

Title	Development of the Polarized Hydrogen-Deuteride (HD) Target for Double-Polarization Experiments at LEPS
Author(s)	Ota, Takeshi
Citation	大阪大学, 2012, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26857
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

氏名	太田 岳史
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)
学位記番号	第 25190 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	Development of the Polarized Hydrogen-Deuteride (HD) Target for Double-Polarization Experiments at LEPS (LEPS 二重偏極実験の為の偏極重水素化水素標的の開発)
論文審査委員	(主査) 教授 中野 貴志 (副査) 教授 岸本 忠史 教授 下田 正 准教授 藤原 守 准教授 與曾井 優

論文内容の要旨

研究課題：核子内のクォーク構造を研究するための偏極 HD 標的の開発

現在、陽子や中性子内部にはアップクォーク、ダウンクォークがあると考えられ核子の振る舞いはクォークモデルで良く説明できる。しかし近年の高エネルギー実験において陽子中に無視できないストレンジクォークの存在を示唆する結果が報告された。一方でアメリカ Jlab では電子と核子の弾性散乱によるパリティの破れの非対称度測定から核子内部のストレンジクォークの寄与はほとんど無いという結果が出た。大阪大学核物理研究センターでは核子中のストレンジネスの存在量に関してさらに高感度な新しい実験結果を提示すべく、偏極標的と偏光 γ 線を用いた ϕ 中間子生成実験を計画している。実験は大阪大学核物理研究センターが所有している LEPS (Laser Electron Photons at SPring-8) で行われる。LEPS ではこれまで偏極光子ビームを無偏極標的を用いて様々な光ハドロン反応実験を行ってきたが、今後は核子スピンの研究を行う為に偏極標的が必要となる。核子中のストレンジネスの存在量に関する実験はその一部である。こういった背景から偏極標的の開発が要望されてきた。

偏極標的には水素、重水素のみからなる HD (水素化重水素) を使用する。HD 偏極標的は従来の動的 (DNP) な方法ではなく、静的な方法で偏極させる。HD ガスを極低温まで冷却し固化させ、超電導マグネットによる高磁場で 1 ~ 3 ヶ月間磁場を印加し続ける。この方法を用いることにより HD 標的の偏極は温度を上昇させても保持される。

偏極 HD 標的の研究開発は 2005 年から行い 3 年間基盤技術の確立に努めた。2007 年には輸送用の冷凍機を使用し 4.2 K で実際に HD ガスを固化させ偏極させ NMR の測定を行った。しかし、ノイズが大きく、また NMR シグナルが温度に敏感なため思うような信号は得られなかった。そこで NMR 測定の改良を重ね 4.2 K の温度でも HD の NMR シグナルを識別可能な程度まで S/N 比を改善させた。この間、実際に偏極 HD 標的を製造する希釈冷凍機の試験も重ね、2008 年には初めて偏極 HD 標的を製造するに至った。蒸留した HD ガスを希釈冷凍機に注入し 0.78mol の固体 HD を作成した。4.2 K で校正用の NMR 信号を得た後、温度を 14 mK まで下げ磁場を 17 Tesla まで昇磁した。この環境に固体 HD を 53 日間晒し偏極させた。53 日後、温度を

SPring-8 で行われる実験の想定温度 300 mK まで上げ磁場を NMR 測定のために 1 Tesla まで下げた。NMR により偏極度と緩和時間の測定に成功した。図 1 は 53 日後に得られたセルを含む偏極 HD 標的の NMR スペクトルである。表 1 は温度を上昇させていった時の緩和時間の測定結果である。

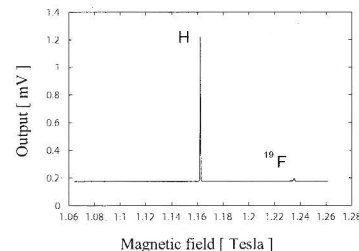


図 1 偏極 HD 標的の NMR シグナル。磁場スイープにより測定した。左に見えるピークは H (水素)、右はセルに含まれる ^{19}F (フッ素) のシグナル。測定した偏極度は $41\% \pm 3\%$ であった (2009 年の解析結果)

