

# 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）

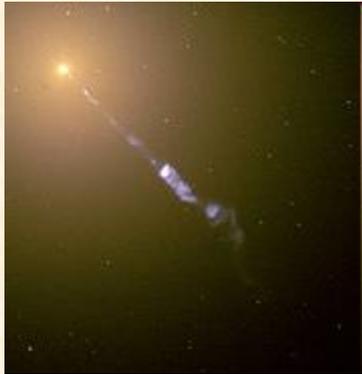
2010年2月9日@宇宙線研究所

# 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

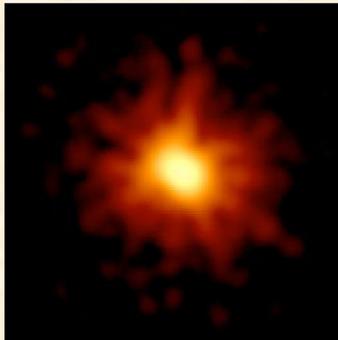
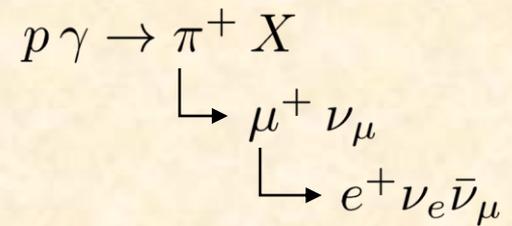
ニュートリノ崩壊  
pseudo ディラック  
CPT/Lorentz 対称性の破れ  
他

# High-energy neutrino



M87, Hubble Space Telescope

**Active Galactic Nuclei (AGN)**



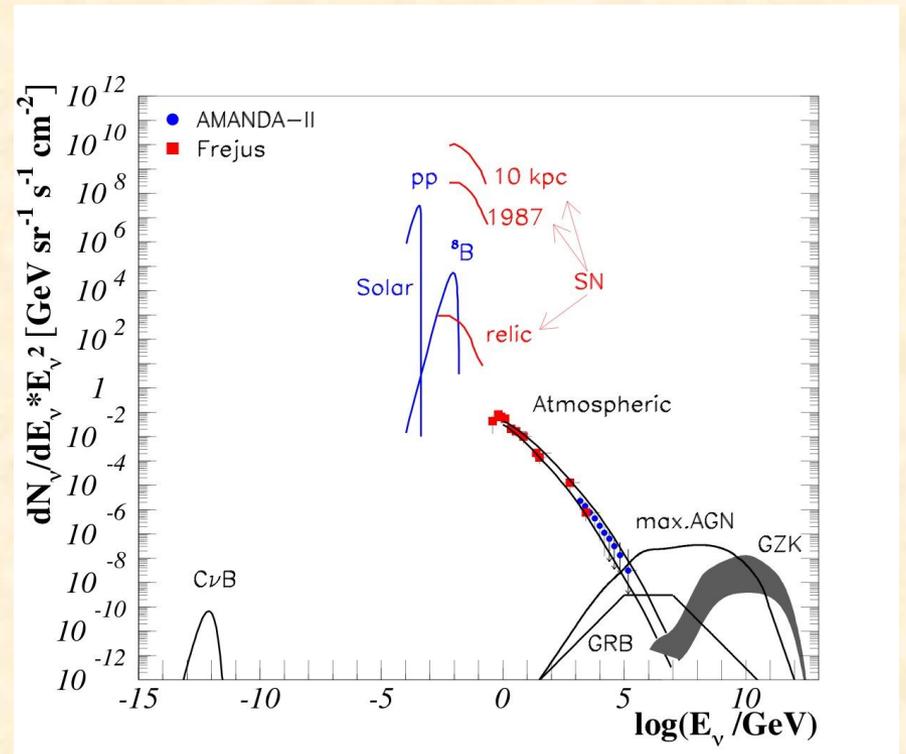
GRB 080319B, SWIFT (X-ray)

