



아마테라스 입자란 무엇인가?

초고에너지 우주선의 수수께끼

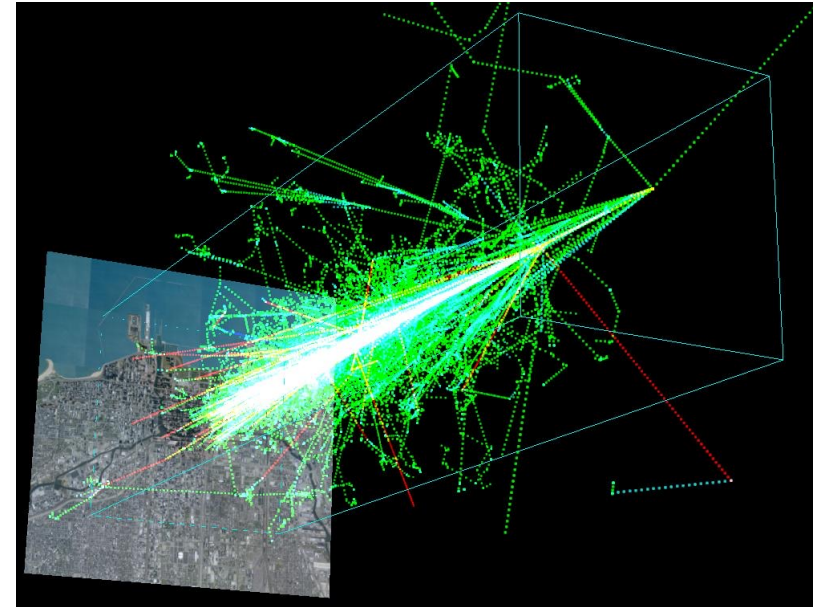
김항배 (한양대학교 물리학과)

한국고에너지물리학회, 2024.05.23

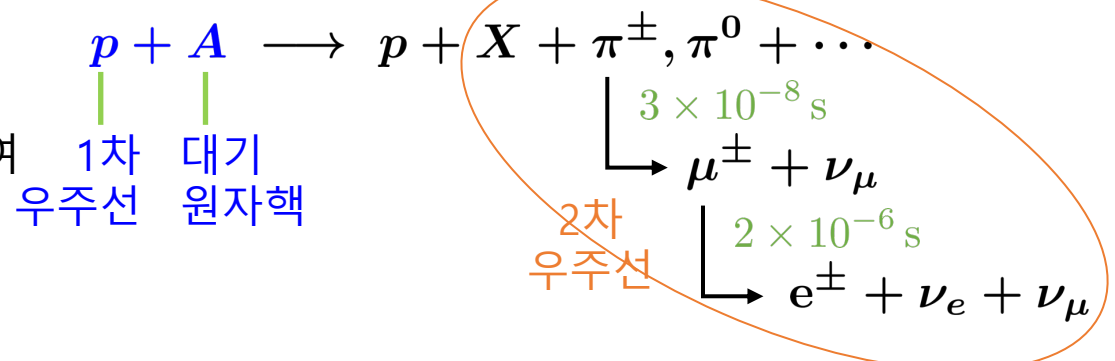


우주선 (Cosmic Rays)

- 우주선이란 무엇인가요?
 - 우주로부터 지구로 날아오는 큰 에너지를 가진 입자
- 우주선 발견
 - 1912년, Victor Hess의 기구 실험 - 고도가 높아질수록 방사선 검출이 늘어난다. → 우주로부터 오는 방사선 (1936년 노벨물리학상)
- 우주선에서 발견된 기본 입자들
 - 우주선 입자가 대기 원자핵과 충돌하여 새로운 입자들을 만든다.
 - 양전자(전자의 반입자), 뮤온(전자의 형님), 파이온(중간자) 등의 기본 입자들은 우주선에서 처음으로 발견됐다.

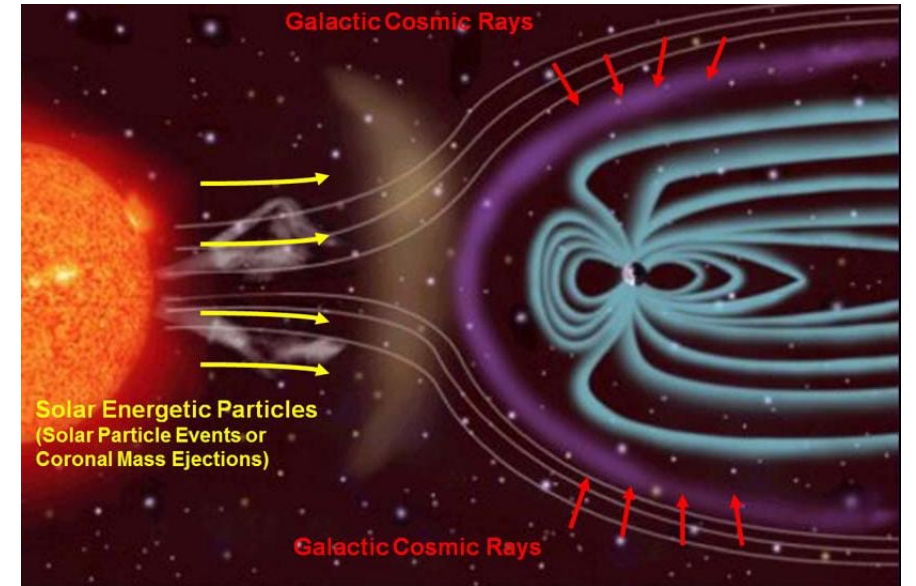


- 대규모 대기 샤워 (extensive air showers) 발견
 - 고에너지 우주선은 대기 원자핵과 반복적으로 충돌하여 수많은 2차 우주선을 만든다. → 대규모 대기 샤워
 - 검출기 배열과 동시 검출 기술
→ 넓은 영역에서 2차 우주선들을 동시에 검출

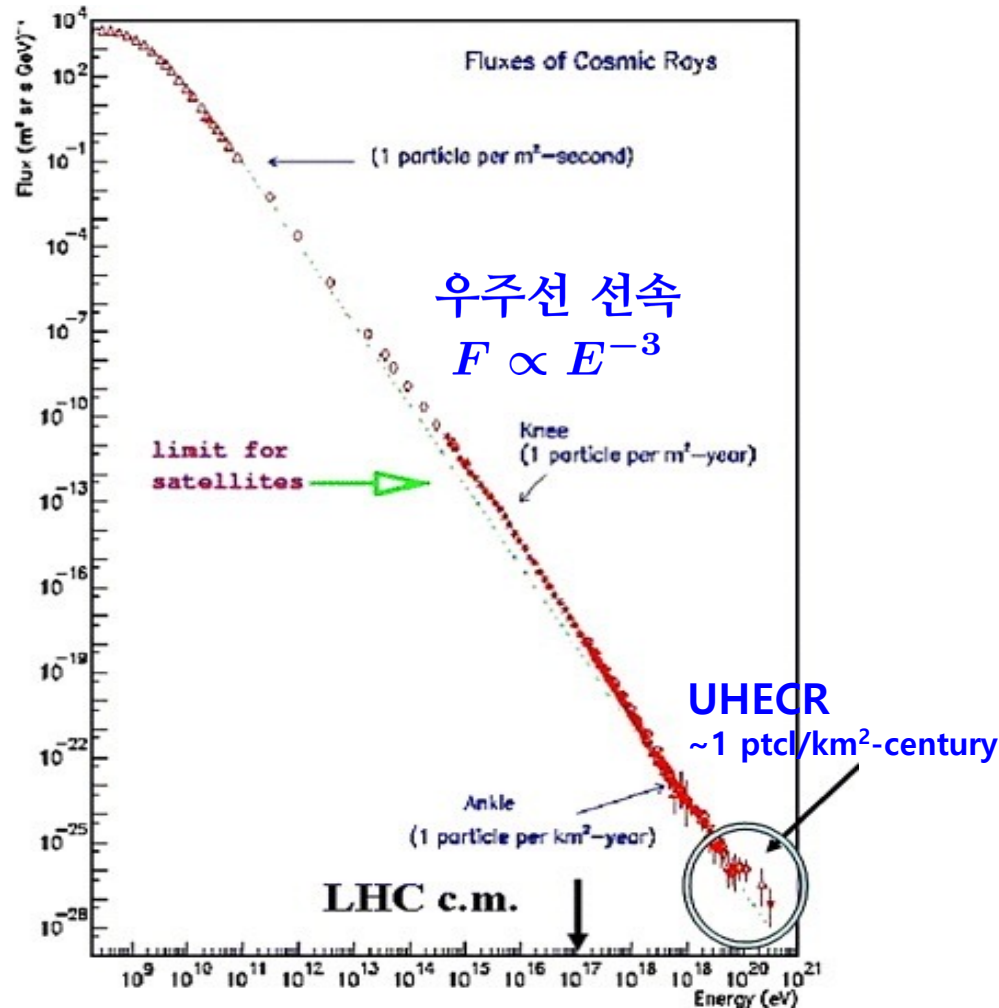


우주선의 영향

- 우주선이 일으키는 현상
 - 해수면에서 뮤온의 선속 $\sim 1 / \text{cm}^2 \text{ min}$
 - 대기에 동위원소 생산 :
 - $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow p + {}^{14}\text{C} \rightarrow$ 탄소 연대측정에 활용
 - 생명체 돌연변이 유발
 - 컴퓨터 등 미세 전자장치에 오작동 유발
 - 대기권 상층부에서 번개 유발
 - 극지방에서 오로라 유발
 - 우주선에 의한 연간 방사능 피폭량
 $\sim 0.39 \text{ mSv}$ (전체 3 mSv 의 13%)
 - 우주선(~방사선) 피폭은 우주 여행에 큰 걸림돌
 - 국제우주정거장에서 6개월 생활 $\rightarrow 75 \text{ mSv}$
 - 화성 여행 6개월 $\rightarrow 320 \text{ mSv}$



초고에너지 우주선 (Ultra-High Energy Cosmic Rays)



초고에너지 우주선이란 무엇인가요?

- 에너지가 10^{18} eV 보다 큰 우주선
 - 1962, Volcano Ranch : $E > 10^{20} \text{ eV}$
 - 1991, Fly's eye
 - $E = 3.2 \times 10^{20} \text{ eV}$ - **OMG 입자**
 - ✓ 입자 하나가 시속 100 km인 야구공의 운동에너지와 맞먹는 에너지를 가졌다!!!
 - 2021, Telescope Array
 - $E = 2.4 \times 10^{20} \text{ eV}$ - **아마테라스 입자**
- 우리 은하의 바깥에서 기원했다.
 - 초고에너지 우주선은 에너지가 너무 커서 우리 은하의 자기장으로 붙잡아 둘 수 없다.

어디에서 어떻게 이런 에너지의 입자가 만들어질까?

Oh My God Particle in Wikipedia

Oh-My-God particle

 22 languages ▼

Article [Talk](#)

[Read](#) [Edit](#) [View history](#) [Tools](#) ▼

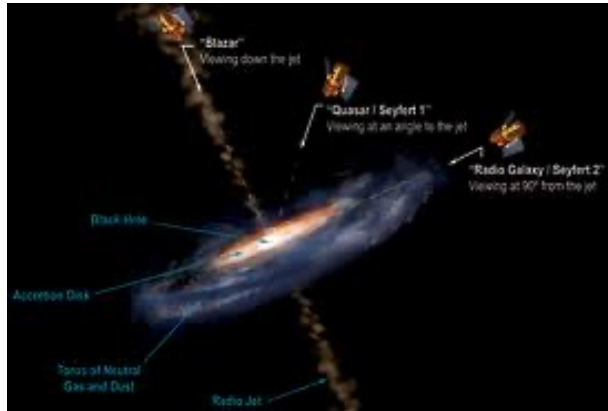
From Wikipedia, the free encyclopedia

Coordinates:  5°40′48″S﻿, ﻿48°0′0″E

Not to be confused with the "God Particle", or [Higgs boson](#).

The **Oh-My-God particle** was an [ultra-high-energy cosmic ray](#) detected on 15 October 1991 by the [Fly's Eye](#) camera in [Dugway Proving Ground, Utah, United States](#).^{[1][2][3]} As of 2024, it is the highest-energy [cosmic ray](#) ever observed.^[4] Its energy was estimated as $(3.2 \pm 0.9) \times 10^{20}$ [eV](#) (320 exa-eV). The particle's energy was unexpected and called into question prevailing theories about the origin and propagation of cosmic rays.

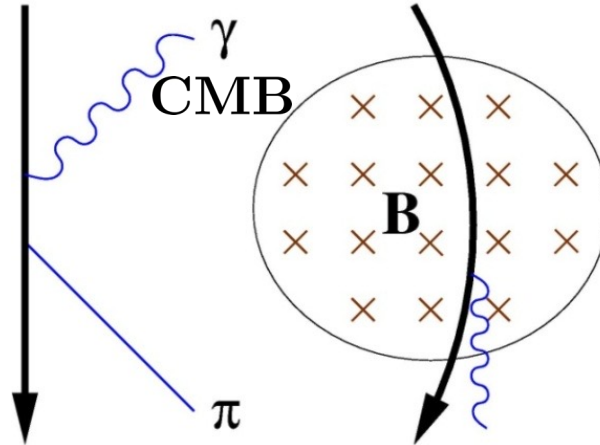
초고에너지 우주선 - 생성, 전파, 관측



생성

전하를 띤 입자의 가속
엄청나게 무거운 입자의 붕괴

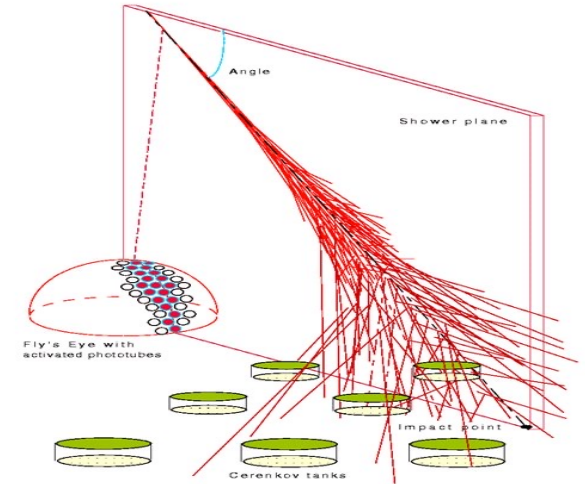
- 위치 (우주선 샘의 분포)
- 성분
- 에너지 스펙트럼



전파

우주 배경과 상호작용
(마이크로파, 전파, 자기장)

