

中性子寿命測定のための 中性子フラックスモニターの 性能評価

第21回 ICEPPシンポジウム
東京大学 長倉直樹

中性子寿命測定実験

目的

V_{ud} は中性子寿命に依存したパラメータ

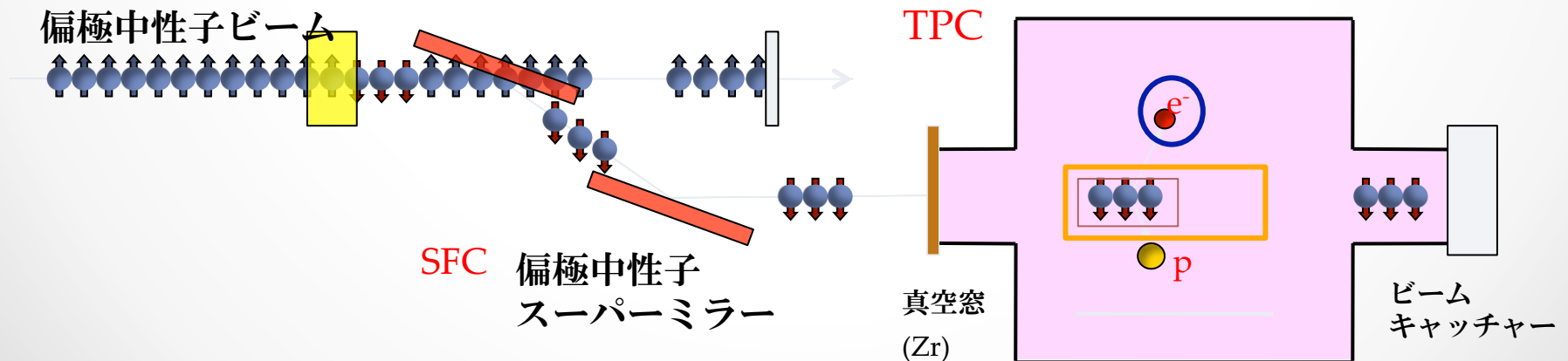
→ 中性子寿命を精度よく測れば、CKM行列のユニタリ性を検証できる。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$$

手法

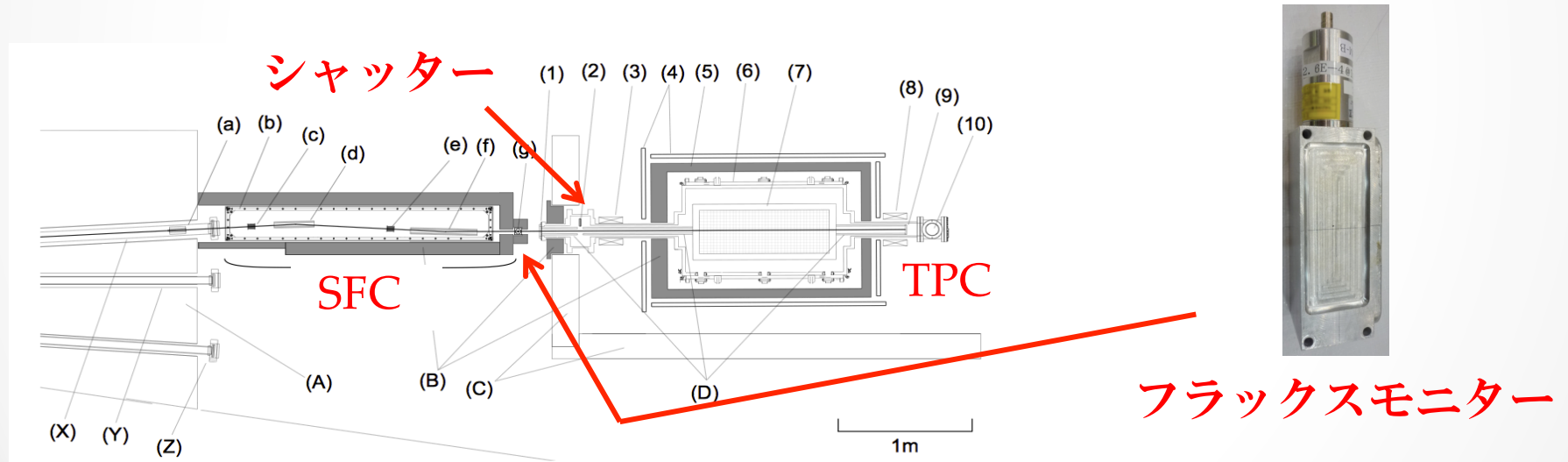
- J-PARCのパルス中性子を利用
- スピンドリップチョッパー(SFC)で中性子をチョップしてバンチをつくることにより、ビーム領域を定義。
- $^4\text{He} + \text{CO}_2 + ^3\text{He}$ ガスを使ったTime Projection Chamber(TPC)で中性子崩壊イベントと $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ の反応を検出し、その比から寿命を求める



フラックスモニターの意義

β 崩壊イベントのBGとして、ビーム起因のBGがある。

TPC手前のシャッターのOpen-Close状態を比較し、BGの量を見積もる。
シャッターをClose状態でのフラックスを測るために、シャッターの直前にフラックスモニターを設置する。



検出効率の絶対値を精度よく求められれば、TPC内の ^3He 分圧の不確かさを見積もれる可能性がある

実験背景と目的

来年度にSFCの大型化を計画している。

ビームサイズ：2 cm × 4 cm → 4.5 cm × 12 cm

フラックス： 10^6 → 10^7 neutrons/sec



新たに別のフラックスモニターを使用する予定。
オルデラ社製中性子検出器がその候補になっている

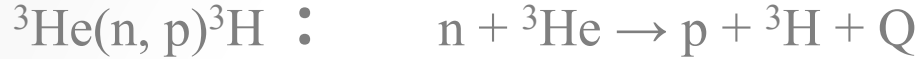


J-PARCのBL05の低発散ブランチのパルス中性子
を利用し、オルデラ検出器の性能を評価する
(検出効率や波高分布の位置依存性を調べる)



中性子吸収反応

TPC内での中性子吸収反応の例

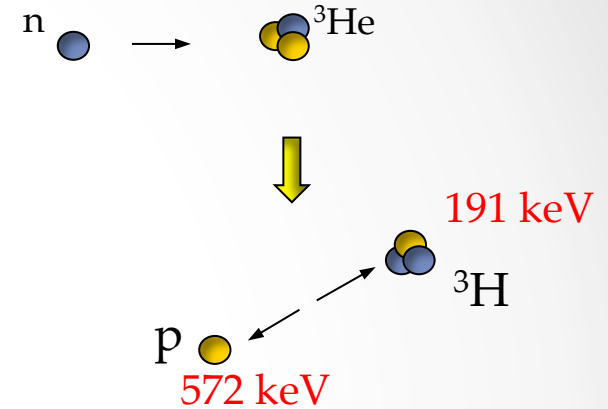


Qは質量差によるエネルギーであり、

$$Q = (M_n + M_{{}^3\text{He}}) - (M_p + M_{{}^3\text{H}}) = \underline{763 \text{ keV}}$$

$$E_p = 763 \text{ keV} \times 3/4 = \underline{572 \text{ keV}},$$

$$E_{{}^3\text{H}} = 763 \text{ keV} \times 1/4 = \underline{191 \text{ keV}} \quad \text{となる}$$



※他にも ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$ $Q=626 \text{ keV}$ といった反応がある。

断面積

$\sigma \propto T \propto 1/v$ となる (1/v則) ← 単位時間あたりの反応率が一定

$v_0 = 2200 \text{ m/sec}$ ($\lambda_0 = 1.8 \text{ \AA}$) に対して ${}^3\text{He}: \sigma_0 = \underline{5333 \text{ barn}}$ 、 ${}^{14}\text{N}: \sigma_0 = \underline{1.91 \text{ barn}}$

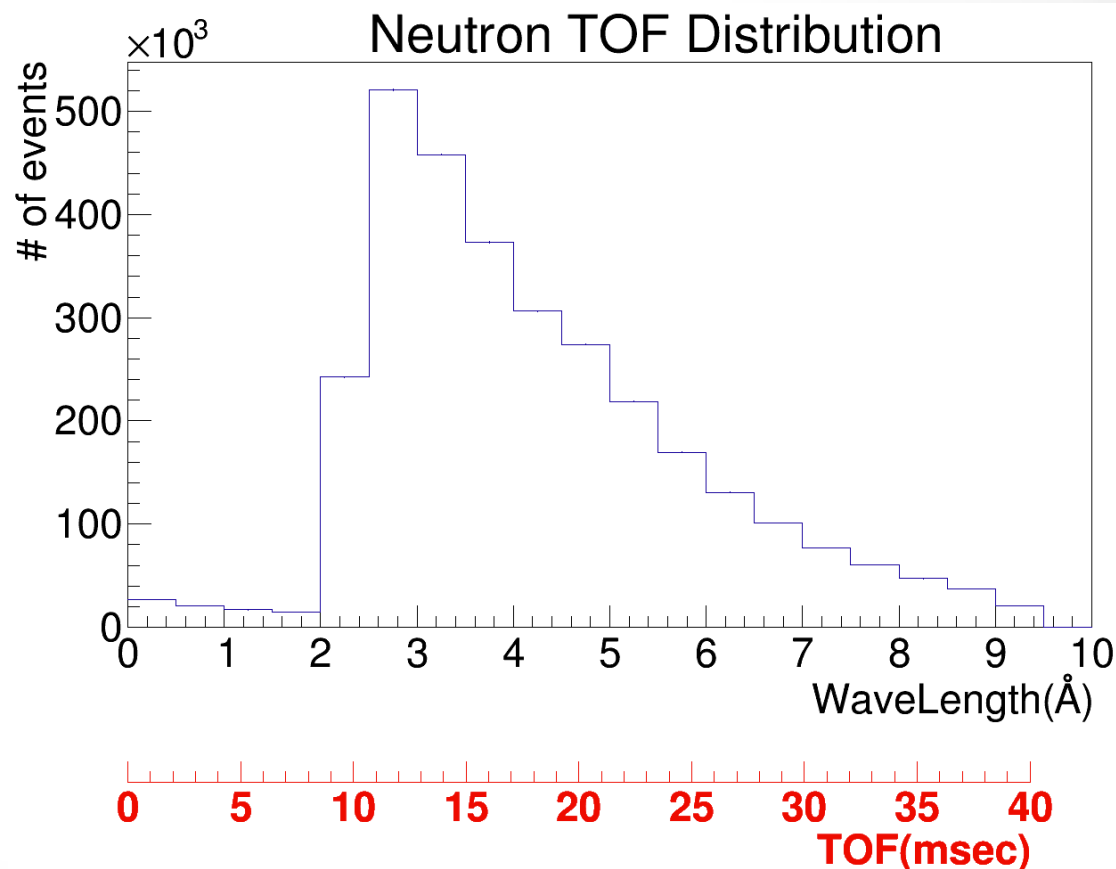
$$\sigma(v) = \sigma_0 \times v_0/v, \quad \sigma(\lambda) = \sigma_0 \times \lambda/\lambda_0$$

J-PARCの中性子ビームの波長分布

J-PARC/MLFでは、3 GeV陽子による核破砕を利用して中性子を生成している。
40 msec周期のパルス中性子が速度分布をもって飛来する。

中性子生成地点から検出器まで
(距離d=17 m) を飛行するのに
要する時間のことをTOF
(Time Of Flight) という

$$\begin{aligned} \text{TOF} &= \frac{d}{v} \\ &= \frac{d}{\frac{h}{m\lambda}} \\ &= \frac{dm}{h} \lambda \end{aligned}$$



検出器概要

厚さ1.3 cm

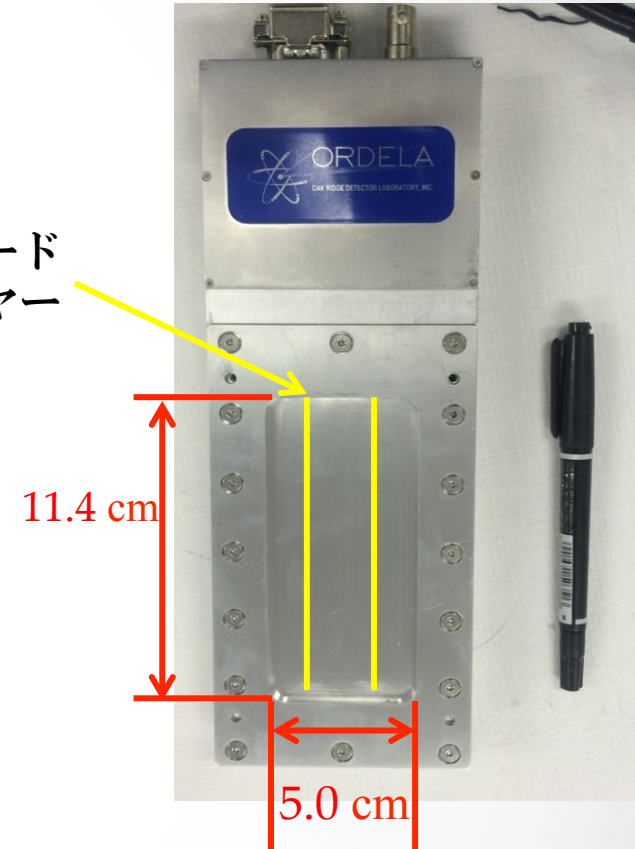
- オルデラ社製ガス検出器
- ガス組成 N_2 (8.6 %) + CF_4 (91.4 %) = 1 atm
- アノードワイヤーが2本(860 V)
- 窓はAl (厚さ2 mm)
- 検出効率 $\sim 10^{-5}$

1. 中性子吸収反応でイオンが生成。
2. イオンがガス分子を電離
3. 電子が電場でドリフトし、なだれ増幅を起こす。

今までの検出器は...

