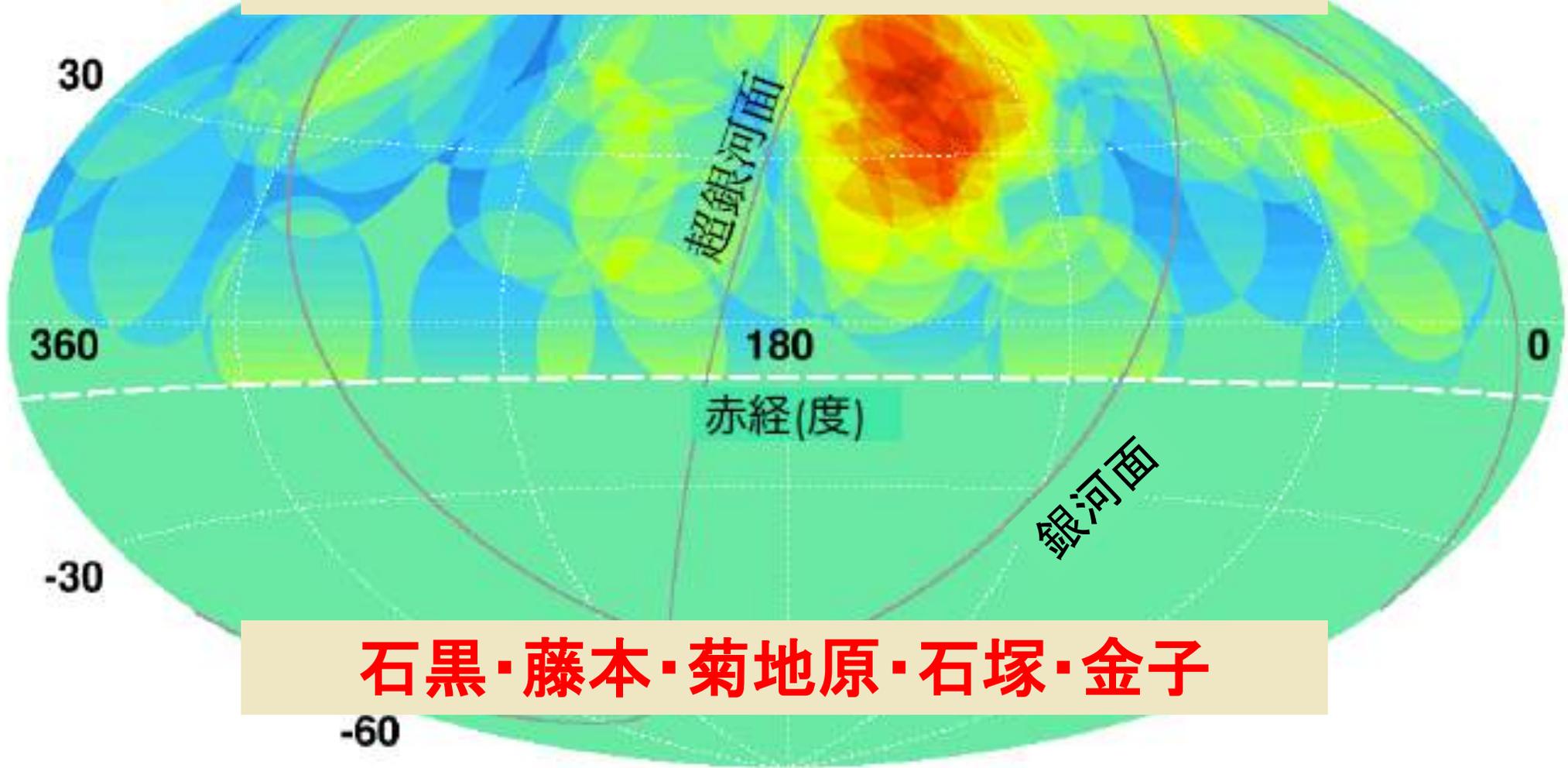


最高エネルギー宇宙線班
「最高エネルギー宇宙線で極高宇宙現象を探ってみよう」



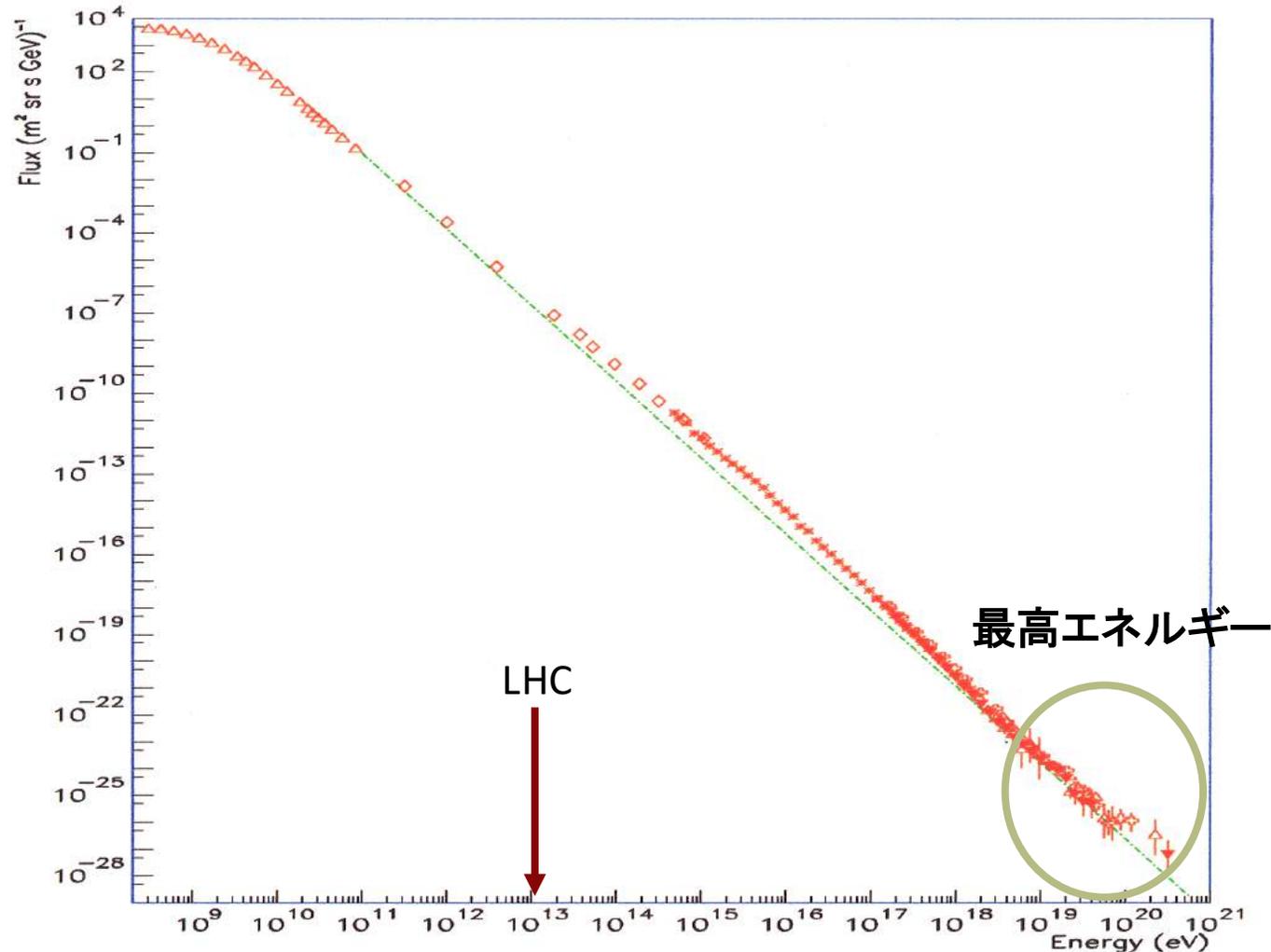
石黒・藤本・菊地原・石塚・金子

内容

- 1. 最高エネルギー宇宙線(石黒)
- 2. TA実験(藤本)
- 3. SDによる粒子の識別(菊地原)
- 4. 異方性の解析(石塚)
- 5. 考察と今後の展望(金子)

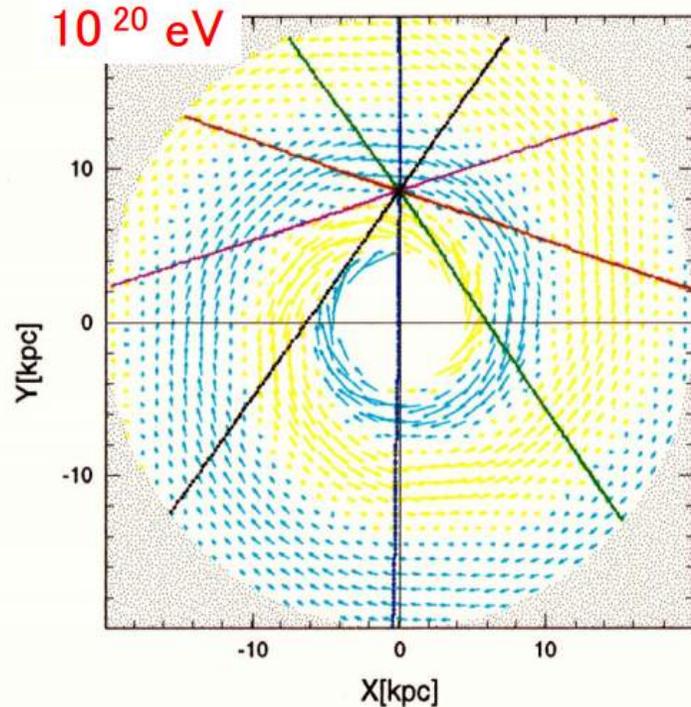
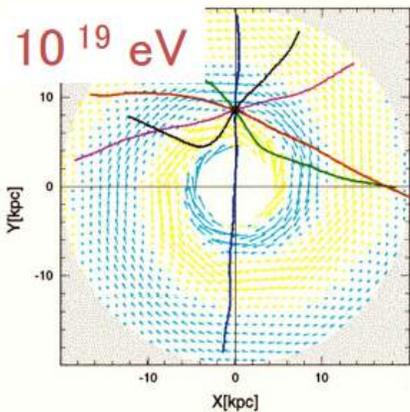
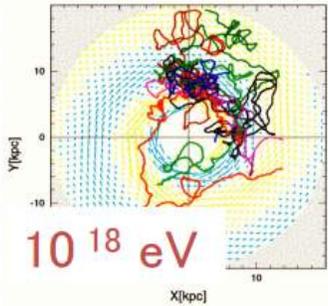
○1. 最高エネルギー宇宙線

最高エネルギー宇宙線とは



- “10²⁰” eV付近の宇宙線
- 到来数が非常に少ない
(1000 km²に年に1度来る
かどうか)
- 加速機構はよくわかって
いない

最高エネルギーを調べる大きな意味



- 磁場でほとんど曲がらない
(10^{20} で 3° 、 10^{19} で 30° 程度)
 - 伝搬距離が限られる(～数十 Mpc)
→GZK Cutoffという
- ⇒観測結果から発生源特定の期待大