**Gamma Ray Burst (GRB)**

# High-energy neutrino

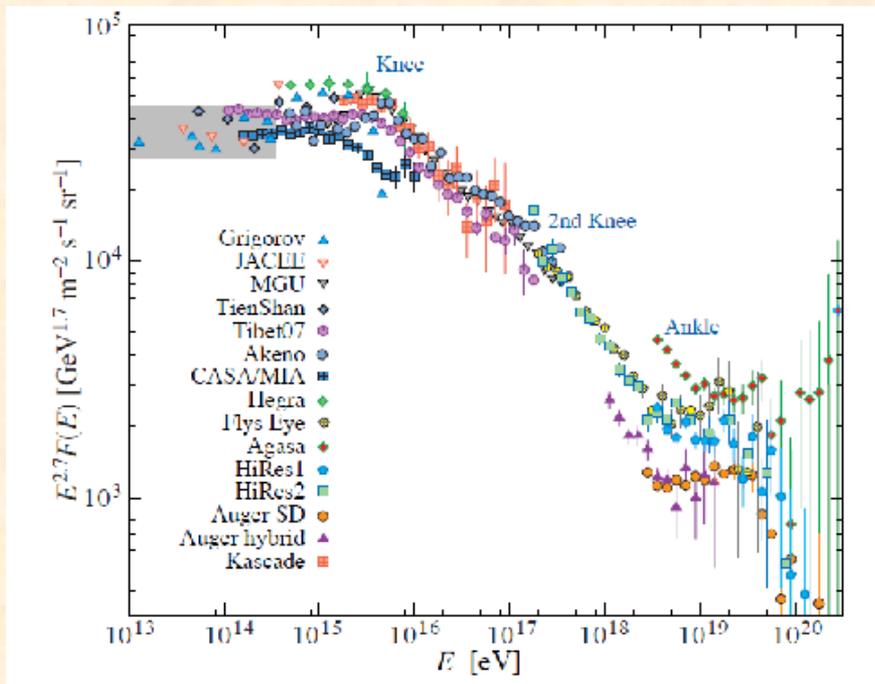
100 TeV までの大気ニュートリノが観測されている

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  $\text{km}^2$  per year per steradian ” といわれる

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

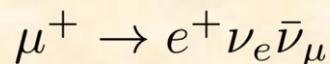
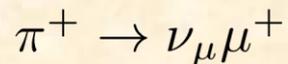
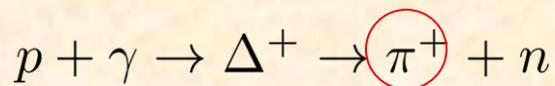
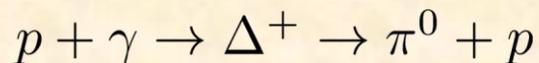
エネルギー密度

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

→ **AGN, GRB のルミノシティと分布がよく一致する**

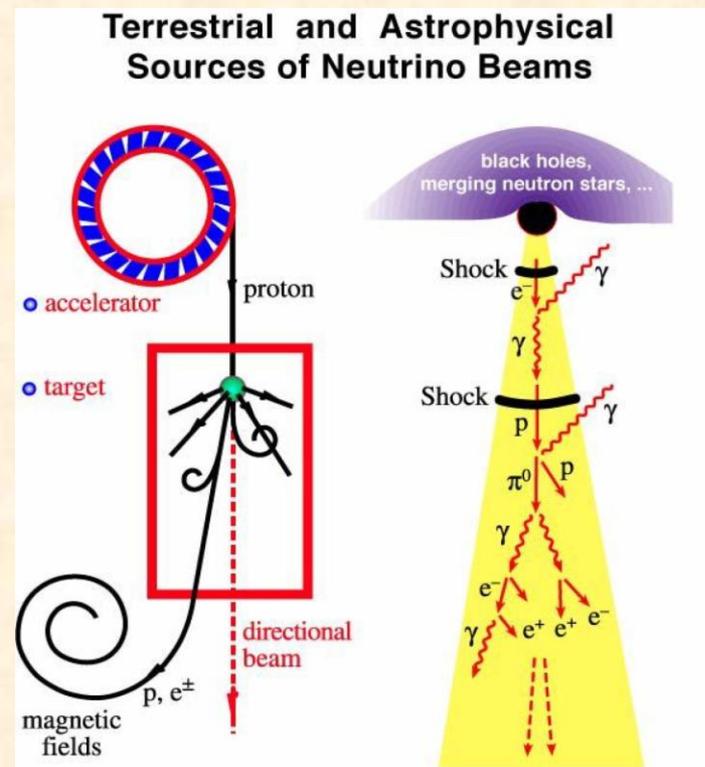
$$\begin{array}{ll} \text{AGN} & L \sim 2 \times 10^{44} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{GRB} & L \sim 2 \times 10^{51} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \end{array}$$

