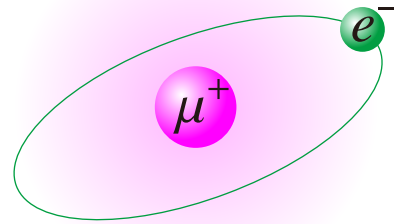




Muonium 精密分光実験



岡山大学異分野基礎科学研究所 植竹 智

科研費
KAKENHI

 RIIS 岡山大学異分野基礎研  理研^A,

 ブリティッシュコロンビア大^B,  KEK^C,  北京大学^D,

 新潟大学^E,  大阪大学^F,  九州大学^G,

実験 collaborator (1S-2S レーザー分光実験)

足立泰平^C, 原秀明, 平木貴宏, 池戸豊^C, 今井康貴, 石田勝彦^A, Saeid Kamal^B,
河村成肇^C, 幸田章宏^C, 増田孝彦, 三部勉^C, 三宅康博^C, 宮本祐樹,
大石裕^C, 大谷将士^C, 下村浩一郎^C, パトリックストラッサー^C,
鈴木一仁^C, 山基真佑, 山崎高幸^C, 吉田光宏^C, 吉村浩司, Ce Zhang^D

理論 collaborator

浅賀岳彦^E, 遠藤基^C, 仁尾真紀子^A, 田中実^F, 津村浩二^G, 吉村太彦

目次

● 岡山大学異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア紹介

● イントロダクション：ミュオニウム精密分光の目標

- ▶ 水素様原子の精密分光と基礎物理学
- ▶ 水素原子レーザー分光の現状と限界
- ▶ 水素原子とミュオニウムの比較
- ▶ 現在の精度と本研究の目標, $g-2$ への寄与
- ▶ 探索可能な新物理

● 実験の原理と精度向上手法

1S-HFS マイクロ波分光

- ▶ 測定原理・過去の研究 (LAMPF1999 実験) の結果

1S-2S レーザー分光

- ▶ 過去 (RAL1999 実験) の結果と改善項目
- ▶ 精度向上のための実験技術

● 実験計画概要 [1S-2S レーザー分光]

- ▶ 実験の概要・実験エリアの状況
- ▶ 年次計画・各実験 Phase の概要
- ▶ シミュレーション研究

● まとめ

Okayama-U Group



教員：吉村浩司，笹尾登，
増田孝彦，平木貴宏，吉村太彦，
吉見彰洋，宮本祐樹，
植竹智，原秀明，今井康貴，
(Federico Chiossi)

学生：岡井晃一，Wang Jing，
小早川大貴，山基真佑，倉本祥至，
嵯峨航，桃原怜央，佐藤有希子
Ming Guan (Dec.-)
Visiting students:
高橋唯基 (CalTech)，
Junseok Han (Seoul Nat. Univ.)

Mu 1S-2S collaboration:
KEK

SPAN collaboration (理論):
田中実(阪大)，津村浩二(九大)，淺賀岳彦(新潟大)

ACME collaboration:
John M. Doyle (Harvard)，David DeMille (Chicago)，
Gerald Gabrielse (Northwestern)

- 素粒子物理
- 原子物理
- 原子核物理
- 物理化学

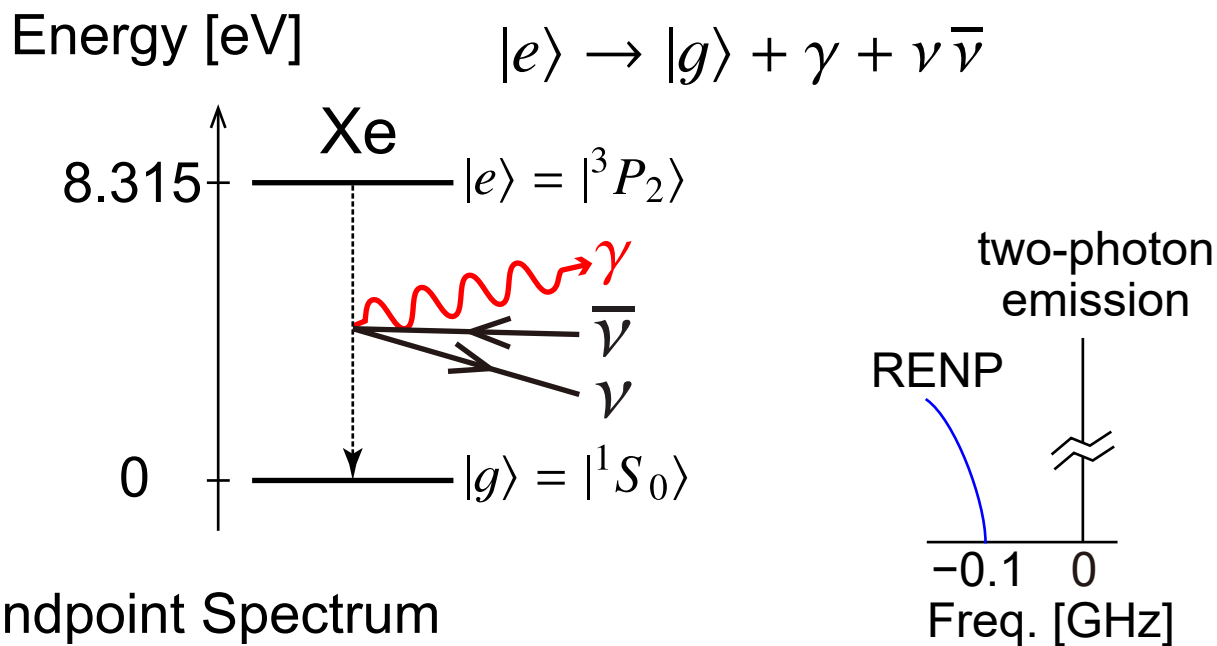
10 staff
9+2 students

原子・分子・光物理学 (AMO Physics) の最先端技術を用いた基礎物理研究

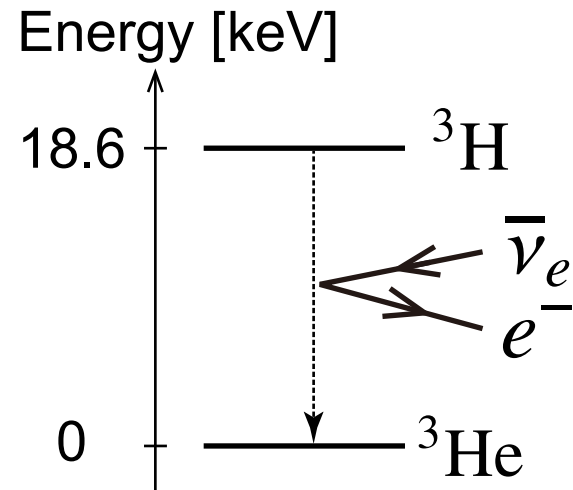
SPAN: SPectroscopy with Atomic Neutrino

● 原子・分子によるニュートリノ質量の精密測定 $m_\nu c^2 \sim 0.1$ [eV] (比較)

▶ Radiative Emission of Neutrino Pair: RENP 過程

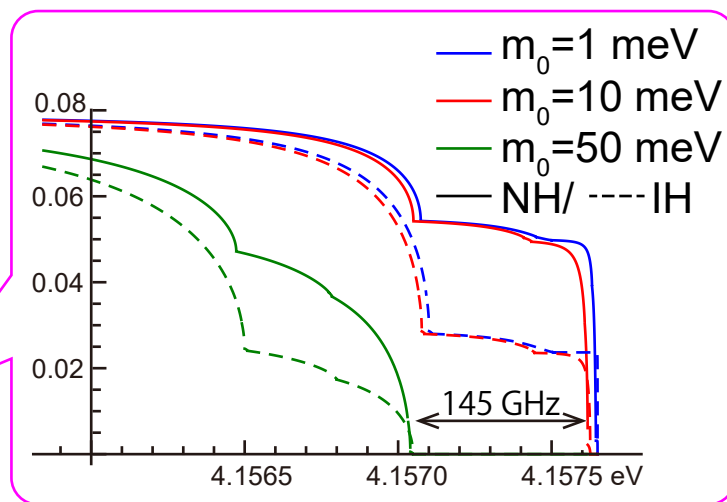
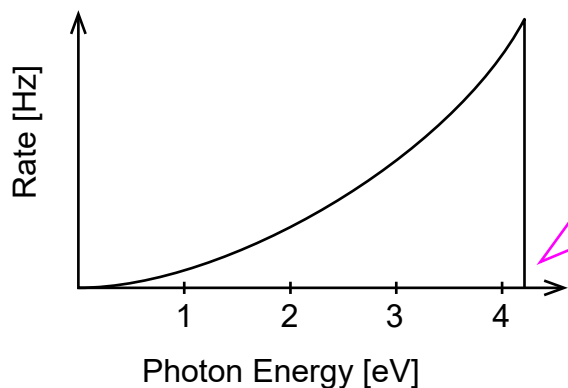


▶ 原子核 ^3H の β 崩壊

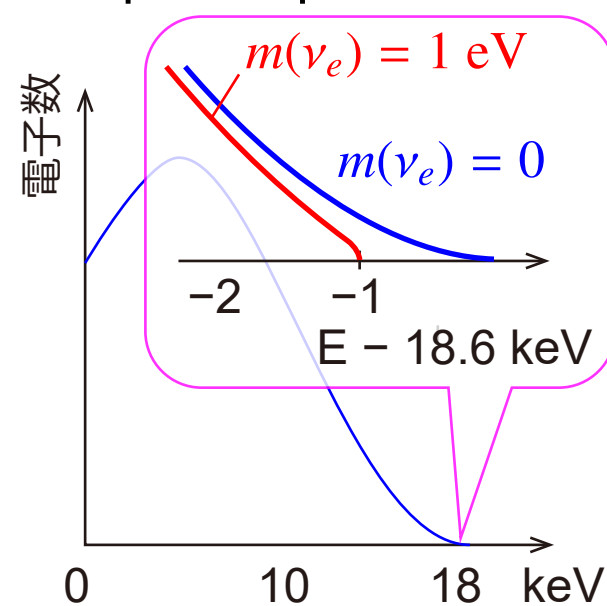


▶ Endpoint Spectrum

$$\hbar\omega_{ij} = \frac{\hbar\omega_{eg}}{2} - \frac{(m_i + m_j)^2 c^4}{2\hbar\omega_{eg}}$$

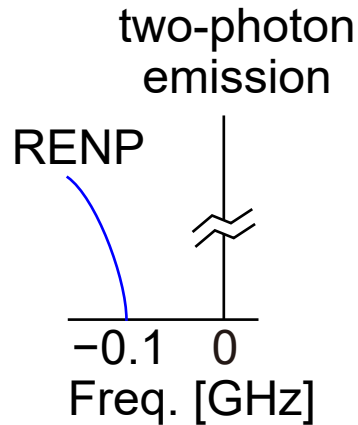


▶ Endpoint Spectrum



レーザー光と原子を使うメリット・デメリット

● RENP 過程をレーザーで誘起：超高分解能分光が可能



- ▶ 1 meV のニュートリノ質量 → 100 MHz の周波数シフト
- ▶ レーザーの周波数分解能 < 1 Hz

ニュートリノ質量の超精密決定が可能

✗ 発生レートが非常に小さい

▶ 1 原子あたり 10^{-34} s^{-1} ($\sim 10^{-26} \text{ year}^{-1}$)

$$|\mathcal{A}|^2 = 10^{-34} \text{ s}^{-1}$$

▶ インコヒーレント原子集団の放射レートは原子数 N に比例 $N|\mathcal{A}|^2 = N \times 10^{-34} \text{ s}^{-1}$
→ 10^{23} 個の励起原子を集めても 10^{-11} Hz の発生レート (1 万年に 3 回発生)

◎ レーザーにより原子の「量子操作」が可能

● 原子集団間のコヒーレンス (協同効果) を応用

協同効果による発生レートの大幅増強を狙う

$$|N\mathcal{A}|^2 = N^2 \times 10^{-34} \text{ s}^{-1}$$

発生確率のごく小さいイベントをいかにして観測するか

- 単純なアプローチ：

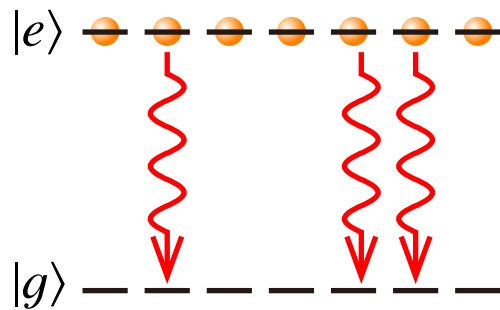
- ▶ ターゲットの量を増やす (e.g. 200 kg のターゲット等)

1 粒子あたりのレート $A \rightarrow N$ 粒子では NA

- ▶ 莫大な励起エネルギーが必要

e.g. 1 eV (波長 $1.2 \mu\text{m}$), 10^{23} 個の励起 $\rightarrow 16 \text{ kJ}$ (160 kW for 10 Hz)

Incoherent Atomic Ensemble



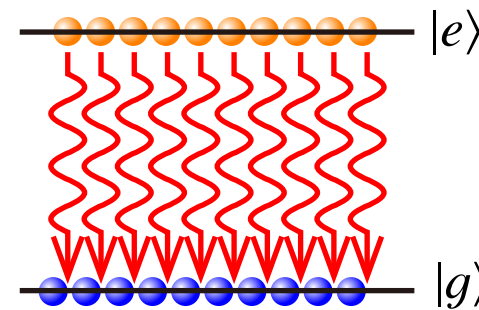
Rate: NA

$$\sum_i k_i = 0$$

$$\left| \sum_a^N e^{-i \sum_i k_i \cdot r} \mathcal{M}_a \right|^2$$

$\times N$

Coherent Atomic Ensemble



Rate: $N^2 A$

$$\frac{|e\rangle + |g\rangle}{\sqrt{2}}$$

- 量子干渉性を活用したアプローチ：

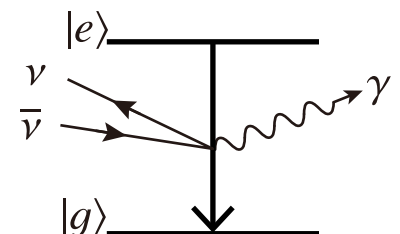
**原子・分子集団のコヒーレンスを使うと
遷移レート的大幅増幅が可能
(マクロコヒーレント増幅)**

- ▶ 超放射 (E1 遷移 一光子過程では 70 年代に実証済, $k \cdot r \simeq 0$)

- ▶ 多光子過程などでは未検証

$$|e\rangle \rightarrow |g\rangle + \underbrace{\gamma + \nu + \bar{\nu}}$$

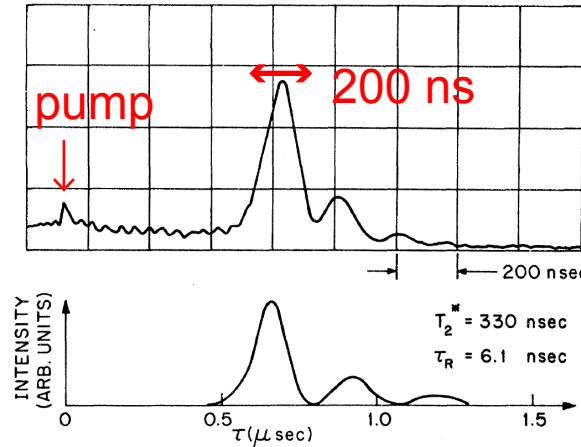
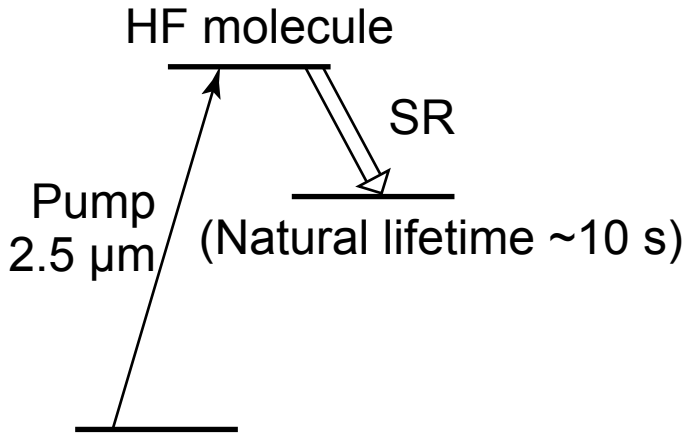
$$k_\gamma + k_\nu + k_{\bar{\nu}} = 0$$



コヒーレンス (協同効果) による放射レートの増幅

- 超放射 (Dicke (1954), E1 放射レートの増幅)
- ▶ N. Skribanowitz *et al* (1973) HF molecule で実証

R. H. Dicke

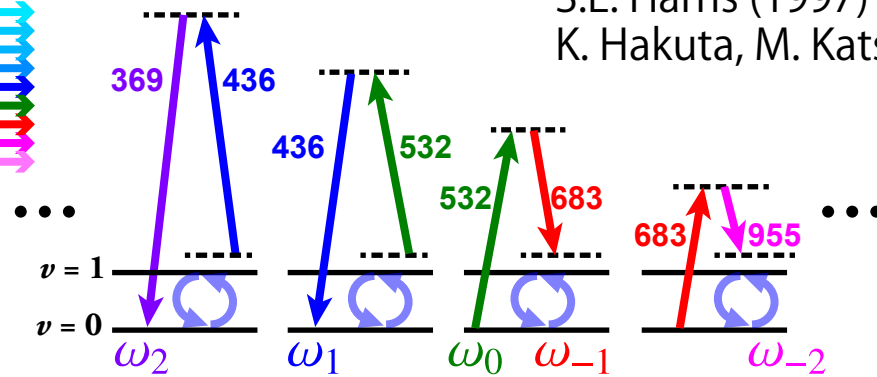
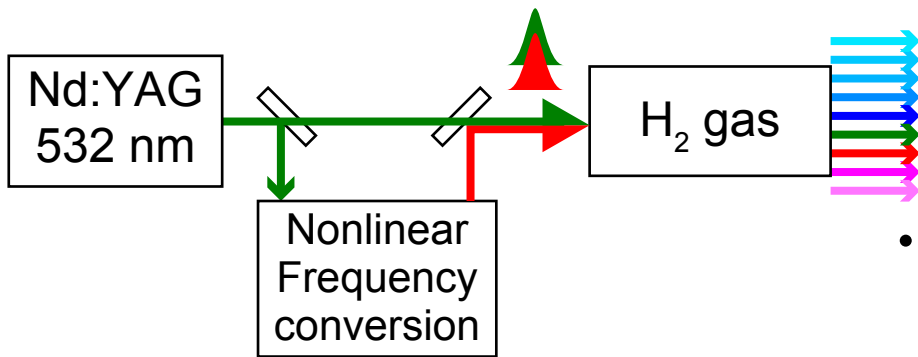


