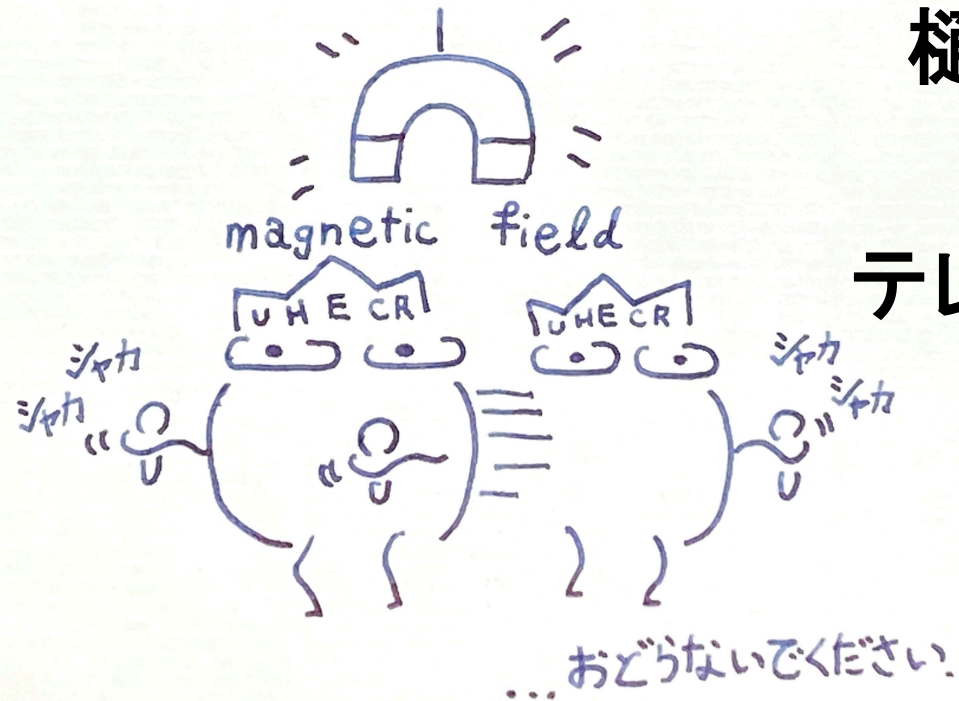
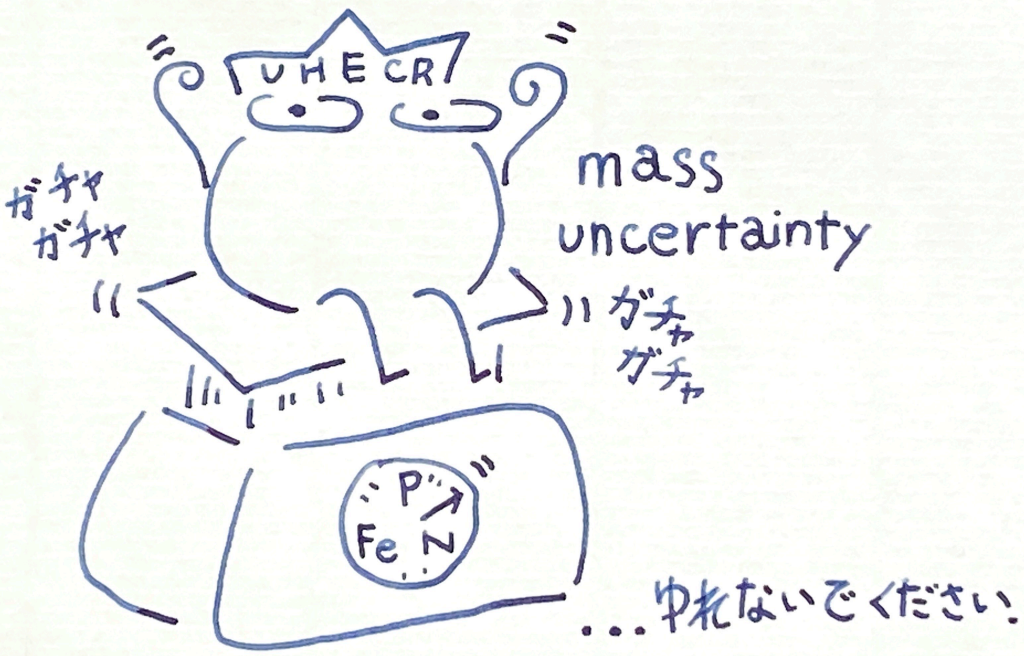


# UHECRの 最近の観測結果2: 到来方向と現象論



樋口 諒 (Ryo Higuchi)  
理化学研究所  
テレスコープアレイ実験

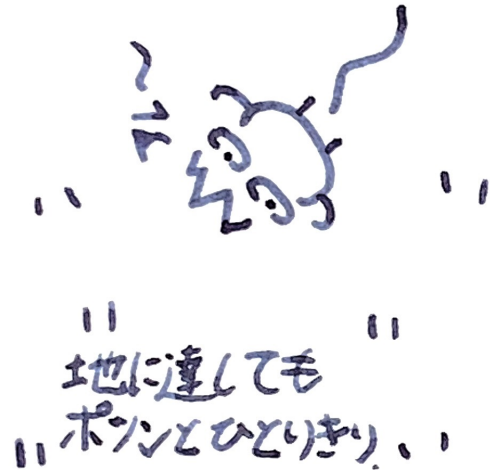


# 到来方向から何がどこまでわかってきたか？ 何がわかっていないか？

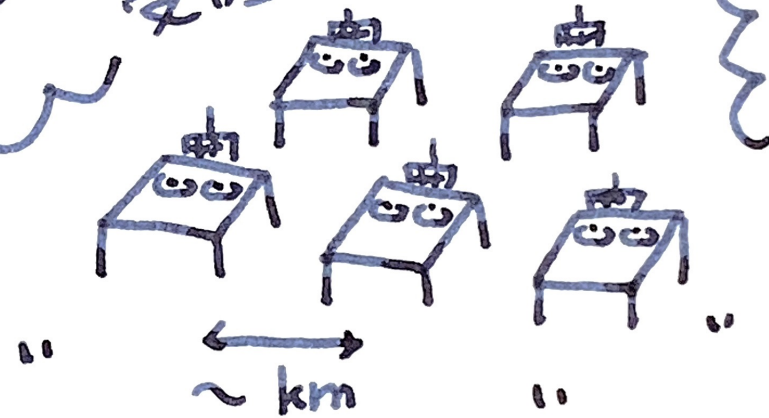
- レビュー講演者としての模範？ 回答（本レビュー前半）
  - TA/Auger実験の成果により、大角度異方性・中角度異方性が見つかっています。
  - 大角度異方性の解析などから、UHECRの起源は銀河系外だと考えられます。
  - 中角度スケールでもTAのホットスポット・Auger実験のウォームスポットといった領域が見つかっており、特にスターバースト銀河と $4.5\sigma$ の強い相関を示しています。
- 個人としての回答：
  - これを本当に信じていいのかについては、まだ誰も確信を持ってない
    - ※だから我々はここにいます
  - 「相関が強い＝因果関係がある」ではない
  - 本レビュー後半では「何が抜け落ちているのか」を中心に話をしていく<sup>2</sup>

# TA/Auger実験による到来方向観測

そう、UHECRの到来頻度は  
1イベント/100km<sup>2</sup>・年



オたちで  
受け止めるぜ!!





# 中角度異方性探査の手法

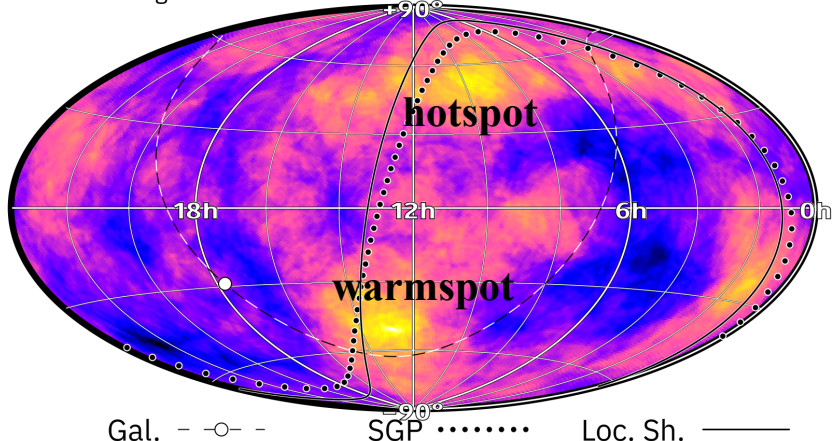
## 密度超過サーチ(blind search):

- エネルギー閾値・探査角度をパラメータにして到来方向の集中(数密度超過)を探す。
- Li-Ma significanceの計算(等方分布に比べてどの程度集中しているか?)
- TAホットスポット・Augerウォームスポットの発見

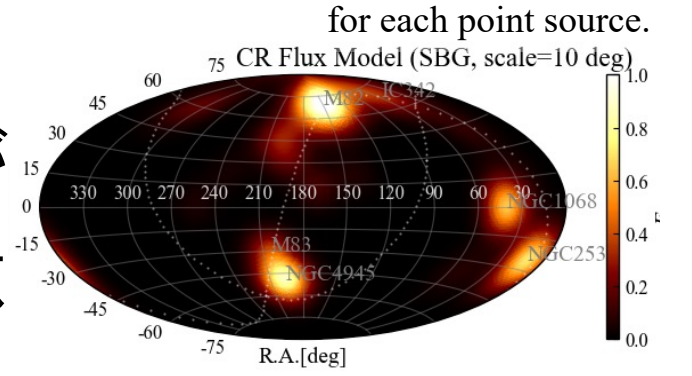
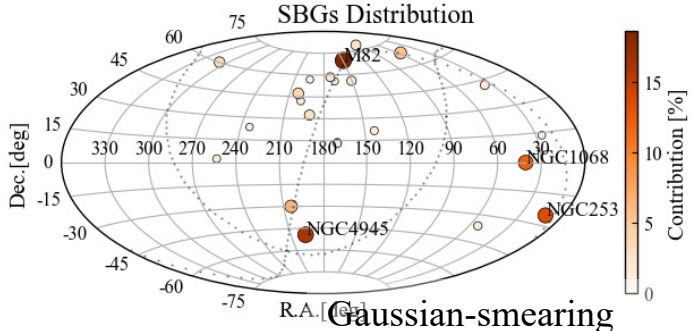
## 起源天体カタログとのlikelihood解析:

- 起源天体候補カタログ(SBGやAGNなど)から天体起源のモデルによる宇宙線のフラックス分布を予言
- 観測データの到来方向分布を説明する最もらしいパラメータの推定
- 近傍スターバースト銀河(SBG)が最も相関が良い?(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)→ここ最近では最も良く言及される起源天体候補

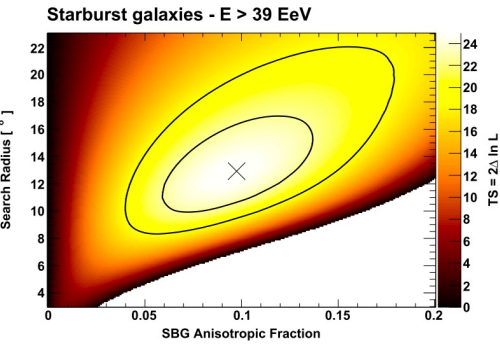
(Auger and TA Anisotropy WG, arXiv:2001.01864)  
 $E_{Auger} \geq 40 \text{ EeV}$ ,  $E_{TA} \geq 53.2 \text{ EeV}$ ;  $20^\circ$  smearing



Nearby starburst galaxies (SBGs) model



Auger実験のUHECRイベントの~10%はSBGで説明できる?

