

“TA2”

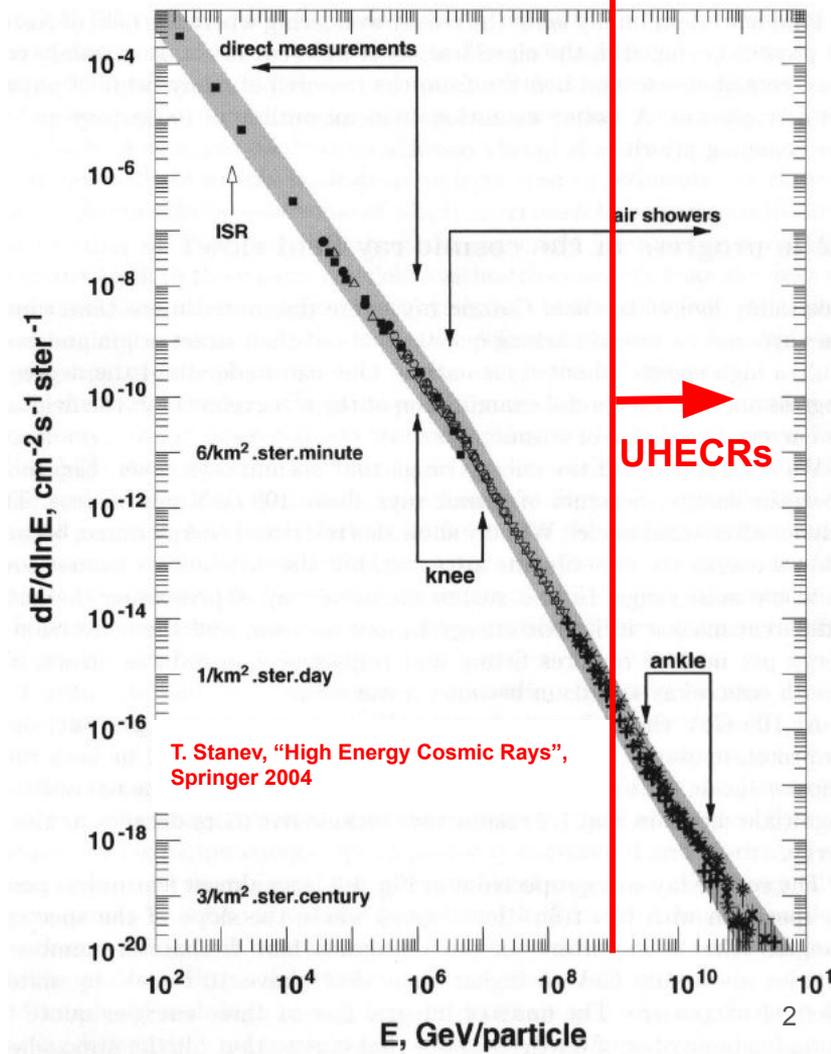
超高エネルギー宇宙線分野将来計画

常定 芳基(大阪市立大学)

CRCタウンミーティング
2021年8月10日

UHECR: 超高エネルギー宇宙線

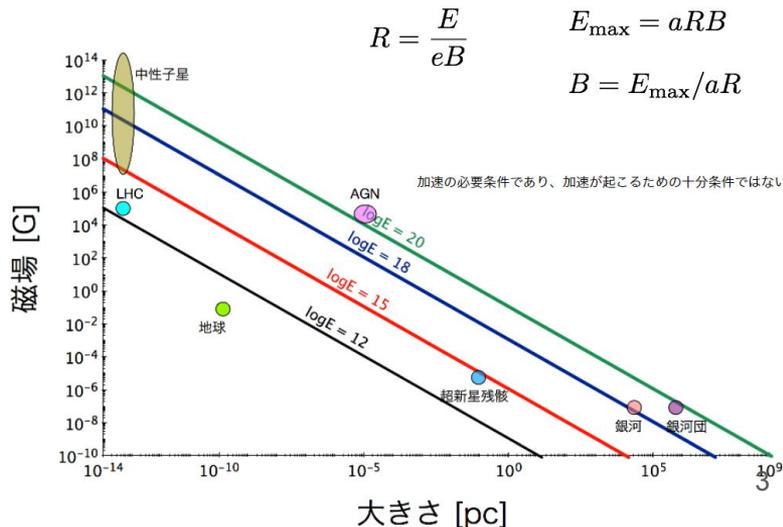
- 陽子、原子核: 荷電粒子
- $dN/dE \propto E^{-3}$
- $E > 10^{18}$ eV
- 到来頻度低い: 大面積、長期間観測
 - 1個/100km²/yr @ 10²⁰ eV
 - 空気シャワー観測
 - 現在の観測は O(1000km²)
- 銀河系外起源、< 100Mpc @ 10²⁰eV
- 角度決定精度
 - 実験: ~ 1°
 - 宇宙線伝播: ~ 1° x (B/nG) x (D/Mpc) / (E/10²⁰eV)



UHECR Physics の目指すもの

- 天文学的: 宇宙線の起源天体は何か
 - 銀河系外宇宙線の起源: AGN etc. (トップダウンシナリオ?)
 - 銀河系内宇宙線の起源: 超新星残骸、パルサー、etc.
 - 銀河系内・外起源の境界はどこか? $10^{15} \sim 10^{18}$ eV の間のどこか?
- 宇宙物理学的: 宇宙線の加速メカニズムは何か?
 - $E_{\max} \propto B \times \text{サイズ}$: 強い磁場と領域の広さが必要条件。実際に加速が実現している環境とは?
 - 宇宙で実現可能な加速限界は?
 - 極限的環境での物理?
 - トップダウンシナリオ?
 - 宇宙磁場のプローブになるか?
 - 起源天体同定とはトレードオフ
- 基礎物理学的
 - 超高エネルギーでの粒子相互作用: 断面積
 - 空気シャワー現象の物理
 - トップダウンシナリオ?
 - 超高エネルギーでの Lorentz invariance test

