

# 最高エネルギー宇宙線 起源探査における 磁場モデル・質量組成 モデルの影響

樋口 諒 (理化学研究所)

さこ隆志

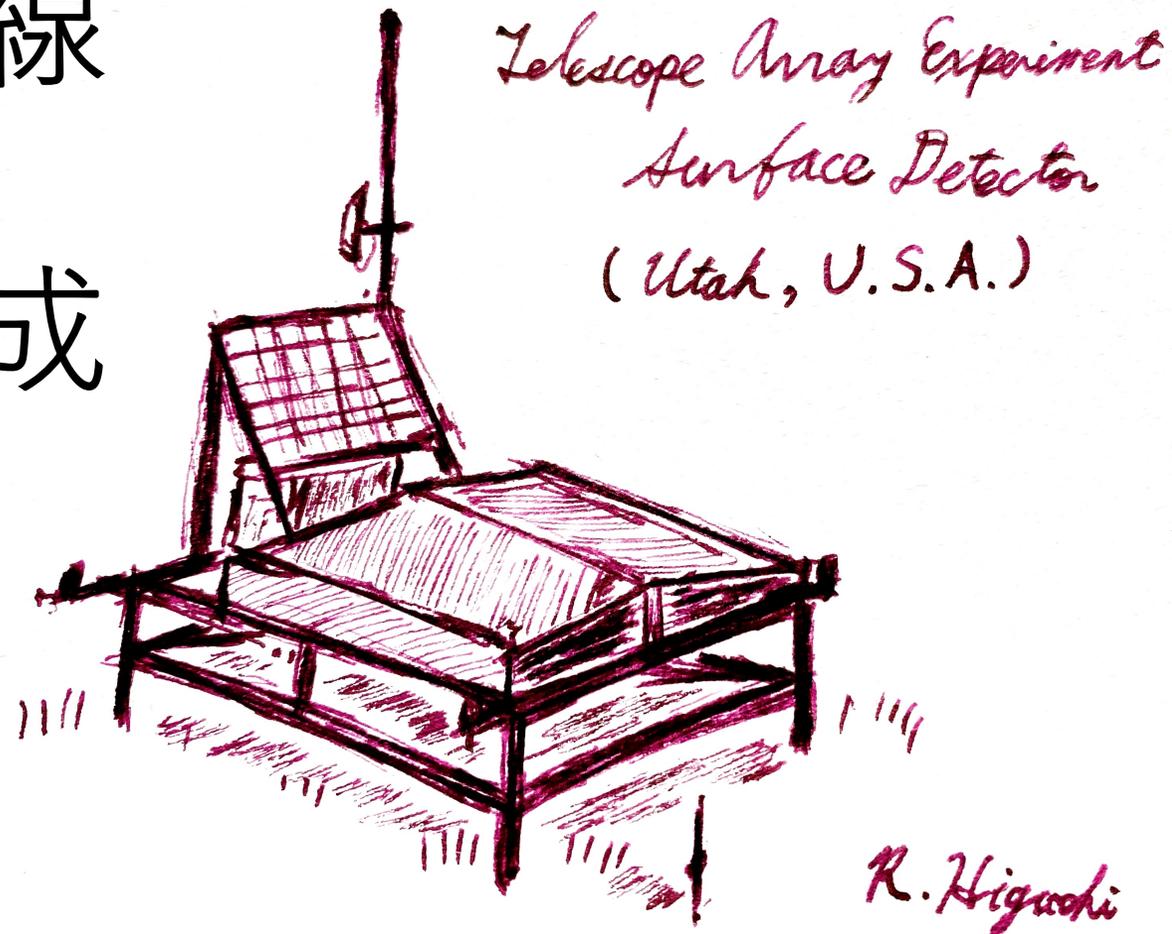
木戸 英治

川田 和正

藤井 俊博

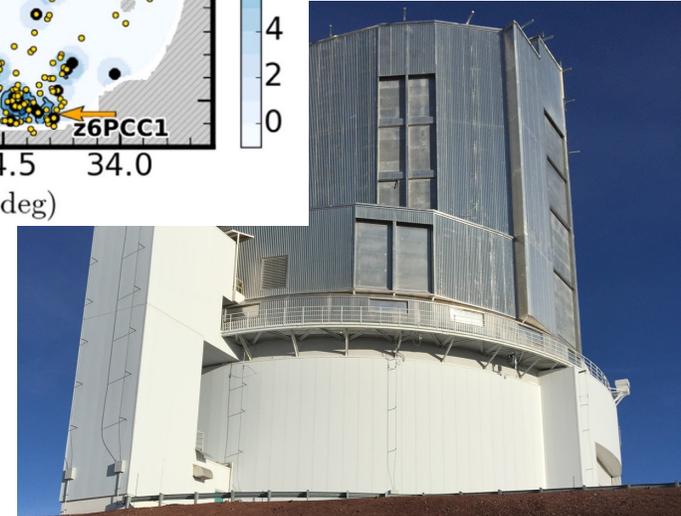
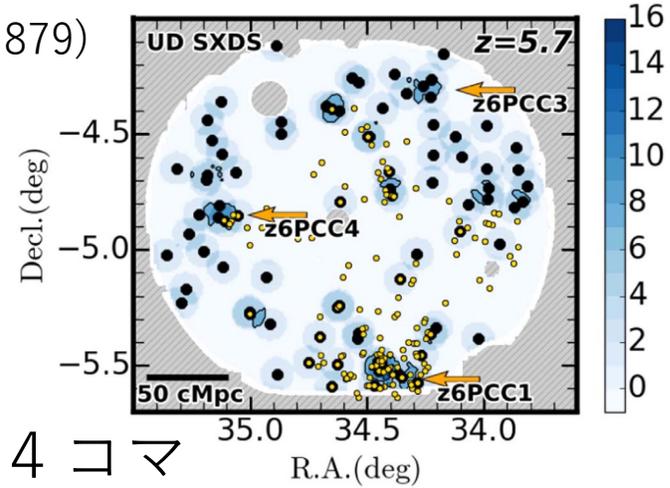
他Telescope Array Collaboration

Submitted to ApJ (arXiv: 2209.00305)



