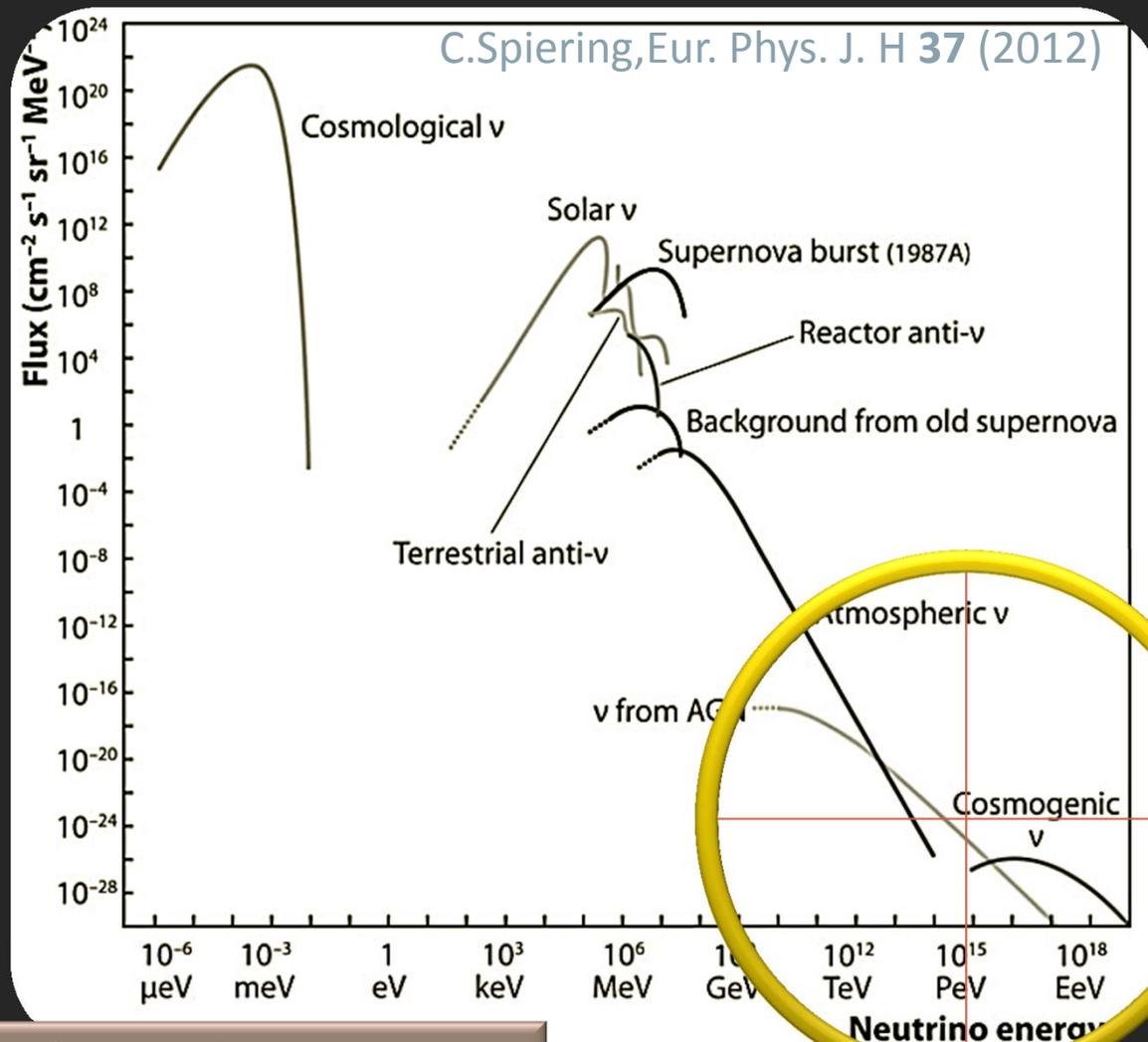


100ギガトン次世代 ニュートリノ望遠鏡計画 (NTA)



佐々木真人



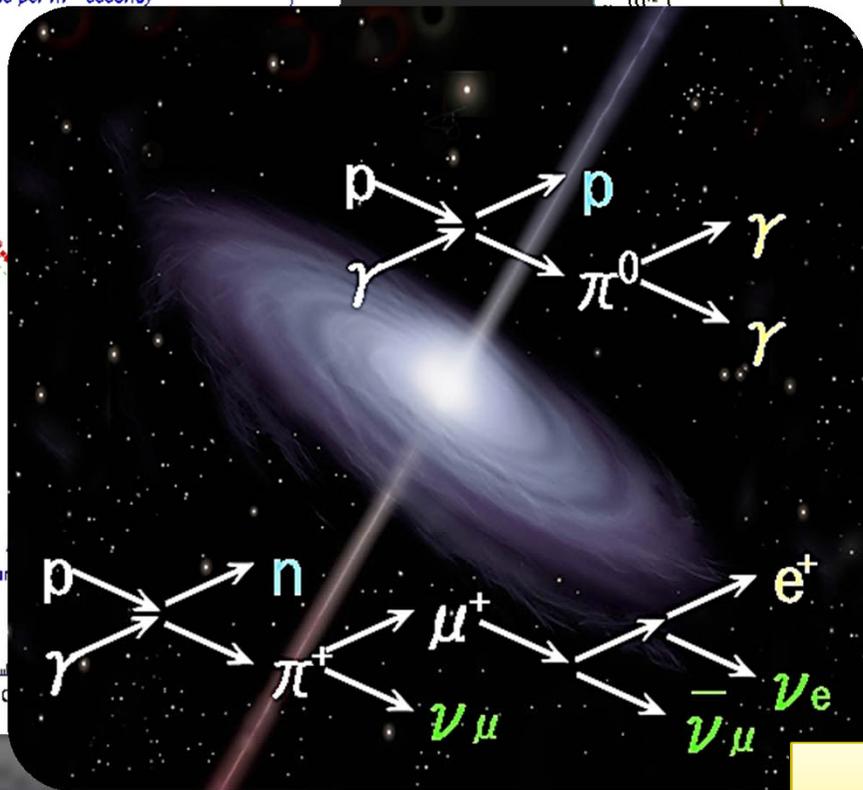
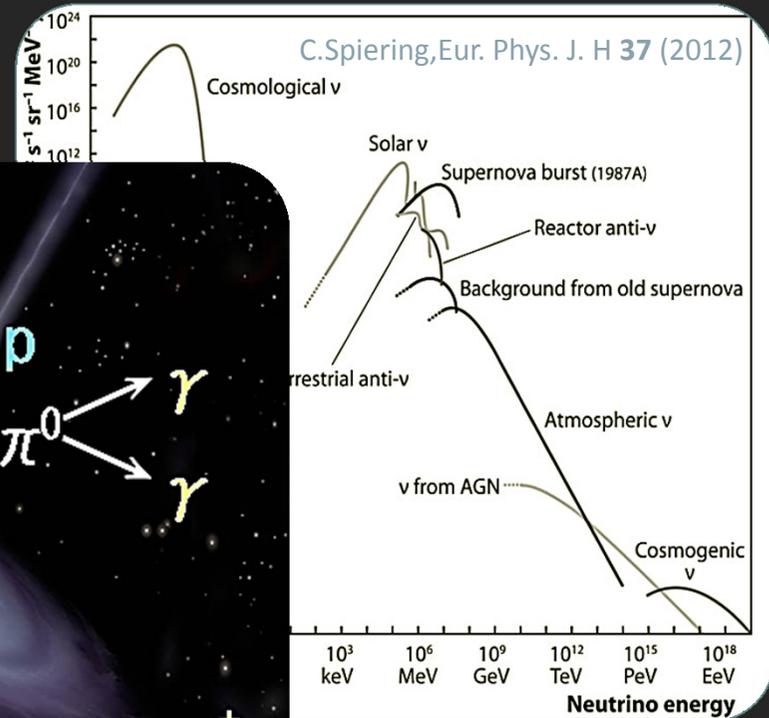
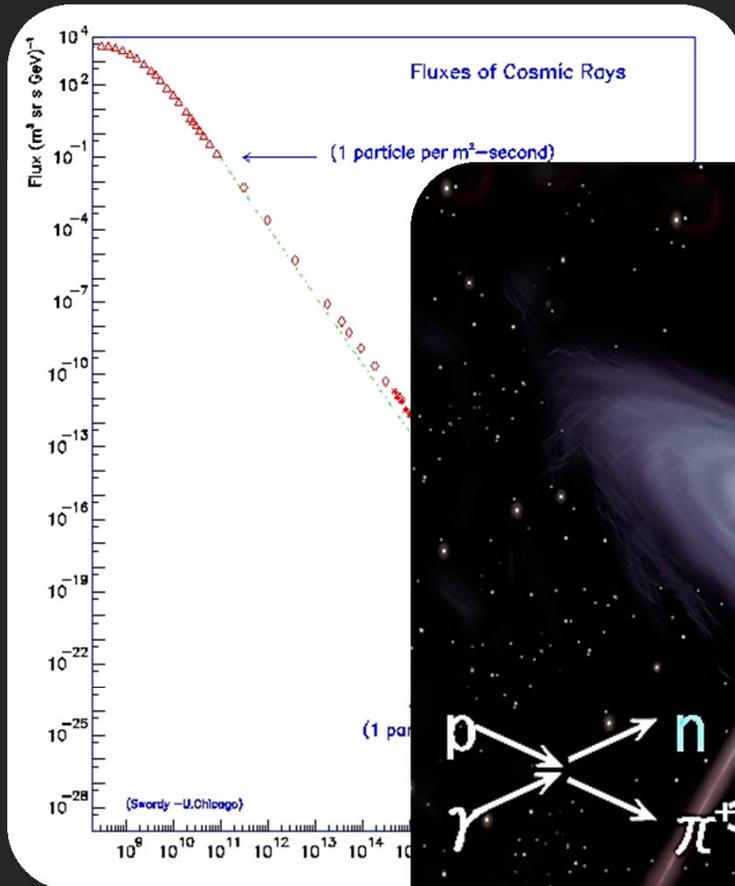


王道の物理

宇宙の新たな窓

大規模な実験を！

重要なエネルギー領域を、できるだけ深く、広く、そして明確に探査すべし
 なのだが...



“多粒子天文”

CR Link

“宇宙の素粒子実験”

Neutrino Telescope Array (NTA)

目標基本仕様

- 実験目的: $\text{HE}\nu$ 天体の近傍広域探査
- 検出方法: 地球かすりタウシャワー撮像法
- 検出領域: PeV-EeV
- 即時感度: ν 標的 100ギガトン-Weq.
- 探査深度: $z = 0.1-0.15$ (20億光年) 標準GRB ν に対し。
- 探査視野: 高度 30° \times 方位 $360^\circ = 2\pi \times 0.5$ sr
- 方向精度: $< 0.2^\circ$ (チェレンコフ光単眼撮像の最悪例)
- 探査効率: 10-20% (好天かつ月のない夜)

