

All-sky Survey High Resolution Air-shower detector



全天高精度素粒子望遠鏡Ashra計画

科学技術振興調整費・先導的研究 超高エネルギー素粒子天文学の創成

科学研究助成金 基礎研究B 全天高精度望遠鏡による発見的光学観測

Ashra共同研究者

佐々木真人

Ashraホームページ: www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ashra

ご意見、ご議論: sasakim@icrr.u-tokyo.ac.jp



Ashra Collaboration

Y.Aita, Y.Arai, Y.Asaoka, T.Browder, S.Dye, F.Fukagawa, T.Hayashino, W.S.Hou,
Y.B.Hsiung, M.A.Huang, M.Ieiri, M.Jobashi, H.Kuze, M.Kimura, T.Kimura, J.Learned,
N.Manago, T.Masuda, S.Matsuno, K.Noda, S.Ogawa, A.Okumura,
S.Olsen, M.Sasaki, N.Sugiyama, H.Usami,
M. Z. Wang, Y.Watanabe, M.Yasuda

University of Hawaii
University of Hawaii
University of Hawaii
Hawaii Pacific



Taiwan University
United University

Ashra計画



宇宙ニュートリノ

低エネルギー ν 検出器



水が標的(3,000トン)

方向が良く決まらない

超新星爆発(16万光年)

超高エネルギー ν 望遠鏡



地殻・大気が標的(100億トン)

方向決定精度(1分角)

宇宙の加速器(～5億光年)

ビッグバンの痕跡

超高エネルギー ν を基軸に深宇宙の探索

超高エネルギー素粒子

ガンマ線バースト



活動銀河核



GZK機構

その起源と伝播の素粒子過程の解明

光メソン反応

$$p\gamma \rightarrow \Delta \rightarrow n\pi^+, p\pi^0$$

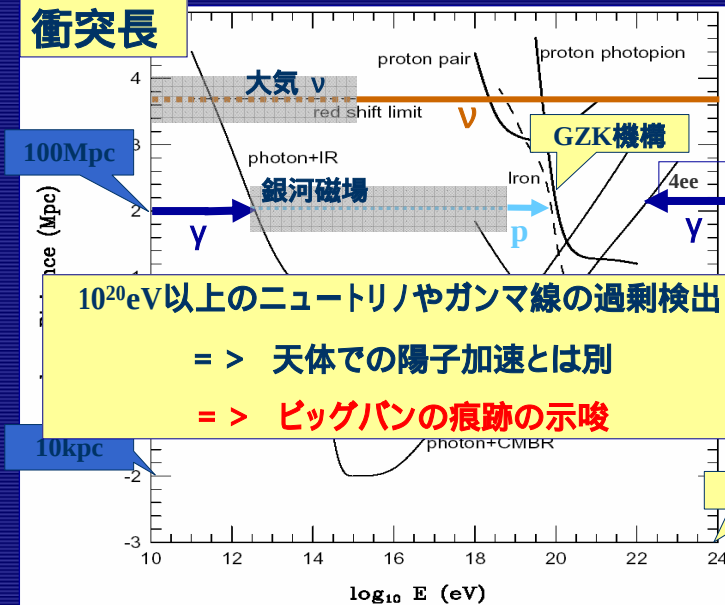
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \nu_\mu, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

$$\varepsilon_\gamma \varepsilon_p \approx 0.2 \Gamma^2 \text{GeV}^2, \quad \varepsilon_\nu \approx 0.05 \varepsilon_p$$

銀河外での陽子加速の証拠

宇宙素粒子の窓

衝突長



超高エネルギー素粒子の検出

Cerenkov Detector

Fluorescence Detector

Ground Array Detector

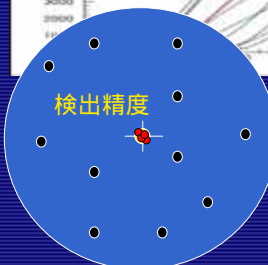
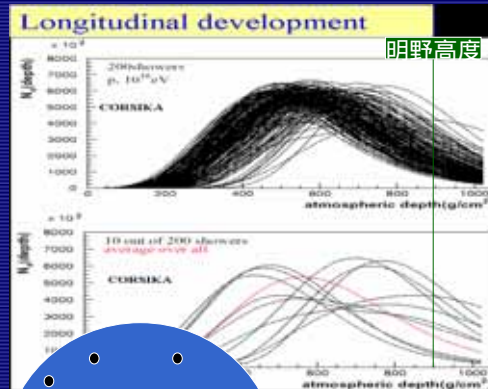
大気発光検出の利点

- シャワー発達ふらつきを補正できる

=> 正確なエネルギー導出

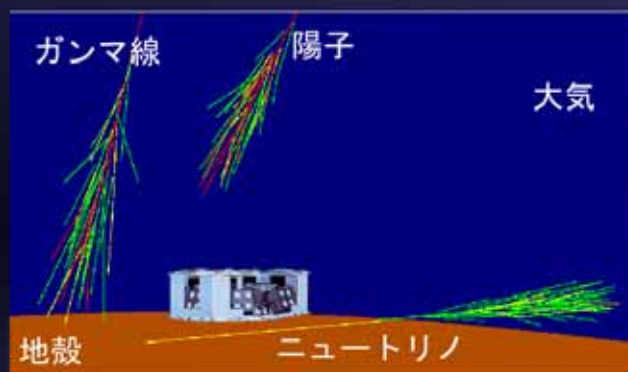
- 宇宙磁場による粒子識別
 - 陽子: 1度以上広がり
 - ν 、 γ : 検出精度のみ

