

CANGAROO実験と現在の TeVガンマ線観測

東京大学宇宙線研究所 チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ
大石 理子

2011/02/20 研究会「グローバルな宇宙天文観測」

目次

- 組織的若手派遣プログラムによる渡航状況
- CANGAROO実験
 - 解像型大気チェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーガンマ線検出原理
 - VHEガンマ線の観測意義・標的天体
 - CANGAROO-III望遠鏡による観測のサマリー
 - 現世代のVHEガンマ線観測装置群
 - CANGAROO望遠鏡による最近の観測結果
- 次期ガンマ線計画: CTA (Cherenkov Telescope Array) について

組織的若手派遣プログラムによる 渡航状況

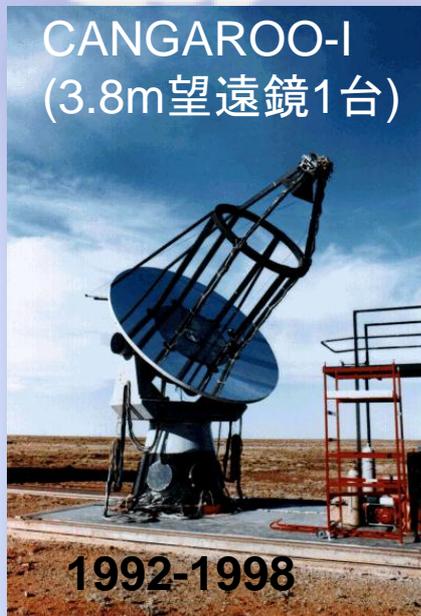
- ◆ 渡航先1: CANGAROO実験 ウーメラ観測所
(オーストラリア・南オーストラリア州)
 - 渡航目的 : (主に)CANGAROO-III望遠鏡による観測
 - 渡航回数 : 学生 1回, 助教 2回, 計3回
- ◆ 渡航先2: マドリッド=コンプルテンセ大学
(スペイン・マドリッド)
 - 渡航目的: Cherenkov Telescope Array (CTA)計画
General meeting(主にヨーロッパで年2回開催)への
参加
 - 渡航回数 : 助教 1回

ご支援ありがとうございました

CANGAROO 実験

Collaboration of Australia and Nippon for a Gamma-Ray Observatory in the Outback

- ◆ 解像型大気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT)を用いて超高エネルギー(VHE)領域のガンマ線の地上観測を行う実験
- ◆ 南半球で初めてIACTによるガンマ線観測を行ったグループ
- ◆ 観測装置は3世代の区分があるが、観測サイトは一貫してウーメラで維持



CANGAROO-III
(2003-2011)

10m望遠鏡 4台で構成
されるステレオ観測シ
ステム(後述)

ウーメラ観測所

- ◆ 観測サイト位置:
 - 東経 136度48分 南緯 31度6分
 - 海拔高度 160m
- ◆ 州都アデレードから北へ約500km
- ◆ 気候区分: 砂漠気候
- ◆ 晴天率: ~80%
- ◆ Woomera立ち入り制限地域 (WPA)内
- ◆ 生活拠点: Woomera Village (定住人口 250人)



CANGAROO collaboration



Australia Telescope National Facility, CSIRO



University of Adelaide



Australian National University



茨城大学



東京大学宇宙線研究所



国立天文台



東海大学



京都大学



山形大学



山梨学院大学



名古屋大学



甲南大学



北里大学



広島大学



早稲田大学

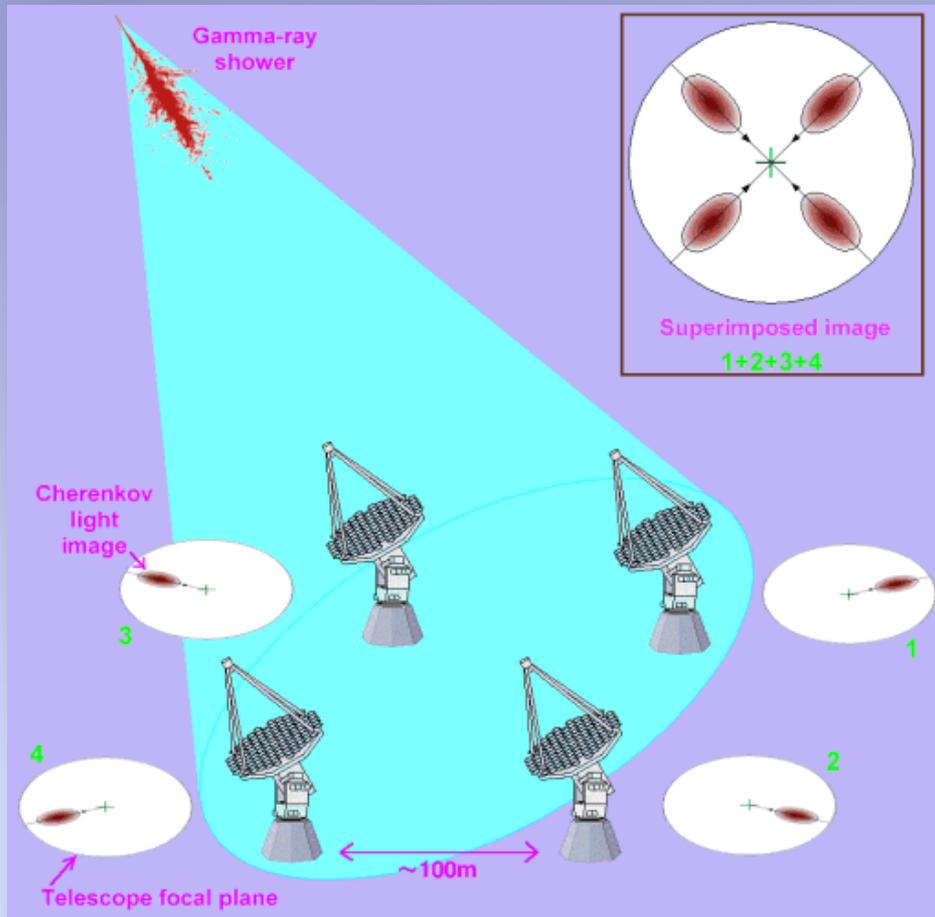


立命館大学



高エネルギー加速器研究機構

解像型大気チェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーガンマ線検出原理(1)



