

ダークマターとニュートリノ

2016年10月30日(日)

宇宙素粒子若手の会 秋の研究会

@東大宇宙線研

中野 佑樹(神戸)

本日の講演題目(4件)

- (方向に感度を持つ)暗黒物質探索実験
 - NEWS実験と開発課題: 吉本(名古屋大)
 - 方向に感度を持った暗黒物質探索実験NEWAGE: 池田(神戸大)
- ニュートリノ実験
 - Super-Kamiokande検出器を用いた太陽ニュートリノ解析の最新結果: 中野(神戸大)
 - AXEL実験: $0\nu\beta\beta$ 探索に向けた高圧キセノンガス検出器開発: 中村(京都大)

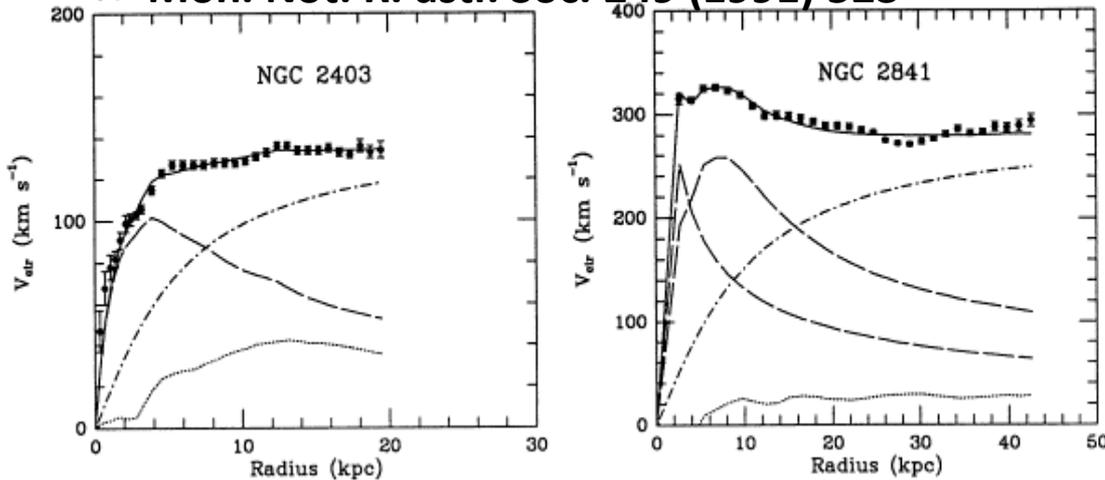
暗黒物質(とその存在を示唆する観測結果)

暗黒物質: 様々な宇宙観測によって、存在が予言されている未知の物質

Planck衛星の観測では 宇宙の**26.8%**が暗黒物質 (A&A 571 (2014) A16)

一般的には、重力相互作用と弱い相互作用を受ける**WIMP**を指すことが多い。

(a) Mon. Not. R. astr. Soc. 249 (1991) 523



◇銀河の回転速度

横軸: 銀河中心からの距離

縦軸: 回転速度

Point: data

Dash: visual components (disk)

Dot: gas

Dash-dot: invisible mass (dark halo)

→見えている物質だけでは、銀河の回転速度を説明できない。

Astrophys. J. 648 (2006) L109

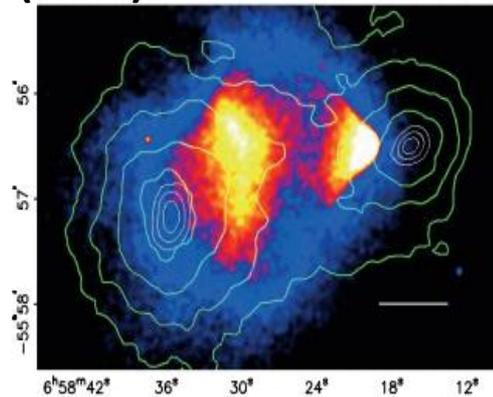
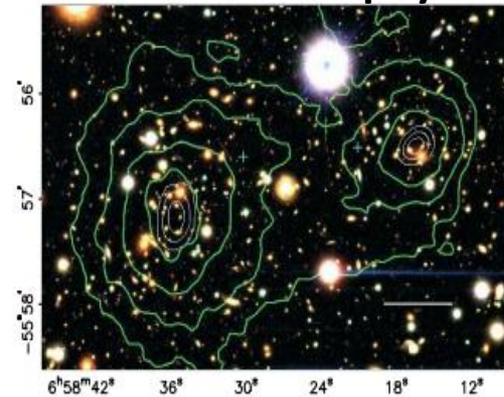
◇重力レンズ(銀河団の衝突)

