

- Aita et al., (Ashra-1 Collaboration), 2011, ApJ, 736, L12
- arXiv:1202.5656



Ashraによるタウニュートリノ探査 と光学閃光探査

120220 グローバルな宇宙天文観測

Ashra共同研究者

東京大学宇宙線研究所

浅岡陽一



Ashraによるタウニュートリノ探査 と光学閃光探査

内容

1. VHEタウニュートリノ観測
 - コミッショニング観測
 - 方向決定精度
2. 光学閃光観測
3. 観測03開始
4. まとめ

Ashra-1 共同研究者

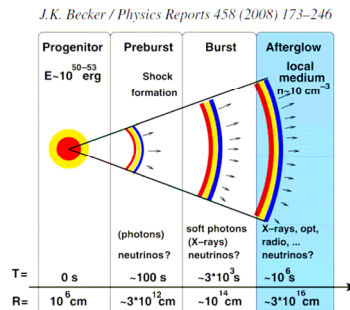
東京大学宇宙線研究所

- A 東邦大学理学部
- B University of Hawaii Manoa
- C University of Hawaii Hilo
- D 名古屋大学理学部
- E 千葉大学 CReS
- F 茨城大学工学部
- G 神奈川大学工学部

会田勇一, 青木利文, 浅岡陽一, 安生純^A, P. Binder^C, J. Goldman^C,
 J. Hamilton^C, 平井駿, 伊藤隆, 木村孝之^D, 小暮大輔^A, 久世宏明^E,
 J. Learned^B, 増田正孝, 松野茂信^B, 森元祐介, 小川了^A, 太田一陽,
 佐々木真人(研究代表者), 渋谷寛^A, 杉山直^F, 辻川弘規^A, 渡邊靖志^G

Ashraプロジェクトの狙い

- Beppo-SAX GRB970228 観測 [Nature 387, 783, 1997]
 - X線アフターグローの分角位置同定
 - 多波長観測 ⇒ 光学対応天体同定
 - ⇒ GRB宇宙論的距離で発生
 - ⇒ **GRB標準モデルの構築**
 - 内部外部衝撃波加速、火の玉モデル
- Swift/Fermi 時代
 - Early X-ray afterglow [Nousek et al. ApJ 642 (2006) 389]
 - プリカーサーの存在 (10-15%) [Burlon et al., ApJ 685 (2008) L19]
 - 時間的に遅れた高エネルギー光子(GeV) [DePasquale et al., ApJ 709 (2010) L146]
 - ... GRB標準モデルで説明しきれない振る舞い・多様性
 - もうひとつのブレークスルーが必要

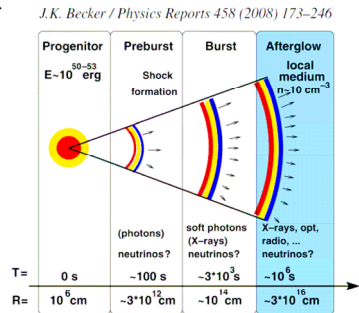


Ashraプロジェクトの狙い

- “Multi Particle Astronomy” [Sasaki 2000]
 - Proc. of ICRR2000 Satellite Symposium: Workshop of Comprehensive Study of the High Energy Universe
 - 多波長から多粒子へ
 - ニュートリノ
 - Optically thick な領域を見渡すプローブ
 - 加速源での素粒子反応の直接的証拠

