

NOPTREX実験に向けた中性子検出器開発

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻

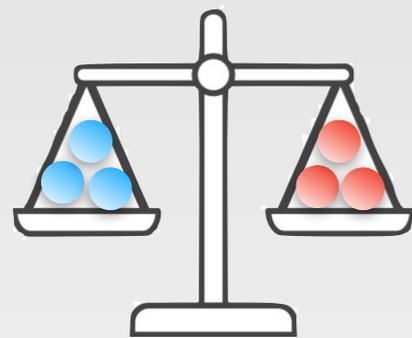
核物理研究センター

吉川 大幹

2021/10/29

計測システム研究会2021@九州大学/Zoom

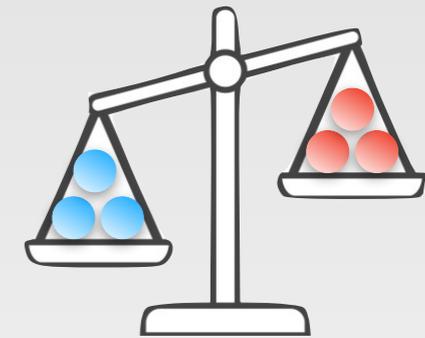




物質・反物質のアンバランスが起こる



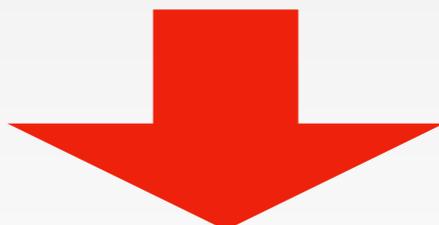
物質・反物質のアンバランスは変わっていない



- ### Sakharovの3条件
- ・バリオン数を破る反応の存在
 - ・C, CP対称性の破れ
 - ・熱平衡状態からのズレが存在

CPT定理

CP対称性の破れはK中間子やB中間子の崩壊過程で観測されているが、物質優勢宇宙を説明するには全く不十分



未知のCPの破れが存在？

CPの破れ \Leftrightarrow 時間反転(T)対称性の破れ

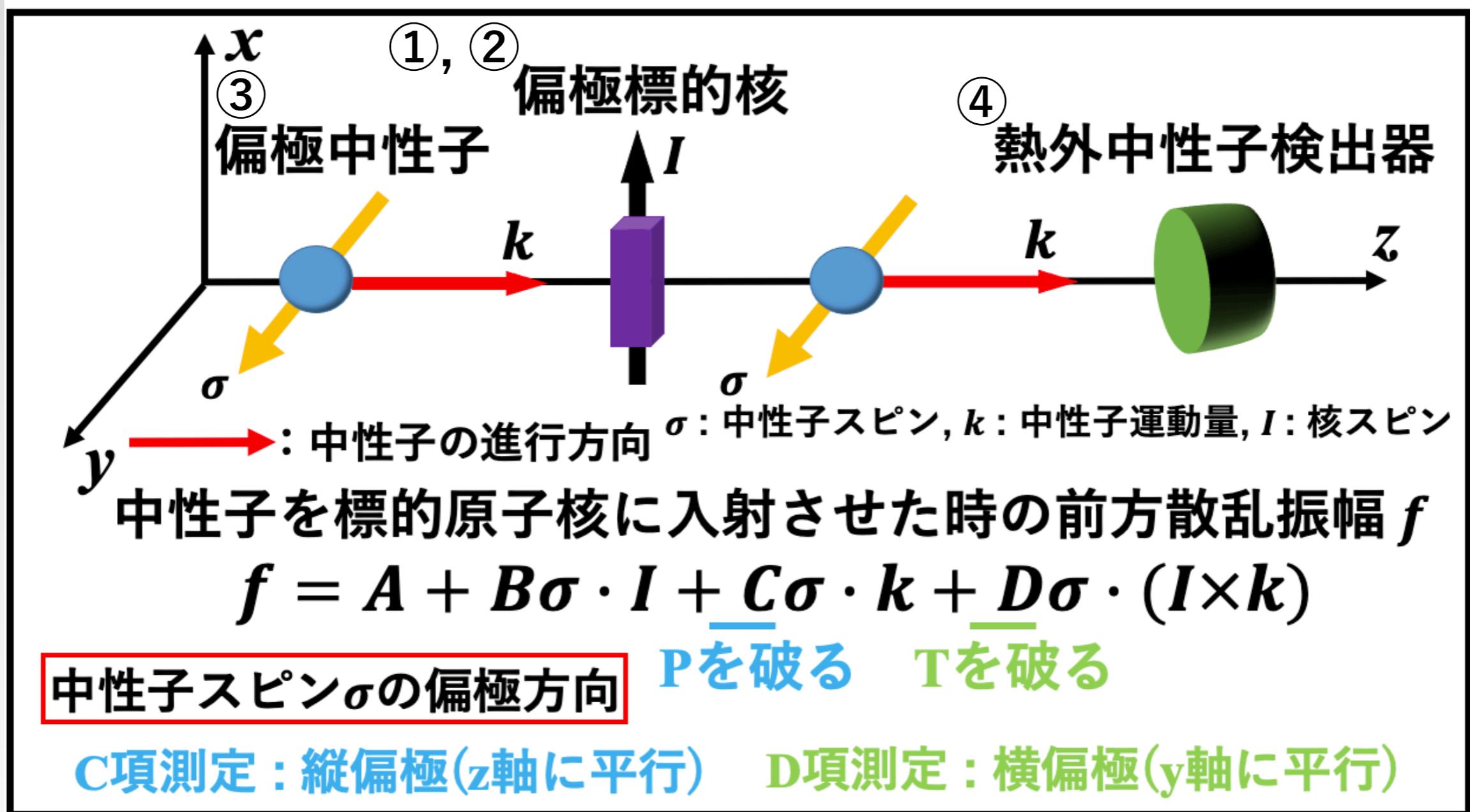
Tの破れ探索を通じてCPの破れ探索が可能 \Rightarrow 新物理探索へ

1. 原子核標的の選定

$\kappa(J)$ の測定

2. 原子核標的の偏極

原子核ごとに適した偏極手法(DNP, Triplet-DNPなど)



3. 中性子偏極技術

共鳴エネルギー (~ eV) の中性子の偏極
 ^3He スピンフィルタ、陽子スピンフィルタ

4. 高計数率取得可能な検出器

信号の高速読み出し技術の開発
 ^6Li -plastic (EJ-270) など

中性子検出器開発の目的

時間反転対称性(T)の破れ

→ nEDM(中性子永久電気双極子能率)の測定結果により制限

複合核共鳴反応におけるTの破れ

→ nEDMの探索感度を超える高感度測定の可能性

[複合核内の核子同士のTの破れの大きさとPの破れの大きさの比]

パイオン交換の際のT-violatingな結合定数

現在の上限値を代入

$$\frac{W_T}{W} \simeq (-0.47) \left(\frac{\bar{g}_\pi^{(0)}}{h_\pi^1} + (0.26) \frac{\bar{g}_\pi^{(1)}}{h_\pi^1} \right)$$

$\bar{g}_\pi^{(0)} < 2.5 \times 10^{-10}$ ($n + p \rightarrow d + \gamma$)
 $\bar{g}_\pi^{(1)} < 0.5 \times 10^{-11}$ (nEDM)
 $h_\pi^1 \sim 3.0 \times 10^{-7}$ (^{199}Hg EDM)

パイオン交換の際のP-violatingな結合定数

$$\left| \frac{W_T}{W} \right| < 3.9 \times 10^{-4}$$

^{139}La 0.74 eV共鳴の場合

$$|\Delta\sigma_T| < 1.0 \times 10^{-4}$$

少なくとも 10^{-5} 以上の測定精度、つまり高統計が必要!

⇒ 高計数率での測定が不可欠

高計数率の場合、Pile-upが頻繁に起こり正確な計数が難しくなる

⇒ Pile-upの処理が必要！

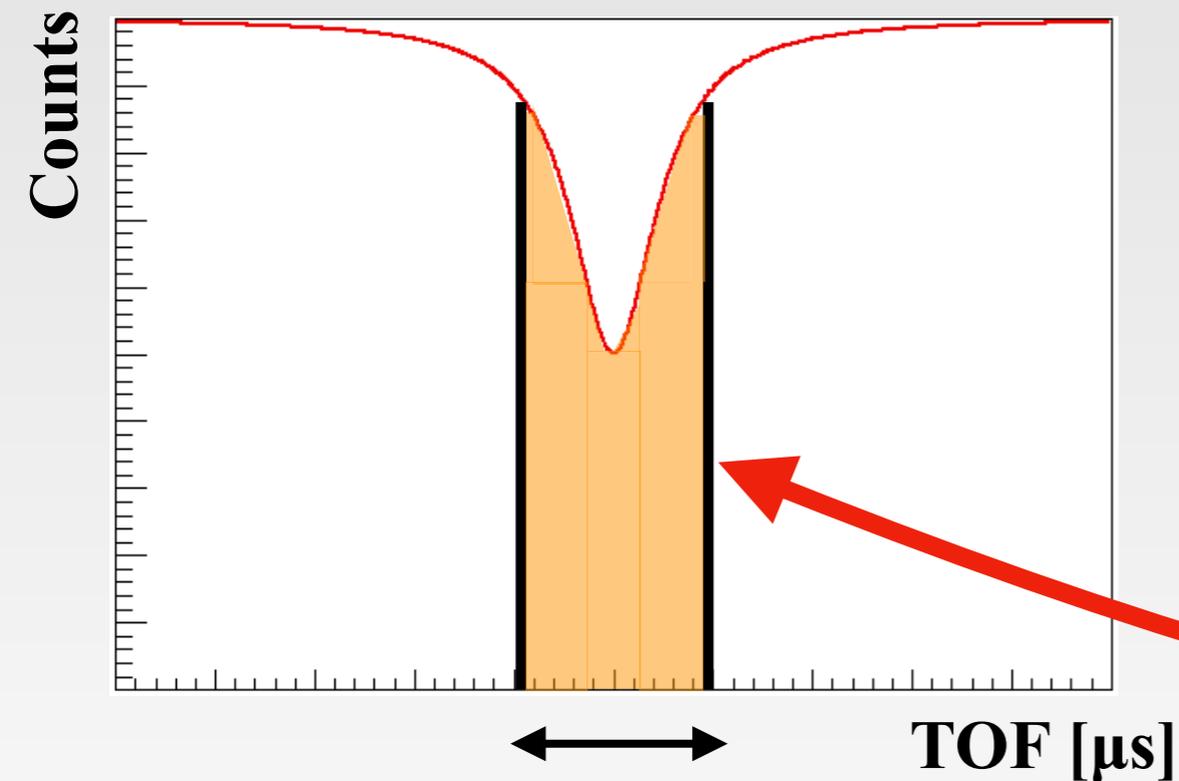
^{139}La 0.74 eV p波共鳴の場合

・ 1日で 10^{-5} の測定精度を目標とした場合、

の領域で必要となる中性子数は 10^{10} 個
⇒ 1 sあたり 10^5 個

J-PARC/MLF では、1パルス = 25 Hz

⇒ 1パルスあたりの中性子量： 4.0×10^3 個/pulse



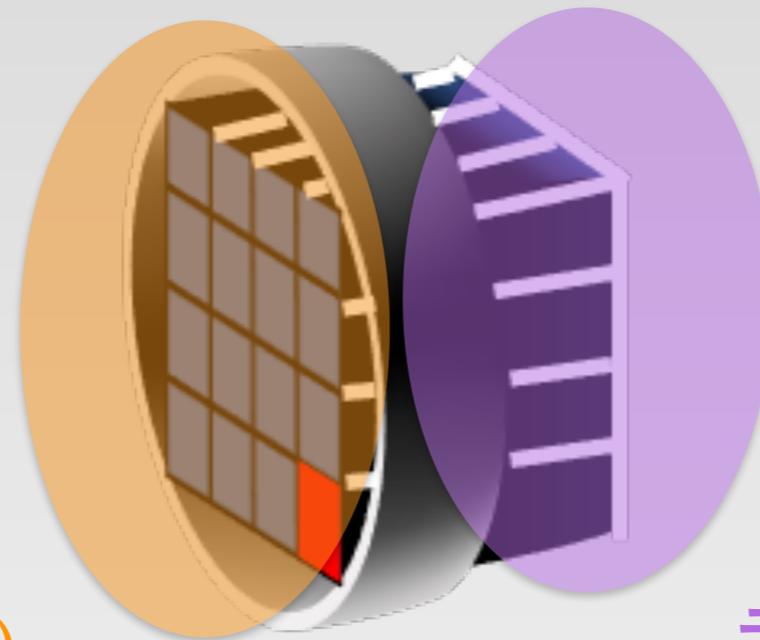
共鳴幅に対応する時間幅： $\sim 50 \mu\text{s}$

1 μs あたり80個/pulse ⇒ 9個セグメントの検出器 ⇒ 1セグメントあたり10個/pulse

10 MHz

高計数率取得可能な熱外中性子検出器開発を目指す！

検出物質の選定



高速応答(早い発光時定数)

加工しやすい(セグメント化可能)