左図: 可視光で観た銀河

右図: X線でみた銀河

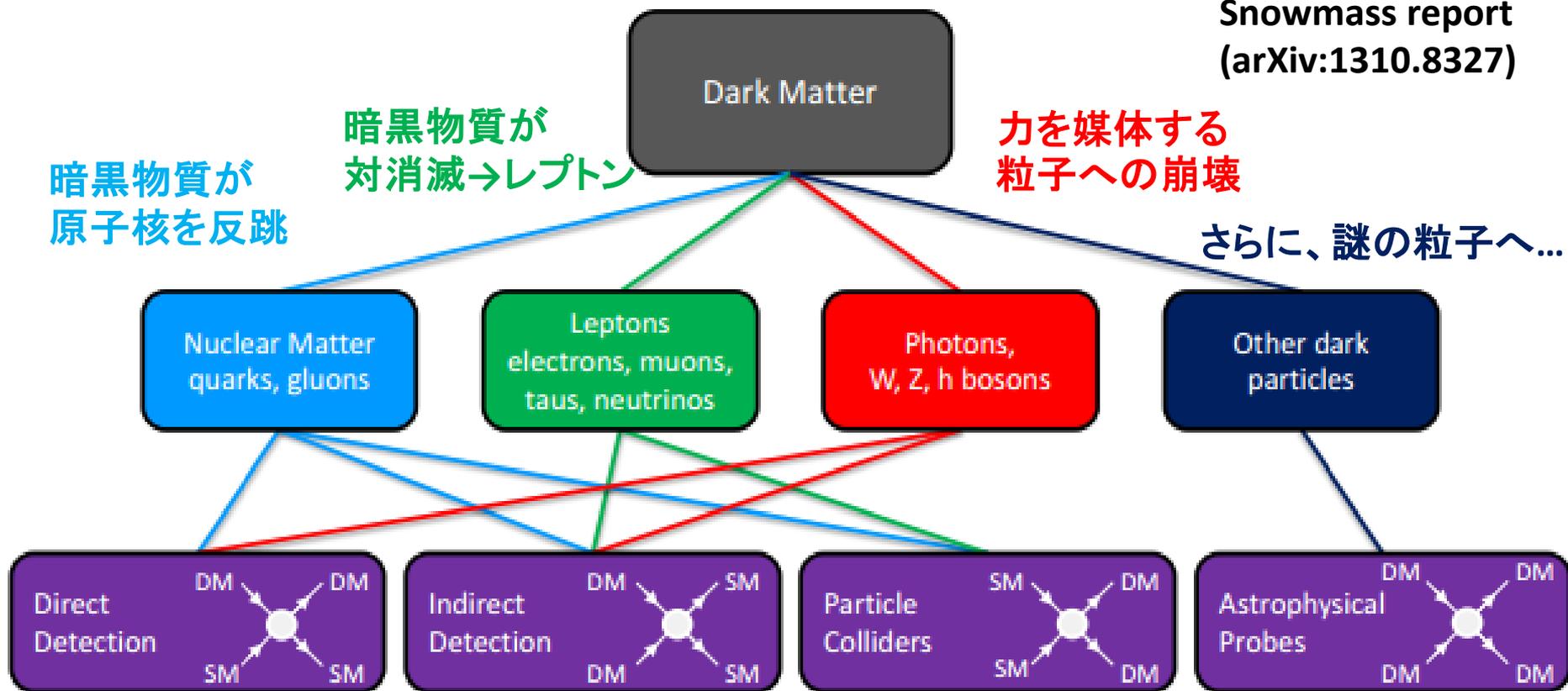
緑線: 質量分布の等高線

→右図では**質量分布の中心と銀河団の位置が一致**。一方、左図では**ガス雲は相互作用で変形し、銀河から遅れて移動**。**ガスとは異なる観測できない質量が存在**。



暗黒物質探索の手法

Snowmass report
(arXiv:1310.8327)



暗黒物質探索実験と言った場合、(基本的には)「直接探索(一番左)」を考える。

Direct Detection: (地下実験) LUX, XENON, XMASS, **NEWAGE**, **NEWS**, DRIFT, etc...

