

超高エネルギーニュートリノ観測の将来展望 とARA



千葉大学大学院理学研究科
ハドロン宇宙国際研究センター
吉田滋

The most energetic universe



The Cosmic Rays

Mostly protons

Some light nuclei

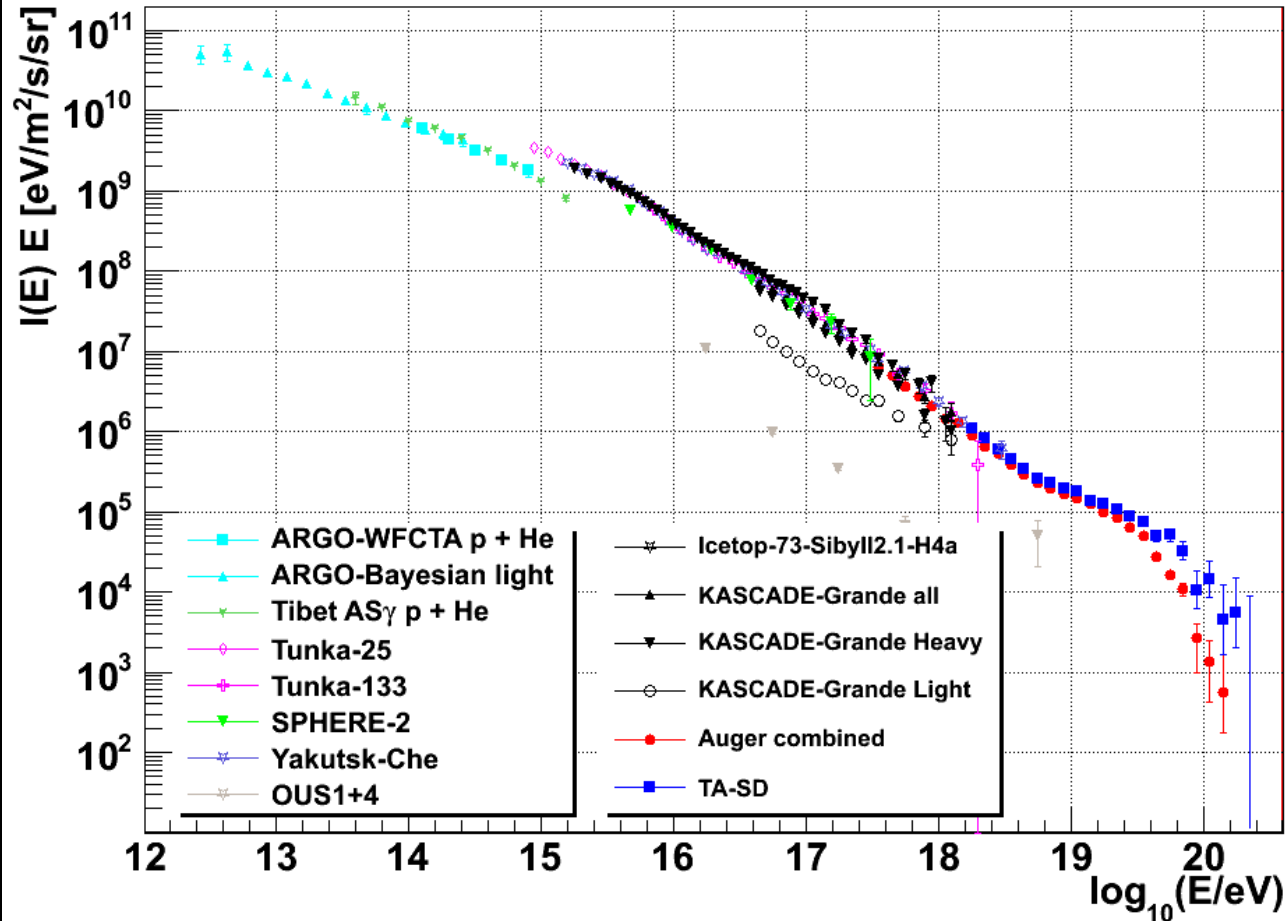
He, Li,

Heavy nuclei (ex. Fe)
may dominate at
higher energies

Not so sure
at the highest energy end

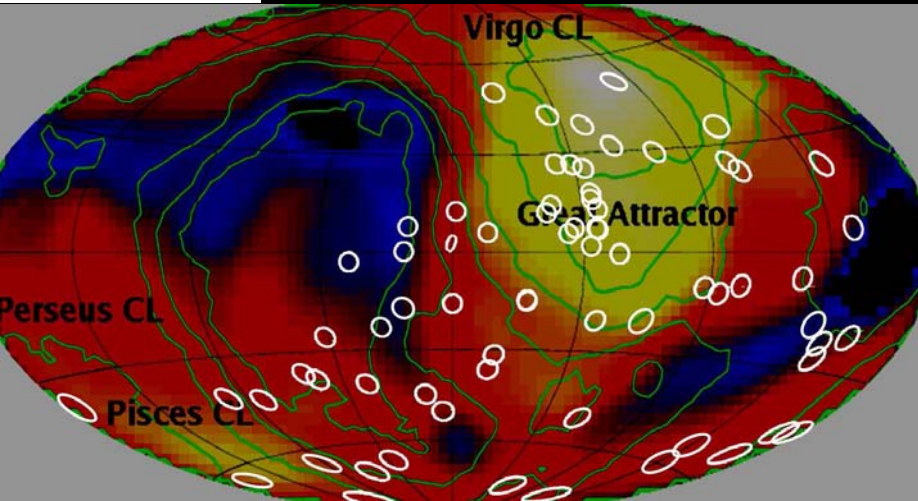
Theoretically favors protons

The Cosmic Ray Spectrum



Recompiled from the ICRC 2013 Rapporteur talk (Y.Tsunesada)

The challenge



Arrival directions of UHE cosmic-rays measured by Auger and the Integral X-ray map (above) or the nearby clusters (arxiv-1101.0273 D.Fargion et al)

No clear correlations.....

Two possibilities

1. Our hypotheses on the high energy cosmic ray emitters are totally wrong

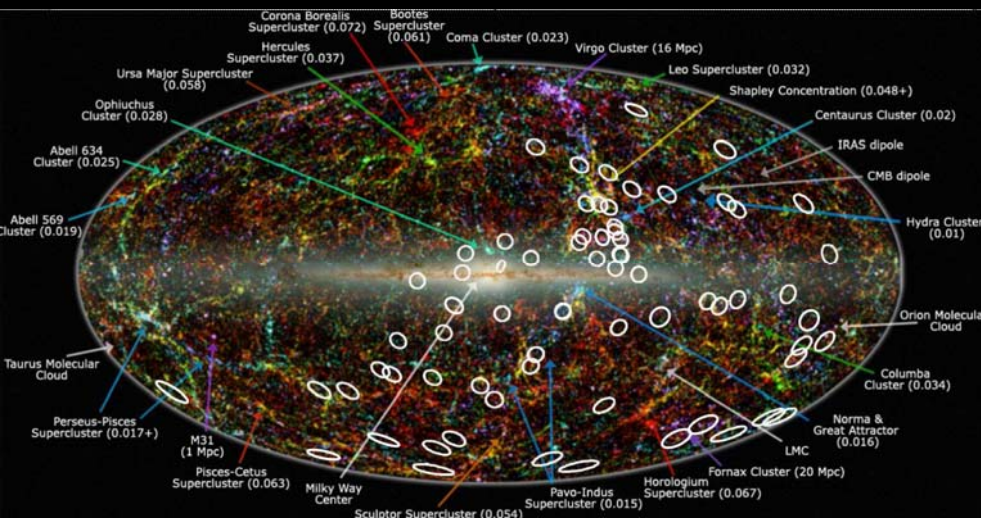
We may not be so smart.

2. Cannot handle pointing them back to their radiation points

Magnetic field?

Particle charge?

Proton or even iron?



Solutions

1. Correct more and more events

A super high statistics may resolve B, charge, and source locations, all of which are uncertain at the moment

2. Neutrinos!!

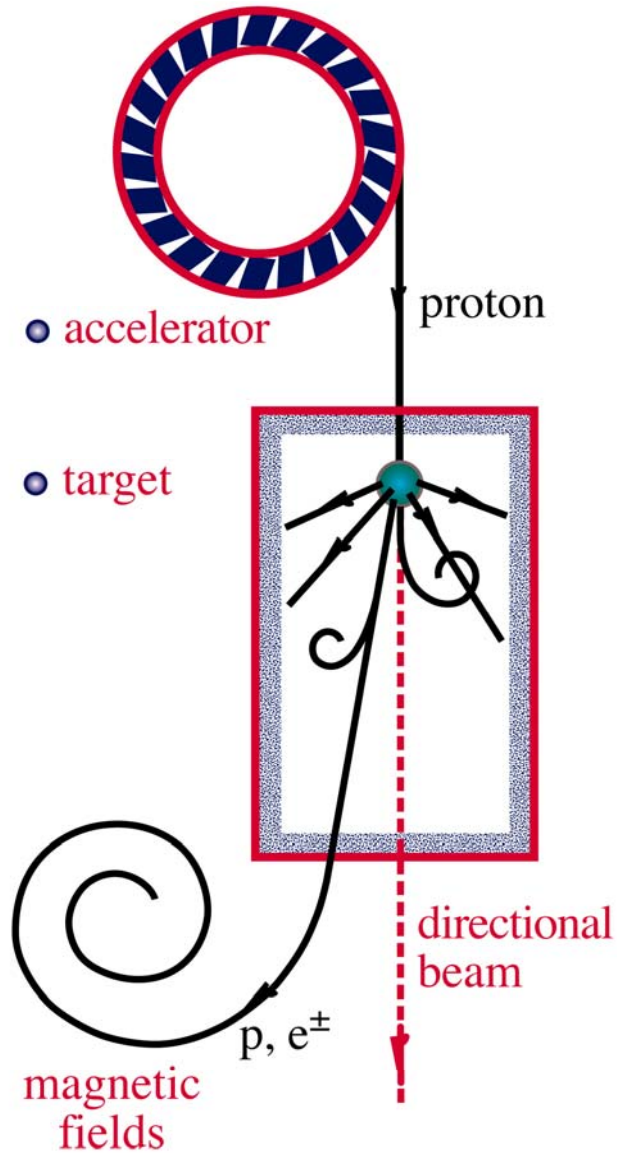
No electric charge. Coming to us straight

