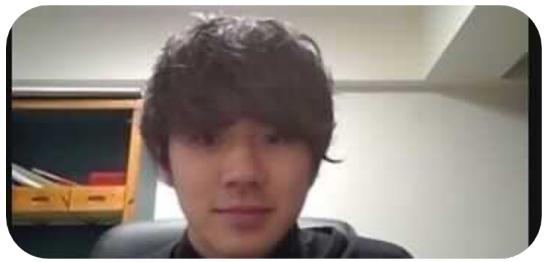
最高エネルギー宇宙線

Member: 佐藤聖真、岡崎玲大、武田紗貴乃、
須田亮介、ダウディ由莉香、笹貫百花



Supported by:
さこ隆志、竹田成宏、申興秀、
樋口諒、藤末紘三、沖本直哉

@ICRR Spring School 2021 online
2021.03.05

目次

- 宇宙線
- 実験の目的
- 原理
- セットアップ
- データ取得
- 解析
  - 「同時」タイミングのずれとその補正（タイムウォーク現象）
  - 空気シャワー到来方向の決定(θ-φ分布)
  - 赤道座標系への換算
- 到来方向についての考察
- まとめ

宇宙線とは

・宇宙線とは、宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線のことである。

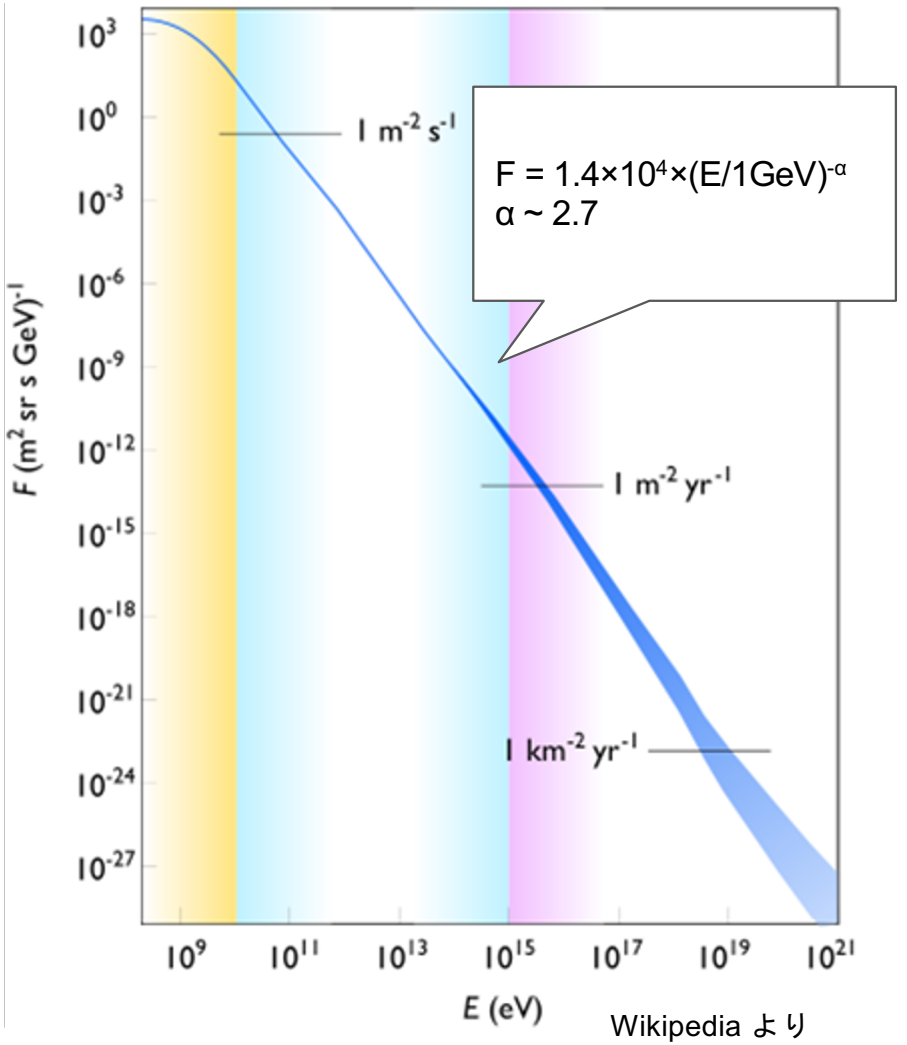
・陽子や、ヘリウム原子核及び各種原子核が主な成分。

・常時様々なエネルギーの宇宙線が地球に到来している。

・高エネルギーの宇宙線は宇宙空間中で加速して発生すると考えられる。

→宇宙線がどこで加速しているかは現在もわかっていない。

宇宙線のエネルギーEと到来頻度F



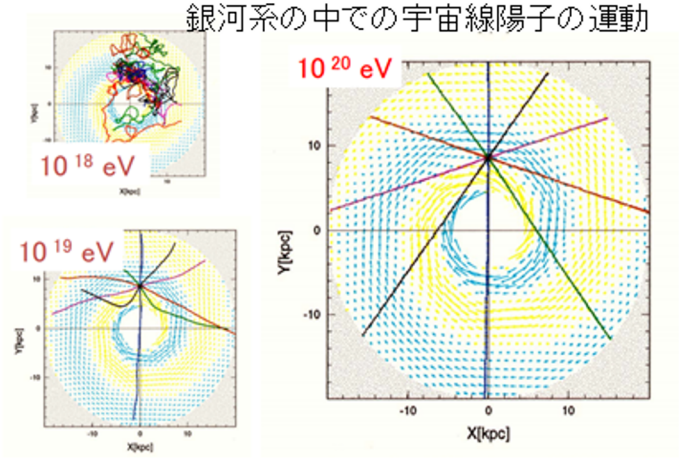
Wikipedia より

最高エネルギー宇宙線

10^{20} eV程度までの宇宙線がきている

10^{20} eVで起源の天体からほぼ真っ直ぐ飛んでくる

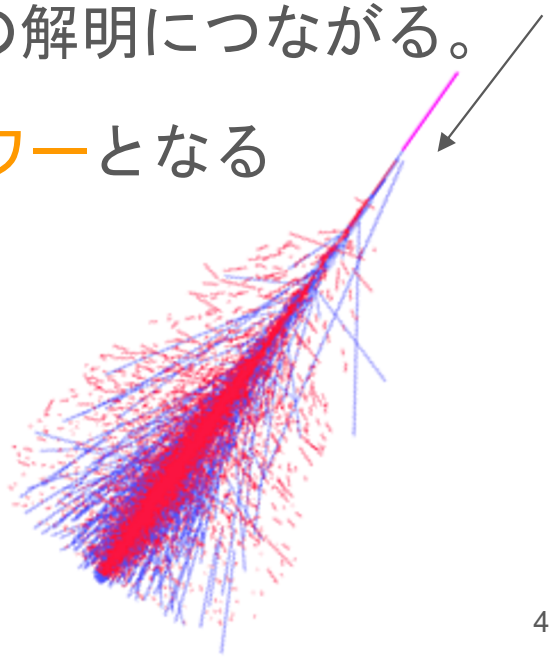
講義スライドより
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