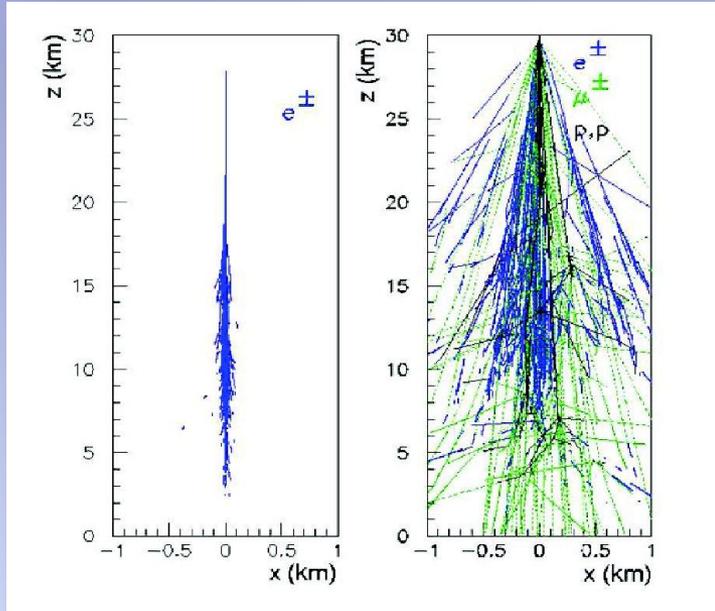
- ◆ 超高エネルギーガンマ線が大気中の原子核と衝突して電磁シャワーを形成、シャワー中の荷電粒子(e^- , e^+)は大気中でチェレンコフ光を放出する
- ◆ 電磁シャワー由来のチェレンコフ光は地表面で半径 $\sim 150\text{m}$ のライトプールを形成
- ◆ 地表に置いた望遠鏡でチェレンコフ光を集光し、主焦点面に光子の到来方向を投影
- ◆ 焦点面に投影されたシャワー像の長軸の向きからシャワー到来方向を推定する
- ◆ 2台以上の望遠鏡で同一のシャワーを観測することで到来方向が決定される(望遠鏡1台でも到来方向の2次元確率分布を求められる)

現世代のtypicalなチェレンコフ望遠鏡の性能

エネルギー領域 : $100\text{GeV} \sim 10\text{TeV}$ 角度分解能 : $\sim 0.1^\circ$
エネルギー分解能 : $\sim 20\%$ 検出面積 : $\sim 10^5\text{m}^2$
感度 : $\sim 1\%$ Crab Flux ($10^{-13}\text{erg/cm}^2\text{s}$)

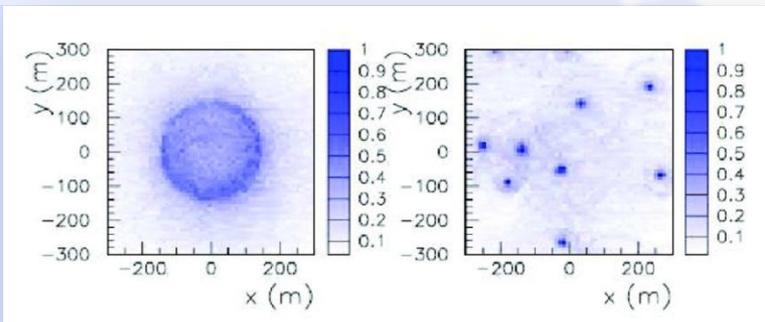
解像型大気チェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーガンマ線観測原理(II)

ガンマ線と陽子のシャワー発展の違い

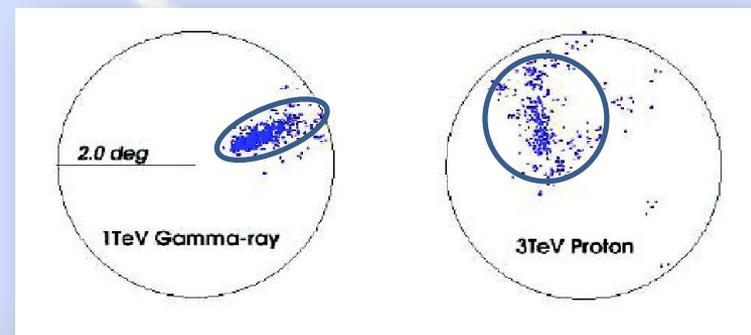


- ◆ ガンマ線の作る電磁シャワーと宇宙線原子核成分の作るシャワーでは、構成粒子の種類と横方向運動量の分布が異なる
- ◆ これらのシャワー特性の違いは主焦点面に投影されたイメージの形状情報として残る
- ◆ 投影されたイメージの形状解析(2次モーメント、Hillas Parameter)を行い、パラメータカットを行うことによって原子核成分を排除する(Imaging 法)
- ◆ Imaging法の導入により1989年に初めてTeV領域でカニ星雲からの信号を検出(信号有意度 9σ , 最初の確実なTeVガンマ線源)

ガンマ線と陽子の地表でのチェレンコフ光の分布の違い



主焦点面に投影されたチェレンコフイメージの違い



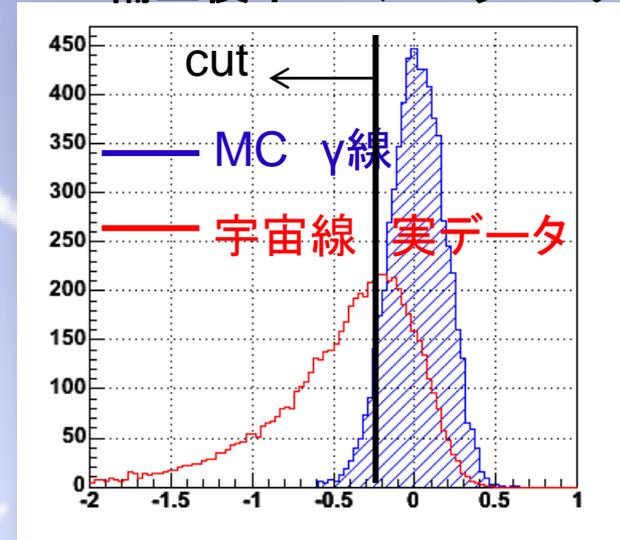
観測手法--バックグラウンド評価法

- ◆ パラメータカット後の宇宙線原子核成分(と電子)の混入数を推定するため、標的天体に望遠鏡を向けて取得した"ON-source"データに対し、標的天体を外して"OFF-source"データを必ず取得して差し引きを行い、 γ 線信号の統計有意度は

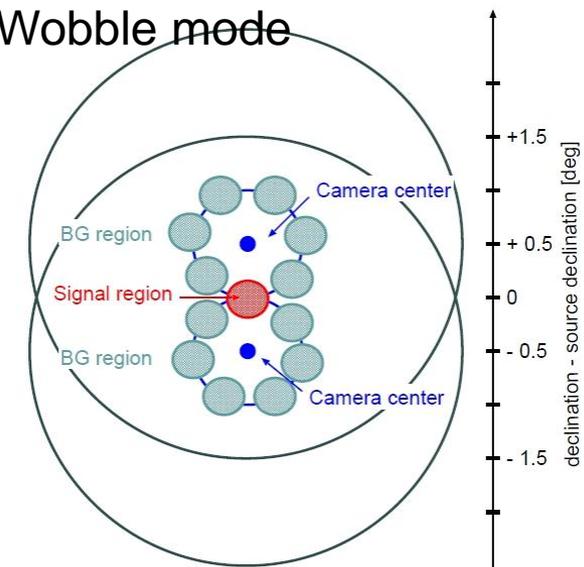
$$\sigma = \frac{N_{ON} - N_{OFF}}{\sqrt{N_{ON} + N_{OFF}}} \quad \text{で評価される}$$

