

ハイパーカミオカンデ計画

～ニュートリノ研究の次の挑戦～

塩澤 真人

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設
東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構

2018年7月14日、オープンカレッジ in 飛騨 2018

素粒子とは何か？

物質の最小単位

デモクリトス (アトム)

アリストテレス (火、空気、水、土)

(現代の) 素粒子の研究

• なにが？

ニュートリノ

1930年パウリ予言

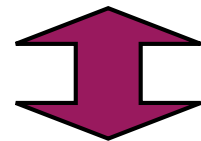
1959年ライネス・コーワン発見

• どのように？

極めて軽い質量

1998年スーパーカミオカンデ

• なぜ？ (必然性) まだわかっていない



宇宙の誕生、進化、生命の誕生の理解

反粒子

- 1928年ディラック方程式

- $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$ (静止 ($p=0$) では $E=mc^2$)

- 2つの解: $E^2=100$ なら、 $E=10$ と $E=-10$

- マイナスのエネルギーの解 → 反粒子の予言

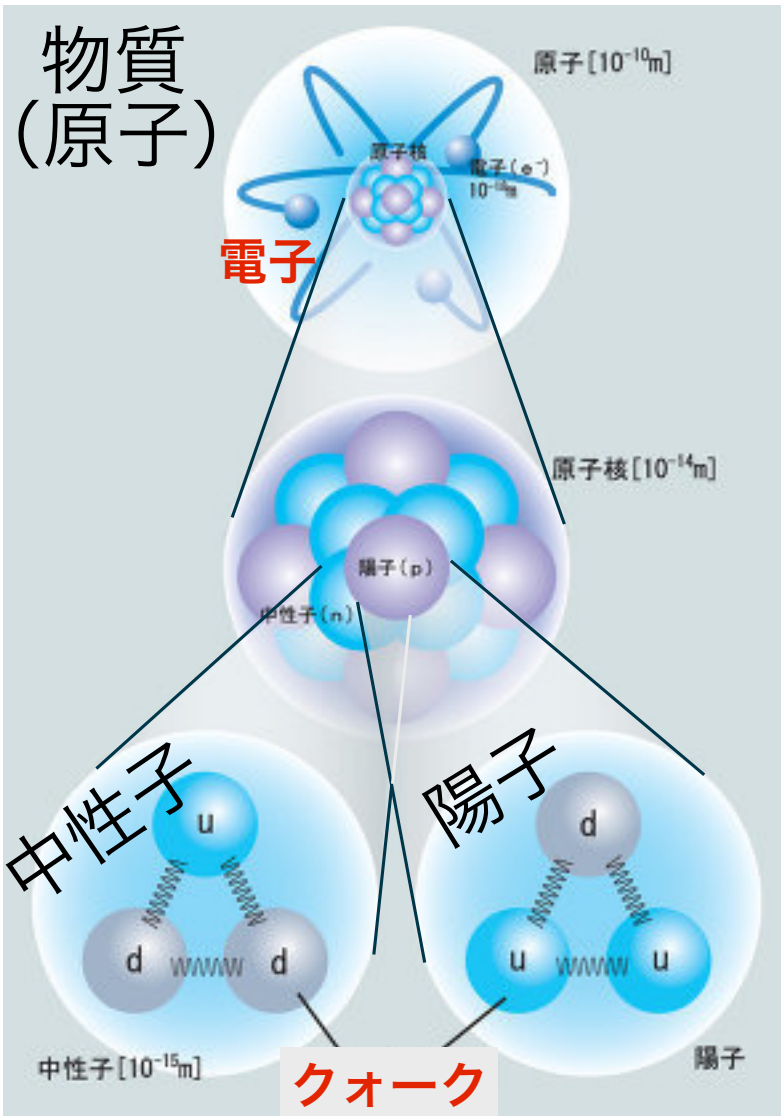
- 全ての素粒子には、反粒子がある

- 重さや寿命は一緒で、“電荷”のプラスマイナスは逆

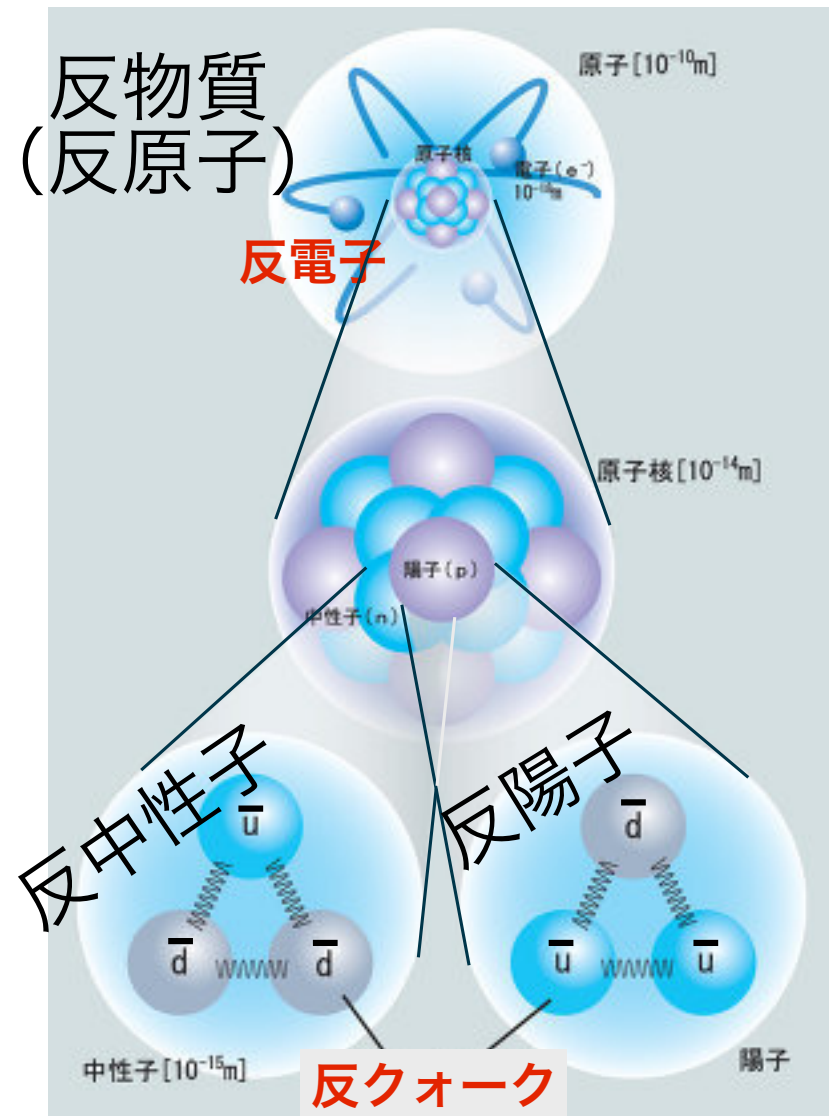
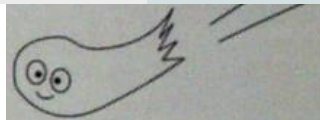
- 1932年 宇宙線の中に陽電子を発見
(アンダーソン)

