

*All-sky Survey High Resolution  
Air-shower detector*

全天高精度素粒子望遠鏡Ashra  
におけるVHE 検出

Ashra共同研究者

佐々木真人

(東京大学宇宙線研究所)

# 内容

- *Ashra*計画
- 開発・試験観測
- VHE 検出

Ashraホームページ: [www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ashra](http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ashra)

ご意見、ご議論: [sasakim@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:sasakim@icrr.u-tokyo.ac.jp)

# Ashra計画



# 宇宙ニュートリノ

低エネルギー 検出器

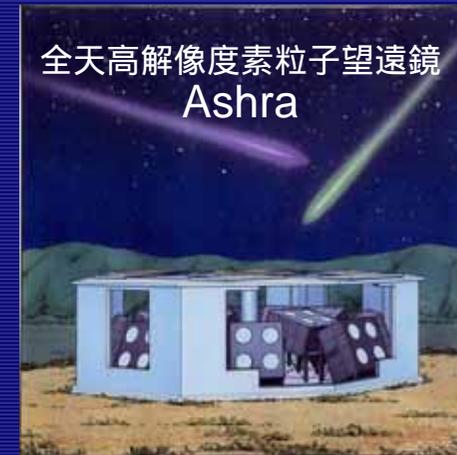


水が標的(3,000トン)

方向が分らない

超新星爆発(16万光年)

超高エネルギー 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)  
ビッグバンの化石

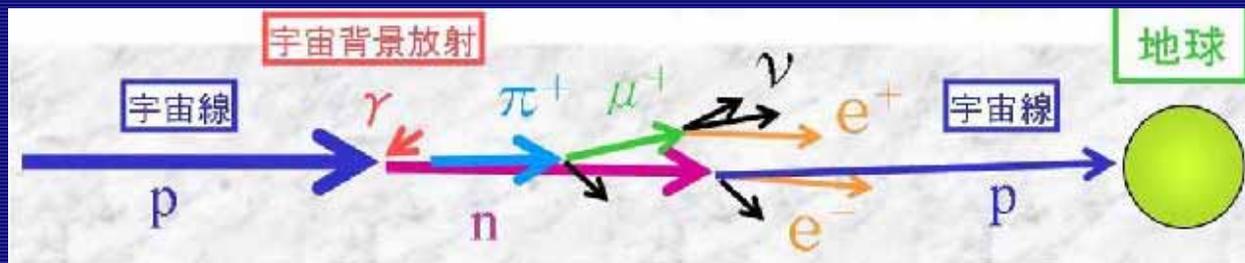
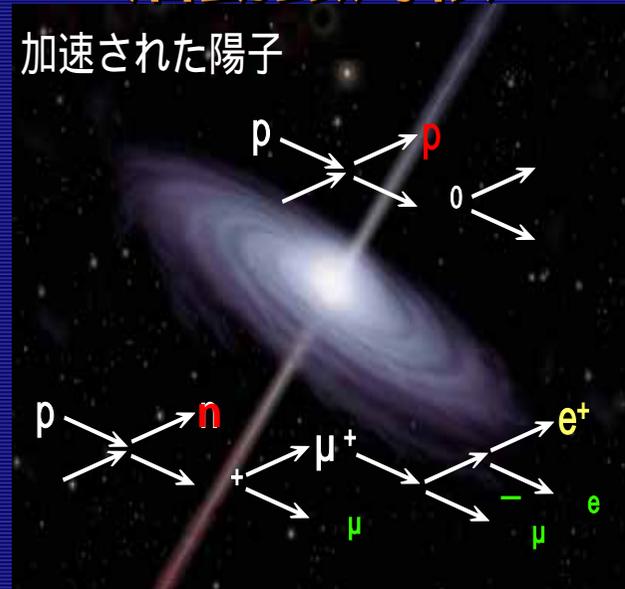
超高エネルギー による深宇宙の探索

# 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

# Ashra検出器

Ashra : チェレンコフ光、大気蛍光の観測を行う新しい検出器

## 特徴:

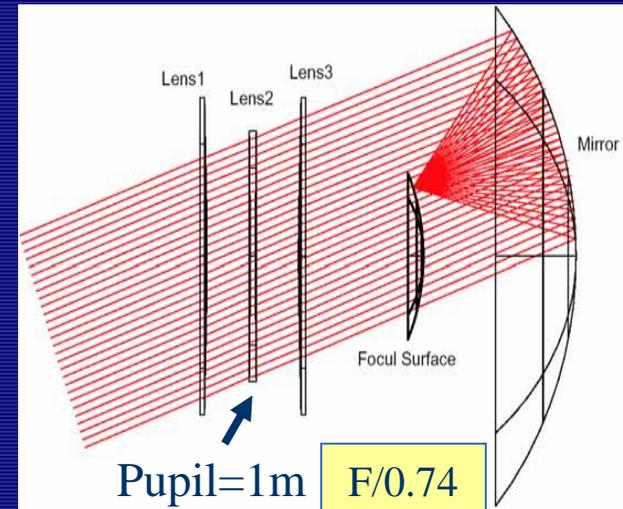
- 全天監視
  - 高分解能
  - 同時観測
    - TeV
    - EHE p/
    - VHE
- 2 sr  
1分角

## Ashra ステーション:

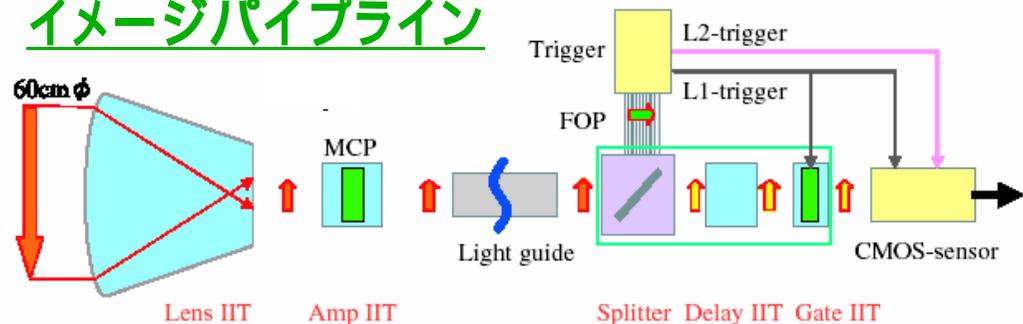
- 12 望遠鏡 / ステーション
- 全天 (2 sr) / 50M pixel
- 広角精細光学系 と イメージパイプライン

