

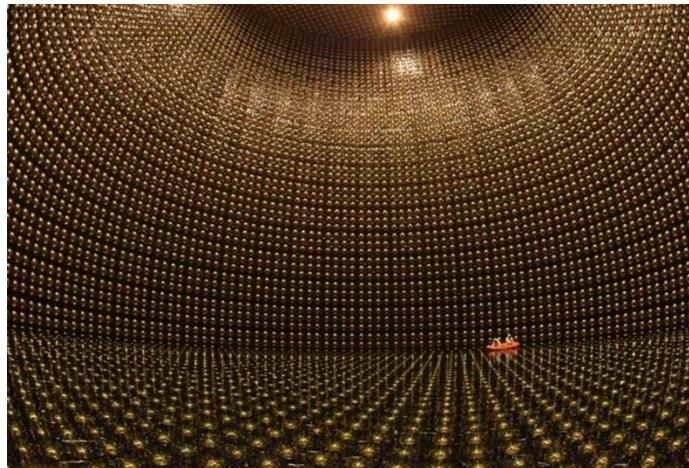
極低放射能アルファ線検出器開発における CF₄ガス発光の基礎研究

東京大学 修士 1 年

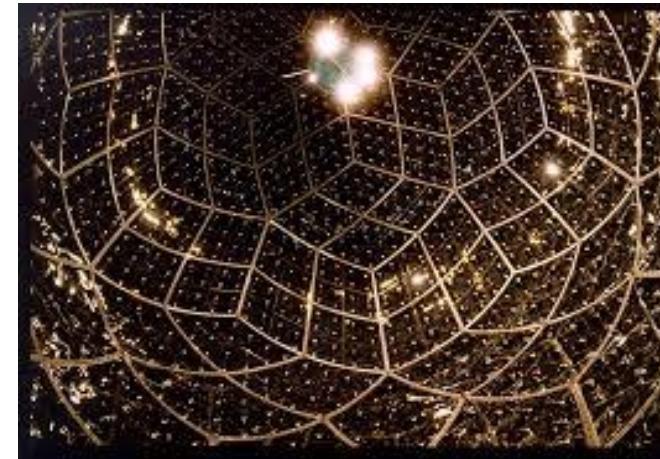
加藤 大聖

2025年5月22日（木）

素粒子実験では検出器が地下深くに設置されている



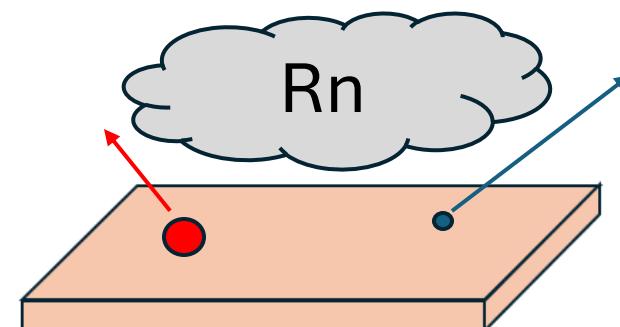
スーパーカミオカンデ



カムランド禪

地下にあることでバックグラウンドとなる宇宙線を削減できる

数 MeV 領域では検出器に含まれる放射性同位体がバックグラウンドとなる

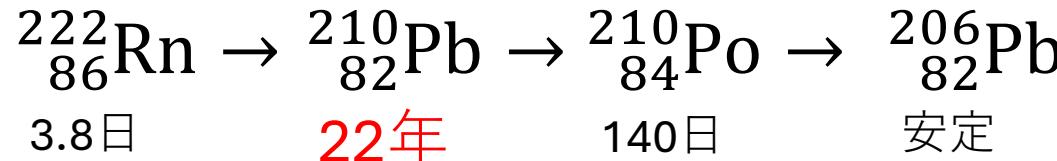


ラドンガスによる放射線汚染

ラドンは鉛まで崩壊する過程で放射線を放出する。この放射線がバックグラウンドになる。

- ・検出器がラドンガスにより汚染されると検出器が放射能を帯びる

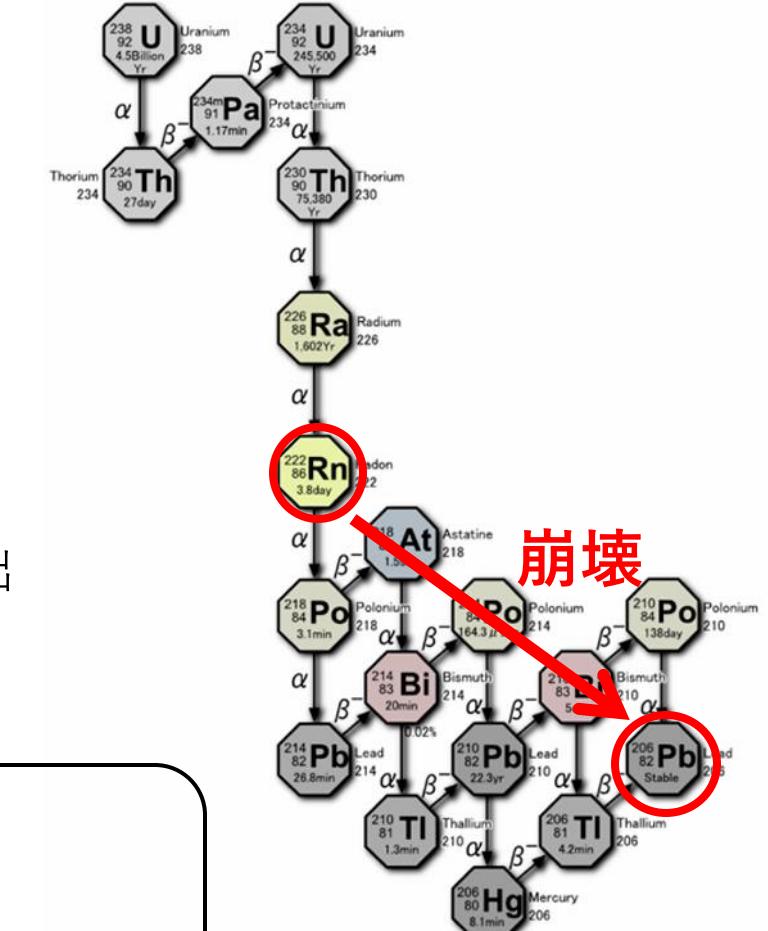
ラドンの崩壊過程



- ・ Pb-210の半減期は非常に長いため汚染された検出器の表面から α 線が定常的に放射されてしまう
- ・ バックグラウンドを低減するためには検出器表面の α 線の放出量を事前に測定する必要がある

本研究の目的

材料の放射線汚染を測定することを目的とした
CF4ガスのシンチレーション発光を用いた α 線検出器の開発

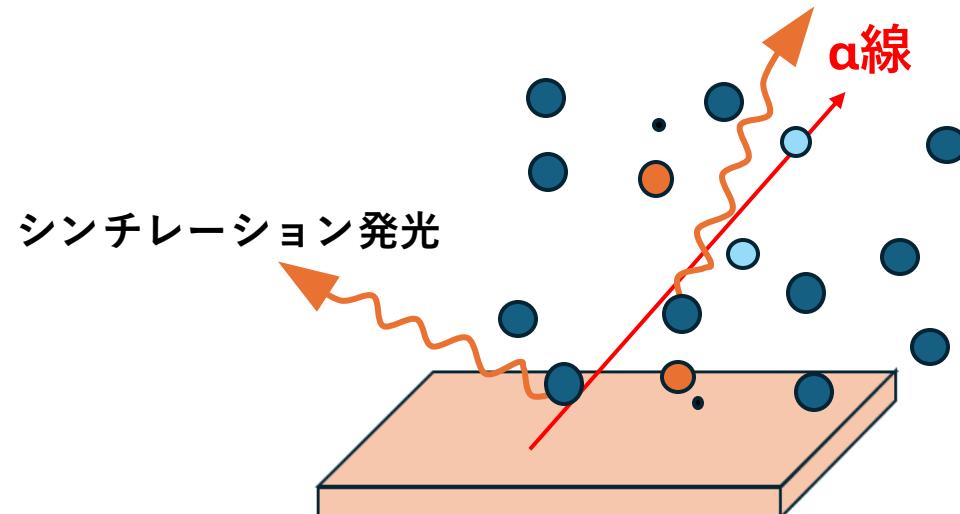
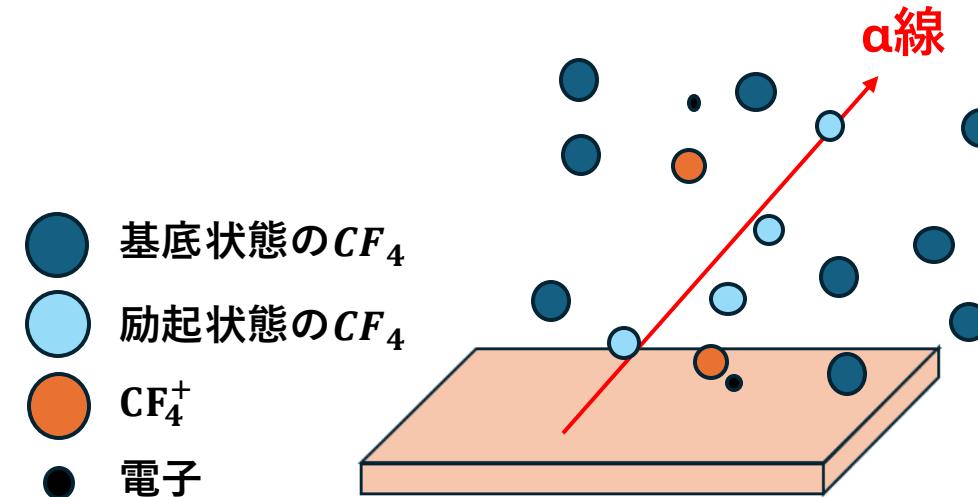


ウラン系列

CF4ガスについて

- ・ 不活性ガス
- ・ α 線によって電離及び励起される
- ・ 励起されたCF4が基底状態に戻る時にシンチレーション発光を起こす

- 基底状態の CF_4
- 励起状態の CF_4
- CF_4^+
- 電子



シンチレーション発光をPMTによって捉える

PMTとは微弱な光が検出可能な高感度の光センサ

～光を検出するまでの過程～

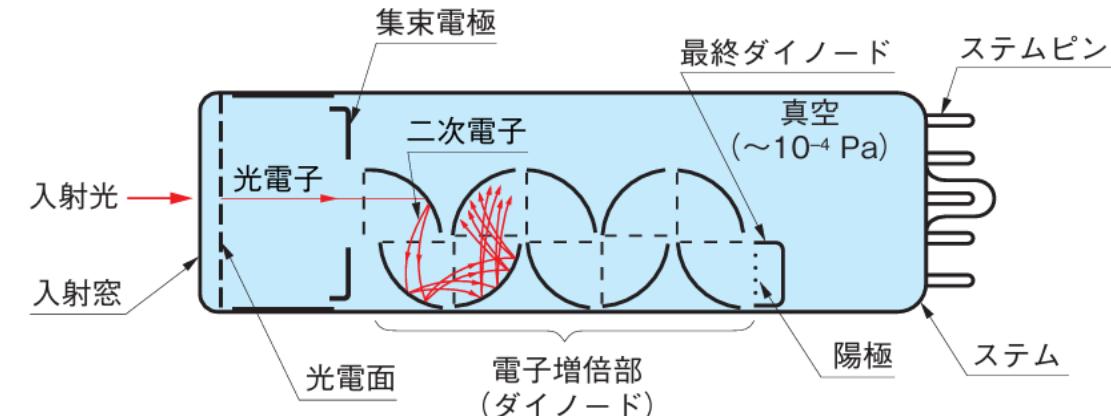
1. 光子が入ると光電子が発生
2. 高電圧によって光電子が加速
3. 光電子がダイノードに当たり電子が増幅
4. 増幅された電子が陽極に集められ、電流として外部回路に出力



PMT

今回のPMTの仕様

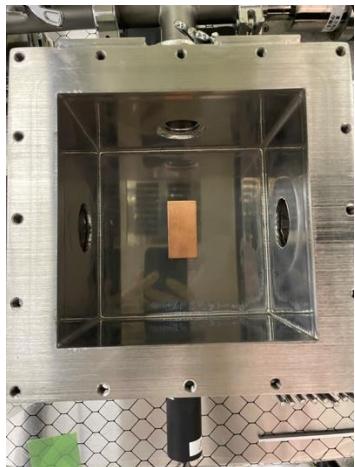
PMT 管径	51 mm
感度波長 (Short)	300 nm
感度波長 (L (Peak))	650 nm
感度波長 (Short)	420 nm
ダイノード段数	12 段
陽極 - 陰極間電圧 (絶対最大定格)	-2700V



