

# 時間反転対称性の破れの探索に向けた ルビジウム磁力計の研究

東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター  
測定器研究部  
内山愛子

# 時間反転対称性の破れの探索に向けたルビジウム磁力計の研究

- **本研究の目的**

  - 冷却フランシウム原子を用いた電子の永久電気双極子能率(EDM)探索

  - EDM探索に必要なとされる磁場精度

- **ルビジウム(Rb)磁力計の原理**

  - 周波数変調光を用いた非線形磁気光学回転効果(FM-NMOR)

- **磁場感度の高いRb磁力計の開発**

  - FM-NMORスペクトルの傾きに対するレーザー周波数, 変調幅, 強度依存性の測定

- **Rb磁力計による磁場の安定性の評価**

  - Allan分散による磁場の安定性の評価

- **まとめ**

# 時間反転対称性の破れの探索に向けたルビジウム磁力計の研究

- **本研究の目的**

  - 冷却フランシウム原子を用いた電子の永久電気双極子能率(EDM)探索

  - EDM探索に必要なとされる磁場精度

- **ルビジウム(Rb)磁力計の原理**

  - 周波数変調光を用いた非線形磁気光学回転効果(FM-NMOR)

- **磁場感度の高いRb磁力計の開発**

  - FM-NMORスペクトルの傾きに対するレーザー周波数, 変調幅, 強度依存性の測定

- **Rb磁力計による磁場の安定性の評価**

  - Allan分散による磁場の安定性の評価

- **まとめ**

# 電子の永久電気双極子能率

素粒子の  
永久電気双極子能率(EDM)の存在は  
時間反転対称性の破れを表す

CPT不変性



C: 荷電共役, P: 空間反転, T: 時間反転

CP対称性の破れ

**標準模型(SM):**

クォークを介した高次の効果で  
電子EDM ( $d_e$ ) が発現

$$|d_e^{\text{SM}}| < 10^{-37} \text{ ecm}$$

**超対称性理論:**

統計性の異なる粒子の  
伝搬により発現



電子EDMと超対称性粒子の質量のスケールは

$$d_e \sim e \times \frac{m_e}{M^2} = 10^{-23} e \text{ cm} \times \left(\frac{1 \text{ TeV}}{M}\right)^2$$