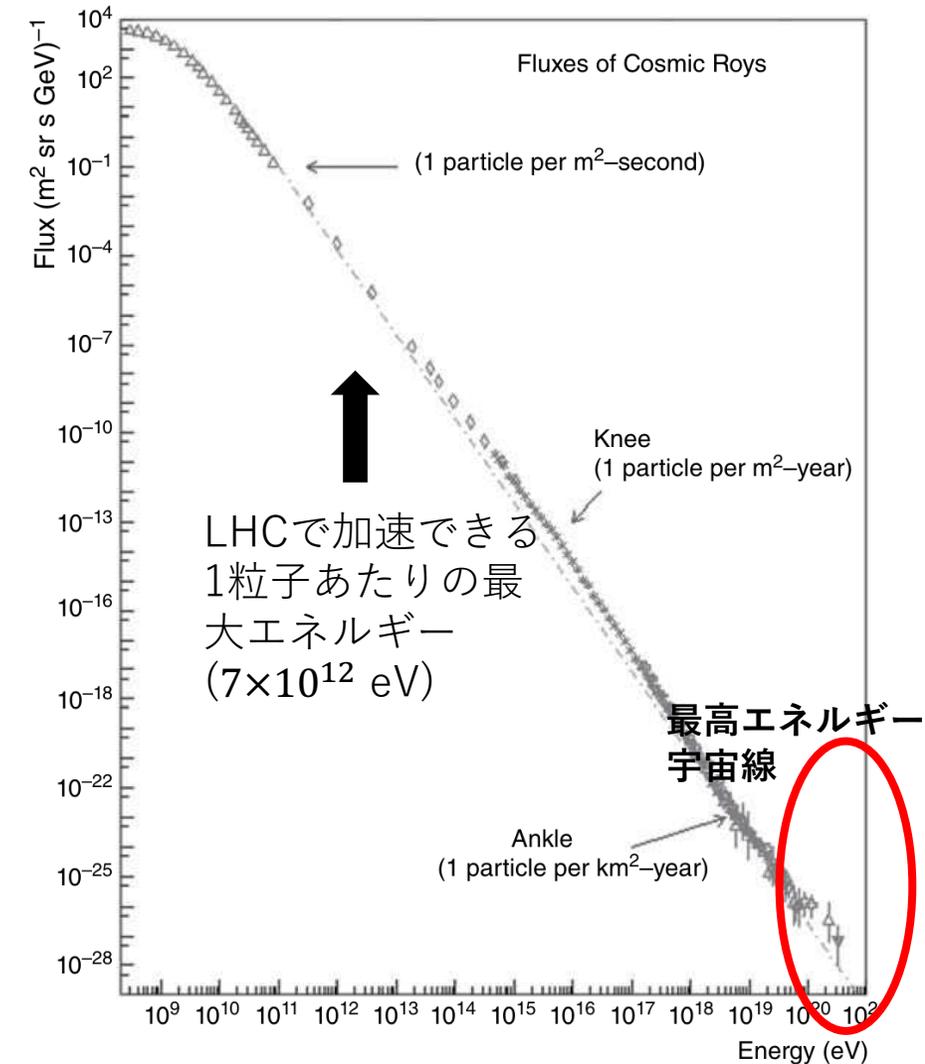
# 宇宙線と私

- 宇宙線との出会い：小学校6年生
  - 「子供の科学」2005年7月号の漫画
  - 「宇宙線のすごいエネルギーで焼き肉を焼く」4コマ
  - →当時は古代エジプトに夢中で忘れていた
- すばる望遠鏡超広視野カメラ(HSC)解析
  - 初期宇宙の銀河団形成・宇宙再電離・星形成史など
  - 「なんかCCDに線が写り込んでるな」→**それが宇宙線です**
- 大規模構造形成・銀河銀河団星形成史と宇宙線物理の接点をやりたい
  - →そうだ最高エネルギー宇宙線異方性をやろう！
  - Telescope Array (TA)実験・最高エネルギー宇宙線異方性の研究（自動的に磁場モデルを扱うことになる）



# 最高エネルギー宇宙線(UHECR)とは 宇宙線のエネルギーと到来頻度

- GZK限界：
  - 宇宙線は伝搬中にCMBと反応しエネルギーを失う
  - 地球までの伝搬距離は長くない (はず)
  - →エネルギースペクトルに $10^{20}$ eV付近でカットオフがあるはず(GZKカットオフ)
- GZK限界( $10^{19.6}$ eV)を超える宇宙線が観測されている→**最高エネルギー宇宙線(UHECR)**
- なぜ最高エネルギーなのか
  - 起源がわかっていない
  - 加速機構もわかっていない
  - GZK限界は存在するのか？
    - super-GZKイベント (1990年代)
    - 新しい物理モデル (2000年代)



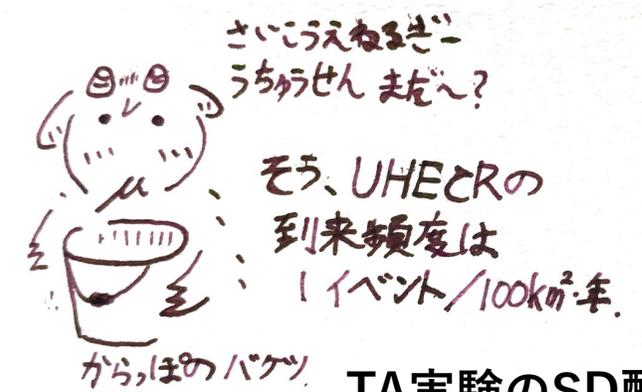
(Sokolsky&Thomson "Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics"  
From J. Cronin, T.K. Gaisser, and S.P. Swordy, Sci. Amer. v276, p44 (1997))

# そもそもなぜ「最高 ultra-high」エネルギーなのか (歴史的な経緯)

- Super-GZK eventの発見
  - 1991年：Fly's Eye実験（ユタ州）の $3.2 \times 10^{20} \text{eV}$ イベント (Bird et al. 1995, Oh-My-God particle)
  - 1991-2004年：AGASA実験（明野）による統計探査(地表検出器・SD)
    - 複数のsuper-GZK event
  - 1997-2006年：High-Resolution Fly's Eye (HiRes) 実験（大気蛍光望遠鏡・FD)
    - GZKカットオフの報告
- GZK限界は存在するか？
  - ないとしたらどんなモデルで説明できるか…？ (2000s)
  - 新しい物理への期待（特殊相対性理論の破れ・Zバースト・SHDM…）
- →SD/FDによる大規模宇宙線探査の必要性(2010s)

# 最高エネルギー宇宙線の観測

- どのように観測するか？
  - フラックスが小さい→直接観測は難しい  
→大気通過時に生じる空気シャワーを地表から観測  
→地表検出器(SD)を広範囲に配置する必要がある
- 2つの実験が観測をリード：
  - **北半球：TA(Telescope Array)実験**
    - アメリカ合衆国ユタ州の国際共同実験
    - 700 km<sup>2</sup>の範囲に507台のSDを配置
  - **南半球：Pierre Auger実験**
    - アルゼンチンの国際共同実験
    - 3000 km<sup>2</sup>の面積をカバー
- 主要な成果：
  - エネルギースペクトルの特徴
  - 質量組成
  - 到来方向の異方性←本日

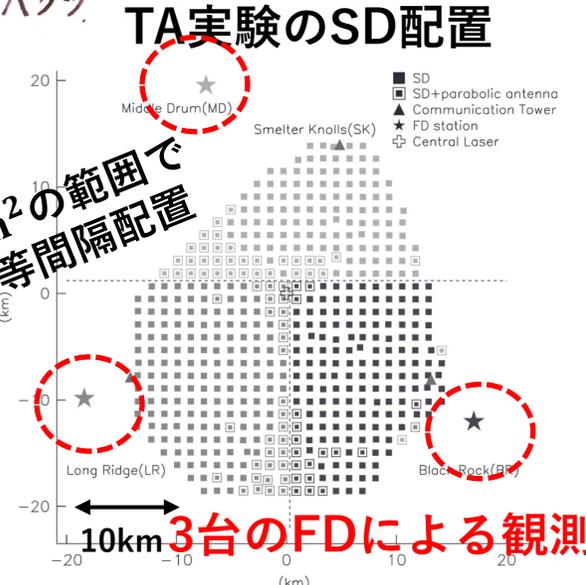


TA実験の地表検出器(SD)



(発表者撮影)

700km<sup>2</sup>の範囲で  
SDを等間隔配置



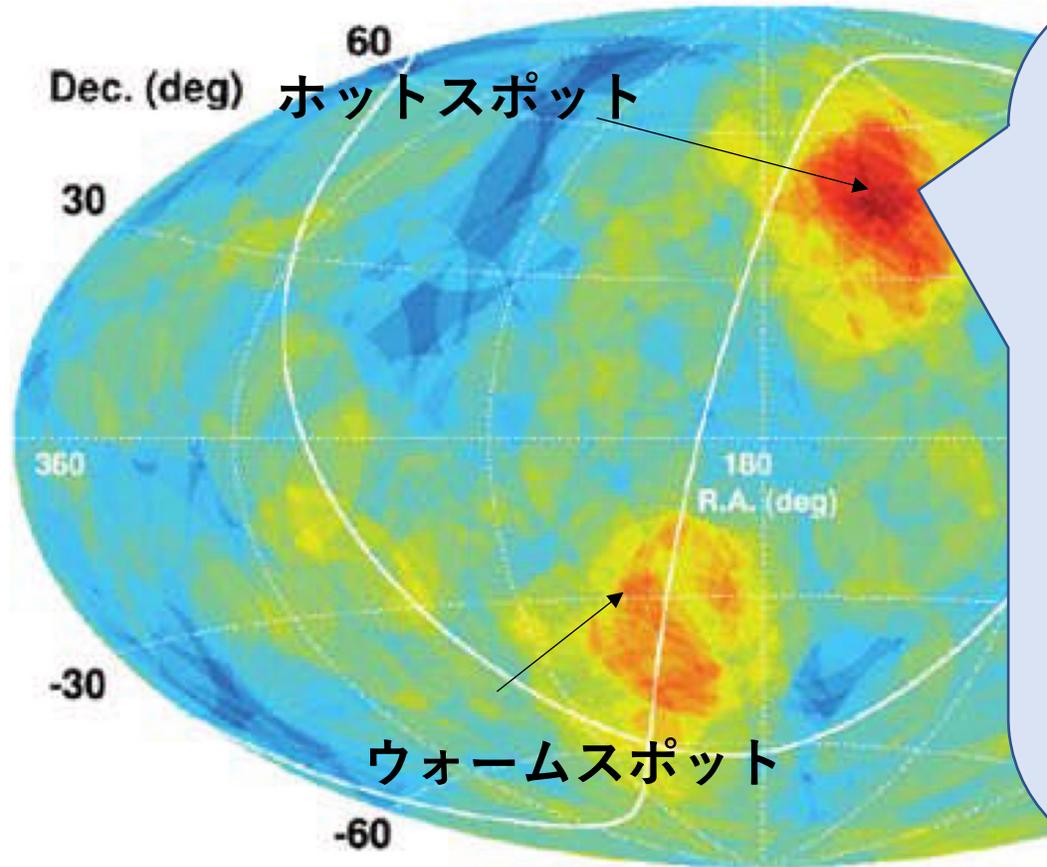
(TA collaboration 2012, NIMPA, 689, 87)