=> 位置精度が重要



宇宙磁場による陽子の拡散範囲

Ashraによる全天高精度撮像



陽子、ガンマ線→大気と反応後発光
ニュートリノ→地殻と反応後発光



Ashra検出器

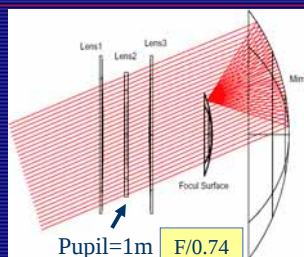
新たなチェレンコフ&蛍光宇宙線検出器

特徴:

- 全天監視 2π sr
- 高分解能 1分角
- 同時観測
 - TeV γ
 - EHE p/γ
 - VHE ν

広角精細光学系

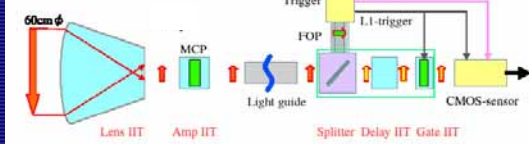
- 修正Baker-Nunn光学系
- 球面鏡 (分割鏡)
- 球面焦点面
- 補正レンズ系



Ashra ステーション:

- 12 望遠鏡 / ステーション
- 全天 (2π sr) / 50M pixel
- 広角精細光学系と
イメージパイプライン

イメージパイプライン



高精度・高S/N・自己トリガー可能な
光電撮像イメージパイプライン

Ashra Project Plan



2002 2003 2004 2005 2006 2007

phase 0

R&D

sub-telescope



prototype in labo.

