

高エネルギーニュートリノでさぐる 新物理



渡辺篤史（九州大学）

2010年2月9日@宇宙線研究所

Outline

- 宇宙線と高エネルギー天体ニュートリノ
- 高エネルギー宇宙ニュートリノと素粒子物理

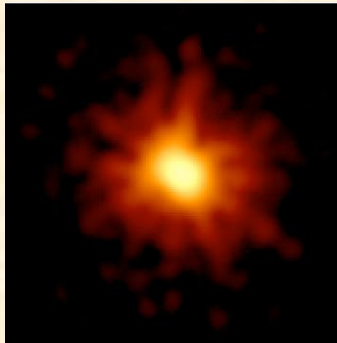
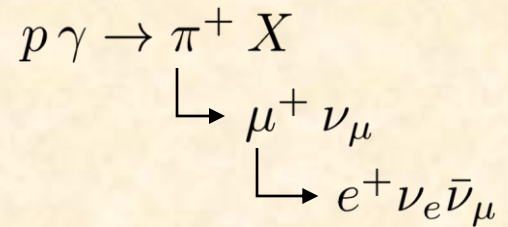
ニュートリノ崩壊
pseudo ディラック
CPT/Lorentz 対称性の破れ
他

High-energy neutrino



M87, Hubble Space Telescope

Active Galactic Nuclei (AGN)



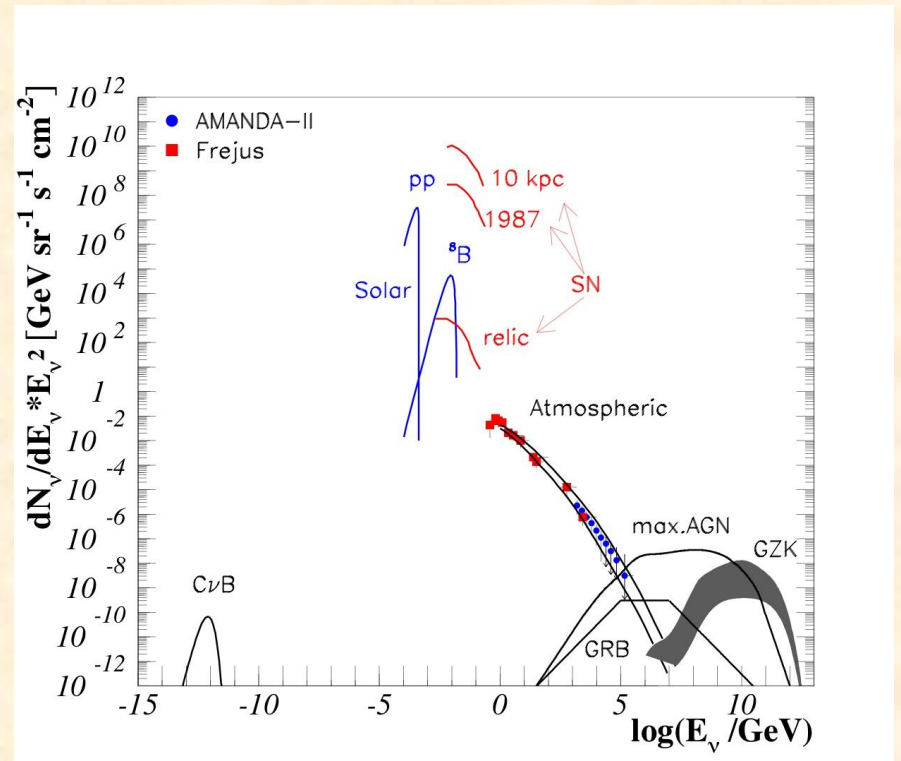
GRB 080319B, SWIFT (X-ray)

Gamma Ray Burst (GRB)

High-energy neutrino

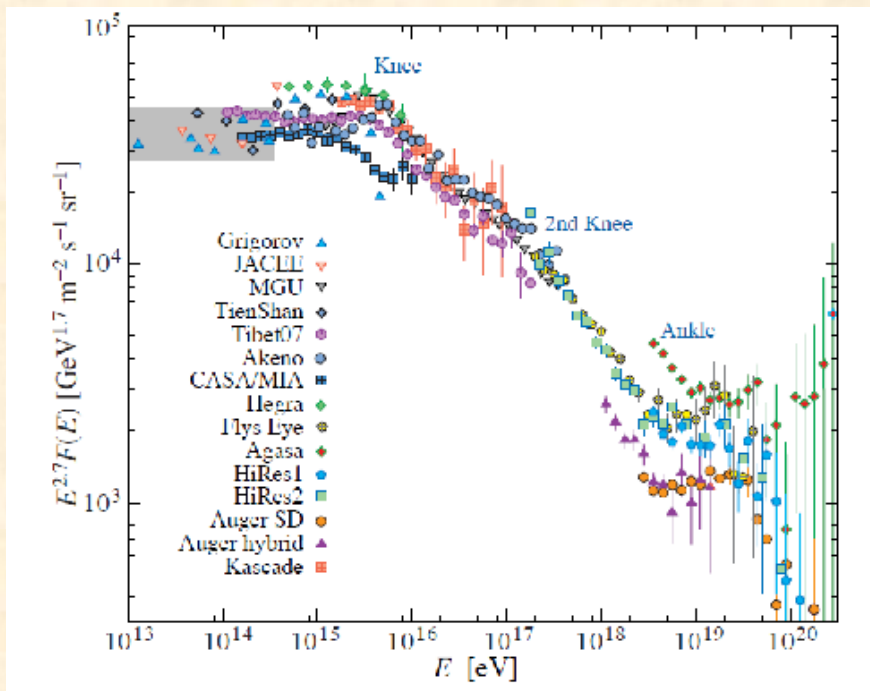
100 TeV までの大気ニュートリノが観測されている

GZK(Greisen-Zatsepin-Kuzmin)
宇宙線とCMBの相互作用によって
生じるニュートリノ



[Halzen, 2007]