TA実験の  
大気蛍光  
望遠鏡(FD)

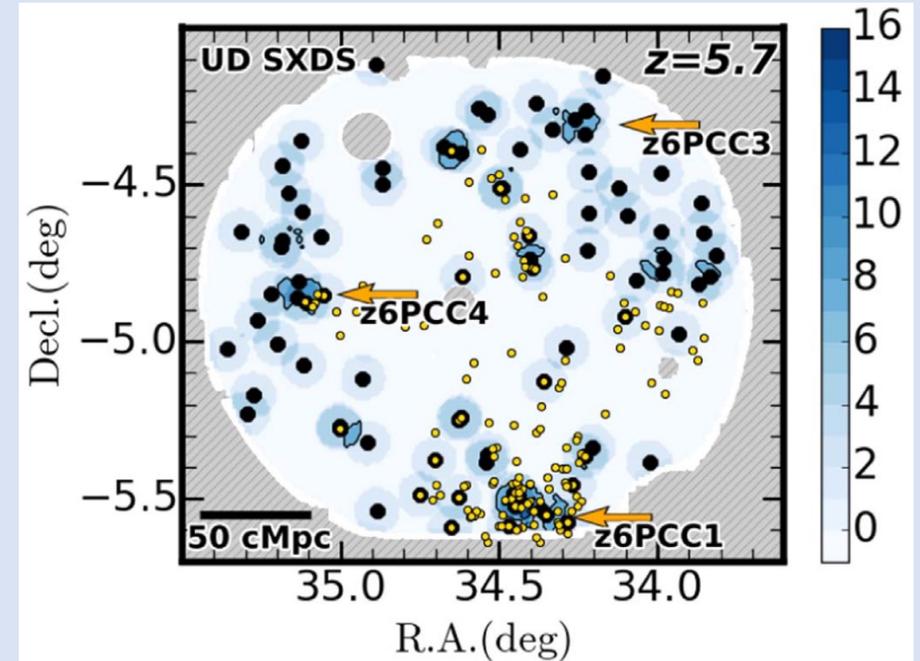


(photo by Sako Takashi)

# 最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性



こういう図を見ると大規模構造を見たくなる



(Higuchi et al. 2019, ApJ, 28, 879)

(Sokolsky&Thomson “Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics”) from K. Kawata

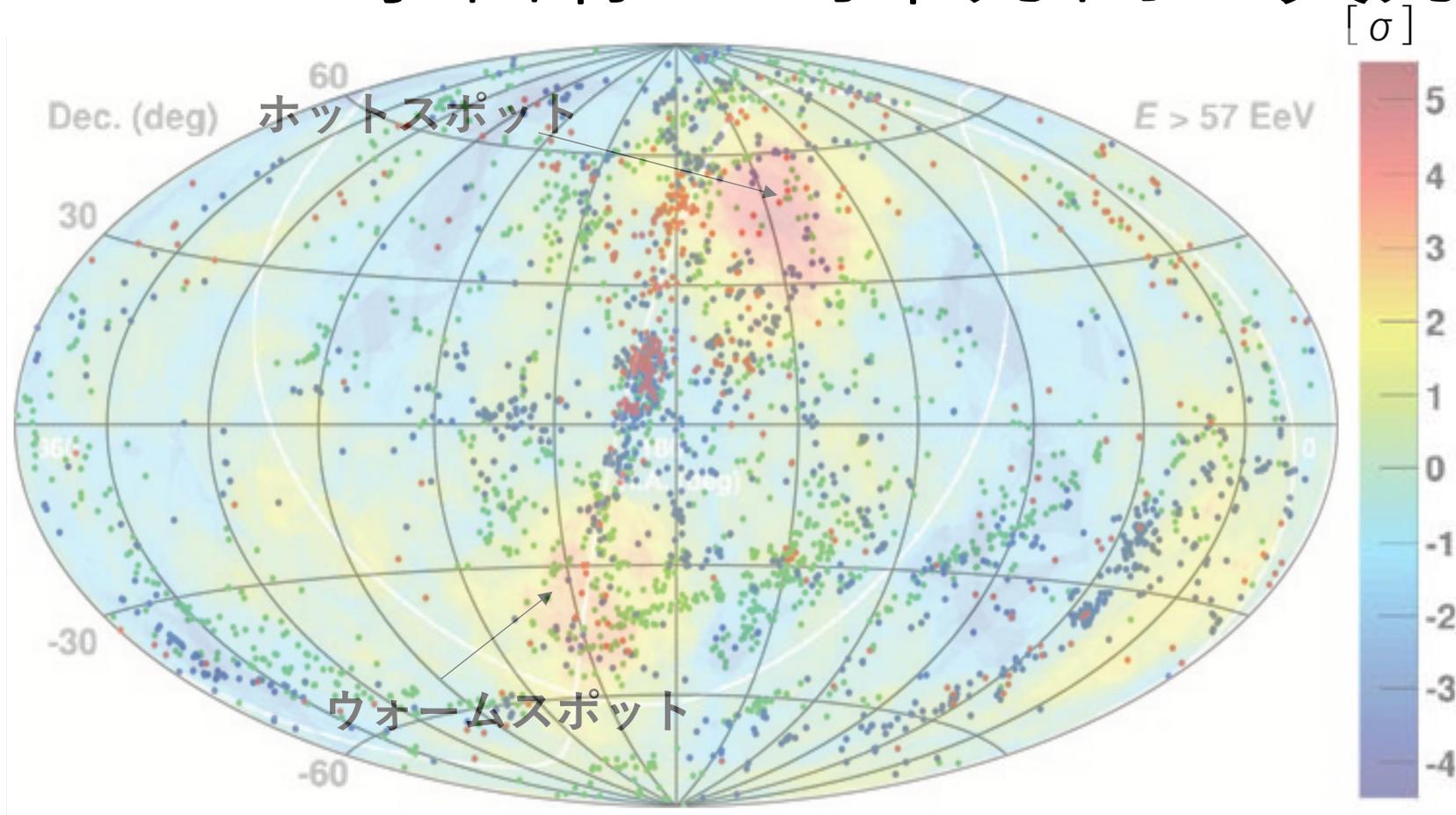
## • 到来方向の集中：

- ホットスポット (TA実験)

- +ペルセウス座・うお座超銀河団付近の密度超過(TA collaboration, 2021, arXiv: 2110.14827)

- ウォームスポット (Auger実験)

# 最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性

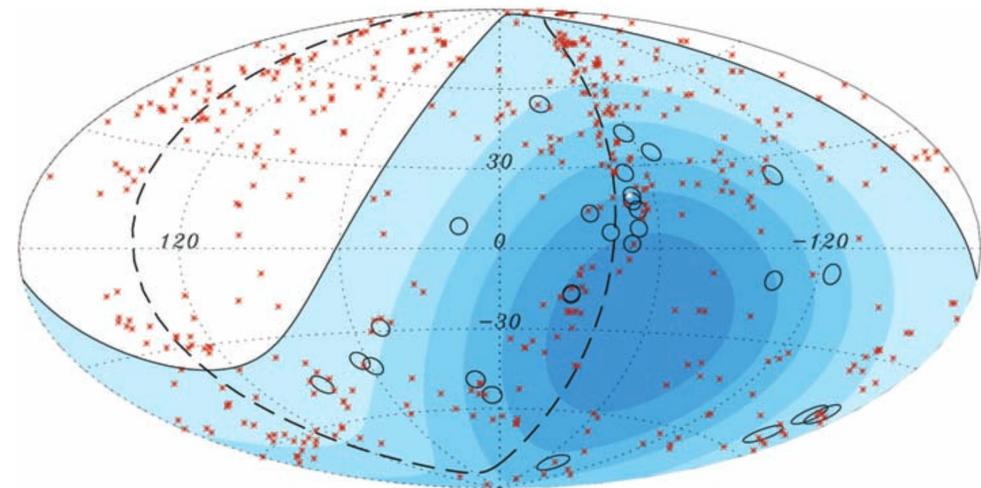


(Sokolsky&Thomson “Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics”)  
from K. Kawata