- ◆ ガンマ線源がコンパクトな場合は、視野内でOFF-source領域を定義することでON,OFFのデータを同時に取得(wobble mode)
- ◆ 広がったガンマ線源に対しては、ON-source観測と同一の方位角・俯角分布になるように標的天体から赤経をずらした座標に対してOFF-sourceデータを取る(Long ON-OFF mode)
- ◆ Long ON-OFF法で銀河面の天体を観測するときはOFFとONで背景夜光による雑音量が異なるため、より雑音の除去効率を高めた解析を行う必要がある

補正後イメージパラメータ



Wobble mode



VHE領域ガンマ線観測の意義

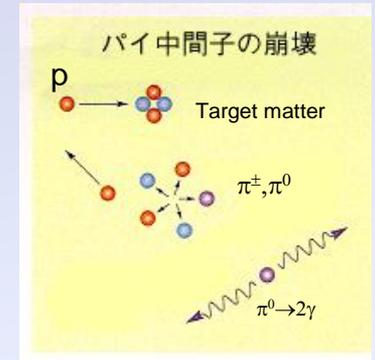
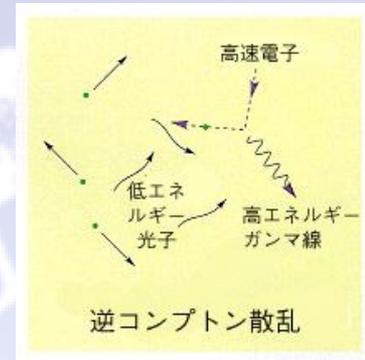
◆ 銀河系内宇宙線の起源・加速・伝播機構の解明

- ガンマ線は高エネルギー荷電粒子—宇宙線から非熱的な機構によって放出される
- 系内の宇宙線の加速源については超新星残骸が有力な候補とされてはいるが、現在でも宇宙線の加速源・加速機構・伝播機構については完全には明らかになっていない(宇宙線の起源の謎)
- 中性粒子であるガンマ線は荷電粒子と異なり磁場内で進行方向が曲がらないため、宇宙線の加速源を探る有用な探針となり得る

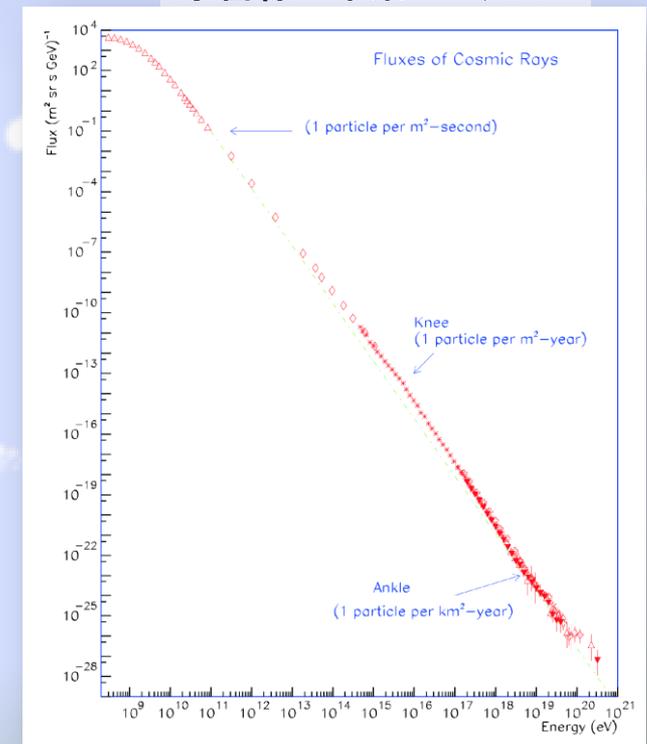
その他

- ◆ 系外宇宙線の加速・伝播機構の解明
- ◆ 暗黒物質対消滅・崩壊によるガンマ線の探索
- ◆ 宇宙論・量子重力効果の検証

VHEガンマ線放射過程の例



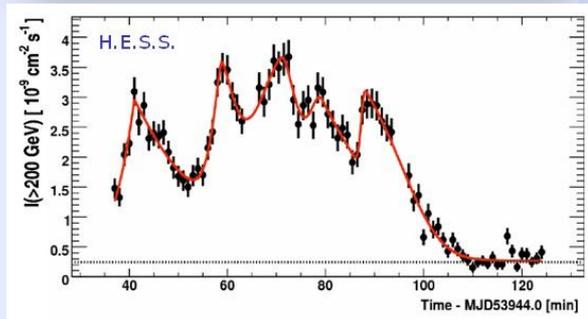
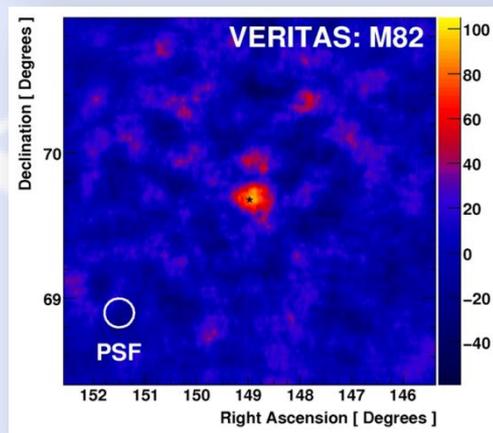
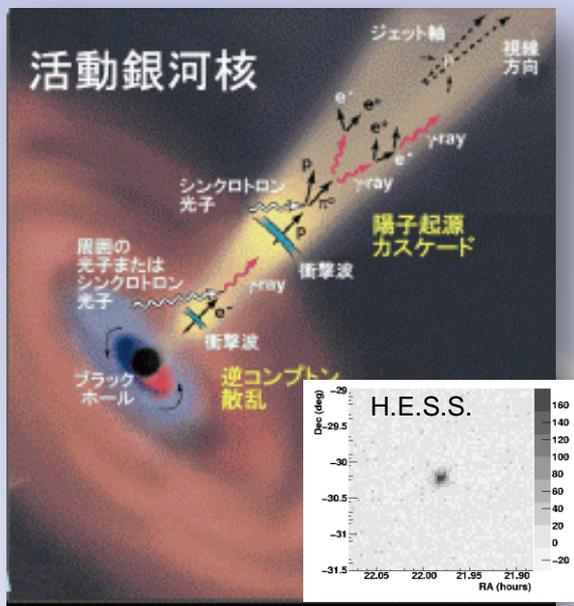
宇宙線の巾乗スペクトル



