

# UHECR異方性解析とその課題

樋口 諒（理研）  
空気シャワー勉強会

# 趣旨

- 今TA/Auger実験で行われていることと、その課題
- GCOSに向けての提言
  
- 一部スライドの主な引用元・参考
  - 昨年のE. Parizotのグループの論文・UHECR2024講演
    - [https://indico.ahuekna.org.ar/event/768/sessions/87/attachments/407/578/UHECR\\_2024\\_Malargue\\_Parizot.pdf](https://indico.ahuekna.org.ar/event/768/sessions/87/attachments/407/578/UHECR_2024_Malargue_Parizot.pdf)
  - 吉田滋「深宇宙ニュートリノの発見」（光文社新書）

# TA/Auger実験の前のUHECR観測予想

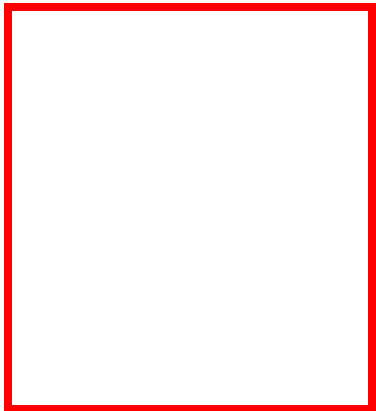
福島&吉田、日本物理学会誌、Vol.55、No. 12、2000年より

- いわゆる「マルチメッセンジャー天文学」的なアイデアは既にまとまっている
- 当時はUHECRの組成は陽子を想定：
  - ここ20年の質量組成の議論/近年のニュートリノ観測を反映させたアップデートを考えるのも楽しそう。
  - **こういうロードマップを作るの好きなので今週話しかけてください**

# TA/Auger実験の前のUHECR観測予想

福島&吉田、日本物理学会誌、Vol.55、No. 12、2000年より

- 現時点でのUHECR起源の具体性のある議論は「天文学」の領域に閉じようとしている
  - 今回はUHECR起源は既知の天体だという前提で話をします
  - 10年後に間違ったら講演者を鼻で笑ってください
- **「新しい物理」は魅力的だが、既存の天体やモデルでできる説明をし尽くせていない段階では時期尚早だと思う。**
  - まずは「天文」をやり尽くす
  - でないと、本当に「新しい物理」が見えた時にそれが新しいのかすらわからないと思う



# 中角度異方性探査の手法

## 密度超過サーチ(blind search):

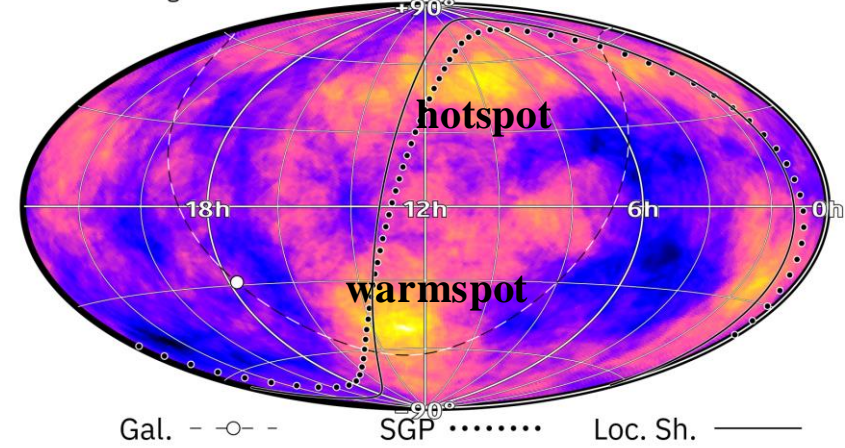
- エネルギー閾値・探査角度をパラメータにして到来方向の集中(数密度超過)を探す。
- Li-Ma significanceの計算(等方分布に比べてどの程度集中しているか?)
- TAホットスポット・Augerウォームスポットの発見

## 起源天体カタログとのlikelihood解析:

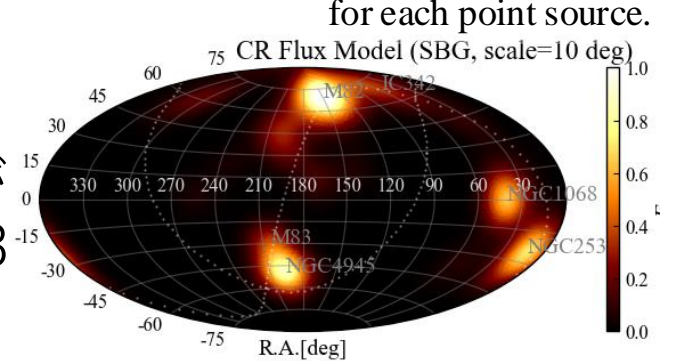
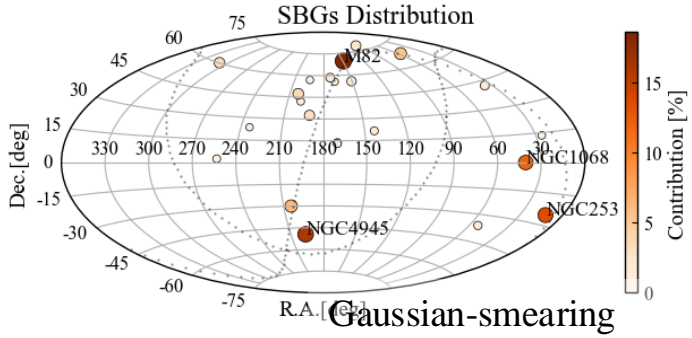
- 起源天体候補カタログ(SBGやAGNなど)から天体起源のモデルによる宇宙線のフラックス分布を予言
- 観測データの到来方向分布を説明する最もらしいパラメータの推定
- 近傍スターバースト銀河(SBG)が最も相関が良い?(Auger collaboration 2018, ApJL, 853 L29)→ここ最近では最も良く言及される起源天体候補

