宇宙背景ニュートリノ崩壊探索
イントロダクション
Introduction to Search for Cosmic Background Neutrino Decay

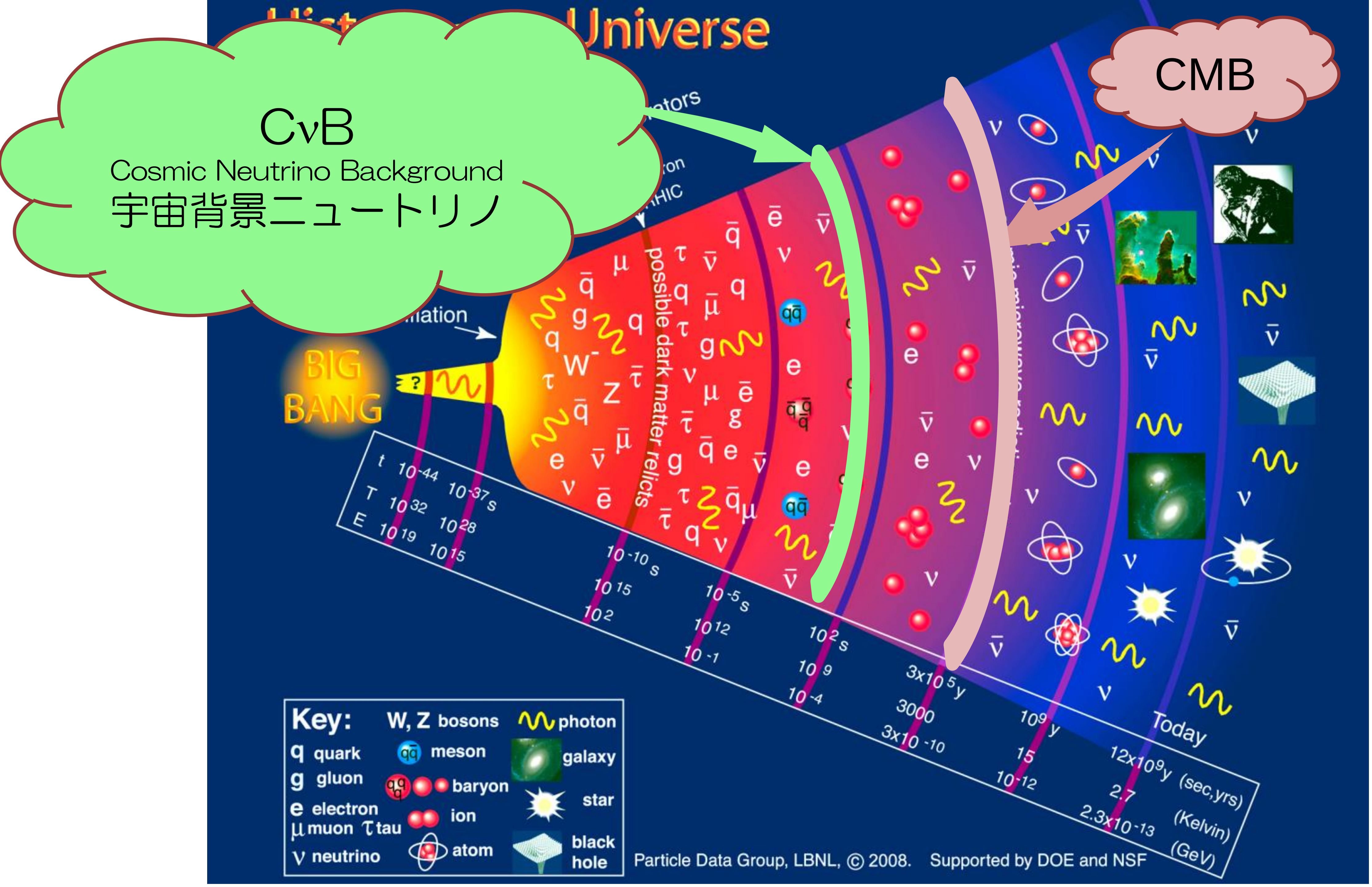
宇宙史研究センターワークショップ
素粒子構造部門セッション
Mar. 23, 2022

武内勇司

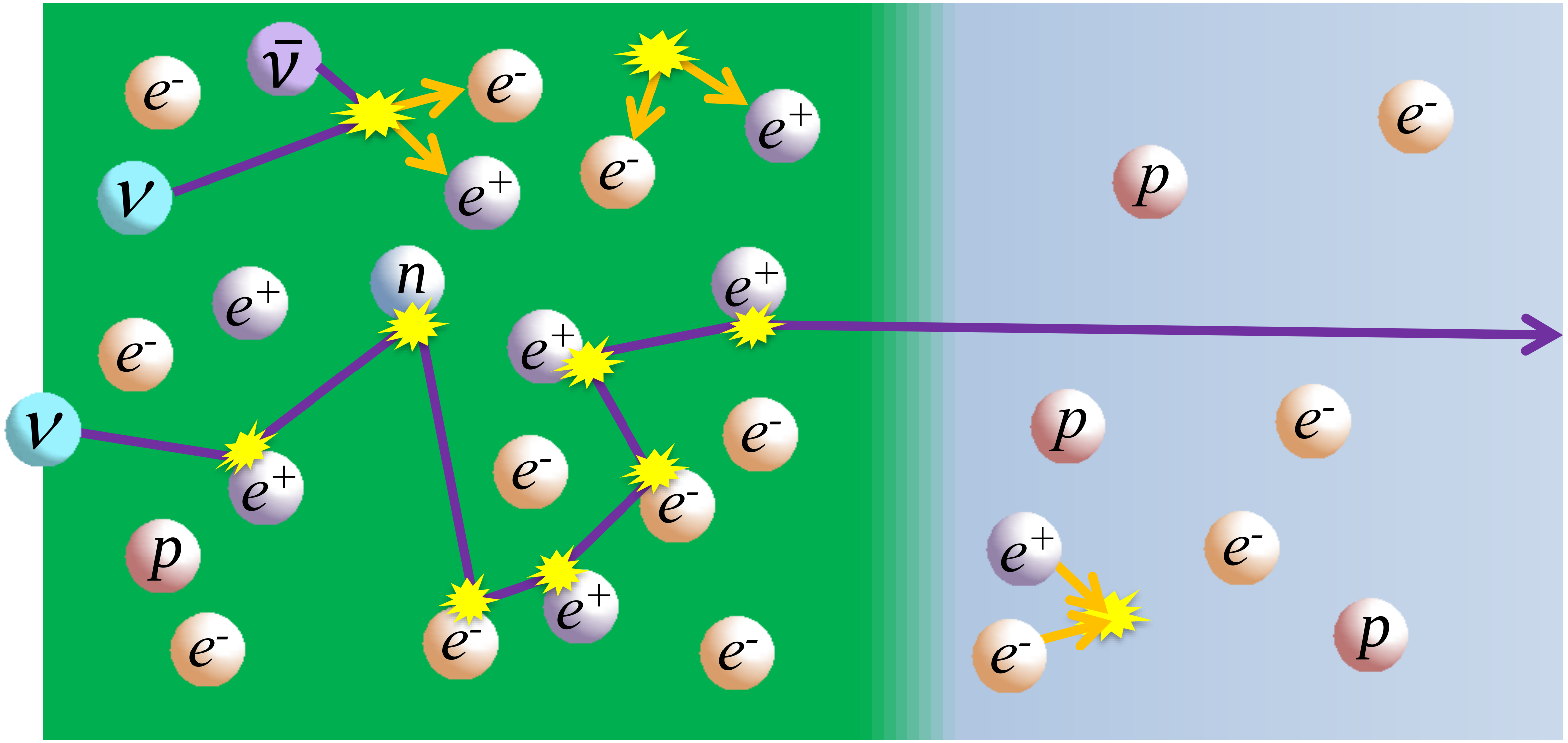
筑波大学
宇宙史研究センター
Tomonaga Center for the History of the Universe