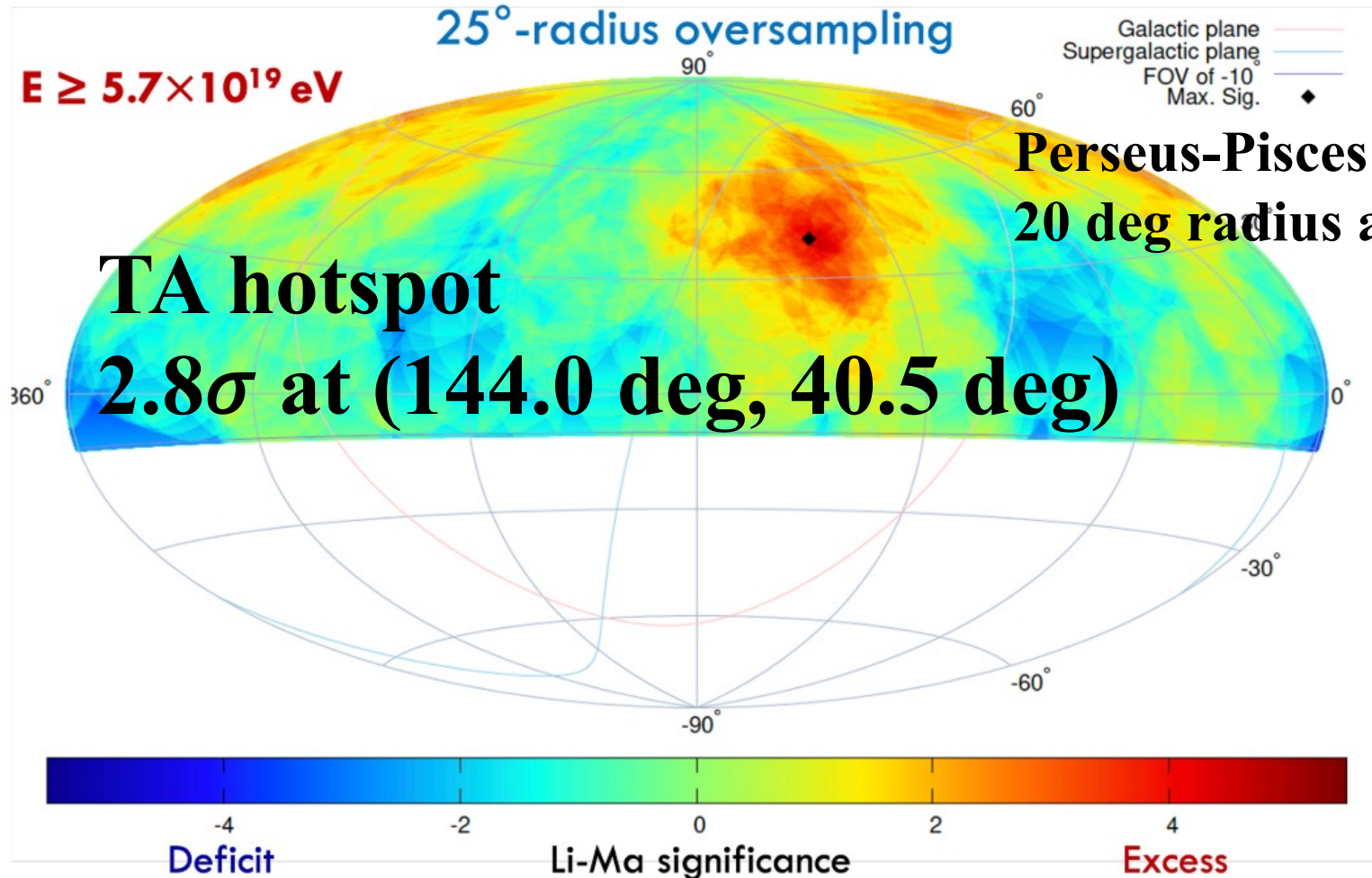


(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)



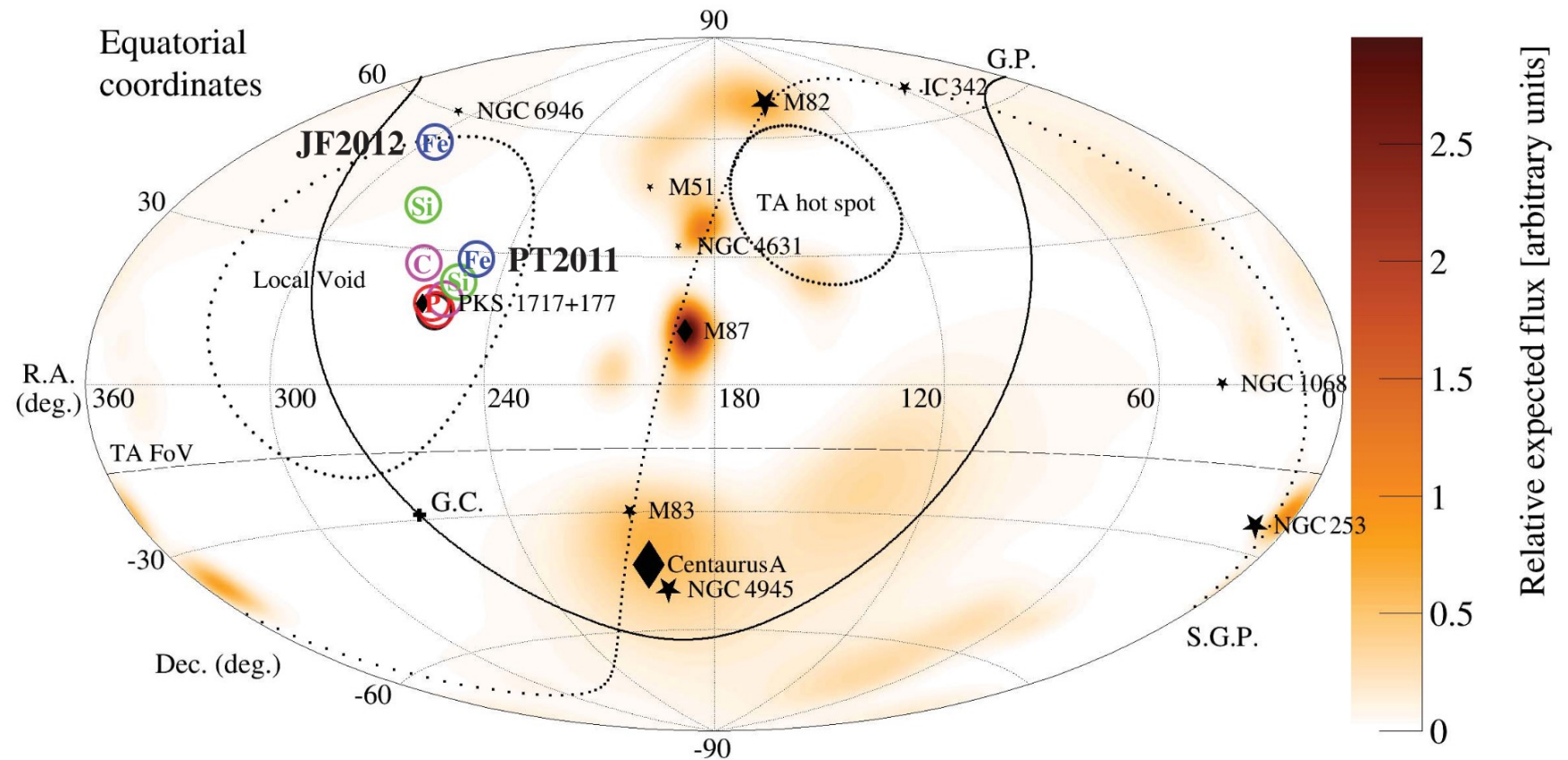
# UHECRの到来方向：観測の現状(TA)

- ICRC 2023年のTA highlight talkより



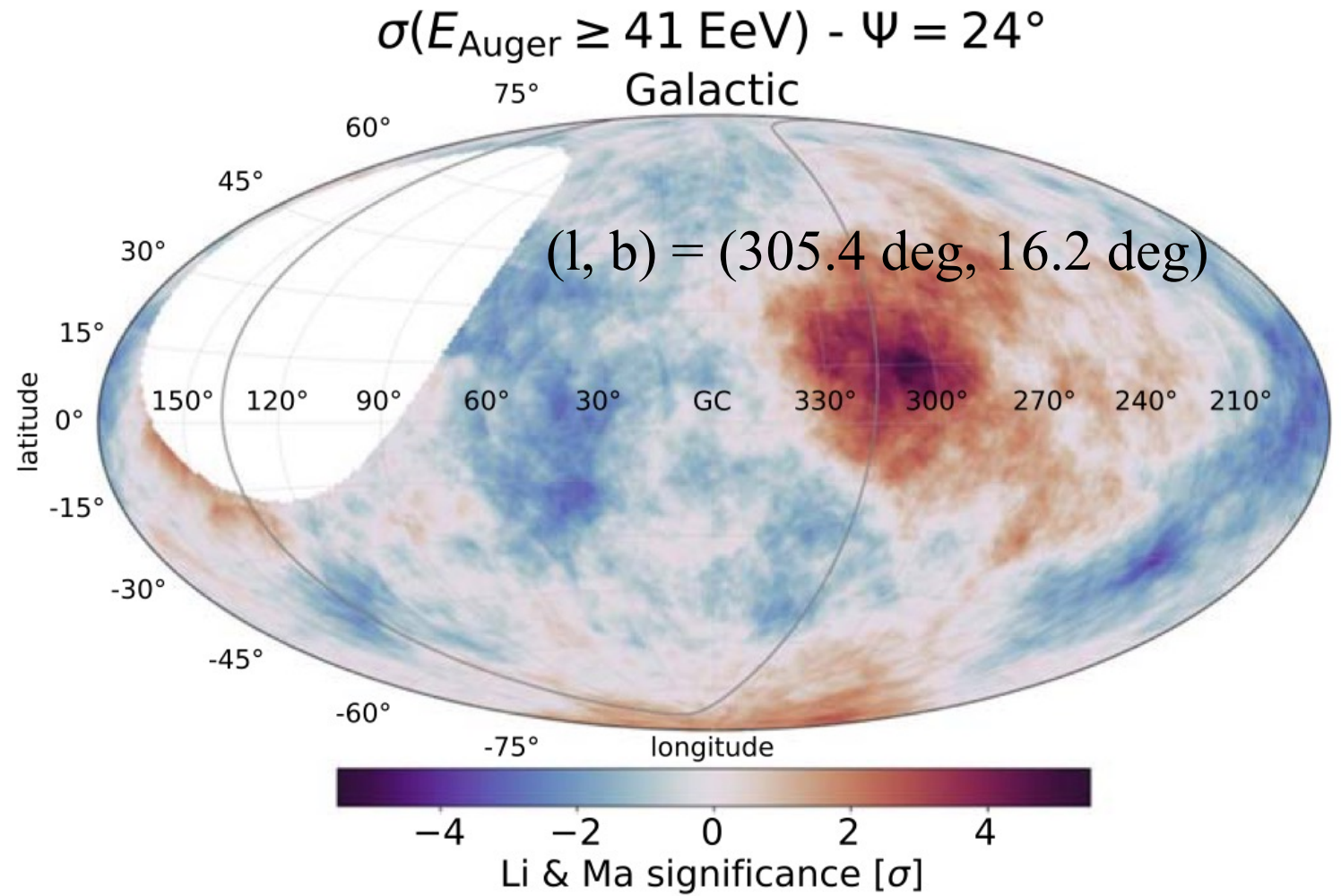
# TA史上最高エネルギー「アマテラス粒子」

- 2021年5月27日、  
244EeVの宇宙線の検出
  - SDアレイによる検出
- 核種判別の課題
- 磁場の不定性の評価
  - Unger & Farrar 2024



