

IceCube の高エネルギーニュートリノと 素粒子現象論

渡邊 篤史
(京都産業大学益川塾)

2015年7月22日 @京都大学素粒子論研究室

あらすじ

近年 IceCube実験でみつかった高エネルギーニュートリノの概要と、素粒子論との関わりについて(主観的で偏った視点から)をご紹介します

● 導入

- ・ 動機
- ・ IceCube実験、高エネルギーニュートリノ
- ・ 典型的な天体物理のシナリオ

● 最近の IceCube の結果

- ・ 強度、スペクトラム、方向依存性、フレーバー比など

● 素粒子論との関わり

- ・ 暗黒物質のシグナル
- ・ 高エネルギーニュートリノの吸収線
- ・ その他

導入

動機

過去に、天然ソースのニュートリノは、
素粒子論の発展に重要な役割を果たしてきた

- 太陽ニュートリノ
- 大気ニュートリノ

素粒子論：実験的な情報が(喉から手が出るほど)欲しい

⇒ 最近発見された高エネルギーニュートリノも、
何とか活用できないか？

(ソースについて、何も分かっていないが)

ニュートリノの歴史



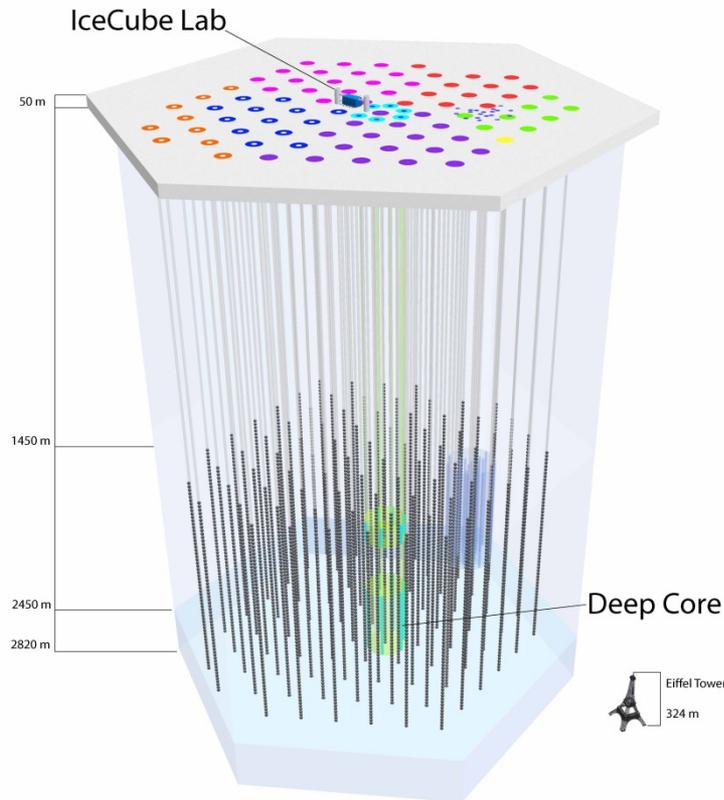
- 1930** ベータ崩壊で放出される電子のスペクトラムを説明するために、理論に導入 (パウリ)
- 1934 ニュートリノと命名 (フェルミ)
- 1959 ニュートリノの観測 (ライネス、カワン)
- 1962 ν_μ の発見 (レーダーマン、シュワーツ、シュタインバーガー)
- 1970 太陽ニュートリノ欠損の提起 (デイビス)

- 1987 超新星ニュートリノの観測 (カミオカンデ、IMB)
- 1998 大気ニュートリノの振動の観測 (スーパーカミオカンデ)
- 2002 太陽ニュートリノの振動の観測 (HomeStake, Gallex, SK, SNO)
- 2004 原子炉ニュートリノの振動の観測 (KamLAND)

- 2010 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の発見 (OPERA)
- 2011 最後の混合角 θ_{13} のヒント (T2K, MINOS, Double Chooz)
- 2012 θ_{13} の値の決定 (Daya Bay, RENO)
- 2013 高エネルギーニュートリノの観測 (IceCube)

- 20XX** 高エネルギーニュートリノにおける・・・の発見 (IceCube, ...)

IceCube 検出器



“南極の氷を利用した巨大な
ニュートリノ検出器”

2005年に建設開始
2011年からオペレーション

$V \sim 1 \text{ km}^3$

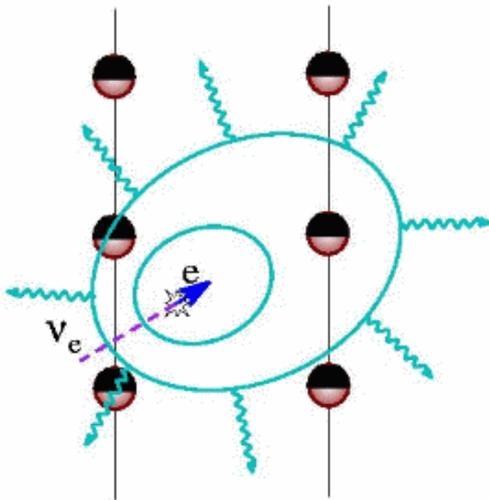
~100GeV 以上のニュートリノを
観測できる

現在までに、2PeV までの
ニュートリノイベントを観測し、
初めて地球外からの高エネルギー
ニュートリノの存在を確認した

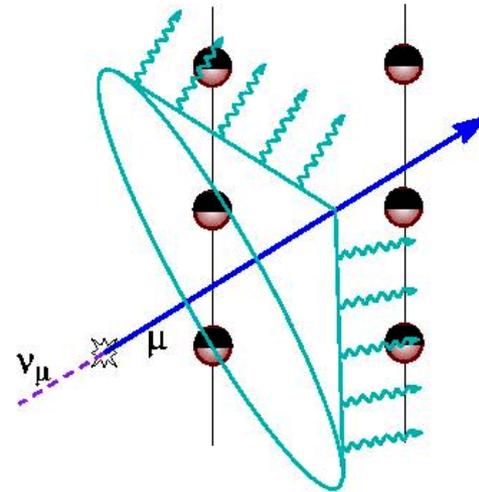
IceCube 検出器

2種類の“メイン”イベント

Shower



Track



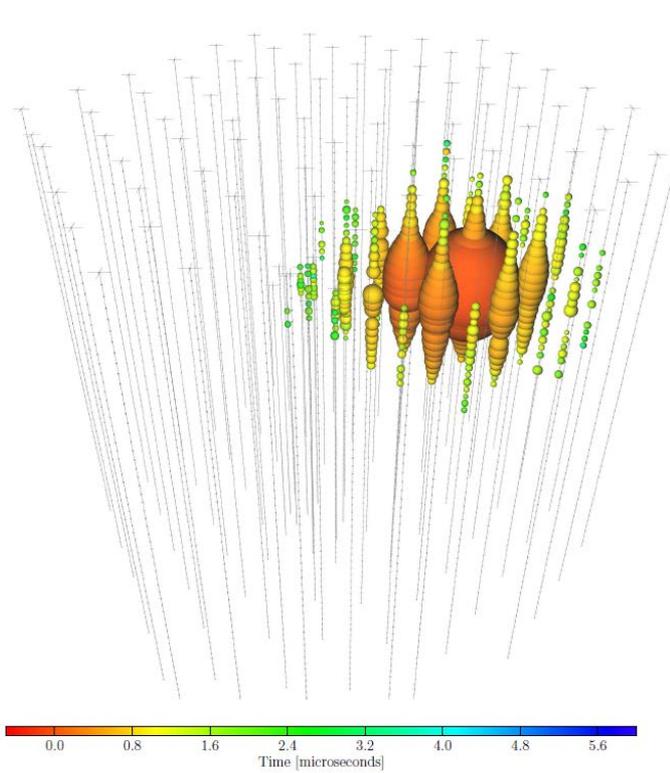
$$\nu_e N + \bar{\nu}_e N \text{ (CC)}$$

$$\nu_\tau N + \bar{\nu}_\tau N \text{ (CC) with } E_\tau < 1 \text{ PeV}$$

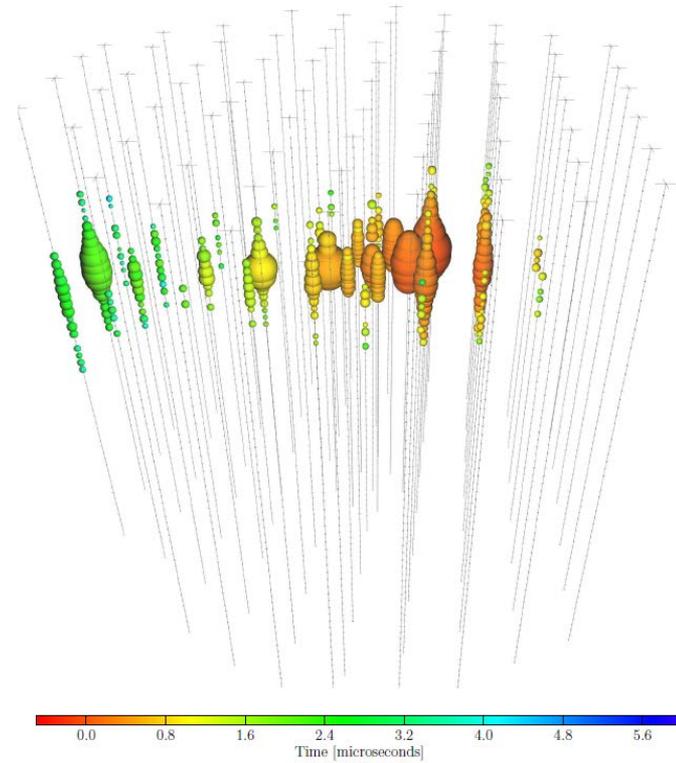
$$\nu_\alpha N + \bar{\nu}_\alpha N \text{ (NC)}$$

