

中性子寿命の謎，解明に向けた新しい手法



三島 賢二
Mishima Kenji

1 はじめに

中性子は陽子と共に原子核を構成する核子のうちのひとつであり，寿命約 15 分で陽子，電子，反ニュートリノの 3 体に β 崩壊する。これは 4 つの基本相互作用のうち「弱い力」が引き起こす最も基本的な反応の 1 つであり，中性子が β 崩壊を起こすまでの時間，つまり中性子寿命は，弱い力の物理法則を理解する上での重要な値である。特に宇宙初期におけるビッグバン元素合成やクォーク間遷移を記述する小林・益川行列の導出に直結しており，世界中でその精度を上げるべく精力的に実験が行われている。

この中性子寿命の測定値が現在大きな問題を抱えている。測定の方法によりその値が異なるのである。本稿では中性子寿命が関連するビッグバン元素合成と 2 種類の測定方法による食い違い，そしてこの問題を解決すべく進めている大強度陽子加速器施設 (J-PARC) での中性子寿命測定実験¹⁾ について紹介する。

2 ビッグバン元素合成と中性子寿命

現代物理学では宇宙はビッグバンから始まった，と考えられているが，宇宙背景放射の発見によりその仮説が決定的になったのは比較的最近の 1964 年のことである。ビッグバンでできた高温の火の玉は，膨張と冷却を経たのち現在の宇宙を形成する。宇宙

の温度が核子の質量である 1 GeV 程度まで冷却されると，宇宙にはまず陽子と中性子が同じ数作られる。そこから時間が経って更に温度が下がると β 崩壊により中性子数が減少し，中性子 / 陽子の比が 1/7 程度となる。そこから核反応で重水素原子核 (D) を形成し，そして D 同士が組み合わさって He 原子核が作られる。その後質量数 7 までの原子核が最初の 3 分間で形成される。この過程をビッグバン元素合成 (BBN) と呼ぶ。質量数 8 に安定な原子核が存在しないため，それよりも重い原子核はその後の恒星での核反応にて形成されることになる。詳細は例えば文献 2) に詳しい。

中性子寿命は D 形成反応が始まる時点での中性子 / 陽子比を決定する。寿命が短いと，宇宙の温度低下中に β 崩壊で陽子ばかりになってしまい D 及びその後の元素が形成されなくなる。逆に長ければ多くの He が形成されることになる。今世紀に入り WMAP や Planck 衛星といった宇宙背景放射観測の大きな発展から BBN はビッグバンの 3 分後という初期の宇宙で何が起こっていたかを知り得る精密宇宙論となっている。BBN 理論の計算精度は中性子寿命の決定精度が律速しており，中性子寿命の乖離は BBN 精密研究の妨げとなっている。

3 中性子寿命の謎：測定法による食い違い

中性子の寿命は 1951 年に中性子 β 崩壊の存在が

確認されて以来、世界中で測定が行われ続け徐々に測定精度が向上している。しかし、近年行われた2つの測定方法では、その値に大きな食い違いが観測された。この食い違いは「中性子寿命問題 (Neutron lifetime puzzle)」と呼ばれ、中性子の寿命という基礎的な値に齟齬があるという事実は BBN やその他関連分野において大きな障害となっており、早急な解決が望まれている。

原因として最もあり得るのは実験精度を実際よりも小さく見積もってしまった、ということであろう。まずは2種類の実験の概要を説明する。測定方法のひとつはやってくる中性子の数とそのうちの崩壊数を計数する方法で、歴史的に中性子ビームを用いてきたところから「ビーム法」と呼ばれる。この実験では中性子ビームを検出器内に入射し、その入射中性子量と崩壊で生成される陽子の数を測定する。中性子数と陽子数の絶対値を別々の検出器で測定しなければいけない所にこの実験の難しさがある。ビーム法の最も精度の良い実験はアメリカ NIST 原子炉にて行われた³⁾。まず原子炉からの特定の速度 (~1,000 m/s) の中性子を取り出し、その中性子を磁場と電場がかかったトラップに通す。中性子がこの中でβ崩壊した場合、発生した陽子はトラップ中に閉じ込められる。一定時間後トラップされた陽子を取り出し、その数を測定する。トラップを通過した中性子数は精度 0.05% という非常によく校正された中性子ビームモニターで測定される。単位時間当たりの陽子検出数、中性子速度、トラップ長さ、中性子ビーム量から中性子の寿命が導出される。2013 年の最新の実験結果は 887.7 ± 2.2 秒であった。

