

氏名 金正倫計

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第68号

学位授与の日付 平成6年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 二重光ポンピング法による核スピン偏極負重水素イオンビーム生成に関する研究

論文審査委員 主査 教授 木原元央

教授 水町芳彦

教授 山根 功

助教授 森 義治

助教授 吉岡正和

教授 小方 厚

（高エネルギー物理学研究所）

論文内容の要旨

光ポンピング型偏極イオン源は、1979年に L.W.Anderson により提案された。このイオン源による偏極負水素イオンの生成方法は次のとおりである。

まず、低エネルギー（5 keV 程度）の H^+ イオンビームを生成する。この H^+ イオンが強い磁場中で、光ポンピングにより電子スピン偏極したアルカリ金属原子との荷電交換反応により、電子スピン偏極した水素原子となる ($H^+ + Na(e \uparrow) \rightarrow H(e \uparrow) + Na^+$)。この電子捕獲反応では、生成された中性水素原子の電子軌道はほとんど $n=2$ (n は主量子数) であるために、スピン-軌道相互作用により捕獲された電子スピンの偏極度が減少する (減偏極)。これを防ぐために強い磁場 (1~2 T 以上) が必要となる。その後、電子スピン偏極した水素原子を、適当な磁場勾配で磁場の方向が反転する零交叉磁場を通過させると、超微細構造の準位間で非断熱遷移 (diabatic transition) が生じ、電子スピン偏極を核スピン偏極に移すことができる。この遷移を Sona transition という。核スピン偏極した水素原子は、アルカリ金属原子との再度の荷電交換反応により、核スピン偏極した負水素イオンとなる ($H(p \uparrow) + Na \rightarrow H^-(p \uparrow) + Na^+$)。

この方法によるイオン源は、1987年に、高エネルギー物理学研究所 (KEK) で 12 GeV 陽子シンクロトロン (KEK-PS) 用の偏極負水素イオン源として、世界で最初に開発に成功した。その後、世界中の様々な研究所で開発されてきた。この光ポンピング型偏極イオン源の開発により、高偏極度 (核スピン 65% 以上) で高強度 (100 μ A 程度) の偏極負水素イオンビームの生成が可能となった。しかしながら、この方法を直接偏極重陽子生成に適用しても、高い偏極度は望めない。それは次の理由による。

偏極負水素イオン生成の場合と同様に、電子スピン偏極した重水素原子を、適当な磁場勾配で磁場の方向が反転する零交叉磁場を通過させると、超微細構造の準位間で非断熱遷移 (diabatic transition) により、電子スピン偏極を核スピン偏極に移すことができる。水素原子では、核スピンは $I=1/2$ であるので、電子スピン $1/2$ の偏極が 100% 核スピンの移った場合には 100% 核偏極となる。しかし、重水素原子では、核スピンは $I=1$ であり、Sona transition 後の重水素原子の核スピン状態は、 $I_z = +1$ と $I_z = 0$ の状態が 2 対 1 の確率で占める。この $I_z = 0$ の状態の存在のために、核スピンのベクトル偏極度は最大で $2/3$ である。このことより、光ポンピング法を偏極重陽子生成に用いることは他の方法に比べて不利であるとされてきた。

核スピンの高いベクトル偏極度を得るためには純粋な核スピン状態 (例えば、 $I_z = +1$ 状態のみ) を選ぶ必要がある。1988年に、Schneider と Clegg は光ポンピング法において純粋な核スピン状態を選ぶ新しい方法を提案した。それは、従来の光ポンピング型偏極イオン源の Sona transition 後の重水素原子をイオン化する領域 (イオン化セル) のアルカリ金属原子も、光ポンピング (二重光ポンピング) することで、イオン化に際して Pauli 原理により純粋な核スピン状態をもった原子のみを選択的にイオン化するというものである。しかし、彼らは、radiation trapping の影響により、イオン化セル中のアルカリ金属原子の密度もあまり大きくできず、そのため、二重光ポンピング法は実用的でないということであった。radiation trapping とは、光ポンピングにおける光子の再吸収過程であり、ポンピングされた原子の最大偏極度はこの radiation trapping により制限される。ところが、

最近の Mori の再検討で、radiation trapping を定量的に検討した結果、強磁場中（2~3 kG）では、radiation trapping の影響はそれほど小さくなく、二重光ポンピング法により、十分な強度の偏極負重水素イオンビームの生成が可能となることがわかった。このように、光ポンピング型偏極イオン源で高偏極度の負重水素イオンビームを得るためには、二重光ポンピング法が有望である可能性が理論的には示されたが、これまで実験的にこの方式の有効性は確認されていない。