# Auger Phase Oneの公開

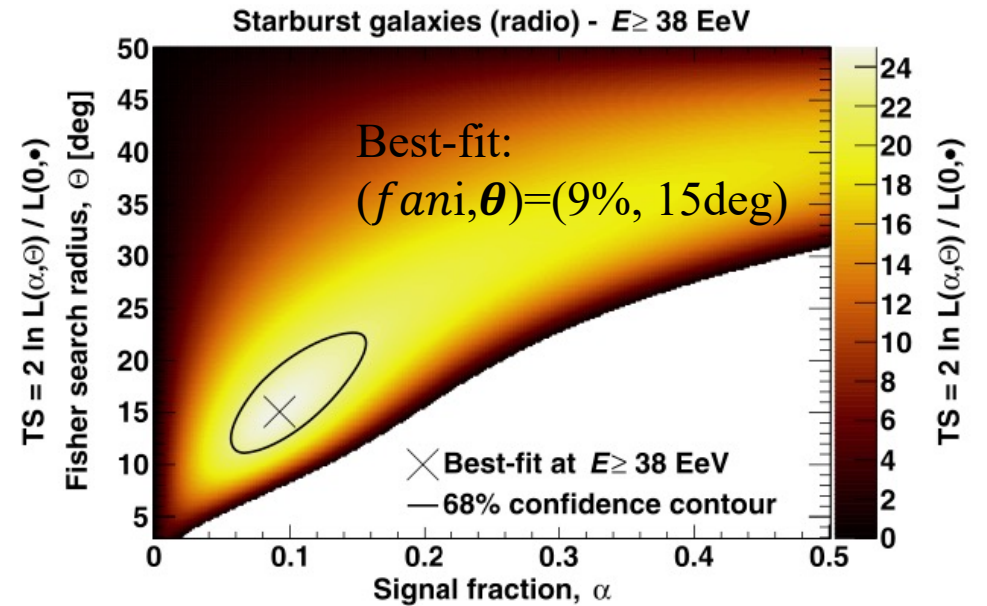
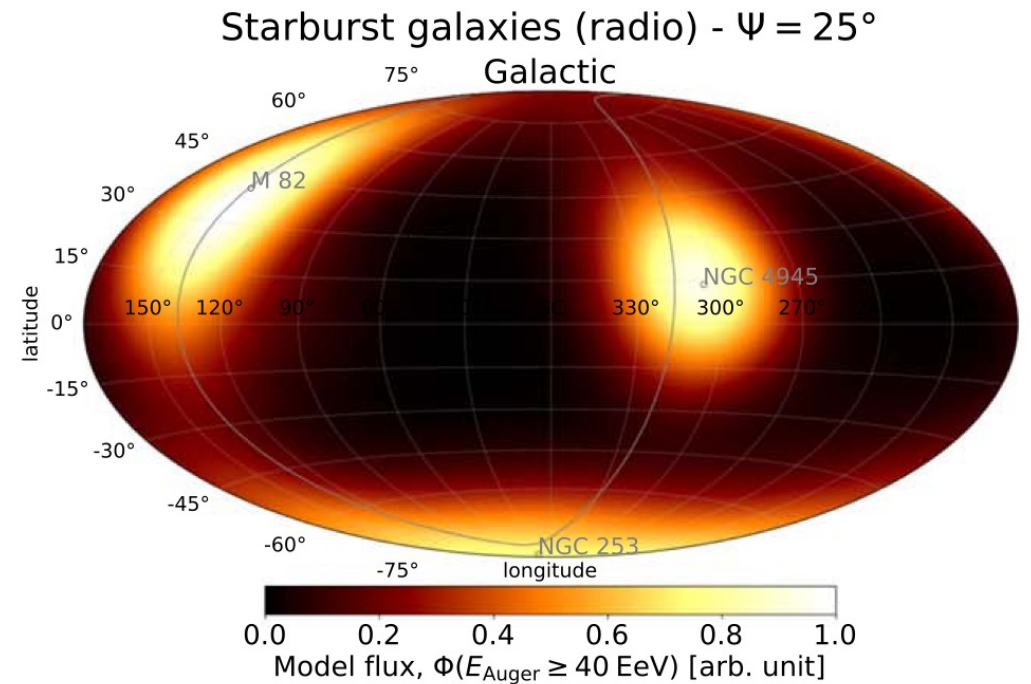
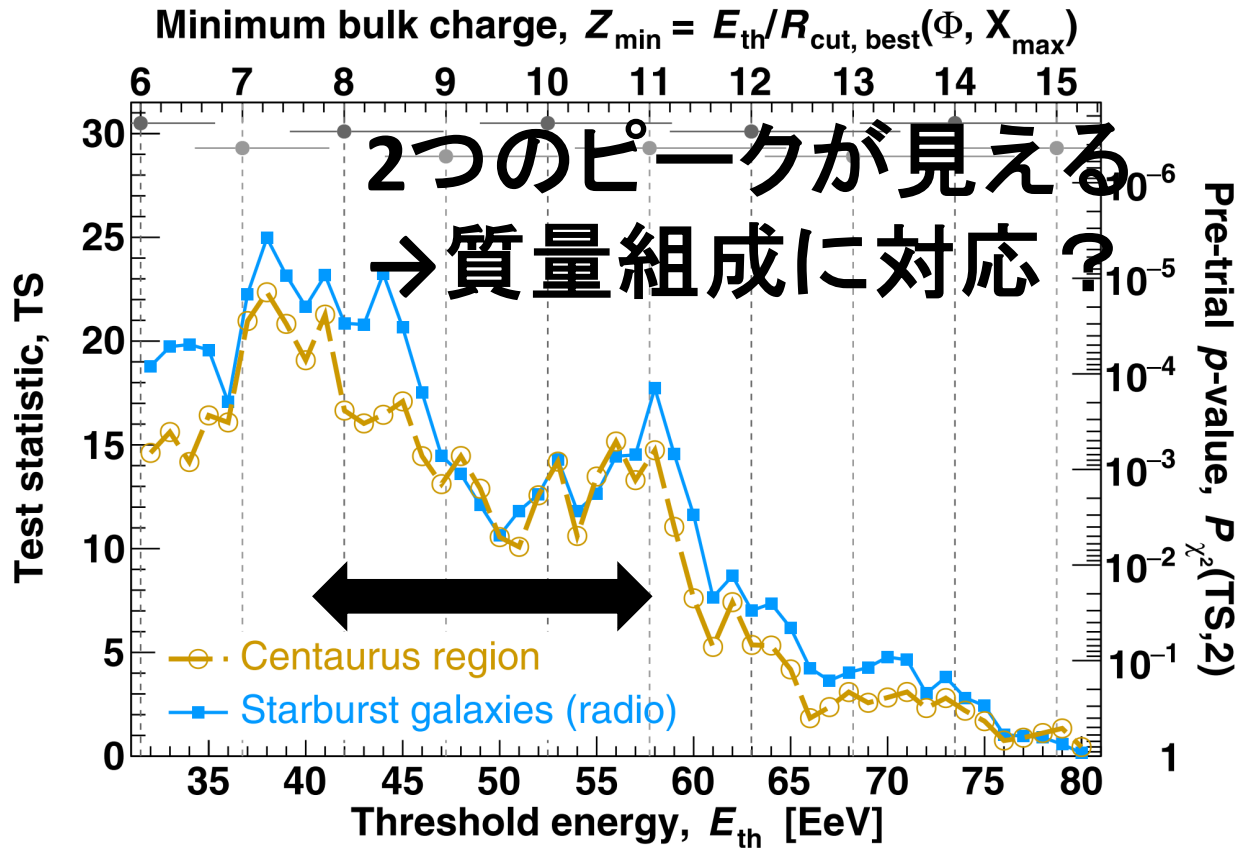
- Auger Phase Oneデータセット:  
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac7d4e>
- Auger実験の17年分の観測データ・解析コードの公開
  - 是非覗いてみてください！





# Maximum Likelihood解析

- Auger Phase Oneの報告
  - nearby 44 SBGs × Auger UHECR events
  - best-fit:  $(E_{th}, f_{ani}, \theta) = (38 \text{ EeV}, 9\%, 15 \text{ deg})$



# 現象論からのアプローチ



(credit:いらすとや)

Mass-composition on source?  
(Rigidity-spectrum)

Source ?  
(steady?/transient?)

Magnetic Fields?  
(GMF+EGMF)

Energy loss?

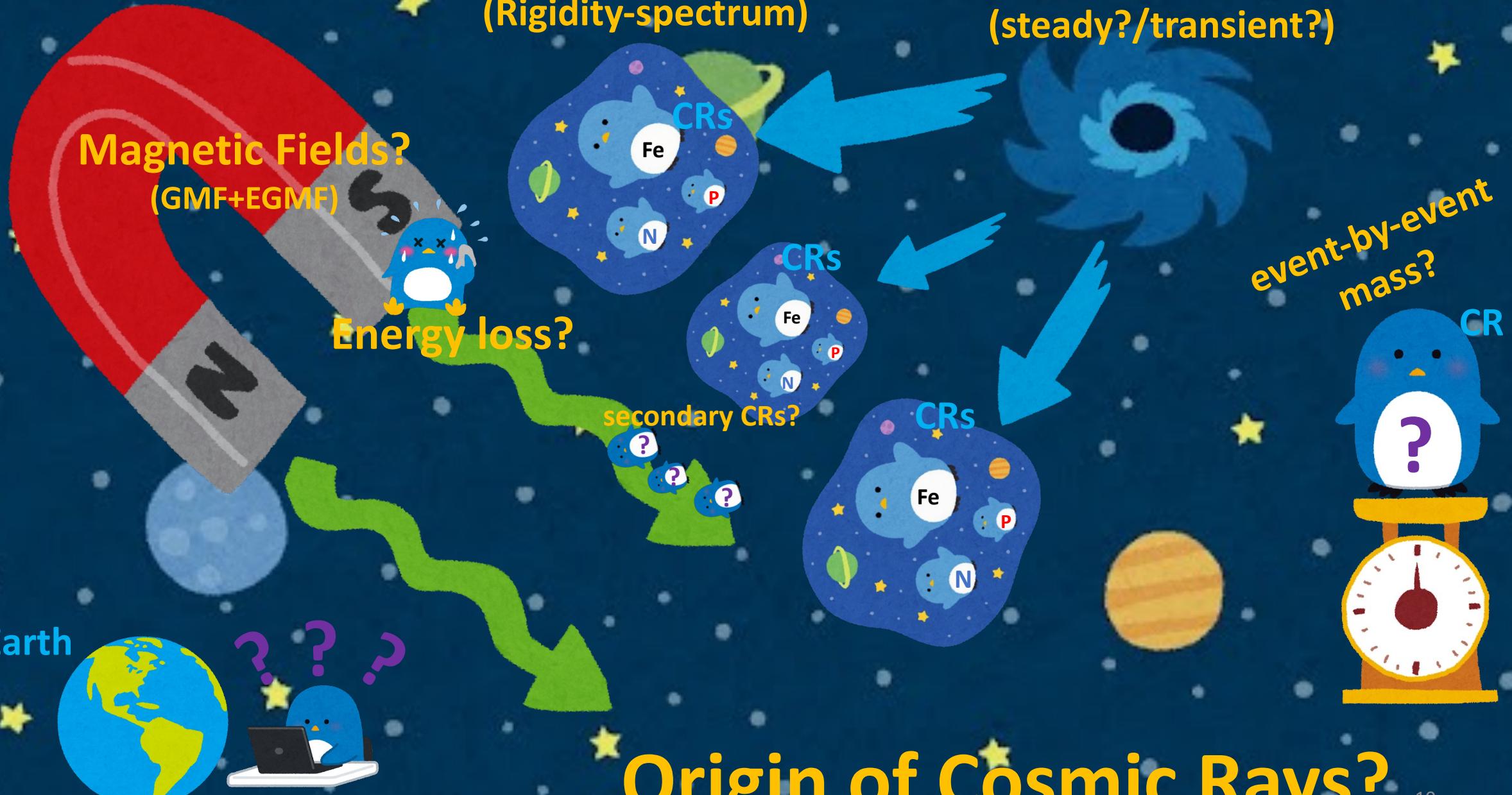
secondary CRs?

event-by-event  
mass?

Earth

Observers

Origin of Cosmic Rays?





Mass-composition on source?  
(Rigidity-spectrum)

Source ?  
(steady?/transient?)

