### Penning trapを用いた 電子g因子測定とDark Photon/Axion探索



#### Xing Fan

**Northwestern University** 京都大学高エネルギー研究室セミナー

2022.Dec.28

ENERGY S







Masason Foundation



#### g因子測定

#### Measurement of the Electron Magnetic Moment

X. Fan,<sup>1,2,\*</sup> T. G. Myers,<sup>2</sup> B. A. D. Sukra,<sup>2</sup> and G. Gabrielse<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, USA <sup>2</sup>Center for Fundamental Physics, Northwestern University, Evanston, Illinois 60208, USA (Dated: September 28, 2022)

> arxiv: 2209.13084 accepted by Phys. Rev. Lett.

> > and axion

#### Dark Photon/Axion

One-Electron Quantum Cyclotron as a Milli-eV Dark-Photon Detector

Xing Fan,<sup>1,2,\*</sup> Gerald Gabrielse,<sup>2,†</sup> Peter W. Graham,<sup>3,4,‡</sup> Roni Harnik,<sup>5,6</sup> Thomas G. Myers,<sup>2</sup> Harikrishnan Ramani,<sup>3,§</sup> Benedict A. D. Sukra,<sup>2</sup> Samuel S. Y. Wong,<sup>3</sup> and Yawen Xiao<sup>3</sup>

Phys. Rev. Lett. 129, 261801 (2022)

For English version, there are videos in <a href="http://cfp.physics.northwestern.edu/gabrielse-group/gabrielse-home.html">http://cfp.physics.northwestern.edu/gabrielse-group/gabrielse-home.html</a>



### 電子のg因子と標準模型の歴史

g=1

*g*=2

古典論



#### Dirac's theory:





+繰り込み群+QCD:

#### *g*=2.002 319 304 36 ...

5 loopsまで + … + 仮想µ, τ +ハドロン B ⊗∽∽∽∽ + & <  $\otimes$  $\frac{1}{2} \times \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)$ + -0.328...  $\frac{g}{2}$ 1 fine structure constant: Rb および Csを用いて 独立に測られる



Aoyama, Kinoshita, Nio, Atoms **2019**, 7(1), 28 and references therein

$$\frac{J. NO.}{D. 28}$$
  
herein 5次のQED計算  $\alpha$ 測定の誤差  
 $\frac{g}{2}$  (Rb) = 1.001 159 652 180 254 (12) (11) (93)  
Nature **588**, 61 (2020)

hadron loop

$$\frac{g}{2}$$
(Cs) = 1.001 159 652 181 598 (12) (11) (234)

Science 360 191 (2018)

5



this work

# なぜ電子のg因子なのか?

- ・電子のg因子なんかより高精度に測れているもの はいくらでもある
  - •水素原子1s-2s:15桁
  - ・光格子時計の周波数:18桁
  - 重力波によるひずみh: 24桁

→しかし理論的にその値を予測できない (原子核モデル, 束縛系・多体系, そもそもパラメータが不明)

 ・高精度の予測・測定のためにはシンプルさが大事
 →Penning trap中の電子のg因子

## g因子測定の原理



7

# **Penning trap中での運動**



## 単一電子の検出



### cyclotron運動は量子的な描像





# なぜv,ではなくv,を測るのか?





## 遷移をどう観測するか?





# 2008年から装置を一新



Penning trap





# 2008年からの改善点

- <u>再現性・安定性の向上</u>
   ▶長期の安定したデータ取得のため、 モジュラーで、冷却で壊れない ハードウェアを多く製作した
- 2. 磁場の一様性・ドリフトの改善 →新しく<sup>3</sup>Heを用いた磁力計を製作 X.Fan, et al., Rev. Sci. Instrum. 90, 083107 (2019)

▶一様性も5倍改善

3. <u>Penning trapによる<sub>v</sub>のずれ(cavity QED)</u> <u>の理解</u>

統計量5倍 (本日は省略)



- cyclotron と anomaly を交互に測定
   →長期的なBドリフトをキャンセル
   →遷移確率 vs ドライブ周波数を記録
- 今回anomaly drive 周波数をblindした
  - $v_a^{true} = v_a^{set in computer} + X$