日・米・台の代表によるIEBが国際共同の拡大推進中

NTAの由来

ICRR-2000 サテライトシンポジウム

「高エネルギー宇宙の総合的理解」

多波長観測から多粒子観測へ 高エネルギーニュートリノ

宇宙線望遠鏡計画改良案(NTA)の概要

2002年1月

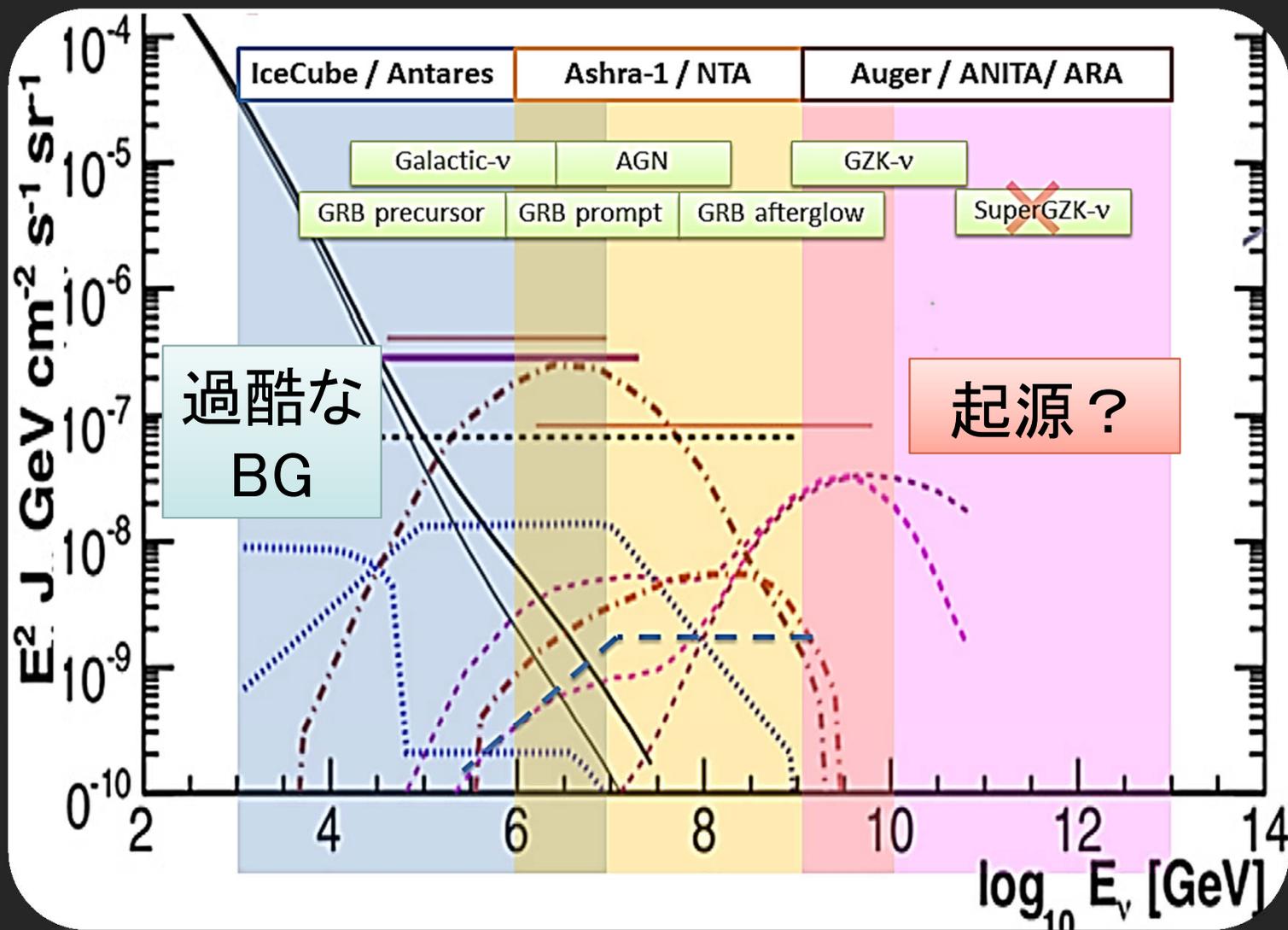
東京大学宇宙線研究所

佐々木 真人

1. はじめに

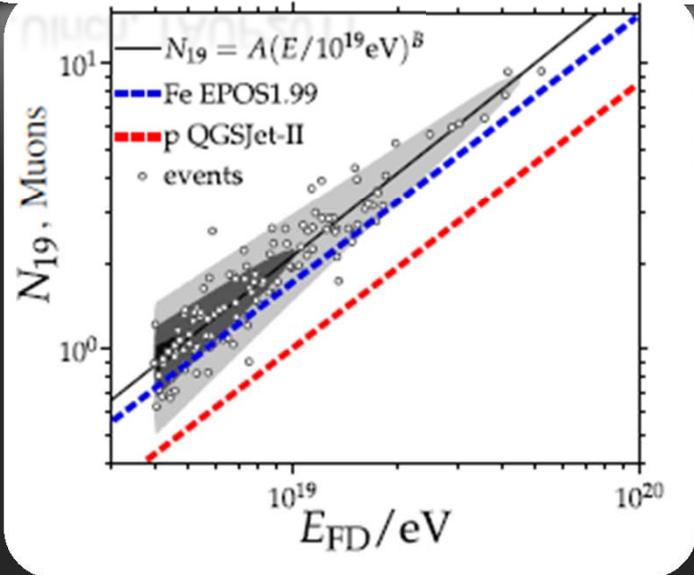
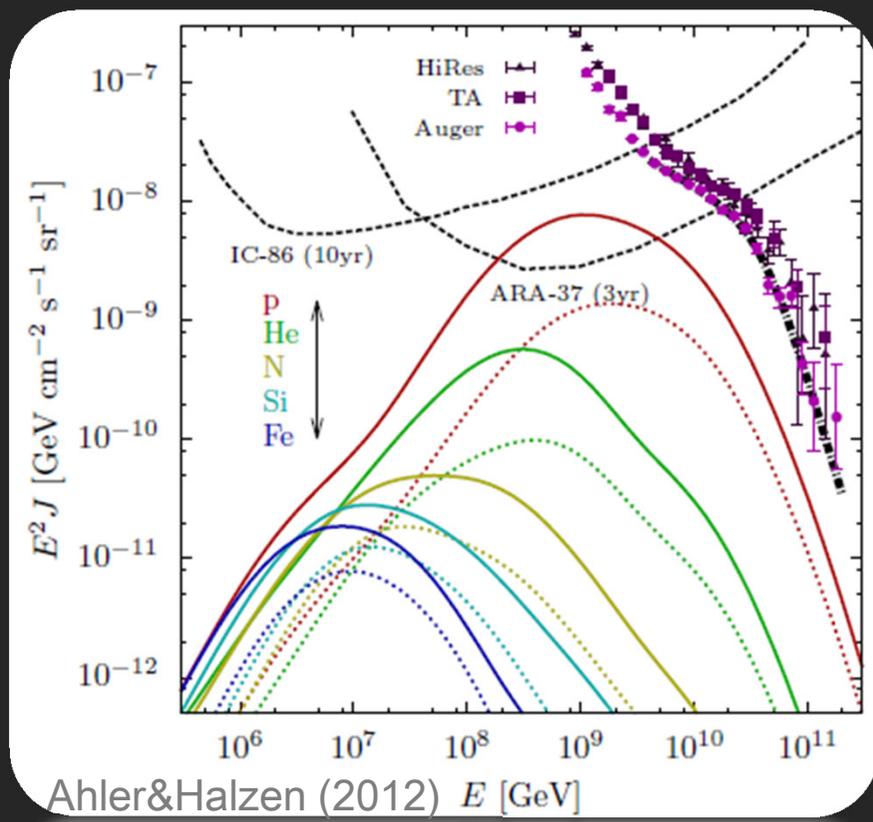
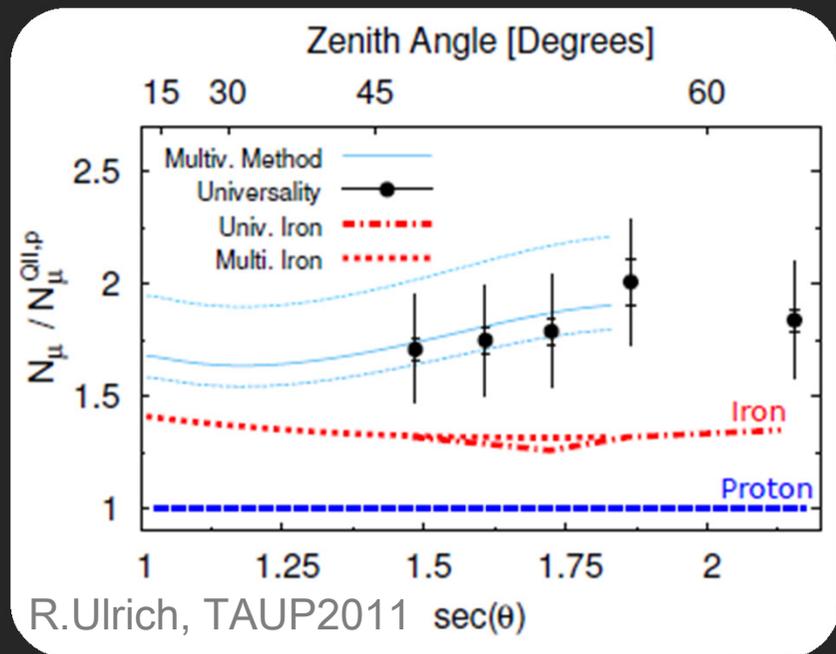
本稿では宇宙線望遠鏡計画(TA)とその現状を振り返り、その問題点を明らかにして、抜本的な基本設計上の改善策を提案する。

ν -Objects, Experiments, Energy



PeV-EeV ν ⇒ クリーン & “普通の” 加速天体

POA μ Rich Results & Cosmogenic ν



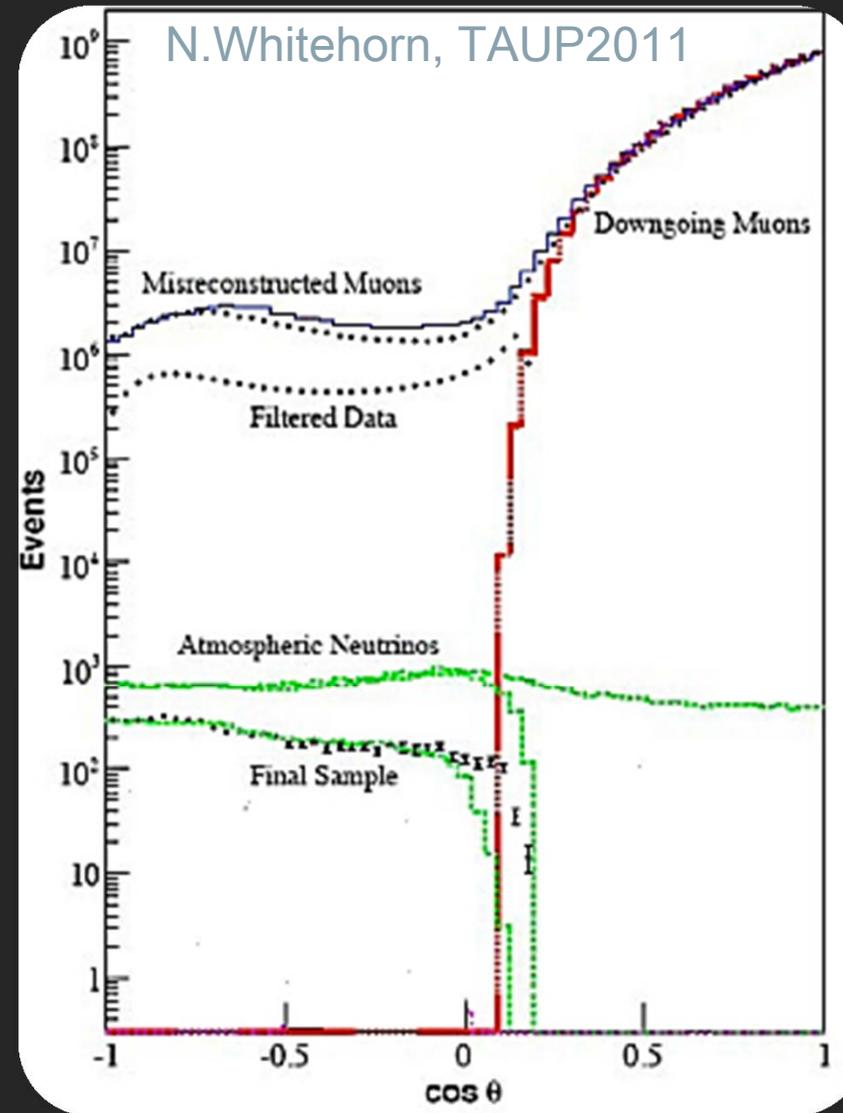
重い核種？ \Rightarrow ν 流束不定

IceCube BG Condition

Surface: 1 cm^{-2}
 minute^{-1}

In ice: 2800 Hz
compared to 1 neutrino
per 10 minutes

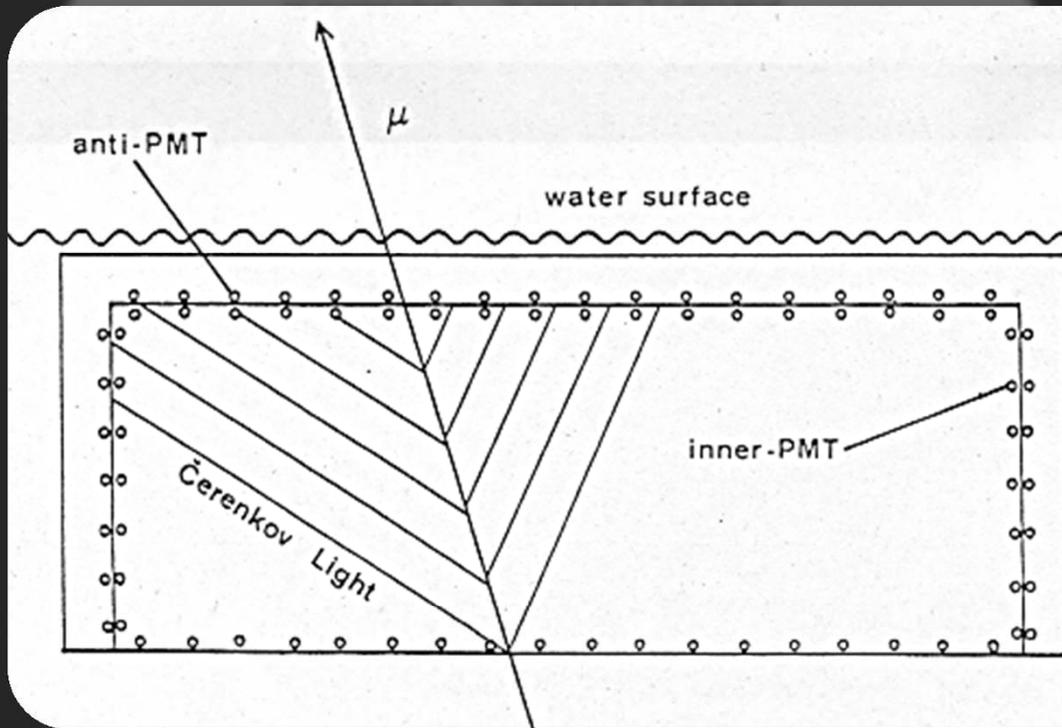
→ requires 10^6
background rejection



Water Cherenkov HE ν Detector

Proposal for a Large Area Water Cherenkov Detector
Dedicated to ν and γ -ray Astrophysics
(LENA)