去年の空気シャワー勉強会のスライド

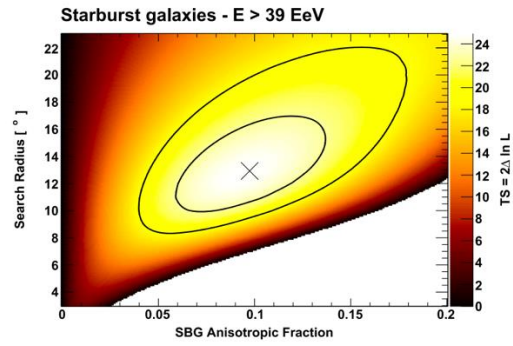
(Auger and TA Anisotropy WG, arXiv:2001.01864)  
 $E_{Auger} \geq 40 \text{ EeV}$ ,  $E_{TA} \geq 53.2 \text{ EeV}$ ;  $20^\circ$  smearing



## Nearby starburst galaxies (SBGs) model



Auger実験のUHECRイベントの~10%はSBGで説明できる?

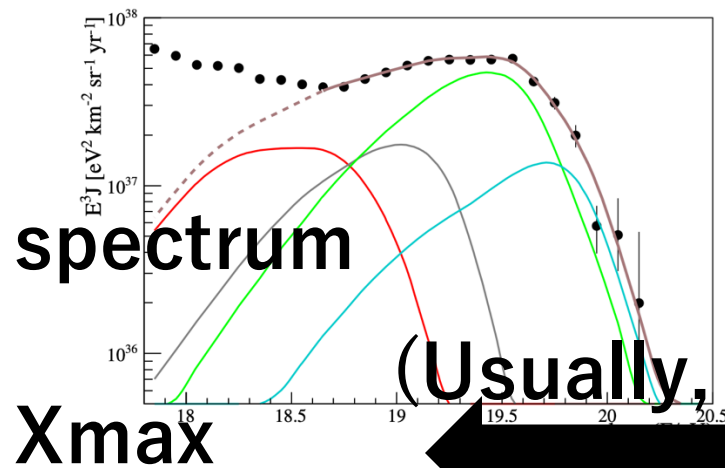


(Auger collaboration 2018, ApJL, 853, L29)

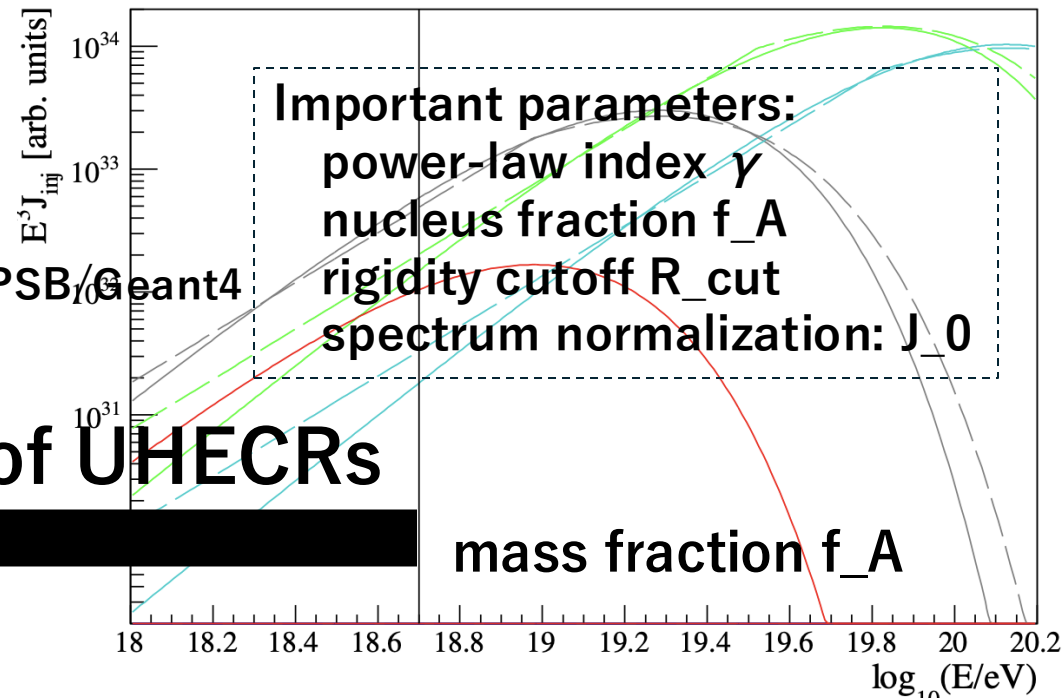
# “combined-fit”の手法

## Injected spectrum on sources

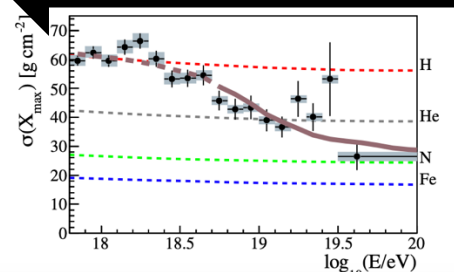
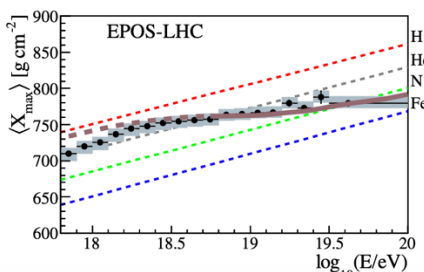
## Fitting on Earth



