

基礎物理学を目指す単一イオン光時計

杉山 和彦, 今井 康貴, 三滝 雅俊, 藤崎 広豊, 西田 圭佑, 友松 駿介

京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻

京大アカデミックデイ

2015年10月4日(日) 京都大学 百周年時計台記念館 2F 国際交流ホール



京大桂キャンパス(2003.9 ~)

物理の基本定数の時間空間変化の探索

- 標準モデルを超えた高次元を扱う理論で、変化する可能性が示唆されている
- 無次元の基本定数(単位系, 計測標準の時間変化によらない)



- 微細構造定数 α

微細構造定数 α の時間変化の観測

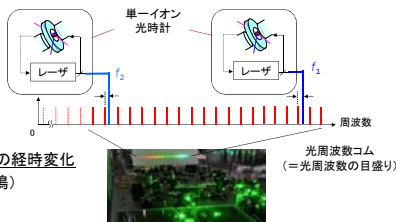
- 電磁相互作用の結合定数
- 無次元

- 過去に起きた現象の観測

- オクロ鉱山の天然原子炉 $\dot{\alpha}/\alpha < 1 \times 10^{-17}/\text{yr}$
- キューサーの吸収線
 - これらは過去の1点の観測
 - モデルに依存(他の結合定数と関連する)

- 異なる原子の共鳴を基準とする原子時計の周波数比の経時変化

- 繰り返し実験が可能(複数のグループ、種々の共鳴)
- 光領域の共鳴
 - マイクロ波標準より小さな不確かさ(不確かさ 10^{-18} 台)
 - モデルに依存しない(マイクロ波共鳴: 核磁気モーメントの変化にも敏感)
 - 光周波数コムによる光周波数計測・比較技術の発明(2000年)



2種類の単一イオン光時計の周波数比較

2つの光時計の周波数比 f_{E1}/f_{E2} と α の時間変化

$$\frac{1}{f_{E1}/f_{E2}} \frac{d(f_{E1}/f_{E2})}{dt} = (K_{E1} - K_{E2}) \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

K_{E1}, K_{E2} : 光時計が基準とする原子の共鳴周波数(右側に説明)の α の変化に対する感度

感度の異なる2種類の共鳴を基準とする
光時計の周波数比を測定し、
時間変化を探索

感度の表(右)
一般に感度が高いのは、
原子よりイオン、重い原子

原子	共鳴	K
H	$1s_{1/2}-2s_{1/2}$	2.4×10^{-5}
Ca	$^1S_0-^3P_0$	0.016
Sr	$^1S_0-^3P_0$	0.06
Yb	$^1S_0-^3P_0$	0.31
Hg	$^1S_0-^3P_0$	0.81

V. Flambaum and V. Dzuba,
Can. J. Phys. 87 25 (2009)

イオン	共鳴	K
Al ⁺	$^1S_0-^3P_0$	0.008
In ⁺	$^1S_0-^3P_0$	0.18
Ca ⁺	$^2S_{1/2}-^2D_{3/2}$	0.15
Sr ⁺	$^2S_{1/2}-^2D_{3/2}$	0.43
Ba ⁺	$^2S_{1/2}-^2D_{3/2}$	2.5
	$^2S_{1/2}-^2D_{5/2}$	2.4
Yb ⁺	$^2S_{1/2}-^2D_{3/2}$	1.00
	$^2S_{1/2}-^2D_{5/2}$	1.03
	$^2S_{1/2}-^2F_{7/2}$	-6.0
Hg ⁺	$^2S_{1/2}-^2D_{3/2}$	-1.5
	$^2S_{1/2}-^2D_{5/2}$	-2.9

Yb⁺とBa⁺: 我々の選択

感度が高い(光時計を実現しやすい中では)
Yb⁺: 単独でも探索可能(重力の影響排除などのメリットも)
Ba⁺: きわめて小さい不確かさの時計ができるかも

α の時間変化の現在の上限值

$^{27}\text{Al}^+$ と $^{199}\text{Hg}^+$ の比較: $-1.6(2.3) \times 10^{-17}/\text{年}$	NIST(米国)	T. Rosenband <i>et al.</i> , Science, 319, 1808 (2008).
$^{171}\text{Yb}^+$ S-D $_{3/2}$ とS-Fの比較: $-0.7(2.1) \times 10^{-17}/\text{年}$ $-2.0(2.0) \times 10^{-17}/\text{年}$	NPL(イギリス) PTB(ドイツ)	R.M. Godun <i>et al.</i> , PRL 113, 210801 (2014). N. Huntemann <i>et al.</i> , PRL 113, 210802 (2014).

