

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9月16日 素粒子物理学の進展2015 京都大学基礎物理学研究所

あらすじ

最近の IceCube 結果と、 $L_\mu - L_\tau$ ゲージ対称性モデル
についてお話しします

- **導入**

- ・ 動機
- ・ IceCube実験、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**

- ・ 高エネルギーニュートリノの吸収線 ($L_\mu - L_\tau$ ゲージ対称性)

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、ほとんど何も分かっていないが)

ニュートリノの歴史



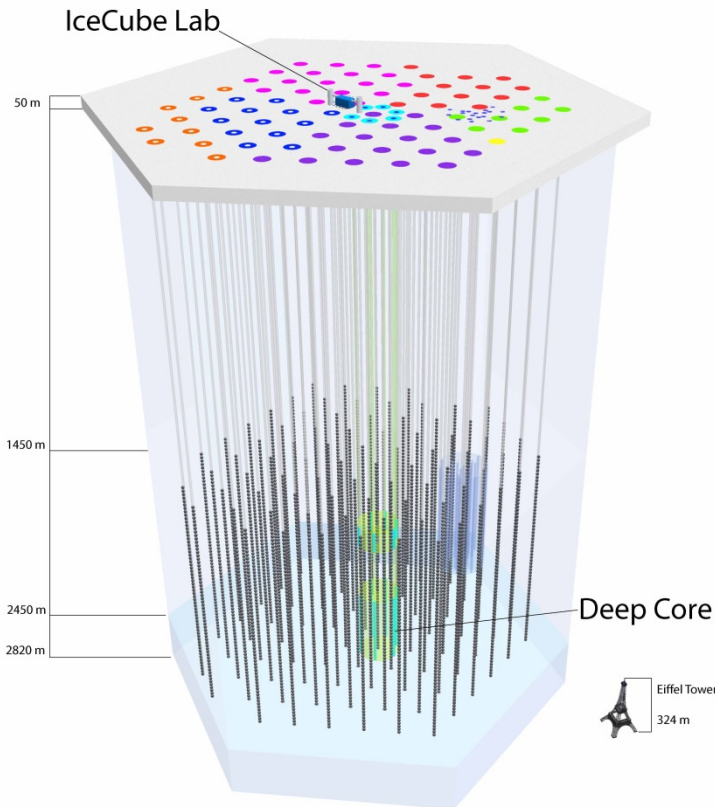
- 1930** ベータ崩壊で放出される電子のスペクトラムを説明するために、理論に導入 (パウリ)
- 1934 ニュートリノと命名 (フェルミ)
- 1959 ニュートリノの観測 (ライネス、カワン)
- 1962 ν_μ の発見 (レーダーマン、シュワーツ、シュタインバーガー)
- 1970 太陽ニュートリノ欠損の提起 (デイビス)

- 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”

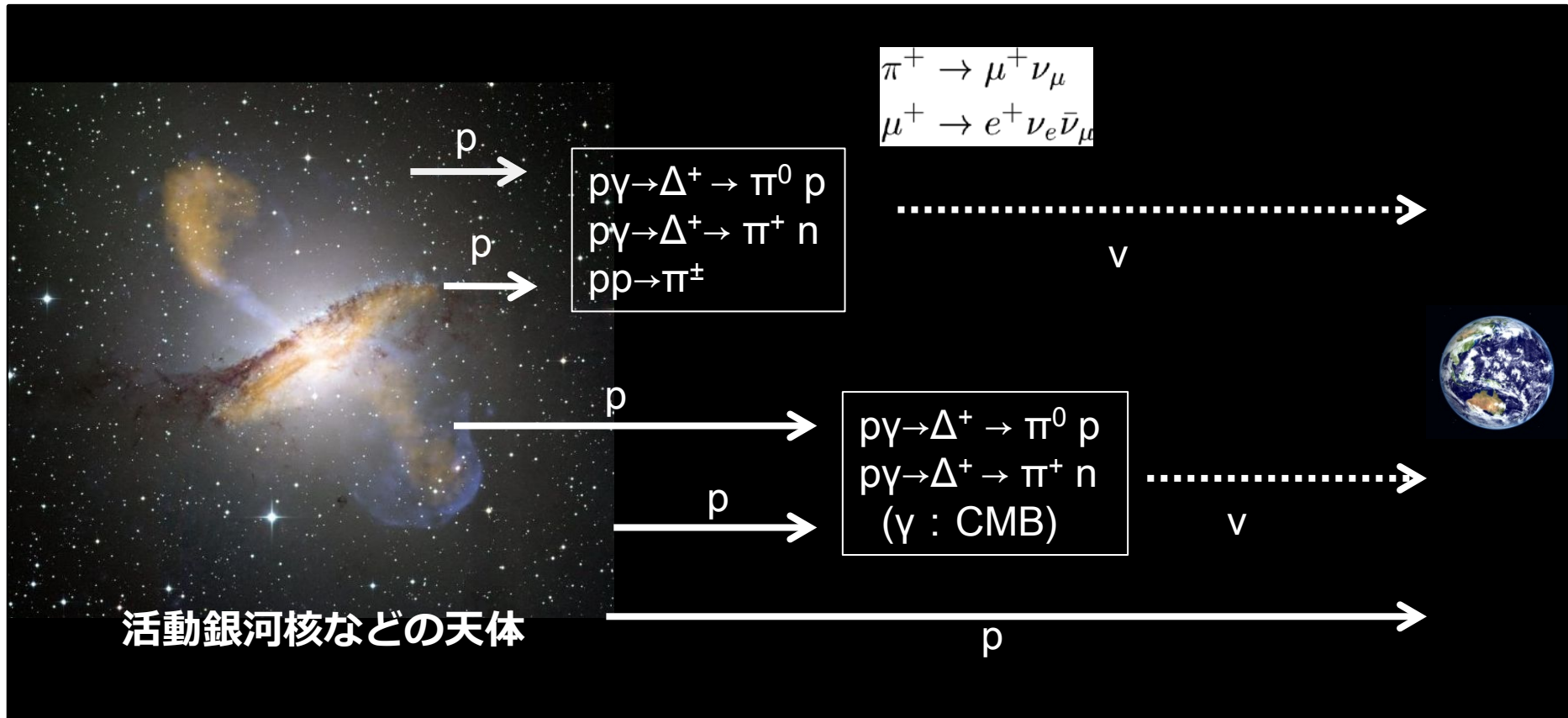
2005年に建設開始
2011年からオペレーション

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

~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

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

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](#)

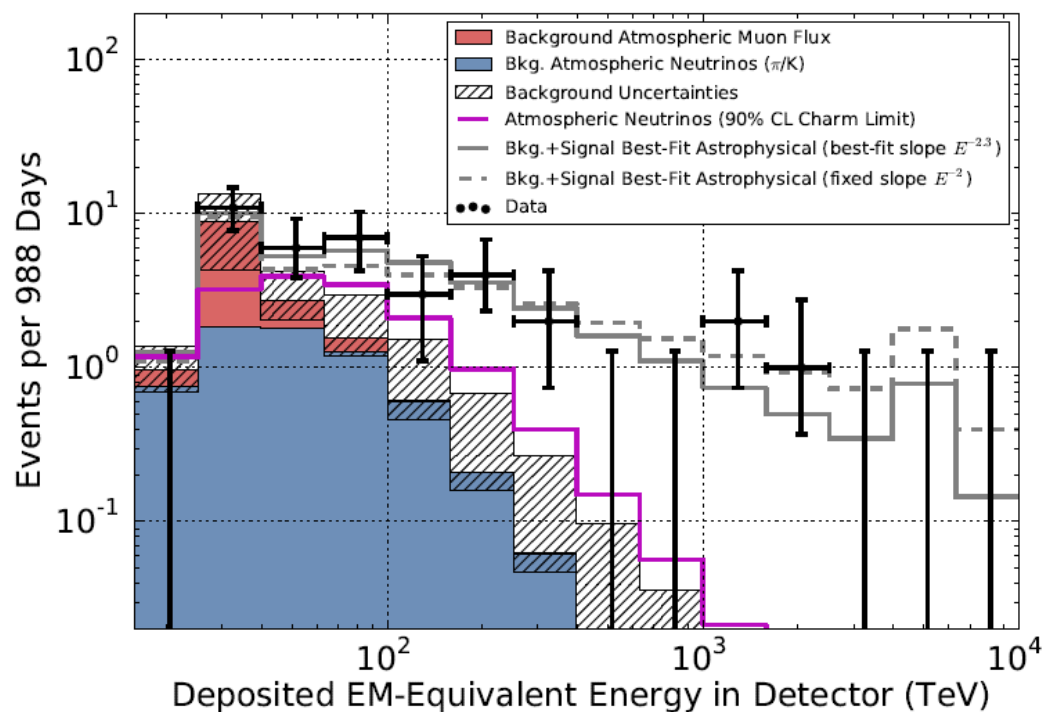
- 2015年7月 [up-going muon の解析、1507.04005](#) 「 3.7σ 」
[Combined な fit, 1507.03991](#) 「スペクトラム etc.」

