

平成27年度 ボリビア共同利用報告

東工大 垣本史雄

2015.12.19

ボリビア・チャカルタヤ山 宇宙物理学研究所共同利用

- 太陽中性子観測(名古屋大学STE研究所)
- 大気中放射性物質モニター(山形大学)
- 電波望遠鏡による銀河系中心の観測準備(国立天文台)
- **BASJE** (**B**olivian **A**ir **S**hower **J**oint **E**xperiment)
日本ボリビア空気シャワー共同実験

ボリビア・チャカルタヤ山 宇宙物理学研究所共同利用

- 太陽中性子観測(名古屋大学STE研究所)
- 大気中放射性物質モニター(山形大学)
- 電波望遠鏡による銀河系中心の観測準備(国立天文台)
- BASJE (Bolivian Air Shower Joint Experiment)
日本ボリビア空気シャワー共同実験
本年度末で終了

実施内容

- 予算 220万円
研究所維持費+維持要員派遣費用
- 人員派遣 (BASJE関連, 科研費による派遣を含む)
 - 田島則夫 (理研) 5/07 - 8/06
 - 常定芳基 (東工大, 大阪市大) 8/11 - 9/17
 - 勝谷龍一 (東工大D2) 4/28 - 7/29
 - 中山慧介 (東工大M2) 8/05 - 9/26

ボリビア・チャカルタヤ山



チャカルタヤ山宇宙物理学研究所

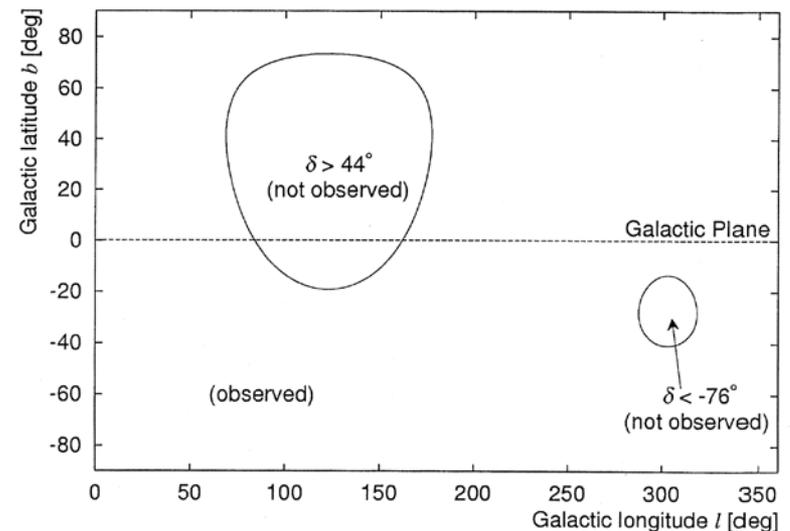
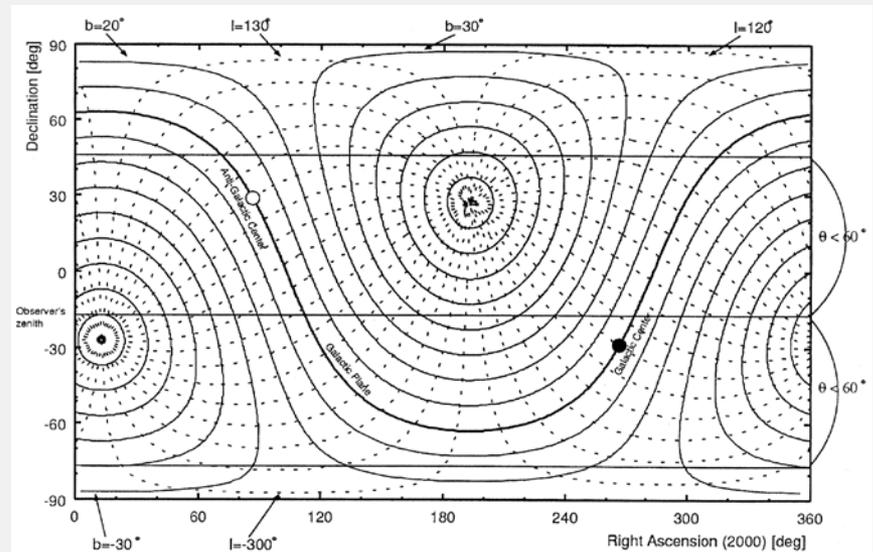


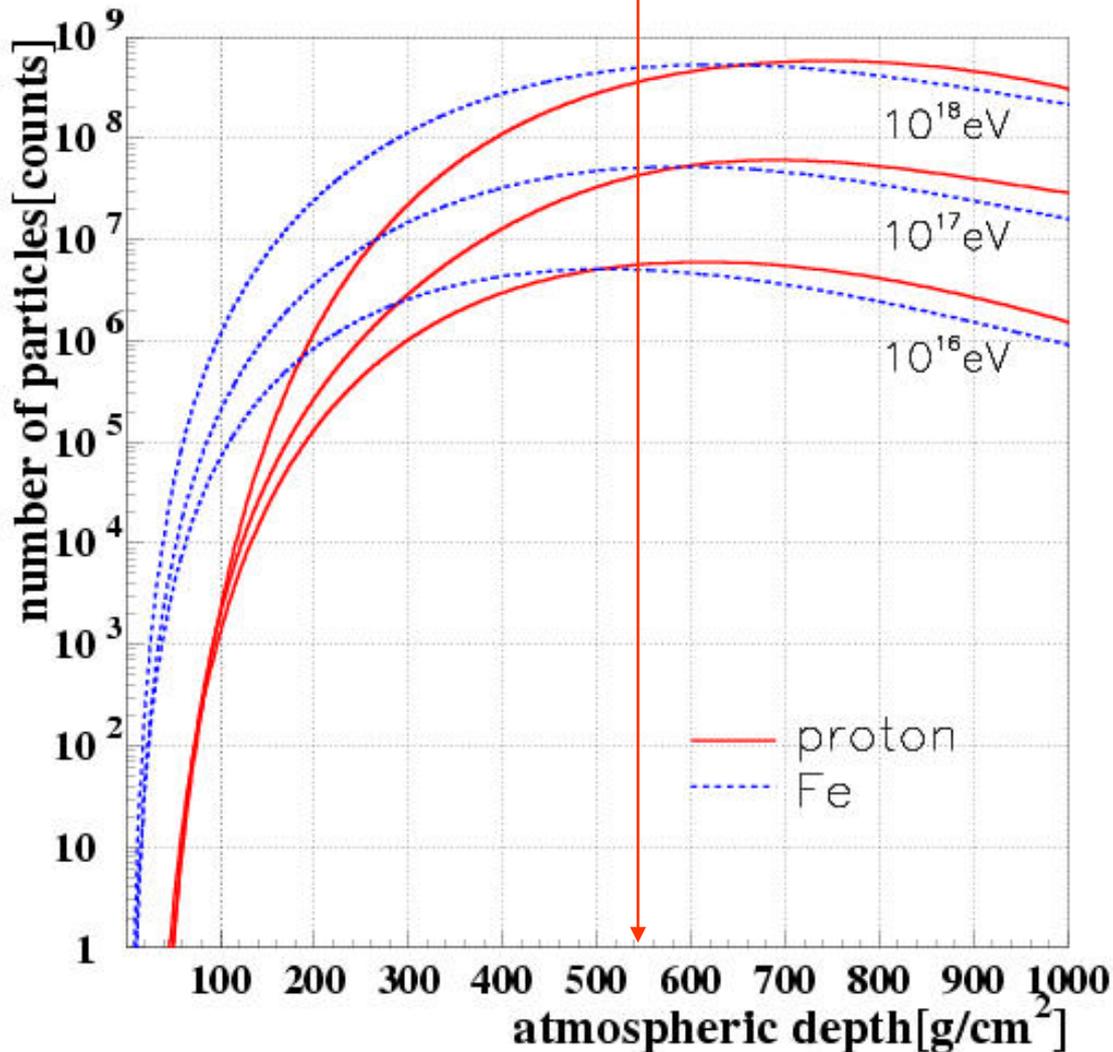
チャカルタヤ山宇宙物理学研究所

- 西経 $68^{\circ} 08'$
- 南緯 $16^{\circ} 21'$
- 標高 5200m
= 550 g/cm^2
世界最高高度



- AS最大発達付近での観測
- 発達初期段階の観測
- 銀河面の広い領域が視野





- エネルギー、到来方向決定精度が良い

$$N_{\max} \rightarrow E_0$$

- 低いエネルギー宇宙線の観測が可能

- 縦方向発達

⇒ 化学組成、高エネルギー原子核相互作用

チャカルタヤ山宇宙物理学研究所

- 簡単な歴史

1941年 I.Escobarによって開設

1947年 π 中間子の発見(C.F. Powell etc.)