# Cosmic rays and neutrinos



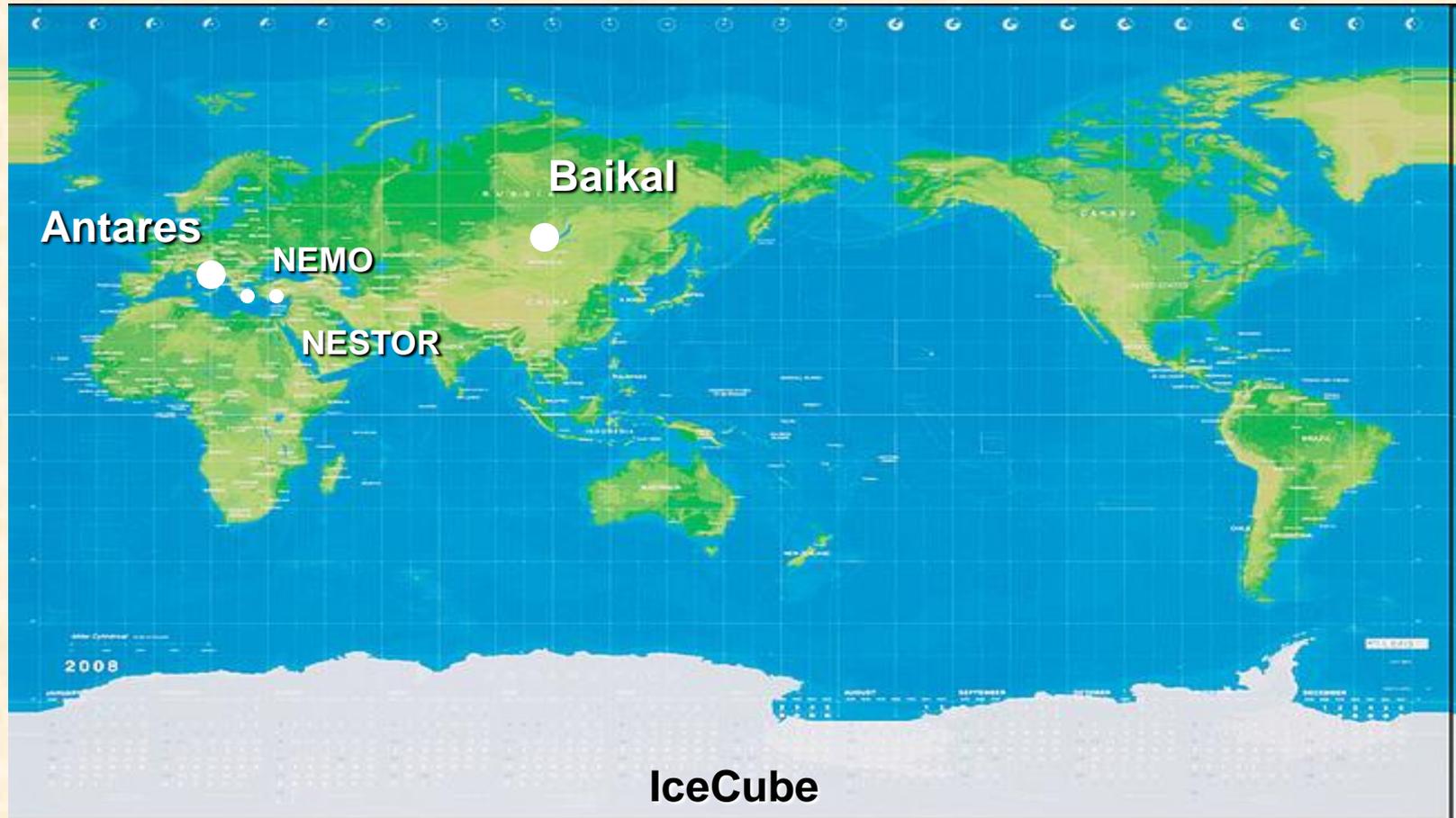
セカンダリープロトンは、磁場  
によってソース付近に閉じ込め

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



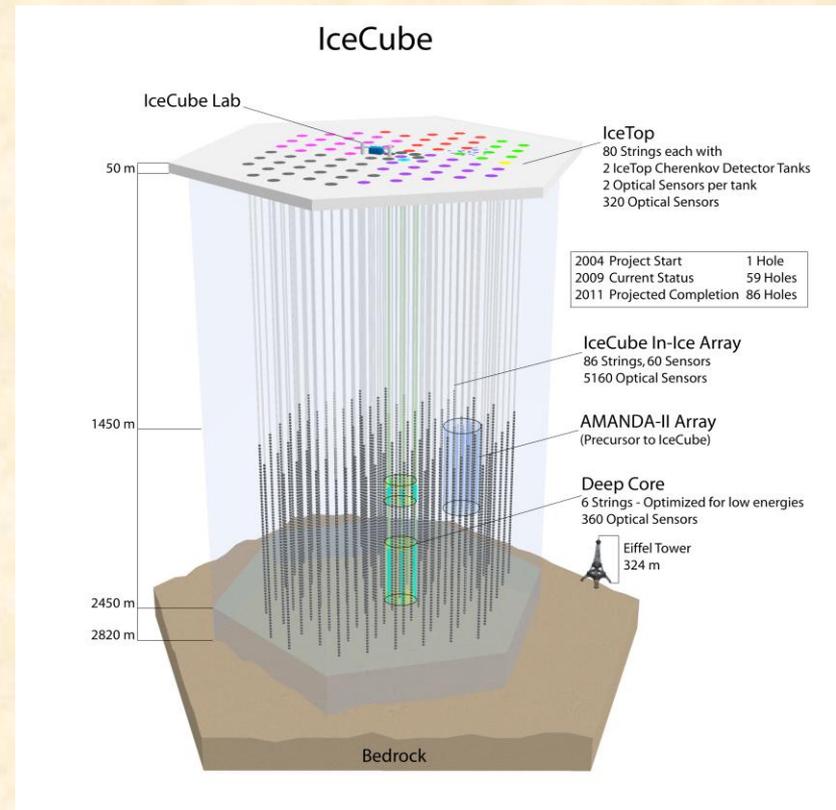
# IceCube observatory

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

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

$E$	$L^{\text{osc}}$
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  $\nu_i \rightarrow \nu_j + \gamma$

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

[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

$$\begin{aligned}\tau_1 &> 10^5 \text{ (s} \cdot \text{eV}^{-1}\text{)} && \text{SN1987A} \\ \tau_2 &> 10^{-4} \text{ (s} \cdot \text{eV}^{-1}\text{)} && \text{Solar} \\ \tau_3 &> 10^{-10} \text{ (s} \cdot \text{eV}^{-1}\text{)} && \text{ATM}\end{aligned}$$