Models:  
 MC: SimProp/CRPropa  
 photodisintegration: TALYS/PSB/Giant4



(Usually, ) 1D propagation of UHECRs



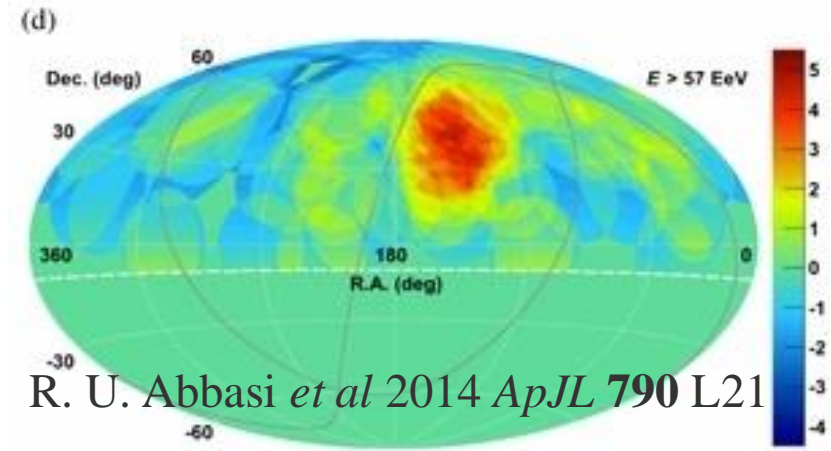
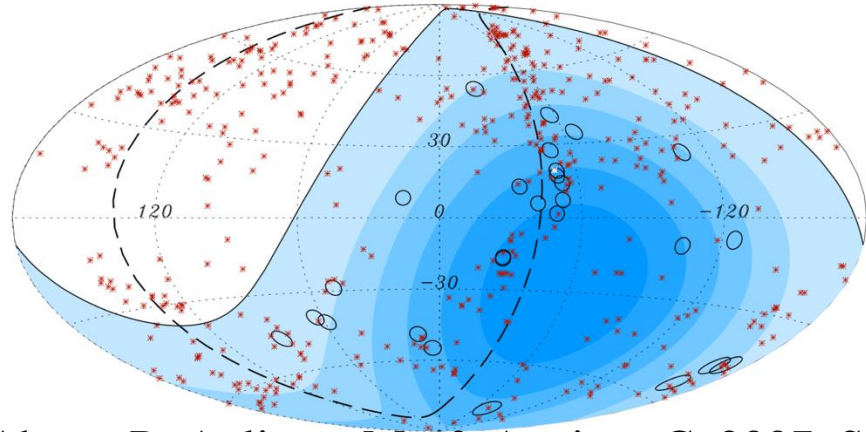
hadron interaction models:  
 EPOS-LHC/QGSJetII-04 /Sibyll 2.1

Constrain parameters:

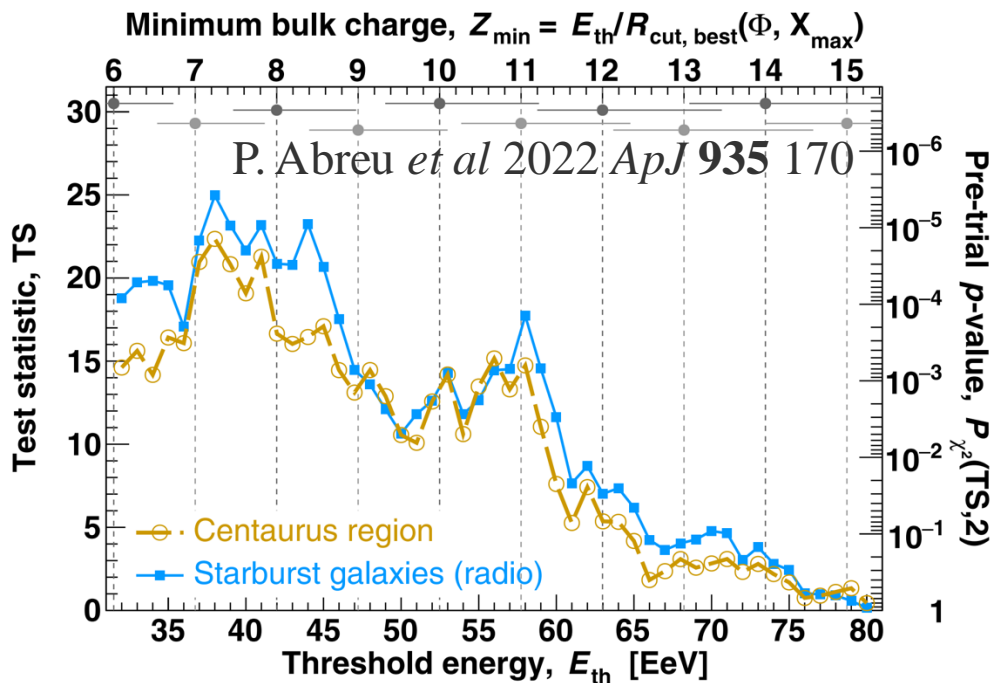
( $J_0, \gamma, R_{cut}, f_A$ )



# 異方性解析のこれまで



Abreu, P., Aglietta, M., & Aguirre, C. 2007, *Science*, 318, 938



- **活動銀河核 (AGN) との相関報告** (*Science* 2007)

- → その後の検証で相関は見られず (2010)