自然放出寿命 1~10 s
 超放射寿命 2×10^{-7} s
→放射レート 10^8 倍
 N^2 倍の効果で一気に加速

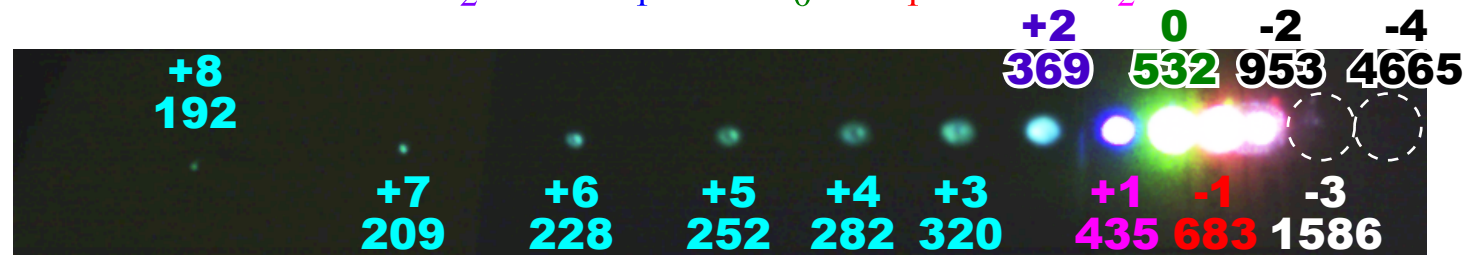
- Raman 散乱レートの増幅 (Stokes / Anti-Stokes 光の高効率発生)

S.E. Harris (1997)

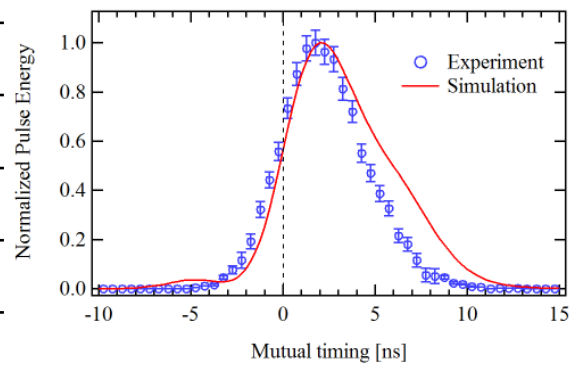
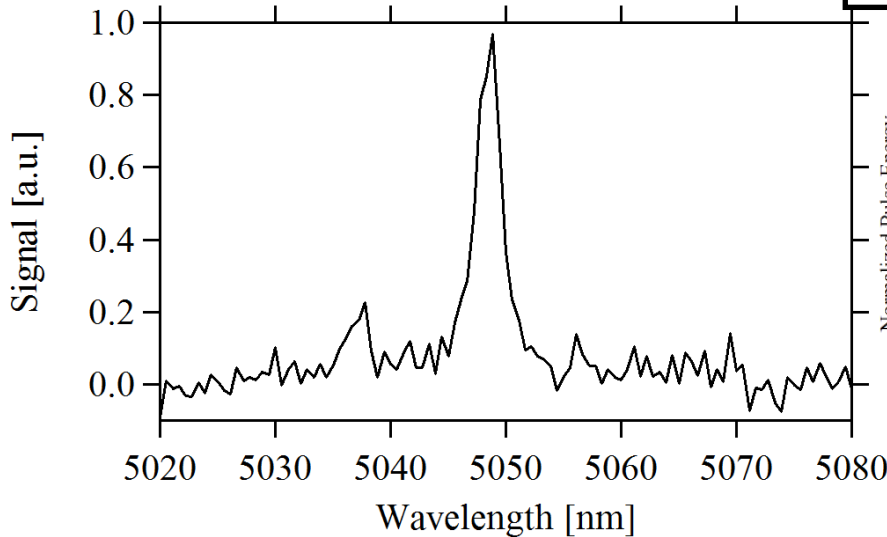
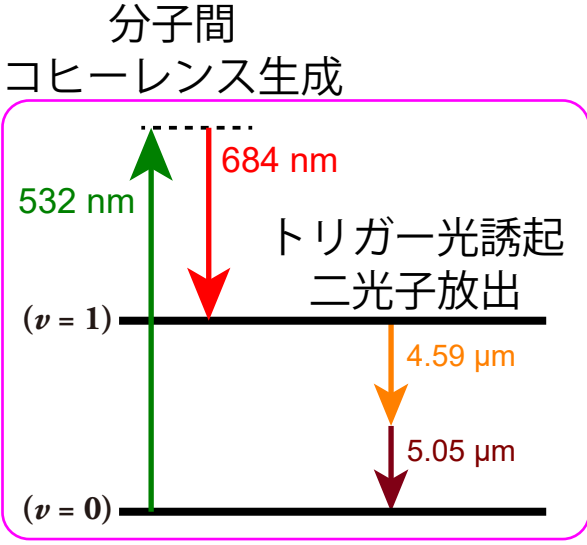
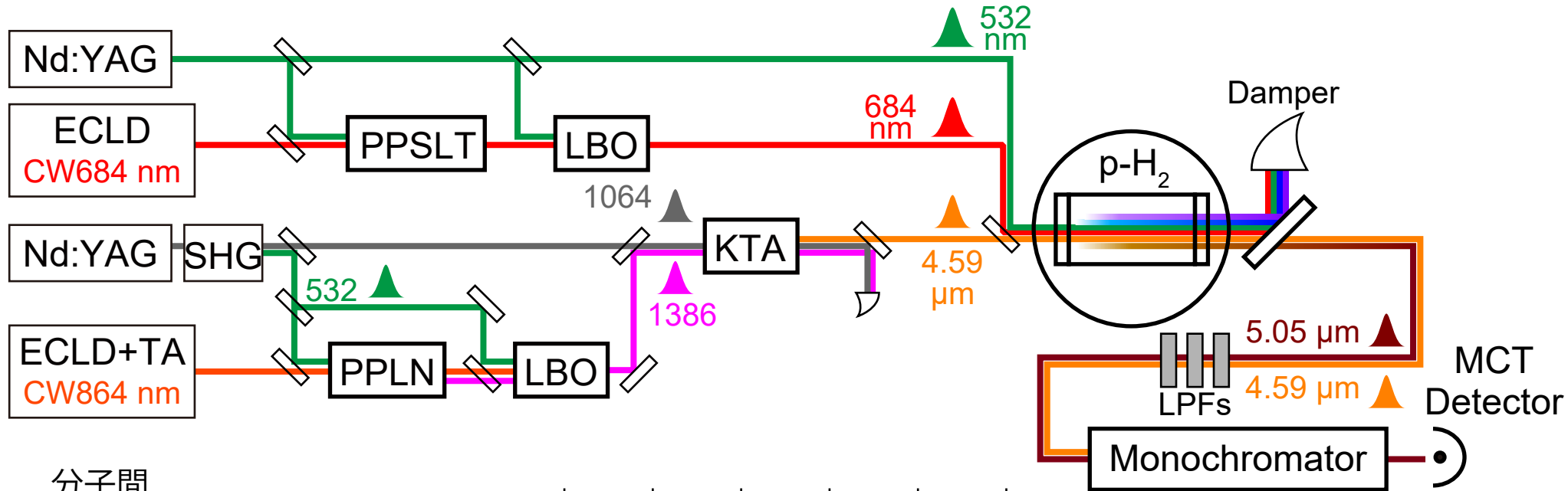
K. Hakuta, M. Katsuragawa (1999)



5 mJ + 5 mJ
 $\phi \sim 200 \mu\text{m}$ beam
 (peak intensity:
 9 GW/cm² total)



協同効果による E1×E1 二光子放射レートを増幅を実証



Y. Miyamoto, SU, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 081C01 (2015)

10¹⁹ 倍の放射レート増幅に成功

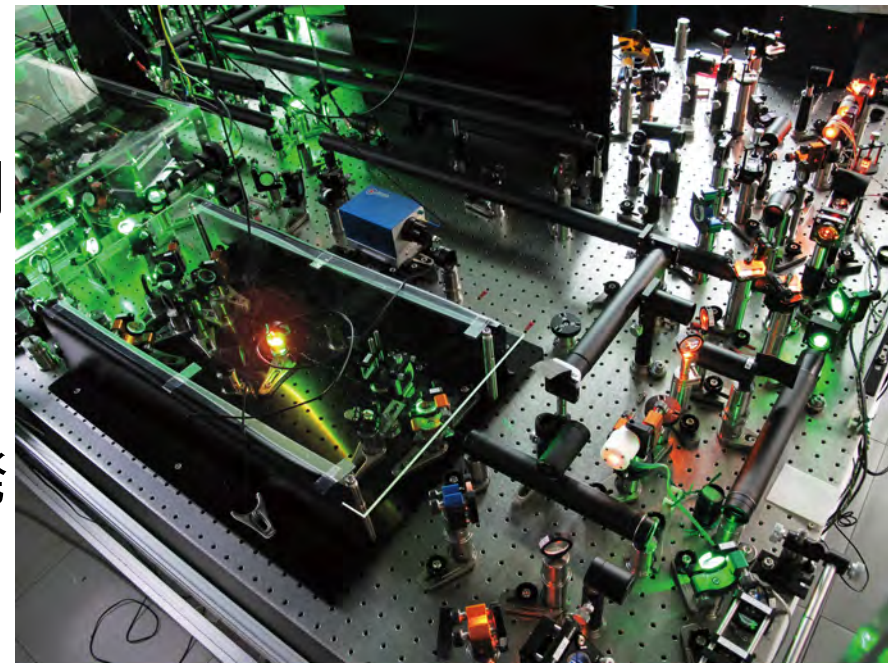
● 原子物理の手法を最大限に活用

▶ 原子集団の協同効果を電弱過程に応用

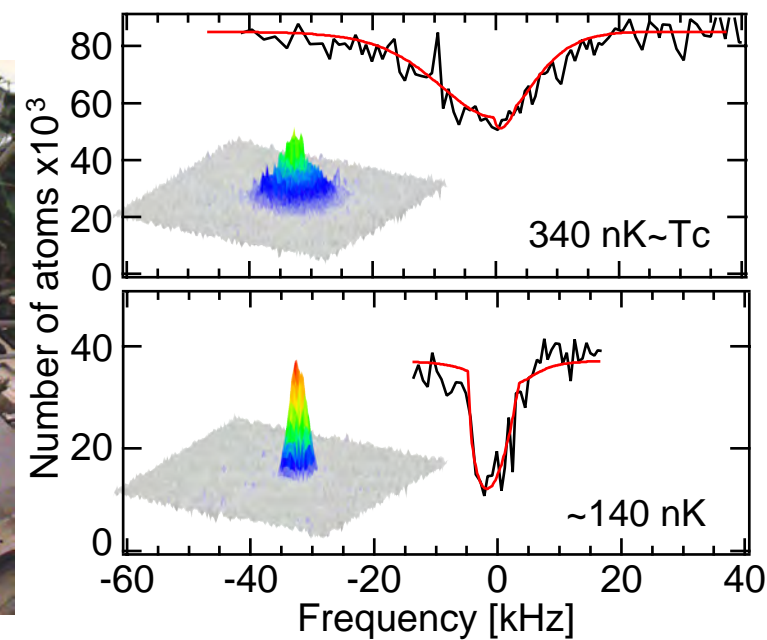
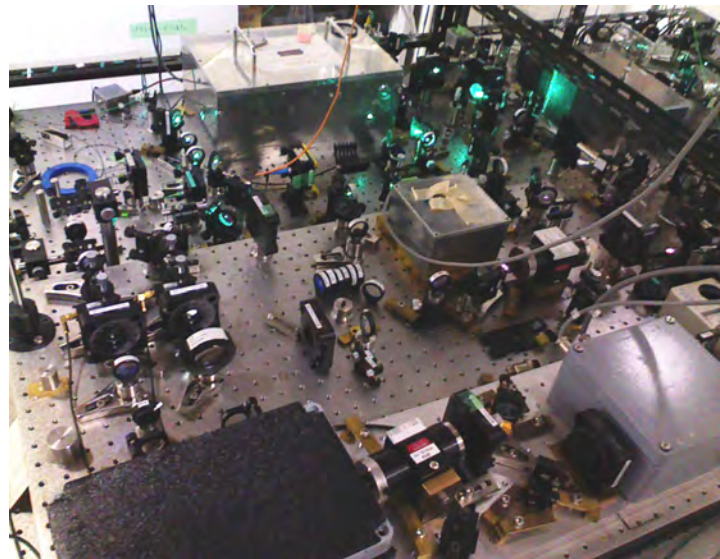
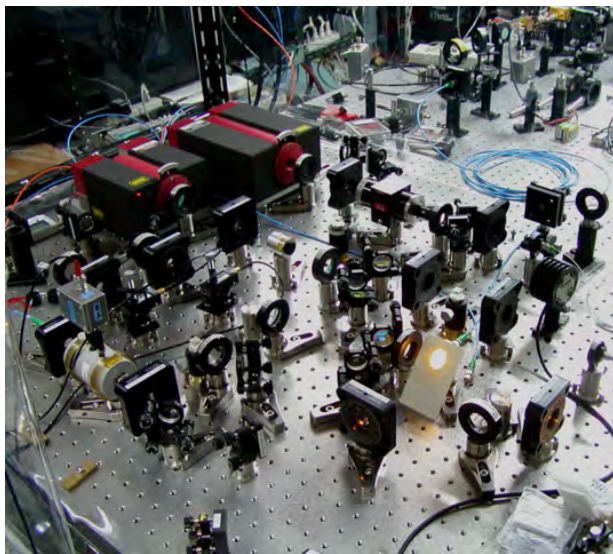
● 電弱スケール物理の詳細解明

goal ニュートリノ基本パラメータ決定

tool 狭線幅・ハイパワーレーザー光源開発



▶ 量子縮退 (ボース凝縮) 原子の精密レーザー分光



New!! Mu 分光による電弱統一理論の精密検証と新物理探索

目次

- **岡山大学異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア紹介**

- **イントロダクション：ミュオニウム精密分光の目標**

- ▶ 水素様原子の精密分光と基礎物理学
- ▶ 水素原子レーザー分光の現状と限界
- ▶ 水素原子とミュオニウムの比較
- ▶ 現在の精度と本研究の目標, $g-2$ への寄与
- ▶ 探索可能な新物理

- **実験の原理と精度向上手法**

- 1S-HFS マイクロ波分光**

- ▶ 測定原理・過去の研究 (LAMPF1999 実験) の結果

- 1S-2S レーザー分光**

- ▶ 過去 (RAL1999 実験) の結果と改善項目
- ▶ 精度向上のための実験技術

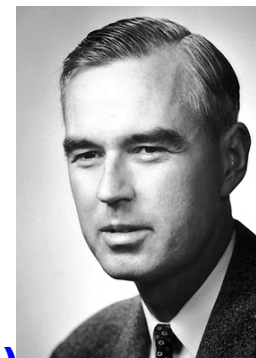
- **実験計画概要 [1S-2S レーザー分光]**

- ▶ 実験の概要・実験エリアの状況
- ▶ 年次計画・各実験 Phase の概要
- ▶ シミュレーション研究

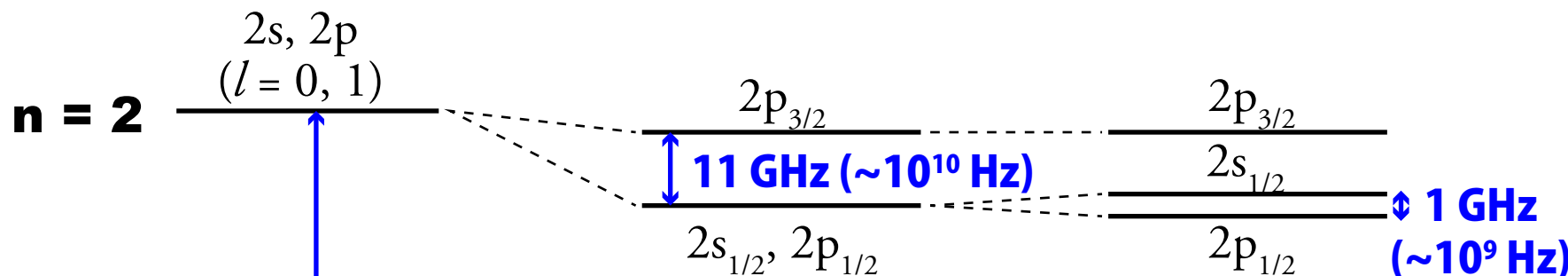
- **まとめ**

Introduction: 水素原子の精密分光と物理学の発展

Willis Lamb



● Lamb シフトの発見 (1947 年) と量子電気力学 (QED) の発展



Lyman- α : 121 nm
($2.47 \times 10^6 \text{ GHz}$)
($\sim 10^{15} \text{ Hz}$)