- 有感領域が狭く、SFC大型化に対応できない。
- ^{10}B 由来と思われるピークがあり、そのピークの量が位置によって変わる。
- 検出効率が高く、フラックス増加時に不感時間が増える。

アノード
ワイヤー



MCによるEnergy Deposit Simulation

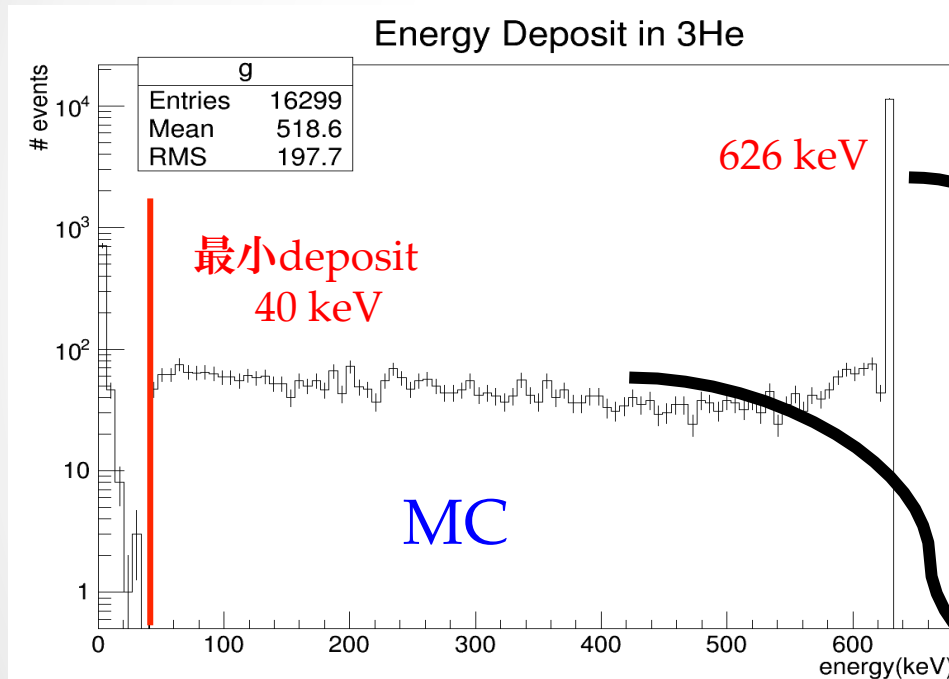
Geant4で検出器を再現し、吸収反応のenergy depositの分布を求めた。

$n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p + 626 \text{ keV}$ が起きると、

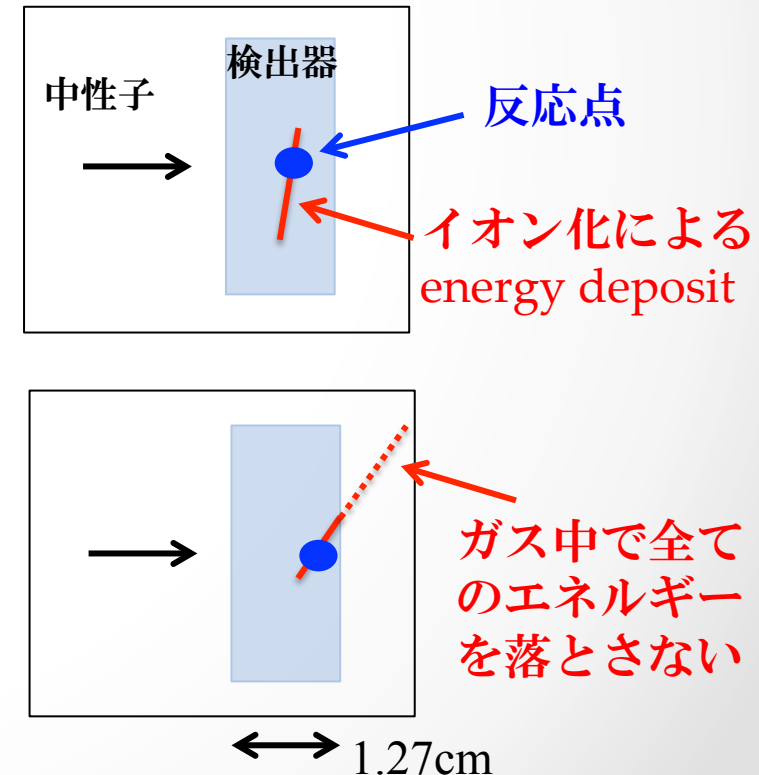
ガス中 ($\text{N}_2 + \text{CF}_4$) での飛程は

$p(584 \text{ keV}) \rightarrow 4\sim 5 \text{ mm}$

${}^{14}\text{C}(42 \text{ keV}) \rightarrow 0.1 \text{ mm}$

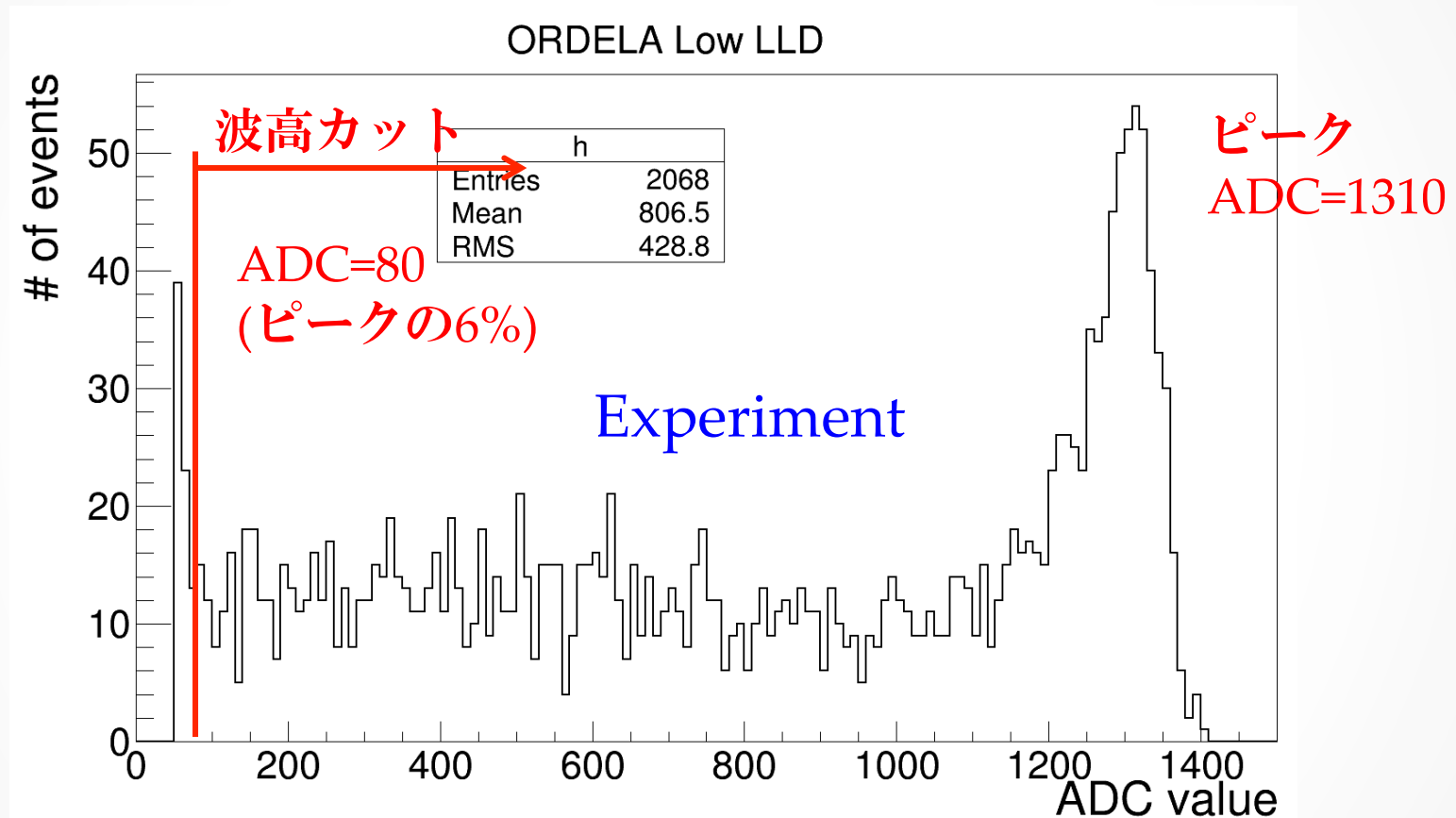


trackが検出器からはみ出ると、energy depositが小さくなる。→分布は広がる
最小energy depositは40 keV (最大値の6%)
ここで波高カットをかけられる



