

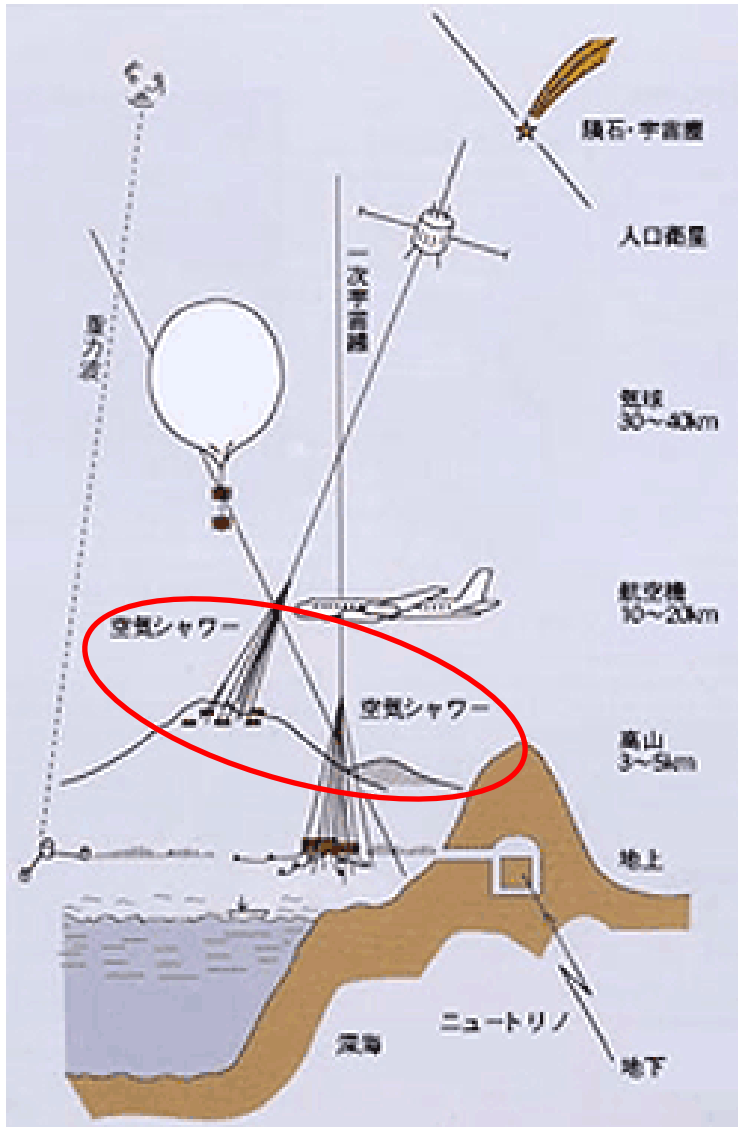
超高エネルギー宇宙線(1)

佐川 宏行(東大宇宙線研)

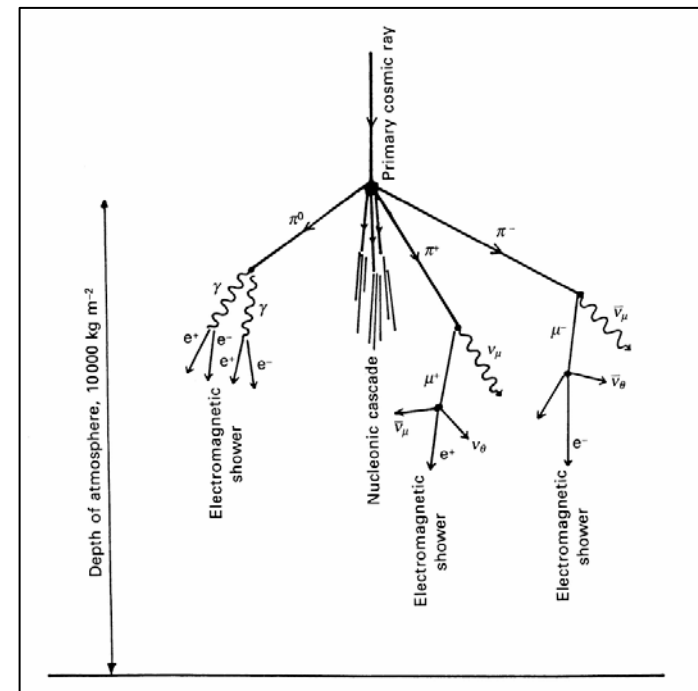
理研シンポジウム

2012年11月27日

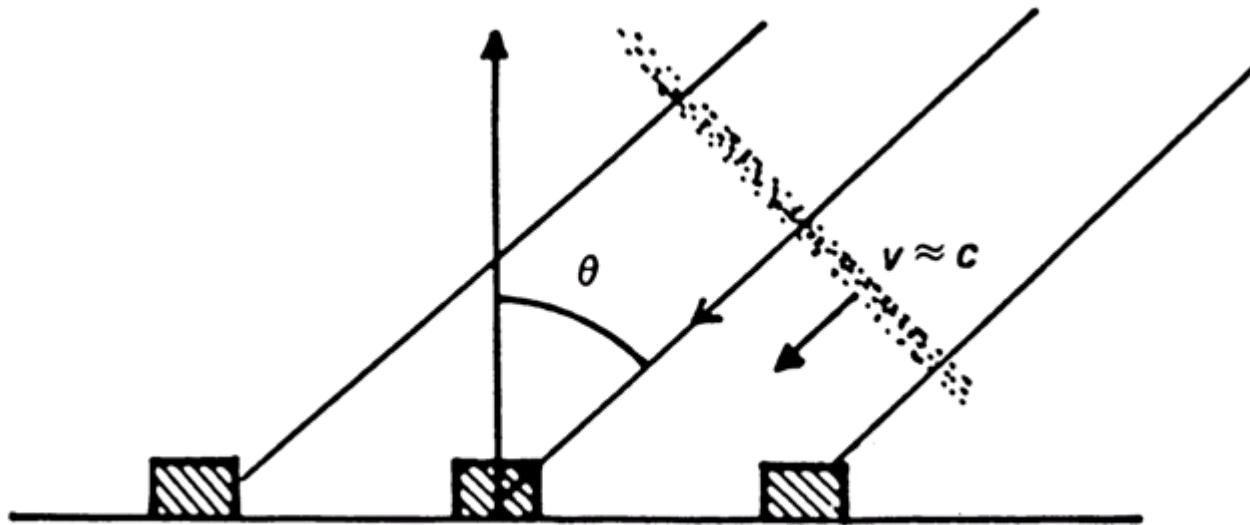
宇宙線の観測方法



- (1) 超高エネルギー宇宙線観測 ←
- (2) 宇宙線ニュートリノ観測
- (3) 宇宙ガンマ線(天文学へ)
- (4) 宇宙線反粒子(未知粒子の対消滅?)
- (5) (重力波; 将来)



地表粒子検出器



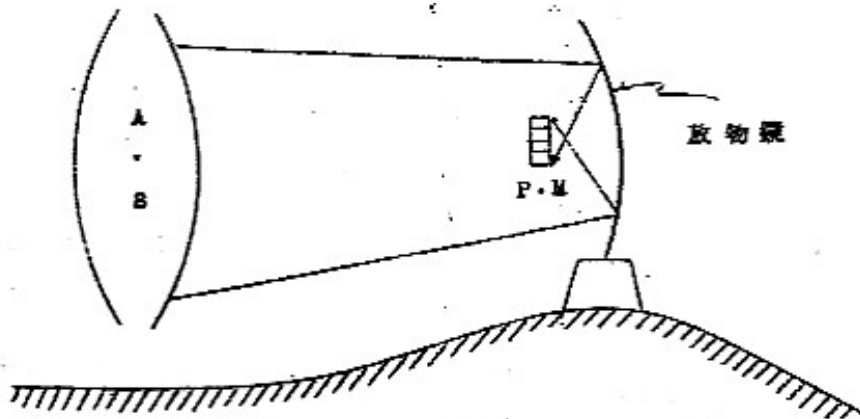
一次宇宙線のエネルギーが高いほど、多くの空気シャワー粒子が地上に到達
空気シャワーアレイで検出した粒子の総数から一次宇宙線のエネルギーを推定
各測定器への到来時間から一次宇宙線の到来方向を求める。