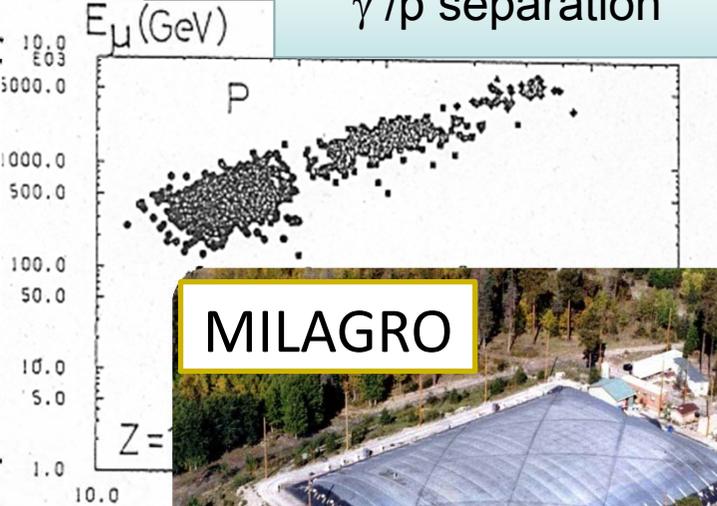
M.SASAKI, K.KAWAGOE, T.KIFUNE*, F.KAKIMOTO**,
M.KOSHIBA***, S.ORITO, J.TESIMA**



PROCEEDINGS OF THE SECOND WORKSHOP
ON ELEMENTARY-PARTICLE PICTURE OF THE UNIVERSE
KEK, February 4-6, 1988



γ / p separation



MILAGRO



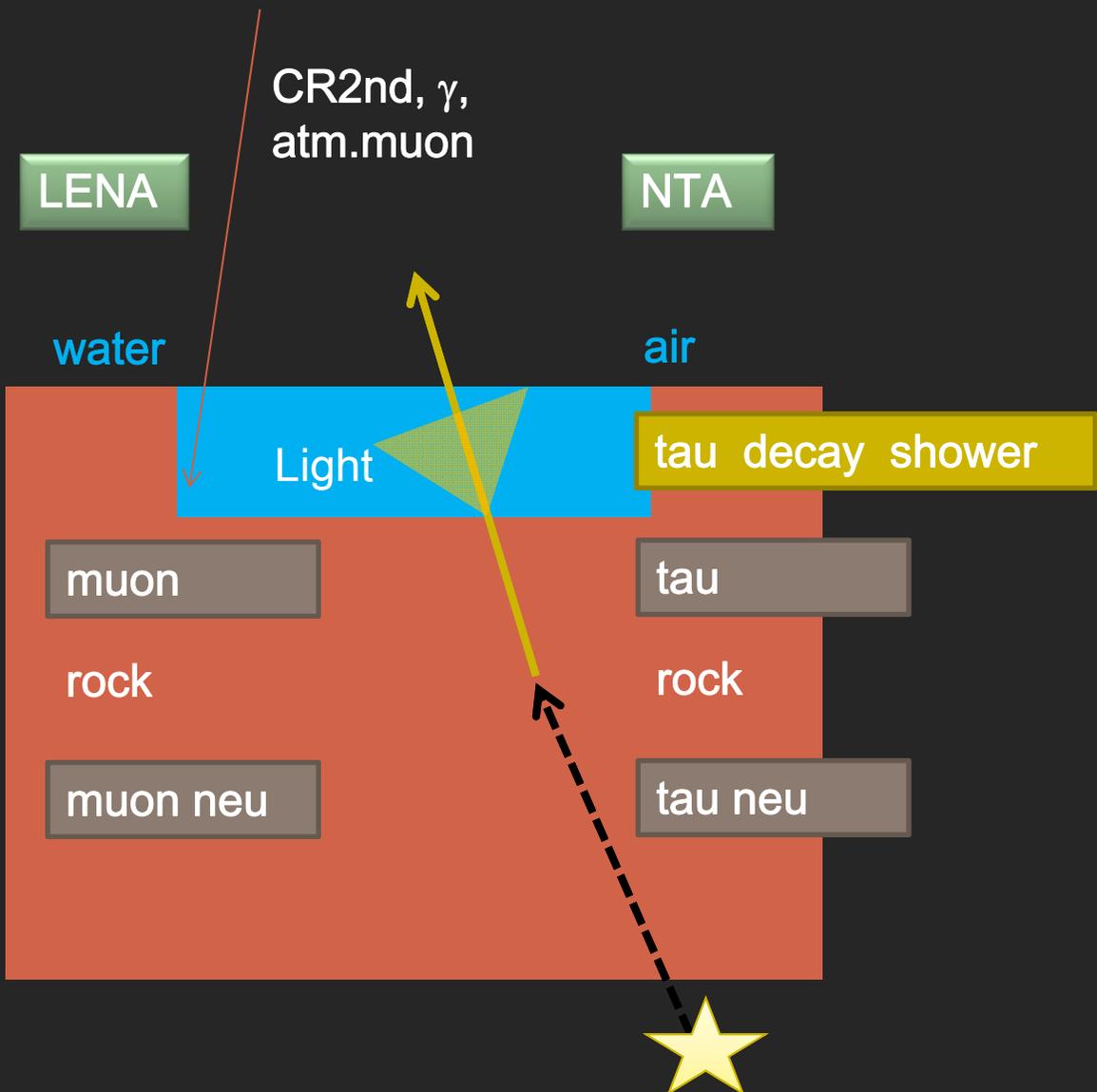
Detection Principle:
Water&Mu vs Air&Tau

Light Emitter

Charged Lepton

Lepton Converter

Neutrino Flavor



Target Mass ~ $\langle \text{area} \rangle \langle \text{lepton propagation distance} \rangle$ neglecting ν opacity
 \rightarrow yield \times transmittance \times efficiency

荷電レプトンの違いで感度が大きく違う

3段階詳細シミュレーション

1. 地球かすりシミュレーション: $\nu_\tau \rightarrow \tau$

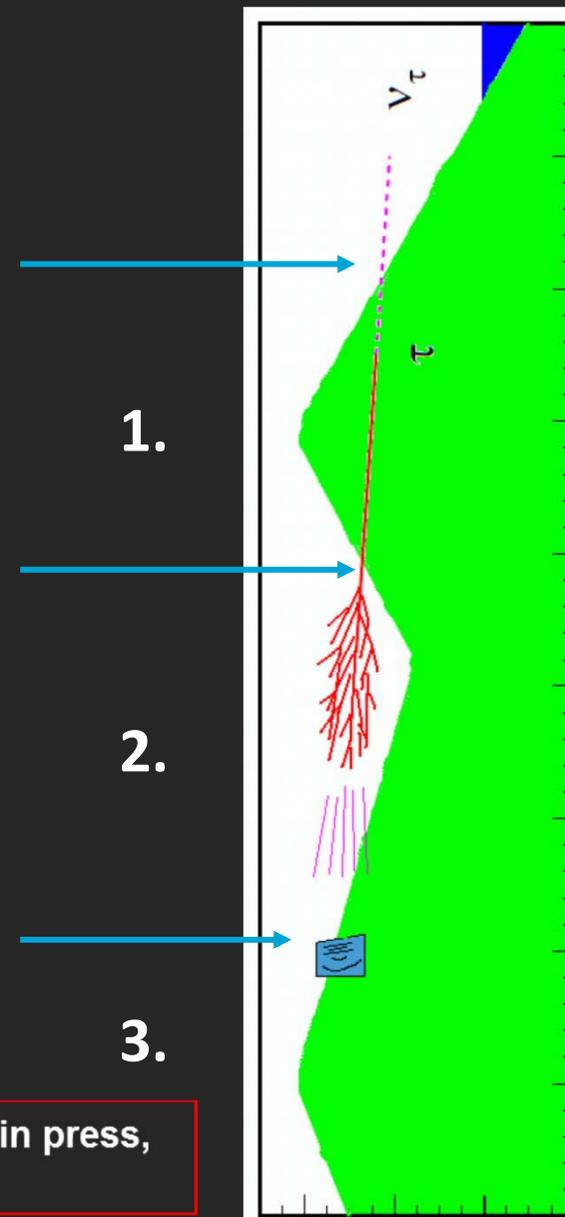
- ニュートリノ荷電相互作用 (CTEQ4)
- 非弾性度 (Gandhi et al.)
- τ 地中でのエネルギー損失 (Dutta et al.)

2. 空気シャワーシミュレーション: $\tau \rightarrow$ チェレンコフ光(大気蛍光)

- τ 崩壊 (TAUOLA)
- 空気シャワー発生 (CORSIKA)

3. 検出器シミュレーション:

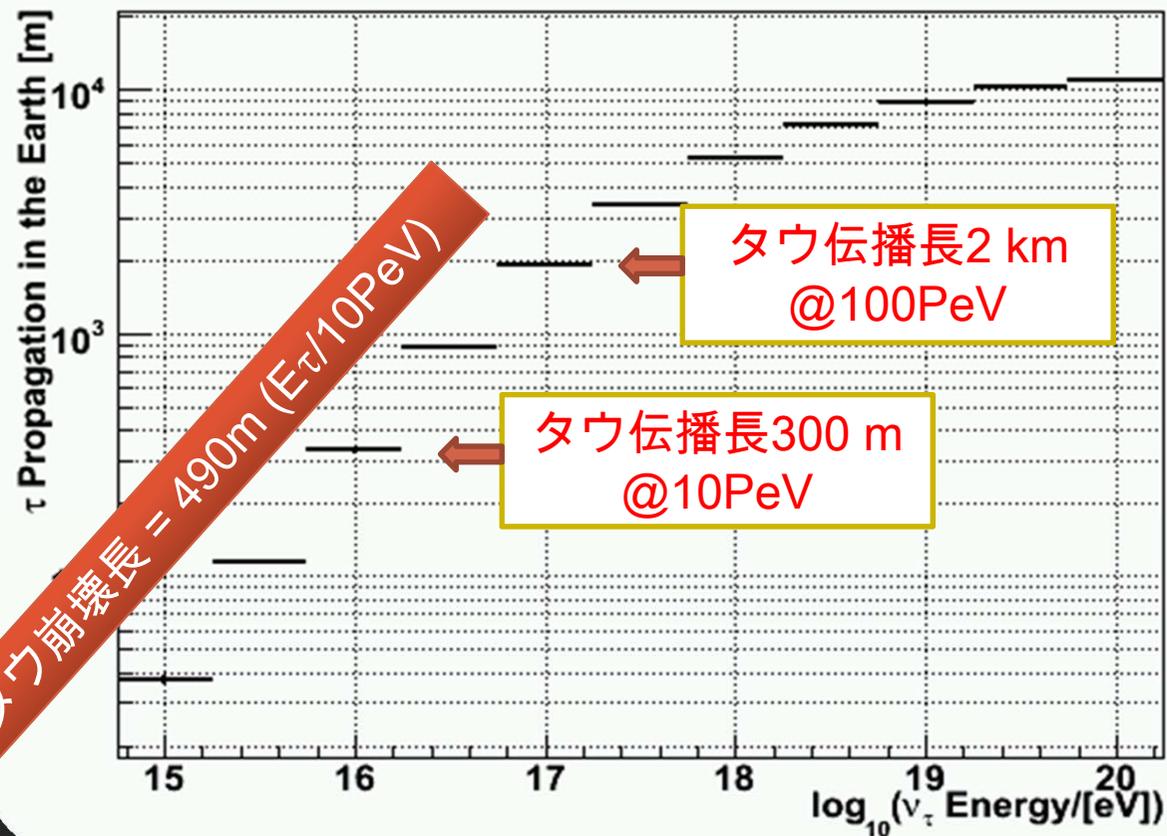
- 集光・光検出
- トリガー判定
- 事象再構成



Astropart. Phys. in press,
arXiv:1202.5656

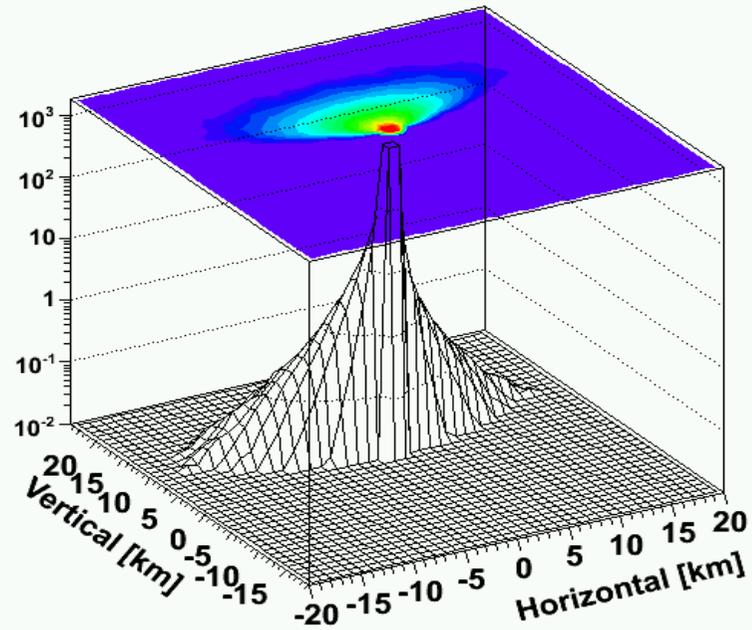
Tau Propagation Length in Rock (MC study)