## 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



## 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

# 蛍光望遠鏡

蛍光検出ステーション

HiRes Fly's Eye



2m 鏡

256ch PMT

PMTカメラ => 解像度 ~ 1°

1 度角の分解能

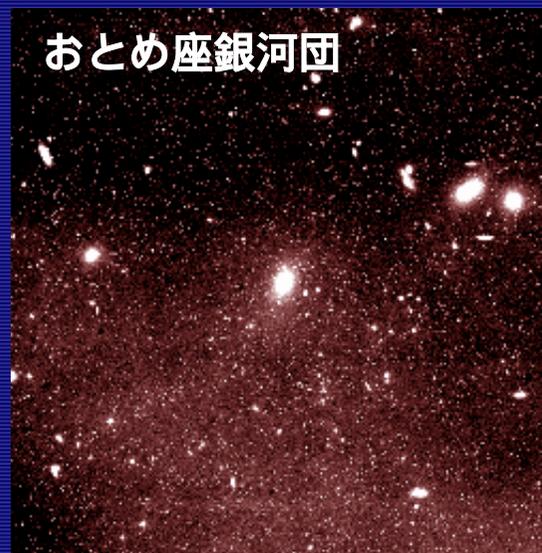
おとめ座銀河団



従来の大気蛍光望遠鏡

1 分角の分解能

おとめ座銀河団



Ashra望遠鏡



# 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



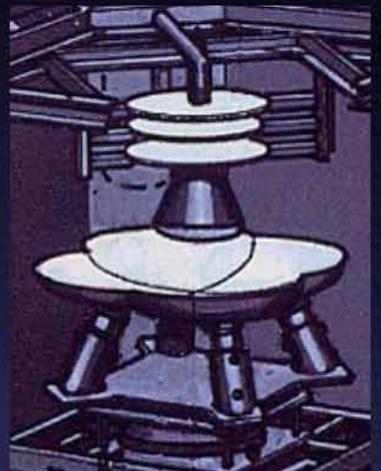
# Ashra Project Plan



**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.**

# マウナロア山観測予定地



マウナケア山

逆転層

マウナロア中腹@3300m

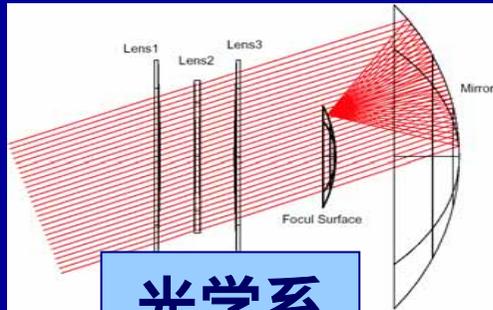




**開発・試験観測**

# 開発・試験観測スキーム

設計・開発



光学系

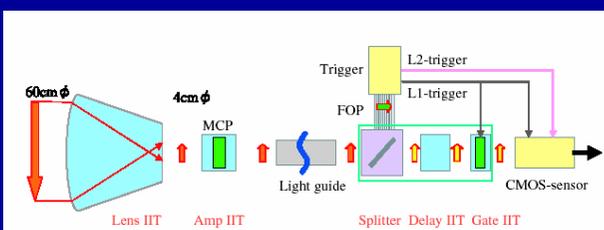
実機製作



2/3スケール望遠鏡

ハワイ観測

Optical  
Flash  
探索



イメージパイプライン



TeV 線源  
追尾観測  
w/ 経緯台望遠鏡

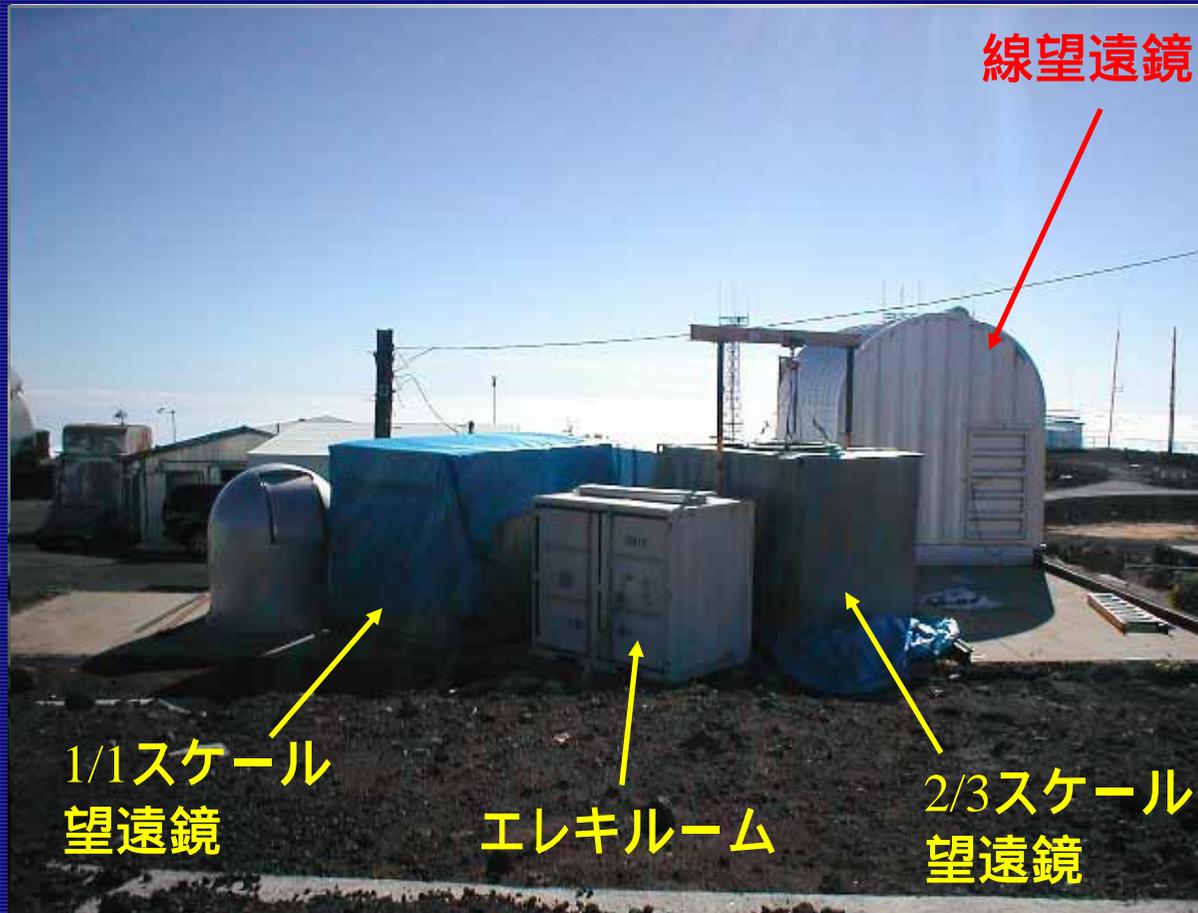
統合

1/1スケール  
Ashra検出器

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

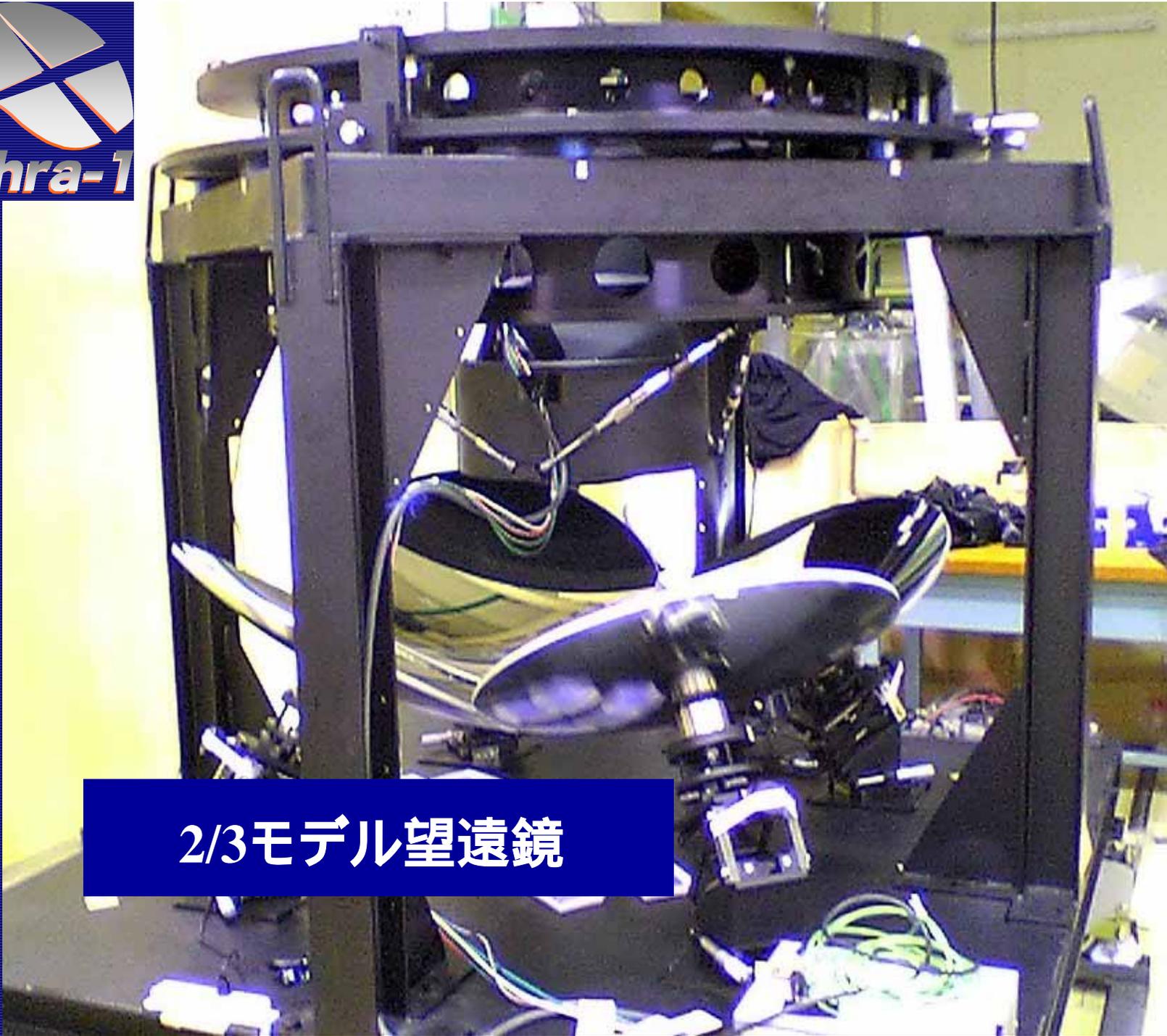
2004年6月: ガレージ完成

2004年8月: コンテナ設置

2004年8月: 望遠鏡搬入

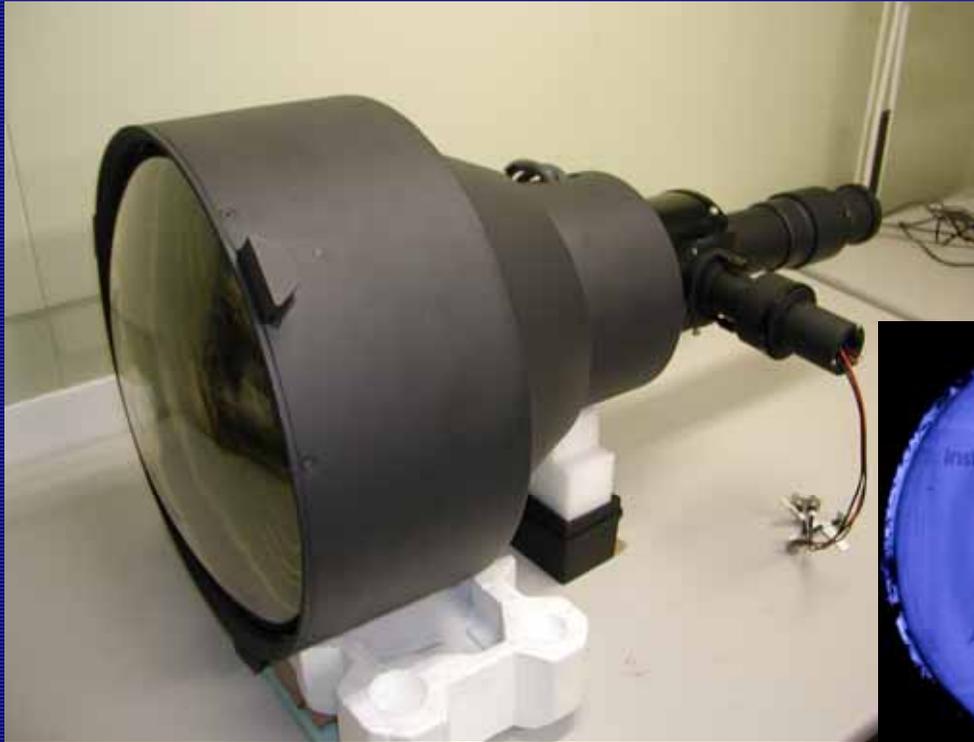


2/3モデル望遠鏡