→　宇宙線発生の起源の解明につながる。

高エネルギー宇宙線は、大気分子と衝突して空気シャワーとなる

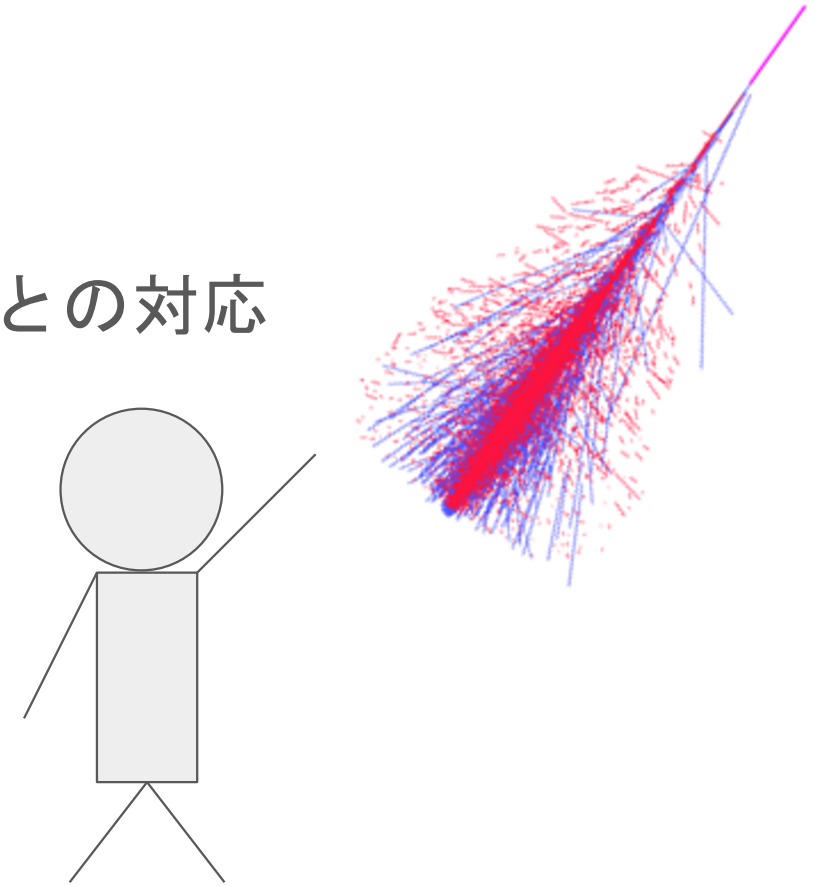
（衝突→二次粒子が次々に生成）



実験の目的

- 空気シャワーの観測

- 到来方向の特定と、赤道座標系との対応

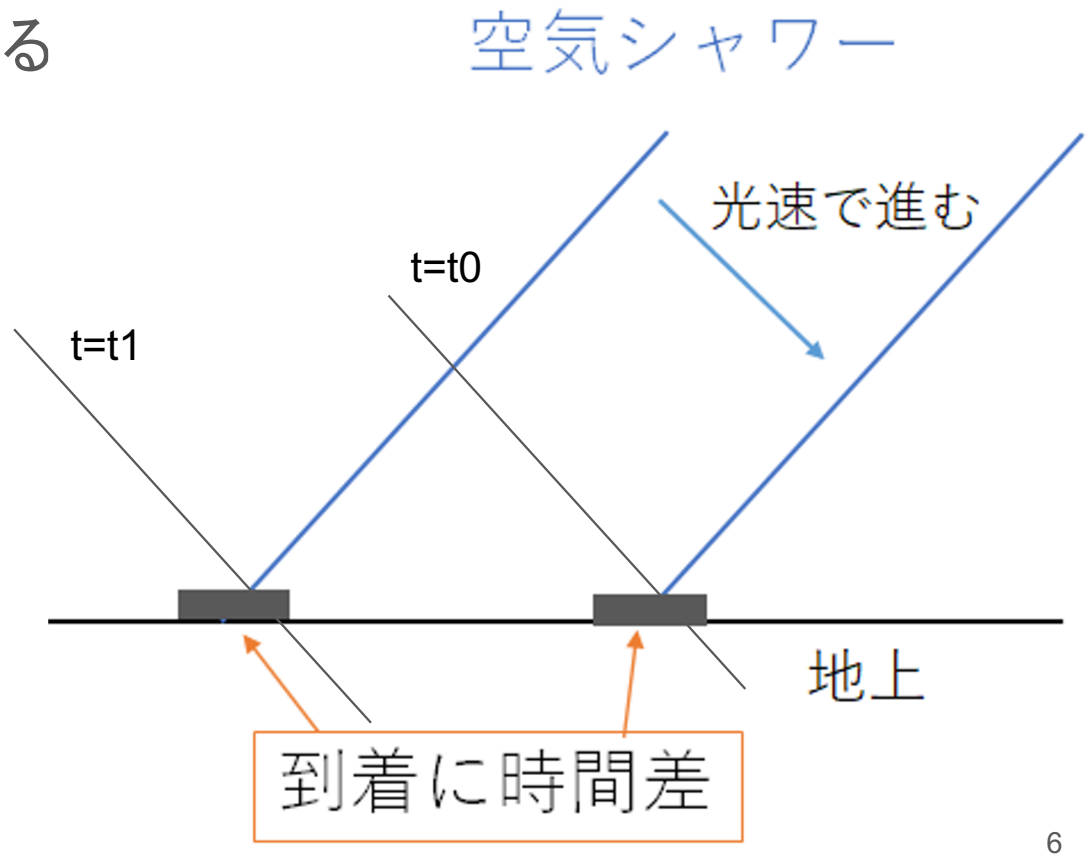


原理

・空気シャワーは、平面でやってくる

・複数の検出器で捉えた信号の

「時間差」から到来方向を特定する

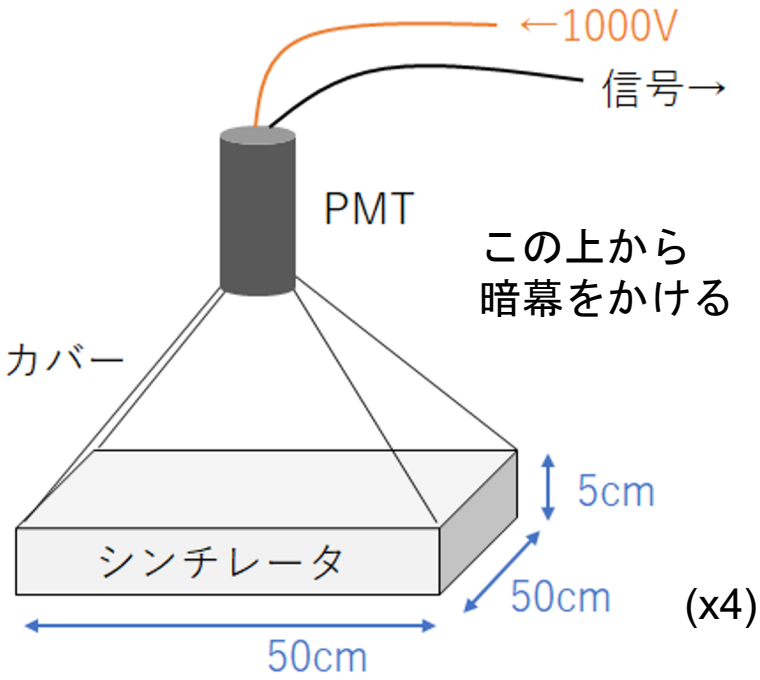


セットアップ

検出器の構成

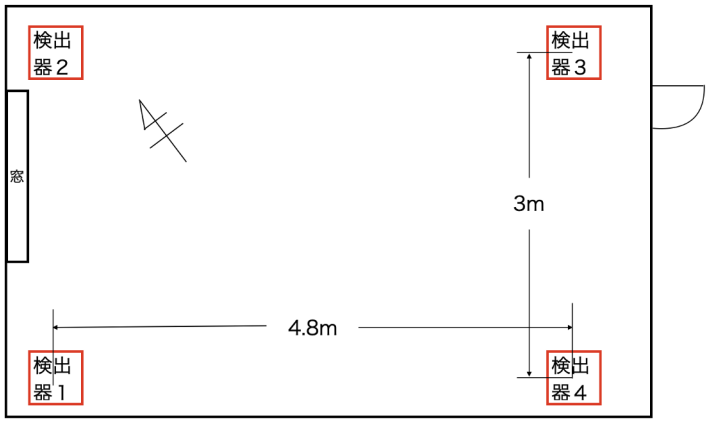
・シンチレータ (50cm×50cm×5cm)

・光電子増倍管 (PMT)