荷電粒子が放出

検出効率が良い

n- γ 波形弁別

データ収集系(DAQ)開発

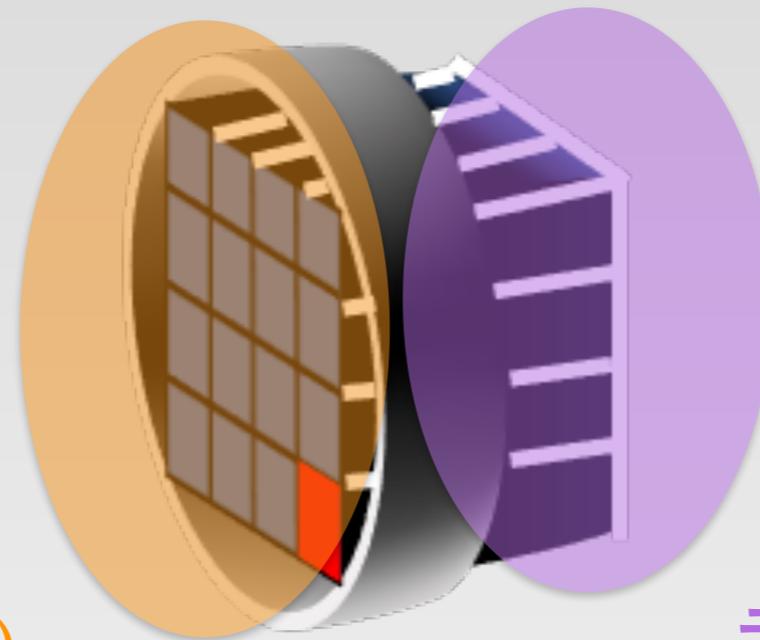


高速なデータ処理回路

読み出し信号のパイルアップ処理

高計数率取得可能な熱外中性子検出器開発を目指す！

検出物質の選定



高速応答(早い発光時定数)

加工しやすい(セグメント化可能)

荷電粒子が放出

検出効率が良い

n- γ 波形弁別

データ収集系(DAQ)開発



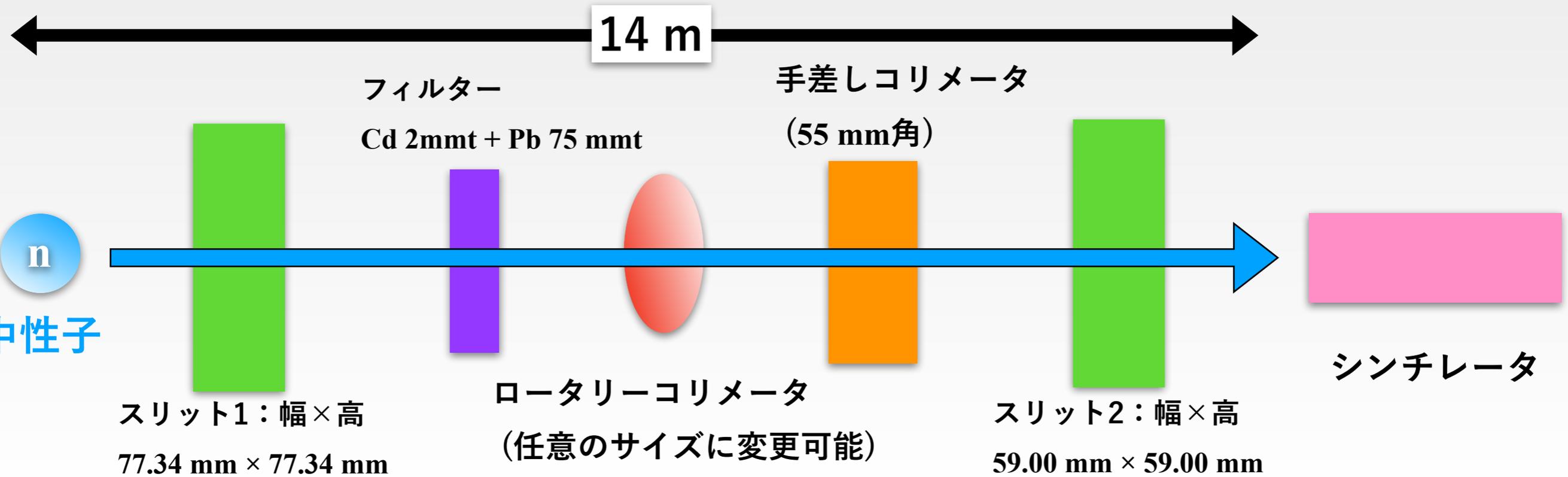
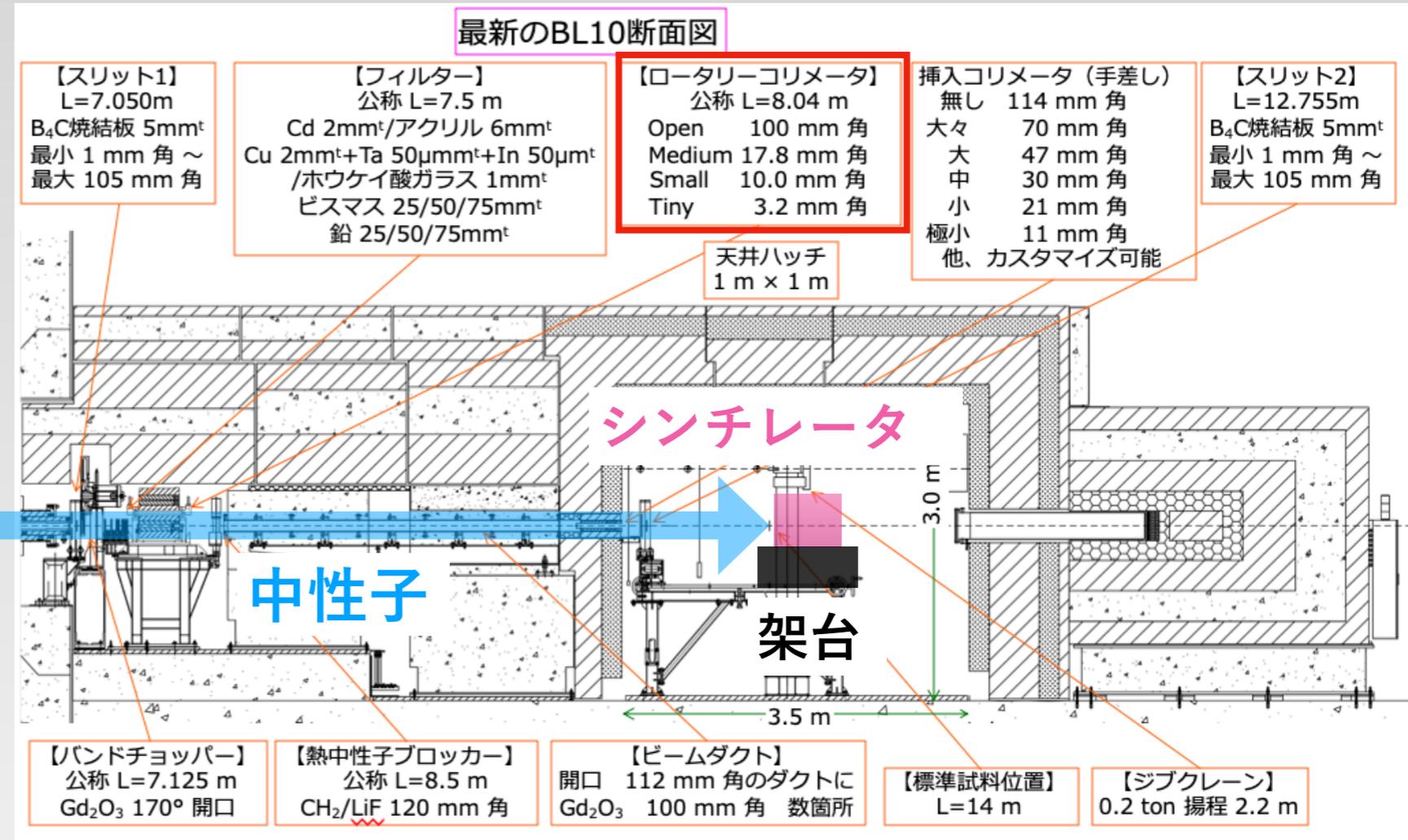
高速なデータ処理回路

読み出し信号のパイルアップ処理

	⁶ Li-glass (GS20)	⁶ Li-plastic (EJ-270)	¹⁰ B-plastic (EJ-254)
発光時定数 [ns]	16 / 49 / 78	TBD	1.51
n/γ 弁別	△	○	△
検出効率	○	△	○
含有量 [%]	6.6	0.5	1 / 2.5 / 5
断面積 [b] @1 eV	170	170	700
密度 [g/cm ³]	2.5	1.14	1.026

⇒ 中性子ビームを上記のシンチレータに照射し、性能を確認

測定は2020年6月に
J-PARC/MLF/BL10(NOBORU)
で実施



測定方法および測定条件

✓波形計測装置(WaveCatcher) (LDL社製)

[WaveCatcherの性能]

	WaveCatcher
Sampling rate	0.4 GS/s
Resolution	12 bit
Channel	2 channel
Full scale	2.56 μ s



✓レートの調整方法

・ロータリーコリメータ

・ External Trigger

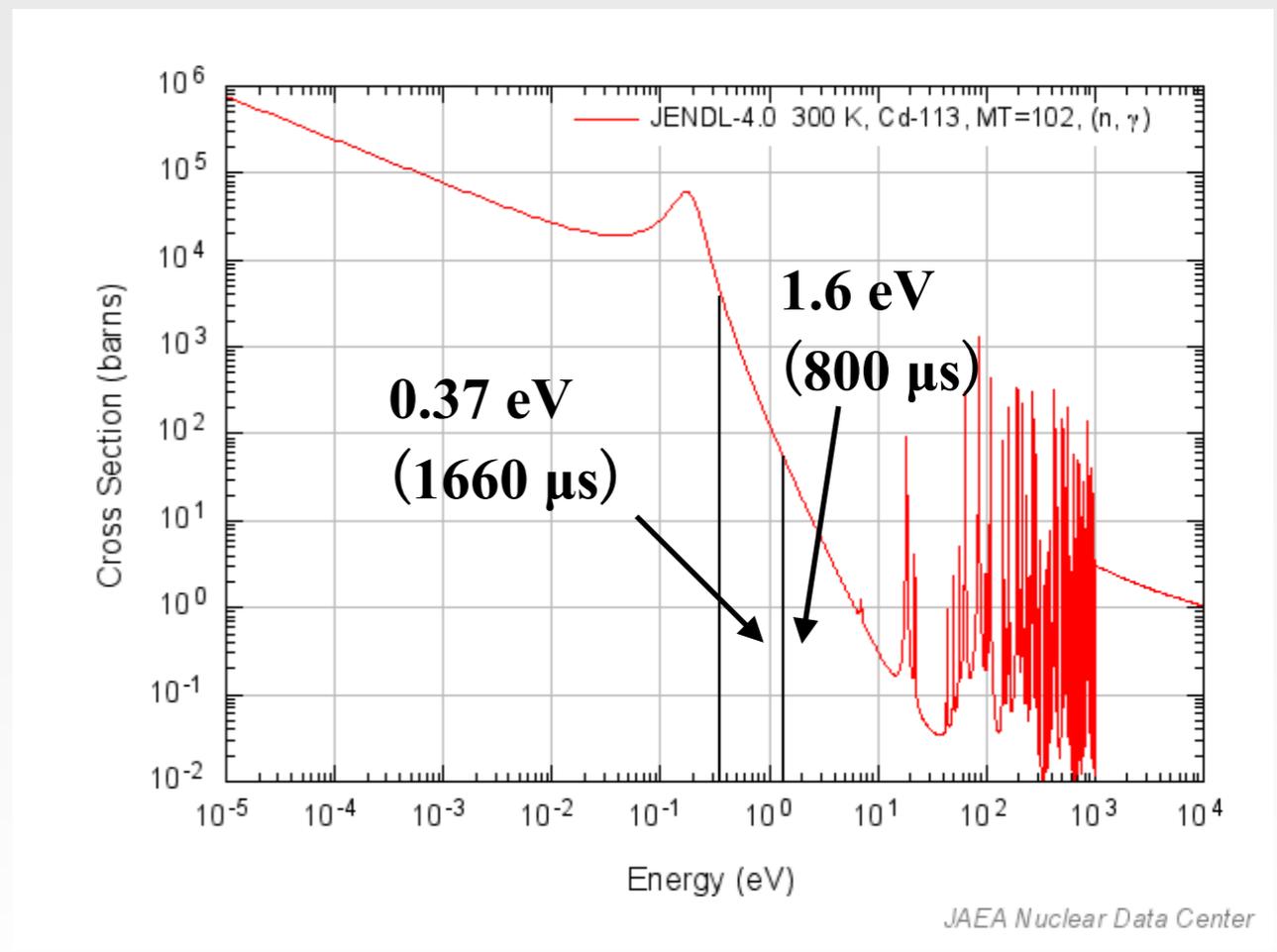
(Trigger delay)

{	Open (100 mm角)	{	800 μ s
	Medium (17.8 mm角)		1000 μ s
	Small (10.0 mm角)		1200 μ s
	Tiny (3.2 mm角)		1660 μ s