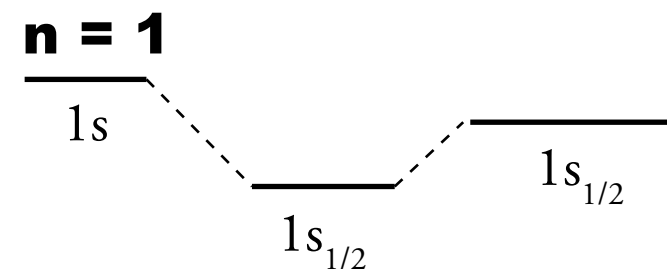
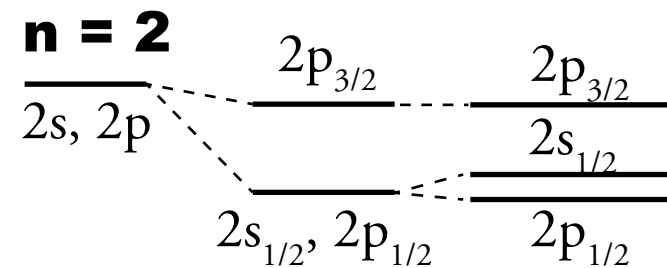
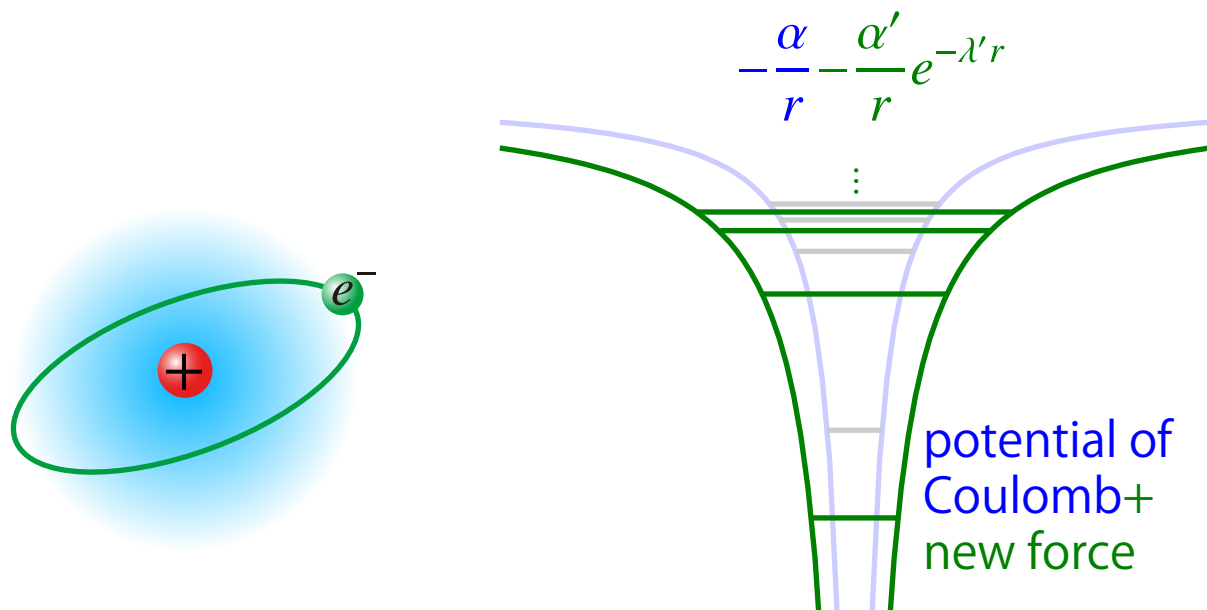
実験値 (1947 年) : $1057.77 \pm 0.10 \text{ MHz}$
計算値 (1949 年) : $1057.70 \pm 0.15 \text{ MHz}$
(量子電気力学 : 人類が手にした最初の場の量子論)
→ その後の場の量子論・素粒子標準模型の発展へ



Hans Bethe

- ▶ ボーア模型 (1913)
- ▶ Dirac 方程式 (1928)
- ▶ 量子電気力学 (1947~)
- Schrödinger 方程式 (1926)
- 相対論的量子力学
- Lamb シフト
- (非相対論的) 量子力学
- (相対論 + 量子力学)

Introduction: 水素様原子の精密分光と基礎物理学



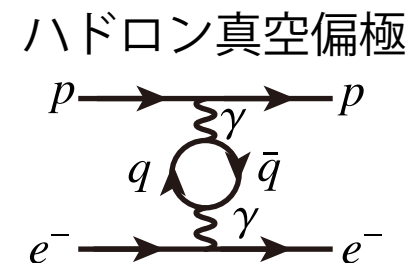
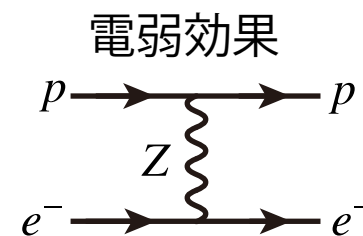
Bohr Dirac QED

- 水素様原子 (1 電子系) : 最も単純な荷電束縛系
 - ▶ エネルギー準位の精密な理論計算が可能
 - 量子力学・QED の発展に寄与
 - ▶ 束縛エネルギー準位 : 陽子-電子間に働く力を反映

精密分光と精密理論計算の比較



QED・電弱統一理論精密検証

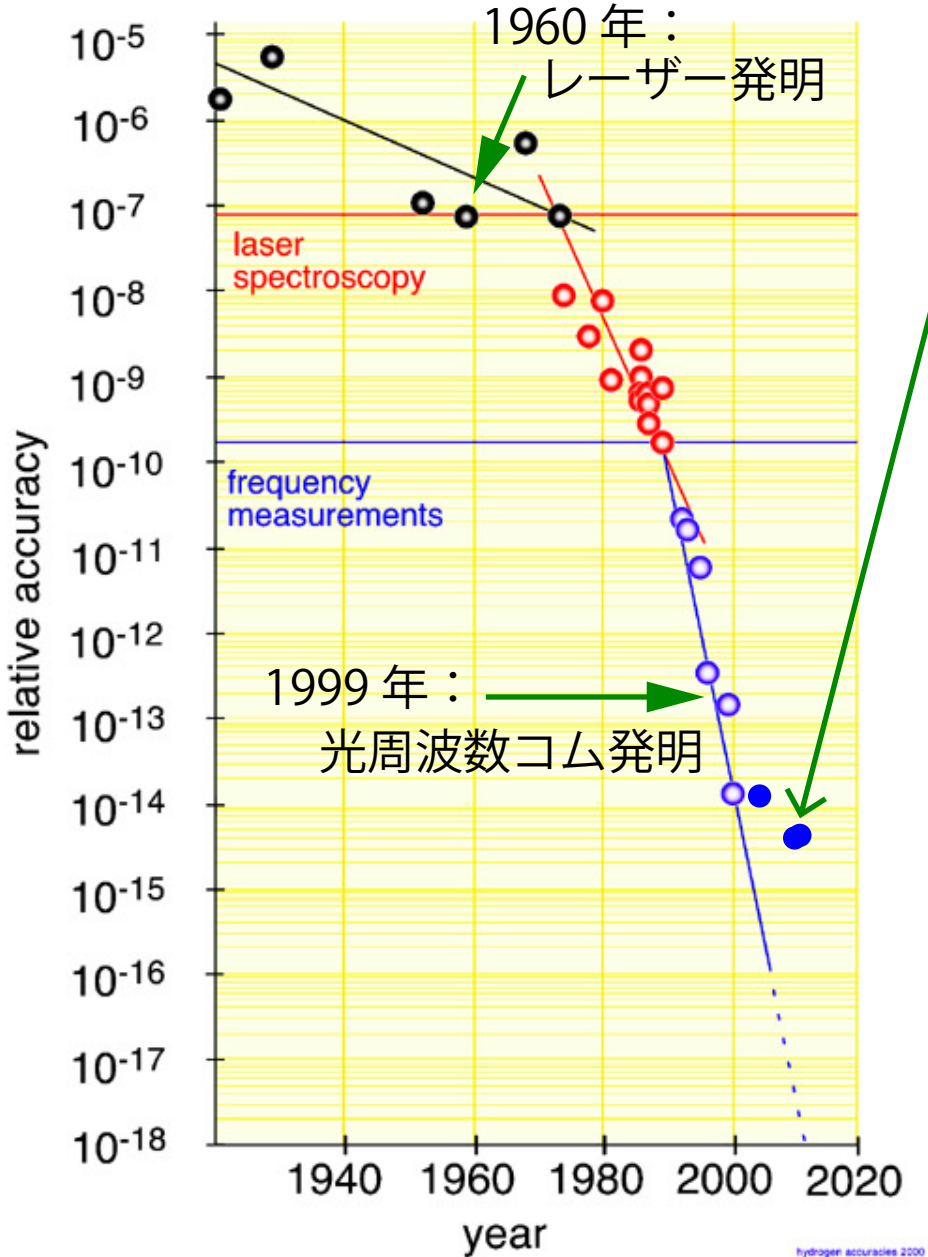


水素原子 1S-2S 分光 ~ 超精密分光技術のトップランナー ~

Optical Spectroscopy of Hydrogen



T. W. Hänsch



$$\Delta\nu_{1S2S} \approx 2.47 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

不確かさ：[実験] 11 Hz [1]

[理論(計算)] 44 kHz [2]

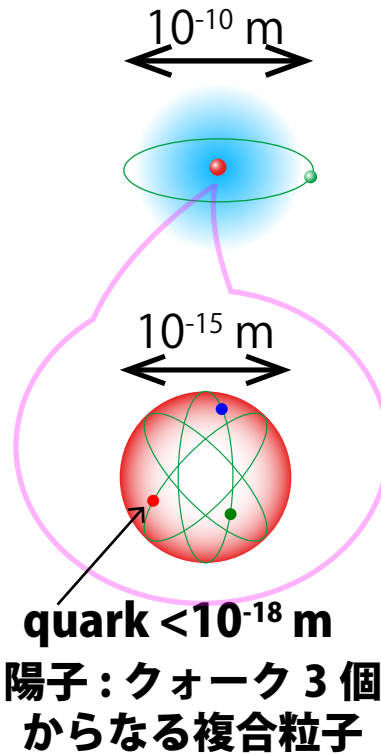
$$\nu_{1S-2S} \approx \frac{3}{4}cR_{\infty} + \frac{L_{2S_{1/2}} - L_{1S_{1/2}}}{h}$$

$L_{nS_{1/2}}$: Lamb Shift

不確かさ：34 Hz 44 kHz

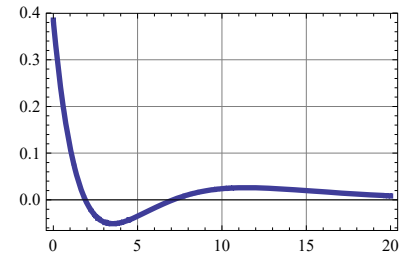
水素原子では実験精度と計算精度が3桁乖離

ハドロン構造の不定性に起因



3S 軌道 (軌道角運動量 0)

{3, 0}



1S 軌道のエネルギーシフト

$$\Delta E_1 = \frac{2\pi\alpha}{3} |\psi^2(0)| R_E^2$$

R_E 陽子半径

(RMS charge radius)

T. W. Hänsch, Nobel Lecture Slides (2005), with recent results ●

● 1S Lamb Shift の計算値と不確かさ [2]

$$\nu_{1S-2S} \simeq \frac{3}{4}cR_\infty + \frac{L_{2S_{1/2}} - L_{1S_{1/2}}}{h}$$

Term of the Lamb shift	Value for the 1S level	Uncertainties
Self-energy (one-loop)	8 383 339.466 kHz	0.083 kHz
Vacuum polarization (one-loop)	- 214 816.607 kHz	0.005 kHz
Recoil corrections	2 401.782 kHz	0.010 kHz
Proton size	1 253.000 kHz	50 kHz
Two-loop corrections	731.000 kHz	3.300 kHz
Radiative recoil corrections	- 12.321 kHz	0.740 kHz
Vacuum polarization (muon)	- 5.068 kHz	< 0.001 kHz
Vacuum polarization (hadron)	- 3.401 kHz	0.076 kHz
Proton self-energy	4.618 kHz	0.160 kHz
Three-loop corrections	1.800 kHz	1.000 kHz
Nuclear size corrections to SE and VP	- 0.149 kHz	0.011 kHz
Proton polarization	- 0.070 kHz	0.013 kHz
1S Lamb shift	8 172 894(51) kHz	

▶ QED 計算の不定性は 3.7kHz (two-loop corrections が支配的)

▶ 陽子半径の不確かさ起因が 50kHz (電子-陽子散乱実験値 0.895(18) fm による)

→ Proton radius puzzle 問題 (μp : 0.84087(39) fm → 1105 kHz for 1S level)

核半径 R_N による
エネルギーシフト [3]

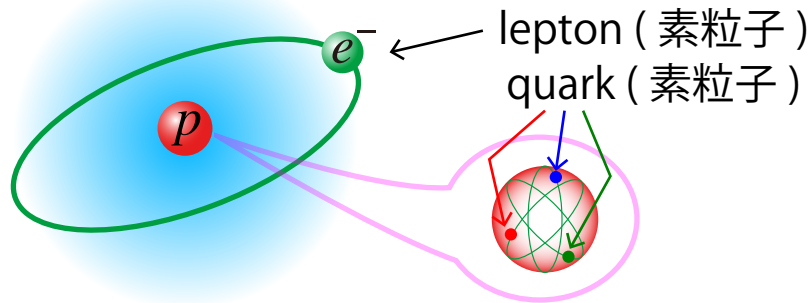
$$\mathcal{E}_{NS} = \frac{2}{3} \left(\frac{m_r}{m_e} \right)^3 \frac{\alpha^2}{n^3} m_e c^2 \left(\frac{2\pi\alpha R_N}{\lambda_C} \right)^2$$

[2] Eur. Phys. J. **172**, 109 (2009)

[3] Rev. Mod. Phys. **77**, 1 (2005): eq. A42

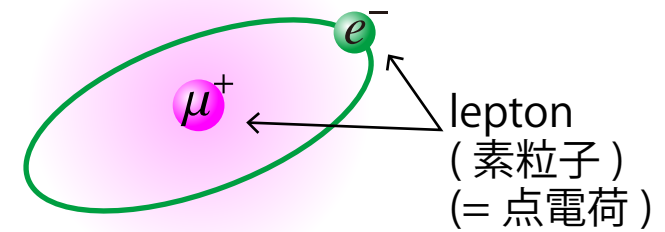
水素原子 vs 純レプトン原子 (ミュオニウム) の精密分光

H [水素原子 (ep)] : 寿命 $>10^{34}$ 年
陽子と電子の荷電束縛系

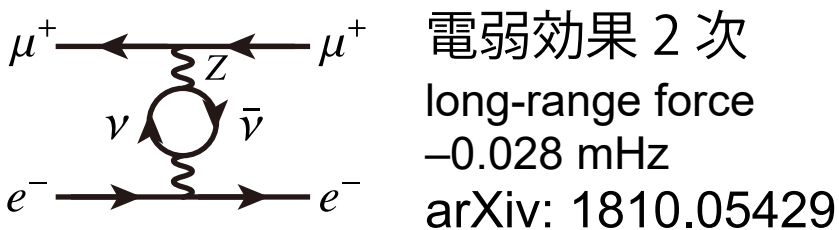
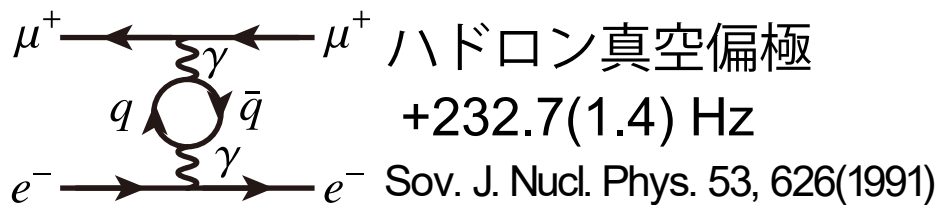
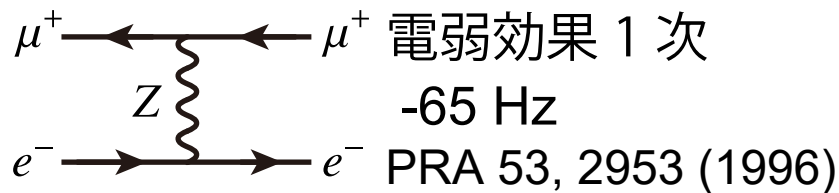


ハドロン(複合粒子)とレプトンで構成
原子核の構造でエネルギーシフト
→理論計算**困難**

Mu [ミュオニウム (μ^+e^-)] : 寿命 $2.2\mu\text{s}$
正ミュー粒子と電子の荷電束縛系



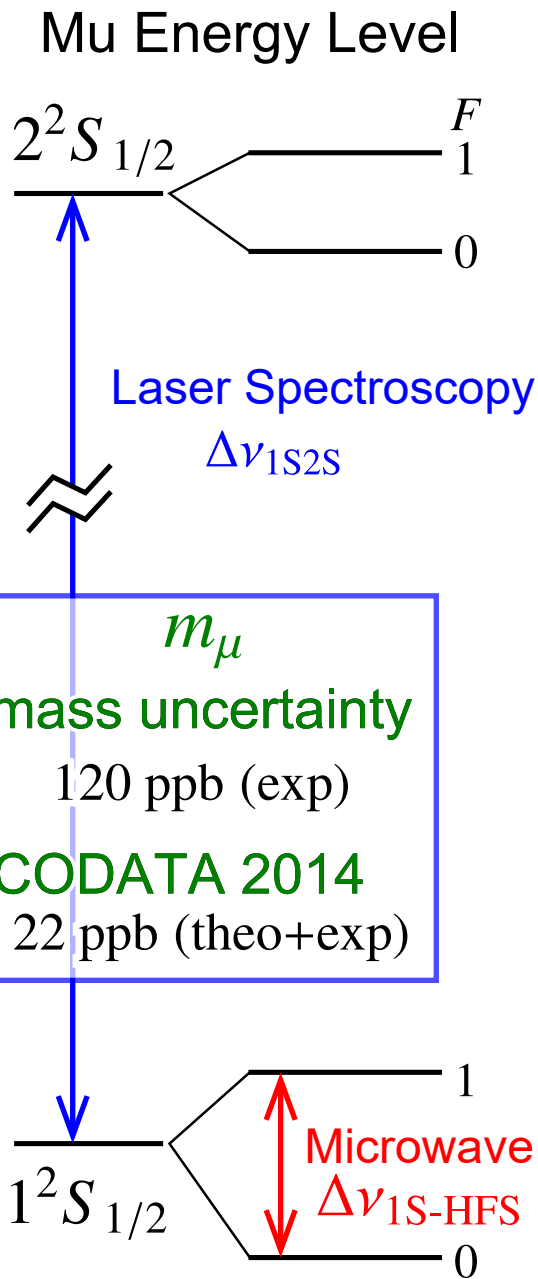
大きさのないレプトンのみで構成
→**核構造の不定性がない**
→理論計算**可能**



- QED
- 電弱相互作用 } 理論の高精度検証
- **理論と実験の不一致?**
- **標準理論を超えた新物理の高感度プローブ**

**~1eV の高精度測定 (レーザー分光) により
電弱スケール (1 TeV) の物理探索が可能**

現在の精度



1S-2S Laser Spectroscopy $\Delta\nu_{1S2S} \simeq \frac{3\alpha^2}{8h} m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{m_\mu}\right)^{-1}$

mass

不確かさ $u[\Delta\nu_{1S2S}]_{\text{Theo.}}$: 1.4 MHz
(質量不確かさ 120 ppb 起因)

遷移周波数への換算質量の影響 : 1.2 THz (0.48%)

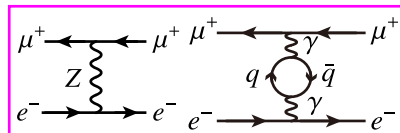
1S-2S 遷移の精密計測 QED error:^[3] $O(m_\mu \alpha^8 \ln^3 \alpha)$
 👉 muon mass m_μ の精度向上に貢献可能 ~ 10 kHz