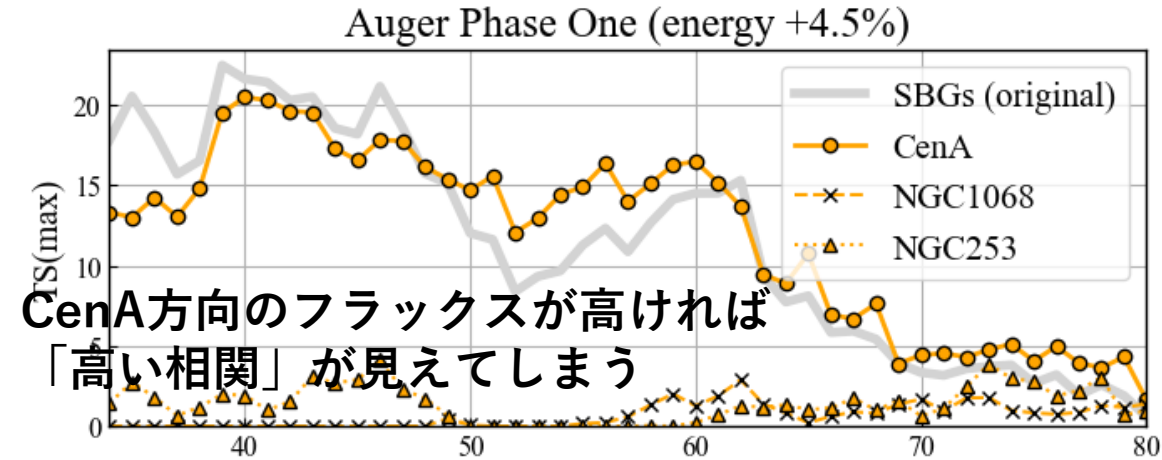
- **「ホットスポット」の検出**

- **スターバースト銀河 (SBG) との相関? 報告** (Auger 2018/2022)

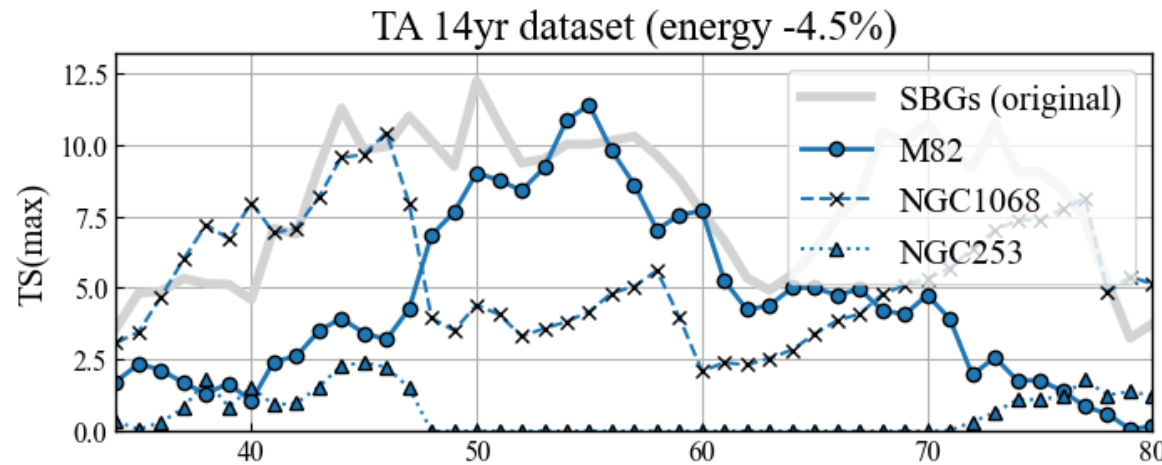
- この結果がどれぐらい信用できるの? 磁場がどれぐらい効くの? ← 私がやってた + やってること

# TA/AugerのSBG “correlation” search

- Augerのデータ：
  - CenAにフラックスの超過があればTSが  
高く出てしまう
  - ~40/60 EeVに2つのピーク⇒combined-  
fitのR\_cutを仮定するとCNO組成？



- TAのデータ：
  - M82/NGC1068が高いTSを示している
  - M82はE~55EeVに単一ピーク (hotspot  
の位置)
  - NGC1068はダブルピーク



- 何が言えるのか？(SBG起源として)
  - 個々の天体の特徴の違い (メインの組成  
or R\_cutを見ている？)
  - 銀河磁場の偏向で天域ごとの違いを見て  
いるのか？
  - 現時点ではなんとも言えないが、少なく  
とも全く同じ起源モデルで説明するのは  
厳しそう