- 에너지 손실
- 방향 굴절과 시간 지연
- 2차 우주선 생성

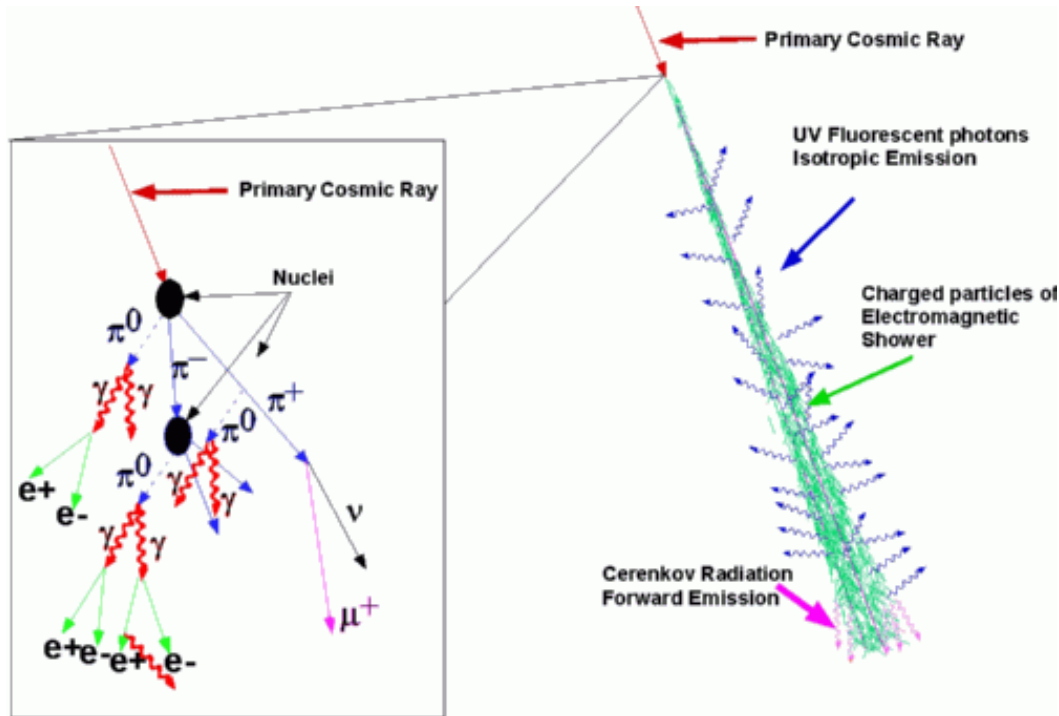


관측

대기를 열량계나
신틸레이터로 활용

- 도착 방향
- 에너지
- 성분

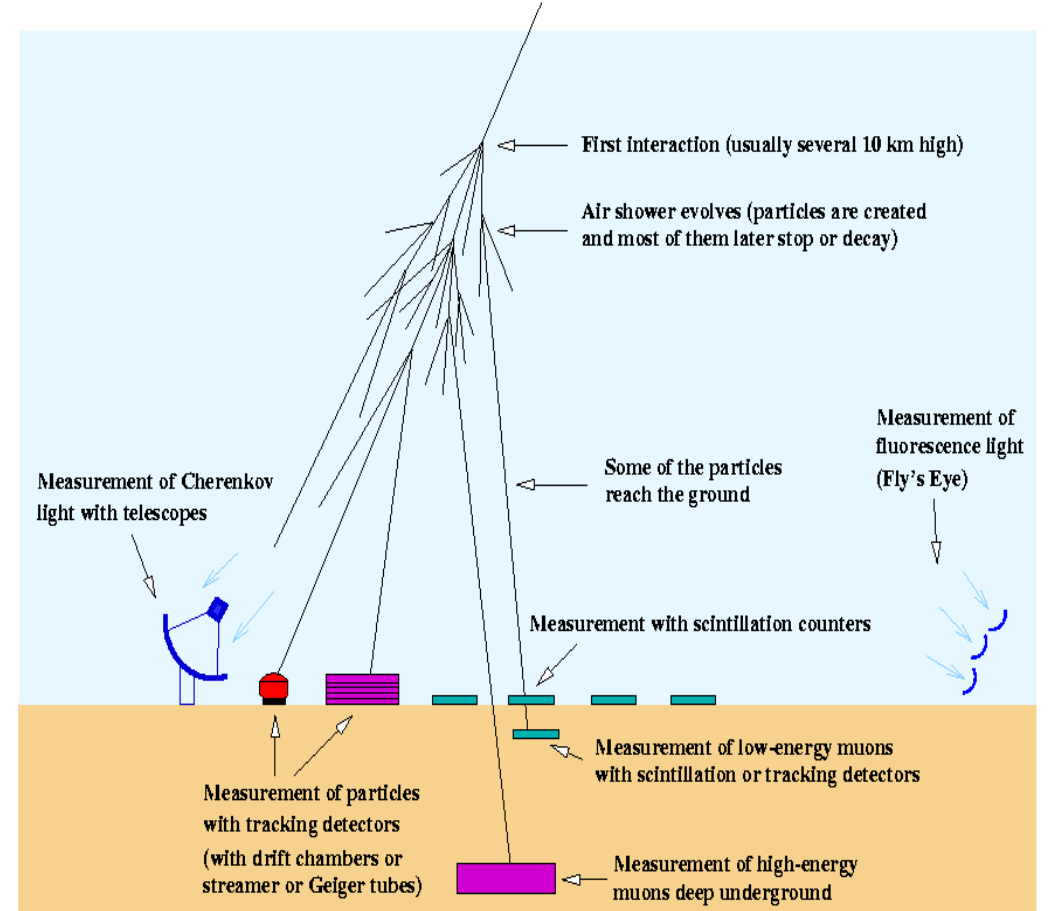
관측



▪ 대규모 대기 샤워의 검출

- 지면 검출기 (Surface Detector) – e, μ
- 형광 검출기 (Fluorescence Detector) – UV
- 체렌코프 방사, 전파

Measuring cosmic-ray and gamma-ray air showers

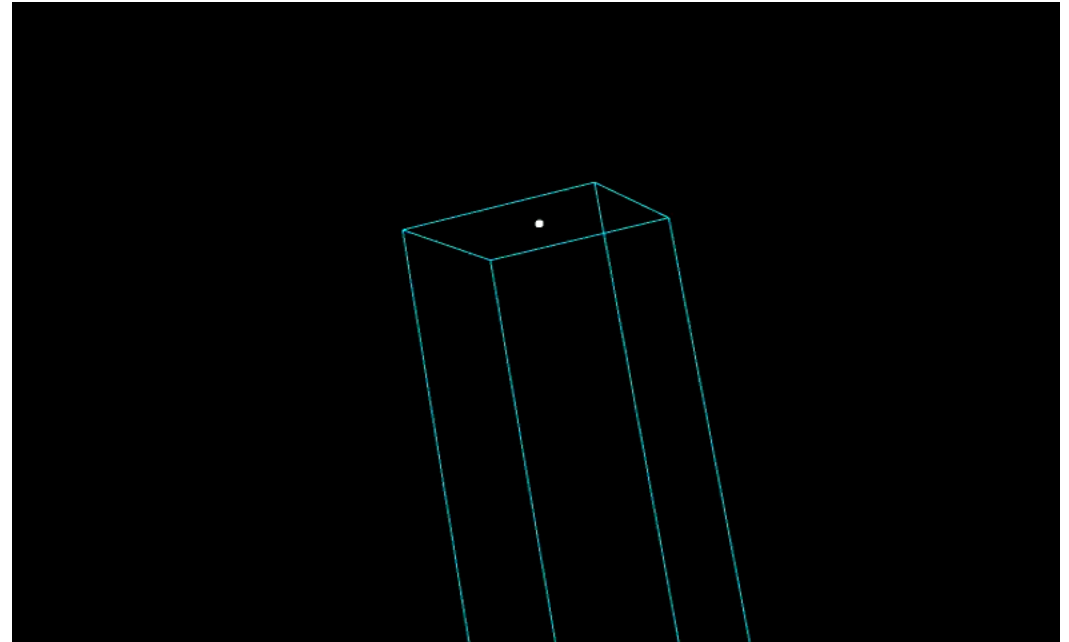
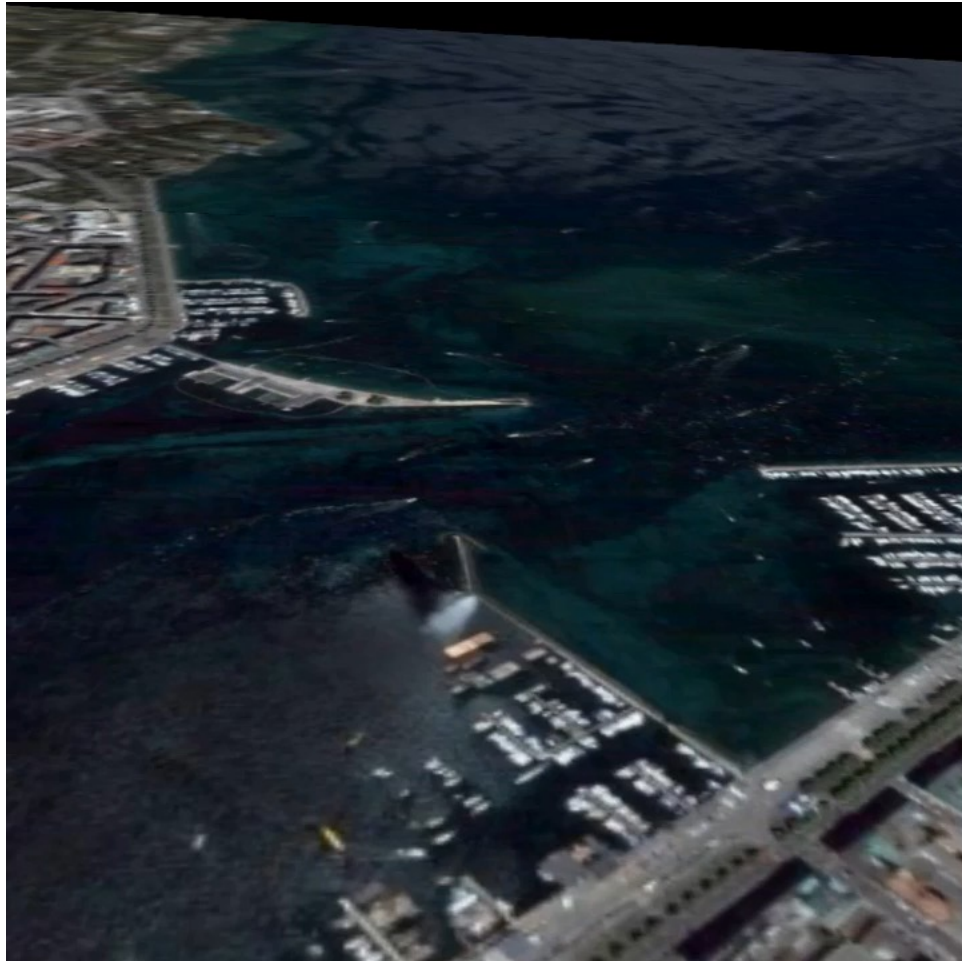


(C) 1999 K. Bernlöhr



- 진행 방향 – 샤워 성장
- 수직 방향 – 단면 형태

대규모 대기 샤워 모사



High Resolution Fly's Eye Observatory

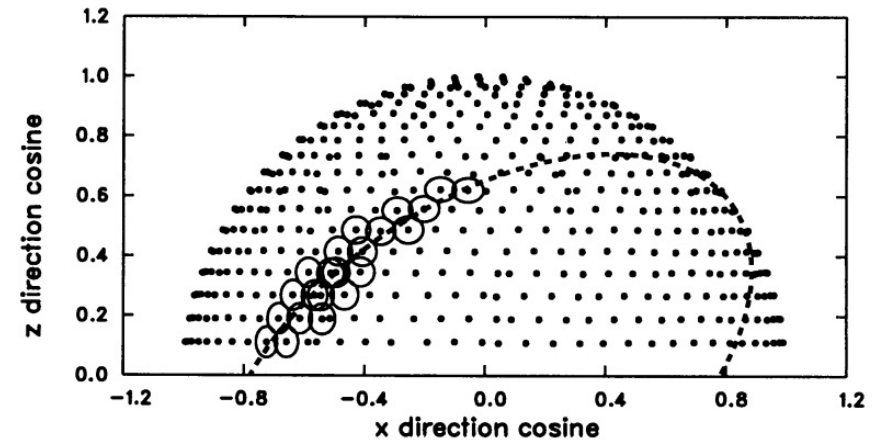
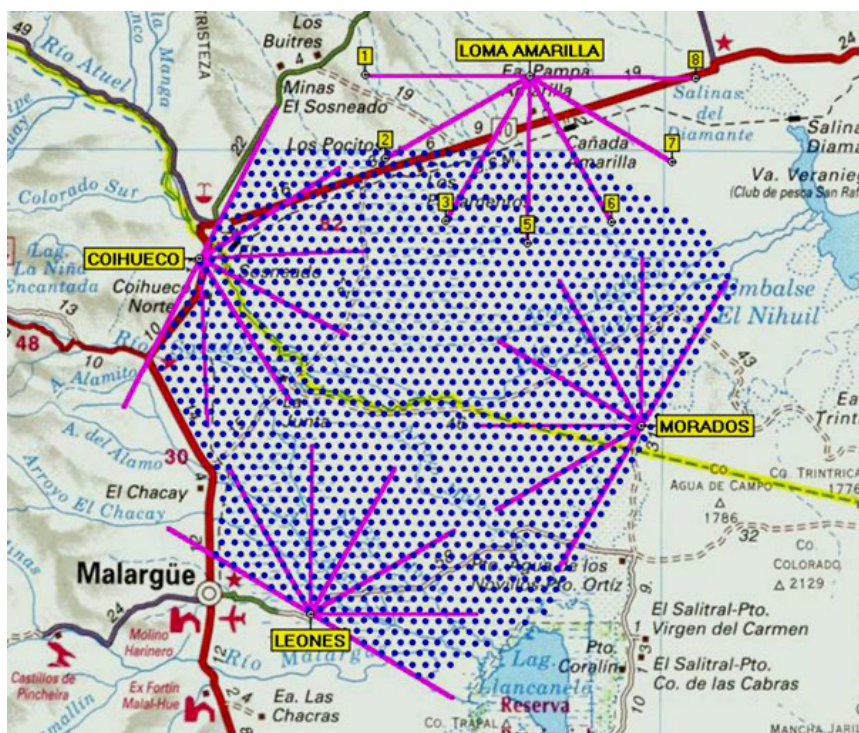


FIG. 1.—The pointing directions of the 22 phototubes which triggered in connection with this event are shown projected into the x - z plane. The x -axis points east, the y -axis north, and the z -axis upward. The triggered phototubes have positive y -components.