1959年 国際宇宙線会議(Moscow)

小田稔-B. Rossiによる提案

→日本・米国・ボリビア国際共同実験(BASJE)

米国: MIT, メリーランド大

ボリビア: Universidad Mayor de San Andres

1961年 装置搬入

1962年1月 本観測開始

1967年 米国撤退

現在に至る

代表者

- 1960-1985年 菅浩一
- 1986-1995年 金子達之助
- 1996-2005年 吉井尚
- 2006-2015年 垣本史雄

主な日本人参加者(物理関係:年代順?)

鎌田甲一, 村上一昭, 豊田好男, 柴田進吉,
永野元彦, 水本好彦, 原忠生, 井上直也,
手嶋政広, 松原豊, 荻尾彰一, 白崎裕治,
常定芳基, 得能久生,

予算関係(科研費以外)

- 1965-1972年 学術振興会国際共同研究事業
- 1973-2003年 文科省海外特別事業費
- 1972-1983年 海外技術協力事業団,
国際協力事業団からの援助
- 2004-2015年 宇宙線研究所共同利用費

研究課題

- 1960-1966年 μ -less showersの観測による宇宙 γ 線(10^{14} - 10^{16} eV)の探索と一次宇宙線エネルギースペクトル(10^{15} - 10^{17} eV)の測定
- 1967-1970年 生き残り宇宙線陽子観測による陽子-空気原子核衝突断面積の測定(3×10^{12} - 3×10^{13} eV)
- 1971-1975年 大AS観測と一次宇宙線エネルギースペクトル(5×10^{16} - 3×10^{18} eV)の測定
- 1976-1980年 大AS中の μ 粒子到着時間分布測定による空気シャワー縦方向発達決定
- 1981-1984年 ASチェレンコフ光到着時間分布測定による空気シャワー縦方向発達決定

過去の研究課題と成果

- 1960～1966年 ミューレス
シャワー観測による一次宇宙
ガンマ線観測
($10^{14} \sim 10^{16} \text{eV}$)

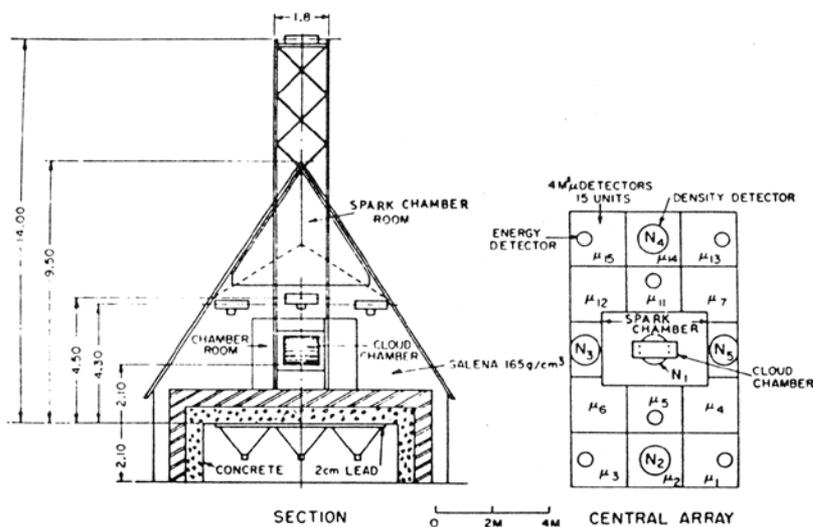
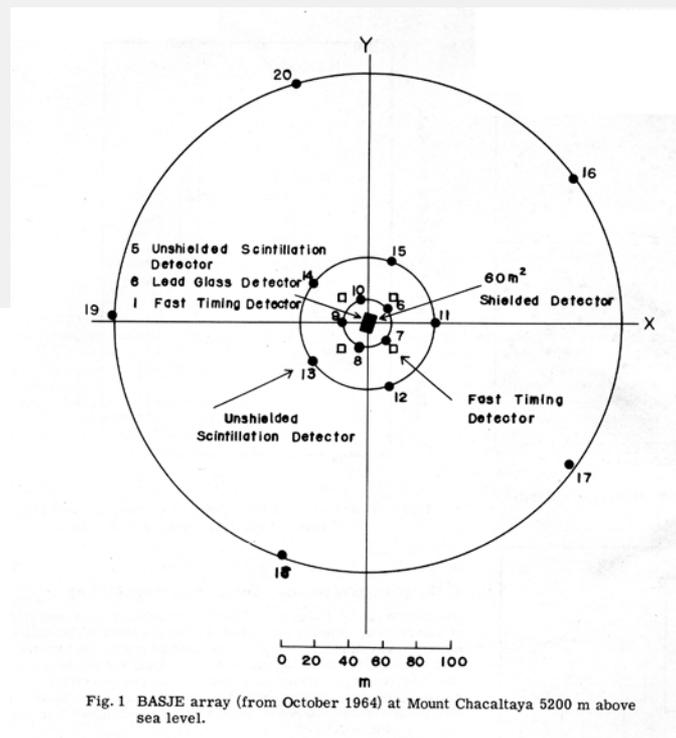


図2. シールド検出器



シンチレーション検出器～40台
 ミューオン検出器～60m²(当時
 世界最大)

- 成果

RA=200~220° 約 3σ のexcess

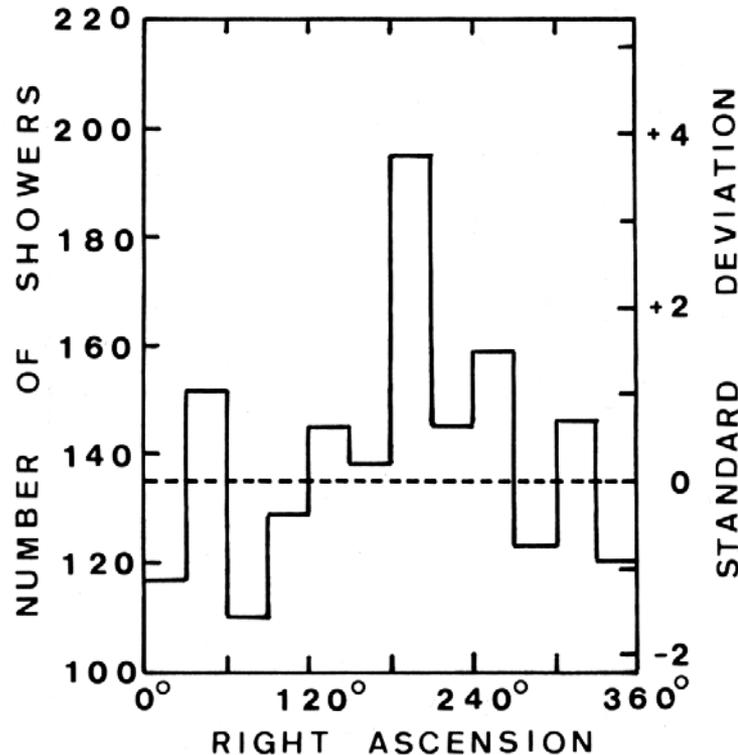
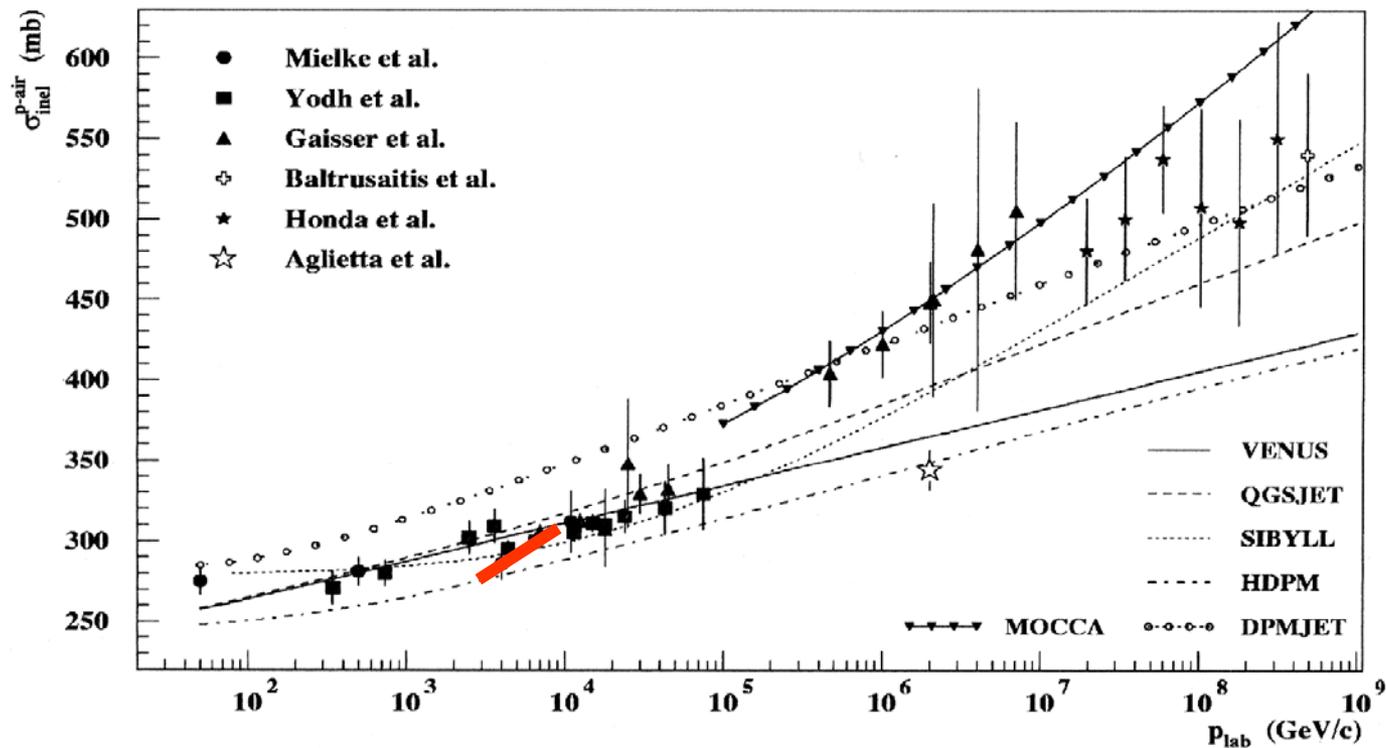