Highly complementary – ν can travel over a LONG distance

The cons : measurement of ν 's is really a tough business

They are weakly interacting particles → a huge detector
The atmospheric ν or μ backgrounds dominates
→ needs excellent filtering programs

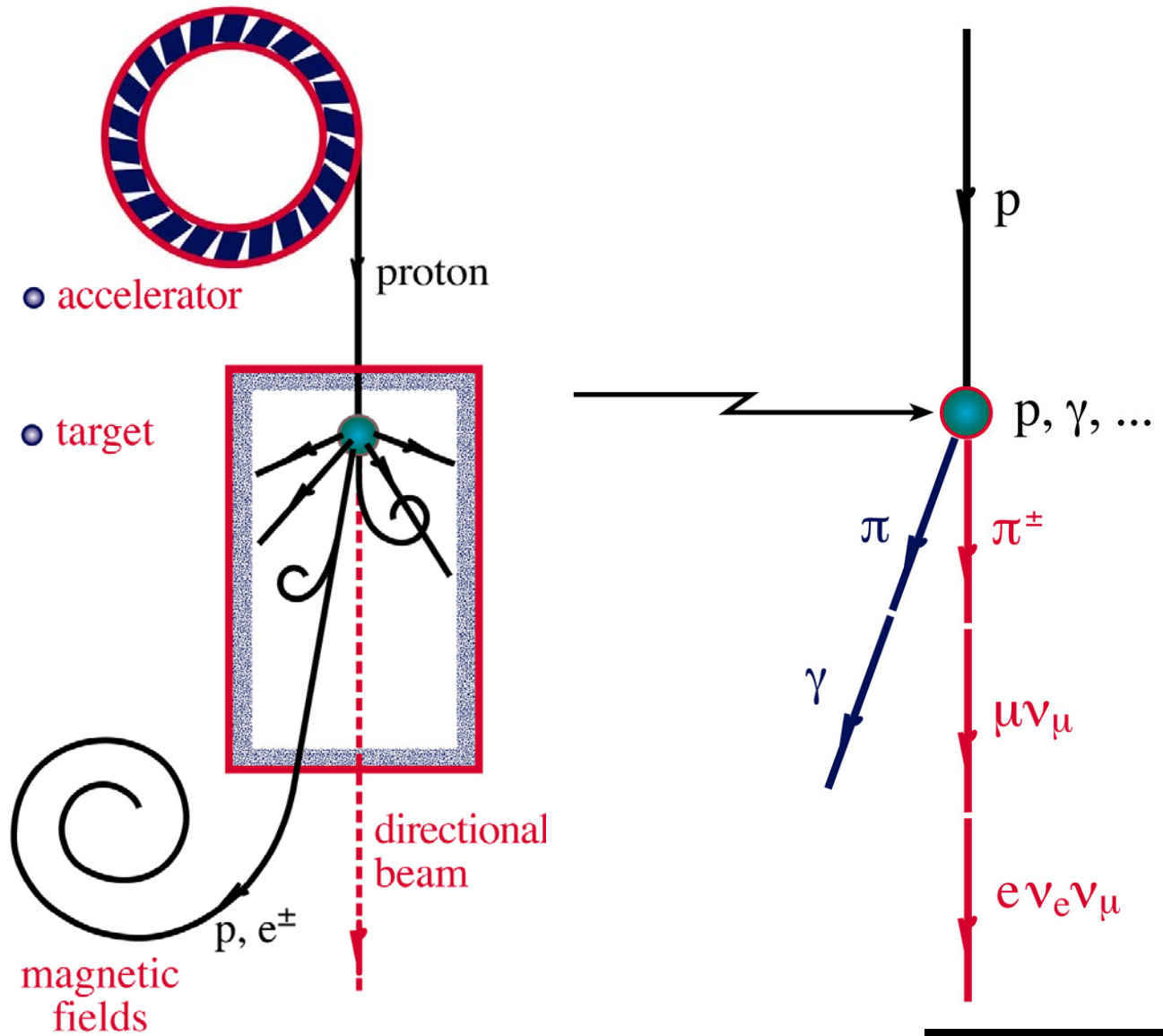
NEUTRINO BEAMS: HEAVEN & EARTH



black hole

radiation
enveloping
black hole

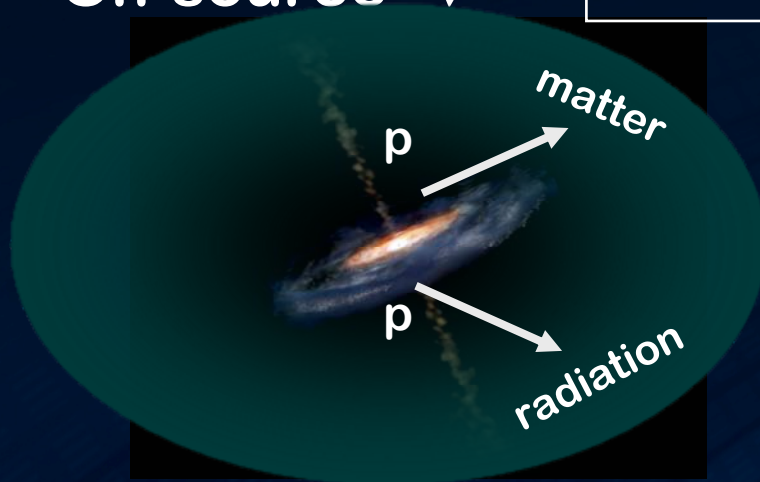
NEUTRINO BEAMS: HEAVEN & EARTH



The Cosmic Neutrinos Production Mechanisms

“On-source” ν

TeV - PeV



$$pp \rightarrow \pi \rightarrow \nu$$

$$\gamma p \rightarrow \pi \rightarrow \nu$$

photopion production

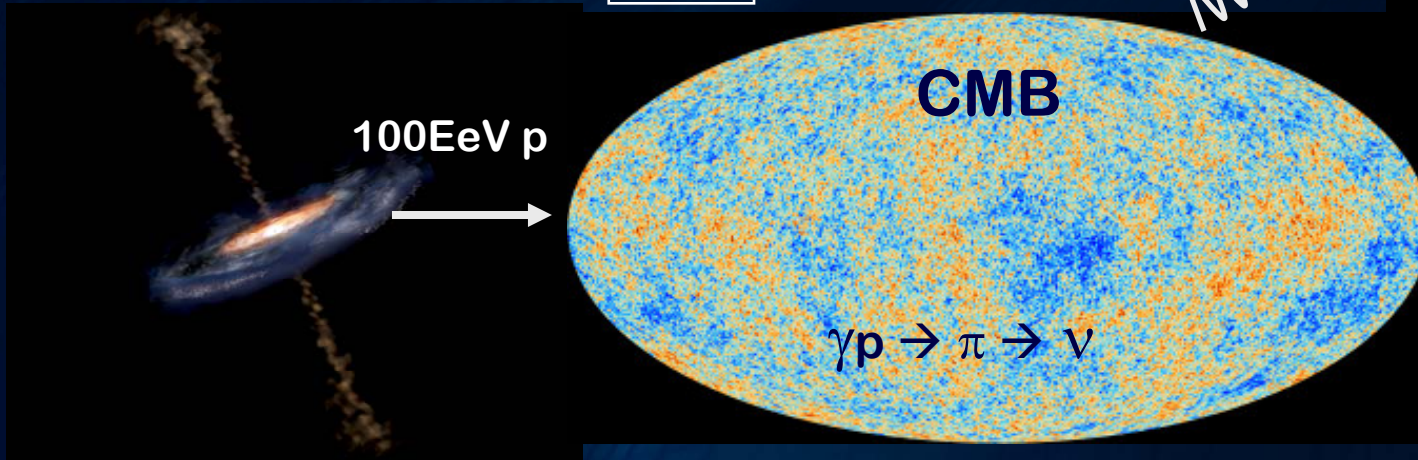


ν

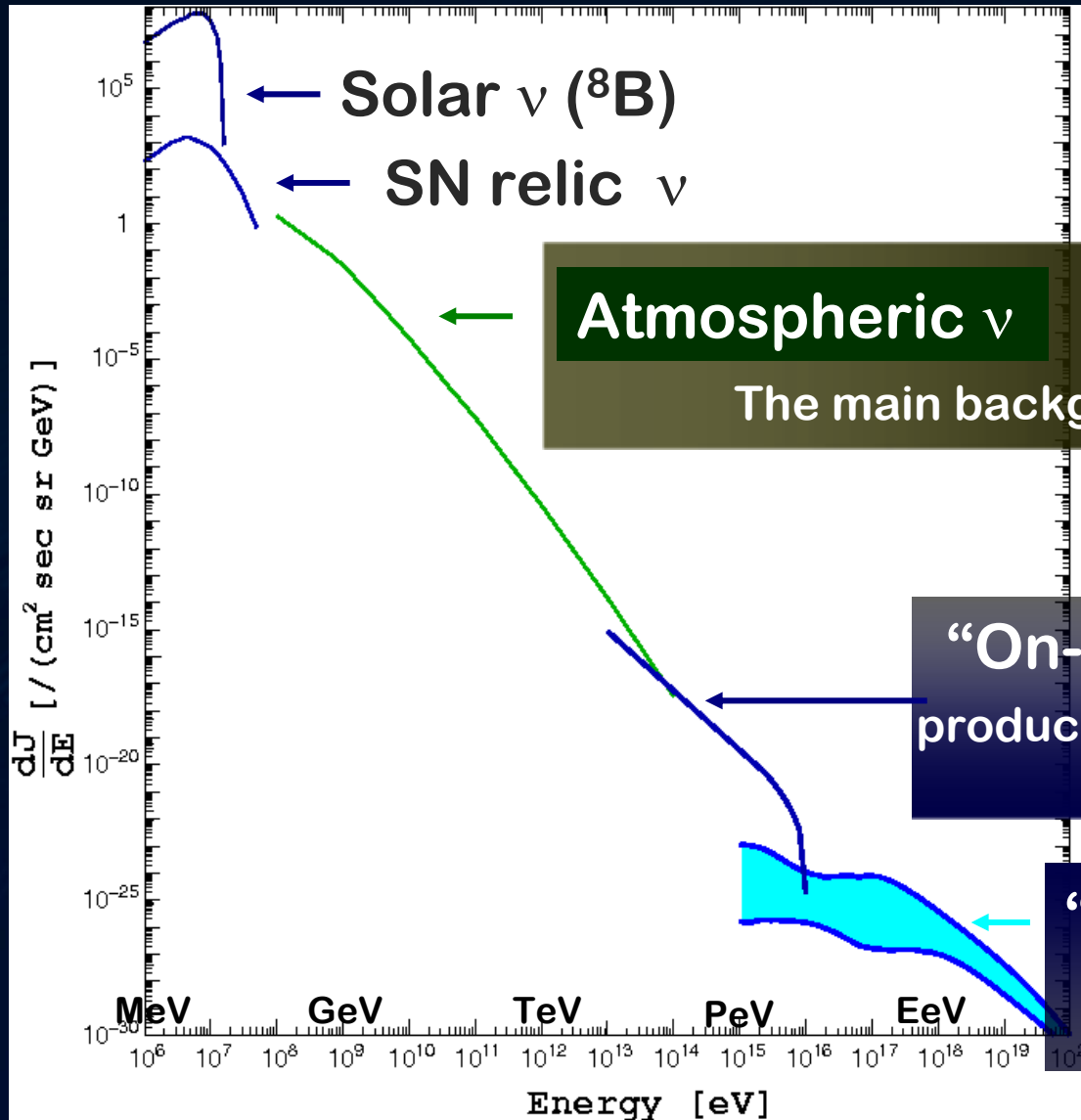


“GZK” cosmogenic ν

EeV



The Neutrino Flux: overview



Atmospheric ν

The main background for astro- ν

"On-source" astro- ν

produced at the UHECR sources

Not established yet

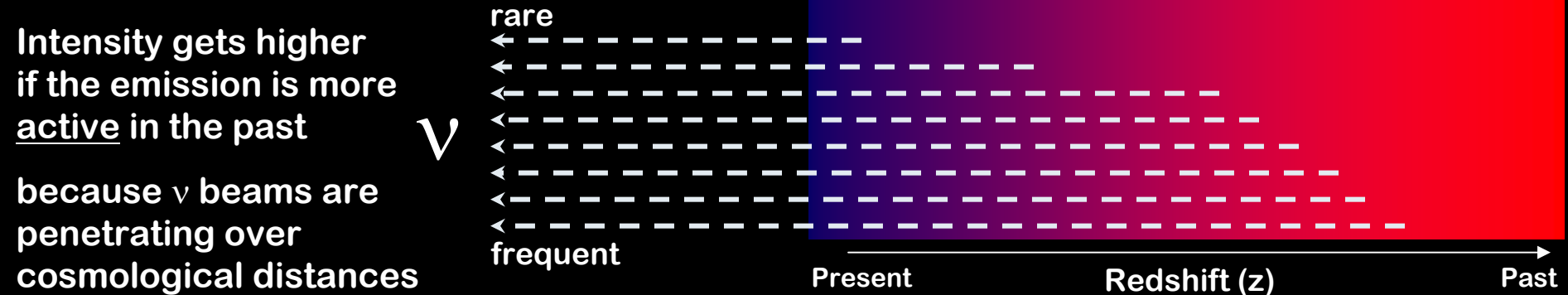
"GZK" cosmogenic ν

produced in the CMB field

Not detected yet

Tracing *history* of the particle emissions with ν flux

color : emission rate of ultra-high energy particles



The cosmological evolution

Many indications that the past was
more active.