- 方向決定精度は宇宙観測に対して本質的に重要
 - Beppo-SAXの成功例
 - 他観測との共同

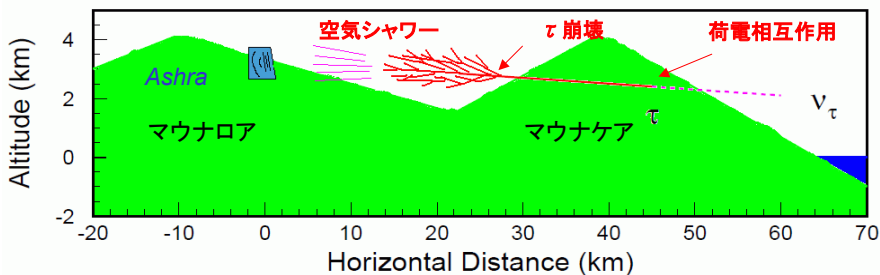
⇒ 複数のプローブを接続するのが位置同定



高い到来方向決定精度での高エネルギーニュートリノ検出

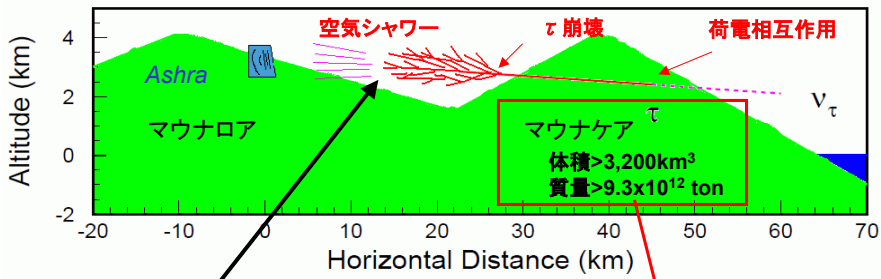
VHE ν_τ 観測原理

地球掠り τ ニュートリノチェレンコフ検出



VHE ν_τ 観測原理

地球掠り τ ニュートリノチェレンコフ検出

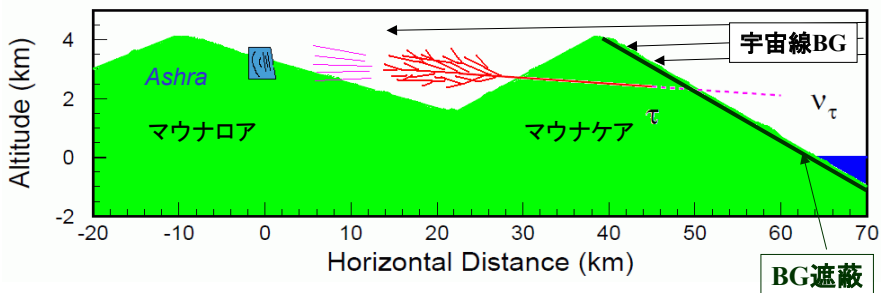


空気シャワーエネルギー測定可能
⇒ ν_τ エネルギー推定可能

大質量標的:
氷 $\sim 10^4$ km³

VHE ν_τ 観測原理

地球掠り τ ニュートリノチェレンコフ検出



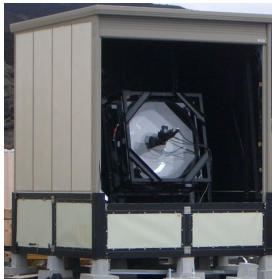
角度精度が鍵:

(1) 高エネルギーニュートリノ点源の特定

(2) 山影から現れる τ ニュートリノのポジティブな識別

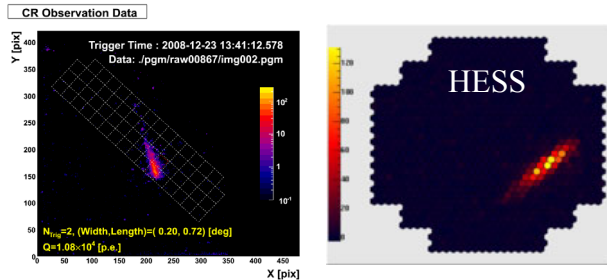
Ashra = 全天高精度宇宙線望遠鏡

- 光+電子によって42° の視野を1インチにまで縮小する超広角光学系
- 光伝送+CMOSセンサによる高精度トリガ撮像



Ashra集光器
@ 観測サイト

圧倒的な画素コスト効率の実現



<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/telescopes/>

Ashra 歴史



- | | |
|------|-----------------------|
| 2003 | 予算化 |
| 2005 | マウナロア観測地の土地利用許可 |
| 2007 | 集中インストレーション |
| 2008 | Ashra観測01開始 |
| | - 光学閃光定常観測 |
| | - VHEニュートリノコミッションング観測 |
| 2009 | Ashra観測02開始 |
| 2011 | 土地利用許可10年間の延長 |
| 2012 | Ashra観測03開始 |