FIG. 1.—Distribution of arrival directions of EAS with low contents of muons and hadrons and initiation depths smaller than 80 g cm^{-2} from a declination band of 0° to -40° . Abscissa is right ascension (α) in degrees. Ordinate on left side is the number of EAS observed in a bin of 30° width. Dashed line is the average number of EAS obtained from the distribution excluding a bin of $\alpha = 180^\circ$ – 210° . Ordinate on right side is the deviation from the average in the standard deviation (σ).

研究課題

- 1960-1966年 μ -less showersの観測による宇宙 γ 線(10^{14} - 10^{16} eV)の探索と一次宇宙線エネルギースペクトル(10^{15} - 10^{17} eV)の測定
- 1967-1970年 生き残り宇宙線陽子観測による陽子-空気原子核衝突断面積の測定(3×10^{12} - 3×10^{13} eV)
- 1971-1975年 大AS観測と一次宇宙線エネルギースペクトル(5×10^{16} - 3×10^{18} eV)の測定
- 1976-1980年 大AS中の μ 粒子到着時間分布測定による空気シャワー縦方向発達決定
- 1981-1984年 ASチェレンコフ光到着時間分布測定による空気シャワー縦方向発達決定

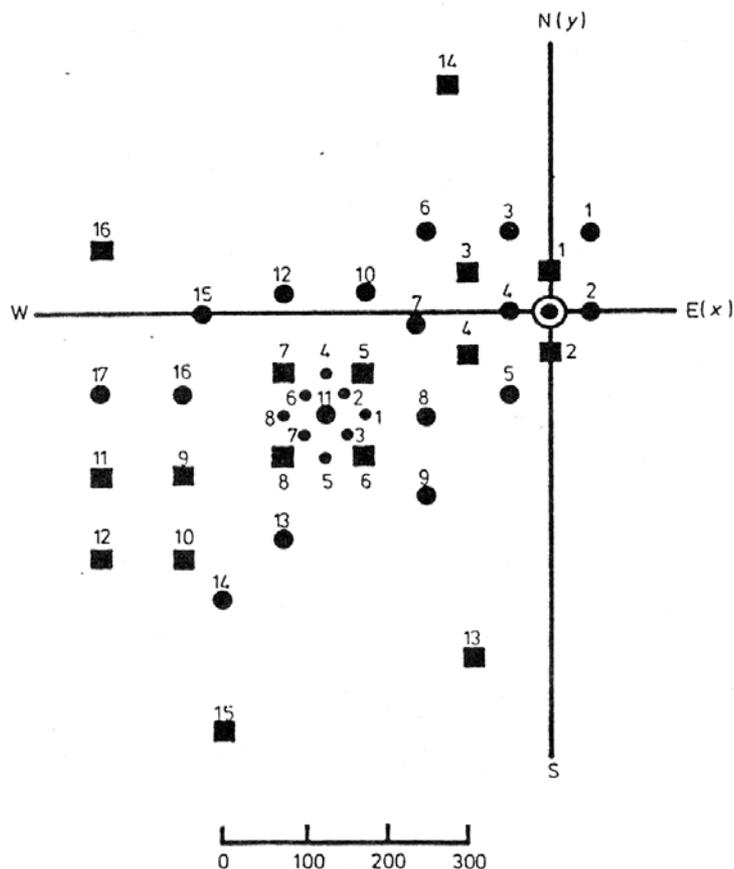
- 1967~1970年 生き残り宇宙線陽子の観測と、陽子・空気原子核衝突断面積の測定



研究課題

- 1960-1966年 μ -less showersの観測による宇宙 γ 線(10^{14} - 10^{16} eV)の探索と一次宇宙線エネルギースペクトル(10^{15} - 10^{17} eV)の測定
- 1967-1970年 生き残り宇宙線陽子観測による陽子-空気原子核衝突断面積の測定(3×10^{12} - 3×10^{13} eV)
- 1971-1975年 大AS観測と一次宇宙線エネルギースペクトル(5×10^{16} - 3×10^{18} eV)の測定
- 1976-1980年 大AS中の μ 粒子到着時間分布測定による空気シャワー縦方向発達決定
- 1981-1984年 ASチェレンコフ光到着時間分布測定による空気シャワー縦方向発達決定