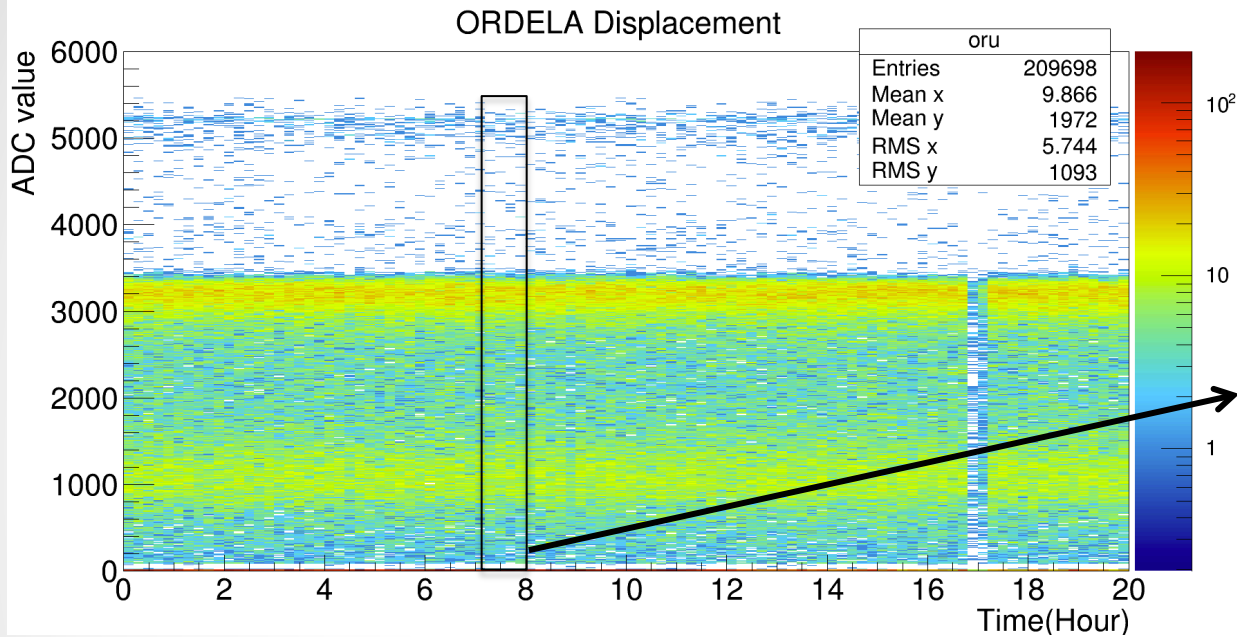
オルデラ検出器の波高分布

J-PARC/MLFの中性子ビームをオルデラ検出器に当てて波高分布を調べた

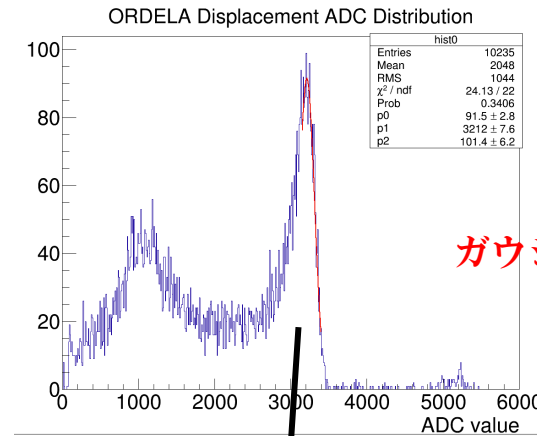


ノイズによるピークと中性子イベントの分布を完全には分離できず、波高カットによる不定性が残った。

ADC分布の時間安定性

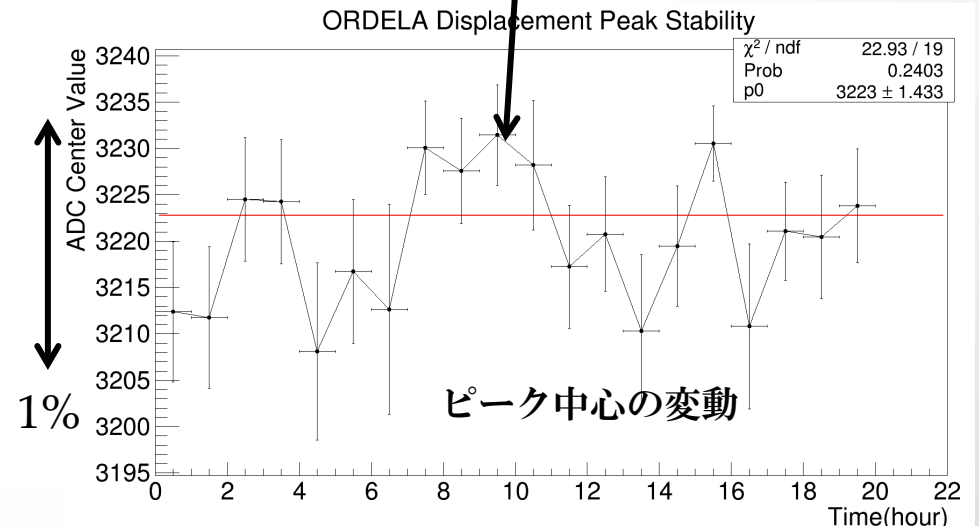


丸一日とったデータから
1時間ごとにADC分布をつくり、
ピークを片側フィットした。



ガウシアンフィット

直線フィットすると、
 $ADC = 3223 \pm 1.4$ ($\chi^2 / \text{ndf} = 22.9 / 19$)
この解析では有意な時間変動はみられない。

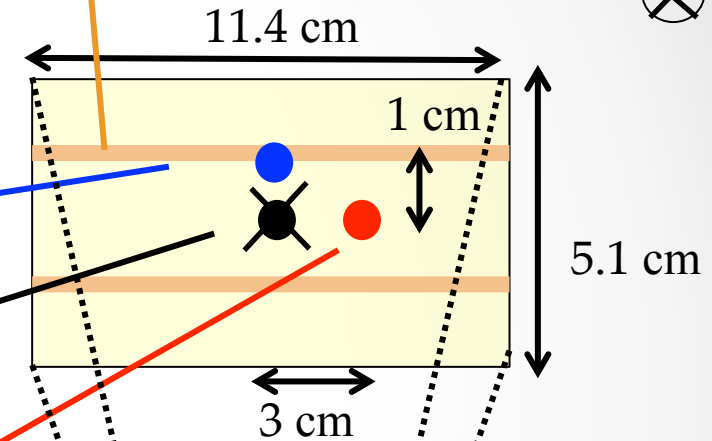


波高分布の位置依存性

ビームの位置を検出器中心からずらして、波高分布がどのように変わるのか調べた。

アノード
ワイヤー

ビーム方向

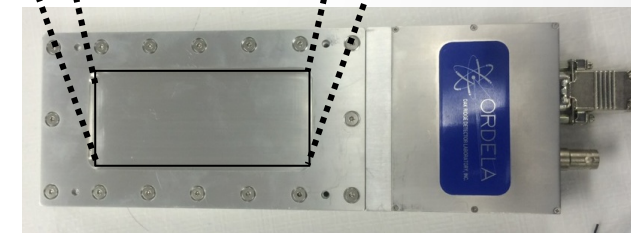
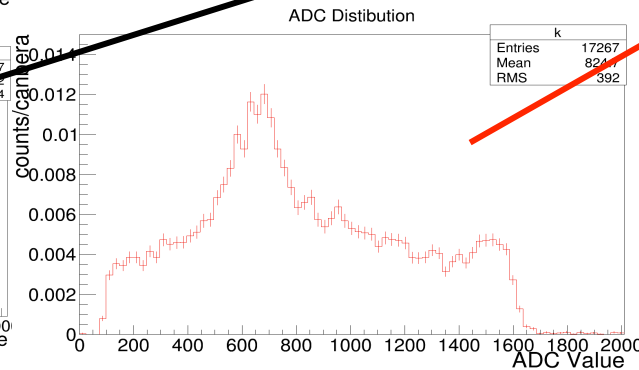
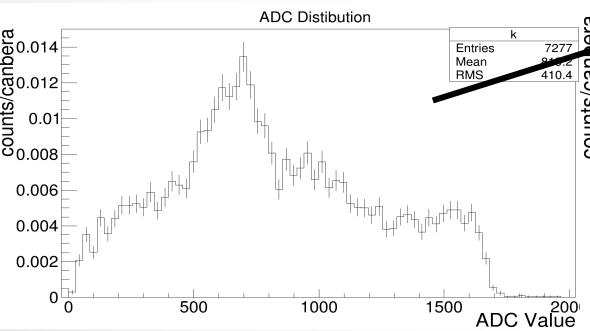
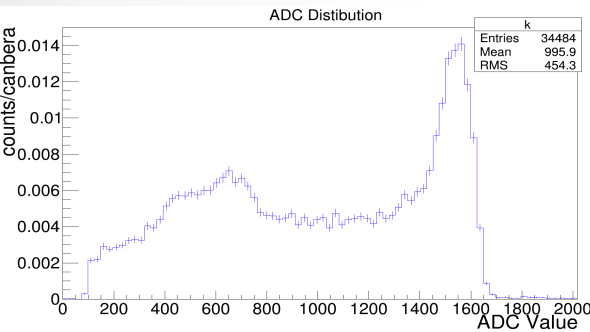


5.1 cm

3 cm

11.4 cm

1 cm



ワイヤー平行方向・・・波高分布はあまり変化しない

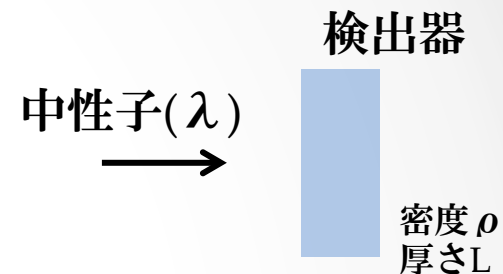
ワイヤー垂直方向・・・波高分布のピークの値が変化した。

今回の測定では、検出器の中心における検出効率を求めた。

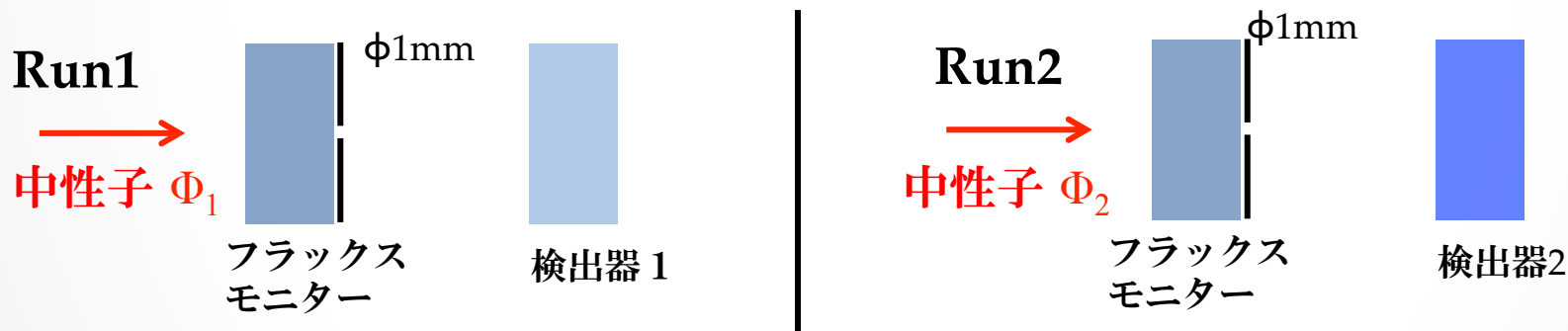
検出効率測定の実理

中性子の検出効率Rが波長に依存することを利用。

$$\begin{aligned} R &= 1 - \exp(-\sigma\rho L) \\ &= 1 - \exp(-\sigma_0/\lambda_0 \times \rho L \times \lambda) \\ &= 1 - \exp(-\alpha\lambda) \end{aligned}$$



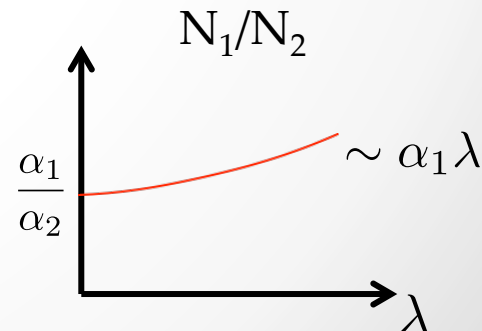
全フラックスは不明なので、検出効率の違う検出器の波長分布の比をとる



フラックスモニターのカウントで規格化

$$N_1/N_2 = (1 - \exp(-\alpha_1\lambda)) / (1 - \exp(-\alpha_2\lambda))$$

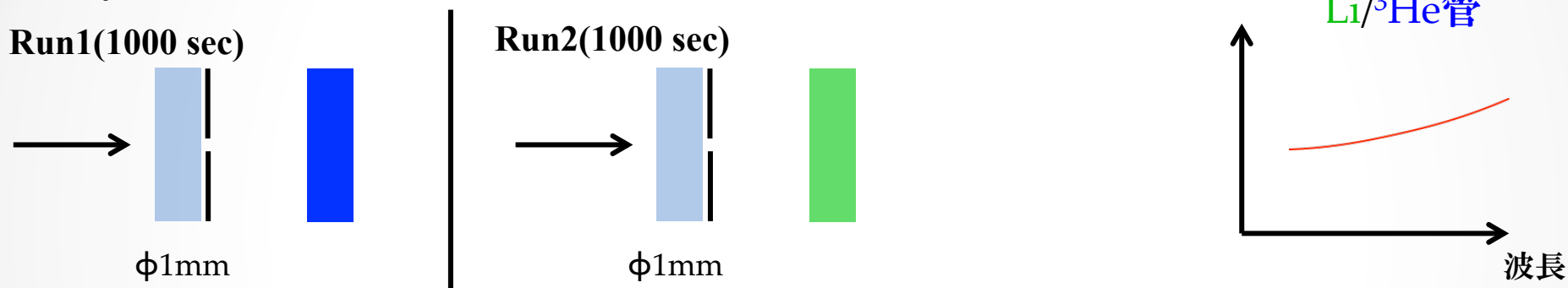
特に、 $\alpha_1 \ll \alpha_2$ の時、比は右のようになる。



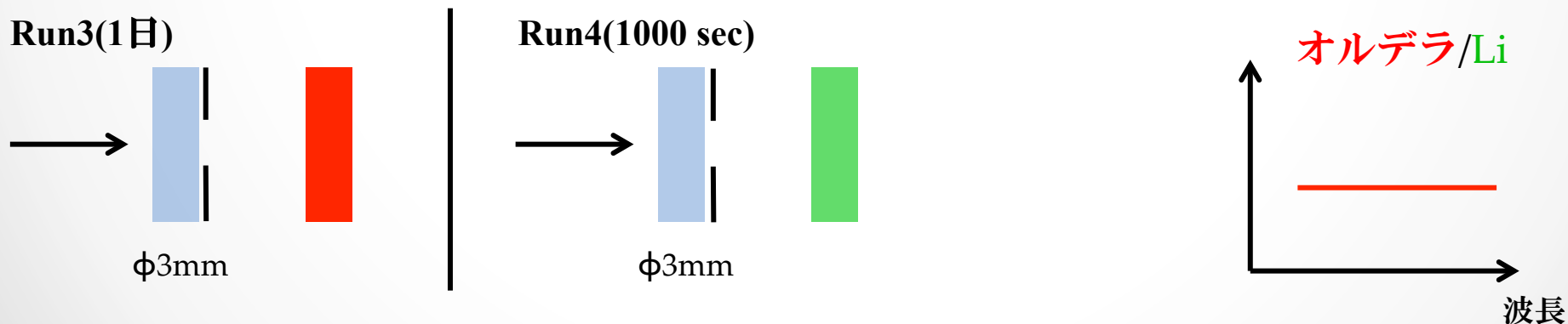
測定方法

オルデラ検出器($\sim 10^{-5}$)と比をとるために、Li検出器($\sim 10^{-2}$)と ^3He 管(~ 1)を使う。不感時間が大きくなるようにコリメーターでフラックスを調整する。