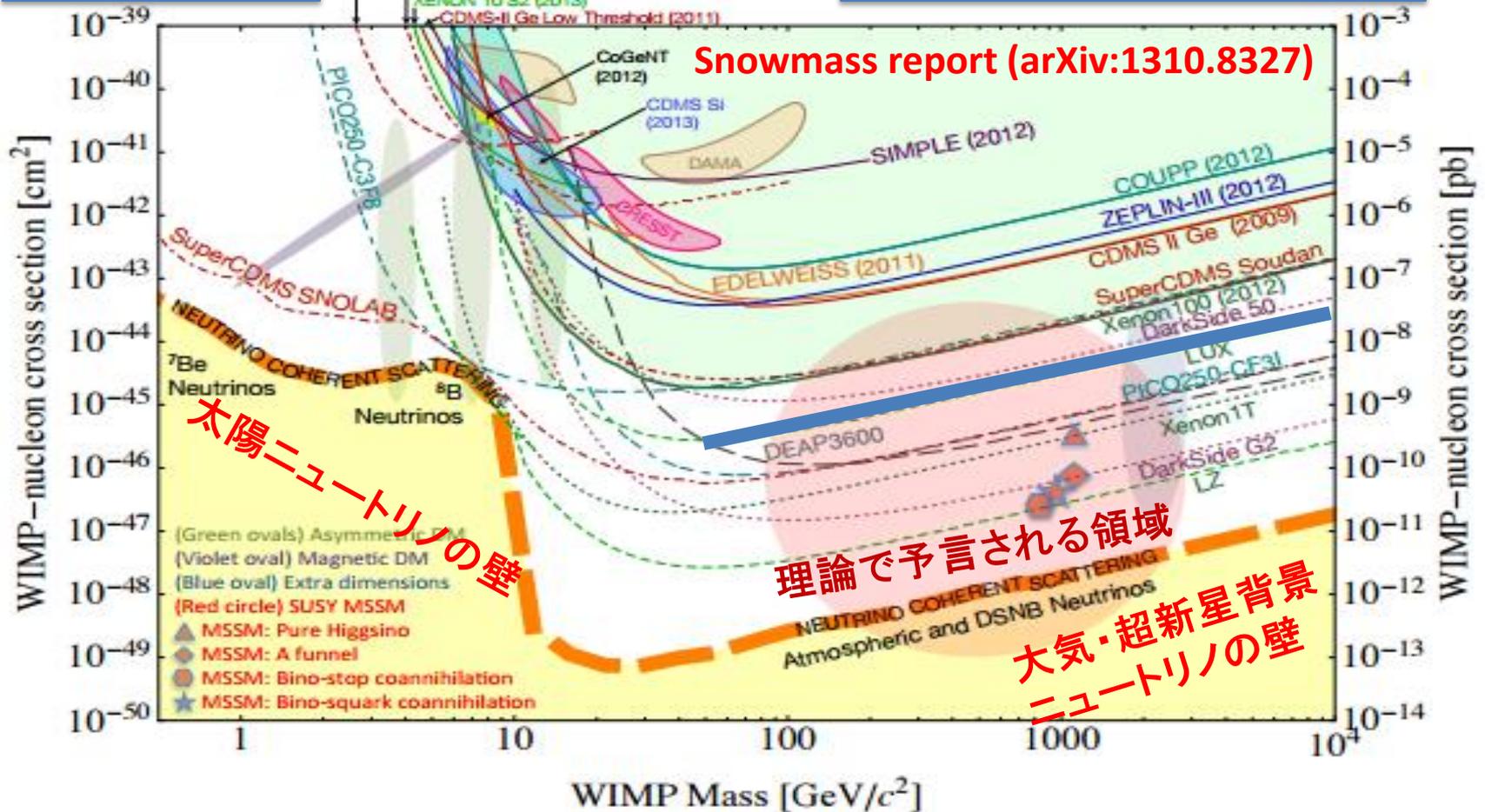
Indirect Detection: (地下実験と衛星) IceCube, Super-Kamiokande, AMS, Fermi, Magic, etc...