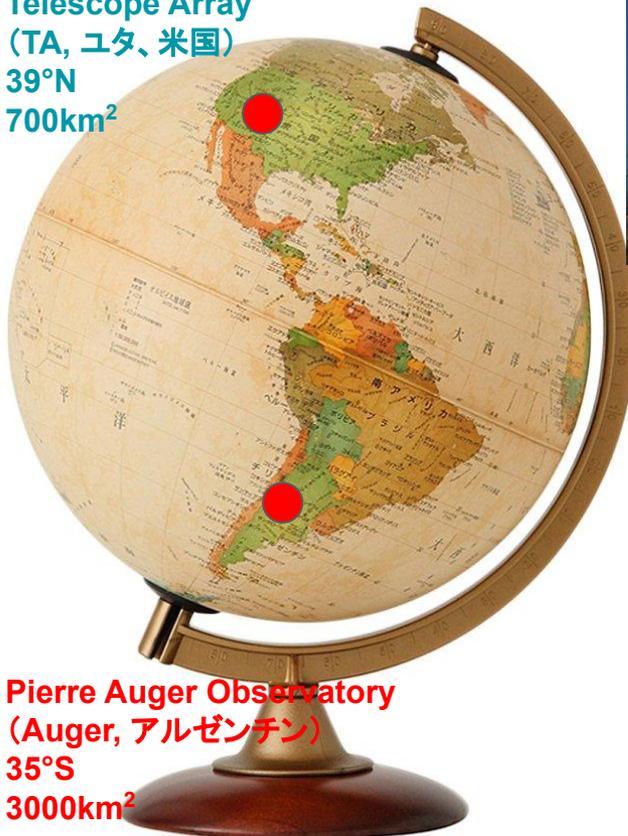
Hillas Plot



現行観測: Telescope Array, Pierre Auger Observatory

Telescope Array
(TA, ユタ、米国)

39°N
700km²

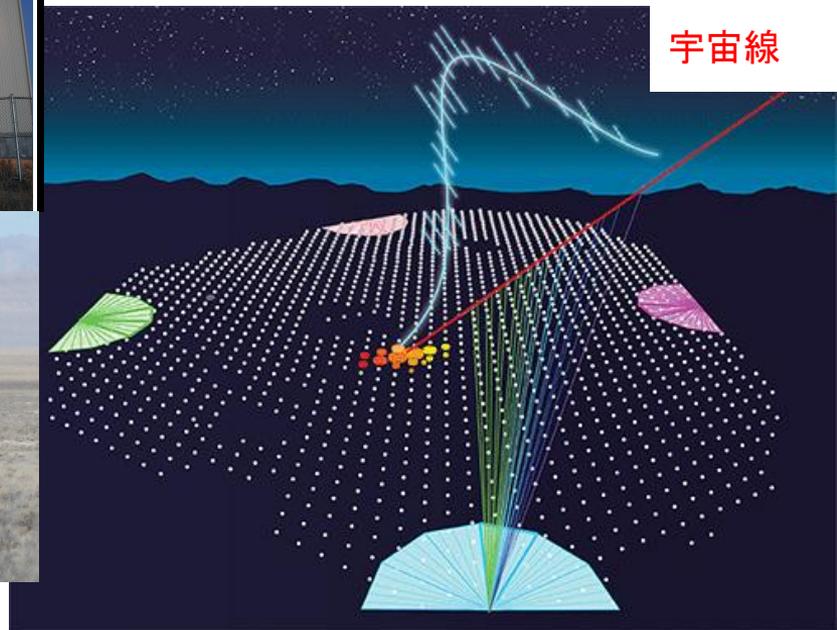
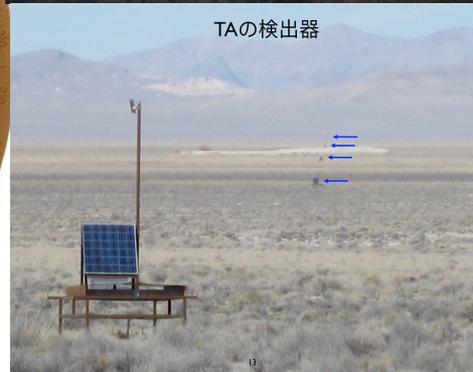


Pierre Auger Observatory
(Auger, アルゼンチン)