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

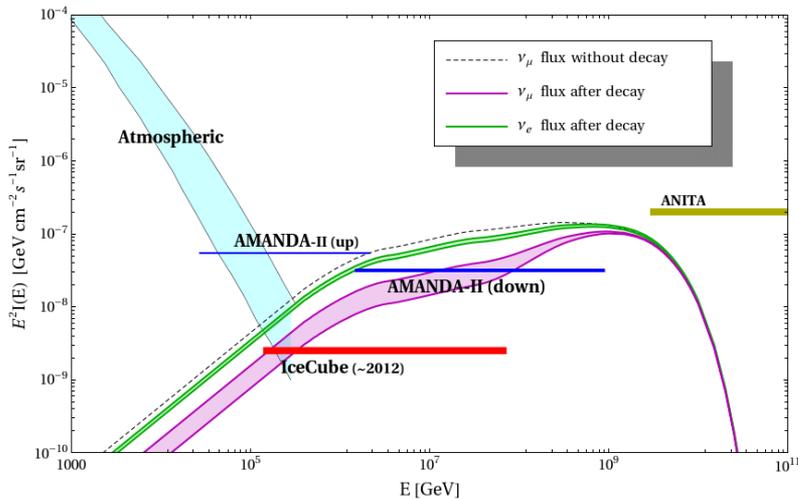
$$\simeq 0 : 1 : 1$$

1:1:1 からおおきくずれる

# Neutrino decay

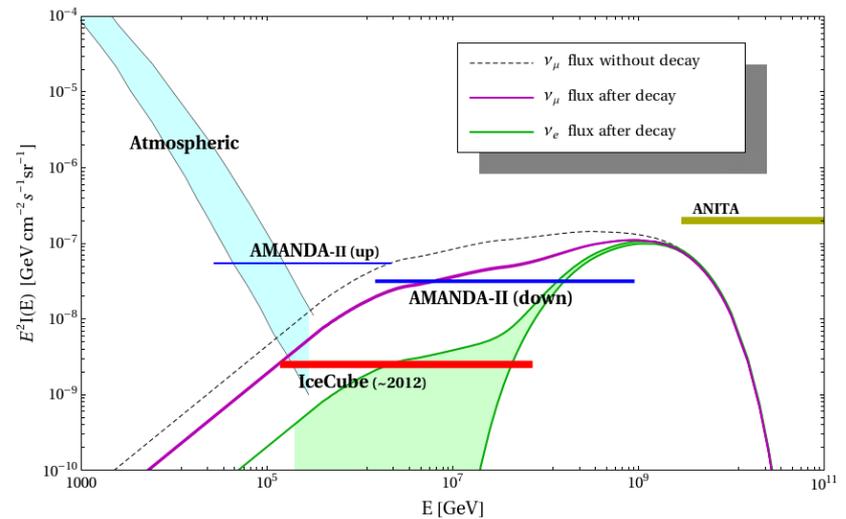
$$\tau_2/m_2 = \tau_3/m_3 = 0.1 \text{ (s/eV)}$$

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



Normal ordering

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



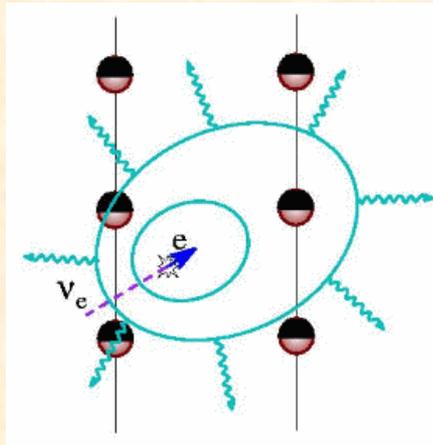
Inverted ordering

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

# Neutrino decay

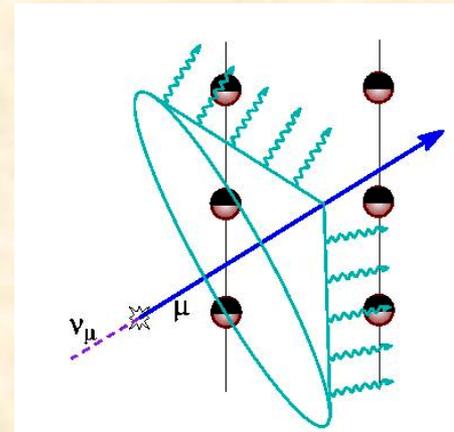
## Flavor identification (in IceCube)

