

# 宇宙線空気シャワー観測

最高エネルギー宇宙線グループ

Member:

大林顕治・関川拓斗・橋爪康希・花岡大河・加島駿一

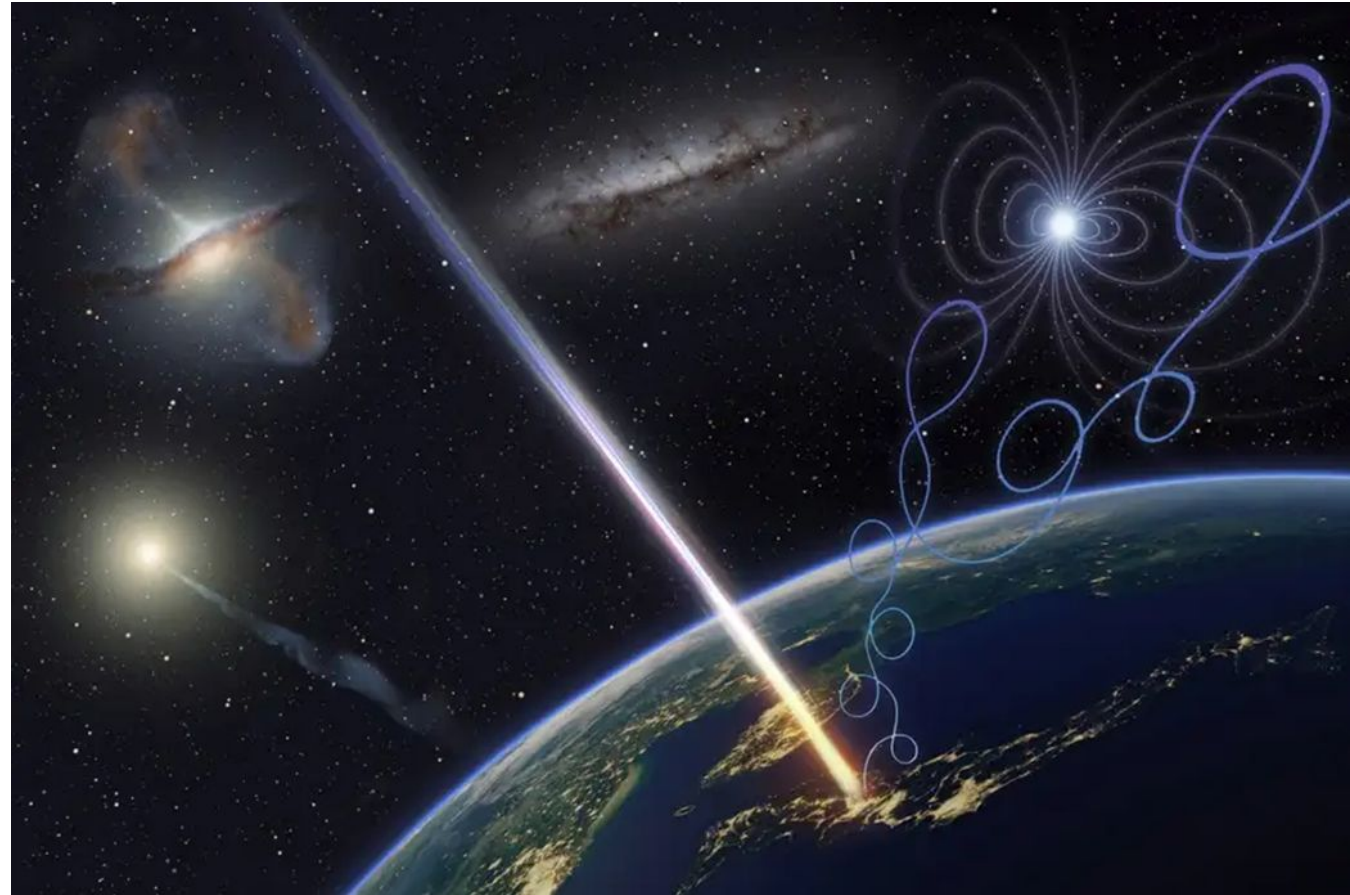
1. 宇宙線空気シャワーとは何か
2. 最高エネルギー宇宙線を発見したい
3. 宇宙線の検出方法
4. 宇宙線の到来方向の推定
5. どのくらいの頻度で宇宙線はやってくるのか
6. 宇宙線のエネルギー分布
7. まとめ

# 宇宙線とは？

3 / 総数

宇宙空間を飛び交う  
高エネルギーの粒子

主成分 原子核  
他に ガンマ線、電子、  
ニュートリノ

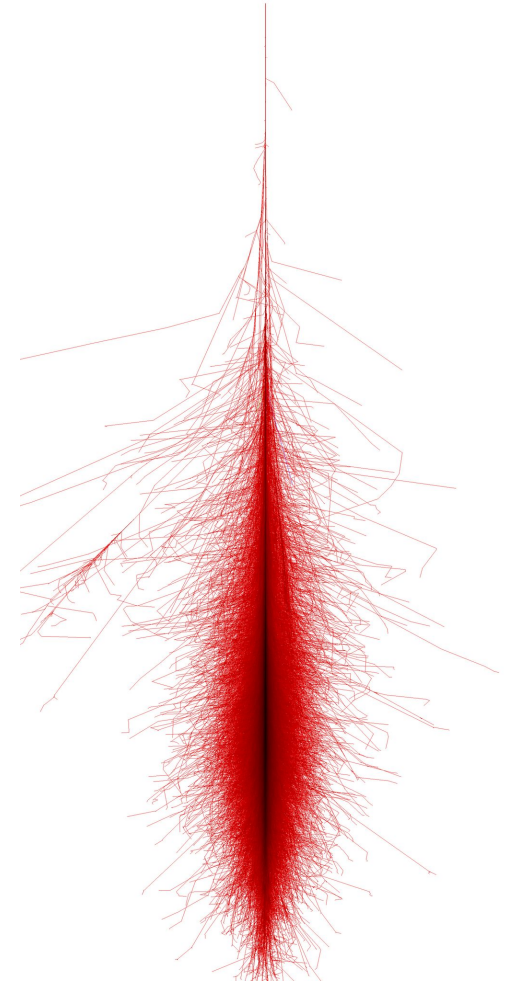


<https://www.newscientist.com/article/2404603-a-mysterious-incredibly-energetic-cosmic-ray-has-smashed-into-earth/>

# 空気シャワー現象とは？

4 / 総数

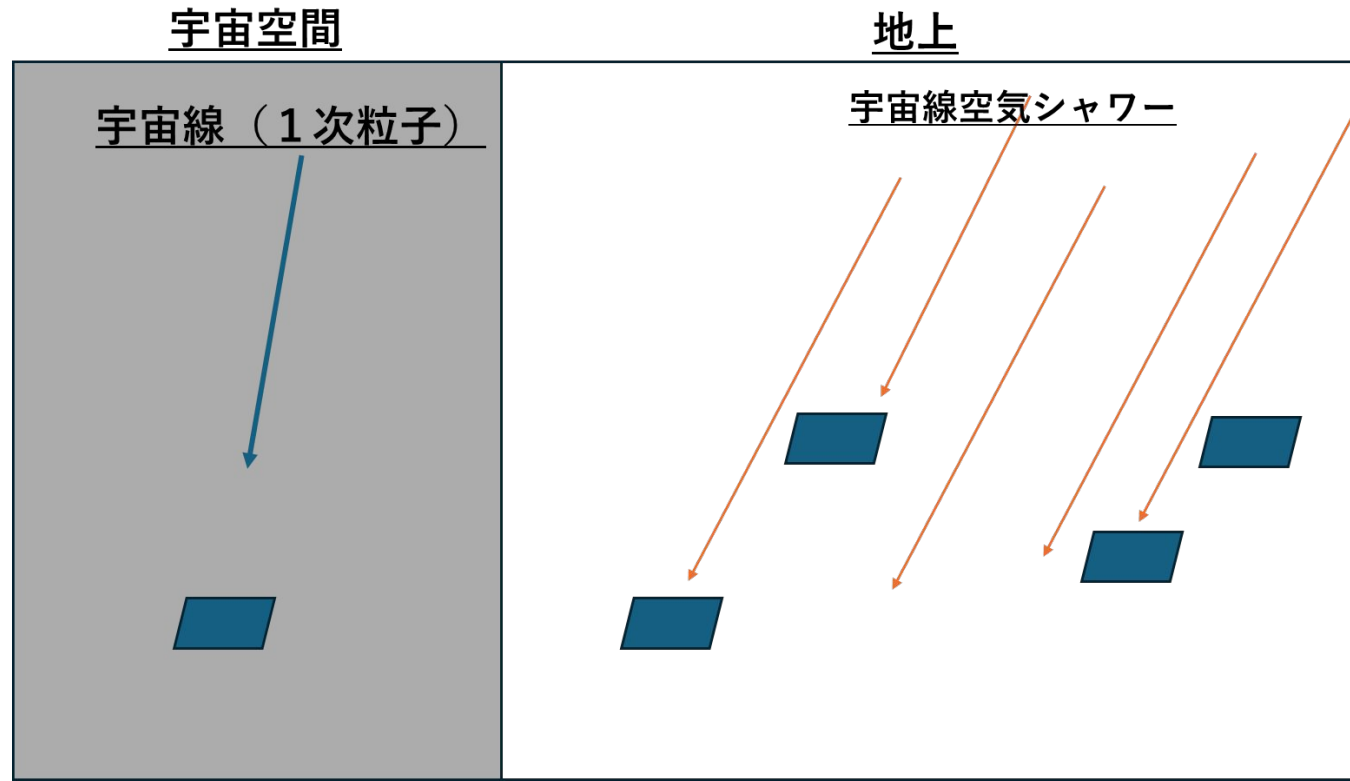
高エネルギーの宇宙線が  
地球の大気原子核と反応し  
結果として地上に大量の粒子群が  
シャワーのように降り注ぐ現象



# なんで空気シャワーに着目するか

5 / 総数

超高エネルギー宇宙線は頻度が低い(100km<sup>2</sup>に1年の間に1個くらい)  
地上での検出では空気シャワーの広がり検出面積になり、検出頻度が  
宇宙空間と比べて多くなります。また、3台の検出器の検出結果から到来方向や  
エネルギーの推定を行うことができる。



目的：  
最高エネルギー宇宙線を発見しよう

1. 宇宙線空気シャワーの検出
2. 時間のキャリブレーション
3. 検出データから到来方向の計算

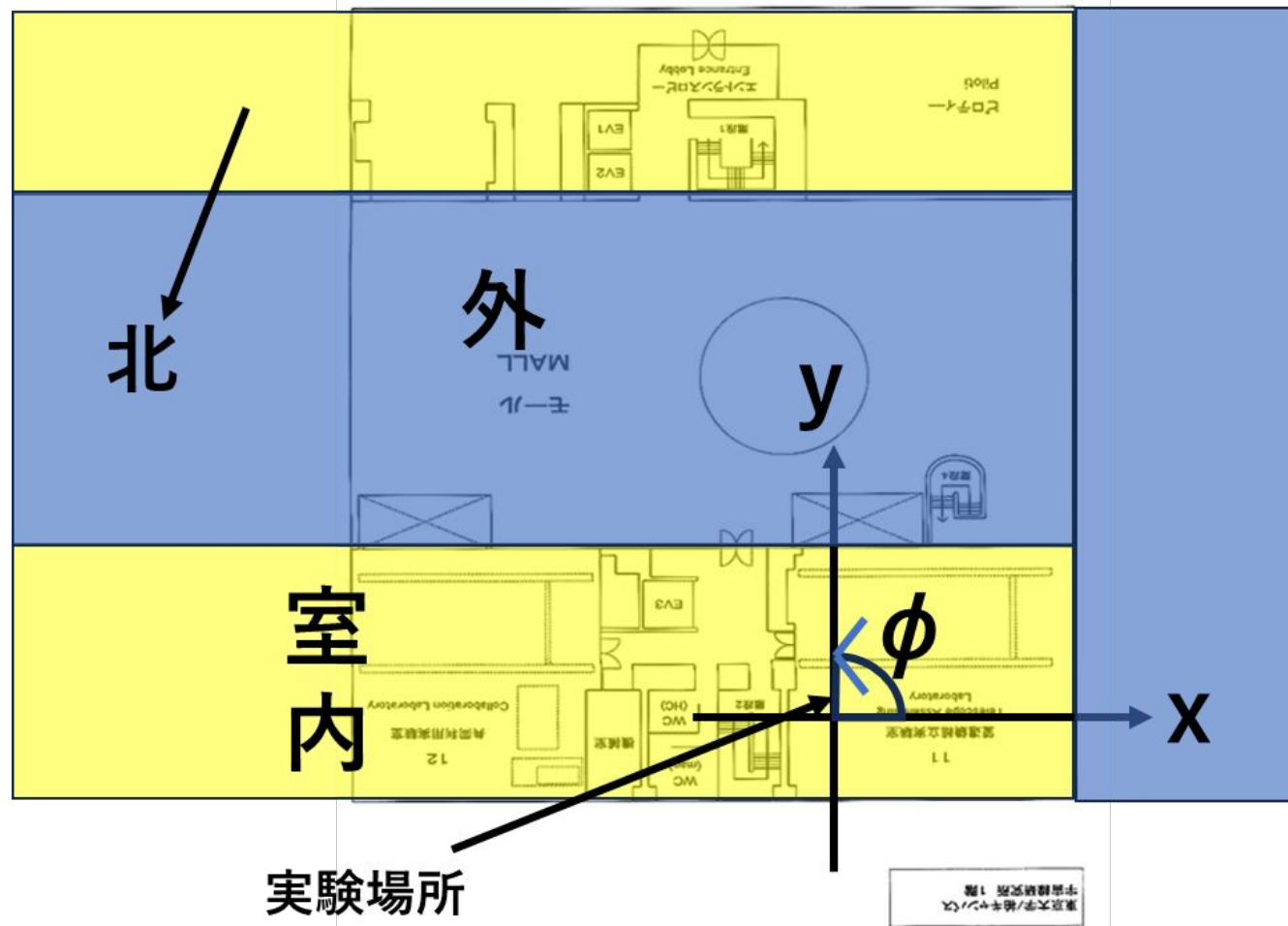
# 実験場所

7 / 総数



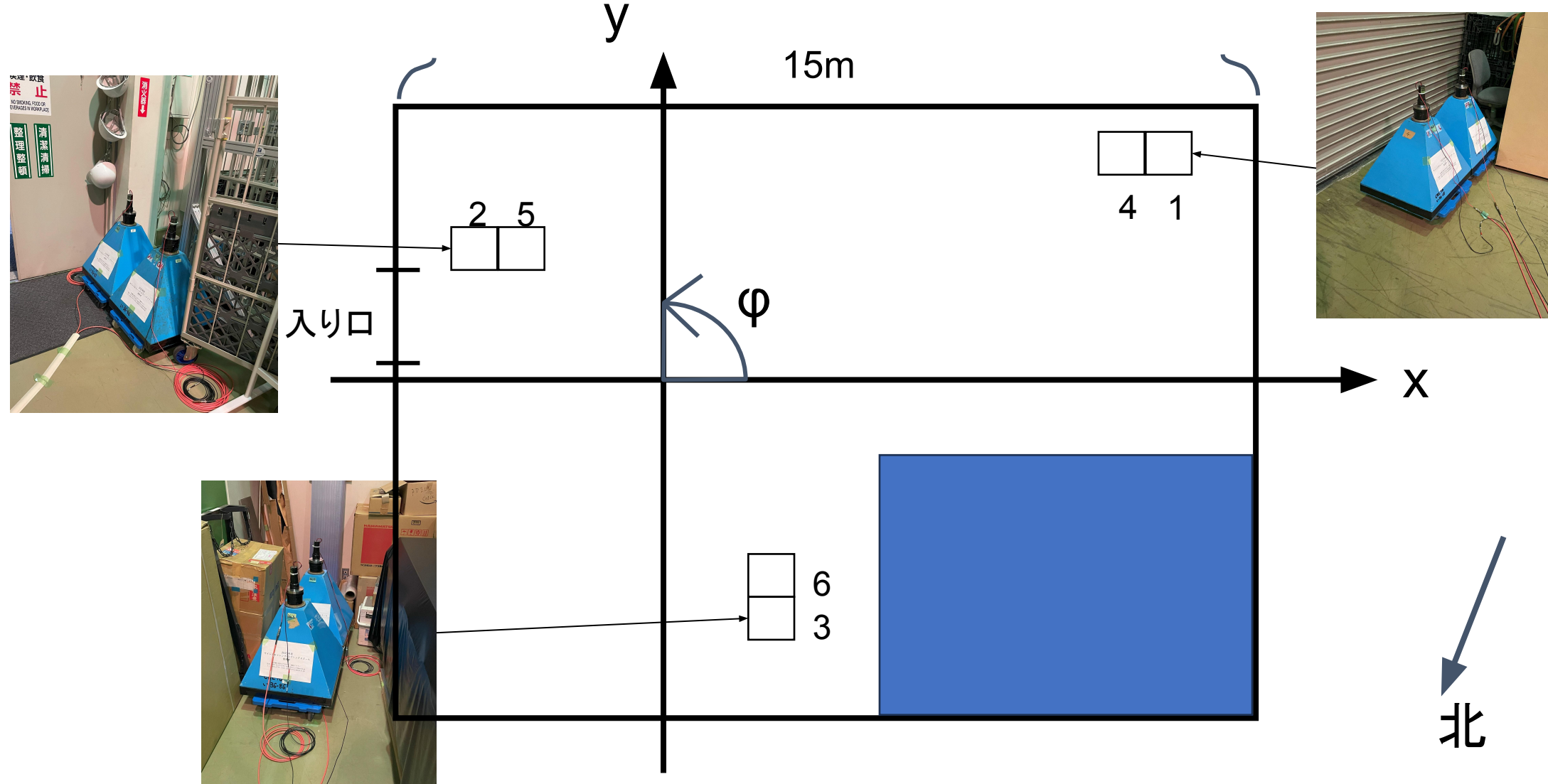
宇宙線研究所

北緯  $35^{\circ}54'9''$   
東経  $139^{\circ}56'19''$



[https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/prwps/access/image/kash\\_bl\\_sub02.gif](https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/prwps/access/image/kash_bl_sub02.gif)