M82が「ホットスポット」Eth [EeV]  
に単一ピーク

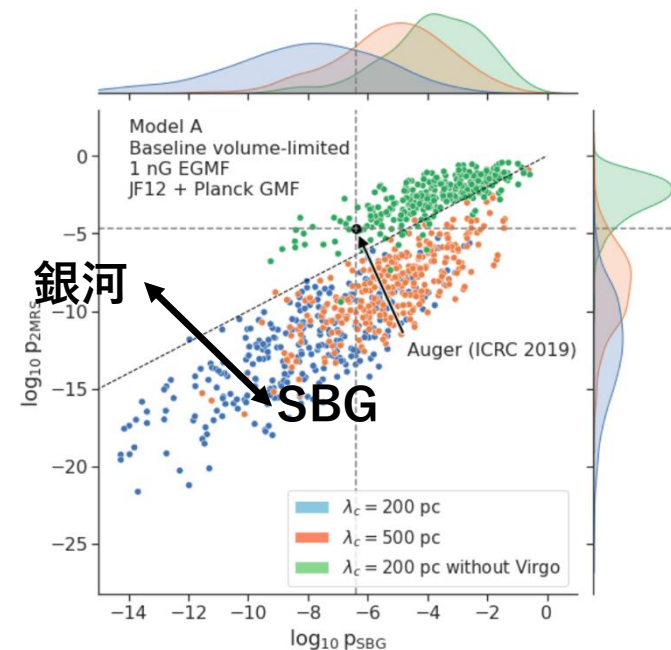
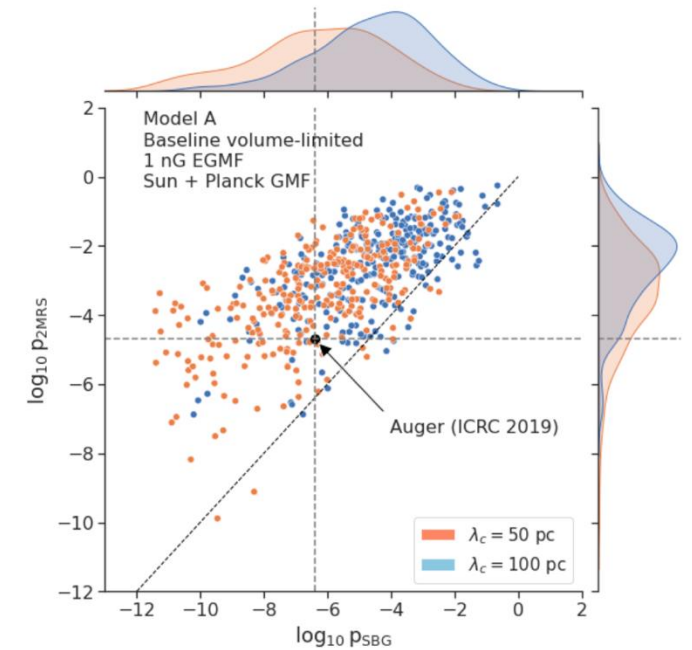
M82/NGC1068が重なって二つのピークを形成  
Augerとは描像が違う (なぜ?)



# 連作論文

## ”What can be learnt from UHECR anisotropies observations I/II”

- 現状のUHECR観測（特にAuger）で行われる異方向性解析に対し、astrophysicalな情報を得られるかをシミュレーションで検証した論文
  - 近傍の大規模構造に沿った銀河分布(2MASSカタログ)
  - 現状の観測と無矛盾な天体モデル
    - スペクトル/質量組成/銀河磁場+系外磁場モデル
- カタログとの”相関解析”に関しては、銀河磁場モデルに依存して結論が変わってしまう現状



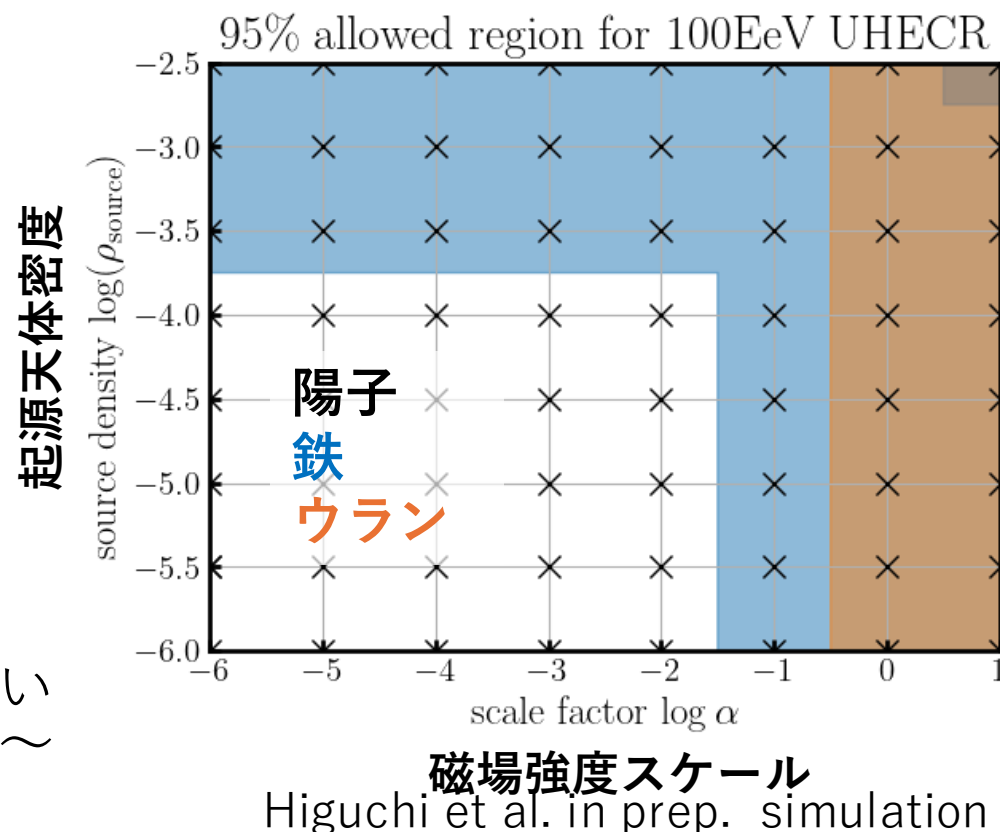
# 異方性解析の課題

- 「 $X\sigma$ のシグナルを見つけた→何年後かに消えた」の繰り返し
  - その「有意度」は統計的に正しく/物理的な仮定に基づいて求められたのか？
  - 「物理的なモデルを立てる→解析手法とパラメータを決める→解析」が筋なのは？
  - likelihood analysisで確実に言えるのは帰無仮説の棄却：「**~40EeV以上のUHECR分布が等方ではない**」という結論のみ
- 「**有意な相関・密度超過を示す = そこに起源天体である**」ではない！
  - 学会発表の度に言うようにしている。
  - でないと、一度出た「有意度」の結果と手法の検証に時間を費やし、向こう10年の議論をミスリードしてしまうことになりかねない
- 「**君たちの誤差と我々の誤差は意味が違う**」 ← 戸塚先生の言葉
  - (吉田滋「深宇宙ニュートリノの発見」(光文社新書)より)
  - 「 $X\sigma$ の相関を発見した」「差異を発見した」「超過を発見した」という報告にはそれなりの慎重さが問われる

