

物質優勢宇宙の誕生の謎に迫る

Keyword: 原子核の二重ベータ崩壊

1. はじめに

ニュートリノ振動現象の発見によってニュートリノは質量を持つことがはっきりした。20世紀末のこの発見は2015年の梶田隆章氏と Art MacDonald 氏のノーベル賞として高く評価されたが、それだけに留まらず次世代の研究の展開を告げるものでもあった。中でも二重ベータ崩壊の研究が注目されている。二重ベータ崩壊とは図1に示されるように、原子核中の中性子が電子と反ニュートリノを放出し陽子に転換するベータ崩壊が2回同時に起こる現象を指す。図1左 ($2\nu\beta\beta$) は標準理論の範囲内だが、粒子数保存則が破れて、反ニュートリノをニュートリノに転換できたら、図1右に示すニュートリノを出さないニュートリノレス二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) が起こり得る。この崩壊率はニュートリノの質量の絶対値を与える。さらに粒子数保存則の破れは宇宙から反物質だけが消え去った謎を解く鍵を与える。このため世界中で研究が進められているだけでなく、大型次世代研究計画が目白押しである。本稿では二重ベータ崩壊の意味と世界の研究の現状を簡単に紹介する。

2. マヨラナ粒子とレプトン数の保存則

ニュートリノはマヨラナ粒子の可能性が高く、その場合レプトン数 (粒子数) の保存則を破る。まず、マヨラナ粒子の説明から入ろう。スピン 1/2 のフェルミ粒子の質量項は、ディラック粒子の場合、左巻きニュートリノ場を ψ_L 、右巻きニュートリノ場を ψ_R として

$$m_D \bar{\psi}_R \psi_L \quad (1)$$

と左巻きと右巻きの積で与えられる。右巻きあるいは左巻きはカイラリティで、粒子の進行方向を量子化軸として、スピンの成分で定義される。粒子が質量を持つと、粒子より速く走る座標系がある。そこから見ると進行方向は逆転するがスピンは変わらないためにカイラリティが反転する。

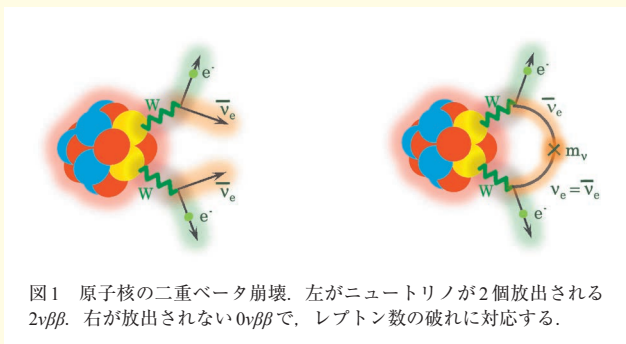


図1 原子核の二重ベータ崩壊。左がニュートリノが2個放出される $2\nu\beta\beta$ 。右が放出されない $0\nu\beta\beta$ で、レプトン数の破れに対応する。

つまり、フェルミ粒子の質量は特殊相対論の座標変換によるカイラリティの反転で表現される。

ニュートリノの質量が0の標準理論では、左巻きが粒子で右巻きが反粒子のワイル粒子と考えられていた。しかし、今やニュートリノは質量を持つ。この場合も質量項は左巻きと右巻きの積で表現されるが、式(1)の右巻きを左巻き粒子の反粒子とするマヨラナ質量項が導入できる。すなわち、

$$m_L \overline{(\psi_L)^c} \psi_L \quad (2)$$

と左巻きの粒子 (ψ_L) だけで質量項 (m_L) が構成できる。これは、座標系 (見方) を変えるだけで粒子と反粒子が反転することを意味するので、粒子数の保存則を破る。同様に右巻きだけでも質量項を作れるので、左巻きと右巻きに別々の質量を与えることも可能になる。

マヨラナはディラック方程式に現れる γ 行列を実数だけで書く表現を見出して、この事実を発見した。つまり、マヨラナ粒子もディラック粒子も根は同じである。クォークと荷電レプトンは電荷の保存則よりマヨラナ質量項を持ってない。ニュートリノは唯一マヨラナ粒子性が許される。さらに、質量を持てば左巻きも右巻きもあるはずなのに、左巻きの粒子しかない。実験での検証に期待が高まる。

この考えをさらに推し進めてニュートリノが非常に小さい質量を持つことを最も自然な形で説明したのがシーソー機構で、Gell-Mann らと柳田によって独立に提案された。¹⁾ ニュートリノをマヨラナ粒子と仮定して、左巻きの質量を標準理論の0とし、右巻きが何らかの統一理論のエネルギースケールである非常に重い質量 M_R を持つとして拡張する。左巻きと右巻きの2行2列の行列で質量項を考えると、左巻きと右巻きを結ぶディラック質量 m_D も存在すると考えるべきであろう。この行列を $m_D \ll M_R$ の条件で行列を対角化すると、左巻きの質量は m_D^2/M_R となる。

$$\begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{対角化}} \begin{pmatrix} \frac{m_D^2}{M_R} & 0 \\ 0 & M_R \end{pmatrix} \quad (3)$$

M_R は非常に重く m_D はニュートリノも他の荷電レプトンやクォークと変わらないとすると、観測されているニュートリノの極端に軽い質量が自然に説明できる。右巻きが重くなるほど左巻きが軽くなる関係からシーソー機構と呼ばれている。