⇒発生源がわかれば、新しい物理がわかる！！

最新の観測成果：異方性

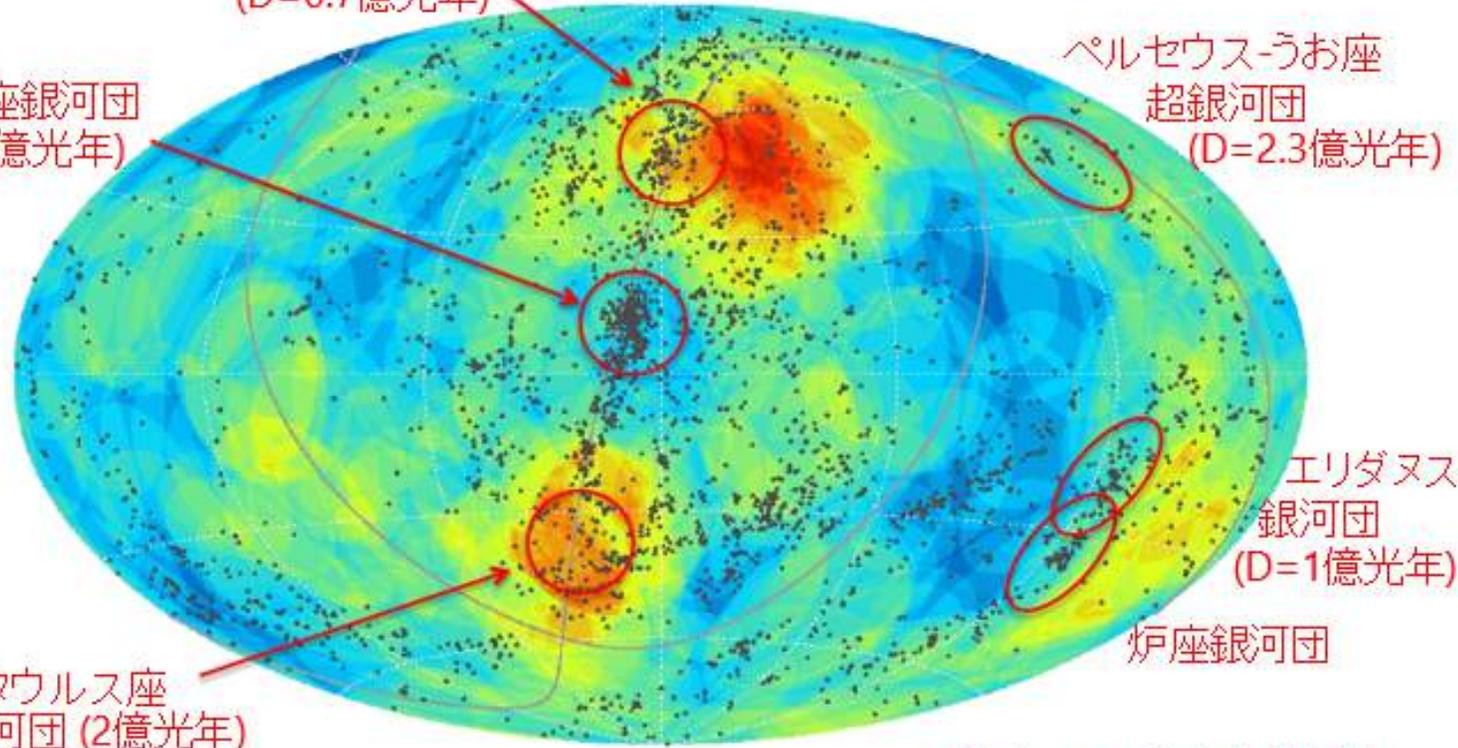
TA+Auger

$E > 5.7 \times 10^{19} \text{ eV}$

大熊座銀河団
($D=0.7$ 億光年)

ペルセウス-うお座
超銀河団
($D=2.3$ 億光年)

おとめ座銀河団
($D=0.7$ 億光年)



ケンタウルス座
超銀河団 (2億光年)

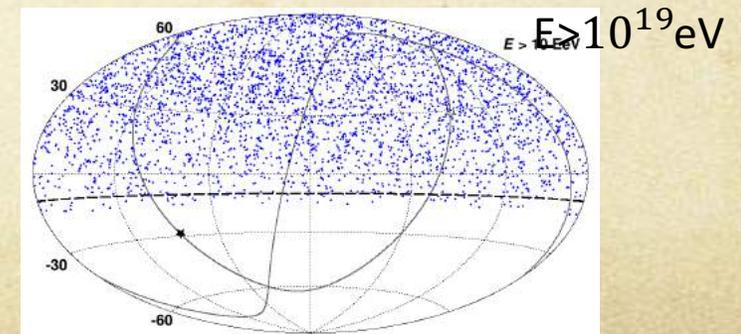
エリダヌス
銀河団
($D=1$ 億光年)

炉座銀河団

(黒点・): 2MASS カタログの銀河 ($D < \sim 1.5$ 億光年)

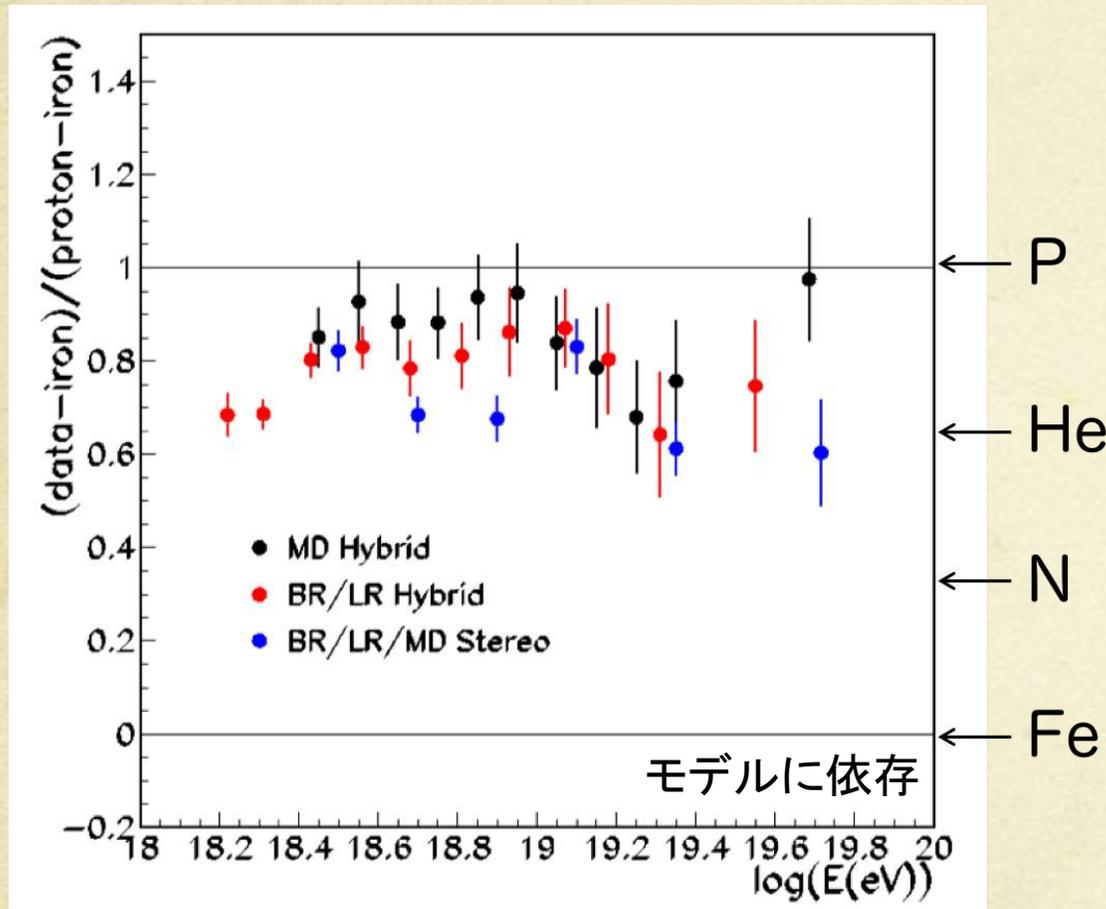
Huchra, et al, ApJ, (2012)

- ホットスポットの有意度 **5.1 σ** 、高い異方性
- 発生源の特定には至っていない
- 10^{19} eV付近は一様等方的



TA

最新の観測成果：粒子の種類



- 高エネルギー宇宙線は軽い組成
(主に陽子)
- 軽い原子核は磁場の影響を受けにくい

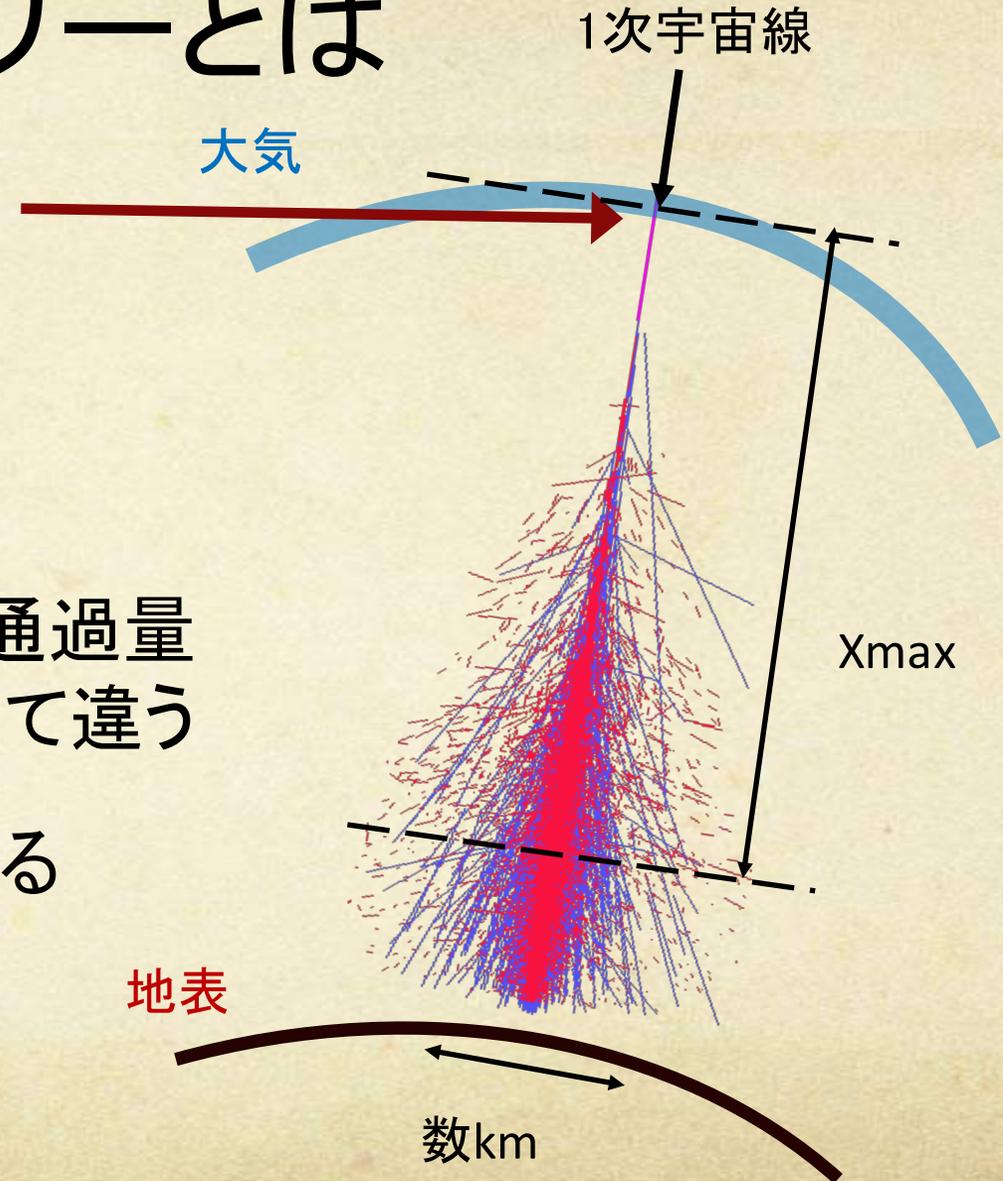
⇒TAデータを**軽い原子核**にさらに絞れば、異方性がわかるだろう！

○2. TA実験

空気シャワーとは

- 1次宇宙線は大気分子と相互作用し、**空気シャワー**を生成
- ~1兆個の2次粒子が作られ、**数km**の範囲に広がる
- X_{max} = 最大発達点までの大気通過量
1次宇宙線の種類によって違う
⇒ 軽い粒子ほど X_{max} が大きくなる