- 今回の検出器では α 線を 2 種類の発光によって検出する

S1発光について

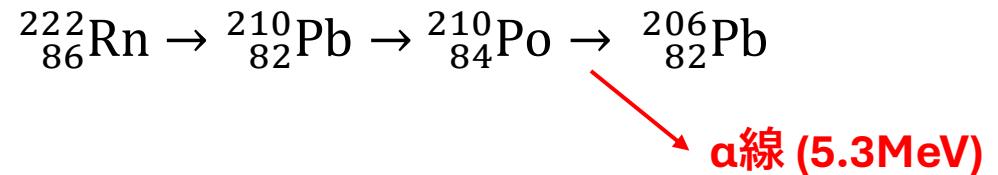
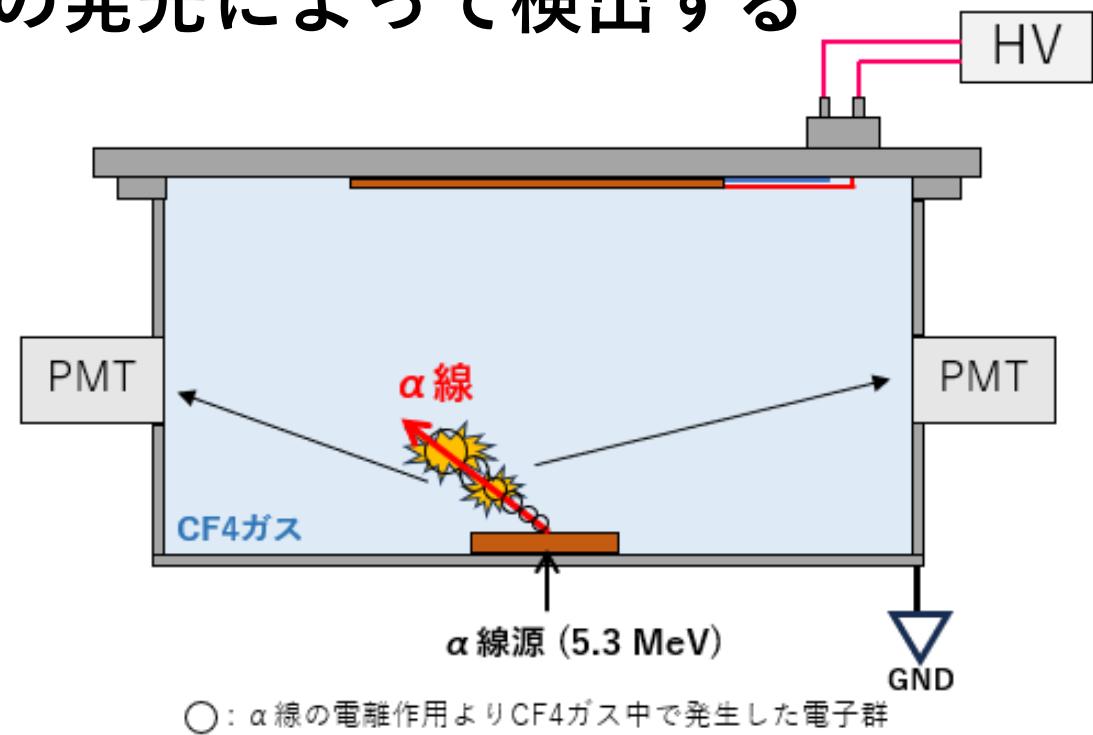
- α 線によって励起されたCF4ガスが基底状態に戻る際の発光(シンチレーション発光)
- 発光をPMTにより検出する



検出器内に設置された α 線源



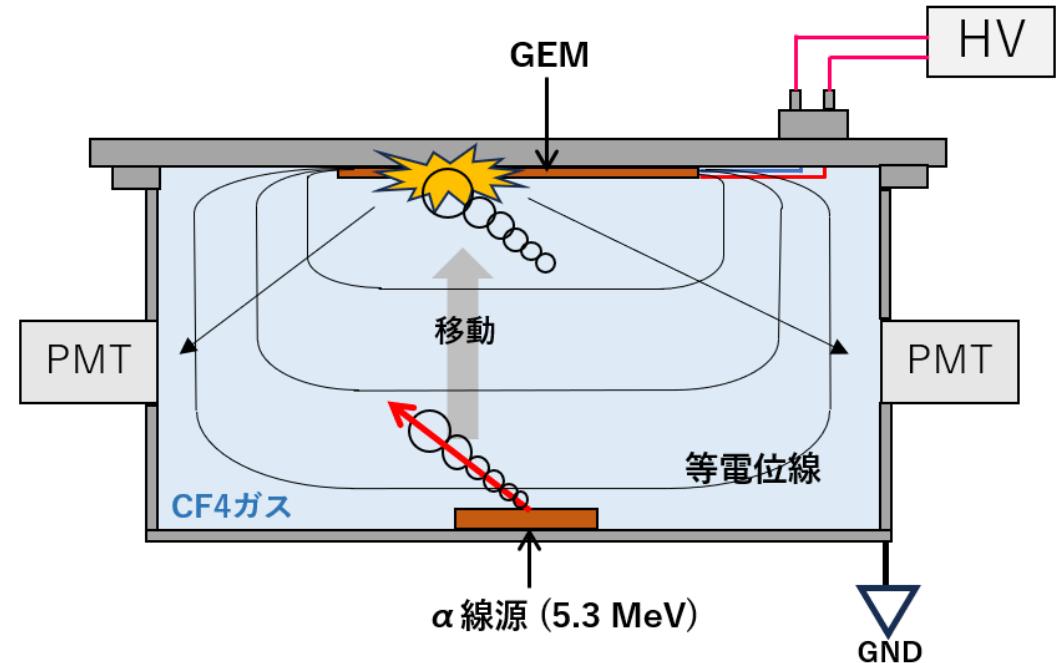
α 線源



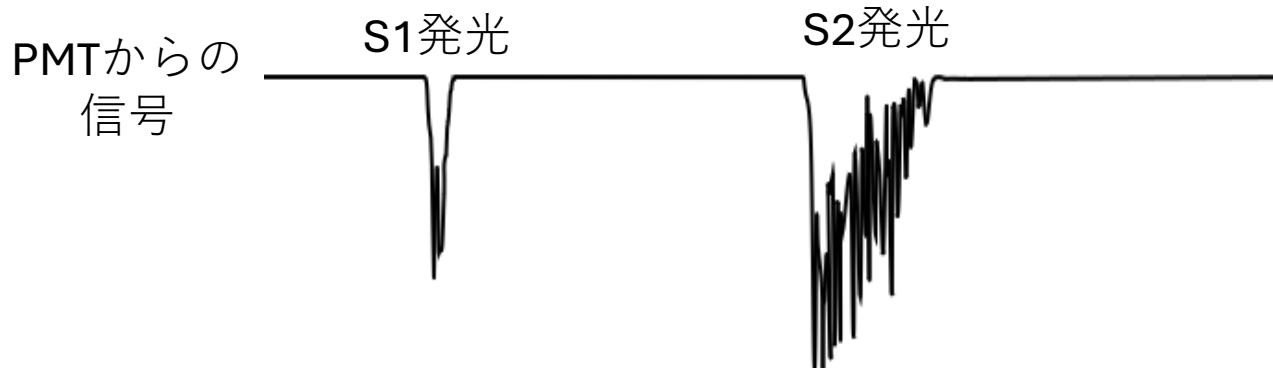
左の図の線源は5.3 MeVの α 線を定常的に放出している。

S2発光の流れ

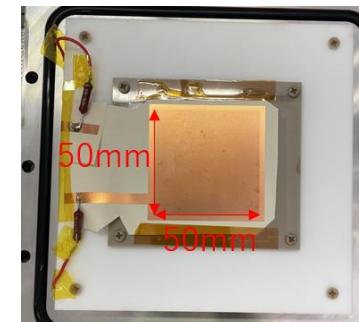
1. α 線の電離作用によってCF4ガスが電離され、電子が発生する
2. 高電圧をかけたGEMによって発生する電場により電子が上側に移動する
3. GEMに電子が入ると電子が増幅されて発光が起こる



○: α 線の電離作用よりCF4ガス中で発生した電子群



2種類の発光をPMTにより捉える



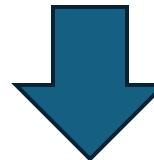
GEM

S2発光の概略図

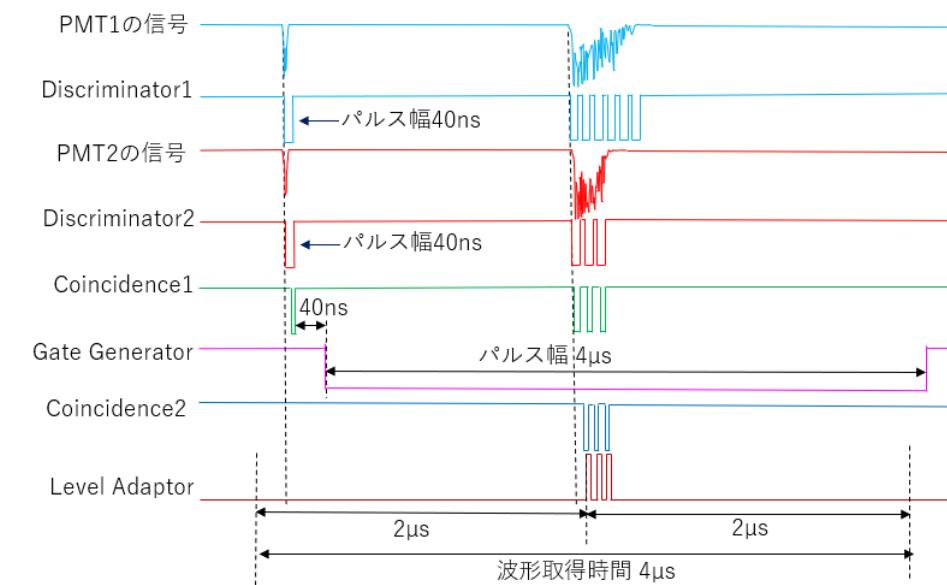
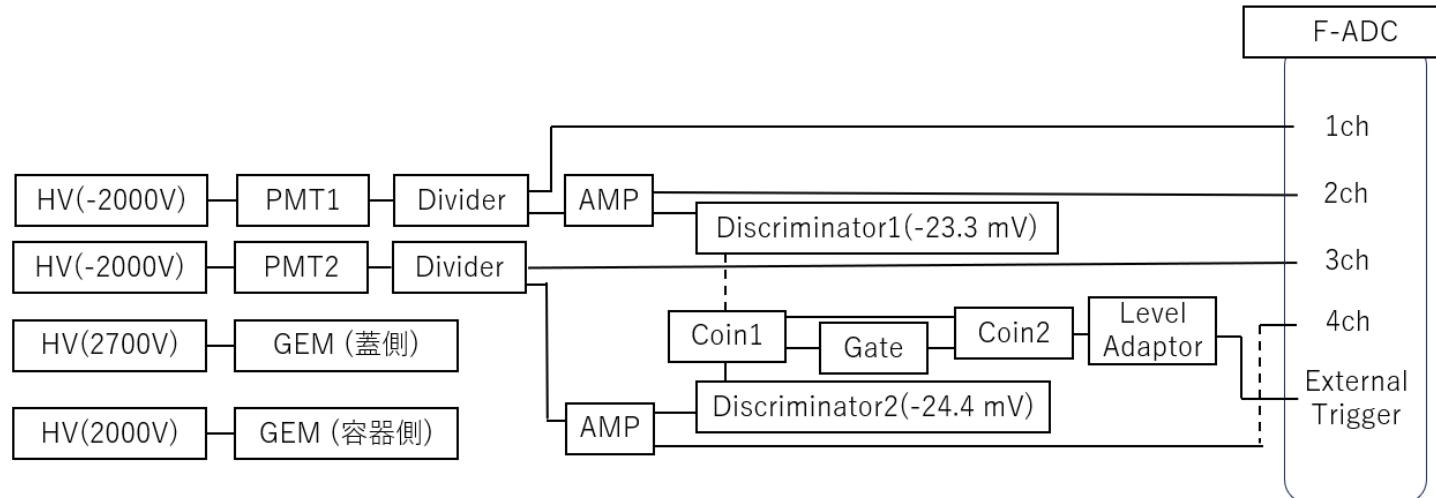
GEMの両面に数百Vの電位差を発生させている。

