

最高エネルギー宇宙線グループ ミニテレスコープアレイ実験



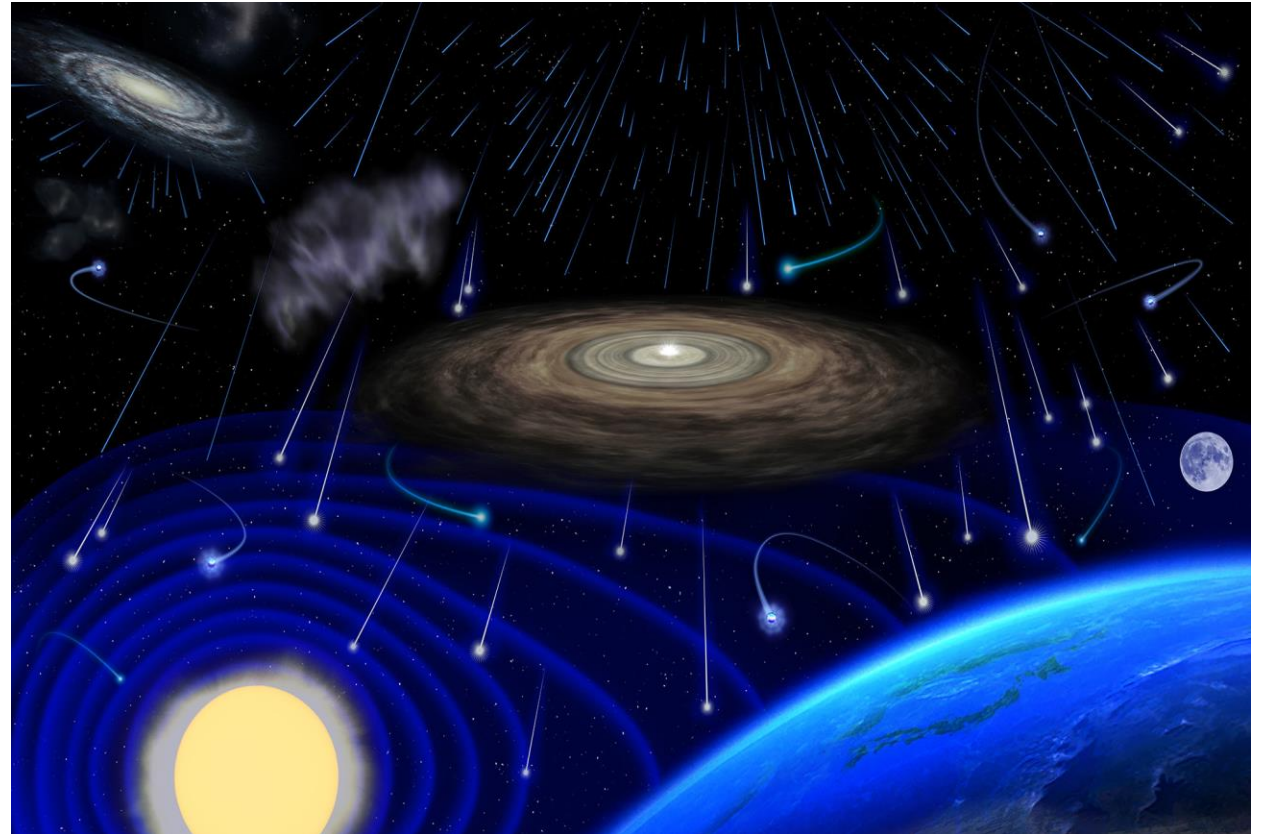
メンバー:

野見山裕也、間部莉帆、平本亮、鳥井陸駆、望月智樹

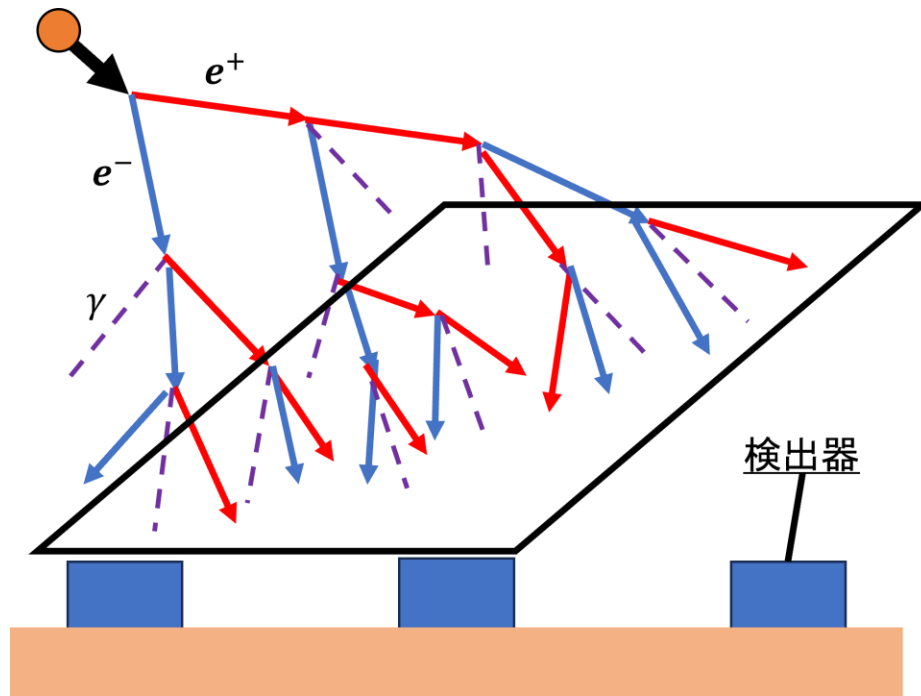
宇宙線とは

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う
高エネルギーの放射線

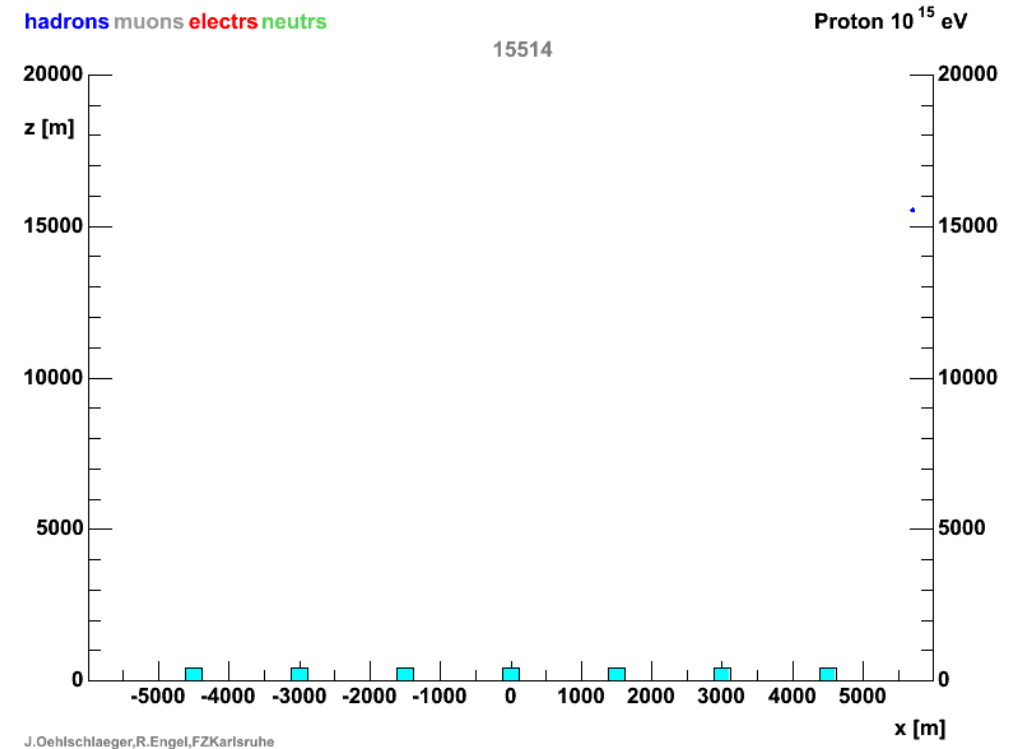
主に、陽子、ヘリウム原子核、
鉄原子核、ガンマ線



空気シャワーとは

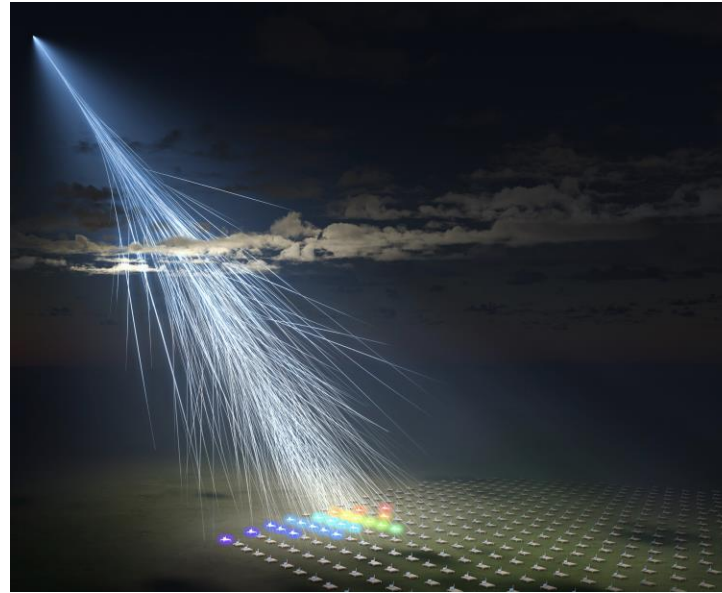


高エネルギーの宇宙線が大気中の原子核と衝突し、大量の粒子がシャワーのように地上に降り注ぐ現象。

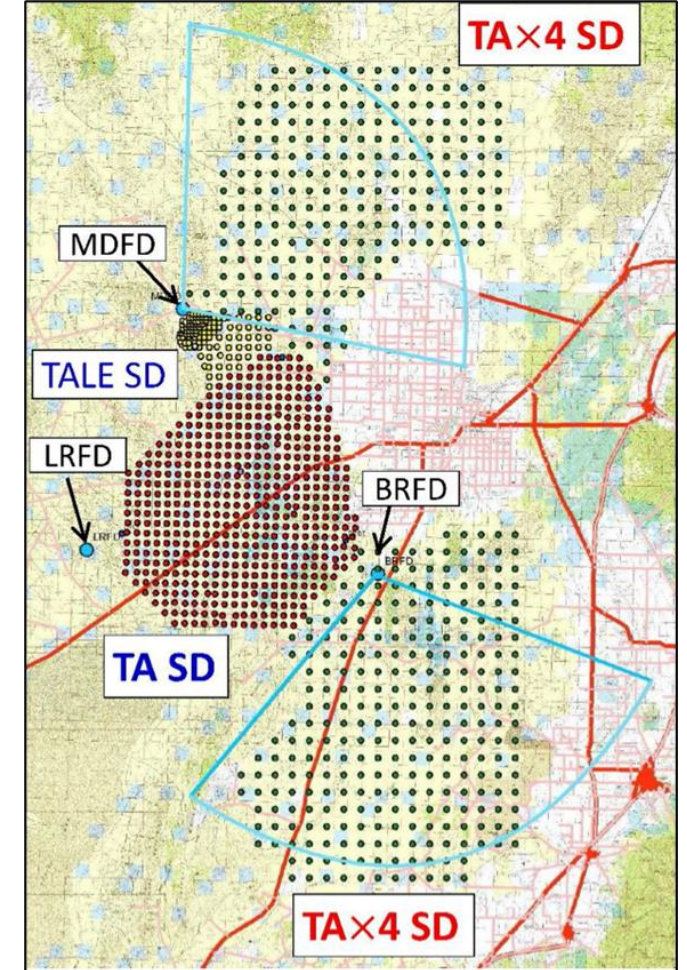


Telescope Array Experiment (TA実験)

