## TUCAN による高強度超冷中性子源の開発

川崎 真介(高エネルギー加速器研究機構)

# Development of a High Intensity Ultra-Cold Neutron Source by the TUCAN

Shinsuke Kawasaki

High Energy Accelerator Research Organization, KEK



#### **ABSTRACT**

A new ultra-cold neutron source has been developed by TUCAN collaboration aiming to measure neutron electric dipole moment at a precision of 10<sup>-27</sup> ecm. Ultra-cold neutrons are extremely slow neutrons of which the kinetic energy is below several hundred neV. Therefore, UCNs are totally reflected at the surface of certain materials and can be confined in a material bottle.

Keywords: Ultra-Cold Neutron, Super-Thermal Method, neutron Electric Dipole Moment,

#### 1. はじめに

現在の物質優勢宇宙となるためには物質・反物質間の対称性(CP対称性)の破れが不可欠である.素粒子標準理論では小林・益川理論によりクォークのCP対称性の破れが説明され、Belle実験等で実験でも確かめられている. さらに T2K 実験によりニュートリノでの CP対称性の破れの兆候も観測されている. しかし、これらだけでは現在の物質・反物質非対称性を説明するには十分な量ではない. すなわち、素粒子標準理論を超えた新しい物理が存在する. この新しい物理を中性子の永久電気双極子モーメント (nEDM: neutron Electric-Dipole Moment) をプローブに探る.

中性子は電気的に中性子であるが、内部に電荷 の偏りを持つ可能性がある. この電荷の偏りによ って生じるのが EDM である. EDM の大きさを測 る単位としては素電荷 e と距離の単位 cm を掛け 合わせた ecm が用いられる. EDM の存在は時間 反転対称性(T対称性)を破る. ローレンツ対称 性から導かれる CPT 保存が成り立つと仮定すれ ば T 対称性の破れはすなわち CP 対称性の破れを 意味する.素粒子標準理論によって予想される nEDM の値は 10-30 - 10-32ecm と抑制されている. 一方で CP 非対称性を内包する SUSY などの新物 理では 10<sup>-26</sup> - 10<sup>-28</sup> ecm の大きさの nEDM を予想 する. 中性子だけでなく電子や原子核を用いて EDM の探索が行われてきたが、これまでに有限の 値が観測されたことは無い.nEDM において最も 感度の高い実験はスイスのポールシェラー研究所 (PSI) で行われた[1]. 超冷中性子 (Ultra-Cold Neutron: UCN) を物質容器に溜め込み電磁場中で

のスピンの歳差運動周期を精密に測定する実験である.この実験では nEDM の大きさに 1.8×10<sup>-26</sup> ecm の上限値を与えている.この測定の感度は統計精度により制限されており、大強度の UCN 源を開発することで新物理の予想する nEDM 領域を探索することが可能になる.

### 2. 超冷中性子 (Ultra-Cold Neutron: UCN)

中性子は物質に入射する際, Fermi の偽ポテンシャルと呼ばれる有効ポテンシャルを感じる.

中性子の持つ運動エネルギーが物質の持つポテンシャルより小さい場合,すべての角度で物質に入射する中性子は全反射する.例えばニッケルの場合,この偽 Fermi ポテンシャルは 252 neV であり,252 neV より小さな運動エネルギーを持つ中

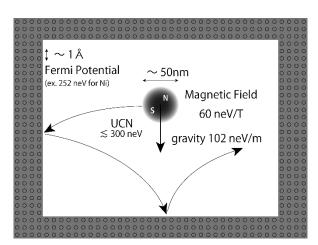


Fig. 1. Property of UCN. UCN reflects at the material surface by Fermi potential. UCN can be controlled by gravity and magnetic field.

性子はニッケルで出来た容器に閉じ込めておくことが可能である. UCN とはこのように非常に小さな運動エネルギーを持つ中性子のことである.