## UHECRの現象論とは？

→起源天体 (種族・分布・寄与など)

→(起源天体での)質量組成・エネルギースペクトル

→磁場 (GMF/EGMF)

をモデルにして最適化する！

しかもこれを全部地球での観測量で制限しなければならない！

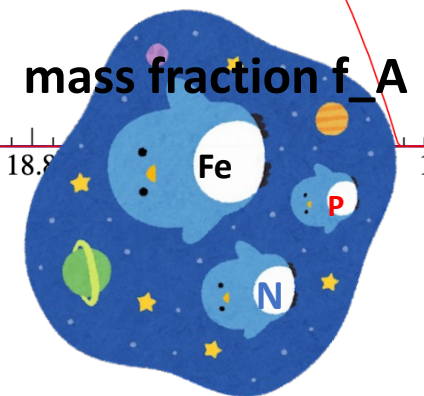
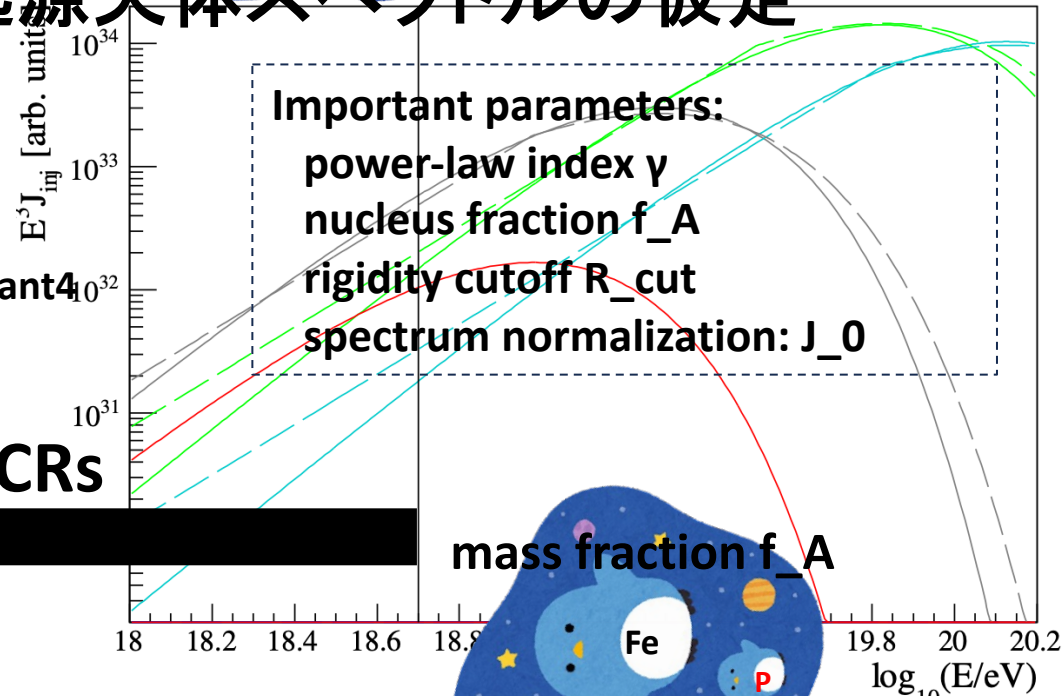


Observers

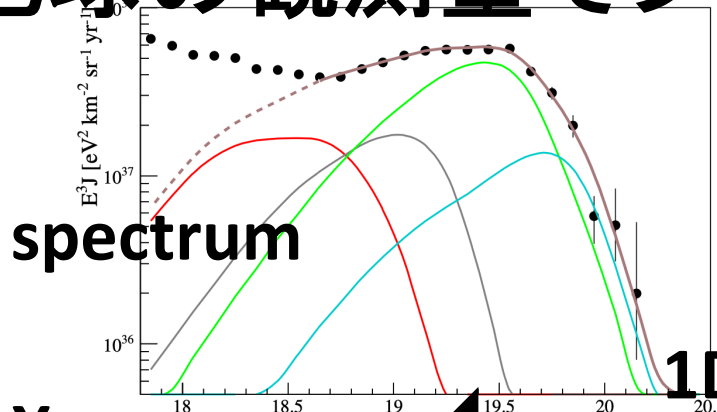
# Origin of Cosmic Rays?



# 起源天体スペクトルの仮定

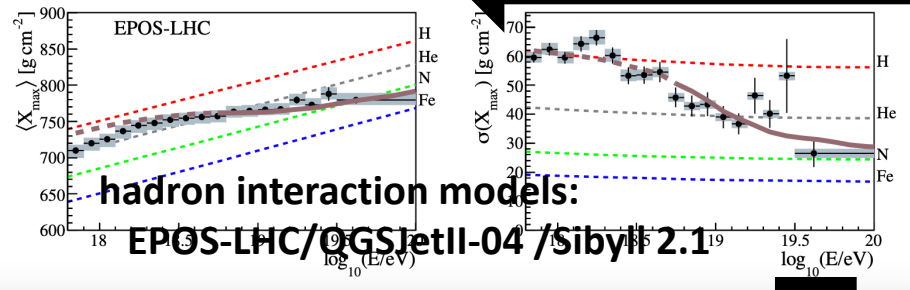


# “combined-fit”とは 地球の観測量でフィット



spectrum

Xmax



Models:  
MC: SimProp/CRPropa  
photodisintegration: TALYS/PSB/Geant4



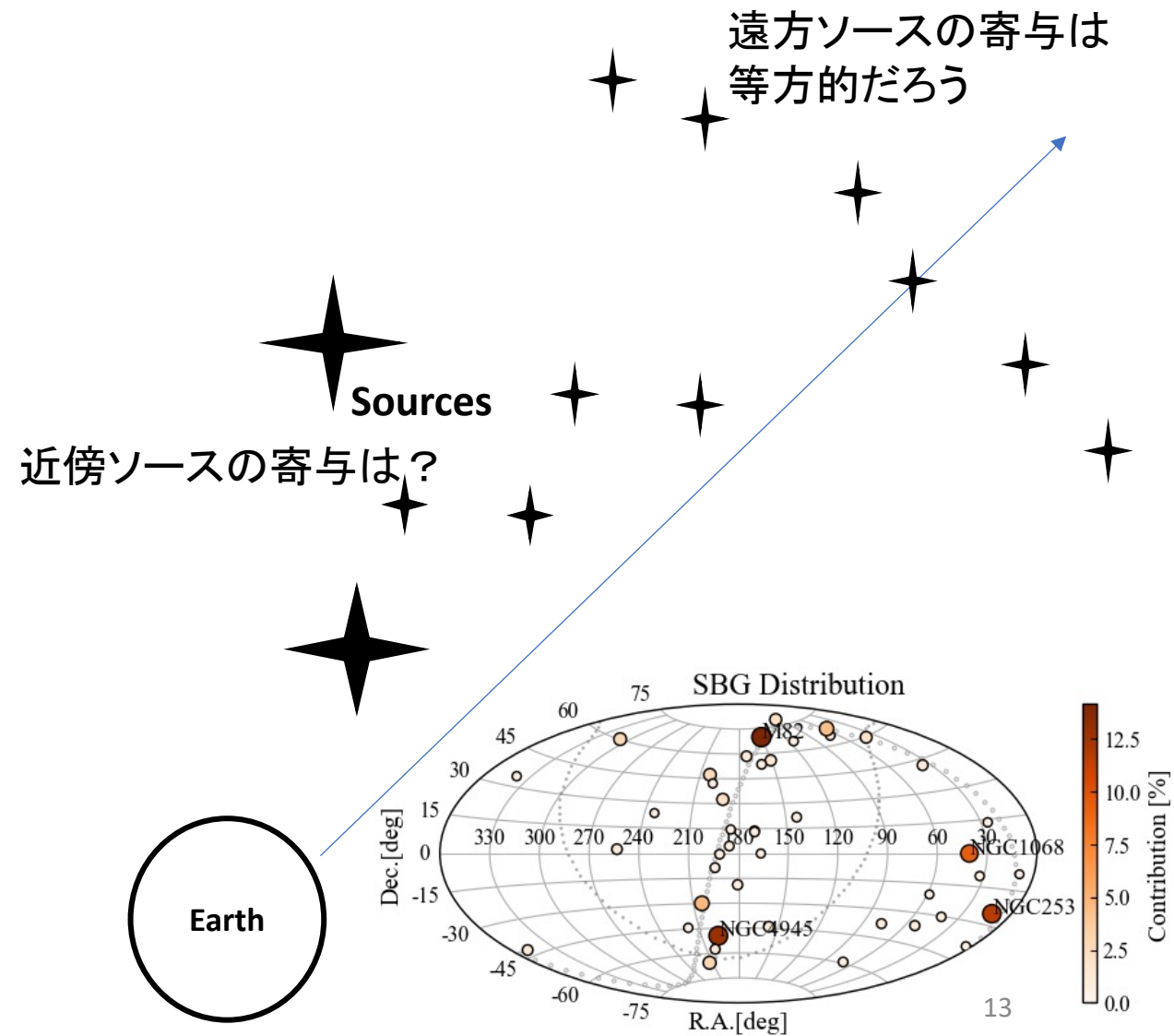
1D propagation of UHECRs



スペクトルパラメータの制限:  
(J\_0, gamma, R\_cut, f\_A)

# Auger Combined-fitの改良

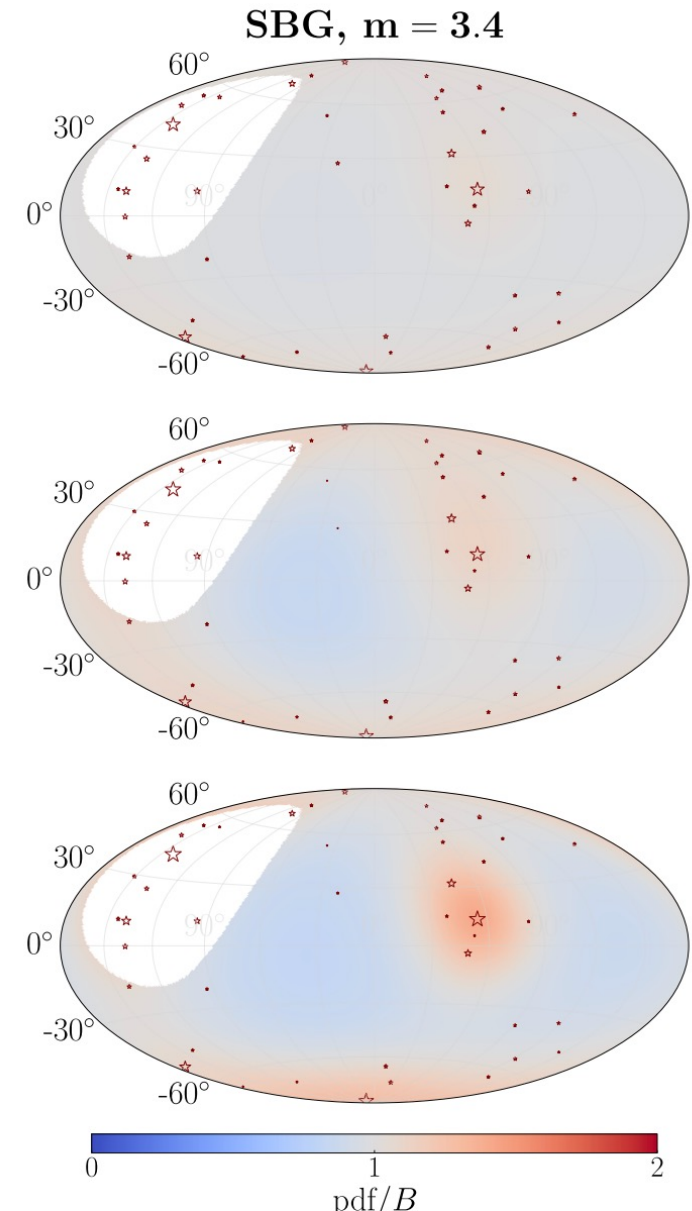
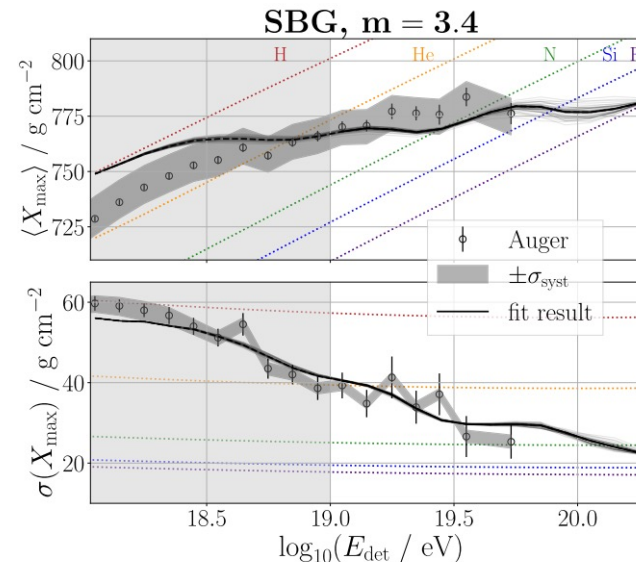
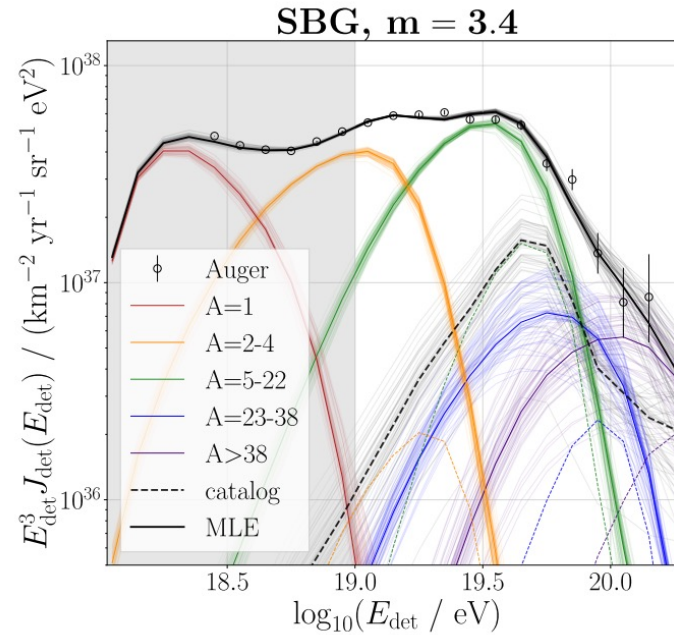
- これまでのcombined-fitではソースの分布は均一かつ等方
- 近傍天体の分布を反映せずに同じ(起源天体における)質量組成・エネルギースペクトルを仮定してしまっている
- 現在最も「相関が良い」とされているSBG天体カタログの分布情報も含めたcombined-fit(次のページ)





