

宇宙線空気シャワーをとらえる

最高エネルギー宇宙グループ

member 井澤 拓海 山崎 眞尋 榊原 滯
坂本 琉之助 杉本 布達

supervisors/supporters

萩尾 彰一先生 谷 隆志先生
高橋 薫さん 大島 仁さん 藤末 紘三さん

目次

- 1.原理
- 2.装置
- 3.宇宙線到来方向の分解能の評価
- 4.宇宙線到来方向分布
- 5.ニュートリノによる上向きシャワーの観測
- 6.まとめ

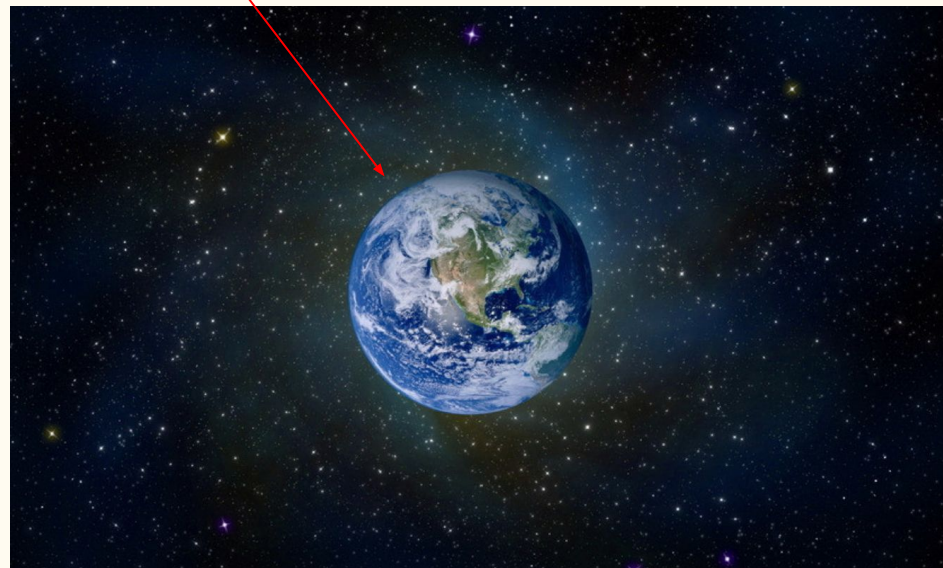
2.原理 宇宙線とは

宇宙空間を飛び交う高エネルギー粒子

主成分 原子核

他に γ 線、電子、ニュートリノ

宇宙線

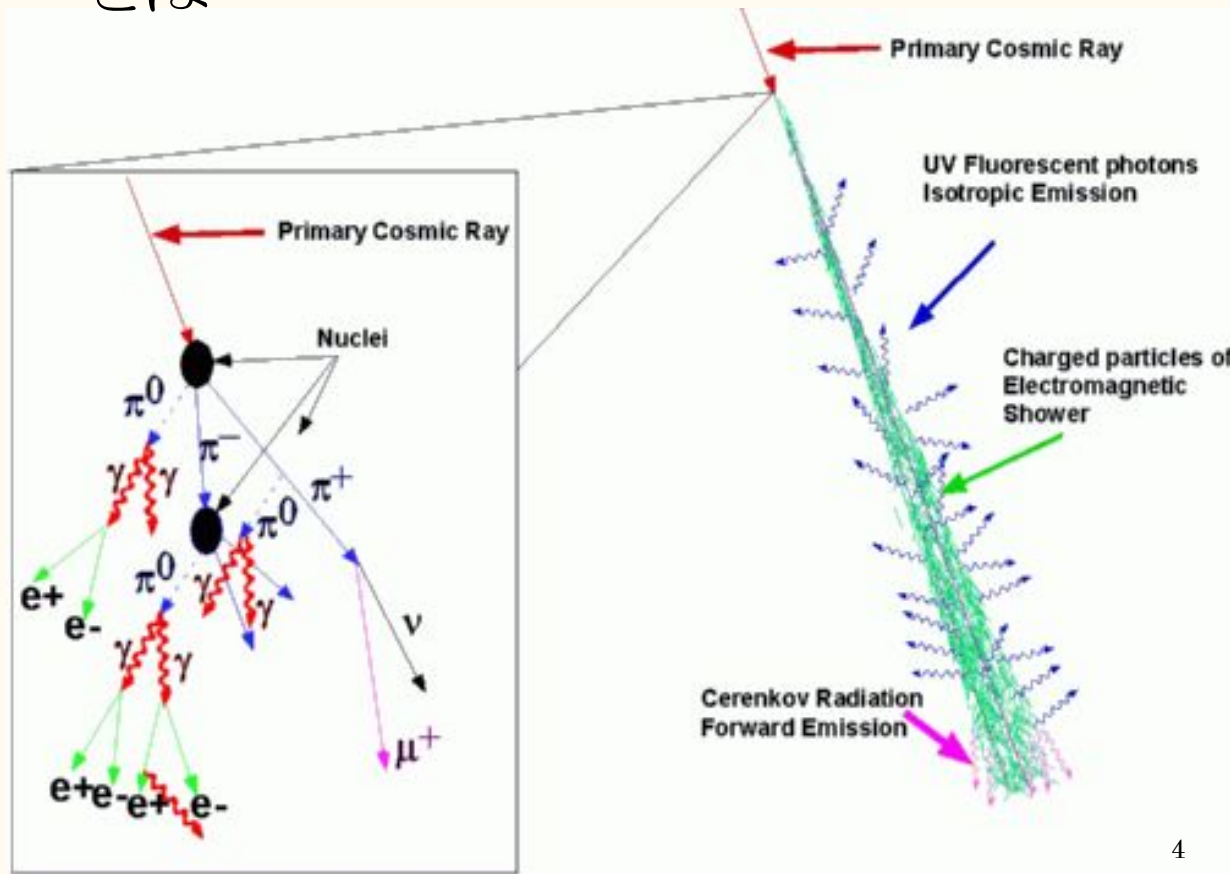


2.原理 空気シャワーとは

大きいエネルギーをもった宇宙線

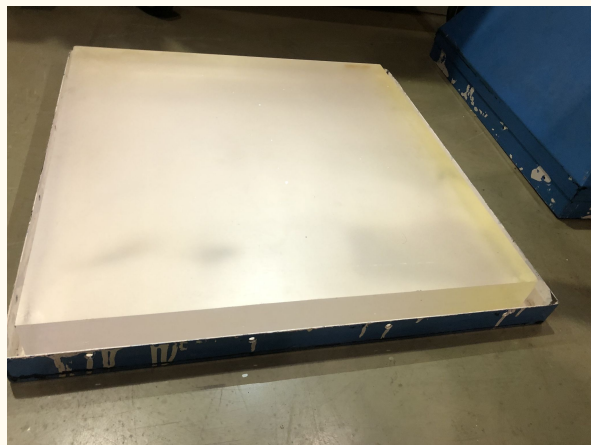
γ 線が電子、陽電子を生成

電子、陽電子が γ 線を放射



装置

宇宙線を観測する検出器



プラスチックシンチレーター

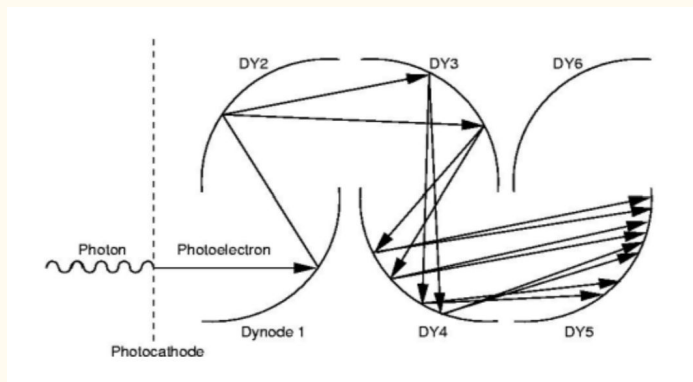
荷電粒子が電離によって失ったエネルギーに比例して蛍光を発する。

光電子増倍管(PMT)