Cosmic rays and neutrinos



Knee までは -2.7 のベキ

100 PeV 以上のものは、
銀河外がソース

[PDG]

Cosmic rays and neutrinos

“Ankle” より高エネルギーのフラックスはしばしば、

“ One 10^{19} eV parcile per km^2 per year per steradian ” といわれる

$$\begin{aligned} E^2 \frac{dN}{dE} &= \frac{10^{19} \text{ eV}}{(10^{10} \text{ cm}^2)(3 \times 10^7 \text{ s}) \text{ sr}} \\ &= 3 \times 10^{-8} \text{ GeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \end{aligned}$$

エネルギー密度

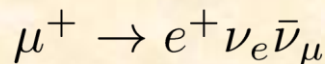
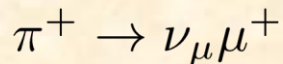
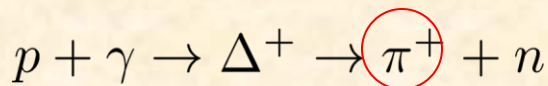
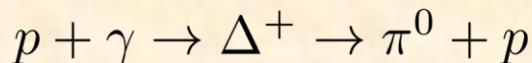
$$\rho = \frac{4\pi}{c} \int dE \frac{3 \times 10^{-8}}{E} \simeq 10^{-19} \text{ TeV} \cdot \text{cm}^{-3}$$

→ **AGN, GRB のルミノシティと分布がよく一致する**

$$\text{AGN} \quad L \sim 2 \times 10^{44} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$$

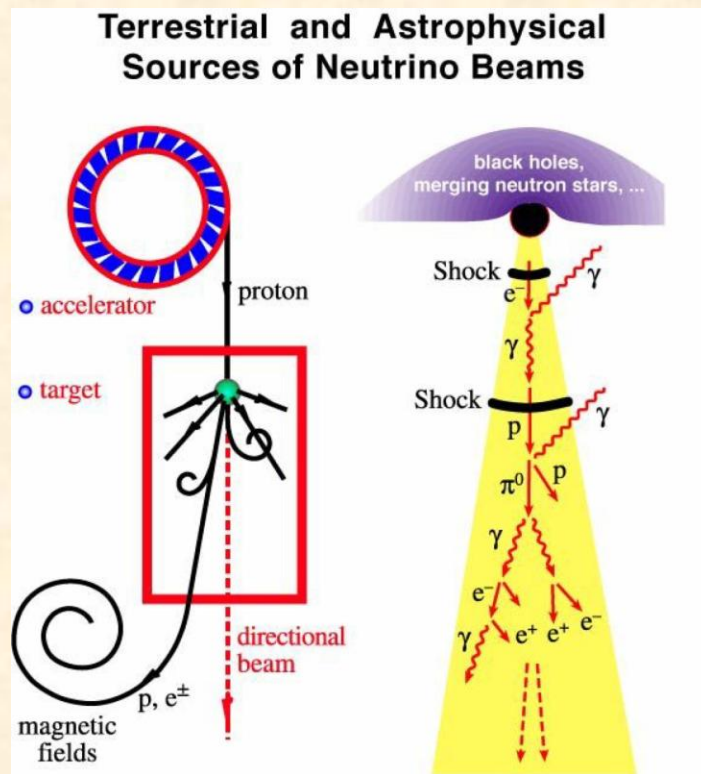
$$\text{GRB} \quad L \sim 2 \times 10^{51} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cosmic rays and neutrinos



