

# ダークマターアクション探索実験CARRACK

福井大工

小川泉

# 目次

---

- Introduction
  - CARRACK実験について
  - 残留電場問題
  - ターゲット質量領域の変更
- 装置の改良
  - リドベルグ原子ビームの原子種の変更
    - ルビジウム ⇒ カリウム
  - バンチ化原子ビーム装置の整備
- まとめ

# 非常に簡単なaxionのまとめ

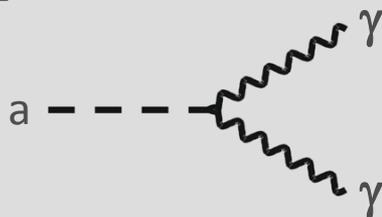
## 素粒子物理学から

「QCDにおけるCPの破れの問題」を解決  
Peccei-Quinn 対称性

→ Axions  $a \sim \pi^0$

$$m_\pi f_\pi \approx m_a f_a$$

$f_a \gg f_\pi$  axions は“見えない” かつ、  
非常に軽い



## 天体物理学から

Axionは星(太陽)の中で作られる  
Primakoff効果



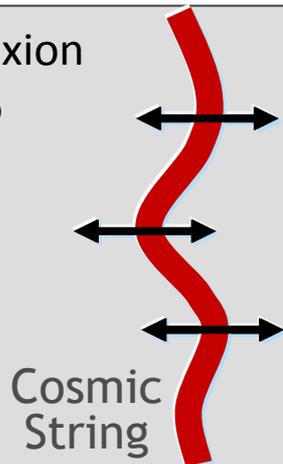
- 星の成長からの制限
- 太陽アクシオンの探索(CAST, Sumico)

## 宇宙物理学から

軽い質量にもかかわらず, axion  
は**非相対論的**に生成される  
("non-thermal relics")

→ “冷たい”ダークマター  
の候補

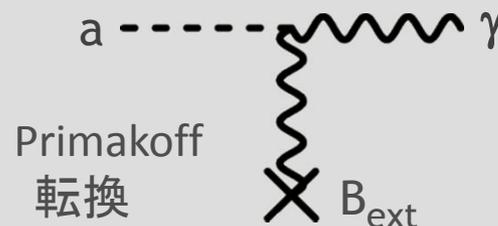
$$m_a \sim 1-1000 \mu\text{eV}$$



## ダークマター-axionの探索



マイクロ波共振器  
(1 GHz = 4  $\mu\text{eV}$ )



# Axion Haloscope

DM axionsの質量  
銀河系での速度  
エネルギー

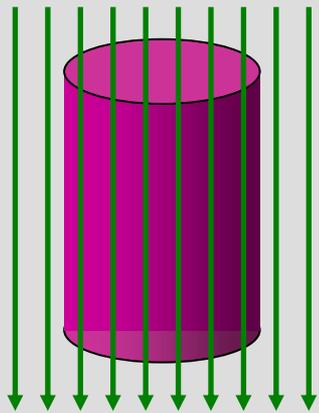
$$m_a = 1-1000 \mu\text{eV}$$

$$v_a \approx 10^{-3} c$$

$$E_a \approx (1 \pm 10^{-6}) m_a$$

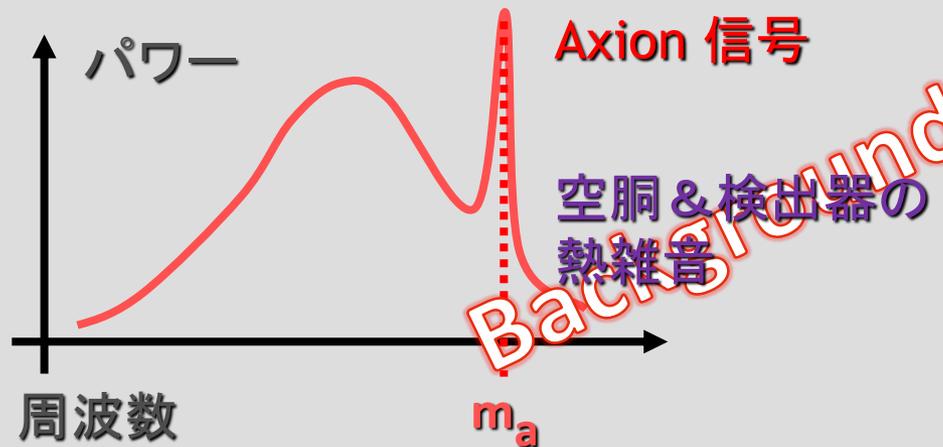
マイクロ波エネルギー  
(1 GHz  $\approx$  4  $\mu\text{eV}$ )

Axion Haloscope (Sikivie 1983)