光子を光電効果で光電子に変換

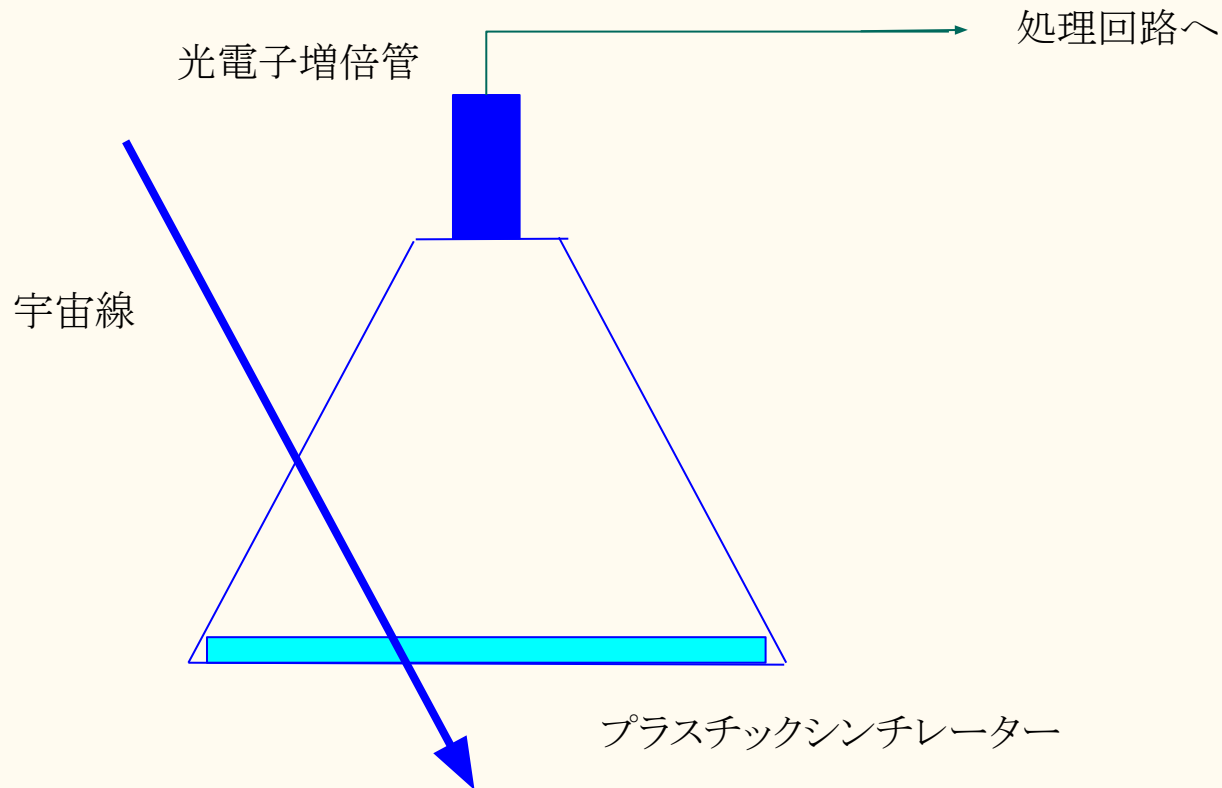
複数の電極(ダイノード)間で電子を加速・増幅

1光子を約 10^6 電子に増幅し、電気信号として読み出す



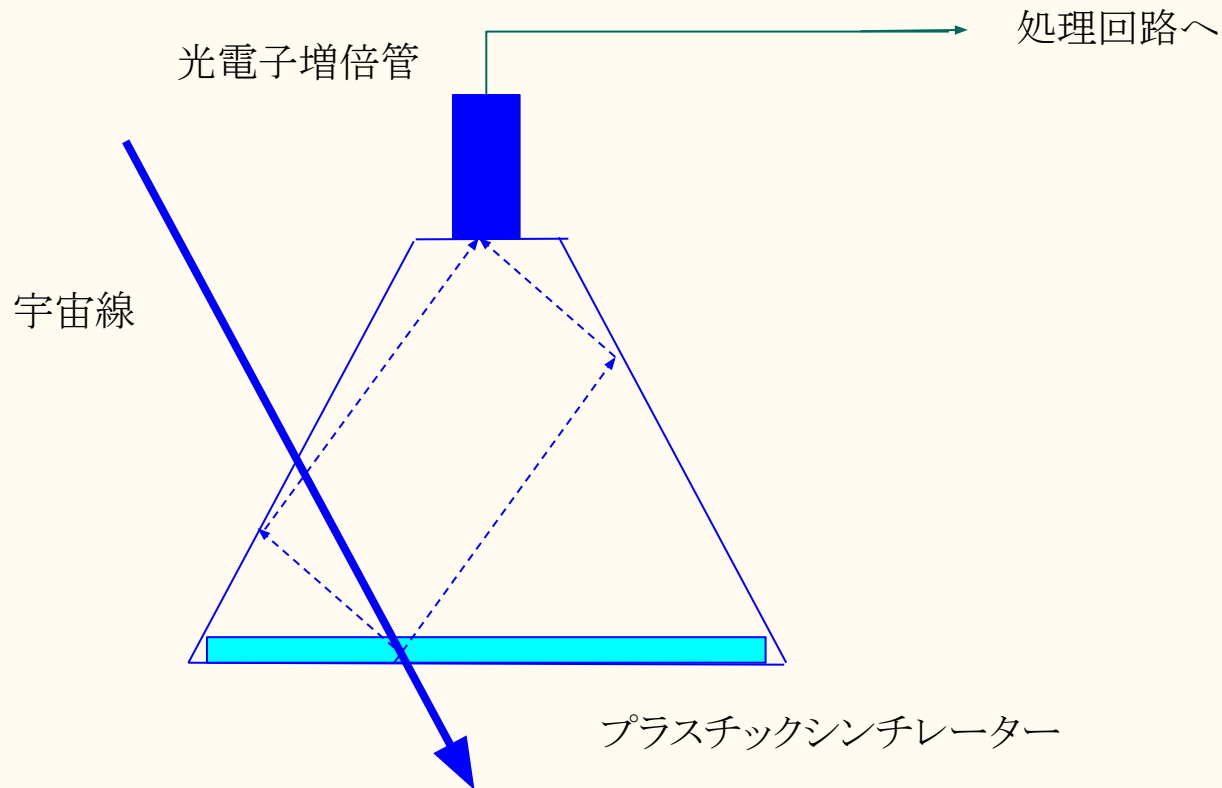
3. 装置

プラスチックシンチレーターと光電子増倍管



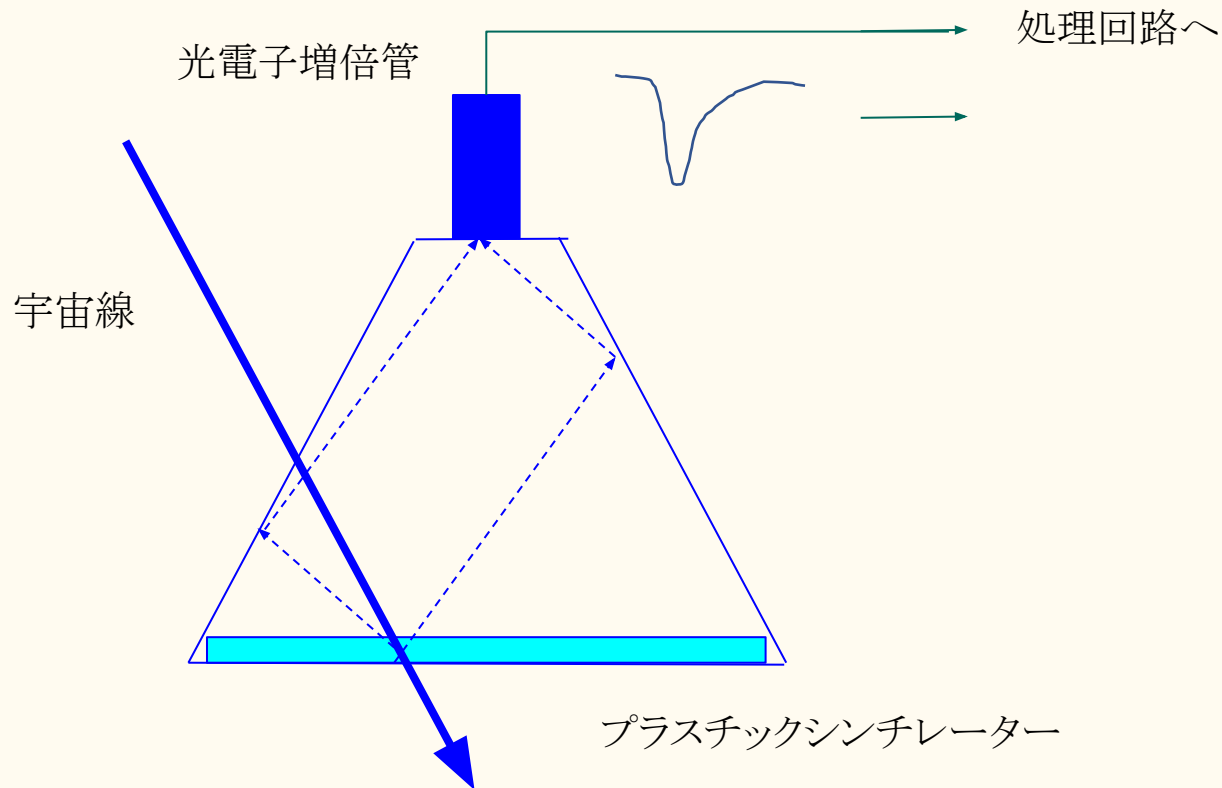
3. 装置

プラスチックシンチレーターと光電子増倍管



3. 装置

プラスチックシンチレーターと光電子増倍管



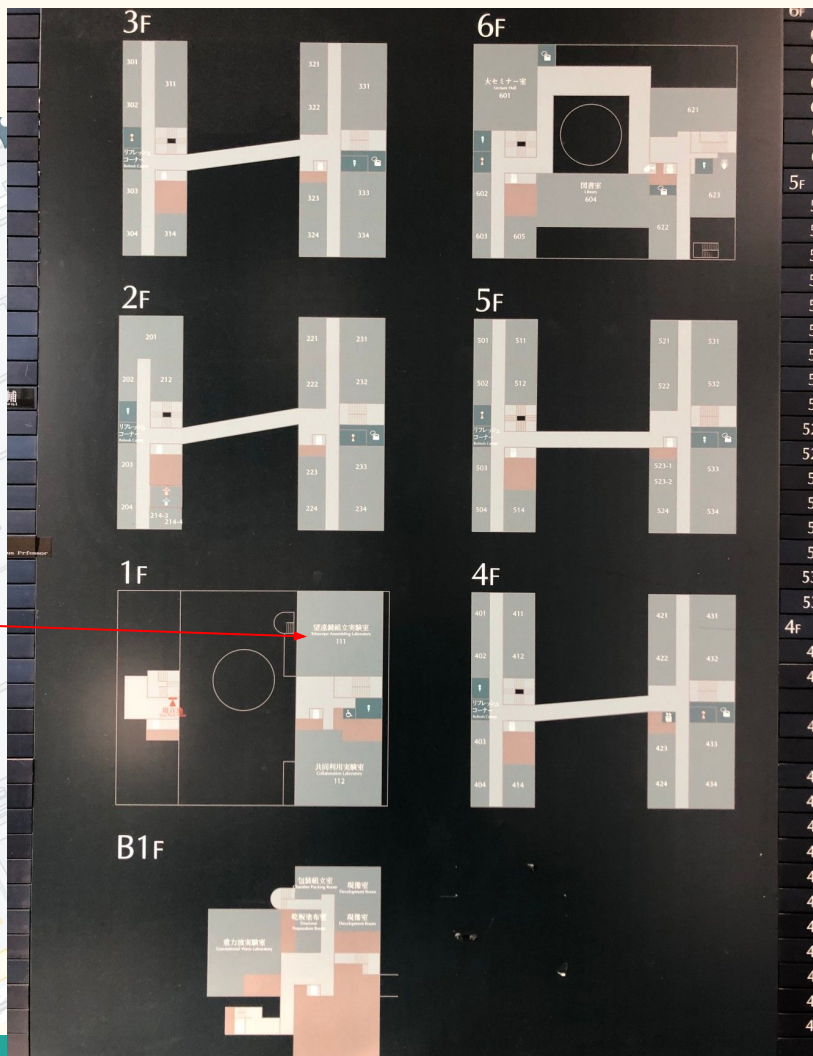
実験場所

宇宙線研究所



実験場所

望遠鏡組立実験室

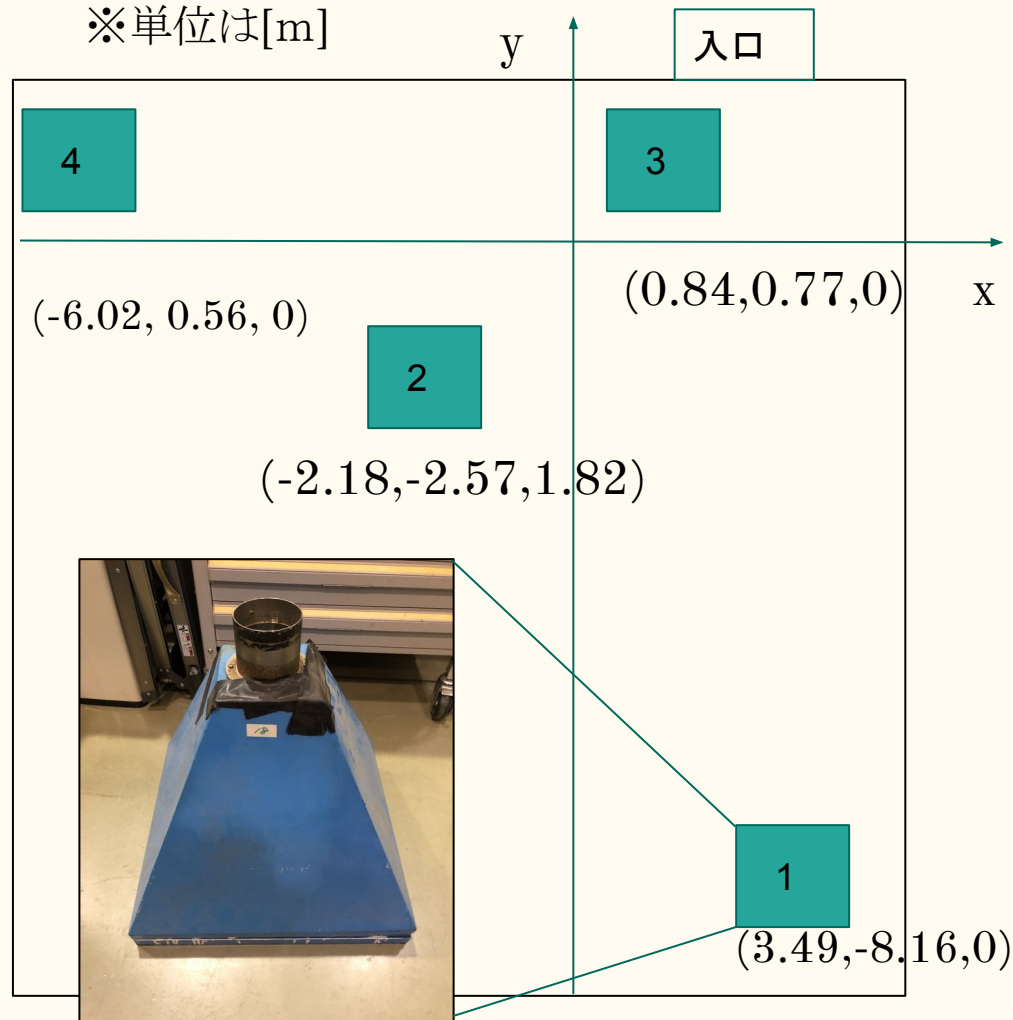


3. 装置

配置図

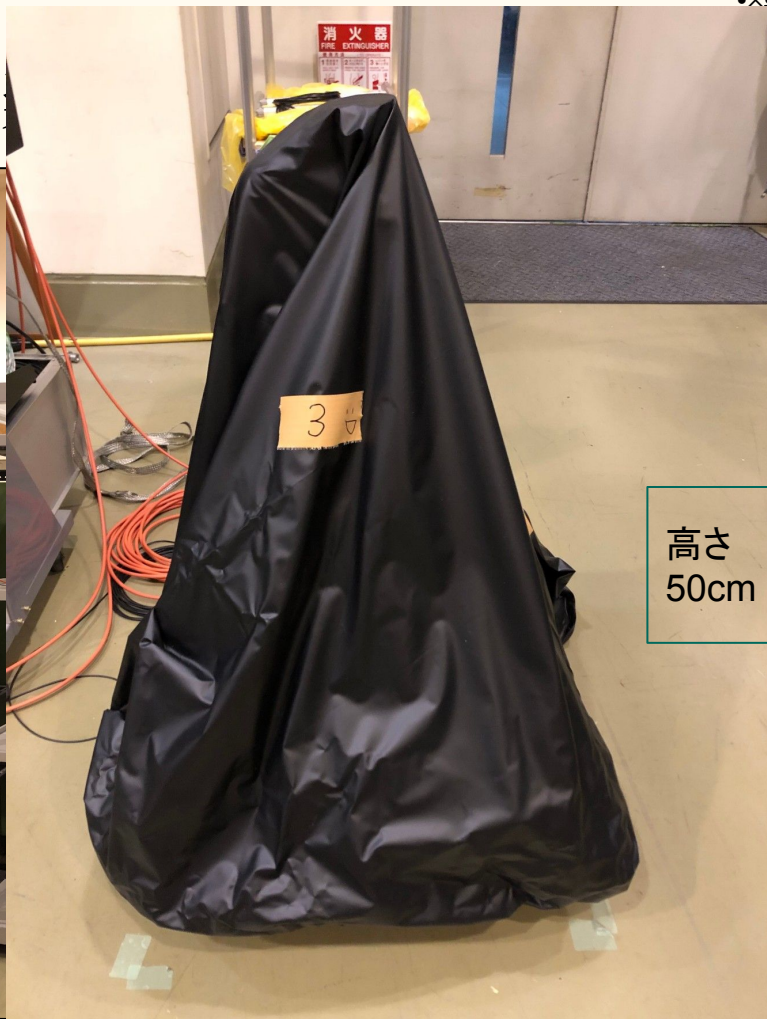


※単位は[m]

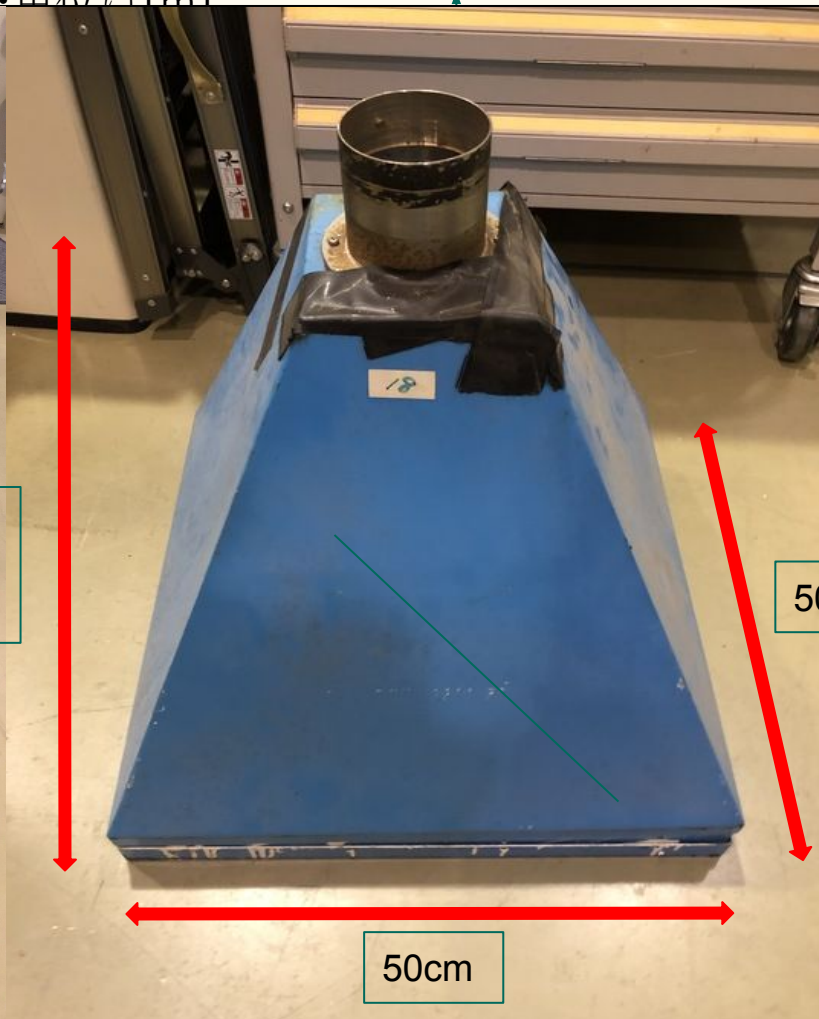


※単位は[m]

3.



高さ
50cm



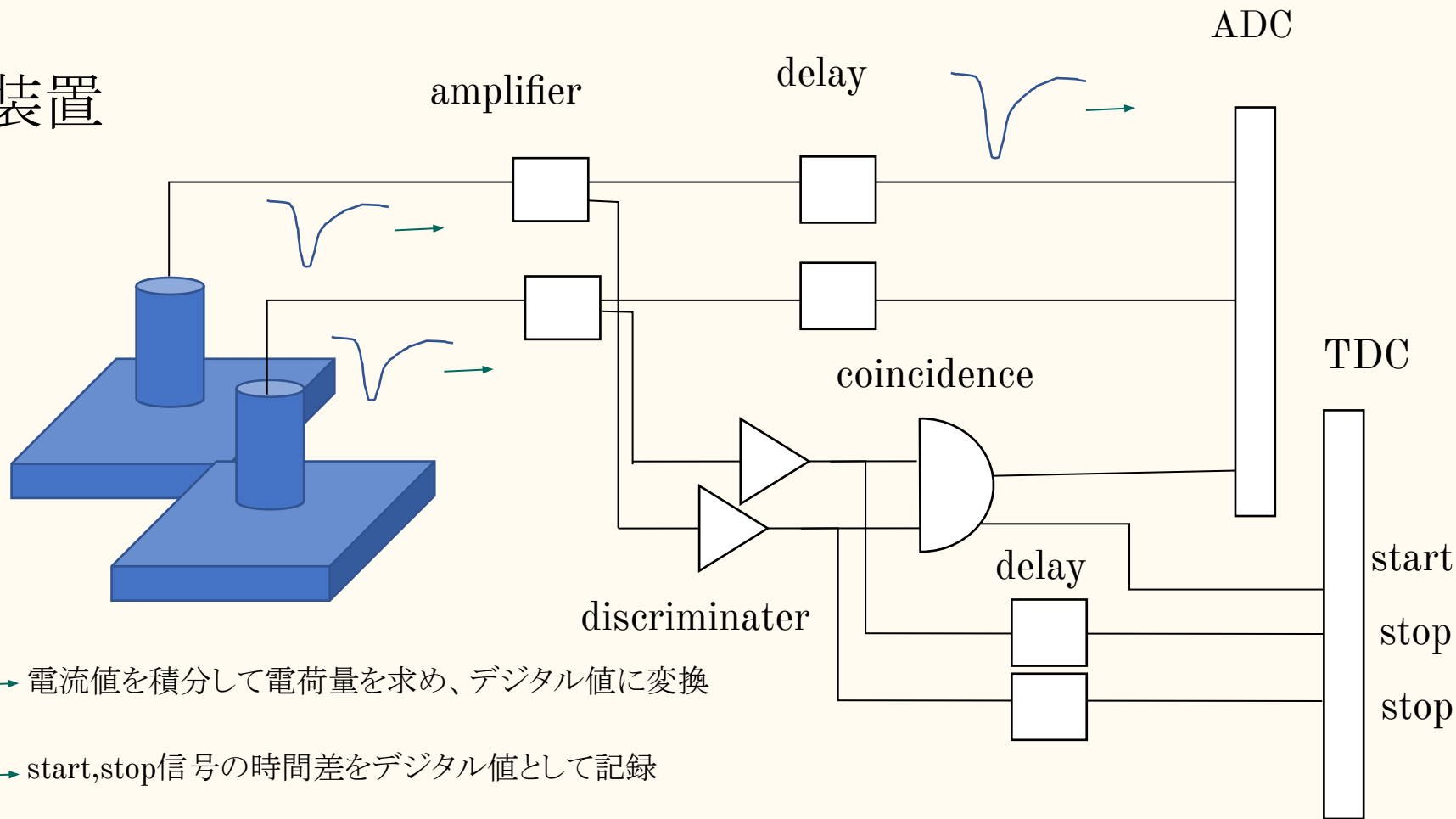
X

50cm

50cm

3,0)

3. 装置



ADC → 電流値を積分して電荷量を求め、デジタル値に変換

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が高い！

目的

1. 宇宙線の到来方向決定精度を求める
2. 天頂角・方位角分布を求め、その意味を理解する
3. 4台目検出器のデータを使って上むき空気シャワーを探す[高エネルギー宇宙ニュートリノの探索]

データについて

トリガー条件: 3つの検出器から信号検出

総イベント数: 672イベント

測定時間: 3日16時間6分(3月6日18時16分～3月10日10時22分)

イベントレート: 7.6イベント毎時間

データ例:

1678094241	status 0	q 1	x 1	count 1	data 1966	40	1417	996	442 4095 391 370
1678094598	status 0	q 1	x 1	count 2	data 491	30	282	842	441 4095 241 176
1678094808	status 0	q 1	x 1	count 3	data 4095	23	1642	2731	441 4095 442 428

赤: UNIX time

青: 各検出器のTDC値

到来方向の決定

$z = 0$ に3つの検出器があるとする

位置ベクトルを $\vec{r}_1$ $\vec{r}_2$ $\vec{r}_3$ 間を、 t_1 と t_2 t_3

シャワーの法線ベクトルと検出器の位置ベクトルの内積を取る

$$\begin{cases} n_x x_1 + n_y y_1 = ct_1 \\ n_x x_2 + n_y y_2 = ct_2 \\ n_x x_3 + n_y y_3 = ct_3 \end{cases}$$

検出器1を基準として差分をとり、 n_x に n_y での連立方程式を出す

$$\begin{cases} n_x \Delta x_{21} + n_y \Delta y_{21} = c \Delta t_{21} \\ n_x \Delta x_{31} + n_y \Delta y_{31} = c \Delta t_{31} \end{cases}$$

到来方向の決定

$$n_x = c \frac{\Delta y_{31} \Delta t_{21} - \Delta t_{31} \Delta y_{21}}{\Delta y_{21} \Delta x_{31} - \Delta x_{21} \Delta y_{31}}$$

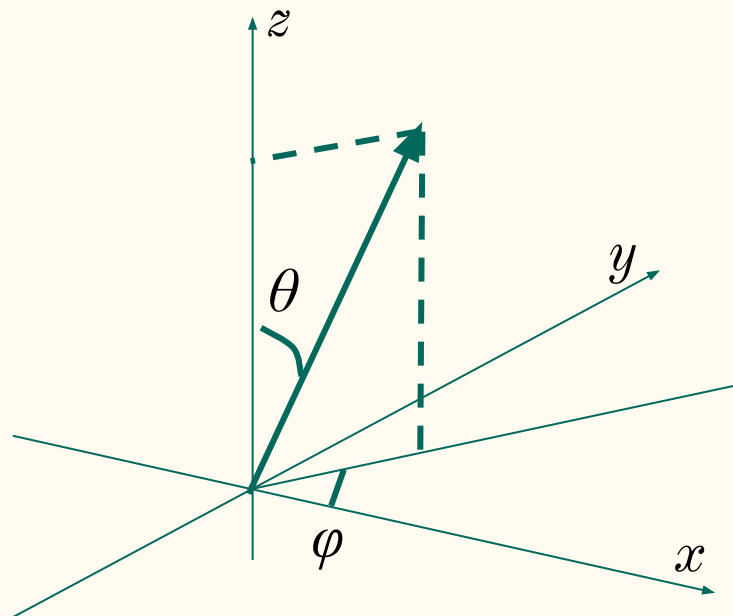
$$n_y = c \frac{\Delta x_{31} \Delta t_{21} - \Delta t_{31} \Delta x_{21}}{\Delta y_{21} \Delta x_{31} - \Delta x_{21} \Delta y_{31}}$$

$$\theta = \arcsin(n_x^2 + n_y^2)$$

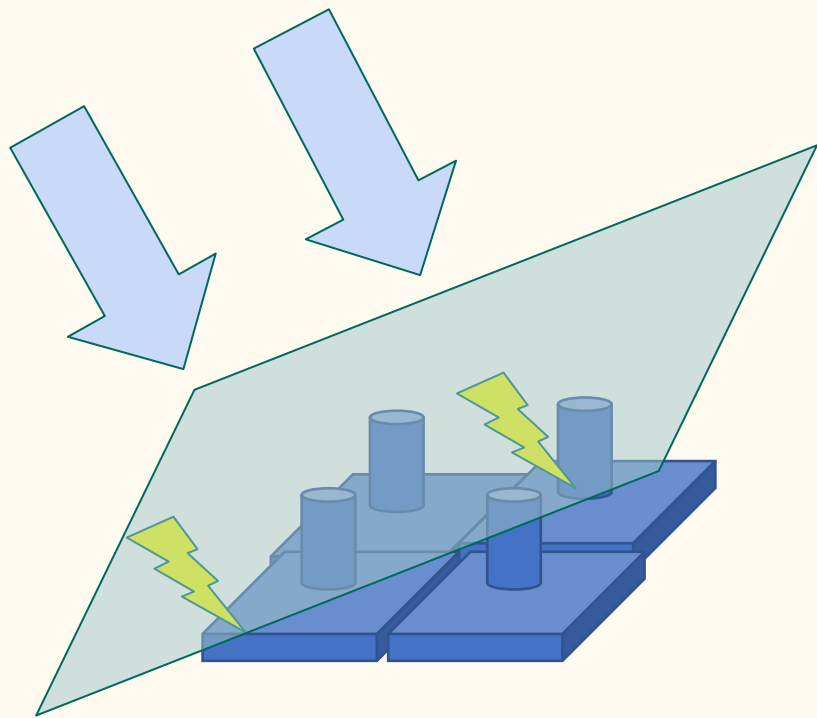
$$\varphi = \arctan(n_y / n_x)$$

と (θ, φ) が求められる

天頂角・方位角の定義 (θ, φ)