35°S
3000km²



TAの検出器

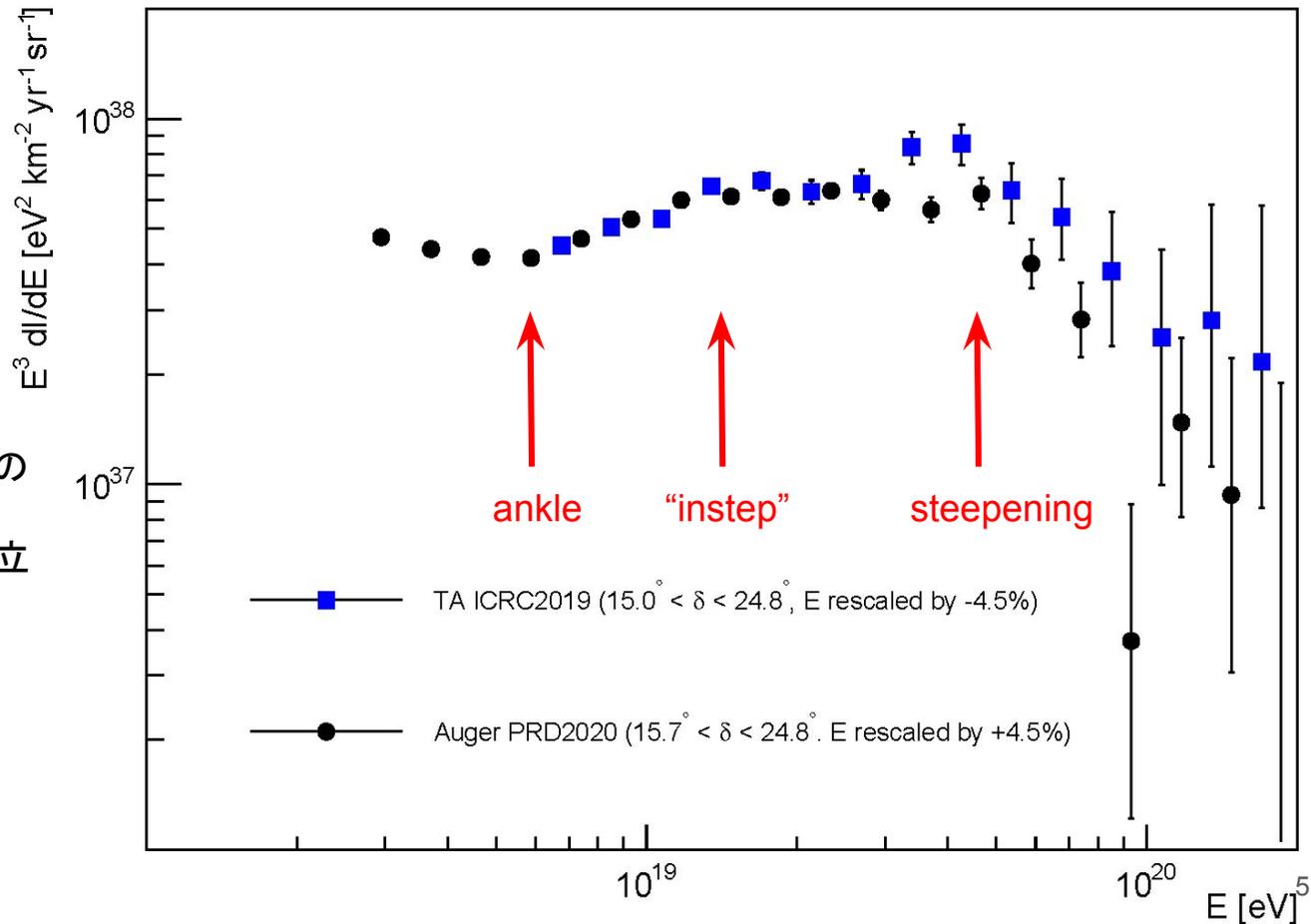


<https://www.auger.org/news/press-reviews/211-cosmic-ray-showers-reveal-muon-mystery>

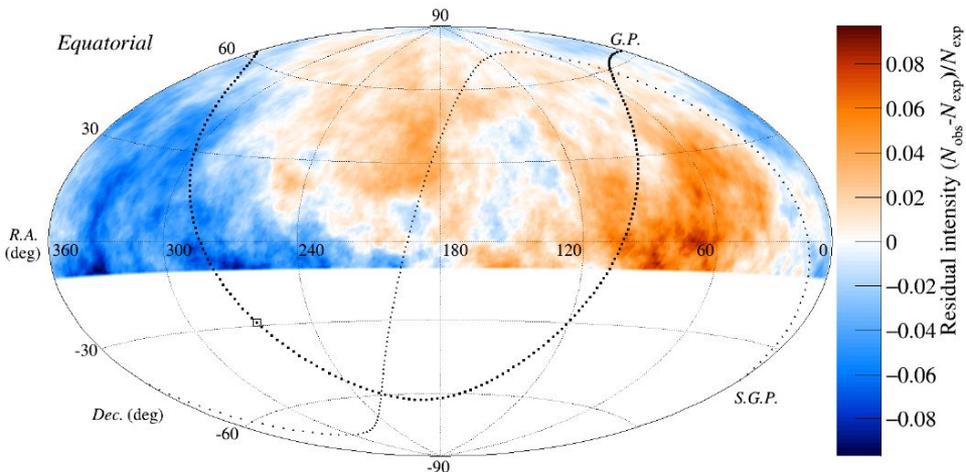
Credit: APS/Carin Cain

TA & Auger の成果: UHECRsのエネルギースペクトル

- TA&Auger 共通視野領域でのスペクトルはほぼ一致
- 折れ曲がり構造の観測的確立
 - メカニズムは未確立
- 南北半球では違い



TA の成果: 宇宙線の到来は等方的ではない

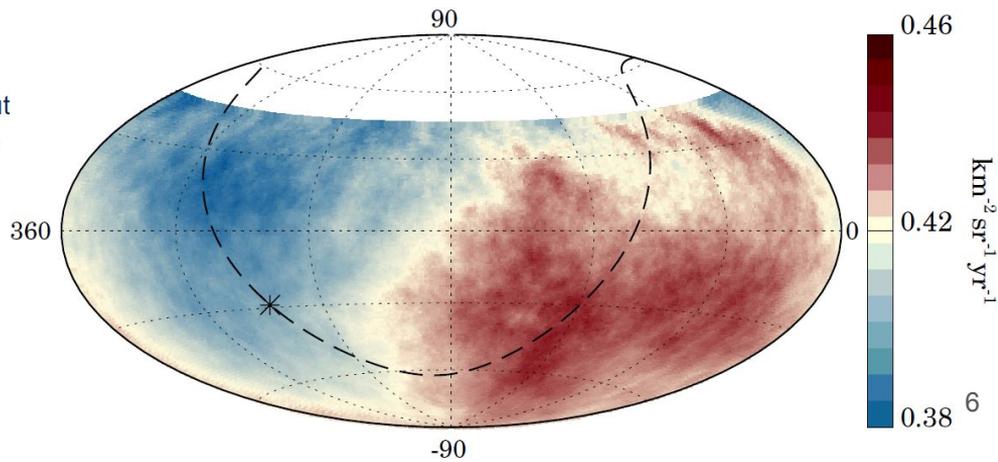


Sky map of residual intensity between TA data and an isotropic distribution for $E > 8.8 \text{ EeV}$ (energy cut corresponds to $E > 8 \text{ EeV}$ used by Auger).