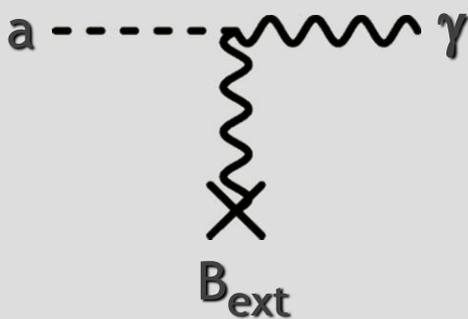


$B_{\text{ext}} \approx 8 \text{ Tesla}$

マイクロ波  
共振器  
 $Q \approx 10^5$



Primakoff 変換

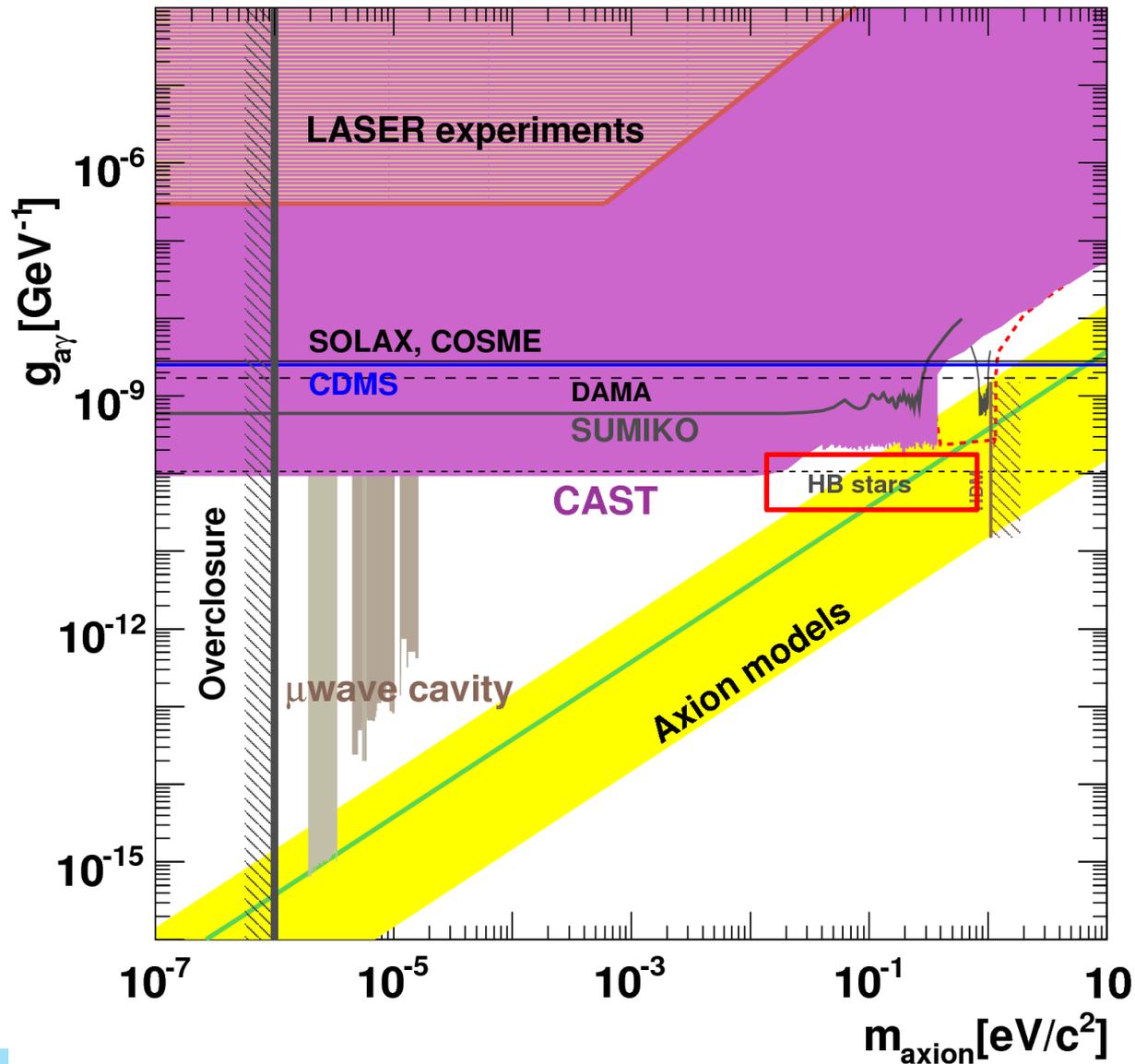


銀河中のaxionによる信号のパワー

$$5 \times 10^{-21} \text{ W} \frac{V}{0.5 \text{ m}^3} \left( \frac{B}{7 \text{ T}} \right)^2 C \frac{Q}{10^5}$$

$$\times \left( \frac{m_a}{2\pi \text{ GHz}} \right) \left( \frac{\rho_a}{5 \times 10^{-25} \text{ g/cm}^3} \right)$$

## World exclusion plot



- 星の進化
- Cosmology
- Laser実験
- Solar axion search
- Halo axion search

## sensitivity

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{sig}}{kT_s} \cdot \sqrt{\frac{t}{\Delta\nu}} \quad P_{sig} \sim B^2 V C Q m_a \rho_a$$

- System Noise Temperature

$$T_s = T + T_N$$

- 温度:  $T=10\sim 100$  mK
  - 希釈冷凍器
- 検出器の等価雑音温度:  $T_s$ 
  - SQUID アンプ
    - ADMX
  - 単一光子計数
    - CARRACK

# Standard Quantum Limit

---

- 光子数と位相は同時には不確定

$$\Delta n \cdot \Delta \phi \geq \frac{1}{2}$$

- 増幅器の使用

振幅と位相の同時観測

⇒  $\hbar\omega/k_B$  程度の熱雑音に相当 ( $10\mu\text{eV} \Leftrightarrow 0.116\text{ K}$ )

- Rydberg原子の遷移

マイクロ波の位相によらない

⇒ SQLなし

## CARRACK(花洛)

## • Rydberg原子によるマイクロ波光子検出

– SQLなし！

– Rydberg原子

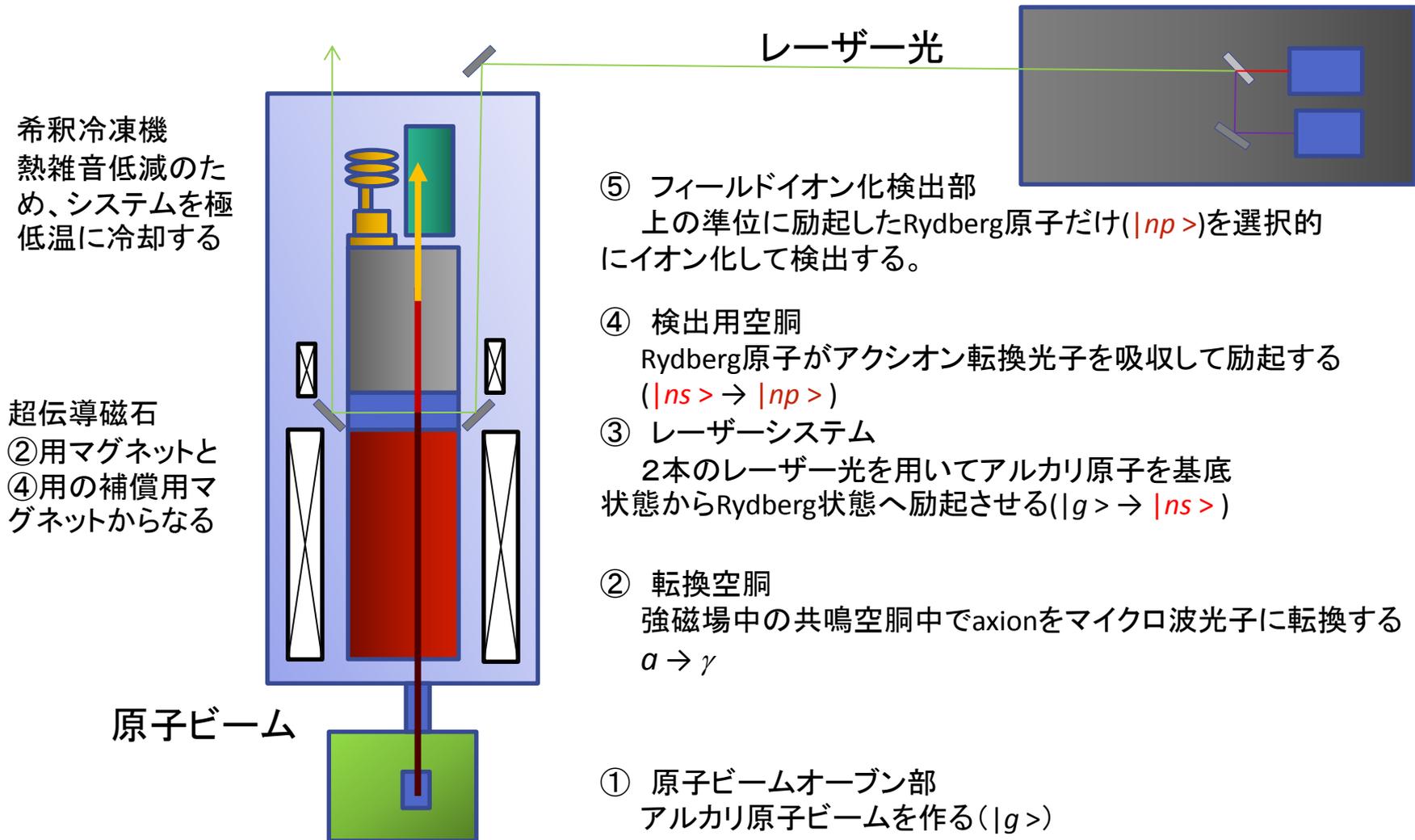
• (主としてアルカリ原子で)最外殻電子が主量子数 $n$ の大きい( $\sim 100$ )状態に励起した原子• Large radius  $\propto n^2$  ( $R = 0.13\mu m$  for  $n=50$ )• Long lifetime  $\tau \propto n^3 \sim \text{msec}$  for  $n \sim 100$ • Energy level  $E_n \propto n^{-2}$ • Energy separation  $E_{np} - E_{ns} \propto n^{-3}$ axion as CDM  $\longleftrightarrow$  $^{39}\text{K}: 110s_{1/2} \rightarrow 110p_{1/2} \quad 10.06 \mu\text{eV}$   
 $^{85}\text{Rb}: 112s_{1/2} \rightarrow 112p_{1/2} \quad 9.98 \mu\text{eV}$ 