1S-HFS microwave spectroscopy

$$\Delta\nu_{1S-HFS} \simeq \frac{16}{3} \alpha^2 R_\infty \frac{\mu_\mu}{\mu_B} \left(1 + \frac{m_e}{m_\mu}\right)^{-3}$$

mass

不確かさ $u[\Delta\nu_{1S-HFS}]_{\text{Theo.}}$: 515 Hz^[2]
(質量不確かさ 120 ppb 起因)

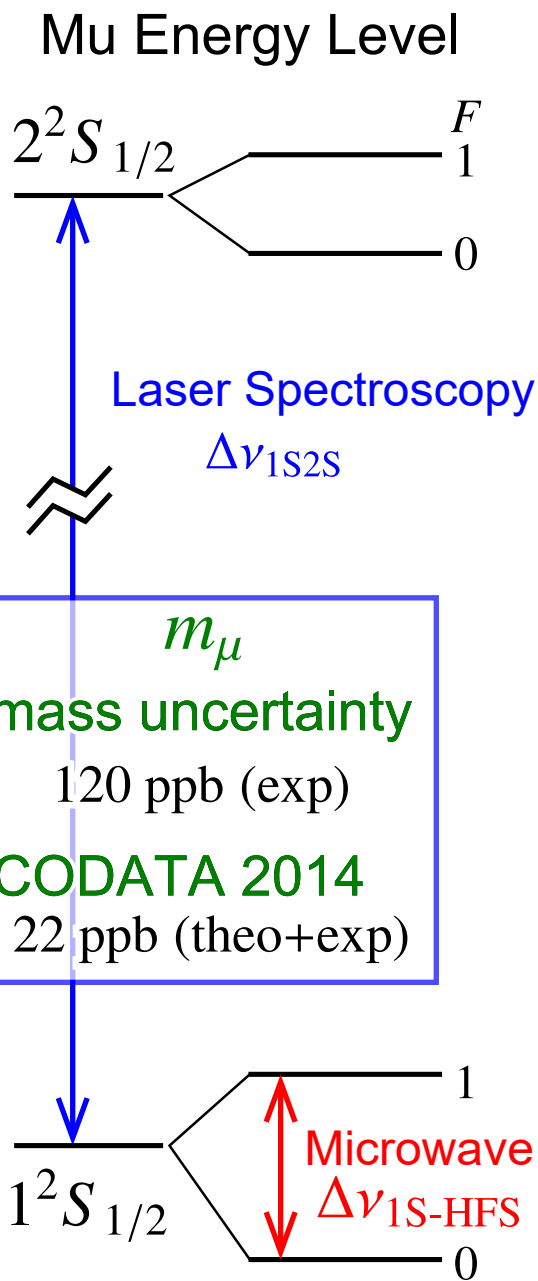


Electroweak Frequency shift: -65 Hz
Hadronic vacuum polarizaiton: +232.7 Hz

[2] M. I. Eides, Phys. Lett. B **795**, 113 (2019)

[3] M. I. Eides, Phys. Rept. **342**, 63 (2001)

現在の精度と本研究の目標



1S-2S Laser Spectroscopy $\Delta\nu_{1S2S} \simeq \frac{3\alpha^2}{8h} m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{\underbrace{m_\mu}_{\text{mass}}}\right)^{-1}$

不確かさ $u[\Delta\nu_{1S2S}]_{\text{Theo.}}$: 1.4 MHz
(質量不確かさ 120 ppb 起因)

263 kHz → 22 ppb
100 kHz → 8 ppb
10 kHz → 0.8 ppb

1S-2S 目標精度

$u[\Delta\nu_{1S2S}]_{\text{exp.}}$: 10 kHz
(RAL 1999: 9.8 MHz^[1])

[1] V. Meyer et al., PRL 84, 1136 (2000)

**目標 (a) : 1S-2S レーザー分光
質量決定精度を向上
120 ppb → 1 ppb**

1S-HFS microwave spectroscopy

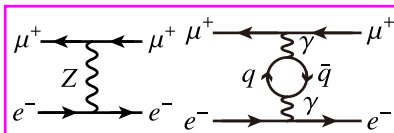
$$\Delta\nu_{1S-HFS} \simeq \frac{16}{3} \alpha^2 R_\infty \frac{\mu_\mu}{\mu_B} \left(1 + \frac{m_e}{\underbrace{m_\mu}_{\text{mass}}}\right)^{-3}$$

不確かさ $u[\Delta\nu_{1S-HFS}]_{\text{Theo.}}$: ~~515 Hz~~^[2] **4 Hz**
(質量不確かさ 120 ppb 起因)

MuSEUM 目標

$u[\Delta\nu_{1S-HFS}]_{\text{exp.}}$: 8 Hz →
(LAMPF1998: 53 Hz)

**目標 (b) : 1S-HFS 分光
電弱相互作用の精密検証・
新物理探索へ**



Electroweak Frequency shift: -65 Hz
Hadronic vacuum polarizaiton: +232.7 Hz

[2] M. I. Eides, Phys. Lett. B 795, 113 (2019)

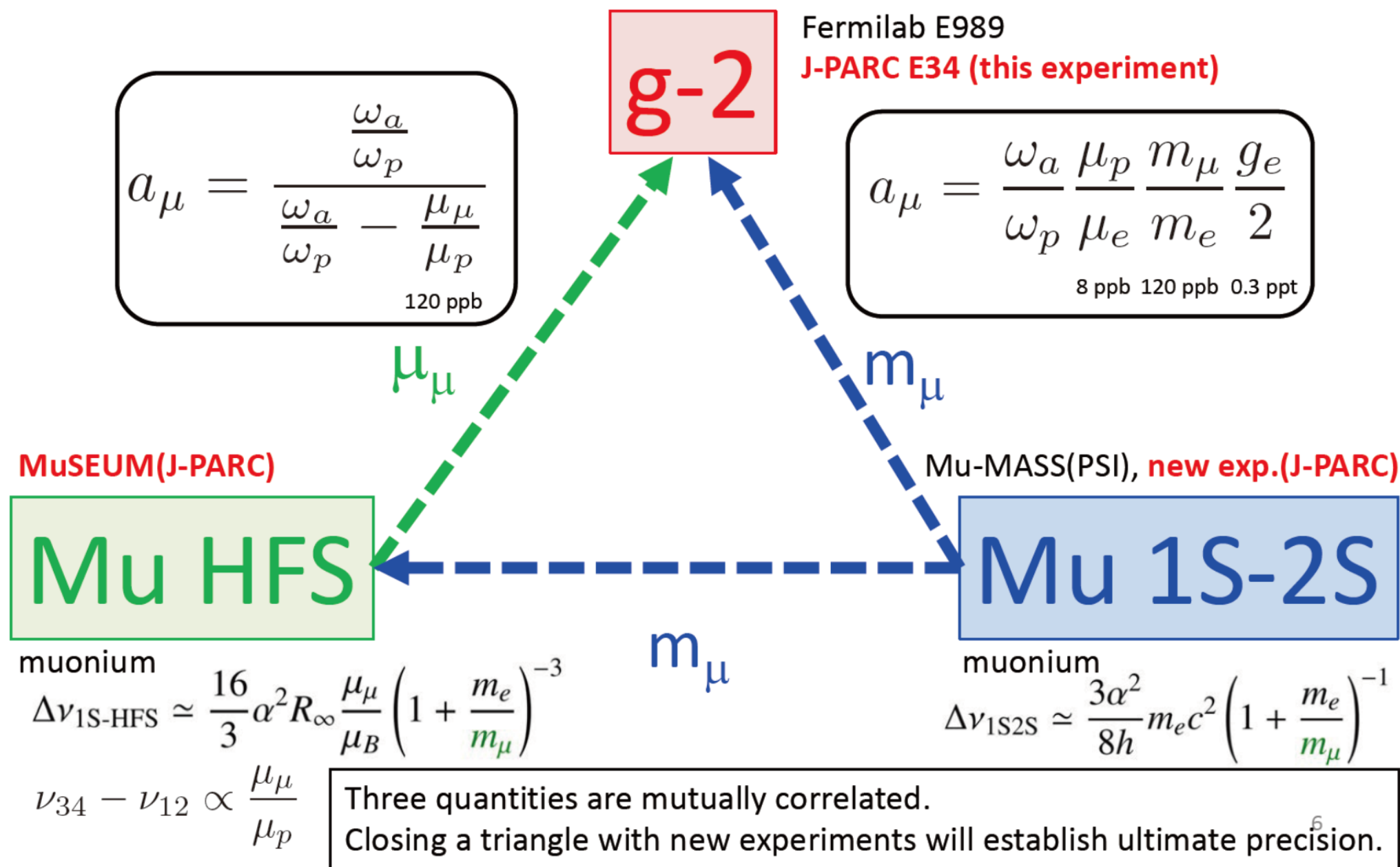
[3] M. I. Eides, Phys. Rept. 342, 63 (2001)

muon g-2 測定への contribution

Slide by T. Mibe

Towards ultimate test of the muon g-2 anomaly

inspired by K. Jungmann's slide



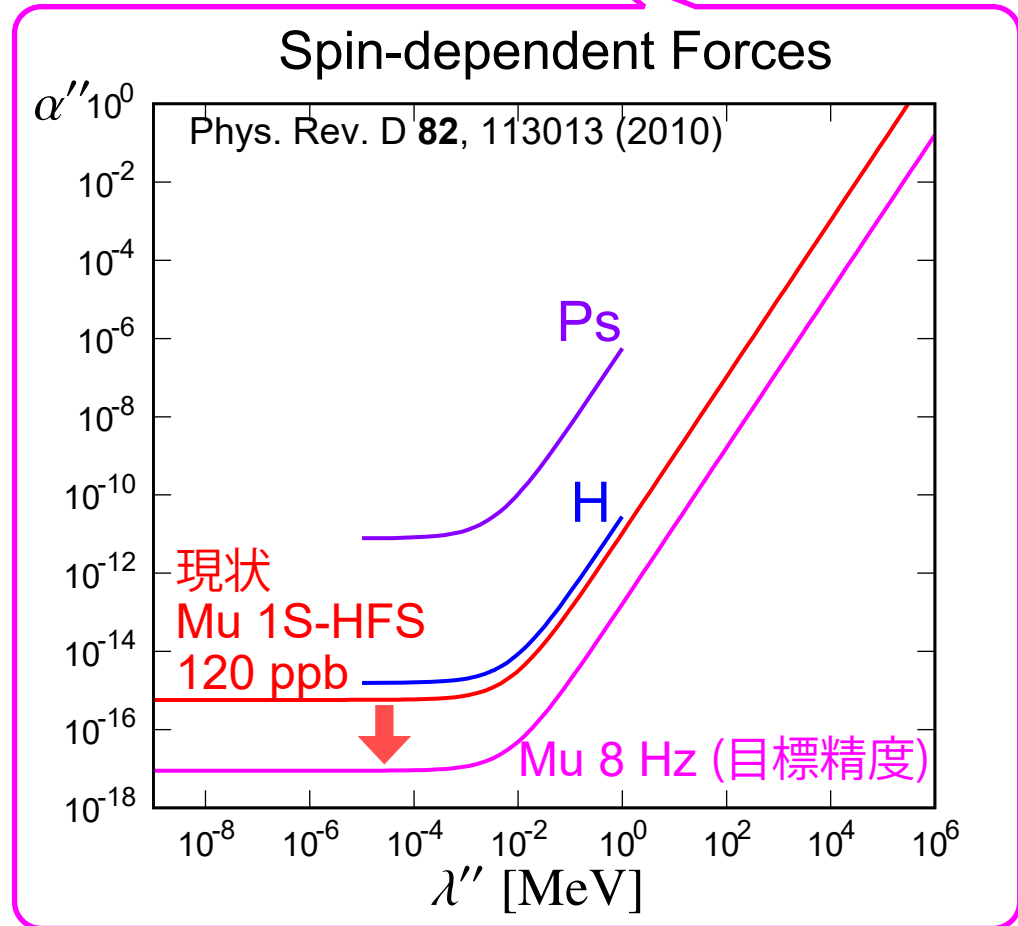
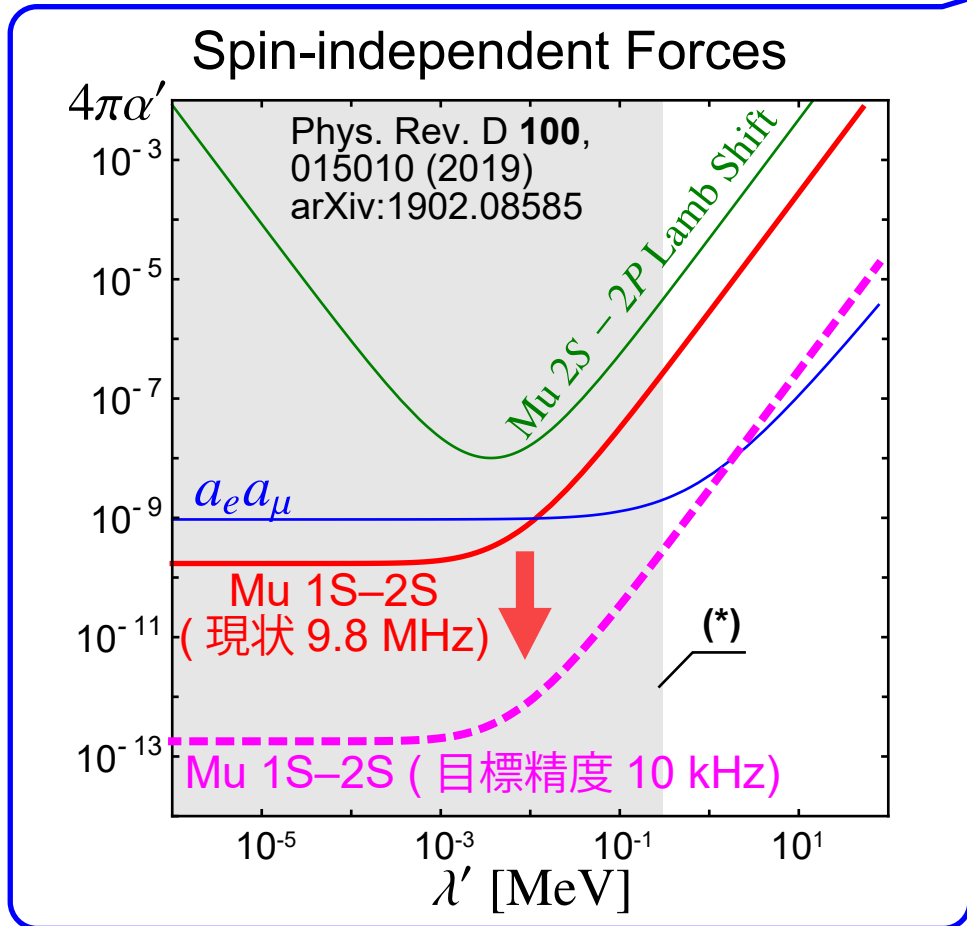
この実験で探索可能な新物理

クーロン力以外の新しい湯川型ポテンシャルの有無を調べることが可能
(電子とミュオン粒子に結合する未知のスカラー・ベクトル粒子の探索が可能)

クーロンポテンシャルの変化: $-\frac{\alpha}{r} \rightarrow -\left(\frac{\alpha}{r} + \frac{\alpha'}{r}e^{-\lambda'r} + \frac{\alpha''(s_e \cdot s_\mu)}{r}e^{-\lambda''r}\right)$

新物理

新物理



1S-2S 分光 + 1S-HFS 分光, 双方の成果により地上実験で探索可能

(*) Constraints from astrophysics: J. High Energy Phys. **02**, 033 (2017)

History of Muonium Laser Spectroscopy

	Japan	World wide
1987	<ul style="list-style-type: none"> ▶ The first laser excitation of 1S-2S transition S. Chu, A.P. Mills, Jr. A.G. Yodh, K. Nagamine, Y. Miyake, T. Kuga 	
1999		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Laser spectroscopy of 1S-2S transition (RAL) V. Meyer et al.
before 2017	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Good facility for 1S-2S laser spectroscopy of Mu ▶ No proposal of experiment 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Mu-MASS (PSI)
2019	<ul style="list-style-type: none"> ▶ KAKENHI type-S: approved S. Uetake (PI), K. Shimomura, M. Yoshida, T. Yamazaki, M. Yoshimura ▶ S type research project of J-PARC MLF: approved 	
2020	<p>Two different KAKENHI was approved:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ type-S (1S-HFS, PI: K. Shimomura) ▶ Specially Promoted Research (g-2, PI: T. Mibe) 	

