



ビッグバン数秒後の残照に標準理論の綻びを探る
COBAND計画

令和元年度 定例 第7回 物理学セミナー

2019年11月20日

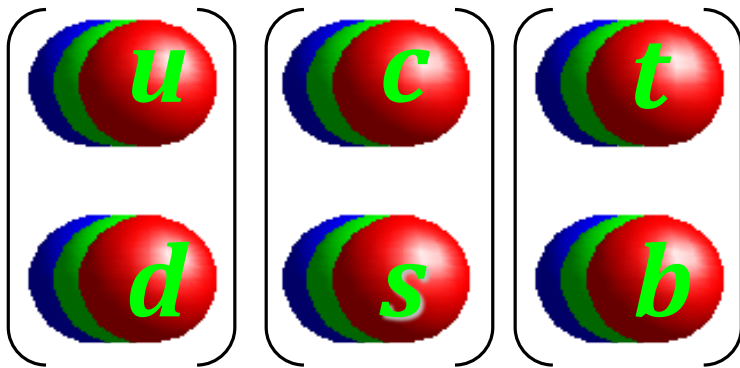
武内勇司 (宇宙史研究センター)

素粒子

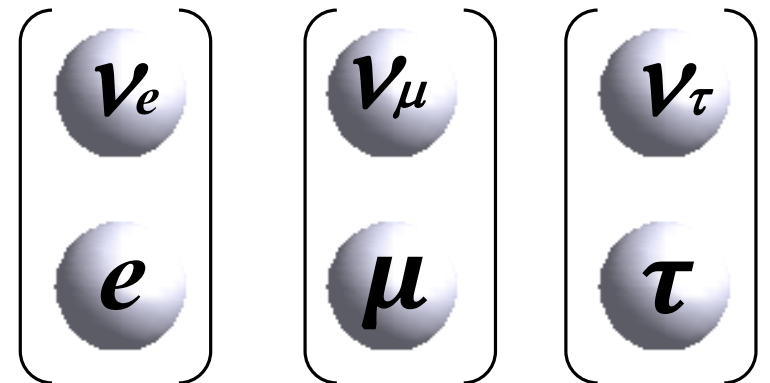
→物質の究極の構造

フェルミ粒子・ゲージ粒子・ヒッグス粒子

クォーク



レプトン



+ 上の粒子の反粒子

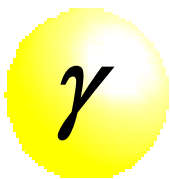
素粒子

→物質の究極の構造

フェルミ粒子・ゲージ粒子・ヒッグス粒子

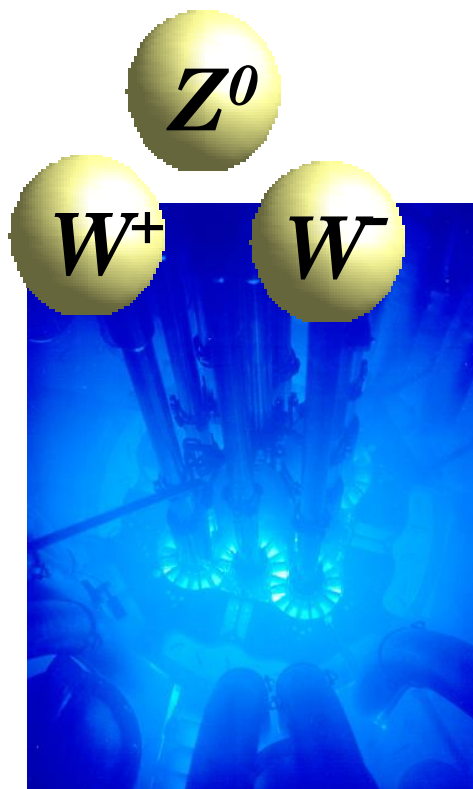
電磁相互作用

光子 (フォトン)



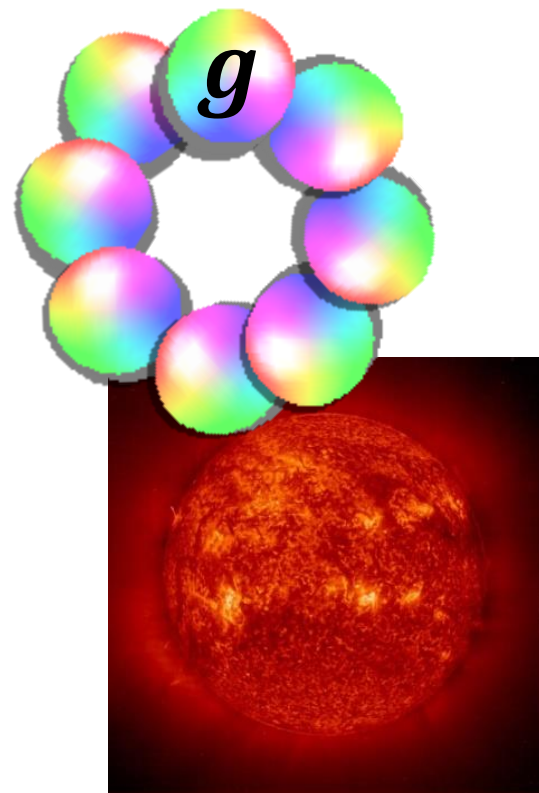
弱い相互作用

ウィークボゾン



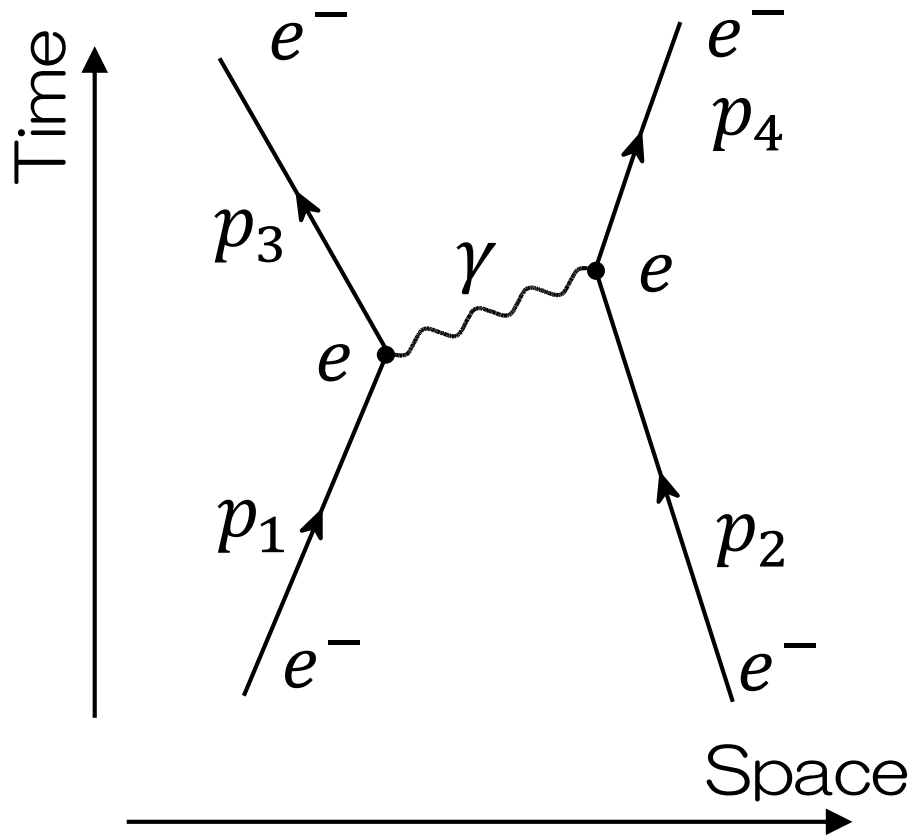
強い相互作用

グルーオン



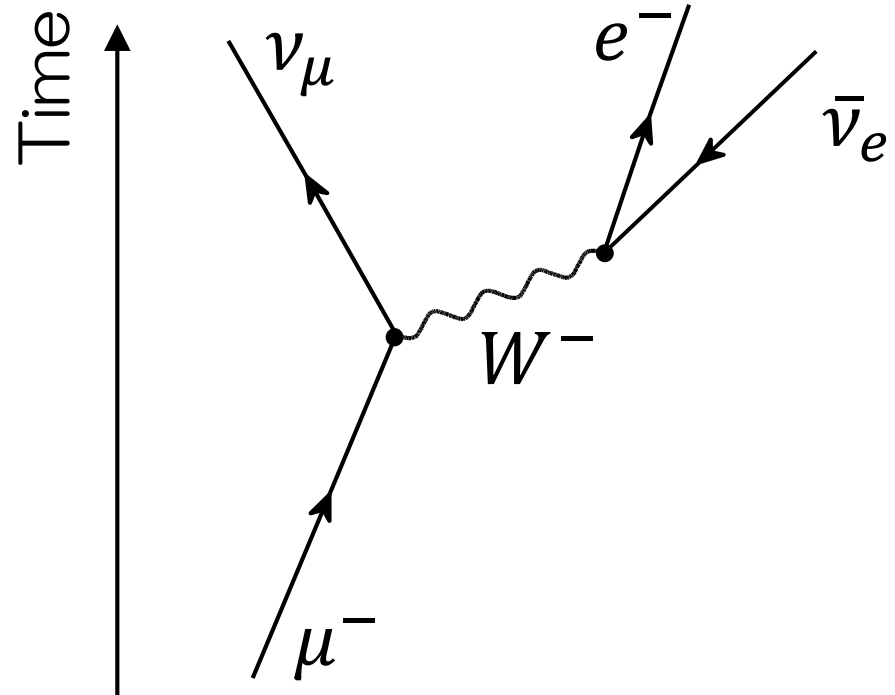
Interaction and decay of elementary particles

$$e^- e^- \rightarrow e^- e^-$$



Feynman diagram of EM interaction between electrons

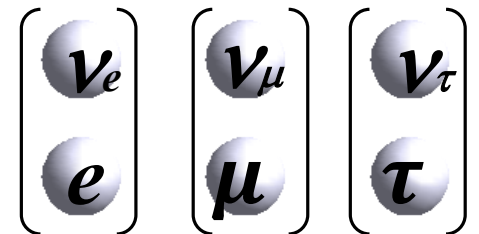
$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$



Muon decay by weak interaction

ニュートリノとは

- 素粒子, フェルミオン, レプトン
- 電荷を持たない. 弱い相互作用をする.
- 3種類ある (ν_e, ν_μ, ν_τ)
 - 非常に小さい質量があり, 3種類の間で異なった質量をもつ. 質量そのものは測定されていない.
- 宇宙で光子の次に多いと, 予言されている.
- 寿命不明 下限値のみ
- 粒子・反粒子の区別があるか不明.
 - マヨラナ粒子かも知れない.



Neutrino

- 質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3)
- フレーバ固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ) は, 質量固有状態ではない

電子ニュートリノ = ニュートリノ1 + ニュートリノ2 + ニュートリノ3
 ミューニュートリノ = ニュートリノ1 + ニュートリノ2 + ニュートリノ3
 タウニュートリノ = ニュートリノ1 + ニュートリノ2 + ニュートリノ3

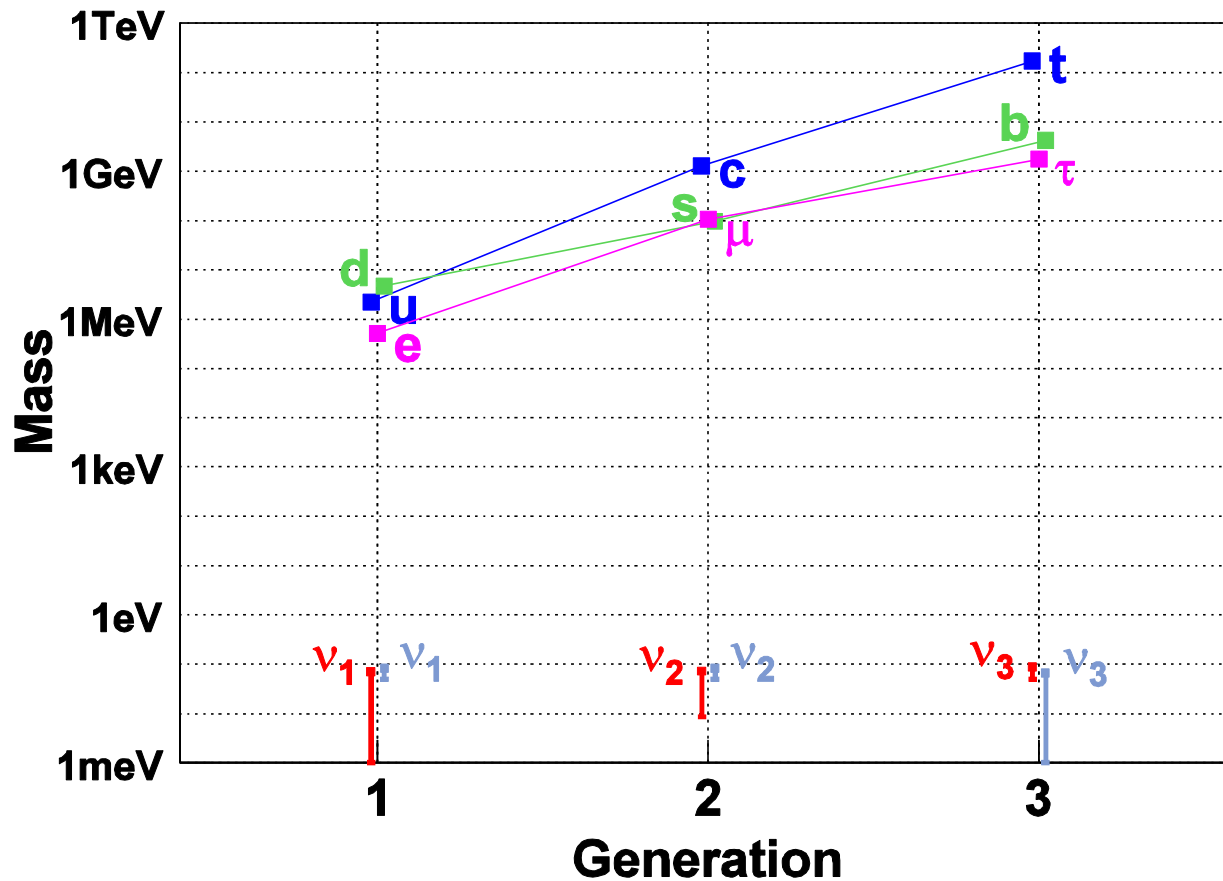
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

↑
ユニタリ一行列

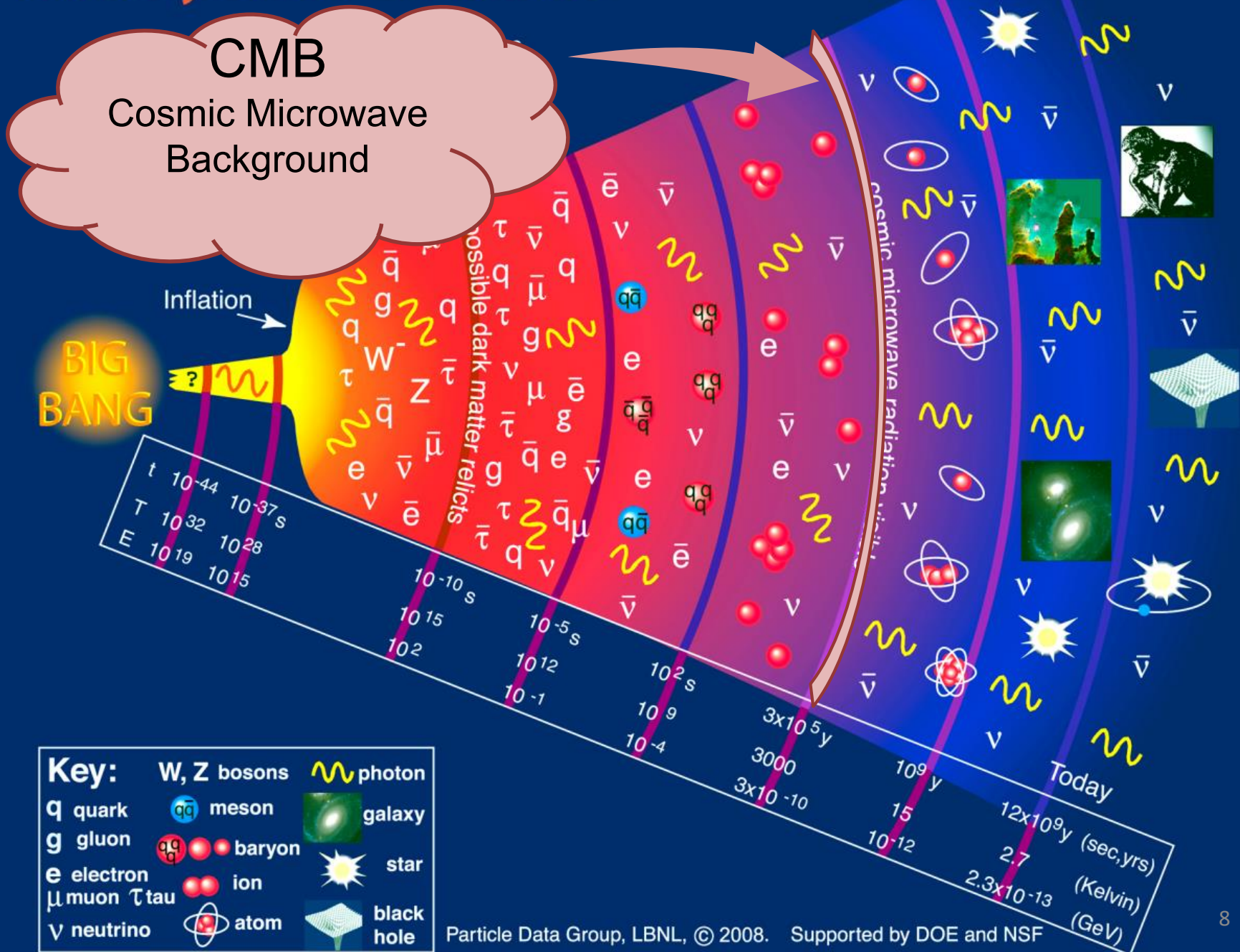
- ➔ ニュートリノフレーバは, 飛行中に振動(変化)する. これにより質量二乗差 ($\Delta m_{12}^2, |\Delta m_{23}^2|$) が測定されている.
- しかし, **質量そのものは, まだ測られていない.**
- 実は**粒子・反粒子に区別があるか (Dirac or Majorana) も分かっていない**