クォーク	↔	反クォーク
電子	↔	反電子 (陽電子)
ニュートリノ	↔	反ニュートリノ

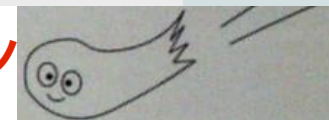
消えた反粒子の謎



ニュートリノ

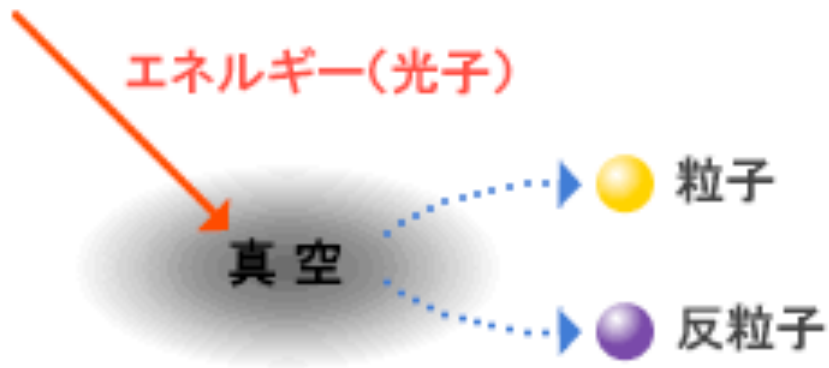
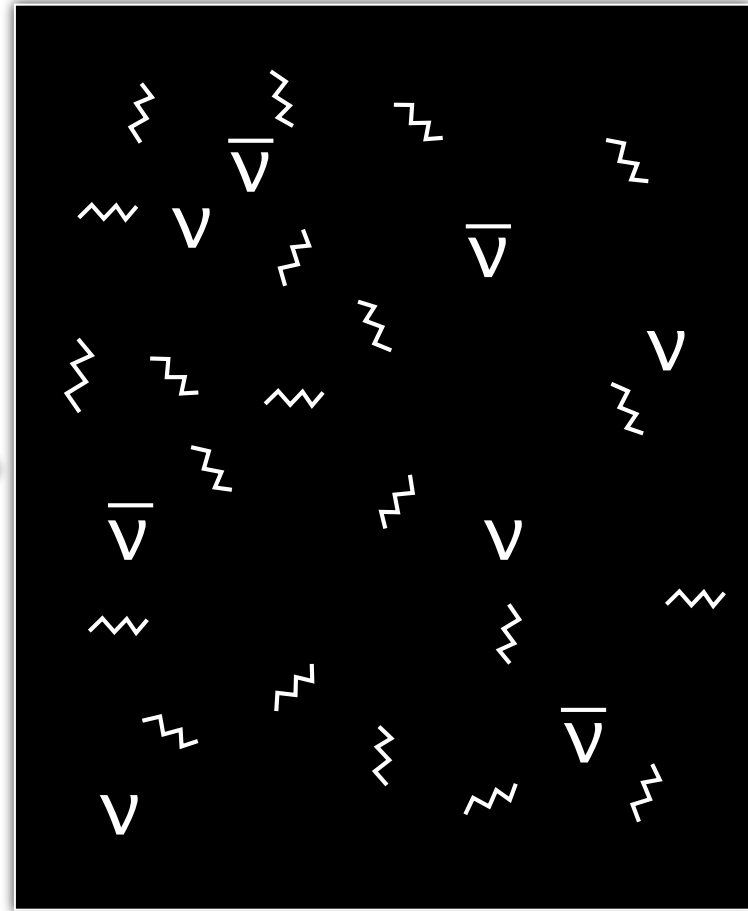
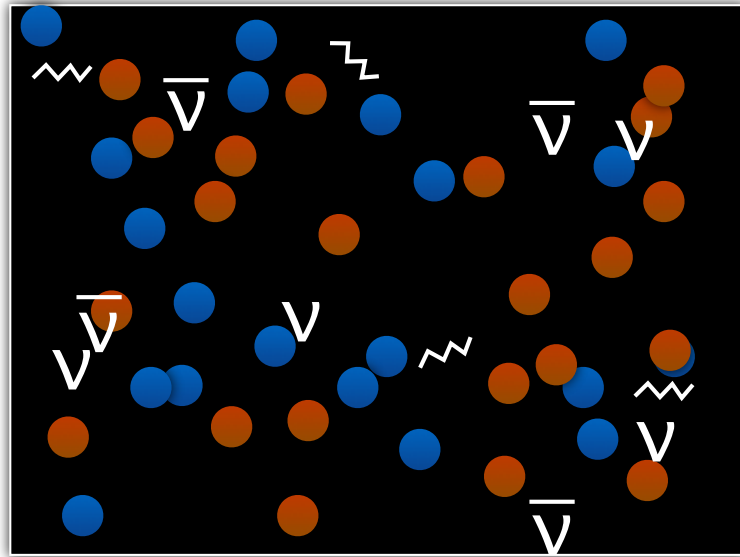