TDC値同時測定のためのセットアップ

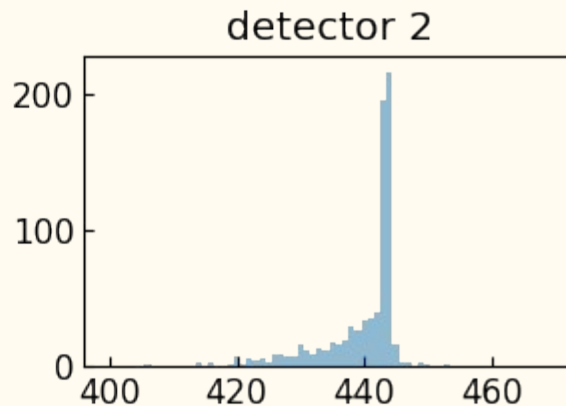
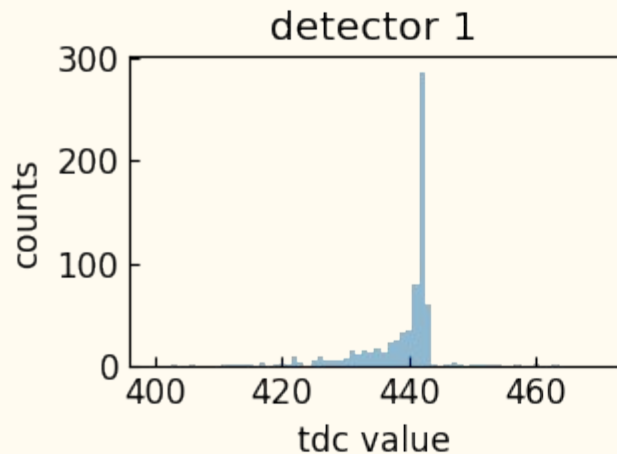


セットアップ

4つの検出器を密接

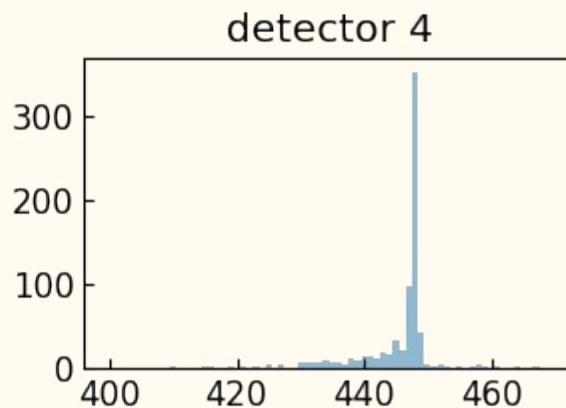
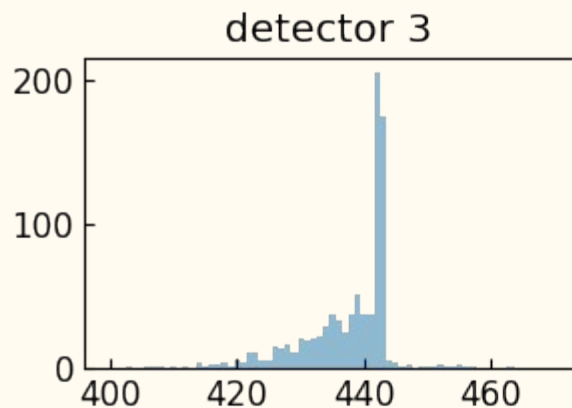
- 空気シャワーを同時に検出

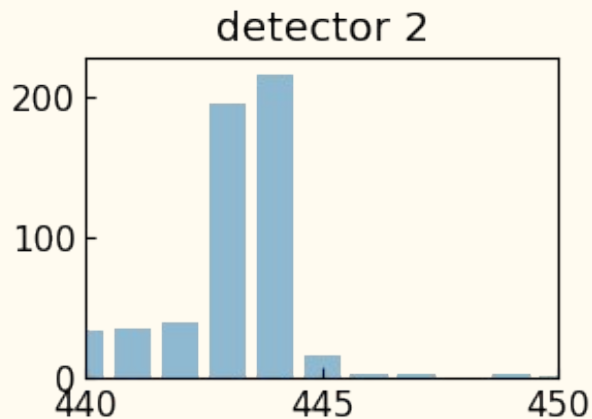
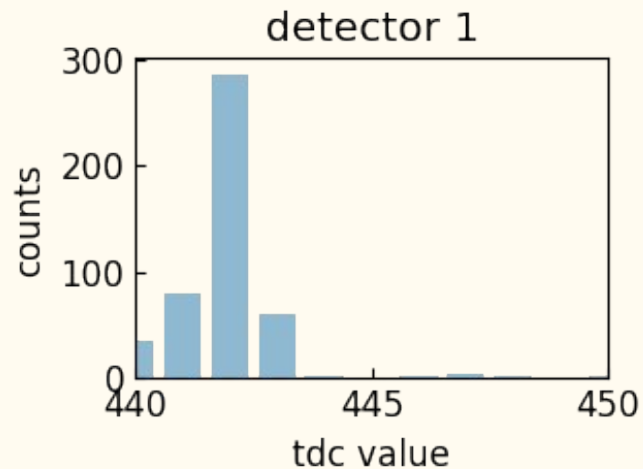
2つ以上の信号で記録 (2 fold)



検出器ごとのTDC値分布

カウント数最大のTDC値が
違う

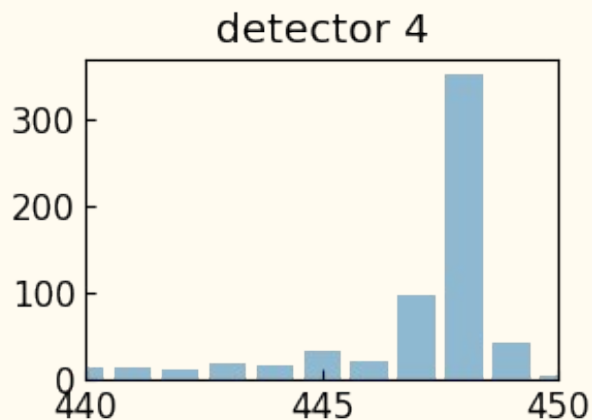
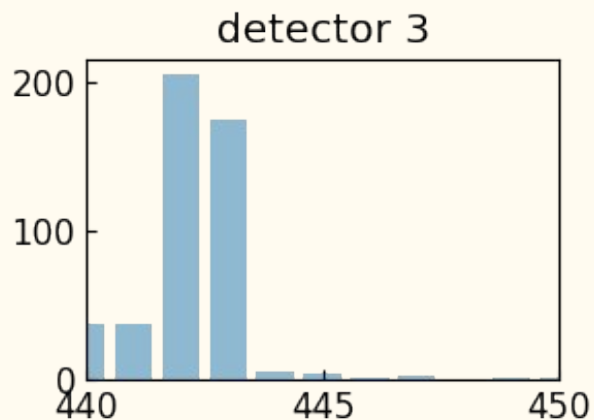




検出器ごとのTDC値分布

440~450の範囲に拡大

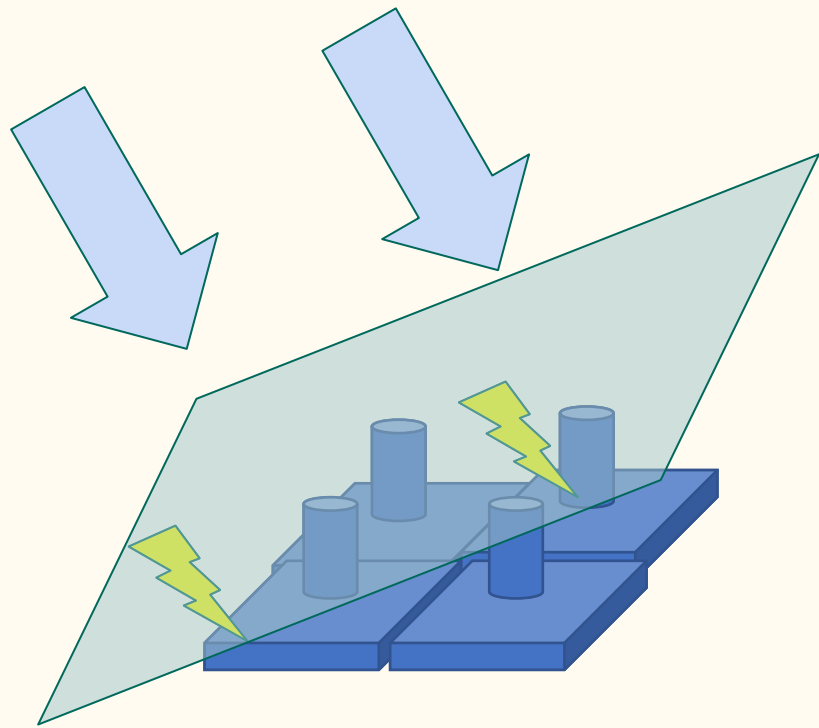
カウント数最大のTDC値が違
う



同時に入射したはずでは？



TDC値の補正



セットアップ

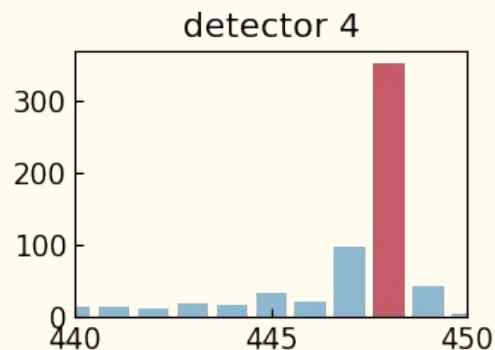
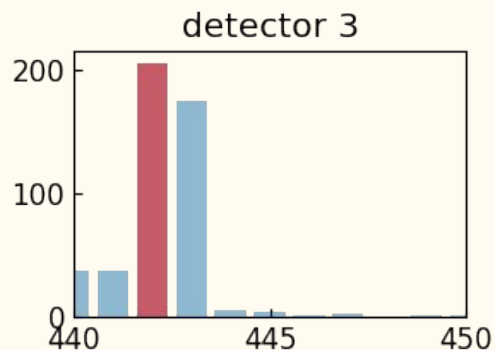
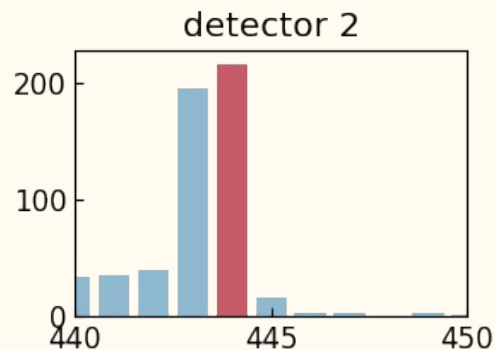
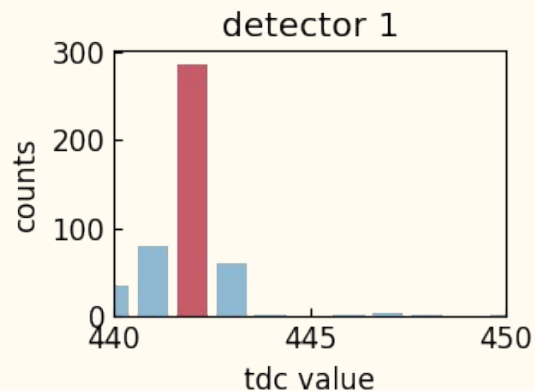
4つの検出器を密接