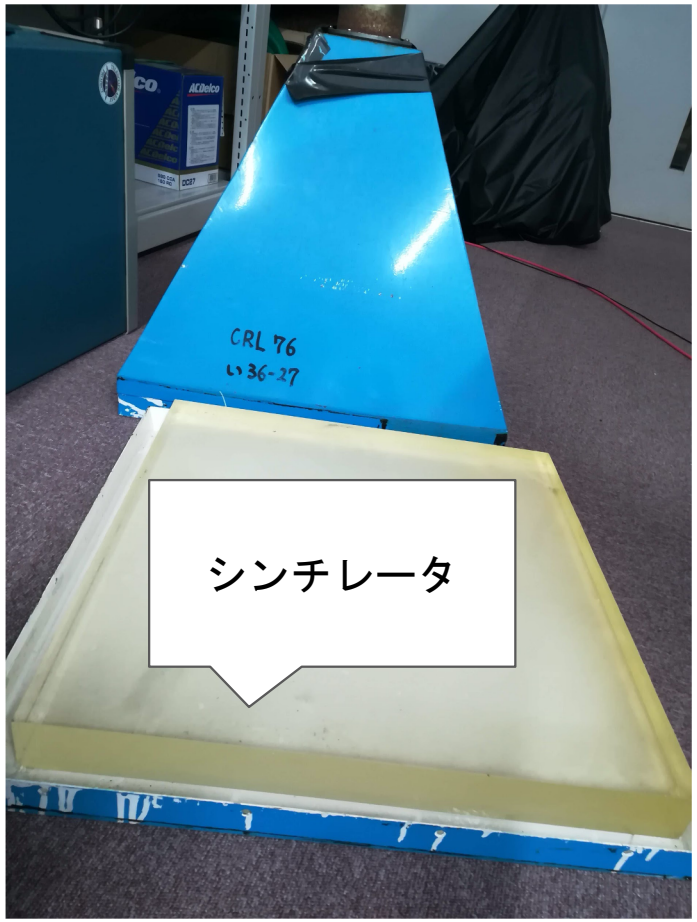


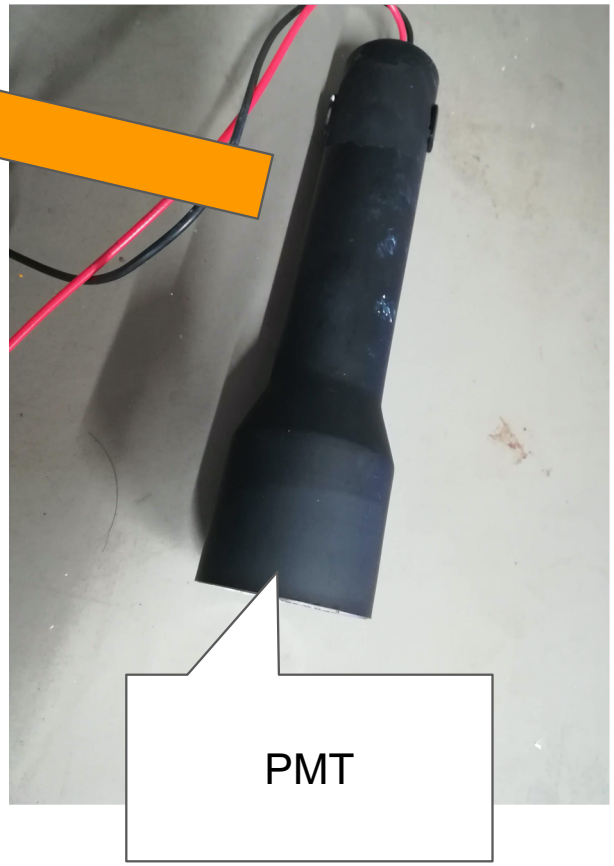
場所：千葉 柏市 宇宙線研究所実験室

・4台の検出器

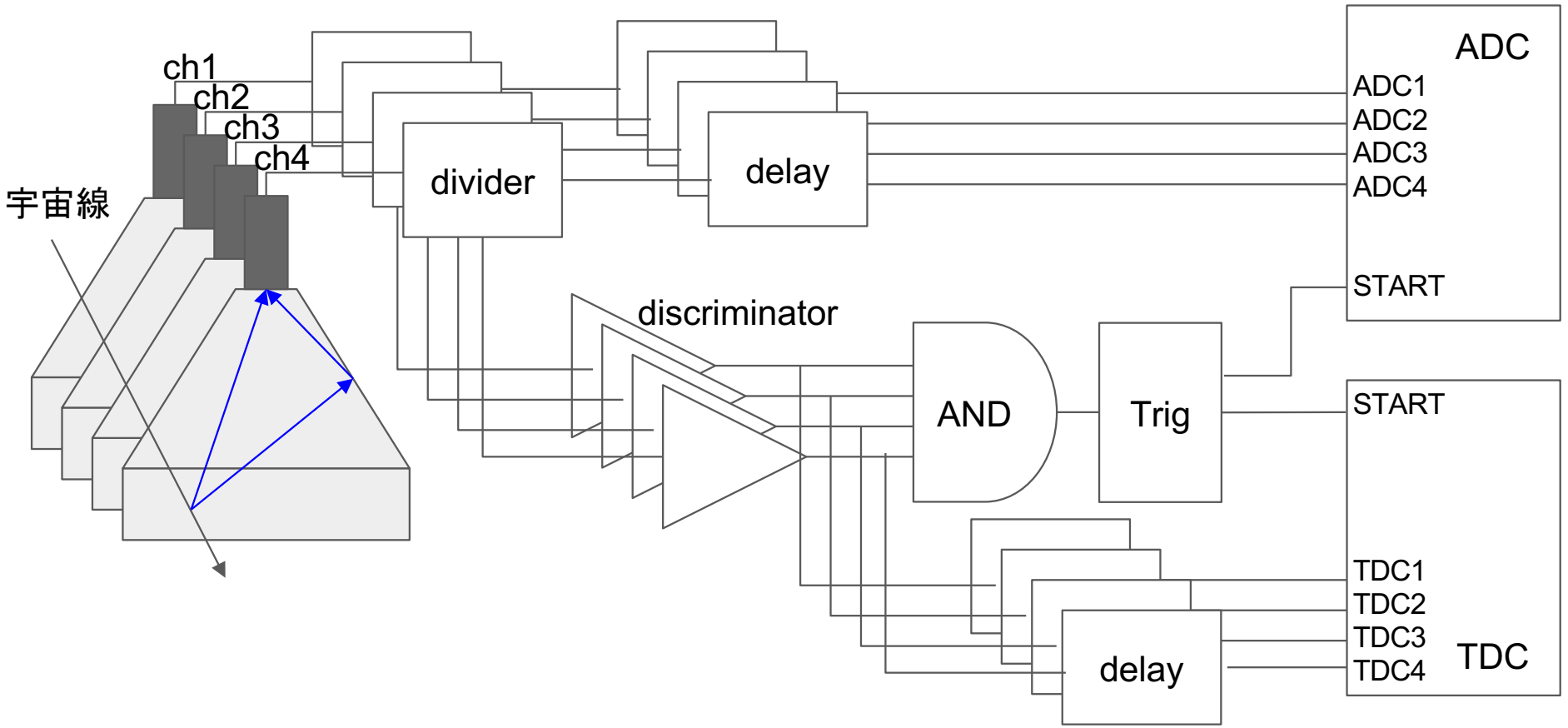


セットアップ

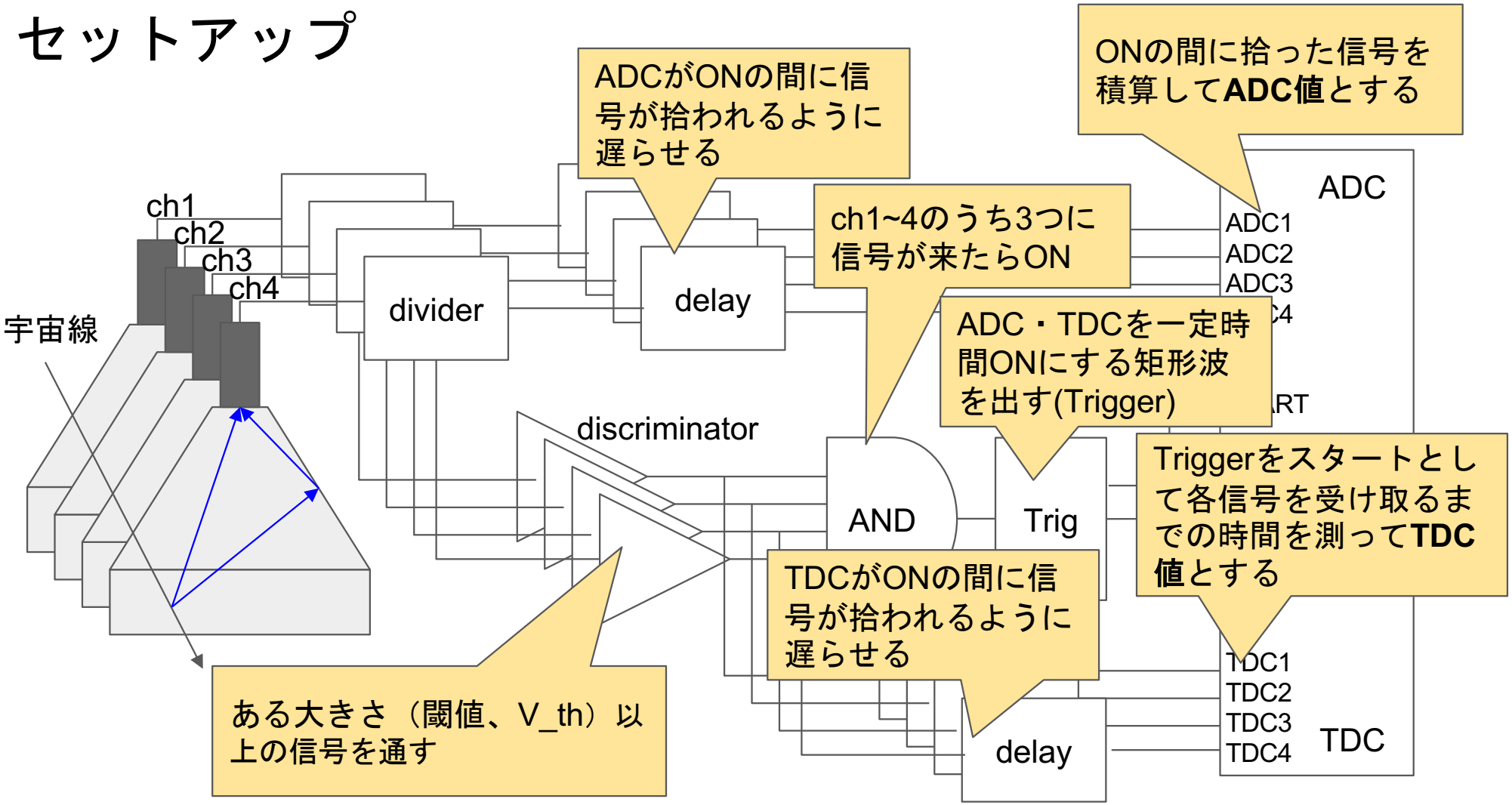




セットアップ

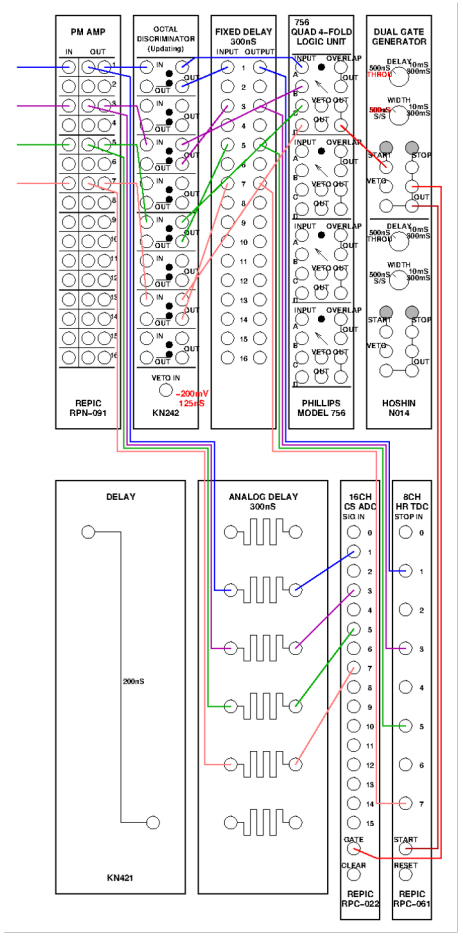

ch1
ch2
ch3
ch4
宇宙線
divider
delay
discriminator
AND
Trig
delay
ADC
ADC1
ADC2
ADC3
ADC4
START
START
TDC1
TDC2
TDC3
TDC4
TDC

セットアップ


ADCがONの間に信号が拾われるように遅らせる
ONの間に拾った信号を積算してADC値とする
ch1
ch2
ch3
ch4
宇宙線
divider
delay
ch1~4のうち3つに信号が来たらON
ADC
ADC1
ADC2
ADC3
ADC・TDCを一定時間ONにする矩形波を出す(Trigger)
discriminator
AND
Trig
Triggerをスタートとして各信号を受け取るまでの時間を測ってTDC値とする
TDCがONの間に信号が拾われるように遅らせる
TDC1
TDC2
TDC3
TDC4
TDC
delay
ある大きさ（閾値、V_th）以上の信号を通す

セットアップ

回路の配置・配線



結果の例

ADC1	ADC2	ADC3	ADC4	TDC1	TDC2	TDC3	TDC4
741	106	306	1269	441	4095	444	443
1138	3216	1570	4095	438	448	443	446

タイムアウト(時間内に粒子が来ていない)

・24時間連続測定を数回したとき

・3台同時検出(3-fold)イベントは約1000回

$F = 1.4 \times 10 \times (E/1\mathrm{GeV})^{-\alpha}$,　　$\alpha \sim 2.7$（実験値、文献※より）

→今回観測している宇宙線の典型的なエネルギーは… 約 10^{13} eV

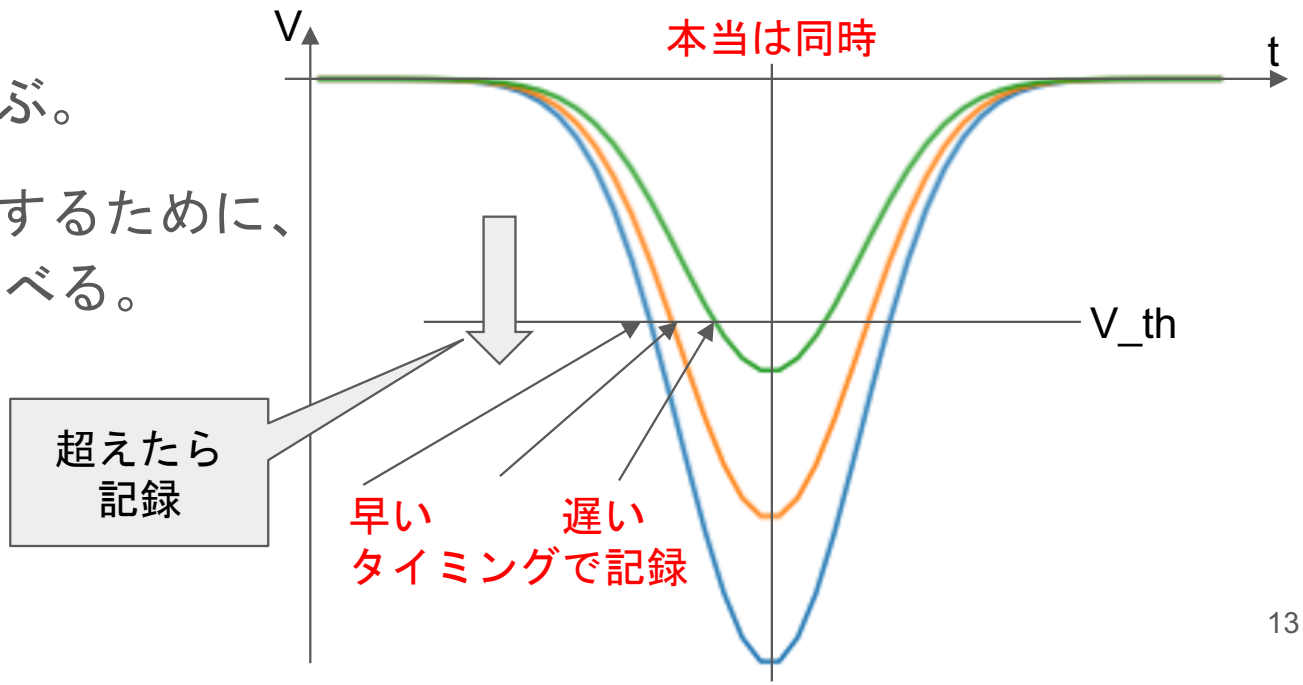
※https://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf

タイムウォーク

計測された信号の波形は、放射線ごとのADCの強さによって信号の高さに違いが生じる。

このとき、信号の高さによってしきい値を超えるタイミングが変わり、結果TDCの値にずれが発生する。
→これをタイムウォークと呼ぶ。

タイムウォークの影響を補正するために、まずはADCとTDCの相関を調べる。



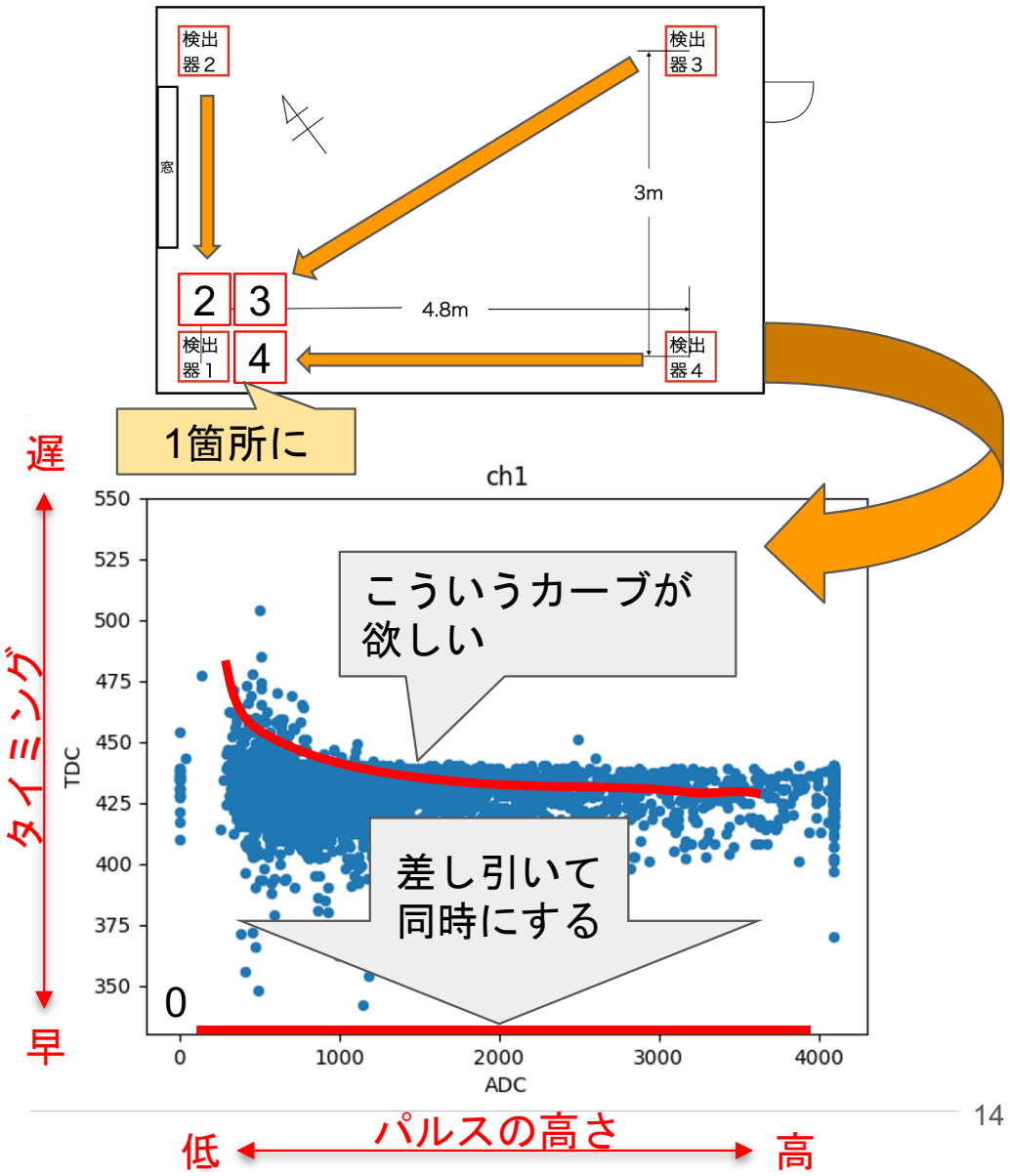
ADCとTDCの相関図

・「同時」を測るため、4台を1箇所に集めて測定

・横軸ADC、縦軸TDC

・タイムアウトしたデータは排除

・タイムウォークの影響を取り除くためには、この相関図に対してカーブフィッティングを行い補正するための関数を求める必要がある。



カーブフィッティング

使うデータ範囲でADC-TDCの相関を再現すればよい（ガウシアン、指数、etc.）

→今回は指数関数で近似

式

$$a \times \exp(-b \times (ADC - C)) + d$$

a = 全体の大きさ、b = 減衰のはやさ、c = 横軸平行移動、d = 縦軸平行移動

フィッティング結果

$$a \times \exp(-b \times (ADC - C)) + d$$

初期値

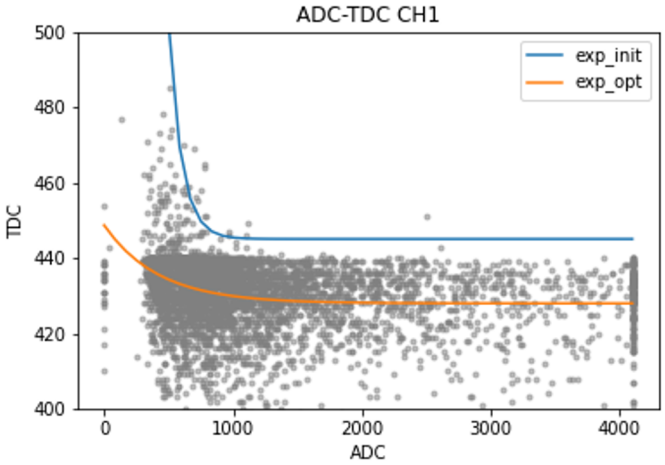
a=70　b=0.01

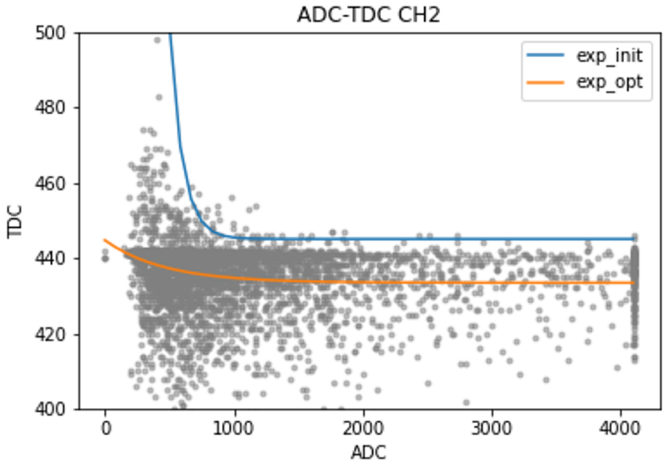
c=480　d=445

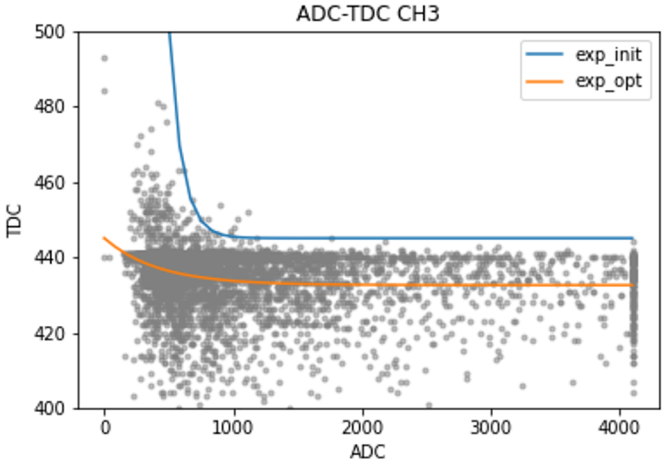
での結果。

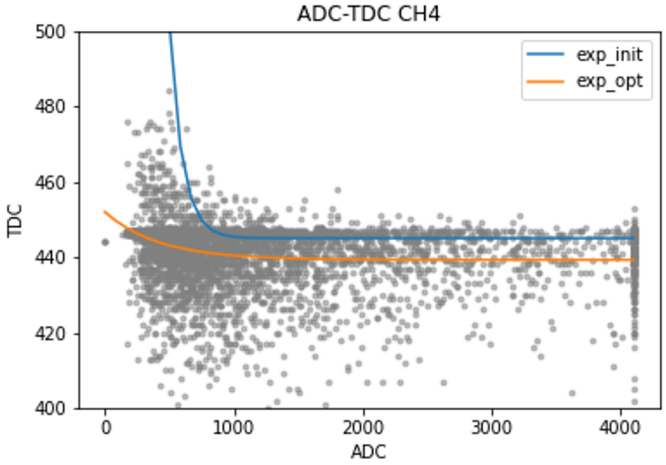
青：初期

橙：フィット後









フィッティング結果

・このフィットした指数関数を各々の測定のTDCのデータから引くことで、タイムウォークの影響を取り除くことができ、正しいタイミングで測定できる。
→以降の解析の精度が上がることが期待できる。

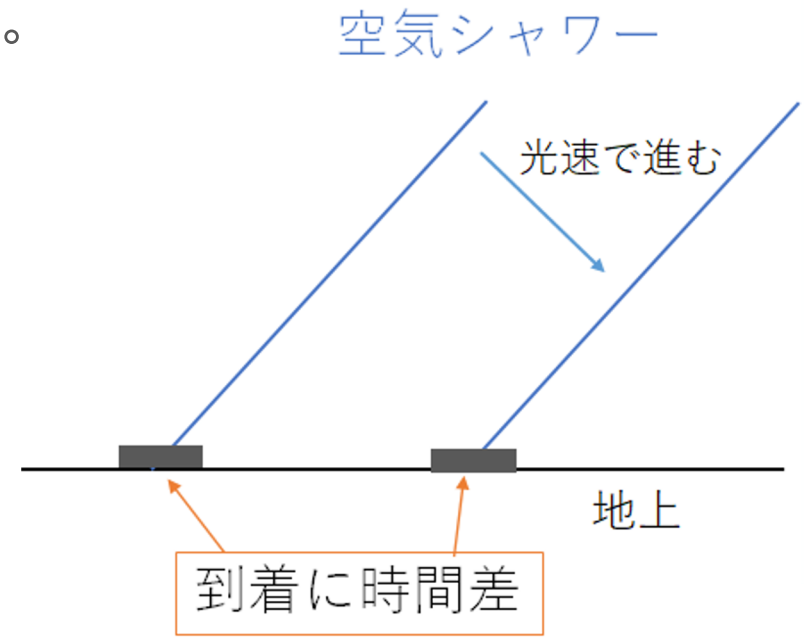
・これから先の解析では、各chのTDCデータから今決めた指数関数を引いたものを使用する。