米国ユタ州の砂漠地帯で行われている大規模実験



検出器約500台を1.2km間隔の格子状に設置し、GPSデータと計測データを「Wi-Fi」を使って取得している。



最高エネルギー宇宙線を観測するテレスコープアレイ実験の手法を用いて空気シャワーを観測する。

検出器の配置によって変わる観測結果を見る

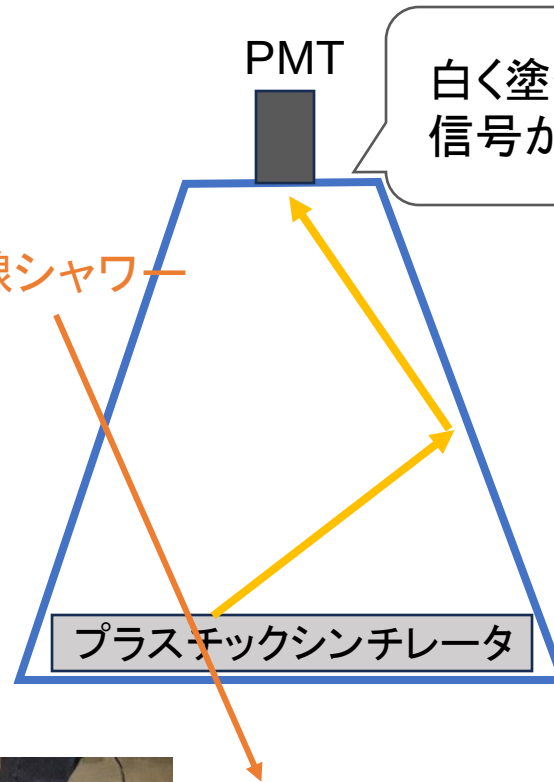
宇宙線の到来方向を求める

宇宙線のエネルギーを求める

空気シャワーの検出

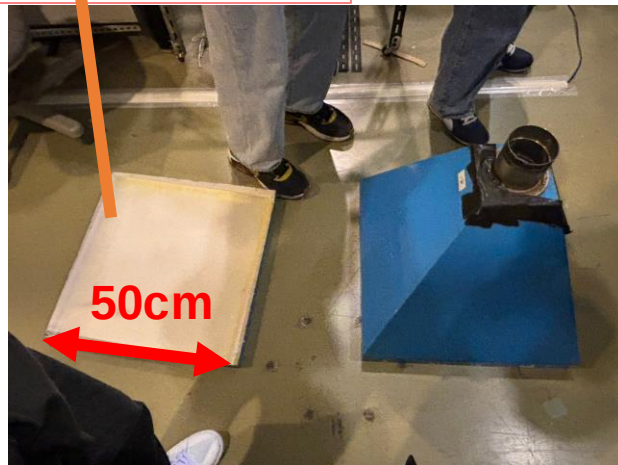


宇宙線シャワー



白く塗っているので、
信号が反射されPMTで検出される

プラスチックシンチレータ

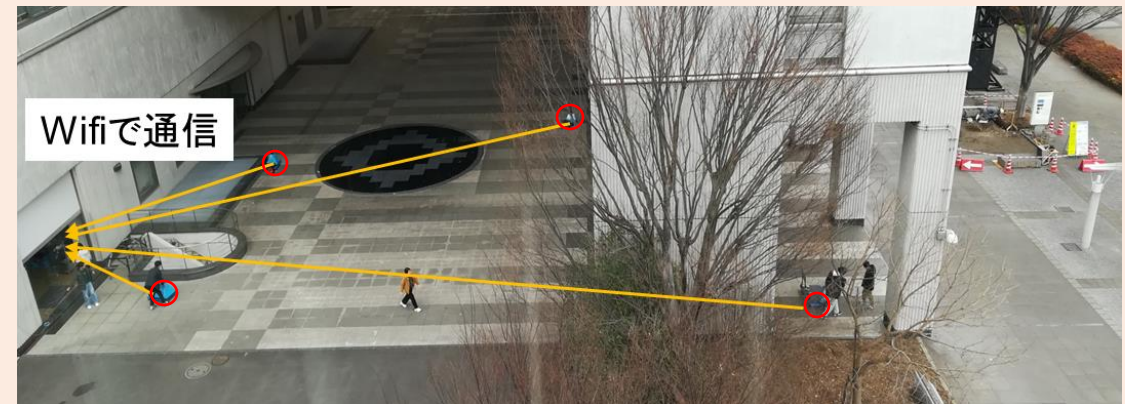


データの取得

実際にテレスコープアレイ実験で
行われている方法！！

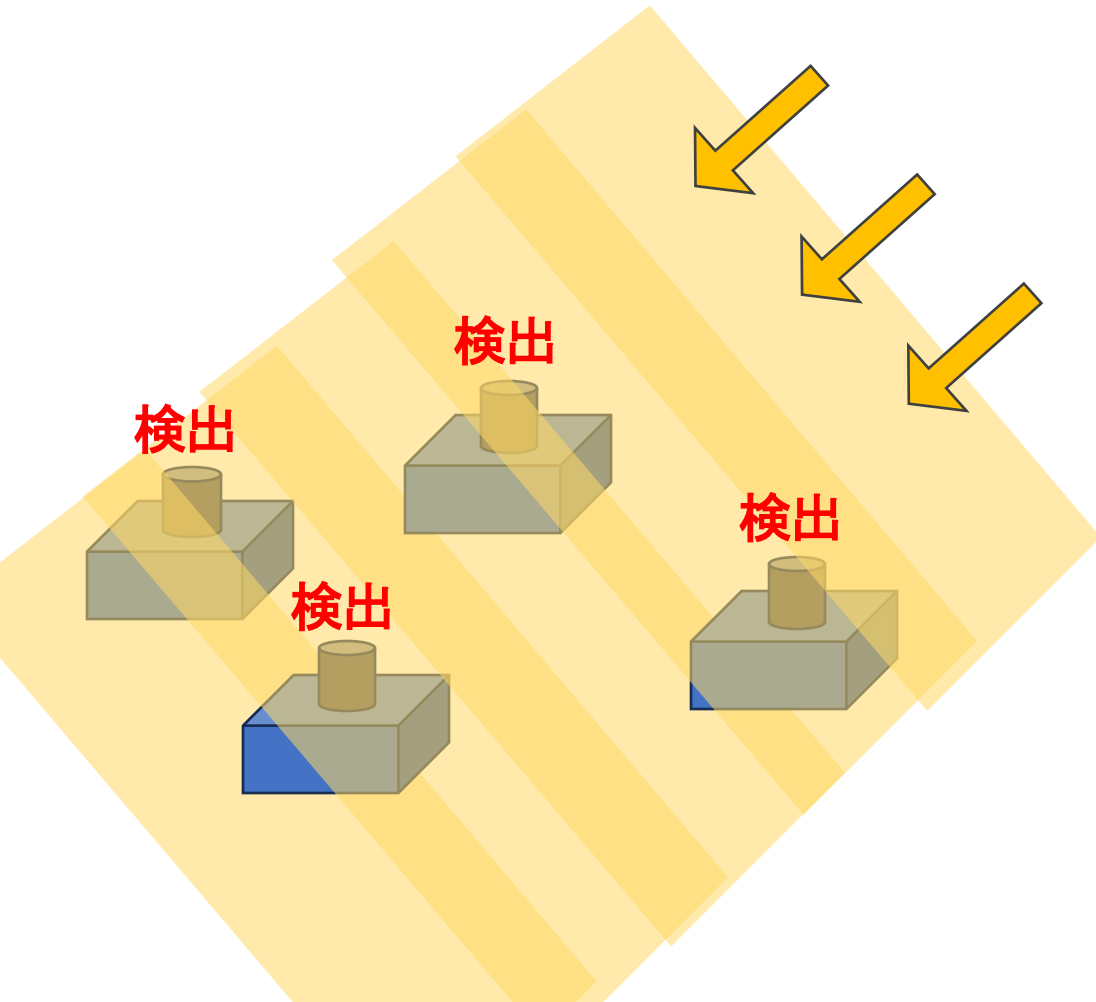


エレクトロニクス
によってデータを信号に

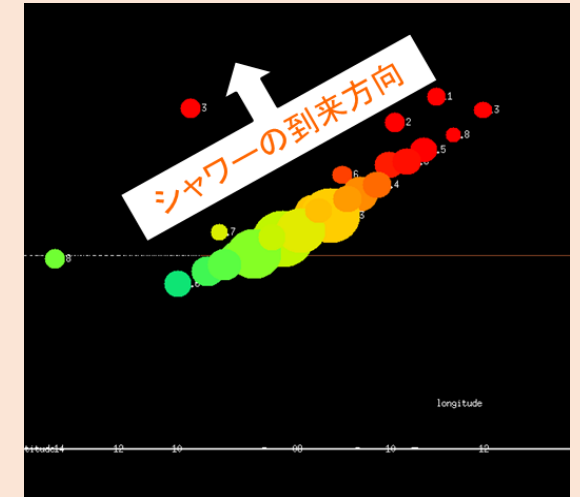
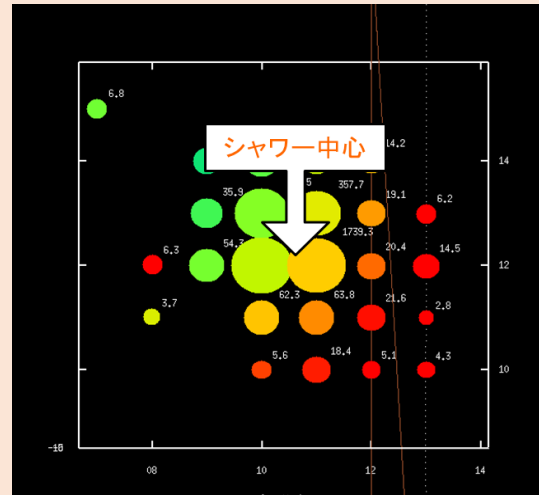


検出器を複数並べることでわかること

検出器を離れて置き、その信号の差を計算することで、シャワーの到来方向やエネルギーを知ることができる。



本来のテレスコープアレイでは



スプリングスクール講義資料より

たくさんの検出器を並べることで
宇宙線の到来方向とシャワー中心が明確にわかる
また、**シャワーの大きさを知ることでエネルギーもわかる**

検出器の配置



実験装置の配置

今回使用する検出器は全5台



日にちによって距離を変えて測定した。
だんだん距離を離している



イベント数

2つの検出器での反応
があった場合にイベント
として記録される

検出器稼働数

青 4

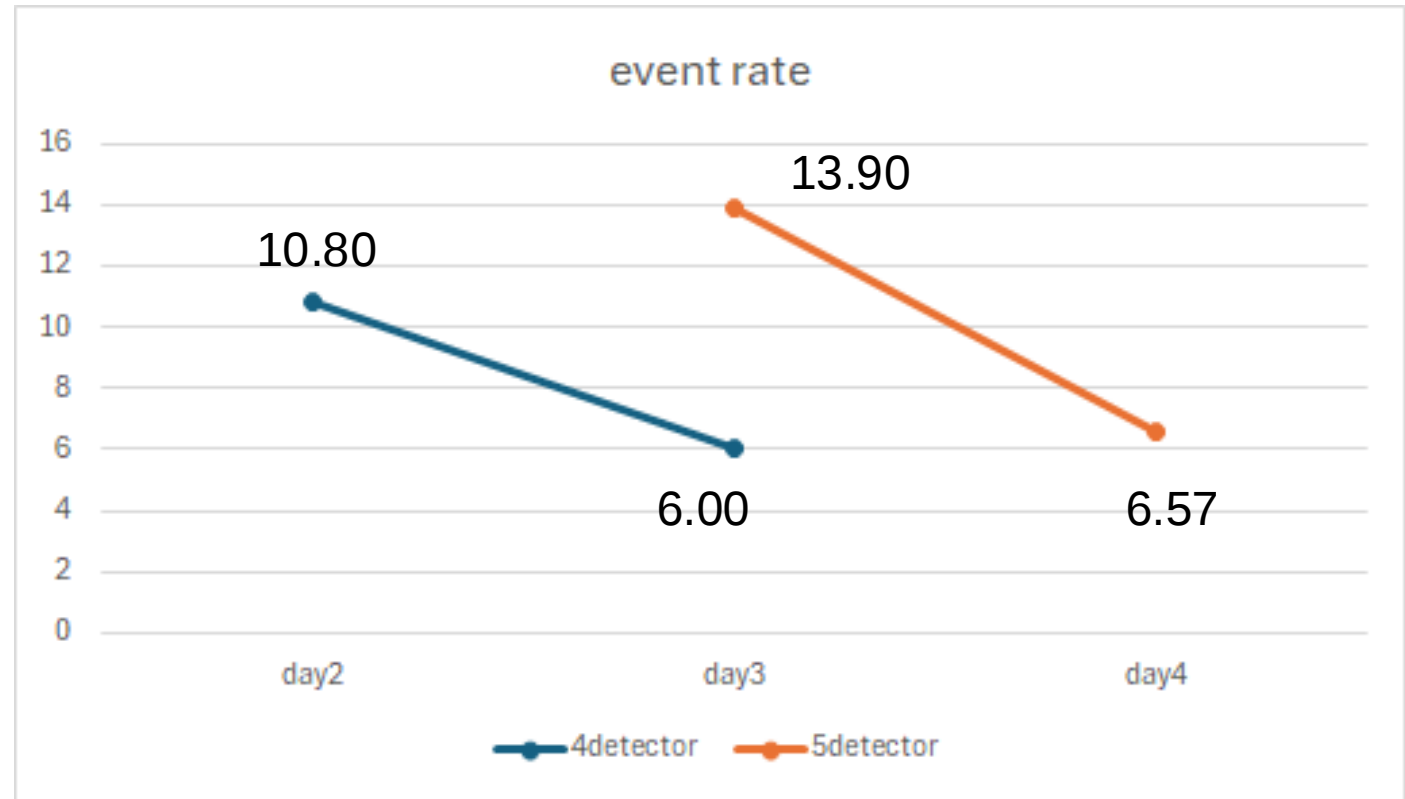
赤 5

	day2 25(m ²)	day3 72.36(m ²)	day4 327(m ²)
観測時間	3h21min	3h53min (57min) (2h56min)	6h04min
air shower(回)	31	29	44

Event rate

一時間当たりの空気シャワーの発生数

範囲を広げるとエネルギーの低い見えなくなるためイベントレートが下がる



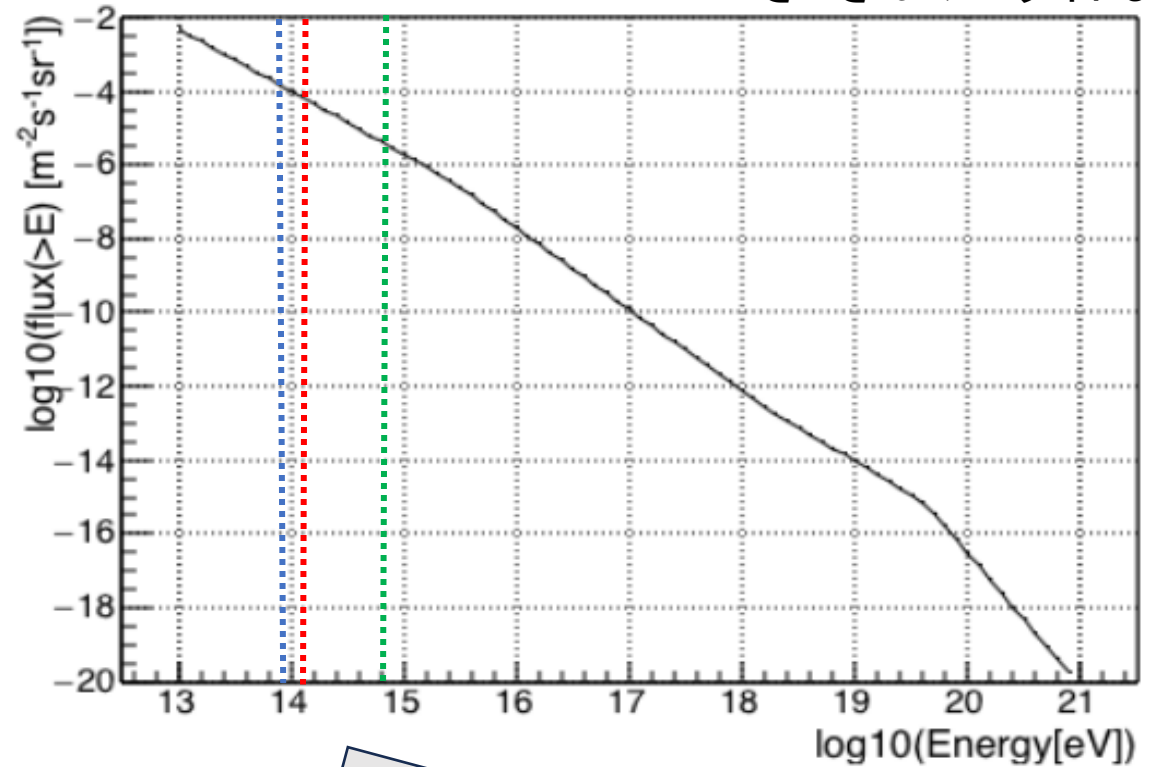
エネルギー推定(下限)

さこさんのスライドより

範囲と頻度の関係から一定以上のエネルギーの宇宙線による空気シャワーであることが求まる

Eのしきい値を求める

$$N = \int_{E_{Th}}^{\infty} F(E) \Omega ST dE$$



この線より高いエネルギーの宇宙線による空気シャワーが見られる！！

day2	day3	day4
9.2544×10^{13}	2.24207×10^{14}	8.47198×10^{14}

(eV)

キャリブレーション

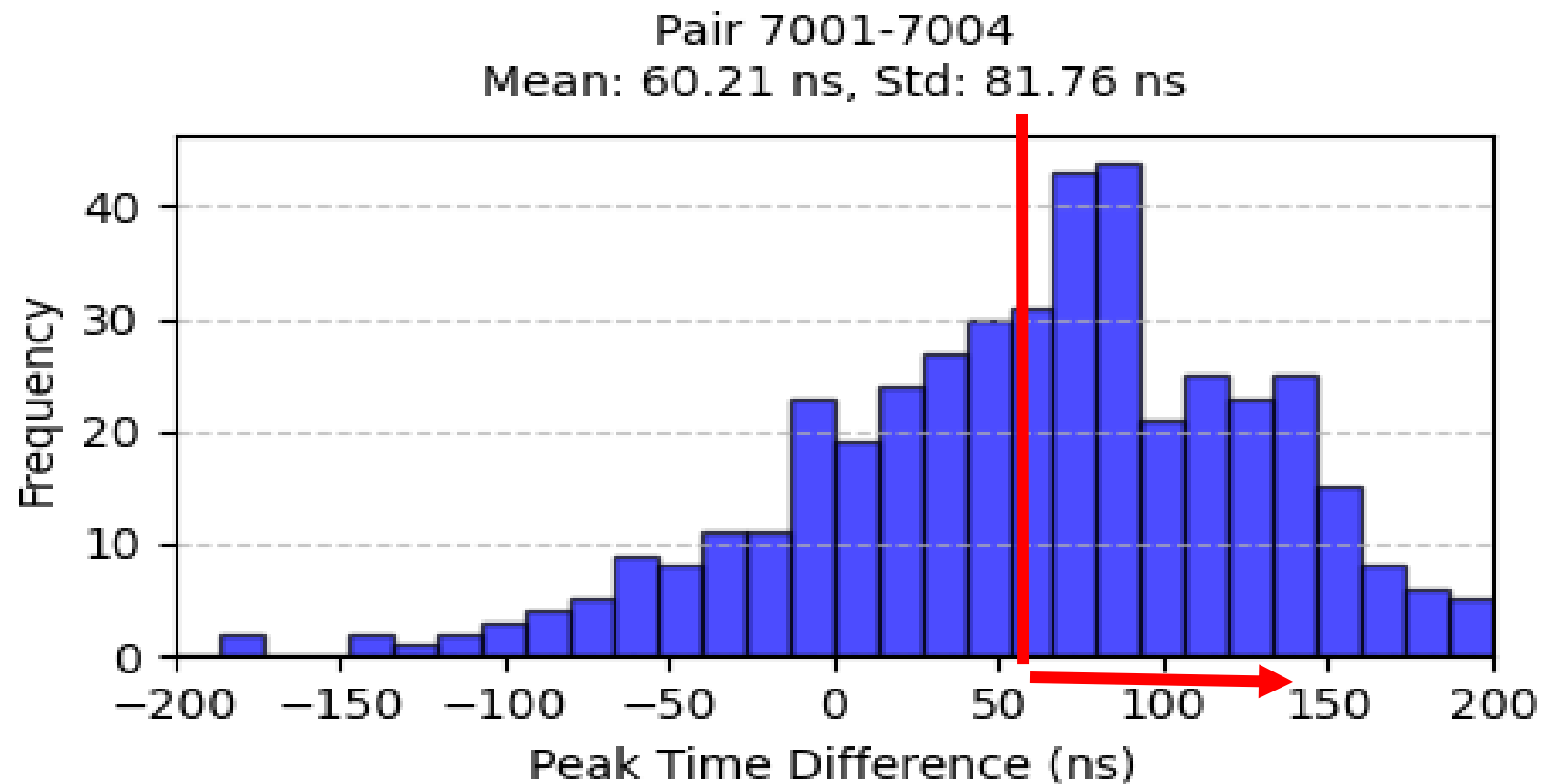
検出器を離して
到来方向を測定する前に...