$$\nu_\mu N + \bar{\nu}_\mu N \text{ (CC)}$$

IceCube 検出器

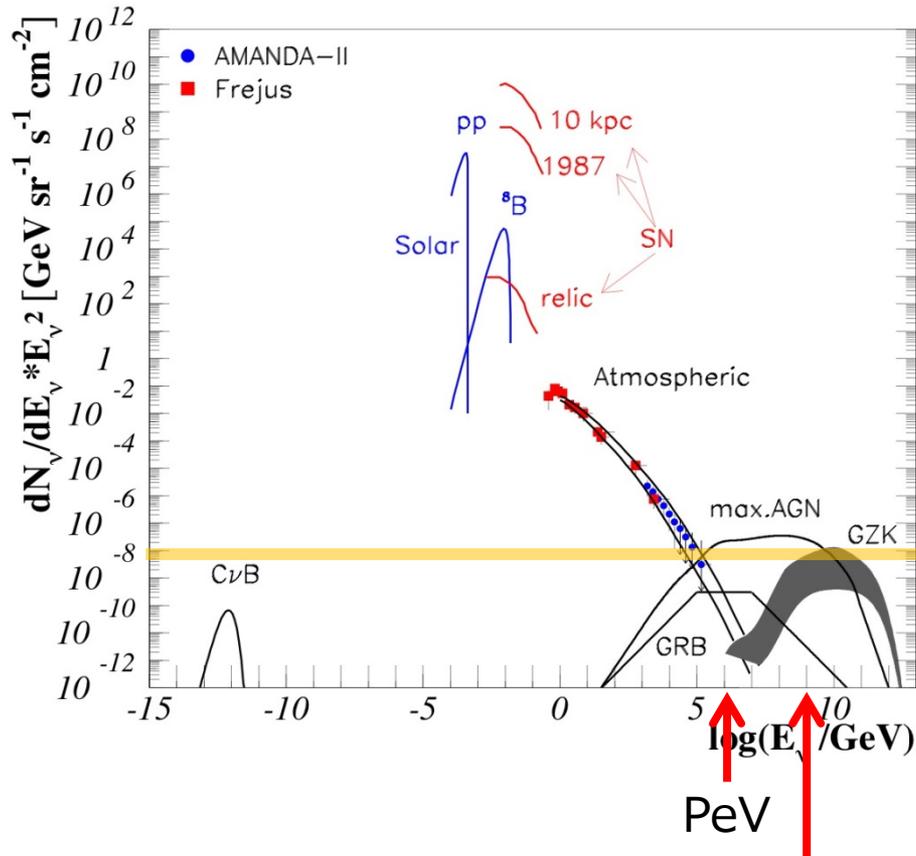


Shower



Track

Neutrino Sky



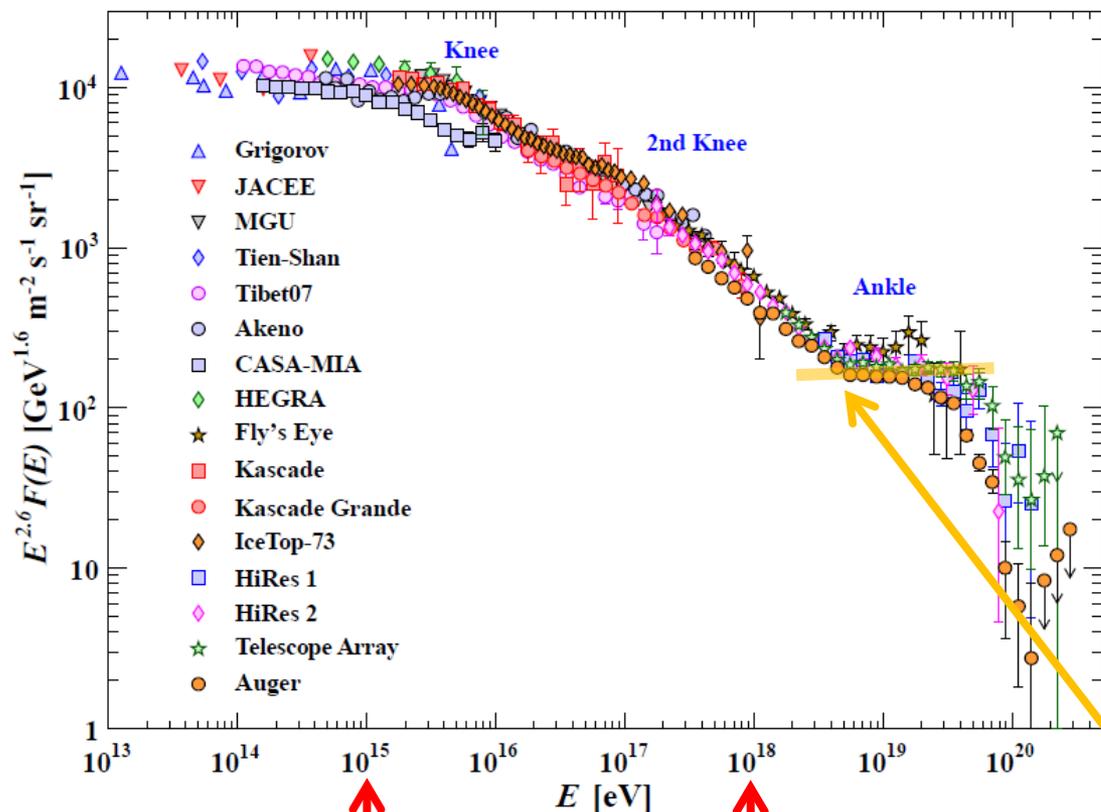
[Halzen, 2007]

1000 PeV

- 大気ニュートリノ
 $\sim E^{-3.6}$
- Astrophysical ν
 $\sim E^{-2}$
- Cosmogenic ν
 (GZK ニュートリノ)

高エネルギー宇宙線

[PDG, 2014]

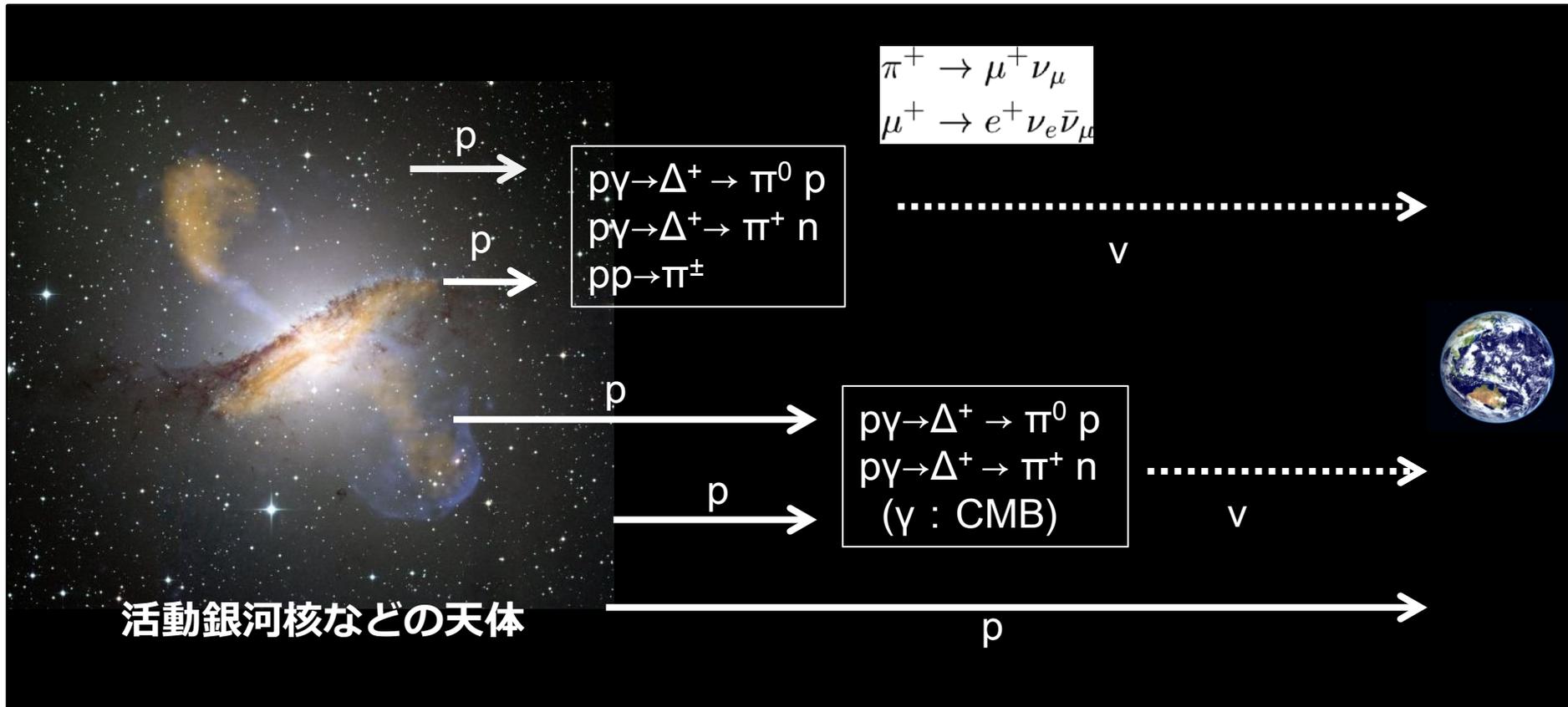


- PeV (Knee) くらいまでは、 -2.6 のベキ
- 2nd Knee 以下は、銀河内の超新星残骸がソース (と信じられている)
- 100 PeV 以上は銀河外
- 10^{19} eV 以上はGZKの効果でカットされている

$$E^2 \Phi \sim 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

活動銀河核 (AGN)
ガンマ線バースト (GRB)