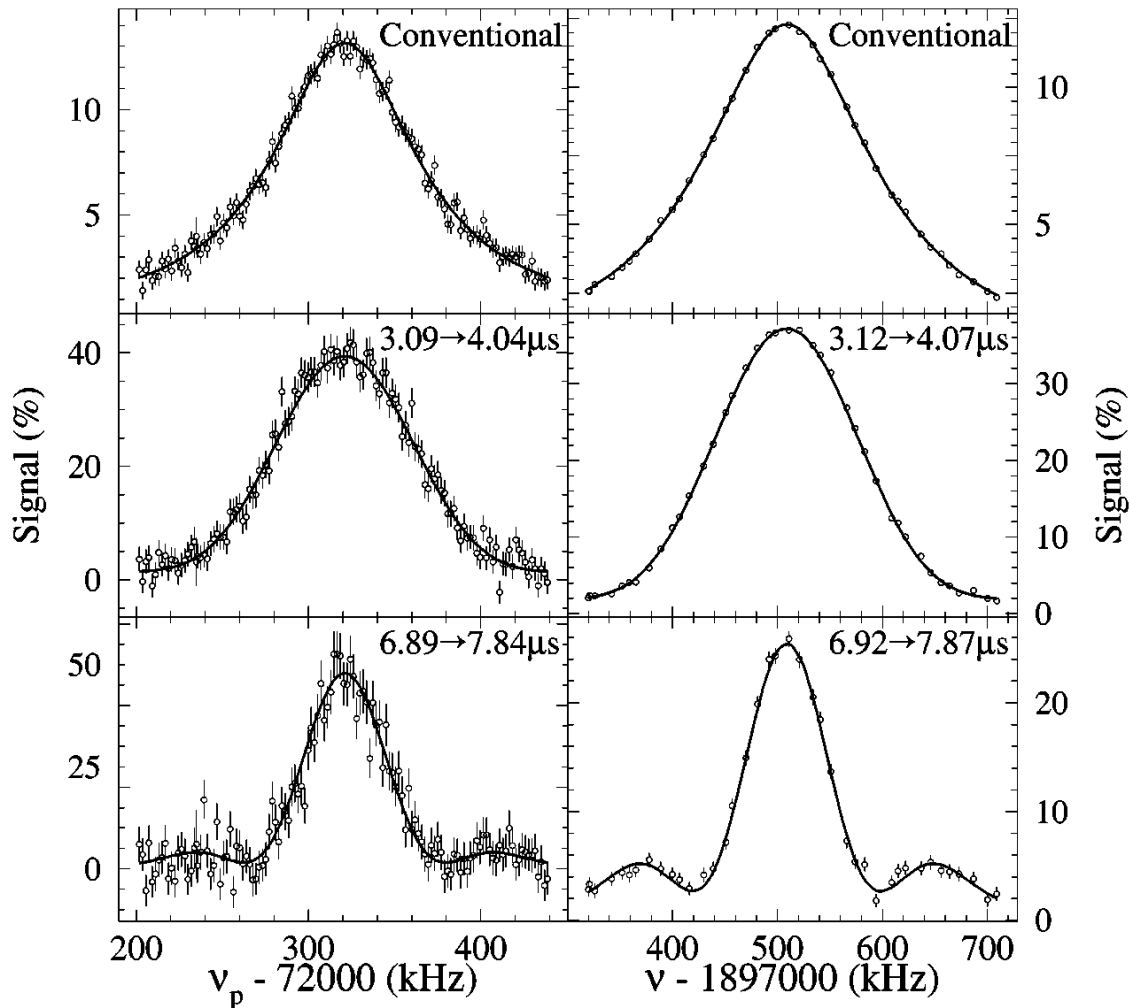
目次

- **岡山大学異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア紹介**
- **イントロダクション：ミュオニウム精密分光の目標**
 - ▶ 水素様原子の精密分光と基礎物理学
 - ▶ 水素原子レーザー分光の現状と限界
 - ▶ 水素原子とミュオニウムの比較
 - ▶ 現在の精度と本研究の目標, $g-2$ への寄与
 - ▶ 探索可能な新物理
- **実験の原理と精度向上手法**
 - 1S-HFS マイクロ波分光**
 - ▶ 測定原理・過去の研究 (LAMPF1999 実験) の結果
 - 1S-2S レーザー分光**
 - ▶ 過去 (RAL1999 実験) の結果と改善項目
 - ▶ 精度向上のための実験技術
- **実験計画概要 [1S-2S レーザー分光]**
 - ▶ 実験の概要・実験エリアの状況
 - ▶ 年次計画・各実験 Phase の概要
 - ▶ シミュレーション研究
- **まとめ**

1S-HFS: Previous Measurement

► Phys. Rev. Lett. **82**, 711 (1999)

W. Liu *et al.*, “High Precision Measurements of the Ground State Hyperfine Structure Interval of Muonium and of the Muon Magnetic Moment”



“old muonium” を観測して線幅を抑える

$$\nu_{12}(\text{exp}) = 1\,897\,539\,800(35) \text{ Hz} \quad (18 \text{ ppb}), \quad (7)$$

$$\nu_{34}(\text{exp}) = 2\,565\,762\,965(43) \text{ Hz} \quad (17 \text{ ppb}), \quad (8)$$

$$\Delta\nu(\text{exp}) = 4\,463\,302\,765(53) \text{ Hz} \quad (12 \text{ ppb}), \quad (9)$$

$$\mu_\mu/\mu_p = 3.183\,345\,13(39) \quad (120 \text{ ppb}), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_\mu}{m_e} &= \left(\frac{g_\mu}{2}\right) \left(\frac{\mu_p}{\mu_\mu}\right) \left(\frac{\mu_B^e}{\mu_p}\right) \\ &= 206.768\,277(24) \quad (120 \text{ ppb}), \end{aligned}$$

120 ppb：統計誤差が支配的
他の要因では，

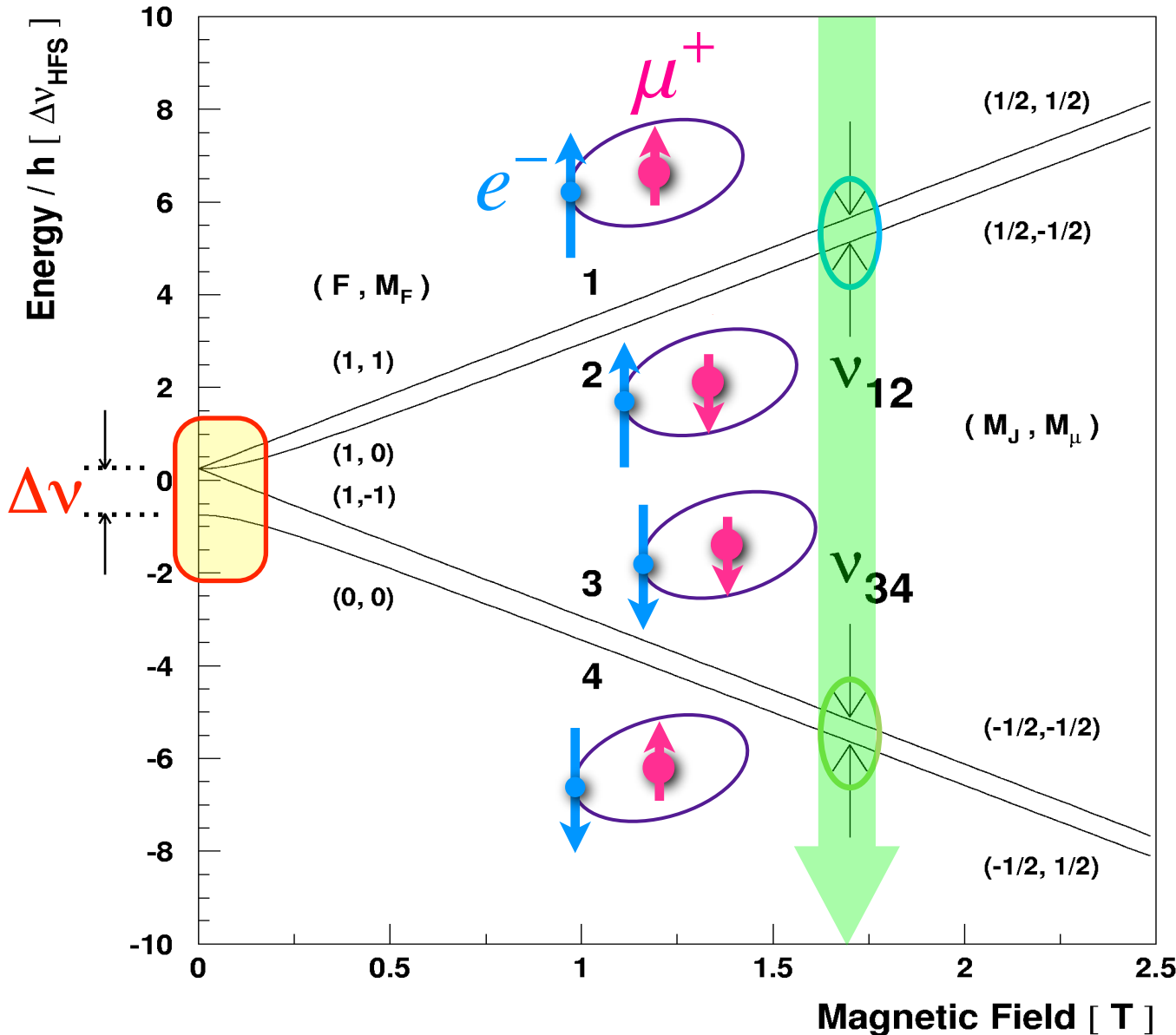
- 共振器内の磁場分布
- マイクロ波パワーの較正の不確かさが大きい (~60 ppb)

Hyperfine Splitting of Muonium

$$\mathcal{H} = a\mathbf{I} \cdot \mathbf{J} + \mu_B^e g_J \mathbf{J} \cdot \mathbf{H} - \mu_B^\mu g'_\mu \mathbf{I} \cdot \mathbf{H}$$

HFS

Zeeman Splitting



$$\Delta\nu = \nu_{12} + \nu_{34}$$

$$\frac{\mu_\mu}{\mu_p} \propto \nu_{12} - \nu_{34}$$

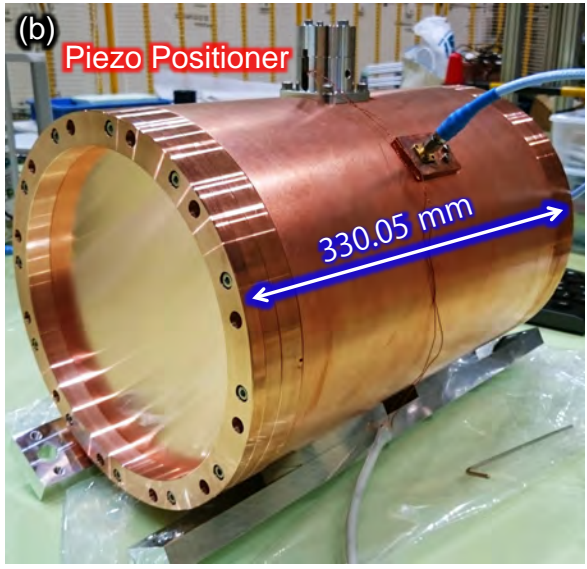
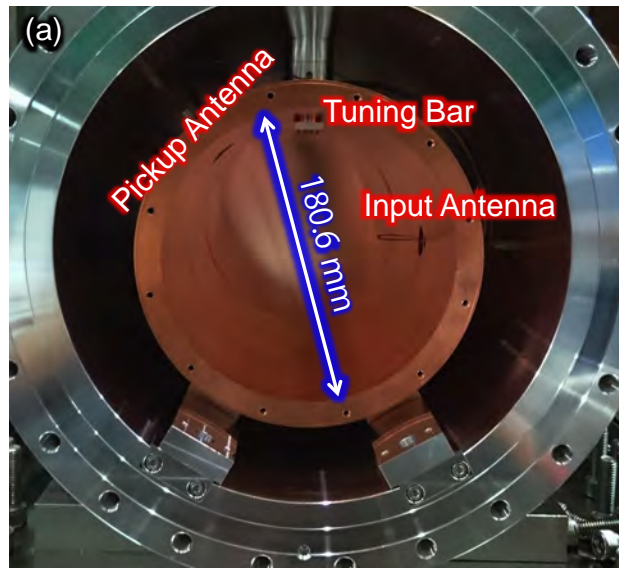
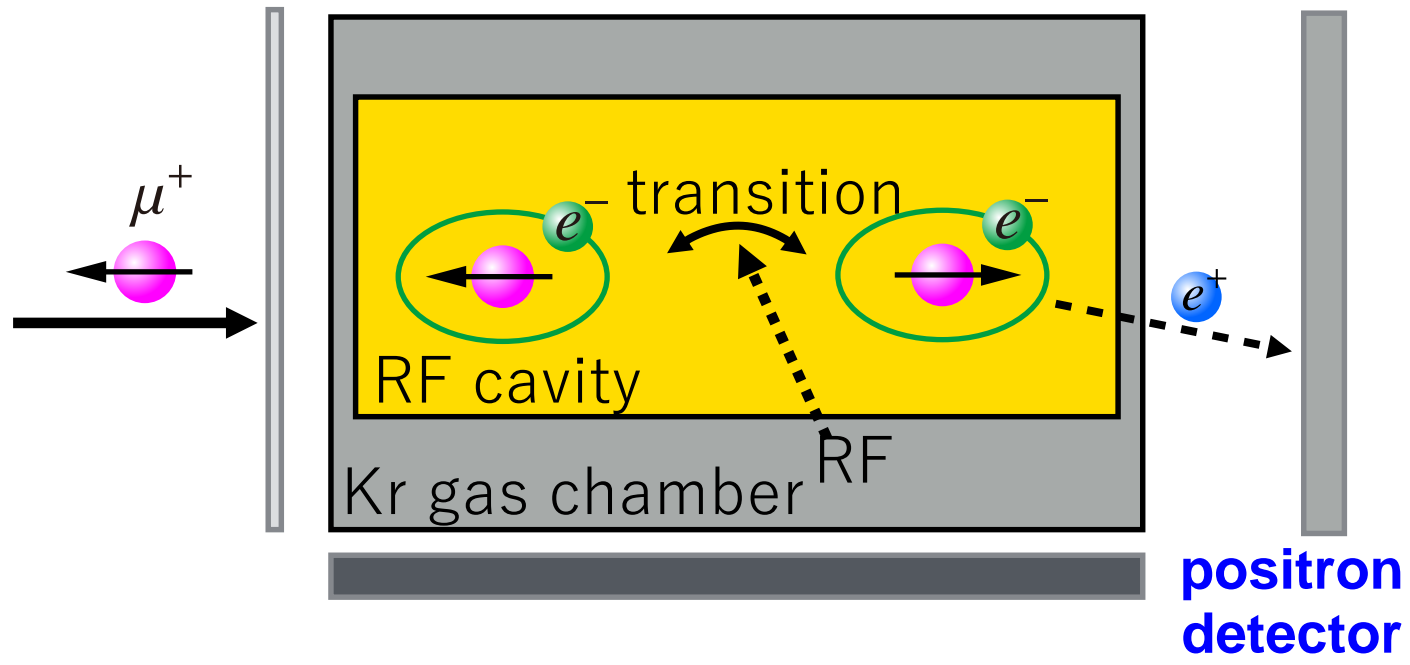
- HFS の周波数測定から
- ▶ 磁気モーメント比 15 ppb
- ▶ 超微細構造係数 8Hz の精度を目指す

$$\frac{m_\mu}{m_e} = \left(\frac{g_\mu}{2}\right) \left(\frac{\mu_p}{\mu_\mu}\right) \left(\frac{\mu_B^e}{\mu_p}\right)$$

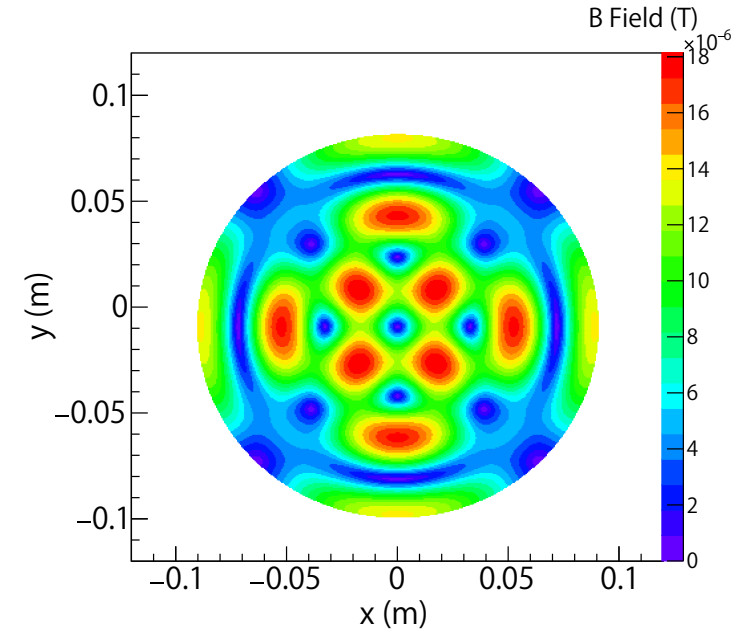
他の測定値を使用

- ▶ 質量比も決定可能 (15 ppb の精度を目指す)
- ▶ 1S-2S レーザー分光で得た値 (目標 1 ppb) との比較・無矛盾性検証

1S-HFS マイクロ波分光実験セットアップ



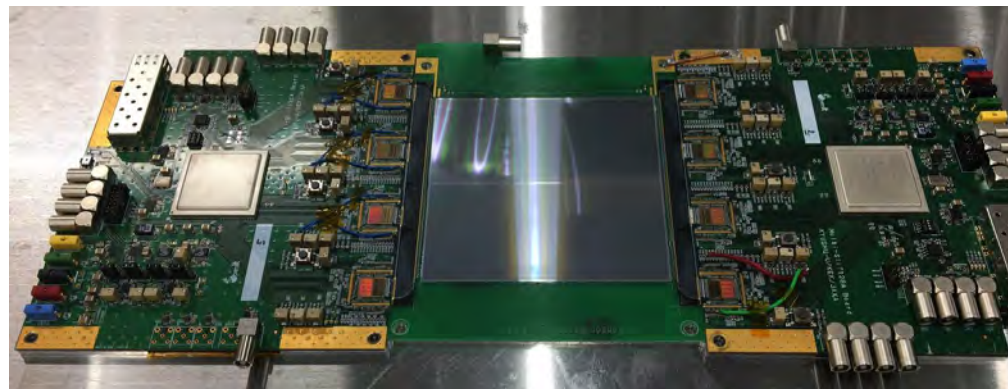
空洞共振器内の定在波



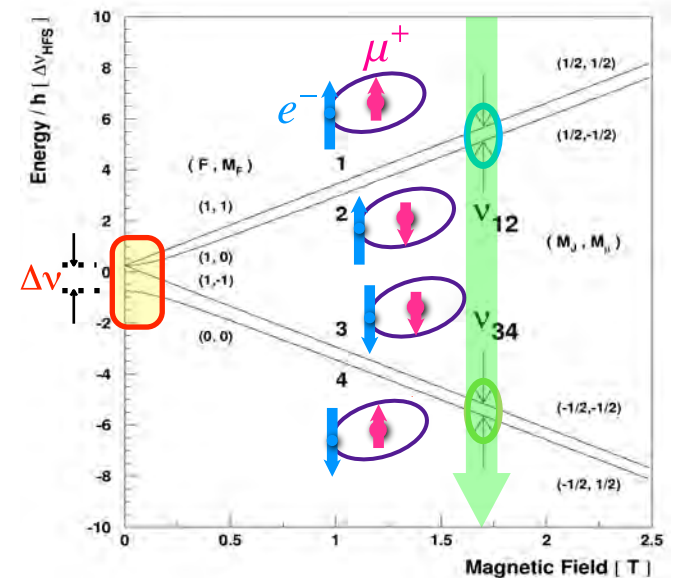
1S-HFS マイクロ波分光実験セットアップ



Positron Detector



400 mm



目次

- **岡山大学異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア紹介**
- **イントロダクション：ミュオニウム精密分光の目標**
 - ▶ 水素様原子の精密分光と基礎物理学
 - ▶ 水素原子レーザー分光の現状と限界
 - ▶ 水素原子とミュオニウムの比較
 - ▶ 現在の精度と本研究の目標, $g-2$ への寄与
 - ▶ 探索可能な新物理
- **実験の原理と精度向上手法**
 - 1S-HFS マイクロ波分光**
 - ▶ 測定原理・過去の研究 (LAMPF1999 実験) の結果
 - 1S-2S レーザー分光**
 - ▶ 過去 (RAL1999 実験) の結果と改善項目
 - ▶ 精度向上のための実験技術
- **実験計画概要 [1S-2S レーザー分光]**
 - ▶ 実験の概要・実験エリアの状況
 - ▶ 年次計画・各実験 Phase の概要
 - ▶ シミュレーション研究
- **まとめ**

