

極高エネルギー宇宙線観測と 原子核物理の「交差点」

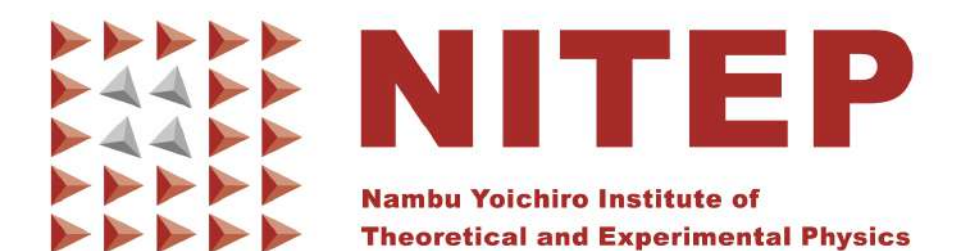


藤井 俊博 toshi@omu.ac.jp,

大阪公立大学大学院 理学研究科

南部陽一郎物理学研究所

2024年9月12日 第6回関西核多体セミナー



自己紹介

- 📌 藤井 俊博（ふじい としひろ）、奈良県出身、実家は法隆寺の近く
- 📌 学位: 博士（理学）2012年 大阪市立大学（指導教官: 荻尾 彰一）
- 📌 シカゴ大学カブリ宇宙物理学研究所、東京大学宇宙線研究所でのポスドク、2019年から京都大学白眉センターを経て、2022年から現職
- 📌 趣味: 写真、体を動かすこと、世界遺産散策 + **痛風予防 (New!!)**
- 📌 研究者を目指したきっかけ：2002年の小柴昌俊さんのノーベル物理学賞受賞



高校時代



梶田隆章さんと（2015年ノーベル賞受賞）



現在



座右の銘

- 📌 分野や立場にとらわれず徹底的に議論を重ねて研究を進める研究スタイルと寛容の精神（仁科 芳雄、コペンハーゲン精神）
- 📌 **社会の動向にとらわれずに純粹に学問的立場をとる「学問優先主義」、自分で真実を確かめるまでは最終結論は出さない「経験主義」（荒勝文策）**
- 📌 **「理論の仁科、実験の荒勝」**
- 📌 嗅ぎつける力がなくては本当の研究はできない（寺田 寅彦）
- 📌 学問とは真実を巡る人間関係である（松本 紘）
- 📌 人・本・旅（出口 治明）
- 📌 固定した目的をもたずに、自然に即して、その神秘をさぐるというやり方の研究が、不必要になることは永久にないであろう（中谷 宇吉郎）

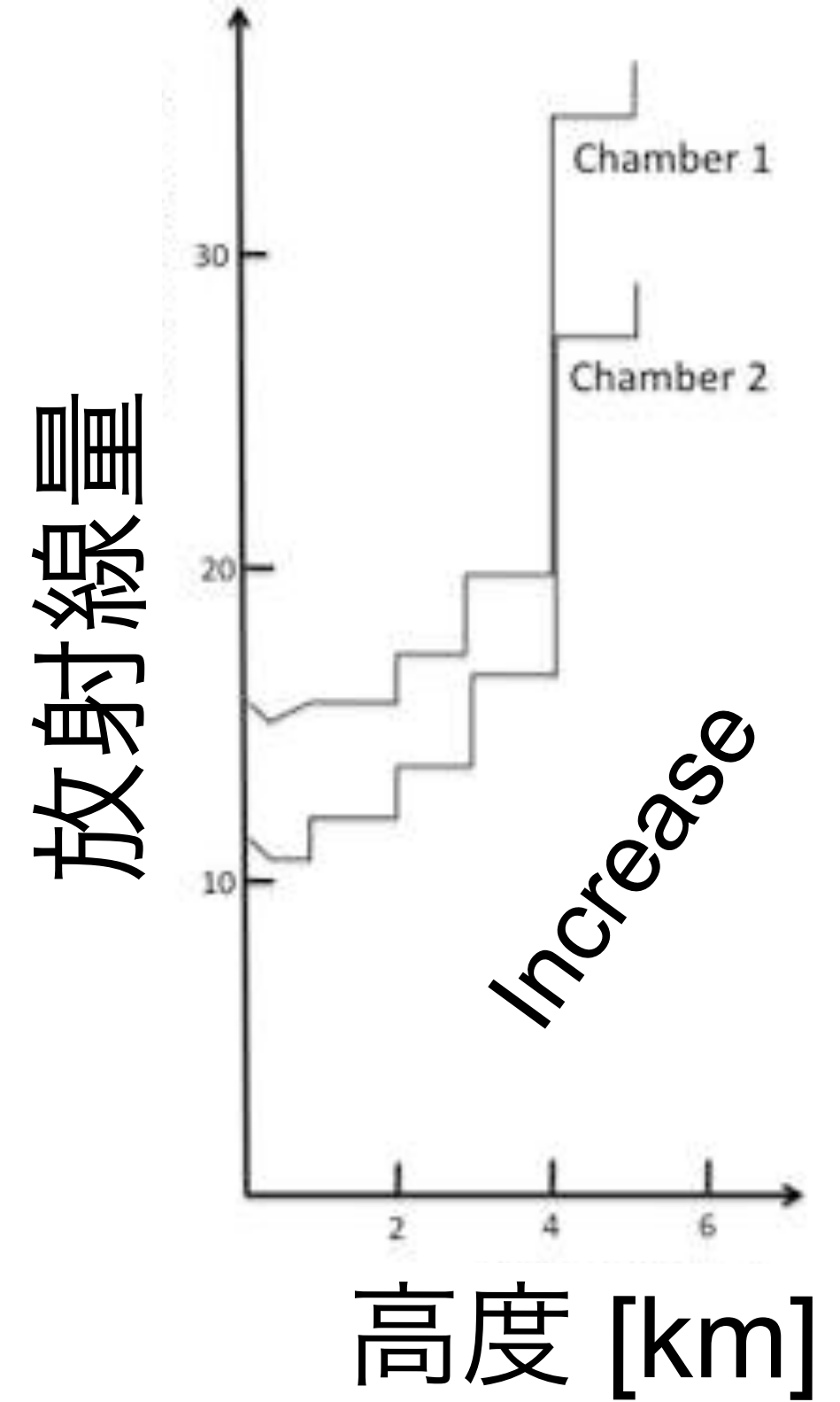
宇宙線とは？

- 宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線
- 1912年にV.F. Hessが発見、1936年にノーベル物理学賞受賞

宇宙線発見の日 1912年8月7日



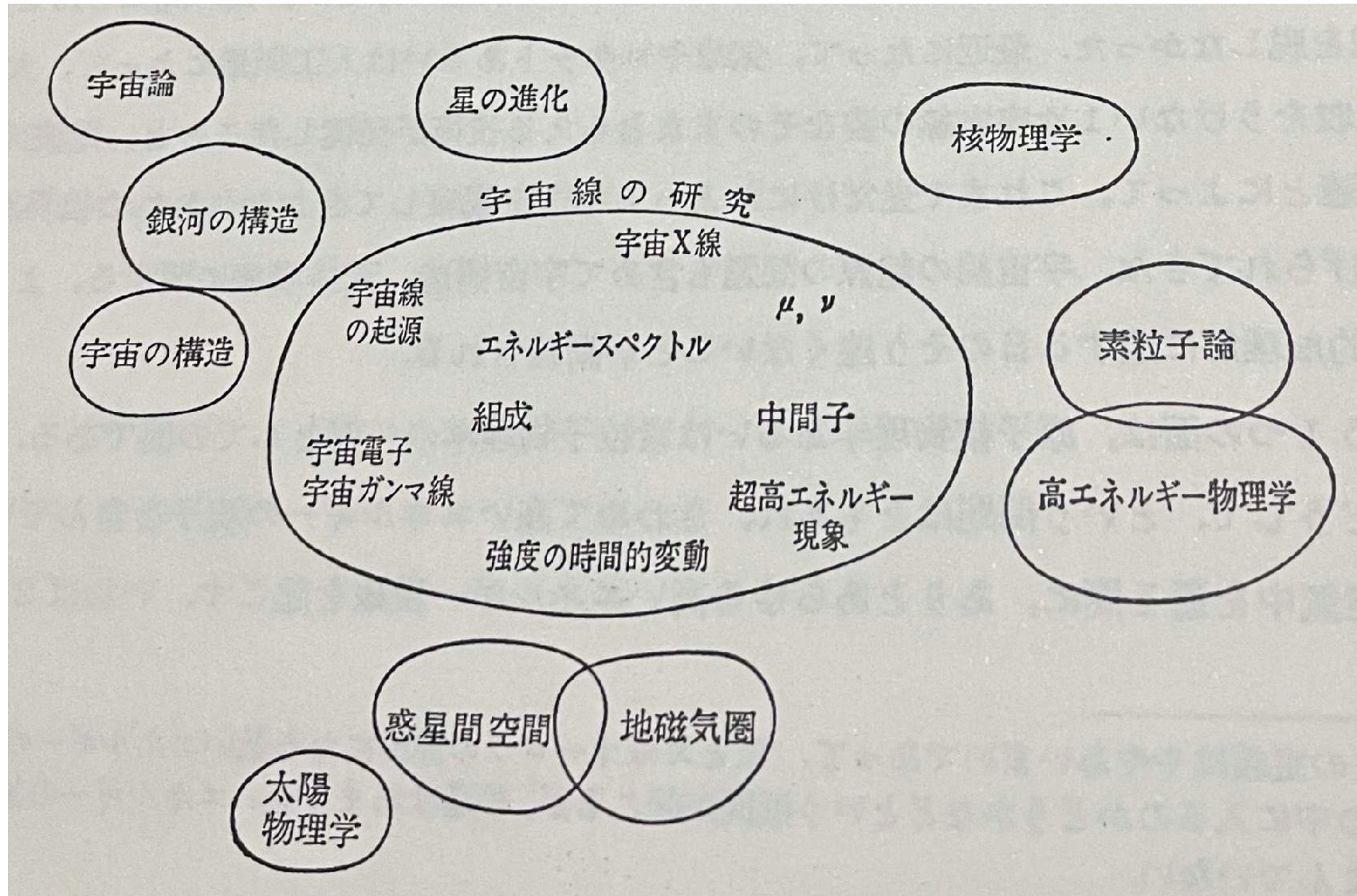
V.F. Hessの孫



V. F. Hess, Phys. Z. 13, 1804 (1912)
5350 m



宇宙線研究の概観 (小田稔、1972年)



- 宇宙での激烈な天体物理現象との関連、宇宙線の起源の解明 (宇宙物理学)
- 加速器未到達エネルギーでの先駆的な新物理探査 (素粒子物理学)
- 素粒子と物質とのあらゆる相互作用の標本を見せてくれる (原子核物理学)
- 宇宙線による太陽活動の履歴、銀河系内外の磁場強度および構造、雷雲などの地球での高エネルギー現象 (太陽・地球物理学)

「宇宙線」小田稔より抜粋



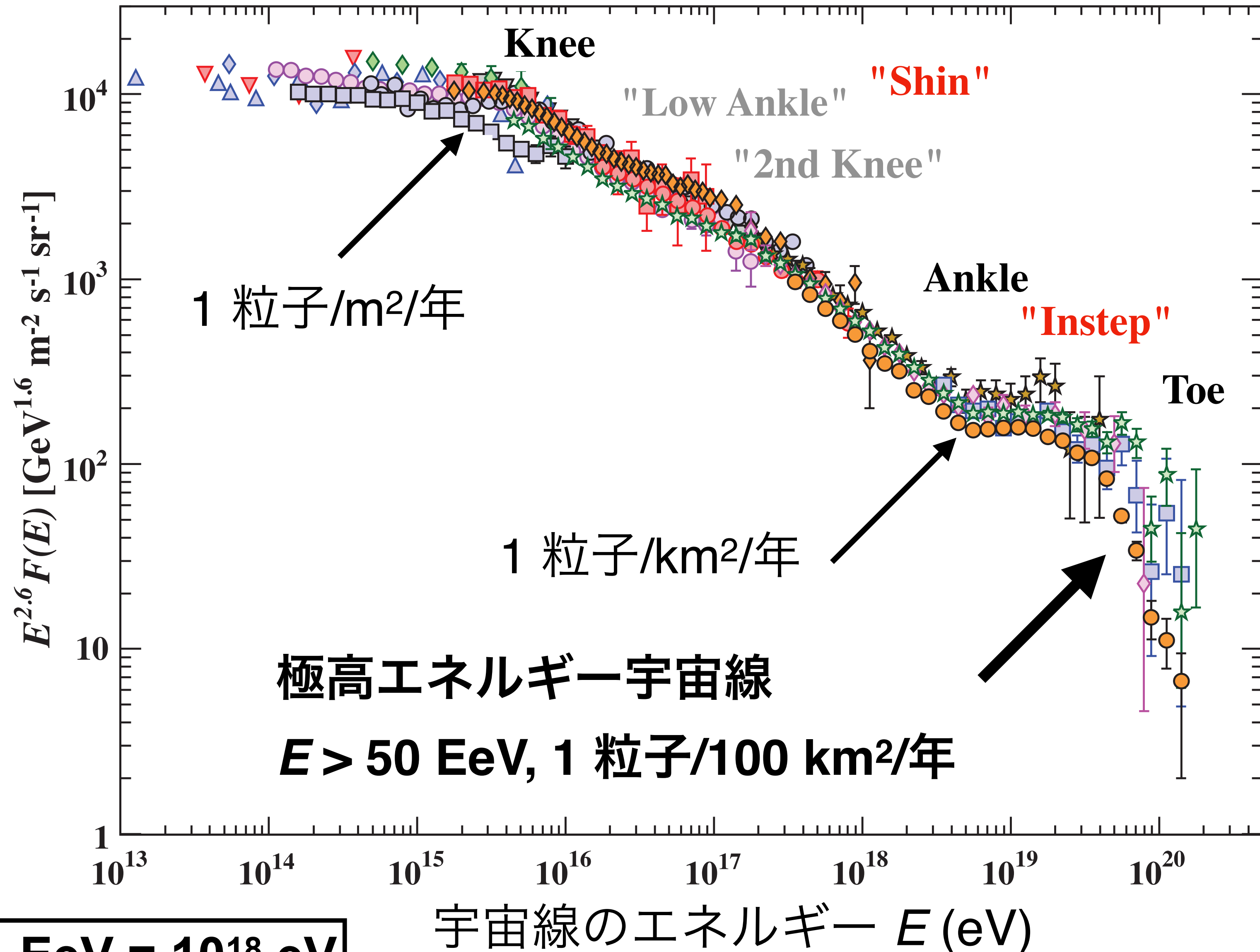
https://www2.nhk.or.jp/archives/articles/?id=D0009250466_00000



宇宙は物理学の 雄大なそして天然の実験室
 そこから人類はいくつもの基本的な法則を学んできたし
 現在でも刻々と私たちは学んでいる (小田稔)

宇宙線のエネルギースペクトル

宇宙線のエネルギースペクトル $\times E^{2.6}$



- 📌 極高エネルギー宇宙線の起源・加速機構は未解明
- 📌 宇宙空間でもっとも高いエネルギーを持つ粒子
- 📌 地上の粒子加速器で加速できる最大エネルギーより7桁以上大きい
- 📌 高いエネルギーの宇宙線はごく稀にしか到来しない
- 📌 エネルギーが10倍になるとスペクトルは約1000分の1に
- 📌 検出には**広大な有効検出面積**と**長期定常運用**が必要

起源は何かを明らかにしたい

SCIENTIFIC AMERICAN

B

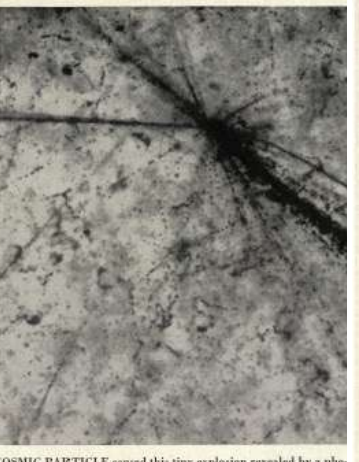
Where Do Cosmic Rays Come From?

This question involves another one: How do these particles attain their awesome energy? They have told us much about the nature of the nucleus, and they promise to tell more about the universe

by Bruno Rossi

The earth is under a ceaseless rain of particles from space. These cosmic rays, our only material contact with the vast universe outside our planetary system, have excited wonder and eager study ever since they were first discovered 41 years ago. They fall upon us with energies far beyond anything that can be produced on earth. They

This was the first recognition of what the U. S. physicist Robert Millikan later named cosmic radiation. The fascinated investigation that ensued concerned itself first of all with finding out what the cosmic rays were. Outside the earth's atmosphere cosmic radiation consists mainly of protons (nuclei of hydrogen), varying widely in



COSMIC PARTICLE caused this tiny explosion revealed by a photo-

Where Do Cosmic Rays Come From?

This question involves another one: How do these particles attain their awesome energy? They have told us much about the nature of the nucleus, and they promise to tell more about the universe

by Bruno Rossi

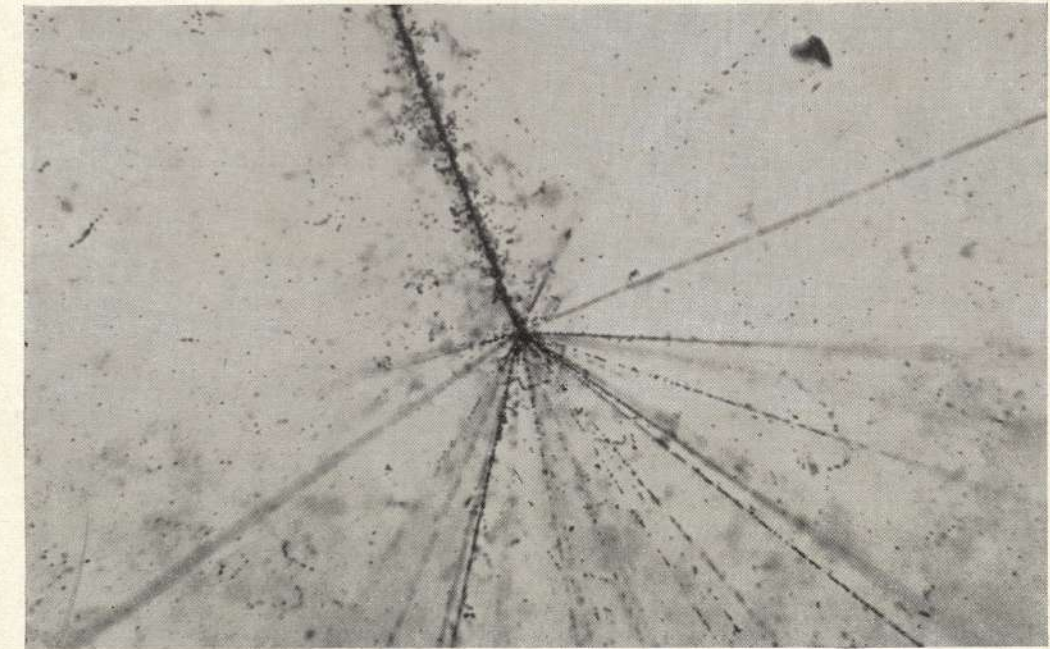
The earth is under a ceaseless rain of particles from space. These cosmic rays, our only material contact with the vast universe outside our planetary system, have excited wonder and eager study ever since they were first discovered 41 years ago. They fall upon us with energies far beyond anything that can be produced on earth. They shatter the atoms of matter and make their nuclei explode into strange fragments. It is the investigation of cosmic rays that has been responsible for the discovery of so many new elementary particles in the past quarter-century: the positron, the various mesons, the V-particles and others which are being discovered even as these lines are written. Besides this, cosmic rays are of great interest in biology, for by producing mutations in genes they are said to have played, and continue to play, a large role in the evolution of life on the earth.

This was the first recognition of what the U. S. physicist Robert Millikan later named cosmic radiation. The fascinated investigation that ensued concerned itself first of all with finding out what the cosmic rays were. Outside the earth's atmosphere cosmic radiation consists mainly of protons (nuclei of hydrogen), varying widely in energy. There are few, if any, protons of energy below one billion electron volts (Bev). Most of them are in the range of one to 100,000 Bev. Occasionally a cosmic-ray particle hits the atmosphere with much higher energy, up to 100 million Bev; it produces a gigantic shower containing millions of particles. For comparison, recall that the most powerful accelerator made by man, the Brookhaven Cosmotron, accelerates protons to an energy of a little more than two Bev. Cosmic rays also contain nuclei of helium and of heavier elements. According to our still incomplete information, the velocity range of all the types of nuclei is approximately the same. At any given velocity, we find approximately 85 helium nuclei and six heavier nuclei for every 1,000 protons. It is interesting to note that the relative abundance of the various nuclei in cosmic rays corresponds closely to the relative abundance of those elements in the universe. Long before striking our atmosphere and beginning the series of collisions by which their energy is eventually dissipated, cosmic-ray particles are deflected by the earth's magnetic field. Some of them are thrown back into space; others reach the earth from a direction which may differ considerably from their original path. Suggestions as to where the cosmic rays may come from divide themselves into two general schools of thought. One

school holds that the cosmic rays were created several billion years ago in a tremendous explosion that gave birth to the universe; since then they have been traveling through space along trajectories curved by the universe's general gravitational field. The trouble with this point of view is that it confines the entire problem to the realm of pure speculation. It therefore seems more profitable to explore the second hypothesis, which is at least theoretically verifiable. This point of view assumes that cosmic rays are produced continuously somewhere in the system of stars which forms our galaxy. The most attractive theory is that they come from the nearest star, our sun, for the farther away we place the source, the harder it is to account for the relatively heavy intensity of the cosmic-ray fall on the earth. The energy of this fall is very small compared to the energy of the light and heat we get from the sun, but it is comparable to the light from the distant stars. Correlations between the intensity of cosmic radiation and activity in the sun have, in fact, been observed. Shortly after the appearance of a large flare on the sun, there is sometimes a sudden burst of extra cosmic radiation at the earth. Three such events are on record. On November 19, 1949, cosmic-ray meters at widely separated stations registered abnormally high intensities about one hour after a solar flare had reached its maximum. A detector of cosmic-ray neutrons at Manchester, England, went off the scale. At Climax, Col., a detector of cosmic-ray mesons registered a 150 per cent increase. Solar flares are often followed by perturbations of the magnetic field around the earth (magnetic storms), which



COSMIC PARTICLE caused this tiny explosion revealed by a photomicrograph of a photographic emulsion especially prepared to record nuclear events. An exceptionally energetic helium nucleus struck a heavier nucleus in the emulsion, giving rise to the jet of mesons going off to the lower right. These photographs were provided by Herman Yagoda of the National Institutes of Health.



PRIMARY COSMIC PARTICLE entered this emulsion from the upper left and shattered a nucleus into about 40 nucleons and mesons. Some of the particles went off at large angles to the plane of the emulsion, and hence are not visible. The nuclear charge of the primary was about 20, that of calcium. The event was recorded during the flight of an unmanned balloon from Pyote, Texas.

Where Do Cosmic Rays Come From?

This question involves another one: How do these particles attain their awesome energy? They have told us much about the nature of the nucleus, and they promise to tell more about the universe

by Bruno Rossi



FUNDAMENTAL QUESTIONS IN SCIENCE

FIFTY CENTS
SEVENTY-FIVE CENTS BEYOND THE AMERICAS

September 1953

1953年9月のScientific American

“Where Do Cosmic Rays Come From?”

Bruno Rossi



ロスアラモス計画：宇宙線観測と原子核物理の「交差点」

Bruno Rossi

Enrico Fermi



ローマ学派の総帥フェルミ（右）と著者〔訳者注：新しい物理学に遅れていたイタリアは、若いフェルミとロッシがリーダーとなって世界の第一線におどり出たが、二人ともファシズム体制を逃れて母国をはなれることになる〕

©物理学者ブルーノ・ロッシ自伝より抜粋

翻訳 小田 稔



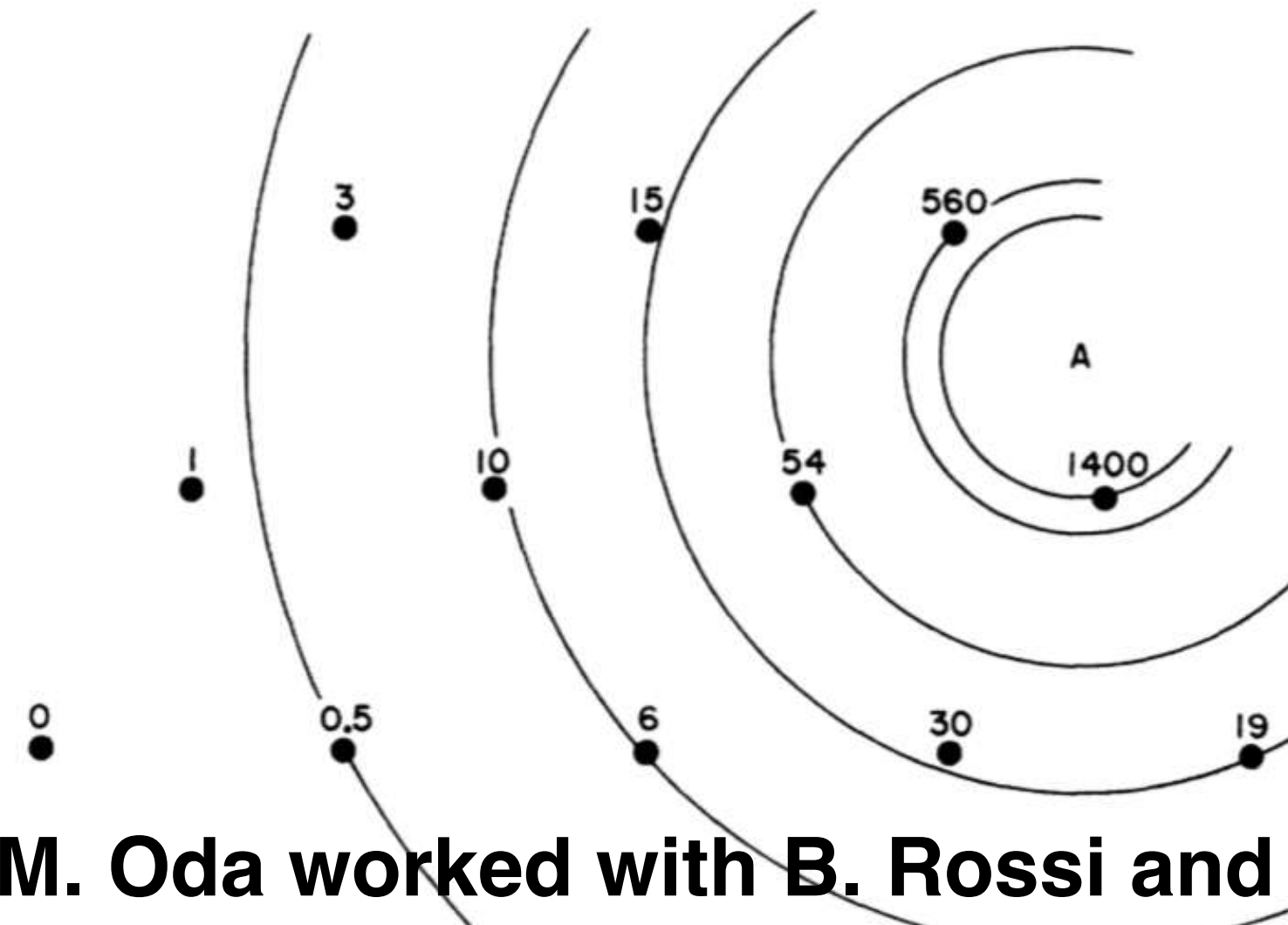
トリニティ・テスト

- ユダヤ系だったため、イタリアのファシストを避けるためアメリカに亡命
- ロスアラモス計画で原子爆弾開発へ参加
 - アメリカニューメキシコにある "Jornada del Muerto (死者の旅)" と呼ばれる場所で、初めて爆発に成功 (トリニティテスト)
 - **1945年7月16日 5時29分 に爆発成功**
 - **フェルミ推定の逸話**：16 km離れた場所で約6フィートの高さから数枚の紙きれを落とすと、爆風で2.5メートルで移動した
 - **TNT爆弾1万トン以上と推定**

100 EeV (10^{20} eV) の宇宙線観測のはじまり

100 EeVの宇宙線の初観測

Volcano Ranch Array (1963)



M. Oda worked with B. Rossi and J. Linsley



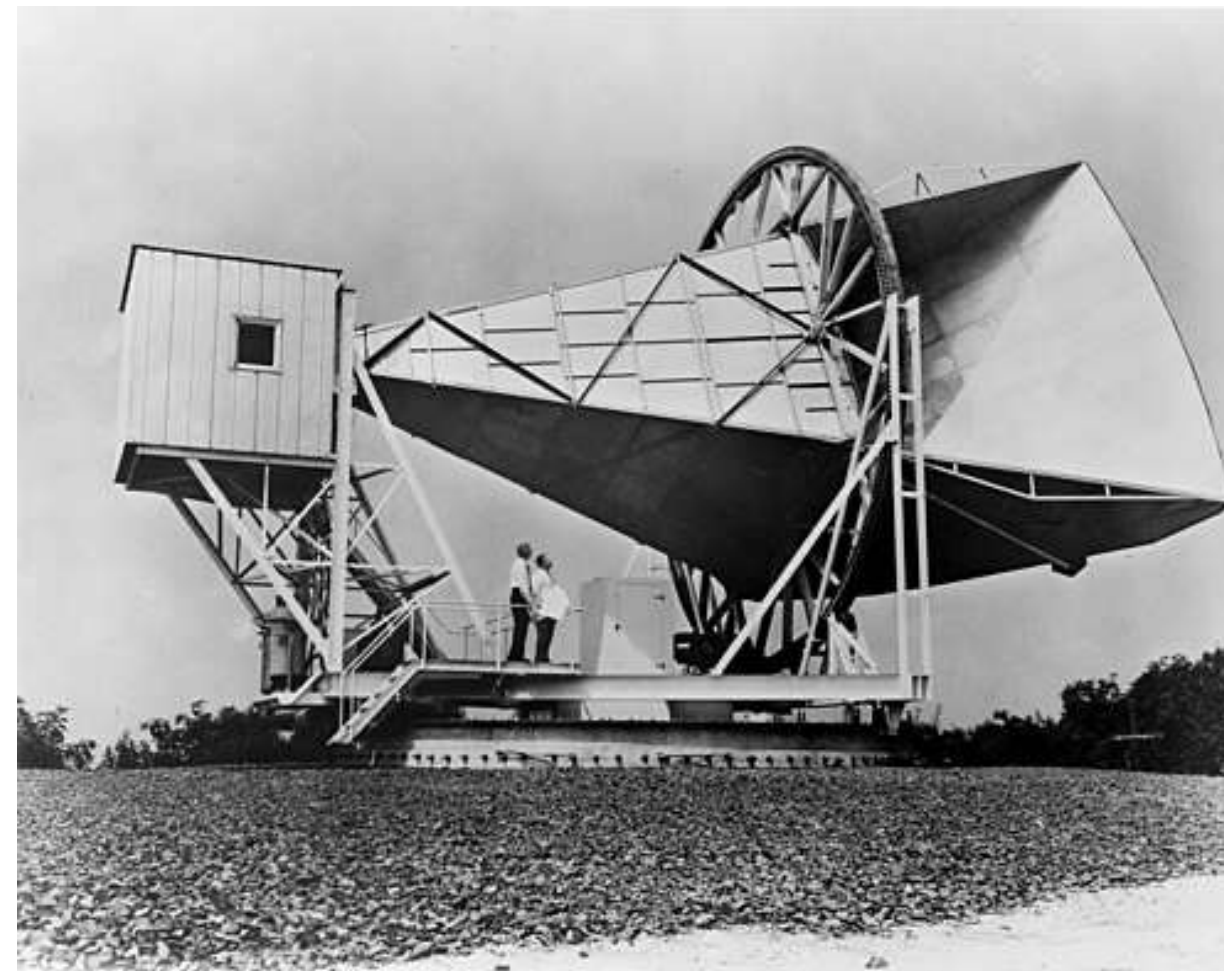
KILOMETERS



J. Linsley, "Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 10^{20} eV". *Phys. Rev. Lett.* 10 (4 Feb. 1963), 146–148

PenziasとWilsonによる宇宙マイクロ波背景輻射

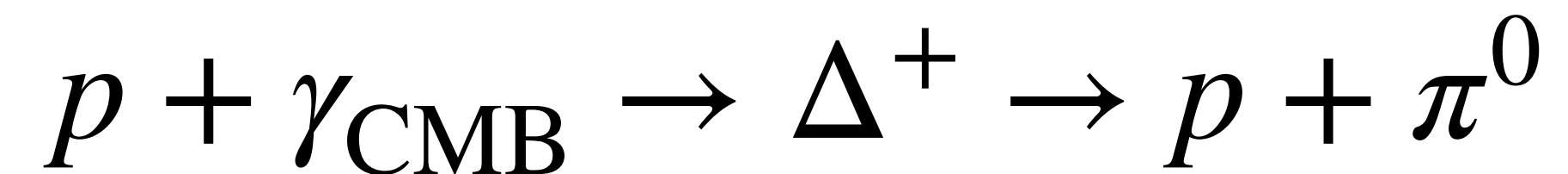
(Cosmic Microwave Background, CMB)の観測 (1965)



From wikipedia

A.A. Penzias and R.W. Wilson, "A Measurement Of Excess Antenna Temperature At 4080 Mc/s", *Astrophys. J. Lett.* 142: 419–421 (1965)

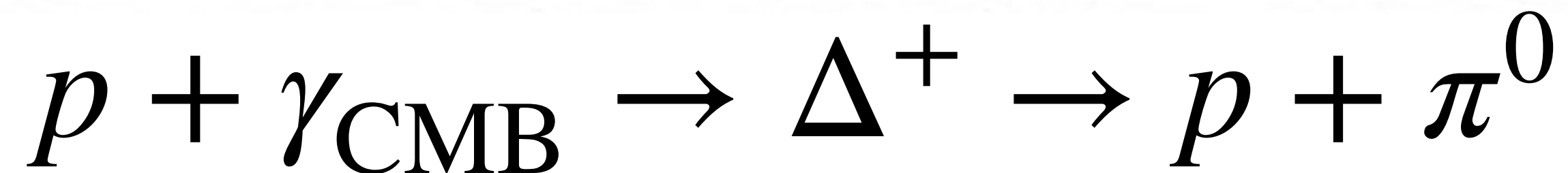
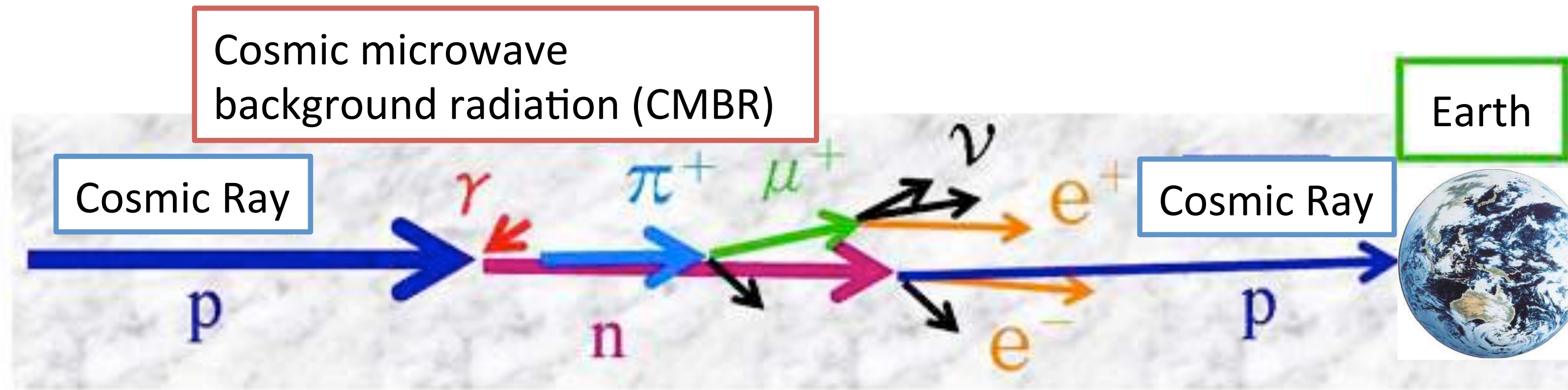
Greisen, Zatsepin, Kuzmin (GZK) 限界 (1966)



K. Greisen, "End to the cosmic ray spectrum?" *Phys. Rev. Lett.* 16 (1966), 748–750

G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, "Upper limit of the spectrum of cosmic rays". *JETP Lett.* 4 (1966), 78–80

GZK (Greisen–Zatsepin–Kuzmin) 限界



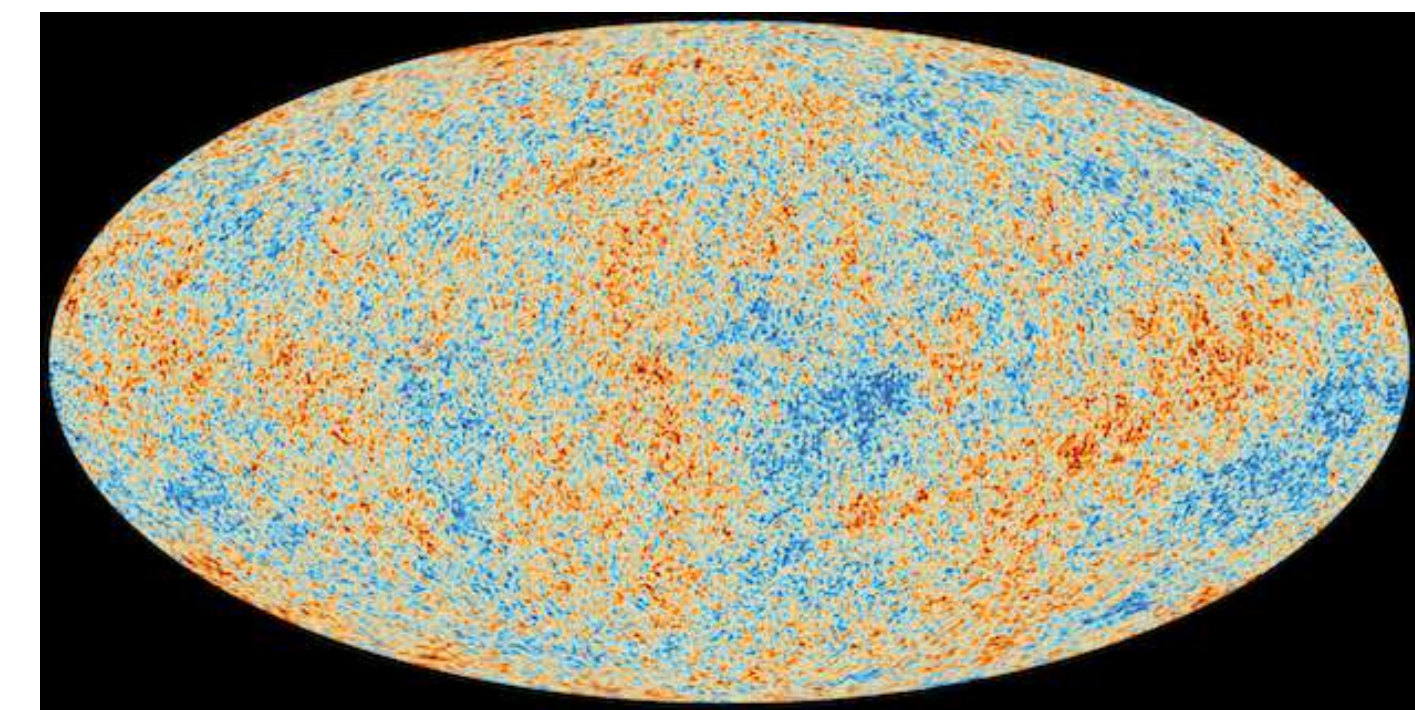
宇宙背景放射と陽子が相互作用し、パイ中間子を生成することで大きくエネルギーを失う

平均自由行程が **50 - 100 Mpc** (宇宙論的には近傍)

60 EeV以上でスペクトルにカットオフがあることを予言

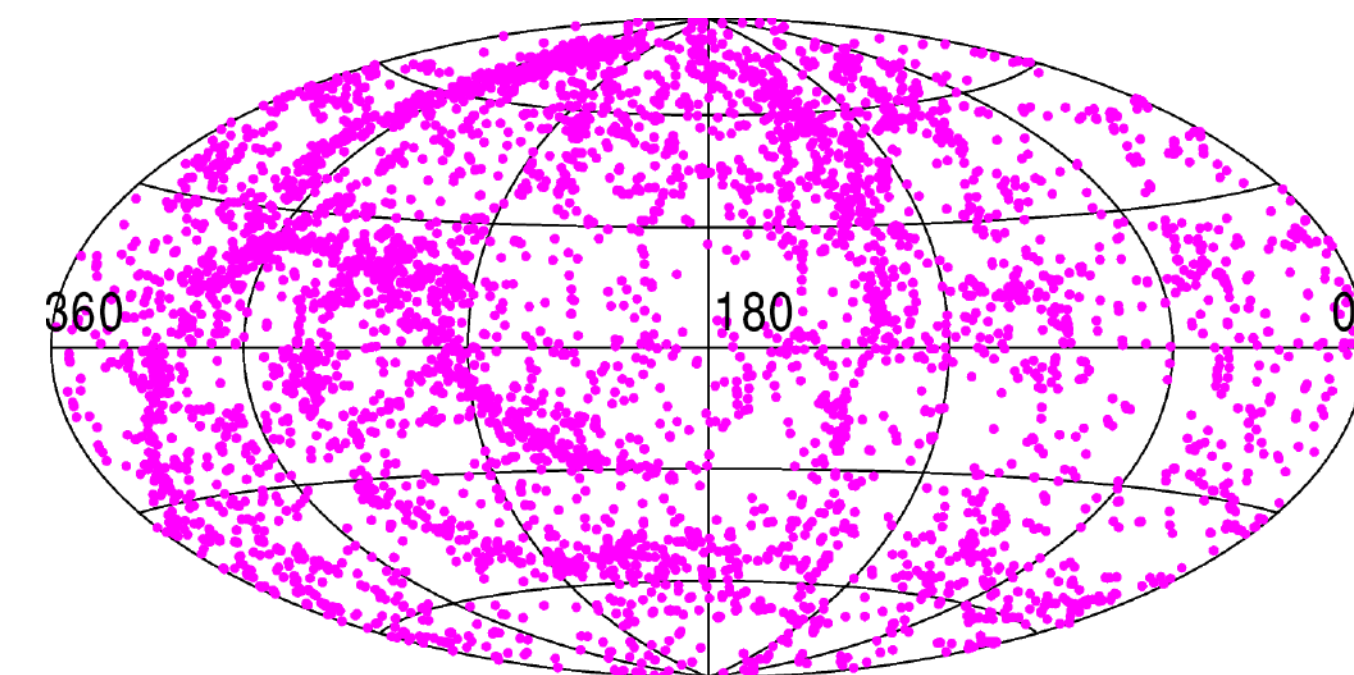
鉄原子核である場合は、光核反応でエネルギーが減少する

近傍の宇宙線源からのみ、極高エネルギー宇宙線が到来する



Planck Collaboration

50 Mpc以内の銀河分布



「宇宙線」が、日本のお茶の間にも登場！？

ウルトラマン (1966)

ウルトラマンブレイザー
でリメイク (2023)