蛍光観測法

空気シャワー中の正、負の電子



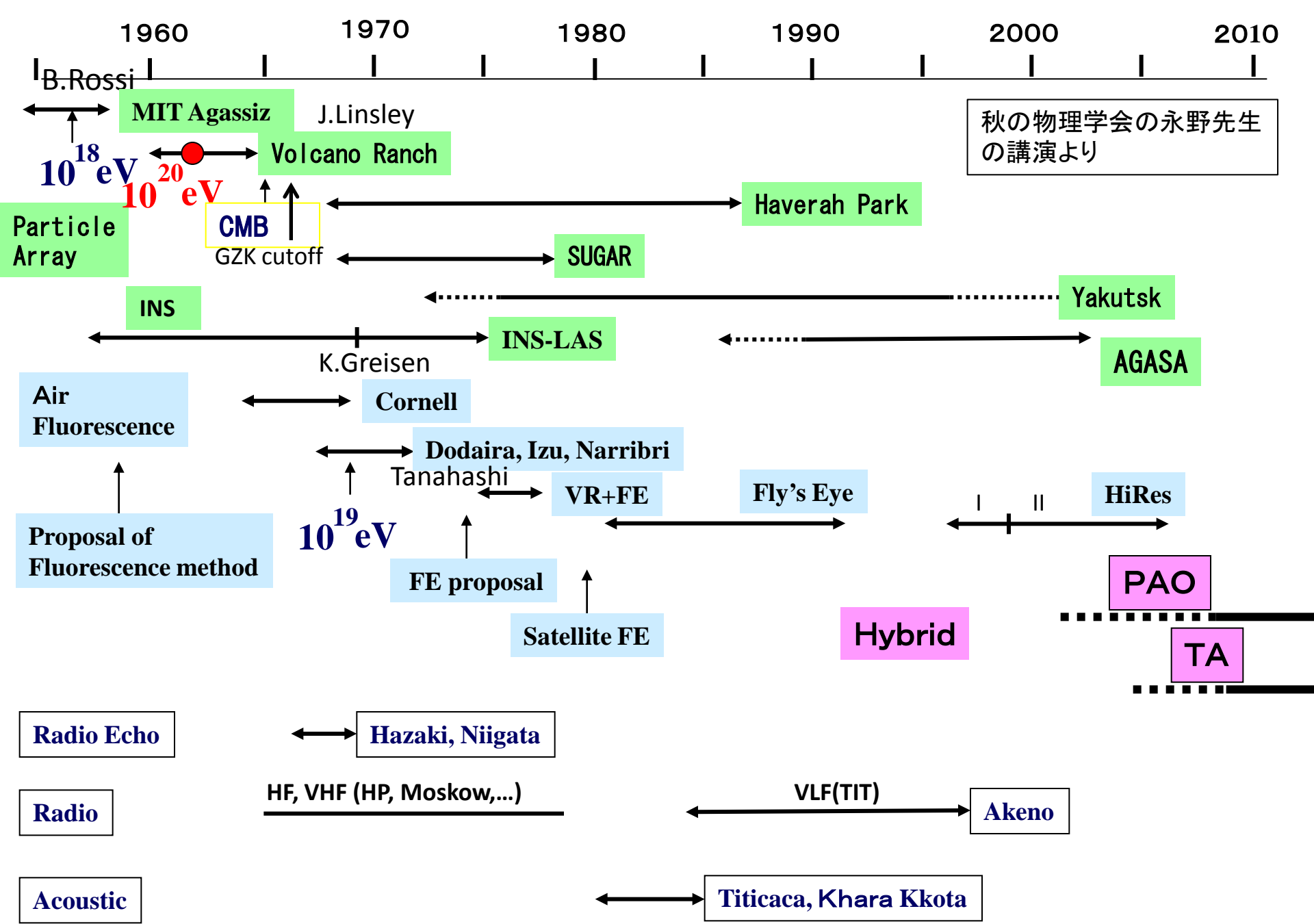
大気中の窒素分子、窒素分子イオンを励起、発光



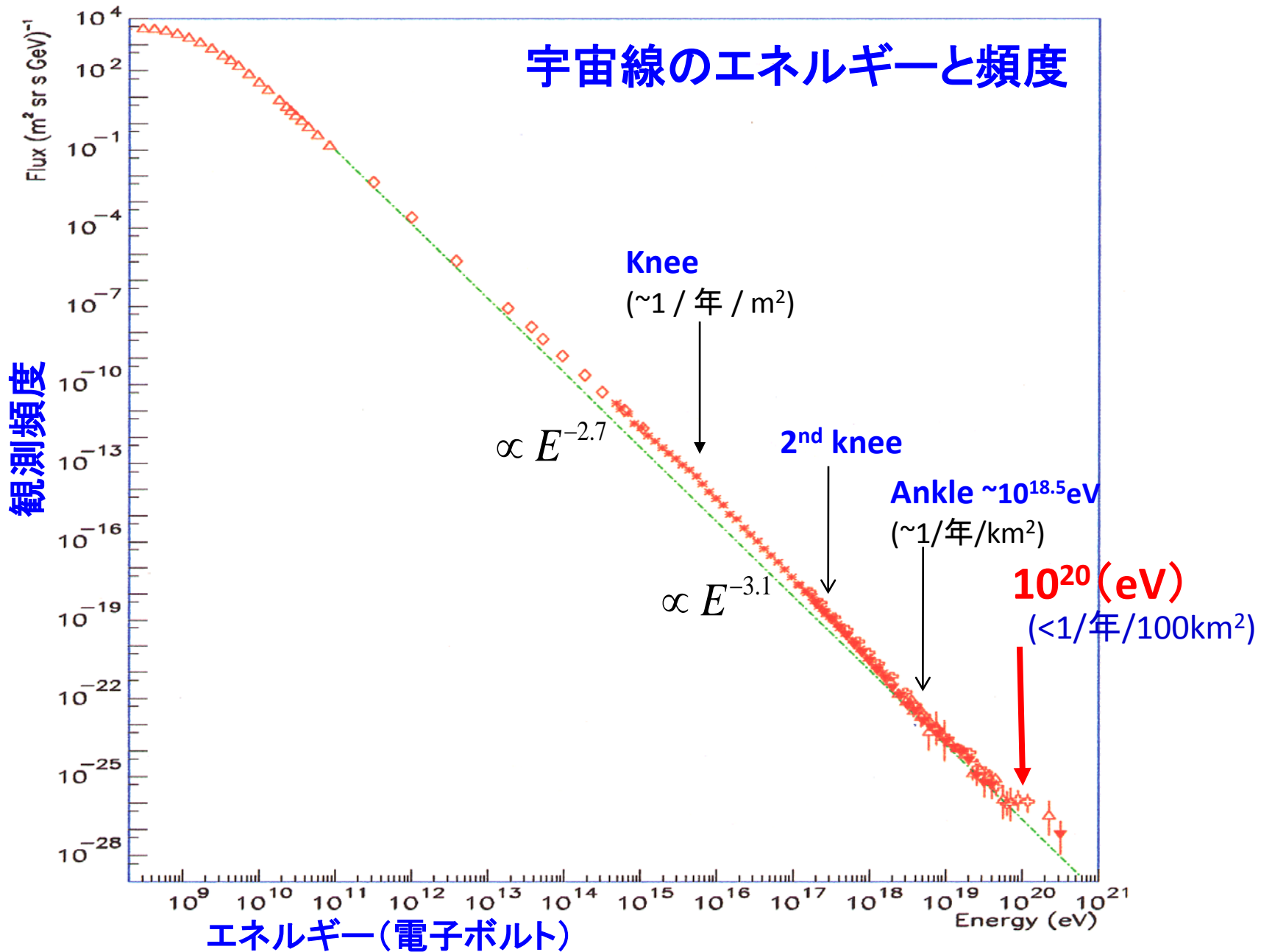
乗鞍シンポジウム 1958

村山喬; 宇宙線研究 3, No.5 (1958) 449

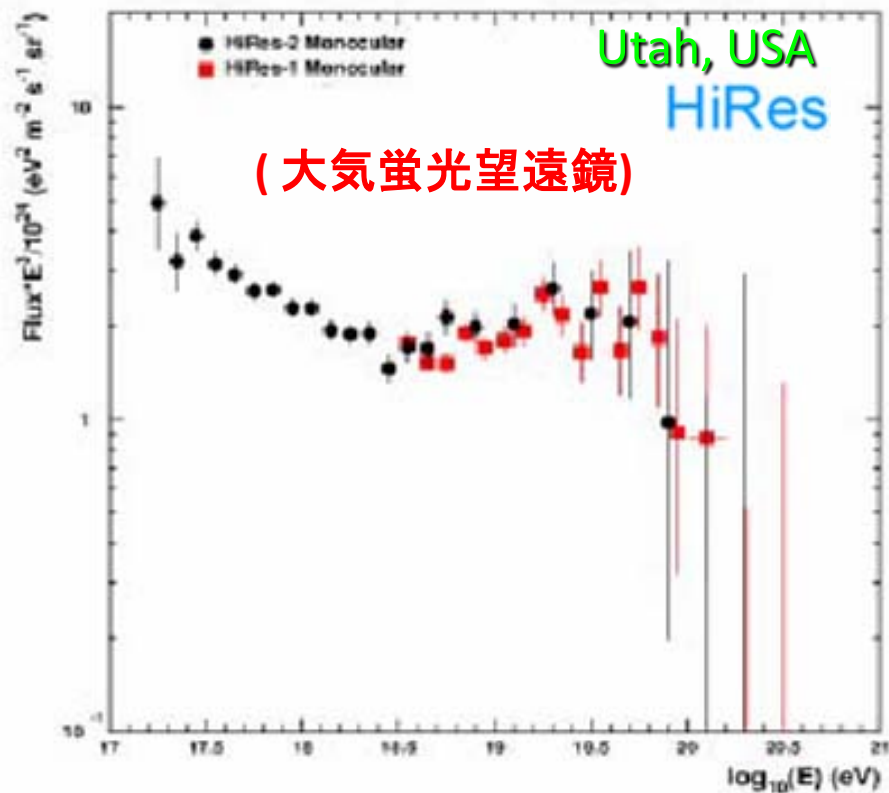
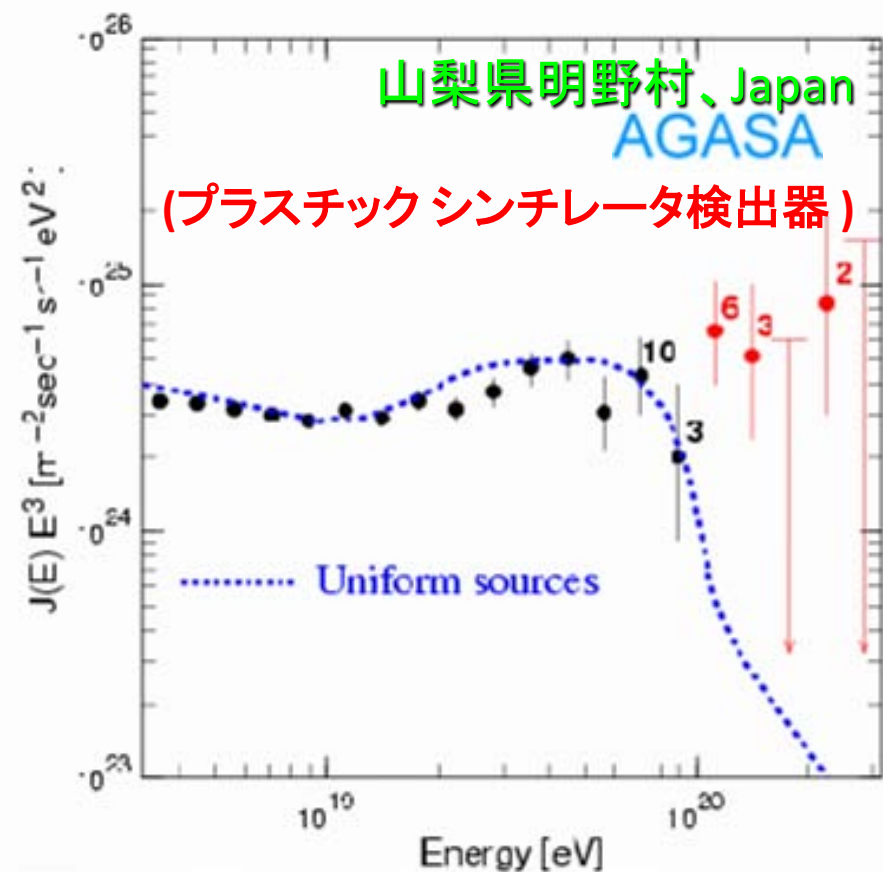
- K.Suga and G.Tanahashi
原子核研究所サイクロトロンでシンチレーション効率を測定 (1960)
- K.Suga, A.Chudakov
5th Interamerican Seminar at
Bolivia (1962)
蛍光法による観測法の具体的議論
K. Suga; Proc. 5th Inter. American Symp., La Paz,
eds I. Escobar et al., 2 (1962) XLIX-1-5.