+2MASS catalog (Huchra et al. 2012, 199, 26)

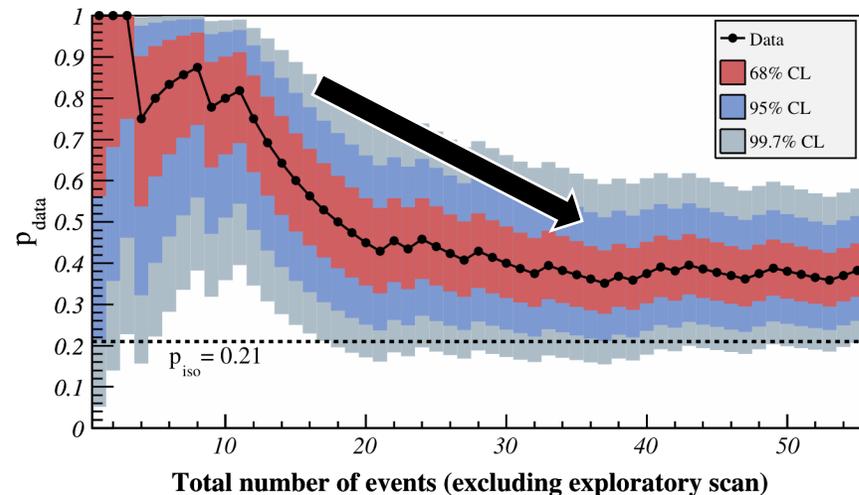
- 統一的な解釈の難しさ
  - なんとなく銀河面・超銀河面に乗ってる？
    - でもホットスポットはズレてる
  - おとめ座銀河団周りに密度超過なし

# これまでの異方性解析(AGN)



AGN (赤) と UHECR (黒丸) の相関を示唆?  
(Auger collaboration 2007, Science, 938-943)

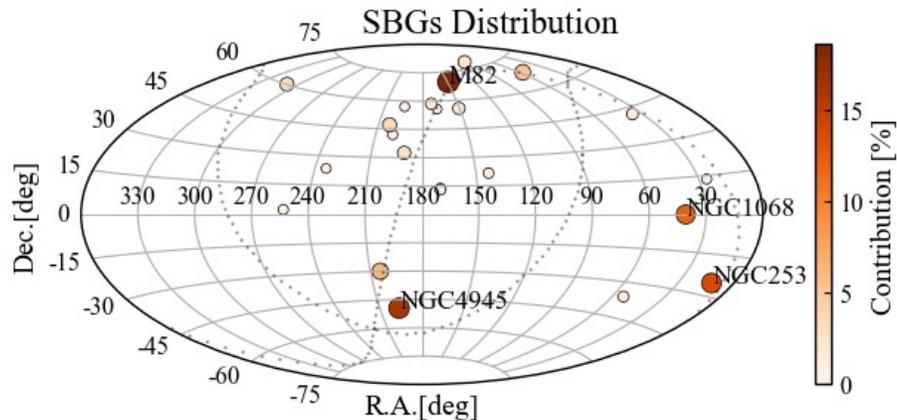
- 最高エネルギー宇宙線の分布と起源天体の分布の相関の探査：
  - 銀河系外起源+GZK限界
  - → ~数十Mpcスケールの近傍 (系外) 天体?
- 「到来方向と近傍系外天体の相関を取れば良いのでは？」 ← そうはいかない
- AGNとの相関の示唆 (Auger 2007)
  - → 統計の増大と共に有意性の減少 (Auger 2010)



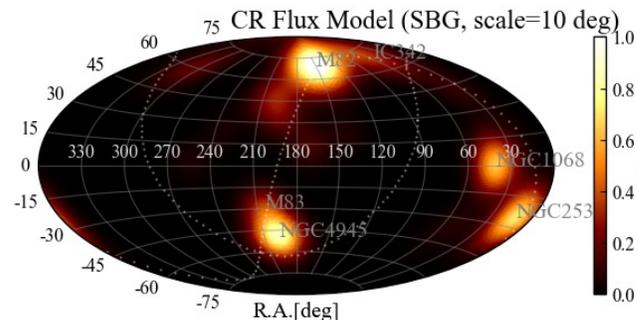
AGNとの相関の減少  
(Auger collaboration 2010, Astroparticle Physics, 314-326) 8

# これまでの異方性解析(SBG)

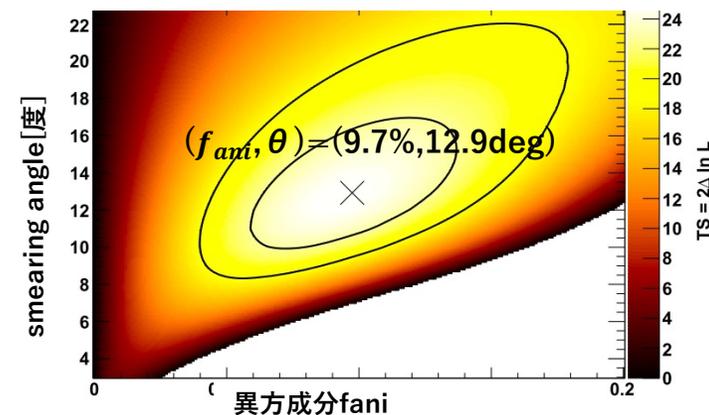
SBGモデルの起源天体分布と寄与  
(Aab et al. 2018, 赤道座標)



SBGによる宇宙線到来頻度モデル



南半球のパラメータ推定  
(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)

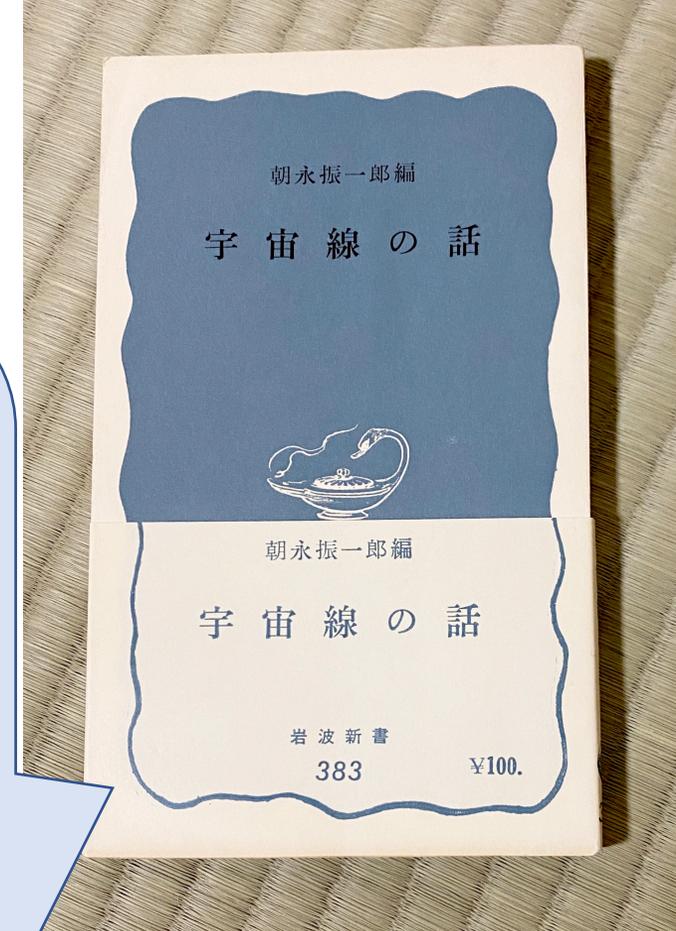


- 現在の有力候補：**スターバースト銀河(SBG)起源モデル**
  - カタログ (右上図) から宇宙線到来頻度モデルを仮定 (右中図)
    - 異方成分 $f_{ani}$  (起源天体の寄与)+等方バックグラウンド
    - smearing angle  $\theta$  : 同じ角度スケールで散乱
  - 南半球の宇宙線到来方向との相関の解析 (右下図)
    - 最も強い相関、 $(f_{ani}, \theta) = (9.7\%, 12.9\text{deg})$  (Auger 2018, TA 2018)
    - 一方でSBGモデルで説明できるUHECRは全体の**10%に満たない**

