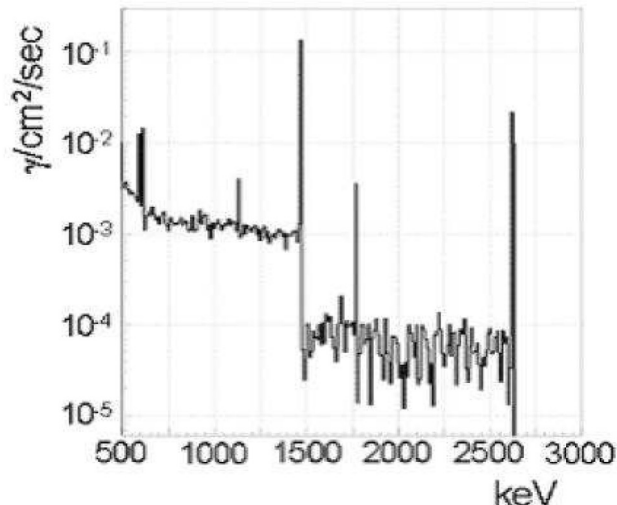


文献 (K. Fukuda, Radioisotope, 46, 161-164 (1997))によると、BGO中の ^{207}Bi として、 $2\sim 9$ mBq/Bi-g が報告されている。今回実験に用いた BGO 中の Bi の重量は 598 g なので、 $1\sim 5$ Hz 分に相当する。

BGOのみのデータで見られた peak の起源 (2/2)

BGOのみを検出器内において取得したデータ (線源等は何も置かれて無い) で、 ~ 600 PEs (~ 1 MeV相当) に peak が見られた (~ 27 Hz)。

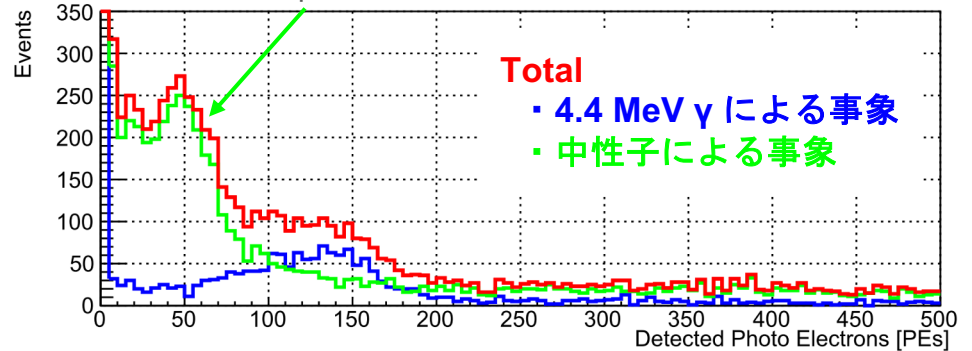
その他の起源の候補としては、岩盤中に含まれる放射性不純物 ^{40}K からの 1.46 MeV ガンマ線が考えられる。



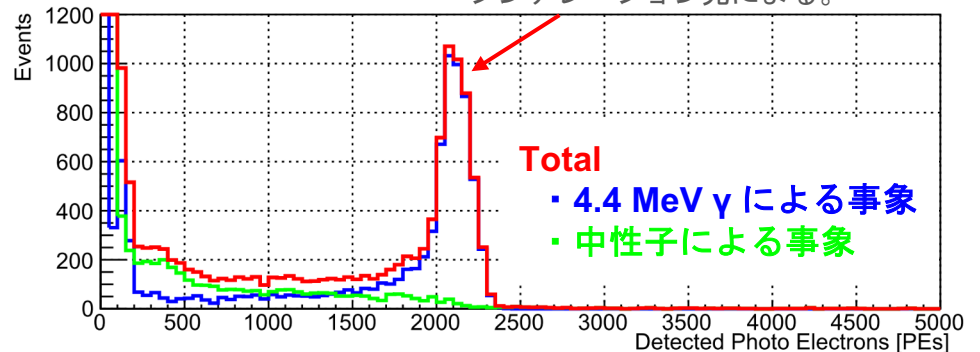
↑ 神岡地下坑内の岩盤中に含まれる放射性同位体からの γ 線分布 (M. Ishitsuka, master thesis, University of Tokyo, 2001)。これによると、BGO に入ってくる 1.46 MeV γ 線は 3 Hz 程度であり、さらに約 20cm 厚の水で < 1 Hz に低減されるため、今回の peak を説明するのは難しい。