電子がGEMの細孔に入ると、電子雪崩が起き、そのタイミングで発光する。

α 線が発生するとPMTから2つの信号が時間差で発生する



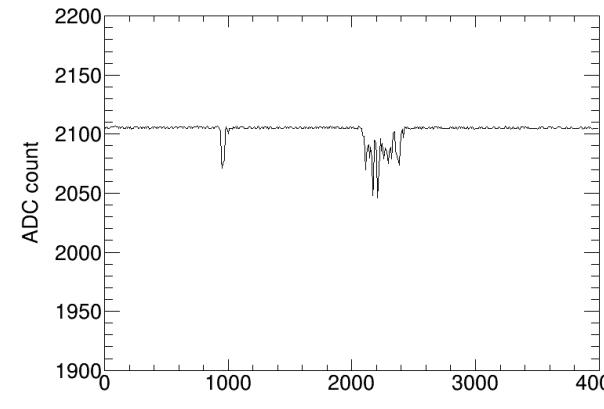
2つのPMTから同じタイミングで信号が来るイベントが
一定時間内に2回以上発生した際に波形取得をする



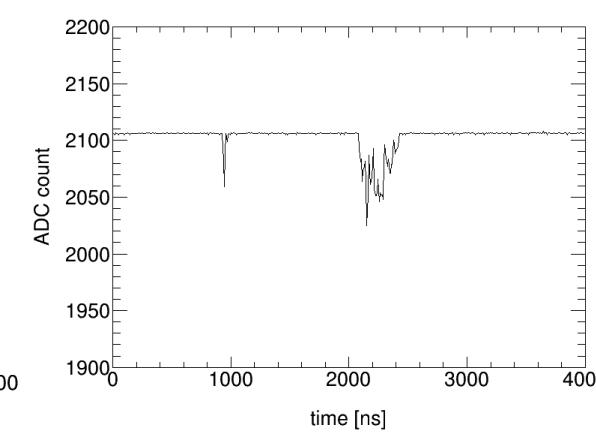


F-ADC
(Cosmo-Z)

信号をデジタル値
として記録

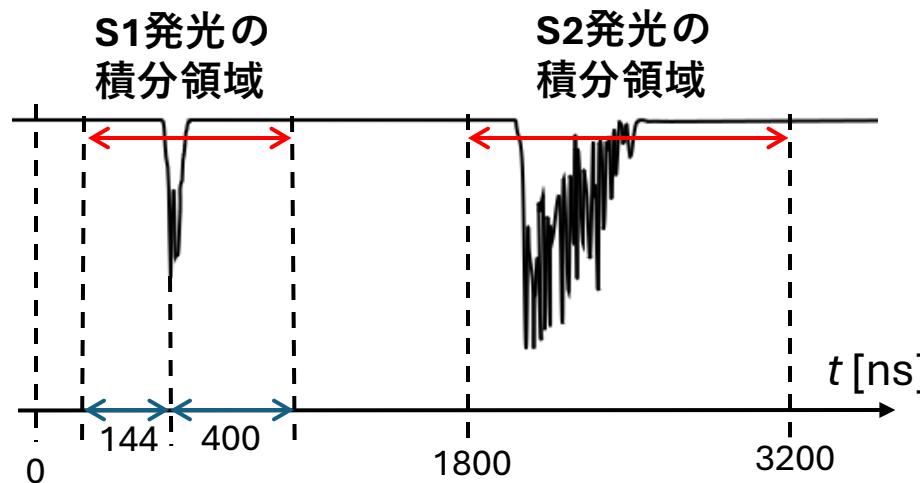


PMT1からの信号



PMT2からの信号

積分電荷の
計算



- 積分電荷はPMTの光電面から発生した光電子数に変換できる
- 光電子数は α 線のエネルギーの大きさに対応する

積分電荷の計算式

$$Q_{\text{ADC}} = \sum_{n=t_1}^{t_2} (b.l. - y(n)) \cdot \Delta t$$

ベースライン
各時点のADC
カウント

測定結果 ~光電子数分布~

9/16

検出器内に線源を入れた場合と入れなかった場合で1日ずつ測定を行った

NS1

S1発光の際に2つのPMTから発生した光電子の合計

NS2

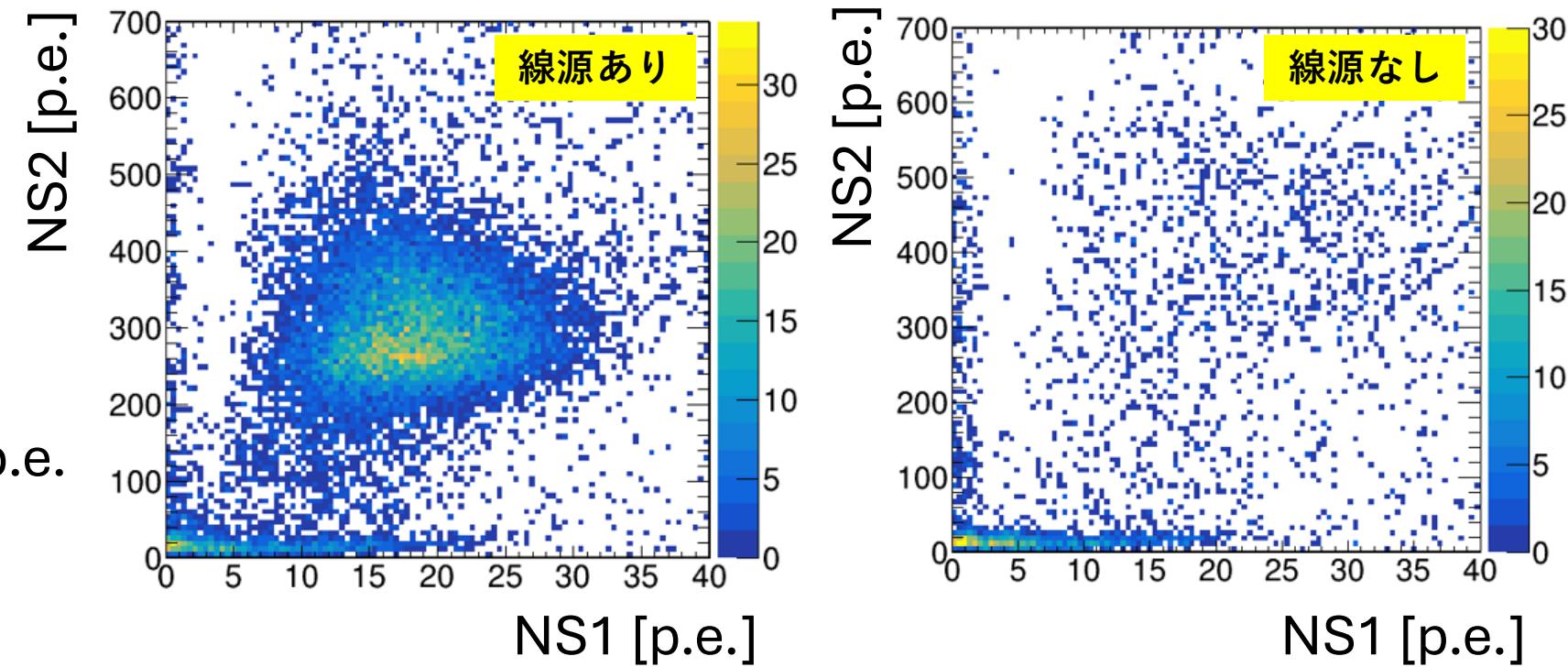
S2発光の際に2つのPMTから発生した光電子の合計

線源ありの場合のみ、

$NS1 \simeq 20 \text{ p.e.}$ 、 $NS2 \simeq 300 \text{ p.e.}$
にピークが見られた。



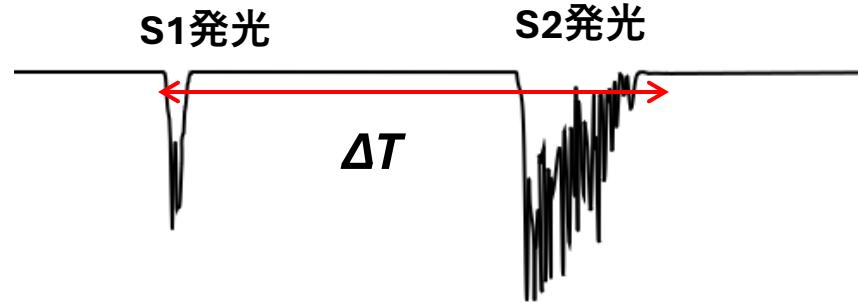
線源由来の α 線による
イベントを確認できた



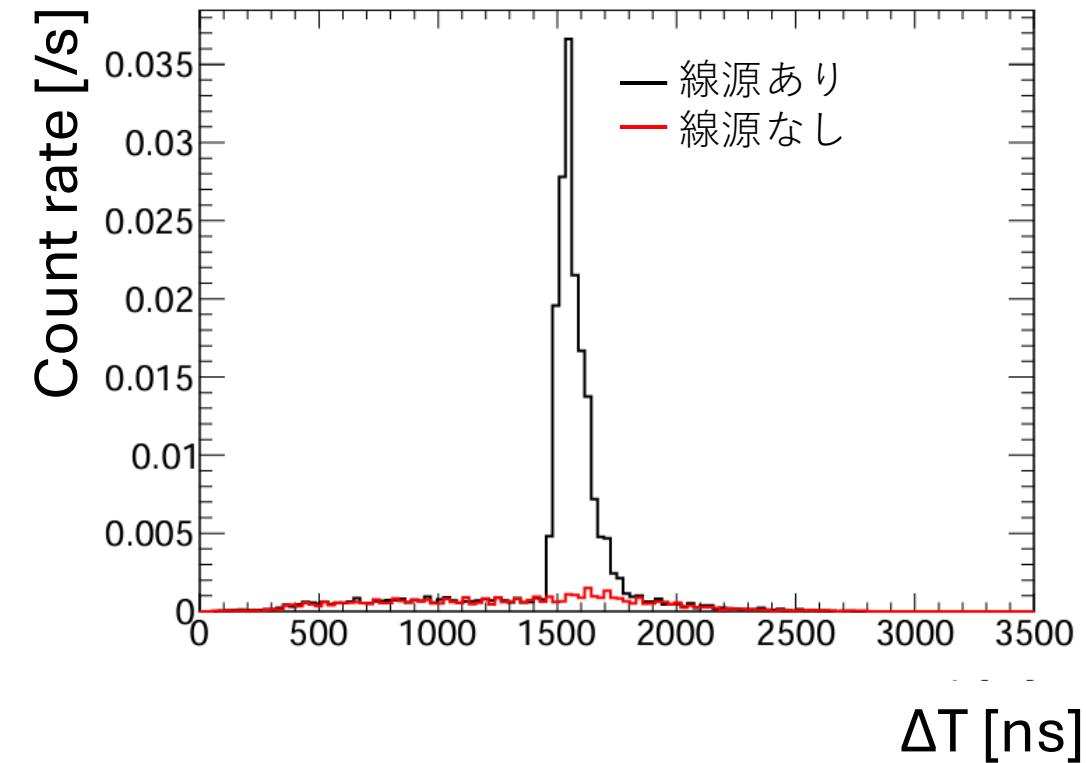
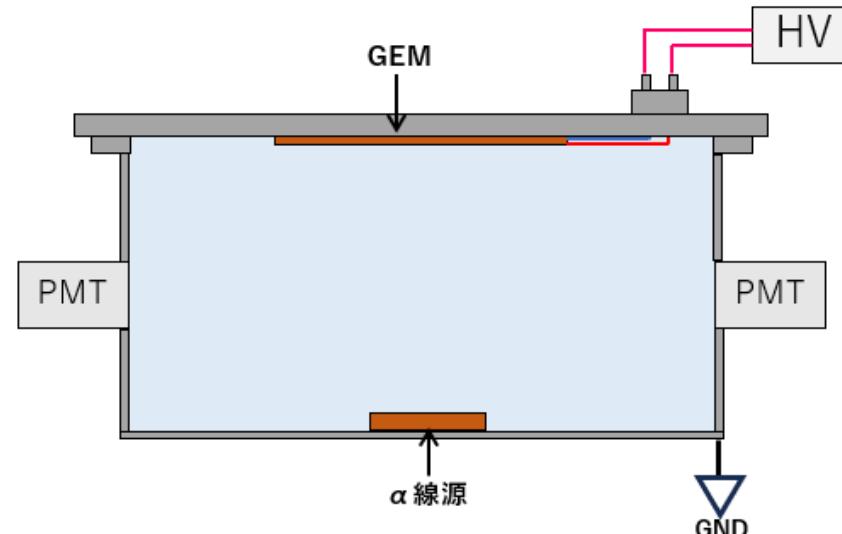
測定結果 ~2種類の発光の時間差~