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
⇒ 5.7 σ でATMを棄却

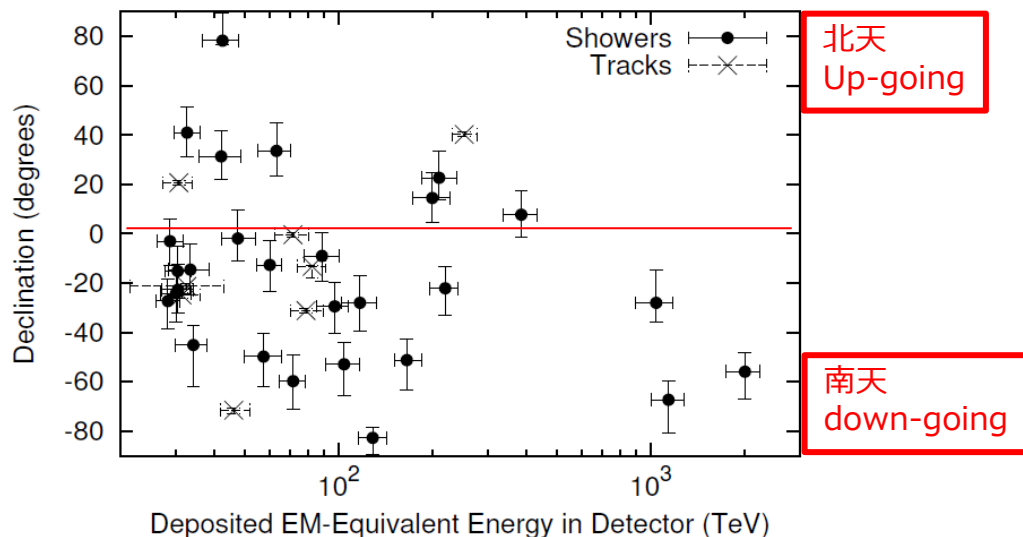
- $Y_{\text{best}} = -2.3$



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

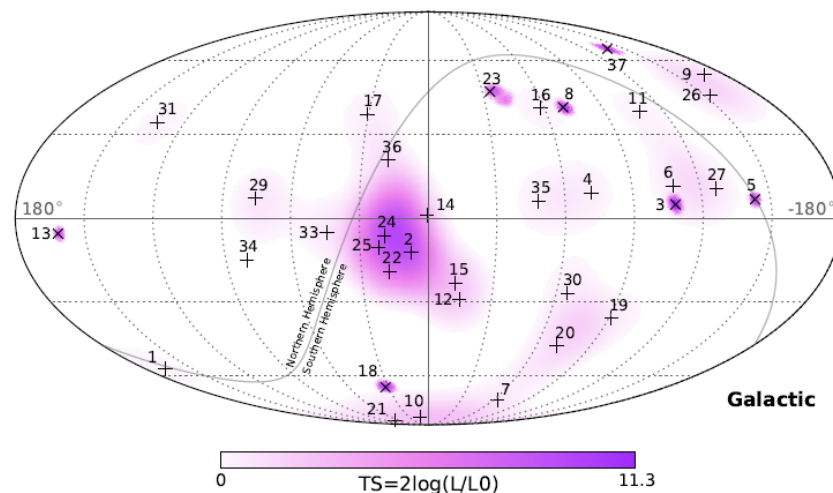
スターティングイベント (3 years)

- 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

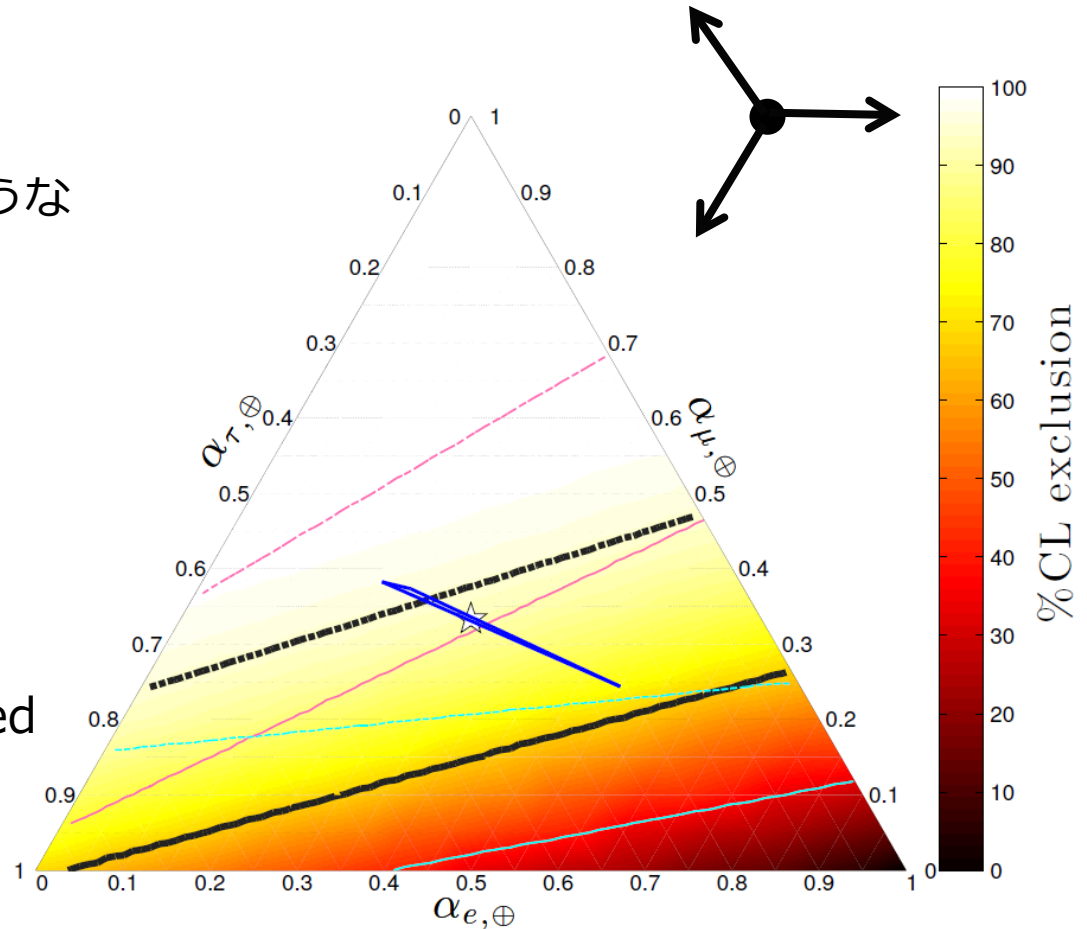
Mena, Palomares-Ruiz, Vincent, arXiv:1404.0017/1411.2998

- 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

↑
標準的なシナリオが
予想するフレーバー比



スペクトラムとフレーバー比

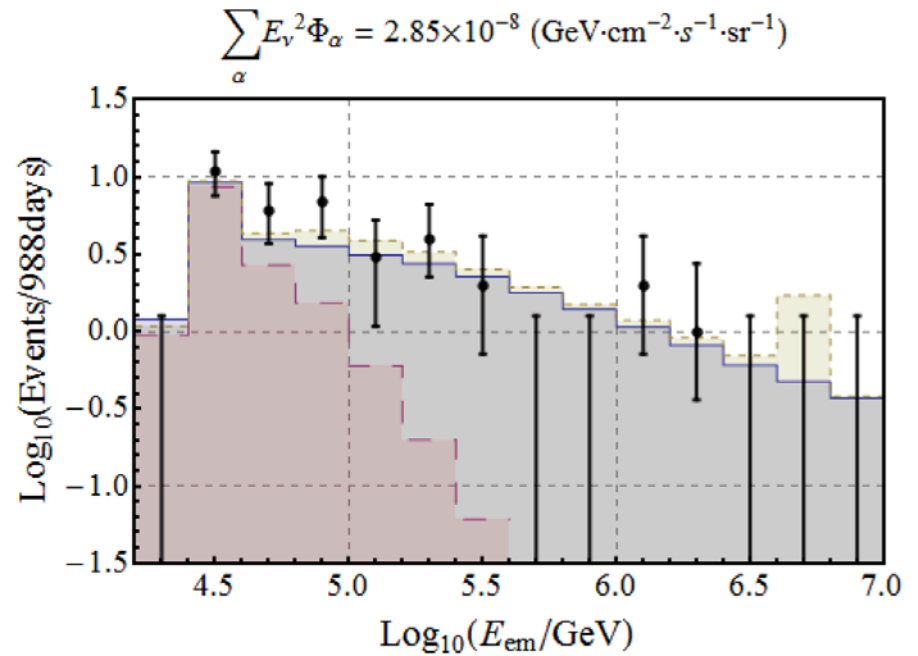
AW, arXiv:1412.8264

$\Phi_\alpha = n_\alpha E_\nu^{-\gamma}$ 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

各 γ の値における χ^2_{\min} の値

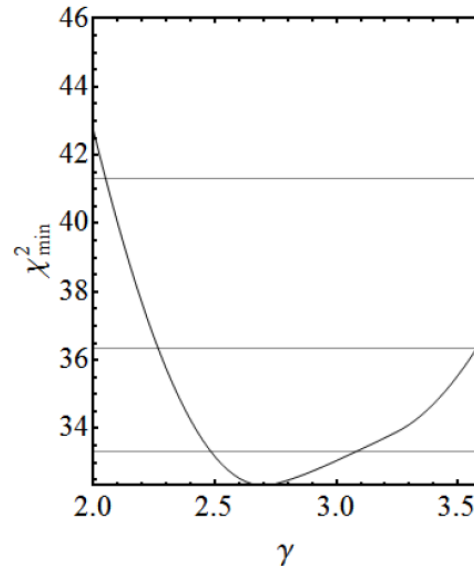
γ のベストフィットは**2.7**

n_d : 自由

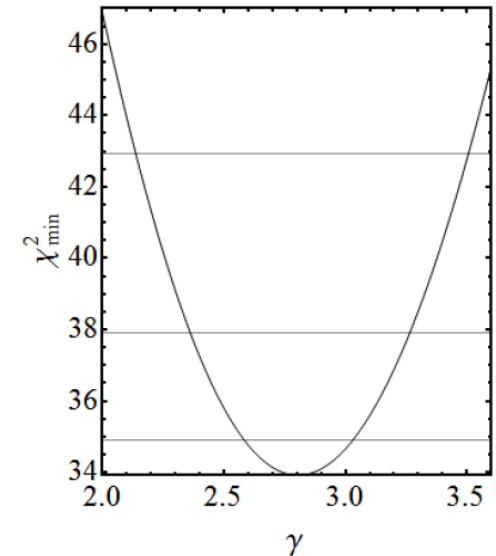
$$\chi^2_{\min} = 32.3/24 \text{ dof} \\ (p = 0.12)$$