宇宙線のエネルギーと頻度

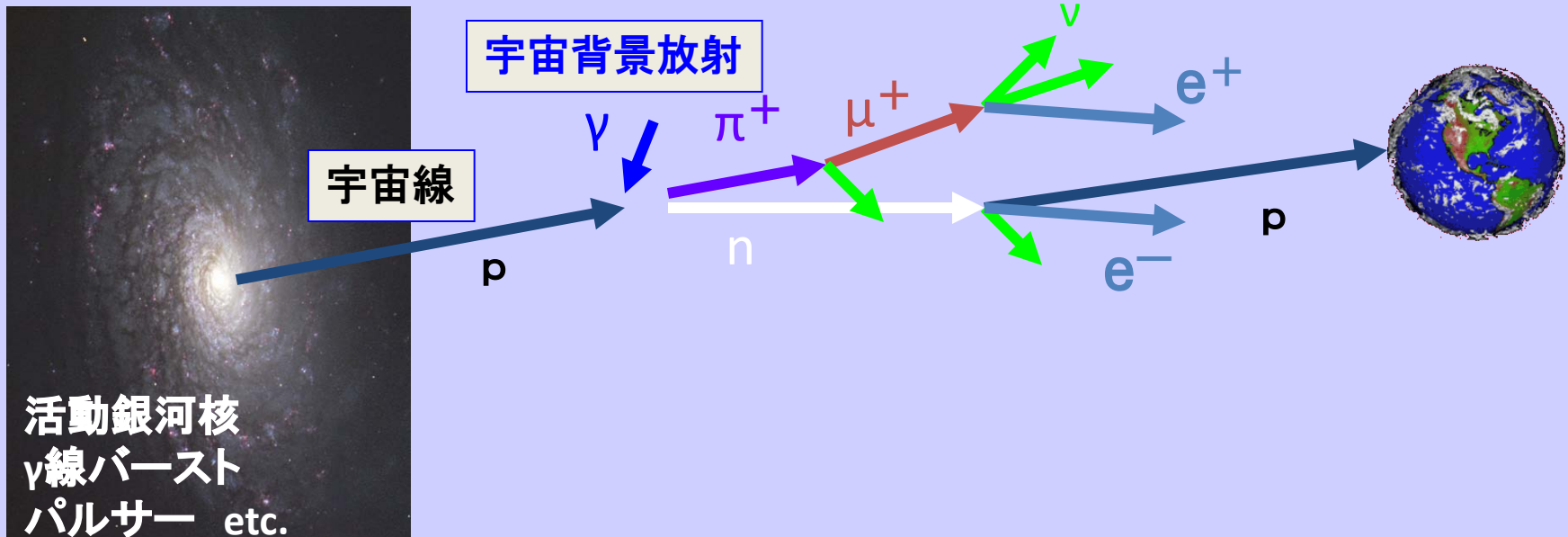


極高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル

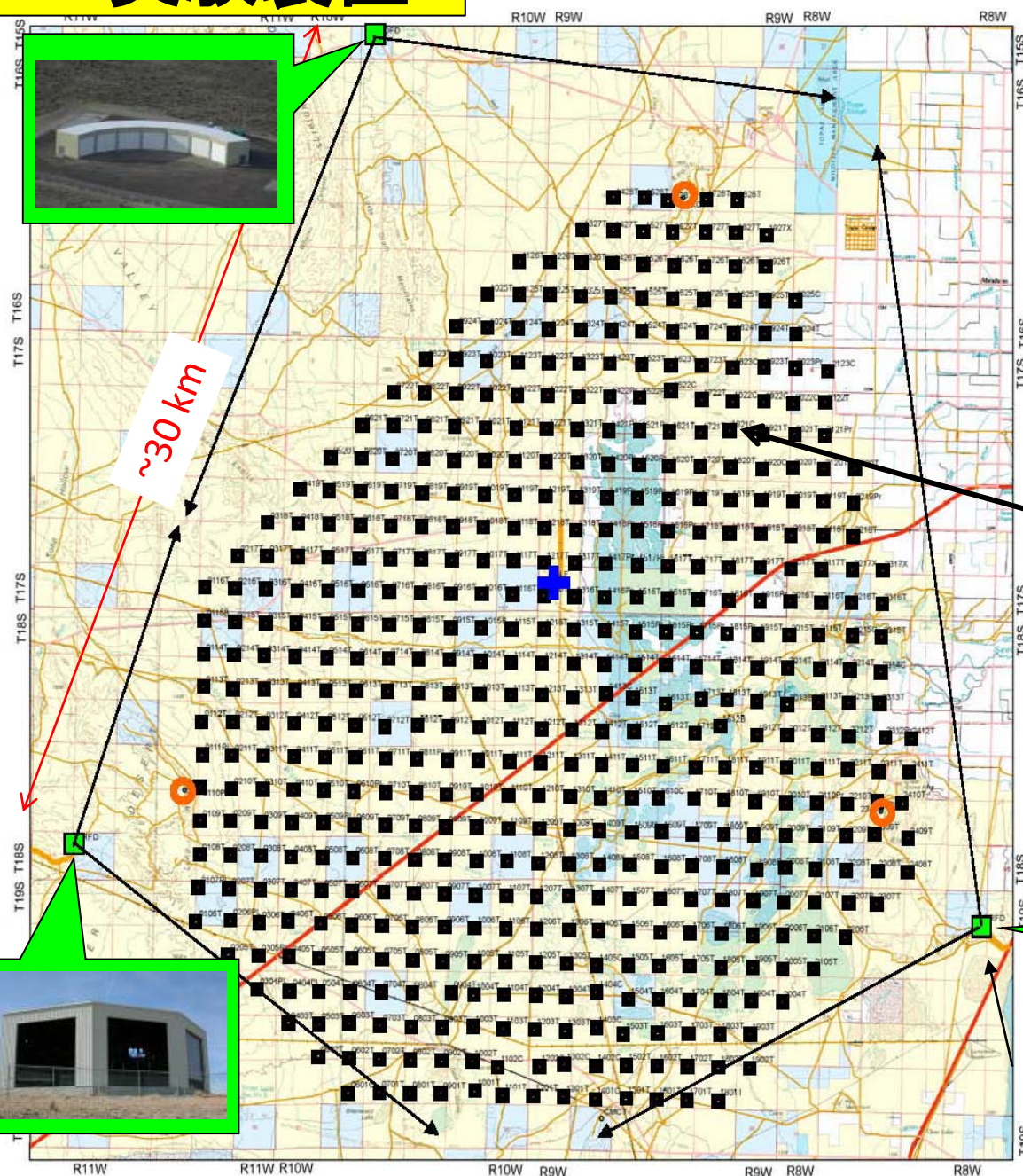


GZK カットオフ

相対性理論によると、 10^{20}eV 以上の宇宙線(陽子)は、
50Mpc以遠からはエネルギーを失い到達できない



TA実験装置



米国ユタ州
北緯39.3度, 西経112.9度
標高 約1400 m

地表粒子検出器
507台(1.2 km 間隔) 700 km²

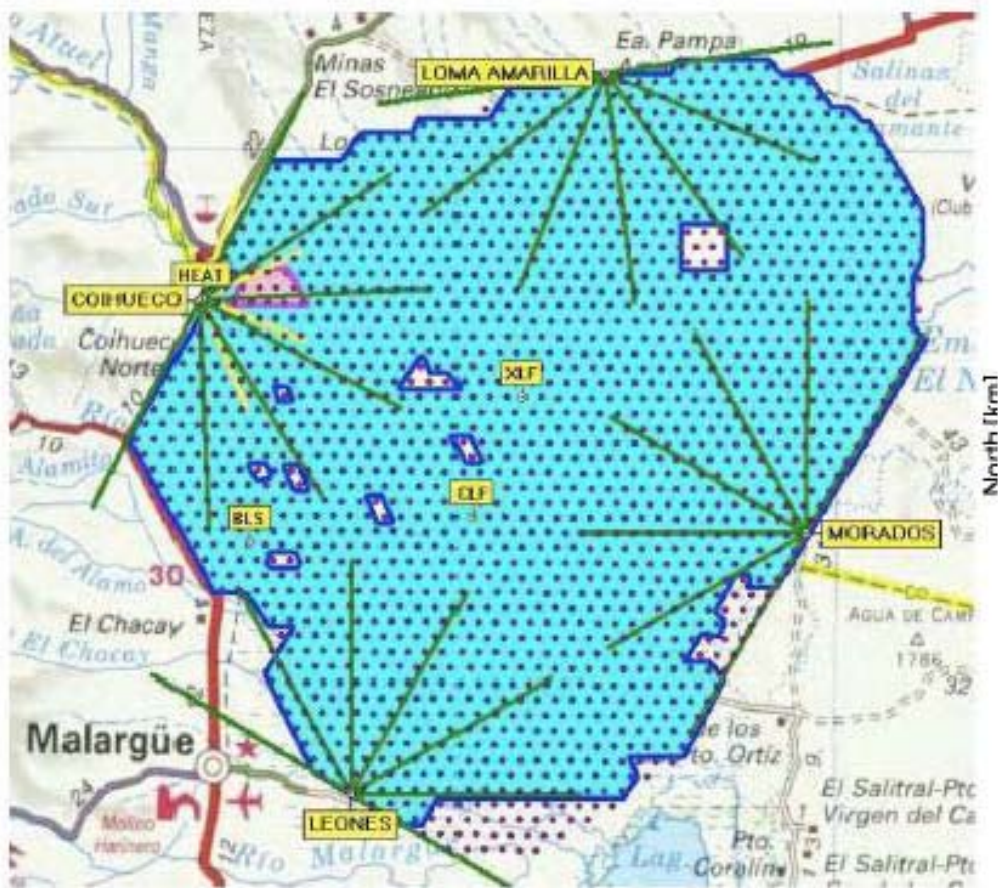


大気蛍光望遠鏡
3ステーション



Pierre Auger Observatory

Over 1600 detectors in operation,
covering 3000 square kilometres



July 2009

南米アルゼンチン 3000 km²