# 実験室のようす

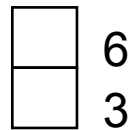
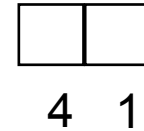
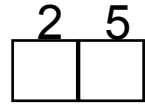
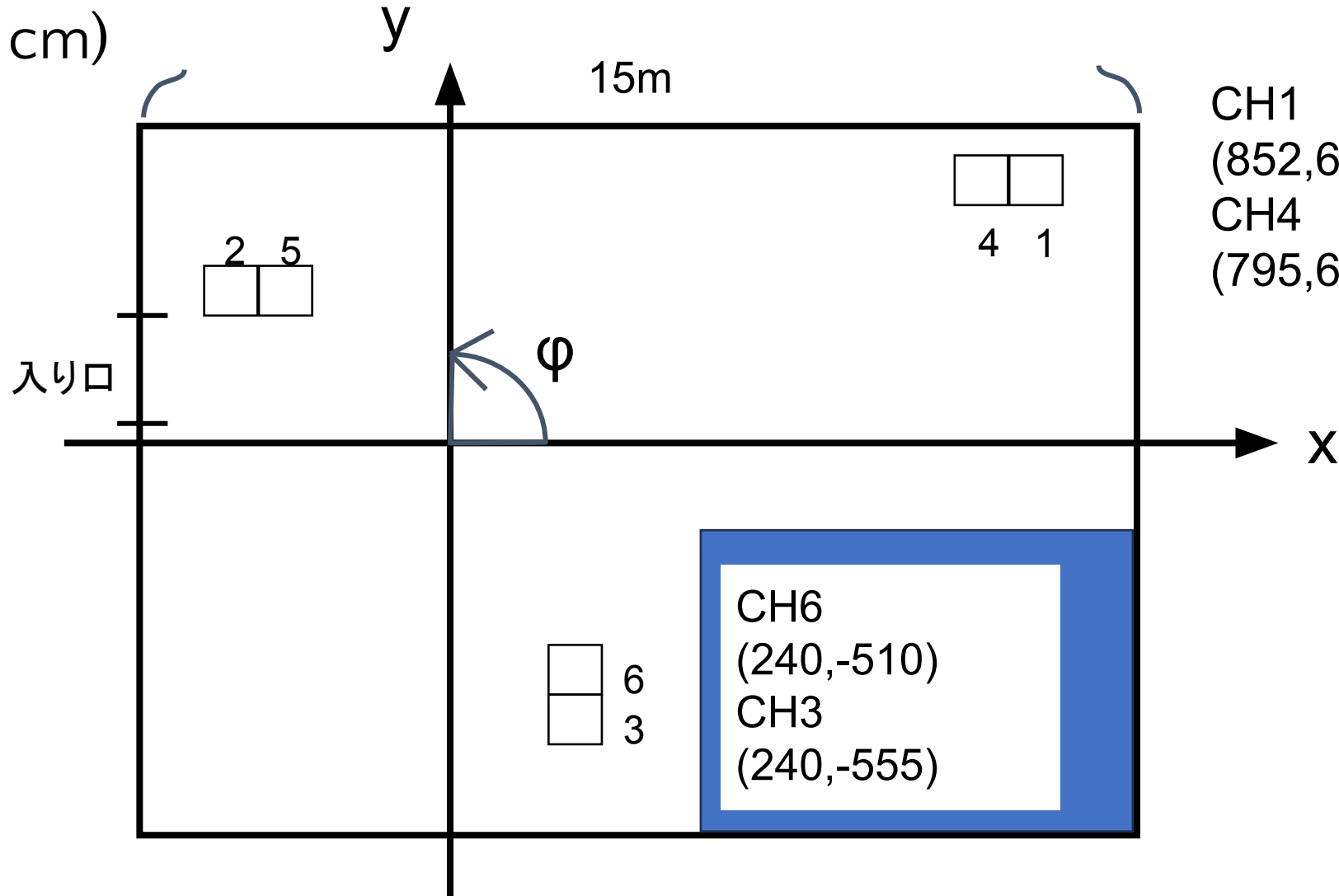


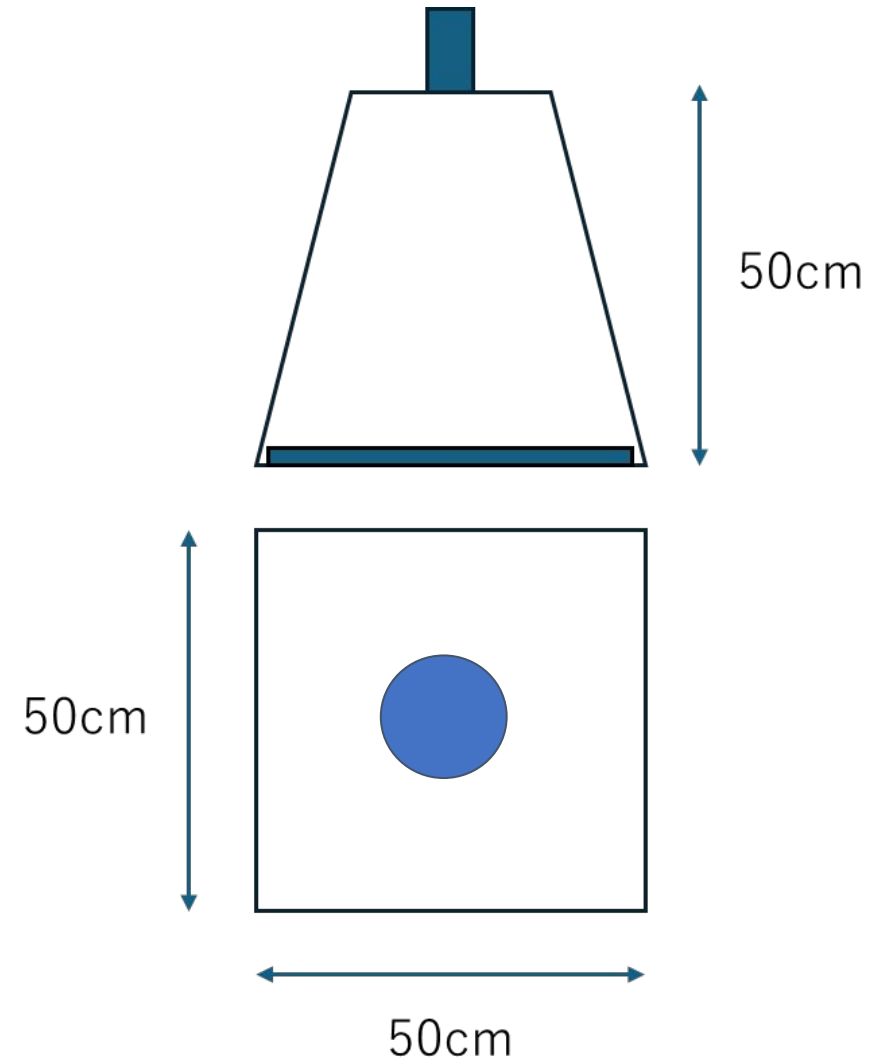


# 装置の配置

(座標の単位は cm)

CH2  
(-295,245)  
CH5  
(-235,245)





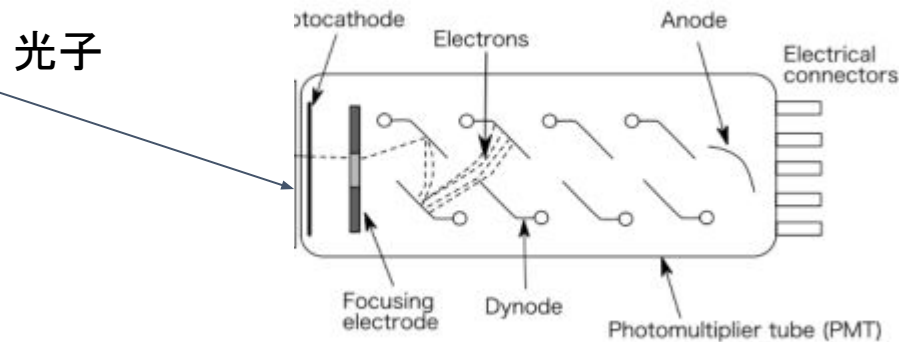


プラスチックシンチレーター

荷電粒子が電離によって失ったエネルギーに比例して蛍光を発光

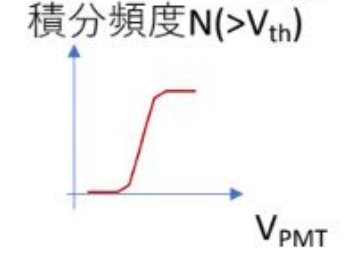
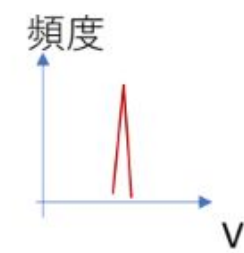
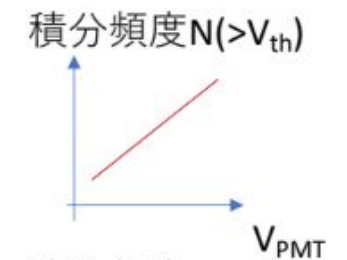
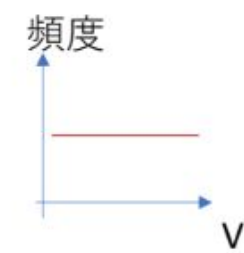
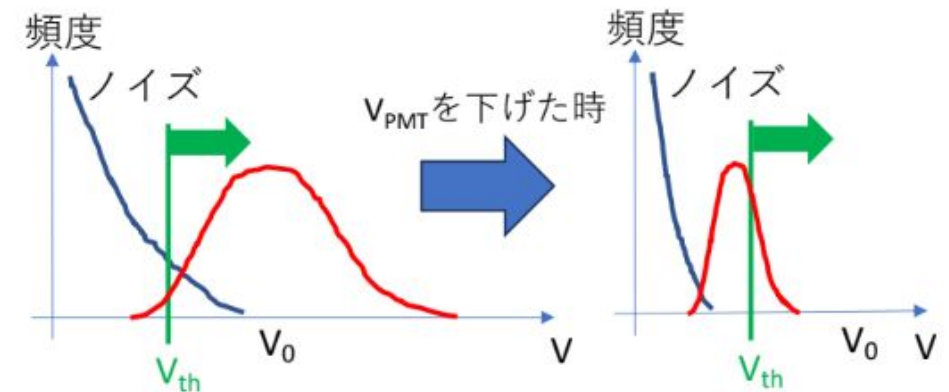
光電子増倍管 (PMT)