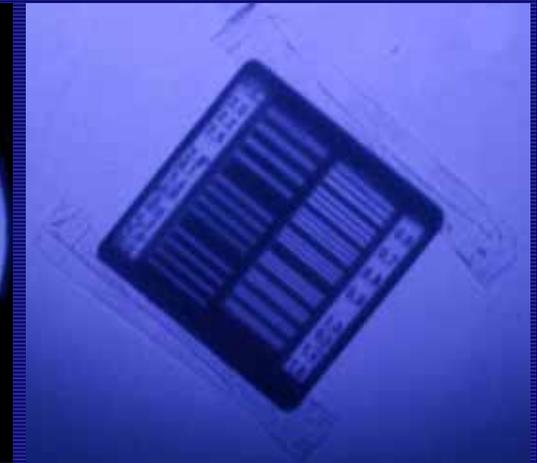




# 大口径レンズIIT

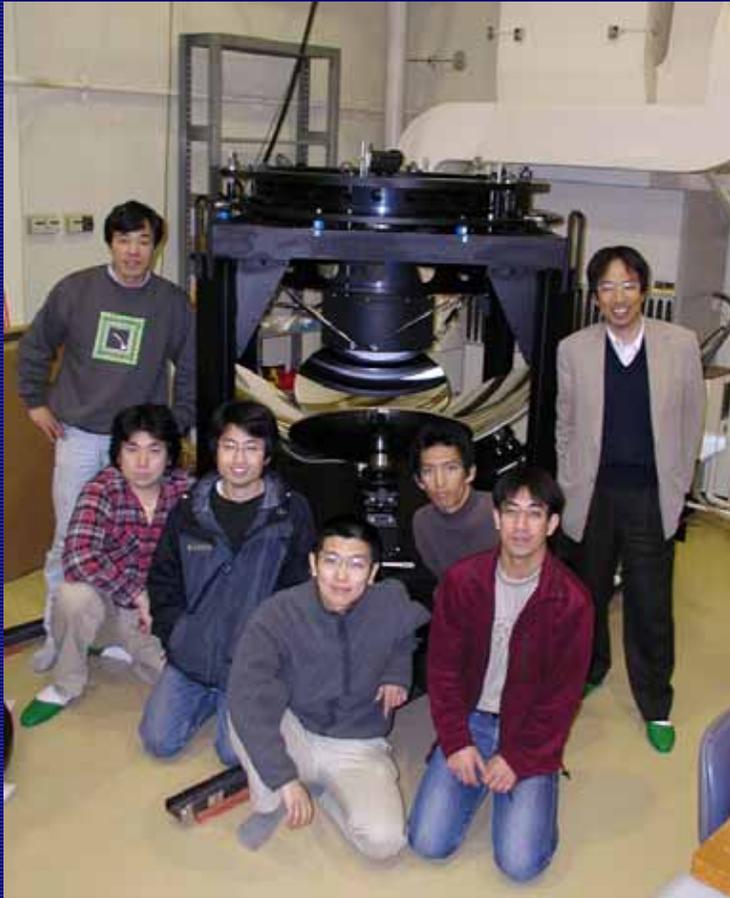


16インチ(400mm) 受光面

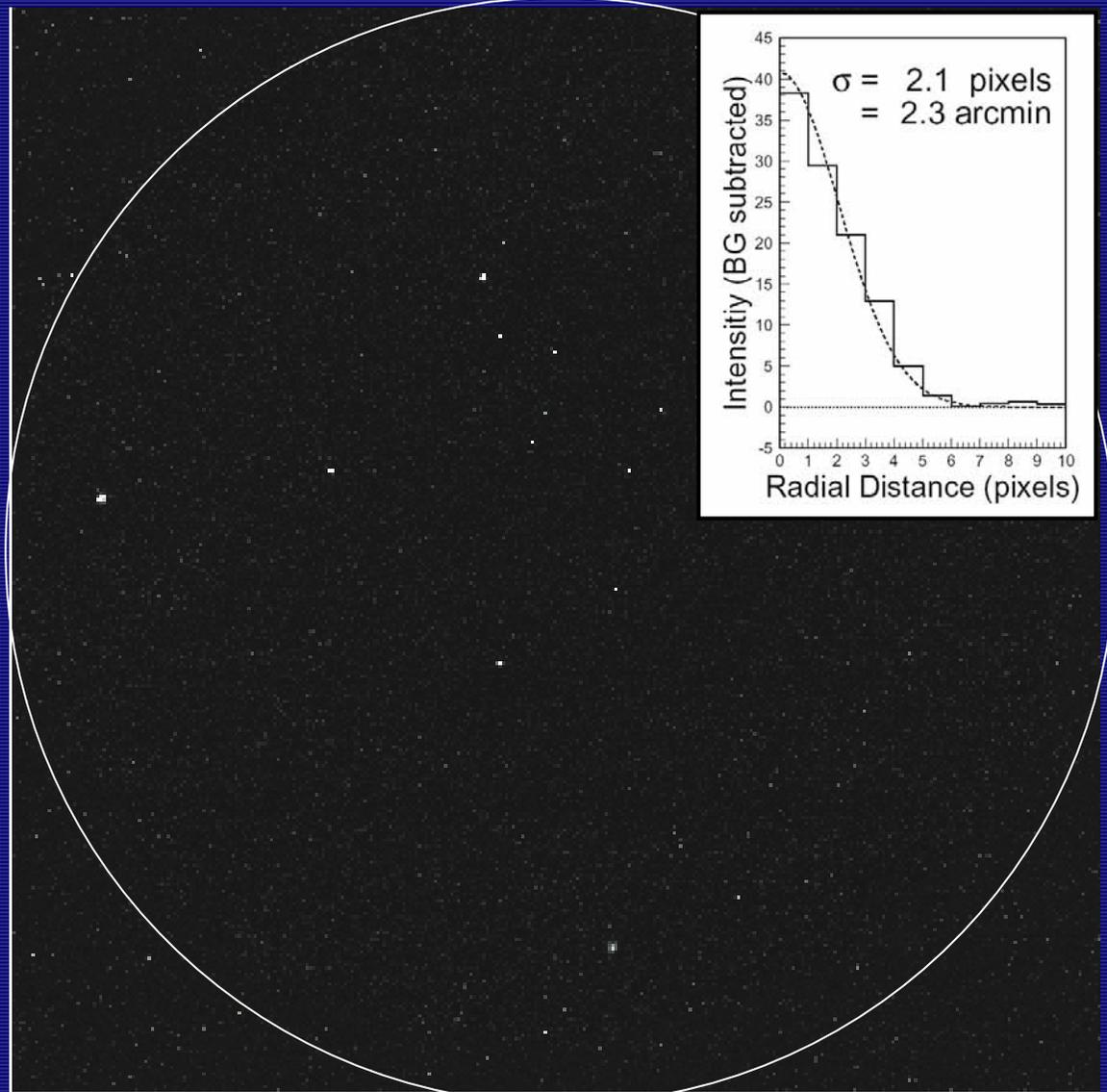


- ⇒ 16インチ 受光面 解像度 3.4ラインペアー/mm
- ⇒ 世界最大&最高精度
- ⇒ 24インチ の開発へ

# ファーストライト



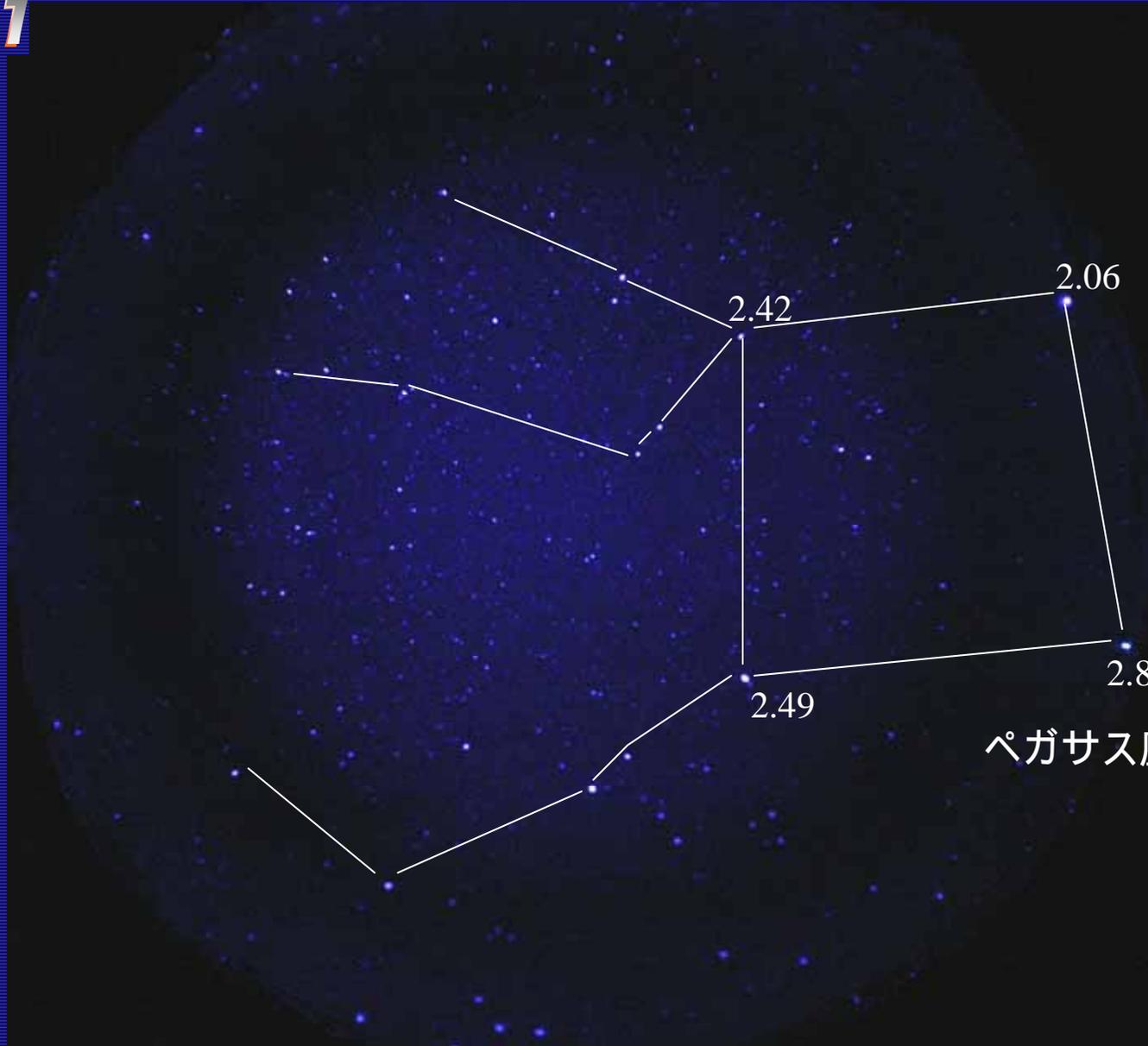
天文機器開発研究センターにて  
2004年2月



調整後の星像スポットサイズ~2分角 => まずまずの出だし



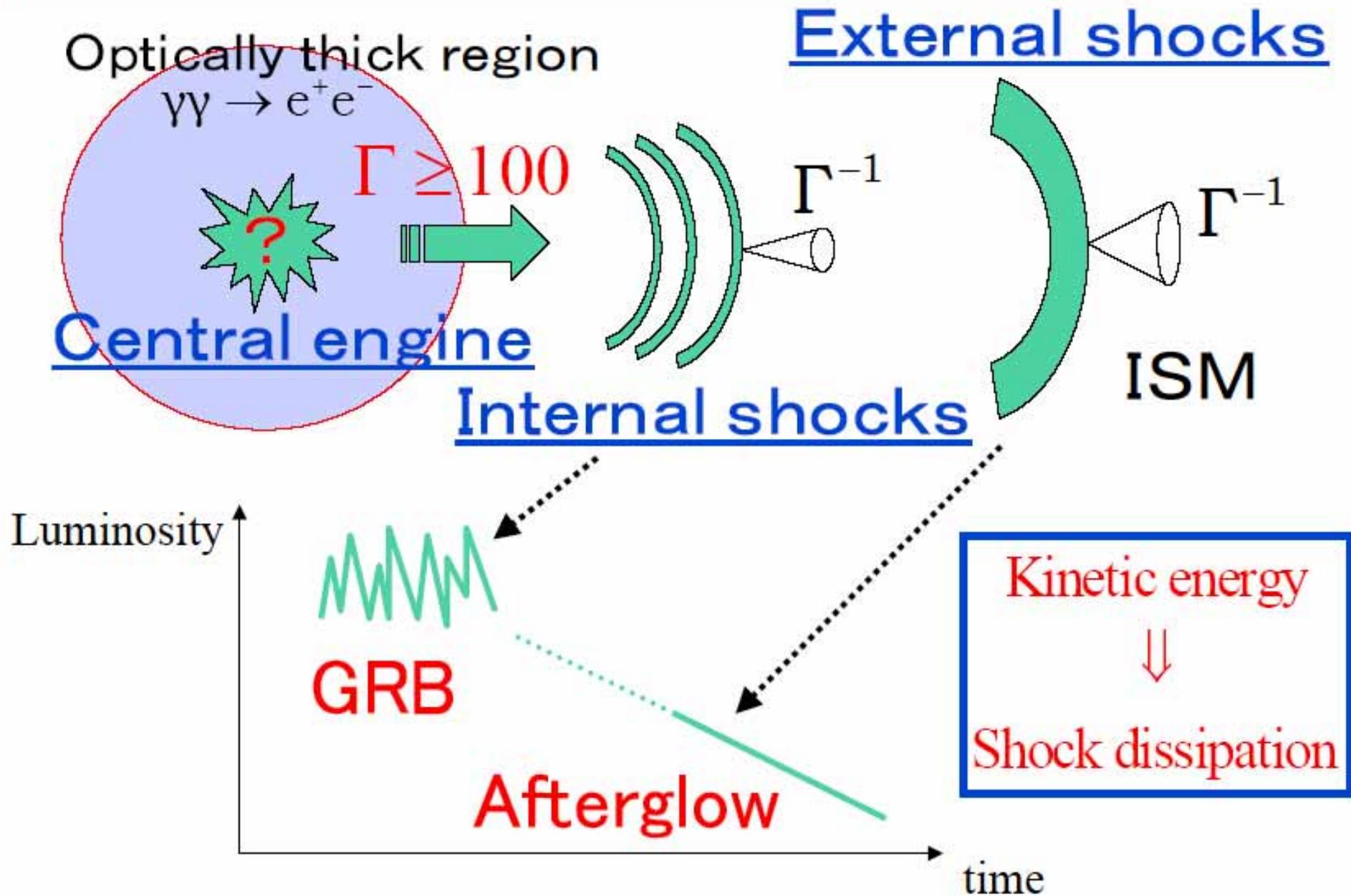
# ハレアカラ山頂での取得画像例



ペガサス座

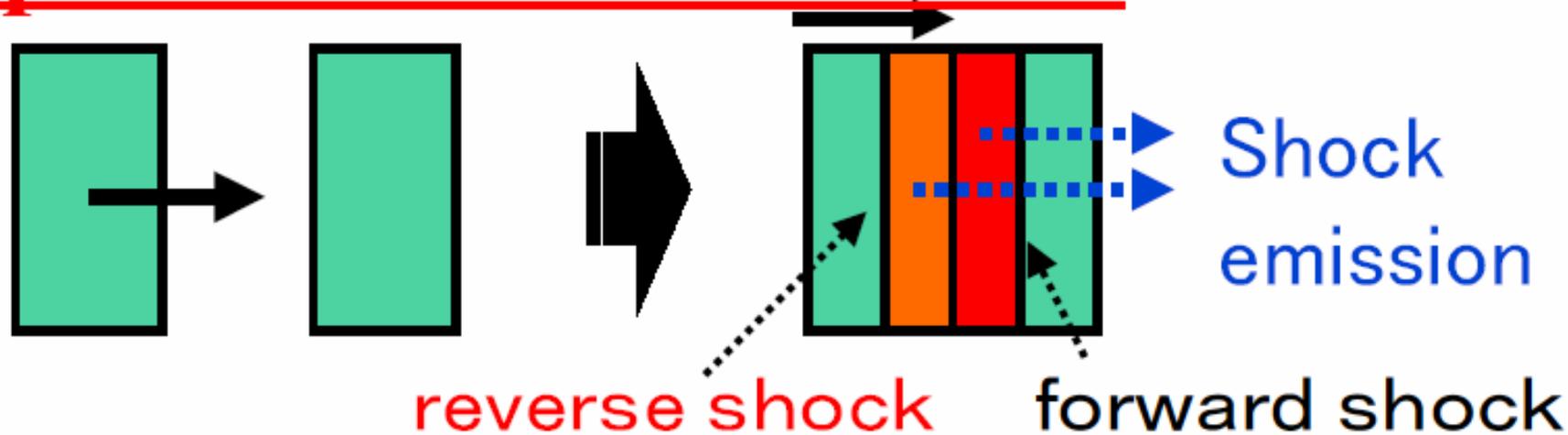
# Internal-External shock model

by loka-san

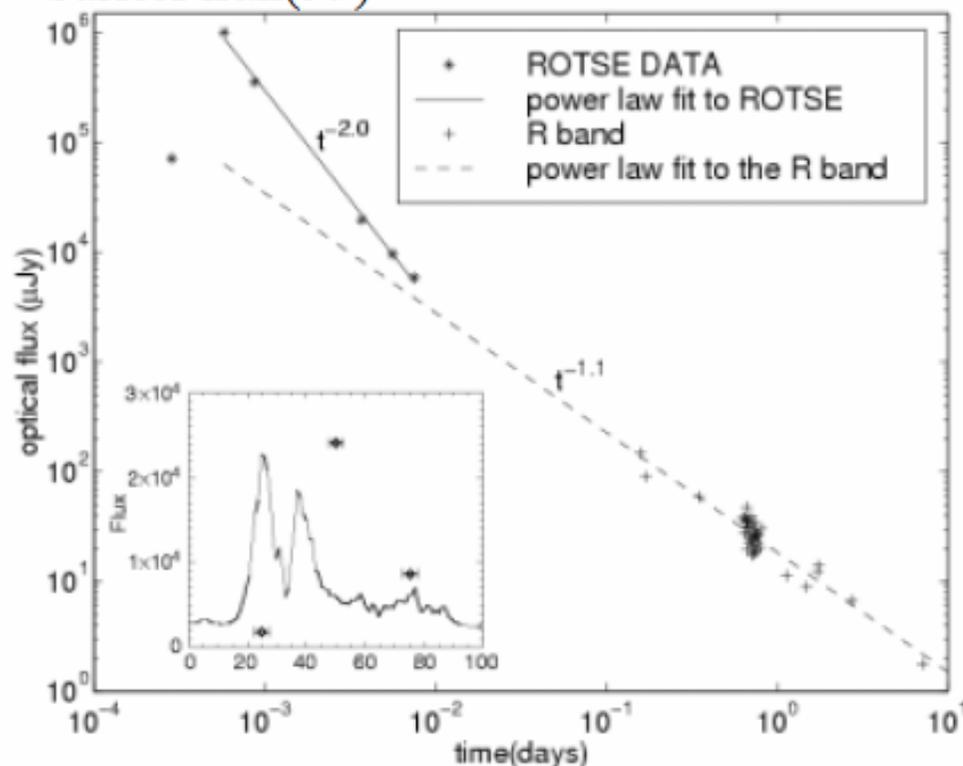


# Optical flash ← ASHRA ?

by Ioka-san

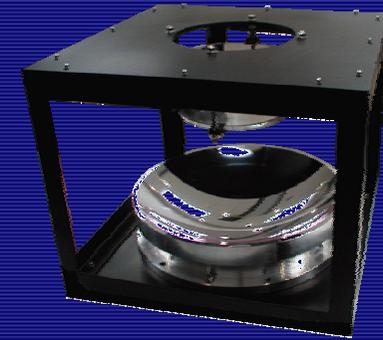


Sari&Piran(99)



9等、10s  
全天光学観測は  
今までほとんどない  
⇒ ASHRA ?

# GRB閃光観測の概略



(予想図)

2/3スケール  
試作望遠鏡

トリガー

高精度望遠鏡  
Meade LX200

1/3スケール  
試作望遠鏡

短時間データ取得  
増光天体発見

詳細情報取得

- ・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)

線にバイアスされないアラート

# GRB041211 フォローアップ

RUN# 03486

2004-12-11 11:31:50 UTC

12:51:48 UTC Notice

13:35

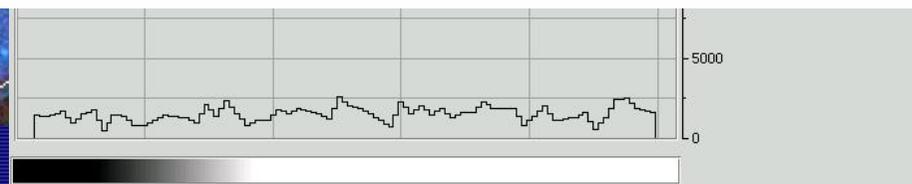
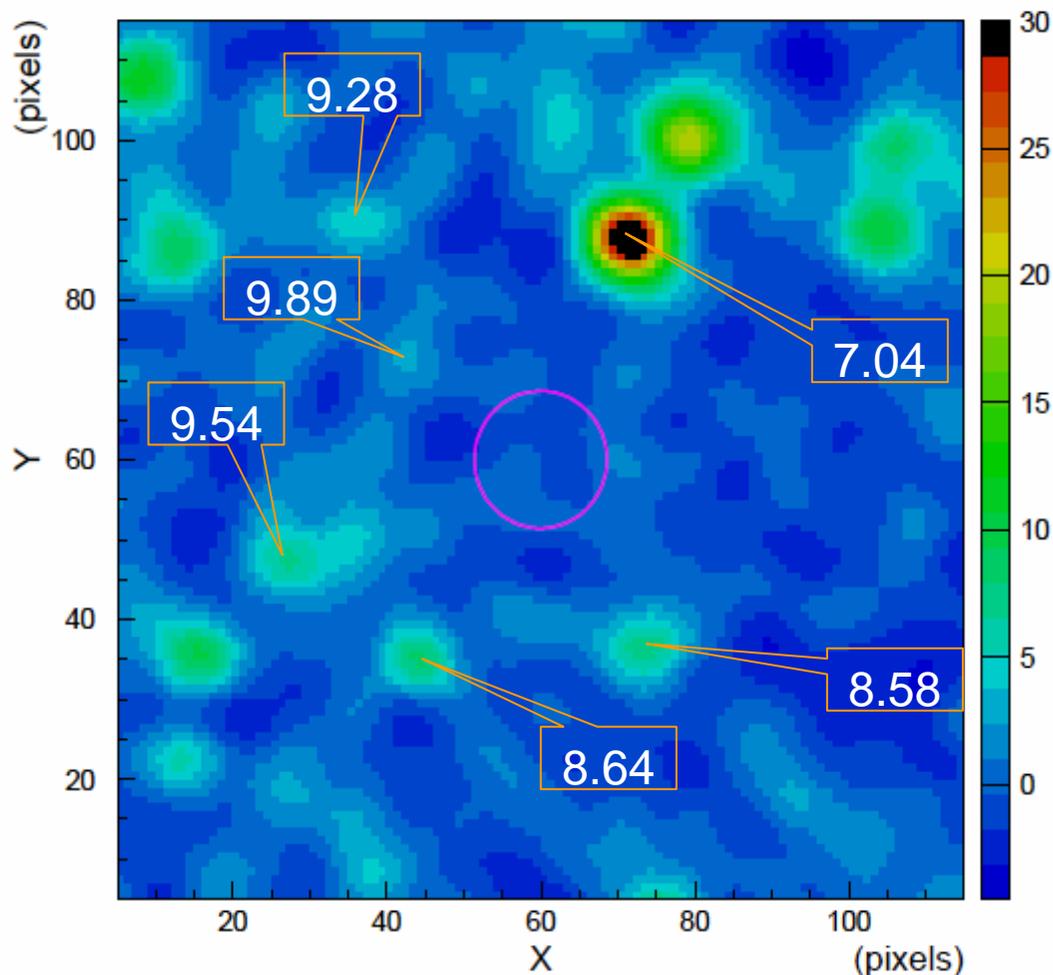
11:3