VHEガンマ線での観測標的天体(2)

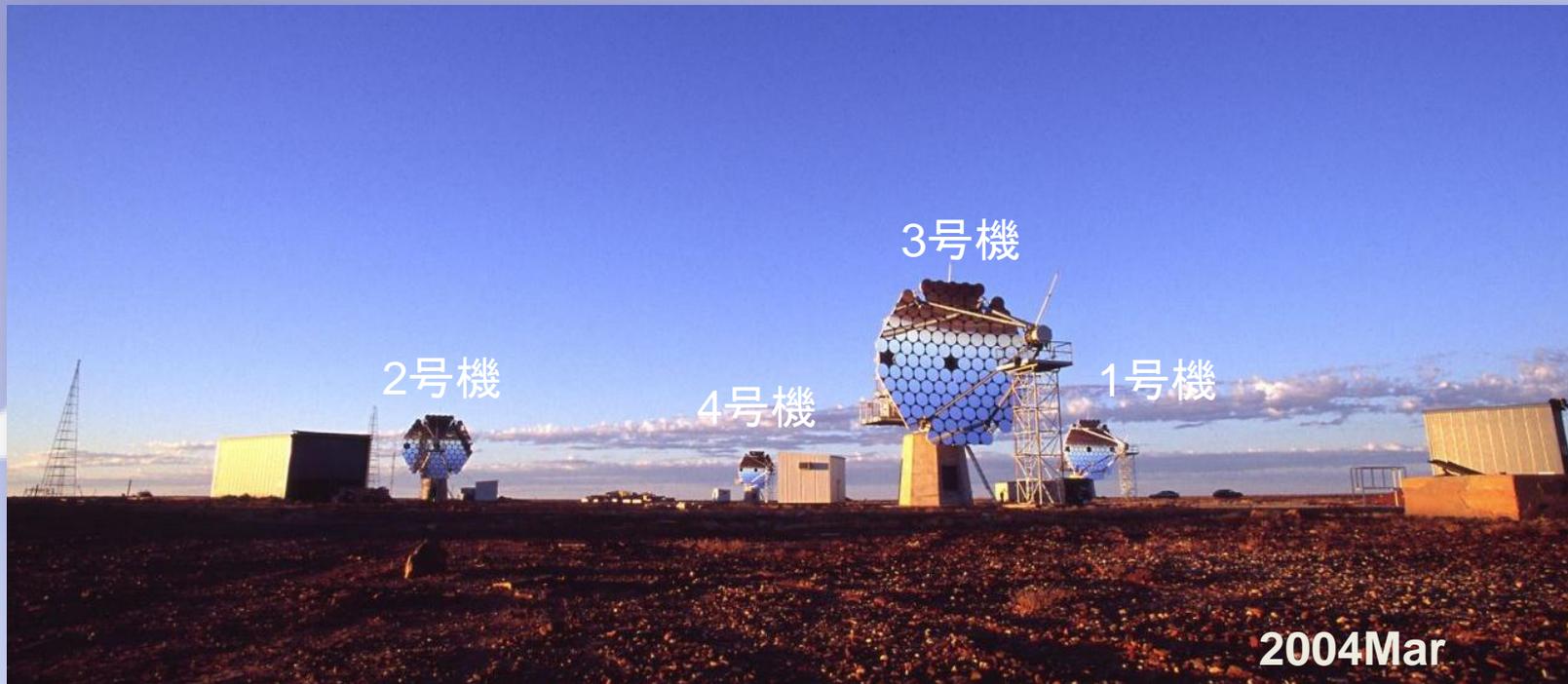
◆ 銀河系外天体

活動銀河核、爆発的星形成銀河、銀河団、近傍銀河など



これらの他、ガンマ線バーストや暗黒物質対消滅由来のガンマ線など、VHE領域でガンマ線放射が期待されるが現在の装置ではまだ検出されていないものも複数ある

CANGAROO-III望遠鏡観測システム

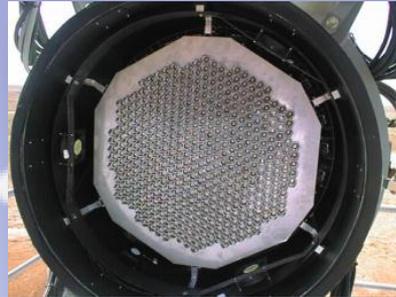


- ◆ 10m口径望遠鏡4台を約100m間隔で配置
- ◆ 2004年3月から4台 full operation (1号機のみ焦点面検出器の仕様が異なるため2004年中に運用終了)
- ◆ 2004年はソフトウェア上でステレオイベントを再構築
- ◆ 2005年から2-4号機の3台運用、オンラインでのコインシデンストリガーを導入

CANGAROO-III 望遠鏡(II)



望遠鏡: 経緯台方式
焦点距離 8.0m ($f/D = 0.8$)
最大駆動速度 $1^\circ.0/\text{sec}$
三菱電機製
(既存の電波アンテナの設計を流用)
シリアル通信制御



主焦点面検出器:

光電子増倍管 + preampアセンブリ
427本を六方細密充填
ライトガイド設置
視野 全角 $4^\circ.0$ 解像度 $0^\circ.17$



反射鏡部:

複合型反射鏡(主鏡放物面)
繊維強化プラスチック小型鏡
直径80cm, 114枚
小型鏡重量: 6kg



エレクトロニクス:

主焦点カメラからの信号をCustom-madeのFront-End module内で増幅・分岐

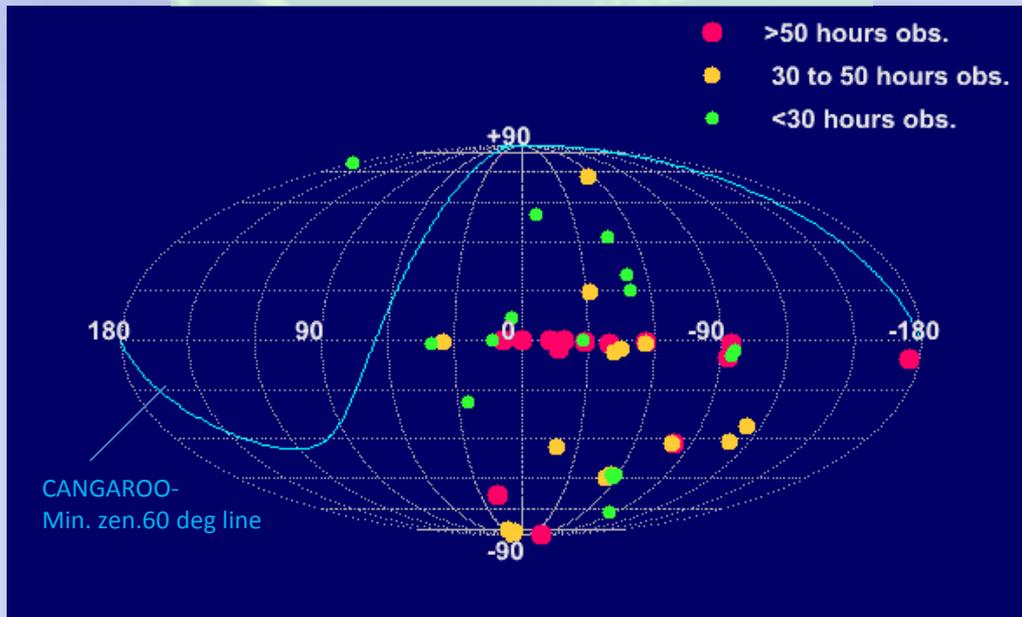
- トリガー信号(logical & analog sum)作成
- Common stop TDC
- 電荷積分型ADC