phase 1 Pioneering

1 + 1/3 stations



2 Mt.s on the Hawaii Is.

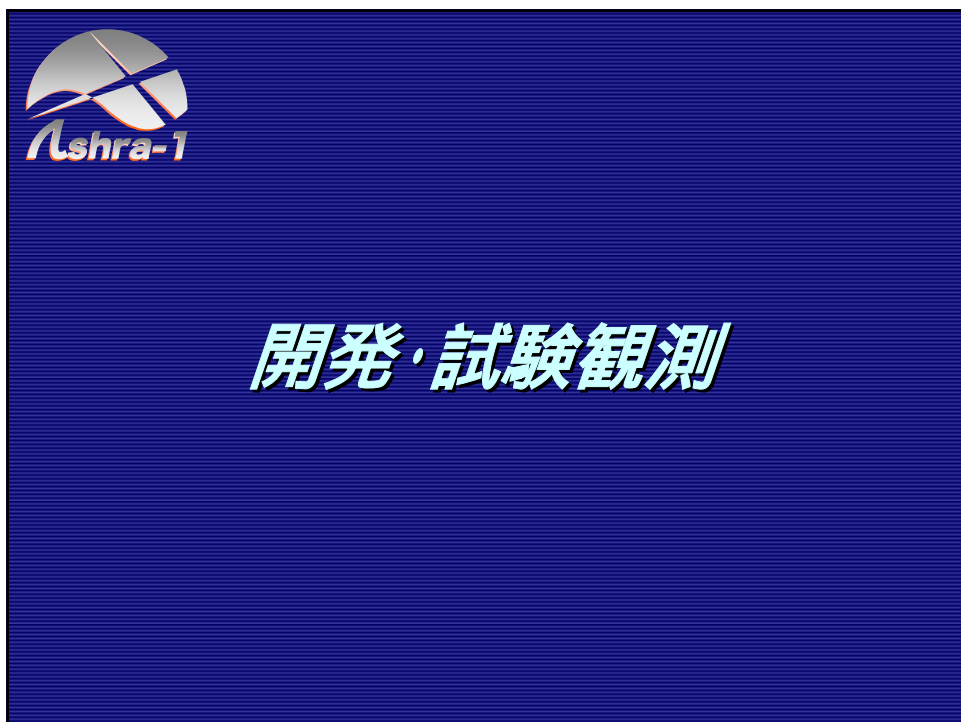
phase 2

High Statistics

complete 3 stations



3 Mt.s on the Hawaii Is.



Ashra-1 年次計画

平成15年度 試作

平成16年度 試験観測 => 最終設計

平成17年度 本番設置 => 観測開始



大口径レンズIIT



16インチ(400mm)φ受光面



- ⇒ 16インチφ受光面 解像度 3.4ラインペア/mm
- ⇒ 世界最大&最高精度
- ⇒ 24インチφの開発へ

ファーストライト

@国立天文台

Camera

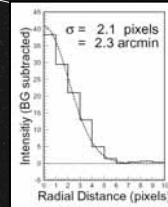
UVII

rail

2/3スケールAshra望遠鏡試作機

光学系 + UVIIの評価

- 「現場」での光学系調整
- 到達精度の検証
- 長期安定性の確認
- 調整後の星像スポット~2分角
- 広角高精度望遠鏡コンセプト実証

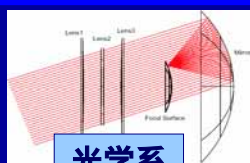


H15-16 開発・試験観測スキーム

設計・開発

実機製作

ハワイ観測

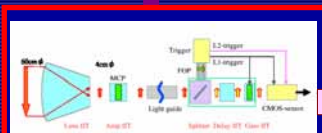


光学系



2/3スケール望遠鏡

Optical
Flash
探索



イメージパイプライン



1/1スケール
Ashra検出器

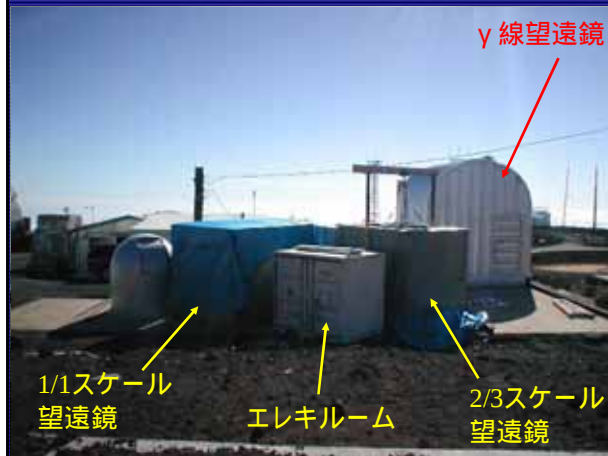
TeV γ 線源
追尾観測
w/ 経緯台望遠鏡

統合

50°視野
空気シャワー
観測

試験観測サイト

ハレアカラ山頂にある、ハワイ大の**コンクリートパッド**を使用
させてもらえることになる。近くにマグナム望遠鏡もある。



2003年8月: 長らくこの状態
で放置されていた

2003年12月: 経緯台望遠
鏡本体の搬入・設置

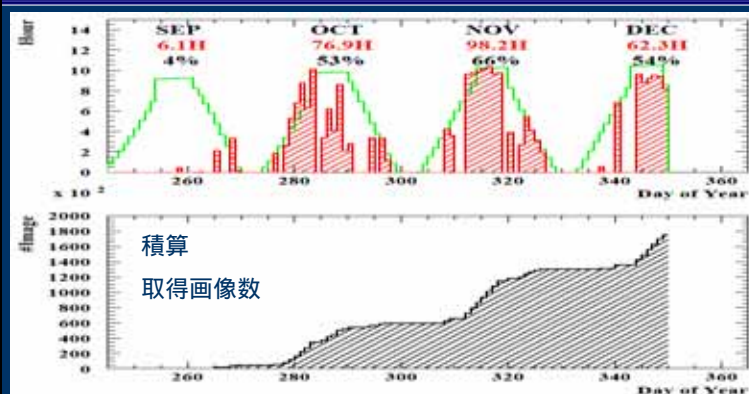
2004年3月: ガレージ胴体
部の設置

2004年6月: ガレージ完成

2004年8月: コンテナ設置

2004年8月: 望遠鏡搬入

稼動状況



Ashra Proto
for
Opt. Flash

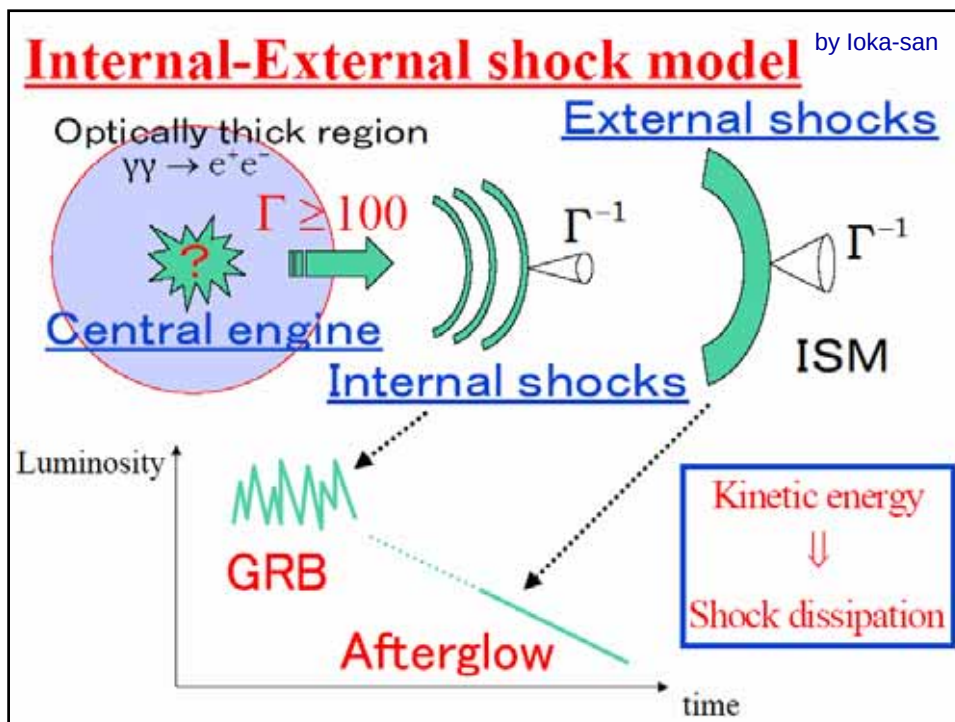
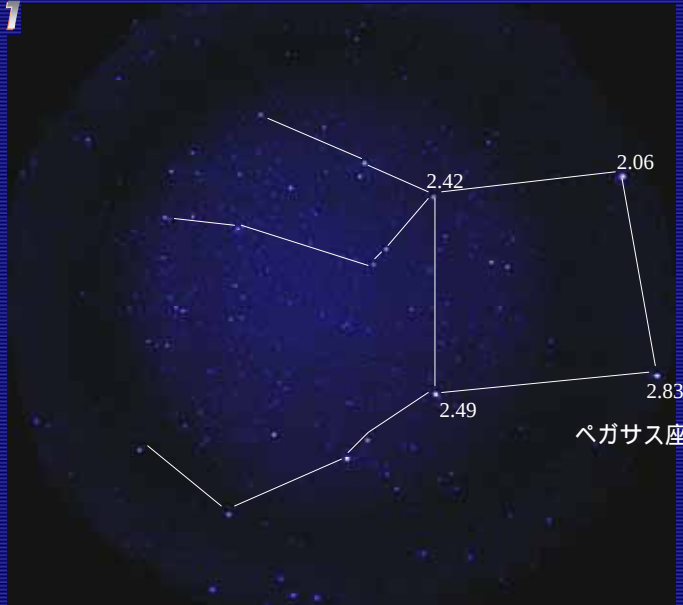
Live time 定義:
astronomical twilight end to
astronomical twilight begin
& Moon bright area rate < 10%
astronomical twilightは太陽高度
が-12° から-18° の間にある時間