$n_e = n_\mu = n_\tau$

$$\chi^2_{\min} = 33.9/26 \text{ dof} \\ (p = 0.14)$$



n_d : 自由

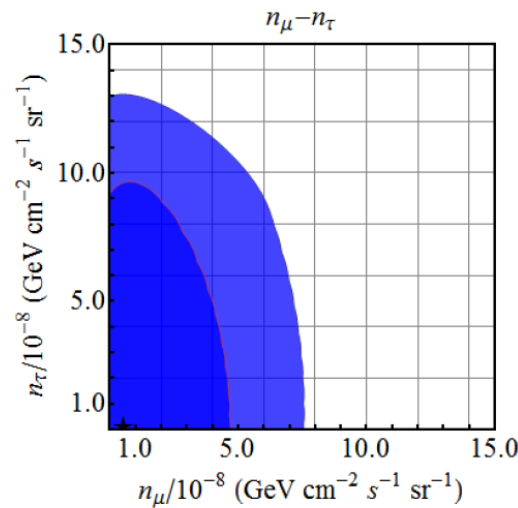
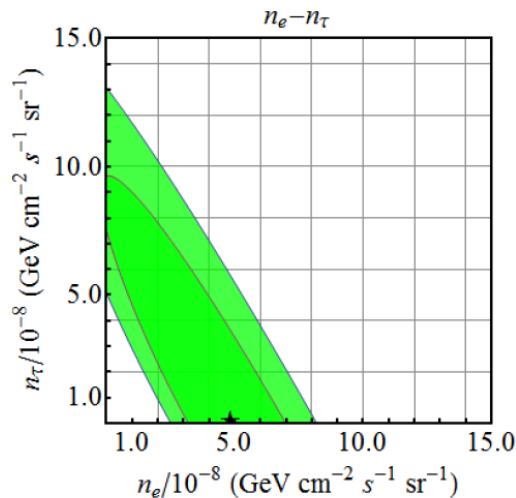
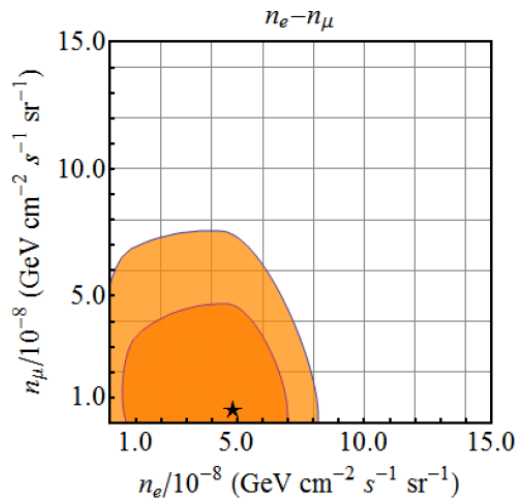


$n_e = n_\mu = n_\tau$

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



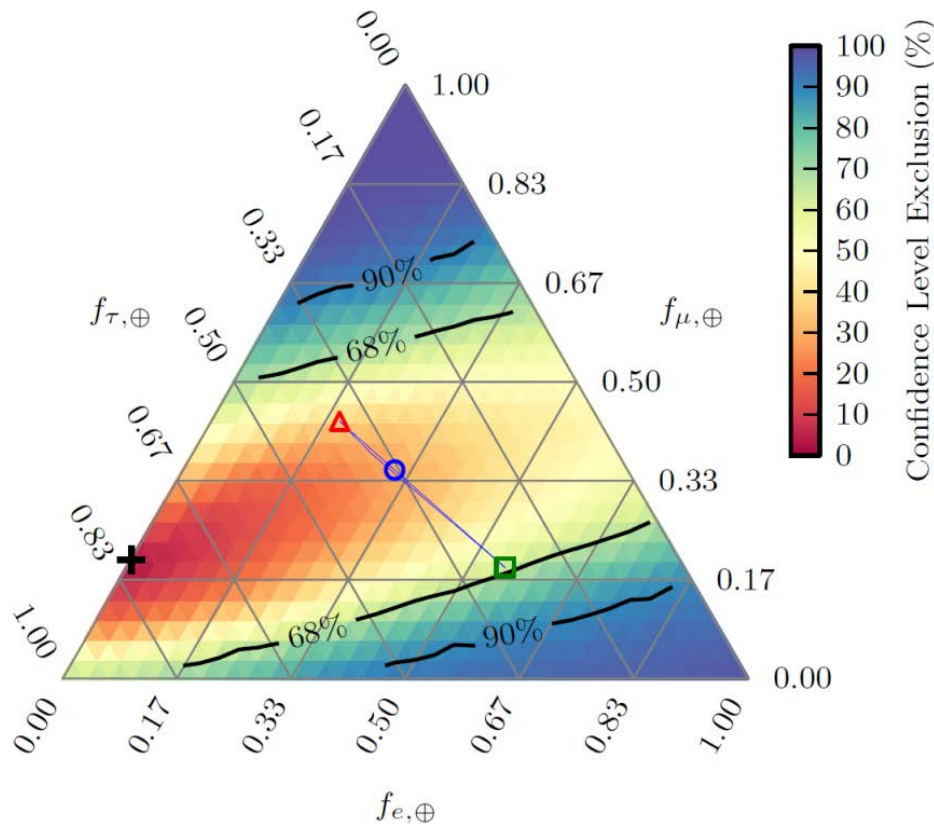
★がベストフィット
(1 : 0.1 : 0)

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

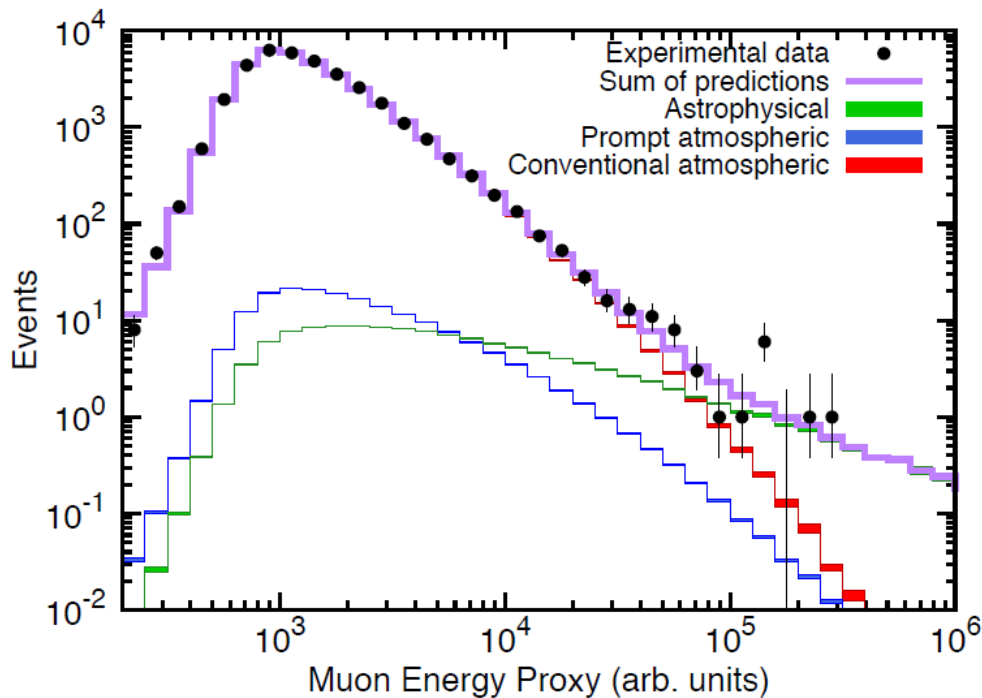
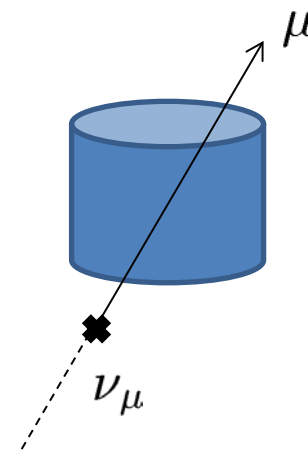
Best fit ratio は、
0 : 0.2 : 0.8