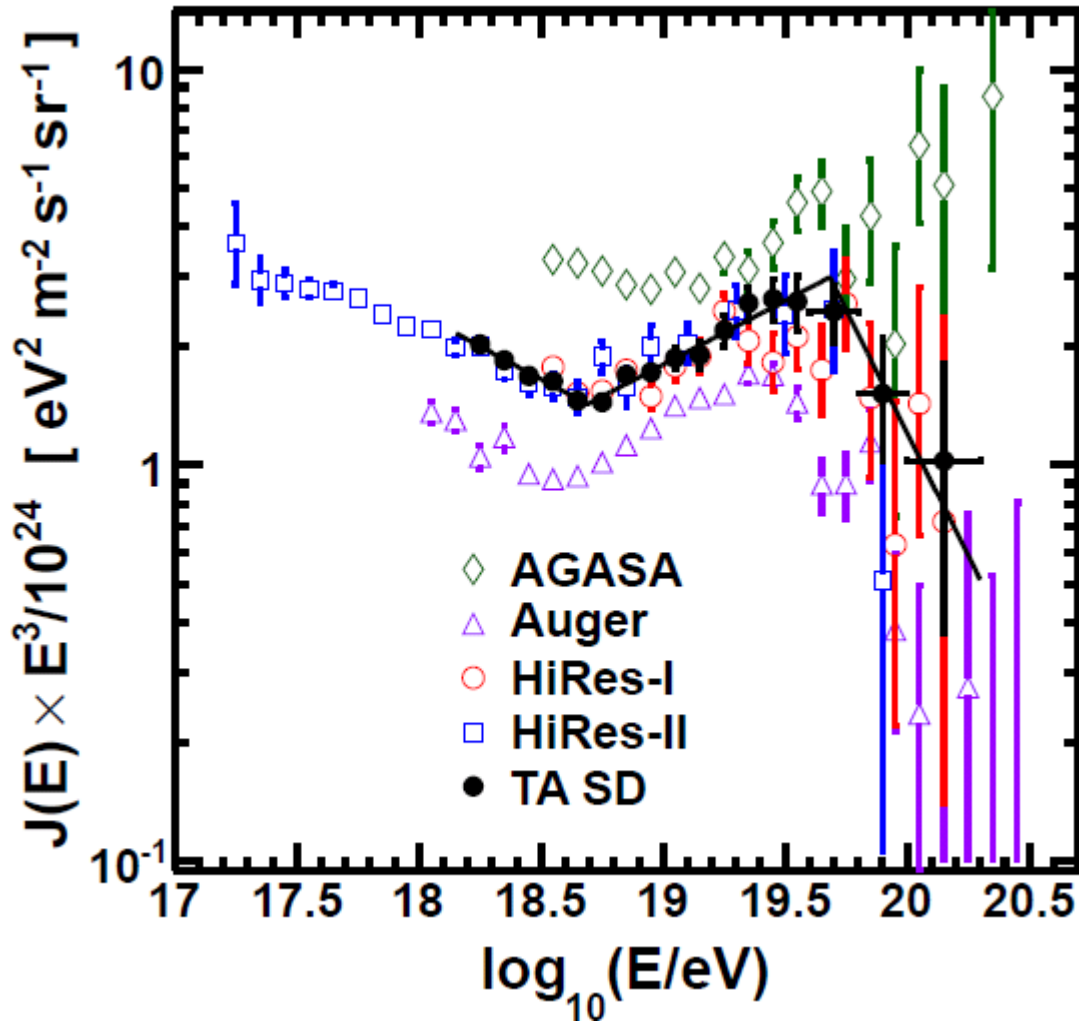


水タンク地表検出器



大気蛍光望遠鏡

Spectrum



HiRes, Auger, TA
Highest energy領域で
Suppressionを確認

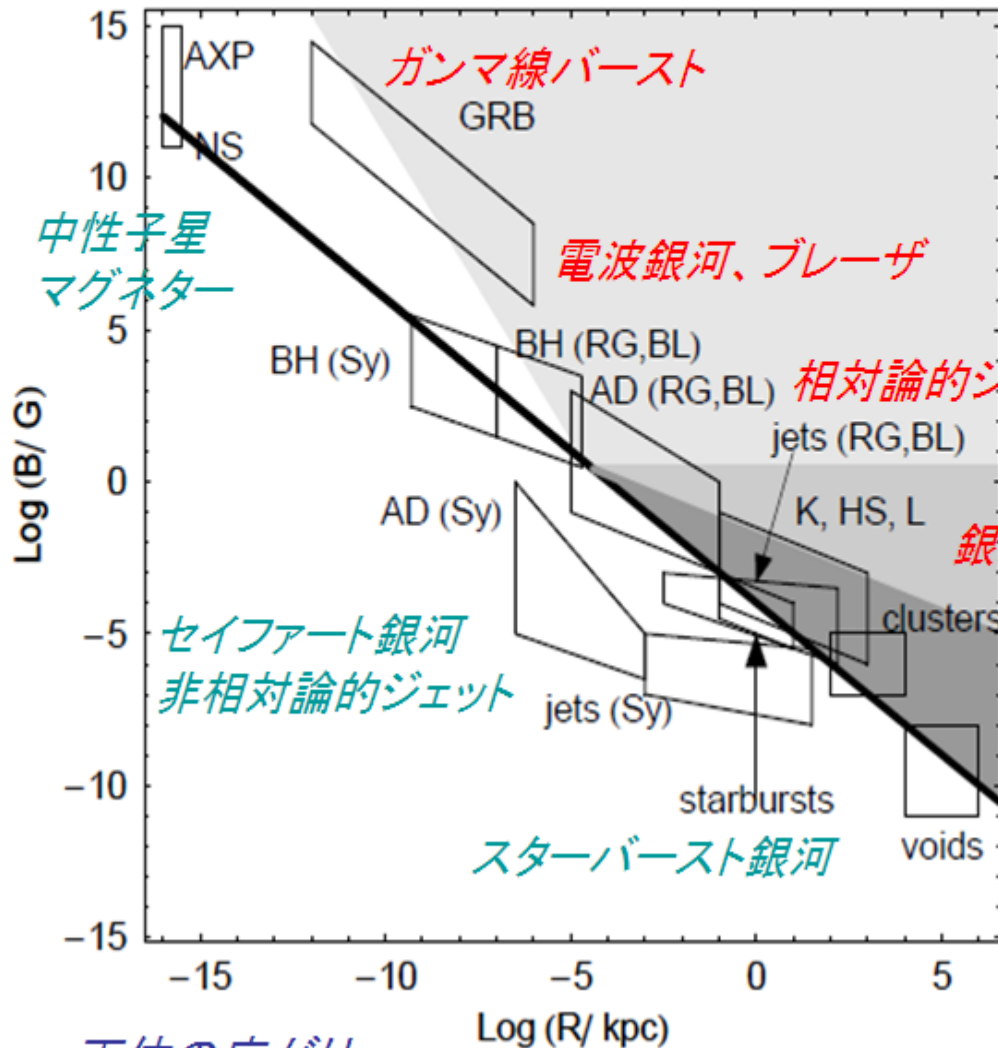
HiResとTAのスペクトル一致
(TA, HiRes)とAugerの差
エネルギーで約20%の差
systematic errorの範囲
エネルギーをスケールさ
せるとスペクトルが一致

TAとAuger間でエネルギー
のsystematicsの検討を始めた

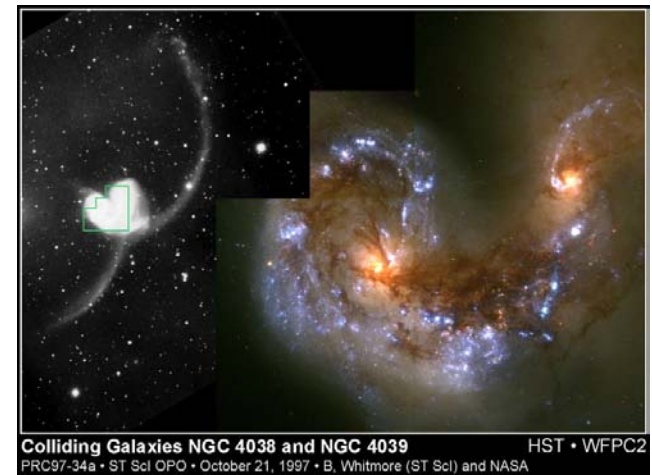
最高エネルギー宇宙線は 何処から来るのか？ Hillas の条件 更新版

10^{20} eV protons

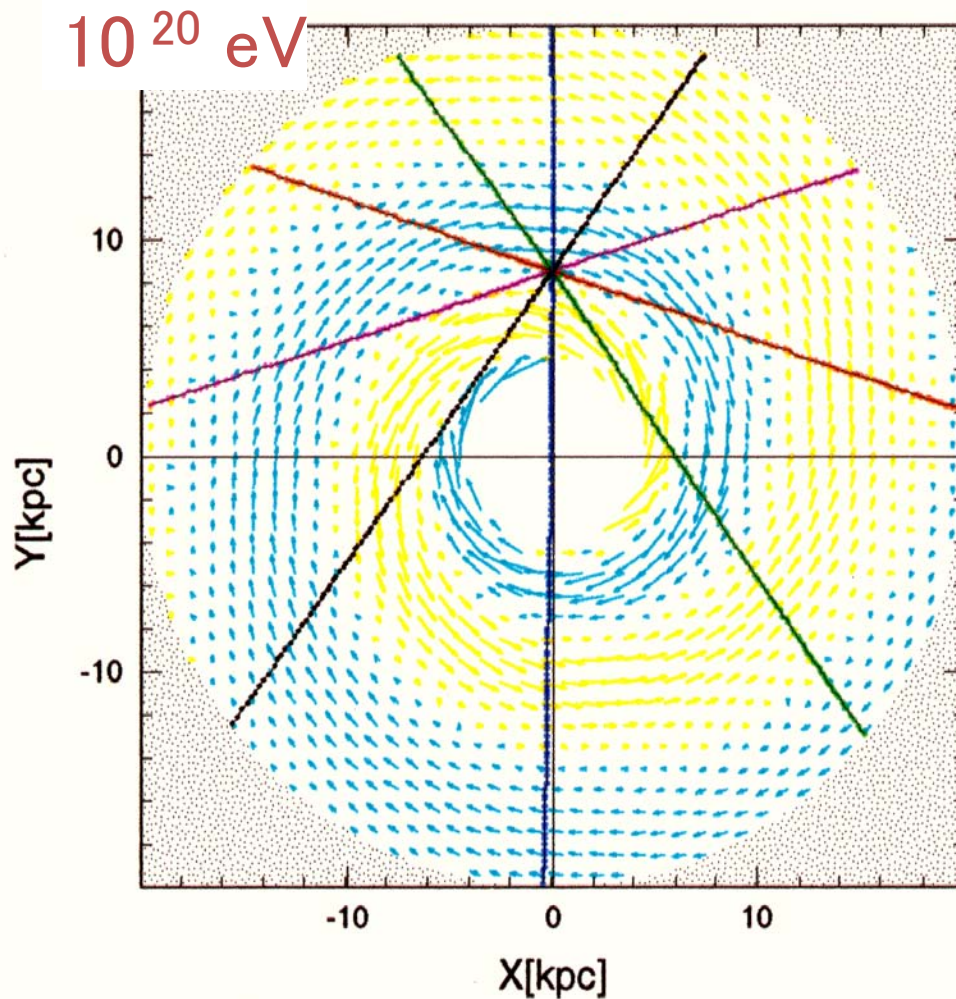
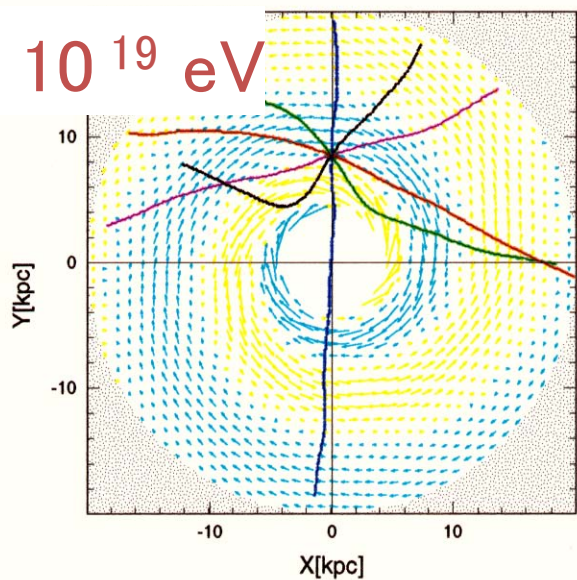
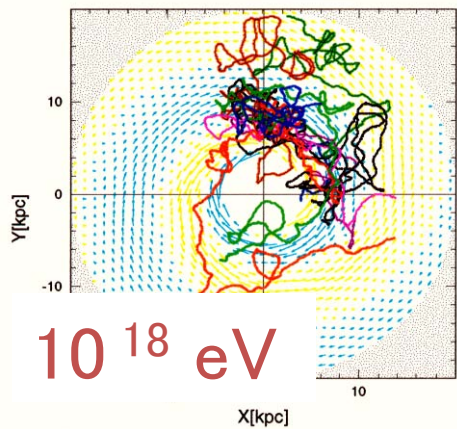
天体内の磁場の強さ