光子を光電効果で光電子に変換し、複数の電極間に高電圧を加え加速・増幅  
1光子当たり10の6乗程度の電子に増幅し、電気信号として出力



オシロスコープの波形にはバックグラウンドが乗っているため、宇宙線を確実に測定することができるPMTの印加電圧を決定する。

その方法としてプラトー曲線を見ながら適切なPMTの印加電圧を決定した。

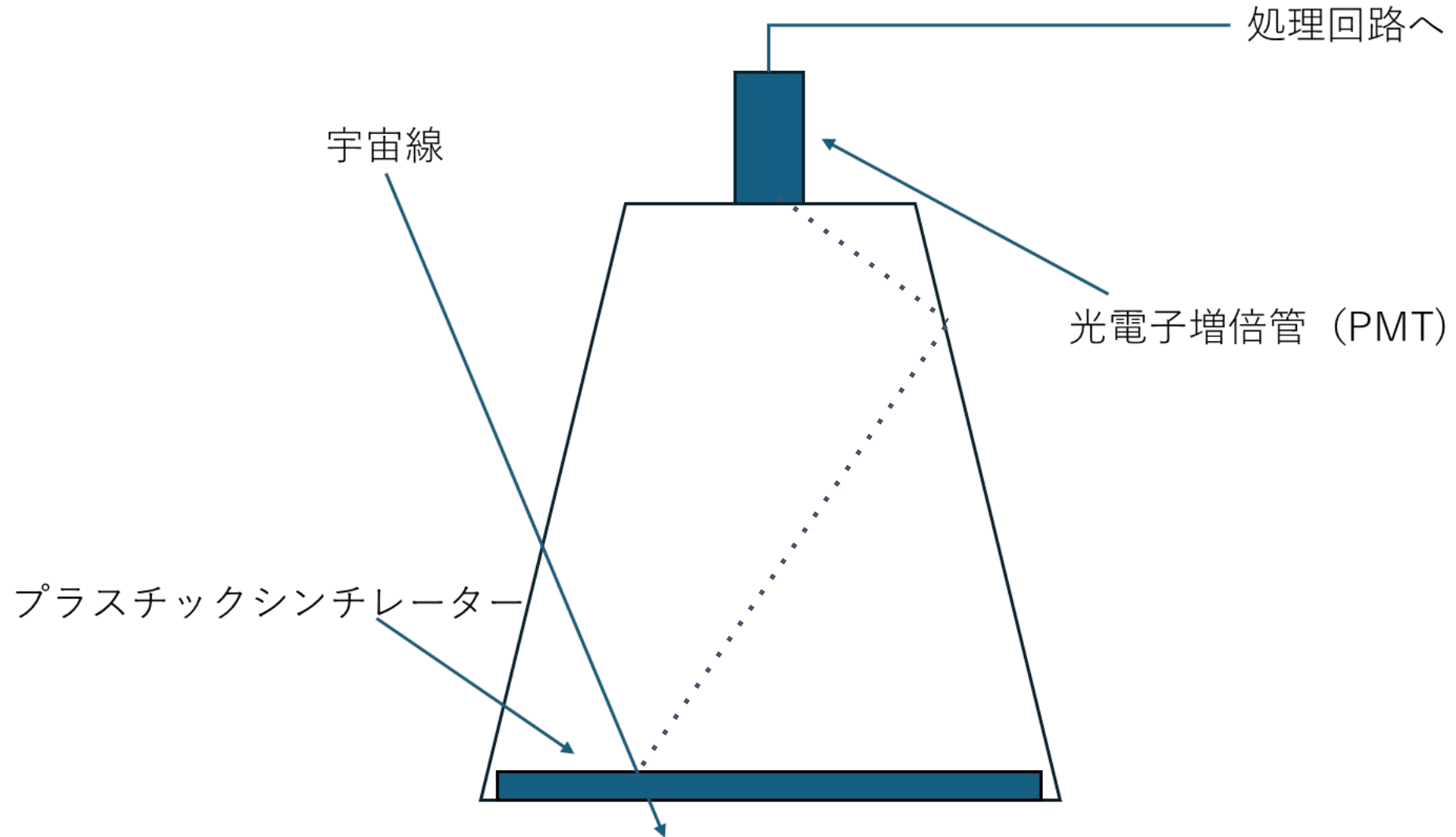


ある $V_{PMT}$ での信号電圧分布

$V_{PMT}$ 変化に対する積分頻度

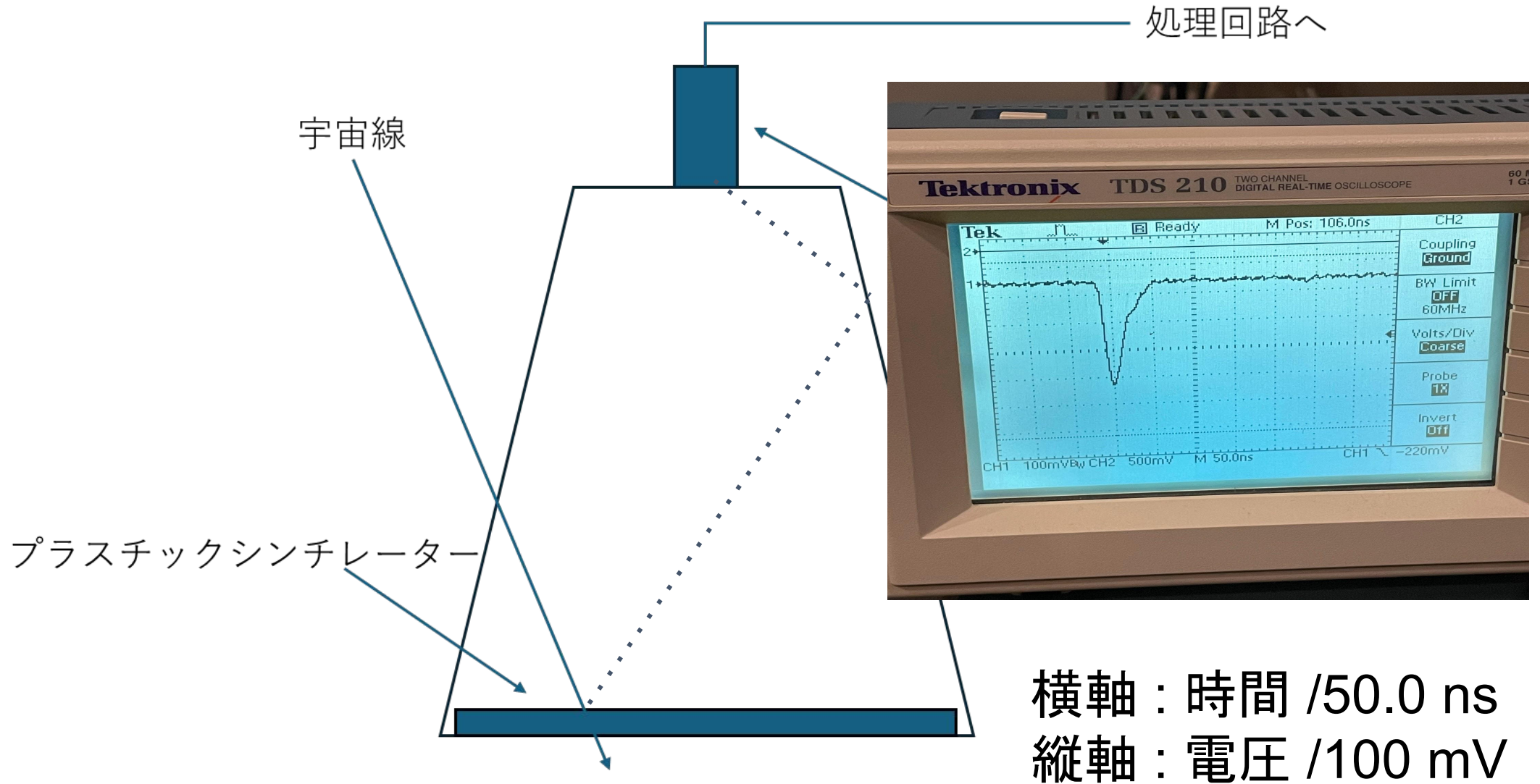
# シンチレーション検出器の検出原理

13 / 総数

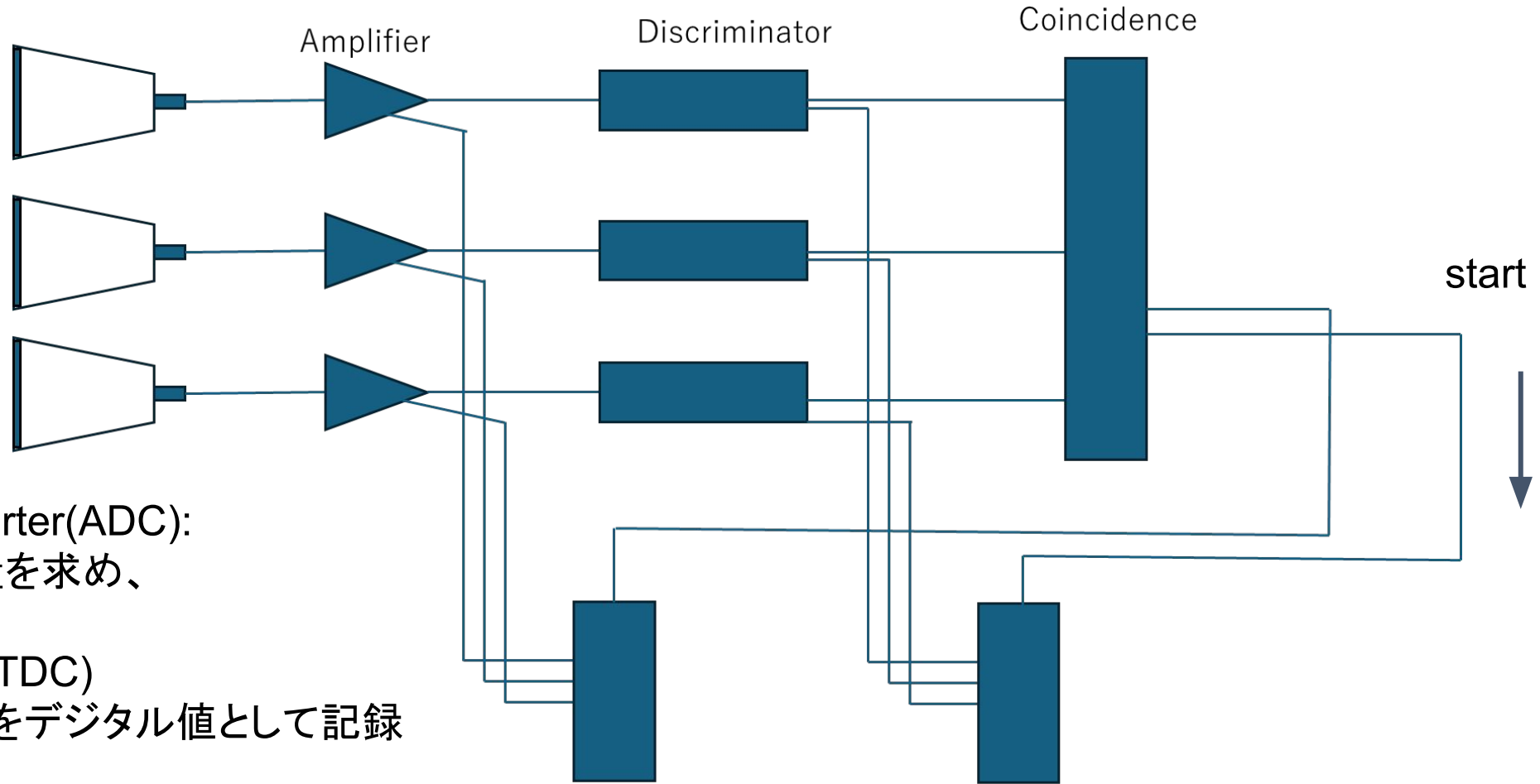


# シンチレーション検出器の検出原理

14 / 総数



## 処理回路



Analog to Digital Converter(ADC):  
電流値を積分して電荷量を求め、  
デジタル値に変換

Time Digital Converter(TDC)  
start,stop信号の時間差をデジタル値として記録

Coincidence:  
各装置から同時に信号が来たら  
空気シャワーの可能性大！！

Analog to Digital Converter

計測期間:

2月26日19時46分27秒 ~

3月6日12時1分8秒

→計 8.6日間(206時間)の計測

検出した空気シャワー候補数:

564個

トリガー(後述)のあったイベントの

UNIX Time、ADCとTDCの4096段階デジタルデータ



イベントは、前のイベントに関係なく、  
ランダムに到来すると仮定する  
→イベントの時間差 $\Delta t$ は、指数分布に従う

$$P(\Delta t)\Delta t' = \left(1 - \int_0^{\Delta t} P(\Delta t)d\Delta t\right) \times (q \times \Delta t')$$

両辺を $t$ で微分すると、 →  $P(\Delta t) = qe^{-q\Delta t}$

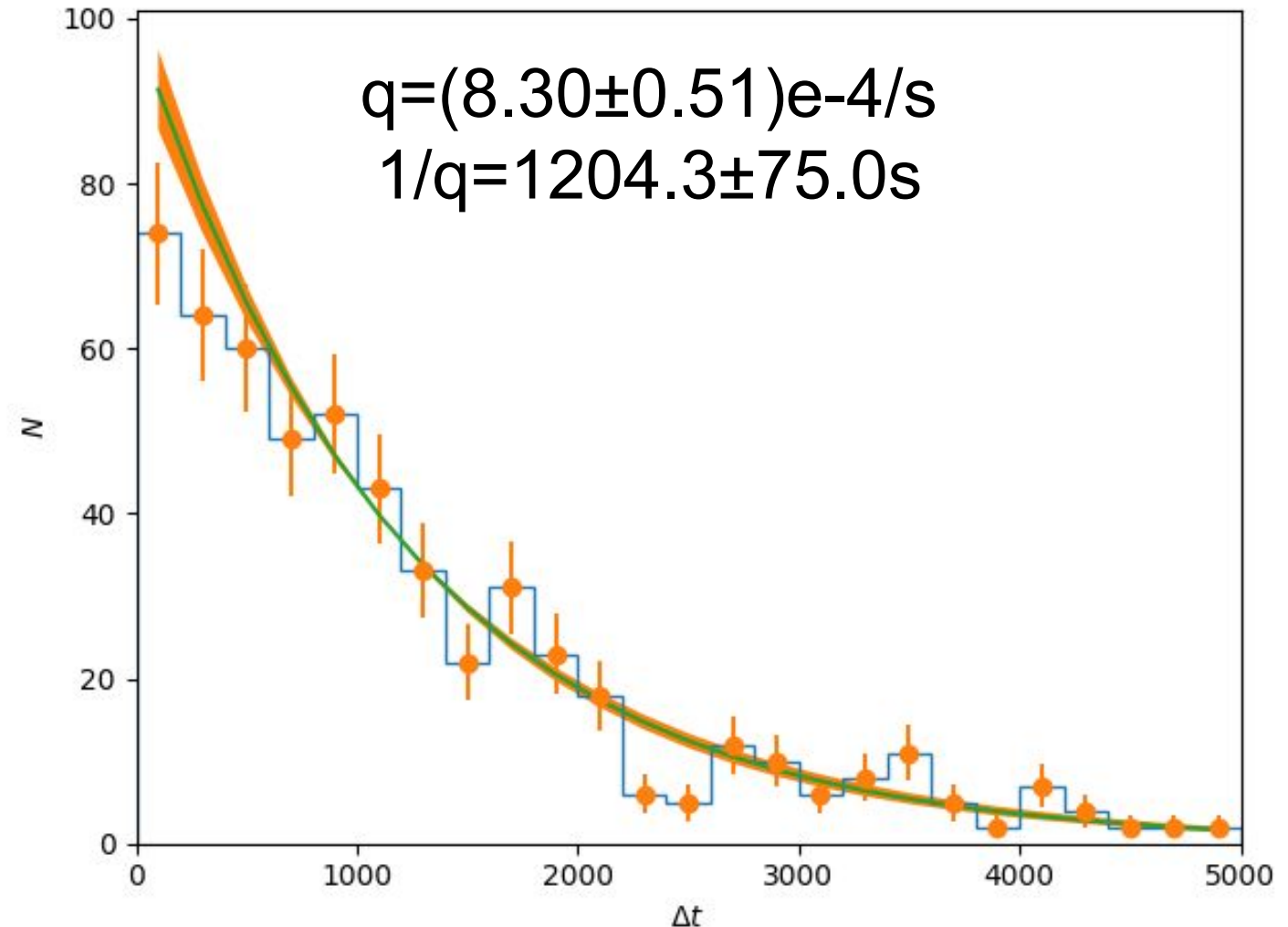
$\Delta t$ :宇宙線の到来した時間から次に観測した時間の差,  
 $P(\Delta t)$ :時刻( $t \sim t + \Delta t$ )間に到来する確率密度,  
 $P(\Delta t)\Delta t'$ : $t \sim t + \Delta t$ の間に到来する確率, $q$ :イベントが起こる平均数/s

$\Delta t$ の分布を  
指数分布で  
フィッティングした

右図.横軸: $\Delta t$ (時間差),  
縦軸:N(到来数)

$\Delta t$ は指数分布に従い、  
イベントは、  
ランダムに到来することが  
分かった

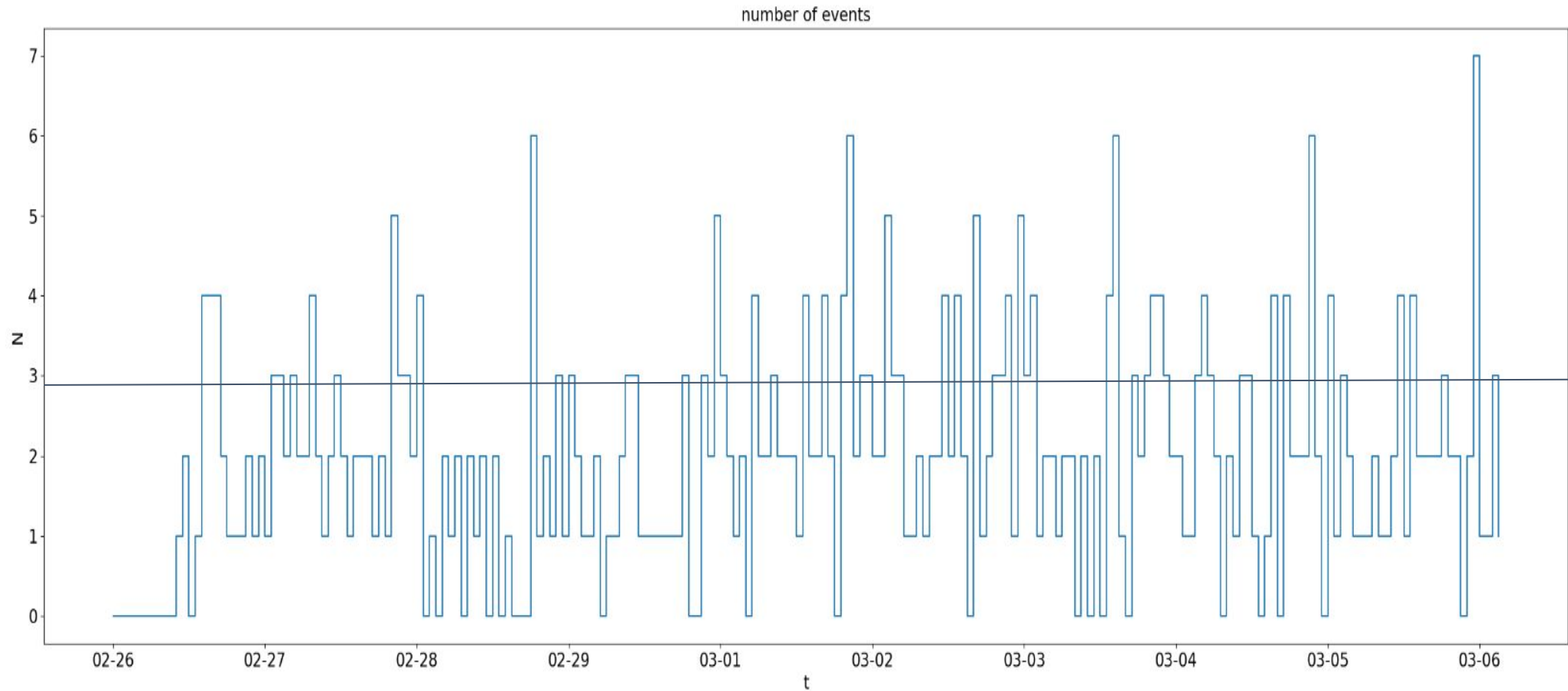
$$P(t) = (8.30 \pm 0.51) e^{-4} * np.exp(-(8.30 \pm 0.51) e^{-4} * t)$$



# 10日間の到来頻度分布

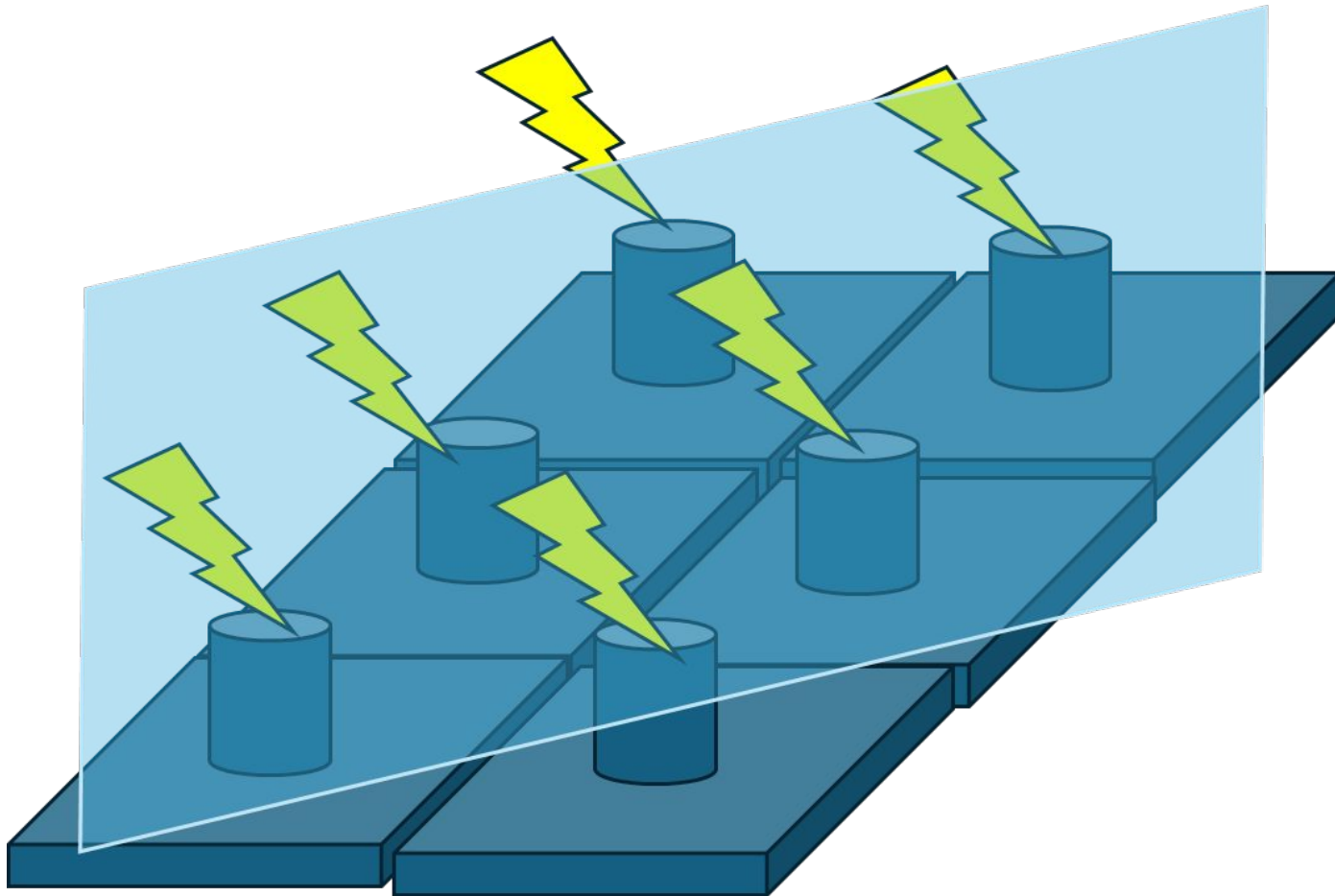
19 / 総数

縦軸：1時間ごとのカウント



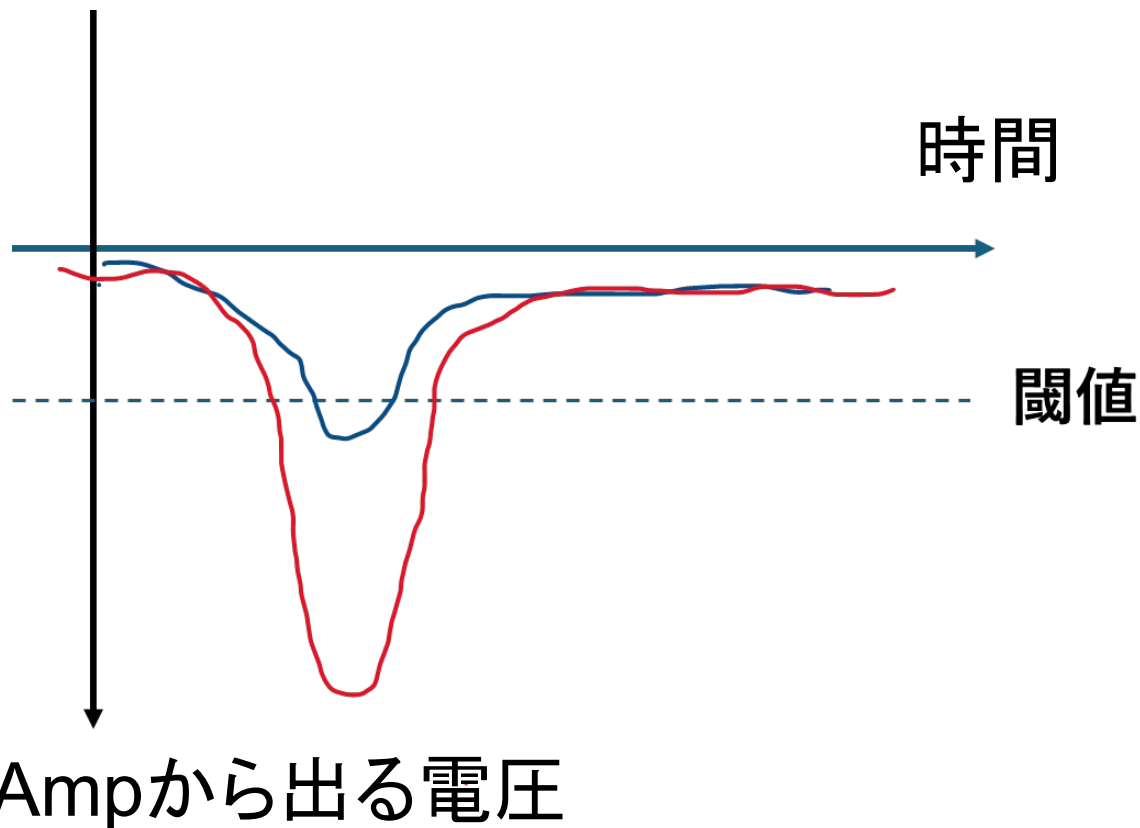
横軸：日付 (1時間ごと)

