



# 高エネルギーニュートリノ天文学

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター  
(ICEHAP)

吉田 滋

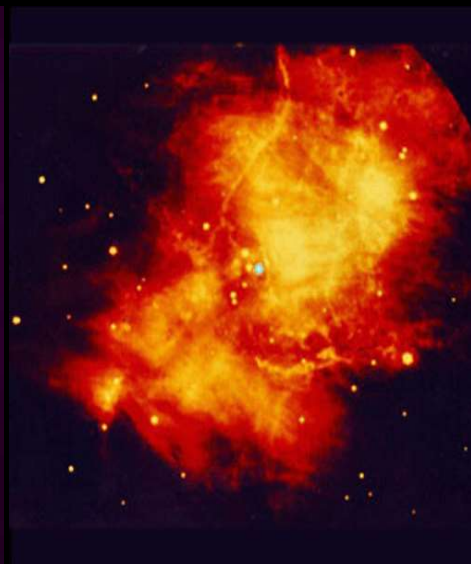
<http://www.icehap.chiba-u.jp/>

# 目にうつらない光が教えてくれる宇宙

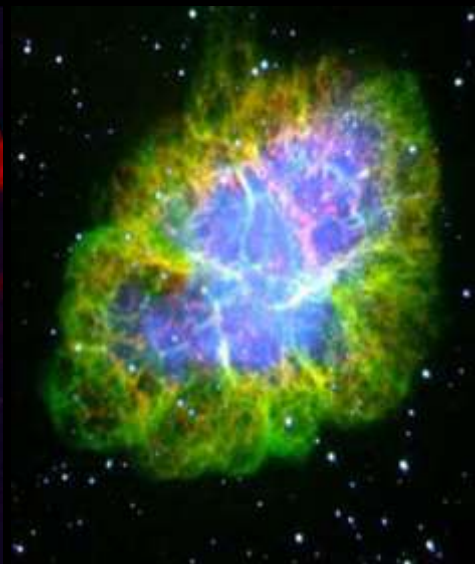
ラジオ線でみる



赤外線で見ると



可視光で見ると



X線でみる



# 目にうつらない**物質**の宇宙

目に見えないものもいっぱいある

宇宙からくるいろいろな粒子 ...

陽子など私たちをつくっている粒子  
知られていない未知の粒子 (?)

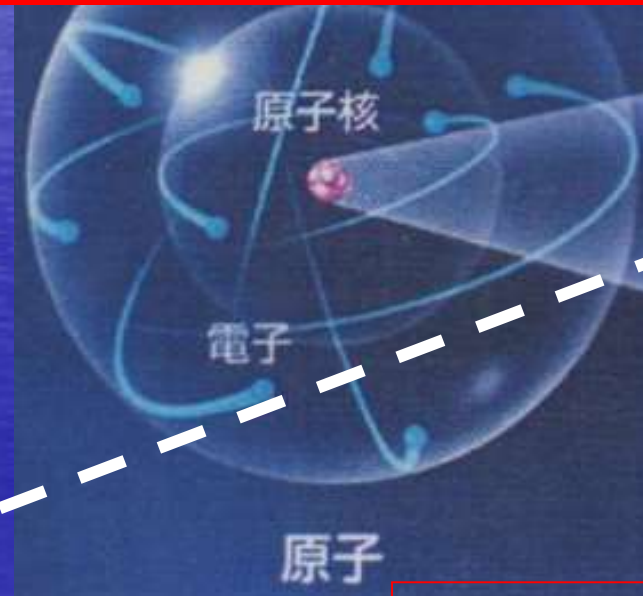
ニュートリノ



# ニュートリノって？ What is “neutrino” ?

だいたいの答え：電子から電荷を取り(電気を帯びてない)、また重さをほとんど取ったもの。

星の内部、高密度ガスに覆われた天体  
あるいは遠方宇宙の情報が得られる！

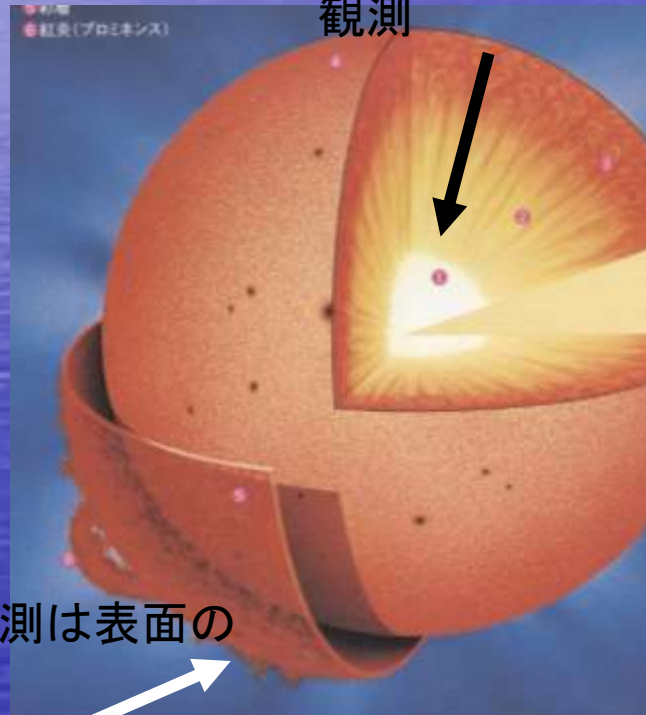


何でも突き抜けて行く！！

# ニュートリノ天文学 Neutrino Astronomy

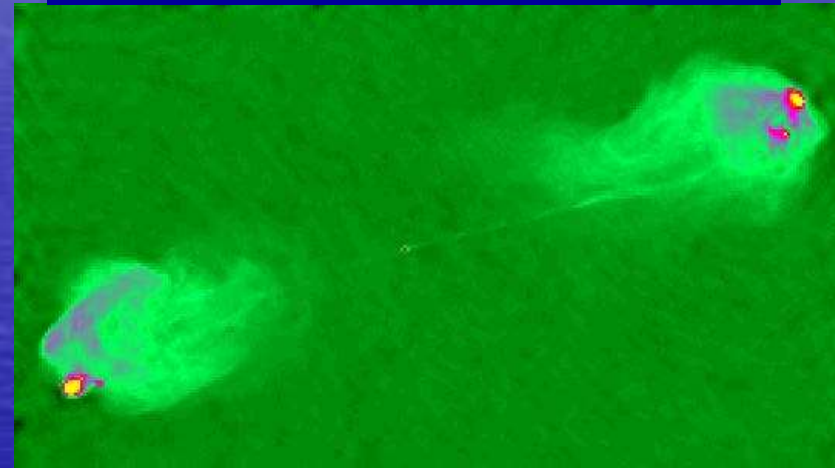
## 星の内部をみる

ニュートリノの観測  
は中心部の様子の  
観測



光の観測は表面の  
観測

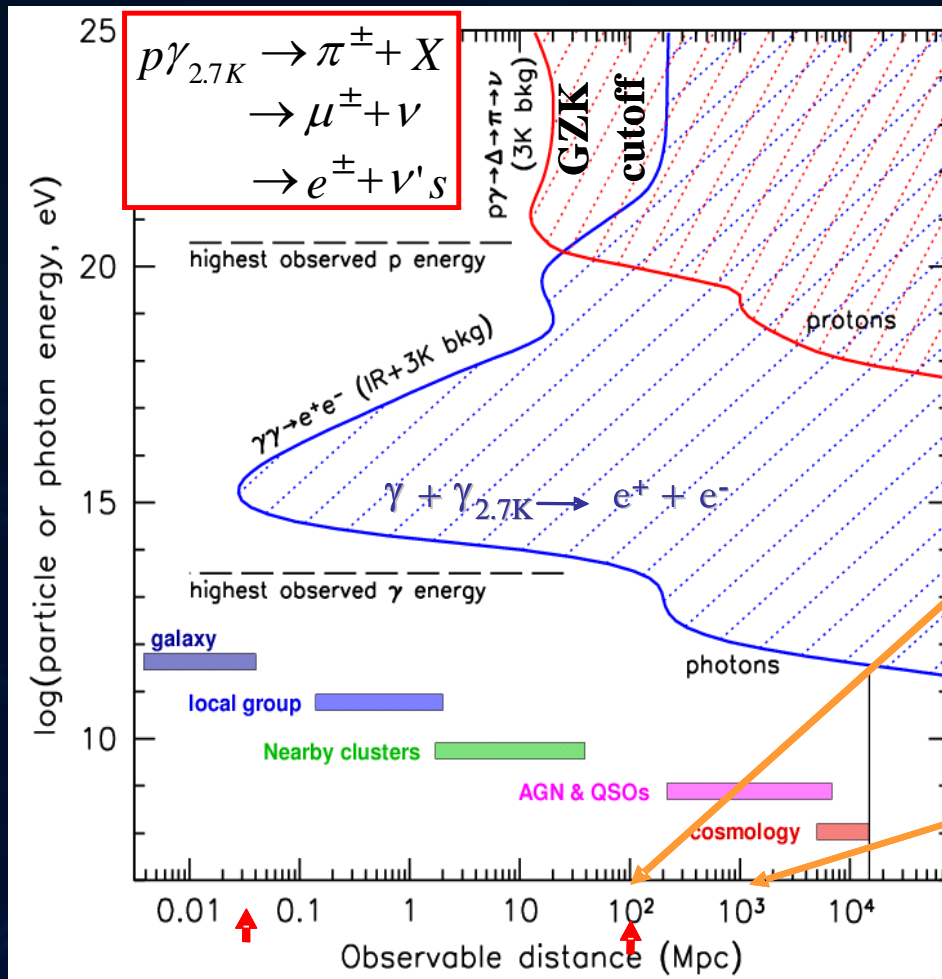
## 遠方宇宙の高エネルギー 天体をみる



VLA image of Cygnus A

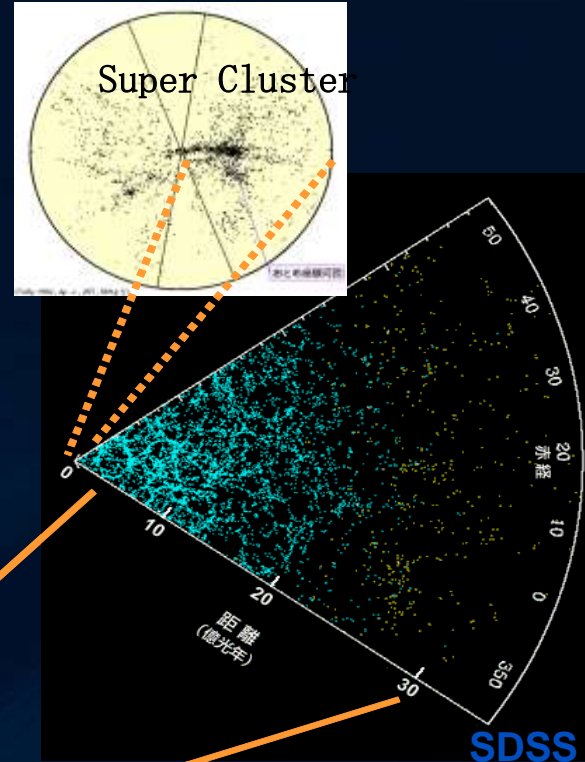
高エネルギーニュートリノ天文学

# Why $\nu$ is so powerful to explore high energy universe?



Our Galaxy

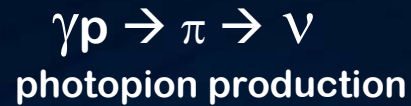
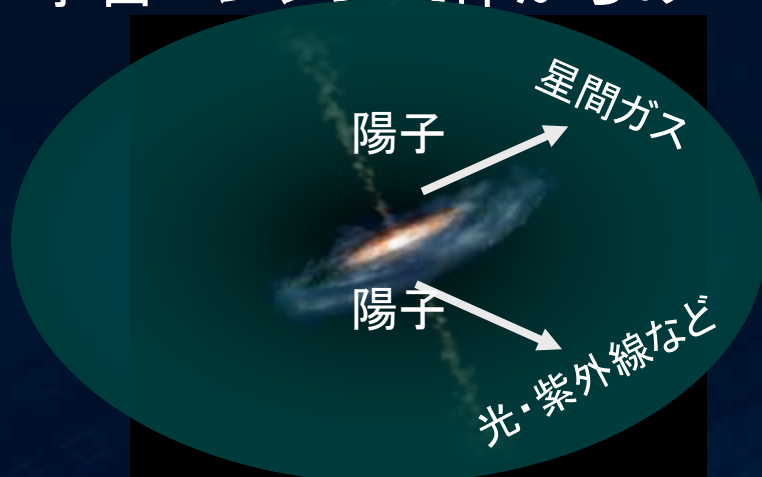
Super Cluster