がなまった形をしている

# cavity QED効果



▶ Penning trapの壁の効果でv<sub>c</sub>だけが変わる(v<sub>s</sub>は変わらない!!!)
 ▶ ずれの大きさはv<sub>c</sub>とcavityの共振周波数で決まる
 →cavityの共振周波数を測り,そこから離れた周波数v<sub>c</sub>でgを測定

## 新しく補正の方法を開発し, 正しくcavity効果を評価(したつもり)







## トラップされた電子を用いた Dark Photon/Axion探索

PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 261801 (2022)

#### **One-Electron Quantum Cyclotron as a Milli-eV Dark-Photon Detector**

Xing Fan<sup>(b)</sup>,<sup>1,2,\*</sup> Gerald Gabrielse,<sup>2,†</sup> Peter W. Graham<sup>(b)</sup>,<sup>3,4,‡</sup> Roni Harnik,<sup>5,6</sup> Thomas G. Myers,<sup>2</sup> Harikrishnan Ramani<sup>(b)</sup>,<sup>3,§</sup> Benedict A. D. Sukra<sup>(b)</sup>,<sup>2</sup> Samuel S. Y. Wong<sup>(b)</sup>,<sup>3</sup> and Yawen Xiao<sup>(b)</sup><sup>3</sup>

#### Collaboration work with Stanford University

- Peter Graham
- Harikrishnan Ramani
- Samuel S. Y. Wong
- Yawen Xiao

#### Fermilab National Laboratory

Roni Harnik







## Dark Matter/Dark Photon/Axion

SM photon A



ダークマターハローの性質

- SM 粒子との結合は弱い
- 速度  $v/c \approx 10^{-3}$ •
- local 密度 ρ<sub>DM</sub> ~0.4 GeV/cm<sup>3</sup>

**Dark Photon** 

U(1)ゲージ場

 $\blacktriangleright$  mass  $m_{A'}$  $\succ \mathcal{L} = \chi (\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}' - \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}')$ 

dark photon A'

Axion strong CP問題の解に付随する粒子  $\blacktriangleright$  mass  $m_a$  $\succ \mathcal{L} = g_{avv} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ SM photon Axion  $g_{a\gamma\gamma}$ h



• Dark Photon



Axion







- そもそもmeVは他の領域に比べデバイスが少ない
- チューナブルな検出エネルギー 0.1-1 meV
- n<sub>c</sub>=0 → n<sub>c</sub>=1 遷移はバックグラウンドフリー
- ・ 強磁場下で何の問題もなく動く (=Axionに応用できる)

# meVは狙い目





# バックグラウンド フリー



## **Demonstration Search**

#### 電子を基底状態n<sub>c</sub>=0に放置してモニターするだけ

![](_page_25_Figure_2.jpeg)

![](_page_25_Figure_3.jpeg)

# 得られたDP Limit

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

ただしあまりに細すぎる DP/Axionに特化した装置を作ると? → next page

# いろんな改良アイデア

#### open endcap trap

✓open endcap trapを使い ✓外部にfocusing antennaをおく ✓10個くらい電子をトラップする

<u>アイデア</u>

![](_page_27_Figure_3.jpeg)

![](_page_27_Figure_4.jpeg)

![](_page_27_Picture_5.jpeg)

# アクシオン用の実験も考え中 $\mathcal{L} = g_{a\gamma\gamma} \, a\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ ▲ Axionからの E field cyclotron motion n<sub>c</sub>=0 $n_c=1$

Axionからの電場(磁場と並行)を cyc.運動平面(磁場と垂直)に変換する必要あり

### Shamelessly Borrowing an Idea

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

### Summary

- 新しく建設した装置で電子のg因子を測定した
   ▶非常に広く磁場を変えて系統誤差をより詳しくスタディ.
- 2. meV Dark Photonサーチをdemonstration
   ▶ 0.6 meVでのバックグラウンドフリーサーチ
   ▶ 感度向上案とアクシオンへの応用も設計中!

#### **Northwestern**

G. Gabrielse X. Fan T. Myers B.A.D. Sukra

![](_page_30_Picture_5.jpeg)

![](_page_30_Picture_6.jpeg)

### Summary

![](_page_31_Picture_1.jpeg)