本研究では、この二重光ポンピング法により核スピンの高くベクトル偏極した偏極負重水素イオンビームを得られることを実験的に検証することを目的とする。検証方法としては、偏極度に応じて変化する負重水素イオンビームの強度を測定することによって行なった。二重光ポンピング法では、負重水素イオンビームの強度は Pauli 原理により次式に従って変化する。 $\varepsilon = I_{off} - I_{on} / I_{off} = 1/3 P_D P_e^i$ ここで I_{on} はイオン化セルの光ポンピングを行なった場合の負重水素イオンのビーム強度、 I_{off} は光ポンピングを行わなかった場合の負重水素イオンのビーム強度をそれぞれ示す。また、 P_D は電子スピン偏極した重水素原子の電子スピン偏極度で、 P_e^i はイオン化セル中のアルカリ金属原子の電子スピン偏極度である。この式から、 ε が中性化セル後の重水素原子の電子スピン偏極度とイオン化セル中のアルカリ金属原子の電子スピン偏極度のみに依存することは明らかである。もし、中性化セル中のアルカリ金属原子と、イオン化セル中のアルカリ金属原子の電子スピンの向きが、それぞれ同じ方向に偏極してれば ε は正（ $P_D P_e^i$ が正）になり、偏極方向がそれぞれ逆であれば ε は負（ $P_D P_e^i$ が負）になる。すなわち、アルカリ金属原子の電子スピン偏極が、中性化セルとイオン化セルで同じ方向であれば、 $I_{off} > I_{on}$ となる。反対に、アルカリ金属原子の電子スピン偏極が、中性化セルとイオン化セルで逆方向であれば、 $I_{off} < I_{on}$ となる。そして変化の割合はどちらの場合でも同じである。

実験の結果、光ポンピングによる電子スピン偏極の方向を変化させることにより、先に示したようなビーム強度の変化が見られた。この実験結果を定量的に評価した結果、二重光ポンピング法で核スピンの高いベクトル偏極度をもつ偏極負重水素イオンビームの生成が可能であることが確認された。

また、偏極負重水素イオンビームの核スピンのベクトル偏極度 (P_D) は先に定義した ε を用いて、 $P_D = -2\varepsilon / P_e^i (1 - \varepsilon)$ で与えられる。この式より、ビーム強度の測定から求められる ε と、イオン化セル中のアルカリ金属原子の電子スピン偏極度から、偏極負重水素イオンビームの核スピンのベクトル偏極度の測定が可能である。この方法により中性化セルの磁場強度変化による偏極負重水素イオンビームの核スピンのベクトル偏極度の依存性を測定した。その結果、中性化セルの磁場強度が 2.7 T の場合に 70 ± 5 % の高い核スピンのベクトル偏極度を得ることができた。

以上本研究により、二重光ポンピング法で核スピンの高くベクトル偏極した負重水素イオンビームの生成が可能であることが確認され、また負重水素イオンに関しては、ビーム強度を測定することで、安易にベクトル偏極度の測定が可能であることが明らかとなった。

論文の審査結果の要旨

核スピンの偏極した負重水素イオンビームの生成は、原子核の実験にとって重要な技術である。これまで用いられている、原子線型イオン源やラムシフト型イオン源は、偏極度は高いが、ビーム強度が低いのが問題である。一方、負水素イオンビームに対して成功しており、ビーム強度も大きい光ポンピング型イオン源は、重水素に対しては最大偏極度が66%であるという原理的な問題がある。

Schneiderらは、原理的に100%の偏極度を可能とする方法として「二重光ポンピング法」を提案したが、技術的な問題があるとして今日まで実現されなかった。本研究は、二重ポンピング法に関して詳細に問題点の検討を行い、これを解決する方法を考え、実際に装置を作って二重光ポンピング法の有効性についての実証を行ったものである。

まず本研究においては、二重光ポンピング法において問題とされている偏極度を左右する諸要因を検討した。その結果、中性化セル中の磁場強度、ソナ変換部における磁場勾配、イオン化セル中の磁場強度が、偏極度に主要な影響を与えることを明らかにし、これらに関して、必要な設計条件を求めることができた。

中性化セル中での偏極アルカリ金属蒸気の厚さと偏極度、ソナ変換部における電子偏極から核偏極への移行度などの諸パラメーターと、最終的に得られる偏極負重水素イオンビームの偏極度との関係を定式化することにより、簡単に重水素イオンビームの偏極度を算出する方法を見いだした。これを用いて偏極度の測定を行うとともに、定式化の結果を用いて、中性化セル、ソナ変換部、イオン化セルにおける動作パラメーターをも評価することができた。

本研究で実際に得られた偏極度は約70%であった。研究の結果、中性化セルに向かってE C Rイオン源から流入する非偏極残留ガスが偏極度に悪影響を及ぼすことが判明し、実験的に評価したところ、これによる減偏極は約10%と見積もられた。その他の減偏極の程度をも実験的に評価した結果からは、80%程度の偏極度が得られるものと推定されるが、実験値との食い違いについては、未解決のままである。

結論として、以上述べた色々の研究成果により、実際に二重光ポンピング型偏極イオン源の有効性を実証してみせたことは、価値ある研究成果である。

本研究は、内容として博士論文に値する、と判断された。