$|d_e| < 10^{-29} e \text{ cm}$ の探索で

$M > 10^3 \text{ TeV}$ の超対称性粒子の探索に相当

M. Pospelov and A. Ritz, *Ann. Phys.* **318**, 119 (2005).

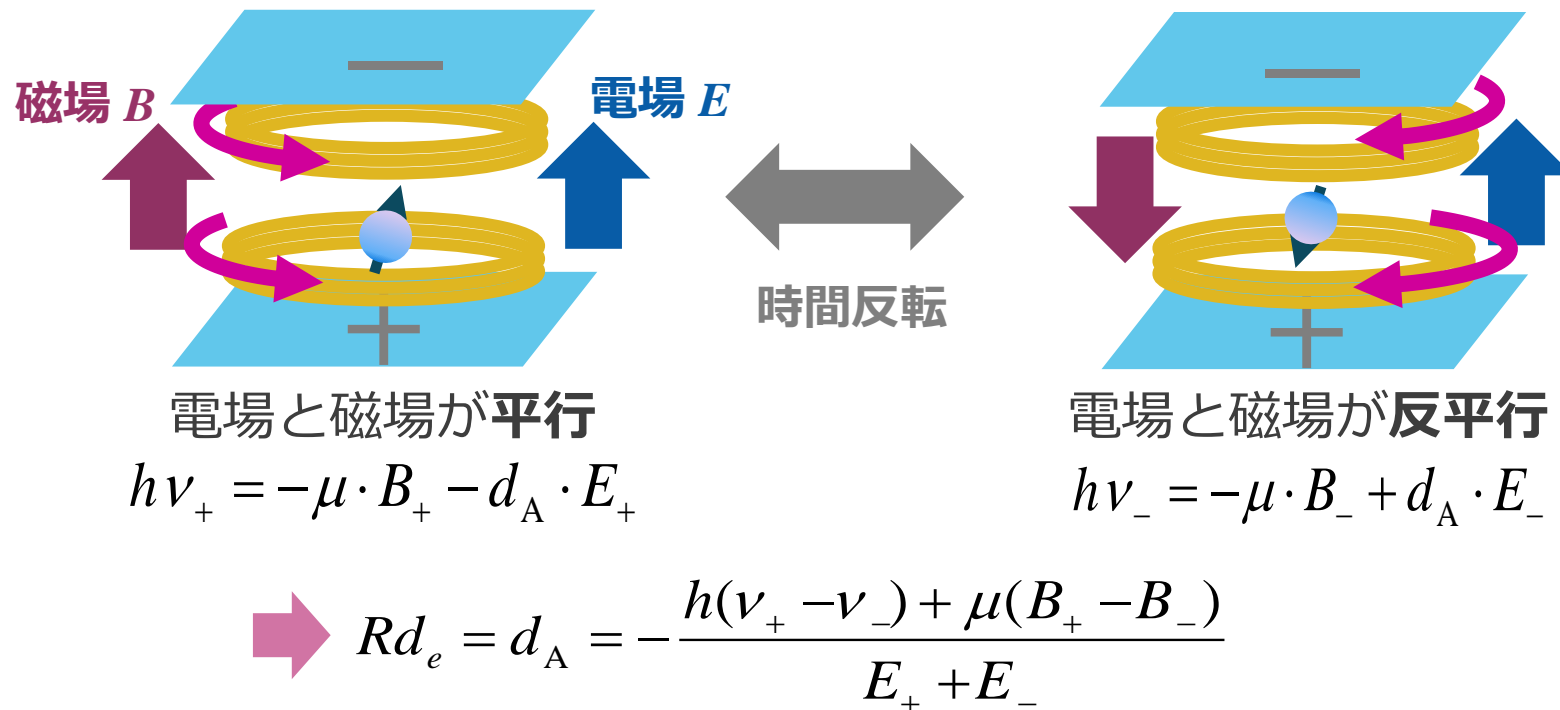
標準模型を超えた物理モデルの検証を行う



# 冷却フランシウム原子による電子EDM探索

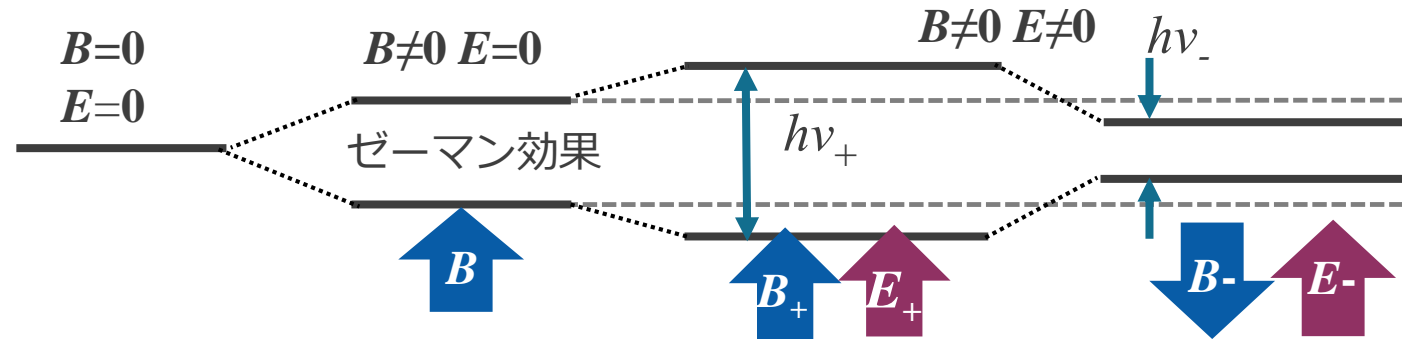
電子EDM  $d_e$  が存在すると原子EDM  $d_A$  が存在する  $d_A = R d_e$   $R$ :増幅率

- ✓ フランシウム(Fr)原子はレーザー冷却・トラップができるため EDMの精密測定に有利
- ✓ Fr原子は  $R \sim 900$  と大きなEDM増幅率を持つ D Mukherjee, et al. *J. Phys. Chem. A* **113**(45) 12549 (2009).



# 冷却Fr-EDM探索測定に必要な磁場精度

高電場印加・周波数の精密測定・**磁場の安定化と精密測定**が重要



$$\begin{aligned} h\nu_+ &= -\mu \cdot B_+ - d_{\text{Fr}} \cdot E_+ \\ h\nu_- &= -\mu \cdot B_- + d_{\text{Fr}} \cdot E_- \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad d_{\text{Fr}} = -\frac{h(\nu_+ - \nu_-) + \mu(B_+ - B_-)}{E_+ + E_-}$$

$\nu_+ = \nu_- = \nu \pm \Delta\nu$ ,  $B_+ = B_- = B \pm \Delta B$ ,  $E_+ = E_- = E \pm \Delta E$  という誤差を持つと

$$\Delta d_{\text{Fr}} > \sqrt{2\left(\frac{h}{2E}\right)^2 \Delta\nu^2 + 2\left(\frac{\mu}{2E}\right)^2 \Delta B^2 + 2\left(\frac{d_{\text{Fr}}}{2E}\right)^2 \Delta E^2}$$

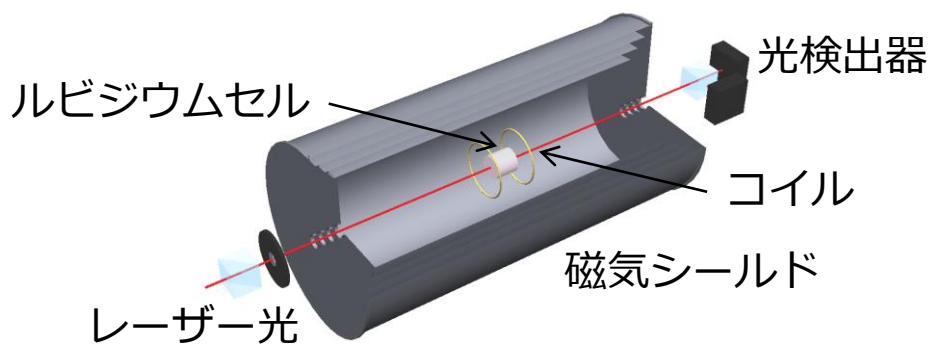
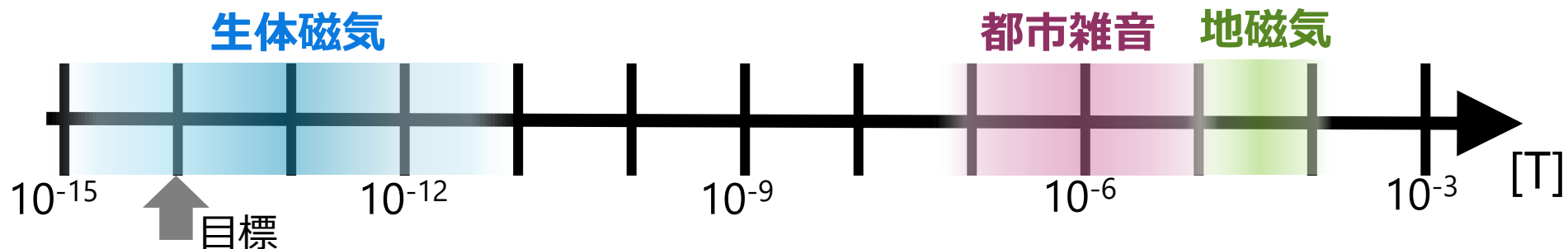
一組の測定で  $\Delta d_{\text{Fr}} < 5 \times 10^{-24} \text{ e cm}$  を達成するためには

$$E > 100 \text{ kV/cm のとき } \Delta\nu < 100 \text{ } \mu\text{Hz}, \Delta B < 10 \text{ fT}$$