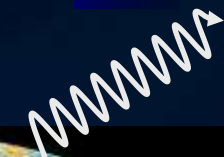
Distant Young Universe

# 高エネルギー宇宙ニュートリノ どのようにして作られるか？

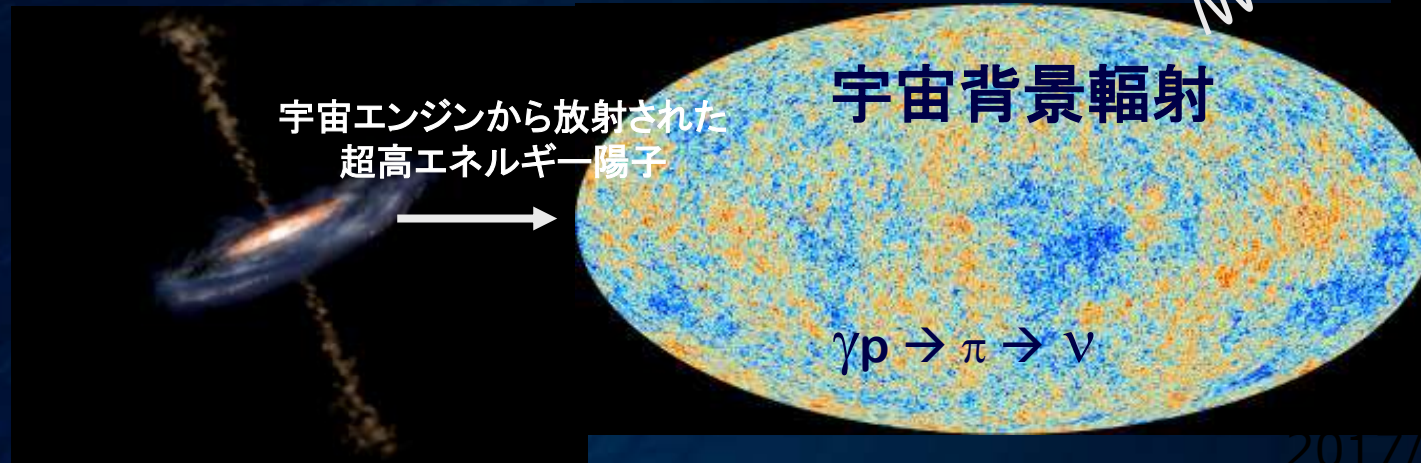
## 宇宙エンジン天体からのニュートリノ



$\nu$



## ビッグバン宇宙背景輻射由来のニュートリノ



# 「天然」ニュートリノの源 Neutrino Natural Source

- **地球大気**: 宇宙から飛来する放射線が大気中の原子核と衝突することで作られる。毎秒約1000個のニュートリノが、あなたの体を突き抜けます。
- 安心してください。体内で反応する確率はせいぜい一生に1回あるかどうかです。
- **太陽**:  $10^{14}$  個が毎秒体を突き抜けています(夜間でも)。
- **超新星**: 1987年に一生を終えた星からニュートリノが飛来しました。



# ニュートリノ望遠鏡はどのくらい 巨大である必要があるでしょう?

- 一生 (30,000 days) に1度、大気ニュートリノが体内 (100 kg or 0.1 m<sup>3</sup>) で反応するという事は
- 1日当り0.00003回が0.1 m<sup>3</sup>で、あるいは
- 1日当り3回、100,000 m<sup>3</sup> (スーパ神岡実験の大きさ) 反応します。
- 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (1 km<sup>3</sup>) では1日当り3万個のニュートリノが反応します。しかし・・・
- 高エネルギーニュートリノは大気ニュートリノの20万分の1の頻度しかない。つまり10日に2個のニュートリノが反応するかどうか・・・

# 南極点

これ以上無い極限環境

Dark sector

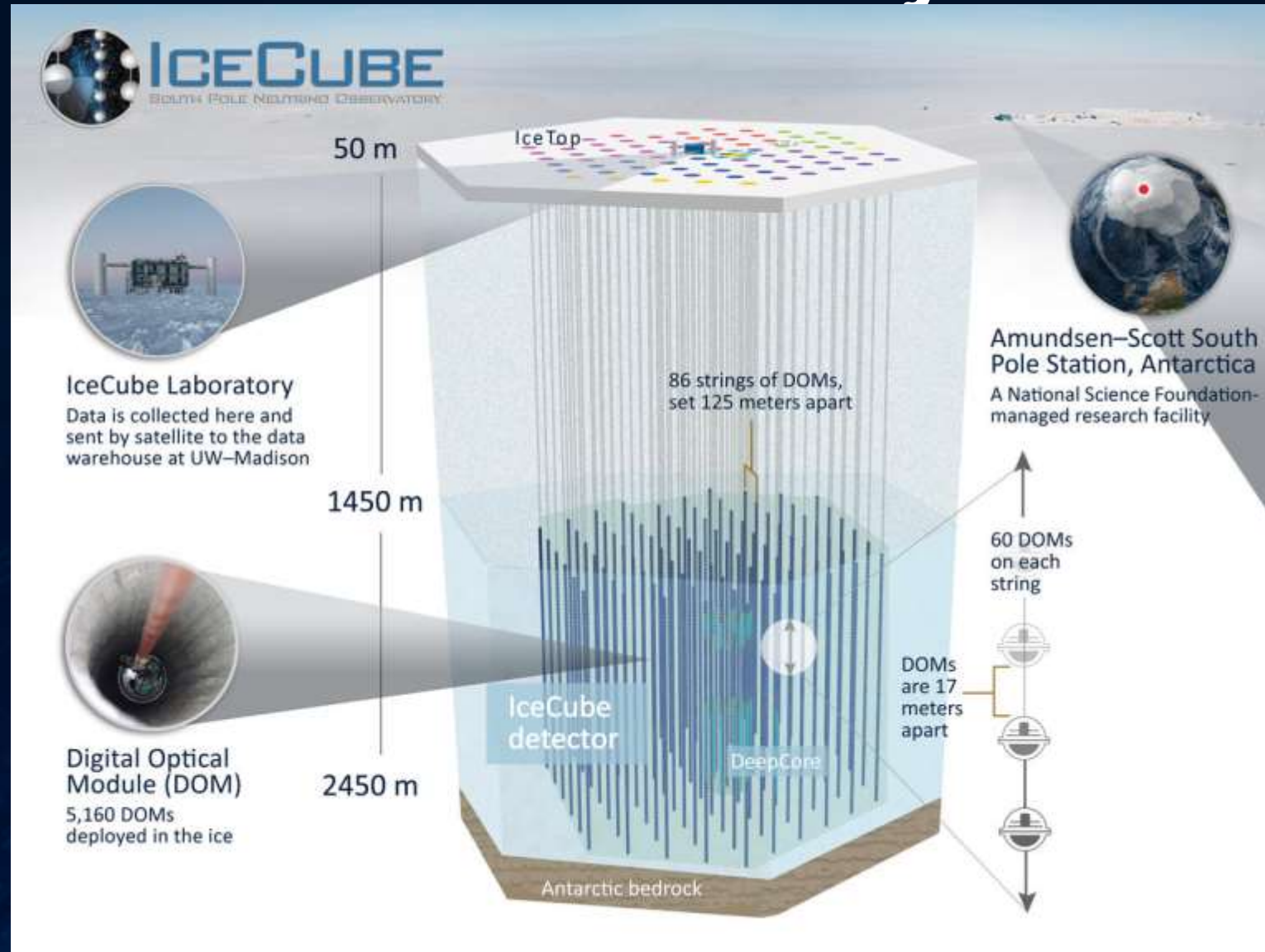
Skiway

Dome

IceCube  
(アイスキューブ)



# The IceCube Neutrino Observatory





# The IceCube Collaboration



University of Alberta

Clark Atlanta University  
Georgia Institute of Technology  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Ohio State University  
Pennsylvania State University  
Southern University and A&M College  
Stony Brook University  
University of Alabama  
University of Alaska Anchorage  
University of California-Berkeley  
University of California-Irvine  
University of Delaware  
University of Kansas  
University of Maryland  
University of Wisconsin-Madison  
University of Wisconsin-River Falls

Chiba University

University of Oxford

Université Libre de Bruxelles  
Université de Mons  
University of Gent  
Vrije Universiteit Brussel

University of Adelaide

University of Canterbury

Stockholm University  
Uppsala Universitet

Deutsches Elektronen-Synchrotron  
Humboldt Universität  
Ruhr-Universität Bochum  
RWTH Aachen University  
Technische Universität München  
Universität Bonn  
Universität Dortmund  
Universität Mainz  
Universität Wuppertal

Ecole Polytechnique  
Fédérale de Lausanne  
University of Geneva

## International Funding Agencies

Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS)  
Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen (FWO-Vlaanderen)

Federal Ministry of Education & Research (BMBF)  
German Research Foundation (DFG)  
Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

Knut and Alice Wallenberg Foundation  
Swedish Polar Research Secretariat  
The Swedish Research Council (VR)

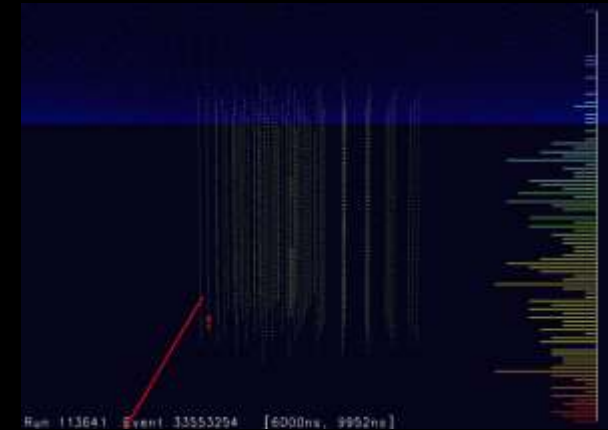
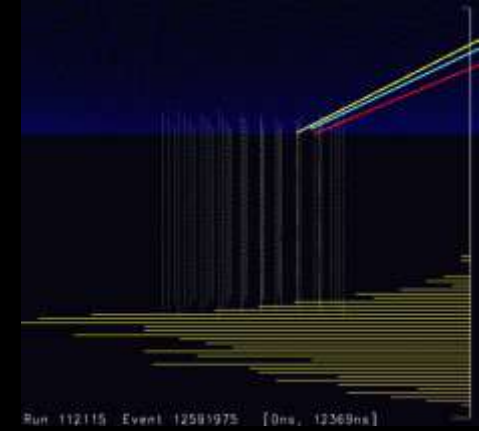
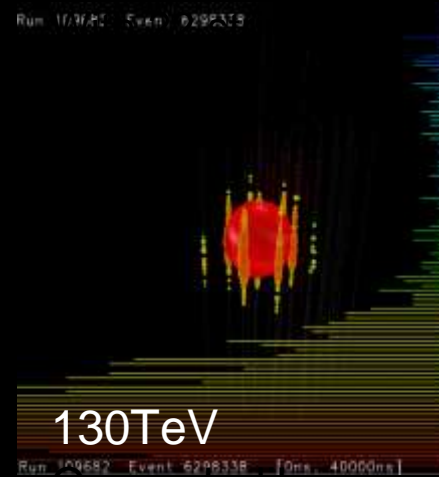
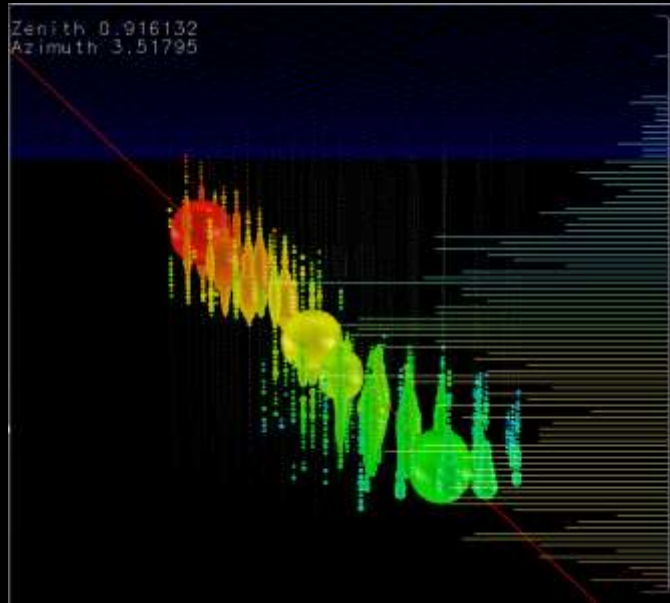
University of Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF)  
US National Science Foundation (NSF)