反ニュートリノ



宇宙のはじまり 138億年前

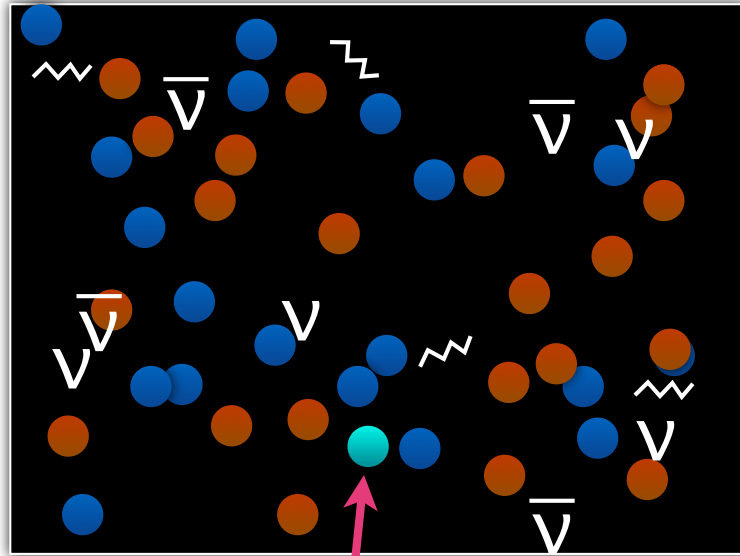
今



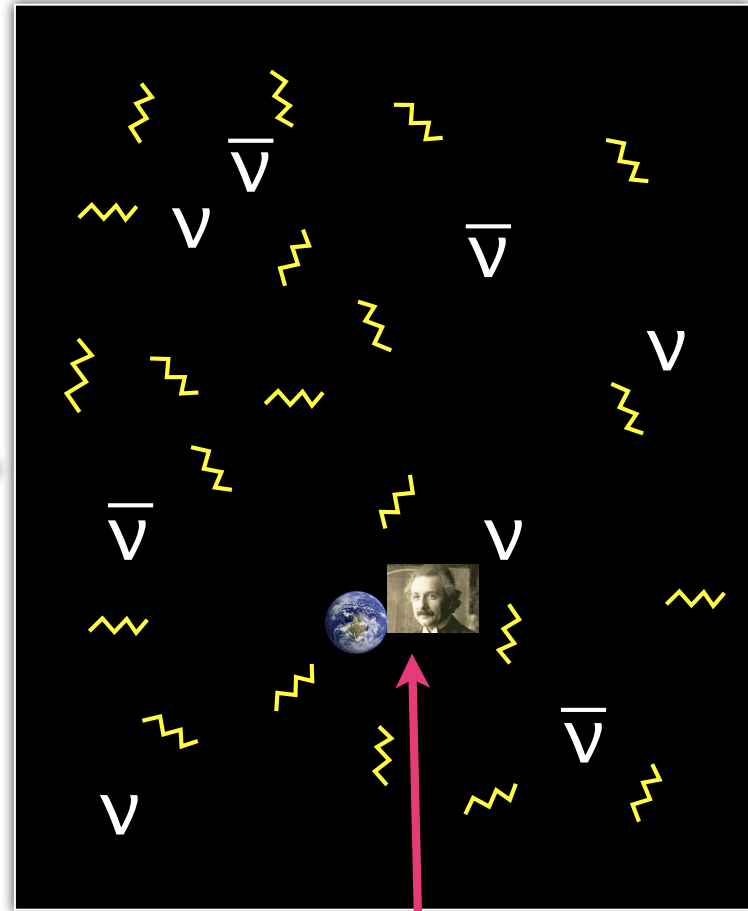
我々は生まれない。何かがおかしい。

宇宙のはじまり

138億年前



今



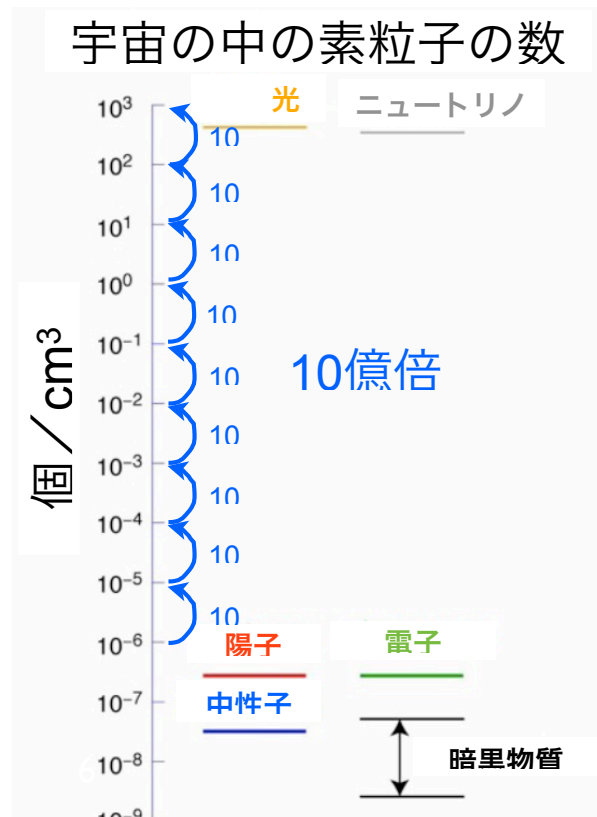
ニュートリノが物質（粒子）
をわずかに増やした可能性が
提案されている。

物質（粒子）が残った！
我々の種はニュートリノ
かもしれない。

ただしニュートリノと反ニュートリノの法則の違い（CP対称性の破れ）が必要

ν は物質優勢宇宙を理解する鍵

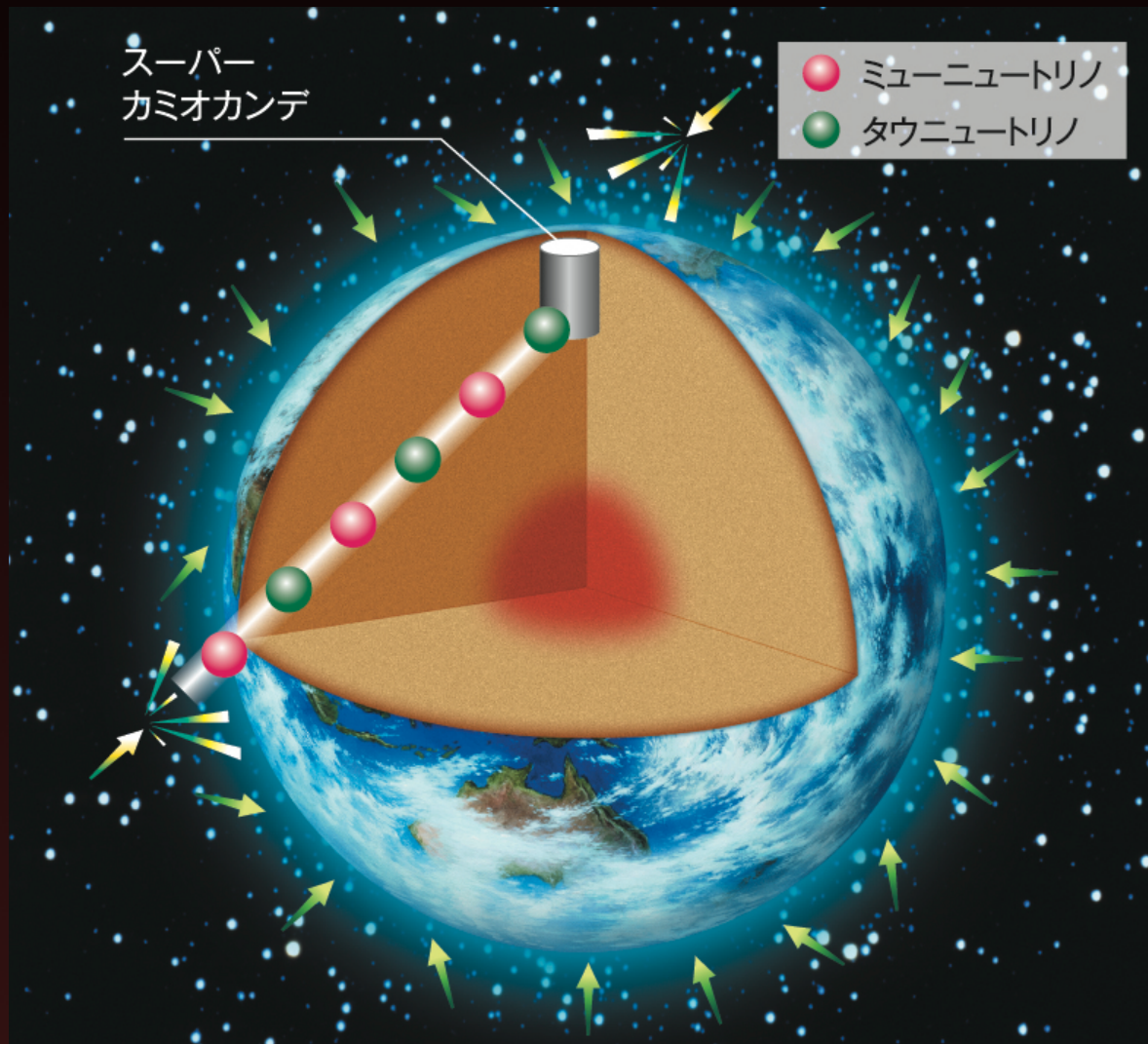
- 物質優勢宇宙にはCPを破る素過程の存在が必要（サハロフの条件）
- 唯一知られているCP非保存はクォーク（小林益川理論）→物質優勢宇宙を説明するには足りない
- レプトン（ニュートリノ）は宇宙に大量に存在し、物質優勢を説明する最有力候補
- レプトン（ニュートリノ）のCPの破れの測定が緊急課題