藤井、*ApJL* **898** L28 (2020)
+ ICRC2021

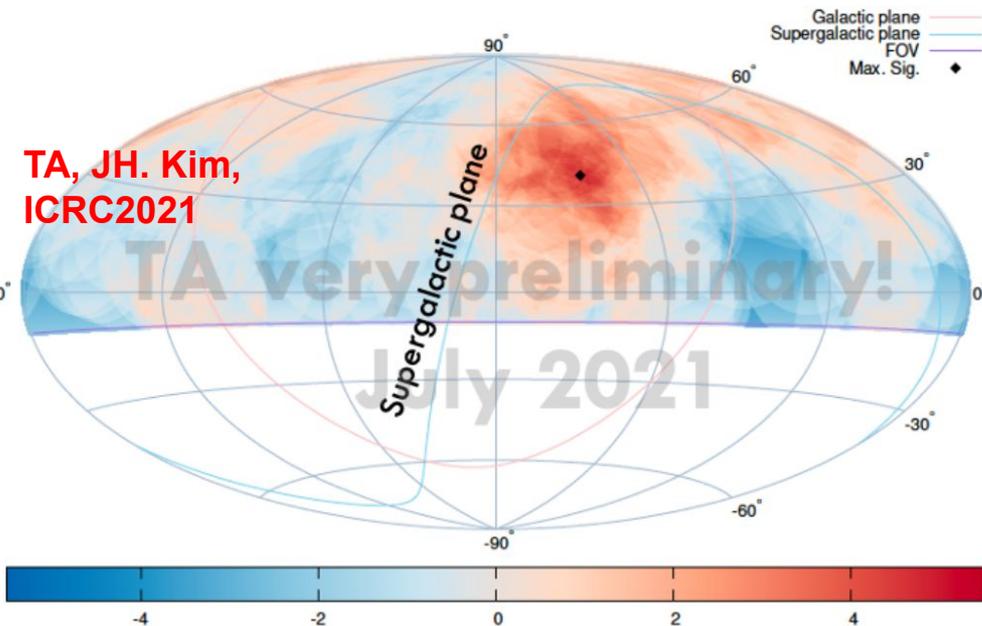
>8EeV 大角度スケール/dipole異方性

Auger, *Science* **357** 1266 (2017)
 $E > 8 \text{ EeV}$



TA の成果: 宇宙線の到来は等方的ではない

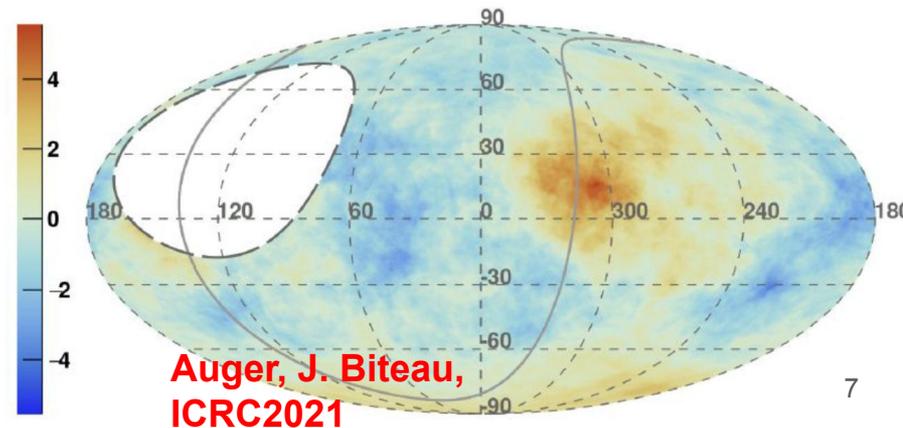
TA: イベント到来方向の集中度解析(赤道座標, $E > 57\text{EeV}$)



> 数 10EeV 中角度スケール/イベントクラスターリング, $20^\circ\sim 30^\circ$

Auger: イベント到来方向の集中度解析(銀河座標)

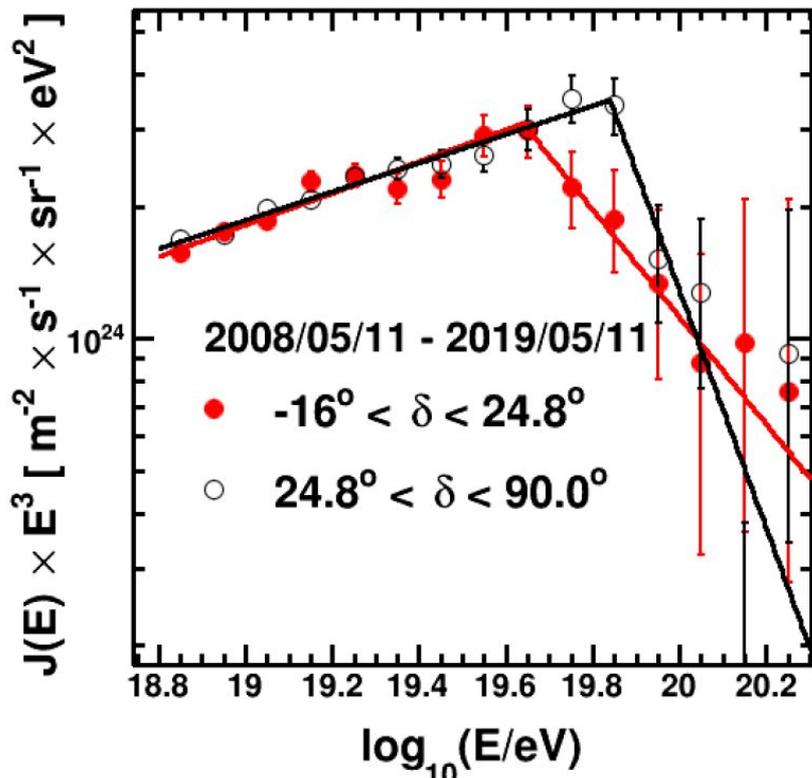
Pre-trial Li & Ma $\sigma(E_{\text{Auger}} > 41\text{EeV})$ - Galactic coordinates - $\Psi = 24^\circ$