# 南極点での建設 2005-2011





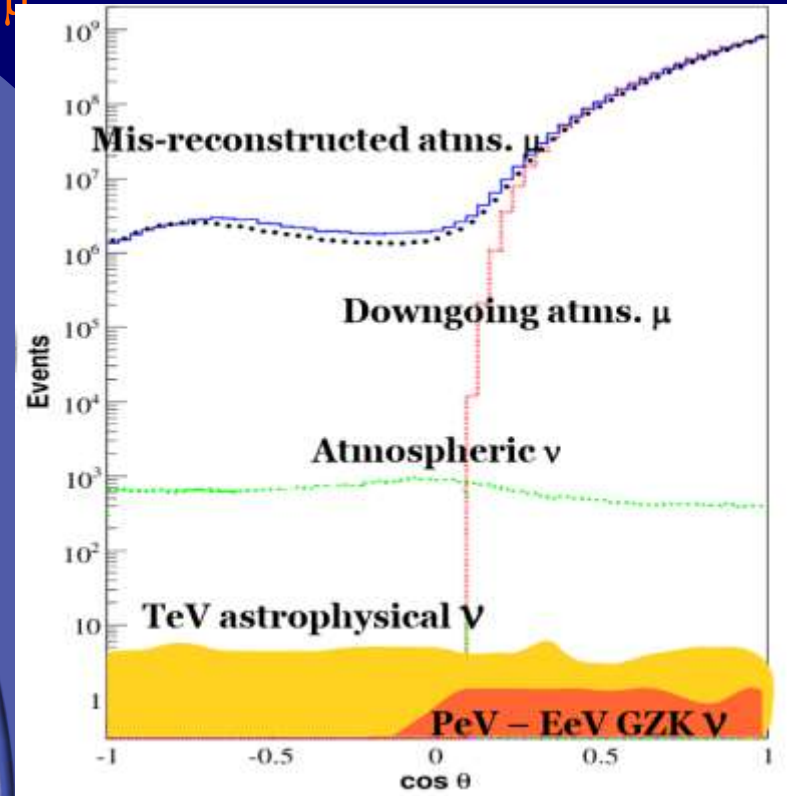
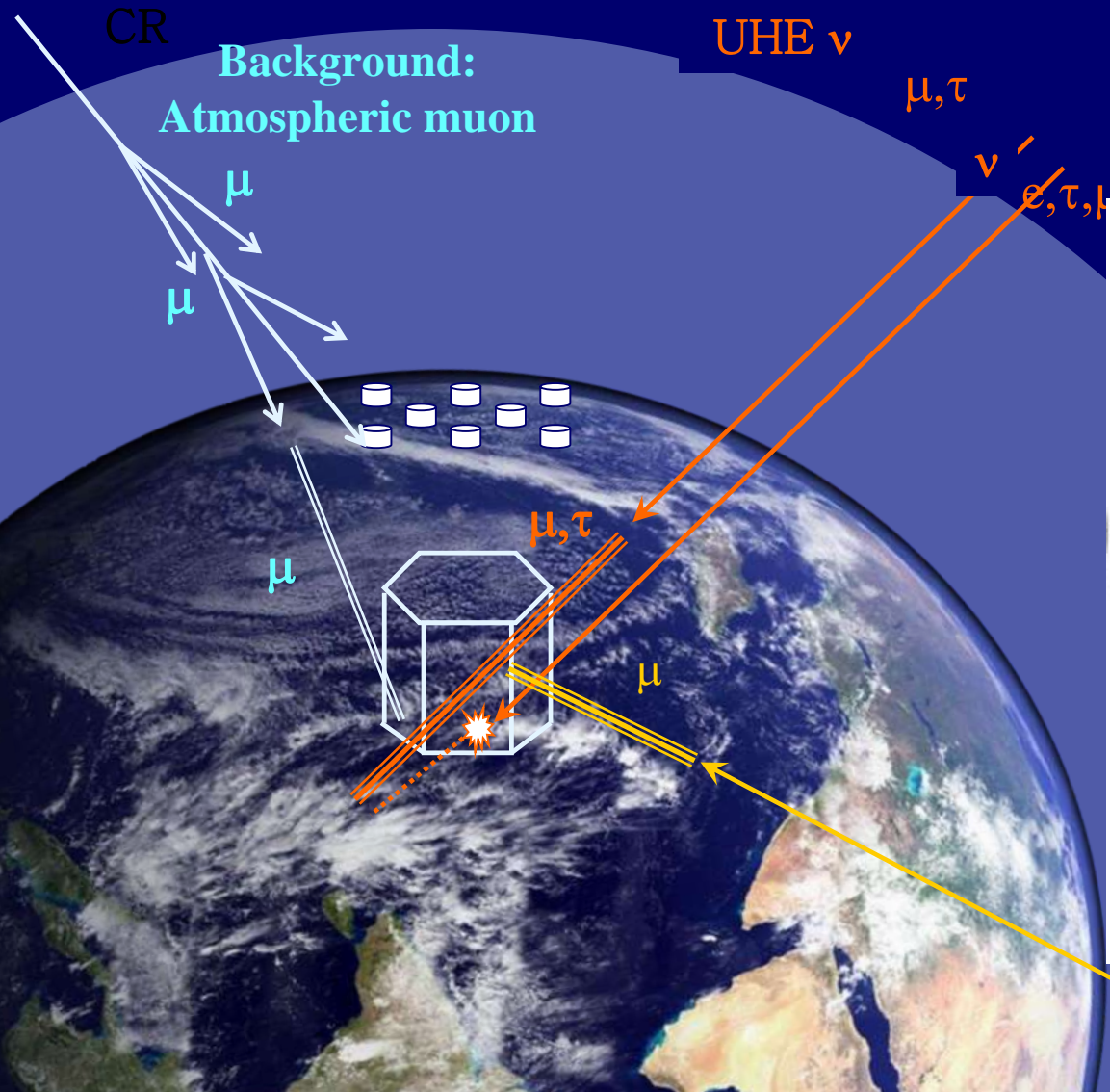
# IceCube Event Gallery



Energy threshold  $\sim 10$  GeV  
 $>10^8$  muons/day  
 $>200$  neutrinos/day

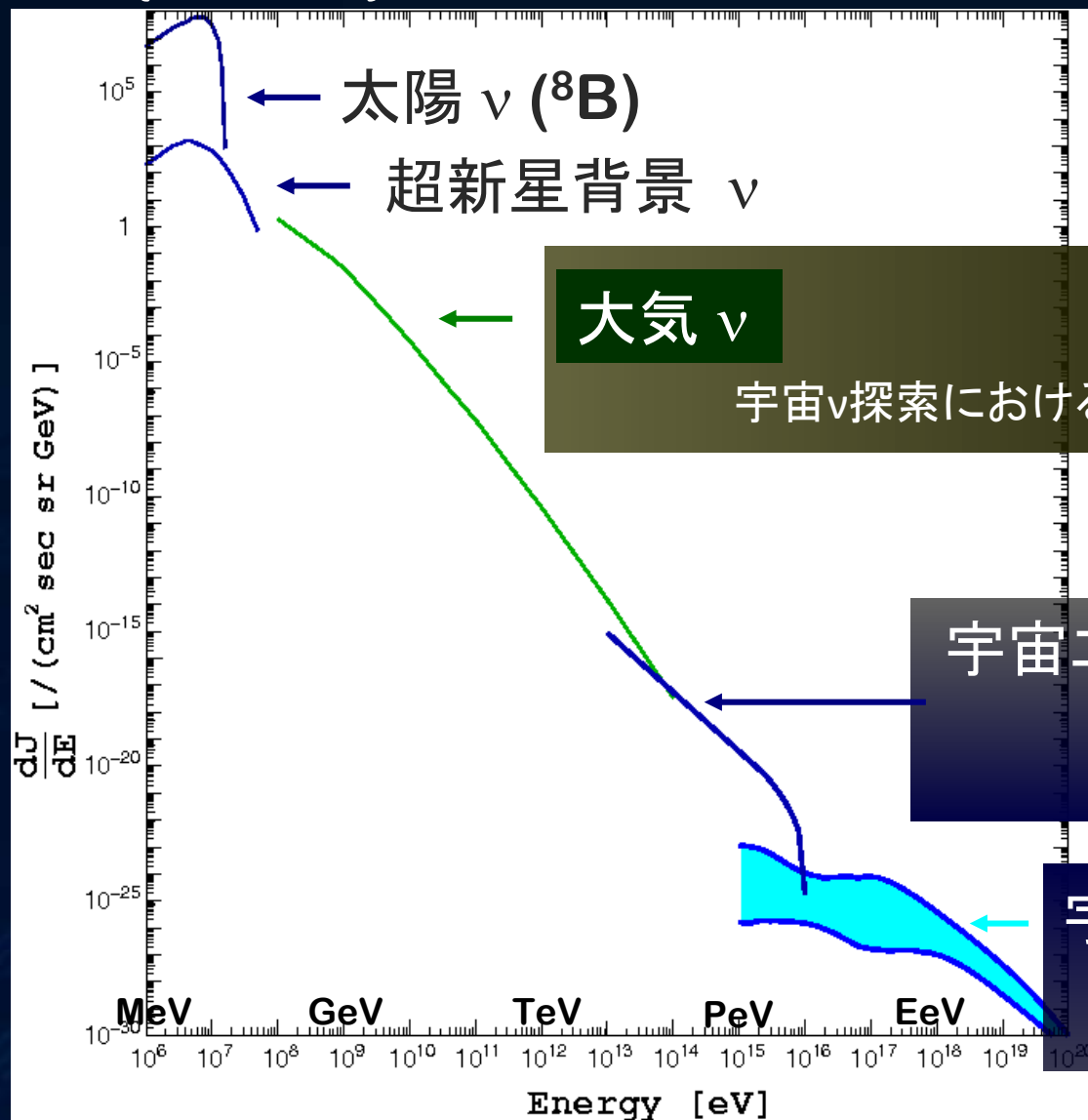
# Neutrino Signatures

UHE ( $>100$  PeV) VHE ( $>100$  TeV)



VHE  $\nu_\mu$

# (宇宙)ニュートリノのスペクトル



大気  $\nu$   
宇宙 $\nu$ 探索における雑音

宇宙エンジン天体からの $\nu$   
今回初めて検出された

宇宙背景輻射由来の $\nu$   
宇宙の歴史と関連  
まだ検出されていない。

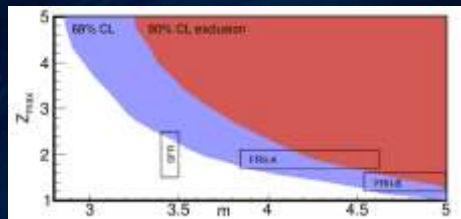
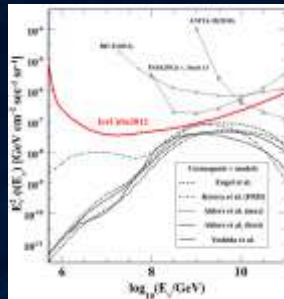


# 超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索

$$> \text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$$



グループの基幹プロジェクト



Phys. Rev. Lett. 111,  
021103

高エネルギー宇宙  
ニュートリノ存在の最初の証拠

Phys. Rev. D 88,  
112008

超高エネルギー宇宙ニュートリノ  
存在量の測定

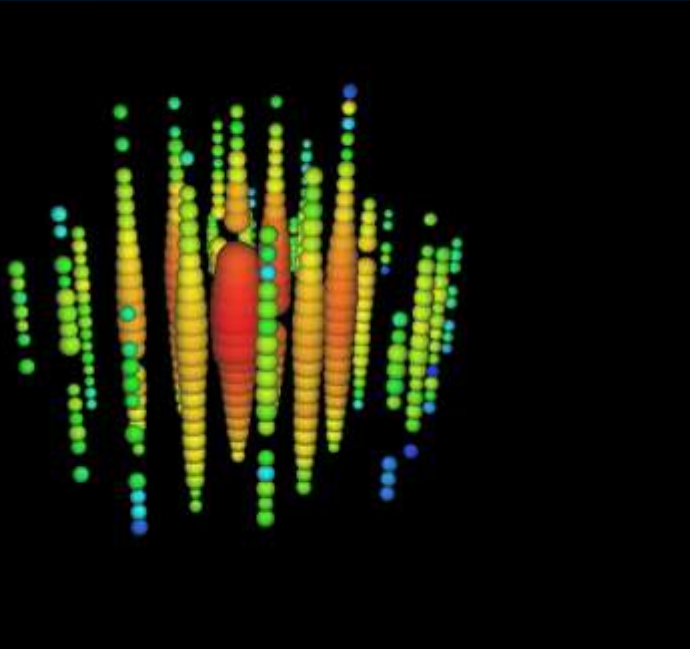
Phys. Rev. Lett. 117,  
241101

超高エネルギー粒子を放出する  
宇宙エンジン天体の性質

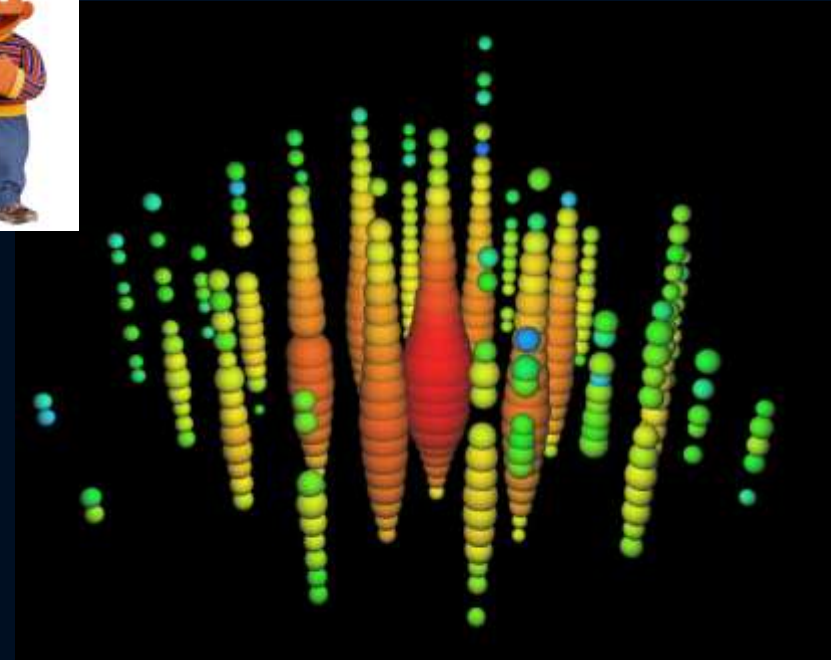
# the 1<sup>st</sup> discovery of the PeV $\nu$



"Bert" 1.04 PeV



"Ernie" 1.14 PeV



2.8 $\sigma$  excess on the atmospheric background  
very the 1<sup>st</sup> indication of astrophysical  $\nu$

# Two events passed the selection criteria

2 events / 672.7 days - background (atm.  $\mu$  + conventional atm.  $\nu$ ) expectation 0.14 events  
preliminary p-value: 0.0094 ( $2.36\sigma$ )