VHE ν_τ コミッショニング観測

Aita et al., (Ashra-1 Collaboration), 2011, ApJ, 736, L12

The Astrophysical Journal Letters, 736:L12, 2011 July 20

doi:10.1088/2041-8207/736/L12

OBSERVATIONAL SEARCH FOR PEV-EeV TAU NEUTRINO FROM GRB081203A

Y. AITA¹, T. AOKI¹, Y. ASAKURA¹, T. CHONAN¹, M. JOHSHI¹, M. MASUDA¹, Y. MORIMOTO¹, K. NODA¹, M. SASAKI¹, J. ASHI², N. ISHIKAWA³, S. OGAWA⁴, J. G. LEARNER⁵, S. MATSUO⁶, S. OKUDA⁷, F.-M. BONDLE⁸, J. HERRING⁹, N. SUGIYAMA¹⁰, AND Y. WATANABE¹¹

¹Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan; yaita@icrr.u-tokyo.ac.jp
²Department of Physics, Toho University, Funabashi, Chiba 274 8540, Japan
³Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822, USA
⁴Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii at Hilo, Hilo, HI 96720 4091, USA
⁵Department of Physics and Astrophysics, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan
⁶Department of Engineering, Kagoshima University, Shimo-oka, Kanagawa 271-8686, Japan
 Received 2011 April 26; revised 2011 June 16; published 2011 June 20

ABSTRACT

We report the first observational search for tau neutrinos (ν_τ) from gamma-ray bursts (GRBs) using one of the Ashra light collectors. The Earth-skimming or technique of imaging Cherenkov τ showers was applied as a detection method. No significant upper limits on the ν_τ fluxes in PEV-EeV region for 3780 s (between 2.83 and 1.76 hr before) and another 3780 s (between 21.1 and 22.2 hr after) surrounding GRB081203A triggered by the Swift satellite. This first search for PEV-EeV ν_τ complements other experiments in energy range and methodology, and suggests the prologue of "multi-particle astronomy" with a precise determination of time and location.

Key words: gamma-ray burst; individual (GRB 081203A) – methods: observational – neutrinos

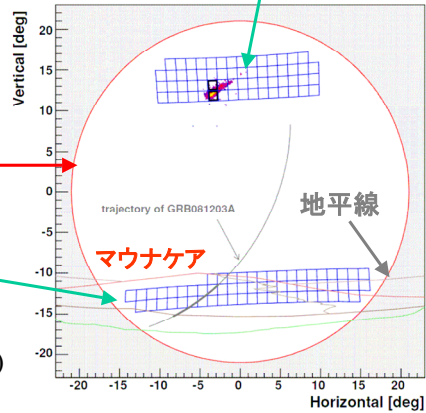
Online-only material: color figures

感度検証:
CR観測トリガーピクセル配置
観測時間:計44.4時間

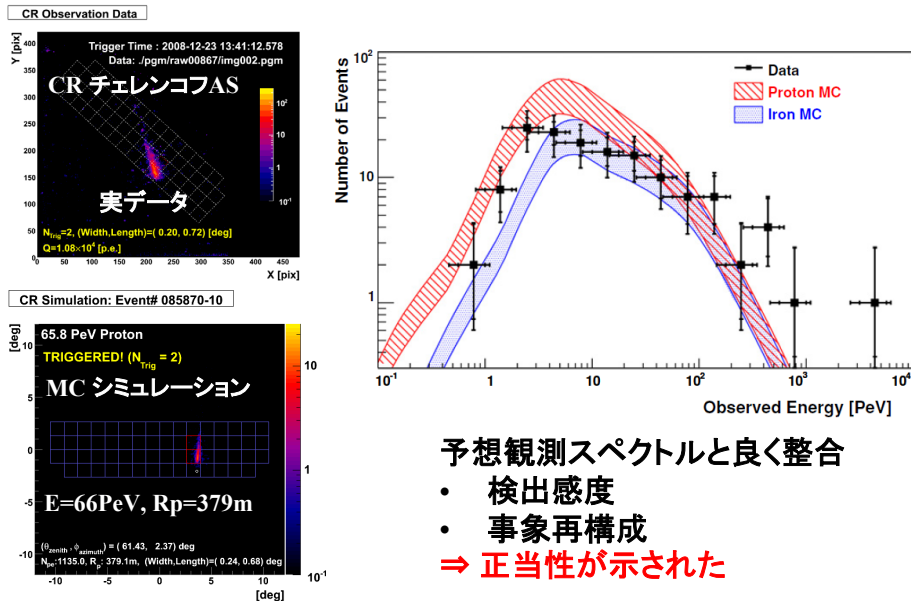
望遠鏡FOV
($\phi 42^\circ$)