Contents

- 宇宙背景ニュートリノ
- COBANDプロジェクト概要
- 宇宙背景ニュートリノ崩壊現象の物理へのインパクト


CνB
Cosmic Neutrino Background
宇宙背景ニュートリノ
CMB
Universe
BIG BANG
possible dark matter rellicts
Today
(sec,yrs)
(Kelvin)
(GeV)
Key:
W, Z bosons
photon
q quark
meson
galaxy
g gluon
baryon
e electron
star
ion
μ muon τ tau
ν neutrino
atom
black hole
Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

Neutrino decoupling



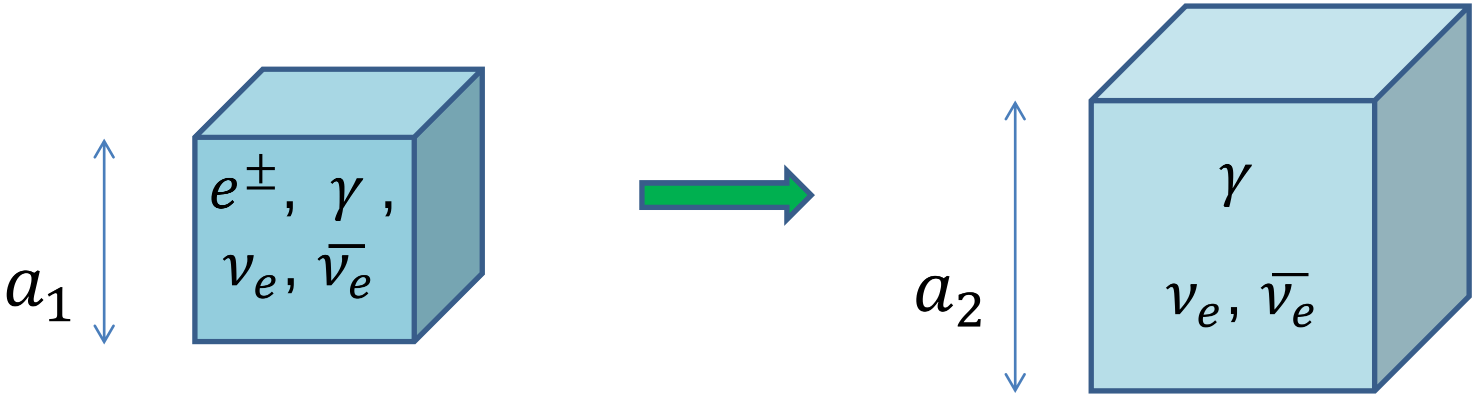
T>1MeV	T<1MeV
$T_\nu = T_e = T_\gamma$	$T_\nu \neq T_\gamma$
$\nu + \bar{\nu} \leftrightarrow e^- + e^+ \leftrightarrow \gamma\gamma$	$e^- + e^+ \rightarrow \gamma\gamma$
$\nu + e \leftrightarrow \nu + e$	

Neutrino decoupling 前後の宇宙の温度

After T<1MeV (t～1sec after big bang)
νは，熱的に切り離され，$e^{\pm}$ は，対消滅が進む.

$$e^{+} + e^{-} \longrightarrow 2\gamma$$

T>1MeV　　　　　　　　T<1MeV



$T_\nu \propto 1/a$

$T_\gamma = T_e = T_\nu$　　　　　　$T_\gamma > T_\nu$

エントロピーの保存 ⟹ $e^{\pm}$の持っていたエントロピーがphotonを加熱

CMBとCνBの温度

エントロピー密度　$s/V \propto g_{\text{eff}} T^3$

$e^+e^- \leftrightarrow \gamma\gamma$ の場合

光子(ボゾン)+電子・陽電子（フェルミオン）の自由度

$$g_{\text{eff}} = 2 + (2+2) \times \frac{7}{8}$$

γ だけの場合　$g_{\text{eff}} = 2$

エントロピー保存　$2T_\gamma^3 = \left(2 + (2+2) \times \frac{7}{8}\right) \mathrm{T}_\nu^3$

$$\mathrm{T}_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{1}{3}} \mathrm{T}_\gamma = 1.95\mathrm{K}$$

$k\mathrm{T}_\nu = 0.168\mathrm{meV}$

CMBとCνBの密度

ニュートリノ密度
(fermion)

$$dn_\nu = \frac{d^3p}{(2\pi)^3}\frac{1}{\exp(p/kT_\nu)+1}$$

光子の場合
(boson)

$$dn_\gamma = \frac{d^3p}{(2\pi)^3}\frac{1}{\exp\left(p/kT_\gamma\right)-1}$$

$$n_\nu/n_\gamma = \left(\frac{kT_\nu}{kT_\gamma}\right)^3 \frac{\int_0^\infty dx\,\frac{x^2}{e^x+1}}{\int_0^\infty dx\,\frac{x^2}{e^x-1}} = \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma}\right)^3 \frac{\frac{3}{4}\Gamma(3)\zeta(3)}{\Gamma(3)\zeta(3)} = \frac{4}{11}\times\frac{3}{4} = \frac{3}{11}$$