CANGAROO-III望遠鏡による南天の観測

※2011年秋にCANGAROO-III望遠鏡は運用を終了

- ◆ 2004年4月 – 2011年10月間統計
- ◆ 総観測天体数 **47** 天体
- ◆ 総観測時間 **2944**時間(3,4号機), **2391**時間(2号機)
- ◆ 日本の組織からののべ派遣人員数 **206**名

CANGAROO-III観測天体のマップ

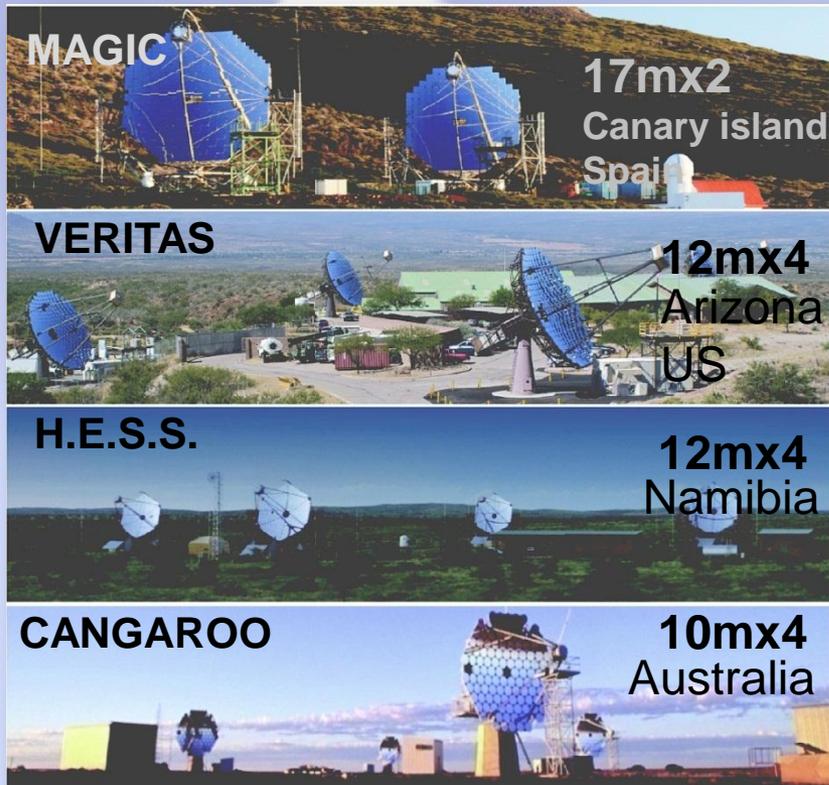


観測時間の多かった天体

- Crab nebula (standard candle, LZA)
- PKS 2155-304
- PSR B1509-58
- HESS J1804-216
- HESS J1303-631 (PSR B1259-63)
- Vela scan

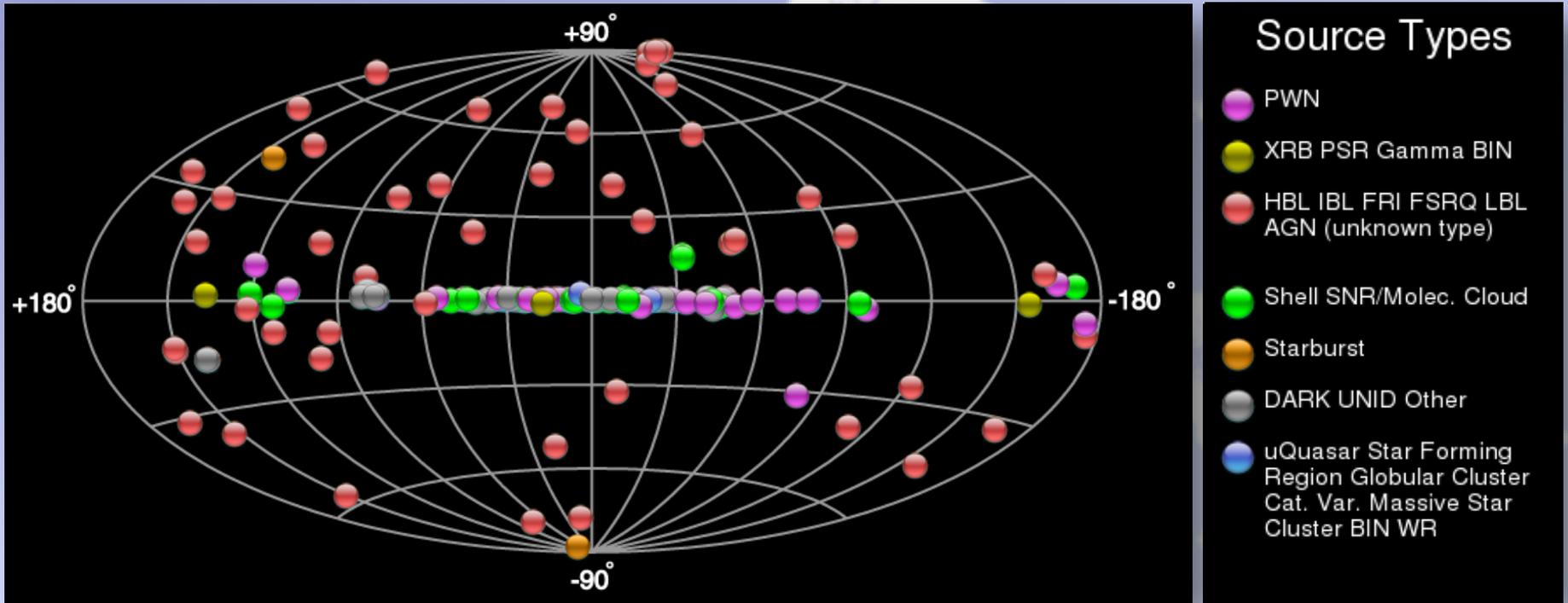
諸外国における現世代のVHEガンマ線観測計画

- ◆ 観測サイトの緯度・経度により 天球上で観測できる領域・観測可能な時間帯が異なるため、複数の観測拠点が存在する意義がある
- ◆ 北天に2実験(VERITAS,MAGIC), 南天に2実験(H.E.S.S,CANGAROO)
- ◆ 望遠鏡アレイの基本デザインは類似