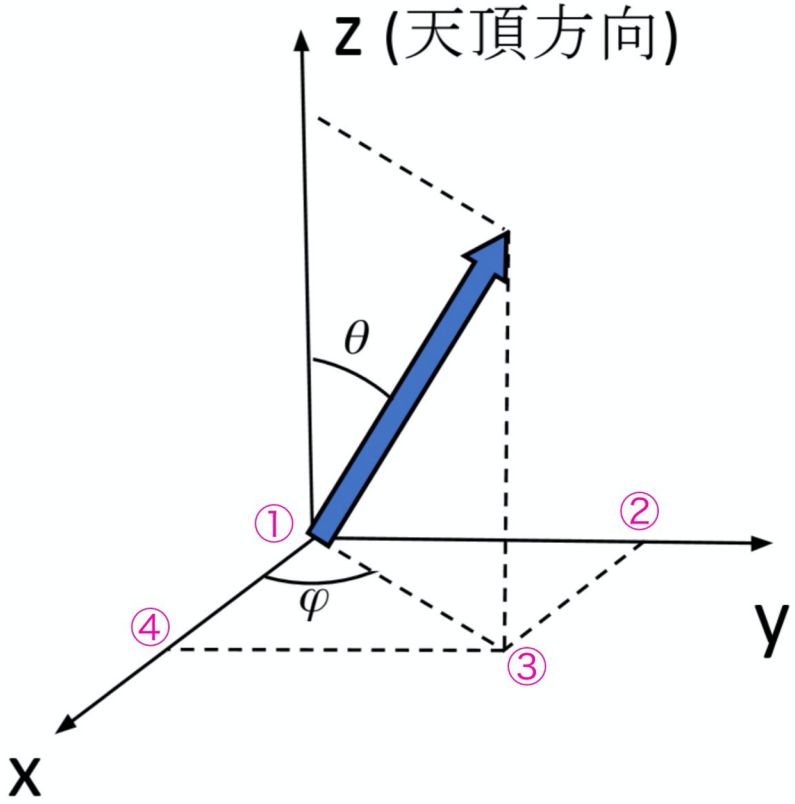
空気シャワー到来方向の決定

タイミングデータから宇宙線空気シャワーの
到来方向を求める。

天頂角θは0°～90°

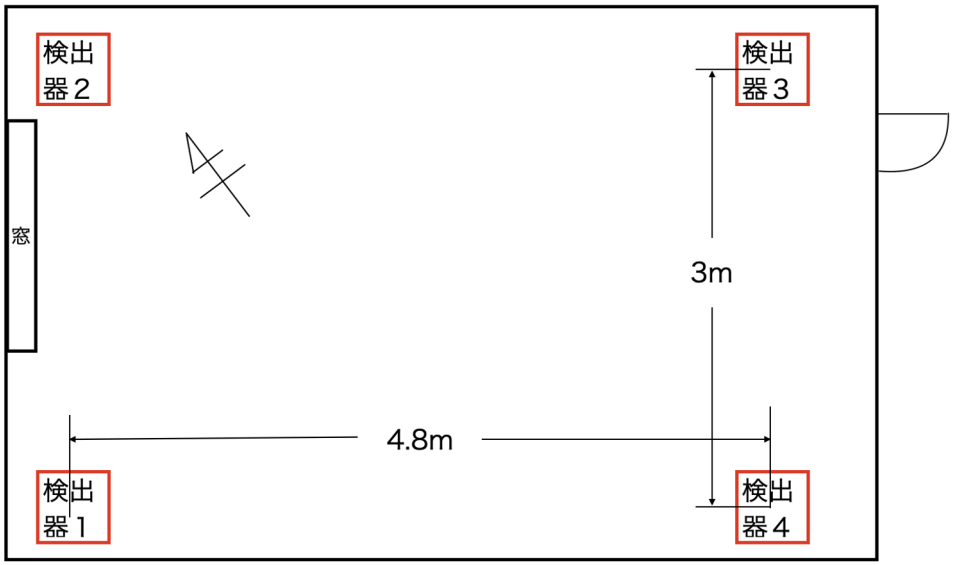
方位角φは0°～360°

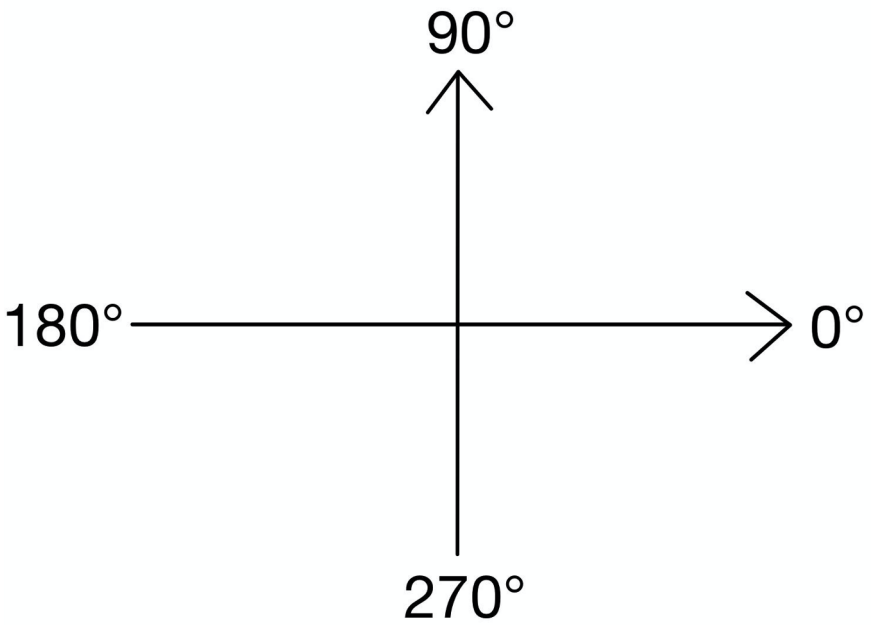




実験室との対応

実験室での方位角φの向き





θとφを求める

検出器の座標

$$(x_1, y_1, z_1) = (0,0,0)$$

$$(x_2, y_2, z_2) = (0,3.0,0)$$

$$(x_3, y_3, z_3) = (4.8,3.0,0)$$

$$(x_4, y_4, z_4) = (4.8,0,0)$$

$$(n_x, n_y, n_z) = (sin\theta cos\varphi, sin\theta \sin\varphi, cos\theta)$$

$$t_{i1} = t_i - t_1 \qquad ct_i = \vec{r} \cdot \vec{n}$$

時間差と検出器の座標からθとφを求める式

$$ct_{21} = y_2 sin\theta sin\varphi$$

$$ct_{41} = x_4 \sin\theta \cos\varphi$$

$$\therefore \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{x_4 t_{21}}{y_2 t_{41}}\right)$$

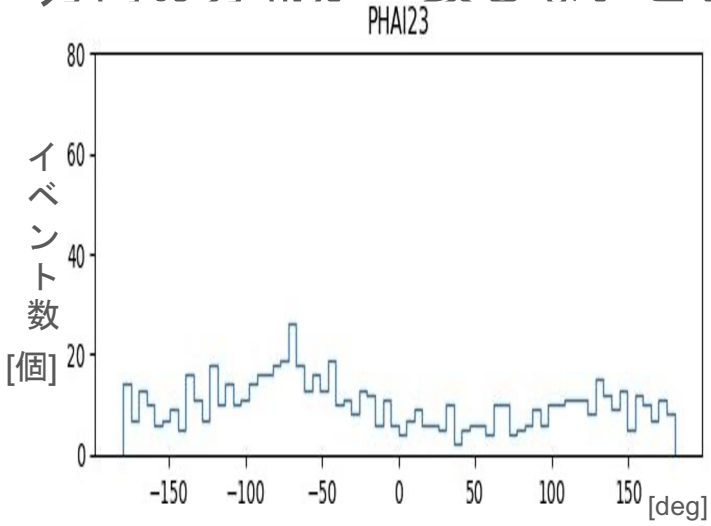
$$\therefore \theta = \sin^{-1}\left(\frac{ct_{21}}{y_2 \sin\varphi}\right)$$

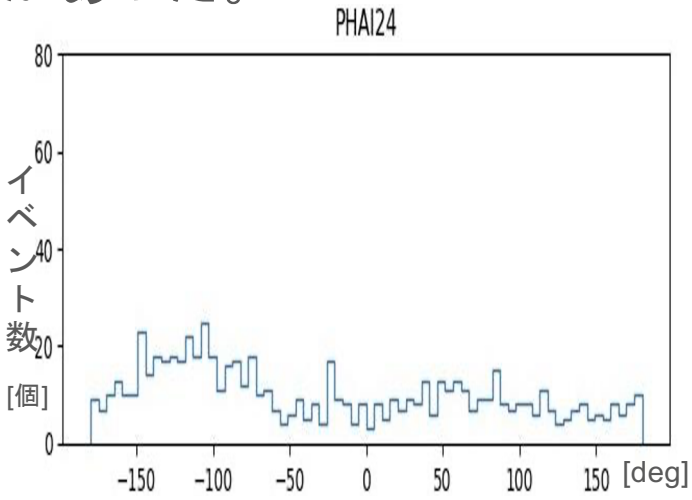
データの取捨選択①

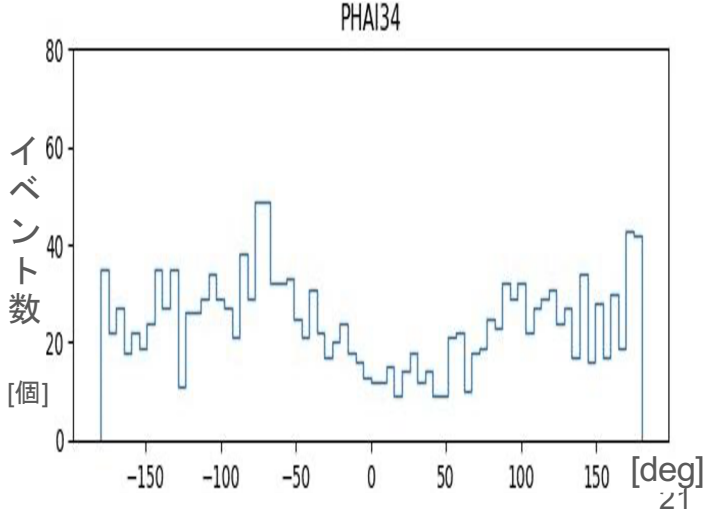
・タイムウォーク、タイムアウトを考慮したデータを使用する。タイムアウトは宇宙線が時間内に来ずに時間超過したもの。