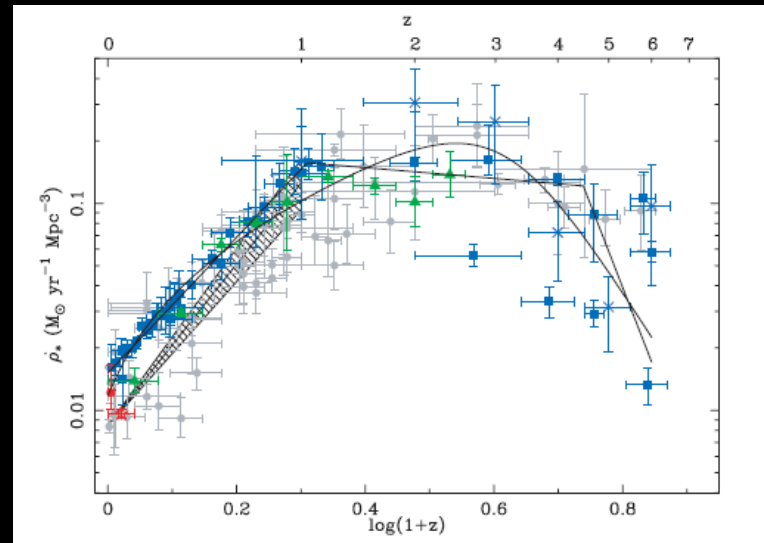
Star formation rate $\rightarrow$

The spectral emission rate

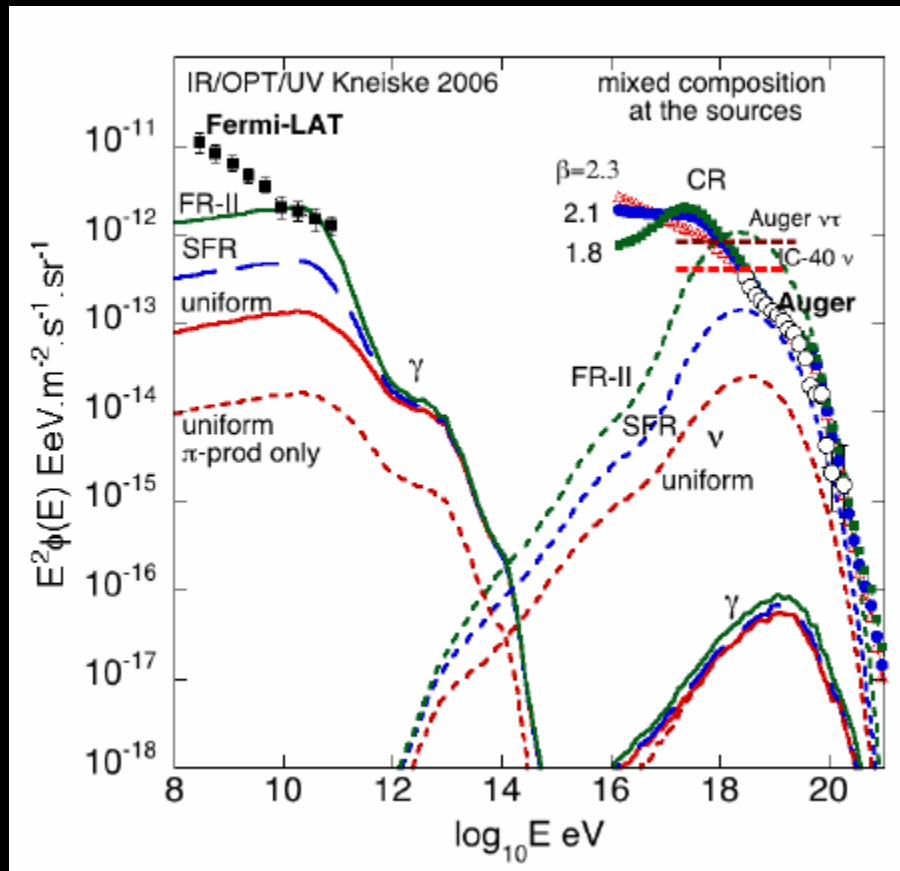
$$\rho(z) \sim (1+z)^m$$

$m=0$: No evolution

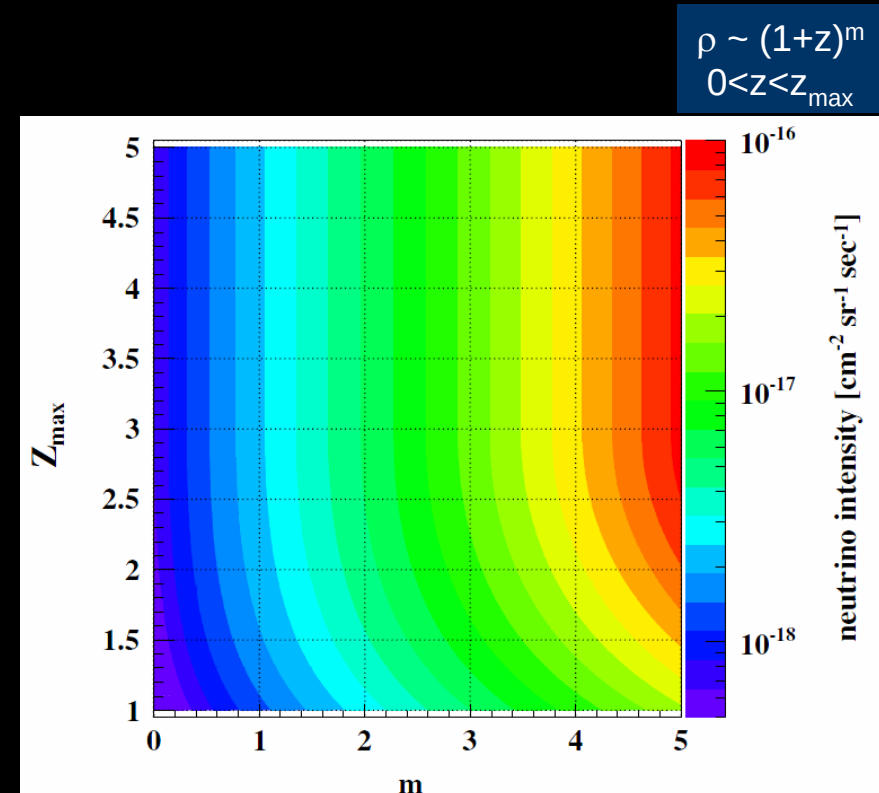
Hopkins and Beacom, *Astrophys. J.* **651** 142 (2006)



Tracing *history* of the particle emissions with ν flux



Decerprit and Allard, A&A (2012)

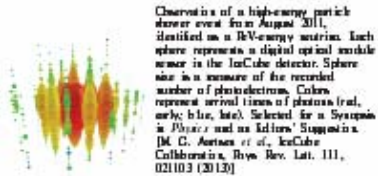


Yoshida and Ishihara, PRD 85, 063002 (2012)

“Cover-boy” of Physical Review Letters



NEWSPAPER



Observation of a high-energy particle shower event from August 2011, identified as a TeV-energy neutrino. Each sphere represents a digital optical module sensor in the IceCube detector. Sphere size is a measure of the recorded number of photoelectrons. Colors represent arrival times of photons (red, orange, blue, teal). Selected for a Symposium in Physics and an Editors' Suggestion. [M. C. Aarssen *et al.*, IceCube Collaboration, Phys. Rev. Lett. 111, 021103 (2013)]

PHYSICAL REVIEW LETTERS™

Contents

Articles published 6 July–12 July 2013

VOLUME 111, NUMBER 2

12 July 2013

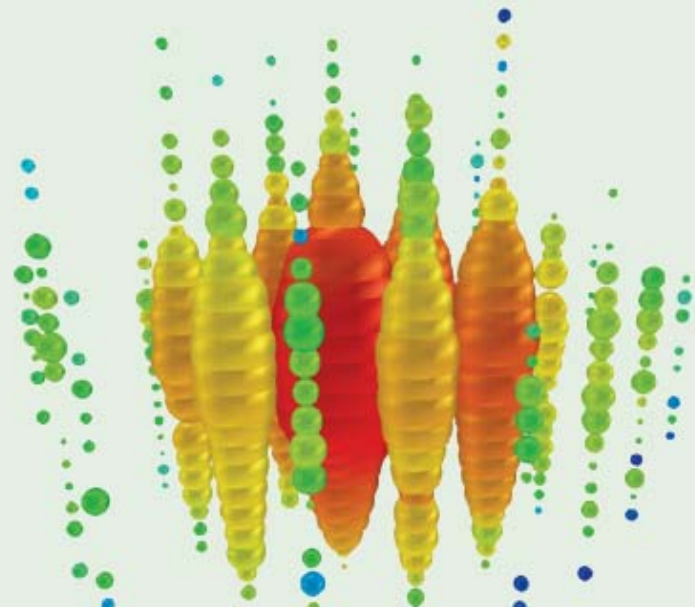
General Physics: Statistical and Quantum Mechanics, Quantum Information, etc.	
Scalable Reconstruction of Density Matrices	020401
T. Baumgart, D. Gross, M. Cramer, and M.B. Plenio	
Particles, Holes, and Solitons: A Matrix Product State Approach	020402
Dominik Drexler, Jukka Hasegawa, Tobias J. Osborne, Vid Stejovic, Larsens Vanderschueren, and Frank Verstraete	
Bounding Temporal Quantum Correlations	020403
Constantin Budassi, Tobias Monder, Matthias Kleinmann, and Otfried Gühne	