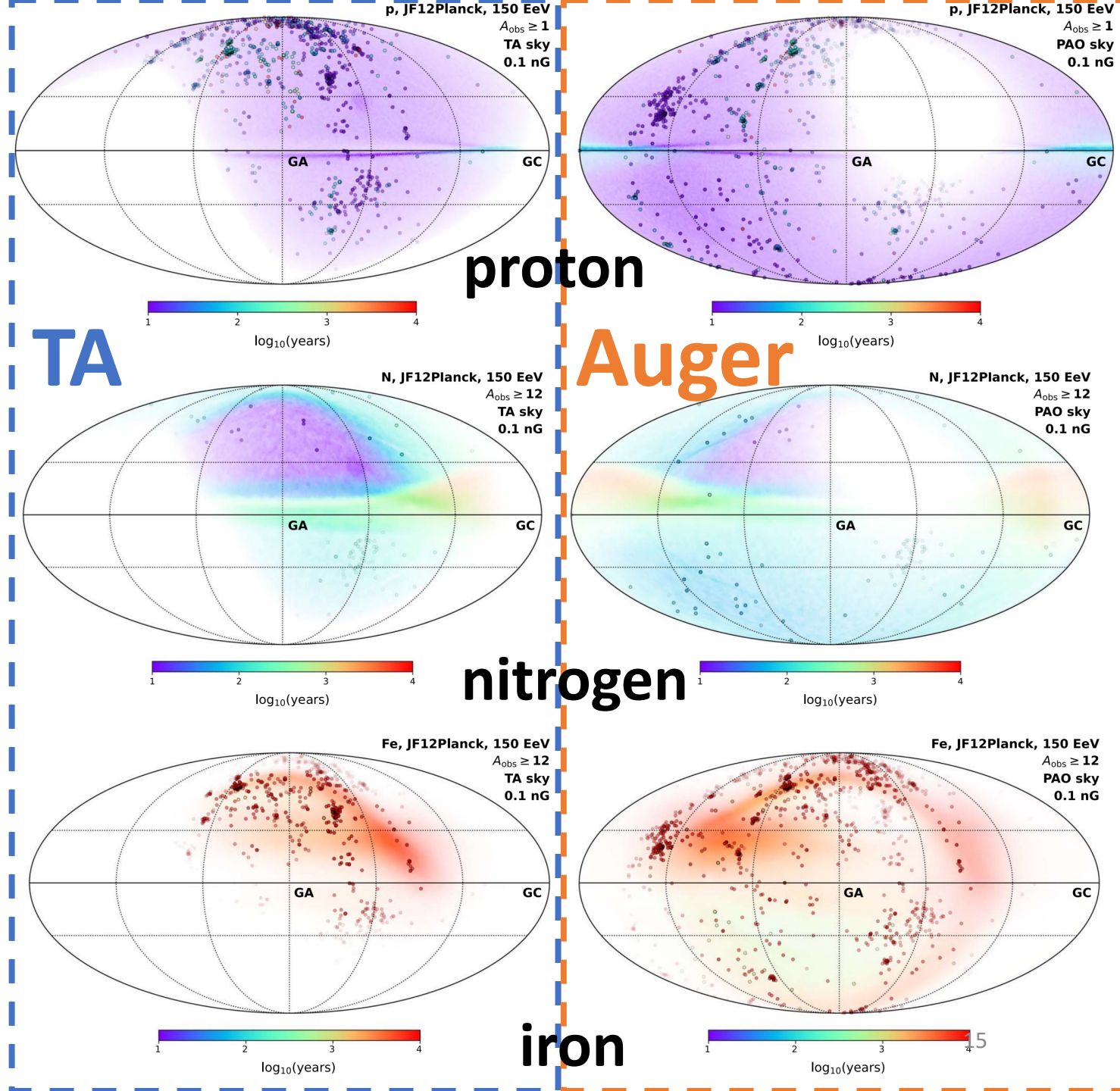
# 到来方向を入れたCombined-fit手法の開発(2024)

- 従来のCombined-fitの解析に前景天体(SBG/AGN)の影響を考慮して同時にフィット
  - SBGと $4.5\sigma$ の相関?
  - AGNは相関が悪い
- Likelihood解析のパラメータの改良点
  - 近傍天体の寄与(anisotropic fraction)・角度スケールをエネルギー・rigidity依存にする
- Best-fitパラメータが従来のlikelihood解析とどれだけ変わったかは留意が必要



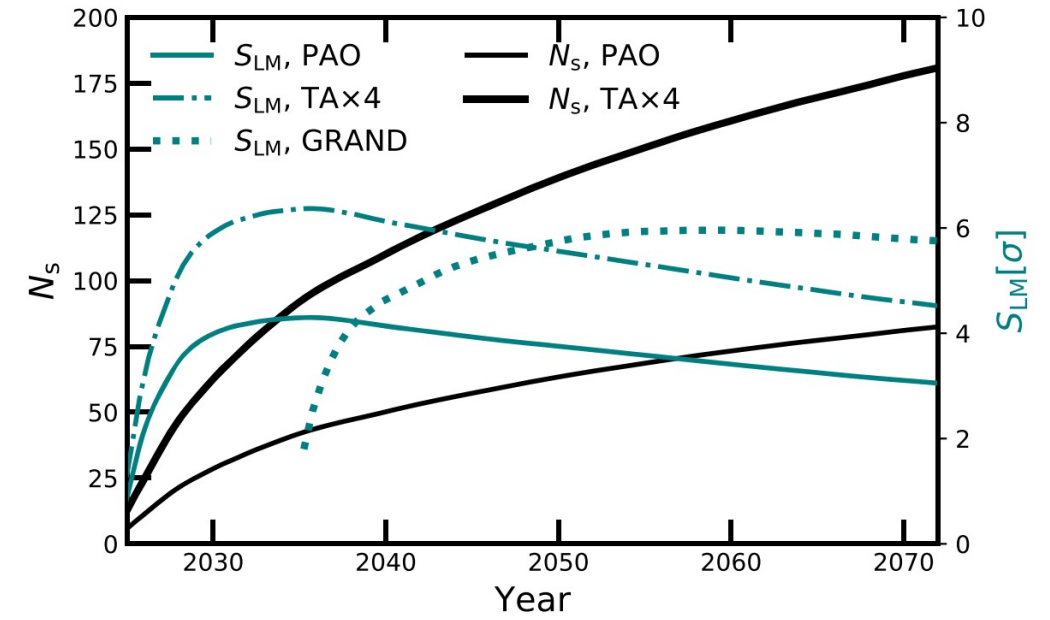
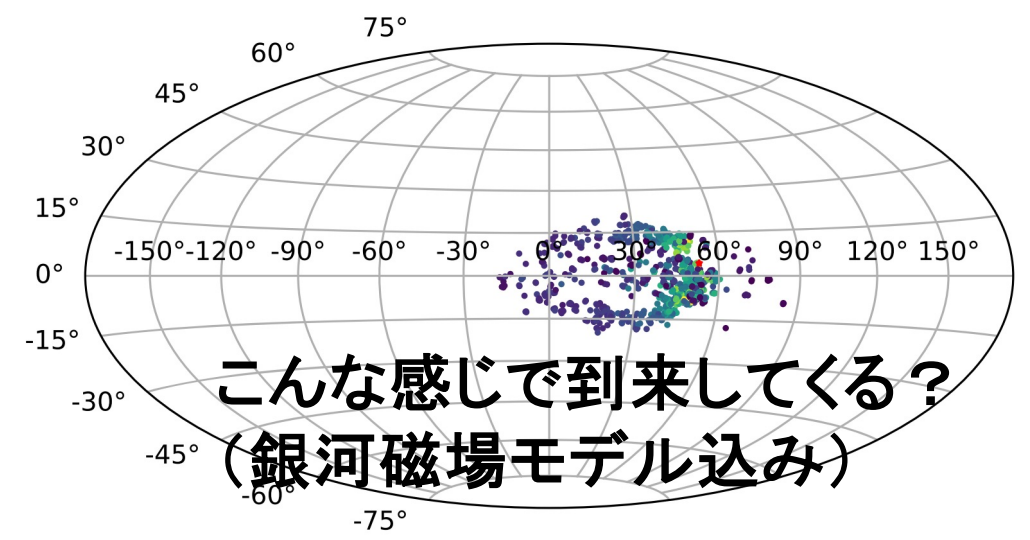
# 突発天体起源モデル

- 突発天体ならば近傍天体と相関しなくても説明できる？
- そもそも突発天体起源の場合に観測で制限をつけられるのか？ (Treasure map 論文, Globus et al. 2023)
  - Doubletを検出できるか？
- 磁場によるtime delayが重要となる



# 突発天体起源モデル

- GRB起源モデルの一例(He et al. 2024)
- GRB221009Aの報告( $z=0.151$ )
- TAx4/Auger実験で10年以内にGRB221009A由来のUHECR outburstが見える...？(本当ならずごい)
- 条件は注意が必要
  - 起源はかなり遠方
  - 質量組成がsingle-proton
  - EGMF強度が $10^{-13}G$ 以下

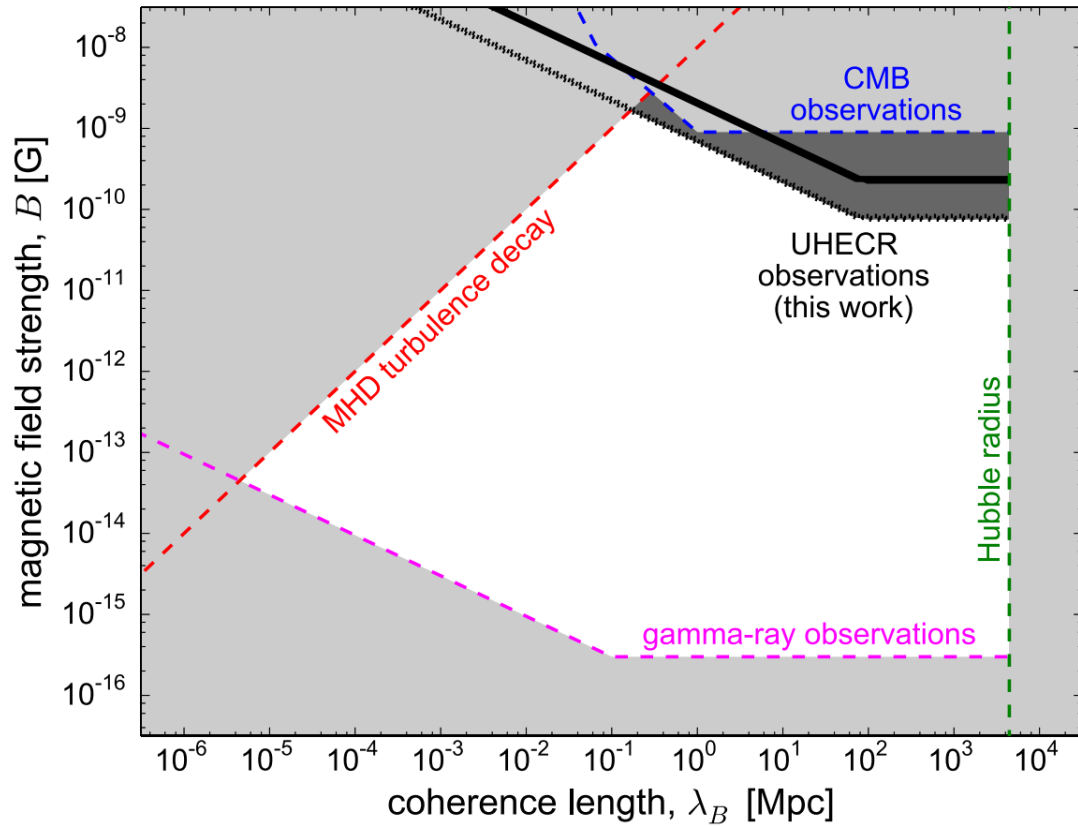


**Figure 6.** The prospect of detecting the UHECR outburst from GRB 221009A. The expected integral counts detected by the PAO and the full TA $\times$ 4, as a function of the time since the trigger time of GRB 221009A, are shown in solid lines. The teal lines denote the significance of the UHECR excess, detected by the PAO, the full TA $\times$ 4 and GRAND, respectively. The x-axis starts from the year of 2025.

