

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

40,000円・旅費

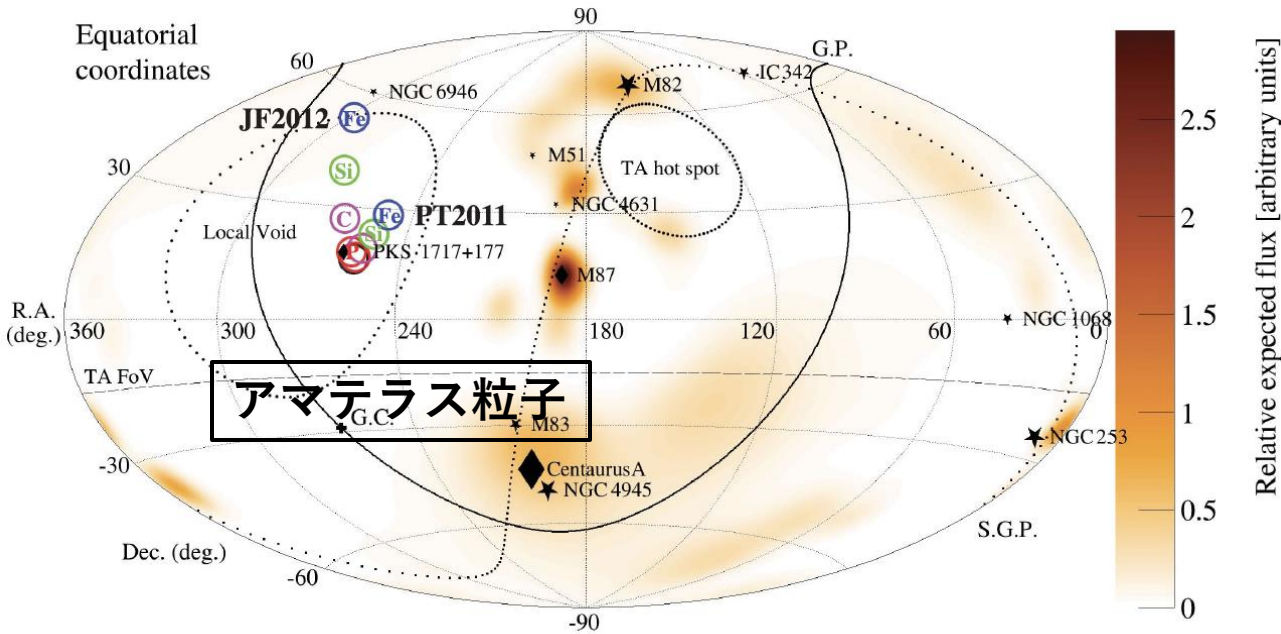
共同研究者：

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)