• Large E1 transition probability

$$\langle np | e\mathbf{r} | ns \rangle \propto n^2$$

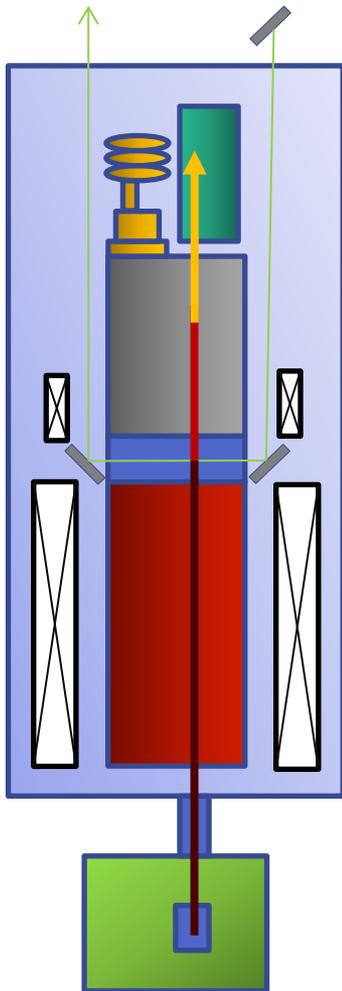
• Low ionization threshold  $F_{\text{ionize}} \propto n^{-4}$ classical ionization threshold : 2.2 V/cm for  $n=110$

## CARRACKの原理



# CARRACK装置

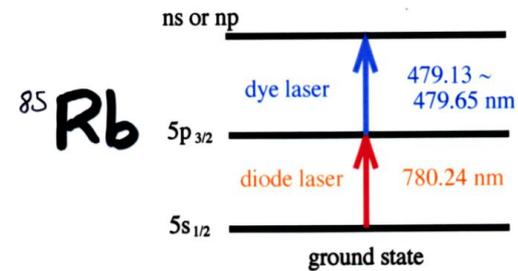
クライオスタット上部



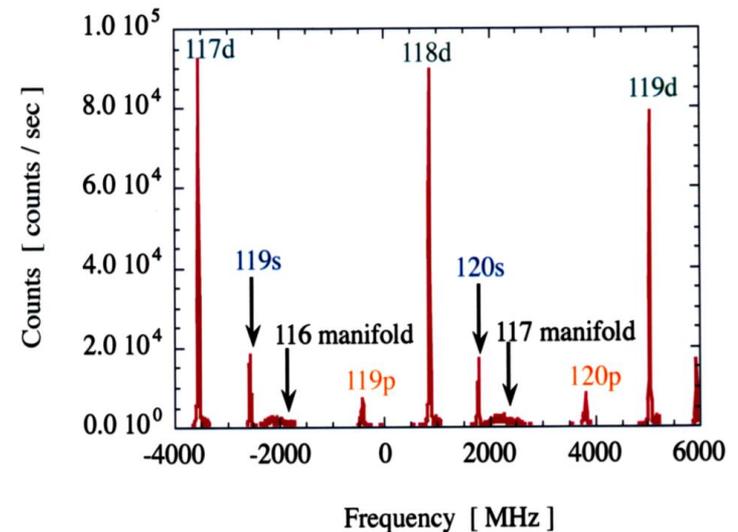
原子ビーム発生装置



Excitation Diagram



Excitation Spectrum



# Rydberg原子による黒体輻射光子の検出

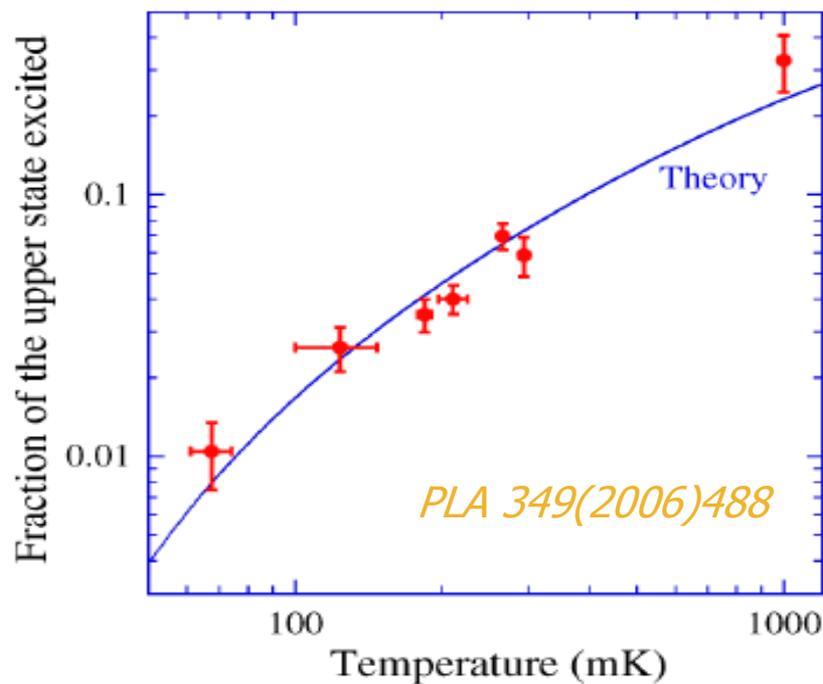
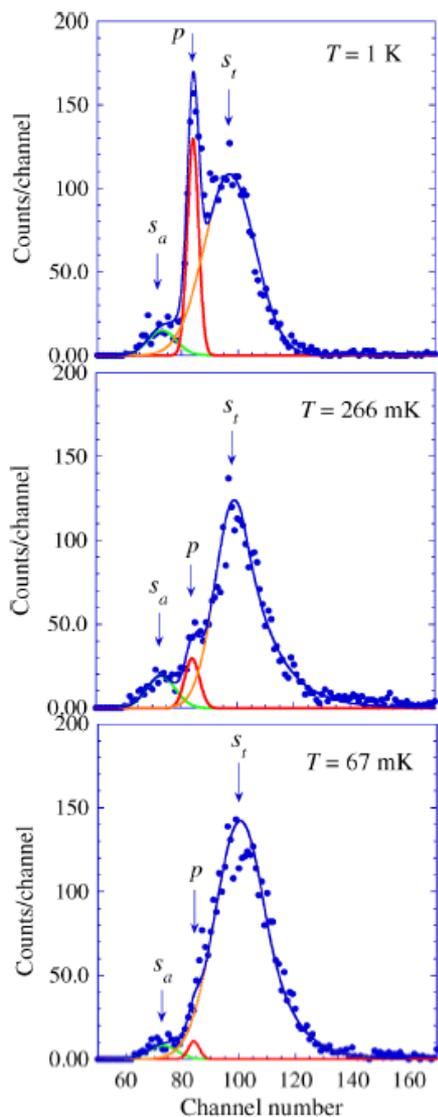