中性子が地球の重力から受けるポテンシャルは 102 neV/m である. UCN が 250 neV の運動エネルギーを持つ場合,その全運動量を鉛直方向に持っていたとしても高々2.5 m ほどしか浮上することができず,その後落下してしまう.中性子はスピンを持つため磁場からも力を受ける.そのポテンシャルは 60 neV/T である.5 Tの磁場が存在するとき,磁場と並行のスピンを持つ UCN は磁場のポテンシャルを超えることができずポテンシャルを超えることができずポテンシャルをもって跳ね返るが,磁場と反平行のスピンをもつ UCN はその磁場ポテンシャルをすり抜ける.磁場を制御することにより,UCN を偏極させることや磁気トラップ内に閉じ込めることも可能である (Fig. 1 参照).

UCN は物質,重力,磁場のポテンシャルで局所的に閉じ込めることが可能であり,外場との相互作用時間を長く取ることができるため,微弱な相互作用を増幅して観測することに適している. UCN は nEDM の探索実験だけでなく,中性子寿命測定や重力相互作用の検証など種々の基礎物理実験に用いられている.

## 3. スーパーサーマル法による超冷中性子生成

中性子の冷却は通常,減速材によって減速する.減速材の中性子が入射すると,減速材中の物質と衝突して中性子は運動エネルギーを失い温度が下がっていく.この過程を熱化と呼ぶ.減速材には室温の軽水,重水や20K程度に冷却された固体重水,液体重水素などが用いられるが,中性子は減速材の温度に応じて減速されていく.しかし,この熱化の過程では減速材の温度より低い中性子を得ることはできない.熱化した中性子の運動エネルギーはボルツマン分布に従う.

$$\Phi(E) = \frac{2\pi\Phi_0}{(\pi k_B T)^{3/2}} \left(\frac{2}{m}\right)^{1/2} E e^{\frac{-E}{k_B T}}$$
(1)

ここで E は中性子の持つエネルギー, $\Phi_0$  は全中性子フラックス,m は中性子質量, $k_B$  はボルツマン定数,T は中性子の温度である.仮に 300 K, 20 K に熱化した中性子を持ってきた場合,250 neV 以下のエネルギーを持つ UCN はフラックス全体の $10^{-11}$ ,  $10^{-8}$  に満たない.そのため熱化した中性子より UCN を取り出すことは非常に効率が悪い.

高い密度の UCN を発生させるための方法として Golub らによってスーパーサーマル法が提唱された[2]. スーパーサーマル法とは超流動へリウムや固体重水素を UCN コンバーターとして用い, UCN コンバーター中のフォノン散乱を利用した中性子冷却法である. UCN コンバーターに超流動へリウムを用いる場合, そのフォノンの分散関係を中性子の分散曲線を重ねたものを Fig. 2 に表す. 1 meV のところで両者は交わる. 1 meV の運動エ

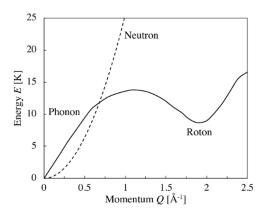


Fig. 2. Dispersion curve of neutron (dashed line) and phonon in superfluid helium (solid line) [3].

ネルギーを持つ中性子は超流動へリウム内のフォノンを励起することによってそのエネルギーを失い UCN となる.