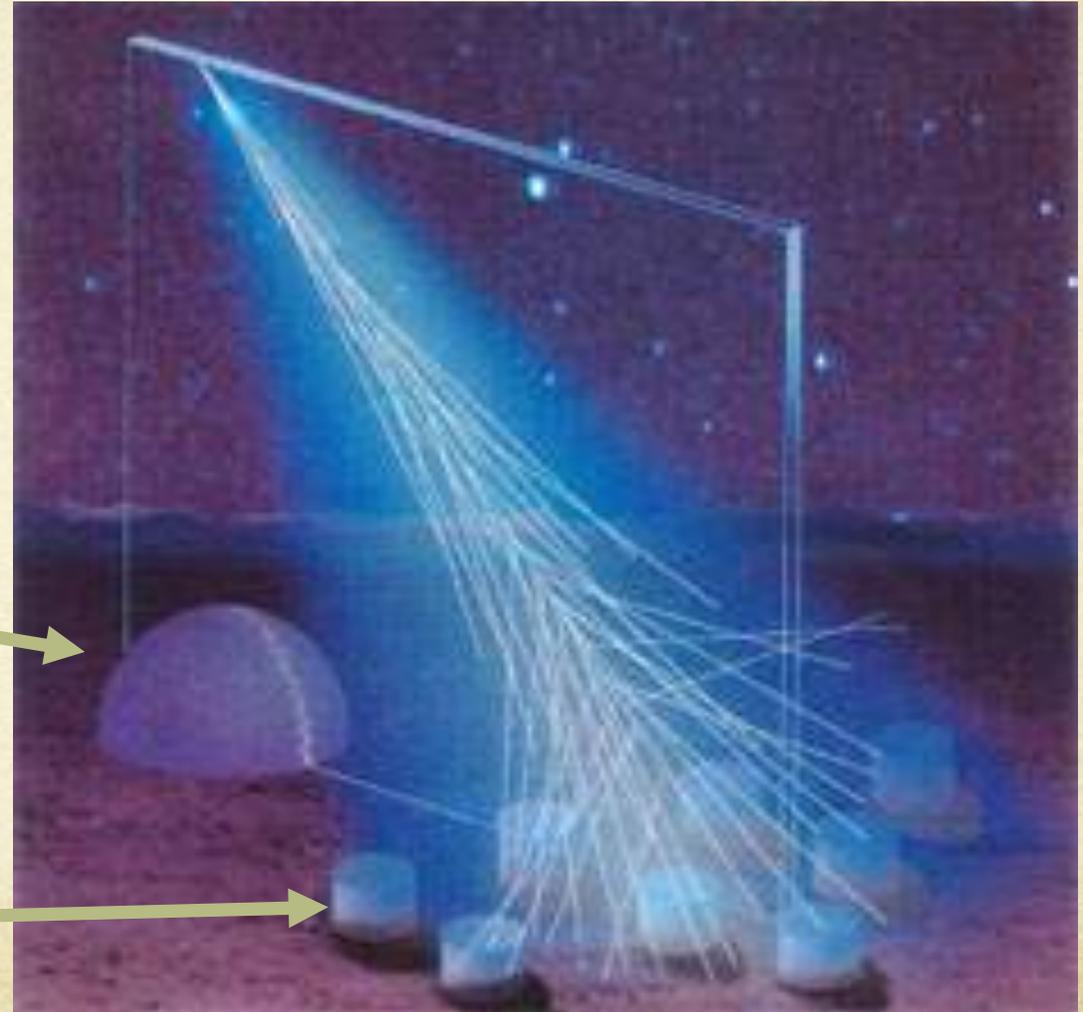
⇒ 空気シャワーの観測により、
超高エネルギー宇宙線を間接的に
観測できる！



空気シャワーの観測

荷電粒子が大気を通過するとき、
紫外領域で発光する(大気蛍光)

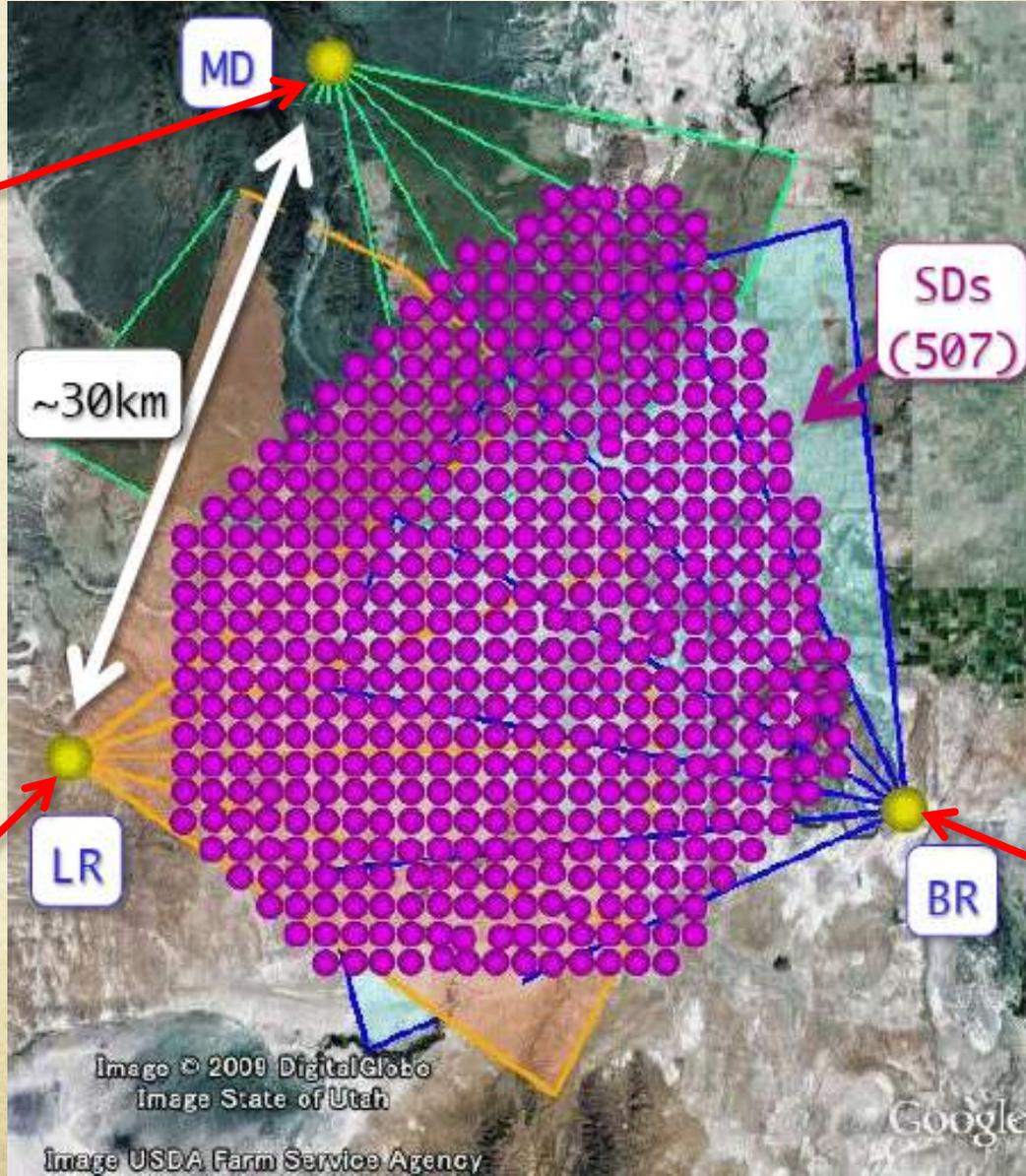
- 空気シャワーの縦発達を大気蛍光望遠鏡(FD)で観測
- 空気シャワーの粒子を地表検出器(SD)で検出



Telescope Array (TA) 実験の概要



大気蛍光望遠鏡(FD)



地表検出器(SD)



大気蛍光望遠鏡(FD)

観測手法

地表検出器(SD)

- 地表での空気シャワーの**粒子数**と**到来時間**を観測
- 24時間、天候にかかわらず観測できる

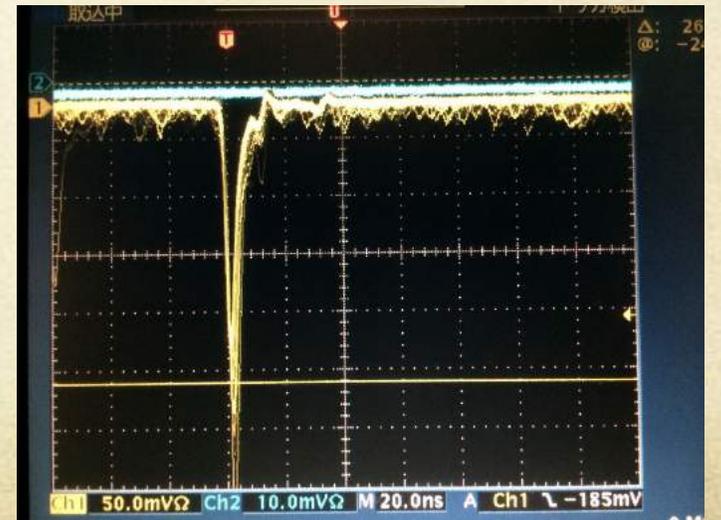
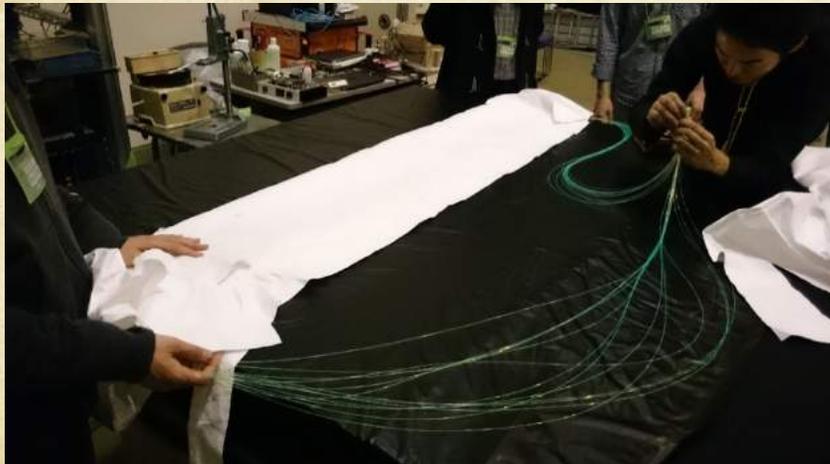
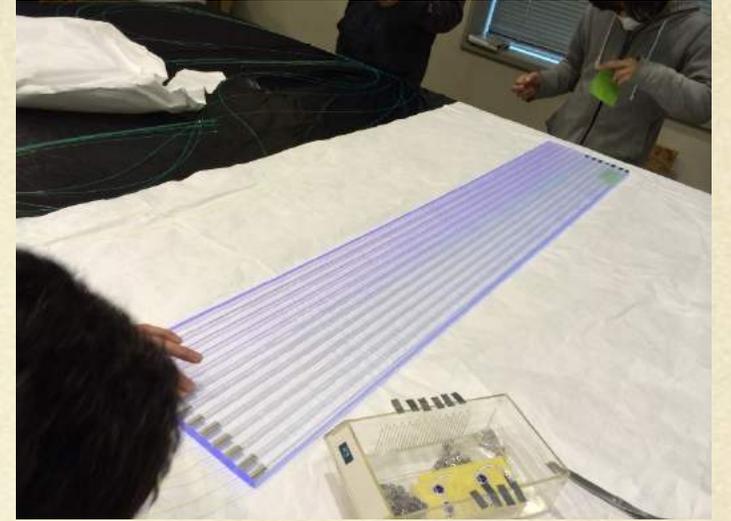


大気蛍光望遠鏡(FD)

- 空気シャワーの大気蛍光を撮像し、**縦発達**を観測
⇒ **Xmax**から粒子が識別できる
- 月のない、晴れた夜のみ観測できる
⇒ 年間の10%以下で、事象数が少ない