Previous Muonium Laser Spectroscopy

● 最新の 1S-2S 分光測定値 (@Rutherford Appleton Laboratory, 1999)

VOLUME 84, NUMBER 6

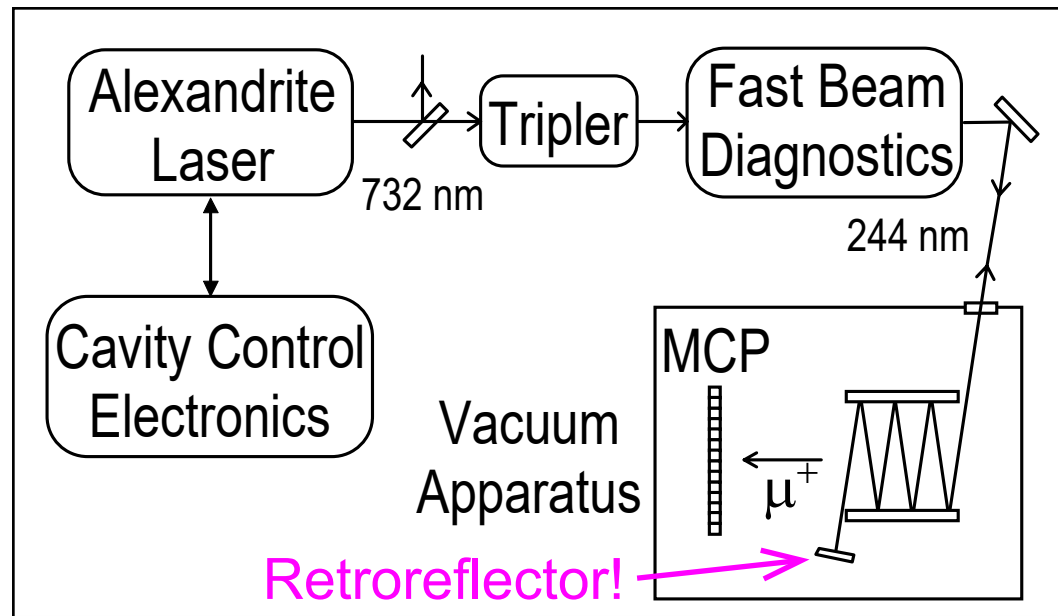
PHYSICAL REVIEW LETTERS

7 FEBRUARY 2000

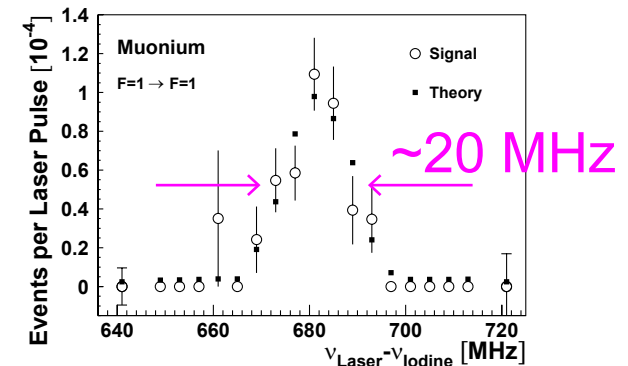
Measurement of the 1s-2s Energy Interval in Muonium

p.1136

V. Meyer,¹ S. N. Bagayev,⁵ P. E. G. Baird,² P. Bakule,² M. G. Boshier,⁴ A. Breitrück,¹ S. L. Cornish,² S. Dychkov,⁵ G. H. Eaton,³ A. Grossmann,¹ D. Hübl,¹ V. W. Hughes,⁶ K. Jungmann,¹ I. C. Lane,² Yi-Wei Liu,² D. Lucas,² Y. Matyugin,⁵ J. Merkel,¹ G. zu Putlitz,¹ I. Reinhard,¹ P. G. H. Sandars,² R. Santra,¹ P. V. Schmidt,¹ C. A. Scott,³ W. T. Toner,² M. Towrie,³ K. Träger,¹ L. Willmann,¹ and V. Yakhontov¹



- ▶ Uncertainty from Residual Doppler → 3.4 MHz
- ▶ Pulse laser was used linewidth ~ 10 MHz



ミュー粒子数 : 3500 μ^+ /s ; レーザー体積内 Mu 数 : 1.5 個 /pulse

結果 : 2 455 528 941.0(9.8) MHz

1S-2S Result of RAL 1999 Experiment

Result: 2 455 528 941.0(9.8) MHz

$$u_r[m_\mu/m_e] = 820 \text{ ppb}$$

[V. Meyer et al., PRL84,1136(2000)]

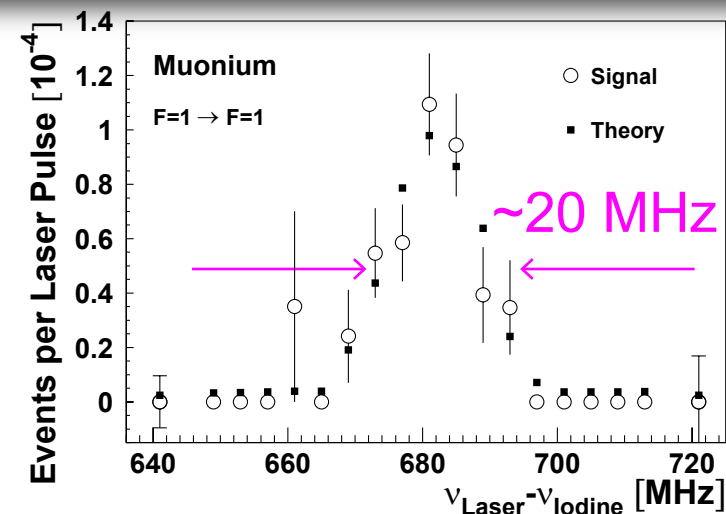
Conclusion of the paper:

	RAL(1999)
μ^+ intensity	3500 \times 50 Hz
Mu yield	600 cps
num. of Mu in Laser	1.5 /pulse
Laser / Linewidth	pulsed / \sim 8 MHz
Number of signals	99
	Uncertainty
Statistics	9.1 MHz
Residual doppler	3.4 MHz
Freq. calibration	0.8 MHz
Line shape	1.2MHz
Total	9.8 MHz

Our reported measurement here was **statistics limited**. In the future the accuracy of the 1s-2s transition frequency could be improved using the novel technology employed here, with extended running and by a more restrictive selection for laser pulses with low chirp swing. Significant progress could be expected from **a cw laser experiment**. The loss in signal strength due to lower cw light intensity could be compensated in part with **an enhancement cavity**. Further, the narrower linewidth would be advantageous. Such an experiment can be expected to be successful with the **higher numbers of M atoms** that can be produced at future high flux muon beams. They may become available at planned accelerator sites such as **the Japanese Hadron Facility**, the Oak Ridge neutron spallation source, and the front end of a muon collider.

Solutions for improvement:

- Larger number of Muonium
- CW laser with optical cavity
- Freq. measurement by opt. comb



Requirements for Mu Laser Spectroscopy

- **1S-2S Signal Rate:** (for CW laser, $I < 1 \text{ MW/cm}^2$)

$$R = N_{\mu} (\underbrace{\Omega_{ge} t}_{1 \text{ 粒子励起レート}})^2 = 4.6 \times 10^{-8} \left(\frac{I}{1 \text{ kW/cm}^2} \right)^2 \left(\frac{t_0}{100 \text{ ns}} \right)^2 \times N_{\mu}$$

N_{μ} : Number of Muonium

t_0 : Mu-Laser Interaction time

I : Laser intensity

$$\sim \frac{(\text{Beam diameter})}{(\text{velocity})} \propto \frac{1}{\sqrt{(\text{temperature})}}$$

$$\frac{\Omega_{ge}}{2\pi} \sim 740 \left(\frac{I}{\text{kW/cm}^2} \right) [\text{Hz}] : \text{Two-photon Rabi frequency}$$

- **Laser beam diameter of 1 mm:**

▶ 4 W laser power $\rightarrow I = 1 \text{ kW/cm}^2$

▶ 300 K Mu (8.1 km/s) $\rightarrow t_0 = 123 \text{ ns}$

😊 Large number of Mu

😊 Higher laser power

😊 Lower Mu temperature
(longer interaction time)

- **Natural linewidth of the 1S-2S transition (1.2 PHz x2)**

▶ Radiative width 1.3 Hz
▶ muon lifetime 72 kHz } }

😊 <1 kHz laser linewidth,
long-term stability

10^{-12} accuracy

精度向上のための実験技術

Result: 2 455 528 941.0(9.8) MHz

$$u_r[m_\mu/m_e] = 820 \text{ ppb}$$

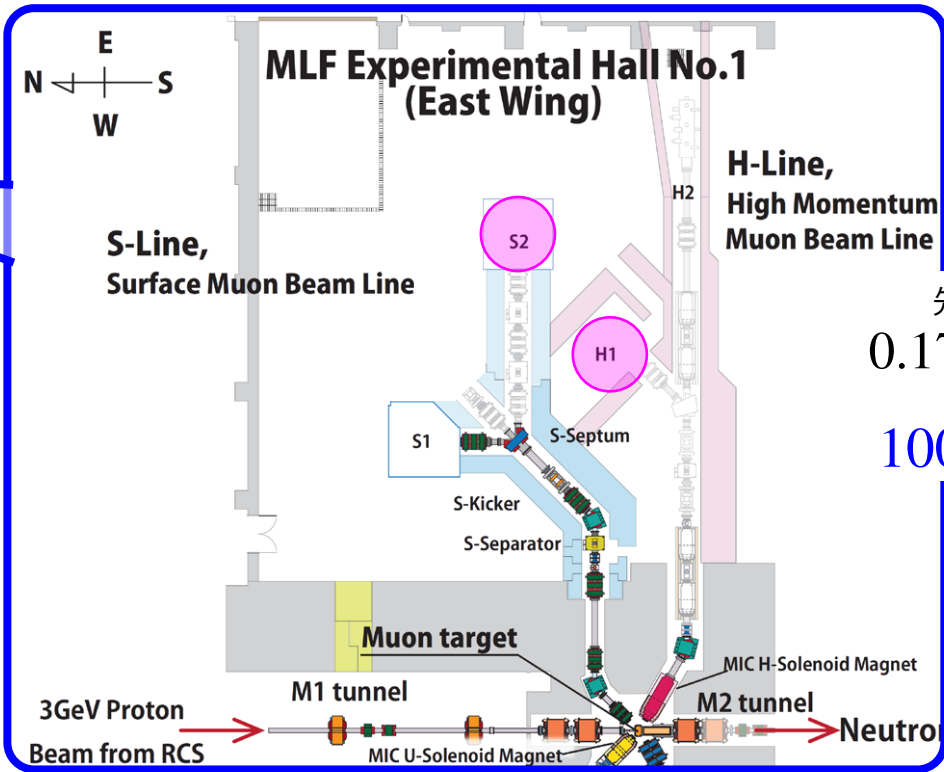
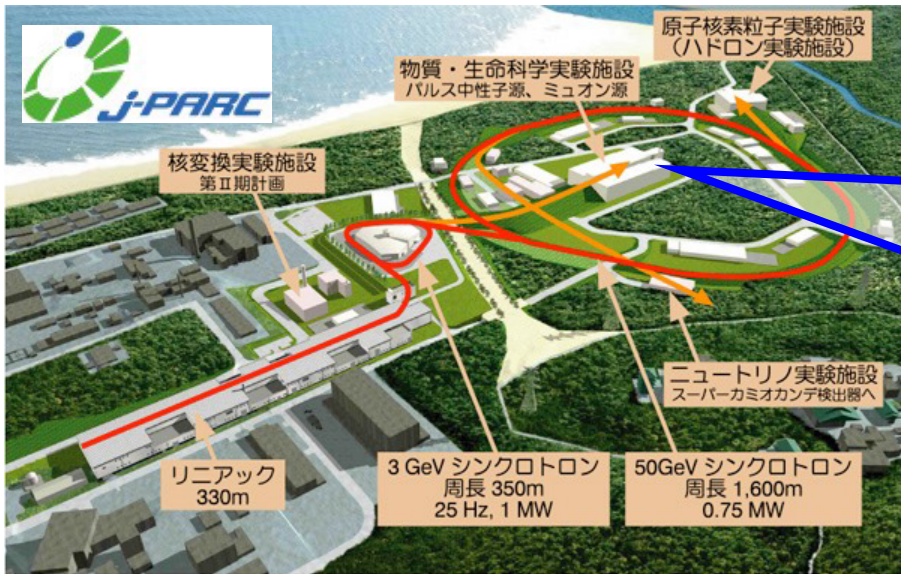
	RAL(1999)
μ^+ intensity	3500 × 50 Hz
Mu yield	600 cps
num. of Mu in Laser	1.5 /pulse
Laser / Linewidth	pulsed / ~8 MHz
Number of signals	99
	Uncertainty
Statistics	9.1 MHz
Residual doppler	3.4 MHz
Freq. calibration	0.8 MHz
Line shape	1.2MHz
Total	9.8 MHz

- 改善点 1 : Mu 数の増加
- 改善点 2 : CW レーザー使用
 - ▶ パルスレーザーと CW レーザー
- 改善点 3 : 光共振器による
残留ドップラー広がり抑制
 - ▶ ドップラー広がりとは
 - ▶ 対向励起によるドップラーキャンセル
 - ▶ 現実のレーザー光と残留ドップラー
- 改善点 4 : Mu 原子の冷却
- 改善点 5 : 光コムによる周波数計測

Solutions for improvement:

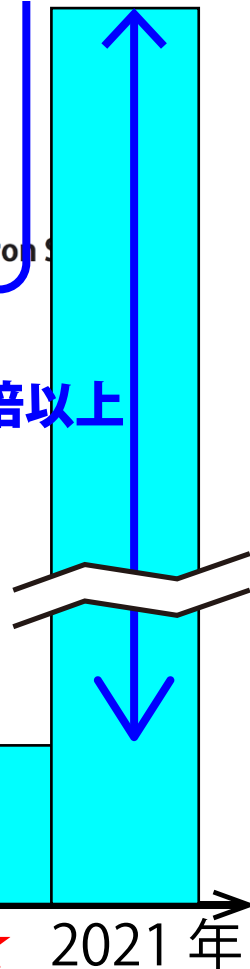
- Larger number of Muonium
- CW laser with optical cavity
- Freq. measurement by opt. comb

改善点 1 : Mu 数



先行研究
 $0.17 \times 10^6 \mu/s$
 \downarrow
 $100 \times 10^6 \mu/s$

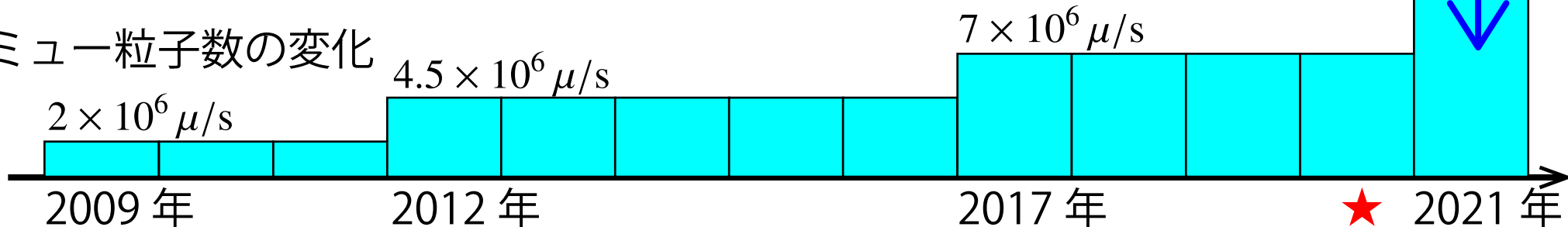
14 倍以上



J-PARC (茨城県東海村) 物質・生命科学実験施設 (MLF)

- 世界最高強度のパルスミュオン粒子ビーム利用可能
- 2021 年度より H1 エリアの運用開始予定
 - ▶ Phase 1 実験 (目標精度 1 MHz, ~2022.3) : S2 エリア (2021 年度前期完成予定)
 - ▶ Phase 2 実験 (目標精度 100 kHz, ~2025.3) : S2 エリア, (H1 エリア)

ミュオン粒子数の変化



精度向上のための実験技術

Result: 2 455 528 941.0(9.8) MHz

$$u_r[m_\mu/m_e] = 820 \text{ ppb}$$

	RAL(1999)
μ^+ intensity	3500 × 50 Hz
Mu yield	600 cps
num. of Mu in Laser	1.5 /pulse
Laser / Linewidth	pulsed / ~8 MHz
Number of signals	99
	Uncertainty
Statistics	9.1 MHz
Residual doppler	3.4 MHz
Freq. calibration	0.8 MHz
Line shape	1.2MHz
Total	9.8 MHz

- 改善点 1 : Mu 数の増加
- 改善点 2 : CW レーザー使用
 - ▶ パルスレーザーと CW レーザー
- 改善点 3 : 光共振器による
残留ドップラー広がり抑制
 - ▶ ドップラー広がりとは
 - ▶ 対向励起によるドップラーキャンセル
 - ▶ 現実のレーザー光と残留ドップラー
- 改善点 4 : Mu 原子の冷却
- 改善点 5 : 光コムによる周波数計測

Solutions for improvement:

- Larger number of Muonium
- CW laser with optical cavity
- Freq. measurement by opt. comb

パルスレーザー・CW(連続発振)レーザー

励起レート目安 (CW, $<1\text{MW}/\text{cm}^2$ の場合)

$$R = N_{\mu}(\Omega_{ge}t)^2 = 4.6 \times 10^{-8} \left(\frac{I}{1 \text{ kW}/\text{cm}^2} \right)^2 \left(\frac{t_0}{100 \text{ ns}} \right)^2 \times N_{\mu}$$