GRB04

4s露光 5秒間隔 11M画素

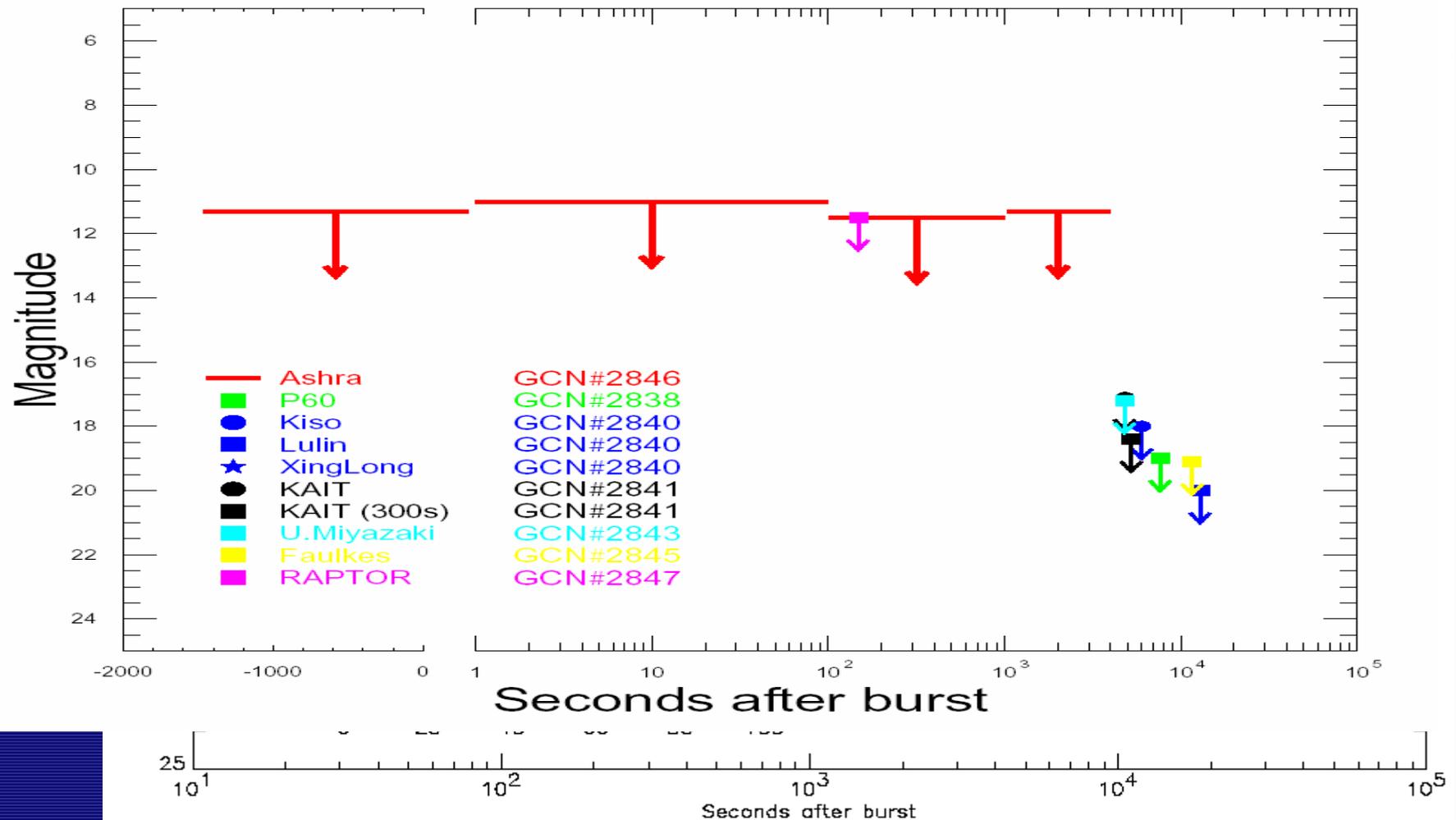
約2000枚の画像取得

S/N Ratio Contour Plot Image:3508



# GRB041211 に対するリミット (抜粋)

## Limiting Magnitude for GRB041211

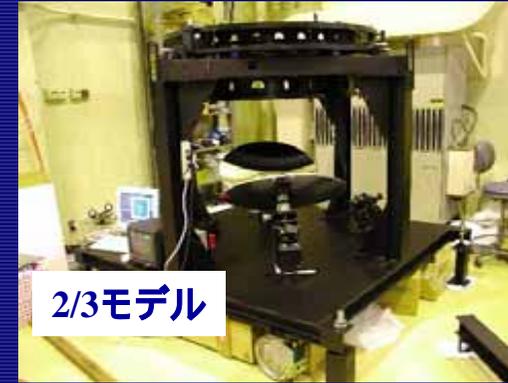




# GRB Optical Flash 観測



RAPTOR

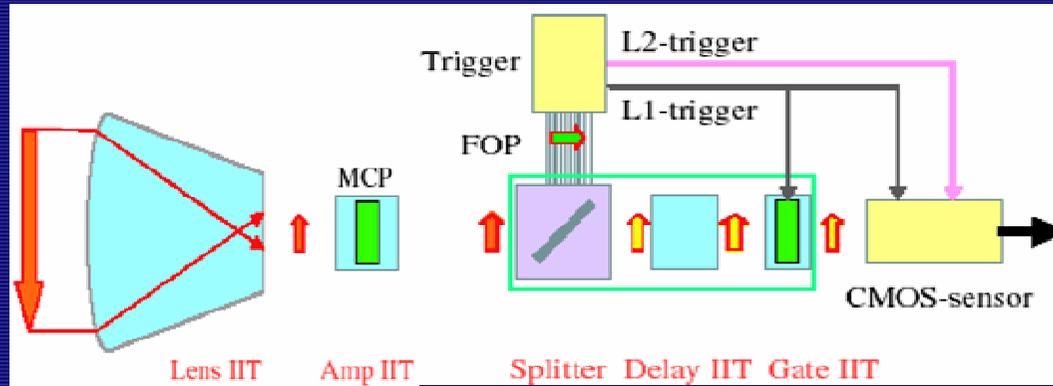


2/3モデル

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



# 光電撮像イメージパイプライン



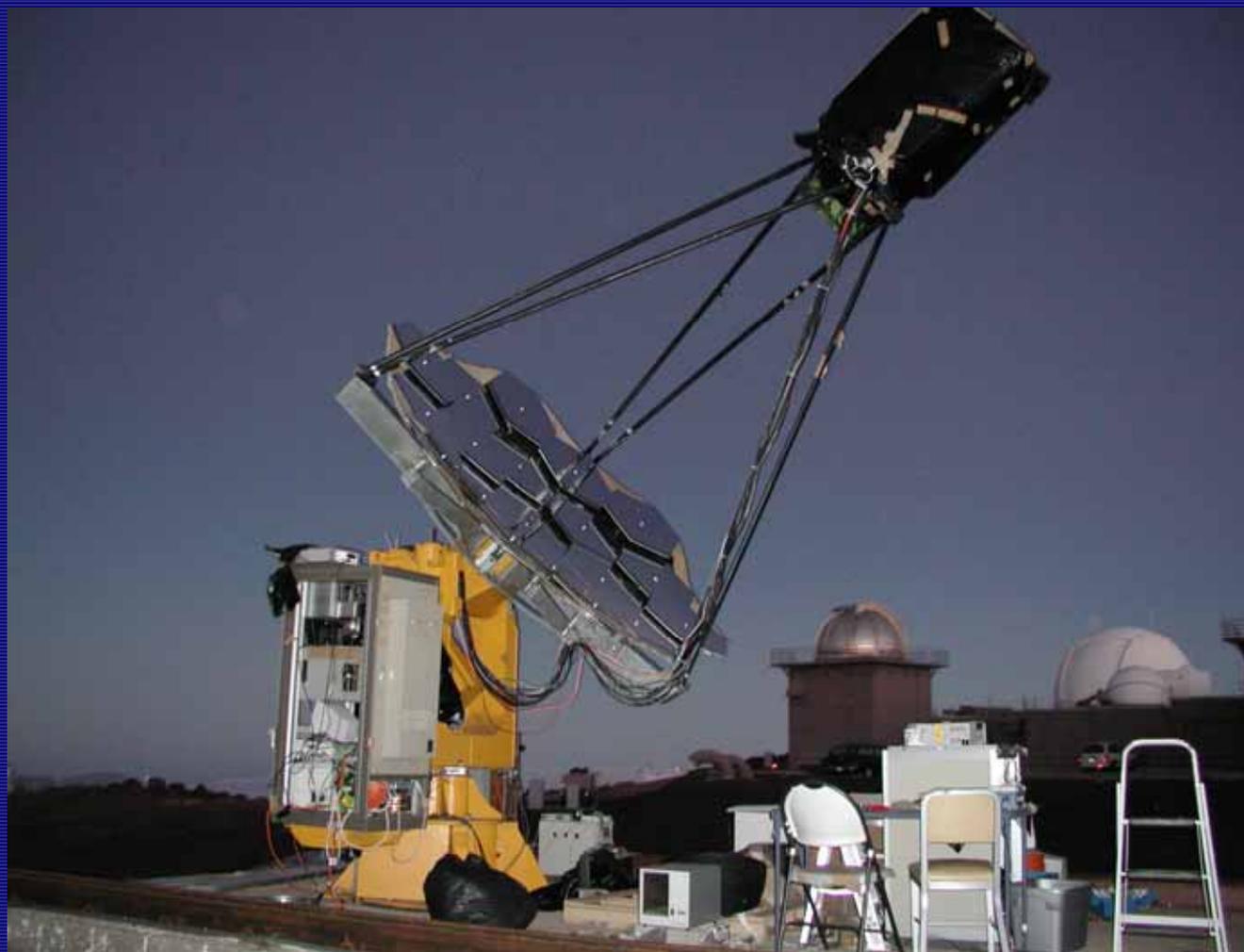
# エレキ試作・装着



経緯台への装着

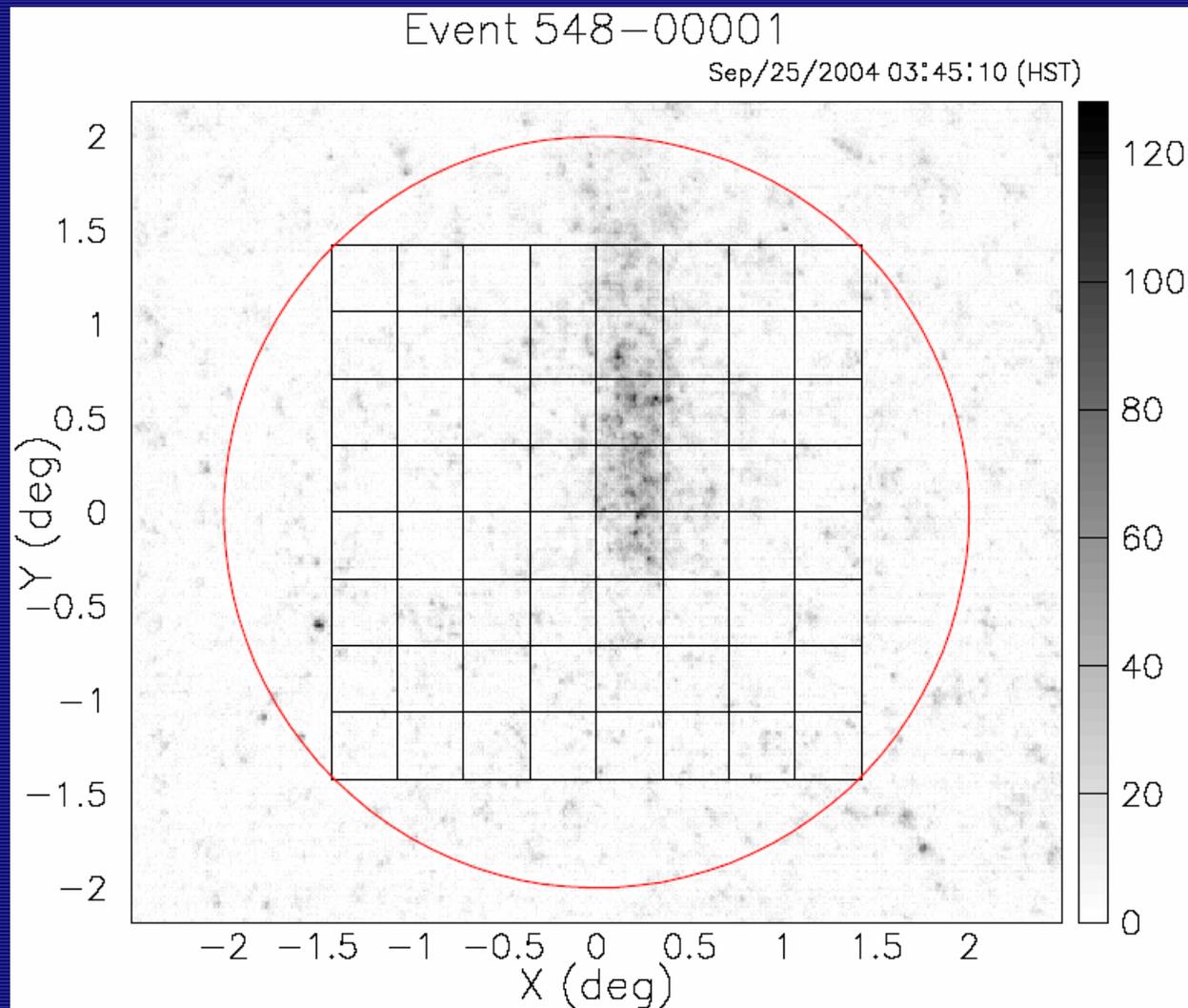


# ハレアカラ山 TeV- 試験観測



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



# 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

光学要素の組み込み・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。

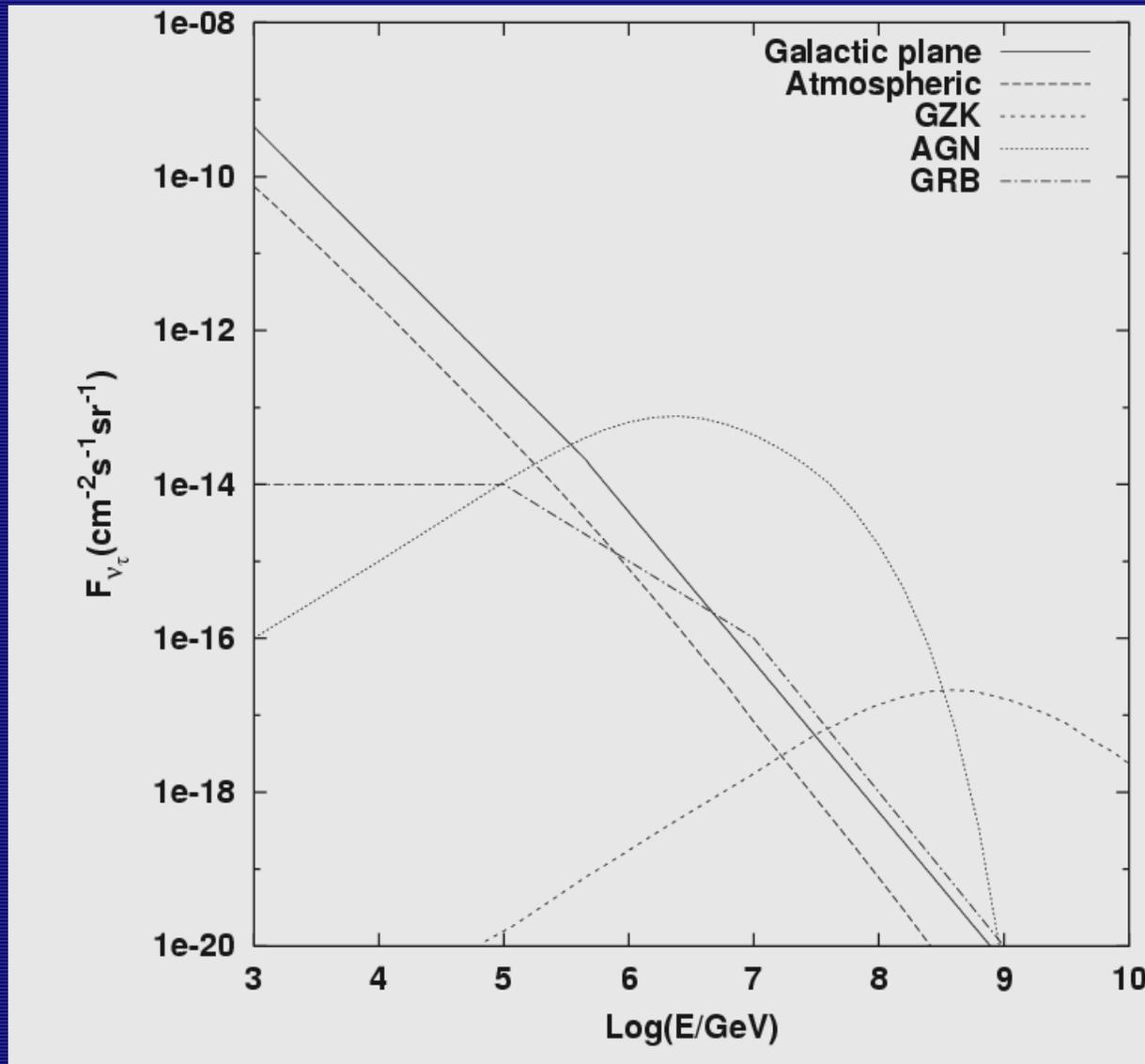


@ハレアカラ山頂



**VHE 検出**

# タウ フラックス



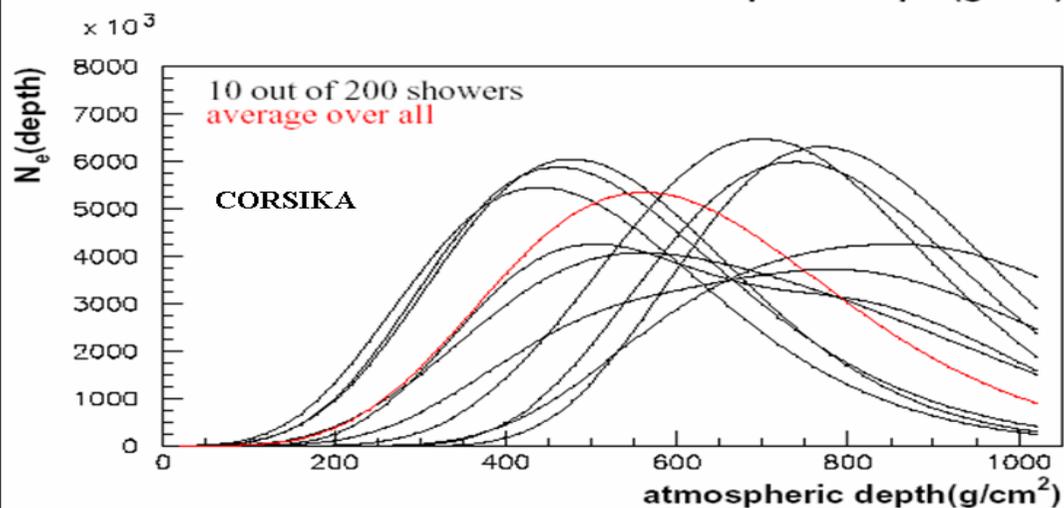
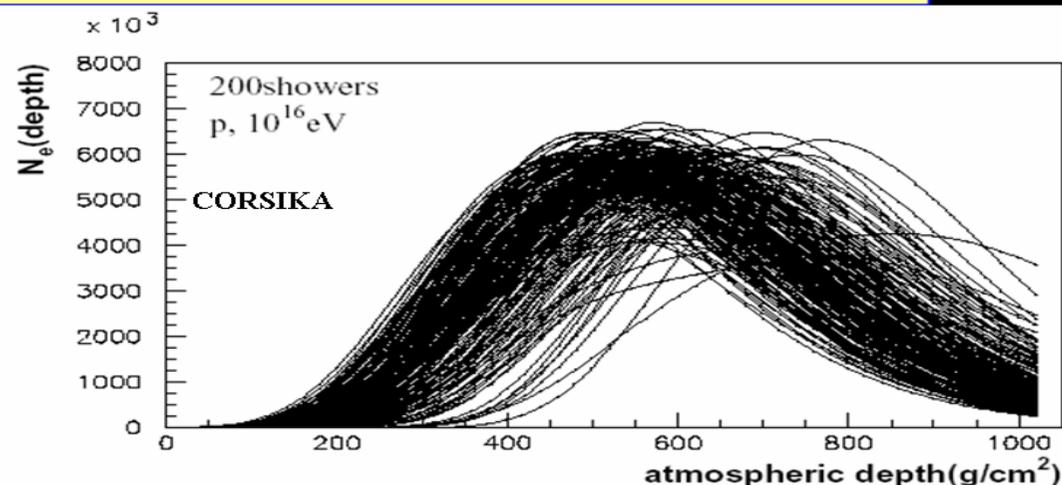
GZK 10<sup>9</sup> GeV