地表に現れた τ が
地中を走行した距離
のMC平均

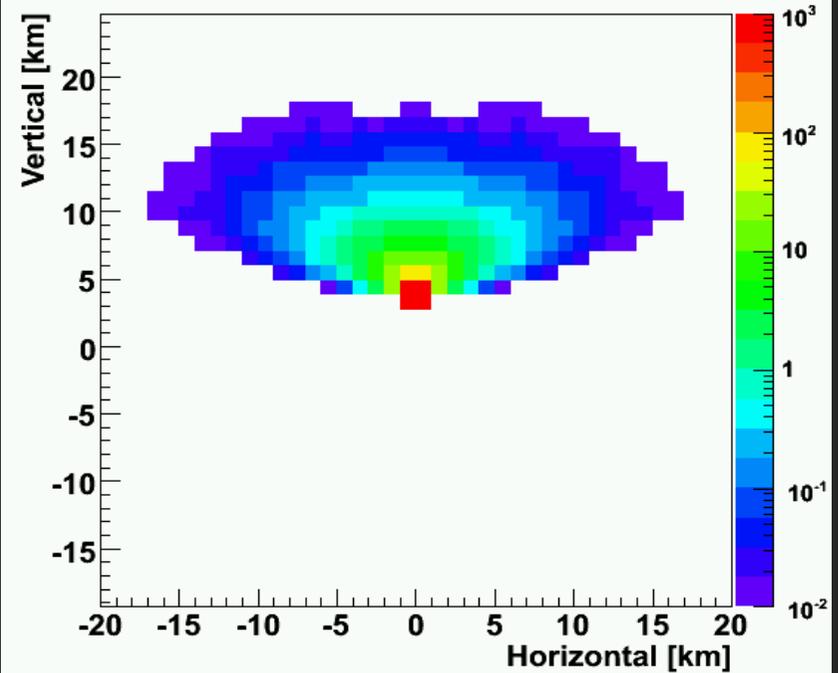


(横軸: ν_τ エネルギー)

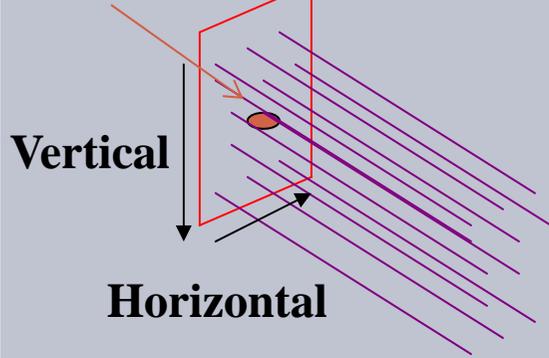
Cherenkov Photon Density [ph/m^2]



Cherenkov Photon Density [ph/m^2]



集光器位置を動かす



タウシャワー
10°吹上げ
シャワー開始
は地表面近く

水平シャワーからのチェレンコフ
光は広範囲(~5km)で検出可能

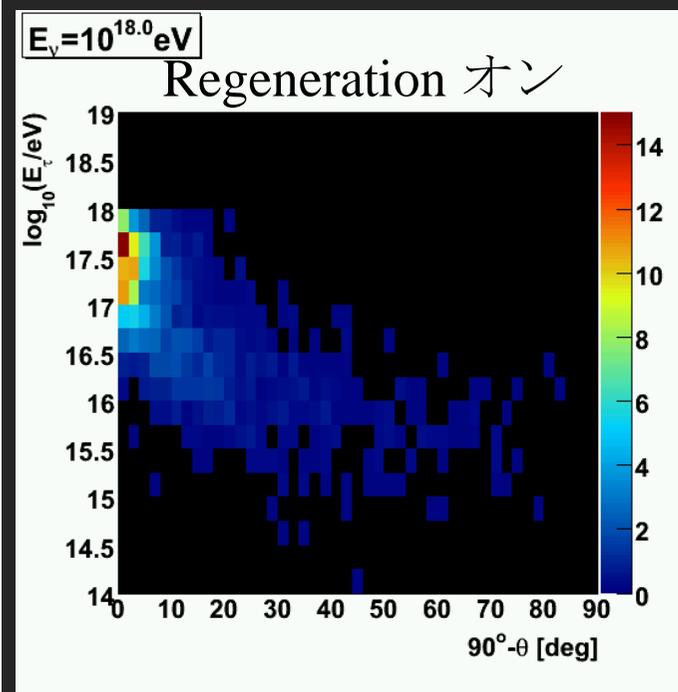
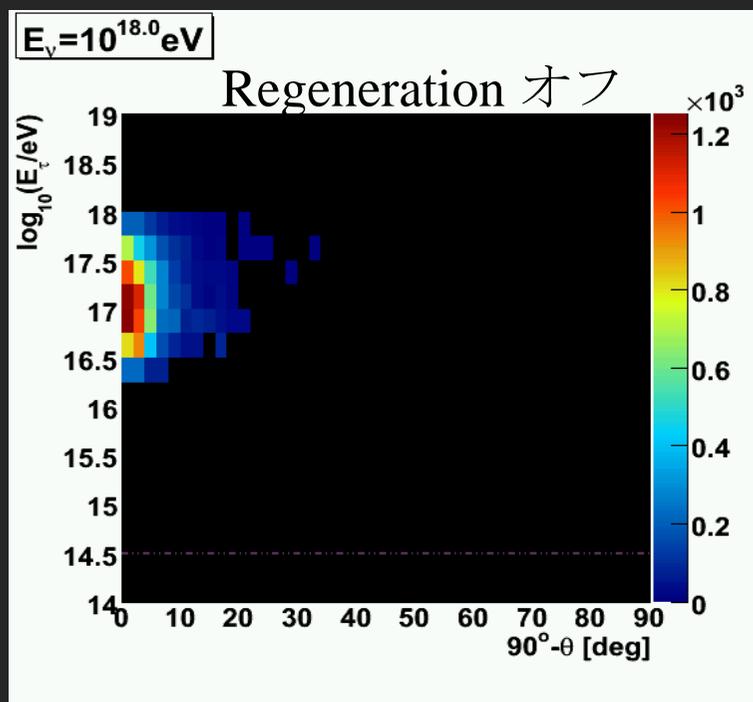
1PeV < E_ν < 10PeV では
チェレンコフ光が蛍光より優勢

Tau Neutrino Regeneration

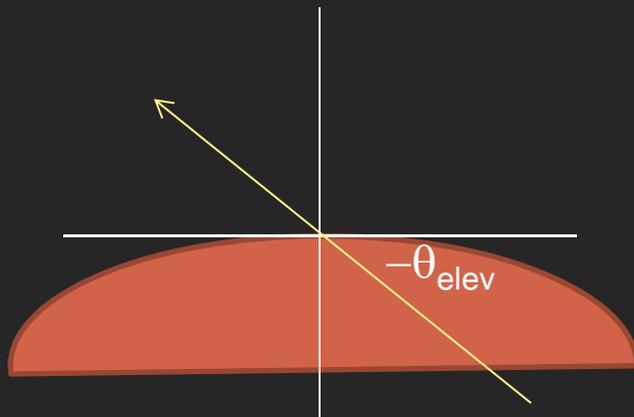


- CC 相互作用ごとに非弾性度分エネルギー損失しながら、レプトン変換を繰り返す
- ⇒ 高いエネルギーの ν_τ を低いエネルギーの ν_τ に“変身”させて検出する。
 - ⇒ 高いエネルギーの ν_τ の地球による遮蔽を軽減できる。
 - ⇒ 検出視野(俯角)を稼ぐことができる
 - ⇒ NTAによる探査範囲が広がる

$E_\nu = 1 \text{ EeV}$
 τ 出現時の
 E_τ vs $-\theta_{\text{elev}}$



地中におけるCC散乱長 (L_{CC}^{ν}) に相当する俯角 ($-\theta_{\text{elev}}$)



E_{ν} (PeV)	L_{CC}^{ν} (10^7g/cm^2)	$-\theta_{\text{elev}}$ (deg)
1	270	32
10	94	16
100	35	5.9
1000	14	2.3

[M.Sasaki et al., Astropart. Phys. 19 (2003) 37]

Regeneration \Rightarrow 低エネルギー化 \Rightarrow 検出立体角度の拡大

τ シャワーの方向精度(検出方法起源)

Astropart. Phys. in press,
arXiv:1202.5656

- 伝播・反応過程での方向変化
 - 素粒子・宇宙線分野で広く用いられ定評あるシミュレーションプログラムにより評価

過程	評価方法	精度@PeV	注釈
ν_τ 荷電相互作用	PYTHIA	< 0.3分角	Pt: W質量で制限
τ 地中伝播	GEANT4 ALLM model	< 1分角	輻射プロセス重要 光核反応のみALLM モデルで評価した
τ 崩壊	TAUOLA	< 1分角	Pt: τ 質量で制限
空気シャワー	CORSIKA	0.1°	AS軸ずれ $\propto E^{-1/2}$

PeV-EeV領域では、 τ シャワーは ν_τ の方向を覚えている

- 事象再構成

- 到来方向決定精度 ⇒ 重要

- 大天頂角宇宙線BG除去
- 超高エネルギーニュートリノ源同定

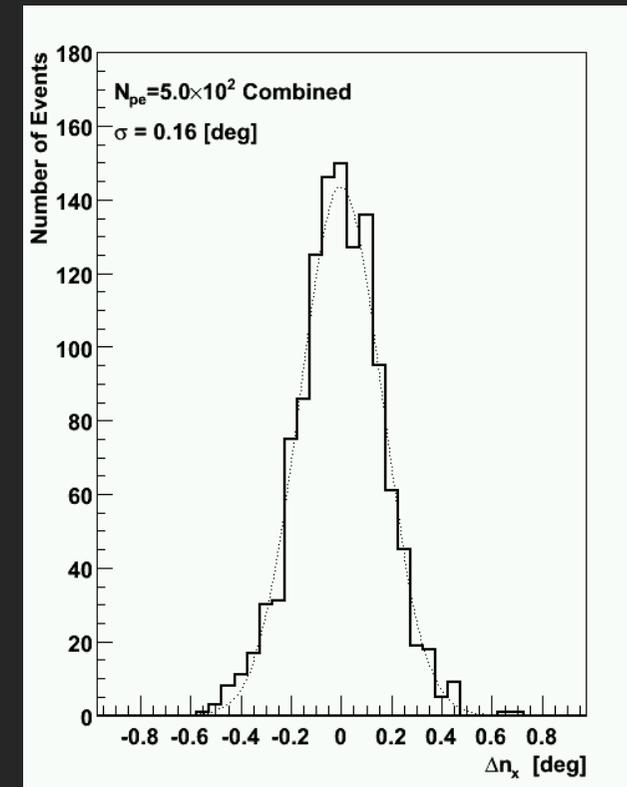
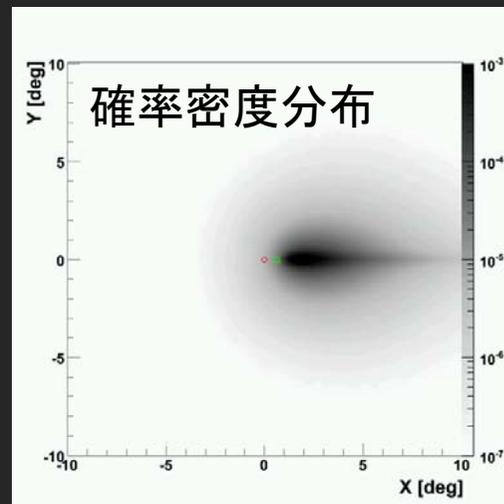
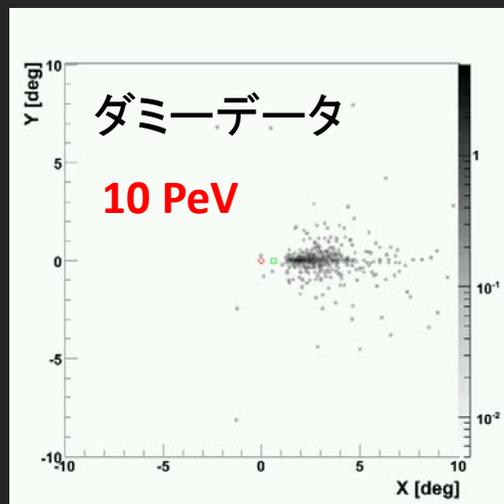
- Likelihood を用いた再構成精度評価