1 粒子励起レート

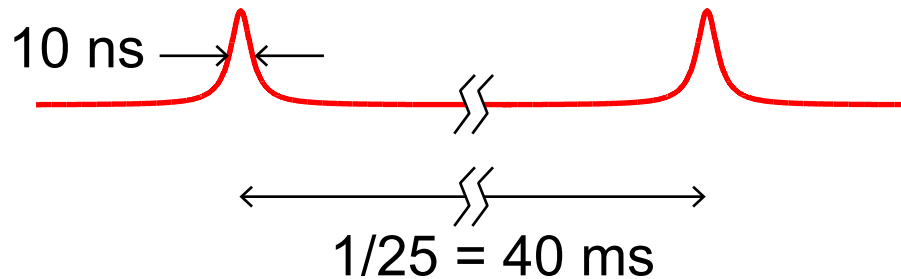
(例)

レーザービーム直径 $2w_0=1\text{mm}$
平均パワー：5 W [= 5 J/s] の場合

●パルスレーザーの特徴

- ▶ ピーク強度が高い：2光子励起させやすい
- ▶ 周波数広がり(線幅)が広い：フーリエ限界

パルス幅 $\tau=10\text{ns}$, 繰り返し 25Hz の場合



1 パルスあたりのエネルギー：

$$\frac{5 \text{ W}}{25 \text{ Hz}} = 200 \text{ mJ}$$

1 パルスあたりのピーク強度：

$$\frac{200 \text{ mJ}}{10 \text{ ns}} \frac{1}{\pi w_0^2} = 2.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$$

線幅 (gaussian パルス)

$$\frac{0.44}{\tau} = 44 \text{ MHz}$$

●CW レーザーの特徴

- ▶ 線幅が狭い：精密分光に最適
- ▶ 光強度が低い：2光子励起には不利

→ハイパワーレーザー開発が必要

(波長 244nm(深紫外)→種々の化学反応で劣化)

光強度：

$$\frac{5 \text{ W}}{\pi w_0^2/2} = 1.27 \text{ kW}/\text{cm}^2$$

線幅：

1 Hz 程度まで狭窄化可能

精度向上のための実験技術

Result: 2 455 528 941.0(9.8) MHz

$$u_r[m_\mu/m_e] = 820 \text{ ppb}$$

	RAL(1999)
μ^+ intensity	3500 × 50 Hz
Mu yield	600 cps
num. of Mu in Laser	1.5 /pulse
Laser / Linewidth	pulsed / ~8 MHz
Number of signals	99
	Uncertainty
Statistics	9.1 MHz
Residual doppler	3.4 MHz
Freq. calibration	0.8 MHz
Line shape	1.2MHz
Total	9.8 MHz

- 改善点 1 : Mu 数の増加
- 改善点 2 : CW レーザー使用
 - ▶ パルスレーザーと CW レーザー
- 改善点 3 : 光共振器による
残留ドップラー広がり抑制
 - ▶ ドップラー広がりとは
 - ▶ 対向励起によるドップラーキャンセル
 - ▶ 現実のレーザー光と残留ドップラー
- 改善点 4 : Mu 原子の冷却
- 改善点 5 : 光コムによる周波数計測

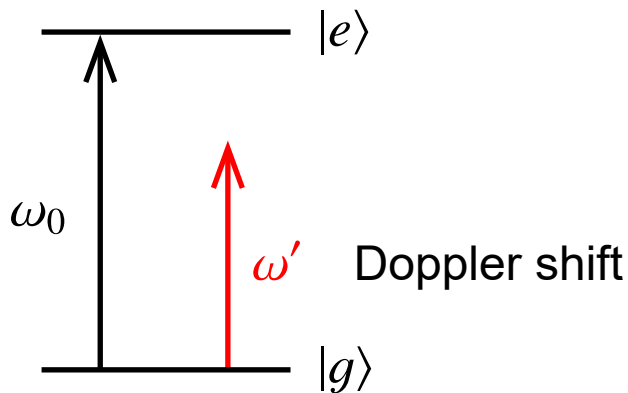
Solutions for improvement:

- Larger number of Muonium
- CW laser with optical cavity
- Freq. measurement by opt. comb

Doppler Broadening



$$E_R \cos(\omega_0 t - kz)$$



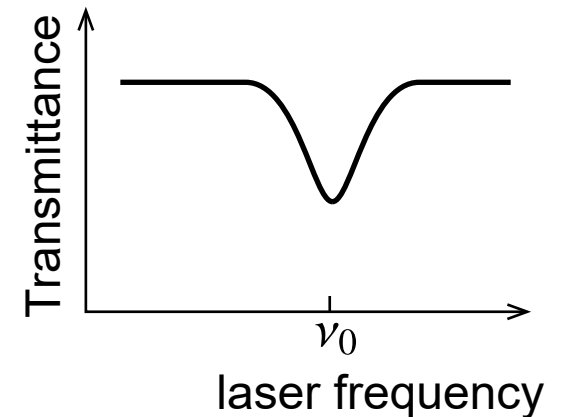
- Velocity distribution at temperature T (Maxwell-Boltzmann distribution)

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\bar{v}} \exp\left(-\frac{v^2}{2\bar{v}^2}\right), \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{k_B T}{M}}$$

M : mass

- Doppler width (FWHM)

$$\delta\nu_D = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{8k_B T \ln 2}{M}}$$



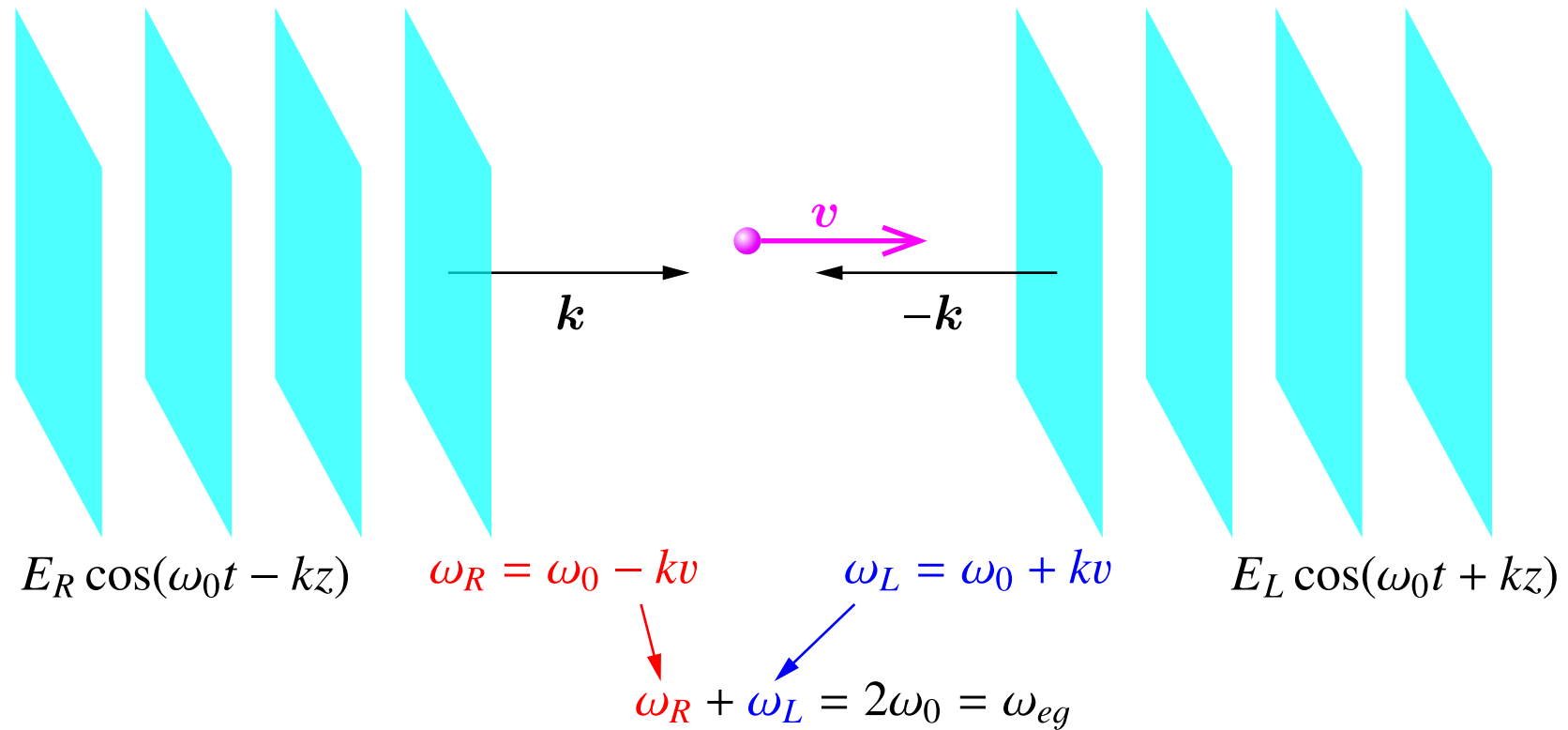
- Doppler width of 1-photon transition, e.g. Lyman- α ($\lambda=121$ nm, $\nu_0=2.4$ PHz), $T=300$ K

Hydrogen $\delta\nu_D^H = 30$ GHz

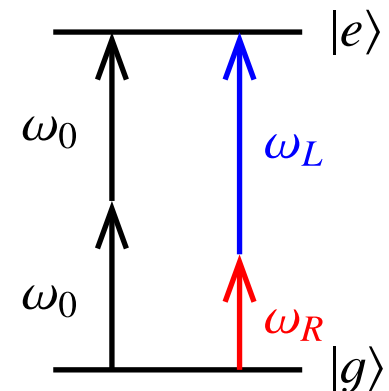
Muonium $\delta\nu_D^{Mu} = 91$ GHz

Doppler Cancellation: Two-photon Absorption

- Two-photon excitation by counter-propagating plane-waves

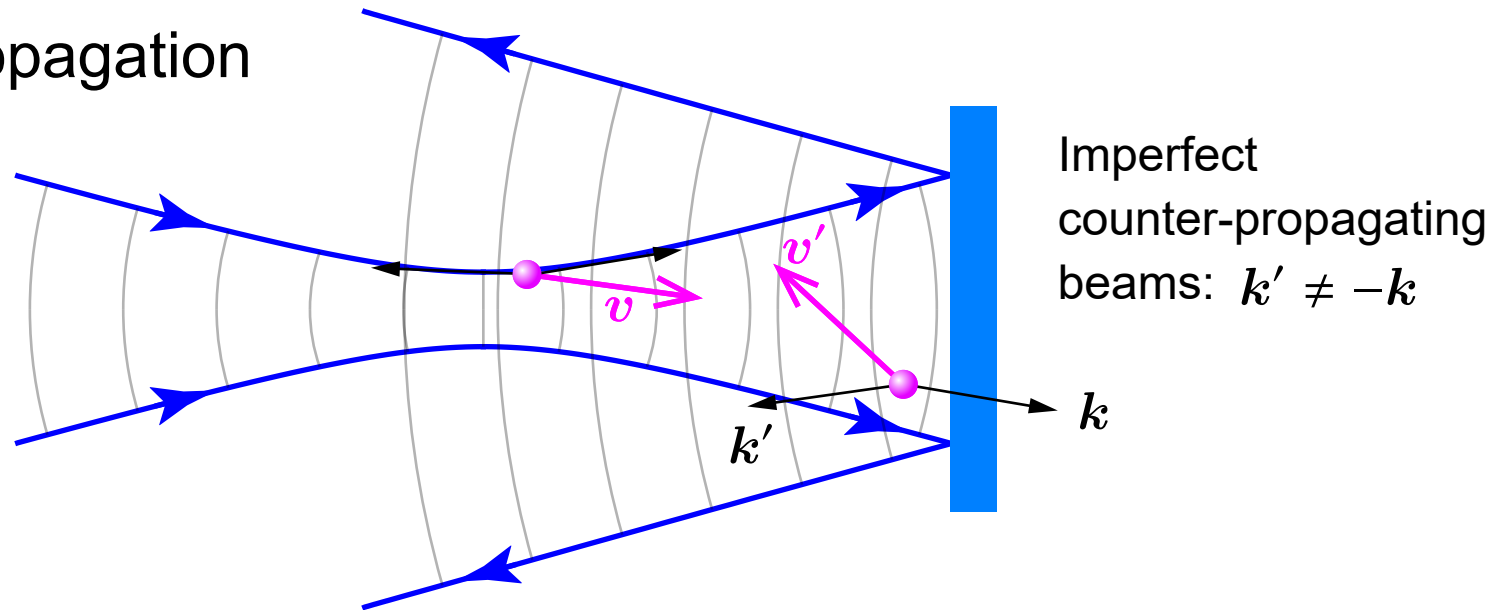


- Doppler shift can be canceled
→ **Doppler-free spectroscopy**

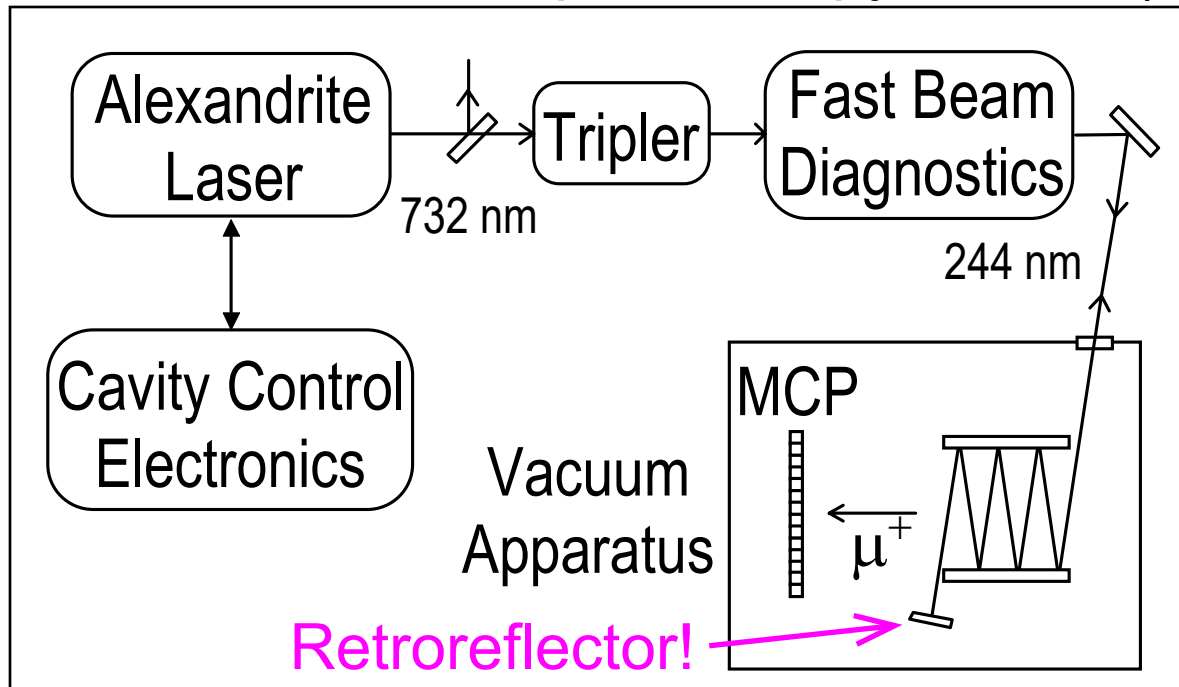


Residual Doppler Broadening

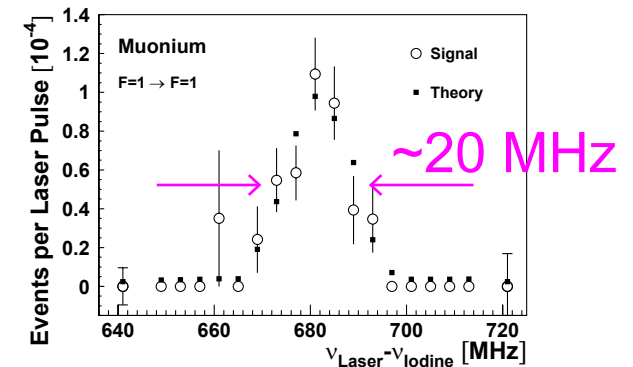
- Gauss beam propagation



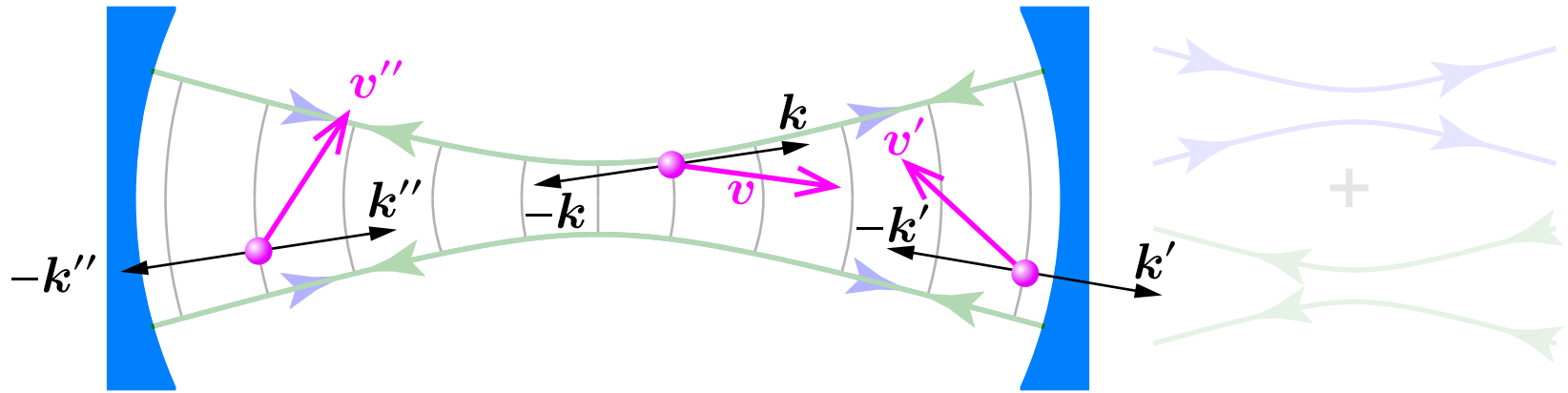
- Muonium 1S-2S spectroscopy at RAL (1999)



- ▶ Uncertainty from Residual Doppler \rightarrow 3.4 MHz
- ▶ Pulse laser was used linewidth \sim 10 MHz



1st Order Doppler Cancellation in Optical Cavity



- A stable resonant-cavity mode (standing wave):
Consists of perfectly counter-propagating laser beams
- 😊 → 1st-order Doppler shift is always cancelled
- Beam intensity can be enhanced in the cavity to

😊 $I_{\text{cavity}} = \mathcal{F} I_{\text{outside}} \quad \mathcal{F} \sim 100$ for a typical 1S-2S cavity

- ☹️ Beam diameter for the stable mode is ~ 1 mm
- ☹️ 2nd-order Doppler shift / broadening cannot be cancelled

$$\delta\nu_{D2} = \frac{\nu_0}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

