



最高エネルギー宇宙線

～空気シャワー観測～

Member: 楠森優貴 小林美咲 土田駿介 西幸太郎 宮田瑠太 山田祐佳

Supervisor: 塔隆志

Supporter: 沖本直哉 高橋薫 樋口諒 藤末紘三



目次

- ・ 空気シャワーをみる
- ・ 実験の概要
- ・ 精度を上げる~Time Walk 補正~
- ・ 到来方向の解析
- ・ 赤経赤緯の偏りの有無
- ・ GRB
- ・ 原始ブラックホールの蒸発
- ・ まとめ

空気シャワーをみる

空気シャワーとは

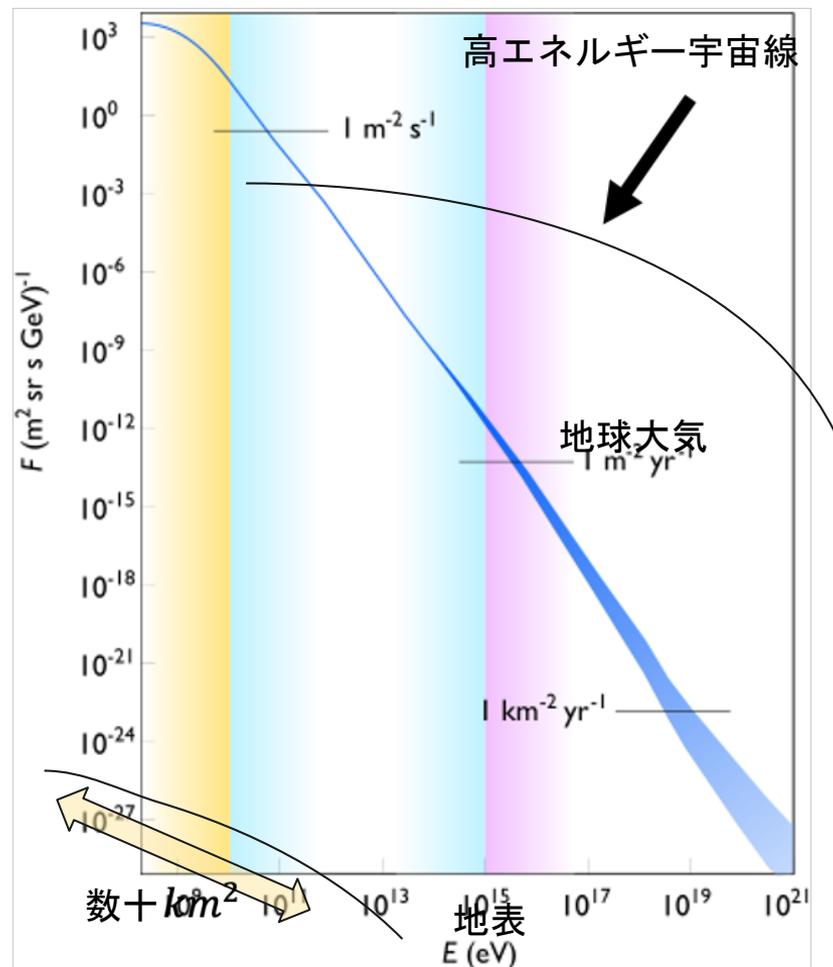
宇宙線が地球大気に突入すると、さまざまな反応段階を経て非常に多くの粒子群(空気シャワー)を作る。

ex)電子、 γ 線、ミューオン、ニュートリノ、荷電 π 中間子

空気シャワーの地表での広がりは数十 km^2 平面的に届く。

一般に地球に届く宇宙線はエネルギーが高くなるほど、その数は少なくなる。(右図参照)

そこで、高エネルギー宇宙線によってできる空気シャワーを観測することによって観測数を劇的に増やすことができる。



空気シャワー観測の目的

主な目的

超高エネルギー宇宙線の
到来方向の観測
→宇宙線の等方性または
異方性を知りたい！

発展的な目的

超高エネルギー宇宙線の到来時刻と
到来方向の観測
→GRBイベントを観測したい！

超高エネルギー宇宙線の到来頻度の
観測
→原始ブラックホールの蒸発を観測
したい！

実験の概要

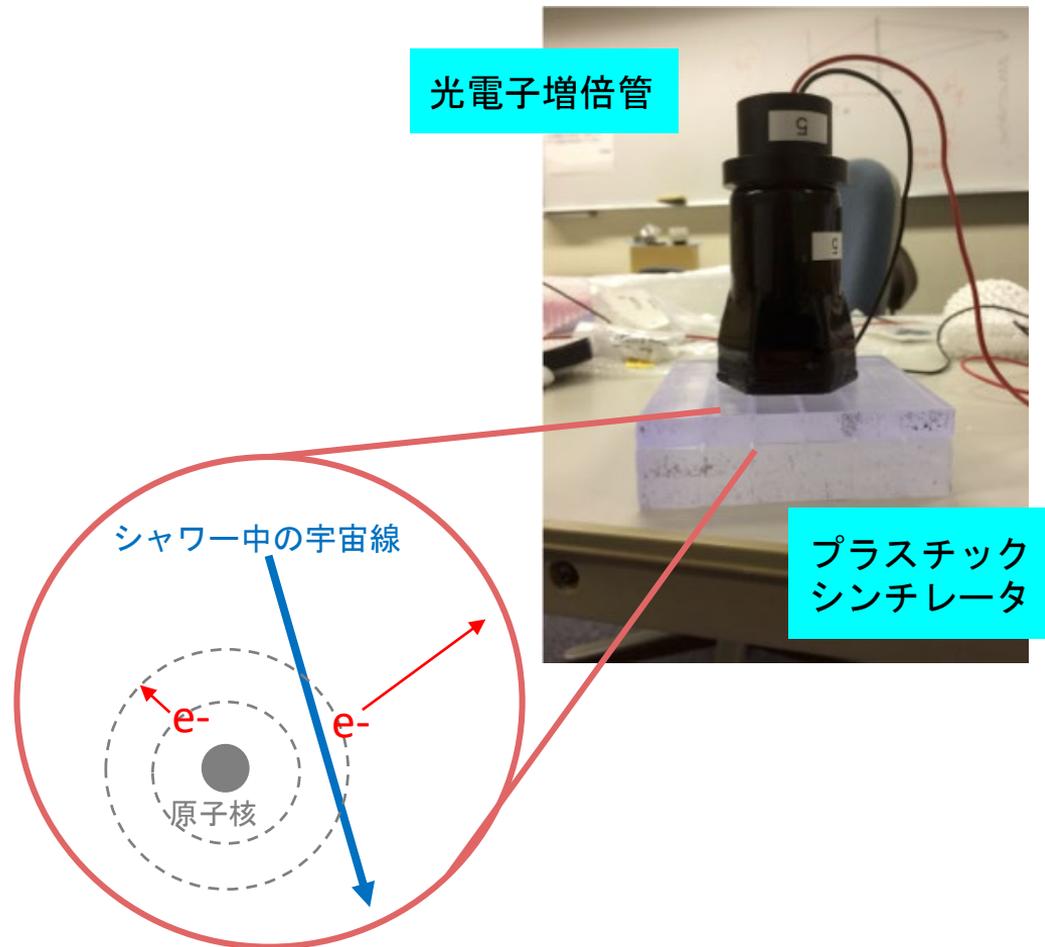
空気シャワーの観測装置

・プラスチックシンチレータ

ポリビニルトルエンという透明なプラスチックにわずかな蛍光物質を混ぜたもの。空気シャワーの宇宙線がシンチレータを通過する時、シンチレータの荷電粒子を励起させる。その後すぐにもとの準位に戻るため、固有の振動数の光を出す。

・光電子増倍管(PMT)

入射した光子の信号を光電子に変換し、増幅させて出力する装置。シンチレーション光は非常に微弱であるため、PMTは欠かせない。



空気シャワーの観測装置

50cm×50cm×5cmのプラスチックシンチレータに、ステンレスのカバーをかぶせ、頂点の穴に光電子増倍管を取り付ける。さらに黒い布をかぶせたものを4台用意する。

これを実験室の四隅に図のようにして配置する。

場所：千葉県柏市 宇宙線研究所研究室
観測日時：2/9,10,11,14,15(全日ともに24時間)