スーパーカミオカンデ実験 (第二世代)

最初の発見:

大気ニュートリノの振動 ($\sin 2\theta_{23} \sim 1$)



- 1998年、上向きの ν_μ が半分しかない事を発見した。
- ニュートリノ振動の発見。
- ニュートリノの質量の発見。

ニュートリノ振動

Flavor eigenstate
Mass eigenstate

$${}^t(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau) = U_{ai}^{MNS} {}^t(\nu_1, \nu_2, \nu_3)$$

U^{MNS} : Maki-Nakagawa-Sakata Matrix

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

$$P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>i} \text{Re}(U_{ai}^* U_{\beta i} U_{ai}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{(m_j^2 - m_i^2)L}{4E_\nu}$$

$$(\mp) 2 \sum_{j>i} \text{Im}(U_{ai}^* U_{\beta i} U_{ai}^* U_{\beta j}) \sin \frac{(m_j^2 - m_i^2)L}{2E_\nu}$$

ニュートリノは三種類
 ν_e (電子型), ν_μ (ミュー型), ν_τ (タウ型)

スーパーカミオカンデ開始前は7個全ての値がわかっていなかった

実験で調べるパラメータは：

θ_{12} , θ_{13} , θ_{23} , δ , m_1 , m_2 , m_3

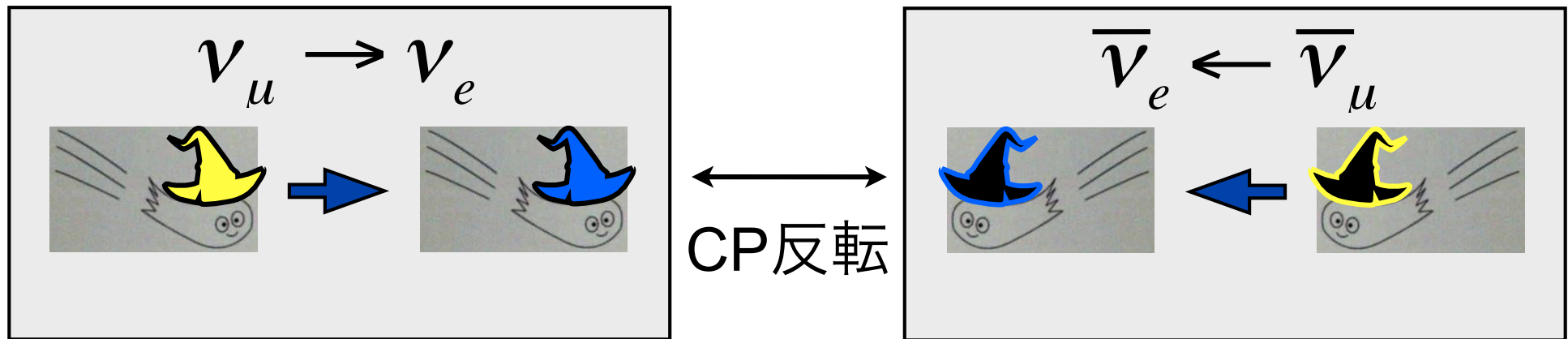
CPの破れのパラメータ