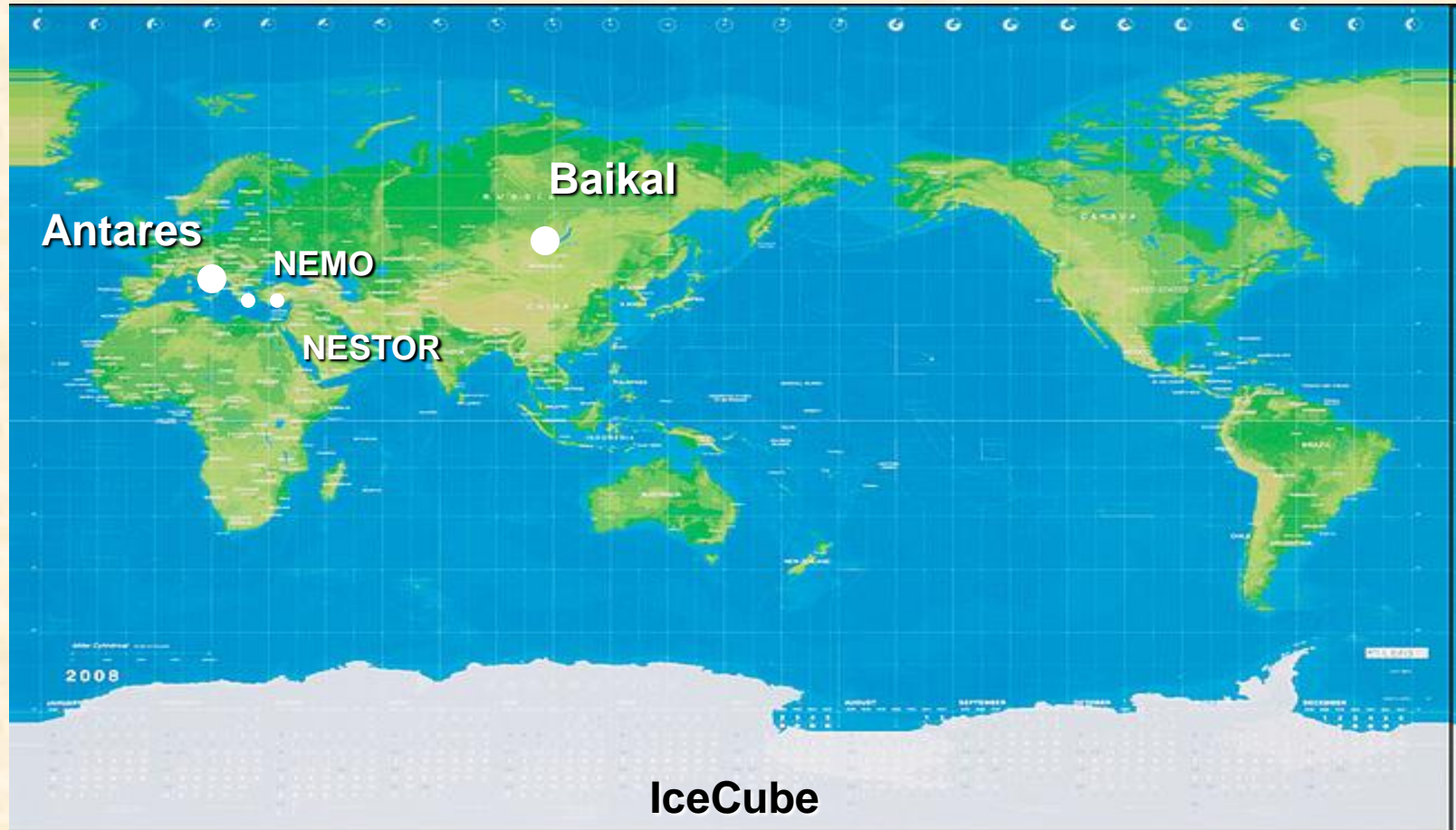
セカンダリープロトンは、磁場
によってソース付近に閉じ込め

一方、中性子は飛び出て、その後
崩壊して宇宙線となる



$$\Phi_e : \Phi_\mu : \Phi_\tau = 1 : 2 : 0$$

Neutrino telescopes



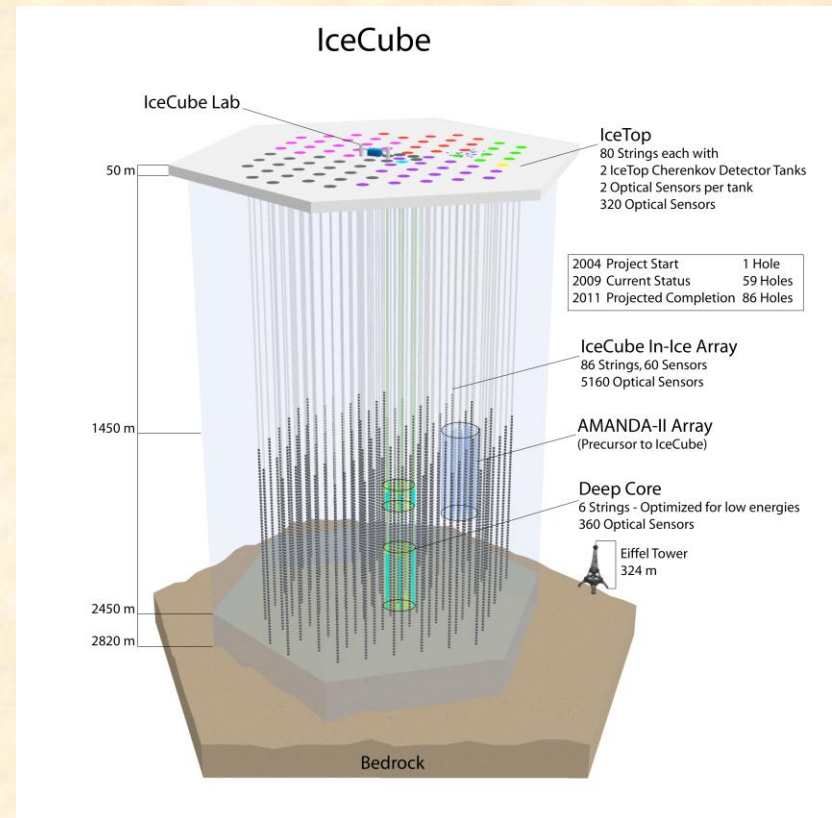
IceCube observatory

80 strings (4800 PMTs)