Particle Colliders: (加速器) ATLAS, CMS

暗黒物質探索の現状

結晶、ガスTPC

2(1)層式 キセノン、アルゴン



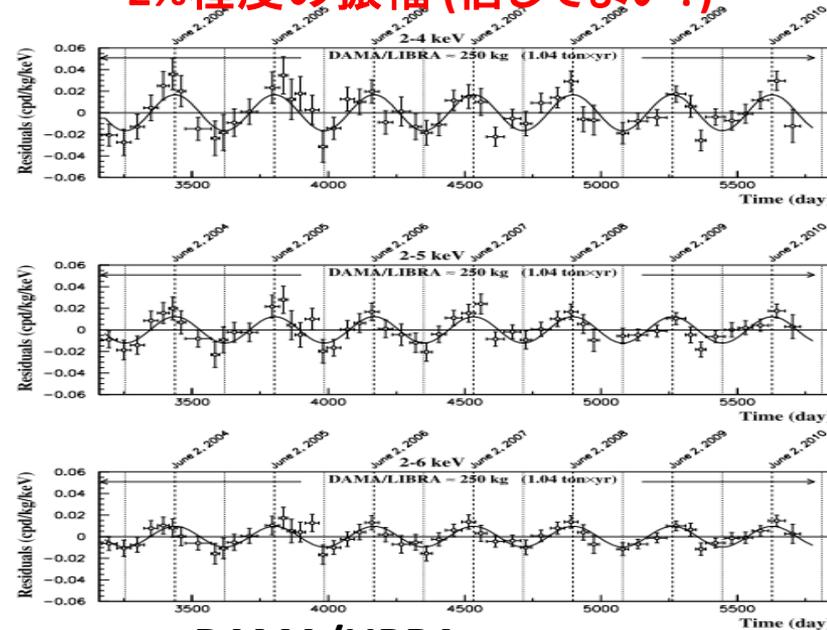
LUXやPANDAXなどの2層式キセノン検出器で質量の大きい領域(右側)をゴリゴリと削っているところ(world leading: LUX, arXiv:1608.07648)
質量の低い領域(左側)はSuperCDMSがどこまでいけるか、という状況。

方向に感度を持たせる意味

• DAMA/LIBRA実験

- 「暗黒物質の観測」を唯一主張。
- 14サイクル、 9.3σ level
- 大気Muonや太陽 ^8B ニュートリノが検出器周辺の物質を壊して、環境中性子を出しているのでは？ (Phys. Rev. Lett. 133 (2014) 081302)

2%程度の振幅 (信じてよい?)

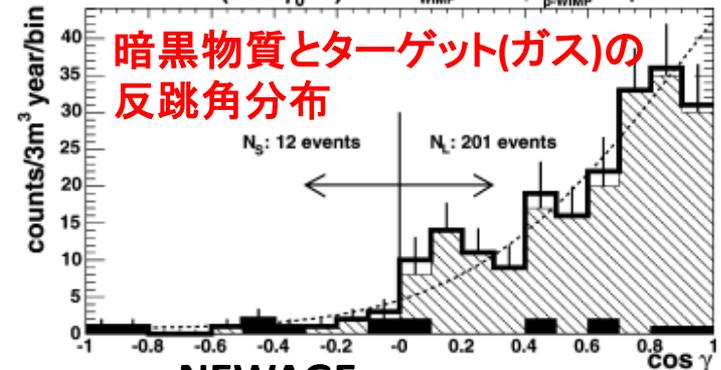


DAMA/LIBRA

(Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2648)

FT ($\cos \gamma_0=0$)

$M_{\text{WIMP}}=80\text{GeV}, \sigma_{\text{p-WIMP}}=0.1\text{pb}$



NEWAGE

(Phys. Lett. B 578 (2004) 241)