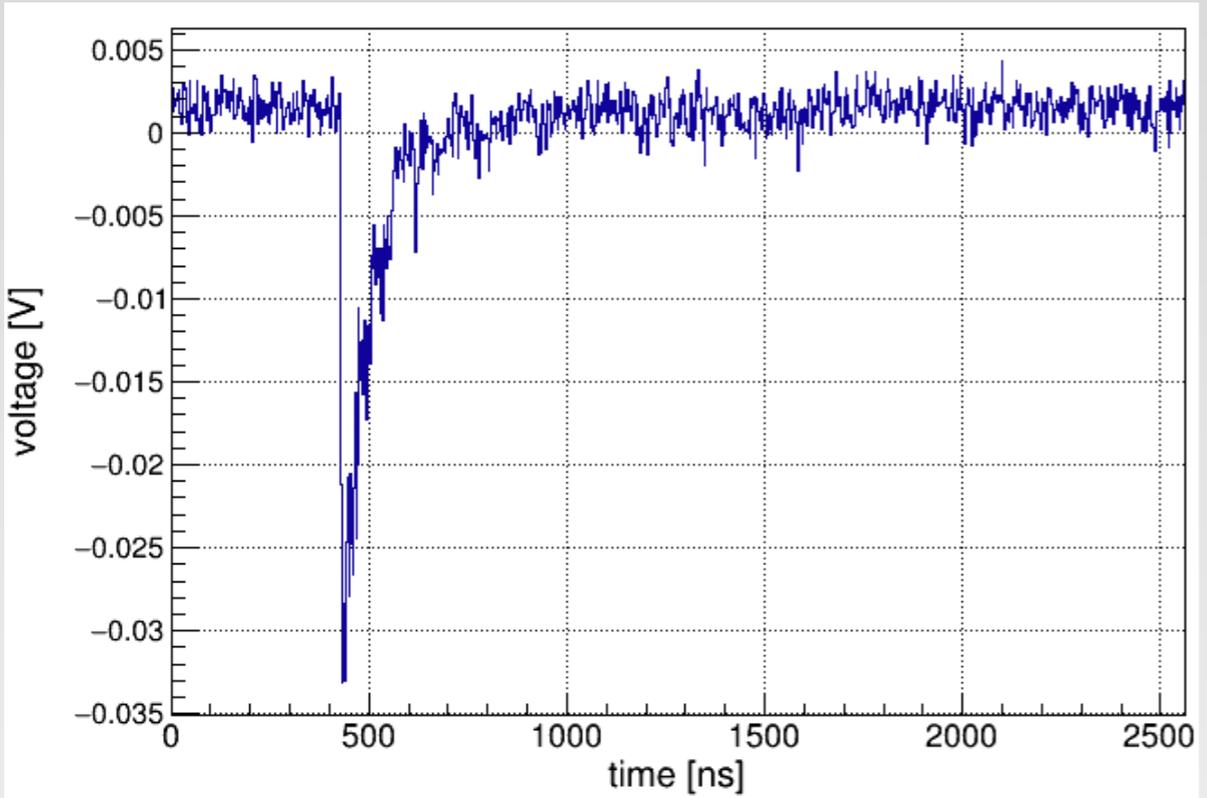
✓推定されるフラックス(n/s)

Run番号	Flux	Run番号	Flux
Run17	1.3×10^4	Run19	1.4×10^7
Run18	5.8×10^5	Run24	1.6×10^7
Run20	1.7×10^6	Run22	2.3×10^7
Run21	2.5×10^6	Run26	3.0×10^7
Run25	3.2×10^6	Run27	5.2×10^7
Run28	6.0×10^6	Run23	1.9×10^8

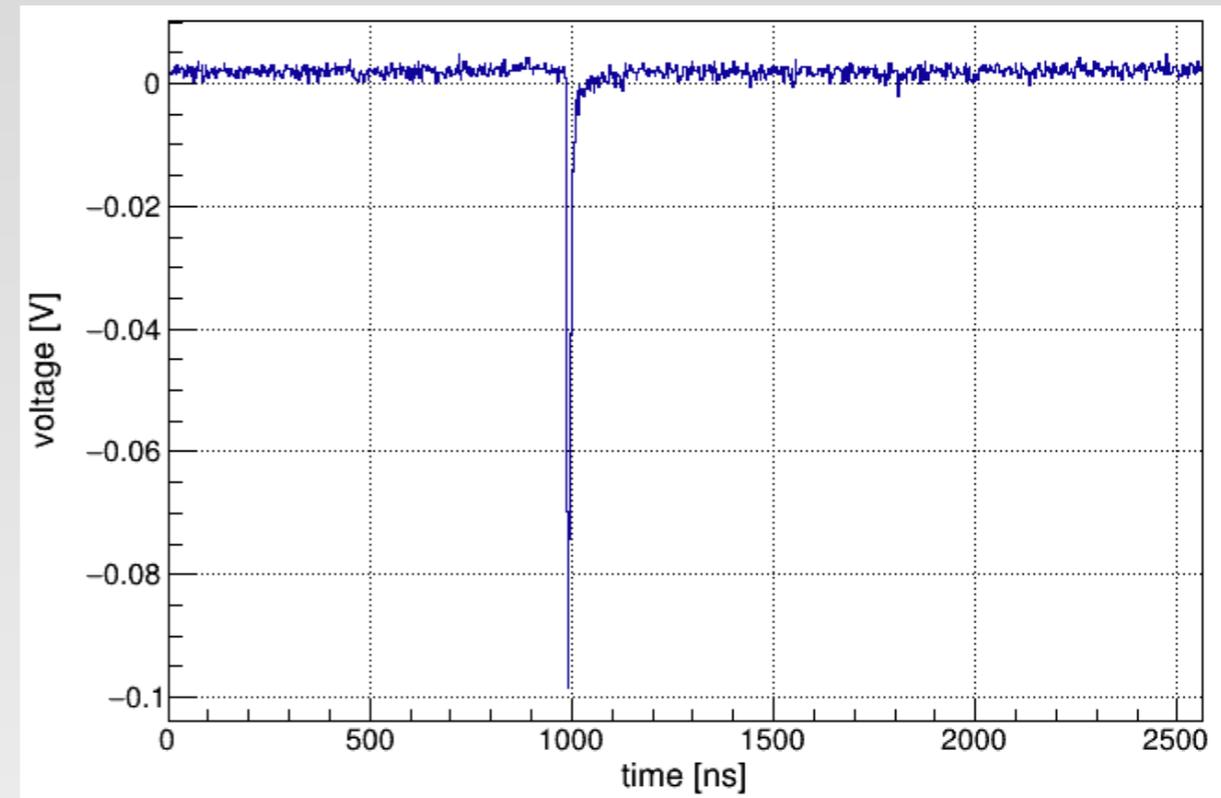
[¹¹³Cd 吸収断面積]



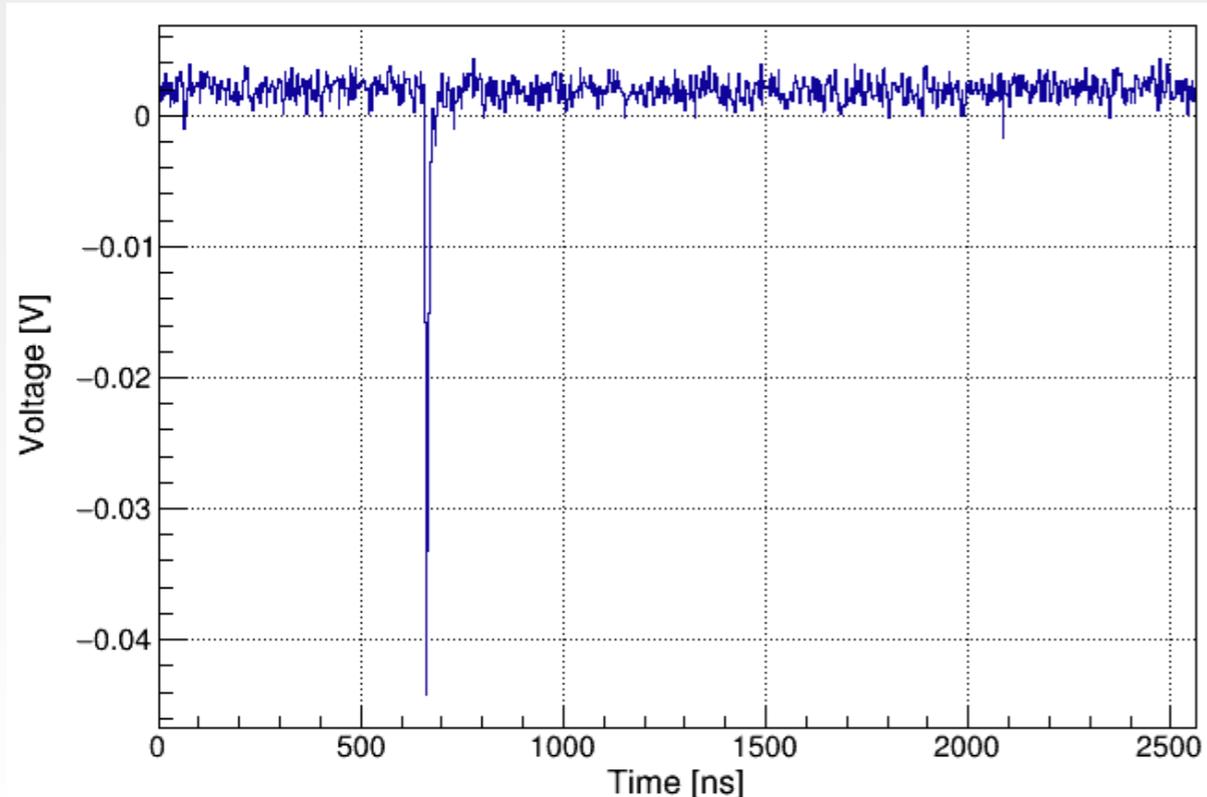
${}^6\text{Li}$ -glass(GS20)



${}^6\text{Li}$ -plastic(EJ-270)



${}^{10}\text{B}$ -plastic(EJ-254)



glassの場合は、
他の2つと比べて明らかに遅い
→時定数が長いとPile-upの確率が増える

Pile-up信号解析：

時間情報を用いたパルス検出から総カウント数を求める

→発光時定数が早いため、Pile-upせずに個別にパルスの分離が可能

波高分布解析：

→エネルギー分解能が優れていることが先行研究(右下図)で知られているため、波高分布のみから中性子とガンマ線の弁別を行える可能性

⇒以上の観点から

EJ-270における性能評価を実施

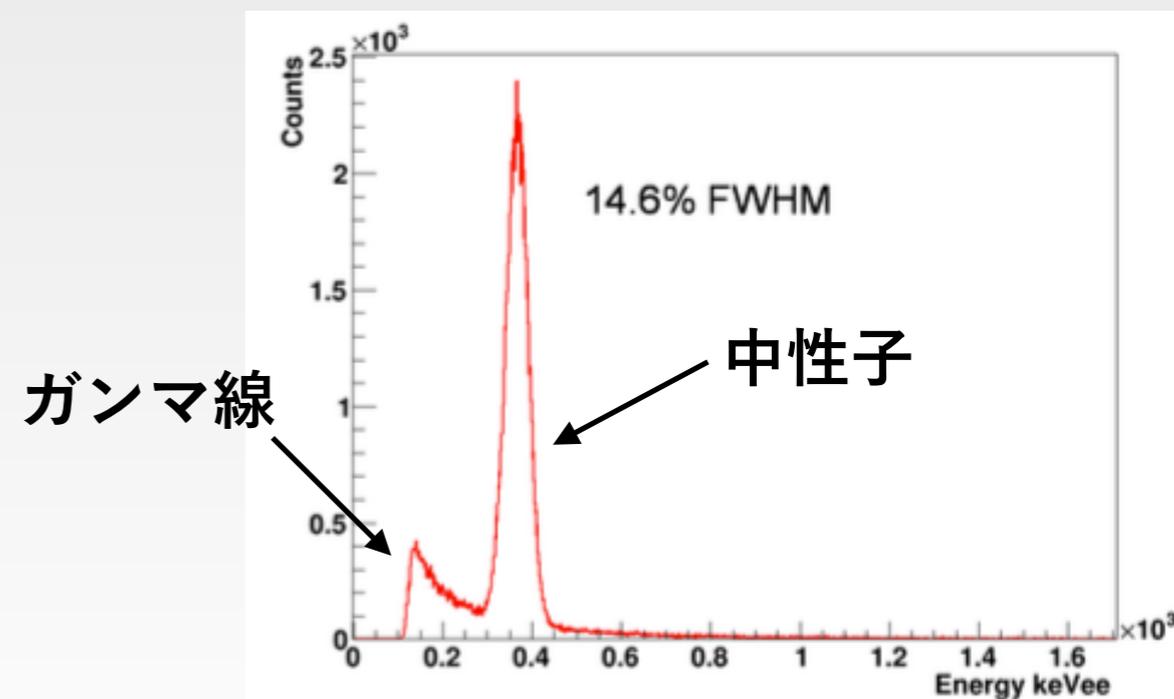
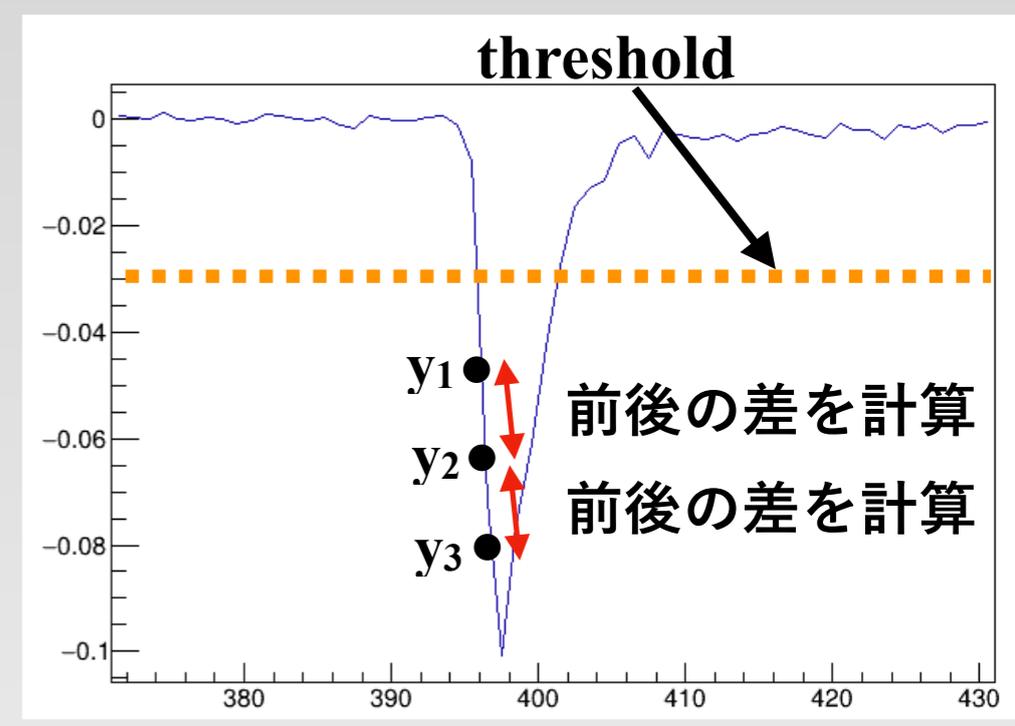