1. ϕ 1mm で、 ^3H 管とLiの検出効率比を求める



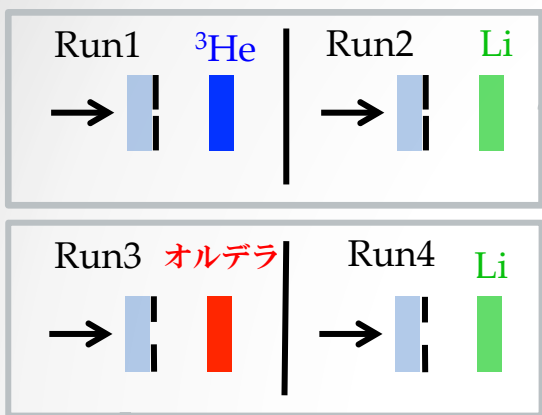
2. ϕ 3mm で、オルデラとLiの検出効率比を求める



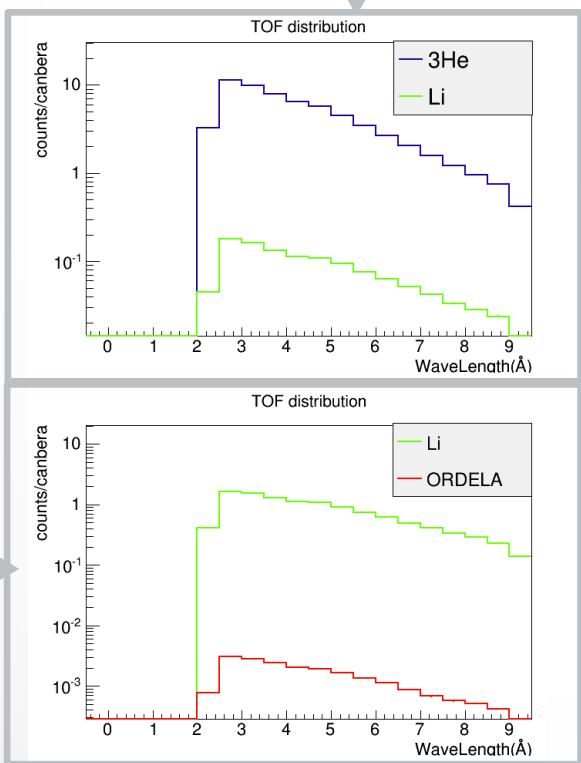
3. 2つをかけてオルデラ/ ^3He 管を求め、fittingをして検出効率を求める

結果

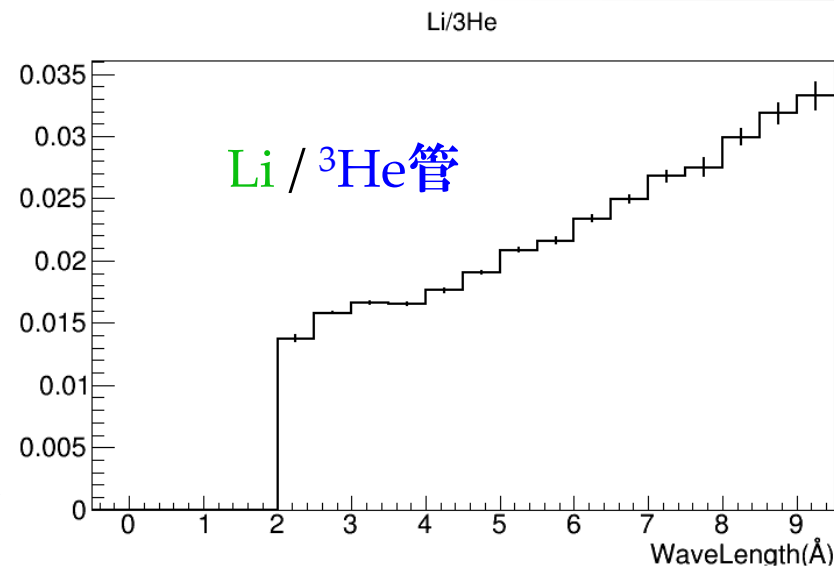
測定したrun



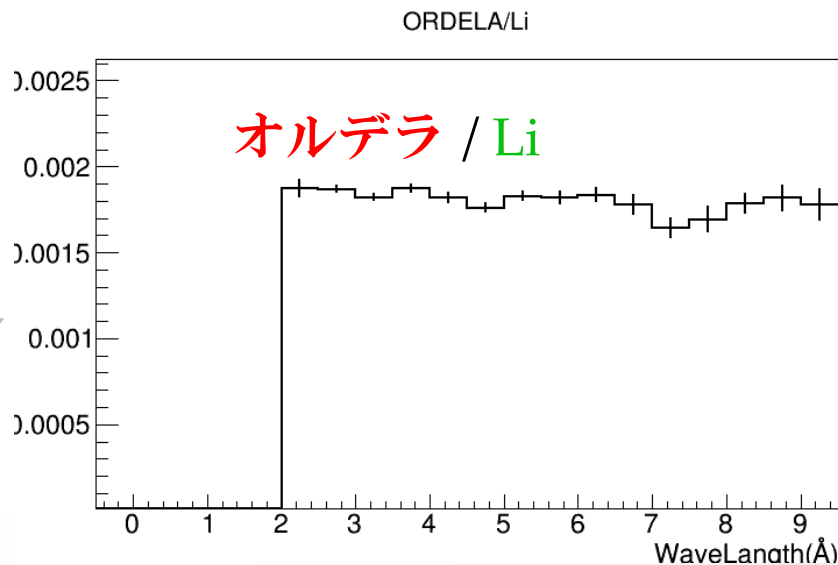
波長分布



波長分布の比



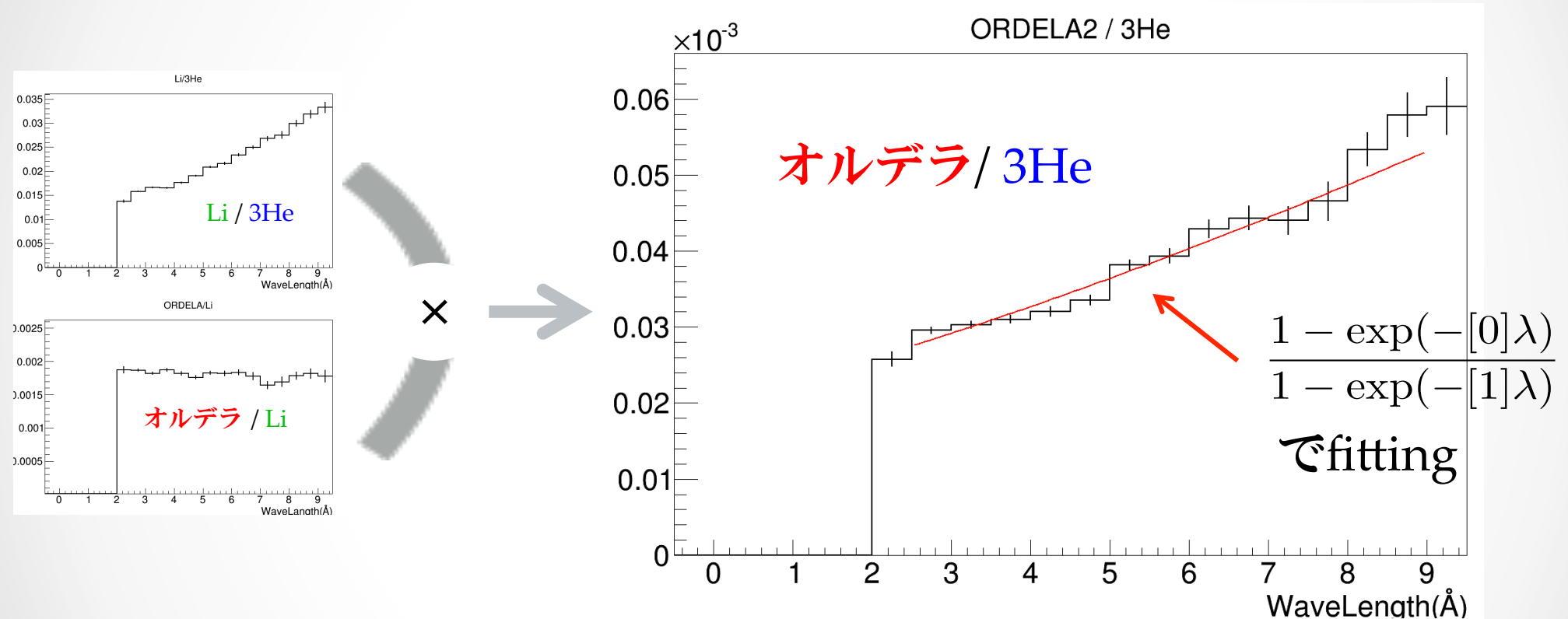
波長とともに増加



波長に対して一定

フィッティングと検出効率

前ページのをヒストをかけ合わせて、fittingした。



fittingの結果、2200 m/s (1.8 Å)中性子に対するオルデラ検出器の検出効率は

$$R=(1.11\pm 0.03)\times 10^{-5} \quad \text{となった}$$

まとめ

- 新しい中性子フラックスモニターの候補であるオルデラ検出器の性能を評価している。
- 2つの検出器のカウントの比をとるという方法で検出器中心の検出効率を測定した。

2200 m/s (1.8 Å)に対する中性子検出効率は

$$(1.11 \pm 0.03) \times 10^{-5} \quad \text{となった。}$$

検出器の課題

- ワイヤーと垂直方向に波高分布の位置依存性がある。
- ADC分布の波高カットによる不定性が残る。

今後

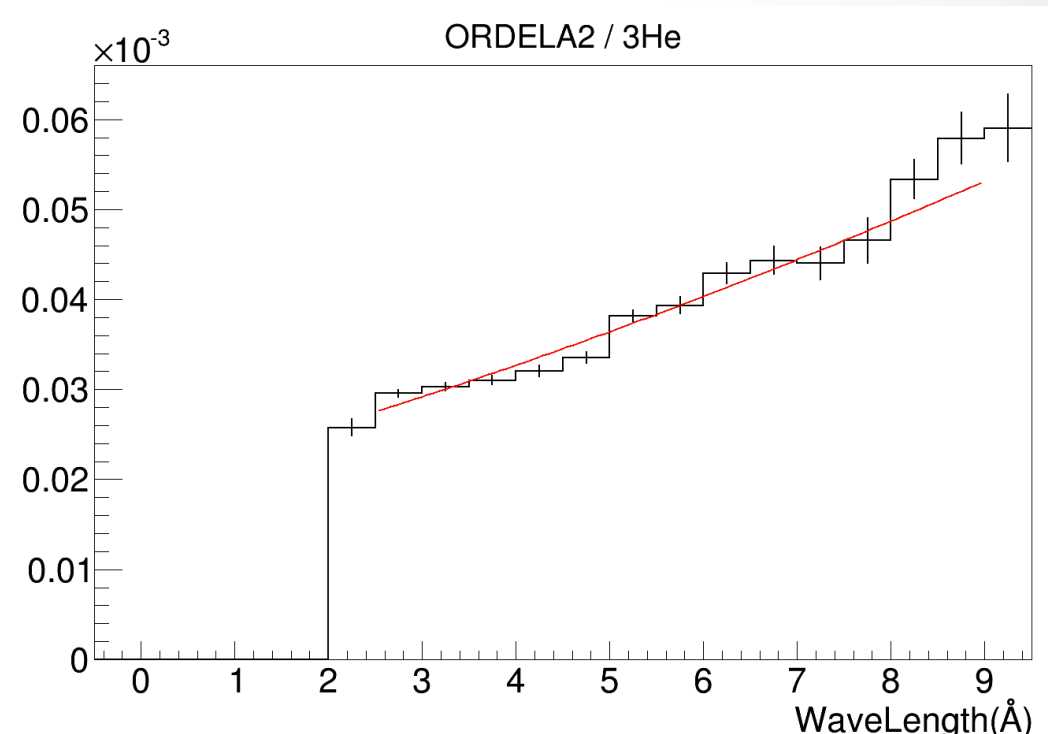
- 検出効率や波高分布の位置依存性を詳細に測り、フラックスモニターとしての要求を満たすか検討する。