Quantum Teleportation of Dynamics and Effective Interactions between Remote Systems	020501
Christine A. Muschik, Klemens Hammerer, Eugene S. Polzik, and Isaac J. Cline	
Secure Extremal Distributions for Double-Secret Blind Quantum Computation	020502
Tamoyuki Morimae and Keisuke Fujii	
Faithful Solid State Optical Memory with Dynamically Decoupled Spin Wave Storage	020503
Marko Lohr, Dieter Suter, Albus Ferret, and Philippe Goldner	
Quantum Finiteness for CPT Symmetry	020504
Michael Sklaris, Boris Tshen, Ian T. Durham, and Barry C. Sanders	
Nonadditivity in Quasiequilibrium States of Spin Systems with Lattice Disorder	020601
Takashi Mori	
Gravitation and Astrophysics	
Observables of a Test Mass along an Inclined Orbit in a Post-Newtonian-Approximated Kerr Spacetime Including the Linear and Quadratic Spin Terms	021101
Steven Hergt, Akshay Shah, and Gerhard Schiller	
Three-Dimensional Model of Cosmic-Ray Lepton Propagation Reproduces Data from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station	021102
Daniela Gaggero, Luca Marciotto, Giuseppe Di Bernardo, Carmelo Evoli, and Dario Giusso	
First Observation of ReV-Energy Neutrinos with IceCube	021103
M.C. Aarssen <i>et al.</i> (IceCube Collaboration)	
Limits on Spin-Dependent WIMP-Nucleon Cross Sections from 225 Live Days of XENON100 Data	021301
E. Aprile <i>et al.</i> (XENON100 Collaboration)	
Effective Field Theory Approach to Gravitationally Induced Decoherence	021302
M.P. Blencowe	

111

PHYSICAL REVIEW LETTERS™

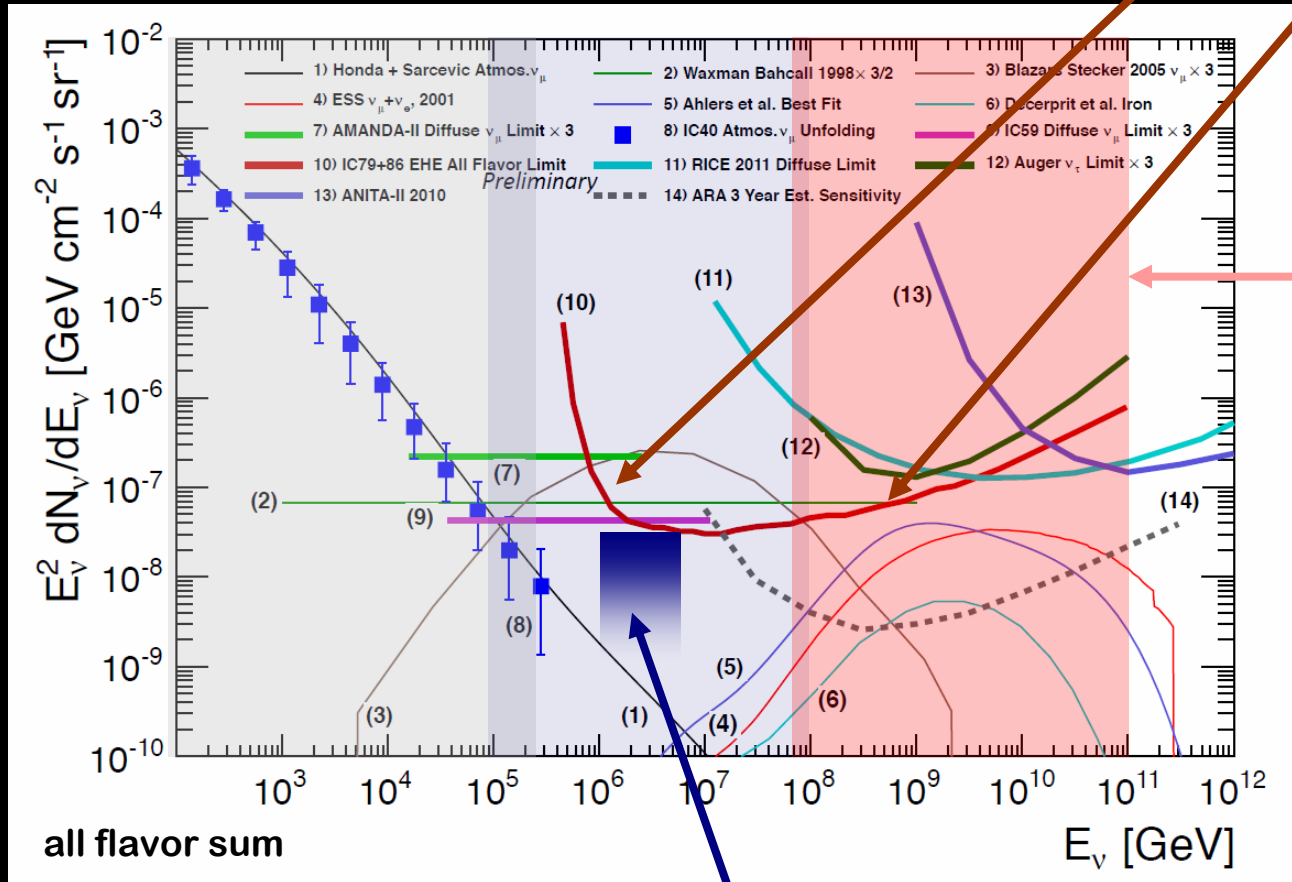
Articles published week ending 12 JULY 2013

