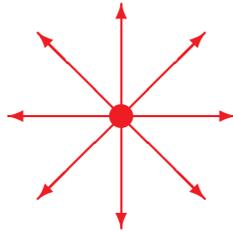


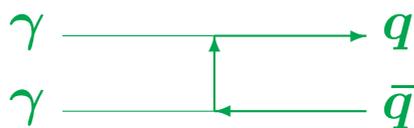
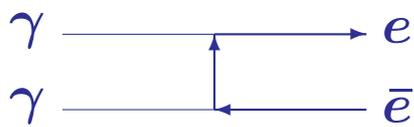
宇宙の物質数生成のシナリオ

I. 宇宙の物質数の謎

我々の宇宙は大爆発とともに始まった



大爆発のエネルギーは、物質と反物質を生成し、
高温高密度の初期宇宙を生み出した



陽子



中性子

高温高密度のプラズマは、宇宙膨張とともに冷えていき、物質と反物質は対消滅を始めた



生き残ったわずかな物質と反物質は、今日の星々を作っている。ここで物質の数は反物質の数に等しい

しかし、我々の観測している銀河や星々は全て物質から作られている。反物質は見つかっていない

光

物質 $\implies \longleftarrow$ 反物質

光

物質と反物質の消滅

このような光は測定されていない

宇宙は初期に物質優勢の宇宙へ進化したはず

WHEN and HOW ?

II. サハロフの考え

Saharov (1964)

1. 高温高密度の宇宙初期に、物質数を破る相互作用が働いた



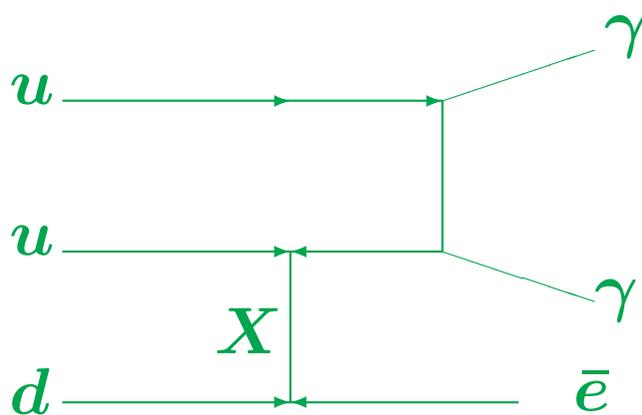
反物質 \implies 物質

2. CPの破れ

3. 非平衡過程

物質 \implies 反物質

陽子崩壊



陽子 \rightarrow 陽電子 + 光

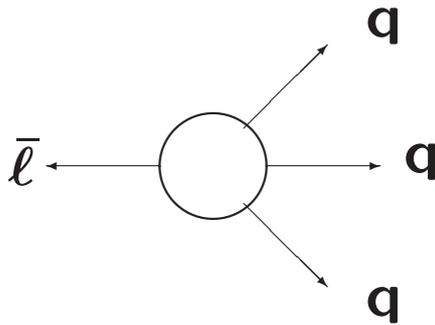
陽子崩壊は発見されていない

SuperKamiokande (2003)

素粒子理論における物質数の破れ

tHooft (1974)

インスタントン効果



物質数 = バリオン数 = $3 \times$ クォーク数 = B
レプトン数 = L

$$\Delta B \neq 0, \Delta L \neq 0 \quad : \quad \Delta(B - L) = 0$$

物質数の破れの確率 $P(\Delta B \neq 0)$

$$P(\Delta B \neq 0) \simeq e^{-\frac{16\pi^2}{g^2}} \sim 10^{-170} \ll 1$$

(at $T=0$)

陽子は安定である

(陽子崩壊は起こらない)

高温の宇宙初期ではどうなるだろう

宇宙の温度が数百 GeV 以上になると、物質数を破る確立は $O(1)$ になる

Kuzumin, Rubakov, Shaposhnikov (1985)

$$P(\Delta B \neq 0) \simeq O(1)$$

$$\text{at } T \geq O(100) \text{ GeV}$$

温度が数百 GeV 以上の初期宇宙で

反物質を物質に変える 反物質 \Rightarrow 物質

温度がほぼ 0 に近い現在では、物質数を破る確立は $\sim 10^{-170} \ll 1$ 。陽子崩壊は起こらない

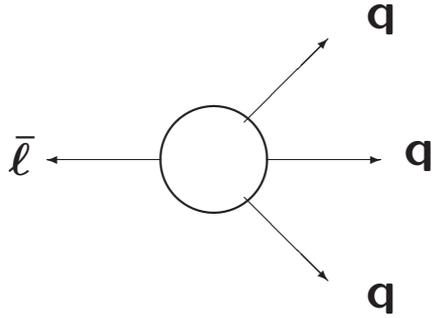
しかし

- 1 . CP の破れが小さすぎる
- 2 . 非平衡過程の条件を満たさない

ゆえに、この考えはほぼ否定された

III. レプトン数の生成

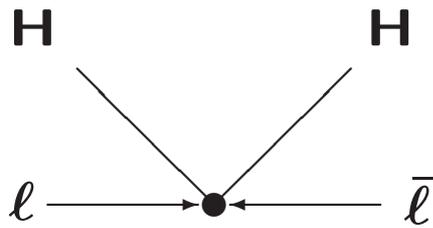
Fukugita, T.Y. (1986)