測定方法のもうひとつは超冷中性子 (UCN) という非常に速度の遅い中性子を容器内に閉じ込め、それが時間経った後に崩壊せず生き残った数から寿命を導出する方法で、容器に閉じ込めることから「ボトル法」と呼ばれている。中性子を容器に閉じ込める、という部分に違和感をもたれるかも知れない。中性子は室温では速度約 2,200 m/s の速さで動いている。これを速度 7 m/s 以下、おおよそ人が走る速さまで減速すると物質表面で全反射するという性質を持つようになるため、一般に透過性の高いと言われる中性子でも容器内に閉じ込めることが可能になる。

2005 年、極めて精度の高いボトル法の実験結果が発表された⁴⁾。この実験は露 PNPI グループが

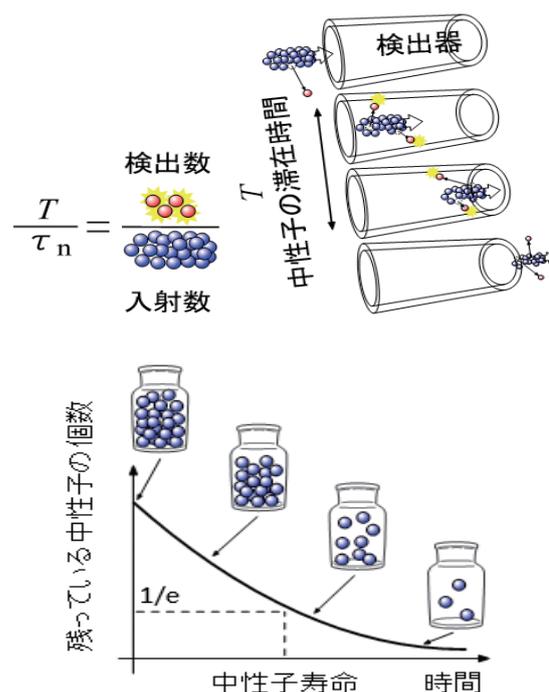


図1 中性子寿命の測定法の概念図
ビーム法 (上) とボトル法 (下) の実験

ILL 原子炉において重力を利用した UCN 蓄積容器を用いたもので、UCN を容器内に取り込み、一定時間経過後、残った UCN の数を検出する。壁との衝突の際のわずかな損失を補正し導出した中性子寿命の値は 878.5 ± 0.8 秒であった。これは、それまでの実験の平均値 885.7 ± 0.8 秒⁵⁾ と大きく食い違うものであり、ここから中性子寿命の問題が議論されるようになった。

ボトル法の新しい試みとして 2018 年、米 Los Alamos では UCN を数テスラの磁場により閉じ込める磁気ボトルによる実験が行われた⁶⁾。原理はボトル法と同じく UCN を蓄積しその崩壊時間を測定するというものであるが、閉じ込めを磁場で行うことで、壁との衝突による UCN 損失の影響を排除できるようになった。結果は 877.7 ± 0.8 秒と 2005 年露 PNPI 結果と無矛盾な値であった。

ビーム法とボトル法、それぞれの実験が双方正しい、などということはあるだろうか？崩壊を検出するビーム法の方が中性子消失を測定するボトル法よりも寿命が長い、という現象は、例えば UCN が蓄積中に未知の粒子に変化し、検出されずに無くなってしまっていれば説明がつく。突飛な考え方ではあ

るが、このような大胆な仮説が中性子寿命問題を契機にされ始めている。

例えば中性子が仮説上の鏡像パートナーである、ミラー中性子という通常の物質とは反応しない粒子に変化する、という仮説が提唱されている⁷⁾。もし中性子がミラー中性子に変化しうるならば、蓄積された中性子はミラー中性子に変化し壁を通り抜け容器からは失われてしまう。また、別の仮説は中性子が崩壊する際に一部が暗黒物質に変化する、というものである⁸⁾。この暗黒物質も検出されないため、中性子寿命の差を説明できる。更に、暗黒物質との散乱により、中性子ビームには影響がないが、エネルギーの小さいUCNのみが容器から蹴り出されたため、寿命が短く見える、という説も提唱されている⁹⁾。

4 J-PARC における新しい手法

この中性子寿命の乖離が実験の間違いなのか、あるいは未知の現象の兆候を捉えているのか、未だ問題は解決していない。問題解決のためには過去に行われた実験とは質的に異なる実験を行う必要がある。筆者らは中性子寿命問題の解決のため、J-PARC パルス中性子を使った新しい中性子寿命測定実験を進めている。この実験はビーム法に分類される。過去のビーム法の実験が中性子崩壊で生じる陽子を検出していたのに対し、この実験では崩壊で生じる電子を検出する。測定対象及び手法が異なるため、仮に陽子計測実験が何らかの原因で間違っていた際、その影響を受けず、正しい結果を導けるはずである（無論、この実験独自の誤差を正しく見積もる必要があるが）。