おまけ:SDの製作

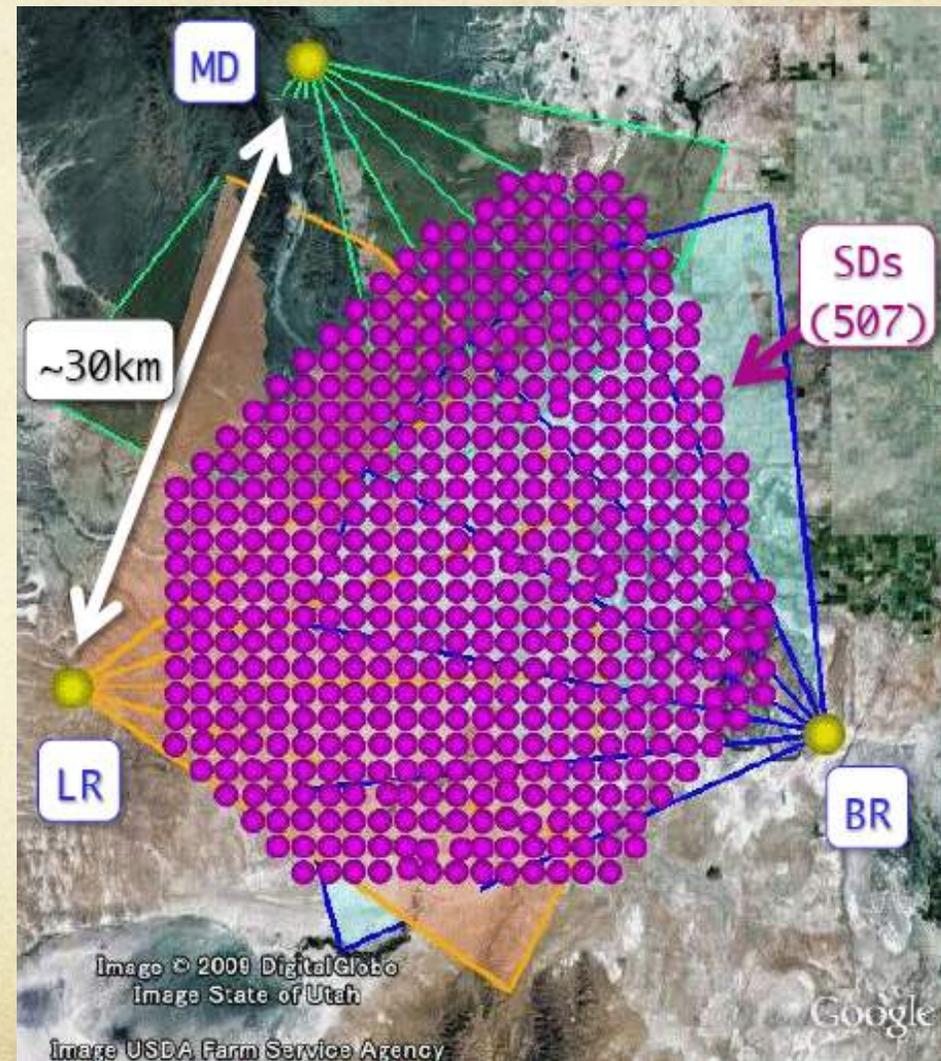


○3. SDによる粒子の識別

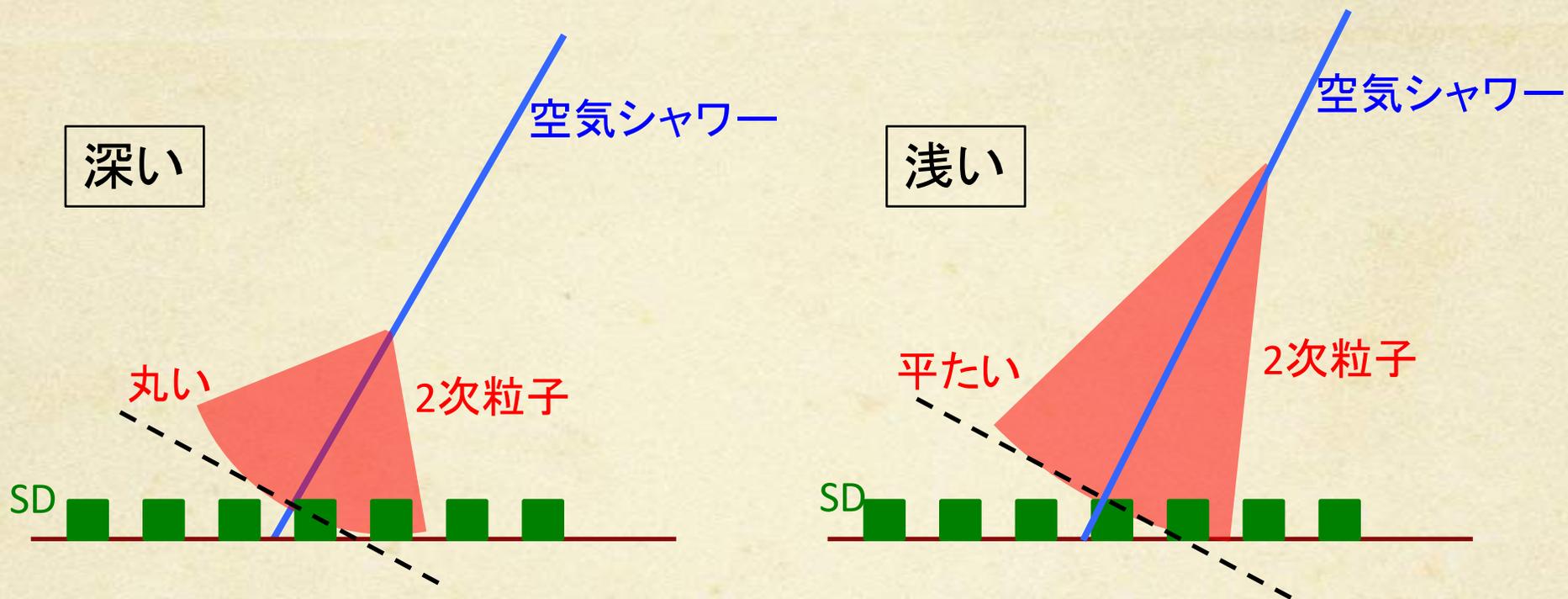
動機

- SDは事象数が多いのが強みだが、宇宙線の粒子種は識別できない

⇒SDを用いて粒子種も
区別したい！



シャワーの“深さ”と“丸さ”



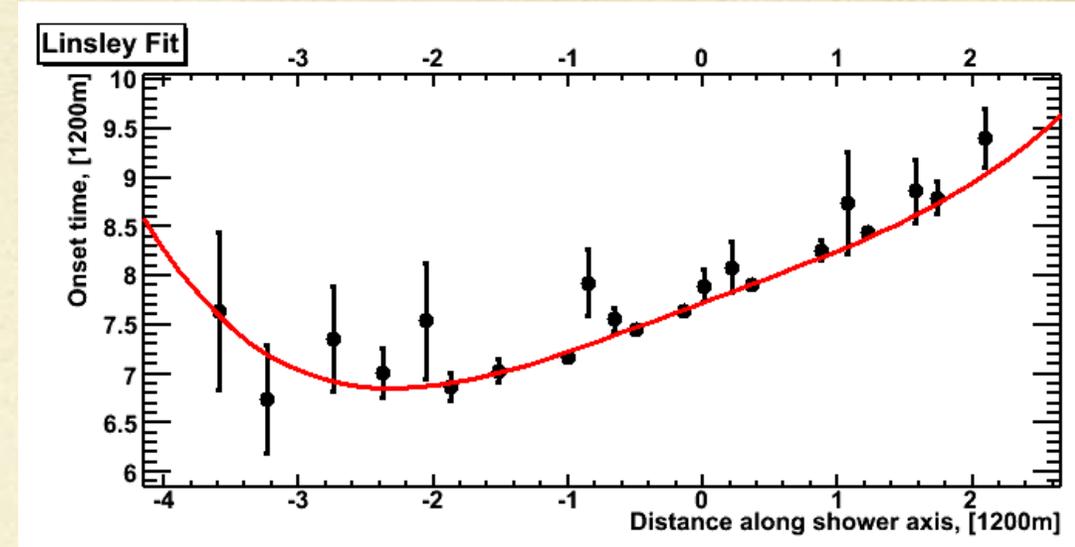
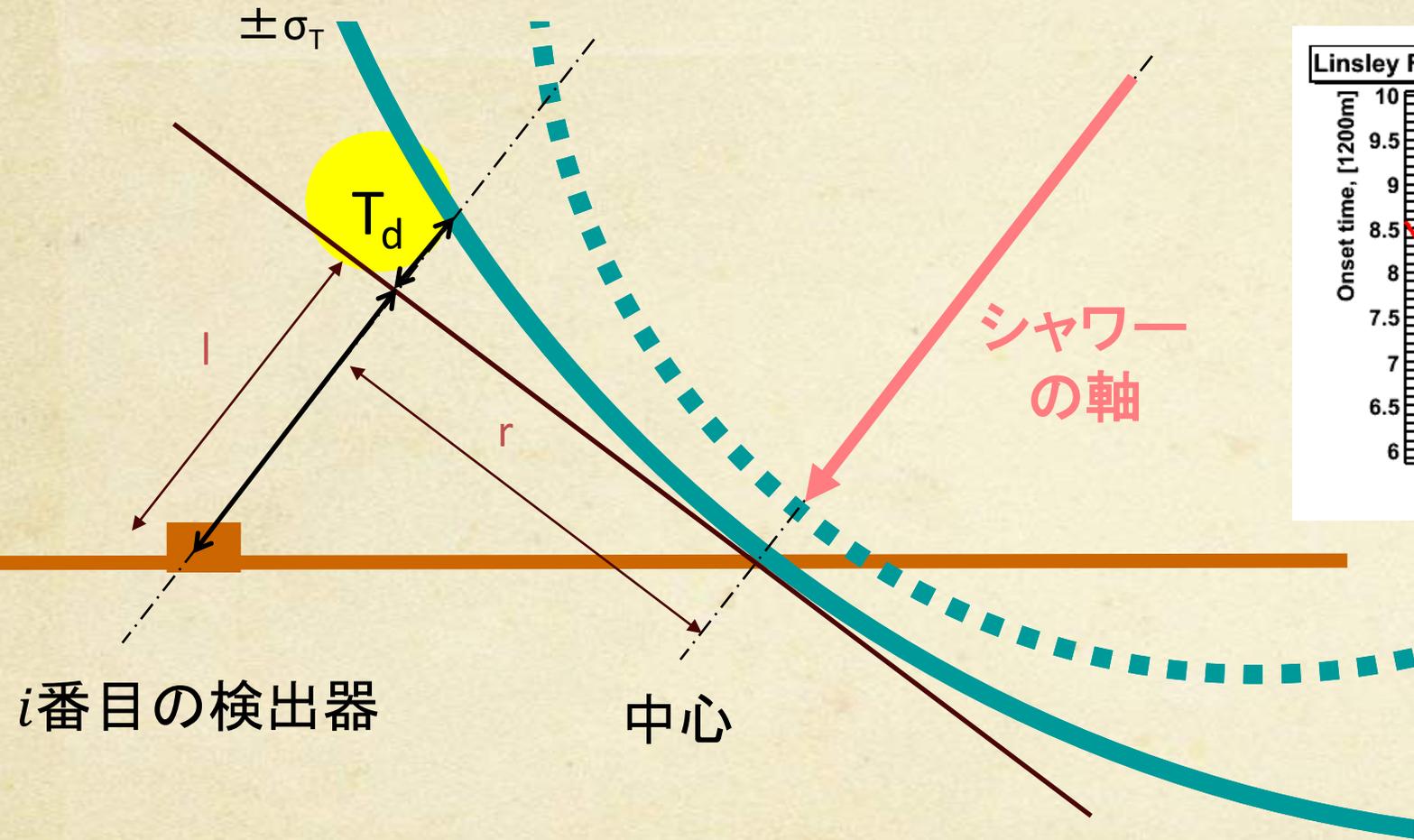
※曲率パラメータ⇕深さ
の対応のしかたは自明で
はない