Pierre Auger Observatory (Auger)

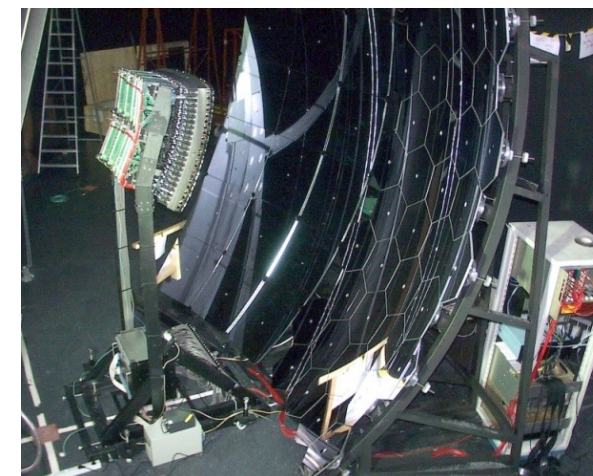
- 위치 : Mendoza, Argentina (35°.20S)
- SD : 1600 water Cherenkov detectors, 1.5 km square grid, 3000 km² area
- FD : 24 telescopes in 4 stations



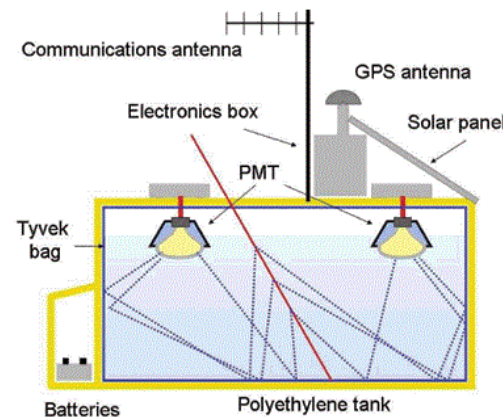
Surface Detector
Water Cherenkov



Fluorescence Detector
PMT pixel camera



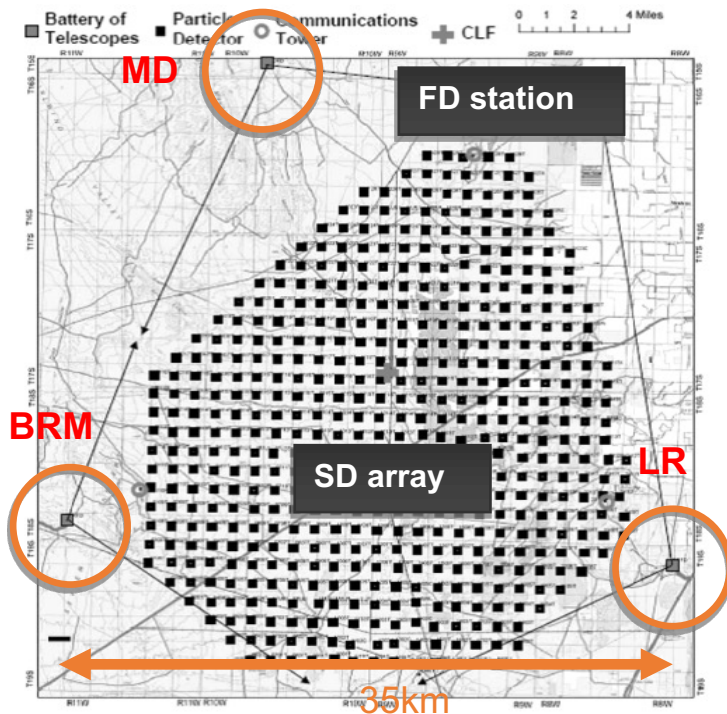
60 km



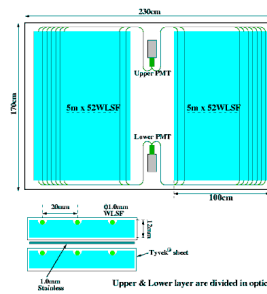
- Duty cycle
 - SD : ~100%
 - FD : ~10-15%

Telescope Array (TA)

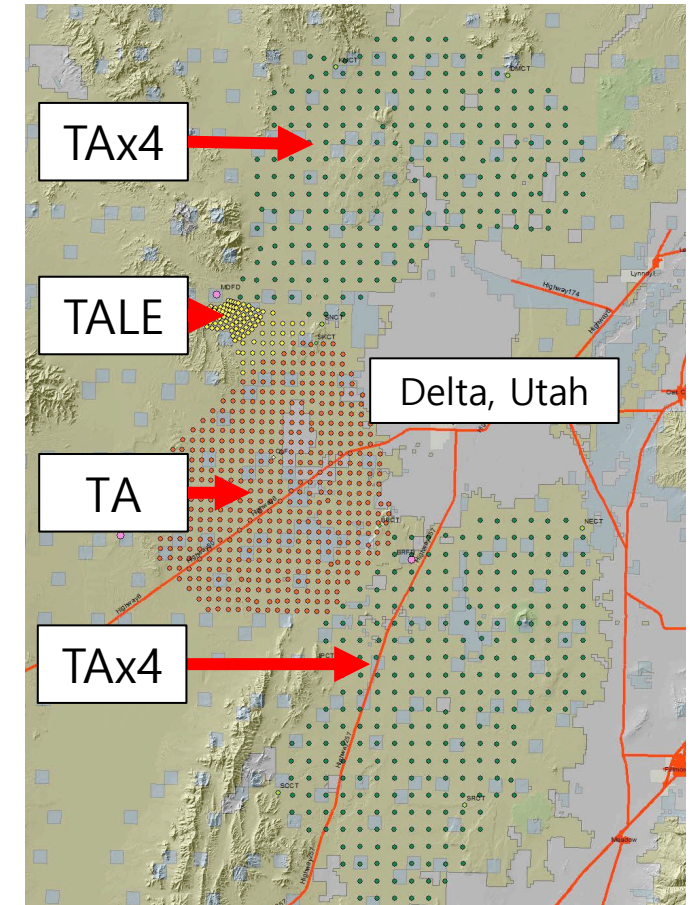
- 위치 : Utah, USA (39°.30N, 112.9°W)
- SD : 507 plastic scintillation detectors, 1.2 km square grid, 678 km² area
- FD : 18 telescopes in 3 stations



Surface Detector
Plastic scintillator



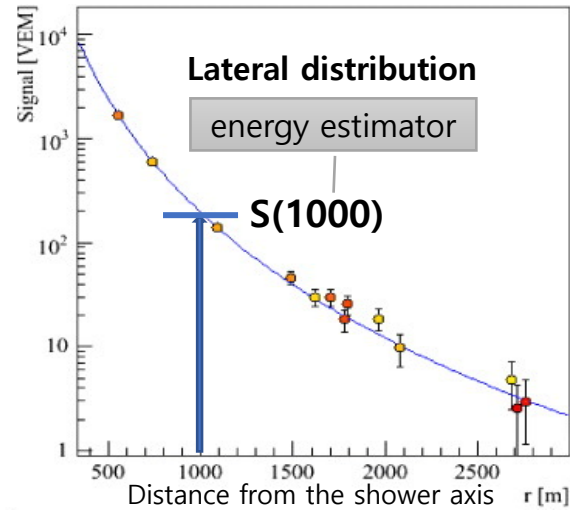
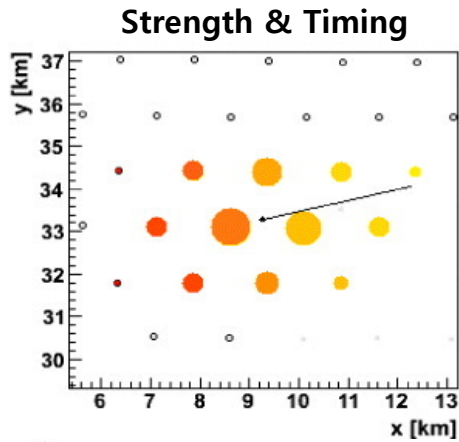
Fluorescence Detector
PMT pixel camera



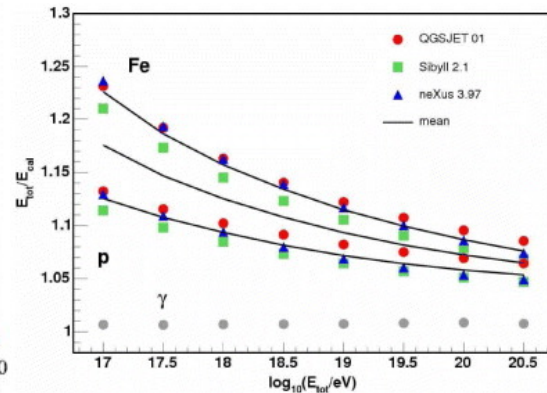
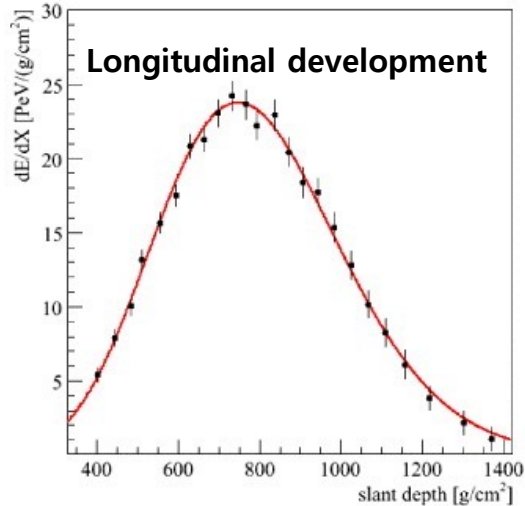
- TALE (TA Low Energy)
- TA x4 (under construction)

도착 방향과 에너지

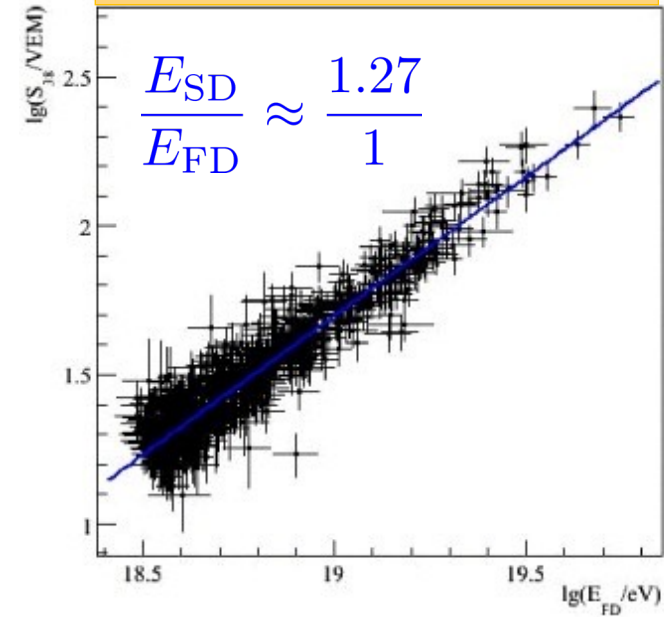
SD



FD



Energy Calibration
by FD-SD hybrid events



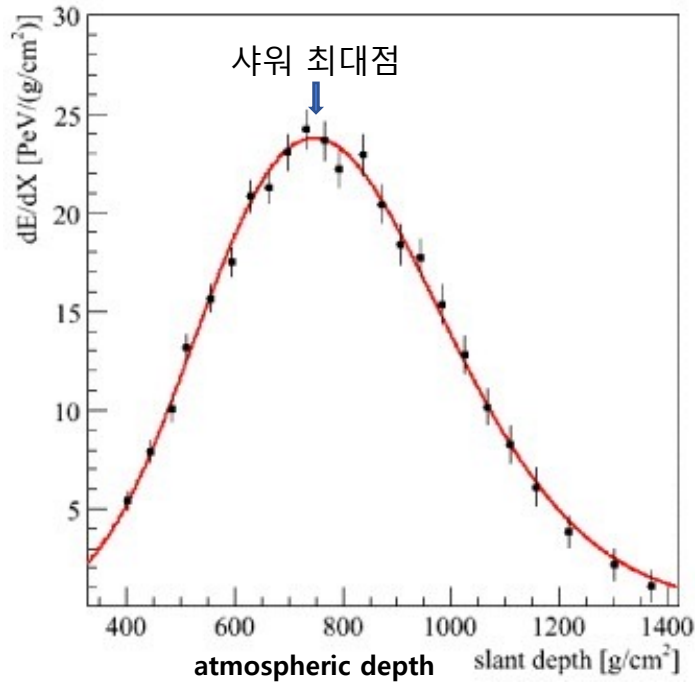
- FD-SD 에너지 스케일 차이 - 원인 불명
- 관측 오차 - 에너지 10~20%, 방향 1~2°

성분

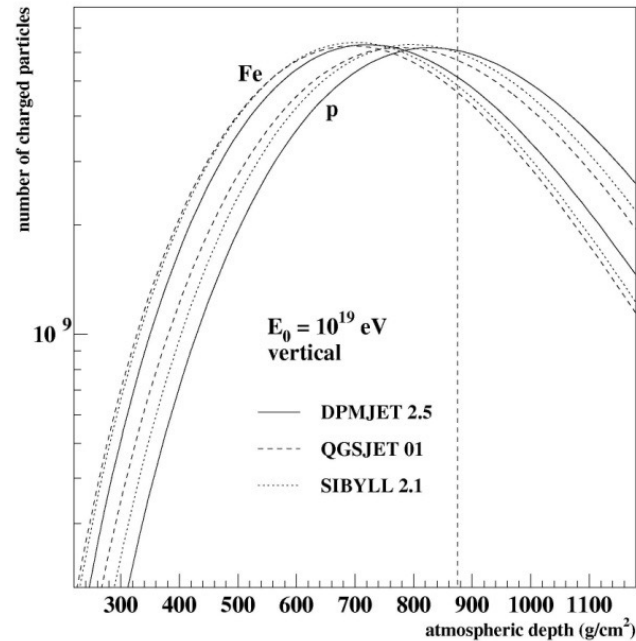
FD – Longitudinal development of shower

$\langle X_{\max} \rangle$ and $\sigma(X_{\max})$

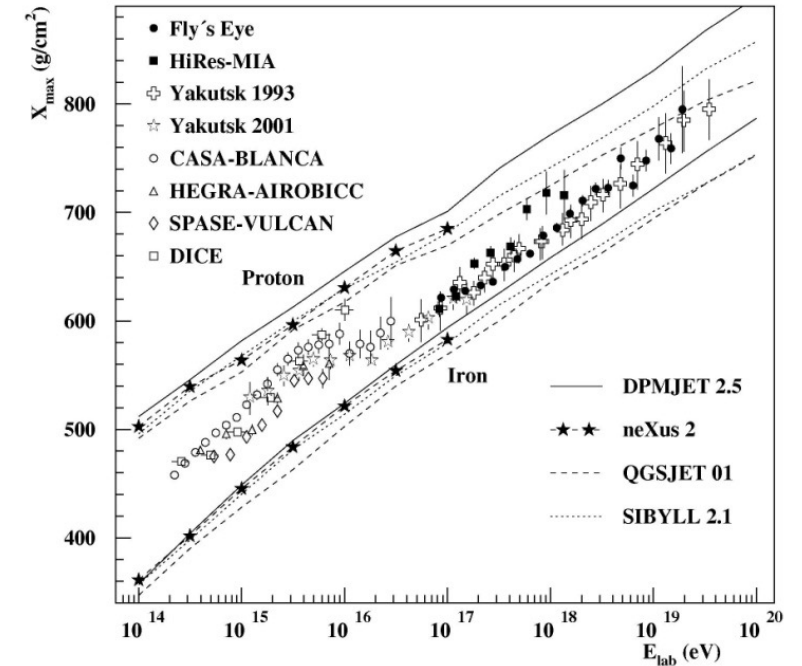
- Stochastic in nature – Composition identification cannot be done for each single event.



X_{\max} – 샤워 최대점의 대기 깊이는 1차 우주선의 에너지와 성분에 따라 달라진다.