VHE ν 観測トリガーピクセル配置
観測時間:計215.8時間

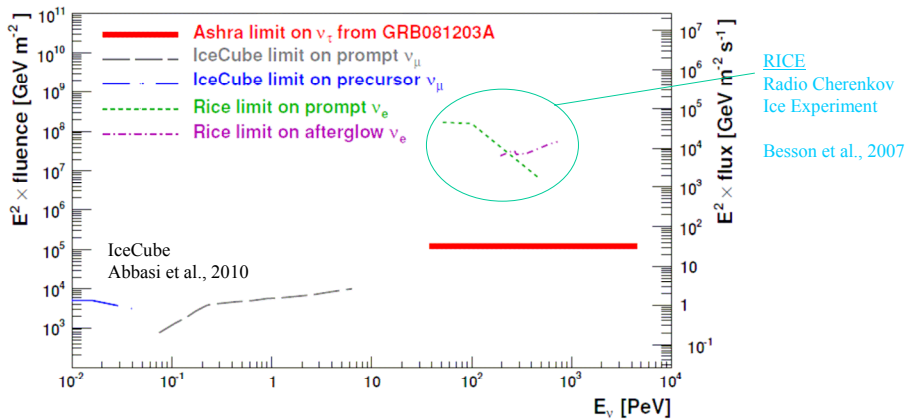
GRB081203A観測:
Precursor(T0-2.7hr), Afterglow(T0+22hr)



宇宙線観測 (感度検証)



GRB081203A VHE ν 流量制限



- ニュートリノシミュレーション ⇒ 有効面積算出
- ニュートリノ事象候補=0 ⇒ 流量制限
- GRBからのタウニュートリノ初探索

“Multi Particle Astronomy” へ向けて

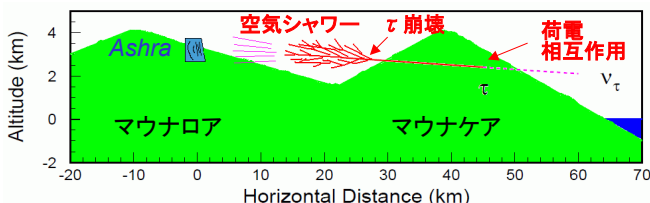
- GRBからの τ ニュートリノ初の探索結果
 - 地球掠り τ ニュートリノチェレンコフ検出法の実証
 - Ashra検出器性能の実証
- 方向決定精度が重要
 - 高エネルギーニュートリノ加速源の特定
 - ニュートリノ識別

⇒ 2つの要検討事項:

- 複雑な反応過程を経た τ シャワーは、ニュートリノの方向を記憶しているのか
 - イベント再構成による方向決定精度評価
- ... Asaoka&Sasaki to be published