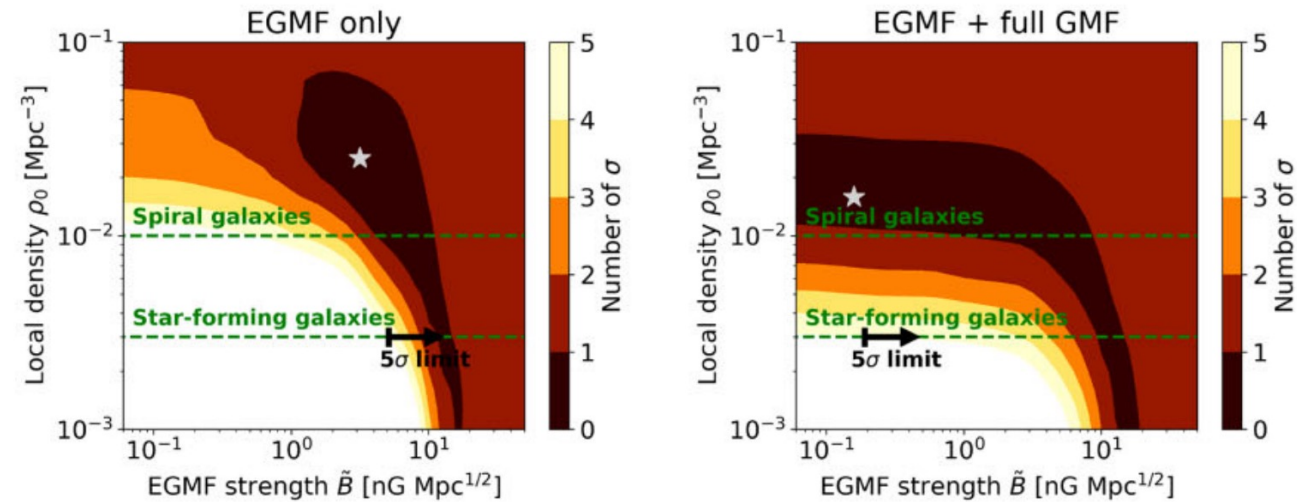


# UHECRによる磁場の制限

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 861:3 (7pp), 2018 July 1

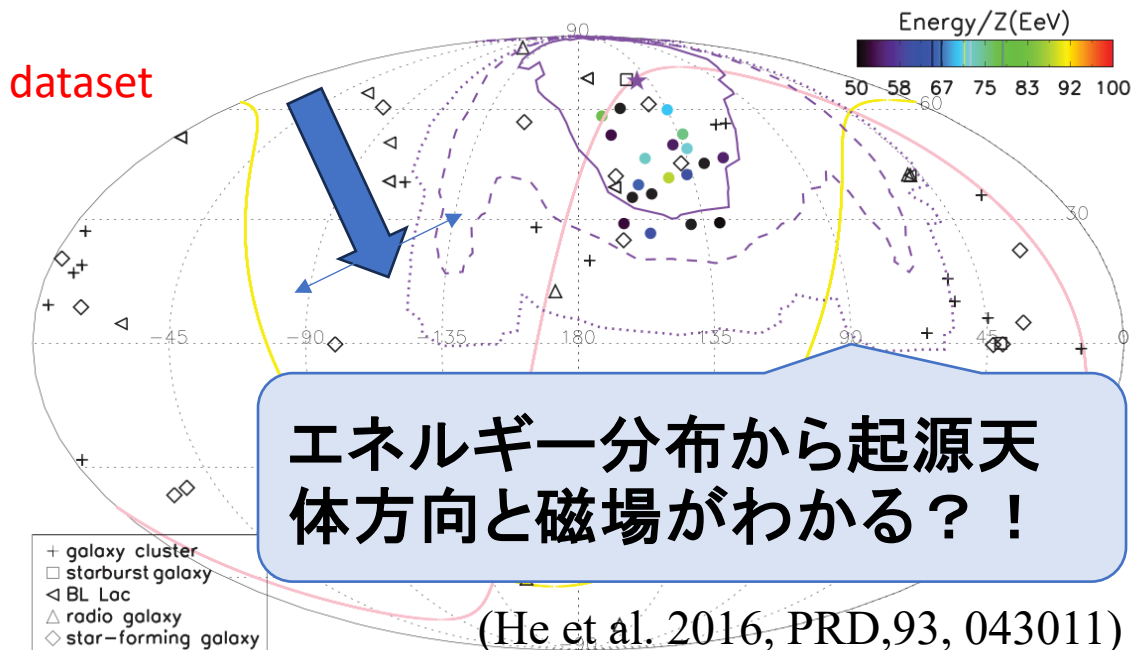
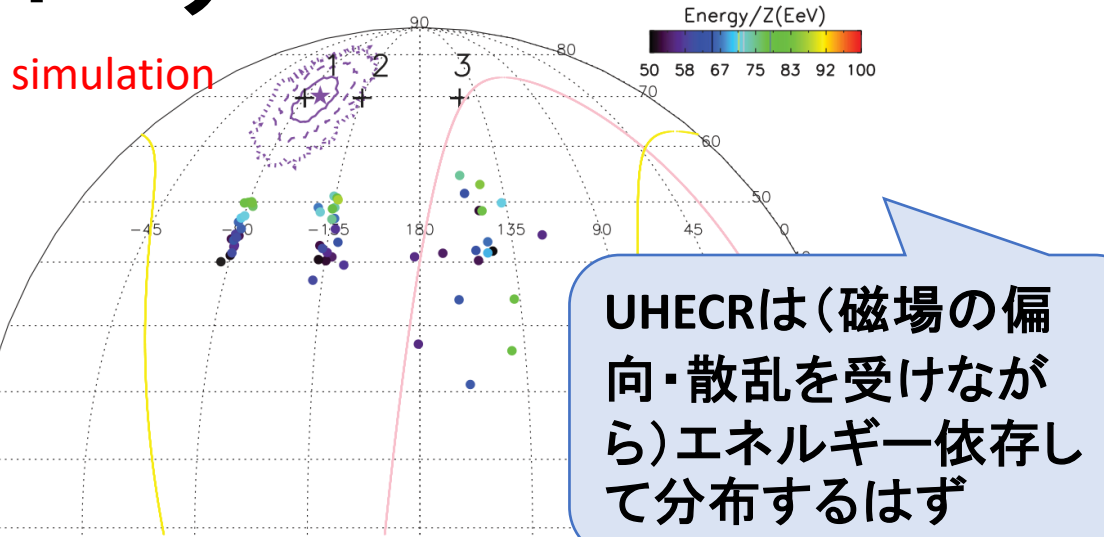


van Vliet+2021  
Auger dataset & SBG model



- 起源天体と質量組成が分かれば、磁場もわかる？
- あくまでも起源天体が「わかった」と仮定した上での磁場の制限

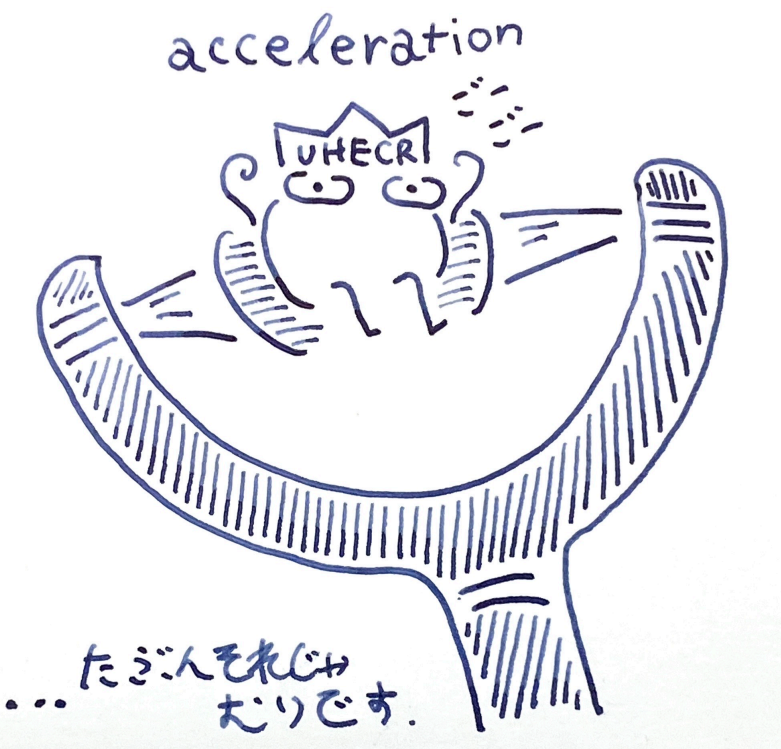
# 起源天体推定のアップ ローチ



(He et al. 2016, PRD,93, 043011)

- TA実験ホットスポットの起源推定(He et al. 2016)
  - エネルギーの高いイベントの方が起源天体に近く分布するはず
  - TAホットスポット: イベントのエネルギーに分布が見られる?
- ホットスポット内のイベントを使って5つのパラメータを推定
  - $\alpha$ : 偏向の中心方向
  - A1: 100EeVでの偏向角(磁場の偏向の強さ)
  - A2: 100 EeVでの散乱角(磁場の散乱の強さ)
  - RA ,Dec: 起源天体方向
- 観測事象毎のエネルギーの情報を消さない・(限られた天域で)磁場も同時に制限できるという点で面白い?

# さて、ここからが本題です





# そもそも疑問：

- 私が学生(2010s)の頃の講義では、最高エネルギー宇宙線観測に関してこのような解説が多かった(今でもよく見ます)

- 荷電粒子の宇宙線は磁場の偏向で曲がって起源がわからない
- でも、最高エネルギー宇宙線は磁場で曲がりにくい
- より高エネルギーの粒子の統計を稼げば異方性がよくわかる
- 異方性から起源天体がわかるはず

- ...これってどこまで本当なのだろうか？
  - 全て陽子なら概ね正しいが...？

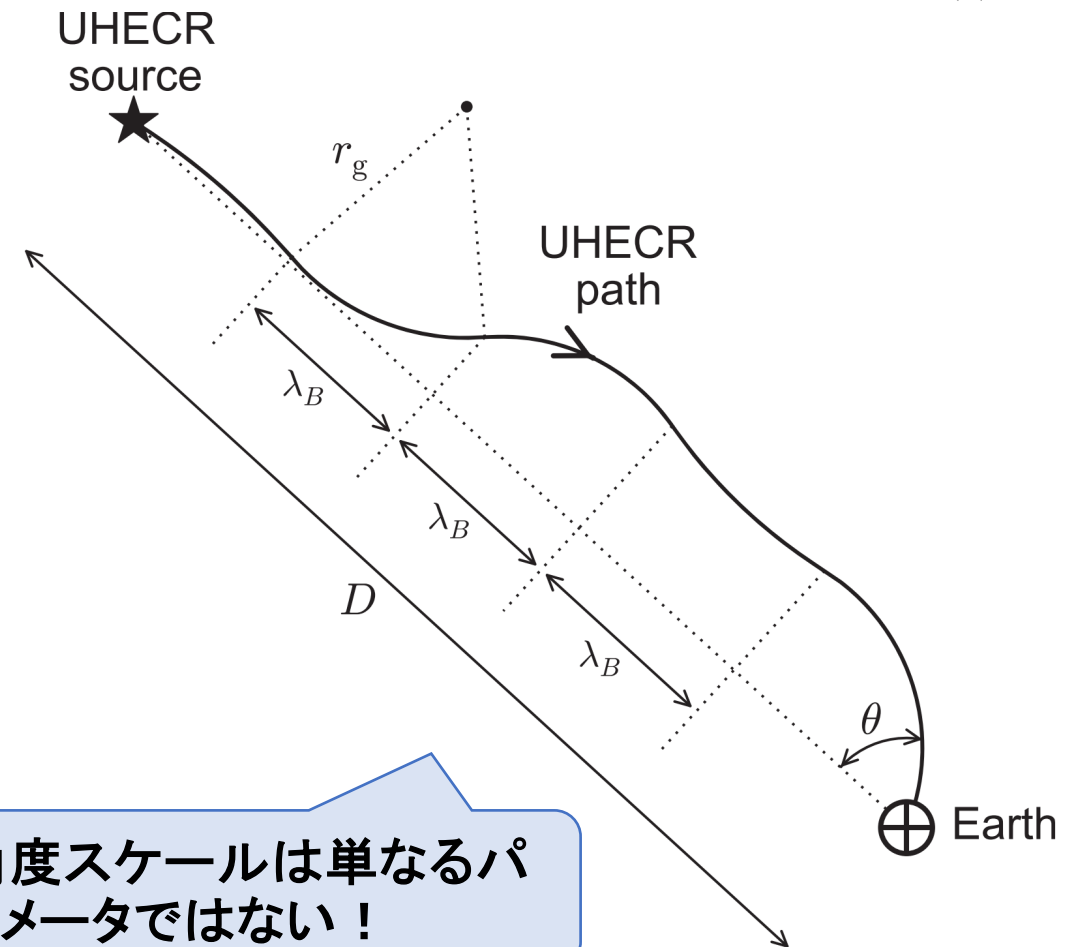


# 角度スケールの意味

- 適切なコヒーレント長を仮定したら、磁場によって宇宙線はランダムウォークになるはず
- 散乱角 $\theta$ は磁場モデル( $B/\lambda$ )の他にエネルギー $E$ ・宇宙線の電荷 $Z$ ・起源天体の距離 $D$ に依存
- **UHECR観測成果でありがちな「半径〇度で密度超過を発見した」「角度スケール〇度で天体カタログとの有意な相関を確認した」の背景には「これだけ磁場で等方にランダムウォークの影響が出る」という物理がある**

