

氏名 石 元 茂

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大乙第4号

学位授与の日付 平成6年3月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位論文題目 動的偏極法によるスピン凍結偏極ターゲットおよび中性子偏極フィルターの開発研究

論文審査委員 主査 教授 平松 成 範

教授 渡 辺 昇

教授 小早川 久

教授 山 崎 良 成

教授 平 林 洋 美

教授 森 本 喜三夫

（高エネルギー物理学研究所）

教授 石 本 英 彦（東京大学）

論文内容の要旨

1. 素粒子実験用偏極ターゲット

素粒子実験用偏極ターゲットにあって、研究の中心はスピンドロズン・ターゲット、特に、そのための冷凍能力の大きな横型 ^3He - ^4He 希釈冷凍器の開発にあった。希釈冷凍器をもちいると、 ^3He 冷凍器より低い温度が得られ、陽子・重陽子の偏極率が大きく上昇する。とくに、重陽子の偏極率は ^3He 冷凍器を使用した場合 15 - 18 % であるが、希釈冷凍器を用いるとその 2 倍以上が得られ、散乱実験における偏極中性子ターゲットとして用いることができるようになる。また、希釈冷凍器による数 10 mK の到達温度においては、2.5 T の磁場中における陽子・重陽子のスピン緩和時間は数 100 時間以上となる。スピン緩和時間が長くなることによって、偏極ターゲットをより低い磁場中、また均一度の低い磁場中に置き、素粒子散乱実験をおこなうことができるようになる。しかし、偏極ターゲットとしてはマイクロ波を用いるため 0.3 - 0.5 K で 10-100 mW の大きな冷却能力が必要である。このことから、希釈冷凍器としては従来の ^3He 循環量 10^{-5} - 10^{-6} mol/s に比べて、極めて大きな量の ^3He が安定して熱効率よく循環できるような大容量の横型希釈冷凍器システムを設計・製作することが必要である。そのため、低温部における通常のタイプの熱交換器を用いることはできないので、連続フロー式の焼結銅を用いた熱交換器を新しく開発し、 ^3He の循環量 10^{-2} mol/s、温度 0.46 K で冷凍能力 90 mW に到達することができた。この冷凍器は完成当時、世界最大級の冷凍能力を持つ冷凍器であった。横型の希釈冷凍器は縦型に比較して ^3He - ^4He の相分離面が重力方向で不安定な要因がある。それを回避するため、相分離面の安定化の条件を計算して設計をおこない成功した。これらの一連の開発と実験から、偏極ターゲットおよびスピンドロズンターゲットとしての次のような基礎的なデータを得た。

(1) ターゲットに用いる物質

従来の有機物質を用いた陽子の偏極ターゲットのうち、1,2-propanediol は重陽子化した場合、化学反応で常磁性イオンである Cr(5+) を作りにくい欠点を持っていた。そこで、新たに安定した不対電子イオンをもつ物質としてシカゴ大学で開発された EHBA(Cr(5+)) を初めて重陽子の偏極ターゲットに使用した。その結果、1,2-propanediol(d8) が液体 ^3He 冷凍器中で約 20 %、希釈冷凍器を用いて冷却した場合、約 40 % の重陽子偏極を得るのに成功した。EHBA-Cr(5+) はスピン濃度が自由にコントロールできる Cr(5+) として初めてのもので、これまで Cr との反応性が悪く Cr との化学反応でのサンプル製作ができなかった butanol + H₂O などの物質でも使用できるメリットがある。EHBA-Cr(5+) は、その後 CERN-SMC 実験用など、広くアルコール系やダイオール系の有機物質中の陽子・重陽子ターゲットに使用されている。

(2) ターゲット本体の技術

マイクロ波の透過性能が良好で、組成中に水素原子を含まない物質がターゲット容器としては必要である。そのためにテフロンの一成形容器を開発した。Cr(5+) の濃度を一

