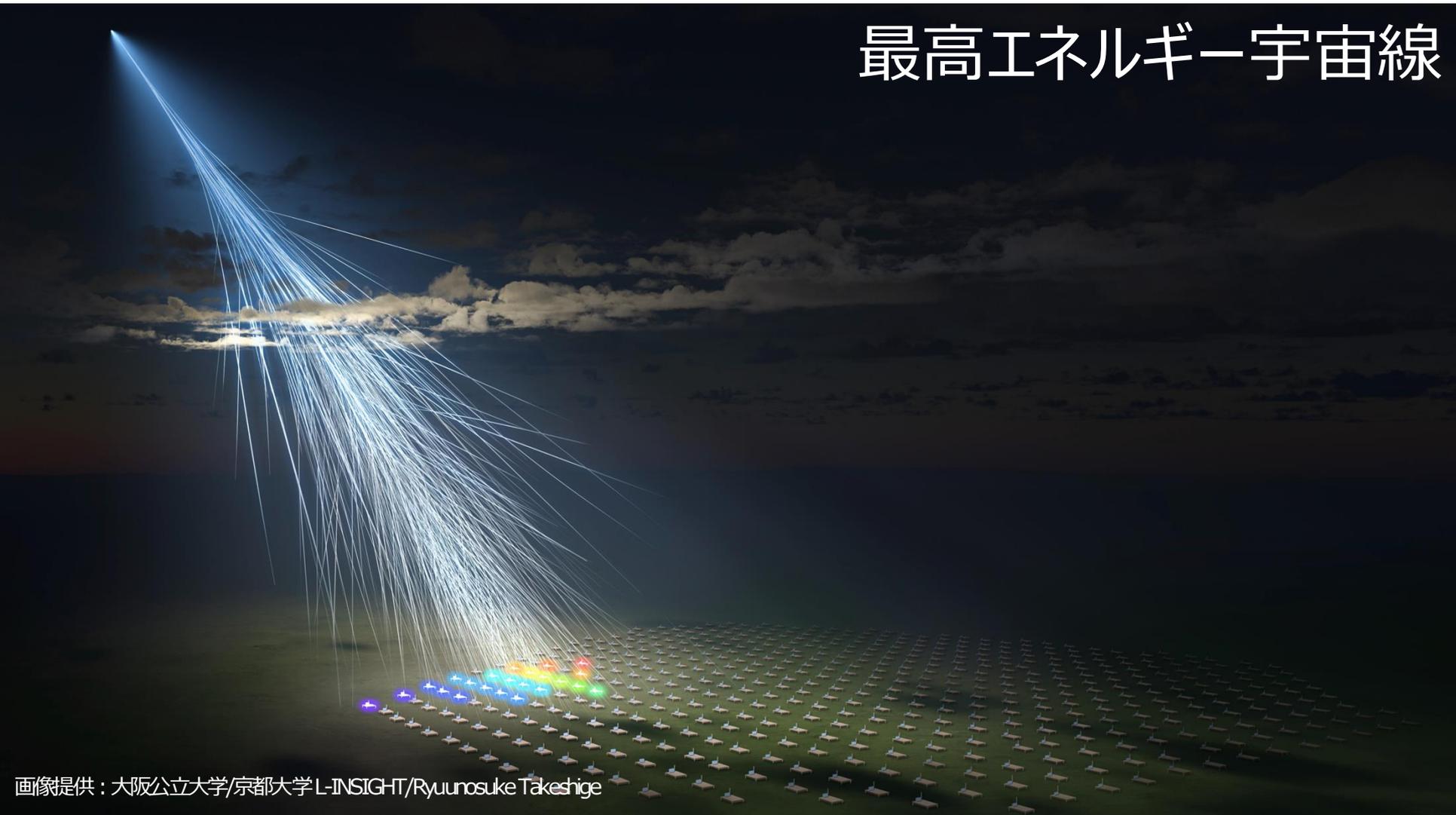


情報×宇宙線

最高エネルギー宇宙線



画像提供：大阪公立大学/京都大学 L-INSIGHT/Ryuunosuke Takeshige

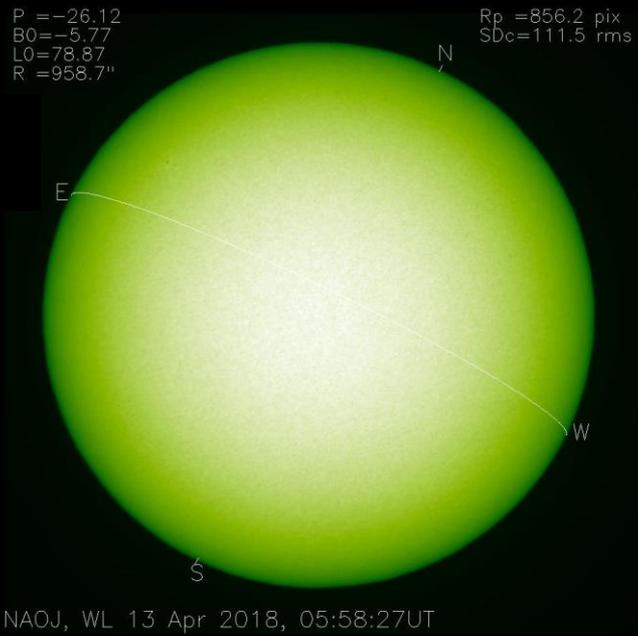
これは「目に見える光」= 可視光で見た空
1eVくらいの光子（素粒子）の多い／少ない

可視光（1eVくらいの粒々）で宇宙や天体を見ると

全天



太陽

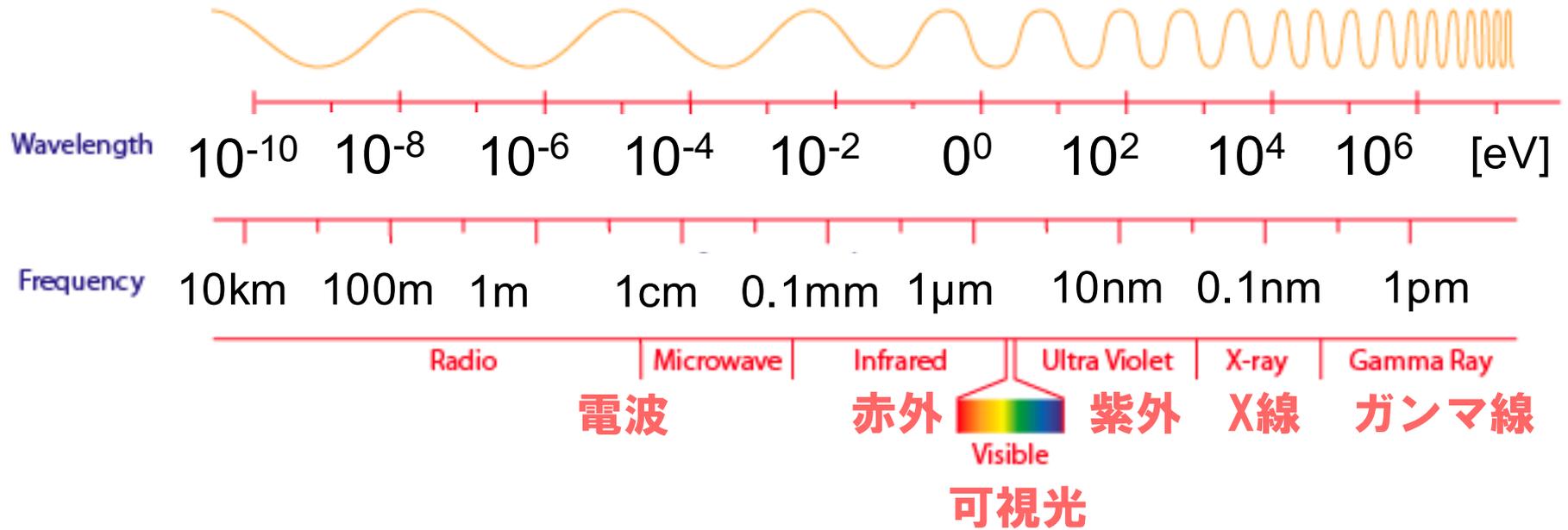


© 2000, Axel Mellinger

M82

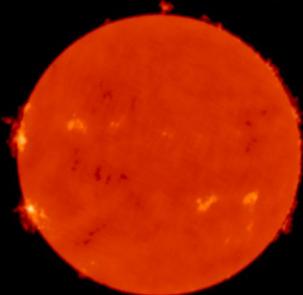


様々な波長（エネルギー）



電波

NOBEYAMA RADIO HELIOGRAPH 17GHz (R+L)



2012-09-19 02:44:35.672

可視光

P = -26.12
B0 = -5.77
L0 = 78.87
R = 956.7"

Rp = 856.2 pix
Sbc = 111.5 rms

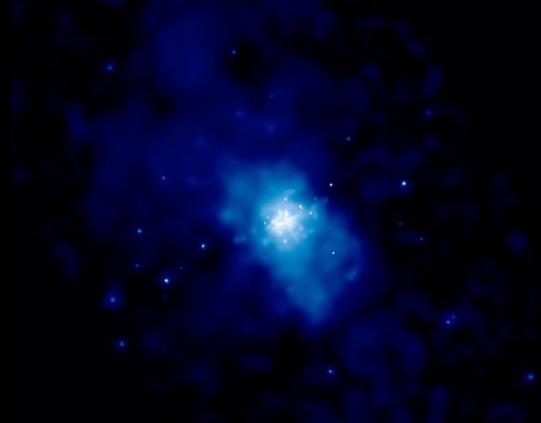
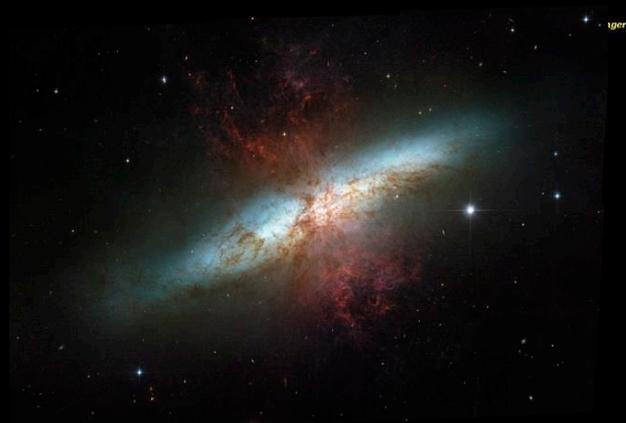
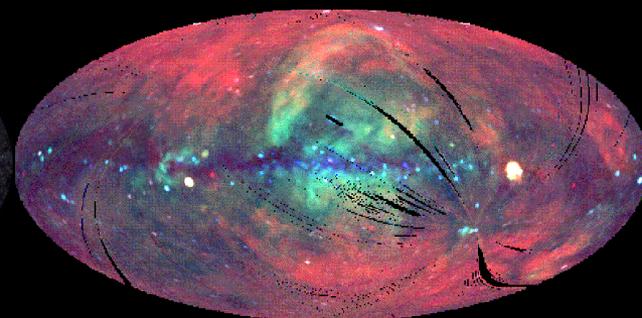
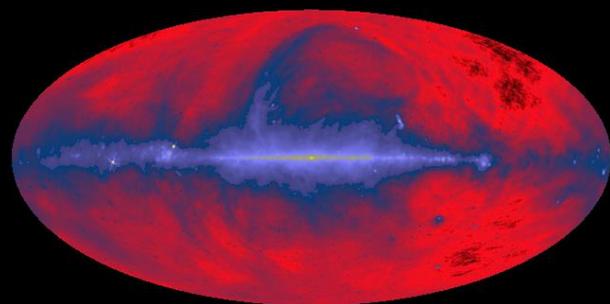


NAOJ, WL 13 Apr 2018, 05:58:27UT

X線



Roost/ART E.golf
2012-03-16T02:10:13.459



より高いエネルギーでは？

可視光

1eV

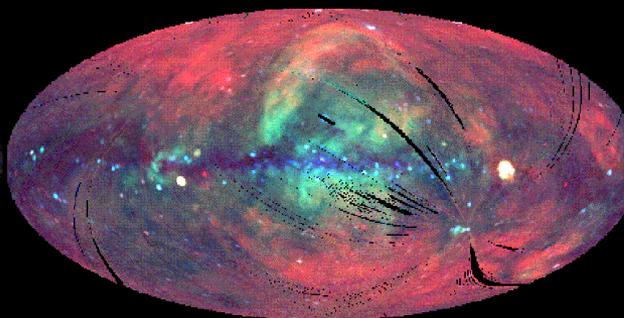
The Deep Sky



© 2000, Axel Mellinger

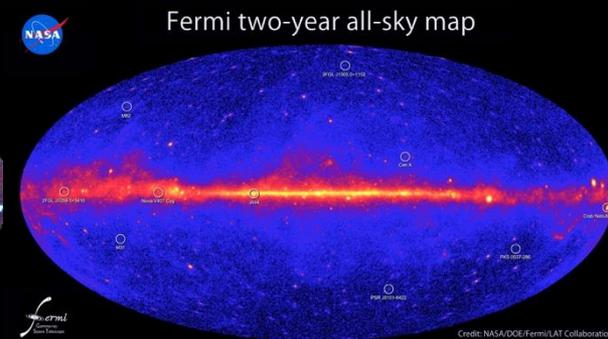
X線

$10^3\text{eV}=1\text{keV}$



ガンマ線

$10^6\text{eV}=1\text{MeV}$

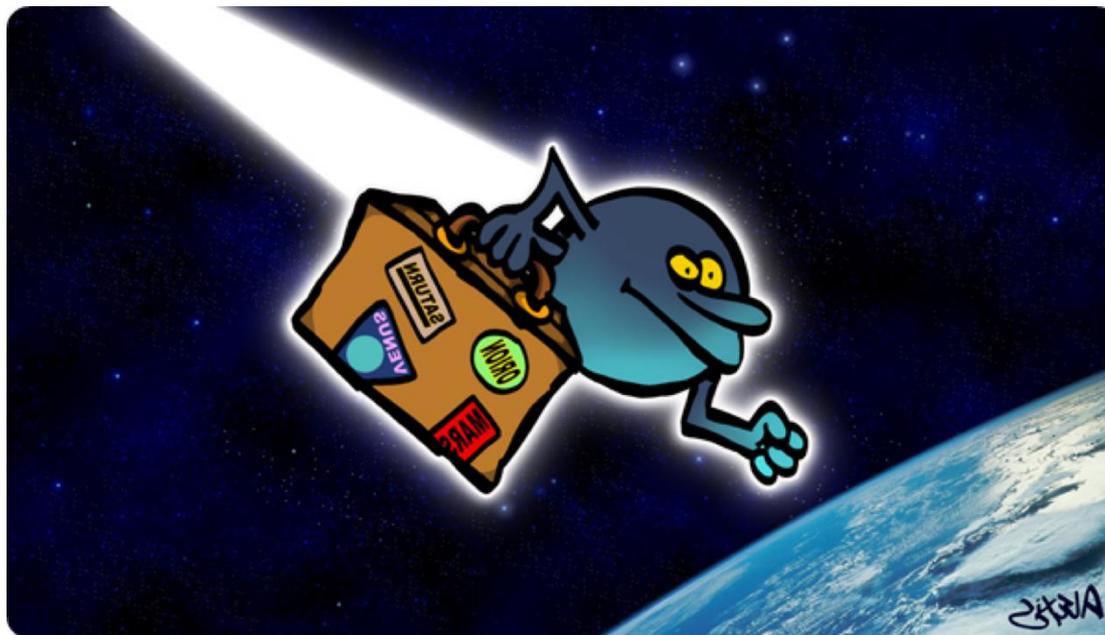


Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

どこで、何が、どれだけ高いエネルギーまで？
→ 宇宙における最高エネルギー現象

宇宙線

宇宙で最も高エネルギーのものは「宇宙線」



光（光子）ではなく、
原子核（主に水素の原子核＝陽子）

宇宙線の最高エネルギー

観測史上最高エネルギーは



3×10^{20} eV
(= 可視光より20桁も大きい)