1:1:1 exclusion < 68%

タウがドミナントになっている

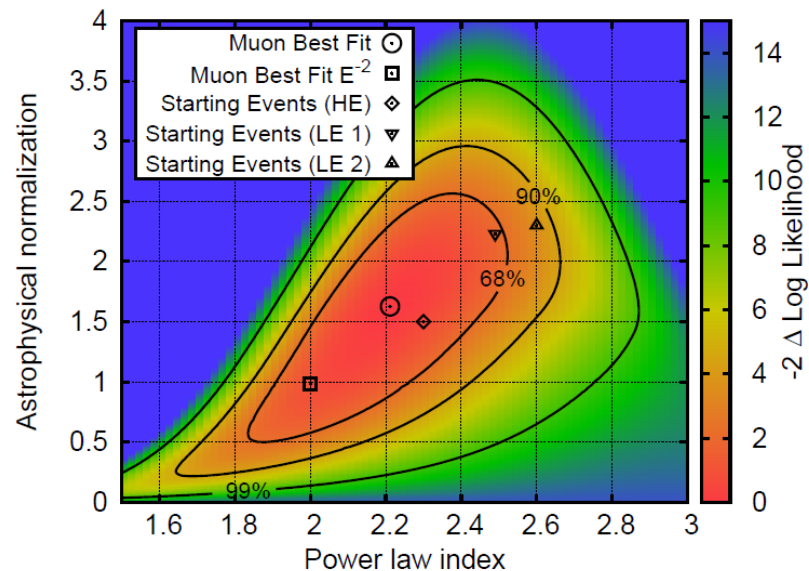
Up-going muon

IceCube Collaboration, arXiv:1507.04005



- point source はいまのところ
みつかっていない

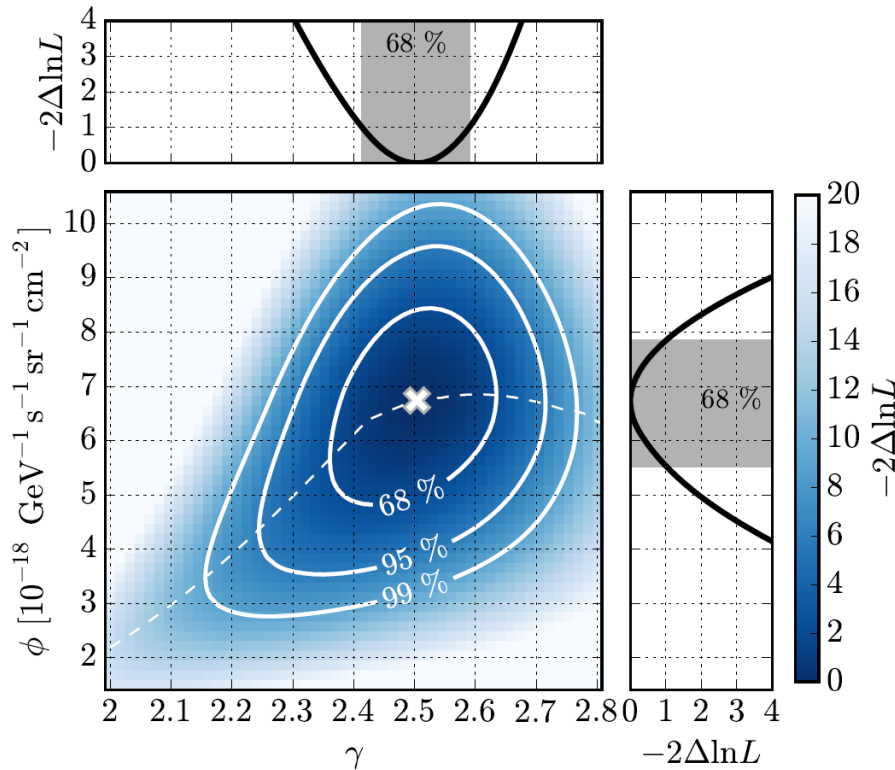
- 659.5 days (May 2010 – May 2012)
- ATM のみは 3.7σ で disfavored
- Starting event の観測と consistent



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”



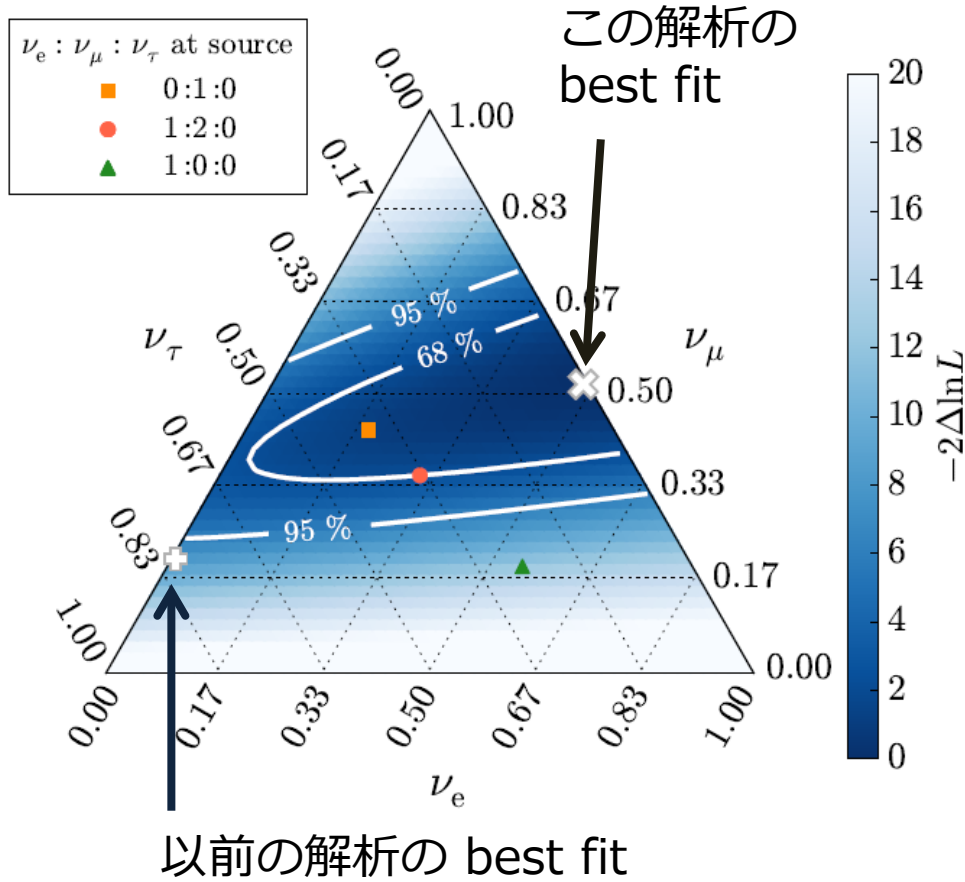
| Model | Parameters |
|------------------|---------------------------------------|
| single power law | ϕ, γ |
| differential | $\phi_1 - \phi_9$ |
| north-south | $\phi_S, \gamma_S, \phi_N, \gamma_N$ |
| 2-flavor | $\phi_e, \phi_{\mu+\tau}, \gamma$ |
| 3-flavor | $\phi_e, \phi_\mu, \phi_\tau, \gamma$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

- 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 | $\phi_e, \phi_\mu, \phi_\tau, \gamma$ |

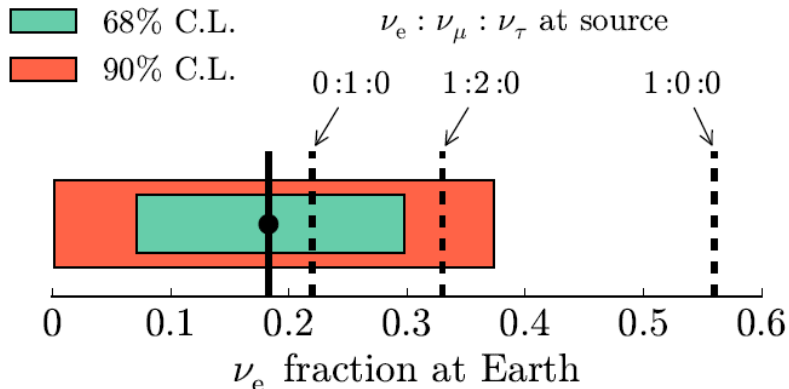
- 3-flavor モデル
- γ は、single と同じ
- 0:1:0 (muon dump) 55%
- 1:2:0 (pion) 27%
- 1:0:0 (neutron) 0.014% (3.6 σ)

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, etc.

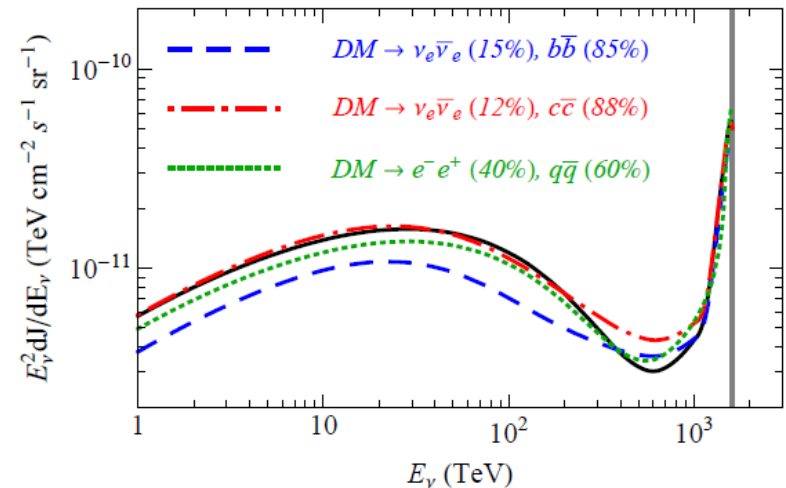
- Line \Rightarrow two body decay [1]

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

- Line + soft component [2]

- Long-lived particle X [4]

- Absorption by CvB [7]



An incomplete list;

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

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

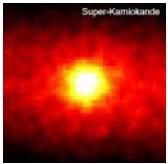
[3]Bhattacharya, Gandhi, Gupta, 2014; [4] Ema, Jinno, Moroi, 2014;

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

[7]Ibe, Kaneta, 2014; ...

