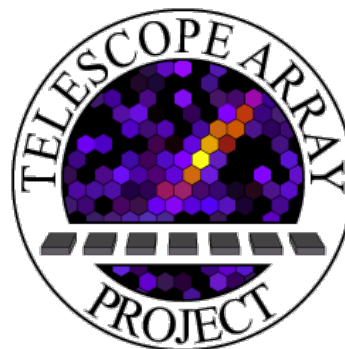
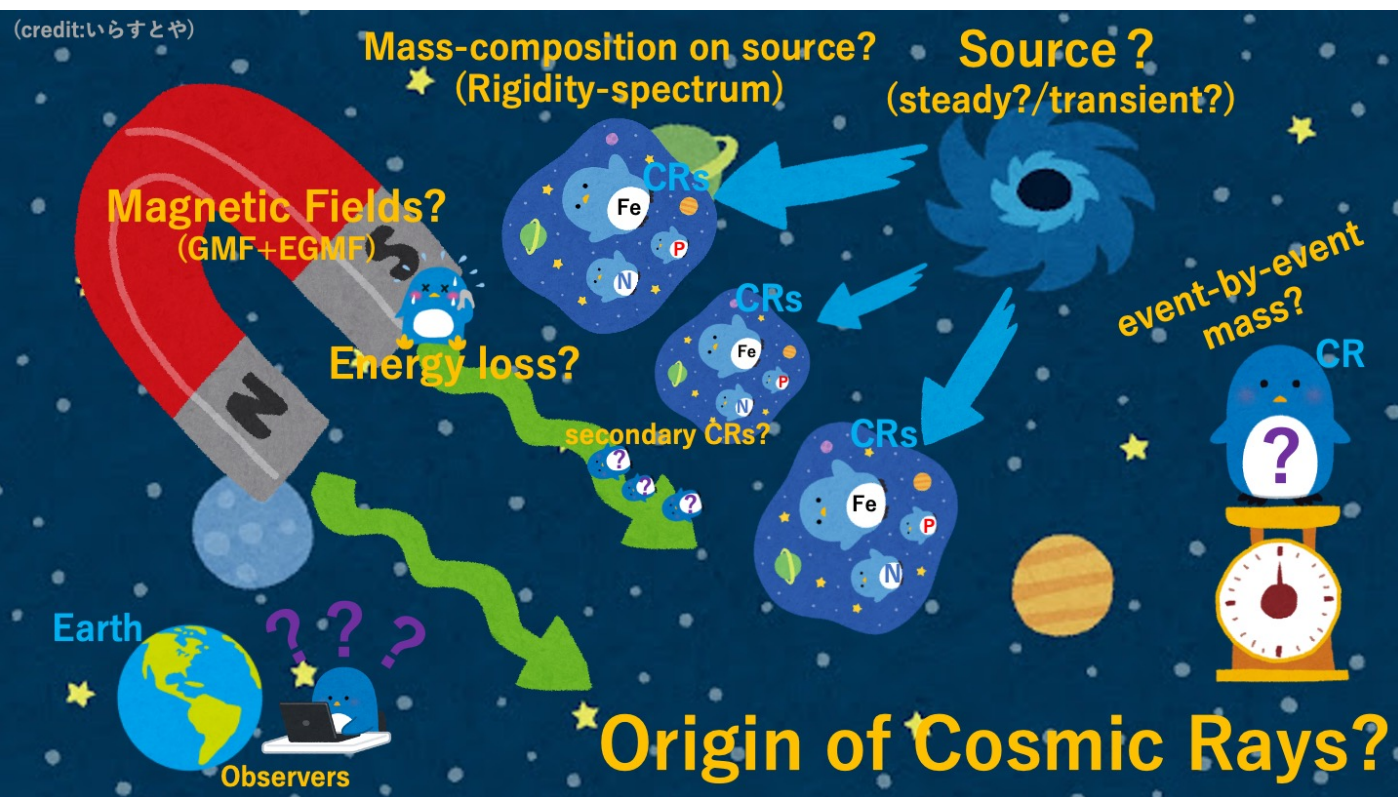
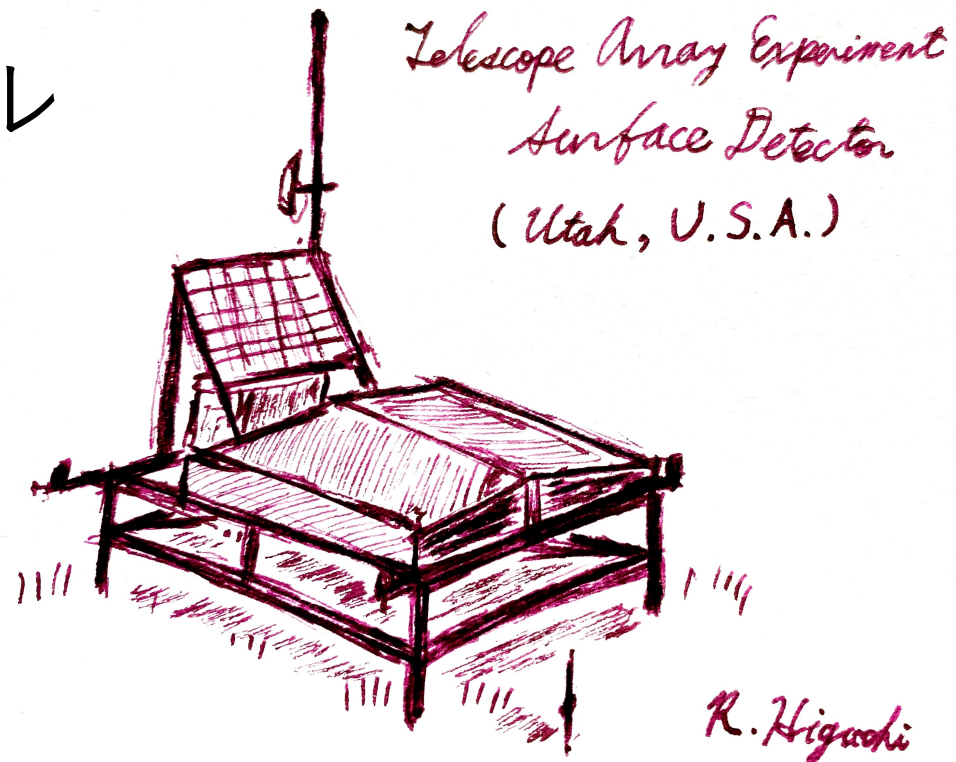


銀河磁場モデル・質量組成モデル に基づく 最高エネルギー宇宙線起源探査



樋口 諒
理化学研究所

令和5年度東京大学宇宙線研究所
共同利用研究成果発表会

概要

- 査定額：40,040 円 用途：国内旅費（議論のため）
- 共同研究者：
 - 樋口 諒（理研）
 - 木戸 英治（理研）
 - さこ 隆志（ICRR）
 - 川田 和正（ICRR）
 - 藤井 俊博（OMU）

概要

• イントロダクション

- テレスコープアレイ・オージェ実験による最高エネルギー宇宙線探査
- 本研究の位置づけ

• 銀河磁場の影響と南北差

- これまでの研究：異方性解析への磁場の影響
- TA/Augerのエネルギースペクトルの南北差
 - 磁場を適用したシミュレーションとその結果・解釈

• 将来計画への展望

本研究の位置付け

- 現在の最高エネルギー宇宙線(UHECR)の観測は、北半球の**Telescope Array (TA)実験**と南半球の**Auger実験**がリードしている
- 両実験の観測を通して、UHECRの**エネルギースペクトル・質量組成・到来方向分布**の特徴が明らかになりつつある。
- 一方でTA/Auger実験での結果が一致しない・整合性のある解釈が難しい結果も存在する→**磁場モデル・起源モデルを仮定した現象論が重要となる**
- 銀河磁場モデル・UHECRの伝搬計算を主軸に、TA/Auger実験の結果の解釈・起源天体モデルの検証を行う（本研究）

TA/Auger実験

TA実験の
地表検出器(SD)



TA実験の
大気蛍光望遠鏡(FD)



TA実験
北緯39.3度

Auger実験
南緯35.2度



Auger実験の地表検出器
(出典：https://www.fast-project.org/pierre_auger_observatory/)

(credit:いらすとや)

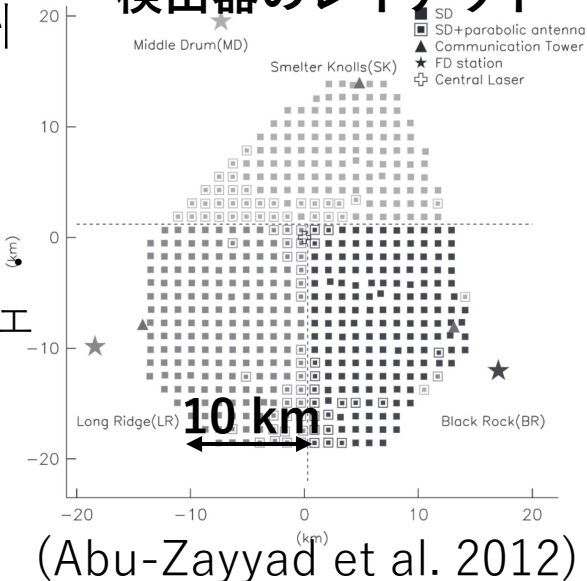
北天(TA)
Dec.>-15.7度

南天(Auger)
Dec.<24.8度

Telescope Array (TA) 実験(2008年~現在)

- アメリカ合衆国ユタ州
- 700km^2
- 拡張実験：
 - TA×4 (面積の拡張)
 - TALE/TALE infill (低エネルギー領域への拡張)

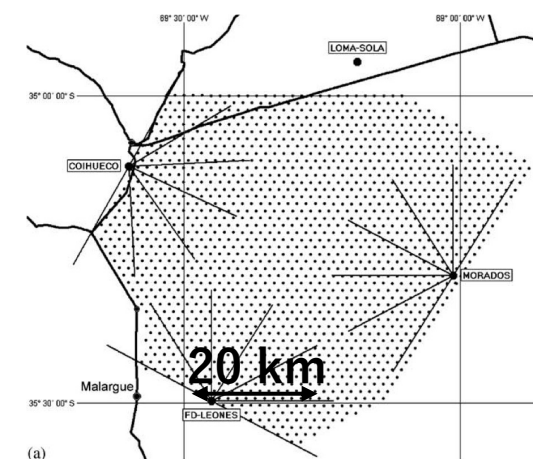
検出器のレイアウト



Auger 実験 (2004年~現在)

- アルゼンチン
Malargue
- 3000km^2
- AugerPrimeが進行中

検出器のレイアウト

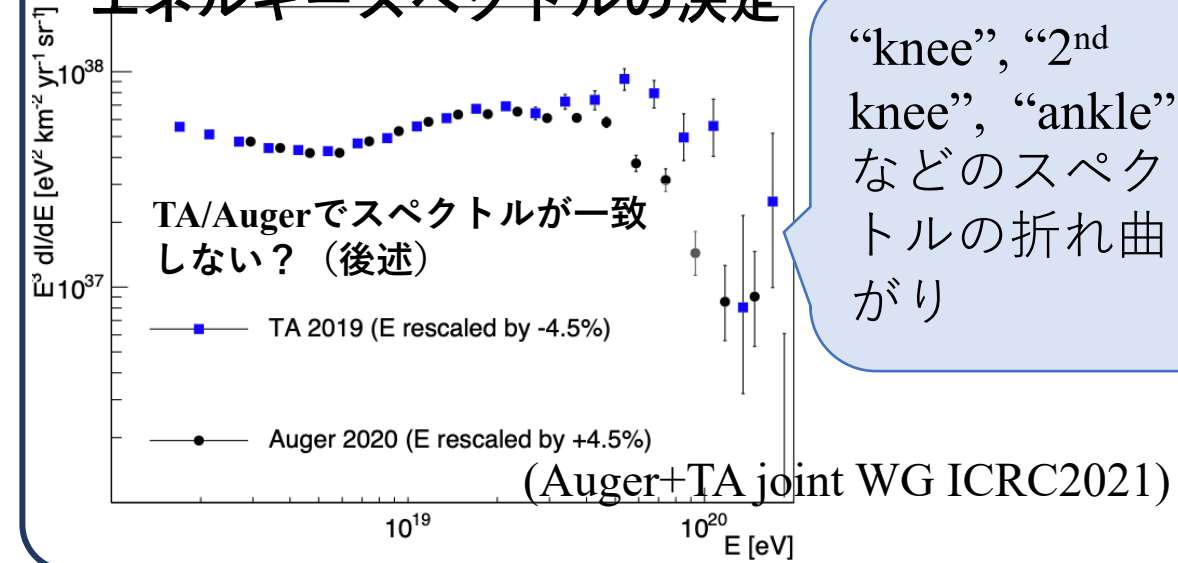


(Auger collaboration 2004)