精度向上のための実験技術

Result: 2 455 528 941.0(9.8) MHz

$$u_r[m_\mu/m_e] = 820 \text{ ppb}$$

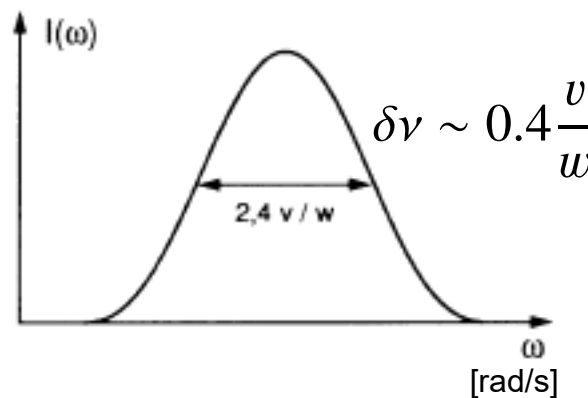
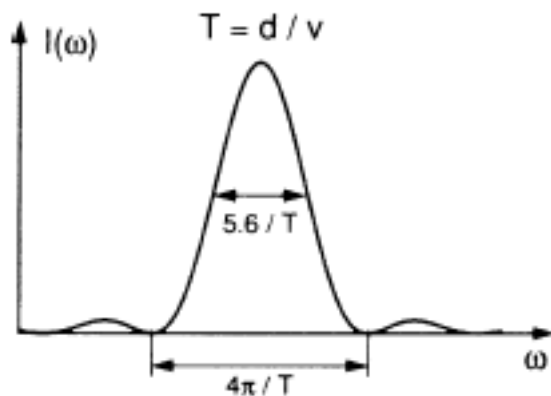
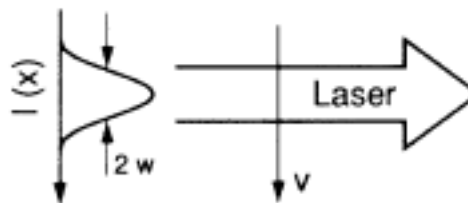
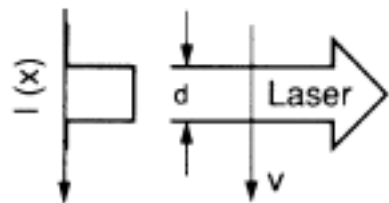
	RAL(1999)
μ^+ intensity	3500 × 50 Hz
Mu yield	600 cps
num. of Mu in Laser	1.5 /pulse
Laser / Linewidth	pulsed / ~8 MHz
Number of signals	99
	Uncertainty
Statistics	9.1 MHz
Residual doppler	3.4 MHz
Freq. calibration	0.8 MHz
Line shape	1.2MHz
Total	9.8 MHz

- 改善点 1 : Mu 数の増加
- 改善点 2 : CW レーザー使用
 - ▶ パルスレーザーと CW レーザー
- 改善点 3 : 光共振器による
残留ドップラー広がり抑制
 - ▶ ドップラー広がりとは
 - ▶ 対向励起によるドップラーキャンセル
 - ▶ 現実のレーザー光と残留ドップラー
- 改善点 4 : Mu 原子の冷却
- 改善点 5 : 光コムによる周波数計測

Solutions for improvement:

- Larger number of Muonium
- CW laser with optical cavity
- Freq. measurement by opt. comb

Transit Time Broadening



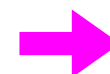
RMS Thermal velocity

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{3k_B T}{M}}$$

W. Demtröder,
"Laser Spectroscopy," Fig. 3.19

$T = 300 \text{ K}$	\tilde{v}	Transit time	width	2nd-order Doppler
Hydrogen	2.7 km/s	366 ns	1.1 MHz	0.1 MHz
Muonium	8.1 km/s	123 ns	3.2 MHz	0.9 MHz
		Beam diameter $2w = 1 \text{ mm}$		

- To decrease the muonium temperature (i.e. increase the interaction time)



Reduction both of
 { transit time
 2nd-order doppler }

レーザー光の周波数測定技術の向上：光周波数コム

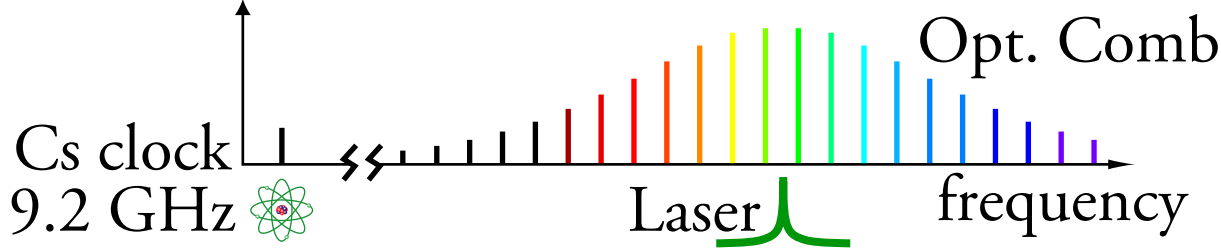
- ▶ 周波数軸上で「櫛 (comb) の歯」状に等間隔に並んだスペクトル
- ▶ 周波数の「ものさし」として使える

Development of Optical Comb (1999)



 Nobel Prize, 2005

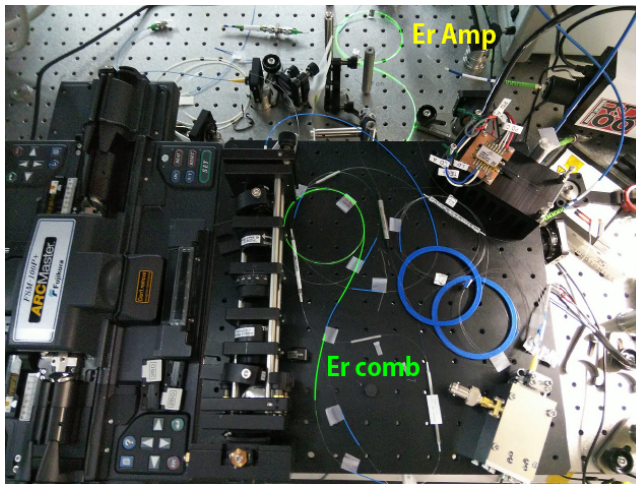
for their contributions to the development of **laser-based precision spectroscopy**, including the **optical frequency comb technique**



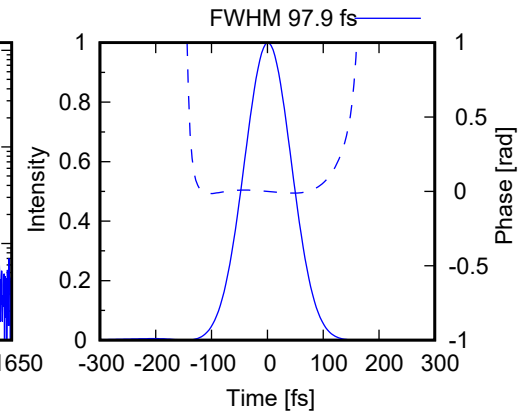
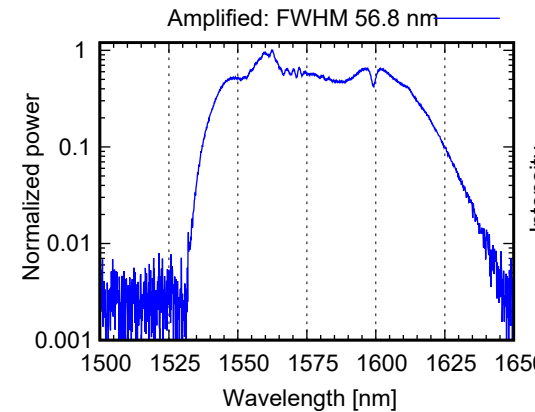
T. W. Hänsch



J. L. Hall



岡山で開発中の光コム



- ▶ ほぼフーリエ限界のパルス幅

目次

- **岡山大学異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア紹介**

- **イントロダクション：ミュオニウム精密分光の目標**

- ▶ 水素様原子の精密分光と基礎物理学
- ▶ 水素原子レーザー分光の現状と限界
- ▶ 水素原子とミュオニウムの比較
- ▶ 現在の精度と本研究の目標, $g-2$ への寄与
- ▶ 探索可能な新物理

- **実験の原理と精度向上手法**

- 1S-HFS マイクロ波分光**

- ▶ 測定原理・過去の研究 (LAMPF1999 実験) の結果

- 1S-2S レーザー分光**

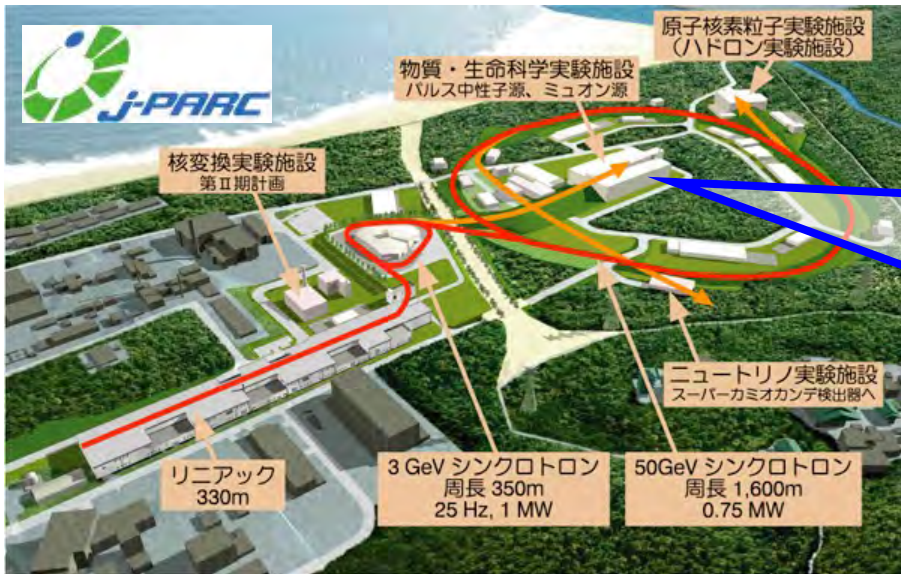
- ▶ 過去 (RAL1999 実験) の結果と改善項目
- ▶ 精度向上のための実験技術

- **実験計画概要 [1S-2S レーザー分光]**

- ▶ 実験の概要・実験エリアの状況
- ▶ 年次計画・各実験 Phase の概要
- ▶ シミュレーション研究

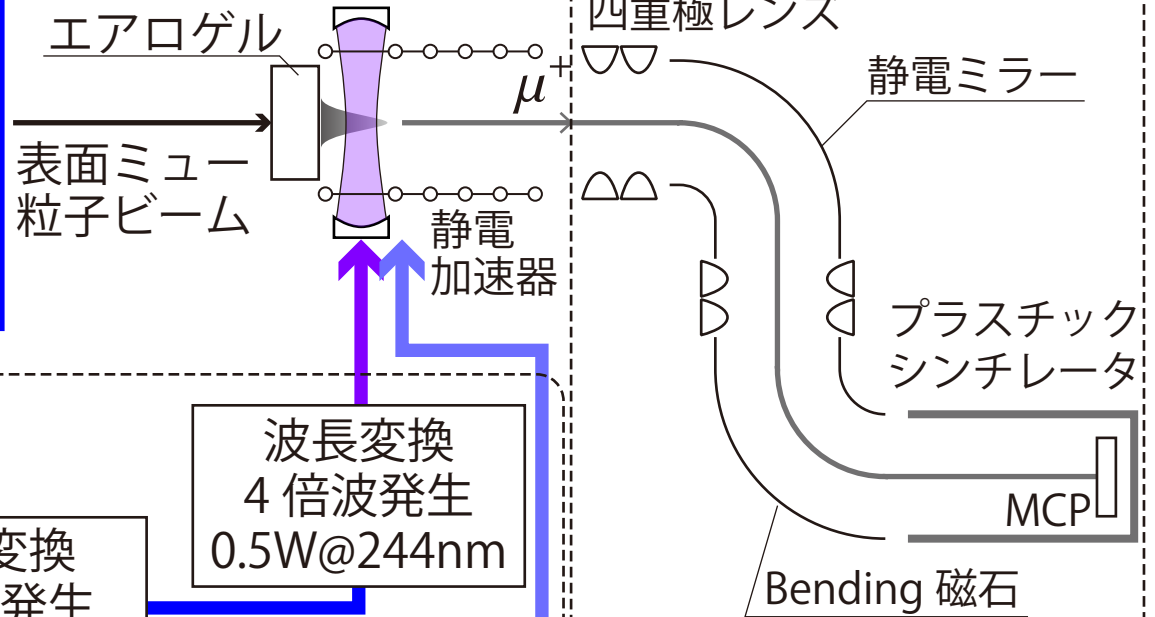
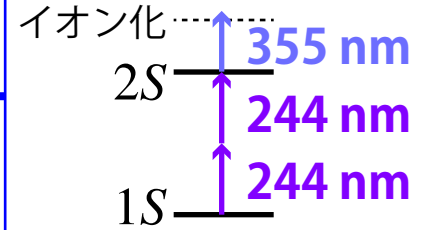
- **まとめ**

1S-2S レーザー分光：実験計画概要



2S 励起検出システム

244 nm 光共振器



狭線幅レーザーシステム

ファイバ光アンプ

半導体レーザー
976 nm
cw, 30 mW

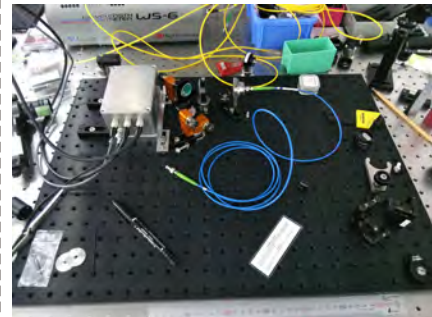
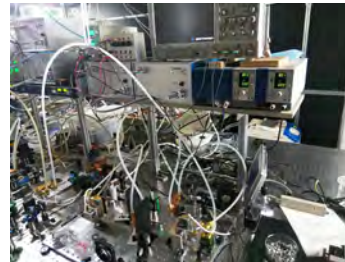


波長変換
2倍波発生
2.4W@488nm



波長変換
4倍波発生
0.5W@244nm

イオン化用
355nm Nd:YAG

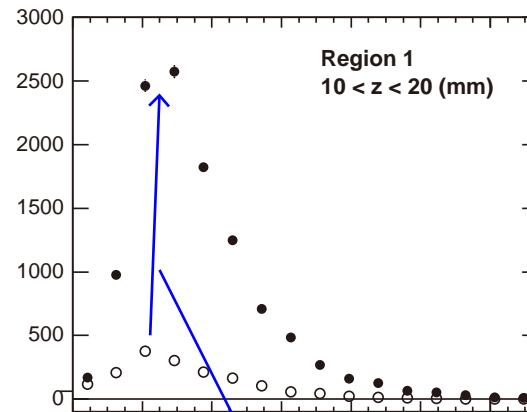
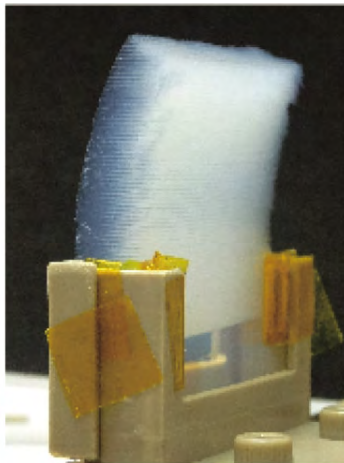
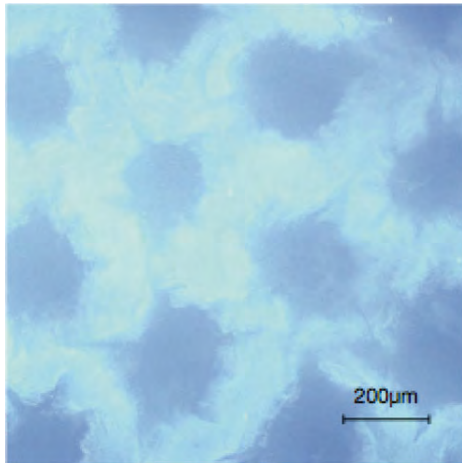


周波数安定化 & ファイバ光コム



実験計画概要：ミュオニウム生成

● シリカエアロゲルによる高効率ミュオニウム生成 (g-2 グループの成果)



レーザー相互作用
体積内ミュオニウム数
RAL1999 1.5 /pulse
S-Line ~10³ /pulse
H-Line ~10⁴/pulse

G. A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014**, 091C01

x10 improved
by laser ablation

- ▶ ミュオニウム生成効率：約 2% (シミュレーション結果より)
- ▶ エアロゲル形状の工夫でさらなる高効率化を検討中

シミュレーションによる 1S-2S レーザー分光最適化：概要

- **S2 エリアビームオプティクスシミュレーション**

- ▶ G4 beamline で計算
- ▶ S1 の実測データとの比較でビーム強度 1/2~1 倍の不定性あり

- **ミュオニウム生成シミュレーション**

- ▶ TRIUMF での実験データに基づいて作成

- **光学 Bloch シミュレーション (1S-2S 共鳴イオン化)**

- ▶ 時間依存シュレーディンガー方程式を厳密に解く解法として原子物理学分野で確立した手法.
- ▶ 水素様原子 (1 電子系) の遷移レートは厳密に計算可能, 水素原子の 1S-2S 分光へ適用・検証された実例がある
M. Haas, et al., T. W. Hänsch, M. O. Scully, G. S. Agarwal, Phys. Rev. A **73**, 052501 (2006)

- **イオン化 μ^+ ビーム輸送系シミュレーション**

- ▶ μ^- の輸送で検証済み

- ▶ **Phase0 実験で検証しさらなる精度向上を目指す**

Muonium 精密分光実験

- 原子物理分野で発展した, 精密レーザー分光/マイクロ波分光技術
- 素粒子・原子核実験分野で発展した, 大強度陽子加速器施設
- 素粒子理論分野で発展した高精度計算

最先端技術・異分野融合
実験 + 理論 共同作業 } により世界最高精度を実現

- ▶ いよいよ日本国内で高統計・高精度実験が可能に!
- ▶ 5年の研究で CODATA 推奨値更新が目標
- ▶ 原子を用いた電弱効果測定を実現
(パリティ非保存実験に続く, 歴史的実験)

先行研究
 $0.17 \times 10^6 \mu/s$
↓
 $100 \times 10^6 \mu/s$