Am/Be のシミュレーション結果

中性子が水中の陽子に捕獲されて放出された 2.2 MeV γ 線起因のチェレンコフ光による。



4.4 MeV γ 線によりBGO中で発生したシンチレーション光による。

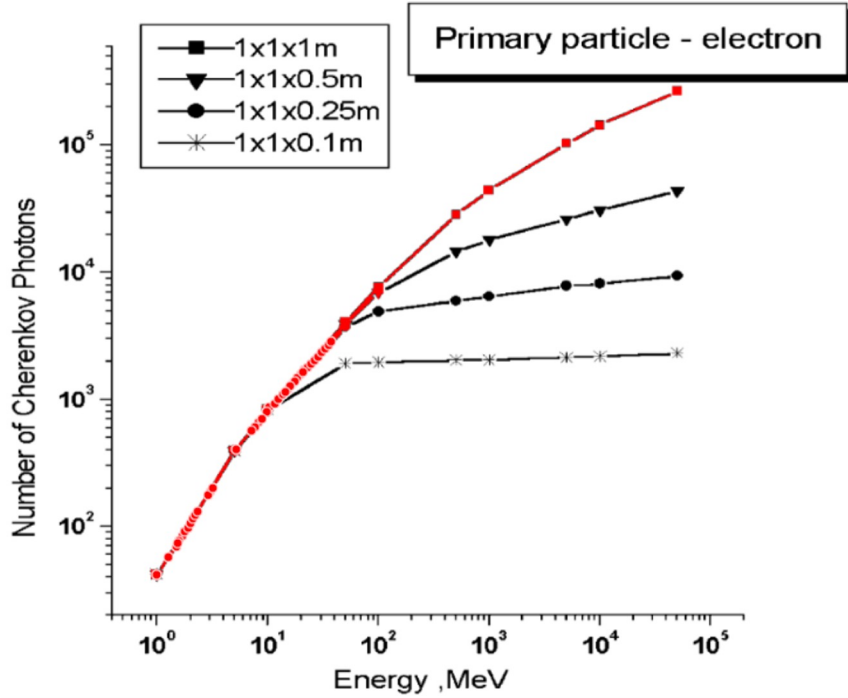


シンチレーション光（先発光）

チェレンコフ光（後発光）

先発信号だけ反応しなくて後発信号だけ反応してしまうような場合（ガンマ線は逃げて中性子は反応する場合）もディレイの時間差で既に捨てられているので問題ない
ただ先発信号が100%反応するようにはしたい

✖ 1



1.2755815977526372, 56.333823761464515
 2.232735148777284, 121.08125760193
 5.233787283440828, 398.1071705534973
 7.181857544960075, 559.36116056110817
 8.311161732375199, 649.0941459108269
 9.855019893393639, 785.9313548893358
 10.346635611251338, 855.6727318044627
 11.685660828961922, 912.0108393559105
 12.57088202149907, 992.9401613666821
 13.856356505284694, 1081.0509278060633
 14.54757810848048, 1127.9963447002026
 15.273281164613934, 1176.9804002104138
 16.035185774143702, 1254.4736355425302
 17.674913370041217, 1365.792159866808
 18.556622927046817, 1455.716897135499
 19.962338540170776, 1551.5623437261934
 20.958155849288865, 1618.9400584942632
 21.47454100668118, 1689.2436991625884
 23.101297000831615, 1762.6003261754577
 24.85128426980557, 1878.651198261659
 26.733837924184698, 2002.3429431605775
 28.759000235047687, 2134.178641428969
 30.937574203337928, 2323.5597573625187