検出器をかためて置き、検出してみる
すべて同じ時間に検出されるはず

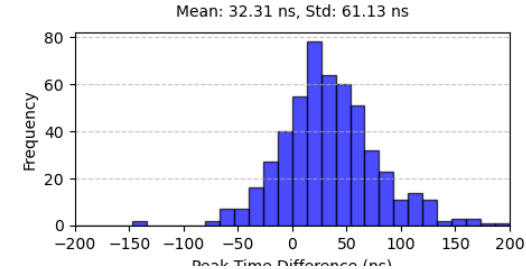
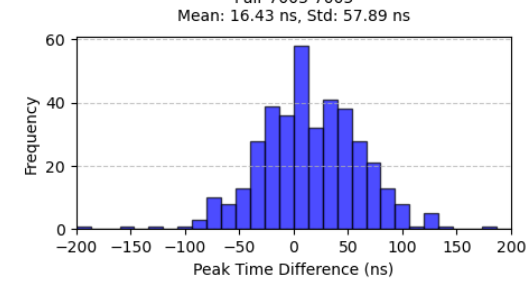
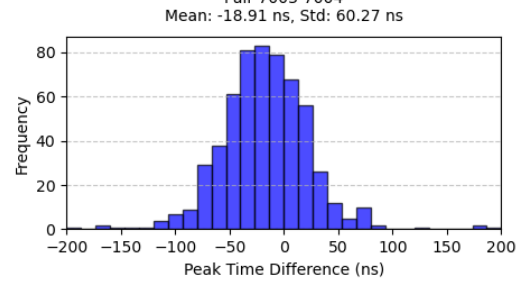
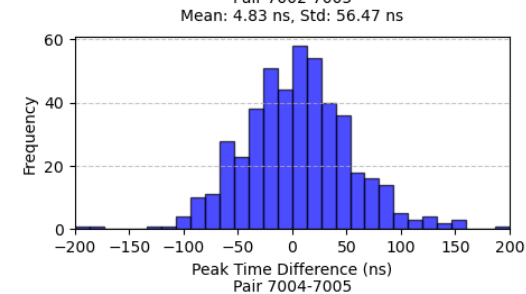
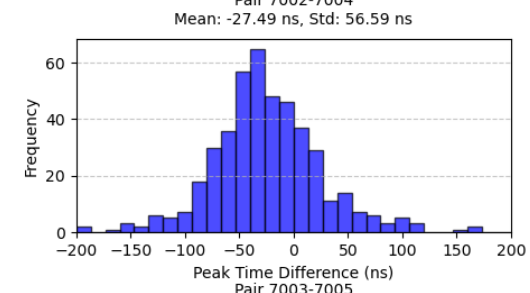
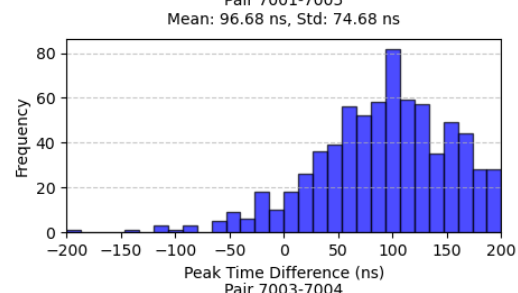
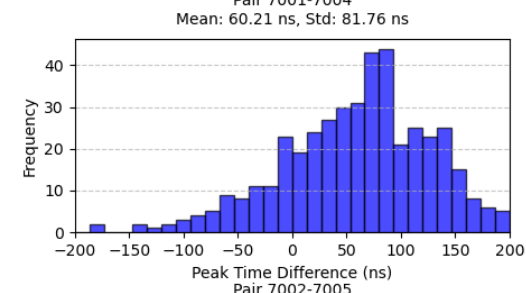
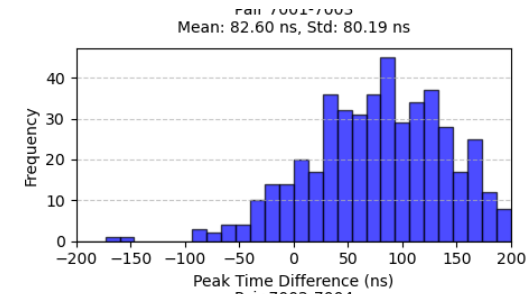
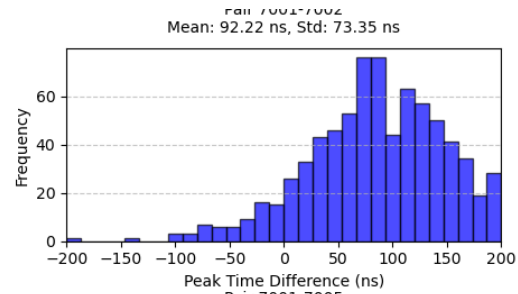
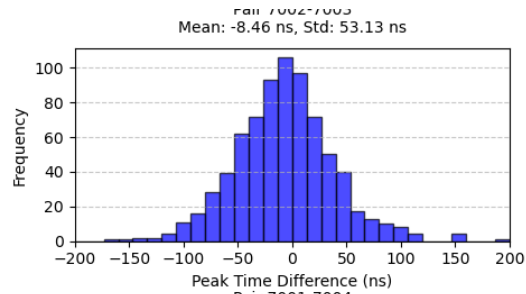


検出器ごとの時間のずれを補正する必要がある
約19時間、1603個データを取り
検出器ごとの時間差を計測した。

キャリブレーションの結果



キャリブレーションの結果

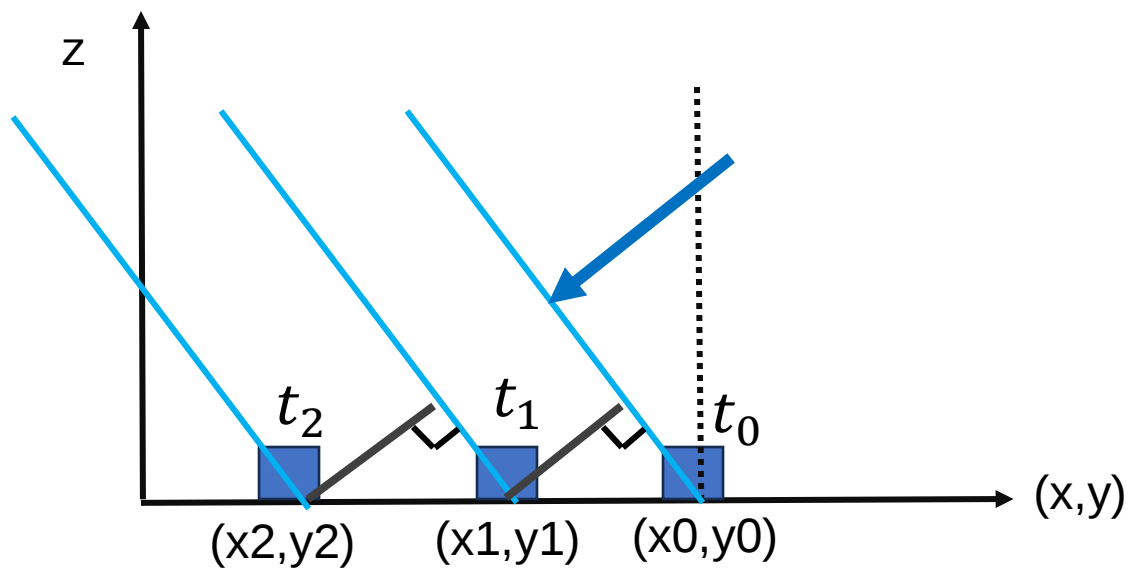


キャリブレーションの結果

検出器7002を基準として時間をセットする

- === Peak Time Difference Statistics ===
- Detector Pair (7002, 7003): Mean = -8.46 ns, Std = 53.13 ns
- Detector Pair (7001, 7002): Mean = 92.22 ns, Std = 73.35 ns
- Detector Pair (7001, 7003): Mean = 82.60 ns, Std = 80.19 ns
- Detector Pair (7001, 7004): Mean = 60.21 ns, Std = 81.76 ns
- Detector Pair (7001, 7005): Mean = 96.68 ns, Std = 74.68 ns
- Detector Pair (7002, 7004): Mean = -27.49 ns, Std = 56.59 ns
- Detector Pair (7002, 7005): Mean = 4.83 ns, Std = 56.47 ns
- Detector Pair (7003, 7004): Mean = -18.91 ns, Std = 60.27 ns
- Detector Pair (7003, 7005): Mean = 16.43 ns, Std = 57.89 ns
- Detector Pair (7004, 7005): Mean = 32.31 ns, Std = 61.13 ns

到来方向(原理)



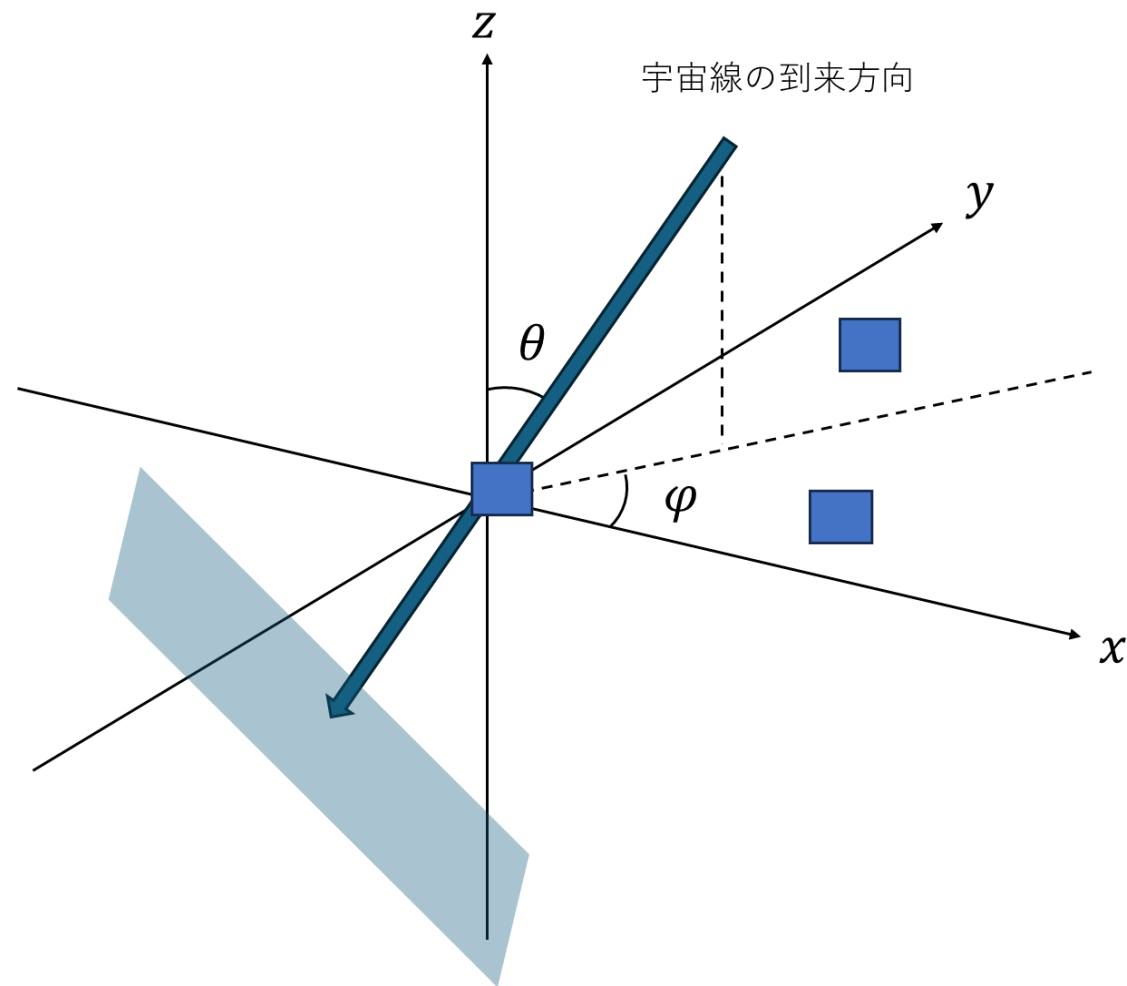
c :光速、 x_{10} は $x_1 - x_0$ を表すとする

$$c \frac{t_{20}y_{10} - t_{10}x_{20}}{x_{10}y_{20} - x_{20}y_{10}} = a \quad -c \frac{t_{20}x_{10} - t_{10}y_{20}}{x_{10}y_{20} - x_{20}y_{10}} = b$$