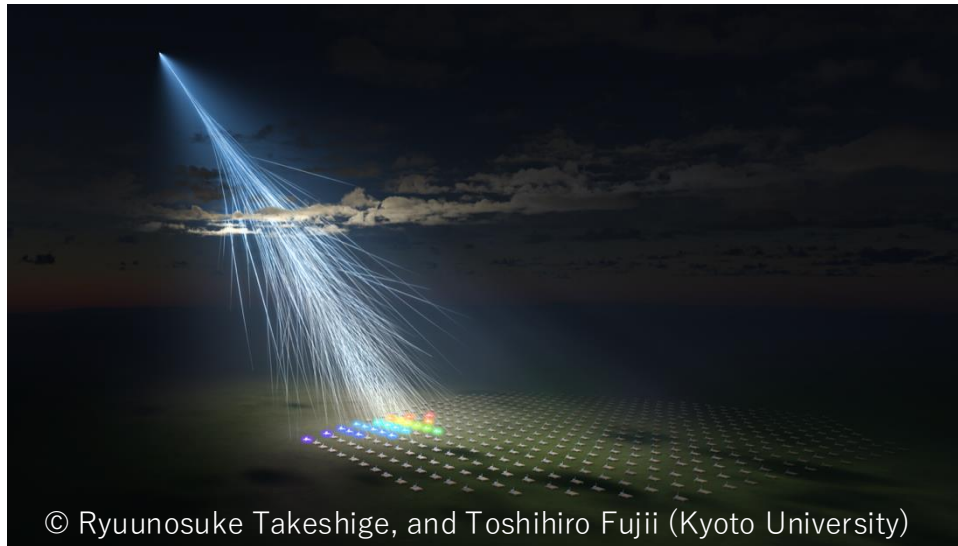
樋口 諒
理化学研究所

令和6年度東京大学宇宙線研究所
共同利用研究成果発表会

「アマテラス粒子」の検出



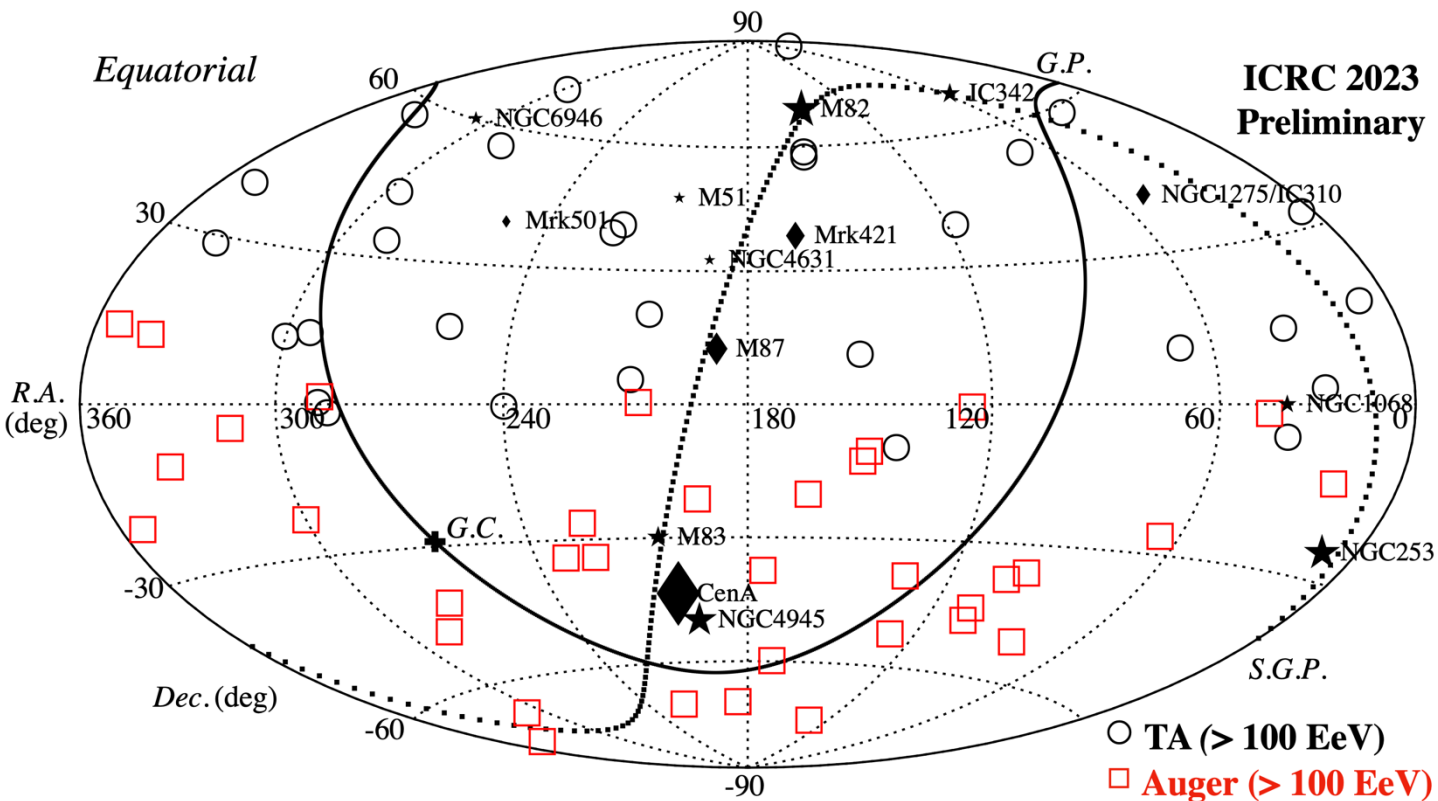
- Telescope Array実験最高エネルギー（史上2番目）宇宙線「アマテラス粒子」
- 近傍の”local void”方向から244EeVの宇宙線が到来
- どこから来たのか？
- **実は100EeV以上のUHECRの到来方向分布も今熱いトピック**



© Ryuunosuke Takeshige, and Toshihiro Fujii (Kyoto University)

(TA collaboration, Science, Volume 382, Issue 6673, pp. 903-907 (2023))

100 EeV以上のUHECR到来方向分布



- 明確な異方性は確認されていない
- Doublet/tripletは存在→現在の統計では等方分布と無矛盾 (Higuchi+ in prep.)

• 解釈：

- ① 起源天体密度が高い
- ② 質量組成が高エネルギー側で重い
- ③ 磁場が強い

• →縮退を解くには？

T. Fujii 2024 (ICRC2023)

鉄より重い原子核？ (Farrar 24, Zhang+24)

- 100 EeV以上のUHECRが鉄より重い原子核ではないかという説
 - “Ultraheavy” UHECRs (Zhang+24)
 - r過程による原子核 (今回はウラン)
 - 磁場の偏向 + 陽子～鉄より長い伝搬距離
- テーマ：
 - 現在の統計で、100EeV以上の異方性の不在を説明できる起源天体密度・磁場強度はどのくらいか？
 - 代表的な原子核種 (P/Fe/U) で調べる