VHEガンマ線天体カタログ

TeVCat <http://tevcat.uchicago.edu>



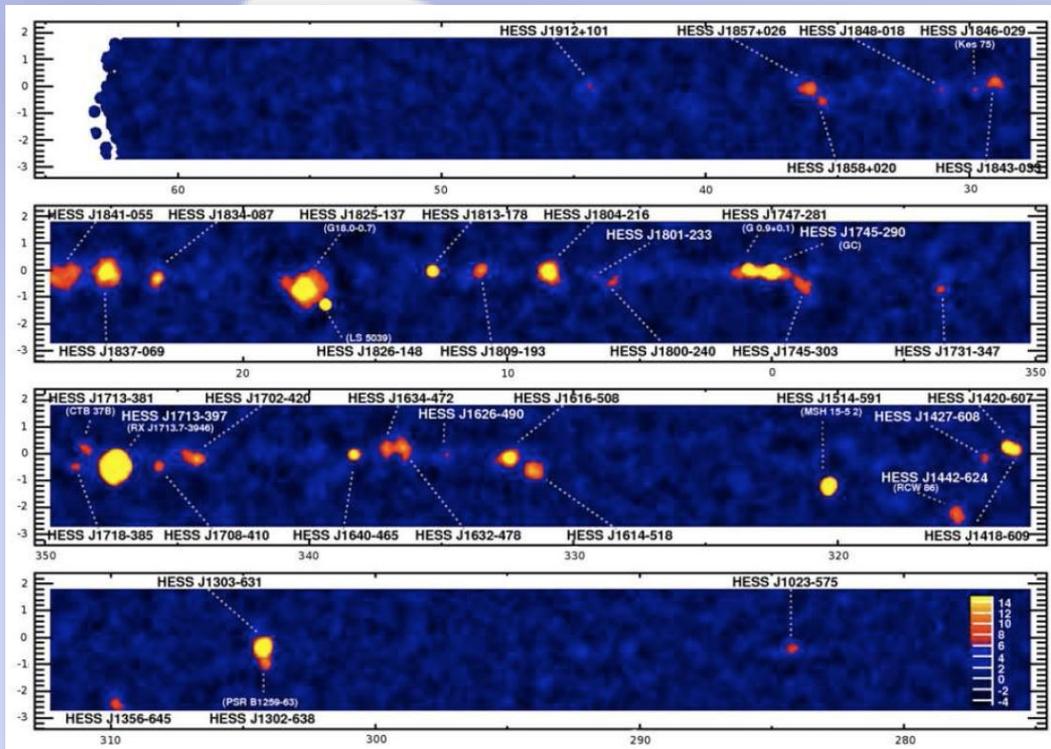
- ◆ 前頁の4つの実験(と前駆実験)のガンマ線検出天体をまとめたカタログ
- ◆ 2012年2月現在で 約130の天体が登録
- ◆ 2002年時点で報告されていたTeVガンマ線ソース数は12

CANGAROOの最近の結果について

- ◆ CANGAROO-IIIによるTeV未同定天体 HESS J1614-518の観測 (Mizukami et al. 2011)

TeV未同定天体

H.E.S.S. Galactic Plane Survey(2005)

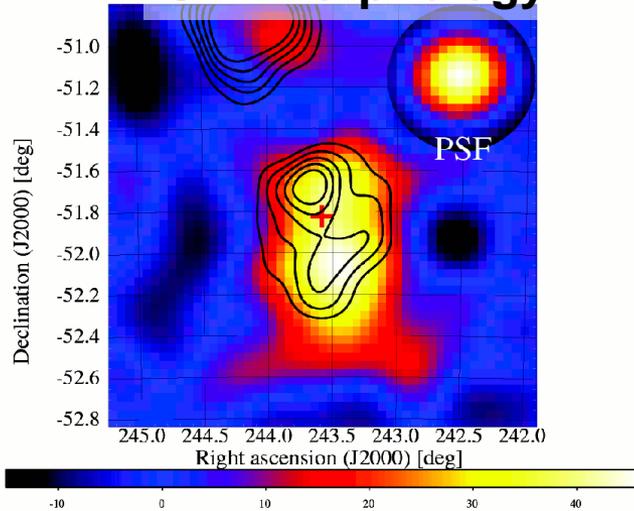


- ◆ H.E.S.S.による銀河面のサーベイ観測(2005)で新たに14天体がVHEガンマ線領域で発見された
- ◆ そのうち3天体は、他波長観測での対応天体候補が見つからないTeV未同定天体であった
- ◆ その後の観測でも未同定天体が見つかり、現在TeVCatには28の未同定天体が登録されている

CANGAROO-III によるHESS J1614-518の観測

◆ TeV 未同定天体 HESS J1614-518

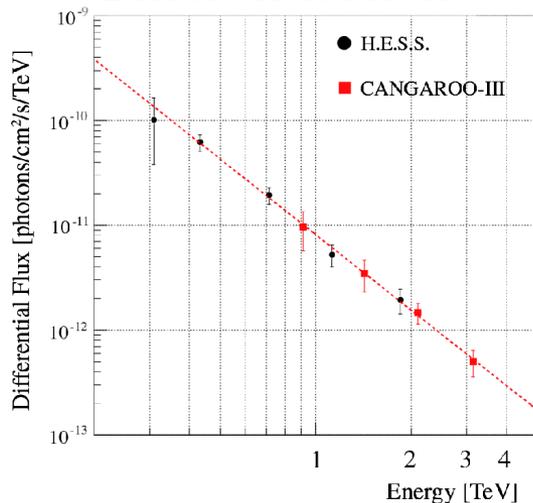
C-III morphology



- ◆ H.E.S.S.のGalactic Plane Survey(2005)で発見される
- ◆ $E > 200$ GeVで 25%Crabのフラックス
- ◆ $14' \times 9'$ の広がった形状
- ◆ スペクトルの巾指数は 2.46

CANGAROO-IIIの観測 ([Mizukami et al. 2011](#))