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

WIMP by Deep Core

2011年完成予定



高エネルギー宇宙ニュートリノ と素粒子物理

長距離を走ってくる

→ 高エネルギーだが、標準的な振動は
averaged out

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

$$L^{\text{osc}} \simeq 10^{n+8} \text{ (cm) with } E = 10^n \text{ (GeV)}$$

質量二乗差の sensitivity

$$\Delta m^2 \sim \frac{E}{L} = \frac{1 \text{ (TeV)}}{1 \text{ (Mpc)}} \sim 10^{-22} \text{ (eV}^2\text{)}$$

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

Neutrino propagation (oscillation)

標準理論の範囲では

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

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

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

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

標準的なシナリオでは、フレーバー比はおよそ1:1:1

Neutrino decay

崩壊モード

radiative $\nu_i \rightarrow \nu_j + \gamma$

$$\tau_{\nu_e} > 5 \times 10^{18} \text{ (s)}$$
$$\tau_{\nu_\mu} > 5 \times 10^{16} \text{ (s)}$$
$$\tau_{\nu_\tau} > 2 \times 10^{11} \text{ (s)}$$

[Pakvasa,2004]

磁気モーメントの実験 $\nu_e e \rightarrow \nu e$

3-body $\nu_i \rightarrow \nu_j \nu_j \bar{\nu}_j$ $\tau \sim 10^{34} \text{ (s)}$

2-body $\nu_i \rightarrow \nu_j (\bar{\nu}_j) + x$

マヨロン

$$\tau_1 > 10^5 \text{ (s} \cdot \text{eV}^{-1}\text{)}$$
$$\tau_2 > 10^{-4} \text{ (s} \cdot \text{eV}^{-1}\text{)}$$
$$\tau_3 > 10^{-10} \text{ (s} \cdot \text{eV}^{-1}\text{)}$$

SN1987A
Solar
ATM

unparticle $\nu_i \rightarrow \nu_j + \mathcal{U}$

Neutrino decay

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

$$\phi_\alpha = \sum_{i\beta} \phi_\beta^{\text{source}} |V_{\alpha i}|^2 |V_{\beta i}|^2 e^{-L/\tau_i^{\text{lab}}}$$
$$\rightarrow \sum_{i(\text{stable})\beta} \phi_\beta^{\text{source}} |V_{\alpha i}|^2 |V_{\beta i}|^2 \quad L \gg \tau_i$$

Normal ordering: $\phi_e : \phi_\mu : \phi_\tau = |V_{e1}|^2 : |V_{\mu 1}|^2 : |V_{\tau 1}|^2 \quad \theta_{12} = 30^\circ$

$$\simeq 6 : 1 : 1$$

Inverted ordering: $\phi_e : \phi_\mu : \phi_\tau = |V_{e3}|^2 : |V_{\mu 3}|^2 : |V_{\tau 3}|^2$

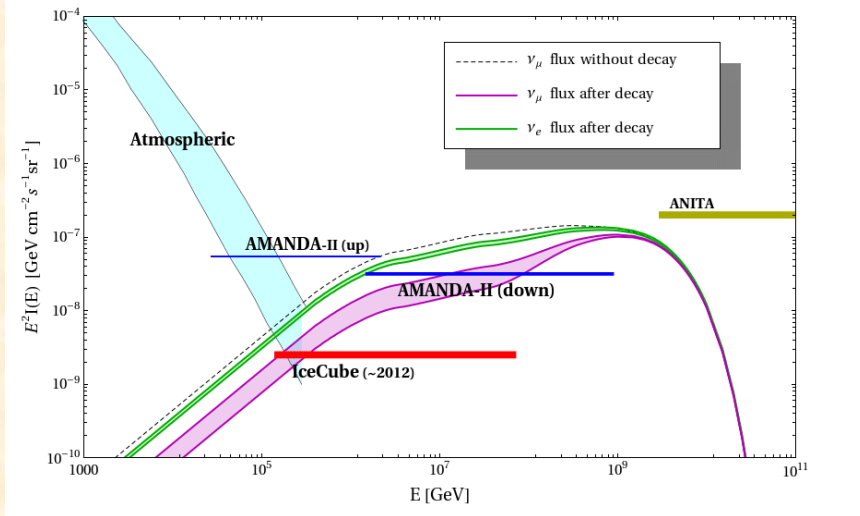
$$\simeq 0 : 1 : 1$$

1:1:1 からおおきくずれる

Neutrino decay

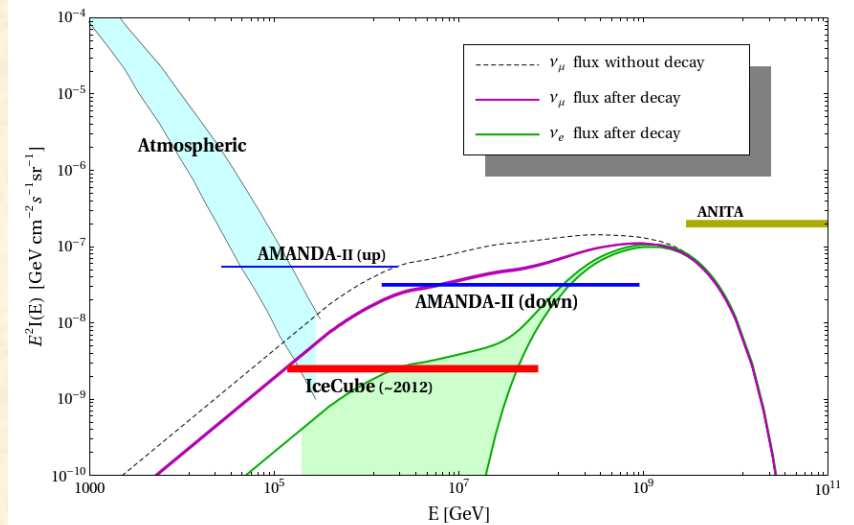
$$\tau_2/m_2 = \tau_3/m_3 = 0.1 \text{ (s/eV)}$$

Effect of θ_{13} variation on Decay: $t_2/m = 0.1, t_3/m = 0.1$ [ev/s], Normal hierarchy.