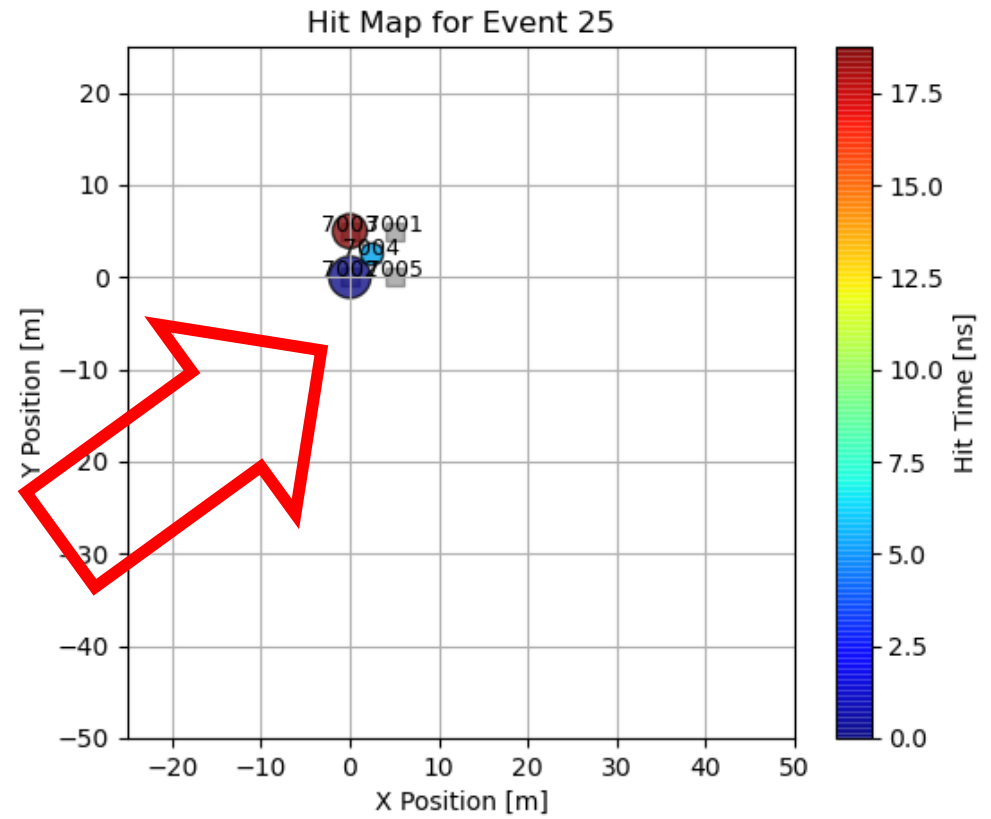
a, b を用いて、

$$\tan \phi = \frac{b}{a}, \sin \theta = \sqrt{a^2 + b^2}$$

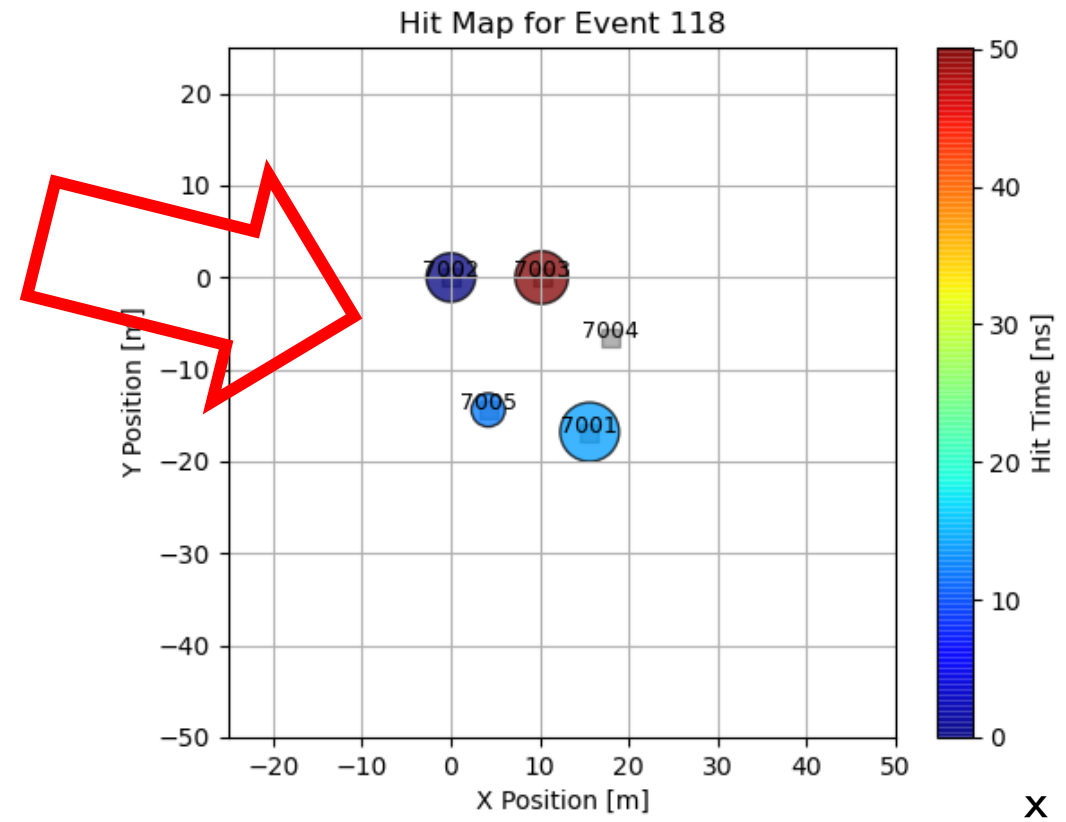
と書ける



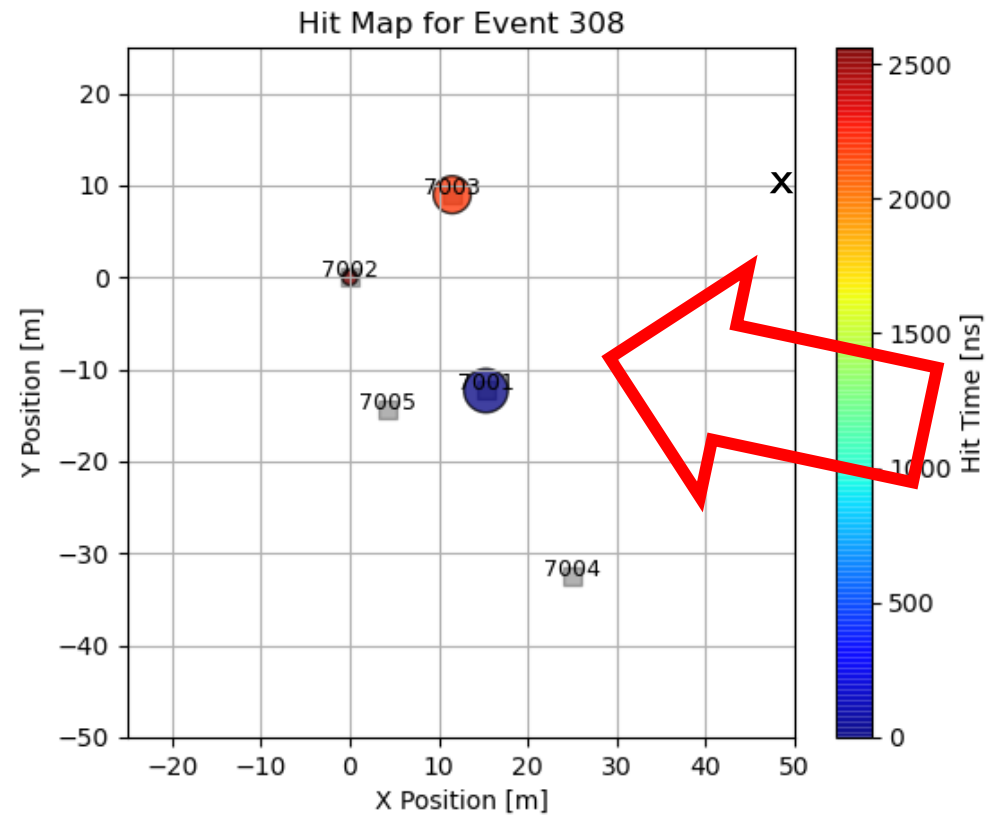
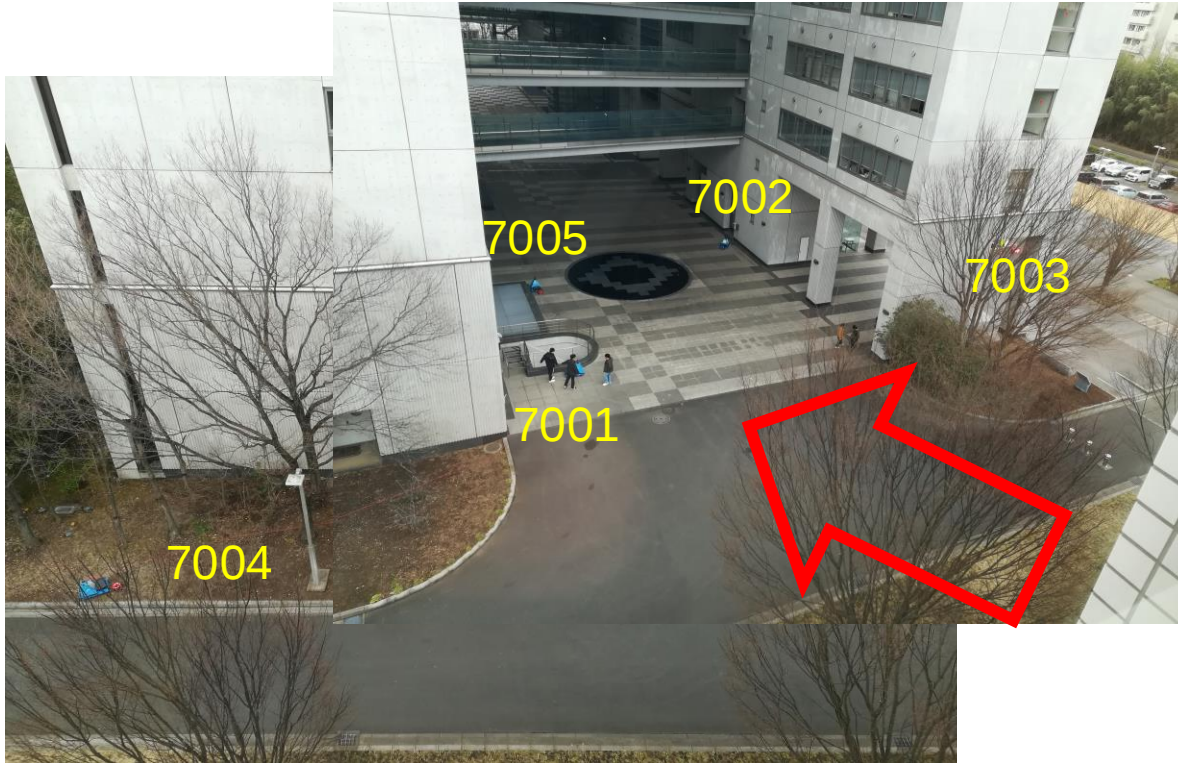
実際の配置(1) Day2



実際の配置(2) Day3

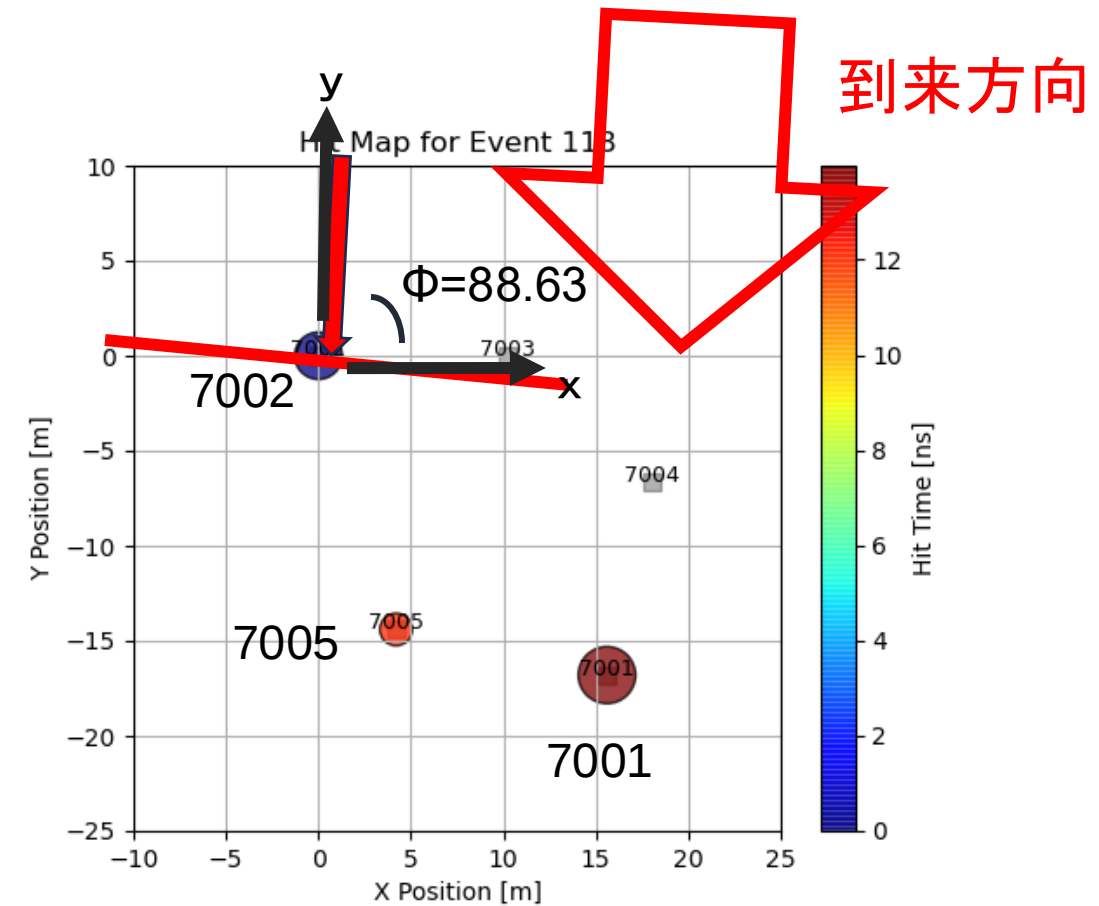
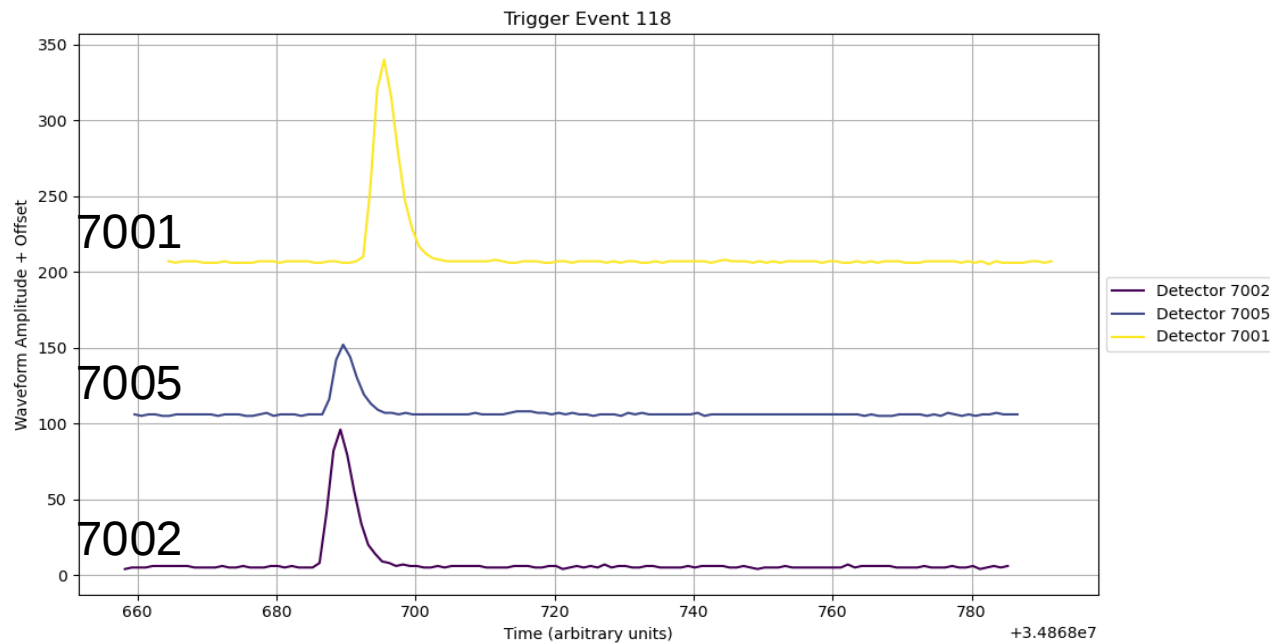