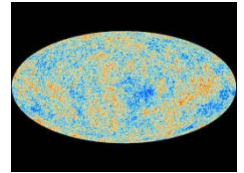
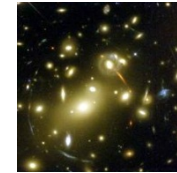
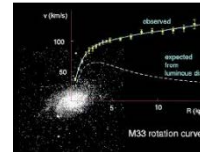
ニュートリノ質量、暗黒物質

Neutrino mass



- Right-handed neutrinos
- Triplet Higgsetc.

Dark matter

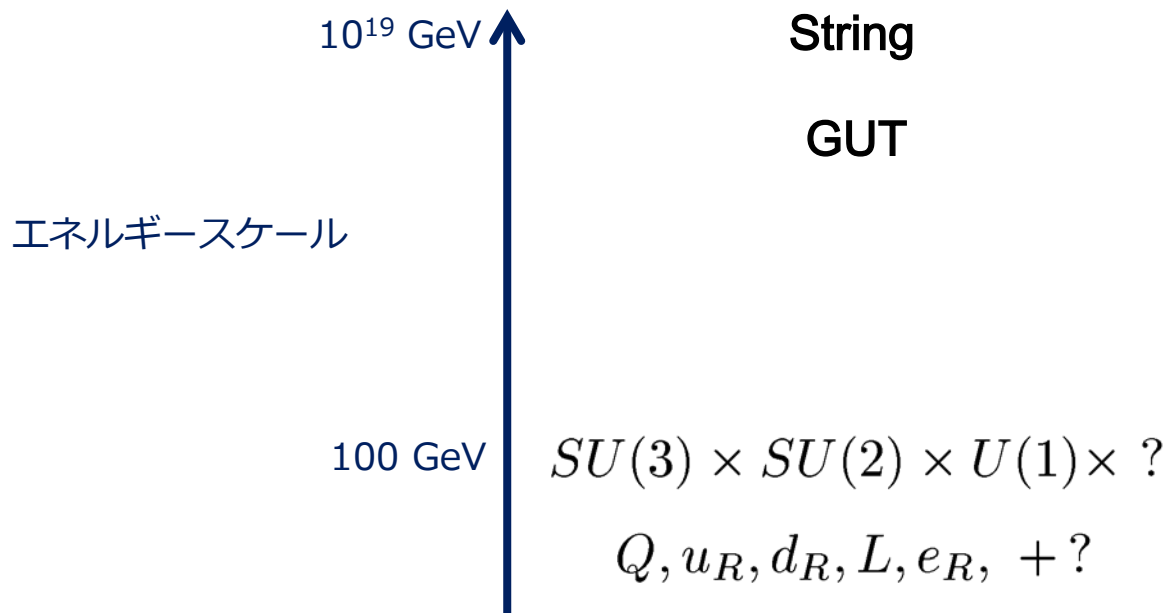


- Particle dark matter
(stable, neutral, non-baryonic)

Gauge-singlet fields

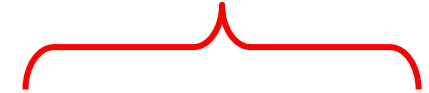
標準模型のゲージ対称性がすべてではないはず

新しい対称性のスケールについて



$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ 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;

Joshipura, Mohanty, 2004;

Bandyopadhyay, Dighe, Joshipura, 2007;

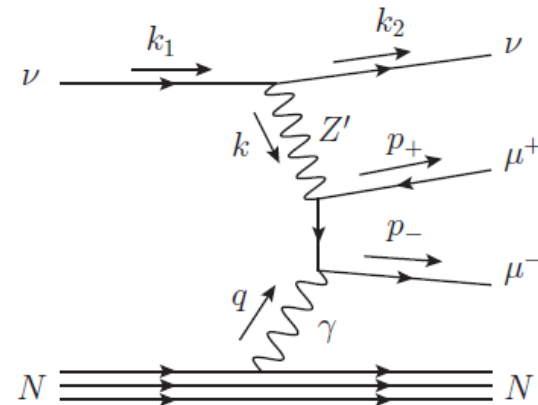
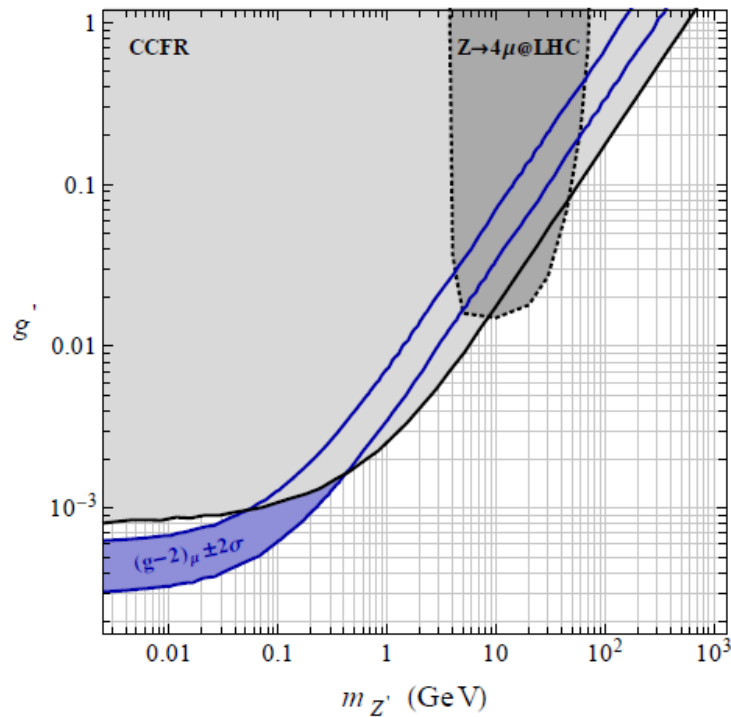
Samanda, 2011;

Heeck, Rodejohann, 2011

Muon g-2

ミューオン 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

IceCube のギャップ

Araki, Kaneko, Konishi, Ota, Sato, Shimomura, arXiv:1409.4180;
arXiv: 1508.0747

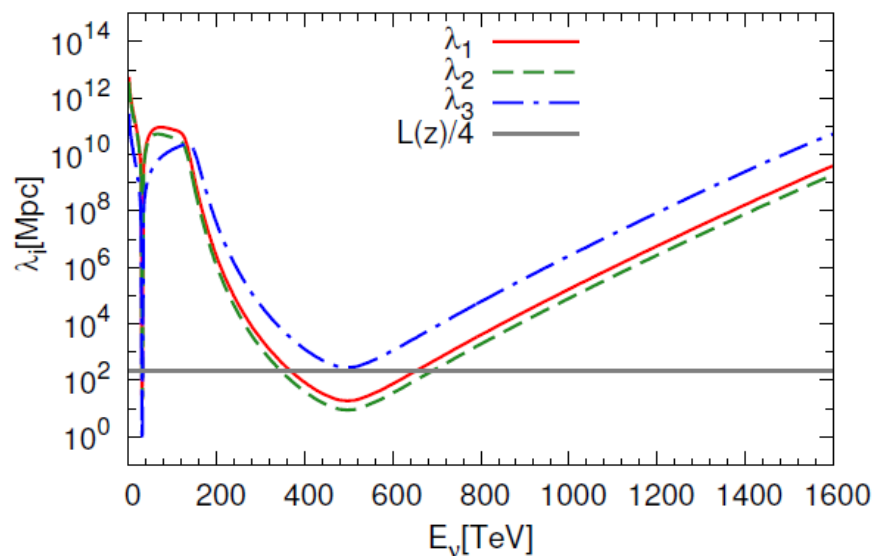
$$\nu\nu \rightarrow Z' \rightarrow \nu\nu$$

高エネルギーニュートリノ
とCvBの衝突で、 Z' が作られる

レゾナンスのエネルギーの目安：

$$E_\nu = \frac{m_{Z'}^2}{2m_\nu} \sim \frac{(10^6 \text{ eV})^2}{10^{-2} \text{ eV}} \\ \sim 10^{14} \text{ eV} = 100 \text{ TeV}$$