- 空気シャワーを同時に検出

→ 同時ならTDC値は同じはず

→ カウント数が最も多いTDC値を引き算して補正する

TDC値の補正



検出器ごとのTDC値分布

最頻値のビンの平均を取ると

検出器1: 442.5 カウント

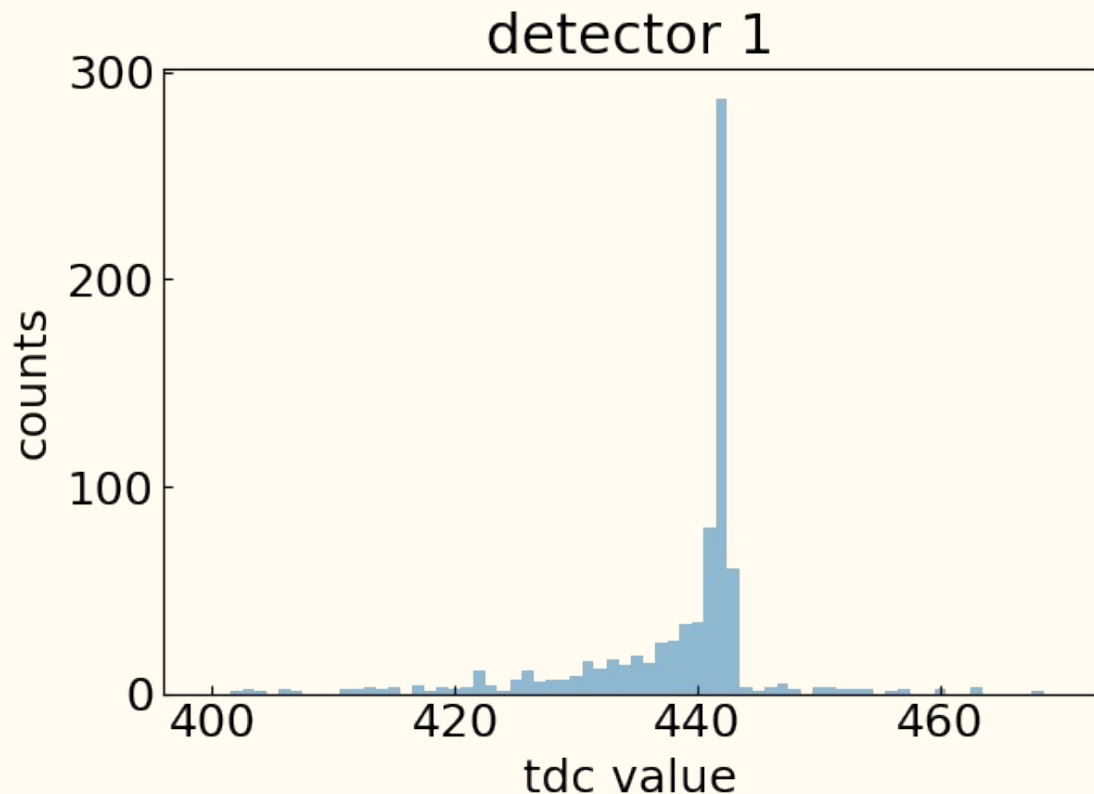
検出器2: 444.5 カウント

検出器3: 442.5 カウント

検出器4: 448.5 カウント

これらを方向計算時に引き算

TDC値の不確かさの算出

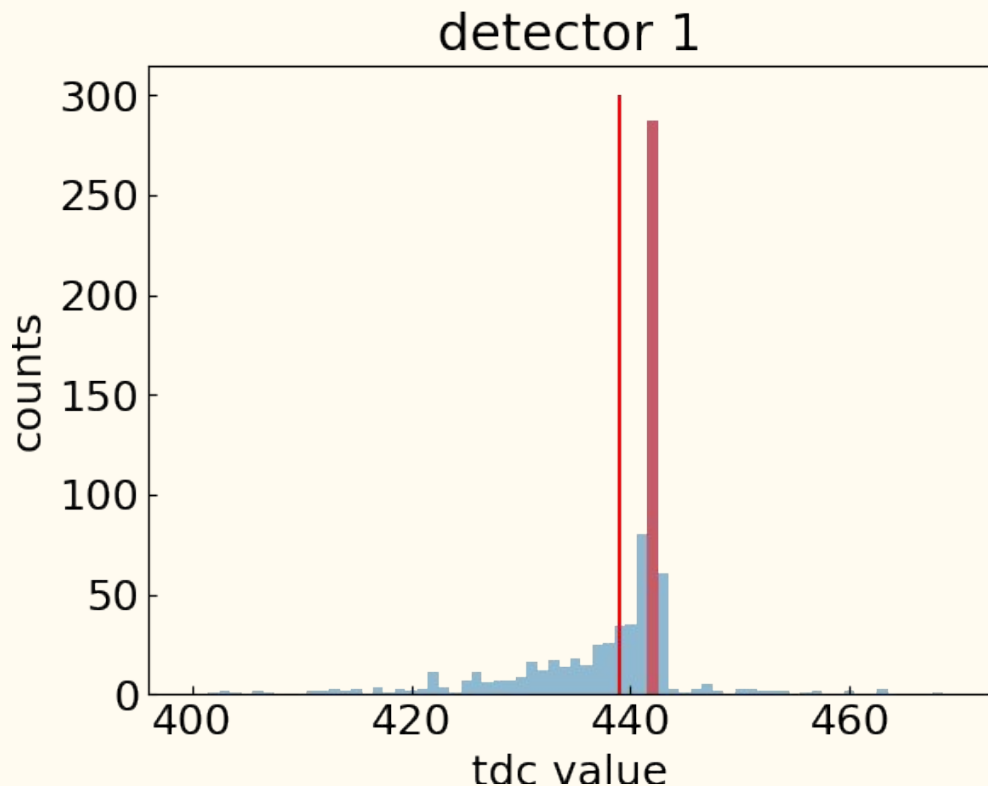


実際のTDC値のカウント数分布

- 突出した最大値
- カウント数が非対称

カウント数の積分で評価する

TDC値の分布について



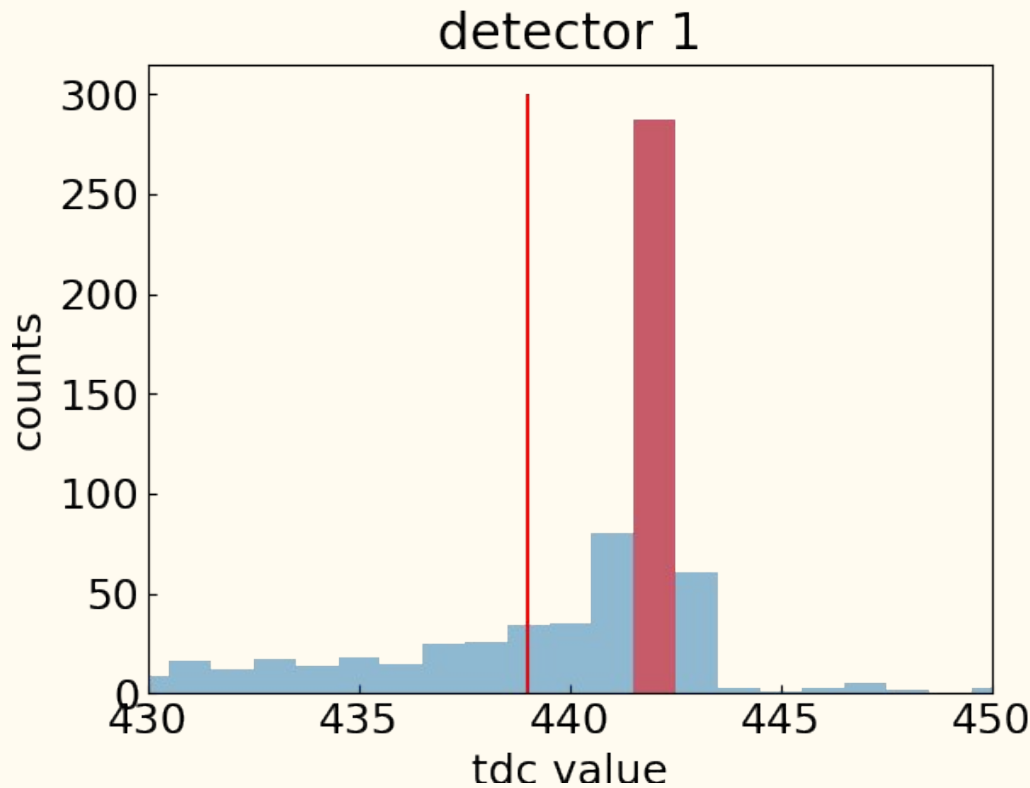
カウント数の積分で評価する

赤領域: 最頻値

赤線: 上側68%点

上側68%点と最頻値の差を
不確かさとする

TDC値の分布について



カウント数の積分で評価する

赤領域: 最頻値

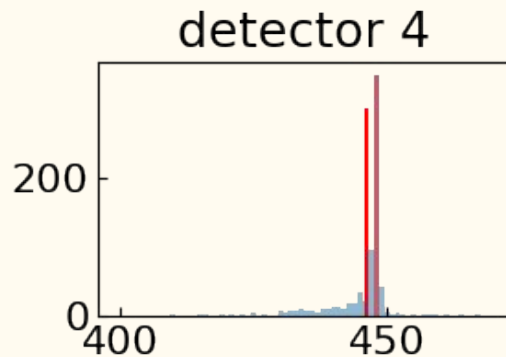
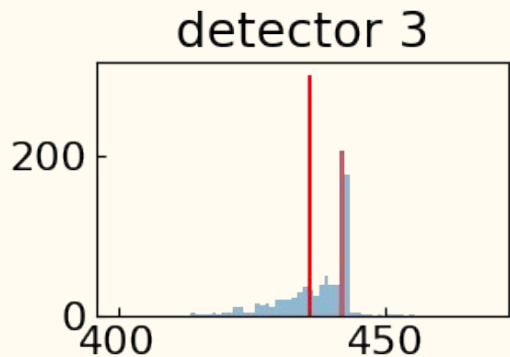
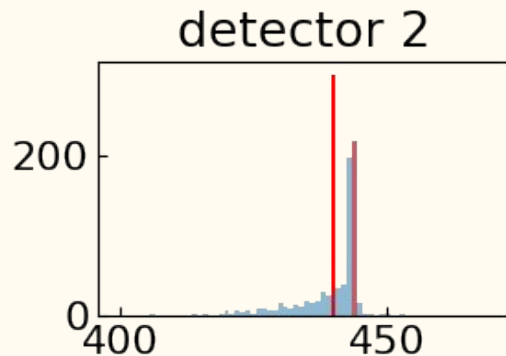
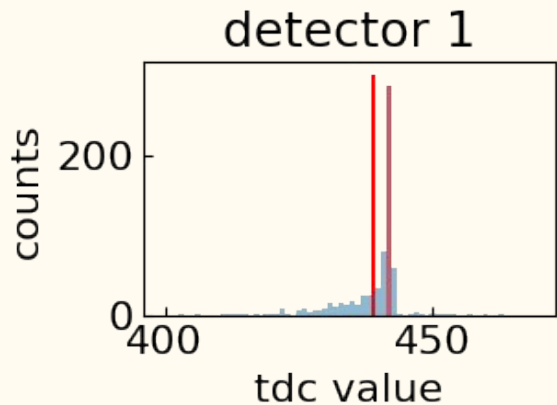
赤線: 上側68%点

上側68%点と最頻値の差を

不確かさとする

→ **3.5カウント**

TDCの不確かさ評価



カウント数の積分で評価する

他の検出器でも同様に求めると

検出器1:3. 5カウント

検出器2:4. 5カウント

検出器3:6. 5カウント

検出器4:2. 5カウント

これを不確かさとする

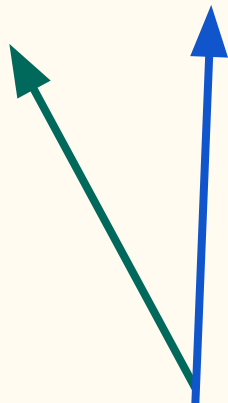
角度分解能

時間のばらつきを考慮するには

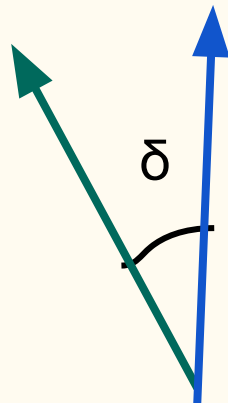
TDC値分布より、TDC値は最頻値より大きい方向にはゆらがないので...



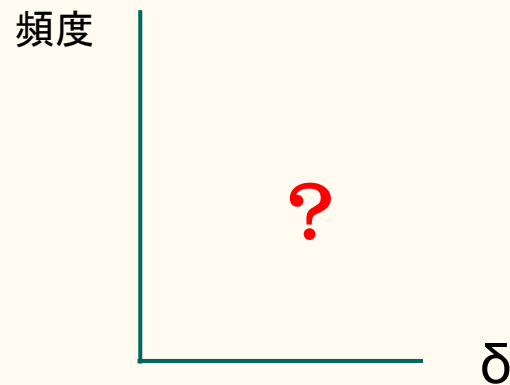
1. 実データの到来方向を求める



2. TDC値をゆらぎ分引いて方向を求める

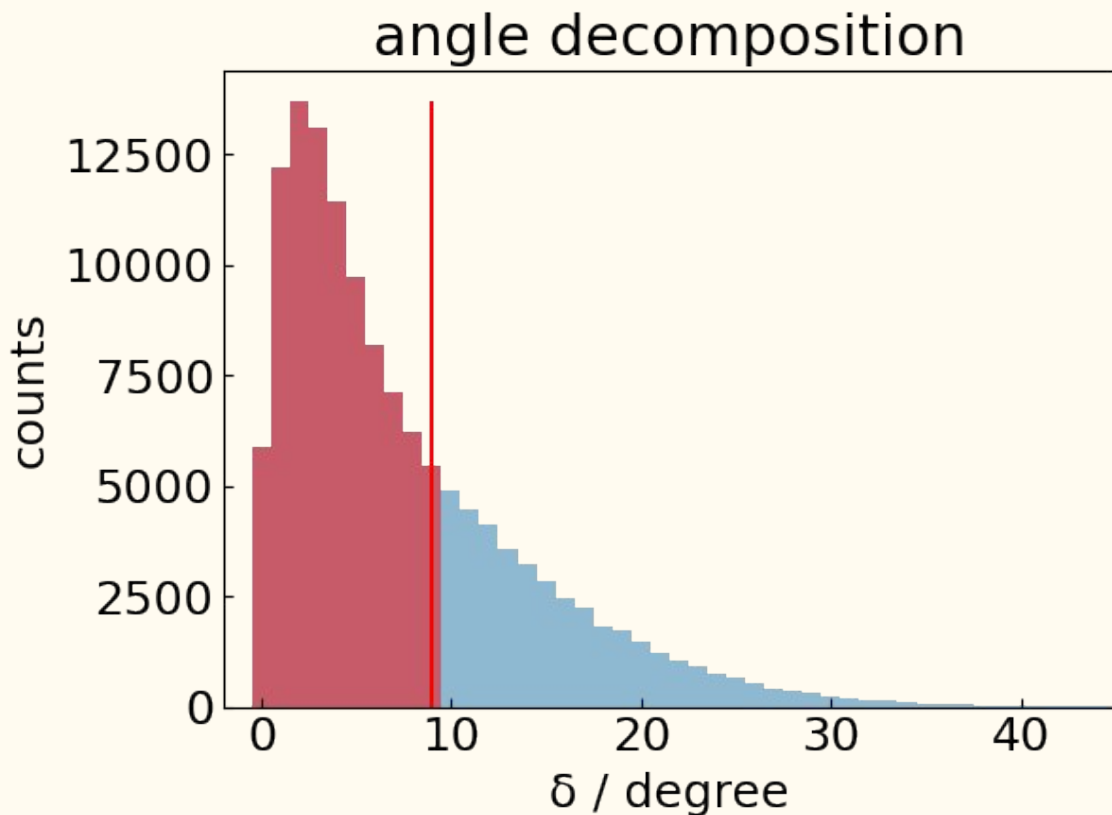


3. 間の角度を出す



4. 角度分布を出して分解能を決定

角度分解能



試行数: 133592回

赤領域: 積分領域

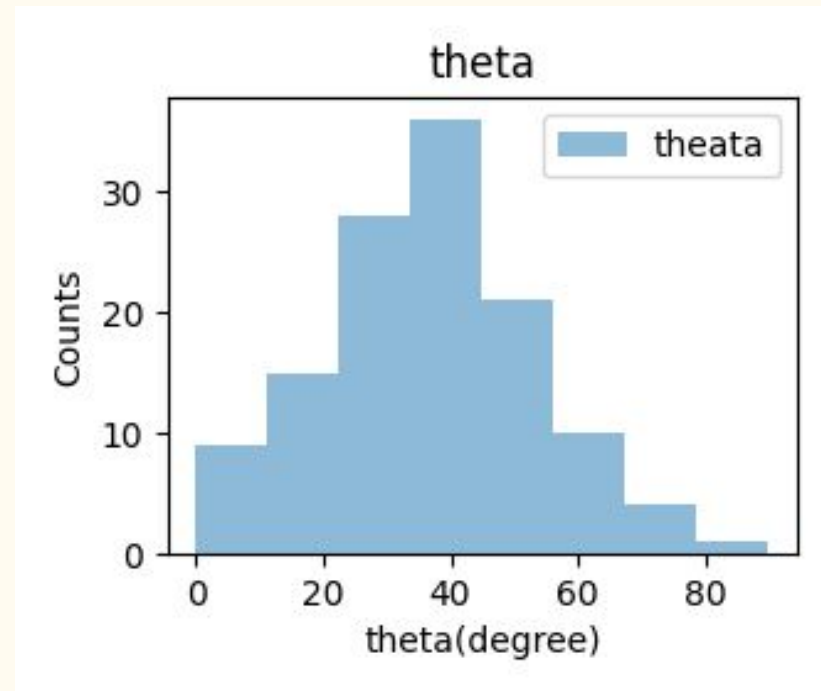
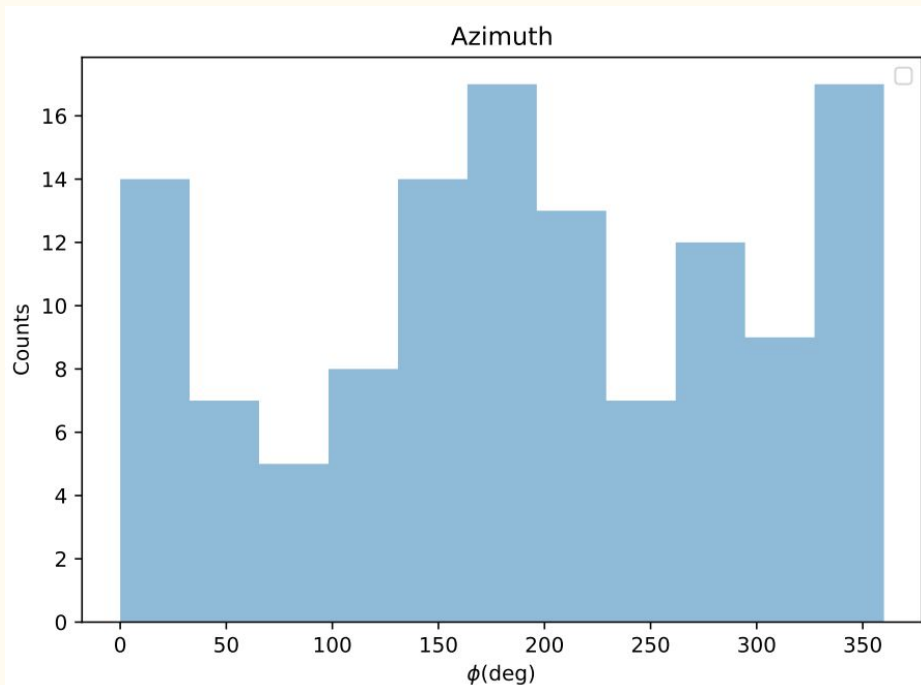
赤線: 下側68%点

角度分解能: 9度

θ を45度で固定したときの ϕ 分解能: 11度

φ, θ 分布の算出

θ 、 ϕ 分布の算出

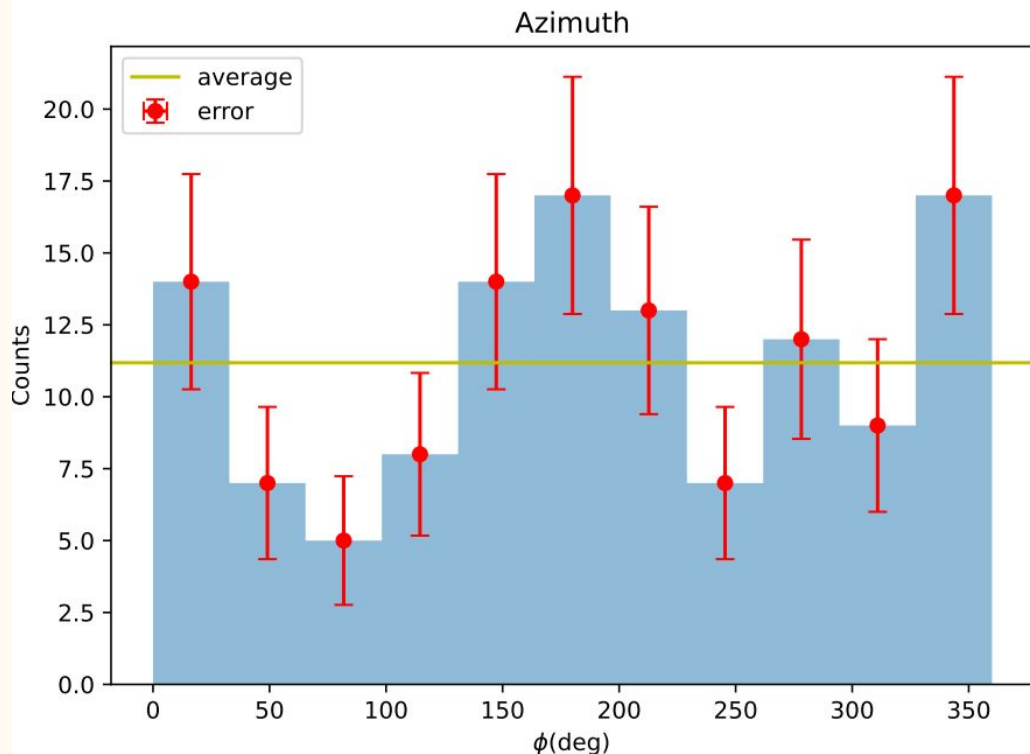


φ分布

今回検出した空気シャワーの元の粒子は、銀河磁場によって曲げられ、地球には等方的にやっけてきていると考えられる。

そこで、地球へ等方的にやっけてきているかどうかを χ^2 検定を行い確かめる。

ϕ 分布の χ^2 検定



χ^2 検定を行い、等方的に来ていると仮定したときに得られるであろう平均値が各count数と一致しているかを確かめる

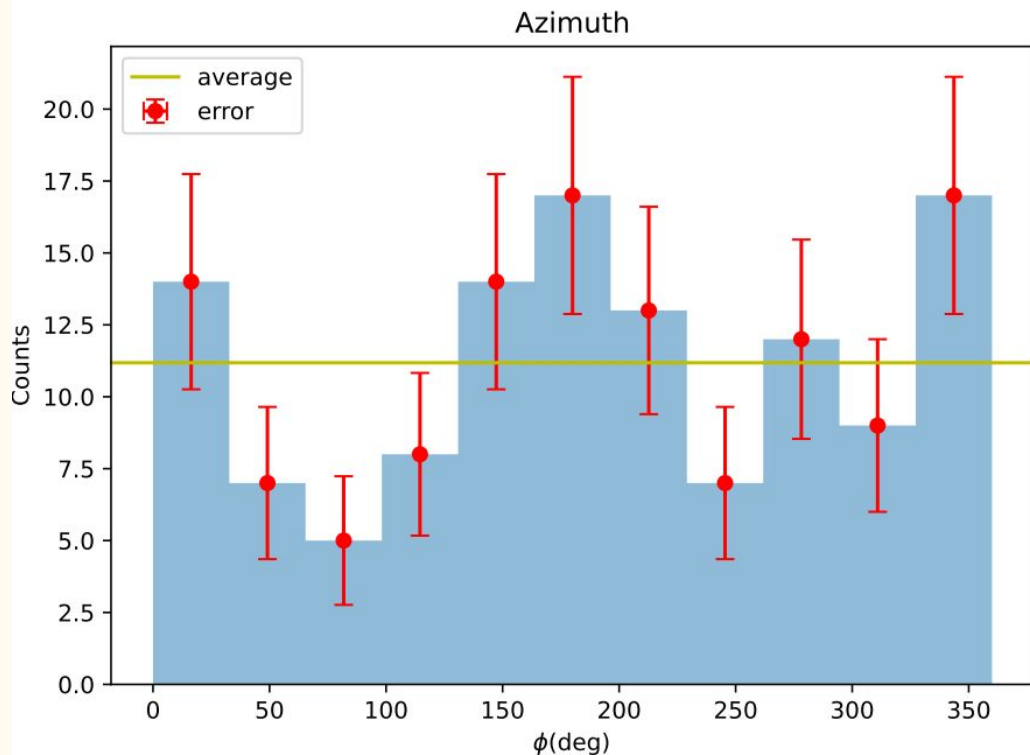
$$\chi^2 = \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\delta_i} \right)^2$$

x_i = count数

$\bar{x}$ = 平均値

δ_i = 各count数の誤差 ($= \sqrt{x_i}$)