私の居室のガヴァドン

恐怖の宇宙線

第15話
朝と夜の中に

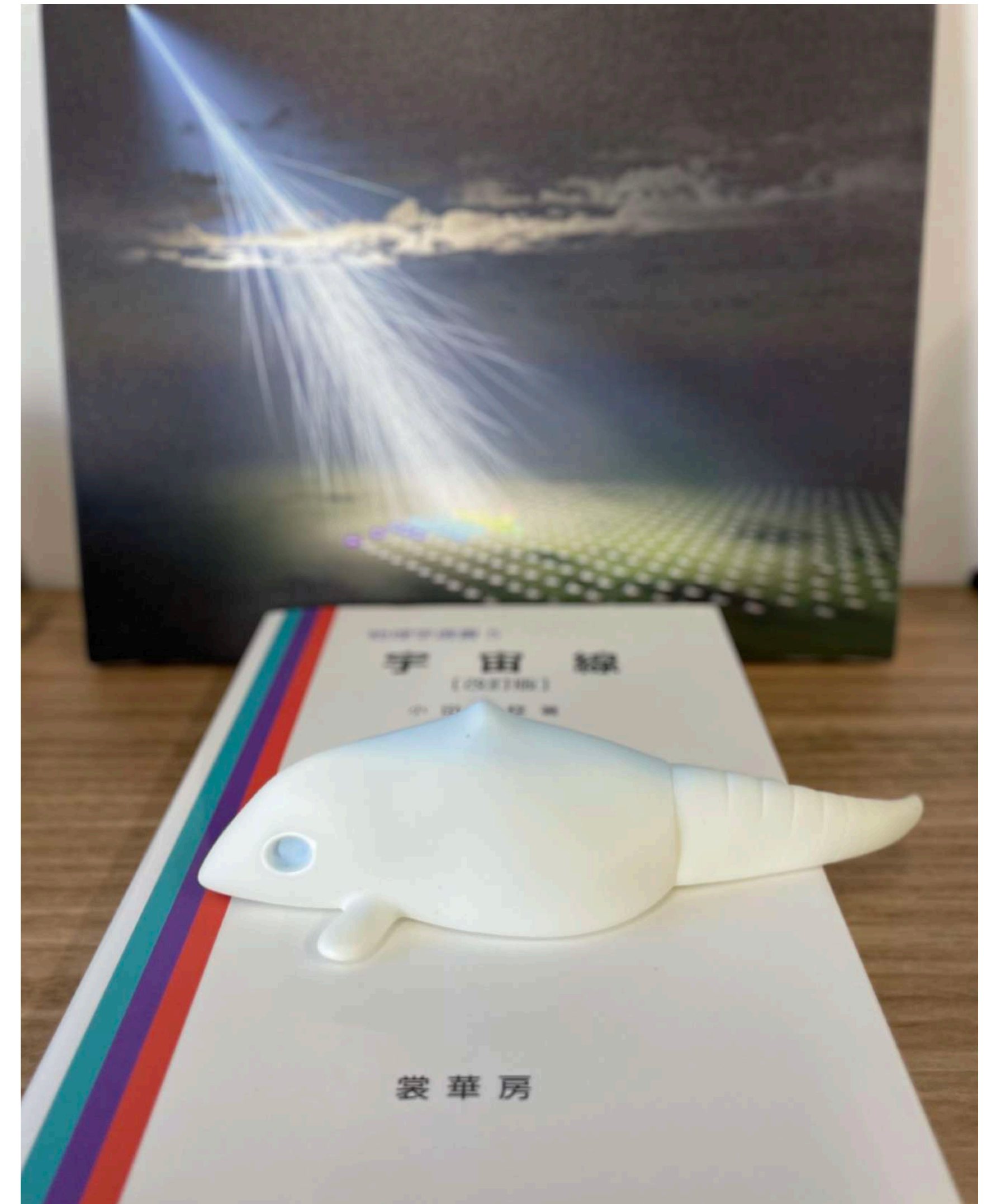


2023/10/21 放送

ゲントの息子ジュンには、一風変わったクラスメイト・アラタがいる。ある日アラタの秘密基地に連れられていったジュンは、アラタが描いた怪獣の絵の熱量と彼の自由さを受け、心を開いていく。ジュンが自主性をもって描いた怪獣はガヴァドンと名付けられた。

夜になり、秘密基地に空から怪光線がふりそそぐと、ガヴァドンの絵が鼓動し始める。

<https://m-78.jp/videoworks/ultraman-blazar/>



極高エネルギー宇宙線による次世代天文学

系内磁場での
曲がり角

$$\theta \sim 10^\circ Z \left(\frac{E}{10 \text{ EeV}} \right)^{-1}$$

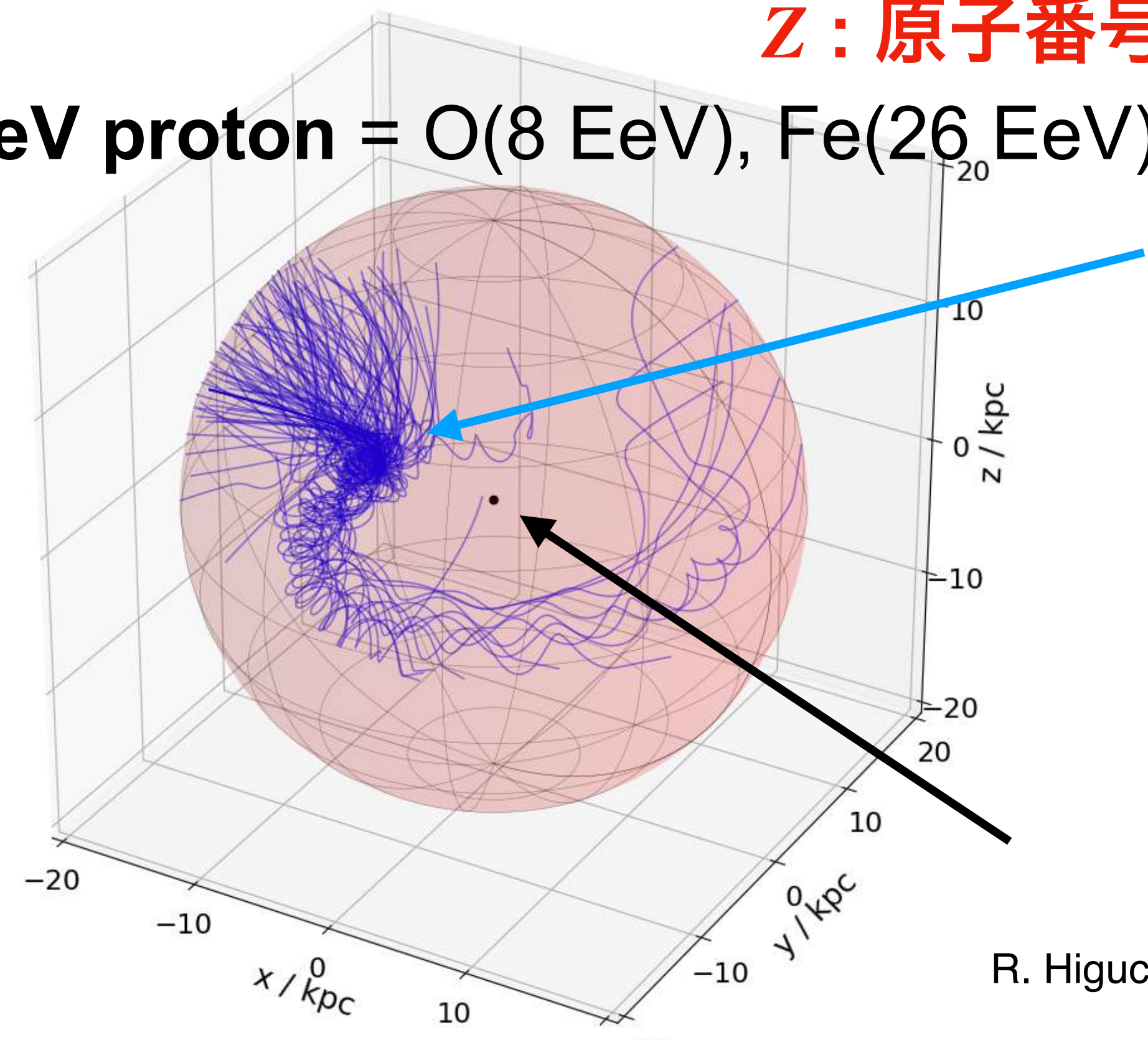
到来
時間差

$$T \sim 100 \text{ yr} \left(\frac{d}{10 \text{ kpc}} \right) Z^2 \left(\frac{E}{10 \text{ EeV}} \right)^{-2}$$

Z : 原子番号 (粒子種、質量組成)

1 EeV proton = O(8 EeV), Fe(26 EeV)

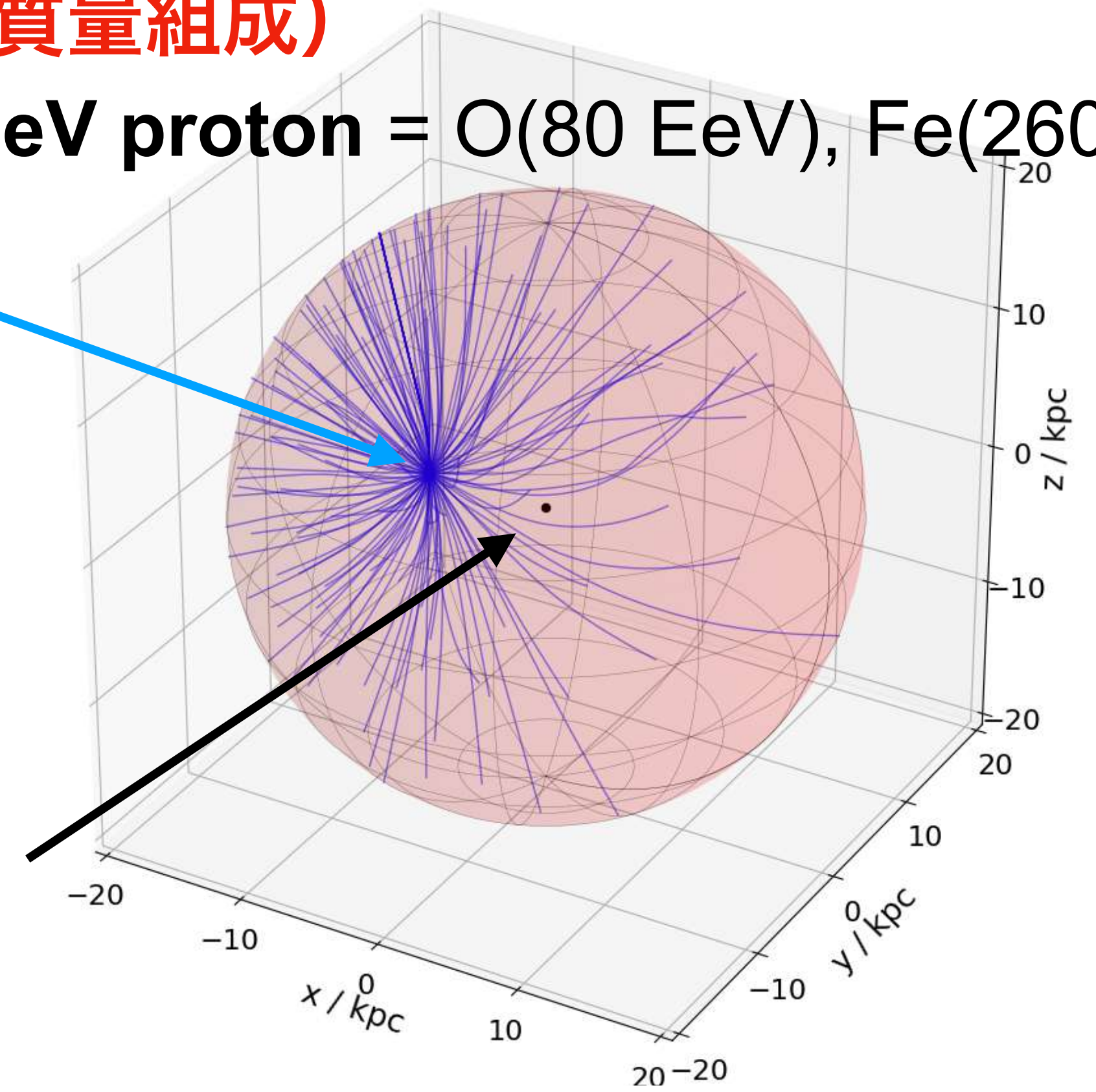
10 EeV proton = O(80 EeV), Fe(260 EeV)



地球

銀河中心

R. Higuchi (ICRR) by CRPropa



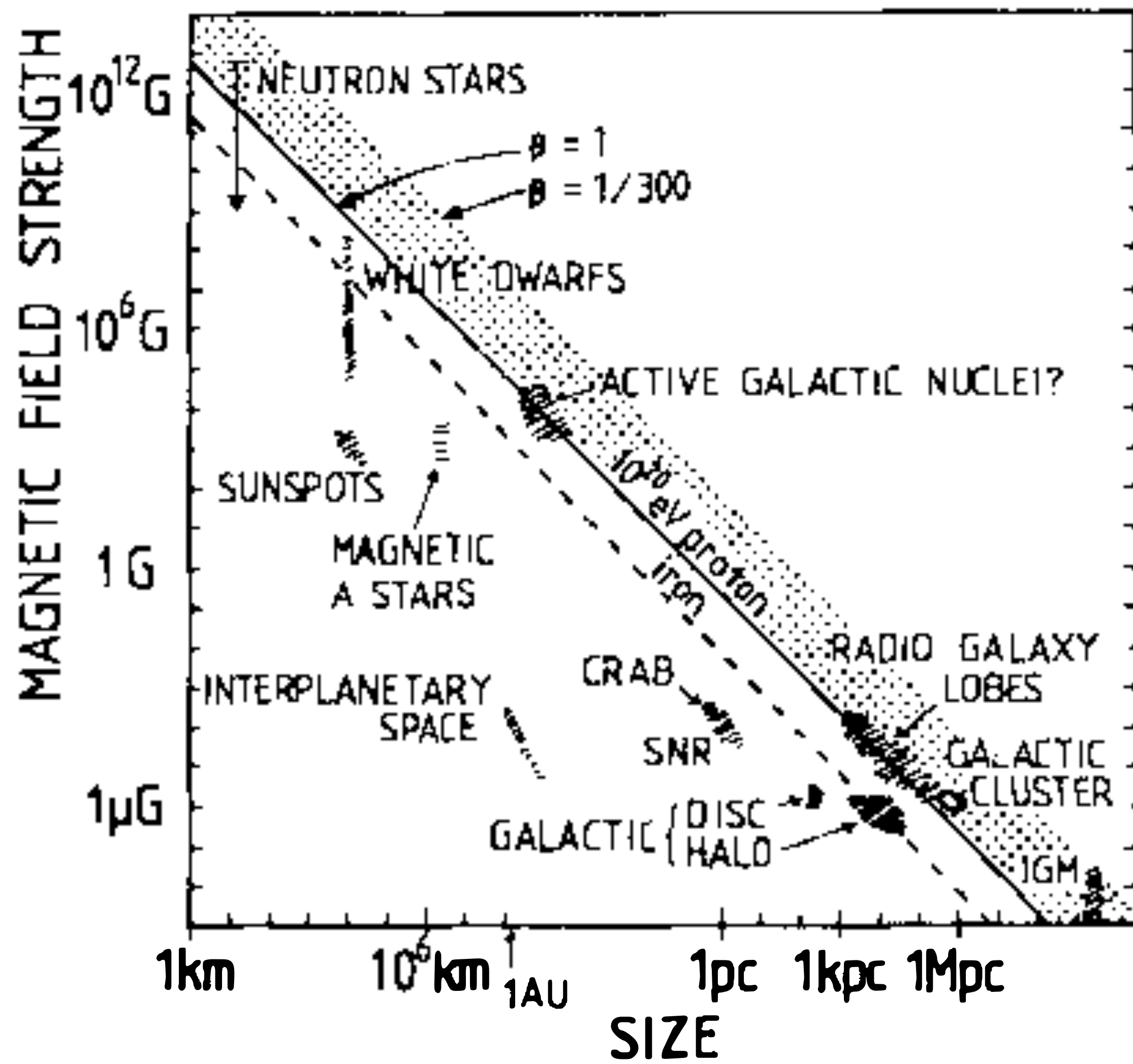
📍 極高エネルギー宇宙線はその莫大な運動エネルギーのため、宇宙磁場で曲げられにくい

📍 宇宙線の起源を解明するための次世代天文学 (極高エネルギー宇宙線天文学)

宇宙線の起源候補天体（ヒラス条件）

$$\left(\frac{E_{\max}}{1 \text{ PeV}} \right) \leq Z \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R}{1 \text{ pc}} \right)$$

$$\left(\frac{E_{\max}}{10 \text{ EeV}} \right) \leq Z \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ kpc}} \right)$$



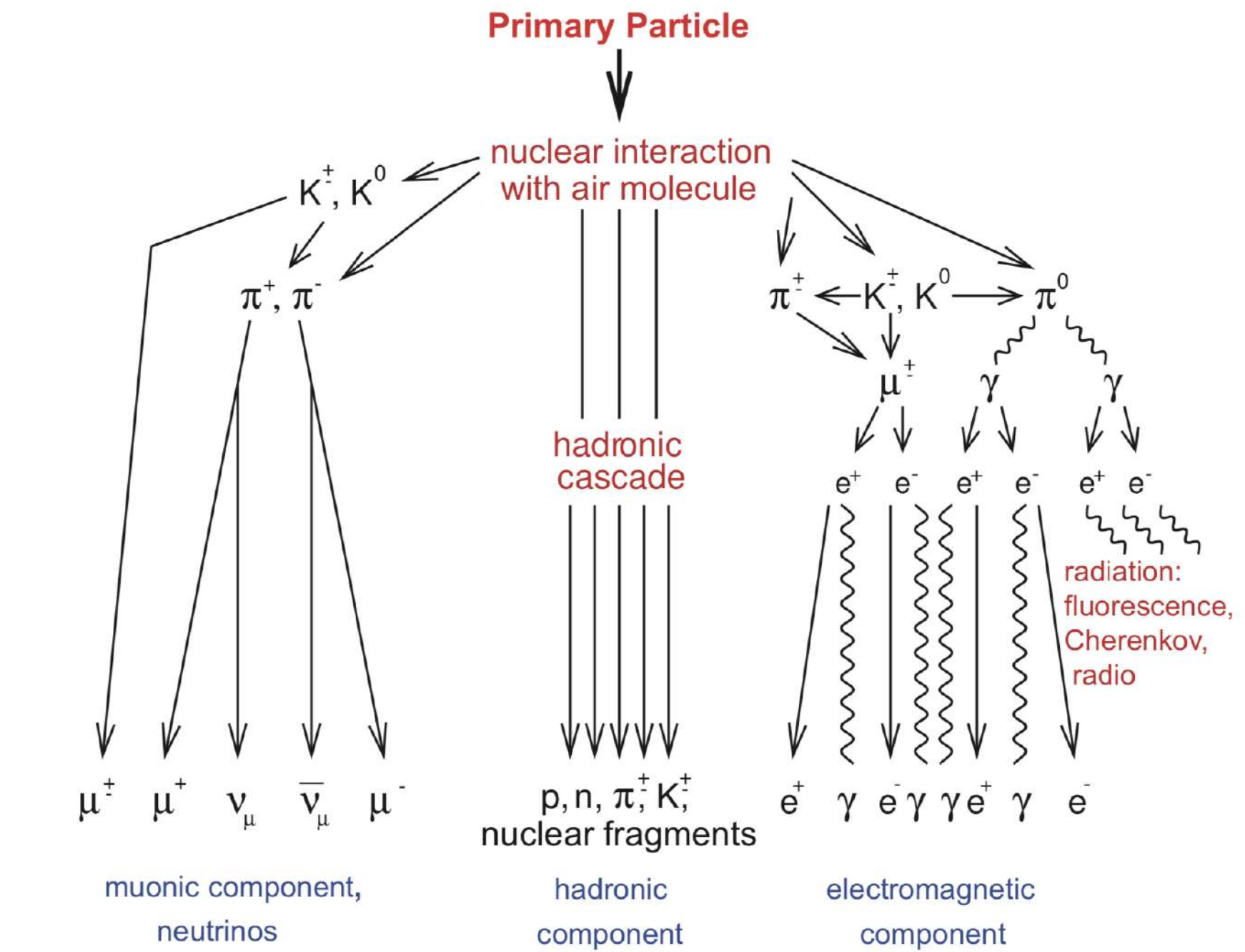
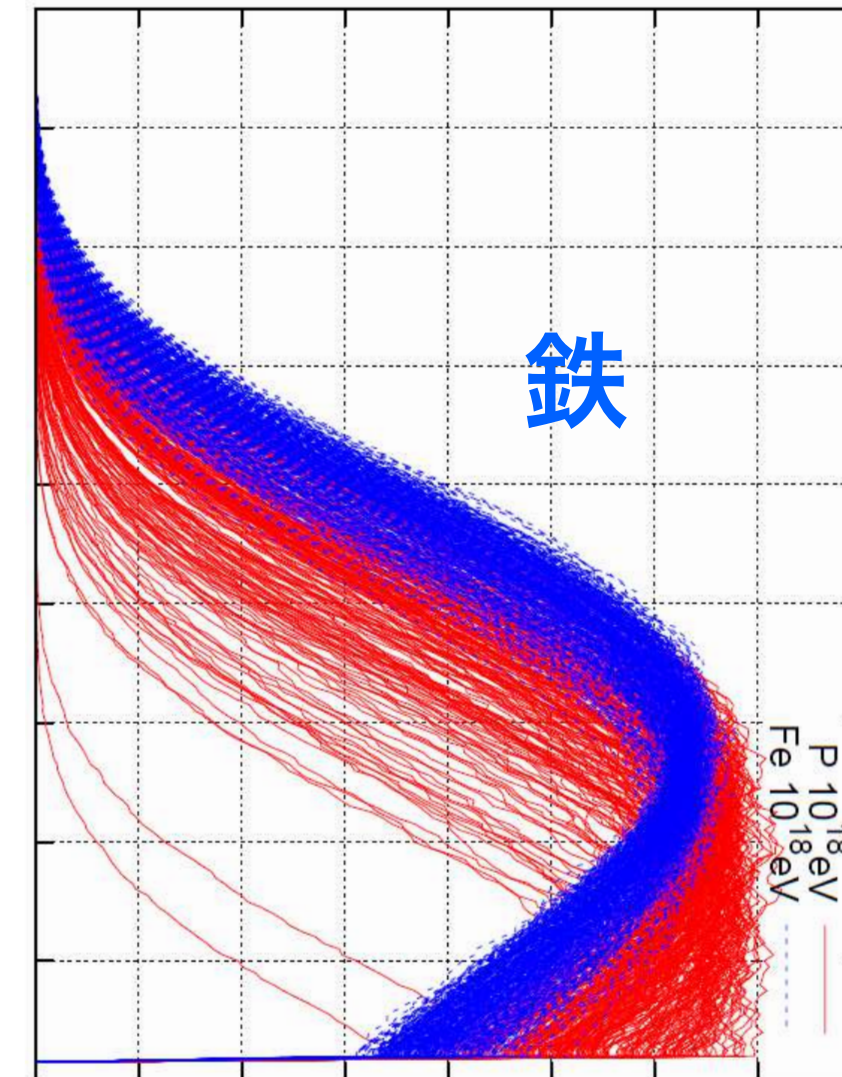
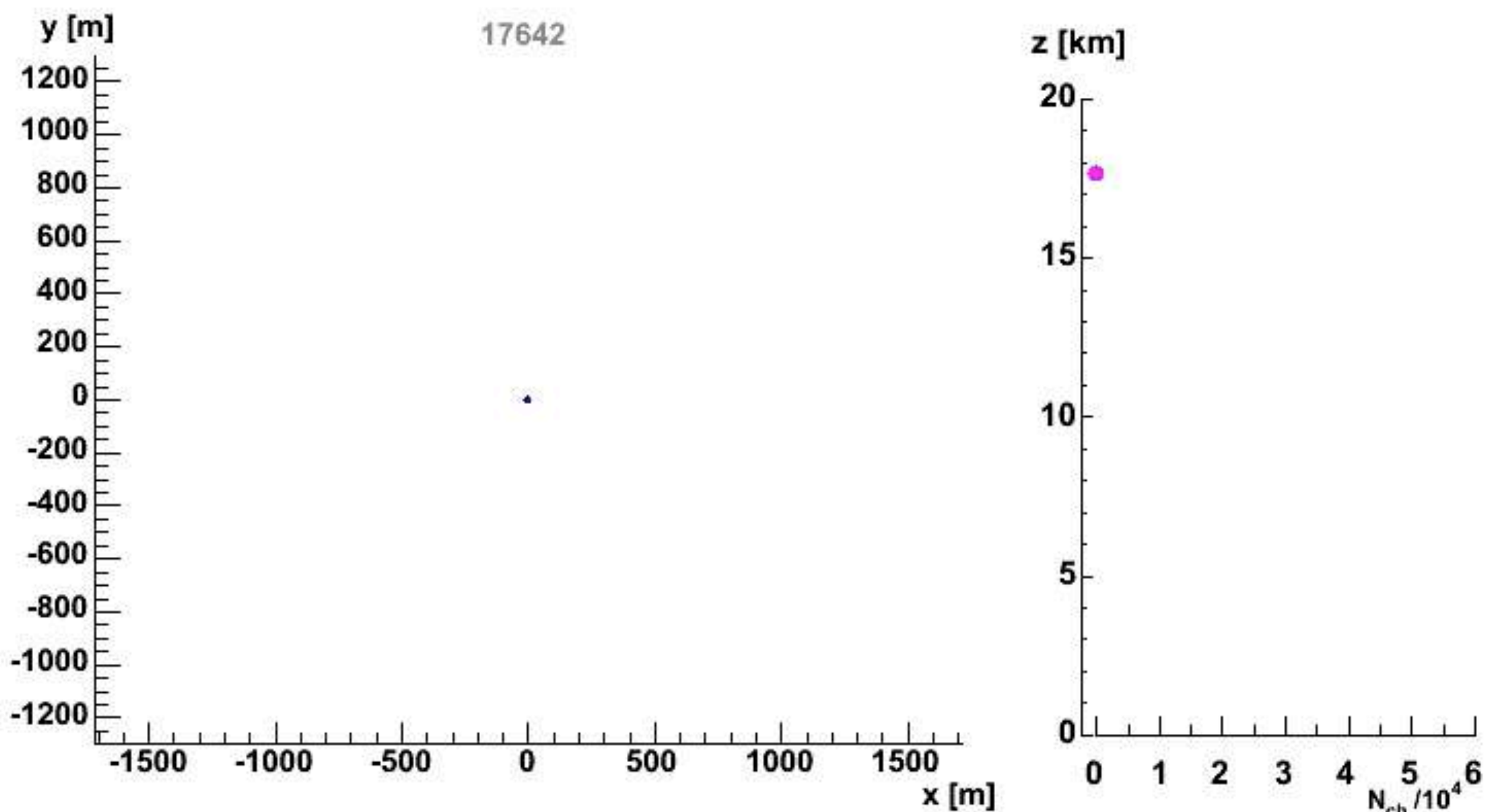
A. M. Hillas, *Astron. Astrophys.*, 22, 425 (1984)



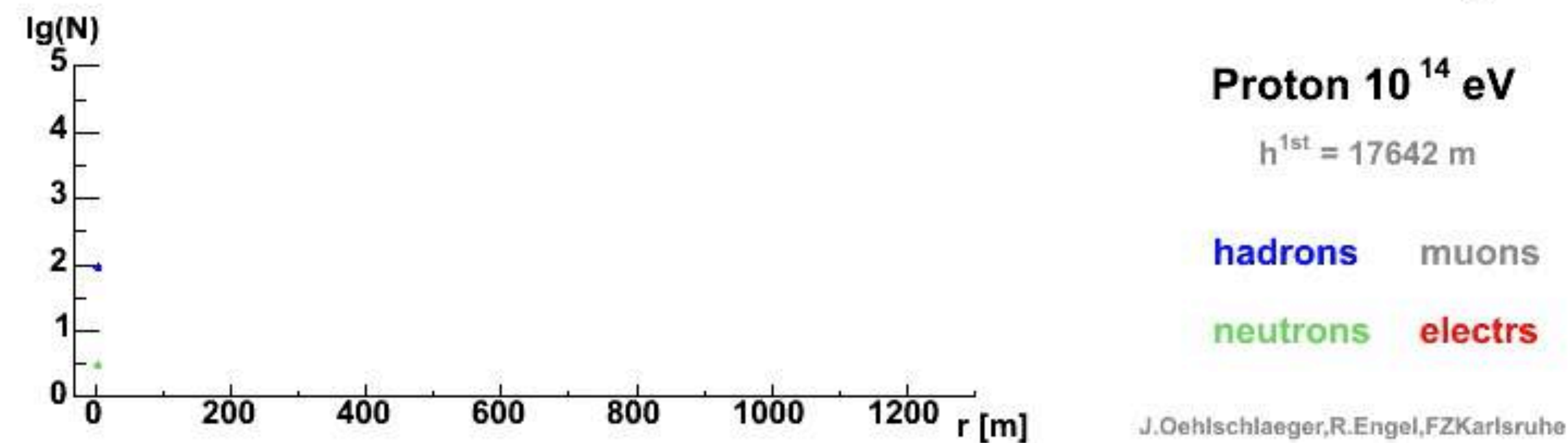
空気シャワー



空気シャワーと粒子種(Z)の推定



A. Haungs et al., , Reports on Progress in Physics 66.7 (2003), 1145



X_{max} : 粒子数が最大になる大気の柱密度

鉄はE/56のエネルギーの核子56個の集合体と考える

$$X_{max}^A \propto \ln \frac{E_0}{A}$$

縦方向発達

大気蛍光望遠鏡で月のない晴天夜に測定できる
 ~10%の年間観測効率、粒子種への感度が高い

横方向密度分布

地表検出器アレイで24時間定常測定できる

<https://web.ikp.kit.edu/corsika/movies>

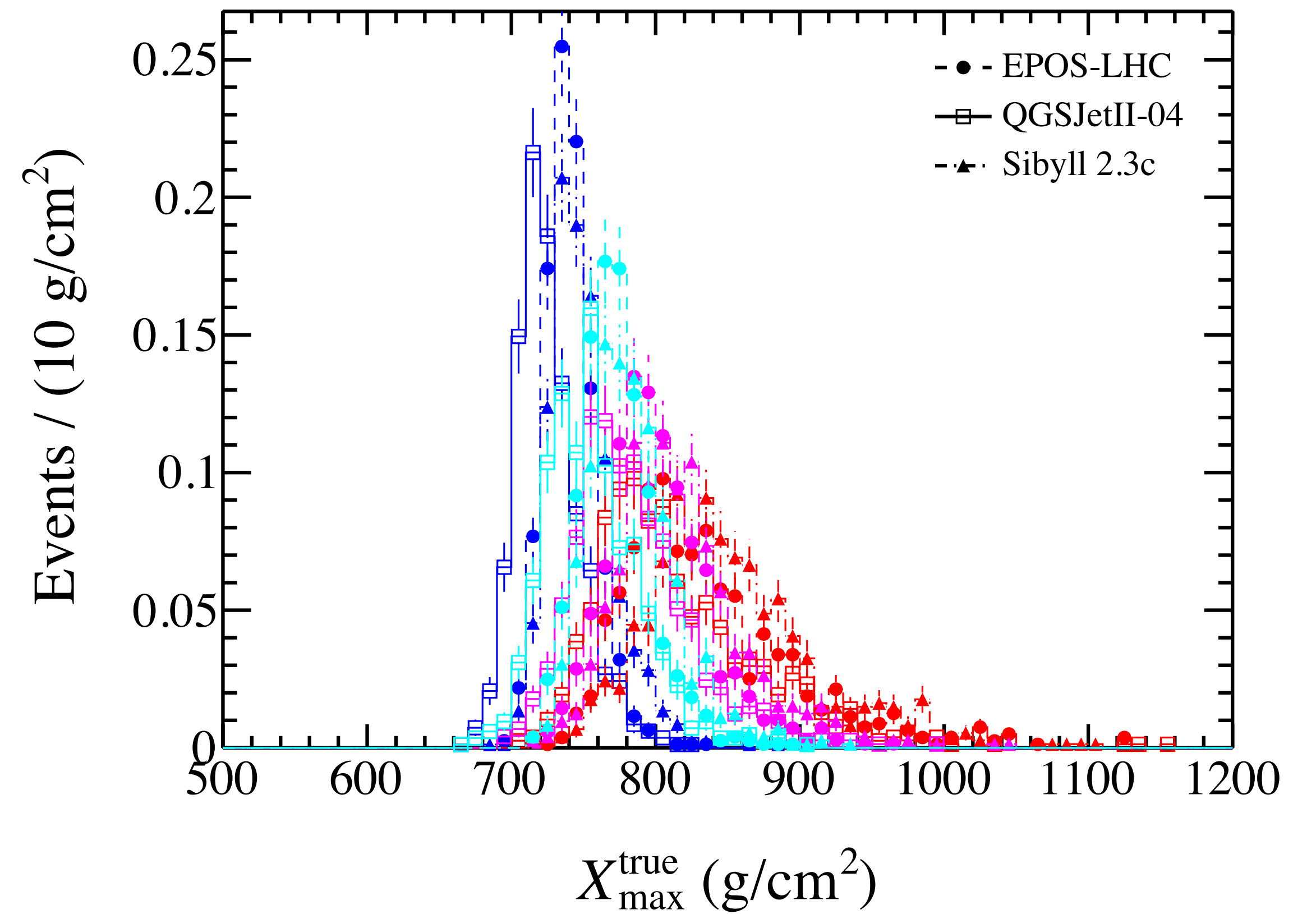
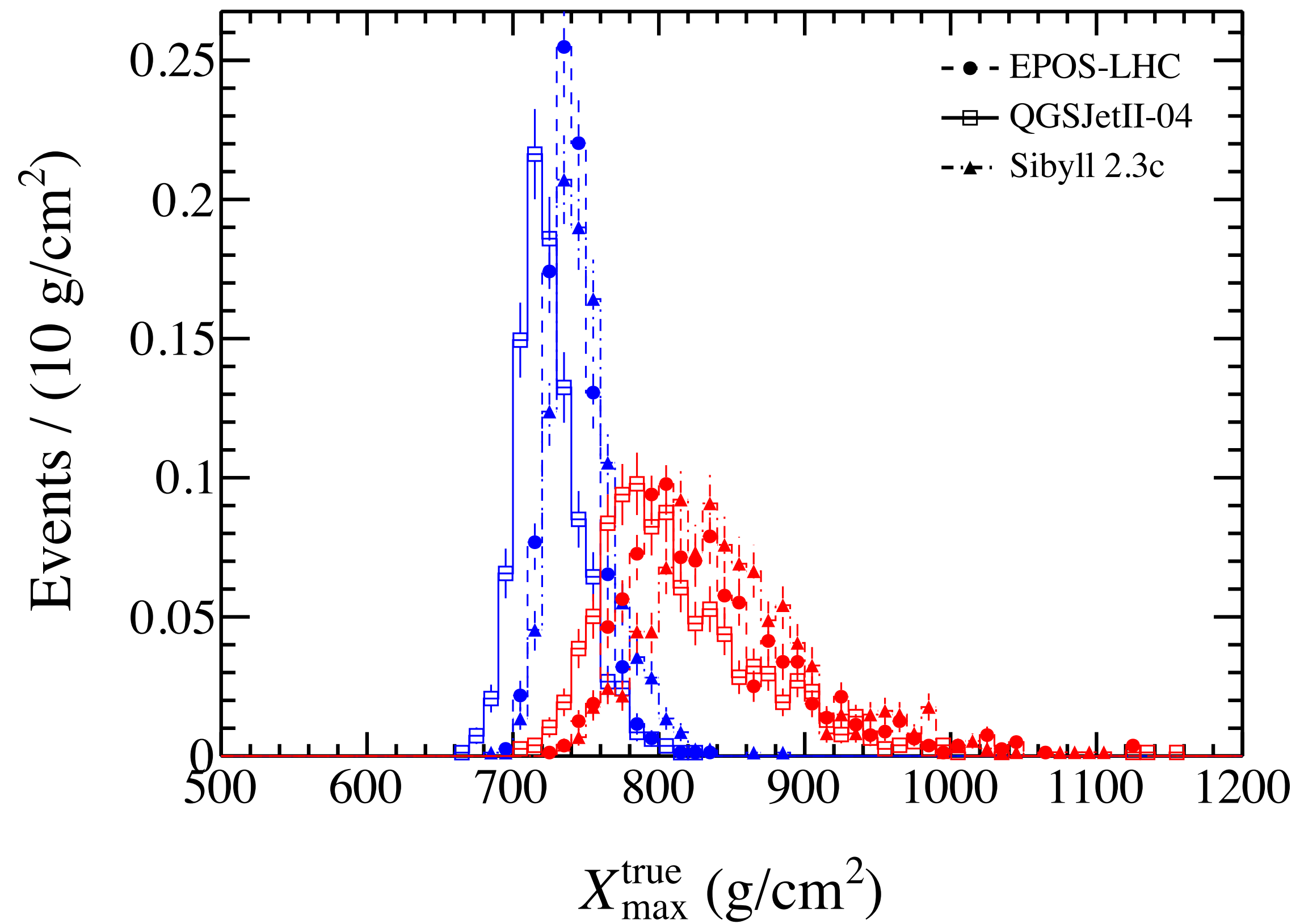
X_{\max} の分布 ($30 \text{ EeV} < E < 40 \text{ EeV}$)

Proton

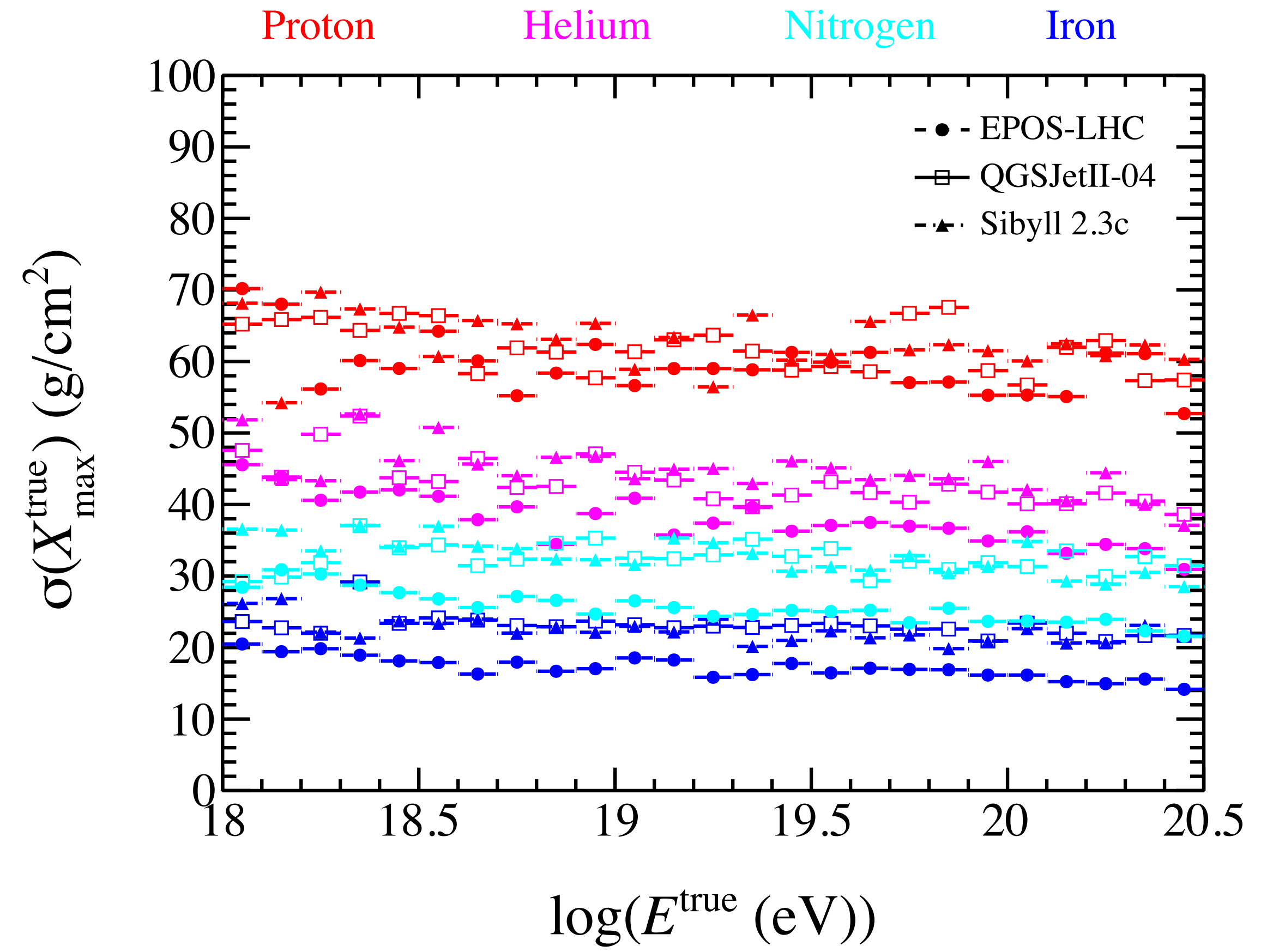
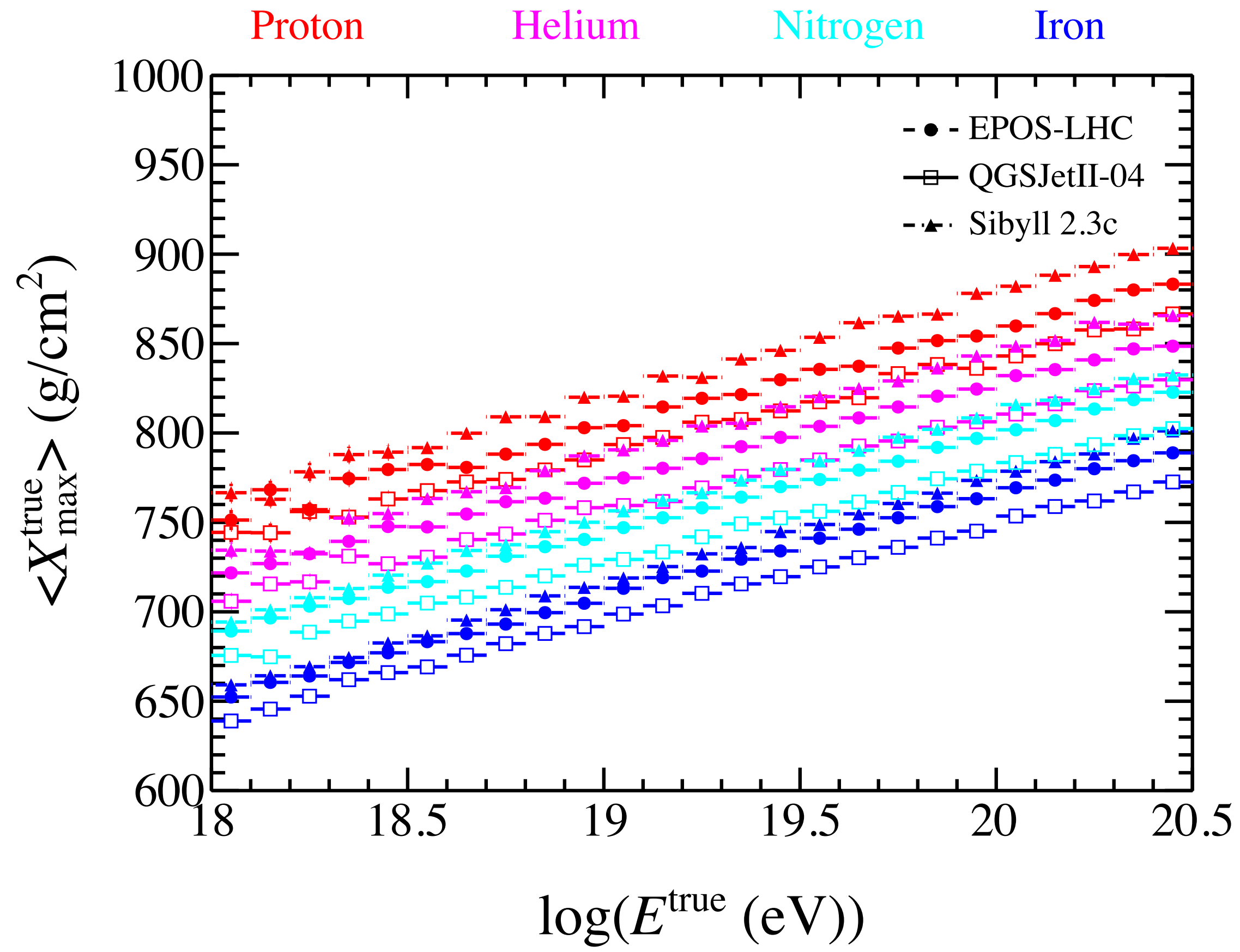
Helium