最高エネルギー宇宙線研究で解明したいこと

- **大きなエネルギーはどこまで？**
- **その仕組み = 宇宙最大の
高エネルギー現象とは？**

①そのエネルギーは？

②どのくらいの到来頻度？



③どうやってつかまえる
(見る)？

④その発生源は？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②どのくらいの到来頻度？



最高エネルギー
宇宙線

③どうやってつかまえる
(見る)？

④その発生源は？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②どのくらいの到来頻度？

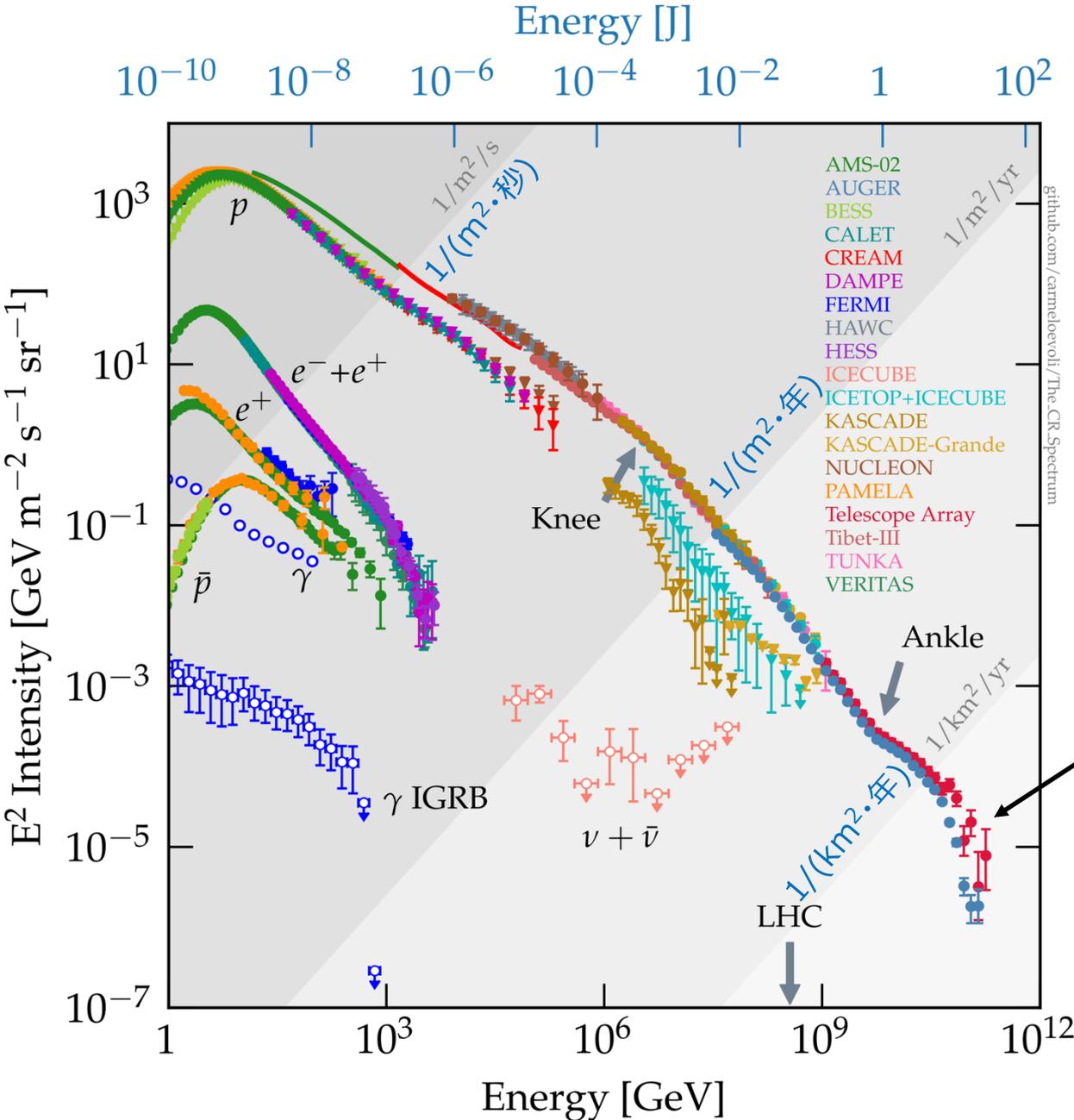


最高エネルギー
宇宙線

③どうやってつかまえる
(見る)？

④その発生源は？

宇宙線のエネルギースペクトル



1個 / (100 km² · 年)
@10²⁰ eV

どれくらいの頻度でやってくる？

3×10^{20} eV

=300,000,000,000,000,000,000,00 eV

という、とんでもない高エネルギー粒子

到来頻度は、1 km²に100年に1個

←とても少ない！

「天文学」をやろうと思ったら

せめて、1年に10個くらいは捕まえたい

→1,000 km²くらいの大きさの

「検出器」が必要

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②どのくらいの到来頻度？

1km²に100年に1個

天文学的研究のためには
1,000km² (～琵琶湖)
の広さの検出器が必要



③どうやってつかまえる
(見る)？

④その発生源は？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②どのくらいの到来頻度？

1km²に100年に1個

天文学的研究のためには
1,000km² (～琵琶湖)
の広さの検出器が必要



③どうやってつかまえる
(見る)？

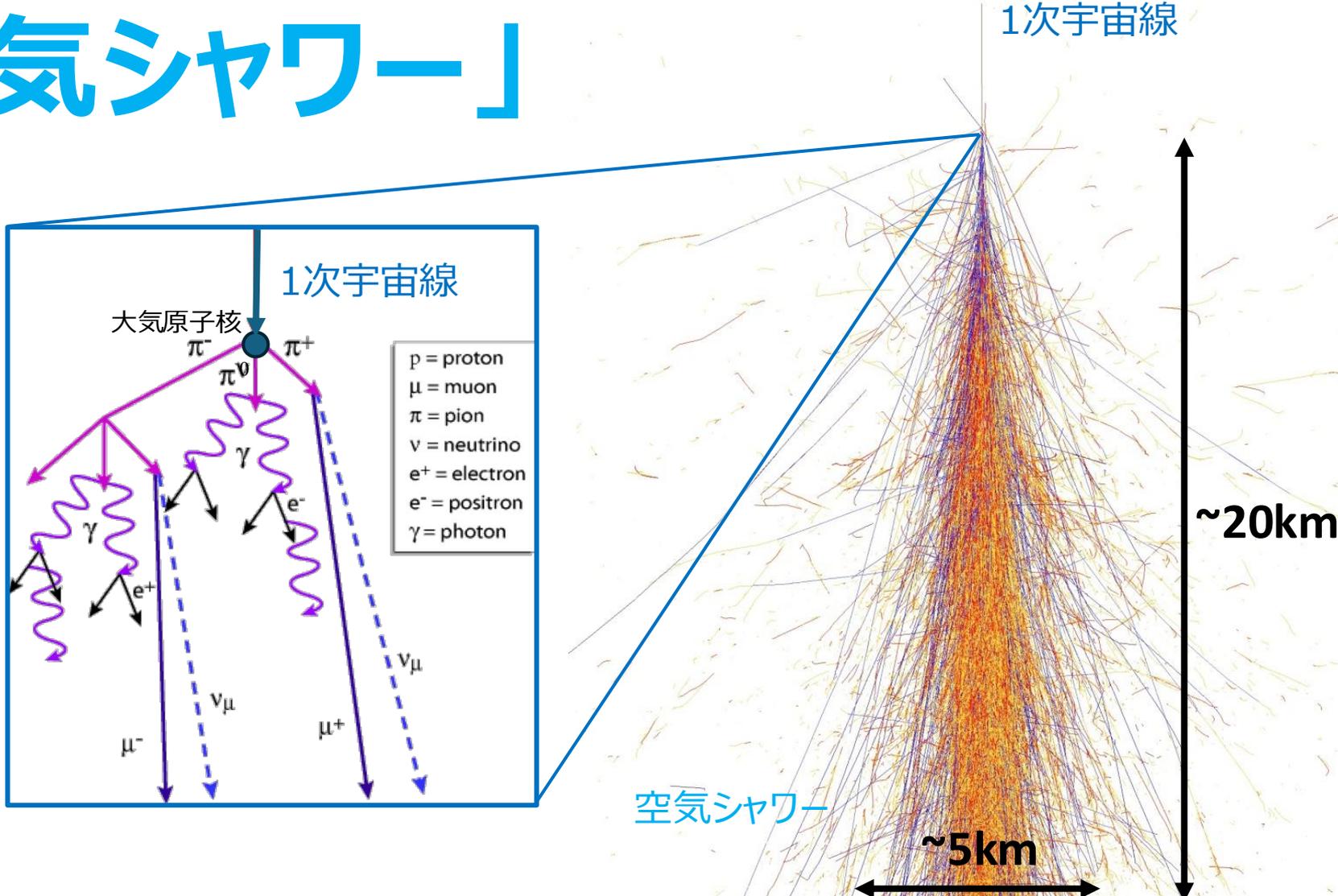
④その発生源は？

どうやってつかまえる（見る）？

1個の高エネルギー宇宙線 → 多数の放射線

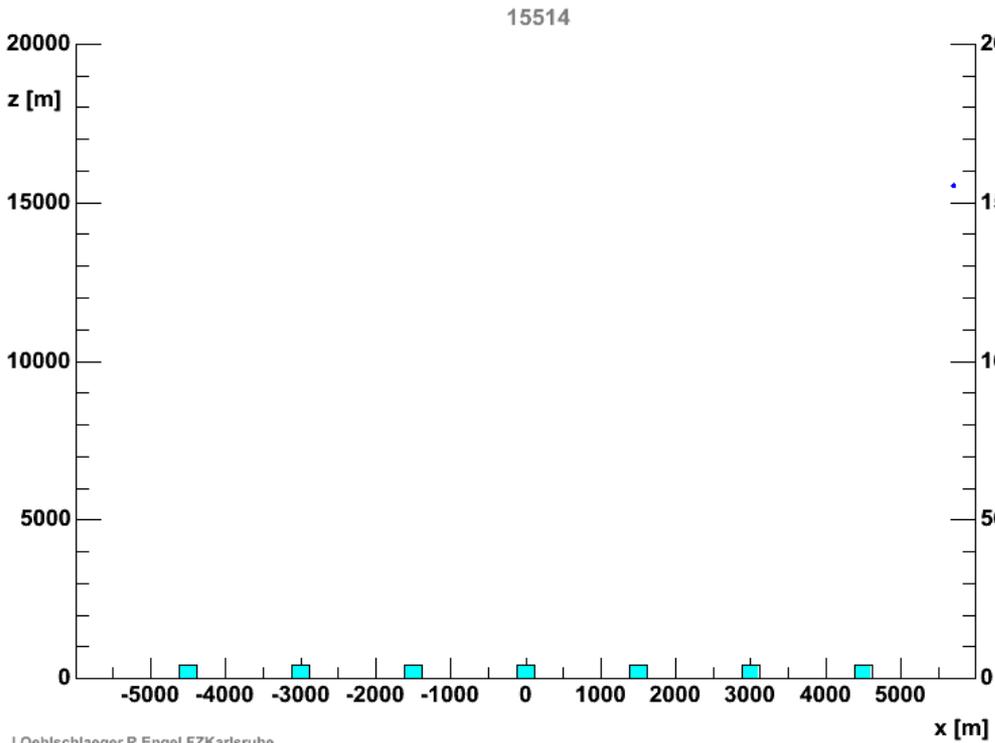
10^{20} eV → ~1千億個の粒子群

「空気シャワー」



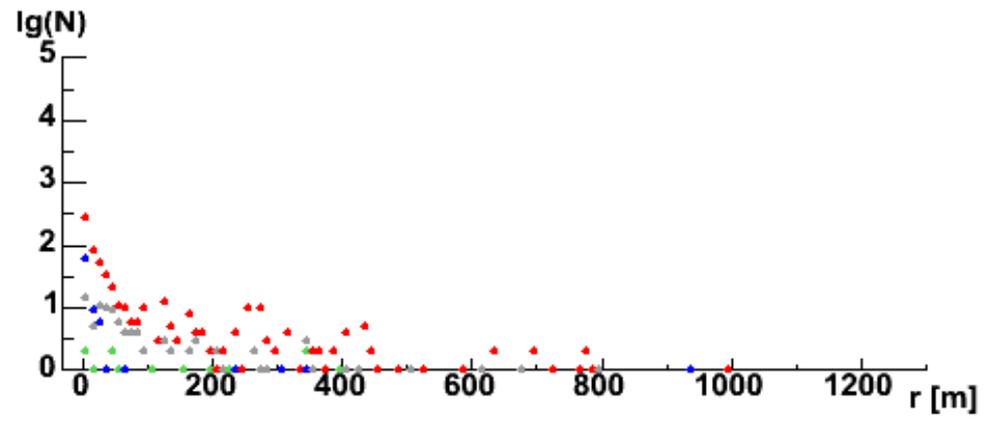
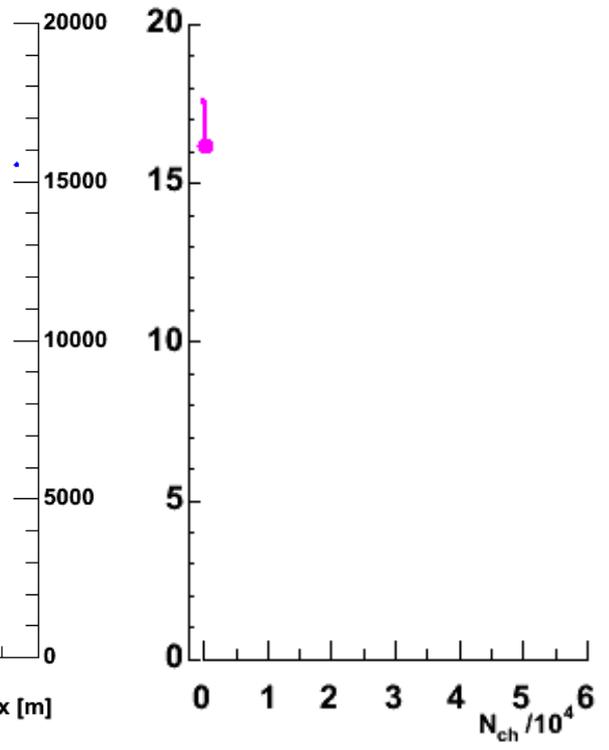
空気シャワーの発達

hadrons muons electrs neutrs



J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlruhe

z [km]