PRL 111 (2), 020401–020902, 12 July 2013 (416 total pages)



The executive summary

The model-independent
upper limit on flux in UHE



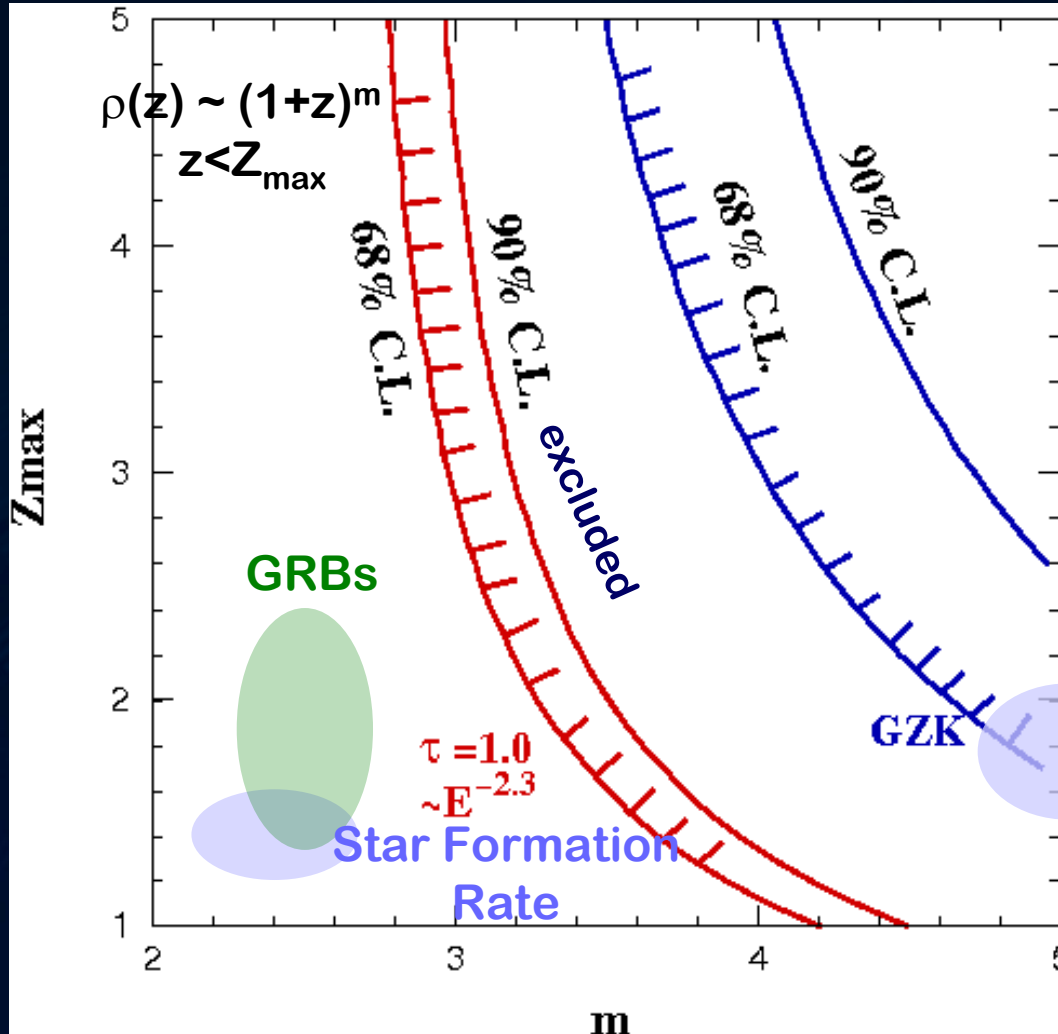
null observation
in this regime

nearly exclude

- radio-loud AGN jets
- $m > 4$ for $(1+z)^m$
- emission maximally allowed by the Fermi γ

Bert & Ernie + O(10) sub-PeV events
4.1 σ excess over atmospheric

The Constraints on evolution (=emission history) of UHE cosmic ray sources



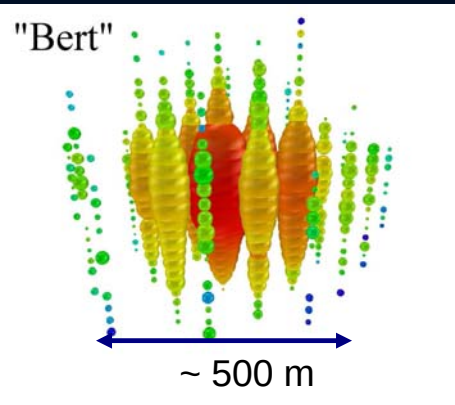
The solid bound by
the GZK ν

+
by the on-source ν
if optical depth ~ 1

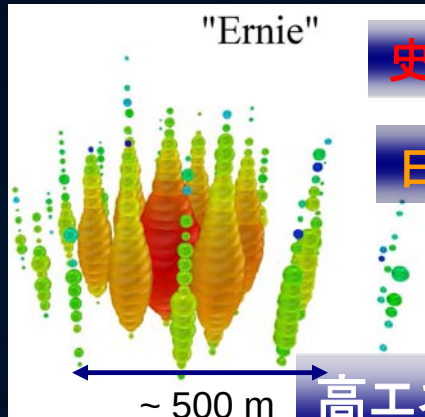
AGNs with
radio-loud jets
no high-redshift emission
consistent with
the star formation rate

IceCube を高エネルギー領域で拡張する

PeV ($=10^{15}$ eV)のエネルギーをもつニュートリノ2事象の同定に世界で初めて成功



2011年 8月8日



2012年1月3日

史上最高エネルギー (LHC $\times 1000$) のニュートリノ

日本グループの解析により探索・同定された

これらが宇宙ニュートリノ以外のバックグラウンドとして現れる確率は $\sim 10^{-3}$

高エネルギー宇宙ニュートリノは確かに存在する。

2事象の「エネルギー」分布と理論的な予測

この2事象を説明する機構は幾つかある(遠方宇宙の γ 線バースト天体等)

統計を格段にあげる必要

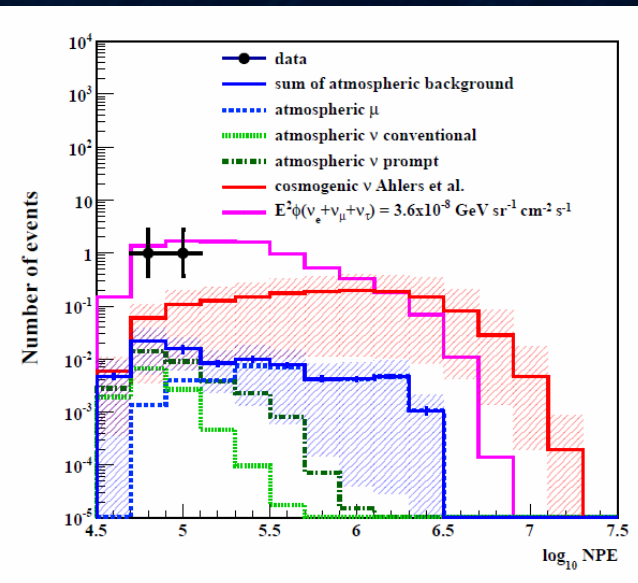
2事象検出から推定される PeV以上の ν 信号の数

0.5~3 事象/年/1km³

宇宙初めからの放射の歴史に依る

今現在実現された観測有効体積
これを増やすことが本質

IceCube とその拡張実験(ARA)によって、こうした事象を約50例検出する。



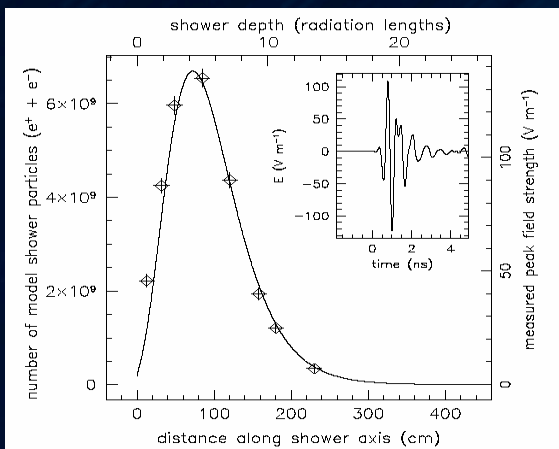
検出手法の概観

IceCube の 100 倍の面積を合理的なコストで覆うにはニュートリノ反応からの電波放射を捉える手法の確立が不可欠

IceCube (スーパーカミオカンデ実験も同様)で測定しているチェレンコフ光放射の電波領域の極限 Askaryan 効果と呼ばれる

$$\frac{d^2 W}{d\nu dl} = \left[\frac{4\pi^2 \hbar}{c} \alpha \right] z^2 \nu \left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right],$$