• 粒子が軽い⇔空気シャワー
は深い⇔シャワーは丸い

• 粒子が重い⇔空気シャワー
は浅い⇔シャワーは平たい

⇒SDを使って、シャワー前面の丸さ = “曲率パラメータ”を測定する！

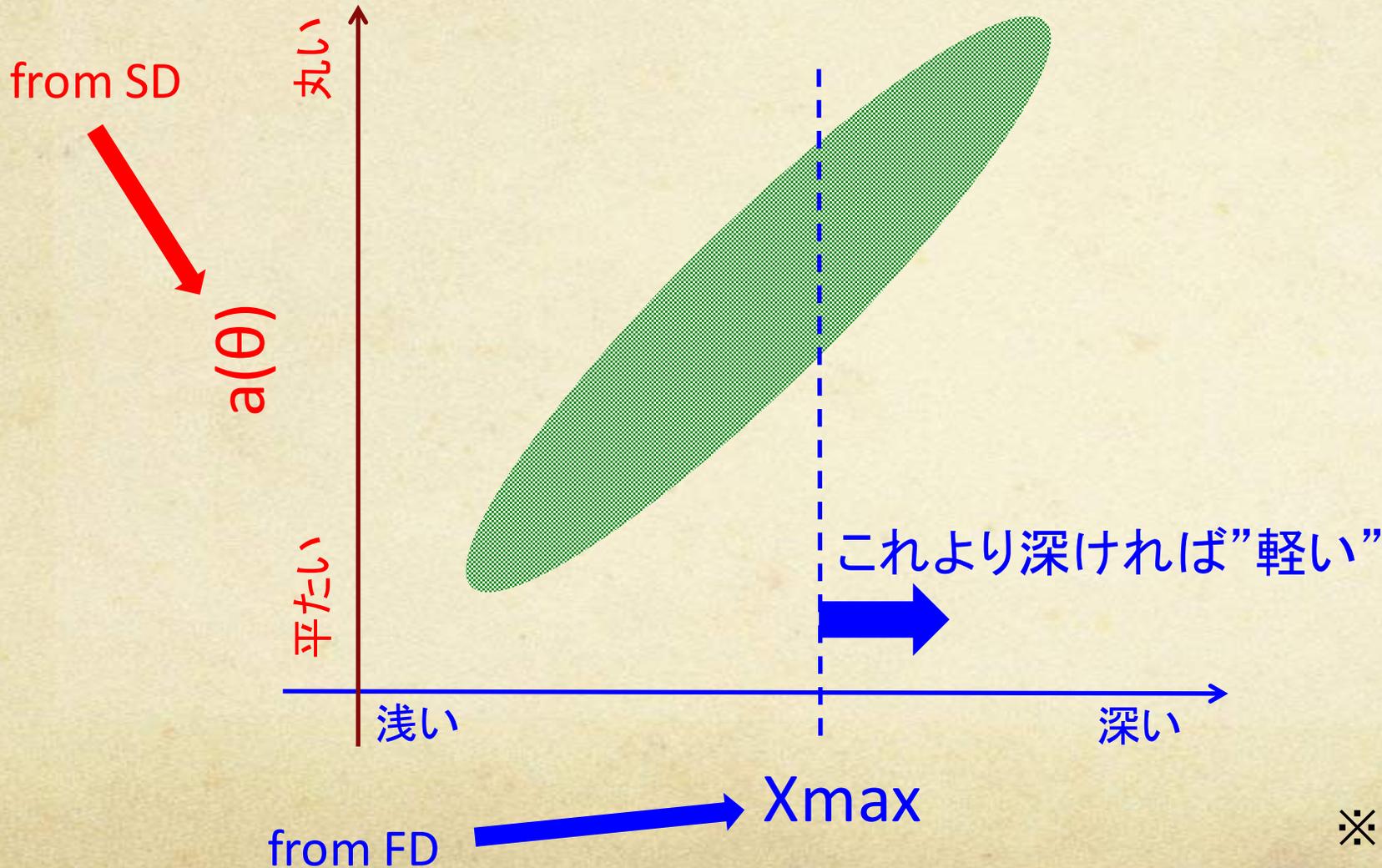
シャワーの曲率パラメータ $a(\theta)$



Linsleyの公式によるフィット

$$\Rightarrow T_d = 0.67 \times a(\theta) \left(1.0 + \frac{s}{30 \text{ m}}\right)^{1.5} \rho^{-0.5}$$

最大発達深さと曲率パラメータ

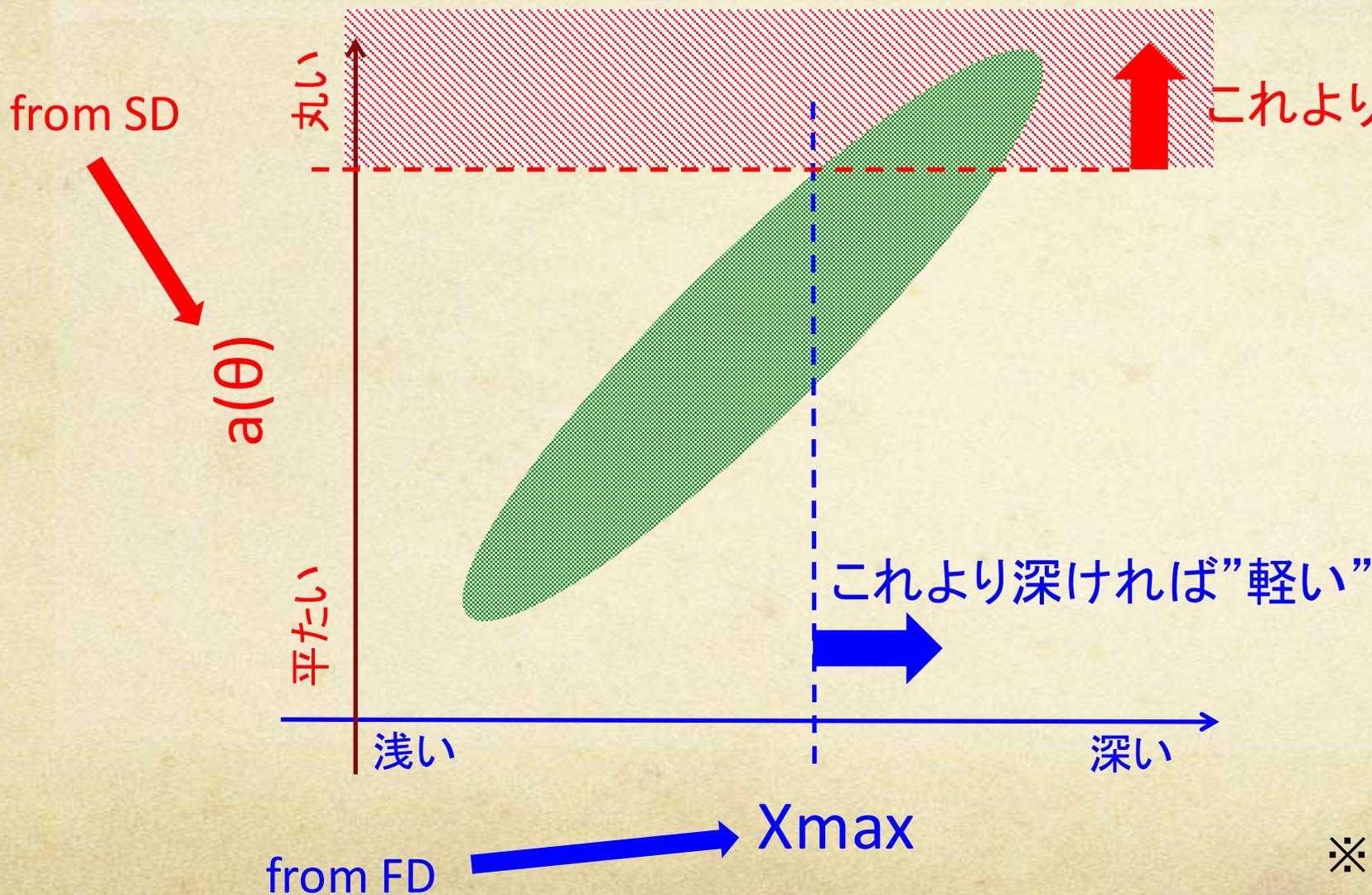


- X_{max} で粒子の軽さを判断したいが、FDのデータもあるとは限らない(～10%)