# 高精度磁力計の開発と磁場の安定性の評価

## FM-NMOR型Rb磁力計の開発と磁場の安定性の評価

周波数変調(FM)光による  
非線形磁気光学回転効果(NMOR)を用いた  
ルビジウム(Rb)磁力計



- ✓ レーザー光1本で測定
- ✓ 測定領域に設置するものはRbセルのみ
- ✓ 1軸方向の磁場成分のみ測定
- ✓ 測定レンジが限定される

# 時間反転対称性の破れの探索に向けたルビジウム磁力計の研究

## ・ 本研究の目的

冷却フランシウム原子を用いた電子の永久電気双極子能率(EDM)探索

EDM探索に必要なとされる磁場精度

## ・ ルビジウム(Rb)磁力計の原理

周波数変調光を用いた非線形磁気光学回転効果(FM-NMOR)

## ・ 磁場感度の高いRb磁力計の開発

FM-NMORスペクトルの傾きに対するレーザー周波数, 変調幅, 強度依存性の測定

## ・ Rb磁力計による磁場の安定性の評価

Allan分散による磁場の安定性の評価

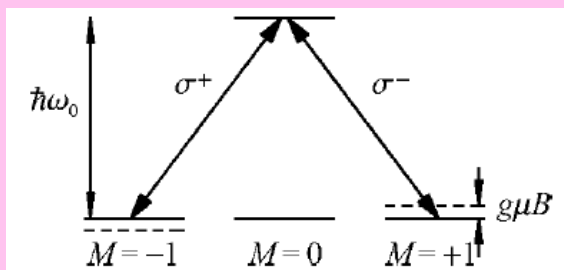
## ・ まとめ



# 非線形磁気光学回転効果(NMOR)とは

原子の共鳴周波数の光が 磁場中の原子と相互作用することで**光の偏光面が回転する現象**

1. 直線偏光によって原子がアラインメント状態が作られる



アラインメント状態  
(光を吸わない状態)

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|M = +1\rangle - |M = -1\rangle)$$

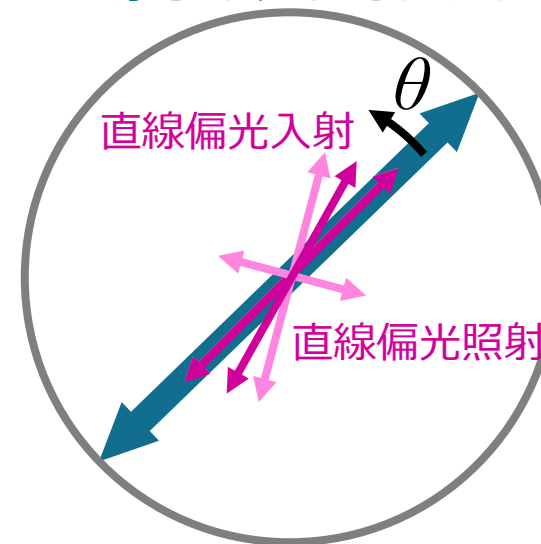
2. 原子のアラインメントは磁場中で歳差する

3. 光の偏光面が原子と相互作用することで回転する  
(アラインメント状態に垂直な向きの光のみが吸収される)

$$\theta(B_z) \approx \theta_{\text{Amp}} \frac{\frac{2g_F \mu_B B_z}{\hbar \Gamma}}{1 + \left(\frac{2g_F \mu_B B_z}{\hbar \Gamma}\right)^2}$$

$g_F$ : g因子,  $\mu_B$ : ボーア磁子,  $\Gamma$ : 緩和レート

## 原子のアラインメント

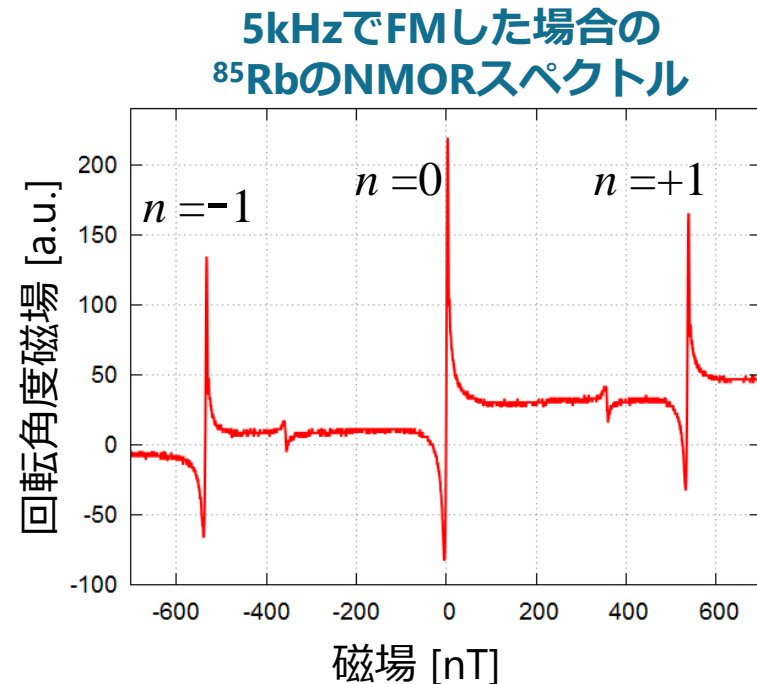


光の吸収により偏光面が回転

光の偏光面の回転角度から  
磁場を測定できる

# 周波数変調光を用いたNMOR

周波数変調(FM)光を用いることで有限磁場でもNMORが生じる(FM-NMOR)



偏光面の回転角度

$$\theta(B_z) \approx \theta_{\text{Amp}} \frac{\frac{2g_F\mu_B(B_z - B_n)}{\hbar\Gamma}}{1 + \left(\frac{2g_F\mu_B(B_z - B_n)}{\hbar\Gamma}\right)^2}$$