# 脱線：先人たちも悩んでいた…？

- 朝永振一郎編「宇宙線の話」岩波新書383, 1960年

「ちょっと昔話になるが、宇宙線が発見された頃、1910年代には、多くの人が宇宙線も天球の特別な方向からたくさんくるのではないかと予想していた。当時は宇宙線望遠鏡などという道具がなかったので、氷河の裂け目に測定器をもちこんで、目ぼしい星が真上を通る時に宇宙線がふえはしないかと、胸をわくわくさせながら待っていた。しかし期待はいつも裏切られてばかりいた。**各種の宇宙線望遠鏡（第6図）**が使われるようになってからも、**異方性の観測が何度か企てられた。**しかし観測された異方性はいつでも太陽によるものであって、宇宙全体として考えると、宇宙線の強度は一様になってしまう。銀河の中心方向に異方を見出したという報告があっても、その多くは統計的精度を上げるとともに異方性が消えてしまった。」



(発表者私物)

- 一世紀に渡り異方性観測と起源推定のトライ & エラーは続いている（らしい）
- => どうしてこうなるのか…？（次項）

Mass-composition?  
(Rigidity-spectrum)  
わからん?

Source?  
なんもわからん

Magnetic Fields?  
(GMF+EGMF)  
わからん?



event-by-event  
mass?  
わからん?



わからん

Earth



Observers



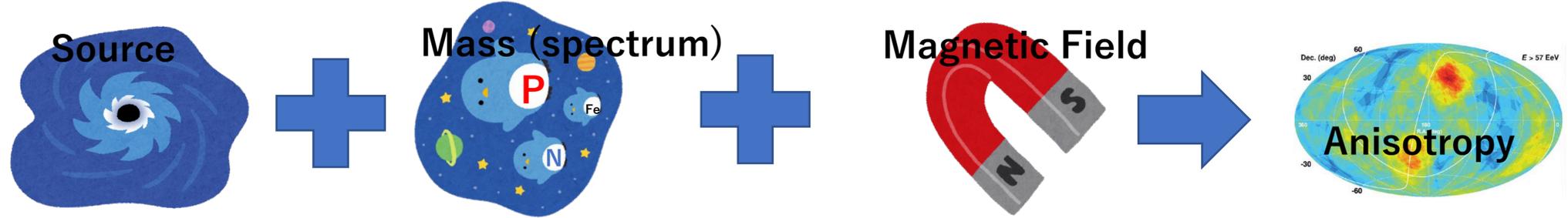
Origin of Cosmic Rays?

# UHECR異方性による制限

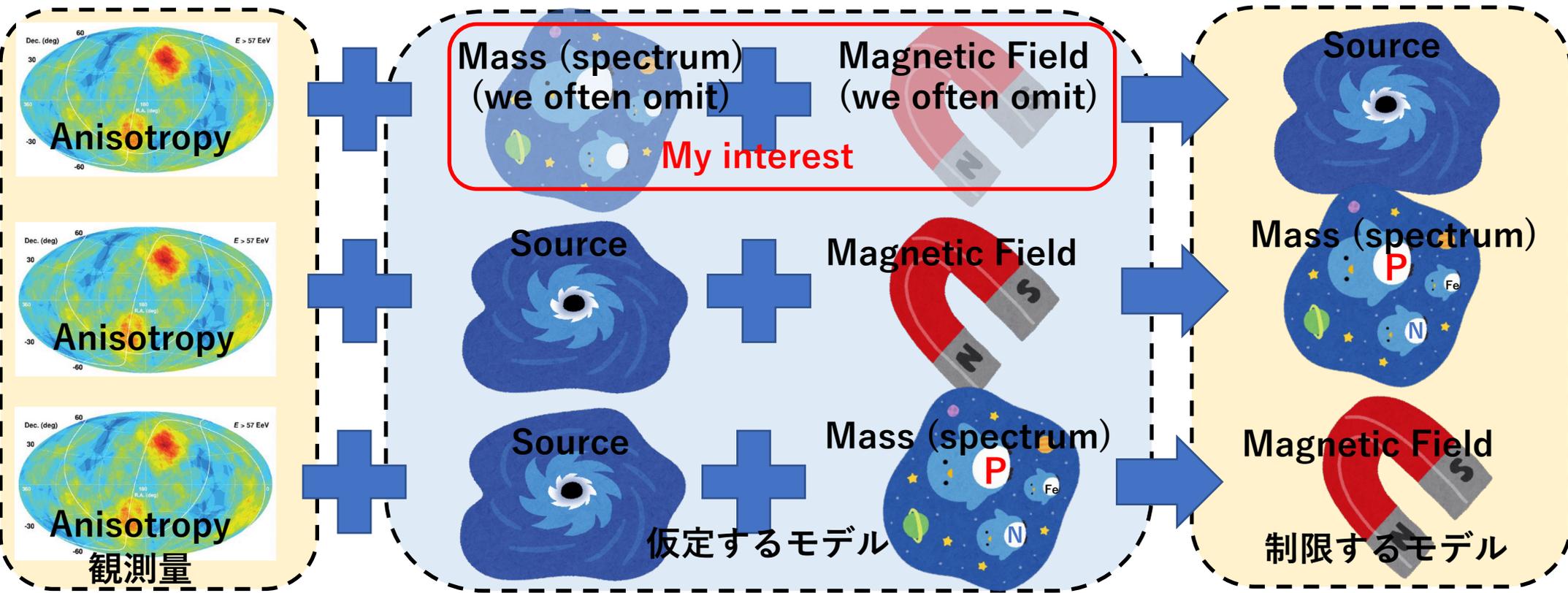
UHECR異方性 → 起源・組成・磁場の重ね合わせ

UHECRの起源・質量組成・磁場の統計的描像やモデルはある

(Ideal case)

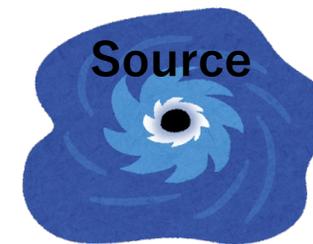
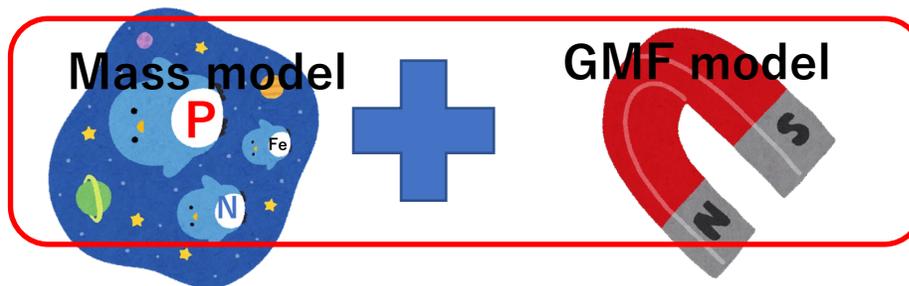
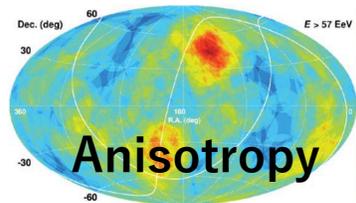