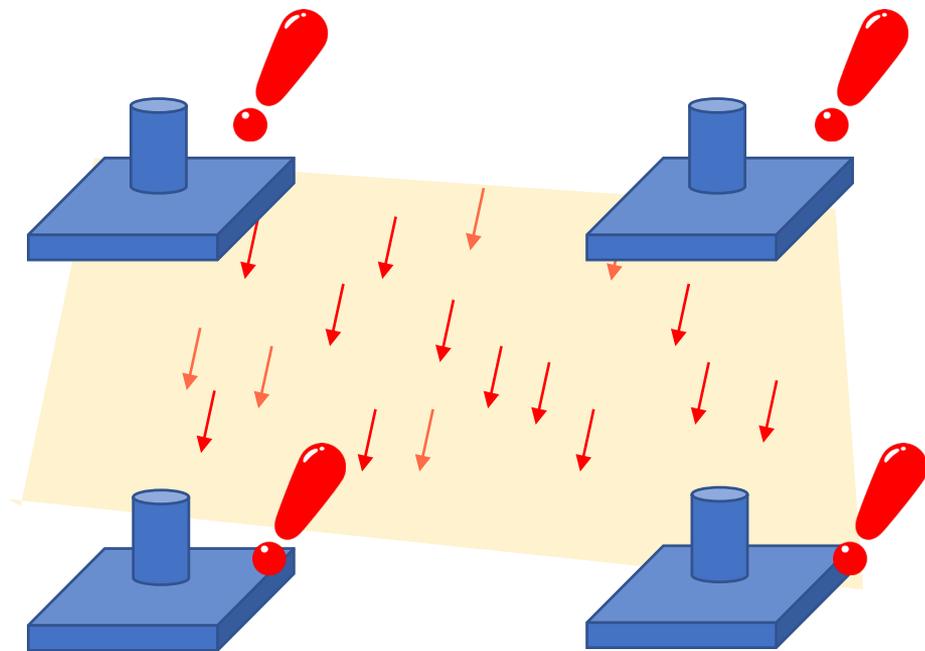
空気シャワーの観測方法

空気シャワーがおよそ平面で到来するとすると、場所によって観測される時刻が異なる。



各装置間の観測時刻のずれを利用すると、宇宙線の到来方向を求めることができる！

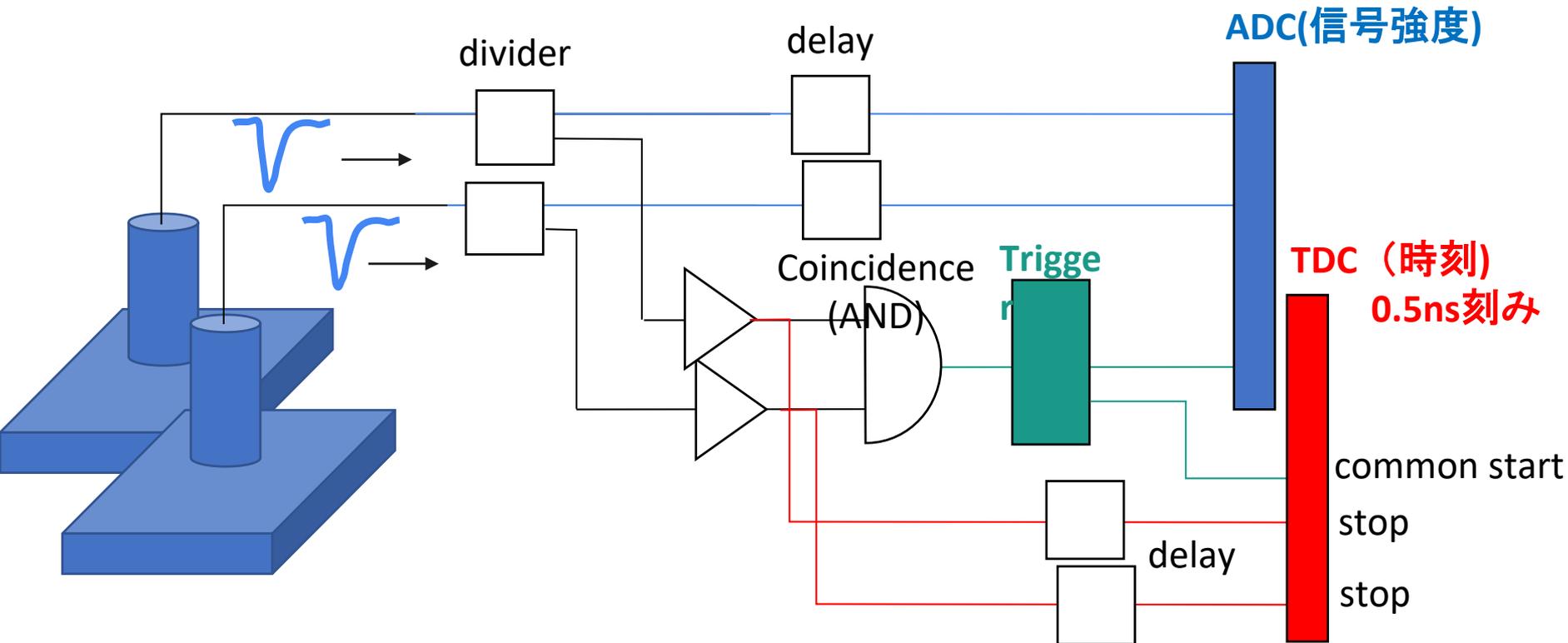
今回の実験では、各検出器間で近しい時刻に電流のピークがあった場合の、電流の強さと時間差のデータを取得した。



精度をあげる~Time Walk 補正~

データの取得

トリガー条件：3イベント同時検出



Time Walk 効果

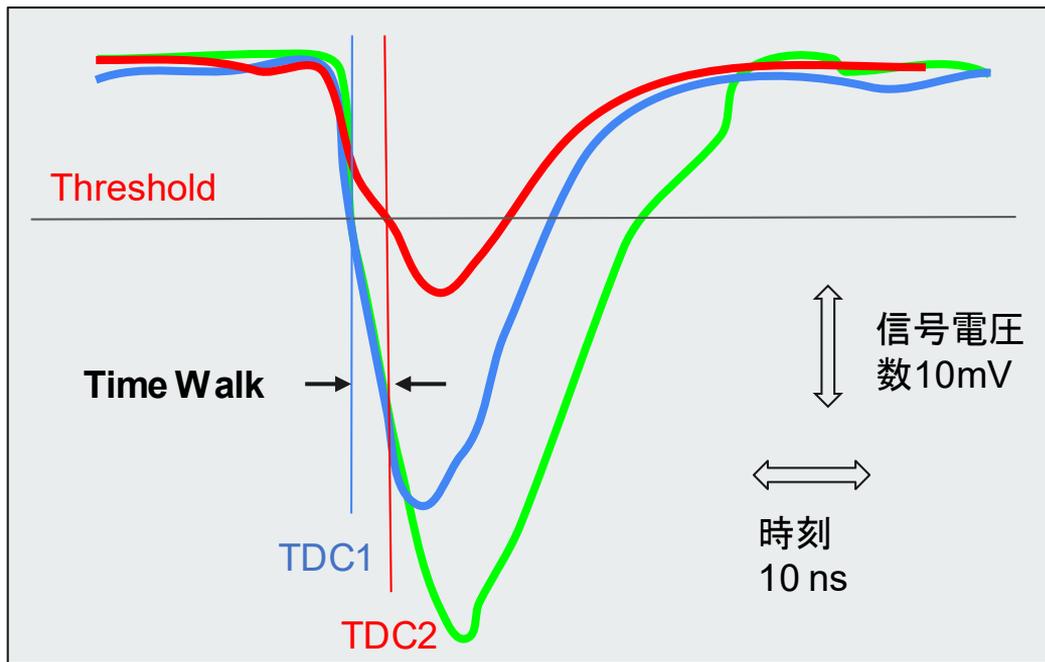
TDCの記録：Threshold電圧を超えた（=信号）時刻がTDCに記録される

ADCの記録：信号電圧の積分値

[予想]

信号が小さいとTDC値が遅くなる
→Time Walk 効果

ある程度信号強度が大きければ
効果は小さくなる



ADC-TDC相関 Time Walk補正式の導出

各検出器を隣接させてデータ取得(およそ3日間,1万イベント)