フェルミオン質量

- ニュートリノ質量階層性 ($m_1 < m_2 < m_3$ or $m_3 < m_1 < m_2$?)
- 不自然に小さいニュートリノ質量

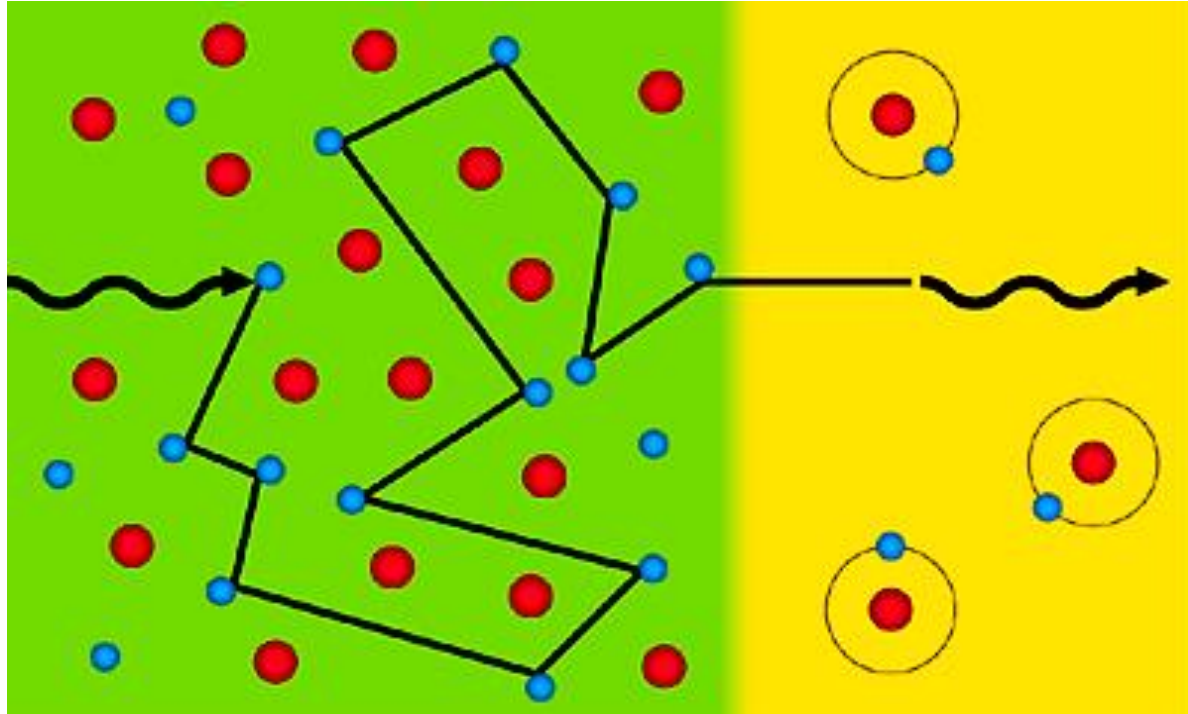


History of the Universe



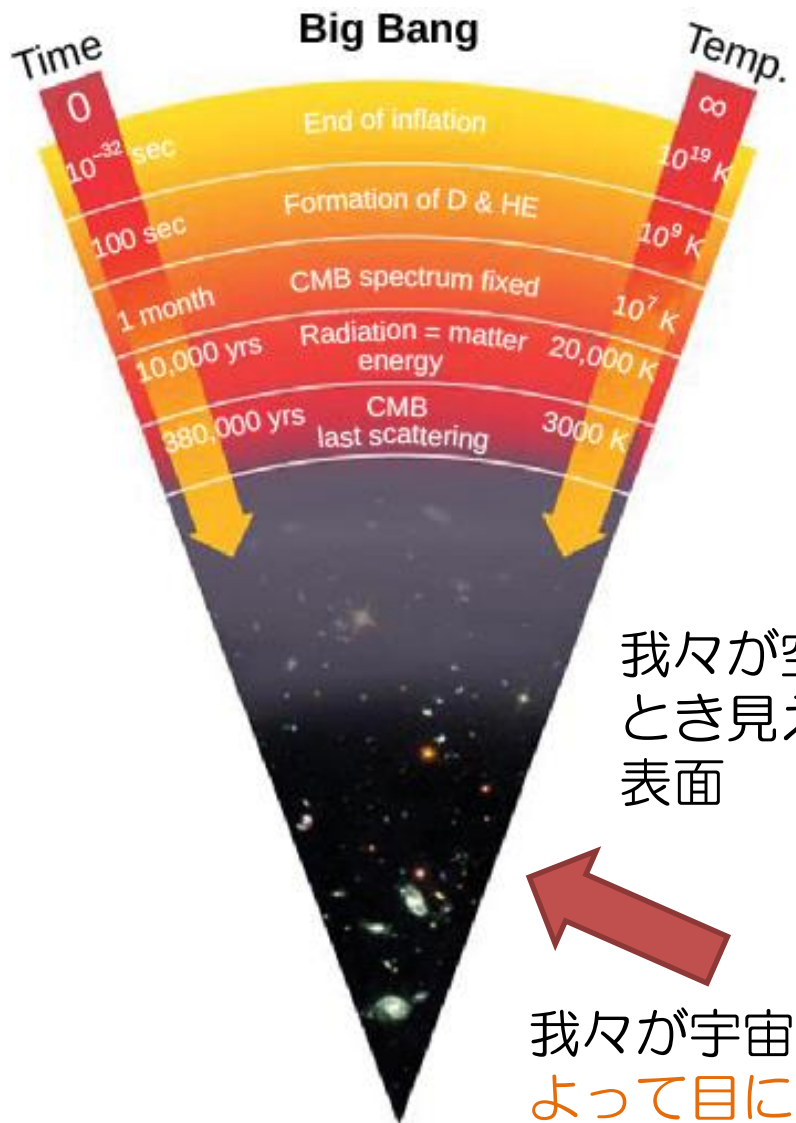
Recombination (Photon decoupling)

宇宙の晴れ上がり



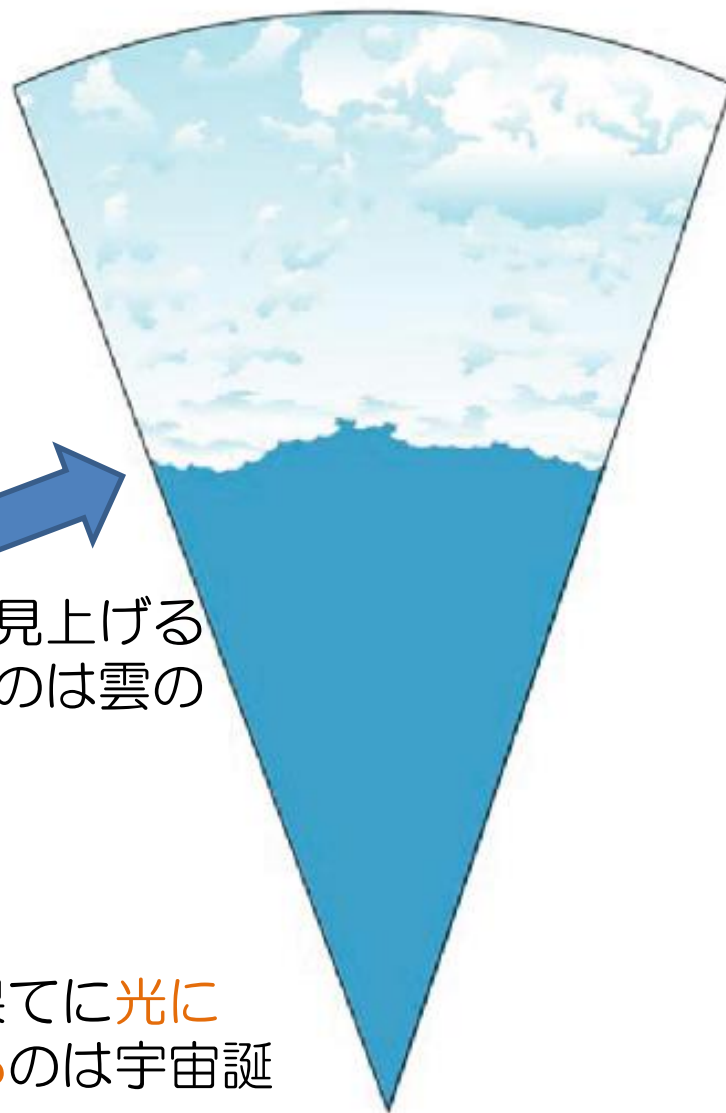
378,000 years after the Big Bang

- $T \sim 3000\text{K}$ ($E = k_B T \sim 0.3\text{eV}$)
- e^- and p^+ become bound to form neutral H atoms
- Photons get traveling freely through universe



Present

(a)

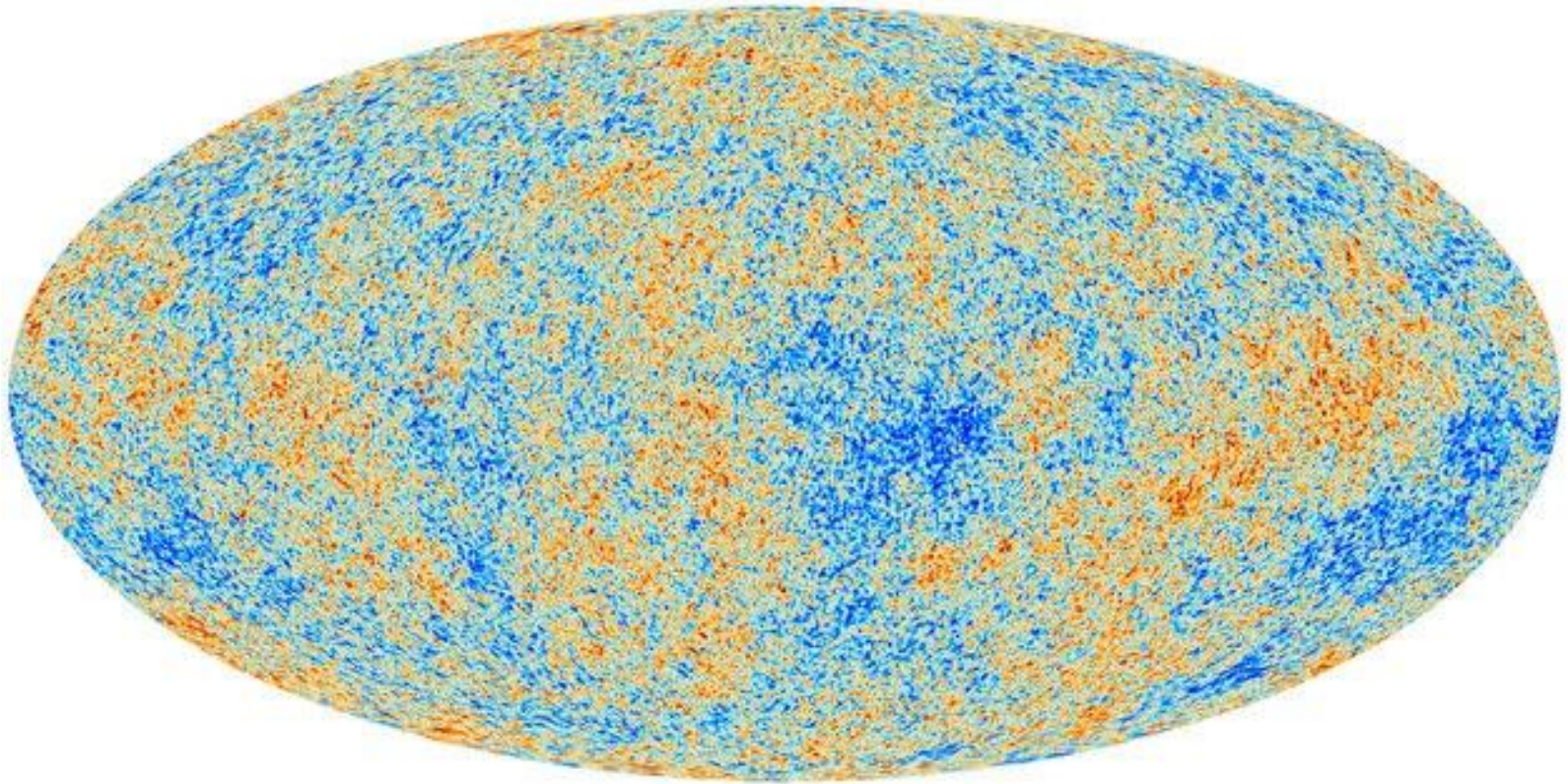


我々が空を見上げる
とき見えるのは雲の
表面

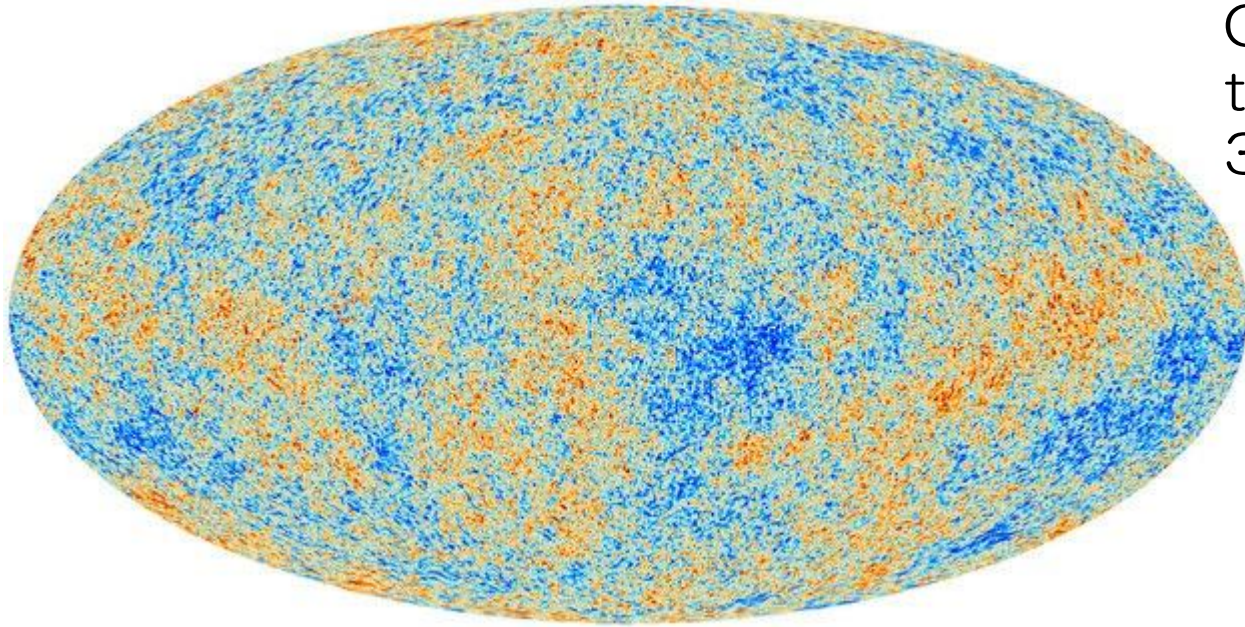
我々が宇宙の果てに光に
よって目にするのは宇宙誕
生38万年の姿

(b)

CMB Temperature Fluctuations by Planck Satellite



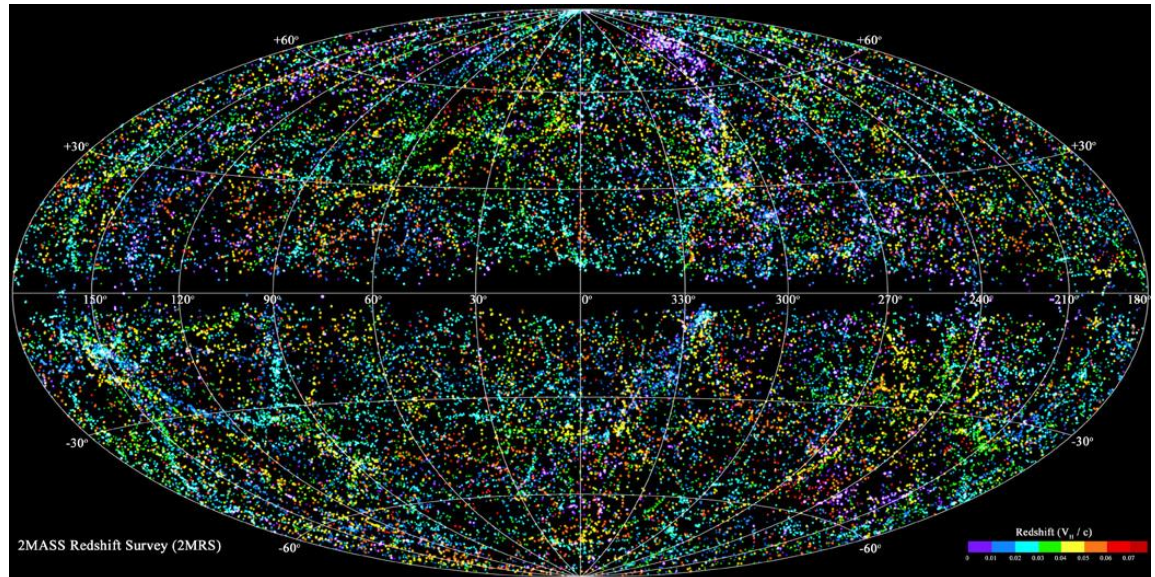
- $T \sim 3000\text{K} \rightarrow 2.7\text{K}$ (Red shift) $Z \sim 1100$
- Almost uniform temperature, but very small fluctuations
- Displayed by Red (hot) and blue (cold), but difference between red and blue is $\sim 1/100,000$

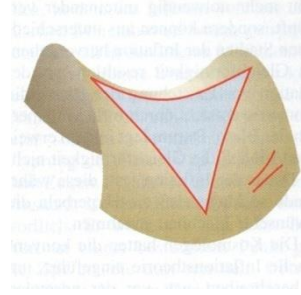
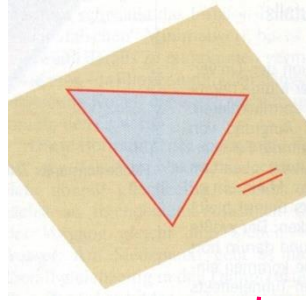
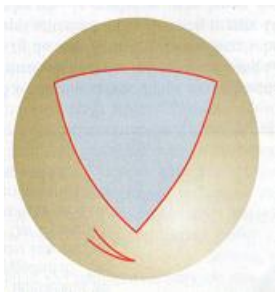


CMB is a snapshot of the Universe 378,000 years

This tiny fluctuation evolves into matter density in the universe at present.

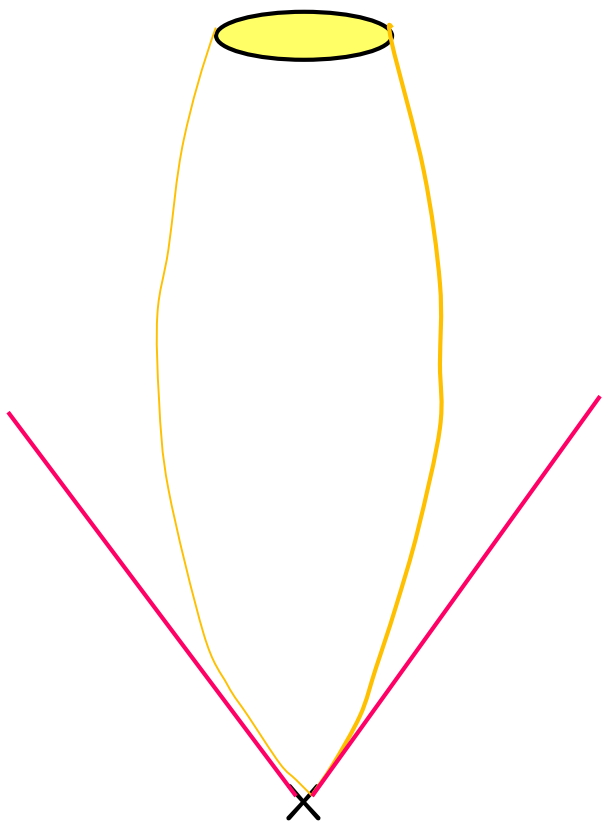
Distribution of galaxies from 2MASS Redshift Survey



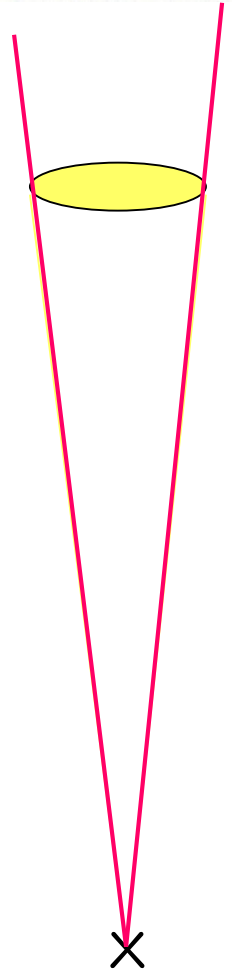


Curvature of Universe

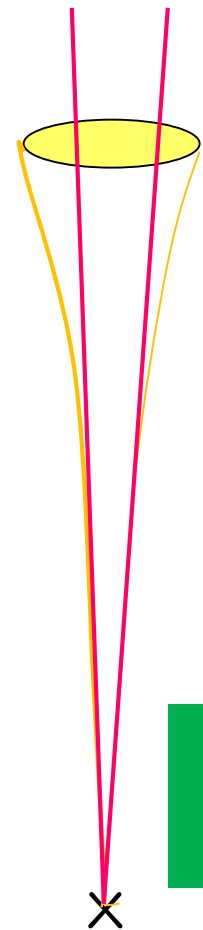
We know the size of the hot spots.