定に保つため、ターゲット物質を液体窒素温度に保ったままの冷凍器への装着ができること、テフロンと金属を迅速にジョイントでき、その接合部で超流動 He 中でもリークのないことが条件である。

(3) 偏極率測定法

ターゲット偏極率の測定誤差は、主に、熱平衡時の信号／雑音比による。そこで、並列 Q-メーター法を用いた NMR と、コンピュータの高速処理による数 10 - 数 1000 回の加算平均化によって信号／雑音比を改善させる方法を発展させた。この結果、陽子偏極率は 3 - 5 % の精度で求められるようになった。重陽子の場合、熱平衡信号の検出が陽子に比べて極めて困難である。偏極した重陽子信号を用い、その非対称性から偏極率をフリー・パラメーターとして計算機でフィットして求めた。この方法の正当性を実験的に確認するために、-OH 基のみを重陽子化した 1,2-propanediol (d2) を初めて偏極した。この偏極信号から、通常は観測できない -OD 基からの重陽子 NMR の形状が計算による形状関数と同一であることが実証できた。このとき求められた重陽子 NMR の形状関数は、重陽子の NMR を解析する上で、現在でも世界的に広く使用されている。

(4) 陽子・重陽子のスピン-格子緩和時間の測定

スピンドーズターゲットとして重要なパラメーターである、陽子および重陽子スピンのスピン-格子緩和時間を、温度および磁場を変えて測定した。

(5) p-p 散乱による偏極率の校正と Kapitza 抵抗の測定大強度の偏極陽子ビームを用いた、p-p 散乱実験の非対称性を用いて NMR と独立に偏極率を測定し、NMR による測定値と比較して、2つの独立した偏極率の測定が誤差の範囲で一致することを確認した。同時にターゲット物質内で発生するビームヒーティングによるターゲット内の温度を見積もることができ、 ^3He - ^4He 希釈溶液と固体 1,2-propanediol(d8) 間の Kapitza 抵抗値を初めて信頼できる精度で求めた。

2. 中性子実験用偏極フィルターの開発とそれを用いた実験

偏極陽子ターゲットを用いて中性子ビームを偏極させる方法は、エネルギーの広い範囲 (<1 MeV) にわたって中性子を偏極できるので、中性子実験にとって非常に有用な方法である。低エネルギー中性子-陽子散乱 (n-p 散乱) における散乱断面積が、中性子と陽子のスピン方向が、互いに平行か反平行かにより大きく異なることを利用した「偏極フィルターによる中性子ビームの偏極」は最初 Dubna において LMN によるテスト実験がなされた。この場合、前述の素粒子実験のために開発したダイオール系の物質が、中性子偏極用のフィルターに非常に適しているのではないかと考え、実験をおこなった。LMN に比べて陽子以外の原子核が少なく、陽子の偏極率が十分高く、且つ安定に保持できること、放射線損傷による偏極率の低下が少ないこと等から、中性子ビームの高い偏極率と強度が可能になるはずである。このような理由によって、素粒子実験用偏極ターゲットの技術そのまま応用して、中性子偏極フィルターの開発をおこなうことになった。

中性子偏極を得るための実験は、日本原子力研究所 3号炉 (JRR-3) と、高エネルギー

物理学研究所ブースター利用施設（KEK-BSF）のパルス中性子源を用いて行われた。Dubnaでは中性子ビームの方向と陽子スピンの方向が垂直という条件で実験が行われたが、状況によっては中性子ビームと陽子スピンの向きが平行（または反平行）の方が実験しやすい。最初の実験はビームと陽子スピンの向きが平行、または、反平行の条件で行われ、その場合にもビームとスピンの向きが垂直の場合とほとんど同じ中性子の偏極が得られることを直接実験的に示した。これによって偏極フィルターの幾何学的配置に関する問題は解決された。この偏極フィルターを高エネルギー研のブースター利用施設におけるパルス中性子源に設置することで、冷中性子、熱中性子から熱外中性子まで広い範囲で十分な強度をもった偏極中性子源を完成させた。