Normal ordering

Effect of θ_{13} variation on Decay: $t_2/m = 0.1, t_3/m = 0.1$ [ev/s], Inverted hierarchy.



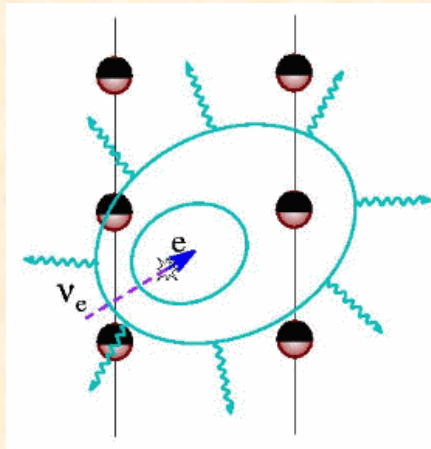
Inverted ordering

- 高エネルギーで no decay、低エネルギーで complete decay
- Inverted の場合に、 θ_{13} 依存性が大きい

Neutrino decay

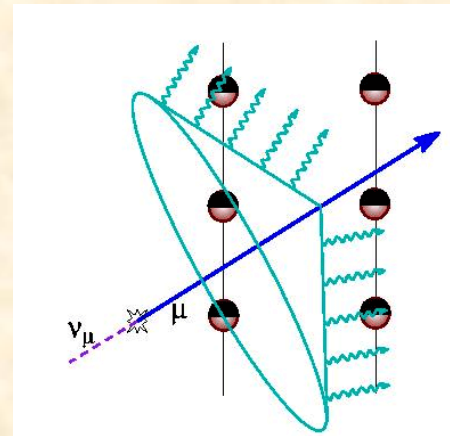
Flavor identification (in IceCube)

Shower events



NC for all flavor + CC for ν_e
+ CC for ν_τ with $E_\tau < 1 \text{ PeV}$

Muon track events



CC for ν_μ

Event rate

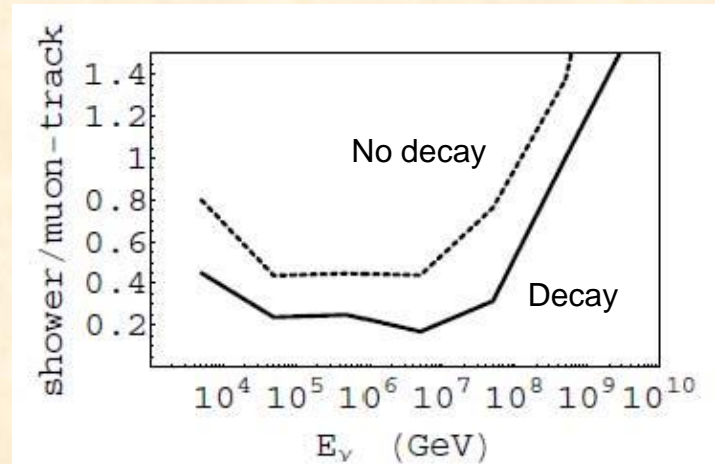
energy bin (GeV)	muon track	shower
10^2 - 10^3	0.09	-
10^3 - 10^4	5	4
10^4 - 10^5	48	21
10^5 - 10^6	163	73
10^6 - 10^7	148	65
10^7 - 10^8	42	32
10^8 - 10^9	8	11
10^9 - 10^{10}	0.7	2
10^{10} - 10^{11}	~ 0	6.9×10^{-3}
10^{11} - 10^{12}	~ 0	~ 0
total	415	206

without decay

energy bin (GeV)	muon track	shower
10^2 - 10^3	0.04	-
10^3 - 10^4	2	0.9
10^4 - 10^5	21	5
10^5 - 10^6	72	18
10^6 - 10^7	65	11
10^7 - 10^8	19	6
10^8 - 10^9	5	5
10^9 - 10^{10}	0.6	1
10^{10} - 10^{11}	~ 0	7.0×10^{-3}
10^{11} - 10^{12}	~ 0	~ 0
total	185	47

with decay (inverted)

Shower/muon-track ratio



No decay: ~ 0.5

Decay: ~ 0.2 at $10^5 \sim 10^7$ GeV

**For 10 year observation
In IceCube**

Pseudo Dirac neutrino

[Wolfenstein, 1981]
 [Petocov, 1982]
 [Giunti, Kim, Lee, 1992]...