Poisson分布

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

期待値 λ の事象が x 回
観測される確率

$$P(x = 0) = \frac{\lambda^0 e^{-\lambda}}{0!} = 0.1$$

今回は90%で0回となる
と考える

$$\lambda = -\ln(0.1) \sim 2.30$$

flux計算に使った値

積分範囲 30 ~ 31 MeVまで

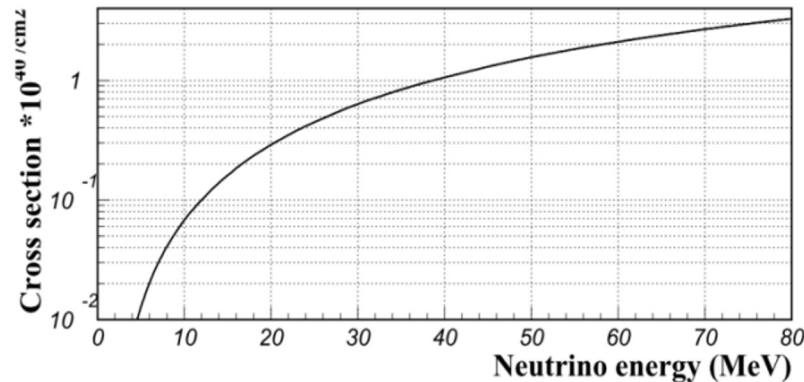
時間 1.472×10^4 (s)

検出効率 1.8%

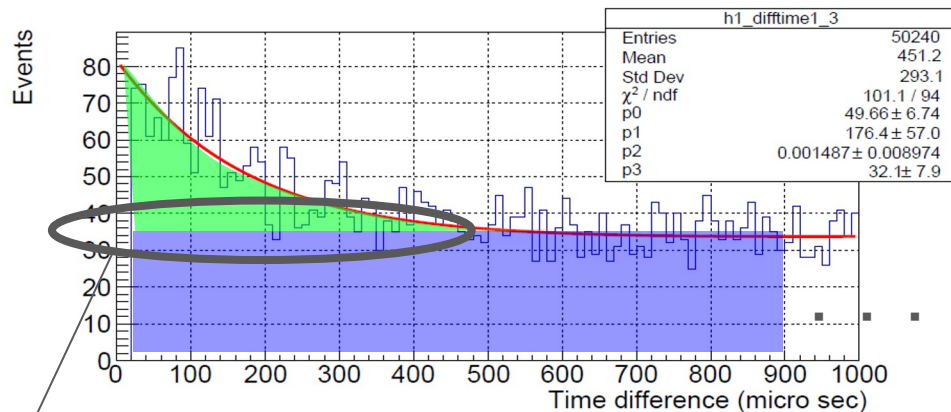
陽子数 $(\pi \times 0.22 \text{ m} \times 0.22 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}) \times 1000 \text{ g} / 18 \times 6.02 \times 10^{26}$
 $= 4.20 \times 10$