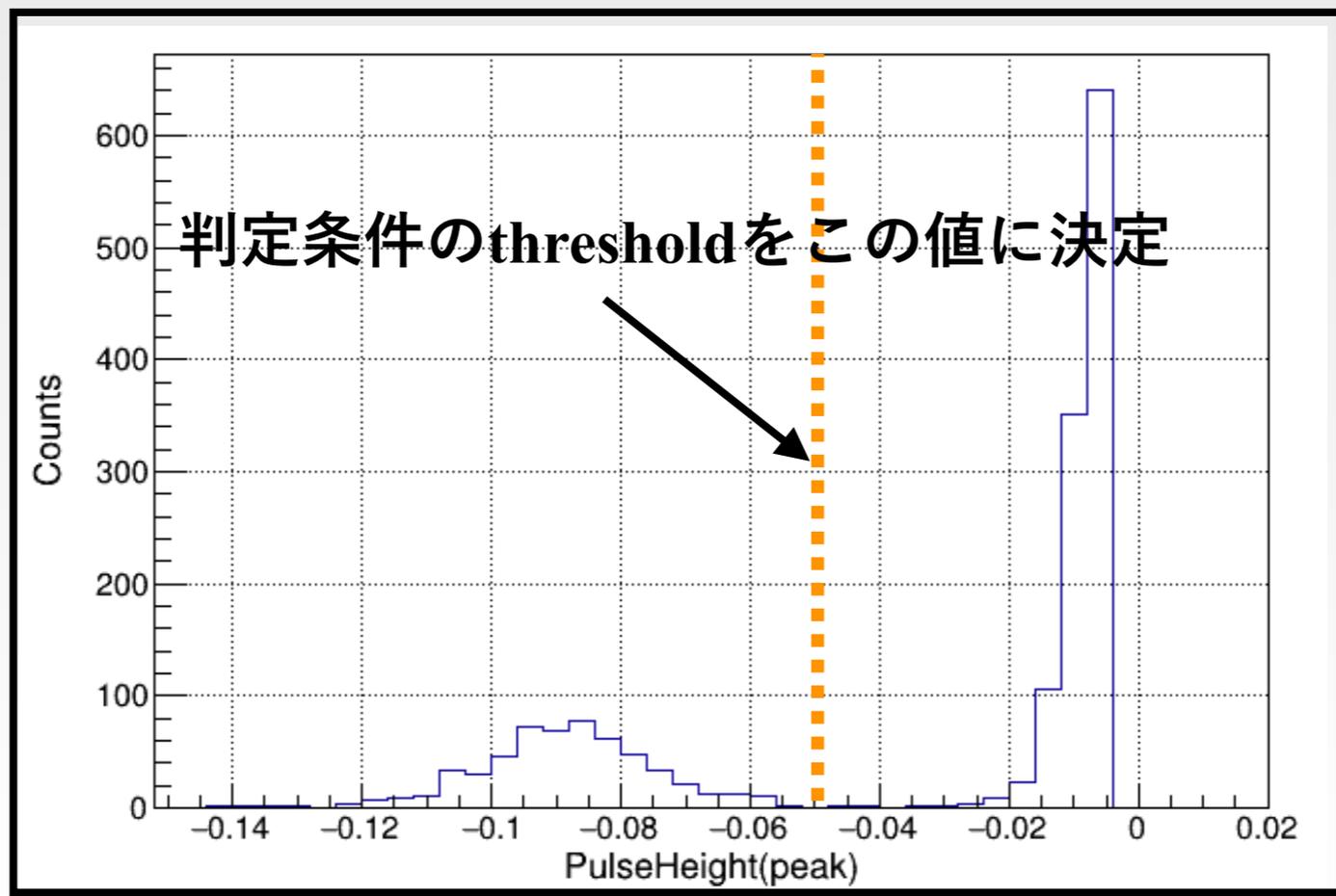
Fig. 7. Neutron energy spectrum for 51 x 51 mm EJ-270 scintillator.

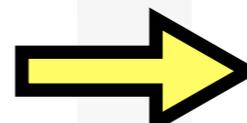
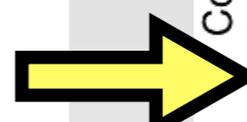
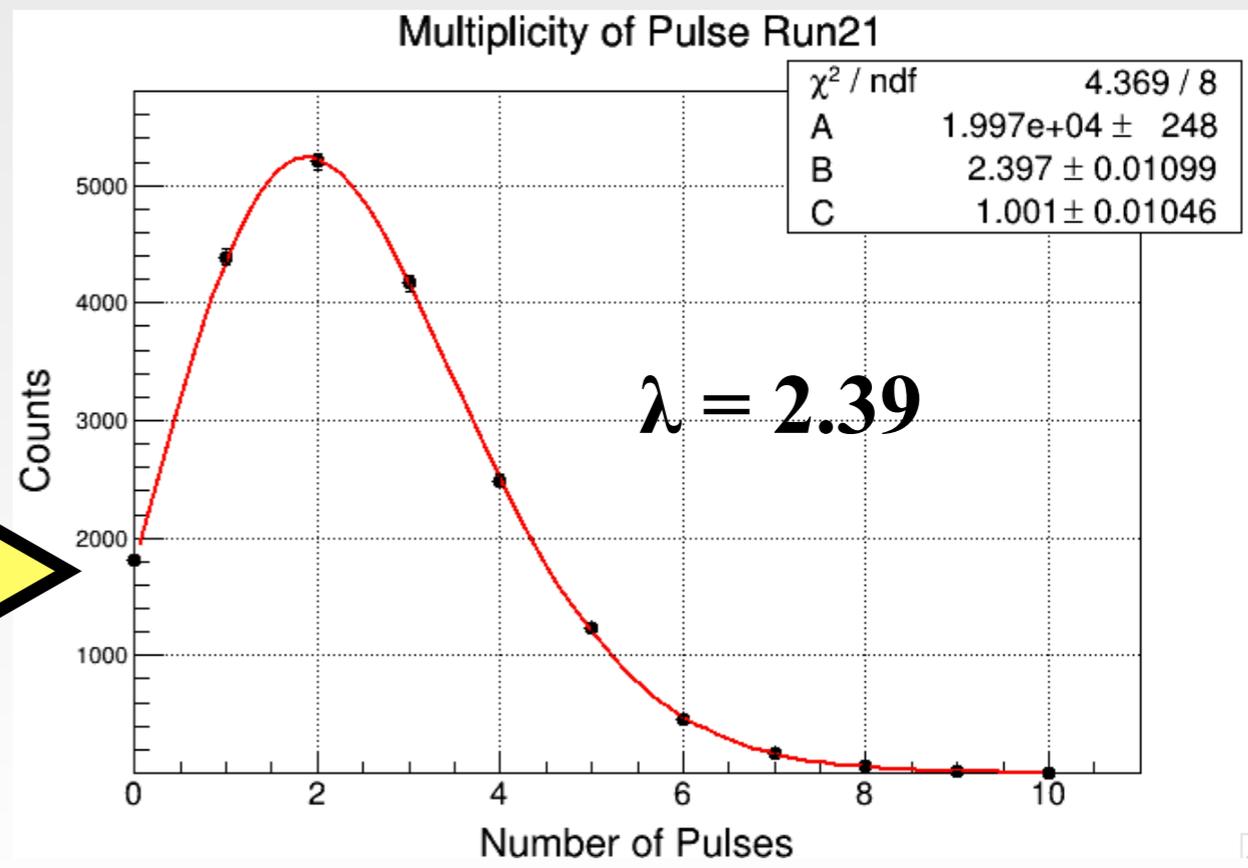
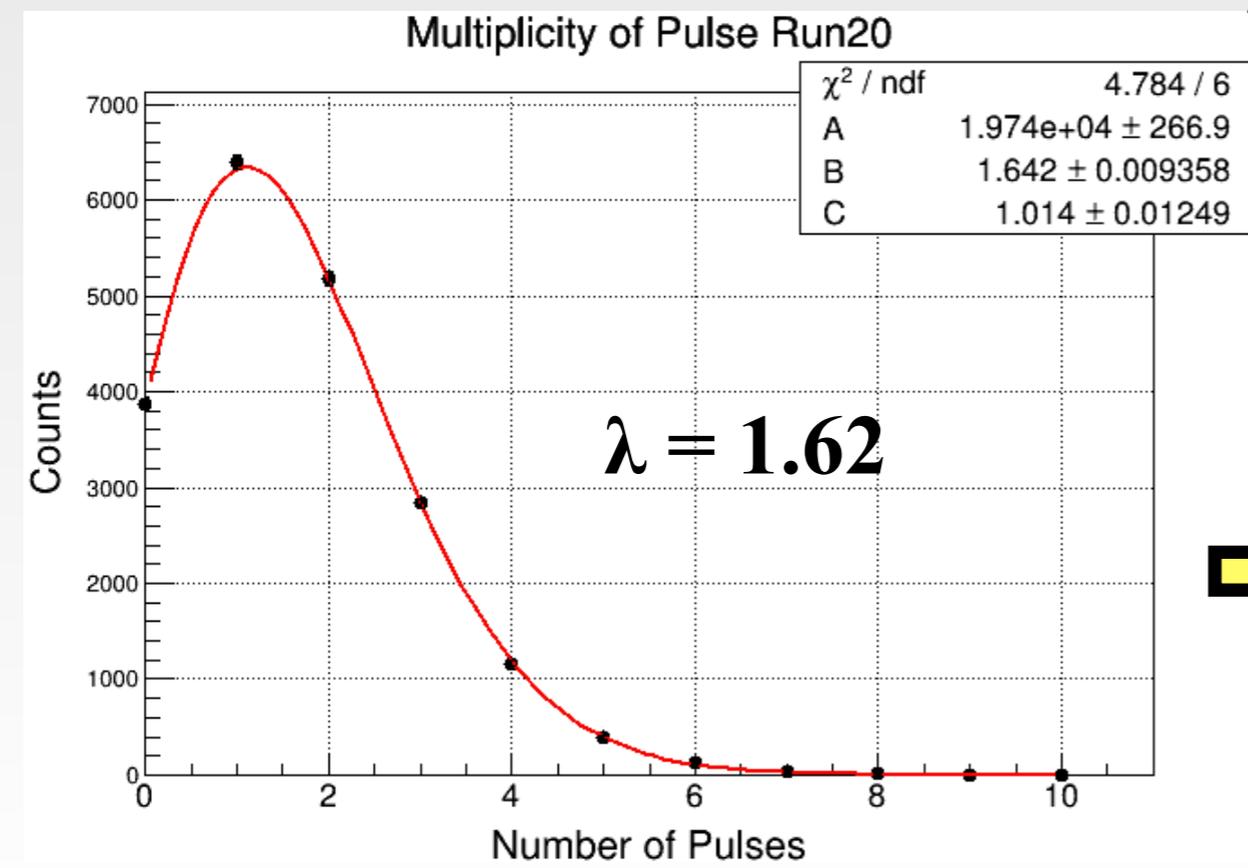
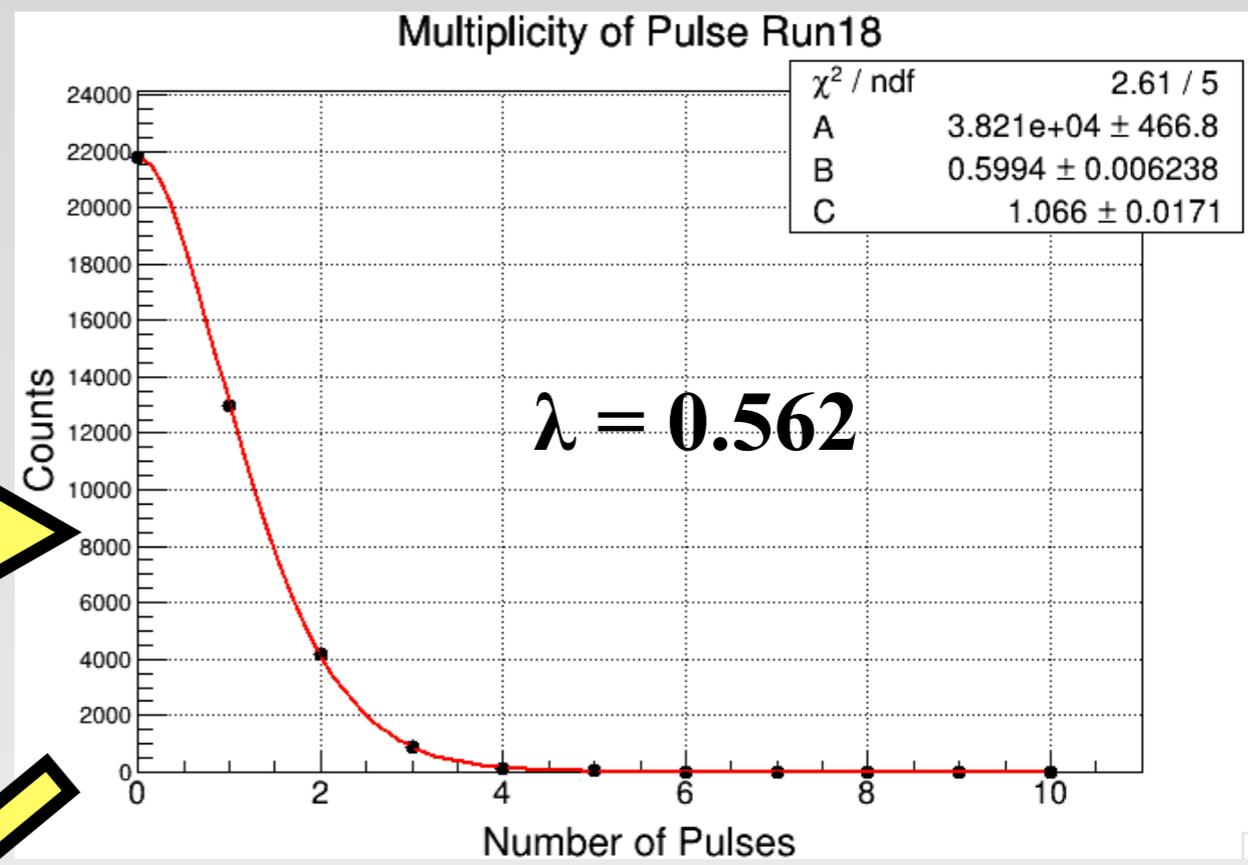
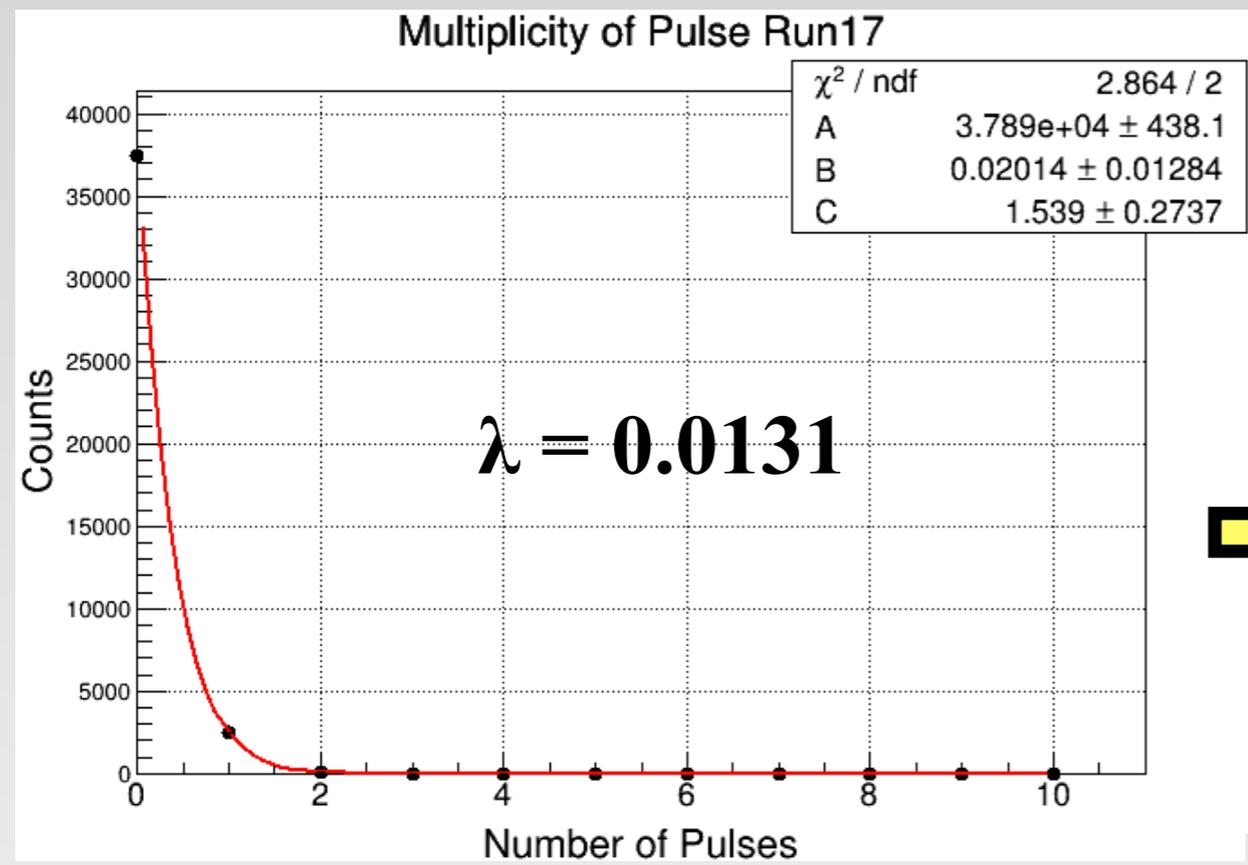
Mark E. Ellis, *et al.*, IEEE 2017.