$n_\gamma = 411$個$/cm^3$ （２自由度）より

$$n_\nu = n_{\bar{\nu}} = \frac{411}{2}\times\frac{3}{11} = 56\text{個}/cm^3$$

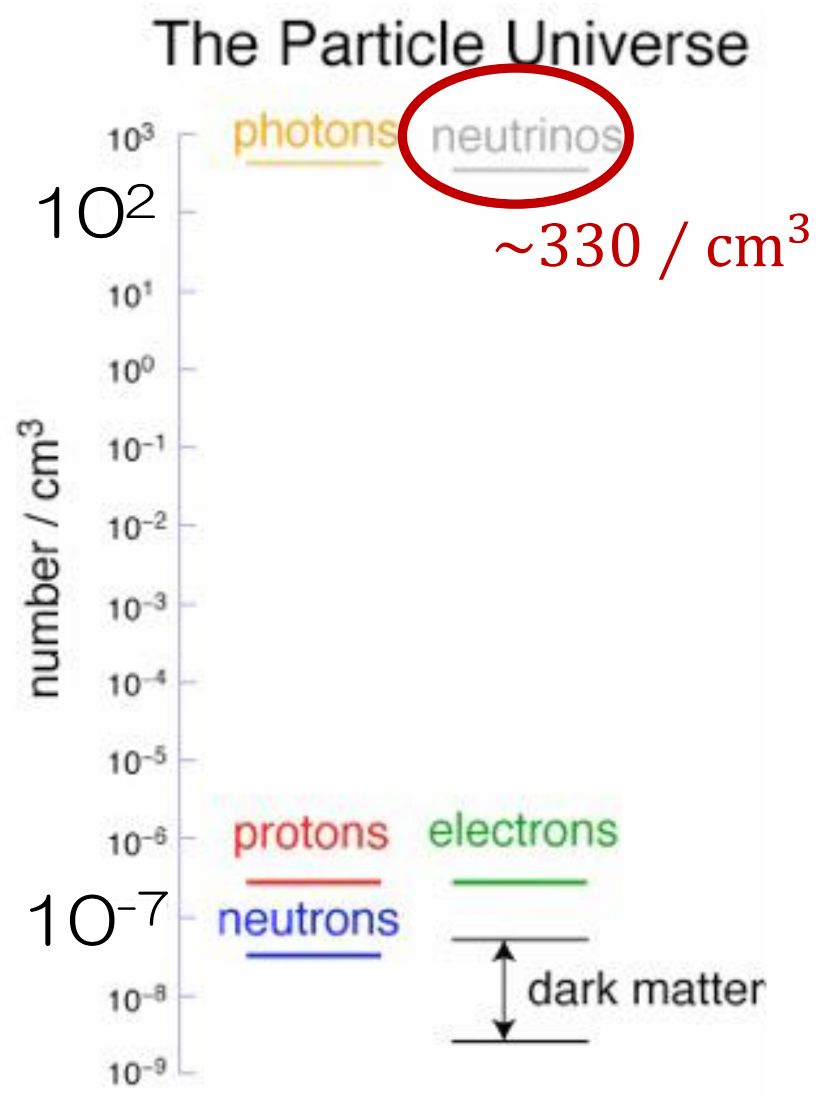
CνBの温度と密度は，CMBの測定と量子論的熱力学だけから分かる!!

宇宙の粒子数密度

物質粒子(フェルミオン)の中で宇宙で最も多いのがニュートリノ

にもかかわらず,

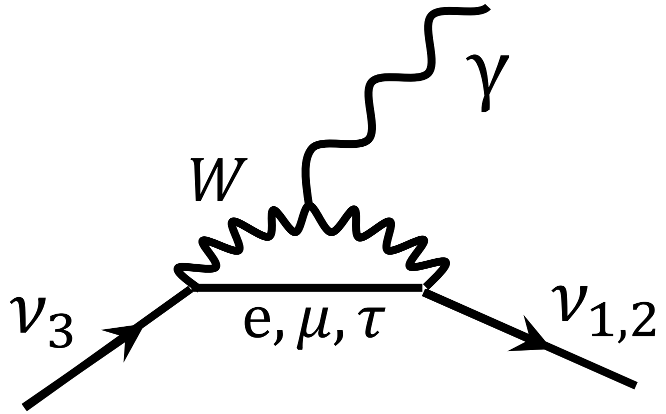
宇宙背景ニュートリノの存在は，実験的には，検証されていない．（間接的証拠のみ）

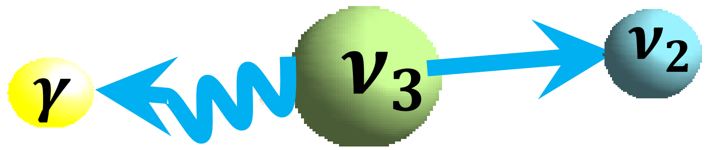


ニュートリノ崩壊

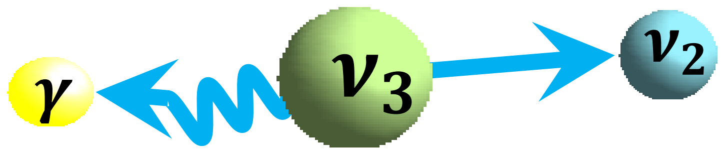
- 重たいニュートリノは，軽いニュートリノへ崩壊可能
  - $\boldsymbol{\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma}$
- ✓ 但し寿命は，宇宙年齢よりもはるかに長い

➔ ニュートリノ源として宇宙背景ニュートリノ(CνB)を用いたニュートリノ崩壊探索実験の可能性





ニュートリノ質量と崩壊光子エネルギーとの関係



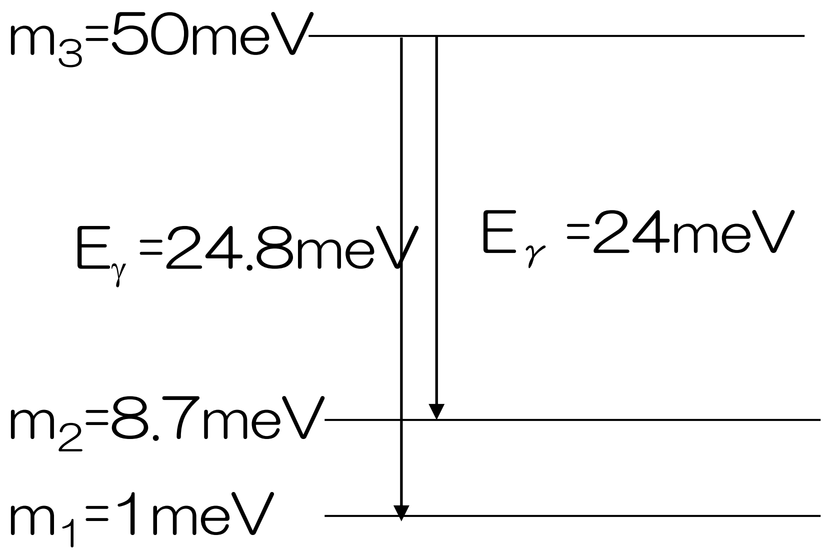
$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3}$$