CP対称性の破れ

全ての粒子と反粒子を入れ替える

振る舞いの違いから、どちらが粒子でどちらが反粒子か区別できる

「CPの反転」をした時に「区別がつく」



振動の大きさの違いは、以下に比例

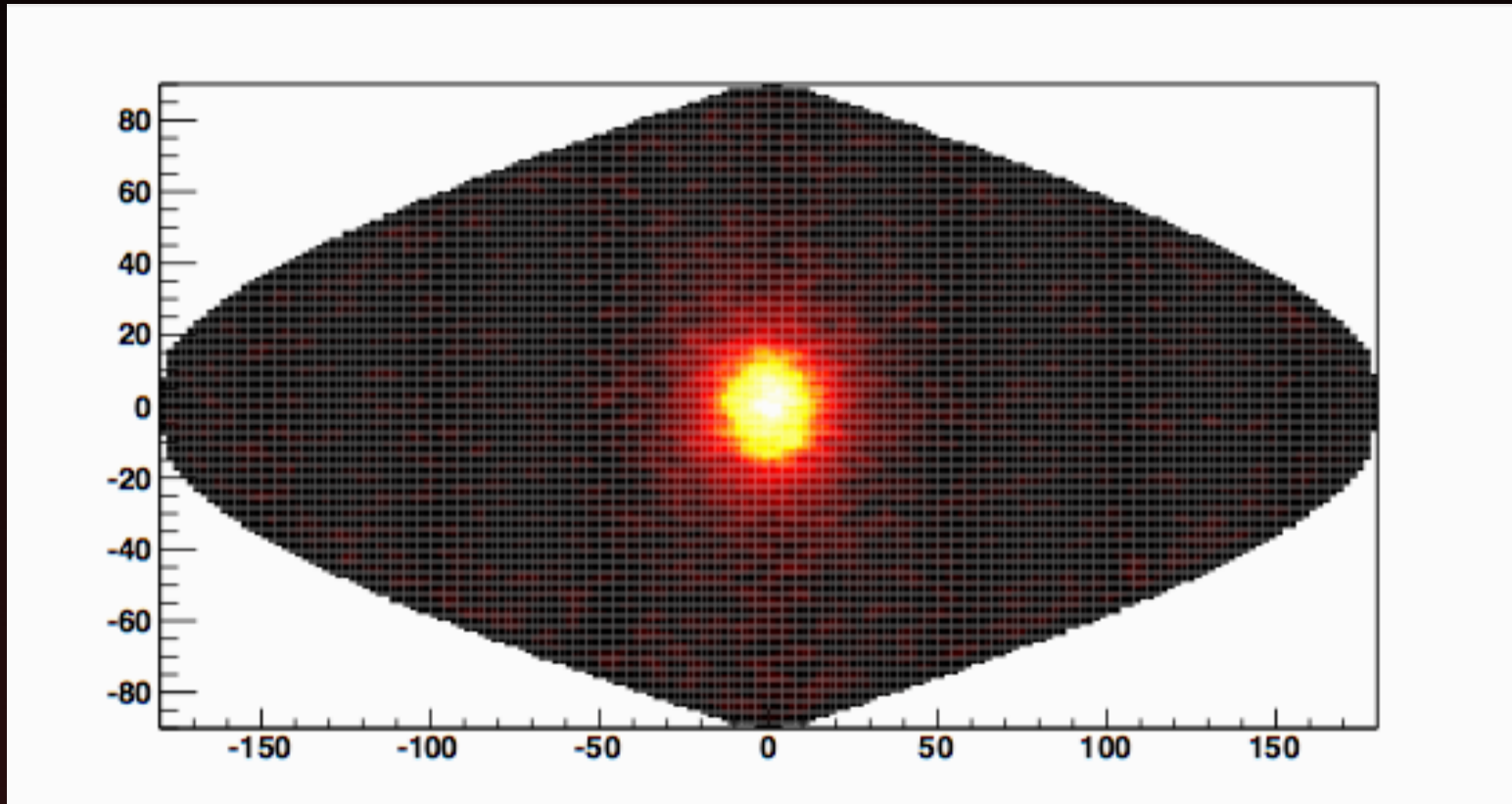
$$\cos \vartheta_{13} \sin 2\vartheta_{12} \sin 2\vartheta_{23} \sin 2\vartheta_{13} \sin \delta$$

CP対称性の破れ ($\sin \delta$ の大きさ) をニュー

トリノ振動を使って調べるのは、 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 全てが大きい時のみ可能

2つ目の発見:

太陽ニュートリノの振動 ($\sin 2\theta_{12} \sim 0.9$)



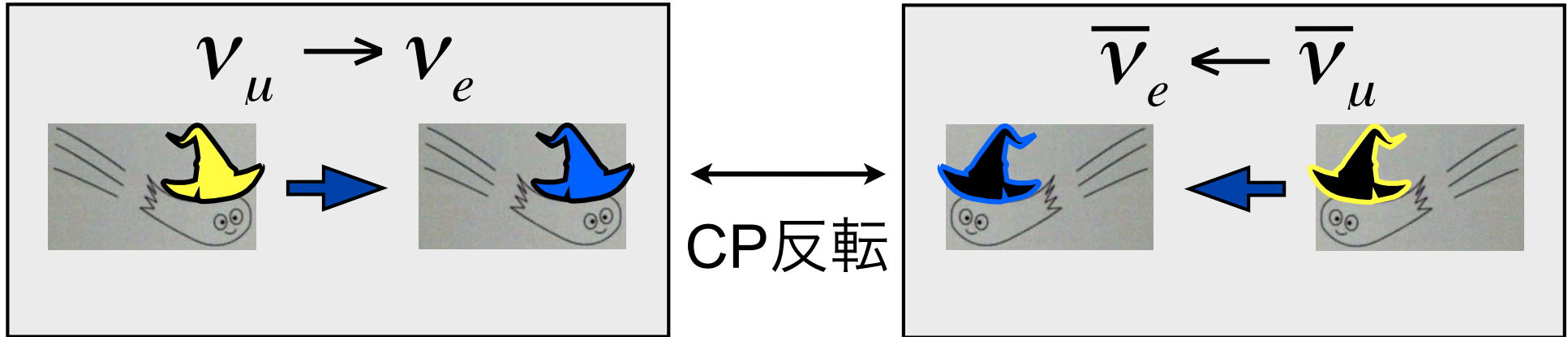
- 2001年、太陽中心の燃焼反応からの ν_e も振動している事が確かめられた。

3つ目の発見:

加速器ニュートリノの振動 ($\sin 2\theta_{13} \sim 0.3$)



- 2012年、加速器で作る ν_{μ} ビームから ν_e への振動を捉えた。3つ目（最後）の振動モードの発見！！！！



振動の大きさの違いは、以下に比例

$$\begin{aligned}
 & \cos \vartheta_{13} \sin 2\vartheta_{12} \sin 2\vartheta_{23} \sin 2\vartheta_{13} \sin \delta \\
 & \sim 1 \times 0.9 \times 1 \times 0.3 \times \sin \delta \\
 & \sim 0.27 \times \sin \delta
 \end{aligned}$$