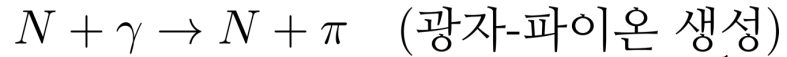
시뮬레이션으로 얻은 양성자(수소)와 철 핵의 평균 샤워 성장 곡선. 양성자가 철보다 X_{\max} 의 값이 크다.



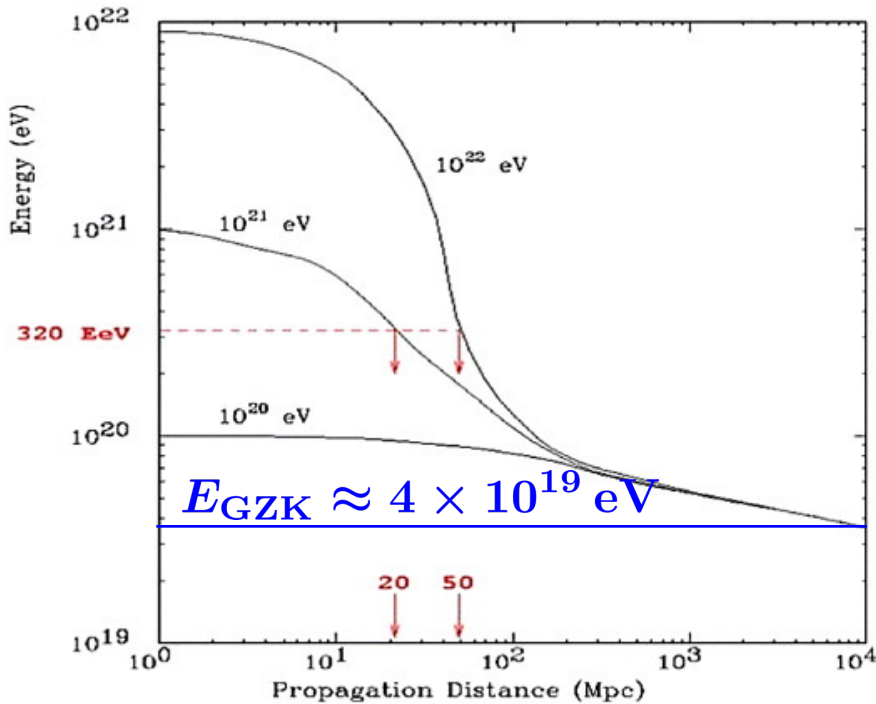
관측된 X_{\max} 값의 에너지에 따른 변동.

전파 - 에너지 손실

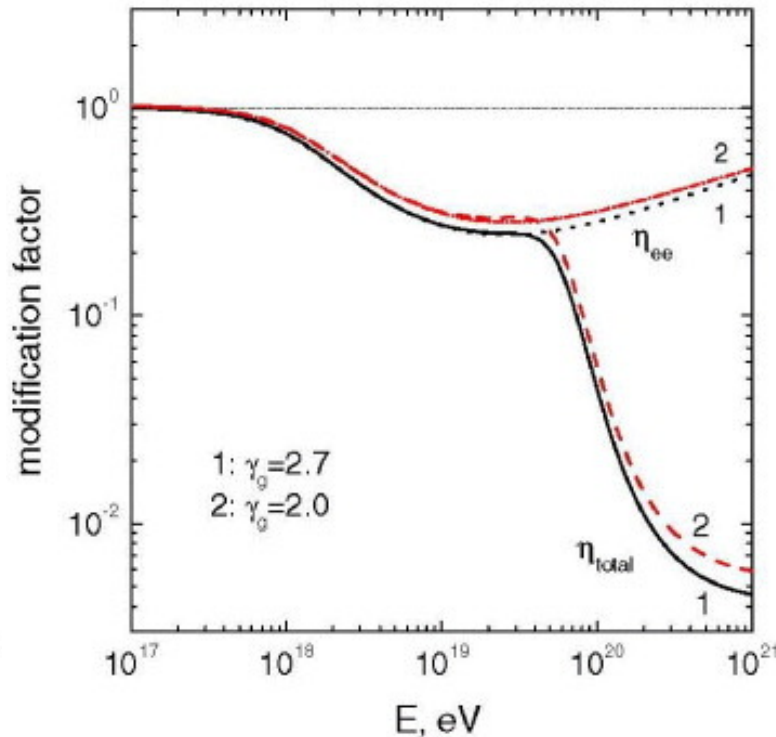
- 초고에너지 우주선 p, A, γ - 우주배경복사의 광자와 상호작용한다.



$$E_{\text{th}} \approx 6.8 \times 10^{19} (E_{\gamma_B} / 10^{-3} \text{ eV})^{-1} \text{ eV} \quad (\text{문턱 에너지})$$



에너지 손실을 고려했을 때
전파한 거리에 따른 양성자 에너지의 변화



관측된 에너지 스펙트럼 / 투입된 에너지 스펙트럼

- GZK 억제 (suppression)
 - 우주선 샘이 균일하게 분포한다면 ...
 - GZK 에너지 이상에서 우주선 다발이 급감 → GZK 억제
 - GZK 반지름 - 양성자 → 100Mpc

전파 - 방향 굴절과 시간 지연

- 우주 자기장 → 방향 굴절과 시간 지연
- 굴절 각도 - 규칙적 자기장

$$\delta\theta = 0.5^\circ Z \left(\frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \right)^{-1} \left(\frac{d}{1 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{B}{10^{-9} \text{ G}} \right)$$

- 굴절 각도 - 난류성 자기장

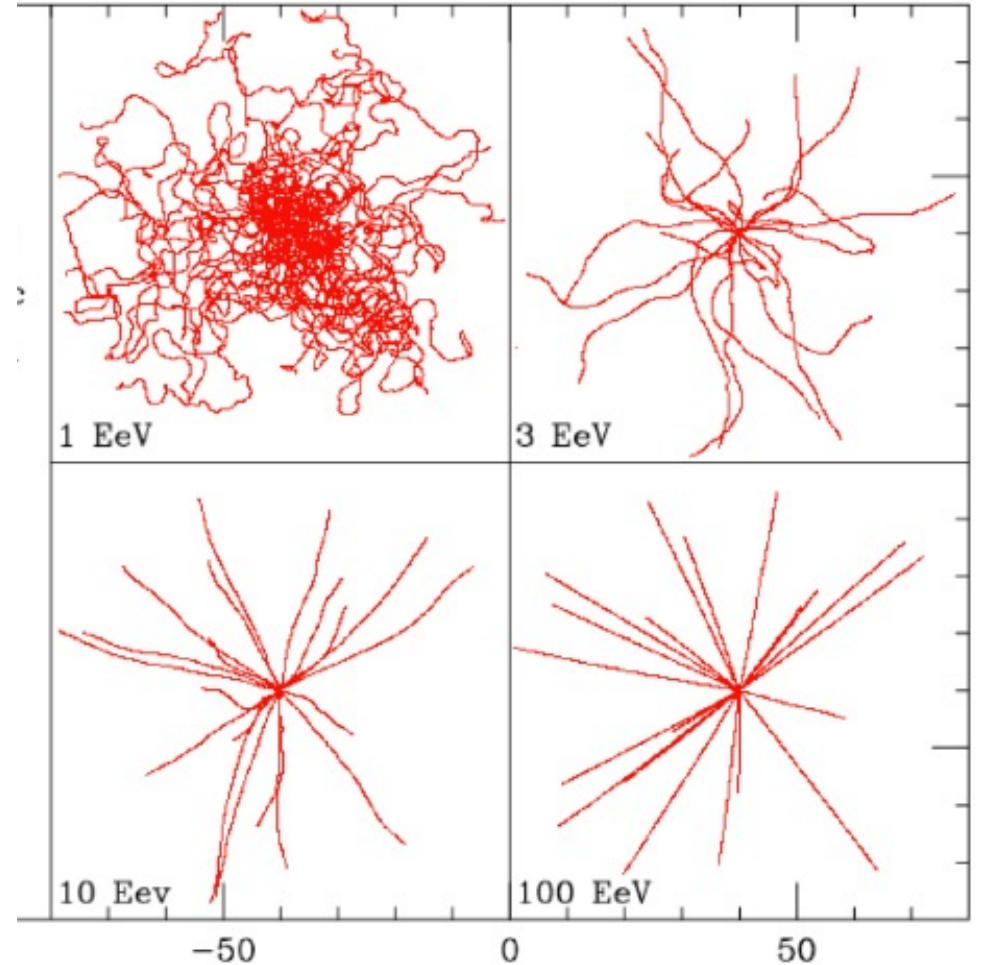
$$\delta\theta_{\text{rms}} \approx 0.4^\circ Z \left(\frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \right)^{-1} \left(\frac{(d \cdot L)^{1/2}}{\text{Mpc}} \right) \left(\frac{B_{\text{rms}}}{10^{-9} \text{ G}} \right)$$

- 우리 은하 자기장

- $B_G \sim 10^{-6} \text{ G}$
- $R_G \sim 10 \text{ kpc}$

- 은하외부 자기장

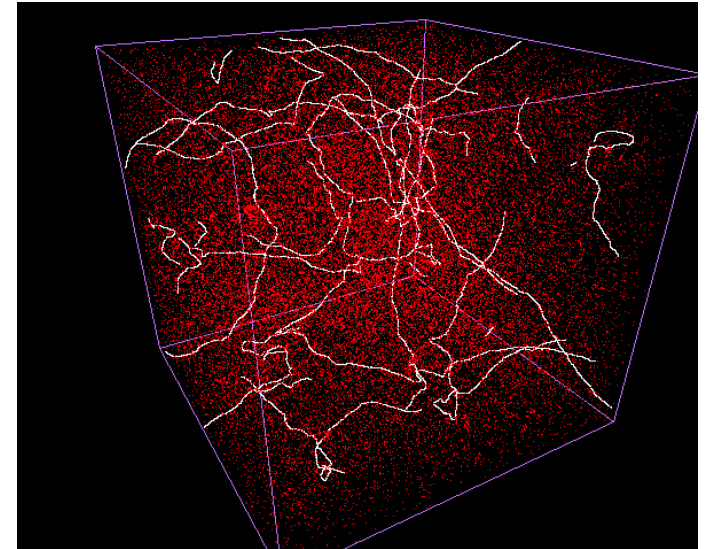
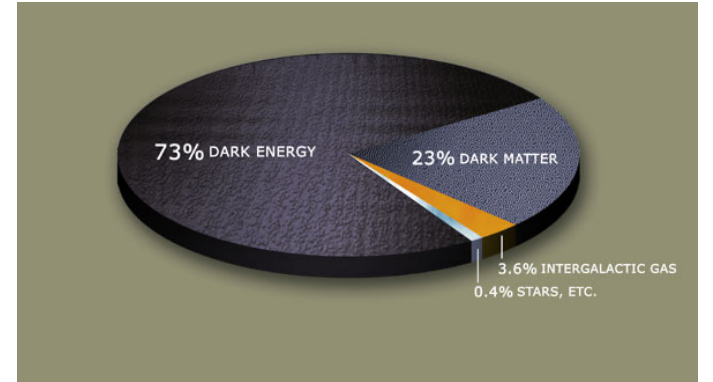
- $B_{EG} \sim 10^{-9} - 10^{-6} \text{ G}$ (매우 불확실)



Proton propagation in a magnetic field of 10^{-9} G

생성 - 하향 (Top-down) 모형

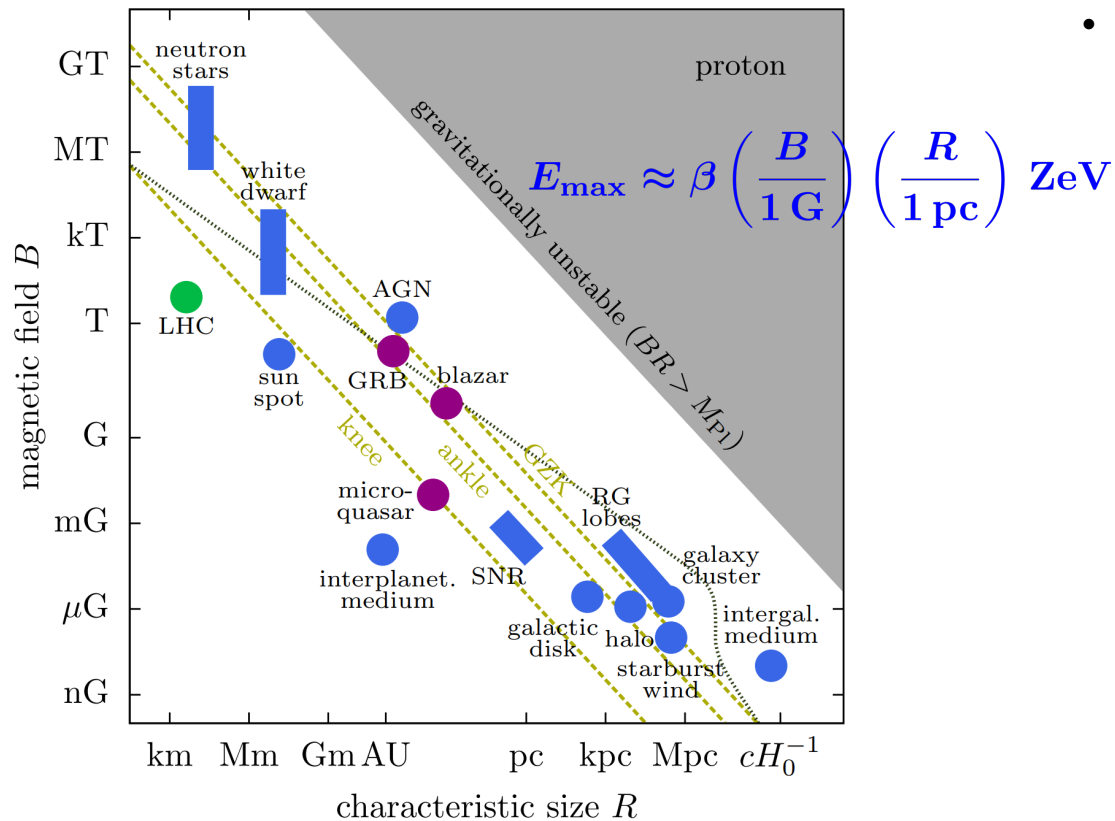
- 초고에너지 우주선의 하향식 우주적 기원에는 표준 우주론과 입자 물리 표준 모형을 넘어서는 새로운 물리가 필요하다.
 - 엄청나게 무거운 입자의 엄청나게 느린 붕괴
 - 위상 결함에서 나오는 방사선
- 하향 모형의 신호
 - 에너지 스펙트럼 형태 - GZK 억제가 없는 고유한 스펙트럼
 - 성분 - 중성미자와 광자가 대부분을 차지한다.
 - 도착 방향
 - 엄청나게 무거운 암흑 물질 입자의 붕괴
→ 은하 중심 방향에서 강한 신호