Shower events



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

Muon track events



CC for  $\nu_\mu$

## Event rate

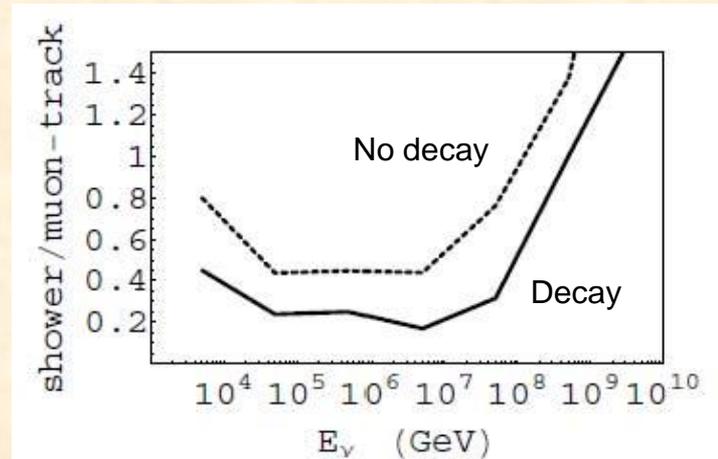
energy bin (GeV)	muon track	shower
$10^2-10^3$	0.09	-
$10^3-10^4$	5	4
$10^4-10^5$	48	21
$10^5-10^6$	163	73
$10^6-10^7$	148	65
$10^7-10^8$	42	32
$10^8-10^9$	8	11
$10^9-10^{10}$	0.7	2
$10^{10}-10^{11}$	$\sim 0$	$6.9 \times 10^{-3}$
$10^{11}-10^{12}$	$\sim 0$	$\sim 0$
total	415	206

**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
$10^{10}-10^{11}$	$\sim 0$	$7.0 \times 10^{-3}$
$10^{11}-10^{12}$	$\sim 0$	$\sim 0$
total	185	47

**with decay (inverted)**

## Shower/muon-track ratio



**No decay:  $\sim 0.5$**

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

**For 10 year observation  
In IceCube**

# Pseudo Dirac neutrino

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

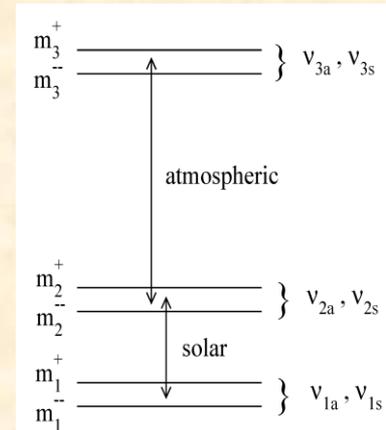
$$\nu_L \quad \nu_R^*$$

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

$$\nu_R^* \begin{pmatrix} m_D & M_R \end{pmatrix}$$

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

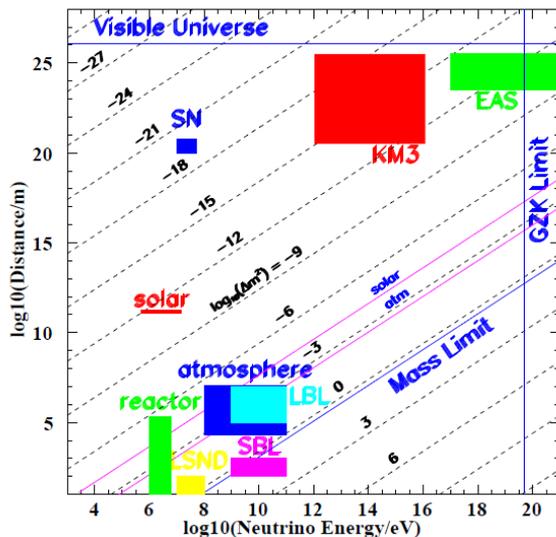
• Pseudo Dirac ( $m_D \gg M_R$ )  
 $\rightarrow m^+ \simeq m_D + M_R/2$   
 $m^- \simeq m_D - M_R/2$



