

## ● 高野 哲至 特定准教授

*Tetsushi TAKANO (Program-Specific Associate Professor)*

研究課題：導波路に捕獲したツリウム原子を用いた量子計測の革新

(Innovation in quantum metrology using thulium atoms trapped in an optical waveguide)

専門分野：量子計測 (Quantum metrology)

受入先部局：理学研究科 (Graduate School of Science)

前職の機関名：理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻量子光学講座

(Graduate School of Science, Division of Physics and Astronomy)



私の専門は量子計測で、特に原子時計に関わる研究をしています。時間・周波数は、あらゆる計測量の中で最も正確に計測可能です。イオン時計や光格子時計などの原子時計は、近年 18 桁の精度に到達し、測地といった実用的応用に向けた可搬化の研究も進んでいます。一方、変化しないはずの原子時計の刻む時間がわずかに変化したとすると、それはまだ誰も知らない物理現象によるものかもしれません。近年、私は、このような標準模型を超えた「新物理」を探索する量子センサーの研究にも取り組んでいます。

本研究は、極低温にレーザー冷却したツリウム (Tm) 原子を光導波路近傍に捕獲することを中核とする、新しい量子計測のプラットフォームの構築を目指します。そして、扱える原子数の拡大、連続稼働の実現、電磁場に対する堅牢性という 3 つの課題に挑戦して、新物理の探索を目指します。

I have studied quantum metrology, in particular experiments on atomic clocks. Time and frequency can be measured most precisely within all the measurable physical quantities. Recently, atomic clocks, such as ion clocks or optical lattice clocks, have achieved 18-digit precision, and the development of transportable clocks has been accelerated for practical applications, such as geodesy. On the other hand, if the ticking rate of an atomic clock, which is thought to be immutable, changes slightly, it may be due to some unknown physical phenomenon. In recent years, I have been trying to develop such quantum sensors to search for “new physics” beyond the Standard Model.

This research aims to develop a new platform for quantum metrology, where laser-cooled thulium (Tm) atoms are trapped near an optical waveguide. Through this platform, I will tackle the three problems of quantum metrology: scalability, continuous operation, and robustness against the electromagnetic field. Then, I would try to search for new physics beyond the Standard Model.

## 量子計測－究極の精度と更なる課題－

今から 30 年程前、光と気体原子を使った計測技術である量子計測分野において、大きなブレークスルーがありました。光周波数コムが発明により光の周波数を極めて高精度に計測できるようになり、レーザーによって原子を極低温 ( $\mu\text{K}$  程度) まで冷やせるようになったのです。そして、これらの技術を基盤として、原子の光学遷移の周波数を基準とする原子時計である「光時計」が提唱されました。近年、イオン時計・光格子時計などに代表される光時計の精度は 18 桁にまで到達し [1,2]、測地学 [3] などの実用化に向けて、可搬化を目指した研究が進行しています [4]。

私は、光時計も含んだ量子計測装置の更なる進化の

方向性として、3 つの課題を考えました。1 つ目は、計測する原子数の増加です。一度にたくさんの原子数を計測できるほど計測の際の S/N が向上して、短期間で高精度な計測ができるようになります。2 つ目は連続動作です。現在のほとんどの量子計測装置は冷却を含めた原子の準備と計測を交互に繰り返しており、全稼働時間中の計測時間が少ないことが問題視されています。3 つ目は、電磁場などの外的環境に対する堅牢性です。近年、ファイバなどの物質の近傍 (手法によって 100nm から 20 $\mu\text{m}$  程度と異なります。) で原子を捕獲する研究が盛んにおこなわれています [5,6] が、物質との表面相互作用により原子の周波数シフトが起きて精度が損なわれてしまいます。また、原子を囲む環境

からの黒体輻射による周波数シフトの影響を低減するため、光格子時計では周囲を低温環境とするなどの対策が必要となっています [2]。

### 量子計測の新しい担い手—ツリウム原子—

私は、前述した量子計測の課題に取り組むため、ツリウムという原子に着目しました。ツリウム原子は光格子時計が実現される [7] など、近年研究が進んでいる原子です。この原子の最大の特徴は、その電子配置にあります。図 1(a) のように、5s,5p,6s 軌道が閉殻構造になっており、4f 軌道に欠陥（ホール）が 1 つあります。このホールのふるまいによってツリウムのエネルギー準位が定まるのですが、閉殻構造となっている外殻の電子軌道が静電遮蔽するために、電場に対してエネルギー準位が鈍感となるのです。図 1(b) に、主要な原子種とツリウム原子の常温の黒体輻射シフトの計算値を示します [7]。常温の黒体輻射のスペクトルは、原子の共鳴波長よりも長波側にあるため、このシフトには DC 電場による周波数シフト（DC シュタルクシフト）が主要な寄与を与えると考えられます。この表を見ると、実際にツリウム原子の黒体輻射シフトは非常に小さいことがわかります。ツリウム原子は、連続動作を行うのに優れた狭線幅の冷却遷移を持つ、新物理候補の 1 つである局所ローレンツ不変性の破れへの感度が報告されている中性原子の中で最も高い [8]、などいった有用な性質が他にもあります。

本研究では、ツリウム原子の冷却・分光技術の確立が、最初の課題となります。そのための冷却用真空槽・冷却用光源の開発を現在行っています。そして、DC シュタルクシフトの計測などを行います。

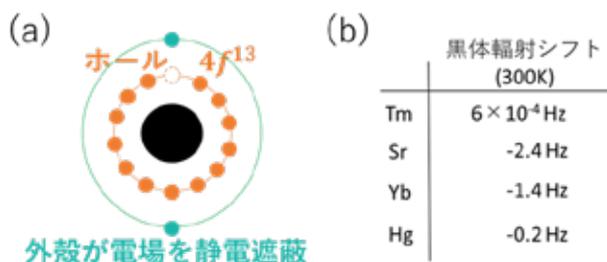


図 1 : (a) ツリウム原子のエネルギー準位  
(b) 主要な原子の黒体輻射シフト

### 光導波路への捕獲

現在のほとんどの量子計測装置は、自由空間中に集光した光によって捕獲された冷却原子を計測しています。しかし、自由空間中で光を集光すると、光は回折して、すぐに拡散してしまうため、原子を捕獲できる領域は微小領域に限定されてしまいます。この問題を解決するために、光ファイバなどの導波路で原子を捕獲することで捕獲体積を拡大する研究がおこなわれています [5, 6]。導波路とは、屈折率などの物質の性質を用いて光を拡散させずに伝搬させる構造を表し、導波路中の光のロスが無視すれば、任意の長さだけ光を伝搬させることが可能です。しかし、導波路で原子を捕獲する際、原子と導波路を構成する物質の相互作用によって周波数が変わってしまうという問題があります。そこで、本研究ではツリウム原子を採用することによって、この周波数シフトを抑制しようと考えています。

### 参考文献

- [1] C. W. Chou *et al.*, Phys. Rev. Lett. 104, 070802 (2010).
- [2] I. Ushijima *et al.*, Nat. Photonics 9, 185 (2015).
- [3] T. Takano *et al.*, Nat. Photonics 10, 662 (2016).
- [4] N. Ohmae *et al.*, Advanced Quantum Technologies 4, 2100015 (2021).
- [5] S. Okaba *et al.*, Nat. Commun. 5, 4096 (2014).
- [6] S. Kato and T. Aoki, Phys. Rev. Lett. 115, 093603 (2015).
- [7] A. Golovizin *et al.*, Nat. Commun. 10, 1724 (2019).
- [8] R. Shaniv *et al.*, Phys. Rev. Lett. 120, 103202 (2018).