典型的なピクチャー



高エネルギー宇宙線 \Leftrightarrow 高エネルギーニュートリノ

伝播/フレーバー遷移

- 振動は averaged out する

$$L^{\text{OCS}} = \frac{4\pi E}{\Delta m^2}$$

E	L^{osc}
1 (MeV)	10^5 (cm)
1 (GeV)	10^8 (cm)
\vdots	\vdots
1 (EeV)	10^{17} (cm) \sim 0.1(pc)

$$\Phi_{\alpha}^{\text{earth}} = P_{\alpha\beta} \Phi_{\beta}^{\text{source}}$$

$$P_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2 \simeq \begin{pmatrix} 1-2s & s & s \\ s & \frac{1}{2}(1-s) & \frac{1}{2}(1-s) \\ s & \frac{1}{2}(1-s) & \frac{1}{2}(1-s) \end{pmatrix}$$

$$s \equiv \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \theta_{12}$$

$$\theta_{13} = 0^\circ \text{ and } \theta_{23} = 45^\circ$$

$$P \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

標準的なシナリオでは、
地球上ではおよそ **1 : 1 : 1**

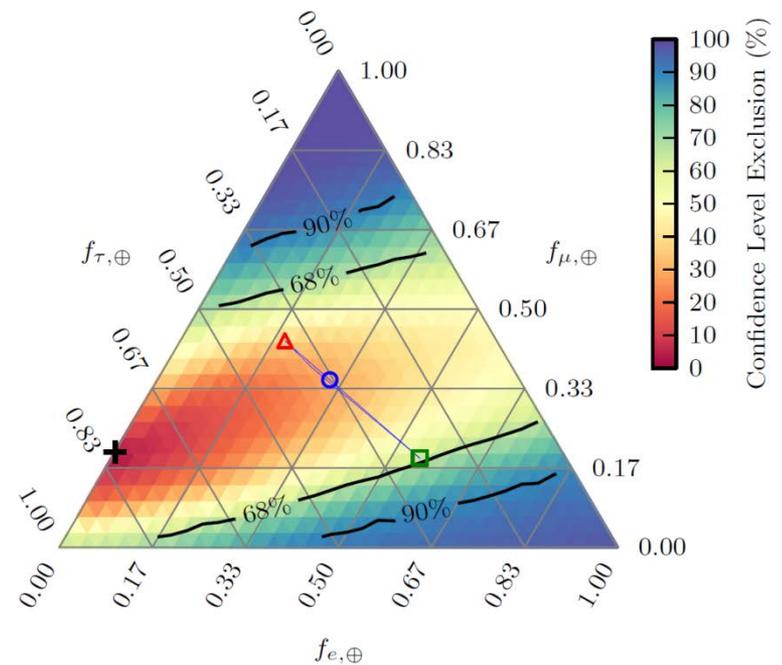
1 : 1 : 1からのずれ

Astrophysics

現在のベストフィット
振動パラメターを使用

[Gonzalez-Garcia, Maltoni, Schwetz, 2014]

- Pion:
 $1:2:0 \Rightarrow (0.35, 0.33, 0.32)$
- Muon-dumped:
 $0:1:0 \Rightarrow (0.26, 0.36, 0.38)$
- Neutron:
 $1:0:0 \Rightarrow (0.55, 0.26, 0.19)$
- Charm:
 $1:1:0 \Rightarrow (0.40, 0.31, 0.29)$



1 : 1 : 1からのずれ

Particle physics

● Neutrino decay

[Beacom, Bell, Hooper, Pakvasa, Weiler, 2003]

e.g., $\nu \rightarrow \nu \phi$

$$\Phi_\alpha = \sum_{i\beta} \Phi_\beta^{\text{source}} |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2 e^{-L/\tau_i^{\text{lab}}}$$

$$L \gg \tau_i \rightarrow \sum_{i(\text{stable})\beta} \Phi_\beta^{\text{source}} |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2$$

Normal ordering: $\Phi_e : \Phi_\mu : \Phi_\tau = |U_{e1}|^2 : |U_{\mu1}|^2 : |U_{\tau1}|^2$
 $\simeq 4 : 1 : 1$

Inverted ordering: $\Phi_e : \Phi_\mu : \Phi_\tau = |U_{e3}|^2 : |U_{\mu3}|^2 : |U_{\tau3}|^2$
 $\simeq 0 : 1 : 1$

1:1:1 からおおきくずれる

1 : 1 : 1からのずれ

Particle physics

- pseudo Dirac

$$\begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} &\cdot \text{Pseudo Dirac } (m_D \gg M_R) \\ &\rightarrow m^+ \simeq m_D + M_R/2 \\ &\quad m^- \simeq m_D - M_R/2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \nu_e : \nu_\mu \neq 1 : 1$$

[Beacom, Bell, Hooper, Learned, Pakvasa, Weiler, 2003]

- Lorentz/CPT violation

E.g., [Hooper, Morgan, Winstanley, 2005]

$$\Rightarrow \nu_\tau \ll \nu_\mu$$

- Dark matter decay

E.g., Feldstein, Kusenko, Matsumoto, Yanagida, 2013;
Esmaili, Serpico, 2013;
Ema, Jinno, Moroi, 2014;
Dudas, Mmbrini, Olive, 2014...

⇒ フレイバー比は、ニュートリノ-DMの結合定数に依る

最近の IceCube の結果

これまでの経緯

- 2012年6月 2イベント(~1 PeV)の報告 @Neutrino2012
- 2013年5月 28イベントの報告 @IC Particle Astroph. Symposium
- 2013年11月 28イベントの論文、[1311.5238](#) ([Science 342 \(2013\) 1242856](#))

- 2014年4月 Mena, Palomares-Ruiz, Vincent, 1404.0017
「フレーバー比の解析」

- 2014年5月 [36イベントの論文、1405.5303](#) 「3年のデータ、 5.7σ 」
- 2014年12月 AW, 1412.8264 「スペクトラムとフレーバーの解析」

- 2015年2月 Mena, Palomares-Ruiz, Vincent, 1502.02649
「エネルギー分布 etc. を取り入れた解析」

- 2015年2月 [フレーバー比の解析、1502.03376](#)

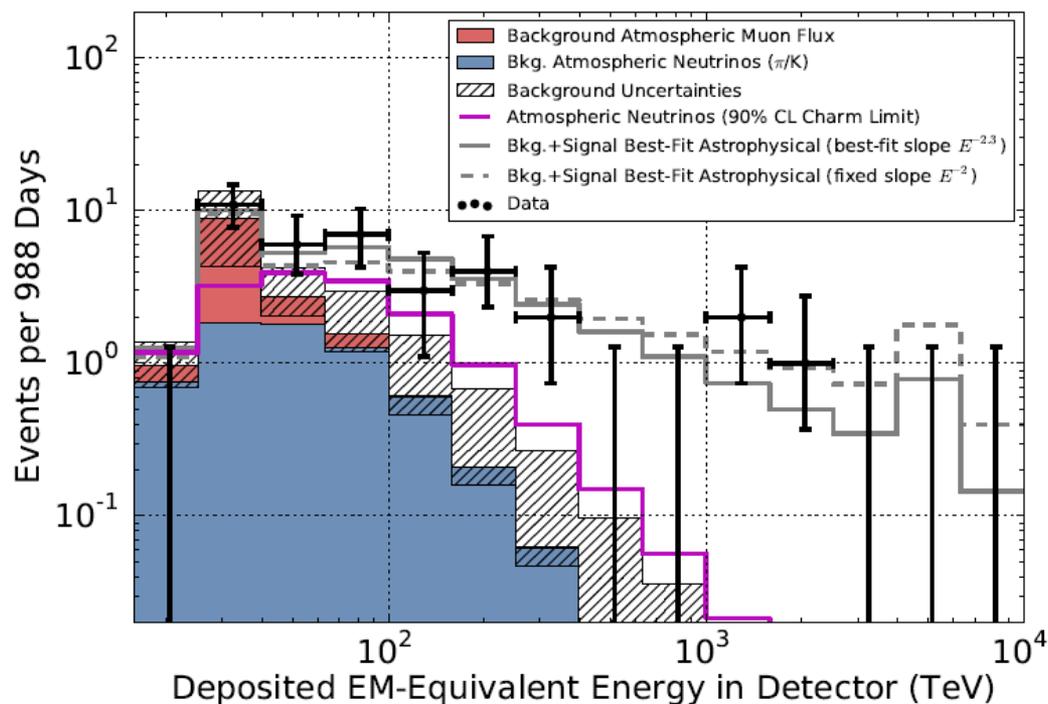
- 2015年7月 [up-going muon の解析、1507.04005](#) 「 3.7σ 」
[Combined な fit, 1507.03991](#) 「スペクトラム etc.」

