

Title	Study of He-II Spallation UCN Source
Author(s)	Matsumiya, Ryohei
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/26156
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

〔 題 名 〕

Study of He-II Spallation UCN Source
(He-II スパレーション UCN 源の研究)

学位申請者 松宮 亮平

超冷中性子 (Ultracold neutron, UCN) は、非常に低速になるまで冷却された中性子であり、物質容器に貯蔵することができる。このため、UCN は中性子が関与する基礎物理の研究に非常に有用である。中でも、中性子電気双極子モーメント (Electric Dipole Moment, EDM) の測定が注目されている。

中性子 EDM は、宇宙のバリオン非対称の原因となる CP の破れで発生し、標準理論で説明できないこれらの問題を解決するために提唱されている、超対称性理論などの新しい理論を検証する非常に有力な手段である。その測定は 1950 年代から行われ、上限値が更新されてきたが、現在まで有限値は検出されていない。

近年の中性子 EDM の高精度測定は、容器に貯蔵された UCN に核磁気共鳴法に基づくスピン操作を行い、共鳴周波数を精密測定することで行われる。測定精度の向上には、容器内の UCN の密度と臨界エネルギーが重要である。これまでの UCN 源は、原子炉内の中性子を液体重水素などで冷却し、その中に存在するわずかな量の UCN を選り出して利用している。この方式で得られる UCN 密度は既に上限に達しており、一定の臨界エネルギーに、より高い UCN 密度を生み出す新しい方式の UCN 源の開発が急務である。

そのための手段として、スーパーサーマル法と呼ばれる手法が考案されている。これは、冷中性子を超流動ヘリウム (He-II) 中などに入射し、フォノンとの散乱によって冷却し、UCN を生成する方法である。中性子の冷却にフォノンの位相空間を利用することで、高い UCN 生成率が期待できる。

我々は、このスーパーサーマル法とスパレーション中性子源を組み合わせた、大強度 UCN 源の開発を大阪大学核物理研究センター (RCNP) で行ってきた。リングサイクロトロンで加速された陽子によるスパレーション反応によって生成した中性子を、常温重水と固体重水減速材によって冷却し、それに続く He-II 中のフォノン散乱で UCN を生成する。我々は、重水と He-II を冷却するためのクライオスタットを開発し、He-II による UCN 生成を成功させた。また、クライオスタットの熱負荷の除去による冷却能力の改善、He-II 中の不純物となるヘリウム 3 の除去、UCN を輸送する UCN ガイド内壁の洗浄などによる改良を行い、これまでに、UCN 源の取出口において、臨界エネルギー 90neV で UCN 密度 $26\text{UCN}/\text{cm}^3$ を達成した (ビームパワー 400W 時)。これは世界的競争力のある水準の UCN 密度である。また、He-II 中の UCN 生成率は $4\text{UCN}/\text{cm}^3/\text{s}$ となり、ビームパワーを考慮すると、他に類を見ない高い値である。

この研究と並行して、UCN 源から取り出される UCN のエネルギー分布の測定を行った。スーパーサーマル法で生成される UCN のエネルギー分布を実際に測定した例はこれまで無かった。我々は、UCN を吸収する可動天板をもつ円筒容器に UCN を貯蔵し、天板の高さを調整して容器内の UCN の臨界エネルギーを変化させ、貯蔵される UCN 数の高さ依存性から容器内でのエネルギー分布を測定した。得られたエネルギー分布は、Geant4 を用いたシミュレーションとよく一致し、He-II 中で UCN が生成される際のエネルギー分布がエネルギーの平方根に比例することを初めて確認できた。

これらの研究により、He-II を用いた UCN 源により、世界的競争力のある水準の UCN 生成率と UCN 密度を達成し、シミュレーションを利用した UCN 輸送の計算手法が確立され、さらに大強度の UCN 源の開発と、中性子 EDM の高精度測定の大きな一歩となった。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (松宮 亮平)			
	(職)	氏名	
論文審査担当者	主査	教授	岸本 忠史
	副査	教授	下田 正
	副査	教授	畑中 吉治
	副査	准教授	佐藤 透
	副査	准教授 (高エネ機構素核研)	増田 康博
	副査	准教授	松多 健策