反レプトン数 \Rightarrow 物質数

レプトン数を破る相互作用を導入する

レプトン \Rightarrow 反レプトン



陽子の安定性と矛盾しない

ニュートリノの小さな質量を预言する

$$L = \frac{\langle H \rangle^2}{M} \nu \cdot \nu$$

$$\ell = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}$$

レプトン数を破る相互作用

この小さな質量は
ニュートリノの振動実験で確認された
SuperKamiokande (2002)

レプトン数の生成機構

何故ニュートリノの質量は非常に小さいのか？

クォークとレプトンの質量

u
d
e
 ν_e

第一世代

c
s
 μ
 ν_μ

第二世代

t
b
 τ
 ν_τ

第三世代

$$m_u \simeq 3\text{MeV}$$

$$m_c \simeq 1\text{GeV}$$

$$m_t \simeq 170\text{GeV}$$

$$m_d \simeq 5\text{MeV}$$

$$m_s \simeq 0.3\text{GeV}$$

$$m_b \simeq 5\text{GeV}$$

$$m_e \simeq 0.5\text{MeV}$$

$$m_\mu \simeq 0.1\text{GeV}$$

$$m_\tau \simeq 2\text{GeV}$$

$$m_{\nu_1} \simeq ?$$

$$m_{\nu_2} \simeq 8 \times 10^{-3}\text{eV}$$

$$m_{\nu_3} \simeq 0.05\text{eV}$$

$$\frac{m_{\nu_3}}{m_t} \simeq 5 \times 10^{-13} \quad : \quad \frac{m_{\nu_2}}{m_c} \simeq 8 \times 10^{-12} \quad !!$$

$$m_\nu \ll m_{q,l} \quad ??$$

シーソー機構

T.Y.
Gell-Mann et al (1979)

スピン 1/2 のフェルミ粒子の質量

左巻きのフェルミオン : $\longrightarrow v$

右巻きのフェルミオン : $\longrightarrow v$

粒子が質量を持っていれば $v < c$ (光速度).
 v より速く右へ進む系から見ると

左巻きのフェルミオン $\longrightarrow \longleftarrow v'$

右巻きのフェルミオン $\longrightarrow \longleftarrow v'$

フェルミ粒子の質量は左巻きと右巻きを混ぜる

$\bar{\Psi}_R \Psi_L$ と書く

例

$\cdot m_e \bar{e}_R e_L$ 電子の質量

$m_\nu \bar{\nu}_R \nu_L$ ニュートリノの質量
 $m_\nu \sim m_q \sim m_\ell$ は自然

WHY $m_\nu \ll m_{q,\ell}$?

大きな見落としがある

右巻きフェルミオンの反粒子は左巻きなので
もしフェルミオンが中性なら、粒子と反粒子
を混ぜる質量が可能になる

ν_R は中性なフェルミオンである

だから

$$\frac{1}{2} M \bar{\nu}_R^c \nu_R \quad (M \gg m)$$

反 ν_R

が可能である

ニュートリノの質量

$$\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}$$

固有値は

$$\begin{cases} m_{\nu_L} \simeq \frac{m^2}{M} \\ m_{\nu_R} \simeq M \end{cases}$$

ニュートリノの小さな質量は大きな質量 M によって説明される

$$m_{\nu_3} \simeq 0.05eV ; m_3 \simeq 100GeV$$

$$\rightarrow M_3 \simeq 10^{15}GeV$$

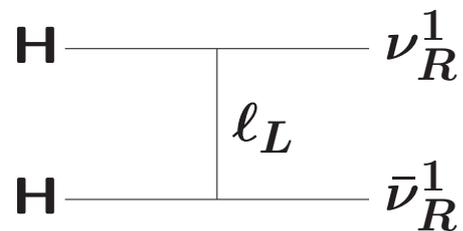
$$M_3 : M_2 : M_1 \simeq m_3 : m_2 : m_1$$