생성 - 상향 (Bottom-up) 모형

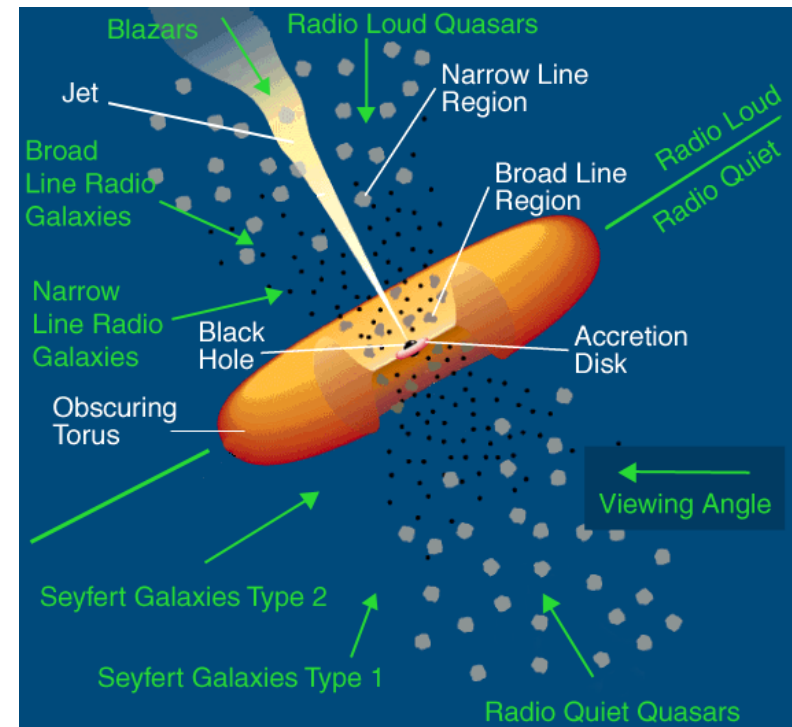
가속 방법

- 확산성 충격파 가속 (Diffusive shock acceleration)
- 얻을 수 있는 최대 에너지 (Hillas plot)

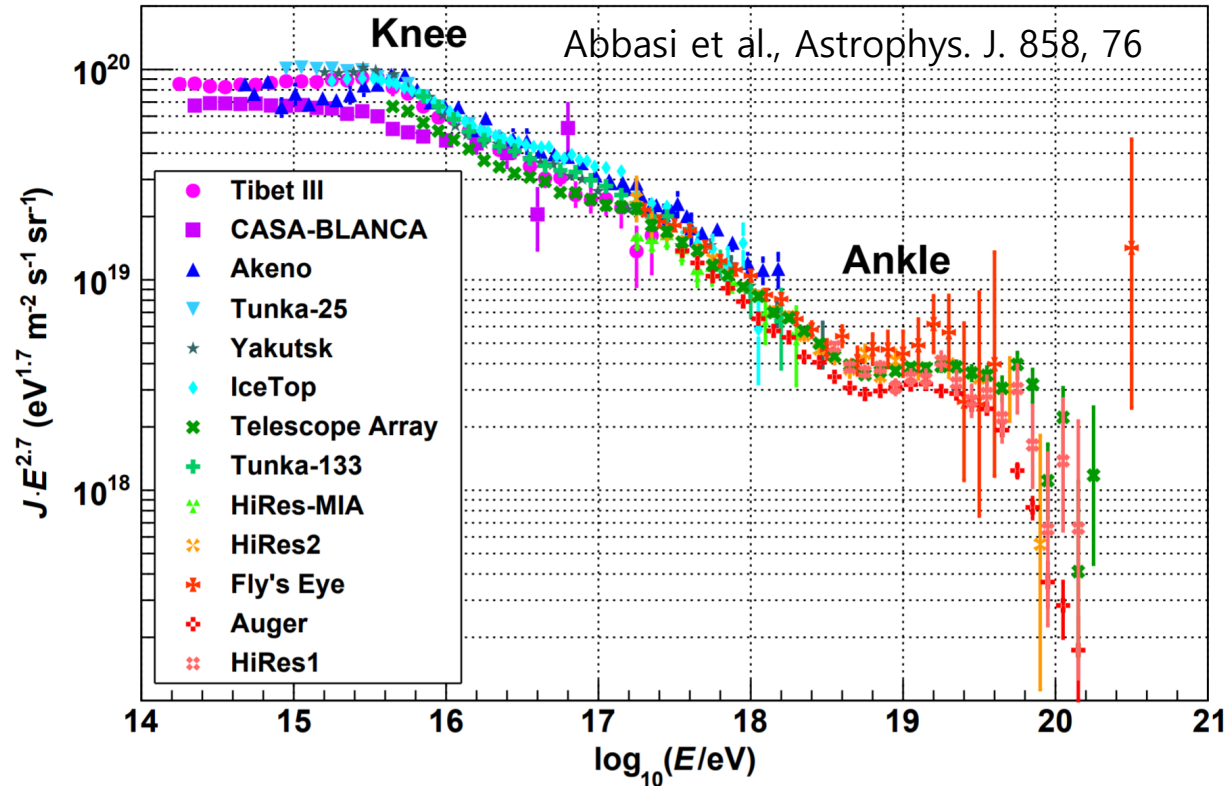


가속 장소

- 활동성 은하핵 (AGN) – 초거대 질량 블랙홀, 제트와 로브
- 별폭발 은하 (SBG) – 감마선 폭발 (GRB), Magnetars
- 거대 우주 구조물 – 은하단, 필라멘트, ...



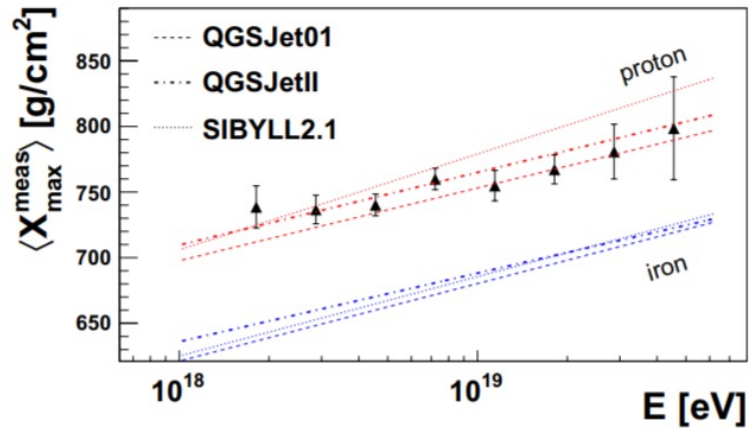
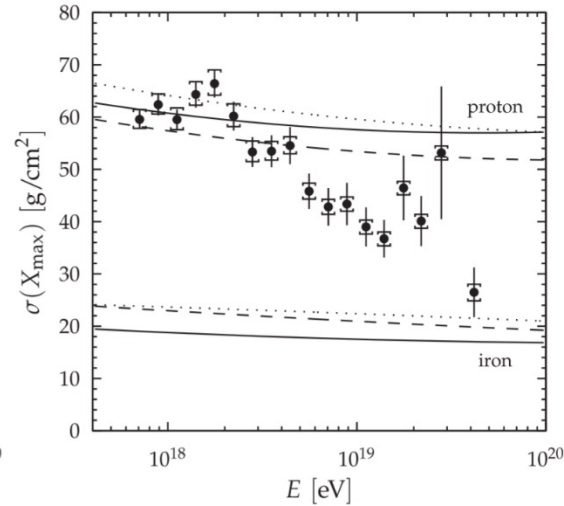
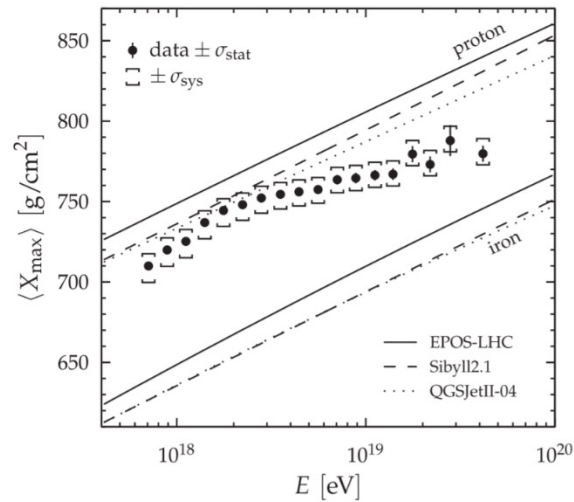
Issues – 에너지 스펙트럼



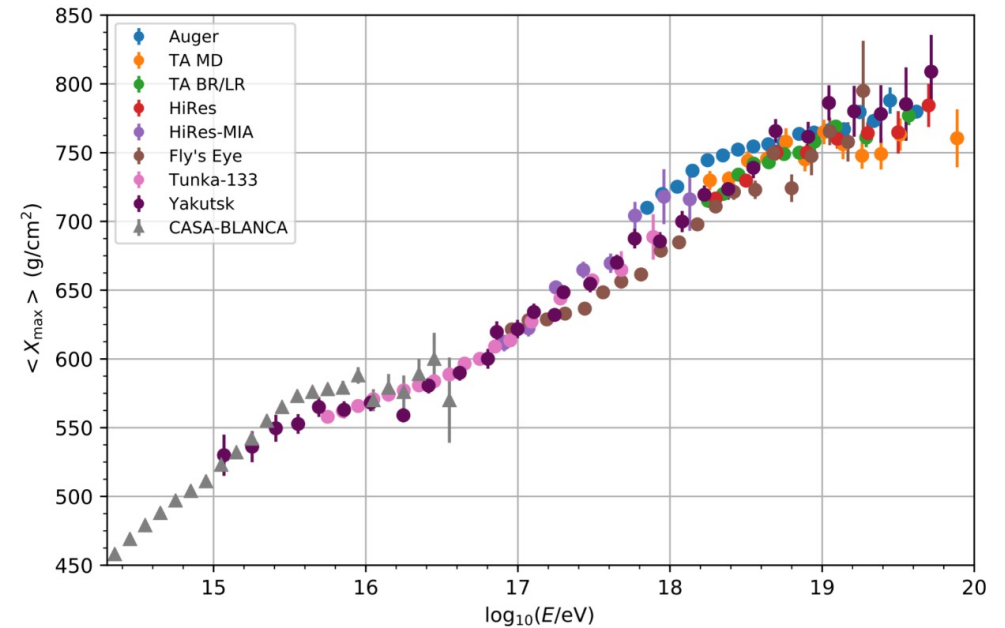
- Auger / TA – 에너지 스케일에 차이가 있다!!!
- 무릎 (Knee)
 - 가파른 하강 → 투입 스펙트럼의 끝?
 - 천체물리 모형 – 가벼운 핵 → 무거운 핵 전이
 - 누출 상자 모형 – 우리 은하 우주선의 누출
 - 상호작용 모형 – 대기과 미지의 상호작용
- 발목 (Ankle)
 - 상승 → 새로운 성분?
 - 발목 모형 – 우리 은하 → 은하 외부 전이
 - 하강 모형 – GZK 2차 우주선 축적
- GZK 억제
 - 1990s, AGASA – GZK 억제가 관측 안됨
 - 2010s, HiRes, Auger, TA – GZK 억제 확인!!!

Issues – 성분

▪ X_{\max} – Auger vs TA

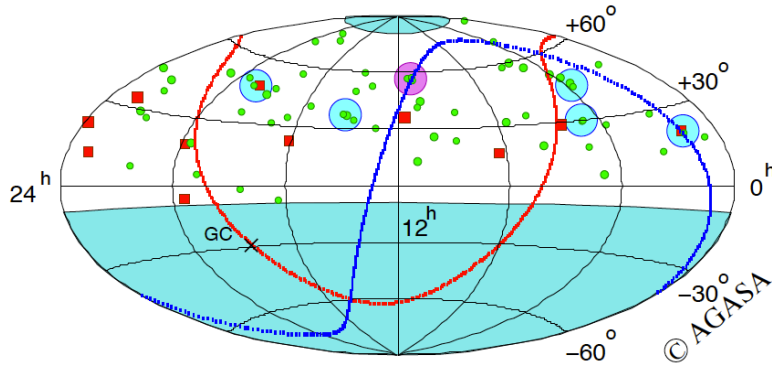


- Auger – 양성자 → 무거운 핵 전이
- TA – 양성자
- 통계적 에러 범위 내에서 두 X_{\max} 결과는 양립



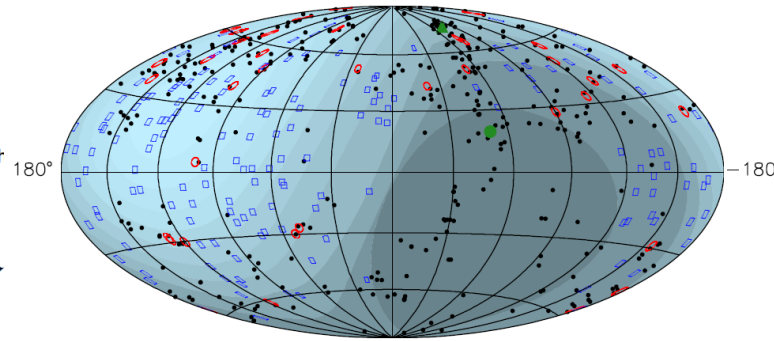
Issues – 도착 방향

- AGASA (Hayashida et al. 2000)



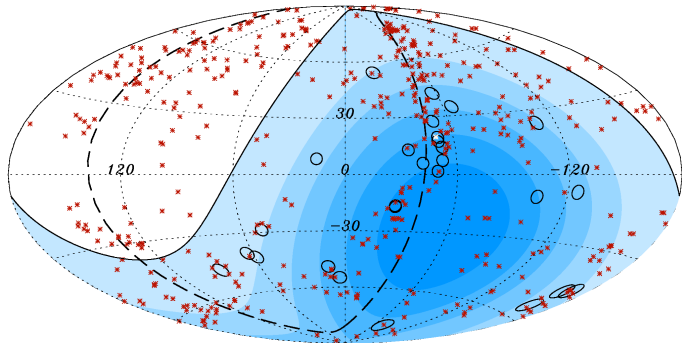
Isotropic, small clustering

- HiRes (Abbasi et al. 2008)



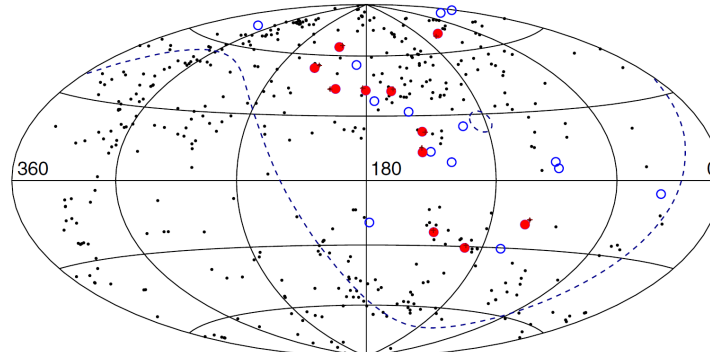
Anisotropic

- Auger (Abreu et al. 2010)



Anisotropic, Correlation with AGN

- TA (Abu-Zayyad et al. 2012)