$g_F$ : g因子,  $\mu_B$ : ボーア磁子,  $\Gamma$ : 緩和レート

回転の生じる磁場

$$B_n = n \frac{h}{g_F\mu_B} \frac{\nu_{\text{Mod.}}}{2} \quad \nu_{\text{Mod.}}: \text{変調周波数}$$

ラーモア周波数  $\times 2 =$  変調周波数  $\times n$   
 となる磁場の周りでもNMORが生じる



**有限磁場において高い感度を持つ磁力計を室温で実現**

# 時間反転対称性の破れの探索に向けたルビジウム磁力計の研究

## ・ 本研究の目的

冷却フランシウム原子を用いた電子の永久電気双極子能率(EDM)探索

EDM探索に必要なとされる磁場精度

## ・ ルビジウム(Rb)磁力計の原理

周波数変調光を用いた非線形磁気光学回転効果(FM-NMOR)

## ・ 磁場感度の高いRb磁力計の開発

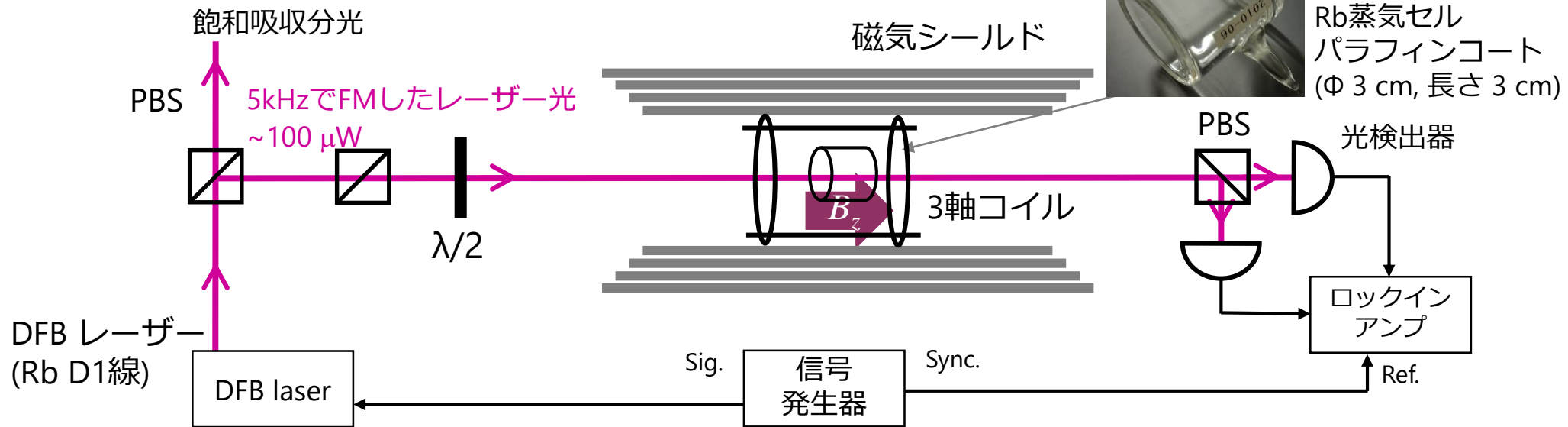
FM-NMORスペクトルの傾きに対するレーザー周波数, 変調幅, 強度依存性の測定