Backup

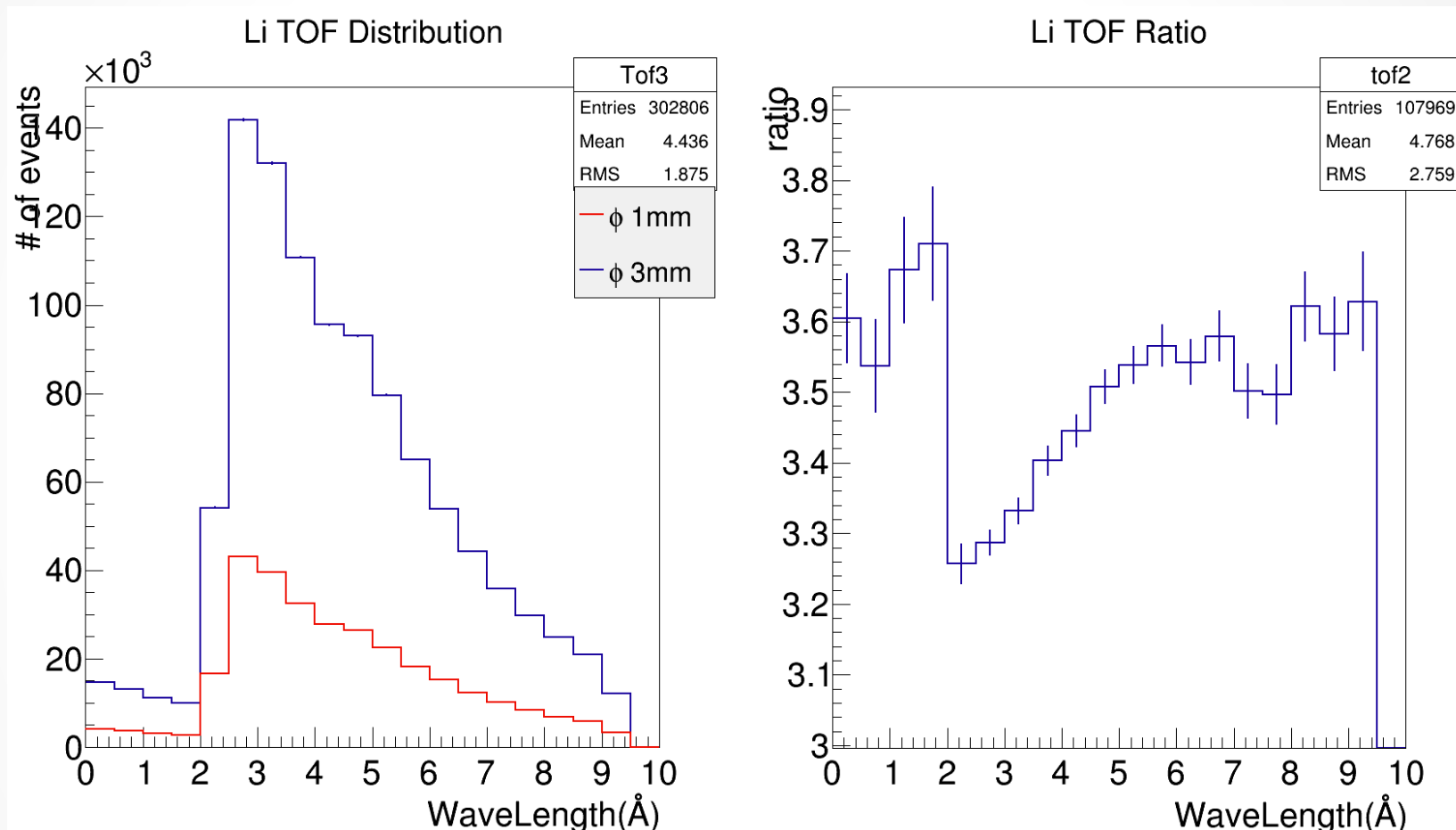
fittingがあっていない原因

検出効率の波長分布の比をフィッティングしたが、あまりあっていない ($\chi^2/\text{ndf}=31.5/11$)。いくつかの原因が考えられる。

1. 窓材のAlによる吸収、散乱の影響
2. ^3He 管での反応イベントの数え落とし。
3. Li検出器での、1 mmと3 mmでビームの位相分布の変化。



Liの $\phi 1$ mmと $\phi 3$ mmの比較



$\phi 1$ mmと $\phi 3$ mmでTOF分布が同じではない

→ コリメータを広げたことでビームの位相分布が変わった可能性がある

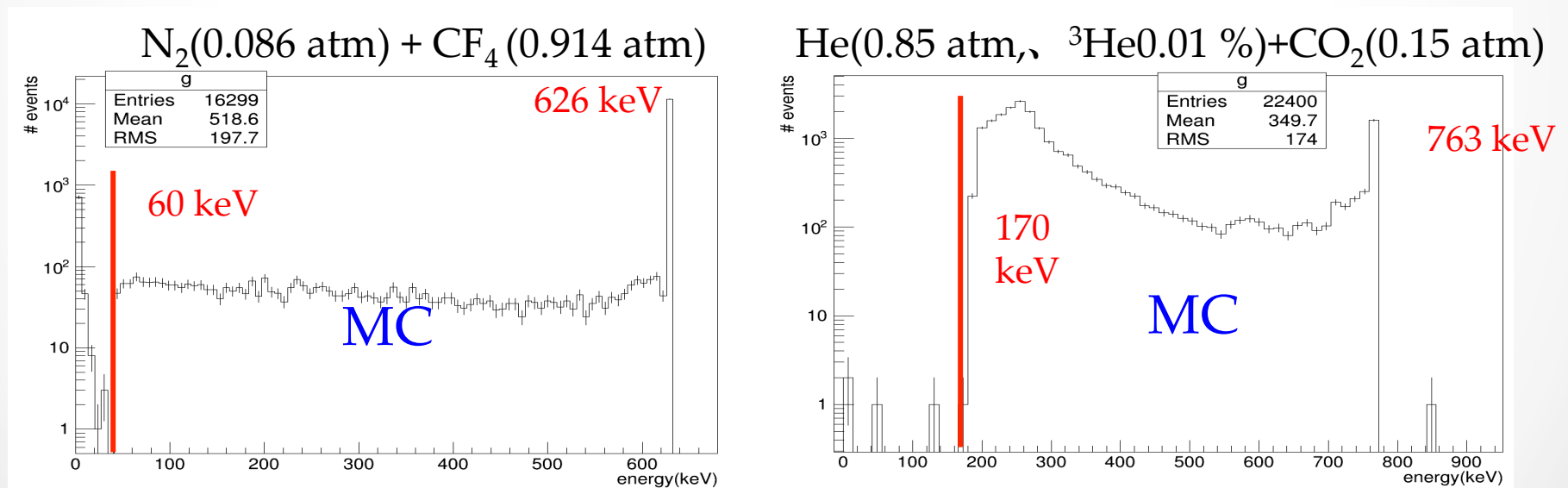
今後の改良案

波高分布において、 γ 線BGと中性子イベントの分離が悪かった

→ 反応ガスとして ^3He を用いる。

^3He 反応の場合、有感領域の端で反応が起きても検出器へのenergy depositの最小値が大きくなる。

^3He ガスと N_2 ガスの場合でenergy depositのsimulationをした。



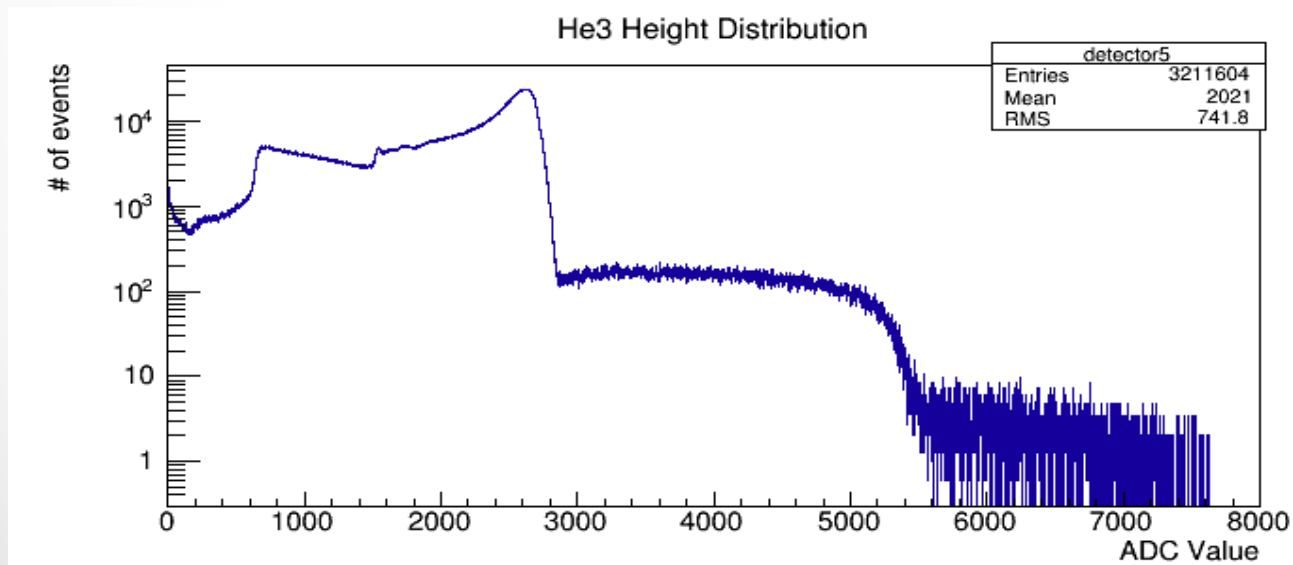
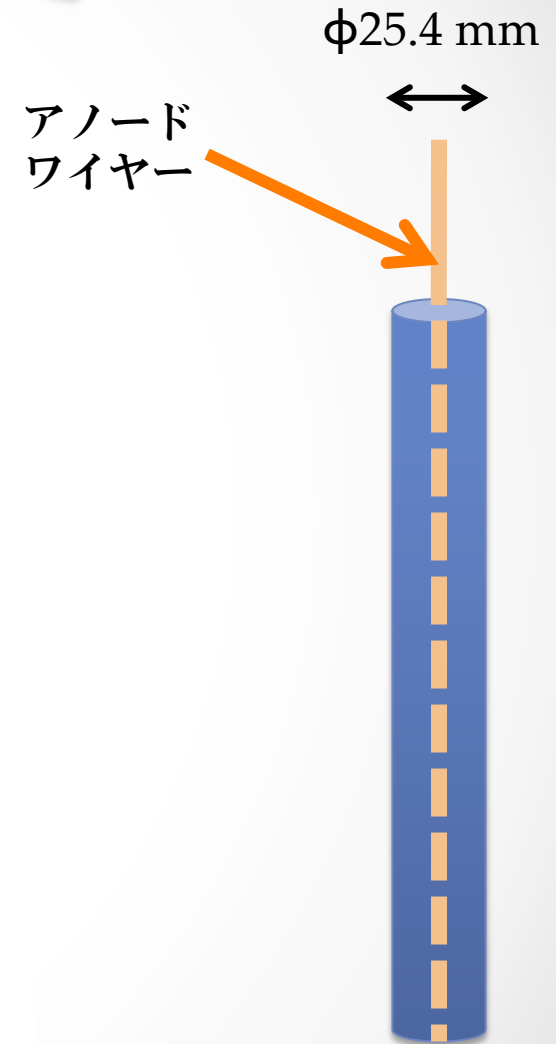
低エネルギーBGと中性子イベントが分離しやすくなる

ただし、 ^3He ガス量を精度よくコントロールするのは難しい

^3He 管について

- 管状の ^3He 反応による検出器
- $^3\text{He}(9.7 \text{ atm})+\text{CO}_2(2 \text{ \%以下})$
- $\text{HV}=1200 \text{ V}$
- 壁圧0.5 mm