10/16

検出器内に線源を入れた場合と入れなかった場合で1日ずつ測定を行った



$\Delta T \simeq 1500 \text{ ns}$ 周辺に線源由来のイベントによるピークを確認した



- 1500 ns周辺のピークの事象
→ α 線源による α 線のイベント

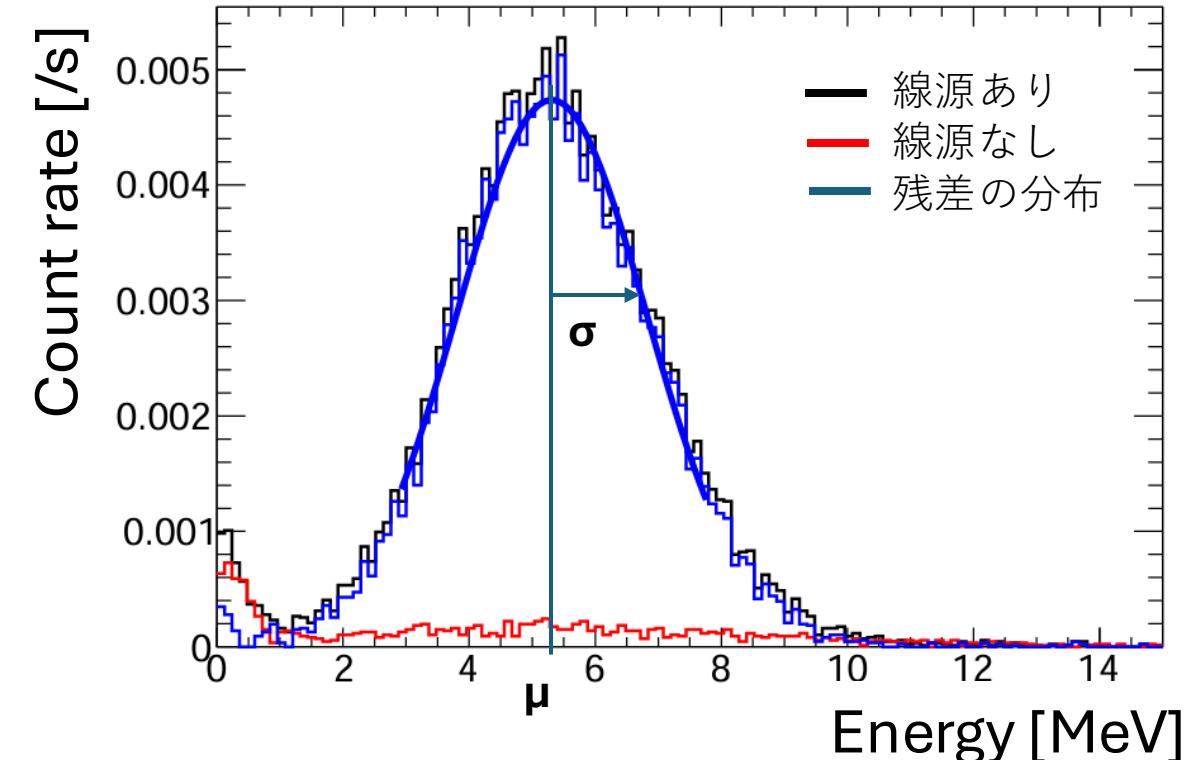
エネルギー分解能とは

測定された α 線のエネルギースペクトルがどの程度の広がりを持っているかを表す指標。広がりが小さい方がエネルギーの測定精度が高く、エネルギー分解能が良い。

S1発光に対応するエネルギー分布からエネルギー分解能を求めた。

$$\text{エネルギー分解能} = \frac{\sigma}{\mu}$$

$$\frac{\sigma}{\mu} = 29.3 \pm 0.5 \%$$



エネルギー分布

$$\mu = 5.301 \pm 0.021 \text{ MeV}$$

$$\sigma = 1.550 \pm 0.023 \text{ MeV}$$

測定結果 ~検出効率~

12/16

閾値を超えるイベント数

線源あり

$N_1 = 14519$ events

線源なし

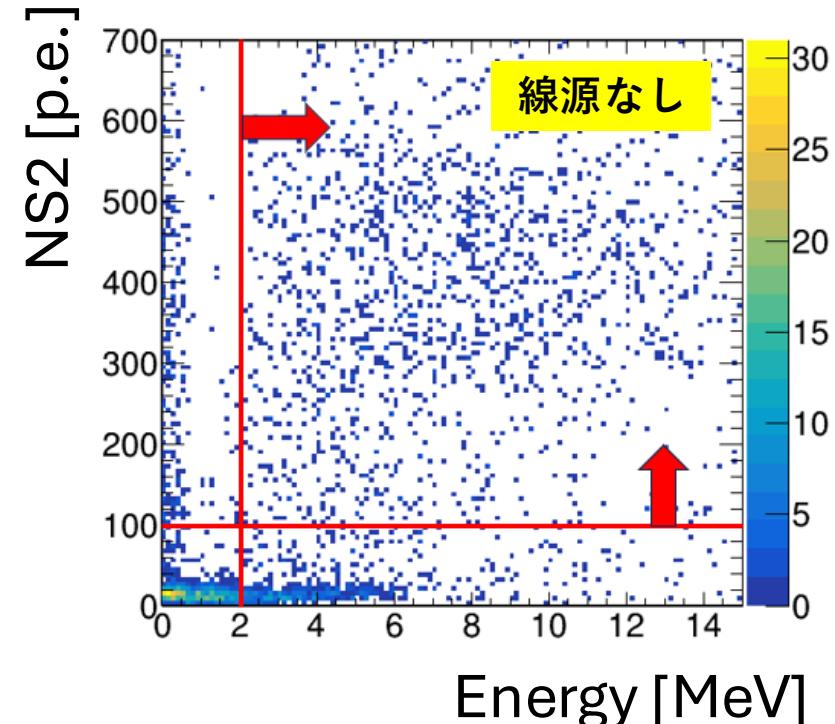
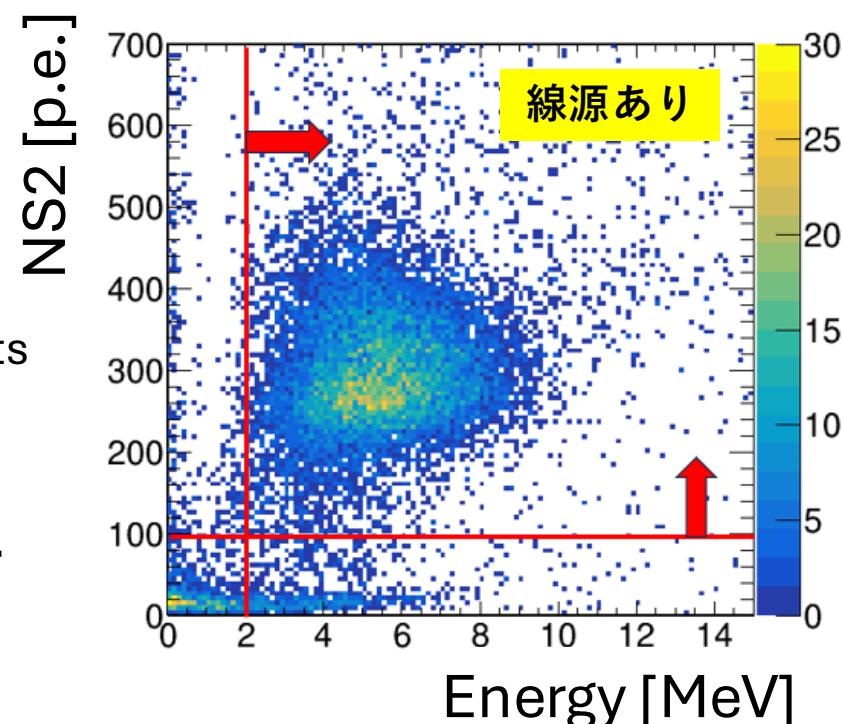
$N_0 = 1689$ events

線源由来の事象頻度：

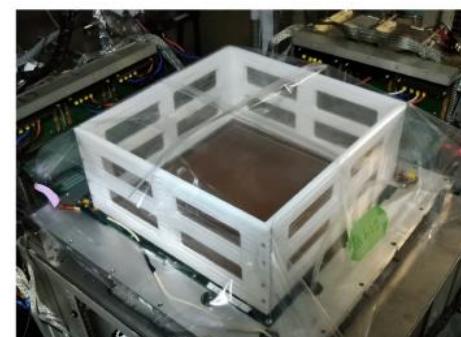
$$\frac{N_1 - N_0}{24 \text{ hr}} = 535 \pm 5 \text{ events/hour}$$

検出効率

$$\frac{\text{(線源由来の事象頻度)}}{\text{(AICHAMによる測定値)}} = 88.7^{+3.0}_{-3.8} \%$$



エネルギー、NS2の二次元分布



AICHAM

AICHAMによる測定値：
 $602.5^{+17.1}_{-19.5}(\text{stat}) \pm 2.8(\text{syst}) \text{ alpha/hour}$

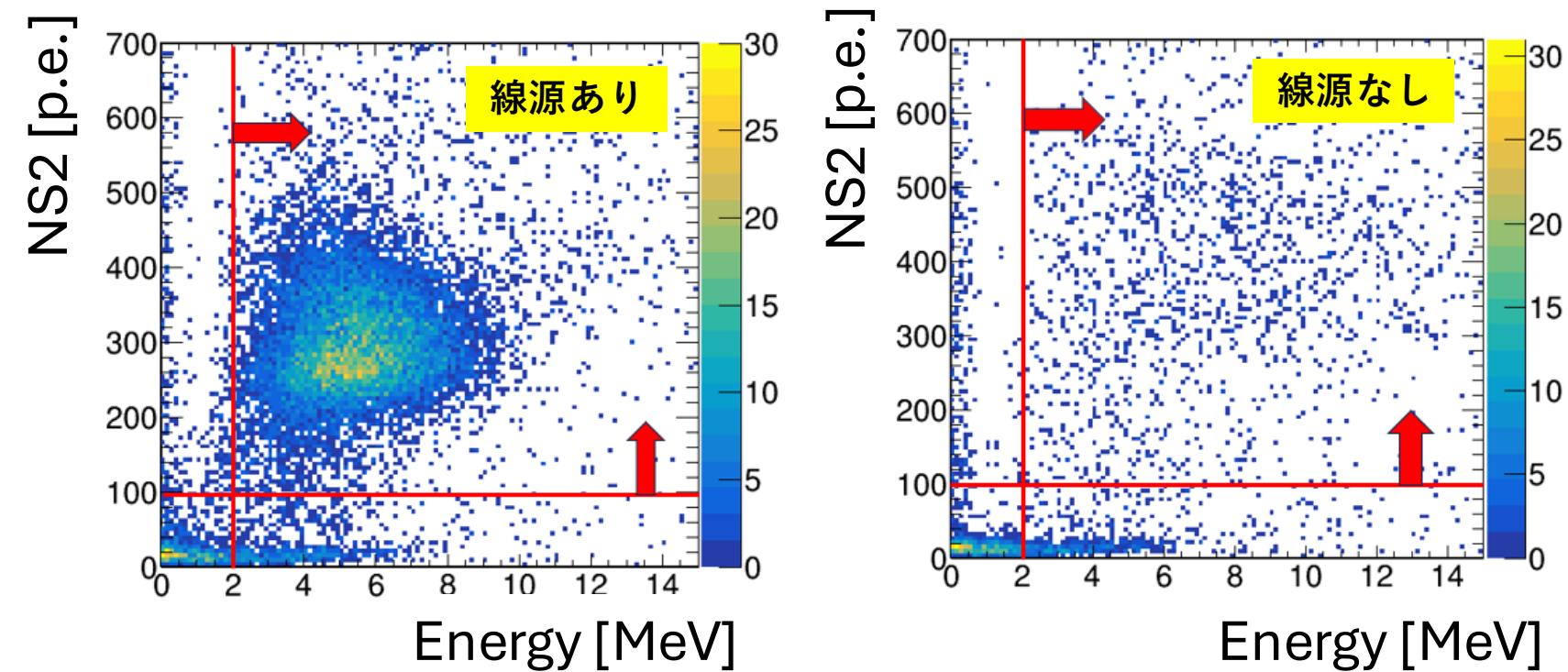
バックグラウンドレート

この値が小さいほど対象物からの信号を有意に検出できる

閾値を超えるイベント数

線源なし

$N_0 = 1689$ events



エネルギー、 NS2の二次元分布

線源なしの場合における閾値を超える事象頻度: $n_0 = \frac{N_0}{24\text{hr}} = 70.37 \pm 1.7 \text{ alpha/hour}$