Run119316-Event36556705

Jan 3<sup>rd</sup> 2012

NPE  $9.628 \times 10^4$

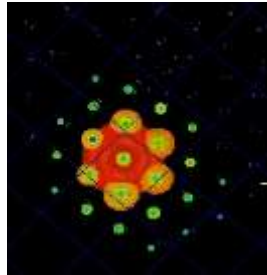
Number of Optical Sensors 312

Run118545-Event63733662

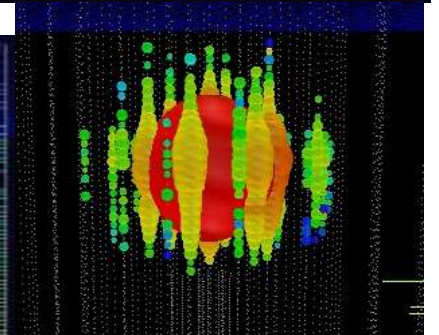
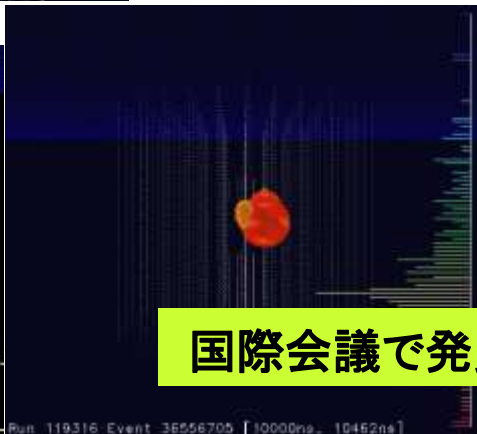
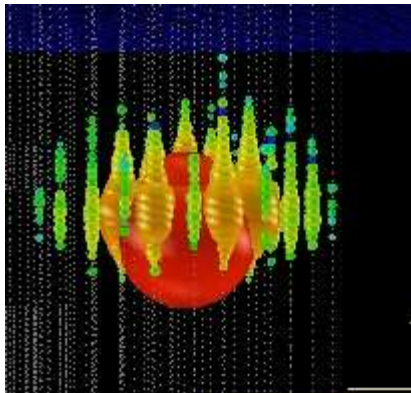
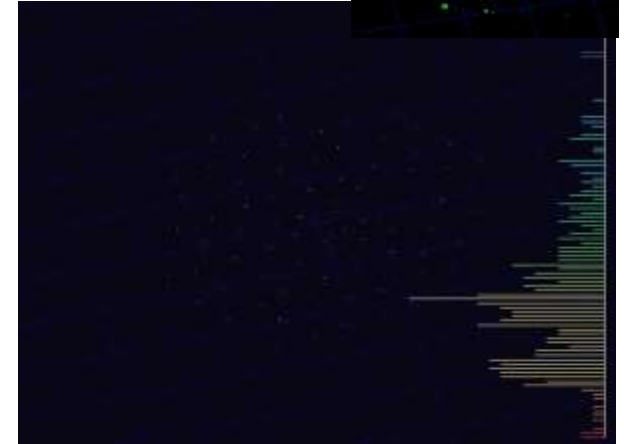
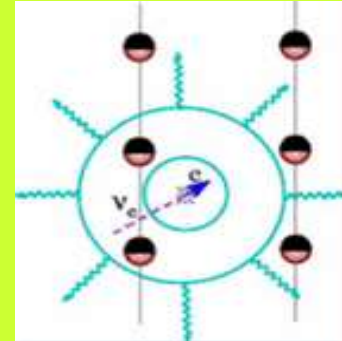
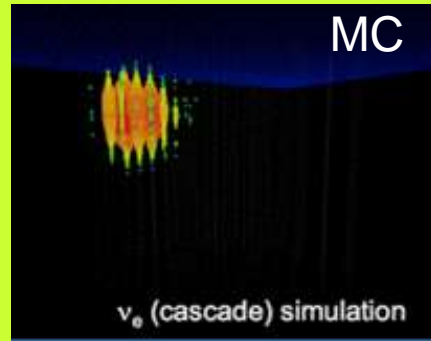
August 9<sup>th</sup> 2011

NPE  $6.9928 \times 10^4$

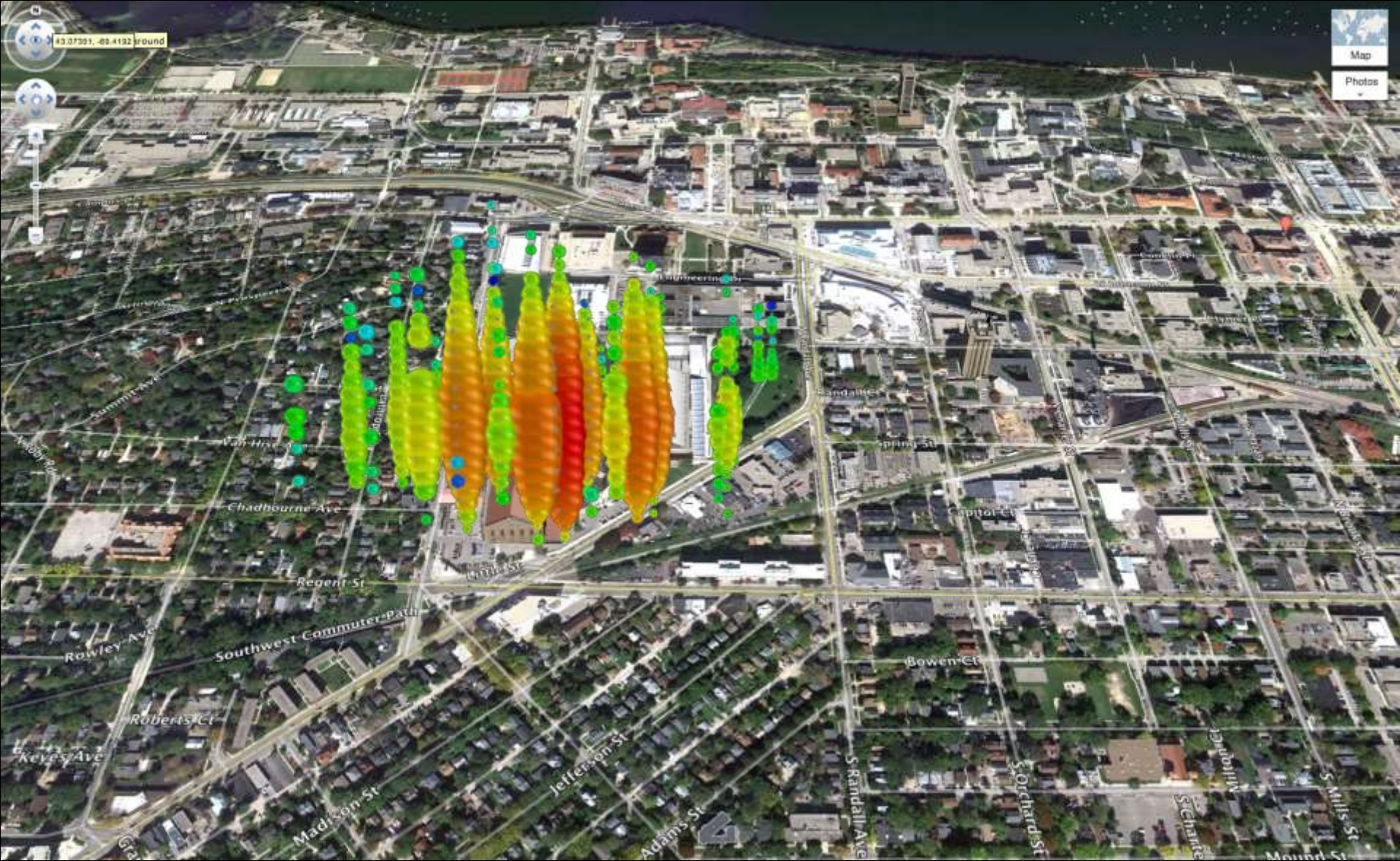
Number of Optical Sensors 354



CC/NC interactions in the detector



国際会議で発見を初公表したときの歴史的スライド



# ニュートリノ観測

## 千葉大など 南極大陸で2回 研究グループ

宇宙から届く高エネルギーの素粒子「ニュートリノ」を、南極大陸で氷を使って検出するプロジェクトを進めていた千葉大などが参加する研究グループが、他の天体から届いたニュートリノを2回にわたり、観測したと発表した。

千葉大など 岐阜県のカミオカンデ実験施設で超新星爆発によるニュートリノを観測したこ

研究グループ 0人の研究者が参加する「アイスキューブ」

地盤面まで貫通する計

研究グループと、今回観測の超新星ノと比べ、倍以上の高倍率を持ってあるといこのグループ大など世

### 超高エネルギーのニュートリノ検出

#### 世界初、未知の天体から飛来か

宇宙物理学に新たな道筋  
千葉大学は、千葉市稲毛区の同大学西千葉キャンパスで記者会見を開き、南極大陸下の氷河中に設置した観測施設で、これまでに見つからなかった超高エネルギーのニュートリノを検出したと発表した。超巨大銀河など未知の天体から飛来した可能性があり、宇宙の謎に迫る宇宙物理学の新たな扉を開く成果という。同大などが参加する国際共同実験「アイスキューブ」プロジェクトが観測に成功した。同大によると、同プロジェクトチームは、2005年から約6年か、南極点直下の氷河中に世界最大規模のニュートリノ観測施設を持つ光を観測する必要があ

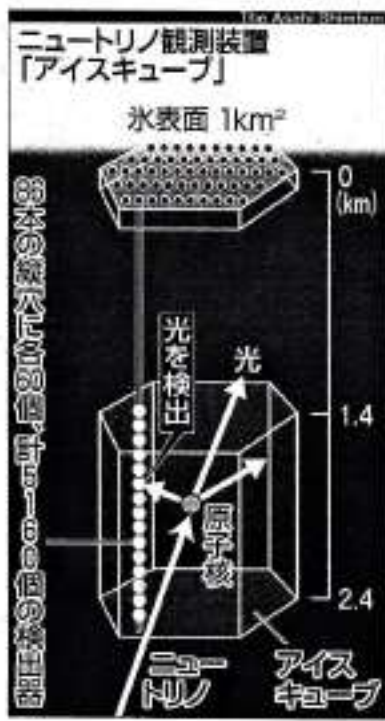
## エネルギー1000倍ニュートリノ

### 8カ国グループ、南極で観測

南極の水約10億トンを使った観測装置「アイスキューブ」が、これまでの記録の1千倍のエネルギーを持つ素粒子ニュートリノを2個捕らえた。ニュートリノで地球を透視する観測も進

む。千葉大など8カ国の研究者のグループが今月、京都市のニュートリノ・宇宙物理国際会議で発表した。アイスキューブは南極の氷河に120メートル間隔で86本の縦穴を掘り、地下に60

観測を始め、8月と今年1月の2回、1千兆電子ボルト以上という超高エネルギーのニュートリノによる光を捕らえた。人類が加速器でつくれるエネルギーの約1千倍にあたる。



また、東大地震研究所のグループは、地球を通り抜けた後にアイスキューブで捕らえたニュートリノの数が、地球の核を通ると38個と多く、密度の違いで差が出ていることを確かめた。

(報道信太郎)





CHIBA  
UNIVERSITY



physicsworld  
**BREAKTHROUGH  
OF THE YEAR**  
**2013**









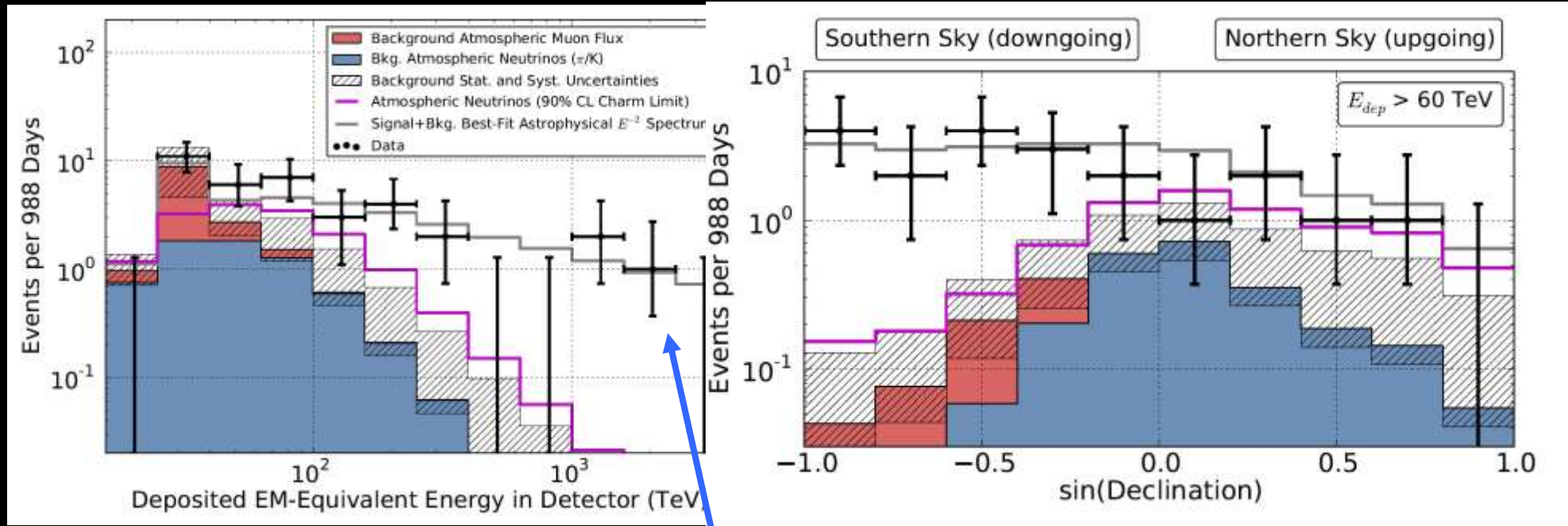
TeV **PeV** EeV

# Mid Energy (60 TeV-)

# HESE

IceCube 3 years data (2010-2013)