Athar, Tseng and Lin, ICRC 2003

# 空気シャワーMCの重要性

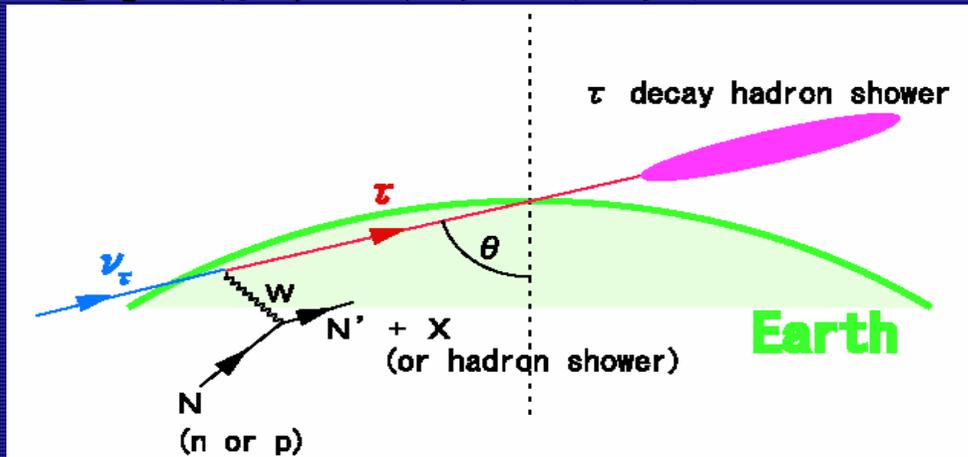
- シャワー発達ふらつき
- ハドロン物理(破碎関数)
- 多重の素粒子反応
- 複雑な大気環境
- 高性能検出器

## Longitudinal development

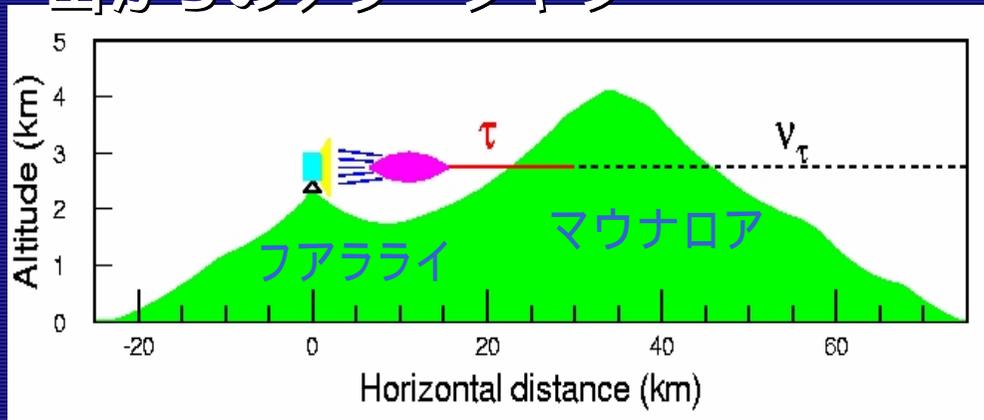


# タウ シャワーシミュレーション

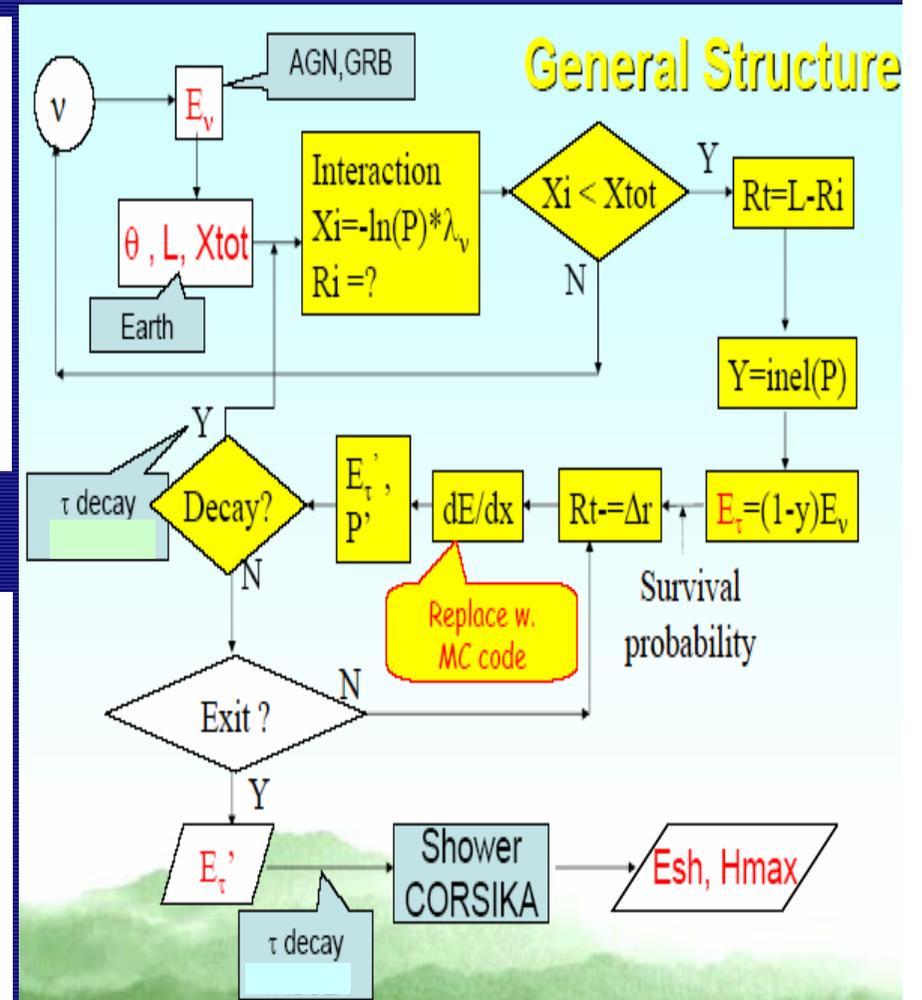
## 地球をかするタウ シャワー



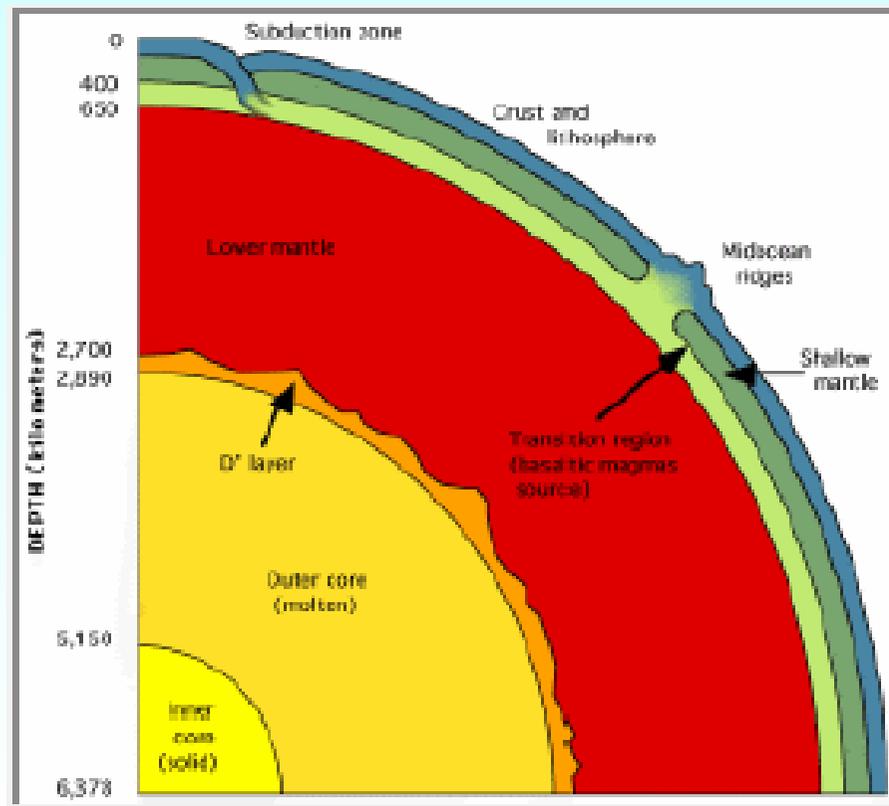
## 山からのタウ シャワー



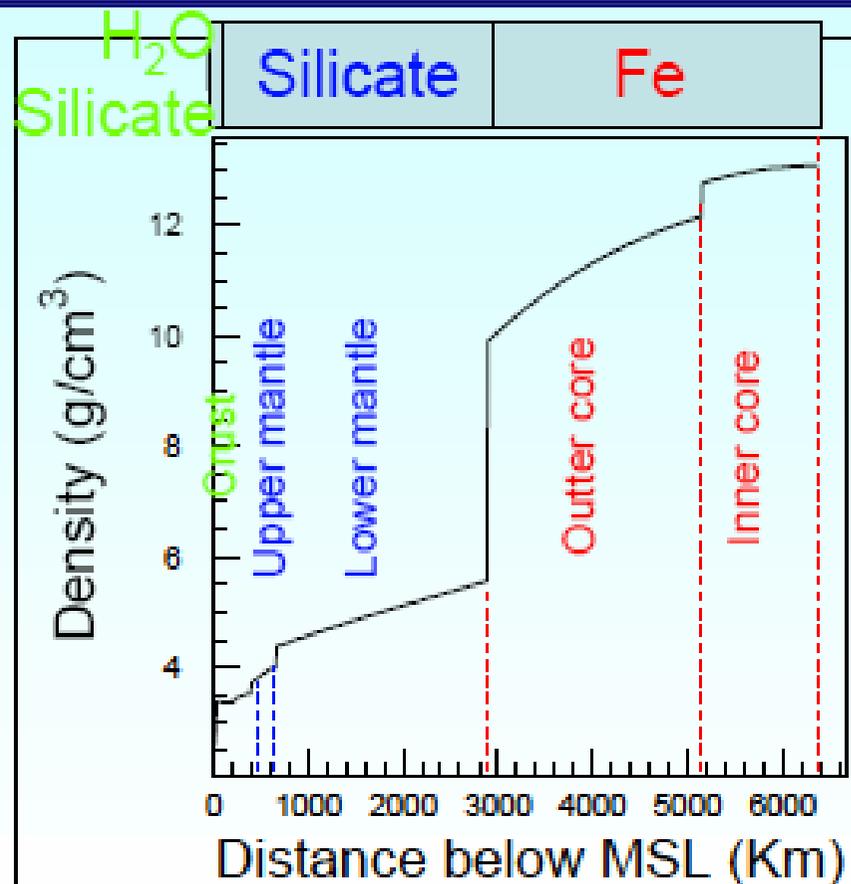
## Ashra チェレンコフ光 + 蛍光



# 地球モデル



Bratt, J. K. and A. Chaikin, *The New Solar System*, 1990.

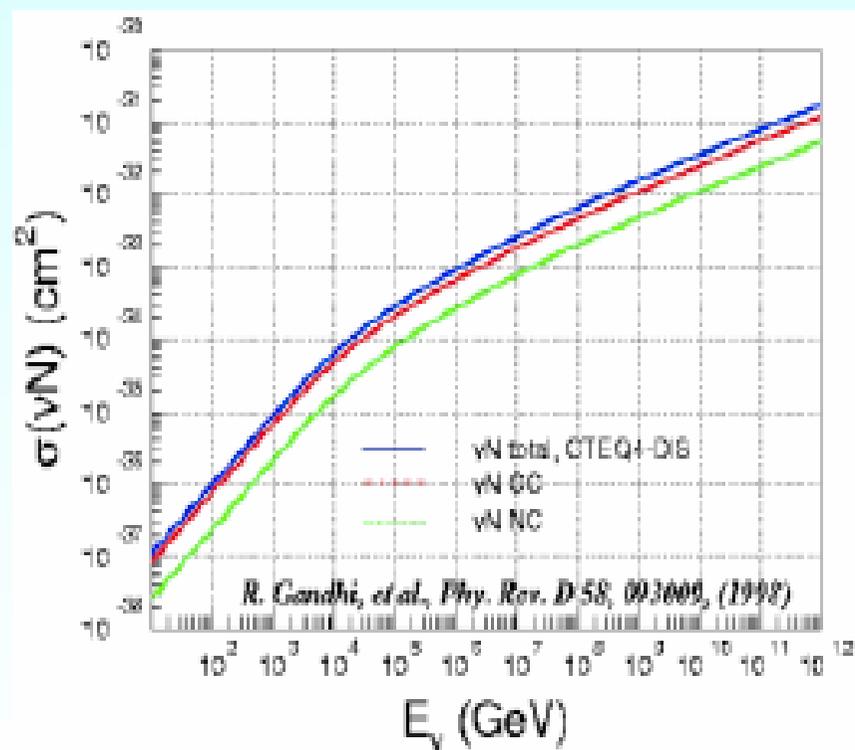
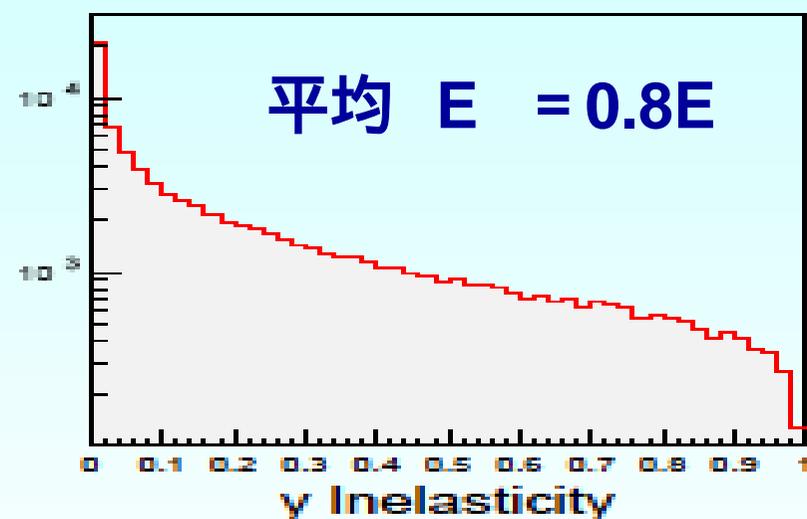


# N反応

CC/NC total cross-section  
determine interaction  
probability.