UCN コンバーターとしては代表的に固体重水 素や超流動へリウムが用いられる. スイス・PSI 研 究所やアメリカ・ロスアラモス国立研究所では核 破砕中性子源と固体重水素 UCN コンバーター組 み合わせた UCN 源が稼働している. 生成される UCN 密度は UCN 生成断面積とコンバーター内の UCN 寿命によって定まる. 固体重水素 UCN コン バーターは UCN 生成断面積が大きいが重水素は 中性子吸収断面積 (5.2 mbarn @ 2.200 m/s) を持つ ため、コンバーター内での UCN 寿命は短い. 一 方、超流動へリウム UCN コンバーターでは UCN 生成断面積は小さいが、ヘリウムは中性子の吸収 断面積がゼロのため、吸収による UCN 損失は無 い. 超流動ヘリウム UCN コンバーター内での UCN 損失はフォノンによる up scattering が主要で ある. UCN は冷中性子が超流動ヘリウム中のフォ ノンを励起することでエネルギーを失い生成する が、逆に超流動ヘリウム中のフォノンが UCN に エネルギーを与え加速し、フェルミポテンシャル を超えて容器外に散逸してしまう. これが up scattering である. 超流動ヘリウム中のフォノンの 密度は超流動ヘリウムの温度に依存する. この up scattering の確率は温度の7乗に比例して大きくな る[4]. up scattering による UCN 寿命は超流動へリ ウムが 1.2 K の時に 36 s, 1.0 K の時に 120 秒とな る. 超流動ヘリウムを UCN コンバーターに用い る場合,この超流動ヘリウム温度を1K程度に冷 却し続けることが重要となる.

## 4. nEDM 測定

nEDM 測定の原理を説明する. 静電磁場中に中性子を置いた場合, スピンと磁場, EDM と電場の相互作用によるハミルトニアンは Eq.(2)の様になる.

$$\mathbf{H} = -\mu_n \cdot B - d_n \cdot E \tag{2}$$

中性子はスピンを持つため、磁場の中で歳差運動を行う.これに電場を掛けた場合、nEDM と電場

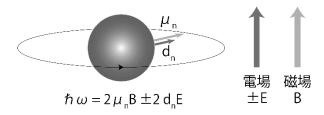


Fig. 3. Neutron spin precesses under electromagnetic field. The precession frequency is changed by the electric field reversal.

の相互作用によって中性子の歳差運動の周期が変わる.電磁場が中性子スピンと直交する向きにかかっている場合を考える.電場を磁場と並行もしくは反平行に加えたときに起きる歳差運動周期の差を測定することにより nEDM が求まる(Fig. 3).

歳差運動周期の変化は磁場変動によっても引き起こされてしまうため、正確に nEDM を測定するためには電場反転の際に起こる磁場の変化を十分に小さくしなければならない。 nEDM の大きさを $d_n=10^{-27}$  ecm、電場の強さを 10 kV/cm とするとき、この磁場変動は 10 fT 程度未満に抑えなければならない。実験には 4 重の磁気シールドを用いるが、実際にこの精度で磁場を制御することは困難である。 UCN の閉じ込められる容器に核スピンをもつ原子を同時に封入し、磁場中でその原子が歳差運動をする様子を観測することにより磁場の変化をモニターし磁場変動を補正する。 UCN とともに電磁場中に置かれる容器に閉じ込められるため、これは共存磁力計と呼ばれる。 先行実験では 199Hg が共存磁力計として用いられた[5]。

歳差運動周期はラムゼー共鳴法を用いて測定する. その統計感度は以下の式であらわされる.

$$\sigma_d = \frac{\hbar}{2\alpha E t_c \sqrt{N}} \tag{2}$$

ここで $\alpha$ は UCN の偏極度を表すパラメーター, E は電場の強さ,  $t_c$  はラムゼー共鳴の際の 2 回の $\pi$  /2 パルスの時間間隔, N は UCN の統計数を表す. 現在の測定感度はこの統計精度によって制限されている.  $\alpha$ や  $t_c$ を先行実験に比べて飛躍的に向上させることは難しい. 実験感度を向上させるには大強度の UCN 源の建設が不可欠である.

#### 5. TUCAN コラボレーション

前述の中性子 EDM 探索のため国際共同実験 TUCAN(TRIUMF Ultra-Cold Advanced Neutron)コラボレーションについて記述する. TUCAN は KEK, RCNP, TRIUMF, ウィニペグ大学, ブリティッシュコロンビア大学などからなる国際共同実験である. このコラボレーションの目的は中性子 EDM を現在の測定感度を 1 桁以上上回る 10 -27 ecm の精度で測ること, またそのためにカナダの TRIUMF 研究所に世界最強強度の UCN 源を建設することである.

