

反磁性原子の電気双極子モーメントで探る新物理

山中長閑 〈Orsay 原子核物理学研究所/理化学研究所 yamanaka@ipno.in2p3.fr〉

吉永尚孝 〈埼玉大学理工学研究科物理学コース yoshinaga@phy.saitama-u.ac.jp〉

旭 耕一郎 〈理化学研究所仁科加速器研究センター asahi@riken.jp〉

夜空に輝く星々や我々人間を構成する電子と原子核、つまり物質は実際宇宙の主成分の一つをなしている。しかしながらそもそも宇宙に物質が多く存在し反物質がほとんど存在しない、というこの一見当たり前の事実は、実は非自明な現象である。CP対称性とよばれる対称性の破れがあってこの現象なのであり、観測から導かれる物質の量は、素粒子物理の標準模型に組み込まれたCPの破れで説明できる量をはるかに超えている。加えて宇宙には、標準模型内の粒子ではないと考えられる粒子（暗黒物質）や未知のエネルギー（暗黒エネルギー）が存在する。標準模型は現在までに地上で行われた加速器実験の結果のほとんど全てを説明する強力な素粒子物理模型であるにもかかわらず、その奥に私たちの知らない新しい物理が控えているのではないかと、多くの研究者が期待を胸に新物理の探索に挑戦している。

新物理の候補のうち、多くの研究者に有望視されていた電弱スケールの超対称標準模型は、超対称粒子が期待される質量領域に見つからないことから最近その特別な地位を譲りつつある。新物理の解明へのこれまでの指針が変更を余儀なくされ、次第に新物理の証拠探しはエネルギーを上げた加速器実験によって新粒子の直接検出を目指す「エネルギーフロンティア」から、標準模型で禁止されているはずの物理過程に新物理の効果を探索する「超精密フロンティア」へと、その重心を移しつつある。この際に鍵となるものの一つは上述のようにCPの破れである。

スピン方向に沿って定常的に生じた粒子の電気分極を電気双極子モーメント (Electric Dipole Moment, EDM) と呼ぶ。EDMはスピンに沿って定義されているのに、空間

反転と時間反転に関してスピンとは異なる変換性を示すという奇妙な物理量。時間反転に関するこの性質は、CPT定理を通じてEDMがCP対称性の破れに係る観測量であることを物語っている。新物理は標準模型とは異種のCPの破れを含むはずである。標準模型のCPの破れはフレーバー混合に関わるものであるため、フレーバー対角な観測量であるEDMには低次で現れず、観測にかからない。もし実験で大きな値のEDMが見つかったなら、それは間違いなく新物理に由来するものである。

EDMの研究は現在、スピンを持つ様々な粒子—中性子、反磁性原子、常磁性原子、ミュオン、陽子・重陽子—を対象に世界中で探索実験が実施または計画されている。理論的にも検討が進み、これら異なる粒子のEDMがそれぞれどのような新物理に感度を持っているのか、それらの実験データが得られた時にどのような解析をすればよいのかもわかってきた：各々の新物理が生み出すCP非保存相互作用は低エネルギーでは限られた個数のパラメータで表され、これらのパラメータはハドロン物理・核物理・原子物理の過程を通じて様々な素粒子・複合粒子にEDMを生じさせる。これを逆に辿ると、測定されたEDMから各パラメータの値が求められ、その値が新物理の存在の証拠を与えることとなる。我々は、キセノンや水銀などの反磁性原子のEDMが素粒子からハドロン、原子核、原子の各階層を繋げて新しい物理を解明する際に持つ感度を明らかにしてきた。こうして今後実験の進展によりEDMが、それもただ一例ならず決定されるようになれば、提案されているいずれの模型が描く新物理が実際に現れるのかを判別する道が拓かれることになる。

—Keywords—

CP対称性：

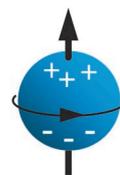
荷電共役(粒子・反粒子)変換(C)と空間反転(P)を同時に行う変換の下での対称性。K中間子の崩壊などの一部の現象でわずかに破れている。一方、CP変換と時間反転(T)を同時に行ったCPT変換の下での対称性は場の理論から要請される。

標準模型：

ミクロの世界に対する今日の標準的な模型。素粒子はクォークとレプトンと、それらの間の基本的な相互作用を伝えるゲージ粒子およびヒッグス粒子に分類される。電弱相互作用と強い相互作用の量子色力学を含む。小林・益川行列にはCP対称性を破る位相が一つ含まれている。

電気双極子モーメント：

スピン系の電荷分布の多重展開の一次の項。PおよびCP対称性の破れに感度がある。単位は $e\text{ cm}$ (正負の電荷の間の実効的距離を指す)。系が角運動量を持っているときのみ生じる。



反磁性原子：

最外軌道の殻が閉じている原子。電子のスピン、軌道角運動量が閉じており、原子全体のスピンは原子核から来る。原子の持つEDMは原子核や電子-核子間相互作用のCP対称性の破れには感度がある。原子スピンの外縁と強く結合しないのでスピン緩和時間が長く、スピン歳差の精密観測に適している。