ADCの値によってビンに分けてカイ2乗フィット

各ビンごとのTDCの平均、標準誤差(=標準偏差/ \sqrt{N})からフィット

関数形は $TDC = a \cdot \exp(b \cdot ADC) + c$

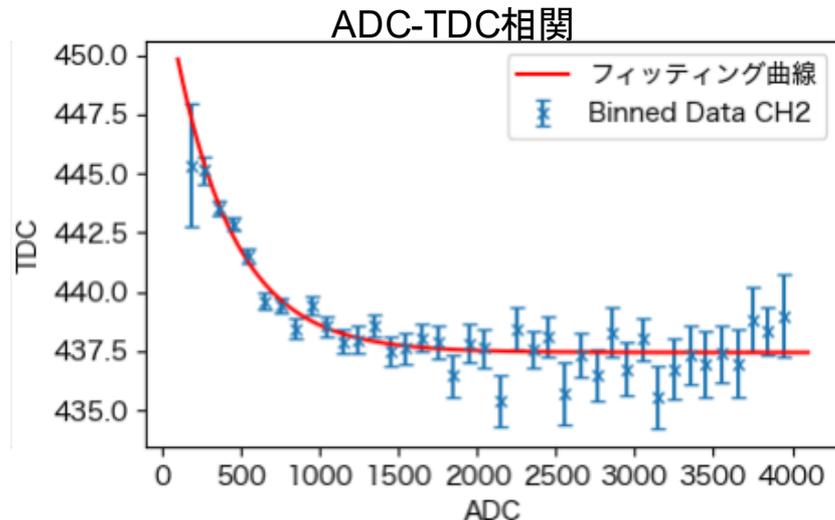
$\chi^2/ndf = 37.384/36$

$a : 16.1 \quad \pm 1.5$

$b : -0.0026 \quad \pm 0.0003$

$c : 437.43 \quad \pm 0.19$

統計的に妥当と言えるので補正に採用



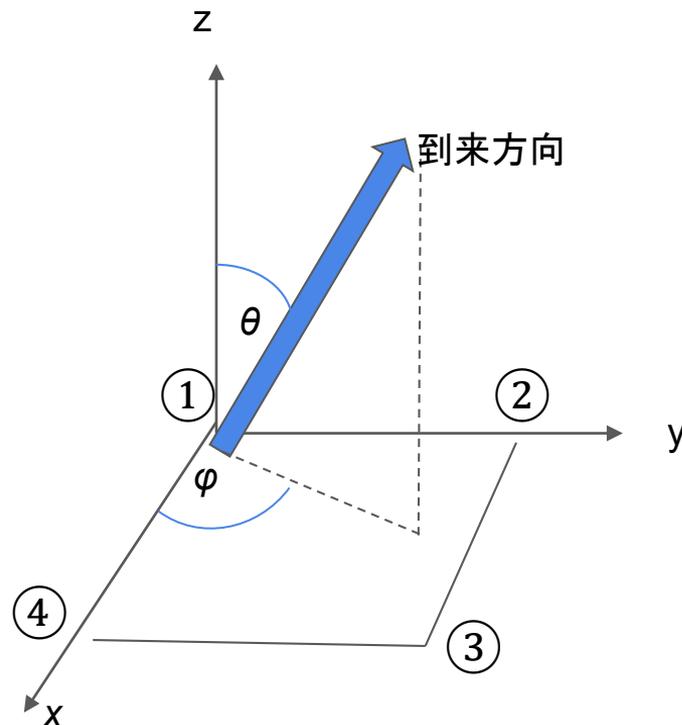
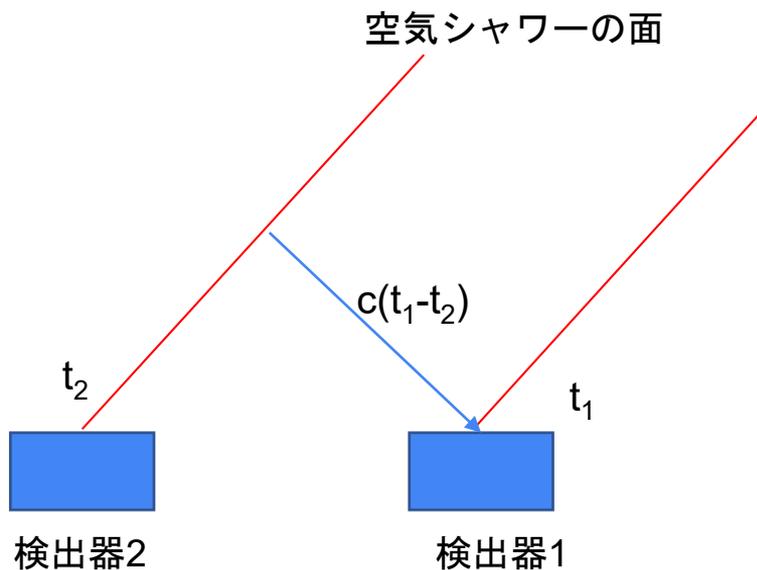
到来方向の解析

空気シャワーの到来方向の決定

天頂角 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

方位角 $0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$

を各検出器の検出した時間差から求める。



到来方向の計算方法

3つの検出器で検出できれば到来方向が求められる

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{n} = c\Delta t$$

(\mathbf{n} は到来方向の単位ベクトル)

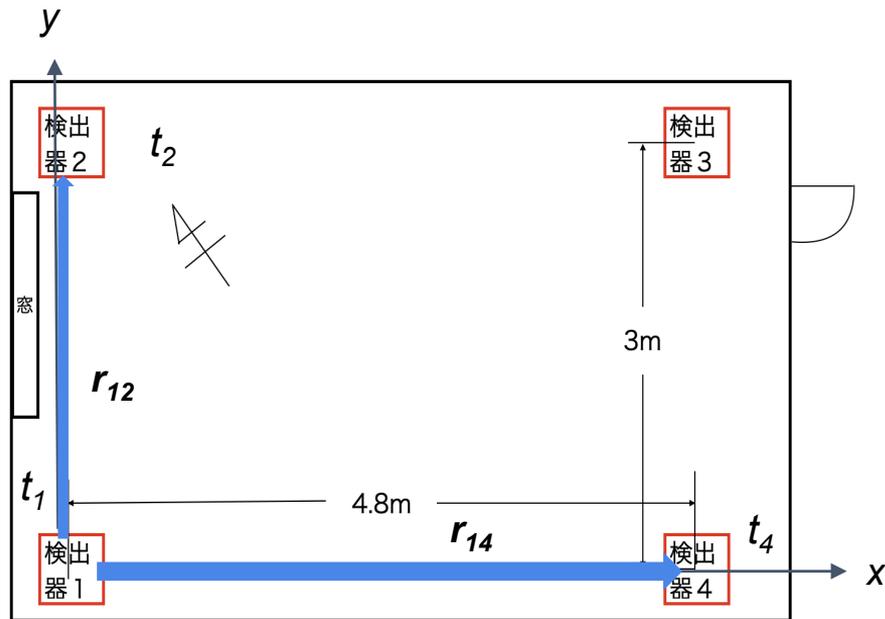
$$3\sin\theta\sin\varphi = c(t_1 - t_2)$$

$$4.8\sin\theta\cos\varphi = c(t_1 - t_4)$$



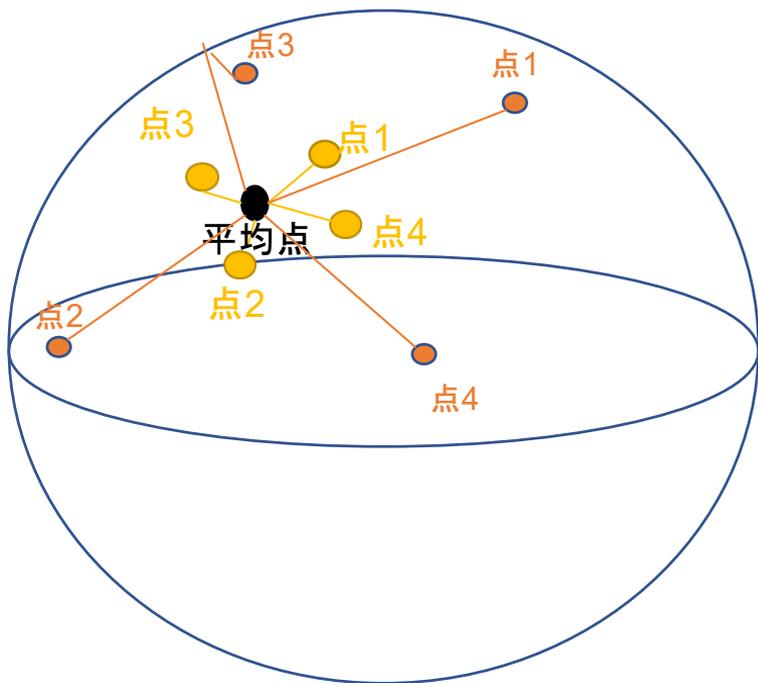
$$\varphi = \arctan\left(1.6 \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_4}\right)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c(t_1 - t_2)}{3\sin\varphi}\right)$$