^3He 圧力から予測される検出効率は96 %

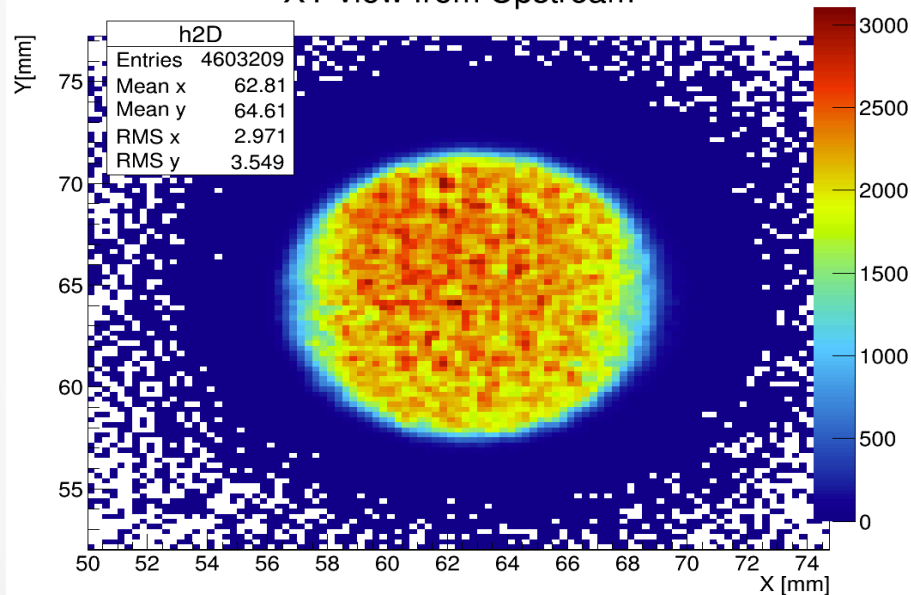


中性子ビームの2次元分布

RPMTという位置検出器を用いて、中性子の2次元位置情報を調べた。

スリット1mm×5mm、コリメータなし

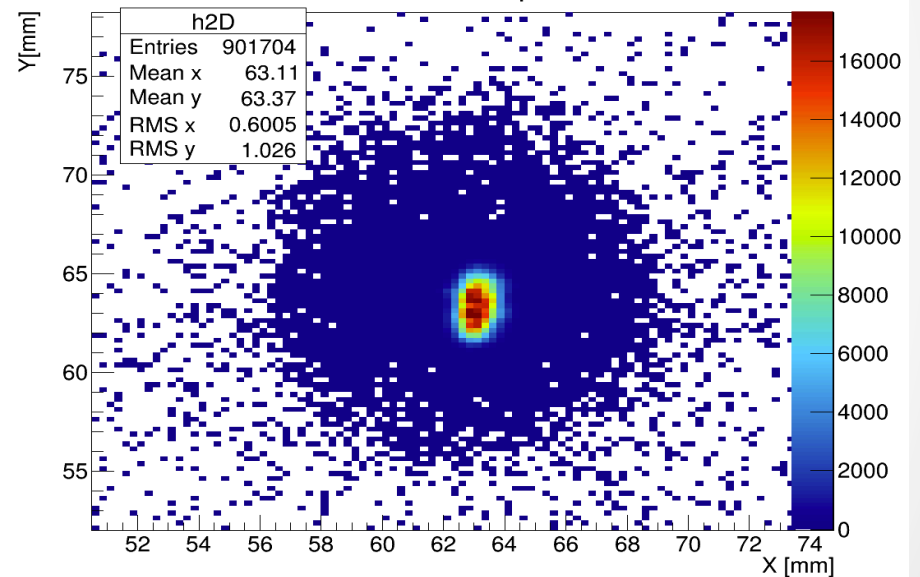
XY view from Upstream



半径6 mm

スリット29mm×21mm、コリメータΦ1mm

XY view from Upstream



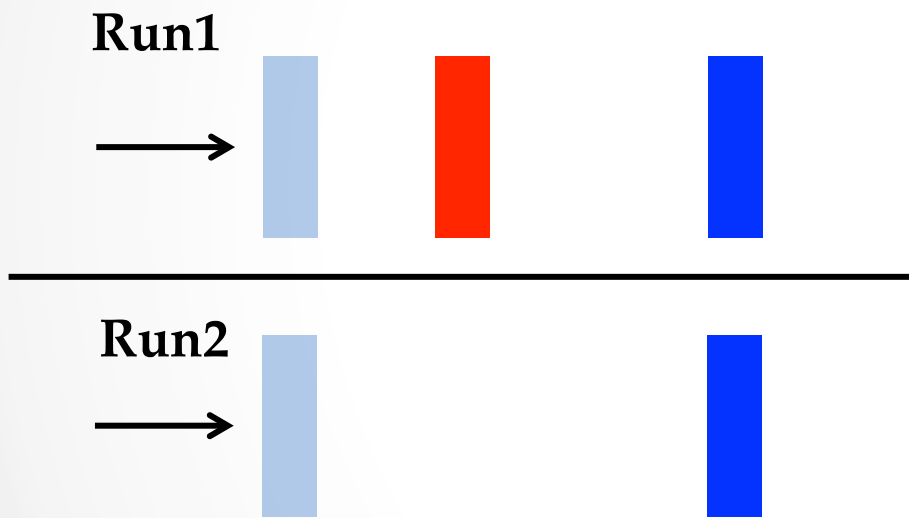
横半径1.5 mm、縦半径3 mm

1/v則の説明

冷中性子、熱中性子では角運動量ポテンシャル障壁を超えられないので、 $l=0$ の反応のみ起こる。

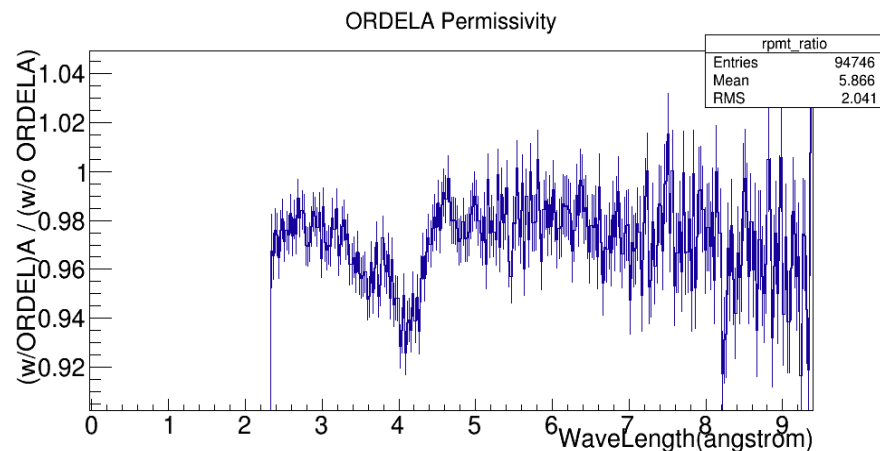
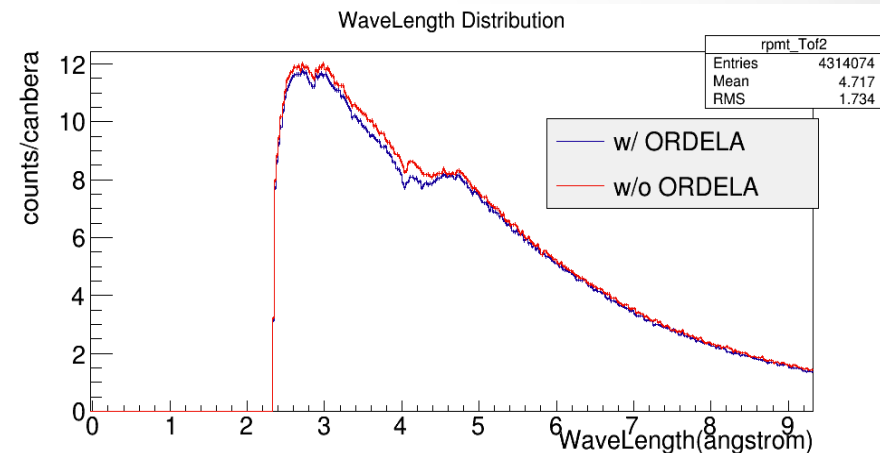
オルデラ検出器の透過率測定

実際にフラックスモニターとして使用する際は、Al壁による吸収、散乱の効果を考えなければいけない。 $\sigma_a=0.23$ barn、 $\sigma_s=1.5$ barn
透過率 = 1 - (検出器ガスの反応率) - (Alによる散乱、吸収率)