スターティングイベント (3 years)

検出器の体積の中に、ニュートリノの反応点が含まれているようなイベントの解析

- arXiv:1405.5303
988 days data
36イベント
⇒ 5.7σ でATMを棄却

- $Y_{\text{best}} = -2.3$



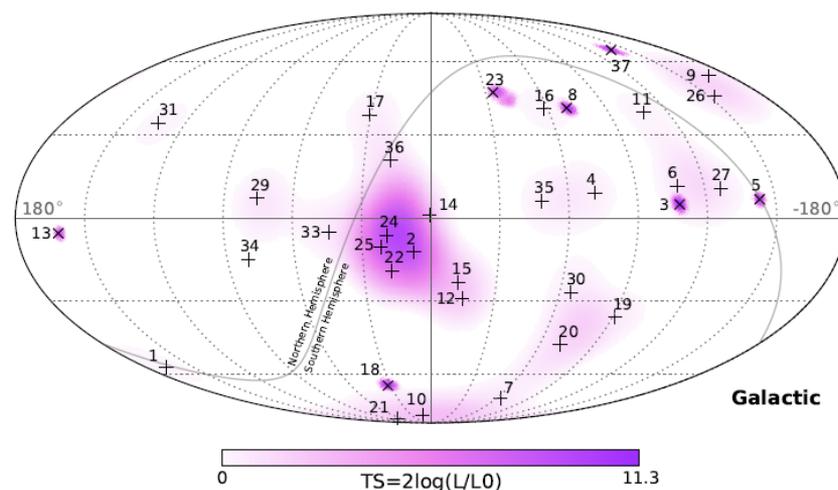
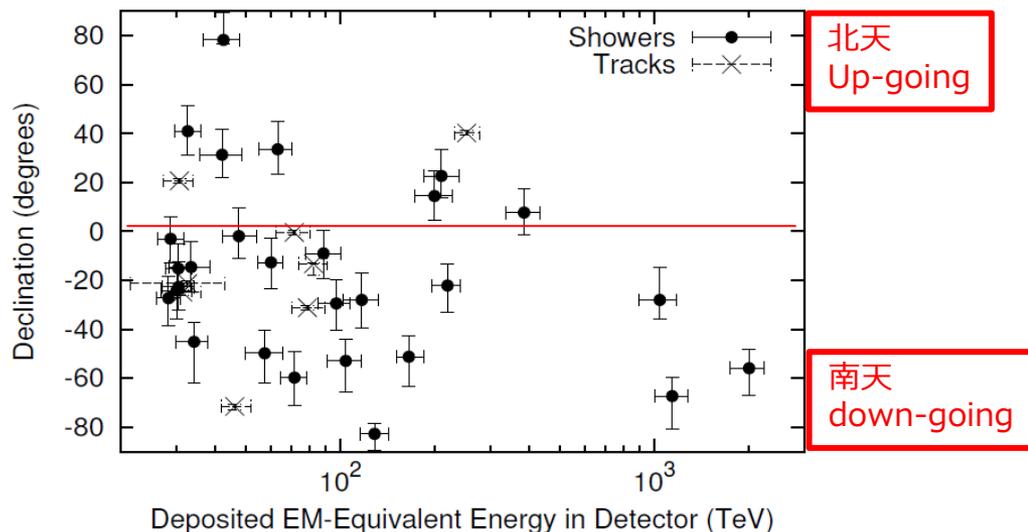
$$E^2 \phi = 0.95 \pm 0.3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

スターティングイベント (3 years)

- 顕著な clustering は、
見えていない (等方的)
- 30 TeV から 2 PeV の領域に、
36 イベント
(8トラック、28シャワー)

バックグラウンドは、
8.4 ± 4.2 (宇宙線ミュオン)
5.0-12.5 (大気ニュートリノ)

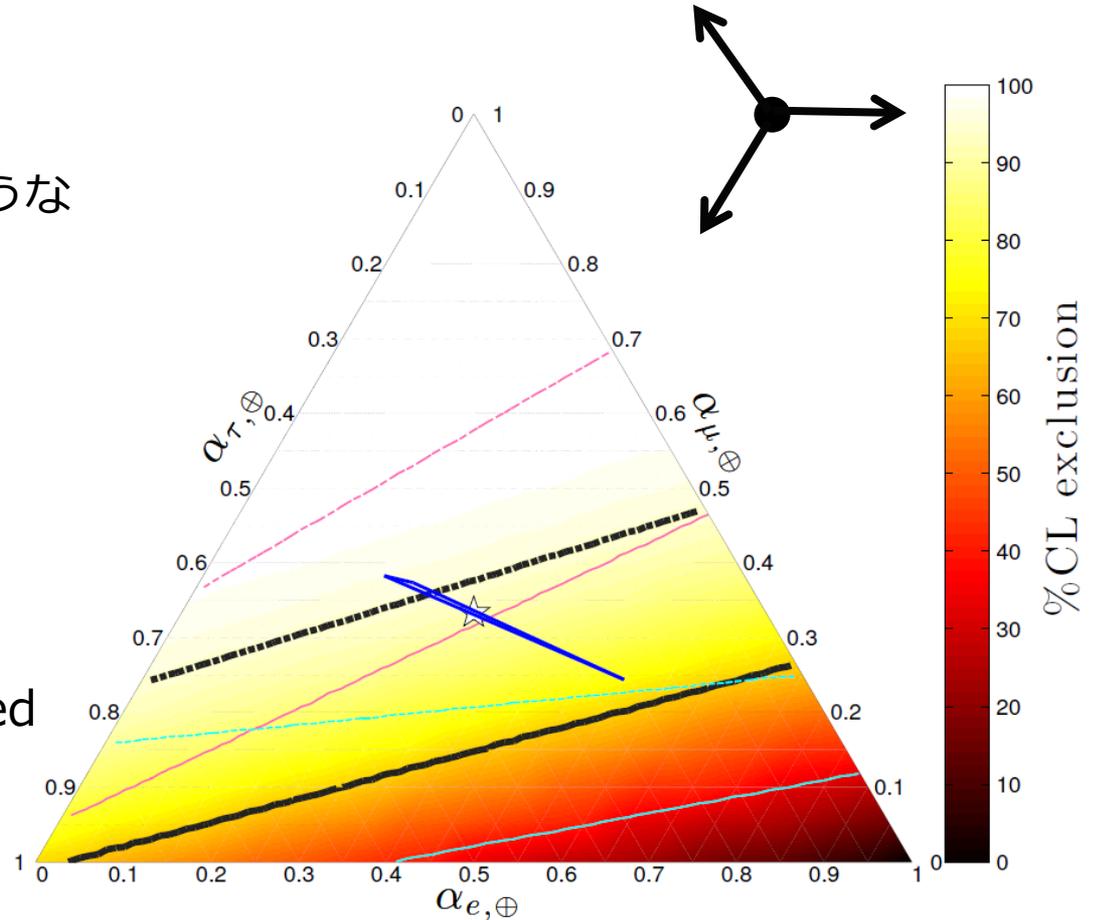
⇒ **トラックが少ない?**



フレーバー比

Mena, Palomares-Ruiz, Vincent, arXiv:1404.0017/1411.2998

- 30 TeV から2 PeVのレンジに、シャワーの28イベント、トラックの8イベントを得るような確率に基づいた解析
- ベストフィットは、1:0:0
- E^{-2} のスペクトラムの場合は、1:1:1は 92%CL で disfavored