これを超える測定を目指す

原子・分子を用いた基礎物理実験

- 物理理論の検証, あるいは淘汰を目指す基礎物理学実験

- 未確認粒子の検出を目指す(通常のアプローチ)
 - $E = mc^2$ より, 未確認粒子は重く, 高エネルギー → 高エネルギーのフロンティア → 大型加速器
 - 微弱な相互作用 → 稀な現象の検出 → 大型の実験施設
- 精密計測の極限を迫り, 微弱な効果の検出を目指す(我々のアプローチ)
 - 原子・分子を用いた超精密計測(レーザー分光技術, 原子・分子の冷却・操作技術...)
 - 装置の大きさは通常の実験室レベル

標準モデルを超える物理への挑戦

→ 2009年10月~2014年3月
新学術領域研究「原子が切り拓く極限量子の世界」

我々の他に...

- 電気双極子能率(EDM)の探索
 - 標準モデルを超える物理(超対称性など)があれば, 観測可能な大きさに
- 原子からの光子+ニュートリノ対生成検出(ニュートリノ質量~赤外線)
 - 物質・反物質の不均衡に迫る

→ 2014年4月~2018年3月

基礎研究B「単一イッテルビウムイオン光時計を用いた微細構造定数の時間変化探索」

時計と時間計測

時間計測の方法

- 再現性の公理(振り子, 水晶時計, 原子時計)
 - 周期はいつでもどこでも同じ, を原理とする
- 動力学(天体の運動)

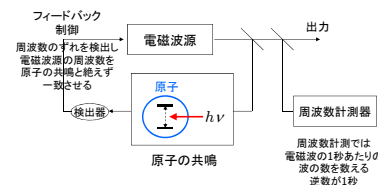
それぞれの時計の周期の基準は?

振り子時計: 振り子の周期
水晶時計: 水晶の機械的振動
たとえば 10 MHz であれば, その周期を10の7乗して1秒

原子時計: 原子の振動
= 共鳴する電磁波の周期

原子時計の構成

原子: 特定の周期(周波数)の電磁波と共鳴(吸収)する
原子を構成する電子がとらえるエネルギーはとびとび
それらのエネルギー間隔と一致するエネルギーの電磁波と共鳴
電磁波のエネルギーは周波数と比例関係
($E = h\nu$ (h : プランク定数))
共鳴する電磁波の周期をふり子のように使って時間を計る
→ 原子時計



現在の時間(周波数)標準

現在の秒の定義

- 秒は, センチュム133の原子の基底状態の2つの超微細構造遷位の間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間である
- (約9.2 GHz, マイクロ波領域)
- 原子泉方式
- 冷却したセンチュム原子を泉のように上方へ一定速度で発射し, マイクロ波との共鳴を調べる
- 不確かさ: 10^{-16} 台

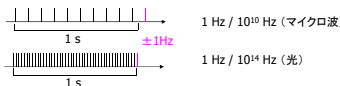
- 時系
 - 世界中にある200個以上の商用マイクロ波原子時計のアンサンブル平均
- GPS
 - GPSの精度が高いのは, それぞれが原子時計を搭載し, 同期を取っているから
 - 一般相対性理論(地球の重力), 特殊相対性理論(衛星のスピード)による周波数シフトの効果も補正されている

光時計(光周波数標準) がさらに優れている

- 周波数標準の性能
 - 周波数安定度(時間変動の小ささ)
 - 不確かさ(中心周波数をどこまで小さな桁まで決められるか)