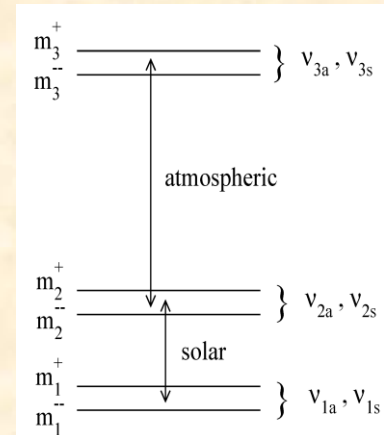
$$\nu_L \quad \nu_R^*$$

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

$$\nu_R^*$$

• Seesaw ($m_D \ll M_R$)
 $\rightarrow m^+ \simeq -m_D^2/M_R$
 $m^- \simeq M_R$

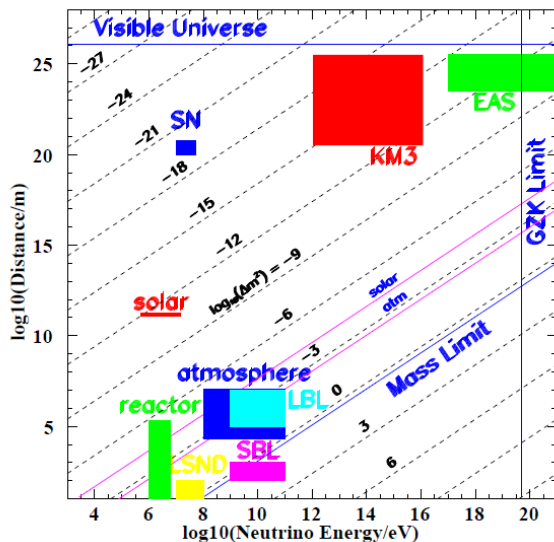
• Pseudo Dirac ($m_D \gg M_R$)
 $\rightarrow m^+ \simeq m_D + M_R/2$
 $m^- \simeq m_D - M_R/2$



フレーバーの固有状態は、

$$\nu_\alpha = V_{\alpha j} \frac{1}{\sqrt{2}} (\nu_j^+ + i\nu_j^-)$$

[Kobayashi, Lim, 2001]



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

Pseudo Dirac neutrino

Fine splitting

$$\delta m_i^2 = (m_i^+)^2 - (m_i^-)^2$$

$$P_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^3 |V_{\alpha i}|^2 |V_{\beta i}|^2 \left[1 - \sin^2 \left(\frac{\delta m_i^2 L}{4E} \right) \right]$$

各フレーバーのフラックスは、
ソースで (1,2,0) のとき

$$\nu_e : \nu_\mu$$

$$\theta_{23} = 45^\circ, \theta_{12} = 30^\circ, \theta_{13} = 0$$

$$P_e = 1 - \left(\frac{3}{4}\chi_1 + \frac{1}{4}\chi_2 \right)$$

$$P_\mu = 1 - \left(\frac{1}{8}\chi_1 + \frac{3}{8}\chi_2 + \frac{1}{2}\chi_3 \right)$$

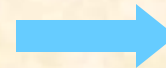
$$\chi_i = \sin^2 \left(\frac{\delta m_i^2 L}{4E} \right)$$

1 : 1	$\xrightarrow{3}$	4/3 : 1	$\xrightarrow{2,3}$	14/9 : 1	$\xrightarrow{1,2,3}$	1 : 1
1 : 1	$\xrightarrow{1}$	2/3 : 1	$\xrightarrow{1,2}$	2/3 : 1	$\xrightarrow{1,2,3}$	1 : 1
1 : 1	$\xrightarrow{2}$	14/13 : 1	$\xrightarrow{2,3}$	14/9 : 1	$\xrightarrow{1,2,3}$	1 : 1
1 : 1	$\xrightarrow{1}$	2/3 : 1	$\xrightarrow{1,3}$	10/11 : 1	$\xrightarrow{1,2,3}$	1 : 1
1 : 1	$\xrightarrow{3}$	4/3 : 1	$\xrightarrow{1,3}$	10/11 : 1	$\xrightarrow{1,2,3}$	1 : 1
1 : 1	$\xrightarrow{2}$	14/13 : 1	$\xrightarrow{1,2}$	2/3 : 1	$\xrightarrow{1,2,3}$	1 : 1

Lorentz/CPT violation

CPT theorem

- 1) Lorentz invariance
- 2) Hermitian Hamiltonian
- 3) Locality



CPT symmetry

[Lüders; Pauli, 1954]

● ローレンツ不変性の破れ

座標系に依らない fundamental な「長さ」

Particular type of string theory

[Kostelecky, Samuel, 1989],

[Madore, Schraml, Schupp, Wess, 2000]

Non-commutative geometry...

● CPT 対称性の破れ

“Quantum decoherence”: pure state \rightarrow mixed state

Loop quantum gravity

[Gambini, Pullin, 2004]

[Alfaro, Morales-Tecotl, Urrutia, 2000]

[Thiemann, 2001]

Lorentz/CPT violation

モデルがたくさんあるので、effective な理論を使ったアプローチが有効

Standard Model Extension [Colladay, Kostelecky, 1998]