スペクトラムとフレーバー比

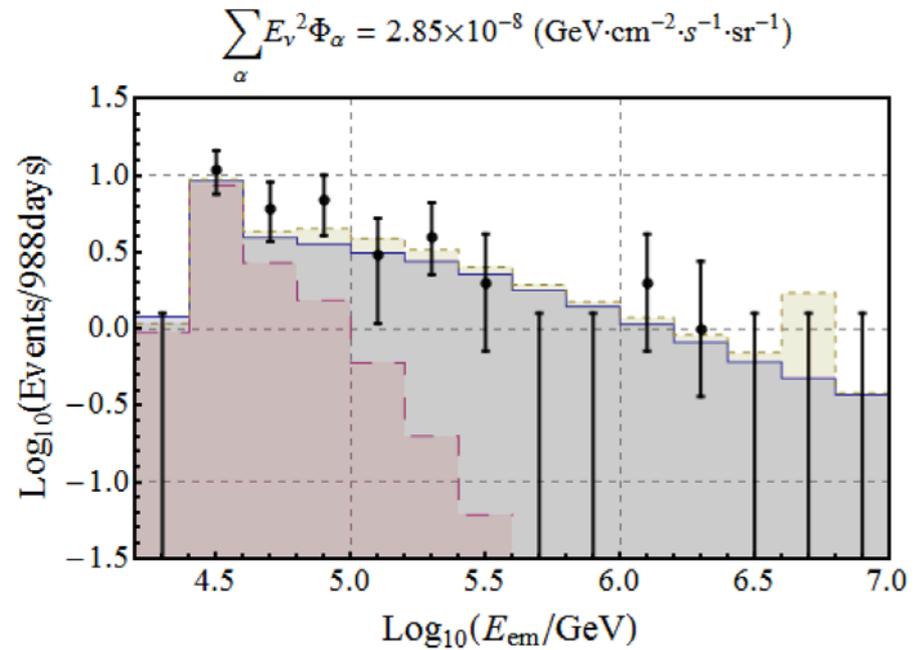
AW, arXiv:1412.8264

$\Phi_\alpha = n_\alpha E_\nu^{-\gamma}$ イベントのエネルギー分布を、4つのパラメーターでフィット

“ χ^2 関数” のミニマムを探す

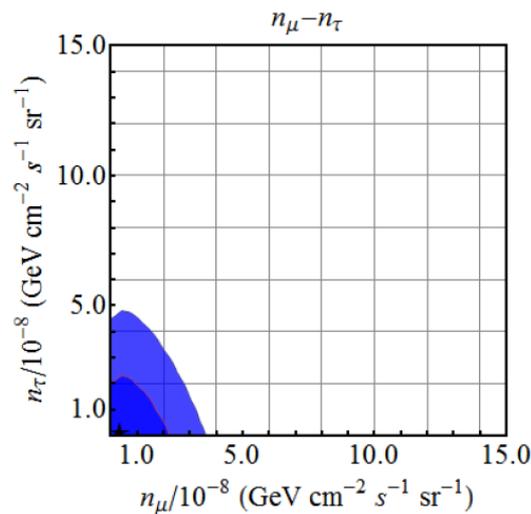
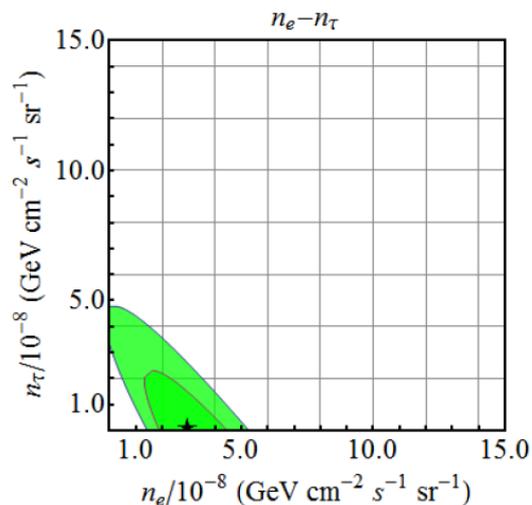
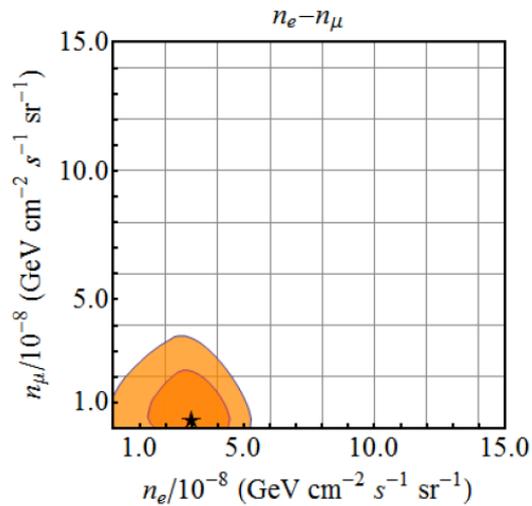
$$\chi^2 = \chi_{\text{shower}}^2 + \chi_{\text{track}}^2,$$

$$\chi_{\text{shower}}^2 = 2 \sum_{i=1}^{14} \left(\mu_i^{\text{sh}} - N_i^{\text{sh}} + N_i^{\text{sh}} \ln \frac{N_i^{\text{sh}}}{\mu_i^{\text{sh}}} \right),$$



スペクトラムとフレーバー比

$\gamma = 2.0$ で固定した場合



★がベストフィット
(1 : 0.1 : 0)
内側は68% 外側は95%
の領域

$$\chi_{\min}^2 = 42.7/25 \text{ dof}$$
$$(p = 0.015)$$

1:1:1は、76% surface に
接している

スペクトラムとフレーバー比

各 γ の値における χ^2_{\min} の値

γ のベストフィットは**2.7**

n_d : 自由

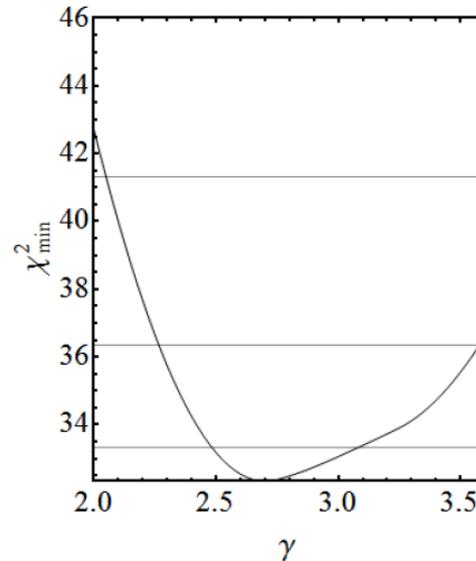
$$\chi^2_{\min} = 32.3/24 \text{ dof}$$

($p = 0.12$)

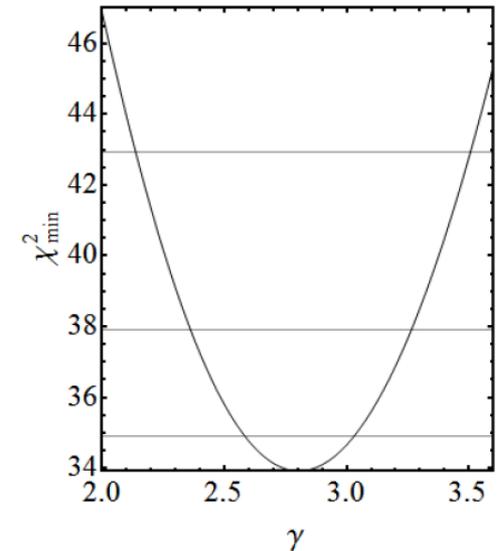
$n_e = n_\mu = n_\tau$

$$\chi^2_{\min} = 33.9/26 \text{ dof}$$

($p = 0.14$)



n_d : 自由

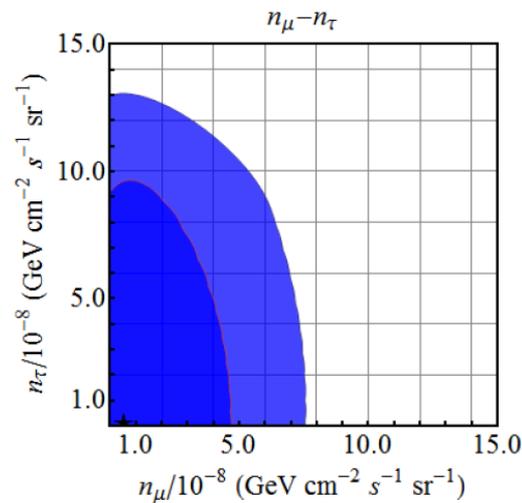
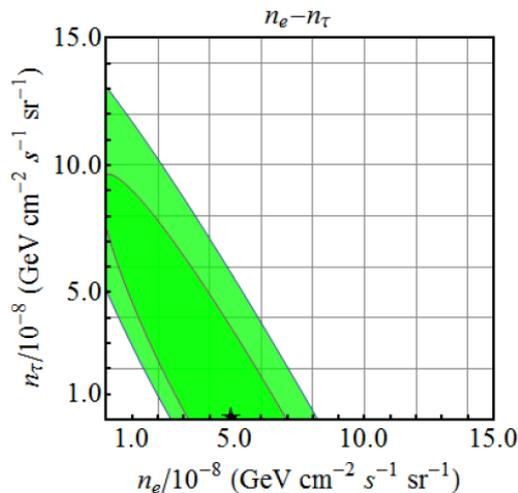
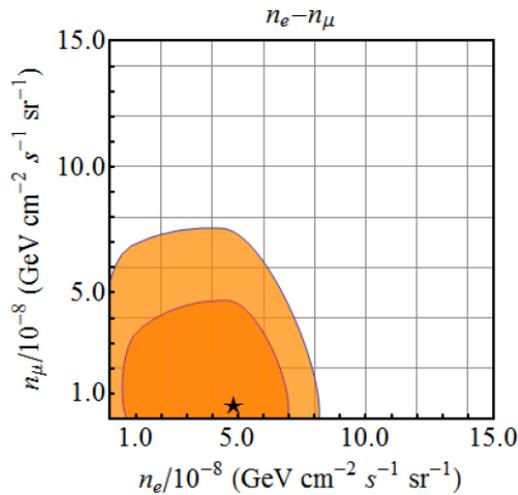