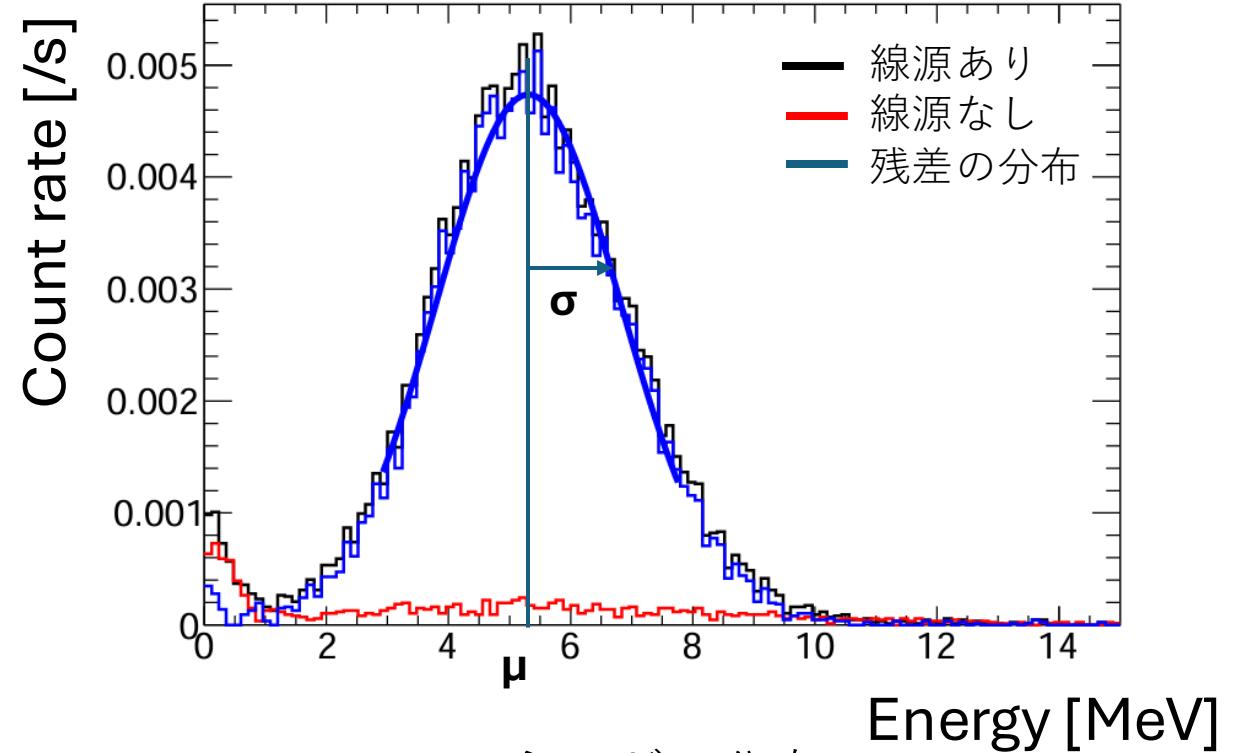
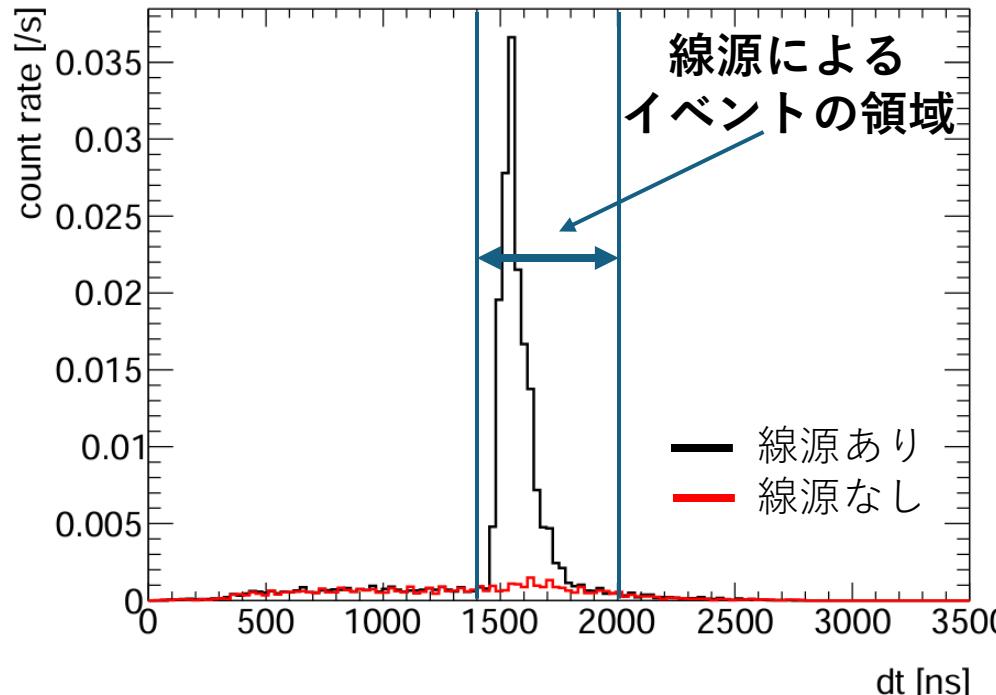


バックグラウンドレート: $\frac{n_0}{\eta} = 79.3^{+3.1}_{-3.3} \text{ alpha/hour}$

ΔT の条件からイベントカットを行なった上で検出効率を求めた

ΔT の条件:

$$1400 \text{ ns} < \Delta T < 2000 \text{ ns}$$



エネルギー分布

$$\mu = 5.300 \pm 0.021 \text{ MeV}$$

$$\sigma = 1.539 \pm 0.027 \text{ MeV}$$

$$\text{エネルギー分解能} = \frac{\sigma}{\mu} = 29.0 \pm 0.5 \%$$

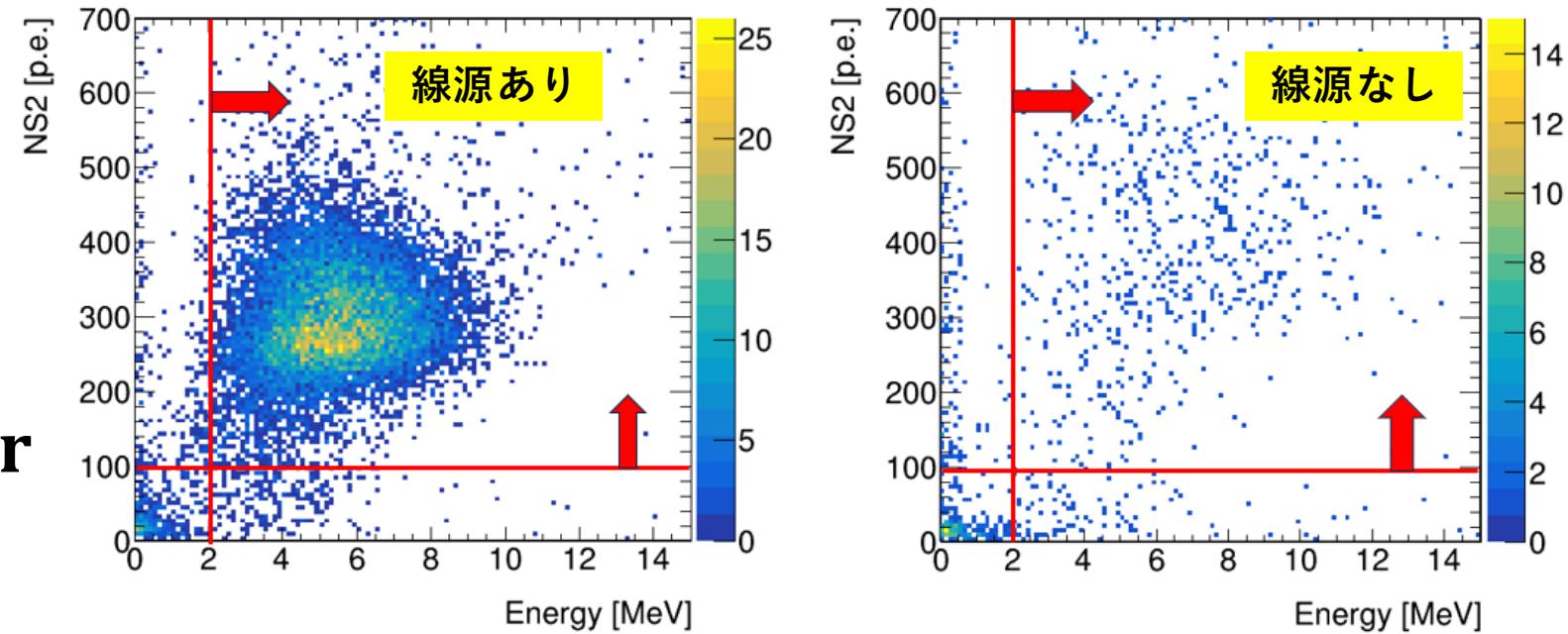
- ΔT の条件を満たすイベントのみで検出効率とバックグラウンドレートを評価した。

検出効率

$$\eta = 88.0^{+3.0}_{-2.6} \%$$

バックグラウンドレート

$$\frac{n_0}{\eta} = 35.4^{+1.7}_{-1.8} \text{ alpha/hour}$$



エネルギー、NS2の二次元分布

α 線検出器としての評価（まとめ）

項目	ΔT の条件なし	ΔT の条件あり
エネルギー分解能 (5.3 MeV の場合)	$29.3 \pm 2.1\%$	$29.0 \pm 2.1\%$
検出効率	$88.7^{+3.0}_{-3.8}\%$	$87.0^{+3.0}_{-2.6}\%$
バックグラウンドレート	$79.3^{+3.1}_{-3.3} \text{ alpha/hr}$	$35.4^{+1.7}_{-1.8} \text{ alpha/hr}$

ΔT の条件による事象選別により
バックグラウンドレート
が半減された

- ・光電子増倍管によって検出器内で発生する二種類の発光を観測し、 α 線の信号を有意に観測することができた。
- ・二種類の発光の時間差の条件から検出器のバックグラウンドレートを半分以上削減することができた。

参考文献

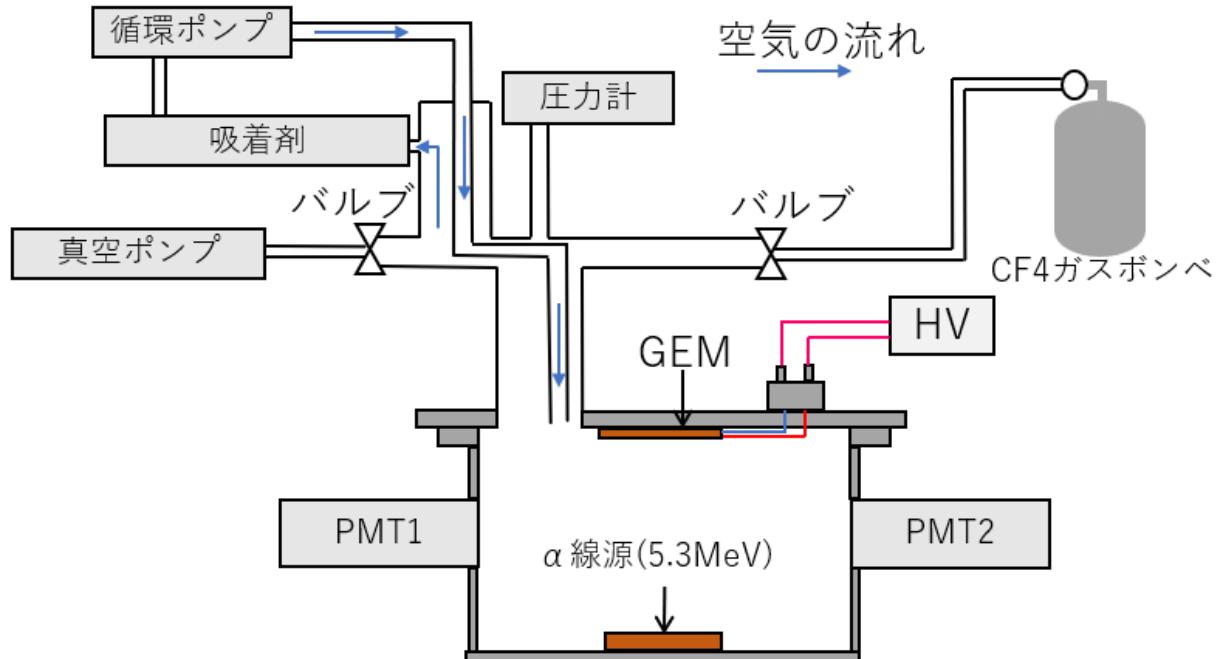
- 極低放射能アルファ線分析の最近の動向
<https://conference-indico.kek.jp/event/197/contributions/3906/attachments/2611/3366/2022.12.09.19thMPGD.AICHAM.pdf>
- 放射線治療に用いられる α 線の研究
https://www.jstage.jst.go.jp/article/dentalradiology/61/2/61_33/ pdf
- A progress of upgrading α -ray imaging chamber in a low background radioactivity
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2156/1/012176/pdf>
- μ -PIC とは-原理と応用-
https://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/lorentz/2010Lorentz_gamma_poster_ver4_2.pdf
- 光電子増倍管 その基礎と応用
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf
- Cosmo-Z 製品情報
<https://cosmoz.jp/product.html>
- GEM の電荷増幅特性に関する研究
https://www.tohoku-gakuin.ac.jp/kougakukai/report/img/50/R_50_05.pdf

