

原子核時計実現に向けたトリウムイオンのレーザー冷却

Laser cooling of thorium ions towards an optical nuclear clock

理化学研究所 山口 敦史

トリウムの同位体トリウム 229 は、エネルギーがわずかに 8.3 eV の原子核励起状態をもつ。8.3 eV は、波長に換算すると 149 nm の真空紫外でありレーザーを作ることができるエネルギーである。すなわち、トリウム 229 は原子核をレーザーで直接励起できる(レーザー分光できる)、現在知られている中では唯一の元素である。その応用の 1 つとして注目されているのが、トリウム 229 原子核の基底状態と、この超低エネルギー励起状態の間の共鳴周波数を基準とする「原子核時計」である。周囲の電子による遮蔽効果により、原子核遷移の共鳴周波数は環境のゆらぎの影響を受けにくいいため、原子核時計は、電子遷移の共鳴周波数を基準とする既存の原子時計よりも格段に高い周波数精度が達成できると期待されている。

原子核時計を実現するためのプラットフォームとしては、イオントラップが最適である。超高真空中の孤立系にトリウム 229 イオンをトラップすることができ、かつトラップされたトリウム 229 イオンの内部状態および運動状態をレーザー冷却の技術を使い精密に制御できるからである。たとえば、高精度な時計を作成するためには、イオンの運動に起因するドップラー効果の影響を抑制する必要があるが、それはイオントラップ中でイオンの運動状態をレーザー冷却により抑制する(すなわちイオンを冷却する)ことで達成される。トリウム 229 イオンには様々な価数があるが、原子核時計という目的には 3 価のイオンが最適である。理由は、(1 価や 2 価のイオンと違い)3 価のトリウムイオンは、レーザー冷却を可能にする電子遷移を持っているからである。そこで本研究では、原子核時計の実現をめざして、価数 3 のトリウム 229 イオンのトラップ装置を構築した。

まず、トリウム 229 イオンを得るために、ウラン 233 を金属板表面に薄く電着した線源を用意した。ウラン 233 はアルファ崩壊してトリウム 229 になる。したがって、ウラン 233 線源の表面からは、トリウム 229 イオンが常に反跳イオンとして飛び出している。この反跳トリウム 229 イオンをヘリウムガスで衝突冷却し、イオンガイドによりイオントラップまで輸送して捕獲し、レーザー分光実験を行った。なお、トリウムイオンの価数は、反跳直後は多価であるが、ヘリウムガスの衝突による電荷交換反応により 3 になる。

ウラン 233 からトリウム 229 イオンを得る手法の利点の 1 つに、原子核が 8.3 eV の励起状態のイオンも、2%程度の確率で得られる点あげられる。原子核励起状態にある価数 3 のトリウム 229 イオンのレーザー分光は今まで実現されたことが無く、したがってその性質も未知であった。今回我々は、この原子核励起状態のトリウム 229 イオンのレーザー分光にも成功し、その電子準位の超微細構造定数を決定した。これにより、この特異な原子核励起状態にあるトリウム 229 イオンの詳細な特性とそのレーザー冷却に必要な情報を明らかにした。講演では、以上の内容を最新の成果もまじえて報告する。

【参考文献】

- 山口敦史、「原子核時計の実現に向けて」、原子核研究 No. 65, pp. 23-33 (2020).
- 増田孝彦、吉見彰洋、山口敦史、吉村浩司、「最小エネルギーを持つトリウム 229 アイソマー状態の人工的生成 - 原子核時計の実現に向けて -」日本物理学会誌 No. 76, pp. 456 (2021).