Proton 10^{14} eV

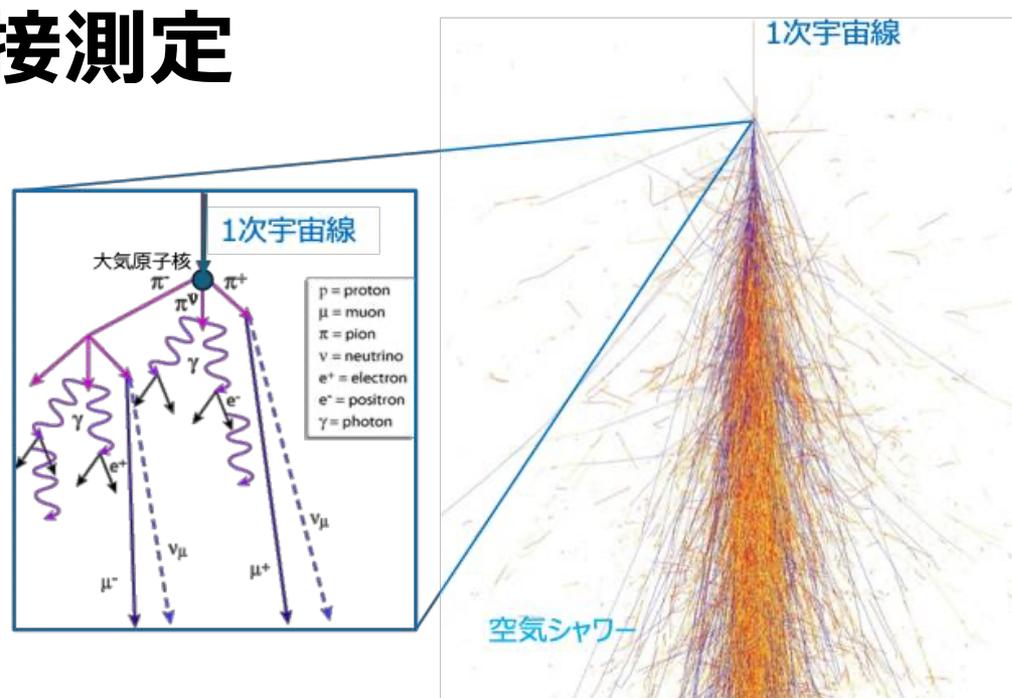
$h^{1st} = 17642$ m

hadrons muons

neutrons electrs

J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlruhe

空気シャワーの間接測定



直接測定では
検出器のサイズ = 検出面積

1次宇宙線

検出器

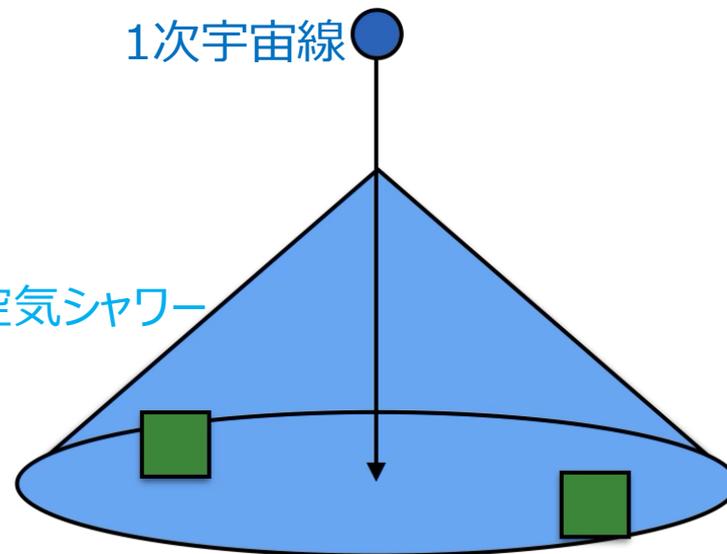


空気シャワーをサンプリングする「間接測定」では
検出器の展開範囲 = 検出面積

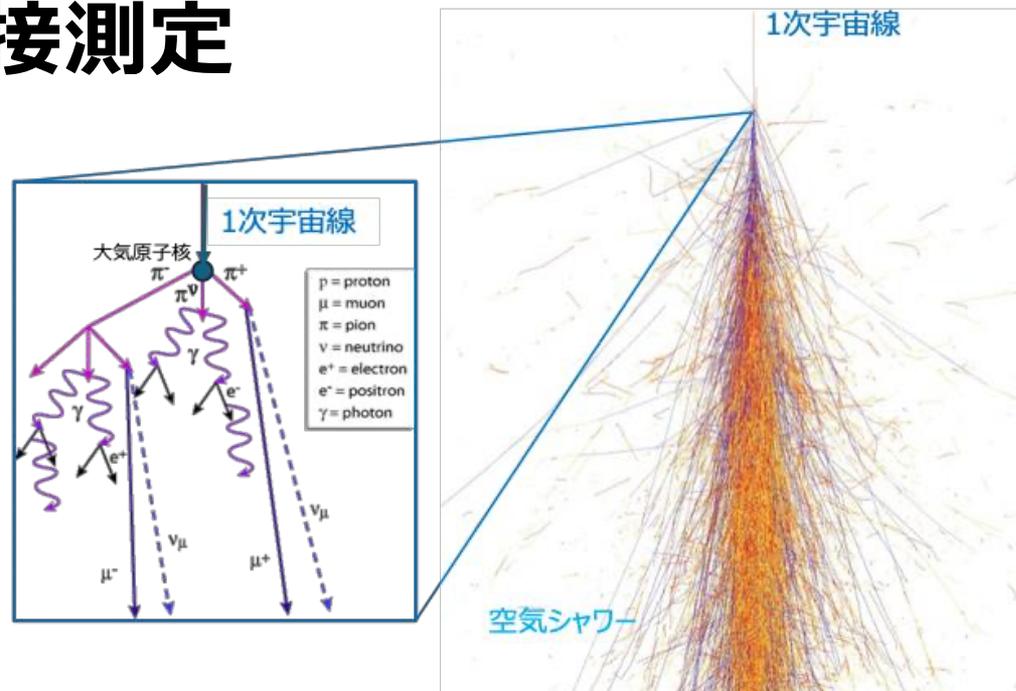
1次宇宙線

空気シャワー

検出器



空気シャワーの間接測定



直接測定では
検出器のサイズ = 検出面積

1次宇宙線

検出器

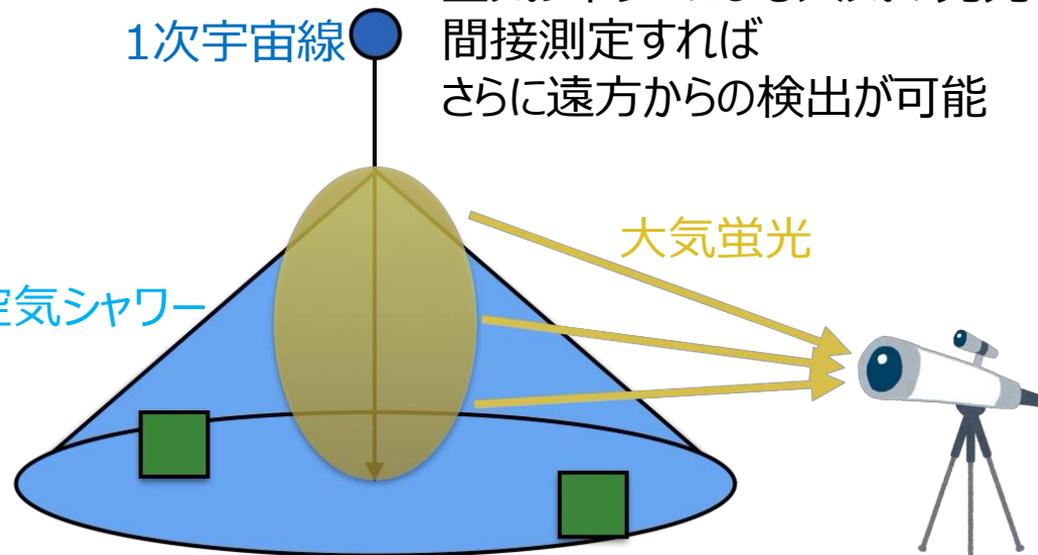


空気シャワーによる大気の発光を
間接測定すれば
さらに遠方からの検出が可能

1次宇宙線

空気シャワー

大気蛍光

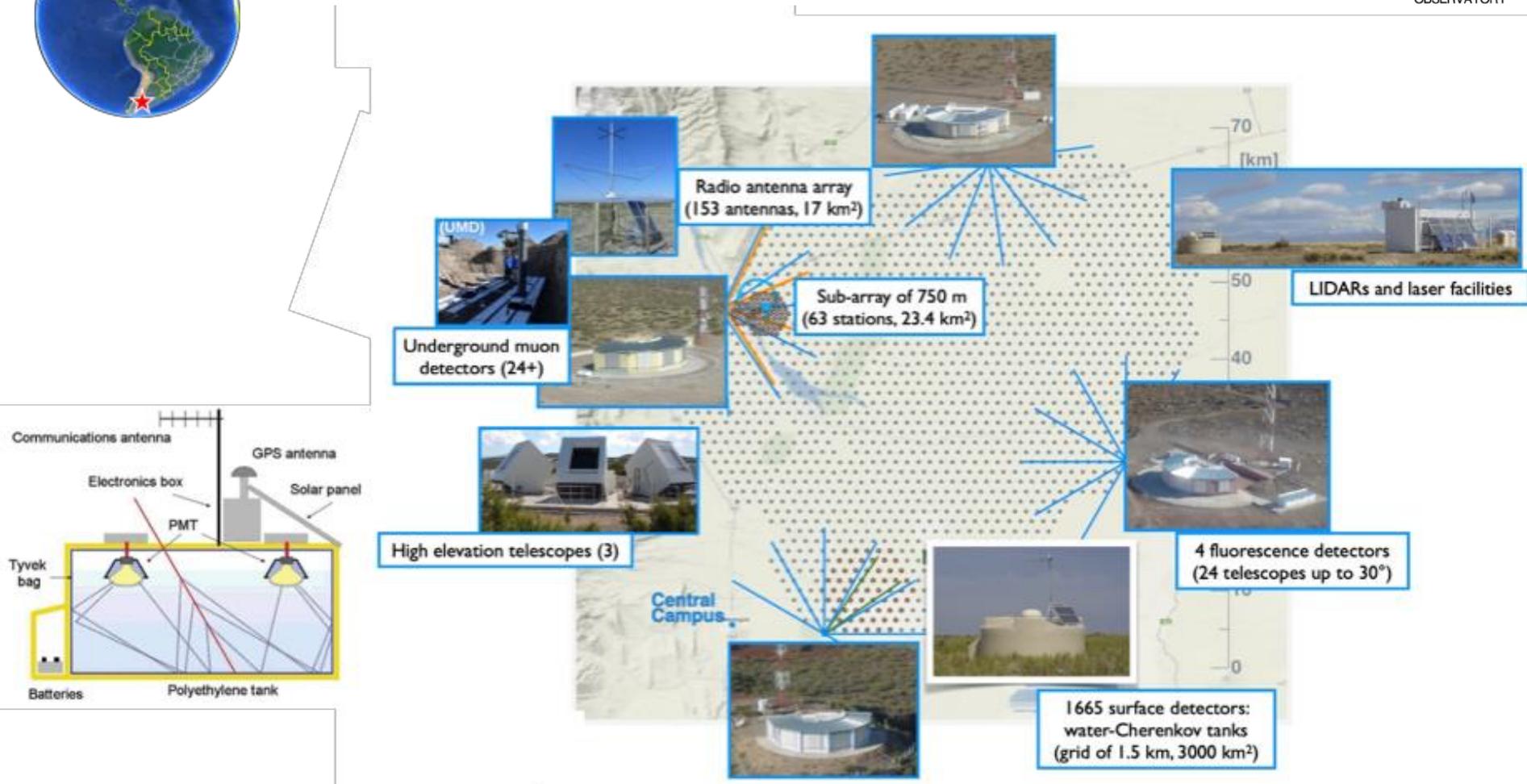


最高エネルギー宇宙線観測装置（南天）

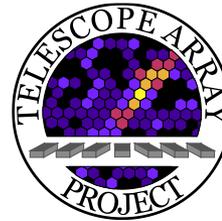
Pierre Auger Observatory (Auger実験, 2005年ー)



3000 km² = 1660台地表検出器 + 27台望遠鏡



最高エネルギー宇宙線観測装置 (北天)



Telescope Array (TA実験, 2008年一)



700 km² = 507台地表検出器 + 38台望遠鏡

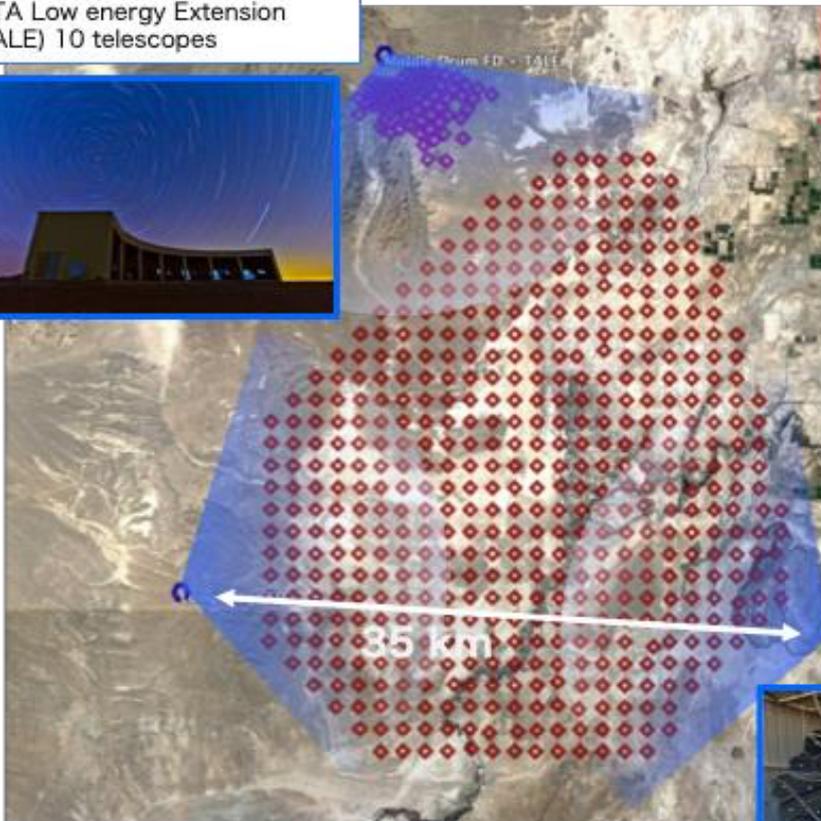
Fluorescence Detectors(FDs)
Middle Drum(MD) station
14 telescopes
+ TA Low energy Extension (TALE) 10 telescopes



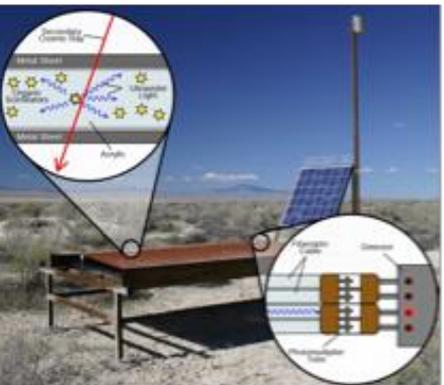
Surface Detector(SD) array
507 scintillation detectors
each 3m², 1.2 km spacing
total coverage ~ 700km²



現在1,700 km² に
拡張中 (TA×4計画)



FDs
Black Rock Mesa(BRM) station
12 telescopes



①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②どのくらいの到来頻度？

1km²に100年に1個

天文学的研究のためには
1,000km² (～琵琶湖)
の広さの検出器が必要



最高エネルギー
宇宙線

③どうやってつかまえる
(見る)？

空気シャワーをとらえる

④その発生源は？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②どのくらいの到来頻度？

1km²に100年に1個

天文学的研究のためには
1,000km² (～琵琶湖)
の広さの検出器が必要



最高エネルギー
宇宙線

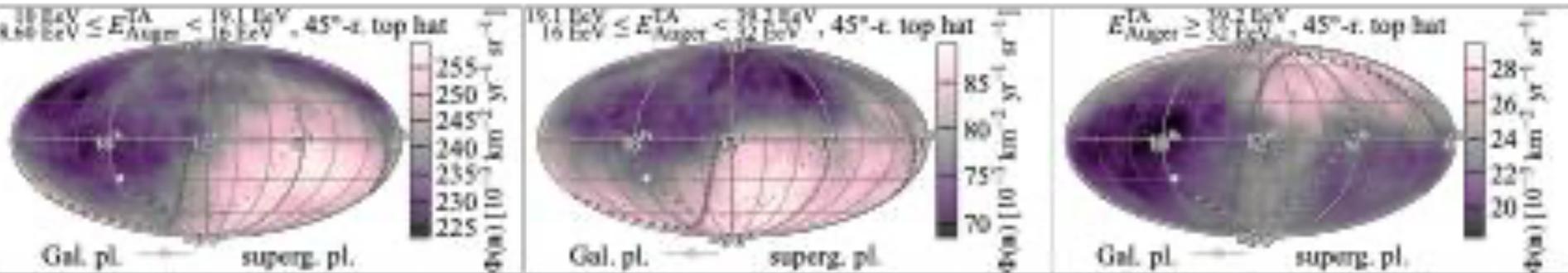
③どうやってつかまえる
(見る)？

空気シャワーをとらえる

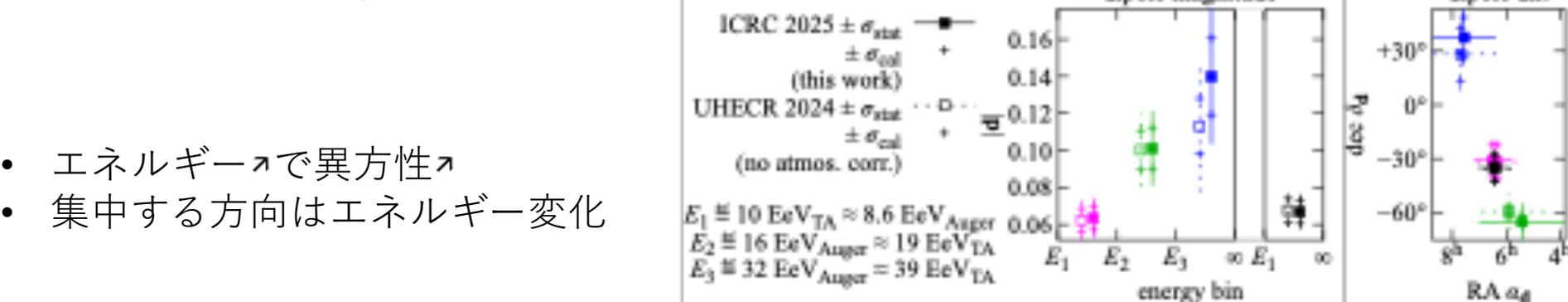
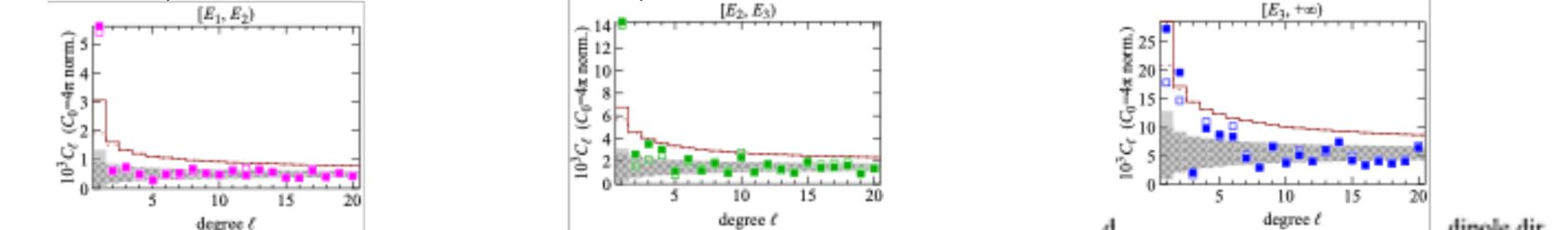
④その発生源は？