## ・ Rb磁力計による磁場の安定性の評価

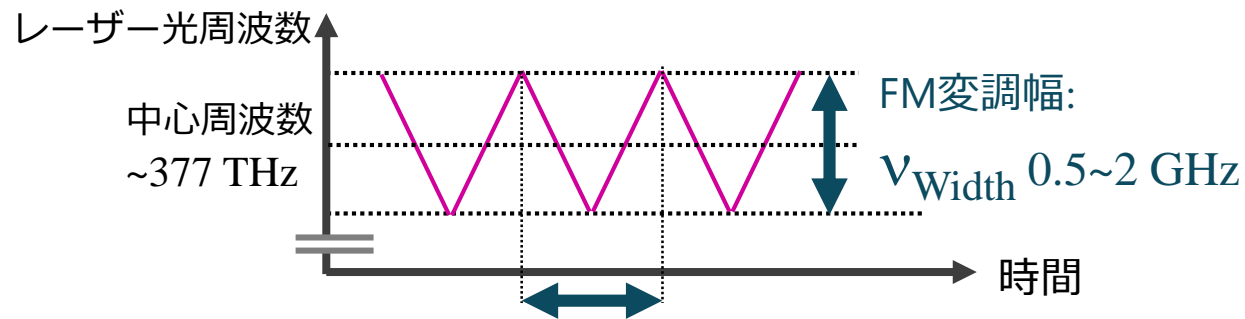
Allan分散による磁場の安定性の評価

## ・ まとめ

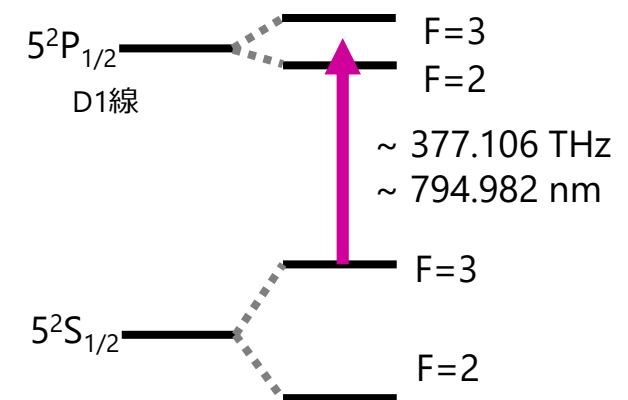
# Rb磁力計セットアップ



周波数を変調しその周波数( $\nu_{Mod}$ )で位相敏感検波する



<sup>85</sup>Rb原子のエネルギー準位



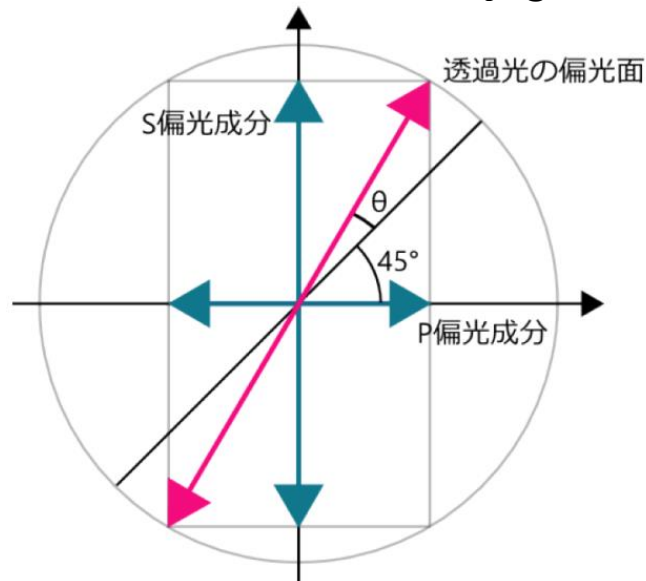
# FM-NMORによる磁場測定と感度

偏光面の回転角度  $\theta \approx \frac{V_S - V_P}{2(V_S + V_P)}$

➡ 2つの検出器の**差分信号**から磁場を測定

$B_z = B_n$  の周りでは  $V(B_z) \approx \frac{g_F \mu_B}{\hbar \Gamma} V_{\text{Amp}} (B_z - B_n)$

$g_F$ : g因子,  $\mu_B$ : ボーア磁子,  $\Gamma$ : 緩和レート



スペクトルの傾き

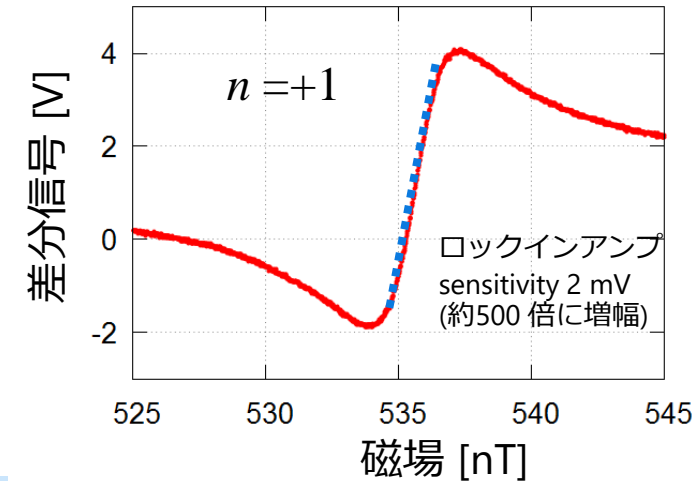
$$\frac{2g_F \mu_B}{\hbar \Gamma} V_{\text{Amp}}$$

が大きいほど感度が良い

回転振幅 ( $V_{\text{Amp}}$ ) が大きく  
緩和レート ( $\Gamma$ ) が小さい

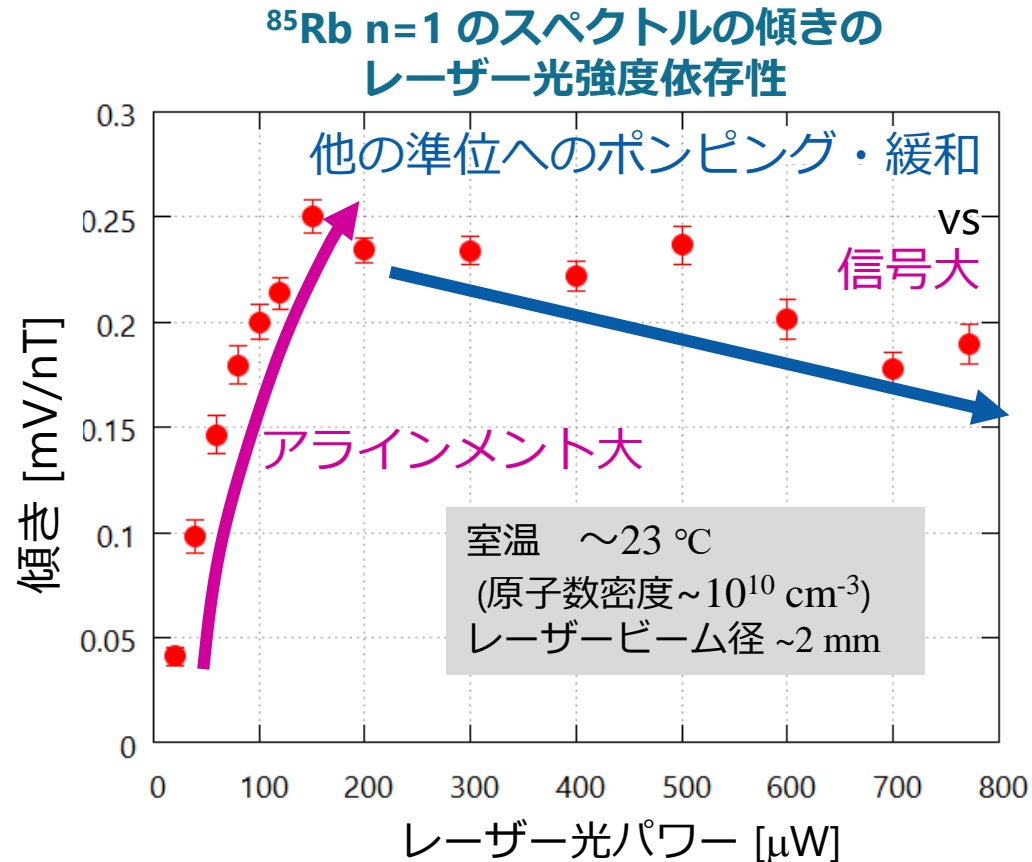
FM-NMORスペクトルの傾きに対する  
レーザー光周波数, 変調幅, **強度**依存性