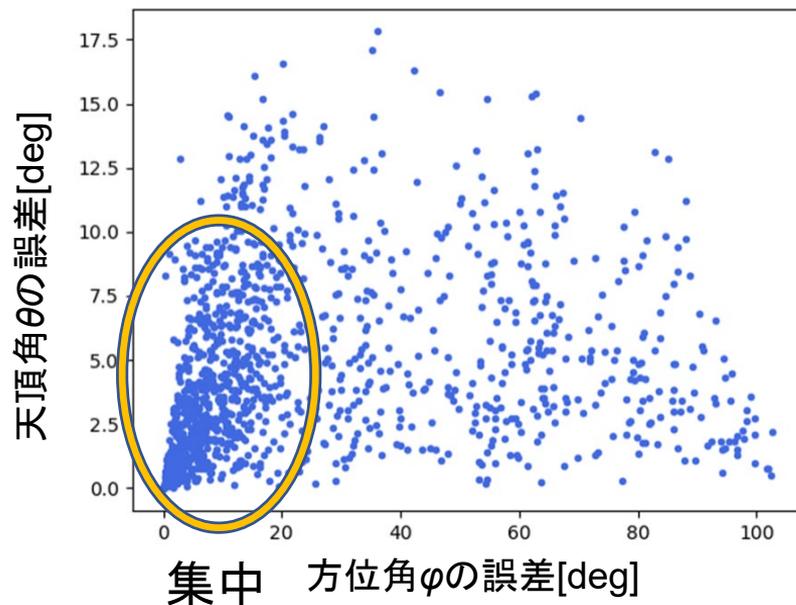


到来方向の決定精度

4つの検出器で検出したイベントは4通りの
到来方向が求められ、平均をとる
→標準誤差を用いて決定精度を決める



φ の誤差 20°
 θ の誤差 10°
以内のデータのみを考慮



φ, θ の誤差分布

3検出イベントの取捨選択

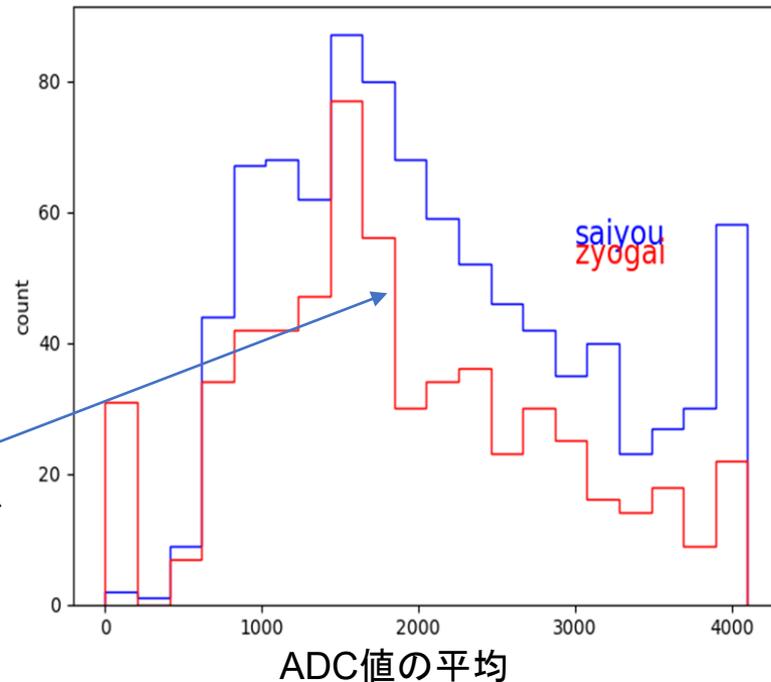
4検出イベントのデータから、
ADC値の傾向を探る

精度が良いデータのADC値
は高い傾向がある

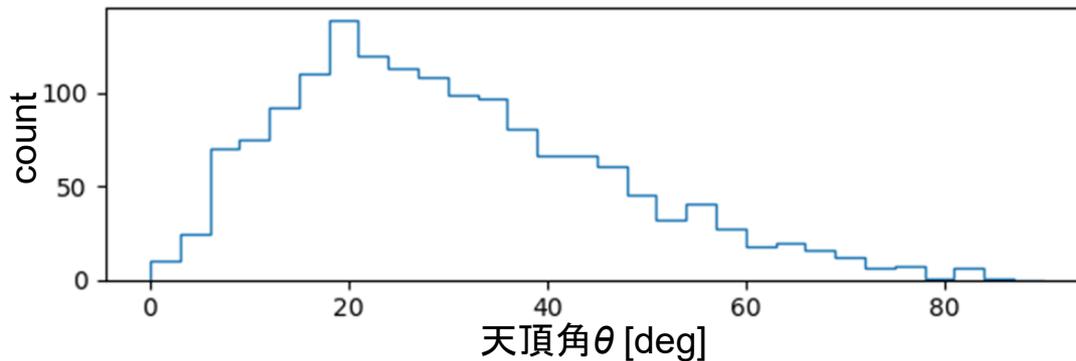
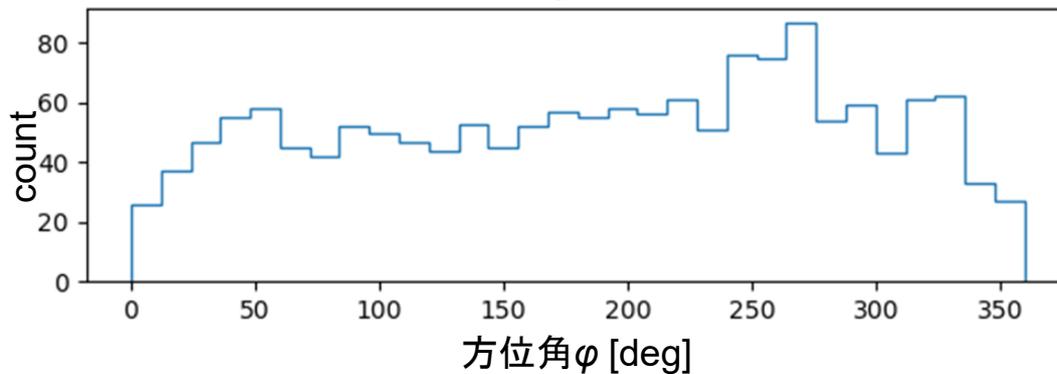


ADC~1800を境に減少

ADC値の平均が1800より大きい
3検出イベントを採用



方位角 φ ,天頂角 θ の分布



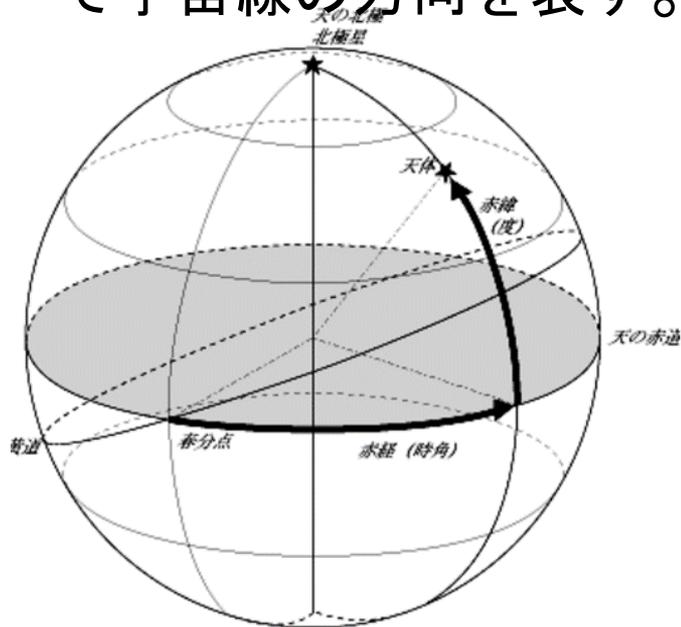
データ数は
1568

最終的な方位角 φ , θ の度数分布

赤経赤緯の偏りの有無

赤経赤緯の導出

方位角と天頂角は地球の運動により変化するので、**赤経赤緯**で宇宙線の方向を表す。



仰角 (90° -天頂角) :h 方位角:A 赤経: α
赤緯: δ 緯度: ψ 時角:H

$$\cosh \sin A = -\cos \delta \sin H$$

$$\cosh \cos A = \cos \psi \sin \delta \sin \psi \cos \delta \cos H$$

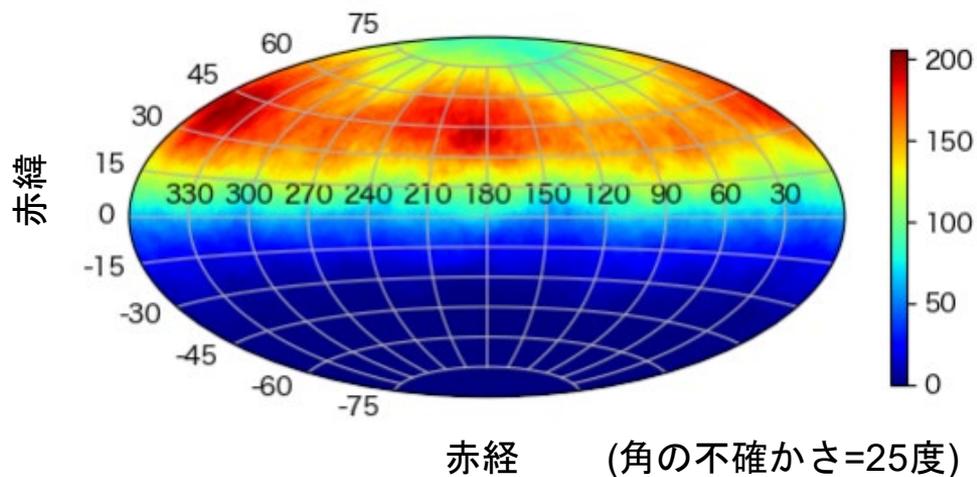
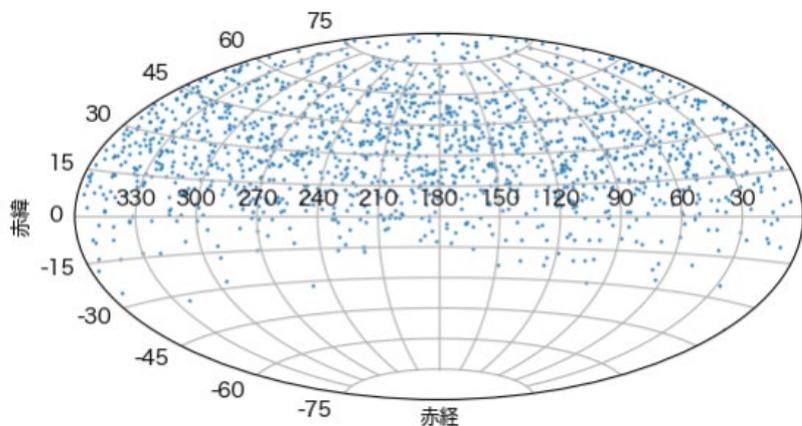
$$\sinh = \sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \delta \cos H$$