SM field + LV tensors with non-zero VEV

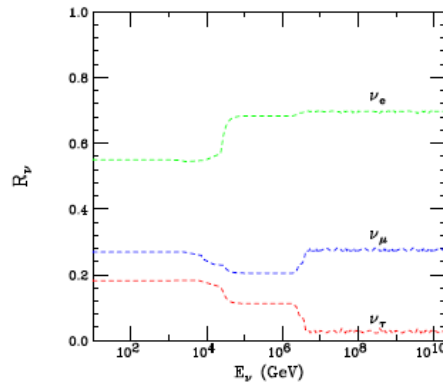
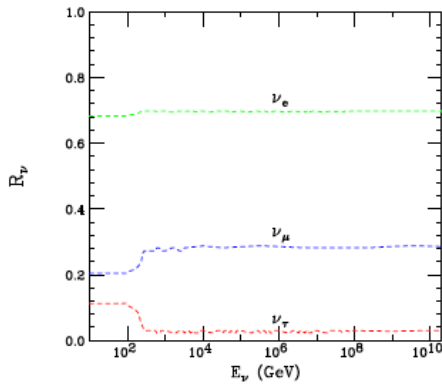
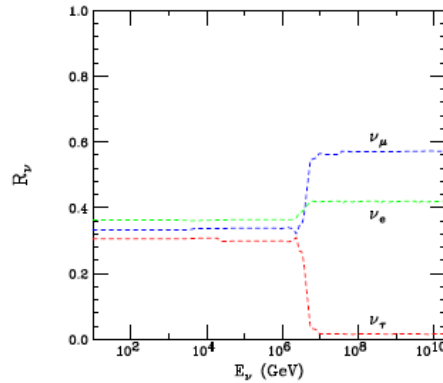
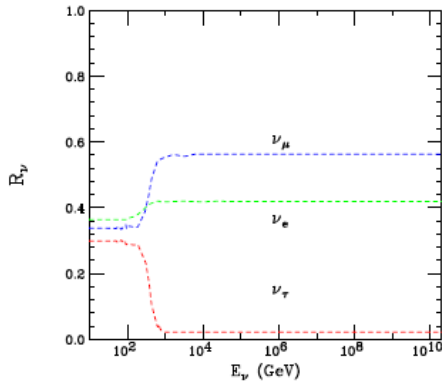
Modified dispersion relation

$$E^2 = p^2 + m^2 + \eta p^2 \left(\frac{E}{M_{\text{pl}}} \right)^\alpha \quad \longrightarrow \quad P_{\alpha\beta} = \sin^2 \theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} + \frac{\Delta \eta E^{\alpha+1} L}{4M_{\text{pl}}^\alpha} \right)$$

Lorentz/CPT violation

$n = 1$

$n = 2$



$$H_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} \frac{m_1^2}{2E} & aE^n \\ aE^n & \frac{m_2^2}{2E} \end{pmatrix}$$

上段: pion decay source
下段: neutron decay source

Normal ordering

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.27, \sin^2 \theta_{23} = 0.50$$

タウニュートリノが
他のフレーバーに比べて
極端に少なくなる

[Hooper, Morgan, Winstanley, 2005]

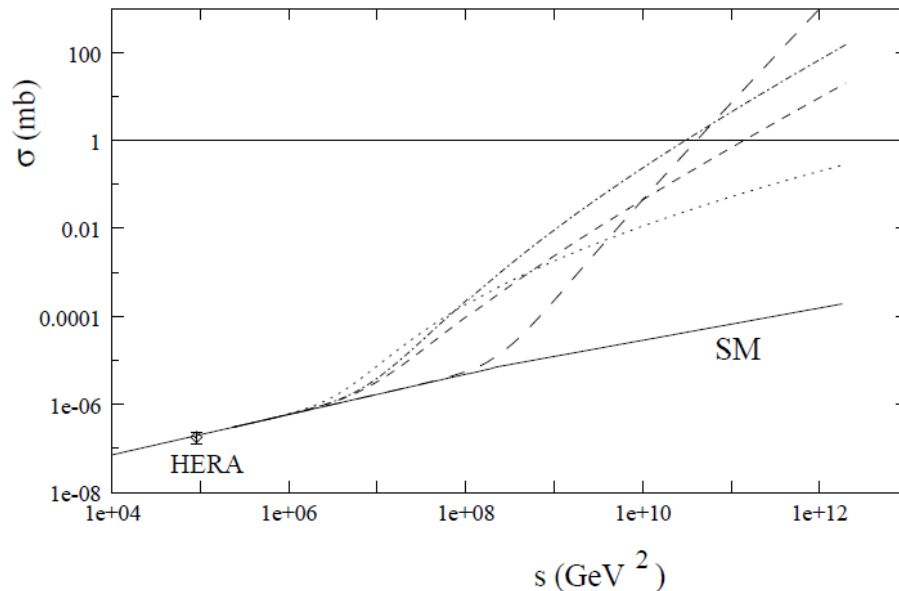
低エネルギーでスタンダードな
フレーバー比が回復

Extra dimensions

[Jain,Douglas,MacKay,Panda,Ralston,2000]