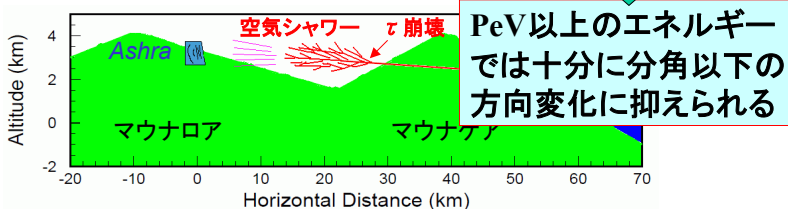
τ シャワーの方向精度

- 検出方法起源の方向決定精度
 - τ ニュートリノと τ シャワーの方向の違い
- 伝播・反応過程での方向変化
 - ニュートリノ荷電相互作用
 - τ 地中伝播
 - τ 崩壊
 - ハドロン空気シャワー



τ シャワーの方向精度

- 検出方法起源の方向決定精度
 - τ ニュートリノと τ シャワーの方向の違い
- 伝播・反応過程での方向変化
 - ニュートリノ荷電相互作用 ⇒ Pt: W粒子質量で制限される
 - τ 地中伝播
 - τ 崩壊 ⇒ Pt: τ 粒子質量で制限
 - ハドロン空気シャワー



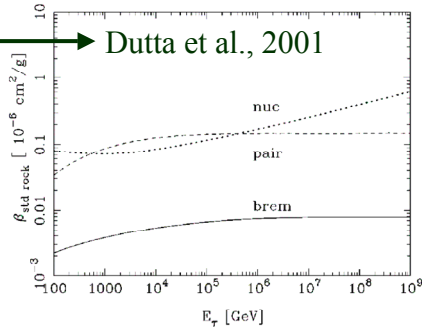
τ 地中伝播による方向変化

- エネルギー損失

$$-\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle = \alpha + \beta E,$$

- 方向変化評価は文献なし
- 輻射プロセス (β)

- Bremsstrahlung
- Pair Production
- Photonuclear



Geant4 使用

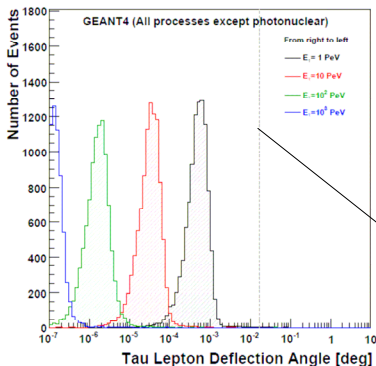
- 加速器用に用意された高エネルギーミュオンのプロセスを τ 粒子に適用
- β のエネルギー依存性を再現 \Rightarrow 正当性の確認OK
- Photonuclear は高エネルギー側で大きなずれが存在(3倍@100PeV)

ALLM微分断面積を再現

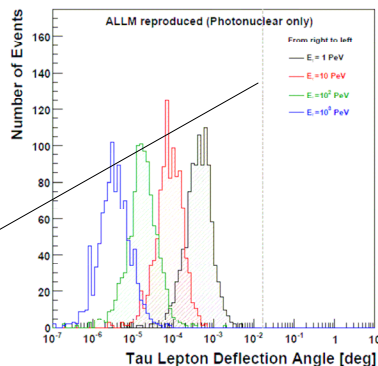
- 手製MCIにて偏角を評価
- β を30%の精度で再現

τ 地中伝播による方向変化

Photonuclear 以外全て



Photonuclear のみ



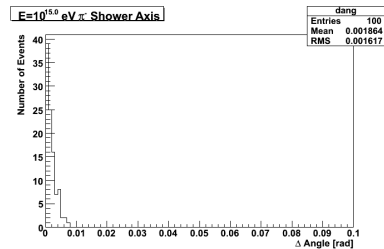
1分角

- 10km走った場合の方向変化 (τ 崩壊なし)
 - 崩壊長が10kmより短い場合はハッチで示した
- 地中伝播による方向変化 \ll 1分角 @ $E > 1\text{PeV}$

ハドロン空気シャワーの方向精度

- τ の方向とシャワーの方向の差異
 - シャワー最大発達での電子陽電子の方向の平均と、親粒子の軸を比較
 - シャワーの横発達
 - ミューオン・ニュートリノの持ち去るエネルギー
 - CORSIKA 使用
 - thinning = 10^{-6}