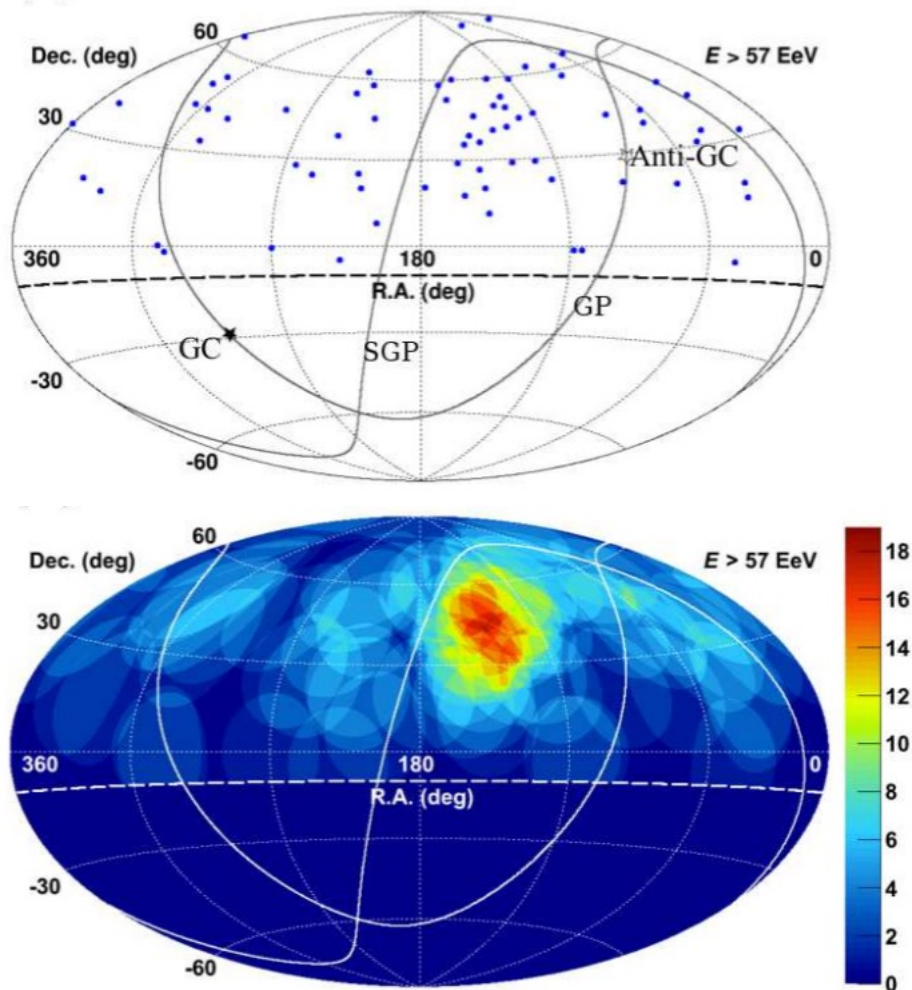


Anisotropic, Correlation with AGN

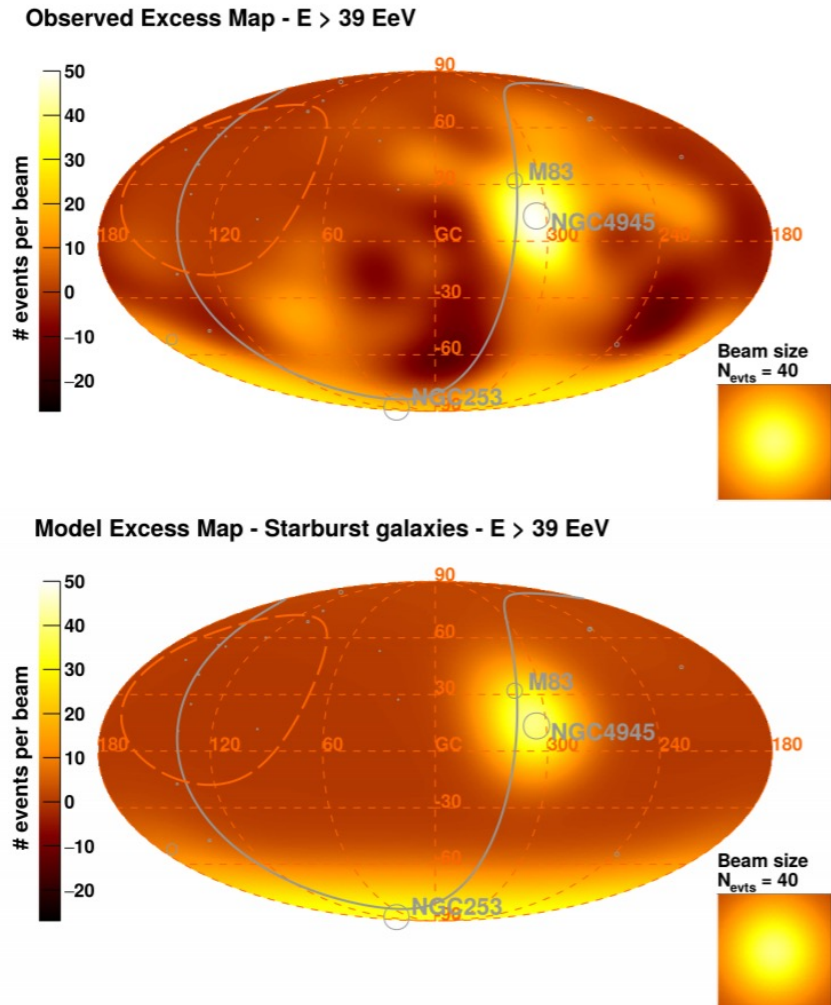
- 낮은 에너지 – 등방성
 - 발목 아래 – 우리 은하 우주선
 - 강한 우리 은하 자기장
 - 발목 위 – 은하 외부 우주선
 - 균일하게 분포한 우주선 샘플
- GZK 에너지 위의 비등방성
 - GZK 반지름 내 우주선 샘플의 분포
 - 불균일 → 비등방성
 - 은하 외부 자기장의 영향
 - 크지 않다 (제발...)
- 초고에너지 우주선과 GZK 반지름 안쪽 우주선 샘플의 상관관계
 - 우주선 – $E > 57 \text{ EeV}$ (Auger, TA)
 - 샘플 – 거리 100 Mpc 이내
 - 자기장의 영향?

Issues – 도착 방향

- TA – Hot Spot : $E \geq 57$ EeV

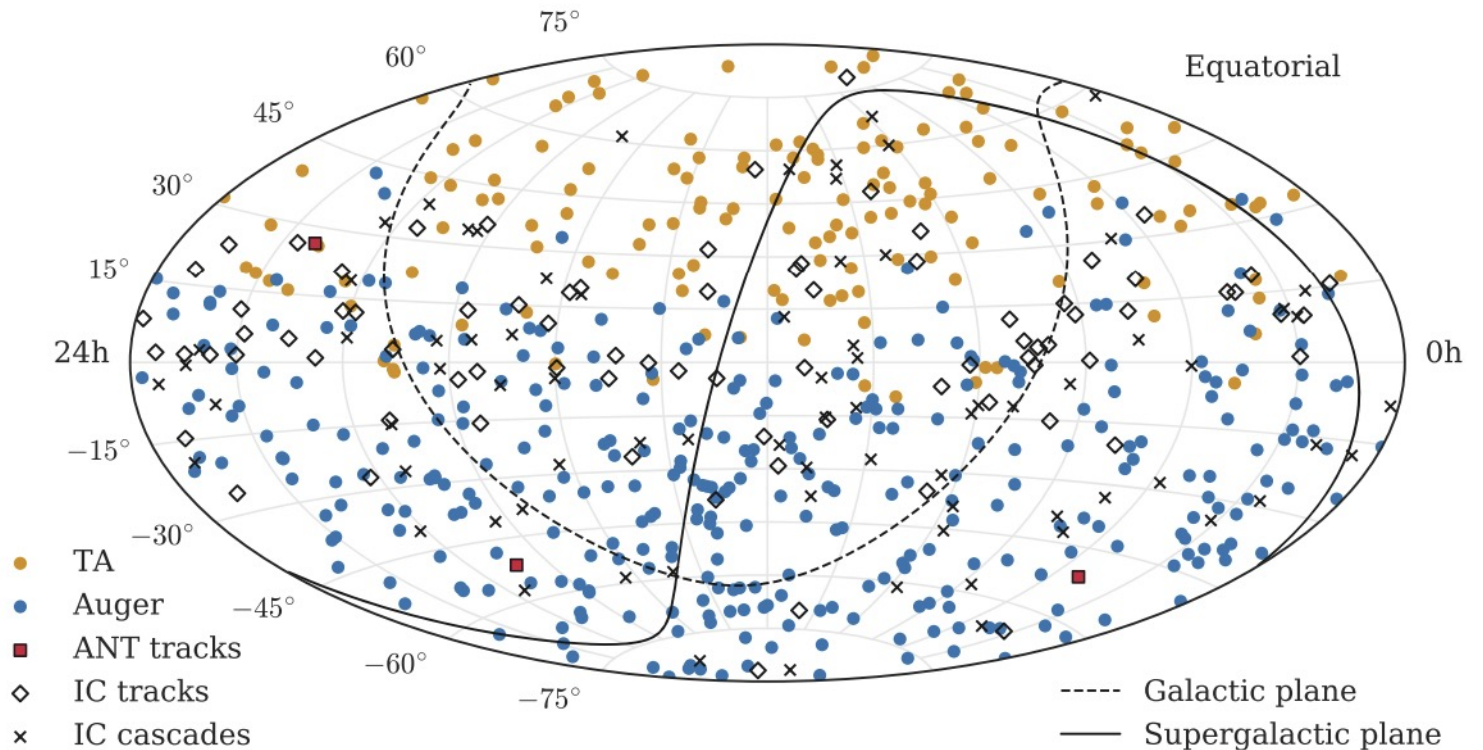


- Auger – 별폭발 은하와 상관관계 : $E \geq 39$ EeV

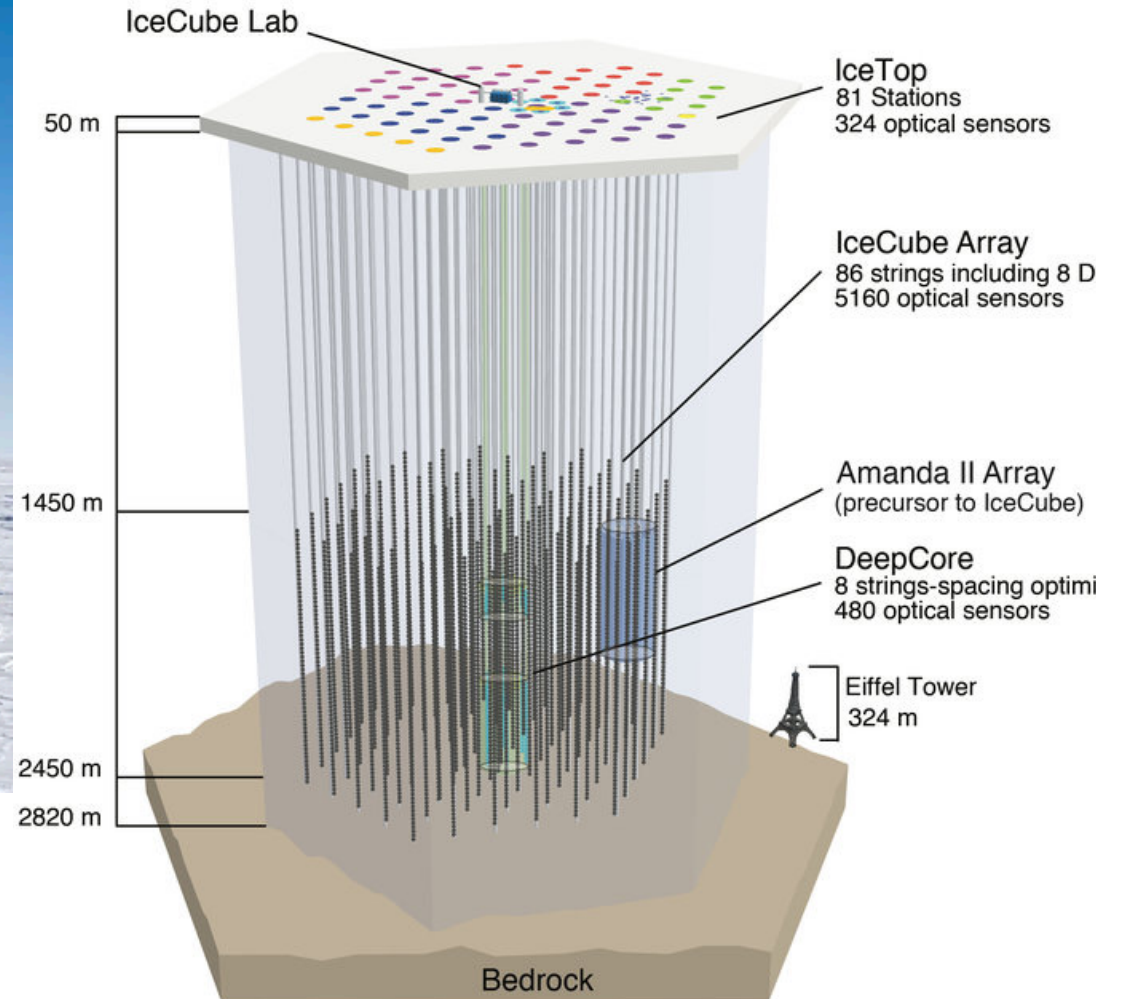


다중 전달자 - 초고에너지 우주선과 중성미자

- 초고에너지 우주선과 고에너지 중성미자 도착 방향의 상관 관계
 - 관측 데이터 - 중성미자 (ANTARES+IceCube) + 초고에너지 우주선 (Auger+TA)
 - JCAP 01 (2016) 037
 - Correlation - 3σ at 22°
 - ApJ 934, 164 (2022)
 - No significant correlation