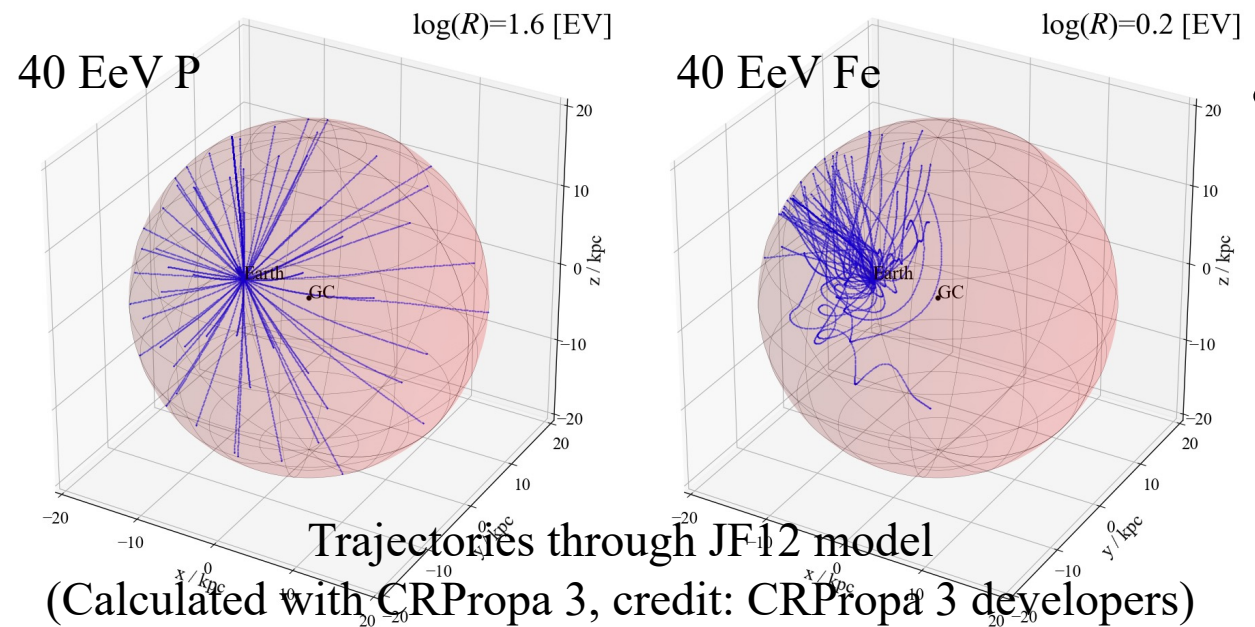
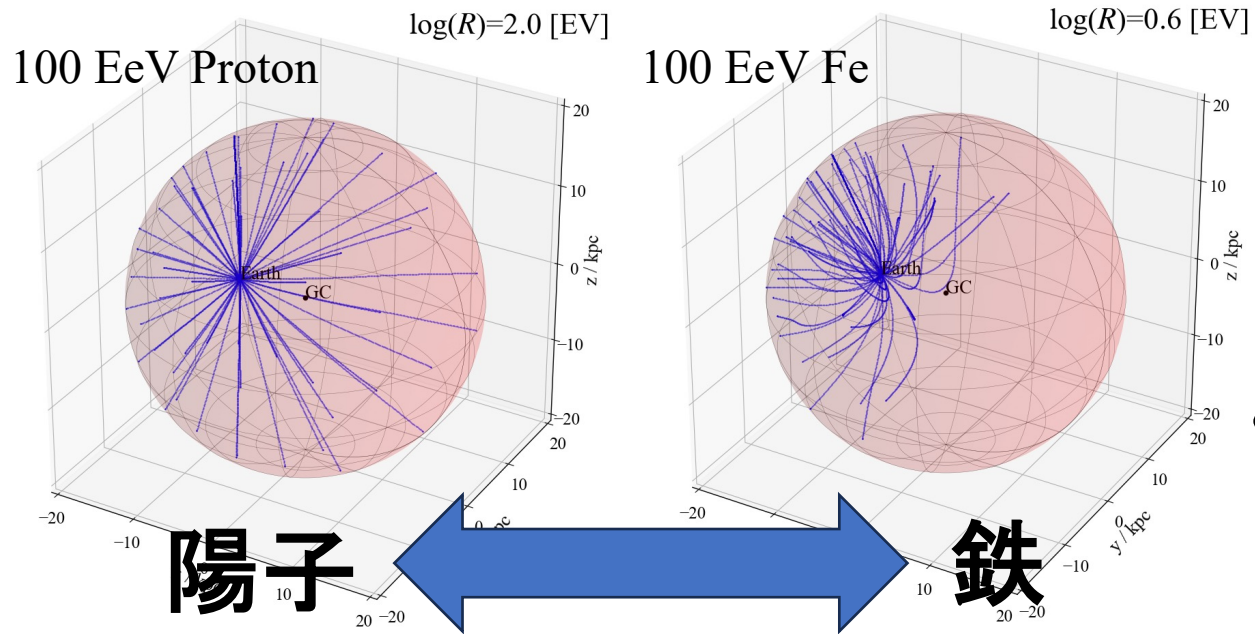
$$\theta_{\text{rms}} \approx \frac{\sqrt{D \lambda_B}}{2} \frac{ZecB_{\perp}}{E} \quad (6)$$

$$\approx 0.84Z \left( \frac{D}{10 \text{ Mpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\lambda_B}{1 \text{ Mpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{B_{\perp}}{10^{-9} \text{ G}} \right) \left( \frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \right)^{-1} \quad (7)$$

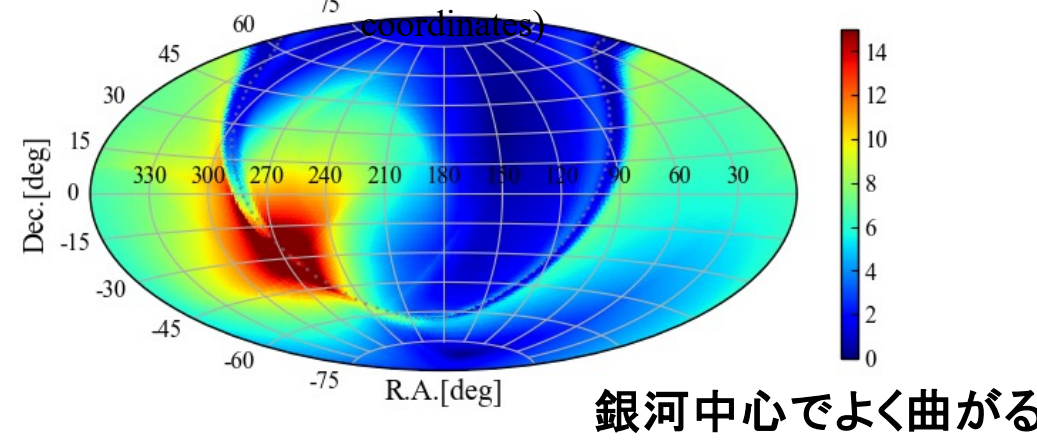


角度スケールは単なるパラメータではない！

# 磁場構造による偏向



Deflection angles of 60EeV protons through JF12 model(deg)  
(reproduced from Jansson & Farrar 2012, ApJ, 757, 14, equatorial



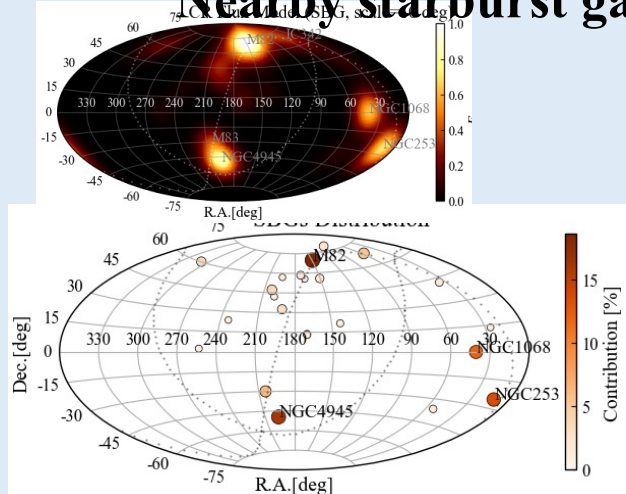
- 磁場には構造がある
  - 大規模構造・ボイド(系外磁場はそんなに制限ついてない)
  - 銀河系の円盤・ハロー
- 平均的な描像はモデルで表せる(はず)
  - 銀河磁場モデル
    - 現在はJansson & Farrar 2012が最もよく参照される
    - Unger & Farrar 2023が投稿されている
  - 宇宙線の到来方向・原子核種によって大きく変わる



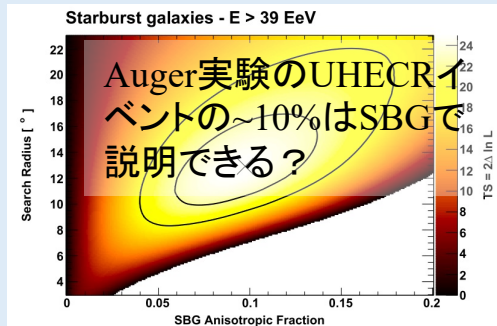
# 研究の例：銀河磁場の異方性解析への影響（我田引水レビュー）

これまでのlikelihood解析

## Nearby starburst galaxies (SBGs) model



Gaussian-smearing  
for each point source.