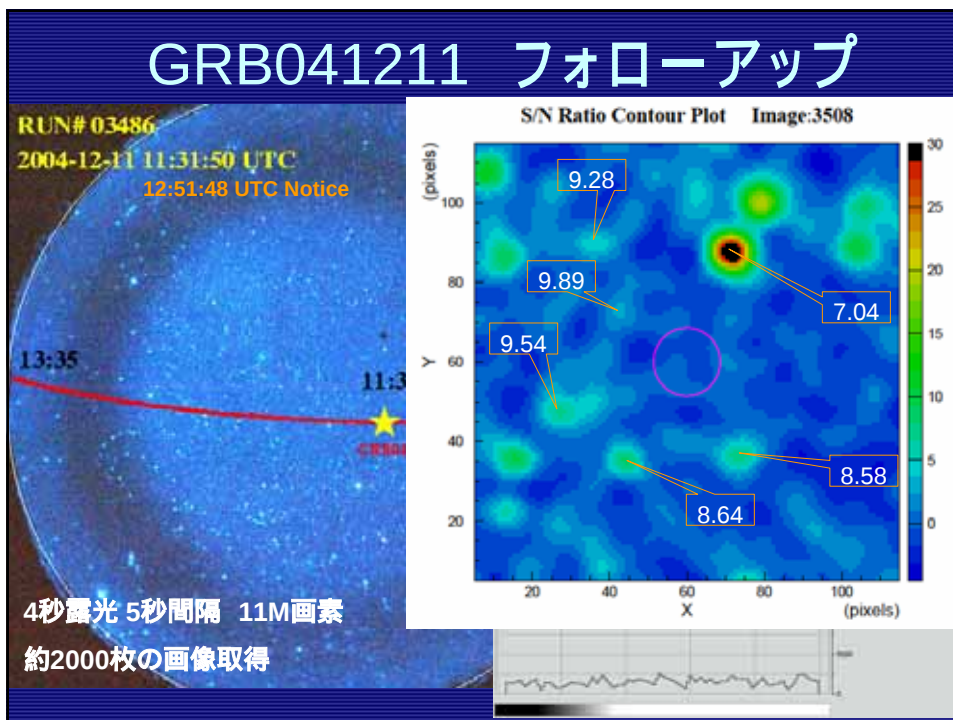


Ashra Proto
for
Gamma



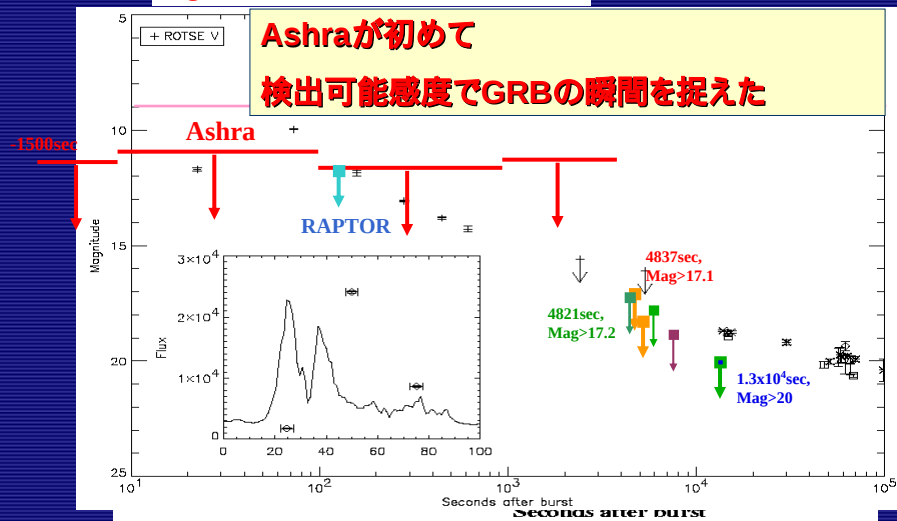
ハレアカラ山頂での取得画像例





GRB041211観測結果 (GCNより)