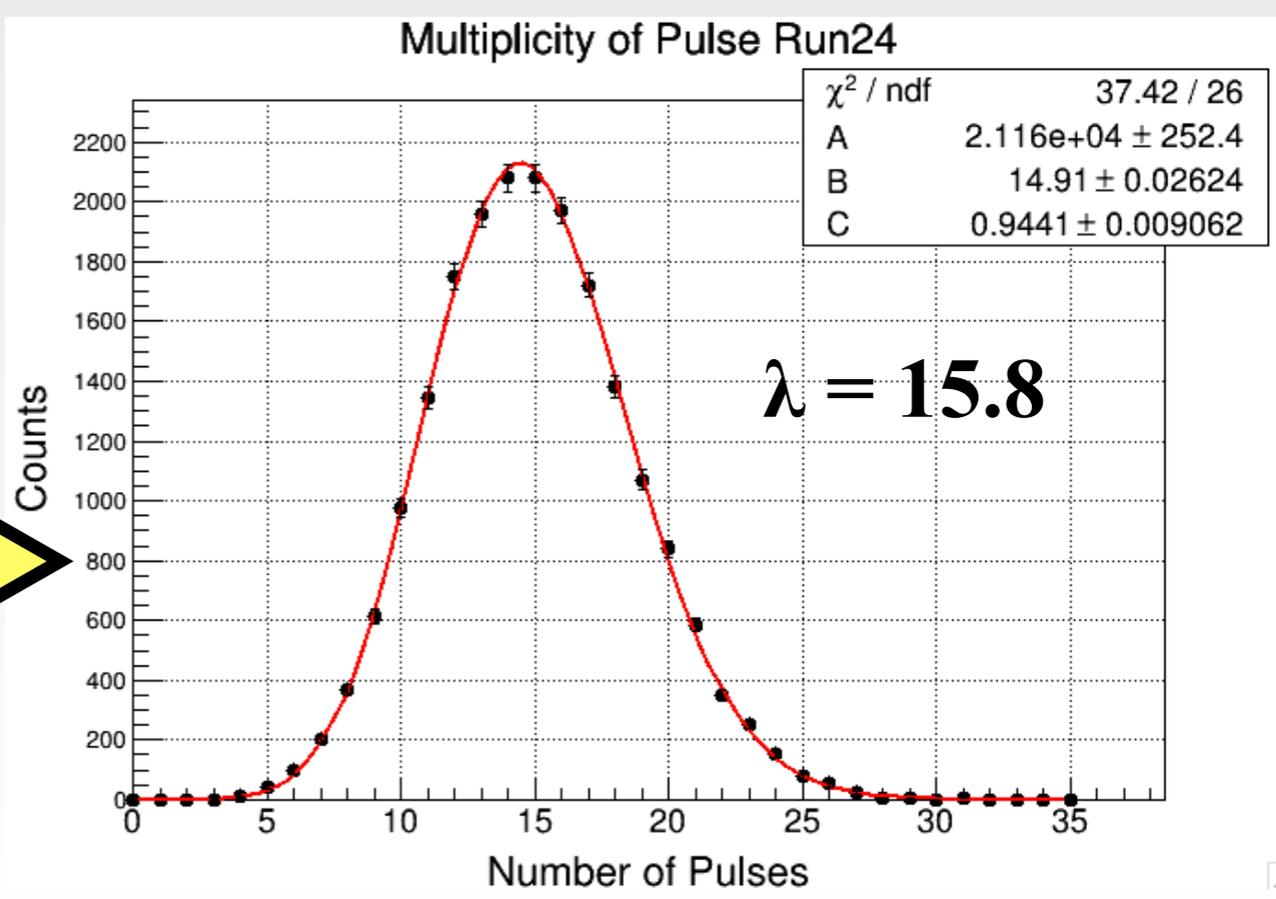
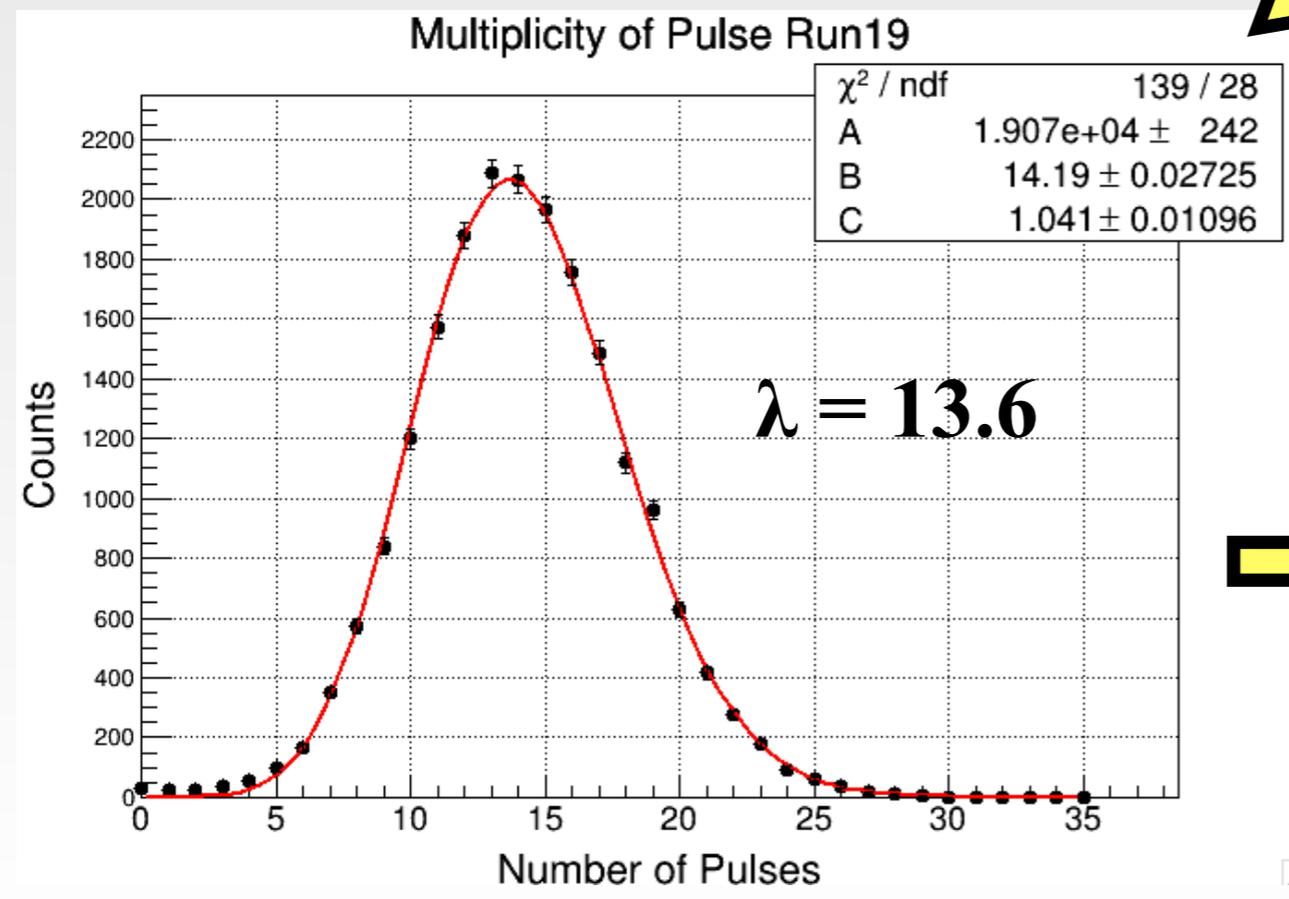
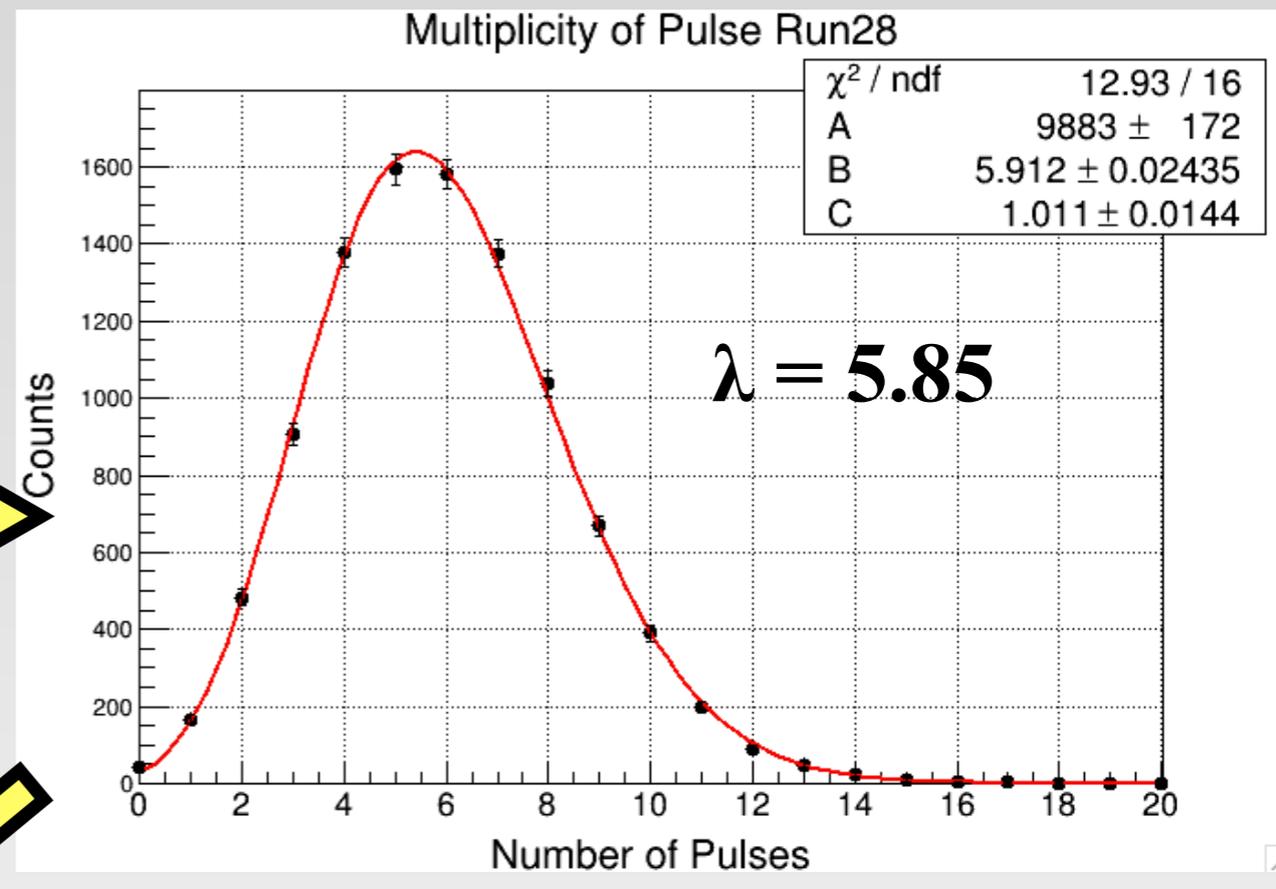
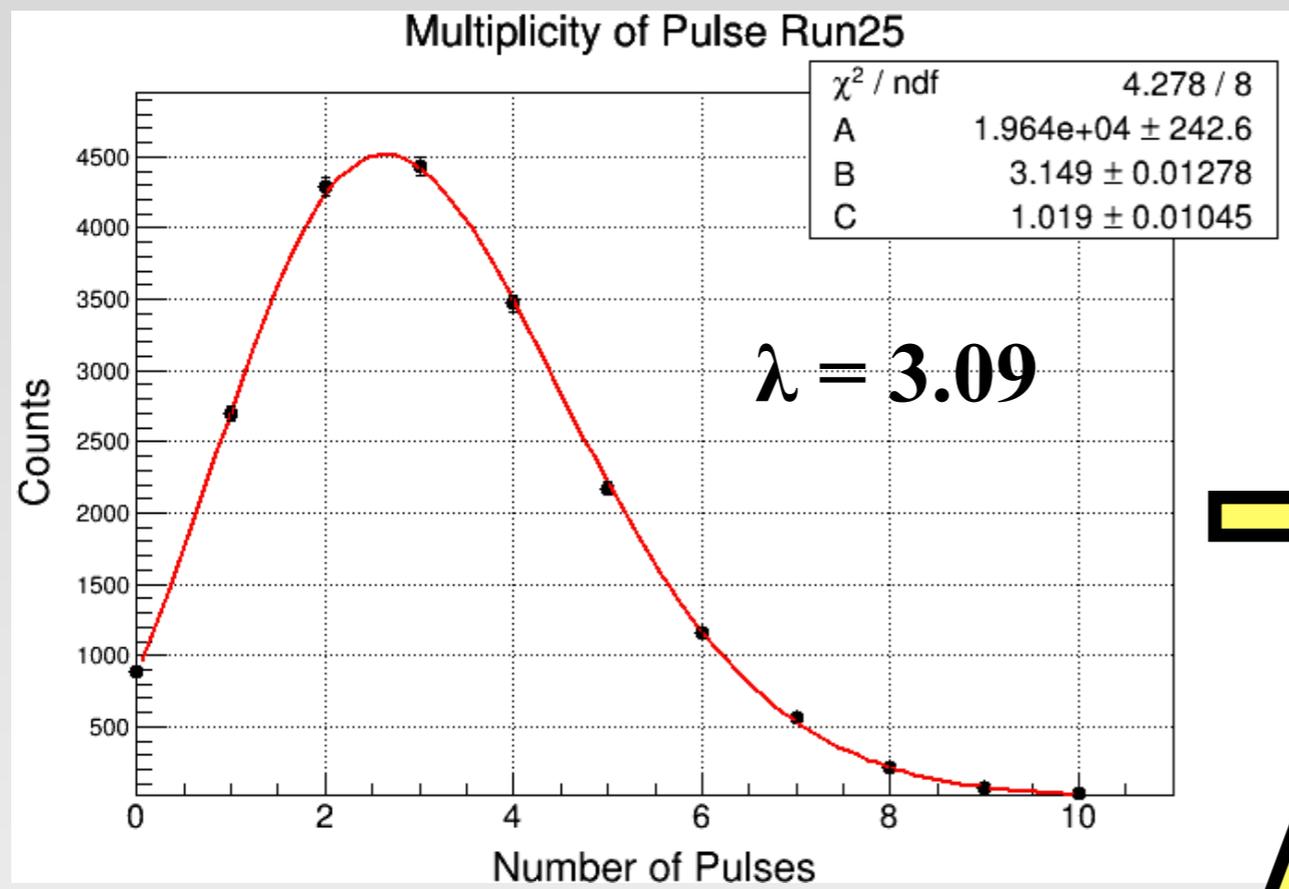
1. 波形に対してあるthresholdを設ける
2. 1024個のデータ点に対して、
1個目から順に前後の値の差を計算
3. thresholdを超え、
 $y_2 - y_1 < 0$ かつ $y_3 - y_2 > 0$ の条件時に1パルスとカウント