天体の広がり



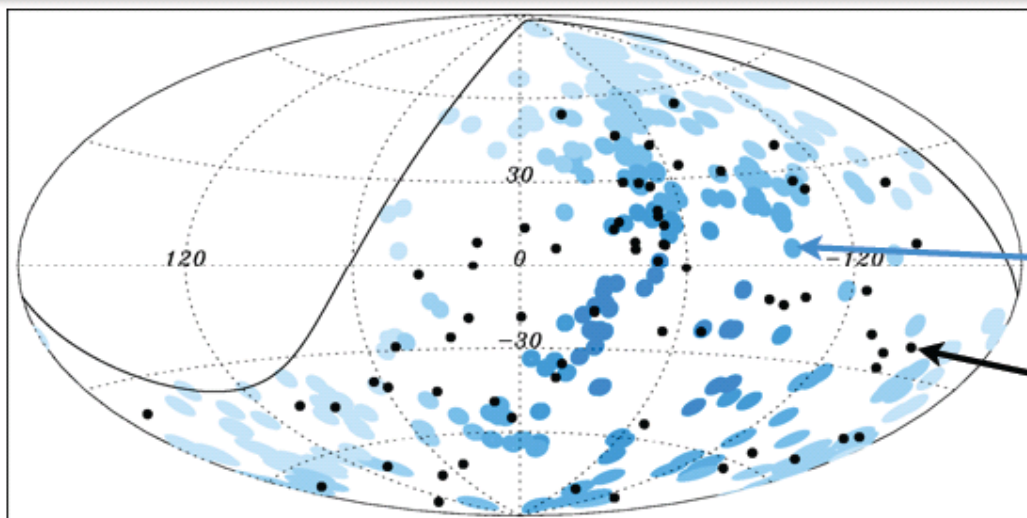
最高エネルギー宇宙線は銀河系内の磁場でほとんど曲がらない。



Update of Correlation with VCV-AGN

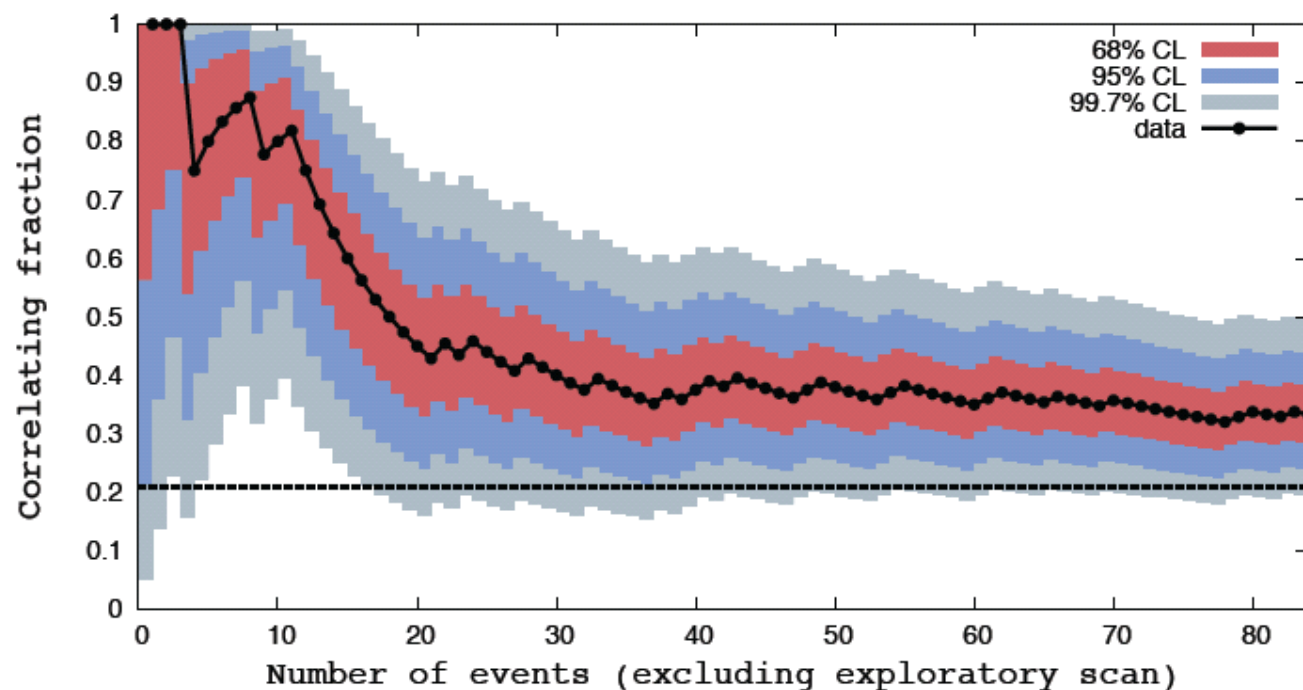
Astropart. Phys. 34 (2010) 314

Auger@ICRC11



AGN position
(3.1° circle)

event position



Update including June 2011

33±5%

Total: 28/84

P=0.006

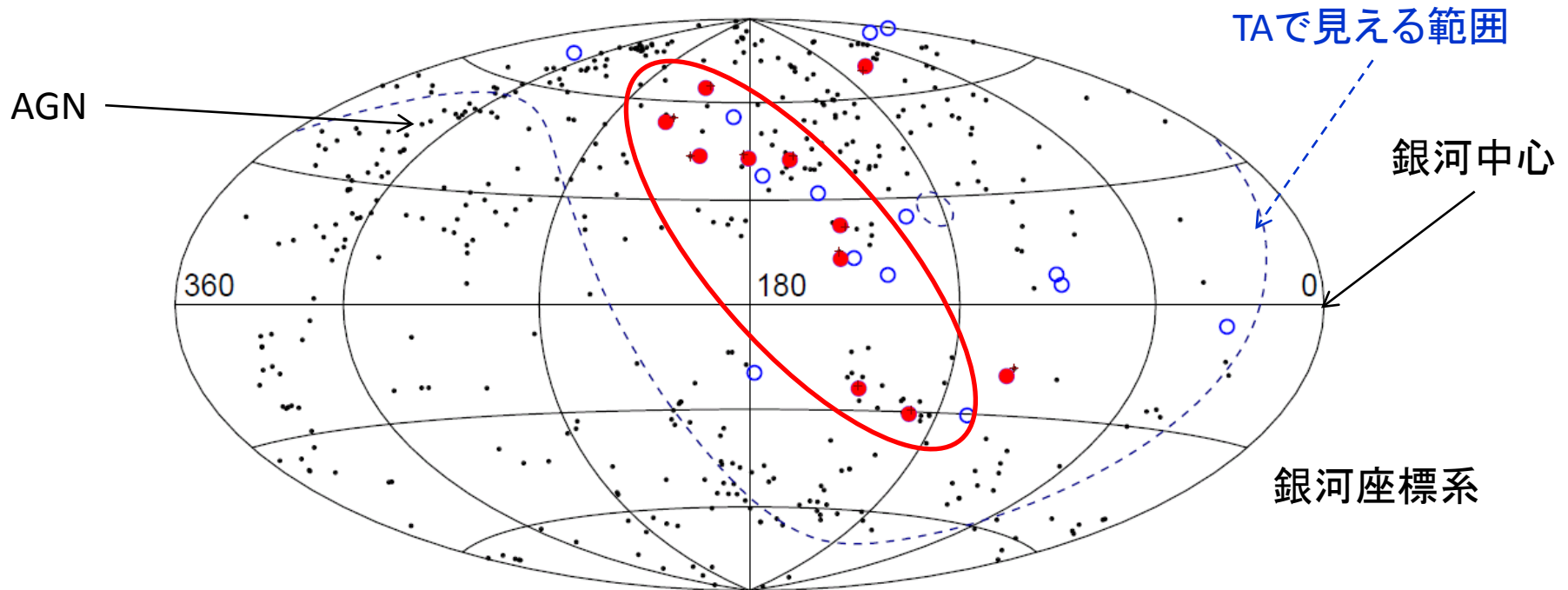
Telescope Array:

8/20 = 40%

with iso-bkg = 24%

TAの最高エネルギー宇宙線と AGNの位置との相関

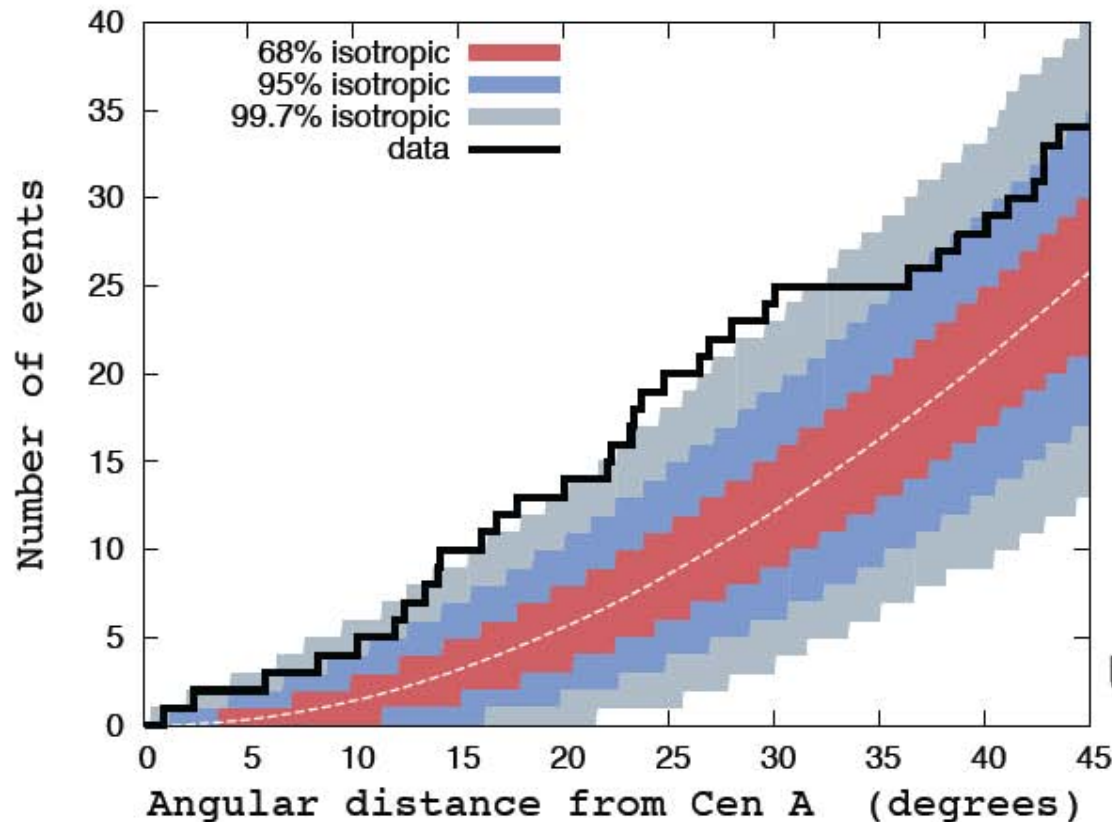
- AGNの距離が $z < 0.018$ (黒点)
- 57 EeV以上の宇宙線: 25事象 (赤丸 + 青丸)
- 3.1度以内の数を求める (赤丸)



- 観測相関数11 (一様な到来方向の場合の期待相関数は5.9: chance probability 2%)

Update on Cen A

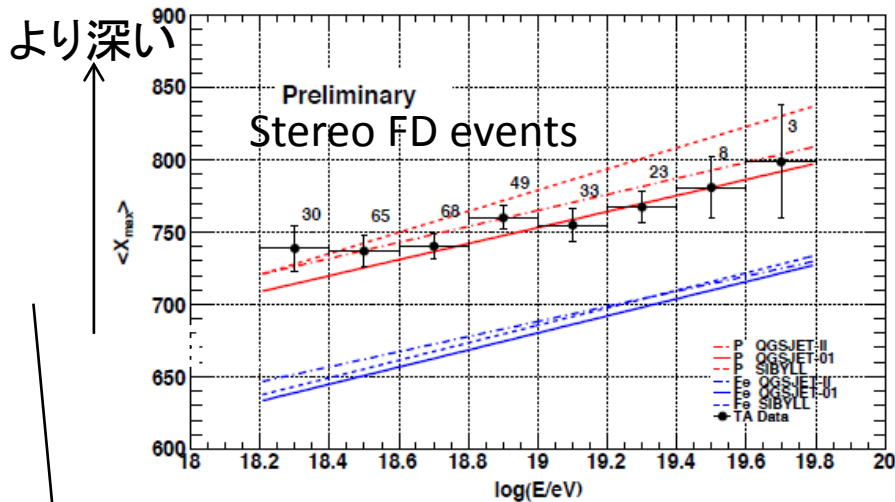
Auger@ICRC11



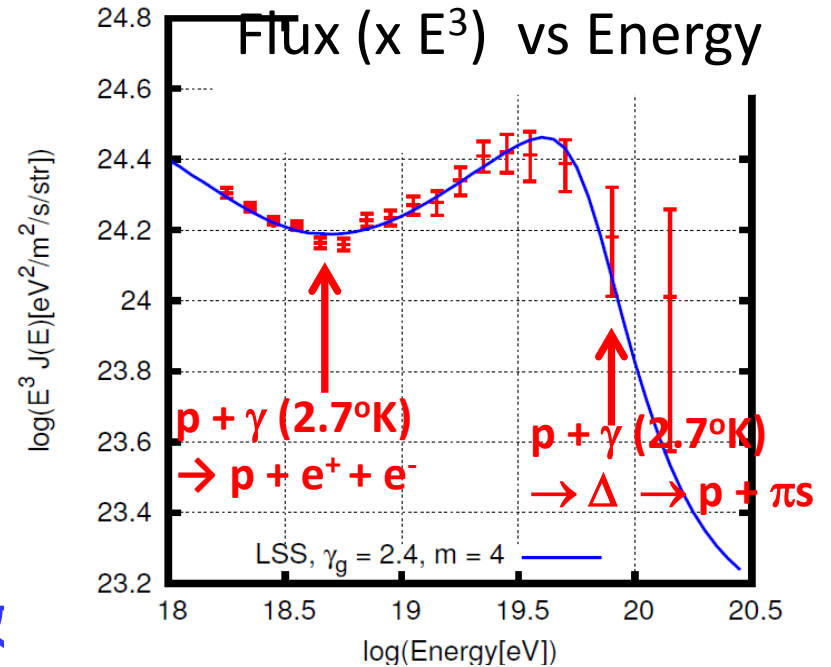
Update including June 2011

KS test yields 4% isotropic probability
Largest departure now at 24°: 19 observed / 7.6 expected

TAからの組成とスペクトル



10^{18.2} eV以上で陽子と一致



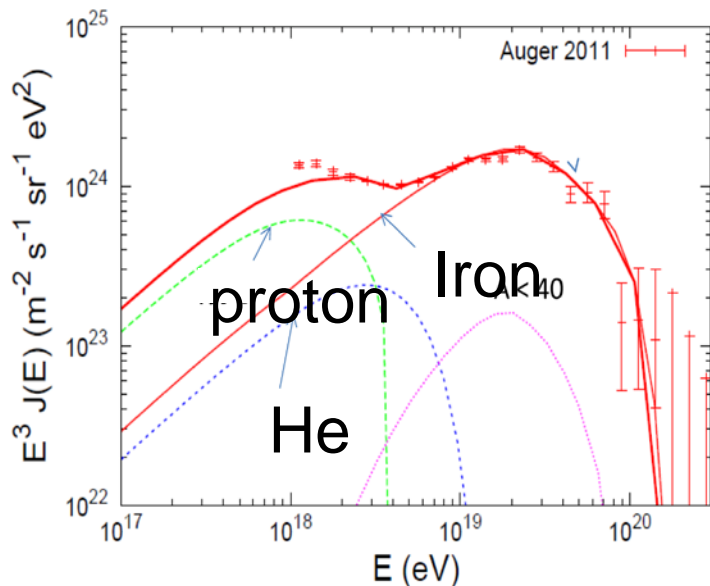
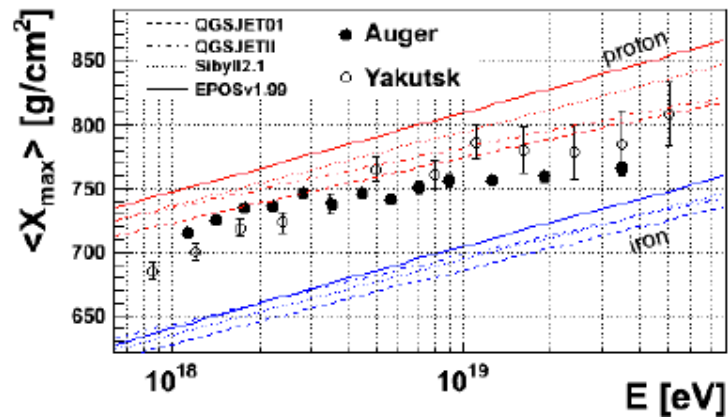
LSS 陽子モデルと一致

異方性観測の可能性
 →統計が欲しい
 (大規模観測装置へ)