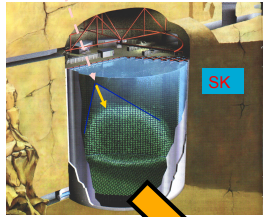
CPの破れを測る条件が成立した！

ただし、より高性能の実験装置が必要

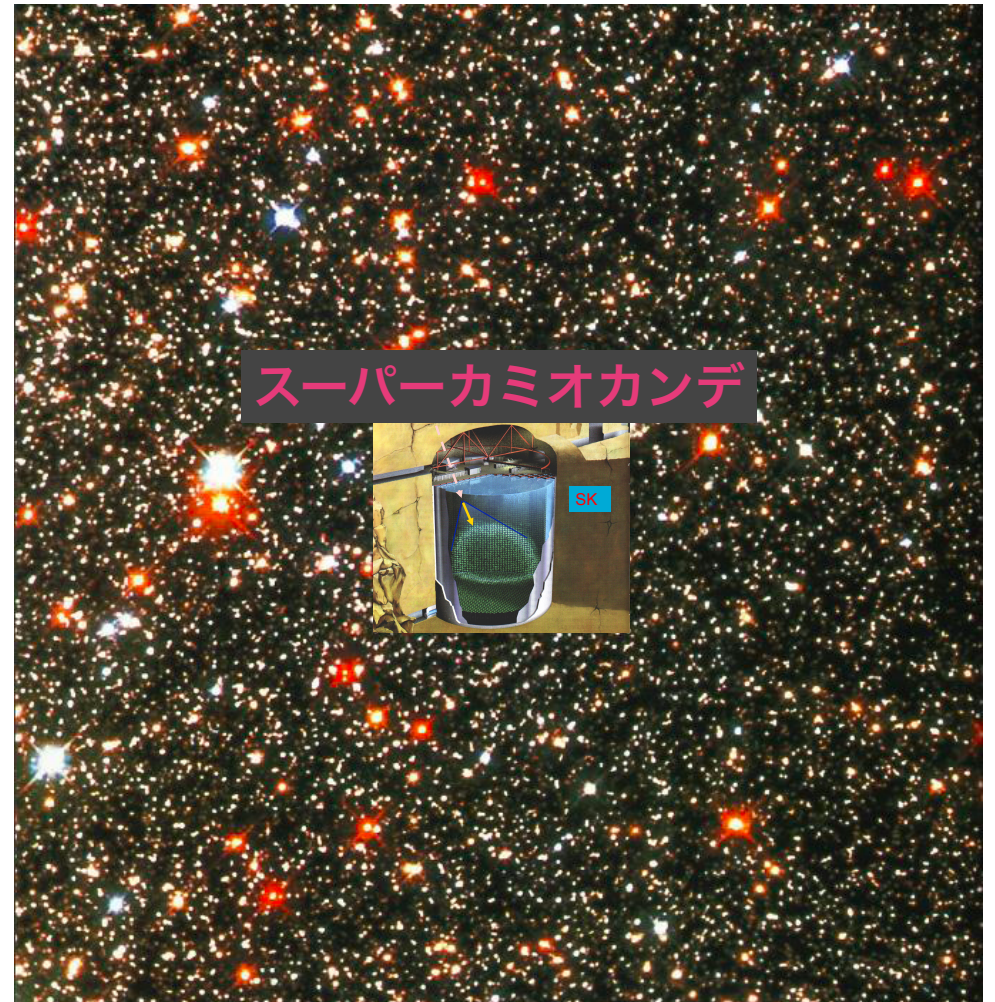
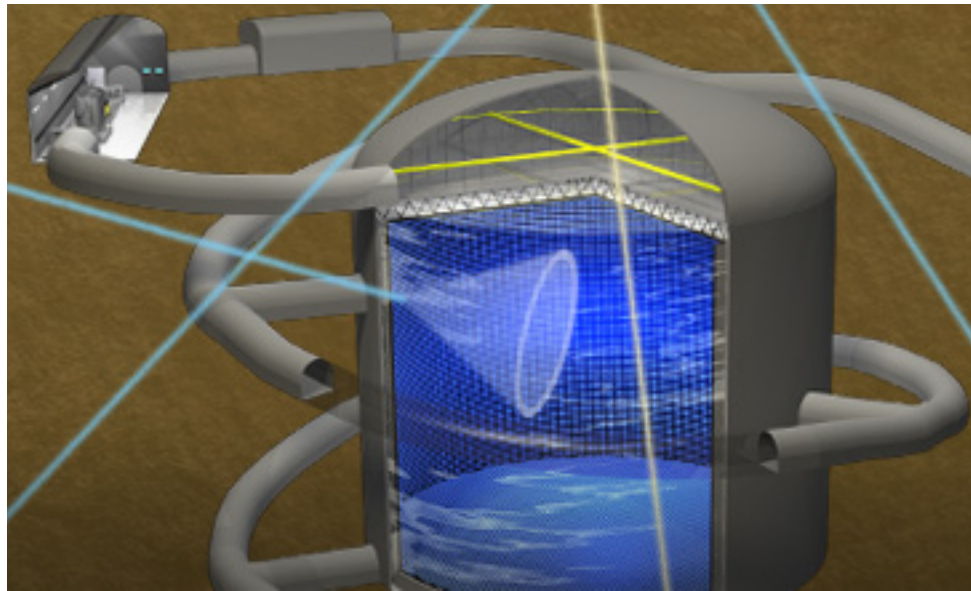
→ハイパーカミオカンデ計画

スーパーカミオカンデの発展

スーパーカミオカンデ



ハイパーカミオカンデ



次世代の大型実験装置計画：
反物質が消えた謎や陽子崩壊
発見に取り組む

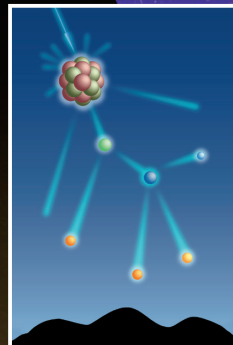
スーパーカミオカンデの改造
による超新星爆発ニュートリ
ノ観測

ハイパーカミオカンデ実験 (第三世代)