Fig. 4. Temperature dependence of the fraction of the  $111p_{3/2}$  states excited by the blackbody-photon absorption in the cavity. The dependence was measured with the present Rydberg-atom single photon detector. Solid line is a theoretical prediction (see text in detail) in the over-damped regime.

$$111s_{1/2} \Rightarrow 111p_{3/2}$$

2527 MHz    SQL: 121 mK

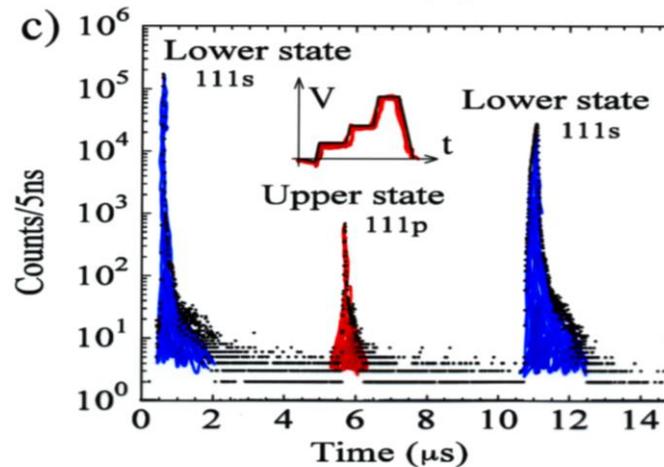
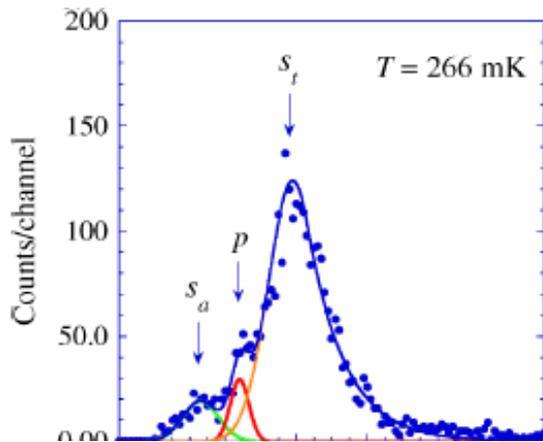
# Background

- Cavity中のStray fieldによる準位の混合
  - Cavity空間的に非一様な浮遊電場が生じる。

$O(10 \text{ mV/cm})$



- 浮遊電場が吸収線幅を広げてしまう。



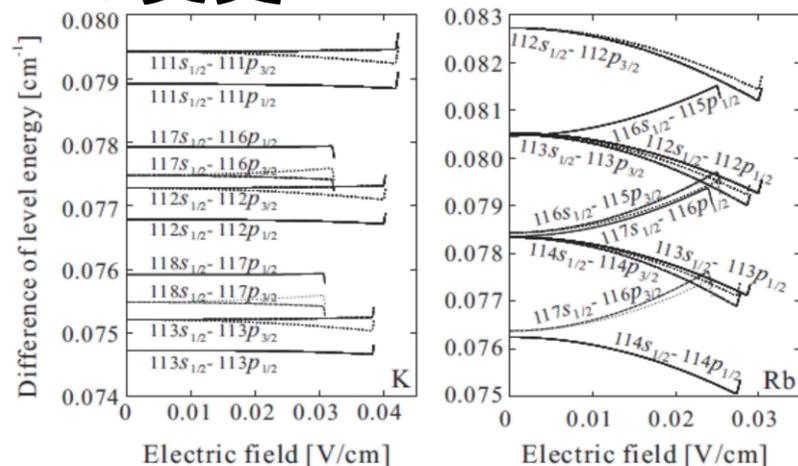
*Ideal situation*

## 解決策

## • 外部電場に鈍感な原子ビームへの変更

(Rb  $\Rightarrow$  K)

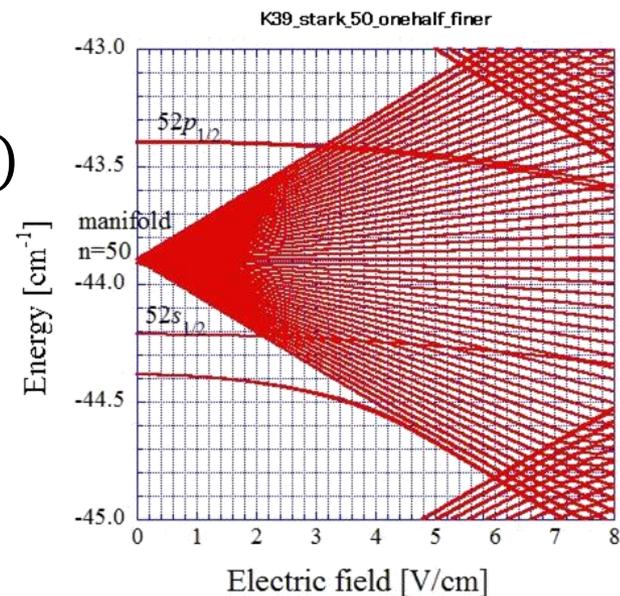
- 励起用レーザーの再整備
- 簡易波長計の整備



## • ターゲット質量領域の変更

- 当初の目標:  $m_a \sim 10 \mu\text{eV}$  (2.4 GHz)
- 新たなターゲット:  $m_a \sim 0.1 \text{ meV}$  (24GHz)