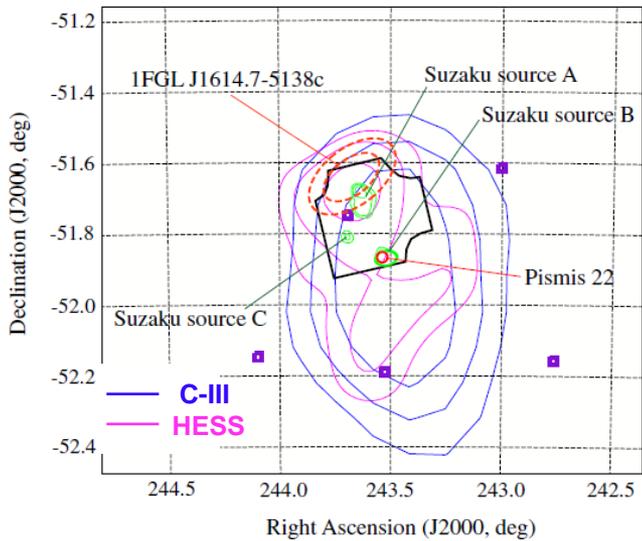
Differential flux



- ◆ 観測時間 54h (2008May-Aug)
- ◆ 3,4号機による 2-fold coincidence
- ◆ フラックス測定値はH.E.S.S.と一致
- ◆ 2次元マップ上のBest-fit positionは CANGAROO-IIIのPSFの大きさを考慮するとHESSの結果とconsistent

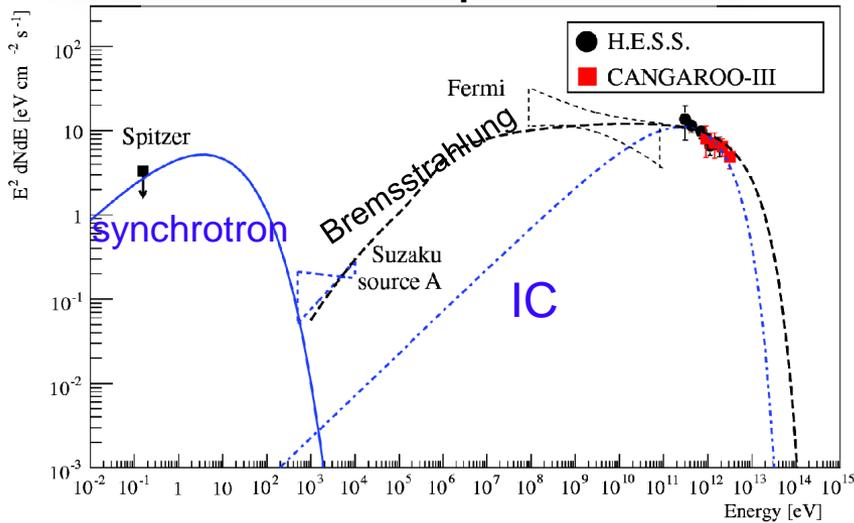
CANGAROO-IIIによる HESS J1614-518の観測結果

Suzaku/Fermi ソースとの位置関係

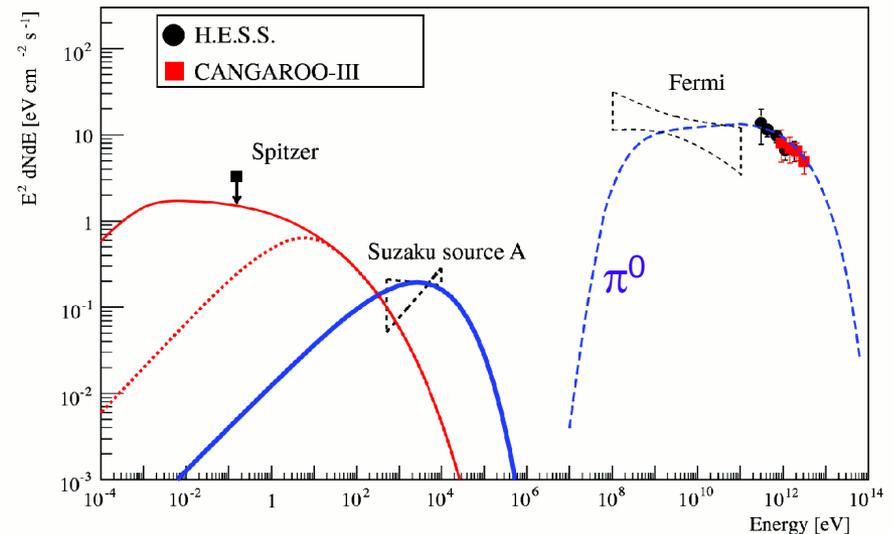


- ◆ Fermi, Suzaku のデータと合わせ対応天体と放射機構を考察
- ◆ Suzaku source Bを中心とする超新星残骸であると仮定した場合、親宇宙線が電子のモデルと陽子のモデルでは、後者の方がVHEガンマ線とX線のデータ点をよりよく説明できる
- ◆ 他にPWN scenario, Stellar wind scenarioなども検討したが、対応天体と放射機構を確定するためには他波長のデータがさらに必要

SNR scenario : leptonic model



SNR scenario : neutral pion decay model



CANGAROO-IIIの最近の結果から(2)

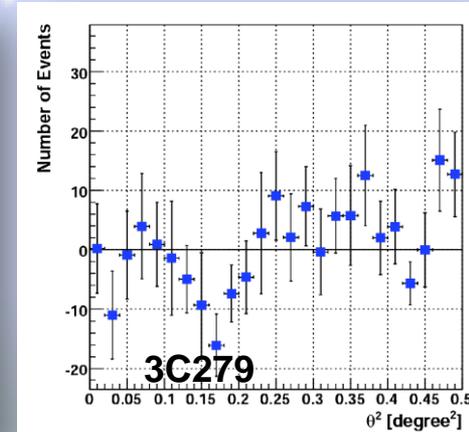
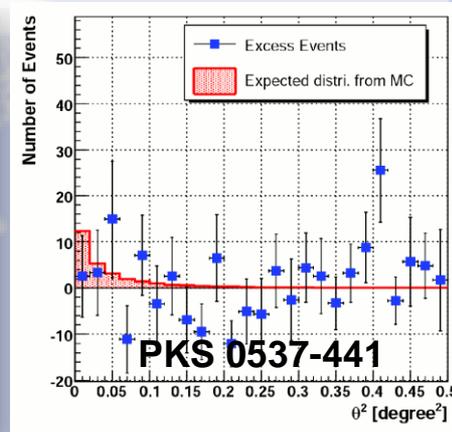
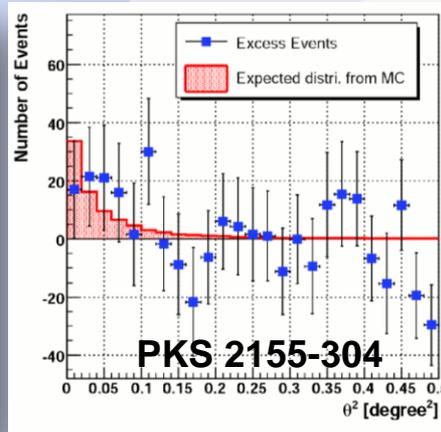
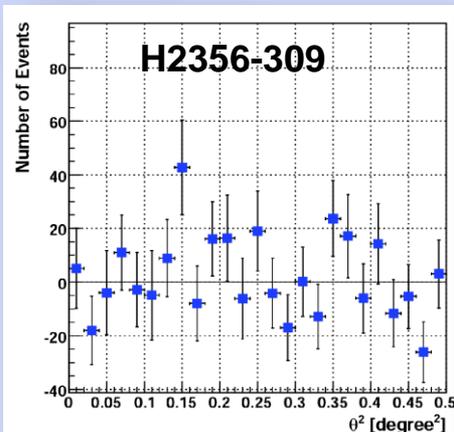
- ◆ 南天の4つのBlazar(H2356-309, PKS 2155-304, PKS 0537-441, 3C279)についての観測結果 ([Mizumura et al., in Press](#))