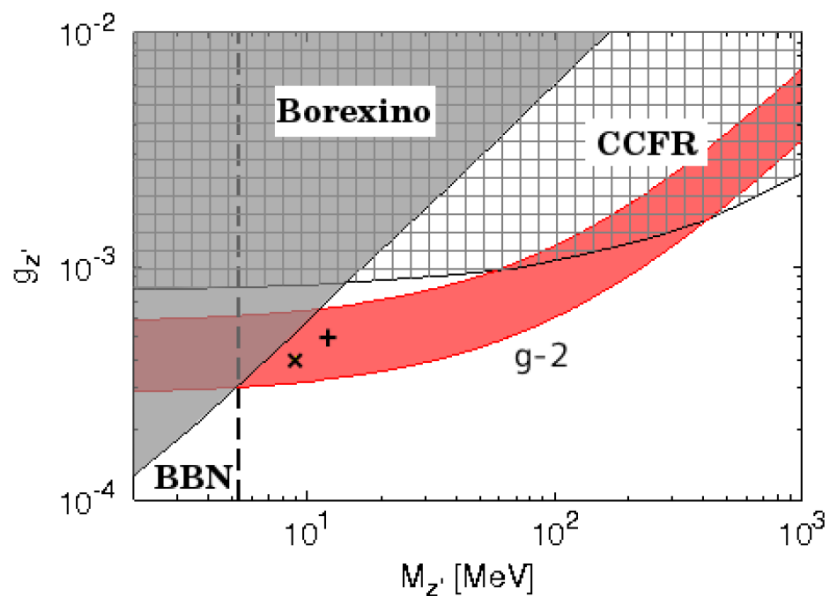
相互作用長



$$g = 5 \times 10^{-4}, M_{Z'} = 1.9 \text{ MeV}, \text{IH}, z = 0.2$$

IceCube のギャップ

Araki, Kaneko, Konishi, Ota, Sato, Shimomura, arXiv:1409.4180;
arXiv: 1508.0747



IceCube の物理にに關係しそうな
パラメターの領域は、 $g-2$ で好まれている
ところと重なっている

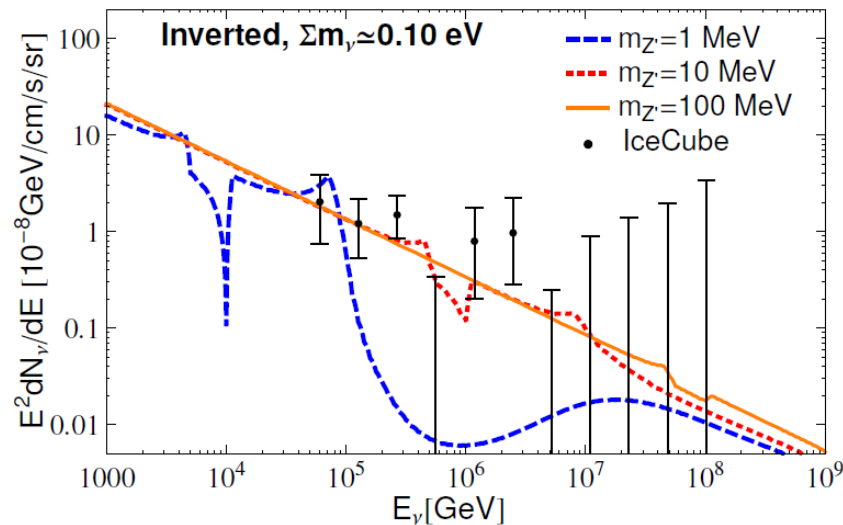
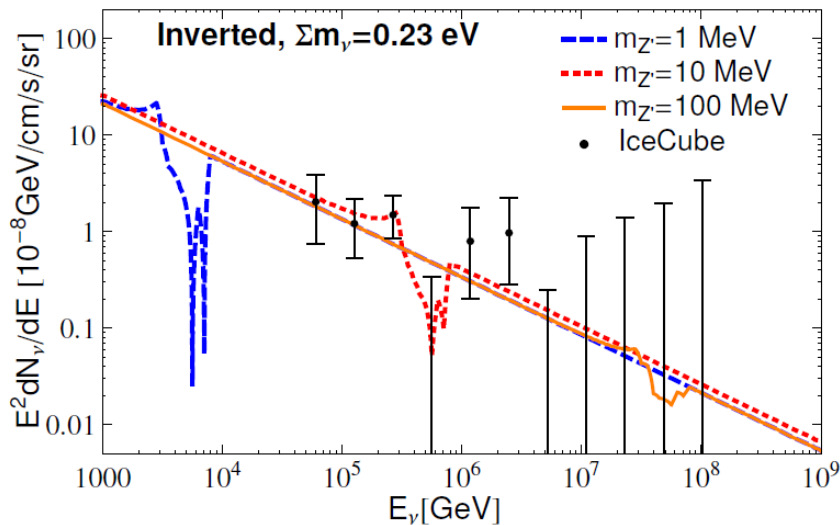
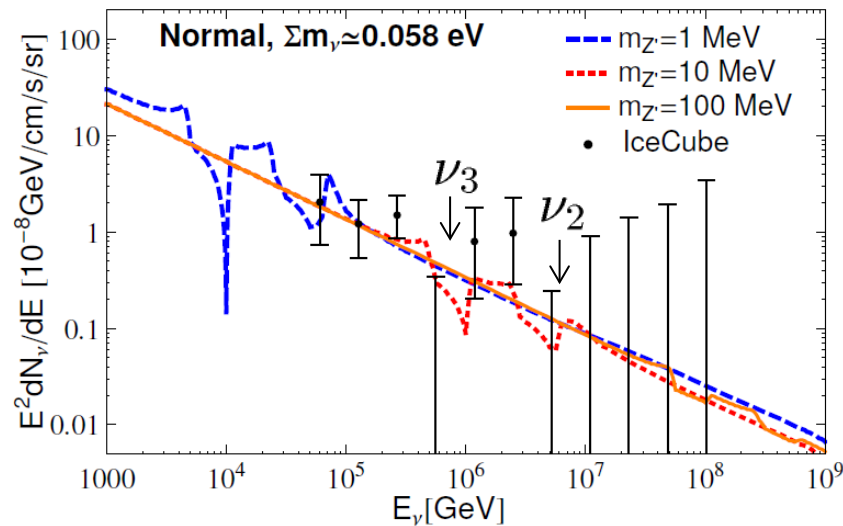
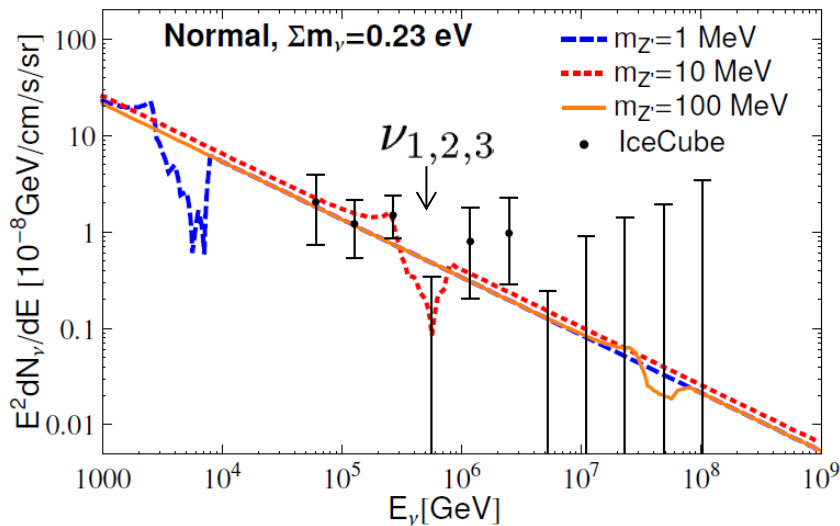
その他の制限

- CCFR (neutrino trident)
- Borexino ($\nu_e \rightarrow \nu_e$)
- BBN (# of relativistic dof)

