

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540307

研究課題名（和文）動的核整列を用いた不安定核の核磁気モーメント測定法の開発

研究課題名（英文）Development of a Technique of Dynamic Nuclear Self Polarization for Measurements of Nuclear Magnetic Moment of Unstable Nuclei

研究代表者

小泉 光生 (MITSUO KOIZUMI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究副主幹

研究者番号：30354814

研究成果の概要（和文）：

動的自己核偏極（DYNASP：DYnamic NucleAr Self Polarization）はDyakonovらが予言した現象で、InPなどのIII-V族化合物半導体の電子を直線偏光レーザーで伝導帯に励起すると、伝導電子と原子核の超微細相互作用により、数Kの臨界温度以下で大きな核偏極が現れるというものである。この理論を、円偏光レーザーで伝導電子を励起した場合に拡張し、伝導電子の偏極が核偏極に与える影響を調べた。実験では、4K以下の低温に冷却できるDYNASP検証装置を開発した。本装置では、小型のベータ線検出器を取り付けた不安定核の β -NMR実験や、安定核のパルスNMR実験を行なうことができる。

研究成果の概要（英文）：

Dynamic Nuclear Self Polarization (DYNASP) was theoretically predicted by Dyakonov *et al.* The phenomenon is observed in III-V semiconductors below a critical temperature (T_c). When electrons are excited to the conduction band with linearly polarized light, the lattice nuclei are largely self-polarized through the contact hyperfine interaction between the electrons and the lattice nuclei. The DYNASP theory was generalized by taking account of the conduction electrons polarized with circularly polarized light. To examine the DYNASP phenomenon below 4 K, an apparatus has been developed. The system is applicable to β -NMR experiments for samples containing unstable nuclei, and pulsed NMR experiments for samples of stable nuclei.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	100,000	30,000	130,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

中性子過剰な不安定核では、安定核で見られなかった現象がずっと見いだされている。たとえば、 $N=20$ の魔法数の消失といった現象では、陽子数・中性子数がアンバラ

ンスになるため、テンソル力の効果により、原子核の殻構造が変化していると指摘されている。このような原子核の構造変化は、他の中性子過剰領域でも観測される可能性があり、系統的な原子核の物理量の測定が求め

られている。核磁気モーメントは、核子のモーメントならびに粒子軌道により生み出されるため、原子核の内部構造を解明するための重要な物理量の一つとなっている。特に、魔法数近辺では、核モーメントに寄与する粒子数が少なくなるので、原子核構造の変化が顕著に現れる。近年では、 $Z=50$ 、 $N=82$ の中性子過剰な 2 重魔法数近傍の核構造に興味が集まっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、動的核整列 (DYNASP : DYnamic NucleAr Self Polarization) と呼ばれる原子核の偏極法を確立させることにある。DYNASP は、Dyakonov らが予言した III-V 族半導体に現れる現象である。半導体の電子をレーザーで伝導帯に励起すると、緩和の過程で、伝導電子は超微細相互作用で原子核とスピンを交換する。臨界温度以下の低温においては、核偏極による磁場が緩和現象に強く影響を及ぼす。その結果、正のフィードバック効果により、原子核が自動的に大きく偏極する。この手法を用いると、原子核を大きく偏極させることができる。本手法を確立し、不安定核の核偏極に適用できれば、より希少な原子核の β -NMR 実験を系統的に進めることができるようになる。

3. 研究の方法

(1) DYNASP についての理論研究

①DYNASP理論

DYNASP は、Dyakonov らが理論的に予言した現象であるが、彼らの論文では、直線偏光したレーザー光で伝導電子を励起している。このとき、励起された伝導電子は無偏極の状態となっている。実際には、円偏光レーザーを用いた励起も考えられるので、本研究では、Dyakonov らの理論を一般化し、伝導電子が円偏光レーザーで励起された場合に拡張し、伝導電子の偏極によって引き起こされる現象について調べる。

②InP結晶におけるDYNASP現象

①で得られた結果を InP 結晶に適用して、数値計算を行ない、どのような現象が観測できるかを調べる。

(2) DYNASP 検証実験のための装置開発

DYNASP は、理論予測されているのみで、実験は、会議録での報告されているだけである。本研究では、DYNASP 現象を実証するための装置開発を行なう。具体的には、レーザー装置、クライオスタット、 β 線検出器などを開発・準備する。