$\Omega > 1$



$\Omega = 1$

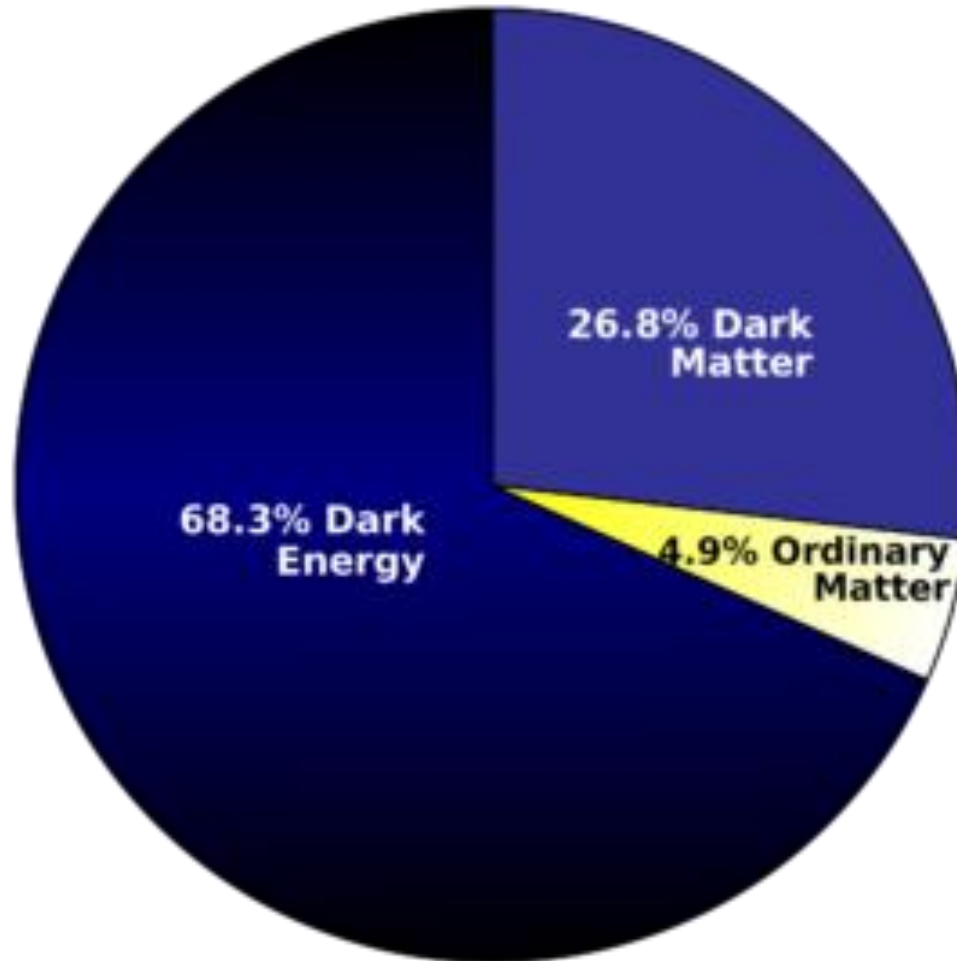


$\Omega < 1$

$\Omega = 1.000 \pm 0.005$
(Planck+BAO)

Cosmic Energy Budget

宇宙のエネルギー内訳



我々に見えている物質は、宇宙の5%
これも、CMBなどの測定から明らかになった。

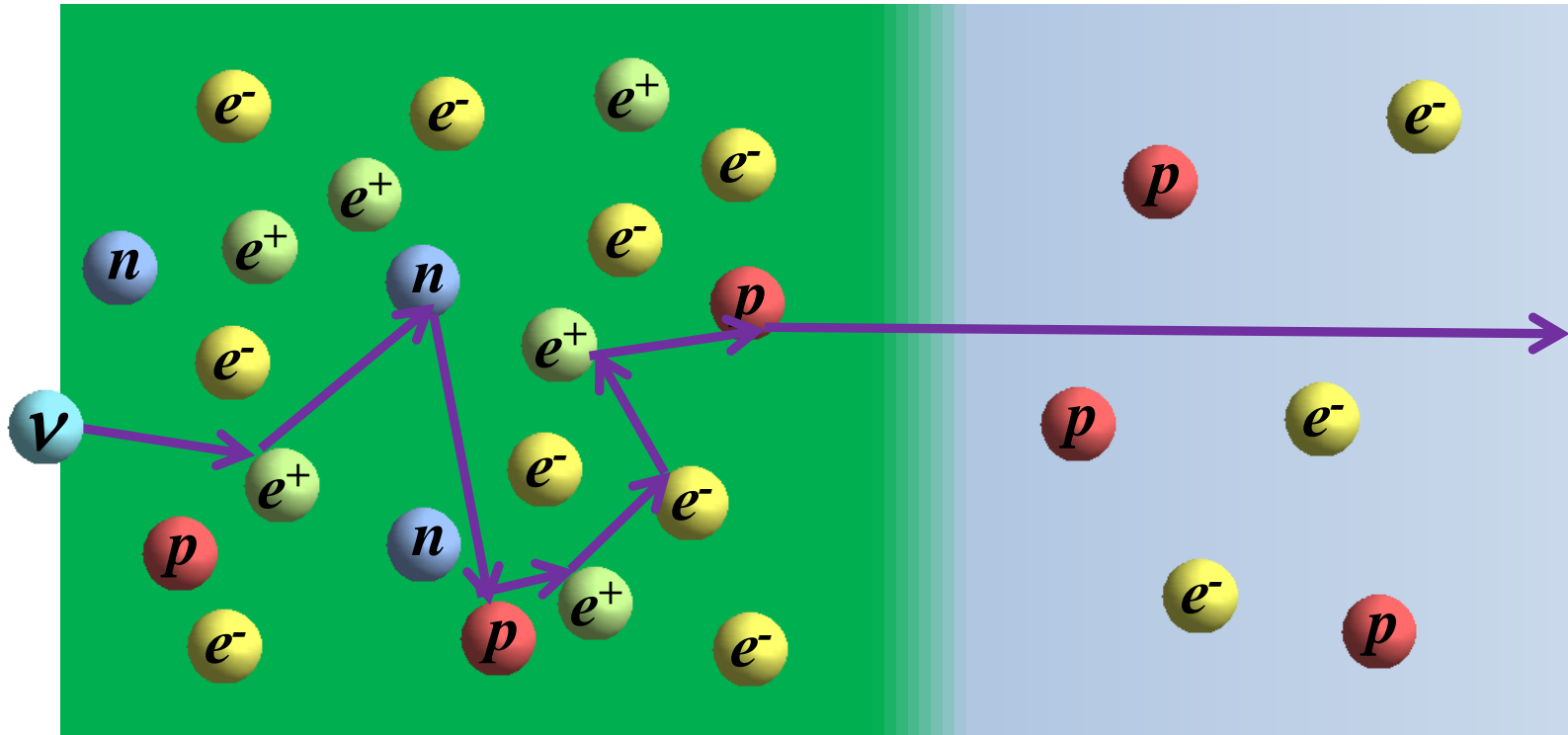
Results from CMB on the universe

Parameter	<i>Planck</i>	<i>WMAP</i>	Difference	
	(“CMB+Lens”)	(9-year)	value	<i>WMAP</i> σ
$\Omega_b h^2$	0.02217 ± 0.00033	0.02264 ± 0.00050	-0.00047	0.9
$\Omega_c h^2$	0.1186 ± 0.0031	0.1138 ± 0.0045	0.0048	1.1
Ω_Λ	0.693 ± 0.019	0.721 ± 0.025	-0.028	1.1
τ	0.089 ± 0.032	0.089 ± 0.014	0	0
t_0 (Gyr)	13.796 ± 0.058	13.74 ± 0.11	56 Myr	0.5
H_0 (km s ⁻¹ Mpc ⁻¹)	67.9 ± 1.5	70.0 ± 2.2	-2.1	1.0
σ_8	0.823 ± 0.018	0.821 ± 0.023	0.002	0.1
Ω_b	0.0481^b	0.0463 ± 0.0024	0.0018	0.7
Ω_c	0.257^b	0.233 ± 0.023	0.024	1.0

Various parameters on the early universe are obtained from CMB.

- Age of the universe. Hubble constant, matter density, dark matter density, dark energy density, ...

Neutrino decoupling



$T > 1 \text{ MeV}$

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

$$\nu + \bar{\nu} \leftrightarrow e^- + e^+ \leftrightarrow \gamma\gamma$$

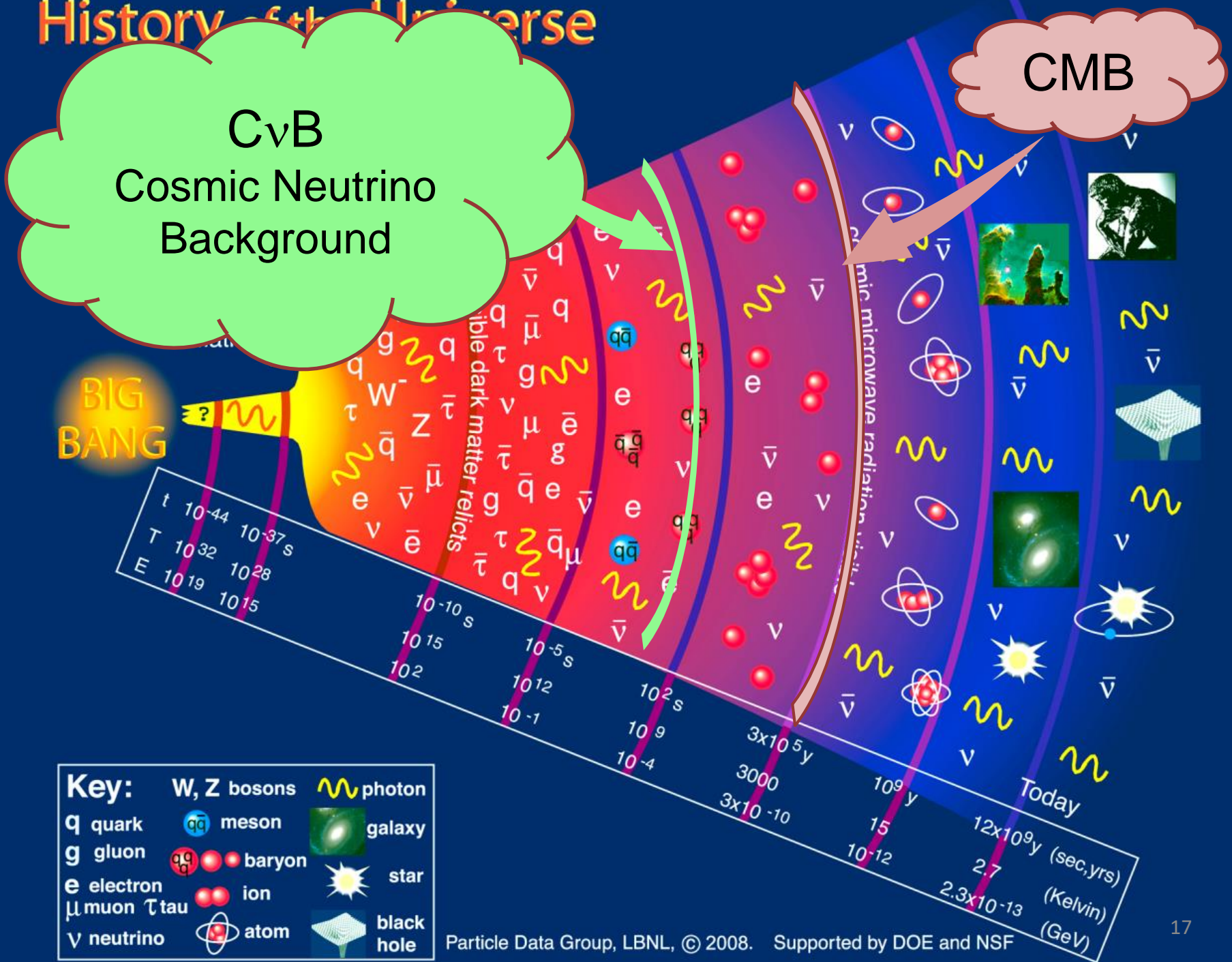
$$\bar{\nu} + p \leftrightarrow e^+ + n \quad \nu + n \leftrightarrow e^- + p$$

$$\nu + e \leftrightarrow \nu + e$$

$T < 1 \text{ MeV}$

$$T_\nu \neq T_\gamma$$

History of the Universe



CvB
Cosmic Neutrino
Background

CMB

BIG BANG

t	10^{-44}	10^{-37} s	10^{-10} s	10^{-5} s	10^2 s	3×10^5 y	10^9 y	Today
T	10^{32}	10^{28}	10^{15}	10^{12}	10^9	3×10^5	15	12×10^9 (sec, yrs)
E	10^{19}	10^{28}	10^2	10^{-1}	10^{-4}	3×10^{-10}	10^{-12}	2.7 (Kelvin)
								2.3×10^{-13} (GeV)

Key:

W, Z bosons		photon	
quark		meson	
gluon		baryon	
electron		ion	
muon		tau	
neutrino		atom	
		galaxy	
		star	
		black hole	

Neutrino decoupling

When neutrinos were relativistic ($E > 1 \text{ MeV}$), e^\pm , ν_e , $\bar{\nu}_e$ were well interacted for each other and in thermal equilibrium

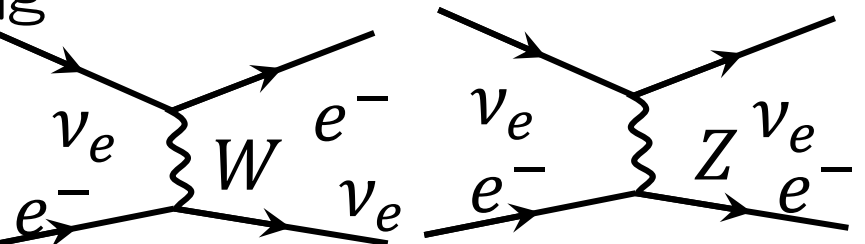
- electron-neutrino scattering

- $e^\pm + \nu_e \leftrightarrow e^\pm + \nu_e$

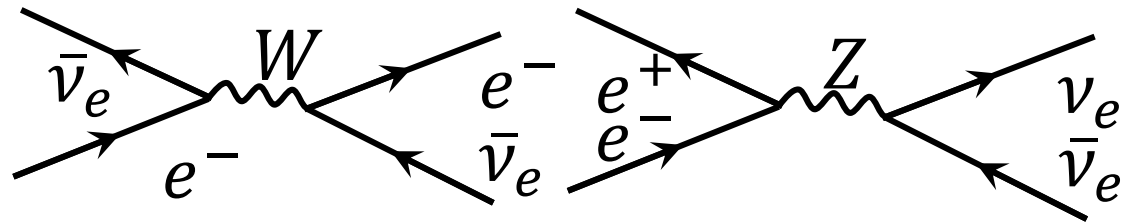
- $e^\pm + \bar{\nu}_e \leftrightarrow e^\pm + \bar{\nu}_e$

- Annihilation-pair creation

- $e^+ + e^- \leftrightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$



$$\sigma \simeq G_F^2 E^2, \rho_\nu \propto T^3$$



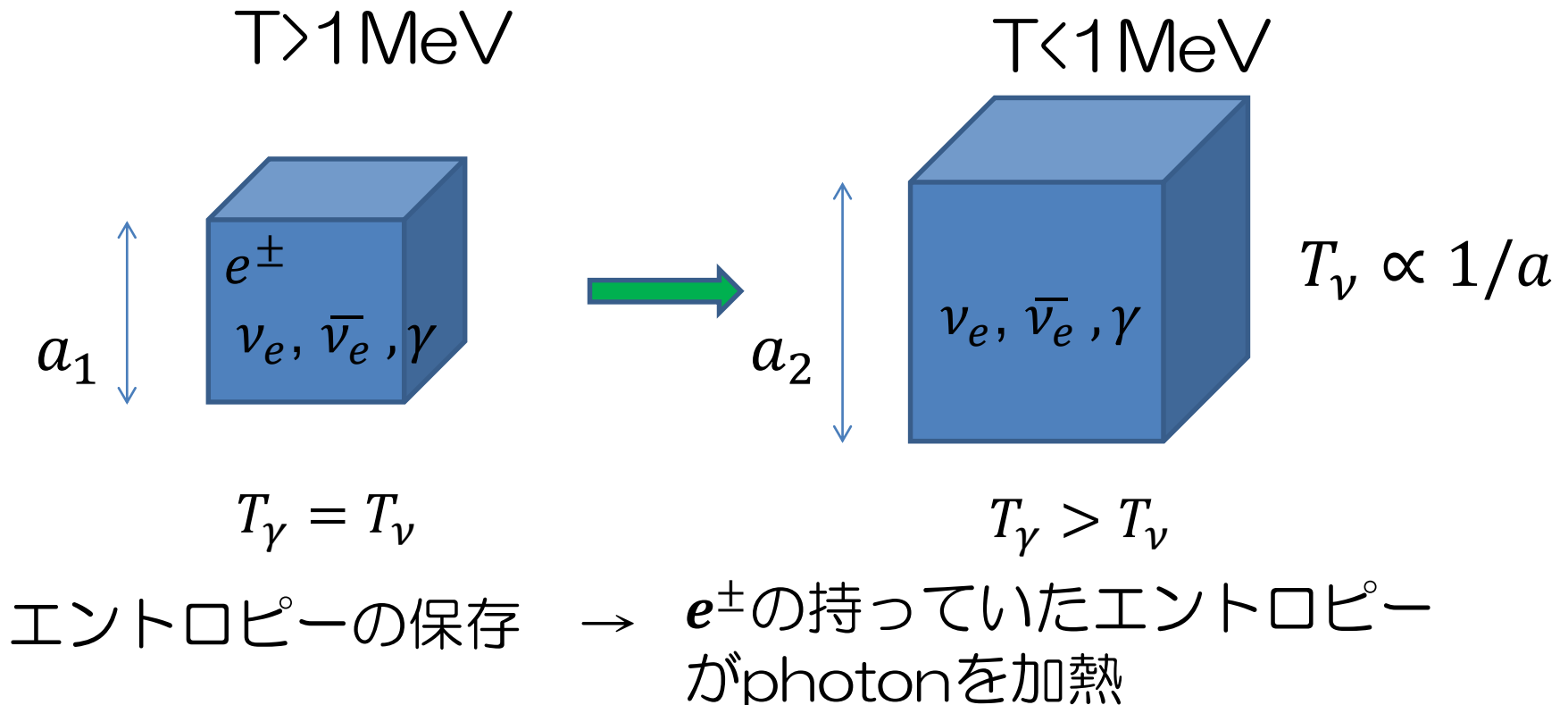
- e^\pm and γ are also in thermal equilibrium

- $e^+ + e^- \leftrightarrow 2\gamma$

Neutrino decoupling

- $T < 1 \text{ MeV}$ になると(1sec後)

e^\pm, γ が熱平衡でなくなる。 ν は熱平衡から外れる。



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 $2T_\gamma^3 = \left(2 + (2 + 2) \times \frac{7}{8}\right) T_\nu^3$

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{1}{3}} T_\gamma = 1.95\text{K}$$

$$kT_\nu = 0.168\text{meV}$$

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)

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

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

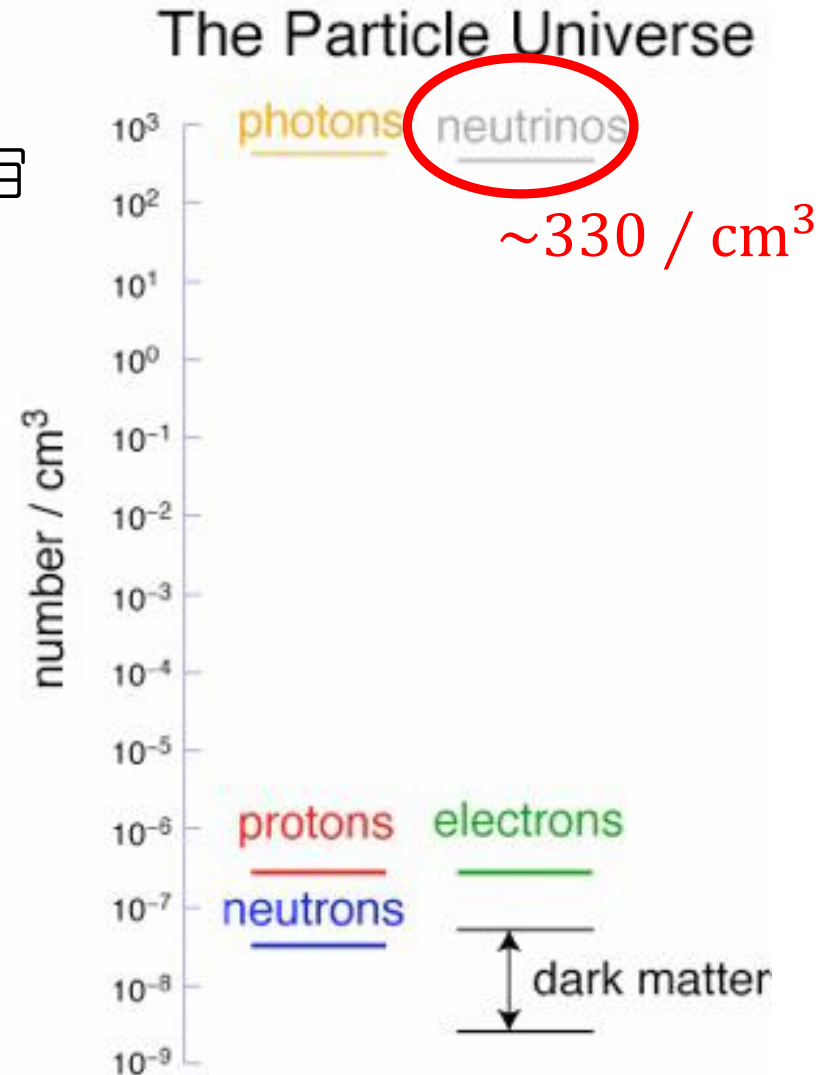
$$n_\gamma = 411 \text{個}/\text{cm}^3 \quad (2 \text{自由度}) \text{ より}$$