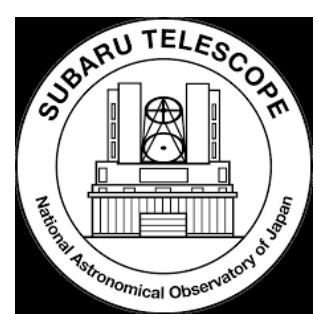
Nitrogen

Iron



X_{\max} の平均値、分布の幅





すばる望遠鏡のCCDで可視化された空気シャワー²¹

標高 4139 m, ハワイ島マウナケア

2014年11月18日 1時14分13秒に150秒露光で撮像

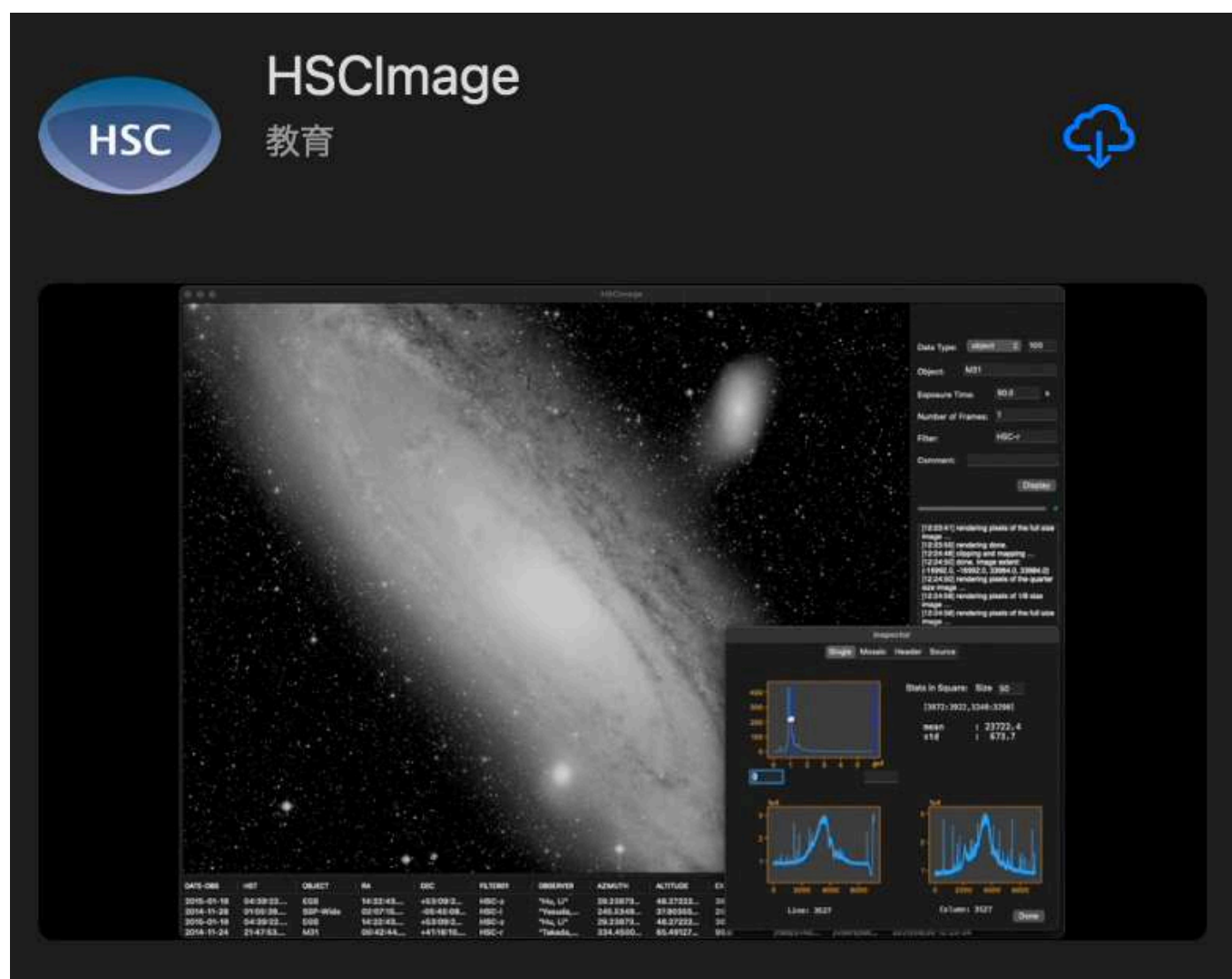
口径 8.2 m の光学赤外望遠鏡

視野角 34' x 27'

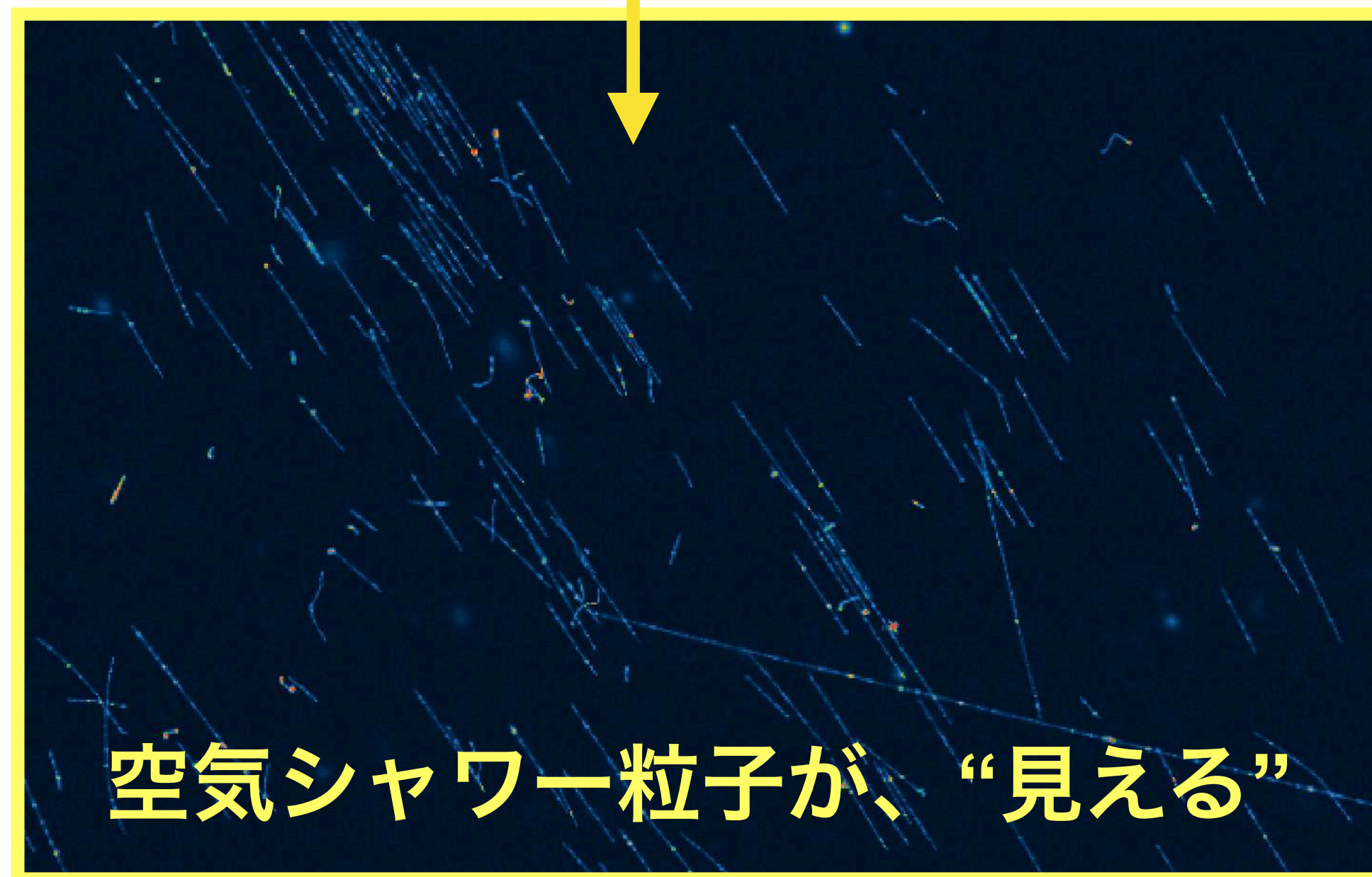
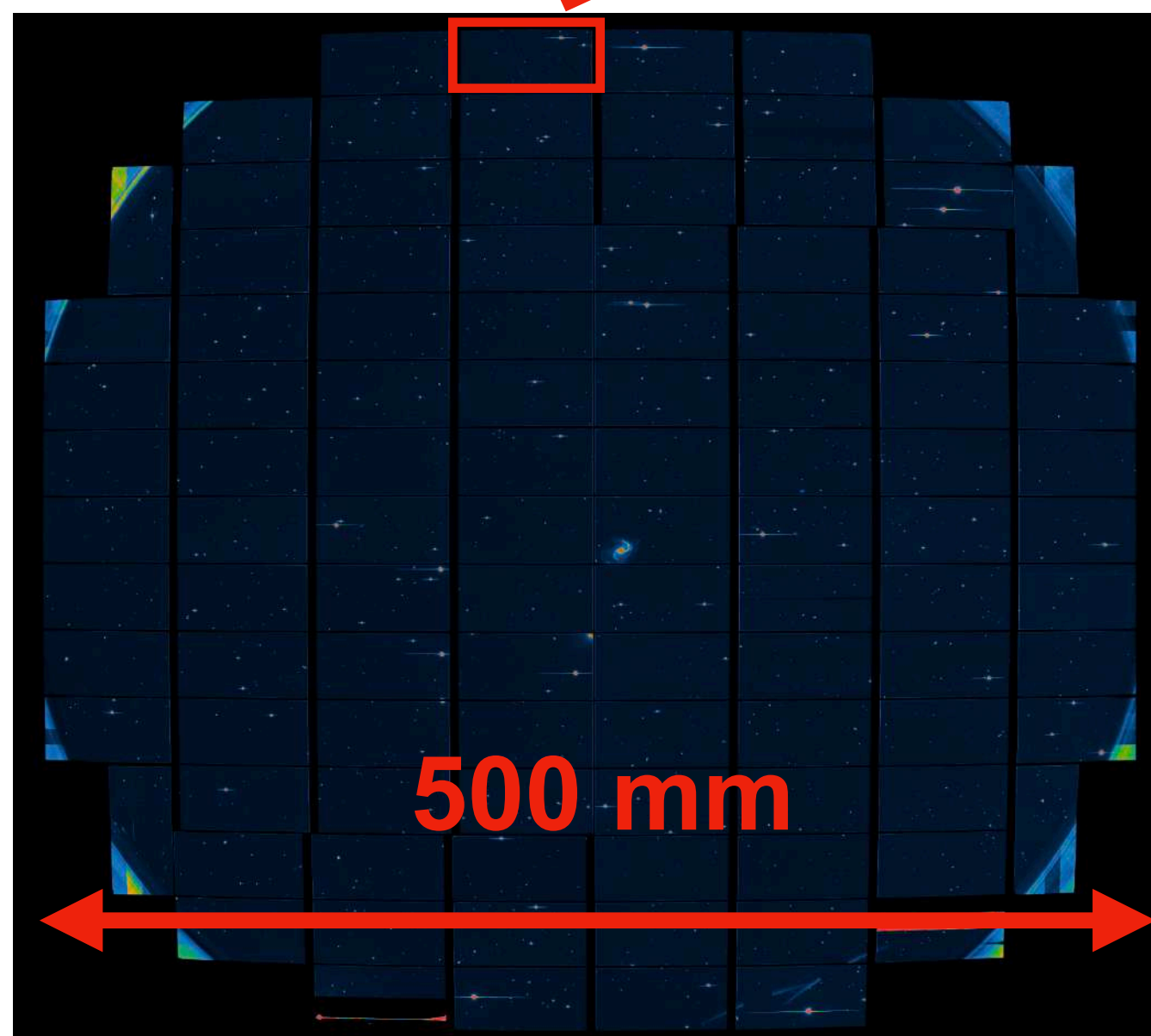


Image credit: <https://subarutelescope.org>

CCD 116枚を配置
30 mm x 60 mm
0.2 mm の空乏層



App Store (Mac)



空気シャワー粒子が、“見える”

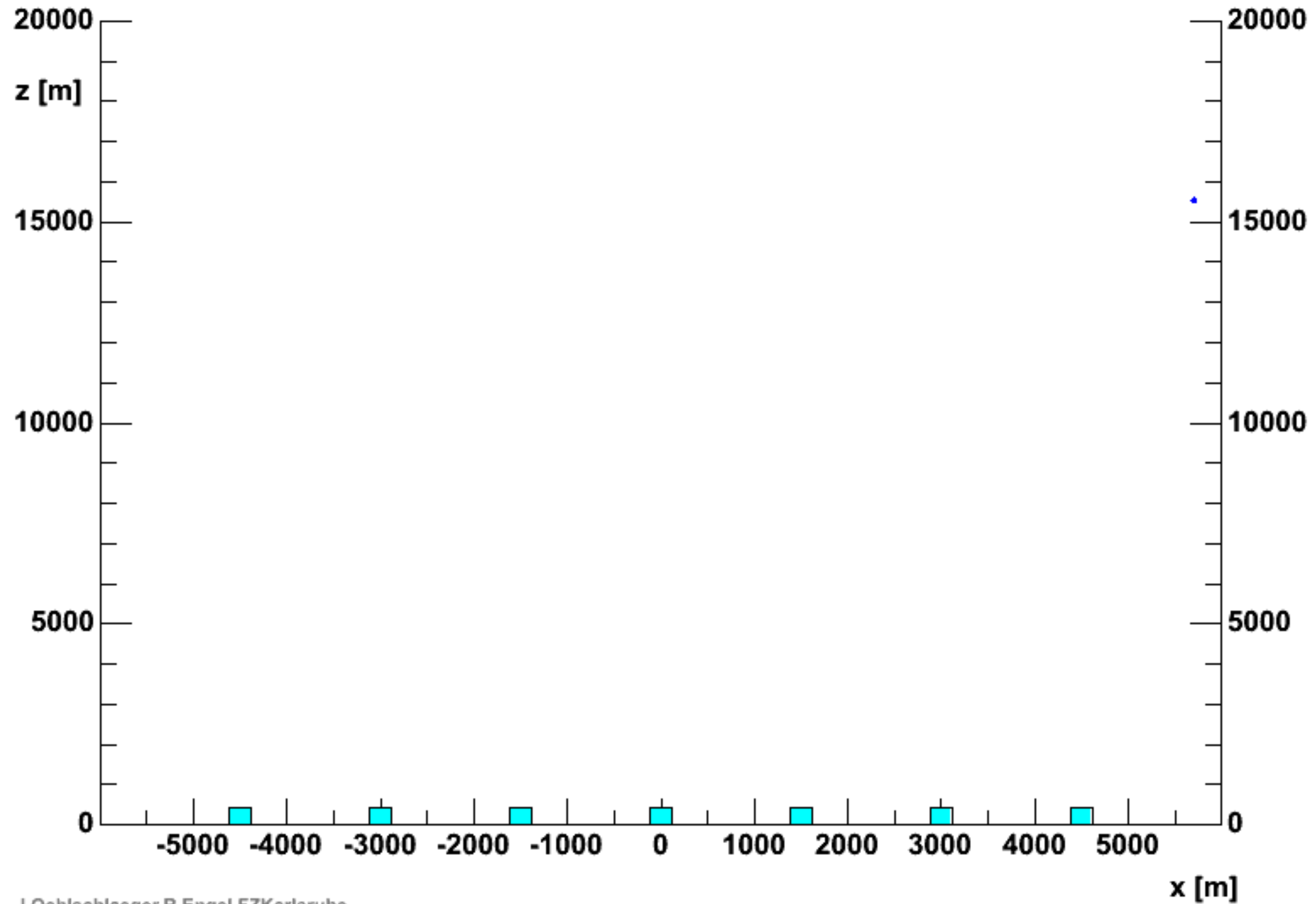
高エネルギー粒子の相互作用の「標本」



1 cm



15514



観測方法、稼働中の宇宙線観測装置

極高エネルギー宇宙線

空気シャワー

地表粒子検出器アレイ

☛ テレスコープアレイ実験 (TA, 700 km²)

☛ アメリカユタ州、2008年から観測開始

☛ 拡張実験TAx4で 3000 km² へ

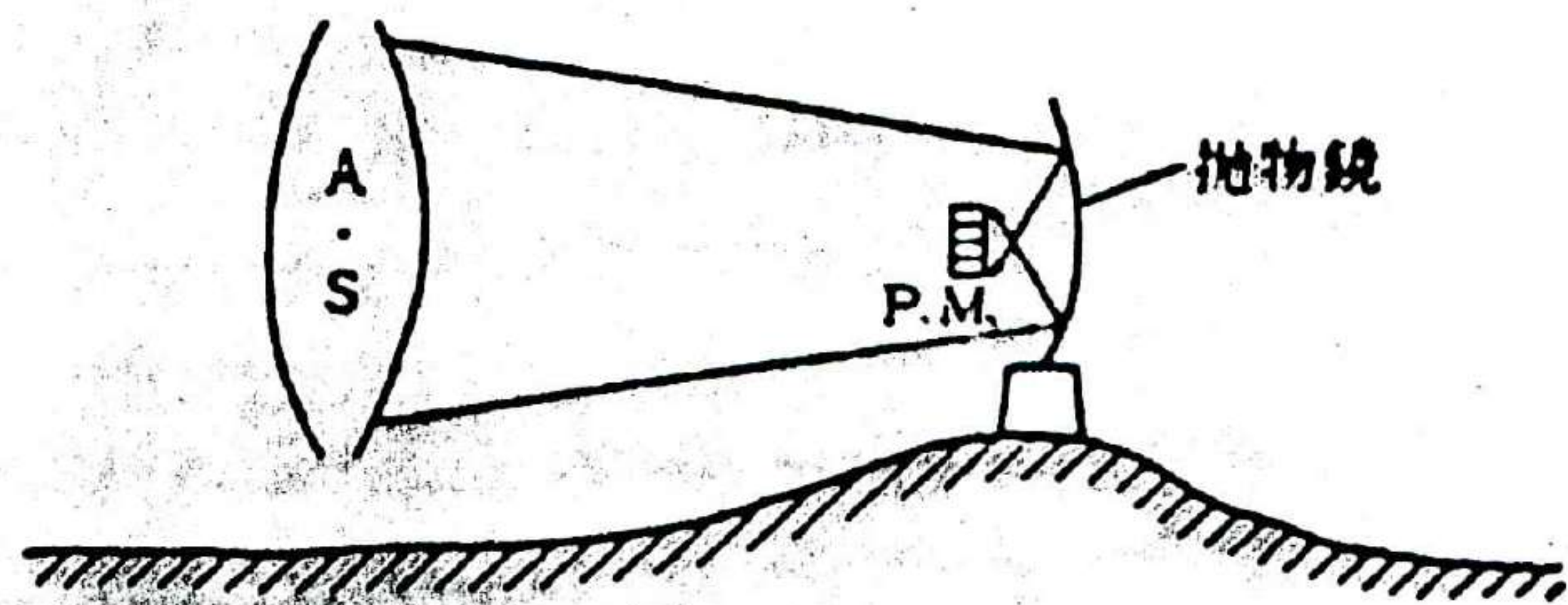
☛ ピエールオージェ観測所 (Auger, 3000 km²)

☛ アルゼンチン、2004年から観測開始

大気蛍光望遠鏡

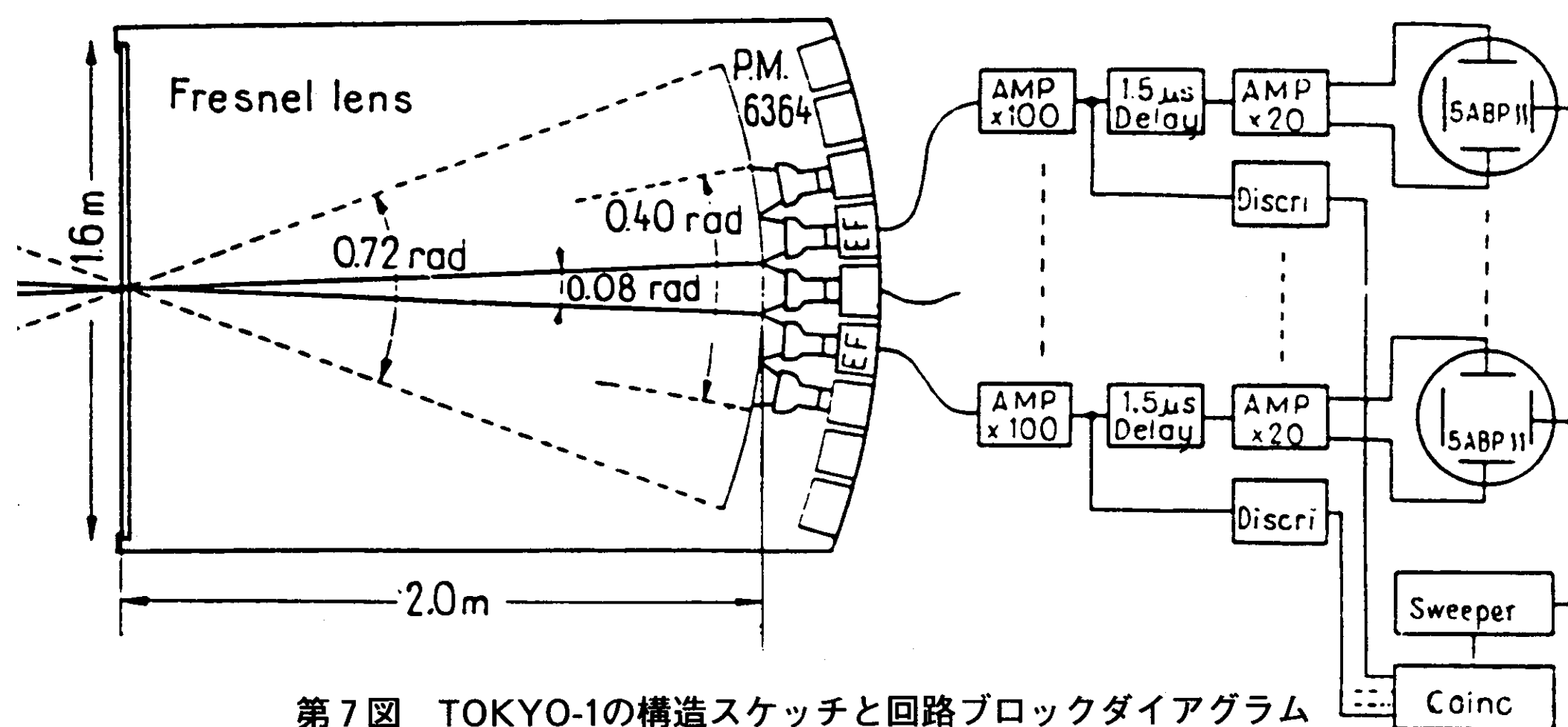


大気蛍光法の始まり

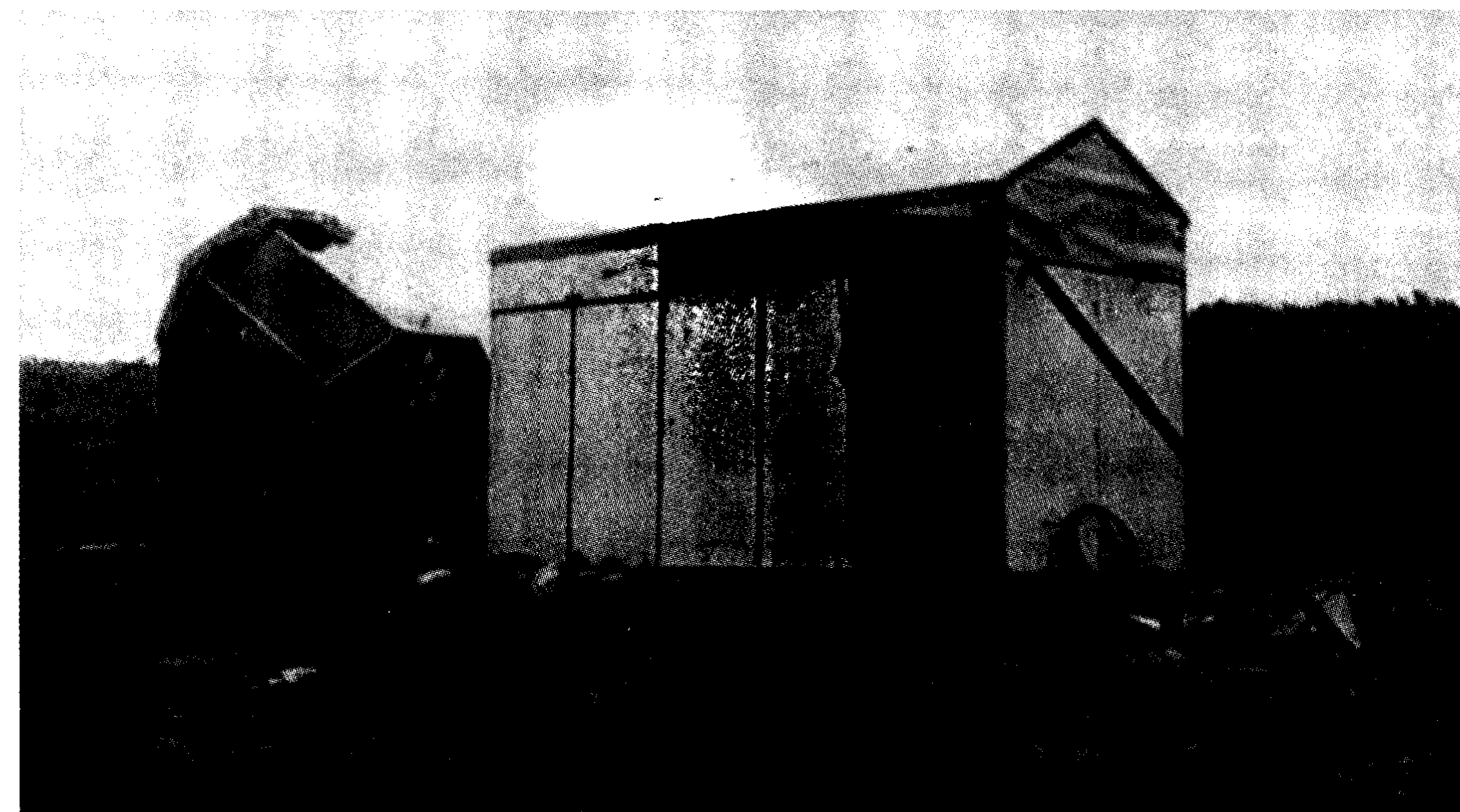


第3図 1958年乗鞍シンポジウムで話されたシャワー・カーブ測定の提案

- ◆ 1958年 大気蛍光法の提案 (菅, 小田@乗鞍シンポジウム) GreisenとChudakovも同時期に検討
- ◆ 粒子種に感度の高いXmaxを測定できる
- ◆ 1969年 大気蛍光望遠鏡(TOKYO-1)による空気シャワー事象の初観測



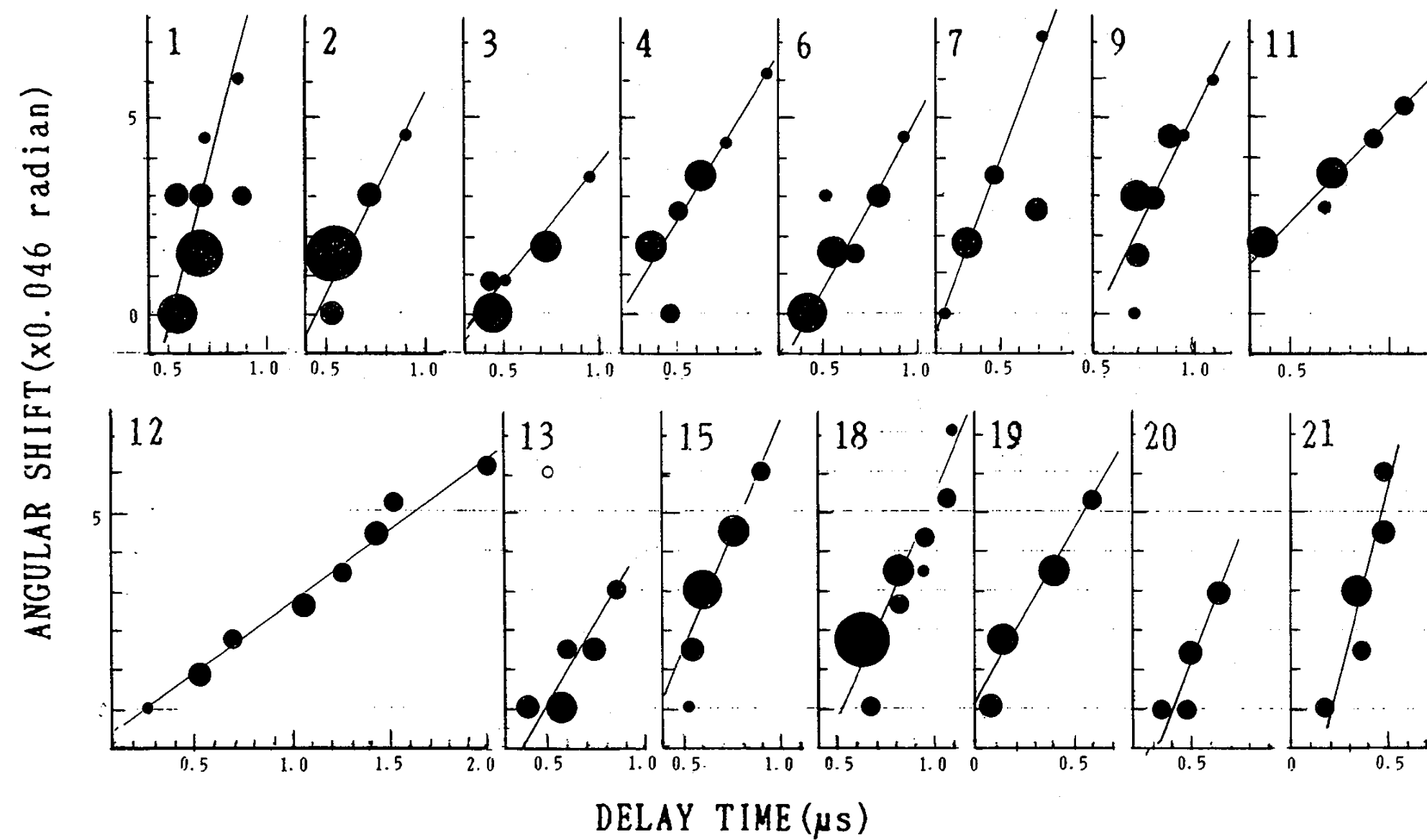
第7図 TOKYO-1の構造スケッチと回路ブロックダイアグラム



第8図 TOKYO-1の設置写真

大気蛍光法による宇宙線の初観測

TOKYO-1で観測された候補事象 (1969年)

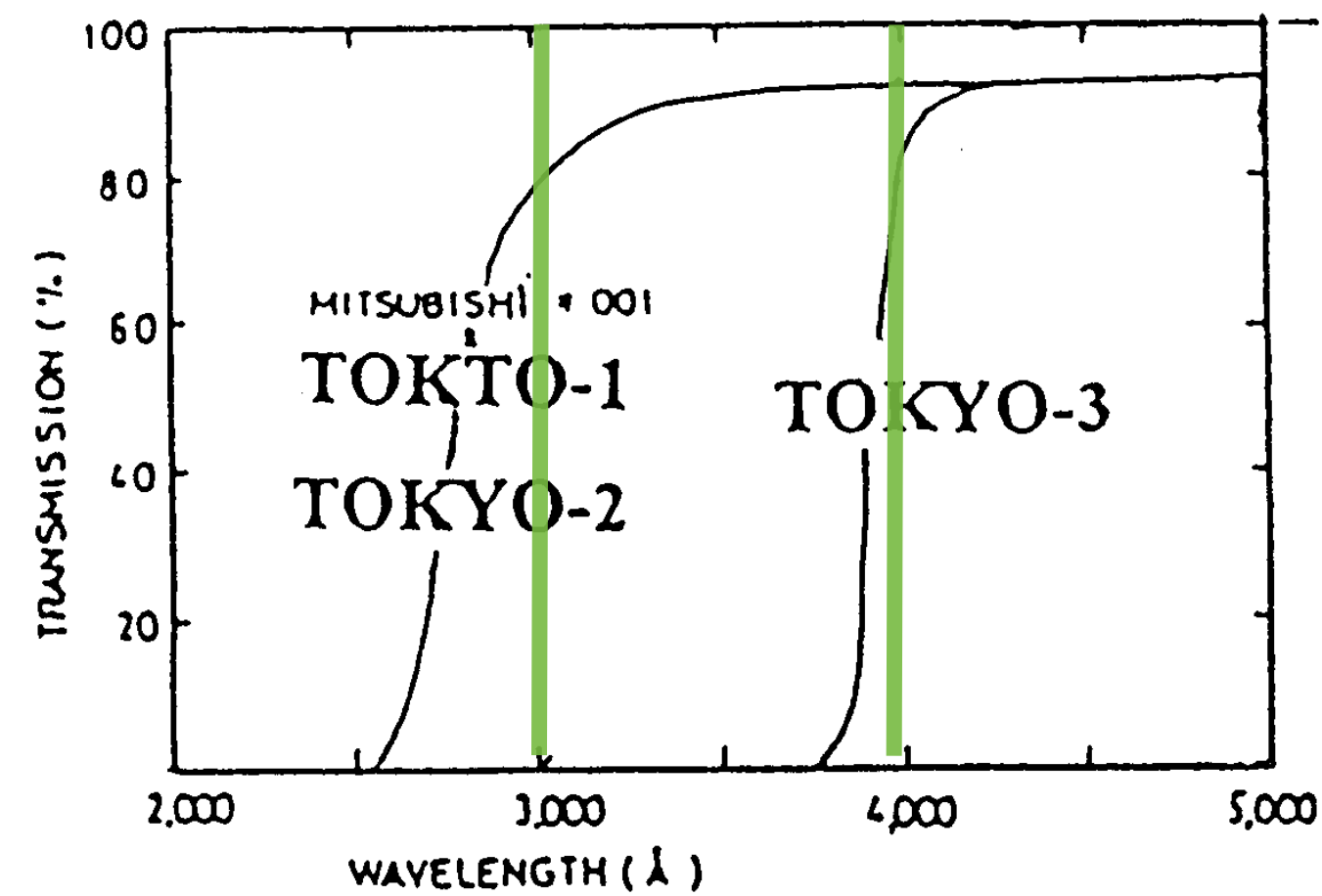


第9図 選ばれた15事象の光角速度。黒丸の大きさは光量に比例

B. Dawsonらによる追解析 (2011年)

- ◆ $E = 5 \text{ EeV}$, $X_{\text{max}} = 680 \text{ g/cm}^2$ の宇宙線からの信号とよく一致 (arXiv:1112.5686)

参考文献: 「大気の蛍光観測による宇宙線実験の始まり」 棚橋五郎



第6図 プラスチックレンズの光透過性能 (TOKYO-1,TOKYO-2,TOKYO-3)

M. Ave et al. / Astroparticle Physics 28 (2007) 41–57

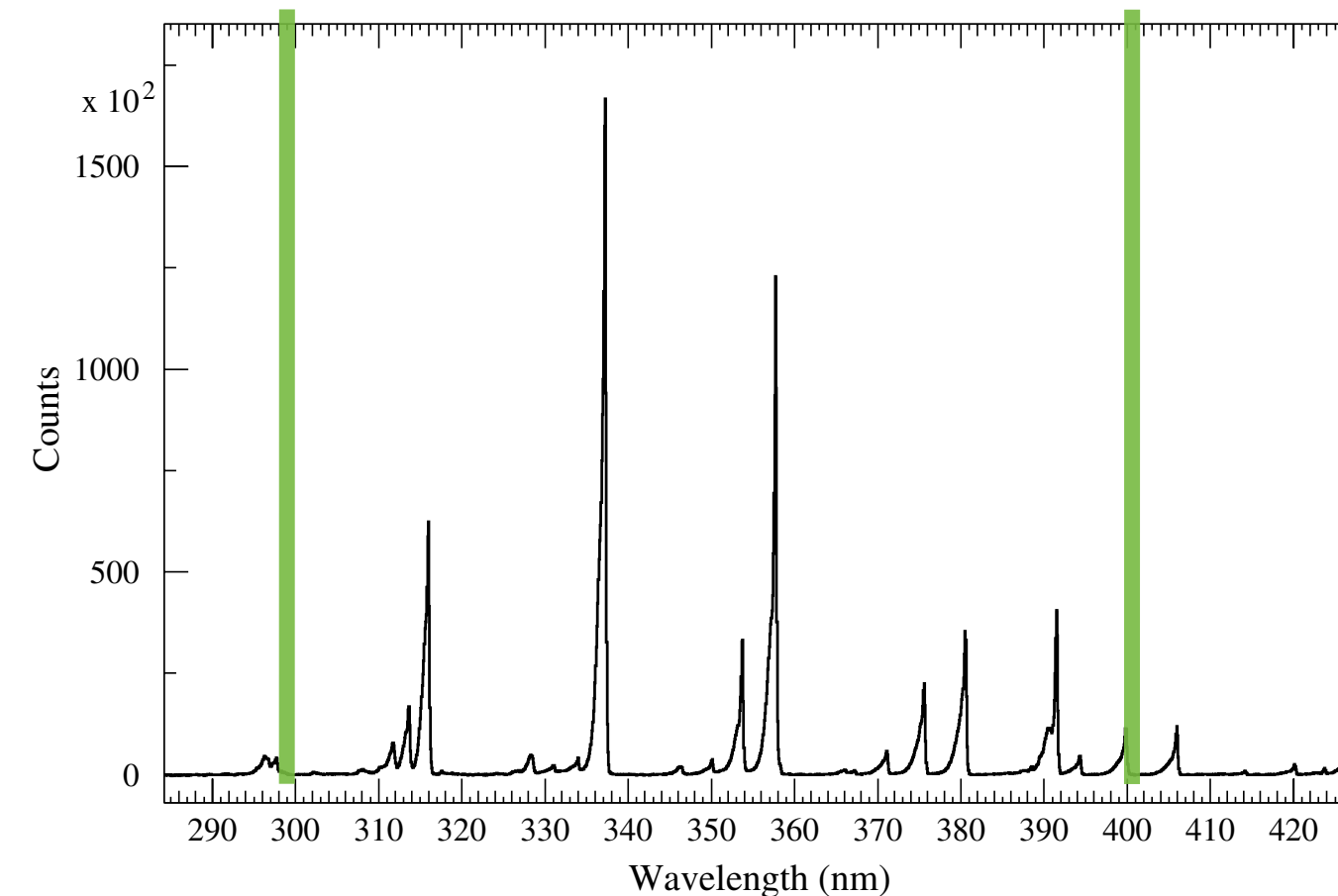
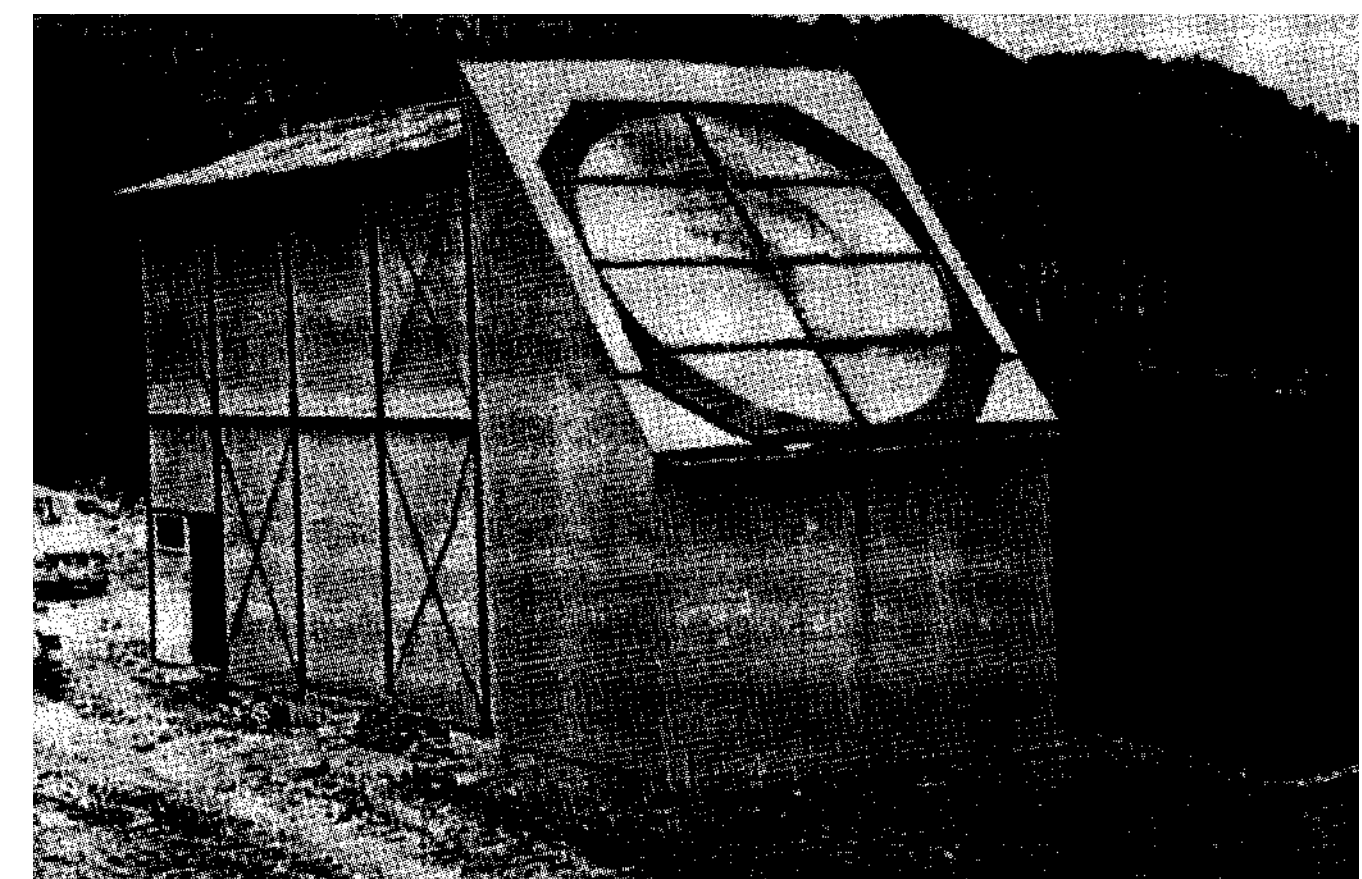


Fig. 4. Measured fluorescence spectrum in dry air at 800 hPa and 293 K.