4. 研究成果

(1) DYNASP についての理論研究

①DYNASP理論

本研究では、伝導帯に励起した電子が偏極した場合を考慮に入れ、DYNASP理論を再構築した。その結果を基にどのような現象が観測されるかを調べた。

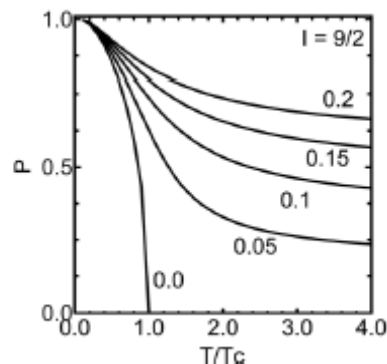


図1 核偏極度の温度依存性 (核スピン $I=9/2$ の場合)

図1に核偏極度の温度依存性を示す。横軸は臨界温度 (T_c) で規格化した温度、縦軸は核偏極度である。曲線の横の数値は、伝導電子の偏極度を示すパラメーター (α) である。伝導電子が偏極していない場合 ($\alpha = 0$)、温度 $T/T_c > 0$ で核偏極が消失し、Dyakonov らの理論を再現していることがわかる。一方、伝導電子が偏極した場合 ($\alpha > 0$)、臨界温度以上 ($T/T_c > 1$) でも核偏極が現れることがわかった。

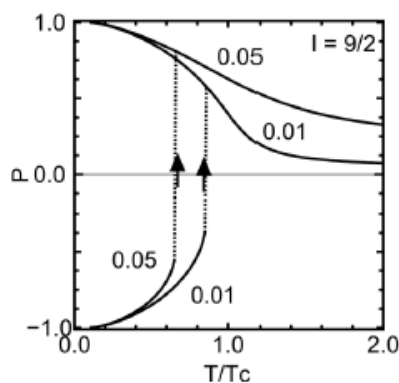


図2 核偏極の温度依存性。負に核偏極させ、伝導電子を正に偏極させた状態で、温度を上昇させると、核偏極のジャンプが見られる。

図2も核偏極の温度依存性を示したものである。伝導電子が正に偏極している場合 ($\alpha > 0$) を考える。低温で核偏極が正に偏極している場合、温度を徐々に上げていくと、核偏極が曲線に従って変化していくことがわかる。

一方、負に核偏極している場合、ある温度で、核偏極がカタストロフ的に正の偏極に反転することがわかった。

つぎに、温度を臨界温度以下にして、伝導電子の偏極度を変化させた。図3に核スピン $I = 1/2$ の半導体を $T_c/T = 1.25$ にしたときの、伝導電子の偏極度(α)に対する核偏極度を示す。この図より、臨界温度以下($T/T_c < 1$)では、核偏極が電子偏極の変化に伴い、ヒステリシス曲線を描くことがわかる。図のヒステリシスを分けている点線は境界線である。初期条件の核偏極が+領域にある場合、核偏極が自動的に増加し、プラス側のヒステリシス曲線上の核偏極になる。-領域の場合は、この逆の現象を起こす。

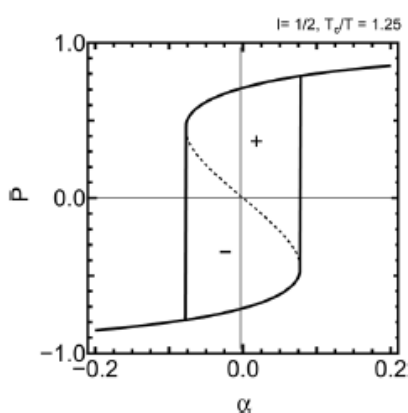


図3 伝導電子の偏極 (α) による核偏極度 (P)

以上のことから、円偏向レーザで伝導電子を偏極させることで、(a) 臨界温度以上でも核偏極を実現できること、(b) 円偏向の向きで、原子核の偏極を制御できること、さらに、(c) 臨界温度以下で円偏向の向きを変化させると、核偏極度がヒステリシス曲線を描くことが明らかになった。