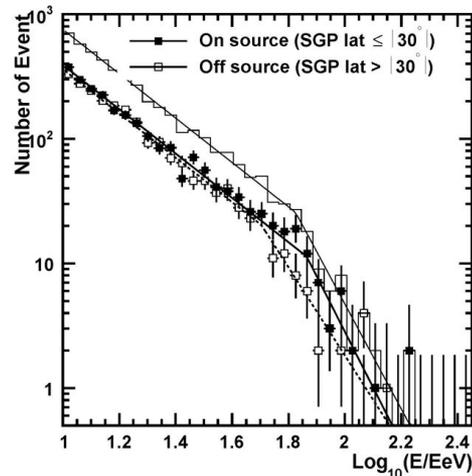
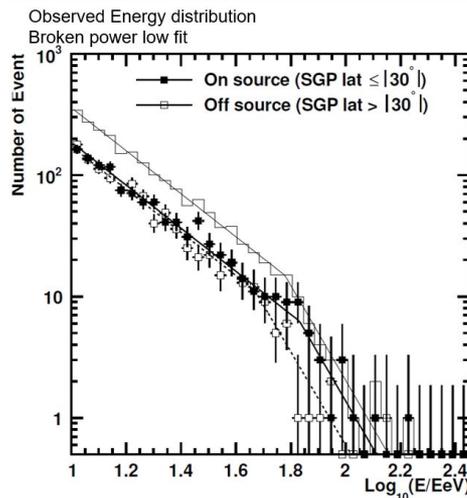
“Spectrum Anisotropy” の試み

TA の北天/南天でのスペクトル比較
D. Ivanov, ICRC2021

超銀河面方向とそれ以外で違う？
野中(東大宇宙線研)、ICRC2021



Energy distribution 5yr, 12yr data



Area	C_0	α_1	$\log_{10}(E_b/EeV)$	α_2
All	$2.141^{+0.343}_{-0.298} \times 10^{+4}$	$-1.775^{+0.053}_{-0.053}$	$1.778^{+0.040}_{-0.068}$	$-3.91^{+0.64}_{-0.66}$
On source	$(1.1128 \times 10^{+4})$	(-1.775)	$1.832^{+0.069}_{-0.041}$	$-3.91^{+0.70}_{-1.26}$
Off source	$(1.0286 \times 10^{+4})$	(-1.775)	$1.668^{+0.052}_{-0.053}$	$-3.86^{+0.58}_{-0.82}$

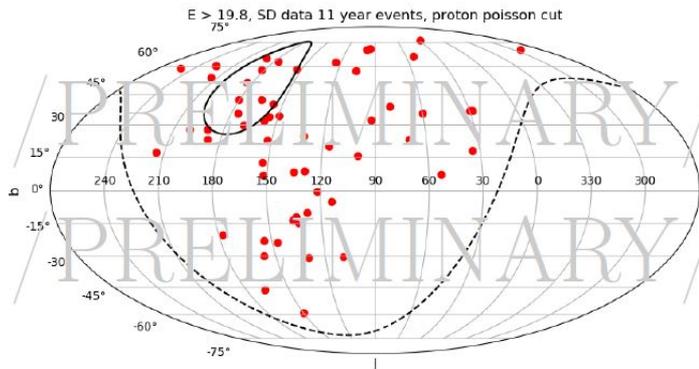
Area	C_0	α_1	$\log_{10}(E_b/EeV)$	α_2
All	$4.519^{+0.458}_{-0.433} \times 10^{+4}$	$-1.778^{+0.036}_{-0.034}$	$1.825^{+0.026}_{-0.033}$	$-4.20^{+0.49}_{-0.52}$
On source	$(1.1128 \times 10^{+4})$	(-1.775)	$1.865^{+0.036}_{-0.042}$	$-4.46^{+0.70}_{-0.77}$
Off source	$(1.0286 \times 10^{+4})$	(-1.775)	$1.705^{+0.054}_{-0.028}$	$-3.54^{+0.60}_{-0.72}$

“Composition Anisotropy” の試み

SD Data, “proton-like” events
Y. Zhezher, ICRC2021
pre-trial 3.6σ , post-trial 1.7σ

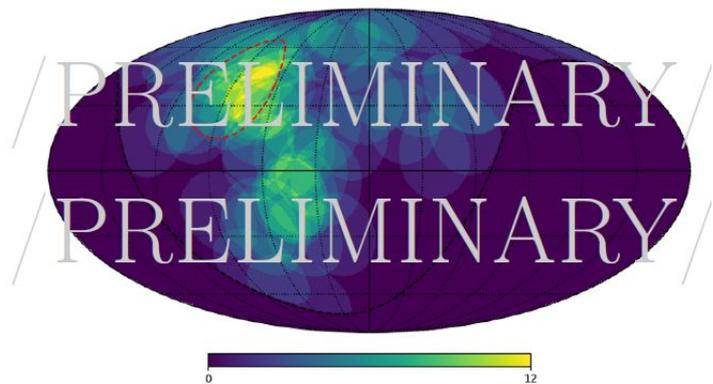
“Proton” data events distribution, $\log E > 19.8$

Event distribution



57 events

20° oversampling



Excesses are observed in the hotspot and Galactic plane area.