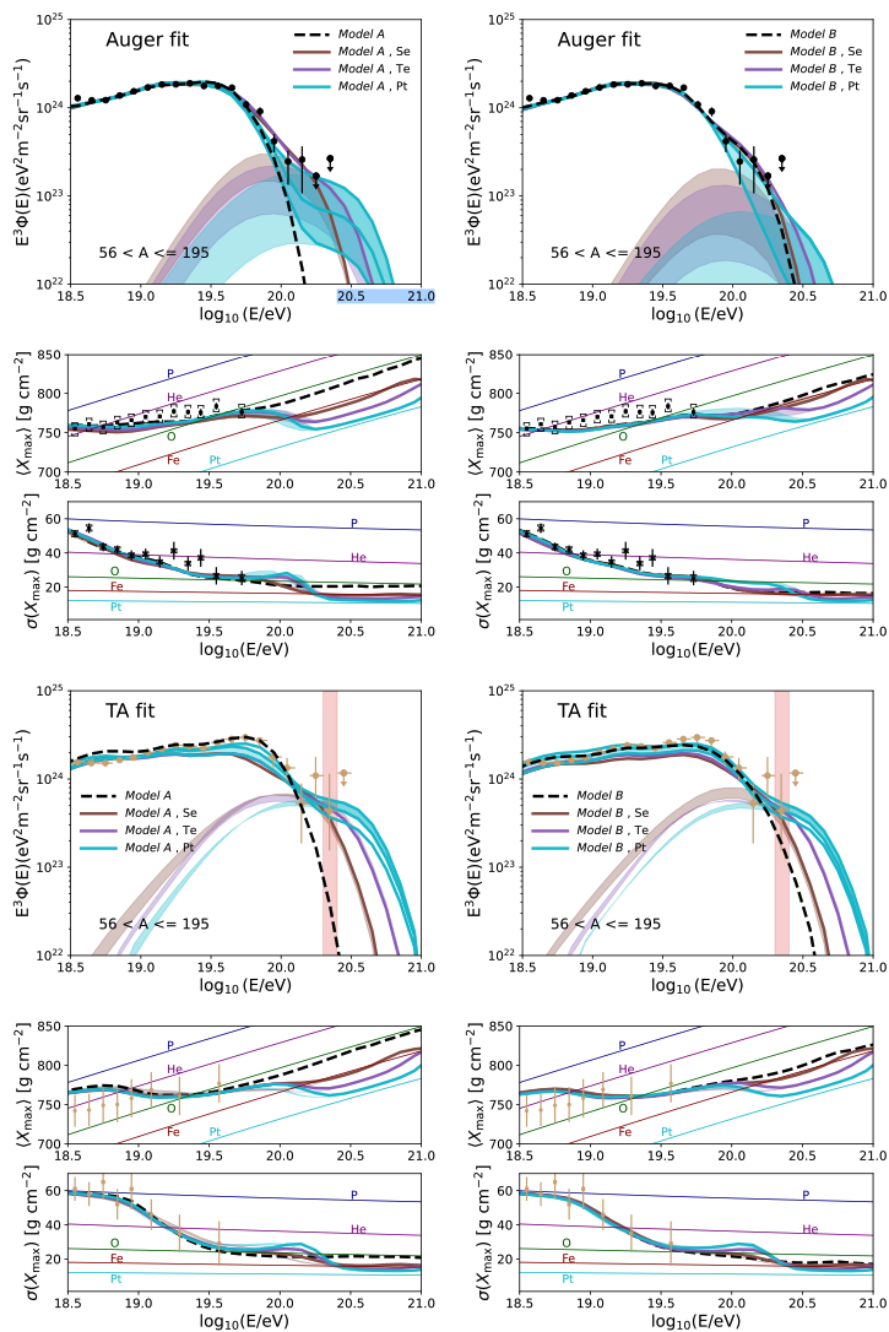
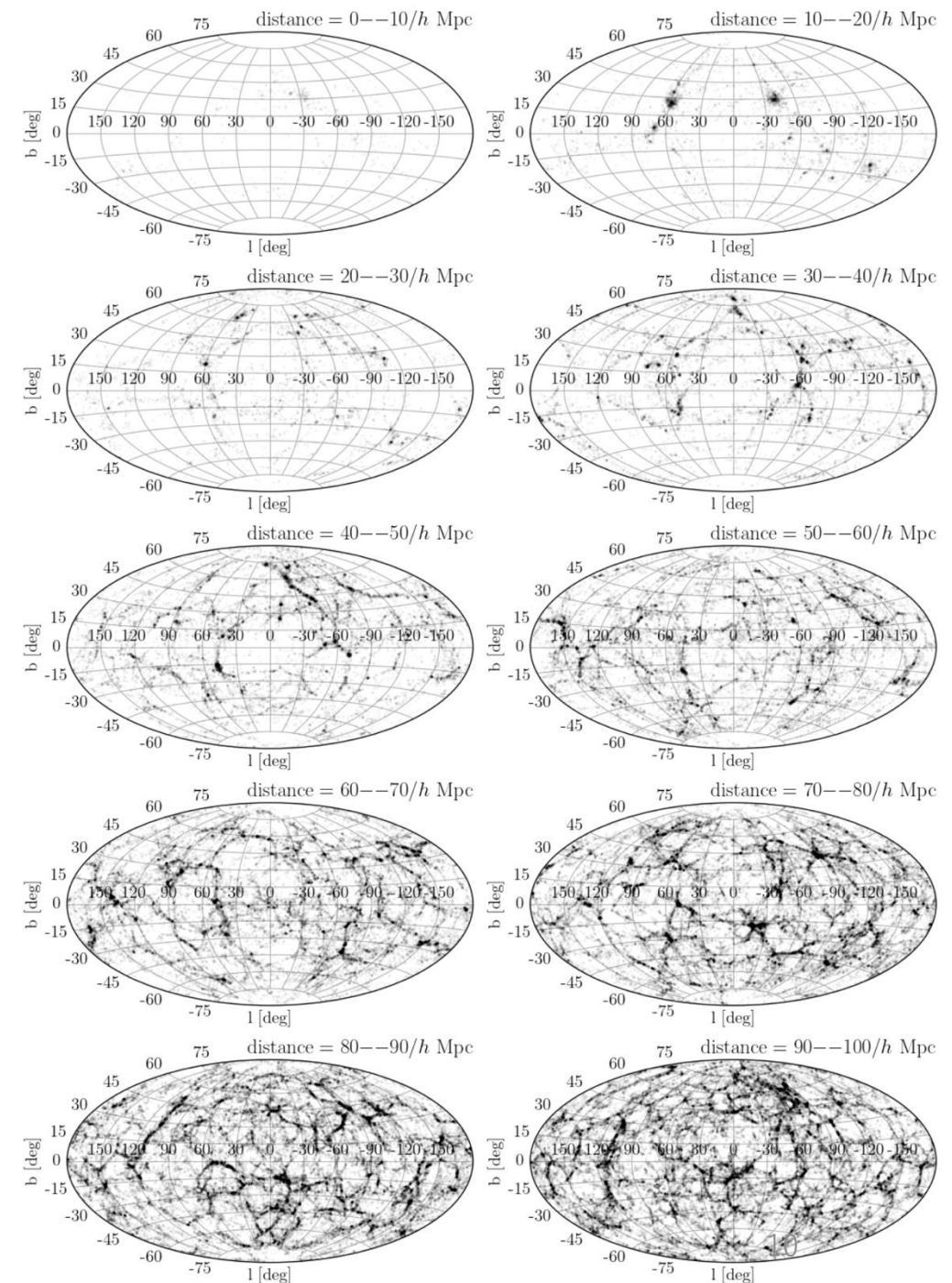


FIG. 2. Energy spectra and the first/second moments of X_{\max} distribution are shown considering both conventional and UH nuclei. Auger data are obtained from Refs. [76, 77], while TA data are from Refs. [78, 79]. Note that the data in the red vertical band corresponds to the Amaterasu particle [13].