そこで…

※SD=地表検出器、FD=望遠鏡

最大発達深さと曲率パラメータ

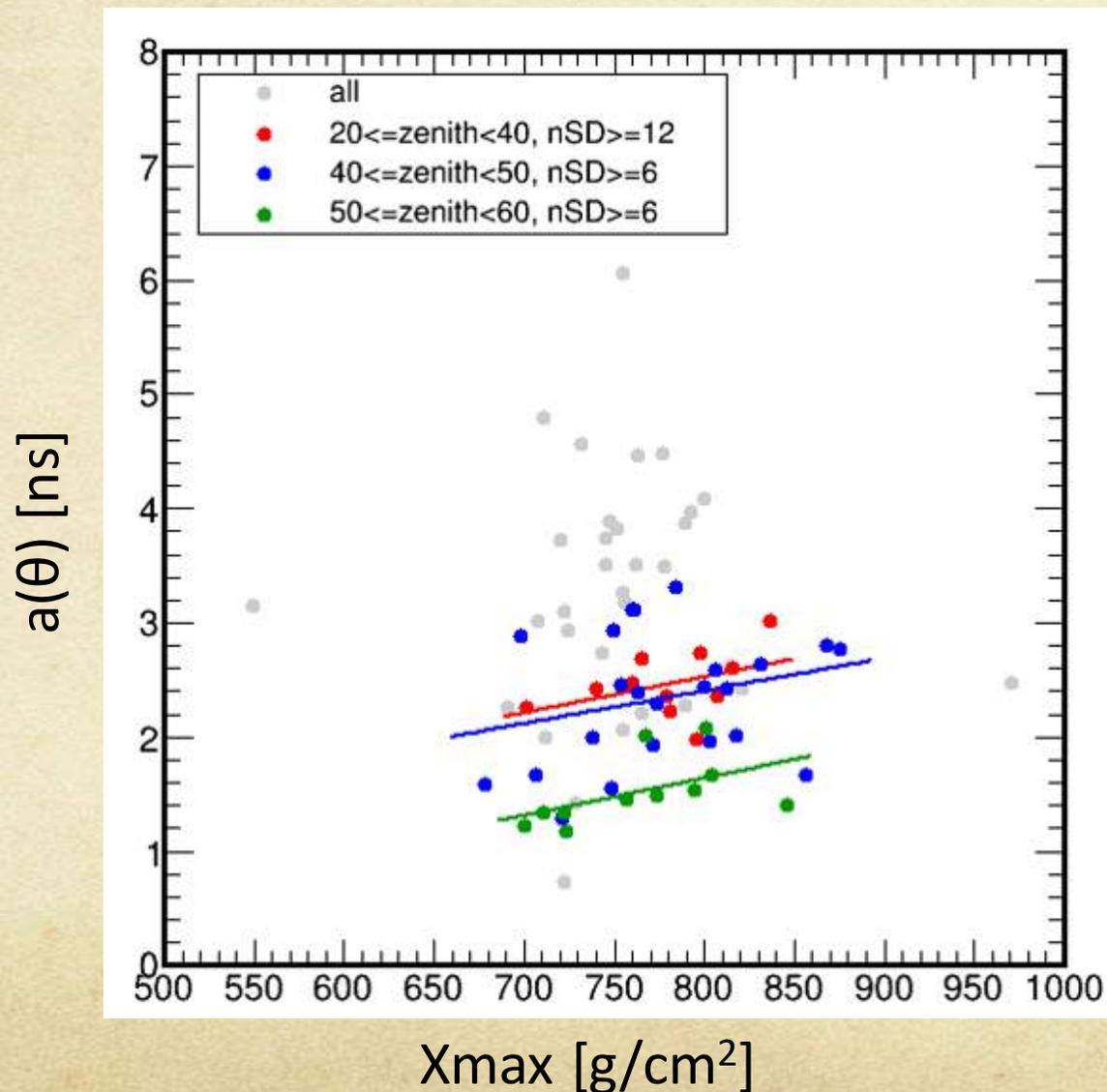


- そこでSDとFDの同時観測データで対応関係を決めて、

⇒“ $a(\theta)$ が大きい⇔粒子は丸い”と判断する！

※SD=地表検出器、FD=望遠鏡

実際の対応関係

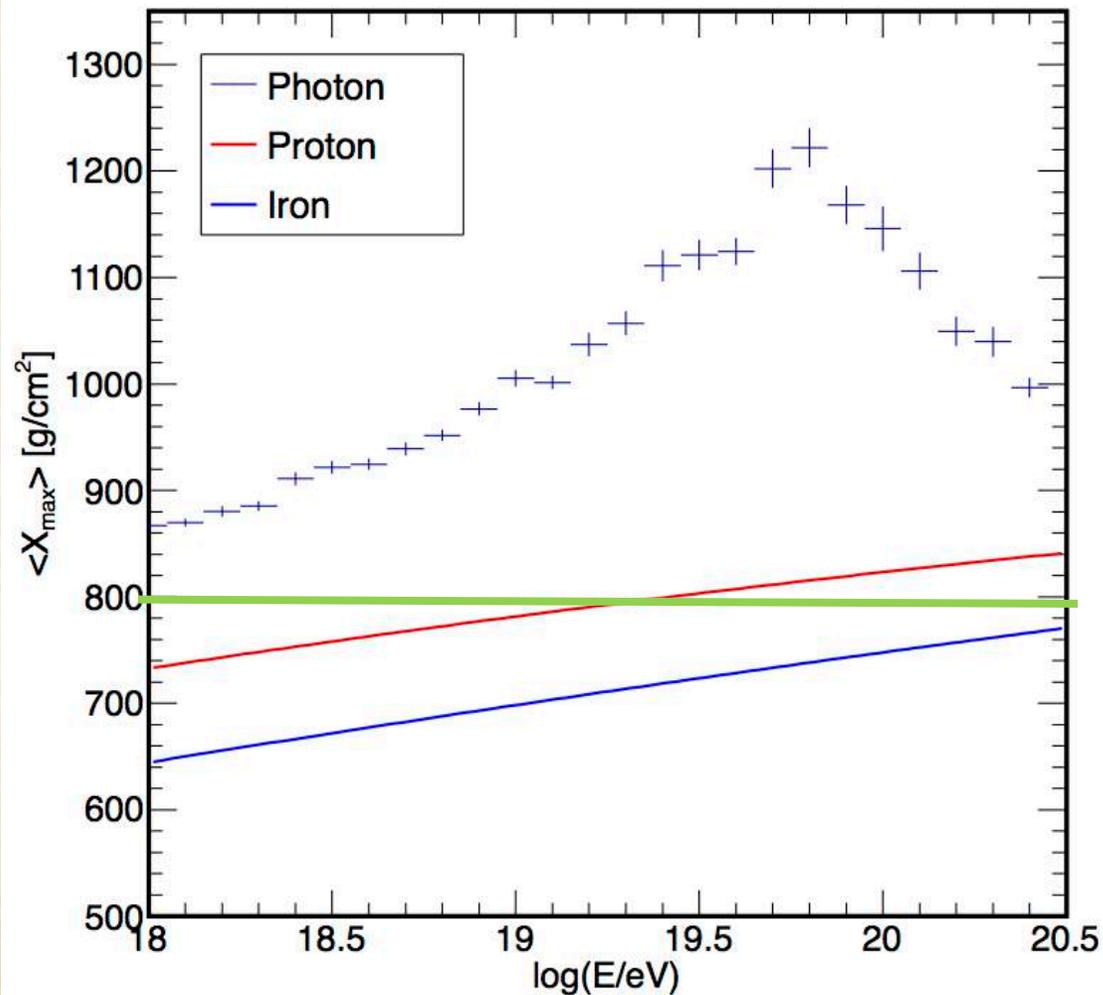


- 曲率パラメータ a は
天頂角 θ に依存する
 $\Rightarrow 20^\circ \leq \theta < 40^\circ$,
 $40^\circ \leq \theta < 50^\circ$,
 $50^\circ \leq \theta < 60^\circ$
に分けて、それぞれ
相関を求めた(左図)

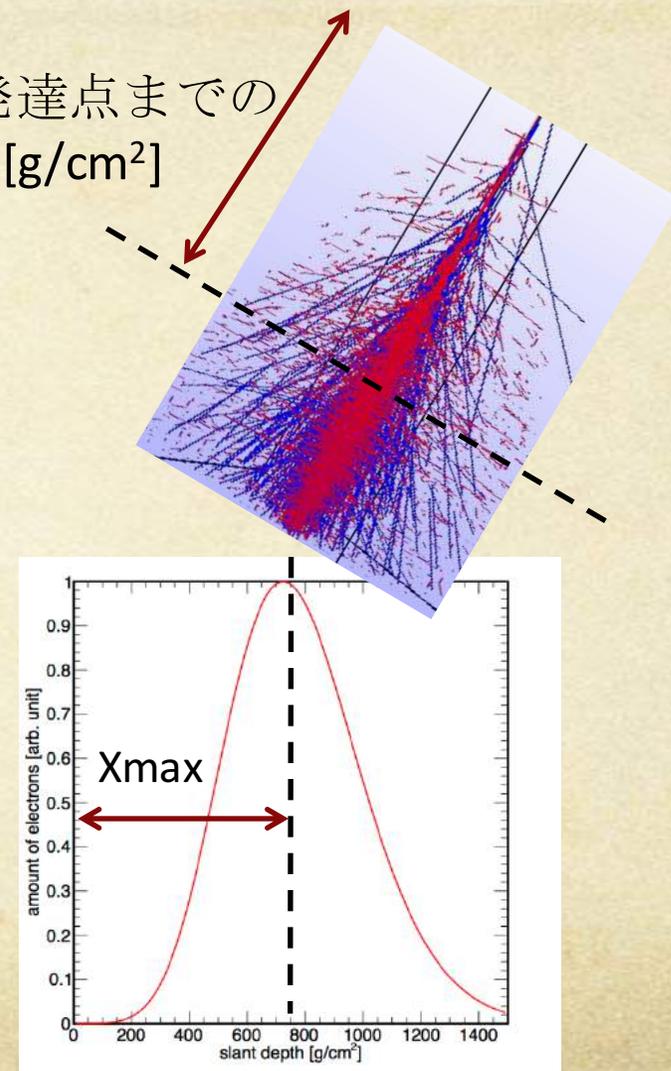
※他の範囲に良い相関はなかった

Xmaxと粒子組成

Corsikaシミュレータを使って計算した陽子、鉄、光子の平均最大発達深さ



Xmax:最大発達点までの大気通過量 [g/cm^2]