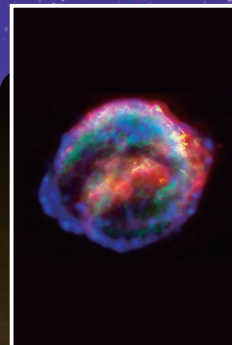
J-PARC 大強度加速器による
高品質ニュートリノビーム



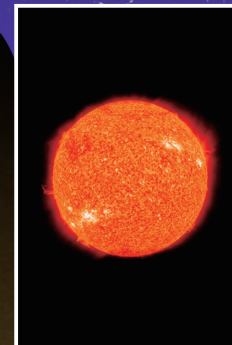
大気



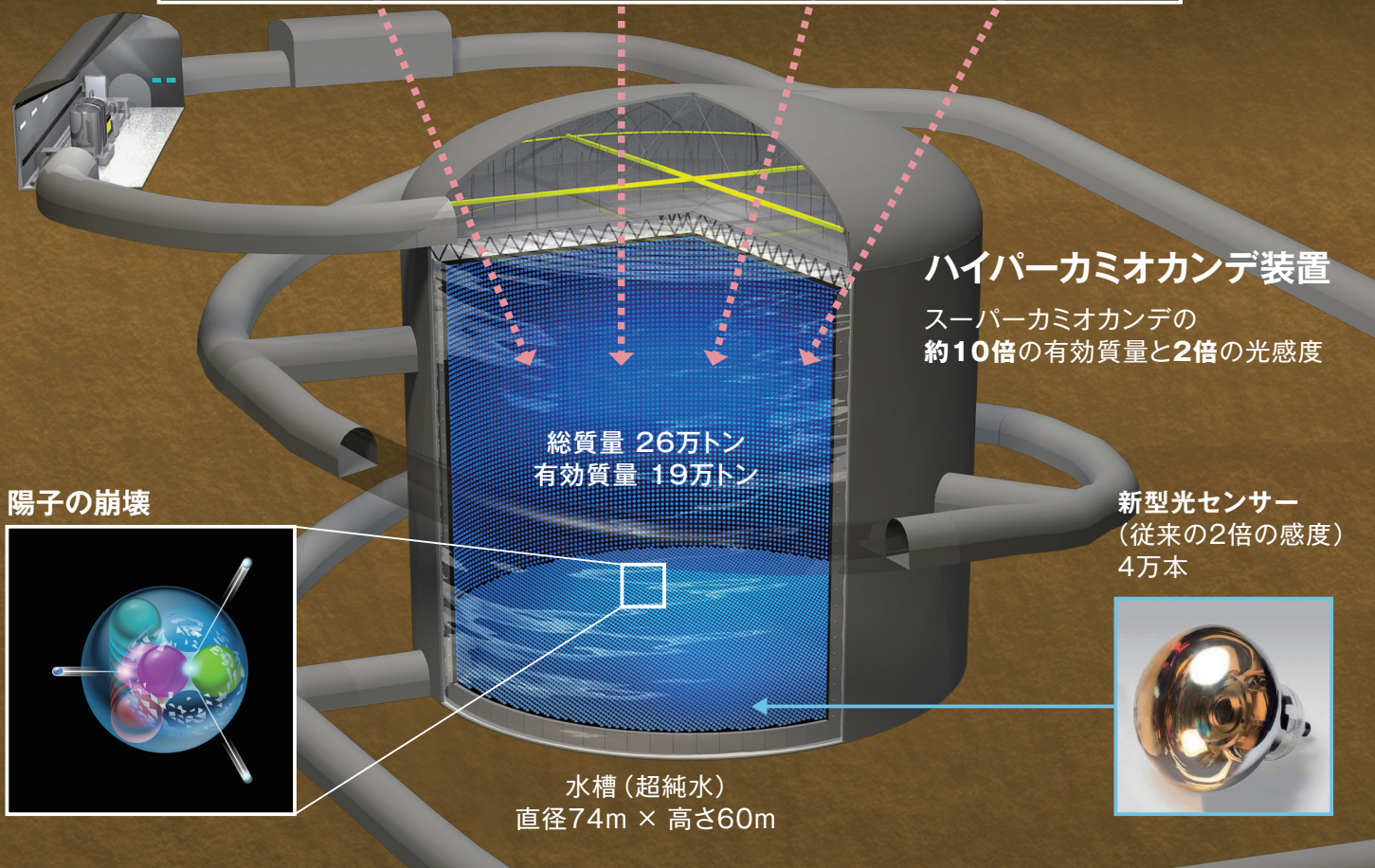
超新星爆発



太陽



ニュートリノ



ハイパーカミオカンデ計画

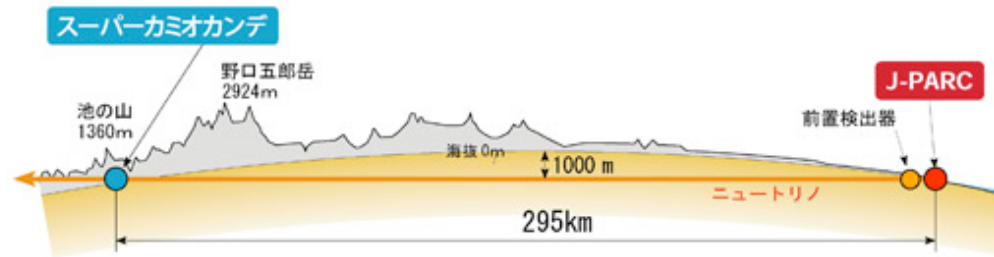


神岡町市街地

大強度陽子加速器 J-PARC

大強度ニュートリノビーム生成施設

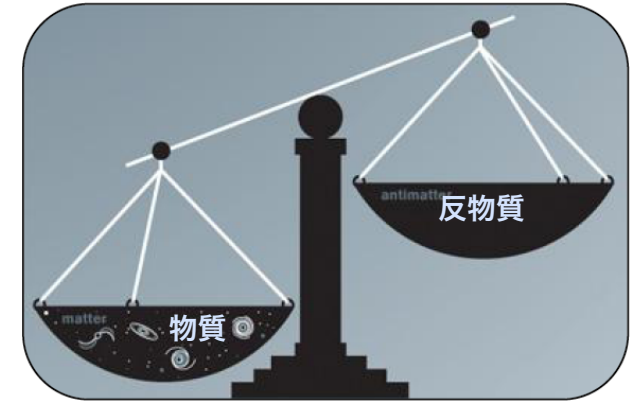
現在の~3倍に増強



ニュートリノ

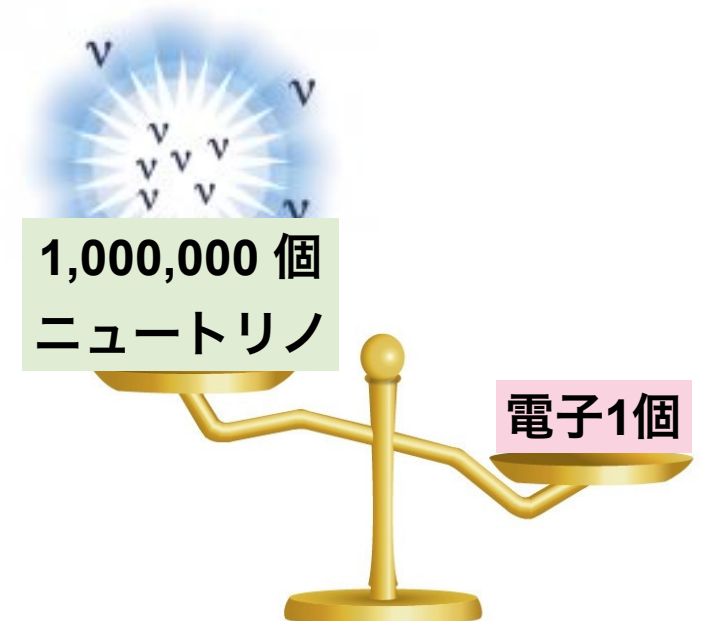
- ニュートリノは宇宙が物質（反物質でなく）からできている原因か？

- ニュートリノのCP対称性の破れ（粒子と反粒子の違い）の測定が理解の鍵



- ニュートリノの性質の背後にある新物理

- 極端に軽い質量のわけ（新しい物理）はわかっていない。未測定の性質も含め、さらなる高性能実験が必要。



ニュートリノ天文学

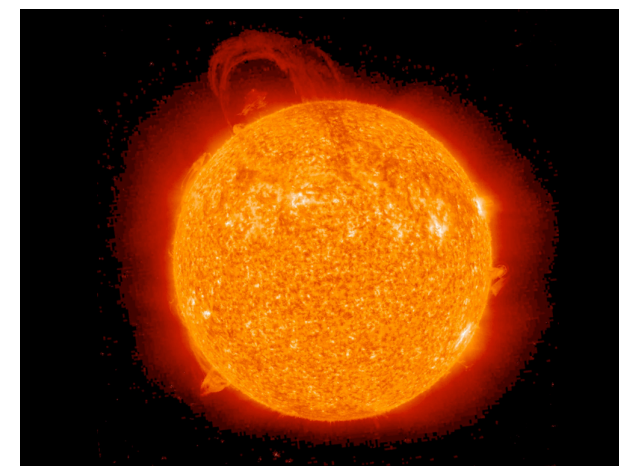