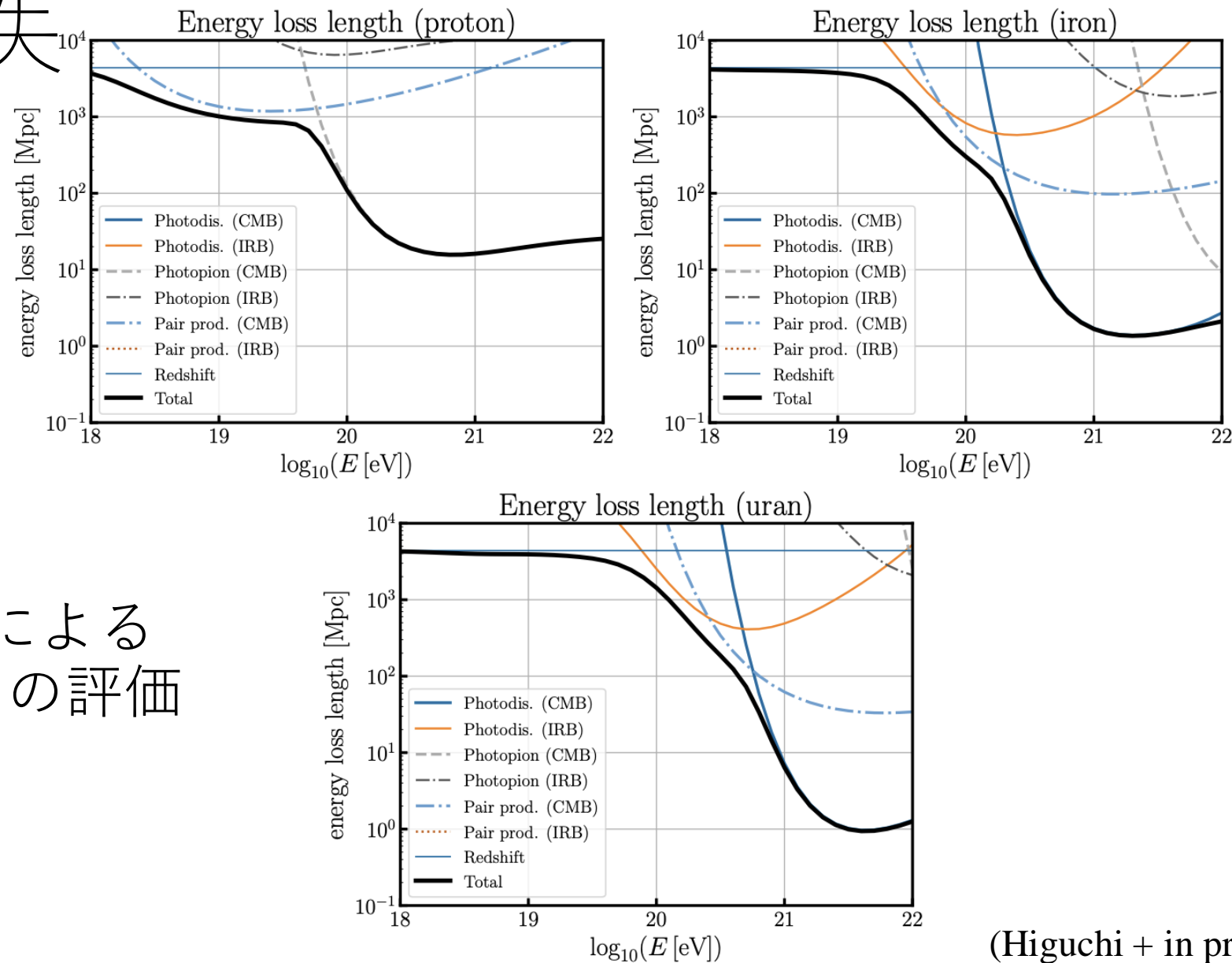
(Zhang+24, arXiv:2405.17409)

大規模構造モデル

- 遠方銀河 (<数百Mpc) の分布を反映したい
 - 観測の検出効率が気になる
 - 大規模構造モデルを用いる
- Millenium Run (Springel et al. 2005)
 - $(500 \text{ Mpc}/h)^3$ の立方体
- 磁場はランダムに等方を仮定
 - scale factor $\alpha = (\lambda / 1\text{Mpc})^{1/2} \times (B/1\text{nG})$
 - $\alpha = 10^{(-6)} \sim 1$ を仮定 (Bray & Scaife 2018, ApJ, 861,3)