- W-resonance will be added later
- Non-Standard model cross-section can be implemented as external data file

## Simulation results



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

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

(2). Bremsstrahlung ( $\beta$ ):



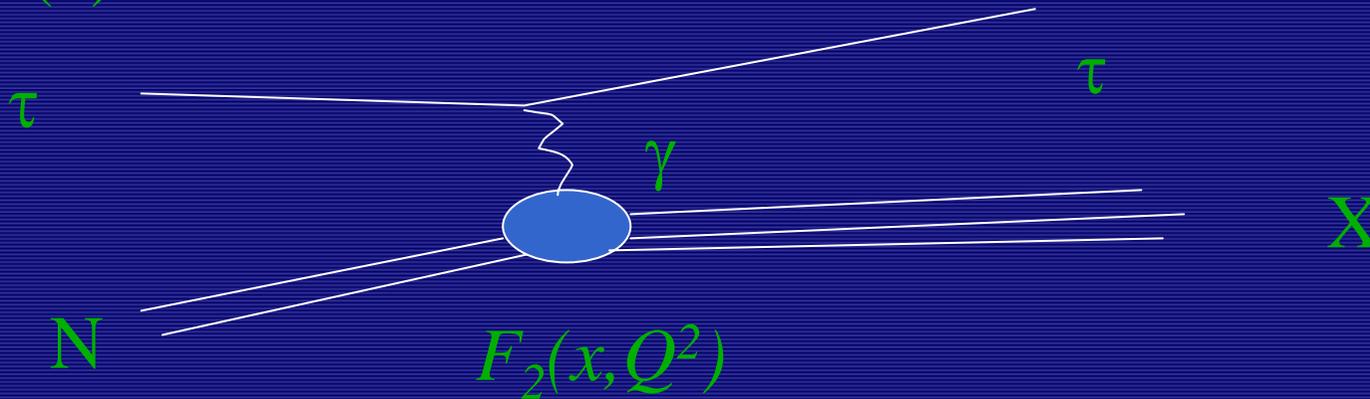
A. A. Petrukhin & V.V. Shestakov, 1968

(3). Pair Production ( $\beta$ ):



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

(4). Photo-nuclear interaction:



Basic component

The nucleus shadowing effect is considered:

$$a(A, x, Q^2) = \frac{F_2^A(x, Q^2)}{AF_2^N(x, Q^2)}$$

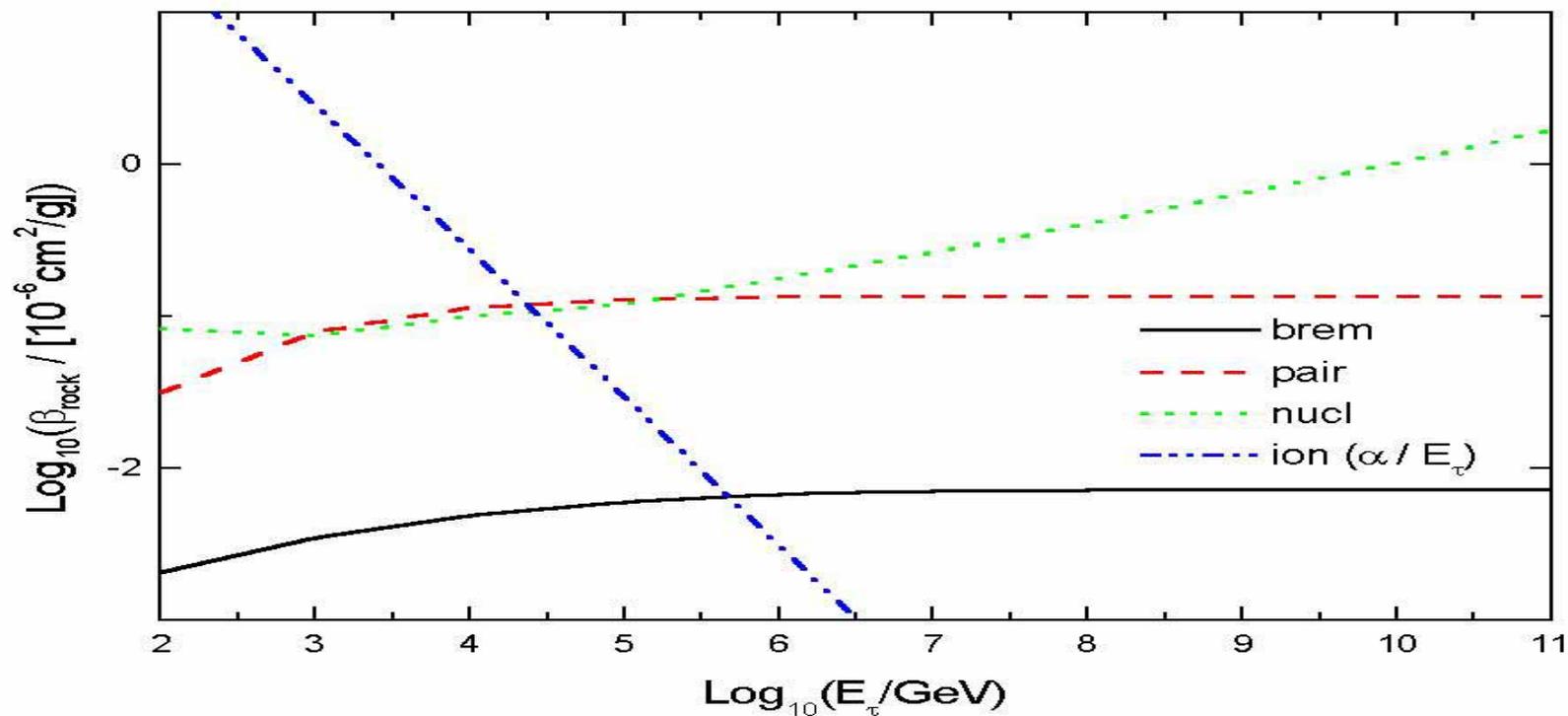
Brodsky & Lu, 1990; Mueller & Qiu 1986;  
E665 Collab. Adams *et al.*, 1992

Summarizing all these:

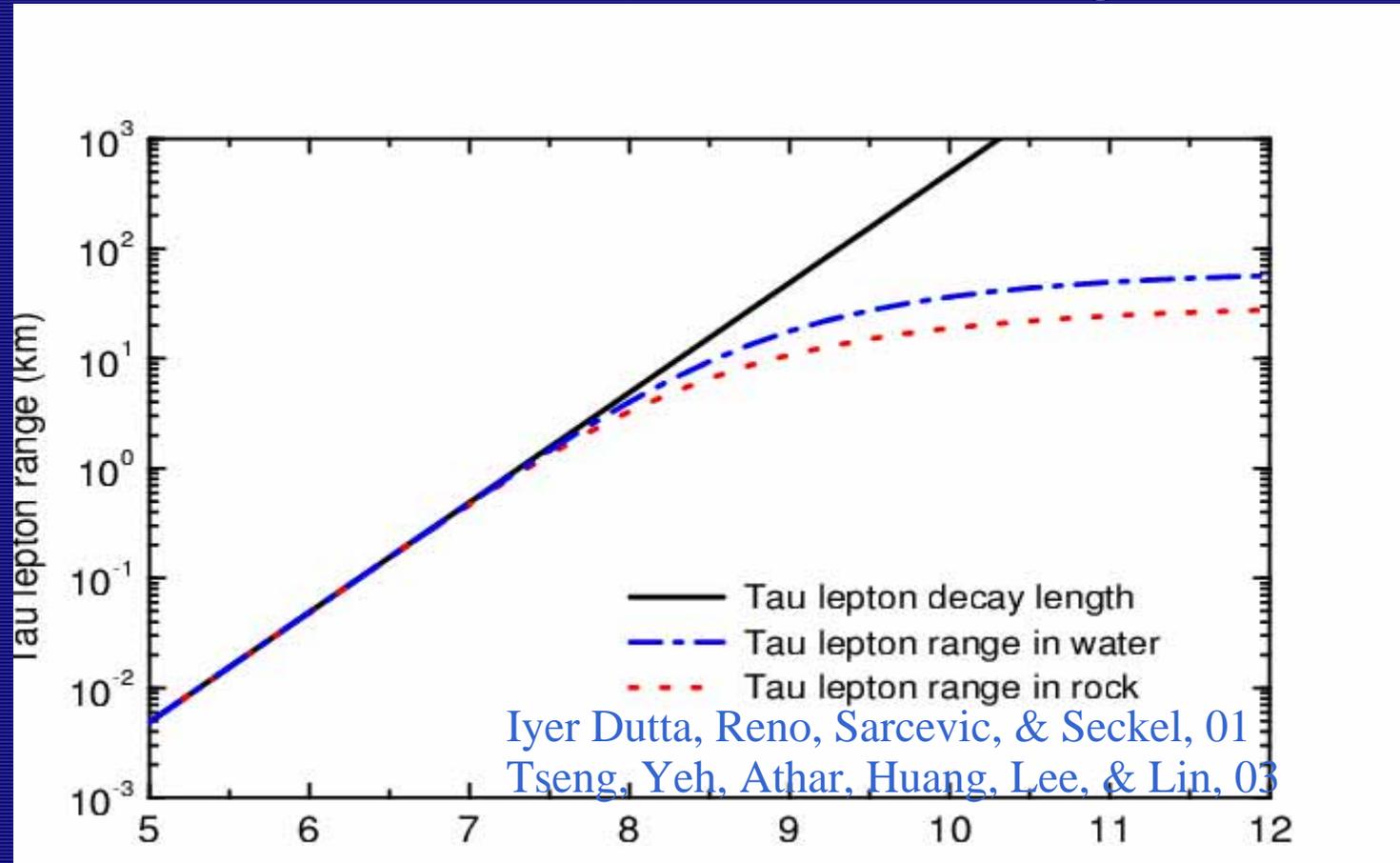
The  $\tau$  energy loss: Iyer Dutta, Reno, Sarcevic, & Seckel, 01

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

$\alpha$  and  $\beta_i$ 's are plotted below.