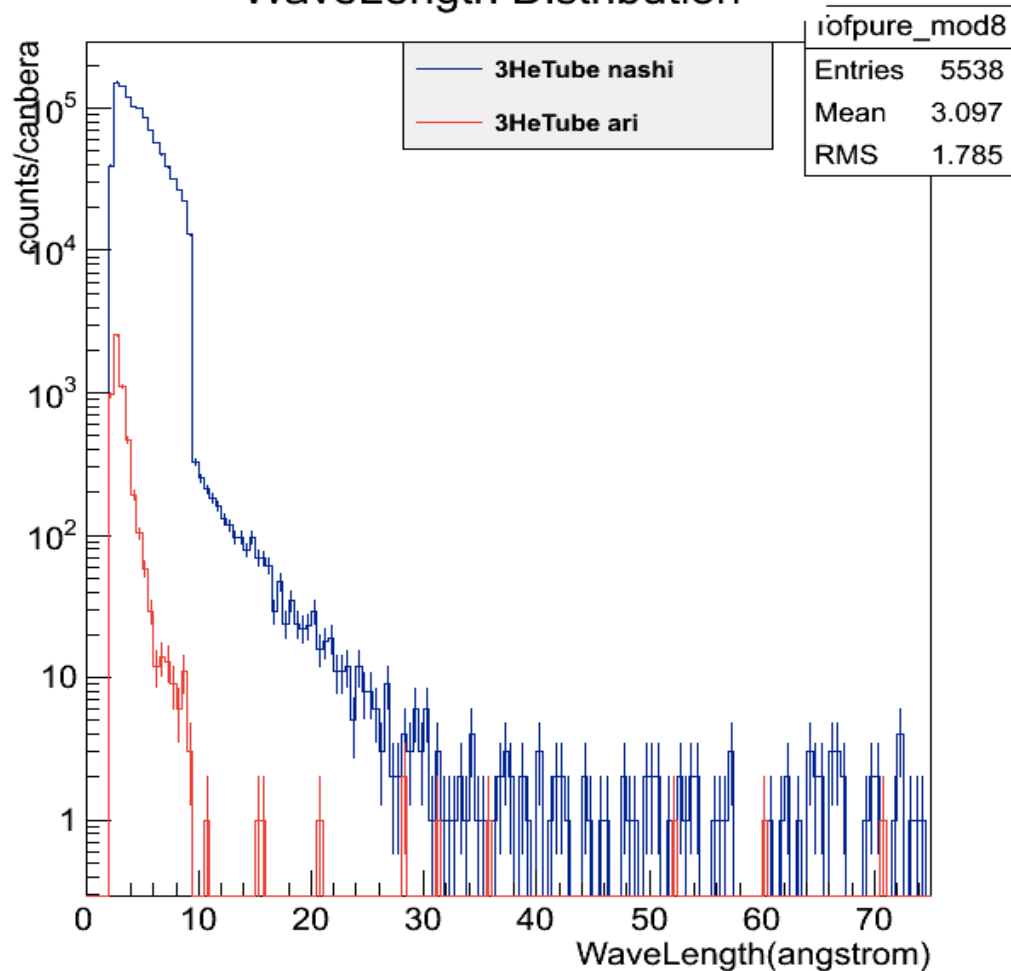
ORDELAを置いた時と置かない時で、
後ろの検出器のカウントを比較

透過率は波長分布をもっていた。
平均でおよそ96%程度となった。

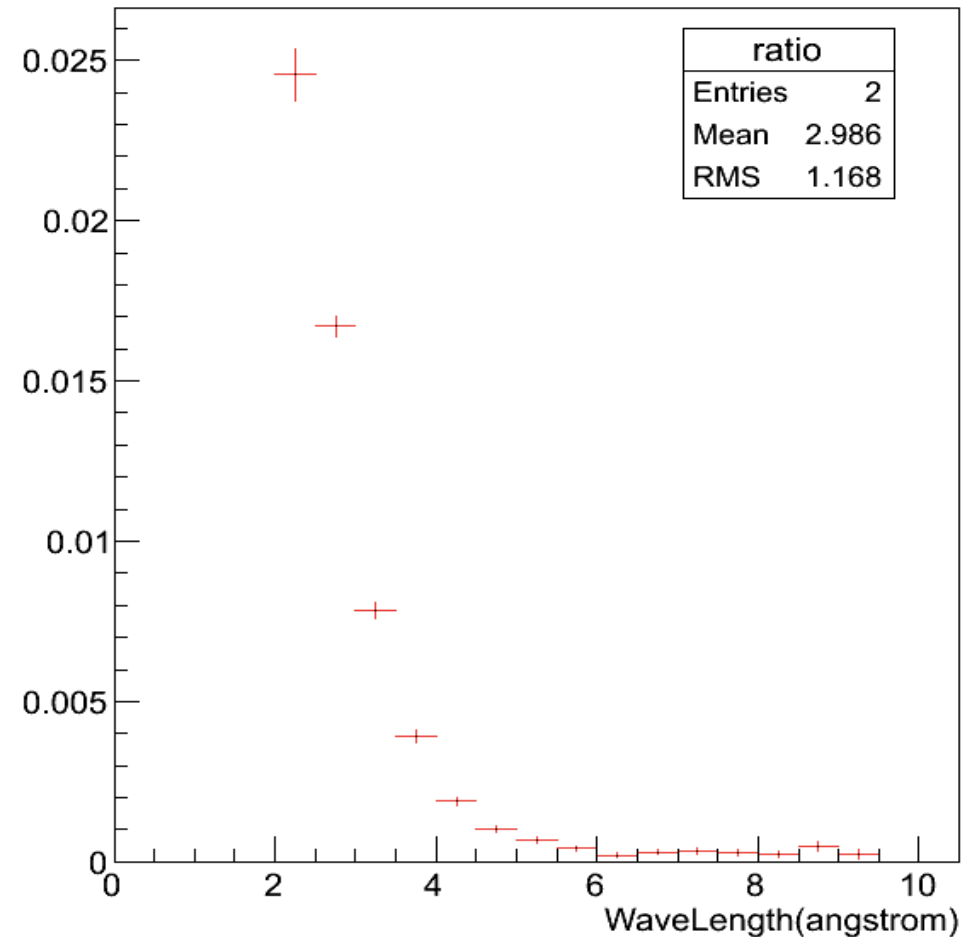


3He管の透過率測定

WaveLength Distribution



3HeTube ari / 3HeTube nashi



1.798 Å中性子に対しては透過率は5%程度
→ fittingにより求まる検出効率 (40%) と矛盾

ADCの不感時間の補正

peak hold ADCを用いて検出器の波高を求めている。

peakを維持する時間 ($\sim 5 \mu\text{s}$) は不感時間となる。

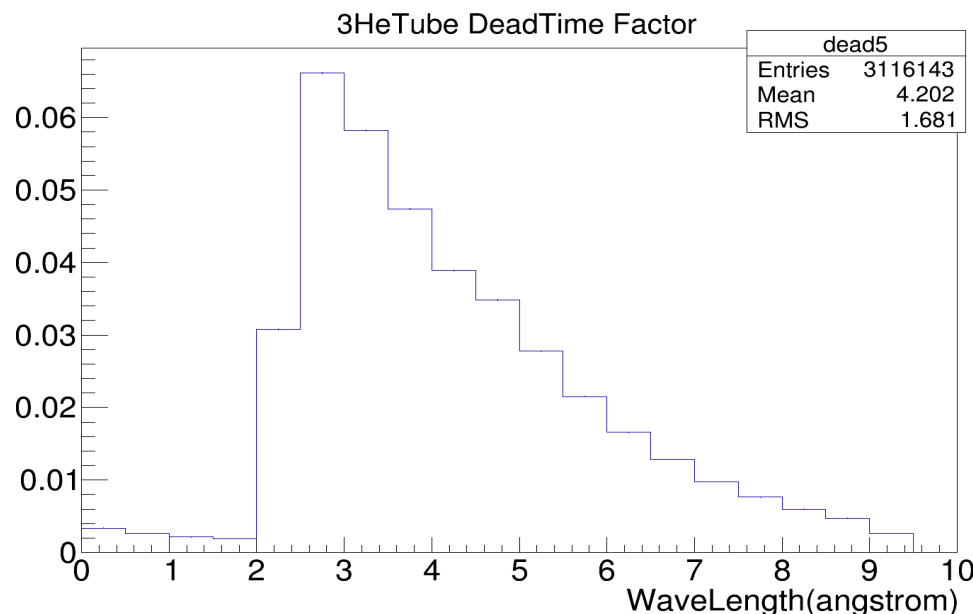
反応率が高い検出器 (^3He 管) の場合は、不感時間を補正する必要がある。

不感時間の分布はカウントレートに比例

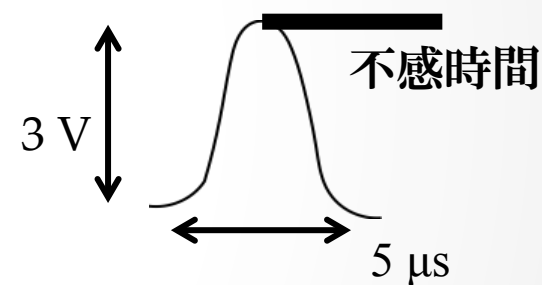
全不感時間はわかる

→ 補正量がわかる。

補正量は最大で5%だった。

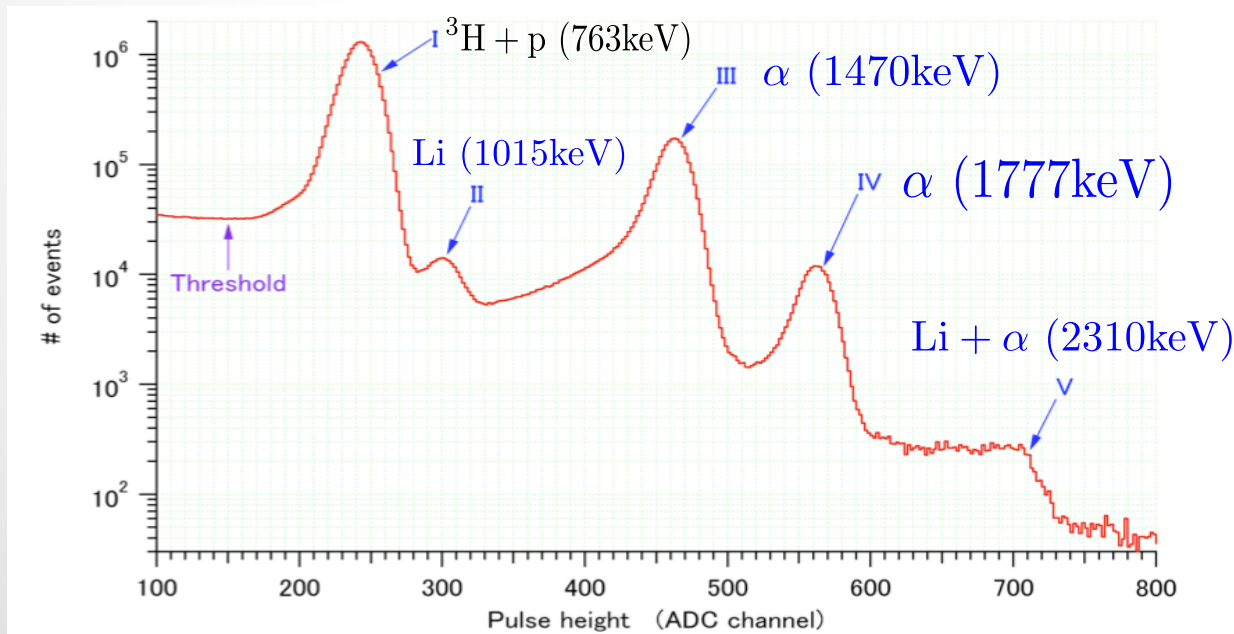


典型的な ^3He 管の波形

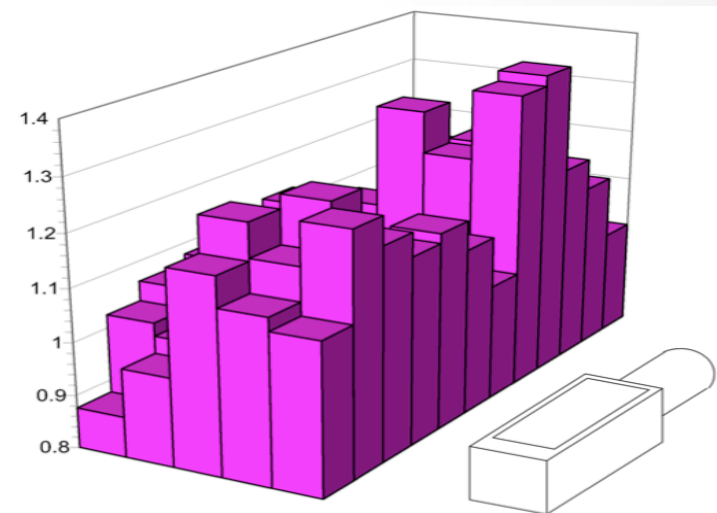


今までのフラックスモニター

- キャンベラ社製 ^3He ガス検出器
- 検出効率は 10^{-4} 程度
- ^{10}B と中性子による反応と思われるピークが複数見える。
 $^{10}\text{B} \rightarrow ^7\text{Li}(1015 \text{ keV}) + \alpha(1777 \text{ keV}) \quad \dots \dots 6\%$
 $^{10}\text{B} \rightarrow ^7\text{Li}(840 \text{ keV}) + \alpha(1470 \text{ keV}) + \gamma(482 \text{ keV}) \quad \dots \dots 94\%$
- 中心に対して、波高や検出効率が最大で20%程度差がある。

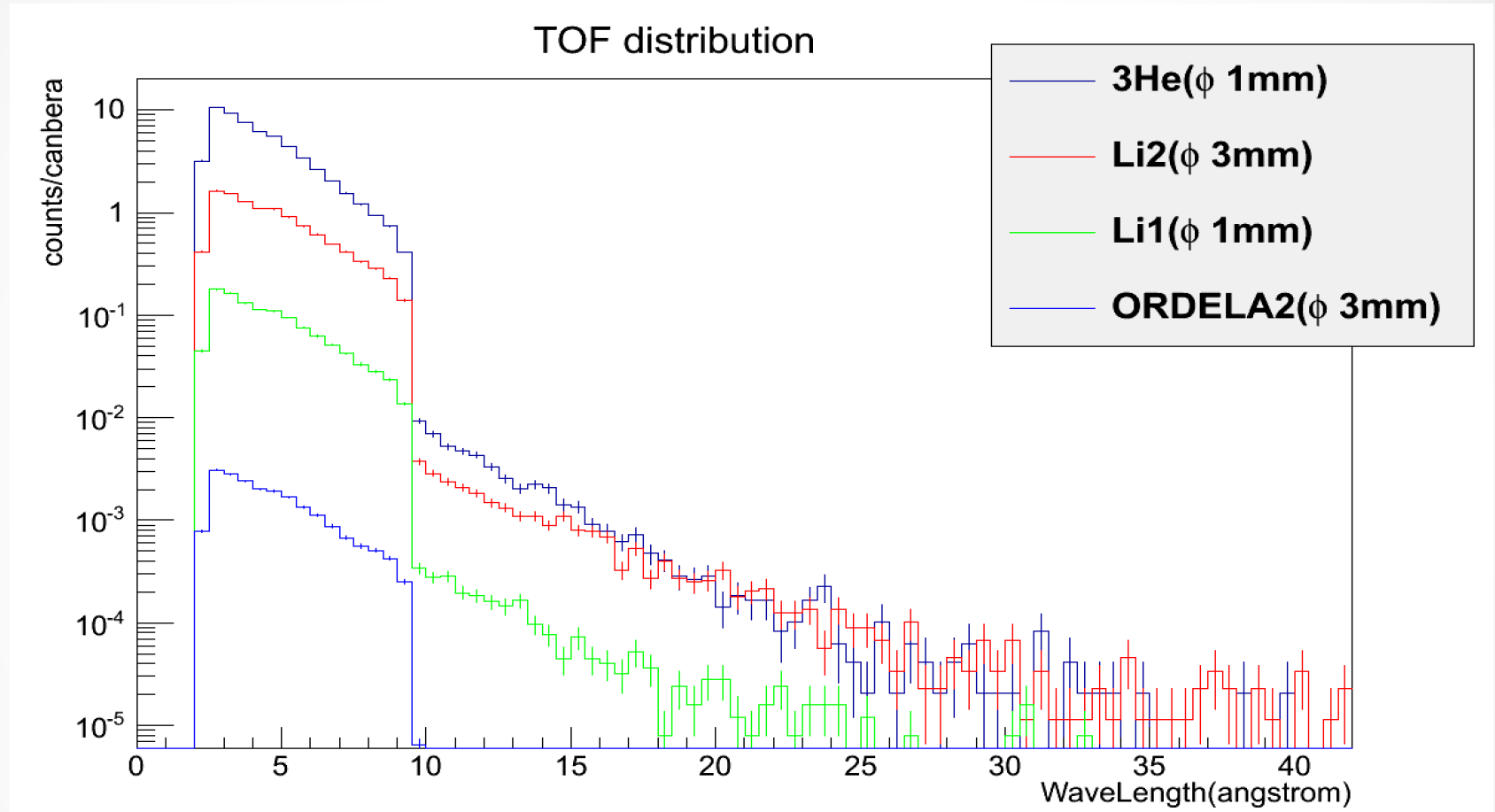


波高分布



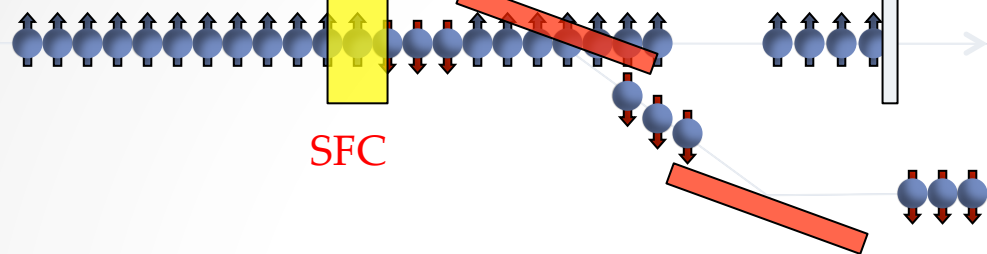
検出効率の位置依存性

波長分布一覽



heightカット + 漏れ込み評価 + 規格化 + DT補正
後の波長分布

偏極中性子ビーム



SFC

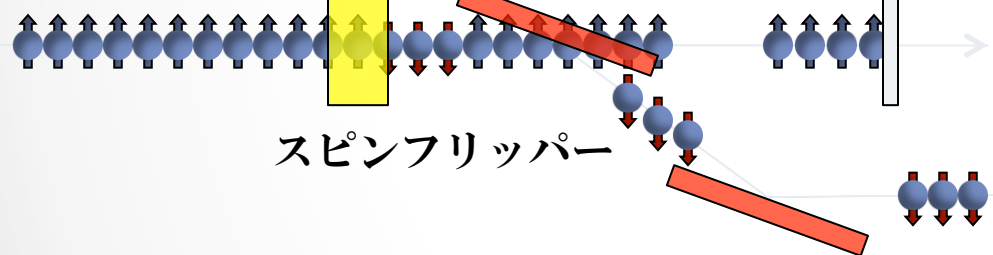
偏極中性子
スーパーミラー

TPC

真空窓
(Zr)

ビーム
キャッチャー

偏極中性子ビーム



スピンフリップパー

偏極中性子
スーパーミラー

真空窓
(Zr)