表 1 測定された各温度での HD 偏極標的内の陽子 (H)、重陽子 (D) の緩和時間。各温度はそれぞれ、実験時、輸送時、冷凍機移送時の温度。温度が低いほど緩和時間は長い (2009 年の解析結果)

温度	300 mK	1.2 K	4.2 K
緩和時間	H: 106.0 ± 15.8 days D: 80.0 ± 7.7 days	H: 11.6 ± 1.5 days D: 13.3 ± 1.0 days	H: 7.5 ± 0.7 days D: 1.7 ± 0.1 days

偏極 HD 標的の試作テスト結果を受け NMR 測定の改善と HD ガスの分析及び HD ガスの純化システムを改善する必要があることがわかった。2009 年からは HD 標的の輸送過程の完成を目標にするとともに、下記の問題の解決にあたった。

- NMR 測定における HD 以外からの水素バックグラウンドの排除とさらなる S/N 比の改善
SPring-8 の実験において偏極度の誤差は測定される 2 重偏極非対称度の誤差へ大きく寄与する。偏極度の誤差の主な要因は 4.2 K での測定における不確かさである。この不確かさを減らすために水素のバックグラウンドがコイルとして使用していたエナメル線に起因していたことを特定し排除し、また NMR 回路系の温度を制御することによってノイズ (ドリフトを含む) を 10 分の 1 まで減らした。
- RCNP と SPring-8 間で輸送可能な NMR 測定システムの開発
偏極 HD 標的は核物理研究センターで製造され SPring-8 へ輸送されるが、NMR 測定システムがそれぞれの場所に必要になる。NMR 測定システムは同条件で得るのが望ましく、核物理研究センターと SPring-8 間での NMR 測定システムの輸送が考えられた。しかし NMR 測定システムは容易に運べる大きさ、重さではない。こういった理由から NMR 測定システムの小型化を思案し、コンピューターテクノロジーを活かしたポータブル NMR 測定システムを開発した。これにより場所を選ばず NMR 測定を行うことが可能となった
- HD ガスを信頼性高く評価できる HD ガス分析システムの開発
偏極 HD 偏極標的の長い緩和時間を維持するためには HD ガスの高純度化とそれを信頼性高く評価できる HD ガス分析システムが必要であった。偏極 HD 標的の緩和時間は HD ガス中の ortho-H₂ と para-D₂ の濃度によって決定される。2009 年の偏極 HD 標的の製造では四重極質量分析器で HD ガス分析を行っていたが、HD ガスイオン化の時に発生する D⁺, H₂D⁺ が H₂ と D₂ と同じ mass/charge として測定されるため H₂ と D₂ の正確な濃度を知ることは困難であった (フラグメンテーション問題)。この問題を解決すべく 2011 年には HD ガスを高信頼度で分析できるガスクロマトグラフィーと四重極質量分析器を連携させた分析装置を開発した。新しい分析装置により H₂ と D₂ の正確な濃度測定が可能になり、さらに H₂ は ortho-H₂ と para-H₂ に分離しそれぞれ精度よく測定可能になった。
- HD ガス中の ortho-H₂ と para-D₂ の濃度をコントロールするための新蒸留器の開発
同 2011 年に HD ガス中の ortho-H₂ と para-D₂ の濃度を 0.01% 以下まで減少させるべく HD ガス蒸留器を開発した。これまでの蒸留器は H₂ のガス濃度が 0.1% を下回ると不安定になった。また蒸留期間が 30 日必要

だったため含まれている ortho-H₂ がほとんど para-H₂ に転換していたと考えている。Ortho-H₂ の最適な濃度は ~0.01% と考えられている。蒸留器では H₂、HD、D₂ の蒸気圧の違いを利用して分離する。蒸留器頭部には H₂ ガスが濃縮され、徐々に抜き取られてゆく。H₂ ガスがほとんど抜き取られた後、蒸留器頭部には次に蒸発のし易い HD ガスが濃縮される。この手法で高純度の HD ガス (ortho-H₂ と para-D₂ の濃度が下げられた) を得る。図 3 は蒸留器頭部の H₂ ガスの時間経過に伴う濃度の減少を示したグラフである。青い三角は 17.5 K で 1.3 ml/min の速度で H₂ が抜き取られていったときの蒸留器頭部での H₂ 濃度である 6 日ほどで目標の 0.01% を下回り 0.001% に達していることがわかる。D₂ は 0.01% 以上では検出されなかった。これにより偏極標的に必要な HD ガスの純度を 0.001% の精度でコントロール可能になった。