エネルギー損失

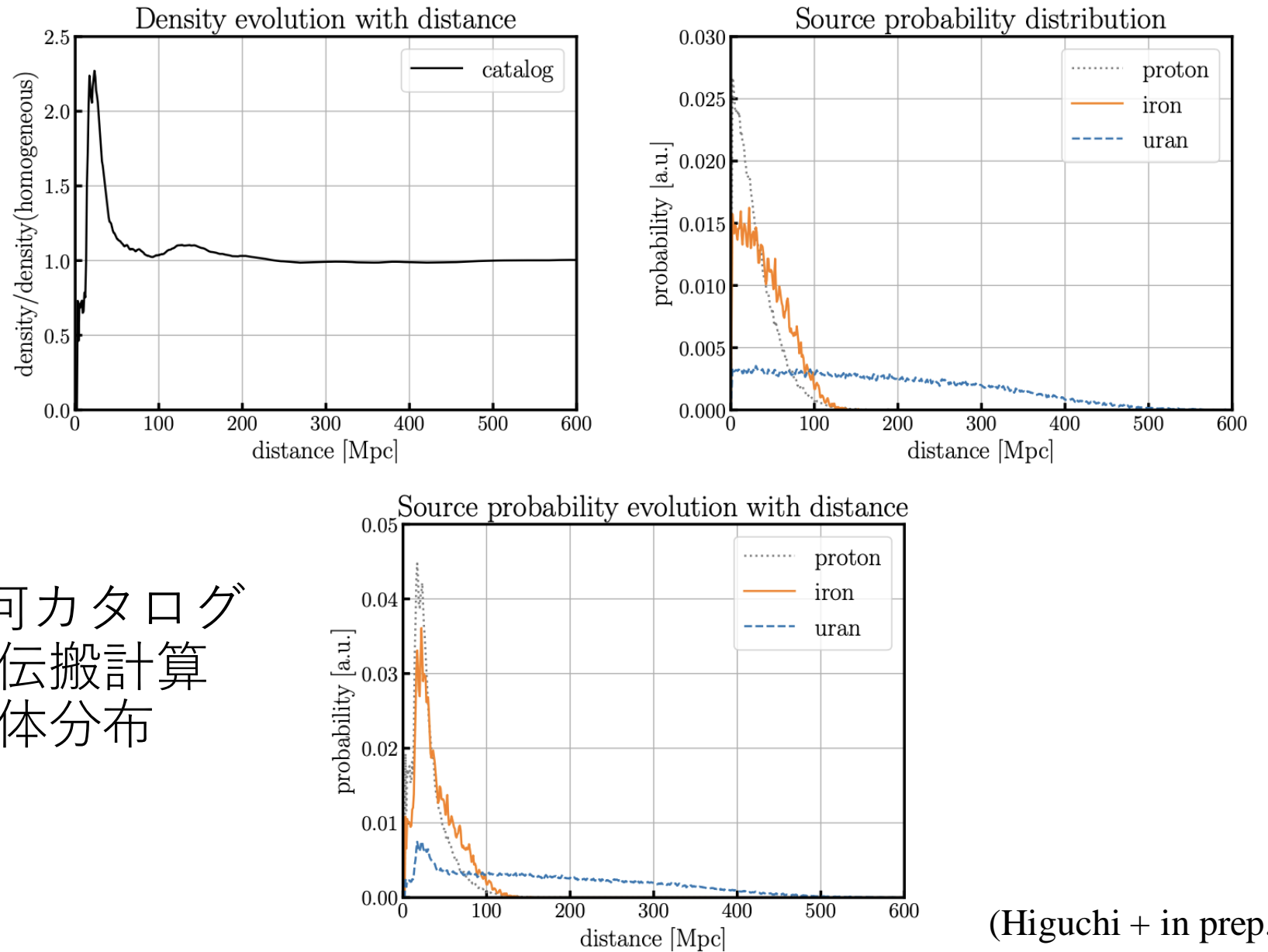


- CRPropa+TALYSによる energy loss lengthの評価

(Higuchi + in prep.)

Figure 2. Energy loss distances of reactions of proton (top panel), ^{56}Fe (middle panel), and ^{238}U (bottom panel) with CMB and IRB photons at redshift $z = 0$. Total energy loss distances are plotted as black solid lines. Adiabatic energy losses due to the cosmic expansion are also plotted as red solid lines.

起源天体分布



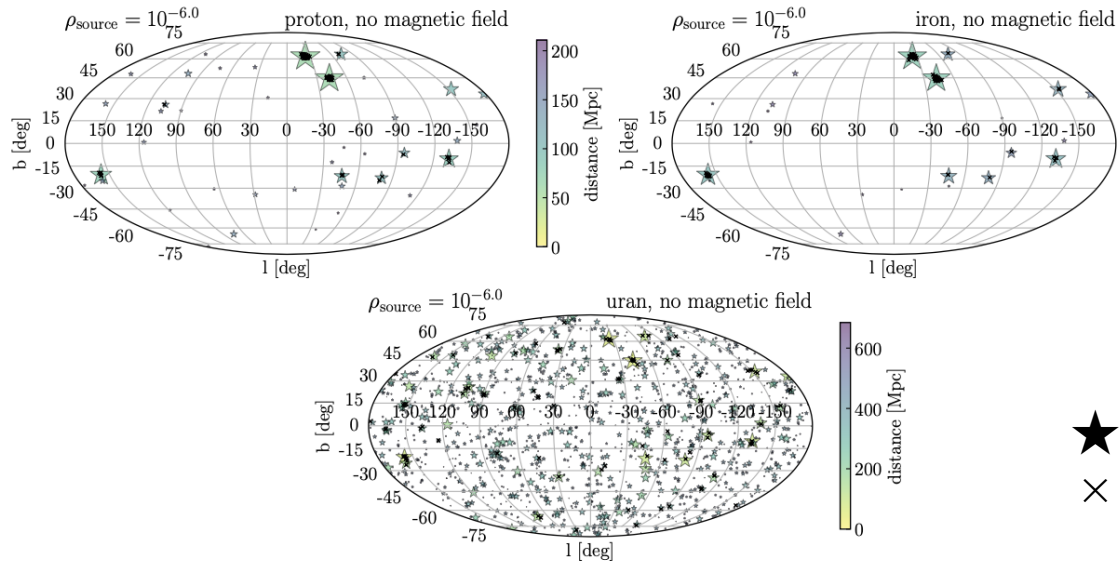
- Millenium Runの銀河カタログの距離分布 × 一次元伝搬計算の距離分布 → 起源天体分布

Figure 3. Matter density $m(r)$, calculated source distribution $\rho(r)$, and weighted source distribution $m(r) \times \rho(r)$ with a function of distance r . Gray-dotted, orange-solid, and blue-dashed lines show the probability of source distribution for 100 EeV protons, irons, and urans, respectively. The density is normalized to be 1 when it is integrated over 1 Gpc distance.