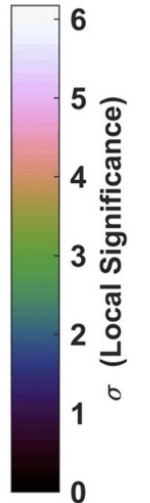
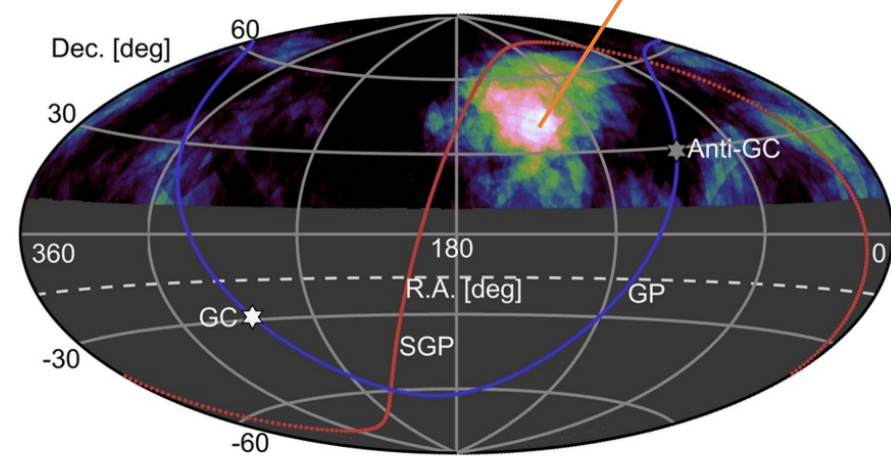
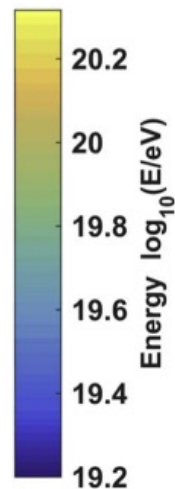
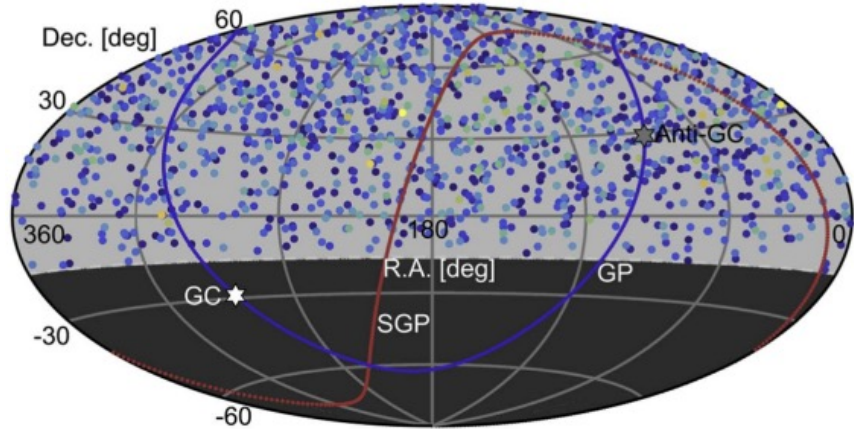
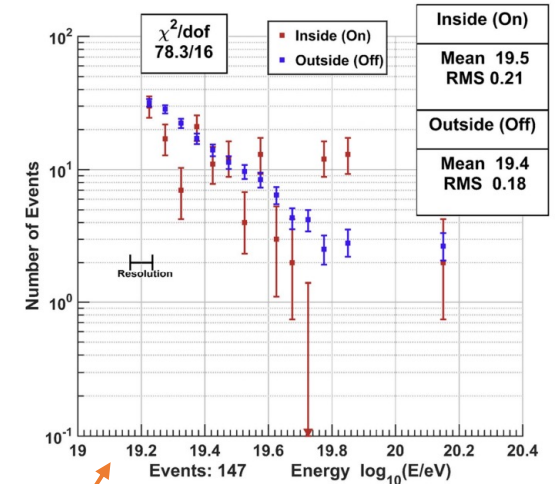


IceCube Neutrino Observatory



TA hot spot – Energy spectrum

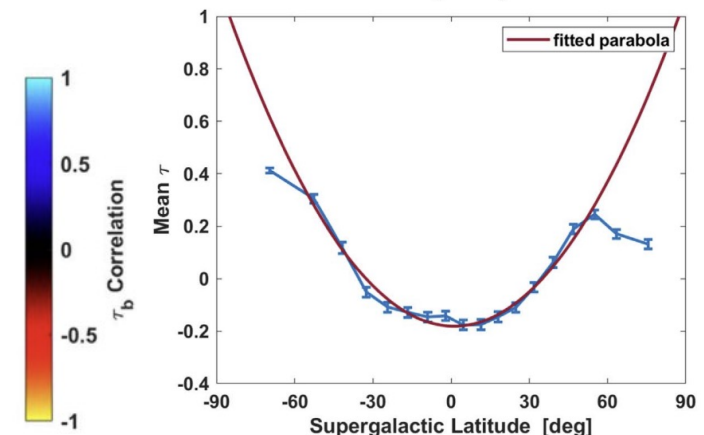
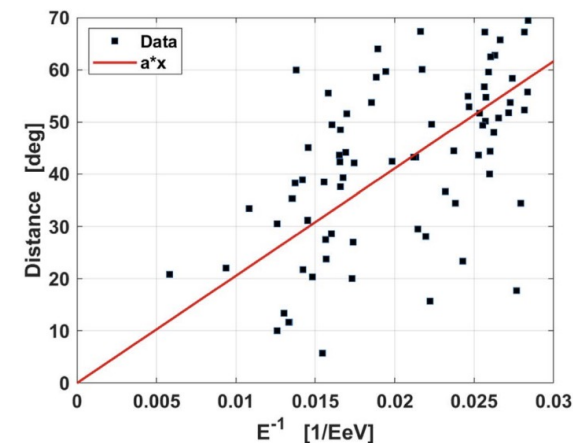
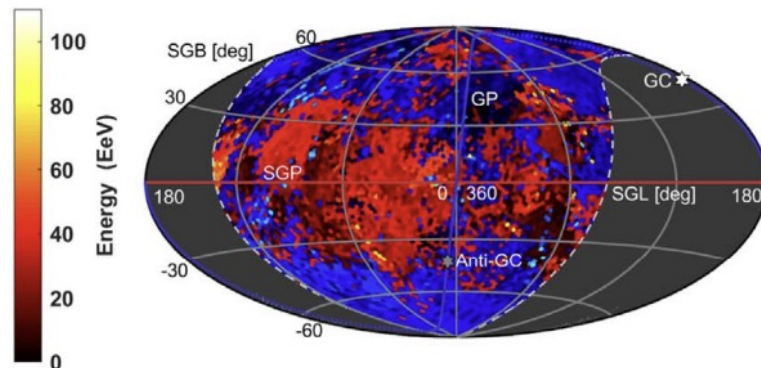
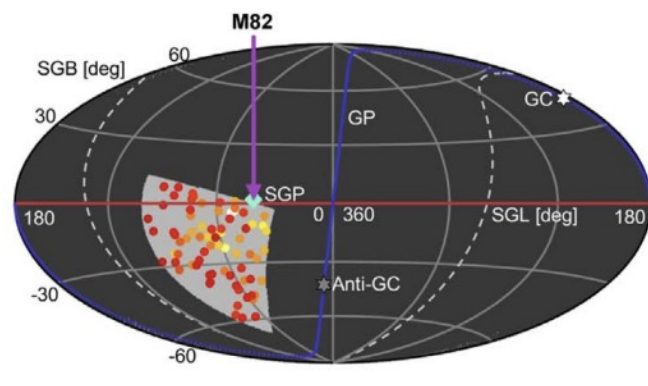
- Energy spectrum anisotropies Astrophys.J. 862 (2018) 91
 - TA 7-year data with $E \geq 10^{19.2}$ eV
 - Scan the sky with circular window of equal exposure (14% – adjusted)
 - Comparison method for energy spectrum
 - Binned Poisson likelihood ratio goodness of fit (GOF) test
 - Maximum significance at $(\alpha = 139^\circ, \delta = 45^\circ)$ with $p = 9 \times 10^{-5}$ (3.74σ)



Combined analysis – AD & E – TA

- Correlation between arrival directions and energy inverses
 - TA 7-year and 10-year data
 - Blind search for magnetic multiplets (point-like sources) – Scan the sky with wedge windows (shape adjusted) to examine the correlation between the angular distance from the source (position adjusted) and the energy inverse of CR
 - Comparison method for correlation – Kendal's τ ranked correlation
 - Supergalactic cosmic-ray multiplet
Significant correlations along the supergalactic plane

Astrophys.J. 899 (2020) 86

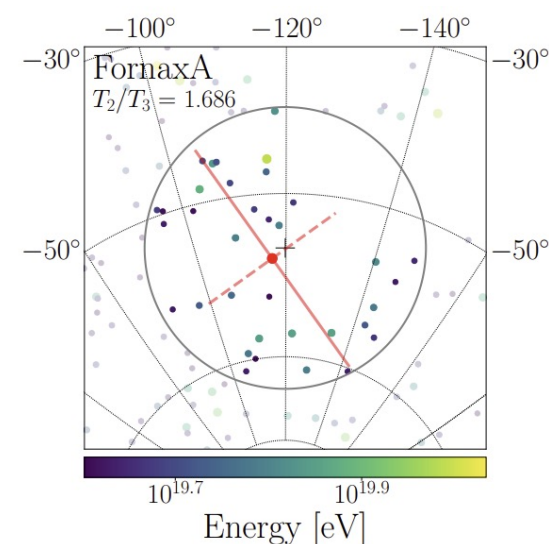
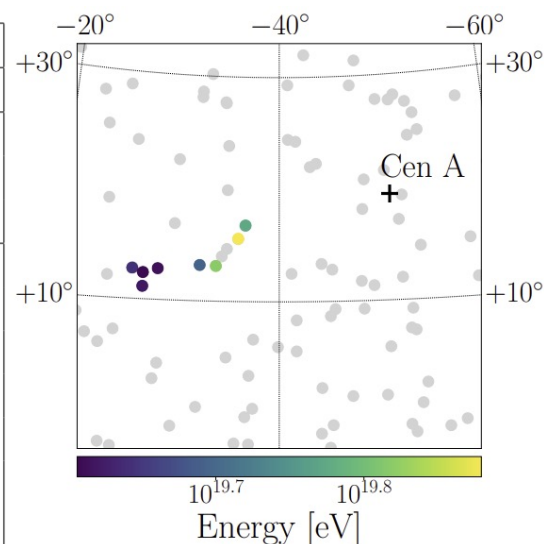


Combined analysis – AD & E – Auger

- Correlation between arrival directions and energy inverses
 - Auger 14.5-year data
 - All-sky blind search and nearby-source-based search
 - Correlation between their arrival direction and the inverse of their energy → **Multiplet**
 - Principal axis analysis aimed to detect the elongated patterns → **Thrust**
 - No statistically significant features

JCAP 06 (2020) 017
Eur.Phys.J.C 75 (2015) 269

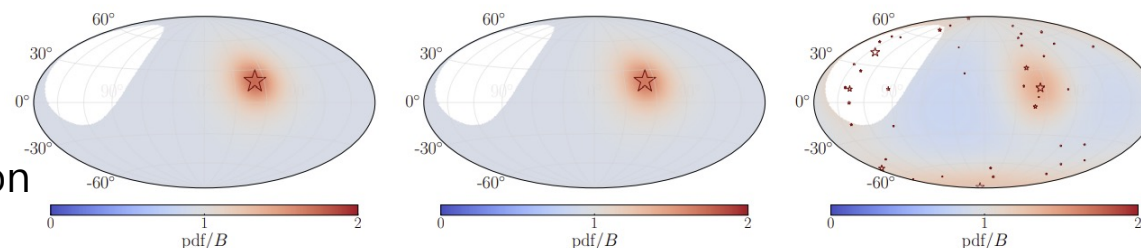
Isotropic chance probabilities			
Target	Multiplets (40 EeV)	Thrust ratio (20 EeV)	Thrust ratio (40 EeV)
Cen A	1.2×10^{-2}	0.75	0.42
M 87	0.61	0.44	0.85
Fornax A	0.96	0.21	1.9×10^{-2}
NGC 253	0.54	0.98	0.88
NGC 4945	0.25	2.9×10^{-2}	3.7×10^{-2}
Circinus	0.99	0.82	0.58
M 83	0.20	0.14	0.54
NGC 4631	—	0.59	0.85
NGC 1808	0.61	0.63	0.77
NGC 1068	0.75	6.0×10^{-2}	0.29



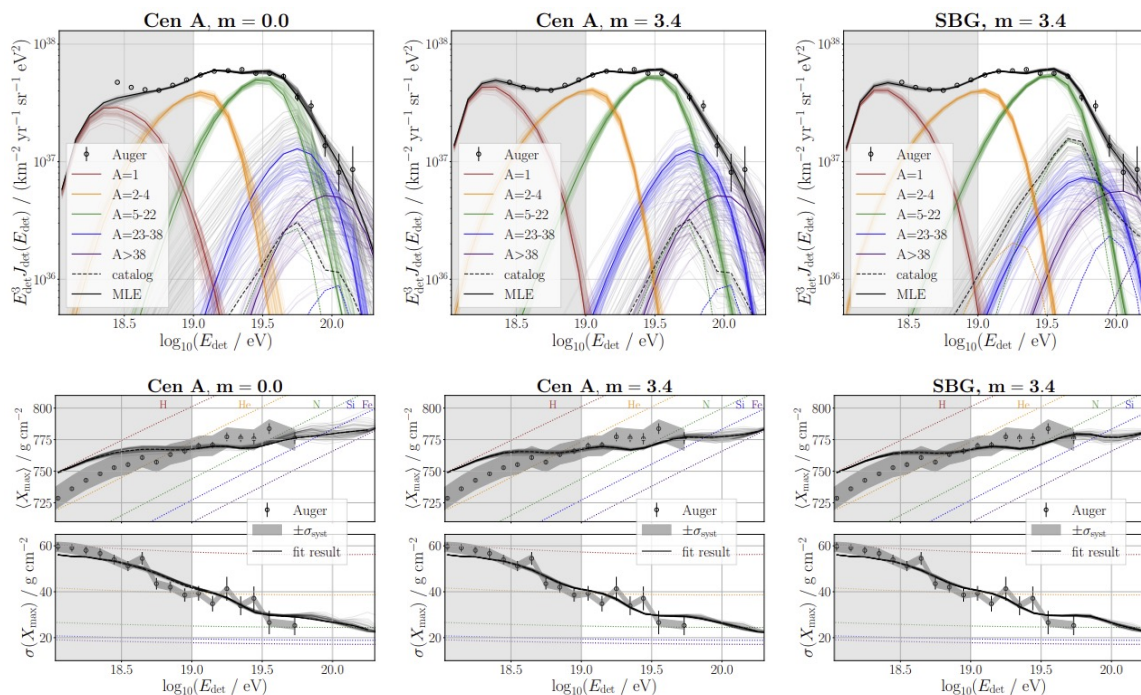
Combined analysis – Auger

- Source model – 9 parameters
 - Foreground (Cen. A, SBGs) + Background
- Auger data set
 - Arrival directions, Energy spectrum, Composition
- Best fit
 - SBG – 20% at 40 EeV, Blurring 20°