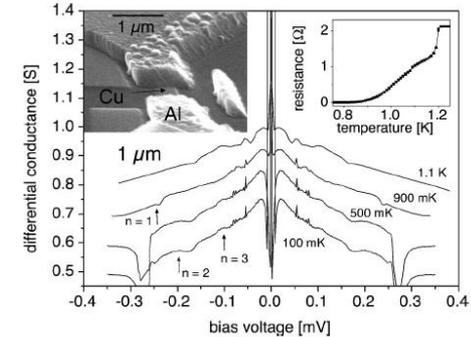
- より低い主量子数 ( $n = 50$  近傍)  
外部電場に鈍感



# ターゲット質量領域について

- small Shapiro step-like signal in Josephson junctions  
(PRB 70 (2004) 180503(R))

- galactic halo axionで説明(PRL 111(2013)231801)
- $m_a = (110 \pm 2) \mu\text{eV}$

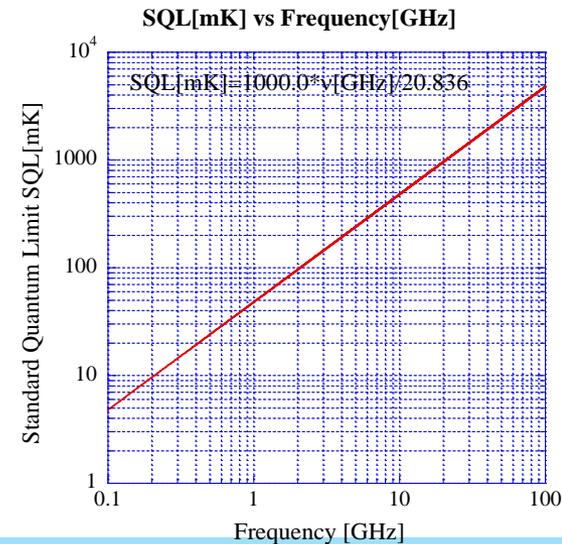
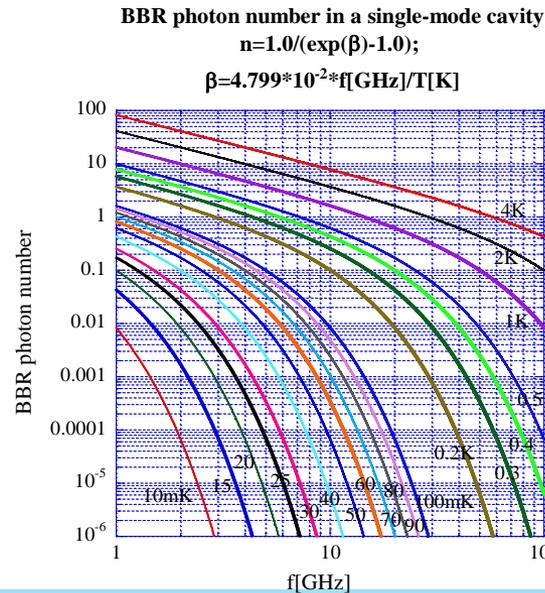


- BICEP2以降の理論計算

- PRL 113(2014)011801, PRL 113(2014)011802, arXiv:1405.1860, etc.
- $m_a = (70 \sim 90) \mu\text{eV}$

- S/Nの向上

- 黒体輻射光子の減少



# 共振空洞

- 高次のモード(TM<sub>0n0</sub>, n=3)を使用する
  - 低次のモード(TM<sub>010</sub>)を使用するとcavityの内径を小さくする必要あり
  - 一方で内部には構造物(Stark電極、tuning rods等)を設置する必要がある
  - デメリット: form factor  $C$  の減少(0.69→0.053)

$$C = \frac{\left| \int_V d^3x \vec{E}_\omega \vec{B}_0 \right|^2}{B_0^2 V \int_V d^3x \epsilon |\vec{E}_\omega|^2}$$

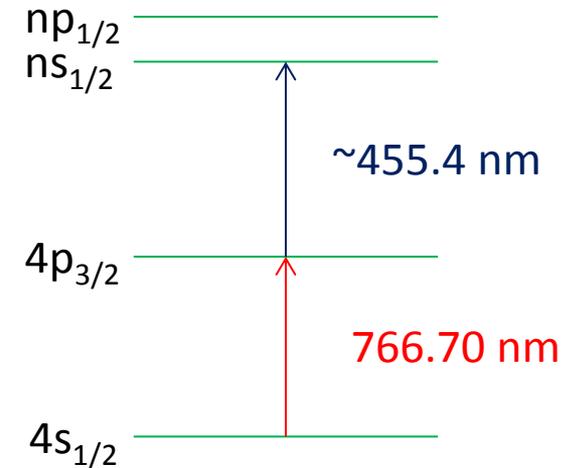
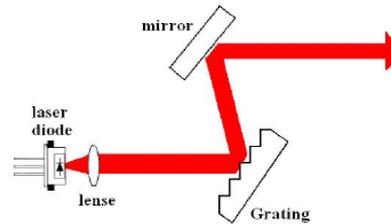
➡ efficiencyを上げるため、フィールドイオン化用パルス電場にタイミングを合わせたbunch化ビームを生成する。

# 励起用レーザーの再整備

- 2段階励起

- 半導体レーザー

ECDL(外部共振器型)