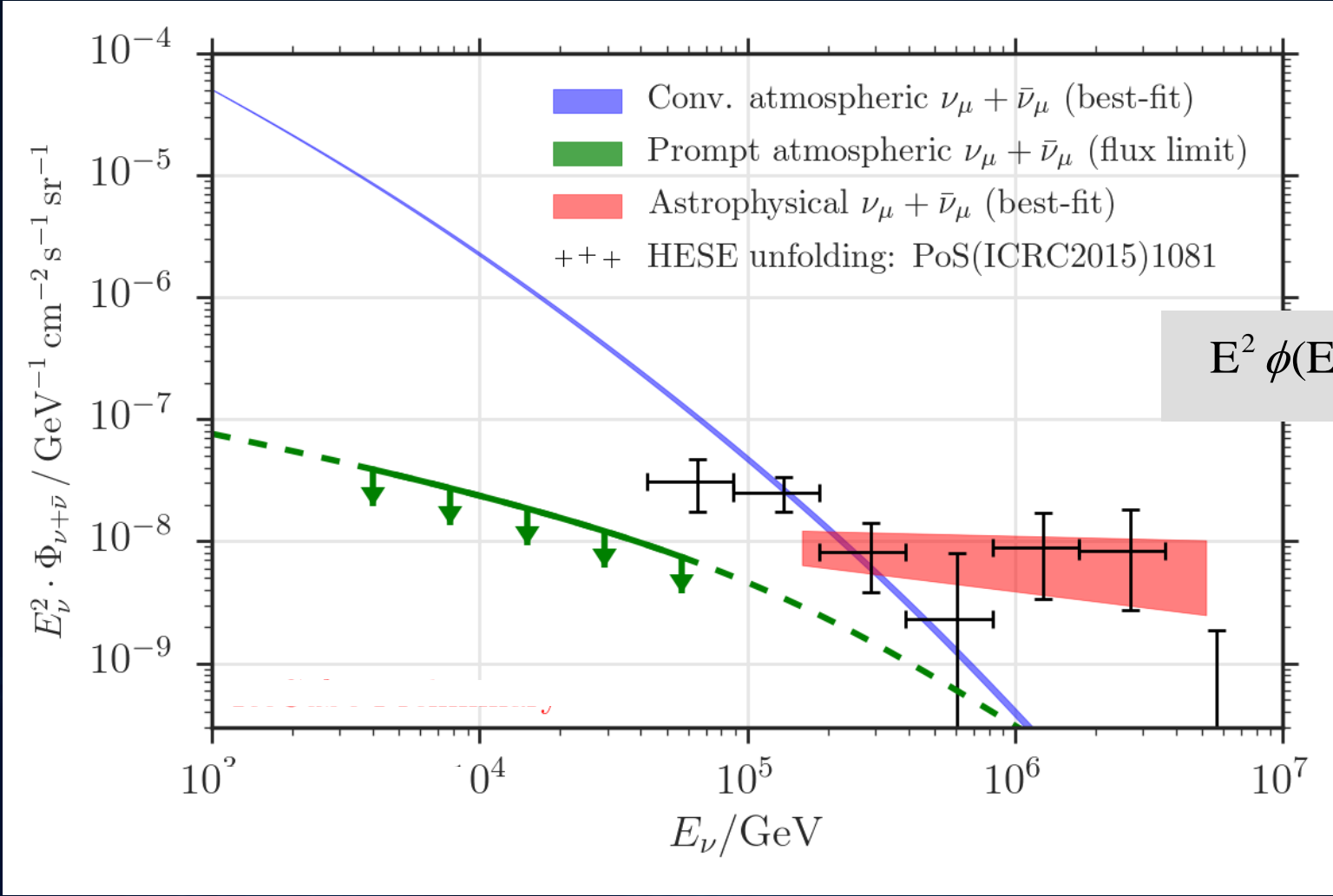
IceCube collaboration  
Phys. Rev. Lett. 113, 101101



2PeV  
"Big Bird"



# VHE (100 TeV-PeV)

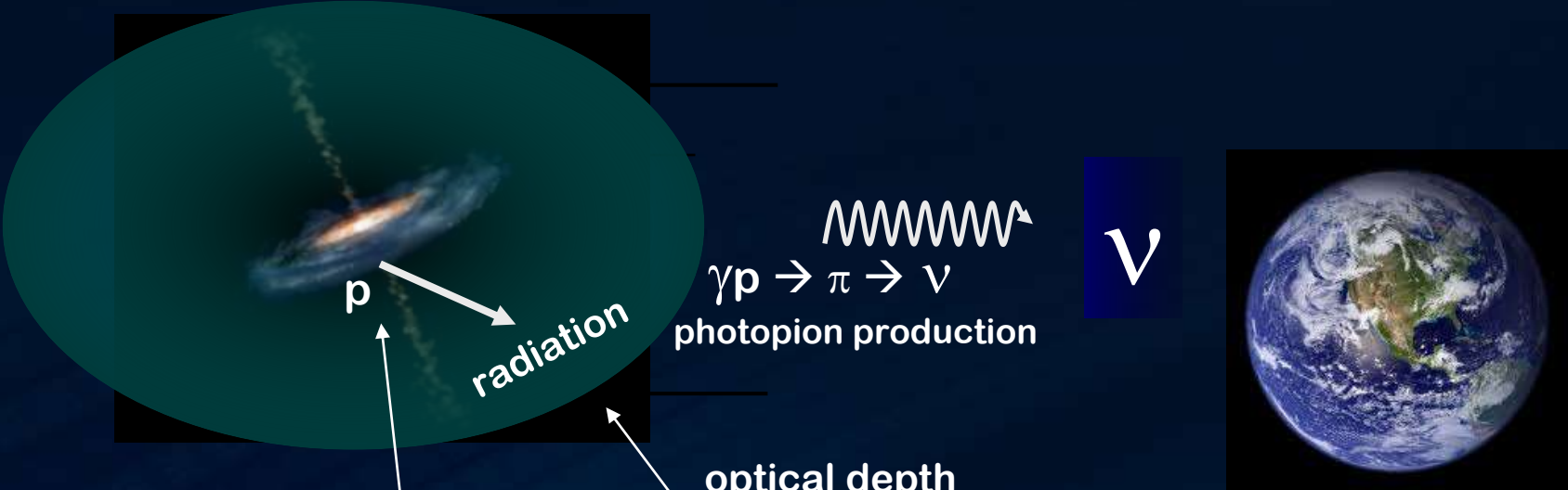


$$E^2 \phi(E) \approx 8 \times 10^{-9} \text{ GeV/cm}^2 \text{ sec sr}$$

per flavor flux



# Constraints on the optical depth and extra-galactic CR flux



optical depth (<1)

$$\frac{dJ_\nu}{dE} \sim F_{\text{GZK CR}} \frac{R_{\text{cosmic}}}{R_{\text{GZK}}} E^{-\alpha} \tau(E) \zeta(z, m, z_{\text{max}}, E)$$

Constrain them by the IceCube 100TeV-PeV observation

Fixed to the Star Formation Rate

# subPeV-Energy $\nu$ origin

Probably  $p\gamma$ , but not so many candidates



GRB

$10^{43-44}$  erg/Mpc<sup>3</sup> year

$\ll$  10PeV-CR

$10^{46}$  erg/Mpc<sup>3</sup> year



BL Lac

Leptonic model

$\tau \ll 1 \rightarrow$

needs a plenty of protons to explain the IceCube flux, would *exceed* the CR flux

Hadronic model

strongly constrained by the trans-PeV to EeV  $\nu$  observation

(will discuss later)



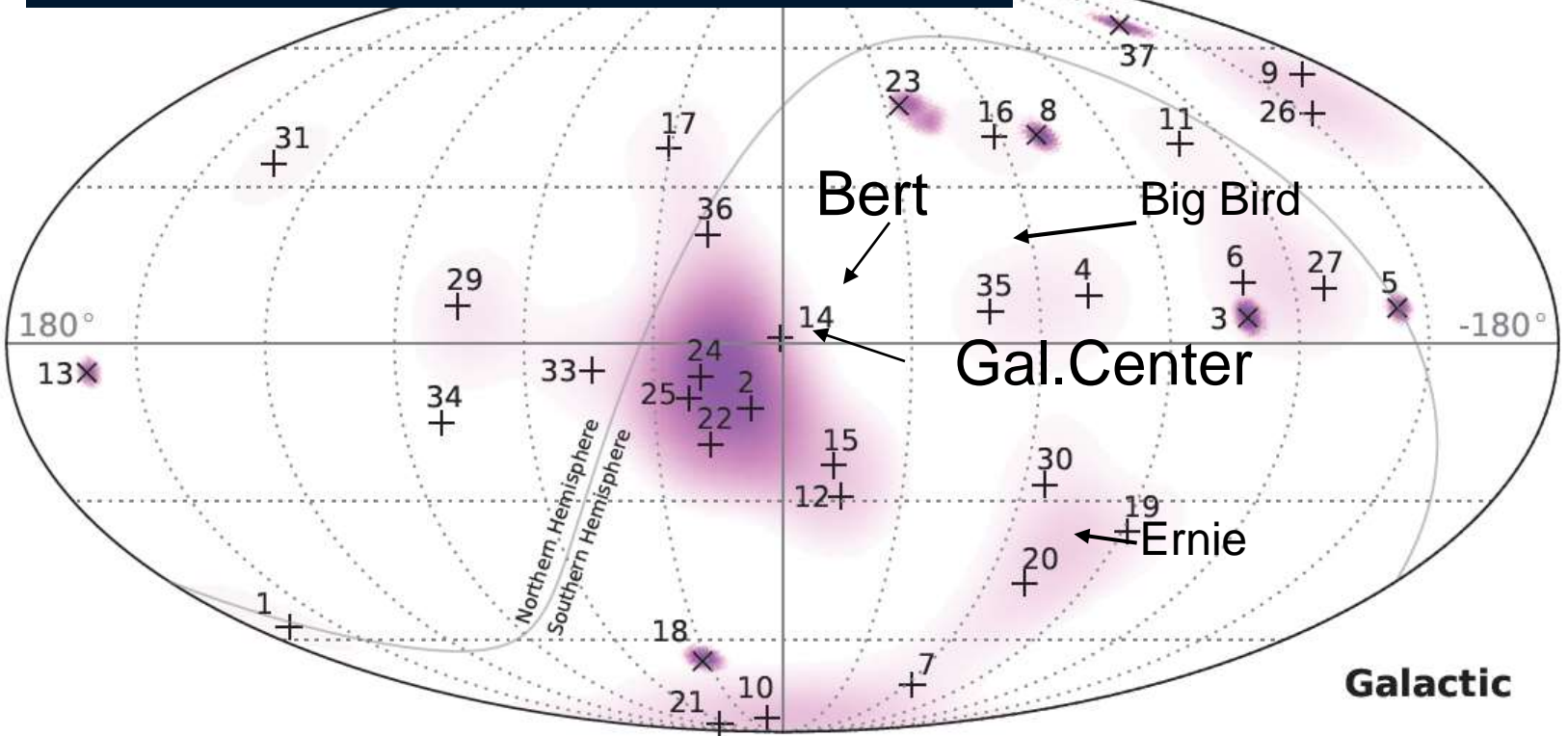
FSRQ

Sources NOT to emit protons

GRB choked jet etc.

# IceCubeで検出された 宇宙ニュートリノ信号の天球分布

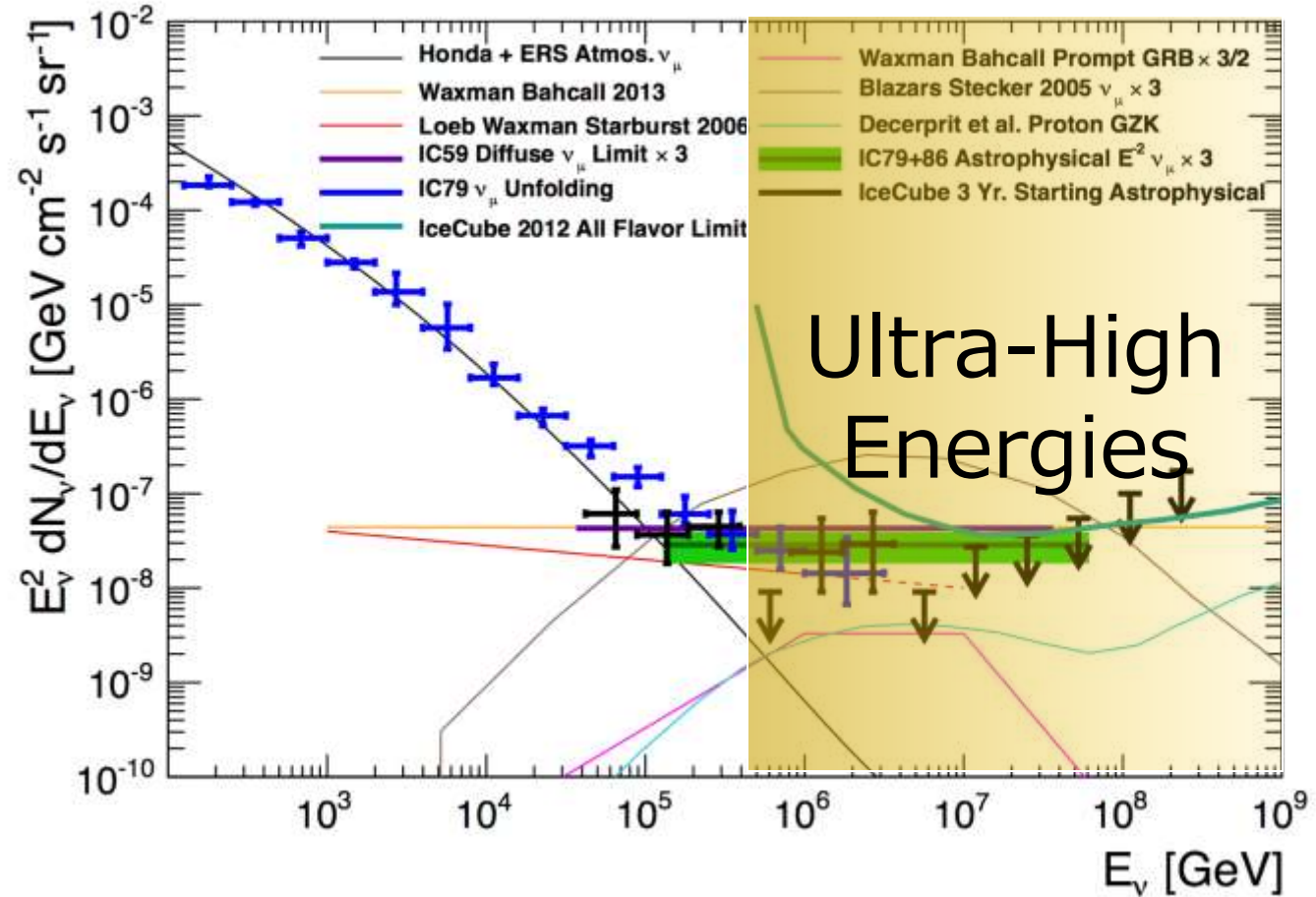
IceCube 3 years data (2010-2013)