問題点：TDC値がシンチレータからの波高に依存してしまう



6つの検出器を同じところに集め、空気シャワーが同時に検出されるようにキャリブレーションを実施

式によって同時を決定！！



(Discriminatorの性質上、閾値を超えない信号は0として処理)

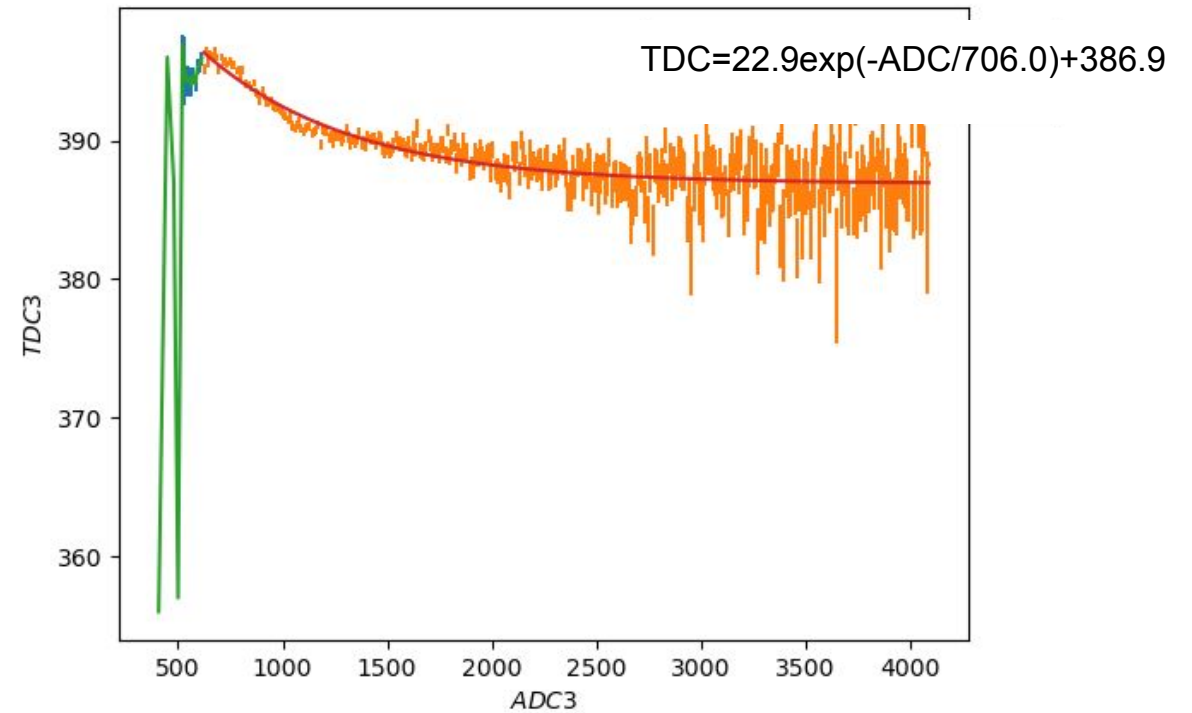
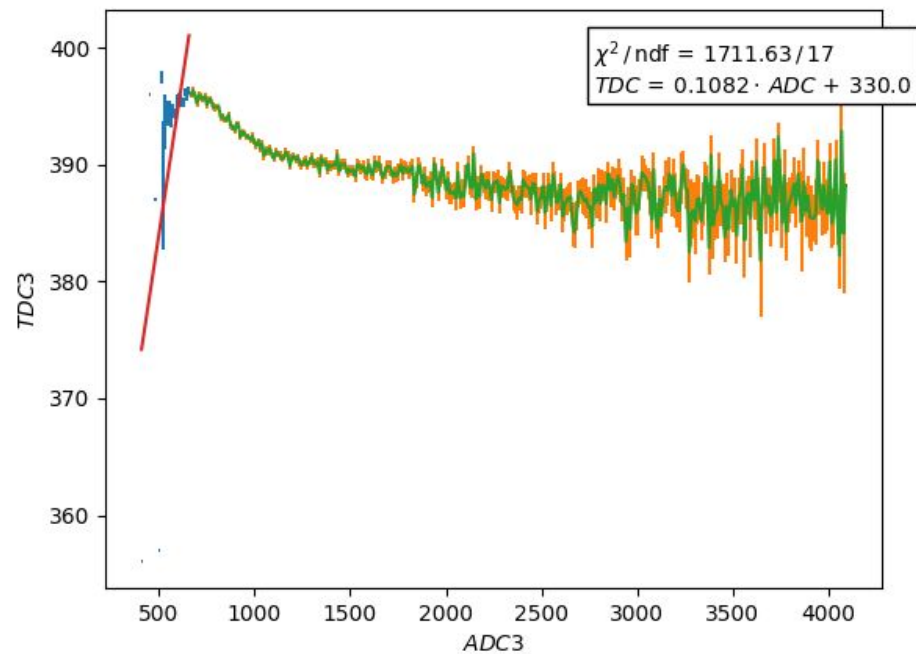
小さい信号は立ち上がりが遅れ、大きい信号は立ち上がりが速くなり、実際に信号が来た時間とずれてしまう。

→ **ADCに依存したTDCを出力してしまっている**

データのTDC値とADC値の関係を  
なんらかの関数でフィッティングし、補正値をADCの関数と  
する。

装置を密集させて、同時に粒子が入射したときに同じTDC値を得られるように補正を行う

補正されたTDC値 = 生のTDC値 - 補正値



ピークの左側を線形で、右側を指数関数でFitした。

$$f(x) = \begin{cases} 0.1082x + 330 & (x < 650) \\ 22.9 \exp\left(-\frac{x}{706.0}\right) + 386.9 & (x \geq 650) \end{cases}$$

ADC-TDC間のキャリブレーションにて精度を高めた状態で、  
空気シャワー候補の解析を行い、

イベント計564事象のうち

**434事象**

が空気シャワー現象であると決定できた。

(次以降のページで説明する気シャワー面の法線ベクトルの計算可能であった  
イベントの数)



空気シャワー一面を真空中の光速で進む平面と仮定

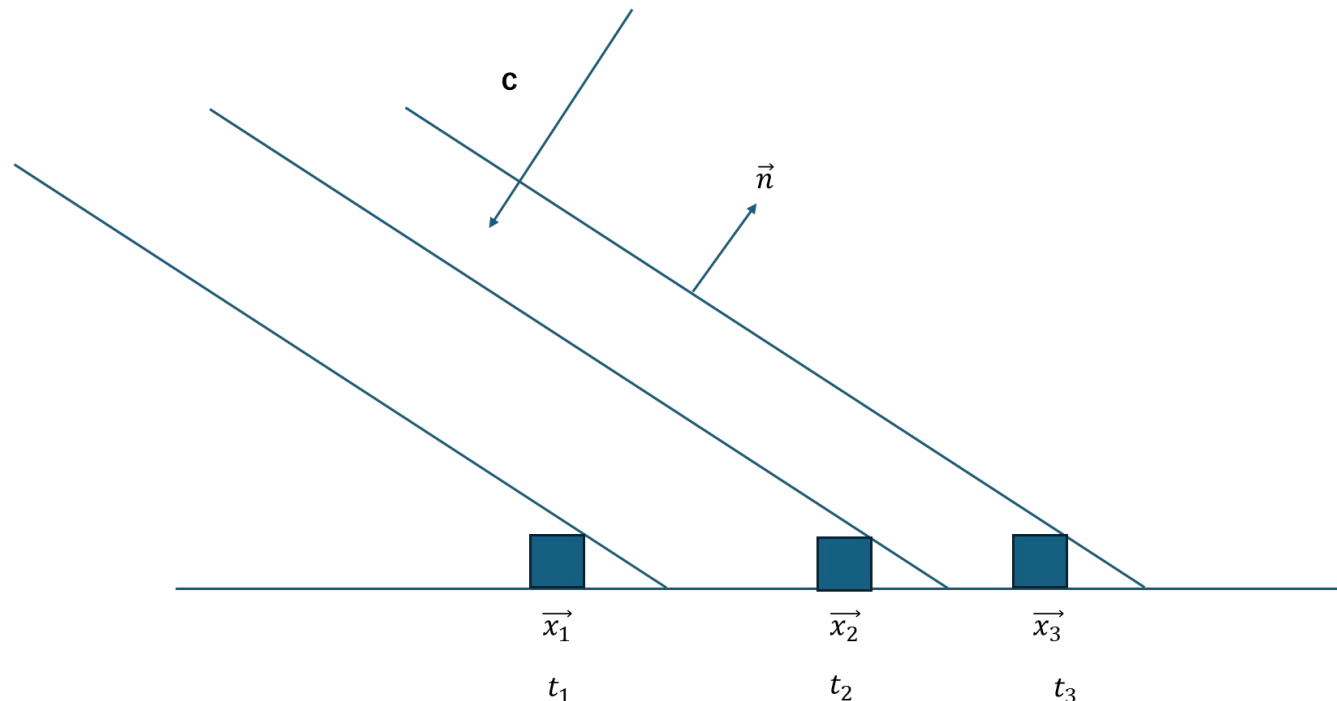
法線ベクトル(到来方向)は

3つの検出器の座標、検出時間から計算可能(差分を $x_{12}$ 等で表す)

$$\begin{cases} n_x = c \frac{y_{13}(t_1 - t_2) - y_{12}(t_1 - t_3)}{x_{12}y_{13} - x_{13}y_{12}} \\ n_y = c \frac{x_{12}(t_1 - t_3) - x_{13}(t_1 - t_2)}{x_{12}y_{13} - x_{13}y_{12}} \end{cases}$$

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{n_x^2 + n_y^2}$$

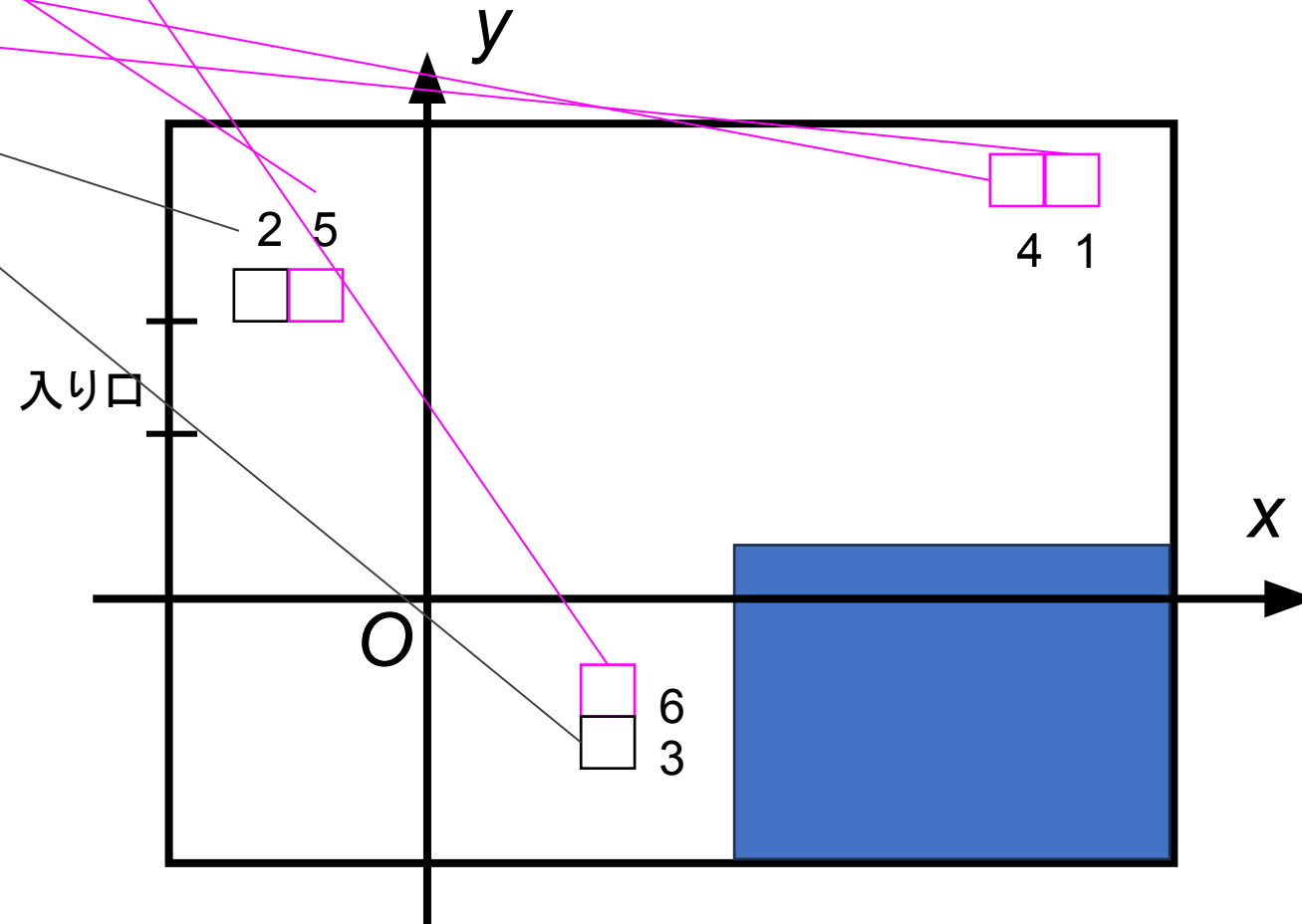
$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{n_y}{n_x} \right)$$



# 解析—空気シャワー—到来方向の決定

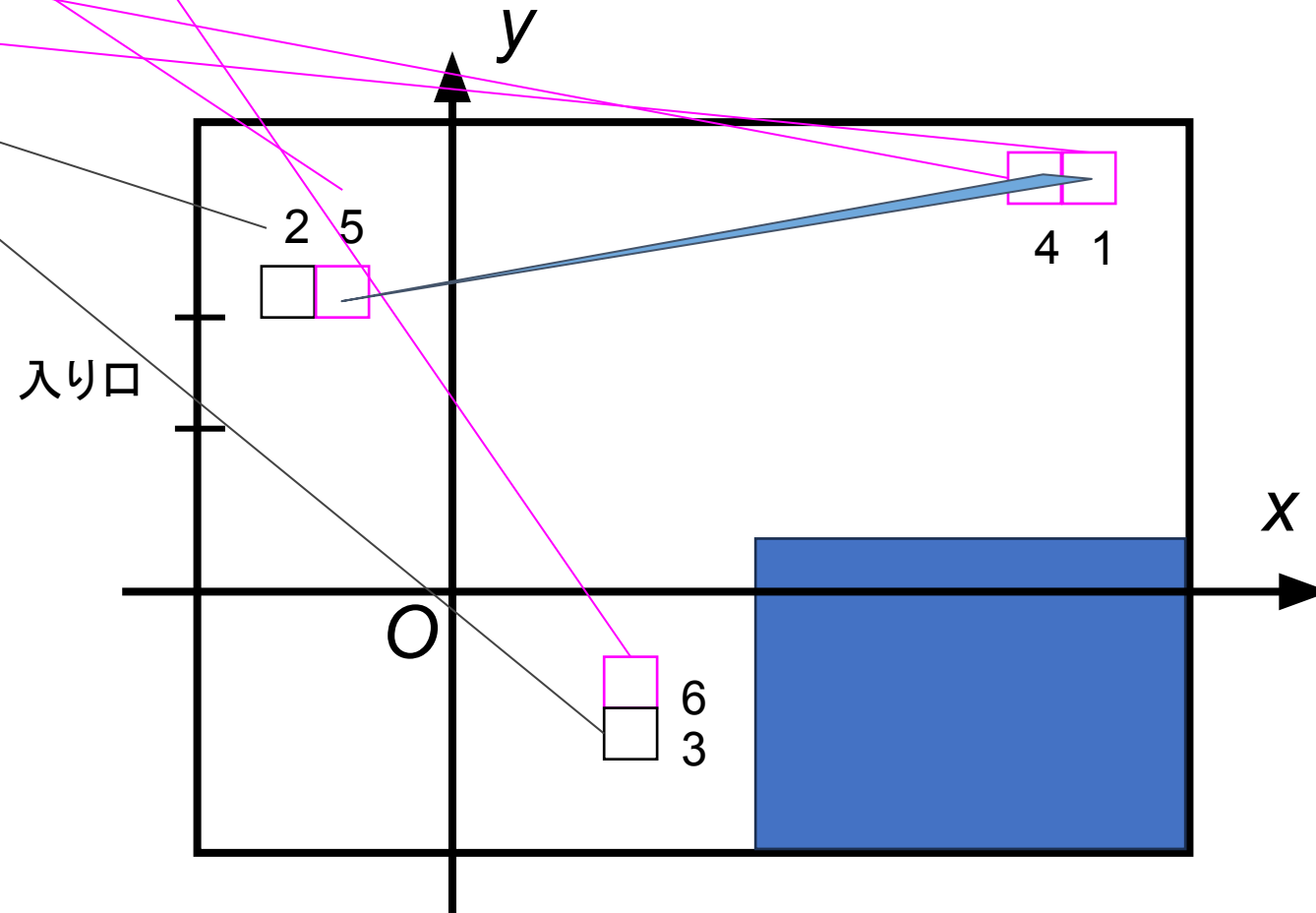
例

TDC = (412, 4095, 4095, 349, 371, 273)



