

## 電磁場に影響されない遷移を用いた対称性の破れの探索

高橋唯基 (カリフォルニア工科大学 Division of Physics, Mathematics, and Astronomy yuiki@caltech.edu)

この宇宙を構成する物質の根源・起源は何なのか。この問いは何世紀にもわたって人類が探求してきた根源的な問いである。近年では、高エネルギー加速器の発明により、実際に新しい粒子を直接作り出すことで、数々の重要な素粒子が発見され、その結果、自然を非常によく説明する標準模型の構築に至った。しかしながら、ニュートリノの性質や暗黒物質、**物質優勢宇宙**の起源など、標準模型では説明しきれない、様々な未解決の基礎物理の重要課題が存在している。

このような素粒子物理学の未解決問題に迫る手法として、近年飛躍的に発達した量子計測技術を用いて、原子や分子の性質を非常に精密に測定する手法が注目されている。高エネルギーの現象が、原子や分子の量子状態のエネルギーをごくわずかに変更するエネルギーシフトを観測することで、間接的に高エネルギー現象を捉えようという試みである。このようなアプローチが可能になっているのは、これまでに確立されてきた様々な精密分光の技術・手法によって、非常に小さいエネルギーシフトをも観測しうるほど測定の精度が高いためである。例えば、近年急速に発展している原子時計は、周波数比で18桁以上の精度を出しており、暗黒物質の探索や一般相対性理論の検証が進んでいる。実際に、特定の種類の暗黒物質の探索や、従来と比べて短い距離スケールでの一般相対性理論の検証が行われた。この原子時計の精度を支える重要なアイデアとして、不確かさを抑えるために提案された**魔法条件**があり、原子時計の精度を飛躍的に向上させた。

原子だけではなく、分子の精密分光実験においても、基礎物理への応用が飛躍的に発展している。例えば、分子の精密分光によって、分子の軌道を回る**電子の電気双極子モーメント**を測定する実験では、ある仮定のもとでは10 TeVあるいはそれよりも

高いエネルギースケールの新物理現象の存在可能性に対してまでも制限をかけている。この実験において、さらに高いエネルギースケールを捉えるためには、測定精度を上げてより小さいエネルギーシフトを測定する必要があるが、それを阻む大きな要因として、実験における様々な統計的・系統的な不確かさが存在する。特に、電気双極子モーメントなどを測定する実験では、外部電場・磁場由来の不確かさが非常に厄介であることが知られており、これらを抑えることができれば測定精度の向上は非常に困難である。

このような不確かさを大幅に抑え、測定精度を飛躍的に向上させるためには、どうすればよいのか？ ごく最近、特定の電場を対象の分子に印加し、特定の量子状態間の遷移を用いることで、外部電場・磁場由来の統計的・系統的な不確かさを大幅に抑えながら新物理現象の測定を行うことが可能であることがわかった。二つの量子状態において、外部電場・磁場からのエネルギーシフトが同じになるような電場の値を選択すると、それら二つの状態間のエネルギー差に対応する遷移周波数は、外部電場・磁場からのエネルギーシフトが相殺されて影響を受けなくなる。このアイデアは、原子時計で用いられている魔法条件と似た発想に基づいていると言えるだろう。

さらに、このアイデアは、様々な分子種に対して応用可能であることがわかっており、例えばレーザー冷却・トラップに適した特定のエネルギー準位・構造を持つ分子に適用することで、熱運動に伴う不確かさも同時に抑えることができる可能性がある。このアイデアを実験に用いることで、今まで人類が到達することのできなかった非常に高いエネルギースケールの物理現象を探索・発見することが期待される。

## 用語解説

## 物質優勢宇宙：

ビッグバン直後の宇宙では、物質と反物質が同じ量だけ生成されたと考えられるが、現在は物質だけが残っている。物質と反物質が同量ならば対消滅を起こし両方も消滅するはずなので、宇宙の初期に物質と反物質の間にわずかな不均衡が生じ、物質が優勢になったと考えられているが、この不均衡の起源は未だ説明されていない。

## 魔法条件：

魔法波長とも呼ばれる。レーザーによって原子が分極されることによるエネルギーシフト(光シフト)を抑えるために、ある特定のレーザー波長を選択することで、遷移の基底状態と励起状態の光シフトが同じとなるようにすること。これにより、遷移周波数への光シフトによる影響を大きく減らすことができるようになった。近年では、さらに光シフトを抑えるためのアイデアとして「実効的魔法条件」も提案・実証されている。

## 電子の電気双極子モーメント：

標準模型において、電子などの素粒子は対称性からの要請により、ごくわずかな電気双極子モーメントしか持たない。しかし、時間反転対称性を破る新物理機構が存在すると、現在の測定精度においても観測可能な大きさの電気双極子モーメントを持つ可能性がある。もしも、現在の測定精度において観測されれば、直ちに標準模型を超えた新物理の存在を意味する。