・誤差により|sin(θ)|>1 となってしまうことがある為これは省いて計算する。

→この条件下で検出器123,124,134の組み合わせでそれぞれθ-φを求めると、到来方向の分布が一致しないことがあった。







データの取捨選択②

3つの求め方で、到来方向が似ているデータが正しいデータ。

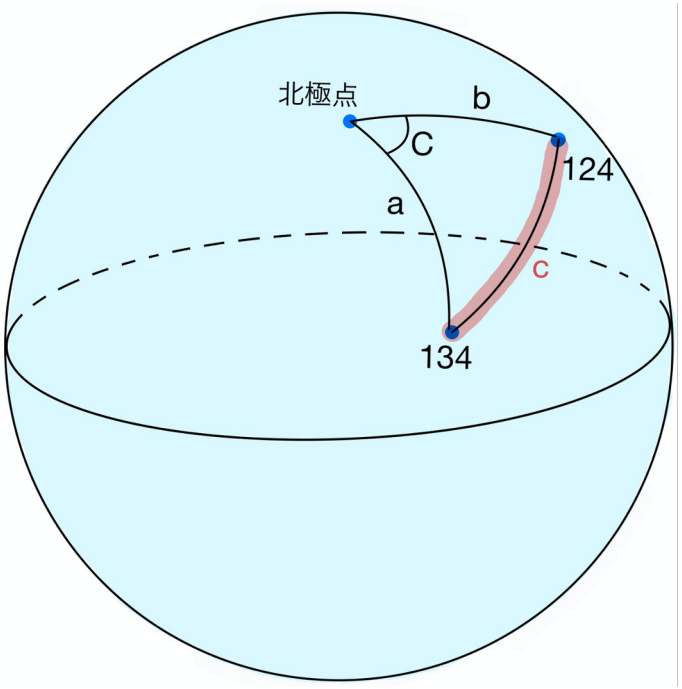
球面上でのそれぞれの角距離を求め、データを精査する。

(角距離c求め方)

球面上での距離

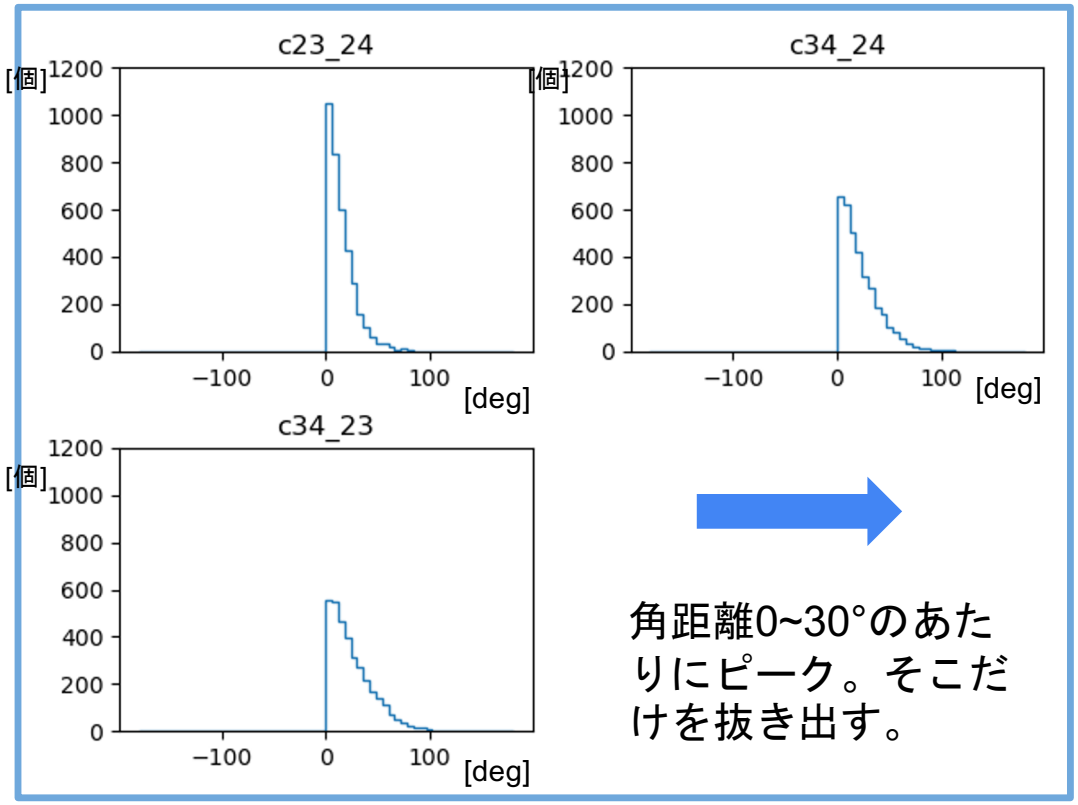
a=θi b=θj c=φi-φj

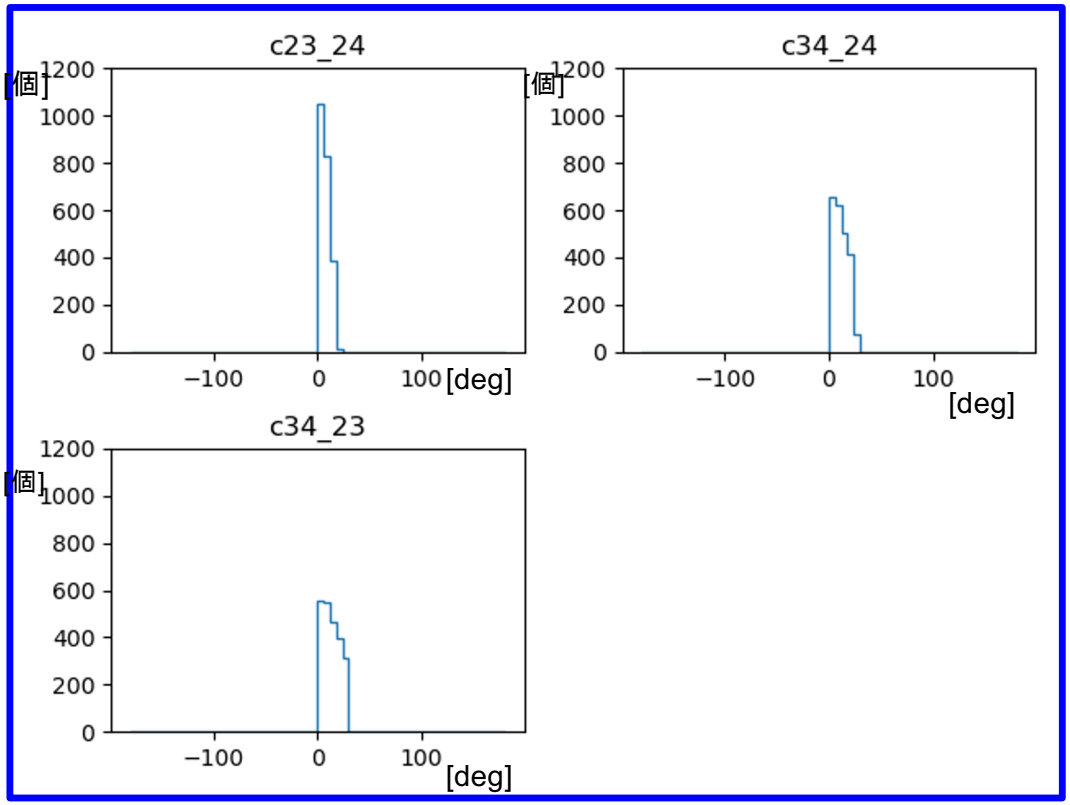
c=acos(cos(a)cos(b)+sin(a)sin(b)cos(C))



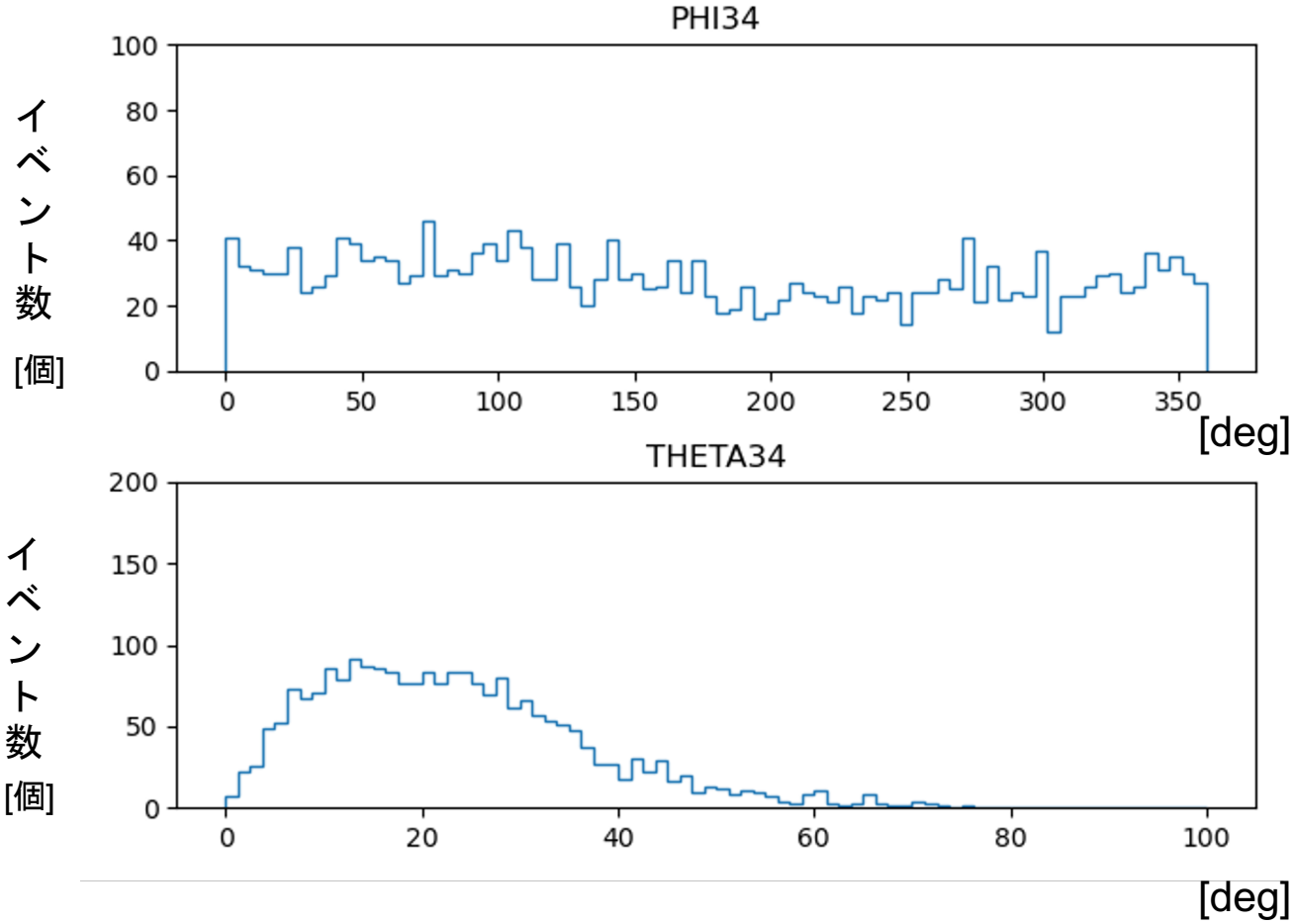
https://qiita.com/ysn/items/fbd57743ac652e0605df