新しい HD ガス分析システムと蒸留器は偏極 HD 標的を安定的に製造するために重要である。ortho-H₂ と para-D₂ の濃度をコントロールできるようになり偏極させるための時間の短縮を図ることができる。

これら HD 標的製造に必要な装置は 2011 年度に完成し、ようやく SPring-8 へ偏極 HD 標的を輸送する準備が整った

論文審査の結果の要旨

核子 (陽子、中性子) は通常 3 つの u、d-クォークから構成されるとして良く記述されるが、その中に隠れた成分としてストレンジ (s) クォークがどの程度含まれているかを調べることは、ハドロン構造のクォーク構造を解明する上で非常に重要である。φ 中間子はほぼ純粋な s-クォークと反 s-クォークからなるため、その光生成においては核子中の s-クォーク・反 s-クォークのペアを叩き出す過程を含み、特にビームと標的のスピンを共に偏極させて得られる二重偏極非対称度はその過程に敏感な測定量である。本研究では、核子中のストレンジネス成分を抽出するための φ 中間子光生成二重偏極実験に必要な偏極 HD (重水素化水素) 標的の開発を行った。

HD 分子は、これまで偏極陽子標的として良く使用されるブタノール等と違い、炭素や酸素の重い原子核を含まないためバックグラウンドの少ない測定が可能となるが、一方、高偏極度を得るためには非常に極低温、高磁場が必要であり、また、高純度の HD ガスが容易に得られない等の困難がある。HD の偏極促進とその後の偏極凍結の鍵となるのが微量 (~0.01%) のオルソ水素やパラ重水素の不純物であり、少なすぎるとなかなか偏極されず、多すぎると例えばオルソ水素がスピンを持たないパラ水素に完全に交換するまで時間を要し、凍結するまでに時間がかかる。

本論文においては、ガス蒸留器や偏極用希釈凍結機及び超電導磁石等の基幹設備が整備された後、先ず 14 mK、17 T の環境下において偏極 HD 標的を作成し、53 日の凍結期間において実際の実験環境下と同じ 300 mK、1 T にして偏極度と緩和時間を NMR 測定によって求めた。その結果、それぞれ 41% と 113 日という結果を得、実用に耐えうる長さの偏極の凍結が確認された。一方、偏極度は期待される値 (84%) より低かったが、その原因として、NMR 測定自身の問題と不適当なオルソ水素濃度が考えられたため、以下の 3 つの改善が為された。

1. NMR コイルの線材をエナメル線からテフロン被覆銀線に交換し、水素バックグラウンドを無くした。また、回路を温調ボックスに入れて S/N 比を 10 倍向上させた。更に、標的作成場所である大阪大学と実験場所である SPring-8 間を容易に移動可能なポータブル NMR システムを高度なソフトウェア技術を用いて開発した。
2. ガスクロマトグラフィと四重極マススペクトロメータを組み合わせたガス分析システムを開発し、HD ガス中に含まれるオルソ水素、パラ水素、重水素の濃度を 0.001% の精度で測定可能にした。
3. 高速で、高純化可能な新ガス蒸留器を設計・製作し、実際に 6 日で不純物濃度 0.001% の HD ガスの精製ができた。不純物を外部から加えることによって、濃度をコントロールした HD ガスの供給が可能になった。

以上の開発により偏極 HD 標的作成技術は確立したと見て良く、今後、本番用標的の製作を待つ φ 中間子光生成を始めとする様々な光核反応実験における二重偏極測定に供されることが期待される。また、上記 3 点はそれぞれ独創的な開発であり、既にこれらの成果は 3 編の査読付論文として公表されている。

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。