Regeneration と フレーバー比

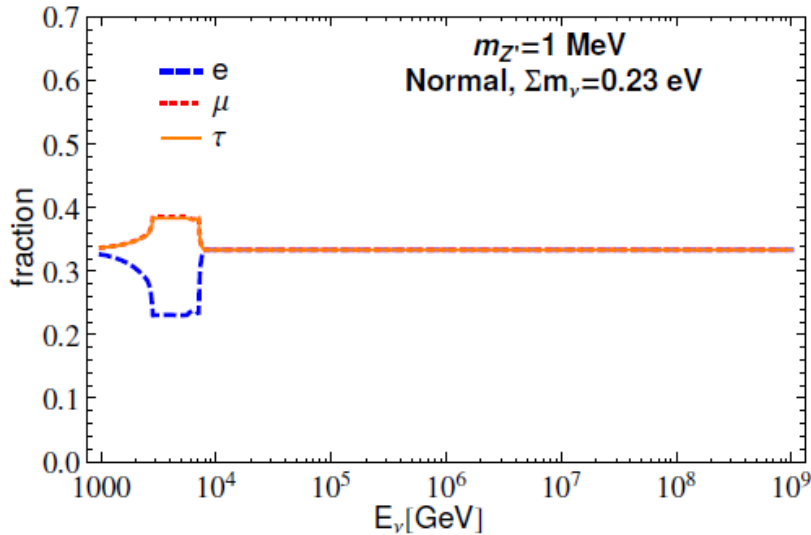
DiFranzo, Hooper, arXiv:1507.0301

$z=1$ のソース

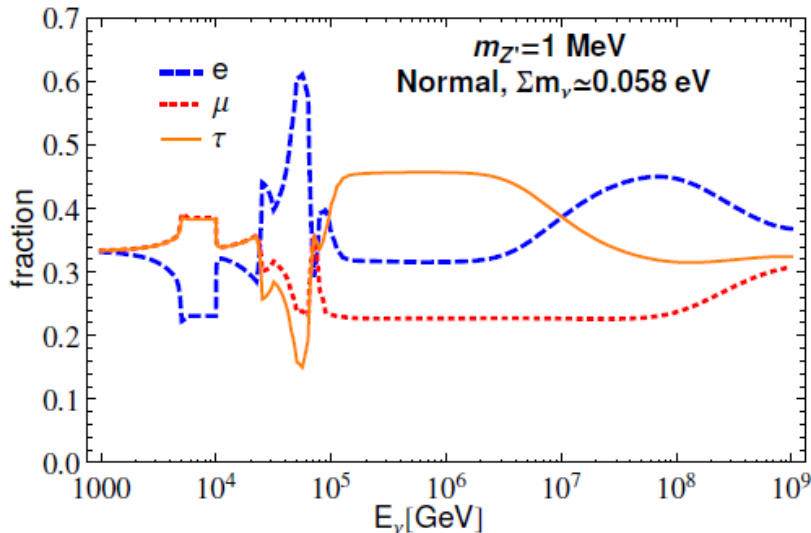


Regeneration と フレーバー比

DiFranzo, Hooper, 2015



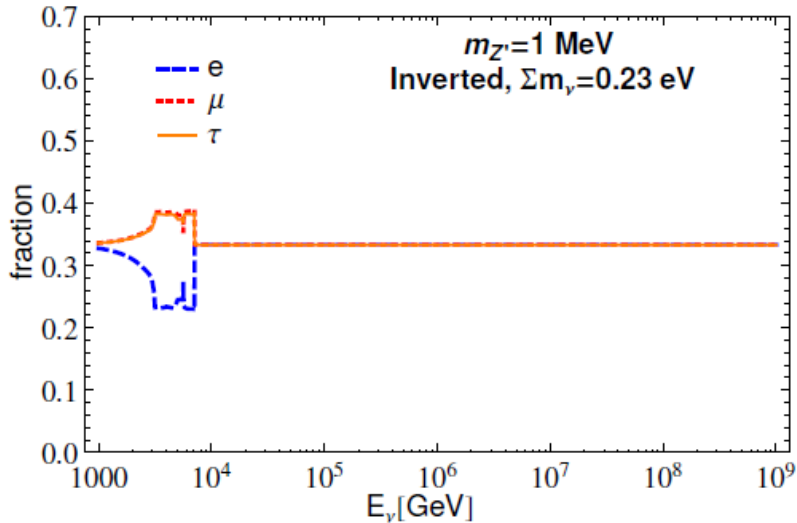
$T < mv$ だと、レゾナンスが起きるエネルギーの範囲はせまい



$Mv < T$ だと、 CvB の運動量が効いてレゾナンスが起きるエネルギーの範囲が広がる

Regeneration と フレーバー比

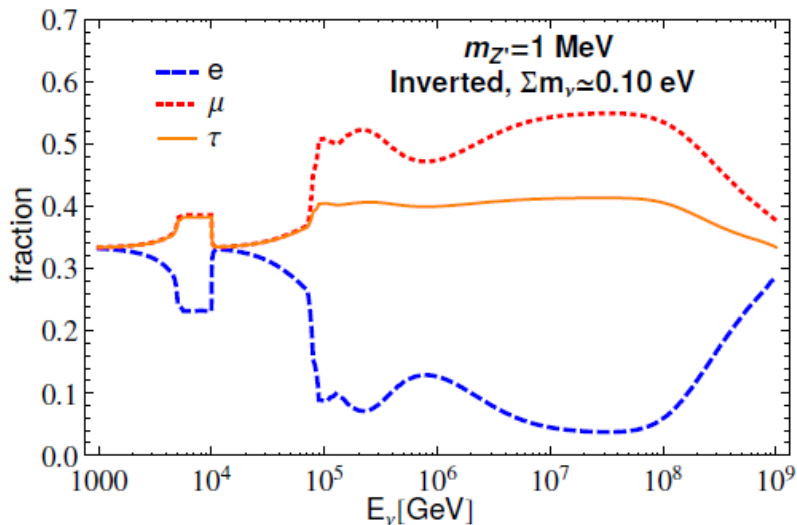
DiFranzo, Hooper, 2015



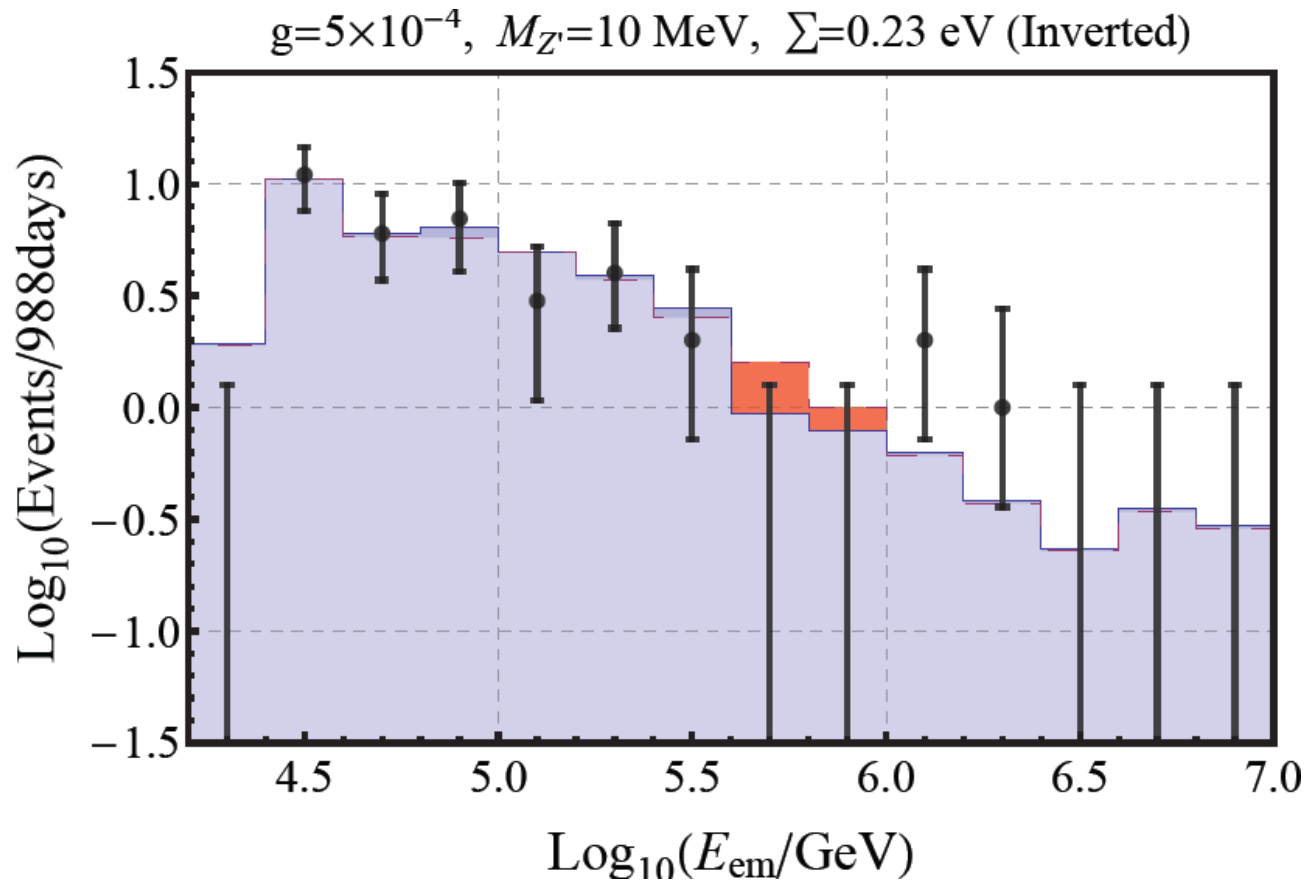
● Inverted の場合

● $T < m_\nu$ の場合は Normal とほぼ同じだが . . .