実際の配置(3) Day4



宇宙線の到来方向の計算

3月5日 ミニ・アマテラスの到来方向



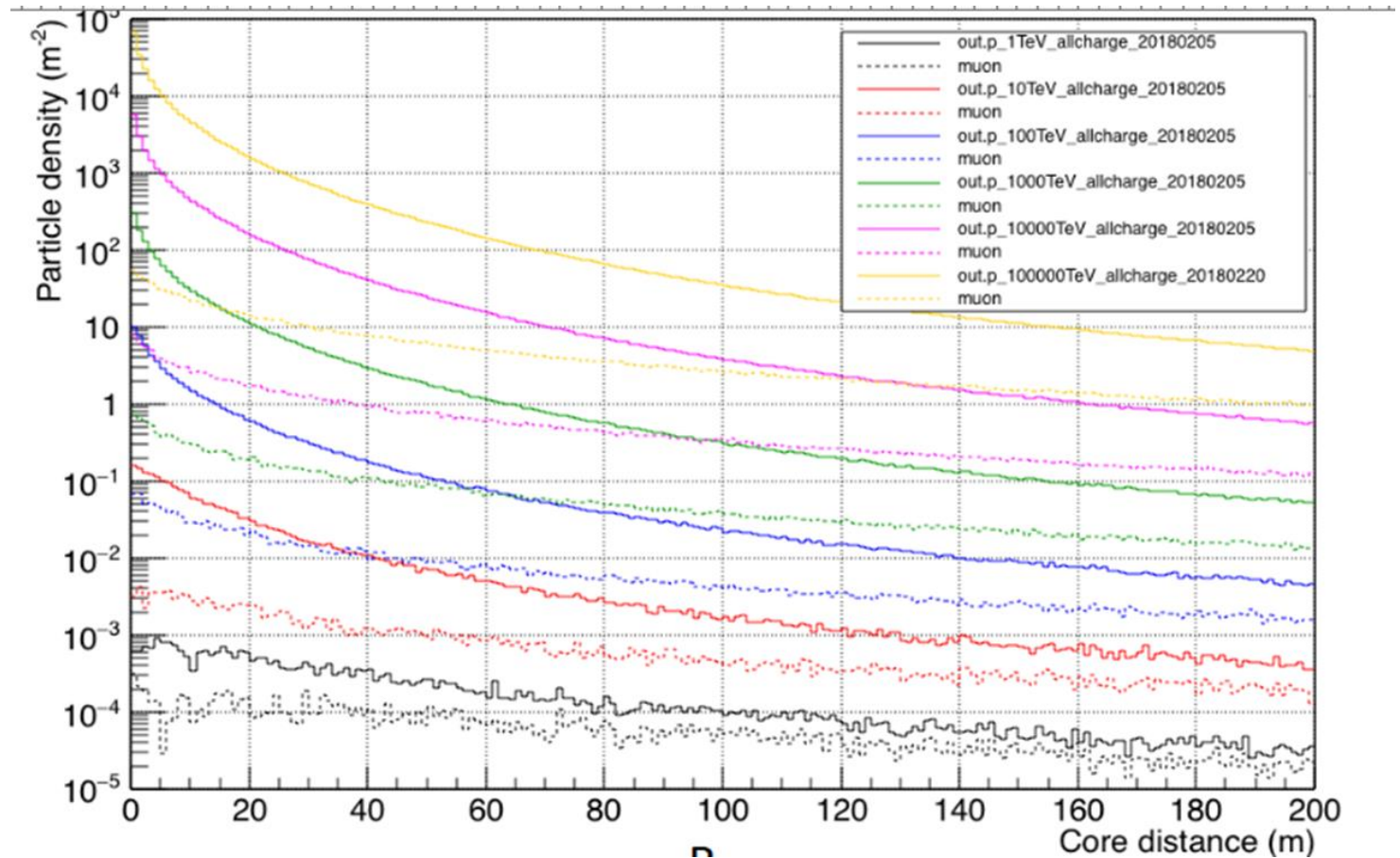
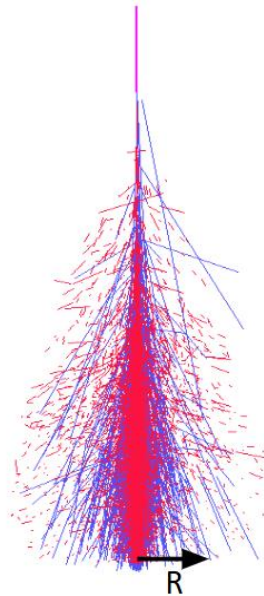
$$(\theta, \Phi) = (14.79, 88.63) [^\circ]$$

エネルギー推定(原理)

シンチレータそのものでは宇宙線のエネルギーを測ることはできない！！

→ではどうするか

→宇宙線の
数密度分布
から求める！！



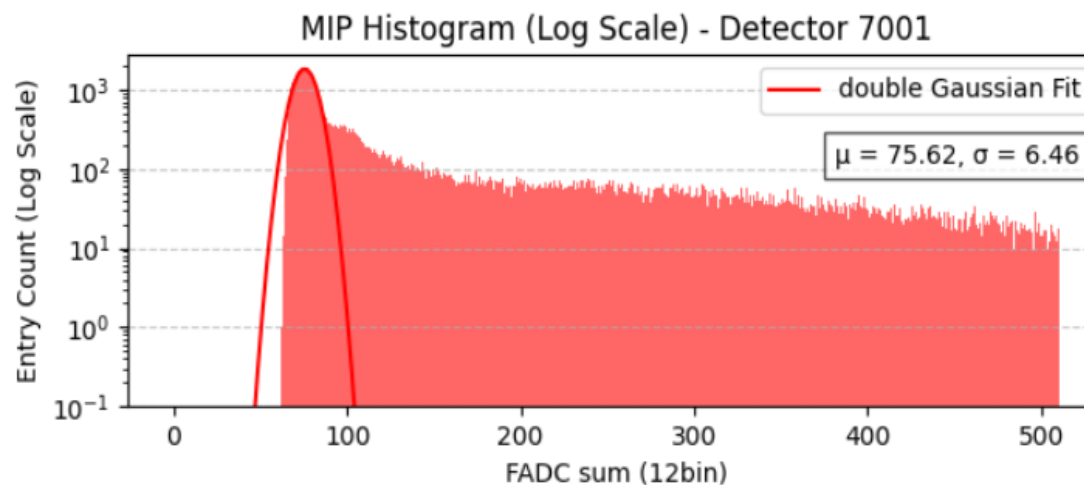
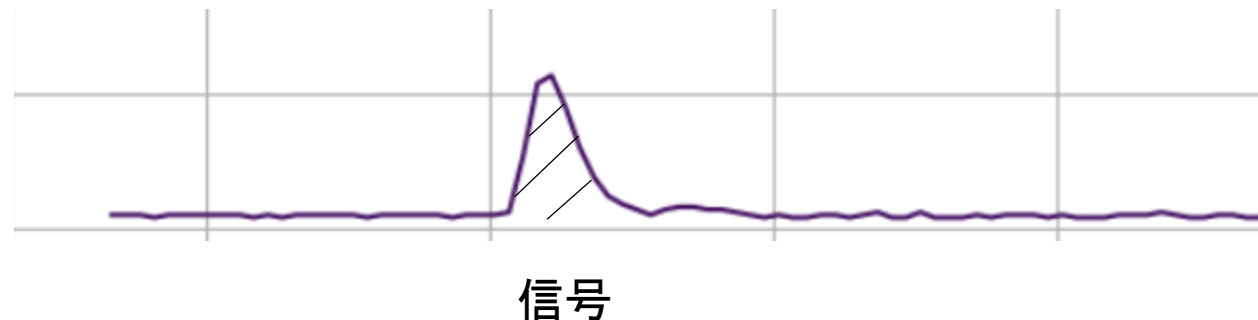
エネルギー推定

数密度の求め方。

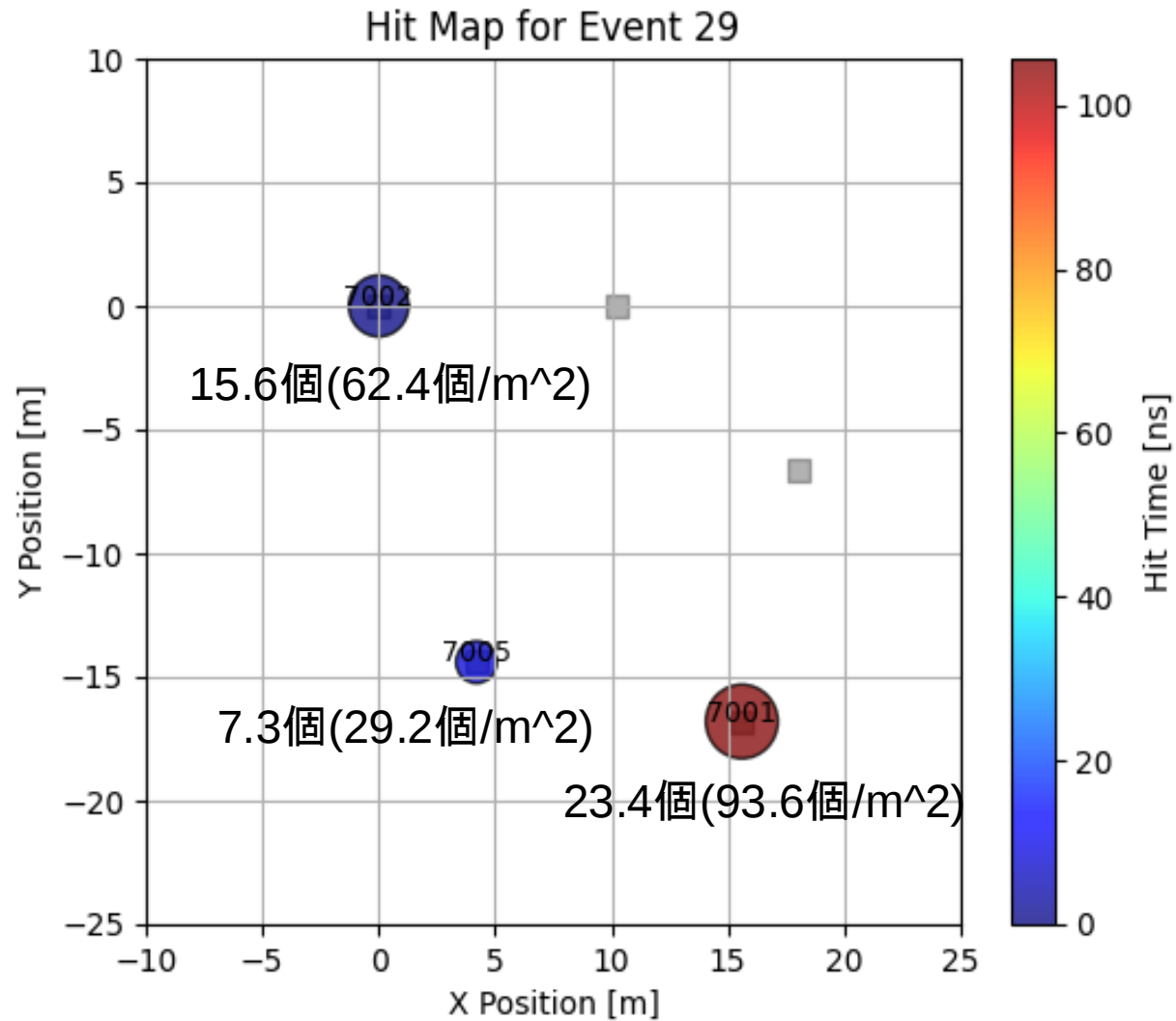
1. 1粒子(MIP)当たりの信号量 (MIP count)を求める。
2. 各信号の信号量をMIP countで割る(粒子数を求める。)
3. シンチレータの面積で割る。

MIP countを求めるには、信号量を統計的に溜めていって、最も高い頻度のものを1粒子当たりの信号量と推定する。

detector	ped μ	mip μ	pedestal	MIP count
1	34.33	75.62	4.29125	24.125
2	33.07	74.32	4.13375	24.715
3	35.99	87.15	4.49875	33.165
4	44.53	88.82	5.56625	22.025
5	41.61	87.52	5.20125	25.105

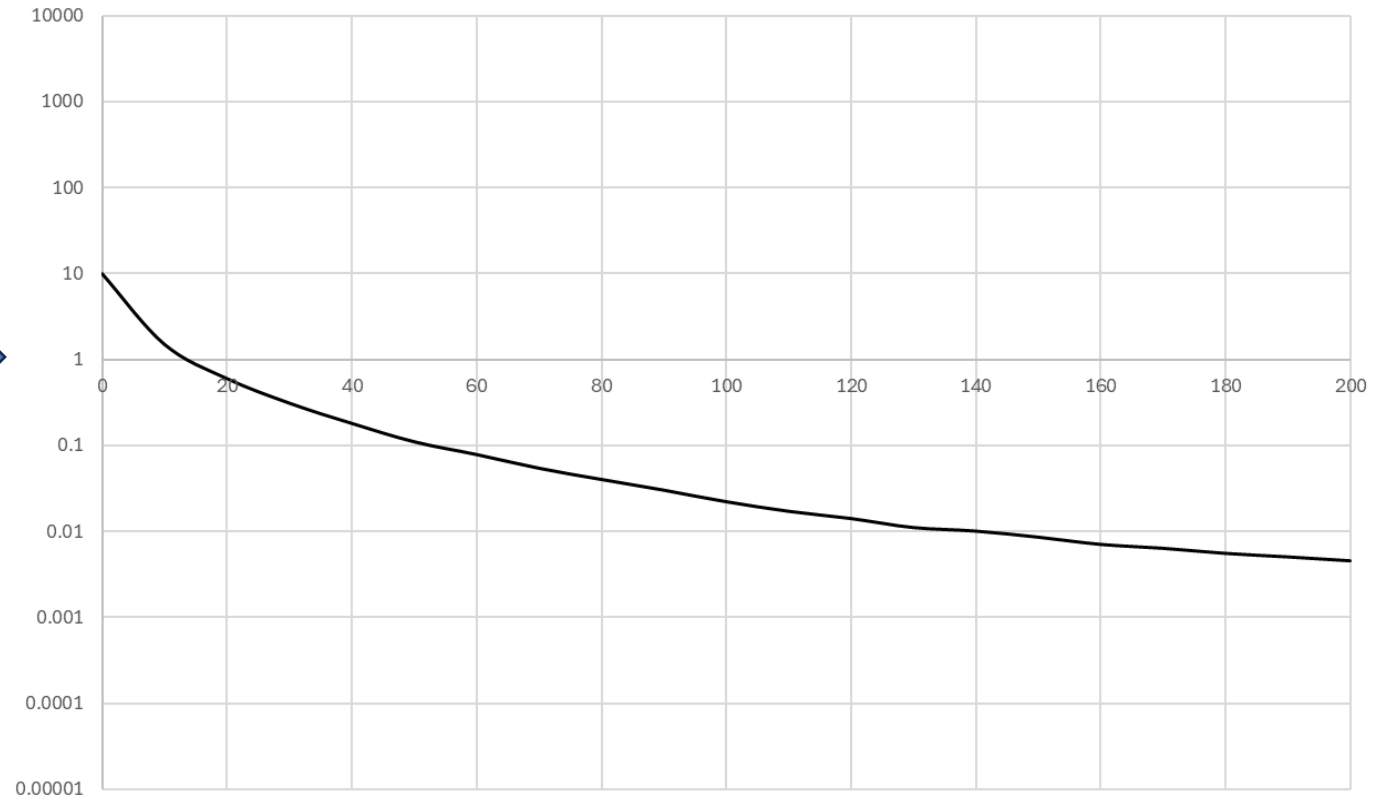
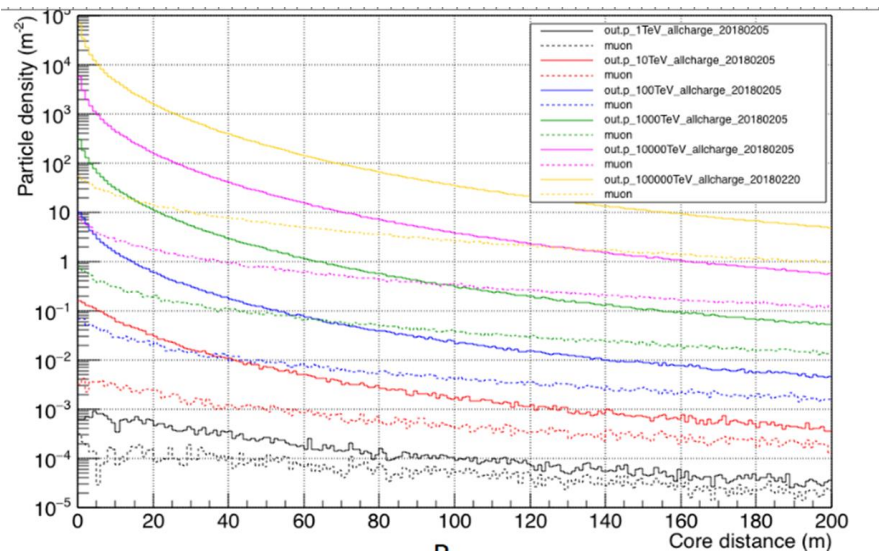