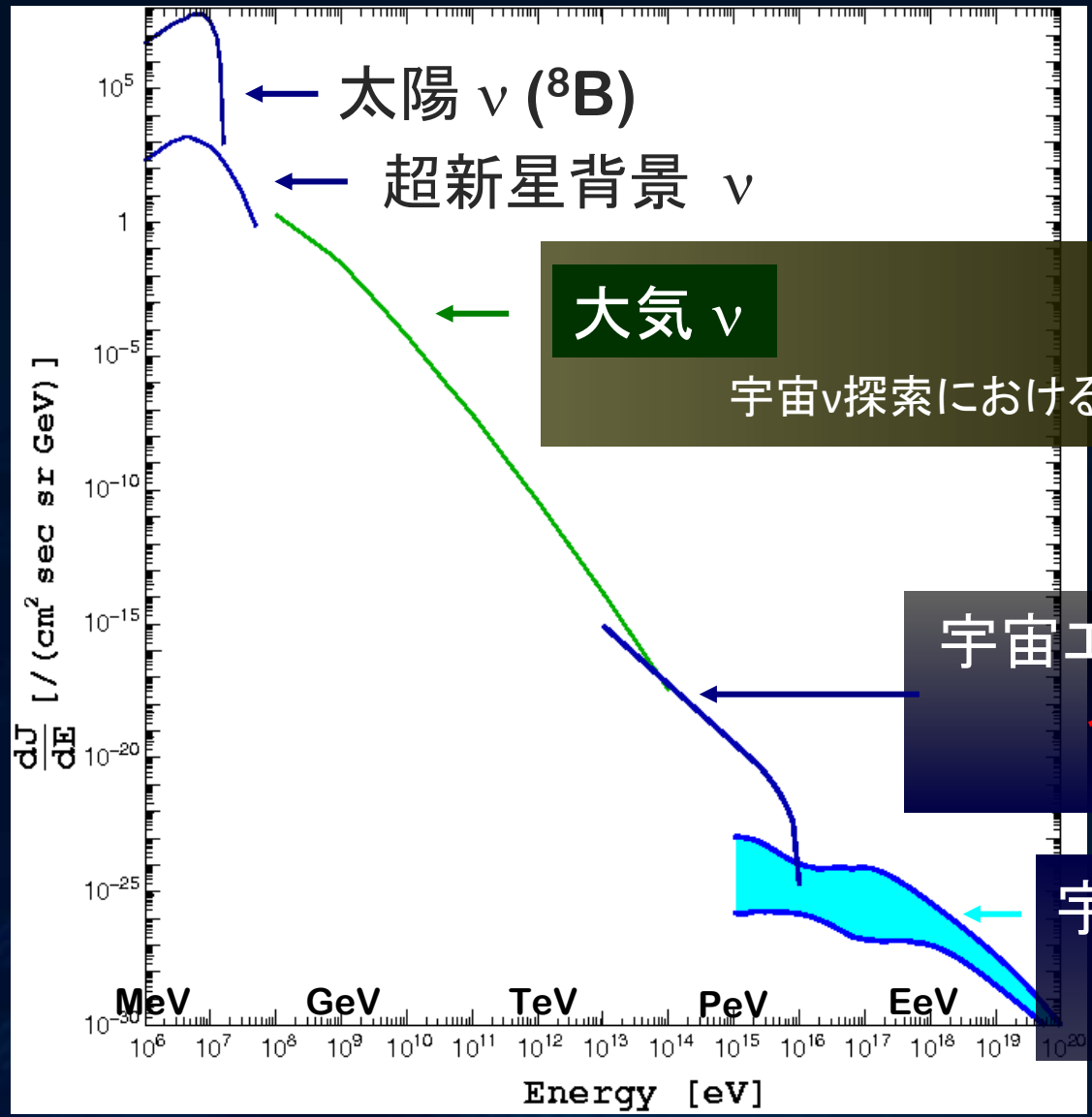


# Summary of the IceCube Diffuse Flux measurements

all flavor sum



# (宇宙)ニュートリノのスペクトル



← 太陽  $\nu$  (<sup>8</sup>B)

← 超新星背景  $\nu$

← 大気  $\nu$

宇宙 $\nu$ 探索における雑音

宇宙エンジン天体からの $\nu$

今回初めて検出された

宇宙背景輻射由来の $\nu$

宇宙の歴史と関連

まだ検出されていない。

# 2008-2015 の7年間の観測データを使った最新解析

IceCube collaboration  
Physical Review Letters  
117 241101 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees Search Press About

Editors' Suggestion Access by Chiba Daigaku Fuzoku Go Mobile »

## Constraints on Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos above 10 PeV with IceCube

M. G. Aartsen *et al.* (IceCube Collaboration)  
Phys. Rev. Lett. **117**, 241101 – Published 7 December 2016

14

Twitter Facebook More

Article PDF HTML Export Citation

### ABSTRACT

We report constraints on the sources of ultrahigh-energy cosmic rays (UHECRs) above  $10^9$  GeV, based on an analysis of seven years of IceCube data. This analysis efficiently selects very high-energy neutrino-induced events which have deposited energies from  $5 \times 10^5$  GeV to above  $10^{11}$  GeV. Two neutrino-induced events with an estimated deposited energy of  $(2.6 \pm 0.3) \times 10^6$  GeV, the highest neutrino energy observed so far, and  $(7.7 \pm 2.0) \times 10^5$  GeV were detected. The atmospheric background-only hypothesis of detecting these events is rejected at  $3.6\sigma$ . The hypothesis that the observed events are of cosmogenic origin is also rejected at  $> 99\%$  CL because of the limited deposited energy and the nonobservation of events at higher energy, while their observation is consistent with an astrophysical origin. Our limits on cosmogenic neutrino fluxes disfavor the UHECR sources having a cosmological evolution stronger than the star formation rate, e.g., active galactic nuclei and  $\gamma$ -ray bursts, assuming proton-dominated UHECRs. Constraints on UHECR sources including mixed and heavy UHECR compositions are obtained for models of neutrino

Issue  
Vol. 117, Iss. 24 — 9 December 2016

Reuse & Permissions

Access Options  
Article part of CHORUS





TeV

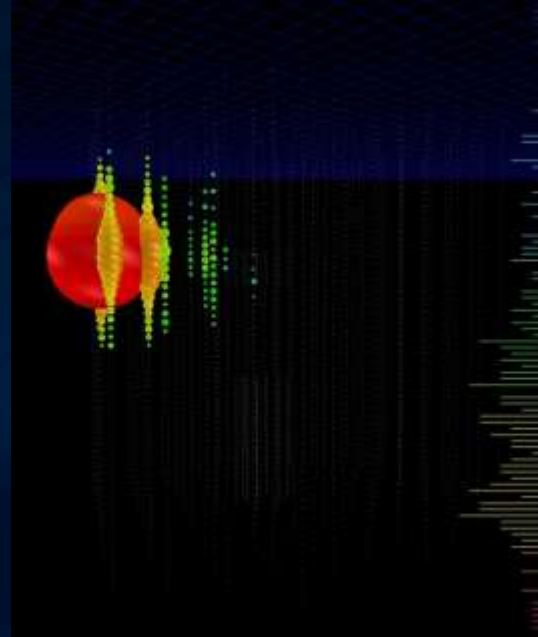
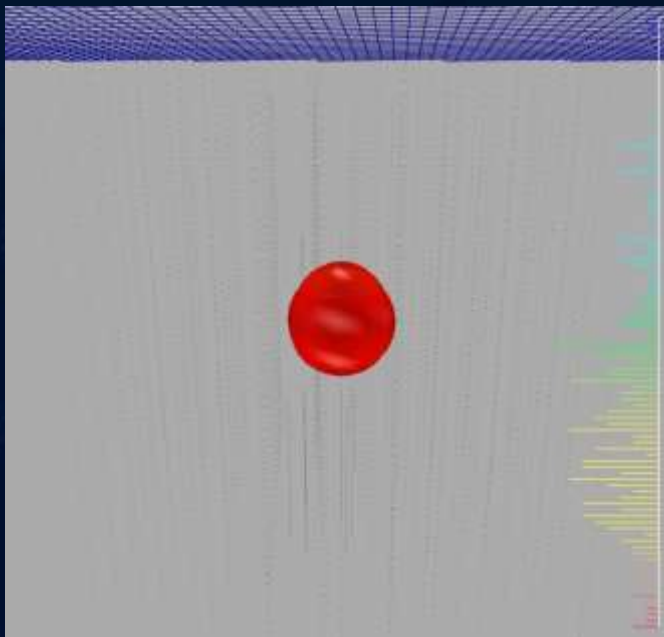
PeV

EeV

# Open the box : What we found

## Two PeV-ish events

1<sup>st</sup> event: shower (cascade) event in 2013 sample



Reconstructed  
Parameters

Diposited Energy  
808 TeV

zenith angle  
174 deg

~20 deg uncernt.

(Probably) the most energetic upgoing event  
detected by IceCube



TeV

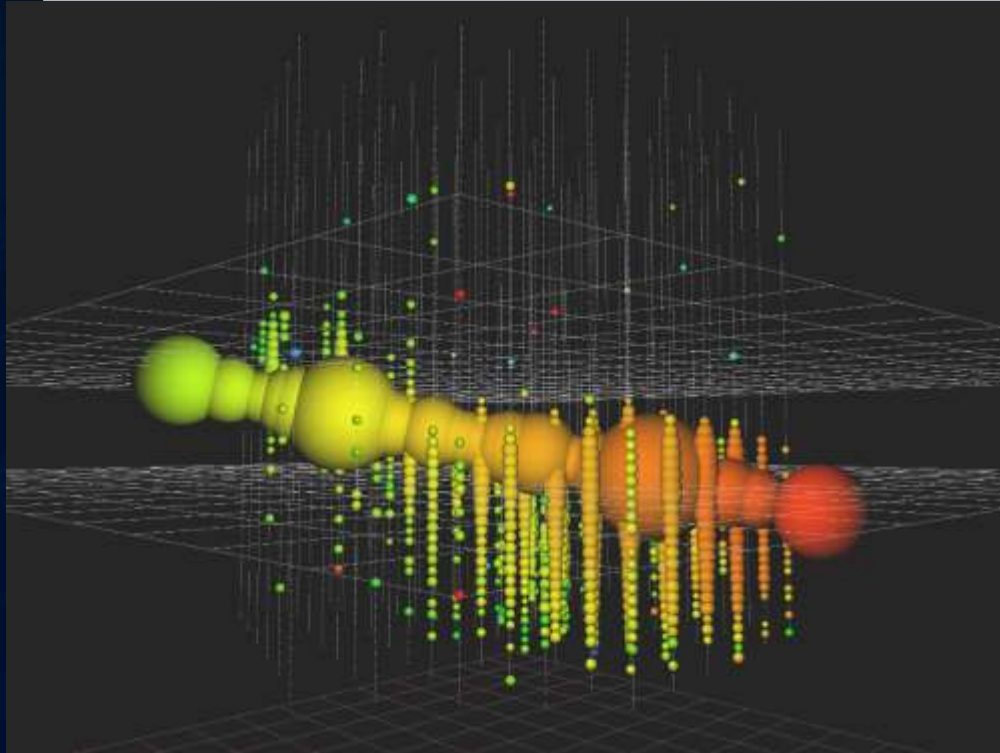
PeV

EeV

# Open the box : What we found

## Two PeV-ish events

2<sup>nd</sup> event: track event in 2014 sample



Reconstructed  
Parameters

Diposited Energy  
2.6 +- 0.3 PeV

8 deg off TeVCat  
3 deg off 2-3FGL  
*~0.5deg uncernt.*

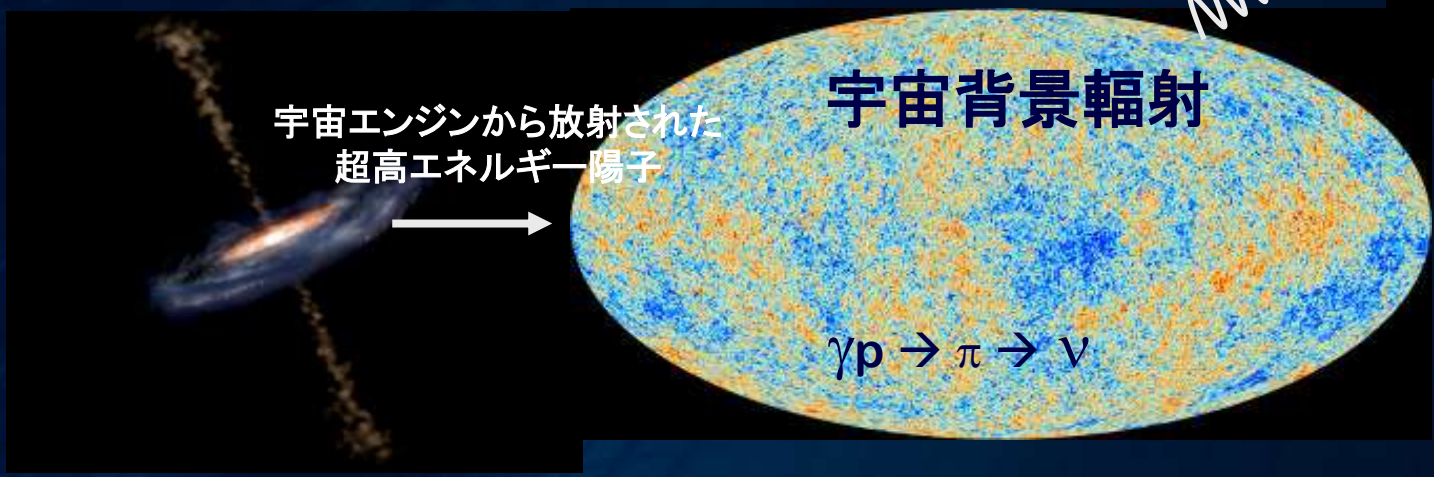
the most energetic event  
ever detected by IceCube