## 5.1 プロトタイプ UCN 源による UCN 生成

1990 年代後半から KEK と大阪大学核物理研究センター (RCNP) らによって核破砕中性子源と超流動へリウム UCN コンバーターを用いた UCN 源の開発が進められてきた. RCNP のリングサイクロトロンの 0.4 kW (400 MeV×1 μA) の陽子ビームライン上にプロトタイプ UCN 源を設置し、初めて UCN 生成に成功した[6]. Fig. 4 にプロトタイプ UCN 源の模式図を表す. 核破砕反応により生成された中性子は常温の液体重水,次いで 20 K に冷却された固体重水の両モデレーターによって冷却され、モデレーターの中心に置かれた超流動へリウム UCN コンバーター内に入射する. UCN 生成成功後も改良を重ね、最終的に UCN 密度 26 UCN/cm³を達成した. この時 UCN 源内での UCN 寿命は 81 秒であった[7].

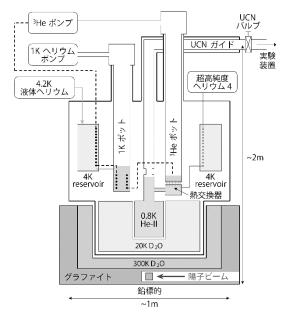


Fig. 4. Schematic diagram of the prototype UCN source [3].

## 5.2 TRIUMF での初 UCN 生成

この成功のもとに前述の TUCAN コラボレーションが組織された。TRIUMF 研究所には世界最大級のサイクロトロンがあり、このサイクロトロンから供給される陽子ビームを用いることで世界最高の強度を持つ UCN 源の建設を目指している。TRIUMF のメソンホールに UCN 源専用の陽子ビームラインが新設された。その最大出力は 20~kW ( $500~MeV \times 40~\mu A$ )である[8]。このビームラインはUCN 源専用であるため、サイクロトロン運転中は常時 UCN を供給することが可能になる。2016~年までにすべてのビームライン要素が設置された。タングステン製の核破砕ターゲット、その上部に液体・固体重水素モデレーターが置かれ、<math>2016~年 秋に陽子ビームのコミッショニングが行われた。

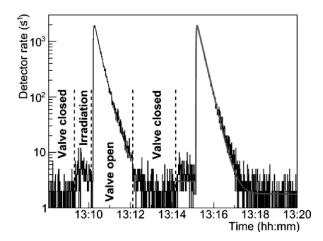


Fig. 5. Rate in the detector during two typical measurement cycles with a beam current of 1  $\mu$ A, an irradiation time of 60 s, and with the valve opened for 120 s [9].

核破砕中性子の生成及び、モデレーターによる中性子の冷却が確認され、UCN源を受け入れる体制が整った.

2017 年,このビームライン上にプロトタイプ UCN 源がインストールされ,11 月に TRIUMF において初の UCN 生成に成功した. Fig. 5 にこの時計測された UCN の計測数を表す.陽子ビーム照射時には生成された UCN はステンレスで出来た UCN バルブによって生成領域に閉じ込められ蓄積されていく.陽子ビーム照射後に UCN バルブを開けて UCN を取り出す.Fig. 5 は 1  $\mu$ A の陽子ビームを 60 秒間当てた後,UCN を取り出したときのカウント数である.得られた UCN は 1 サイクルあたり  $5\times10^4$  であった.Fig. 6 は陽子ビーム出力を  $10~\mu$ A まで増加させたときの UCN 計測数の変化である.ビーム出力が小さい時は陽子ビームに比例して UCN 計測数が増大するが,陽子ビーム出力が高くなると比例から外れて UCN 計測数

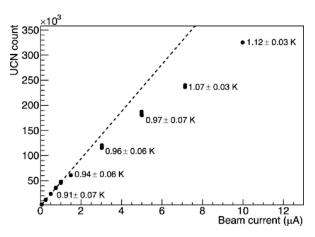


Fig. 6. Number of UCNs extracted from the source after irradiating the target for 60 s with different beam currents. At currents below  $1\mu A$ , the UCN yield is proportional with current (dashed line). At higher currents, the yield drops due to the increased heat load; the labels indicate the peak helium temperatures reached during irradiation [9].