$n_e = n_\mu = n_\tau$

Flavored なモデルでも、Democratic なモデルでも、
エネルギー分布のフィットの質はあまり変わらない

スペクトラムとフレーバー比

$\gamma = 2.7$ で固定した場合



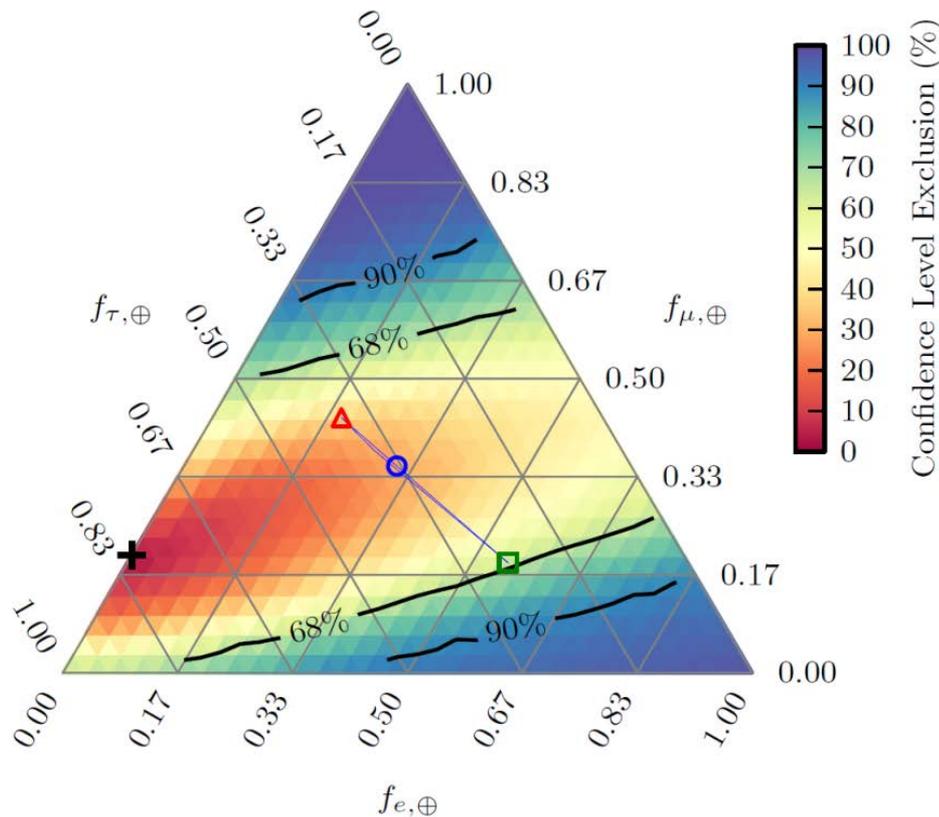
★がベストフィット
(変わらず、1 : 0.1 : 0)

1:1:1は、38% surface に
tangent

⇒ track の miss ID の効果を入
れると、12%にダウン

スペクトラムとフレーバー比

IceCube Collaboration, arXiv:1502.03376



974 days data
129 showers, 8 tracks
(starting events)

1:1:1のときの γ_{best} は2.6

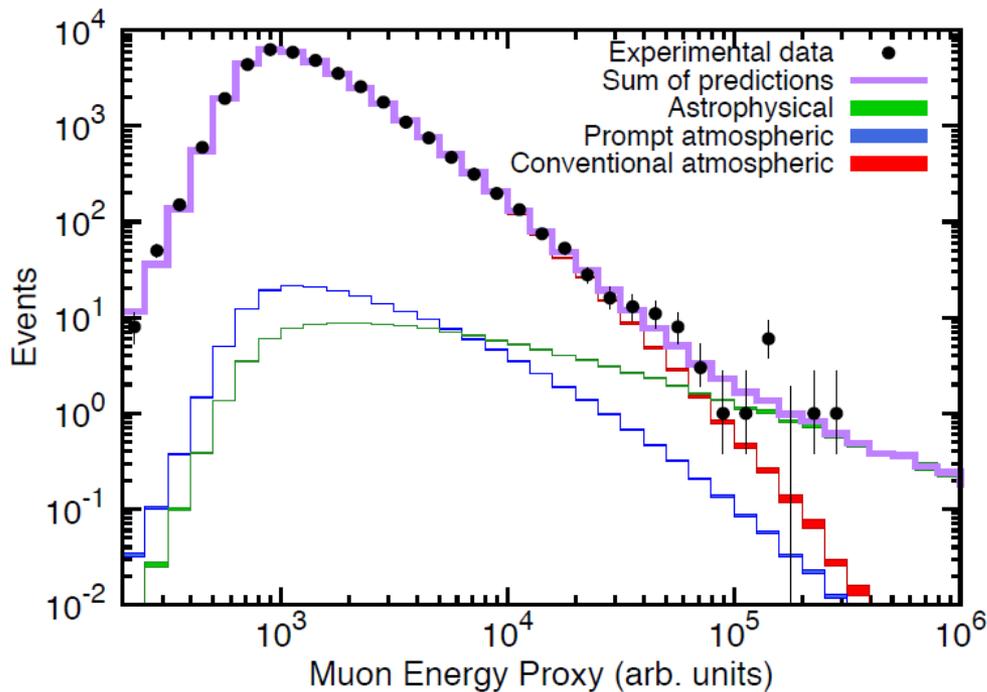
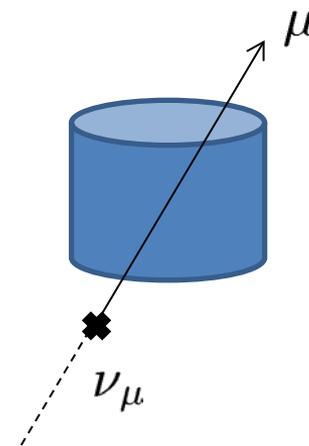
Best fit ratio は、
0 : 0.2 : 0.8

1:1:1 exclusion < 68%

タウがドミナントになっている

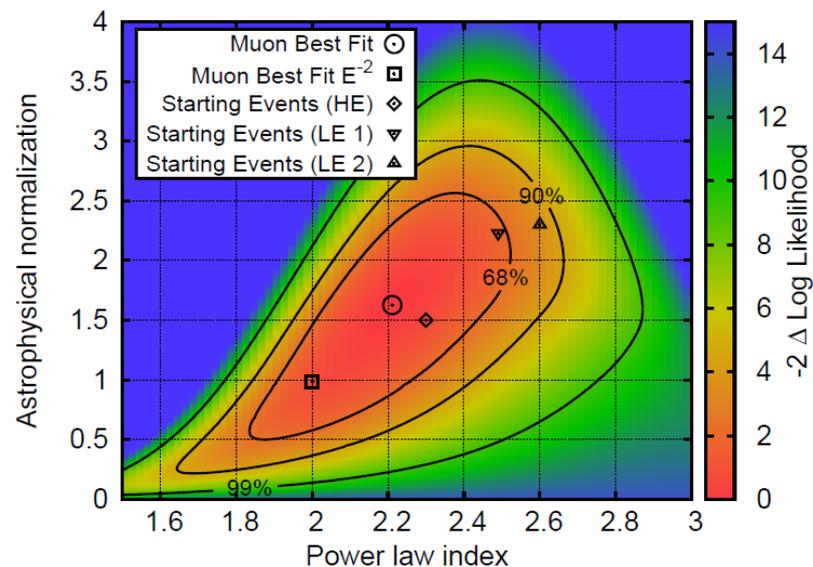
Up-going muon

IceCube Collaboration, arXiv:1507.04005



- point source (はない)

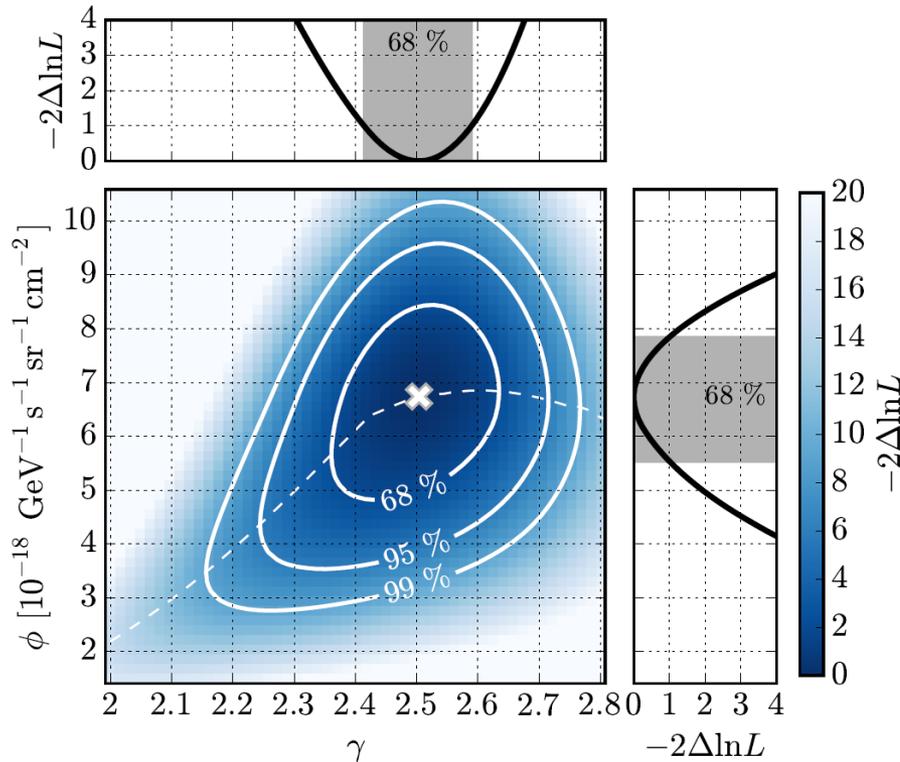
- 659.5 days (May 2010 – May 2012)
- ATM のみは 3.7σ で disfavored
- Starting event の観測と consistent