反応断面積 $6 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$

フラックス $\Phi = 3.44 \times 10^9$



検出効率の詳細



厳密には指数関数的に減衰する。
→Amは崩壊率が十分小さい
→直線に近似できる。

対応関係

青→BGOからのシンチレーション光

緑→中性子捕獲によるチェレンコフ光

シンチレーション光はAmの崩壊で生じる放射線による。

Am崩壊して次の崩壊が起こるまでの確率は指数分布に従う。

$$P(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

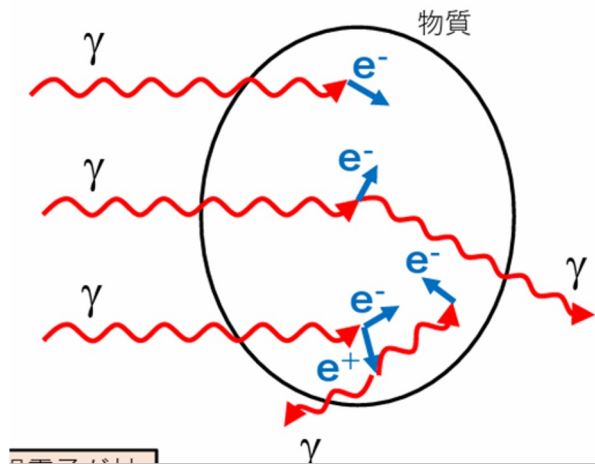
使わないスライド

γ 線の主な相互作用

光電効果：入射光子エネルギーから電子の結合エネルギーを差し引いた運動エネルギーを持つ光電子が吸収原子の電子殻から作られる

コンプトン散乱：反跳電子と散乱 γ 線が作られる

対生成： γ 線が1.02 MeV以上のエネルギーを持つ場合におこる

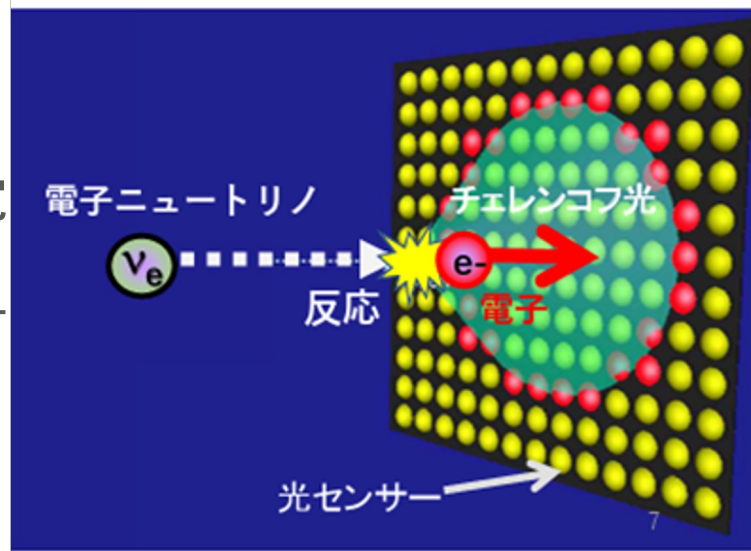


チェレンコフ光

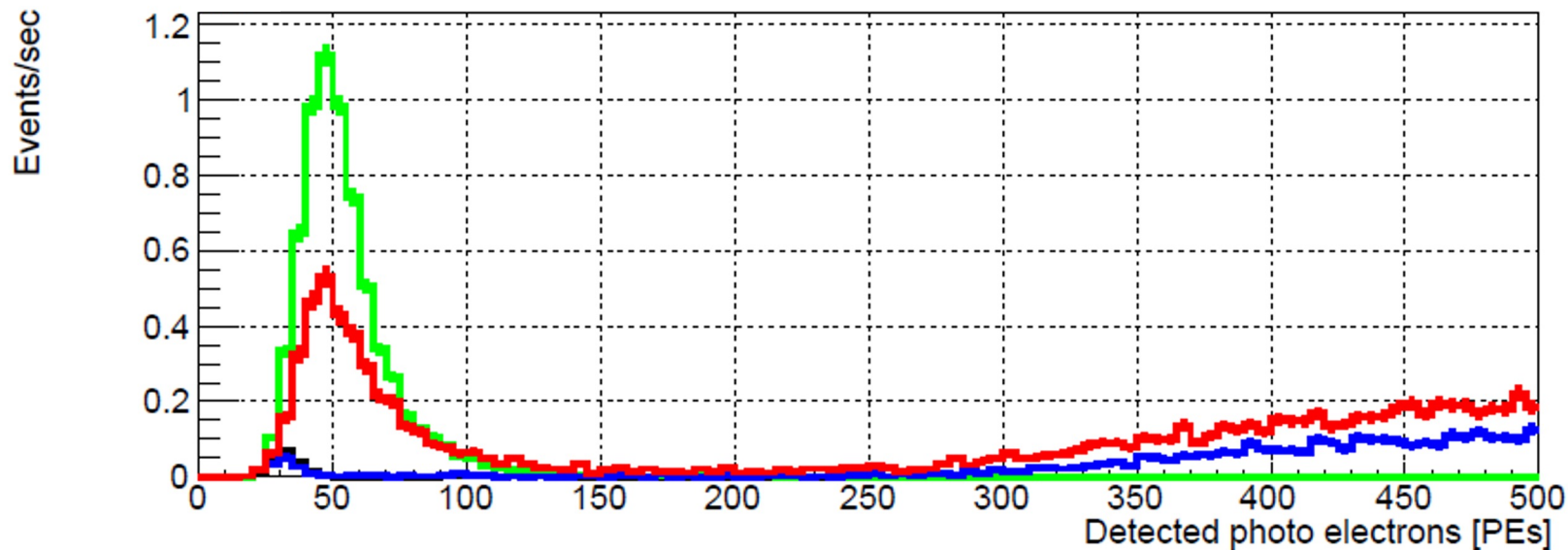
水中でニュートリノが粒子と衝突すると荷電粒子が発生

水中での光速を超えた時に円錐状の光を放射

▶降ってきた粒子の進行方向を決定できる
($\theta=42^\circ$)