# 今回の超高エネルギーニュートリノデータから何が言えるか?

Two PeV-ish events

No EeV-ish events

宇宙背景輻射由来の超高エネルギーニュートリノ生成機構をテストすることによって、超高エネルギー宇宙線起源天体の性質を調べる

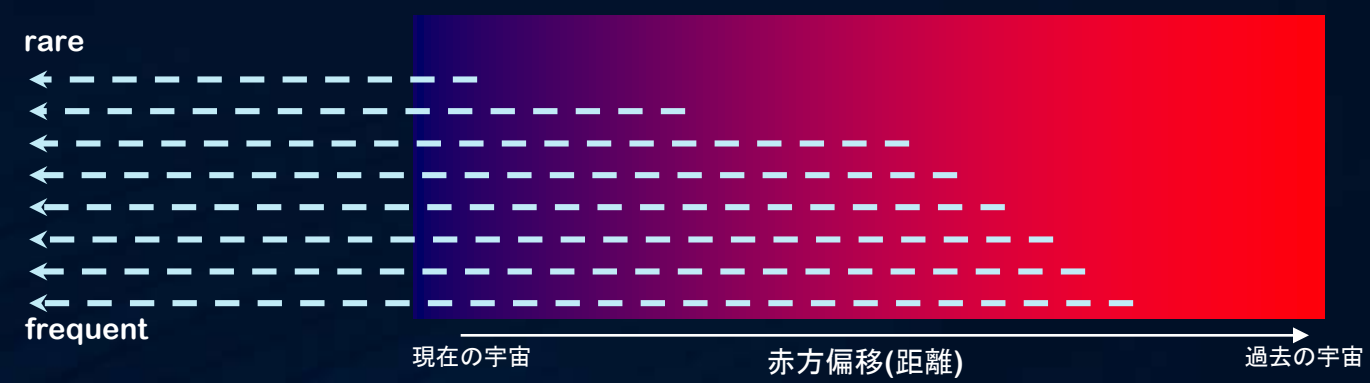


# 宇宙ニュートリノの存在量から 宇宙エンジンの歴史を探る

ニュートリノは遠方宇宙からでもエネルギーを失わずに届くので遠方=過去の宇宙で放射が盛んであったなら、地球に到達する高エネルギーニュートリノ量は増える

$\nu$

色：宇宙エンジンからの高エネルギー粒子放射頻度



## 宇宙の「進化」

過去の宇宙はもっと「活動的」だった  
多くの示唆がある

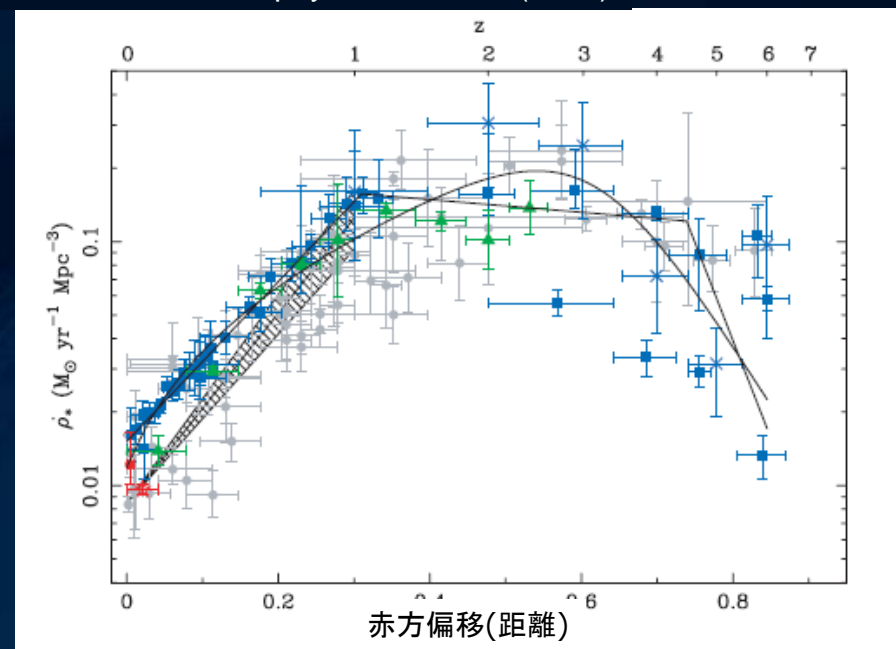
星形成の頻度→

放射密度

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

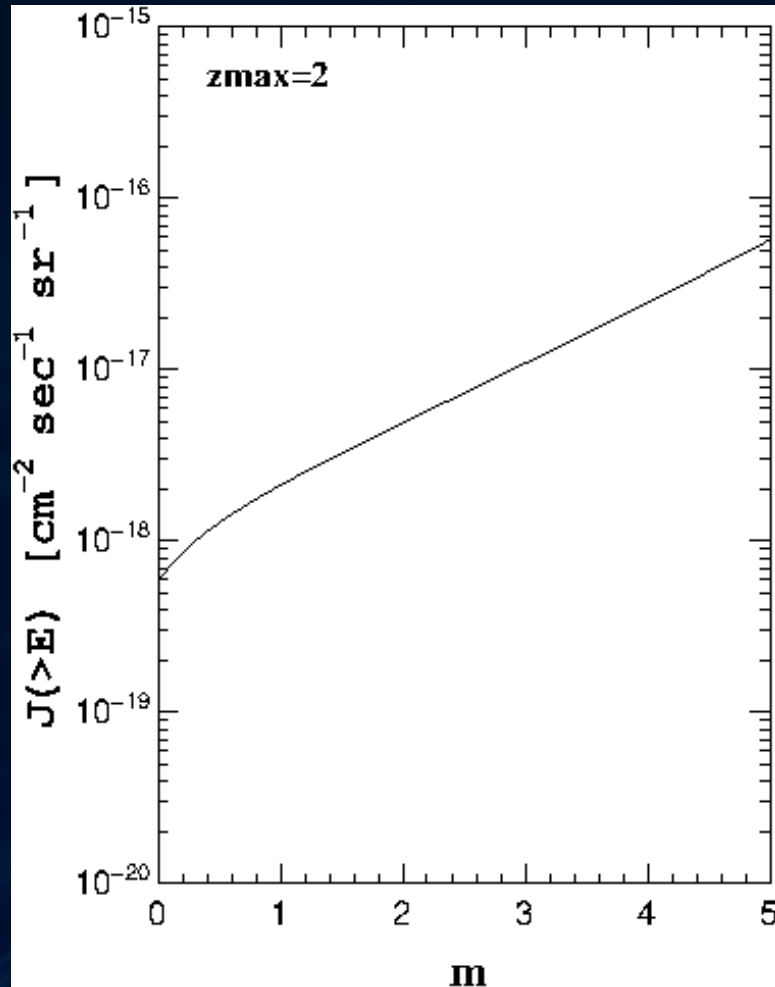
m = 0 : No evolution

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



# 確かに超高エネルギーニュートリノ量は 過去の宇宙の「活動量」に依存する

intensity above 1 EeV (=10<sup>18</sup> eV)



ニュートリノの量が一桁以上  
変わる

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

「静か」

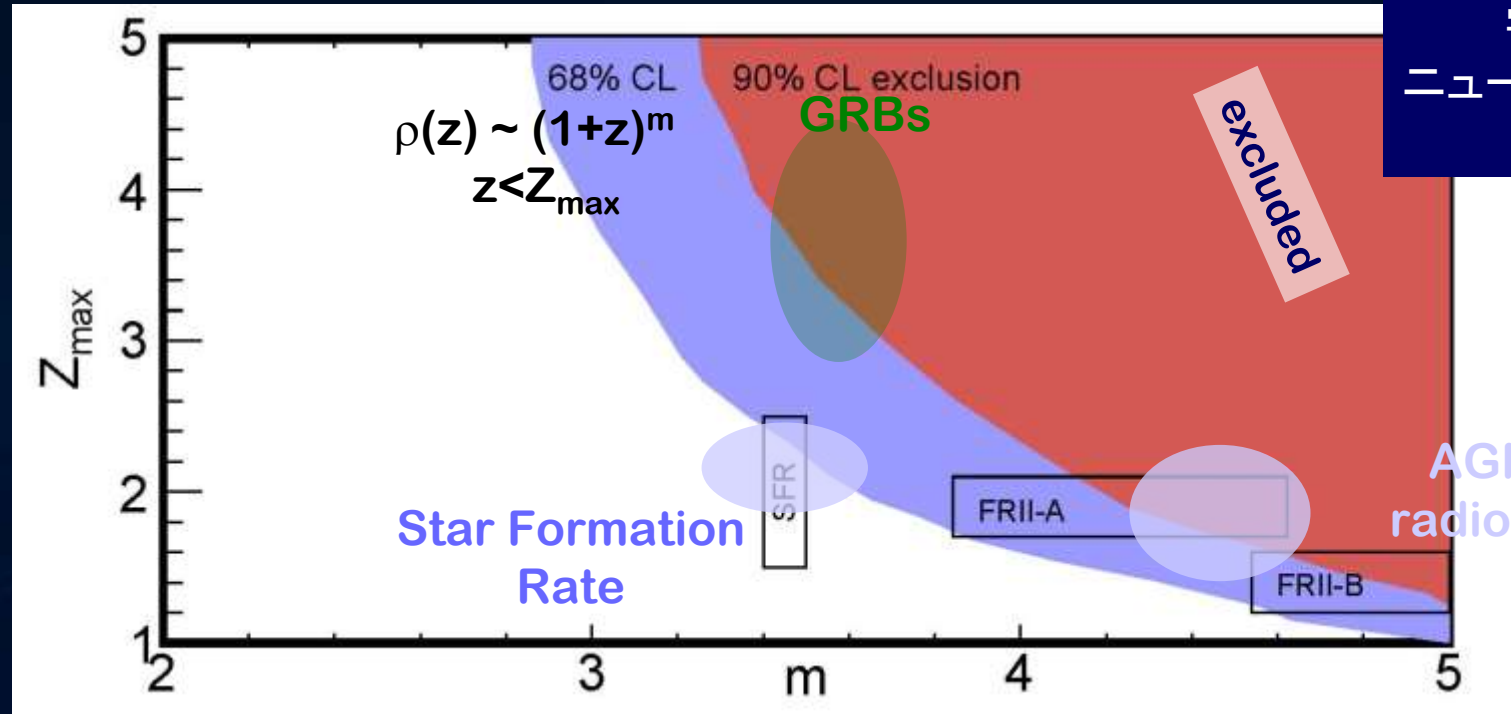
遠方宇宙での宇宙エンジンの活動

「ダイナミック」

# 宇宙エンジンの進化から 天体を同定する

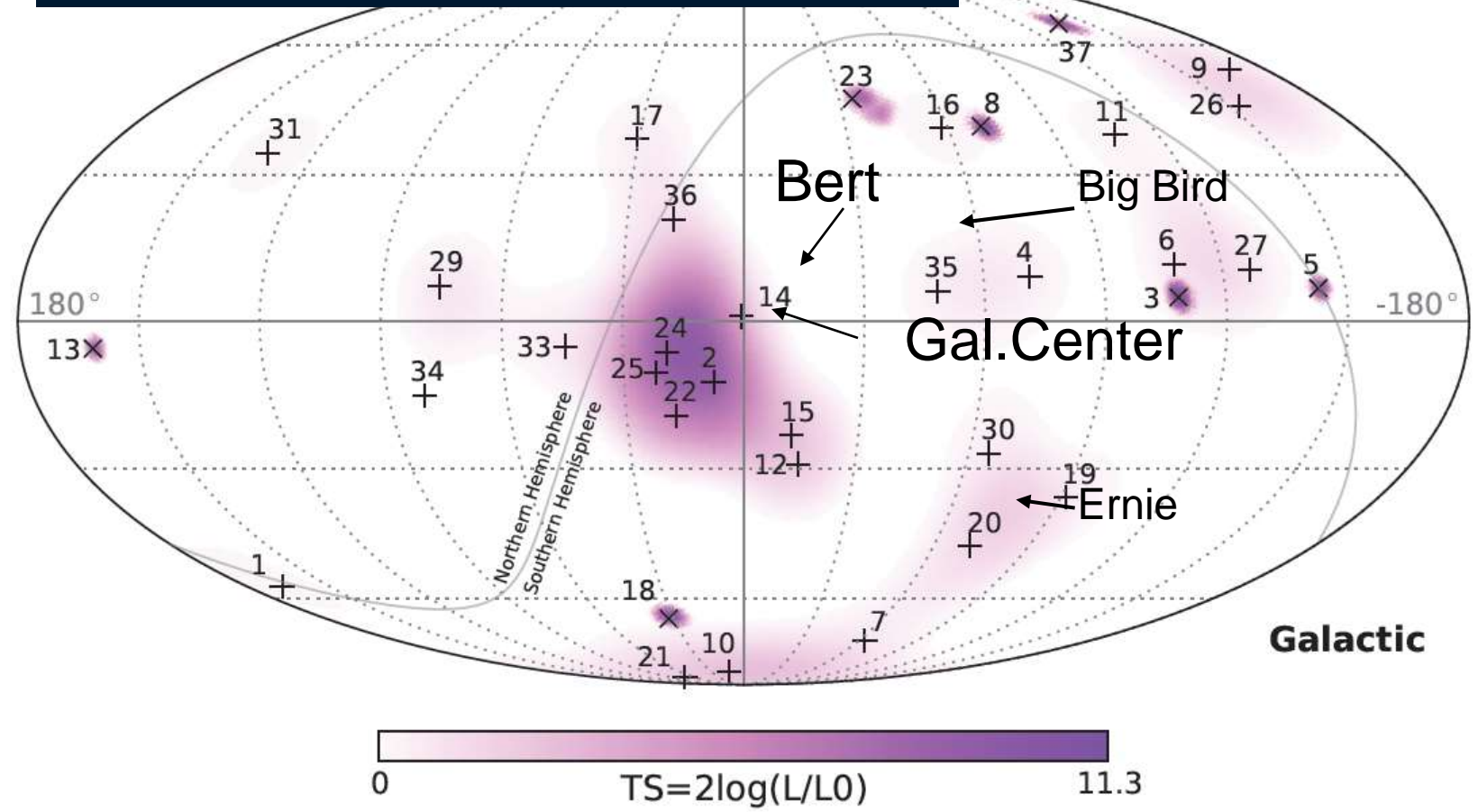
IceCube collaboration  
Physical Review Letters  
117 241101 (2016)