実験はJ-PARC 物質生命科学研究所の基礎物理ビームライン (BL05/NOP) で行われている。装置全体の写真を図2に示す。J-PARC のパルス中性子ビームはまず、スピンドリフチョッパーと呼ばれる中性子制御装置を用い40 cm 程度の長さに整形する。その後、長さ1 m のガス検出器 (Time Projection Chamber, TPC) に導入し、検出器内部で発生する中性子崩壊からの電子を検出する (図3)。中性子パンチが完全にガス検出器の内部に入っている時のみ計測を行うことで、中性子を360度検出器で囲むことができ、高い検出効率を達成できる。

J-PARC パルス中性子の速度はおおよそ1,000 m/s

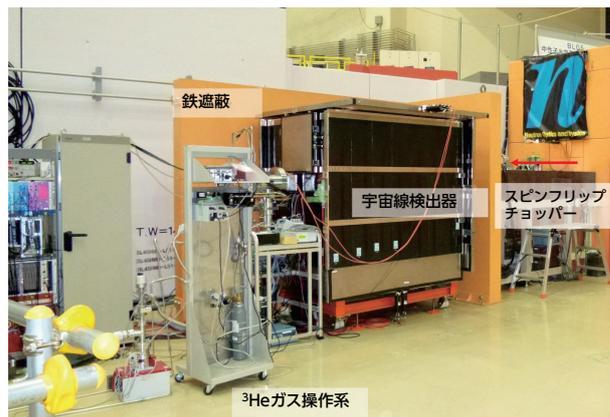


図2 BL05 実験エリアに設置された中性子寿命測定装置

中性子は写真右から入射され、スピンドリフチョッパーで整形される。宇宙線検出器内に鉛で遮蔽された真空容器があり、その中に TPC が設置されている

であり、検出器の有感領域1 m を1 ms で通過してしまう。寿命が880秒とすると透過中性子 10^6 個あたり1回崩壊する程度である。J-PARC の高強度を持ってしても β 崩壊計数は0.1 cps 程度であるため、本実験の装置は加速器実験でありながら、非常に低バックグラウンドが要求される。

一般に検出器構造材として使用されるガラスエポキシといった材料は ^{40}K やウラン・トリウム系列の自然放射能を多く含み、バックグラウンドの原因となる。そのため、筆者らは放射能含有量が非常に小さいポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を構造材に選定した¹⁰⁾。TPC の動作ガスによって散乱した中性子は TPC 容器の壁面に当たり即発 γ 線によるバックグラウンドを引き起こす。そのため、TPC 内部を ^6LiF 遮蔽体で覆っている。これは ^6LiF 粉末とテフロンを混ぜて焼結しタイル状に整形したものであり、中性子の大部分は $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ により吸収されるため γ 線を発生させることがほぼない。

この TPC は真空容器の中に収められた状態でビームラインに設置されている。低バックグラウンドの PEEK 製 TPC を用いたとしても実験室内のコンクリート壁からの自然放射能は問題になるため、 γ 線遮蔽として真空容器を厚さ5 cm の鉛で覆っている。

宇宙から地表に、 100 cm^2 あたり毎秒1個降り注ぐ宇宙線も問題になる。宇宙線はエネルギーが高く簡単には遮蔽できない。ニュートリノ実験のような低バックグラウンド実験では1,000 m 以上の地下に検出器を設置するが、さすがにJ-PARC を地下に持っていくことはできない。そこで、TPC の周りを宇宙

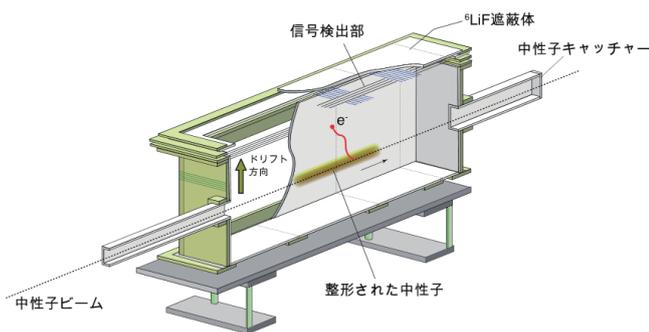


図3 TPC 検出器概略図

整形した中性子ビームを打ち込み、全体が検出器内部に存在する時の中性子崩壊を測定する

線検出器で覆い、宇宙線が飛来したタイミングの信号を除外している。中性子源や隣のビームラインからの中性子線やγ線からTPCや宇宙線検出器を遮蔽するため、更に20cm厚さの鉄で全体を覆っている。