TDC = (412, 4095, 4095, 349, 371, 273)

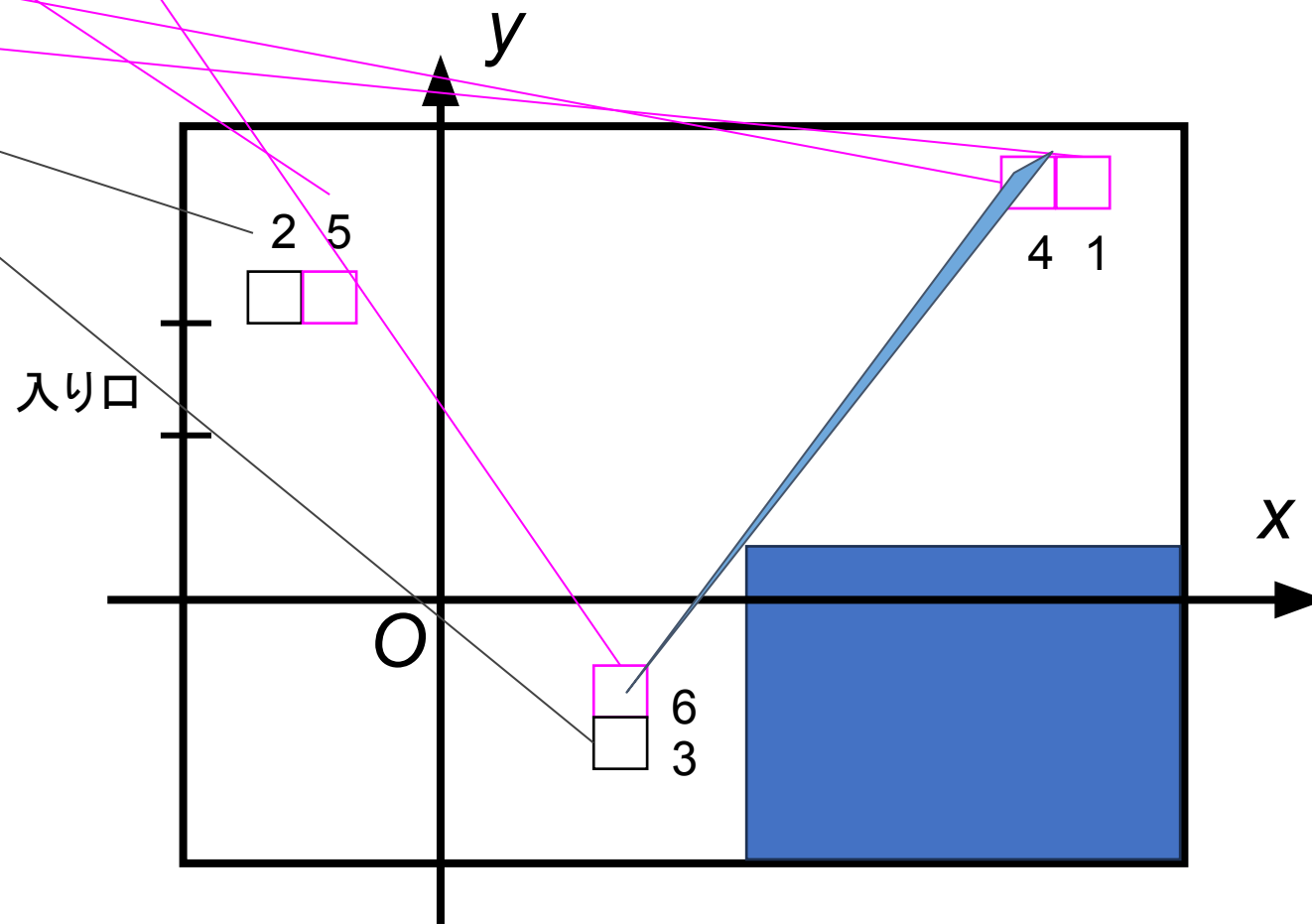
(4)  
(3) = 4通りの個数の三角形を取れるが...



# 解析—空気シャワー—到来方向の決定

$$\text{TDC} = (412, 4095, 4095, 349, 371, 273)$$

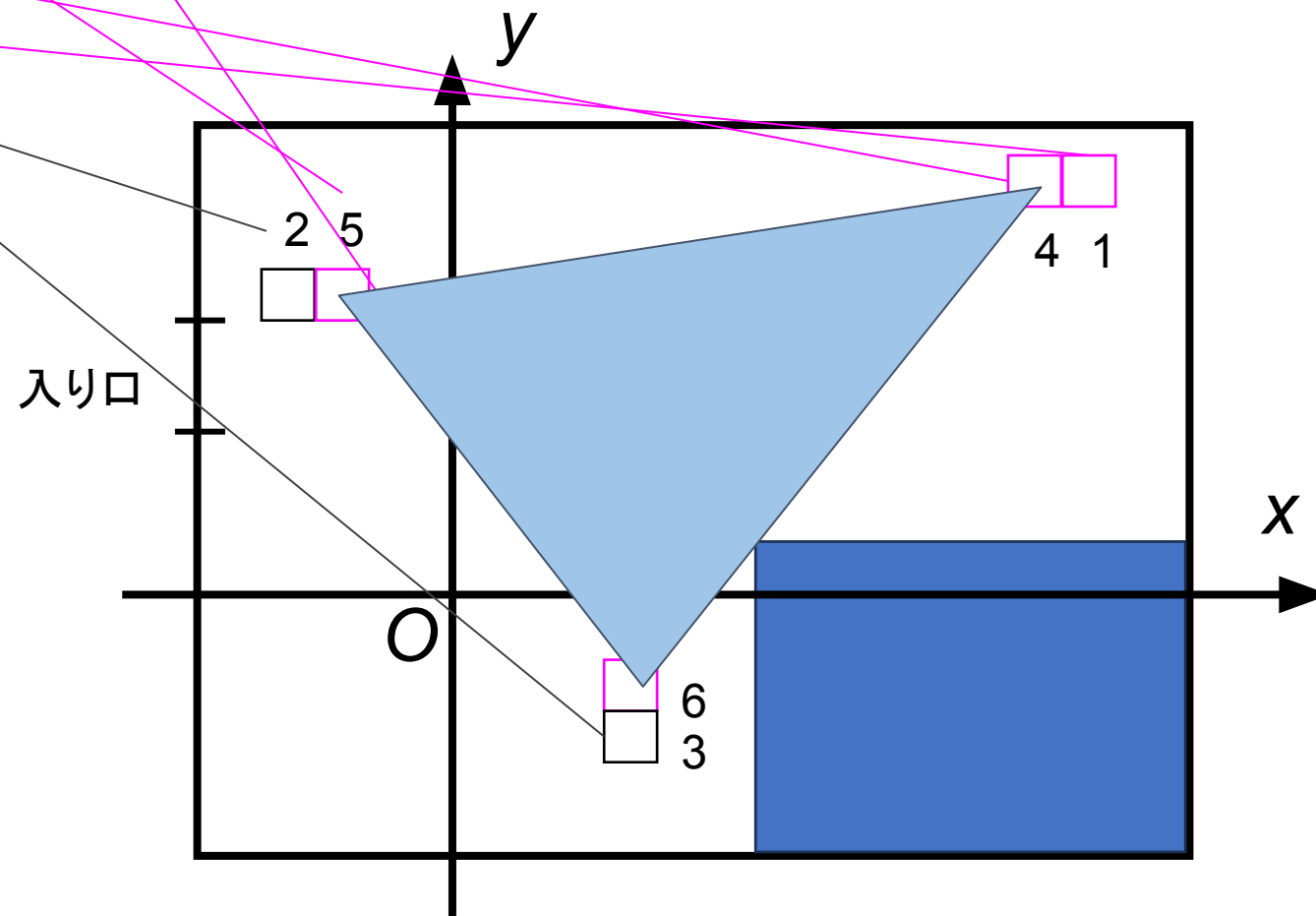
$\binom{4}{3} = 4$ 通りの個数の三角形を取れるが...



# 解析—空気シャワー—到来方向の決定

$$\text{TDC} = (412, 4095, 4095, 349, 371, 273)$$

$\binom{4}{3} = 4$ 通りの個数の三角形を取れるが...

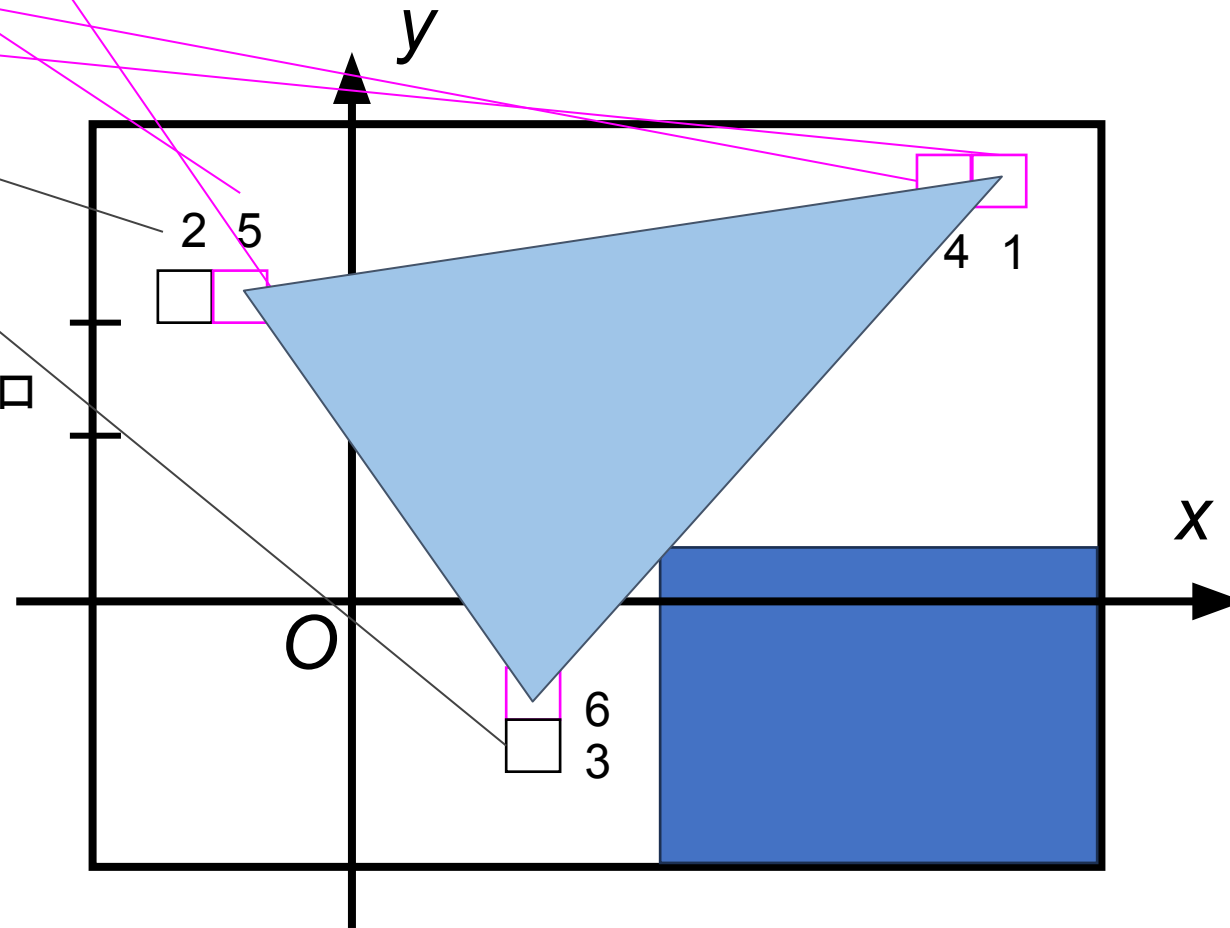


TDC = (412, 4095, 4095, 349, 371, 273)

$\binom{4}{3} = 4$ 通りの個数の三角形を取れるが...

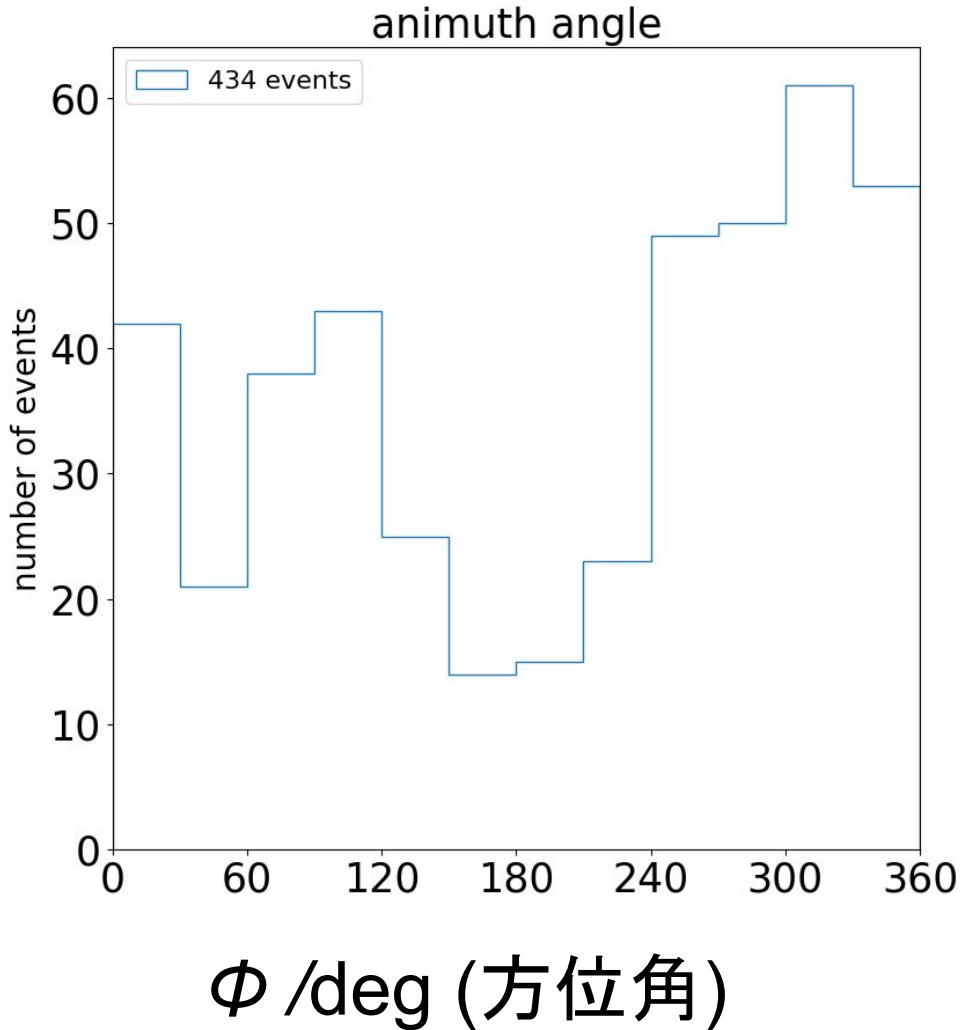
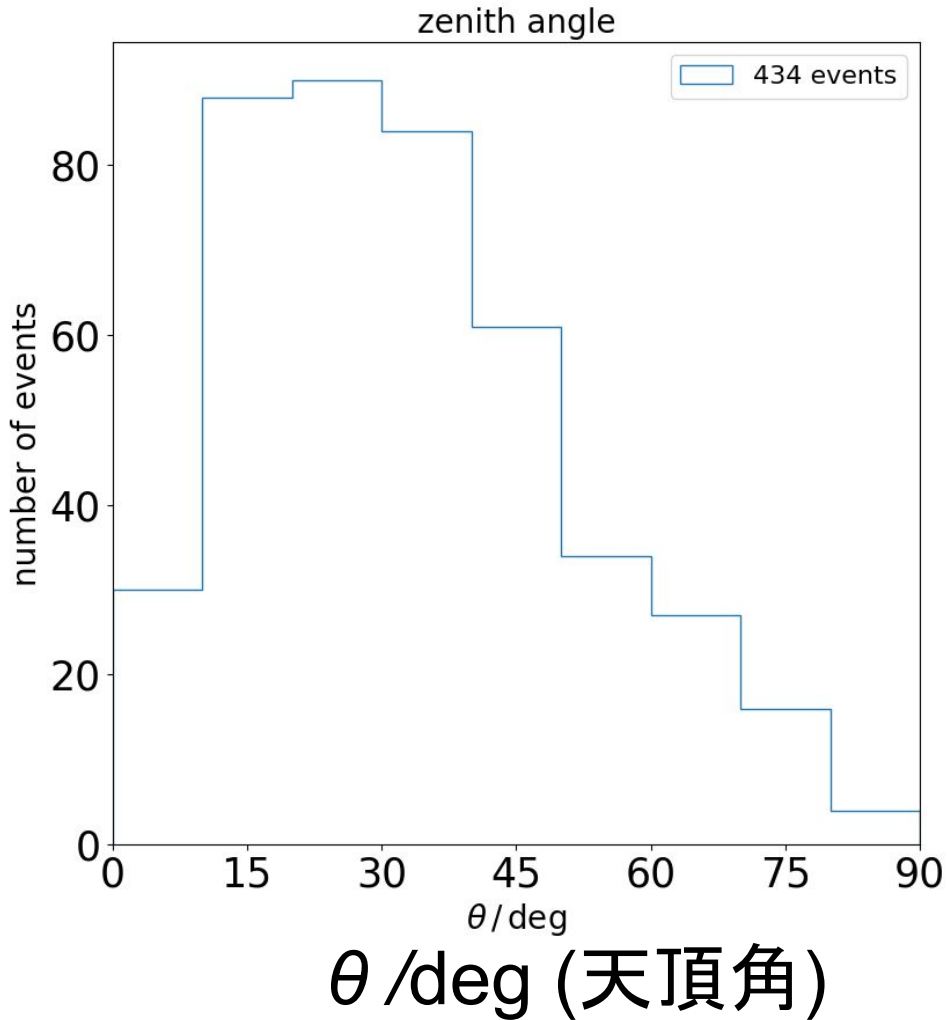
より良い方向の決定精度には  
デカイ三角形を作るほうが良い