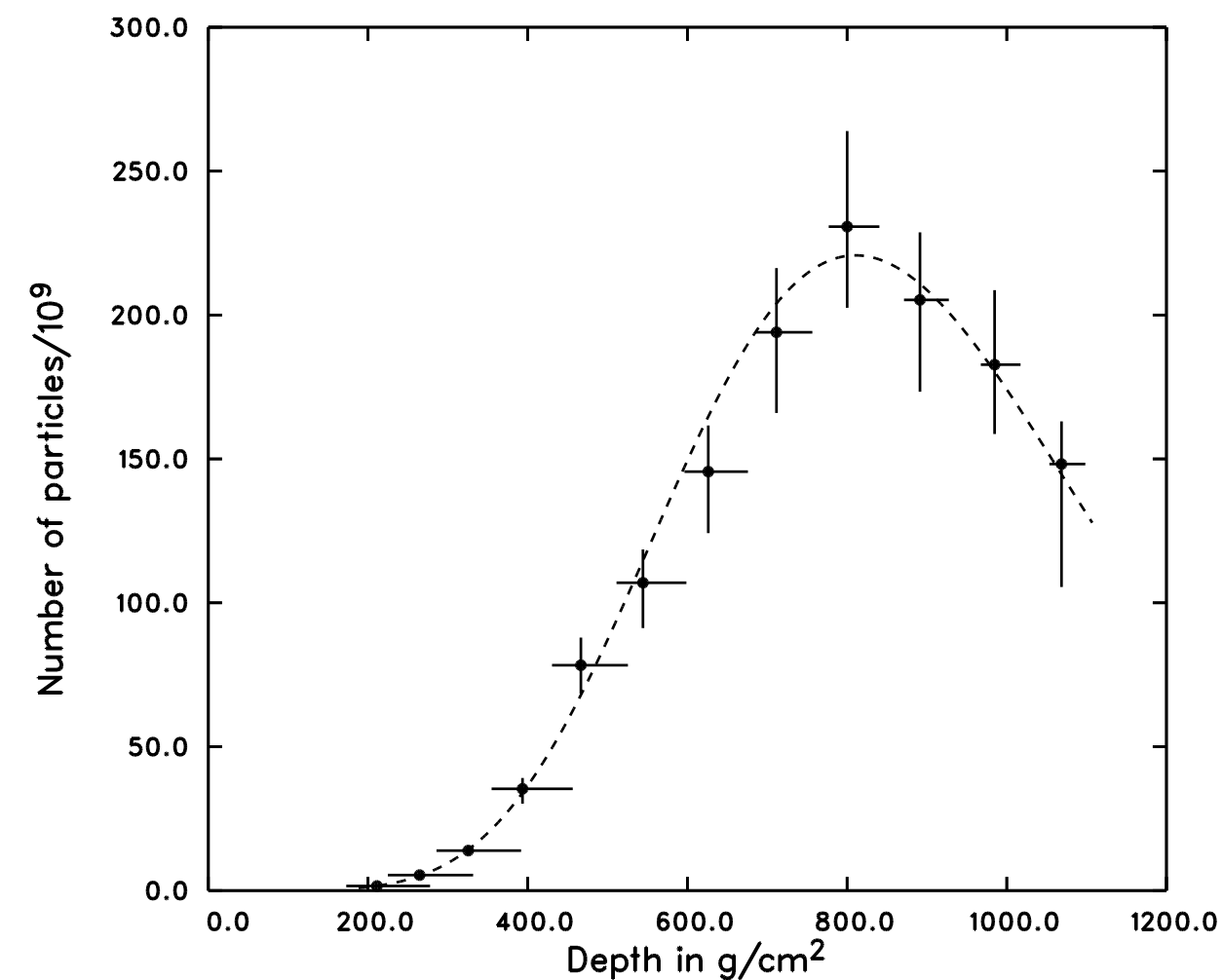
- ◆ 信号の時間幅が長く、光量が一定 (No. 12)
- ◆ 宇宙線からの大気蛍光発光を初めて検出 (1969年)
- ◆ 静岡県南伊豆町での TOKYO-3で大型化
 - ◆ 4 m²のフレネルレンズが一般の紫外線遮断材入り



10²⁰ eVの宇宙線を掴まえる競争 (2000年代)

Fly's Eye (Utah, USA)

1976年~ Volcano Ranch Arrayに望遠鏡を設置、
宇宙線からの信号を確認後、建設開始



D.J. Bird et al., ApJ 441 (1995) 144

320 ± 38 (stat.) ± 85 (syst.) EeV

1991年10月15日、観測史上最大のエネルギー
の宇宙線を観測 (オーマイゴッド粒子)

1994年から High Resolution Fly's Eye に

明野観測所 (山梨県明野村、1977年~)

Akeno Giant Air Shower Array (AGASA)

1993年-2004年, 面積 ~100 km²

1993年12月3日に **213 (170 – 260) EeV**、
2001年5月10日に **~280 EeV** 観測



2.2 m²、厚さ5 cmの
シンチレーター

GZK限界の存否 (2000年代)

M. Takeda et al., Phys.Rev.Lett. 81, 1163 (1998)

オーマイゴッド粒子

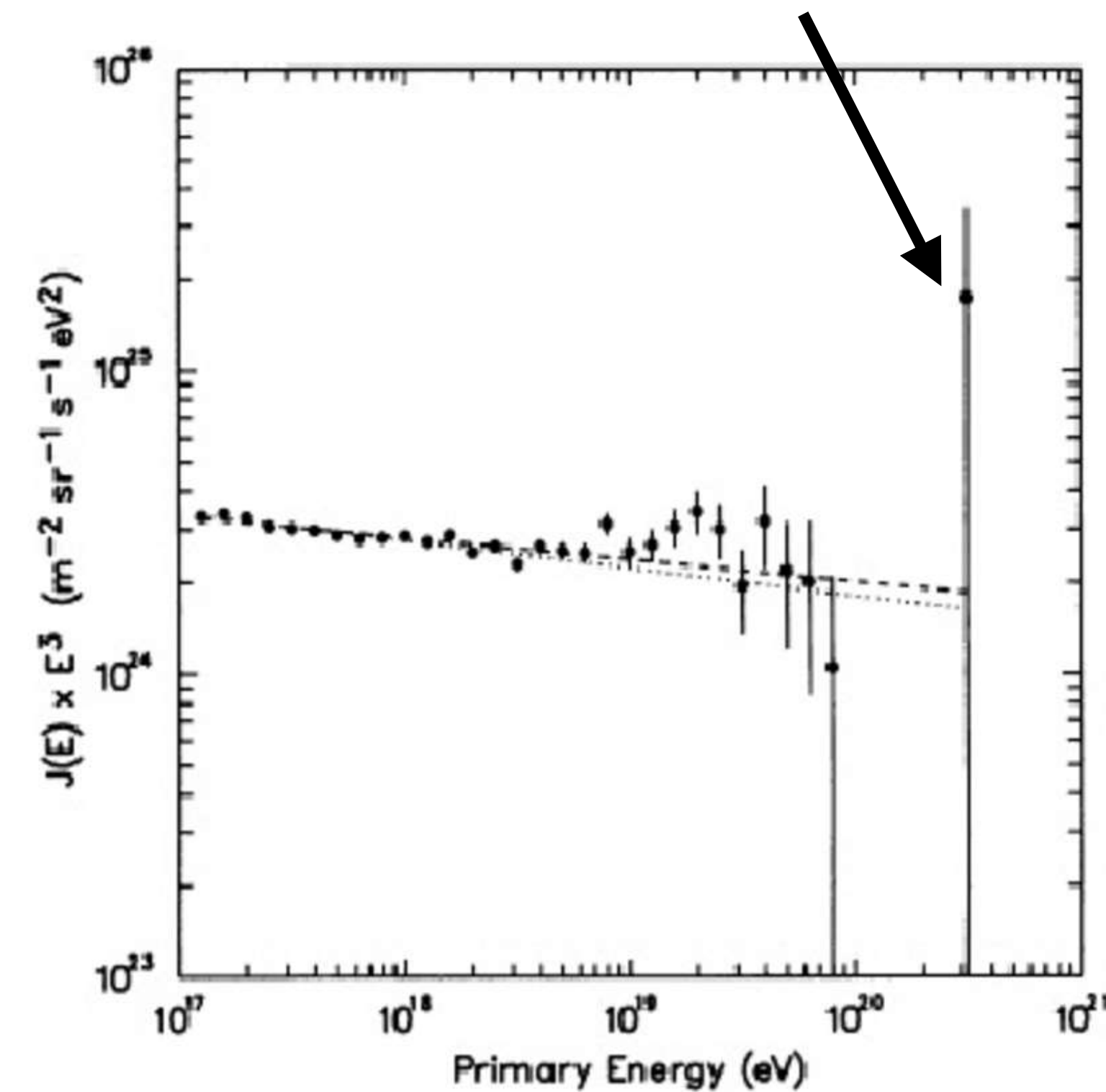
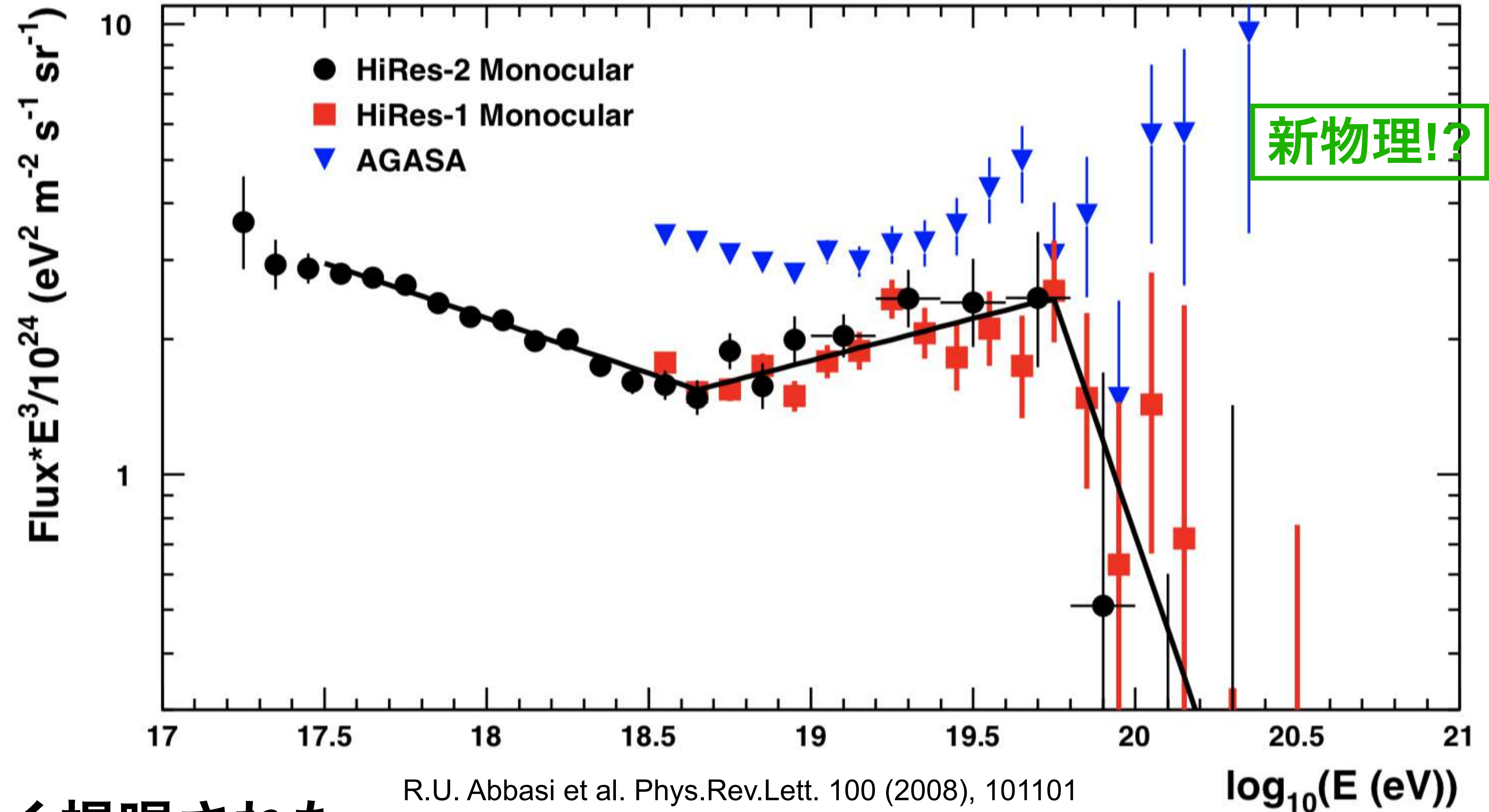


FIG. 11.—Fly's Eye monocular energy spectrum. Points: data. Dashed line: best fit of the total spectrum. Dotted line: best fit up to $10^{18.5}$ eV.

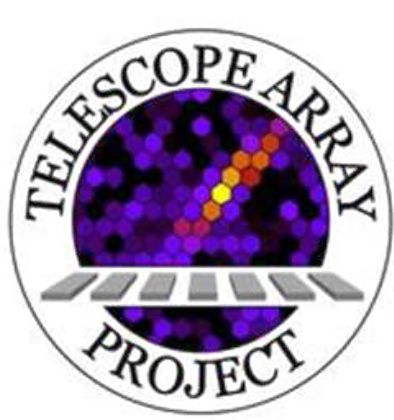


R.U. Abbasi et al. Phys.Rev.Lett. 100 (2008), 101101

新物理起源モデルが数多く提唱された

📍 暗黒物質、未知の素粒子、モノポール、宇宙ひも、初期宇宙の位相欠陥

F W Stecker, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 29 R47 (2003)



テレスコープアレイ実験 (TA)

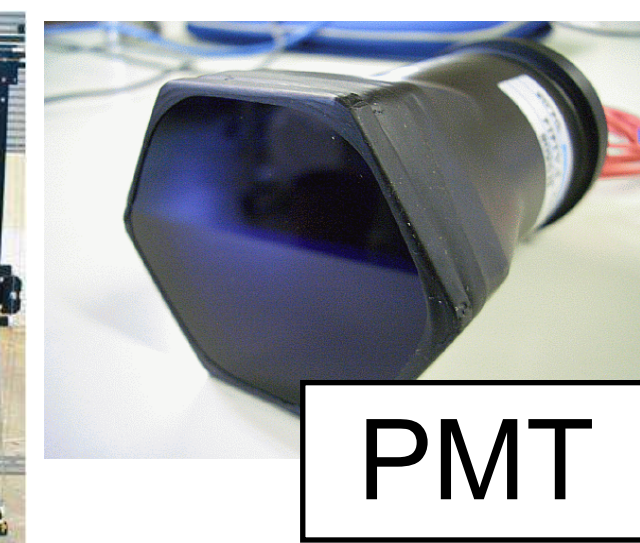
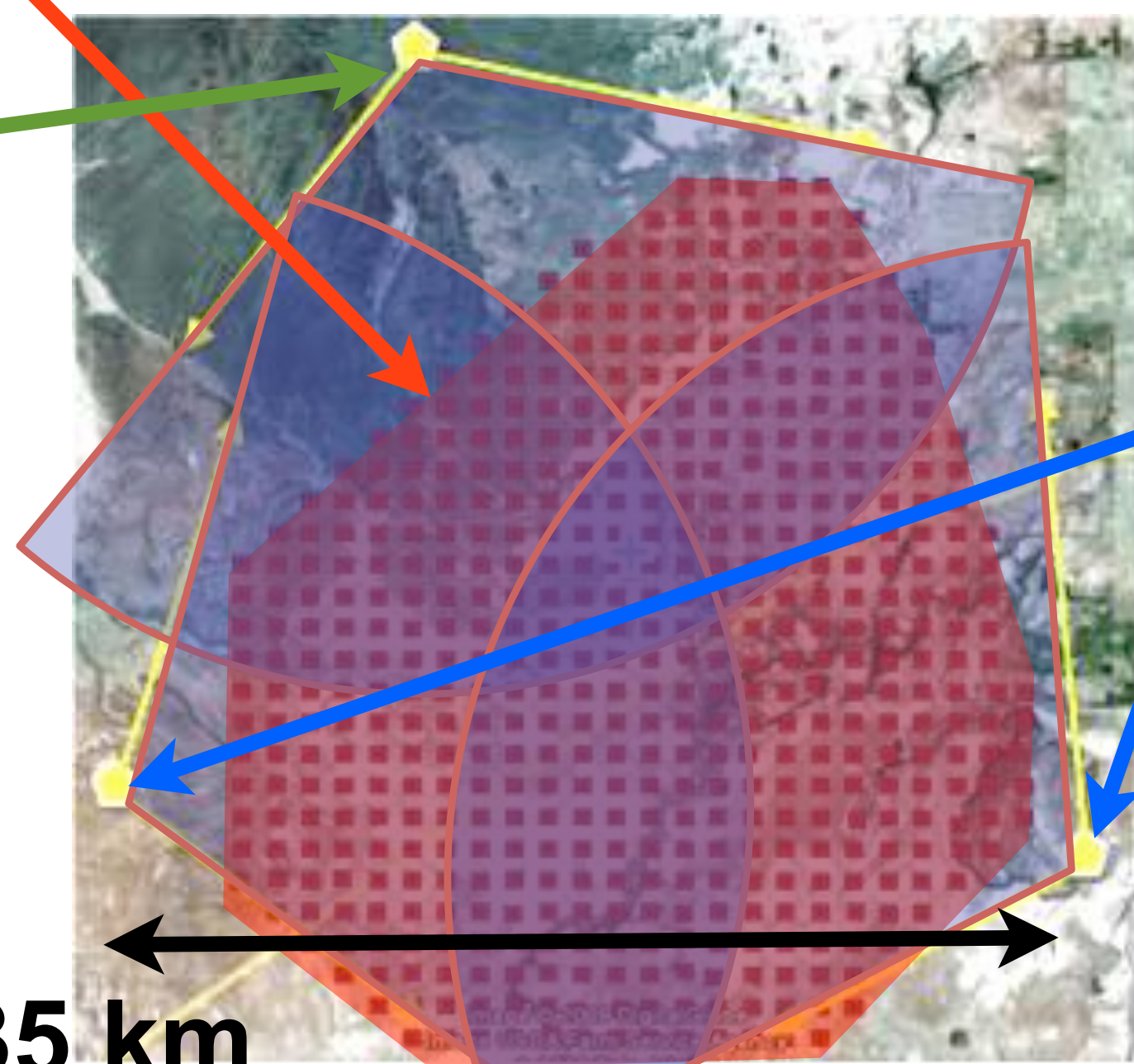
- 北半球最大の宇宙線観測装置, アメリカユタ州にて2008年から観測開始, 面積 700 km²
- 大気蛍光望遠鏡と地表粒子検出器アレイ → 「呉越同舟」

地表検出器アレイ

507台の3 m²のプラスチックシンチレーターを1.2 kmで設置

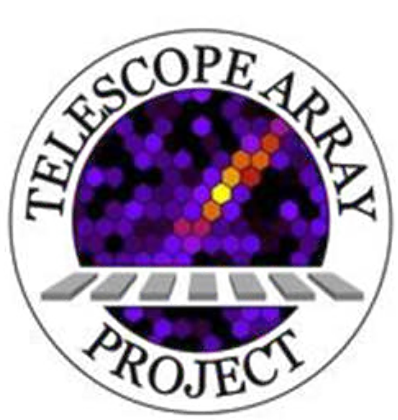
大気蛍光望遠鏡 (TAで新たに設計、製作)

3.3 mの球面鏡+256本の光電子増倍管(PMT), 12基



大気蛍光望遠鏡

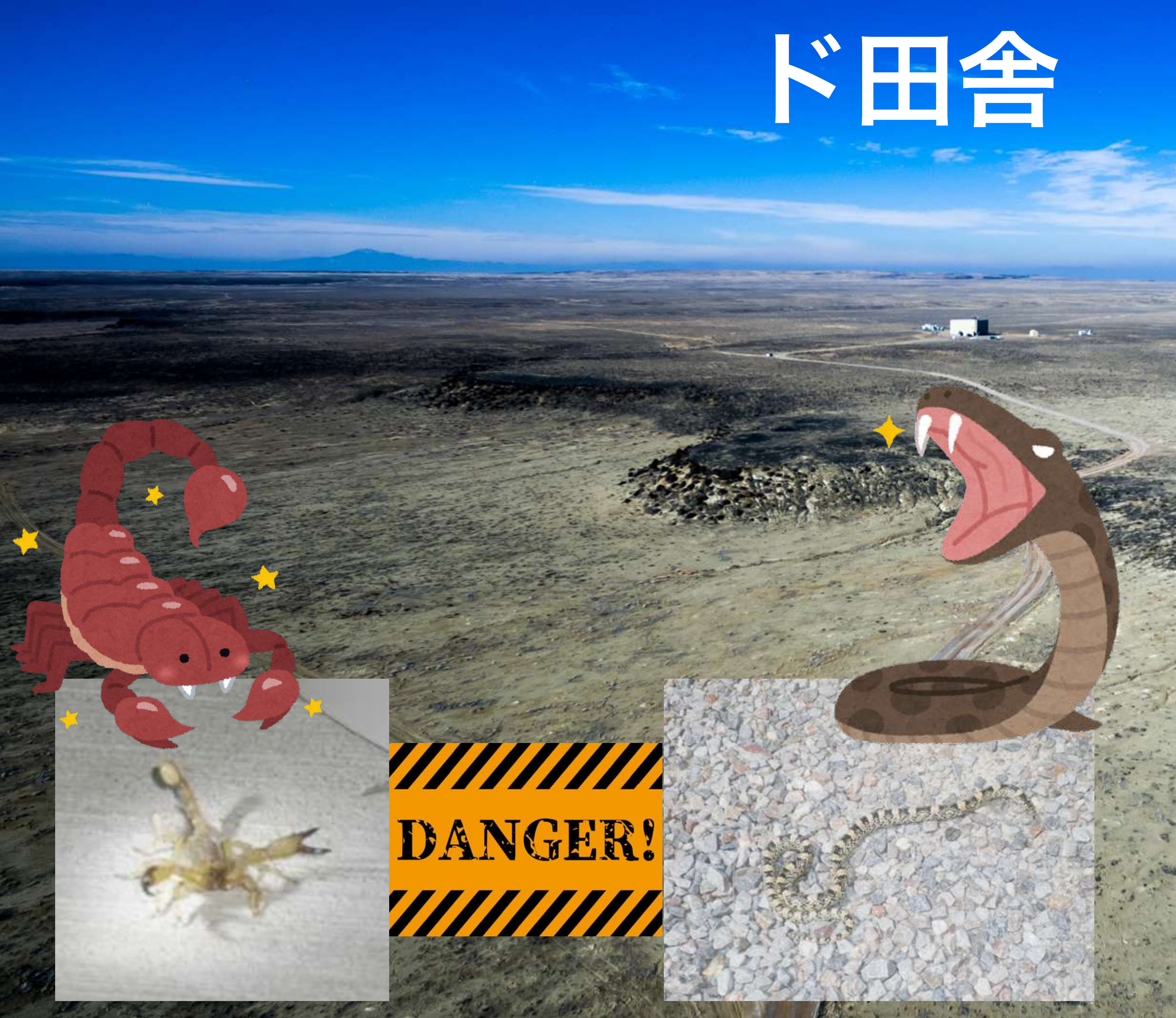
HiRes実験から移設
2.4 mの球面鏡と
256本の光電子増倍管(PMT), 14基



テレスコープアレイ実験 @Utah, USA



ド田舎



DANGER!





検出器はヘリコプターで砂漠に“撒く”

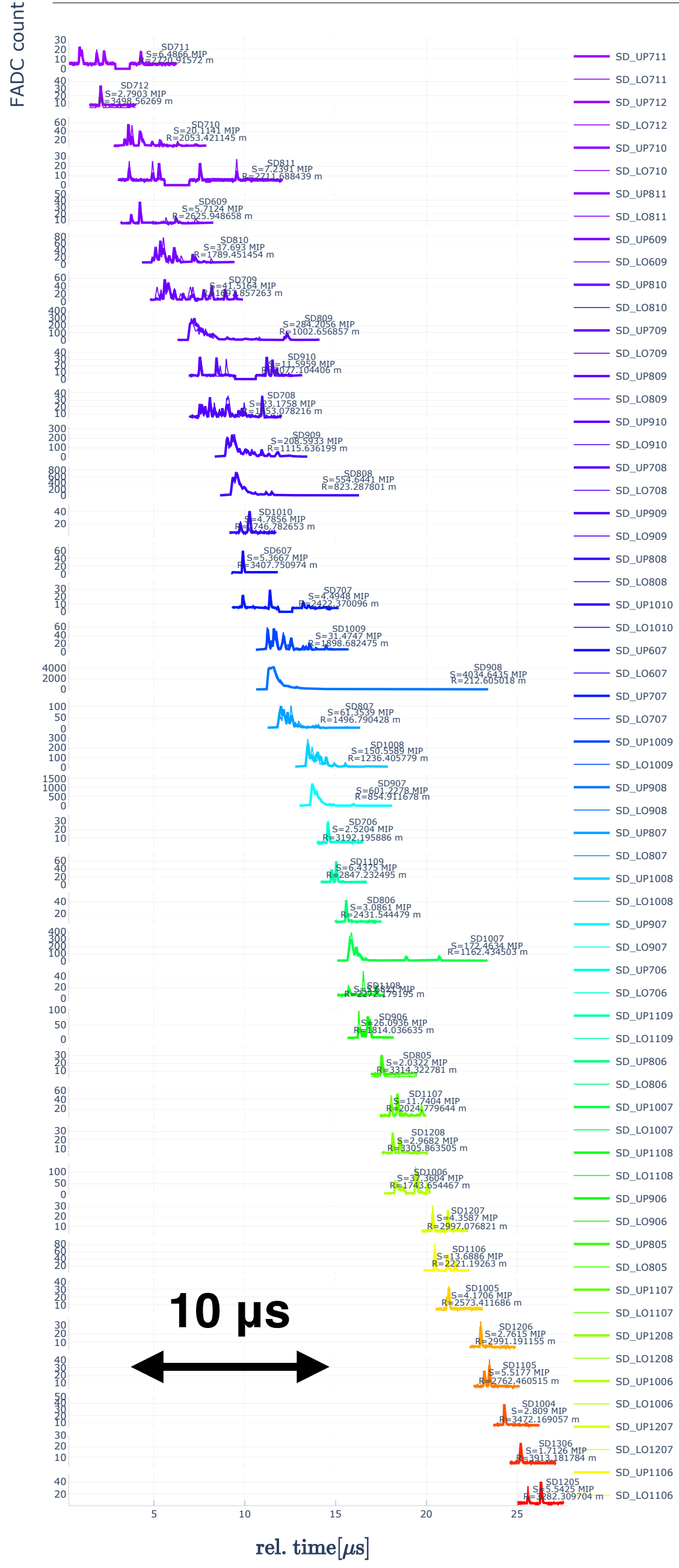




テレスコープアレイ実験の大きさ

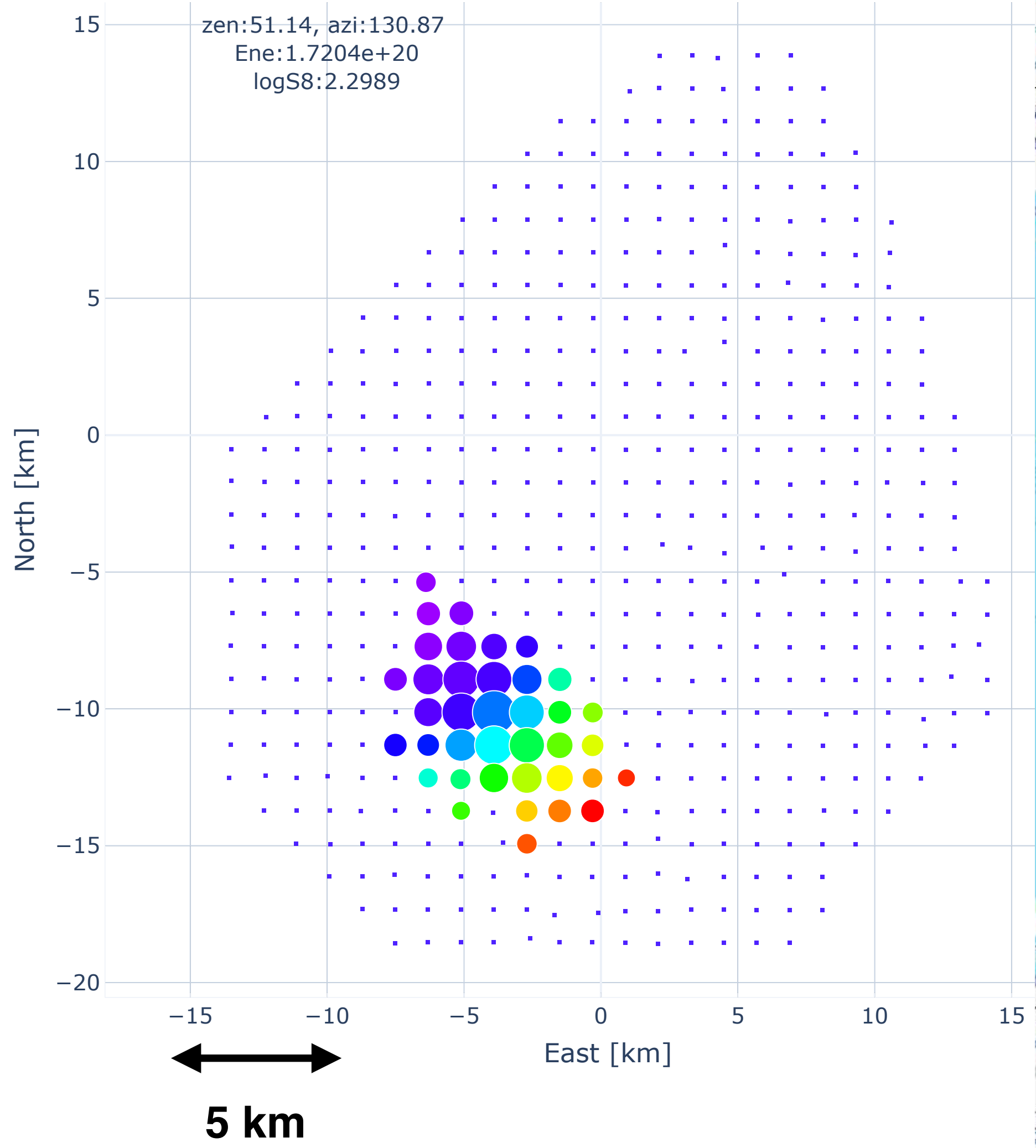


Hybrid SD event->Date:20160523 Time:70203.690178



10 μ s

TA SD map: data event

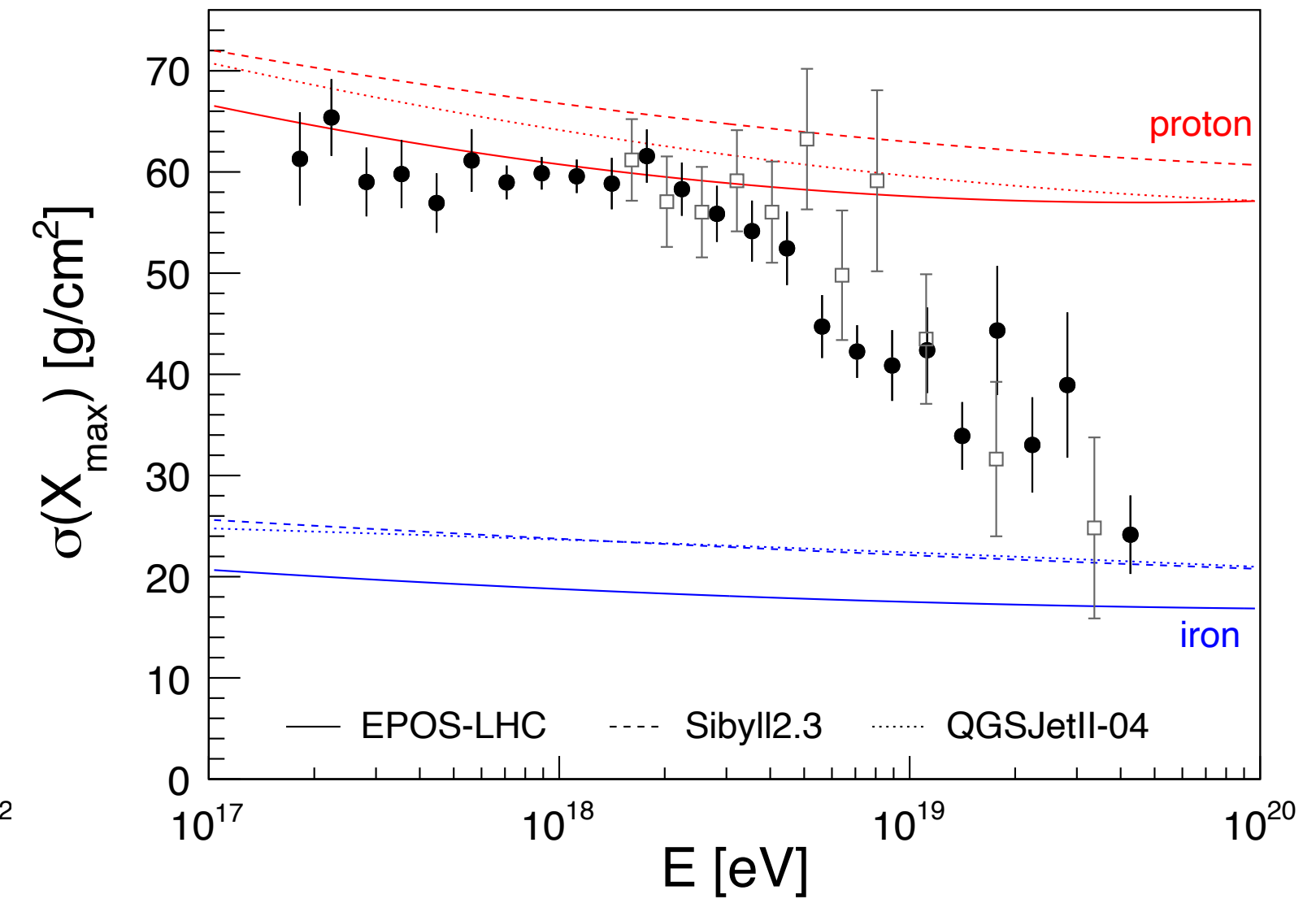
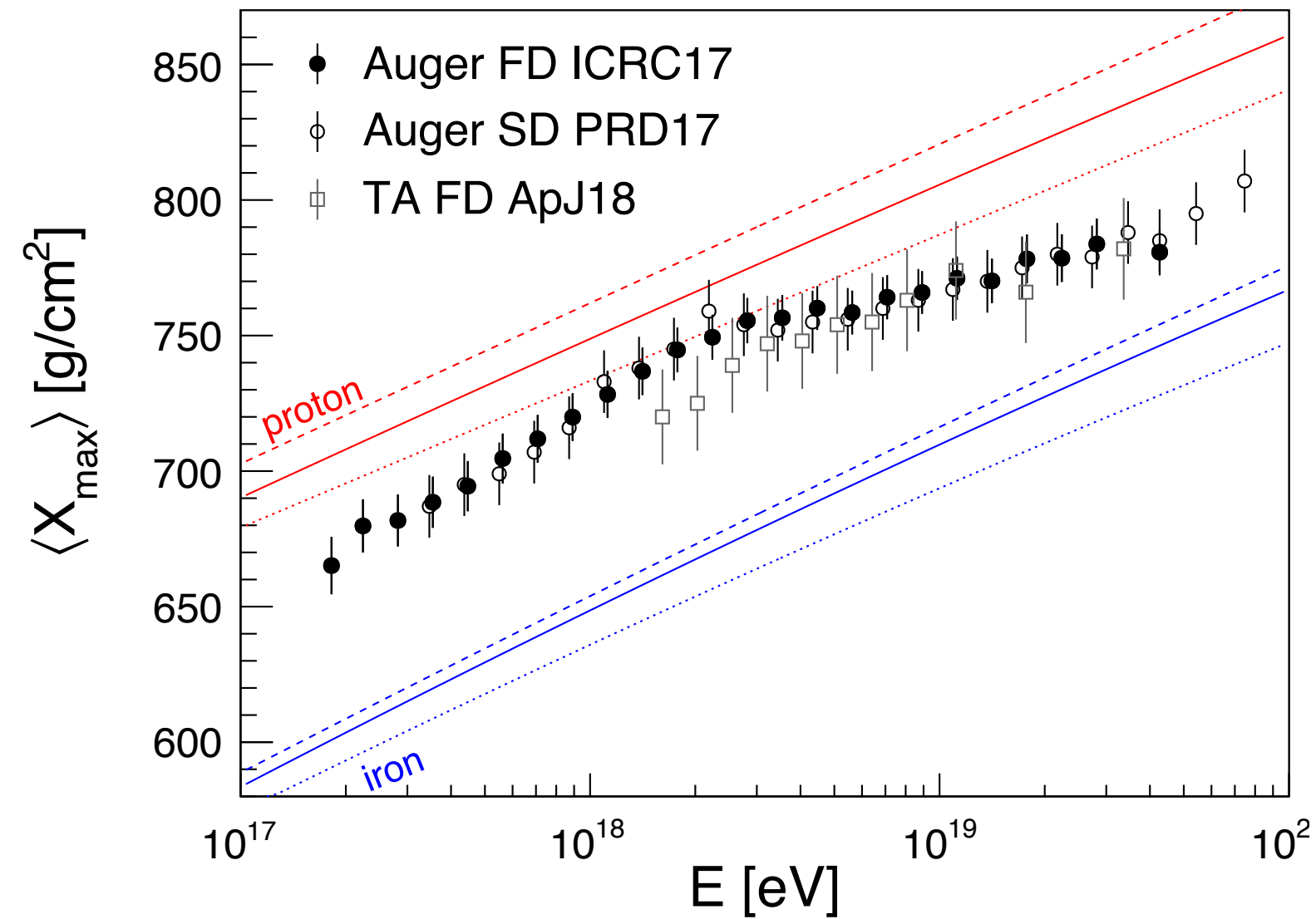
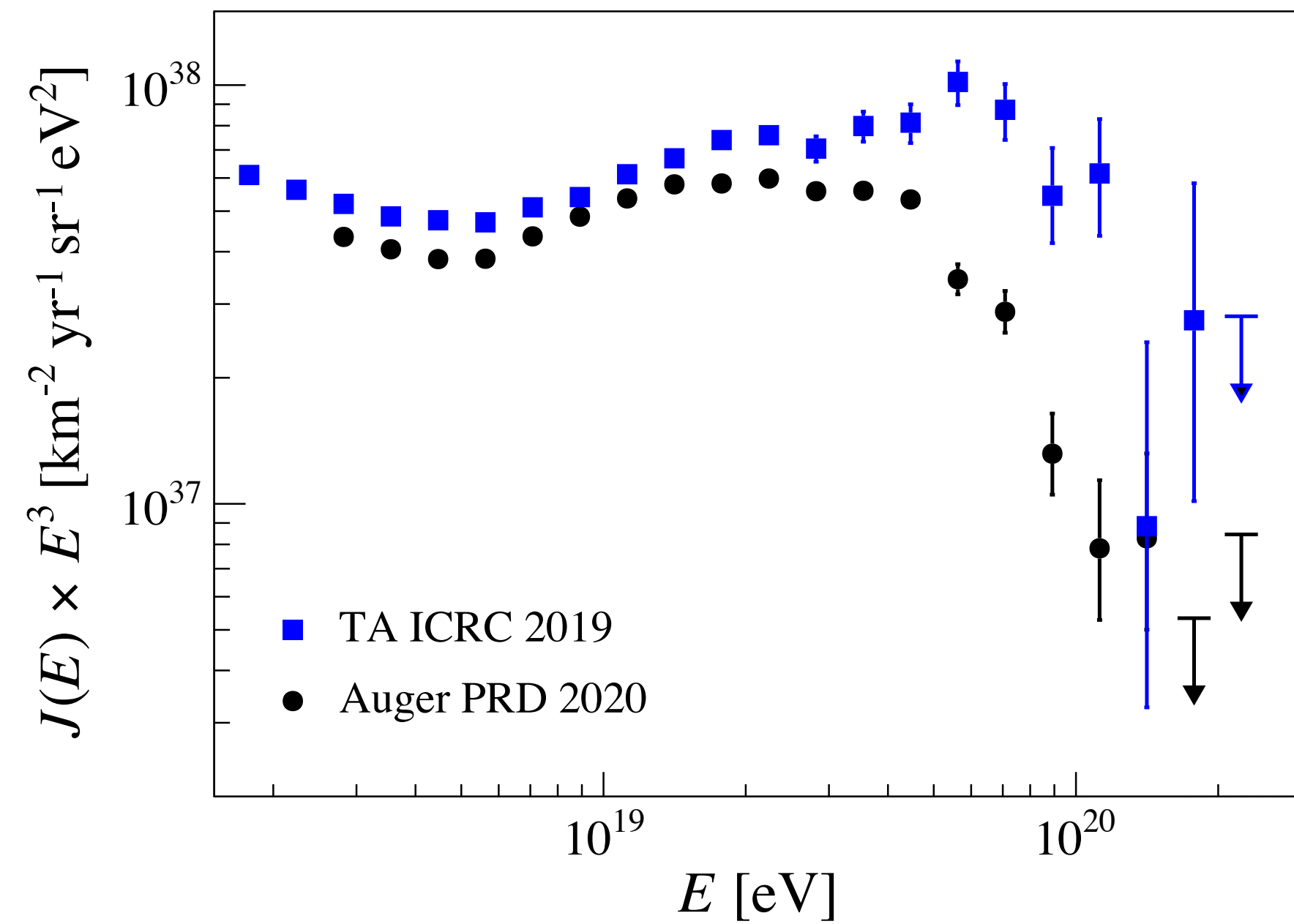