○4. 異方性の解析

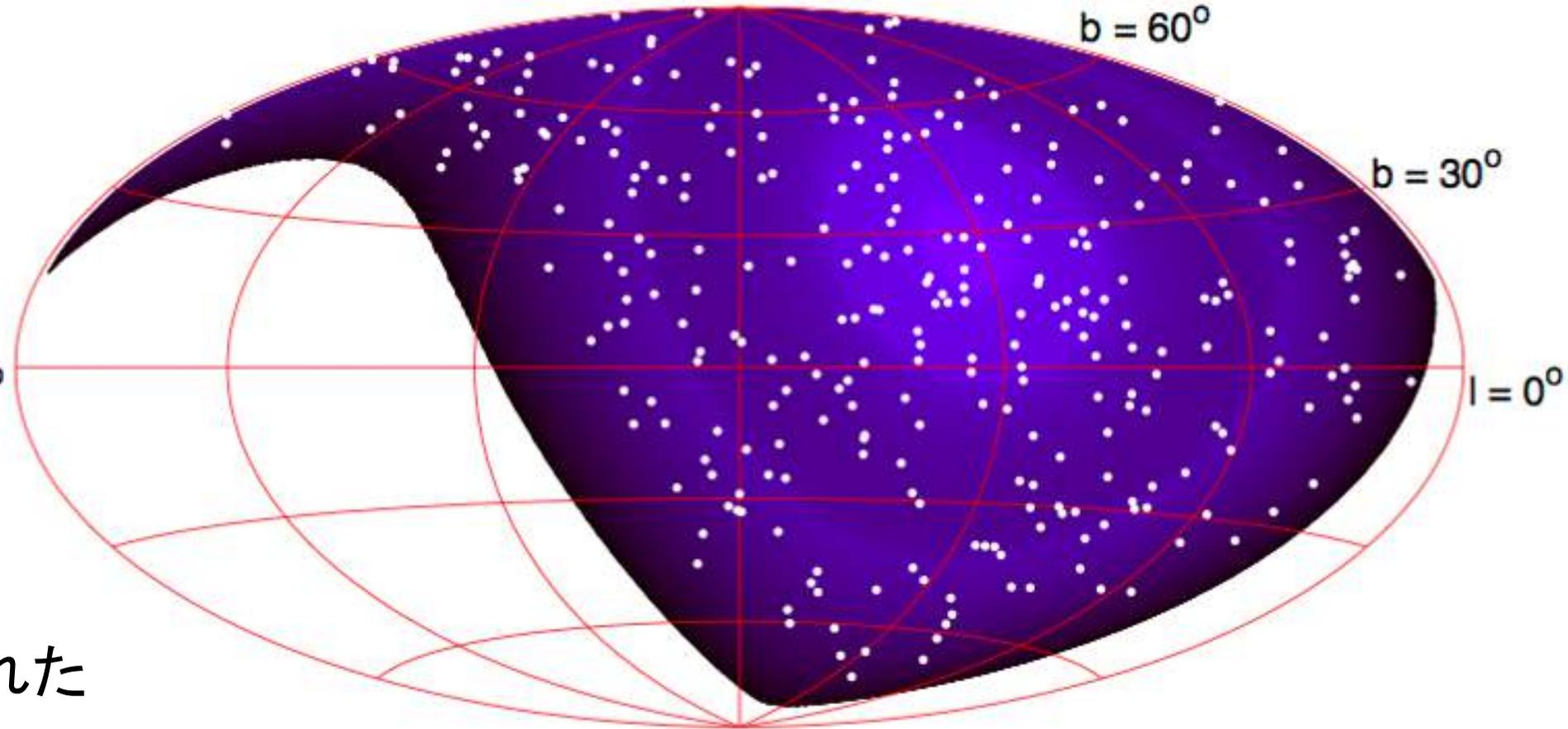
結果

- : 観測データ

- 背景の濃淡:
等方分布から
期待される
フラックス分布

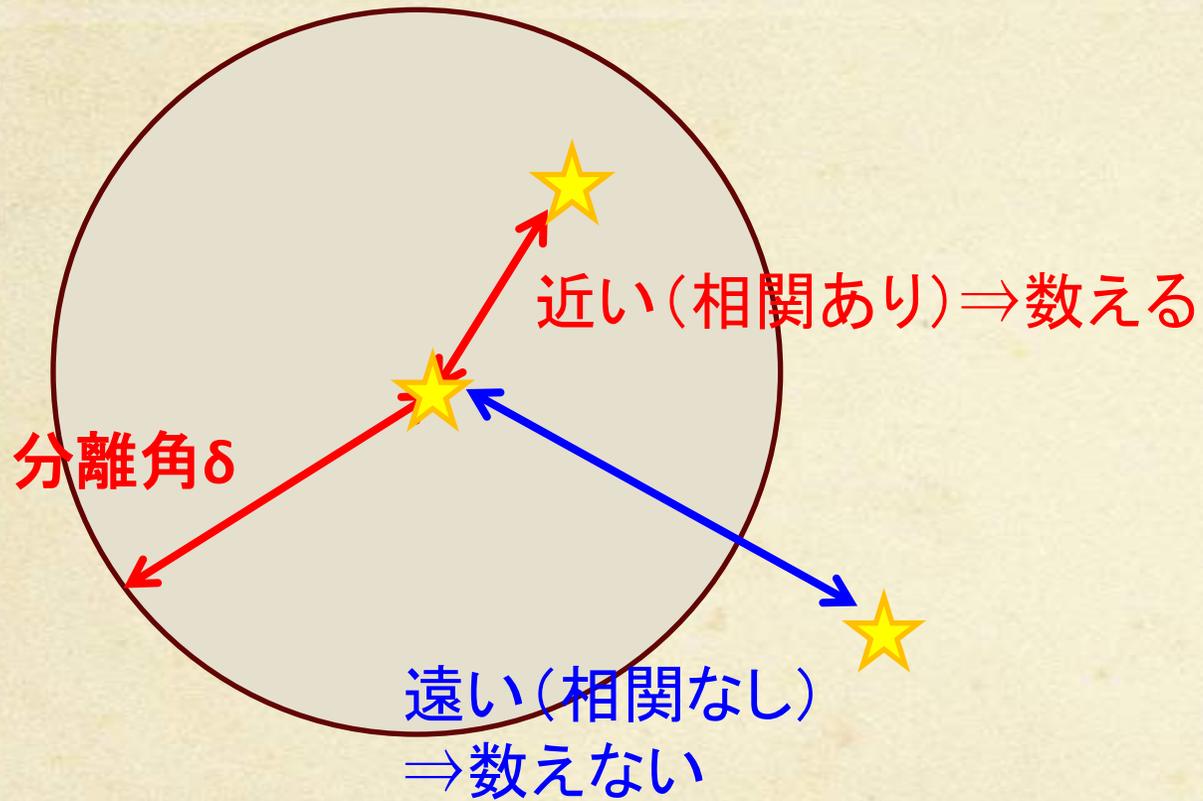
- 観測期間:
2008/5-2011/5

- “軽い”と判断された
SDの事象数:
298



10^{19} eV以上のうち、“軽い”と判断された宇宙線の到来方向

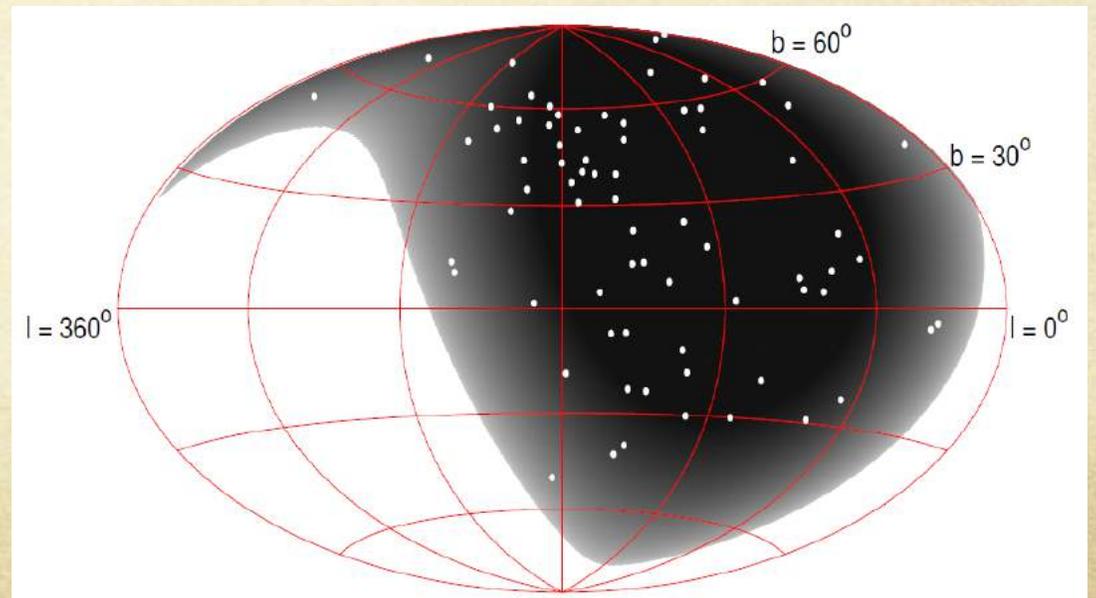
異方性の判断：自己相関



☆: 各事象の到来方向

- δ 度以内の事象のペアが何個あるかを数える

“自己相関”
= 分布にどれくらい偏りがあるか



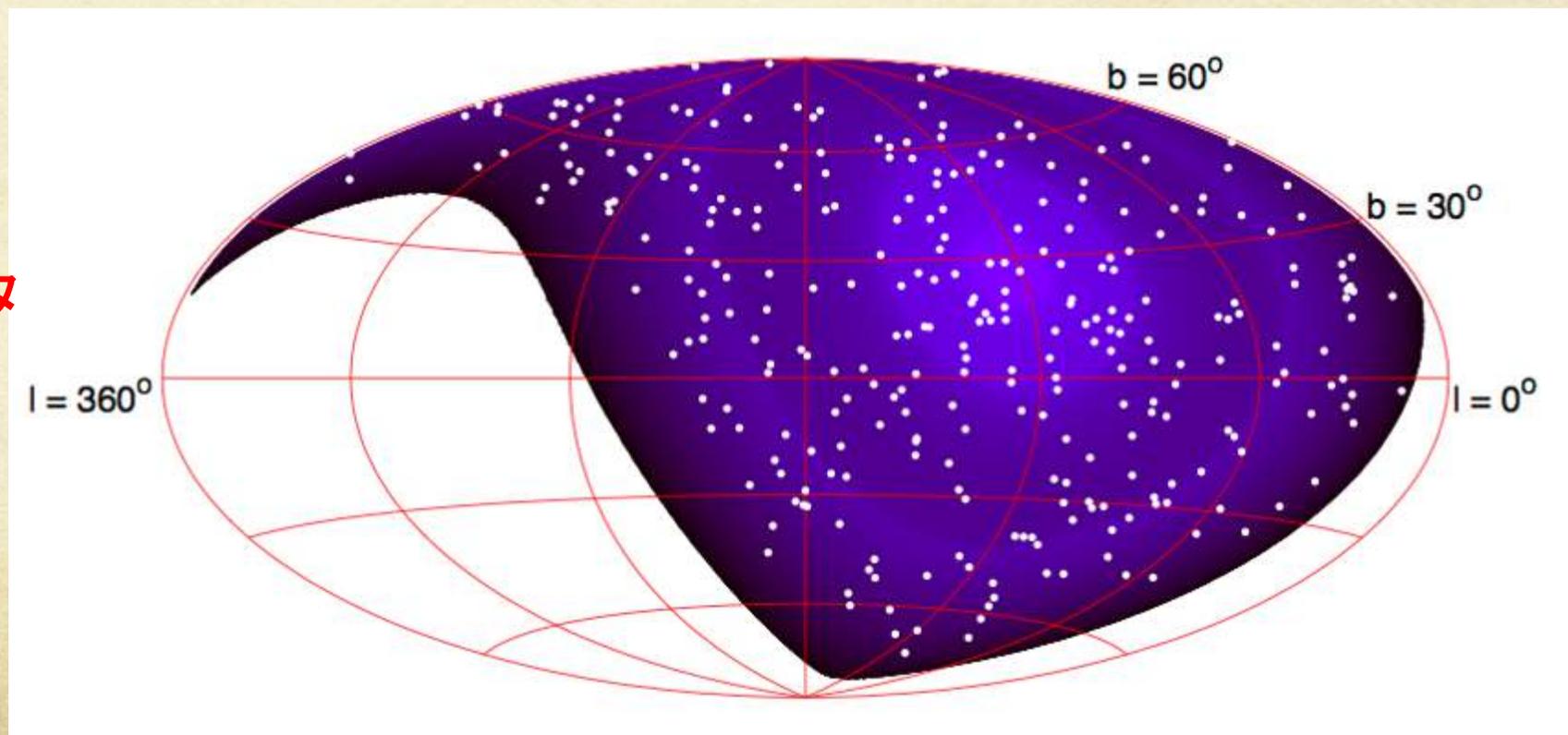
異方性の判断: モンテカルロ法

- 下図の濃淡に従って**ランダム**に298個(=観測の事象数)の宇宙線をシミュレーションで計算し、自己相関を計算する

⇒これを3355回

行って、**観測データ**

と比較する

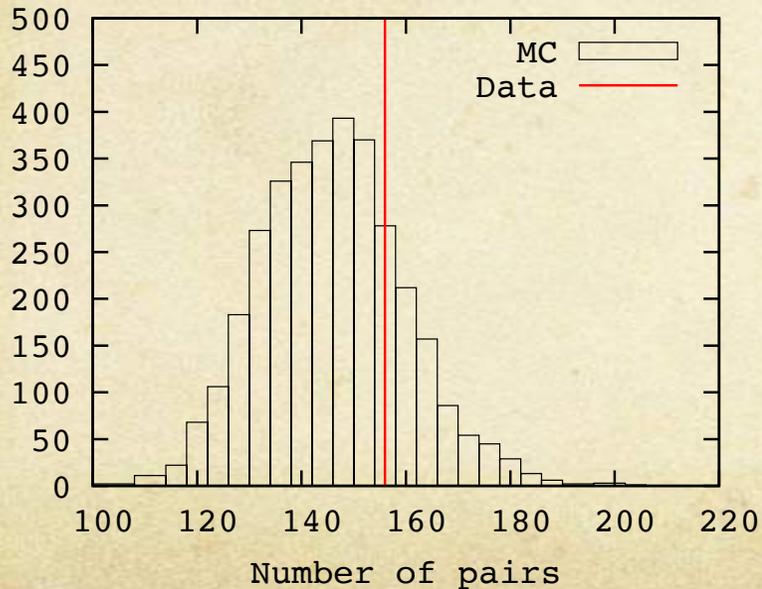


異方性の判断：p値

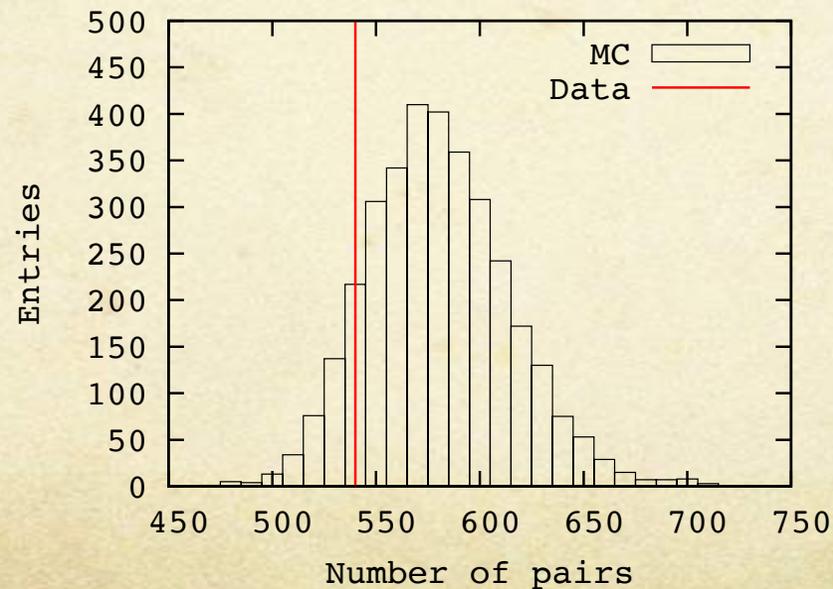
分離角 δ	5°	10°	20°
自己相関	156	540	2173
p値	0.528	0.172	0.290