時角Hと赤経 α は観測時刻での地方グリニッジ恒星時 θ を用いて

$$H = \theta - \alpha$$

と表せる。

各赤経赤緯方向での宇宙線密度



一見宇宙線密度には偏りがあるように見える？

➡ **今回観測された宇宙線の分布には統計的に有意な偏りがあるのか検証しよう！**

χ^2 検定で検証

χ^2 検定... 観測によって得られたデータが、理論的予想と一致しているかを判断する手法

$$\chi^2 = \sum_i^N \left(\frac{x_i - f}{\sigma_i} \right)^2$$

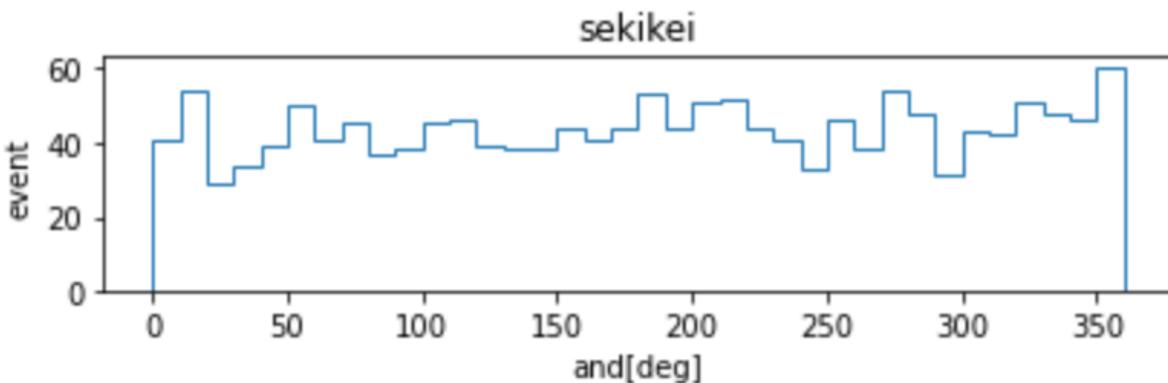
x_i : 観測値

f : フィットティング値

σ_i : 誤差

赤経分布に偏りはあるのか？

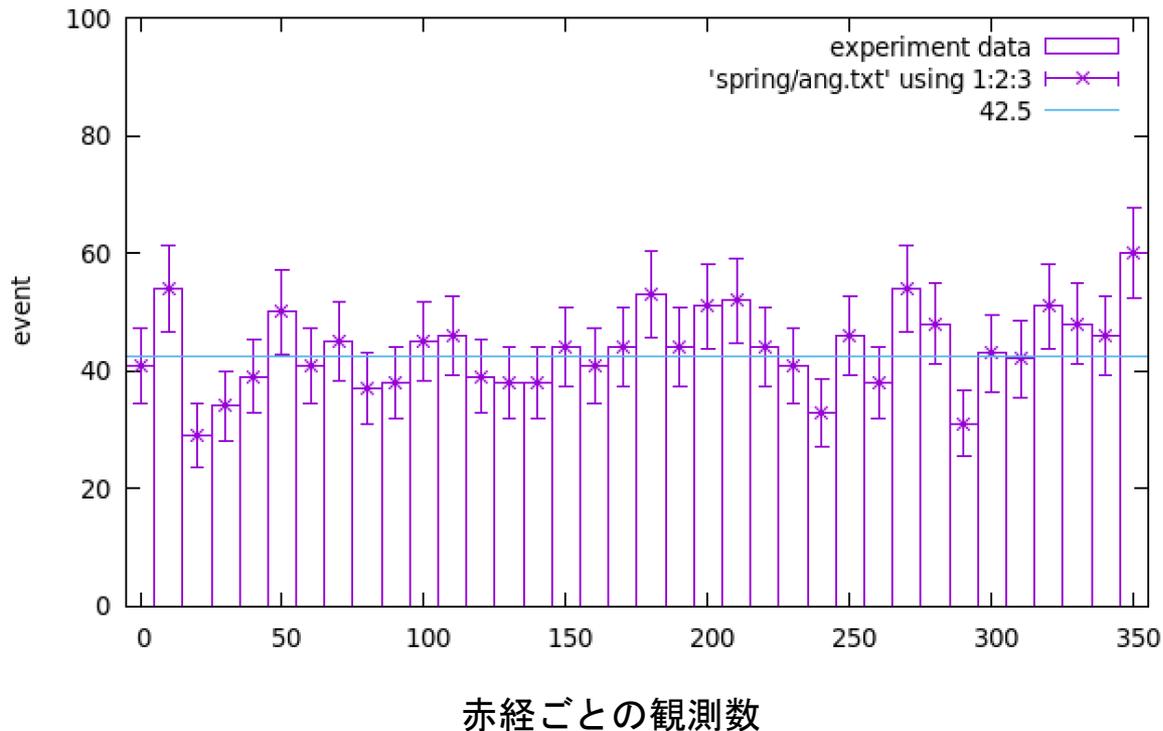
得られた赤経分布



誤差の範囲内なのか??

統計的なばらつきがある

χ^2 検定の検証結果



$$\chi^2 = \sum_i^N \left(\frac{x_i - f}{\sigma_i} \right)^2$$

計算結果

$$\chi^2/\text{ndf} = 39.5/35$$

赤経赤緯の偏りの有無

χ^2 分布表と比較

$$\chi^2 = 39.5$$

自由度35

χ^2 分布表と比較

有意水準5%で棄却されない
→ 「赤経方向に等方的」
という仮定に矛盾しない

自由度

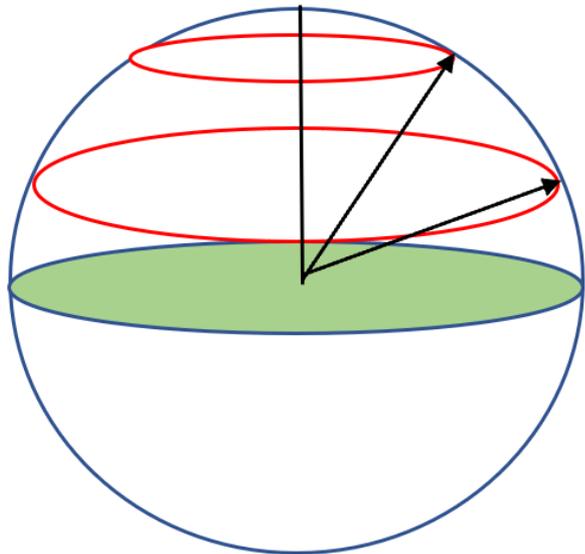
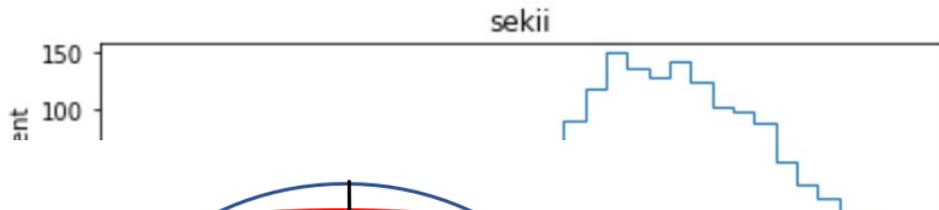
35

$\chi(\chi^2)$

右側確率(有意確率)

0	1.00000000000000
0.5	1.00000000000000
1	1.00000000000000
1.5	1.00000000000000
2	1.00000000000000
2.5	0.99999999999999
.	.
.	.
.	.
37.5	0.35520611494929
38	0.33430926330450
38.5	0.31408834022613
39	0.29457657005231
39.5	0.27580073208947
40	0.25778138125313
40.5	0.24053312597445
41	0.22406495355918

赤緯分布に偏りはあるのか？

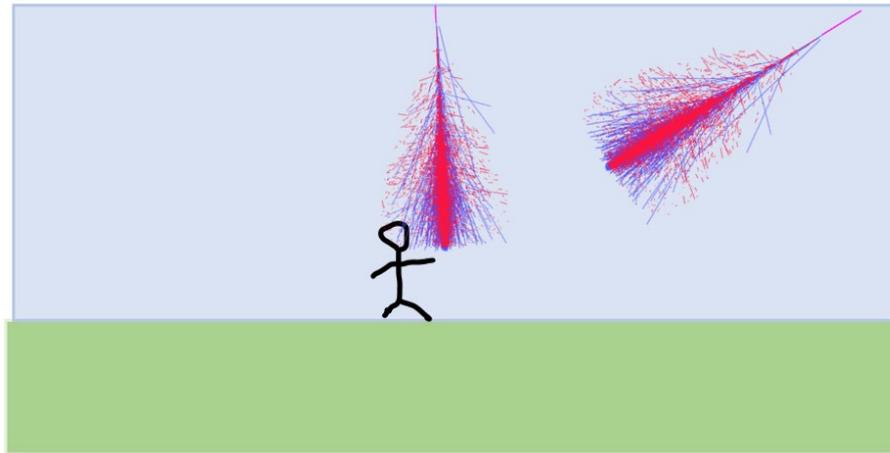


偏りがあるように見える！

50

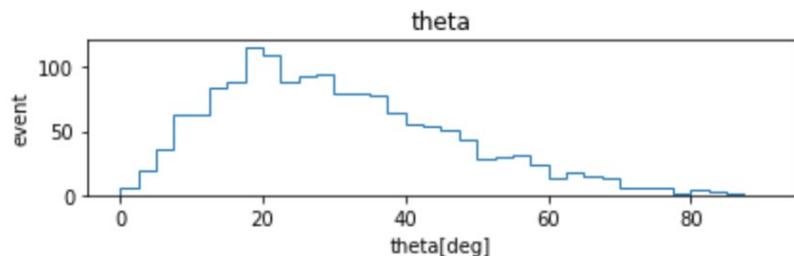
\bar{j}

り測

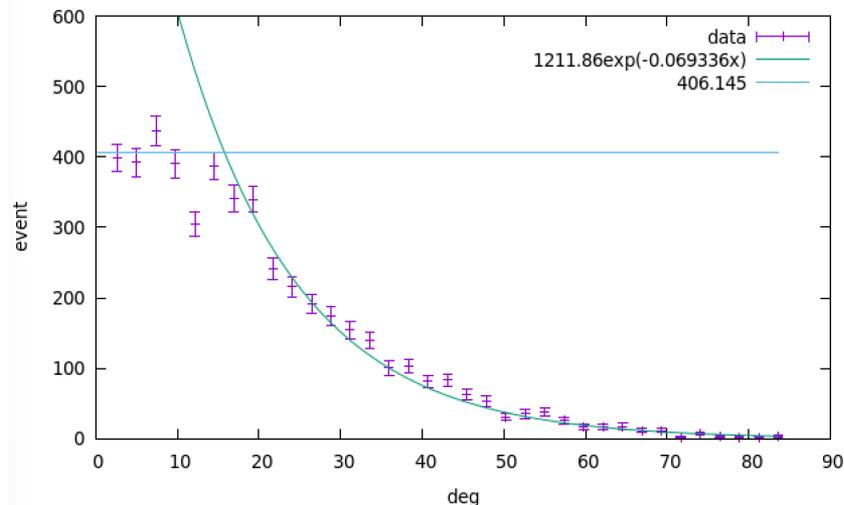


赤緯分布に偏りはあるのか？

今回の実験で観測した観測数の天頂角依存性を、そのまま天頂角ごとの観測効率とみなし、全ての赤経赤緯から等方的に宇宙線が入射されるときに、観測されるはずの観測数を求めてみる。