# 異方性が”見えない”ことからアプローチ

- 起源天体分布は大規模構造周りに分布するはず
- →期待される異方性の不在から起源天体密度・磁場強度の制限
  - Virgo cluster周りのexcessの不在
  - 100 EeV以上での異方性の不在
- 起源天体密度・宇宙磁場強度の下限は制限できる
  - 厳しい制限とは言えない（辻褄が合う）
  - 質量組成に大きく依存
- 新しい起源天体モデルができた時に気になること：
  - 何を見ればモデルを検証できるのか
  - 既存の観測と接続するか
  - 個人的には「候補天体が天の川銀河の周りでどういう分布をしているのか」までの示唆があると伝搬～空気シャワーの接続がスムーズになる気がする

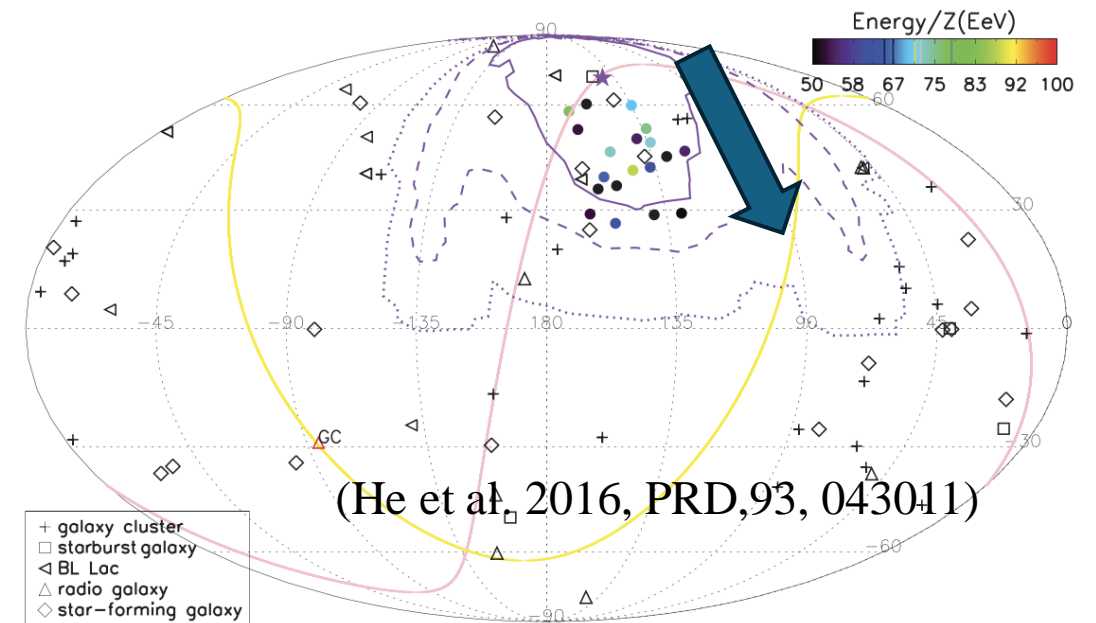
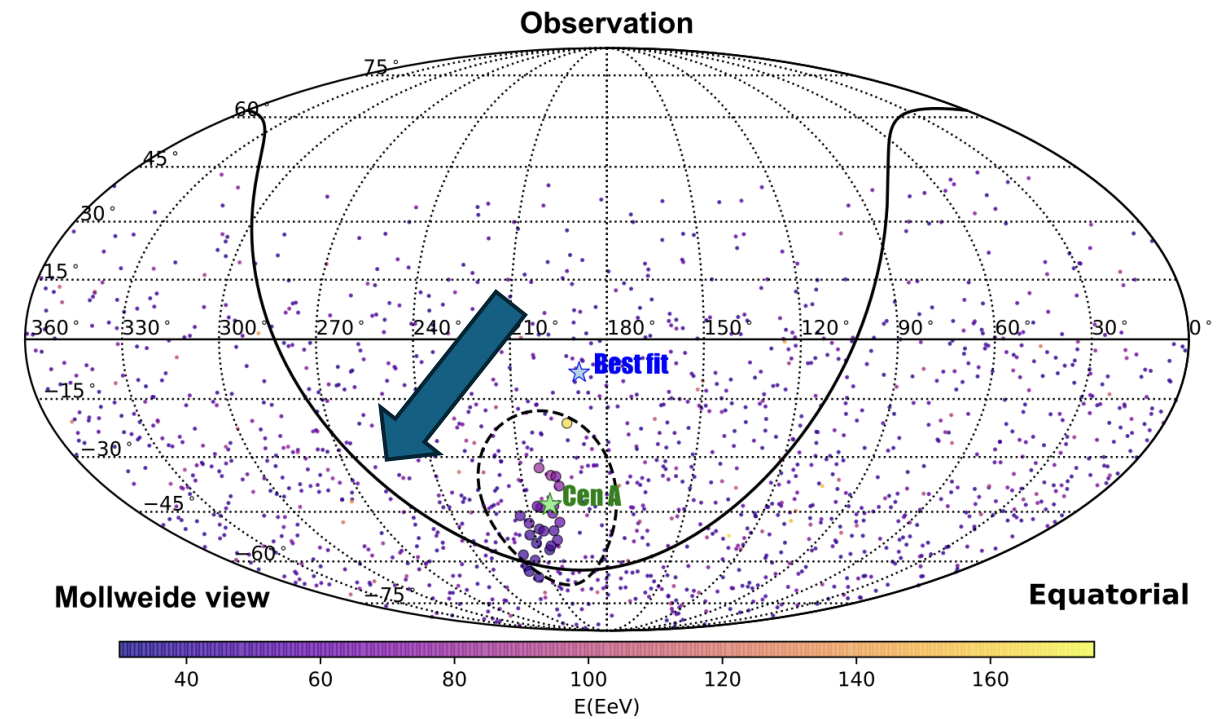
100EeV宇宙線が等方分布の時認められるパラメータ範囲