1971~1975年 大空気シャワー観測



•対象エネルギー領域

$5 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{18} \text{eV}$

•目的

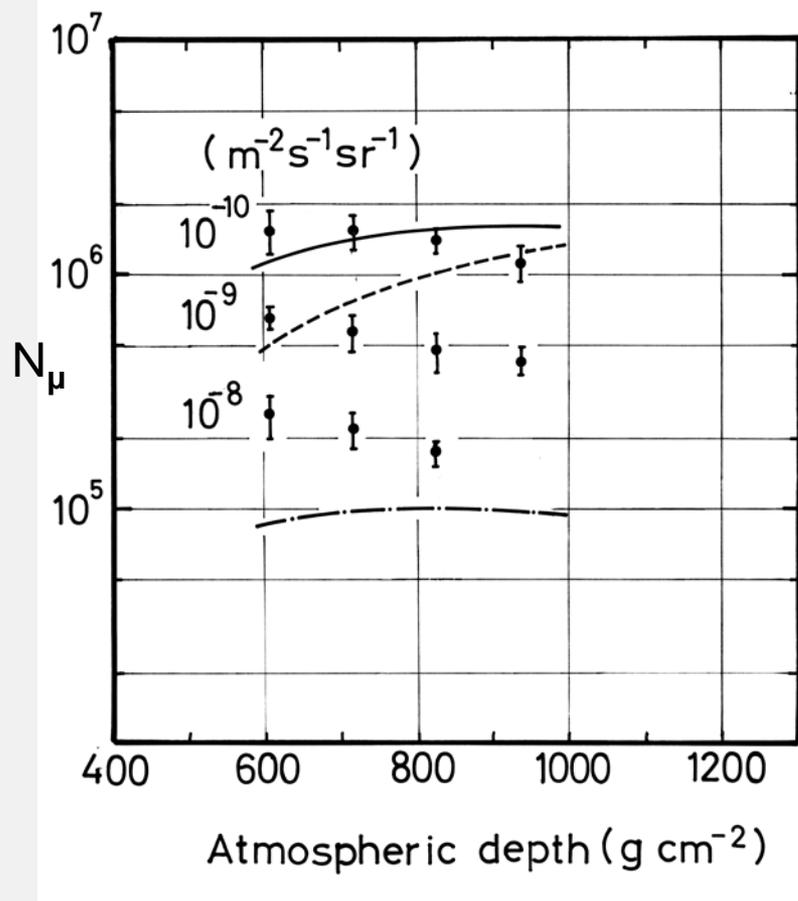
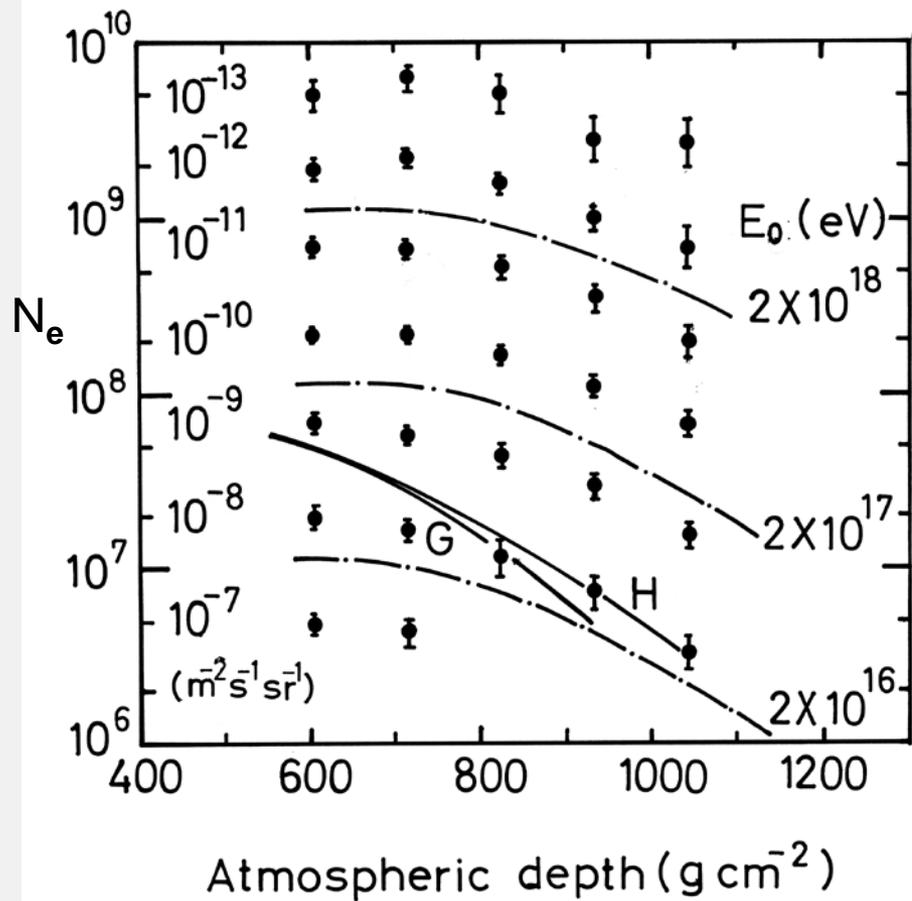
高エネルギー相互作用

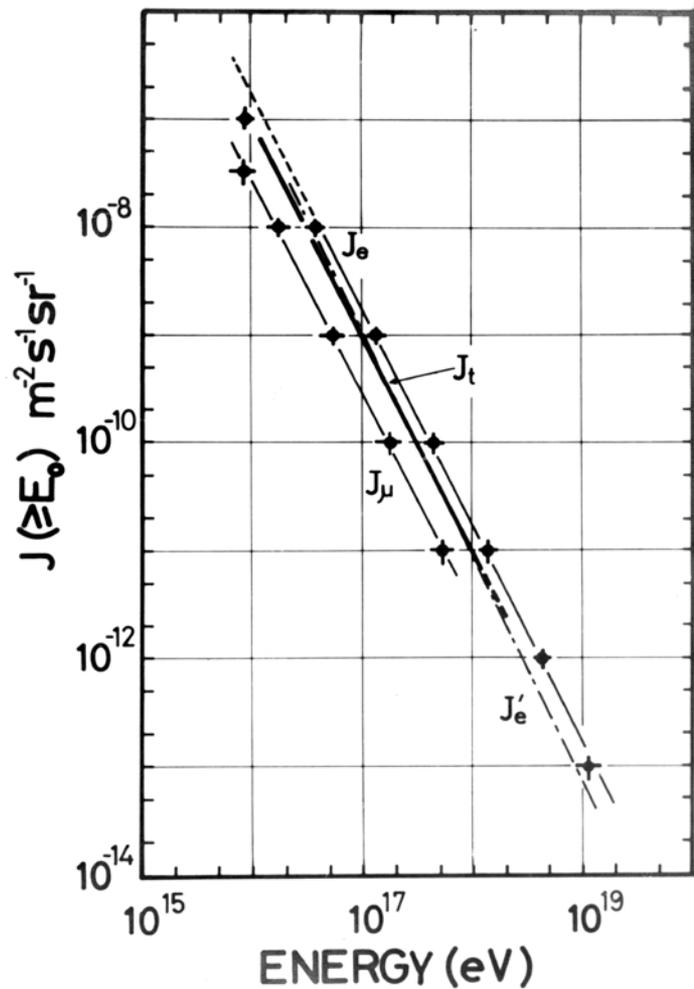
宇宙線起源

シンチレーション検出器 44台

(内 FT-channel 16台)

結果





結論

- $E^{1/4}$ 多重発生モデルで予想されるよりも早い発達を示す。
- 平均的質量組成は $\langle A \rangle \sim 20$
- 電子とミュオンの縦方向発達を同時に説明できるモデルはない
→ Direct γ production ?

- 1981-1985年 宇宙線エネルギー上限確定のための観測方法の開発
 - 水中音響測定による
 - VLF, LF電波測定による
- 1985-1995年 高エネルギー宇宙 γ 線点源, diffuse源探索 (Vela X-1, Cen X-1, SN1987A)
- 1996-2015年 一次宇宙線質量組成とエネルギースペクトル測定
 - 3×10^{13} - 10^{16} eV(1996-2005年)
 - ① 空気チェレンコフ光到着時間分布
 - ② 等頻度曲線
 - ③ 空気チェレンコフ光横方向分布
 - 10^{15} - 10^{18} eV(2006-2015年)
空気チェレンコフ光到着時間・横方向分布

1981～1985年 加速限界宇宙線の観測方法の開発

水中音響測定法

- 空気シャワー中のハドロンコア→高山の湖→音波
- チチカカ湖、カラコッタ湖で背景雑音を測定
- 結果：一箇所になくとも10本程度のセンサーが必要である。

低周波電波測定法

- 空気シャワー中の陰電子過剰(～20%)に伴う電波の発生
- 本研究所での観測は短期間→**明野観測所**
- 結果

波形観測の収率が悪い

大気電場による過剰電子の減速による電波か？

- 1981-1985年 宇宙線エネルギー上限確定のための観測方法の開発
 - 水中音響測定による
 - VLF, LF電波測定による
- **1985-1995年 高エネルギー宇宙 γ 線点源**
(Vela X-1, Cen X-3, SN1987A), diffuse源探索
- 1996-2015年 一次宇宙線質量組成とエネルギースペクトル測定
 - 3×10^{13} - 10^{16} eV(1996-2005年)
 - ① 空気チェレンコフ光到着時間分布
 - ② 等頻度曲線
 - ③ 空気チェレンコフ光横方向分布
 - 10^{15} - 10^{18} eV(2006-2015年)
空気チェレンコフ光到着時間・横方向分布

