

Title	二重ベータ崩壊測定によるニュートリノの研究
Author(s)	嶋, 達志
Citation	大阪大学低温センターだより. 1990, 72, p. 15-18
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/8534
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

二重ベータ崩壊測定によるニュートリノの研究

理学部 嶋 達 志 (豊中4342)

はじめに

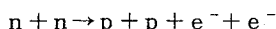
- ・ニュートリノの質量 (m_ν) は本当にゼロなのか？
- ・ニュートリノが粒子・反粒子の区別のないマヨラナ粒子である可能性はないのか？
- ・レプトン数は厳密に保存するのか？
- ・パリティは 100%非保存なのか？ 弱い相互作用には左巻 (V-A) 相互作用以外に右巻 (V+A) 相互作用も存在しないのか？

など、ニュートリノにまつわる素粒子物理学上極めて重要かつ根本的な問題が、今もなお未解決のまま残されている。特にニュートリノの質量の問題は、宇宙の見えない質量の問題や、太陽ニュートリノ問題と関連して、解決が切望されている。

これらの問題にアプローチするための最も有効な実験的手段の一つに、ニュートリノ (ν) の放出されない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の測定がある。本稿では、加速器科学とは相補的な役割を担い、近年急速な進歩を遂げている非加速器実験科学の一例として、江尻研究室で進められている二重ベータ崩壊測定実験を紹介する。

二重ベータ崩壊とは？

$0\nu\beta\beta$ は、次式で表されるように、1つの原子核内でベータ崩壊が同時に2度起きる反応である。^{1,2)}



この反応は、レプトン数保存則が破れている場合にのみ許容される反応であり、しかも、一方のベータ崩壊で放出される仮想的な ν が、もう一方のベータ崩壊で吸収されなければならないため、“ ν がマヨラナ粒子であること”、及び、“ゼロでない m_ν が右巻相互作用のどちらかが存在すること”、が要求される。すなわち $0\nu\beta\beta$ は、いわゆる電弱標準理論の枠内では起こらない現象であり、その探索によって標準理論や大統一理論を厳しく検証することができる。現在 $0\nu\beta\beta$ に対する最も厳しいリミットは、U.C.S.B.とL.B.L.グループによる ${}^{76}\text{Ge}$ を試料とした実験による $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}({}^{76}\text{Ge}) > 10^{24}\text{yrs}$ であるが³⁾、この実験値と、遷移核行列要素の理論計算から、ニュートリノ質量の上限値として $< m_\nu < 1\text{eV}$ が得られる。

一方、2個の ν が放出される $2\nu\beta\beta$ は、 $0\nu\beta\beta$ のような条件を必要とせず標準理論の枠内でも起こり得るが、検出器による直接測定では現在までにU. C. Irvineグループによる ${}^{82}\text{Se}$ を試料とした実験で $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}({}^{82}\text{Se}) = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{20}\text{yrs}$ (68% C.L.) と言う結果が一例報告されているだけである⁴⁾。 $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}$ は、 m_ν などの未知パラメーターを含まないので、実験値と理論値を比較することにより理論計算の妥当性の検証が可能であり、ひいては $0\nu\beta\beta$ の遷移核行列要素の計算精度の向上にもつながる。

従って $2\nu\beta\beta$ の精密な測定もまた重要である。

我々江尻研究室は、 ^{76}Ge よりも一桁程度崩壊確率が大いと考えられる⁵⁾ ^{100}Mo を試料とし、 $\langle m_\nu \rangle \geq 0.3\text{eV}$ の領域での $0\nu\beta\beta$ 探索を目指して、5年前からより高感度な測定器ELEGANTS V[®] の開発に着手し、今年2月より岐阜県神岡鉱山の地下1000mでの本格的な測定を行っている。

ELEGANTS Vによる ^{100}Mo の二重ベータ崩壊測定

$0\nu\beta\beta$ の場合、1mol 程度の量の試料原子核を用いると、 $\langle m_\nu \rangle = 1\text{eV}$ と仮定しても、真のイベントは年間数カウント以下しか期待できない。これに対して、天然放射線などによる偽イベントは年間数億カウントにも達する。従って、 $0\nu\beta\beta$ 観測には、いかに高い感度とイベント識別能を備え、かつ極めて放射能の少ない測定システムを実現するかが鍵となる。