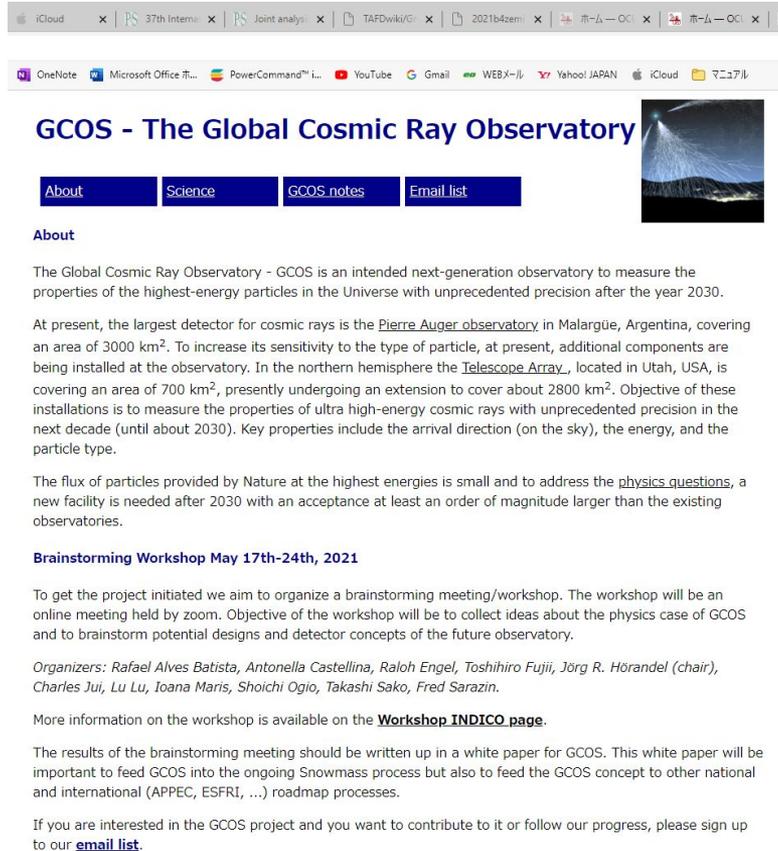
UHECR Observation: 次へ行くには？

- TA, Auger では異方性が見えてきている
- 新しい解析の試み
 - 方向ごとのエネルギースペクトル
 - 原子核種ごとのエネルギースペクトル
 - 起源天体の種族同定、特定天体同定
- クリアすべきこと
 - Auger-TA の違いの理解 - Joint working groups
 - 空気シャワー現象 - muon puzzle
- Auger/TAx4 の1+桁上の面積: 圧倒的統計量による解析
 - 既知の天体との相関: SGP, starburst galaxies etc.
 - 天体との相関を問わないイベント集中
 - proton-like イベントのみを用いての解析
 - サイズ見積もり:
 - エネルギースペクトルには TA3年分でOK
 - 宇宙線異方性は $\sim 30^\circ$ 程度のスケール
 - 方向を 50-100 分割して解析
 - \sim ”数10TA” で数年観測すればよい

UHECR Physics 将来計画

- TA グループ内では将来計画の議論を続けてきた
- TA, Auger は既に国際共同実験 -> さらに大きな world-wide な実験
 - 現状では TA, Auger それぞれでのアップグレードが進行中
 - 将来計画のためのチャンネルを模索
- GCOS構想
 - Global Cosmic Ray Observatory
 - Auger, TA など世界中の研究者のコンソーシアム
 - Snowmass 2020 Lol submitted
 - 今年5月に第1回ワークショップ
 - 参加者数 ~200(登録数215)
 - Science cases
 - Technical developments
 - UHECR Physics の続きをやりたい、という研究者の興味の一一致の確認
 - 2021-2022 に White Paper
 - 南北半球？
 - 実現は2030年以降:体制づくり、開発、サイト決定、予算獲得運動
 - 日本グループも GCOS という枠組みの中で実現を目指す

GCOS: <http://particle.astro.ru.nl/gcos/index.html>



The screenshot shows a web browser window with several tabs open. The address bar displays the URL <http://particle.astro.ru.nl/gcos/index.html>. The page title is "GCOS - The Global Cosmic Ray Observatory". Below the title is a navigation menu with buttons for "About", "Science", "GCOS notes", and "Email list". To the right of the menu is a photograph of a large, dark, conical structure, likely a detector component, set against a night sky with a bright light source. The "About" section contains the following text:

About

The Global Cosmic Ray Observatory - GCOS is an intended next-generation observatory to measure the properties of the highest-energy particles in the Universe with unprecedented precision after the year 2030.

At present, the largest detector for cosmic rays is the [Pierre Auger observatory](#) in Malargüe, Argentina, covering an area of 3000 km². To increase its sensitivity to the type of particle, at present, additional components are being installed at the observatory. In the northern hemisphere the [Telescope Array](#), located in Utah, USA, is covering an area of 700 km², presently undergoing an extension to cover about 2800 km². Objective of these installations is to measure the properties of ultra high-energy cosmic rays with unprecedented precision in the next decade (until about 2030). Key properties include the arrival direction (on the sky), the energy, and the particle type.

The flux of particles provided by Nature at the highest energies is small and to address the [physics questions](#), a new facility is needed after 2030 with an acceptance at least an order of magnitude larger than the existing observatories.

Brainstorming Workshop May 17th-24th, 2021

To get the project initiated we aim to organize a brainstorming meeting/workshop. The workshop will be an online meeting held by zoom. Objective of the workshop will be to collect ideas about the physics case of GCOS and to brainstorm potential designs and detector concepts of the future observatory.

Organizers: Rafael Alves Batista, Antonella Castellina, Raloh Engel, Toshihiro Fujii, Jörg R. Hörandel (chair), Charles Jui, Lu Lu, Ioana Maris, Shoichi Ogio, Takashi Sako, Fred Sarazin.

More information on the workshop is available on the [Workshop INDICO page](#).