JCAP 01 (2024) 022

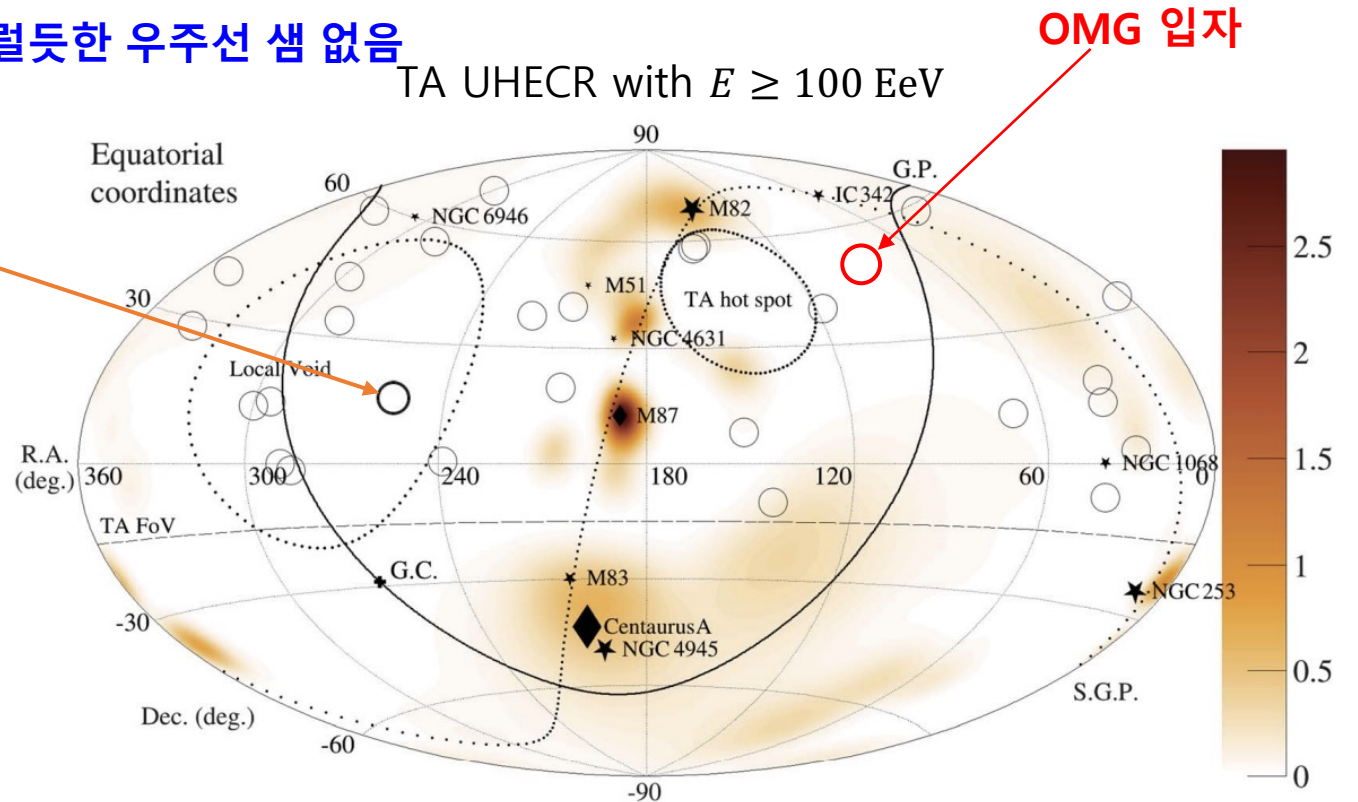


	Cen A, $m = 0$ (flat)		Cen A, $m = 3.4$ (SFR)		SBG, $m = 3.4$ (SFR)	
	posterior	MLE	posterior	MLE	posterior	MLE
γ	$-1.67^{+0.48}_{-0.47}$	-2.21	$-3.09^{+0.23}_{-0.24}$	-3.05	$-2.77^{+0.27}_{-0.29}$	-2.67
$\log_{10}(R_{\text{cut}}/V)$	$18.23^{+0.04}_{-0.06}$	18.19	$18.10^{+0.02}_{-0.02}$	18.11	$18.13^{+0.02}_{-0.02}$	18.13
f_0	$0.16^{+0.06}_{-0.14}$	0.028	$0.05^{+0.01}_{-0.03}$	0.028	$0.17^{+0.06}_{-0.08}$	0.19
$\delta_0/^\circ$	$56.5^{+29.4}_{-12.8}$	16.5	$27.6^{+2.7}_{-16.3}$	16.8	$22.2^{+5.3}_{-4.0}$	24.3
I_{H}	$5.9^{+2.5}_{-1.7} \times 10^{-2}$	7.1×10^{-2}	$8.3^{+2.0}_{-8.3} \times 10^{-3}$	1.6×10^{-5}	$6.4^{+1.3}_{-6.4} \times 10^{-3}$	4.3×10^{-5}
I_{He}	$2.3^{+0.3}_{-0.5} \times 10^{-1}$	1.9×10^{-1}	$1.3^{+0.2}_{-0.2} \times 10^{-1}$	1.4×10^{-1}	$1.7^{+0.3}_{-0.4} \times 10^{-1}$	1.8×10^{-1}
I_{N}	$6.3^{+0.3}_{-0.3} \times 10^{-1}$	6.2×10^{-1}	$7.4^{+0.3}_{-0.3} \times 10^{-1}$	7.3×10^{-1}	$7.4^{+0.3}_{-0.3} \times 10^{-1}$	7.4×10^{-1}
I_{Si}	$6.5^{+3.6}_{-3.3} \times 10^{-2}$	9.9×10^{-2}	$9.2^{+3.2}_{-2.3} \times 10^{-2}$	1.1×10^{-1}	$5.7^{+2.5}_{-3.1} \times 10^{-2}$	5.4×10^{-2}
I_{Fe}	$1.6^{+0.7}_{-1.0} \times 10^{-2}$	2.0×10^{-2}	$2.5^{+0.8}_{-0.9} \times 10^{-2}$	2.3×10^{-2}	$2.5^{+0.8}_{-0.9} \times 10^{-2}$	2.3×10^{-2}
$\log b$	-264.0 ± 0.2		-272.6 ± 0.2		-266.9 ± 0.1	
D_E ($N_J = 14$)		22.3		28.5		33.3
$D_{X_{\text{max}}}$ ($N_{X_{\text{max}}} = 74$)		124.9		130.6		126.2
D		147.2		159.1		159.5
$\log \mathcal{L}_{\text{ADs}}$		10.5		10.4		13.3
$\log \mathcal{L}$		-239.1		-245.1		-242.4



아마테라스 입자

- TA SD(지면검출기)에서 검출된 최고 에너지 우주선 Science 382 (2023) 903
 - $E = 2.4 \times 10^{20}$ eV
 - 아마테라스(天照, 일본 태양 여신) 입자
 - 도착 방향 - 국소 공동 (local void), 그럴듯한 우주선 샘 없음



논의와 전망

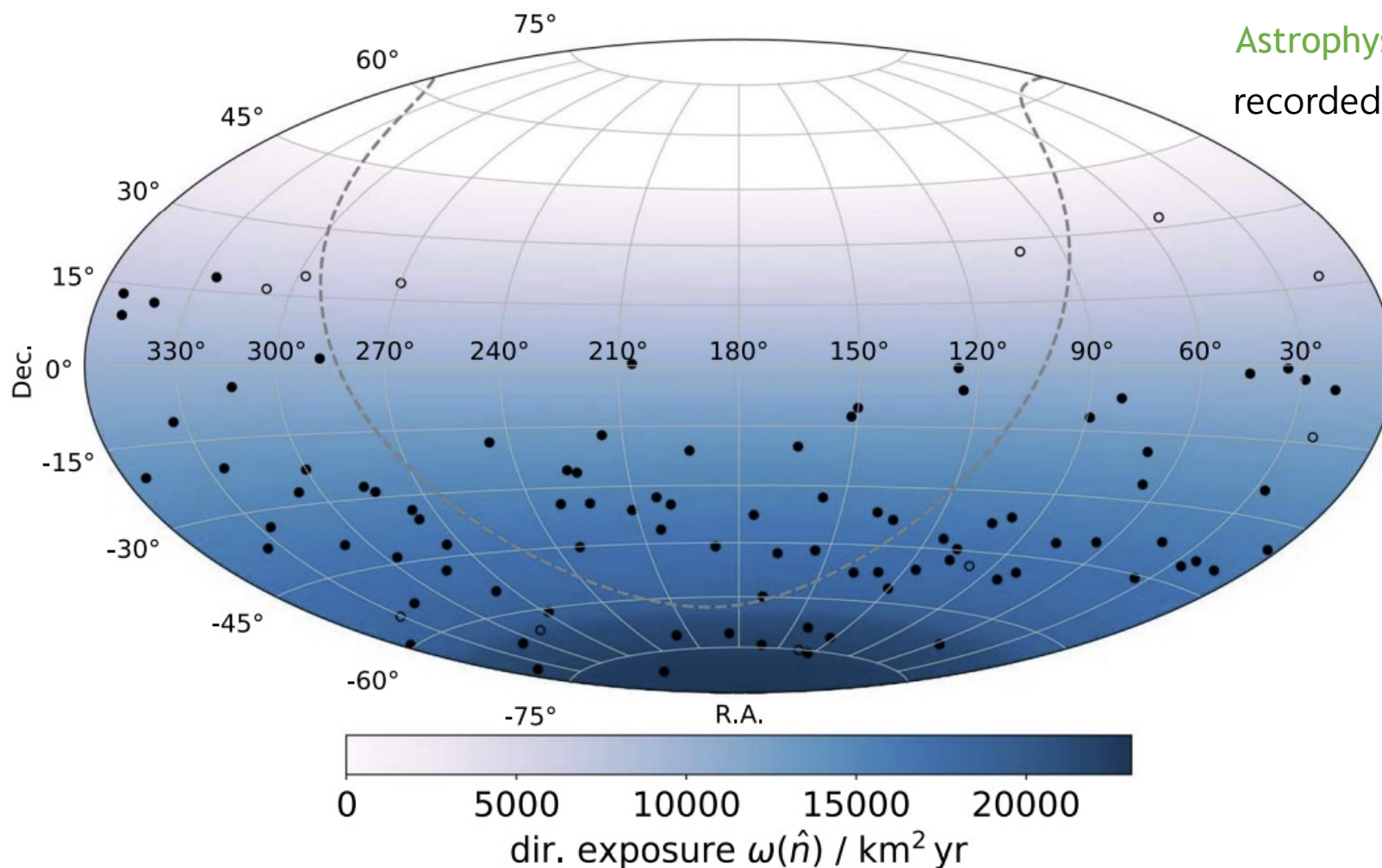
- 통계적 분석을 확장하는 방향
 - SD 데이터에서 성분 구하기
 - Multiple observables and Deep learning
 - 통합 분석
 - 다중 전달자 – 중성미자, 감마선
 - 복합 분석 – 도착 방향, 에너지 스펙트럼, 성분
- 어떻게 충분한 데이터를 확보할까?
 - 북반구 – TAx4 is running.
 - 우주기반 검출기
 - 전파 검출기 배열
 - 우주선 검출 신기술?
- 이론적인 이해의 확장
 - LHC 보다 높은 에너지에서 강입자 물리학
 - 우주 가속기의 동작 원리
 - 초거대질량 블랙홀과 제트
 - 자세한 모형 만들기
- 희망적인 생각
 - **고에너지에서 새로운 물리의 발견**
 - **초고에너지 우주선 천문학**
 - 우주선 샘 확인
 - 투입된 우주선의 성분과 스펙트럼 확인
 - 우주 자기장 탐색

Supplementary slides

Auger – Highest 100

Astrophys. J., Suppl. Ser. 264 (2023) 50

recorded between year 2004 and 2020
Energy range 78–166 EeV

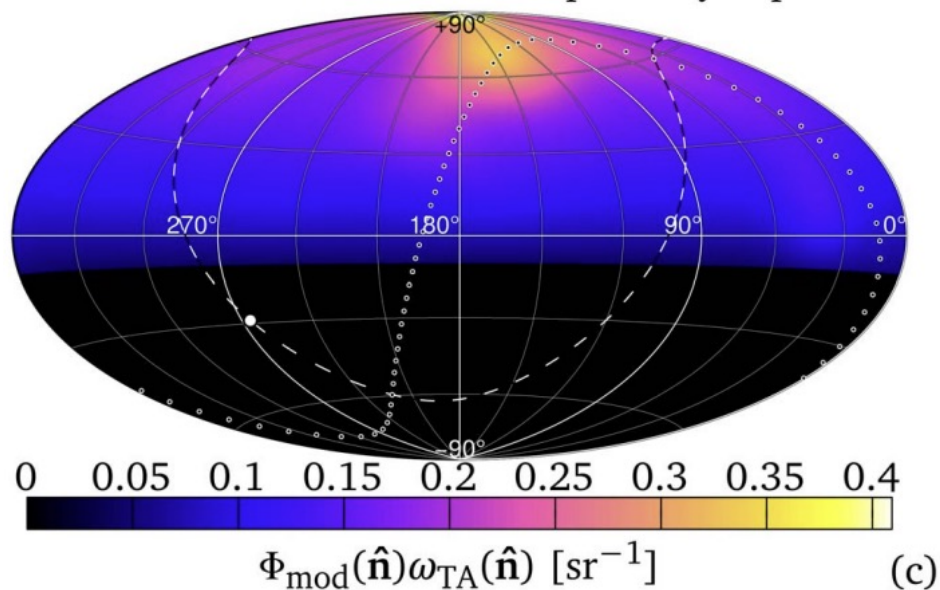


The positions of the arrival directions of the 100 highest-energy cosmic rays detected at the Pierre Auger Observatory shown in equatorial coordinates. The open circles show the arrival directions of the inclined events. The graded color scale shows how the exposure varies with decl. for the whole data set. The white region, above $\sim 45^\circ$, is not accessible from the latitude of Malargüe. The dashed line indicates the Galactic plane.

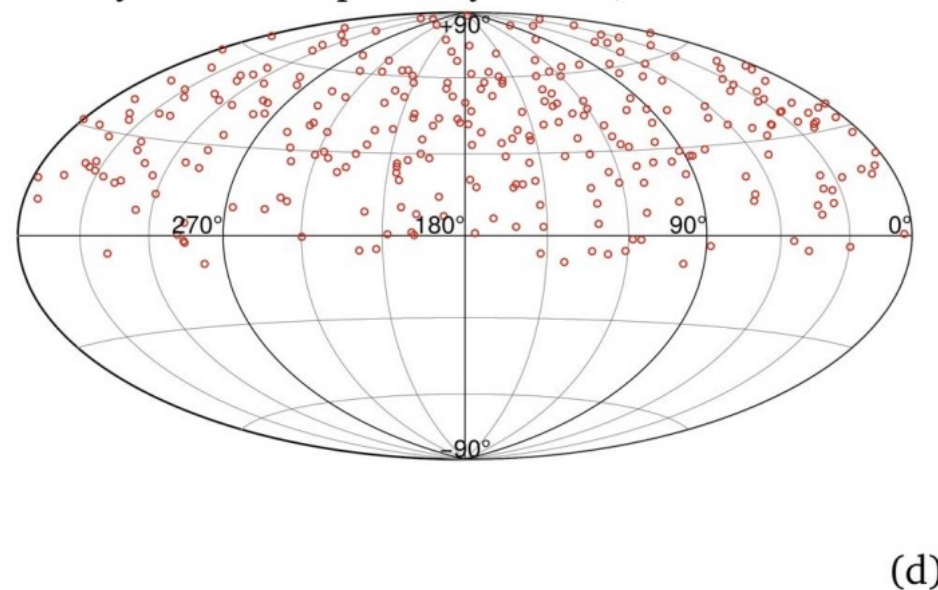
Correlation with SBG – TA

- TA UHECR and SBG correlation [Astrophys.J.Lett. 867 \(2018\) 2, L27](#)
 - 23 nearby SBG
 - TA UHECR with $E \geq 43$ EeV (Corresponding to 39 EeV of Auger energy)
 - Consistent with both isotropy and Auger claim (SBG fraction 9.7%, correlation angle 12.9°)

total model flux times Telescope Array exposure



9-year Telescope Array events, $E \geq 43$ EeV



Composition from SD