⇒「等方的である」
という仮定に
矛盾しない！

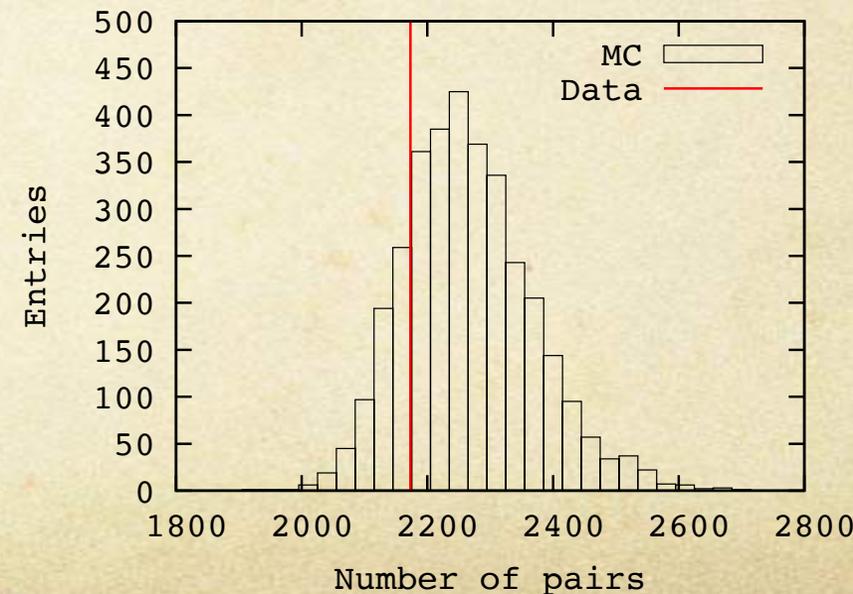
$\delta = 5^\circ$



$\delta = 10^\circ$



$\delta = 20^\circ$



モンテカルロデータの自己相関と観測データの自己相関

○5. 考察と今後の展望

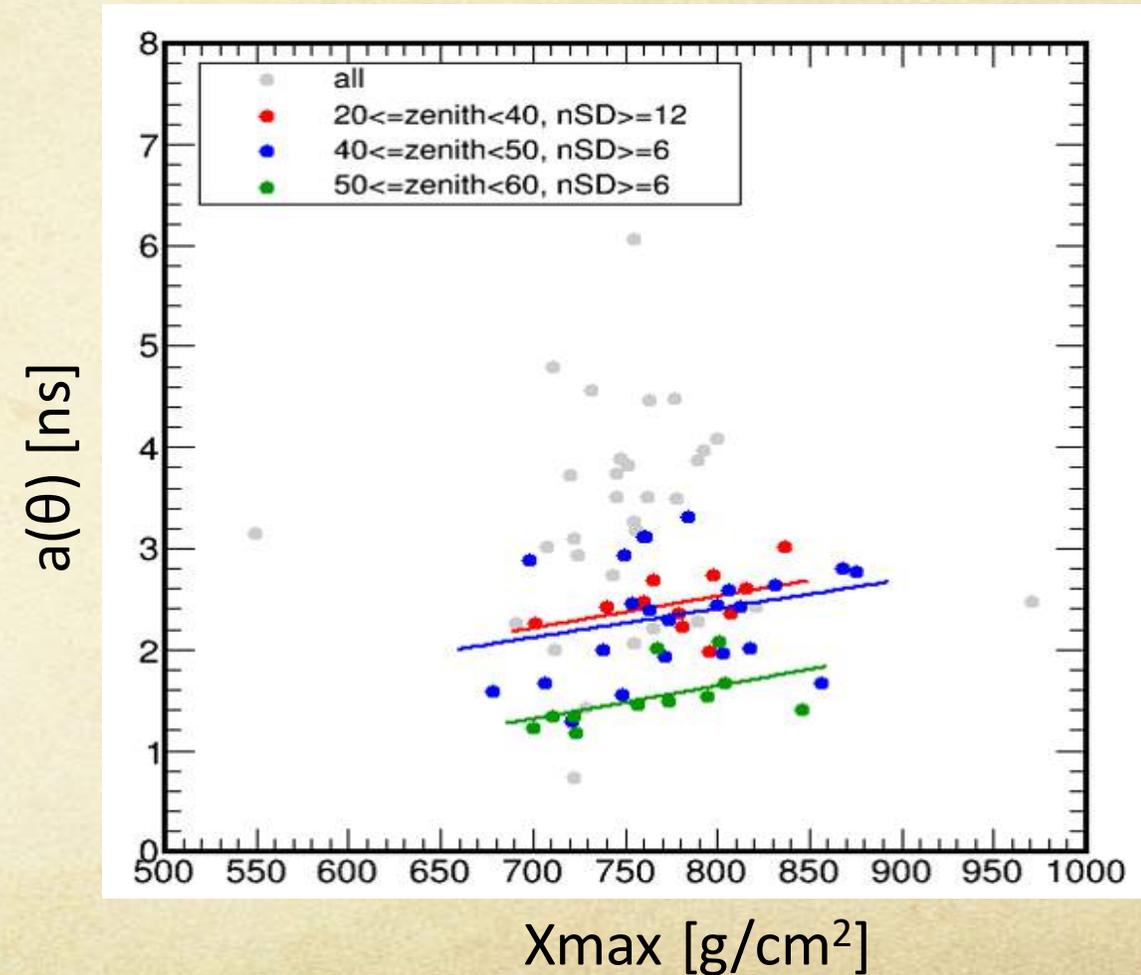
成果

1. X_{\max} と $a(\theta)$ の対応関係を得た

⇒SDでも粒子が識別できる可能性を見出した！

2. 1.を用いて、 10^{19} eV以上の宇宙線に対して軽い粒子を選んで異方性を調べたところ、等方分布と矛盾がなかった

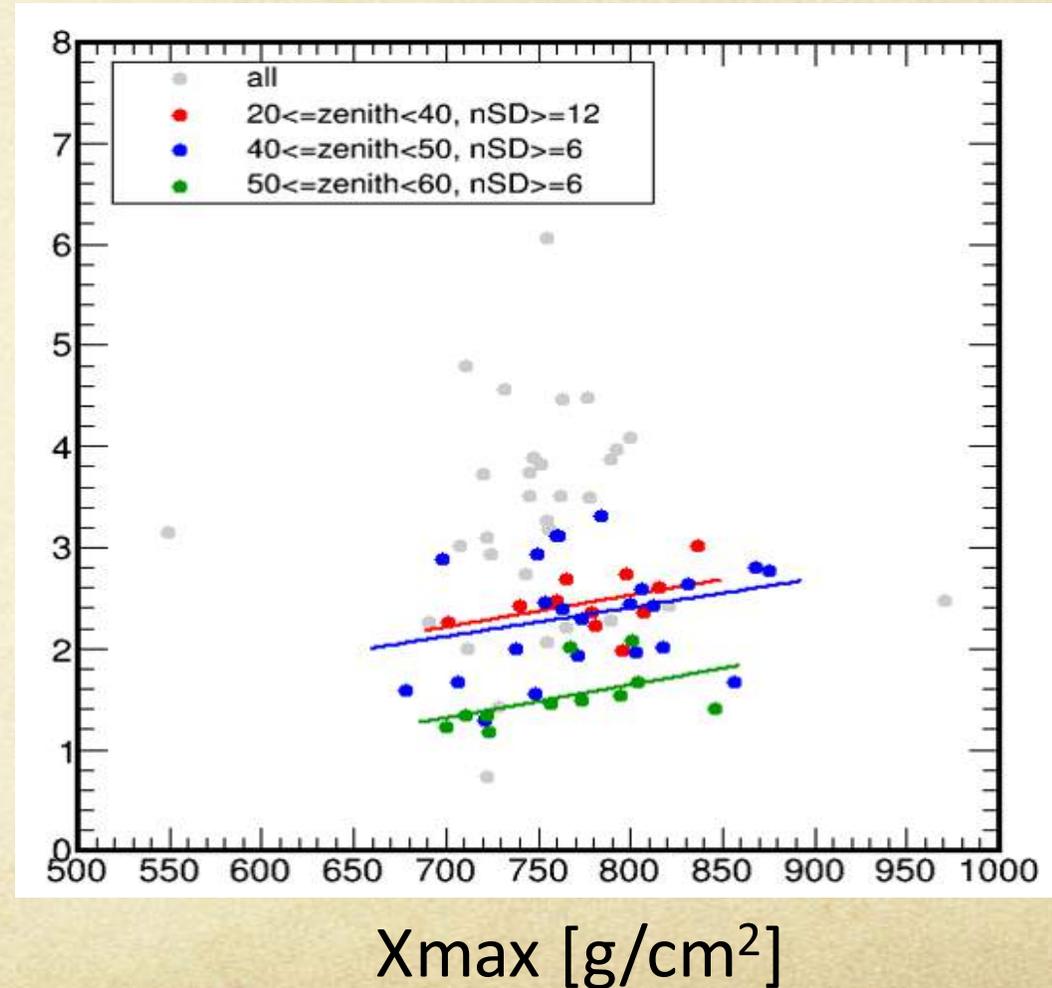
⇒等方分布と矛盾がなかった！



考察1: X_{\max} と $a(\theta)$ の対応関係について

- 事象数が少なかったため、十分に粒子の識別ができていない可能性がある
- 高いエネルギーの事象に対して調べることができなかった

$a(\theta)$ [ns]



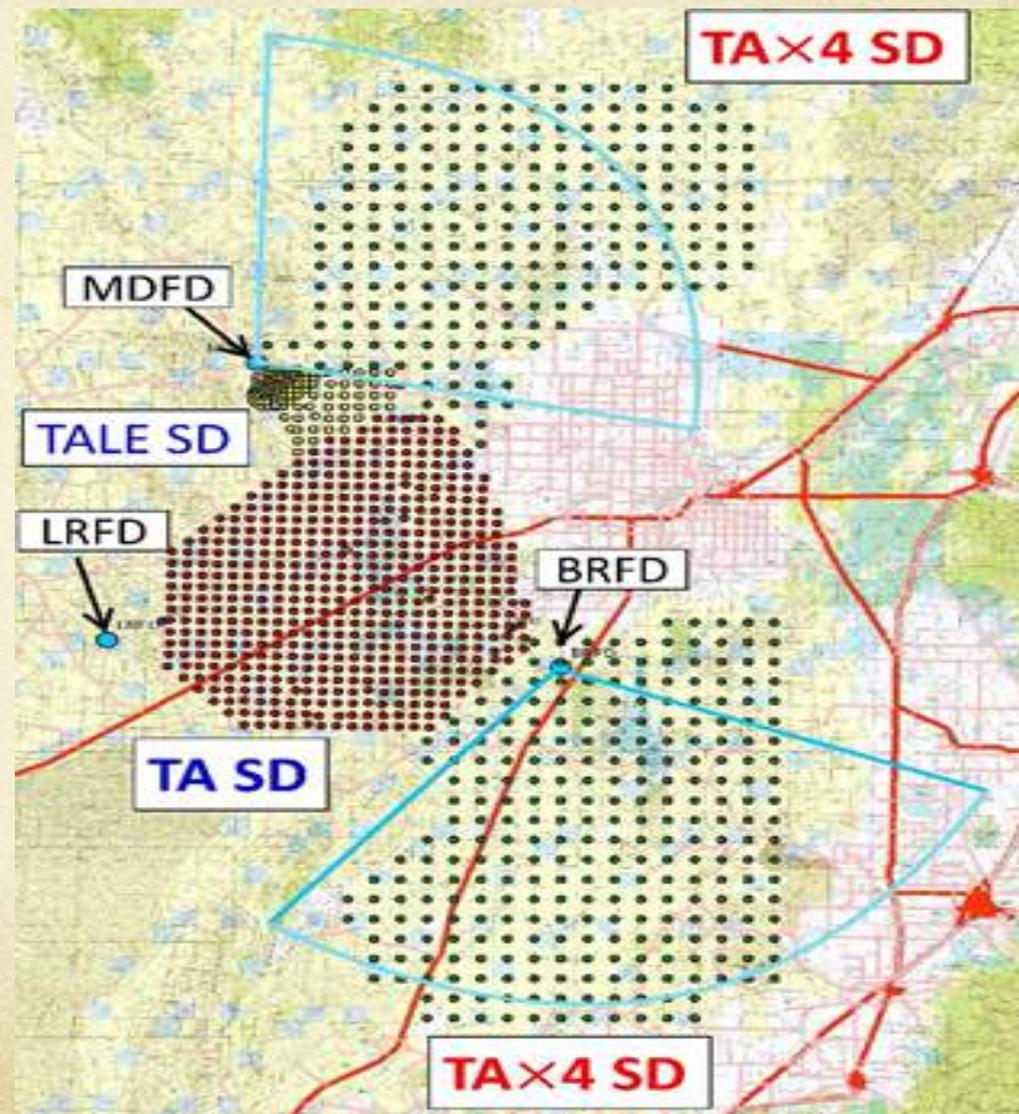
考察2: 等方性について

- 到来方向が等方分布と矛盾がなかった理由
 - 軽い原子核を十分選ぶことができなかった
 - 強い磁場の影響
 - 発生源が多い

最高エネルギー宇宙線観測の今後

- **TA × 4** パワーアップ！
 - 広さ**4**倍
 - 検出器500→**1000**
 - 望遠鏡3→**5**か所

⇒より楽しく異方性観測が
できます！



まとめ

- 最高エネルギー宇宙線とは現在観測することのできる最大のエネルギーをもつ宇宙線
- TA実験は超高エネルギーを観測している
- X_{\max} と $a(\theta)$ の対応関係を得て、SDでも粒子が識別できる可能性を見いだした！
- 10^{19} eV以上の宇宙線に対して軽い粒子を選んで異方性を調べたところ、等方分布と矛盾がなかった
- 今後は観測面積を4倍にしてより多くの事象数を得ることで、異方性や様々な宇宙物理現象を探る！

佐川先生、木戸先生、池田先生

ありがとうございました。