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

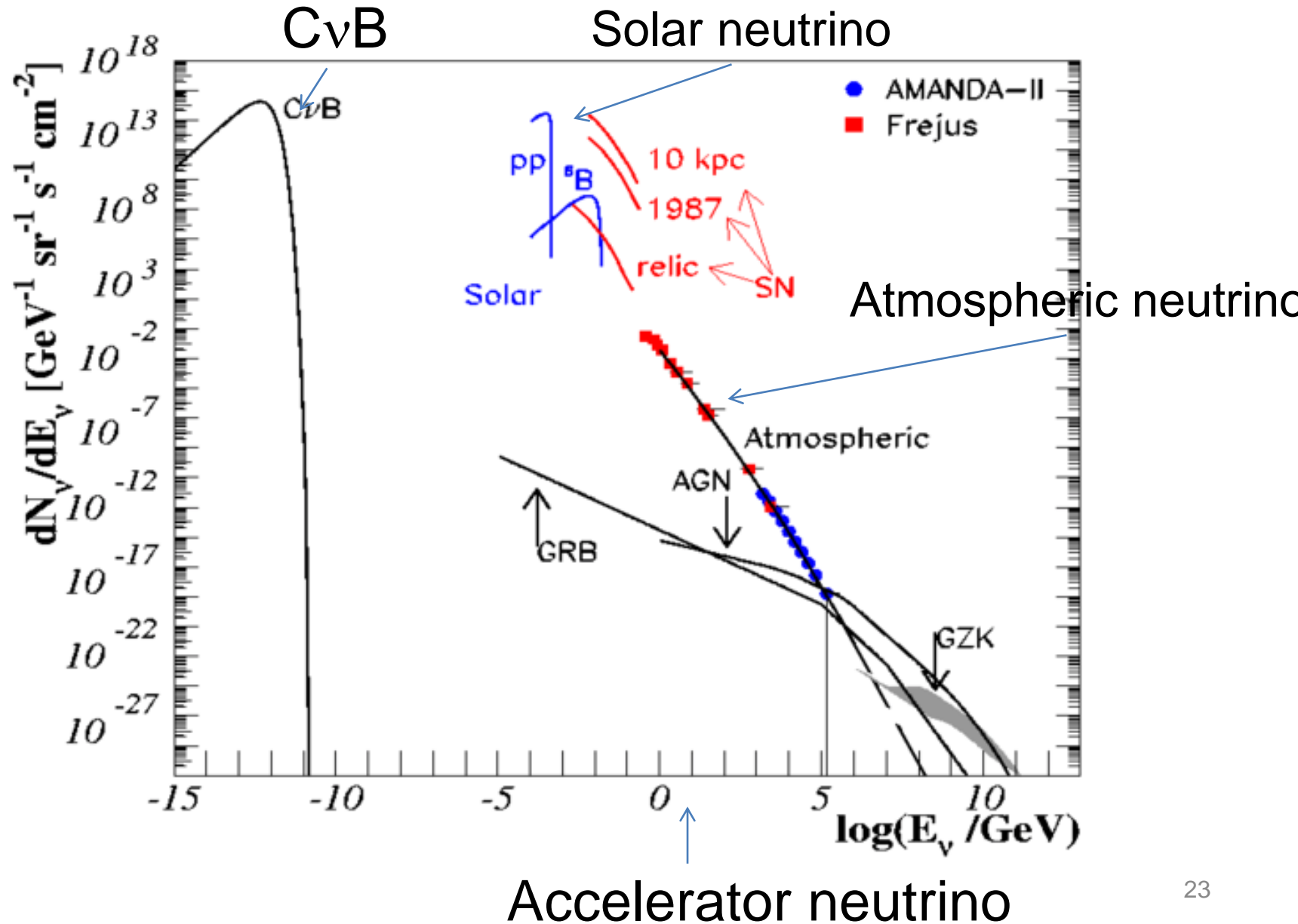
宇宙背景ニュートリノ

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

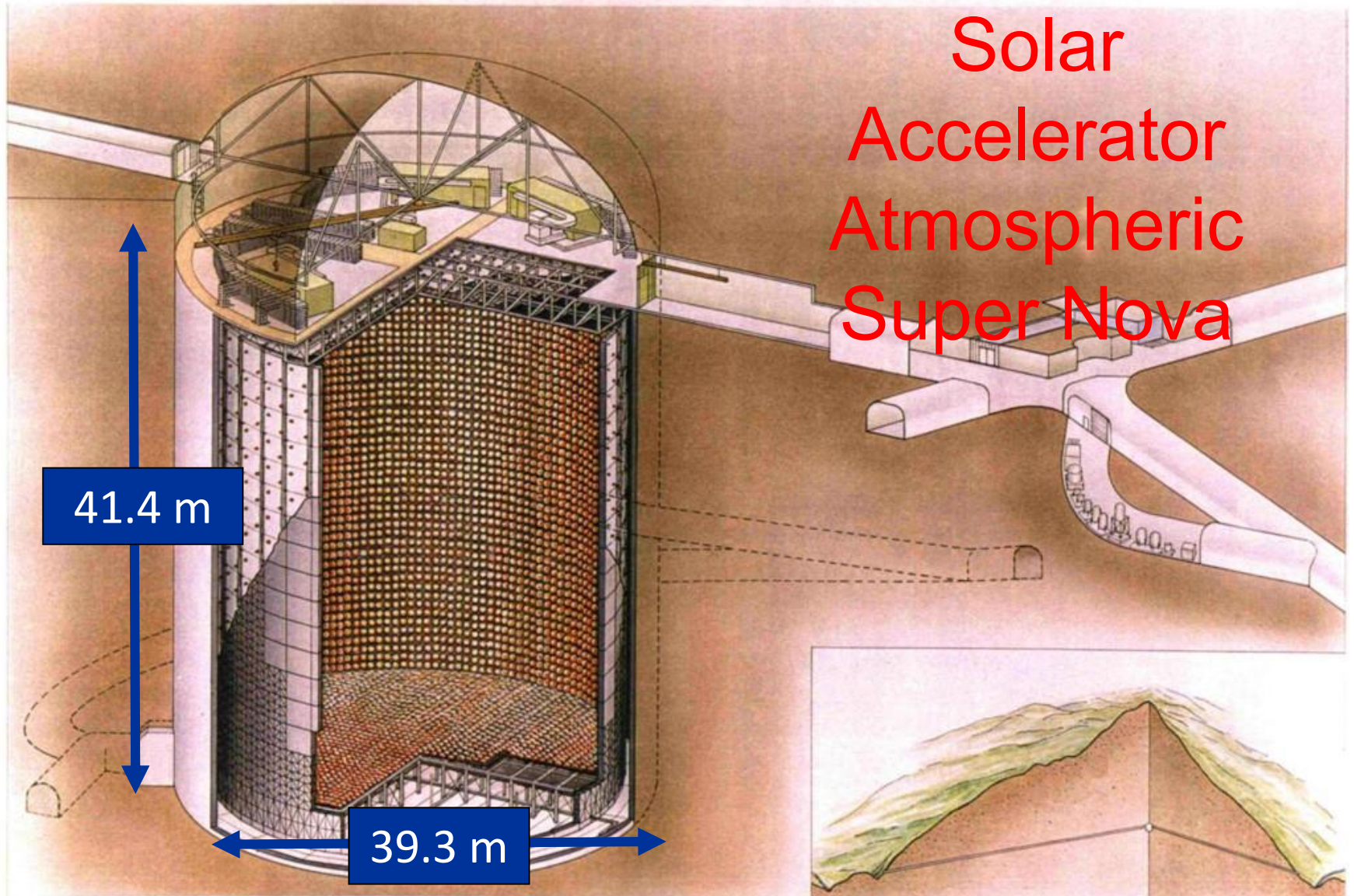
にもかかわらず、
宇宙背景ニュートリノの存在は、
実験的には、検証されていない。
(間接的証拠のみ)



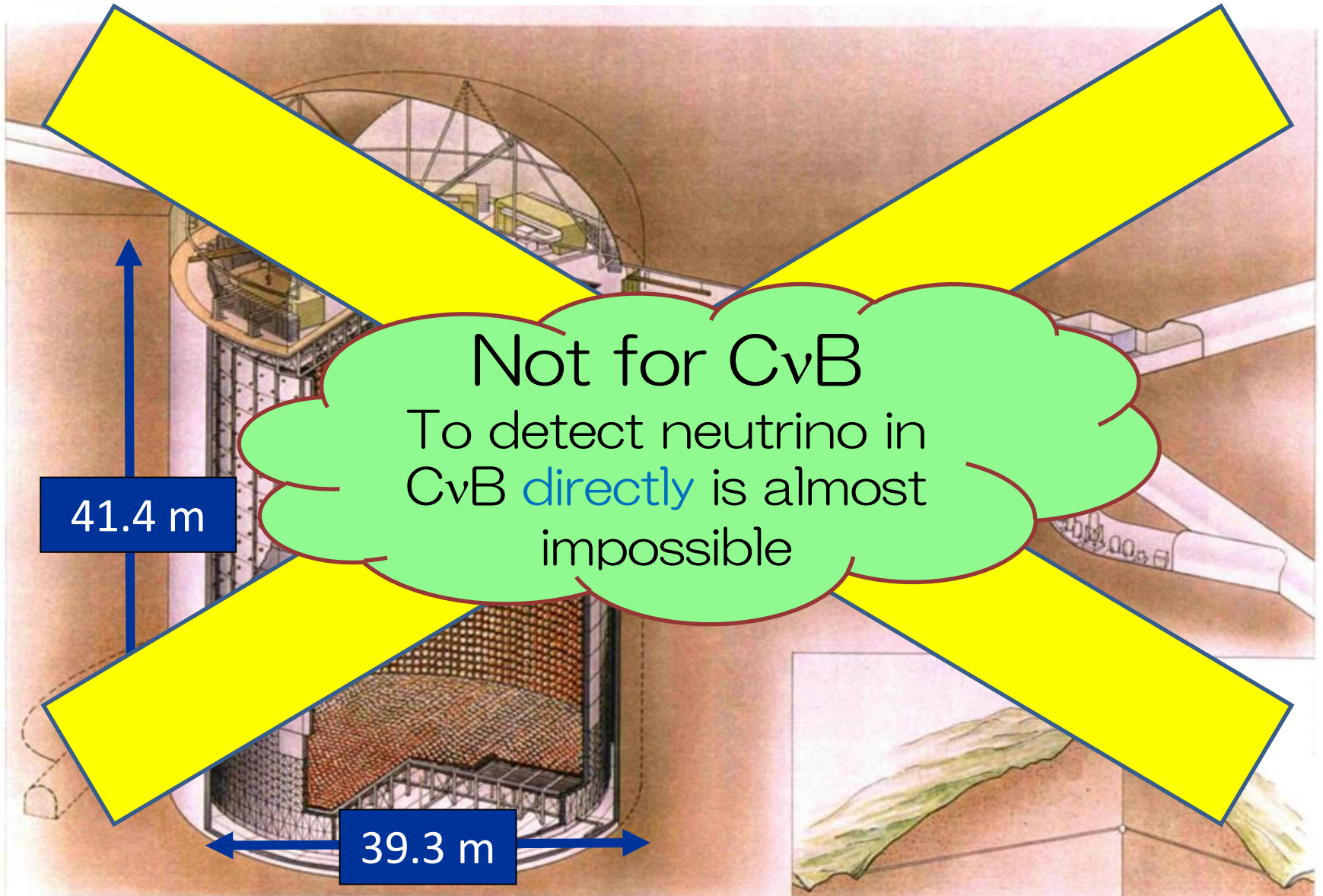
Neutrino flux v.s. energy



Neutrino Detector (Super Kamiokande)



Neutrino Detector (Super Kamiokande)



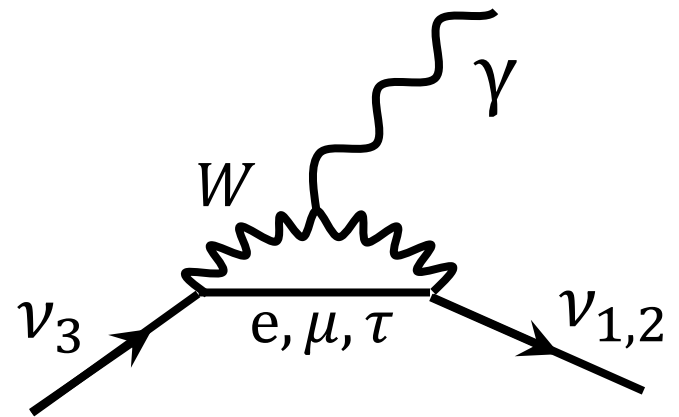
ニュートリノ崩壊

- 重たいニュートリノは，軽いニュートリノへ崩壊可能

$$\square \nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$$

- ✓ 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



標準模型でのニュートリノ崩壊(遷移放射)

振動実験から

$$\Delta m_{12}^2 = 7.65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

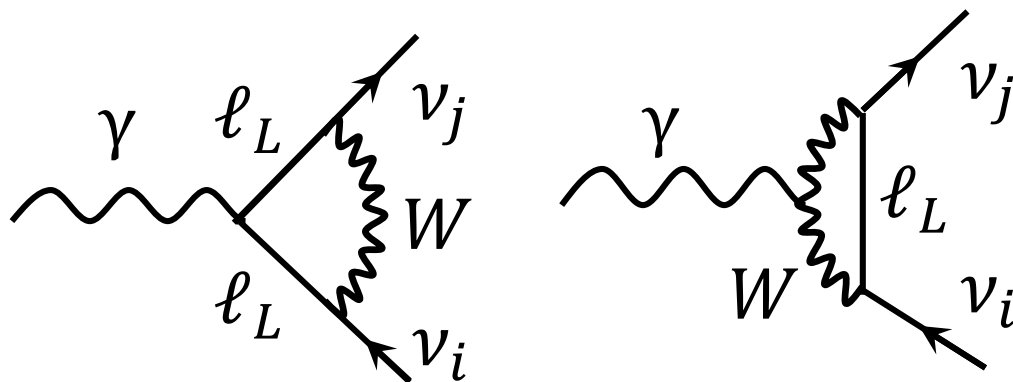
$$|\Delta m_{23}^2| = 2.40 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

もし $m_1^2 \ll m_2^2$ とすると

$$m_2 = 8.7 \text{ meV}$$

$$m_3 = 50 \text{ meV}$$

P.B.Pal and L.Wolfenstein, Phys. Rev.D23, 766-773(1982)



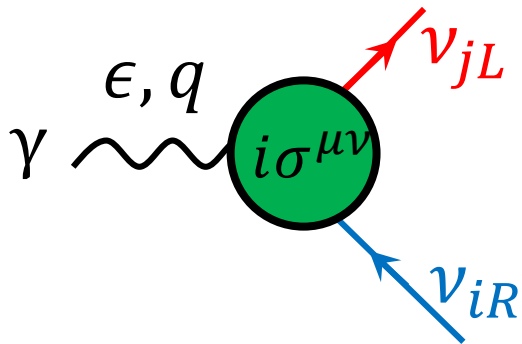
$m_3 = 50 \text{ meV}$ とすると

$$\Gamma_{3 \rightarrow 1,2} \sim (10^{43} \sim 10^{44} \text{ yr})^{-1}$$

標準模型では、ニュートリノの寿命は非常に長い。

cf 宇宙年齢 138 億年 $\sim 10^{10}$ 年

ニュートリノの磁気能率



ベクトル結合項は、ゲージ不変でない ($\epsilon \rightarrow q$ 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

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

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

$\sigma^{\mu\nu}$ 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

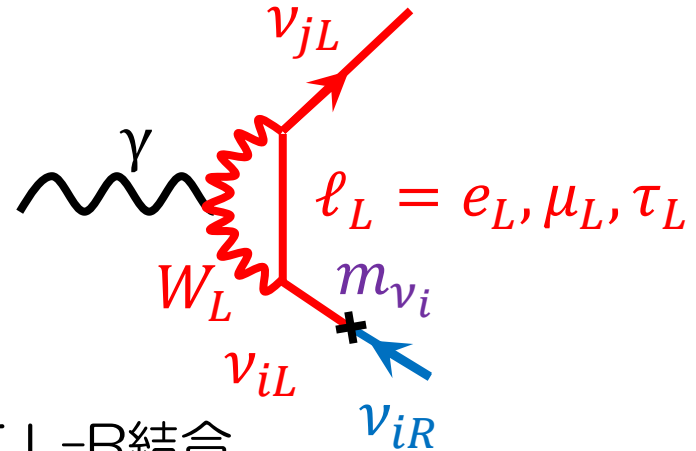
- $\bar{\nu}_{jL} i \sigma^{\mu\nu} q_\nu \nu_{iL}$ や $\bar{\nu}_{jR} i \sigma^{\mu\nu} q_\nu \nu_{iR}$ の項は許されない

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: $SU(2)_L \times U(1)_Y$

標準模型では、Wボソンは、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) 内線を電子, ミュー, タウが寄与し, 打ち消し合う

→ GIM抑制

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

Motivation of ν -decay search in CvB

→ 標準模型を超える物理の寄与がほんの少しでもあれば、劇的に寿命は短くなり得る

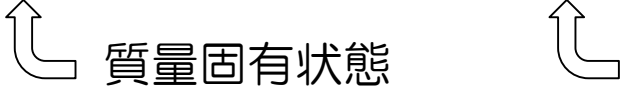
例えば L-R symmetric model では、
Right-handed と couple するボゾン W_R^\pm, Z_R が存在。
ただしすごく重たいので今までの観測にかかっていない。

→ $\tau = O(10^{17} \text{ yrs})$ まで寿命が短くなる可能性あり。

L-R 対称模型

もしRight-handedのinteraction をする W_R が W_L と混合していると

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta \\ \sin\zeta & \cos\zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_L \\ W_R \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} W_L \text{ and } W_R \text{ はそれぞれ L, R と結合する} \\ \zeta \text{ は, 混合角} \end{array}$$



質量固有状態 カイラリティ固有状態

我々が知っている W 粒子は、実は、 W_1 のことで W_2 は非常に重くてまだ見つかっていないだけかもしれない。

- M_{W_2} 無限大で $\zeta = 0$ で標準模型と一致。
- 現在の測定下限値 $M_{W_2} > 1.8 \text{ TeV}/c^2$, $\zeta < 0.013$

ATLAS:EPJ C72(2012)2056

$M_{W_2} = 1 \text{ TeV}$, $\zeta = 0.02$ というシナリオは十分あり得る

L-R 対称模型でのニュートリノ崩壊(磁気能率)

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 × SU(2)_R × U(1)模型で計算

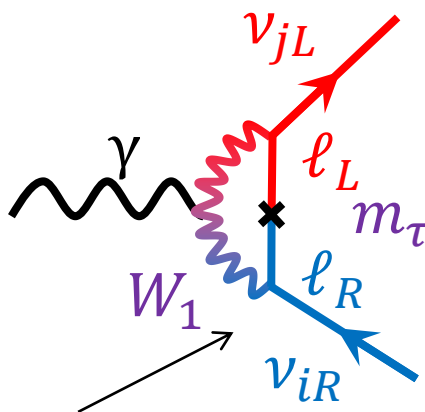
WがRight handと結合できるので、内線の荷電レプトン質量項を通じてL-R結合

→ m_ν の抑制がない

ほぼタウのダイアグラムのみが寄与する

→ GIM抑制がない

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

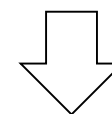


$\zeta \sim 0.02$ による抑制のみ

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

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

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



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

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

10^{26} の増幅

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索のMotivation

- 標準模型での寿命予想 $\tau = 0(10^{43}\text{yrs})$
- 現在の実験的寿命下限値 $\tau > 0(10^{12}\text{yrs})$
S.Kim et al.,JPSJ 81 (2012) 024101
- $\tau > 0(10^{12}\text{yrs})$ は、全く手が付けられていない未踏の領域
→何があっても全然不思議ではない

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 $10^{12}\text{yrs} < \tau(\nu_3) \ll 10^{43}\text{yrs}$ 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!!! ← $m_3 = (m_3^2 - m_{1,2}^2)/2E_\nu$

ニュートリノ質量と崩壊光子エネルギーとの関係



- 振動実験から

- $|\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

- $\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

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

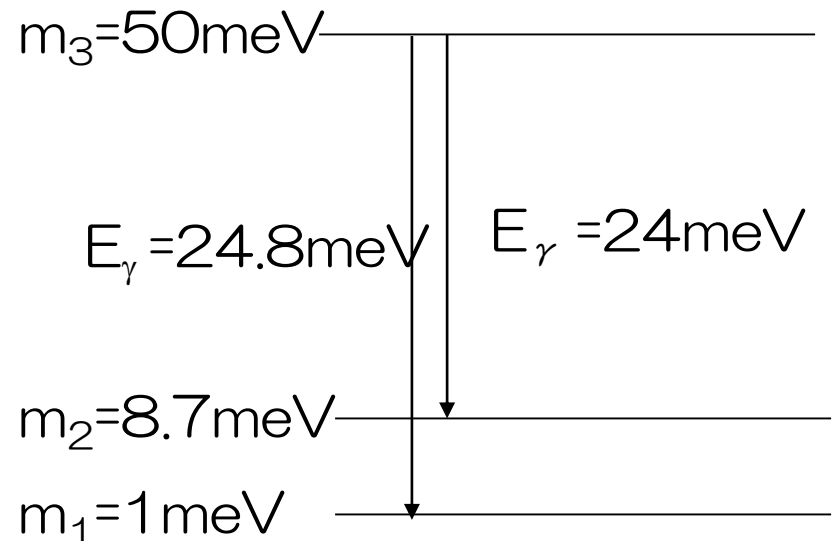
- CMBの揺らぎ(Plank+WP+highL) とバリオン音響振動(BAO)から