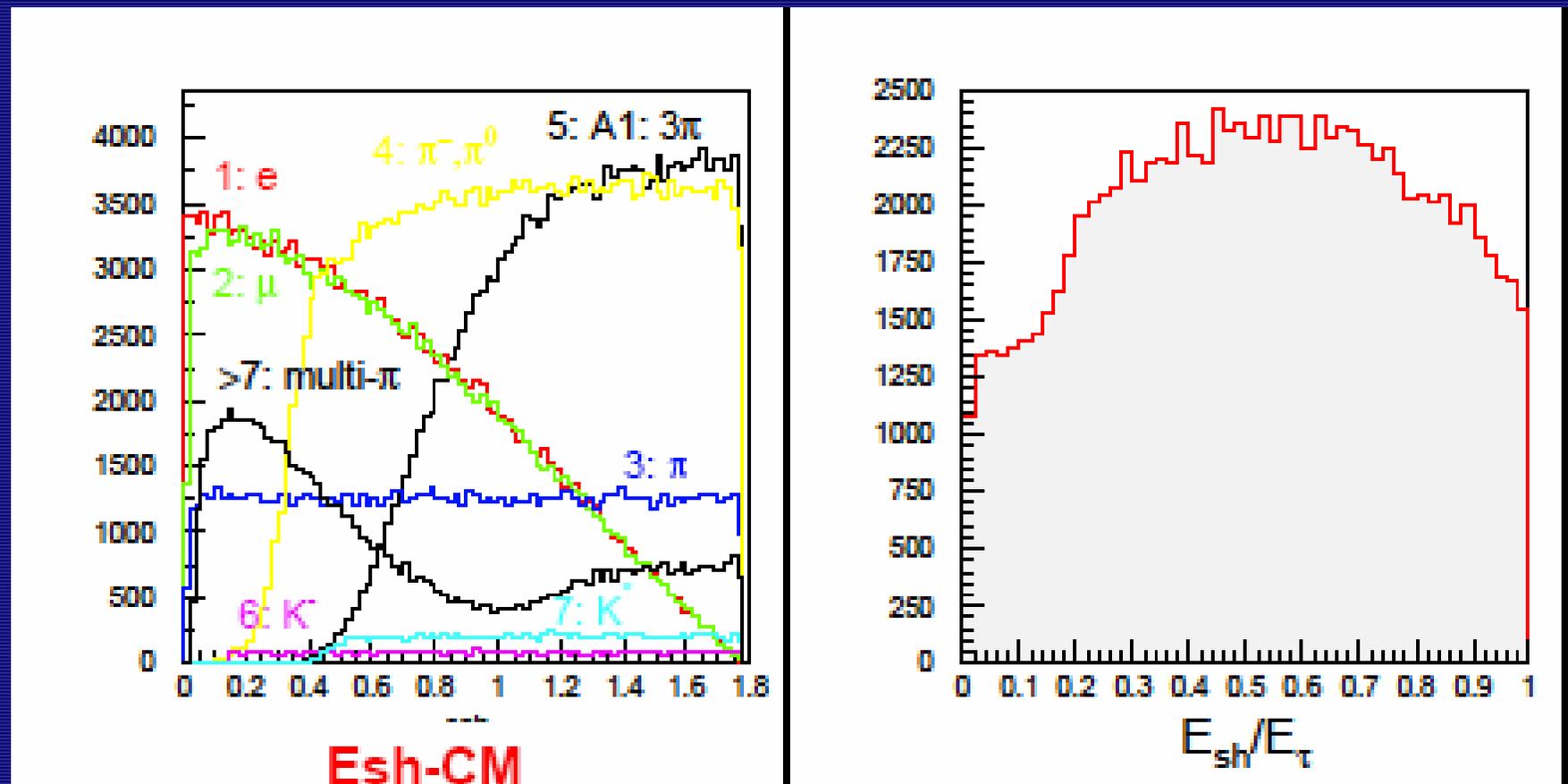
# Tau Lepton Range



$\text{Log}(E/\text{GeV})$

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

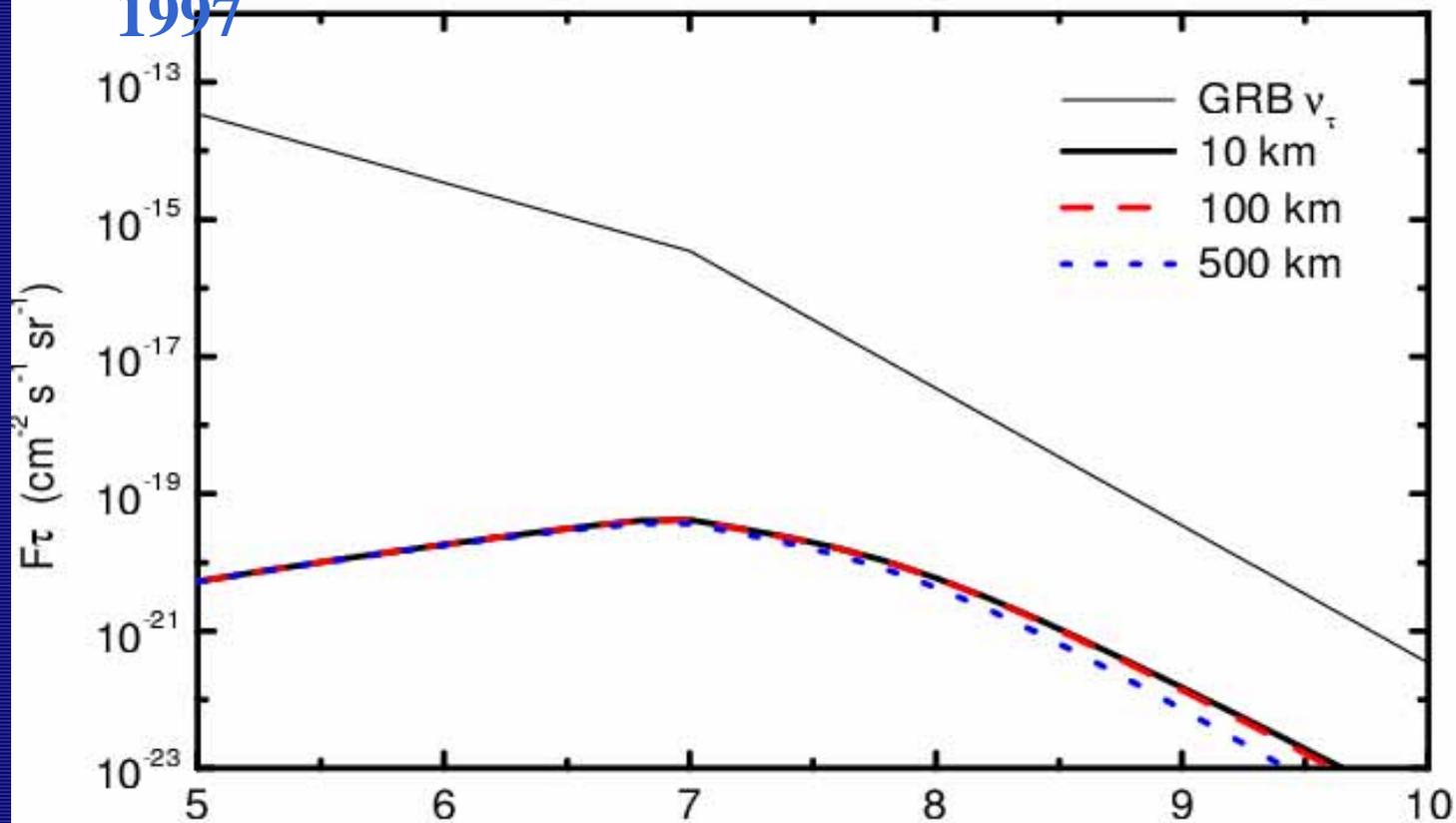
# タウ崩壊とシャワーエネルギー



- $E_{sh} = (\text{ハドロン成分} + \text{EM成分})$  のエネルギー和
- 崩壊粒子質量とタウ偏極度の影響

# GRBからのタウフラックス

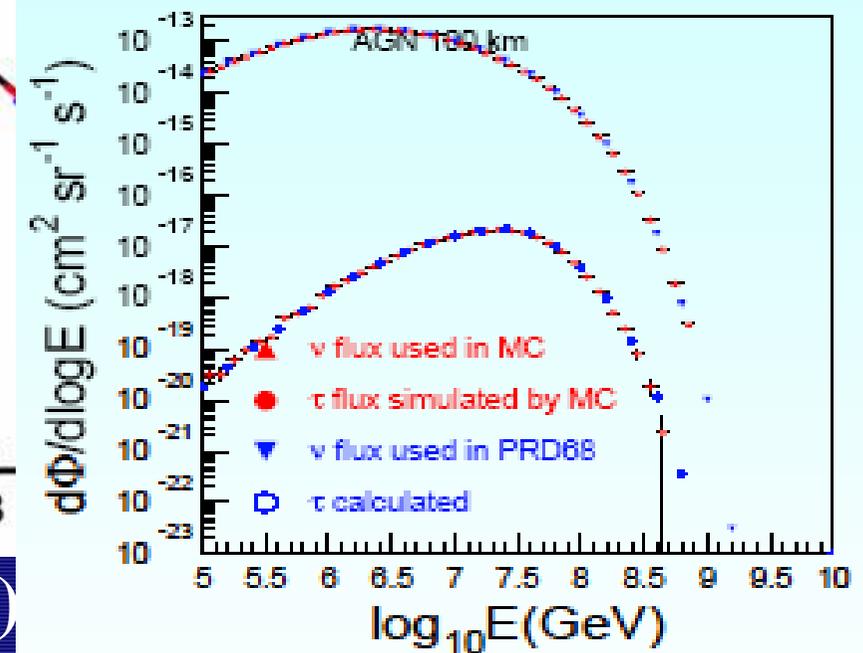
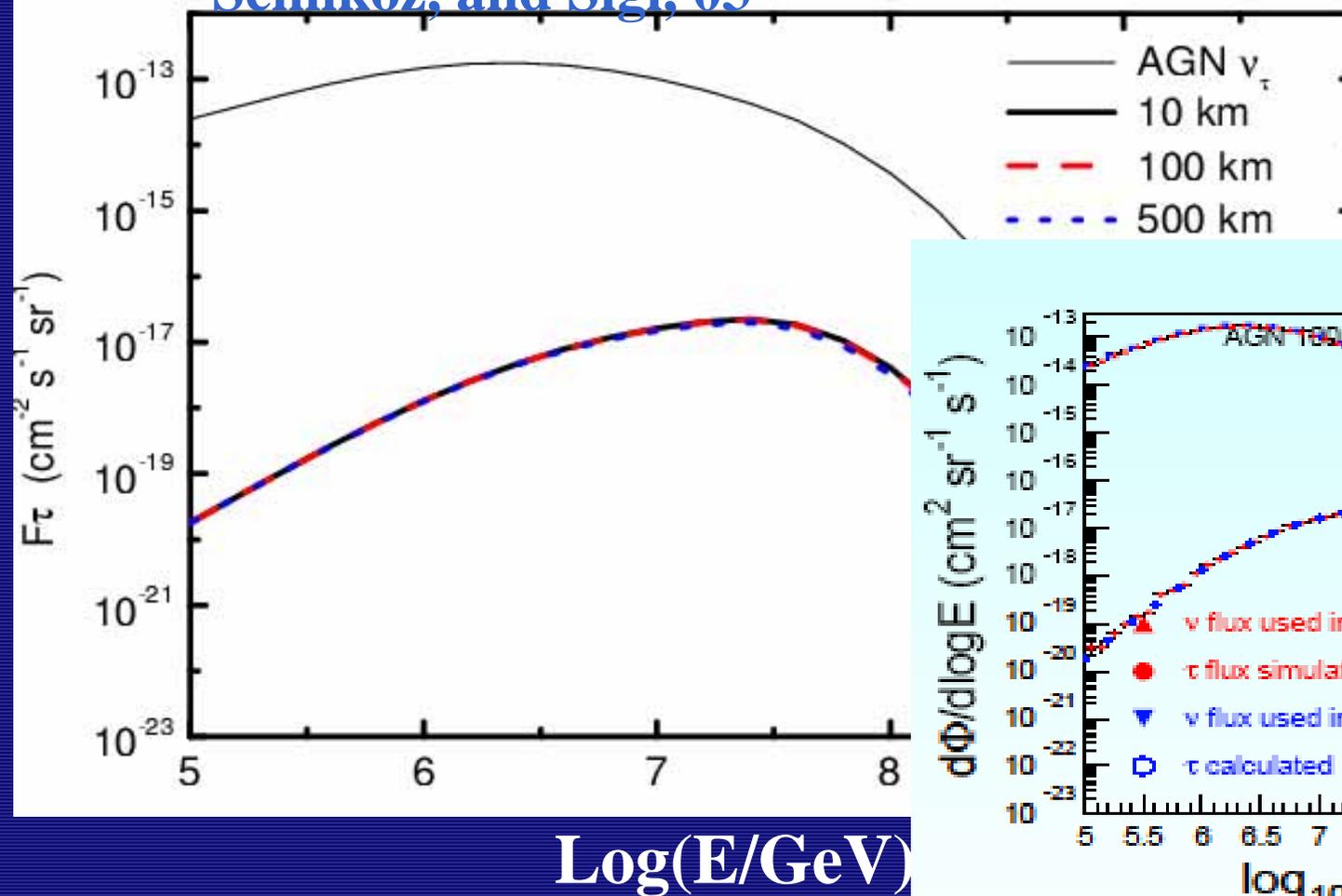
GRB  $\nu_\tau$  flux inferred from Waxman and Bahcall 1997



$\text{Log}(E/\text{GeV})$  Tseng et al., 03

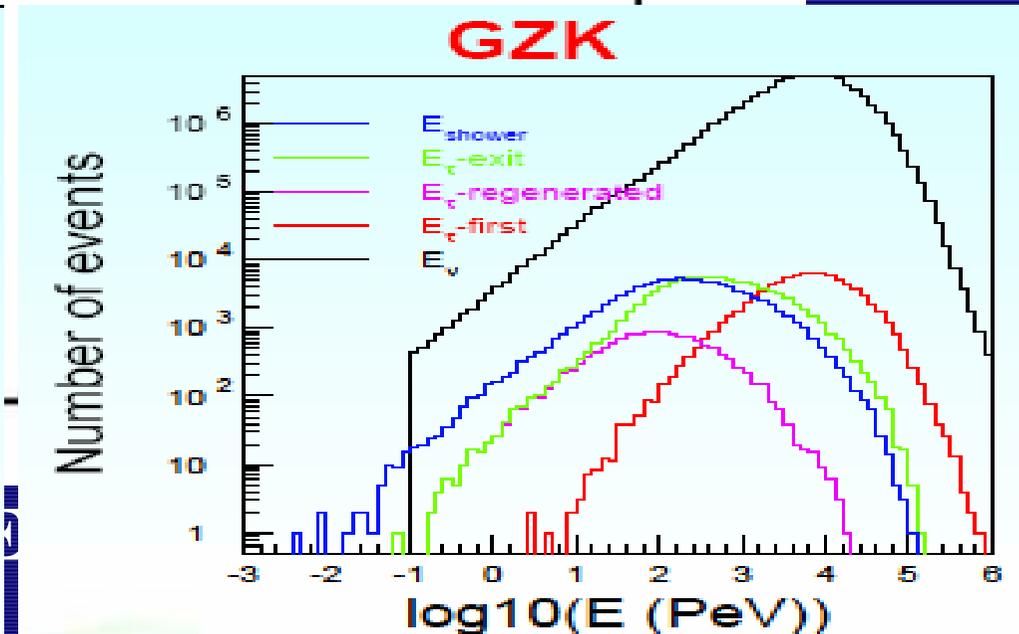
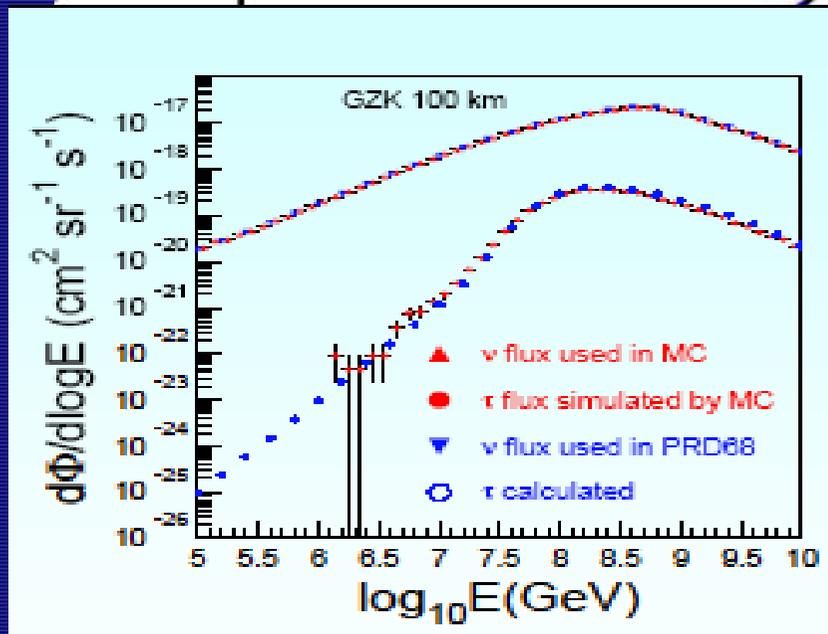
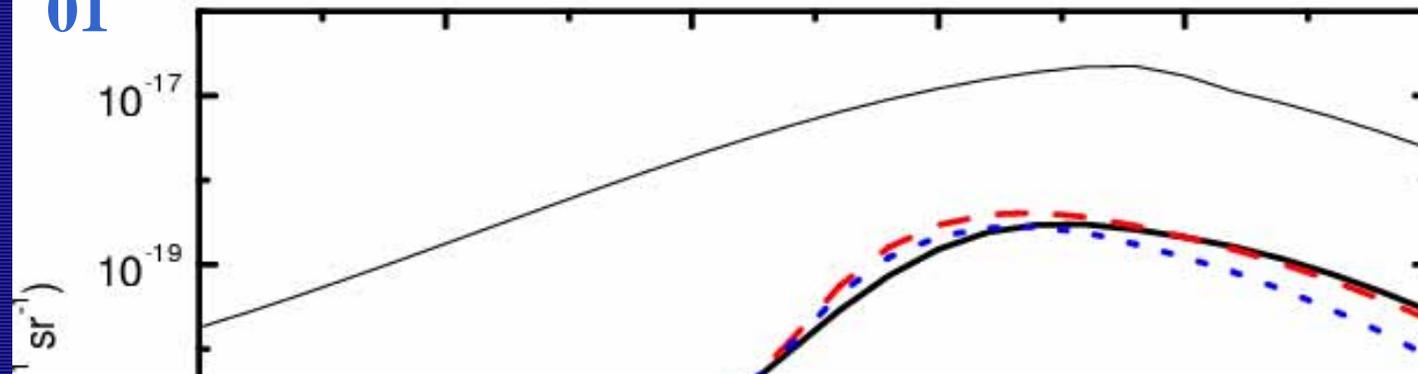
# AGNからのタウフラックス

AGN  $\nu_\tau$  flux inferred from Kalashev, Kuzmin, Semikoz, and Sigl, 03



# GZKからのタウフラックス

GZK  $\nu_\tau$  flux inferred from Engel, Seckel, and Stanev, 01



# Integrated tau lepton flux

in units of  $\text{km}^{-2}\text{yr}^{-1}\text{sr}^{-1}$

by G.-L.Lin

| Energy & flux               | AGN        | GRB                  | GZK                  |
|-----------------------------|------------|----------------------|----------------------|
| $10^{15}\text{-}10^{16}$ eV | <u>2.2</u> | $9.6 \times 10^{-3}$ | $7.4 \times 10^{-5}$ |
| $10^{16}\text{-}10^{17}$ eV | 4.9        | $7.1 \times 10^{-3}$ | $1.1 \times 10^{-2}$ |
| $10^{17}\text{-}10^{18}$ eV | 0.2        | $5.4 \times 10^{-4}$ | $8.2 \times 10^{-2}$ |
| $10^{18}\text{-}10^{19}$ eV |            | $1.1 \times 10^{-5}$ | $3.3 \times 10^{-2}$ |

W resonance (AGN) 0.08

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

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

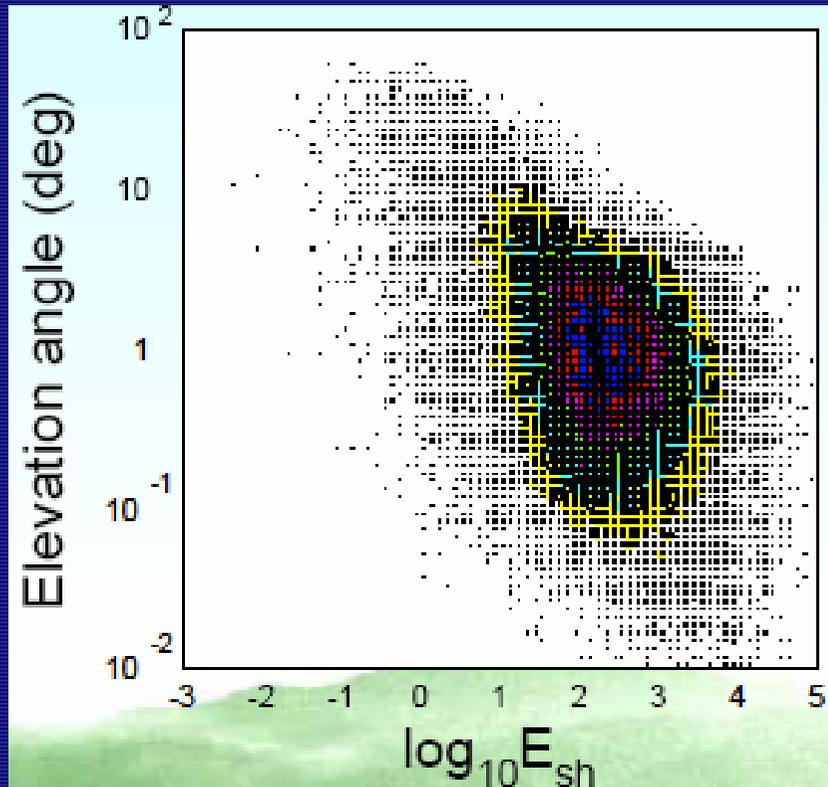
| Energy & Aperture<br>(km <sup>2</sup> sr) | AGN | GRB   | GZK |
|---|-----|-------|-----|
| 10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup> eV     | 4.5 | 1000  |     |
| 10 <sup>16</sup> -10 <sup>17</sup> eV     | 2.0 | 1400  | 910 |
| 10 <sup>17</sup> -10 <sup>18</sup> eV     | 50  | 19000 | 120 |
| 10 <sup>18</sup> -10 <sup>19</sup> eV     |     |       | 290 |