- 周波数安定度

- 同じ変動なら周波数が高いほうが相対的に安定



- 不確かさ

- 高い周波数安定度 → より小さな桁まで不確かさを評価
- 原子の共鳴そのものの素性のよさ(擾乱に対して鈍感)
- 擾乱の小さい環境を原子に提供する方法

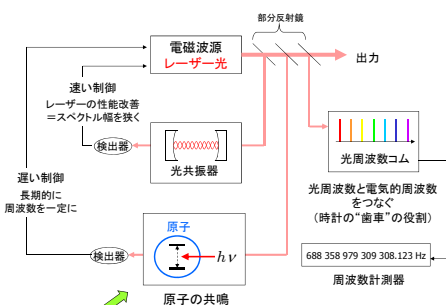
光時計と光周波数コム

光周波数を直接計測できる周波数カウンターはない

- マイクロ波以下の電氣的周波数へ落とす必要あり
- 時計にする → 連続運転が必要
- 光周波数に同期した電氣的周波数を連続的に発生させたい

モード同期レーザーによる光周波数コムが解決(発明:2000年)

光時計の構成



光時計の心臓部

一原子の共鳴を検出する
有力な方法一

イオントラップ

一原子を1個だけ空間に静止させる一

- 単一イオン時計

- 原子をイオン化し, 超高真空中の空間に1個だけ閉じ込めて冷却
- 周波数をずらす要因が極めて小さい
- 信号は弱い(1個しかない)
- α の変化に対する感度が大きいものがある
 - 不確かさ 8.6×10^{-18} (Al⁺: NIST(米国) PRL 104, 070802 (2010).)
 - 不確かさ 3×10^{-18} (Yb⁺ S-F: PTB(ドイツ) ICOLS 2015.)



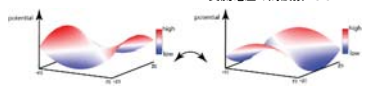
- 光格子時計

- 冷却した多数個の原子をレーザー光で閉じこめる
- 閉じ込めレーザー光による周波数のずれを取り除く
- 信号は強い
- 不確かさ 7.2×10^{-18} (Sr: 東大, Nat. Photon. 9, 185 (2014).)

- 2006年 2次の秒の現示(2次周波数標準)に光周波数

- $^{88}\text{Sr}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, $^{87}\text{Sr}^+$: 不確かさ $\sim 10^{-15}$

- 10年後には秒の定義が光周波数に変わる可能性



縦軸: トラップポテンシャル 赤: 正, 青: 負
左では径(r)方向に閉じこめられ, 右では軸(z)方向に閉じこめられ
これを交流(高周波)で時間的に切り替える

単一Ybイオン光時計の開発

開発順序

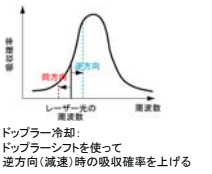
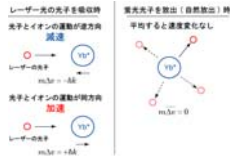
- ① 単一イオンをトラップに導入
- ② イオンを静止させる(レーザー冷却)
- ③ スペクトル線幅の狭い時計用レーザーを開発
- ④ 基準共鳴を見つける(量子跳躍)
- ⑤ 基準共鳴のスペクトルを取得
- ⑥ 基準共鳴に時計用レーザーの周波数をフィードバック制御
- ⑦ 2台を比較し不確かさ評価