- $\sigma = 0.16^\circ$

⇒ Cherenkov モノ観測でも
高精度方向決定が可能

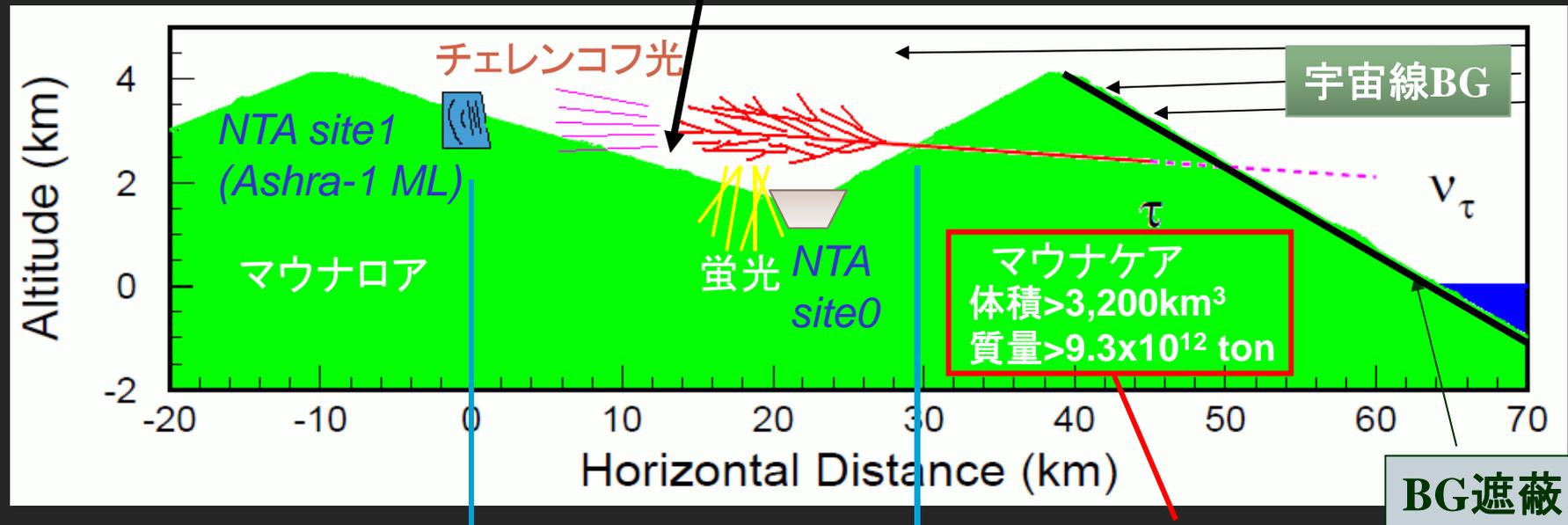
$$L = \sum_i N_{pe}^i \log(p_i).$$

(cf.) E>PeV τ シャワー
の方向精度良好



地球かすり τ シャワー撮像法

シャワーエネルギー測定可 \Rightarrow ν_τ エネルギー再構成



空気シャワー発展に適切な距離: ~30km

大質量標的:
氷~ 10⁴ km³

Ashra-1がこの方法を初めて実用化!

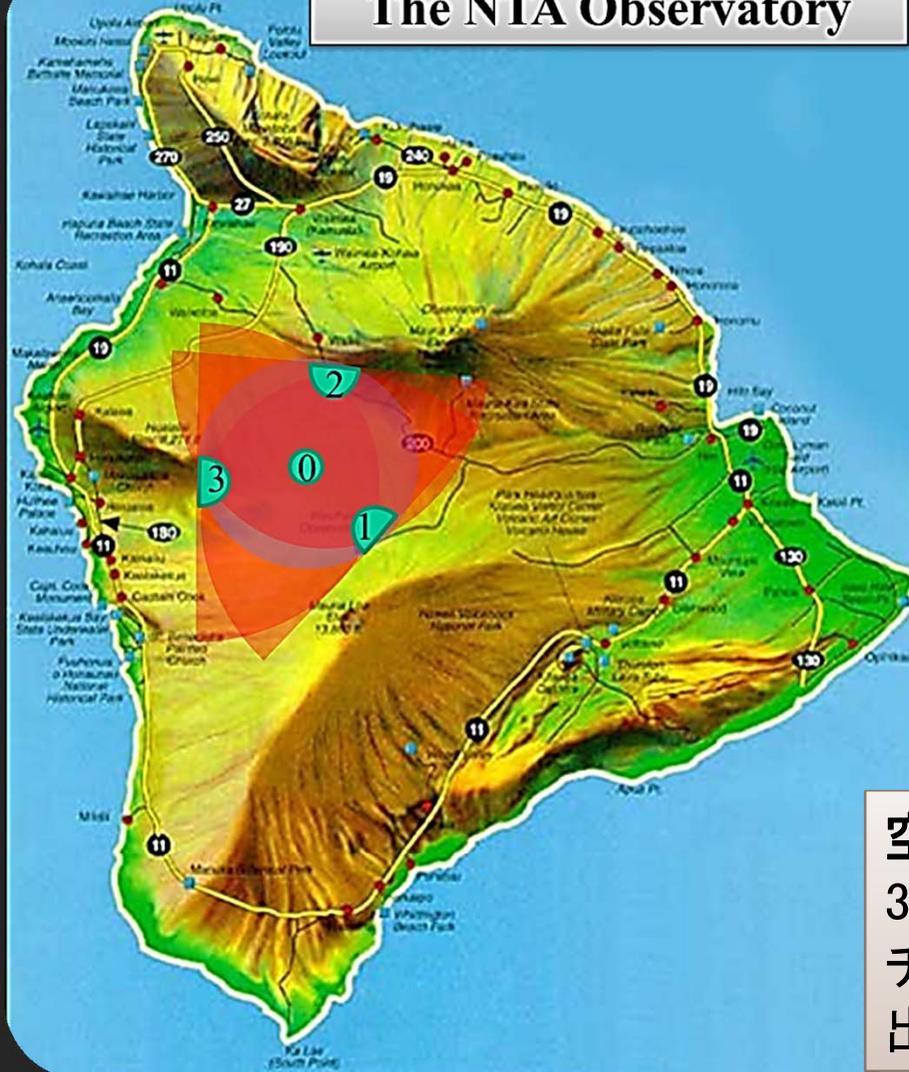
(ApJ, 736 (2011) L12)

(ApJ, 736 (2011) L12)

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) \Rightarrow 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

The NTA Observatory



レイアウト概念案

中央サイト (Site-0)

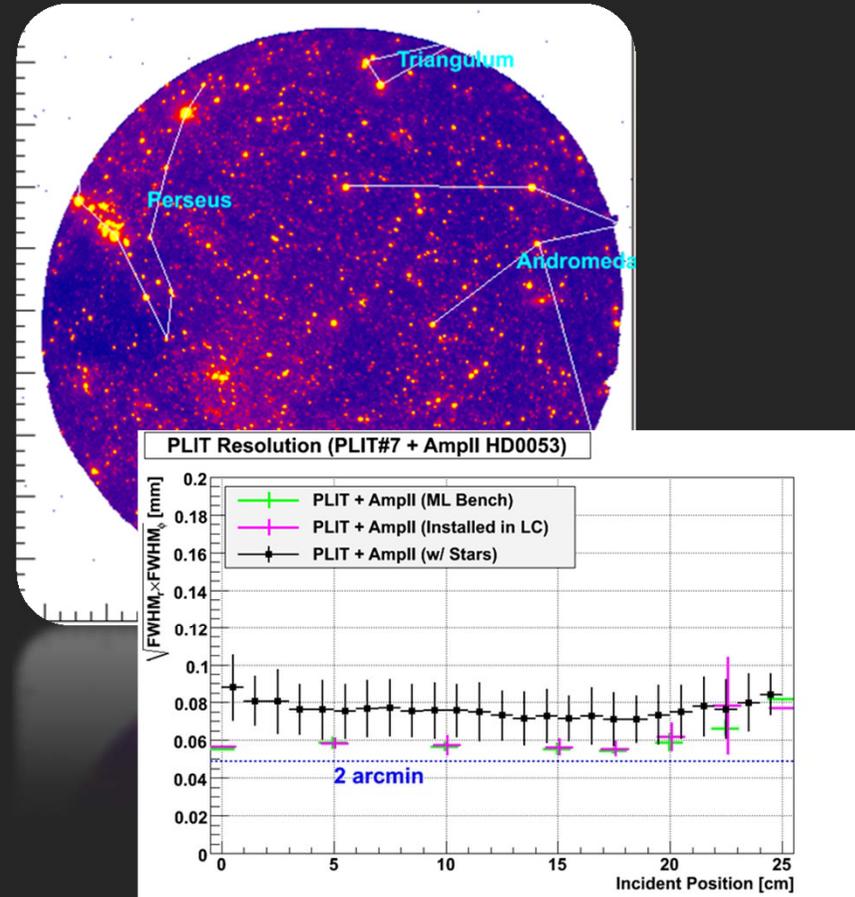
周辺サイト (Site-1,2,3)

1辺25kmの正三角形頂点

⇒巨大標的 (100-1000km³-weq)
巨大空気 (面積1000km²上空)
BG遮蔽 (3山の谷間)