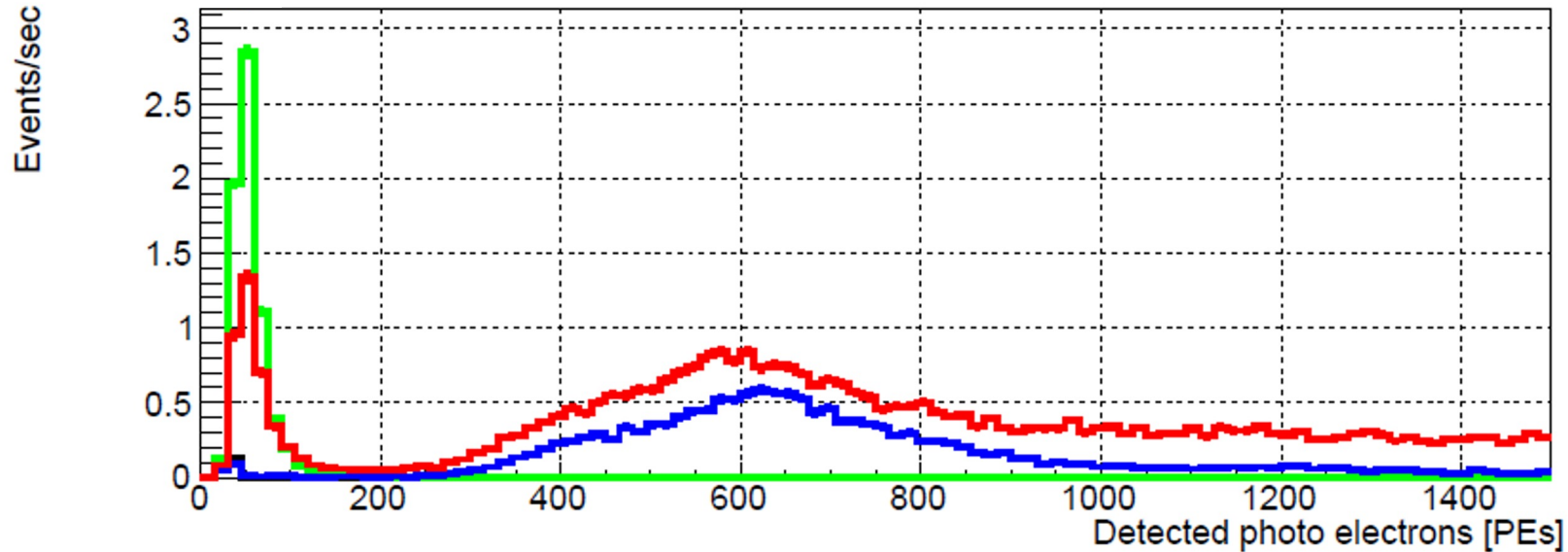


測定結果



3つの測定結果を重ねたもの(0~500PEs)
Red:Am/Be+BGO Green:Am/Be Blue:BGO

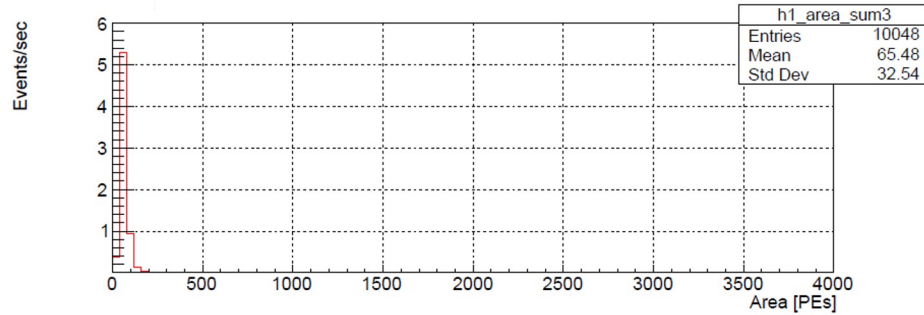
測定結果