CANGAROO-IIIの観測

Table 1: Summary of CANGAROO-III observations for the four blazars

Blazar	Observation periods ^a			Nights ^b	t_{obs} ^c [hrs]	$\langle \theta_z \rangle$ ^d [°]	Target positions ^e	
	Year	Begin	End				RA[°]	Dec[°]
H 2356-309	2005	July 8	Aug. 12	14	30.3	12.7	359.783	-30.628
PKS 2155-304	2008	July 29	Sep. 27	18	57.5	14.6	329.717	-30.22
PKS 0537-441	2008	Nov. 24	Dec. 29	14	36.7	17.2	84.7098	-44.0858
3C 279	2009	Feb. 24	Mar. 28	12	40.1	34.3 (26.8) ^f	194.046	-5.789

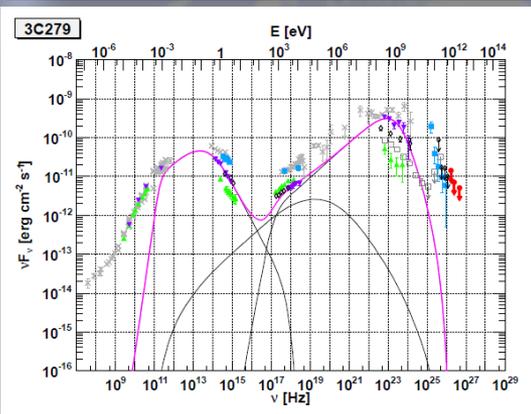
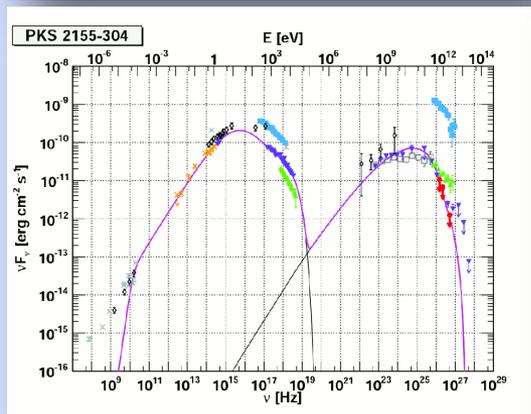
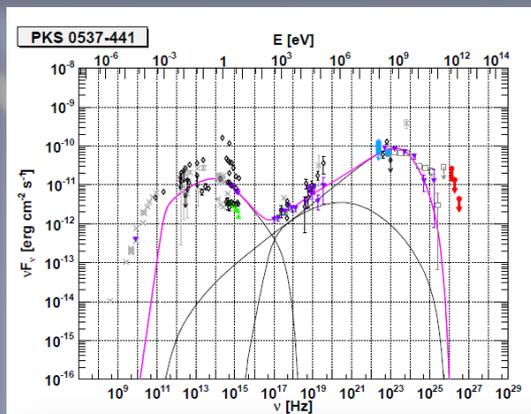
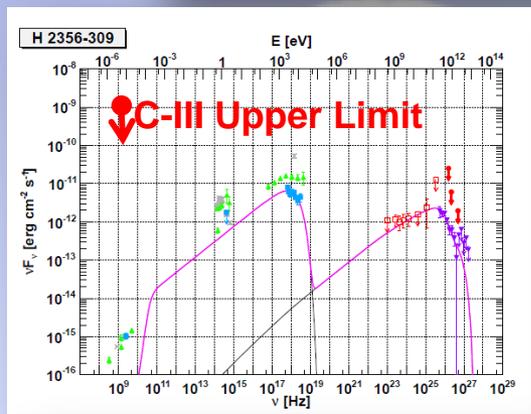
各Blazar の excess count θ^2 分布



CANGAROO-IIIによるBlazar観測結果

Table 3: Summary of CANGAROO-III observation results

Blazar	Excess ^a [events]	Significance ^b [σ]	t_{live}^c [hrs]	Γ^d	E_{th}^e [TeV]	$I_{\text{U.L.}} (> E_{\text{th}})^f$ [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]
H 2356-309	-16.9 ± 25.2	-0.67	23.3	3.1	0.68	$< 2.6 \times 10^{-12}$
PKS 2155-304	59.5 ± 29.9	1.99	41.8	3.3	0.60	$< 3.8 \times 10^{-12}$
PKS 0537-441	20.8 ± 18.0	1.16	26.6	6.0	0.51	$< 7.0 \times 10^{-12}$
3C 279	-11.7 ± 12.9	-0.90	12.5	4.1	0.72	$< 1.7 \times 10^{-12}$



- ◆ いずれのBlazarについてもこの観測期間に有意な信号は検出されず、TeV領域でのガンマ線フラックスの上限値を求めた
- ◆ 各Blazarについて他波長の観測結果と合わせてSSC (+EC)モデルとの適合性を評価
- ◆ H2356-309とPKS2155-304は simple SSC モデル, PKS0537-441と3C 279はSSC+ECを組み合わせたモデルで説明可能

10mステレオ世代から次世代観測装置へ

- ◆ 現世代のIACTの4つの観測拠点のうちCANGAROOは観測終了、他の3つは装置のアップグレードを行いながら観測続行
- ◆ 次世代観測装置計画のうち最大のものは、ヨーロッパを中心とするCTA(Cherenkov Telescope Array)計画。実験規模の巨大化に伴い、既存の複数のガンマ線実験グループ(H.E.S.S., MAGIC, VERITAS)が共同で一つの次期計画を進める方向

報告まとめ

◆ 組織的若手派遣プログラムの支援により、下記の超高エネルギーガンマ線地上観測分野の研究活動を行った

- CANGAROO実験 ウーメラ観測所へ渡航(のべ人数3回)し、主に現地のCANGAROO-IIIステレオ観測システムを運用してVHE天体の観測データを取得。
- 次期計画として立案中のCherenkov Telescope Array計画について、年2回開催されるGeneral Meetingに参加するために渡航(のべ人数1名)。Face to Face meetingにおいてCTA consortium全体での研究進捗状況について情報を収集。