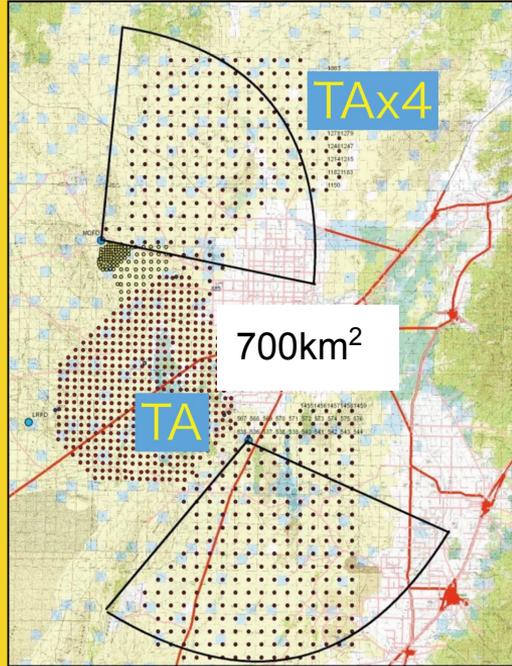
The results of the brainstorming meeting should be written up in a white paper for GCOS. This white paper will be important to feed GCOS into the ongoing Snowmass process but also to feed the GCOS concept to other national and international (APPEC, ESFRI, ...) roadmap processes.

If you are interested in the GCOS project and you want to contribute to it or follow our progress, please sign up to our [email list](#).

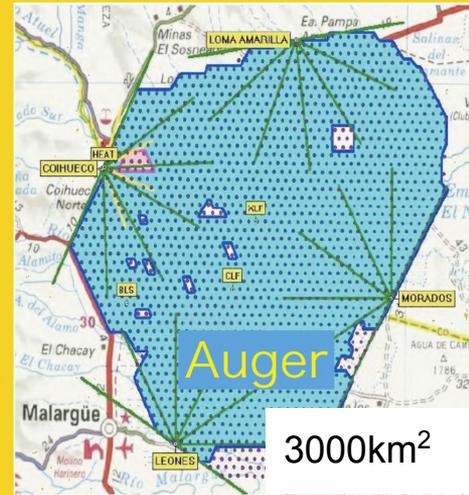
For more information, please contact [Jörg R. Hörandel](#)

CRC Town Meetings & GCOS Workshop

200km

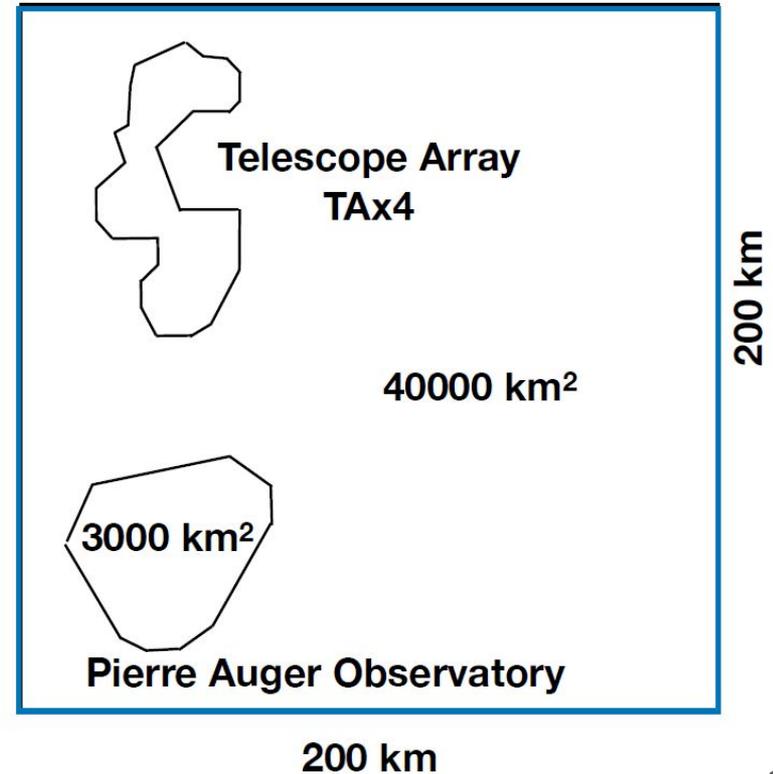
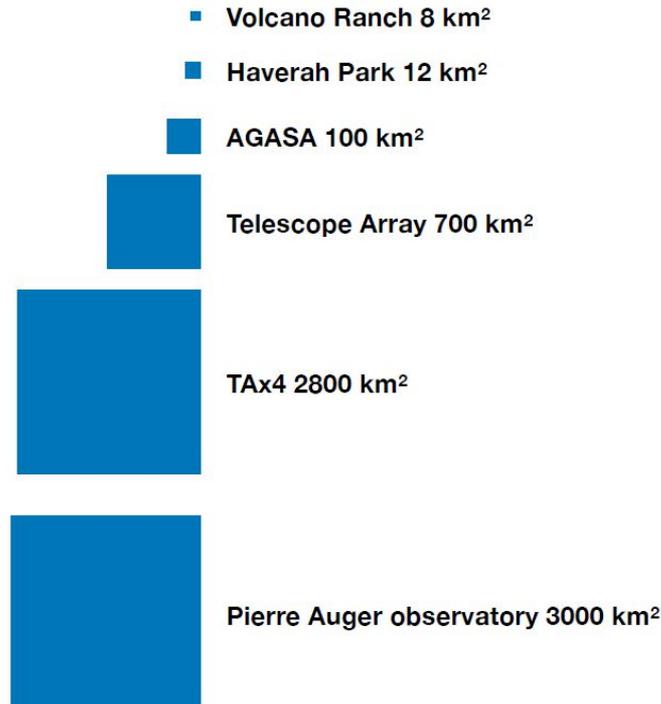