(Higuchi + in prep.)

UHECRの分布予測

without magnetic field



with magnetic field

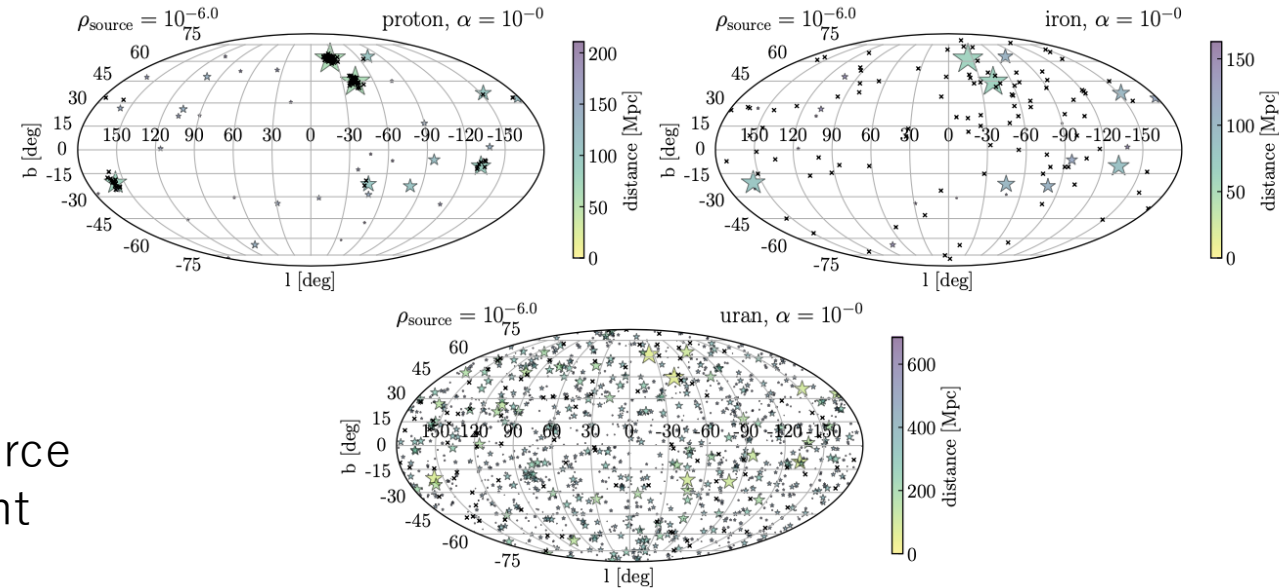


Figure 5. An example of mock CR distribution without turbulent magnetic fields derived from the fluxmaps in Fig. 1. Black crosses show the distribution of mock CR events. Stars indicate contributing source. The area of each star represents the relative contribution. Distances of sources from the earth in represented by colors.

Figure 7. Same as Fig. 5, but in case with turbulent magnetic fields.

- 100 events over the sky \times 1000 datasets
- multipletの数で小角度スケール異方性を評価する (Higuchi + in prep.)

Result: number of multiplets

- no magnetic field case:
 - single-proton is rejected
- for higher source density, only single-uran case can reproduce isotropy.