② InP結晶におけるDYNASP現象

単一原子核で構成される半導体の場合は、理論式より解析的に現象を解くことが出来る。しかし、複数の原子で半導体が構成される場合は、そうすることが出来ない。そこで、理論式を用い数値計することによって、実際にInP結晶におけるDYNASP現象を調べることにした。計算では、InP結晶が ^{115}In と ^{31}P で構成されているとして、文献から得た超微細構造定数を用いた。Dyakonovらは、半導体を構成する各原子の臨界温度(T_{c_i})の荷重平均値を、その結晶の臨界温度と近似した。InPの場合、加重平均した臨界温度は約2Kとなる。ちなみに、 ^{31}P ($I=1/2$) は、 ^{115}In ($I=9/2$) と比べ核ス

ピンがと小さいため、単独の臨界温度が $T_{c_i} \sim 0.11\text{K}$ と低くなる。InP結晶について、数値計算を行った結果、図4に示す温度依存性を得た。図から、臨界温度が約2Kとなることがわかった。また、臨界温度以下では、核偏極の温度依存性の形状が、InとPで多少異なることがわかった。臨界温度以上では、InとPで電子偏極に対する核偏極の大きさが異なっているが、これは、核スピンの違いが現れたものである。

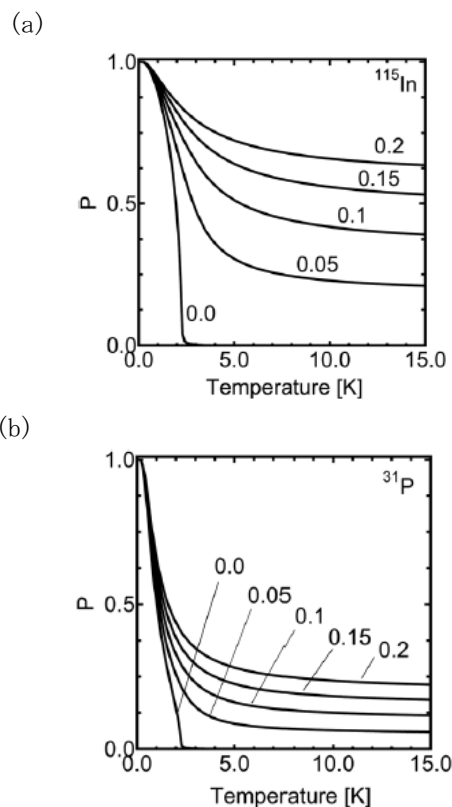


図4 数値計算で求めた核偏極度の温度依存性

次に、InP結晶における核偏極の伝導電子の偏極度の変化によるヒステリシス現象を調べた。図5は、温度1.5Kにおいて ^{115}In の核偏極が電子の偏極度(α)によりどのように変化するかを調べた結果で、図3で得られた結果と同じようなヒステリシス曲線となった。このヒステリシス曲線は温度を上げていくと幅が狭まり、臨界温度以上で、原点を通る緩やかな曲線となることがわかった。

以上の結果から、複数の原子から構成される半導体においても、DYNASPが観測できることが、数値計算の結果から示された。そのときの臨界温度は、Dyakonovらが求めた、加重平均された臨界温度に近くなることがわかった。

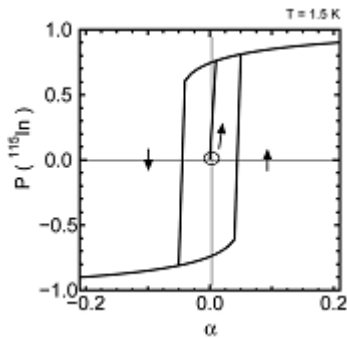


図5 伝導電子の偏極による核偏極度

(3) DYNASP 検証実験のための装置開発

① クライオスタット

InP 結晶では、DYNASP は、約 2K 以下で起きると予測される。そこで、InP 試料を 4K 以下に冷却できるように、クライオスタットを準備した。本クライオスタットは、トップドロ型で、上部から容易に試料を交換することができる。また、液体ヘリウムをロータリーポンプで減圧することにより、温度を 4K 以下に下げることができる。図 6 に、クライオスタットの概略図を示す。クライオスタットには、レーザ導入用の窓がある。試験の結果、ラムダ点 (2.17K) 以下の温度に冷却できることを確認した。