しかし3つのモデルは同時に解けない ⇒ 2つのモデルを固定し、1つを制限



# 本日の発表

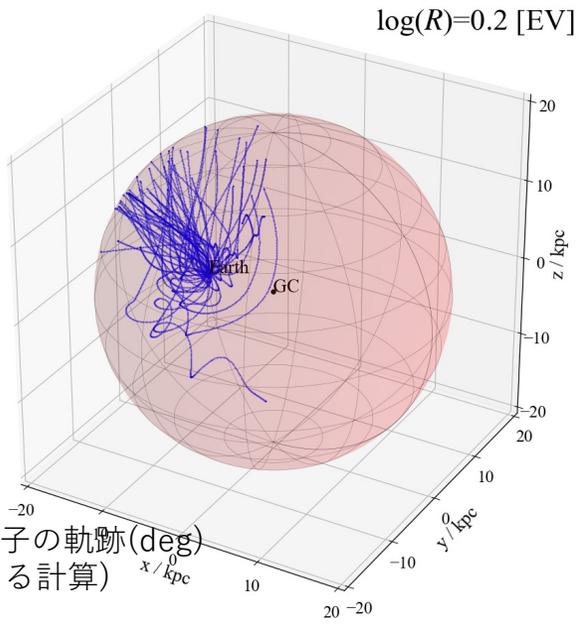
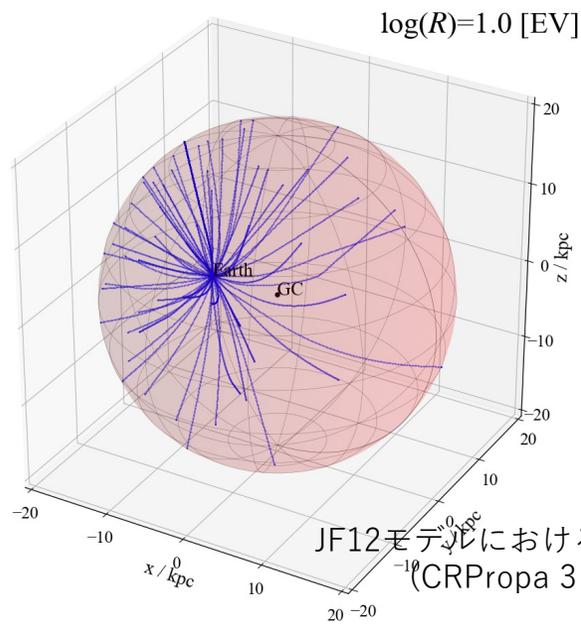
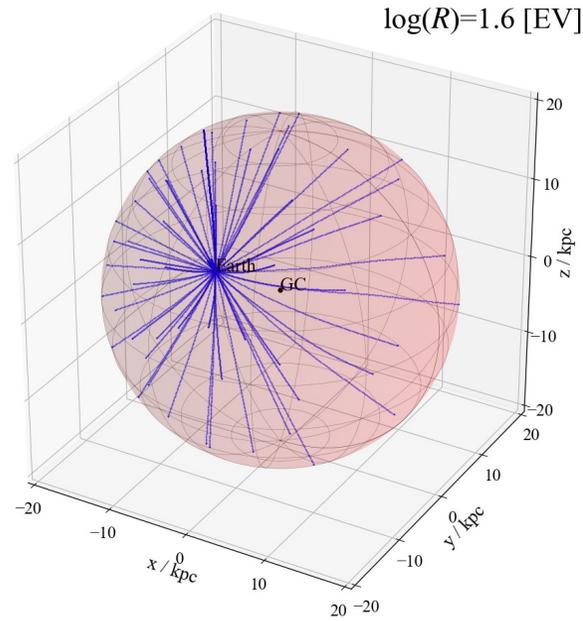
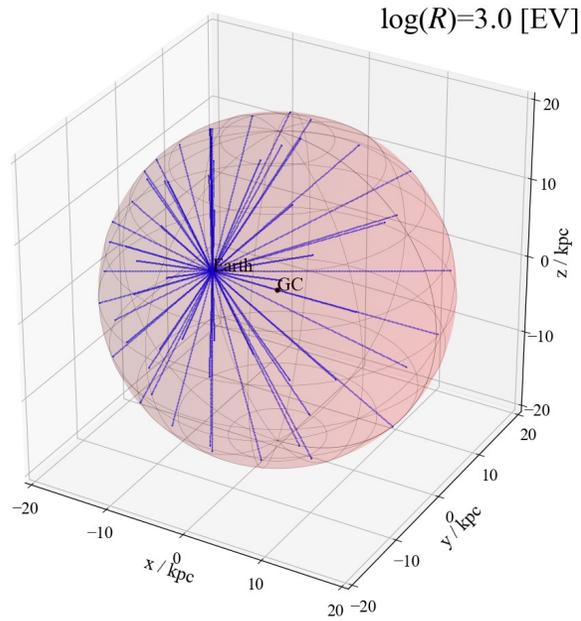
- いわゆる相関解析では、質量組成と磁場偏向が組み込まれていない（難しい）
- 磁場と質量組成を無視した相関が最も強いものが起源天体モデルとして示唆されてしまう



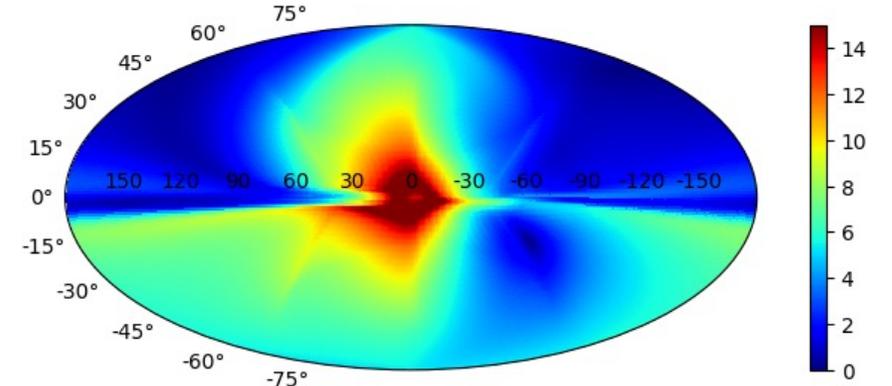
- 磁場モデルと質量組成モデルを仮定し、現在のSBG起源モデルの結果がどの程度変わりうるかを調べる
- SBG起源モデルは現在提唱されているもので固定・質量組成モデル・銀河磁場モデルは現時点で支持されるものを用いる。
  - 銀河磁場モデル：JF12(Jansson & Farrar 2012ab)定常成分
  - 質量組成：Heinze & Fedynitch 2019
- 観測データを模したMCデータセットを生成→同じ解析を行う。

# 銀河磁場による偏向(GMFバイアス)

JF12モデルにおける60EeV陽子の偏向角(deg)  
(Jansson & Farrar 2012, ApJ, 757, 14を元に作成・銀河座標)



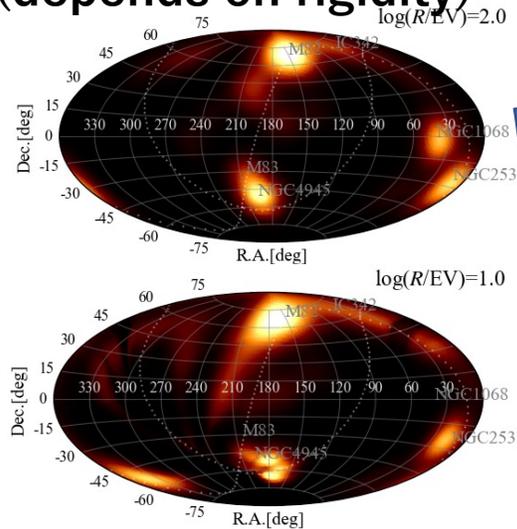
JF12モデルにおける陽子の軌跡(deg)  
(CRPropa 3による計算)



- いわゆる「最高エネルギー」でも銀河磁場の偏向は無視できない
  - 60EeV陽子：銀河中心で十数度
- **到来方向依存性：**
  - 定性的には銀河中心・銀河面での偏向が大きくなる
- **核種依存性：**
  - 偏向角はRigidity ( $R = E/Ze$ ) に依存
  - 同じエネルギーでも電荷Zに比例して偏向角は大きくなる