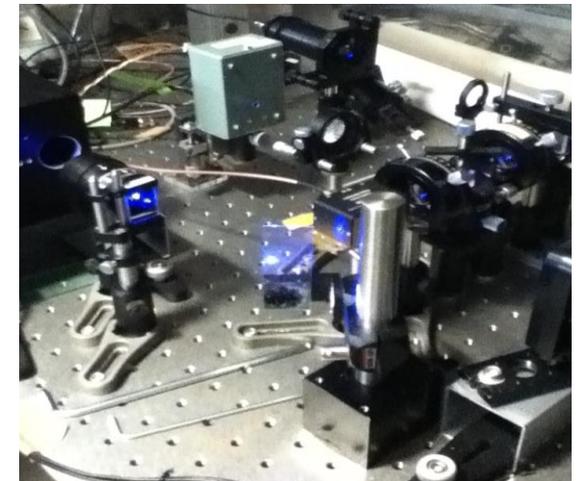
- 周波数の安定化

- 初段: 外部の原子セルを利用して飽和吸収分光法でロック

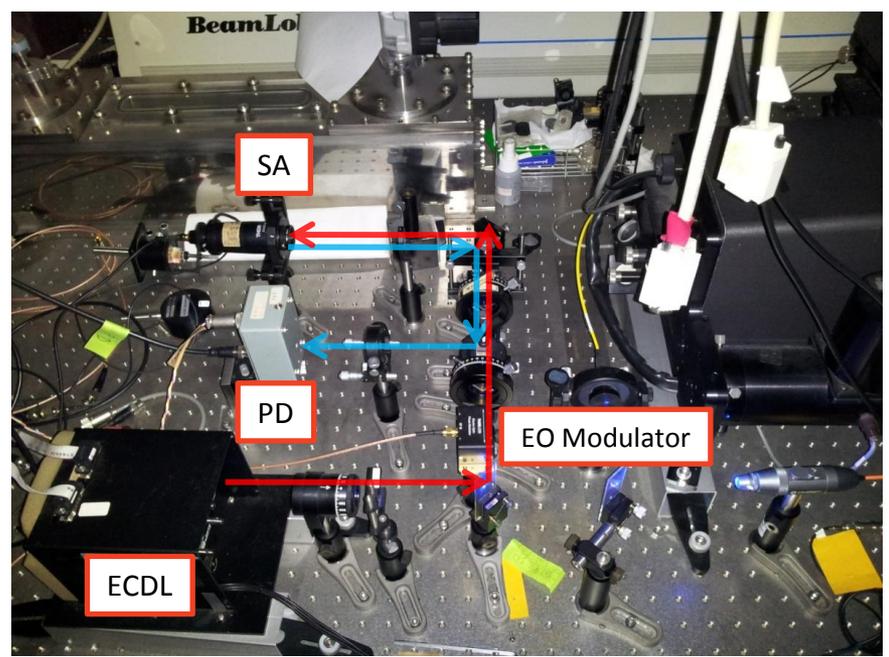
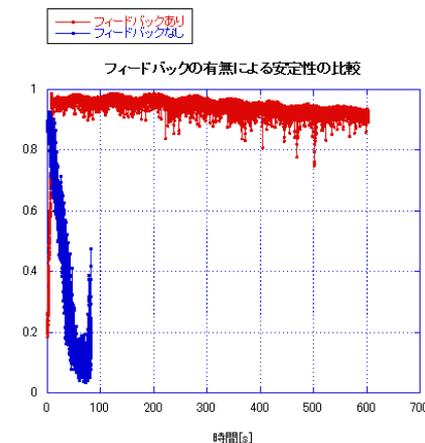
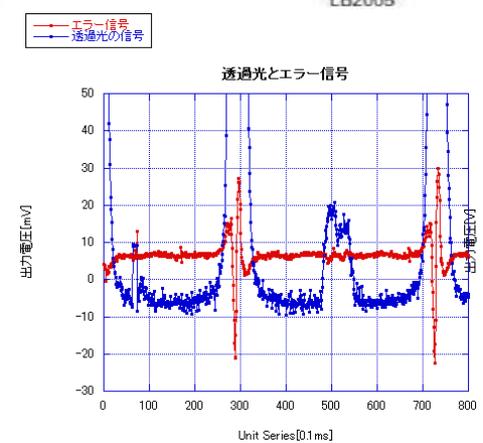
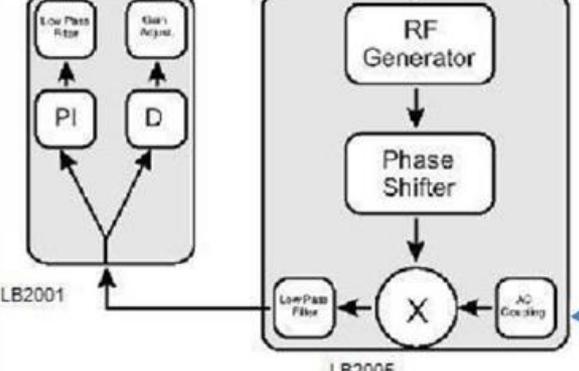
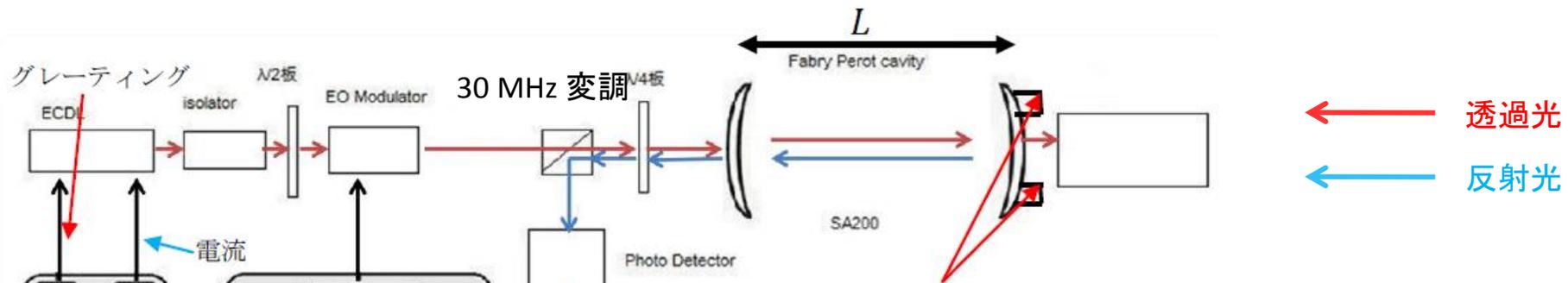
➡ レーザー素子、原子セルの交換

- 2段: 外部のFabry-Perot共振器にPDH法でロック

➡ 新規に整備



# 2段目励起レーザー



実際の光学系

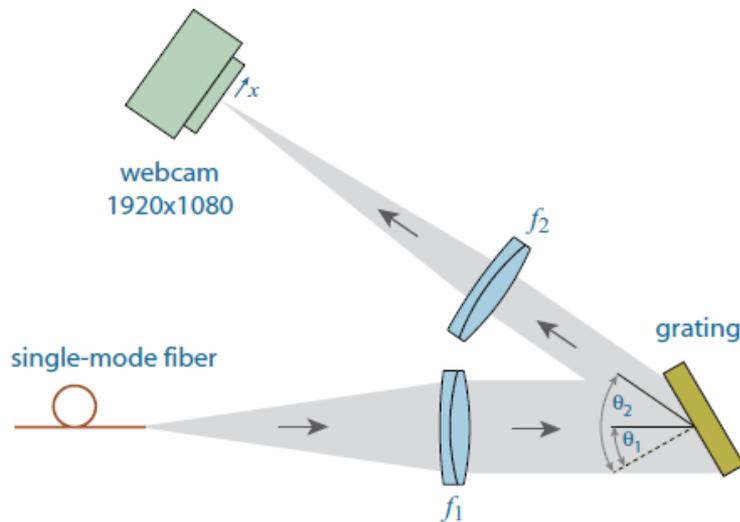
# 簡易波長計の整備

1. ファイバーからの光はレンズ1でコリメートされる。
  2. その光は回折格子で回折され、そのときの回折角は波長により異なる。
- $$\sin \theta_1 + \sin \theta_2 = \frac{\lambda}{d}$$
- Grating equation
3. 回折光はレンズ2で集束され、焦点付近に置かれたWeb Cameraの撮像素子に投影される。
  4. このとき回折角の違いにより、波長に対して各ピクセルごとの位置依存性が生じる。