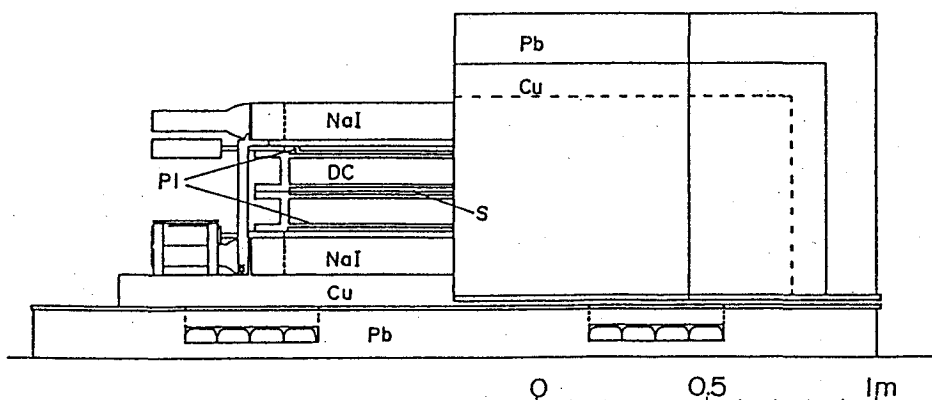


図1 ELEGANTS V概略図 (側面図)

S : Mo試料、 DC : ドリフトチェンバー

PI : プラスティックシンチレーター

NaI : NaI 検出器、 C : 無酸素銅シールド、

Pb : 鉛シールド

ELEGANTS Vの概略図を図1に示す。試料面(S)は、 $18\text{cm} \times 18\text{cm} \times 40\mu\text{m}^2$ の大きさを持つ区画4つから成り、そのうち2区画が94.5%濃縮 ^{100}Mo 、他の2区画がバックグラウンド差引きのための天然Moでできている。試料面の上下には β 線の飛跡検出用のドリフトチェンバー(DC)が置かれている。 β 線の飛跡が2本あり、かつそれらが試料面上の1点で交わるイベントだけを真のイベントとして選び出すことにより、効果的にバックグラウンドを除去することができる。ドリフトチェンバーの上下には各 β 線のエネルギー及び時間情報を得るためのプラスチックシンチレーション検出器(PI)が設置され、さらにその外側には、バックグラウンドとなる環境放射線や宇宙線に反同時計数をかけてそれらを除去したり、二重ベータ崩壊の $0^+ \rightarrow 2^+$ 遷移が起こった場合に娘核が放出する γ 線と同時計数を取るためのNaIシンチレーション検出器(NaI)が設置されている。ELEGANTS Vは、それぞれ異なる特長を持つこれら3種類の検出器を巧みに組み合わせることにより、極めて高い感度とイベント識別

能を実現している。

また、極低バックグラウンド実現のため、装置の各部品にはあらかじめ測定・吟味した低放射能材料を用い、検出器全体を10cm厚の無酸素銅 (Cu) と15cm厚の鉛 (Pb) で環境放射能に対するシールドを施した上で、全システムを神岡地下1000mの実験室に設置して宇宙線を回避している。さらに、液体窒素を蒸発させて得られる純窒素ガスを循環させることによって、空気中に含まれる放射性ラドンの影響を避けている。

現在までの結果及び成果

今年2月からスタートした1212.44時間の測定データによるスペクトルを図2に示す。これは ^{100}Mo の上に飛跡の交点を持つイベントの2個の β 線のエネルギー和のスペクトルから天然 Mo のそれをバックグラウンドのスペクトルとして差し引いたものである。これより、 $0\nu\beta\beta$ 及び $2\nu\beta\beta$ 各々の半減期に対して

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} (^{100}\text{Mo}) = 1.5 \times 10^{21} \text{ yrs (68\% C.L.)}$$

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} (^{100}\text{Mo}) = (1.14^{+0.28}_{-0.18}) \times 10^{19} \text{ yrs (68\% C.L.)}$$

と言う結果が得られた。⁷⁾

このことから、 $0\nu\beta\beta$ に対しては1年から数年の連続測定で $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} \sim 10^{21}$ yrs、 $\langle m_\nu \rangle \sim 0.3$ eVの領域に到達可能と考えられる。また、 $2\nu\beta\beta$ についてはMoscowグループが $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = 3.3 \times 10^{18}$ yrs