空気を横と下から睨む複眼望遠鏡
3山に囲まれた好天候の空気中の
チェレンコフ光 & 蛍光の両方で
出現タウを漏らさず撮像

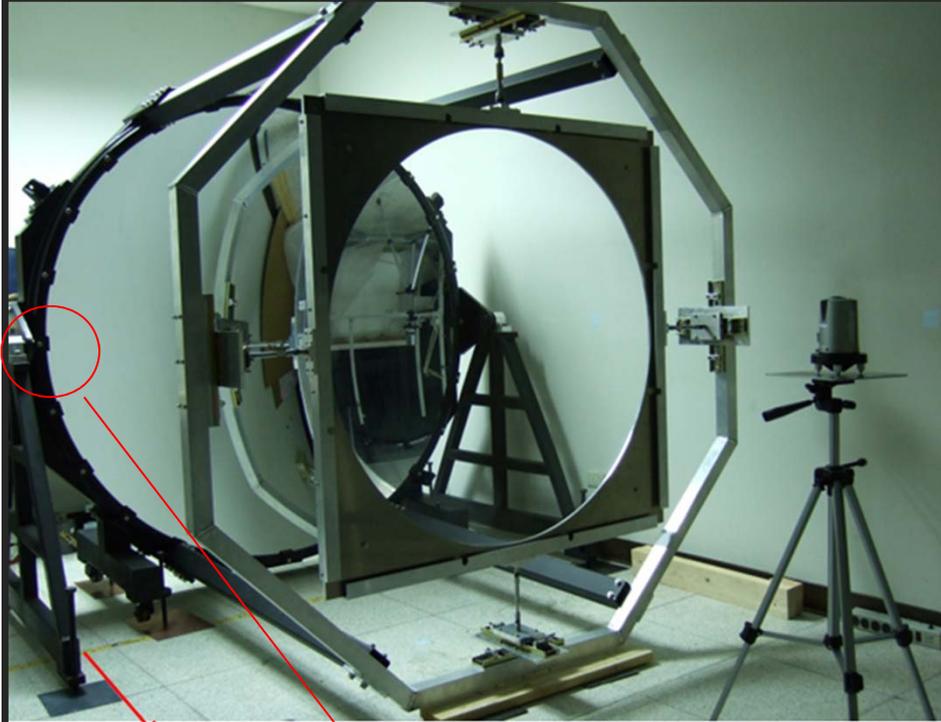
Ashra-1 Light Collector



Total Resolution: ~3 arcmin image in 42deg. FOV

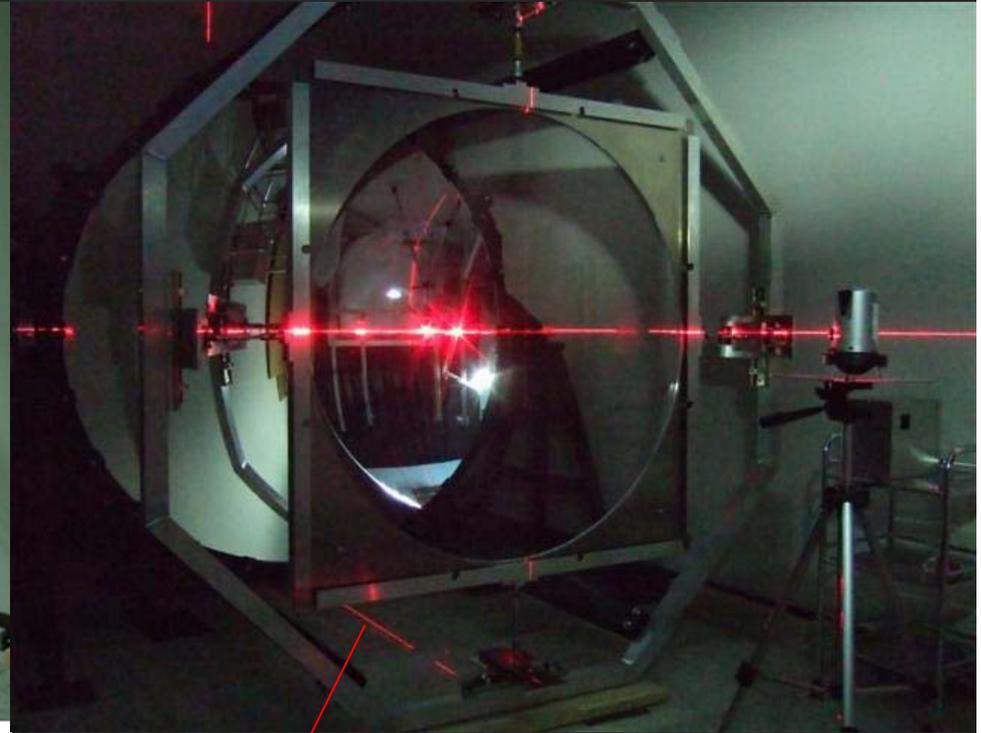
Can Cover Mauna Kea Surface at 35km Distant

NuTel at NTU



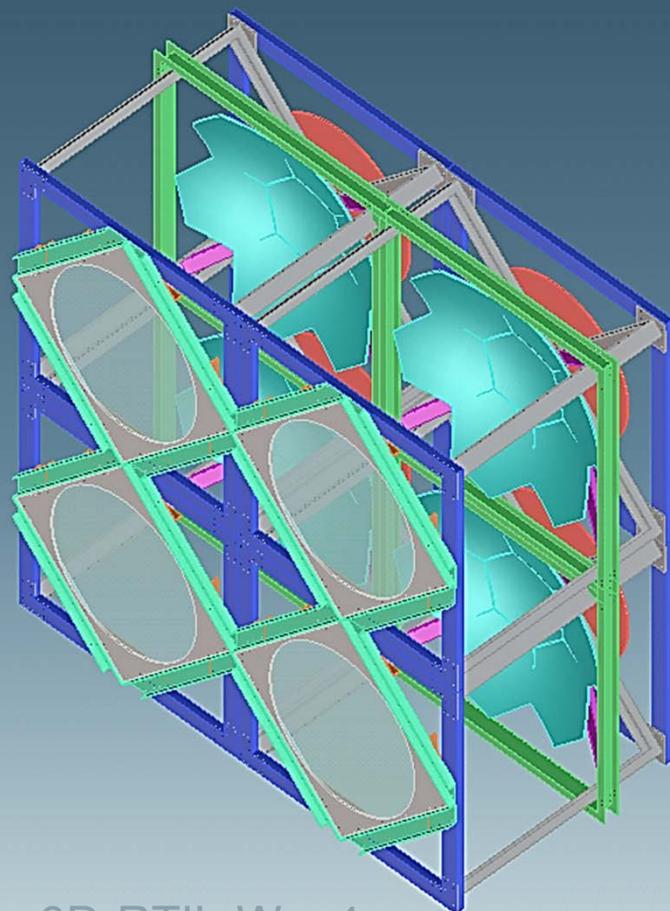
Fix and let the main part of support easily leaving the floor to rotate vertically.

Gravity center, make rotation easier.



Trick of alignment of position & tilt: make incident and reflected light overlapped.

NTA Light Collector (NTA-LC)
mount baseline design (tentative)



Ashra 3D-RTIL-W × 4

約1年間の設計レビュー後、
Ashra-1(日米)、NuTel(台湾)、
新提案から最良な部分設計
を決定 ⇒ 設計提案書

Light Collector (LC)
瞳径1.5mのシュミット型
視野28度 = 焦点面50cm径

Detector Unit (DU)
同視野を覗む4個のLC
重ね合わせ
⇒ 有効瞳径=3m

⇒ NTA集光器 概念設計案 ~ Ashra-1の1.5倍スケールアップ + 同じ読み出し

MC Event Sample (100PeV)

R00264/E00052: $E_\nu=10^{17.0}$ eV, $E_\tau=10^{16.8}$ eV, $E_{\text{show}}=10^{16.7}$ eV

Elevation=-6.4°, Azimuth= 347.6°

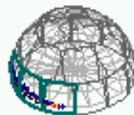
Mauna Loa
(Site1)



Hualalai
(Site3)



Central
(Site0)



Mauna Kea
(Site2)



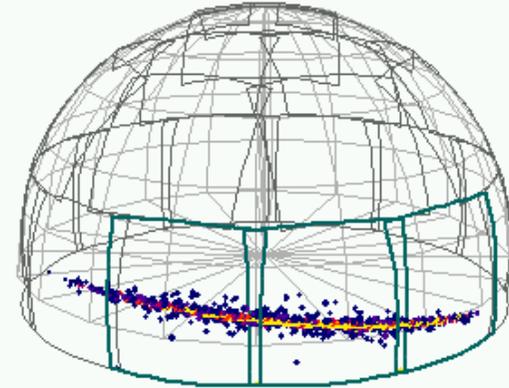
Xmax

Decay Point

Impact Point

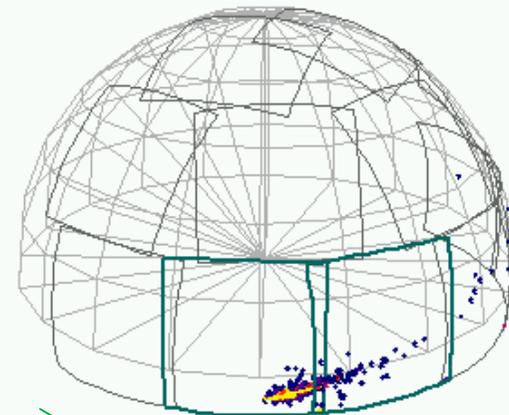
$N_{pe}^{tot}=4035$ (C:1363, F:2672), $R_p^{min}=1.8$ km, $R_x^{min}=5.4$ km

Central (Site0) Fluorescence

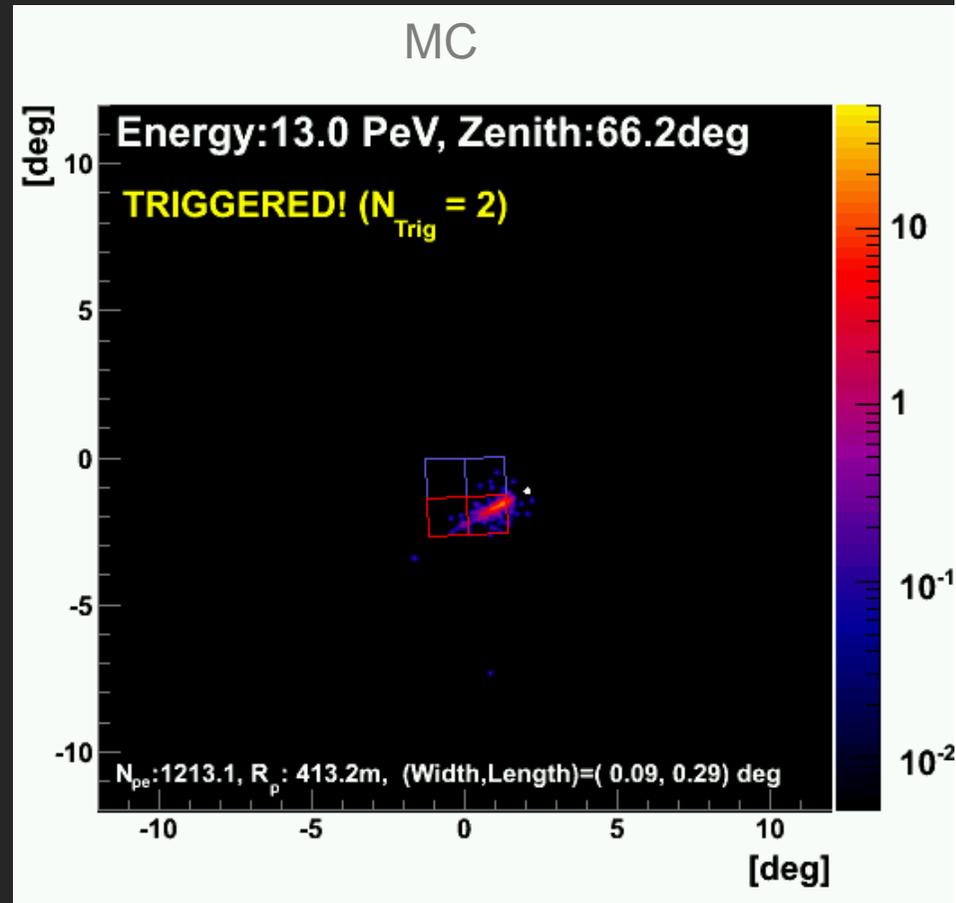
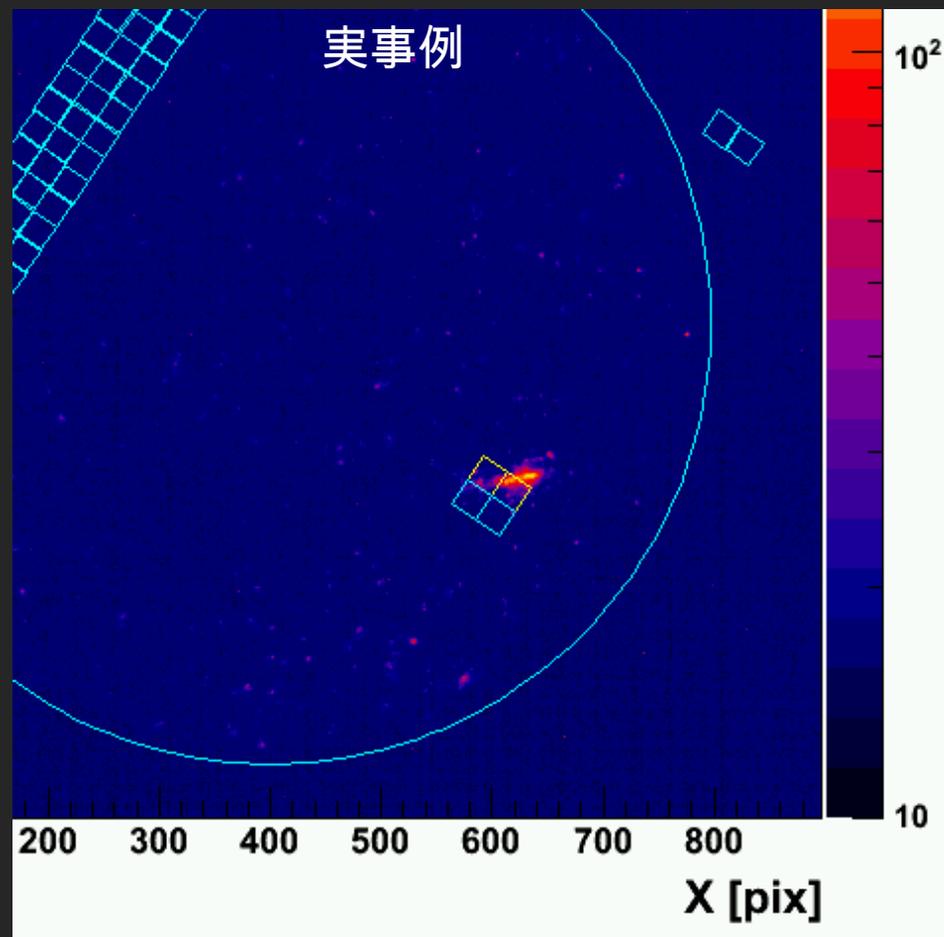