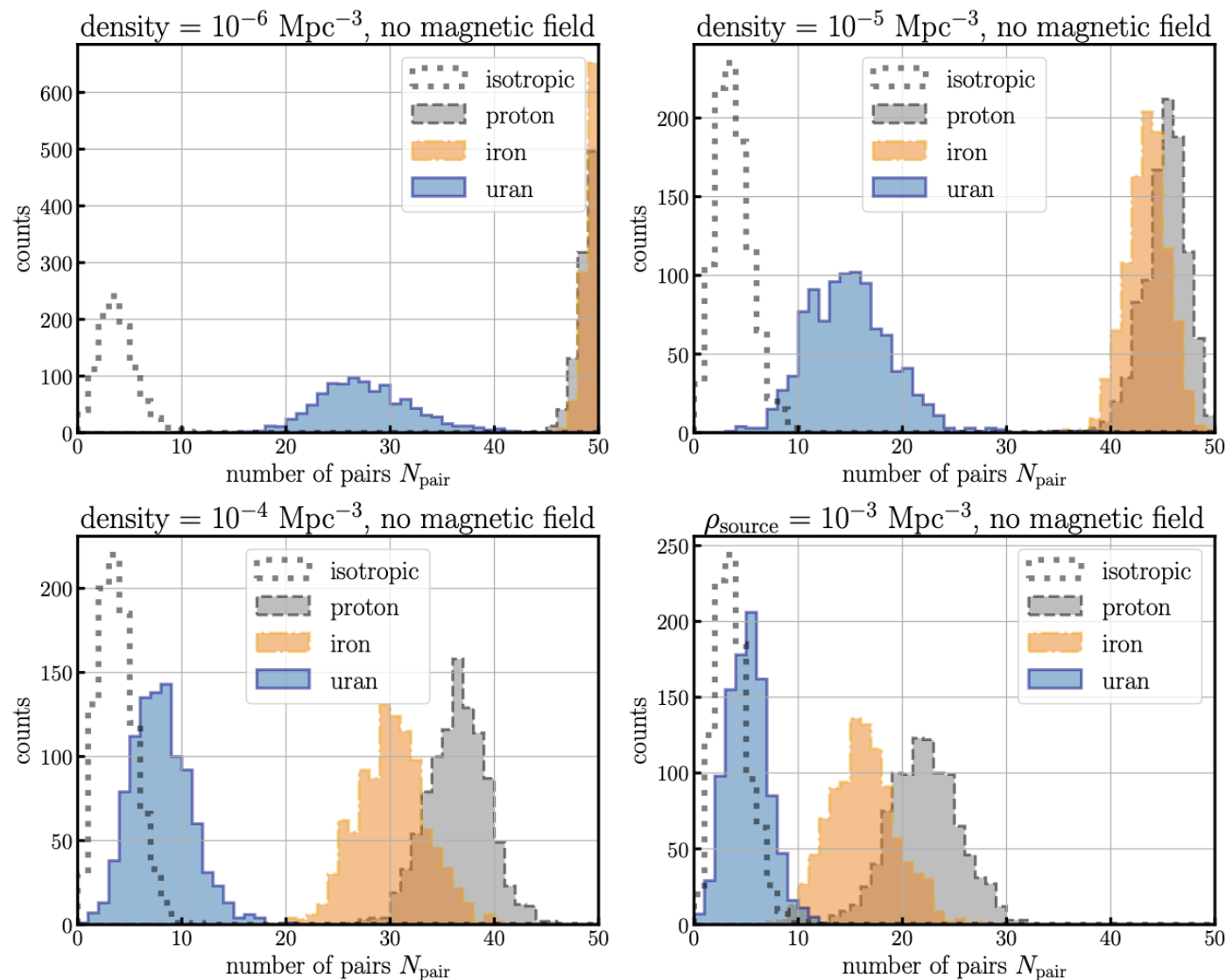


Figure 6. Histograms of number of pairs N_{pair} for MC datasets from Millenium Simulation. From the top to bottom, we change the source number density from 10^{-6} to 10^{-3} per Mpc^3 , respectively. Grey-filled histogram indicates isotropic distribution.

Result: number of multiplets

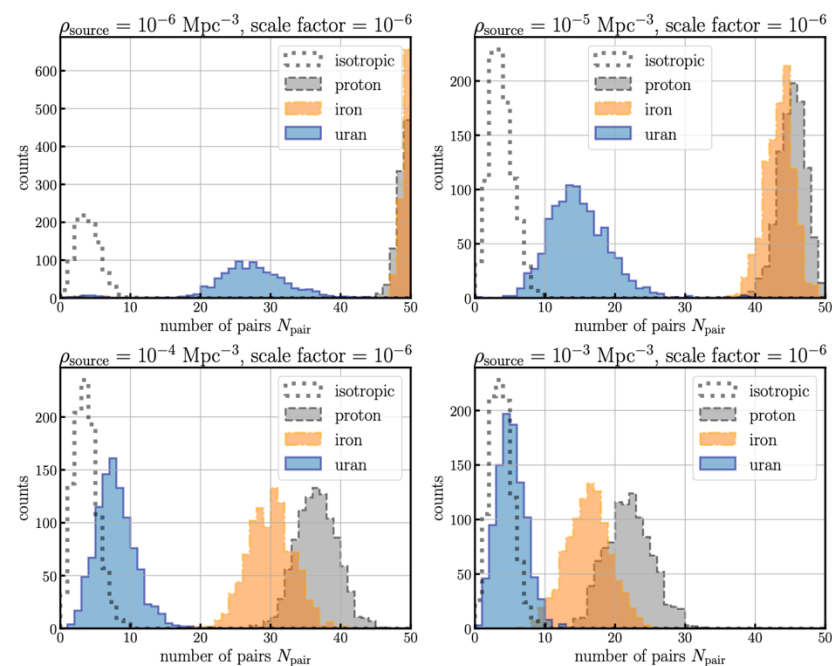


Figure 8. Same as Figure 6, but for the cause when we assume turbulent magnetic fields.

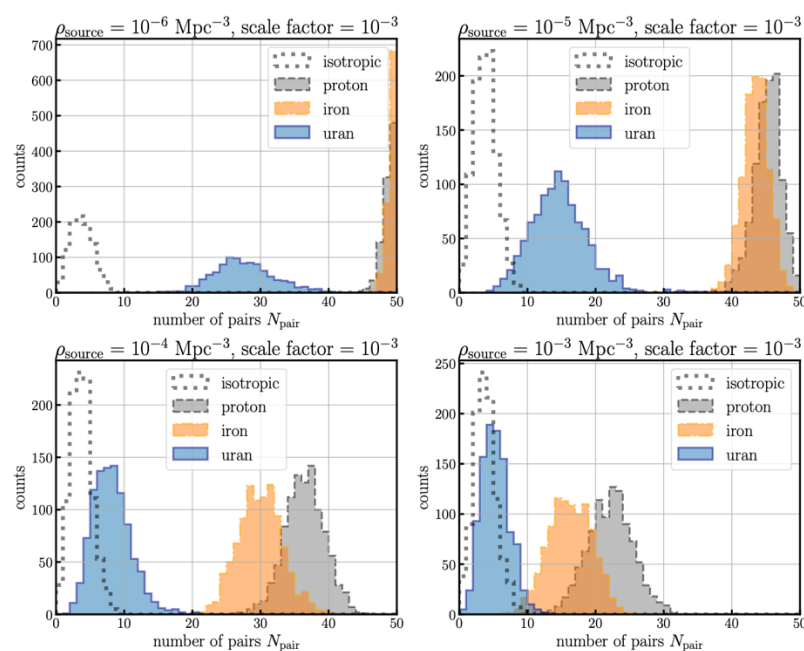


Figure 9. Same as Figure 8, but for the cause when we change the source density.