最高エネルギー宇宙線源は見つかったか？

TA：2008年5月11日から16年分、Auger：2004年1月1日から18年分のデータ



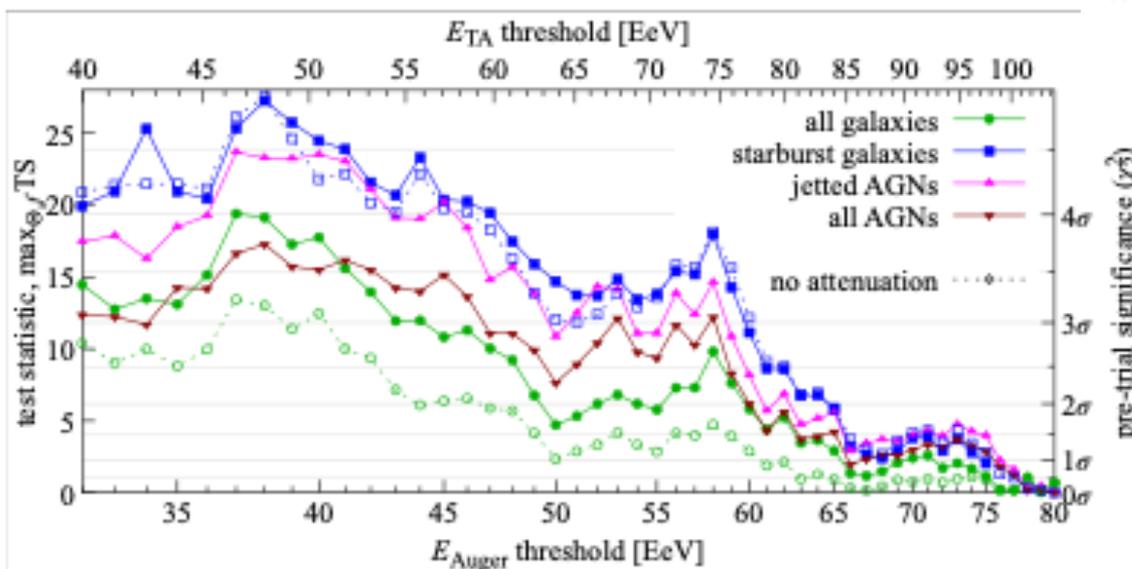
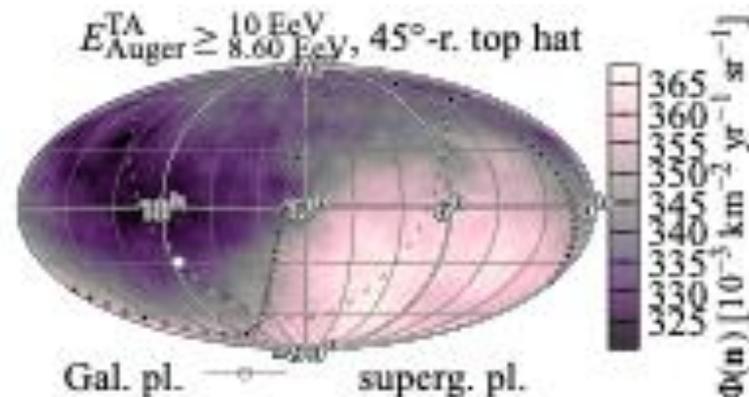
	10 - 19.1 EeV	19.1 - 39.2 EeV	39.2 EeV 以上
Auger:	30,573	10,288	2,739
TA:	4,644	1,438	484



- エネルギー \rightarrow で異方性 \rightarrow
- 集中する方向はエネルギー変化

最高エネルギー宇宙線源は見つかったか？

既知の天体の天球マップと
最高エネルギー宇宙線の到来方向マップに
相関があるか？

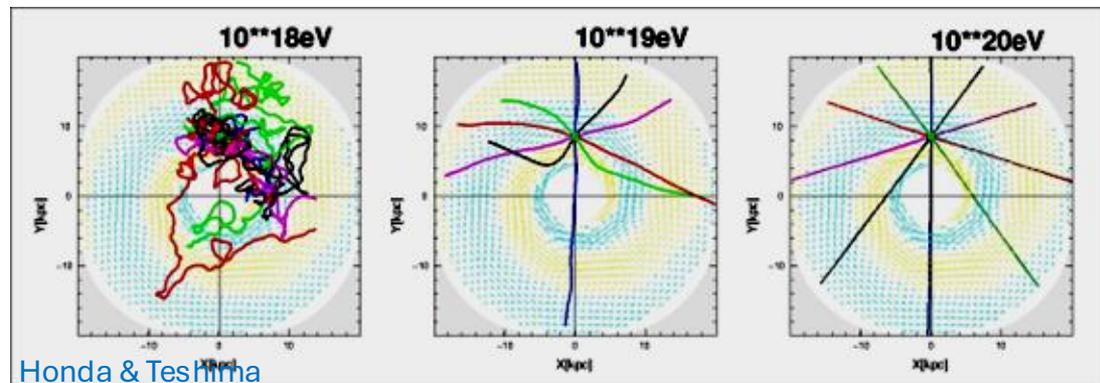
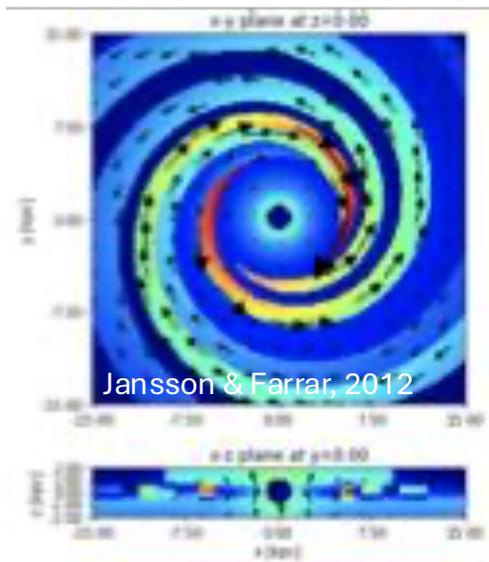


	E_{\min}	TS	$f/\%$	$\Theta/^\circ$	post-trial
All galaxies	$37 \text{ EeV}_{\text{Auger}} \approx 47 \text{ EeV}_{\text{TA}}$	19.3	$13.1^{+4.7}_{-3.6}$	$15.5^{+6.1}_{-3.6}$	3.4σ
Starburst galaxies	$38 \text{ EeV}_{\text{Auger}} \approx 48 \text{ EeV}_{\text{TA}}$	27.3	$10.6^{+56.6}_{-3.2}$	$17.6^{+26.6}_{-4.1}$	4.2σ
All AGNs	$38 \text{ EeV}_{\text{Auger}} \approx 48 \text{ EeV}_{\text{TA}}$	17.6	$4.8^{+1.6}_{-1.4}$	$15.4^{+3.5}_{-2.8}$	3.3σ
Jetted AGNs	$37 \text{ EeV}_{\text{Auger}} \approx 47 \text{ EeV}_{\text{TA}}$	22.9	$8.8^{+2.6}_{-2.3}$	$17.4^{+3.4}_{-2.8}$	3.8σ
All gal. (no atten.)	$37 \text{ EeV}_{\text{Auger}} \approx 47 \text{ EeV}_{\text{TA}}$	13.5	$33.6^{+26.3}_{-19.4}$	$29.2^{+12.9}_{-17.5}$	2.8σ
Starburst gal. (no atten.)	$38 \text{ EeV}_{\text{Auger}} \approx 48 \text{ EeV}_{\text{TA}}$	27.3	$10.6^{+4.0}_{-2.7}$	$15.0^{+4.8}_{-2.9}$	4.2σ

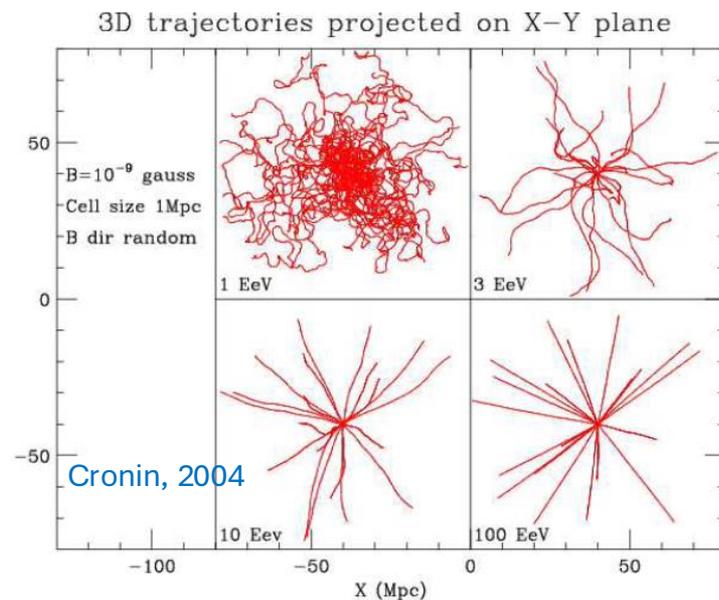
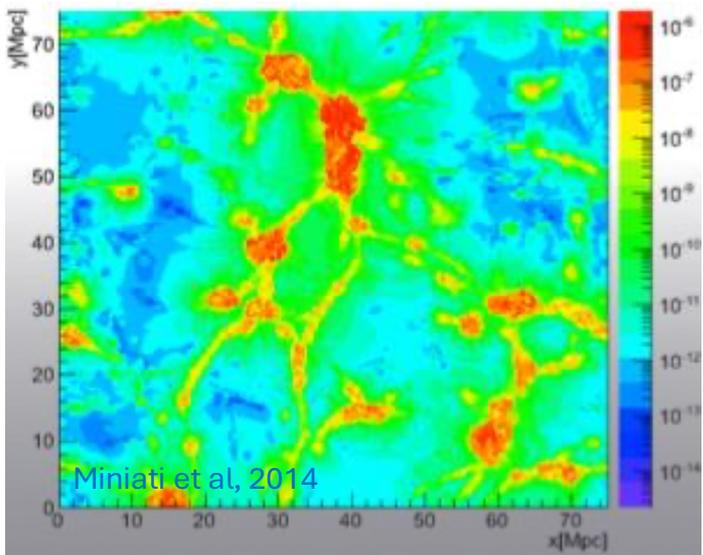
ありそう！
しかし「この天体」と
同定されたわけではない

宇宙線は真っ直ぐ飛べない

銀河磁場による偏向



銀河間磁場による散乱



宇宙線は真っ直ぐ飛べない

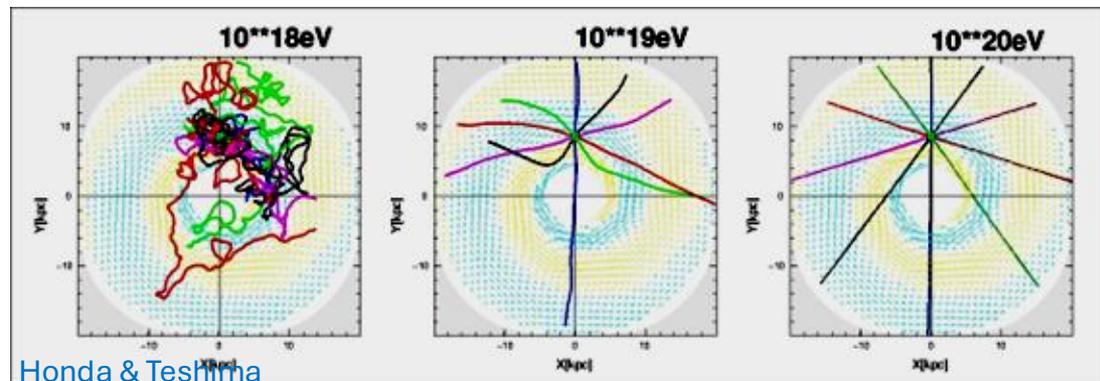
銀河磁場による偏向

$$\theta_{\text{GMF}} \lesssim 10^\circ Z \left(\frac{40 \text{ EeV}}{E} \right)$$

E=100 EeVに対して

陽子 $Z = 1 : \theta_{\text{GMF}} \lesssim 4^\circ$

鉄原子核 $Z = 26 : \theta_{\text{GMF}} \lesssim 104^\circ$



銀河間磁場による散乱

$$\theta_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{D l_c} Z (B / 1 \text{ nG})}{1.08 \text{ Mpc} (E / 1 \text{ EeV})}$$

E=100 EeV、B=0.1 nGに対して

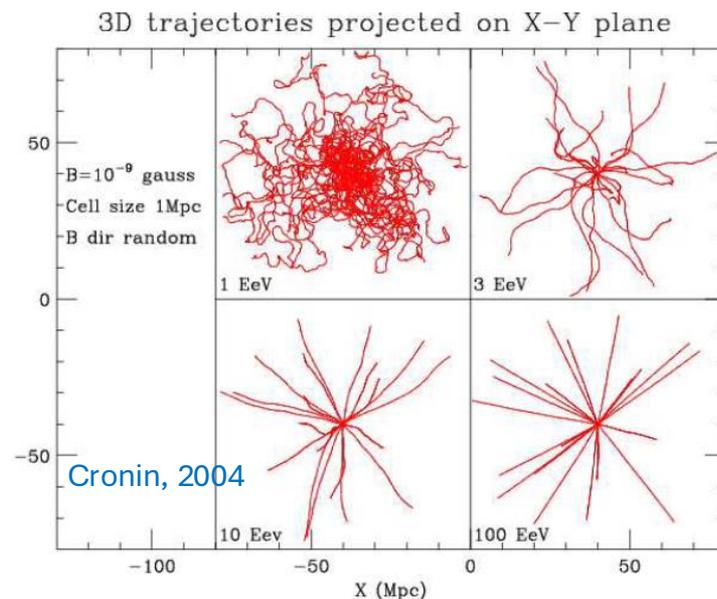
陽子 $D = 10 \text{ Mpc} : \theta_{\text{rms}} = 0.17^\circ$