現在⑤まで、ほぼ開発終了

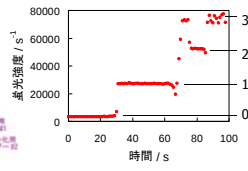
② イオンを静止させるレーザー冷却

— 単一イオンの観測、ドップラー効果の除去 —

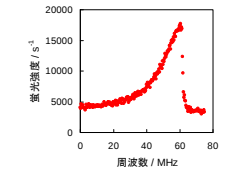
- 原理: レーザー光がイオンに与える力を使ってイオンを減速する



ドップラー冷却: ドップラーシフトを使って逆方向(減速)時の吸収確率を上げる



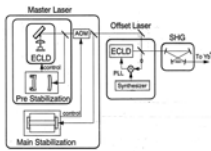
Ybイオンを一個ずつトラップに導入



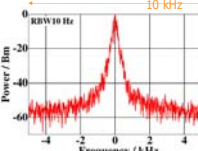
単一偶数同位体¹⁷⁴Yb⁺ レーザー冷却に使っている共鳴線のスペクトル

高周波側は加速されて、イオンがレーザー光の外まで運動し蛍光が消える
到達温度 約20 mK

③ 時計用レーザー — こちらもスペクトル幅を狭くする —



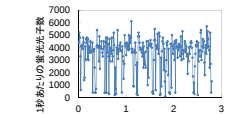
外部共振型半導体レーザー(Extended-cavity Laser Diode; ECLD)
出力光を一部反射させて戻す → スペクトルが狭くなる
光共振器の共鳴に高速でフィードバック制御
約1 μsの速度でレーザーの周波数をコントロール
スペクトル幅が狭くなる



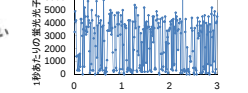
独立した2台のビート信号
スペクトル幅 500 kHz以下
波長が110~100 nm可変になる
 $\cos \omega_1 t \times \cos \omega_2 t = (1/2) \cos(\omega_1 + \omega_2) t + (1/2) \cos(\omega_1 - \omega_2) t$
より、 ω_1 と ω_2 は光領域でも両者が近ければ下線の部分を電氣的に調べることができる

④ 単一イオンの基準共鳴をみる — 量子跳躍信号 —

- 観測結果



時計用レーザーの周波数が離れているとき

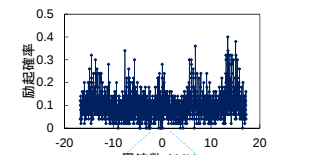
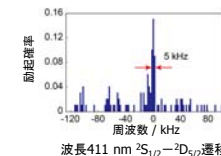


時計用レーザーの周波数が同調しているとき
観測中の様子は動画で...

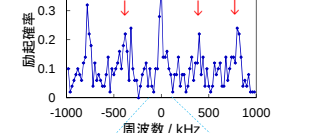
⑤ 単一Ybイオンの基準共鳴のスペクトル

測定方法

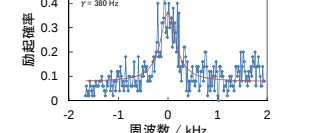
- ① 時計用レーザーを一定時間照射
- ② 蛍光を確認
- ③ 消えたら共鳴が起きた
- ④ 上記①から③を繰り返すと共鳴が起きる(励起)確率が得られる
- ⑤ 時計用レーザーの周波数を変えて遷移確率を測定
- ⑥ スペクトルが得られる



磁場による5つの分裂



トラップ中の振動によるサイドバンド



波長411 nm ²S_{1/2} - ²D_{5/2}遷移
中心成分 幅380 Hz
時計用レーザーのスペクトル幅で分解能が制限

2種類の共鳴スペクトルの検出に成功
次は光時計構築へ

光周波数と電氣的周波数をつなぐ — 光周波数コム —

- 光周波数は直接測定できない
- 電氣的周波数に正確に分離する“時計の歯車”が必要
- 光周波数と電氣的周波数(マイクロ波)は1万倍違う

超短パルス モード同期レーザーが解決

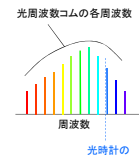
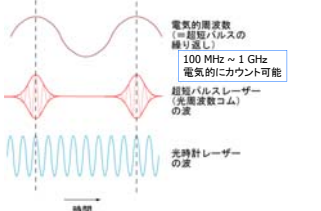
モード同期レーザー

同時に複数の周波数で発振しているレーザーで、それらの相対的な位相がいつも一定なもの(モード同期)

- 横軸を時間でみると
→ 一定の時間間隔の光パルス列
- 横軸を周波数でみると
→ 同時発振しているレーザーの周波数間隔が一定
→ まるで櫛の歯のよう → 光周波数コム(comb(コム) = 櫛)