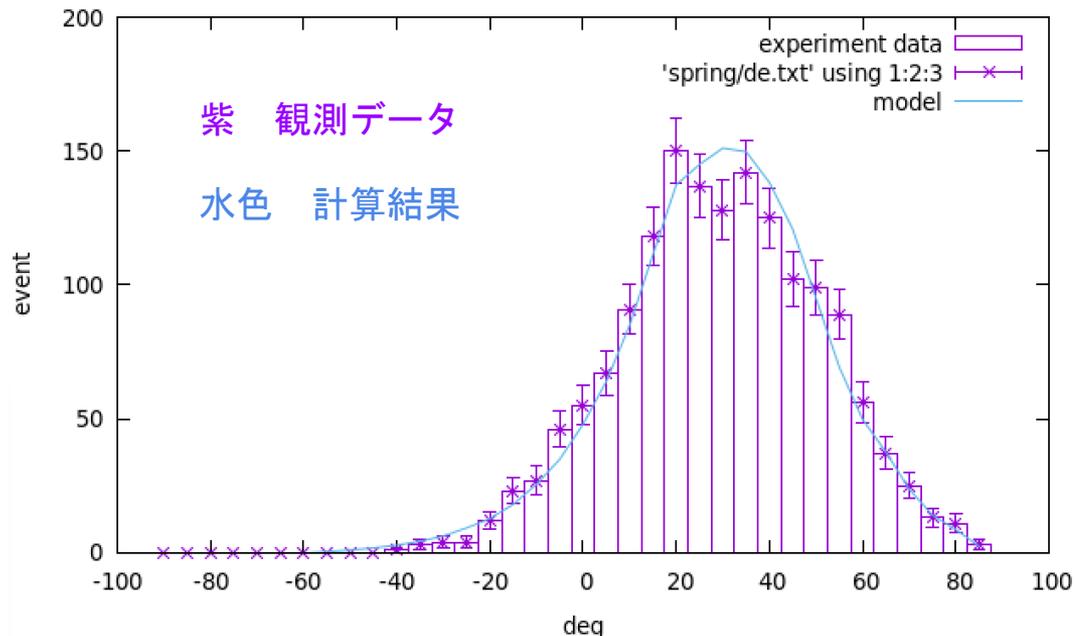


天頂角ごとに観測されたイベント数



単位立体角当たりの観測効率

赤緯分布に偏りはあるのか？



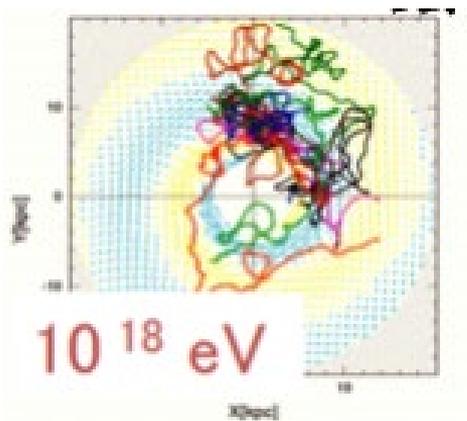
赤緯ごとの観測数

カイ二乗検定を行ったところ、
 $\chi^2/\text{ndf}=34.48/25$

有意水準5%で棄却されない
→「赤緯方向にも等方的」という
仮定に矛盾しない

赤経赤位の偏りの有無

赤経赤緯に対してともに等方的に宇宙線が入射しているという仮定と矛盾しない結果になっていた。



銀河系内での宇宙線陽子の運動

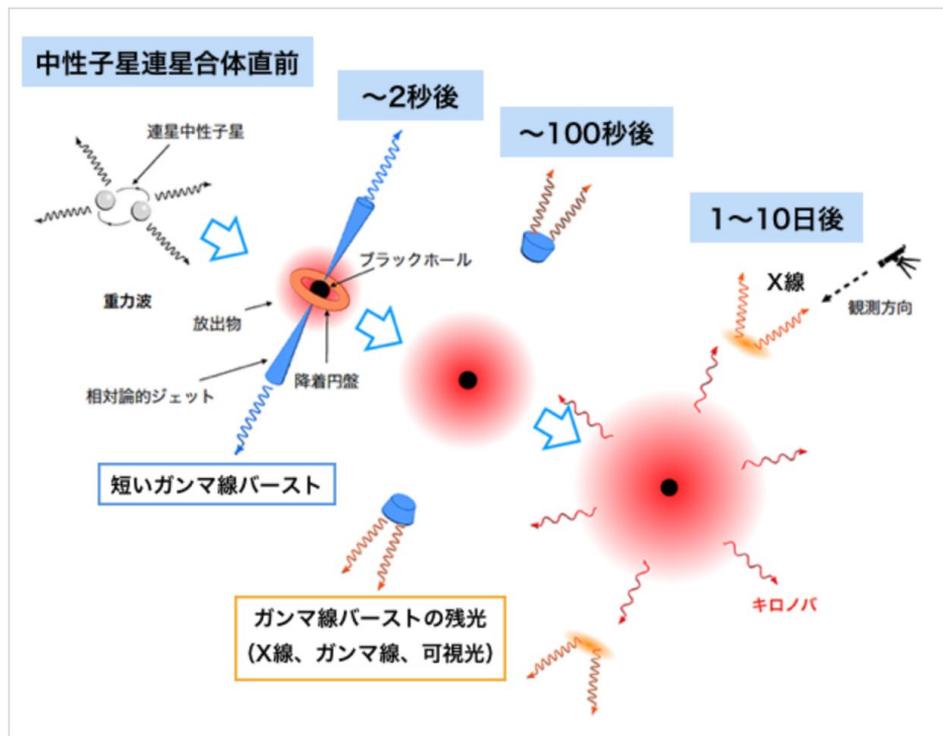
宇宙線の正体が荷電粒子である場合、粒子は宇宙の磁場によって発生方向から様々な向きに曲げられる。

出典 塚先生の講義資料

—

GRB

GRBを探す



連星中性子星合体から放射されるガンマ線バースト

GRBとは...宇宙のある一点から強いガンマ線が放出される現象。

超新星爆発や中性子星が連合するときに発せられる

ガンマ線は荷電粒子ではないので、磁場で曲げられることなく、発生源からまっすぐ地球に届く。

出典 河合誠之 ガンマ線バーストで宇宙創成の謎と元素の起源に迫る

GRBを探す

グリニッジ標準時

name	date	観測時刻	赤緯(deg)	赤経(deg)	statistica
220209A	2022/2/9	23:00:50UT	72	352.3	1
220210A	2022/2/10	23:56:38UT	61.5	7.9	5
220211A	2022/2/11	01:07:48UT	40	207.2	8.7
220211B	2022/2/11	15:46:28UT	46.2	3.8	7
220214A	2022/2/14	00:02:40UT	16.7	125.9	3.9

出典：GRB データベース

日本標準時

赤緯

赤経

2022-02-12 00:28:21 49.168667365024305 307.7532971277833
 2022-02-12 00:30:05 37.94760394407293 305.87632698751986
 2022-02-12 00:30:13 56.87799459270099 314.935799411498
 2022-02-12 00:35:46 7.99119914467114 351.90264584776014
 2022-02-12 00:45:29 33.21008499137228 349.8023173818365
 2022-02-12 00:55:11 76.29584751525744 354.5692623546347

観測成功？

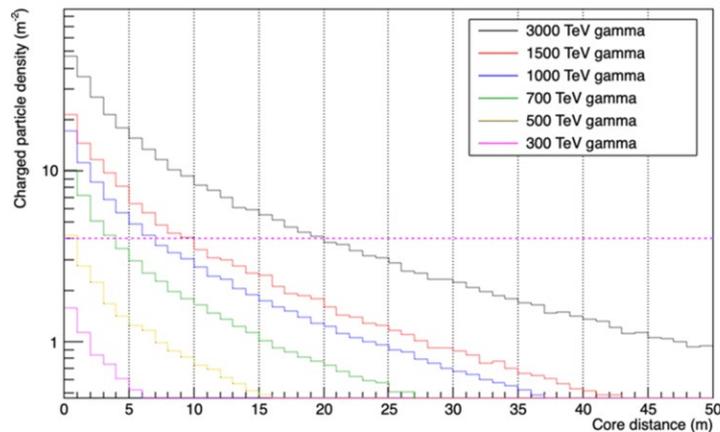
0.3%

観測データ

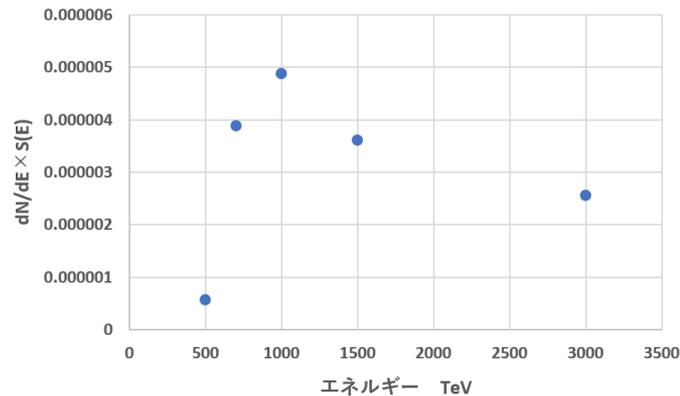
GRBを探す

今回の実験で用いた観測器はおよそ4particles/m²以上の密度が必要

→500TeV以下のγ線を観測するには好条件が必要



各エネルギーごとの中心距離に対する粒子密度



宇宙線のエネルギーに対する観測される相対的な粒子数

→一方、超高エネルギー宇宙線は宇宙背景放射と相互作用するので、遠距離は進めない

今まで検出されたGRBのうち最もエネルギーの大きかったものは、
2019/01/14に観測されたGRB **190114C**で、エネルギーは**0.2~1TeV**

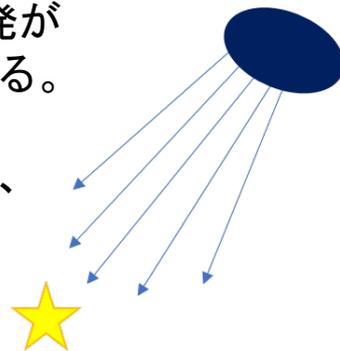
原始ブラックホールの蒸発

原始ブラックホールが蒸発すると...