$D = 100 \text{ Mpc} : \theta_{\text{rms}} = 0.53^\circ$

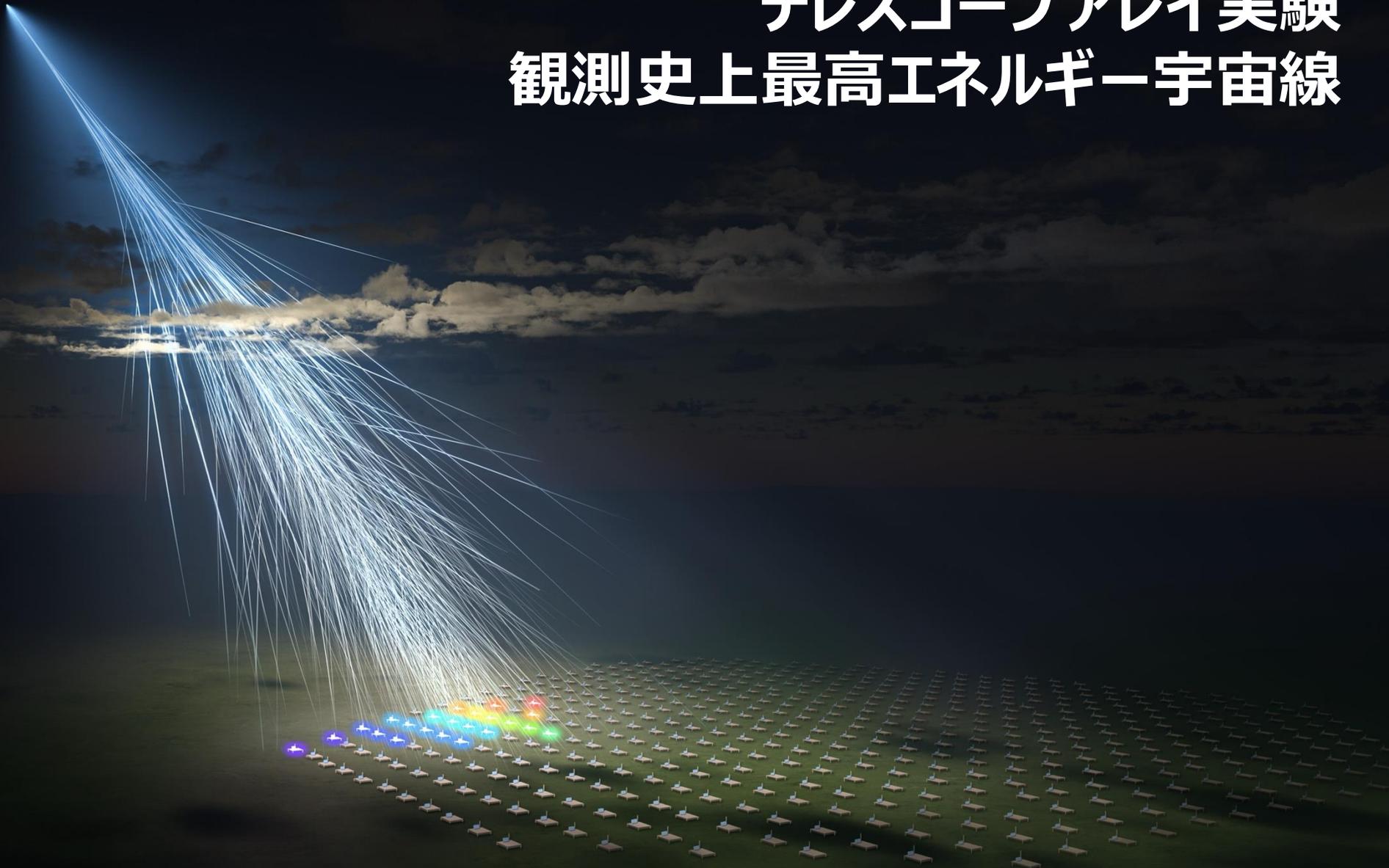
鉄原子核

$D = 10 \text{ Mpc} : \theta_{\text{rms}} = 4.36^\circ$

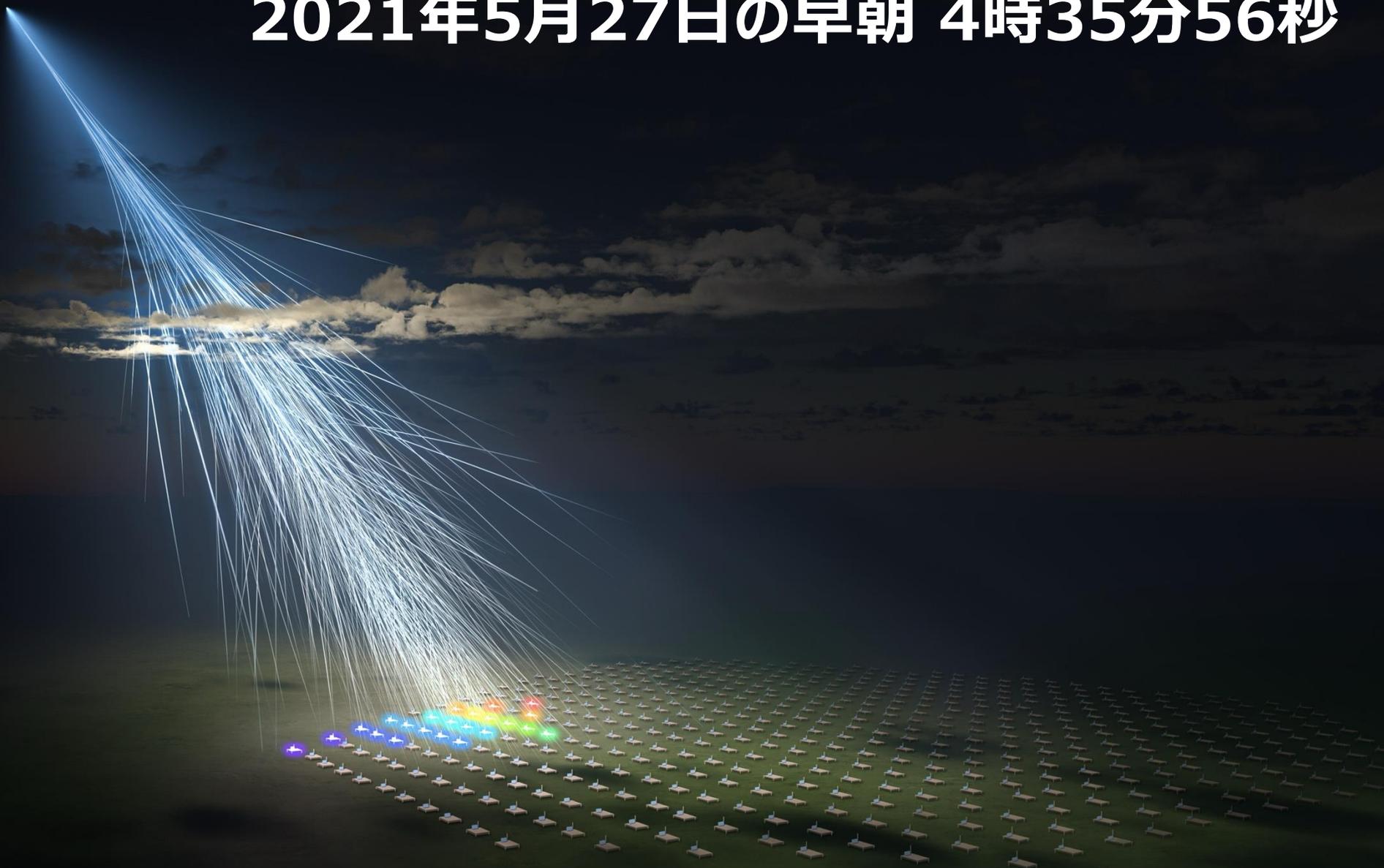
$D = 100 \text{ Mpc} : \theta_{\text{rms}} = 13.79^\circ$



テレスコープアレイ実験 観測史上最高エネルギー宇宙線



2021年5月27日の早朝 4時35分56秒

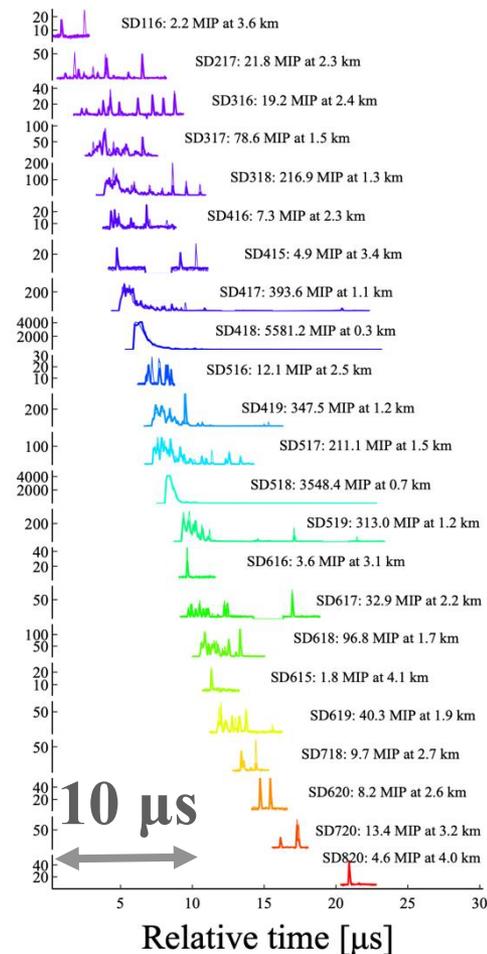
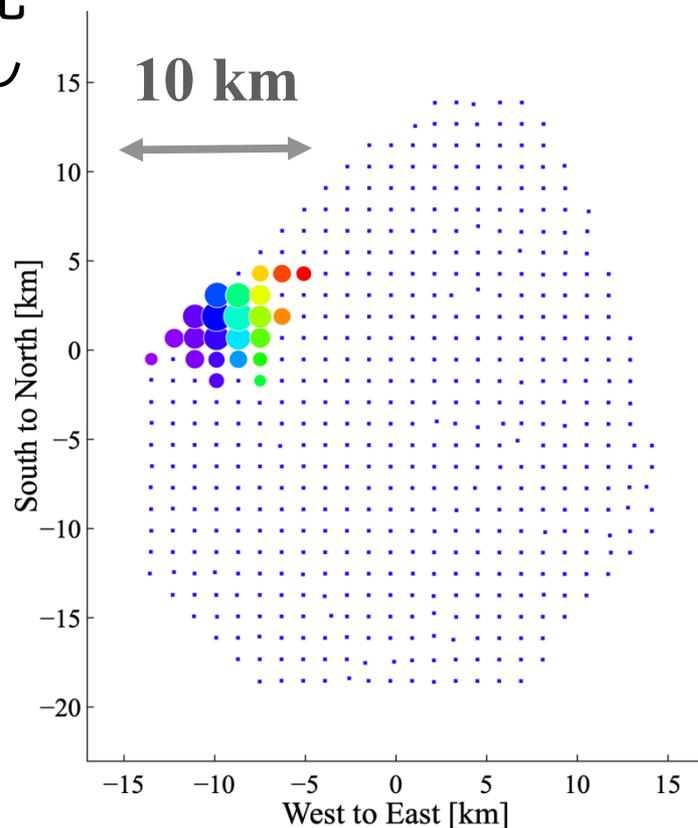


2021年5月27日に観測された宇宙線

2.44×10^{20} eV

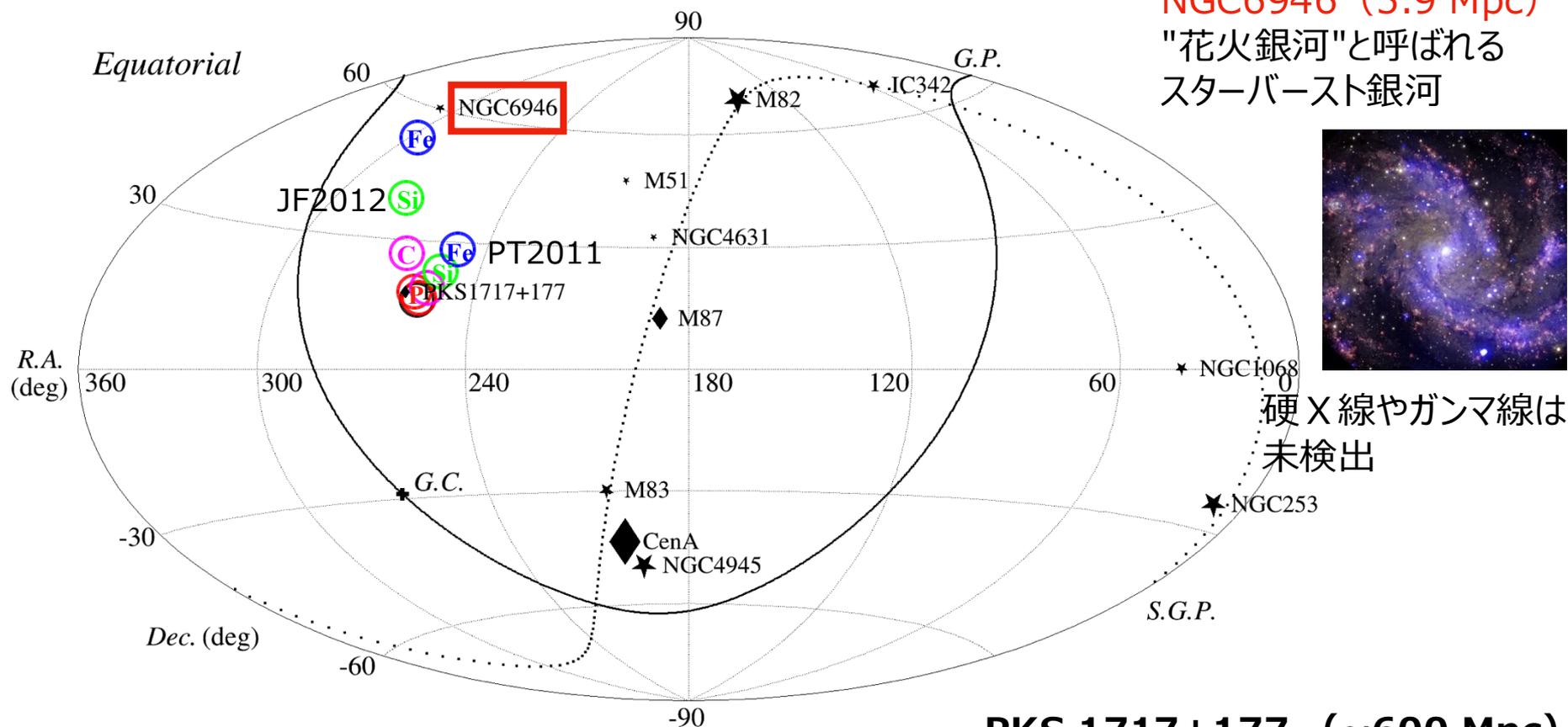
早朝だったため大気蛍光
望遠鏡による観測はなし

Surface detector array of TA



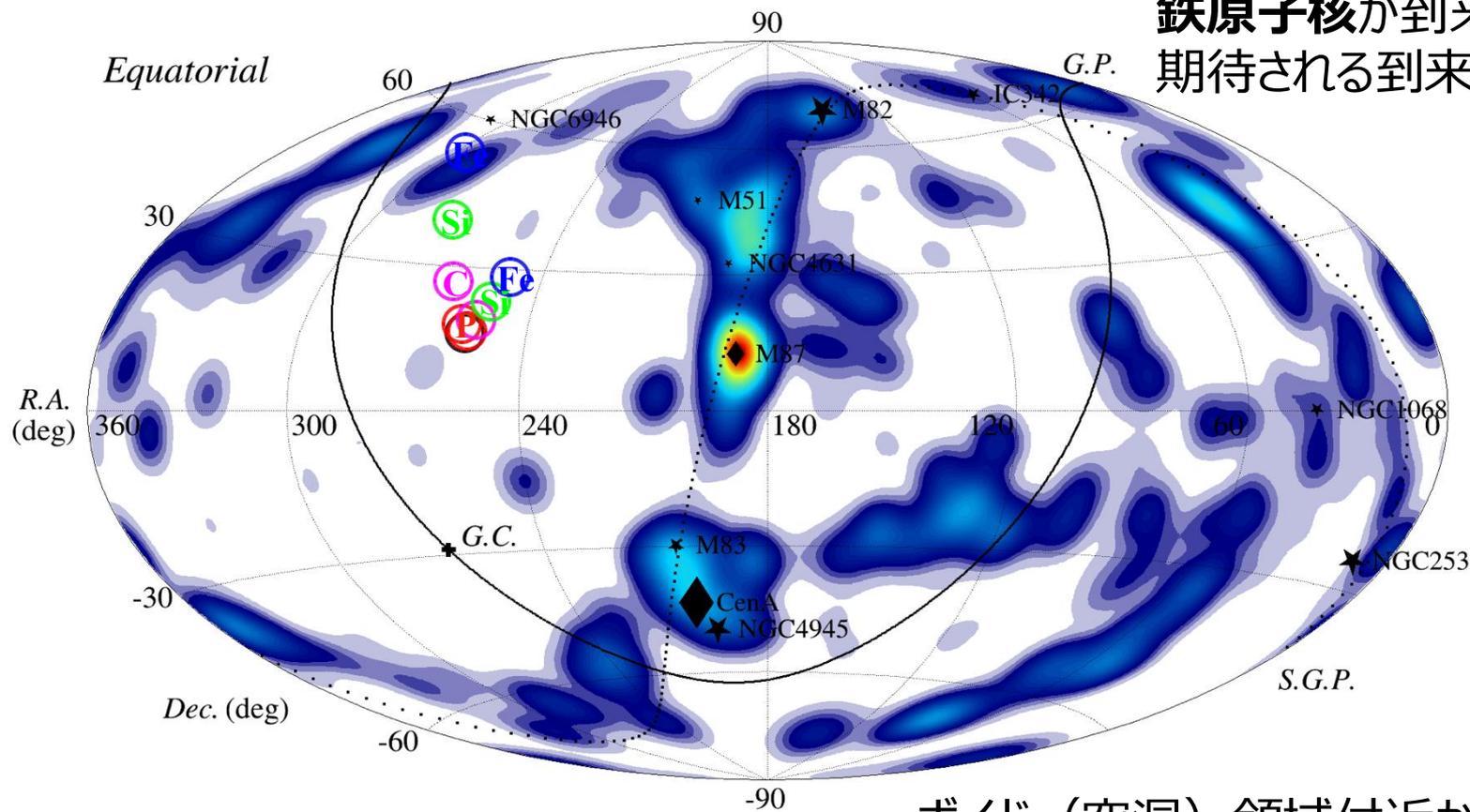
2008年5月から2021年11月の13.5年の
TAの観測運用の中で最もエネルギーの高い宇宙線