角距離ごとのイベント数のヒストグラム





宇宙線の到来方向[θφ]分布



φ…

小さなピークはあるものの、ほぼ一様に分布している。

θ…

15°付近でピークを迎え、その後急激に少なくなる。

天頂角とイベント数

天頂角θが大きくなると立体角が大きくなる。これにより、天球上の面積は

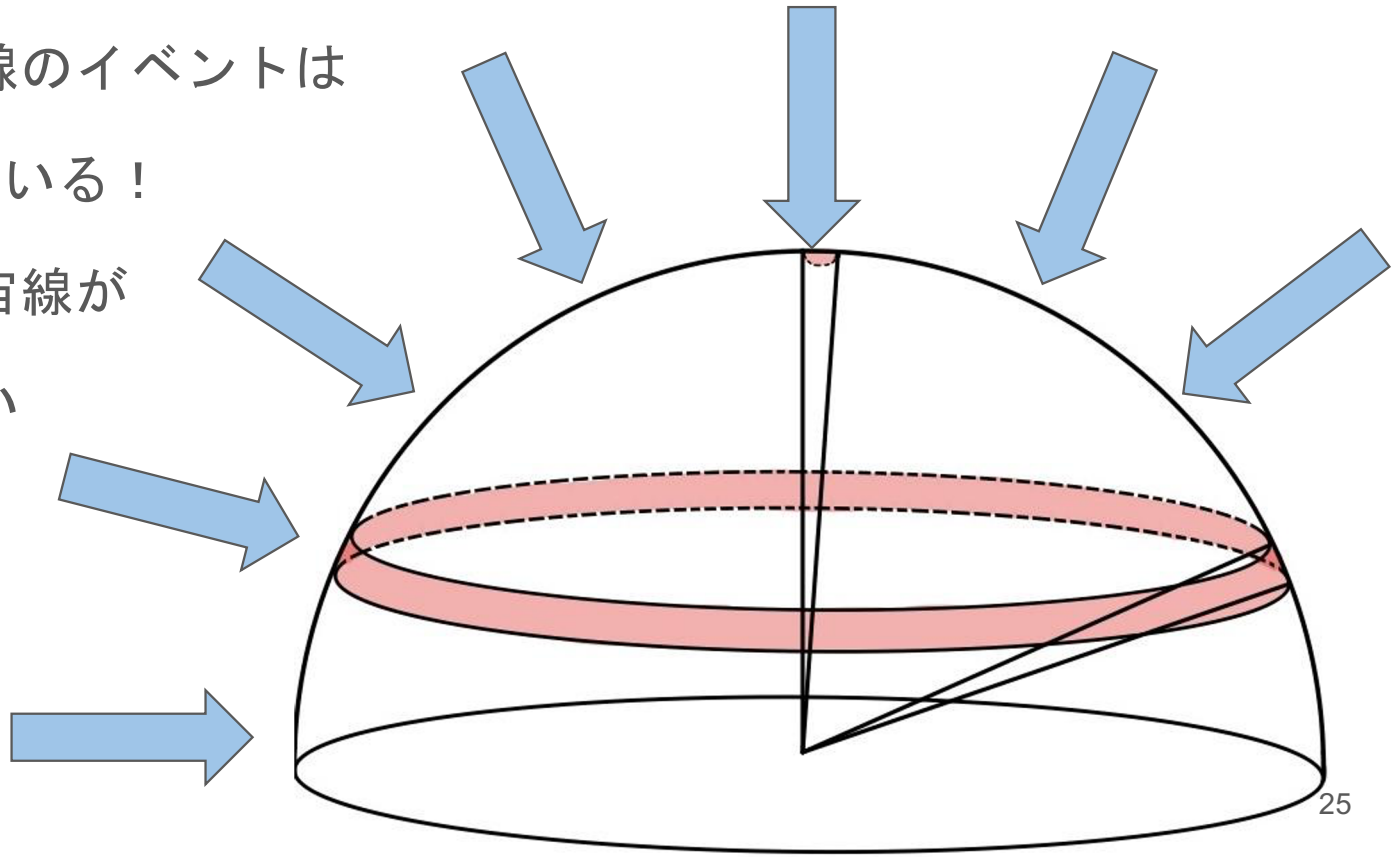
大きくなるので得られる宇宙線のイベントは

多くなるはず.....だけど減っている！

→天頂角が大きくなると、宇宙線が

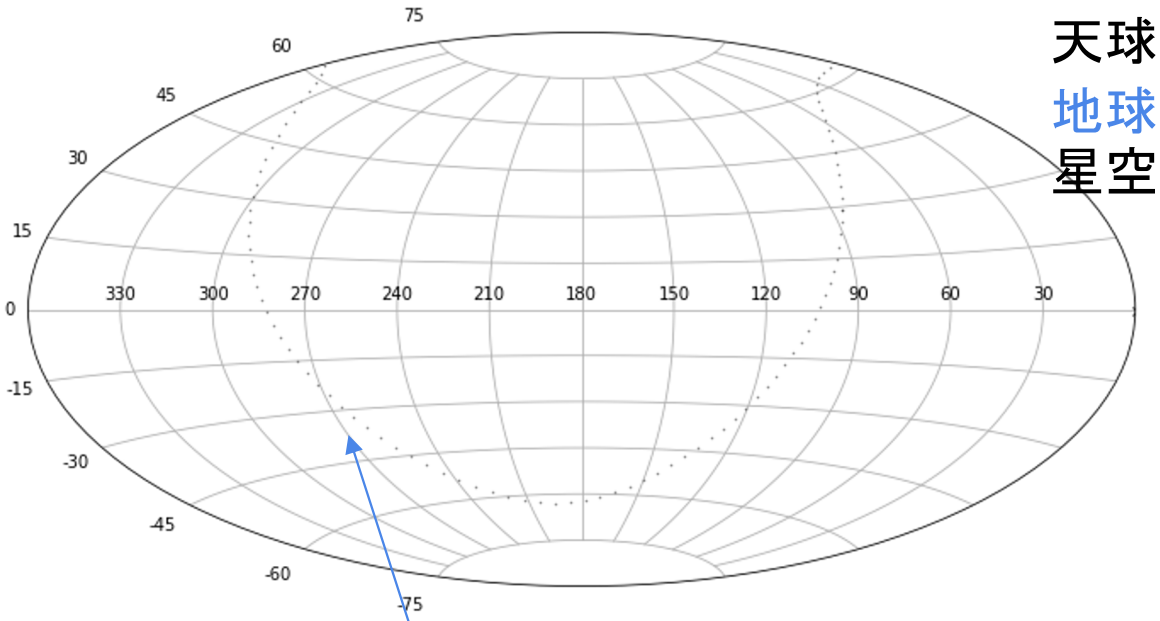
大気を通過しなければならない

距離が長くなるため。



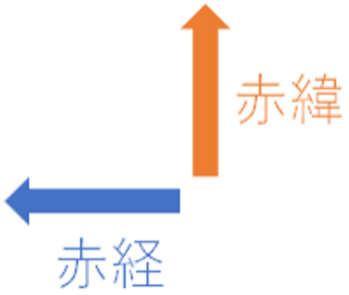
宇宙との関連を見る

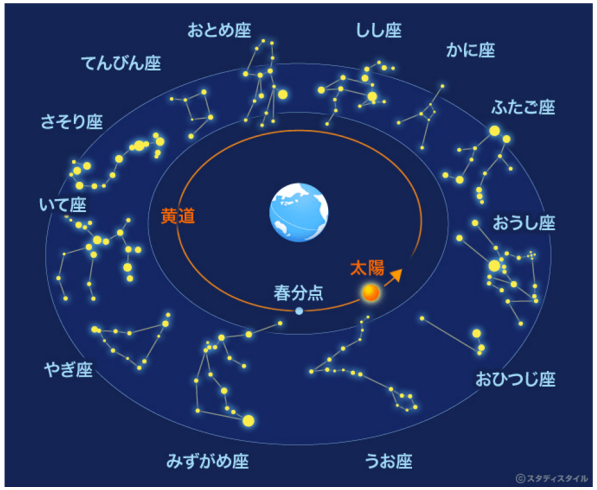
天球上の座標系(赤経 赤緯)でプロットし、到来方向と天体を結びつける



点線は銀河面を表す

天球図：
地球から見える
星空を広げた図





【出典】スタディスタイル★自然学習館
https://www.study-style.com/

赤経 赤緯

・求めたθ,φから赤道座標(赤経，赤緯)に換算し、天体との関連を見る。

・θ,φと赤緯δ, 赤経αの関係式

$$\delta = \sin^{-1}[\sin\Psi\cos\theta + \cos\Psi\sin\theta\cos\varphi]$$

$$\alpha = \Theta_{G0} + 1.002738UT + \lambda - \sin^{-1}\left[\frac{\sin\theta\sin\varphi}{\cos\delta}\right]$$

緯度：Ψ=35.9 [deg]、経度：λ=139.9 [deg]（千葉 柏 宇宙線研究所）

Θ_{G0} ：0時のグリニッジ恒星時、UT：世界時

参考：https://www.ir.isas.jaxa.jp/~maruma/kougi/sec2_190411.pdf

参考：世界時 UT

各イベントで測定された時刻を世界標準時に直す

単位は、次式のように揃えておく

$$UT = hour + \frac{minute}{60} + \frac{second}{3600} \ [\text{hour}]$$

世界時と0時グリニッジ恒星時は、

[hour]から角度の単位に換算して単位を合わせて計算する。

参考：グリニッジ恒星時

世界標準時での Y:year, M:month, D:day, h:hour, m:minute, s;second として

JD : ユリウス通日

$$JD = [365.25Y] + \left[\frac{Y}{400}\right] - \left[\frac{Y}{100}\right] + [30.59(M-2)] + D + 1721\,088.5 + \frac{h}{24} + \frac{m}{1440} + \frac{s}{86\,400}$$

$$TJD = JD - 2440\,000.5$$

グリニッジ恒星時：

$$\Theta_{G0} = 24 \times (0.671\,262 + 1.002\,737\,9094 \times TJD)\ [\mathrm{hour}]$$

0時グリニッジ恒星時で、h=0, m=0, s=0として計算すればよい

参考：恒星時 (star.gs) / 恒星時 - Wikipedia

赤経赤緯が正しく計算できているかの確認

1．ある時刻で観測できる星のθ,φから、赤経赤緯を計算する。

2．その星の赤経赤緯と一致していることを確かめる。

from Wikipedia

例）すばる

調べた値：赤緯 24[deg]、赤経 3h47m ~57[deg]