よく知られた
チェレンコフ放射の表式で
表される。



電子ビームを標的に照射する実験で
検証された

この「チェレンコフ電波放射」の特徴

- コヒーレントな位相で放射
- 縦偏光である



雑音との弁別
が容易

Phys.Rev.Lett. **99** 171101 (2007)

検出手法の概観

IceCube の 100 倍の面積を合理的なコストで覆うにはニュートリノ反応からの電波放射を捉える手法の確立が不可欠

IceCube (スーパーカミオカンデ実験も同様)で測定しているチェレンコフ光放射の電波領域の極限 Askaryan 効果と呼ばれる

よく聞かれる質問

チェレンコフ放射は $\sim 1/\lambda^2$. 波長が長い電波領域は強度が足りないのでは？

答え

もはや光子ではなく、波。ポインティングベクトル(=Energy)が測定感度を決める。

1個の荷電粒子からの電場

$$R\vec{E}(\omega, \vec{x}) = \frac{e\mu_r i\omega}{2\pi\epsilon_0 c^2} \vec{\delta l}_\perp \underbrace{e^{i(\omega - \vec{k} \cdot \vec{v})t}}_{\text{位相}} e^{ikR},$$

ここがコヒーレントであれば、強度=Poynting Vector
は荷電粒子数の2乗に比例

検出手法の概観

IceCube の 100 倍の面積を合理的なコストで覆うにはニュートリノ反応からの電波放射を捉える手法の確立が不可欠

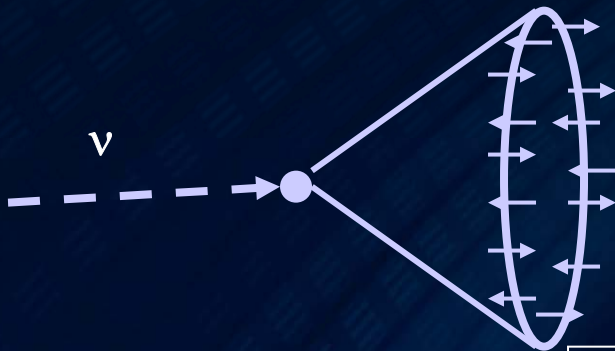
IceCube (スーパーカミオカンデ実験も同様)で測定しているチェレンコフ光放射の電波領域の極限 Askaryan 効果と呼ばれる

コヒーレント性

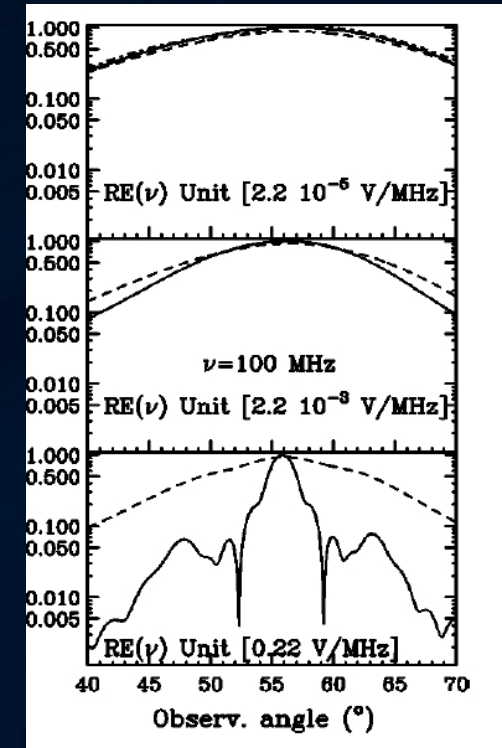
氷河中での電磁カスケードの大きさは $L \sim O(m)$ 程度

$$\frac{\omega}{c}(1 - n^{\text{ice}} \cos \theta_{\text{ch}}) L = 0.38 \left(\frac{\nu}{300 \text{ MHz}} \right) \ll 1$$

↑
~1.8@UHF



- コヒーレントな位相で放射
- 縦偏光である



➡ 雑音との弁別
が容易

検出手法の概観

電波雑音の弁別が鍵

南極現地での R&D

氷河

ARA検出器

電波パルサー

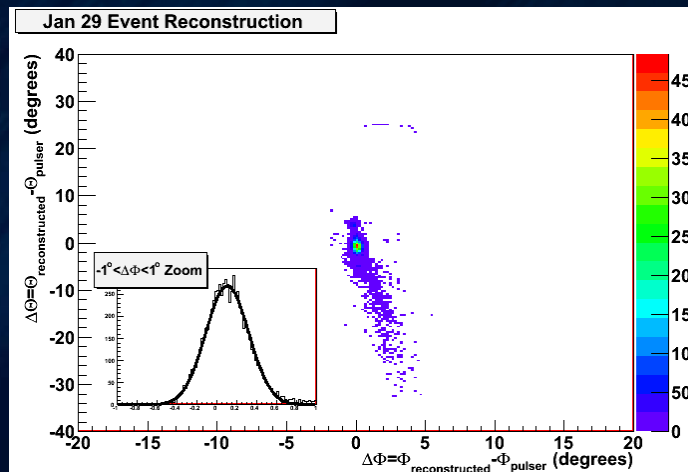
ニュートリノ反応に無関係な電波雑音は氷河の外からくる

太陽からのRF、熱雑音、人工活動雑音

ニュートリノ反応事象は、電波ノイズの無い氷河深部からくる

深度2600 m に埋設したパルサーからの擬似信号を弁別して、
方向(=深氷河、すなわち下方向からきた)を推定することができるか？

天頂角



反応点の方向を再構成
できた。

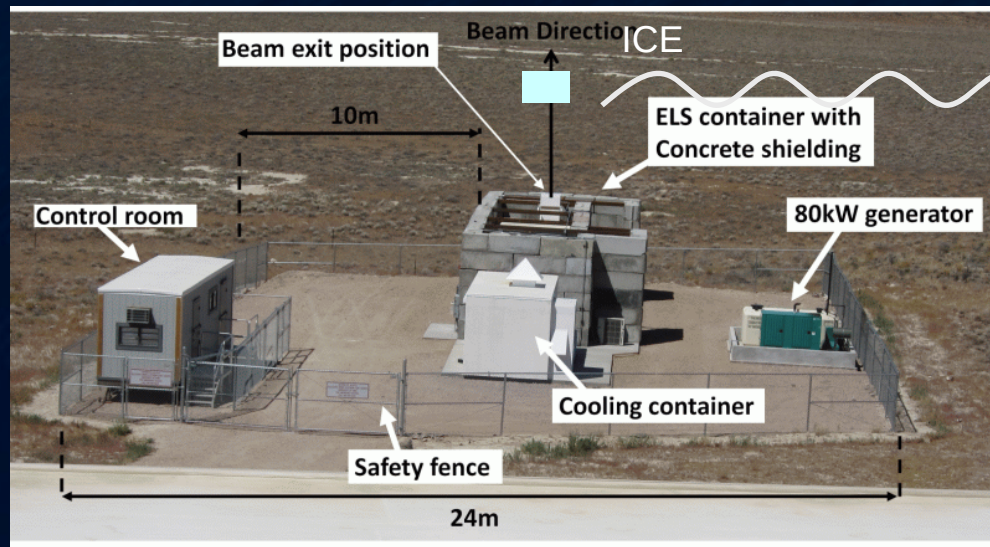
方位角

End-to-End calibration

$$R|\vec{E}(\omega, \vec{x})| \simeq \frac{e\mu_r i\omega}{2\pi\epsilon_0 c^2} e^{ikR} \sin\theta \int dz Q(z) e^{ipz}.$$