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**

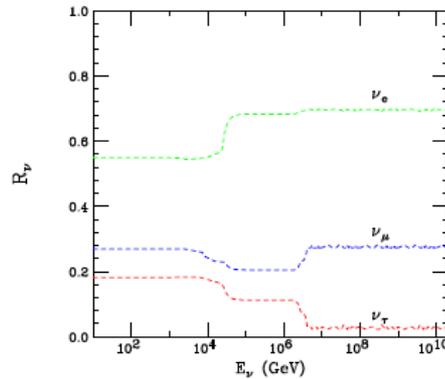
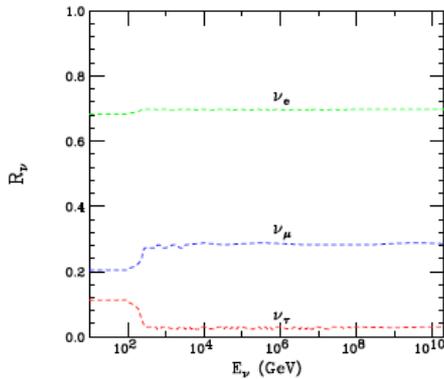
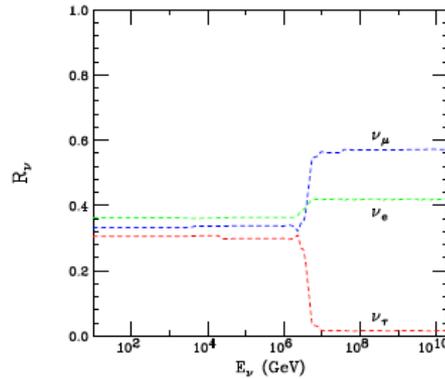
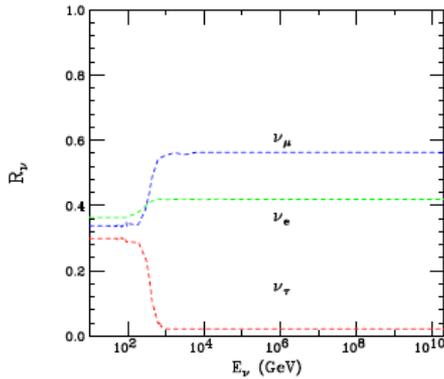
**Modified dispersion relation**