どの方向から？ 起源の候補は？



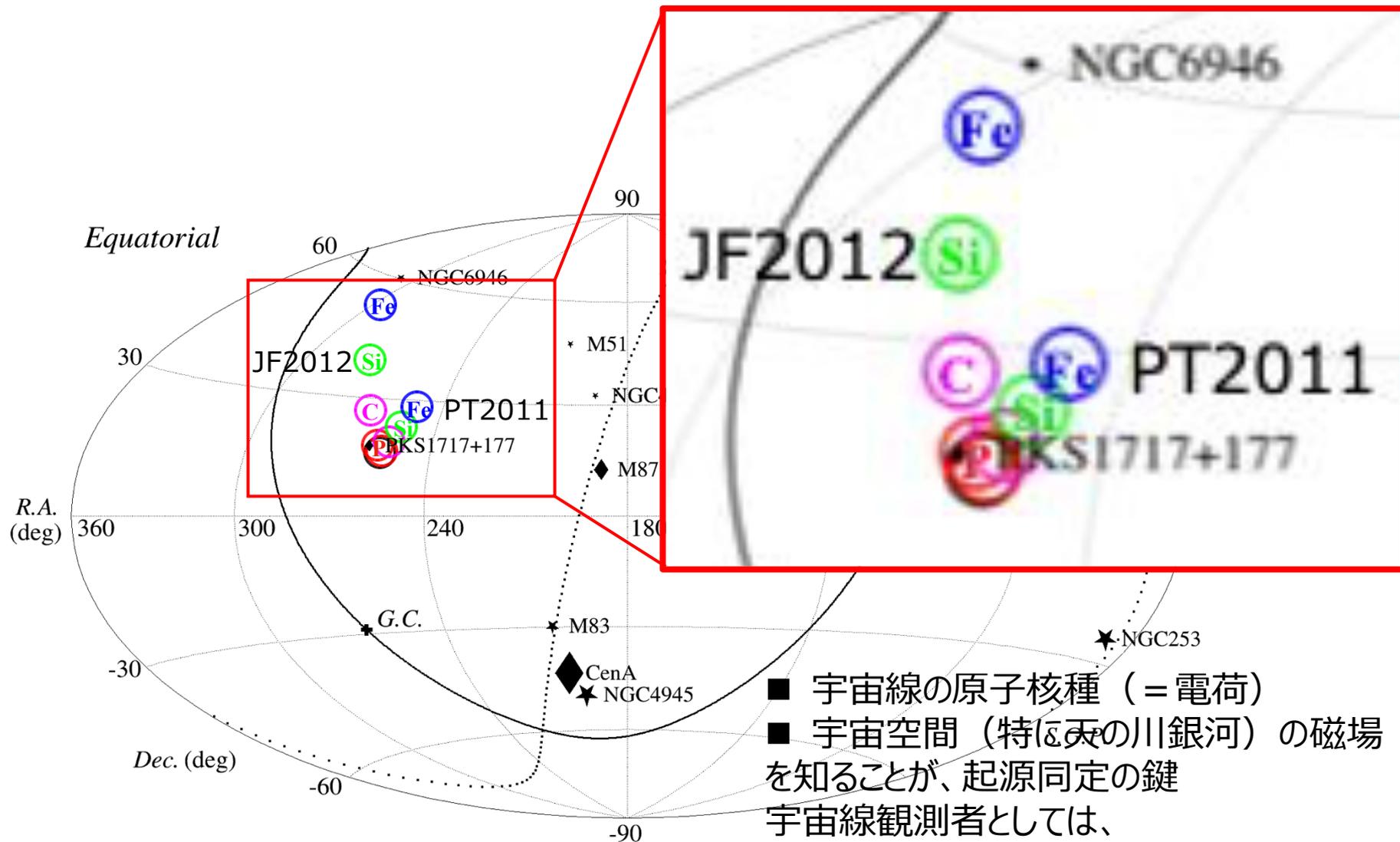
近く天体の分布から期待される確率と比べても…

近傍天体から**244 EeVの鉄原子核**が到来した場合に期待される到来方向分布



ボイド（空洞）領域付近から到来
→ **天体起源では可能性が低い方向**

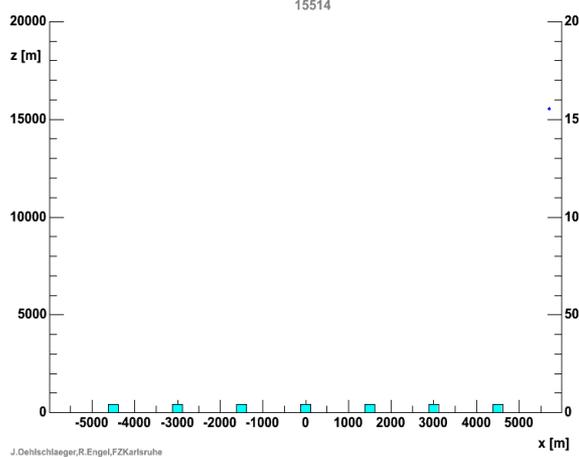
一次原子核種決定の重要性



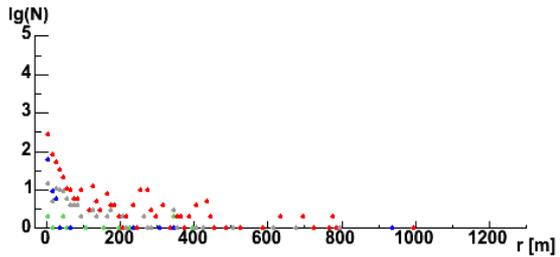
- 宇宙線の原子核種 (= 電荷)
 - 宇宙空間 (特に天の川銀河) の磁場を知ることが、起源同定の鍵
- 宇宙線観測者としては、とにかく原子核種を知ること!

一次原子核種←シャワー発達 (従来法)

hadrons muons electrs neutrs



J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe



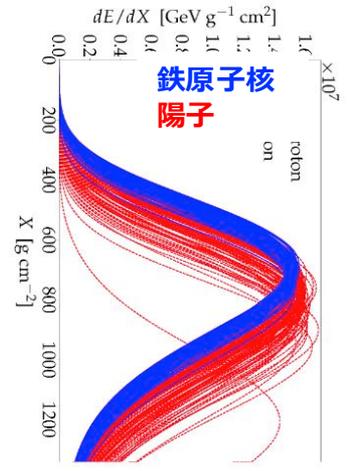
Proton 10^{14} eV

$h^{1st} = 17642$ m

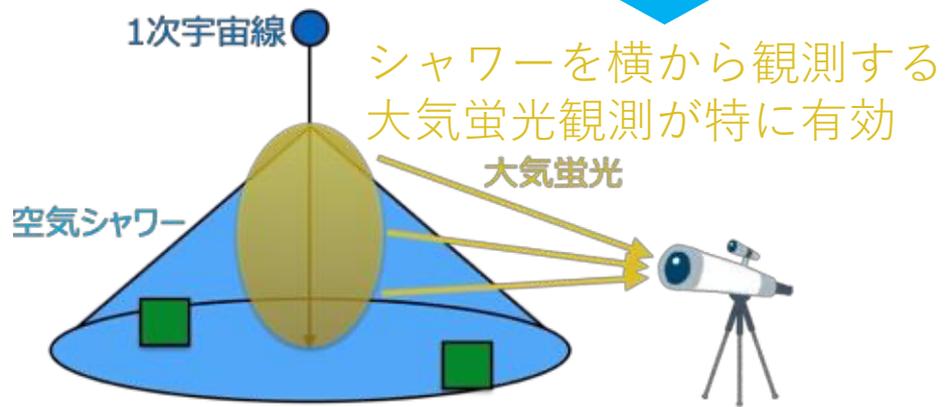
hadrons muons

neutrons electrs

J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe



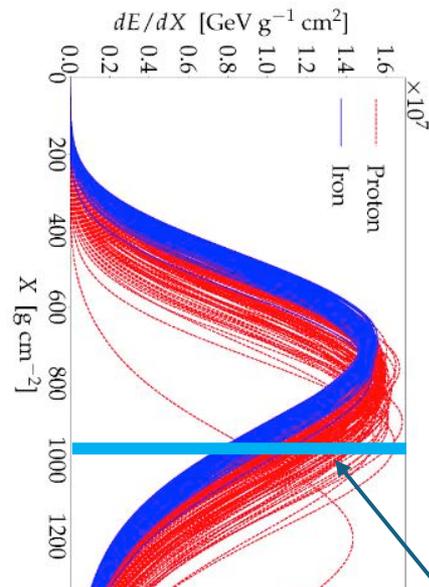
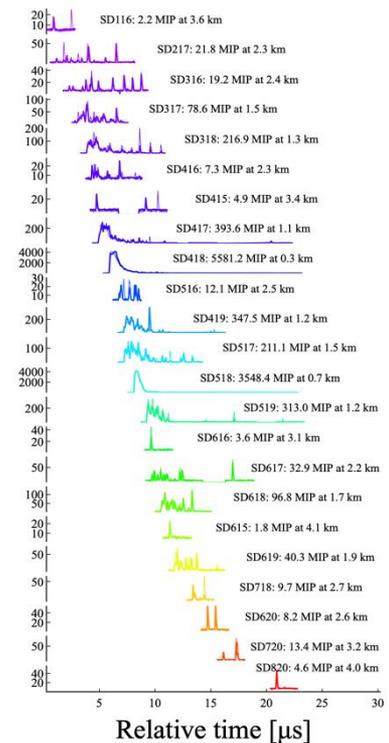
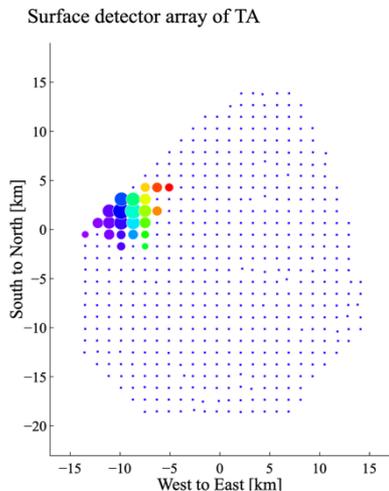
シャワー粒子の増減の様子
特に「最大発達深さ」が
原子核種を反映



しかし、望遠鏡による観測は
「暗い晴れた夜」のみに限られる
→ 観測統計量は地表アレイの10分の1



一次原子核種 ← 地表アレイの観測データから

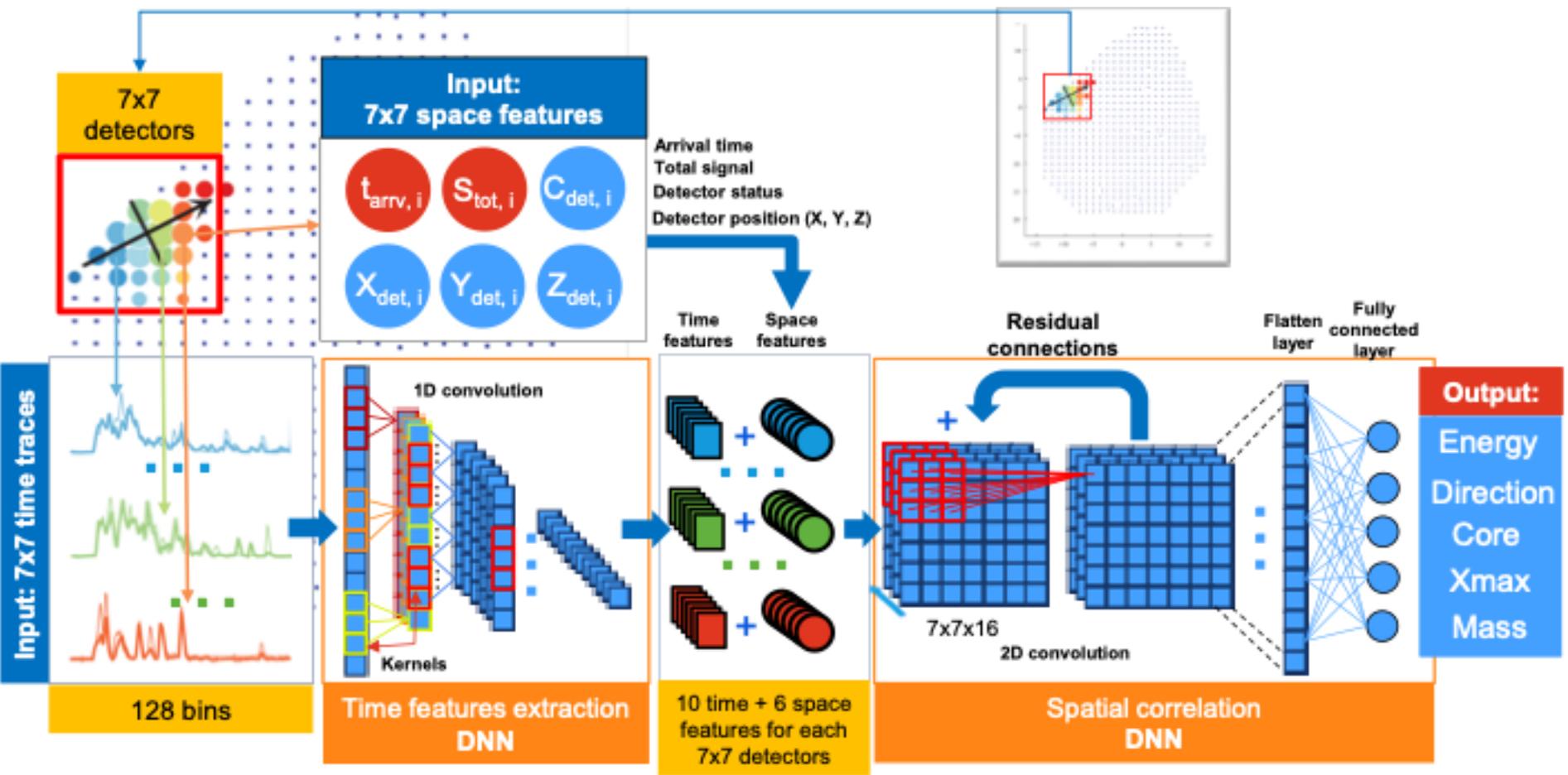


シャワー全体ではなく、
ある深さでの「断面」を
サンプリングすることに相当
(情報が「わかりにくい」)