ϕ 分布の χ^2 検定

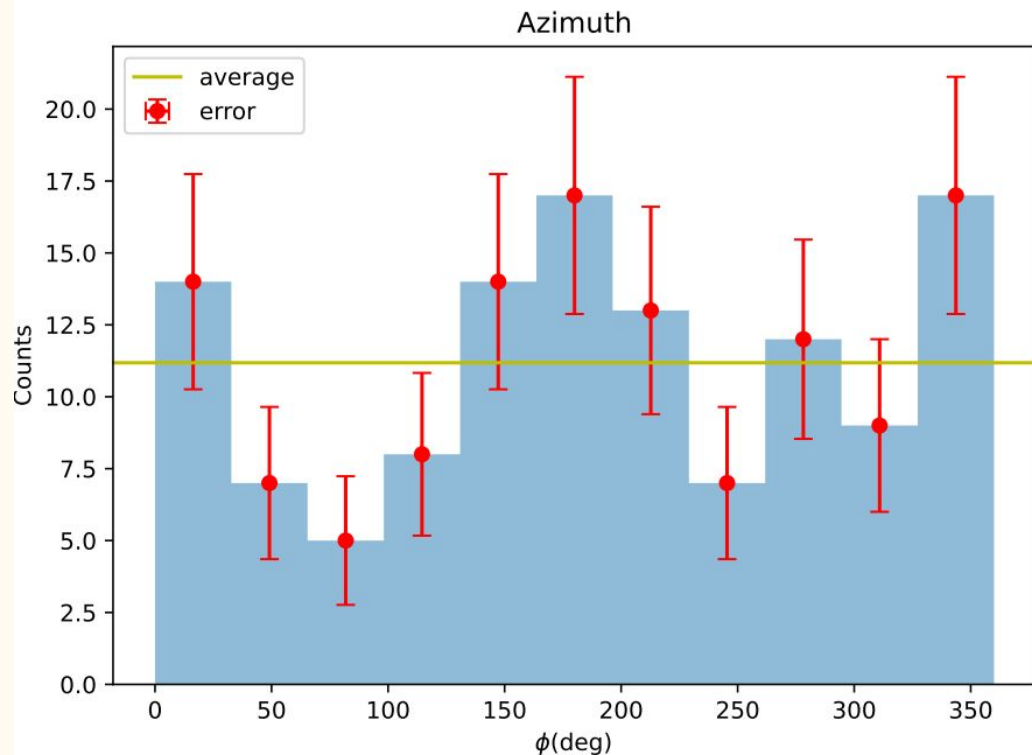


$$\chi^2 = 19.86$$

自由度 = 10

求めた χ^2 と自由度を χ^2 分布表と比べる

ϕ 分布の χ^2 検定

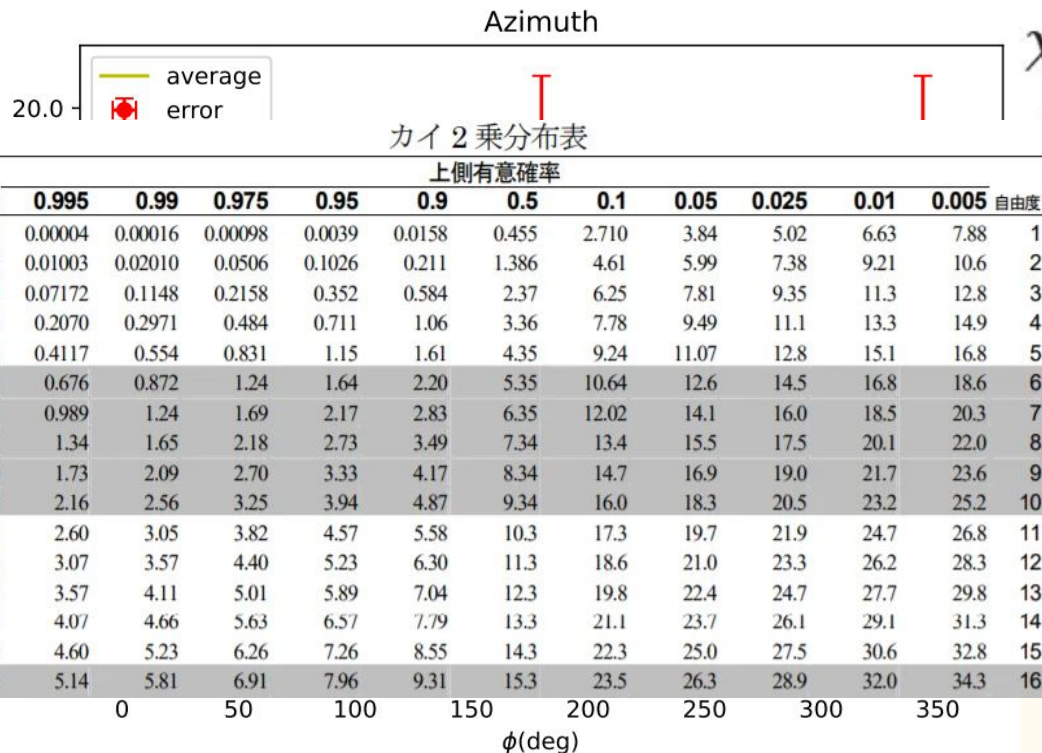


$$\chi^2 = 19.86$$

自由度 = 10

求めた χ^2 と自由度を χ^2 分布表と比較

φ分布の χ^2 検定



$$\chi^2 = 19.86$$

自由度 = 10

求めた χ^2 と自由度を χ^2 分布表と比較

φ分布の χ^2 検定



$$\chi^2 = 19.86$$

自由度 = 10

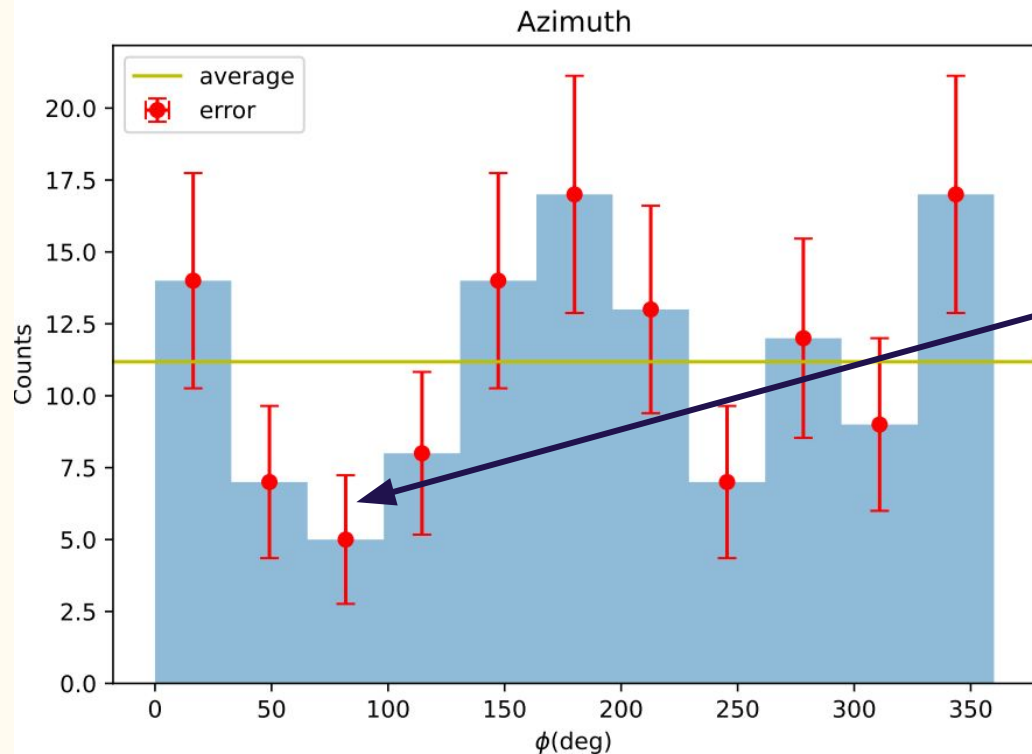
上側有意確率												
自由度	0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.5	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	自由度
1	0.00004	0.00016	0.00098	0.0039	0.0158	0.455	2.710	3.84	5.02	6.63	7.88	1
2	0.01003	0.02010	0.0506	0.1026	0.211	1.386	4.61	5.99	7.38	9.21	10.6	2
3	0.07172	0.1148	0.2158	0.352	0.584	2.37	6.25	7.81	9.35	11.3	12.8	3
4	0.2070	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
7	0.989	1.24	1.69	2.17	2.83	6.35	12.02	14.1	16.0	18.5	20.3	7
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	7.34	13.4	15.5	17.5	20.1	22.0	8
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	8.34	14.7	16.9	19.0	21.7	23.6	9
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	9.34	16.0	18.3	20.5	23.2	25.2	10
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	10.3	17.3	19.7	21.9	24.7	26.8	11
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	11.3	18.6	21.0	23.3	26.2	28.3	12
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	12.3	19.8	22.4	24.7	27.7	29.8	13
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	13.3	21.1	23.7	26.1	29.1	31.3	14
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	14.3	22.3	25.0	27.5	30.6	32.8	15
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	15.3	23.5	26.3	28.9	32.0	34.3	16
0 50 100 150 200 250 300 350												
φ(deg)												



$$p\text{値} = 0.047 < 0.050$$

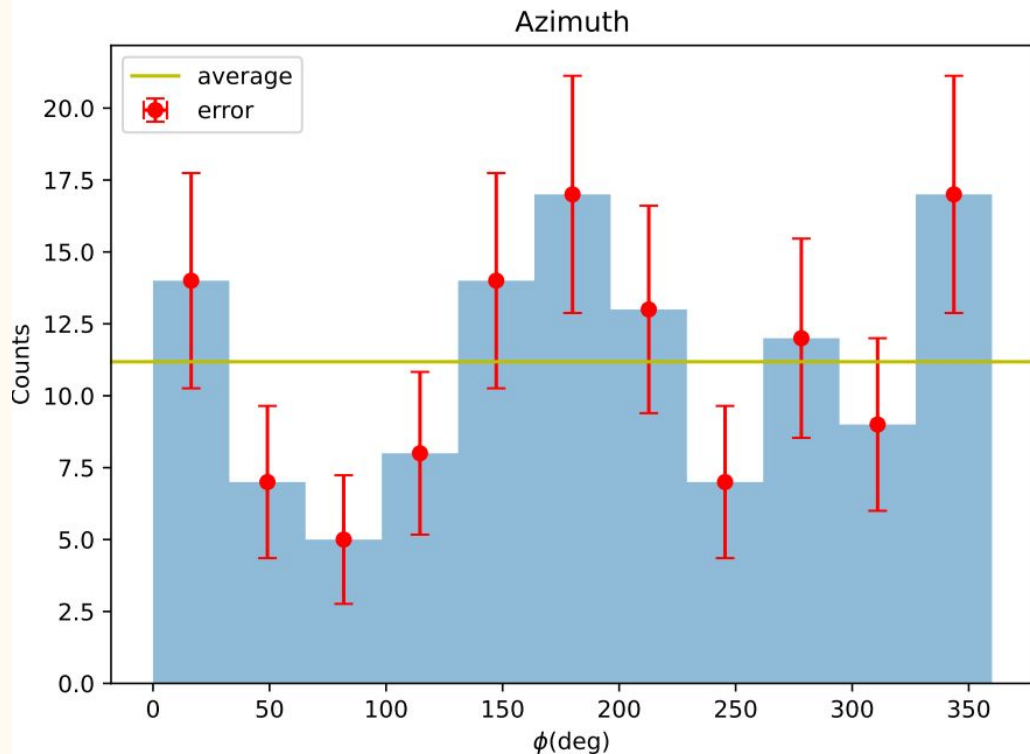
χ^2 検定の結果、
「宇宙線はφ方向に等方的やってくる」とはいえない。

ϕ 分布の χ^2 検定の考察



$\phi=70\sim100$ 辺りで、平均値とのずれが55%ほどあり偏りがある。

ϕ 分布の χ^2 検定の考察



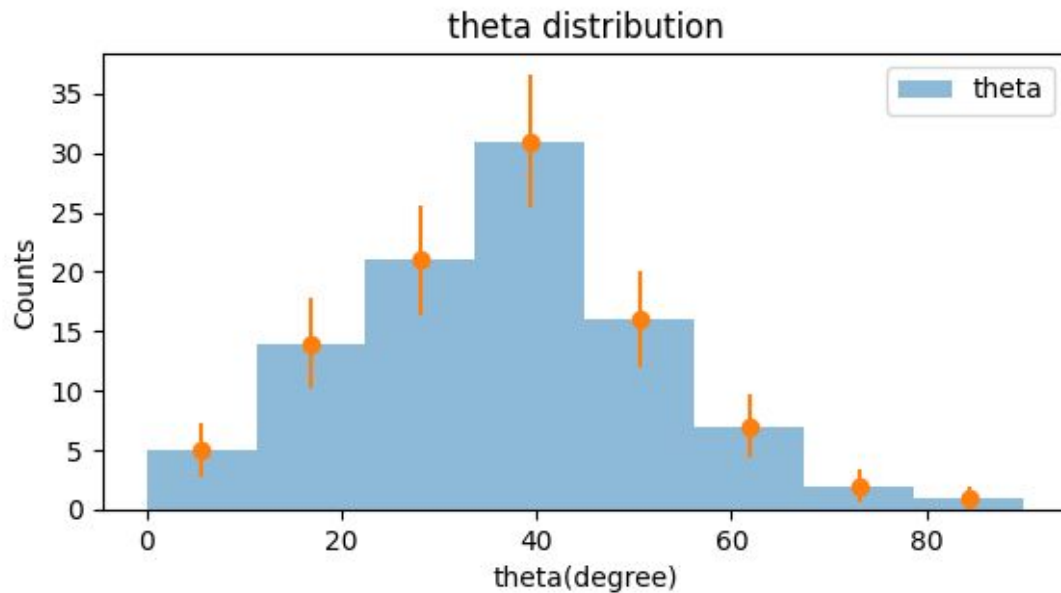
等方的であるという仮定が
否定された理由

3つの検出器だけでは、誤差が大
きくなるためだと考えられる。

θ 分布について

θ 分布は右図の通り

オレンジ線は誤差棒

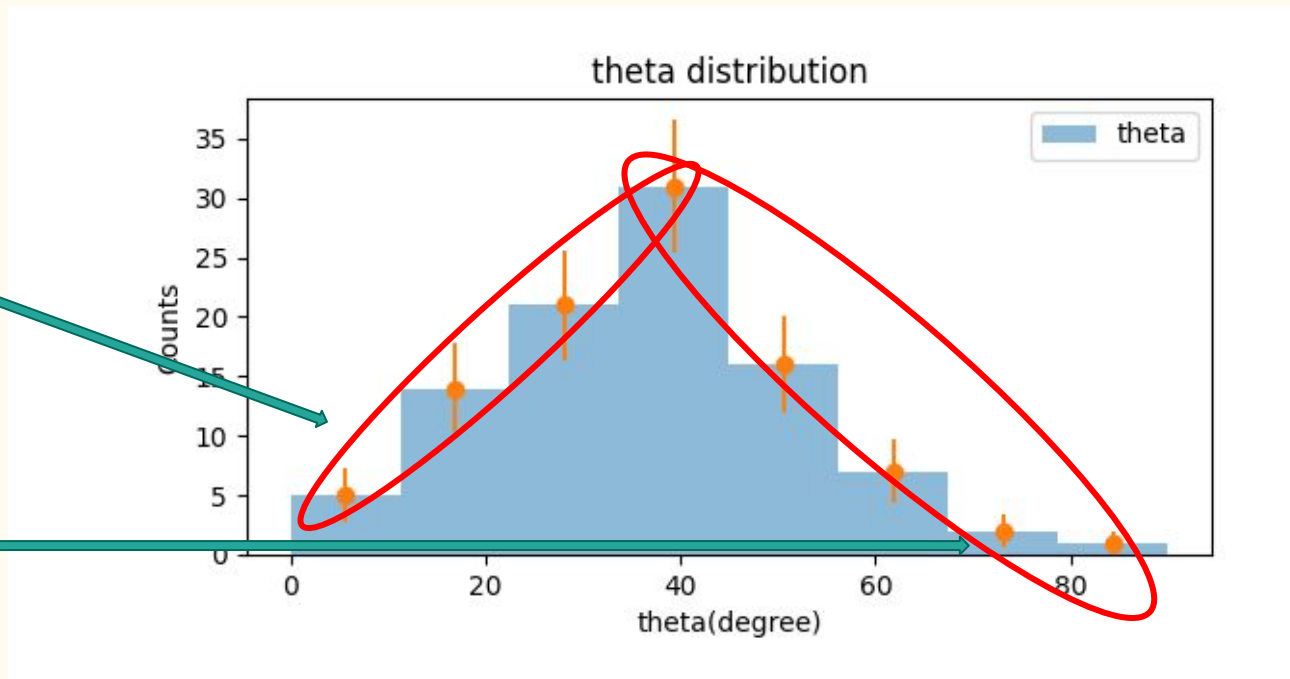


θ 分布について

θ 分布の特徴

- 単調に増加

- 急激に減少



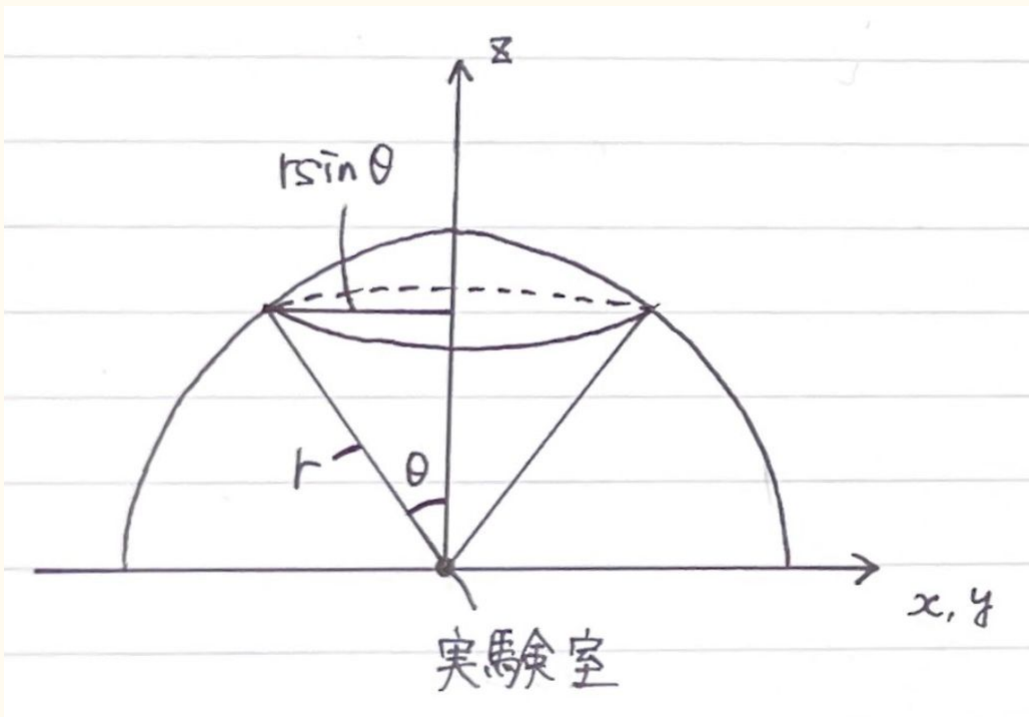
θ 分布について

θ の分布について、次の二つの原因を予想した

- 立体角の影響
- 大気の厚さとそれによる空気シャワーの遮蔽

θ 分布について(立体角の影響)