② ベータ線検出器

β -NMR による DYNASP 検証実験を行なうには、クライオスタットにベータ線検出器を組み込む必要がある。ベータ線検出器としては、シンチレータ、Si 検出器、PIN シリコンフォトダイオードの 3 つを候補とした。シンチレータを使用した場合、光電子増倍管が磁場中で使えなため、ライトガイドでシンチレータ光を取り出す必要があり、構造が複雑となることが欠点である。市販の Si 検出器の場合、クライオスタットに導入するためには、小型のものを導入する必要がある。フォトダイオードは、小型だが、むき出しのままなので、光や電気ノイズの影響を受けることが問題であった。これら検出器を、標準ベータ線源を用いて、試験した結果、シールドを強化したフォトダイオードが、最も S/N 高く測定することができた。また、フォトダイオードを用いると、クライオスタット中に無理なく納めることができた。実際にフォトダイオードを導入して、4K の低温の条件において試験した結果、正常にベータ線を測定できることが確認できた。

③ レーザ装置

レーザ装置は、当初 Ar イオンレーザを励起光源として用いる予定であったが、Ar イオンレーザチューブが経年劣化のため、十分な

パワーが得ることができなかった。そこで、固体レーザを導入した。メンテナンスを行なった結果、励起光 5 W で、Ti サファイアレーザより約 600mW の出力を得た。また、ステップモーターを導入し、1/4 波長板を回転させることで、レーザの偏光をコンピューターで制御できるようにした。

④ InP 試料の作成

InP 試料を原子力機構 JRR-3M にて放射化し、1 ヶ月程度冷却し、取り出し、0.5MBq の試料を作成した。

⑤ パルス NMR システム

東日本大震災の影響で、原子炉が停止したままなので、安定同位体で DYNASP を検証するため、パルス NMR システムを導入した。本装置は、RF 発生装置、パルス RF アンプ、信号アンプで構成される。 ^1H のパルス NMR を観測することで、本システムが正常に動作することを確認した。

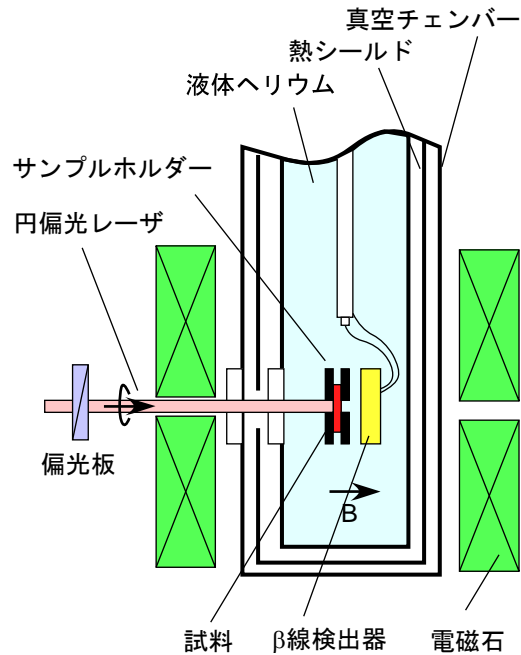


図6 クライオスタット概略図

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① M. Koizumi, J. Goto, and S. Matsuki, Dynamic nuclear self-polarization with circularly polarized light, J. Appl. Phys., 査読有り, 110, 2011, 013911-1-8
DOI: [10.1063/1.3602118](https://doi.org/10.1063/1.3602118)

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 小泉光生、後藤淳、松木征史、動的核整列を用いた不安定核の偏極法の開発、日本物理学会第 65 回年次大会、2010/3/20、岡山大
- ② 小泉光生、後藤淳、松木征史、中村詔司、動的核整列を用いた不安定核の偏極法の開発、日本物理学会第 66 回年次大会、2011/3/27（地震のため学会ホームページにて発表）、新潟大
- ③ 小泉光生、後藤淳、松木征史、円偏光レーザーによる III-V 族半導体の動的自己核偏極、日本物理学会第 67 回年次大会、2012/3/24、関西学院大

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

- ①M. Koizumi, et al., J. Appl. Phys., 110, 2011, 013911-1-8 は、Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology (<http://www.vjnano.org>)の2011年July 25日号（24巻4号）に選定された。

ホームページ等

http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2011/7_1.html

http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai-en/2011/index_set.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 光生 (MITSUO KOIZUMI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究副主幹
研究者番号：30354814

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

飯村 秀紀 (IIMURA HIDEKI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究主幹
研究者番号：10343906

後藤 淳 (JUN GOTO)
新潟大学・アイソトープ総合センター・助教
研究者番号：90370395

松木 征史 (SEISHI MATSUKI)
立命館大学・総合理工学研究機構・客員研究員