• 飛跡検出器

- 季節変動(5%程度)で探索する手法より確実な証拠を出せる。
- → 反跳角分布の前後非対称性が最大で10倍程度になる
- 飛跡を捉える技術
 - NEWS: 原子核乾板 (arXiv:1604.04199)
 - NEWAGE: ガスTPC (SF₆, CF₄)

ニュートリノ

- レプトンの1種

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

- 質量が非常に軽い

- $\sum m_\nu = 0.32 \pm 0.11 \text{ eV}$ (Astrophys. J. 782 (2014) 74)

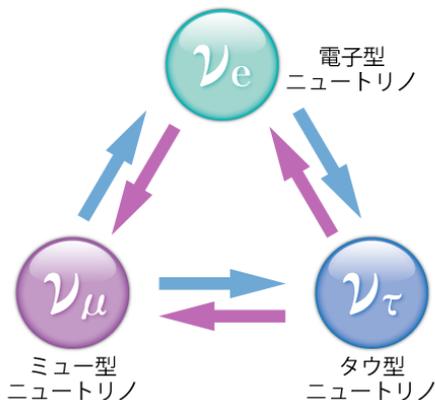
- 電荷を持たない

- 3世代(である証拠がある)

- 加速器実験: CERN LEP実験(Phys. Rept. 427 (2006) 257)

- 宇宙論からの制限: Plank衛星 (A&A, A16 (2014) 571)

- ニュートリノ振動 (全貌がわかってきた)



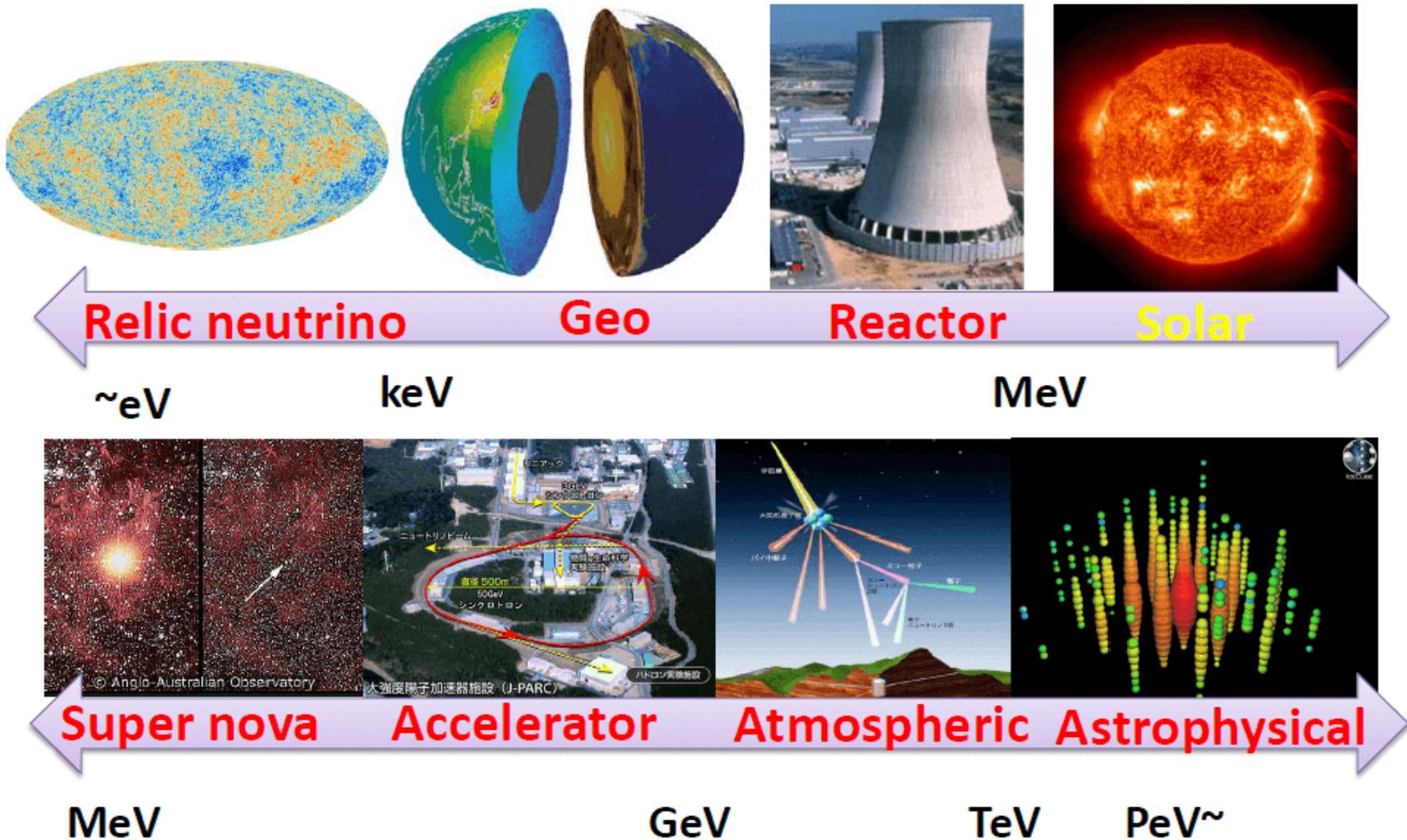
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Atmospheric Accelerator