Combined analysis

IceCube Collaboration, arXiv:1507.03991

Up-going muon, Starting event などのデータの“グローバルフィット”



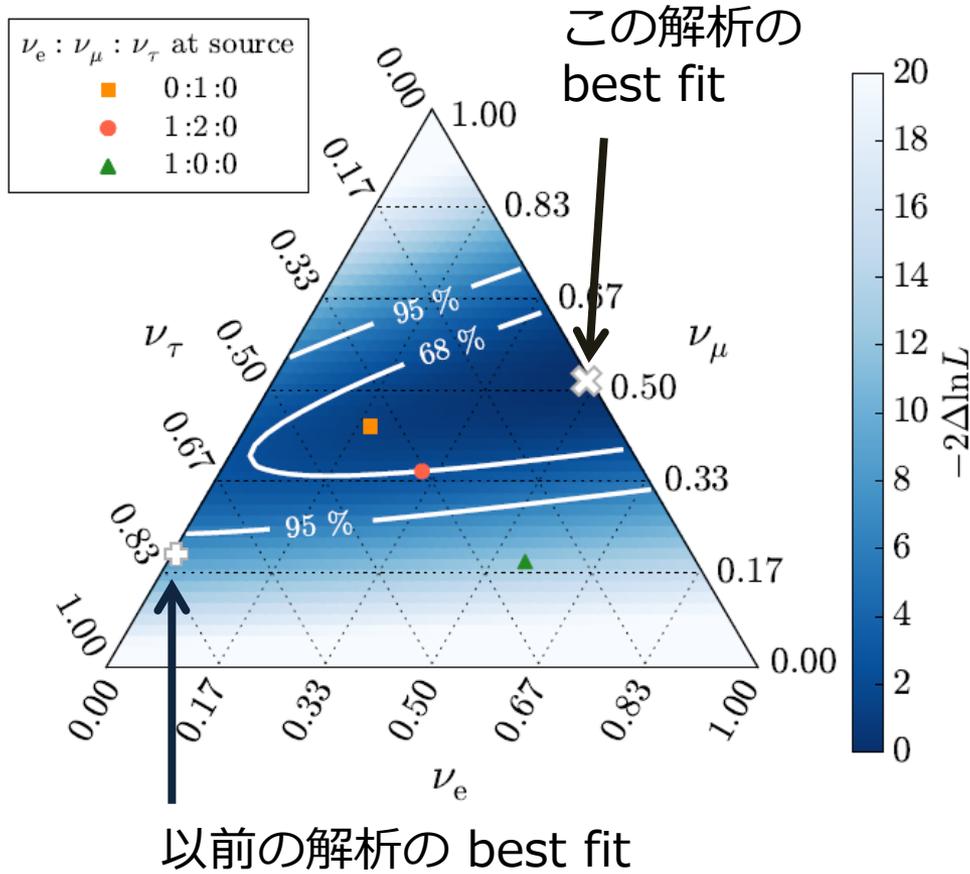
Model	Parameters
single power law	ϕ, γ
differential	$\phi_1 - \phi_9$
north-south	$\phi_S, \gamma_S, \phi_N, \gamma_N$
2-flavor	$\phi_e, \phi_{\mu+\tau}, \gamma$
3-flavor	$\phi_e, \phi_{\mu}, \phi_{\tau}, \gamma$

- Non-flavored, single power law

$$\gamma = 2.50 \pm 0.09$$

- 2.0 は、 3.8σ で disfavored
- カットオフを入れても、still disfavored (2.1σ w.r.t free γ)

Combined analysis



Model	Parameters
single power law	ϕ, γ
differential	$\phi_1 - \phi_9$
north-south	$\phi_S, \gamma_S, \phi_N, \gamma_N$
2-flavor	$\phi_e, \phi_{\mu+\tau}, \gamma$
3-flavor	$\phi_e, \phi_\mu, \phi_\tau, \gamma$

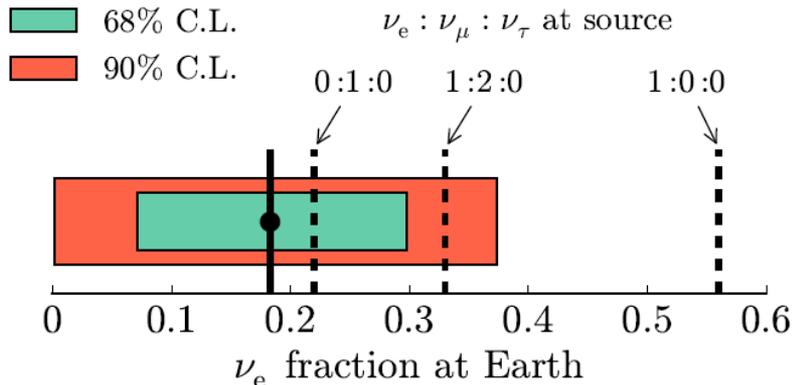
- 3-flavor モデル
- γ は、single と同じ
- 0:1:0 (muon dump) 55%
- 1:2:0 (pion) 27%
- 1:0:0 (neutron) 0.014% (3.6 σ)

Combined analysis

Model	Parameters
single power law	ϕ, γ
differential	$\phi_1 - \phi_9$
north-south	$\phi_S, \gamma_S, \phi_N, \gamma_N$
2-flavor	$\phi_e, \phi_{\mu+\tau}, \gamma$
3-flavor	$\phi_e, \phi_\mu, \phi_\tau, \gamma$

- Northern sky $\gamma = -(2.0^{+0.3}_{-0.4})$
- Southern sky $\gamma = -2.56 \pm 0.12$

しかし significance は 1.1σ



- 3-flavor とコンシステントに
Muon dump > pion > neutron

素粒子論との関わり

暗黒物質, long-lived particles

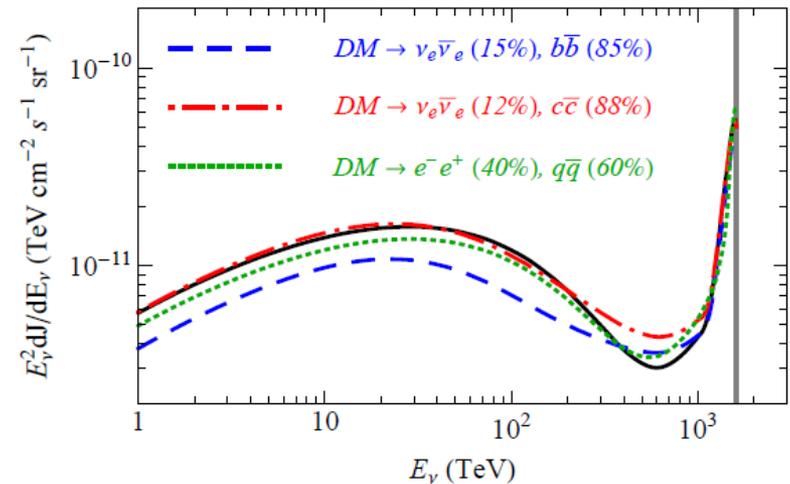
- Line \Rightarrow two body decay [1]

$$\bar{L}^c \phi L, \bar{L} H^c \psi, \dots$$

- Line + soft component [2]

- Long-lived particle X [4]

...



An incomplete list;

[1]Feldstein, Kusenko, Matsumoto, Yanagida, 2013;

[2]Esmaili, Serpico, 2013; Higaki, Kitano, Sato, 2014;

[3]Bhattacharya, Gandhi, Gupta, 2014; [4] Ema, Jinno, Moroi, 2014;

[5]Fong, Minakata, Panes, Funchal, 2014; [6]Dudas, Mambrini, Olive, 2014;

...

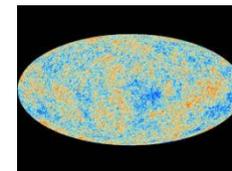
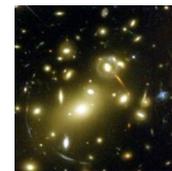
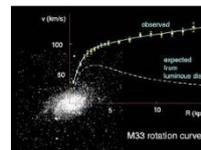
ニュートリノ質量、暗黒物質

Neutrino mass



- Right-handed neutrinos
- Triplet Higgsetc.