入射中性子量はガス中に微量(1ppm)に、しかし精密に混合させた ^3He と中性子の $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応から求める。この手法では入射中性子数と中性子崩壊数を同じ検出器で測定するため、別々の検出器を使う過去の陽子検出の手法と比較して系統誤差を小さく抑えることができる。 ^3He ガスの量が変化しないよう、ガスは真空容器に封じきった状態で使用する。その場合、TPC構造材や容器壁面から発生するアウトガスの混入によって徐々にTPCの応答が変化する。TPCの外側の回転ステージ上に ^{55}Fe 校正線源が設置してあり、1時間に1回程度、線源からの5.9keVのX線をTPCに導入し、TPCの応答を校正している。

実験立ち上げ直後東日本大震災に見舞われ、またJ-PARCのトラブルによって年単位での中断を余儀なくされる等苦難の連続であったが、筆者らは2020年この実験の最初の実験結果を発表した¹⁾。値は 898 ± 10 (統計誤差) $+15/-18$ (系統誤差)秒で、ビーム法、ボトル法の双方と無矛盾な結果であった。

結果を過去の測定と合わせて図4に示す。

5 まとめと展望

中性子寿命が測定方法によって異なるという中性子寿命問題の原因究明に向け、筆者らはJ-PARCパルス中性子源を用いた新しい測定方法を確立した。

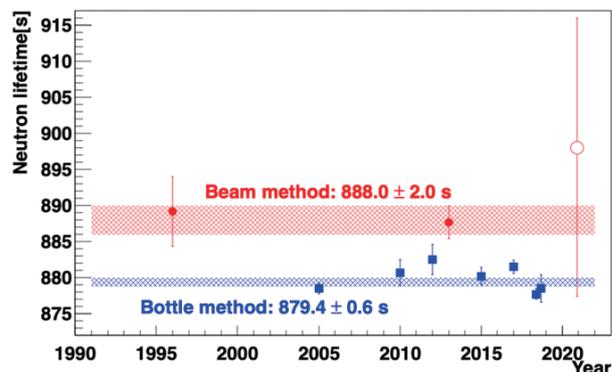


図4 世界の中性子寿命実験結果のまとめ

■がボトル法、●がビーム法によるものである。○がJ-PARCで得られた最初の結果である¹⁾

得られた中性子寿命の値はまだ精度が低く、ビーム法、ボトル法のどちらとも無矛盾な値であり、現状ではまだ中性子寿命問題の原因究明には至っていない。統計精度改善のため、ビームラインには大型のスピンプリップチョッパーが実装され、中性子強度の3.2倍の増強に成功した。実験装置は系統誤差対策も含め改良を続けており、より高精度のデータ取得が可能になった。紙面の都合上、実験背景や手順の詳細は省いたが、参考文献11)に詳細があるので、興味を持たれた方は参考にいただければ幸いである。今後数年のうちに中性子寿命問題解決の糸口を掴む結果が出ることをご期待いただきたい。

参考文献

- 1) K. Hirota, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 123C02 (2020)
- 2) 市川和秀他, ビッグバン元素合成(解説), 日本物理学会誌, **65**(7), 535-544(2010)
- 3) A. T. Yue, *et al.*, *Phys.Rev.Lett.*, **111**, 222501 (2013)
- 4) A. Serebrov, *et al.*, *Physics Letters B.*, **605**, 72-78.(2005)
- 5) S. Eidelman, *et al.*, *Phys. Lett. B.*, **592**, 1(2004)
- 6) R. W. Pattie Jr., *et al.*, *Science*, 3606389, 627-632(2018)
- 7) Z. Berezhiani, *Eur. Phys. J. C.*, **79**, 484(2019)
- 8) B. Fornal and B. Grinstein, *Phys. Rev. Lett.*, **120**(19) 191801(2018)
- 9) S. Rajendran and H. Ramani, *Phys. Rev. D.*, **103**, 035014(2021)
- 10) Y. Arimoto, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.*, **799**, 187(2015)
- 11) 三島賢二他, “中性子寿命の謎の解明に向けて”, 高エネルギーニュース, Vol.39 No.4(2021)

(高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 中性子研究系)