

核スピン偏極——光励起三重項電子を用いた動的核偏極



立石 健一郎

理化学研究所開拓研究本部/
仁科加速器科学研究センター
kenichiro.tateishi@riken.jp



上坂 友洋

理化学研究所開拓研究本部/
仁科加速器科学研究センター
uesaka@riken.jp

多彩な物性の元となる電子スピンに対し、核スピンの影響が顕わになることは極めて稀である。それは、スピンドアウンの占有数差である**スピン偏極**が非常に小さく、互いの効果を打ち消しあっているためである。近年、このスピン偏極を向上させる技術の進展と共に高偏極状態のみ発現する現象がいくつも報告されるようになってきた。

原子核物理では、陽子や中性子のスピンの原子核の構造に多大な影響を及ぼしていることが古くから知られている。安定原子核において閉殻構造が生じる核子数（魔法数と呼ばれる）が原子の魔法数と異なることは、陽子・中性子に対するスピン-軌道相互作用に由来するものと理解されている。さらに、安定原子核と全く異なる魔法数が不安定原子核で見つかるに至り、不安定原子核まで含めた原子核像を構築するには、スピンに関する精密測定が必要なことは明白であろう。

核スピン偏極が低い根本的な原因は熱エネルギーによる擾乱である。原子核の中では最も大きな磁気モーメントを持つ¹Hでさえ、10テスラ(T)、室温下でのスピン偏極は0.004%に過ぎない。そこで、この核スピン偏極を劇的に向上させるため、様々な「超偏極法」が開発されている。

加速器実験では、**動的核偏極**という手法が広く導入され、¹Hスピン偏極を数十%まで高めた**偏極標的**が運用されている。これまで広く用いられてきた偏極標的は、ラジカル分子を少量添加したアンモニアなどで、2.5 T、0.1 Kで動作する。この偏極標的は、散乱粒子への磁場の影響が小さい高エネルギー実験との相性が良い。一方、

中～低エネルギー領域における荷電粒子の軌道は、標的周辺の磁場によって大きく曲げられてしまう。これが角度分解能の低下を招き、最悪の場合、荷電粒子が磁場から脱出できなくなるため、低エネルギー原子核実験で動的核偏極を適用した偏極標的を使用することは難しいとされてきた。

この困難を乗り越えるため、低磁場(<1 T)で機能する新しい超偏極法(光励起三重項電子を用いた動的核偏極)を導入した。有機分子へのレーザー照射によって生じた励起一重項状態からの項間交差によって生じる短寿命の「スピン三重項状態にある電子スピン」の偏極率は磁場や温度に依存しないことに着目し、高温(77 K～室温)や低磁場(<1 T)で従来法では原理的に到達しえない値まで核スピンを偏極する技術の開発を進めている。原理検証実験として、ペンタセン(C₂₂H₁₄)を少量添加した*p*-ターフェニル(C₁₈H₁₄)単結晶を用いて、0.65 T、室温で¹Hスピン偏極40%を達成した。

この手法を用いて、ペンタセン(C₂₂H₁₄)を少量添加したナフタレン(C₁₀H₈)単結晶を用いて、0.1～0.35 T、100 Kで動作する偏極標的を構築した。そして、典型的な中性子過剰核である⁶He、⁸Heと偏極標的との弾性散乱実験から、不安定核のスピン-軌道ポテンシャルが安定核に比べて明らかに浅く、広がっていることを実証した。この手法は、非偏極中性子ビームを偏極中性子ビームに変換するための「中性子スピンフィルター」にも応用できる。

このようにスピンに由来する相互作用の直接観測を可能とする偏極標的は、今後の不安定核研究のキーデバイスとしてますますの発展が期待される。

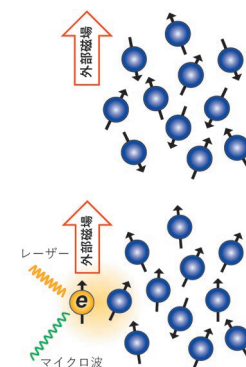
用語解説

スピン偏極:

スピンアンサンブル系におけるスピン磁気量子数の期待値。スピン1/2の場合は、外部磁場を量子化軸とする「スピンドアウン」と「スピンドアアップ」の占有数差となる。この値を熱平衡偏極以上に高めたものを超偏極状態と呼ぶ。

動的核偏極:

マイクロ波照射を用いて、電子スピン偏極を核スピンに移行する手法。電子スピン偏極を高めるために従来法では高磁場・極低温を用いるのに対し、我々の手法では有機分子へのレーザー照射によって生じる励起状態を利用している。(上)熱平衡偏極状態、(下)光励起三重項電子を用いた動的核偏極を適用した超偏極状態。



偏極標的:

加速器実験で用いられる核スピン偏極を数十%に高めた標的。¹Hを超偏極化する場合が多く、他にもDや³Heなどを超偏極化し標的として用いる場合もある。