ただし、Augerの組成とスペクトル

Augerの X_{\max} の測定結果は
 3×10^{18} eV以上で重い組成
 に一致する方向

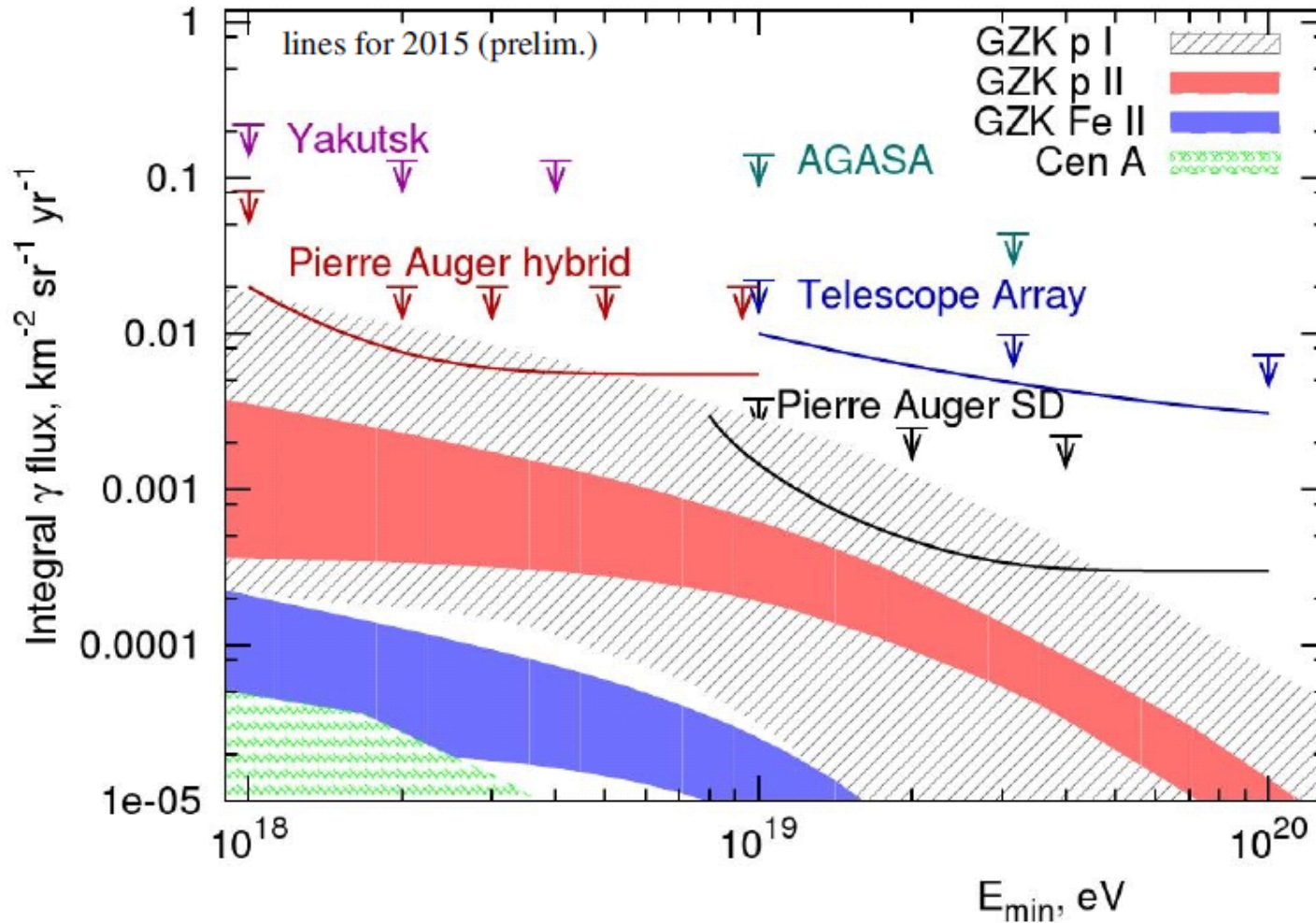
TAとAuger間で解析の
 検討を始めている



mixed modelと一致

超高エネルギー光子探索

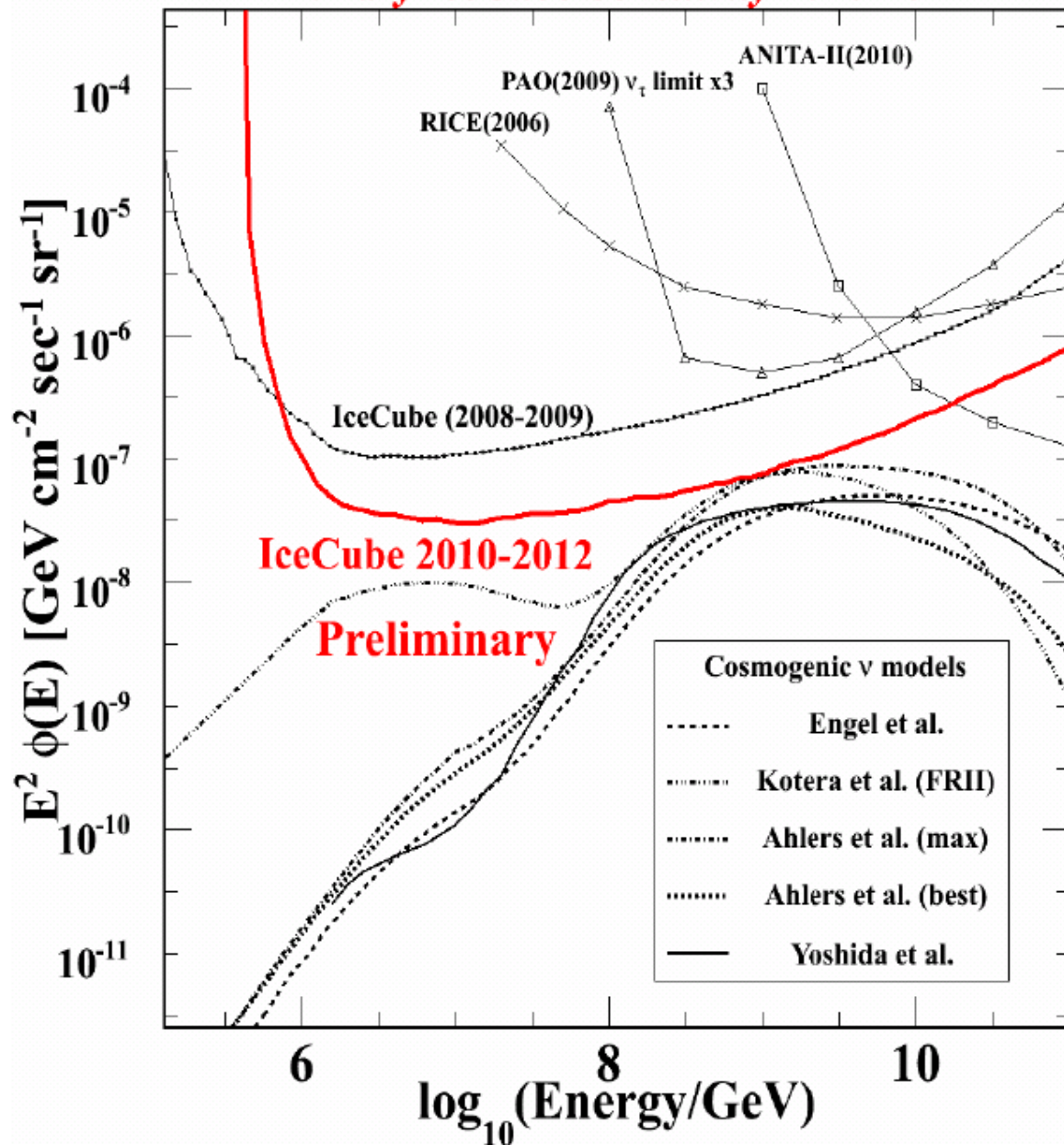
Photons: ~2015 sensitivity estimates



→ photon observation possible but not guaranteed (of course) !

IceCube UHE Sensitivity 2010-2012

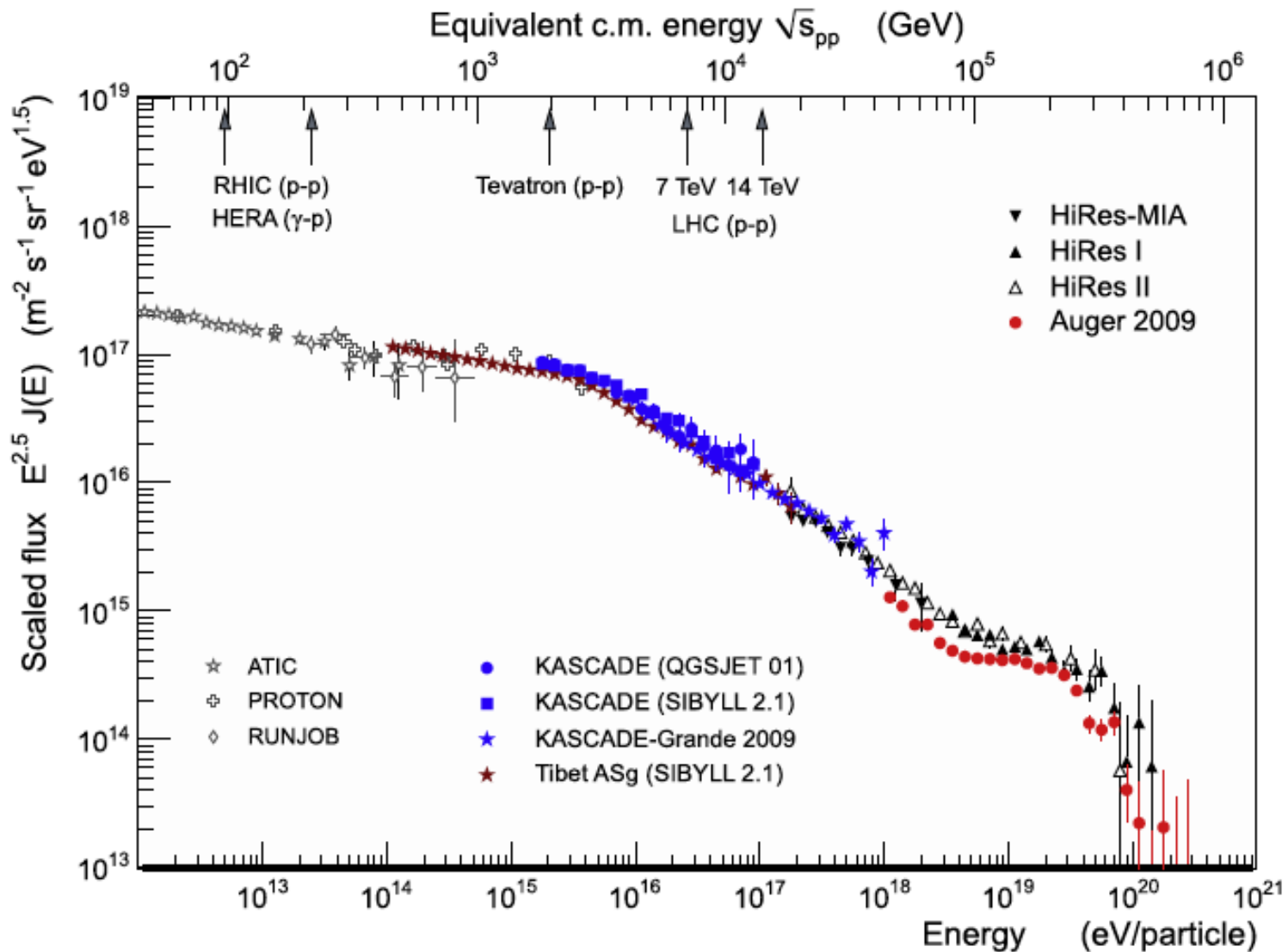
Primary IceCube Sensitivity 2010-2012



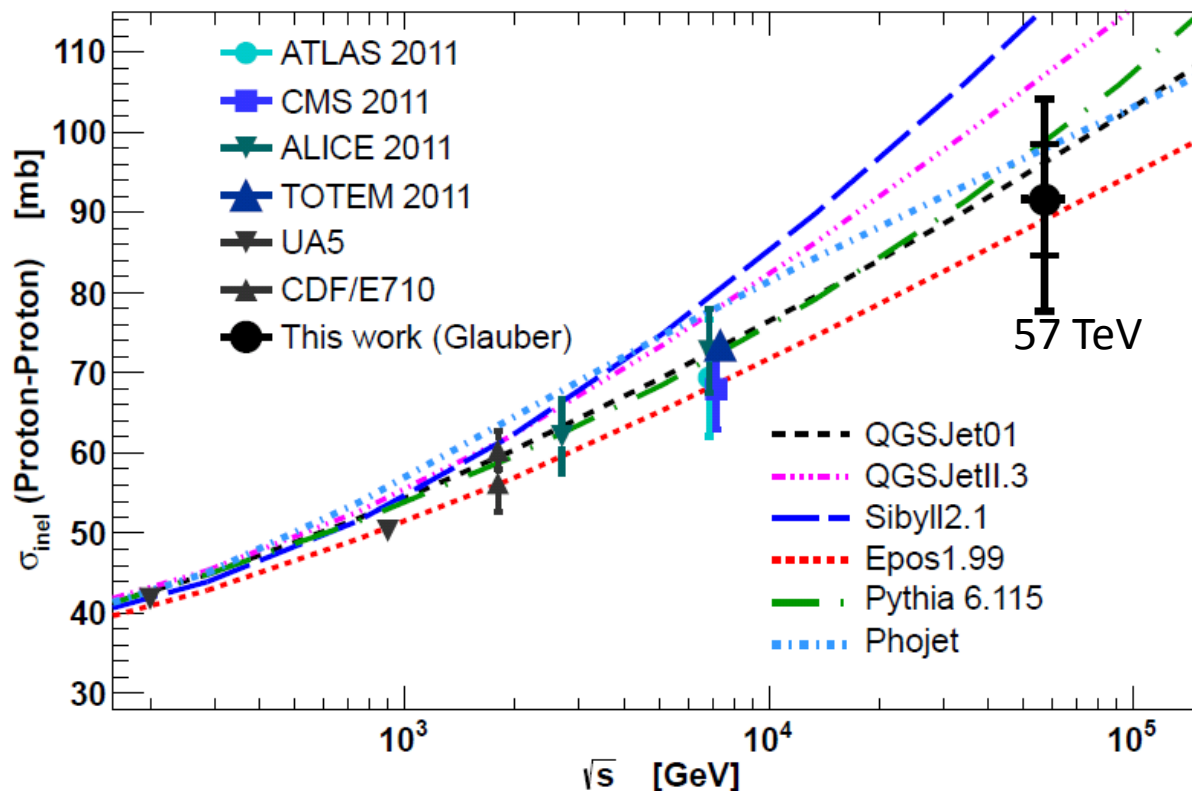
- Significantly improved from the previous IceCube results
- The world's best sensitivity!
- Will constrain (or detect) the neutrino fluxes down to mid-strong cosmological evolution models