5kHzでFMした場合の  
 $^{85}\text{Rb}$ の差分信号出力



# Rb磁力計の感度

## -レーザー光強度依存性



ロックインアンプの sensitivity 20 mV を  
用いて正味の信号に換算

レーザー光強度が強いと

アラインメント **大**  
(原子増  $\Leftrightarrow \theta$  大)

信号 ( $V_s + V_p$ ) **大**

傾き **大**

他の準位に  
ポンピングされる  
(原子減  $\Leftrightarrow \theta$  小)

緩和レート ( $\Gamma$ ) **大**

傾き **小**

差分出力 ( $V_s - V_p$ )

$$V_s - V_p \approx \frac{g_F \mu_B}{\hbar \Gamma} V_{\text{Amp}} (B_z - B_n)$$

$$V_s - V_p = 2(V_s + V_p)\theta$$

室温ではレーザー光パワー 150  $\mu\text{W}$  が最適



# 時間反転対称性の破れの探索に向けたルビジウム磁力計の研究

- **本研究の目的**

  - 冷却フランシウム原子を用いた電子の永久電気双極子能率(EDM)探索
  - EDM探索に必要とされる磁場精度

- **ルビジウム(Rb)磁力計の原理**

  - 周波数変調光を用いた非線形磁気光学回転効果(FM-NMOR)

- **磁場感度の高いRb磁力計の開発**

  - FM-NMORスペクトルの傾きに対するレーザー周波数, 変調幅, 強度依存性の測定

- **Rb磁力計による磁場の安定性の評価**

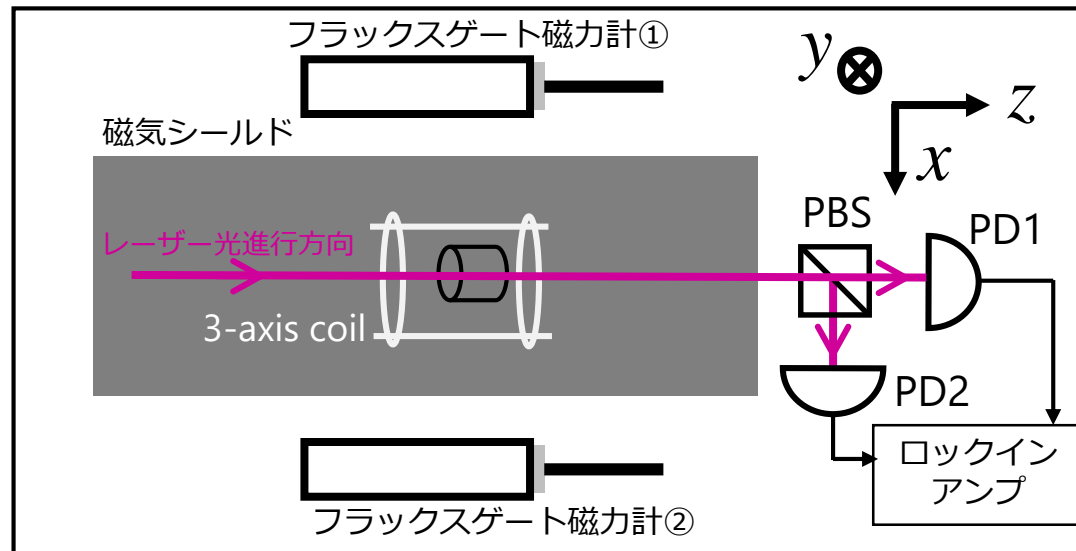
  - Allan分散による磁場の安定性の評価

- **まとめ**

# 磁場の安定性の評価-実験内容

Rb磁力計を用いて磁場を24時間測定

レーザー光軸方向に一定の磁場を印加した状態で磁力計の出力を測定した



サンプリング周波数 200 Hz  
1 ランあたりのサンプリング数  $2^{14}$

測定時の磁場感度:  $1.33 \pm 0.02$  V/nT

ロックインアンプの設定:  
sensitivity 2 mV time constant 1 msec

測定したもの

- ✓ ルビジウム磁力計の出力  
(差分信号をロックイン検波して得られた信号)