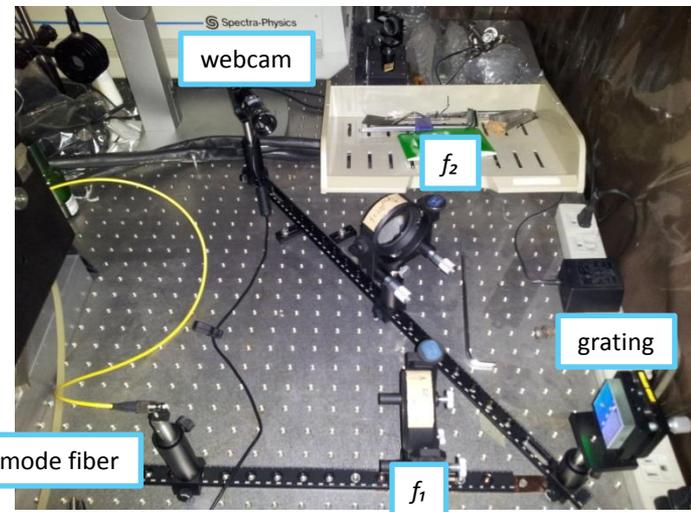
$$x = -f_2 \theta_2 \quad (x = -f_2 \Delta \theta_2)$$

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{f_2}{d \cos \theta_2}$$

波長の変化 $d\lambda$ に対する  
撮像位置の変化 $dx$ の関係式



新波長計概要図[2]

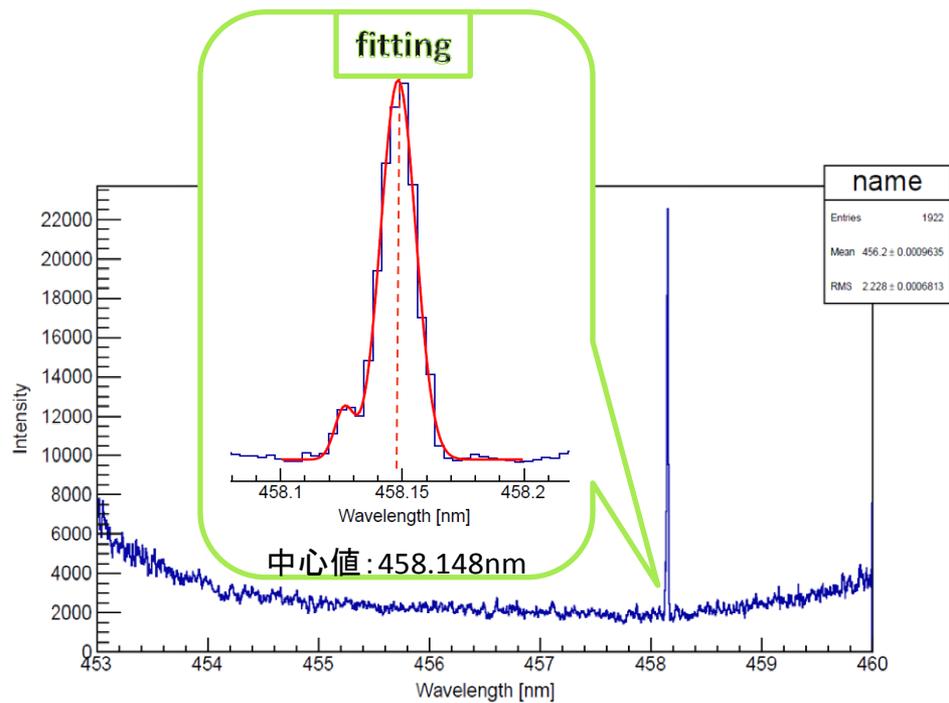
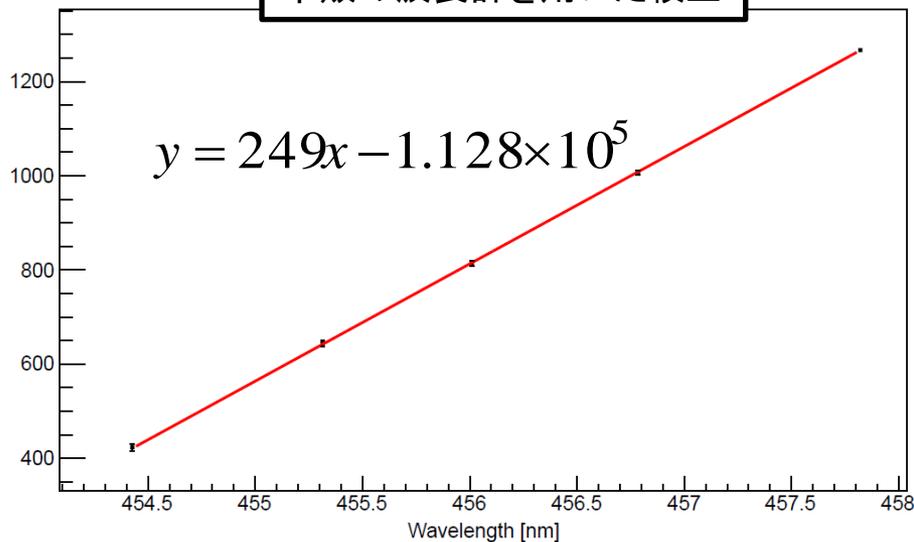


光学系セットアップ

# 簡易波長計の性能

		計算値	測定結果
1pixel当たりの波長変化		4.10 pm/pixel	4.01pm/pixel
測定可能な波長範囲		$\Delta=7.792\text{nm}$ (452.973nm~460.766nm)	$\Delta=7.711\text{nm}$ (453.012nm~460.723nm)
		理想的な測定精度	測定結果
測定精度 (FWHM)	照射pixel	1.40 pixel	4.60 pixel
	波長換算	5.74 pm	18.4 pm