Light Curve例: GRB990123



Sari & Piran (99)



GRB Optical Flash 観測



	RAPTOR -A,B (wide)	Ashra 2/3モデル
視野角	19.5 °	50 °
集光面積	57cm ²	990cm ²
分解能	0.57分	2.0分
極限等級 /露光時間	12等/30秒	13等/4秒

GRB閃光観測の概略



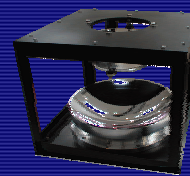
2/3スケール
試作望遠鏡

短時間データ取得
増光天体発見



高精度望遠鏡
Meade LX200

詳細情報取得



(予想図)

1/3スケール
試作望遠鏡

・地球近くの偽事象を
視差で除去
・クロスチェック
(天文台で調整中)

- HETE + SWIFTとのクロス観測(予想:年間数例)
- γ 線にバイアスされないアラート



電撮像イメージパイプライン



エレキ試作・装着

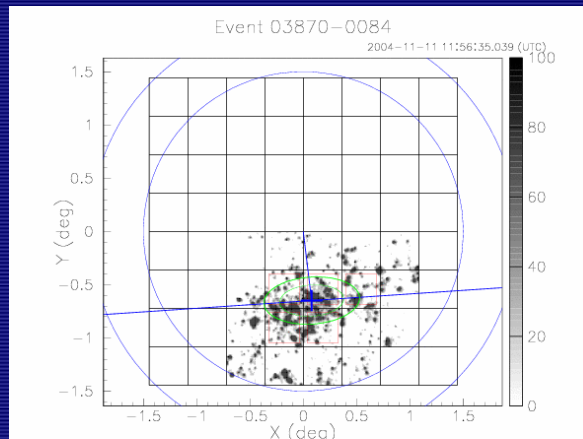


試験観測2: TeV- γ



3m径反射望遠鏡 + 光電パイプライン

イメージパイプラインによるシャワー像



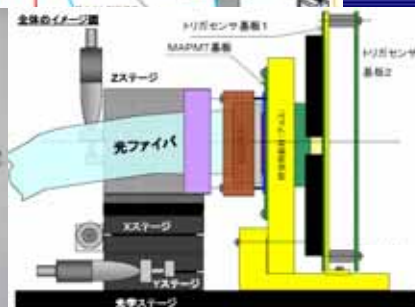
解析は現在、注意深く進行中



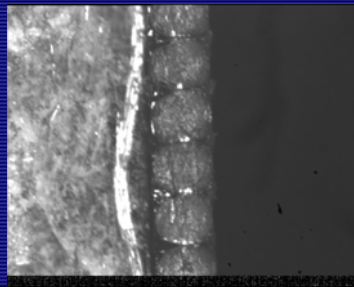
トリガー・読み出し系



回路設計:
木村さん
(茨城大工)



ファイバー束



試験観測3: 50° 視野空気シャワー観測

- 50° 視野での初めての γ 線イメージング観測
- Ashra検出器の現地統合試験
 1. 1/1スケール光学系
 2. イメージパイプライン
 3. トリガーセンサー
 4. CMOSセンサー

光学要素の組込み・調整を行い、イメージパイプライン、トリガー部をインストールして観測を早急に開始。



@ハレアカラ山頂

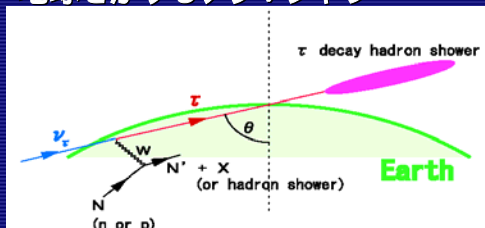


VHE ν 検出

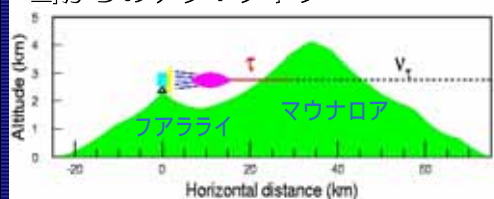
タウ ν シャワー

地殻かすり、山から出るシャワーはタウニュートリノ起源

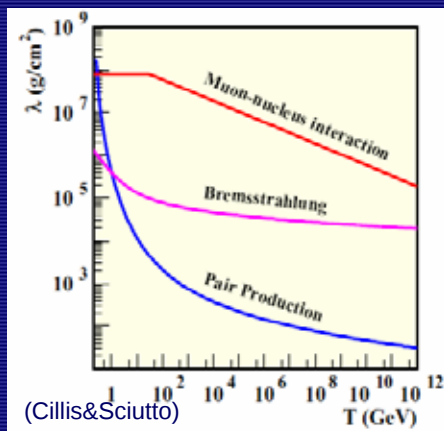
地球をかするタウ ν シャワー



山からのタウ ν シャワー



μ



(Cillis&Sciutto)

The tau lepton loses its energy in the rock through 4 kinds of interactions:

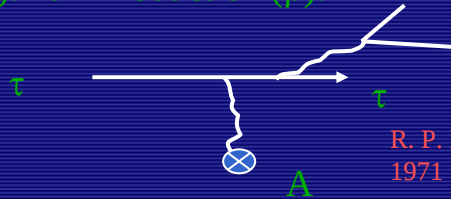
(1). Ionization (α): the tau lepton excites the atomic electrons. H. A. Bethe 1934

(2). Bremsstrahlung (β):



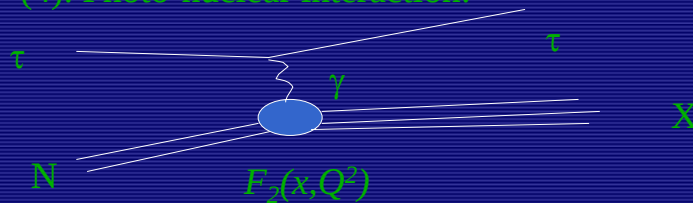
A. A. Petrukhin & V.V. Shestakov, 1968

(3). Pair Production (β):



R. P. Kokoulin & A. A. Petrukhin, 1971

(4). Photo-nuclear interaction:



Basic component

The nucleus shadowing effect is considered:

$$a(A, x, Q^2) = \frac{F_2^A(x, Q^2)}{A F_2^N(x, Q^2)}$$

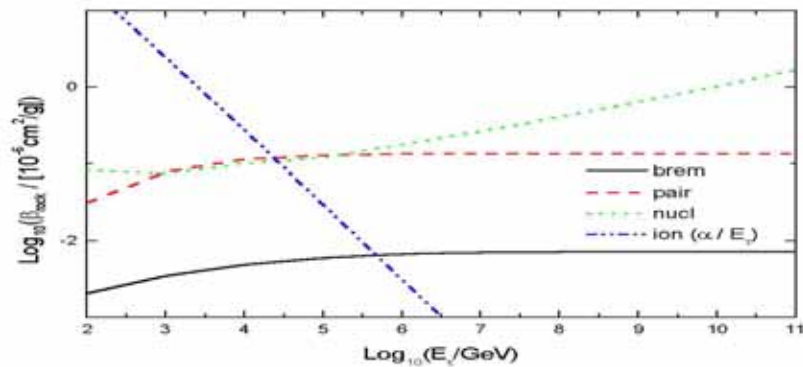
Brodsky & Lu, 1990; Mueller & Qiu 1986;
E665 Collab. Adams *et al.*, 1992

Summarizing all these:

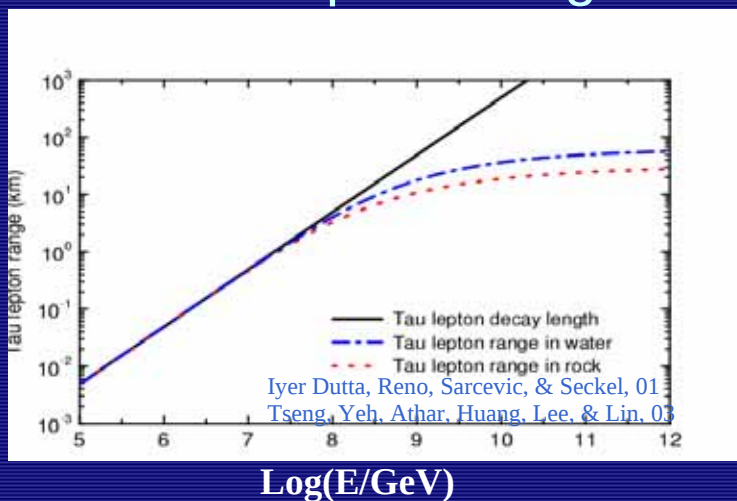
The τ energy loss: Iyer Dutta, Reno, Sarcevic, & Seckel, 01

$$-\frac{dE_\tau}{dX} = \alpha + \left(\sum_i \beta_i \right) E_\tau, X \text{ in units of g/cm}^2,$$

α and β_i 's are plotted below.



Tau Lepton Range



**Tau lepton range approaches to 20 km in rock.
Mountain-penetrating is sufficient!**

Effective aperture $(A\Omega)_{\text{eff}}$

required for 1 event/yr, assuming a 10% duty cycle.

確実なニュートリノ起源

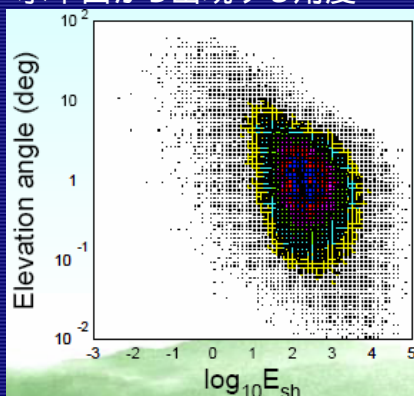
Energy & Aperture ($\text{km}^2 \text{ sr}$)	AGN	GRB	GZK
$10^{15}\text{-}10^{16} \text{ eV}$	4.5	1000	
$10^{16}\text{-}10^{17} \text{ eV}$	2.0	1400	910
$10^{17}\text{-}10^{18} \text{ eV}$	50	19000	120
$10^{18}\text{-}10^{19} \text{ eV}$			290

AGN, GRB => 起源 v 流量計算の不定性

GZK- ν_τ => Ashraで確実に狙える

GZK ν 出現タウの“姿”