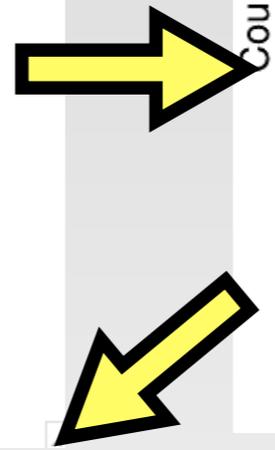
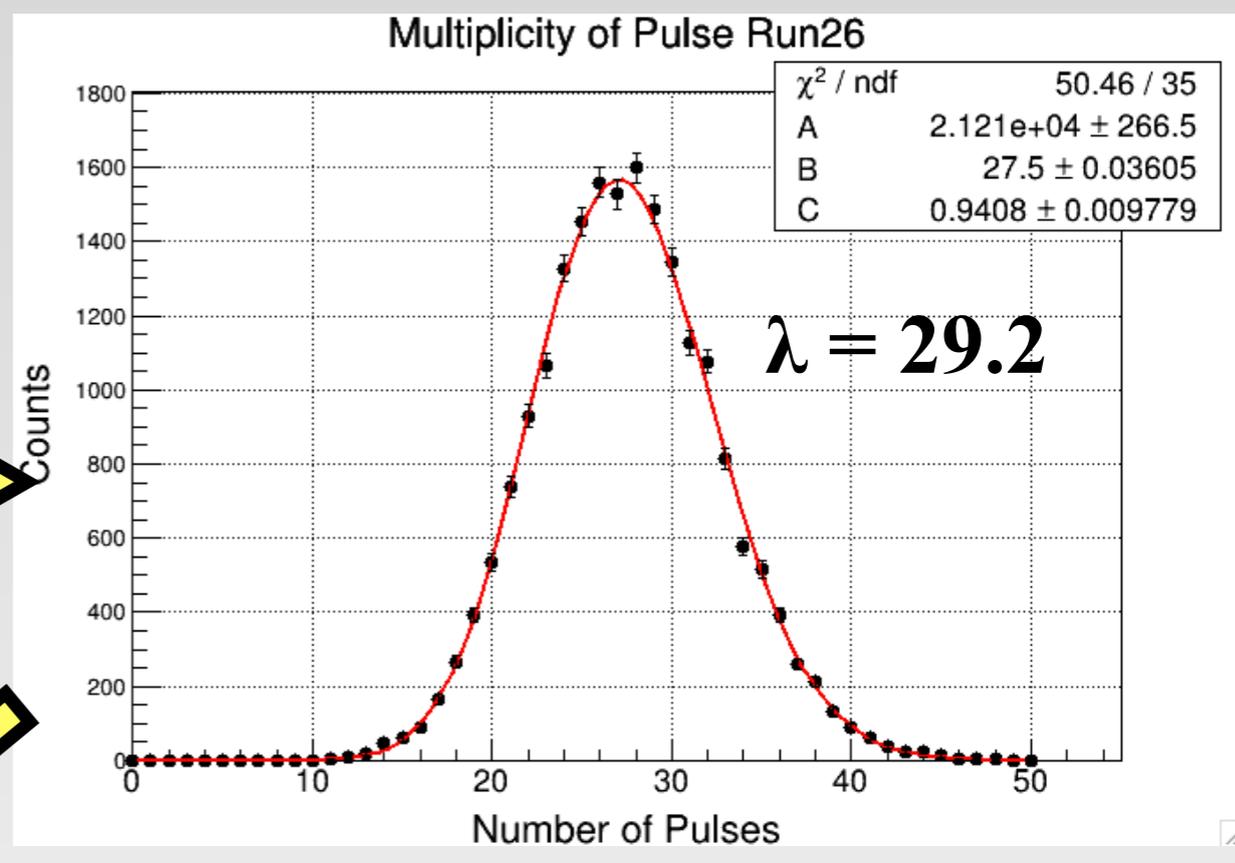
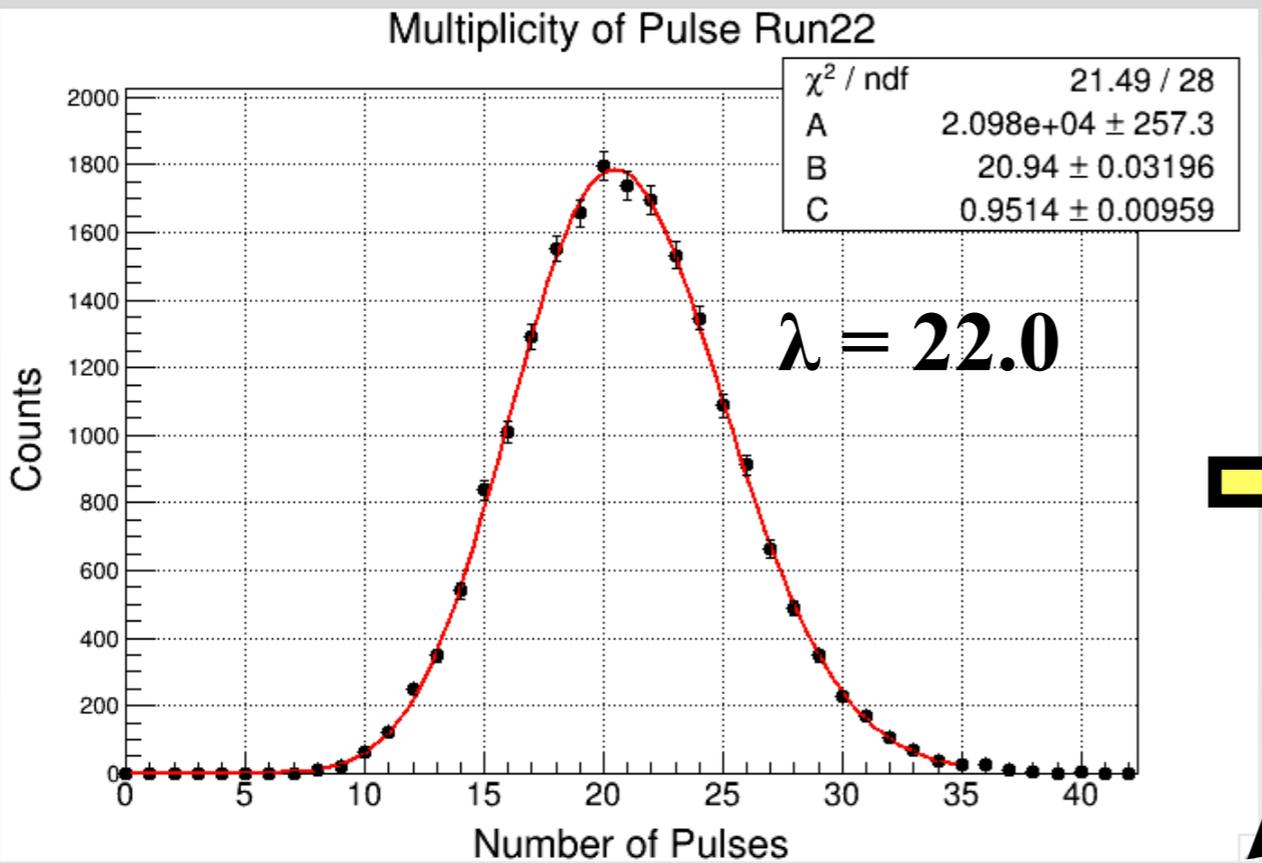


[Thresholdの決め方]