$$\theta \approx \frac{V_S - V_P}{2(V_S + V_P)}$$

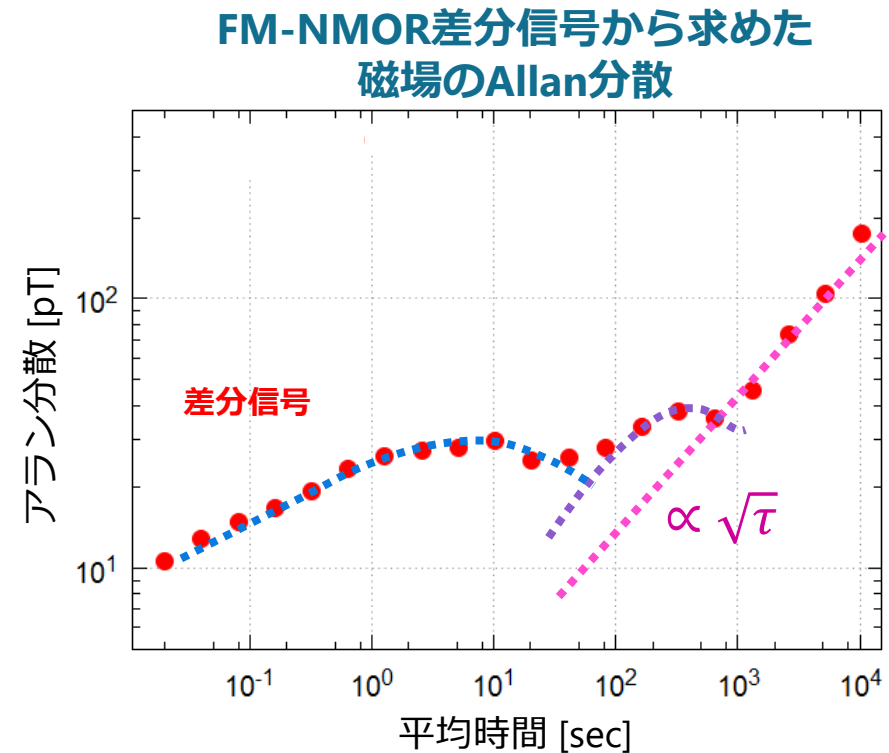
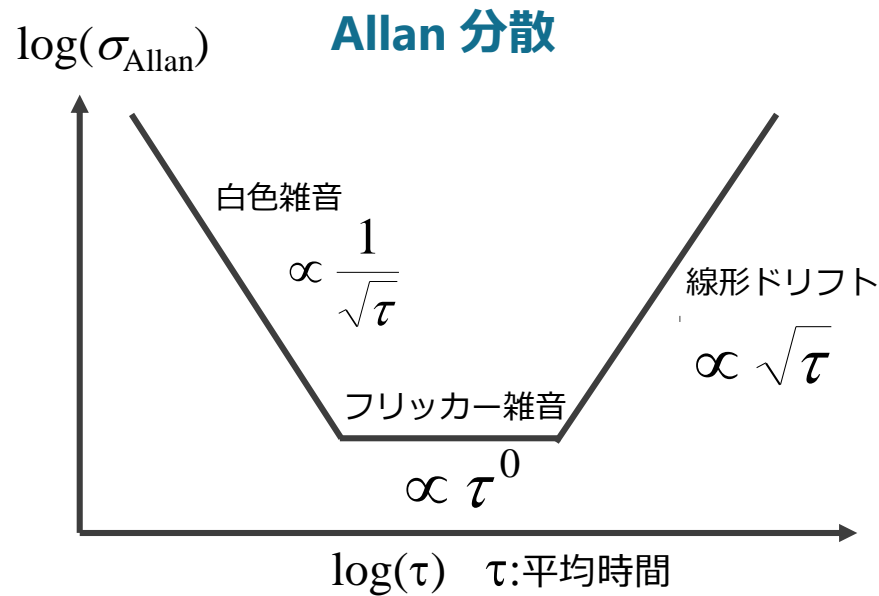
- ✓ z方向コイル印加電圧
- ✓ 外部磁場 (フラックスゲート2台の出力)  
-> 磁場変動の見積もり
- ✓ セルを固定する樹脂台の温度

# 磁場の安定性の評価-結果

磁場の安定性をAllan分散  $\sigma_{\text{Allan}}^2$  を用いて評価する

$$\sigma_{\text{Allan}}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (\overline{B_k(\tau)} - \overline{B_{k-1}(\tau)})^2$$

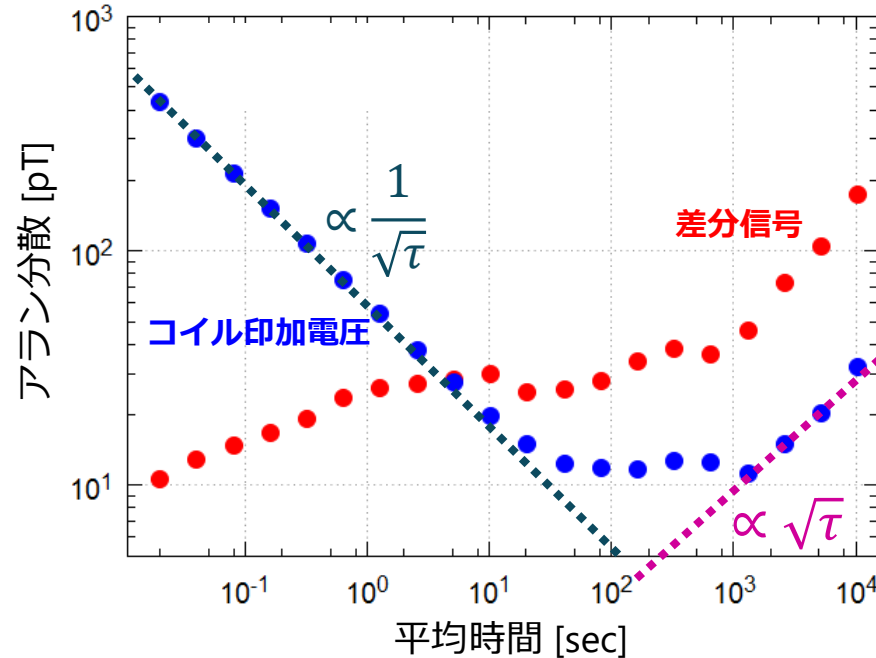
$\overline{B_k(\tau)}$ : 磁場測定結果を時間  $\tau$  平均した値の  $k$  番目