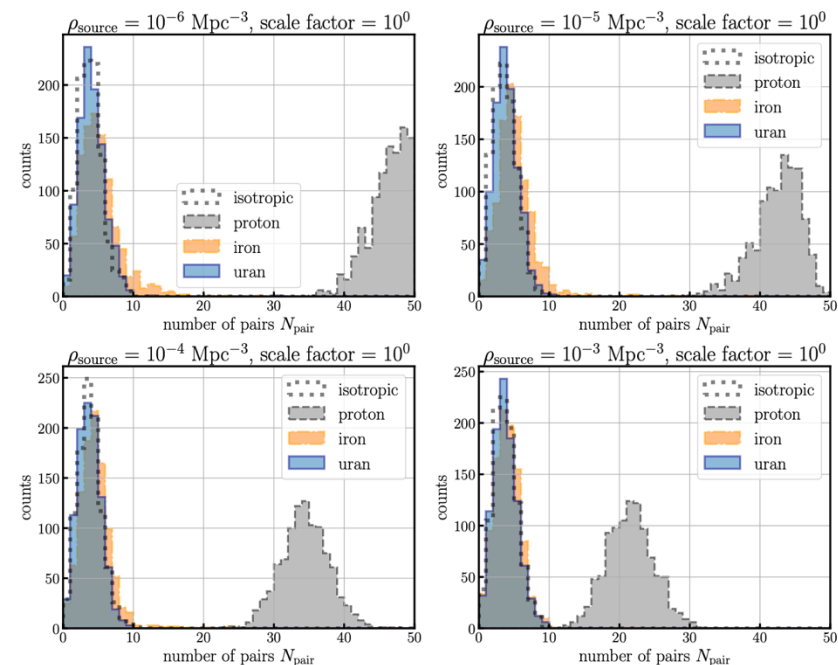
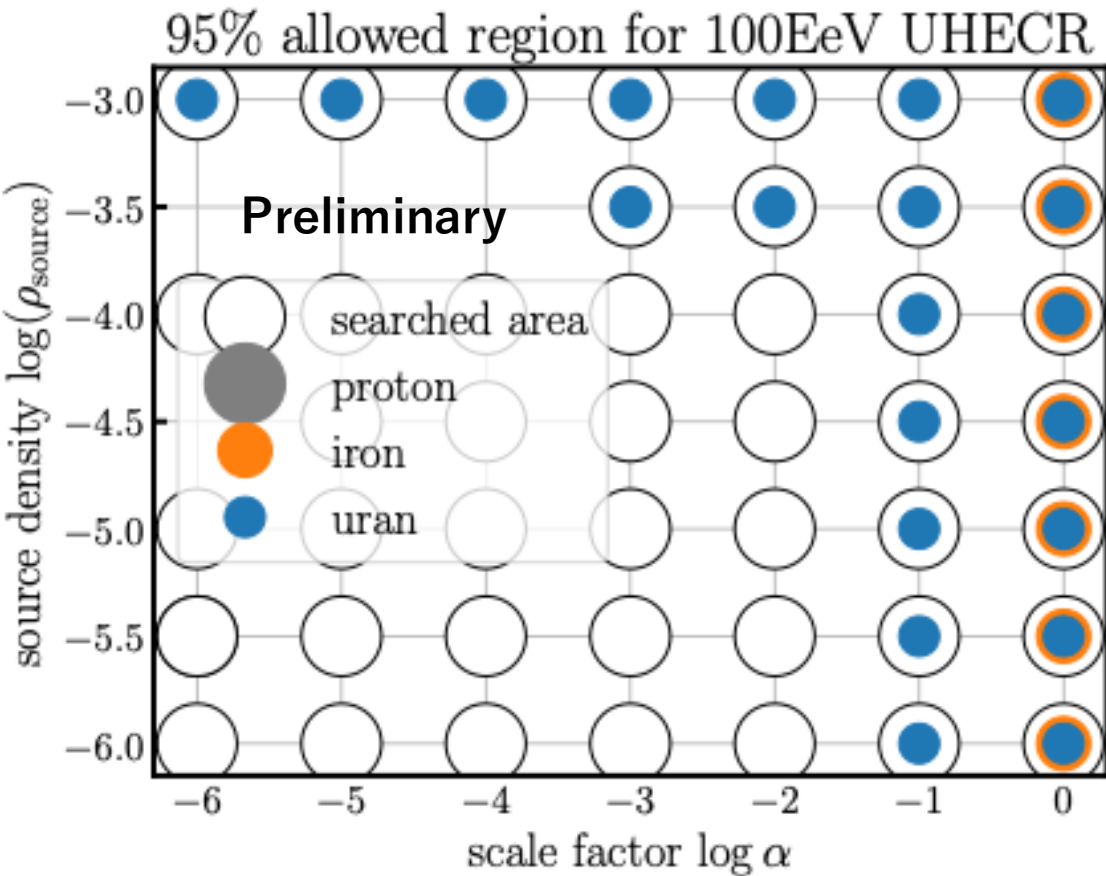


Figure 10. Same as Figure 8, but for the cause when we change the different turbulent magnetic field scale.

stronger magnetic field

(Higuchi + in prep.)

Result: allowed region for isotropy



- 陽子では100EeV以上の等方分布を説明できない。
- 鉄では磁場が強い($\alpha > 0.1$)時のみ等方分布を再現
- 起源天体密度が高ければ ($\rho > 10^{-3}$)
ウランは磁場に関係なく等方分布を再現
- 課題：
 - 磁場が強い時に鉄/ウランの縮退をどう解くか
 - 現実の銀河分布の反映
 - 銀河磁場/系外磁場偏向の導入
 - small-scale/intermediate-scale/large-scale異方性解析の再検討

まとめと今後

- 2023年度のTA実験史上最高エネルギー事象「アマテラス粒子」の検出→100EeVスケールUHECRの伝搬中の磁場・起源天体モデルに関する議論が高まりつつある。
- 大規模構造シミュレーションを用いた100EeV宇宙線の起源天体密度/磁場強度の下限の制限。
- 本日発表分についてはAGASA実験~TA/Auger実験までの小角度スケール異方性研究をまとめながら、論文として完成予定。
- TA+Auger実験の異方性+銀河磁場モデル解析についても継続中。