- 振動実験から
  - $|\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| = 2.4 \times 10^{-3}\ eV^2$
  - $\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.65 \times 10^{-5}\ eV^2$
- CMBの揺らぎ(Planck+WP+highL) とバリオン音響振動(BAO)から
  - $\sum m_i < 0.23$ eV

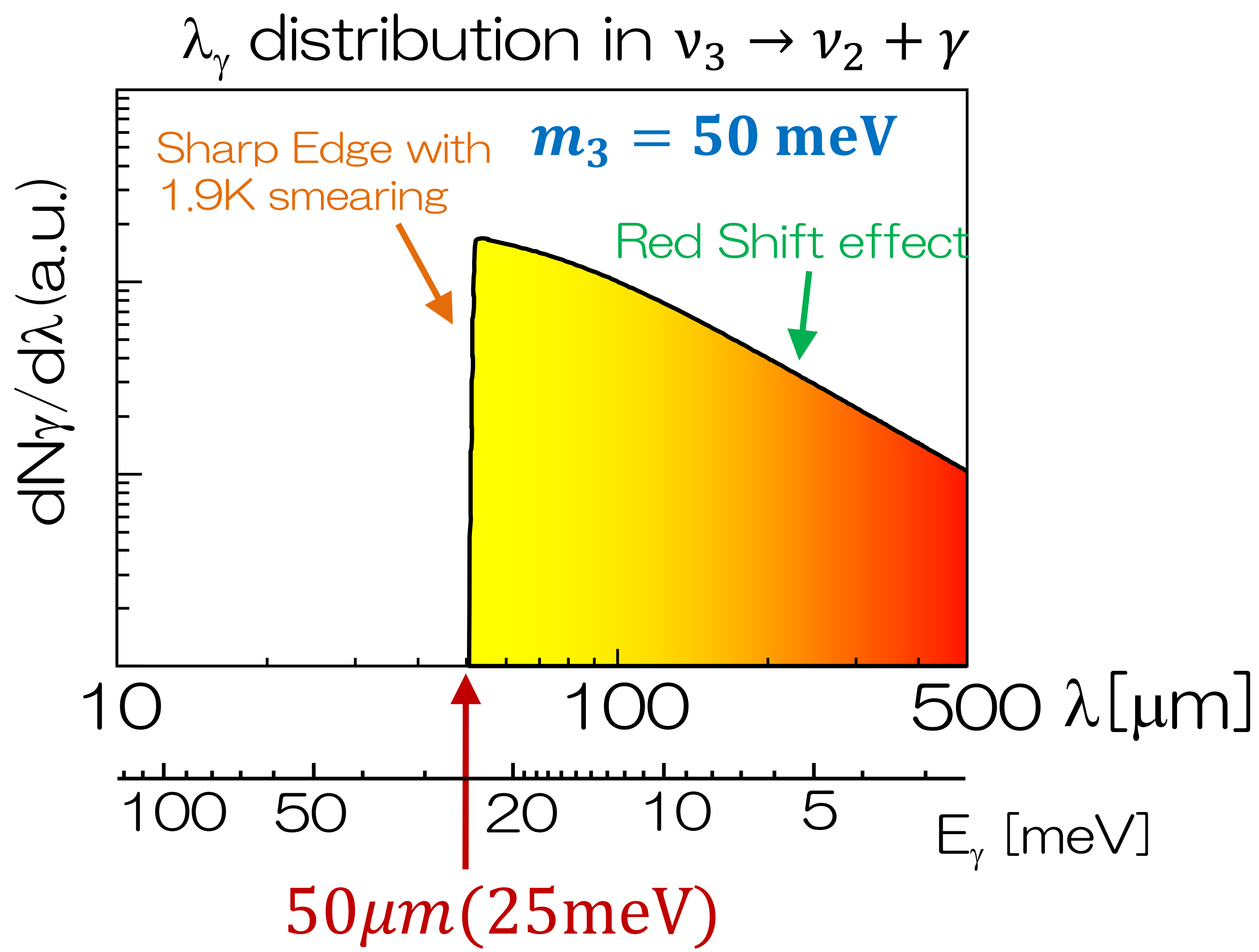
➔50meV<m_3<87meV

E_γ =14～24meV

λ_γ =51～89μm



期待される宇宙背景ニュートリノの崩壊光の波長分布



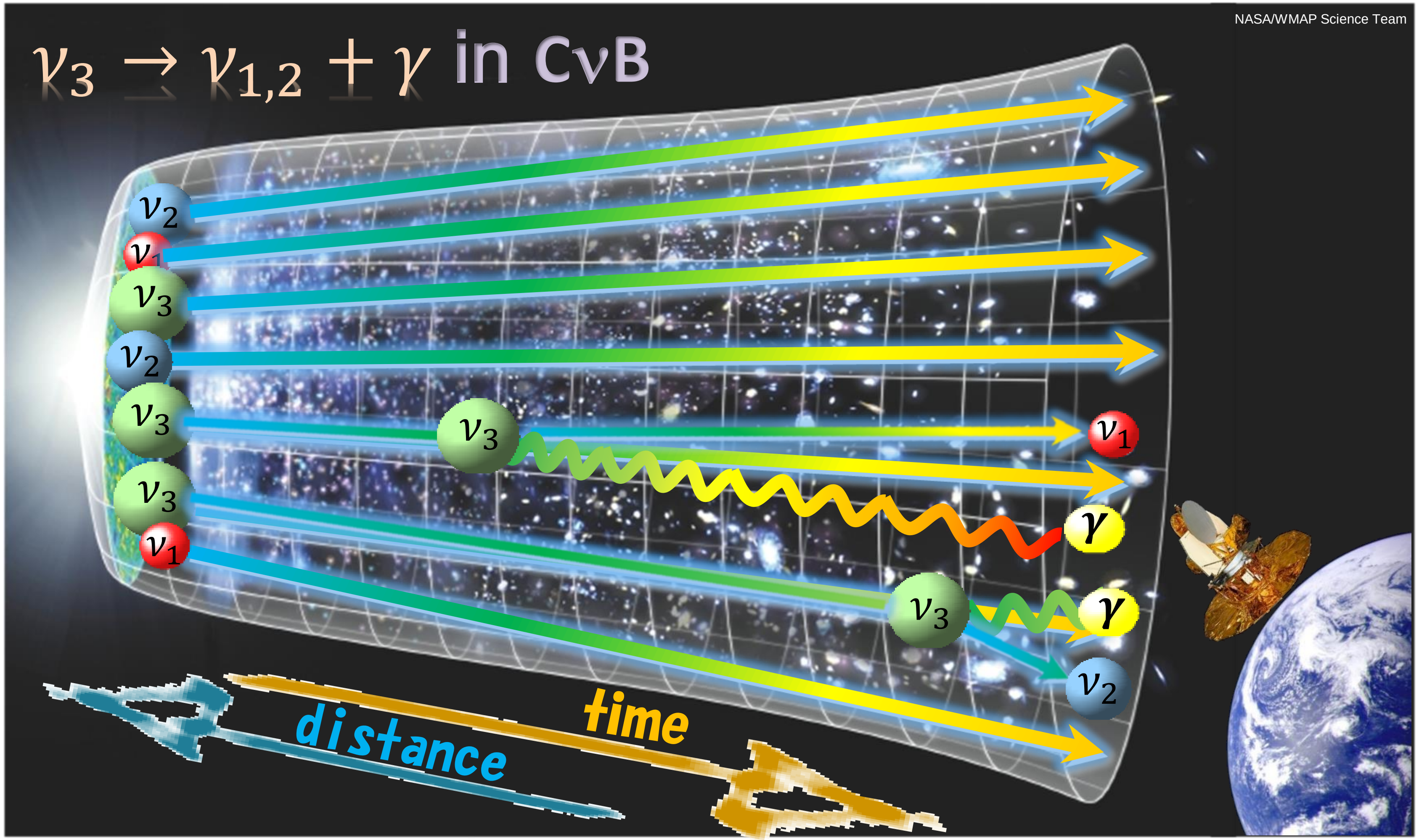
鋭いエッジを持った分布は，ある質量を持った粒子の二体崩壊によるもの

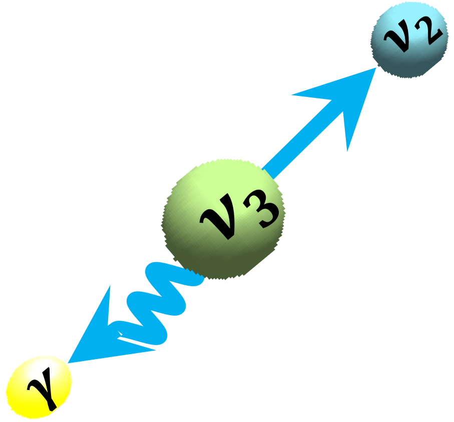