- $\sum m_i < 0.23 \text{ eV}$

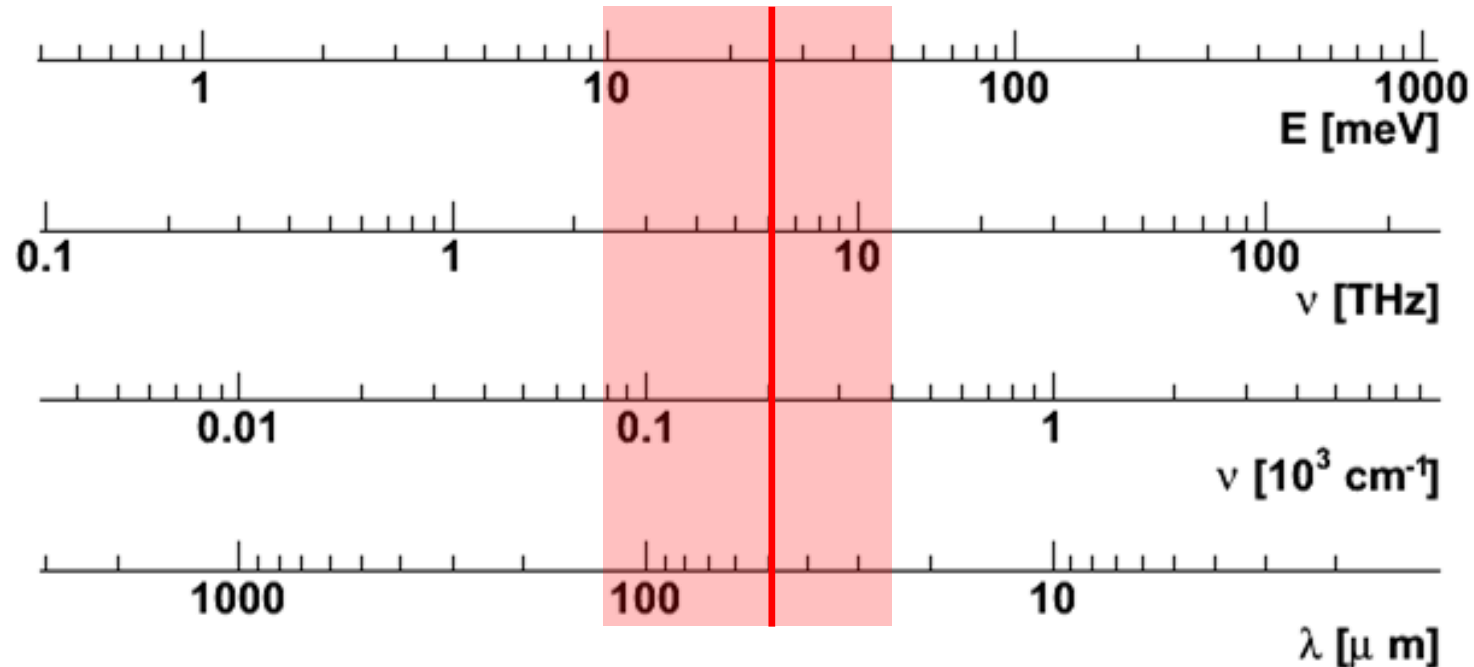
→ $50 \text{ meV} < m_3 < 87 \text{ meV}$

$E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$

$\lambda_\gamma = 51 \sim 89 \mu\text{m}$



Energy/Wavelength/Wavenumber

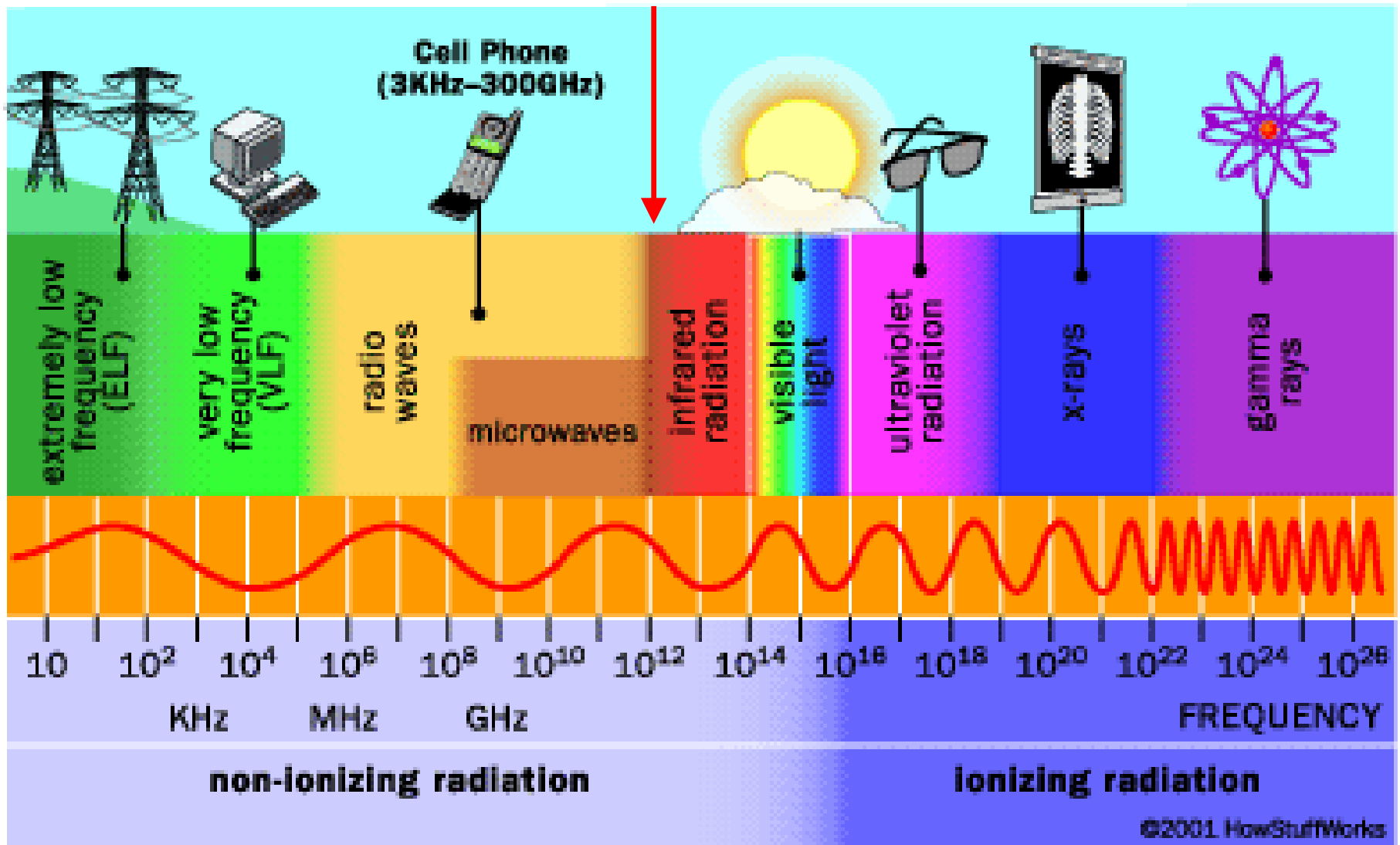


$$E_\gamma = 25 \text{ meV}$$

$$\nu = 6 \text{ THz} \quad E_\gamma = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = 50 \mu\text{m}$$

$$\lambda = 50\mu m$$

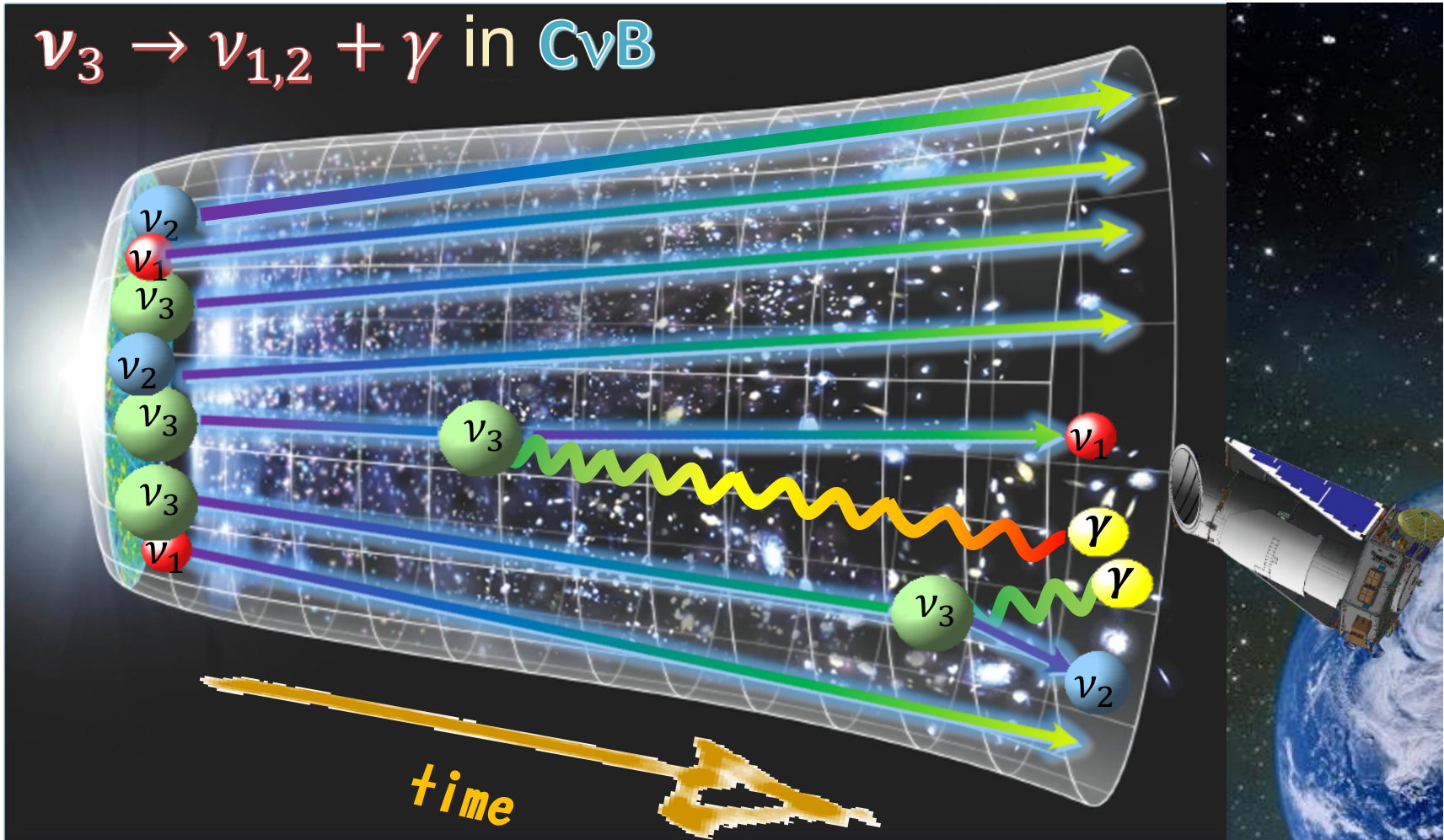


COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)



Search for **Neutrino decay** in **Cosmic background neutrino**

→ To be observed as photons in neutrino decays



ニュートリノ崩壊探索実験

COBAND (COsmic BAcground Neutrino Decay) Collaboration Members (2019年11月)

金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, (武政健一), 浅野千紗, (若狭玲那, 笠島誠嘉, 中
原瑛依子, 前川群, 山根 綾太, (大塚洋一) (筑波大学)

松浦周二 (関西学院大学),

池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS),

吉田拓生, 鈴木健吾, 竹下勉, 浅胡武志(福井大学),

石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学),

美馬覚 (理化学研究所), 木内健司(東京大学),

加藤幸弘 (近畿大学),

羽澄昌史, 新井康夫, 倉知郁生 (高エネルギー加速器研究機構),

浮辺雅宏, 志岐成友, 藤井剛, 大久保雅隆 (産業技術総合研究所),

川人祥二 (静岡大学)

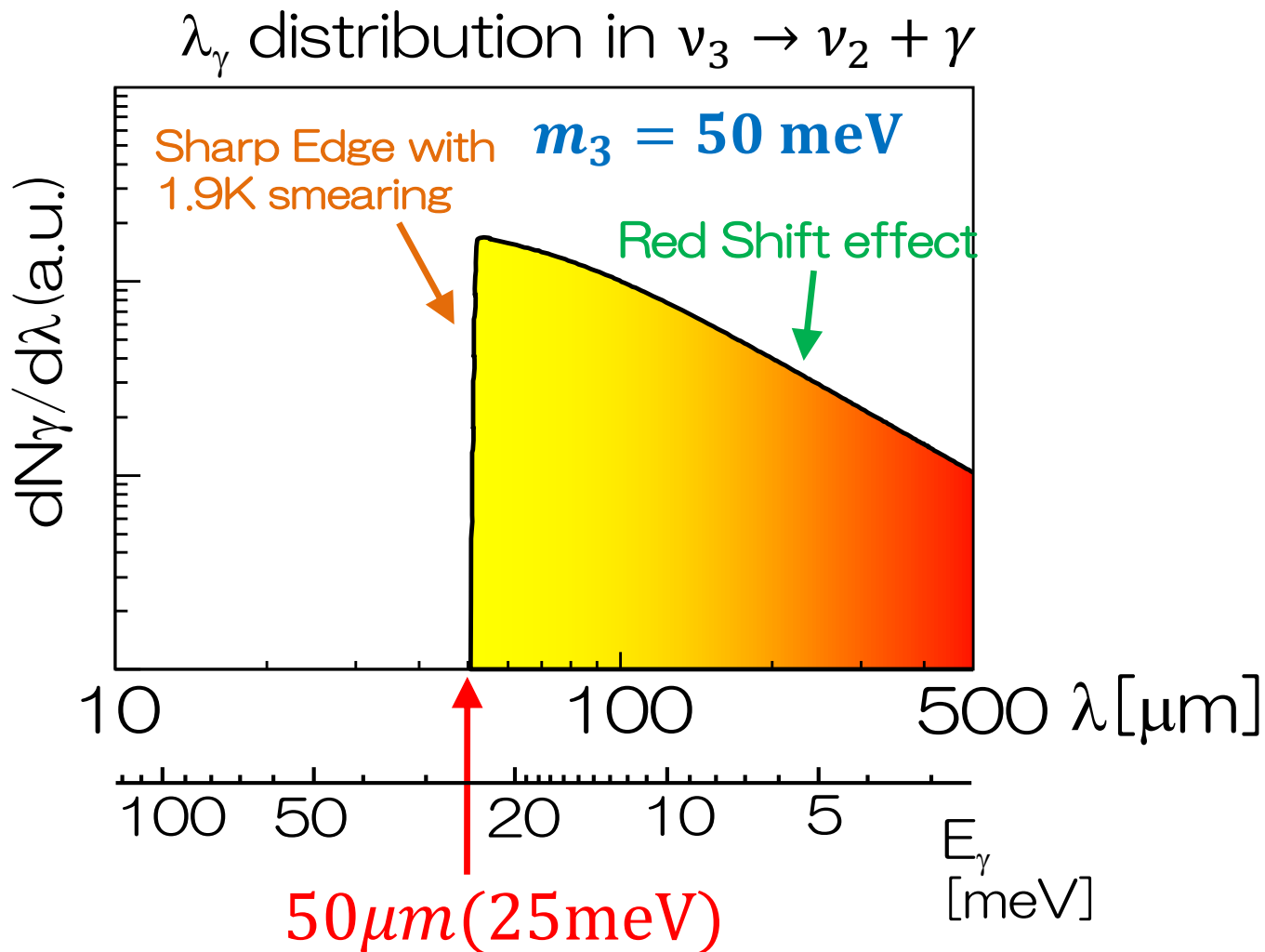
Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab),

Soo-Bong Kim (Seoul National University) ,

Yong-Hamb Kim, Hyejin Lee (IBS/Center for Underground Physics)



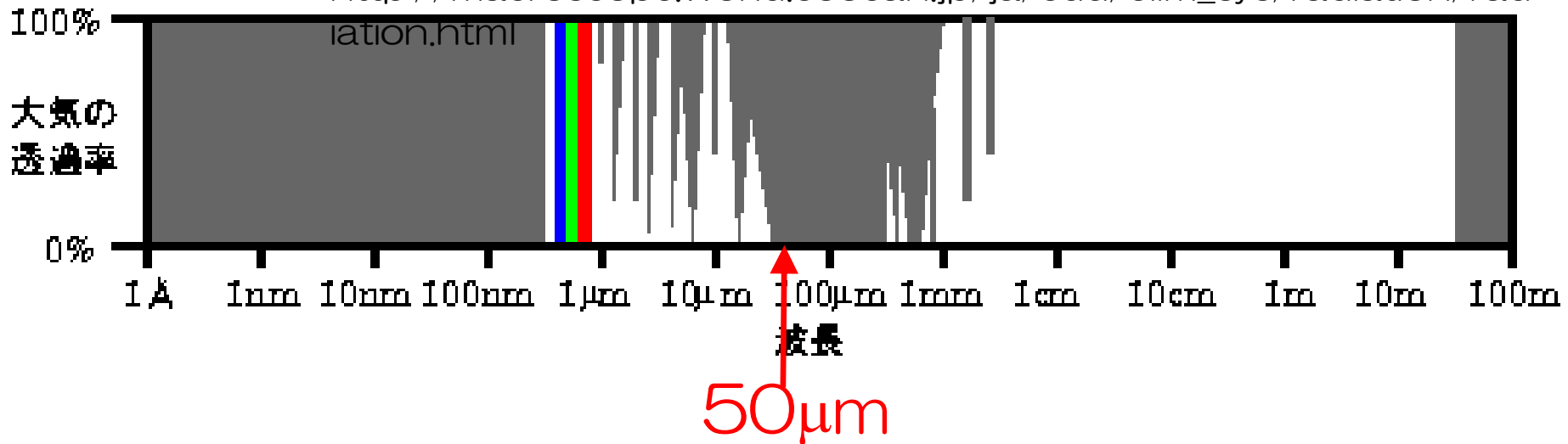
期待される宇宙背景ニュートリノの崩壊光の波長分布



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

地上で50 μm 光は観測可能か？

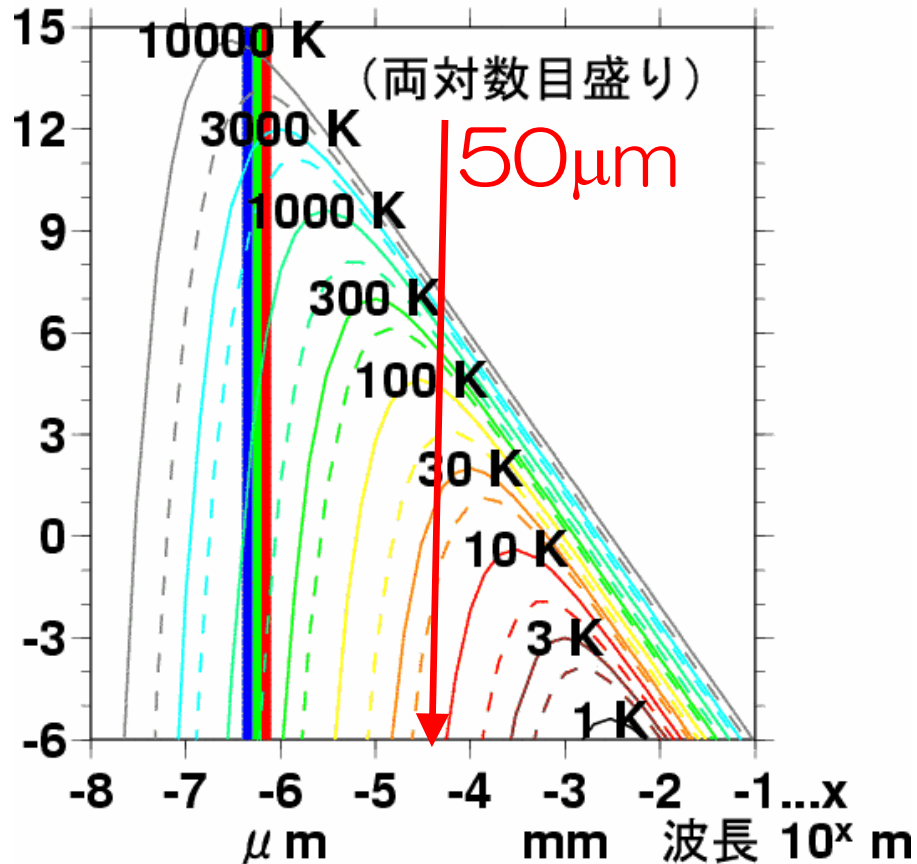
http://macroscope.world.coocan.jp/ja/edu/clim_sys/radiation/radiation.html



- 大気は，50 μm を透過しない。

地上で50 μm 光は観測可能か？

http://macroscope.world.coocan.jp/ja/edu/clim_sys/radiation/radiation.html



- 地上付近の熱を持ったあらゆる物体から50 μm が放射
→ 大気圏外での観測が必須

黄道光 (Zodiacal Emission)