原始ブラックホール(PBH)とは、宇宙初期の密度の揺らぎによって形成されるブラックホールであり、まだ観測されていない。

PBHが蒸発するとき大量の γ 線が放出されるため、データ取得中に蒸発が起きていれば同じ時間、同じ方向からのデータ数が増えるはずである。

今回の実験条件において、どのくらい離れた場所でPBHが蒸発すると、いくつかの γ 線が検出されるのかを求める。



目的：測定を行った時間でPBHの蒸発が起きていたかどうかを推測する。

蒸発時に放出される γ 線の数

$E_\gamma = 10^6 \text{ GeV}$ のとき、縦軸の値は 10^{18} GeV^{-1} 程度。

以下の2つの仮定をし、 1 m^2 あたりで検出される γ 線の数を求める。

- ① $0.9 \sim 1 \text{ PeV}$ (幅 100 TeV) において、検出される数は一定である。
- ② 放出された γ 線は等方的に広がる。

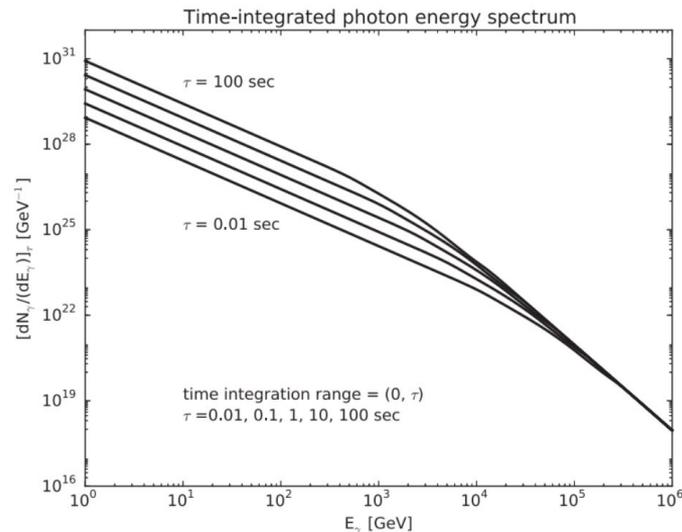
$$\frac{10^{18} \text{ GeV}^{-1}}{\text{単位エネルギーあたりで放出される}\gamma\text{線の数}} \times \frac{(100 \times 10^3 \text{ GeV})}{E_\gamma \text{の幅}(100 \text{ TeV})} \times \frac{1}{4\pi r^2} \text{ m}^{-2} = \frac{1}{4\pi r^2} \times 10^{23} \text{ m}^{-2}$$

単位エネルギーあたりで放出される γ 線の数

E_γ の幅(100 TeV)

半径 $r \text{ m}$ の球の表面積で割る

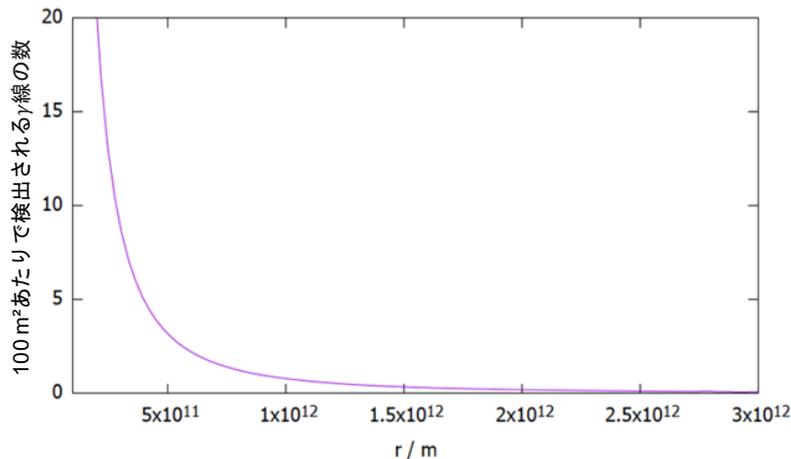
r は PBH から観測地点までの距離



γ 線のエネルギー E_γ と単位エネルギーあたりで放出される γ 線の数との関係
Holes: Observational characteristics of the final evaporation, "Astroparticle Physics", 80, 2016, 100.

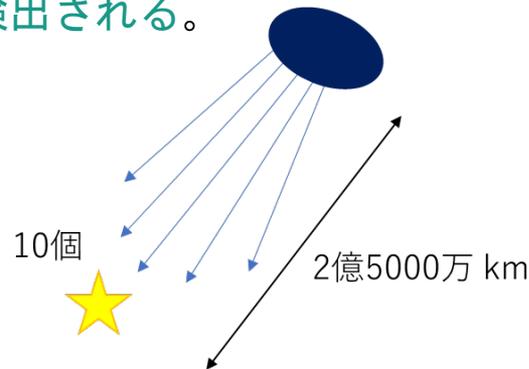
本実験で検出できる γ 線の数

本実験条件の有効検出面積は約 100 m^2 であることから、先に得た式を100倍すると、 100 m^2 あたり $\frac{1}{4\pi r^2} \times 10^{25}$ 個の γ 線が検出されることが分かる。



PBHから観測地点までの距離 r と 100 m^2 あたりで検出される γ 線の数との関係

例えば、
観測地点から2億5000万 km ($2.5 \times 10^{11} \text{ m}$)の
場所でPBHの蒸発が起こったとき、0.01秒間に
約10個の γ 線が検出される。



原始ブラックホールの蒸発は起こっていたのか

5日間のデータの中で、1秒間に2つ検出された回数は**35回**あり、1秒間に3つ以上検出された例はなかった。

1秒間に検出された2つのイベントが**同じ方向**から到来したものかどうかを調べる。
→ 方位角 φ が 20° 以内かつ天頂角 θ が 10° 以内
→ **1秒間に同じ方向から2つ以上到来していたものはなかった。**

よって、**観測地点から6億3000万 km以内では、観測期間内にPBHの蒸発は起こっていなかったことが分かった！**

と思ったのですが、、、

原始ブラックホールの蒸発は起こっていたのか

検出器の特性上、1つのイベントが検出された0.01秒後に次の γ 線が到来していても検出することはできないと思われる..。(要確認)

PBHが蒸発するときは0.01秒間で高エネルギーの γ 線が放出されるため、この実験においてPBHの蒸発の有無を判断することは難しい。

0.01秒以下の精度で γ 線を検出することのできる検出器を用いれば、PBHの蒸発を観測できるかもしれない。

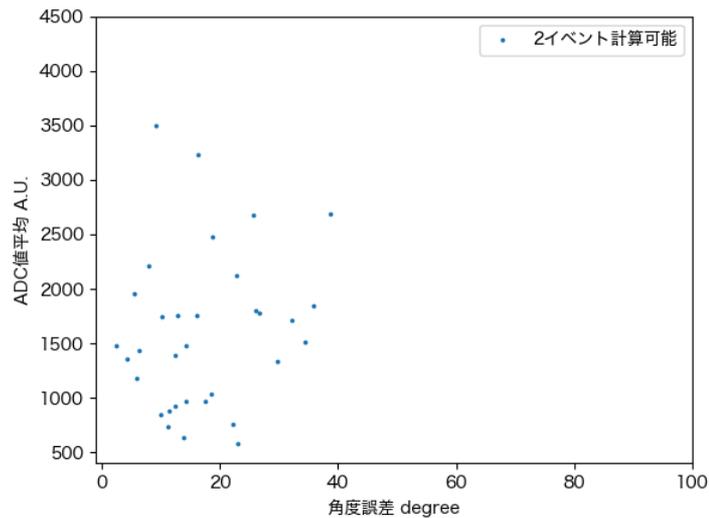
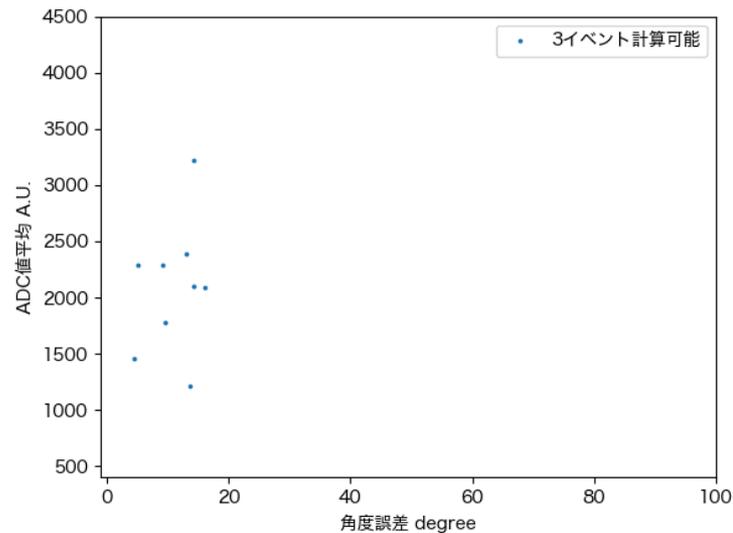
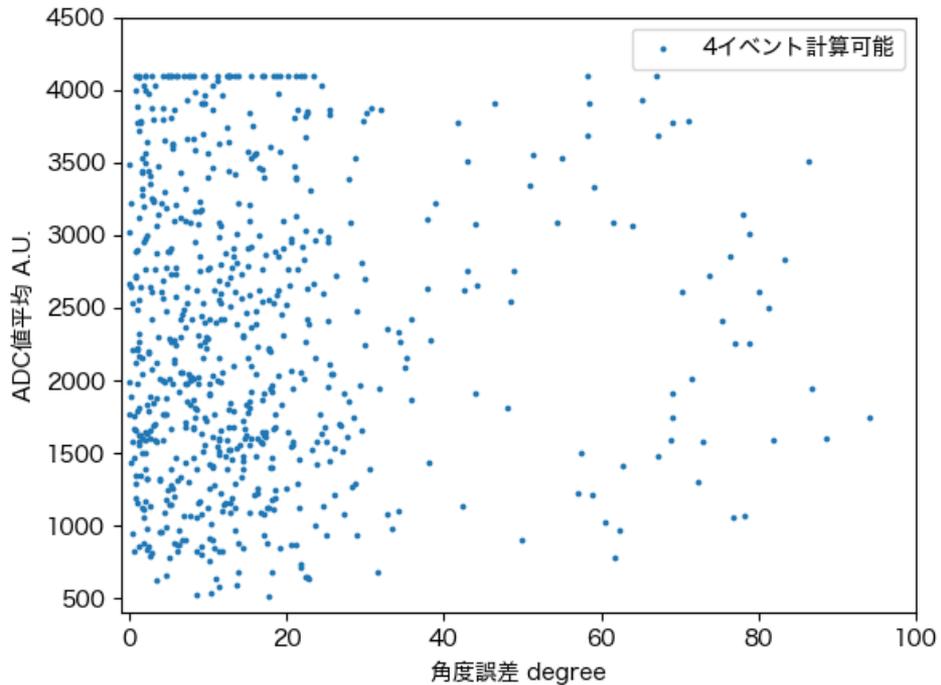
まとめ