cascade 中の電荷超過
電子数>>陽電子数

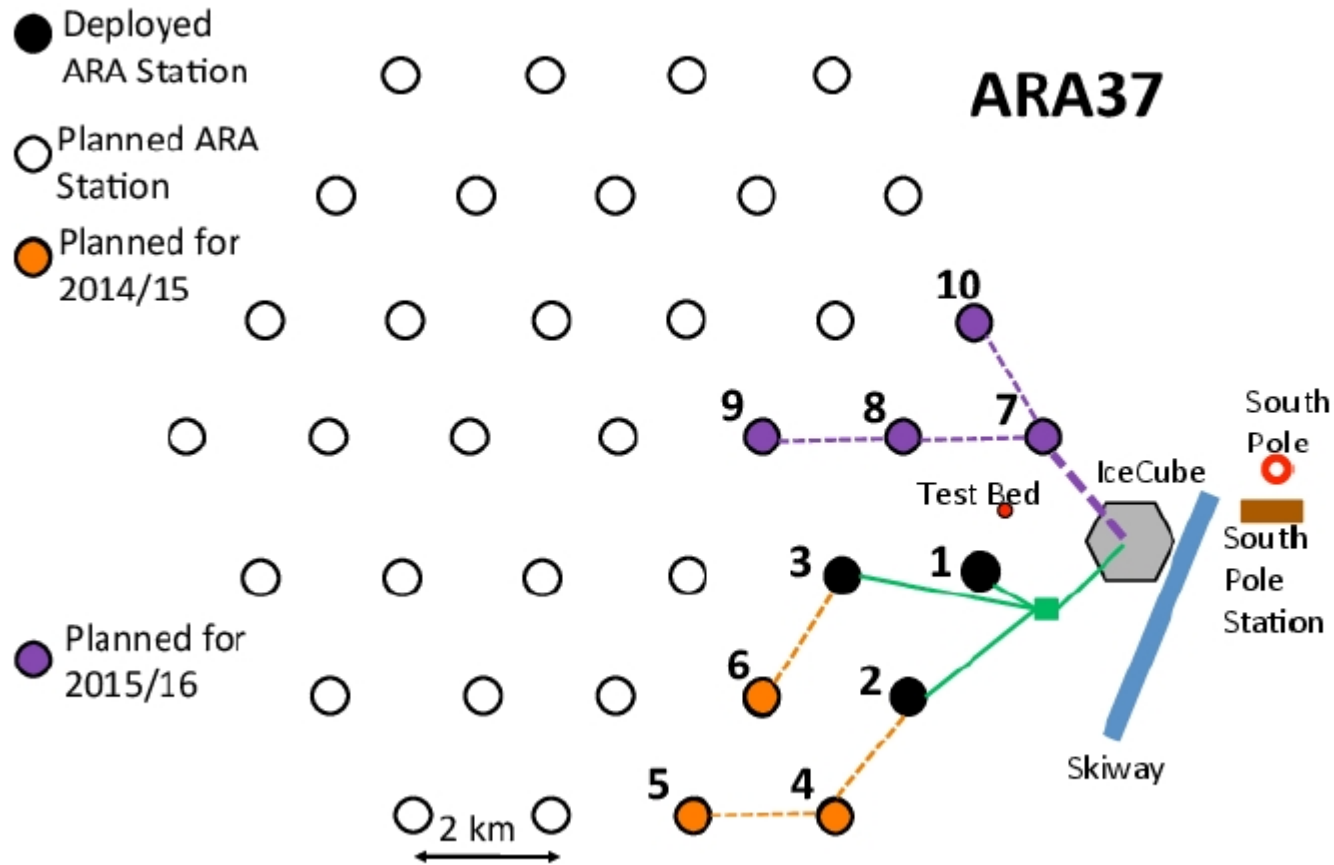
LINAC at the Telescope Array site



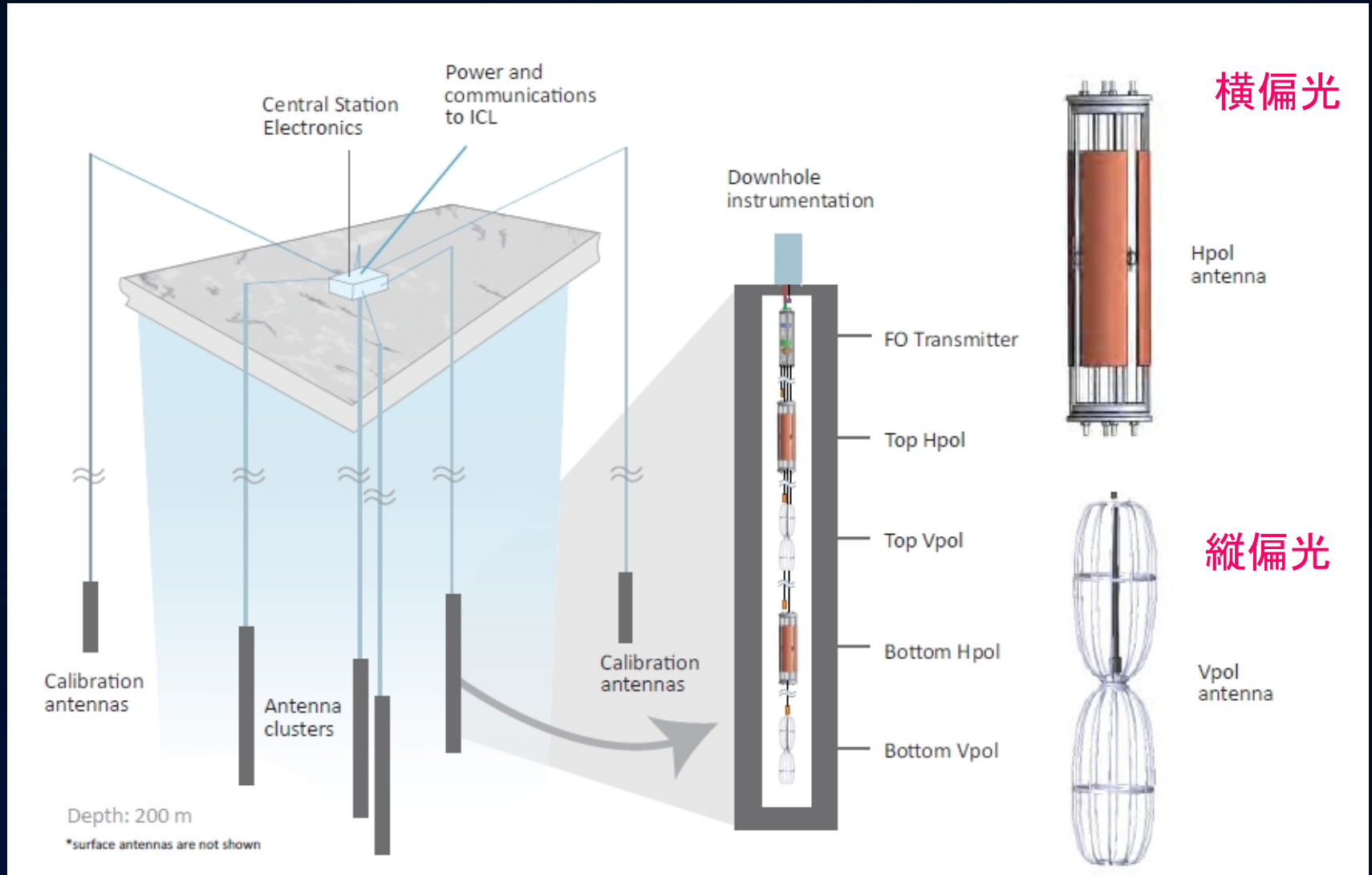
来年度冬の実験開始を目指している。

ARA

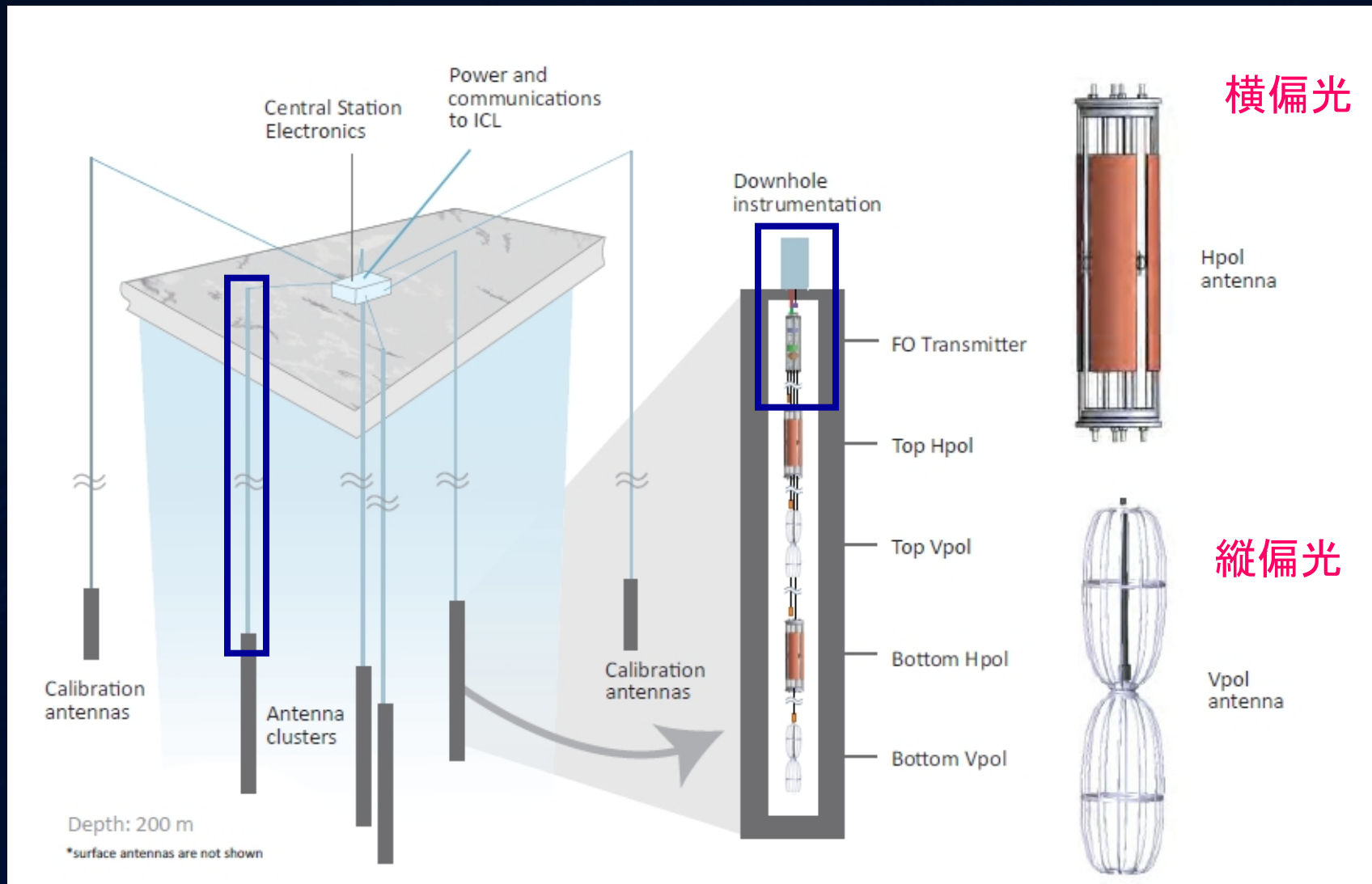
Askaryan Radio Array



The Station Layout

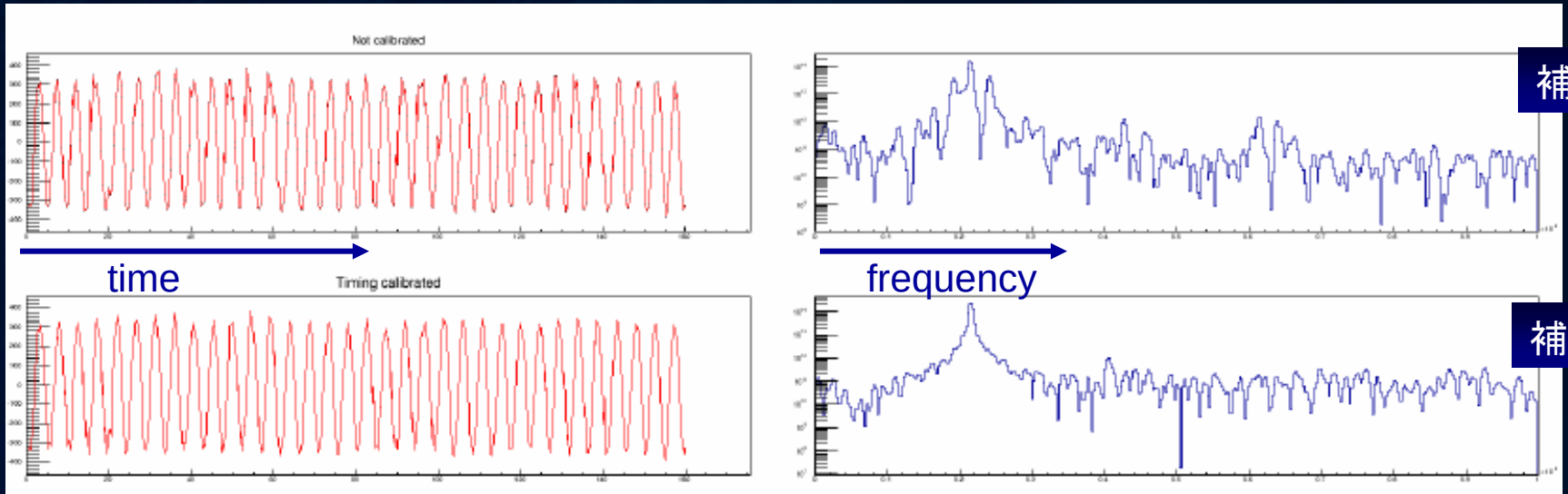
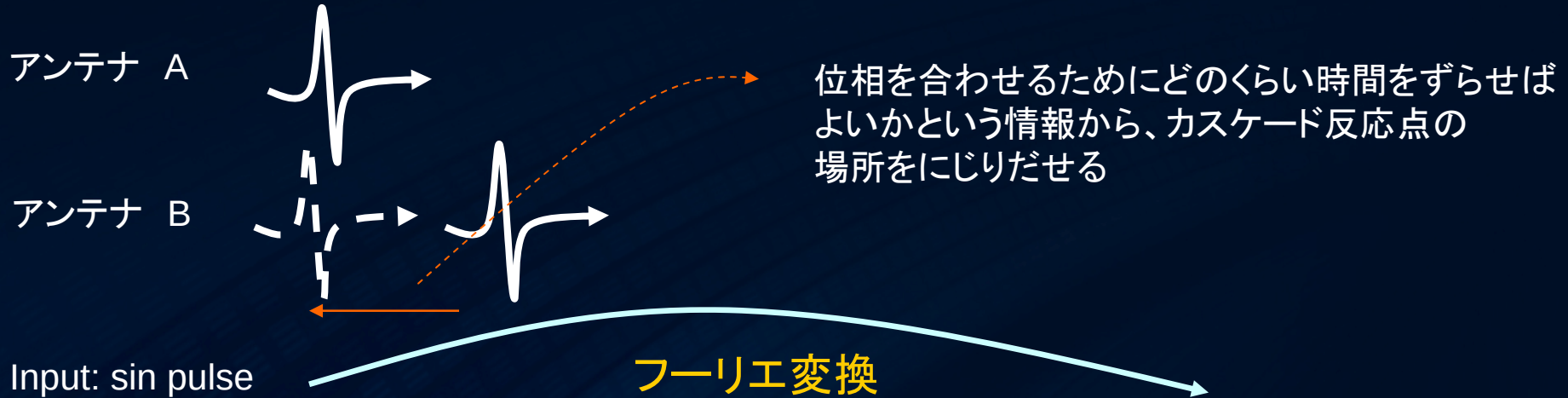


2013年度の日本の主担当



An Example of the calibration Waveform Timing Correction

波形の位相が正確に記録できれば干渉計の手法が使える



2014年度以降の日本の主担当

- 引き続き 光信号伝送部分
- 3 station 分のアンテナ製造

国内での製造ラインを現在計画中

- Linac を使った end-to-end calibration