5 km

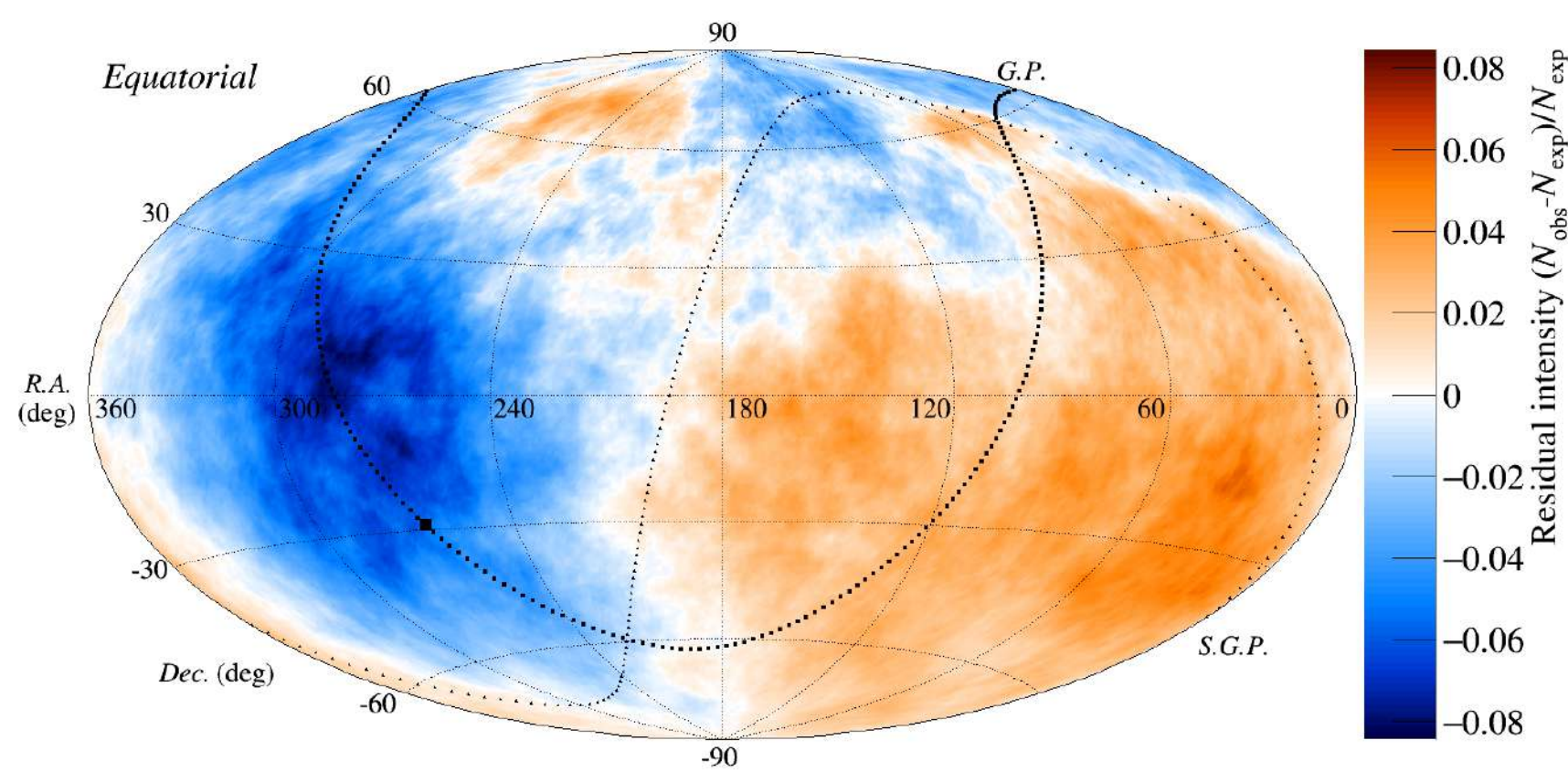


極高エネルギー宇宙線の観測結果

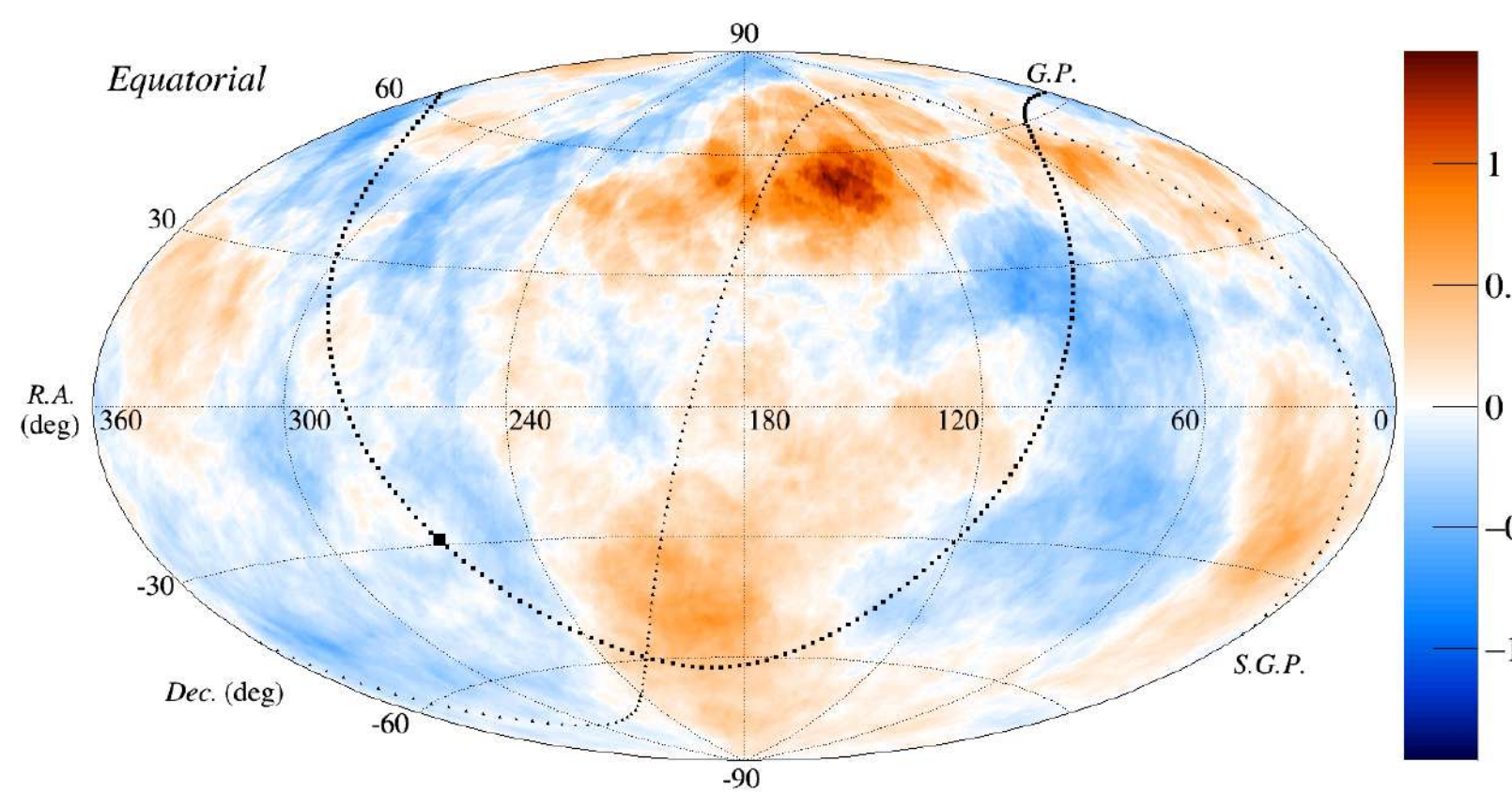
$$J(E) \times E^3$$



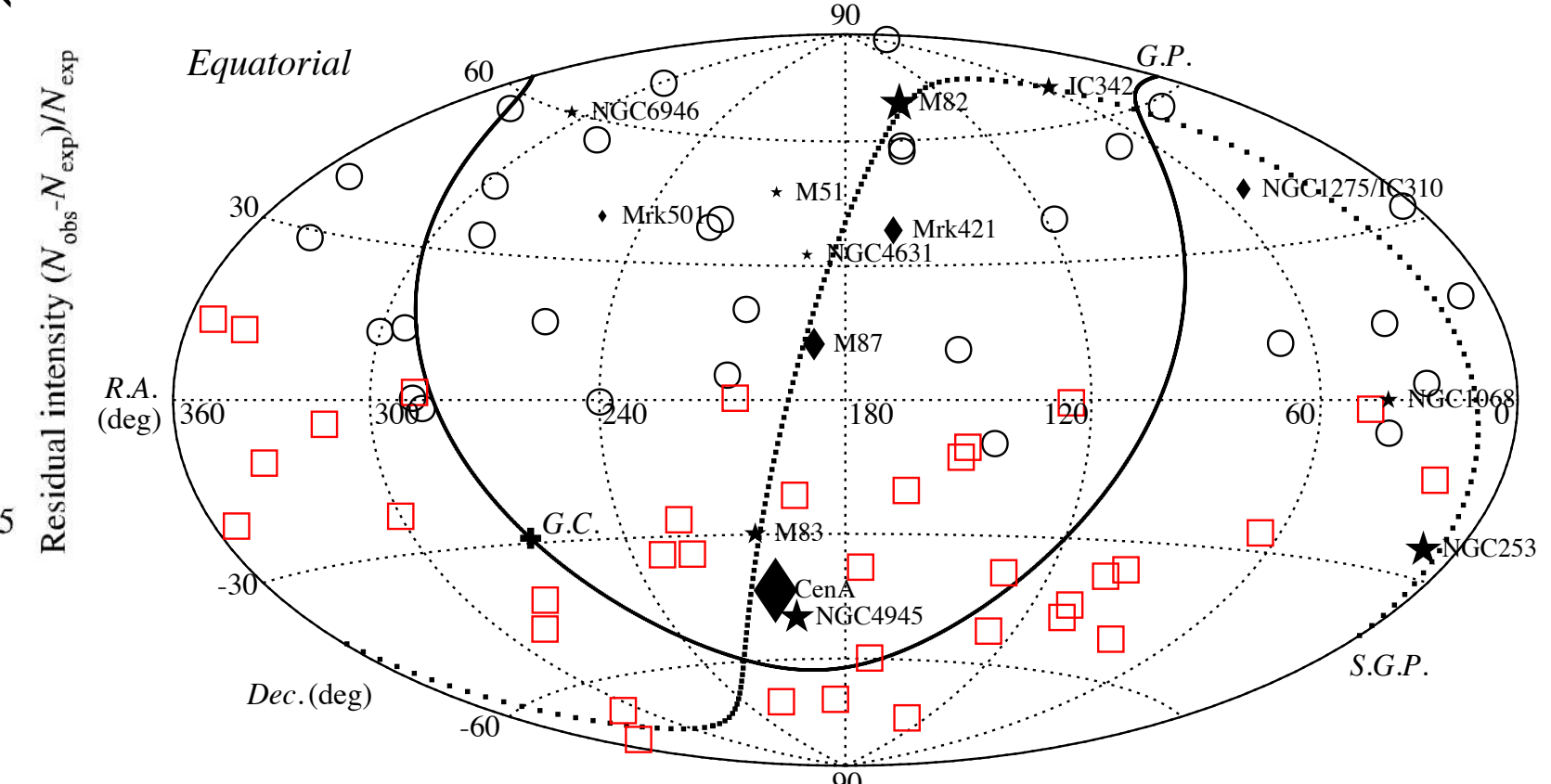
$$\theta \sim 10^\circ Z \left(\frac{E}{10 \text{ EeV}} \right)^{-1}$$



Ankle ($E > 10 \text{ EeV}$)



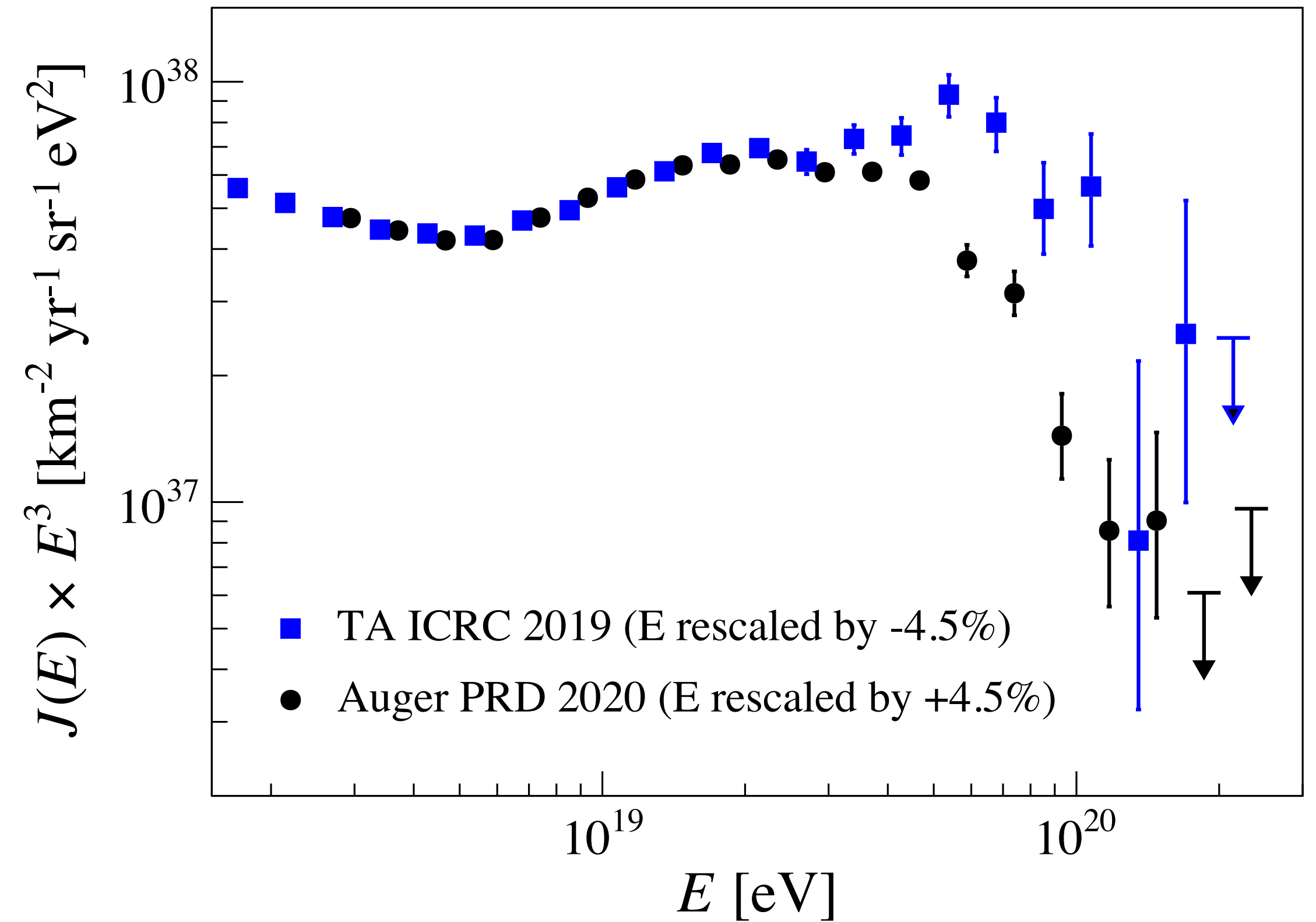
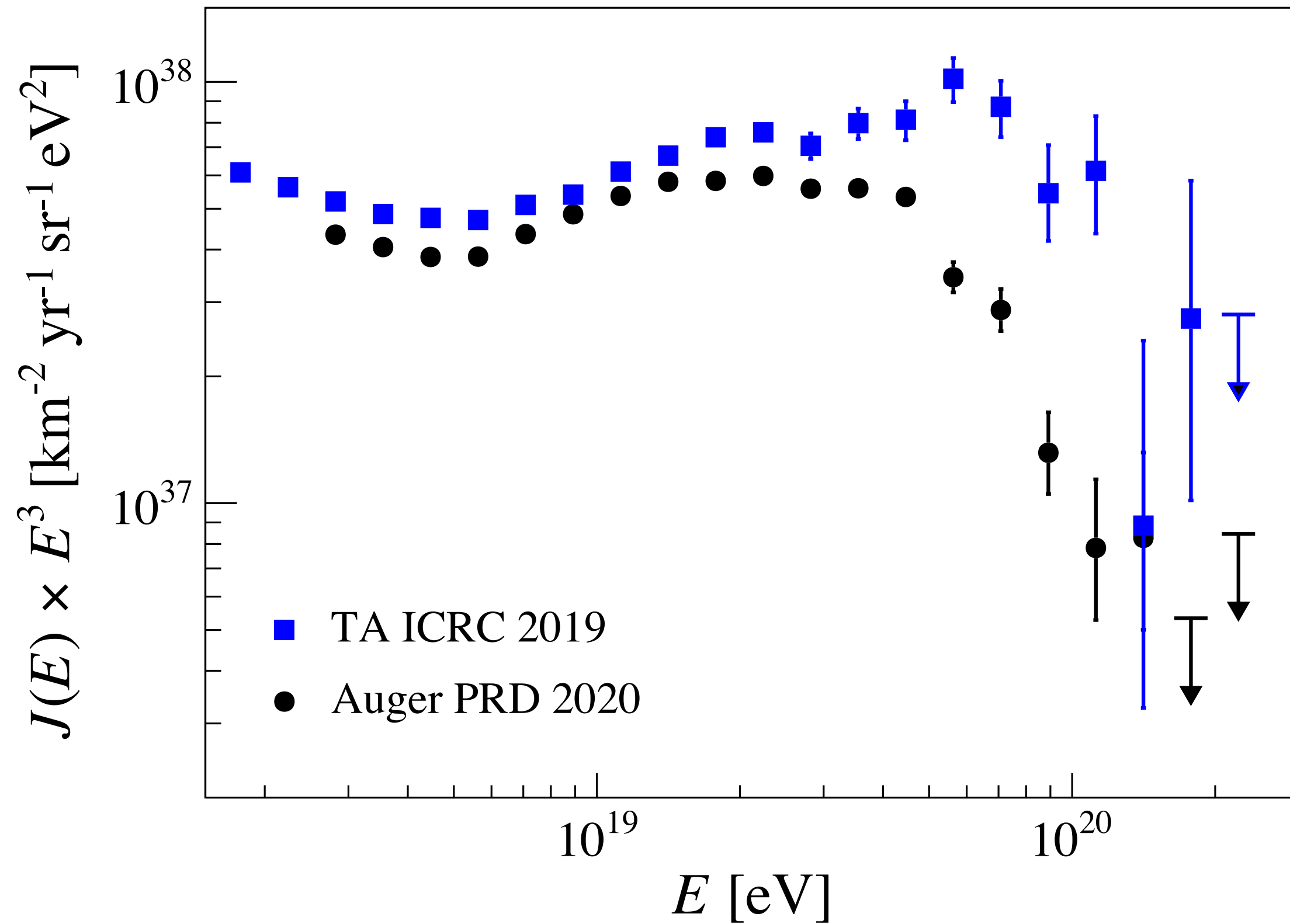
Cutoff ($E > 50 \text{ EeV}$)



Beyond-Cutoff ($E > 100 \text{ EeV}$)

エネルギースペクトル

$$J(E) \times E^3$$



TA/Auger Spectrum working group

最高エネルギーでの相対論の検証

📍 GZK限界と一致したカットオフが観測されている $p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$

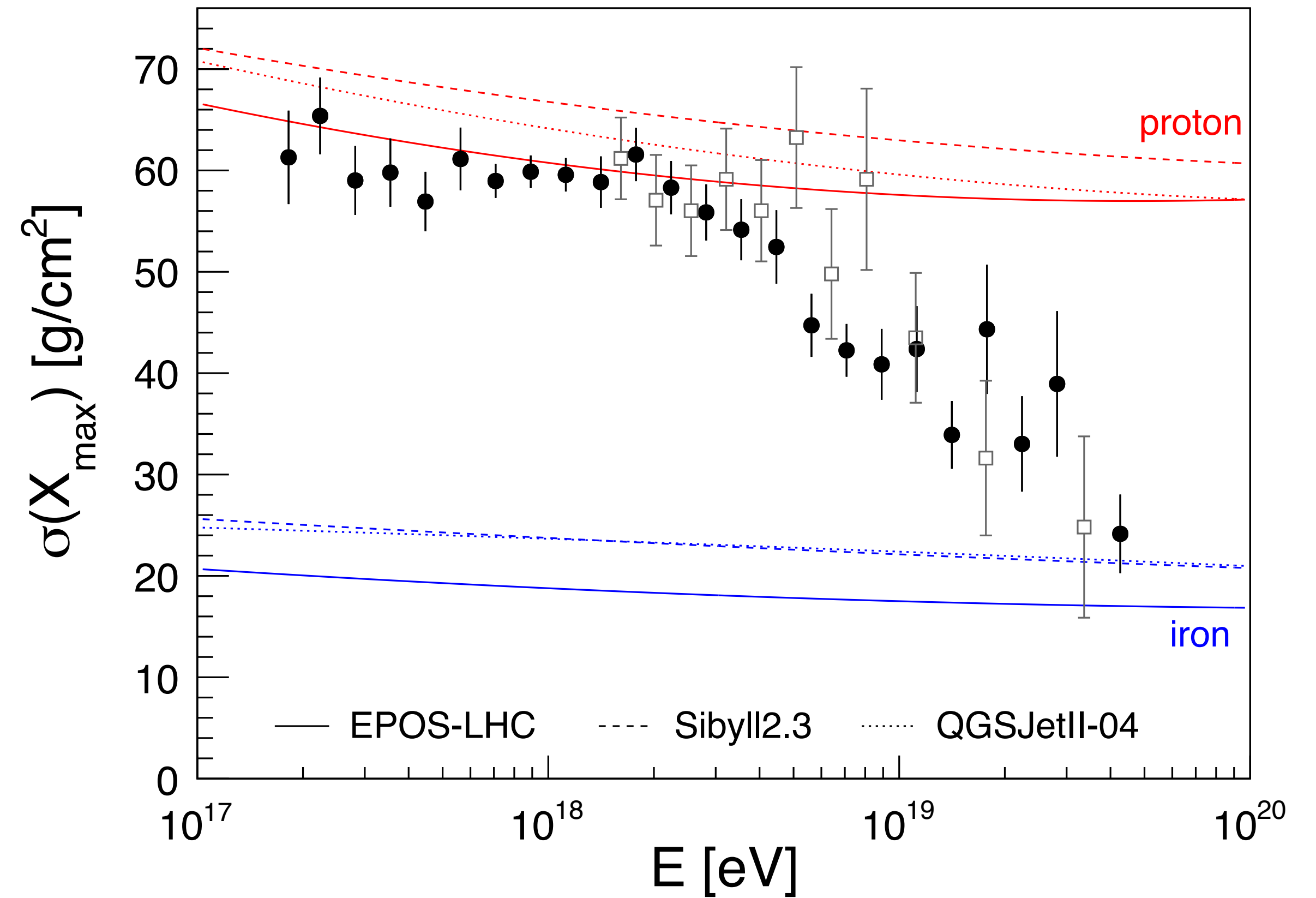
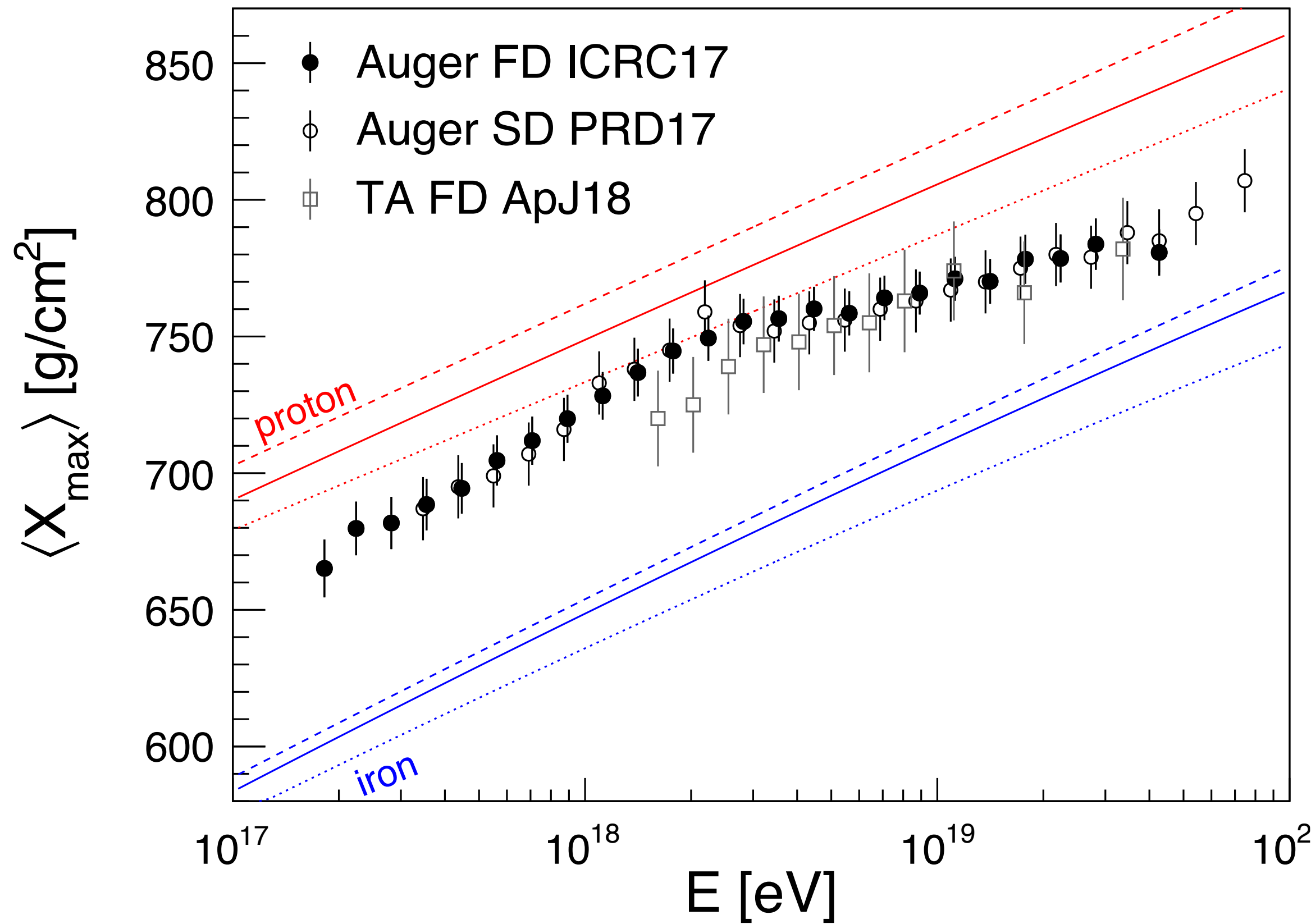
📍 近傍宇宙から到来する → 100 Mpc以内の天体分布は非一様 → 到来方向の異方性が期待

粒子種 (質量組成)

~3 EeVの陽子ビーム
 学術的価値は3兆円?
 (Future Circular Collider)

3 EeV以上でゆっくりと重たい組成へ遷移している

R.A. Batista et al., Front.Astron.Space Sci. 6 (2019) 23



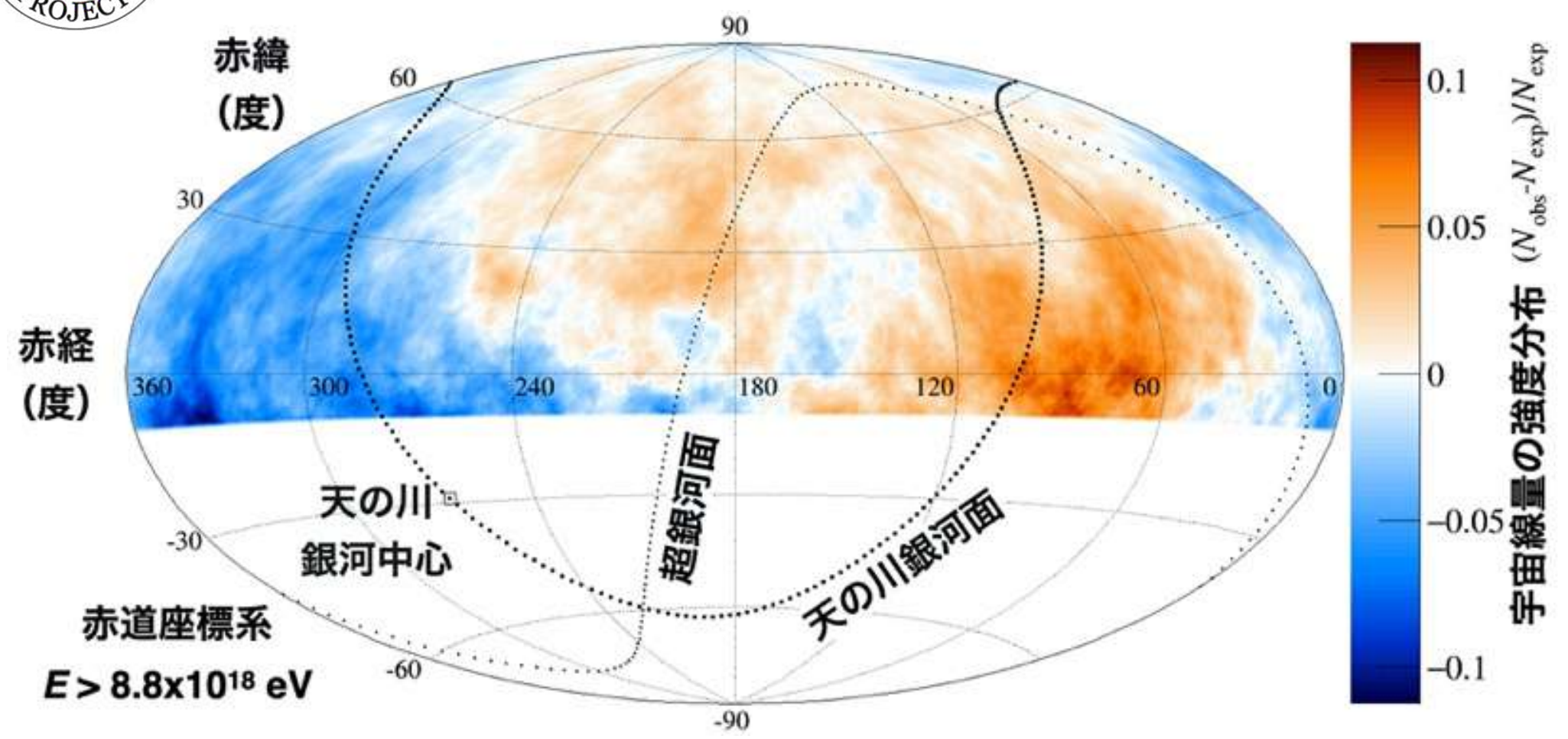
カットオフは鉄原子核の光核反応か?
 重い原子核だと宇宙磁場で曲げられやすい
 → 異方性が見えづらい

$$\theta \sim 10^\circ Z \left(\frac{E}{10 \text{ EeV}} \right)^{-1}$$

宇宙線到来方向の大角度異方性の観測 (~10 EeV)



TA 北半球 ApJL, 898:L28 (2020)

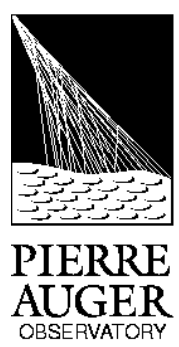


宇宙磁場の影響が小さくなる10 EeVで、宇宙線の到来方向分布の偏りを有意に検出

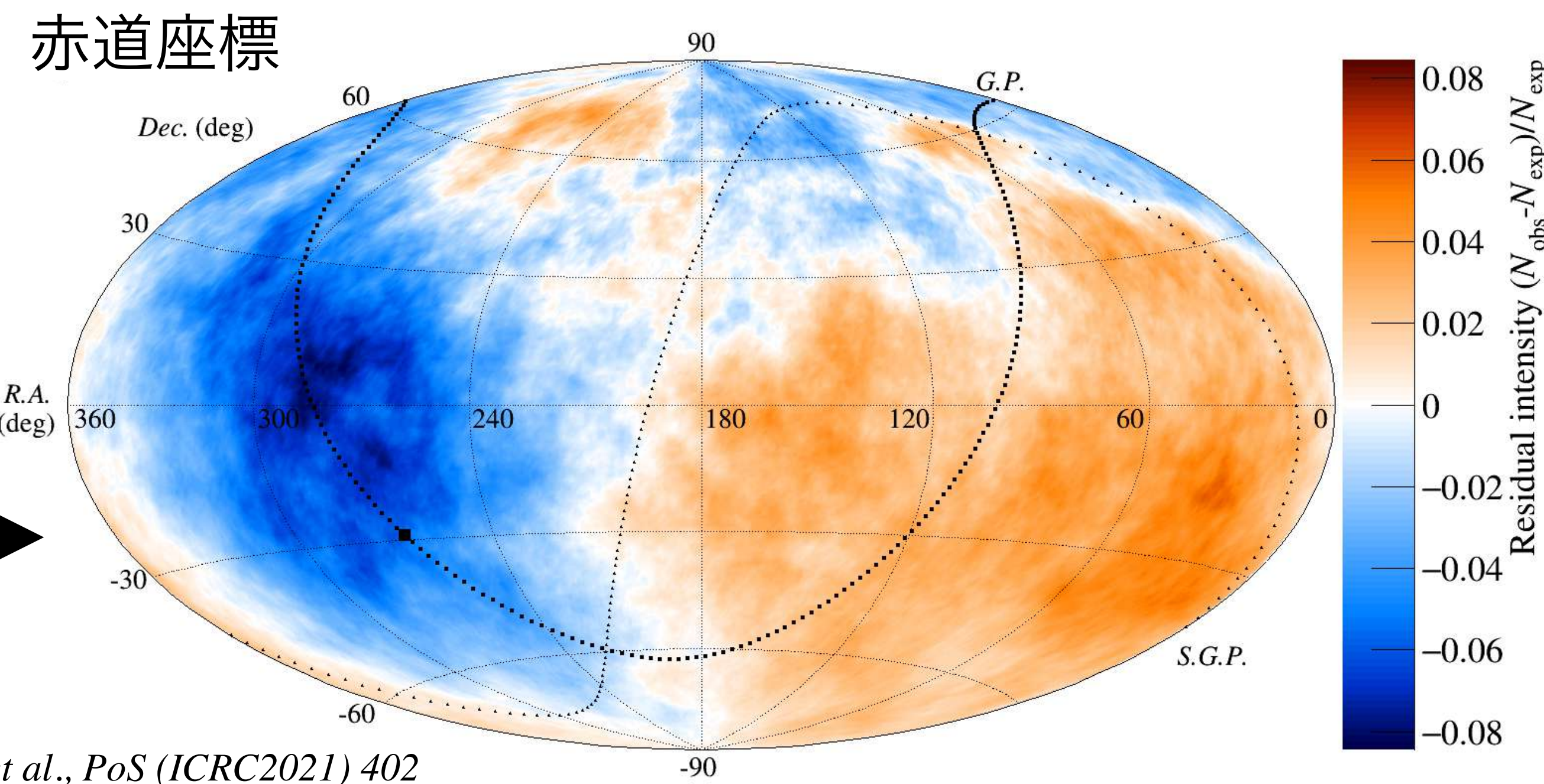
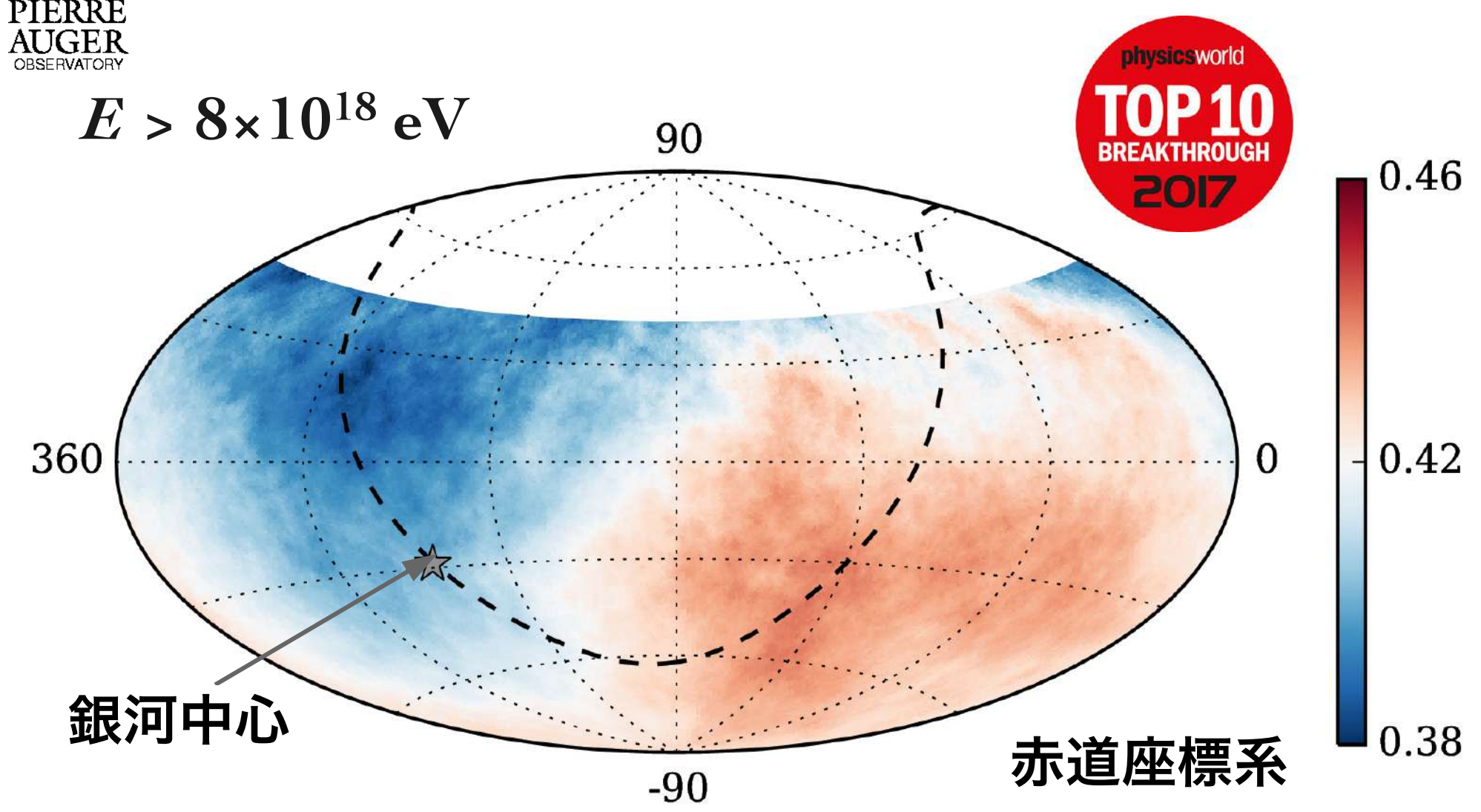
銀河中心より125度離れた方向から宇宙線が多く到来している

銀河系外の宇宙線起源を支持する結果

合同解析



Auger 南半球 Science 357, 1266 (2017)



T. Fujii et al., PoS (ICRC2021) 402

一様分布と比べたときの宇宙線の強度分布

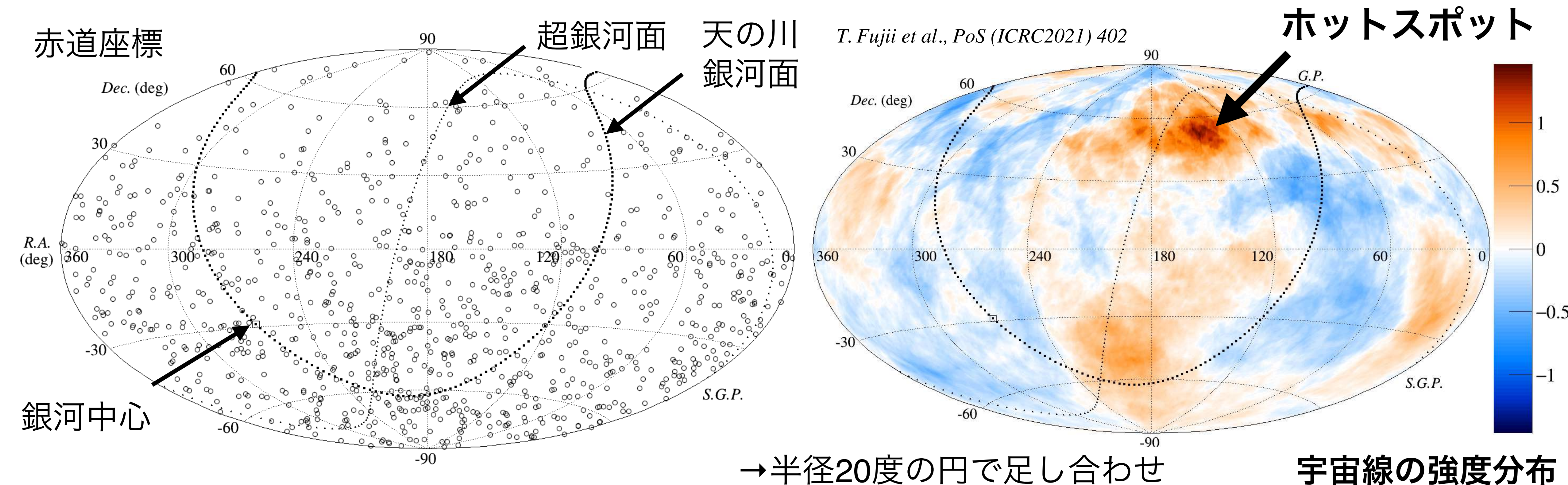


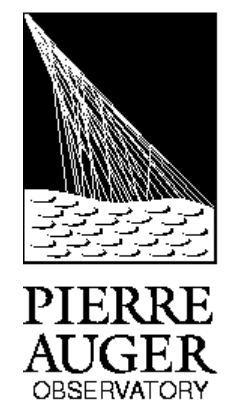
極高エネルギー領域の観測結果 ($\sim 50 \text{ EeV}$)

Augerの13年間の観測で842事象、TAの9年間の観測で127事象 → 約1000事象

北天のホットスポットや、超銀河面方向に宇宙線の偏りが見られる

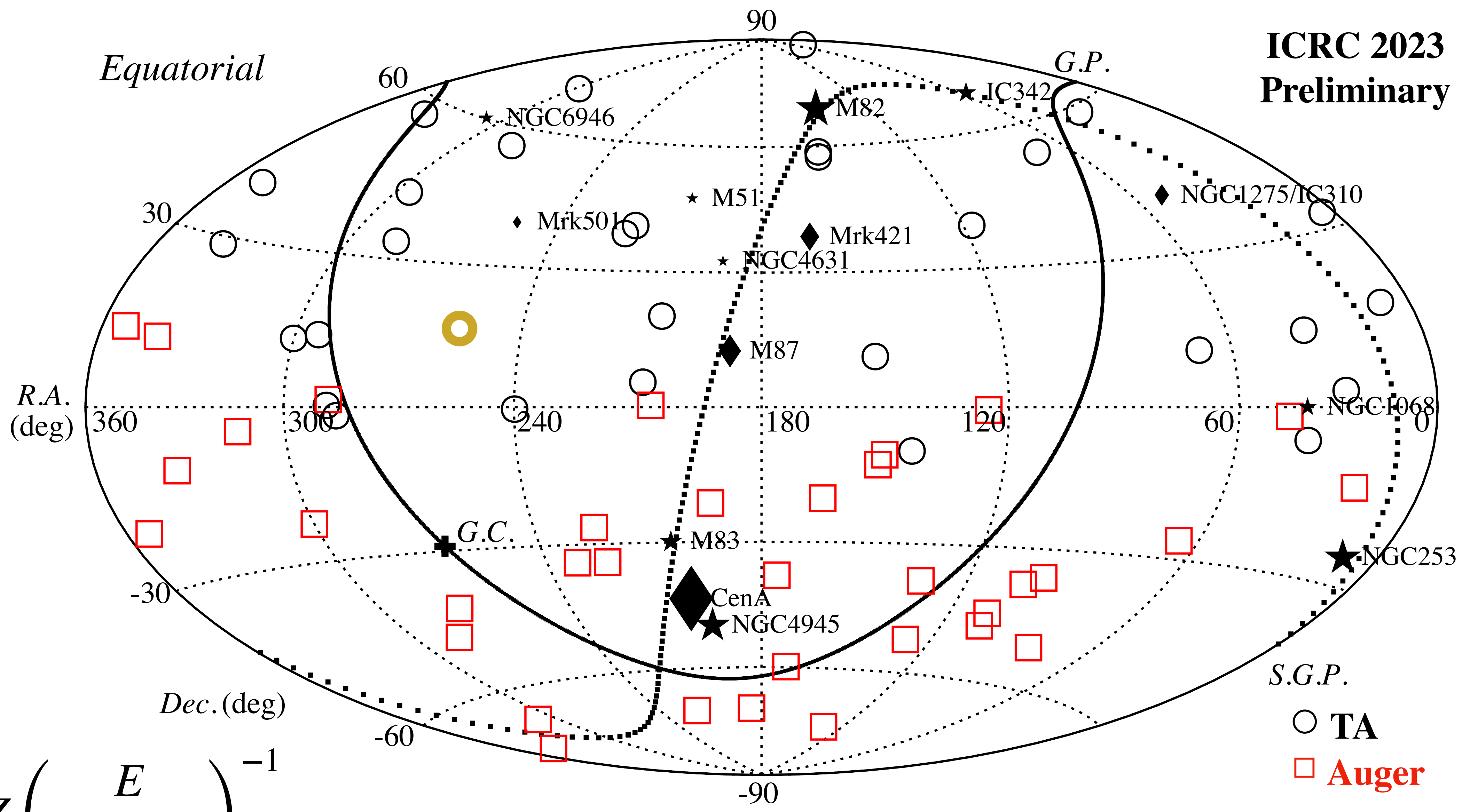
決定的な証拠は得られていない





GZK限界を超えた宇宙線 (>100 EeV)

ICRC 2023
Preliminary



$$\theta \sim 10^\circ Z \left(\frac{E}{10 \text{ EeV}} \right)^{-1}$$

100 EeV以上だと発生源に集中するはず... → なぜか一様に分布



2021年5月27日 現地時間午前4時35分56秒

「アマテラス粒子」の検出

20210527	001716.635727	5.737	-8.895	9.98	22.48	168.53	0.587	0.00	2.06
20210527	005753.524148	7.988	1.748	10.51	38.09	155.29	0.277	0.00	3.14
20210527	012459.385602	-5.703	-9.588	6.59	17.86	204.01	0.165	0.00	1.46
20210527	020622.327294	-4.091	-12.485	11.16	33.44	297.15	0.228	0.00	2.84
20210527	022215.026443	-5.554	-4.402	4.53	40.69	257.32	0.324	0.00	1.35
20210527	022953.053133	4.534	0.286	4.36	25.51	93.45	0.676	0.00	1.04
20210527	032730.128559	6.769	8.087	3.70	42.25	213.29	0.608	0.00	1.20
20210527	034324.408578	4.286	11.504	2.36	54.83	277.55	0.373	0.00	1.31
20210527	044710.753089	-2.208	6.068	6.57	23.24	213.93	0.200	0.00	1.38
20210527	045739.611334	3.358	-5.096	6.19	27.52	51.49	0.386	0.00	1.34
20210527	052456.616001	-8.802	-0.043	3.74	47.33	265.97	0.400	0.00	1.60
20210527	053039.195422	7.042	-0.775	5.07	51.50	253.88	0.338	0.00	3.25
20210527	060309.528577	7.681	-2.878	5.22	41.97	354.02	0.307	0.00	1.60
20210527	063750.948203	-9.893	-10.150	10.05	10.90	198.69	0.386	0.00	1.97
20210527	064513.310301	-0.567	-9.565	2.95	46.76	237.80	0.199	0.00	1.13
20210527	065111.717578	-2.120	2.494	5.77	40.51	246.21	0.142	0.00	1.70
20210527	072300.050046	5.441	12.539	2.87	48.35	327.27	0.538	0.00	1.22
20210527	073937.403223	8.820	-15.204	7.60	40.87	96.83	0.436	0.00	2.32
20210527	075907.626302	-0.188	-13.335	3.59	43.43	123.62	0.390	0.00	1.19
20210527	081936.883244	7.531	12.513	7.21	28.55	63.75	0.371	0.00	1.53
20210527	085544.355178	-3.884	3.239	9.03	41.35	233.83	0.416	0.00	3.03
20210527	103556.474337	-9.471	1.904	529.53	38.62	206.80	0.044	0.00	243.61
20210527	103819.341498	4.773	-16.531	3.90	52.08	21.79	0.250	0.00	2.39
20210527	122815.858965	-2.615	8.767	4.69	35.65	357.84	0.289	0.00	1.22
20210527	124726.186961	-4.969	-16.217	9.31	22.84	86.24	0.550	0.00	1.93
20210527	130030.400026	-6.704	-16.486	11.12	19.46	57.86	0.292	0.00	2.24
20210527	131652.649468	-2.707	2.834	8.41	30.48	159.44	0.317	0.00	1.85
20210527	131931.788147	3.315	-18.699	7.52	38.62	277.76	0.506	0.00	2.05
20210527	135753.703832	-11.351	-6.900	6.24	25.40	113.13	0.446	0.00	1.42
20210527	143154.113642	-6.137	-17.021	10.56	34.18	200.72	0.205	0.00	2.77
20210527	150126.752503	8.285	2.807	2.52	40.84	76.01	0.411	0.00	1.07