が少なくなる.これは核破砕反応時に発生した放射線により超流動へリウムが暖められ、up scattering によるロスが大きくなるためである. プロトタイプ UCN 源では超流動へリウムを冷やす冷却能力が足りず、ビームラインの最大出力である  $40~\mu A$  まではビーム出力を上げることができない.

#### 5.3 UCN 源アップグレード

現在 TUCANでは TRIUMF の陽子ビーム強度を最大限生かすための UCN 源のアップグレードを行っている. Fig. 7 にアップグレード後の UCN 源を図示する. 新たな UCN 源では固体重水モデレーターの代わりに液体重水素モデレーターを用いる. TRIUMF の専用陽子ビームラインの最大出力500 MeV×40 μA (20 kW)での運転時に超流動へリウム UCN コンバーターに与えられる熱負荷はMCNPX6 による計算で 8.1 W と見積もられている. この熱負荷による超流動へリウム UCN コンバーターの温度上昇を抑えるために大型のヘリウム冷凍機が開発されている. 放射線による機器の損傷を避けるため, このヘリウム冷凍機は放射線シールドの外側に置かれる.

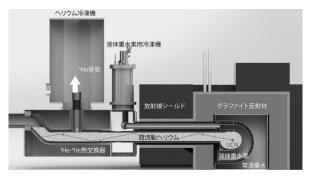


Fig. 7. Schematic diagram of the upgraded UCN source.

#### 5.3.1 液体重水素モデレーター

プロトタイプ UCN 源ではコールドモデレータ ーに固体重水を用いていたが, アップグレードさ れた UCN 源には液体重水素モデレーターを用い る. 重水は室温付近では良いモデレーターである が、20K 付近の低温では中性子と相互作用してエ ネルギーを持つ運動モードがなく冷中性子用のモ デレーターとしての性能が高くない.一方,20Kの 液体重水素はそのような低エネルギーの運動モー ドを持ち、中性子の温度を下げて UCN 生成に寄 与する1 meV 付近の中性子フラックスを増大させ ることができる. Fig. 8 に核破砕ターゲット, モデ レーター、超流動ヘリウム UCN コンバーターの 配置を示す. 核破砕ターゲットより生成した中性 子は常温の重水,20Kに冷却された液体重水素に よって冷却され超流動ヘリウム UCN コンバータ 一に入射する. 重水, 液体重水素, 超流動ヘリウ ム UCN コンバーターはそれぞれ 630 L, 125 L, 25 L である. UCN 生成は典型的には 60 秒間の

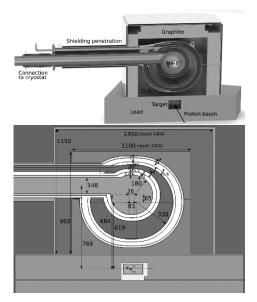


Fig. 8. Detailed concept for the moderator and vessel (top) and the simulation model (bottom) [10].

UCN 生成, 180 秒間の測定と 1/4 のデューティで 運転を行う. 液体重水素モデレーターはピーク時 に 63 W, 平均化すると 21 W の熱負荷がかかる. この熱負荷は液体重水素容器に用いたアルミニウム合金が放射化した際の  $^{28}$ Al の  $\beta$ ·崩壊のような遅延性の発熱を含む.