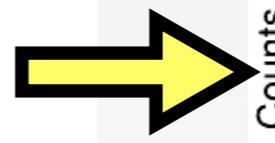
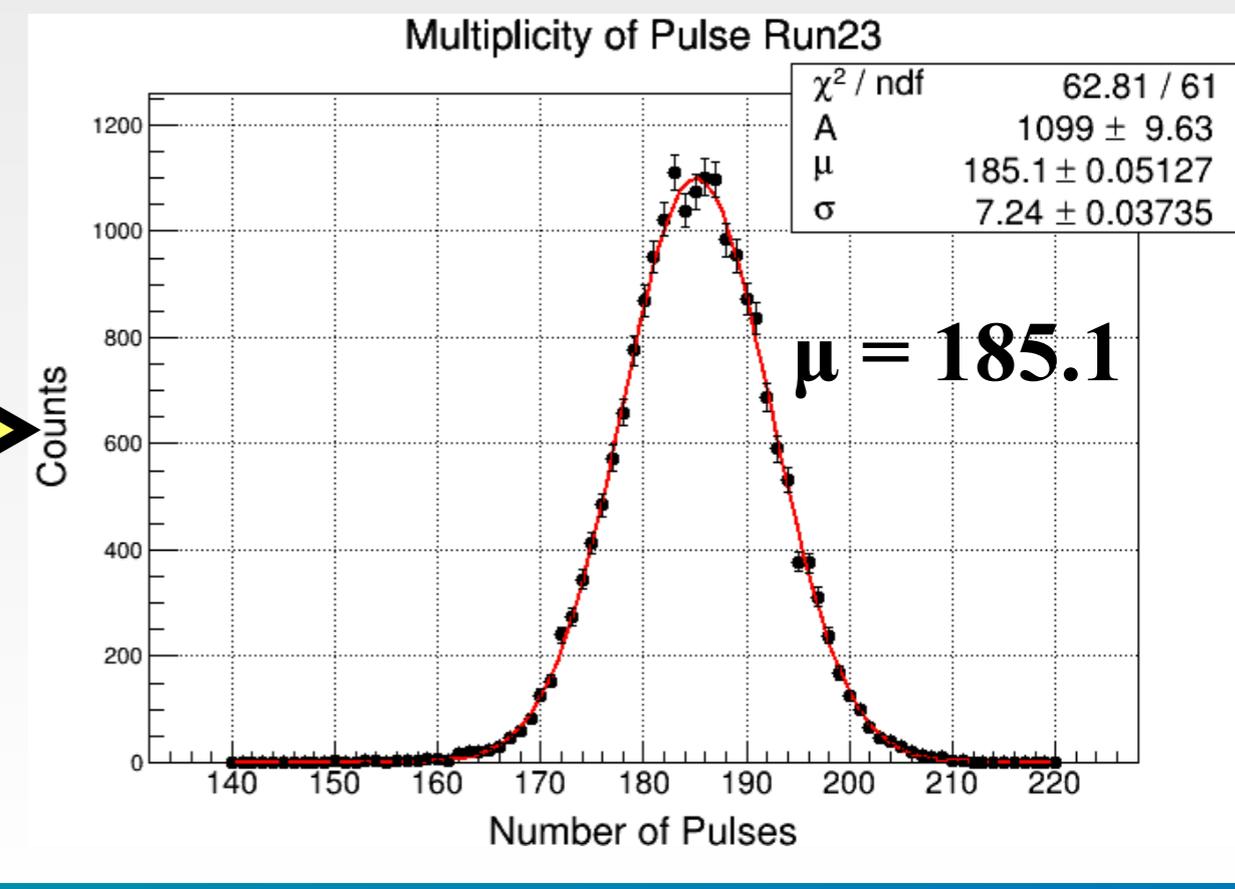
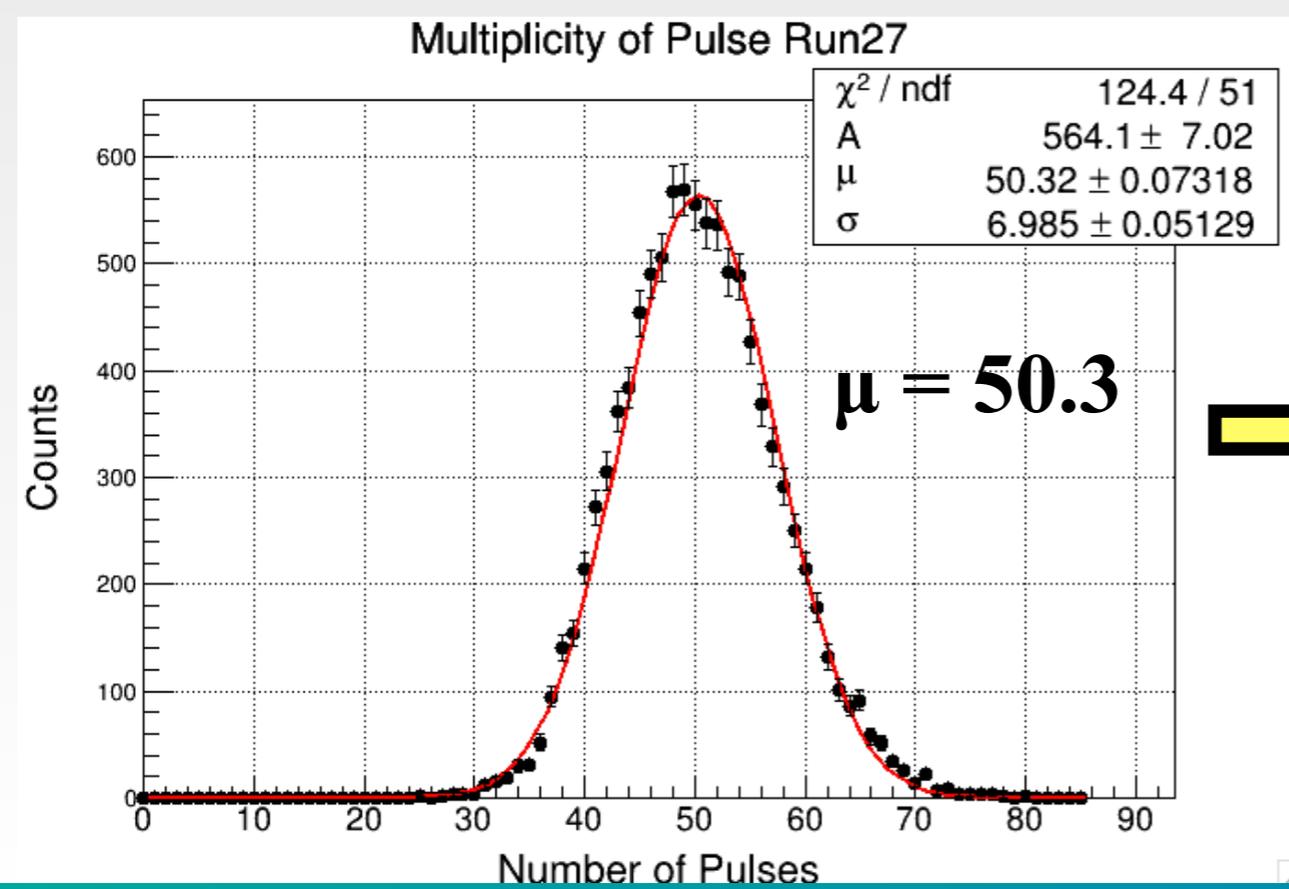