Back up

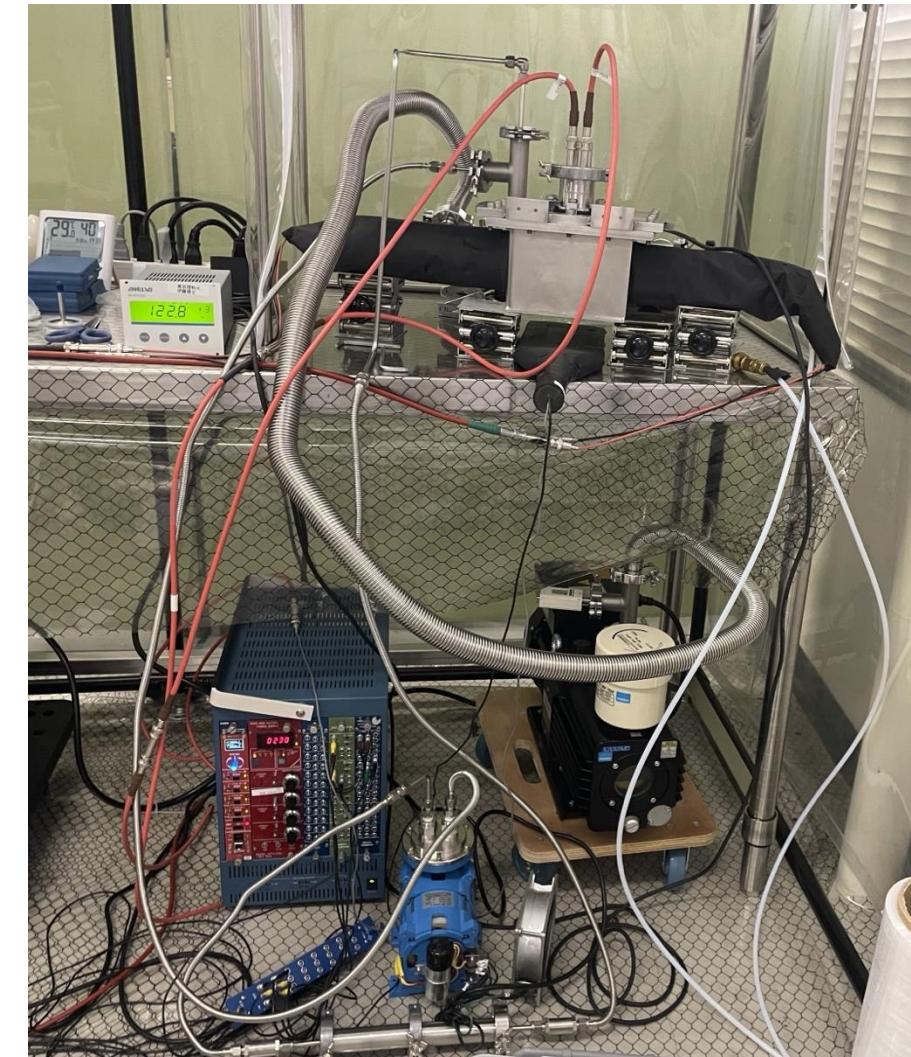
実験装置 ～ガス配管～

7/20

- ・ ガスチャンバーに2つのPMTが取り付けられている
- ・ チャンバー内は1気圧程度のCF4ガスで満たされている
- ・ 吸着材によってチャンバー内のラドン濃度を低減している



ガス配管の概略図



測定装置の外観

測定結果 ~光電子数分布~

10/20

- ・ チャンバー内に線源を入れた場合と入れなかった場合で1日ずつ測定を行った。

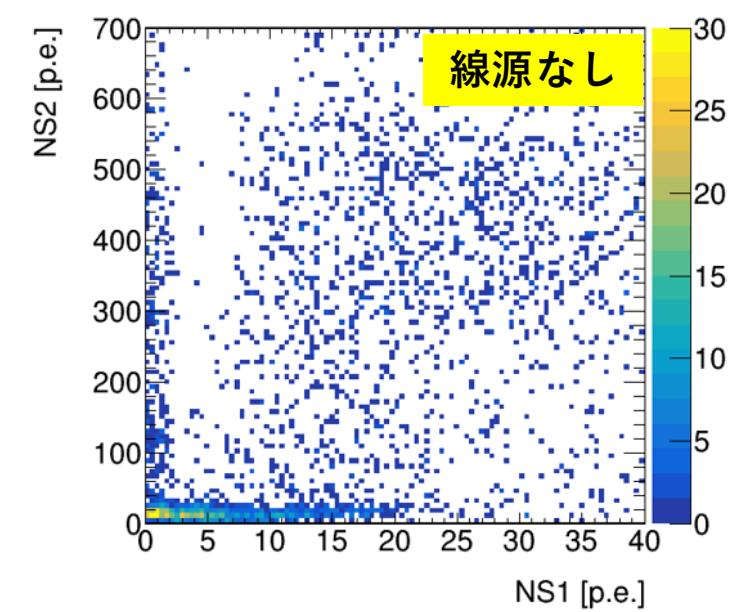
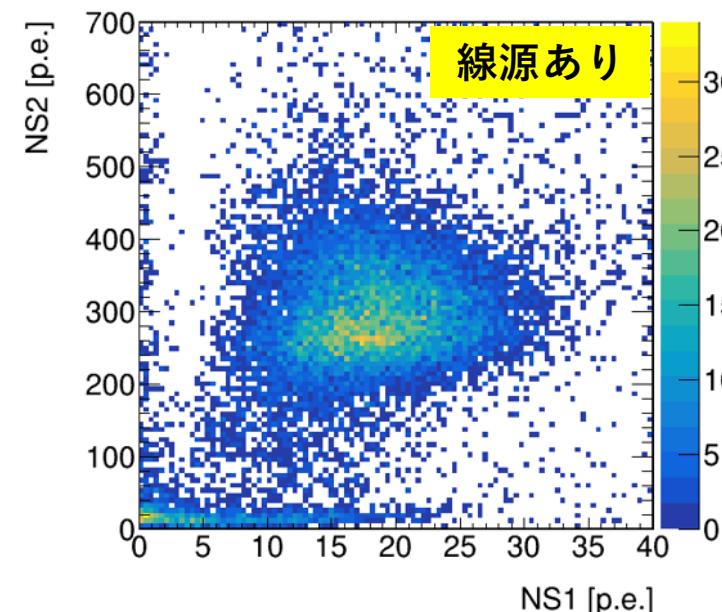
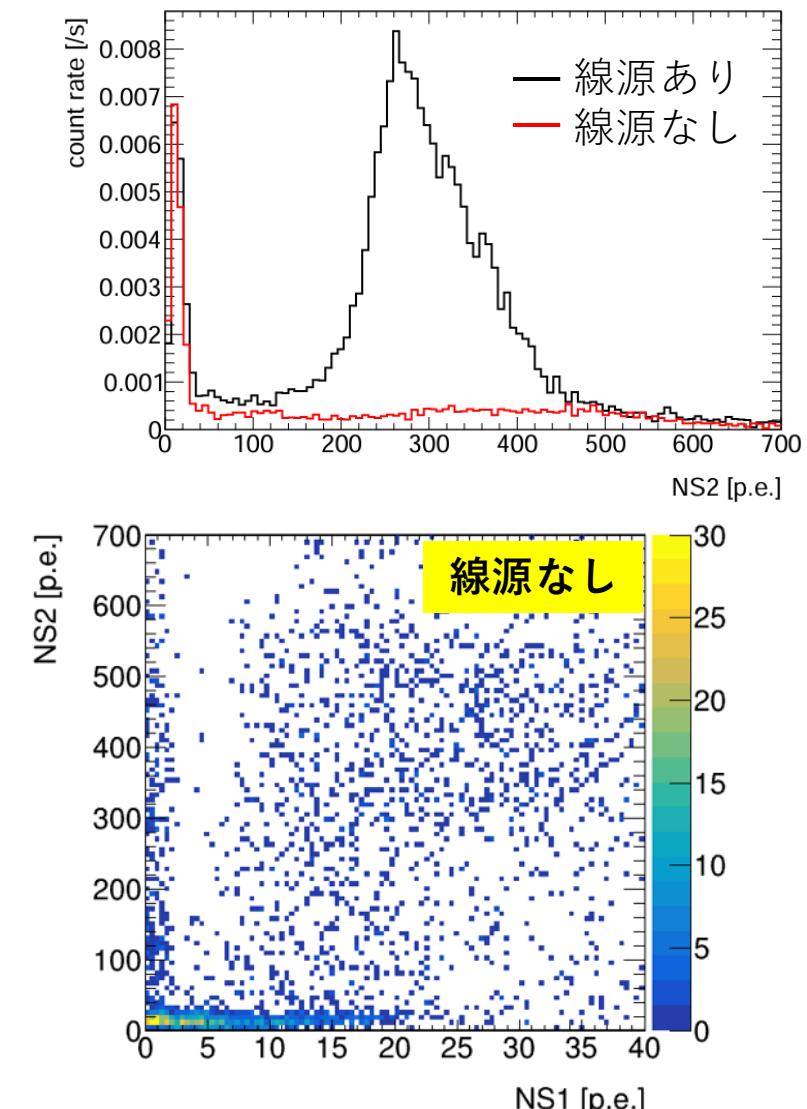
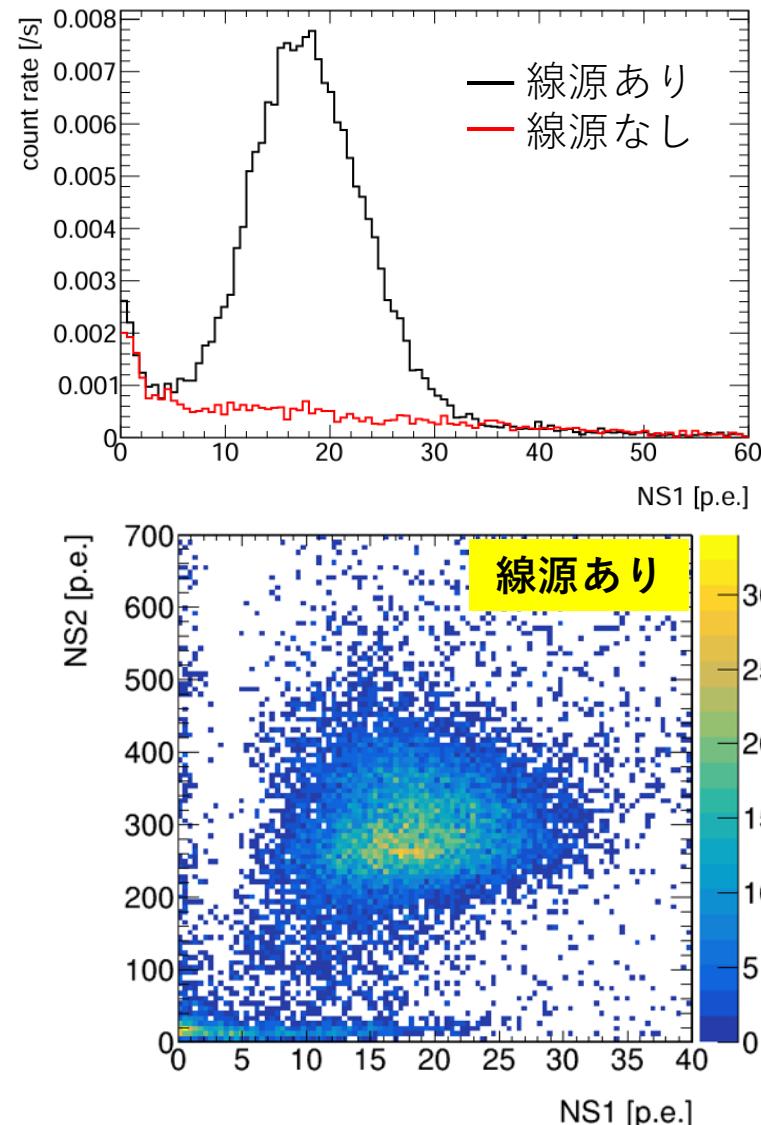
NS1
S1発光の際に2つのPMTから発生した光電子の合計