高温の初期宇宙の粒子と反粒子は温度が下がるにつれて対消滅して光となり、現在の物質量は粒子と反粒子の差の残り、光に対して10桁小さい。粒子数が保存するなら、

宇宙初期に100億分の1だけ粒子が反粒子より多かったことになるが、そんな差が最初から決まっていたとは考え難い。粒子数保存則が破れていれば、CP対称性の破れと組み合わせて物質優勢の宇宙ができ上がったことが説明できる。宇宙初期の重い右巻きニュートリノの崩壊でレプトン数が平衡値からずれ、それからバリオン数が生み出されることが福来、柳田によって示された。²⁾レプトン数非保存を通してバリオン数(物質)を生み出すのでレプトジェネシスと呼ばれ、有力なシナリオと考えられている。

3. 二重ベータ崩壊の観測

$2\nu\beta\beta$ は2次の摂動でその崩壊率は寿命で $10^{19\sim 20}$ 年と小さいながらも標準理論の枠内で起こる。実験的には2電子のエネルギーを観測する。 $2\nu\beta\beta$ ではニュートリノにもエネルギーが配分されるので2電子の全エネルギーは最大がQ値の連続スペクトルになる。一方で、 $0\nu\beta\beta$ はQ値にピークを作るので信号は明確だが、 $2\nu\beta\beta$ よりさらに5~6桁崩壊率が小さいので、観測には工夫した検出器が必要になる。

$0\nu\beta\beta$ の崩壊率(寿命 $T^{0\nu}$ の逆数)はニュートリノの質量の自乗に比例し、以下のように表される。

$$|T^{0\nu}|^{-1} = G_{0\nu} M^{0\nu} \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (4)$$

Gは位相空間の体積で、 $M^{0\nu}$ は核行列要素、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ は電子ニュートリノの有効質量である。寿命から質量への変換には核行列要素の理論的計算値を用いるしかないが、現状では数倍の不定性がある。精度の向上が待たれる。ニュートリノには種間に混合があることが分かっているので、 $0\nu\beta\beta$ で観測できる有効質量は、大きく3つの領域に分類される。(1)縮退(degenerate)領域は $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ が0.1 eV程度以上で3種類のニュートリノがほぼ同じ質量になる。(2)逆階層(inverted hierarchy)領域は $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ が0.01~0.1 eVの領域で、3種の中で電子ニュートリノが一番重くなる。(3)順階層(normal hierarchy)領域は $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ が0.01 eVより小さい領域で、他のクォークや荷電レプトンと同じく電子ニュートリノが一番軽くなる。順階層が自然との考え方もあるが、ニュートリノにはクォークや荷電レプトンには無い大きな混合があり、同様な階層性になっているとは逆に考え難い。どちらにしても実験だけが答えを出せる。

4. 研究の発展と現状

二重ベータ崩壊の研究に用いられる原子核(以下 $\beta\beta$ 崩壊核)は、Q値が大きい一方で、ベータ崩壊が禁止されている原子核が適しており、10種類程の原子核が研究に使われている。検出器は大きく分けて、検出器が線源を兼ねる

タイプと検出器と線源が独立なタイプがある。前者の実験は検出効率が高いので多くの原子核が研究されている。例として ^{76}Ge の研究では、自然存在比8%の ^{76}Ge を80%程度にまで濃縮したGeで半導体検出器を作り、その中で崩壊の結果生成された電子の全エネルギーを観測する。濃縮により多くの $\beta\beta$ 崩壊核を用意するのが一般的である。約10年前に ^{76}Ge で $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ にして0.4 eV程度の有限の寿命を観測したとの報告があった。その後研究が進み、現在世界で最も精度の高い実験は東北大を中心とするKamLAND-Zenによる ^{136}Xe の実験で、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ で60 meVに迫る上限値に到達した。³⁾これにより ^{76}Ge の有限値はほぼ排除された。

二重ベータ崩壊の崩壊率(4)は、マヨラナ質量の自乗に比例する。質量の感度を1桁上げるには寿命の感度を2桁上げなければならない。これには物質質量を少なくとも2桁増やす必要がある。次世代研究が大型化していく理由がここにある。実験の鍵は次の3点に纏められる。(1)大量の $\beta\beta$ 崩壊核を用意し、(2)Q値領域の放射線のバックグラウンドを減少させ、(3)エネルギー分解能を向上させて $2\nu\beta\beta$ からの寄与をなくす、である。バックグラウンドの低減には検出器の開発だけでなく、宇宙線の寄与のない地下実験室の整備が欠かせない。今や地下実験室の整備は世界中でブームになっている。日本には世界に知られる神岡がある。またKamLAND-Zen以外にも、CANDLES, DCBA, AXEL等多数の実験が進行中あるいは開発中である。

ニュートリノの質量として10 meV程度まで探れれば縮退領域を超えて逆階層領域まで検証できる。世界の大型将来計画はこの辺りを目標にしている。さらに、1 meV程度まで探れれば順階層領域を含めて探索が可能になるが、困難な点はまだ多い。実験技術の発展が解決策を見出すと期待したい。

原子核の二重ベータ崩壊の研究によって、レプトン数非保存の検証やニュートリノ質量の決定などができる。そこには粒子と反粒子が転換可能という大きな発見を通して現代物理学の基本的な考え方の変更を迫る重要性がある。

参考文献

- 1) T. Yanagida: in Proc. of the Workshop on the Unified Theory and Baryon Number in the Universe, eds. O. Sawada and A. Sugamoto (KEK report 79-18, 1979) p. 59; M. Gell-Mann, *et al.*: in Supergravity, eds. D. Freedman and P. van Nieuwenhuizen (North Holland, Amsterdam, 1979) p. 315.
- 2) M. Fukugida and T. Yanagida: Phys. Lett. B. **174** (1986) 45.
- 3) A. Gando, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **117** (2016) 082503 and 109903.

岸本忠史(大阪大学大学院理学研究科 kisimoto@phys.sci.osaka-u.ac.jp)

(2016年10月10日原稿受付)