TA/Auger実験でわかってきたこと (~2020)

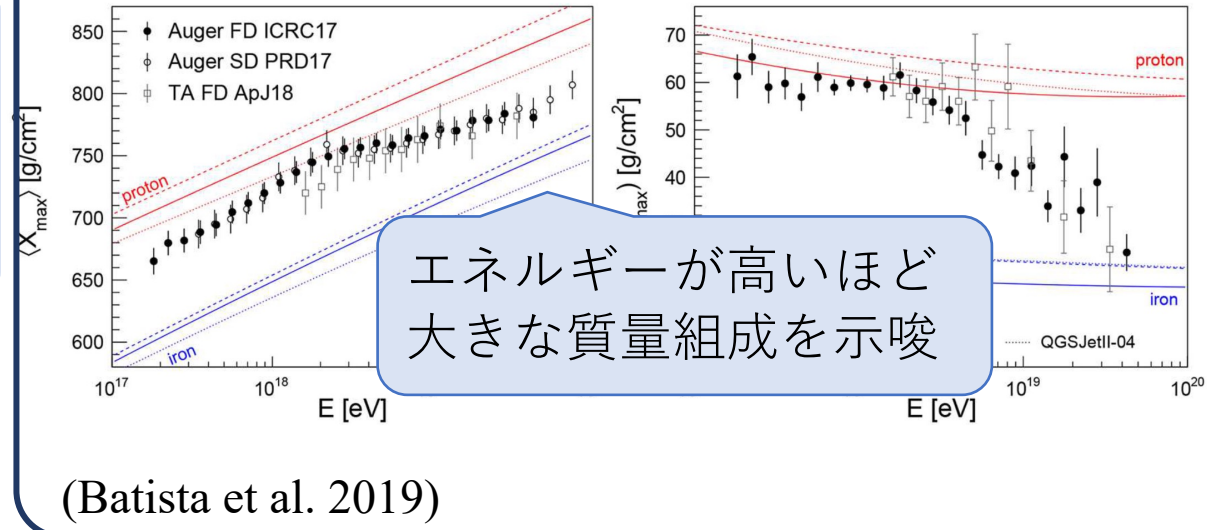
Energy spectrum

エネルギースペクトルの決定



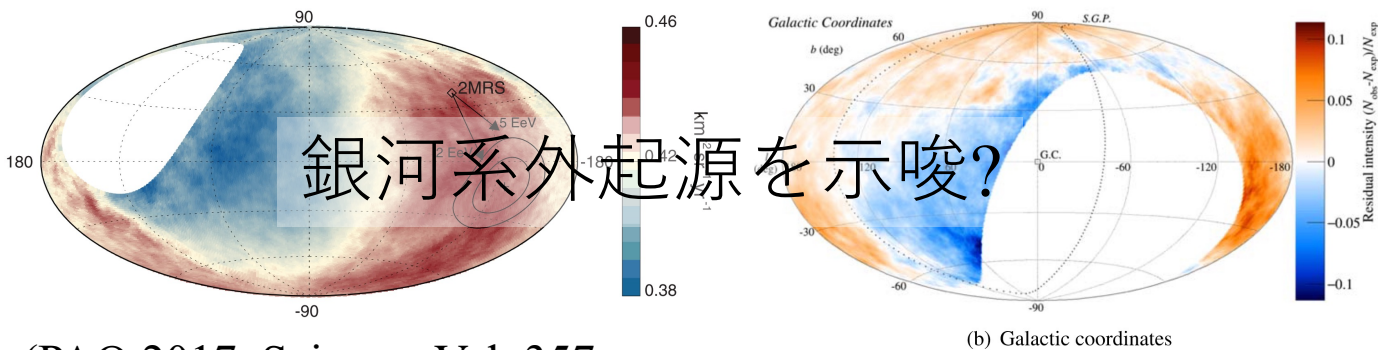
Mass composition

FDによる質量組成観測



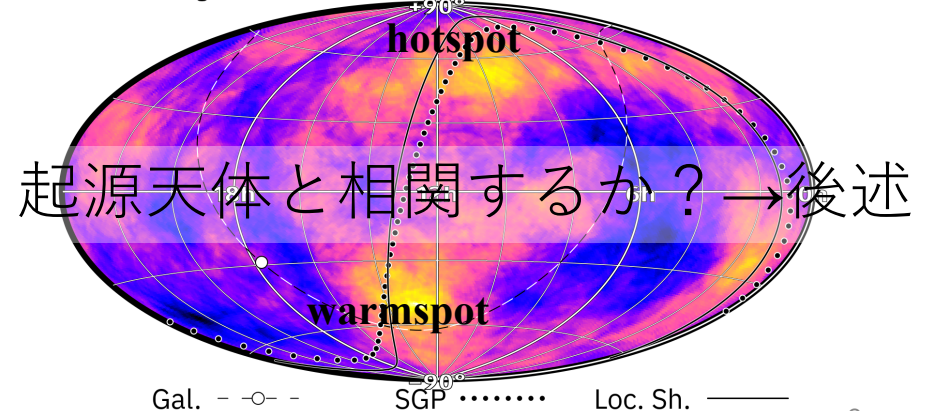
Anisotropy

大角度異方性



中角度異方性

$E_{Auger} \geq 40$ EeV, $E_{TA} \geq 53.2$ EeV; 20° smearing



TA/Auger実験でわかってきたこと(~2020)

Energy spectrum

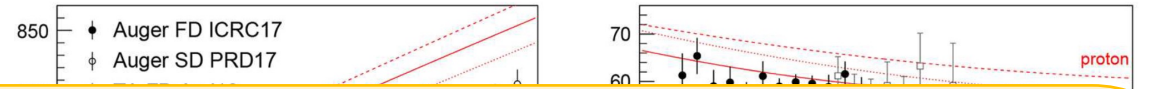
エネルギースペクトルの決定



“knee”, “2nd knee”, “ankle”

Mass composition

FDによる質量組成観測

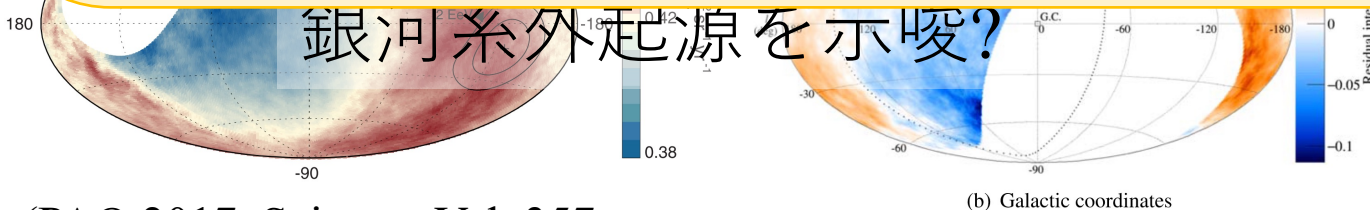


私の興味：

これらの観測結果に磁場がどの程度のシステムティックを与えるのか？

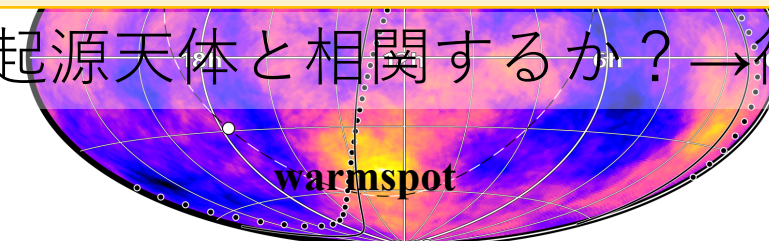
- ・ 異方性
- ・ エネルギースペクトル
- ・ 質量組成

銀河系外起源を示唆？



(b) Galactic coordinates

起源天体と相関するか？→後述

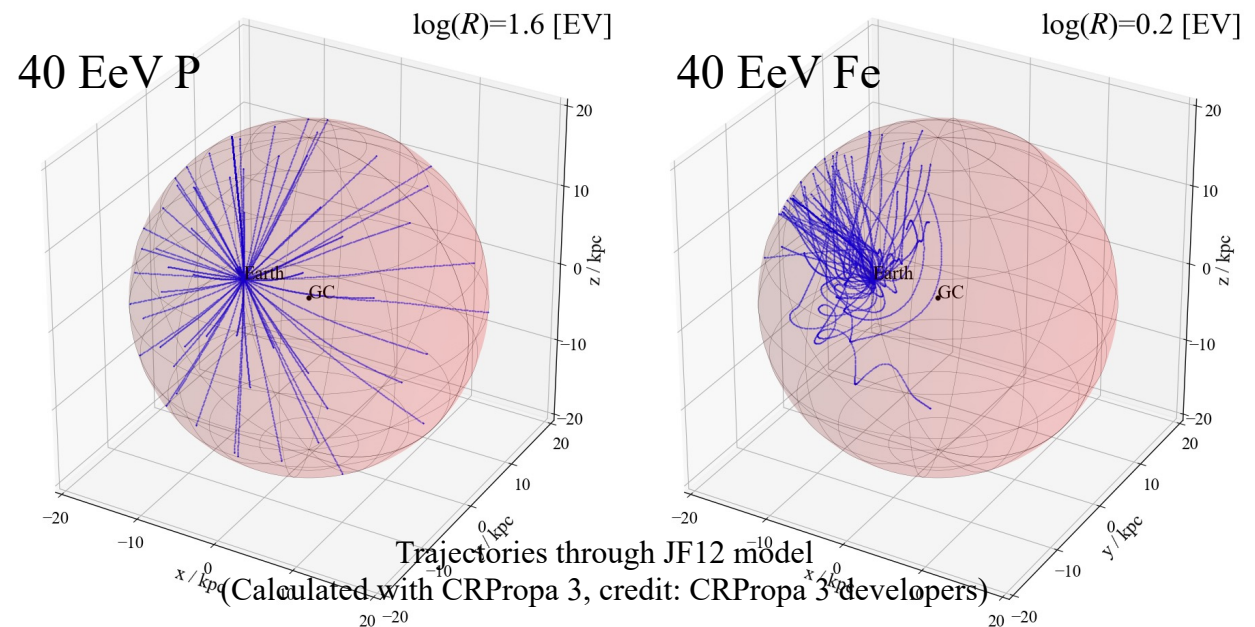
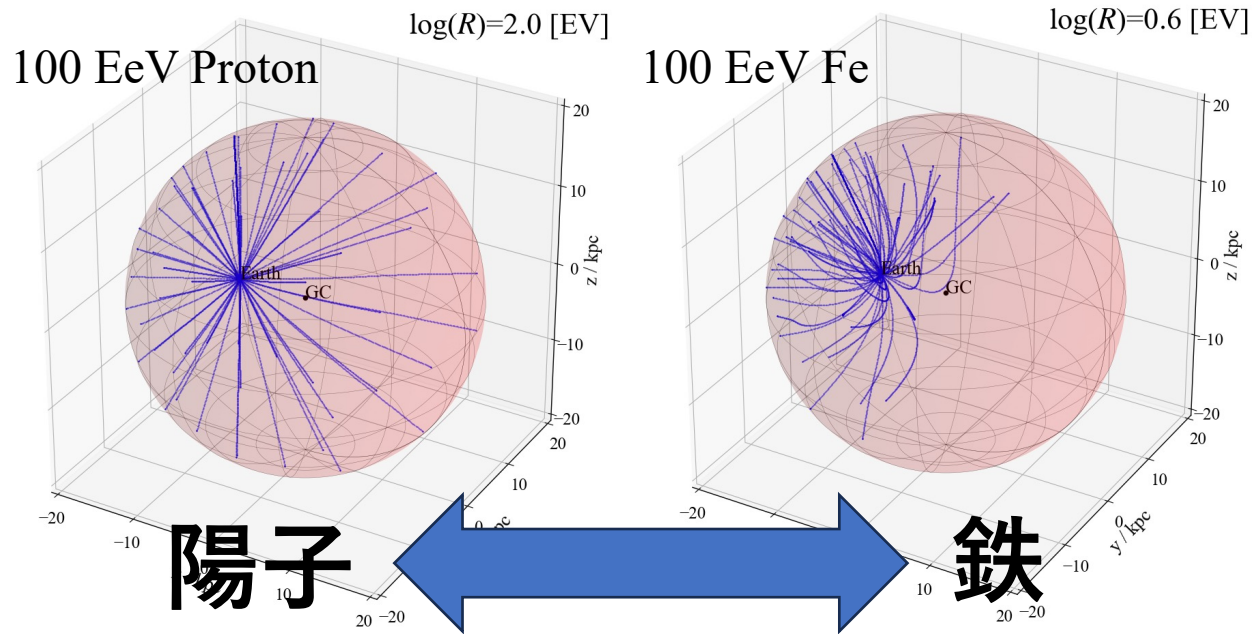