NS2
S2発光の際に2つのPMTから発生した光電子の合計

線源ありの場合のみ、
 $NS1 \simeq 20$ p.e.、 $NS2 \simeq 300$ p.e.
にピークが見られた。



線源由来の α 線によるイベント
を確認できた。

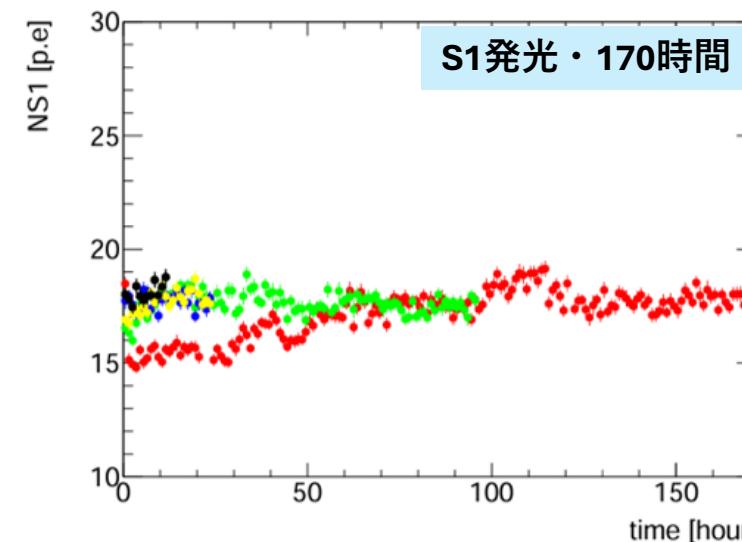
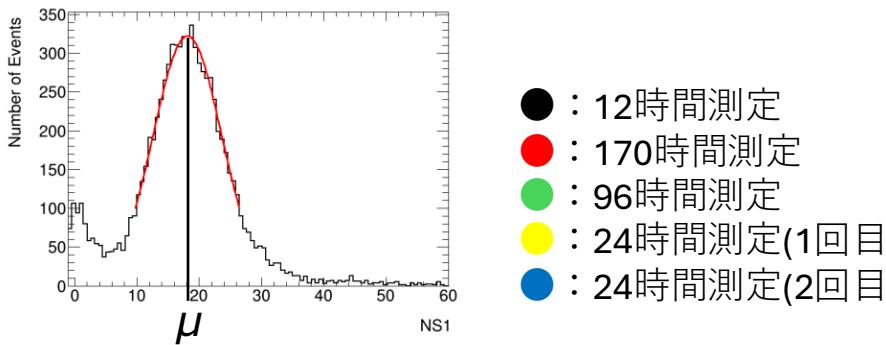


測定結果 ~発光量の時間安定性~

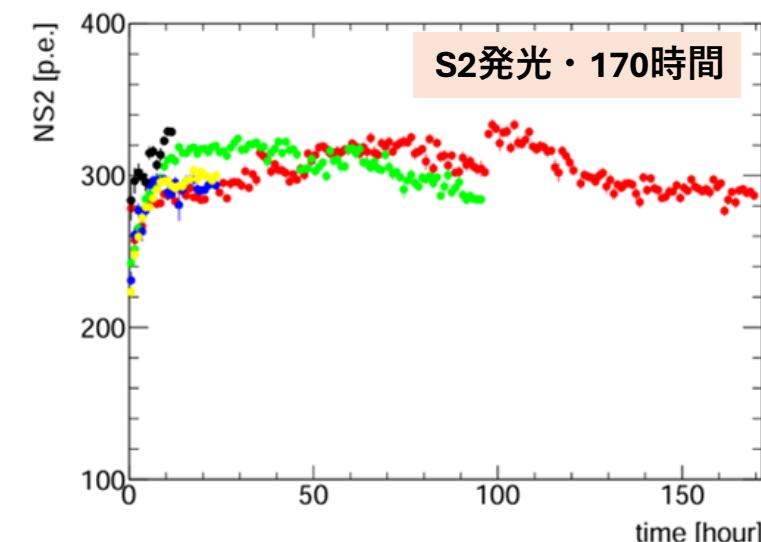
12/20

- S1、S2発光に対する信号の光電子数ピーグの時間依存性を調べた

線源由来のピーグの値の
1時間ごとの変化を確認



- S1発光は170時間測定を除き、
18 p.e. 付近で安定していた。
- S2発光は最初の10時間にかけて
発光量の増加が見られ、安定して
いなかった。

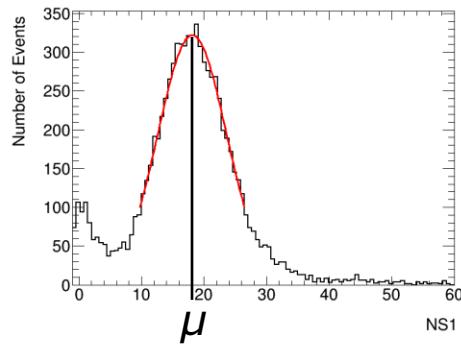


測定結果 ~発光量の時間安定性~

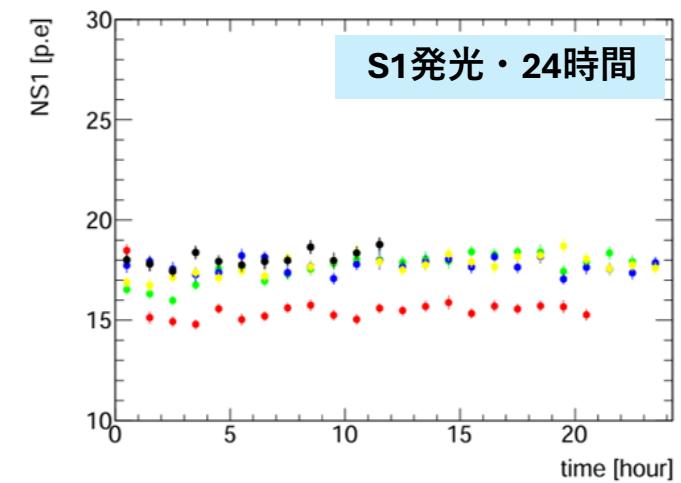
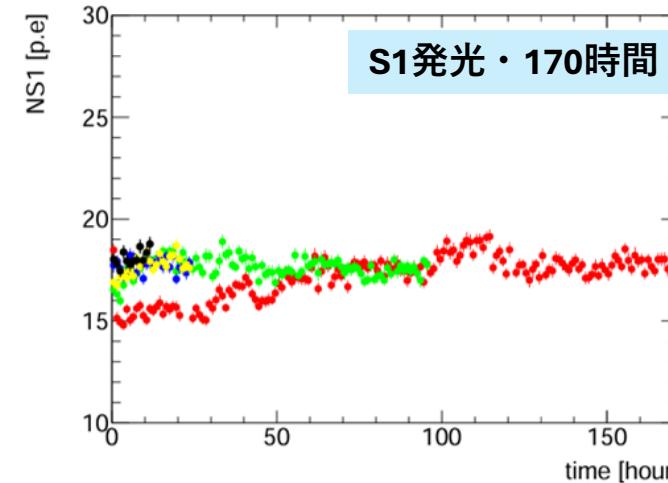
12/20

- S1、S2発光に対する信号の光電子数ピーグの時間依存性を調べた

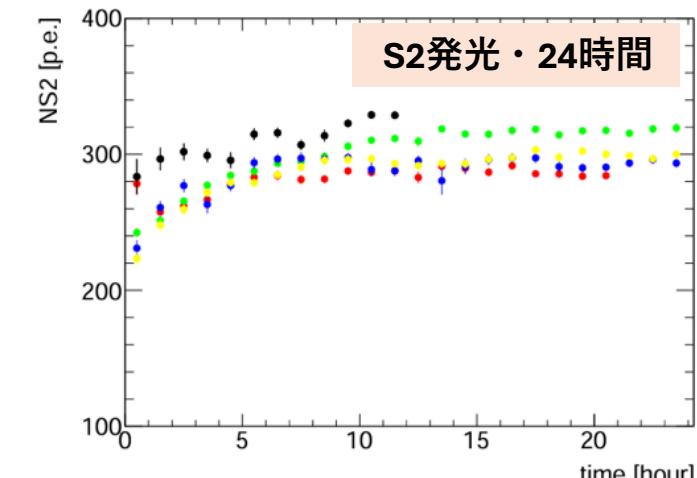
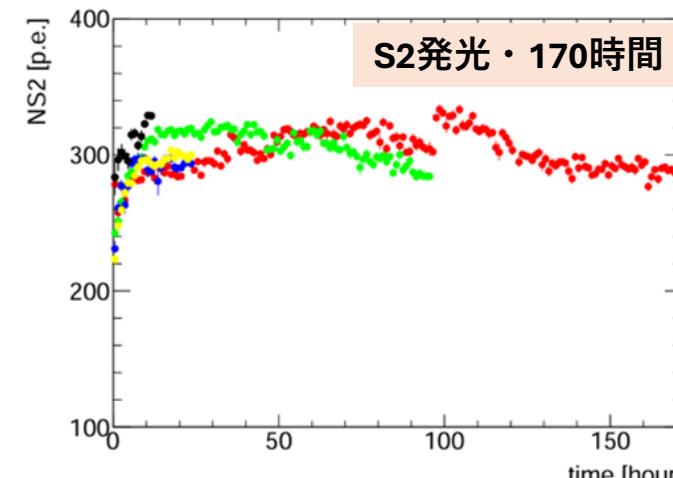
線源由来のピークの値の
1時間ごとの変化を確認



- : 12時間測定
- : 170時間測定
- : 96時間測定
- : 24時間測定(1回目)
- : 24時間測定(2回目)