- 惑星間ダストによる太陽光の散乱(可視光付近)
 - こちらは問題にならない
- 惑星間ダストからの熱輻射
 - 地球近傍のダストからの輻射が問題

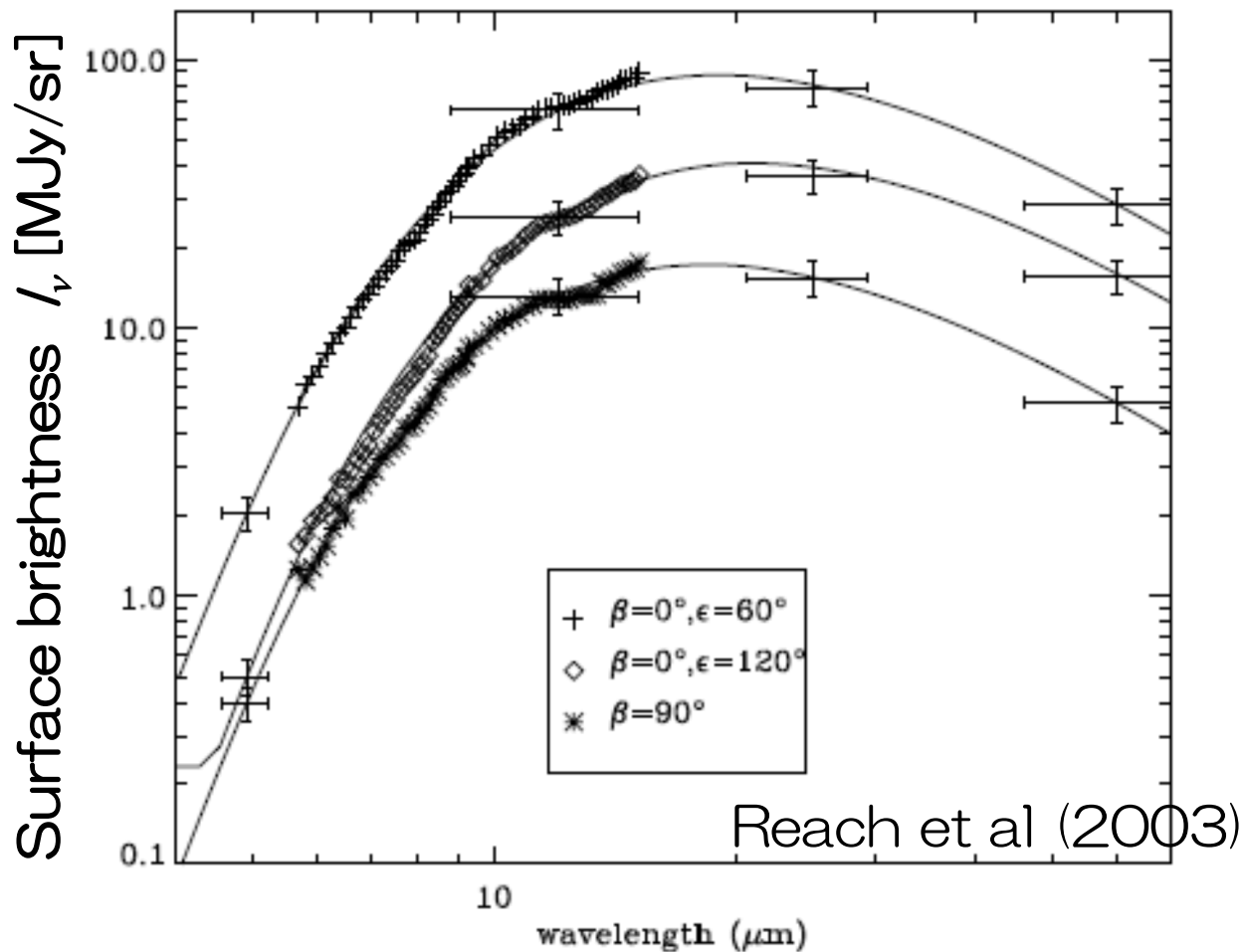


wiki より

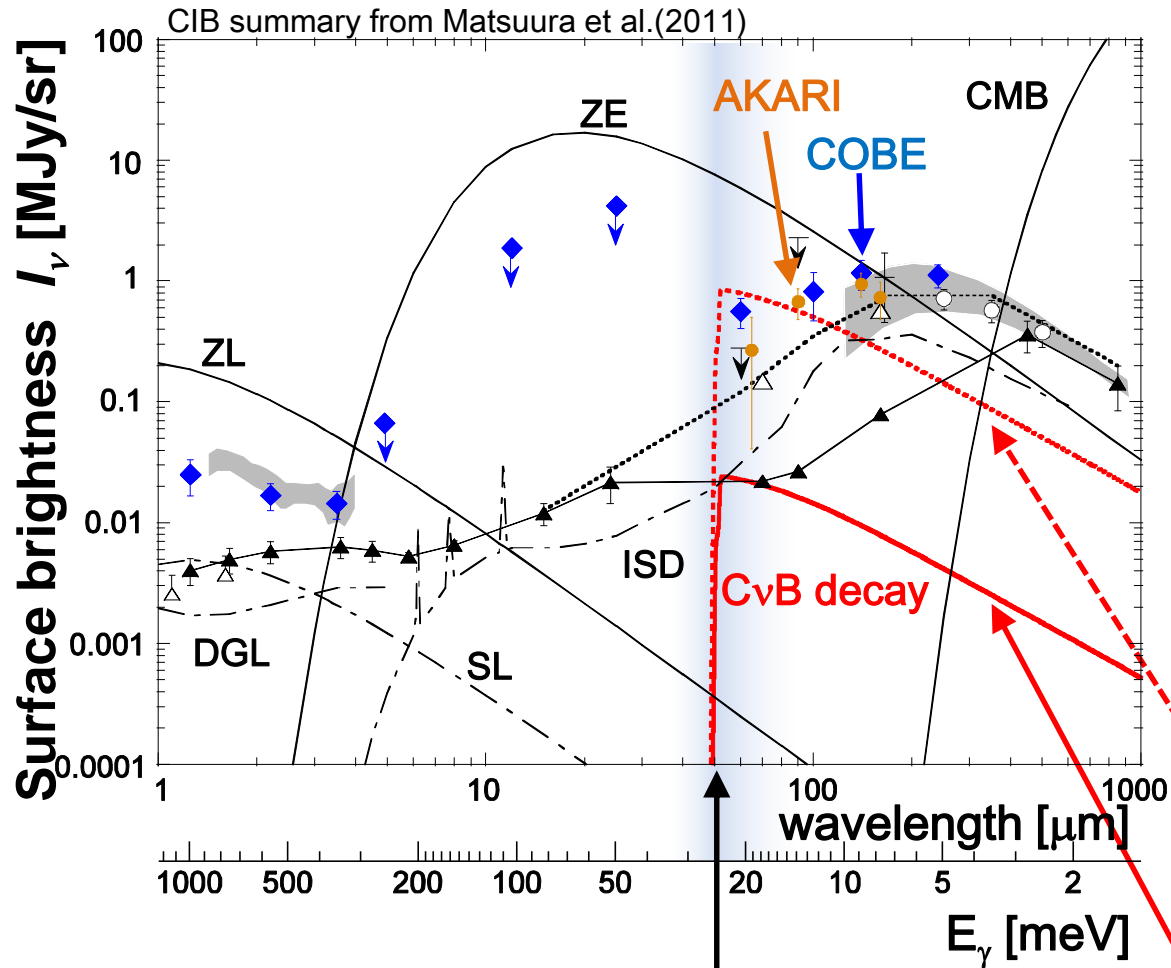
波長50 μm 域の黄道光

Infrared Space Observatory (ISO)

- ISOCAM/LW: 32 \times 32 pixel array of SiGa ($\lambda=5\sim 16\mu\text{m}$)
- 単一温度の黒体放射分布にFit ($T\sim 270\text{K}$)



CνB radiative decay and Backgrounds



at $\lambda = 50\mu\text{m}$

Zodiacal Emission

$$I_\nu \sim 8 \text{ MJy/sr}$$

Cosmic Infrared Background (CIB)

$$I_\nu \sim 0.1\text{-}0.5 \text{ MJy/sr}$$

CνB Decay

Expected E_γ spectrum

$$m_3 = 50\text{meV}$$

$$\tau = 3 \times 10^{12} \text{ yrs}$$

$$I_\nu \sim 0.8 \text{ MJy/sr}$$

Excluded by S.H.Kim et. al 2012

$$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$$

$$I_\nu \sim 25 \text{ kJy/sr}$$

$$\lambda = 50 \mu\text{m}$$

$$E_\gamma = 25 \text{ meV}$$

$$1\text{Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$$

COBAND 実験提案

ニュートリノ寿命測定感度目標

$$\tau(\nu_3) = O(10^{14}) \text{ yrs}$$

■ 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



COBAND 実験の要求する光検出器

- ニュートリノ崩壊を同定するため $\lambda \sim 50\mu\text{m}$ 域スペクトル測定により崩壊光子エネルギー端検出が重要
- 光強度測定の系統誤差 \ll 光子数の統計誤差.



$\lambda \sim 50\mu\text{m}$ ($E=25\text{meV}$) 単一光子検出が可能な性能

- Dark count rate が到達可能な光強度測定の感度を決める

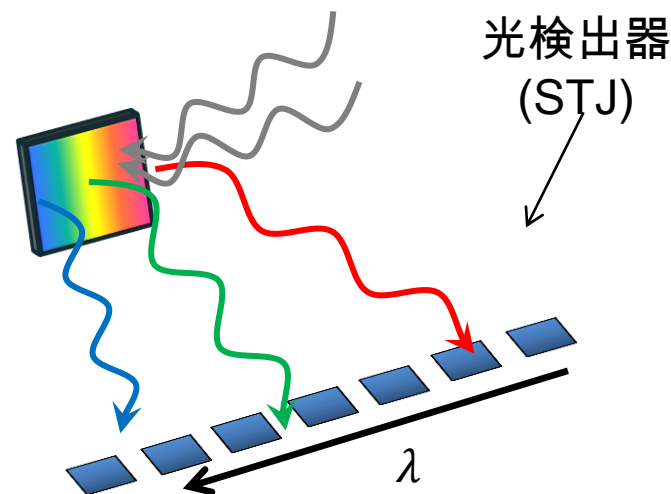
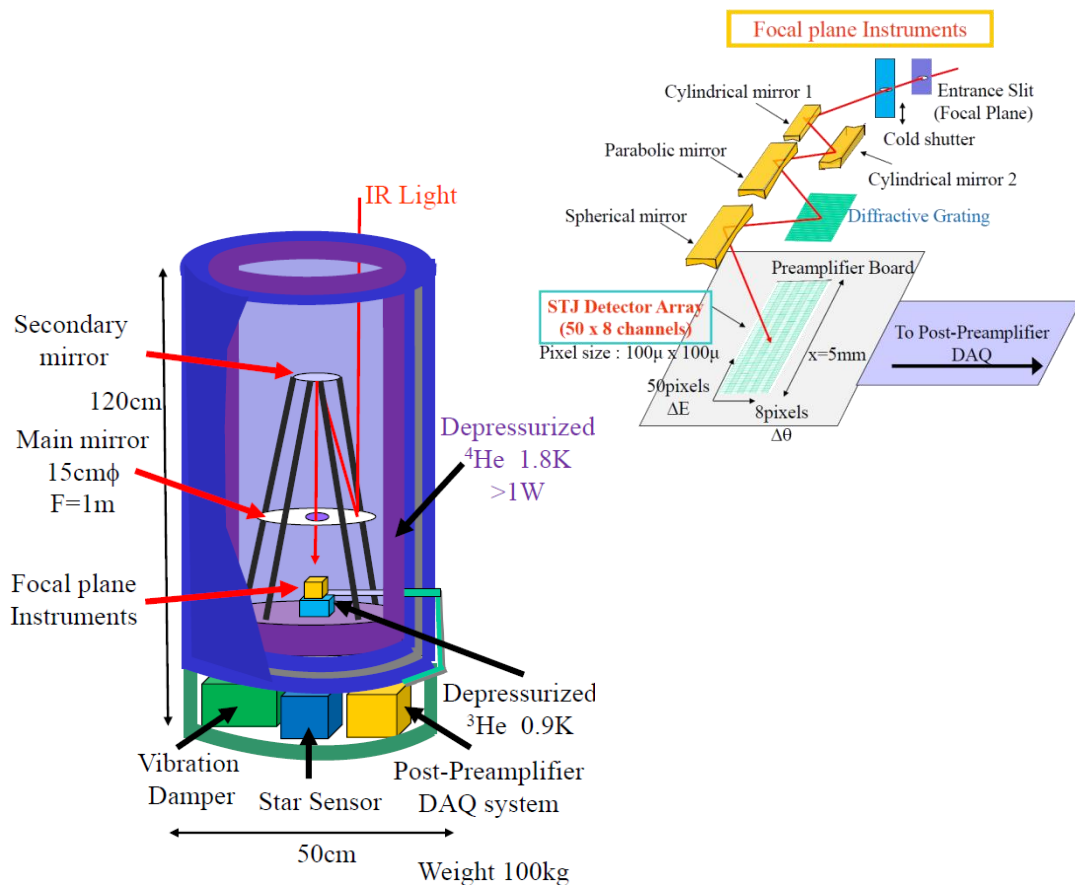


- Superconducting Tunnel Junction (STJ) sensor
- Cryogenic amplifier readout

COBAND口ケット実験 デザイン

■ 焦点位置に $\lambda=40-80\mu\text{m}$ (16-31meV) をカバーする回折格子と 50(波長方向) ピクセル配列の遠赤外光検出器(STJ)

- 各々のピクセルで波長ごと($\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$)の**光子計数**
- 1ピクセル当たりの受光面積は $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ (視野角 $400\mu\text{rad} \times 400\mu\text{rad}$)



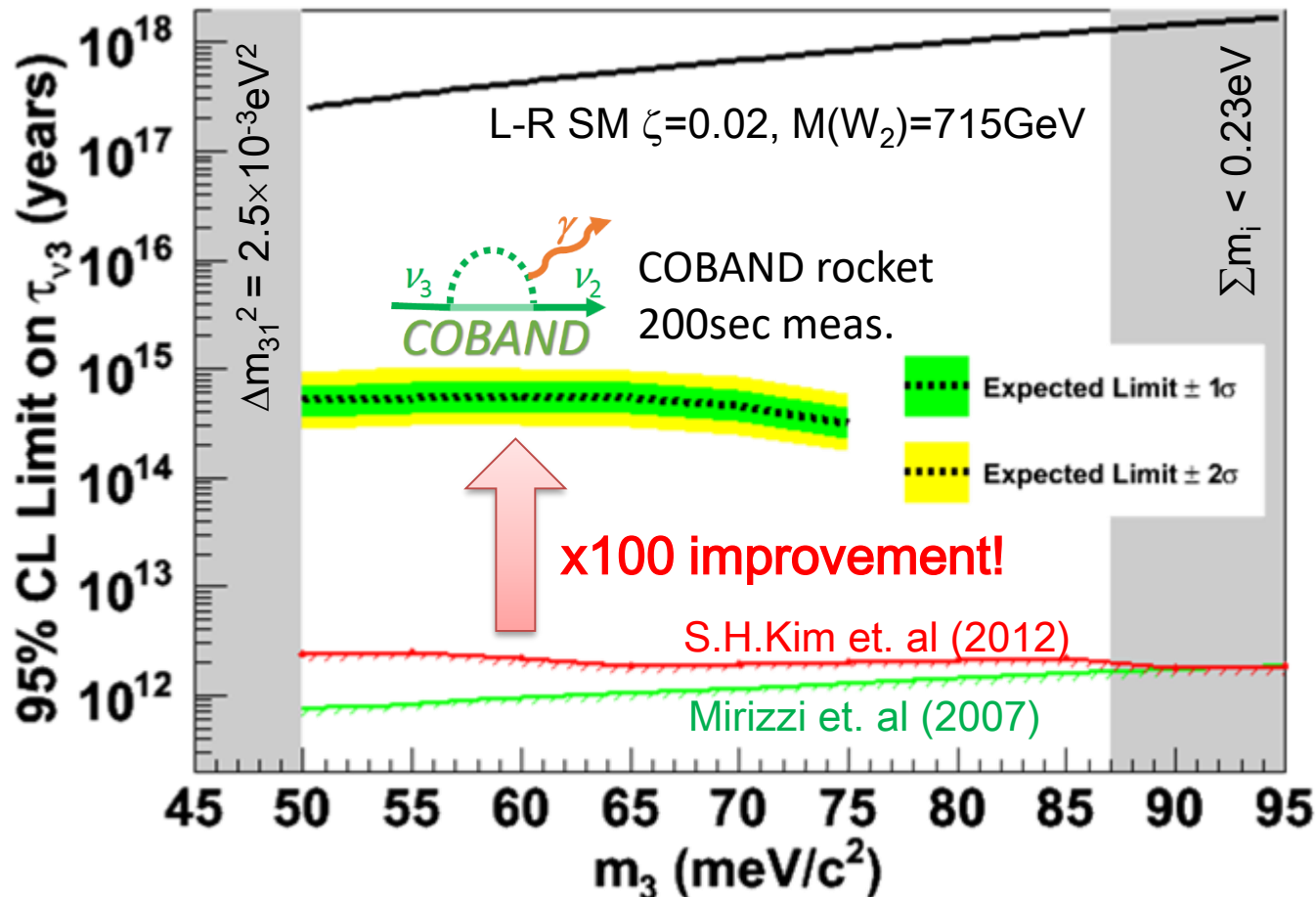
50 columns

$$\lambda = 40 - 80\mu\text{m}$$

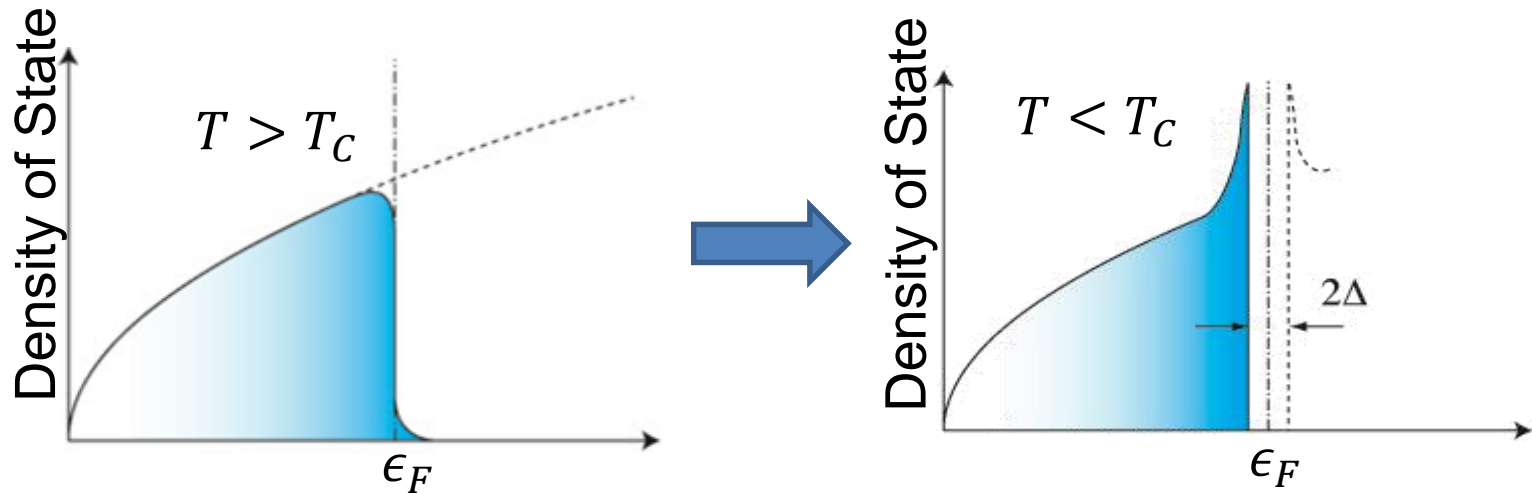
$$E_\gamma = 16 \sim 31\text{meV}$$

COBAND rocket experiment sensitivity

- 200-sec measurements with a sounding rocket
- 20cm dia. and 80cm focal length telescope and grating in 40~80 μm range
- Each pixel in 400 μm ×400 μm ×50pix. array **counts number of photons** with detection efficiency of 22%



超伝導エネルギーギャップ



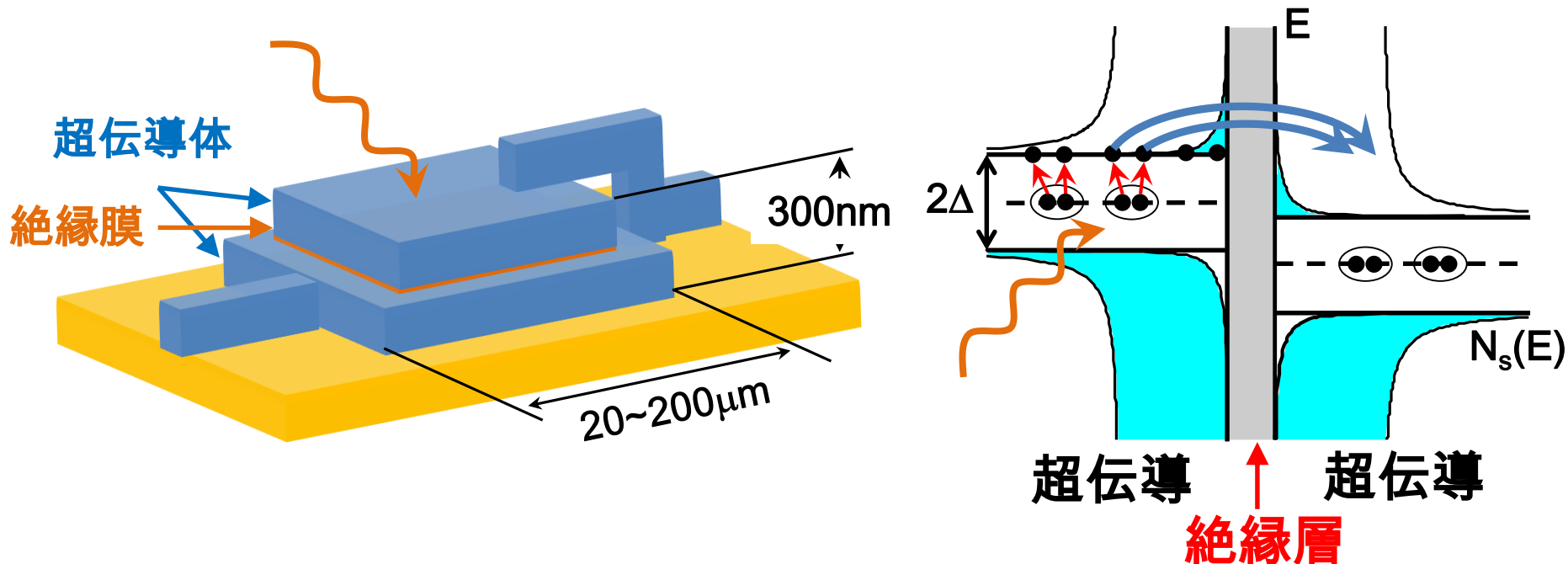
超伝導状態では，フェルミ準位 ϵ_F の付近の準位の電子二個が 2Δ の束縛エネルギーにより，Cooper 対を形成 \rightarrow エネルギー準位にギャップが生じる