確実なニュートリノ  
起源

GRB- , GZK- 検出 => 1000 km<sup>2</sup>sr クラスの検出器

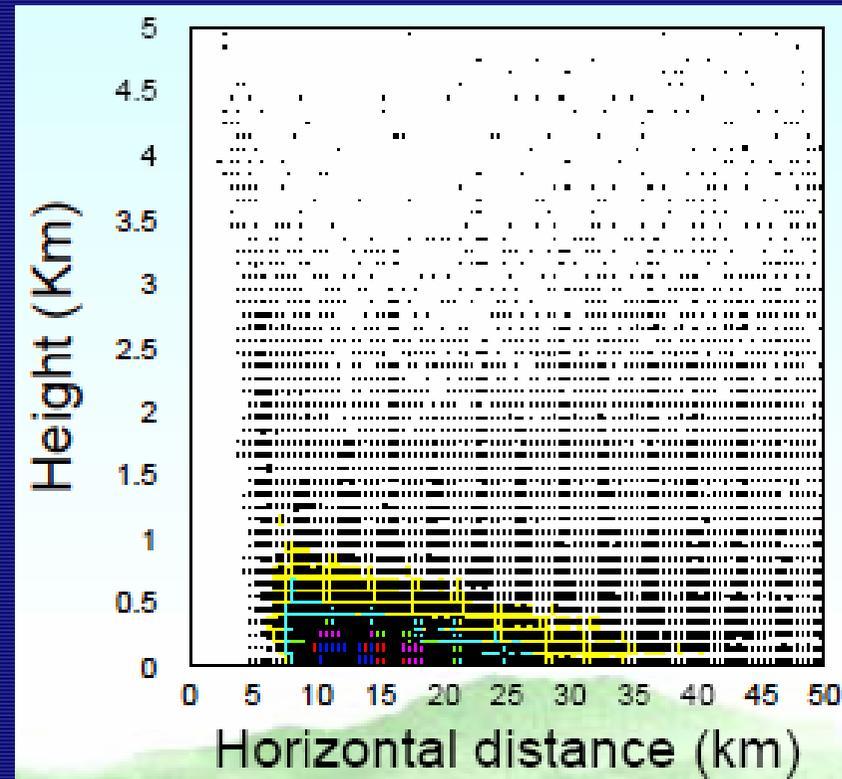
# GZK 出現タウの“姿”

水平面から出現する角度



- Mostly  $\varepsilon < 8^\circ$
- mean  $\varepsilon \sim 2^\circ$ ,
- re-generated  $\tau$  could come out at larger angle

シャワー最大発達的位置



- Mostly at  $H < 500$  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

# GRBタウ検出に関するコメント

- Ashraの分角解像度=>
  - 地殻/山からの出現事例の効率的で確実な同定
- Ashraのチェレンコフ光検出=> 低エネルギー側
  - 40 km遠方 = 25 km (最大発達) + 15 km (大気減衰長)
  - 検出立体角小
- Ashraの蛍光検出=> 高エネルギー側
  - 1 ~ 30 km遠方での出現事例
  - シャワー軸を横から見る => 検出立体角大
- 大気モニター重要
  - 地面と雲に近いシャワー飛跡

# 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

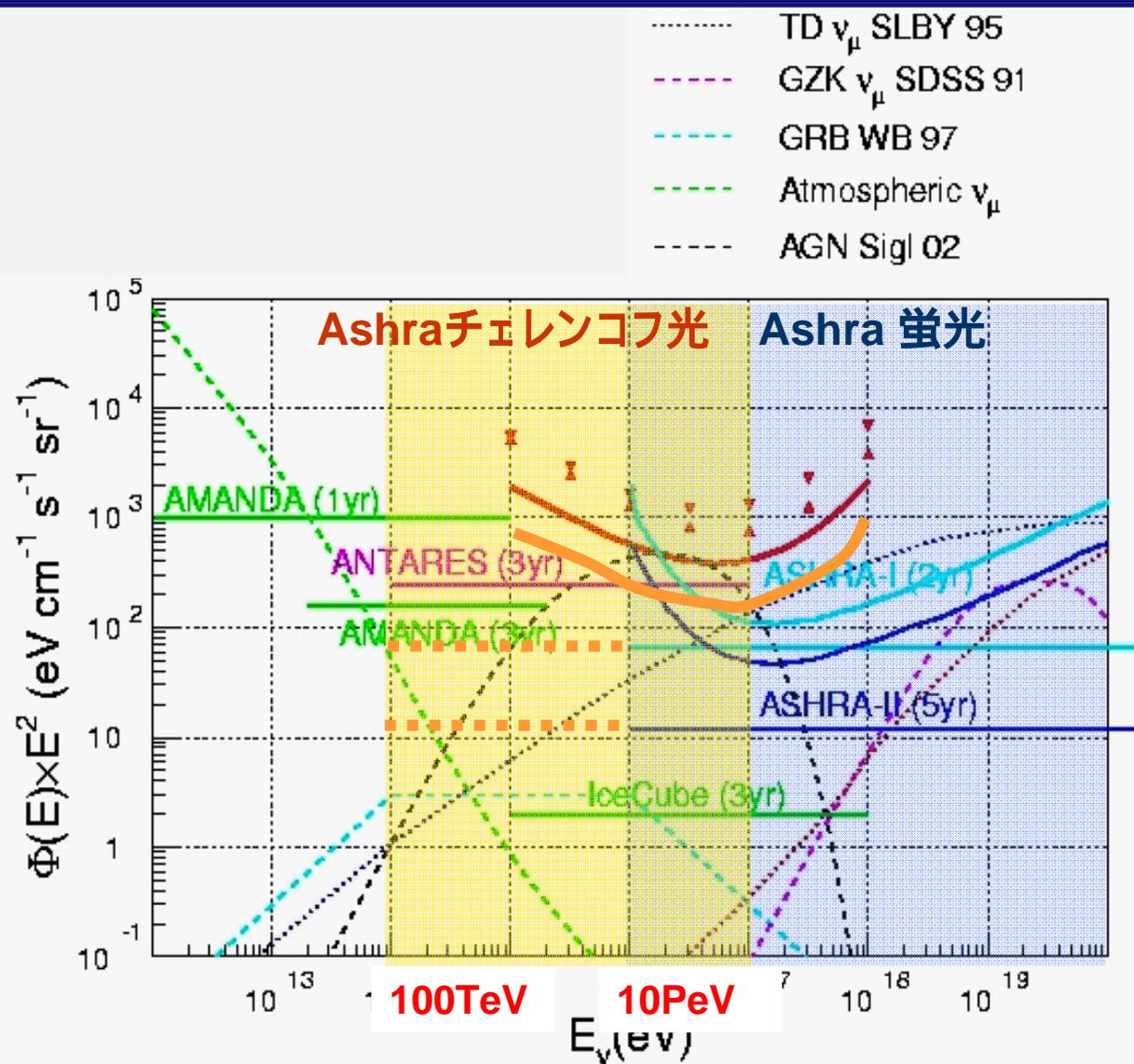
チェレンコフ + 蛍光



100TeV以上の  
エネルギー全域で  
高感度にて探索



- GZK 蛍光で初検出
- GRB チェレンコフで初検出
- AGN スペクトル解析



# まとめ



- **Ashraの先導性:**
  - 広角高精度光学系
    - GRB041211リミット      => 稼動、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      => 稼動、解析進行中
  - 若い力
- **いよいよ本番設置へ:**
  - 入念な調整・校正・搬出前試験のため基盤整備
  - **GZKニュートリノ 確実な初検出**

**皆様の暖かいご支援ご協力を何卒宜しくお願いいたします。**



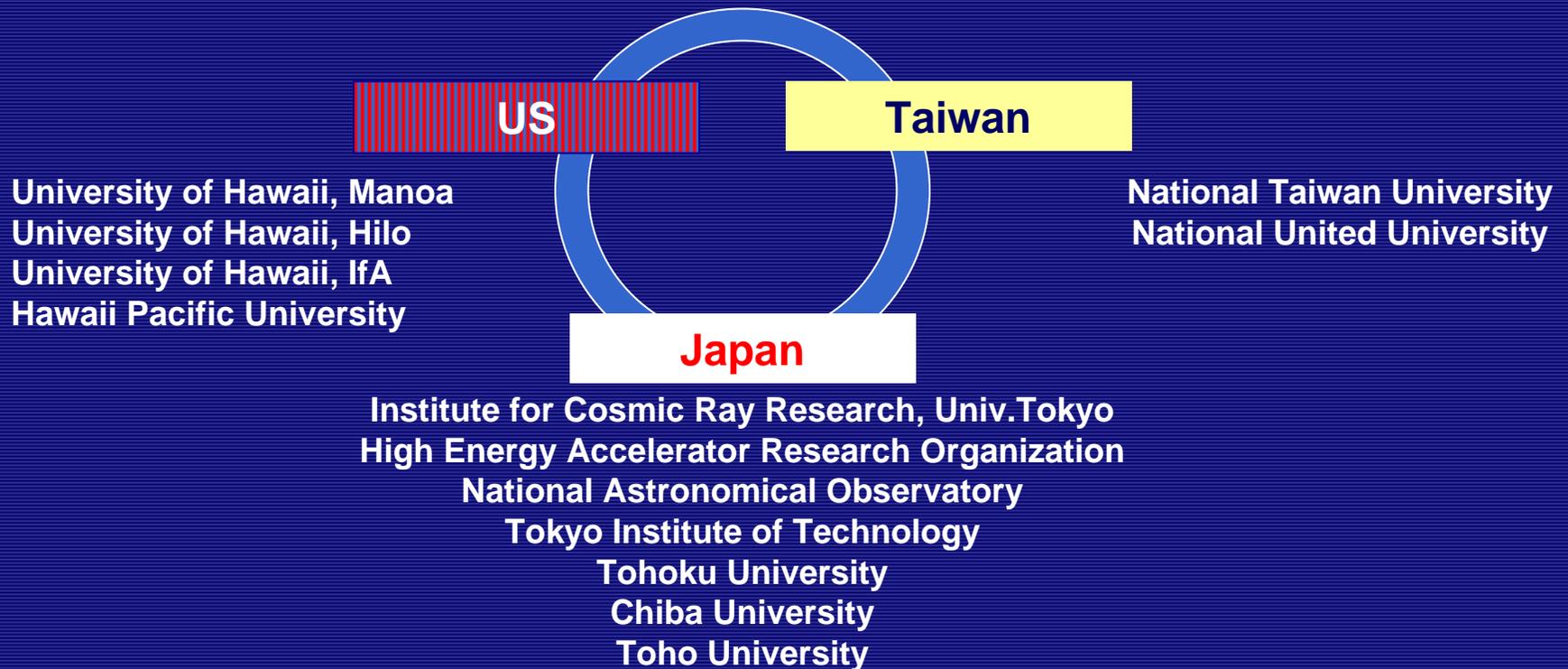
予備



# Ashra Collaboration

under development

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, J.Learned,  
N.Manago, T.Masuda, S.Matsuno, K.Noda, S.Ogawa,  
A.Okumura, S.Olsen, K.Sakurazawa, M.Sasaki,  
N.Sugiyama, N.Ujiie, H.Usami, M. Z. Wang,  
Y.Watanabe, S.Yamada, M.Yasuda



# 3. データフロー

GRB990123は、30秒程度で11等から2等以上増光。  
急激に時間変化するものだけを素早く特定したい。

a) 前の画像との差分 計算量の削減目的。最重要。

b) 増光事象のリストアップ、カタログマッチング

c) 複数リストで偽事象を排除

d) 明るさの絶対値情報で判断

アラート

LX200

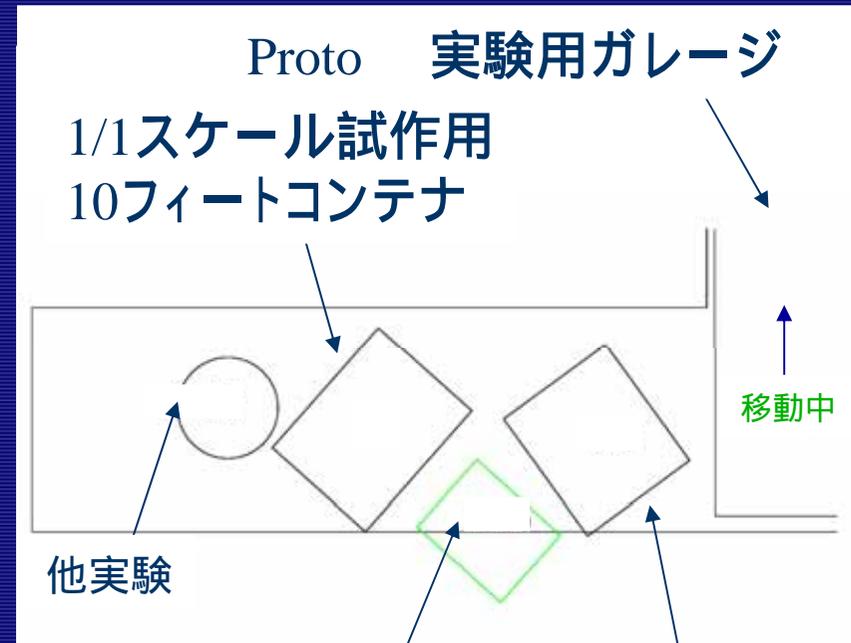
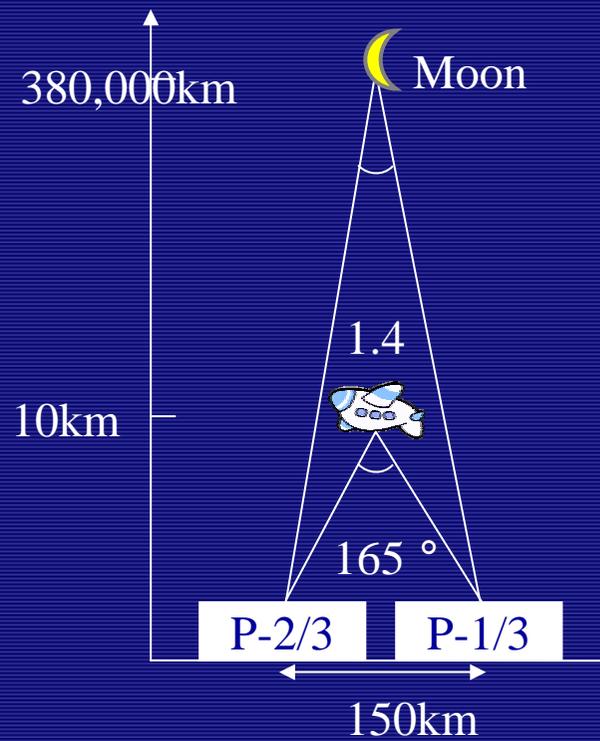
オフライン解析

詳細情報を得て、  
Optical Flash、新星、変光星などを区別。

すでに完成

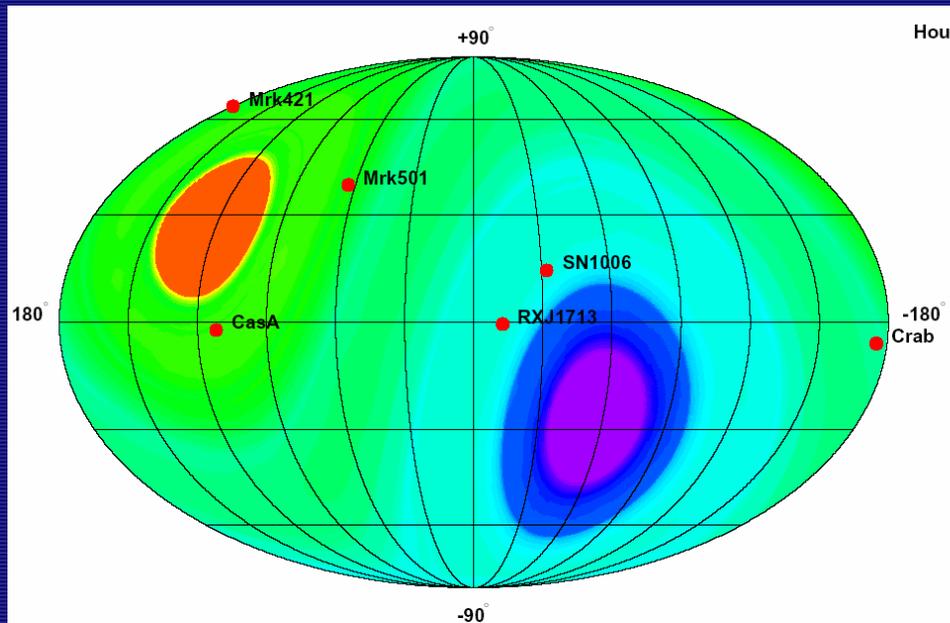
} 現在構築中

# 視差、山頂



# AshraによるTeV- 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



年間観測可能時間の全天分布