# 銀河磁場を考慮したMCデータセット

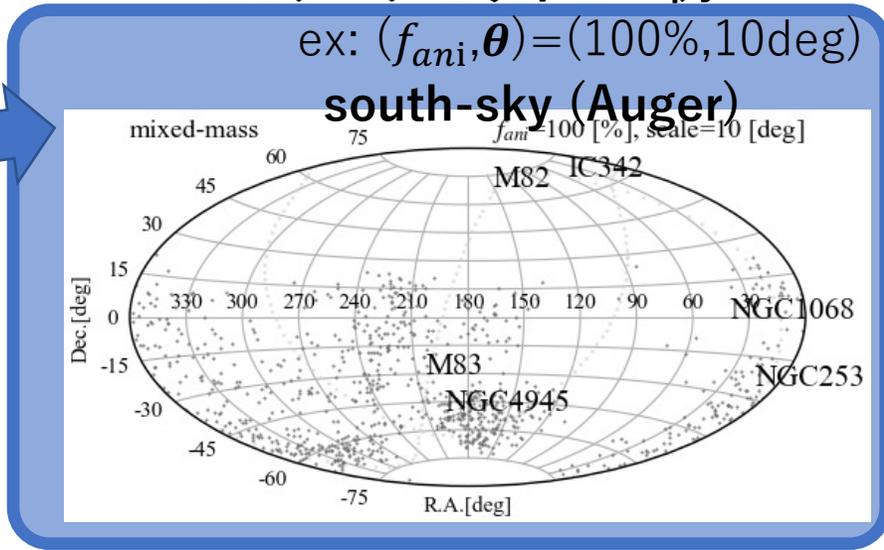
CR flux patterns with GMF  
(depends on rigidity)



MCデータセットの一例

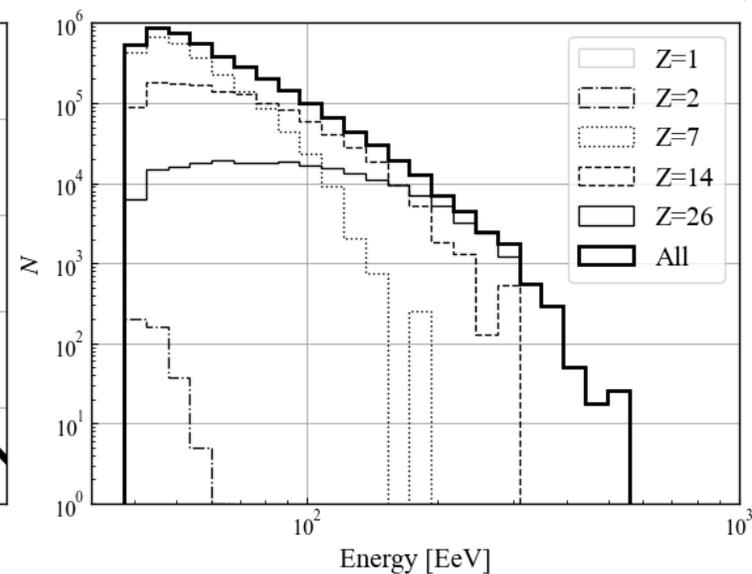
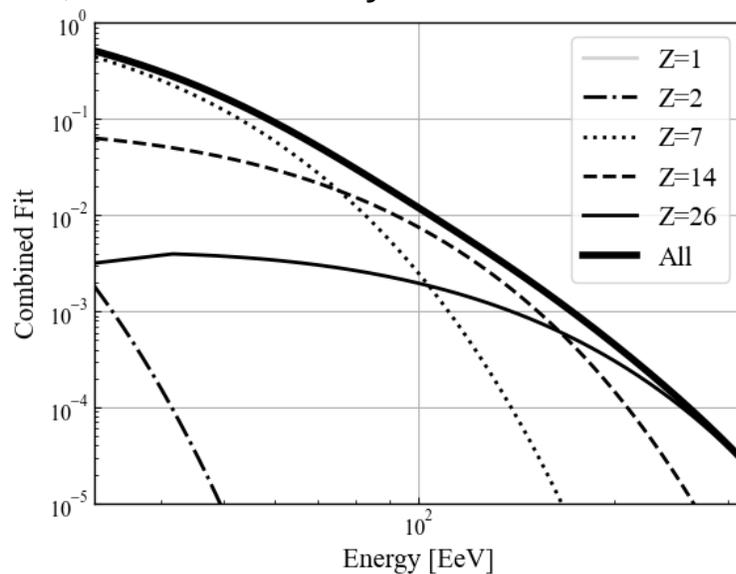
ex:  $(f_{ani}, \theta) = (100\%, 10\text{deg})$

south-sky (Auger)

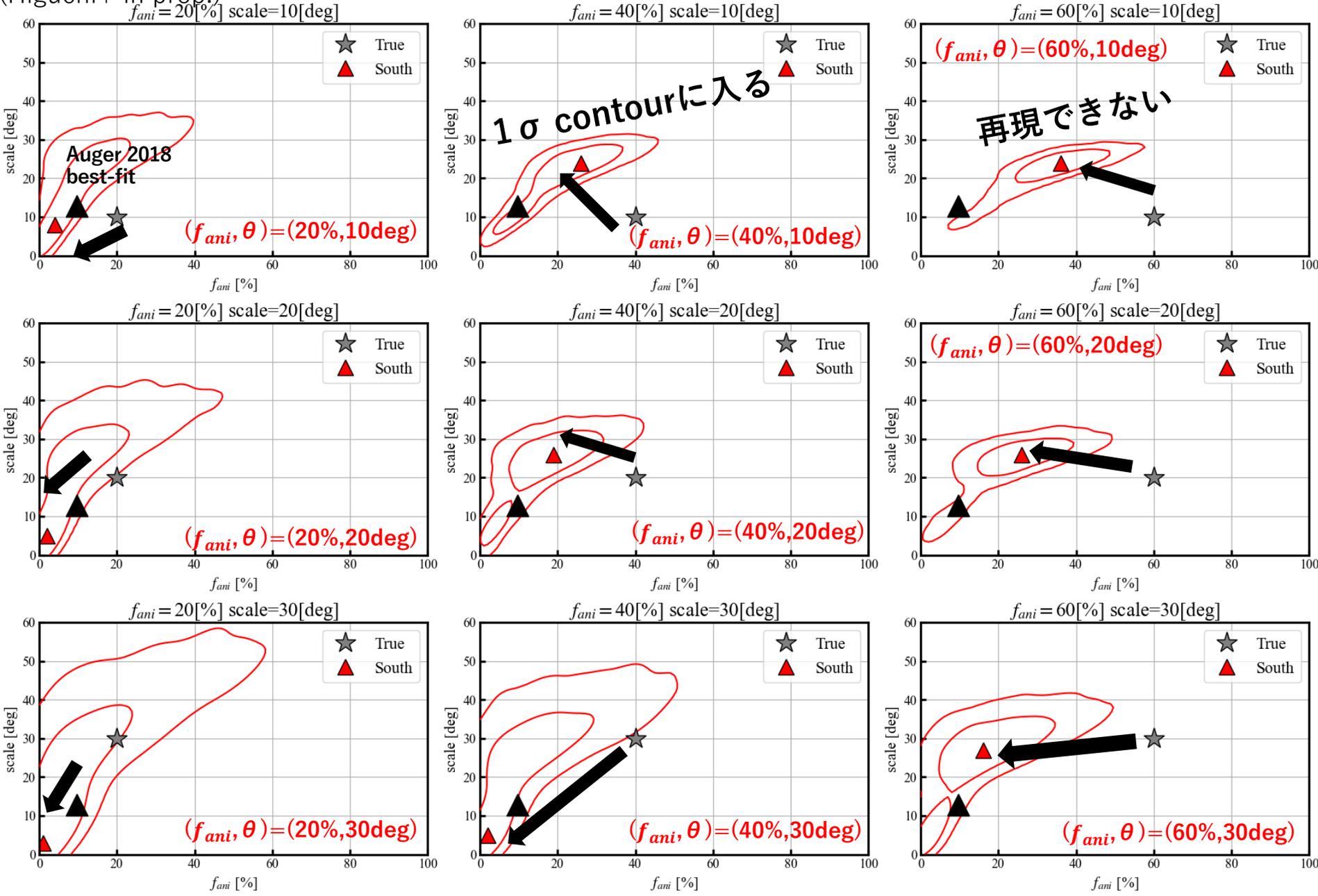


- 磁場の偏向を入れたフラックスパターンの計算(JF12モデル, CRPropa3)
- Augerのexposureを考慮し南天に894イベント×4000データセットを乱数生成
- エネルギースペクトルと質量組成：Heinze & Fedynitch 2019のmixed-mass compositionを仮定
- =>ベストフィットの分布を調べる (次)

(Heinze & Fedynitch 2019 の質量ごとスペクトル・ヒストグラム)



(Higuchi+ in prep.)