- 周波数の等間隔性が正確(不確かさ<10⁻¹⁹)
- Hänsch博士, Hall博士: 2005年 ノーベル物理学賞

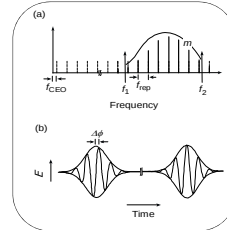
光周波数コム → 時計の歯車の役割



横軸を時間で見ると...
光時計の波と光パルスの繰り返しを同期させる

横軸を周波数で見ると
コムの周波数を光時計レーザーの周波数に固定する(位相同期)

モード同期レーザーのモード周波数(正確に)



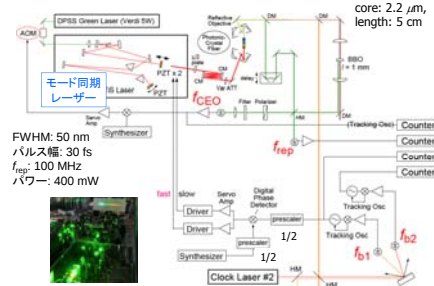
$$f(n) = n f_{rep} + f_{CEO}$$
$$= \left[n + \left(\frac{\Delta \phi}{2\pi} \right) \right] f_{rep}$$

f_{rep} : パルス繰り返し周波数
carrier-envelope offset frequency
(搬送波-包絡線オフセット周波数)
carrier-envelope offset phase

f_{rep} : 100 MHz ~ 1 GHz
 $f(n)$: 600 THz ~ 300 THz (500 ~ 1000 nm)
 n : 10⁵ ~ 10⁶ (0 ≤ f_{CEO} ≤ f_{rep})

1オクターブ光周波数コム装置

(チタニウムサファイアレーザーによる)

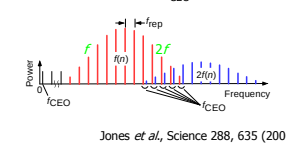


FWHM: 50 nm
パルス幅: 30 fs
 f_{rep} : 100 MHz
パワー: 400 mW

オフセット周波数 f_{CEO} 測るには

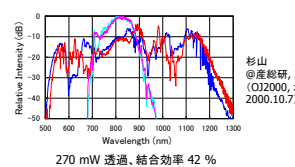
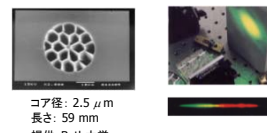
- 自己参照法

低周波端の第2高調波
 $2f(n) = 2 \times (n f_{rep} + f_{CEO}) + 2f_{CEO}$
基本波の高周波端
 $f(2n) = 2n f_{rep} + f_{CEO}$
ビート周波数 = f_{CEO}



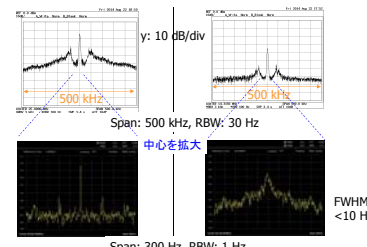
Jones et al., Science 288, 635 (2000)

フォトリック結晶ファイバー



杉山
@産総研, 2000
(032000, 北見,
2000.10.7)

光周波数コムを光時計レーザーに同期



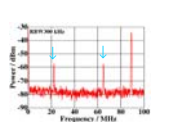
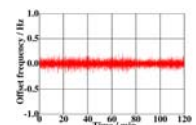
コムの1本と光時計レーザーとのビート

コムを同期させたビート^f1
中心を拡大してもスペクトルは幅広い(下)
波長 822 nm

同期させたコムと
別の時計用レーザーとのビート^f2
スペクトルが鋭くされている(上)
波長 871 nm

長期連続運転を目指す 半導体レーザー励起Yb:KYWレーザーによるコム

目標: 低ランニングコストで長時間連続運転
ファイバーレーザーと同等に
優位性: 低発熱, 高効率, ファイバーのテク不要



コムの周波数の固定(位相同期)
連続2時間以上
モード同期だけでなく1ヶ月連続も

レーザーとのビート