Gal. - - - SGP Loc. Sh. —

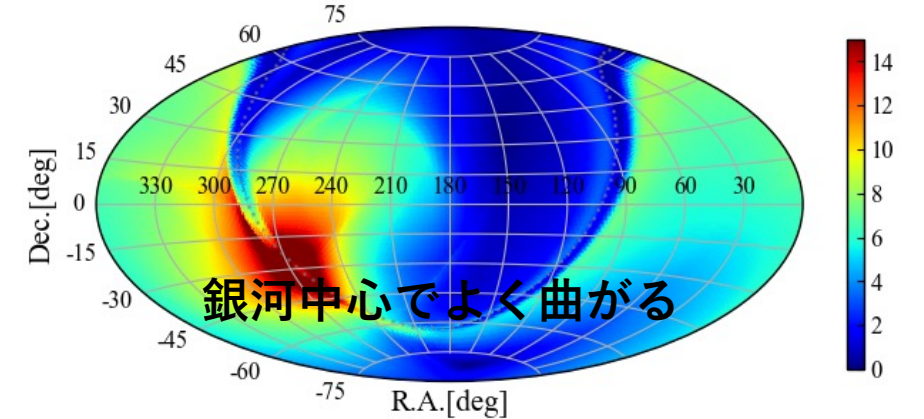
(PAO 2017, Science, Vol. 357, Issue 6357)

(TA2020, ApJ, L28, 898(2))

銀河磁場について詳しく



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



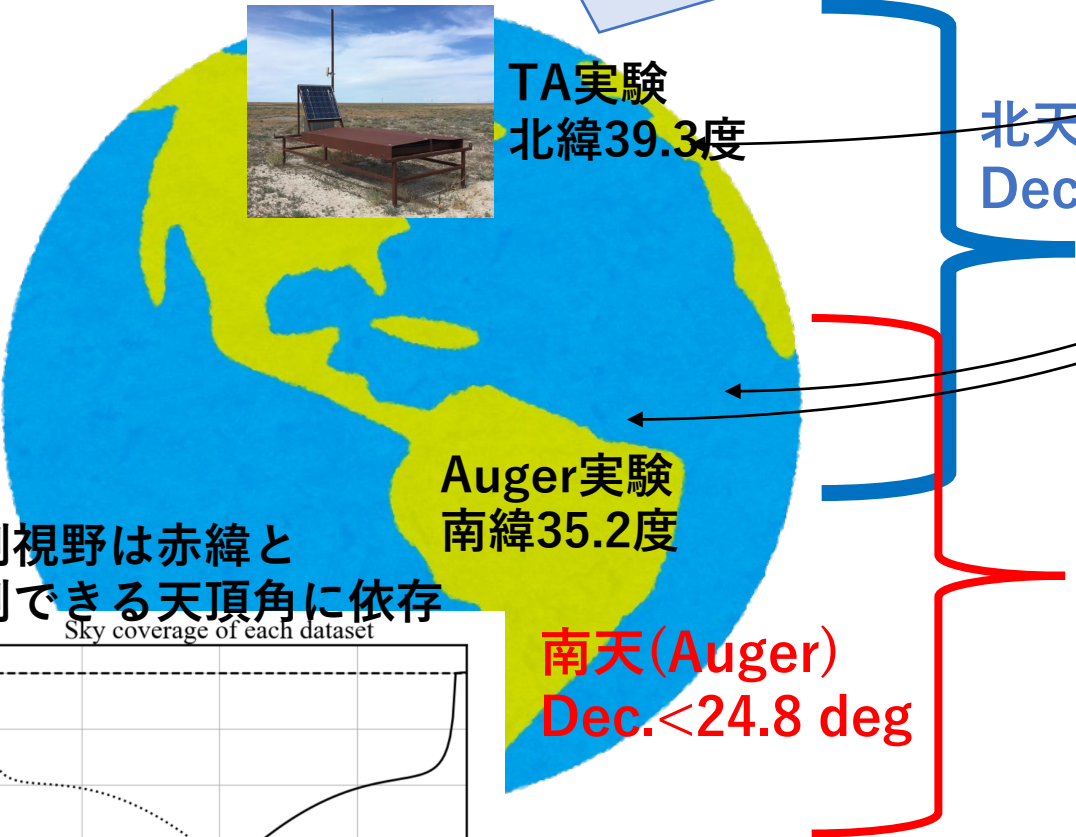
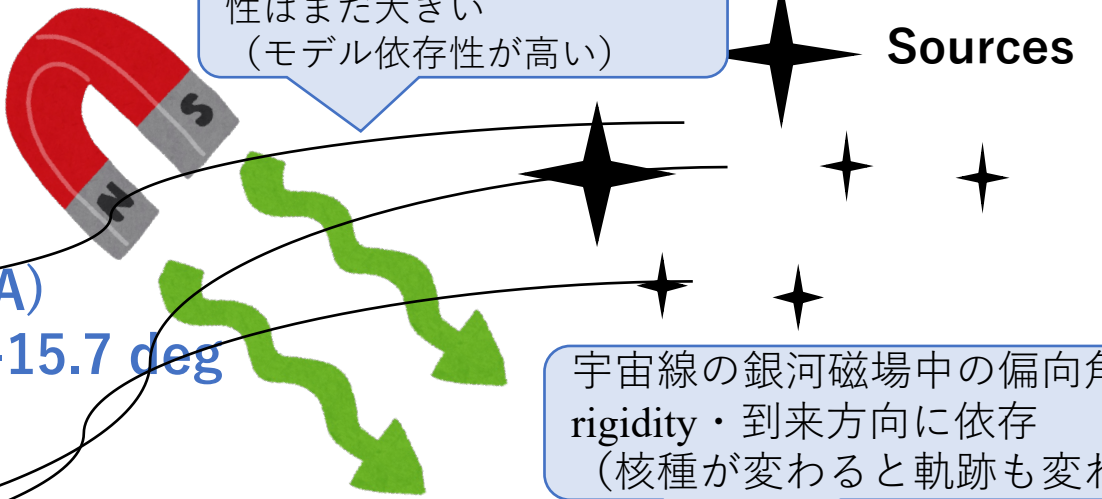
- “最高エネルギー”宇宙線でも、銀河磁場による偏向は無視できない
 - 「最高エネルギーなら磁場の影響を受けにくい」はあくまでも陽子の話
 - 質量組成を考えると話はもっと複雑
- 到来方向依存性：
 - 銀河中心(GC)付近で偏向角大
- 質量依存性：
 - 偏向角度はrigidity に依存($R = E/Ze$)
 - 同じエネルギーで偏向角度は電荷に依存

銀河磁場の影響と観測の南北差

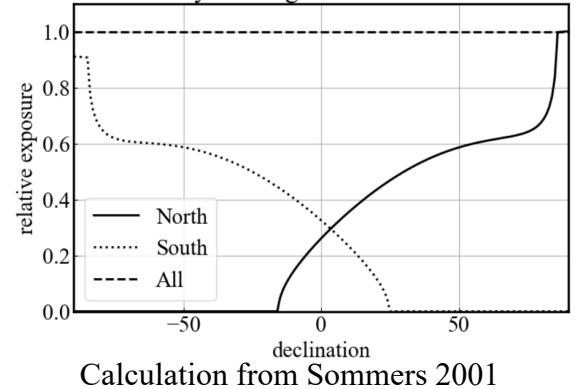
TA/Auger実験は天球の限られた領域を観測している。

銀河磁場・系外磁場の不定性はまだ大きい
(モデル依存性が高い)

宇宙線の銀河磁場中の偏向角は rigidity · 到来方向に依存
(核種が変わると軌跡も変わる)

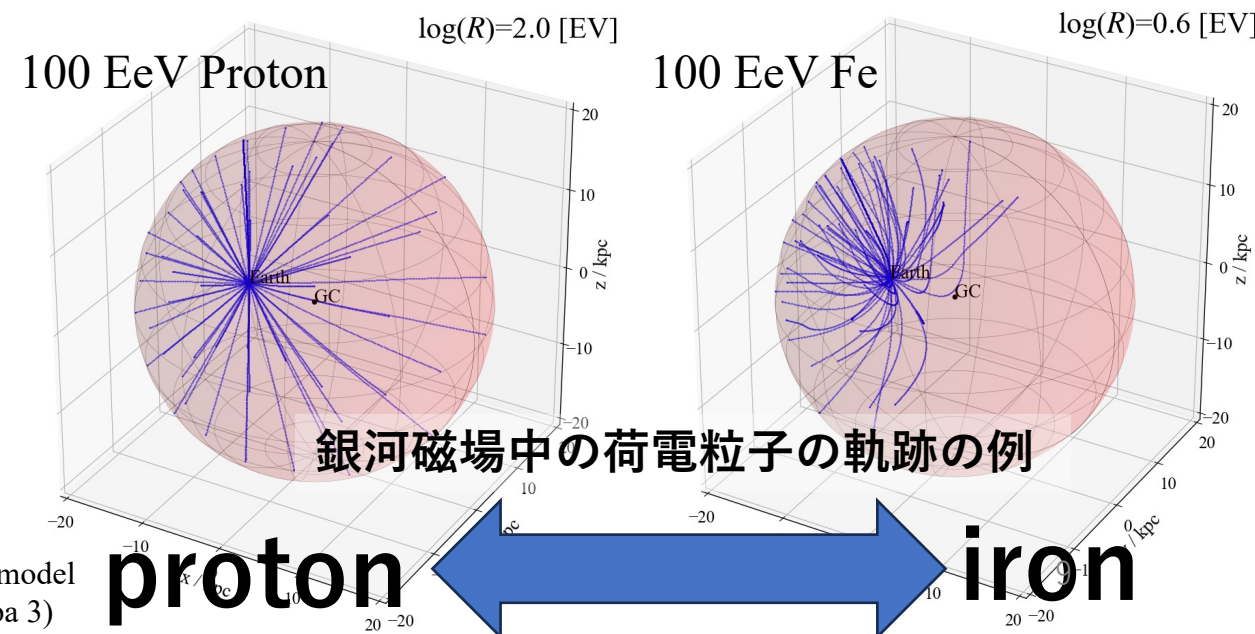


観測視野は赤緯と観測できる天頂角に依存
Sky coverage of each dataset



(credit:いらすとや)