論文審査の結果の要旨

この論文では、スーパーサーマル法を用いた、大強度の超冷中性子 (Ultra cold neutron, UCN) 源の開発を目的として、設計指針、性能評価、性能の向上、生成されるUCNのエネルギー分布測定の結果とシミュレーションによるUCNの挙動の解析結果、ならびに大強度UCN源の将来への展望が議論されている。

超冷中性子 (Ultra cold neutron, UCN) と呼ばれる、非常に低速にまで冷却された中性子は、物質表面で全反射し、物質容器に閉じ込めることができるため、中性子電気双極子モーメント (Neutron Electric Dipole Moment, nEDM) や寿命の精密測定、重力の観測等に非常に有用である。中でも、中性子EDMの測定は、時間反転対称性の直接の検出方法であり、CP対称性の破れ、宇宙のバリオン非対称性、素粒子の階層性の問題など、標準理論では説明できない問題を解決すると期待される超対称性などの新しい理論の妥当性を検証する有力な手段である。nEDMの測定は1950年代から行われてきたが、現在に至るまで有限値は検出されておらず、最近の測定で使用されるUCNの密度の不足のために統計精度をこれ以上向上させられなくなっている。そこで、高いUCN密度を生み出す新たな手段として注目されている、スーパーサーマル法を用いた、大強度のUCN源を大阪大学核物理研究センター (RCNP) に建設し、その性能評価と性能向上を行った。

RCNPのリングサイクロトロンによって加速された陽子を鉛標的に照射し、スパレーション反応によって中性子を生成、常温重水減速材、固体重水減速材によって冷中性子となるまで冷却して、最後に極低温超流動He-II内でフォノンとの衝突によりUCNに変換する。UCNの生成を確認した後、UCNのロスの原因を取り除くため、クライオスタットの冷却能力の改善によりHe-IIの温度を下げ、He-II中の不純物となるヘリウム3を除去し、UCNを輸送するUCNガイドのアルカリ脱脂方法を考案して、ベーキングと重水素置換を併用することで、UCN密度の向上をはかった。これらは全て有効に働き、最終的に、UCN源内のUCN貯蔵時間を81 (s)まで改善し、400Wの陽子パワーにより、UCN源の取出口において、UCN密度 $26 \text{UCN}/\text{cm}^3$ (臨界エネルギー90 neV) を達成した。これは世界最高水準のUCN密度であり、UCN生成におけるフォノン散乱の有効性を示している。また、He-II中のUCN生成率 $4 \text{UCN}/\text{cm}^3/\text{s}$ を得た。これは、固体重水減速材によって得られた冷中性子のエネルギー分布が80 K相当にまで冷却されている事を示している。

並行して、このUCN源から取り出されるUCNのエネルギー分布の測定を行った。UCNを吸収するポリエチレンの天板を持つ円筒状の容器をUCN取出口に装着し、UCNを貯蔵した。UCNは重力によってトラップされるので、天板の高さを変えてUCNを貯蔵することで、UCNのエネルギーを分別することができる。このようにして得られたエネルギー分布はエネルギーの平方根にほぼ比例し、He-II中でUCNが生成される際、その位相空間上に密度が均等に分布することを示した。また、Geant4を用いたモンテカルロシミュレーションと比較し、低エネルギー側の僅かなズレの原因も明らかにした。

この研究により、He-IIを用いたUCN源のUCN密度向上に重要な技術と、シミュレーションを利用したUCNの移送やエネルギーの計算手法が確立された。これらの研究を基に、さらなる大強度のUCN源の開発の展望が示され、これによりnEDMの高精度の測定などの基礎物理測定の実現性が高まった。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。