0.5°トリガピクセル (黄色 5pe以上)

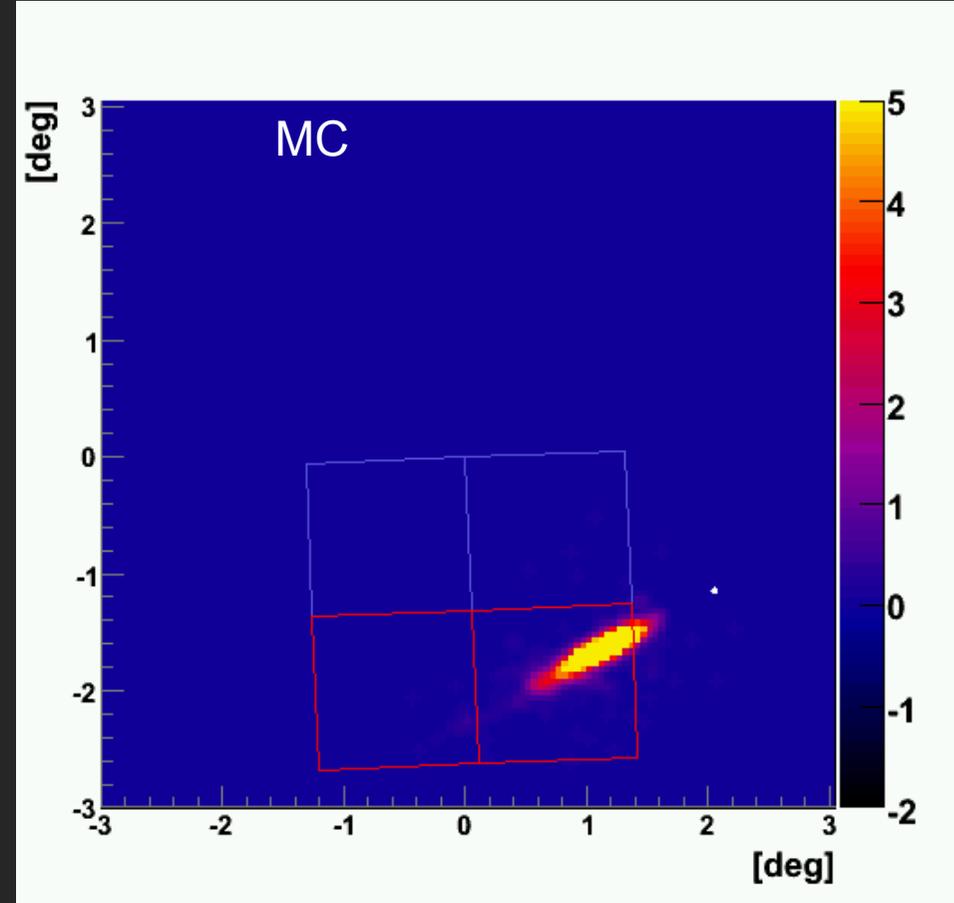
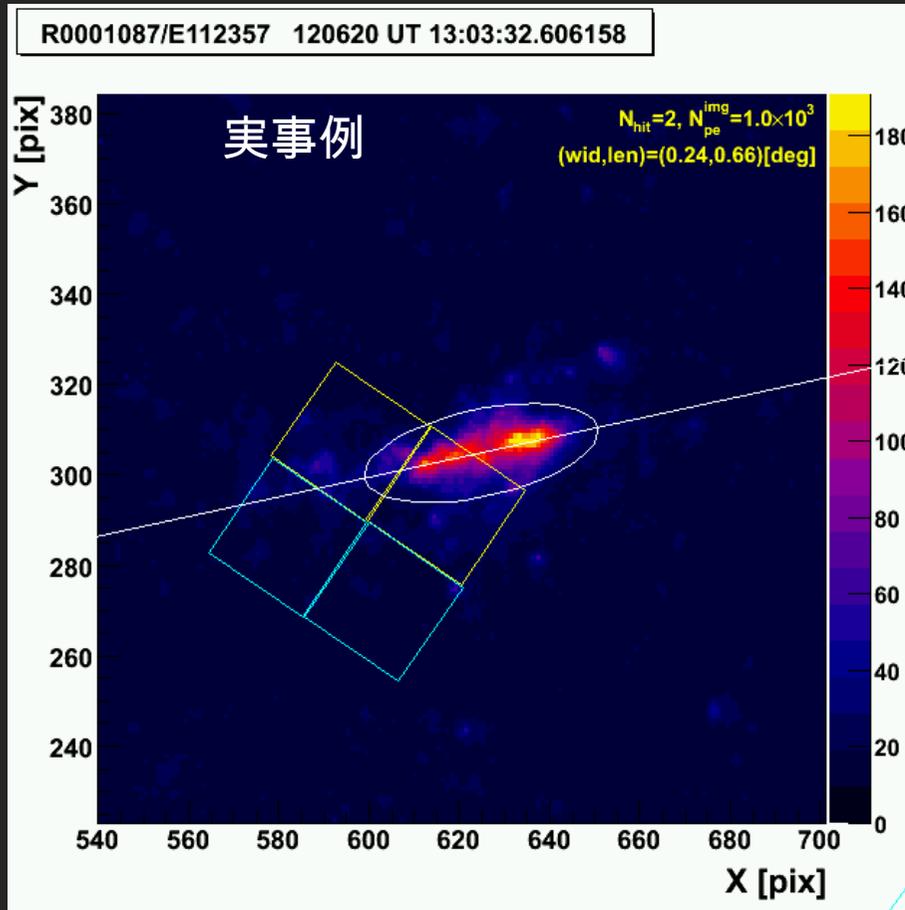
Mauna Loa (Site1) Cherenkov



Ashra-1 R0000941/E115513 トリガー事例 vs MC

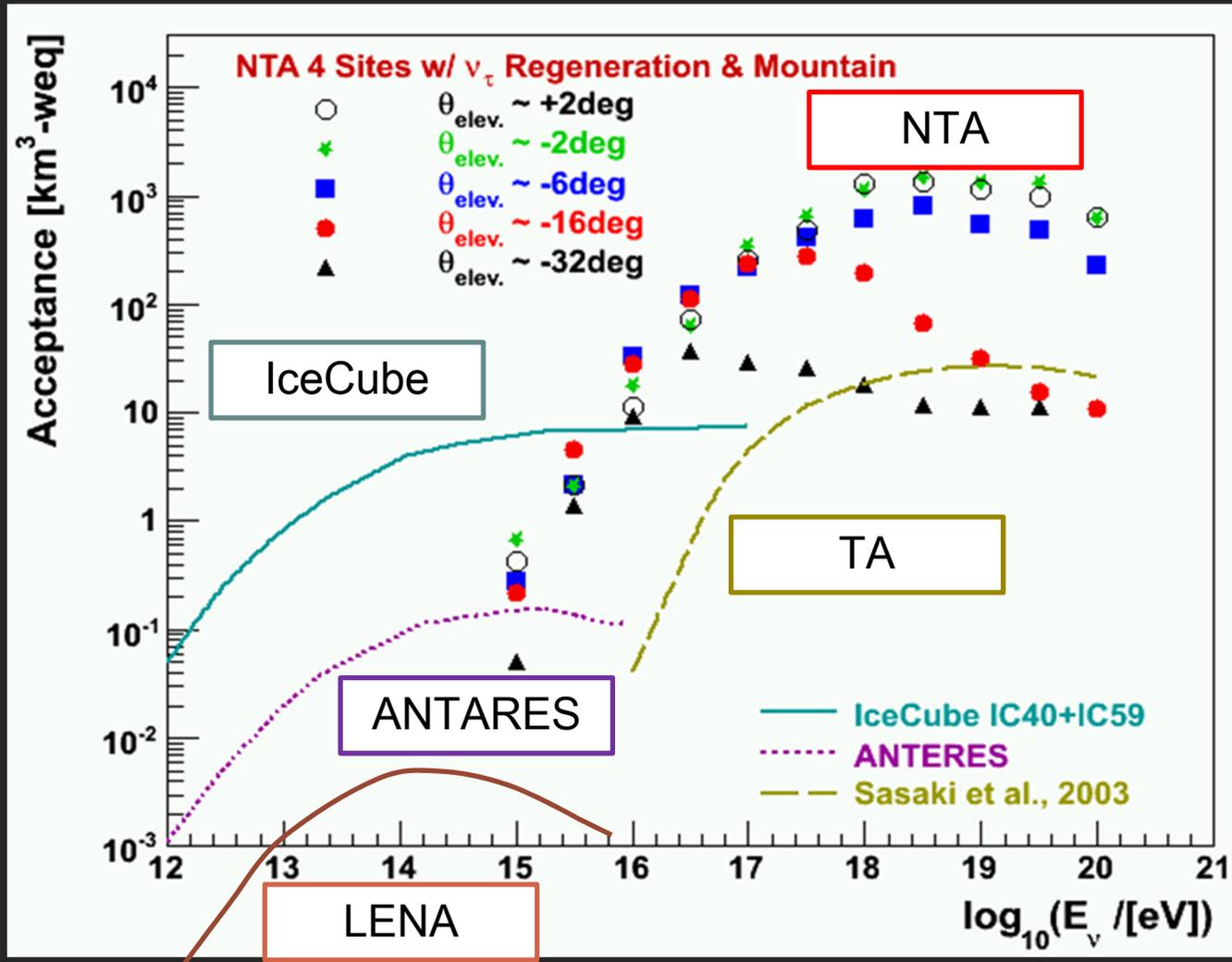


Ashra-1 R0000941/E115513 拡大図 vs MC

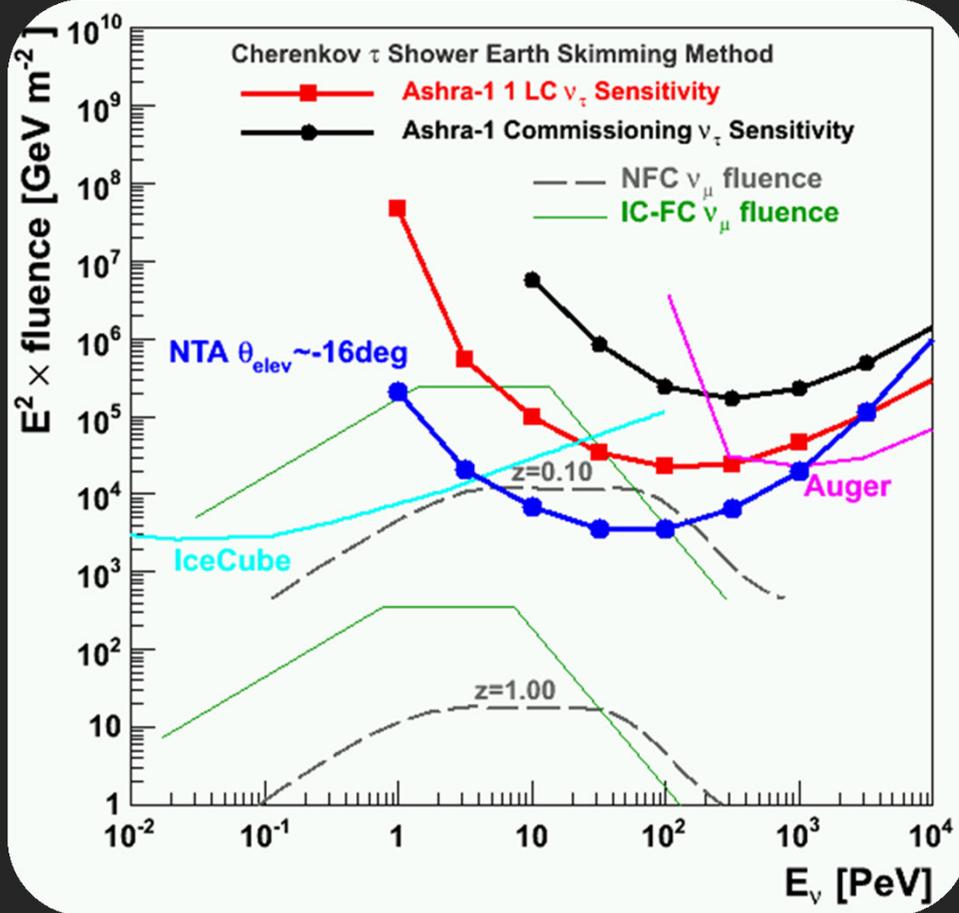


MCは実事例を再現

Acceptance with Water & Muon vs Air & Tau



⇒ 視野30度で ν_τ を検出できる



Auger, PRD 79 (2009) 102001

Upper limits: 2.3 events/ $\Delta \ln(E)$

(Feldman&Cousin, PRD 57 (1998)3873)

1. [IceCube, Nature 484 (2012) 351]

- IC40+IC59 stacked 117+181GRBs

- Very strong bias for time window (28s) around Satellite Triggers to suppress huge BG

BG

2. [Hummer et al. PRL 108 (2012) 231101]

- Recalculated neutrino flux =>

PeV-EeV Energy Region more important

3. [Murase et al. ApJ 651 (2006) L5]

- Nearby Low luminosity (LL) GRB (ex. GRB 060218/SN 2006aj) dominate total neutrino fluxes at Earth

- X or γ Satellites cannot detect

• X or γ Satellites cannot detect

NTAは標準GRB ν 源(Hummerら再計算)を
 $z \sim 0.1-0.15$ (20億光年)の深さまで探査可
 近傍宇宙はHE ν の宝庫?