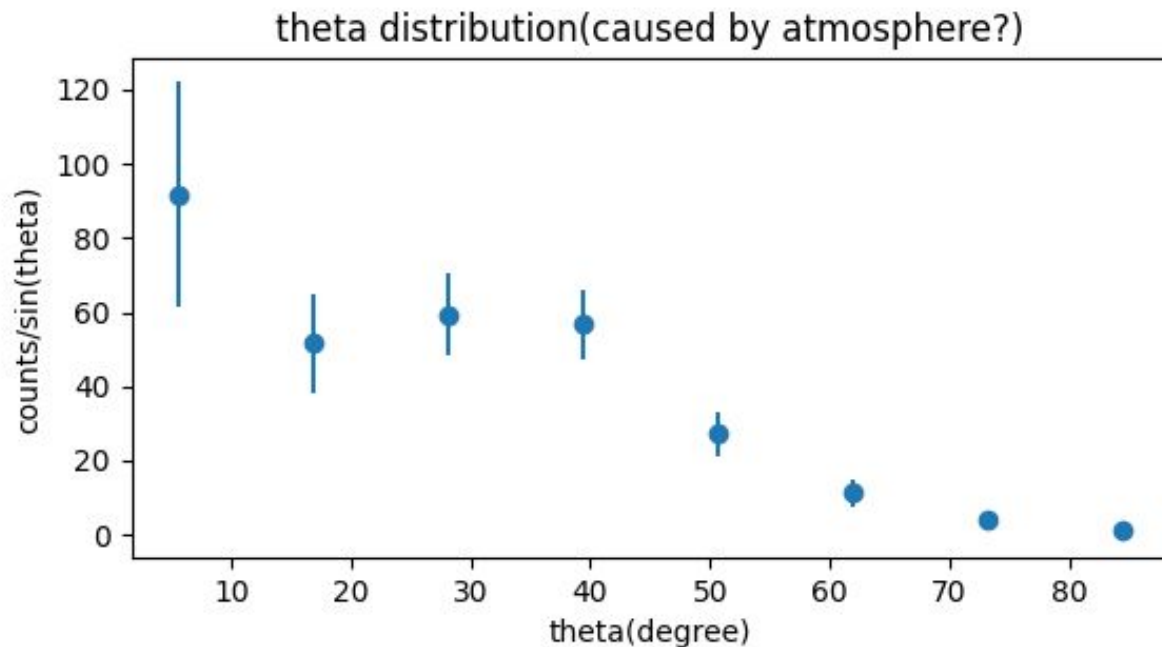
- 立体角は $\sin\theta$ に比例



θ 分布について(立体角の影響)

- 立体角は $\sin\theta$ に比例

→各countを $\sin\theta$ で割ってみる

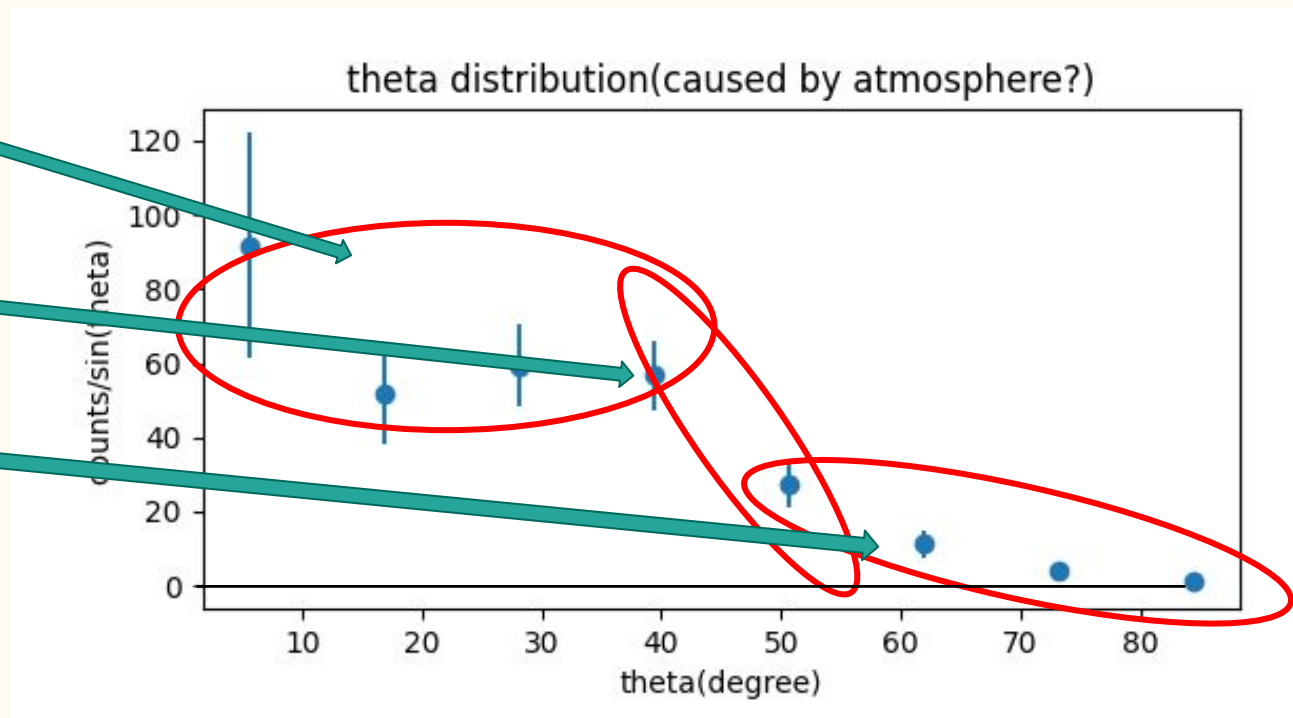


θ 分布について(立体角の影響)

• ほぼ一定

• 急激に減少

• 0に近づく



θ 分布について(大気の厚さの影響)

大気の厚さと θ の関係は未知

→フィッティングしてその関係を求める

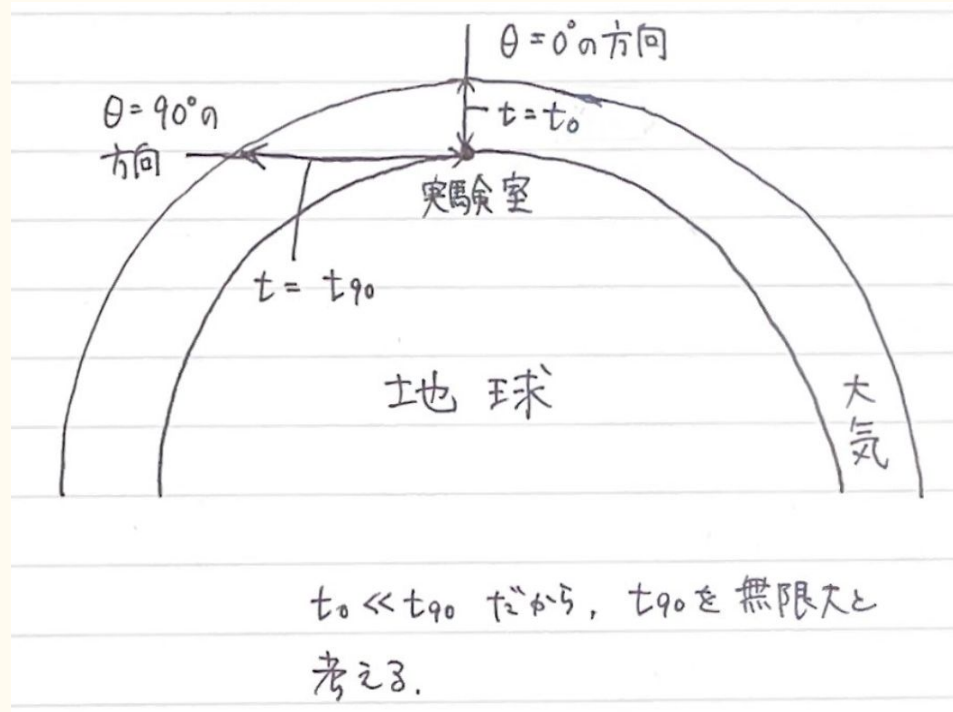
今回は $t=1/\cos\theta$ と置き、 $\frac{a}{t^2}$ フィッティング

θ 分布について(大気の厚さの影響)

$t=1/\cos\theta$ と置く理由

→大気の厚さをあらわすパラメーターが欲しい

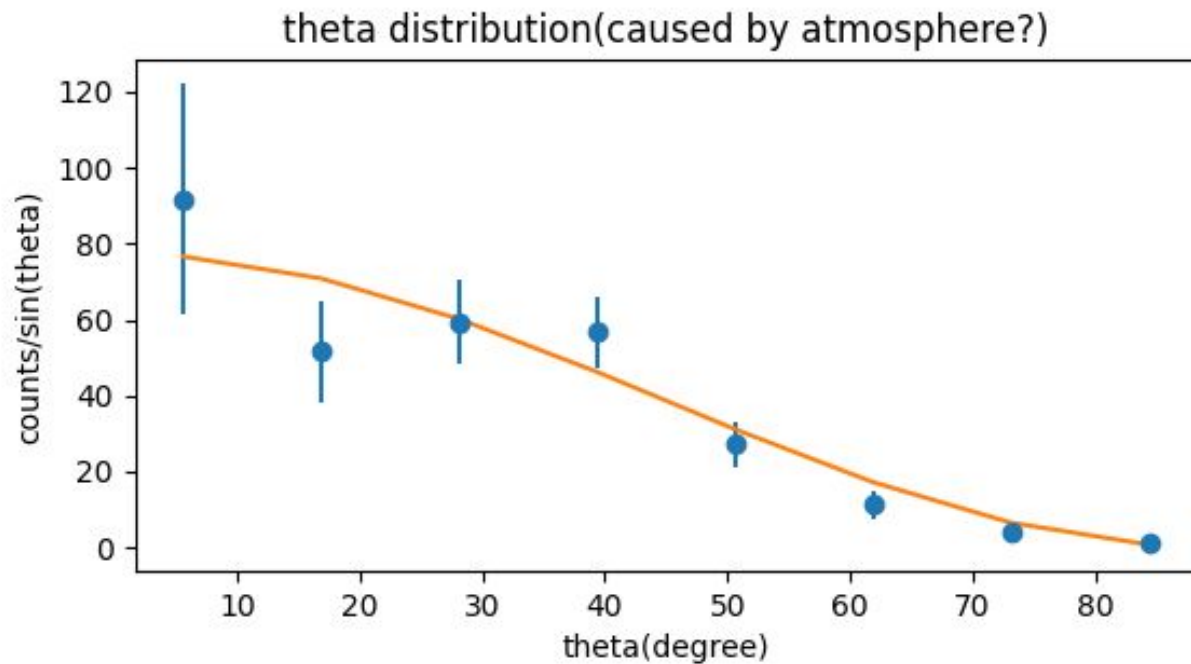
大気の厚さは右図の通り



θ 分布について(大気の厚さの影響)

$a=77.39344196$ となった

黄色線はfitした関数



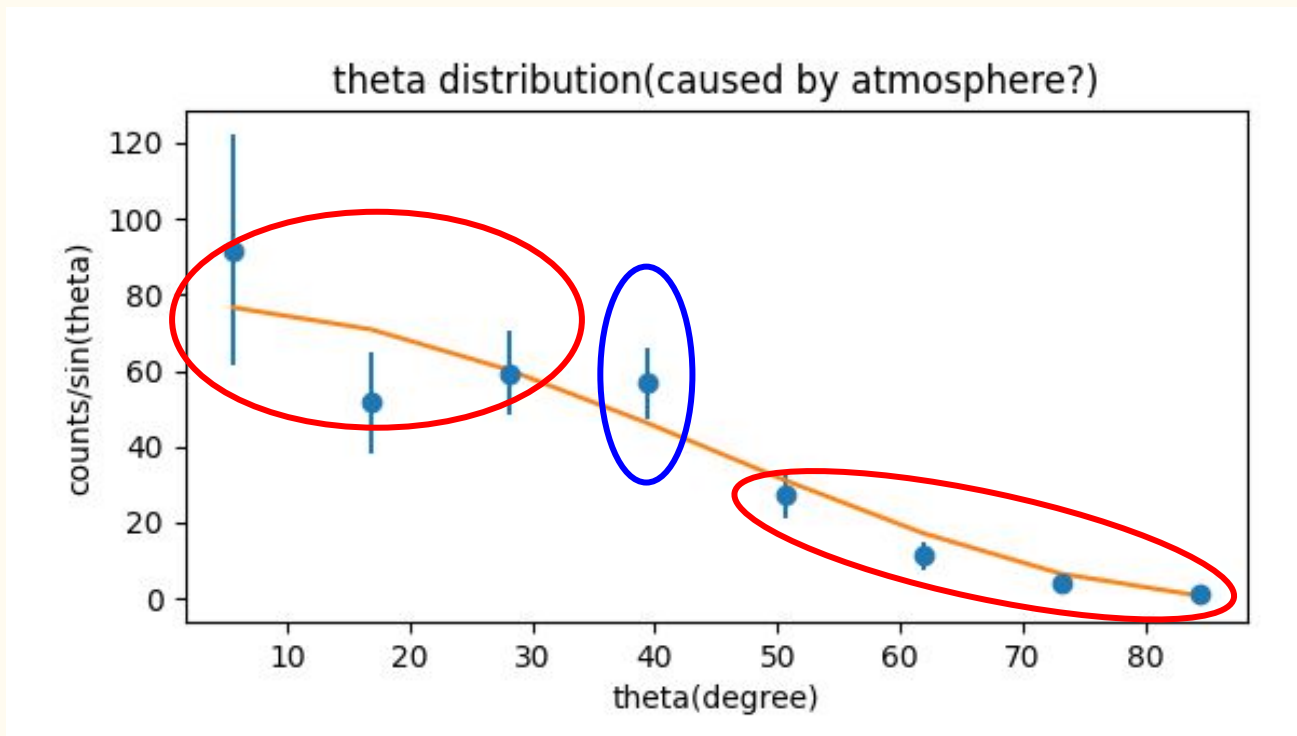
θ 分布について(大気の厚さの影響)

- ・赤線部分

→fit出来ている

- ・青線部分

→fit出来ていない



θ 分布について(大気の厚さの影響)