このようなマップと
個々の検出器が記録した波形
(時間変化する画像！)
から一次宇宙線に関する情報を
取り出すことができないか？

近年発達してきた
深層機械学習による
データ解析手法を開発・
適用
観測統計量を過去にさか
のぼって10倍増！

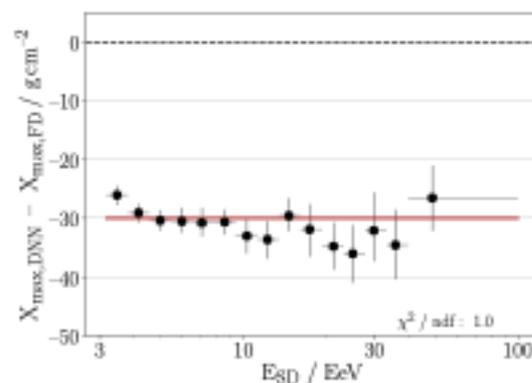
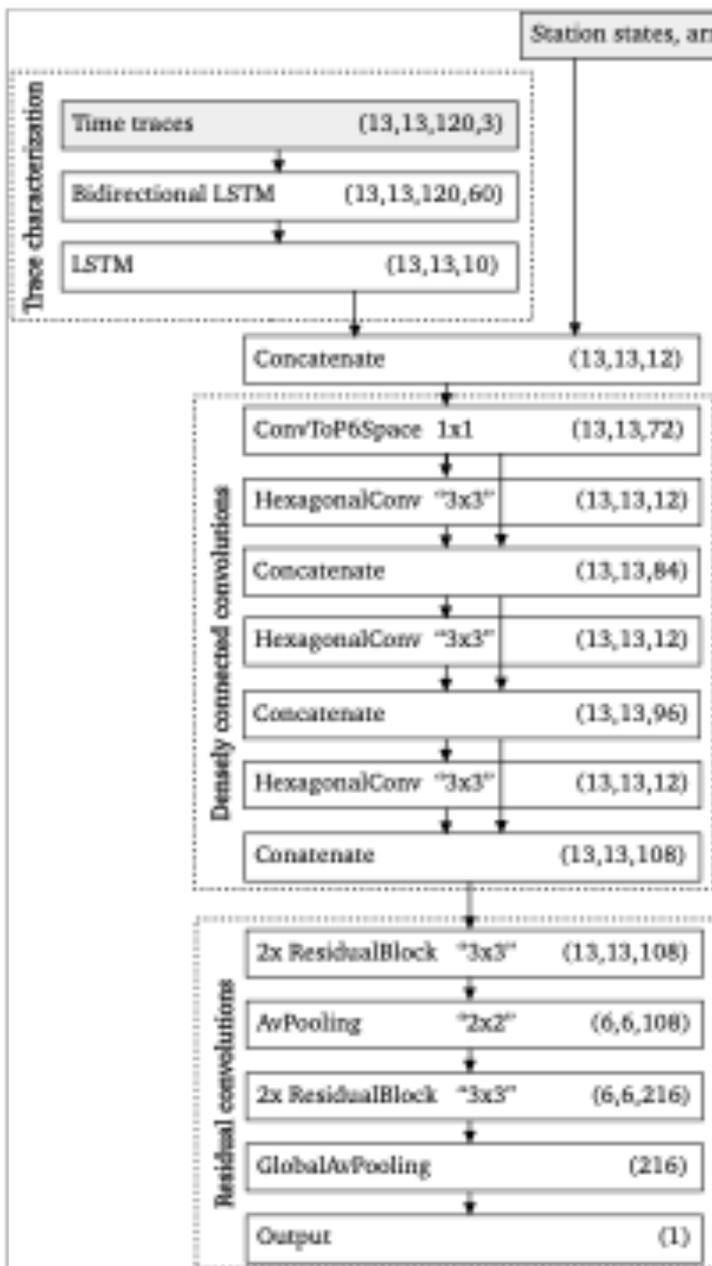
概念図：畳み込みニューラルネットによる解析



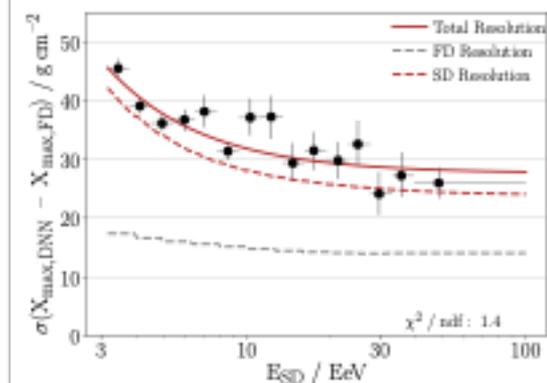
CNN : Auger実験による解析例

The Pierre Auger collaboration, JINST 16 P07019 (2021)
PRL. 134, 021001(2025)

大気蛍光法との、実データを使った性能評価

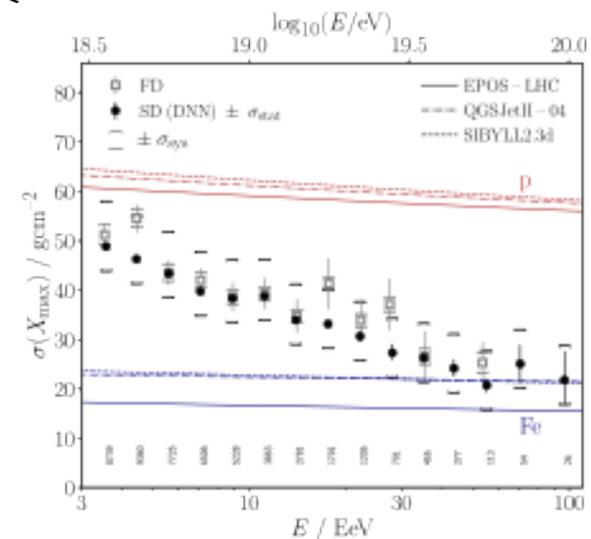
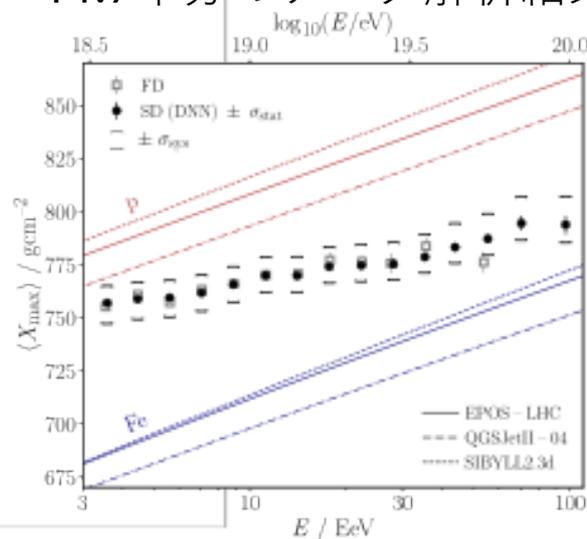


バイアス

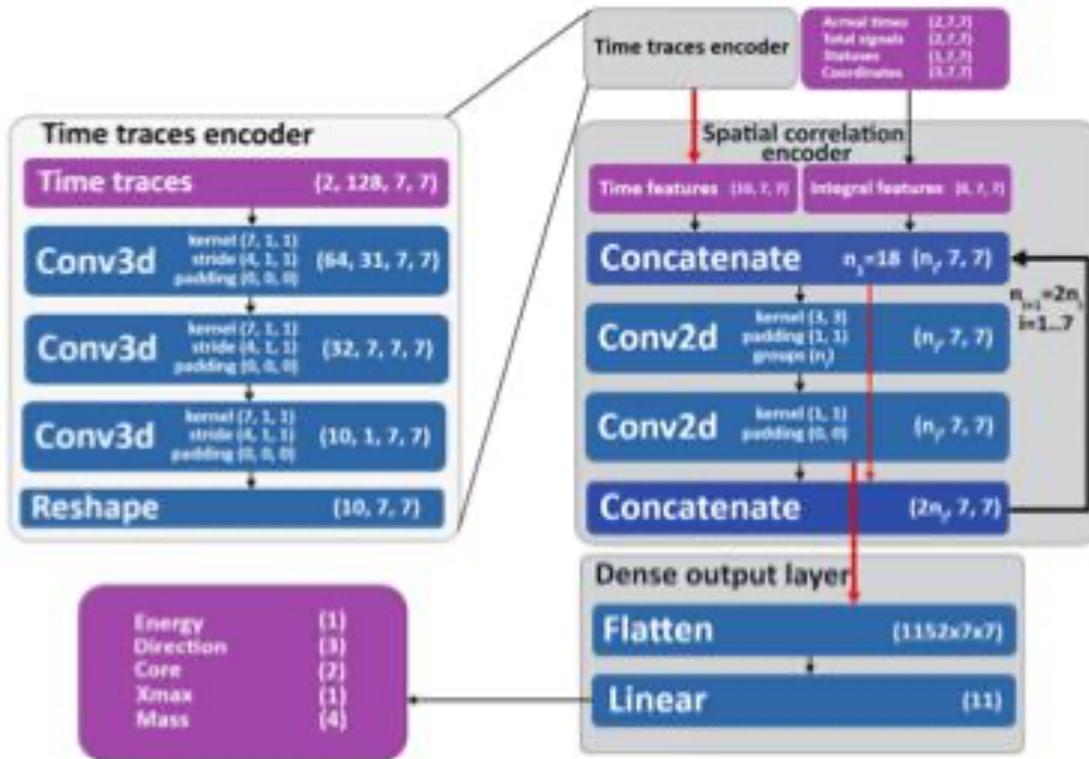


分解能

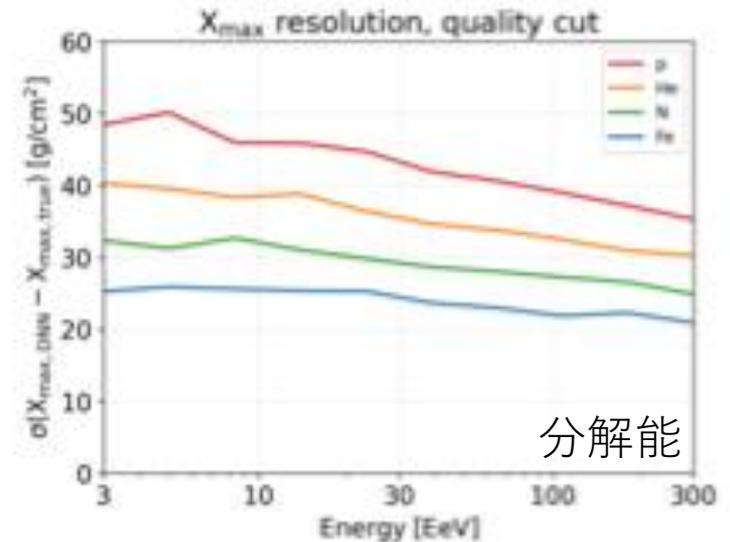
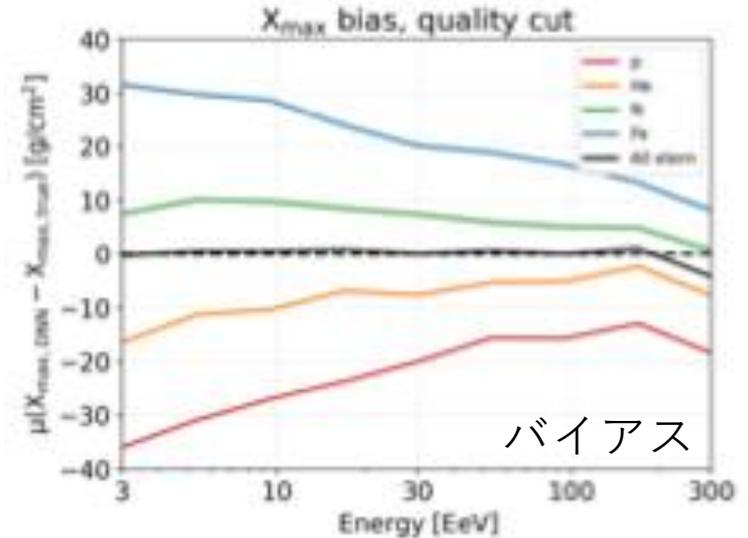
14.7年分のデータ解析結果



CNN : TA実験における開発例



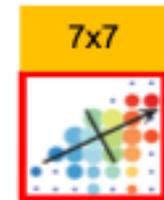
モンテカルロ計算による性能評価



CNNの限界：TA実験における開発例

Anton Prosekin, 2025

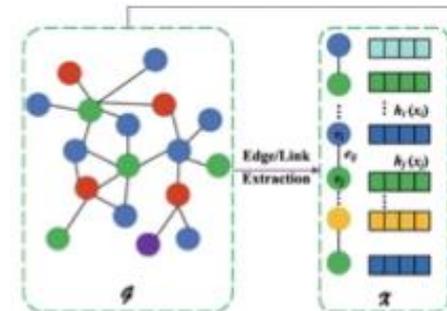
- **最大信号を記録した検出器を中心とする固定サイズの $n \times n$ (7×7) 格子を使用**
 - 格子の外にある検出器の情報は切り捨てられる
 - 規模が大きい・まばらである・非対称であるシャワーの広がりでは、情報の欠落が生じる
- **CNNは、事象ごとに検出器の数が異なる場合をそのまま扱うことができない**
 - 不足部分を埋める、または余分な部分を切り取る前処理が必要となる
- **最初の128ビン分の時間波形のみを使用**
 - 2～6区間に分かれた時間波形を持つ事象では、一部の情報が失われる
 - 長時間にわたる、または構造の複雑な波形は途中で切り捨てられる



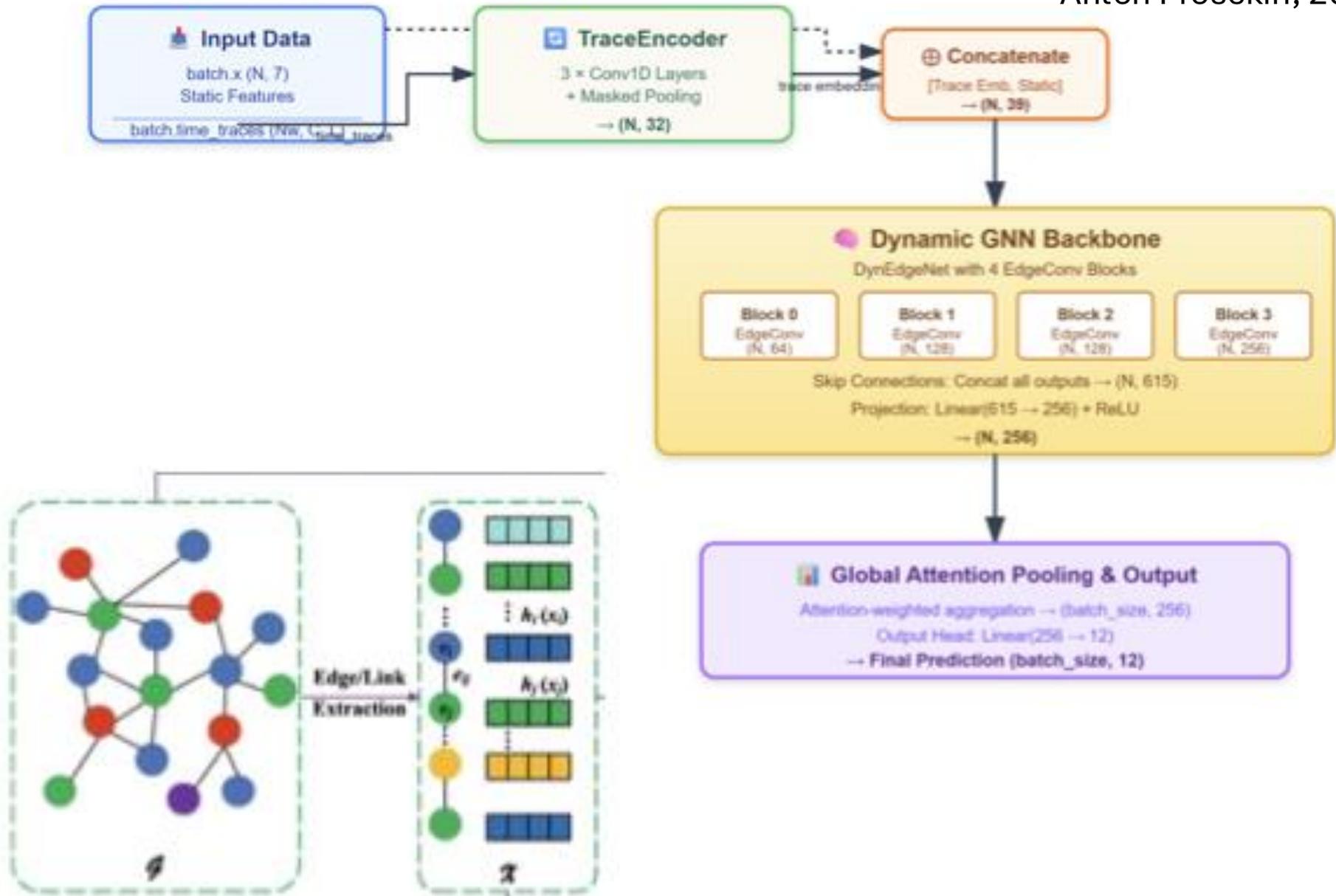
Graph NNの利用：TA実験における開発例

Anton Prosekin, 2025

- **事象に含まれるすべての検出器を利用し、固定的な格子選択を行わない**
 - シャワーの広がり全体をそのまま保持できる
 - 規模が大きい・まばらである・非対称である場合でも、情報の欠落が生じない
- **可変長の時間波形を扱える符号化器により、すべての時間区間を取り込む**
 - 波形の切り捨てがなく、時間方向の情報を完全に保持できる
 - マスク付き集約処理を用いることで、有効な時間区間のみを反映
 - 長さをそろえるための埋め合わせ処理に起因する偏りを生じさせず、異なる長さの波形に対応可能
- **EdgeConvにより、局所的かつ動的な構造をとらえる**
 - 初期段階では、実際の空間距離に基づいて近傍検出器を定義
 - 層を重ねるにつれて、信号の特徴量に基づいた近傍関係を学習し、受容領域が動的に更新される
 - 固定的・空間的な近傍に依らず、シャワーの形状や発達段階に応じた構造を表現可能
- **GlobalAttentionによる集約処理を導入**
 - 再構成にとって重要な検出器を、GlobalAttentionが自動的に学習
 - 事象全体の情報を、重要度に応じて適切に統合できる