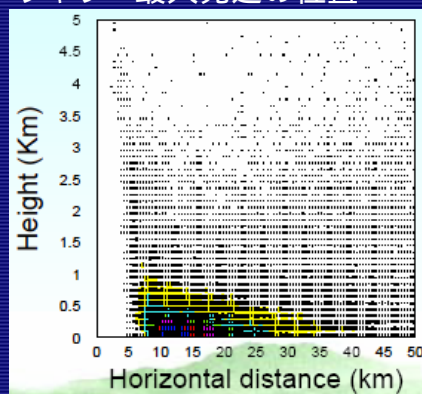
水平面から出現する角度



- Mostly $\varepsilon < 8^\circ$
- mean $\varepsilon \sim 2^\circ$,

• re-generated τ
could come out at
larger angle

シャワー最大発達的位置



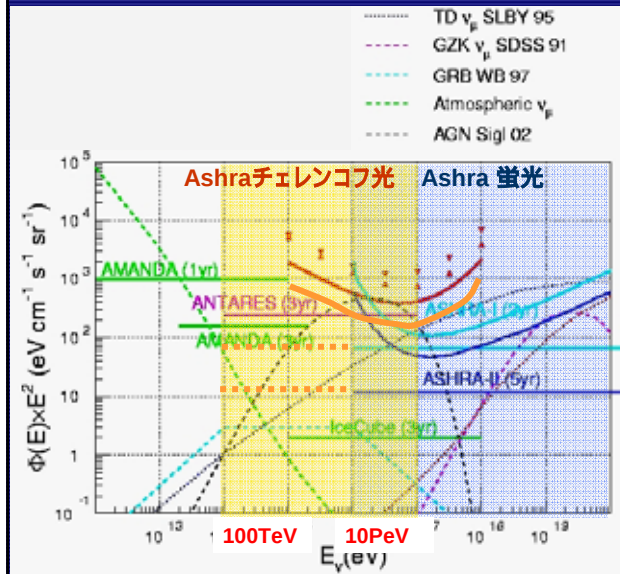
- Mostly at $H < 500 \text{ m}$
and $8 \text{ Km} < D < 25 \text{ Km}$

Ashra分角解像度=>

地殻/山からの出現事例の効率的で確実な同定

検出感度

- 1年でエネルギー1桁あたり1例検出される流束(曲線)
- E^{-2} 流束に対する90%CL上限値(直線)



Ashra

チェレンコフ + 蛍光

100TeV以上の
エネルギー全域で
高感度にて探索

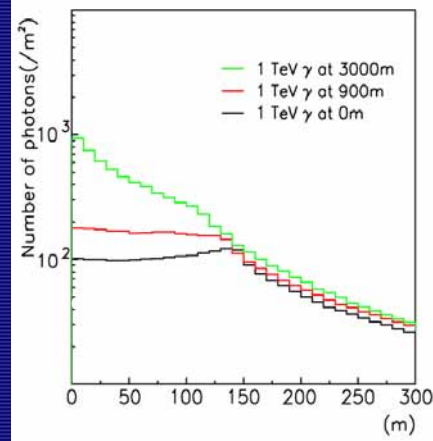
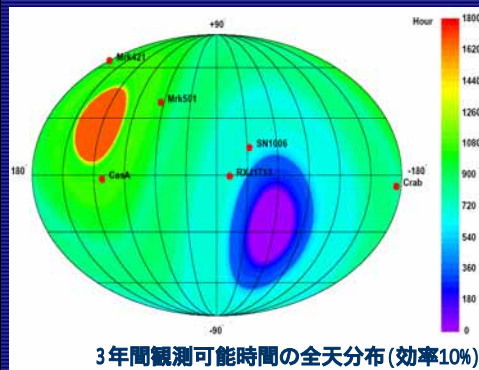
GZK ν 蛍光で確実な初検出
起源での流量正しければ
GRB ν チェレンコフで初検出
AGN ν スペクトル解析



VHE γ 検出

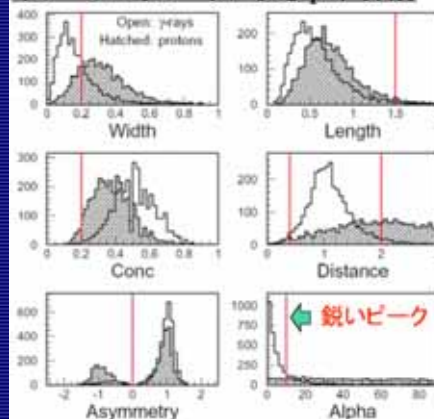
AshraによるTeV- γ 全天観測

- 標高3030m、清澄な大気
- 低い夜光 + 人工光BG
- 高密度チェレンコフ光束
- 全天で長時間同時観測



イメージング法の重要性

イメージパラメータによる p/ γ 弁別

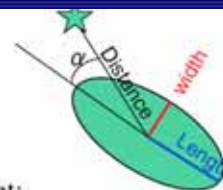


検出効率: $\varepsilon(\gamma) = 0.52$
 $\varepsilon(CR) = 0.003$

Comment:

1. Distance, Asymmetry, Alpha は全て到来方向に関するカット
2. ファインピクセル・高精度光学系により、 α 分布のピークがシャープになっている $\Rightarrow$ likelihood 等の Ashra 用解析を開発する事により、大きく改善する可能性あり。