GZK cutoff をこえるイベントは、neutrino induced だと
考えることはできるか？

→ 普通の弱い相互作用だと、断面積が小さくてつじつまがあわない $\sim 10^{-4}$ mb



spin 2 の粒子の交換で、
断面積を大きくできるか？

高エネルギーの領域は、Log 依存性の
仮定と低エネルギーへのマッチングで
決まる外挿をつかう

Neutrino absorption spectroscopy

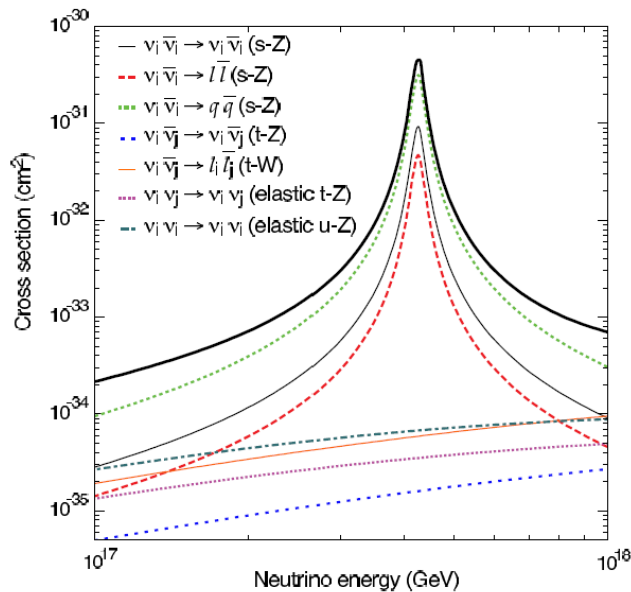
高エネルギーニュートリノと CNB の相互作用

$$\nu\bar{\nu} \rightarrow Z^0$$

Weiler, 1982,
Roulet, 1993,...

$$E = M_z^2 / 2m$$

“Z-burst” が吸収線が見えれば、
CNB の存在を確認できる



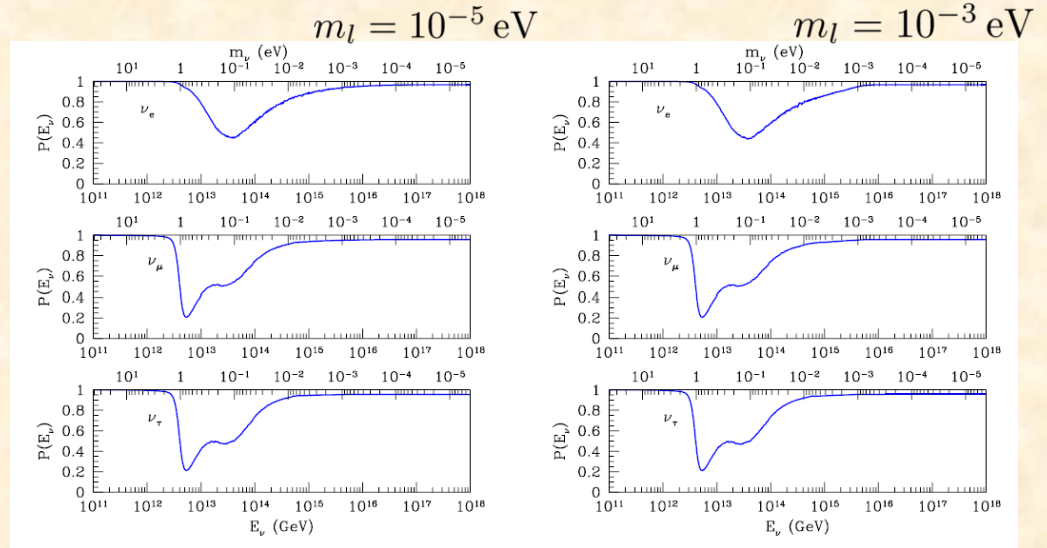
[Barenboim, Requejo, Quigg, 2004]

Neutrino absorption spectroscopy

Survival probabilities

Normal ordering

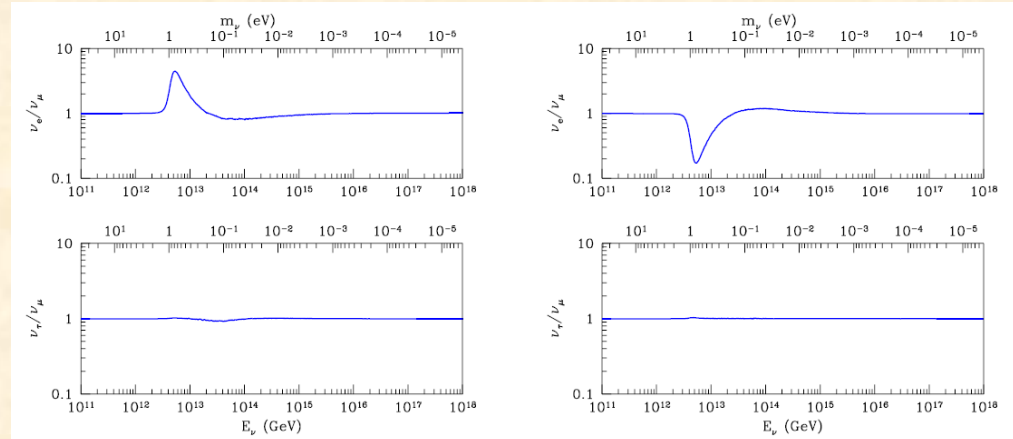
Integrated back to $z = 20$



Flavor ratio

Left: normal ordering

Right: inverted ordering



Dark matter

● 太陽での annihilation

Srednicki, Olive, Silk, 1987,
Ellis, Flores, Ritz, 1987,
Ritz, Seckel, 1988,

...

● Diffuse (galactic halos)

Beacom, Bell, Mack, 2007,
Yuksel, Horiuchi, Beacom, Ando, 2007,

...

● PAMELA の positron との関連

Spolyar, Buckley, Freese, Hooper, Murayama, 2009

まとめ

- 宇宙から来る高エネルギーニュートリノをつかって、
いろいろな物理をさぐることができる

ニュートリノ崩壊
pseudo ディラック
CPT/Lorentz 対称性の破れ

- フレイバー比が重要