入り口



1. 6CHの検出器のうち、少なくとも3CHの同時検出  
↑空気シャワーでなくとも偶然同時に検出する可能性アリ
1. 法線ベクトルの計算結果が  $|n| > 1$  になるような非物理的なTDC値の組は到来方向の結果から除外する  
→偶然検出事象の排除に貢献

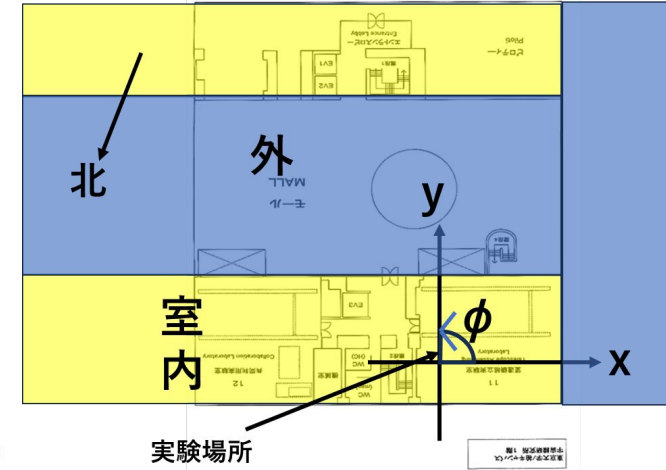
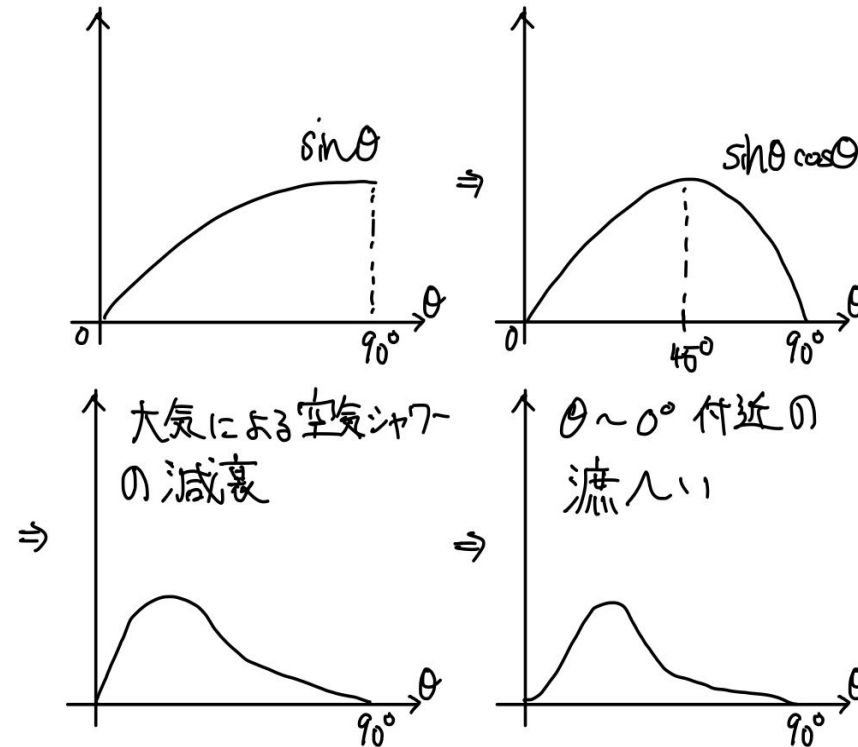
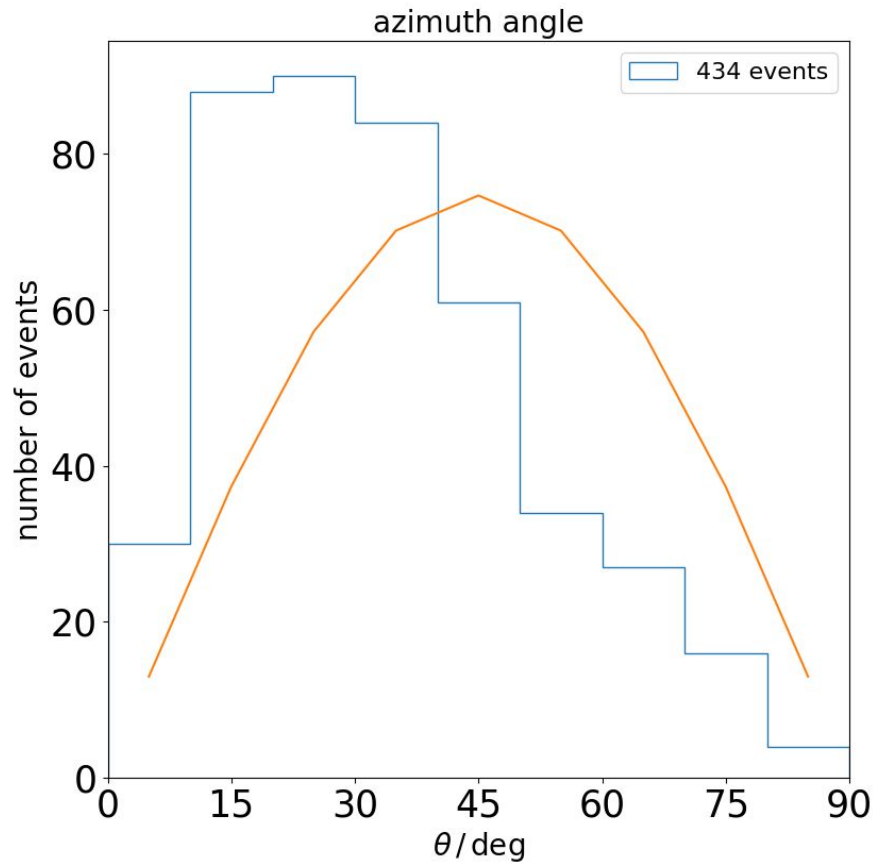
# 空気シャワーの到来方向の角度分布





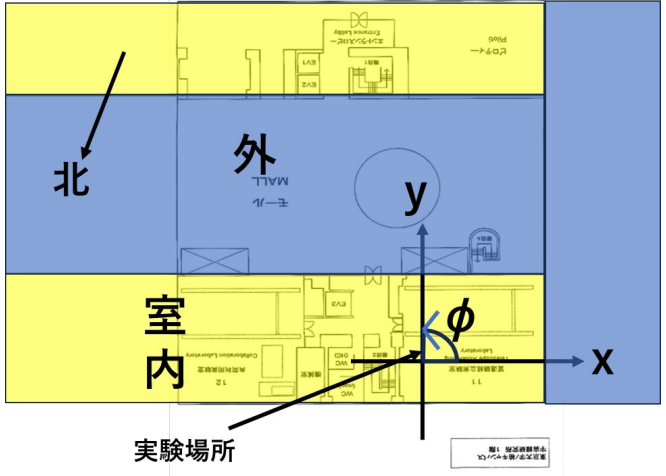
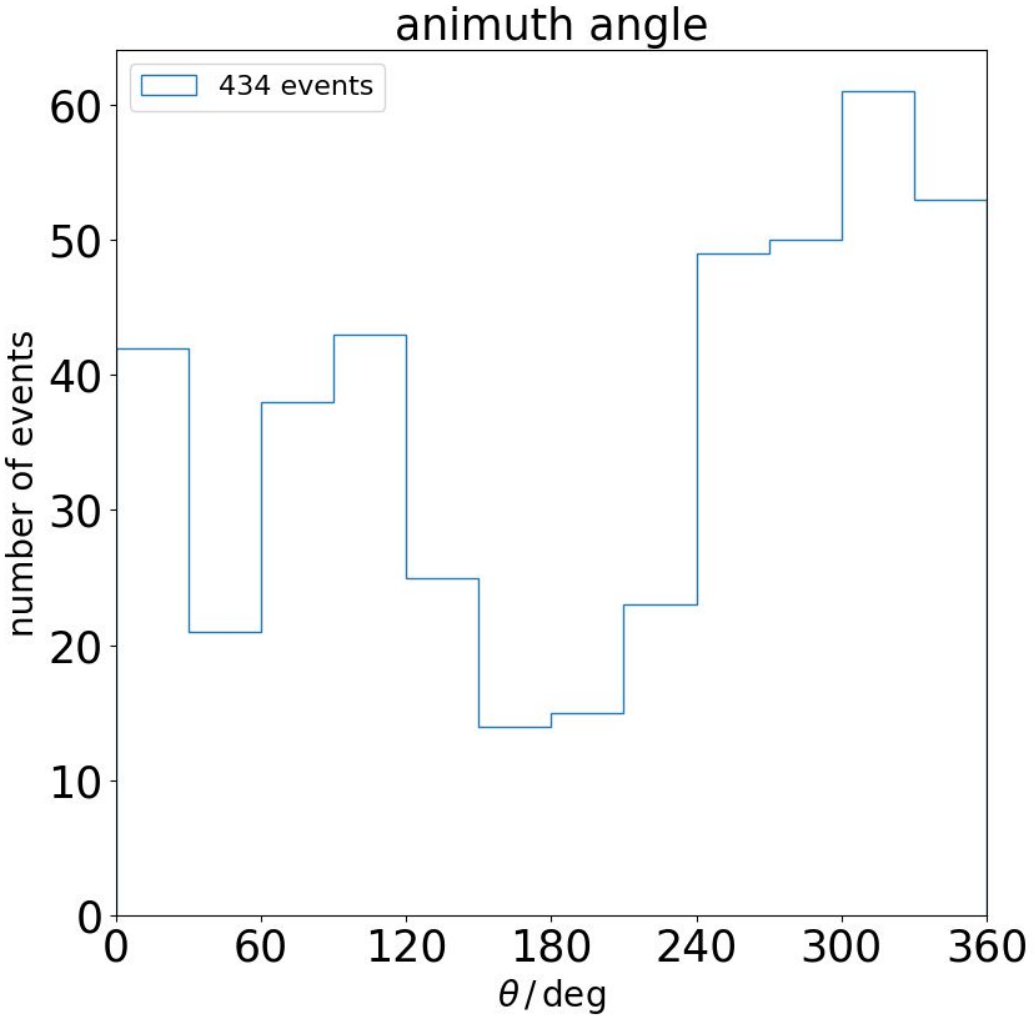
# 空気シャワーの角度分布の考察

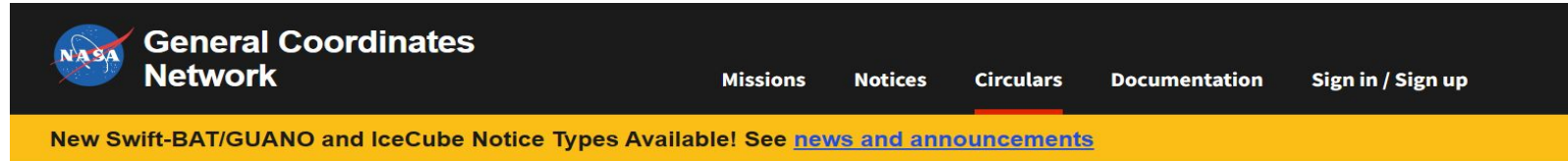
$\theta$ 方向について



# 空気シャワーの角度分布の考察

φ方向について

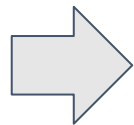




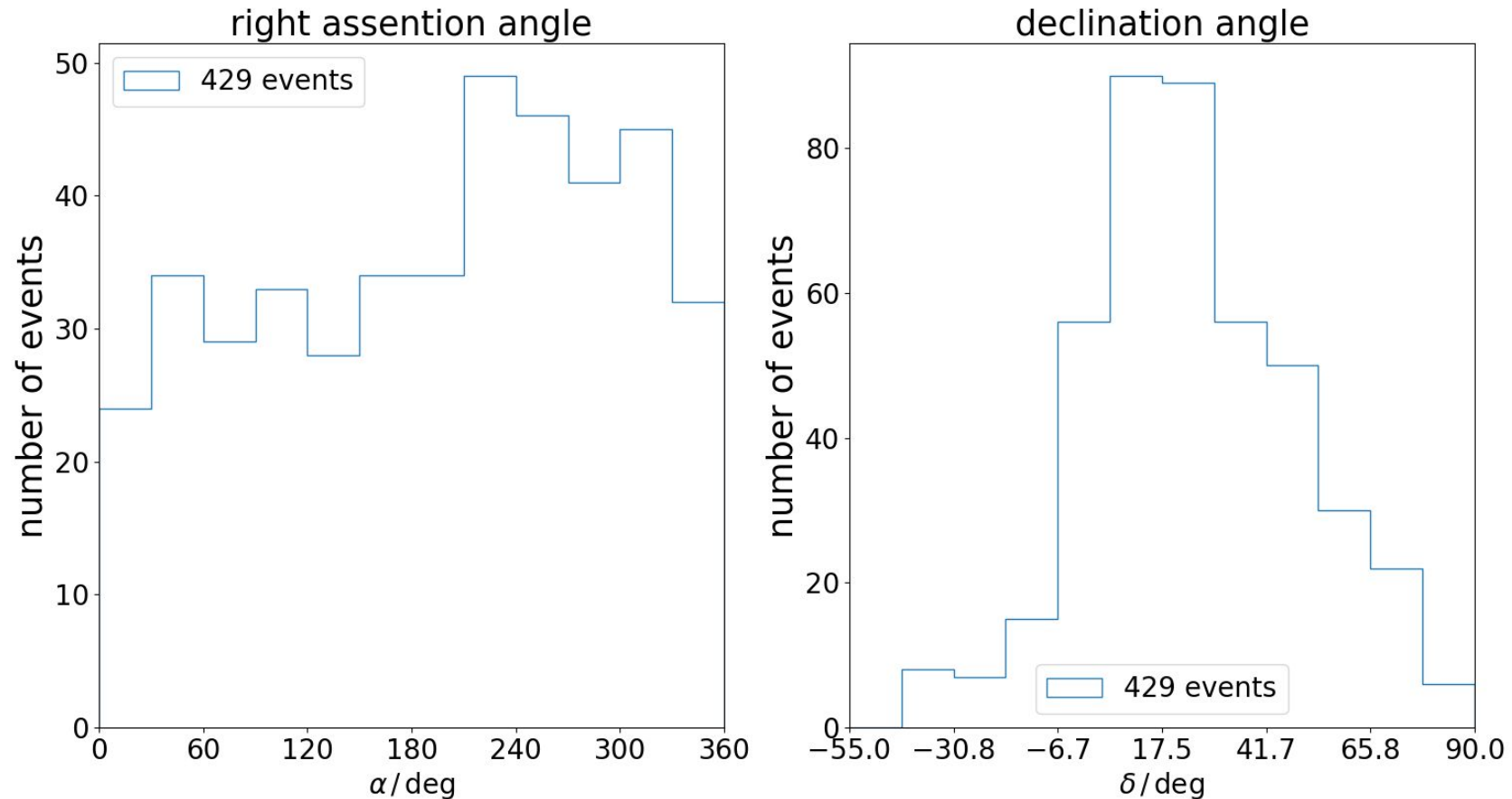
## GCN Circulars

**GCN Circulars are rapid astronomical bulletins submitted by and distributed to community members worldwide.** They are used to share discoveries, observations, quantitative near-term predictions, requests for follow-up observations, or future observing plans related to high-energy, multi-messenger, and variable or transient astrophysical events. See the [documentation](#) for help with subscribing to or submitting Circulars.