を仮定すると

$$M_2 \simeq 10^{12-13} GeV$$

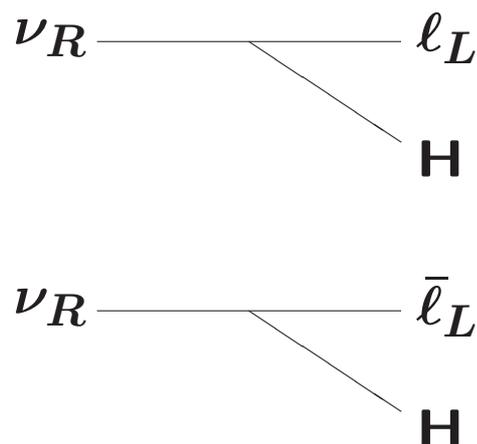
$$M_1 \simeq 10^{10} GeV$$

宇宙の温度が M_1 より高い初期宇宙では
 ν_R^1 や $\bar{\nu}_R^1$ が作られる



ν_R^1 や $\bar{\nu}_R^1$ を含む高温プラズマの宇宙が形成される

宇宙膨張とともに宇宙の温度は下がっていく
 宇宙温度が M_1 より低くなったころ ν_R^1 は
 レプトン ℓ や反レプトン $\bar{\ell}$ に崩壊する



$$\begin{cases} P(\nu_R \rightarrow \bar{\ell} + H) > P(\nu_R \rightarrow \ell + H) \\ P(\bar{\nu}_R \rightarrow \bar{\ell} + H) > P(\bar{\nu}_R \rightarrow \ell + H) \end{cases}$$

反レプトン数 > レプトン数

反レプトン優勢の宇宙が形成される

反レプトン \rightarrow 物質

このようにして物質優勢の宇宙が生まれた

宇宙の物質数 $n_B \equiv 3 \times (n_q - n_{\bar{q}})$

$$\frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 10^{-9} \left(\frac{m_{\nu_3}}{0.05 eV} \right) \left(\frac{M_1}{10^{10} GeV} \right) \sin \delta$$

光子の数

CPの位相

$$\text{観測値} \simeq 0.5 \times 10^{-9}$$

観測値をうまく説明する

宇宙の温度が $10^{10} GeV$ ぐらいまで下がってきたところに我々の宇宙は物質優勢の宇宙に進化したと考えられる

IV. 仮説の検証

1. ニュートリノの小さな質量 ✓
2. ニュートリノ振動にCPの破れ
3. レプトン数の破れ

ニュートリノ振動における CP の破れ

CP の破れ

K メソンの崩壊で発見 (1964)

B メソンの崩壊で発見 (2002)

ハドロン (クォーク) セクター

レプトンセクターの CP の破れが重要 ($\sin\delta \neq 0$)

ニュートリノ振動に現れる

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \neq 0$$

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau) \neq 0$$

もし、CP が破れていれば

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \neq P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau)$$

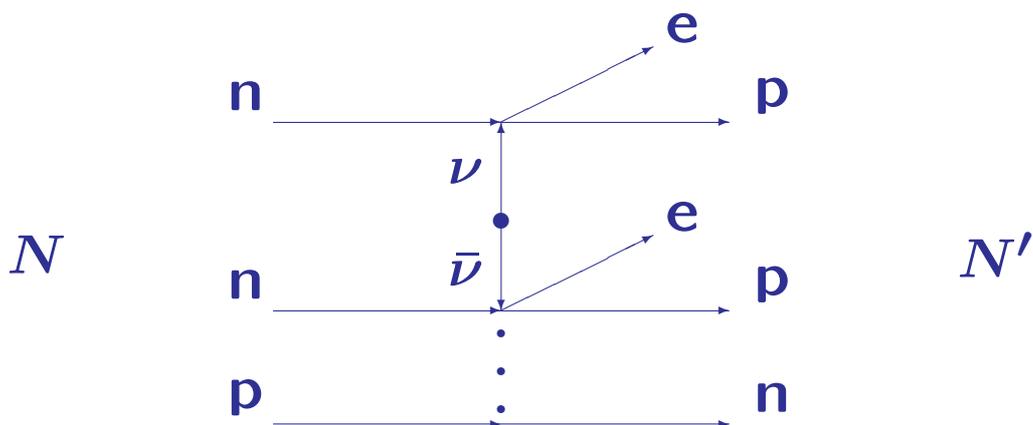
将来のニュートリノ振動実験で検証可能

レプトン数の破れ

$$\nu \longrightarrow \bullet \longleftarrow \bar{\nu}$$

ニュートリノと反ニュートリノの混合

原子核の2重ベータ崩壊



この2重ベータ崩壊を発見したという報告があるが
将来に実験で検証する必要がある

今のところ未発見と考えている

V. まとめ

1. ニュートリノの小さな質量

$$m_{\nu_3} \simeq 0.05 eV \dots$$

2. 宇宙の物質数

$$\frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 0.5 \times 10^{-9}$$

素粒子物理学の生んだシーソー機構はこの二つの基本的な観測量を同時に説明する

検証実験

1. ニュートリノ振動における CP の破れ
2. 原子核の 2 重ベータ崩壊