まとめ

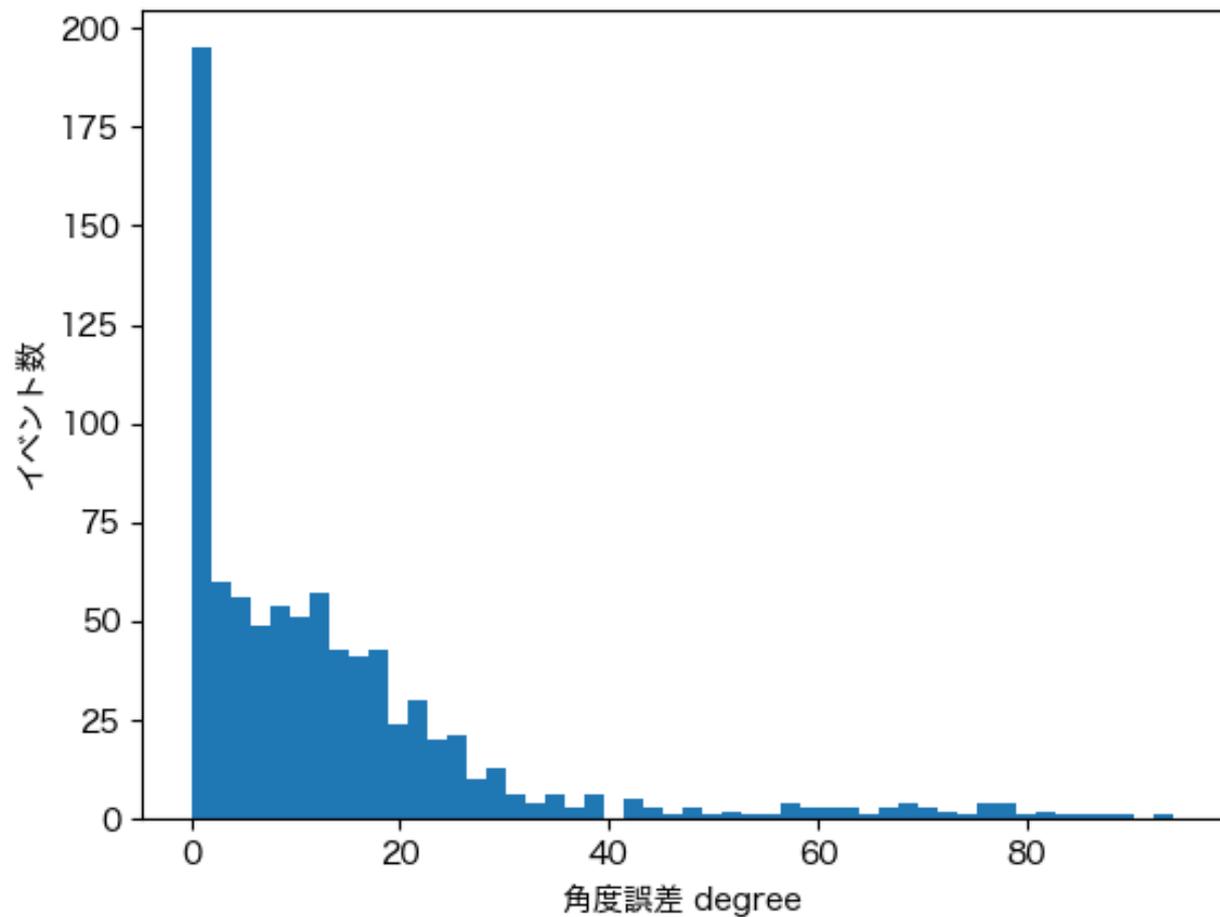
- ・ 4台の検出器を用いて空気シャワーを観測した。
- ・ Time Walkの効果を統計的に妥当な関数で推定し、検出器の精度向上ができた。
- ・ 1568イベントについて到来方向を求め、方位角の誤差 20° 、天頂角の誤差 10° でそれぞれのヒストグラムを求めた。
- ・ 宇宙線の赤経赤緯分布を求めたところ、「宇宙線は赤経赤緯に対して等方的である」という仮定に無矛盾な分布となっていた。
- ・ GRBの観測を試みたところ、それらしいイベントは発見されたが、統計的に有意な結果を示すためには精度の向上が必要。
- ・ 宇宙線の到来頻度により原始ブラックホールの蒸発の観測を試みたが、本実験の検出方法では蒸発の有無を判断することはできなかった。

予備

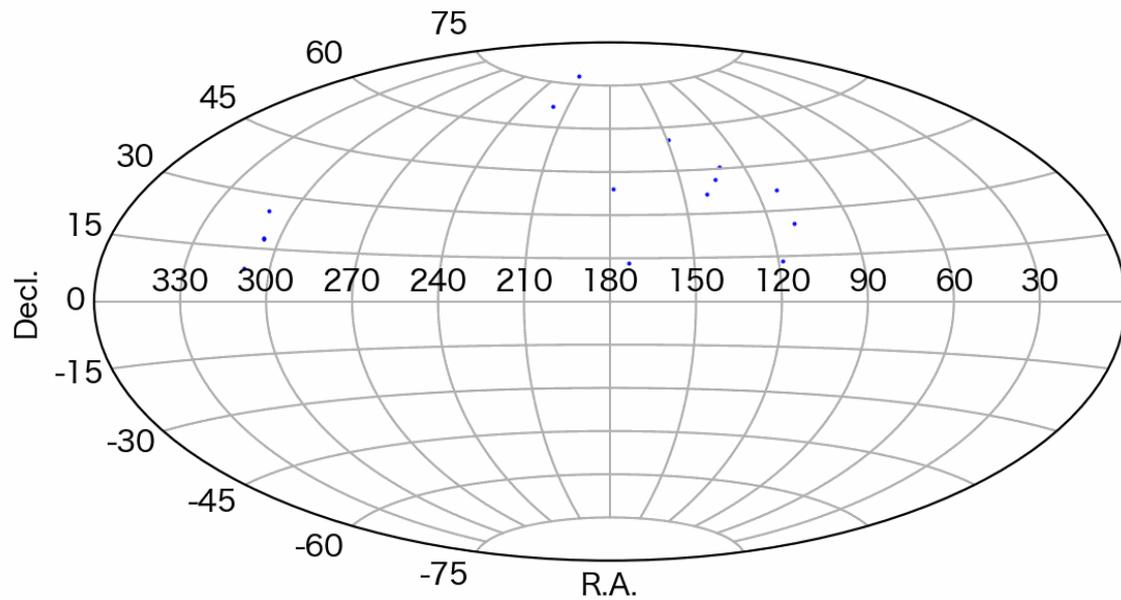
角距離で測った到来方向の誤差 (本スライドでは方位角、天頂角それぞれ)



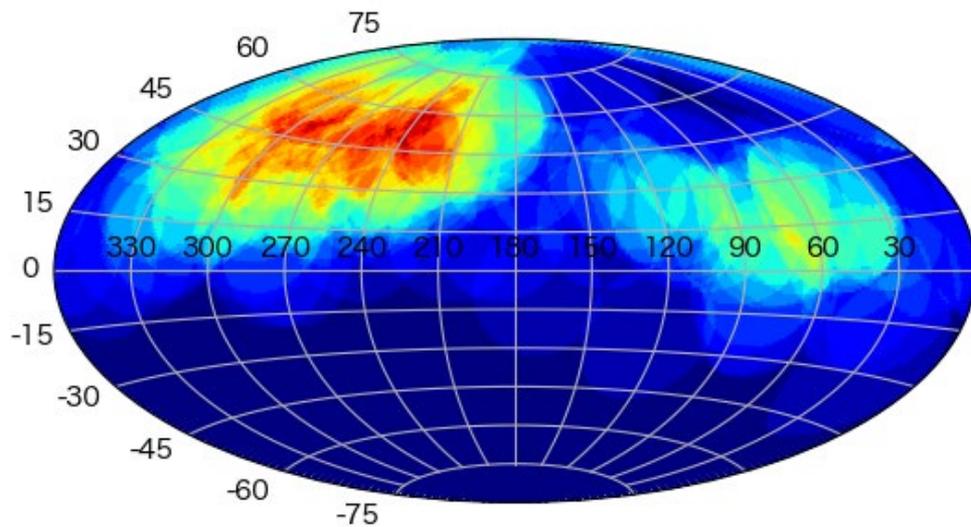
角距離で測った角度誤差の分布



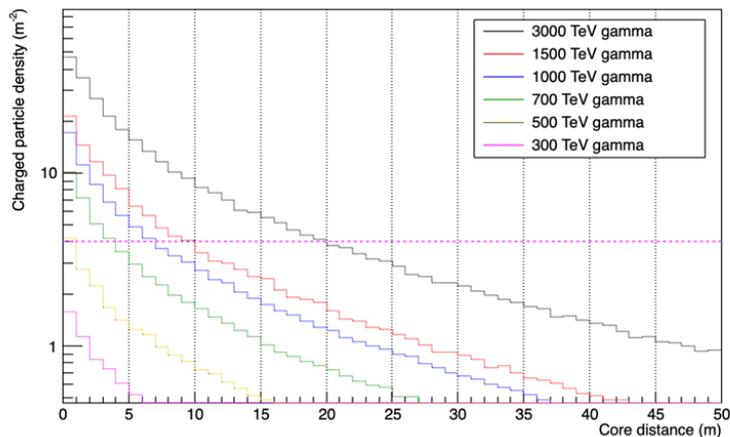
時系列で検出される様子（アニメーション）



oversampling plotの説明（100イベント程度）



本実験で検出できる γ 線の数



各エネルギーごとの中心距離に対する粒子密度

検出器1つの面積は 0.25 m^2 であり、4台中3台に1個以上の荷電粒子が入ったときにカウントされるため、 1 m^2 に4つの粒子があれば検出できるとする。

今、考えている γ 線のエネルギーは約 1000 TeV であるため、左図の青色の線に着目すると、中心から 6 m 以内は検出可能であると分かる。

よって、有効検出面積は半径 6 m の円の面積と考え、約 100 m^2 となる。