エネルギー推定



シンチの面積は
 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.25\text{m}^2$

How to fit



フィッティングする関数(数密度 n)

$$n_i = A \cdot 10^{(a_6 r_i^6 + a_5 r_i^5 + a_4 r_i^4 + a_3 r_i^3 + a_2 r_i^2 + a_1 r_i + a_0)}$$

シャワー中心からの半径

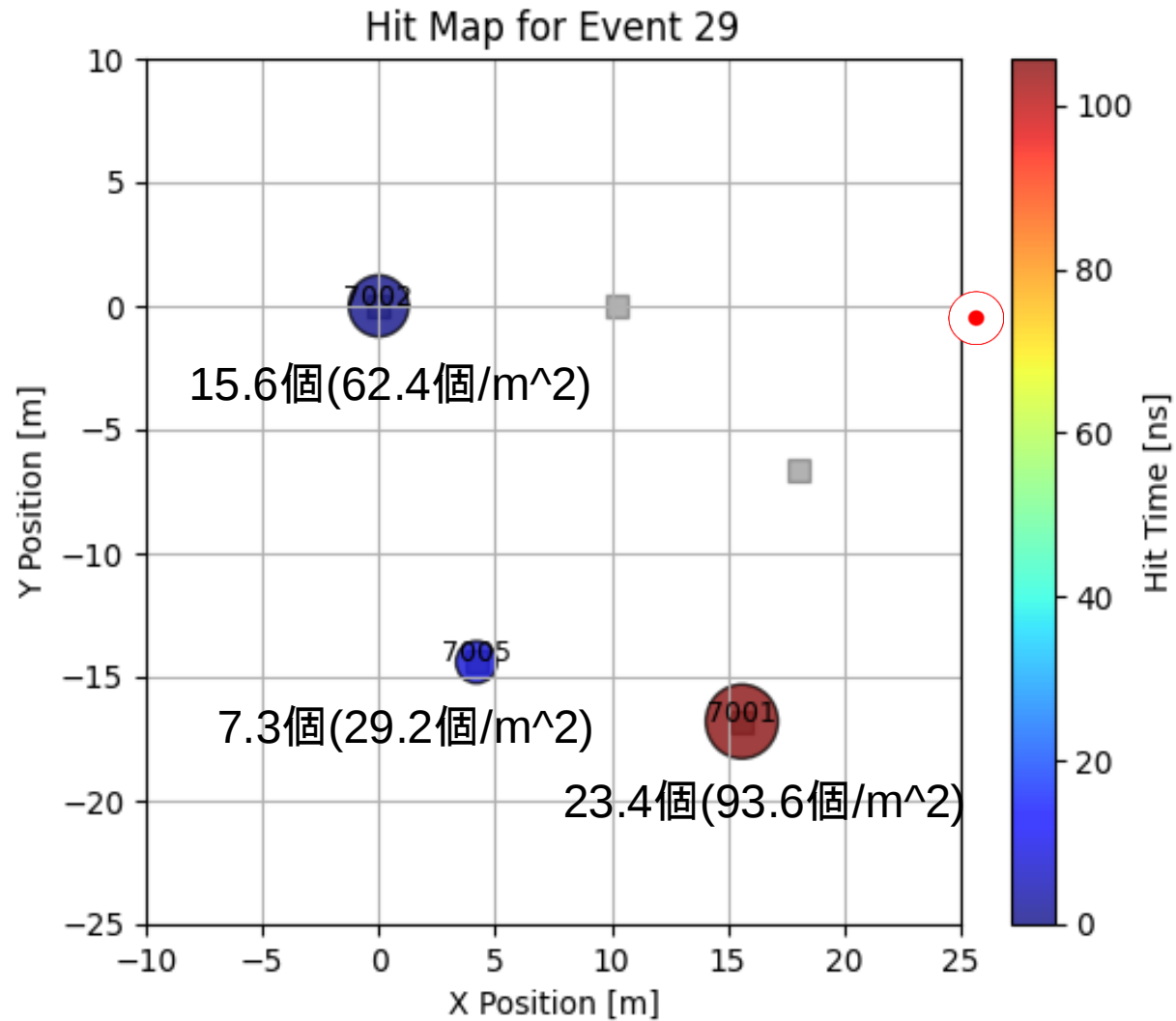
$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

(x_0, y_0) シャワー中心

少なくとも3点以上 (x_i, y_i, n_i) をとることで (A, x_0, y_0) を決定する。

→先ほどの3点を用いて関数を決定する。

エネルギー推定



結果...

$$A=136.5$$

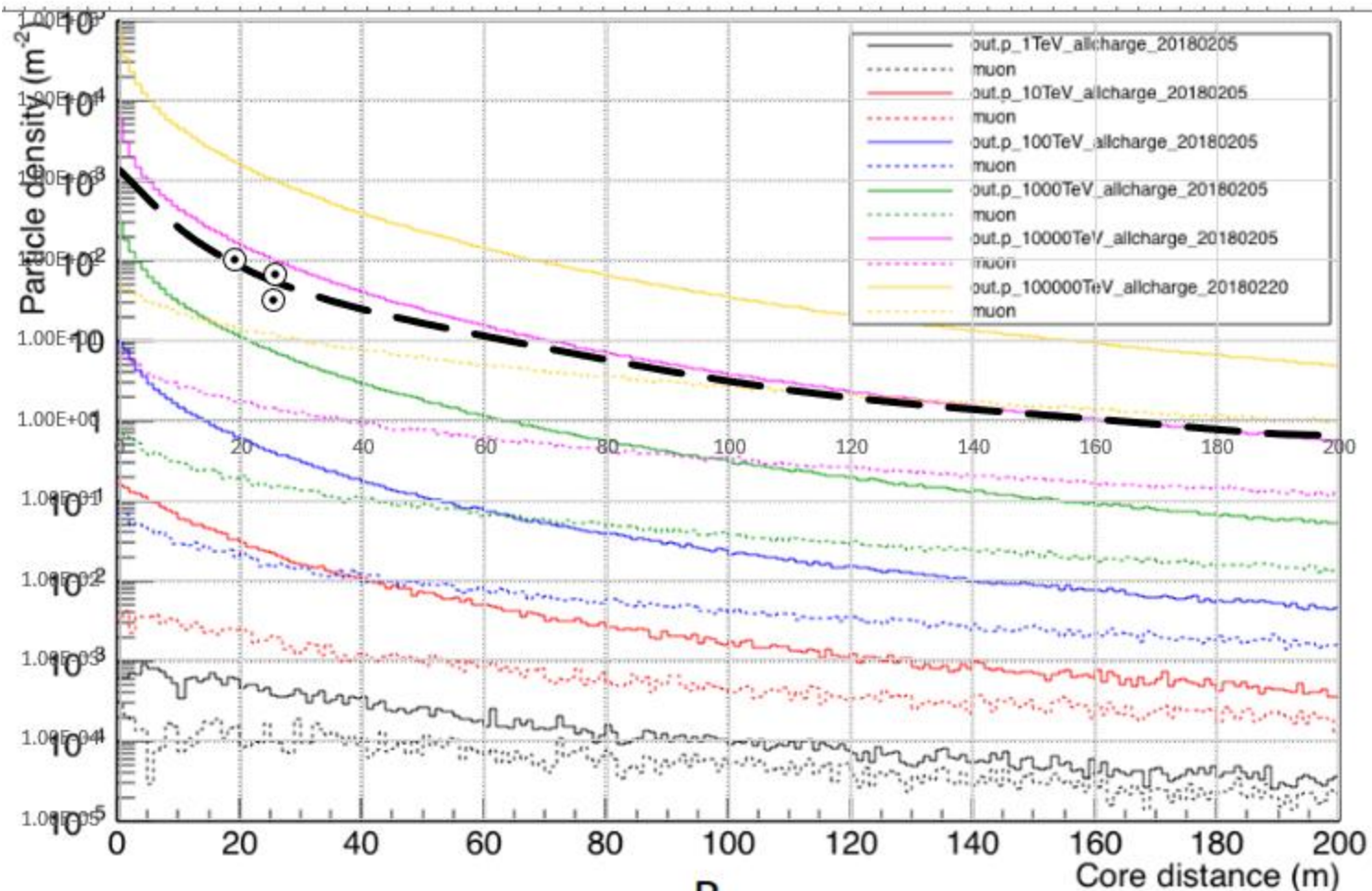
$$x_0=25.8$$

$$y_0=-0.7$$

(x_0, y_0) シャワー中心

$$= (25.8, -0.7)$$

Fitting



$$A=136.5$$

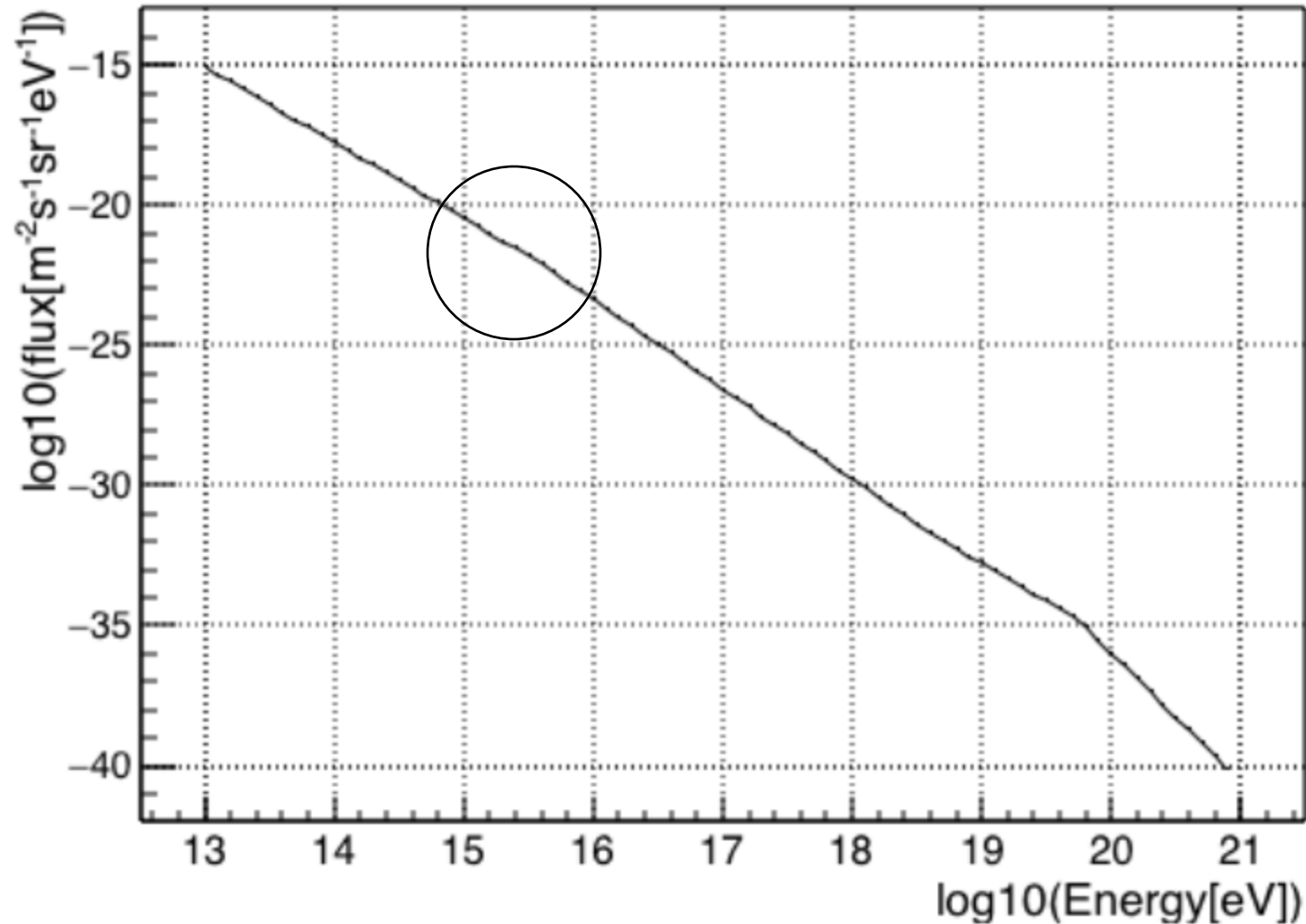
A	宇宙線エネルギー
10	~100TeV
110	~1000TeV
1100	~10000TeV
11000	~100000TeV

$$10^{15} \sim 10^{16} \text{ eV}$$

線形に変換すると...

$$1.2 \times 10^{15} \text{ eV}$$

Fitting



さこさんのスライドより

$10^{15} \sim 10^{16} \text{eV}$ のエネルギー幅のとき

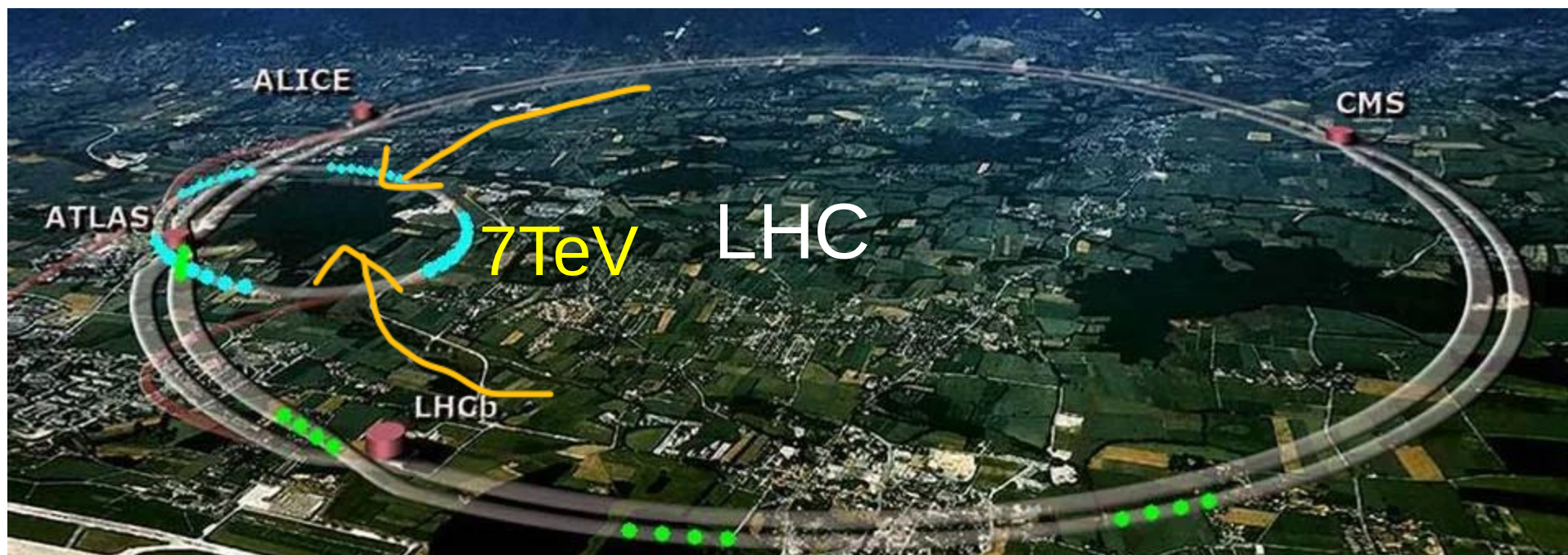
10m × 10mで3時間(10000秒)計測したとき、立体角は全天の上半分(2π)を見込むとすると

$$\begin{aligned} &10^{-22} [\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1} \text{eV}^{-1}] \\ &\times 100 [\text{m}^2] \times 10000 [\text{s}] \\ &\times 2\pi [\text{str}] \times 9 \times 10^{15} [\text{eV}] \\ &\sim 5 \text{個} \end{aligned}$$