- fitできた θ について

大気の厚さが影響しているといえる

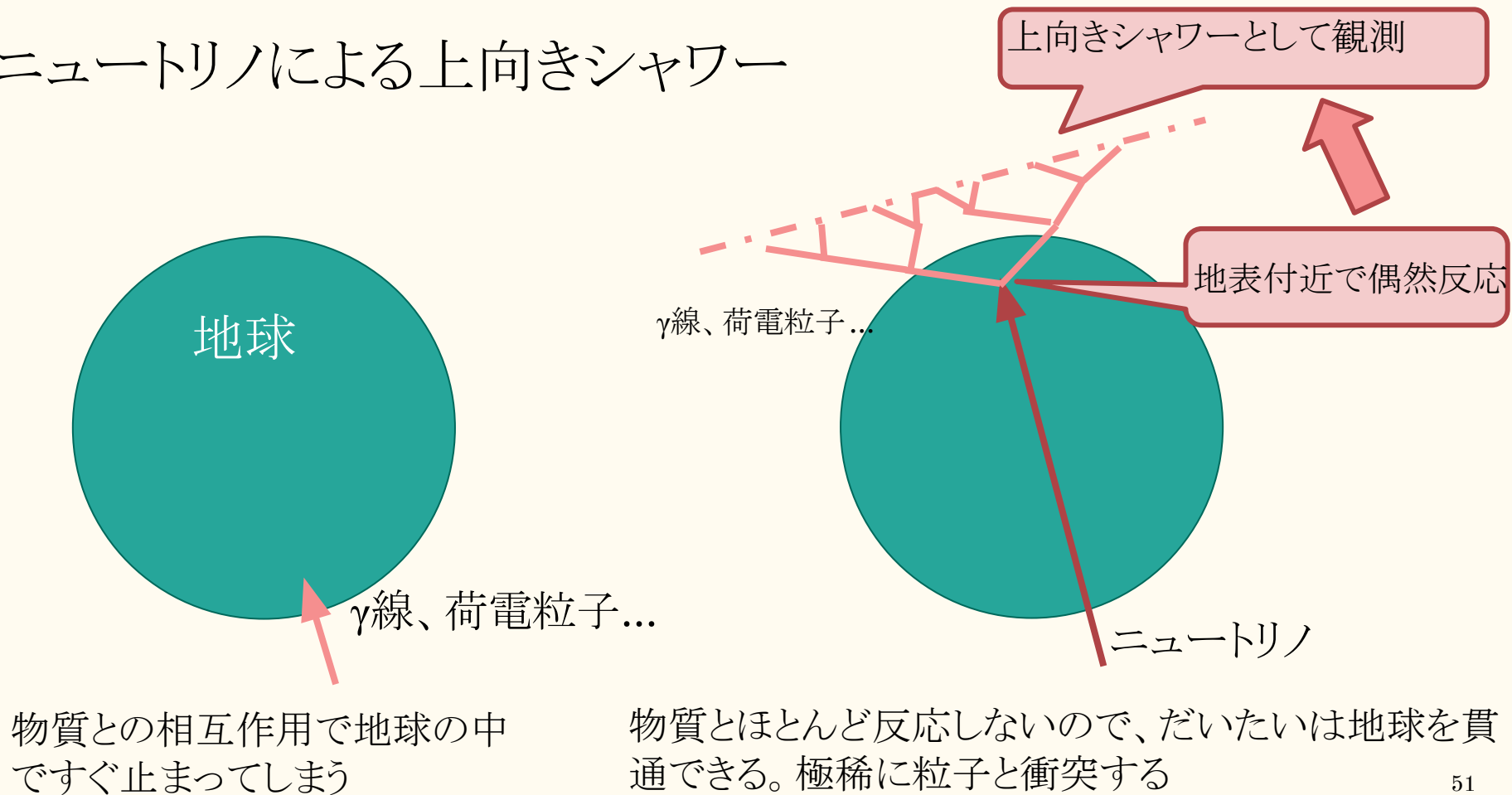
- fitできない θ について

大気の厚さ以外の要因？

大気の厚さとカウント数に反比例より複雑な関係？

ニュートリノ事象の探索

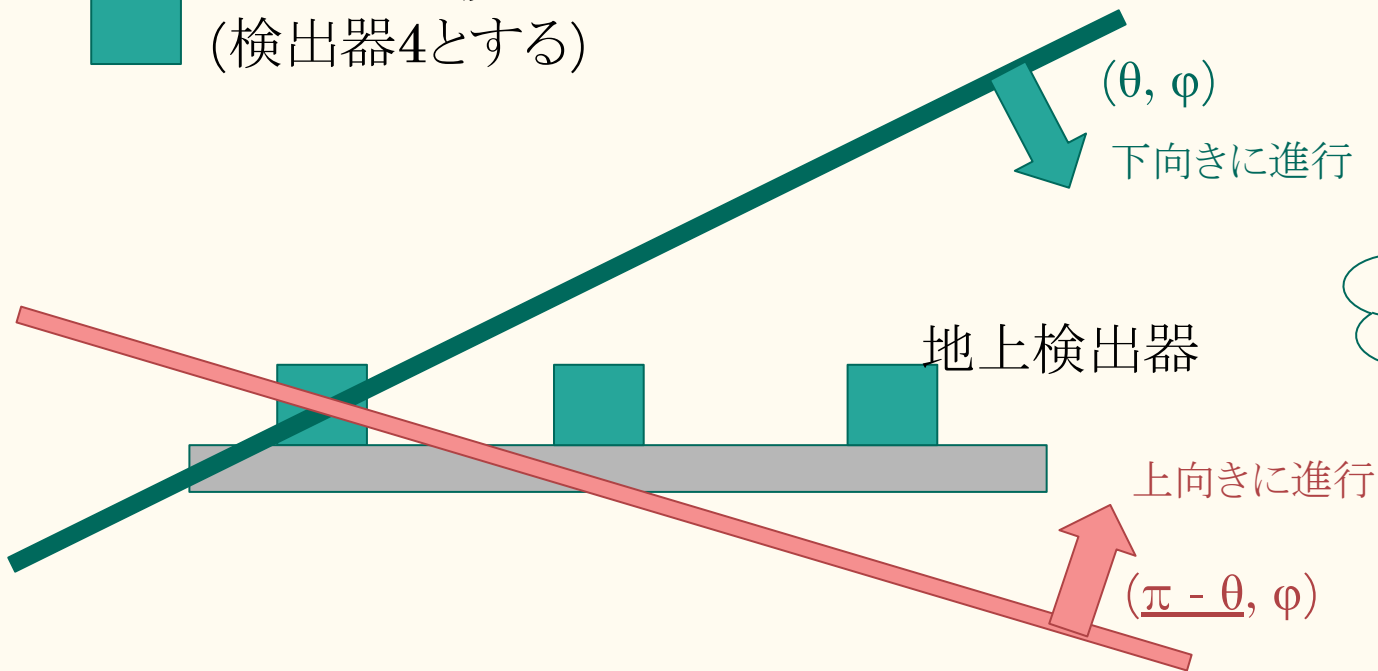
ニュートリノによる上向きシャワー



上向きシャワー

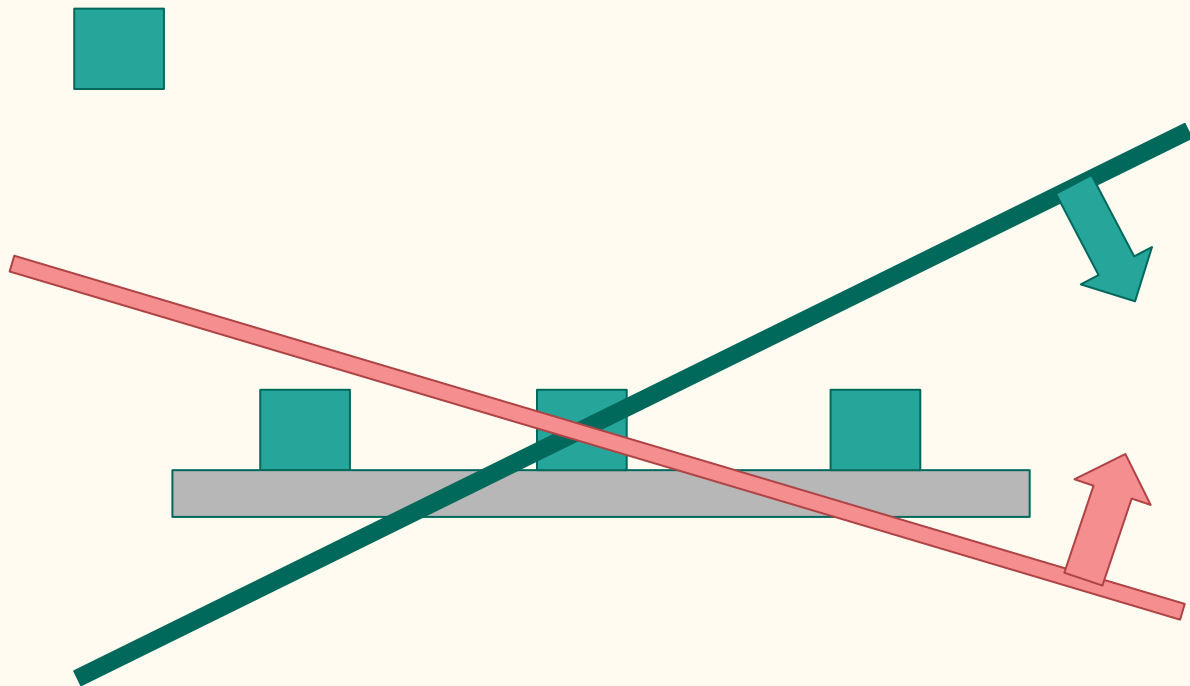
上向きに進行するシャワーも考慮すれば、地上の3つの検出器の到達時間から考えられる平面は2通りある

■ 高さのある検出器
(検出器4とする)

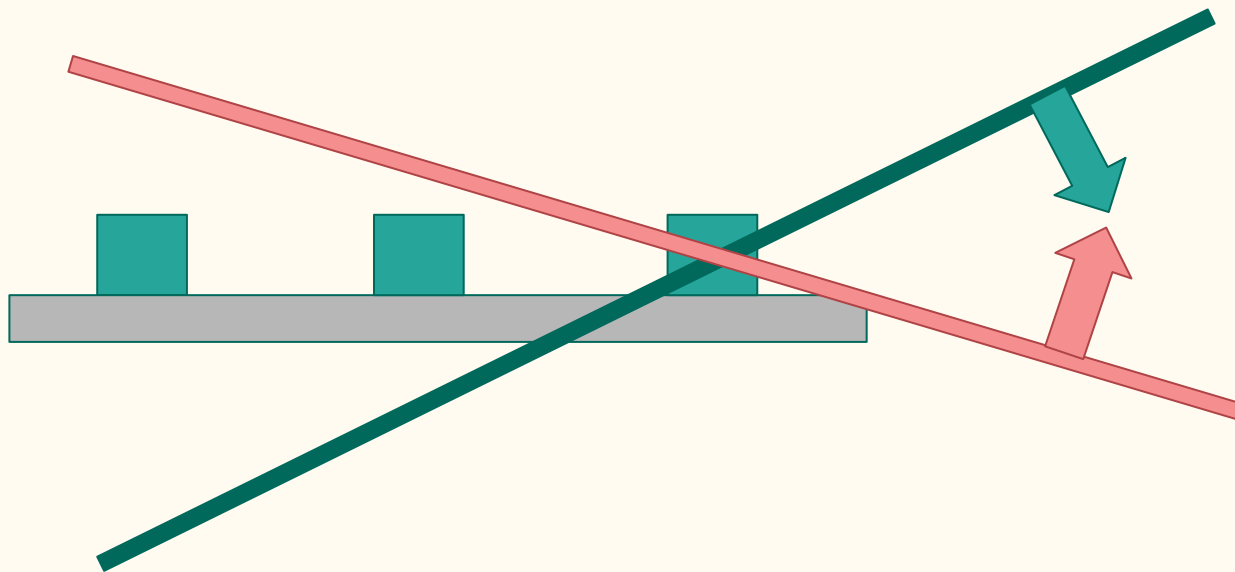


今までは暗に
これを仮定してい
た

上向きに進行するシャワーも考慮すれば、地上の3つの検出器の到達時間から考えられる平面は2通りある

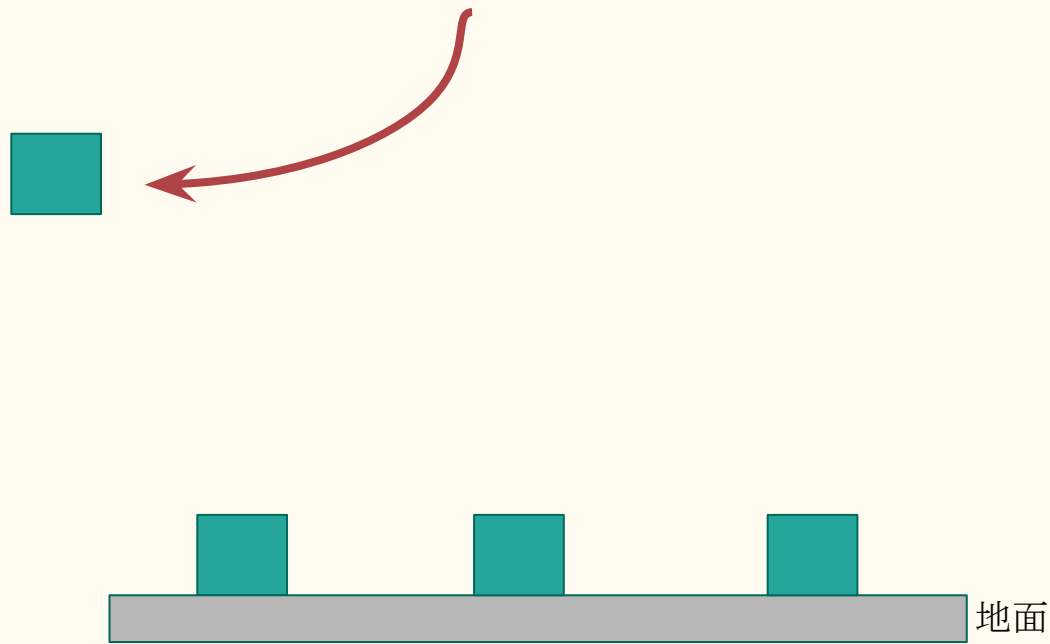


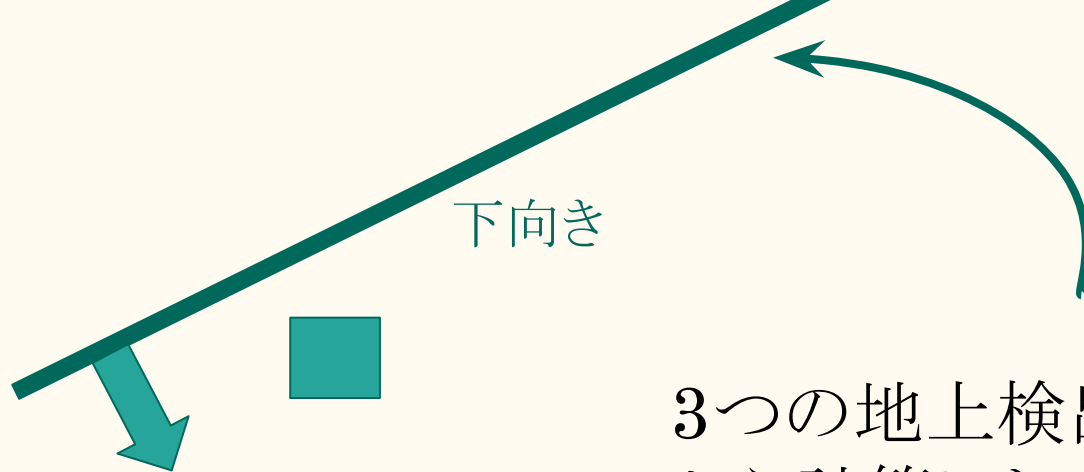
上向きに進行するシャワーも考慮すれば、地上の3つの検出器の到達時間から考えられる平面は2通りある