Reactor Accelerator

Solar Reactor

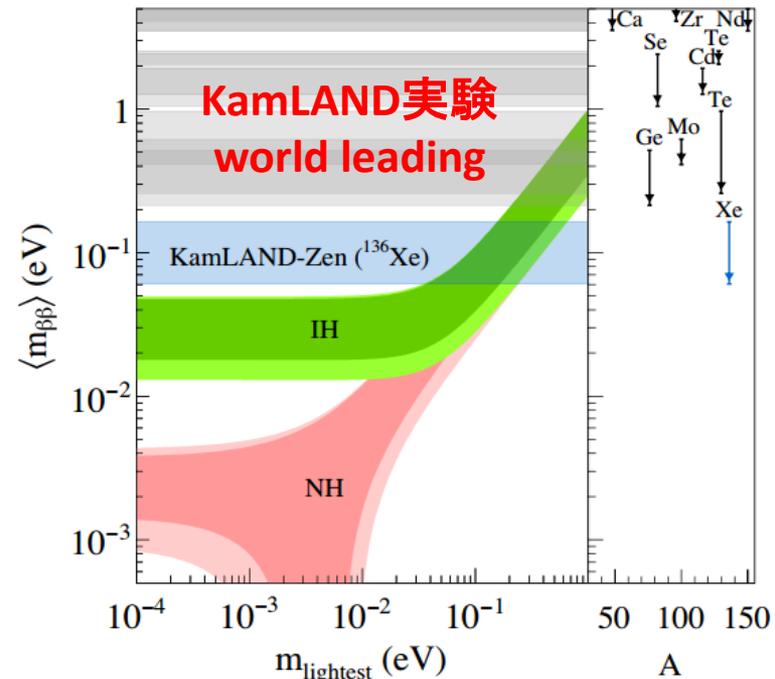
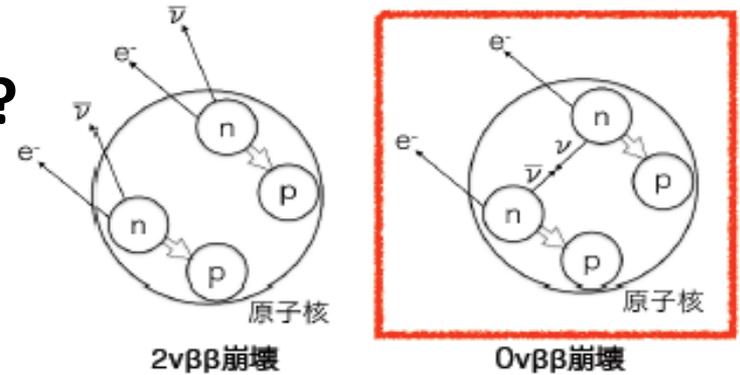
ニュートリノはどこから?