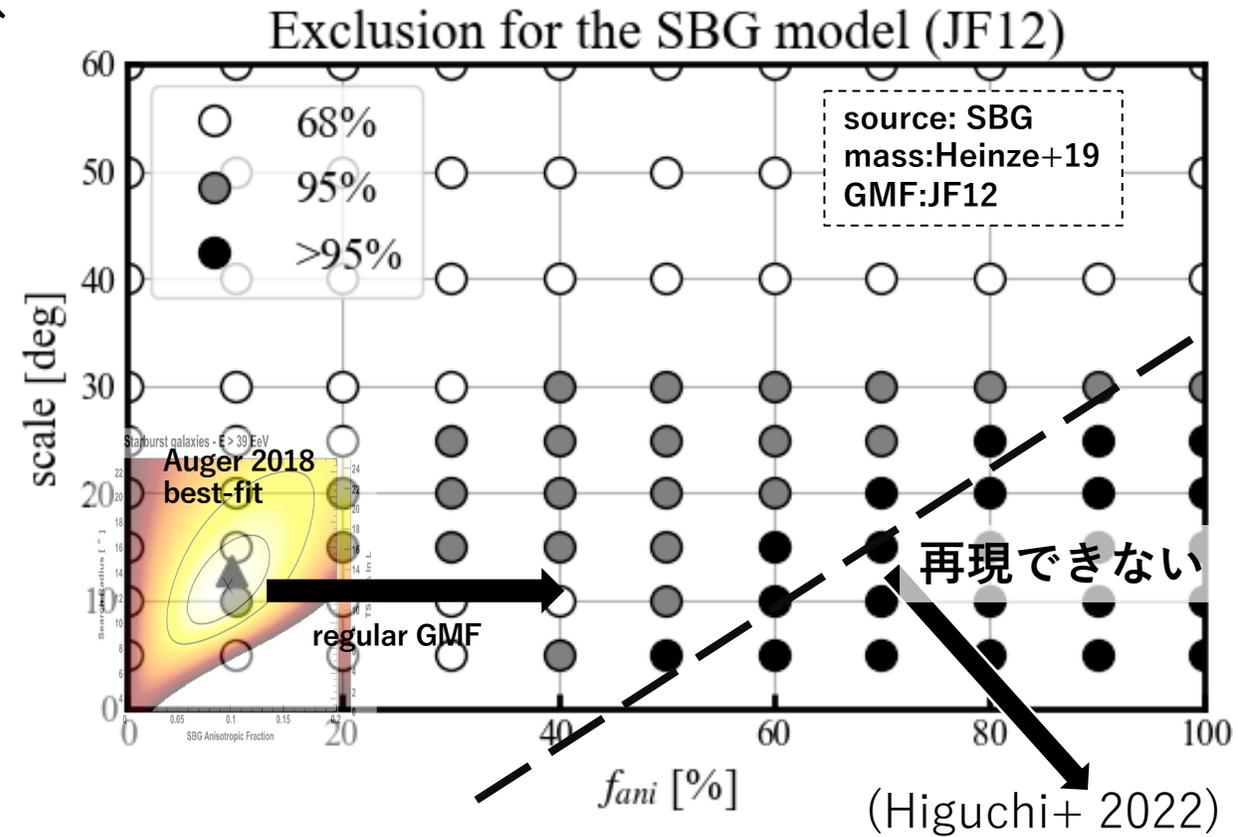


- 南天894 イベント × 4000 データセットを生成
- 南半球ではSBGのUHECRへの寄与は低く見積もられてしまう (より等方になる)
- 観測からのベストフィット  
 $(f_{ani}, \theta) = (9.7\%, 12.9\text{deg})$  を  $1\sigma/2\sigma$  で再現するパラメータを探す

# Auger 2018

## ベストフィット再現

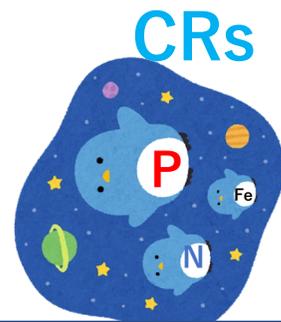
- Auger 2018のベストフィットを再現できる領域
- SBG起源モデル+銀河磁場の定常成分で説明できる範囲は右図の通り
  - $\theta$  が小さい範囲ではUHECRの40%までは説明できる
- →残りの成分は？
  - 銀河磁場のランダム成分？
  - 銀河系外磁場？
    - →どちらも $\theta$ で仮定されている
- 以下の2モデルを仮定:
  - 質量組成: Heinze & Fedynitch 2019
  - 銀河磁場: JF12
- そもそもSBG起源モデル自体が磁場のバイアスを無視して作られている→要検証



# まとめと今後

- 最高エネルギー宇宙線の起源の特定のためには、観測された異方性から銀河磁場モデル・質量組成モデルを一緒に解く必要がある
  - →わかるところから一つずつクリアに
- 銀河磁場の定常成分の偏向を考慮すると、SBGの寄与は南天観測の推定結果よりずっと大きいかもしれない
- 銀河磁場のランダム成分・銀河系外磁場の寄与の評価が課題
- 統計の課題：
  - さらに（磁場の影響が少ないはずの）高エネルギーの北天・南天100EeV以上では有意な異方性は確認されていない…？
  - →そもそもUHECRの等方成分って？（現在の課題）

何よりも観測の継続・拡張が重要：  
・ イベント数の増加 (TAX4/AugerPrime)  
・ イベント毎の核種の推定



質量組成・磁場モデルのアップデート



# わからん

Earth



Observers

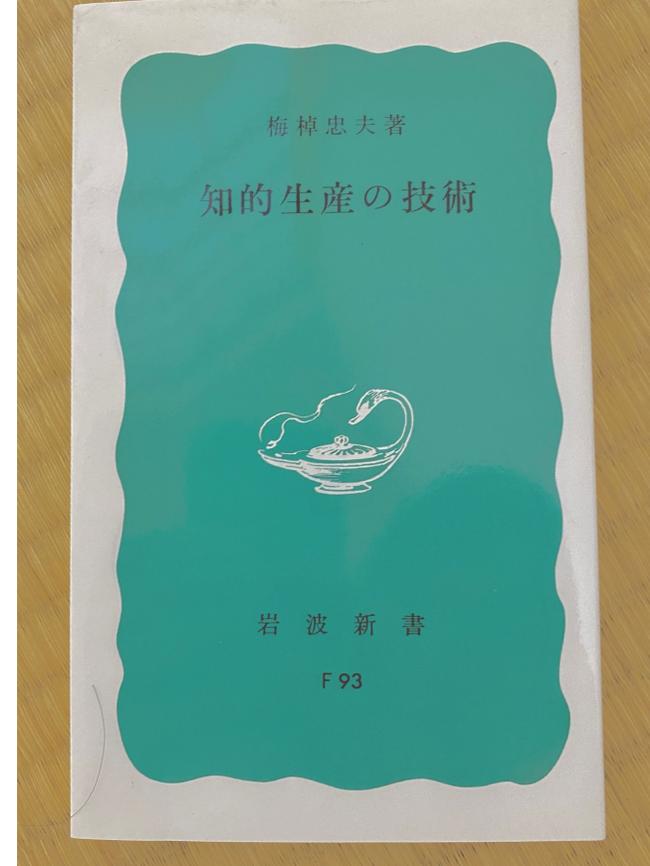
(個人の気持ち)  
観測された宇宙線の描像を大規模構造形成・星形成史の文脈から統合的な解釈ができないだろうか？

# 最後に脱線

- 梅棹忠夫「知的生産の技術」岩波新書F93, 1969年

「発見」というものは、たいていまったく突然にやってくるものである。まいにちみなれていた平凡な事物が、そのときには、ふいにあたらしい意味をもって、わたしたちのまえにあらわれてくるのである。

**たとえば宇宙線のような、天体のどこかからふりそそいでくる目に見えない粒子の一つが、わたしにあたって、脳を貫通すると、そのとき一つの「発見」が生まれるのだ、というふうに、わたしは感じている。**



(発表者私物)



かっこいいので一度は使ってみたいです<sup>19</sup>