	Si	Nb	Ta	Al	Hf
Tc[K]		9.23	4.48	1.20	0.165
Δ [meV]	1100	1.550	0.7	0.172	0.020

$$\Delta \sim 1.8k_B T_C \text{ (BCS theory)}$$

超伝導トンネル接合素子 Superconducting Tunnel Junction (STJ)

超伝導体/絶縁層/超伝導体の構造 (ジョセフソン接合)



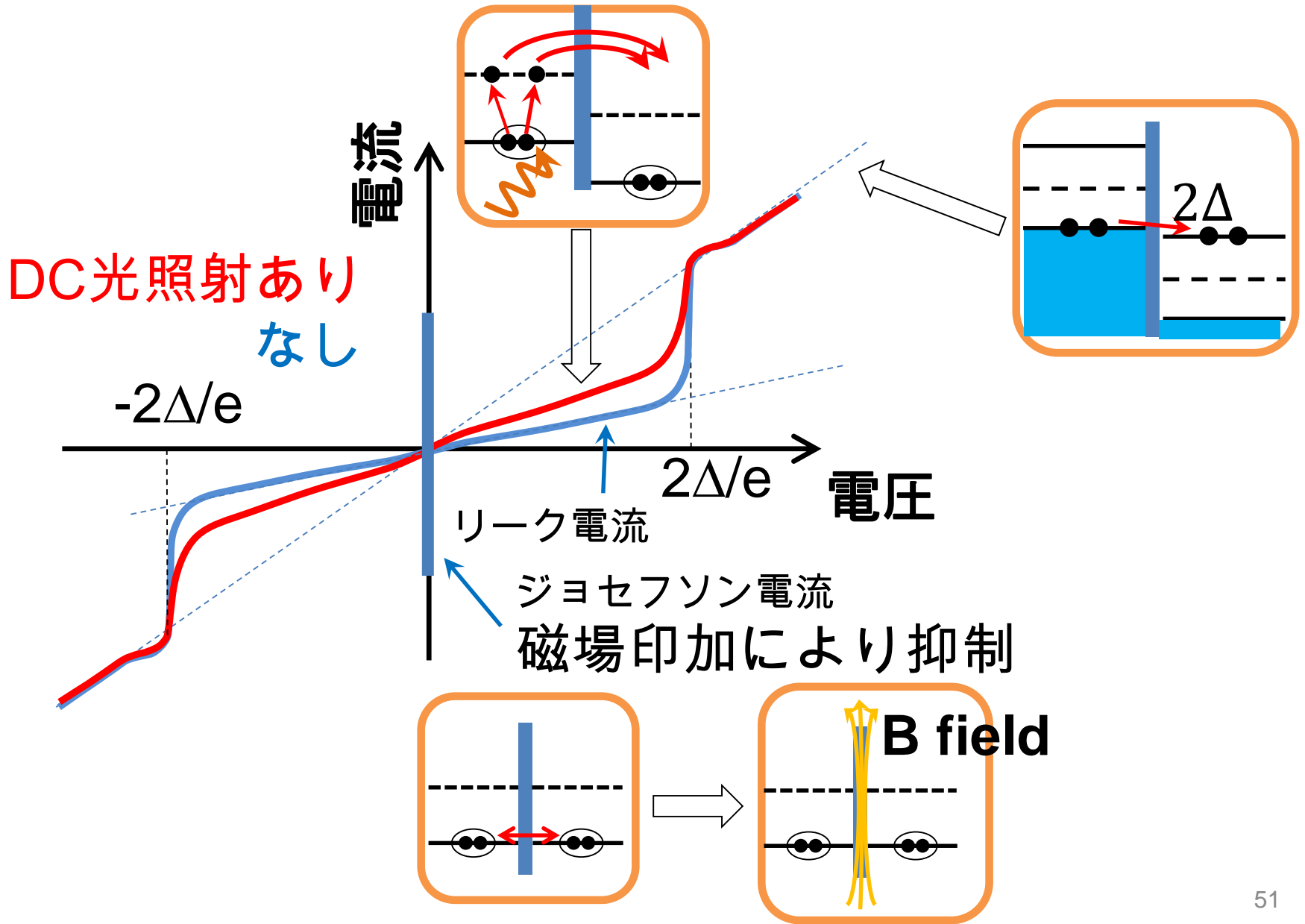
接合面を挟んで電位差 ($|V| < 2\Delta/e$) を印加

超伝導体に吸収された光子のエネルギーにより複数のクーパ対が解離(励起)し、生成された準粒子によって、エネルギーに比例したトンネル電流が発生。

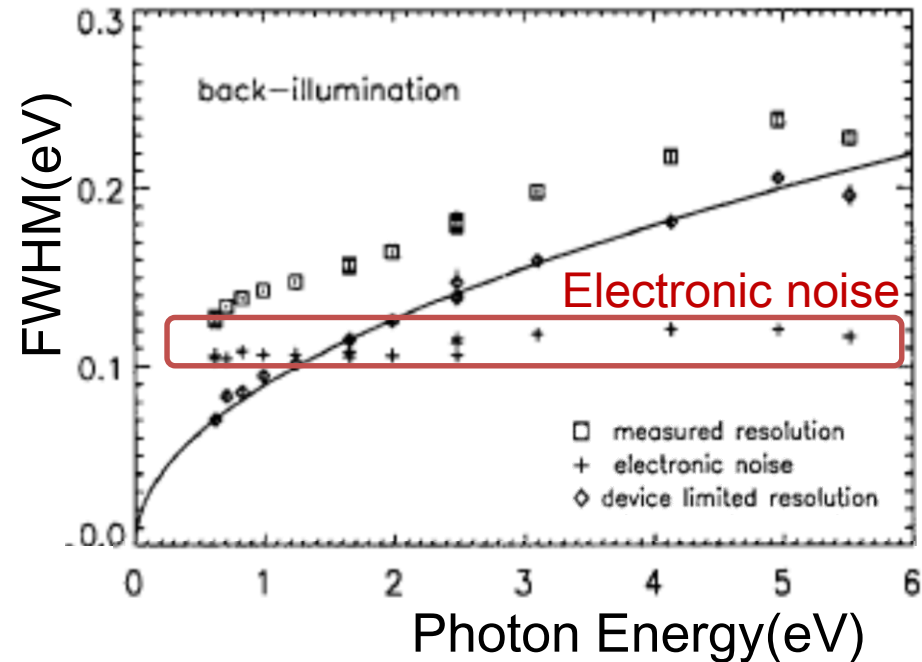
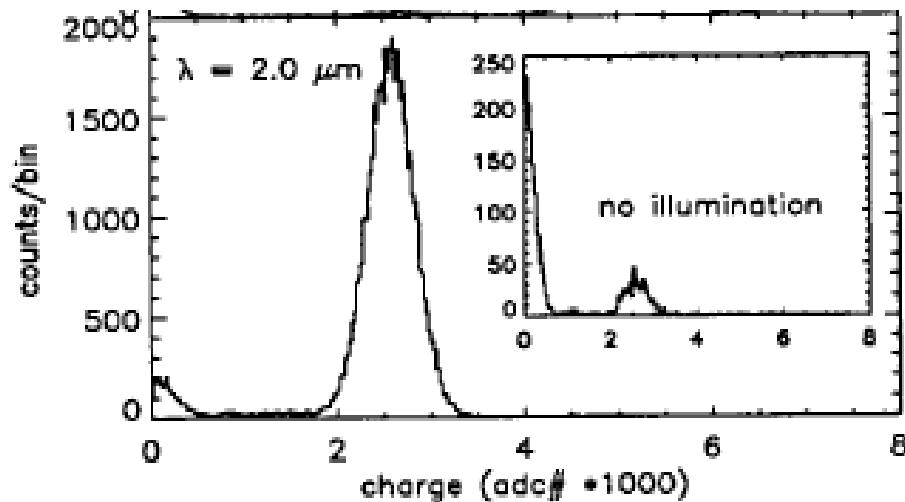
Δ : 超伝導ギャップエネルギー

- 超伝導ギャップ(Δ)は遠赤外光子のエネルギーよりもずっと小さい($\Delta < 1\text{meV}$)
→ 原理的には、遠赤外域一光子を検出可能
- $1\mu\text{s}$ 程度の比較的高速なパルス応答(Nbの場合)
→ 光子計数することでS/Nの著しい向上が期待

STJ I-V 特性



STJ energy resolution for near infrared photon



P. Verhoeve et. al 1997

- 30 μm sq. Ta/Al-STJ
- $\Delta E \sim 130 \text{meV}$ @ $E = 620 \text{meV}$ ($\lambda = 2 \mu\text{m}$)
- Charge sensitive amplifier **at room temp.**
 - **Electronic noise $\sim 100 \text{meV}$**

In sub-eV \sim several-eV region, STJ gives the best energy resolution among superconductor based detectors, **but limited by readout electronic noise.**

STJの候補

	Si	Nb	Al	Hf
Tc[K]		9.23	1.20	0.165
Δ [meV]	1100	1.550	0.172	0.020

Nb/Al-STJ

- 最もよく使われていて，製法も確立
 - Al層を入れることにより，近接効果で $\Delta \sim 0.6\text{meV}$
 - 実用運転の温度 $< 400\text{mK}$
 - バックトンネルゲイン ~ 10
 - $N_{\text{q.p.}} = 25\text{meV}/1.7\Delta \times 10 \sim 250$ $\sigma_E/E \sim 10\%$ for $E = 25\text{meV}$
- 25meV の一光子検出も原理的には可能．分光光学系と組み合わせ
→ ロケット実験に使う光検出器候補

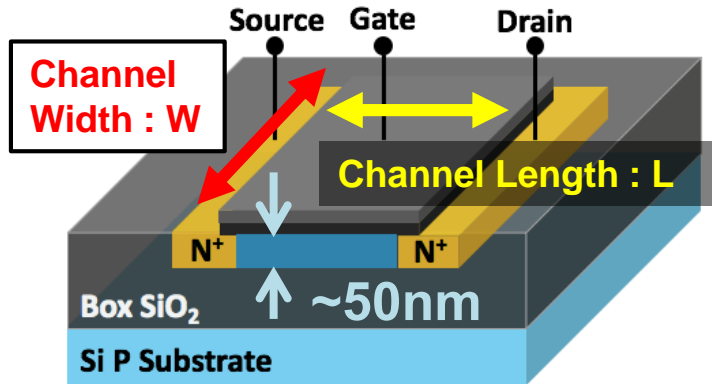
極低温増幅器による冷凍機内信号読出しにより
25meV単一光子検出へのブレークスルーを目指す．

Hf-STJ

- 我々を含め世界中のいくつかのグループが開発中または開発を試みたが，まだ実用段階のものがない
 - $N_{\text{q.p.}} = 25\text{meV}/1.7\Delta \sim 735$
 - 25meV の一光子に対して2% のエネルギー分解能
- 分光光学系なしでエネルギー分布測定可能
→ 将来の衛星実験に使う光検出器候補

FD-SOI-MOSFET at cryogenic temperature

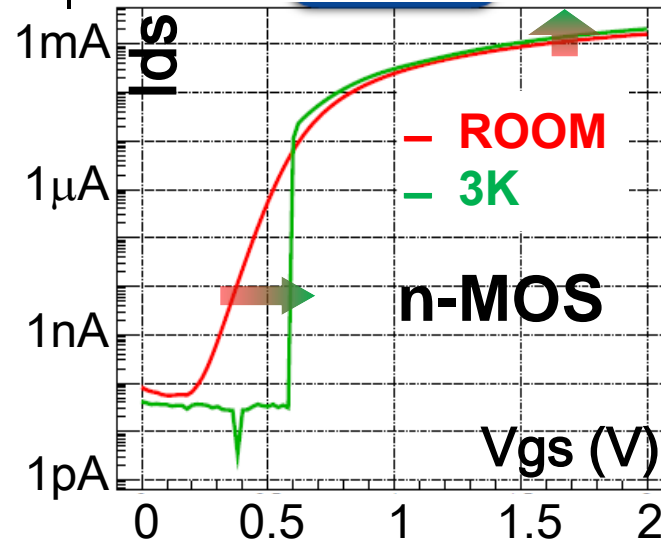
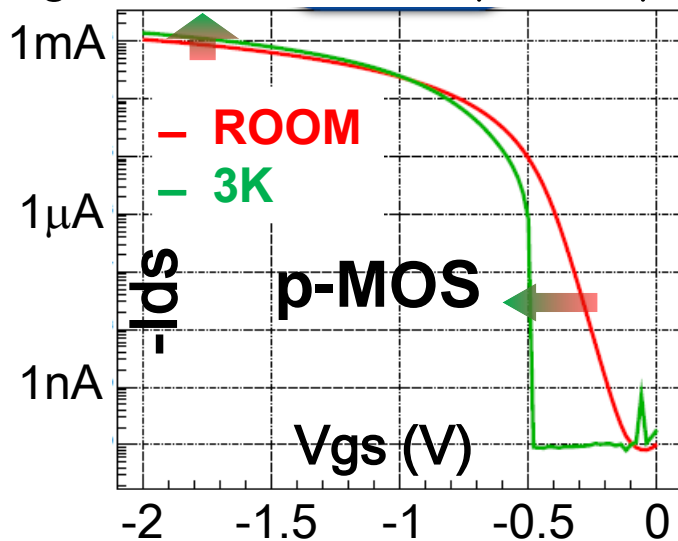
FD-SOI : **F**ully **D**epleted – **S**ilicon **O**n **I**nsulator



- Very thin channel layer in MOSFET on SiO₂
- No floating body effect caused by charge accumulation in the body
- FD-SOI-MOSFET is reported to work at 4K

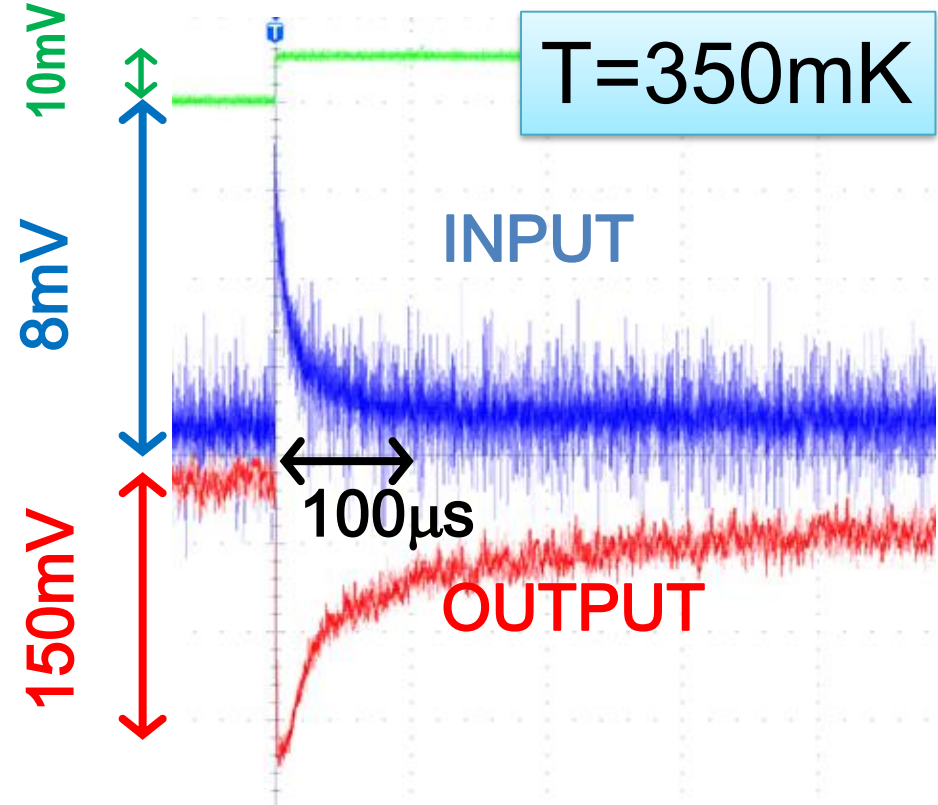
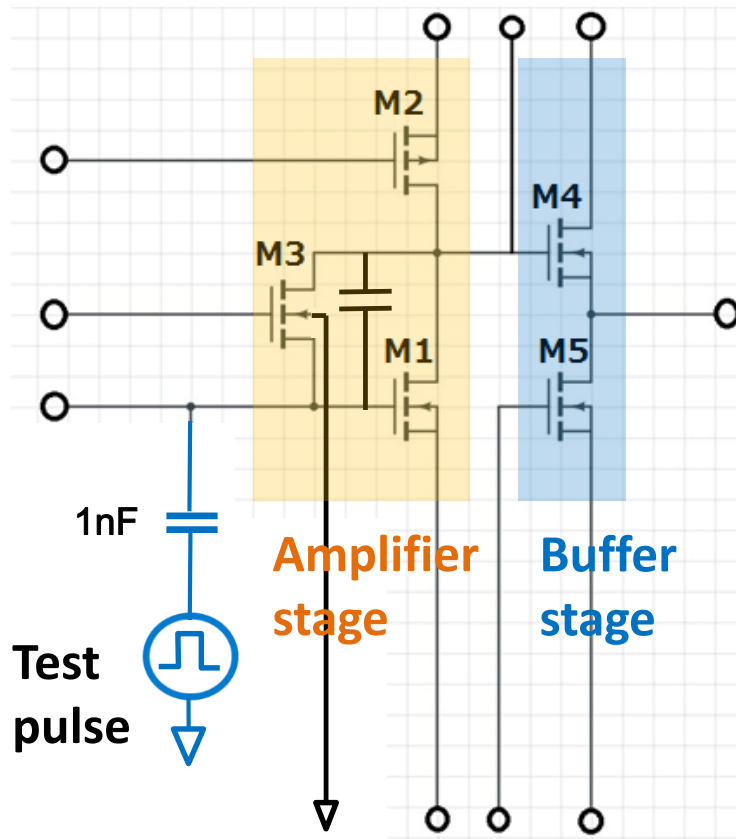
JAXA/ISIS AIPC 1185,286-289(2009)
J Low Temp Phys 167, 602 (2012)

I_d - V_g curve of $W/L=10\mu\text{m}/0.4\mu\text{m}$ at $|V_{ds}|=1.8\text{V}$



Both p-MOS and n-MOS show excellent performance at 3K and below.