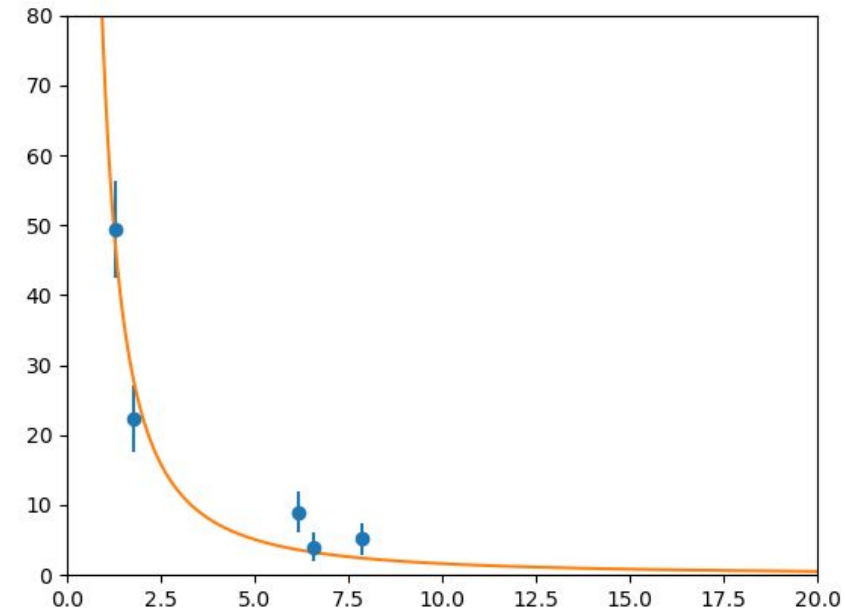
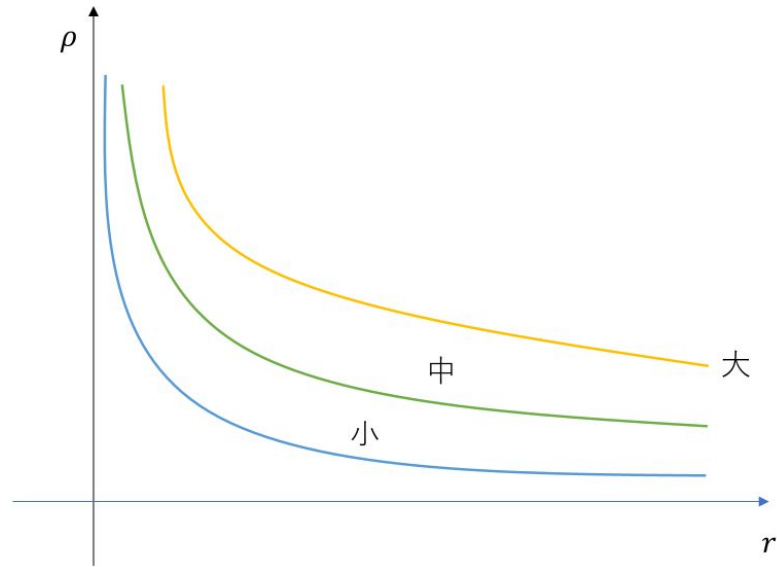
実験室の座標系では見ることができない  
高エネルギー一天体現象を見たい



座標を変換し下のサイトと照合



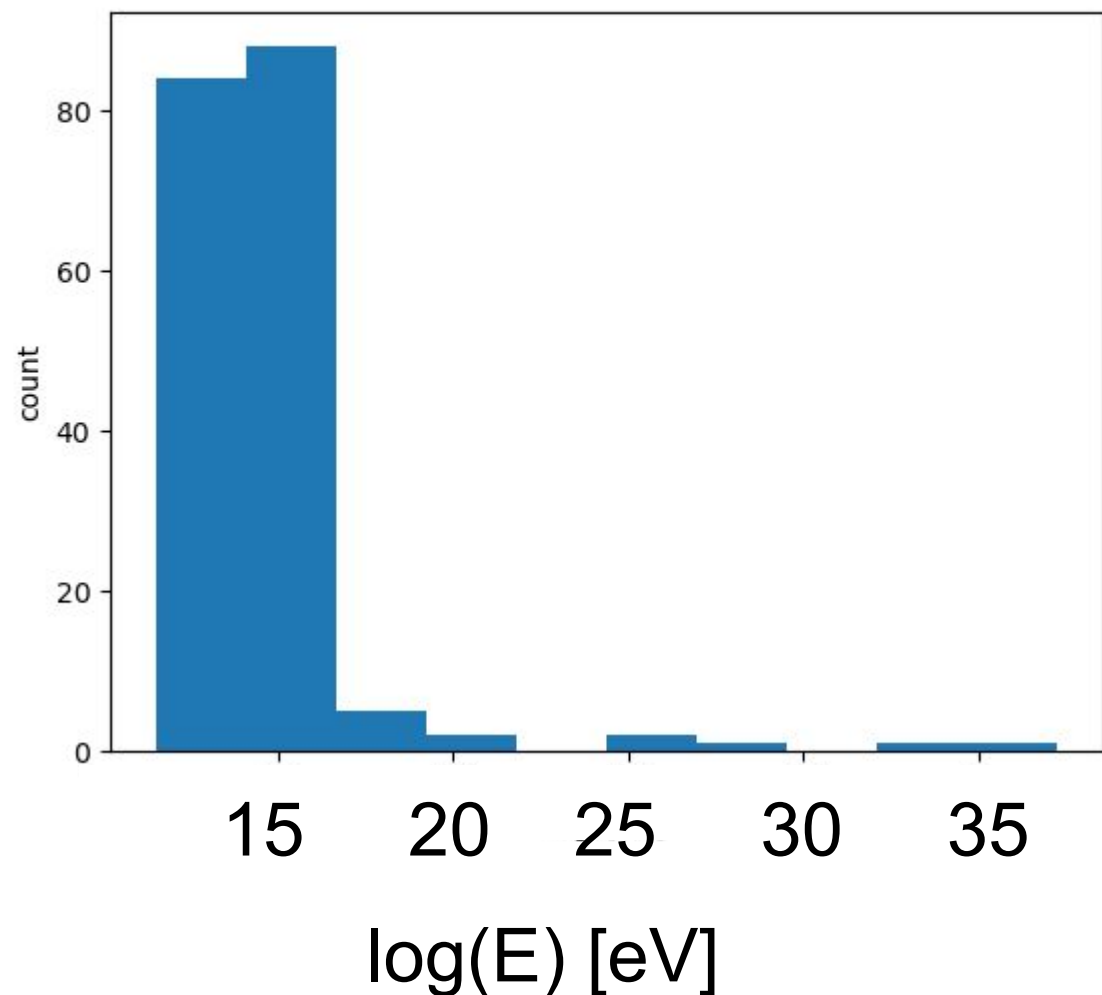
ピークは見られなかった。。。



距離と粒子数密度の関係をフィッティングしたものを積分して、粒子の個数からエネルギーを出す

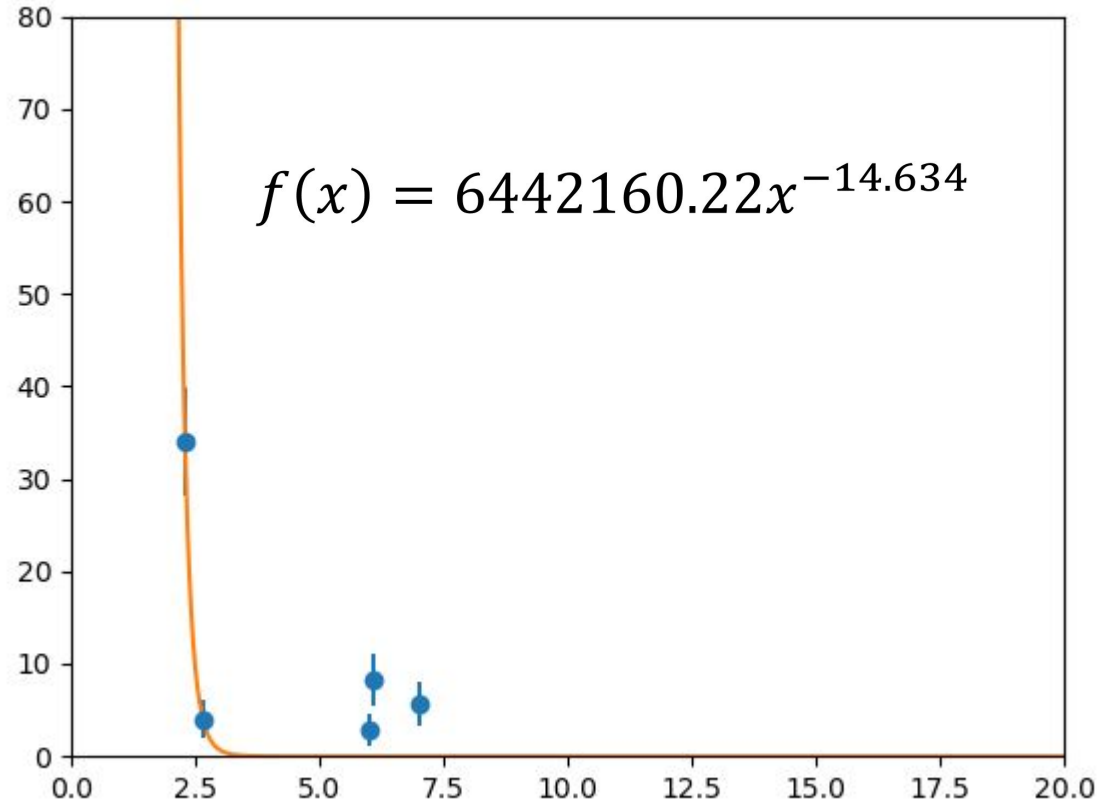
$$E[\text{eV}] = 3.9 \times 10^{15} \times (N/10^6)^{0.9}$$

出典: Extensive Air Showers / M.V.S.R. & B.V.Sreekantan / (1998) by World Scientific



5台以上の検出器において、有効な粒子の検出がされた  
イベントでエネルギーの推定を行った。

今回、観測された最大のエネルギーは  $10^{37}$  eV!!!