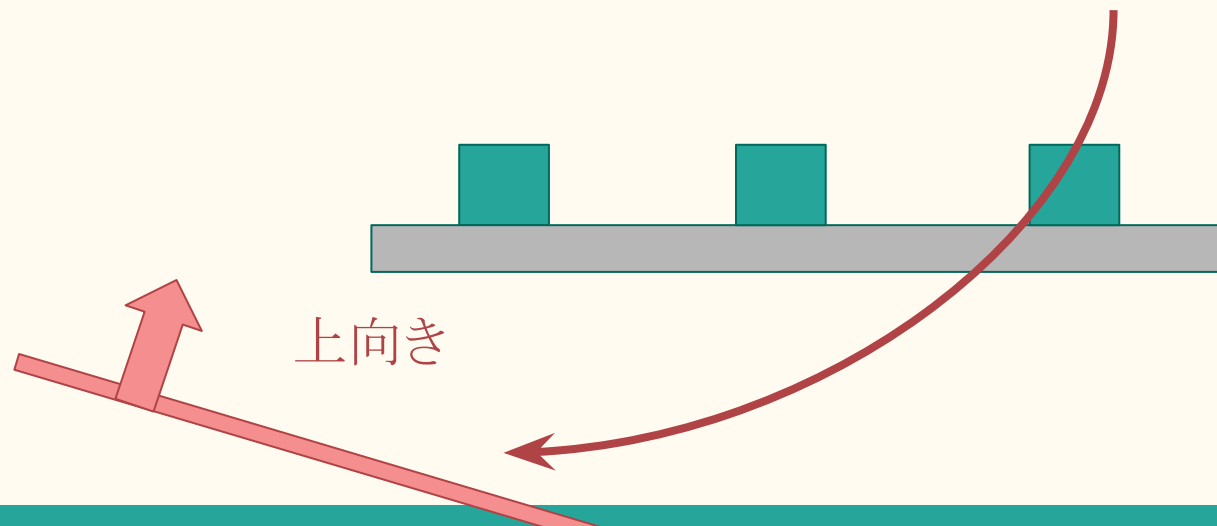
シャワーの進行方向の決定方法

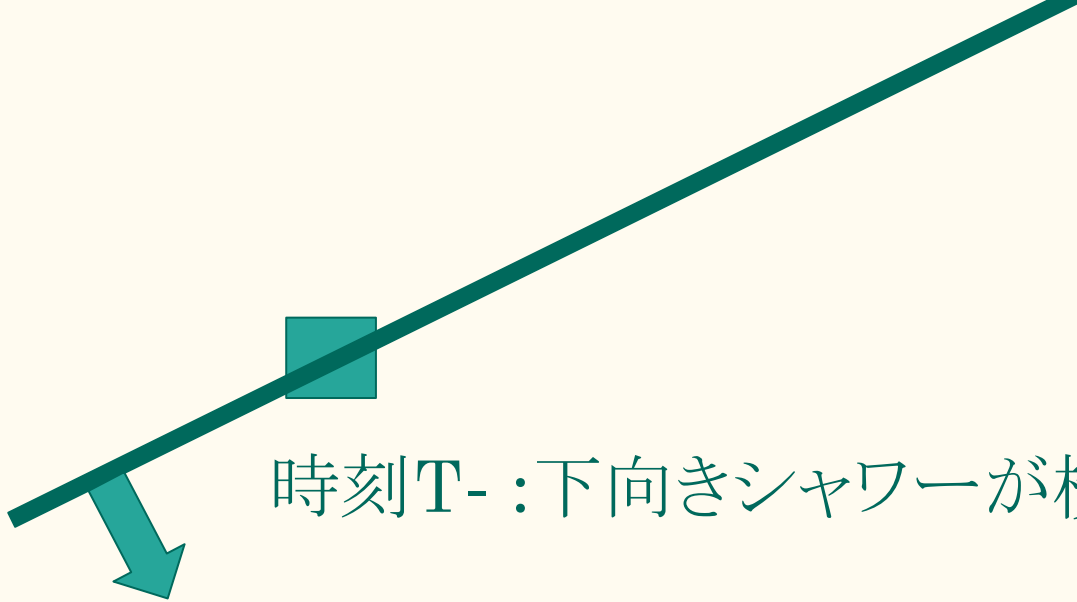
:(高さのある)検出器4にシャワーがきた時刻をみる



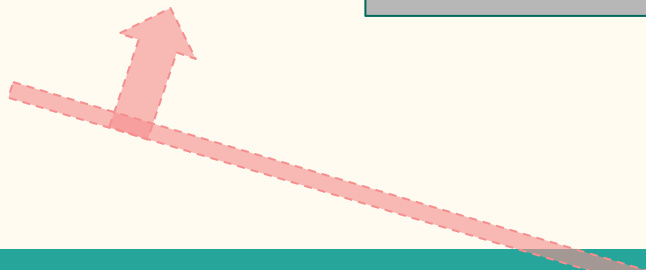


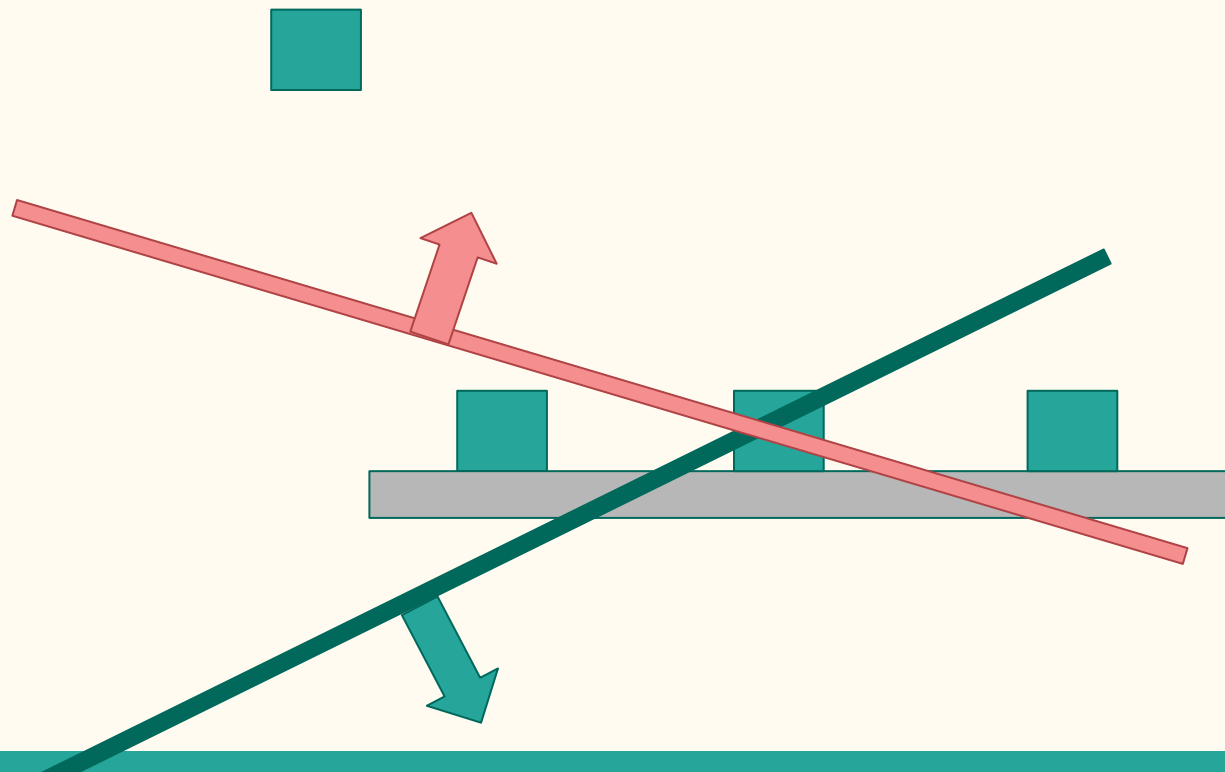
3つの地上検出器の到来時間
から計算したシャワー面



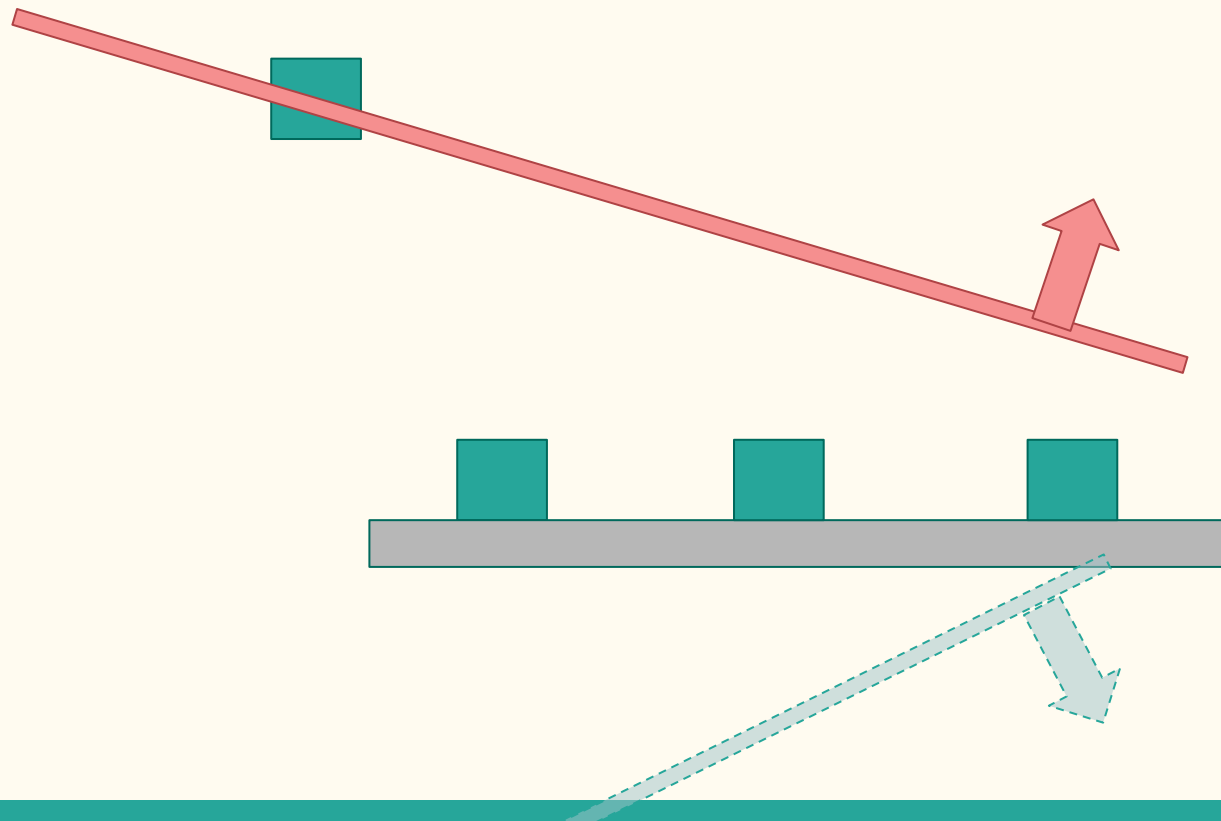


時刻T- : 下向きシャワーが検出器4に入る

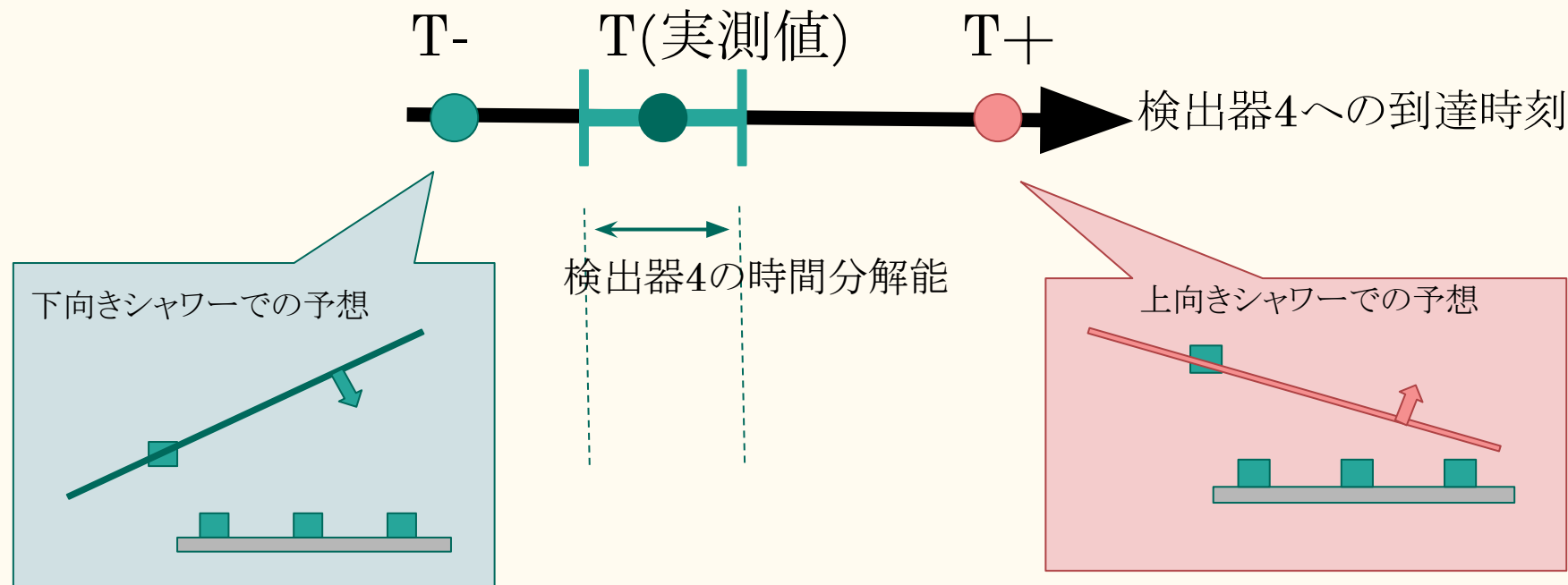




時刻 $T+$: 上向きシャワーが検出器4に入る

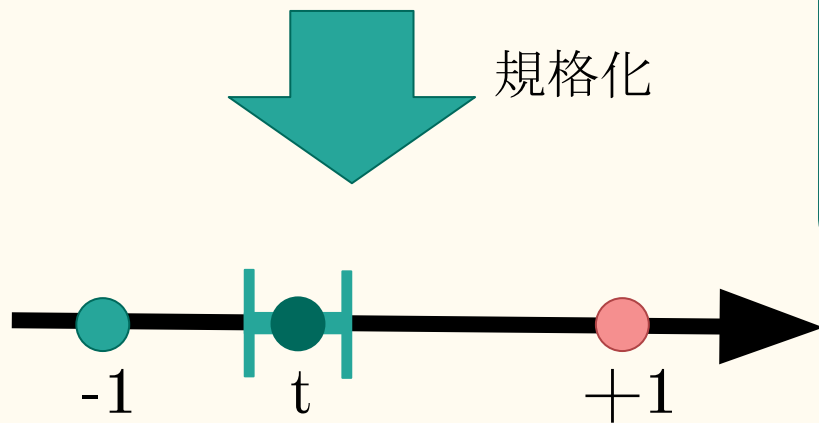
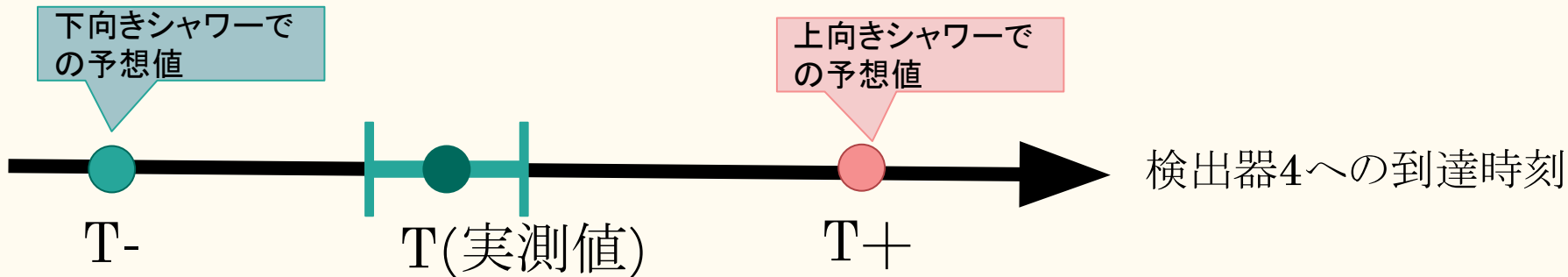


検出器4のシャワー到来時刻の評価



TがT+とT-のどちらに近いかを考えれば良い

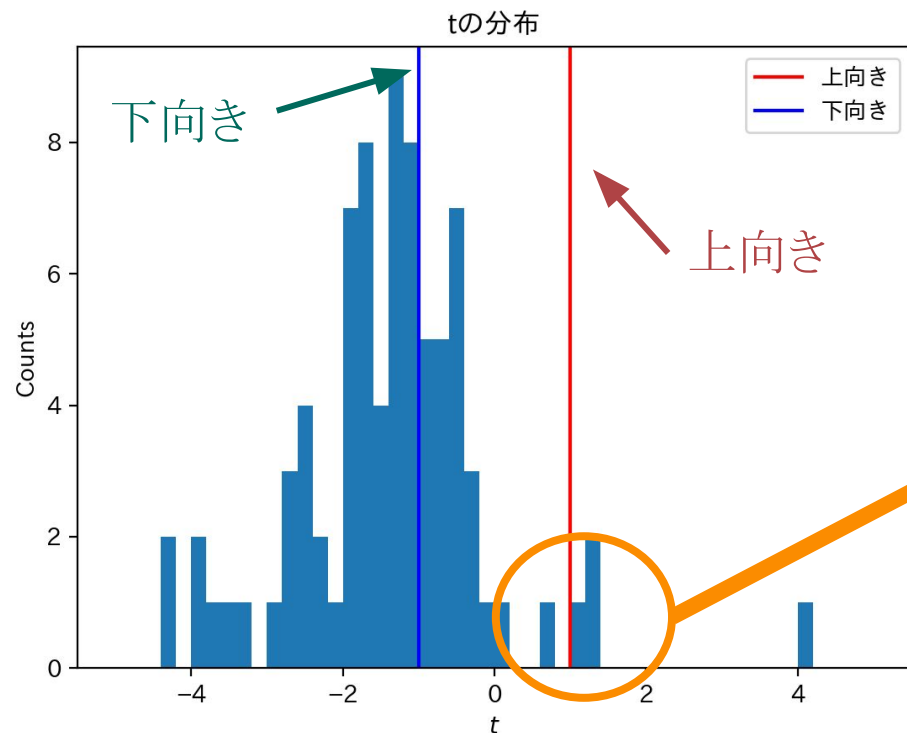
4つめの検出器シャワー到来時刻の評価



パラメータ t を導入

上向きの可能性が高い $\longleftrightarrow t \sim 1$
下向きの可能性が高い $\longleftrightarrow t \sim -1$

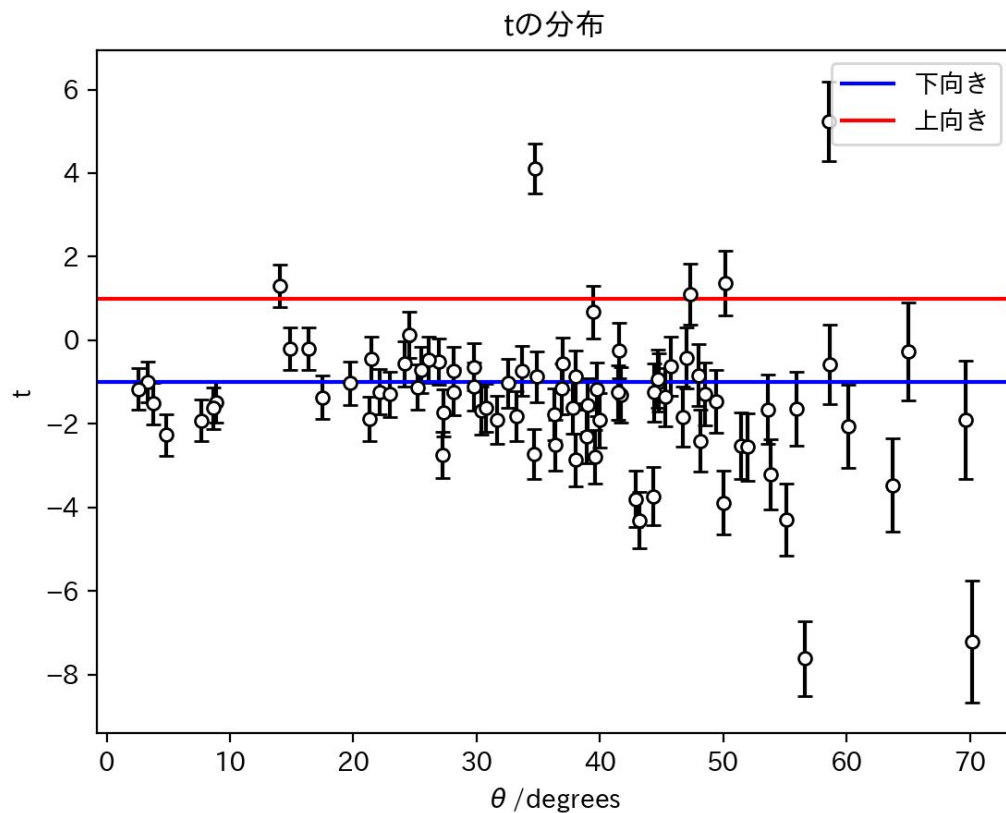
パラメータ t の分布



下向き($t = -1$)を中心にほぼ
左右対称

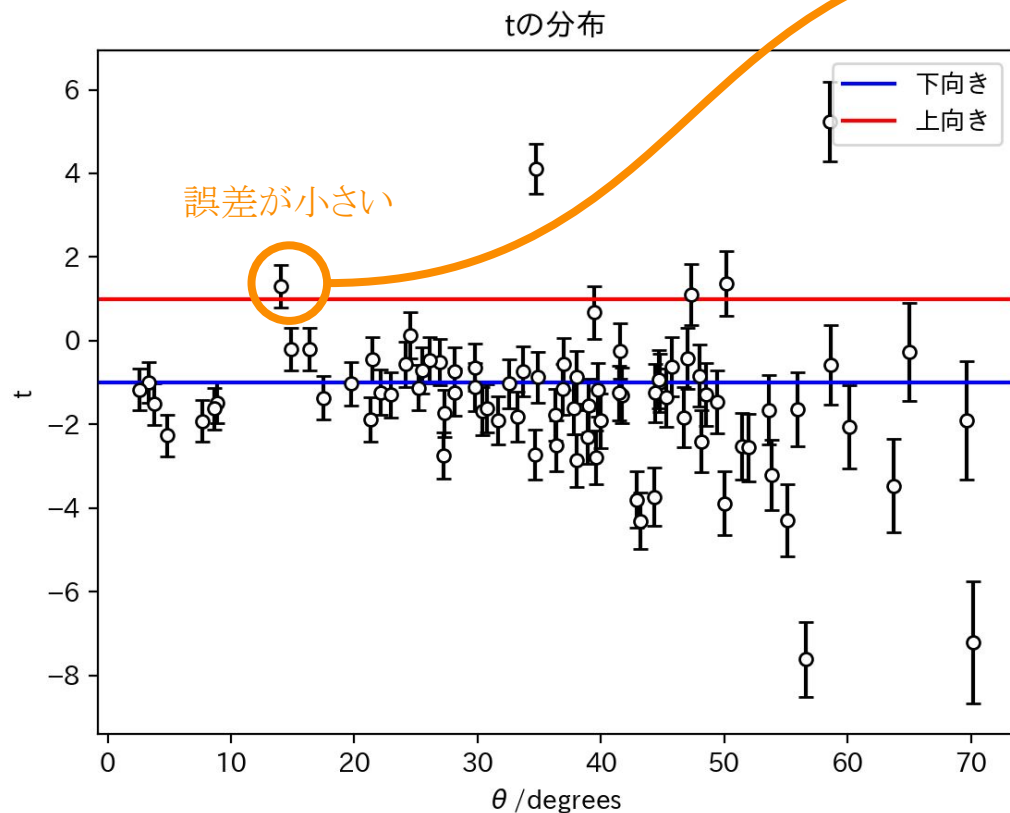
上向きと考えた方がよいかもしれない
イベントがいくつかある

パラメータ t の θ 分布



誤差
＝ 検出器の時間分解能

パラメータ t の θ 分布



ニュートリノ
有力候補

上向き

下向き

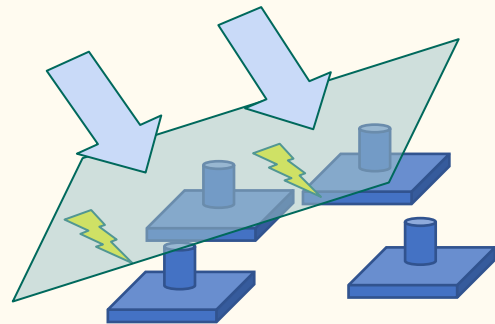
θ が大きい

$T+$ と $T-$ が近い

誤差棒が大きくなる

まとめ

検出器を4つ用いて、高エネルギー宇宙線による空気シャワーを観測



- ϕ 方向に等方的にやってきているという仮定が否定された
- θ の分布について、大気の厚さの影響が確認できた一方、大気の厚さ以外の影響も見られた。
- 角度分解能を8度と評価することができた
- ニュートリノによる上向きシャワーである可能性の高いイベントが1つ見つかった

予備

補足

宇宙線のエネルギー 10^{15} eV

$$N = (E/10^{12} \text{ eV})^{-1.7} (0.18 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1})$$

N = 空気シャワーの数

E = 宇宙線のエネルギー [eV]

検出器間の面積 = 30 m^2

時間 = $3 \text{ day} = 3 \times 24 \times 60 \times 60 [\text{s}]$

立体角 = 2π

銀河系の中での宇宙線陽子の運動