SOI prototype amplifier for demonstration test

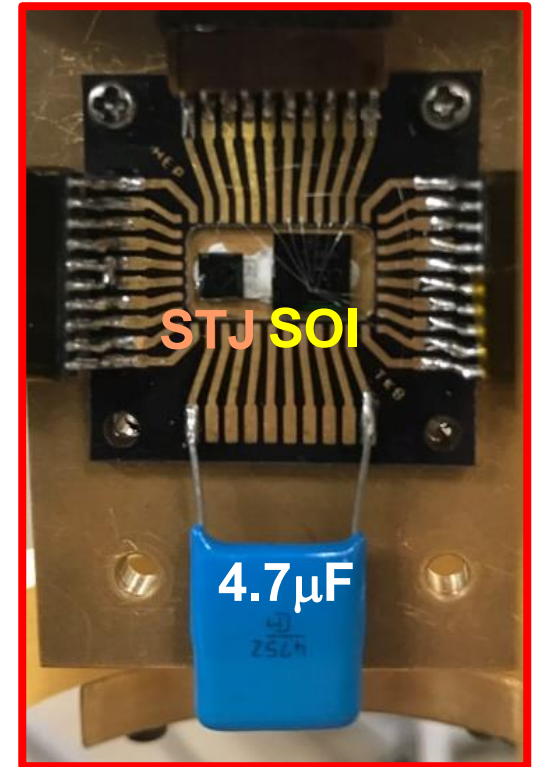
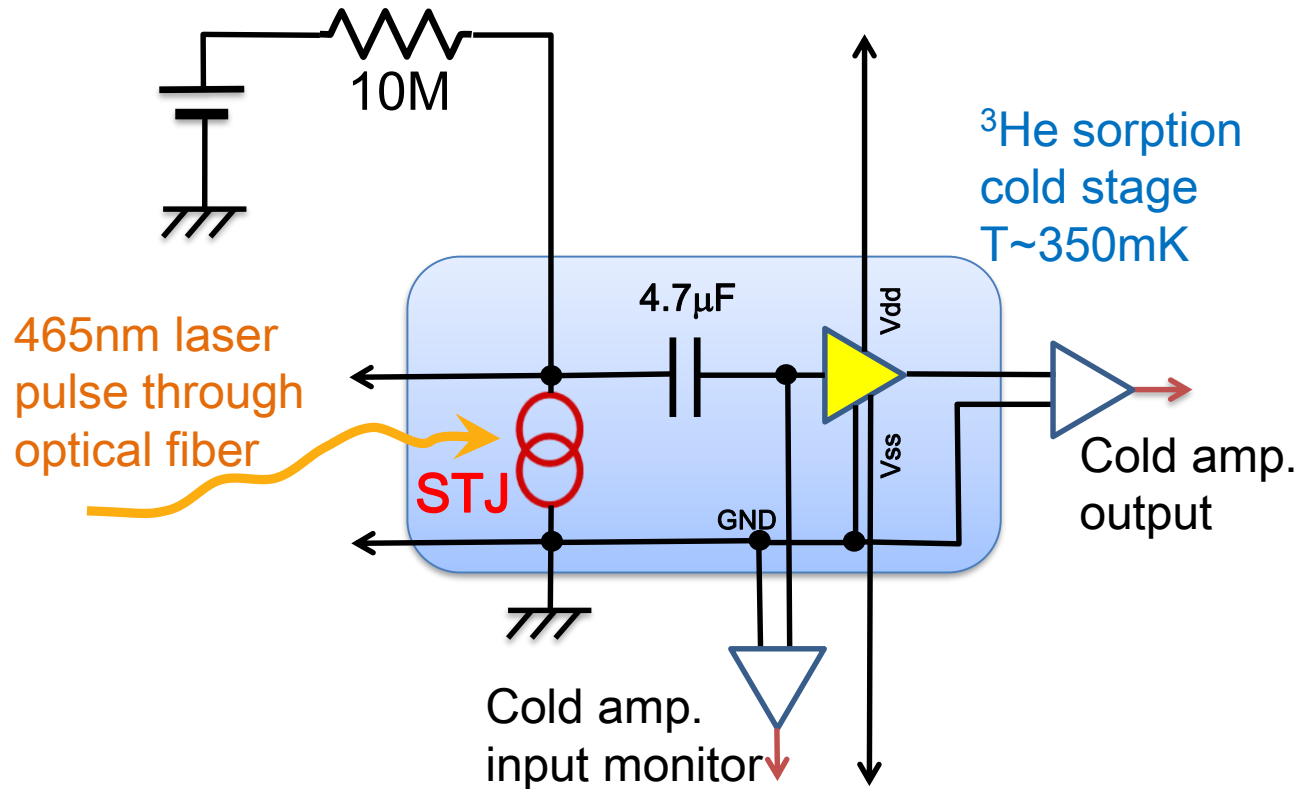


Test pulse input through $C=1\text{nF}$ at $T=3\text{K}$ and 350mK

- Power consumption: $\sim 100\mu\text{W}$
- Output load: $1\text{M}\Omega$ and $\sim 0.5\text{nF}$

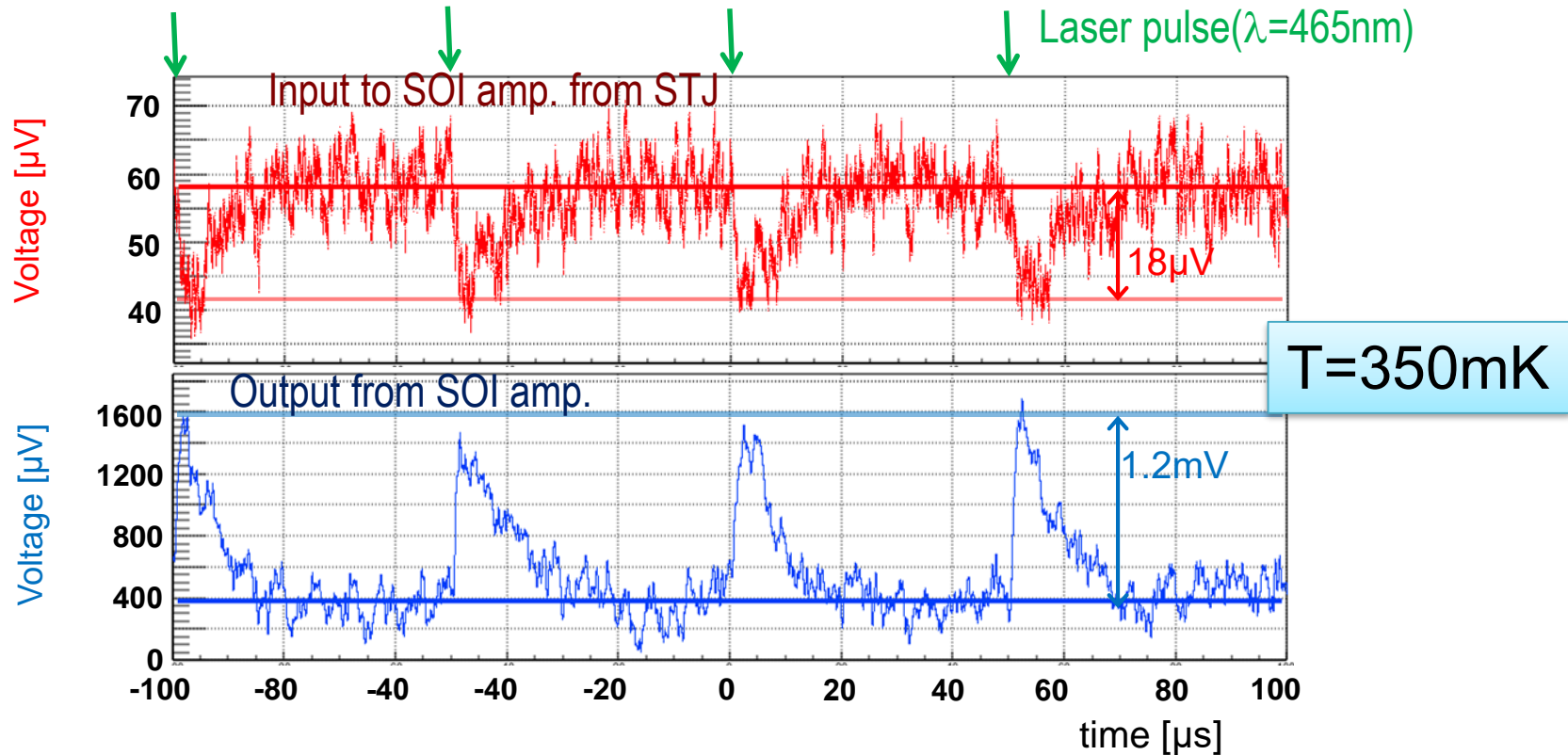
We can compensate the effect of shifts in the thresholds by adjusting bias voltages.

STJ response to laser pulse amplified by Cold amplifier



Connect 20 μm sq. Nb/Al-STJ and SOI amplifier on the cold stage through a capacitance

STJ response to laser pulse amplified by Cold amplifier



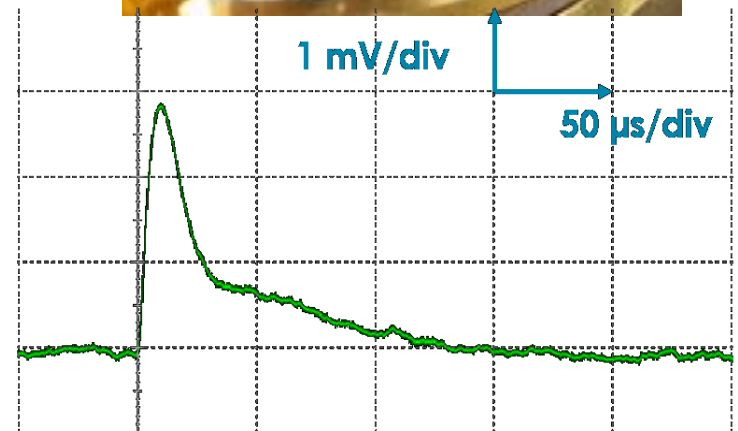
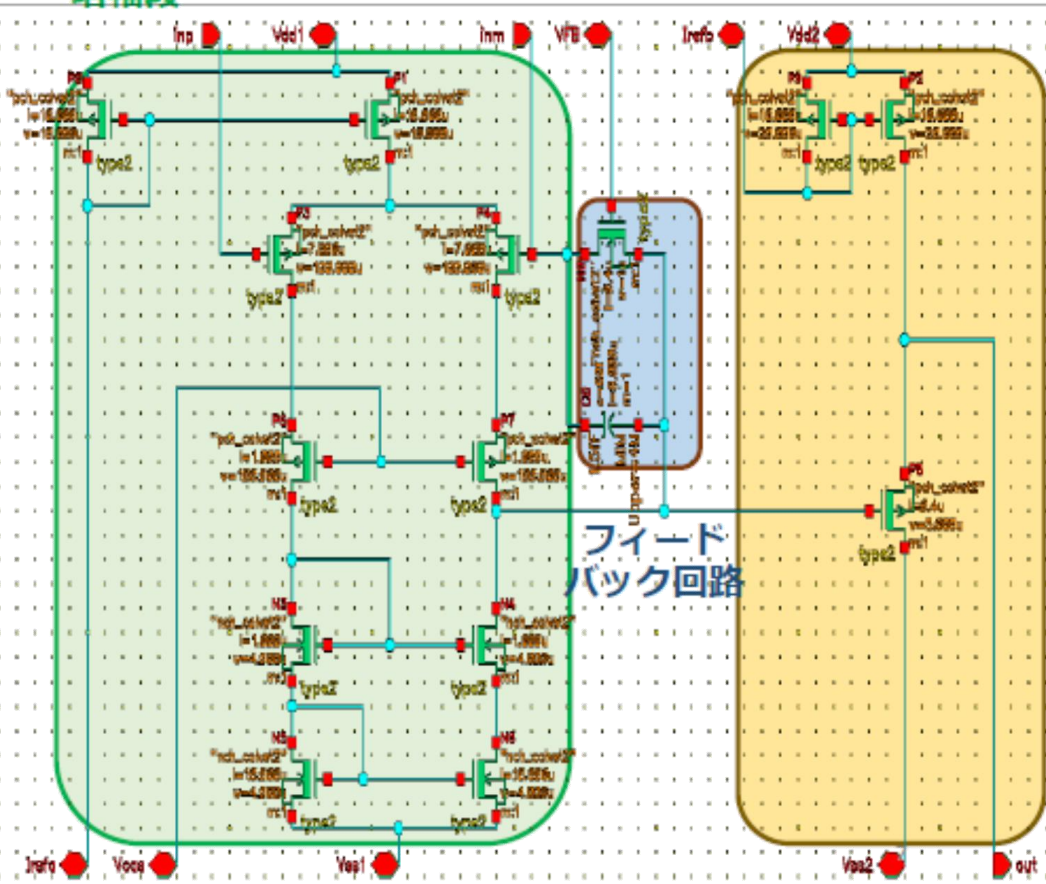
Demonstrated to show amplification of Nb/Al-STJ response to laser pulse by SOI amplifier situated close to STJ at $T=350\text{mK}$

Development of SOI cryogenic amplifier for STJ signal readout is now moving to the stage of design for practical usage!

電荷積分型増幅器の製作と評価

増幅段

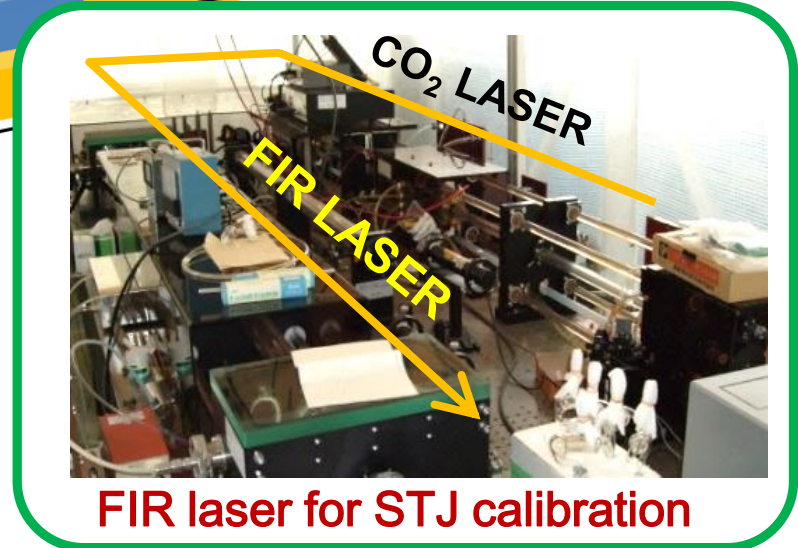
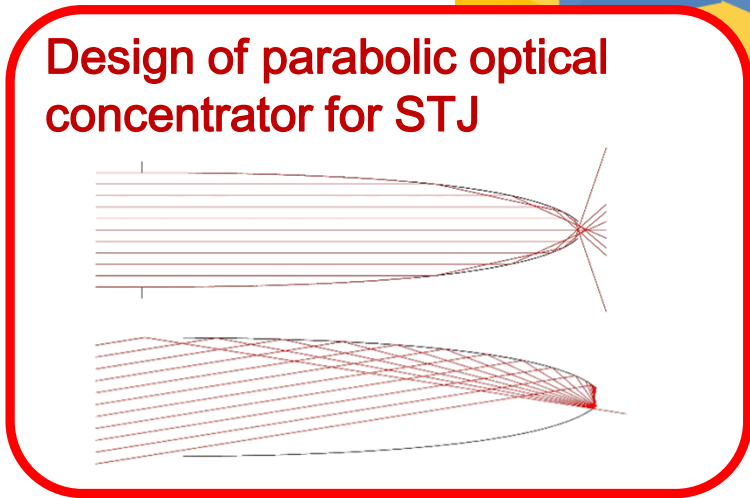
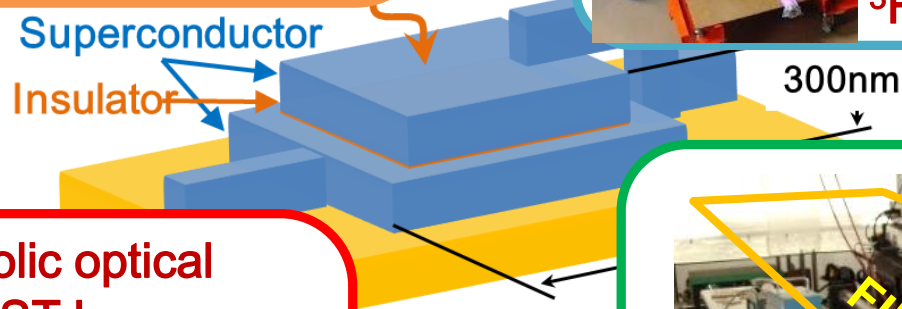
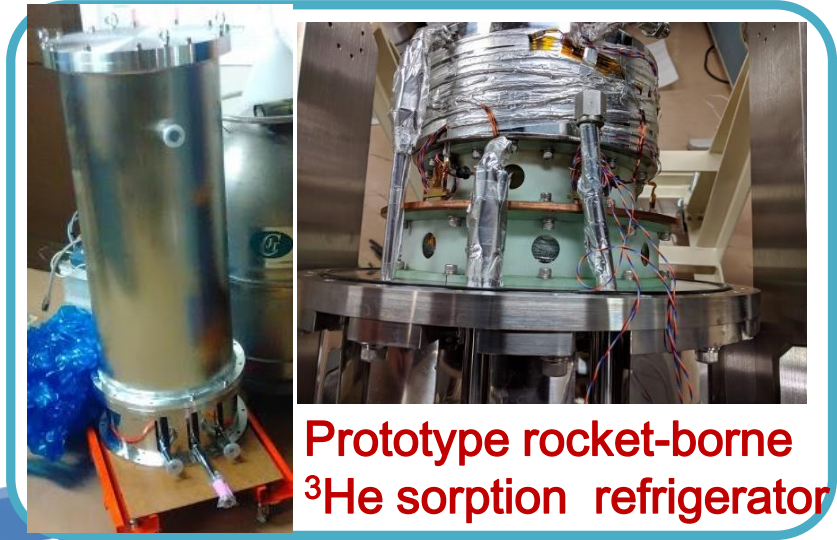
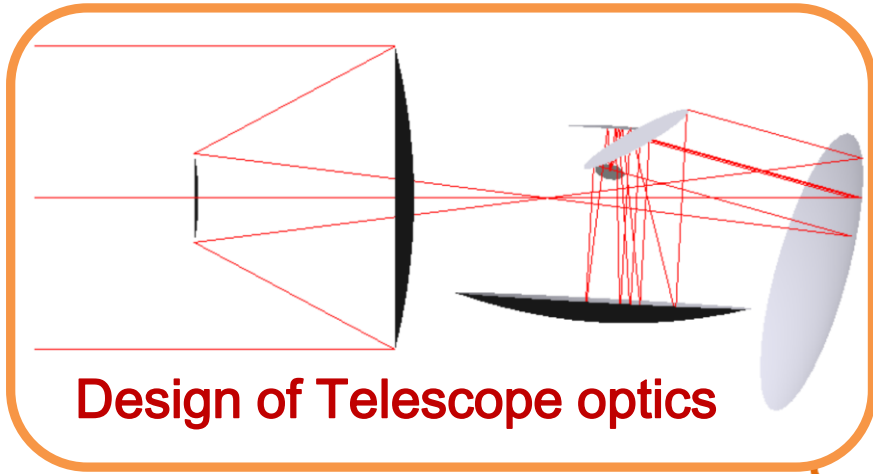
バッファ段



試作SOI 極低温電荷積分型増幅器
テレスコピックカスコード電流ミラーによる
差動増幅回路に容量性負帰還を用いた

可視光(465nm)に対する応答信号の
冷凍機内増幅に成功

Other R&D components for COBAND rocket experiment



まとめ

- ビッグバンの数秒後に自由となり現在も存在し続ける宇宙背景ニュートリノの中にニュートリノ崩壊現象を探す
COBAND計画が筑波大を中心として進行中
 - ニュートリノ寿命感度 10^{14} 年を目指したロケット実験
 - 将来計画として 10^{17} 年の感度を目指した衛星実験
- もし標準理論の予想していない寿命で検出されると,
 - 標準模型を超える物理の発見!!!
 - νB の直接検出!!!
 - ニュートリノ質量の絶対値測定!!!

まとめ

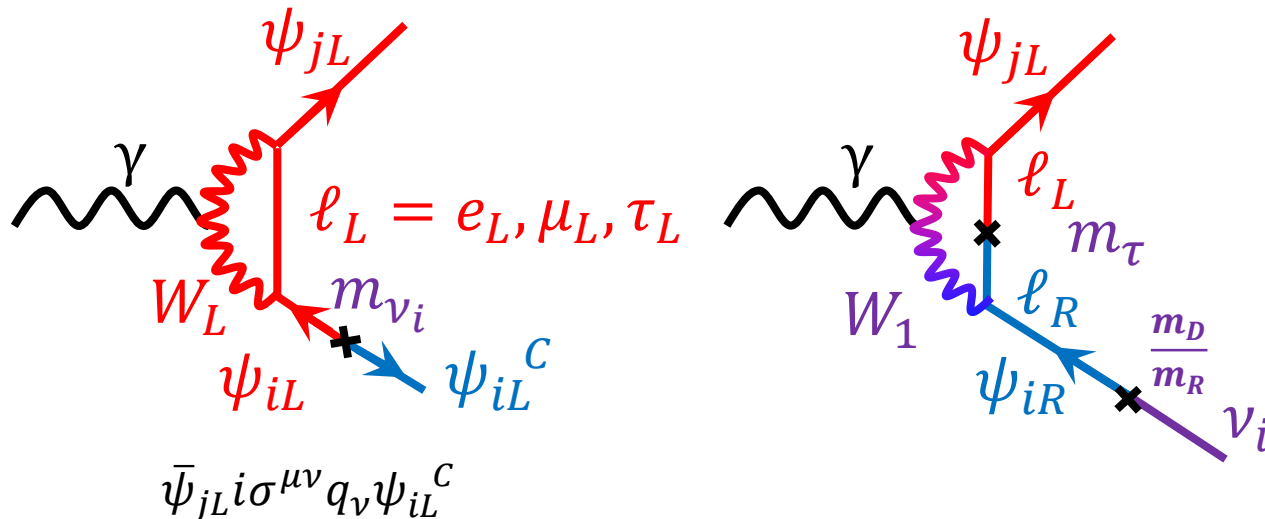
- 光検出器となる STJ素子は要求値を満たすものが手に入る
- STJ信号読出しのための極低温増幅器は開発が進んでいる
- ロケット実験の光学系（望遠鏡や回折格子など）の設計・製作も始まった。
- ロケット搭載冷凍機：試作機製作段階

各要素のプロトタイプでの実証が完了後，JAXAへの提案が認められれば，ロケット実験は最短で2年後に実施可能

Backup

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ない。(但し $i=j$ のときは，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 中の ψ_R 成分が $\frac{m_D}{m_R}$ 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



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

たぶん・・・

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

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

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

ニュートリノ質量と崩壊光子エネルギーとの関係



• 振動実験から

$$- |\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$- \Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

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

• CMBの揺らぎ(Plank+WP+highL) とバリオン音響振動(BAO)から

$$- \sum m_i < 0.23 \text{ eV}$$

$$\rightarrow 50 \text{ meV} < m_3 < 87 \text{ meV}$$

$$E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$$

$$\lambda_\gamma = 51 \sim 89 \mu\text{m}$$