宇宙背景輻射由来の  
ニュートリノが見つからない  
ことによる制限



# IceCubeで検出された 宇宙ニュートリノ信号の天球分布

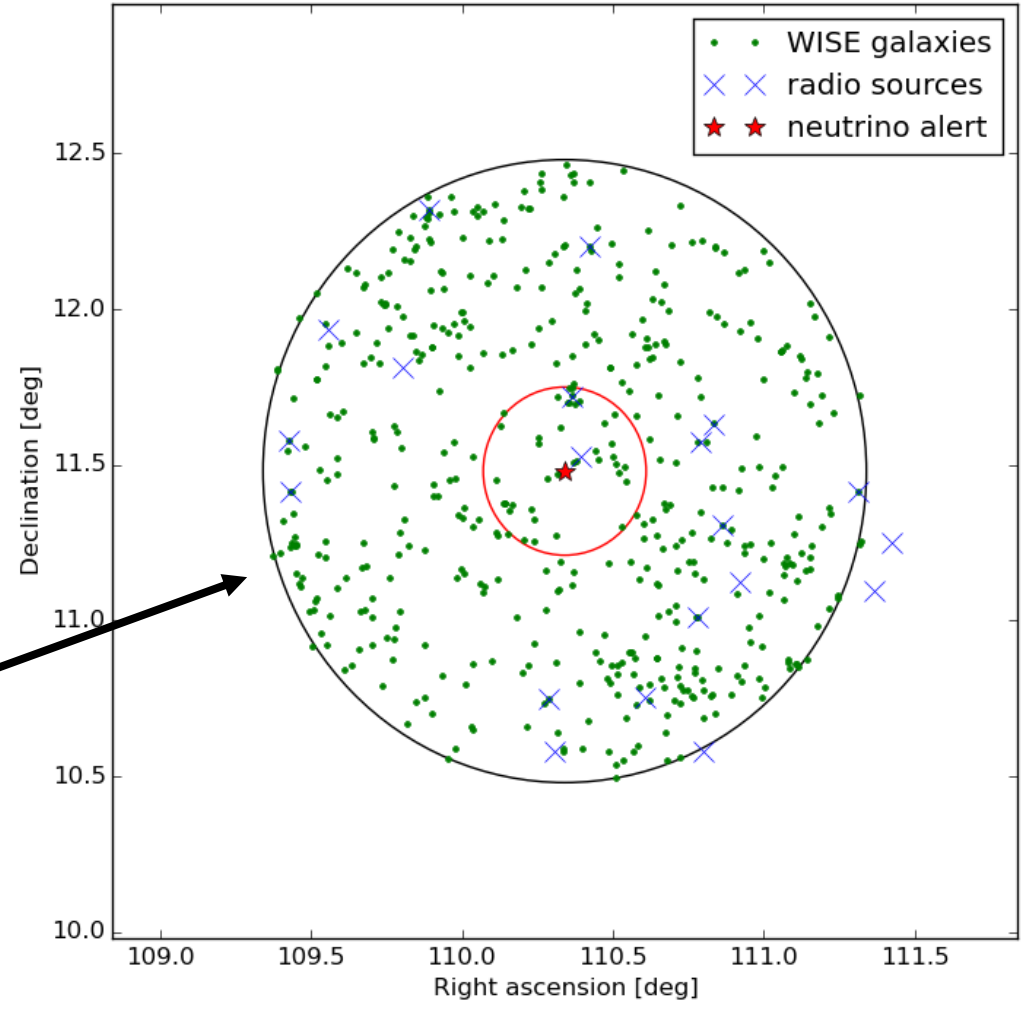
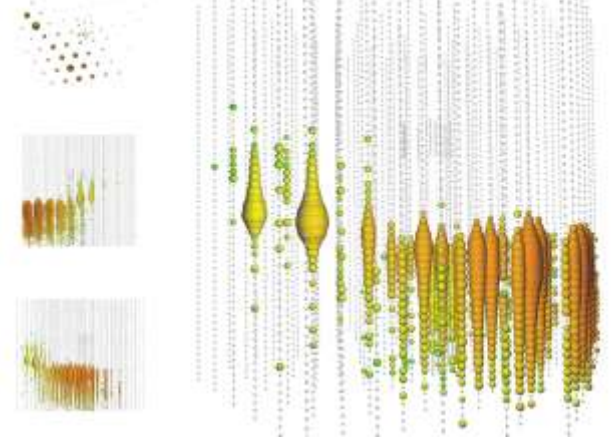
IceCube 3 years data (2010-2013)



# ニュートリノ放射天体はどれだ？



高エネルギーニュートリノ事象



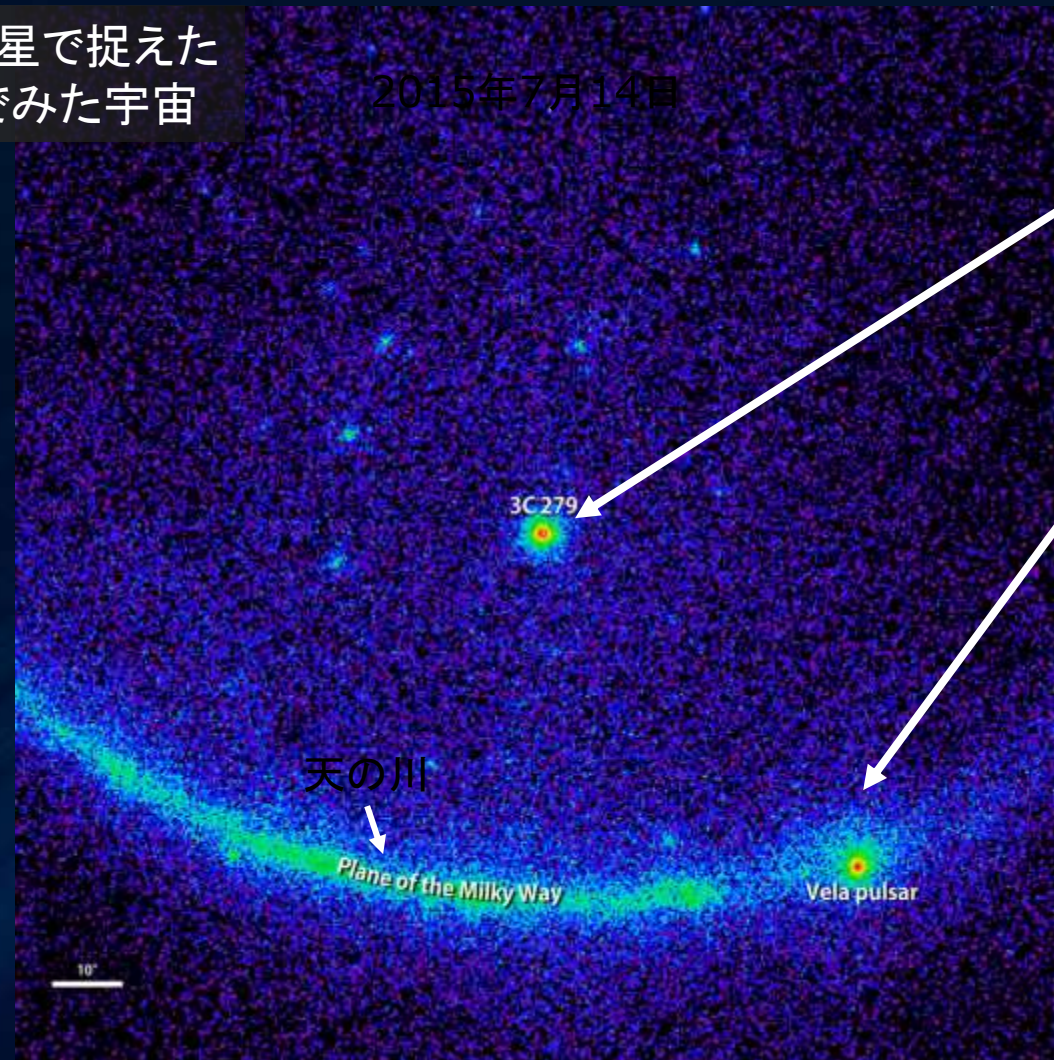


# 宇宙エンジン候補天体は 明るさが変動する。

フレアとよばれる現象一急に明るく活動的になる。

フェルミ衛星で捉えた  
ガンマ線でみた宇宙

2015年7月14日



宇宙エンジン候補で  
ある、AGN銀河。  
50億光年かなた。

ヴェラパルサー。  
我々の銀河内にあり  
最も明るいガンマ線  
放射天体。1000光年

# IceCube 即時アラートシステム

南極 IceCube観測所



宇宙ニュートリノ検出後  
3分以内

北半球ウイスコンシン  
データセンター

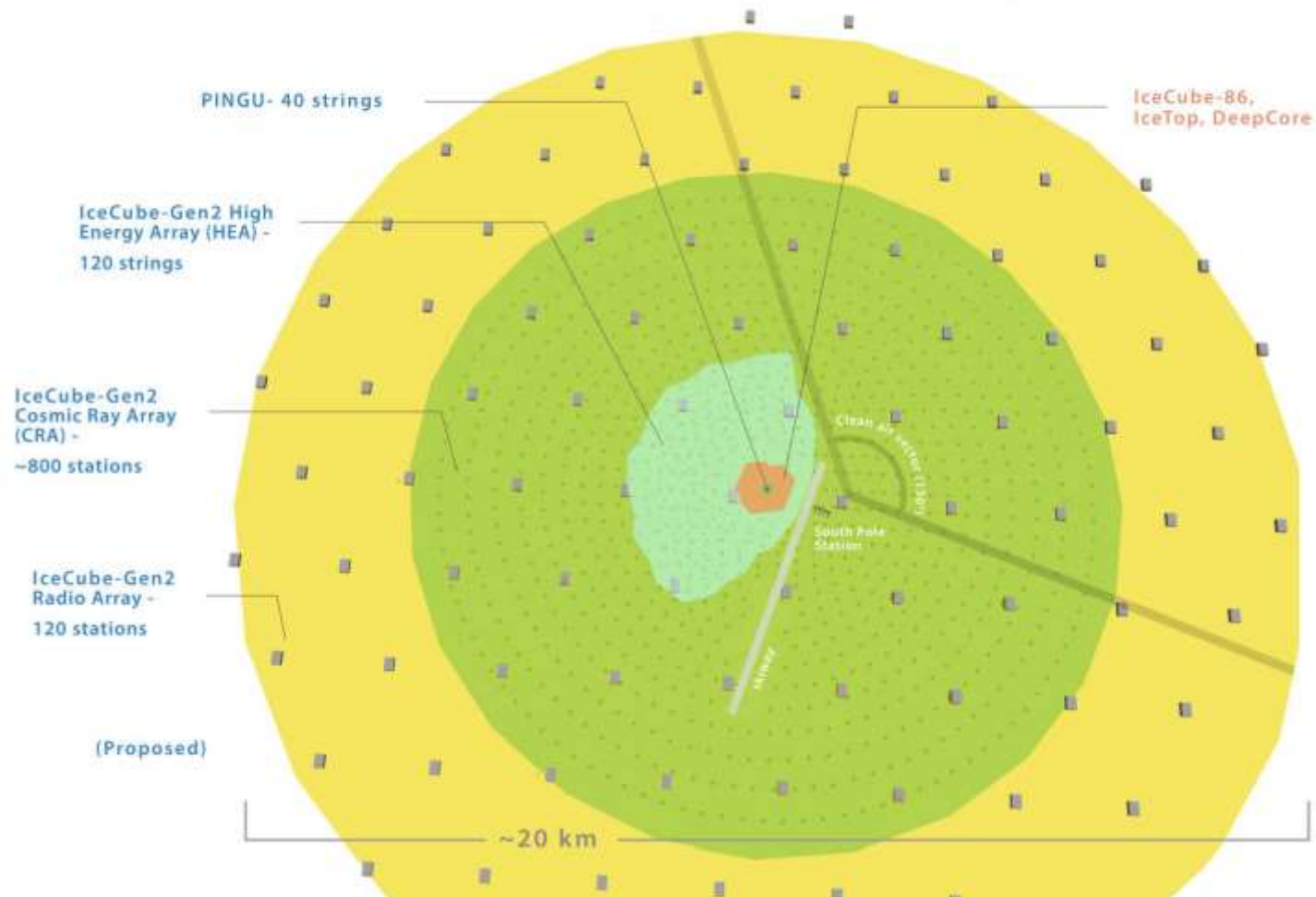




# IceCube-Gen2 8 x IceCube

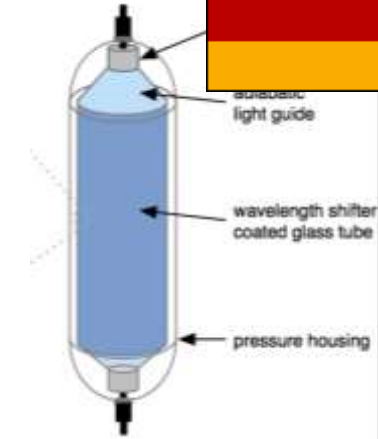


## IceCube-Gen2 Facility





# IceCube-Gen2 Optical Sensors



# 高エネルギーニュートリノ天文学のまとめ

- 理論だけでなく、観測的な天文学・宇宙物理分野として  
歩み始めたばかり
- 理論的に期待されていた高エネルギー宇宙ニュートリノ  
が発見された
- 高エネルギー宇宙線起源に新たな知見を与え、これまで  
信じられてきた有力な仮説に疑問符をつけている
- 起源天体はまだわからない。他の観測とのあわせ技と  
さらに大規模なニュートリノ観測装置建設で挑む

成熟分野ではなく、何があるか分からないフロンティア分野