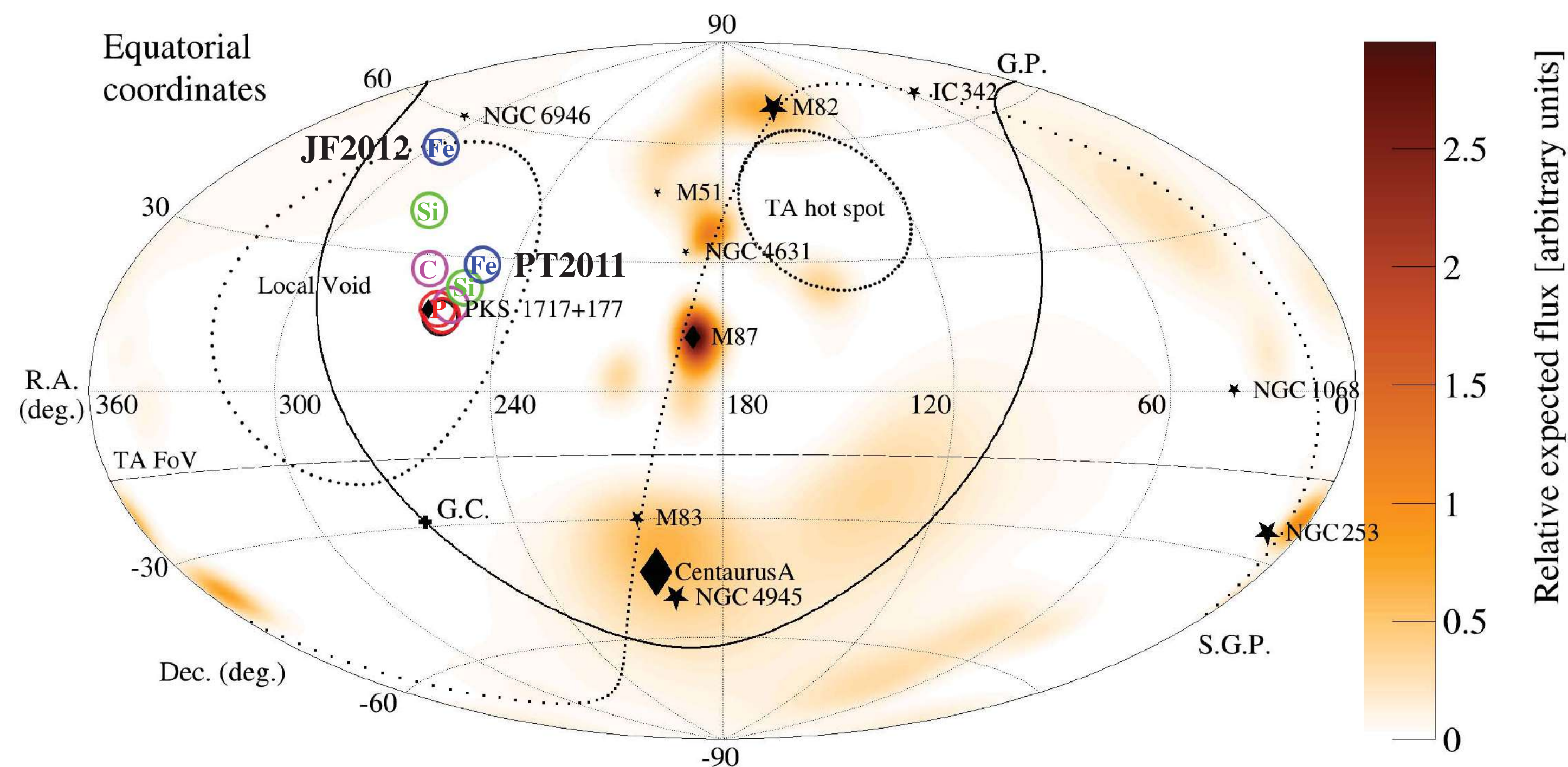


アマテラス粒子は「局所的空洞」から到来

$E = 244 \pm 29$ (stat.) $+51, -76$ (syst.) EeV

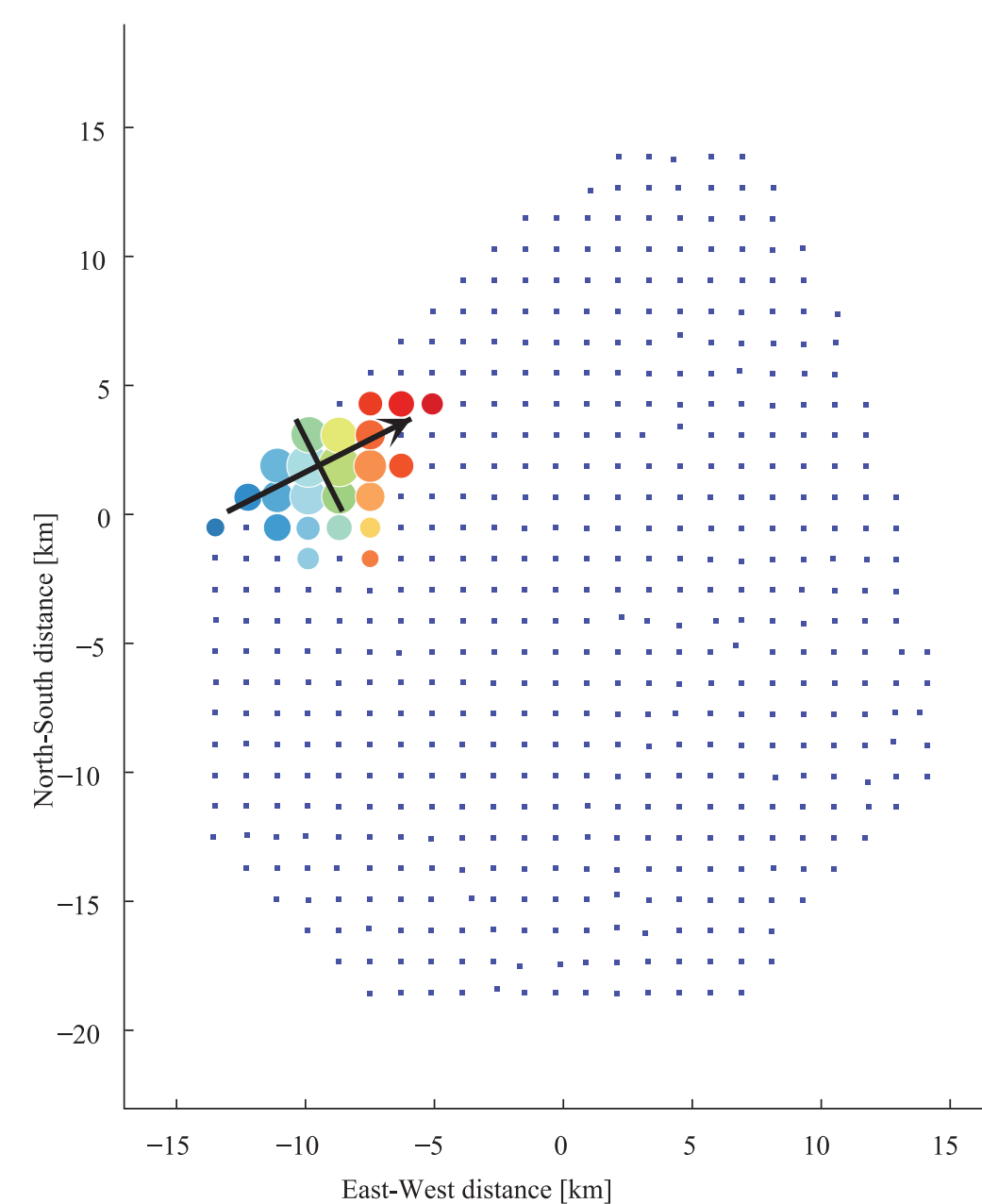
近傍の宇宙の大規模構造では、局所的空洞と呼ばれる方向から到来

有力な候補天体がほとんどない方向

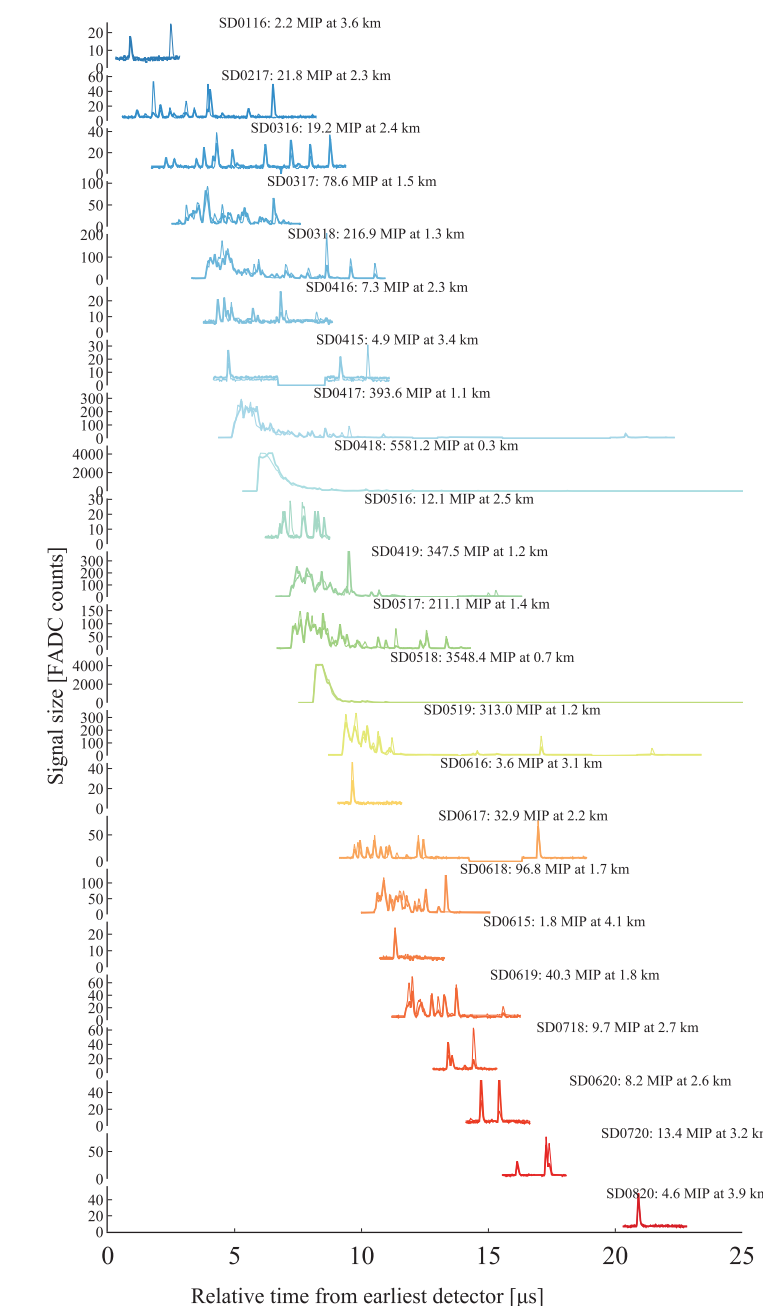


→ さらなる統計量が必要

A Surface detector array of TA



B Date: 27 May 2021 Time: 10:35:56.474337 UTC



Possible source region (Unger and Farrar, arXiv:2312.13273)

Monopole (Frampton, arXiv:2403.12322)

Binary neutron star merger (Farrar, arXiv:2405.12004)

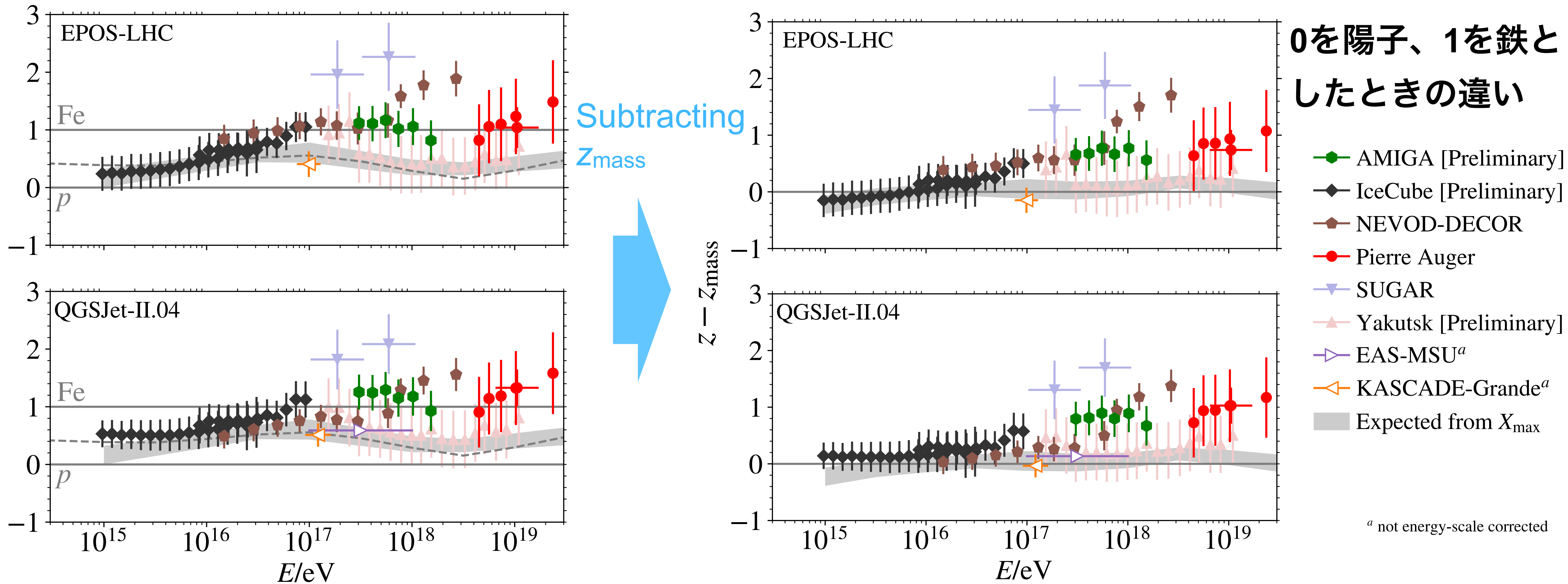
Ultra-heavy composition like Te or Pt (Zhang+, arXiv:2405.17409)



原子核物理との「交差点」：「ミューオンパズル」

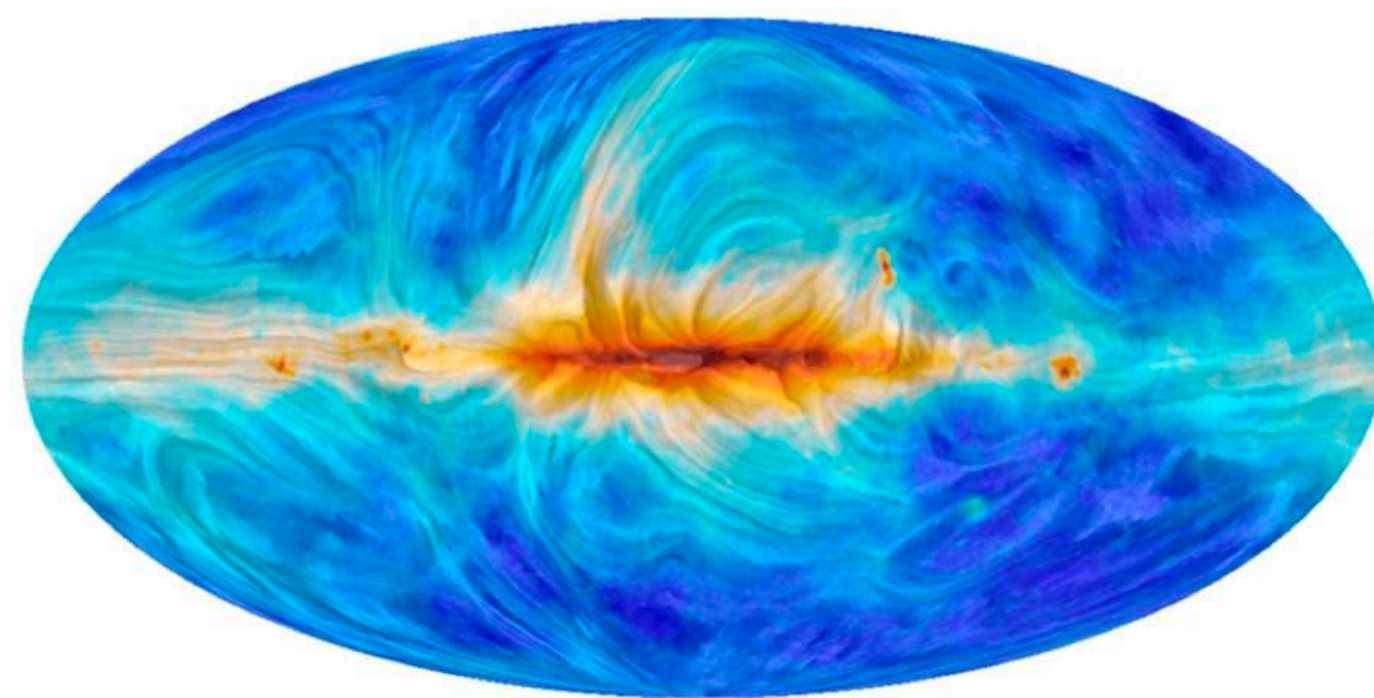
ミューオンの生成量が合わない。データが多い = シミュレーションが少ない

→ 地表粒子検出器でエネルギーを大きく推定してしまう → **成因は未解明**

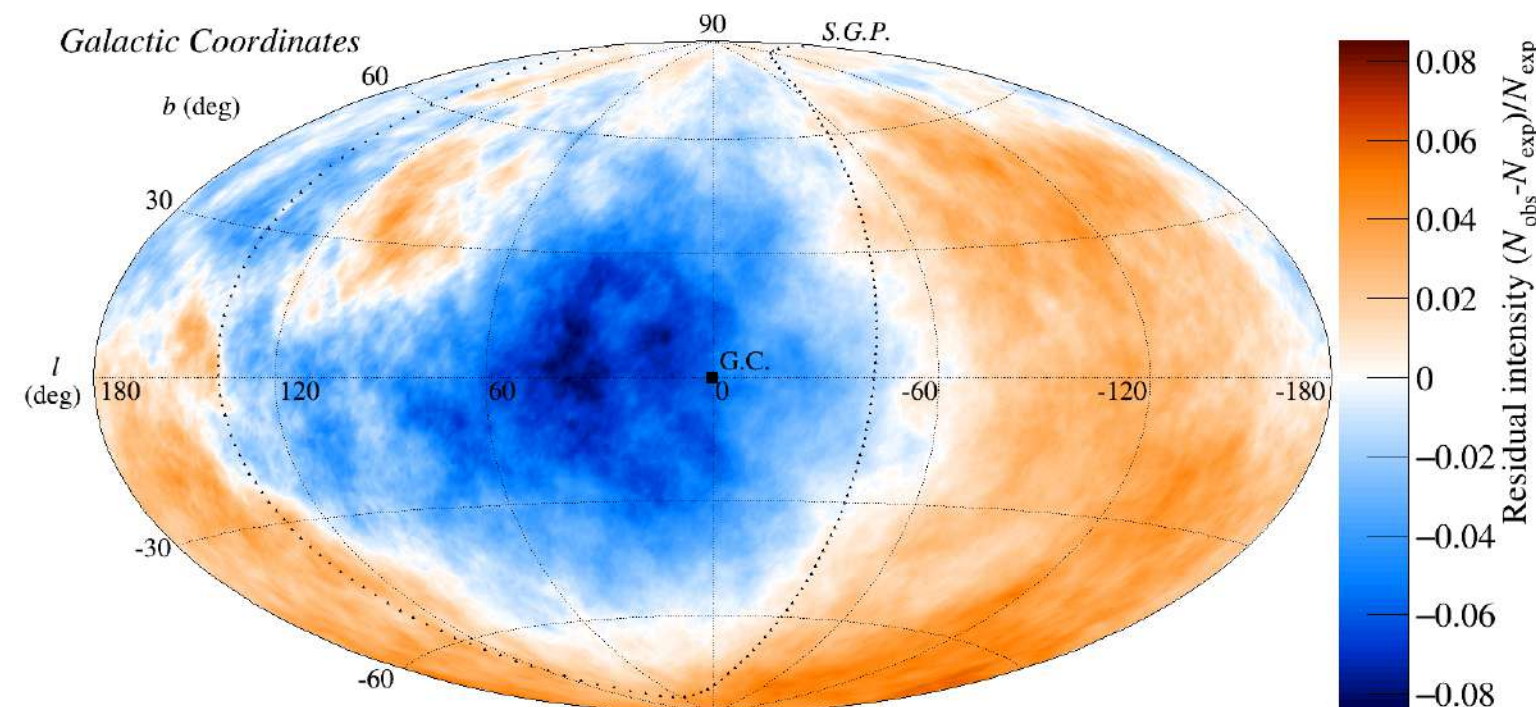


銀河磁場の理解、原子核物理学との「交差点」

IMAGINE project (arXiv:1805.02496)



Synchrotron emission at 30 GHz



UHECR ~10 EeV

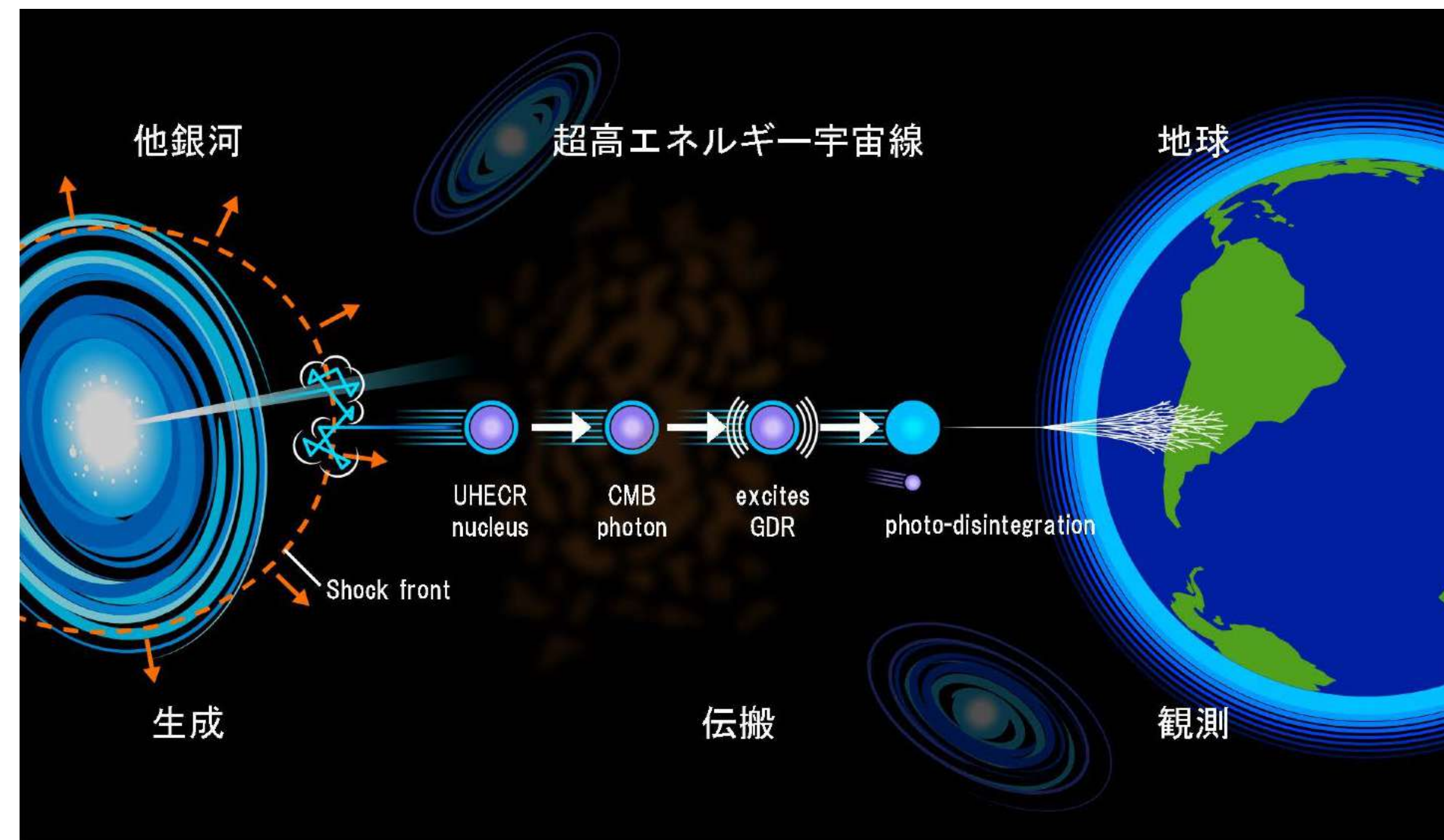
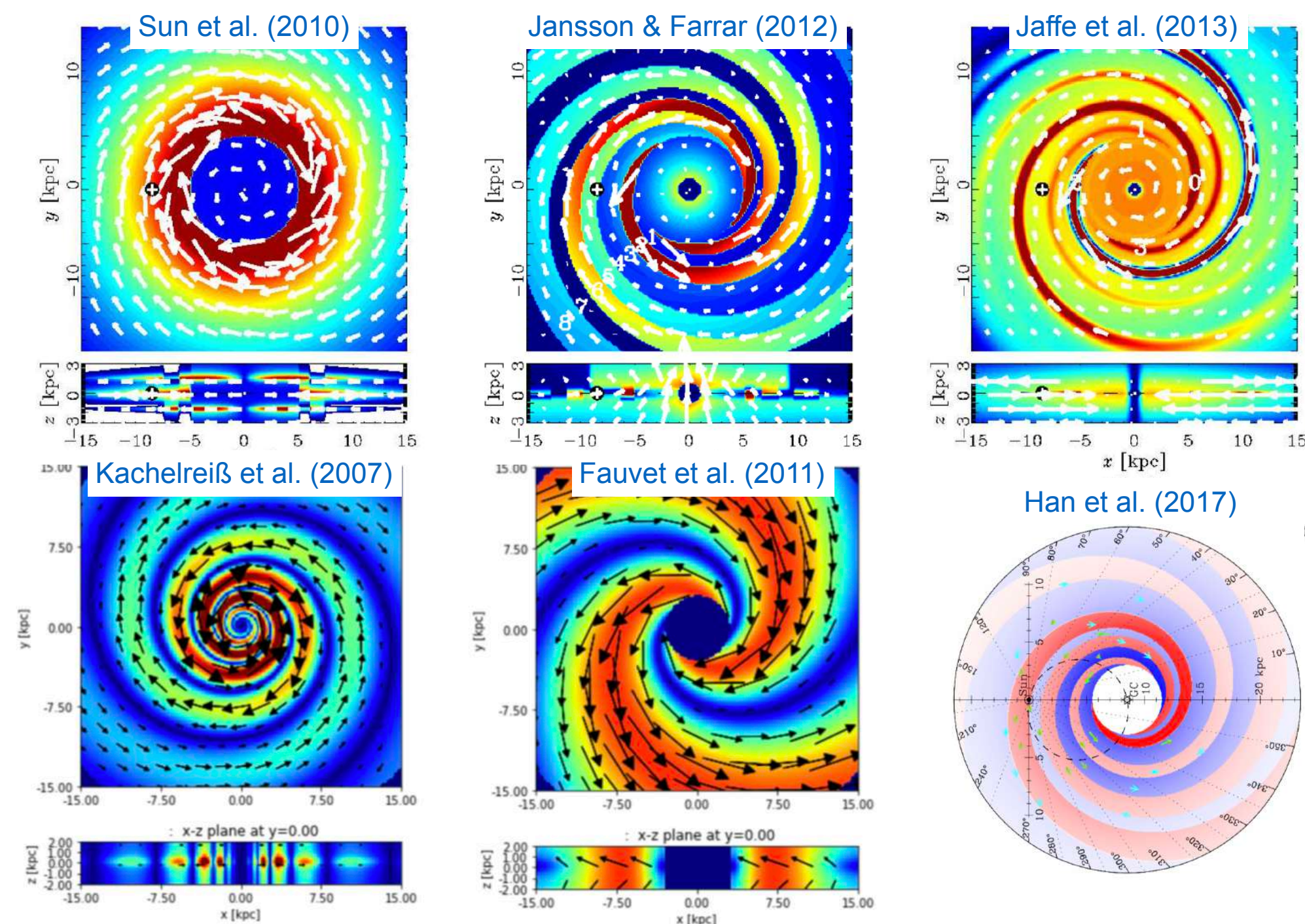
最高エネルギー原子核とCMBとの
光核反応の理解

A. Tamii, E. Kido et., arXiv:2211.03986

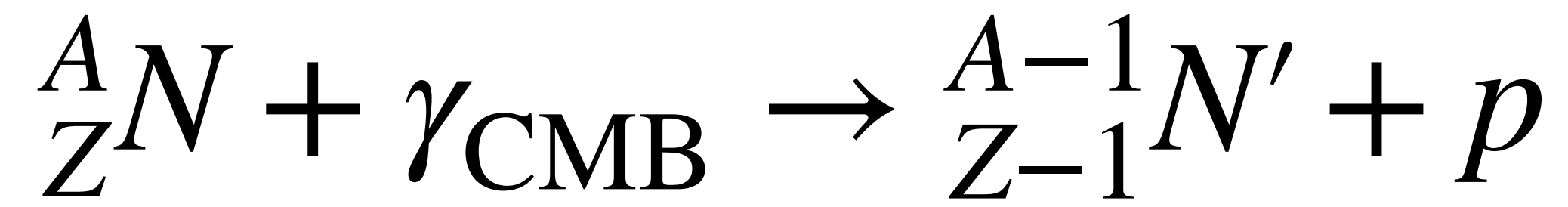
PANDORA Project

A < 60 核の光核反応の理解が目的

主目的の1つは超高エネルギー宇宙線のエネルギー質量減衰機構の定量的記述



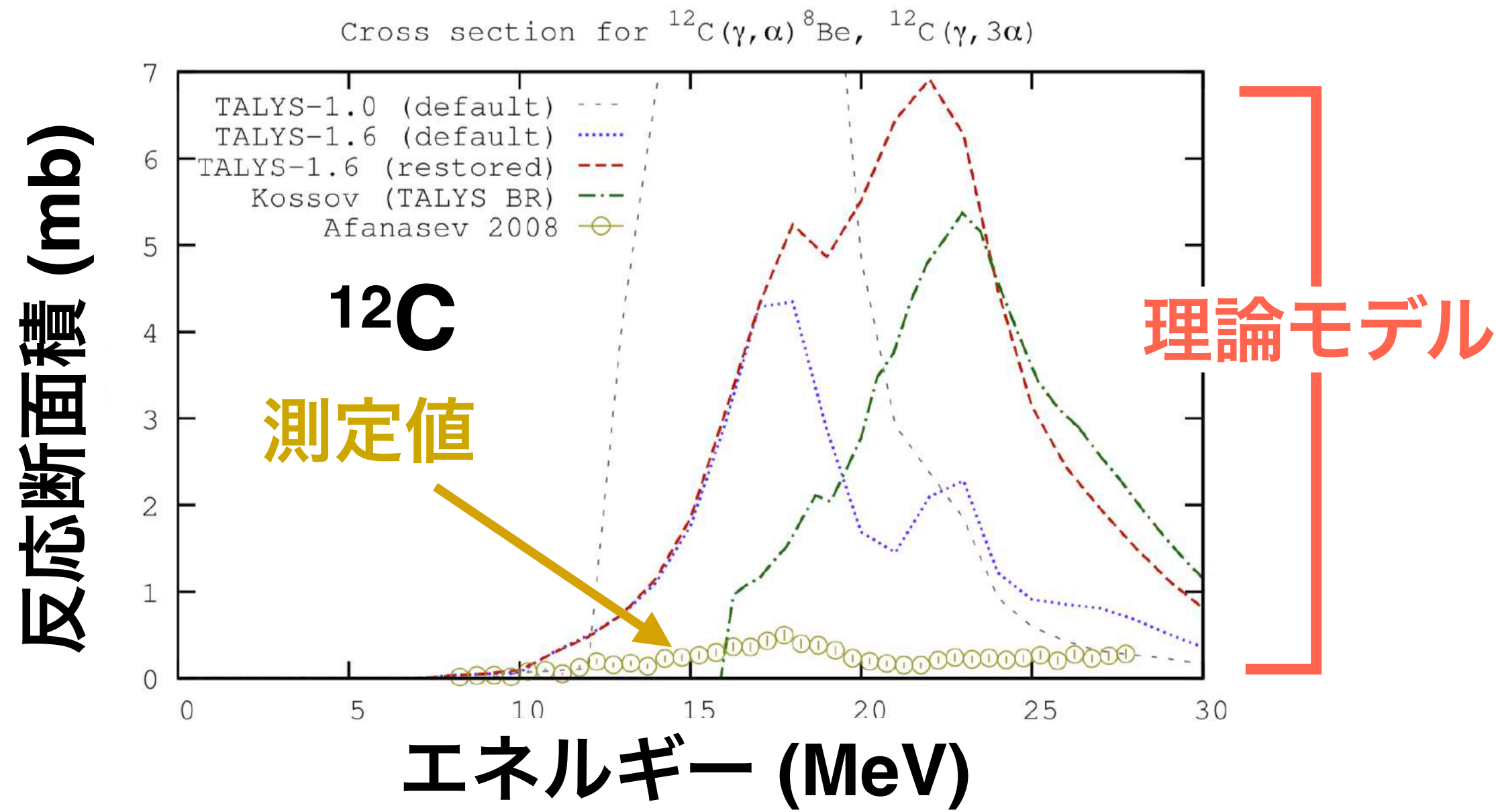
極高エネルギー原子核とCMBの光核反応



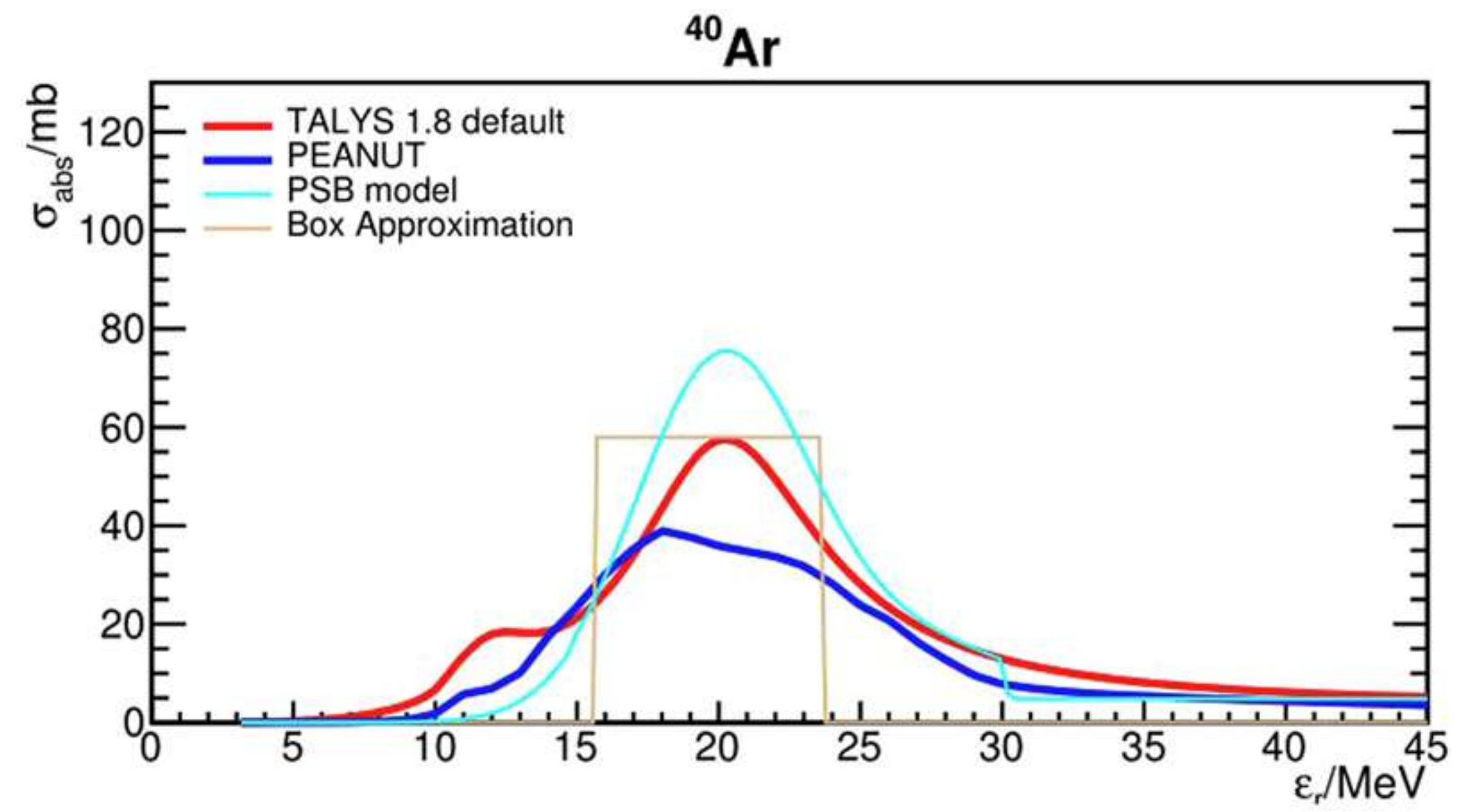
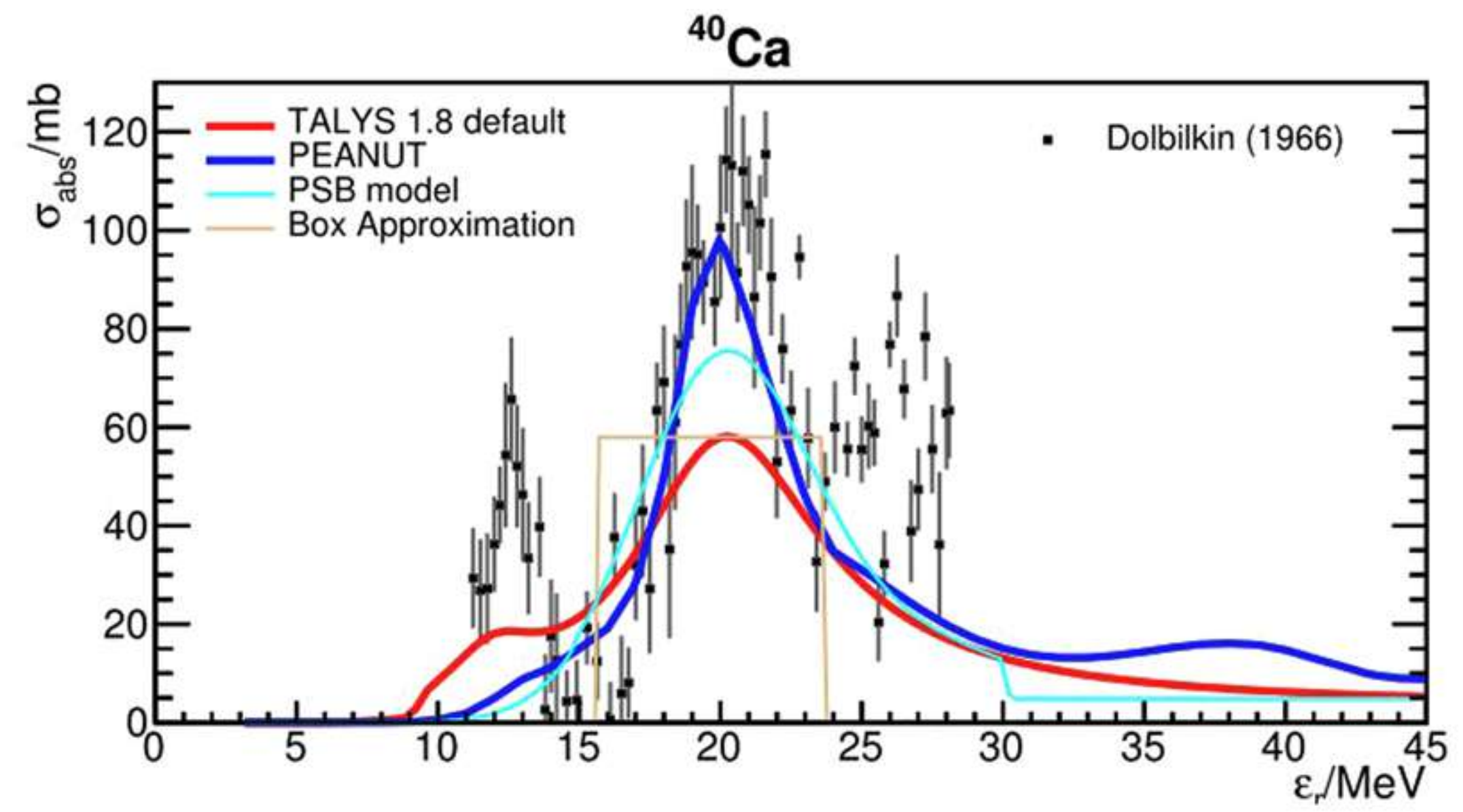
A < 60の原子核では、巨大双極子共鳴の散乱断面積の不定性が非常に大きい

宇宙線・原子核理論・CMBとの
連携による相互理解が重要

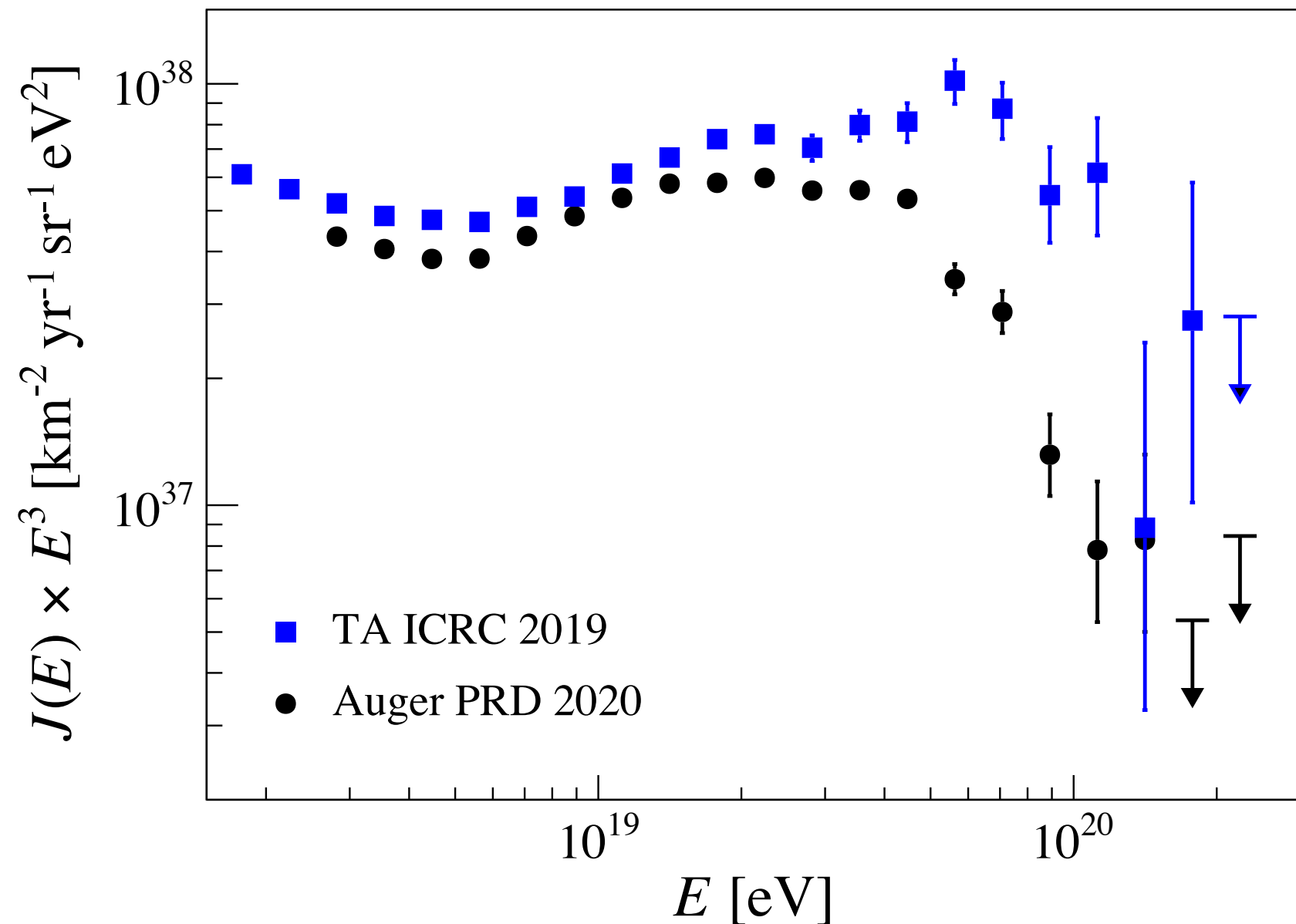
D. Boncioli et al., Sci. Reports 7:4882 (2017)