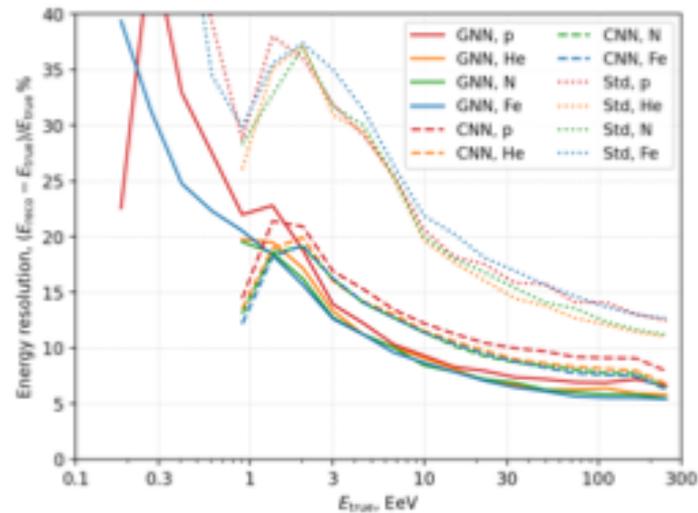
GNN architecture overview



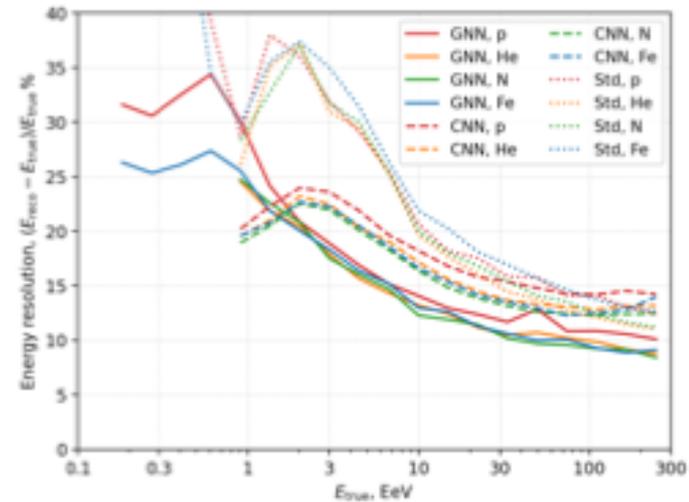
GNNによる解析：TA実験における開発例

Anton Prosekin, 2025

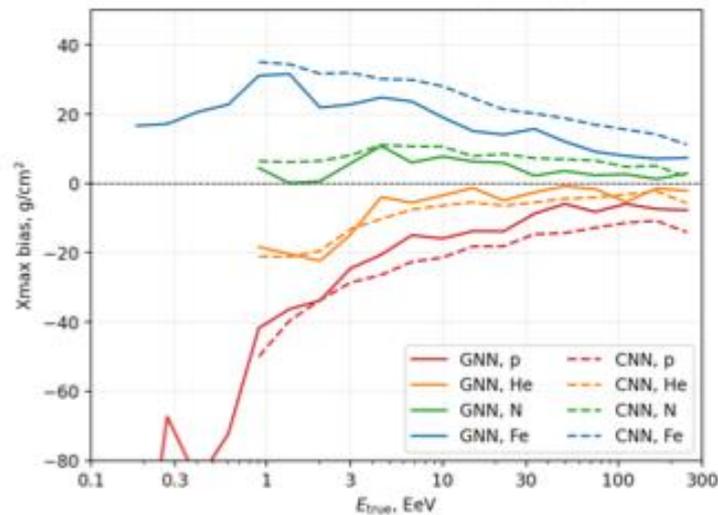
Resolution, standard quality cuts



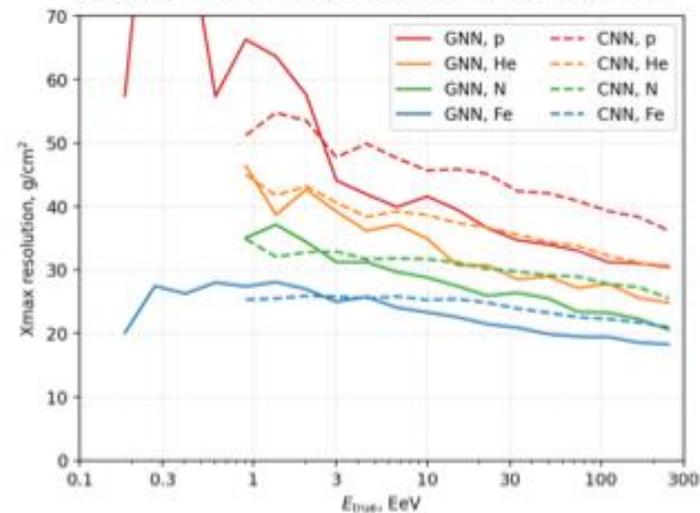
Resolution, no quality cuts for GNN and CNN



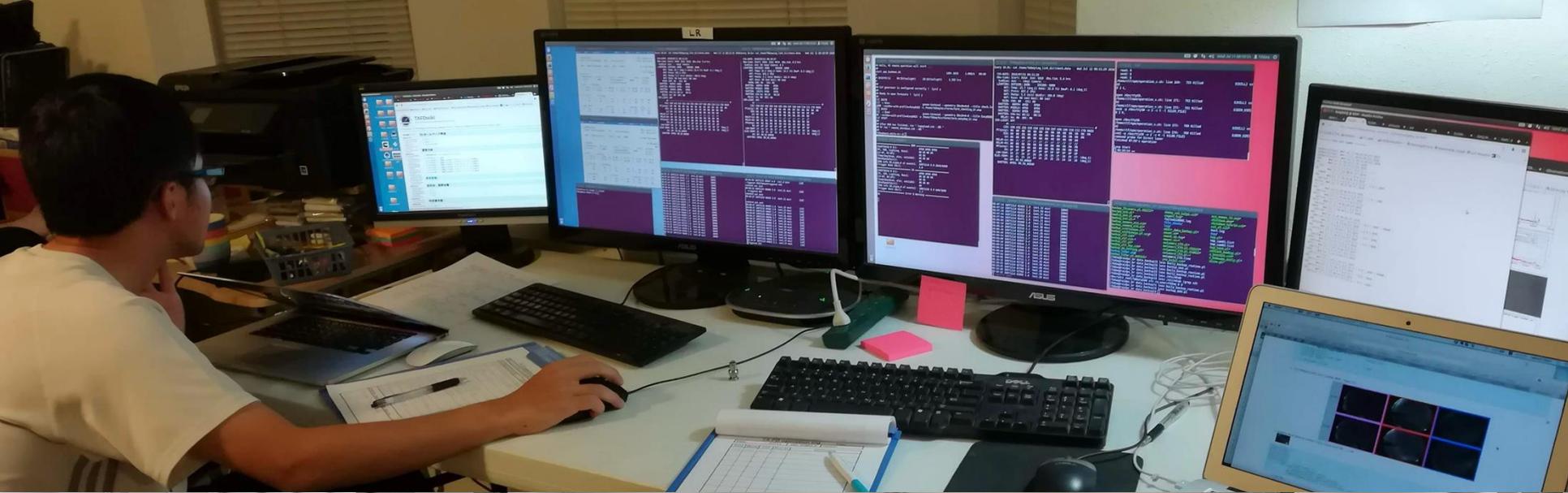
Xmax bias, standard quality cuts



Xmax resolution, standard quality cuts



データ解析以外のAIの利活用



観測運用サポートAI

- 長期間（約20年）の運用実績
 - 観測ログがWiki形式で保存されている
 - コンピューター可読
 - 実際の運用ログ・トラブルシュート履歴
- RAG (Retrieval-Augmented Generation)

観測装置運用の安全性、サステナビリティ向上、省力・省資源



AI Co-Scientist by Google DeepMind

研究者の思考プロセスを支援する協働型AI

主な機能・役割

● 仮説空間の体系的探索

研究課題に対して、成立しうる仮説や選択肢を網羅的に整理し、人間が見落としがちな可能性や前提条件を可視化する。

● 仮説間の比較・評価

各仮説について、新規性・整合性・検証可能性・脆弱性を明示し、どの仮説を優先して検証すべきかを整理する。

● 前提条件・モデル依存性の明確化

結論がどの仮定に強く依存しているかを示し、議論の分岐点や不確実性の源を明らかにする。

● 研究計画・検証戦略の支援

限られた観測・実験リソースの中で、どの測定や観測が最も識別力を持つかを提案する。

重要な位置づけ

AI Co-Scientistは答えを出す存在ではない。最終判断・責任は常に人間研究者に。
研究者の創造性と批判的思考を 拡張・加速する思考の増幅器

まとめ

- **情報×宇宙線**

- 1次宇宙線（宇宙を飛んでいる宇宙線そのもの）を検出できない
- 2次粒子群のサンプリング測定から1次宇宙線の情報を出している
- 特に原子核種 = 電荷、の決定が最重要に

- **DNN利用は急速に進んでいる**

- CNNは伝統的なパラメータ抽出データ解析を上回る性能
- しかし、大気蛍光法（観測効率～10%）にはかなわないのが現状
- Graph NNに期待

- **データ解析だけでないAI利活用を進める**

- RAGにより、LLMの回答精度を高めることで観測運用を支援として利用したい
- AI Co-Scientist：研究者の思考プロセスを支援する協働型AI

第1184回

淡青評論



七穂堂先生

AIを引っ提げてやってきた大学院生

学外のとある修士2年生の学生から、研究を評価してほしいと頼まれました。彼がやっているのは、私が専門とする研究分野のある仮説をデータによって検証する内容でした。読んでみたところ、経済学の五大誌は難しいにしても、着眼点、新規性、データの質などから、ファイナルトップの学術誌に挑戦できる水準にあると感じました。

驚かされたのは、彼が経済学を専攻する学生ではなく、それどころか経済学をこれまでほとんど学んだことがないという点です。彼の関心は技術の新領域への応用、特に「生成AIの新活用」にあり、専門外である経済学という分野で、AIとの対話だけでどこまでのレベルの研究ができるかを1年間かけて試してみたというのです。研究のアイデア出し、先行研究のレビュー、理論モデルと仮説の構築、データの探索と収集、計量ソフトを用いた分析、図表の作成、英語論文文化に至るまで、さまざまなAIツールを組み合わせながら、ほぼ独学で試しているとのことでした。

私自身も、AIの力を借りて日々の研究を進めています。その活用はまだ限られたものであり、彼のようにAIを方法論の中核に置いて新しい領域を切り拓こうとする姿勢はとても頼もしく思えました。と同時に、学部・大学院で経済学の訓練を受けていないにもかかわらず、これほどまでのアウトプットが出てくることに心底たまげました。このようなAIネイティブの若い人たちがこれからどんどん出てくることにちょっとした恐怖さえ感じました。彼自身は経済学分野での論文公刊には関心がなく、アカデミアにも残らないようです。論文としては、このまま世に出ることはないのでしょうか。

なぜ彼は私に相談したのでしょうか。AIとの対話の中では、国際誌に通用する水準と評価されたものの、自身には経済学の素養がないため、その評価が正しいのかわからない。自分が知見の無い分野でのAIの判断が正しいかどうかをどうやって確かめるといいのか。そのひとつとして、経済学の教授に意見を求めてみたということでした。

研究とは何か、研究者とは何者か。私自身が揺さぶられる経験となりました。

小川 光
(経済学研究科)

寄稿

情報学環准教授 ダルグリーシュ・ブレガム
Bregham DALGLIESH



Another question concerning AI

In a recent “Tansei Hyōron” column (no. 1184), Ogawa Hikaru describes how generative AI (GAI) is transforming the world, particularly academic authorship. Whether painters or professors, everyone is grappling with GAI. For one thing, it epitomises the Promethean gap, which depicts our incapacity to conceive the consequences of what we construct. Furthermore, GAI is a technoscience. With its profit-driven research underwritten by the global gerontocracy of guys, the tech brosrarchy enjoys unfettered freedom to manufacture their learning machines.

Ogawa’s concern raises the broader question of GAI’s threat to thinking. On campuses of concentration, the interpretive sciences specialise in the how of it. They inculcate deciphering texts and contemplating otherwise. Teaching students to create meaning initially depends on sensory memory, which intuits things immediately present. Learning subsequently requires students to demonstrate knowledge, or the what of thinking. It relies on mind memory that recalls things already past. These individual retentive capacities are notoriously porous. As animals of forgetting, we long ago became digital. We use our fingers to exteriorise our ideas in technical memory, from mulberry paper to data banks. Looping back into our embodied brains, we re-present our previously scattered thoughts as presto thinking. Teaching and learning are therefore strategic and serendipitous processes. Notwithstanding the imperialism of concepts, they spawn a subject of knowledge, which is the holy grail of GAI, and a self with agency that distinguishes me from you.

Getting GAI to comprehend for me overrides having a say in what I know and who I am. The journey becomes superfluous, nay a burden given the capacity of GAI to compute; only the destination counts. Akin to leapfrogging life at birth to get to death, differences in the know-what of each person remain, yet we become the same in our inability to knowwhy. GAI hereby makes consultants of students. Skilled in sourcing information from Cartesian clouds in space, thinkers adept in questioning their time and place become extinct. In short, by deferring to GAI we not only abdicate constituting ourselves as subjects of thinking and acting, but we also enrich its promoters and enhance the powers that support them. For these reasons, we ought to discourage students from the nihilistic gymnastics of GAI, though with Ogawa I fear the horse has already bolted for Gen Z.

(大意)

「淡青評論」において小川光先生は、生成AI (GAI) が世界、とりわけ学術的著述や教育に与える根本的な影響を論じています。GAIは、人間が自ら作った技術の帰結を予測できないといういわゆる「プロメテウスのギャップ」を体現し、利益主導的で男性中心的なテクノサイエンスの政治構造に支えられて発展してきました。

大学教育においては、解釈や方法論がGAI対応に偏り、感覚記憶や身体化された思考を通じて意味を創造する学びが弱体化しています。人間は忘却する存在であり、知を外部化して技術的記憶に依存しますが、これまではそこから主体的思考が形成されてきたといえます。しかし、GAIに理解を委ねすぎることによって、知ることや「なぜ」を問う主体性が失われ、学生は思考する存在から情報操作するコンサルタントへと変えられてしまうのではないのでしょうか。

私たちは、GAIに従うことで、思考と行動の主体としての立場を放棄するだけでなく、GAIの推進者を豊かにし、彼らを支える力を強めてしまいます。学生たちはGAIの虚無主義的な振る舞いから距離を置くべきだと私は考えますが、Z世代のなかですでにその流れが始まっているのもしれません。

※生成AI (ChatGPT) による要約です。元原稿と比べて生成AIの現在地をご確認ください