Trajectories through JF12 model
(Calculated with CRPropa 3)



銀河磁場の影響と観測の南北差

TA/Auger実験は天球の限られた領域を観測している。

銀河磁場・系外磁場の不定性はまだ大きい
(モデル依存性が高い)

Sources

磁場の偏向が観測に影響を与え得るもの：

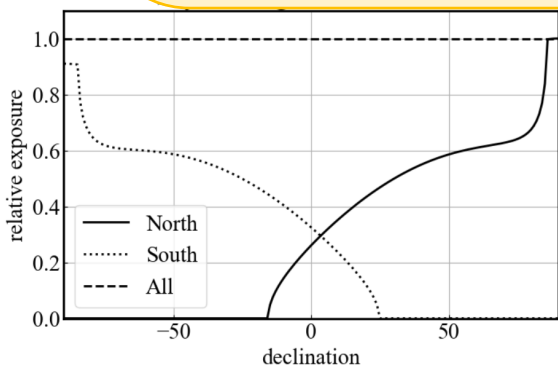
- 宇宙線の到来方向分布 (異方性)
- 宇宙線の到来頻度 (フラックス、スペクトル)
- etc.

の偏向角は
依存
亦も変わる)

→ これらの影響を我々は北半球・南半球に分割して観ている

→ どこまで影響するか？

観測
観測

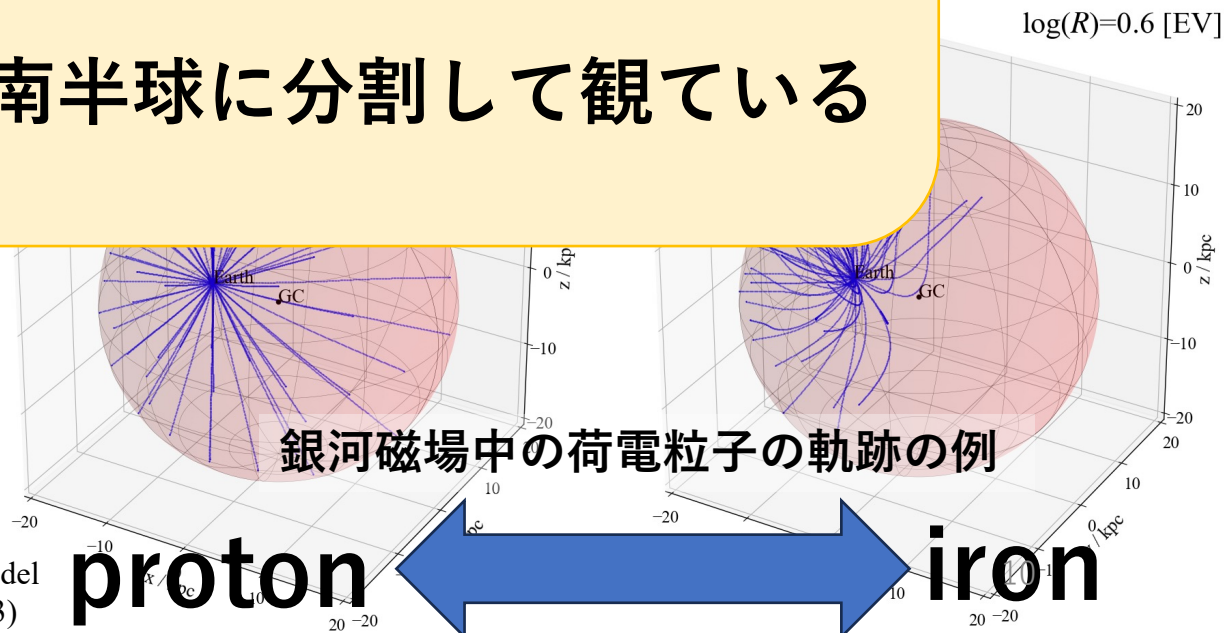


Calculation from Sommers 2001

南大 (Auger)
Dec. < 24.8 deg

(credit: いらすとや)

Trajectories through JF12 model
(Calculated with CRPropa 3)

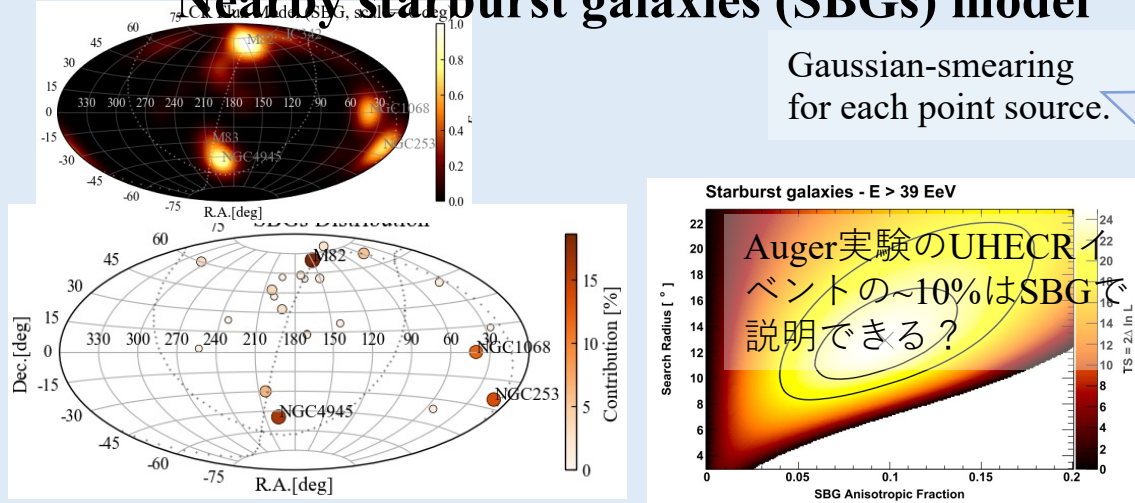


$\log(R)=0.6$ [EV]

研究の例：銀河磁場の異方性解析への影響（今年度出版）

これまでの異方性解析

Nearby starburst galaxies (SBGs) model

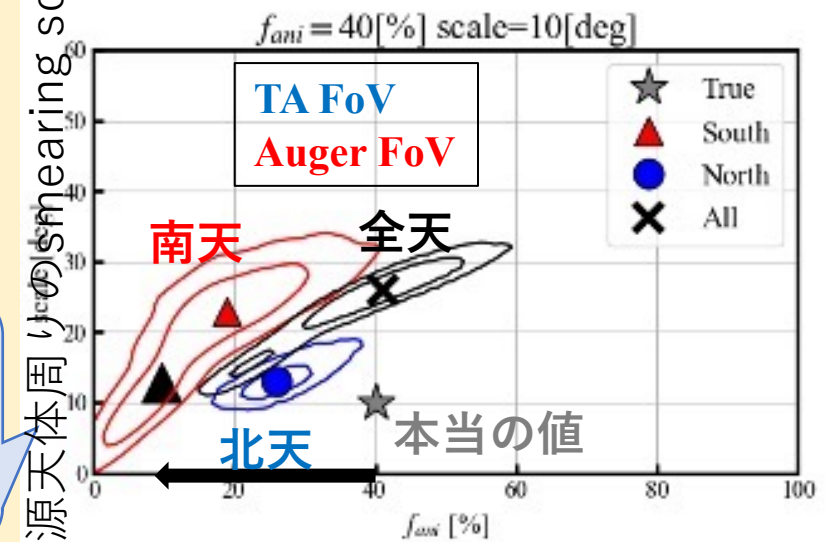


(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)

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

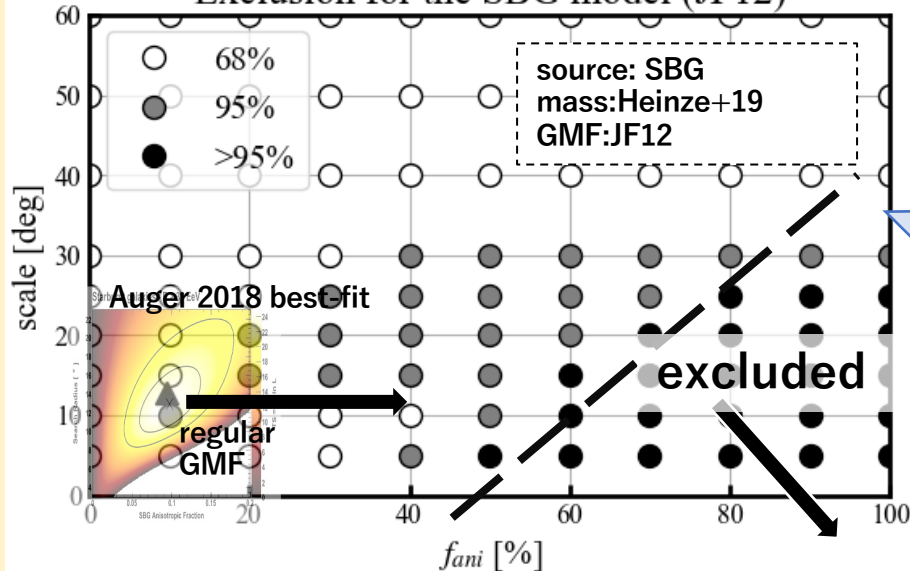
銀河磁場によって北天・南天の結果は一致しない。

Higuchi+2023



起源天体周りのsmearing scale
f_ani: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anisotropy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

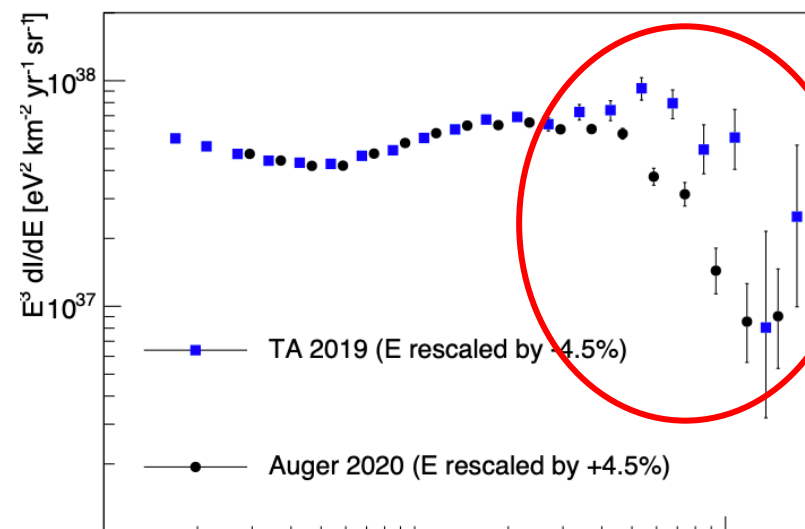
(Higuchi et al 2023, ApJ 949 107)