# そのほかの手法

## He et al. 2024

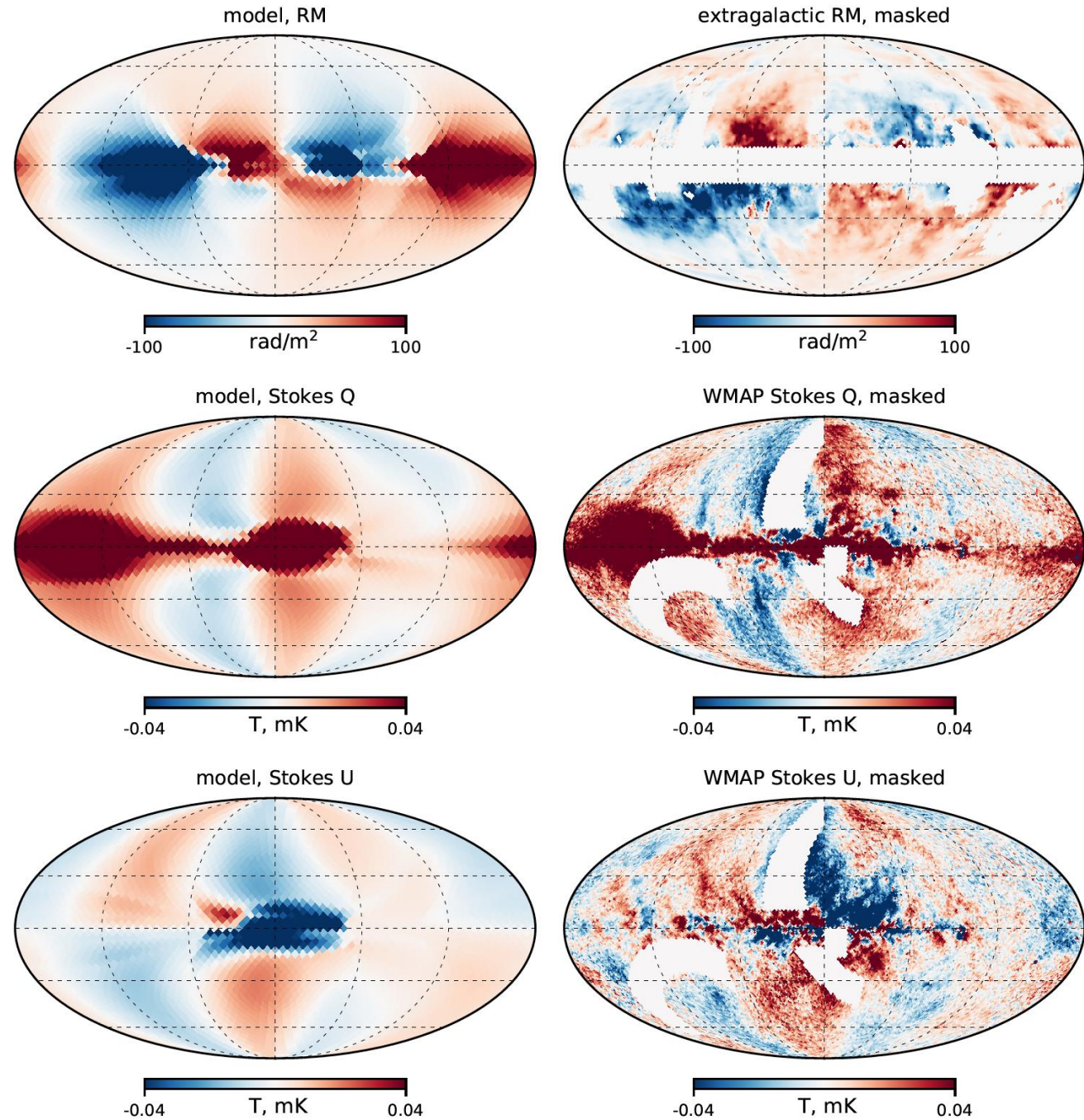
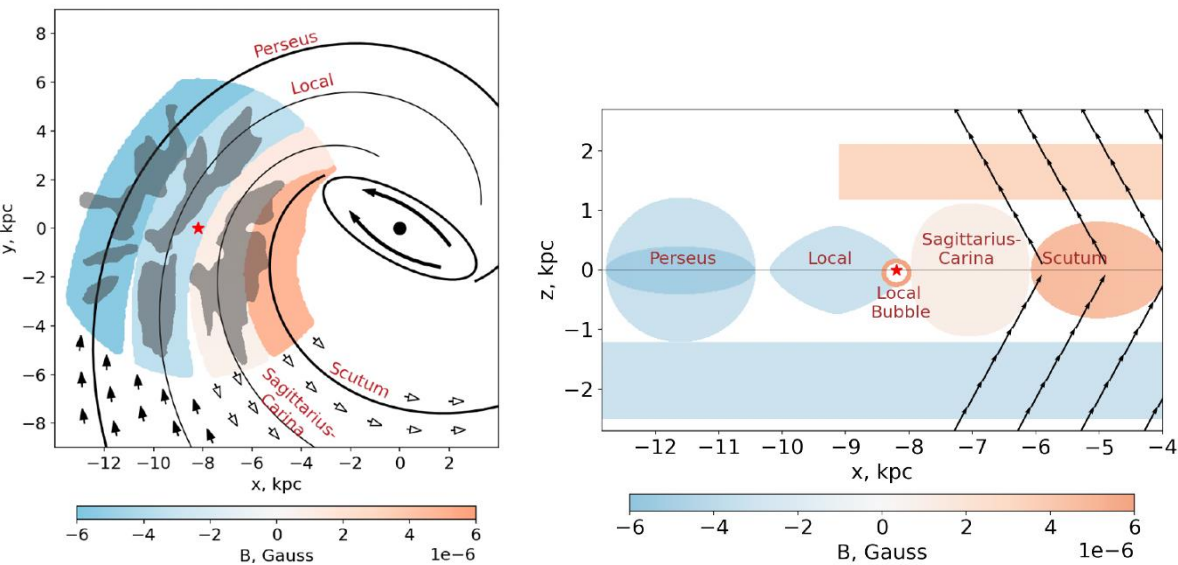
- 元の発想はHe et al. 2016
- 単一起源天体ならば、磁場の偏向 + 散乱で起源天体周りのイベントにエネルギーの傾斜が見えるはず。
  - Augerの公開データ → 従来超過の見ていたCen A周りではなく、Sombrero銀河周辺にbest-fit
  - 銀河磁場モデルJF12の偏向の方向と一致？
  - 質量組成は単一 → この辺の仮定も検証が重要