~40,000km²
(14Auger/60TA)



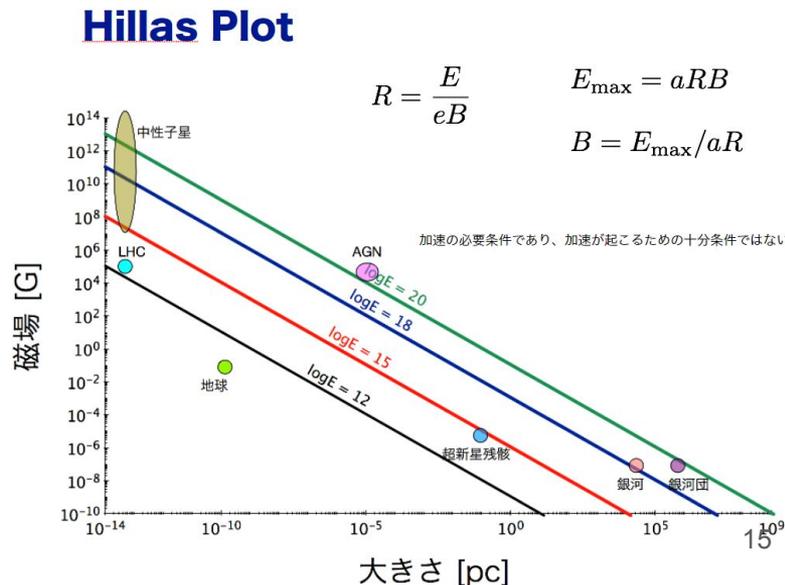
GCOS Workshop: J. Horandel

How big and where do we want to build GCOS?



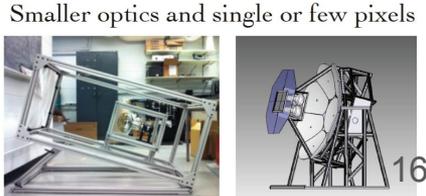
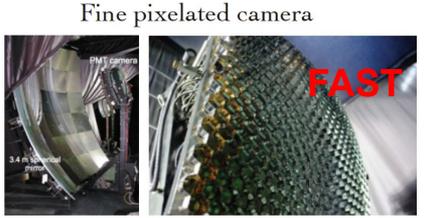
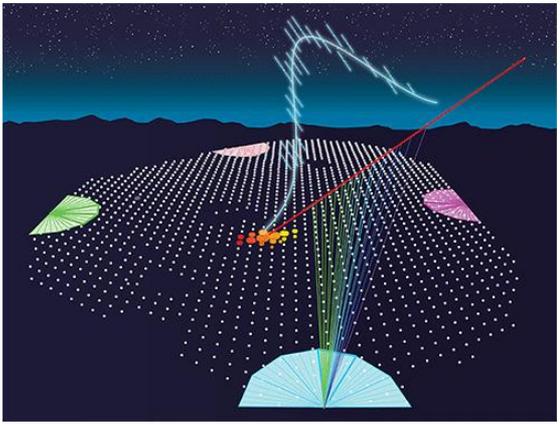
UHECR Physics の目指すもの

- 天文学的: 宇宙線の起源天体は何か
 - 銀河系外宇宙線の起源: AGN etc. (トップダウンシナリオ?)
 - 銀河系内宇宙線の起源: 超新星残骸、パルサー、etc.
 - 銀河系内・外起源の境界はどこか? $10^{15} \sim 10^{18}$ eV の間のどこか?
- 宇宙物理学的: 宇宙線の加速メカニズムは何か?
 - $E_{\max} \propto B \times \text{サイズ}$: 強い磁場と領域の広さが必要条件。実際に加速が実現している環境とは?
 - 宇宙で実現可能な加速限界は?
 - 極限的環境での物理?
 - トップダウンシナリオ?
 - 宇宙磁場のプローブになるか?
 - 起源天体同定とはトレードオフ
- 基礎物理学的
 - 超高エネルギーでの粒子相互作用: 断面積
 - 空気シャワー現象の物理
 - トップダウンシナリオ?
 - 超高エネルギーでのLorentz invariance test
- 太陽/太陽圏の物理
 - 太陽活動と長期・短期的宇宙線強度変動
- 大気・雷の物理
 - 雷と地表での放射線



検出器案

- 地表検出器アレイ
 - 空気シャワー粒子を地表で検出: TA: 507台、Auger: 1600台
 - 40,000km² カバーするなら 10,000台
 - 検出器多層化、エレクトロニクス高性能化 - 粒子弁別
- 大気蛍光検出器
 - 大気中での分子発光をとらえる。TA&Auger では多数の光電子増倍管を夜空にさらす
 - 低コスト版検出器開発がすすんでいる
- 電波アンテナアレイ
 - 空気シャワー中の荷電粒子からの放射をとらえる。10MHz-1GHz帯。比較的安価
 - セルフトリガーに課題



最後に

- 計画としては大型だが、今回は「中型B」で出している
 - MPではなく分科会の冊子への掲載希望
- サイエンスの重要性と緊急性:サイエンスの価値、CRCの活性化効果の有無、すぐに重点大型に選定される必要性があるかどうか
 - この宇宙における最高のエネルギーへの粒子加速と天体現象。宇宙線物理学としては重要性最高
 - 「宇宙線」(原子核成分)対象。CRC全体に活性化効果ある
 - Auger&TA でエネルギー決定、組成測定、到来方向分布解析を技術的に確立 - 次を議論する時期
 - すぐに選定される状況ではない
- 計画規模の大きさ
 - O(100億円)
- 国際性:国際競争、国際協力の状況、日本の役割
 - 世界規模の大型実験 - TA + Auger + X
 - 国際協力の枠組みができた - GCOS
 - 予算的裏付けがあるわけではない
 - 日本は1国としての参加規模は大きい。分担はこれから議論