論文の審査結果の要旨

石元茂氏の学位論文（動的偏極法によるスピン凍結偏極ターゲットおよび中性子偏極フィルターの開発研究）は、中高エネルギーの原子核や素粒子の散乱実験においてスピンの依存する相互作用の実験研究に有用な、陽子または重陽子の偏極状態を長時間保持するスピン凍結ターゲット、およびその技術を応用した偏極陽子による、物質の微細構造の研究や中性子捕獲反応の研究に有用な、偏極中性子ビームを得るための中性子偏極用陽子フィルターの開発研究を行ったものである。

スピン凍結偏極ターゲットの研究の主要部は、約 100cm^3 のターゲット物質を動的に偏極しスピン凍結状態に保つための、 0.45K で 90mW の冷却能力を有し最低到達温度 25mK の大容量 ^3He - ^4He 希釈冷凍器を実現したことである。重要技術として、 He^3 ガスの大排気能力を持つクライオスタット構造、大きな ^3He 循環量に対応し高い熱交換効率を持つ連続フロー式熱交換器等を考案した。 ^3He - ^4He 希釈冷凍器の冷却能力に関する相似則を導き、更にフェルミ流体モデルに基づく簡潔な理論的解析により、 $0.1\text{K}\sim 0.5\text{K}$ での焼結銅のカピツア抵抗、 ^3He の最適循環量、および冷却能力の温度依存性を明らかにした。これは希釈冷凍器の具体的設計に有力な指針を与えるものである。偏極ターゲット物質については、化学反応法による製法を確立し、また安定な遊離基 EHBA-Cr(5+) を初めて使用することで、完全に重水素化された有機物質を偏極重水素ターゲット物質として使用する道を開いた。また偏極した重水素 NMR スペクトルの解析から、正確な偏極度を求める方法を開発すると同時に4重極相互作用に関するパラメータを初めて精度良く決定し、4重極相互作用の研究に新しい測定方法を提供した。更に初めて 0.5K 以下の領域での重陽子のスピン-格子緩和時間、およびターゲット物質のカピツア抵抗の測定値を与え、偏極保持時間の推定を可能にした。以上により、陽子（重陽子）偏極度 $85\sim 90\%$ （ $35\sim 40\%$ ）、偏極保持時間 $10\sim 100$ 時間というスピン凍結偏極ターゲットを実用化した。

偏極ターゲットの研究で開発したダイオール系物質を、中性子ビーム偏極用陽子フィルターに応用し、銅製フィンによる熱交換器にて冷却する構造の ^3He 冷凍器を考案することで中性子ビーム偏極用陽子フィルターを開発し、中性子偏極度 72% 、中性子透過率 25% の偏極フィルターを世界で初めて実用化した。本フィルターを高エネルギー研のパルス中性子源に設置することで、熱中性子から熱外中性子に渡る広いエネルギー範囲の高強度偏極中性子ビームを実現した。本装置により、陽子偏極試料または偏極中性子を用いた中性子小角散乱による物質の構造研究、あるいは中性子捕獲反応の研究等の中性子実験分野に新しい研究手段を提供した。

以上のように石元氏は、CERN と同時期に世界で最初のスピン凍結偏極ターゲットを実現し、重水素のスピン凍結ターゲットについてはターゲット物質、緩和時間等に関して貴重な成果を上げた。更にその成果を応用し、世界で唯一の中性子ビーム偏極用陽子フィルターを開発し、偏極中性子源を実現した。論文ではこれらに関する基礎研究と技術開発等について詳細に論じ、その成果を報告している。これらの成果は世界的に高く評価されており、今後の発展に資するところが極めて大きい。また大規模で複雑な装置の開発から卓抜した実験技能が伺われる。加速器のビーム利用に新しい道を開いた研究であり、数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文として相応しい内容を有していると判断した。