- IceCube との統合シミュレーション・解析

IceCube サイドで超高エネルギー ν 探索を主導している強み

2014年度以降の日本の主担当

- 引き続き 光信号伝送部分
- 3 station 分のアンテナ製造

国内での製造ラインを現在計画中

- Linac を使った end-to-end calibration
- IceCube との統合シミュレーション・解析

IceCube サイドで超高エネルギー ν 探索を主導している強み



一緒にやらないかい

2014年度以降の日本の主担当

- 引き続き 光信号伝送部分
- 3 station 分のアンテナ製造

国内での製造ラインを現在計画中

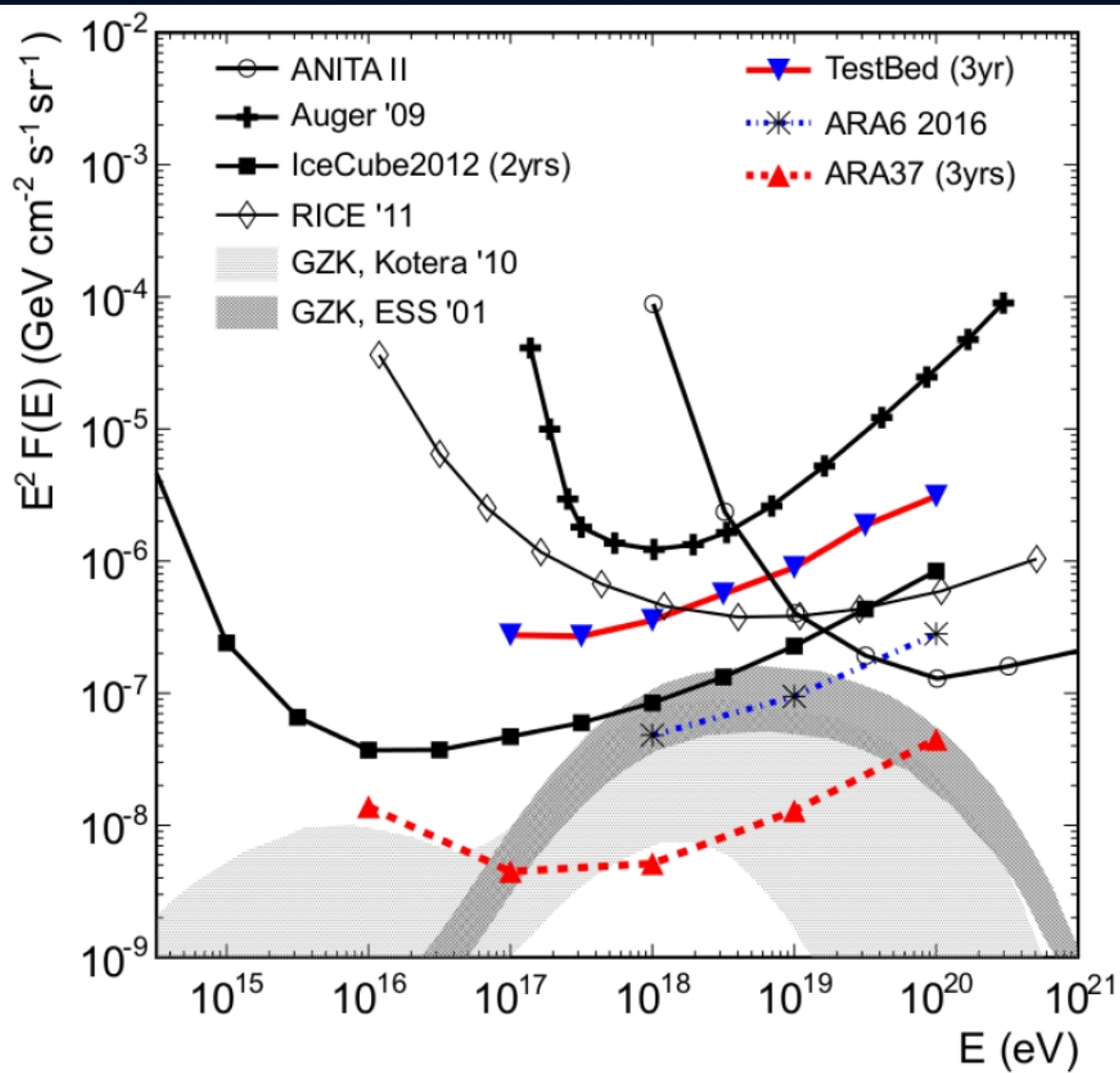
- Linac を使った end-to-end calibration
- IceCube との統合シミュレーション・解析

IceCube サイドで超高エネルギー ν 探索を主導している強み



ボーリング大会に優勝
したついでに
やってやるぜ

The ARA Sensitivity



ARA

Askaryan Radio Array