ビーム
キャッチャー

${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ - CO_2 TPC ($\epsilon > 99.9\%$)

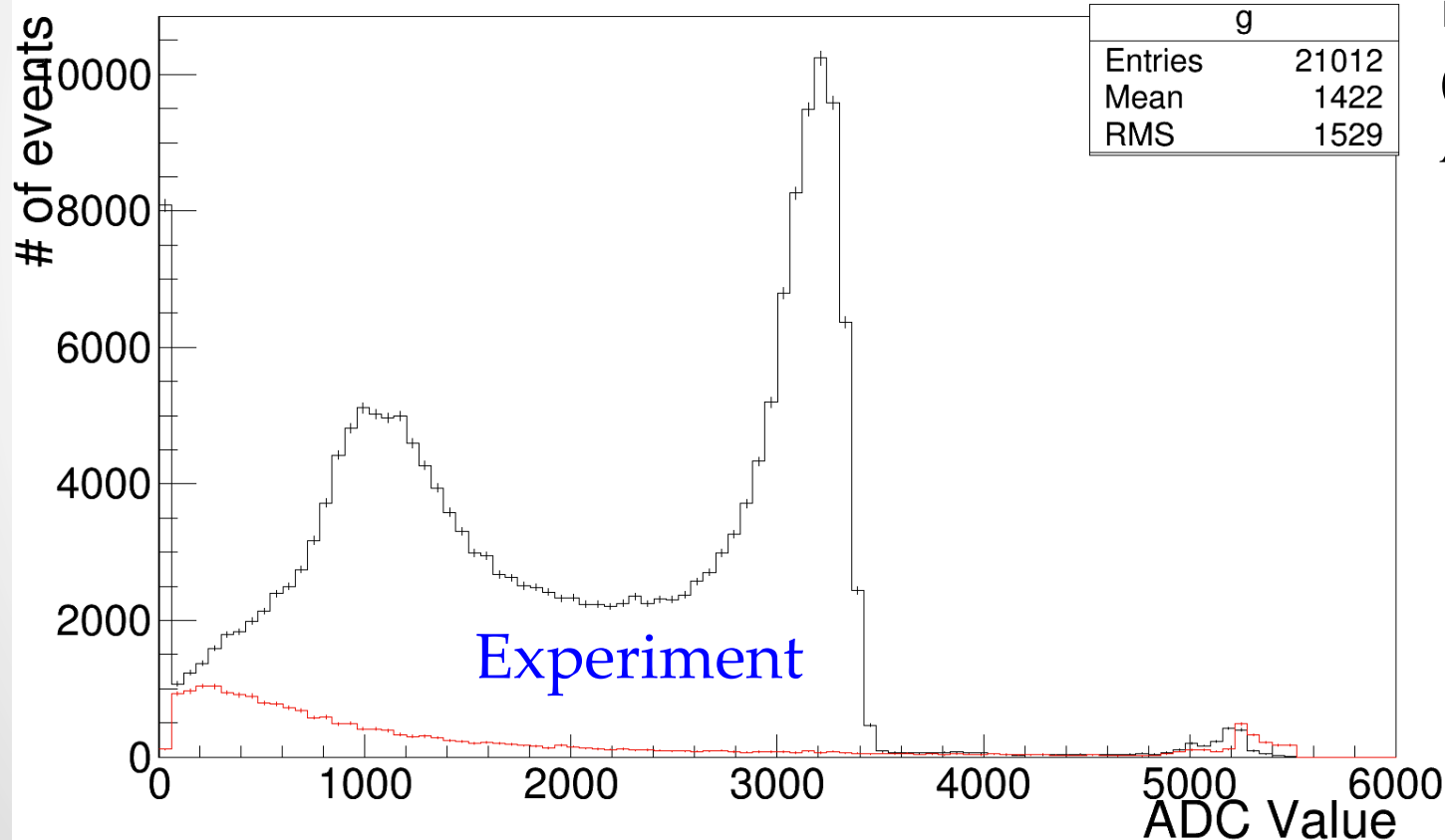


オルデラ検出器の波高分布

TOF=0 msecには γ 線由来のBGイベントが生じる。

→中性子イベントを見積もりときに、TOF=0 msec周辺はカットする (TOFカット)

ORDELA ADC Distribution

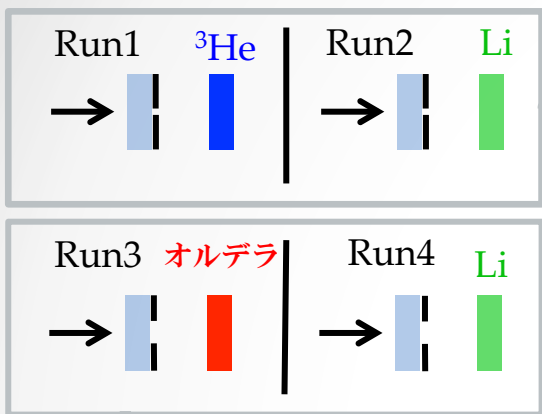


中性子イベント
(TOF=0.1-39.9 msec)
ADC~3000あたりに
ピークをつくる

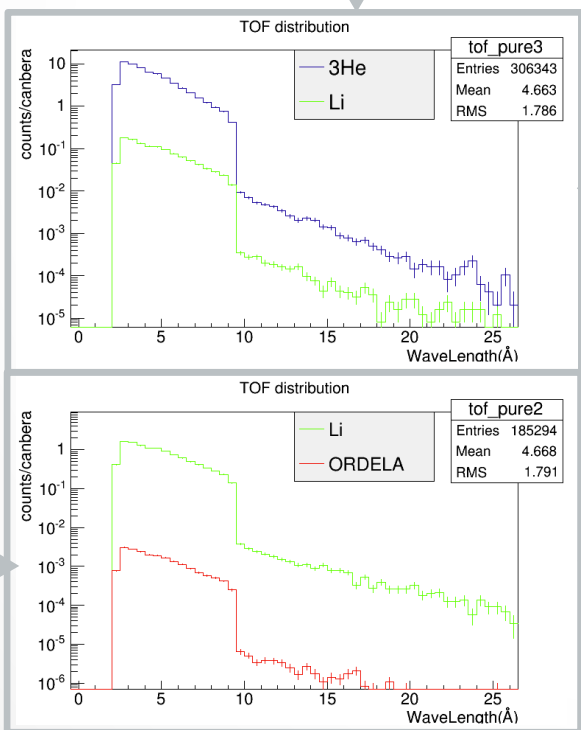
BGイベント
(TOF=0.0~0.1 msec
& 39.9~40 msec)
ADC値が低い

結果

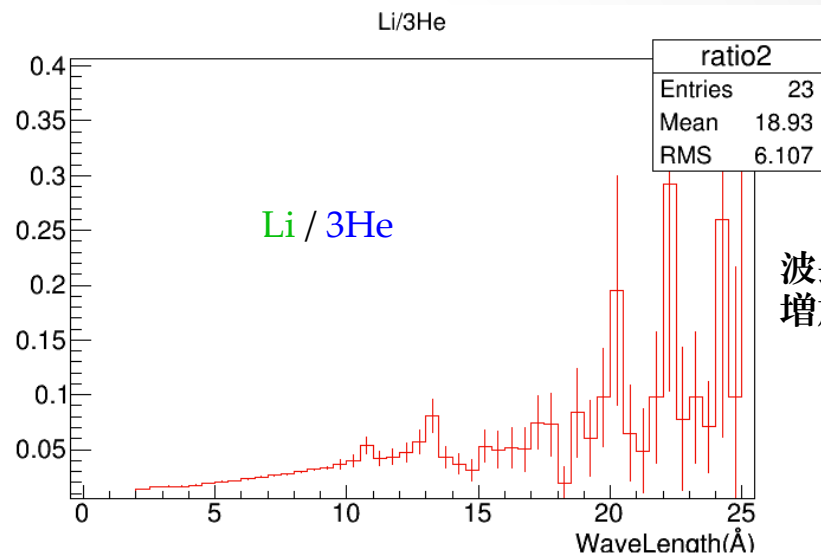
測定したrun



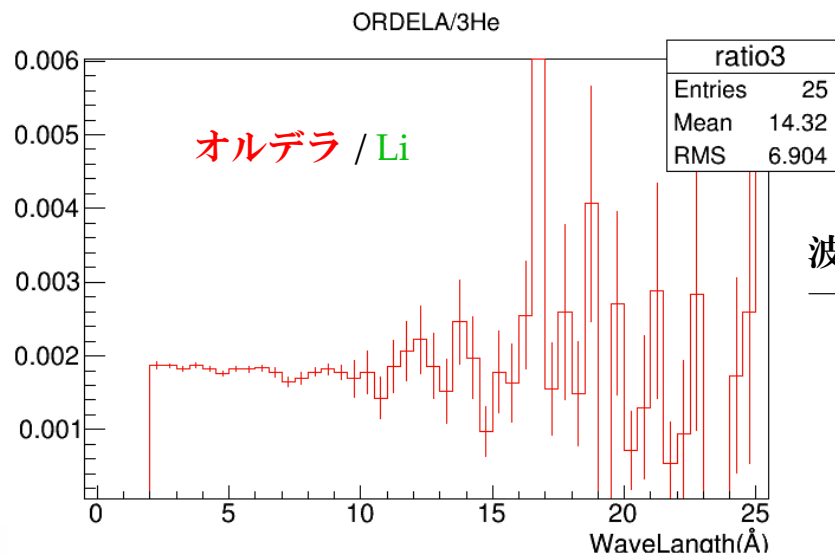
波長分布



波長分布の比



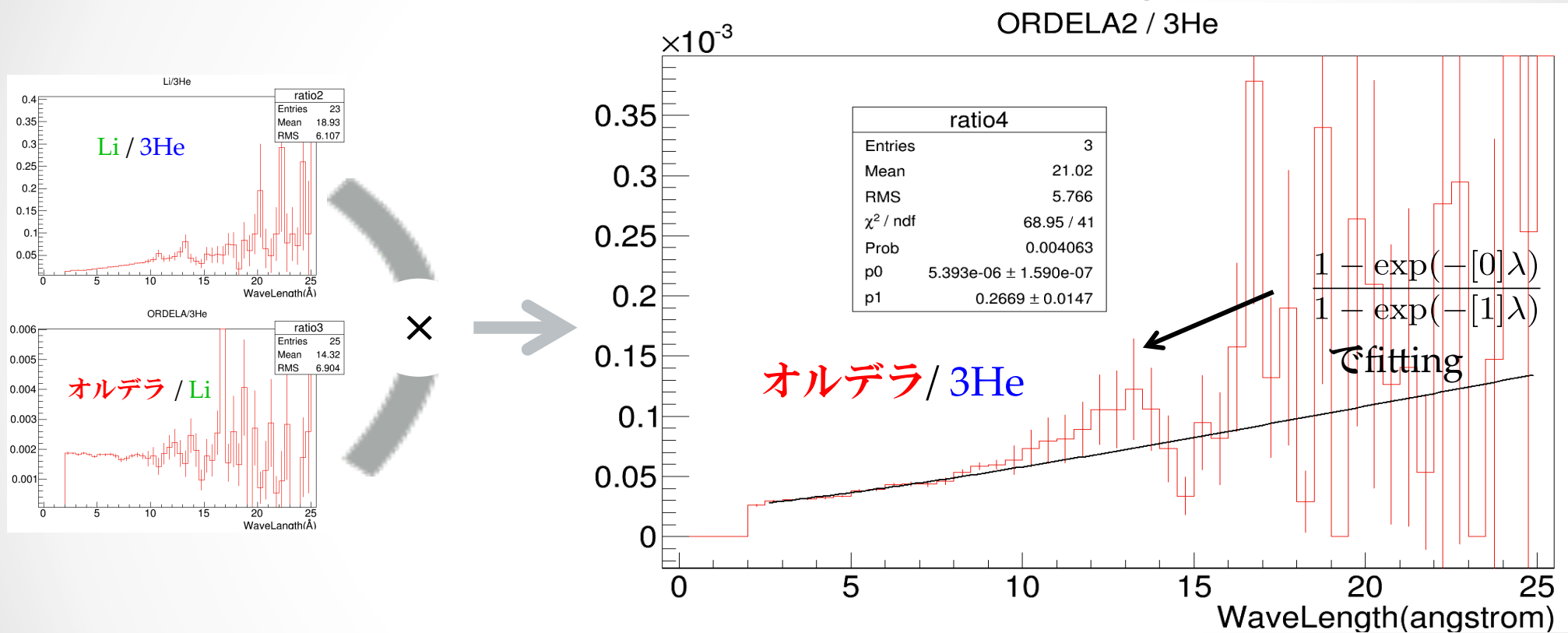
波長とともに増加



波長に対して一定

フィッティングと検出効率

前ページのをヒストをかけ合わせて、fittingした。



2.5-25 Åの範囲でfittingすると、 $\chi^2/\text{ndf} = 69/42$ となった。
300 K中性子(1.798 Å)に対するオルデラ検出器の検出効率は

$$R = (9.7 \pm 0.3) \times 10^{-6} \quad \text{となった}$$