以下の分布はガウシアンでFit

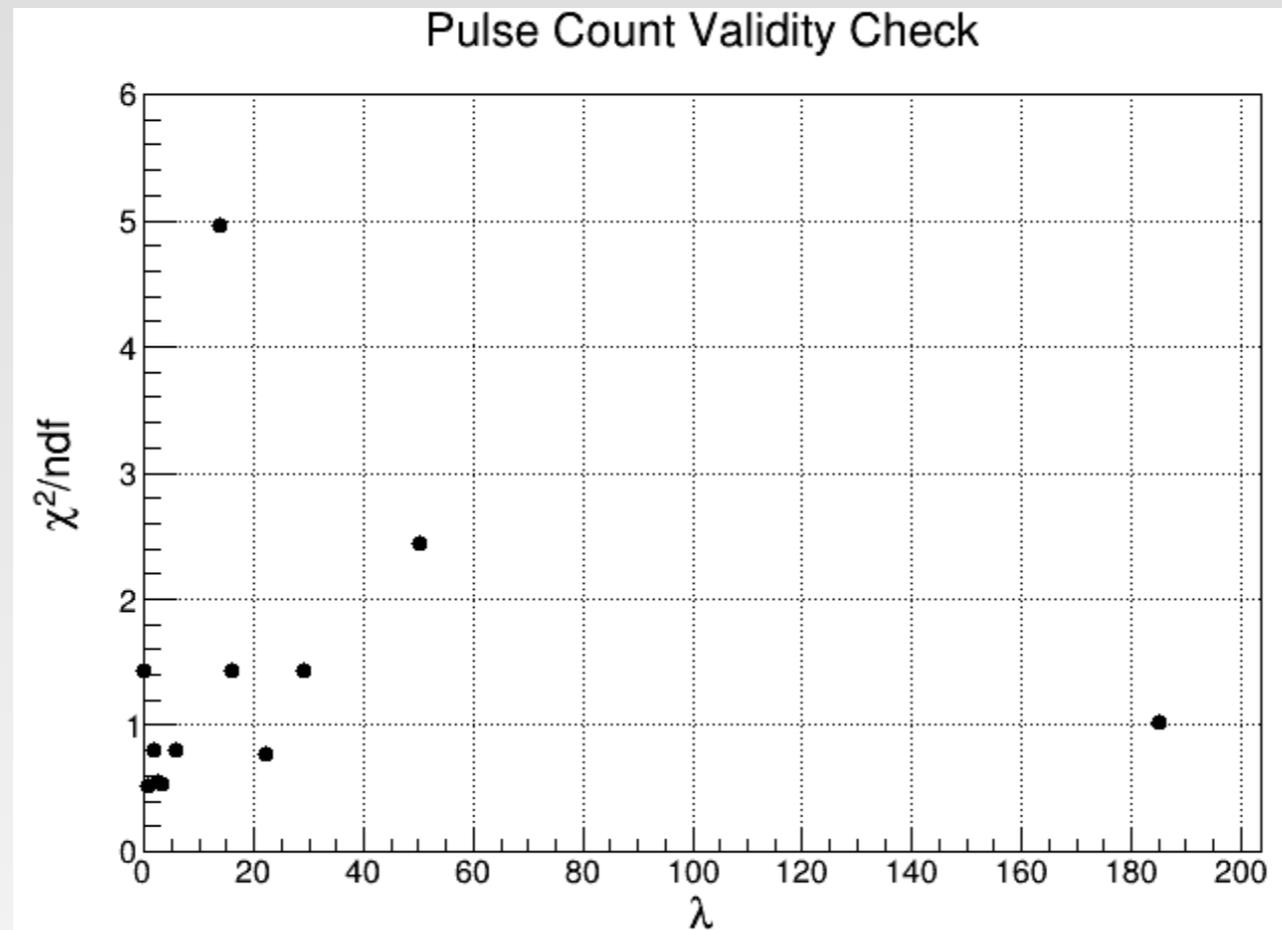


判定されたパルスの多重度の妥当性

前ページまでのポアソン分布によるFitの結果から、

レートの変化に応じてポアソン分布の平均値($=\lambda$)の線形性が保たれているか？

⇒ χ^2/ndf とレートの関係性から考察



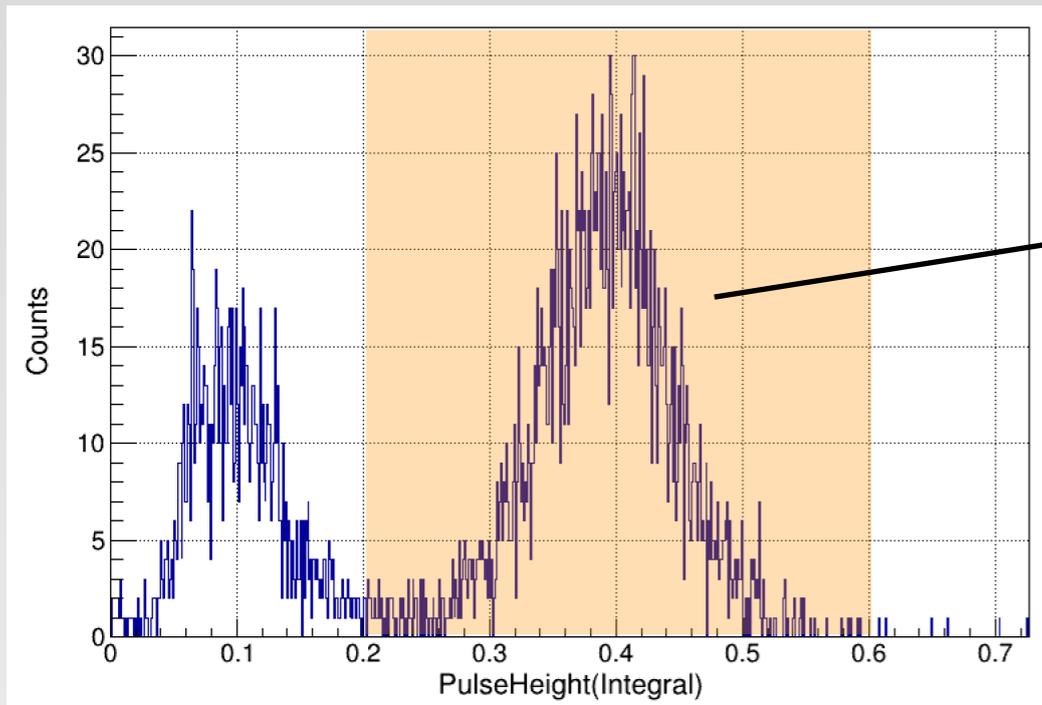
χ^2/ndf の値がレートによらず ~ 1 になっていることから、

$\lambda \sim 30$ までは正確にカウントできていると判断

→現状のパルスカウントでは、**中性子とガンマ線の区別はできていない**

⇒ n/γ の識別を行う

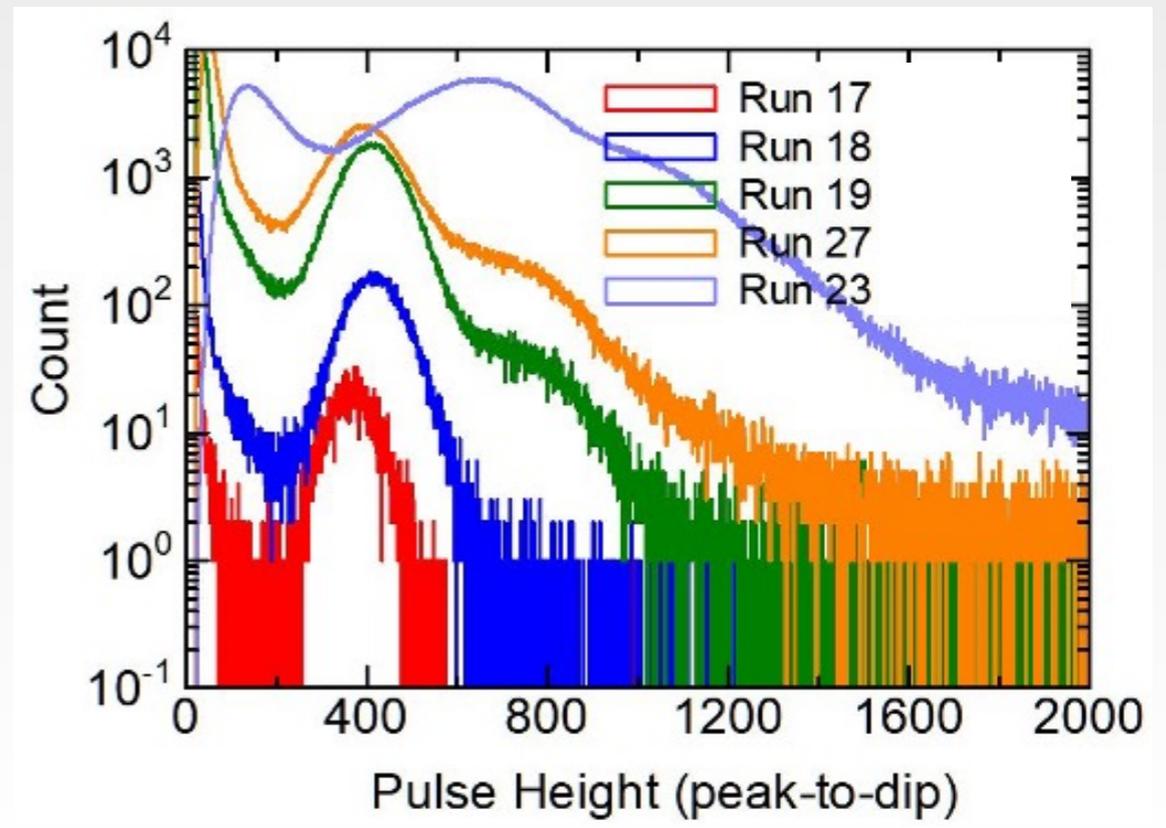
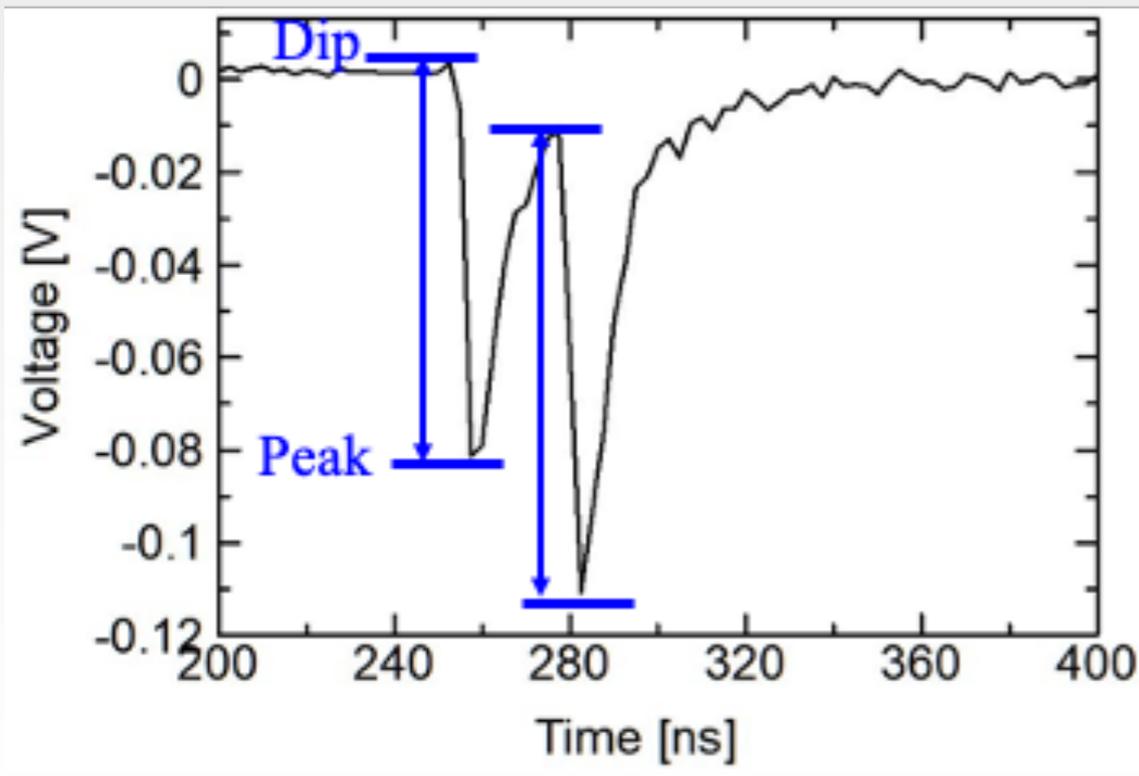
最低レートでのRunでパルス高さを計算すると、ピークが分離している様子が確認できた



α粒子(中性子)由来のピーク?

文献で知られているスペクトルと比較し、
右側がα粒子由来のピークであると推測

パルス高さはパルスの積分値で求めているが、
高レートになるとうまく計算できないことが予想されるので、次のような計算に変更

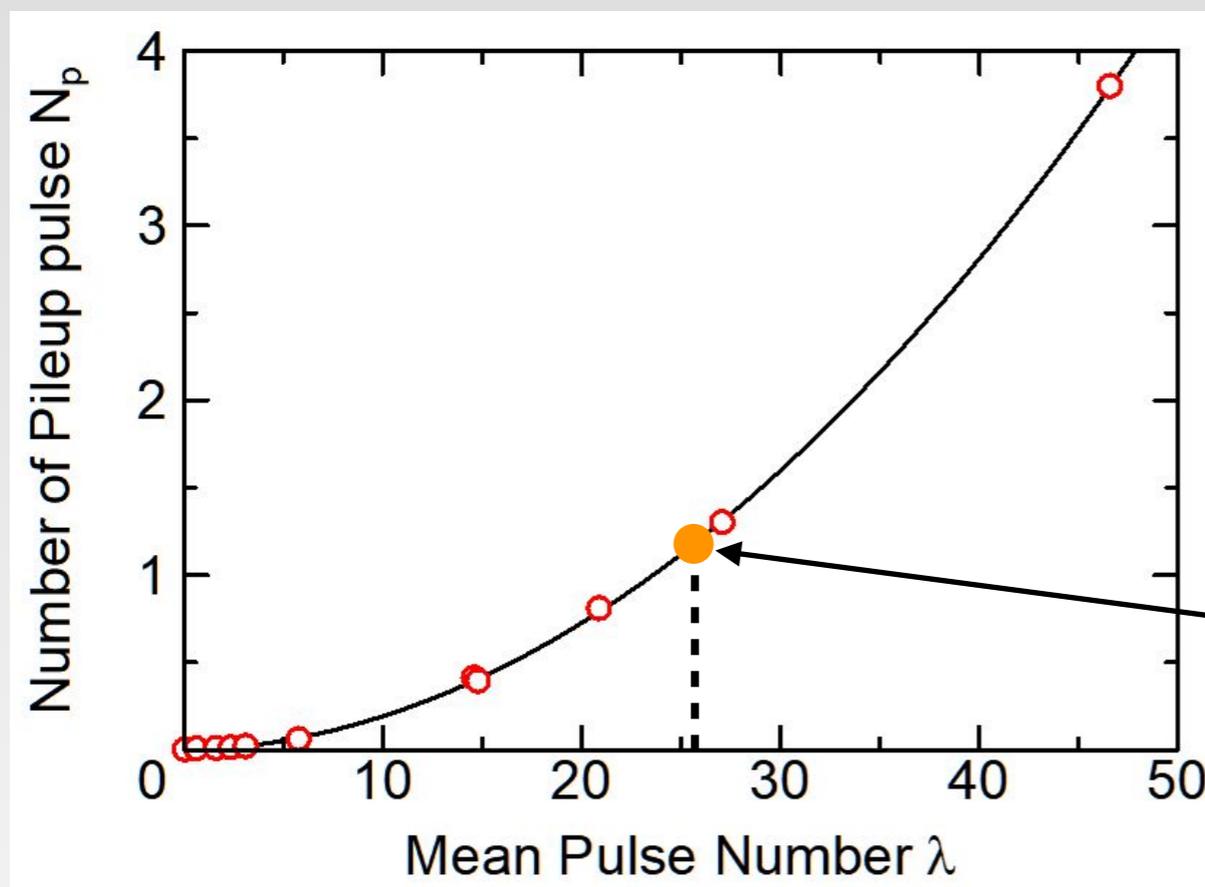


波高分布の妥当性

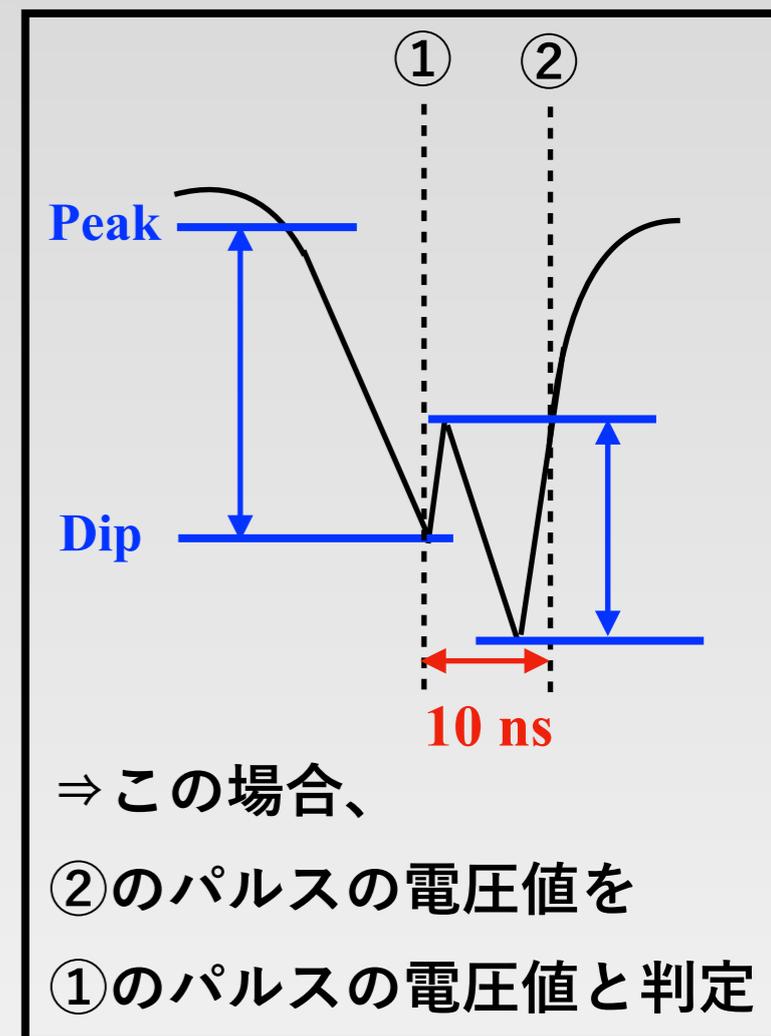
現在の解析手法では、あるパルスの立ち下がり時間から+10 nsの範囲で

(絶対)電圧値が最も大きいパルスを”Peak”と判定

⇒2パルス間が接近しすぎると、パルスの数え落としが発生



10 MHzに対応



あるパルスの立ち下がり時間から時間 Δt 内に次のパルスが発生し、

分離できず1つのパルスとみなされてしまうとする

パルスの真の計数率を f とすると、

$$f = \frac{\lambda}{2560} \text{ [1/ns]} \Rightarrow N_p = \lambda \cdot f \Delta t = \frac{\Delta t}{2560} \lambda^2$$

左上図の曲線は2次関数でのfit結果であり、
その結果、 $\Delta t \sim 4.4 \text{ ns}$

- ・ 複合核共鳴反応を用いた時間反転対称性の破れ探索
⇒ 高計数率での測定が要求される
- ・ 高計数率取得可能な熱外中性子検出器を開発するため、
最適なシンチレータ及びジオメトリを模索中
- ・ EJ-270での中性子照射測定から、 ~ 10 MHzでのパルスカウントは問題なく実現
→ 分布に歪みなどが確認されなかったため、パルス検出アルゴリズムは正常に動作
- ・ 波高分布解析から、低レートでは中性子とガンマ線の分離ができた
→ 高レートでは数え落としが発生しているが、補正量の誤差は小さそう
- ・ 他のシンチレータ (EJ-254) の評価
- ・ 測定したい共鳴幅は ~ 50 μs ⇒ フルスケール ~ 100 μs 、 1GS/s が必要