Dark matter



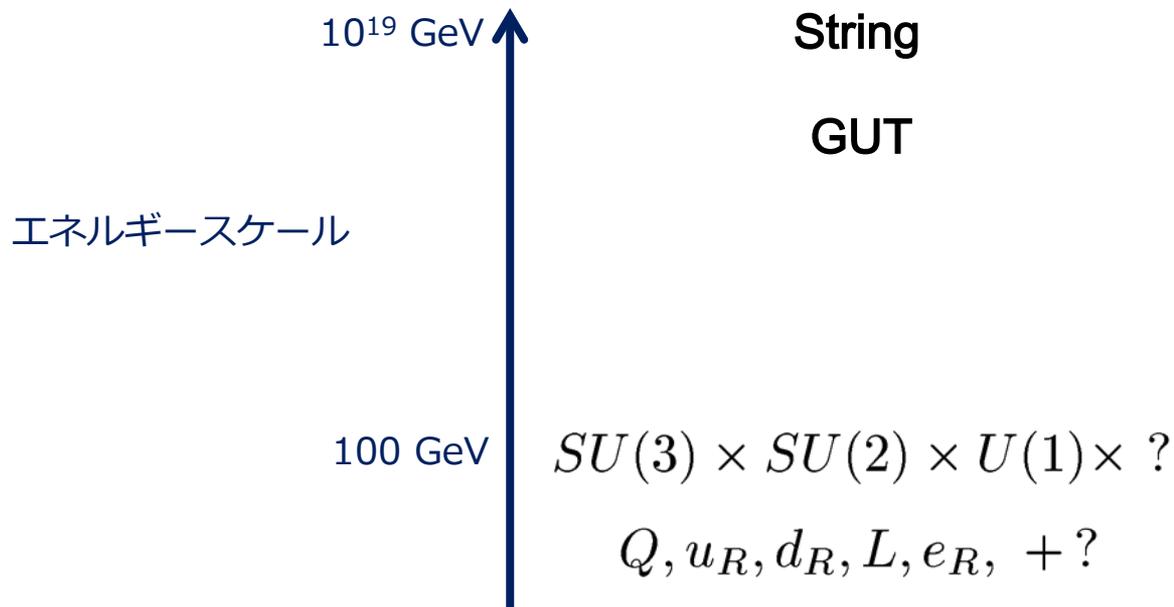
- Particle dark matter
(stable, neutral, non-baryonic)

Gauge-singlet fields

標準模型のゲージ対称性がすべてではないはず

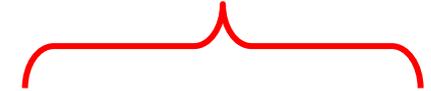
新しい対称性のスケールについて

低いスケールの新しい対称性はあるか？



$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ ゲージ対称性

右手型ニュートリノ



	L_e	L_μ	L_τ	e_R	μ_R	τ_R	H	ν_{R1}	ν_{R2}	ν_{R3}
$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$	0	1	-1	0	1	-1	0	0	1	-1

- 新しいゲージ場は、電子にはカップルしない
- レプトン混合の、大きい μ - τ 混合を説明できる
- 繰り込み可能なレベルでモデルを作れる
- 新しいゲージ場の質量は、電弱以下でも大丈夫

Bell, Volkas, 2000;

Joshiyura, Mohanty, 2004;

Bandyopadhyay, Dighe, Joshiyura, 2007;

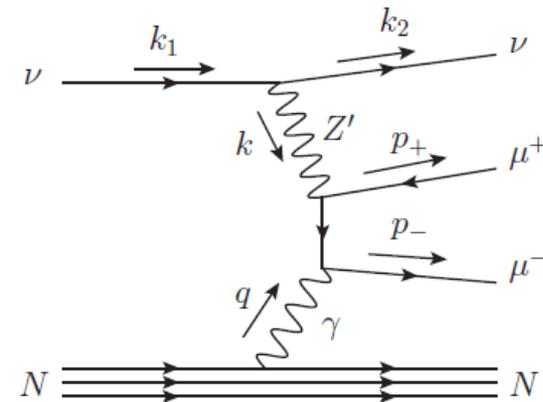
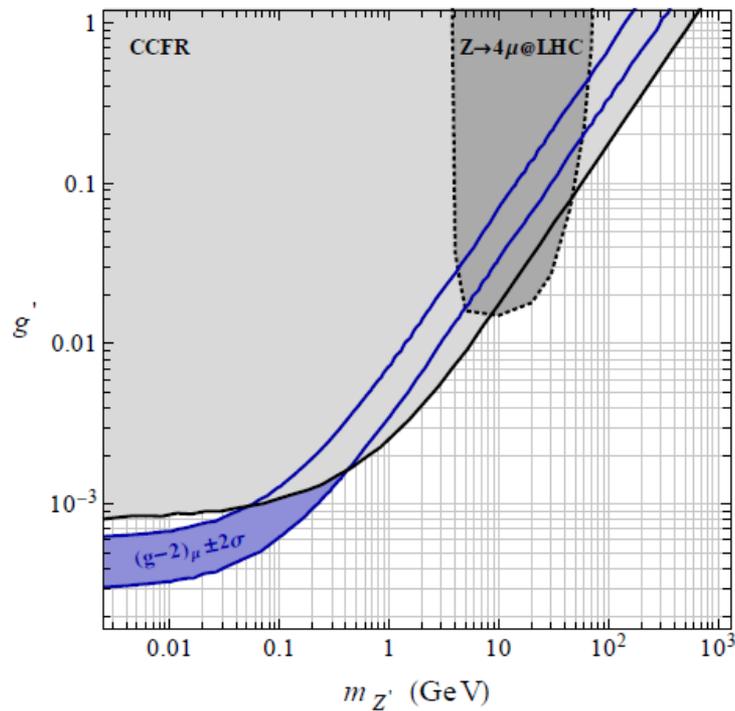
Samanda, 2011;

Heeck, Rodejohann, 2011

$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ ゲージ対称性

ミュオン $g-2$ のズレを説明できる

Ma, Roy, Roy, 2002;
Baek, Deshpande, He, Ko, 2001;
...



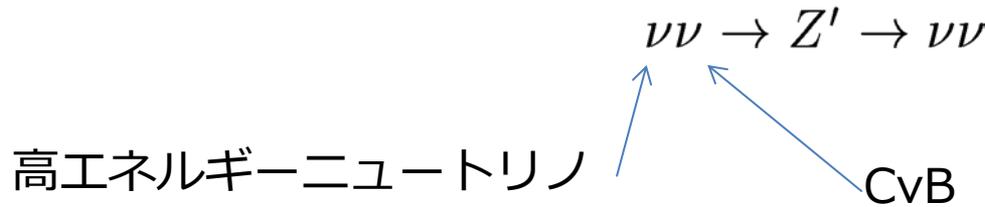
Neutrino trident production

Altmannshofer, Gori, Pospelov, Yavin, 2014

U(1)_{L_μ - L_τ} ゲージ対称性

IceCubeの物理と関係しうる

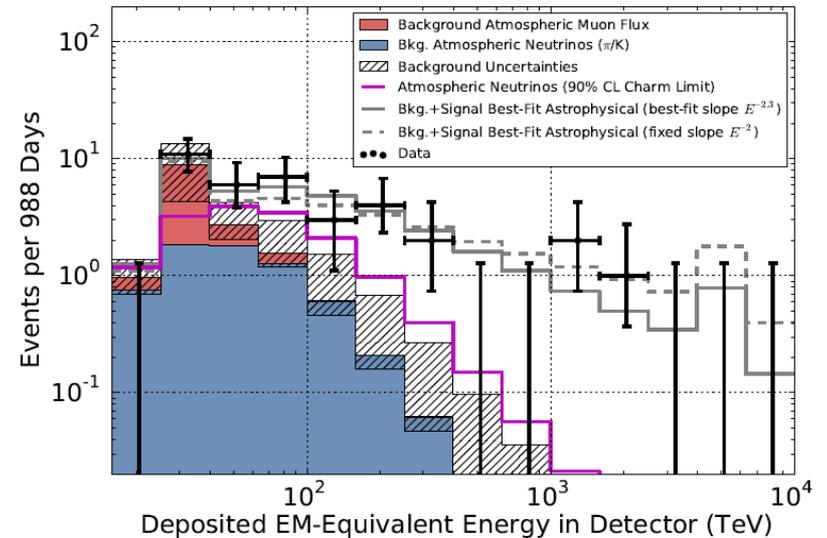
Araki, Kaneko, Konishi, Ota, Sato, Shimomura, 2014



レゾナンスのエネルギーは、およそ

$$E_\nu = \frac{m_{Z'}^2}{2m_\nu} \sim \frac{(10^6 \text{ eV})^2}{10^{-2} \text{ eV}}$$

$$\sim 10^{14} \text{ eV} = 100 \text{ TeV}$$



arXiv:1405.5303

まとめと展望

- 高エネルギーニュートリノの観測は、今のところ典型的な天体物理のシナリオと矛盾のない形で進んでいる
 - $\sim E^{-2.5}$ (**-2.0 は disfavored**)
 - **等方的**な diffuse flux
- ソースについて、今後議論が進んでゆくと期待される
- Tau flavor の (double bang) 情報や、ニュートリノ/反ニュートリノの情報は、今後の進展のカギ
- 素粒子論との関わりもおもしろい