1985～1995年 一次宇宙ガンマ線の観測

観測対象： 10^{14} eV以上⇒現在 6×10^{12} eV以上

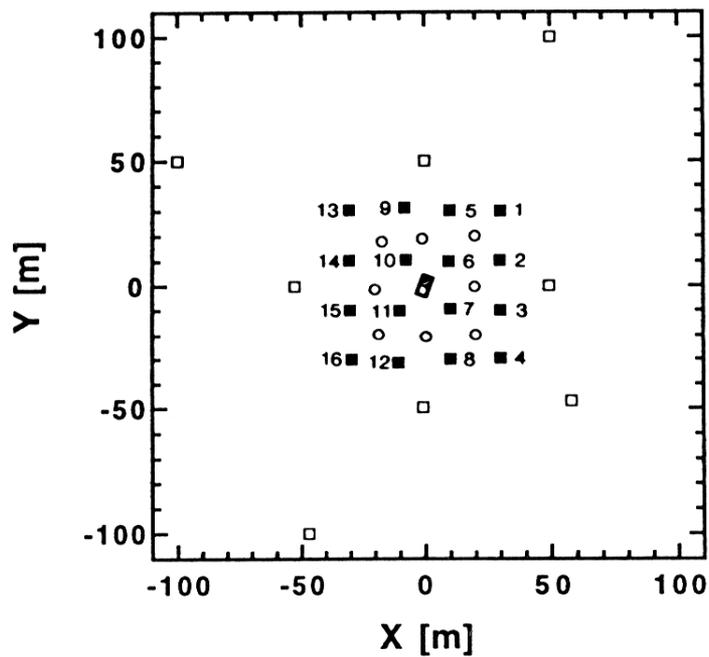


Fig. 1. Arrangement of detectors in the SAS array: G-detectors with detector numbers (■), N-detectors (□) and NT-detectors (○). The shadow rectangle is a 60 m^2 shielded detector.

1987～1990年 SN1987Aからの一次ガンマ線観測

南向き斜面(傾斜 30°)に $4\text{m}^2 \times 12$ 台、 $1\text{m}^2 \times 32$ 台のシンチレーション検出器を設置

10^{14}eV 以上のガンマ線の検出を目的とする



点源探查結果

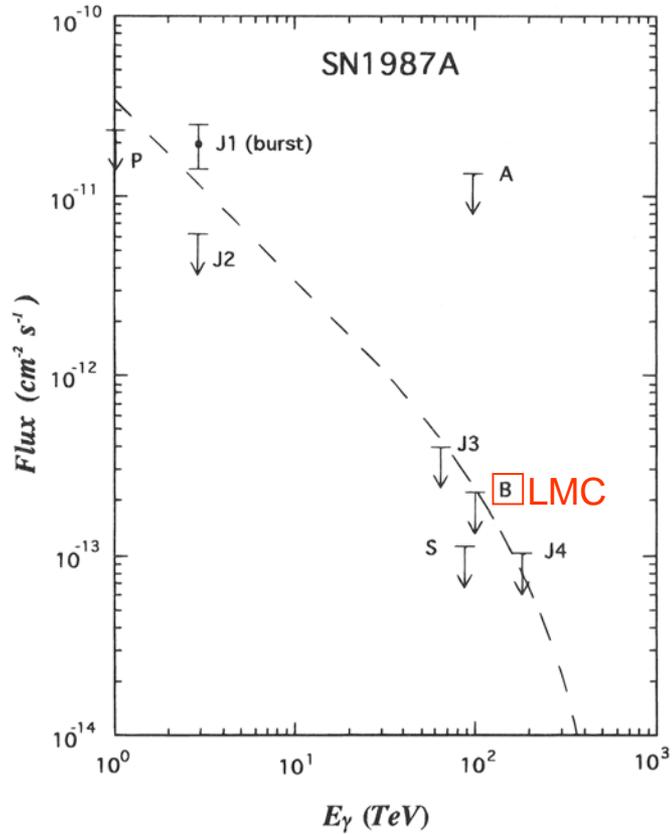


FIG. 7.—Upper limits on the flux of gamma rays from SN 1987A. The dashed line represents a spectrum of photons calculated by Gaisser et al. (1989b) assuming that photons are produced by protons accelerated with a differential energy spectrum $\propto E_p^{-2}$ up to a maximum energy $E_p^{\text{max}} \sim 10^5$ TeV at the source. P: Potchefstroom (Raubenheimer et al. 1988); J1–J4: JANZOS (Bond et al. 1988a, 1988b; Allen et al. 1993a, 1993b); A: Adelaide (Ciampa et al. 1988); S: SPASE (Stekelenborg et al. 1993); B: present result (LMC array).

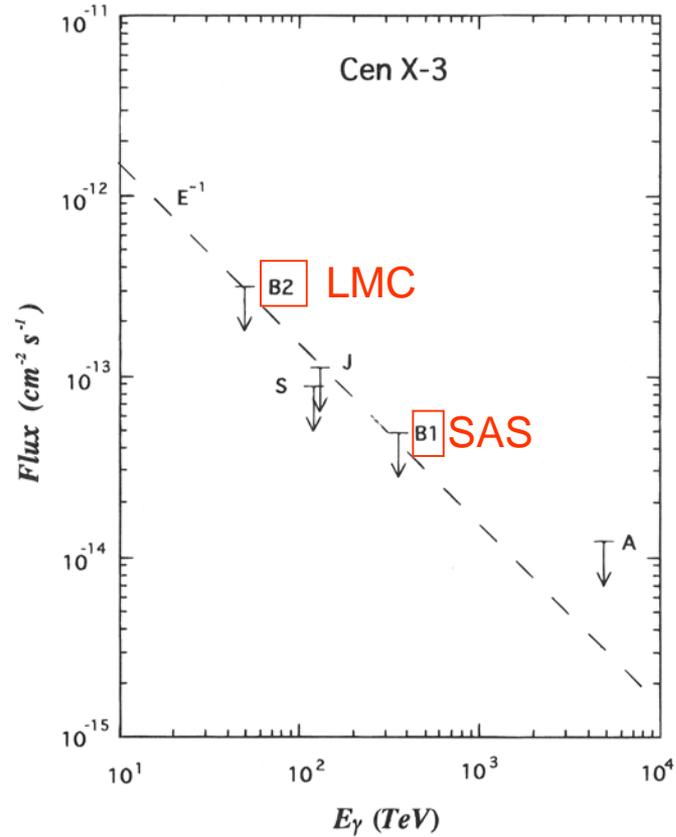


FIG. 8.—Upper limits on the flux of gamma rays from Cen X-3. The dashed line represents an E^{-1} integral spectrum. J: JANZOS (Allen et al. 1993b); S: SPASE (Stekelenborg et al. 1993); A: Adelaide (Protheroe & Clay 1985); B1: BASJE (SAS array) (Kaneko et al. 1991); B2: present result (LMC array).

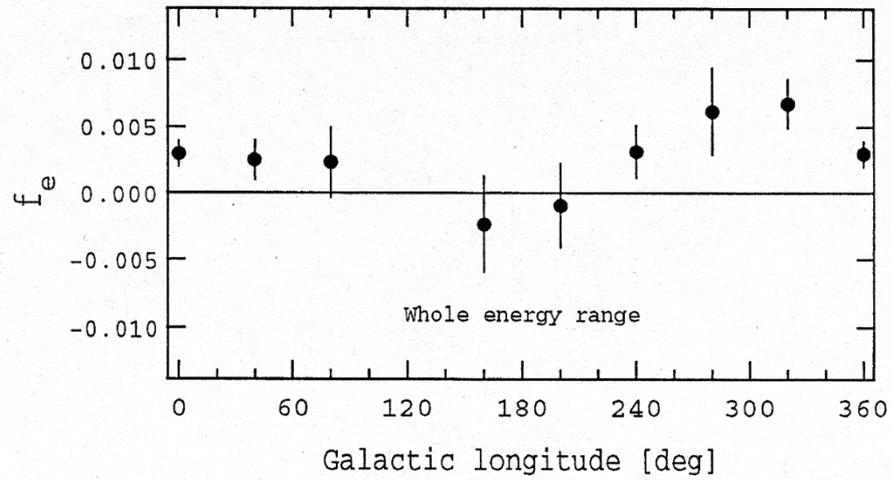


Figure 2: The galactic enhancement factor f_e vs. the galactic longitude l with SAS array.