- 結果:
 - 0.1° @ 1PeV
 - ほぼ $1/\sqrt{E}$ の依存性



ブーストと粒子数増加による平均化が効き、ハドロン空気シャワーであっても親粒子の方向が良く保存されている

τ シャワーの方向精度

- PeV(10^{15} eV)領域では τ シャワーはニュートリノの方向を覚えている ($<0.1^\circ$)
 - 複雑な反応過程 vs
 - 非常に大きなローレンツブースト \Rightarrow ブースト優位

角度精度が鍵:

- (1) 高エネルギーニュートリノ点源の特定
- (2) 山影から現れる τ ニュートリノのポジティブな識別

物理過程は方向保存
測定器の方向決定精度が良ければ
ニュートリノ点源特定可能

検出器側の到来方向決定精度

- 精細画像を用いた事象再構成

- 高解像度
- 高統計

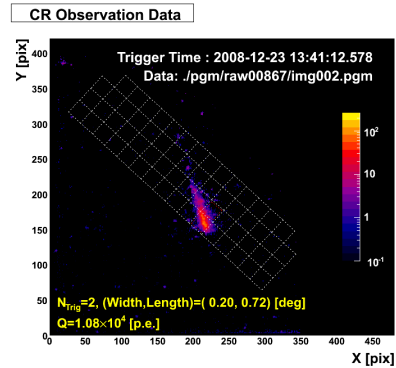
⇒到来方向再構成に対する
インパクト評価

- 最大限の情報抽出

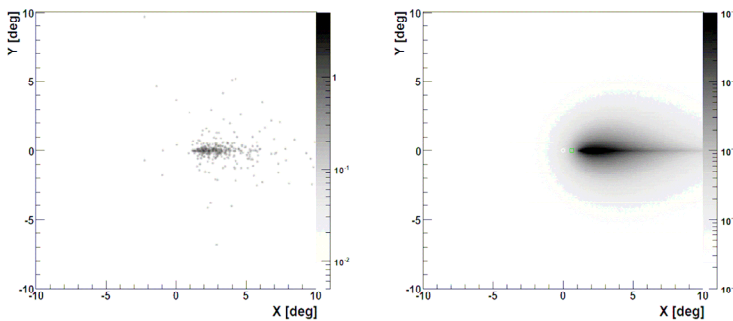
⇒ Maximum Likelihood

- Gaisser-Hillas
- NKG

によるシャワーシミュレーション
を使用して方向決定精度評価



方向決定精度評価サンプル



- 事象再構成パラメータ:

- (n_x, n_y) : シャワー軸方向
- (X', Y') : 山の表面とシャワー軸の交点
- E: エネルギー [Likelihood計算ではfix]

今回の例

(0.0, 0.0)

(0.6, 0.0)

100 PeV

- Likelihood 定義:
$$L = \sum_i N_{pe}^i \log(p_i).$$

誤差行列を用いた精度評価

$$L = L(a_1^*, a_2^*) + \frac{1}{2}(a_1 - a_1^*)^2 \frac{\partial^2 L}{\partial a_1^2} + \frac{1}{2}(a_2 - a_2^*)^2 \frac{\partial^2 L}{\partial a_2^2} + (a_1 - a_1^*)(a_2 - a_2^*) \frac{\partial^2 L}{\partial a_1 \partial a_2}$$

$$H_{ij} = 2M_{ij} = \frac{\partial^2 L}{\partial a_i \partial a_j}$$

これを計算するため、L最大パラメータ周辺にて、あらゆるパラメータで確率密度分布を求め、Lの値計算

$$R = M^{-1}$$

- 誤差行列Rの対角成分が求める事象再構成のエラーとなる(パラメータ間の相関を含む)
- 3-5分角の精度が得られた
 - 長いトラック (Rp大)
 - 十分な非対称性
 - ⇒ 高統計+高解像度活用

得られた相関行列の例

	n_x	n_y	X'	Y'
n_x	1.00	0.30	0.97	0.21
n_y	0.30	1.00	0.31	0.70
X'	0.97	0.31	1.00	0.21
Y'	0.21	0.70	0.21	1.00