TA/Augerのエネルギースペクトル

- Auger+TA joint WG (ICRC2021)
 - 高エネルギー領域では（スケールリングしても）南北でスペクトルが一致しない？
- 解釈:
 - 装置・解析手法の違い?
 - →そうではないらしい(ICRC2023)
 - 天体起源?
 - Plotko et al. 2022 (arXiv:2208.12274)
 - 北半球でしか見れない天体がある?(ex. M82)

- 私に興味:
 - そもそも磁場（だけ）でスペクトルはどれくらいズレるのかを確認したい
 - まずは単純なモデルから始めてみる

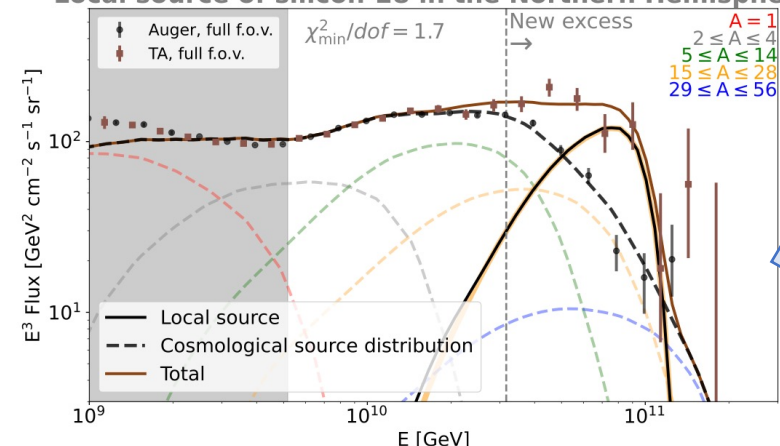
TA/Auger実験のエネルギースペクトル(scaled)



高エネルギーではスペクトルが一致しない（なぜ？）

Auger+TA joint WG (ICRC2021)

Local source of silicon-28 in the Northern Hemisphere

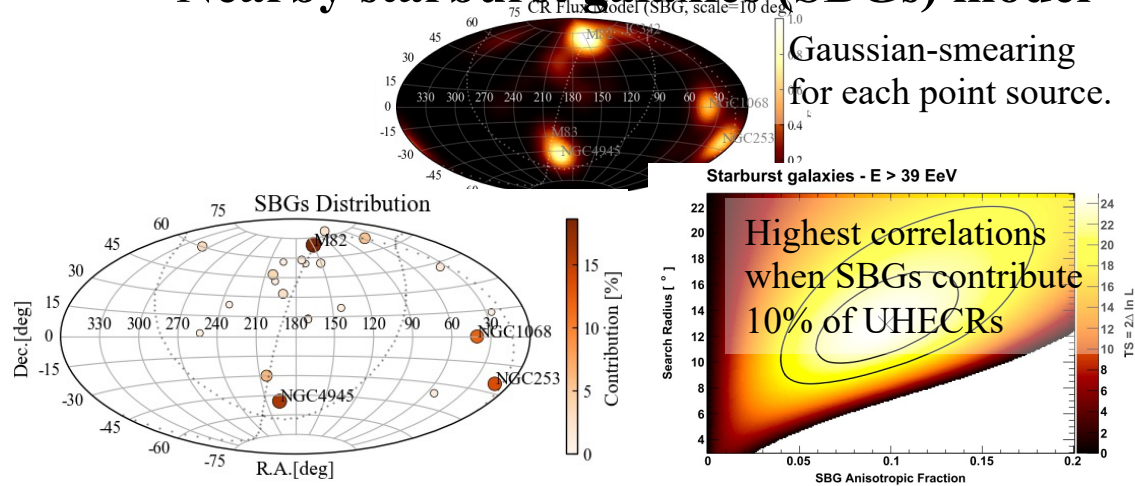


天体起源解釈：北天の起源天体がスペクトルの差異を引き起こしている？

使用するモデル(Higuchi et al 2023, ApJ 949 107)

Source model

Nearby starburst galaxies (SBGs) model



(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)

Mass model

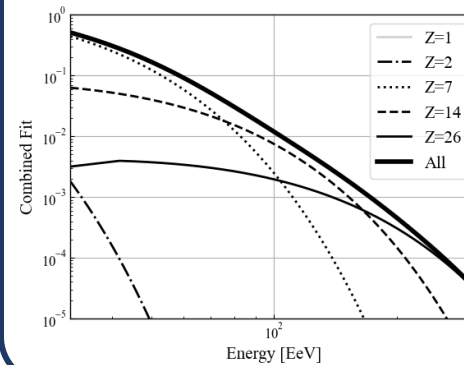
Mixed-mass model from Heinze & Fedynitch 2019 (HF19)

$$J_A(E) = \mathcal{J}_A f_{\text{cut}}(E, Z_A, R_{\text{max}}) n_{\text{evol}}(z) \left(\frac{E}{10^9 \text{ GeV}} \right)^{-\gamma}$$

$$f_{\text{cut}}(E) = \begin{cases} 1, & E < Z_A R_{\text{max}} \\ \exp\left(1 - \frac{E}{Z_A R_{\text{max}}}\right), & E > Z_A R_{\text{max}} \end{cases}$$

Today we assume (P,He,N,Si,Fe)

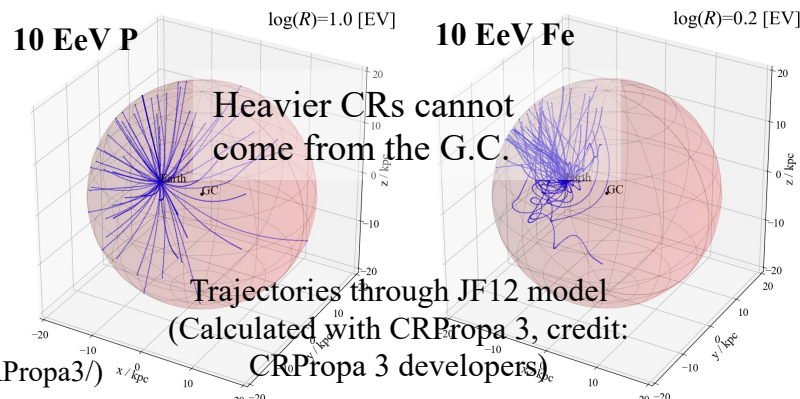
(Heinze, J., & Fedynitch, A. 2019, ApJ, 873, 88)



Single-massについては
-2.7 index power-lawを仮定

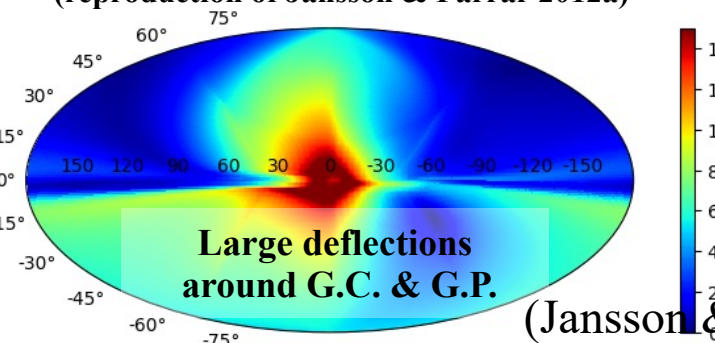
GMF model

JF12 model & PT11 model



(<https://crpropa.github.io/CRPropa3/>)

Deflection angles of 60EeV protons through JF12 model (deg) (reproduction of Jansson & Farrar 2012a)



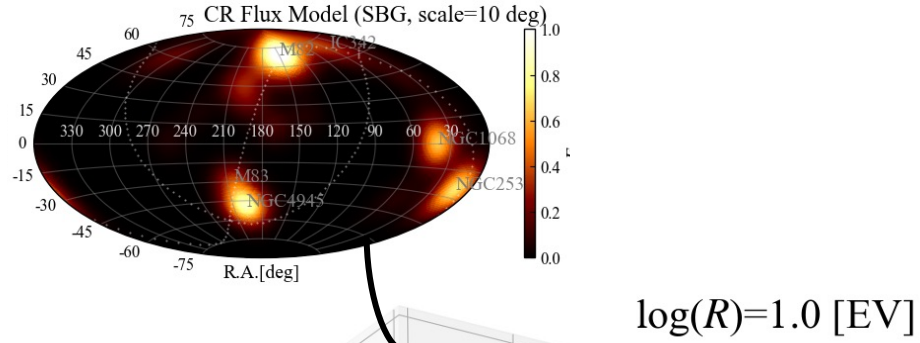
Jansson & Farrar 2012ab (JF12)モデルを使用

(Jansson & Farrar 2012a, ApJ, 757, 14)

(Jansson & Farrar 2012b, ApJ, 873, 88)

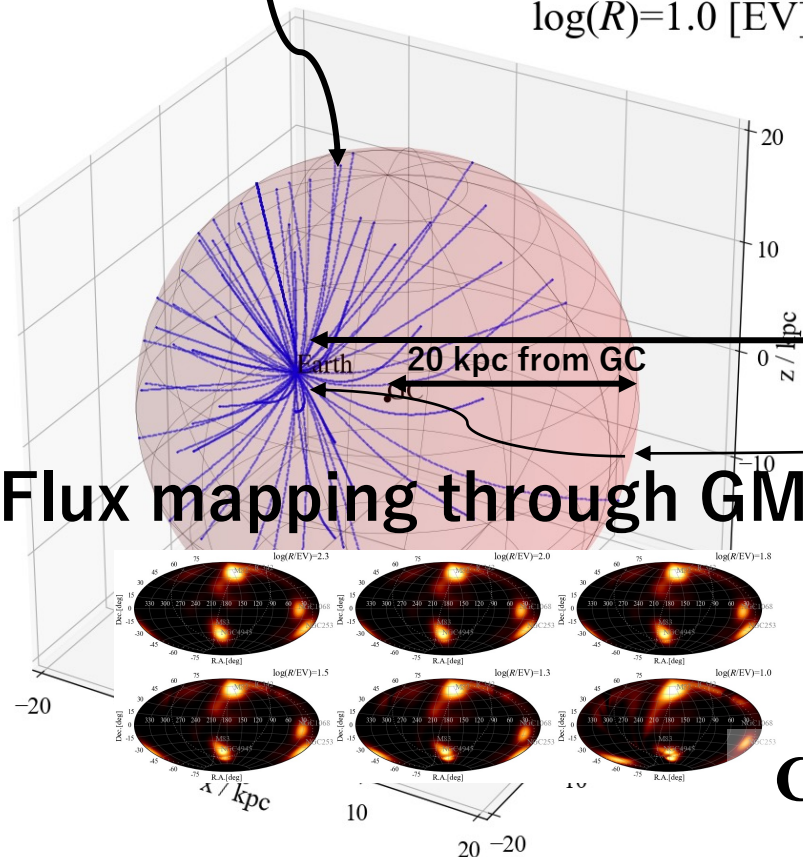
データセット生成

① Calculation of CR flux outside the Galaxy (for each source)

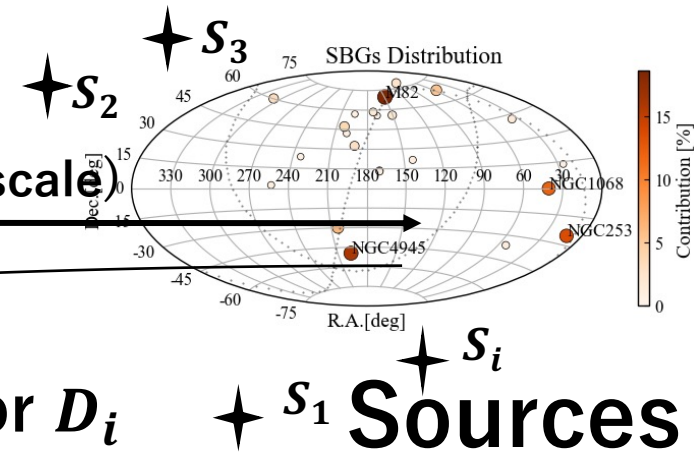


- ①各天体に対し銀河系外でのCRフラックス計算
- ②GMF中の偏向を計算
→地球でのCRフラックスを求める
(各rigidity $eR=E/Z$ に対し)
- ③天体の各距離 D_i に対し1次元の伝搬計算
- ④③の計算結果から粒子をランダムに抽出 (E,Z,A)
- ⑤②のCRフラックスに基づいてランダムに到来方向を決定