A. Tamii, E. Kido et., arXiv:2211.03986

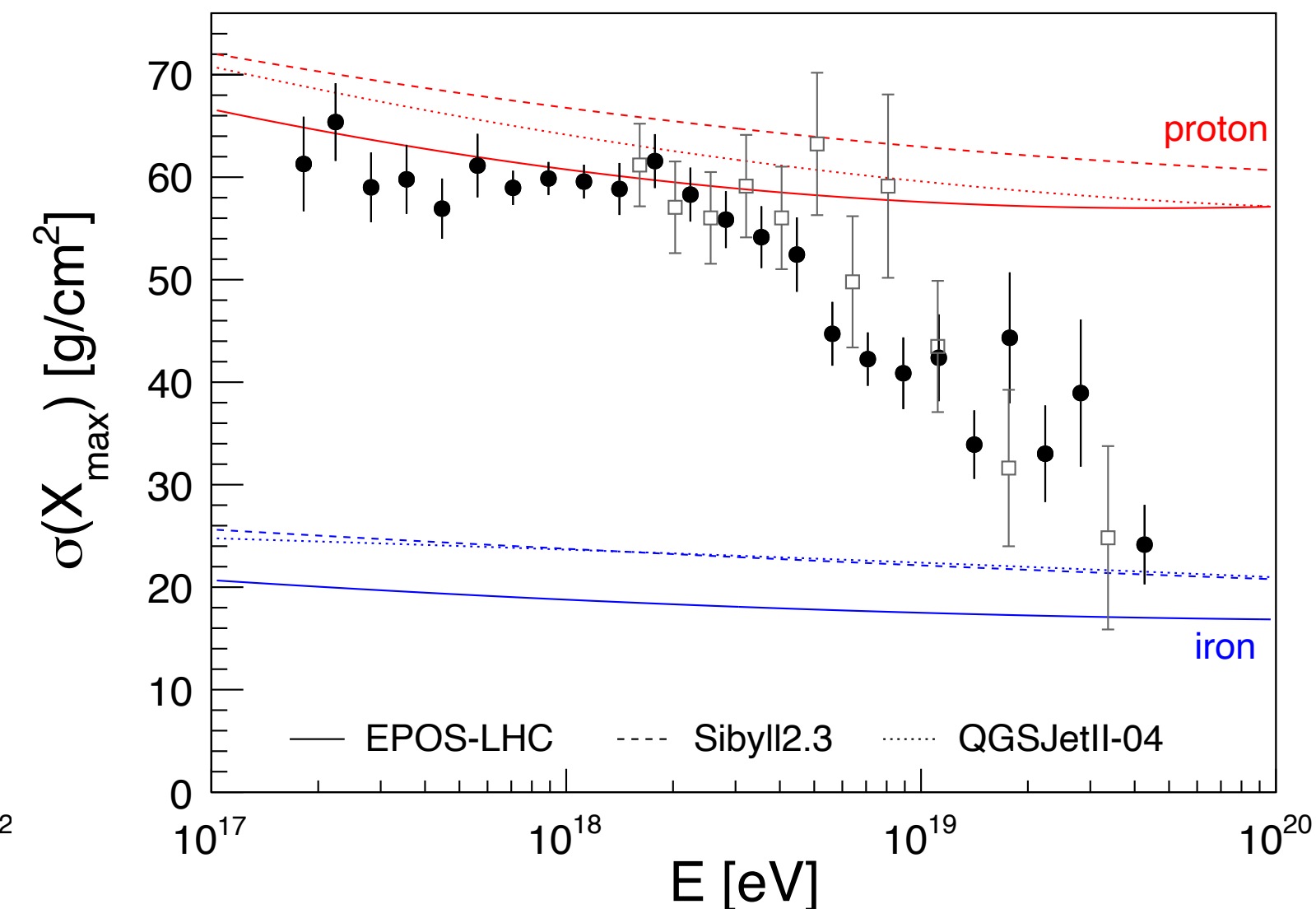
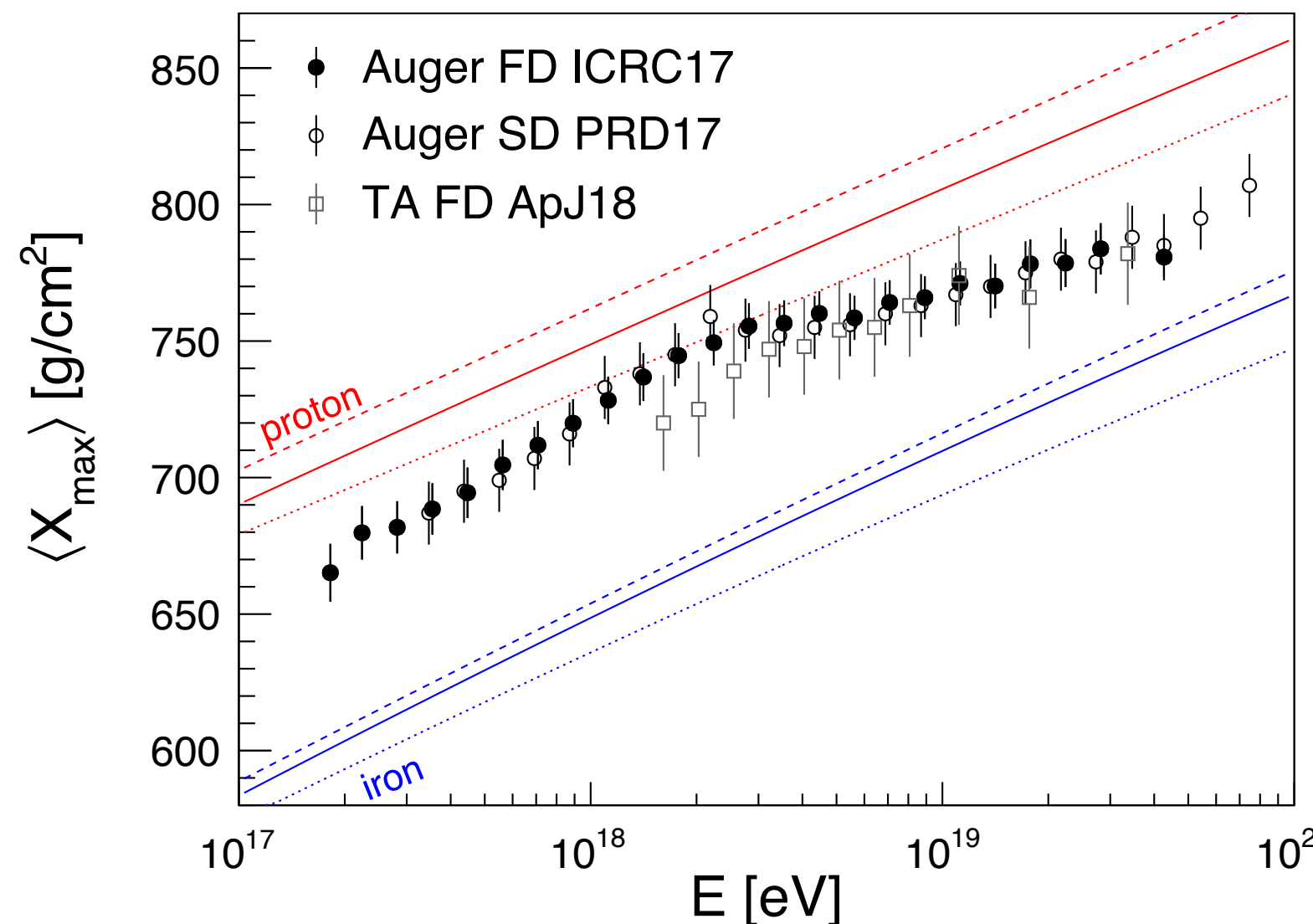


$$J(E) \times E^3$$



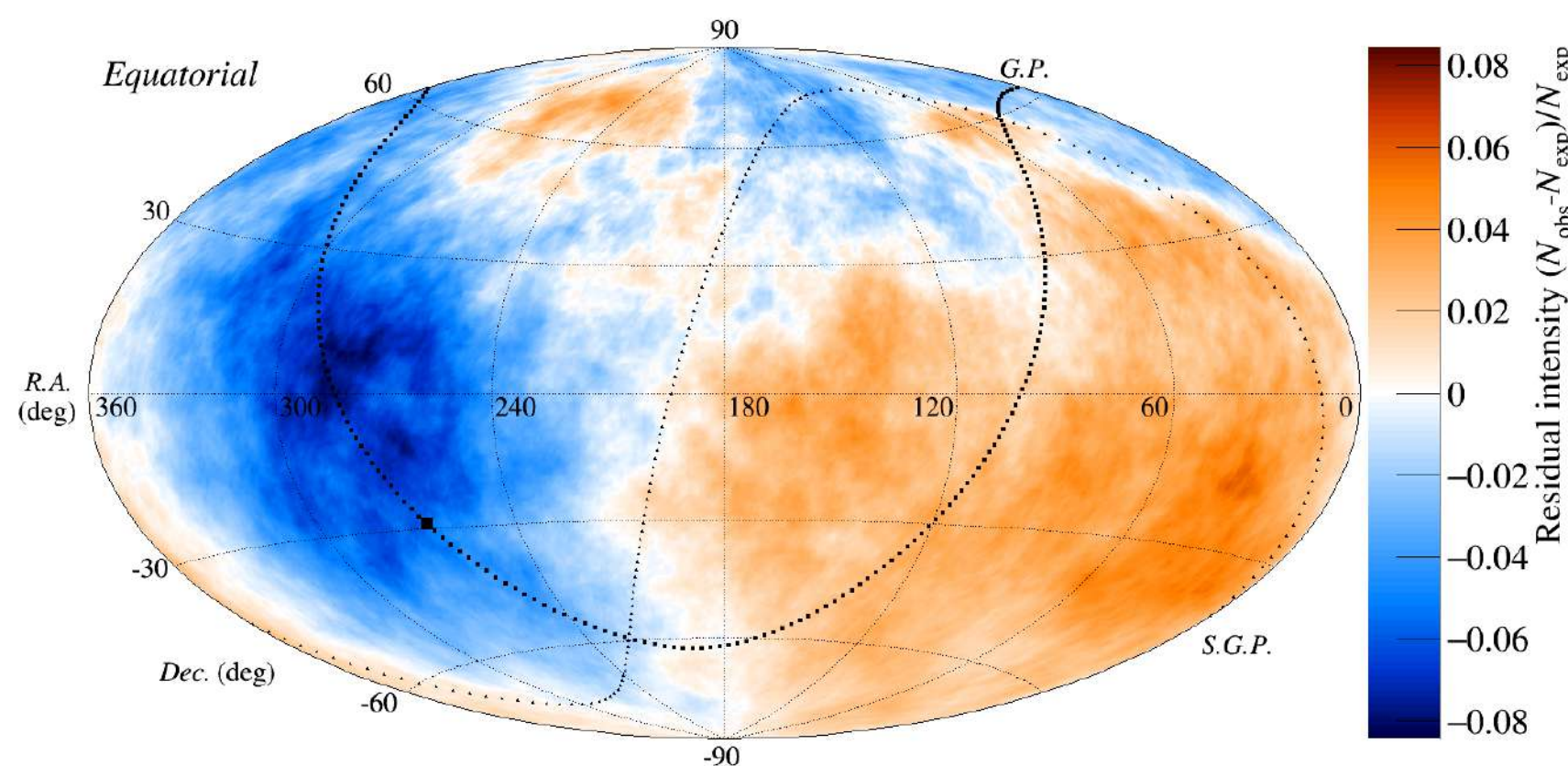
まとめと今後

$$\theta \sim 10^\circ Z \left(\frac{E}{10 \text{ EeV}} \right)^{-1} \quad 48$$

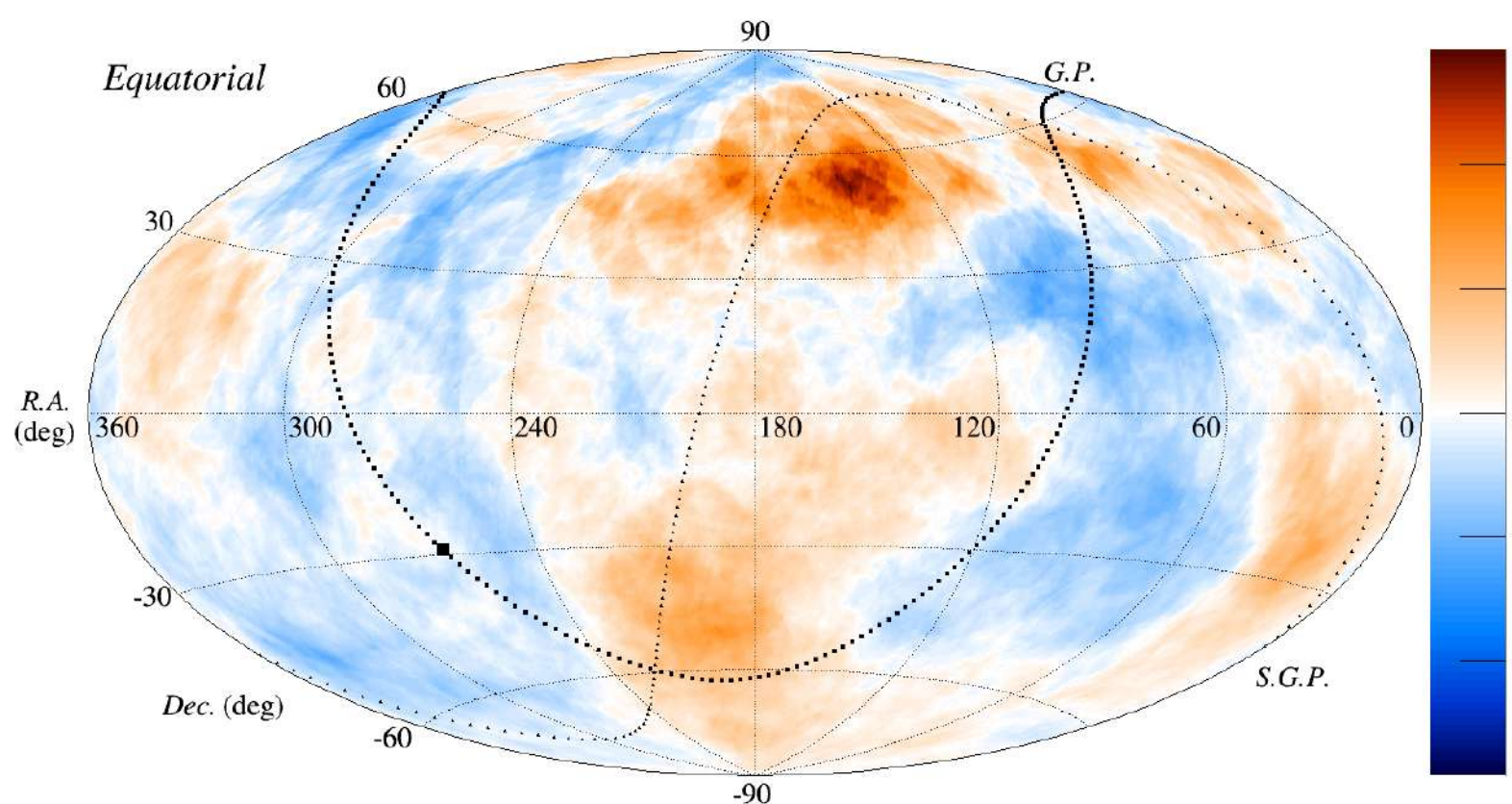


極高エネルギー宇宙線が重たい原子核である傍証がそろってきた

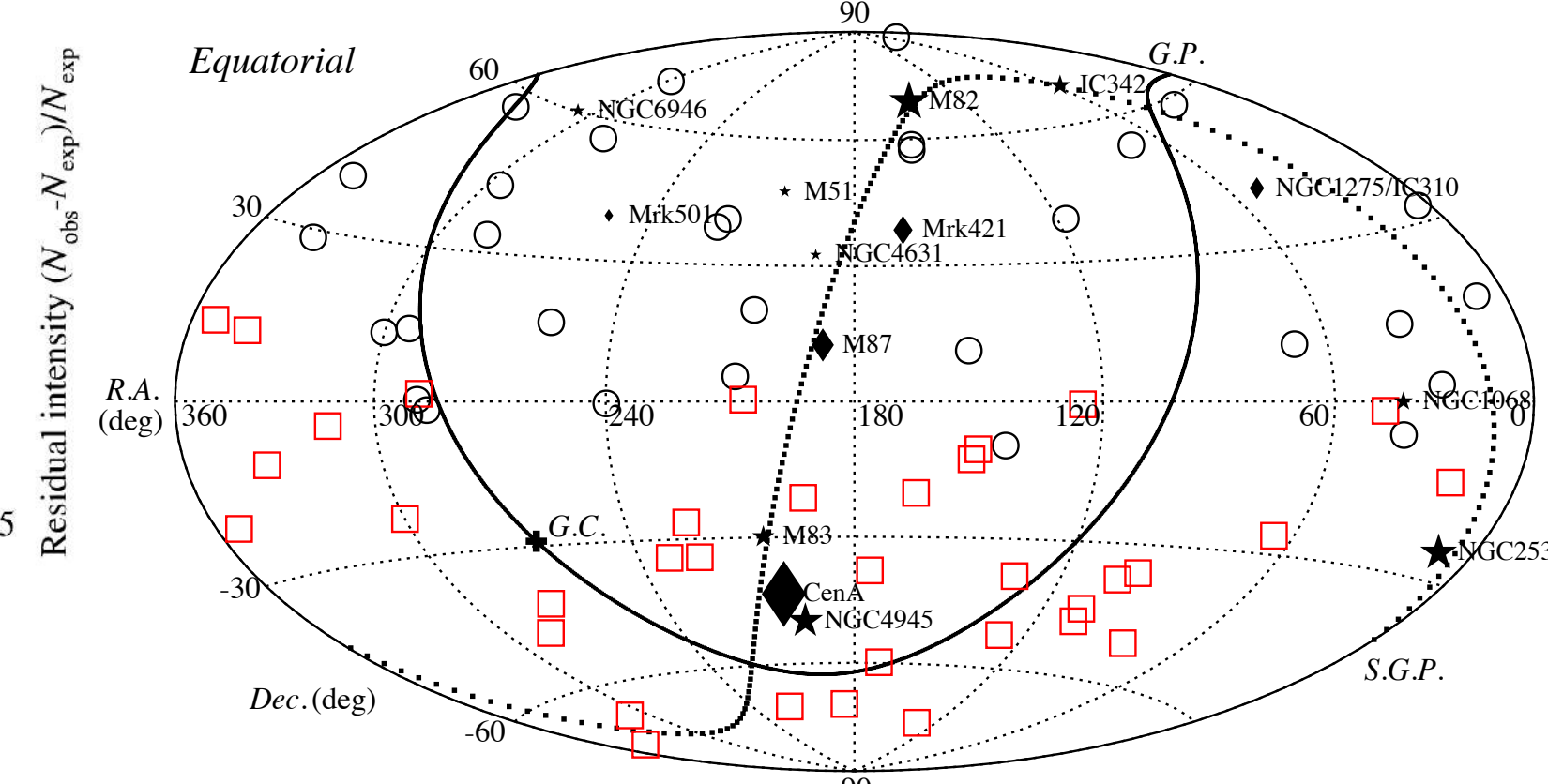
宇宙線観測と原子核物理と「交差点」として今後も活発な情報交換を...



Ankle ($E > 10 \text{ EeV}$)



Cutoff ($E > 50 \text{ EeV}$)



Beyond-Cutoff ($E > 100 \text{ EeV}$)

1 (一般シンポジウム講演) 趣旨説明 (5分)

東大宇宙線研究所

埜隆志

2 (一般シンポジウム講演) 光核反応モデルが超高エネルギー宇宙線観測結果の解釈に与える影響 (25分)

理化学研究所長瀧天体ビッグバン 研究室

木戸英治

3 (一般シンポジウム講演) 光核反応の課題と系統的理解 (25分)

大阪大学RCNP

民井淳

4 (一般シンポジウム講演) 空気シャワー観測による原子核種測定 (25分)

東京大学宇宙線研究所

藤田慧太郎

5 (一般シンポジウム講演) LHCを用いた宇宙線相互作用の研究 (25分)

名古屋大学宇宙 地球環境研究所

毛受弘彰

休憩 (15:15~15:30)

6 (一般シンポジウム講演) 銀河宇宙線の伝播と原子核反応 (25分)

東京大学理学系研究科

大平豊

7 (一般シンポジウム講演) 核破碎反応測定とその銀河宇宙線伝搬への重要性 (25分)

理化学研究所齋藤高エネルギー原子核研究室/GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research, Germany / 埼玉大学

齋藤武彦

8 (一般シンポジウム講演) 原子核理論計算の現状と展望 (25分)

九州大学

緒方一介

物理学会での シンポジウム講演 18日午後

あまてらす み そ ら み ち し る べ
まだ観ぬ宇宙の

解説： アマテラス粒子 宇宙(天)から到来(照らす)
まだ観測できていない宇宙の未知を知っているかも
宇宙の謎を解明する道しるべとなるかも知れない

參考資料

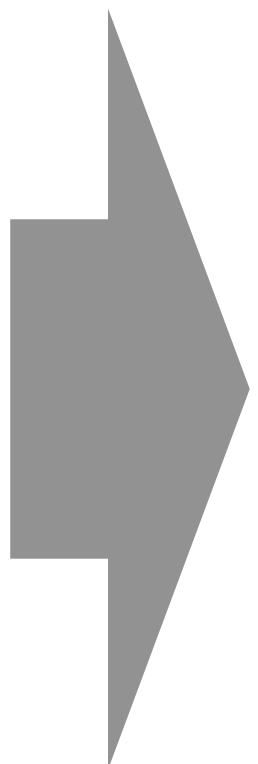
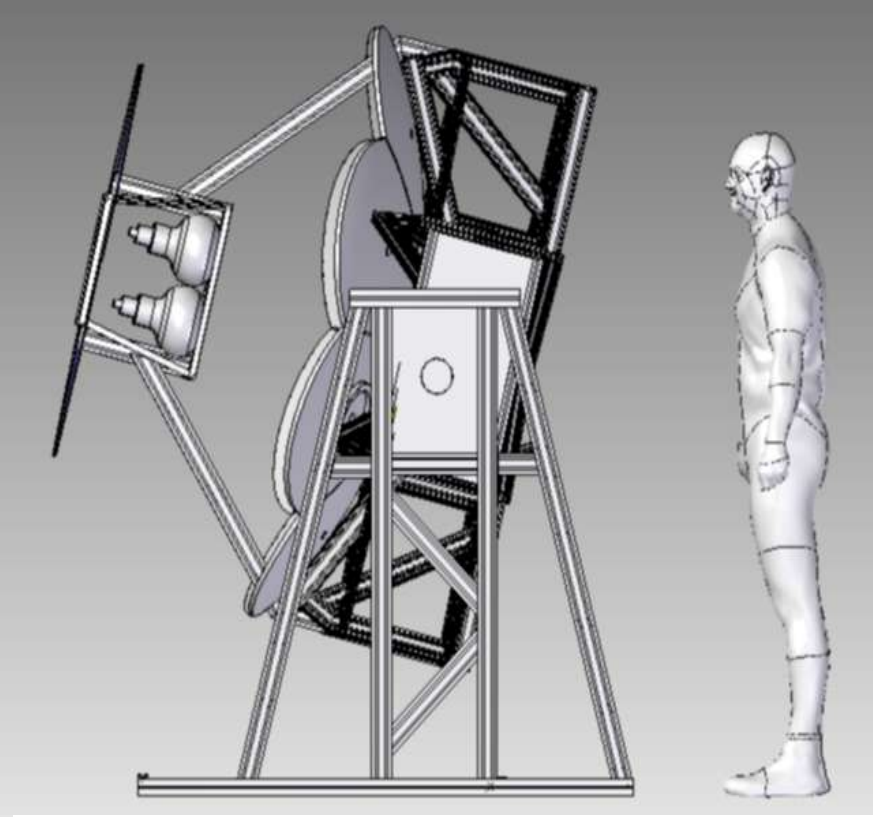
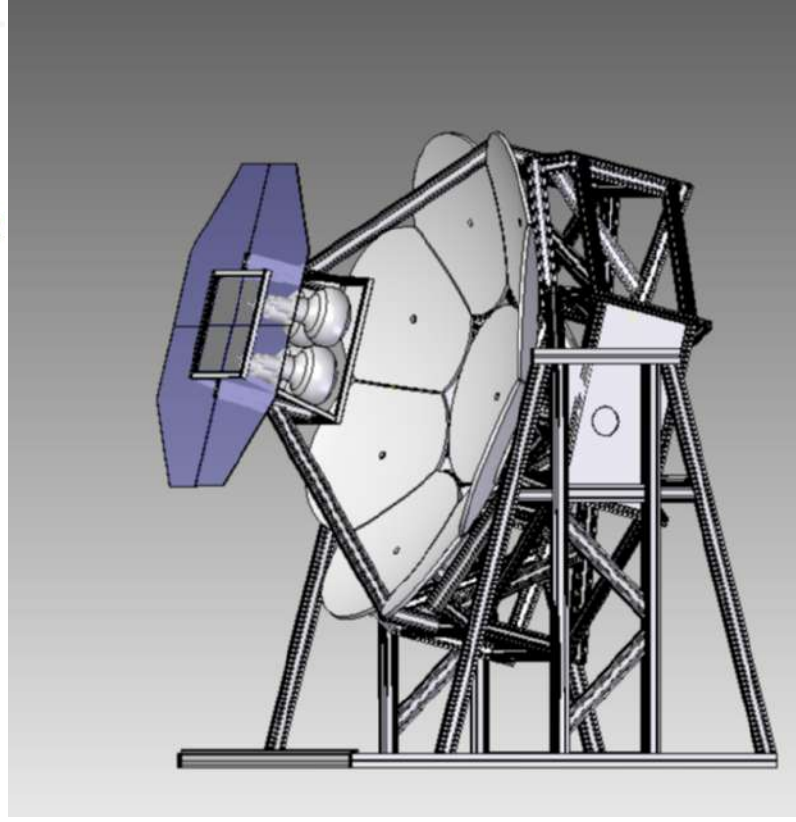
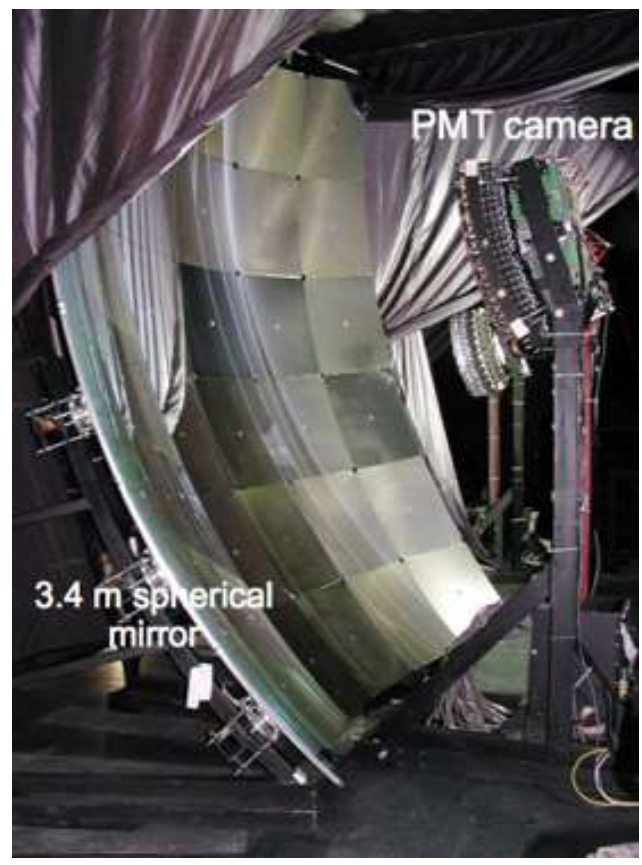
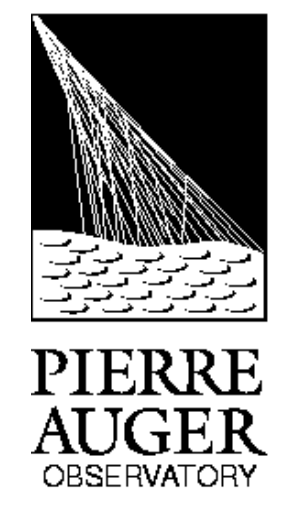
Fluorescence detector **A**rray of **S**ingle-pixel **T**elescopes (**FAST**)

HP: <https://www.fast-project.org>

📌 極高エネルギー宇宙線の年間観測事象数を10倍に増やす将来計画

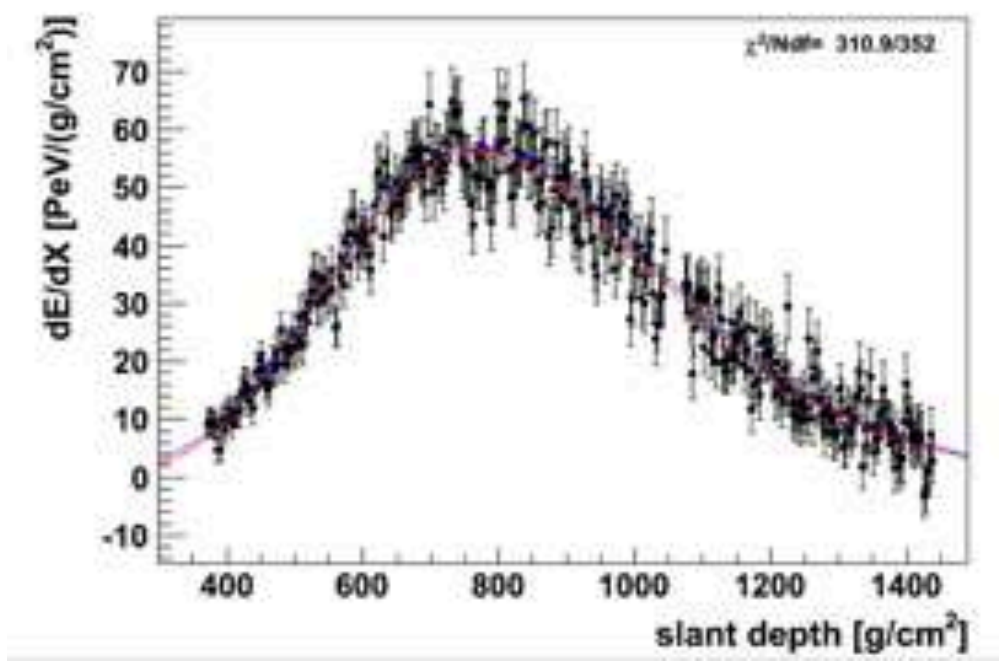
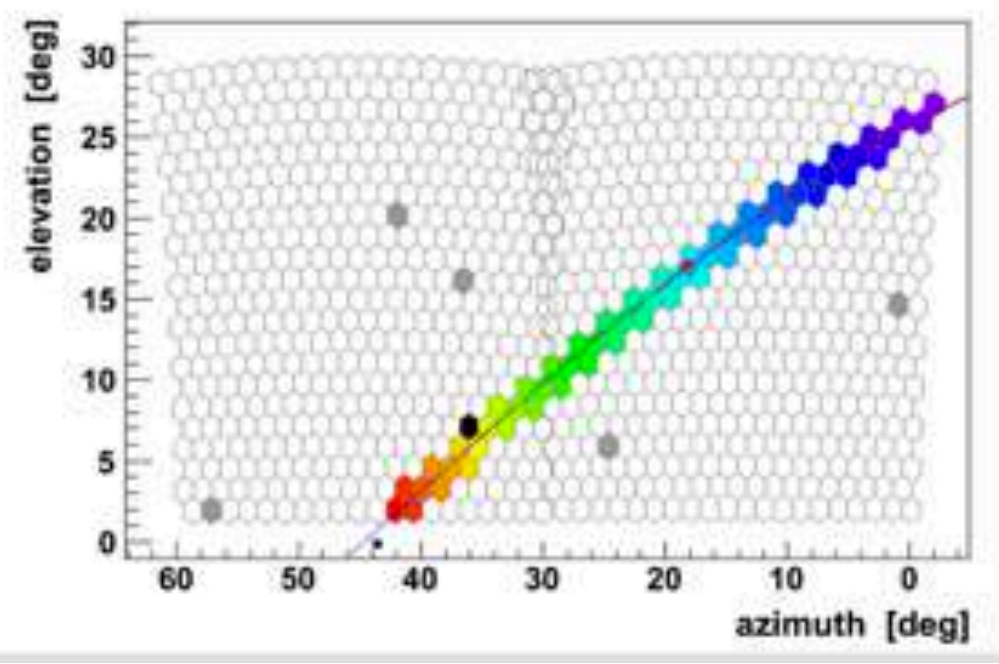
📌 既存の方法の単純拡張では、予算・管理の面から現実的ではない

📌 >30 EeVの宇宙線観測に特化した新たな検出方法 → 「望遠鏡アレイ」

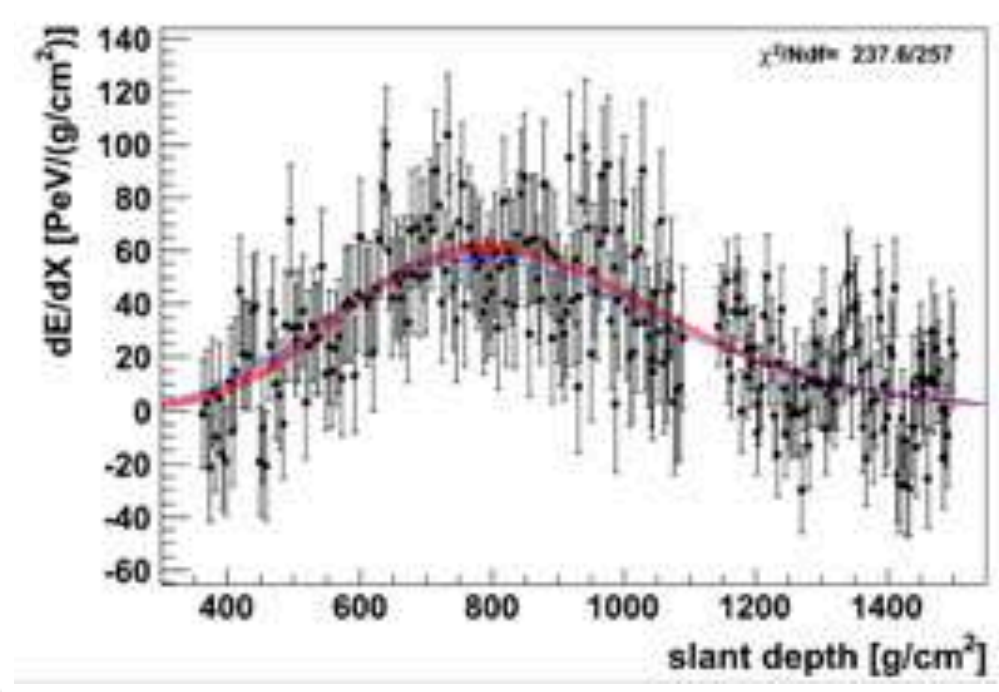
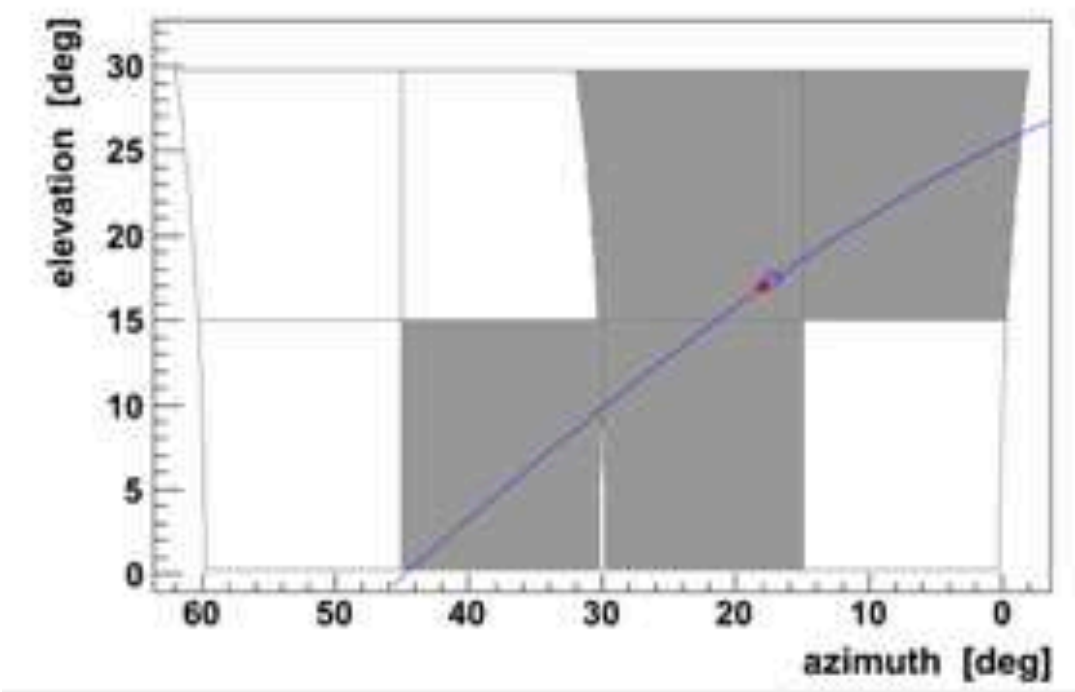


望遠鏡アレイとして展開するには高価

極高エネルギー宇宙線観測に特化し、低コスト化

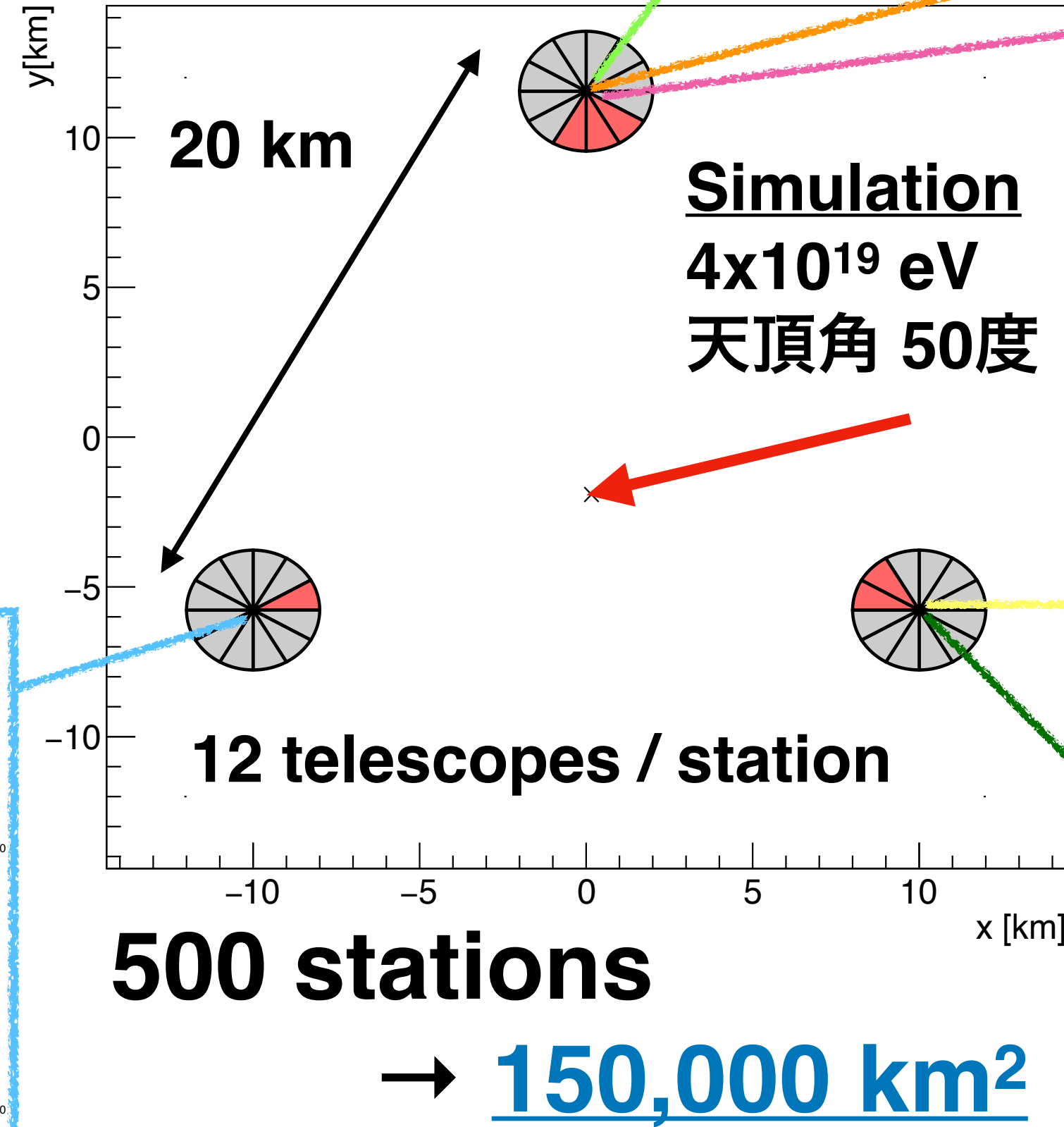
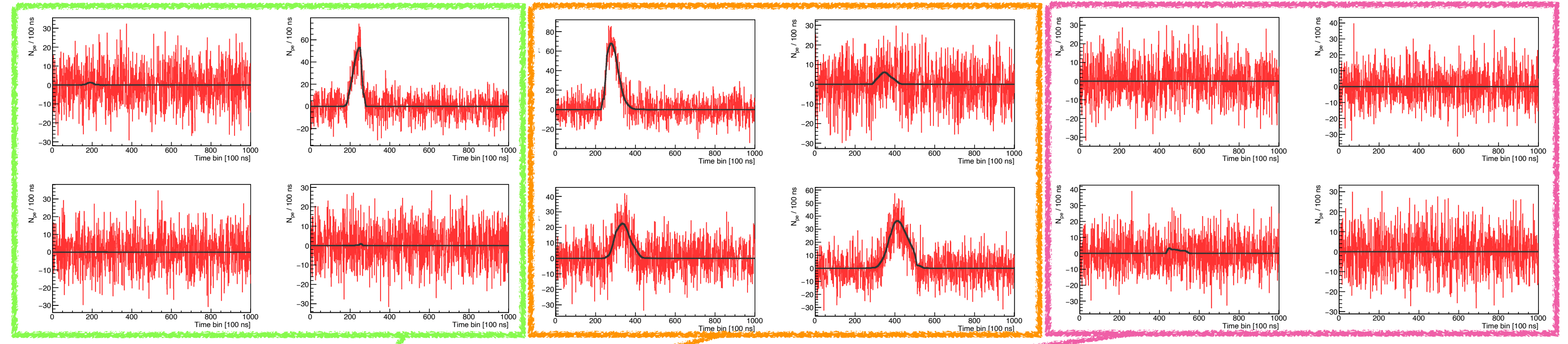
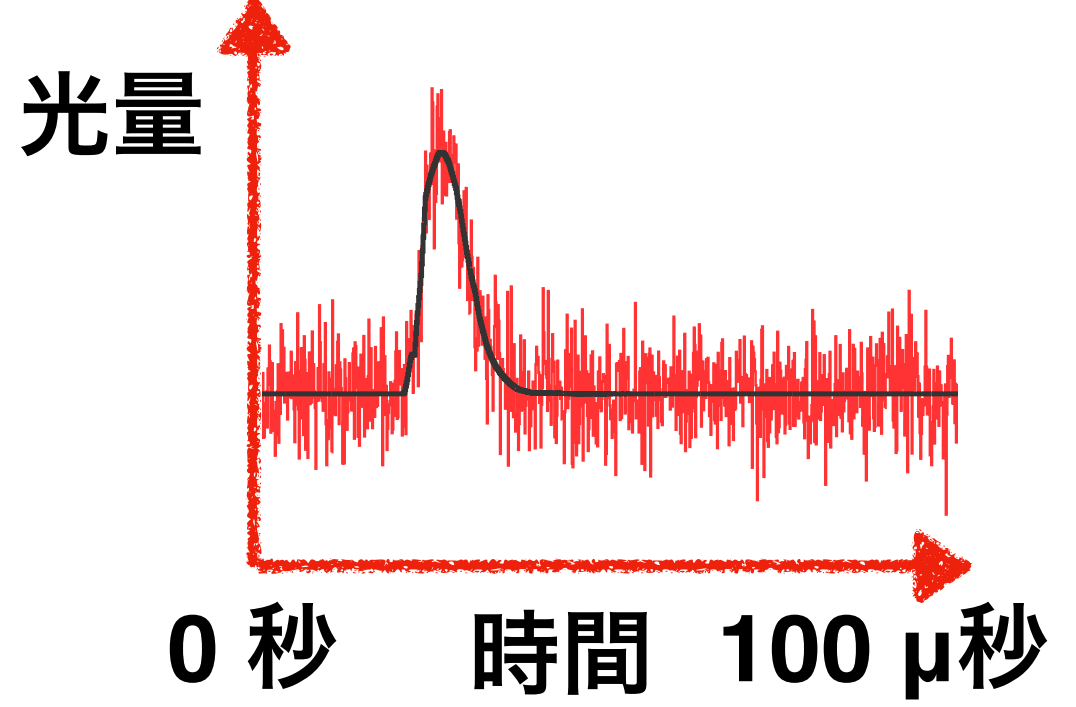