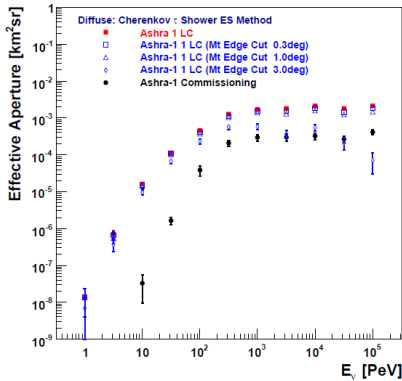
- 高解像度撮像の本質的な利点を明示

宇宙線BG

- 支配的なバックグラウンド
 - 大天頂角からの宇宙線シャワー
- 期待されるBG量 (CORISKAにて推定)
 - Commissioning 観測
 - $N_{BG} = 1.3 \times 10^{-4}$ (197.1hr) ⇒ 無視可能
 - 本観測 (1LC)
 - 山際からの距離 0.1° 0.3° 1.0° 3.0°
 - 期待されるBG頻度 0.082/yr 0.55/yr 4.3/yr 39/yr
- (注) 本観測のセットアップ:
 - 全視野をTrigger Pixel が覆う
 - トリガーピクセルのサイズ 1/2 (面積1/4)
- 山は完璧なBG遮蔽
 - ターゲットかつBG遮蔽

山際カット

- 山際をカットすることで、BGフリーを達成
- ⇒ 必要な山際カットの量は方向決定精度に依存
 - 0.3° の山際カットでは Diffuse Aperture を90%キープ可能
 - 高い角度精度により、感度を保ちつつニュートリノ識別が可能



地球かすり ν_τ チェレンコフ観測、
1LCのDiffuseニュートリノ感度

赤:本観測
青:山際カット有
黒:Commissioning

(本観測定義)

- 全視野をTrigger Pixel が覆う
- トリガーピクセルのサイズ 1/2 (面積 1/4)

結論: Cherenkov τ Shower Earth Skimming 法
を用いたPeV-EeV ν_τ 観測

- Cherenkov τ シャワー地球かすり検出法:
 - 膨大な標的質量($10^4 \times$ 氷 1km^3) & BG遮蔽
 - ニュートリノ方向が τ シャワーまで保存
 - Ashra-1 検出器は高い方向決定精度を有する
 - 精細画像 + 高統計 チェレンコフ像
- ⇒ 検出方法と測定器がぴったりとマッチ

⇒ 以下が実現可能:

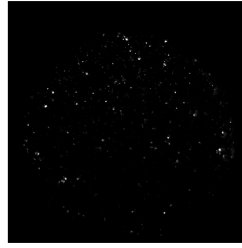
- (1) 高エネルギーニュートリノ点源の特定
- (2) 山影から現れる τ ニュートリノのポジティブな識別

Ashra-1検出器は、VHEニュートリノやその加速源
の同定へ向けたユニークなプローブ

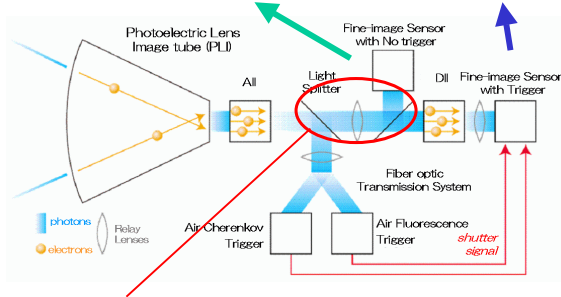
Ashra検出器: 光電撮像パイプライン



露光4秒

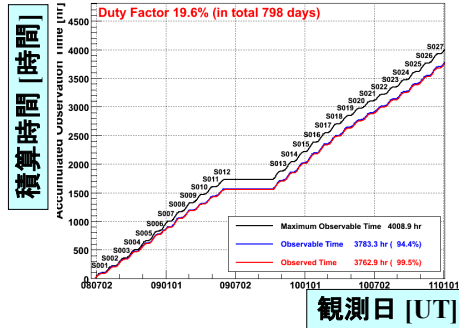
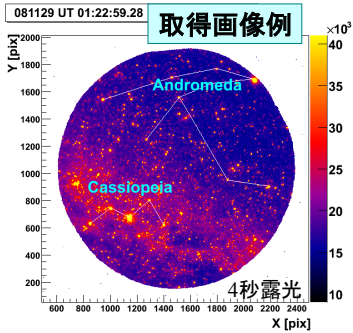