幅広いエネルギーのニュートリノが存在
宇宙の様々な現象で重要な役割を担っている

ニュートリノの性質で未解決なもの

- ニュートリノの質量の絶対値
 - 超新星爆発の観測でいけるかも?
- ニュートリノ振動
 - 振動パターン (CPの破れ)
 - 粒子と反粒子で振動現象は同じ?
 - 質量階層性
 - Normal ($m_1 < m_2 < m_3$)
or Inverted ($m_3 < m_1 < m_2$)
- ニュートリノのマヨラナ性
 - 中性 → 粒子と反粒子が同一?
 - この場合、 **$0\nu\beta\beta$ 崩壊**を起こす
- 世代数
 - 本当に3世代? ステライル?



まとめ

- セッションでは以下の講演を行う。
 - 方向に感度を持つ暗黒物質探索実験
 - 原子核乾板のNEWS実験
 - ガスTPCのNEWAGE実験
 - 太陽ニュートリノ観測
 - Super-Kamiokande実験
 - $0\nu\beta\beta$ 探索実験
 - AXEL実験
- 実験の詳細は各発表者に尋ねてください。
- 理論的な背景や世界情勢などに関しては、質問を受け付けようと思います。

Back up

ニュートリノ振動

- ニュートリノの固有状態

- 数種類の質量固有状態が混ざり合い、フレーバー固有状態として存在。**実験ではフレーバー固有状態を観測する。**
- 質量固有状態のハミルトニアンが対角的なので、始状態と終状態が同じ。一方で、**フレーバー固有状態はハミルトニアンが非対角成分をもつので、始状態と終状態が一致しない。**

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^N U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

PMSN行列

J. Exptl. Theoret. Phys. 33 (1957) 549

Prog. Theor. Phys. 28 (1962) 870

- ニュートリノ振動 (簡単のために2世代)

- エネルギーEを持ったフレーバー α のニュートリノが距離L[km]進んだときに、フレーバー β に振動している確率は以下で表される。

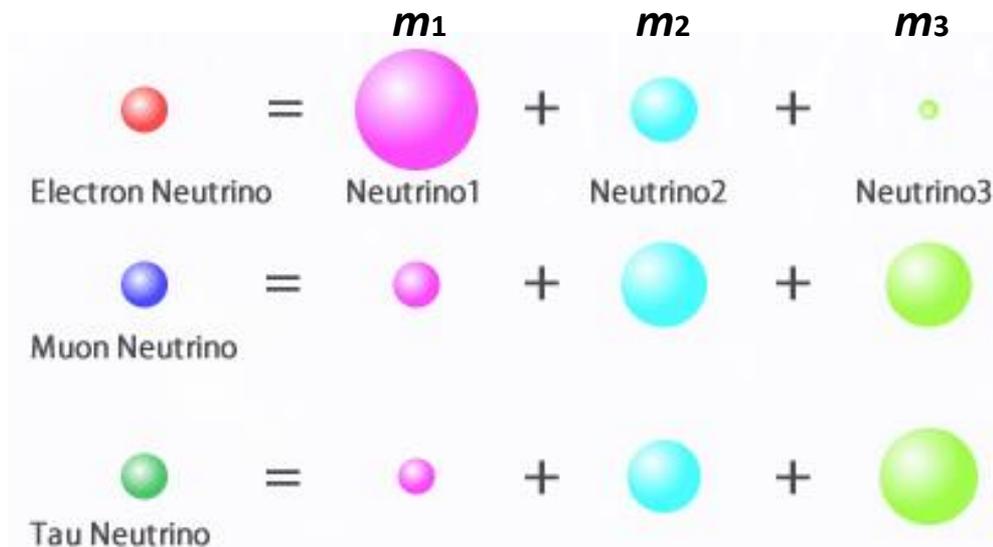
$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$$

例) 太陽ニュートリノ: $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu/\tau}$ 、加速器ニュートリノ: $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e/\tau}$ など。

ニュートリノ振動の現状

ニュートリノのフレーバーは質量固有状態の重ね合わせ。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^N U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$



PMSN行列

J. Exptl. Theoret. Phys. 33 (1957) 549

Prog. Theor. Phys. 28 (1962) 870

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

**Atmospheric
Accelerator**

**Reactor
Accelerator**

**Solar
Reactor**

混ざり具合を混合角(θ_{ij})で表す。これらのパラメータはすでに測定されていて、精密測定の段階になっている。CP(δ)を測定する段階へ移行中。