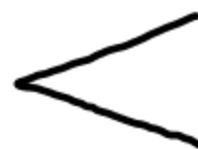
- 宇宙線を検出して空気シャワーを観測できた
- 検出面積を広げるとイベントレートが下がり、検出できる宇宙線のエネルギーも高いものしか見えなくなる
- 時間のキャリブレーションを行い到来方向の決定を行った。
- 宇宙線のエネルギーを求めた。 $1.2 \times 10^{15} \text{ eV}$

まとめ

<https://ja.namu.wiki/w/LHC>



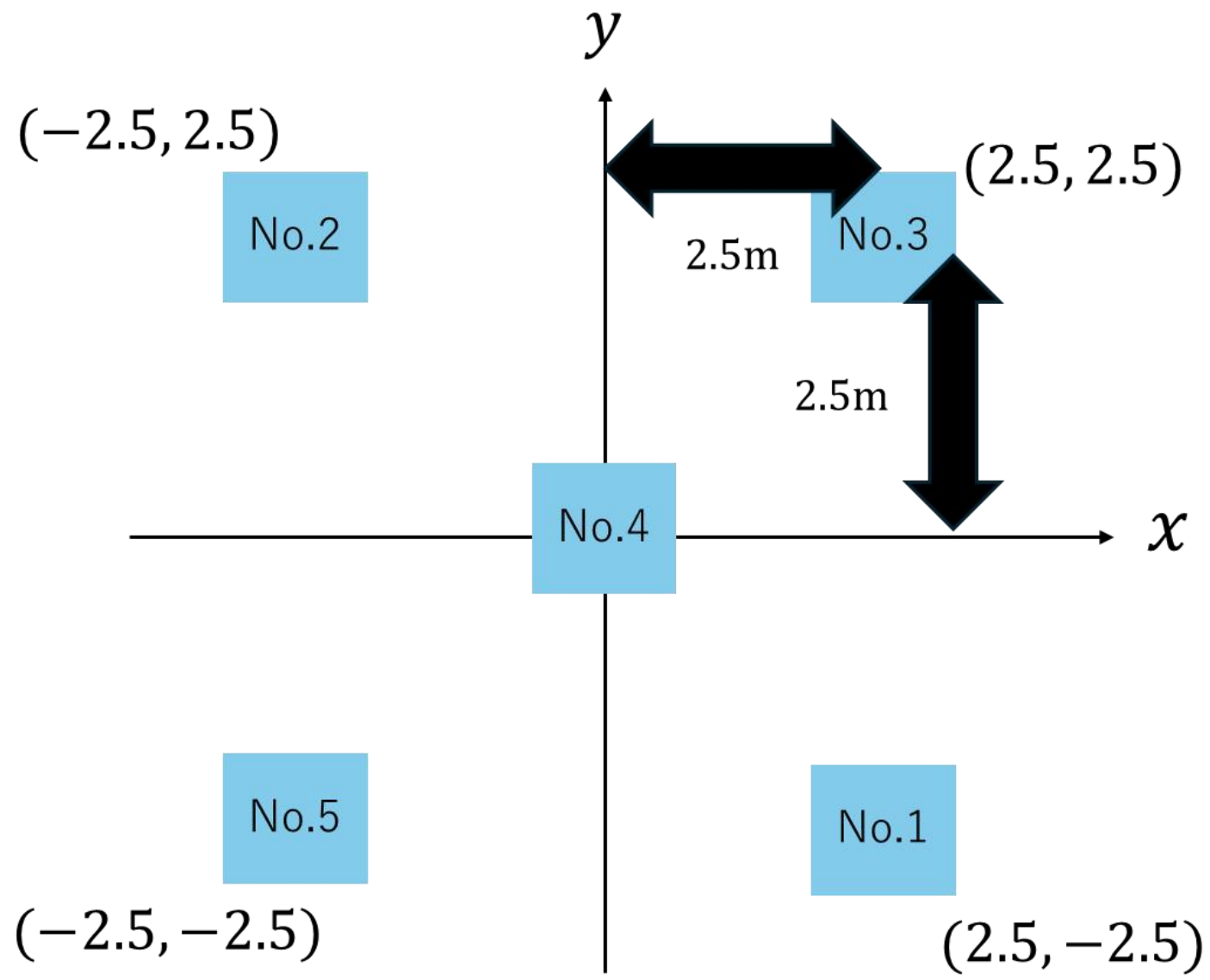
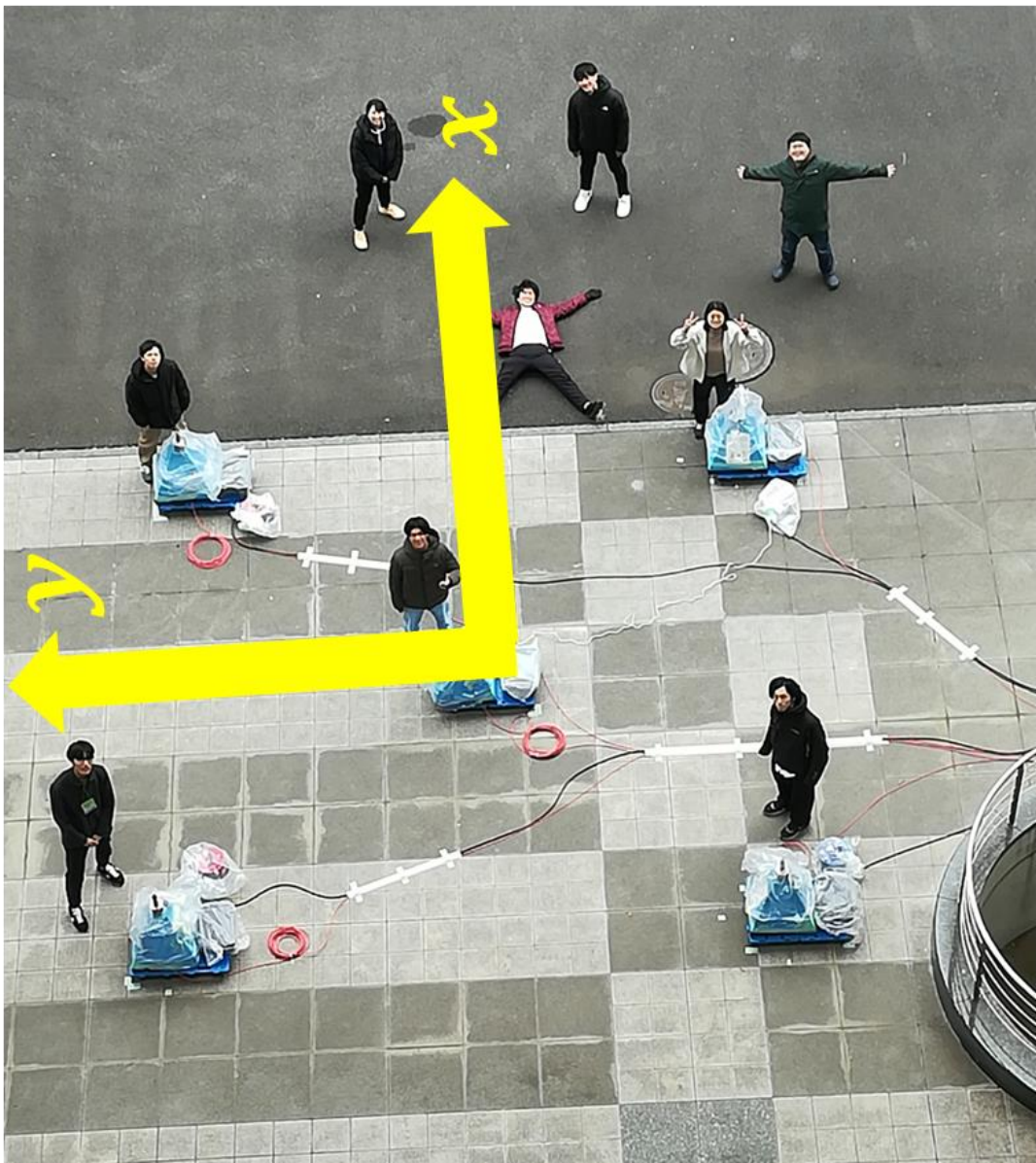
人類の最高到達エネルギー: 7TeV~10の12乗eV

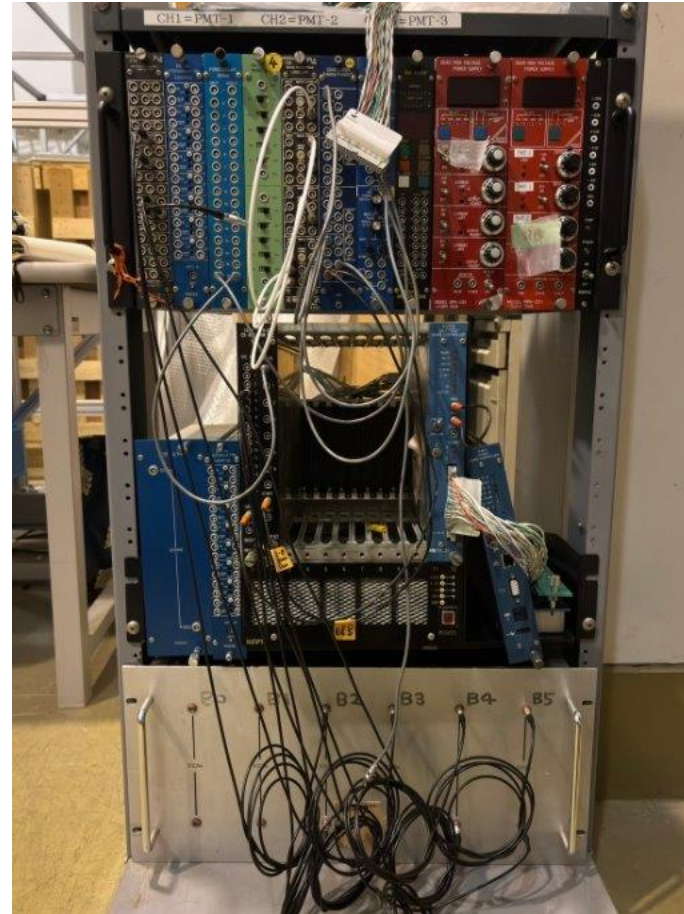


$1.2 \times 10^{15} \text{ eV}$

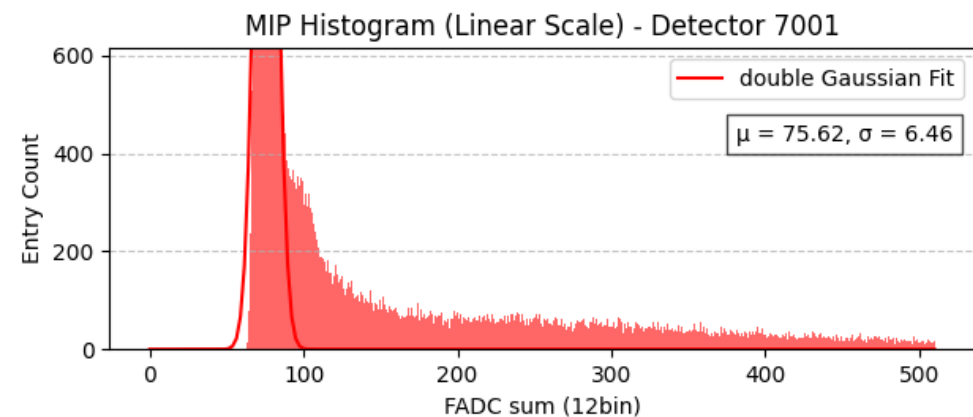
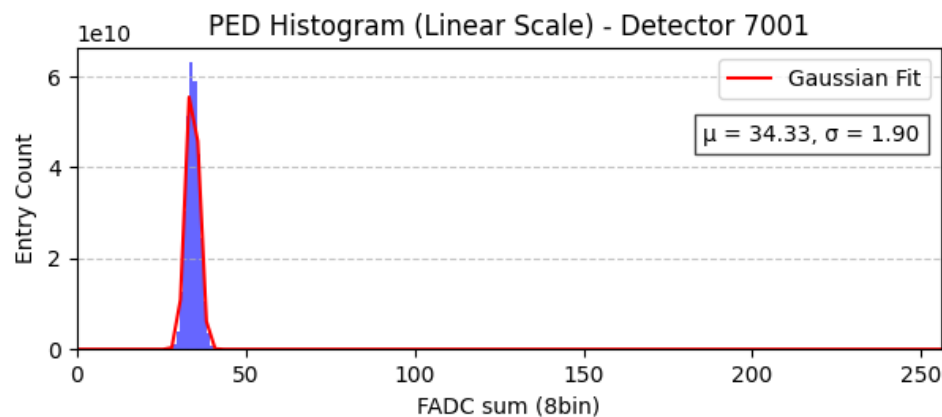
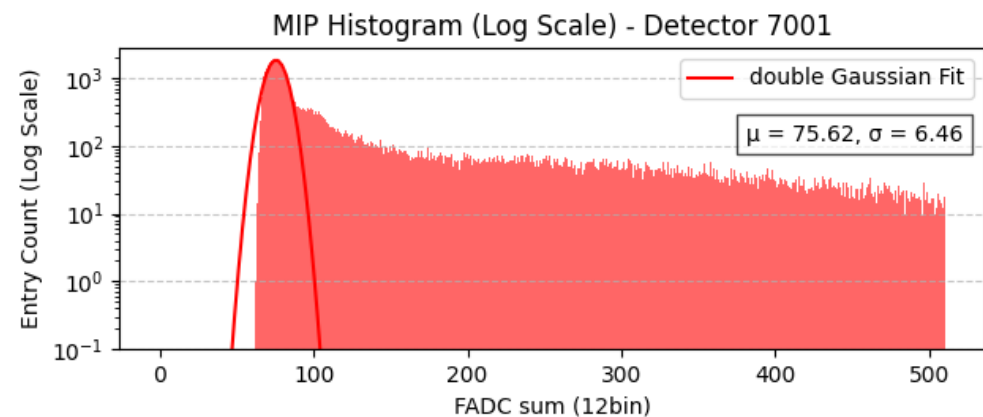
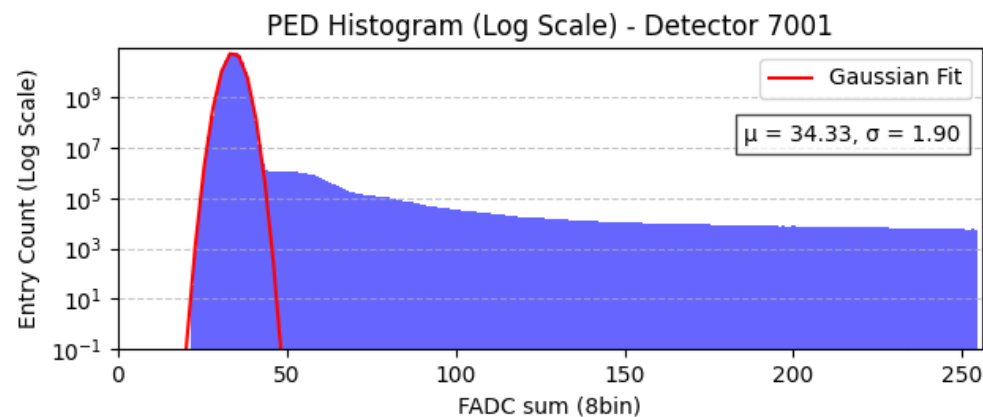
我々が見つけた宇宙線のエネルギー