液体重水素モデレーターの開発は TRIUMF で 進められている. 2020 年中に設計を完了し, 製作 を開始する.

## 5.3.2 ヘリウム冷凍機

UCN は物質ガイドを伝って実験室に取り出されるが、この一部でもある UCN 生成領域からへリウム冷凍機までを超流動へリウムで満たす. UCN 生成時に発生した熱は超流動へリウム内を

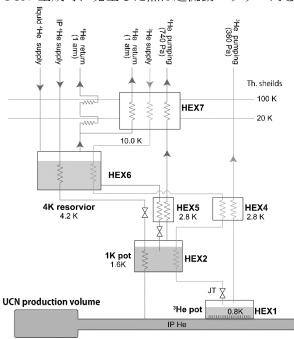


Fig. 9. Flow diagram of the helium cryostat.

伝わり、ヘリウム冷凍機内に設置された無酸素銅製の熱交換器を介して液体ヘリウム3に伝えられる。液体ヘリウム3の蒸発潜熱を用いて超流動ヘリウム UCN コンバーターは冷却される。ヘリウムは一般に低温冷媒としてよく用いられるがその中でも同位体のヘリウム3は蒸気圧がヘリウム4に比べて高く、減圧することにより容易に1K以下の低温を得ることができる。しかし、ヘリウム3は非常に高価なため、蒸発させたヘリウム3は回収し、再度ヘリウム冷凍機内に導かれる。Fig.9にヘリウム冷凍機のフロー図を示す[11,12]。

このヘリウム冷凍機は完成し、2020年9月より冷却試験を開始している.

## 5.4 今後の計画

冷却試験を終えたヘリウム冷凍機は 2021 年に TRIUMF に向けて移送される. 2022 年に液体重水素モデレーターやその他の要素と統合され, コミッショニングを行う予定である. 計画通りに進めば 2023 年に中性子 EDM 測定を開始する. アップグレードされた UCN 源では 1 サイクルあたり  $1.5 \times 10^7$  UCN が生成される. EDM 測定容器での UCN 密度は 250 UCN/cm³ となる見込みで, およそ 400 日間の測定で  $10^{-27}$  ecm の感度での nEDM 探索が行われる.

## 6. まとめ

UCN は非常に低エネルギーの中性子のことで、物質容器中に閉じ込めることが可能である。種々の基礎物理実験に用いられるが、TUCAN では nEDM 探索による時間反転対称性の検証を行っている。目標とする感度は  $10^{27}$  ecm である。これまでの感度は UCN の統計によって制限されているため、TUCAN では TRIUMF に世界最高強度のUCN源を建設している。2023 年よりこの UCN源は稼働予定である。

### 謝辞

本研究は日本,カナダの国際共同実験 TUCAN によって進められている.本研究は JSPS 科研費 18H05230,JP18H03702の助成を受けたものです.

#### 参考文献

- [1] C. Abel et al., Phys. Rev. Lett. 124, 081803 (2020).
- [2] R. Golub and J. Pendlebury, Phys. Lett. A **62**, 337 (1977).
- [3] 川崎真介, 松宮亮平, 木河達也, 「TUCAN 実験 -超冷中性子を用いた電気双極子モーメント探索」, 高エネルギーニュース **37-1**, 2 (2018).
- [4] K. K. H. Leung et al., Phys. Rev. C 93, 025501 (2016).
- [5] K. Green *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **404**, 381 (1998).
- [6] Y. Masuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 284801 (2002).
  [7] Y. Masuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 134801 (2012).

- [8] S. Ahmed *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **927** 101-108 (2019).
- [9] S. Ahmed et al., Phys. Rev. C 99, 025503 (2019)
- [10] W. Schreyer *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **959**, 163525 (2020).
- [11] S. Kawasaki and T. Okamura, EPJ Web Conf. **219**, 10001 (2019).
- [12] S. Kawasaki and T. Tkamura, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **755** 012140 (2020).