② Flux mapping through GMF

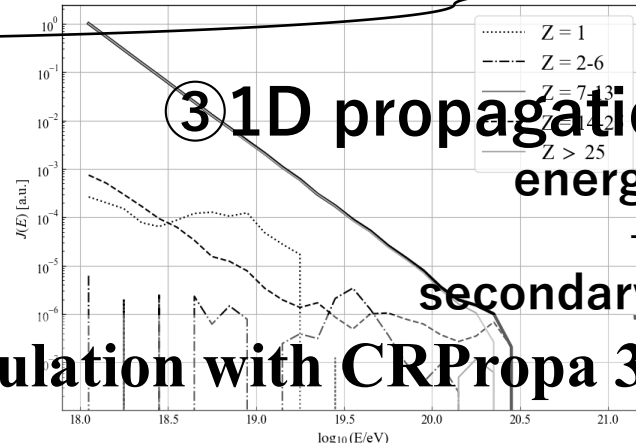


Distance from the Earth D_i (~Mpc scale)

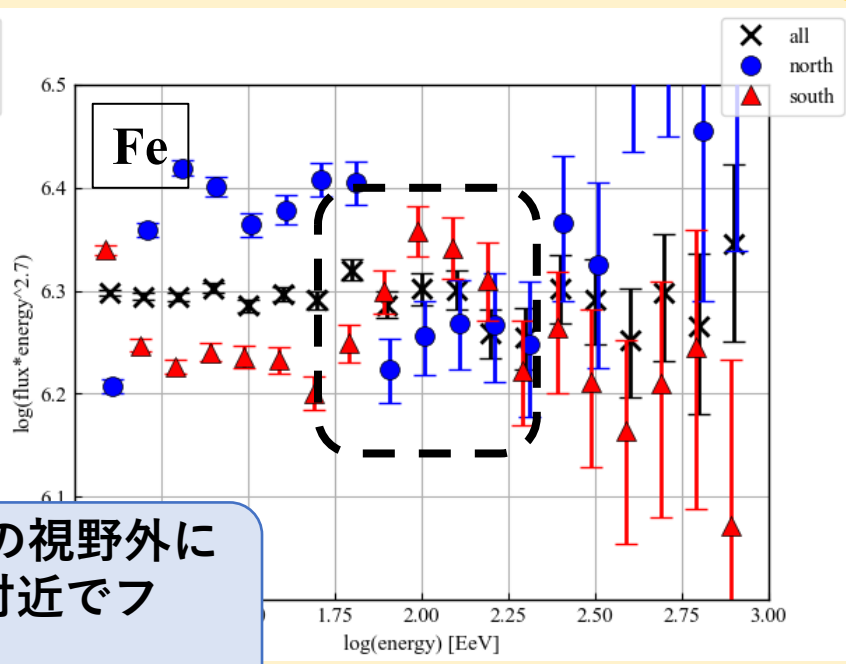
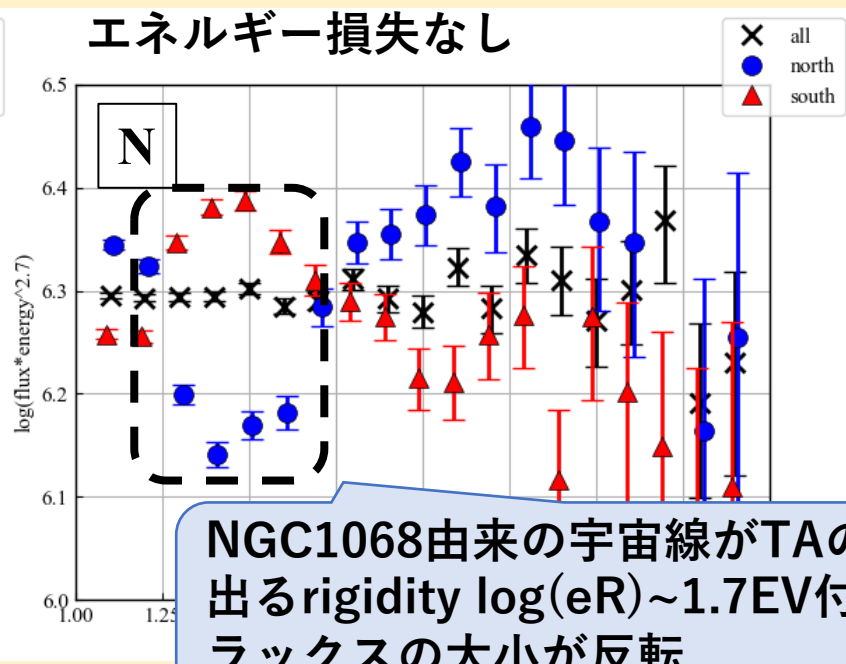
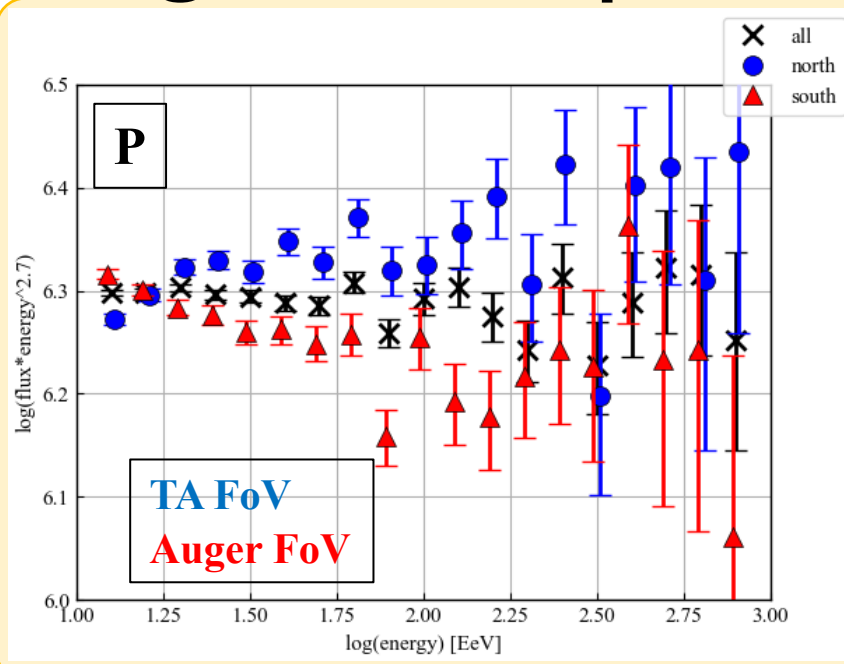


③ 1D propagation for D_i
energy loss
+ secondary particles

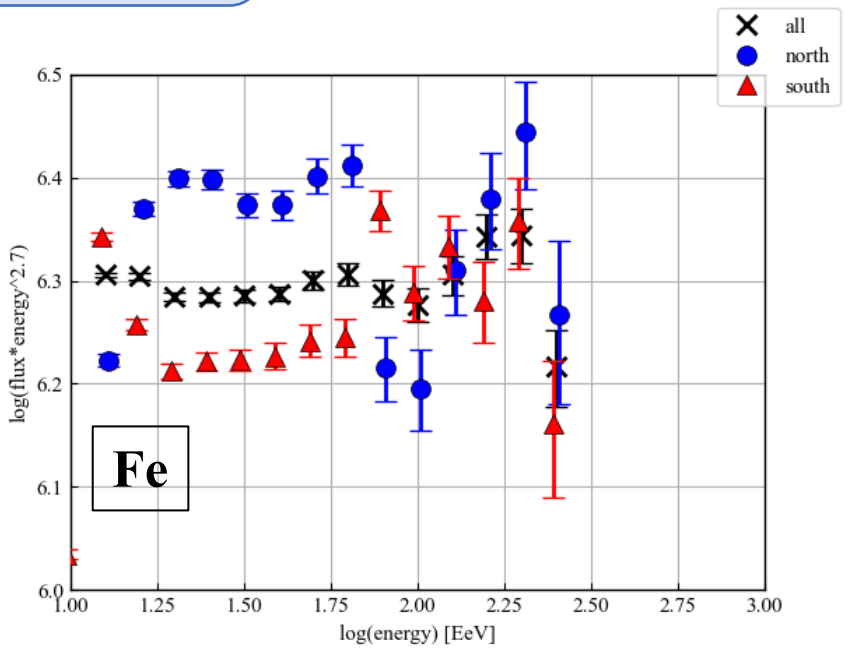
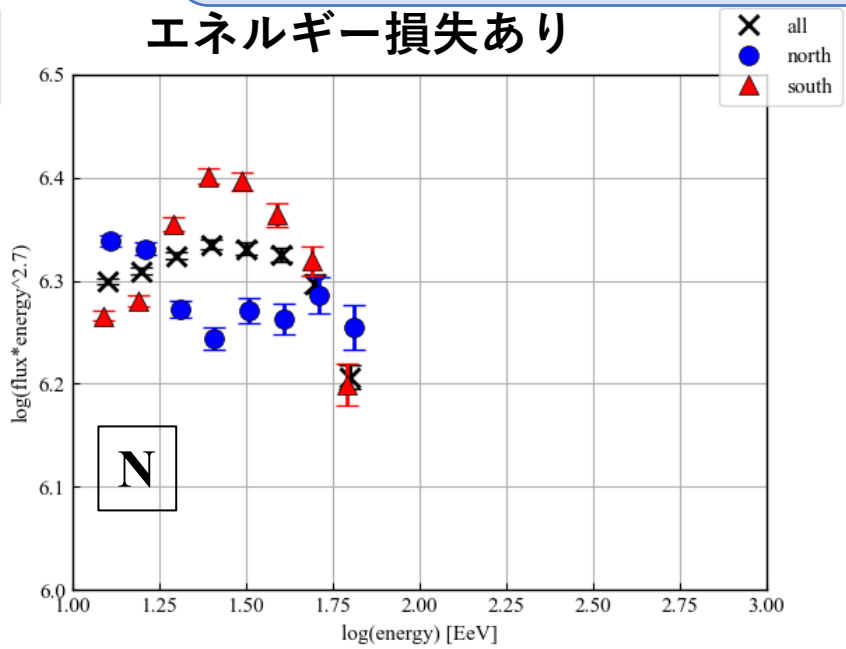
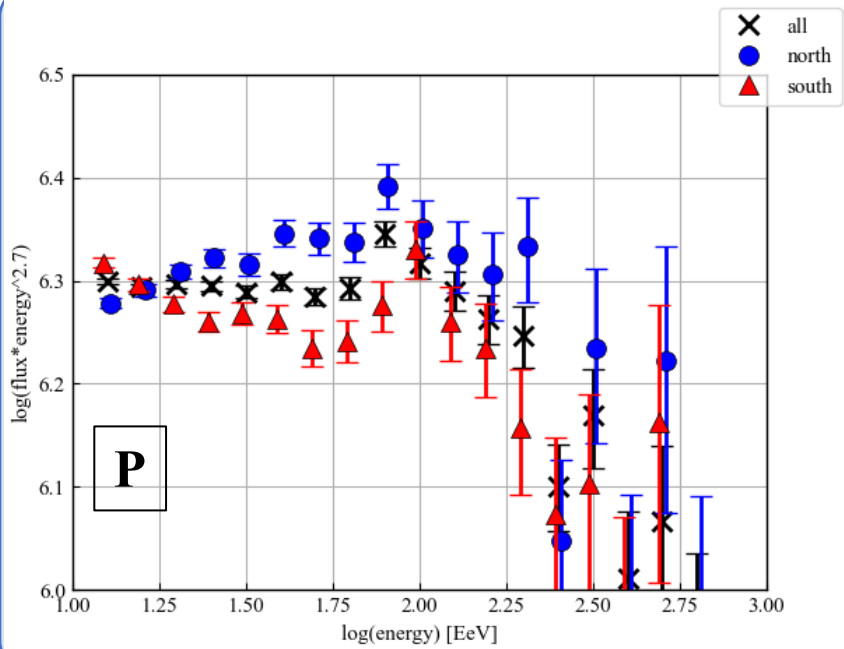
Calculation with CRPropa 3.2