➔　ニュートリノ崩壊の決定的証拠といえる

COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)

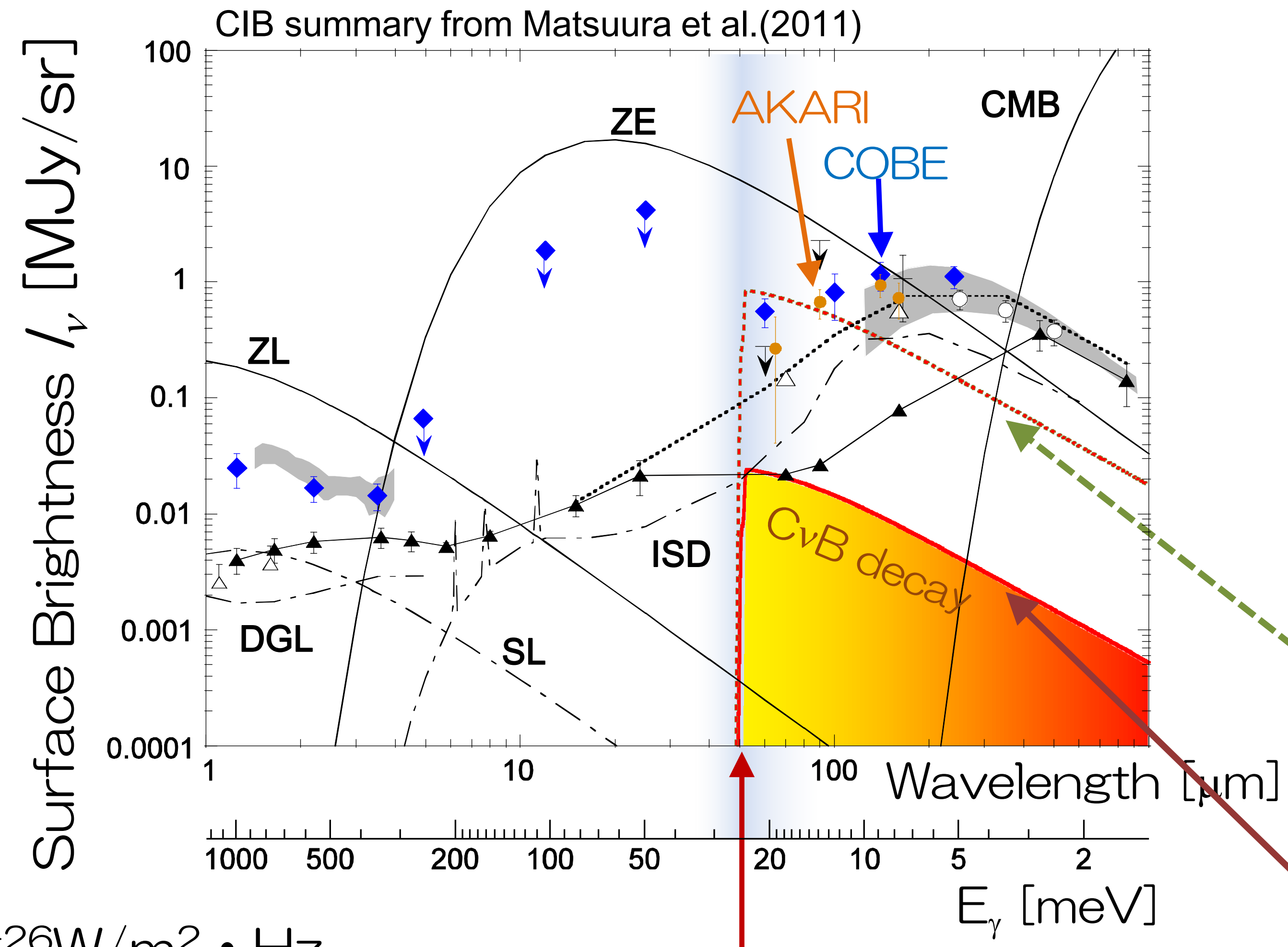
宇宙背景ニュートリノの中のニュートリノ崩壊を探索

➔ 波長50μmの微弱な光として観測





CνB radiative decay and Backgrounds



1Jy=10^-26^W/m^2^・Hz

λ=50μm
E_γ=25meV

at λ = 50μm

黄道輻射
I_ν ~8 MJy/sr

宇宙赤外線背景放射
(CIB)
I_ν~ 0.1-0.5 MJy/sr

CνB Decay

Expected E_γ spectrum
$m_3 = 50\mathrm{meV}$

$\tau = 3 \times 10^{12}\mathrm{yrs}$
I_ν ~ 0.8MJy/sr
Excluded by S.H.Kim et. al 2012

