

# ニュートリノ現象論の現状と今後の展望



安田 修

東京都立大学  
yasuda@phys.se.tmu.ac.jp

素粒子の**標準模型**と呼ばれる理論では、陽子や中性子などの核子を構成するクォーク3世代と電子などのレプトン3世代とが物質を構成する素粒子であると考えられており、標準模型は現在までのほとんど全ての素粒子の現象を説明している。

**弱い相互作用**は、クォークやレプトンがゲージ粒子と呼ばれる媒介粒子 ( $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  の3種類) のキャッチボールをすることにより引き起こされる。特に  $W^\pm$  の放出・吸収の過程では、素粒子に質量がある場合、質量が定義できる質量固有状態とは異なる**フレーバー固有状態**と呼ばれる状態を通して弱い相互作用が起こる。

フレーバー固有状態は一般に質量固有状態とは異なり、両者は  $3 \times 3$  のユニタリー行列  $U$  で関係付けられる。  $U$  が単位行列ではない場合、フレーバー混合が存在すると呼ばれる。  $U$  の物理的自由度は4つあり、3個の回転行列の回転角(混合角と呼ばれる)と**CP変換**の不変性を破る位相1個に対応することが知られている。クォークに対しては、3個の混合角とCP位相が決定されている。

1998年にはスーパーカミオカンデにより**ニュートリノ**に質量が存在することが示されている。ニュートリノに質量がある場合、レプトンにもフレーバー混合が存在することになる。レプトンのフレーバー混合に対しては、現在までに3個の混合角がある程度決定されている。その結果、レプトンの混合角は、クォークのものとは著しく異なることがわかっている。また、CP位相は近未来の加速器実験で決定される見込みとなっている(ニュートリノにマヨラナ質量項と呼ばれる質量項がある場合にはさらにマヨラナ位相と呼ばれるCP位相が2個現れるが、現時点ではニュートリノにマヨ

ラナ質量項があるのかどうかは不明である)。

クォーク・レプトンの混合角がなぜ著しく異なるのかは謎であり、標準模型を超える物理に関するヒントを与えると考えられている。クォーク・レプトンの混合角とCP位相を説明するモデルは色々提唱されているが、現在まで決定的なものは得られていない。しかし、レプトンの混合角が明らかになったことでクォーク・レプトンのフレーバー混合のモデルに対する制限が1998年以前に比べて強くなったことは大きな進歩と言える。

さらに、宇宙にはクォークとレプトンから構成される物質ばかりがあり、それぞれの**反粒子**からなる反物質は存在していないことが謎として知られている。ニュートリノの質量が他のクォーク・レプトンに比べて非常に小さいことを説明する仮説として、シーソー機構と呼ばれるものが知られているが、その仮説では標準模型には存在しない、非常に重い右巻きニュートリノの存在が仮定されている。この右巻きニュートリノは、レプトジェネシスと呼ばれるシナリオにより物質優勢の謎を解決する可能性がある。近未来の加速器ニュートリノ実験でCP位相が決定されれば、レプトジェネシスの議論においてもある種のモデルに対する制限が加わり、1998年以前に比べて一歩前進となる。

一方、これまでのニュートリノの実験結果の中には3世代のニュートリノだけでは説明ができないと思われる現象も報告されている。これらはさらなる実験で検証する必要があるが、もし正しい結果であることが判明すれば、標準模型を超える物理に関する、さらなるヒントを与えると考えられている。

## 用語解説

**標準模型:** 標準模型では、物質を構成する素粒子は第一世代~第三世代のクォーク・レプトンからなる:

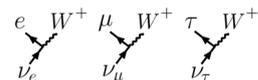
世代	第一	第二	第三
クォーク	アップ型 ダウン型	$u$ $d$	$c$ $s$ $b$
レプトン	アップ型 ダウン型	$\nu_e$ $e^-$	$\nu_\mu$ $\mu^-$ $\nu_\tau$ $\tau^-$

素粒子には下表の相互作用が働くが、電荷のないニュートリノには弱い相互作用しか働かない。

	強い相互作用	電弱相互作用	弱い相互作用
媒介粒子	グルオン	光子	$W^\pm, Z^0$
クォーク	$\times$	$\circ$	$\circ$
レプトン	$\times$	$\times$	$\circ$

**弱い相互作用:** 弱い相互作用はクォーク・レプトンに働く力で、核子や素粒子を崩壊させる力である。

**フレーバー固有状態:**



図のように弱い相互作用を媒介する  $W^\pm$  ボソンを放出・吸収する状態がフレーバー固有状態と定義され、質量固有状態とは異なる。

**CP変換:** 荷電共役 C (Charge conjugation) と空間反転 P (Parity) の操作を実施する演算がCP変換である。

**ニュートリノ:** 運動量とエネルギーが一見保存しないと思われていた中性子の崩壊を説明するため、1930年にパウリにより導入された電氣的に中性で質量の小さい粒子。電子型 ( $\nu_e$ )、ミュー型 ( $\nu_\mu$ )、タウ型 ( $\nu_\tau$ ) の三種類が存在する。

**反粒子:** 粒子に対して、質量は同じで電荷や他の量子数(バリオン数やレプトン数と呼ばれるものなど)を逆符号にしたものを反粒子と呼ぶ。