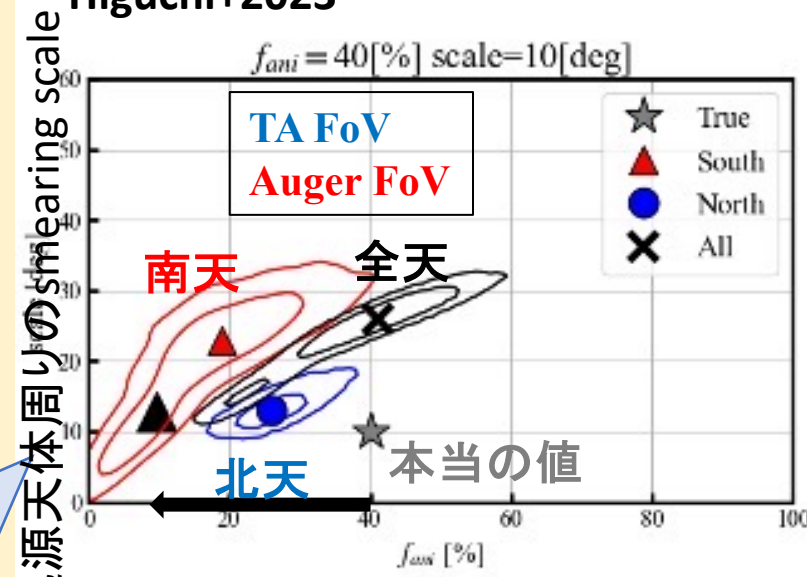


(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)

これらは銀河磁場の  
偏向+Auger実験の  
視野の限定は考慮  
されていない

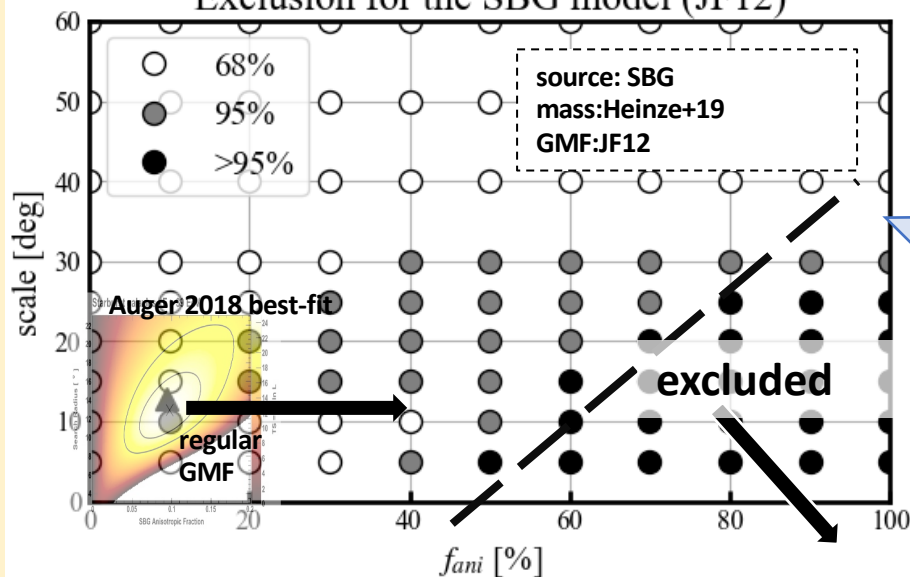
銀河磁場によって北  
天・南天の結果は一  
致しない。

Higuchi+2023



起源天体周りのsmearing scale  
f\_sbg:SBGで説明できる宇宙線の割合

## Exclusion for the SBG model (JF12)



磁場によって起源天体の寄  
与は過小評価される。  
磁場の影響を考えると、今  
のSBG起源モデルでAuger  
のUHECRはもうちょっと説  
明できるはず。

要約:

- ・銀河磁場の偏向はlikelihood解析に「影響する」
- ・TA/Augerの各視野内のイベントだけでsourceと相関を取っても結果は一致しない/正しい結果が得られない
- ・全天データ&磁場&組成を一緒に考える必要がある→GCOS?!

(Higuchi et al 2023, ApJ 949 107)

# 我々が見落としがちなこと

- 「半径○度で○シグマの密度超過を発見した」「角度スケール○度で天体カタログとの○シグマ有意な相関を確認した」背景の物理
  - 磁場強度 $B$ ・コヒーレント長 $\lambda$ を仮定した乱磁場で距離 $D$ だけ伝搬した電荷 $Z$ の宇宙線が、これだけの角度スケールで等方に広がりながら地球に到達する
  - 「有意な密度超過」「有意な相関」を報告した時に、上記の仮定をどこまで考えているかという疑いは重要(たまにそれ、ホンマか？という報告を見る)
  - 数十EeVのUHECRで角度スケール20deg程度ならば、(仮に乱磁場を $B=1\text{nG}/\lambda=1\text{Mpc}$ で固定したとして)どの程度の距離 $D$ と電荷 $Z$ なら許容できるかという見積もり
    - 陽子ならば100Mpcオーダーで到来できる(もちろんGZK限界を考える)
    - CNOなら10Mpcぐらいなら妥当だろう(ただし、photodisintegrationを考慮すべき)
    - もっと重い粒子(鉄)ならば、相当近傍でないは無理
- 現在の我々のメジャーな解析手法(密度超過・カタログ相関...)は、比較的軽い質量組成・近傍天体・等方な磁場の仮定で有効
- 重い質量組成だったらどうしよう... ?
  - 現に、Auger実験は重い質量組成を示唆している
  - もちろん磁場構造を考えるともっとややこしいことになる

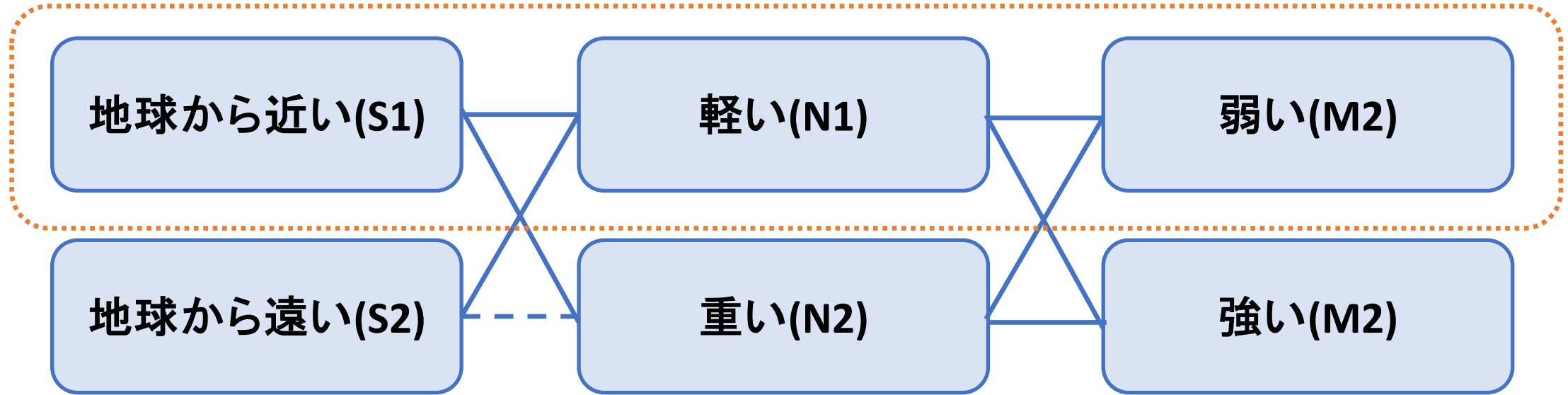
# 今後の戦略(妄想)

今はここ

起源天体

原子核種

磁場の構造の影響



- 今後何がわかってくるかで解析もサイエンスも大きく異なる
- 今日紹介した解析手法の多くは**S1-N1-M2の仮定のみ**で成立する
  - 核種が重い(N1→N2)と証明されてしまえば、今後は通用しないのでは？
- TA/Auger実験で測定できるのは原子核種のみ→**観測はここに注力すべき**
- 原子核種N1/N2が決まれば戦略も決まるはず



# 質量組成と異方性

- もし観測で質量組成が重いと確定した場合、単に「より大統計・より高精度」は通用しない(かもしれない)
  - 新しい解析手法をどうしよう
  - 陽子に絞って異方性解析をするのも手だが、統計は著しく縮小する
  - 現在のXmaxの観測精度から見積もれないだろうか？
- **そもそも、全天球の質量組成を平均的描像だけで語れる保証はどこにもない**
  - Augerでは質量組成の異方性を報告している
  - **TA/TA×4実験での検証が重要**
  - 仮にTAで見えるUHECRが本当に陽子ならば、我々は質量組成の異方性を観測していることになる(かも)
    - 陽子の多い天域に限定して解析を進められないか？
  - Augerと無矛盾ならばそれはそれでよし

銀河面から重い組成の粒子が到来している？  
(銀河磁場の影響？起源天体分布？)

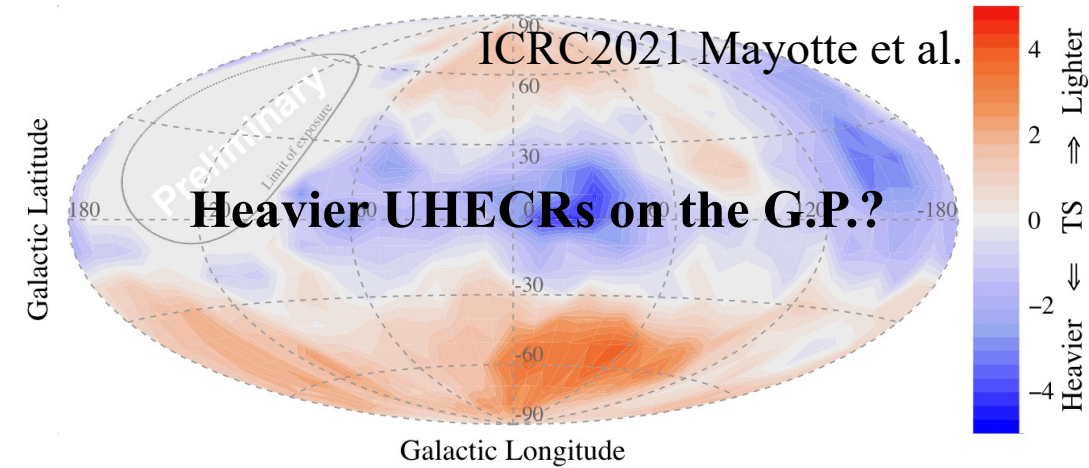
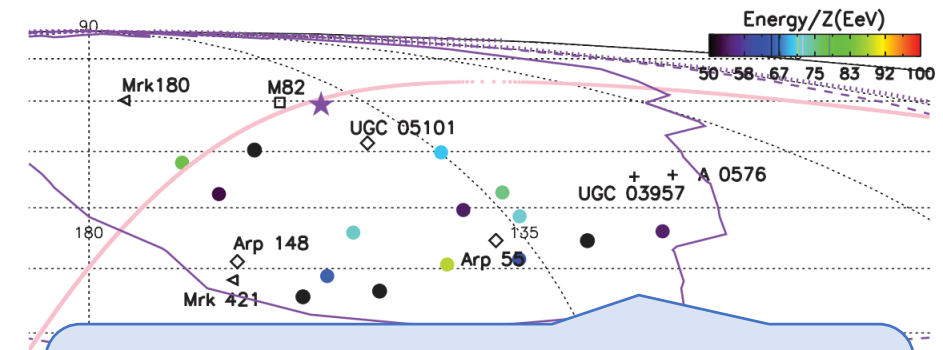


Figure 8: Sky map of cosmic ray composition for  $E \geq 10^{18.7}$  eV

PHYSICAL REVIEW D 93, 043011 (2016)



局所的であればエネルギー分布の情報も有効なはず

# “次世代宇宙線望遠鏡”を実現するには

- 空気シャワー観測を光学望遠鏡に例えるならば？
  - 空気シャワーの物理の理解は、可視光望遠鏡における光学系のキャリブレーションに相当する
    - ハドロン相互作用の理解
    - エネルギー決定精度→光量の測定
- 我々は「より大統計」「より高精度」をいつまで言い続けられるのか...？
  - 質量組成の決定精度(+エネルギーの決定精度)が悪ければ統計を稼いでもSBGモデル検証は厳しい(D論の最後にやった)
  - 多くの望遠鏡建設が難航している時代に、我々は未完成のキャリブレーションを継続しながらもっと広領域の望遠鏡を建てなくてはならない
  - “望遠鏡”を作る以上は・“荷電粒子天文学”をやる以上は、まず自分たちが「望遠鏡をどこに向けたいか」を確認する必要があるし・分野外の人に知ってもらふ必要もある
    - なんの起源モデルを検証したいのか？
    - 宇宙から何を知りたいのか？(磁場？天体？)
    - 多分具体的な指標を出すステップに来ている



# まとめ

- 観測の「有意度」「モデル」の観点ではここ2-3年の報告に大きな変化は感じない
  - Auger Phase Oneのカタログ・コードが公開された事は大きい
- 現象論は様々なアプローチが進んでいる
  - Auger combined-fit到来方向の組み込み・likelihoodの改良
  - 銀河磁場モデルUF23のアップデート
- 現時点では近傍のスターバースト銀河が条件付きで「それっぽい」(答えやすい)
  - 一方で報告の多くは、「近傍天体から組成の軽い宇宙線が到来していて、なおかつ磁場が等方に散乱してくれる」という特殊な条件が土台にある
  - そしてこの条件は宇宙線の組成が重ければ崩れてしまう
- **これから10-20年先のUHECR起源解明のためには、TA/TAx4/AugerPrimeで質量組成をはっきりさせる必要がある**
  - この課題が明確になったのはこの10-20年での大きな進展なのかもしれない