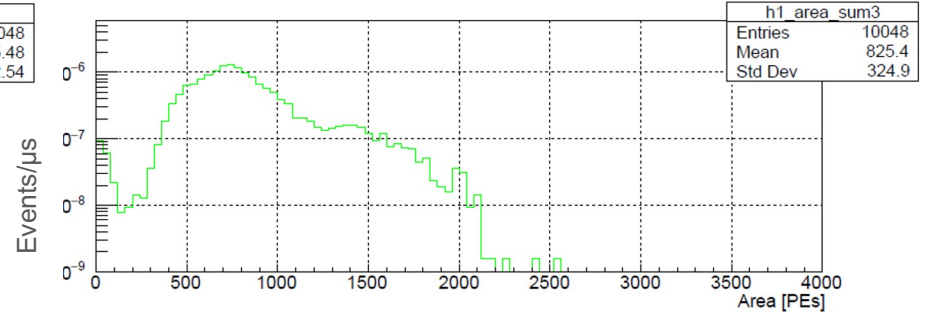
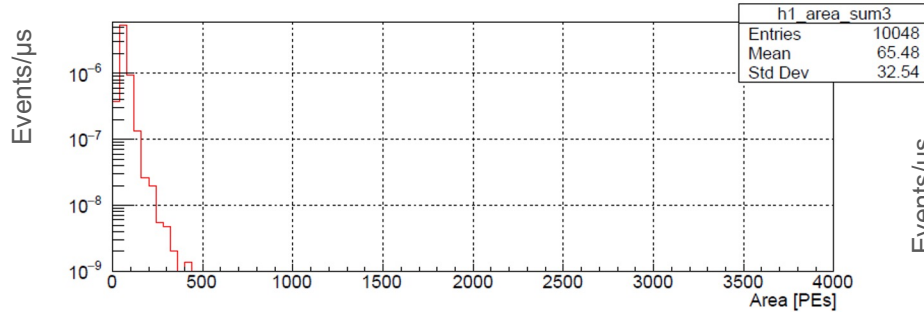
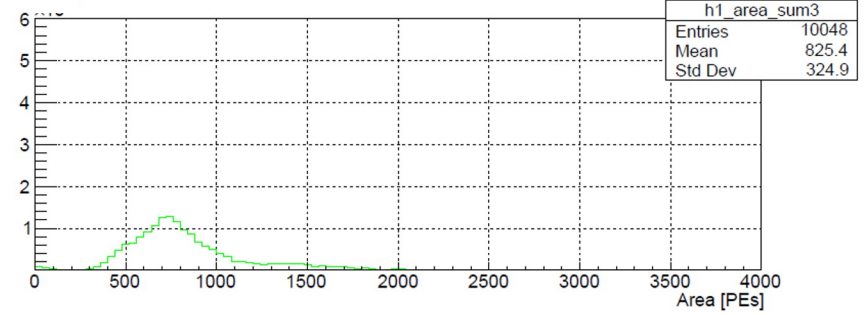
3つの測定結果を重ねたもの(0~1500PEs)
Red:Am/Be+BGO Green:Am/Be Blue:BGO