$\tau = 1 \times 10^{14}\mathrm{yrs}$
I_ν ~ 25kJy/sr

COBAND実験提案

ロケット実験でのニュートリノ寿命測定感度目標

$$\tau(\nu_3) = O(10^{14})\ 年$$

- JAXA 観測ロケット S-520
  - http://www.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/index_j.html
  - 直径: 520mm
  - ペイロード: 100kg
  - 到達高度: 300km
- 高度200～300km で200秒の測定
  - 主鏡直径20cm，焦点距離80cm の望遠鏡
  - 光学系(主鏡，副鏡，フィルター，シャッター，回折格子等)は全て1.8K程度に冷却

- 将来計画：衛星実験
  - 検出器の視野角を増やし，60日程度の測定
  - 10^{17}年の測定感度を目指す

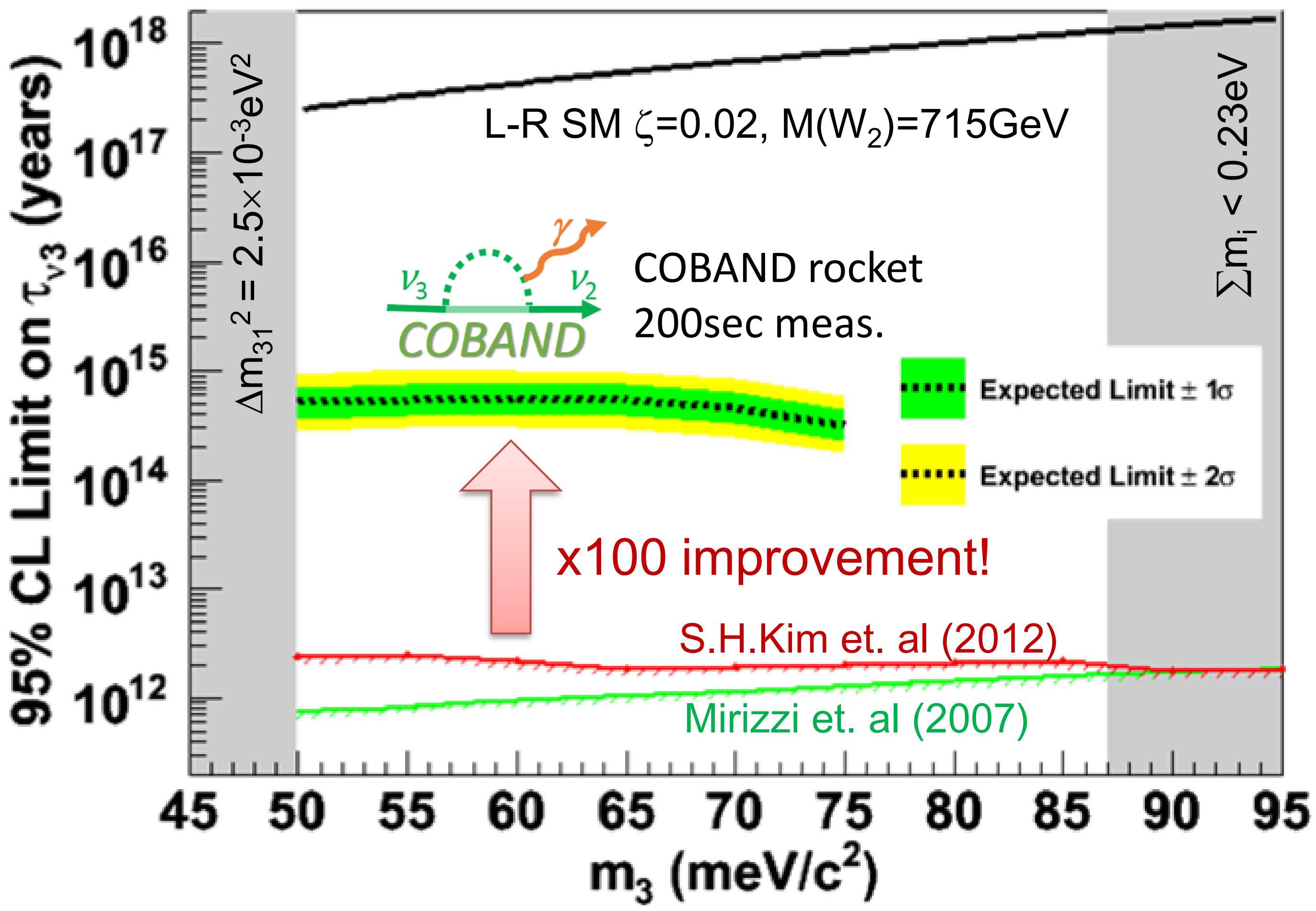
JAXA 観測ロケット S-520

https://www.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/index_j.htmlから引用

COBAND ロケット実験の到達感度

シミュレーション条件

- 測定時間：200秒
- 主鏡直径：20cm
- 焦点距離：80cm
- 40～80μm の範囲を回折格子で分光
- 400μm×400μm×50ピクセルの素子で受光
- 受光素子での**単一光子検出率**は22%



ν_3 寿命

- 標準模型(Standard Model)での寿命予想: $\tau = O(10^{43})$ 年
  - c.f. 宇宙年齢: 10^{10}年

- 現在の実験的寿命下限値: $\tau > O(10^{12})$ 年

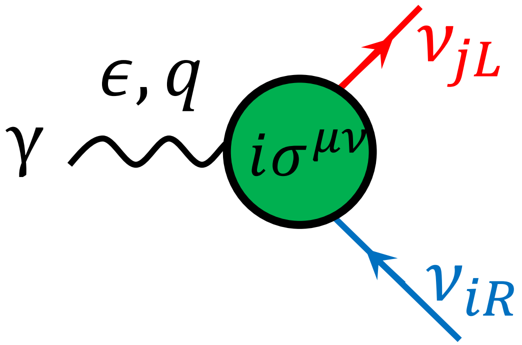
  S.Kim et al.,JPSJ 81 (2012) 024101

標準模型では，ニュートリノ崩壊は厳しく抑制される.

逆に言えば，ニュートリノ崩壊は標準模型を超える新物理に対して非常に高い感度を持っている.