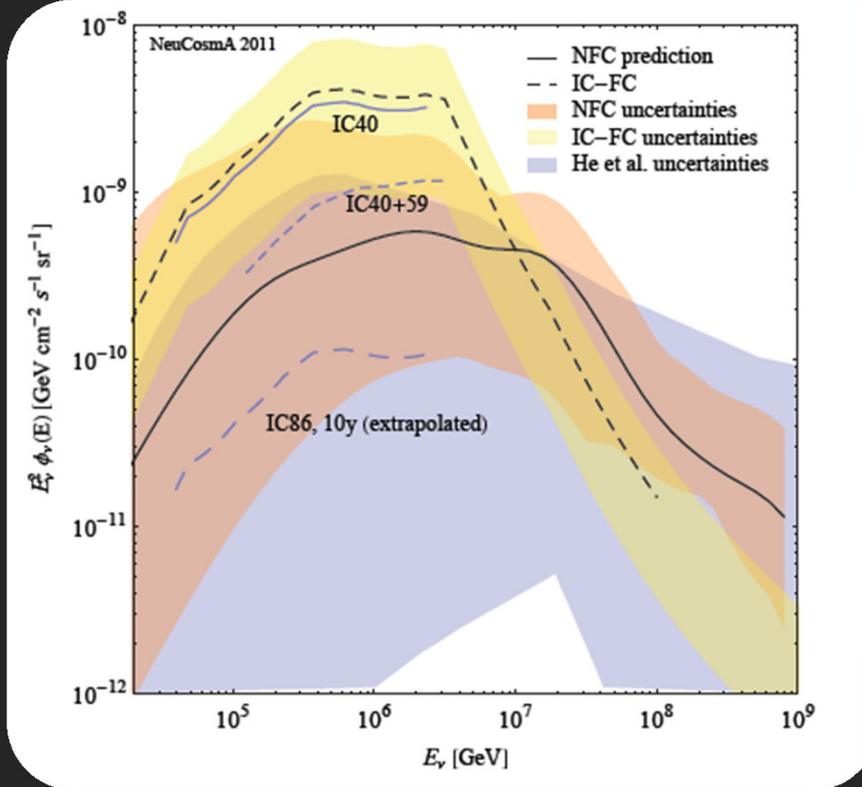
[IceCube, Nature 484 (2012) 351] says GRB Fireball model in trouble

LETTER

doi:10.1038/nature11068

An absence of neutrinos associated with cosmic-ray acceleration in γ -ray bursts

IceCube Collaboration*



[Hummer et al. PRL 108 (2012) 231101]

1. IC-FC: IceCube Fireball Calculation

2. RFC: Revised Fireball Calculation

Correction to shape:

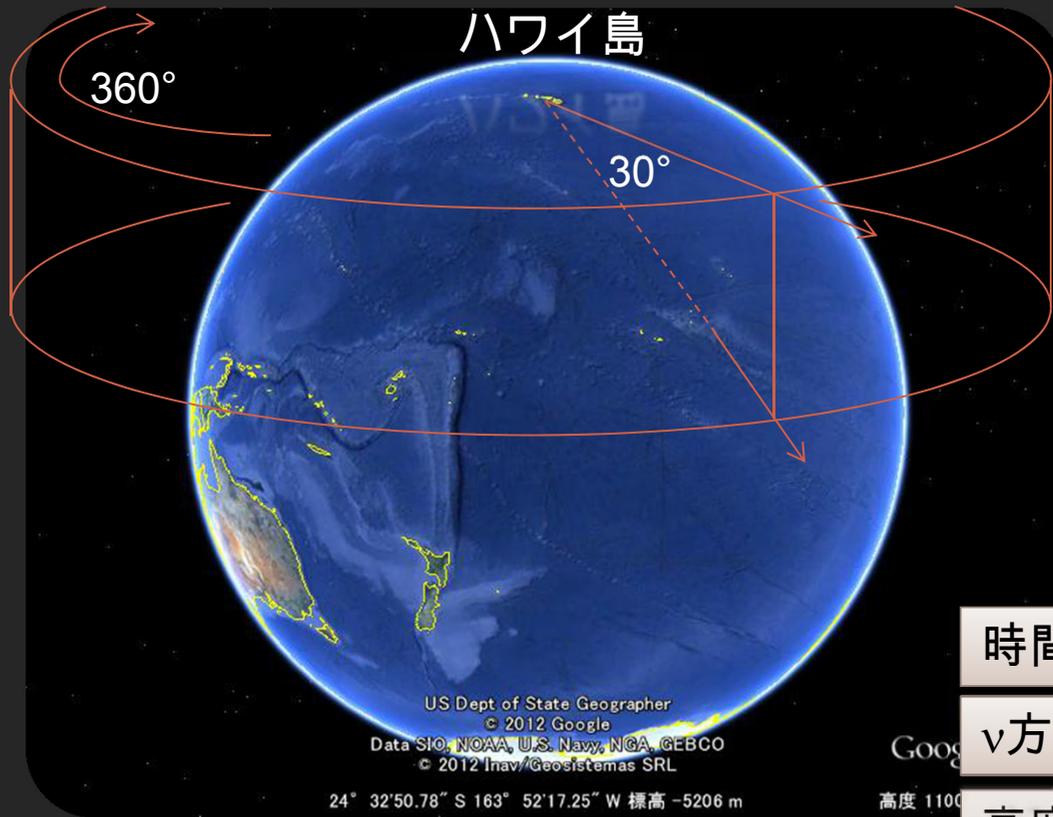
- Revised shape
- Correct energy losses of secondaries
- Full energy dependencies
- Correction to f_π :
- Normalization of photon spectrum
- Rounding errors
- Width of Δ -resonance

3. NFC: Numerical Fireball Calculation

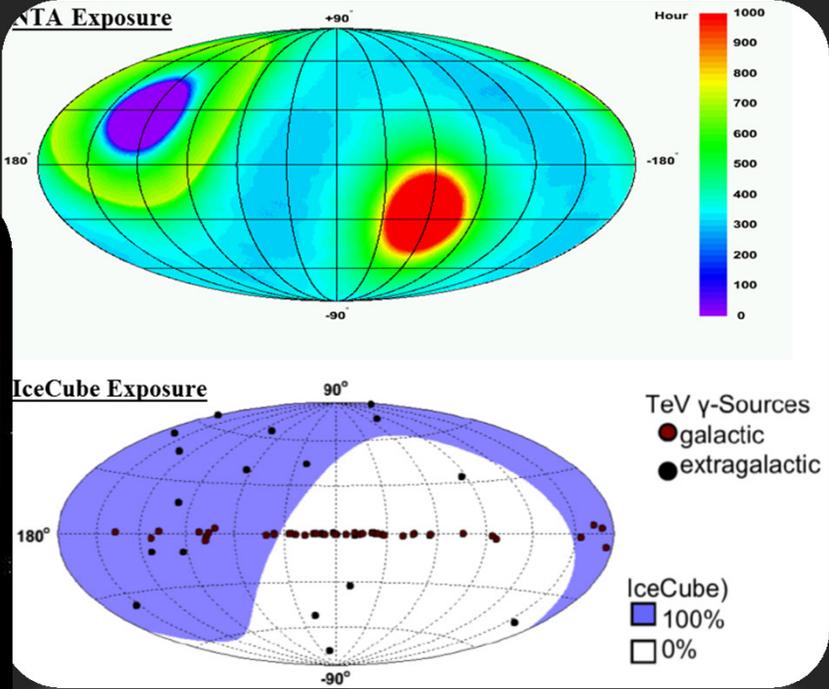
[P.Baerwald, Gamma-Ray Bursts 2012
Conference in Munich May 11, 2012]

PeV-EeV領域の重要性

NTAのGRB探査の重要性



NTA ν サーベイ能力



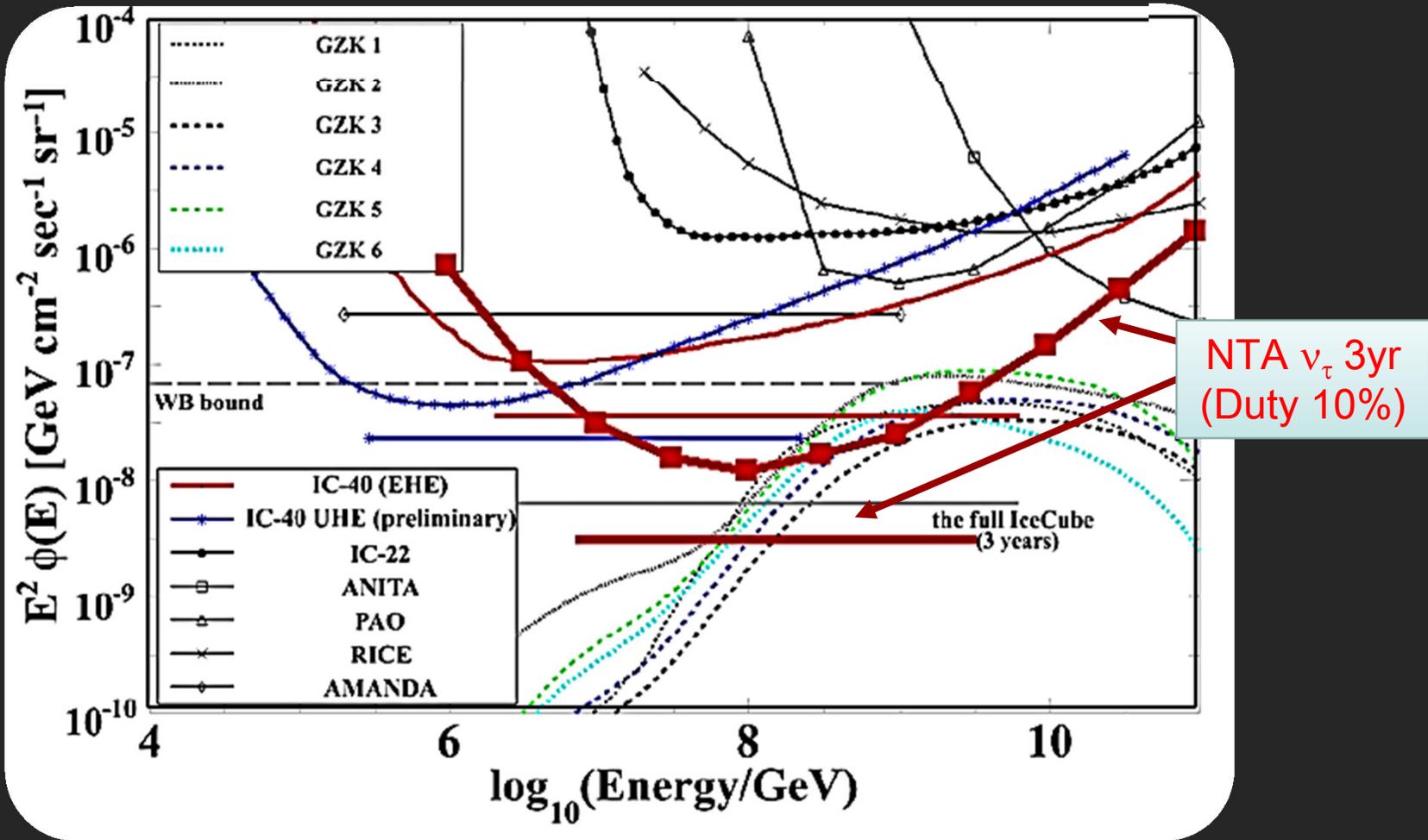
時間効率10-20%@Ashra-1実績

ν 方向精度 $< 0.2^\circ$ (Chren. mono)

高度 $30^\circ \times$ 方位 360°

標準GRB ν に対し
 深さ $z=0.1-0.15$ (20億光年)
 \Leftrightarrow 重力波KAGRA(7億光年) の3倍

Diffuse- ν Sensitivity



Abassi et al., PRD 83 (2011) 092003,
H. Johansson Ph.D Thesis (2011)

拡散 ν の場合: Duty 10% \times 立体角比 0.5 \Rightarrow IceCubeと同等の感度