● $m_\nu < T$ の場合は、ガラッと変わる

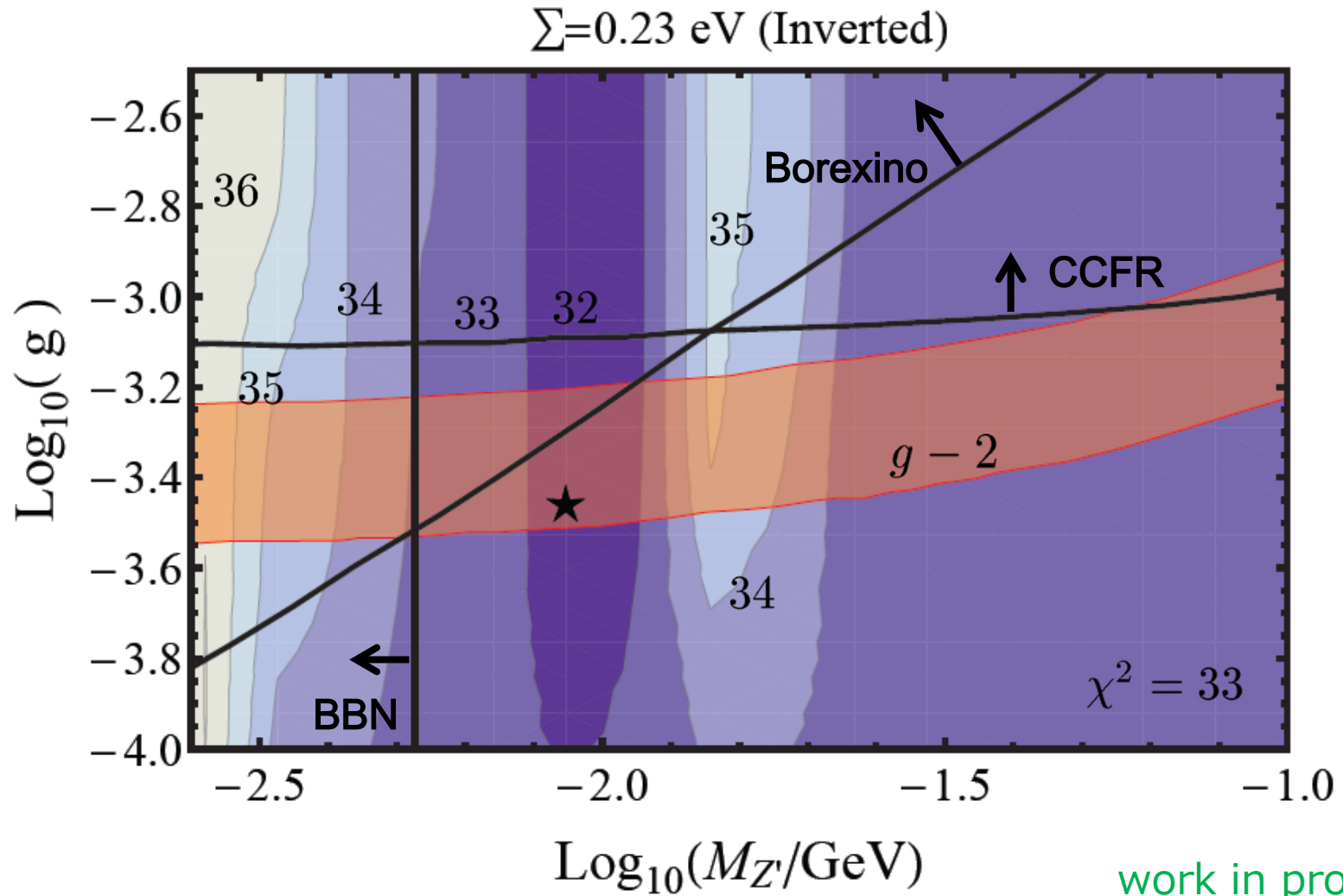


イベントのエネルギー分布



work in progress

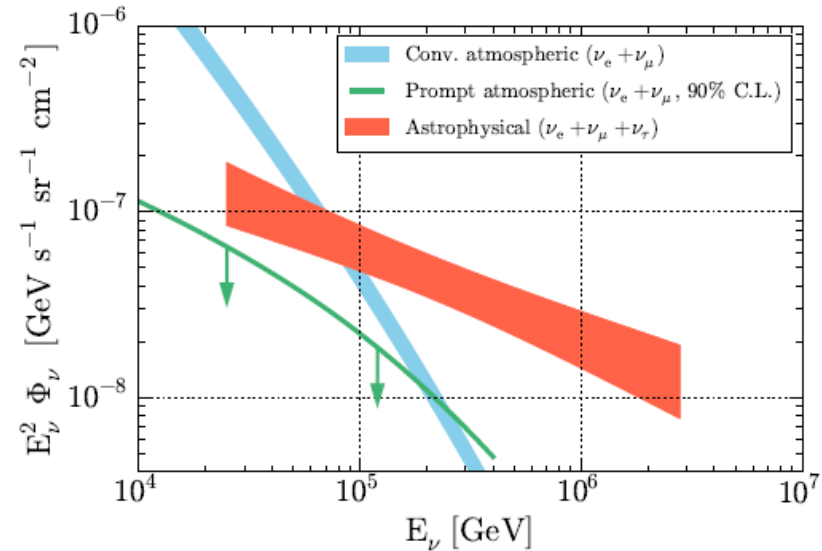
g-Mz' のマップ



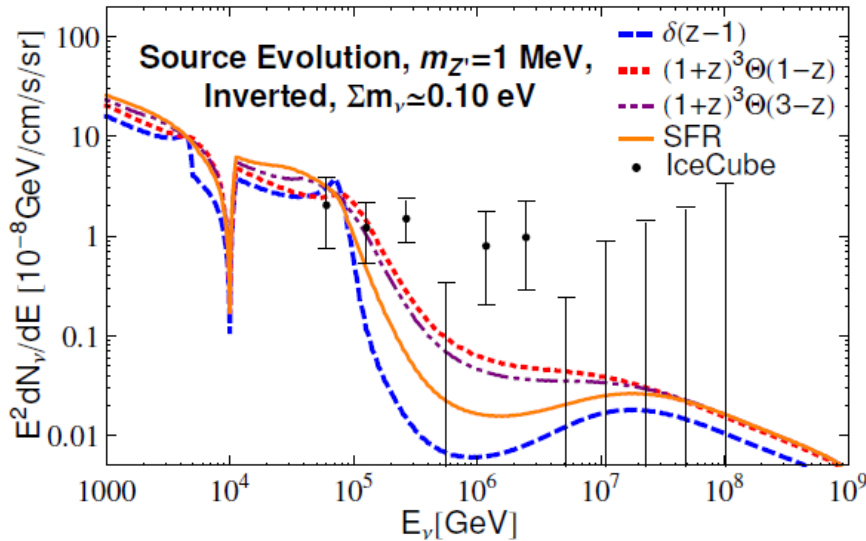
work in progress

まとめ

- 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 (Long-lived particles, g-2, Leptoquarks, etc.)



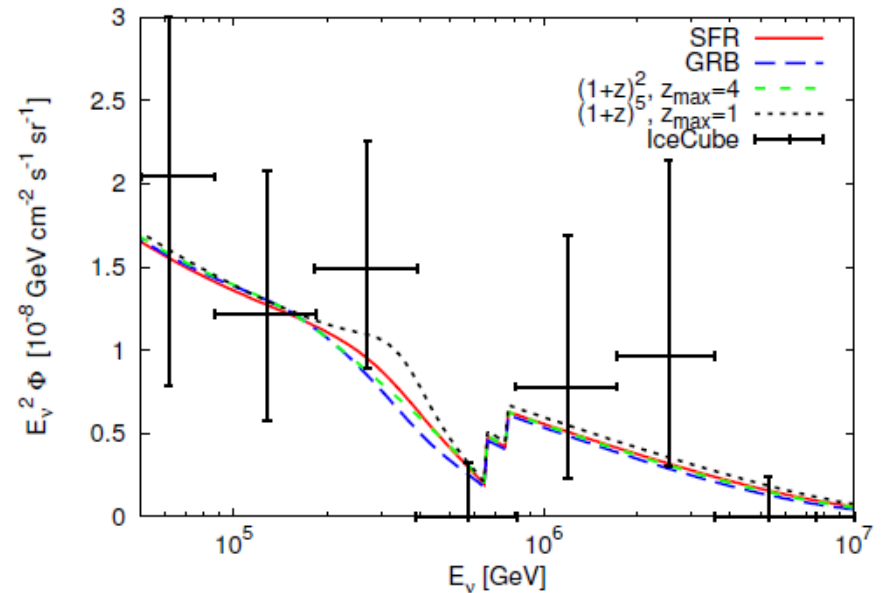
Source distributions



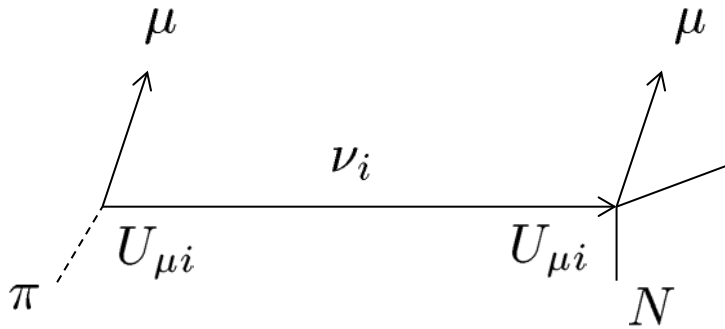
DiFranzo, Hooper, arXiv:1507.0301

Araki, Kaneko, Konishi, Ota, Sato, Shimomura,
arXiv: 1508.0747

Normal ordering, $M_{Z'} = 11$ MeV



Flavor transitions

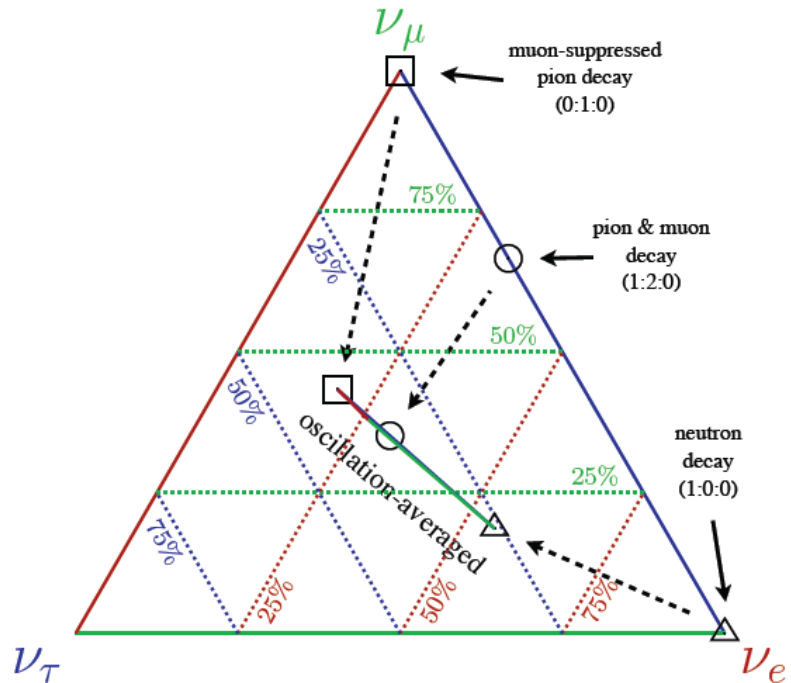


コヒーレンスが
保たれない場合

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \sum_{i=1}^3 |U_{\mu i}|^2 |U_{\mu i}|^2$$

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

$$P_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2$$



arXiv:1412.5106