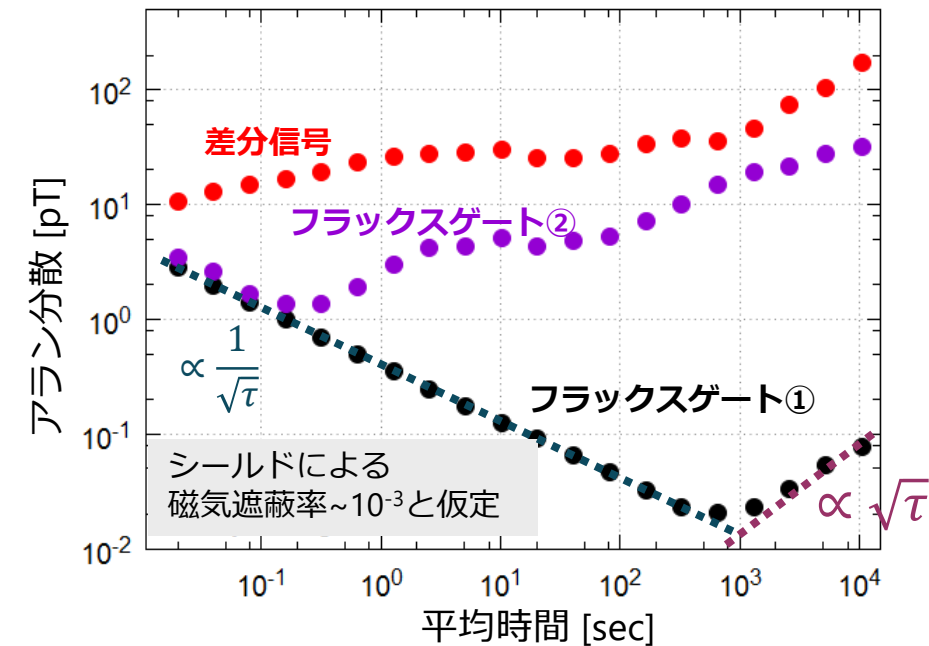
# 磁場の安定性の評価

## -磁場変動による影響

差分信号のAllan分散と  
コイル印加電圧のAllan分散の比較



差分信号のAllan分散と  
外部磁場のAllan分散の比較



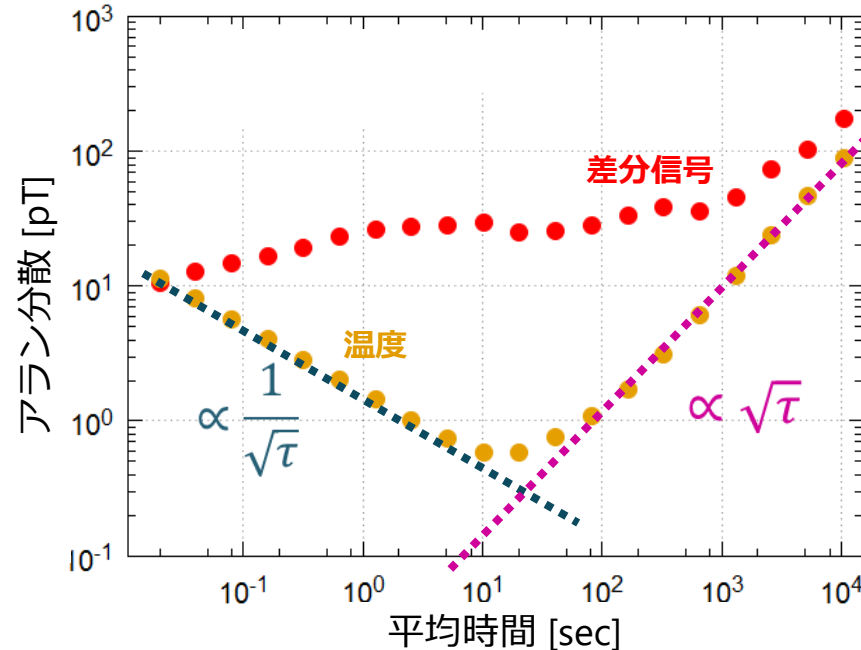
外部磁場変動 特にフラックスゲート②側の磁場変動が大きい ➡ **補正コイルが必要**

磁場変動のみで説明できる？ ➡ 磁場変動**以外**による影響についても評価

# 磁場の安定性の評価

## -磁場変動以外による影響

差分信号のAllan分散と  
温度のAllan分散の比較



差分出力( $V_s - V_p$ )

$$V_S - V_P \approx \frac{g_F \mu_B}{\hbar \Gamma} V_{\text{Amp}} (B_z - B_n)$$

温度変化

- > 原子数密度変化
- > 出力( $V_s - V_p$ )変化

レーザー光周波数や強度変化

- > 傾き( $g_F \mu_B V_{\text{Amp}} / \hbar \Gamma$ )変化
- > 出力( $V_s - V_p$ )変化

レーザー光強度変化

- > 透過光パワー( $V_s + V_p$ )変化
- > 出力( $V_s - V_p$ )変化

**レーザー光周波数・強度の安定化←FMとの共存が課題**

# 時間反転対称性の破れの探索に向けたルビジウム磁力計の研究

---

- **本研究の目的**

  - 冷却フランシウム原子を用いた電子の永久電気双極子能率(EDM)探索
  - EDM探索に必要とされる磁場精度

- **ルビジウム(Rb)磁力計の原理**

  - 周波数変調光を用いた非線形磁気光学回転効果(FM-NMOR)

- **磁場感度の高いRb磁力計の開発**

  - FM-NMORスペクトルの傾きに対するレーザー周波数, 変調幅, 強度依存性の測定

- **Rb磁力計による磁場の安定性の評価**

  - Allan分散による磁場の安定性の評価

- **まとめ**



# まとめと今後の展望

---

**目的** 冷却Fr原子を用いた電子EDM探索に向けた高精度磁力計の開発と評価

**開発** FM-NMOR型Rb磁力計の開発  
磁力計の感度が高くなるレーザー光周波数・変調幅・強度依存性を測定

**実験** FM-NMOR型Rb磁力計を用いた磁場測定

**結果と考察** 外部磁場により磁場の不安定さが生み出されていることがわかった  
磁力計自身の不安定さも示唆された

**今後の展望** 補正コイルの導入, レーザー光周波数・強度の安定化などの改良  
共存磁力計への応用

# 謝辞

---

**多くの方のご指導とご支援に感謝いたします。**

酒見泰寛教授（現・東大CNS）、井上壮志助教、原田健一講師、川村広和助教、Umakanth Dammalapati 講師、伊藤正俊准教授、早水友洋博士（現・UBC）  
および東北大CYRICの皆さま

東京工業大学の旭耕一郎教授（現・理化学研究所）

岡山大学の吉見彰洋准教授

東京大学の青木貴稔助教

修士論文の副査および論文審査員の皆さま

測定器開発修士論文賞の選考委員の皆さま