ミニ・アマテラス粒子と名付けた

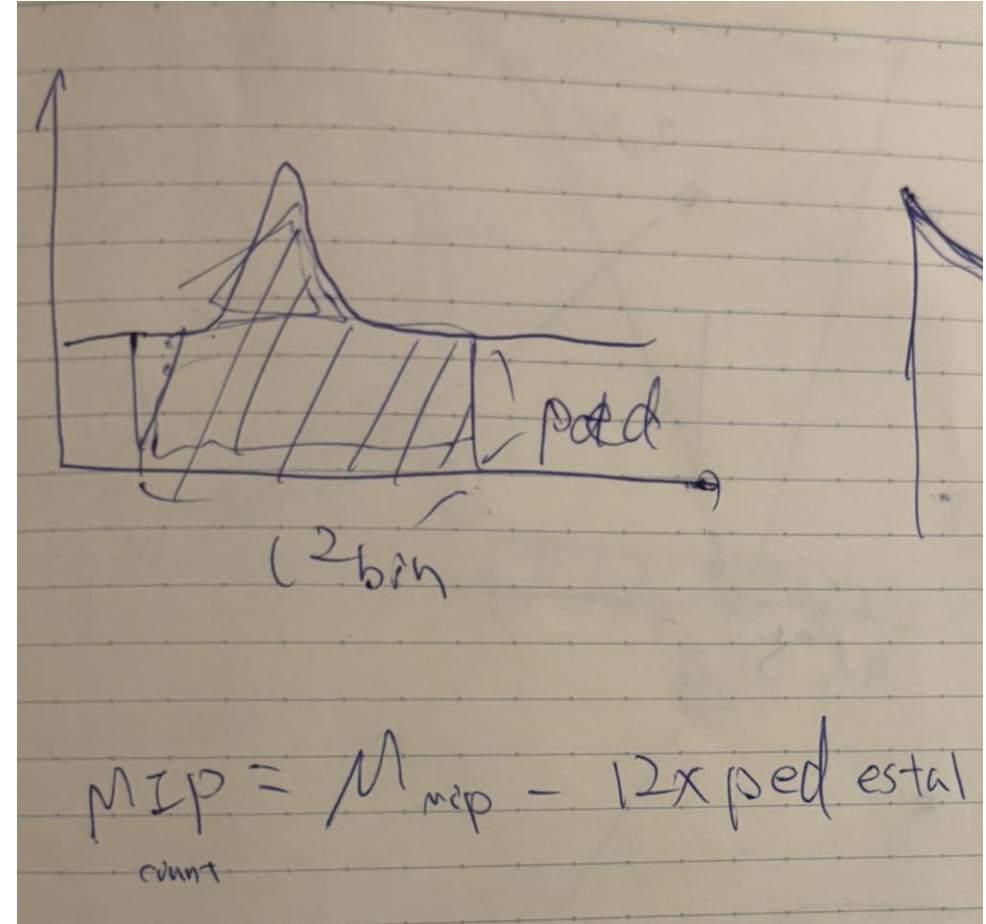
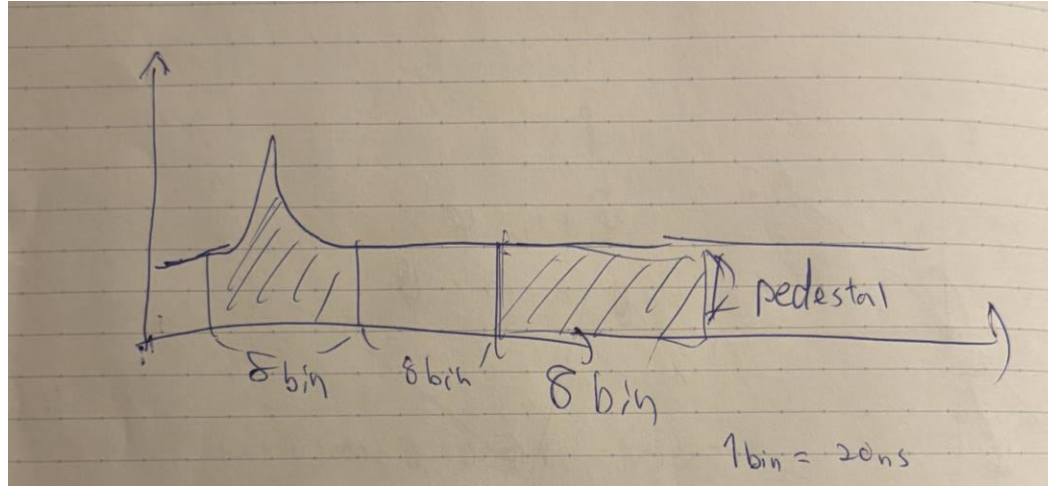


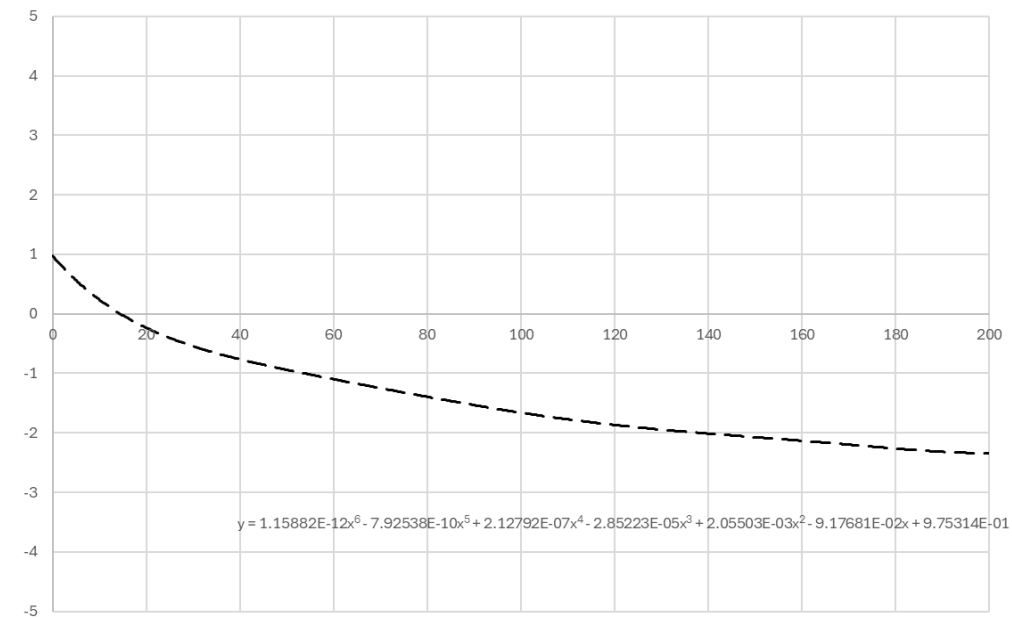
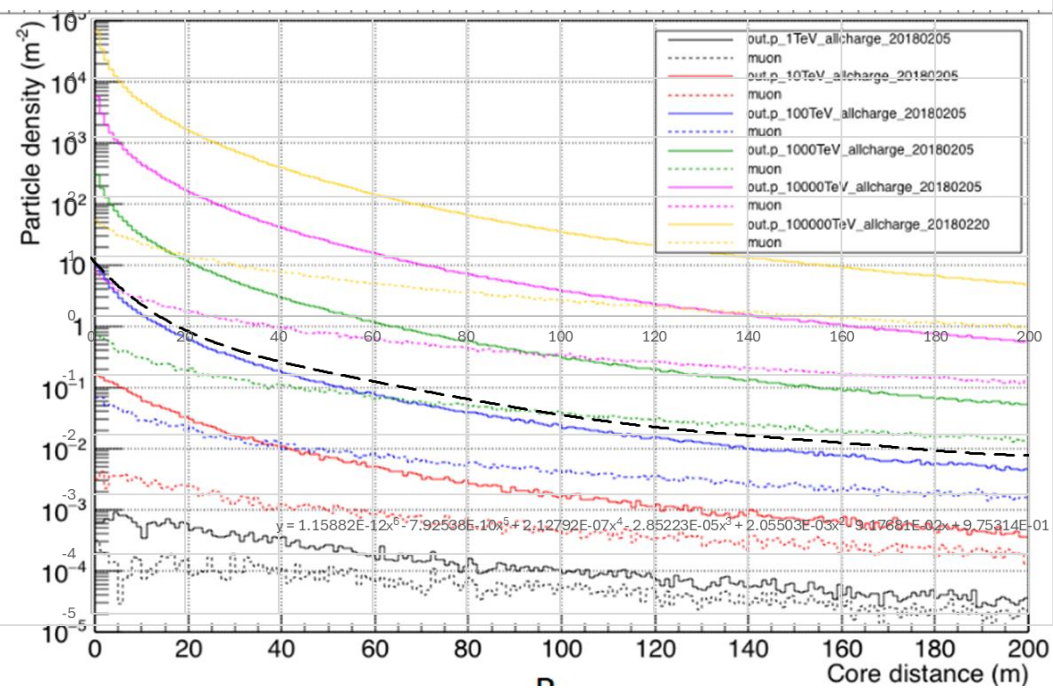


宇宙線のエネルギー推定



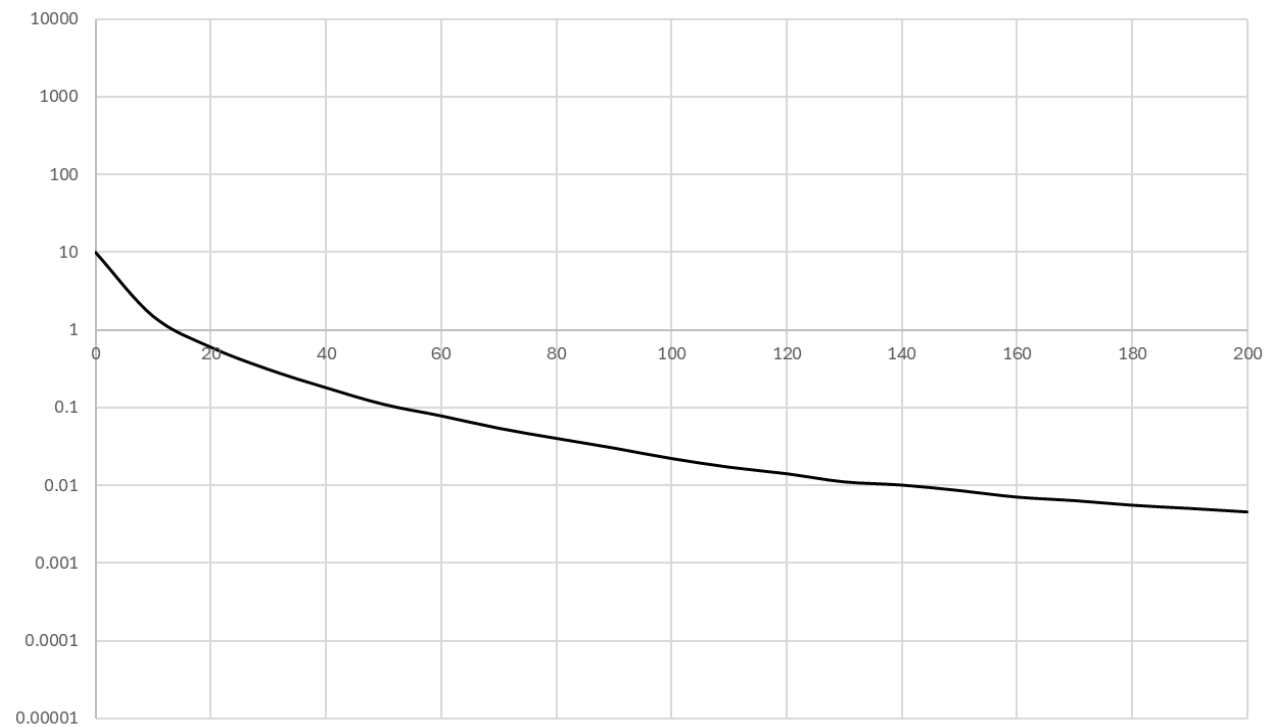
宇宙線のエネルギー推定



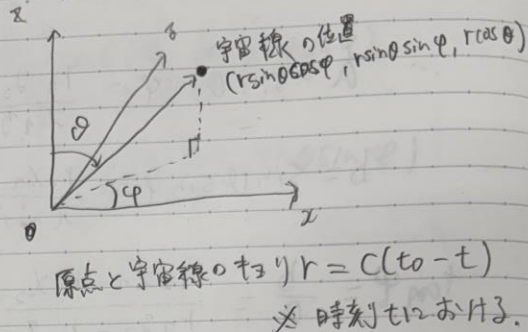
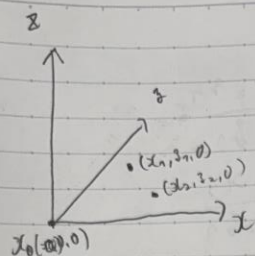


$$n_i = A \cdot 10^{(a_6 r_i^6 + a_5 r_i^5 + a_4 r_i^4 + a_3 r_i^3 + a_2 r_i^2 + a_1 r_i + a_0)}$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$



a6	a5	a4	a3	a2	a1	a0
1.16E-12	-7.93E-10	2.13E-07	-2.85E-05	2.06E-03	-9.18E-02	0.975314



この面は宇宙線に向かうベクトルが張る法平面

$$\text{面の式} : r \sin \theta \cos \phi (x - r \sin \theta \cos \phi) + r \sin \theta \sin \phi (y - r \sin \theta \sin \phi) + r \cos \theta (z - r \cos \theta) = 0$$

この面は $t = t_1$ のとき

$(x_1, y_1, 0)$ を通る

$t = t_2$ のとき $(x_2, y_2, 0)$ を通る。

(x_0, y_0, z_0) を通り、法線ベクトル (a, b, c) とする

$$\text{面の式} : a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0$$

$$\Rightarrow \sin \theta \cos \phi (x_1 - r_1 \sin \theta \cos \phi) + \sin \theta \sin \phi (y_1 - r_1 \sin \theta \sin \phi) - r_1 \cos \theta = 0$$

$$\sin \theta \cos \phi (x_2 - r_2 \sin \theta \cos \phi) + \sin \theta \sin \phi (y_2 - r_2 \sin \theta \sin \phi) - r_2 \cos \theta = 0$$

$$(r_1 = c(t_0 - t_1), r_2 = c(t_0 - t_2))$$

$$\Rightarrow \sin \theta \cos \phi x_1 + \sin \theta \sin \phi y_1 = r_1$$

$$\sin \theta \cos \phi x_2 + \sin \theta \sin \phi y_2 = r_2$$

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}$$

$$\therefore \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \end{pmatrix} = \frac{1}{x_1 y_2 - x_2 y_1} \begin{pmatrix} y_2 - y_1 \\ x_2 - x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}$$

$$\therefore \sin \theta \cos \phi = \frac{r_1 y_2 - r_2 y_1}{x_1 y_2 - x_2 y_1} = a \quad \text{と置く}$$

$$\sin \theta \sin \phi = \frac{r_2 x_1 - r_1 x_2}{x_1 y_2 - x_2 y_1} = b \quad \text{と置く}$$

$$\tan \phi = \frac{b}{a} = \frac{r_2 x_1 - r_1 x_2}{r_1 y_2 - r_2 y_1}$$

$$\sin \theta = \sqrt{a^2 + b^2}$$

フラックス関数

$$F(E) = 1.8 \times 10^4 \times \left(\frac{E}{1\text{GeV}} \right)^{-2.7}$$