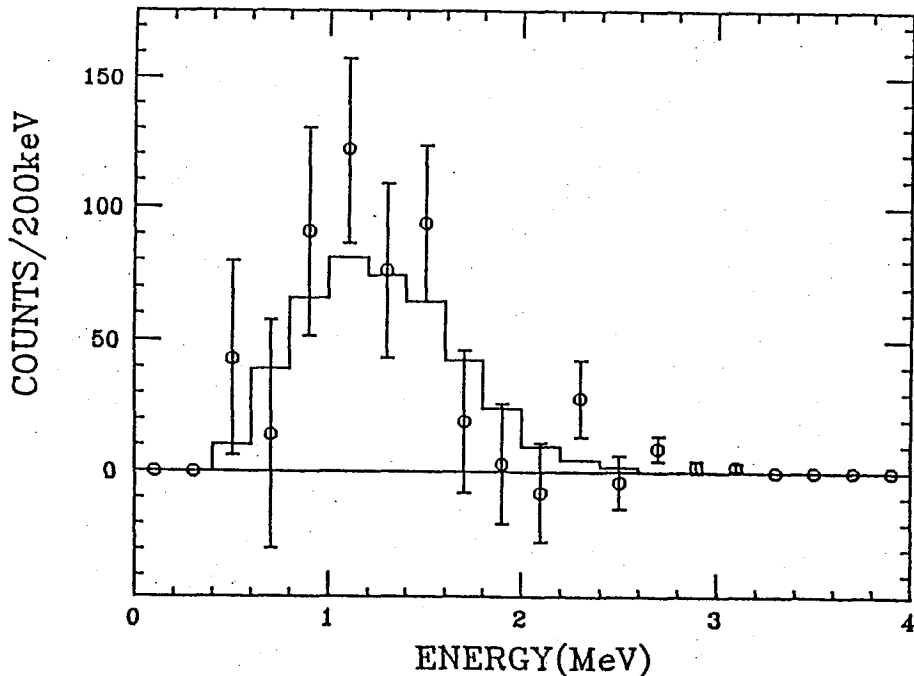


図2 2β エネルギー和スペクトル

ドット：測定値 ヒストグラム：モンテカルロ計算値)

と言う測定結果を主張している⁸⁾が、バックグラウンドの評価などの点で疑問視する向きが多く、ELEGANTS Vの結果が¹⁰⁰Moにおける世界初の信頼できる半減期となる公算が大である。また、この結果は $T_{1/2} \sim 10^{18}$ yrs と言う理論的な予想⁴⁾を覆す可能性もあることから、現在議論・注目的となっている。

非加速器実験の今後の動向

以上、我々が開発した汎用放射線測定器ELEGANTS Vの概略と、それによる二重ベータ崩壊実験の最近の成果について述べた。ELEGANTS Vは、二重ベータ崩壊だけでなく、電子崩壊や電荷非保存崩壊など原子核崩壊が関与するあらゆる超稀現象の探索に対して応用可能であり、その活躍が期待される。

非加速器実験の分野では、今後さらに高感度・高選択度化、低ノイズ化、試料及び検出器の大型化等の追求が続けられると予想されるが、その意味で、近年特に注目されているのが極低温技術を応用した粒子検出器である。⁹⁾ 現在、

- 1) 臨界温度近くに保たれ、かつ磁場をかけられた超伝導微粒子が、入射粒子のエネルギーロスにより加熱され、常伝導状態にもどる際の磁場の変化を検出する方法、
- 2) mK程度に冷却されたSi等、Debye 温度の高い物質の純結晶の、粒子のエネルギーロスによる温度上昇を、サーミスタなどの温度センサーで検出する方法、
- 3) mK程度の温度の純結晶中の結晶原子核と、入射粒子との弾性散乱で励起されるフォノンをピックアップする方法、

等が考えられており、これらの検出器は、従来の半導体検出器よりも一桁以上良好なエネルギー分解能と、数KeV 程度の極めて低いエネルギーレスショルドを達成できると予想されている。このような検出器が実用化されれば、 $\langle m_\nu \rangle \sim 0.01$ eVの領域での $0\nu\beta\beta$ の探索や、地球近傍を漂っている宇宙暗黒物質の検出など極めて重要かつ興味深いテーマの探究が可能になると期待され、我々を含め、現在世界各地のグループが実現を目指して努力中である。

参考文献

- 1) M. Doi, T. Kotani and E. Takasugi, Prog. Theor. Phys. Supp. No.83 (1985).
- 2) 上窪田紀彦、柴田徳思、江尻宏泰 月間フィジクス 68 (1987) 37.
- 3) P. O. Caldwell, R. M. Eisberg et al., Phys. Rev. D33 (1986) 2737.
- 4) S. R. Elliott, A. A. Hahn and M. K. Moe, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2020.
- 5) K. Muto and H. V. Klapdor, Phys. Lett. B201 (1988) 420.
- 6) K. Okada et al., Nucl. Phys. A478 (1988) 447C.
- 7) H. Ejiri et al., Proc. Int. Conf. PANIC '90, to be published in Nucl. Phys. 1990.
- 8) A. A. Klimenko et al. Proc. Int. Conf. Nucl. Weak Process and Nucl. Structure, Osaka (1989) 180.
- 9) P. F. Smith and J. D. Lewin, Phys. Rep. 187 (1990) 205.