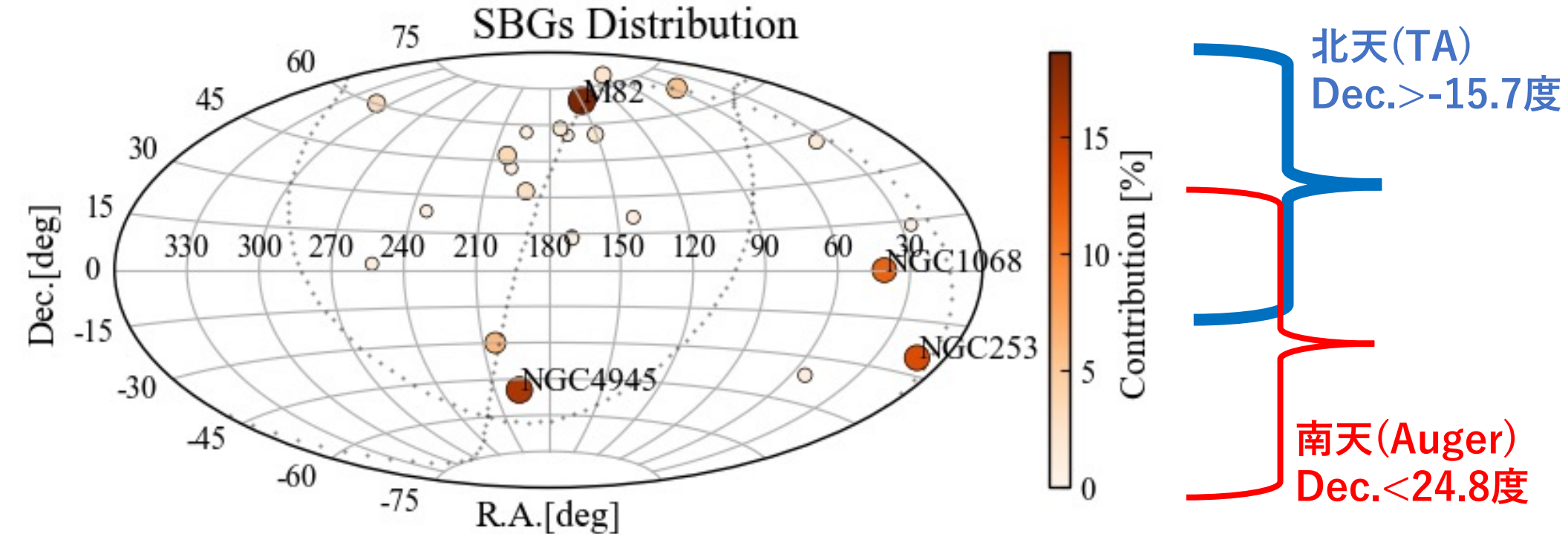
Single-mass (proton/N/Fe, -2.7 index, 10^5 events, JF12)



NGC1068由来の宇宙線がTAの視野外に出るrigidity $\log(eR) \sim 1.7$ EV付近でフラックスの大小が反転

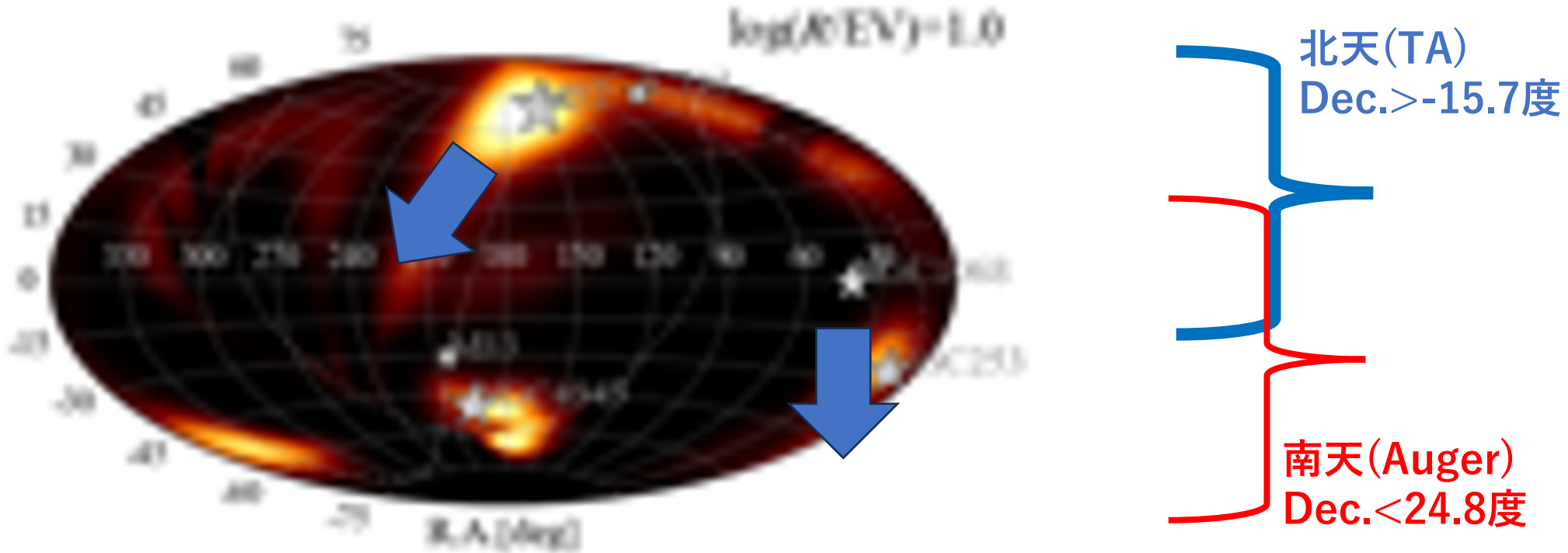


何がTA/Augerのフラックス差を生むのか？



- SBG起源モデル：大きく寄与しているのは4天体：
 - M82, NGC1068, NGC253, NGC4945
 - NGC1068はcommon declination bandに存在(TA/Auger両方で見える)
- 原則としてM82の寄与が最も強い(TAのフラックスが高くなる)
- 磁場の偏向でNGC1068起源の宇宙線がTAの視野で観測できなくなる(rigidityによる)

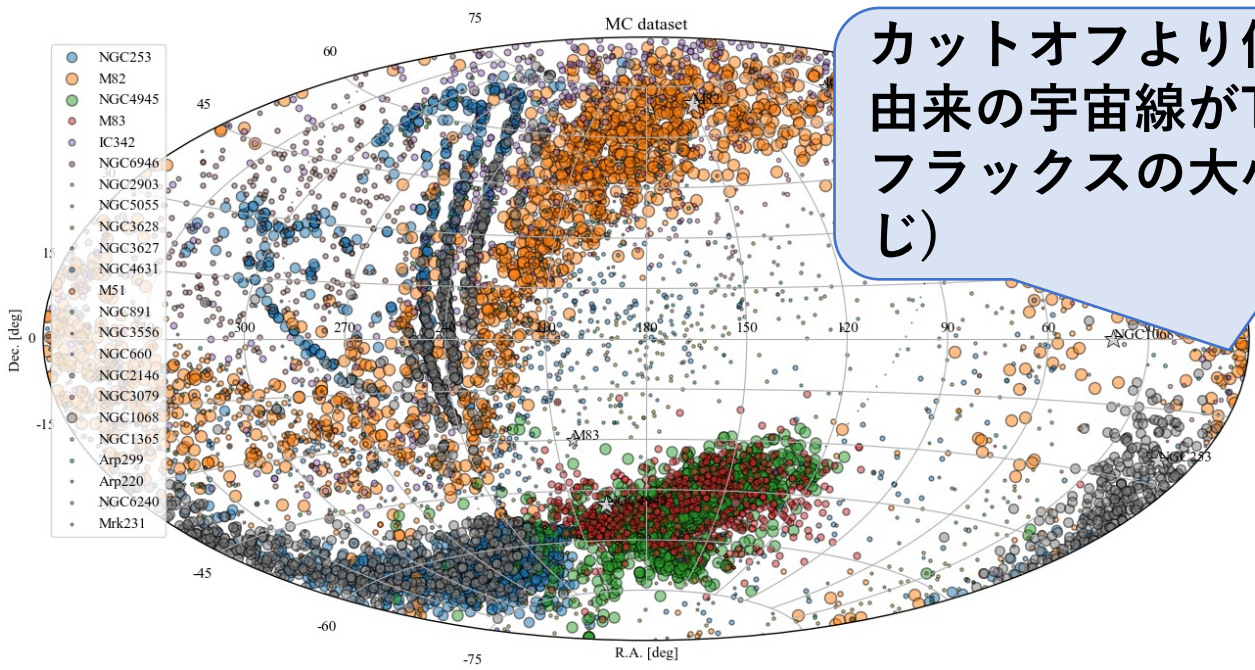
何がTA/Augerのフラックス差を生むのか？



- SBG起源モデル：大きく寄与しているのは4天体：
 - M82, NGC1068, NGC253, NGC4945
 - NGC1068はcommon declination bandに存在(TA/Auger両方で見える)
- 原則としてM82の寄与が最も強い(TAのフラックスが高くなる)
- 磁場の偏向でNGC1068起源の宇宙線がTAの視野で観測できなくなる(rigidityによる)