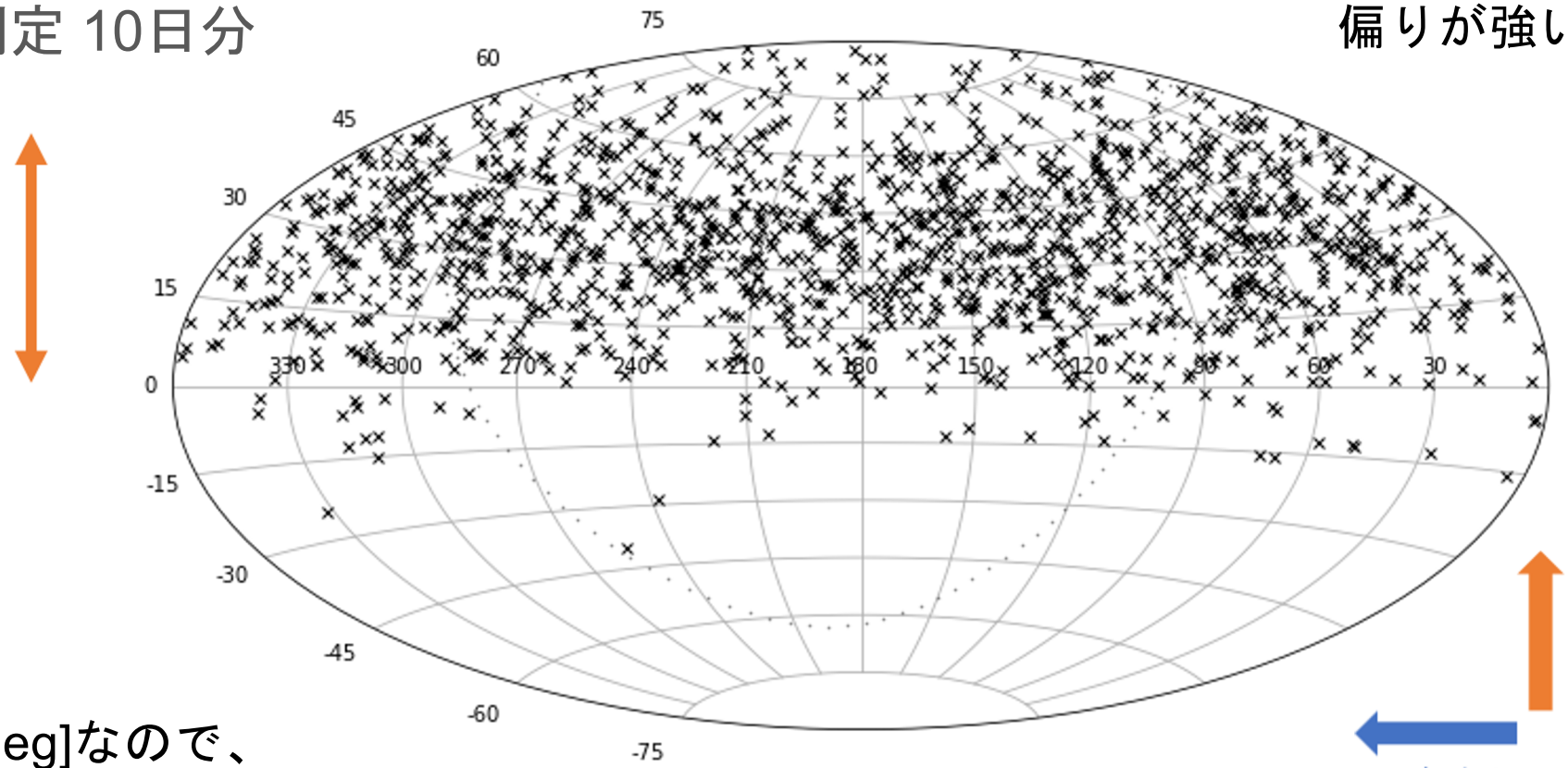
計算結果：

```
Unixtimestamp 1614423600 方位角265 仰角50 すばる
UTC: 2021-02-27 11:00:00
赤緯[deg]: 23.81636547460332
赤経[deg]: 56.008511923593176
```

得られた 天球図

24h測定 10日分

赤緯方向には、
偏りが強い



緯度35[deg]なので、
赤緯-55[deg]より上に見られる

赤経分布を見る

・推測されたエネルギー値：$E \sim 10^{13}[\mathrm{eV}]$

宇宙線は、銀河内をぐちゃぐちゃに曲がる　→　一様等方から来る

→偏りは少ないはず

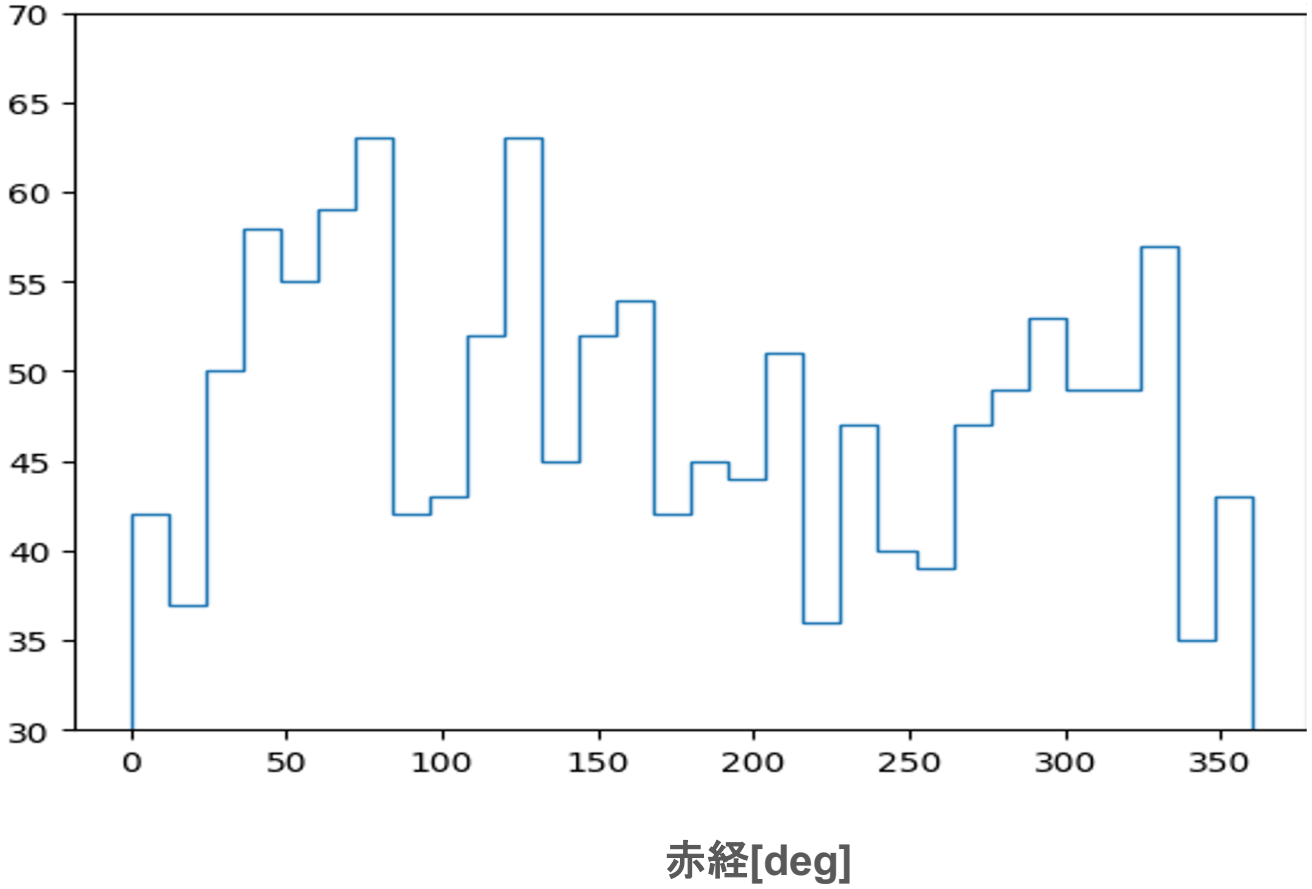
・地上での観測で通過する大気の厚みからθ方向については偏りが出る

→長時間の観測で、東西方向には偏りはでないはず

→赤経方向を見ればよい

∴　赤経方向については偏りが見られないと期待される。

得られた赤経分布



このヒストグラムをどう捉えるか？

・得られた赤経の分布は均一ではない

→統計的ばらつきがあるため

・では、統計的なばらつきはあるとして、このばらつきは誤差の範囲内と言えるのであろうか？

→ χ^2 検定で検証

赤経分布 の χ^2 検定

赤経分布にばらつきがあるかどうか、調べる

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{x_i}$$

x_i ：観測データ、 $\bar{x}$ ：平均値

計算 χ^2 ： = 35.66

χ^2 分布表との比較

計算結果 χ^2 = 35.66

カイ２乗分布表

自由度	上側有意確率 0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.5	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	自由度
1	0.00004	0.00016	0.00098	0.0039	0.0158	0.455	2.710	3.84	5.02	6.63	7.88	1
2	0.01003	0.02010	0.0506	0.1026	0.211	1.386	4.61	5.99	7.38	9.21	10.6	2
3	0.07172	0.1148	0.2158	0.352	0.584	2.37	6.25	7.81	9.35	11.3	12.8	3
4	0.2070	0.2971	0.484	0.711	1.06	3.36	7.78	9.49	11.1	13.3	14.9	4
5	0.4117	0.554	0.831	1.15	1.61	4.35	9.24	11.07	12.8	15.1	16.8	5
6	0.676	0.872	1.24	1.64	2.20	5.35	10.64	12.6	14.5	16.8	18.6	6
22	8.64	9.54	11.0	12.3	14.0	21.3	30.8	33.9	36.8	40.3	42.8	22
23	9.26	10.2	11.7	13.1	14.9	22.3	32.0	35.2	38.1	41.6	44.2	23
24	9.89	10.9	12.4	13.9	15.7	23.3	33.2	36.4	39.4	43.0	45.6	24
25	10.5	11.5	13.1	14.6	16.5	24.3	34.4	37.7	40.7	44.3	46.9	25
26	11.2	12.2	13.8	15.4	17.3	25.3	35.6	38.9	41.9	45.6	48.3	26
27	11.8	12.9	14.6	16.2	18.1	26.3	36.7	40.1	43.2	47.0	49.6	27
28	12.5	13.6	15.3	16.9	18.9	27.3	37.9	41.3	44.5	48.3	51.0	28
29	13.1	14.3	16.1	17.7	19.8	28.3	39.1	42.6	45.7	49.6	52.3	29
30	13.8	15.0	16.8	18.5	20.6	29.3	40.3	43.8	47.0	50.9	53.7	30

http://www3.u-toyama.ac.jp/kkarato/2019/statistics/table/chisq.pdf

結論：「赤経方向に等方的」と**矛盾しなかった**

まとめ

・4台のシンチレーターを用いて3-foldで空気シャワーを観測して宇宙線の到来方向を調べた。

・本実験で観測された宇宙線のエネルギーは $E \sim 10^{13}[\mathrm{eV}]$ と宇宙の磁場によって曲げられない程には大きくなかった。

・そのため、測定した宇宙線の到来方向は赤経方向に一様に分布するはずだと仮定をし、宇宙線の到来方向を赤道座標に換算し、天球図にプロットした。

・その結果赤経方向に一様に分布するという仮定に矛盾しなかったので今回の測定では宇宙線の到来方向は一様であると結論づけられた。