- 例えば，L-R symmetric model では，モデルのあるパラメータが許される範囲の最大値（W_L-W_R 混合角 $|\zeta|\sim 0.02$ ）において $\tau = O(10^{17})$ 年 が予言されている.

ニュートリノの磁気能率による遷移輻射



ベクトル型結合項は，ゲージ不変でない
($\epsilon \to q$の置き換えで0にならない)

$$\epsilon_\mu \bar{\nu}_j \gamma^\mu \nu_i$$

磁気能率に寄与するラグランジアンの項

$$\epsilon_\mu \bar{\nu}_{jL} i\sigma^{\mu\nu} q_\nu \nu_{iR}$$

$\epsilon \to q$の置き換えで自動的に0

$$\sigma^{\mu\nu} = \frac{i}{2}[\gamma^\mu, \gamma^\nu]$$

$\sigma^{\mu\nu}$は，ガンマ行列を二個含んでいるのでニュートリノのカイラリティーはL-R結合

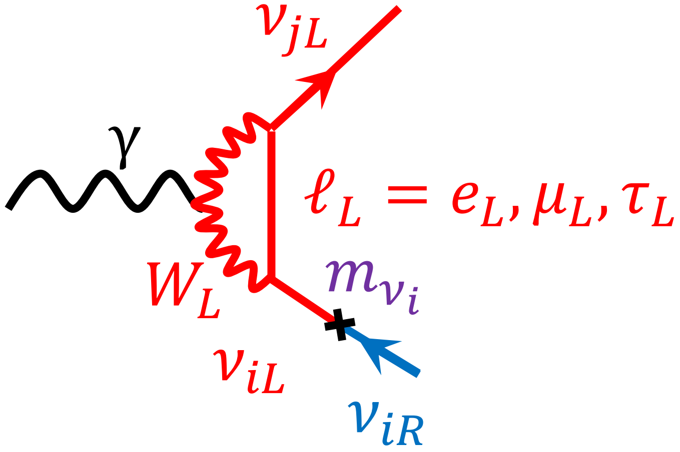
- $\bar{\nu}_{jL} i\sigma^{\mu\nu} q_\nu \nu_{iL}$ や $\bar{\nu}_{jR} i\sigma^{\mu\nu} q_\nu \nu_{iR}$ の項は許されない

ニュートリノの磁気能率

標準模型での寿命予想が長いのは，遷移磁気能率項に対する強い抑制効果のため

標準模型: SU(2)$_L$ × U(1)$_Y$

WボゾンはLカイラリティのフェルミオンとのみ結合

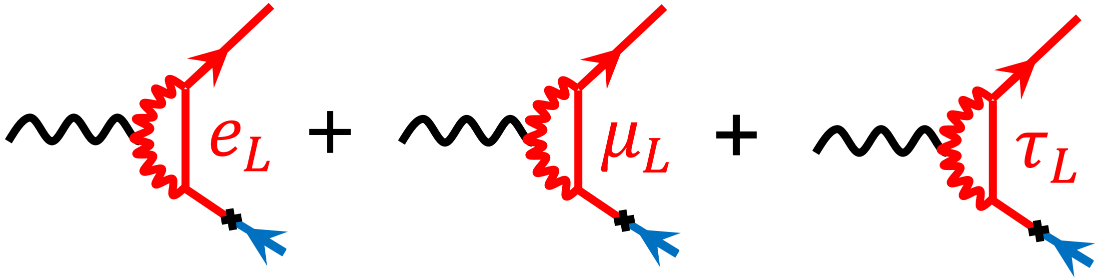


ニュートリノ質量項 $m_\nu(\bar{\nu}_L \nu_R + \bar{\nu}_R \nu_L)$ を通じて L-R結合

➔m_ν で抑制

(遷移磁気能率の場合)内線を e，μ，τ が寄与し，打ち消し合う

➔　GIM抑制



$$= 0\left(\frac{m_\tau^2}{m_W^4}\right)$$

$U_{ej}^* U_{ei}$　　$U_{\mu j}^* U_{\mu i}$　　$U_{\tau j}^* U_{\tau i}$

足すとMNS行列U（ユニタリー）の$U^\dagger U = 1$ の非対角成分

L-R 対称模型でのニュートリノ崩壊(ζ~0.02のシナリオ)

M. Beg, W. Marciano and M. Rudeman Phys. Rev. D17 (1978) 1395-1401
ニュートリノ崩壊幅を$SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$模型で計算

WがRight handと結合できるので，内線の
荷電レプトン質量項を通じて L-R結合
➔m_ν の抑制がない

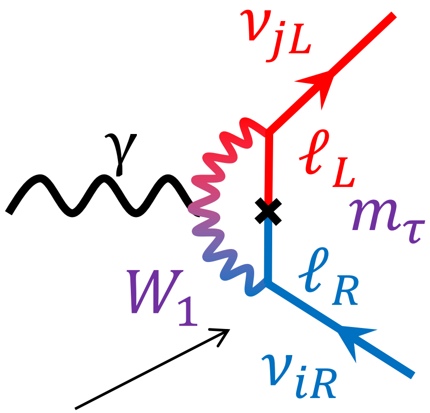
$$m_\nu \to m_\tau$$

タウ粒子のダイアグラムがほぼ寄与する
➔GIM抑制がない

$$\frac{m_\tau^2}{m_W^4} \to \frac{1}{m_W^2 - m_\tau^2} \sim \frac{1}{m_W^2}$$

LRS: $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$

$M_{W_2} = 1\ \mathrm{TeV},\ \zeta = 0.02,$
$m_3 = 50\ \mathrm{meV}$ を仮定すると



$$\Gamma_{SM} \sim (10^{43}\ yr)^{-1}$$

$$\Gamma_{\mathrm{LRM}} \sim (10^{17}\ yr)^{-1}$$

PRL 38,(1977) 1252, PRD 17(1978) 1395

ζ~0.02による抑制のみ

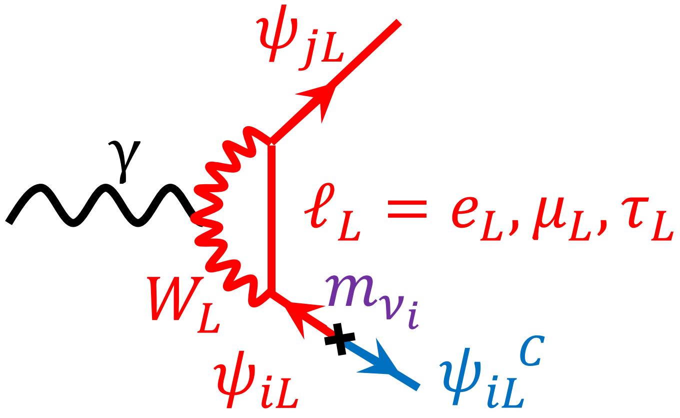
$$W_1 \simeq W_L - \zeta W_R$$

10^{26} の増幅

$$\left| \frac{m_\tau}{m_\nu} \frac{m_\tau^2}{m_W^2} \zeta \right|^2 \sim 2 \times 10^{24}$$