- S1発光は170時間測定を除き、
18 p.e. 付近で安定していた。
- S2発光は最初の10時間にかけて
発光量の増加が見られ、安定して
いなかった。



測定結果 ~イベントレートの時間安定性~

13/20

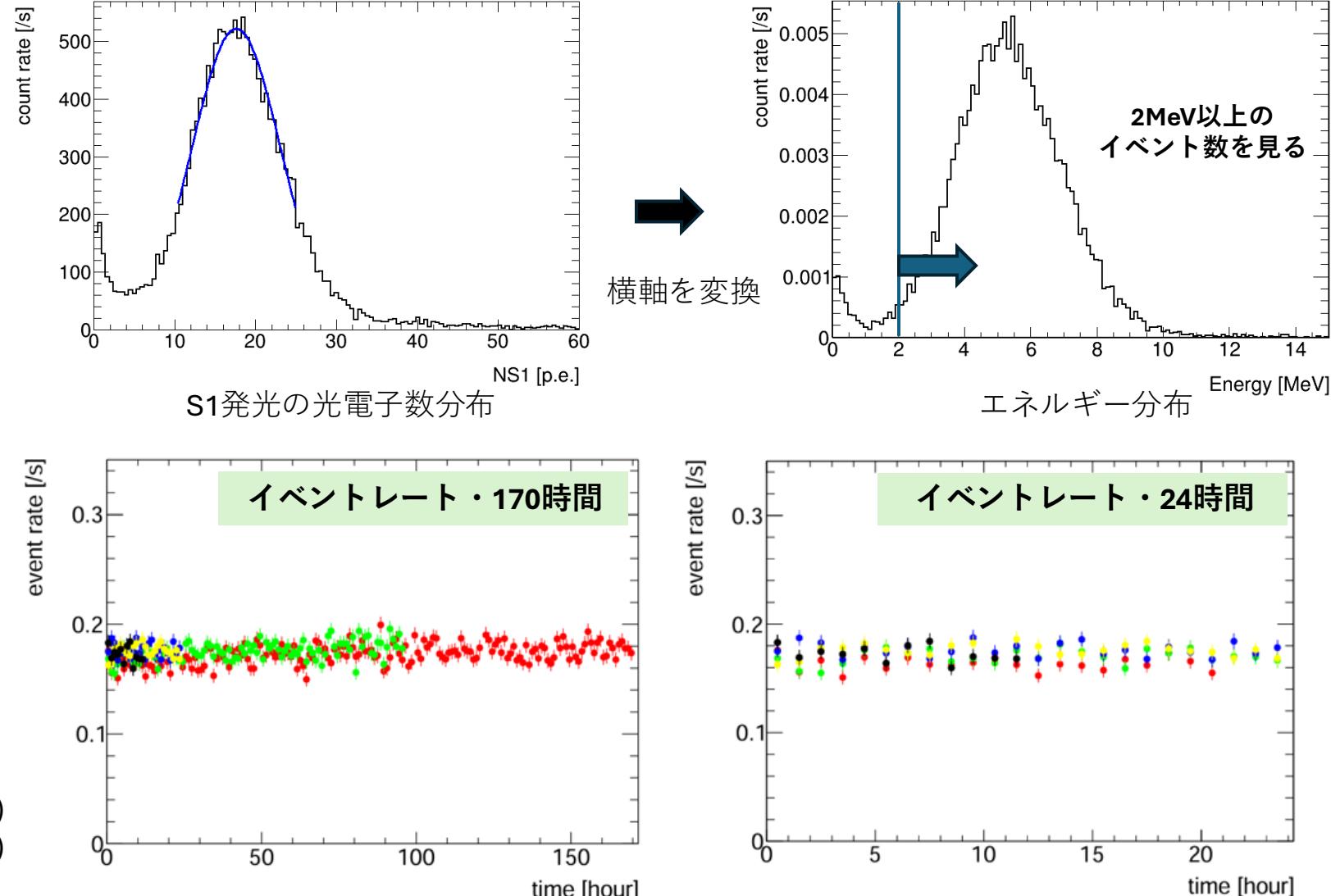
- ・ 閾値 (2 MeV) を超えるS1発光の事象頻度の時間安定性を確認した

1. S1発光に対応する光電子数分布のピークが5.3 MeVに対応するとして、エネルギー分布に変換する。

2. エネルギー分布において2 MeV以上となるイベント数を1時間ごとにカウントする。

0.18 event/s 付近で安定していることが確認できた。

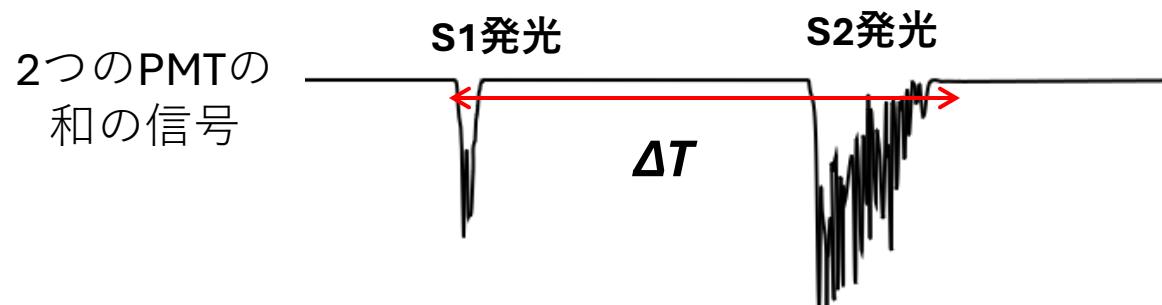
- : 12時間測定
- : 170時間測定
- : 96時間測定
- : 24時間測定(1回目)
- : 24時間測定(2回目)



測定結果 ~ ΔT の時間安定性~

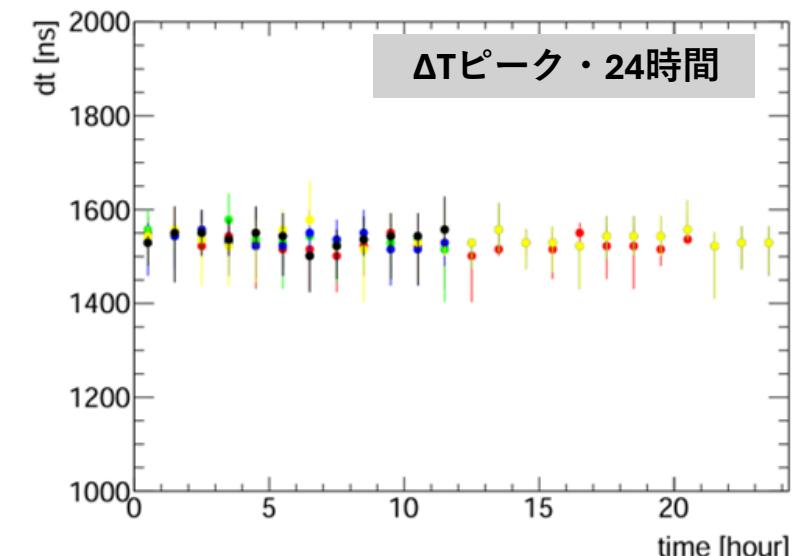
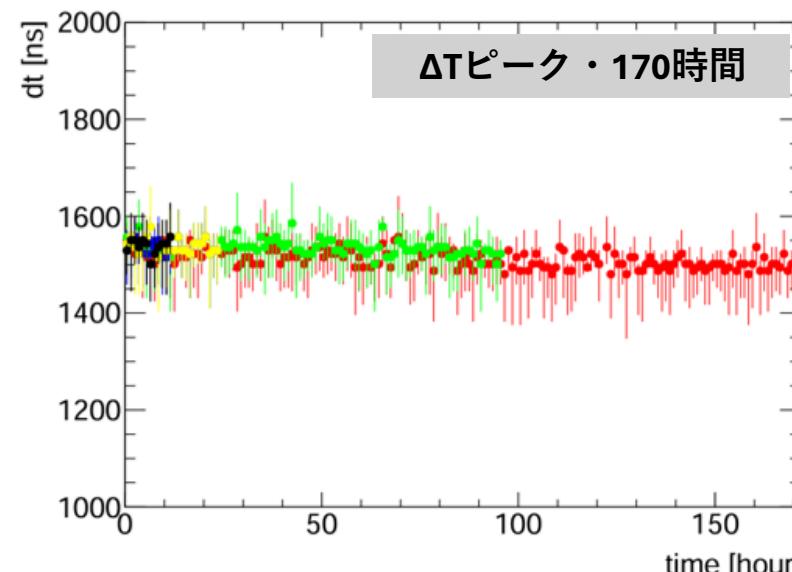
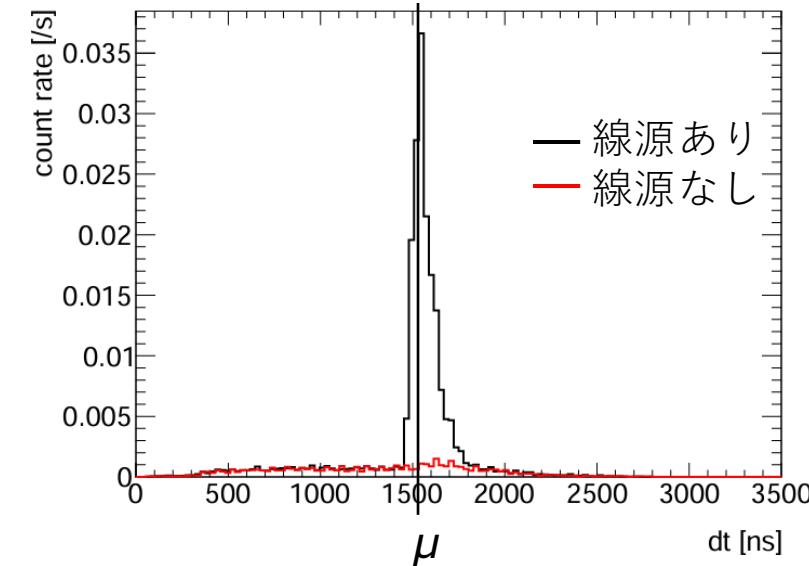
14/20

- 2種類の発光の時間差分布のピークの値の時間変化を確認した。

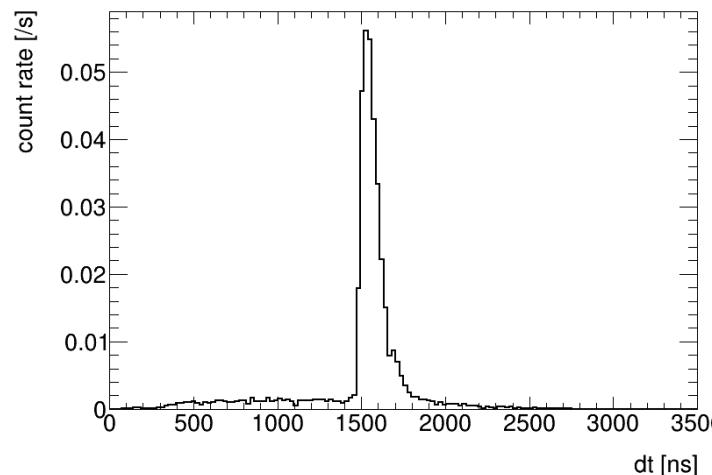


$\Delta T \simeq 1500 \text{ ns}$ 周辺のピークの値の1時間ごとの変化を確認する。

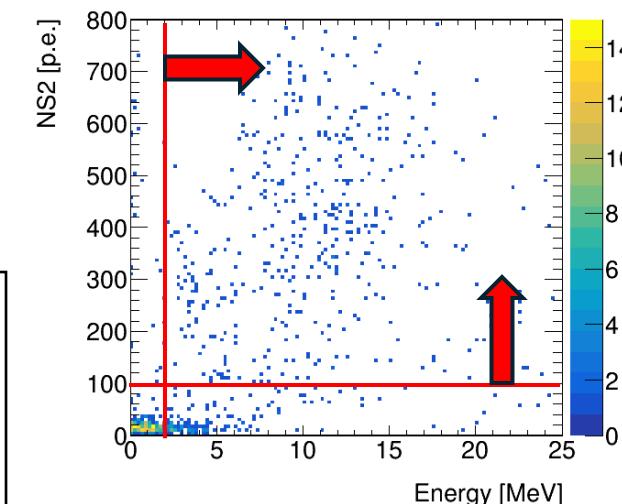
170時間測定において各ピークの値は不確かさの範囲内に収まっており、安定していた。



バックグラウンドについて



700 ns < dt < 1200 ns を満たすのイベントに
関して Energy-NS2 の
二次元分布を確認

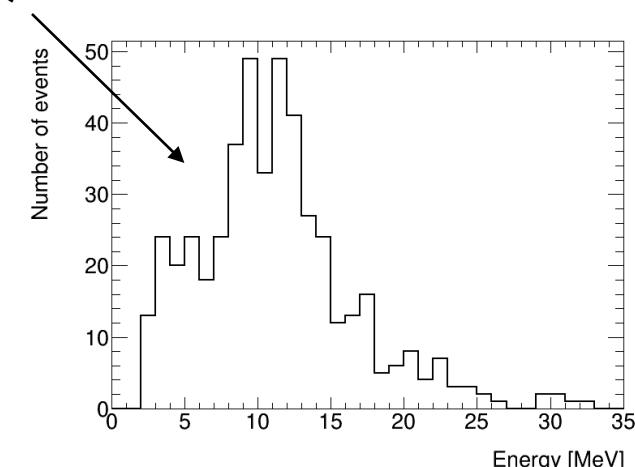


合計 469 イベント

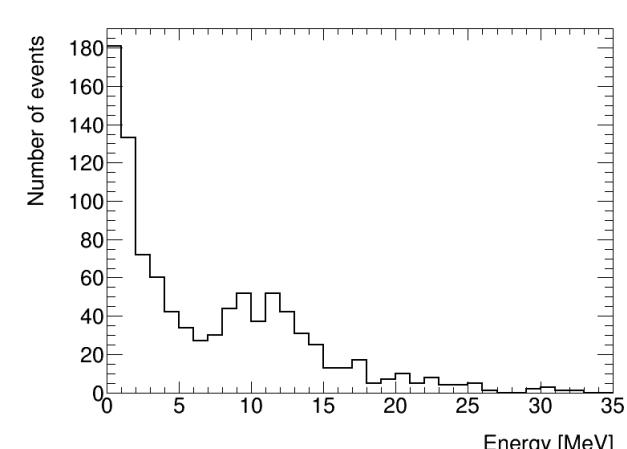
$$\frac{469 \text{ events}}{24 \text{ hr} \times 3600 \text{ s}} = 4.15 \times 10^{-4} \text{ events/s}$$

$$\frac{4.15 \times 10^{-4} \text{ events/s}}{6.11 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 8.87 \text{ events/s/m}^3$$

$6.11 \times 10^{-4} \text{ m}^3$:
700 ns < dt < 1200 ns に対応する検出器の体積



閾値によるカットあり
(Energy > 2 MeV、 NS2 > 100 p.e.)



閾値によるカットなし