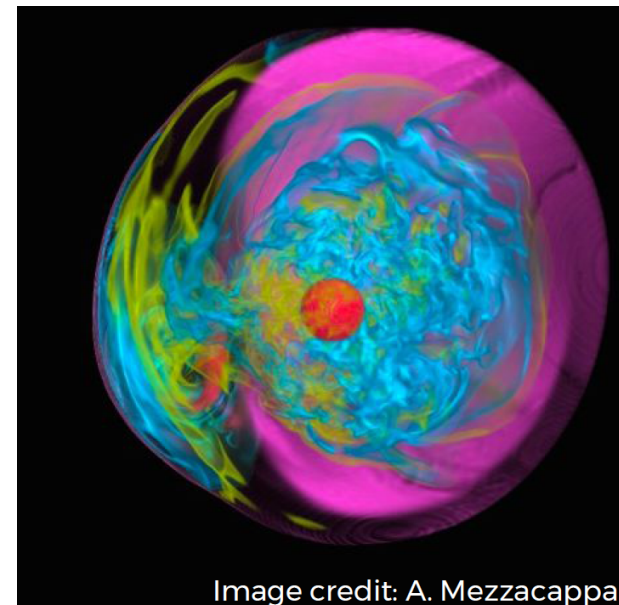
•天体内部を見る

•超新星爆発の内部

- 人類や星の原材料を宇宙に放出する役割
- 巨大な星の重力に反して爆発できる仕組み？
- ブラックホール・中性子星誕生の瞬間を捉える
- 超高温・高密度での物理の研究なども

•太陽内部でのエネルギー生成反応

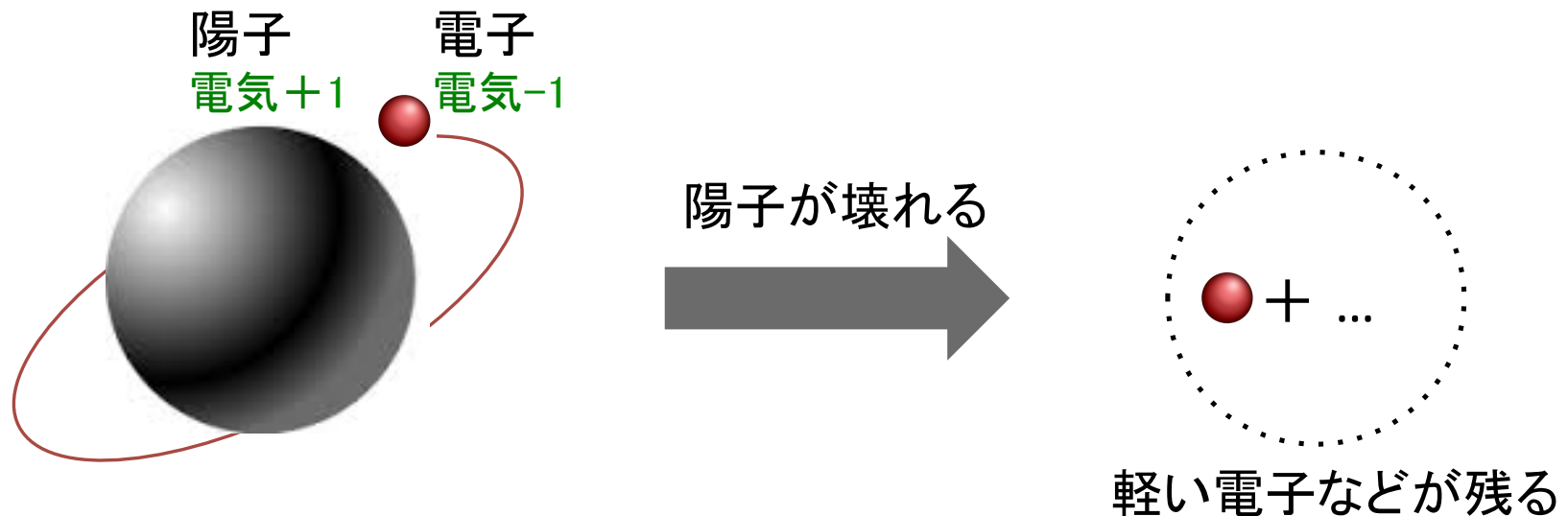
•地球内部も



素粒子及び力の統一理論

- 素粒子に働く力は一つ
 - 強い核力、弱い核力、電磁気力は同じ仲間
- 素粒子のグループは一つ
 - クォーク、電子、ニュートリノは同じ仲間
- 陽子がより軽い電子などに壊れる現象を予言する

原子の例(水素)



陽子が壊れることが見つかったと

- 大統一理論
 - 素粒子の統一、力の統一
- 宇宙（物質）は永遠ではない
 - 全ての星も人間も、消滅する運命
 - 物質不滅の法則にも反する

ハイパーカミオカンデで発見を目指す

まとめ

- ニュートリノと陽子崩壊は、素粒子と宇宙の理解の鍵
- 日本（神岡）は世界のニュートリノ・陽子崩壊研究の中心
- ハイパーカミオカンデでさらなる発見を目指す
 - ニュートリノが全ての物質の種の可能性（反物質が消えた謎）
 - 陽子崩壊と統一理論、宇宙の運命
 - ニュートリノを使った宇宙観測
 - 他