加速器のエネルギーと宇宙線スペクトル

(D'Enterria et al., APP, 35,98-113, 2011)



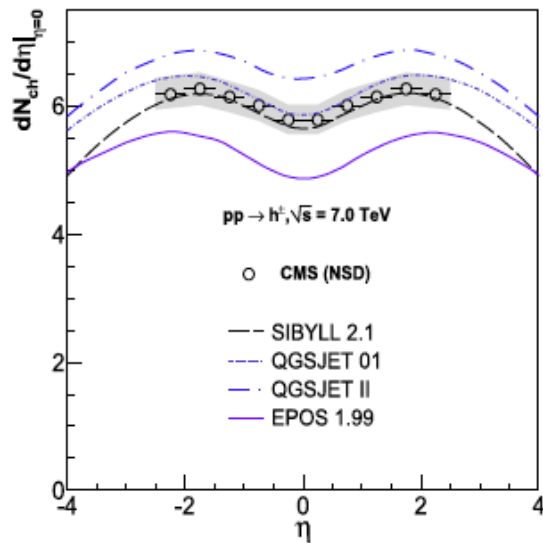
加速器実験と超高エネルギー宇宙線の のp-p 非弾性散乱断面積



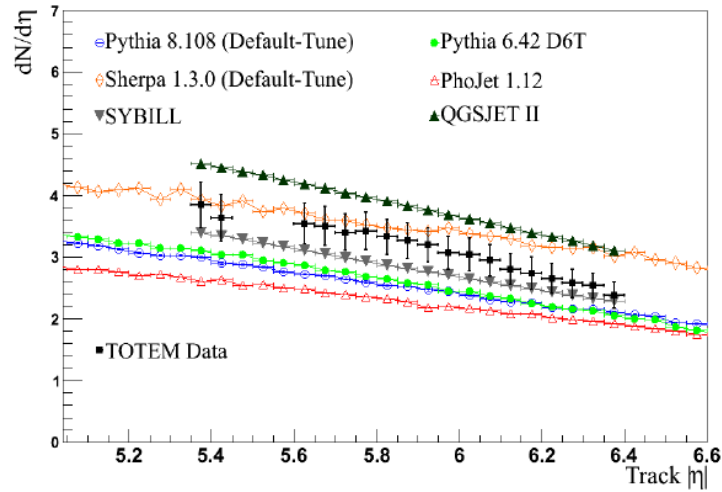
P. Abreu et al. (**Pierre Auger Collab.**), Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 062002

LHCの多重度と宇宙線モデルとの比較

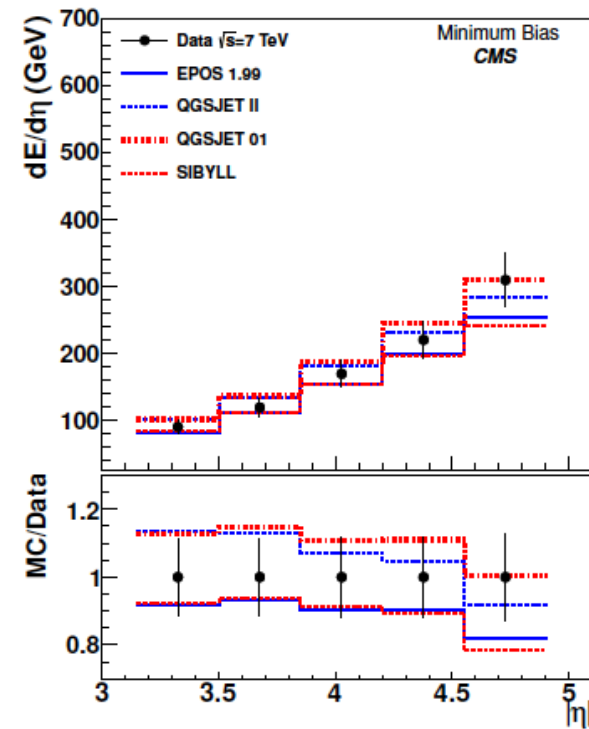
中間子多重度@central
CMS



前方中間子多重度@TOTEM



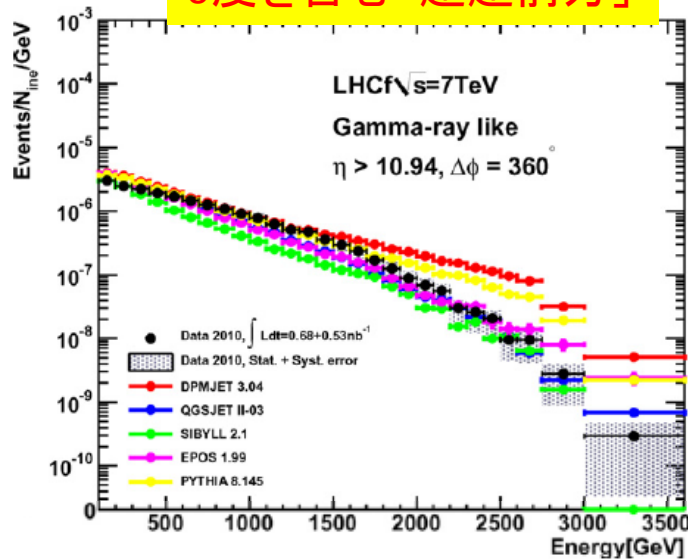
ハドロン前方多重度
@CMS



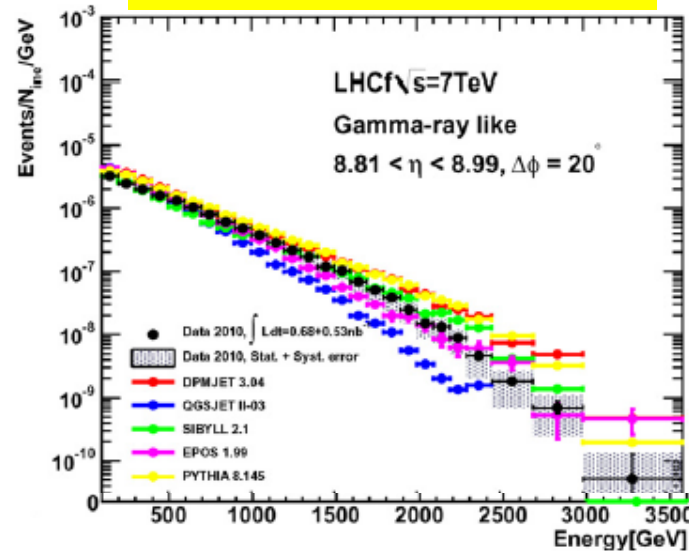
LHCf実験

ATLAS IP 140m 前方カロリメータ

0度を含む「超超前方」



0度を含まない「超前方」



$\sqrt{s} = 7\text{TeV}$
LHCf, PLB, 2011

重心系 14 TeV (静止系 10^{17} eV) への期待

LHC: 軽原子核を含めた理想的な測定が実現可能

TALE, HEAT/AMIGA: SD/FDのenergy問題
Excess muonの起源は?

EAS simulation ← 加速器のデータ

原子核衝突 (宇宙線のためのcollider利用)

LHC p-Pb衝突; 2013年1-2月

RHICで窒素衝突の可能性(2017年?)

p-N ($E_{\text{lab}}=1.1 \times 10^{13}$ eV), N-N
(7.4×10^{13} eV)

Tibet (MD)とのoverlap, proton dominantなenergyでcalibration

LHCでの酸素衝突の可能性(2020年?)

次世代最高エネルギー宇宙線観測の計画

- Huge aperture
 - Auger, TAの10～100倍
 - 測定装置
 - 宇宙から
 - JEM-EUSO
 - 一様なaperture
 - 地上で
 - これまでの地上検出器を発展させ、新方法も検討
 - 一次宇宙線の精度のよいエネルギー、角度測定、粒子識別
 - 最高エネルギーから低エネルギーへのスムーズな接続
- (今後TAとAuger等を中心に検討 総計100億円程度)

次世代最高エネルギー宇宙線観測の計画

例：電波による宇宙線観測のR&D（古くて新しい）

- Huge aperture
– Auger, TA

- **測定装置**

- 宇宙から

- JEM-EUS

- 一様な

- 地上で

電波観測のメリット

基本的に24時間稼働・安価(多分?)・拡張性がありそう

電波観測の可能性・テストは60年代から:

- Jelley et al., Nature (1965) ...44MHz 帯域4MHz

- 東工大菅グループによる電波観測(数十kHz帯)

- 理論的考察:

- 西村・藤井「空気シャワーの電波発生機構について」

- 東京大学宇宙航空研究所報告 1969

現在TA、AugerサイトでいくつかR&D中

- これまでの地上検出器を発展させ、新方法も検討

- 一次宇宙線の精度のよいエネルギー、角度測定、粒子識別

- 最高エネルギーから低エネルギーへのスムーズな接続

次世代最高エネルギー宇宙線観測の計画

- Huge aperture
 - Auger, TAの10～100倍
- 測定装置
 - 宇宙から
 - JEM-EUSO
 - 一様なaperture
 - 地上で
 - これまでの地上検出器を発展させ、新方法も検討
 - 一次宇宙線の精度のよいエネルギー、角度測定、粒子識別
 - 最高エネルギーから低エネルギーへのスムーズな接続

宇宙線研究所のTAグループ
大阪市大のTAグループが

TAの経験を活かして

この12月からJEM-EUSOに参加

まとめ

- 超高エネルギー宇宙線研究における日本の貢献大きい
- 超高エネルギー宇宙線の起源の問題が理解されつつある
- 宇宙線と近隣分野との共同研究
 - Multi Messenger
 - 加速器実験(LHC)
- 宇宙線観測実験の精密化、大型化が必要
- 国際競争・協調