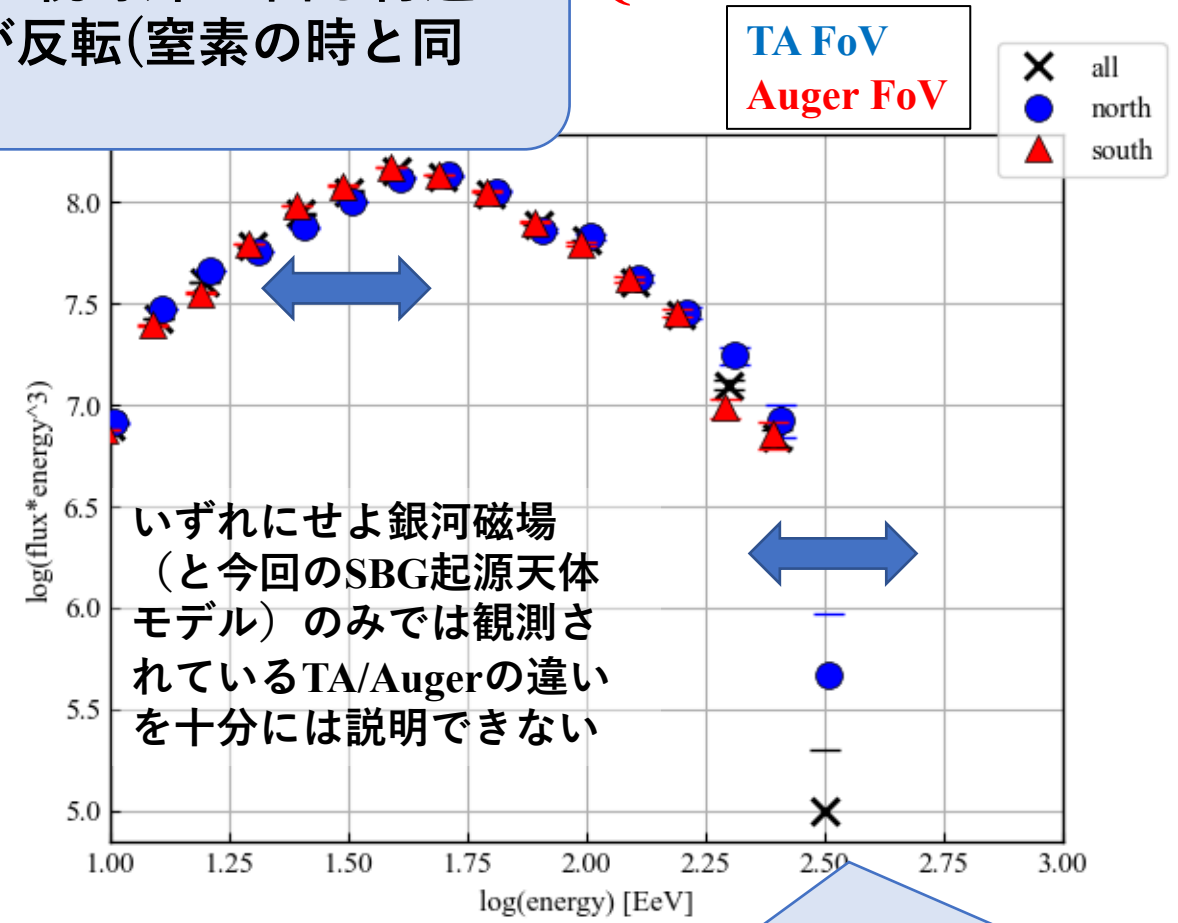
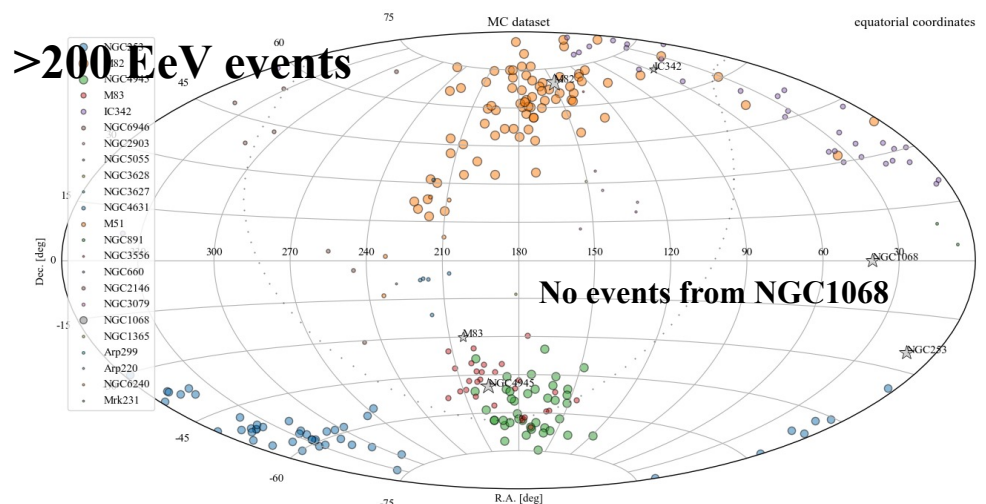
Mixed-mass (10^6 events, JF12)

**SIMULATION
(PRELIMINARY)**



カットオフより低エネルギーでNGC1068由来の宇宙線がTAの視野外に出る付近でフラックスの大小が反転(窒素の時と同じ)

Corresponding sources (10000 events)



いずれにせよ銀河磁場(と今回のSBG起源天体モデル)のみでは観測されているTA/Augerの違いを十分には説明できない

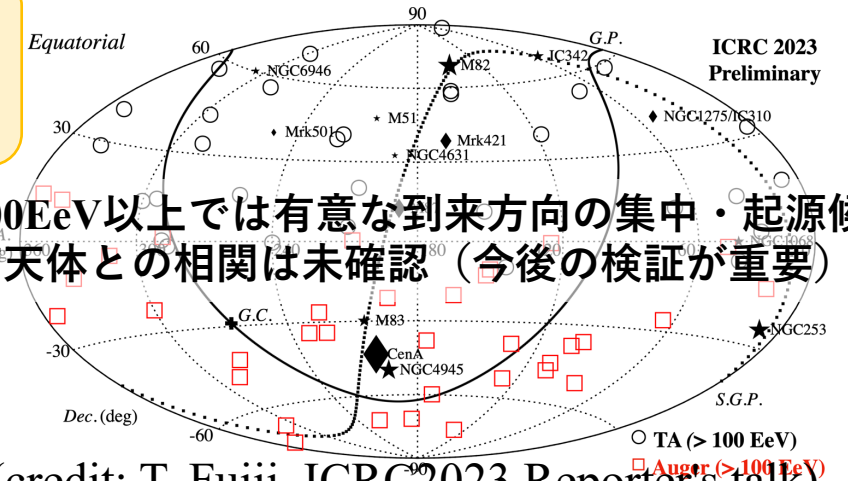
最もエネルギーが高い領域ではNGC1068由来の宇宙線はそのまま到達できない(TAのフラックスが少し高い)

将来計画に向けて

これまでのUHECR研究の解説・イントロの多くは、UHECRが全て陽子である事が暗黙の前提

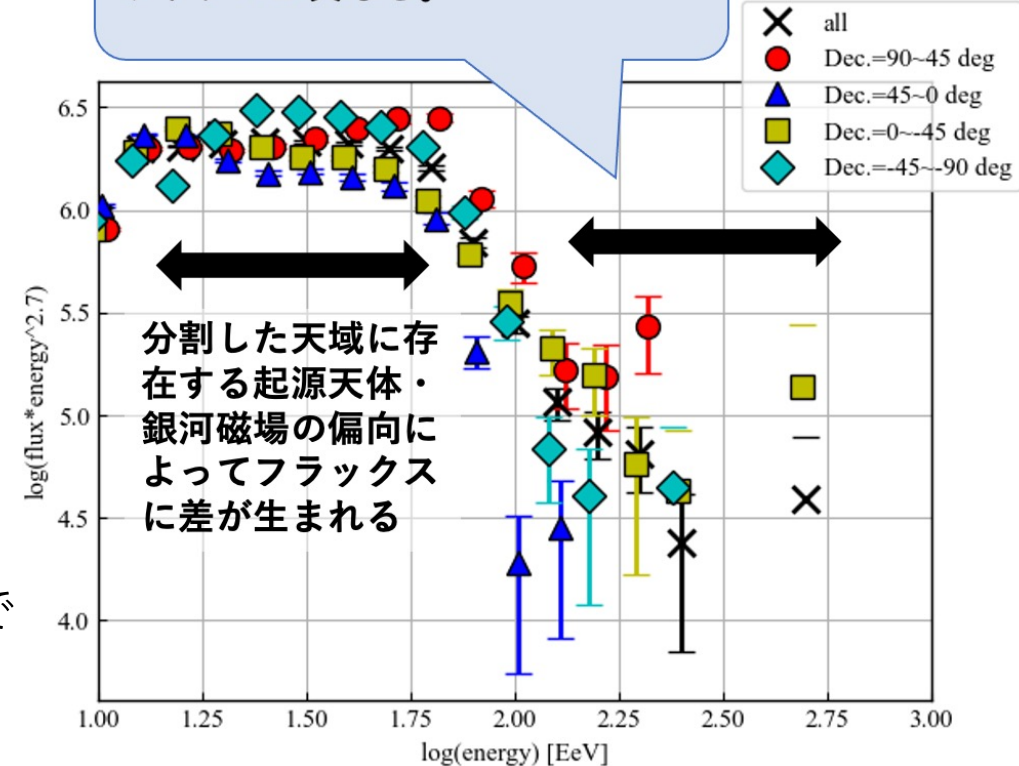
- 現時点での観測結果の示唆：
 - 100EeV以上の粒子では特に異方性や相関は見られない（質量組成が重ければ説明可能）
 - **これまでの数密度による異方性解析によるアプローチで、どこまで起源に迫れるか？**
- その他のアプローチの提案：
 - イベント毎の質量への感度を高めてrigidityの高い粒子（陽子）に絞る
 - →統計の問題+どのエネルギーに観測を絞るか？
 - **到来方向とエネルギー分布による起源天体推定**（He et al. 2016に基づく理研を中心とした研究）
 - エネルギースペクトルがrigidityのビンとcoherentな磁場の影響を受ける→天域で分割すれば影響が見れる？
 - 全天で同じ検出器・解析手法を適用すれば有効なのではないか？（ex. GCOS project）

100EeV以上では有意な到来方向の集中・起源候補天体との相関は未確認（今後の検証が重要）



(credit: T. Fujii, ICRC2023 Reporter's talk)

最高エネルギーのビンも起源天体の地球までの距離に依存してフラックスが異なる。



まとめ

- 銀河磁場のTA/Augerエネルギースペクトルへの影響：
 - 仮定する組成・rigidityに応じてTA/Augerでfluxに差が出る
 - 磁場モデルのcoherent成分に大きく依存
 - どの起源天体からの粒子が・TA/Augerの視野で観測されるかでスペクトルに差異が生まれる
 - highest-energyビンでは起源天体の距離が大きく差異に寄与する
- 今後：
 - 今回の仮定では観測されているTA/Augerのスペクトルの差異を説明できない。
 - 質量組成異方性（Auger報告）の説明
 - エネルギースペクトルを任意の天球面で分割して磁場と質量組成の情報を得られないだろうか？（将来計画との関連）

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？）

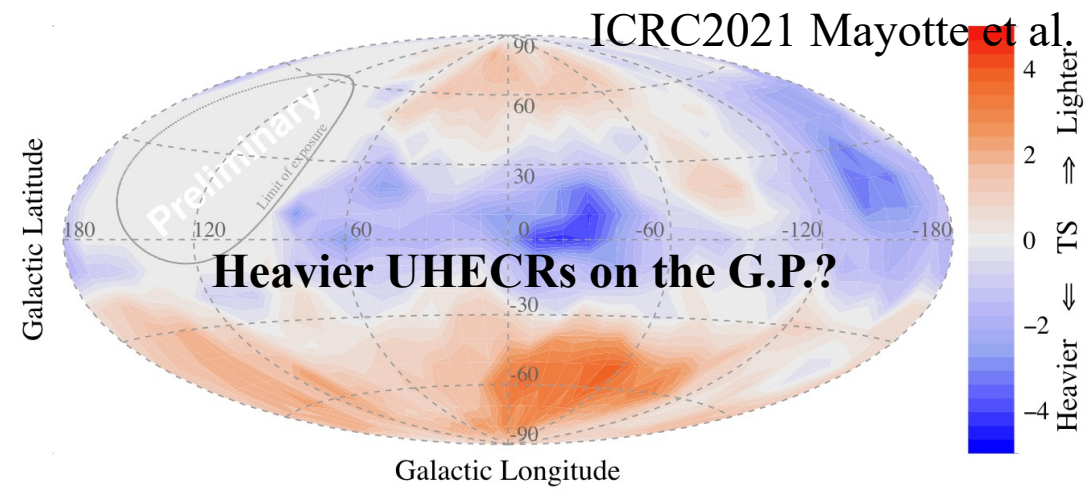


Figure 8: Sky map of cosmic ray composition for $E \geq 10^{18.7}$ eV