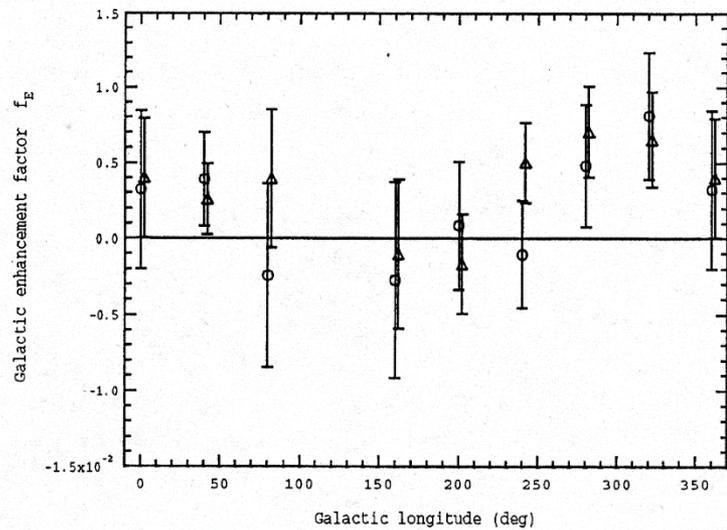
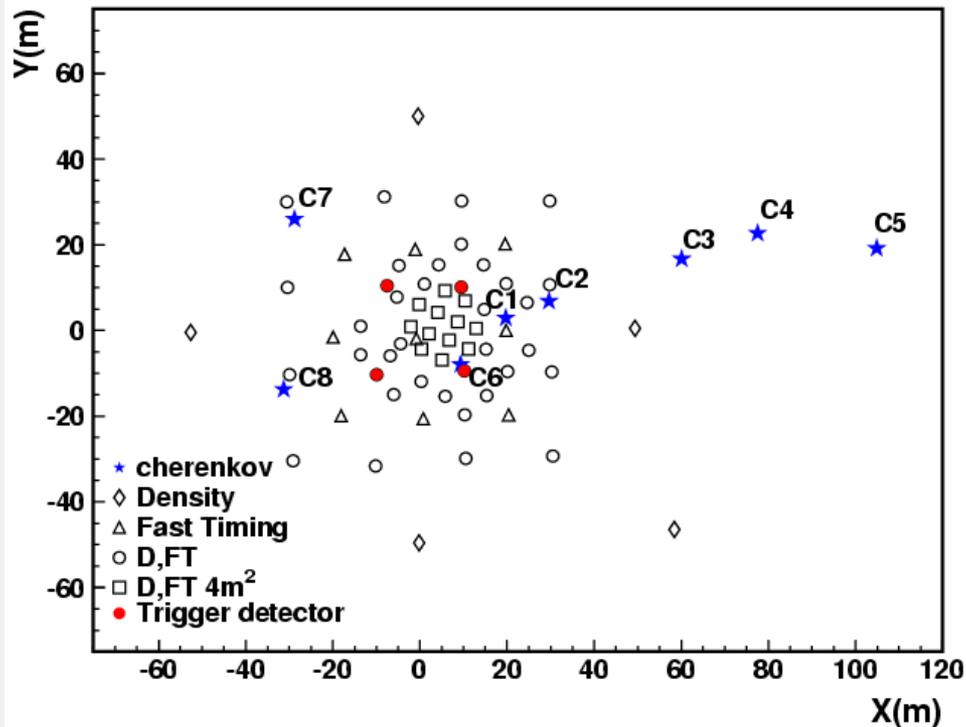


Figure 3: f_e vs. l ; \circ is for muon-less air showers and \triangle for muon-rich air showers (see text).

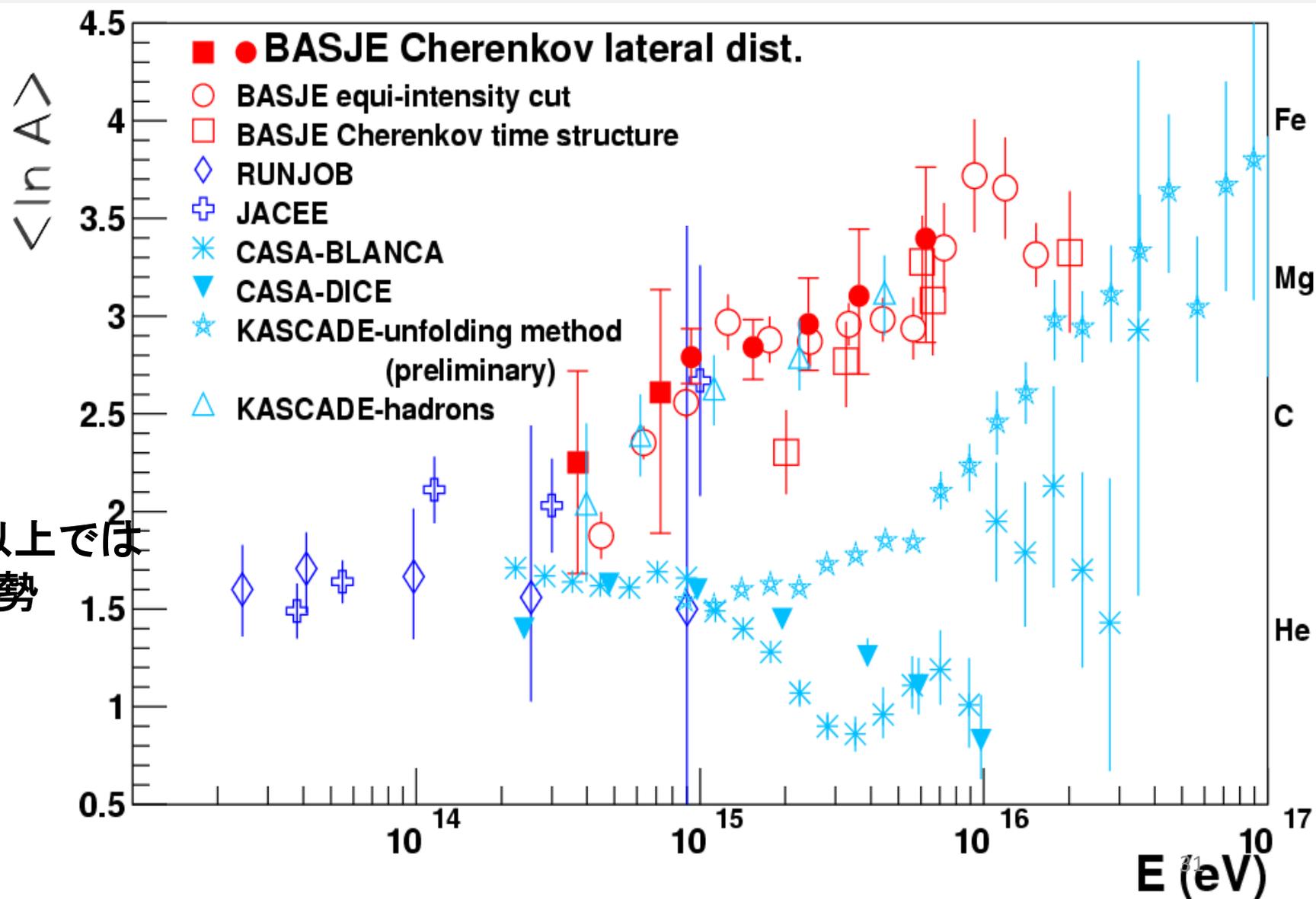
- 1981-1985年 宇宙線エネルギー上限確定のための観測方法の開発
 - 水中音響測定による
 - VLF, LF電波測定による
- 1985-1995年 高エネルギー宇宙 γ 線点源, diffuse源探索 (Vela X-1, Cen X-1, SN1987A)
- 1996-2015年 一次宇宙線質量組成とエネルギースペクトル測定
 - 3×10^{13} - 10^{16} eV(1996-2005年)
 - ① 空気チェレンコフ光到着時間分布
 - ② 等頻度曲線
 - ③ 空気チェレンコフ光横方向分布
 - 10^{15} - 10^{18} eV(2006-2015年)
空気チェレンコフ光到着時間・横方向分布

1996～2015年 一次宇宙線質量組成とエネルギースペクトル測定

- $3 \times 10^{13} - 10^{16} \text{ eV}$ (1996-2005年)