Width カット $\Rightarrow$ CR1/3 より、角度関係のカットでの CR rejection は100倍。元々半径 3° の範囲に CR を発生させているので、事象毎の角度精度は $\phi 0.3^\circ$ に相当する。



TeV γ 地上アレイとの比較

Tibet [Ref: ApJ 525 (1999) L93], Milagro [Ref: ApJ 595 (2003) 803]

	Ang. resol. [$^{\circ}$]	Det. Area [m^2]	Thresh. ^a [GeV]	γ -rate(Crab) ^b [1/hr]	CR-rate ^b [1/hr]	Signal/ $\sqrt{\text{hr}}$ ^c [$\sigma/\sqrt{\text{hr}}$]
Tibet	0.8 $^{\circ}$	<5175	~ 3	0.17	10	0.050
Milagro	0.8 $^{\circ}$	<4800	~ 3	0.44	96	0.043
Ashra	<u>$\sim 0.3^{\circ}$</u>	70000	1 $\sim$ 2	13	26	<u>2.5</u>

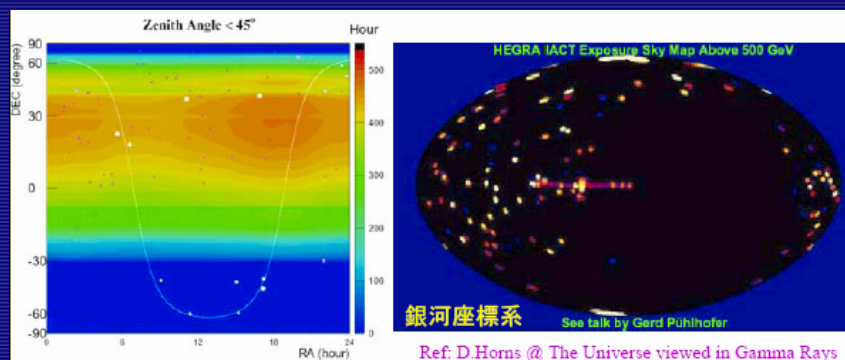
* event by event 相当

注) duty 10% (= exposureの図は、20%相当)、望遠鏡1台での観測と比較するために、FOV ϕ 50 $^{\circ}$ を仮定すると、実時間での Signal/ $\sqrt{\text{hr}}$ は、 $\sqrt{(10 \times (45/25)^2)} = 5.7$ 倍小さくなる (2.5 $\Rightarrow$ 0.44)。

Ashra の狙いどころ:

1. 解像型の利点は大きい (= 高角度分解能・大面積)
+ 高精度光学系・ファインピクセル $\Rightarrow$ p/ γ 弁別性能の向上
2. 角度分解能をもっと向上させたい ... ステレオ?
3. 観測時に視野内で transient現象が起きれば特に高感度

TeV γ 全天イメージングの威力



Ashra exposure (1年)

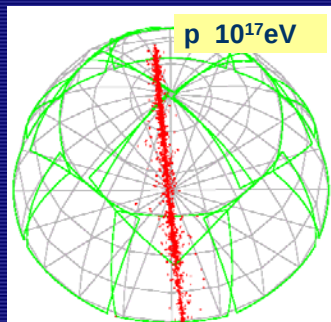
HEGRA exposure (total)

解像型の望遠鏡として、広視野を有し(4 $^{\circ}$) survey観測を積極的に行っていたHEGRA実験の exposure との比較からも、Ashra望遠鏡が、圧倒的に広視野を監視できることが明快に示される。



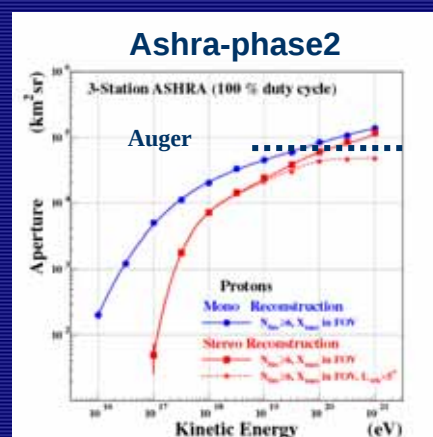
EHECR検出

EHECRに対するAshra-2感度



ステレオ観測率 (稼働率10%)

エネルギー閾値	観測数/年
10 ¹⁹ eV	1324
10 ^{19.5} eV	259



まとめ



- Ashraによる創成:
 - GZKタウニュートリノ初検出 => 超高エネルギー素粒子天文学の創成
 - GRB光学閃光・TeVガンマ線監視 => GRB機構解明と突発現象の発見
 - EHECR精密測定 => 宇宙磁場による粒子同定と精密スペクトル
 - もちろん、既知の素粒子反応では理解できない異常現象も監視
- Ashraの先導性:
 - 広角高精度光学系
 - ・ GRB041211リミット => 稼働、天文学に貢献
 - 光電撮像パイプライン
 - ・ チェレンコフシャワー像 => 稼働、解析進行中
- いよいよ本番設置・運用へ:
 - 入念な調整・較正・搬出前試験の基盤整備
 - 現地での土木工事・支援体制の強化
 - 堅実な運用(建設・観測・解析)を目指す

真に日本が誇れる国際的な実験へ

皆様の暖かいご支援ご協力を宜しくお願いいたします。