シャワーの中心が実験装置の真ん中に落ちることを  
仮定しているため、本来中心に落ちていないシャワーの場合はそもそも分布が上手くいかない。

宇宙線を検出し、時間のキャリブレーションを行い到来方向の決定を行った。

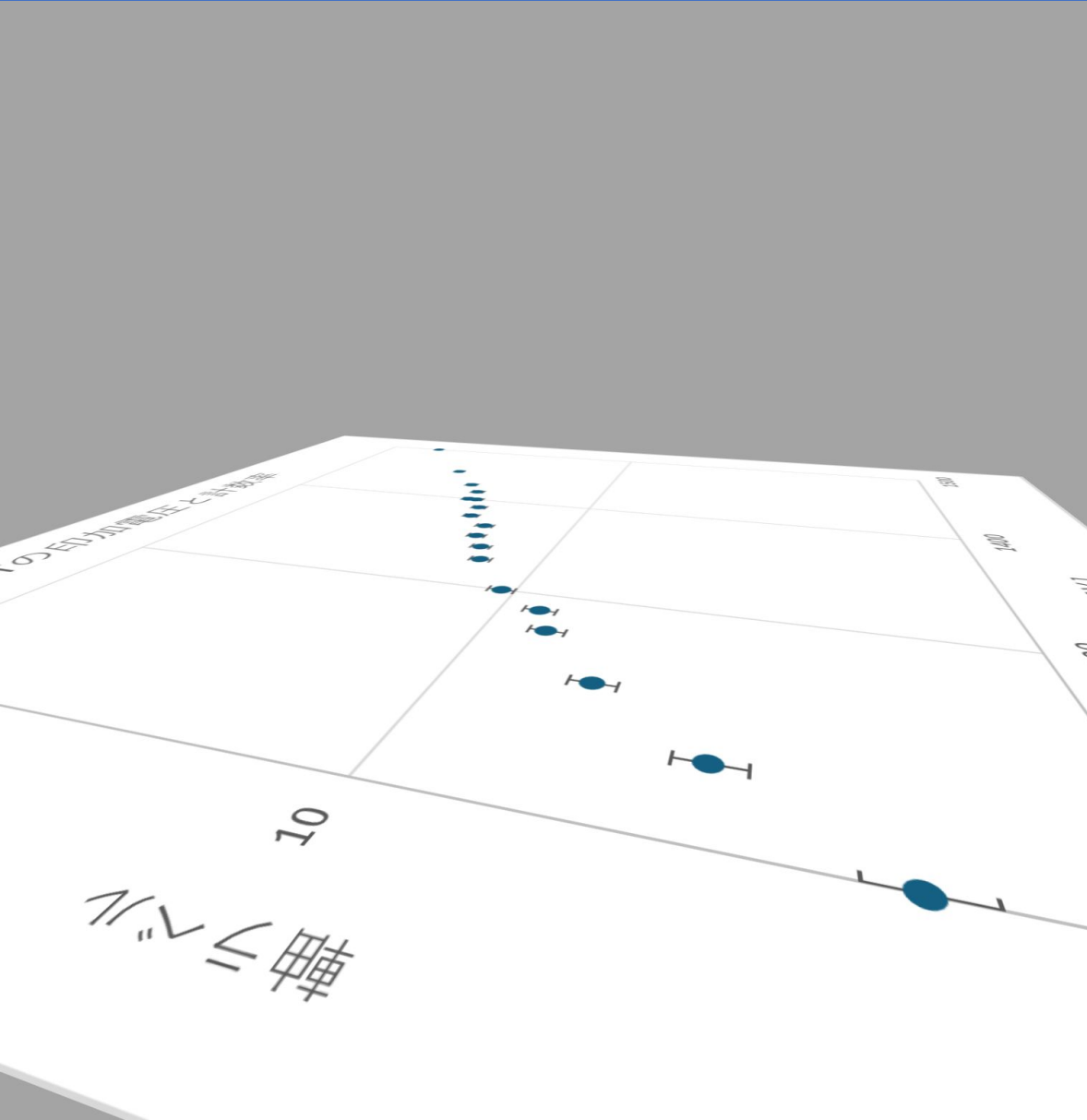
宇宙線の時間差分布を求めた

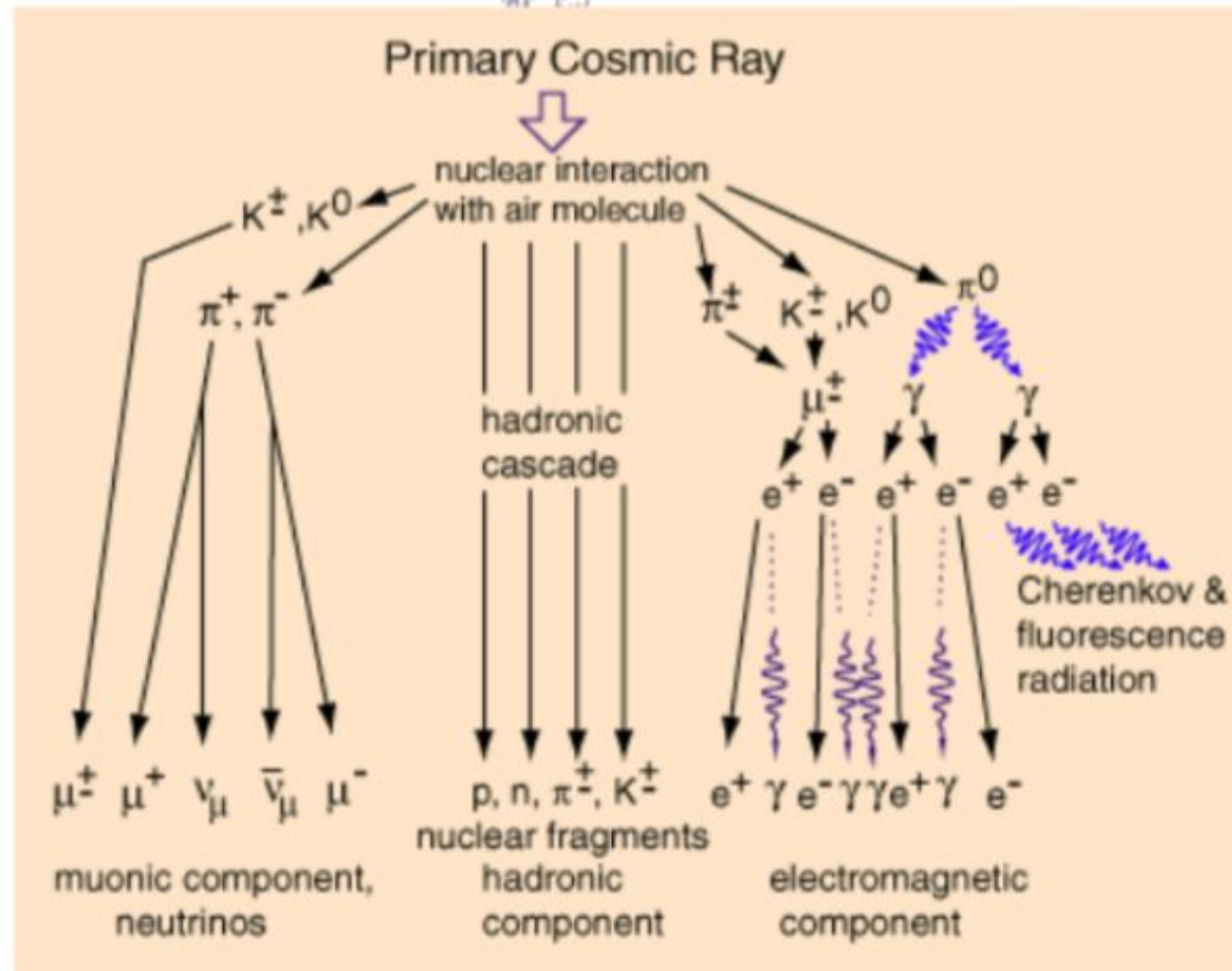
宇宙線のエネルギー分布を求めた

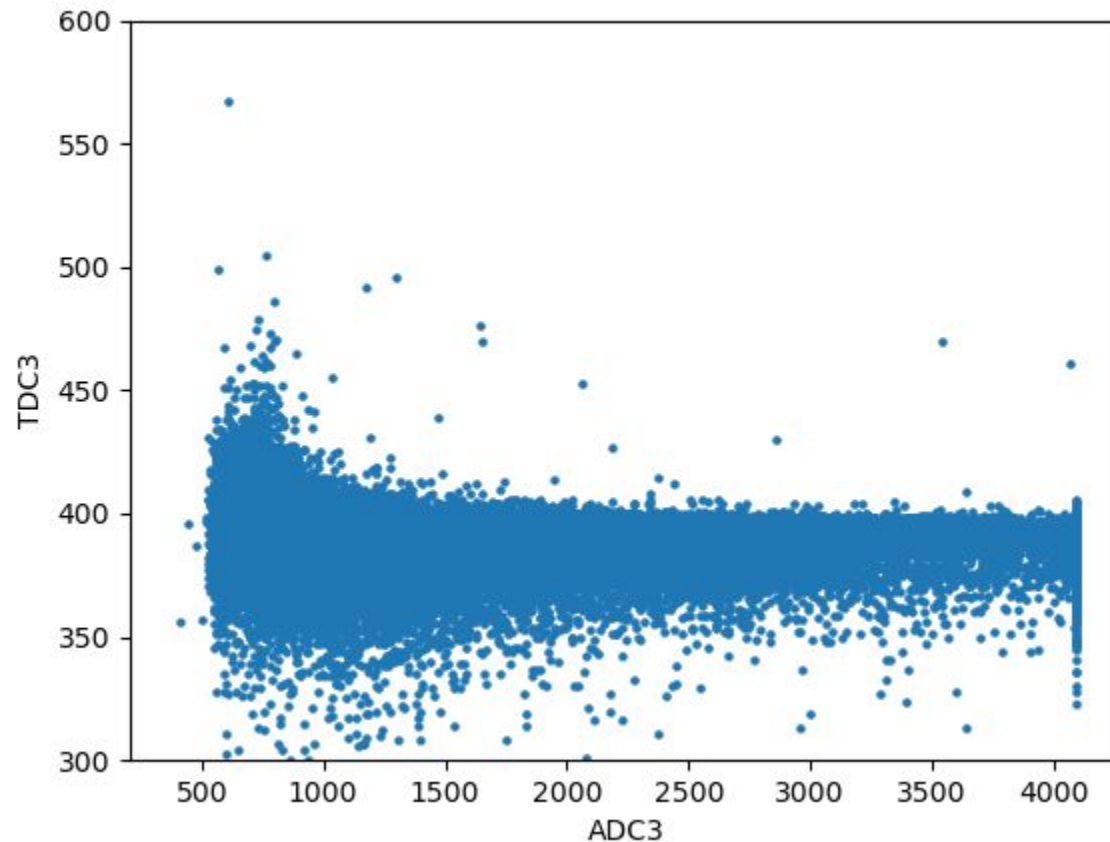
最高エネルギー宇宙線の候補を見つけた

到来頻度の分布を求めた

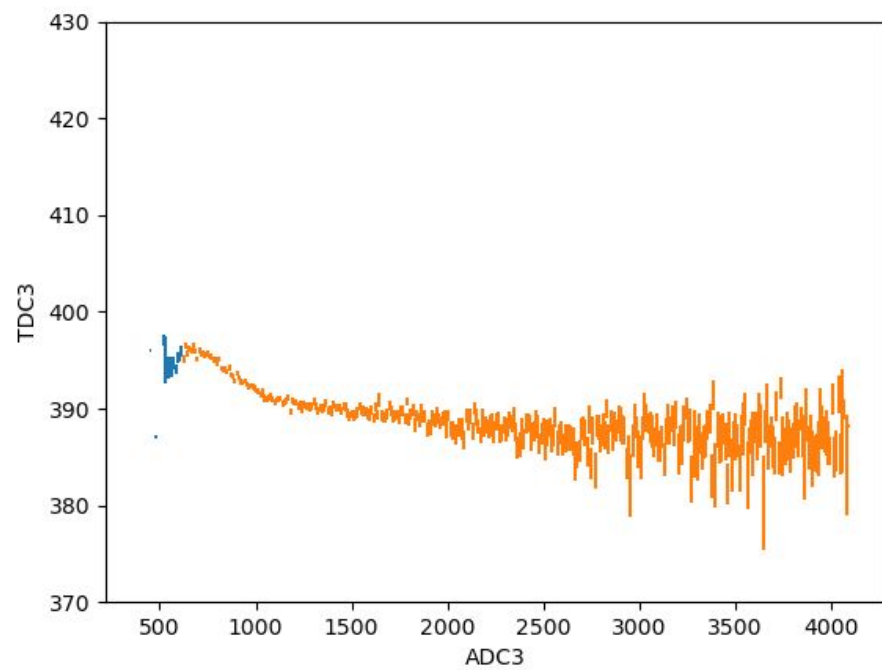






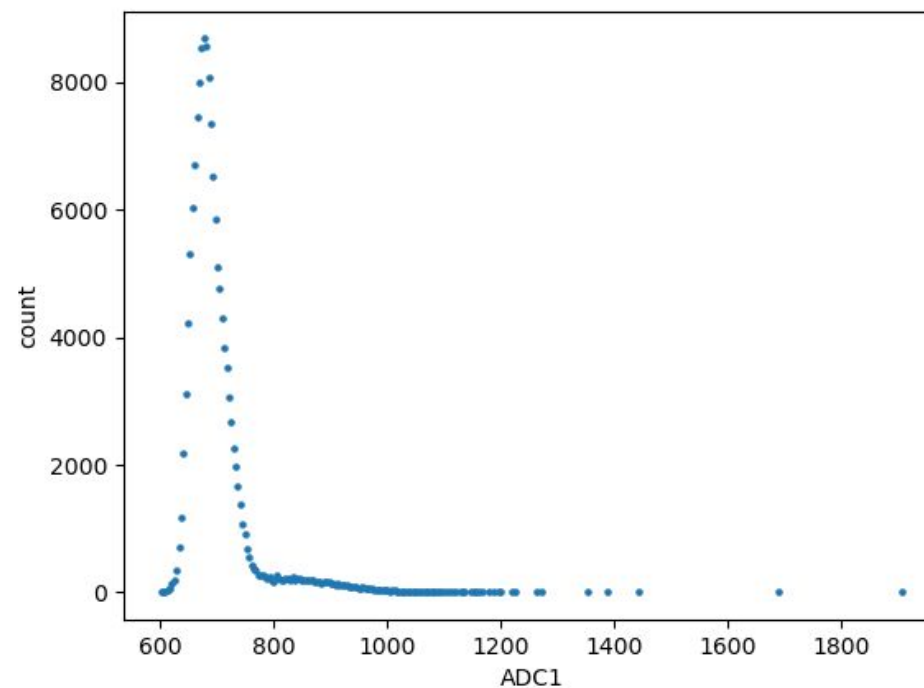
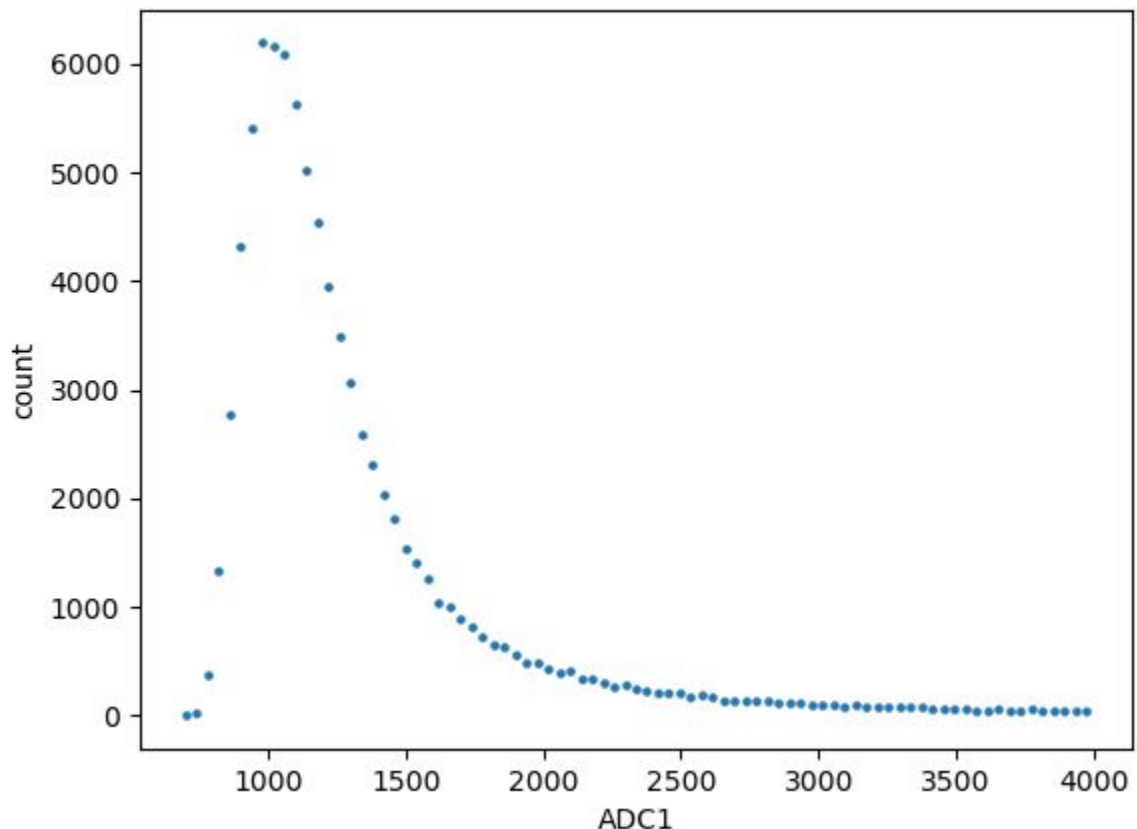


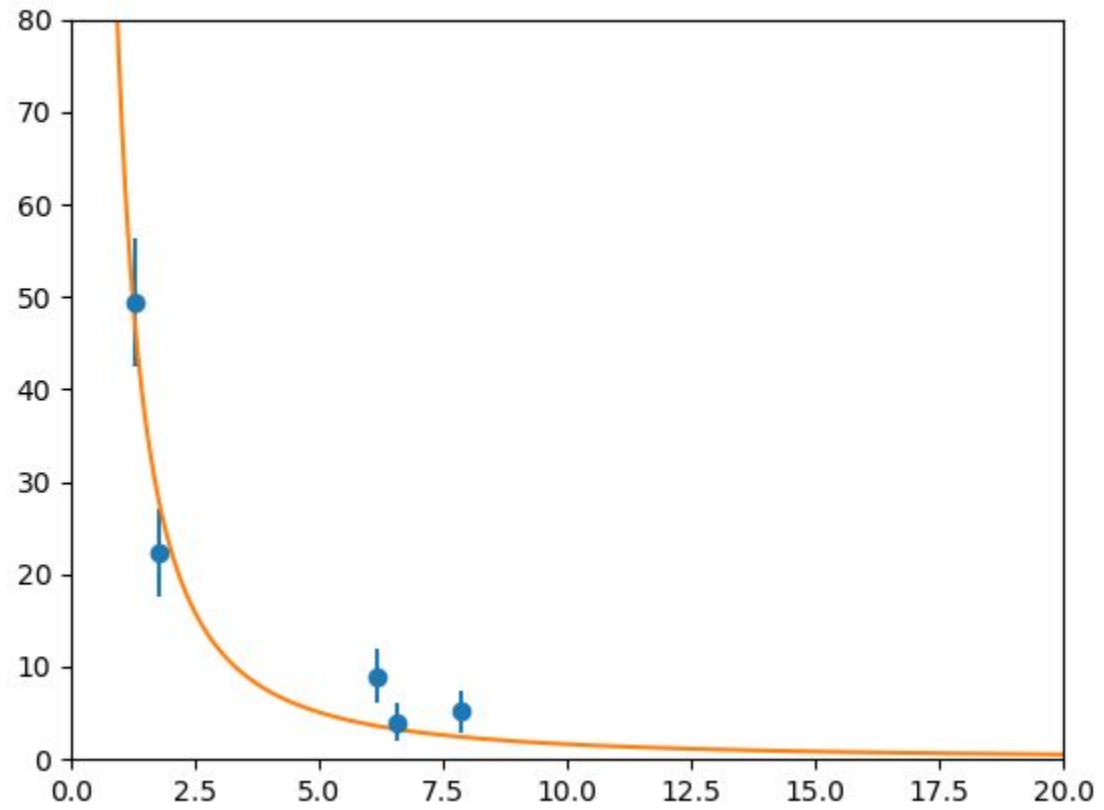
明らかに宇宙線の信号でないと判断したものを除外し、x軸を一定の幅で分け、その平均を求めることによってその幅の代表点を決定し、プロットしたうえで関数でFitした。

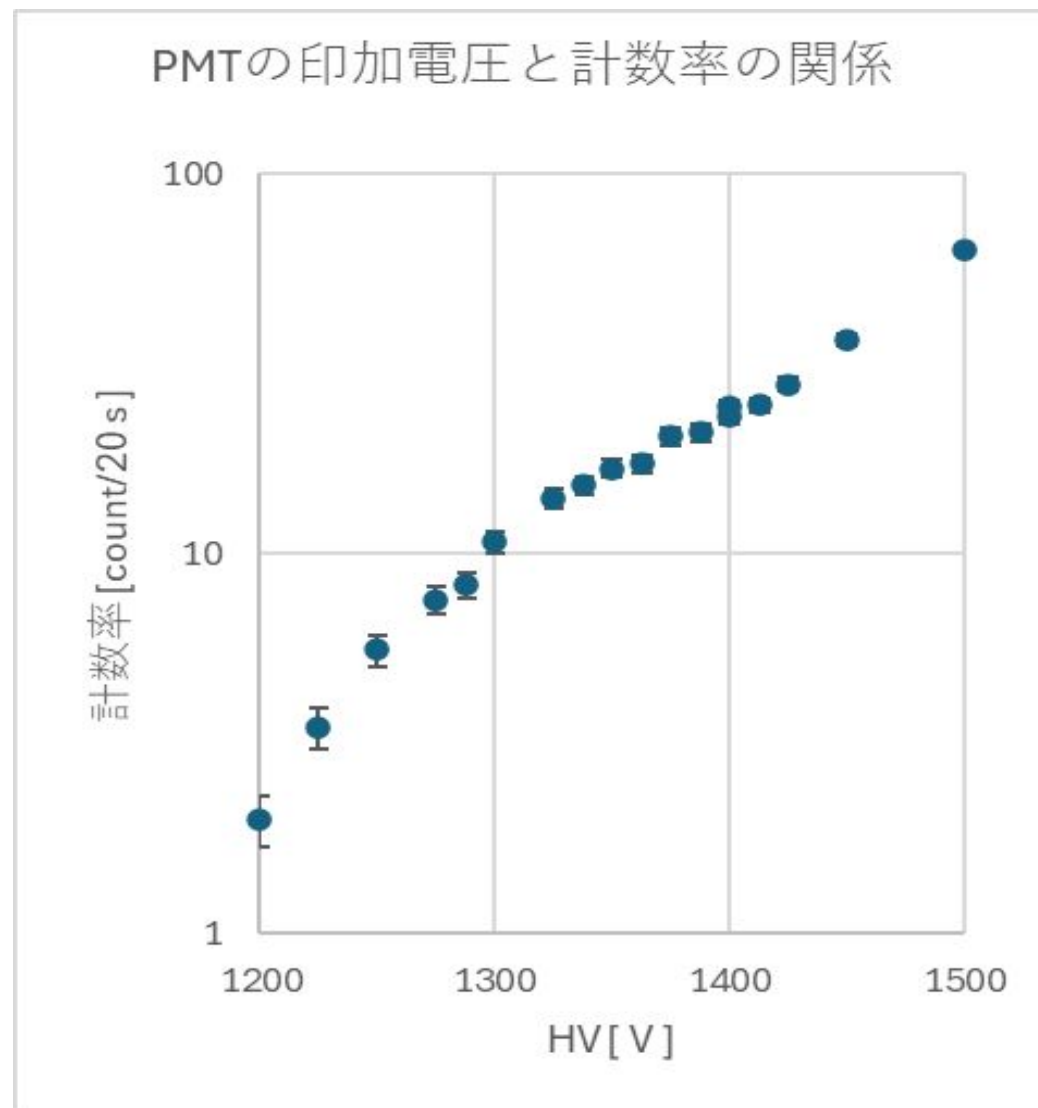
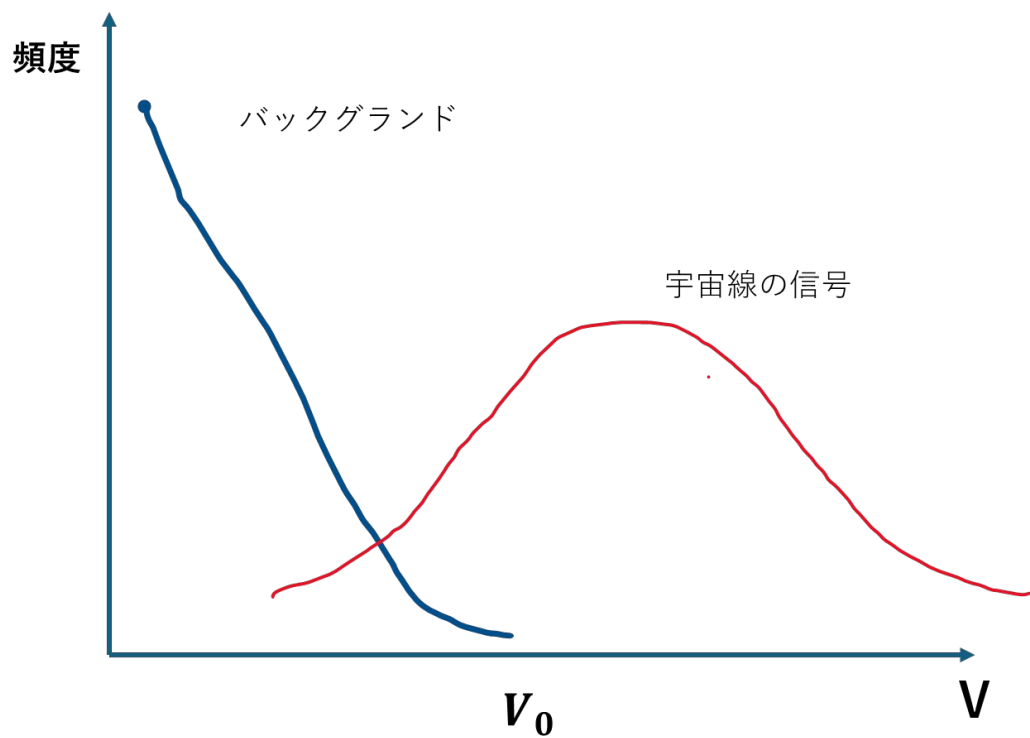


MIP

pedestal







# 10<sup>37</sup>eVイベントの詳細

赤経赤緯 171.8° 56.4°

2024/3/4/21:47:13

北斗七星の真ん中くらいの方角

232.89866976634235	37.3685219559898	54.91290192454283	60.12856688991708	2024-03-04	18:36:44.000
224.0029236639162	21.91524952865774	61.266300322244376	29.36737395011217	2024-03-04	19:15:16.000
259.679245700399	17.684166222074055	28.182475090169845	39.40338660600607	2024-03-04	19:30:51.000
188.455914226516	45.95720784850737	70.84944351707145	132.29625350258507	2024-03-04	20:22:16.000
268.77642075435654	0.06126850422881182	12.535628843535466	26.461616956598114	2024-03-04	20:59:25.000
268.16571863909655	40.17352581056712	27.8170507620464	66.24590155633766	2024-03-04	21:10:05.000
256.57347262310185	-0.008870185537587935	23.20752258145582	20.231019389994568	2024-03-04	21:18:54.000
254.60852540668265	75.12275737183481	33.28862871753066	107.2343164711615	2024-03-04	21:21:31.000
297.5190365000803	-11.990613737582862	-18.363888339456164	28.58012999956323	2024-03-04	21:35:47.000
171.8743914153457	56.404715414468654	57.09872528337952	144.32741646140153	2024-03-04	21:47:13.000
252.04374201598952	47.17358177336802	40.117144705919436	73.16545282663856	2024-03-04	21:57:07.000
278.2200949661769	41.88043474101952	20.977495281552475	70.29772585895786	2024-03-04	22:15:54.000
277.4245356226431	6.590021434254972	7.82045391454454	36.35976846450238	2024-03-04	22:24:17.000
267.9610049912712	19.274493508348083	21.500778368930305	44.28241006308675	2024-03-05	00:06:19.000



$$P(\Delta t)\Delta t' = \left(1 - \int_0^{\Delta t} P(\Delta t)d\Delta t\right) \times (q \times \Delta t')$$

$$P(\Delta t) = q \left(1 - \int_0^{\Delta t} P(\Delta t)d\Delta t\right)$$

$$\frac{dP(\Delta t)}{d\Delta t} = -qP(\Delta t)$$

$$P(\Delta t) = qe^{-q\Delta t}$$