測定結果

Am/Be線源のみ

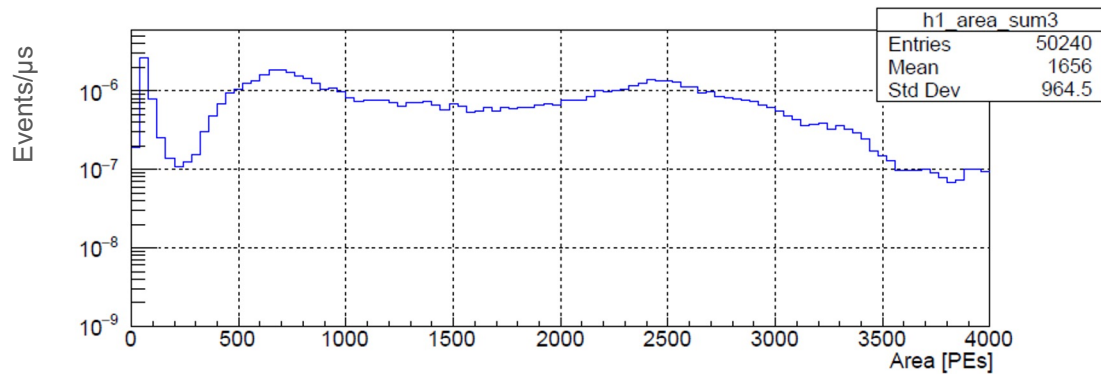
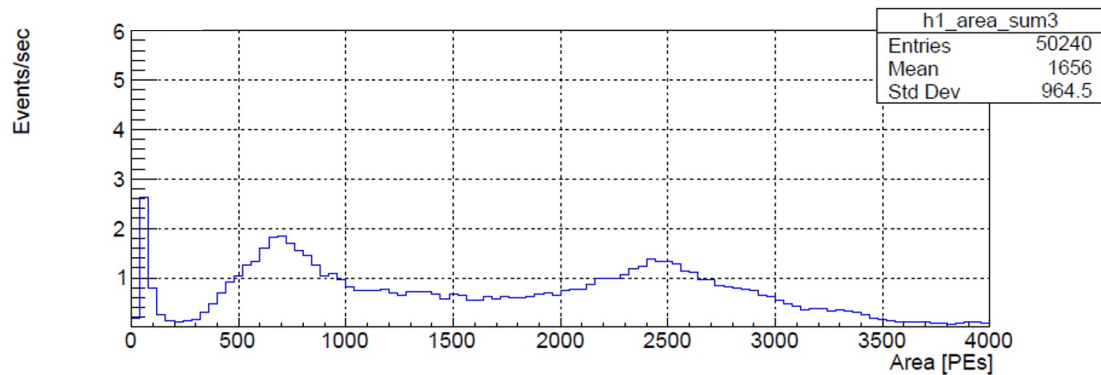


BGOのみ



測定結果

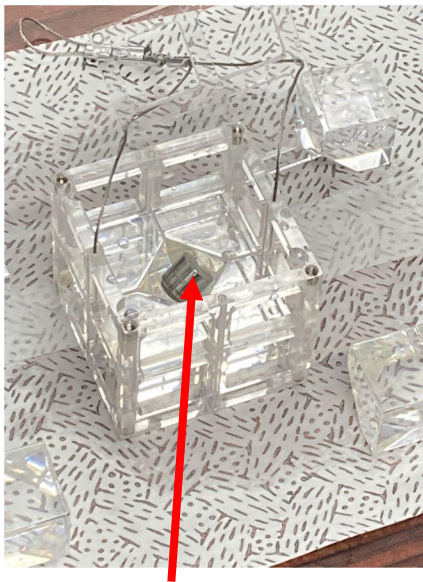
Am/Be+BGO



Am/Be線源を用いた検出効率の測定

Am/Be線源 Am(アメリカシウム)、Be(ベリリウム)

BGO $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ の略。放射線によるシンチレーション光を発する。



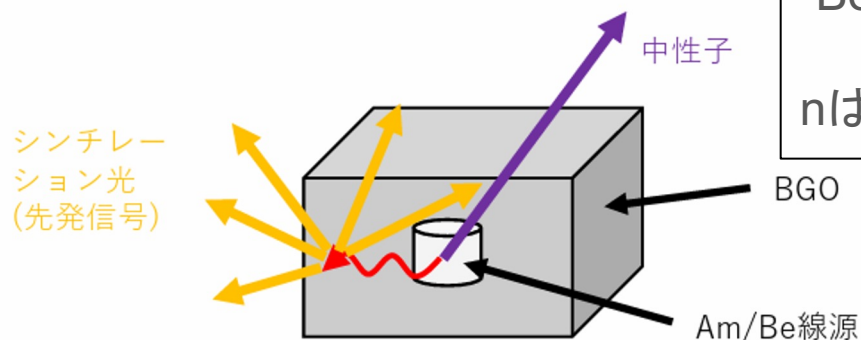
Am/Be線源



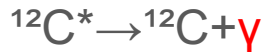
BGOケースにしまう

Am/Be線源を用いた検出効率の測定

Q.なぜAm/Be線源を用いるのか？



n は水分子の陽子 p に捕獲 \rightarrow γ 線(2.22MeV)を出す。



γ (4.43MeV)はBGO内で光電吸収
 \rightarrow シンチレーション光

A. シンチレーション光を先発信号として、そこから遅れて検出される中性子由来の γ 線を連続して観測可能に