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

# 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]

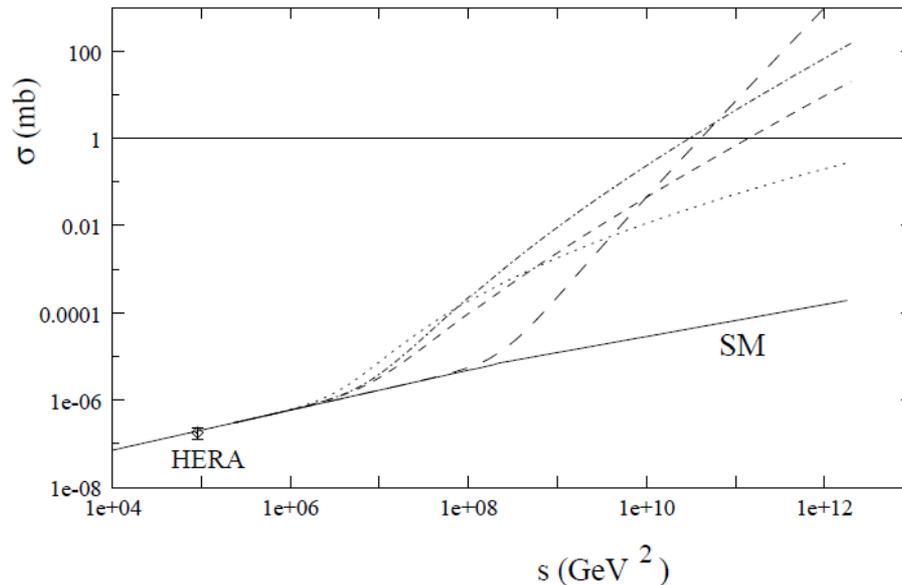
低エネルギーでスタンダードな  
フレーバー比が回復

# 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

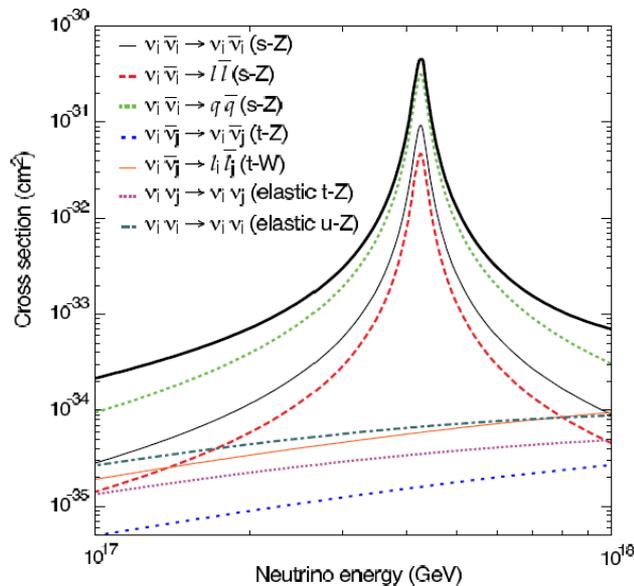
高エネルギーニュートリノと CNB の相互作用

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

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



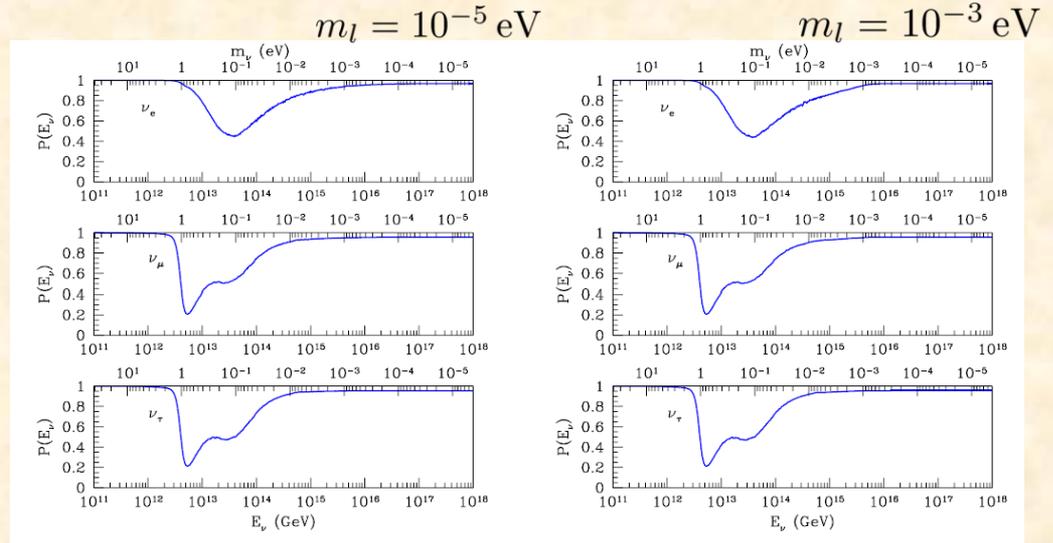
[Barenboim, Requejo, Quigg, 2004]

# Neutrino absorption spectroscopy

## Survival probabilities

Normal ordering

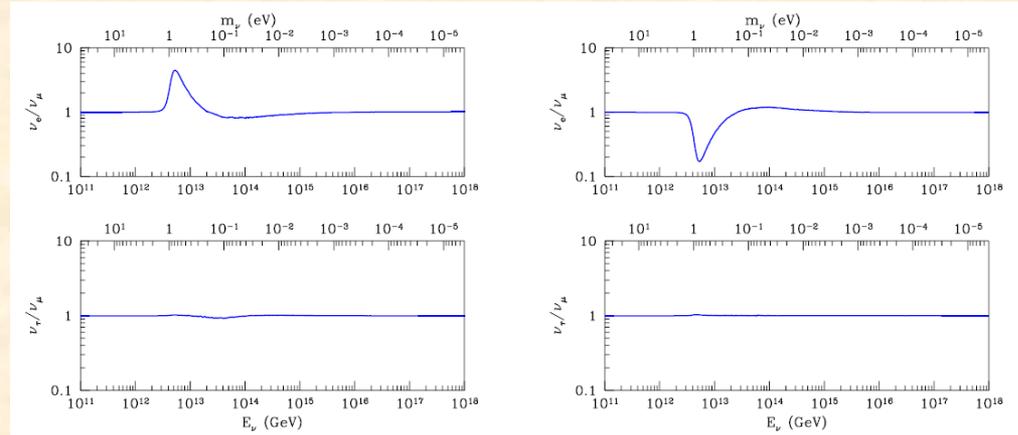
Integrated back to  $z = 20$



## 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