BASJE 原子核組成解析結果



Knee以上では
重核優勢

現在の研究目的

10¹⁶eV以上の宇宙線質量組成：大気上空での縦方向発達の様相



宇宙線起源天体：銀河系内から銀河系外への変化

- ・ 銀河系内加速限界エネルギーの確定
- ・ 銀河系外起源宇宙線の存在

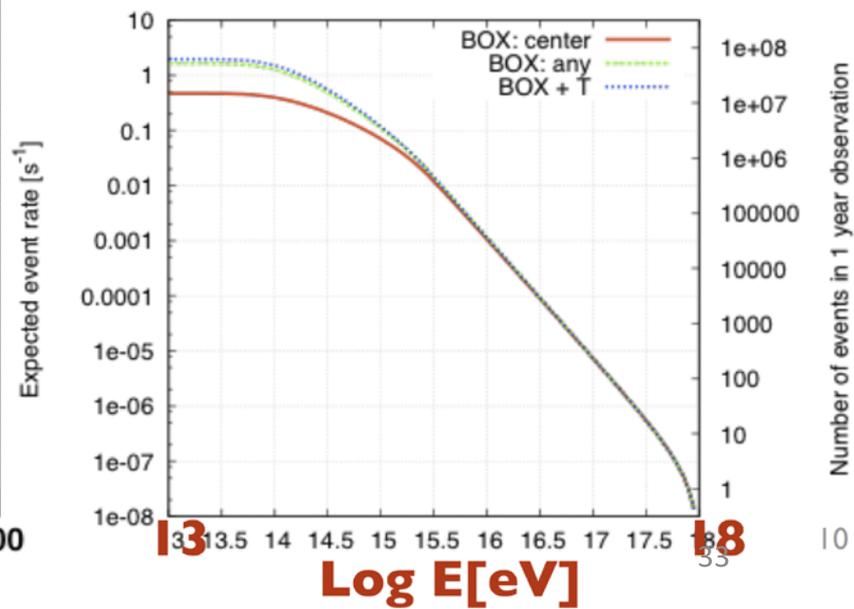
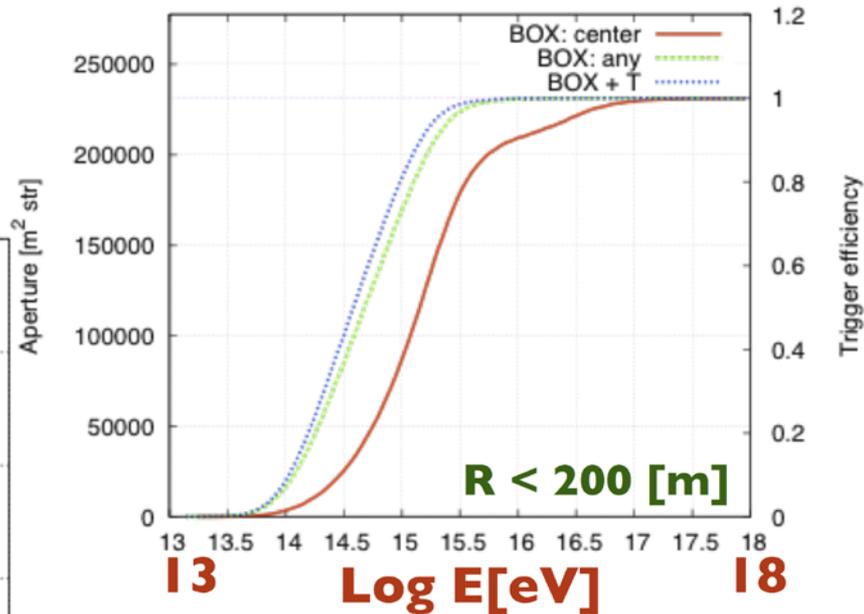
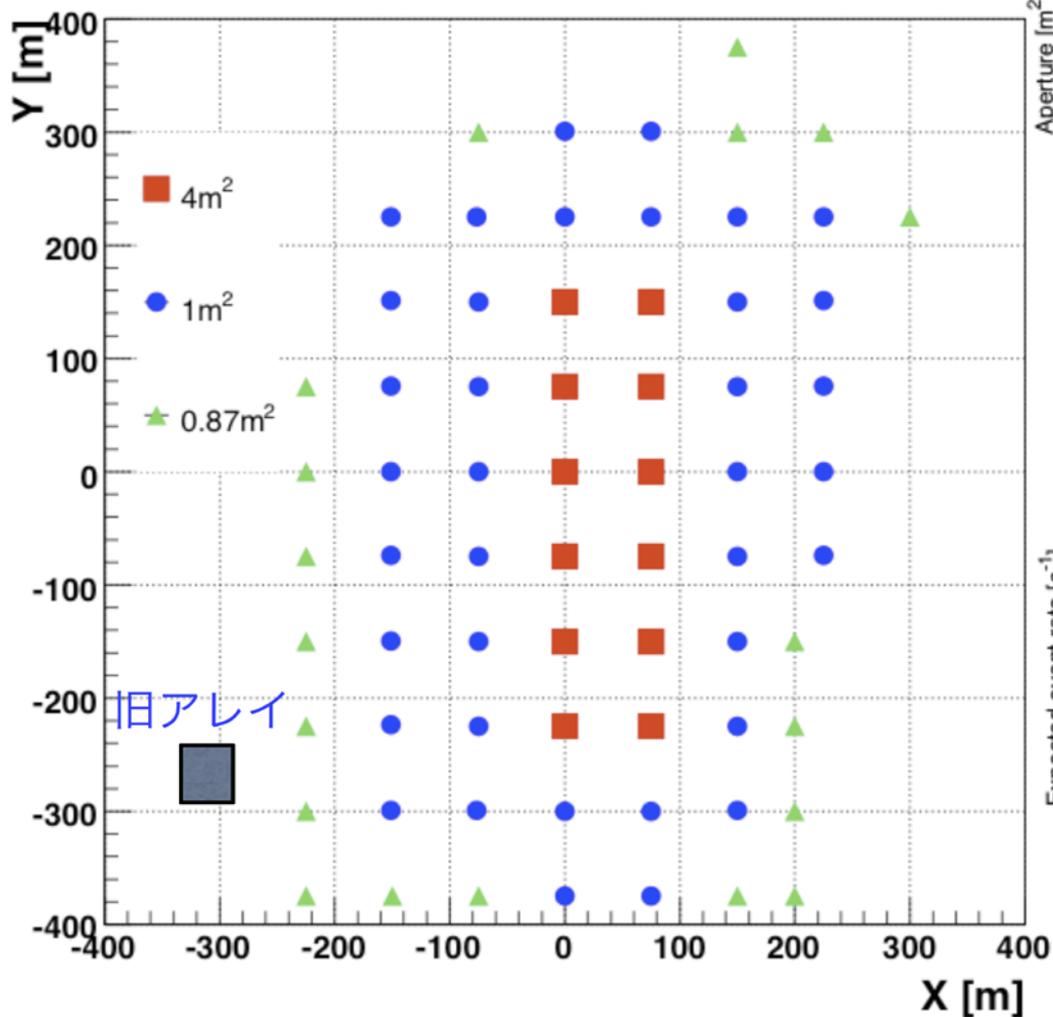
10¹⁵eV以上(2006-2015年)