ピクセル数減少
望遠鏡小型化



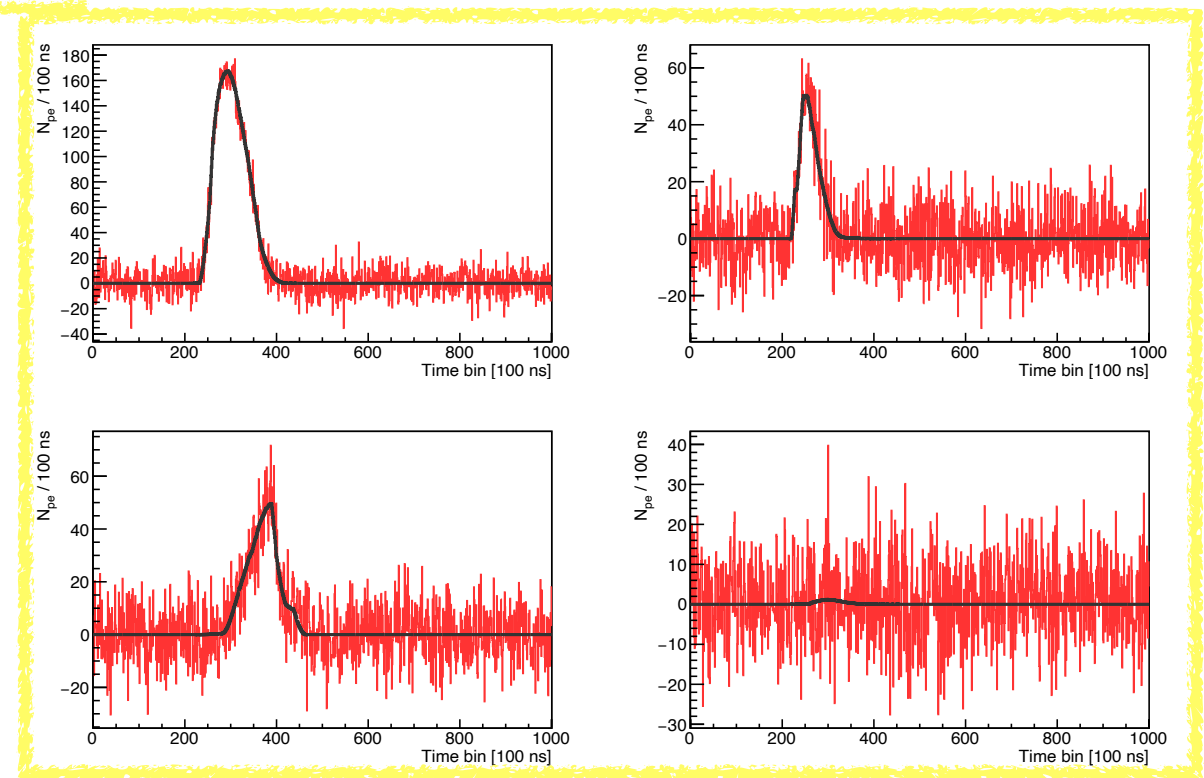
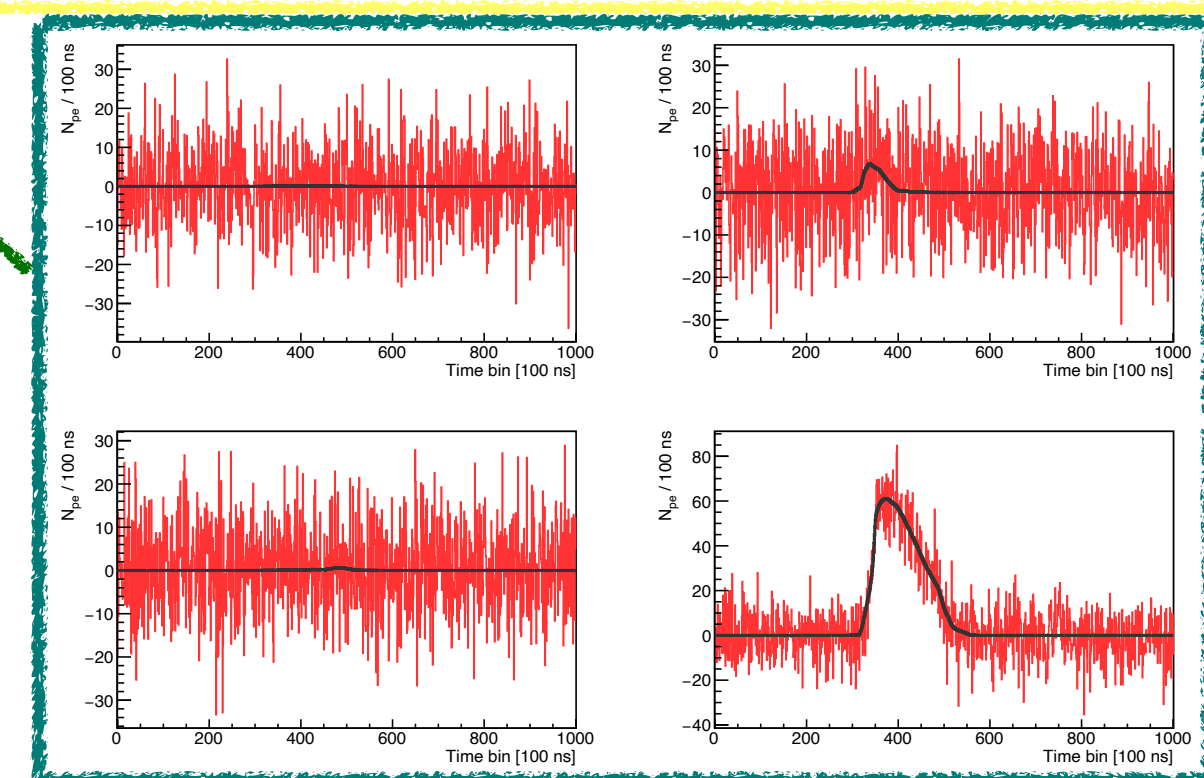
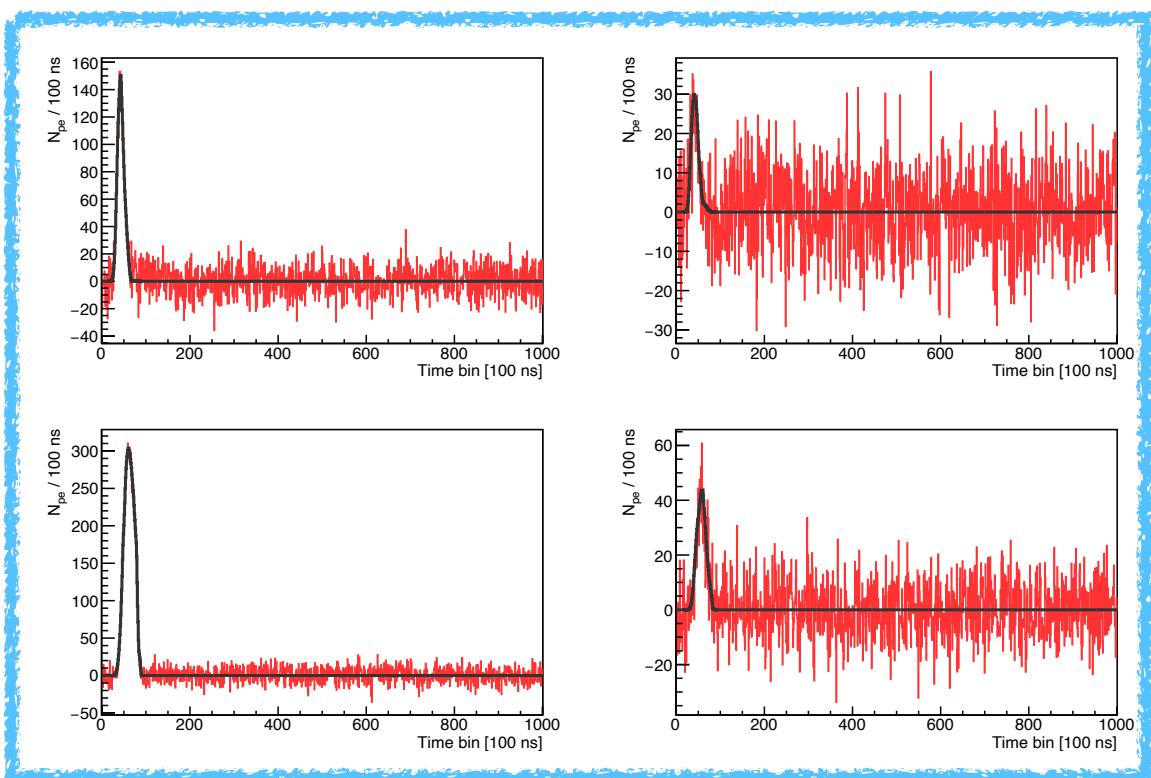
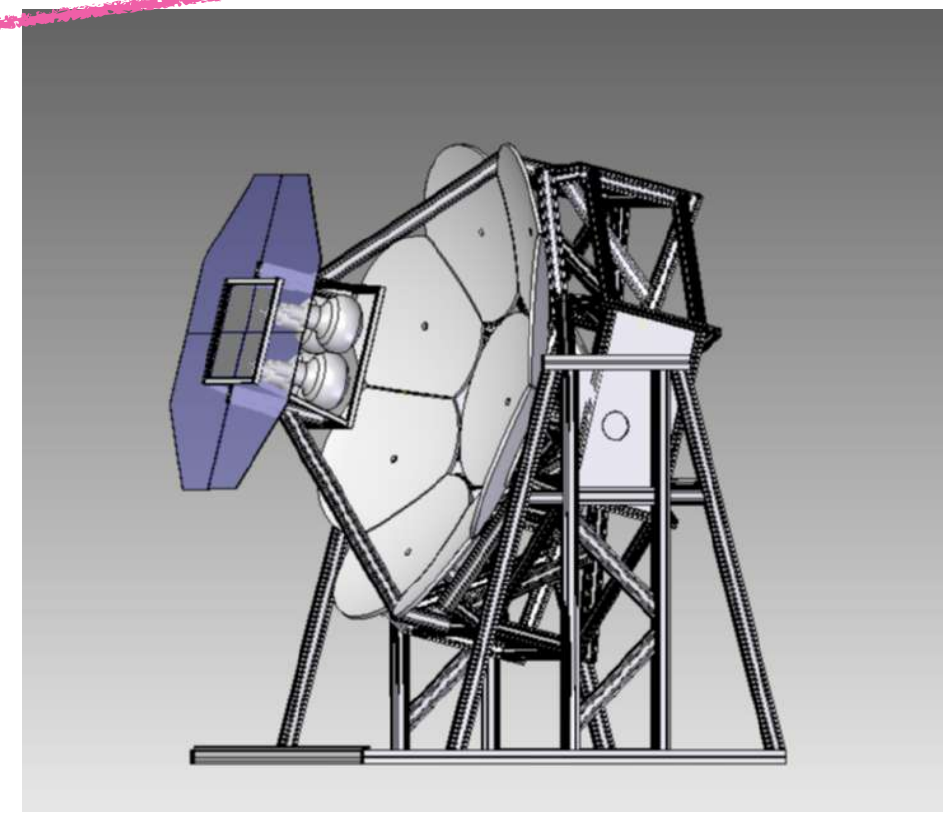
新型大気蛍光望遠鏡でアレイを展開し、広範囲の宇宙線を検出する

各望遠鏡で得られる波形

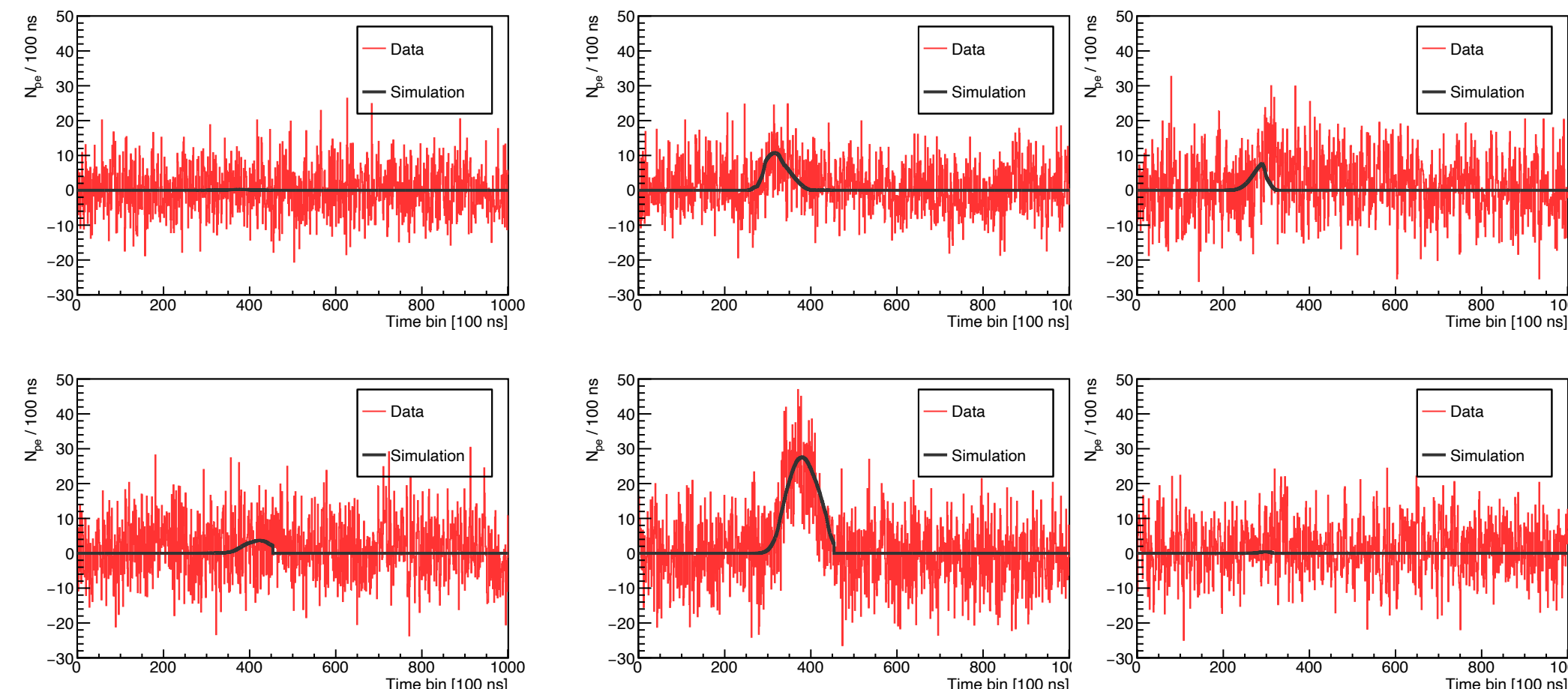


新型大気蛍光望遠鏡 (FAST)

- ✿ 1.6 m口径の小型の集光部
- ✿ 4本の大口径光電子増倍(PMT)
- ✿ 20 km 間隔で設置し,望遠鏡アレイを展開



FAST望遠鏡による試験観測結果



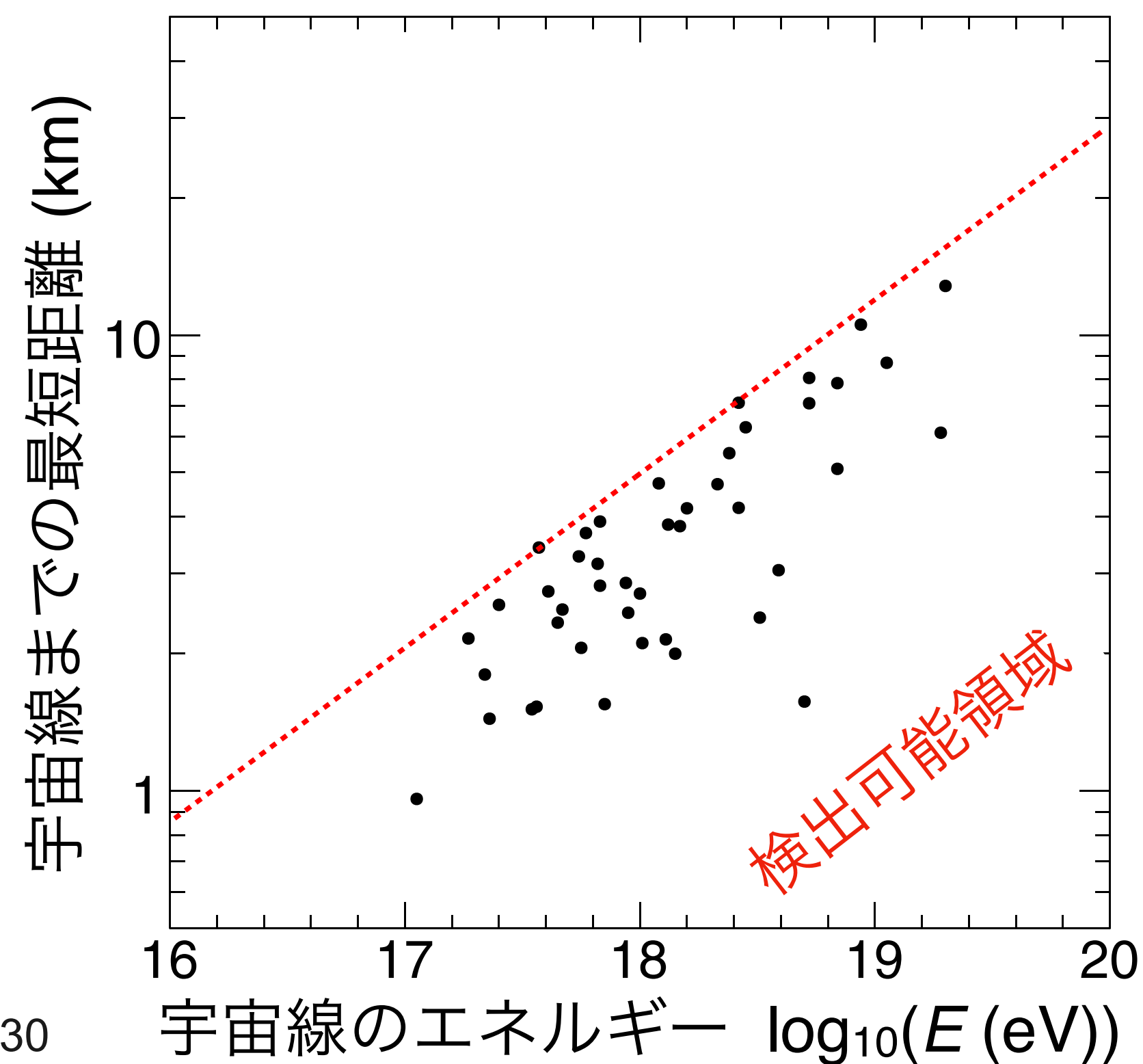
新型大気蛍光望遠鏡
で観測された宇宙線
 $E = 2 \times 10^{19}$ eV

TAサイトに3基の望遠鏡を設置

発電機からの電力供給によって、宇宙線を観測

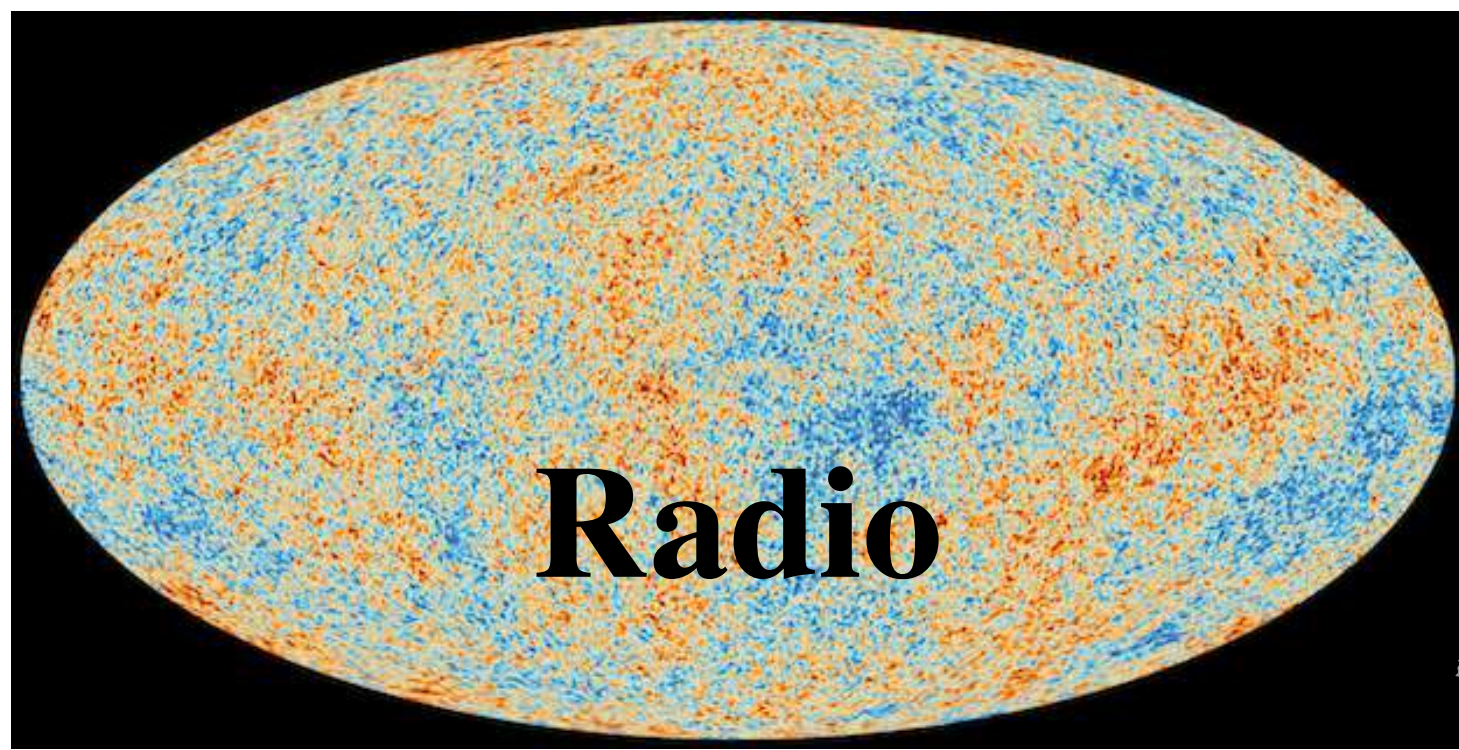
150時間の観測で、44事象の極高エネルギー宇宙線を検出

宇宙線の検出能力を確認

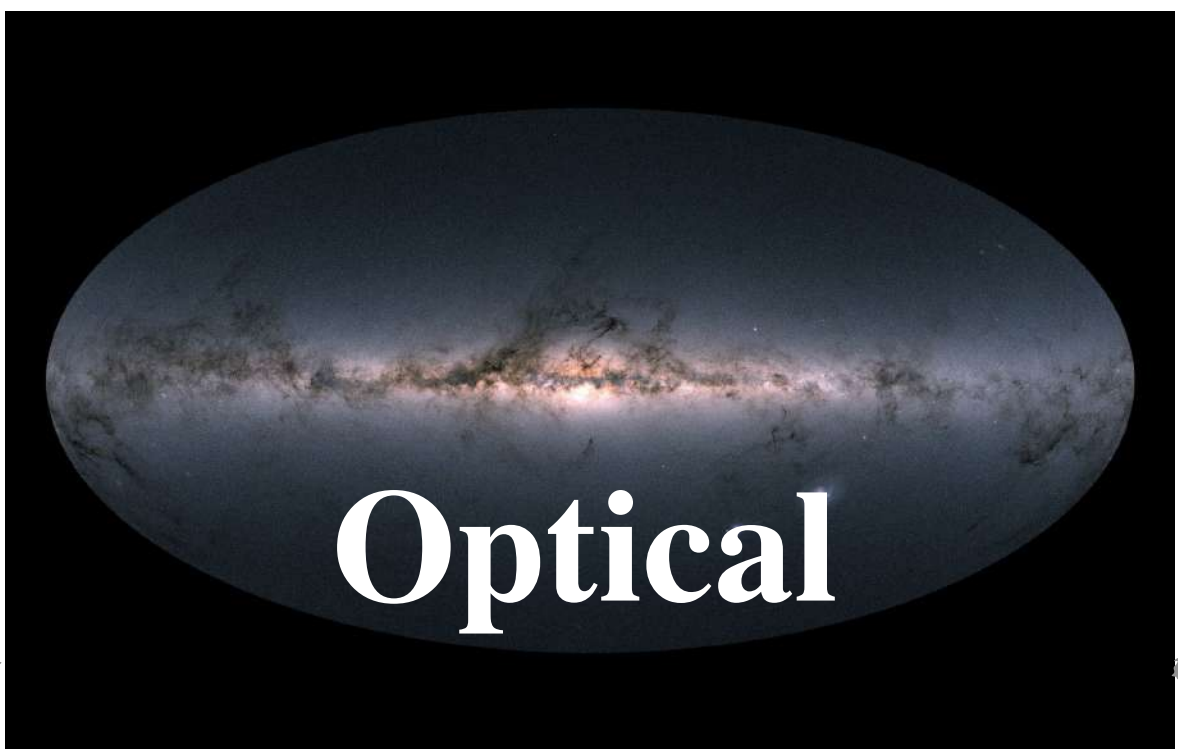


Augerサイトに2基の望遠鏡を設置

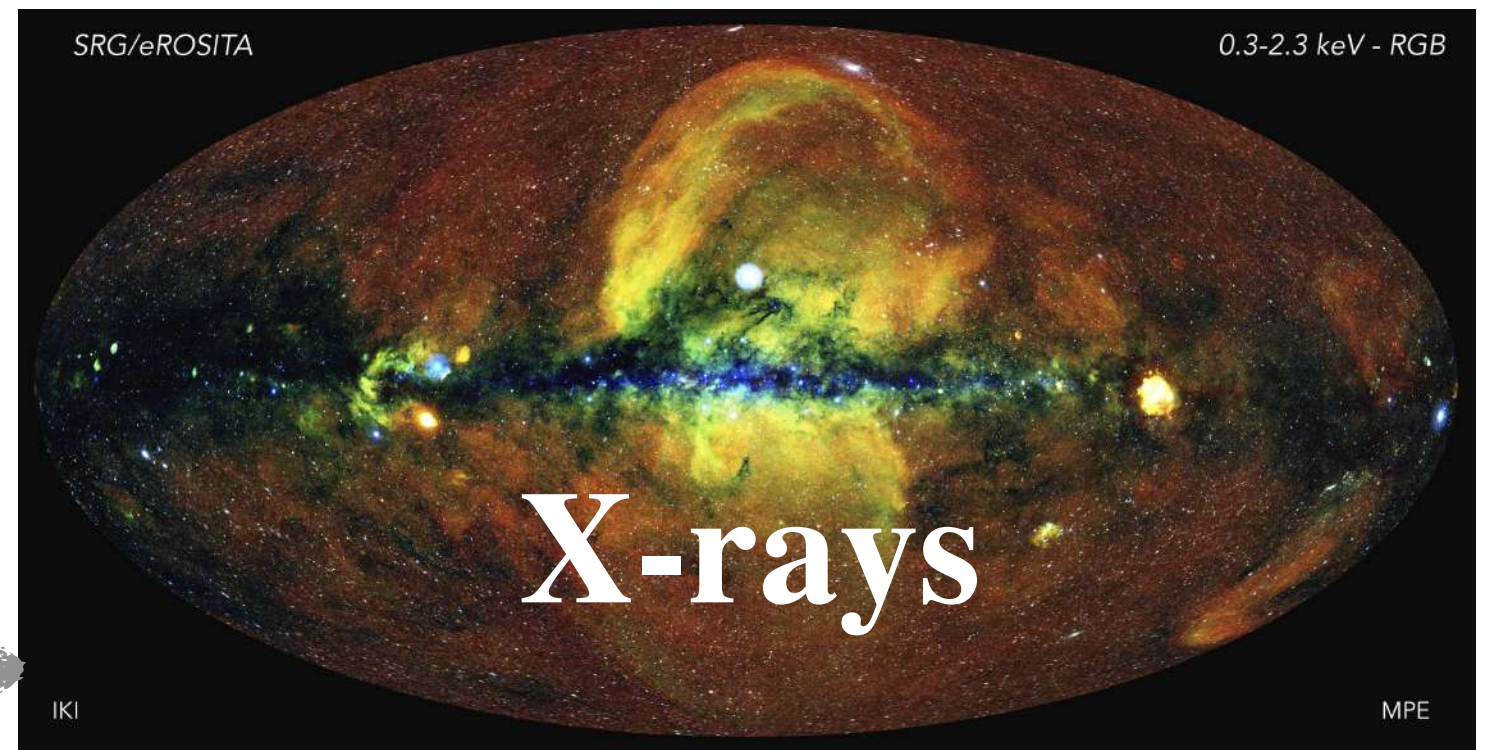
3地点からのアレイ観測を目指して準備中



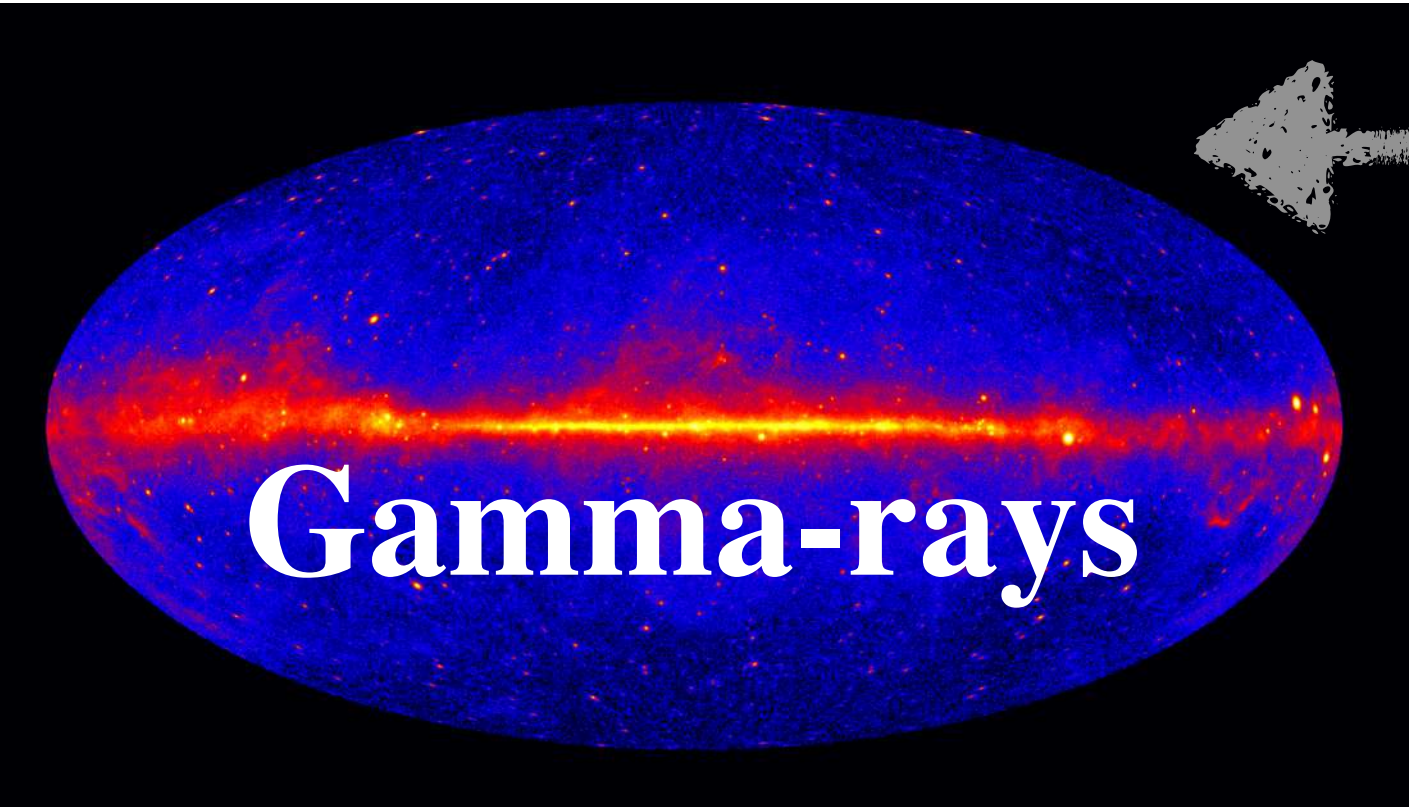
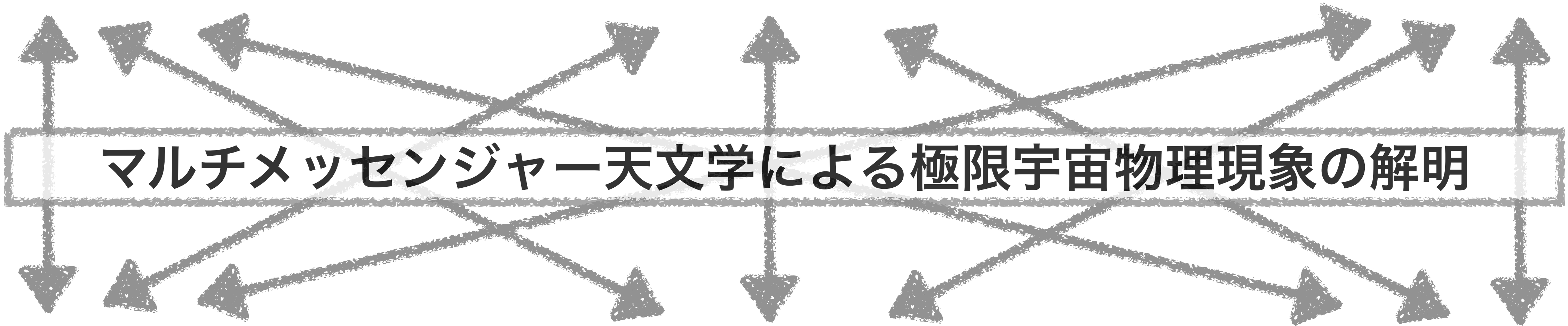
Planck Collaboration



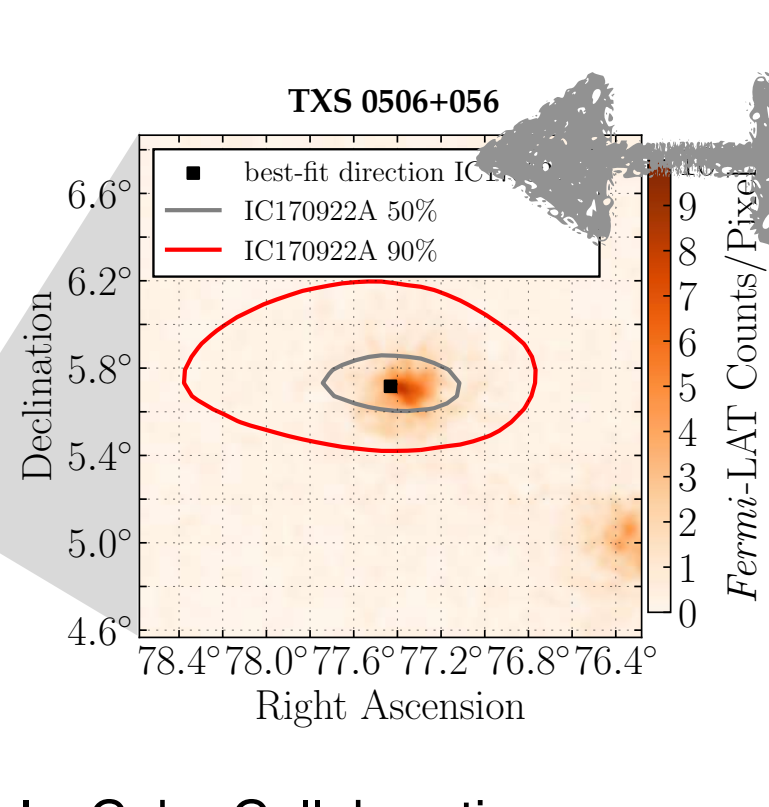
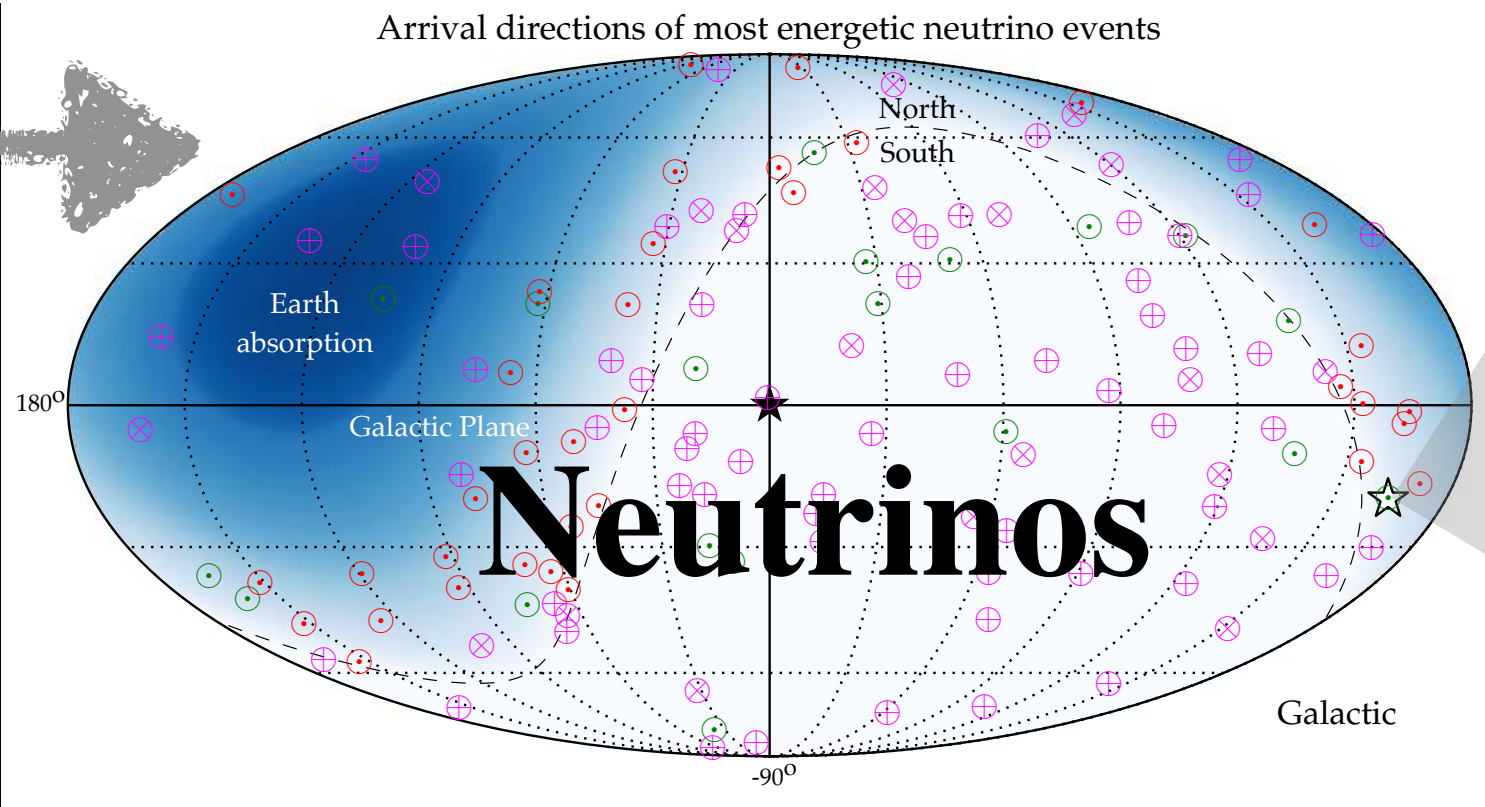
GAIA Collaboration



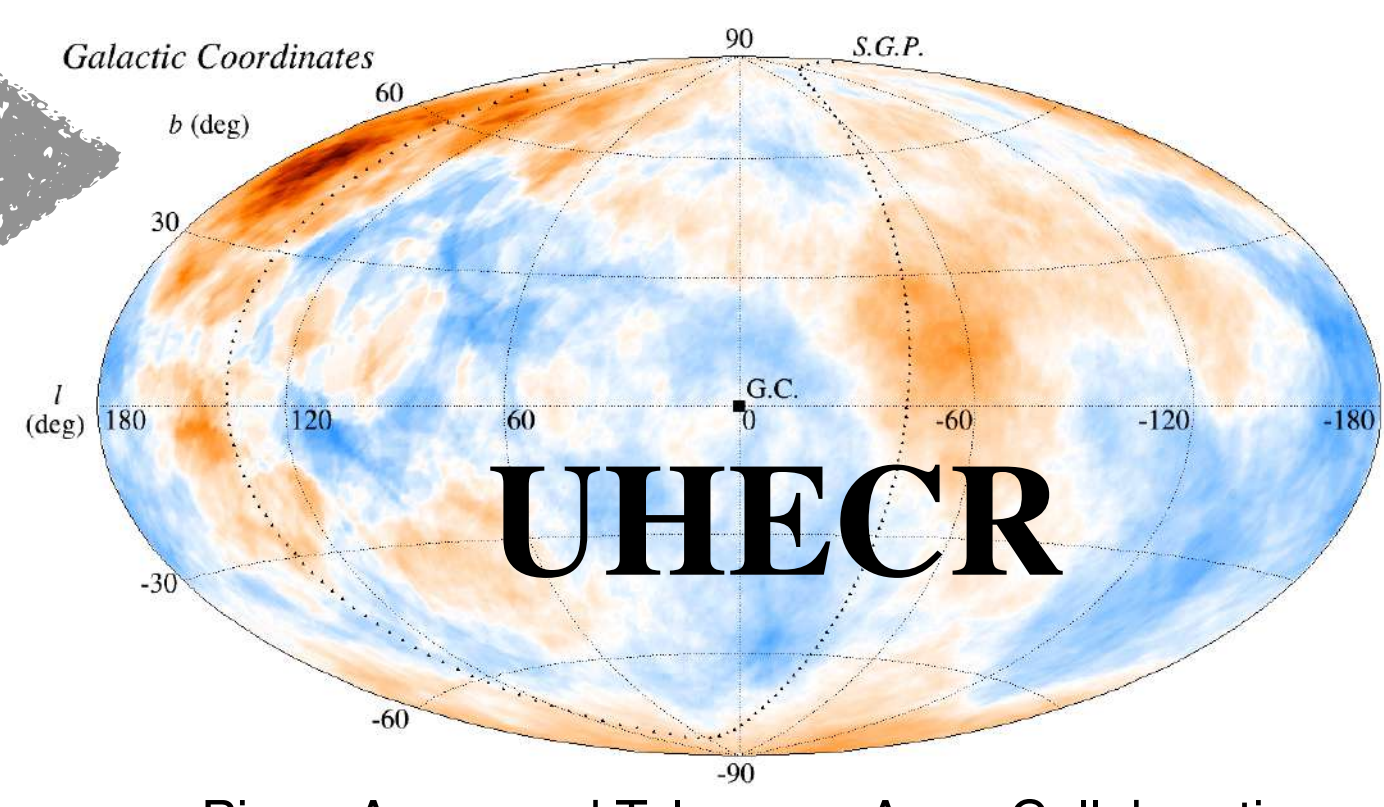
eROSITA Collaboration



Fermi Collaboration



IceCube Collaboration



Pierre Auger and Telescope Array Collaborations

宇宙線と芸術との融合（中島裕司 作）