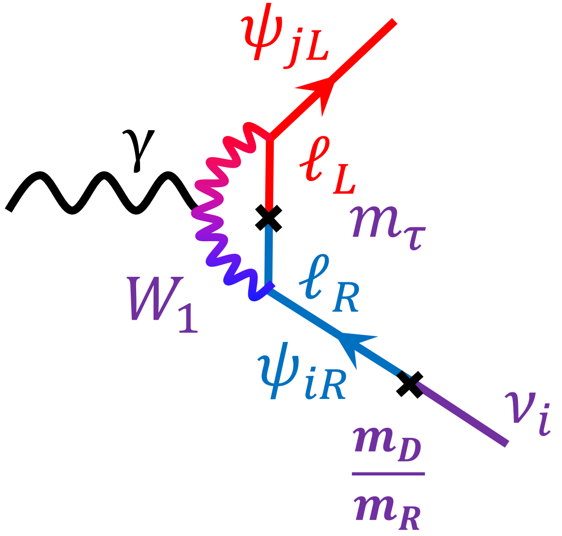
マヨラナの場合のニュートリノ崩壊

- Rカイラリティーは，超重たいニュートリノなので始状態・終状態には現れない
- $\bar{\nu}_{jL} i\sigma^{\mu\nu} q_\nu \nu_{iR}$ の代わりに $\bar{\psi}_{jL} i\sigma^{\mu\nu} q_\nu {\psi_{iL}}^C$ も許されるので，W_L結合のみ場合，標準模型との違いは factor 1/2のみ.
  - 但し $i=j$ のとき(磁気能率)は，マヨラナでは消える
- L-R模型での増幅はマヨラナ模型では， νの中のψ_R成分が$\frac{m_D}{m_R}\left(\sim \frac{m_\nu}{m_\ell} < 10^{-10}\right)$で抑制されるので，$10^{17}$yr の寿命の場合はマヨラナ模型を否定



$\bar{\psi}_{jL} i\sigma^{\mu\nu} q_\nu {\psi_{iL}}^C$

マヨラナ＋ W_L結合のみ



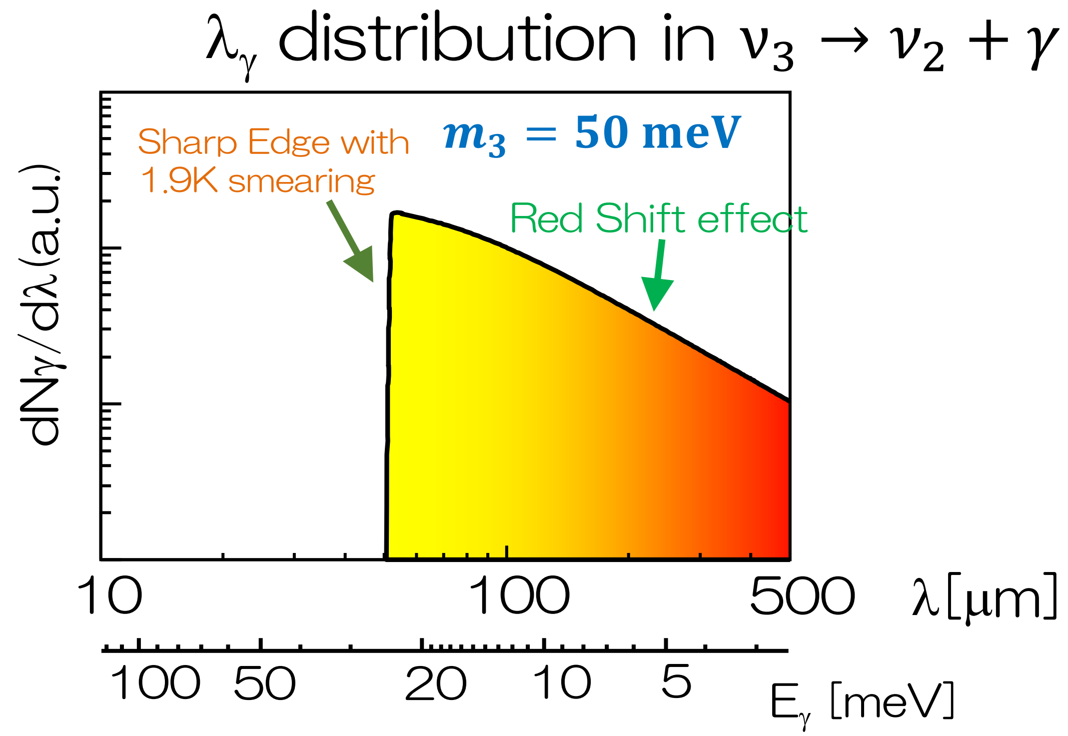
マヨラナ＋ LRM

$$\nu \equiv \gamma^5 \left(N_1 - \frac{m_D}{m_R} N_2 \right)$$

$$N_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \{\psi_L + (\psi_L)^C\}$$

$$N_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \{\psi_R + (\psi_R)^C\}$$

ダークエネルギーの時間依存性情報



$$I_\lambda = \frac{1}{4\pi\tau_\nu}\rho_{\nu,0}\frac{hc}{\lambda^2}\frac{c}{H_0}\left[\Omega_{m,0}\left(\frac{\lambda}{\lambda_s}\right)^3 + \Omega_{\Lambda,0}\right]^{-\frac{1}{2}}$$

Red shift によるテール部分：ダークエネルギーの時間依存性情報を内包
➔宇宙終焉シナリオを予測する上で重要

宇宙一様に分布する輻射崩壊する粒子
➔CνBが唯一のソース

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索の意義

$\tau > O(10^{12})$年は，既存の測定で全く手が付けられていない未踏の領域

➔何が見つかっても全然不思議ではない

目指すニュートリノ寿命感度：$\tau = O(10^{13} - 10^{17})$ 年

もし，CνBからのニュートリノ輻射崩壊光が標準模型予想よりもずっと短い
10^{12}年 $< \tau(\nu_3) \ll 10^{43}$年で観測されたら

- 標準模型を超える物理の発見!!!
- CνBの直接検出!!!
- ニュートリノ質量の絶対値測定!!! $m_3 = \left(m_3^2 - m_{1,2}^2\right)/2E_\gamma$
- 重いRニュートリノのマヨラナモデルの排除!!!
- ダークエネルギーの時間依存性情報!!!