- 検出器を移設

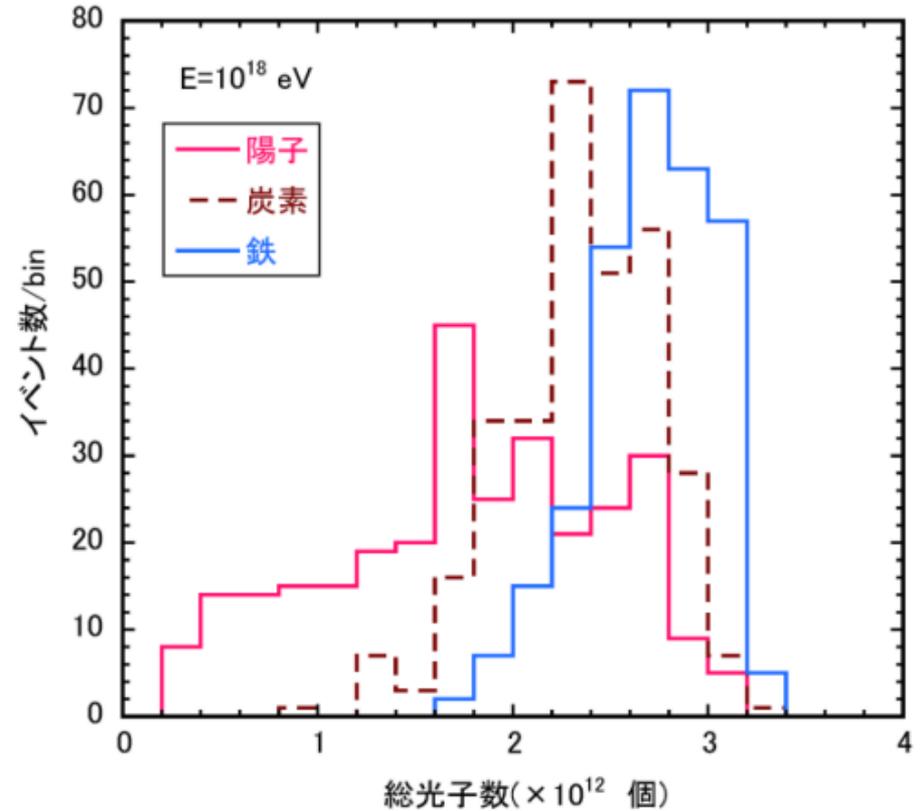
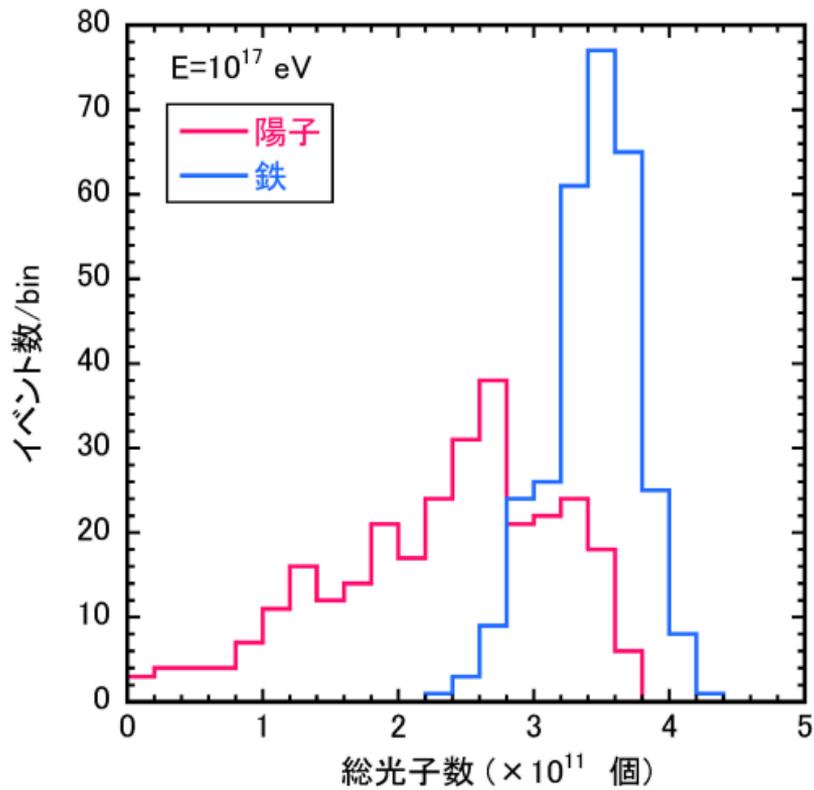
(μ検出器はそのまま)

- 600m X 700m
- 75m間隔

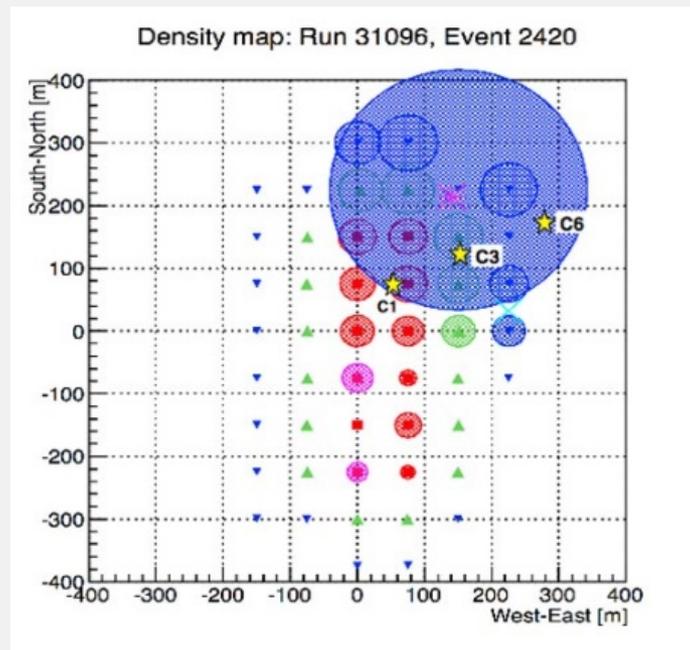
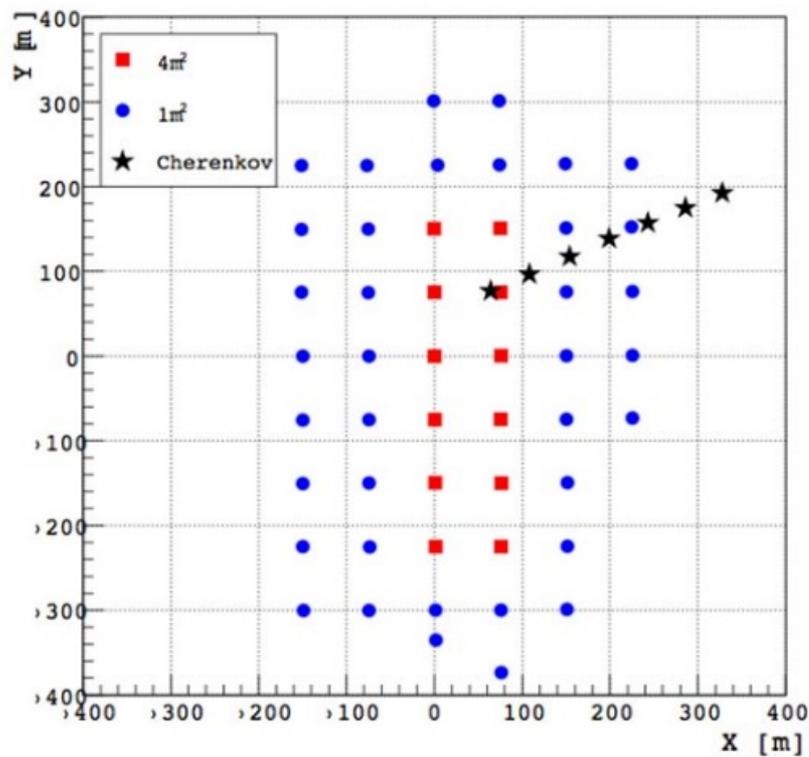
c.f. R_{mol}=150m



シミュレーション計算



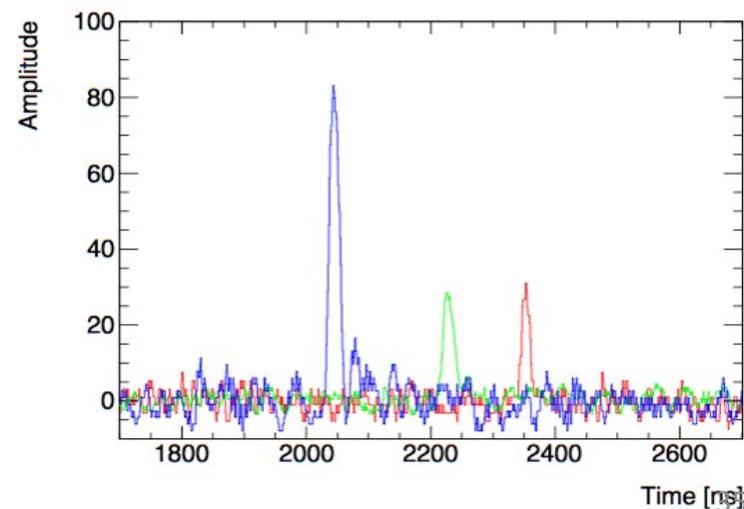
空気チェレンコフ光観測(2011-2015年)



本観測(2013-2015)

総観測時間 1150 時間

(チェレンコフ光観測)



永らくのご支援に対し
心より感謝申し上げます