露光200ns



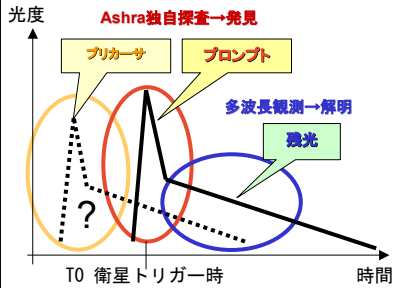
輝度増幅後に光像として分配することで、SNの損失なく3種の像を同時に得る

光学閃光観測実績



	Observation 1	Observation 2	合計
期間	080628-090605	091007-110104	798日
実観測時間	1551時間	2212時間	3763時間
好天率	90.6%	97.3%	94.4%
稼働率	99.1%	99.7%	99.5%
Duty Factor	18.8%	20.3%	19.6%

GRBクロス観測



衛星	時間領域ごとの閃光探索可能な衛星トリガー数		
	プリカーサ閃光 (24時間以内)	プロンプト閃光 (T0-contained)	残光 (3時間以内)
Swift	28	4	1
Fermi	52	7(+2)	4

(+2: Swiftとの同時トリガー)

fiducial cut:
中心から18°
以内を要求

• プロンプト閃光に対する制限

GCN#	GRB	制限	時間幅
8632	GRB081203A	~12等	T0 ± 300sec
11291	GRB100906A	~12等	T0 ± 600sec

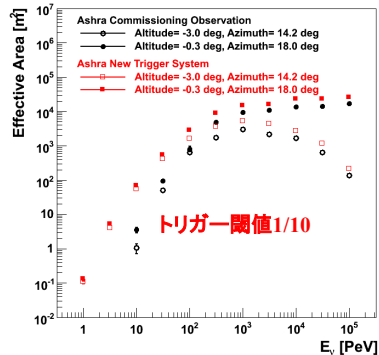
• プリカーサー探索、プロンプト閃光探索 ⇒ 広視野監視観測の独自性

Obs01 & Obs02 から Obs03 へ

• Obs03ターゲット

1. 高感度化 v_t チェレンコフ観測定常化

- 新規エレキ導入 (本格的スキーム)
- 低トリガー閾値 (1/10)
- **物理による制限ぎりぎりの感度を実現する**



2. 光学閃光観測感度向上

- 高速モノクロCCD採用
 - ベイヤー配列なし
 - 撮像間の死時間なし
 - その他改善
- 約1等の感度向上が狙える



➡ Obs03観測開始

Obs03 観測統計

- 120111 より、改善した測定器を用いた定常観測を開始
- 観測継続中 (表は 120205までの統計)

	τ ニュートリノ	光学閃光
実観測時間	155.1時間	158.8時間
好天率	99.6%	99.7%
稼働率	97.7%	99.9%
Duty Factor	21.9%	22.4%

(注) Duty Factor が特に高いのは、最も観測時間の長い時期だったことも関係している

まとめ

- Multi Particle Astronomy
 - VHEタウニュートリノチェレンコフ光観測
 - 精細チェレンコフ像 \Rightarrow 高い到来方向決定精度
 1. 高エネルギーニュートリノ点源の特定可能
 2. 山影から現れる τ ニュートリノのポジティブな識別可能
- 星空の同時観測
 - GRBからの光学閃光等、突発天体探索
 - 高効率観測データ: 計3763時間/798日
- Obs03開始

Ashra-1検出器はグローバルな宇宙天文観測へのユニークかつ強力なプローブ