# 銀河磁場モデルのアップデート

- UF23: Korochkin et al. A&A, 693, A284 (2025)
  - Jansson & Farrar 2012abのアップデート
- KST24:
  - Pshirkov & Tinyakov 2011の後継に当たる
  - これまで大幅にマスクされてきた観測データの領域 (Fan region) なども採用
  - local bubbleの構造を組み込む
    - ⇒JF12らで現象論的に組み込まれてきた”striated field”の問題を解消



**Fig. 6.** RM (top row) and polarised synchrotron skymaps for Stokes Q (middle row) and Stokes U (bottom row) produced with the best-fit model (left column) in comparison with the data (right column). Masks on the data maps are discussed in the Sect. 2.2.

## ① UHECR 加速起源

- a. 元素を合成できるか
- b. 合成した元素を加速できるか
- c. 加速した元素が脱出できるか
- d. 起源天体がどう分布しているのか
  - ・ 大規模構造に沿ってどう分布しているか
  - ・ 磁場構造・伝搬との接続

## ② 宇宙空間の伝搬

- a. 光核反応
- b. エネルギー損失・二次粒子生成 ニュートリノ/ガンマ線
- c. 磁場の偏向・拡散
  - ・ 磁場の構造はどうなっているのか（観測・理論）
  - ・ どのエネルギーの・どの原子核が・どの方向から地球に到来するか
  - ・ 空気シャワーとの接続

## ③ 空気シャワーの物理

- a. どの方向から・どのエネルギーのどういう原子核が来るか
- b. どういう空気シャワーを生成するか
  - ・ ハドロン相互作用をどこまで抑え込めるか
- c. 再構成をどうするか

# UHECR起源のための10ステップ？

- ・ おそらく10ステップを「全て」「連続性を保って」解き明かさなければならない
- ・ ①②③は個別の分野として扱われやすい
  - ・ ①と②、②と③が連続して議論されなければならない
- ・ ニュートリノ/ガンマ線の位置付け
  - ・ 重い質量組成の場合、どこどこを結ぶのか？

※妄想段階なのでコメントお願いします



# 次世代宇宙線望遠鏡（GCOS）で何ができるか？

- もちろん、**観測の継続は最優先事項**
  - 全天+質量組成+大統計
  - ただ多分「より大統計」「より高精度」だけでは解決しない課題がいくつもある
- 時間との戦い
  - **人間の寿命は短い（数十年ぐらい？）**
  - 大体3-5年おきに成果が求められる、継続して短期スパンのゴールを設定できるか
- コミュニティの問題：多分既存の空気シャワー実験コミュニティ（TA/Auger）だけに籠っていては解決しない
  - 前ページ10項目を全て解決する前提で取り組まないと起源はわからないのでは？
  - 「荷電粒子天文学」を**本気で**提唱するなら、天体/磁場観測へのアクセスは不可欠
  - 宇宙磁場の制限→SKA実験 / 天体の理解→日本天文学会
  - 建設地へのリスペクト・仁義の通し方

# まとめ

- UHECR起源の描像は、四半世紀前の期待に反してはるかに複雑になっている
  - 単純な到来方向の異方性の議論ではうまくいかない
  - 情報を得られても「状況証拠」にしかない
  - うまくいかない理由として、大事なステップをいくつか見落としている
  - また、起源天体モデルの方も、同じ種族に全く同じエネルギースペクトルと組成を仮定できるようなシンプルな描像ではないかもしれない。
- UHECRの「ゆりかごから墓場まで」小さなステップを一つ一つ丁寧に進めていく必要がある
  - もちろん空気シャワー（本研究会）は重要なトピック
  - 宇宙磁場の話ももっと詰められるはず
    - 電波観測+モデル+シミュレーション
  - "天文学"との連携：GCOSを動かすならば、各ステップの接点を繋ぎ止める存在にならなければならない