市販の波長計を用いた較正



# バンチ化原子ビーム

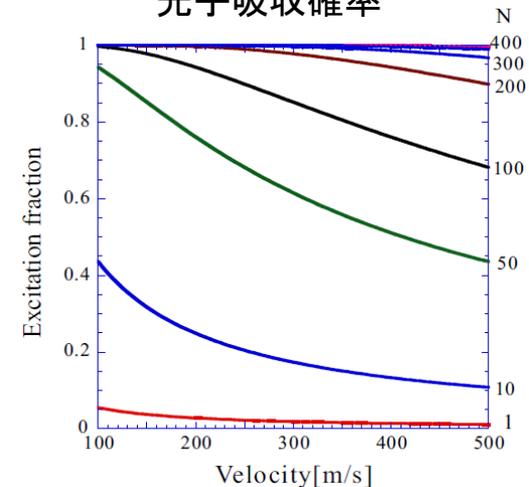
## 原子ビームバンチ化・高輝度化

Velocity selectorを用いてビームの速度を選別し、  
ビーム軸方向の位置・速度広がりを取り除く

## 共振空洞内でaxion検出に必要なビーム

- 1バンチ内の原子数:  $10^2 - 10^3$  atoms
- ビーム速度: 300[m/s]
- ビーム軸方向
  - 位置広がり: 4[mm]
  - 速度広がり: 1[m/s]
- ビーム垂直方向
  - 位置広がり: 4[mm]
  - 速度広がり: 1[m/s]

## 光子吸収確率



## 問題点

オーブンからの黒体輻射を避けるためにオーブン(バンチ化装置)を共振空洞から遠ざけなければならない。

解決法

## バンチ化の前に

- 高輝度化
  - Zeeman加速
- ビーム垂直方向の位相空間圧縮
  - レーザー冷却

# バンチ化原子ビーム生成方法

●以下のプロセスでバンチ化原子ビームを生成する

## 1. 原子オーブン

- ▶ 加熱された原子がハニカムパイプの穴から飛び出し、原子ビーム発生

## 2. レーザー冷却(第1圧縮)

- ▶ Zeeman加速の間の広がりを抑えるために、横方向の運動量を圧縮

## 3. Zeeman加速

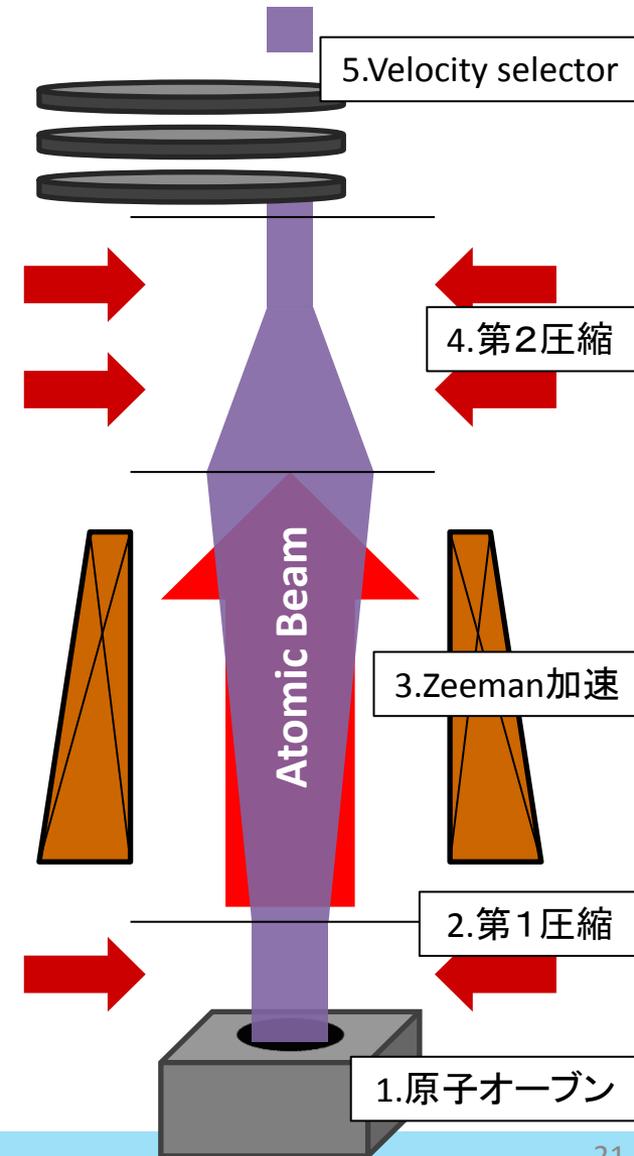
- ▶ 1バンチ内の原子数を増やすために、ビームの速度の遅い成分を加速して300 m/sにする

## 4. レーザー冷却(第2圧縮)

- ▶ 加速時に広がった横方向の位置と速度を圧縮。共振空洞までの広がりを抑制

## 5. Velocity selector

- ▶ スリットが開いた円板を回転させ、速度300m/sの原子のみを選別し、バンチ化



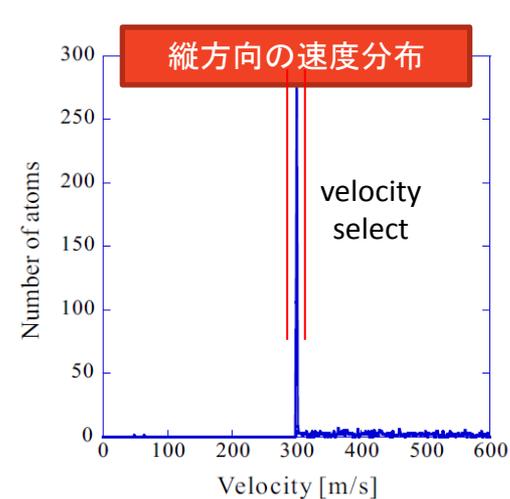
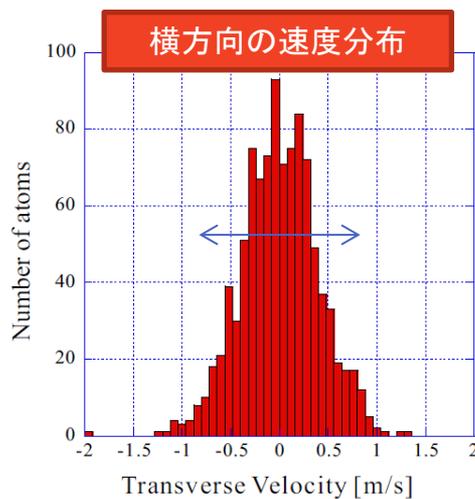
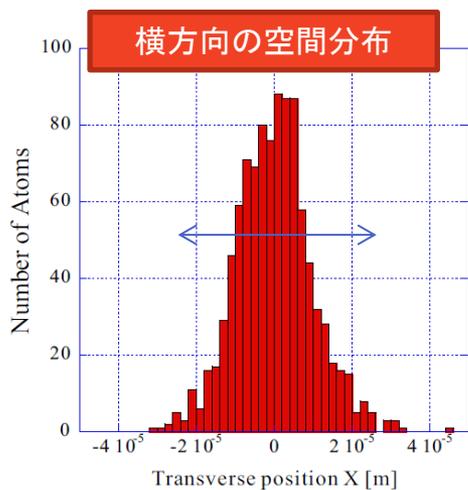
# 原子ビームシミュレーション

- レーザー冷却・ゼーマン加速のシミュレーション
  - 共振空洞内での要請に対する最適化

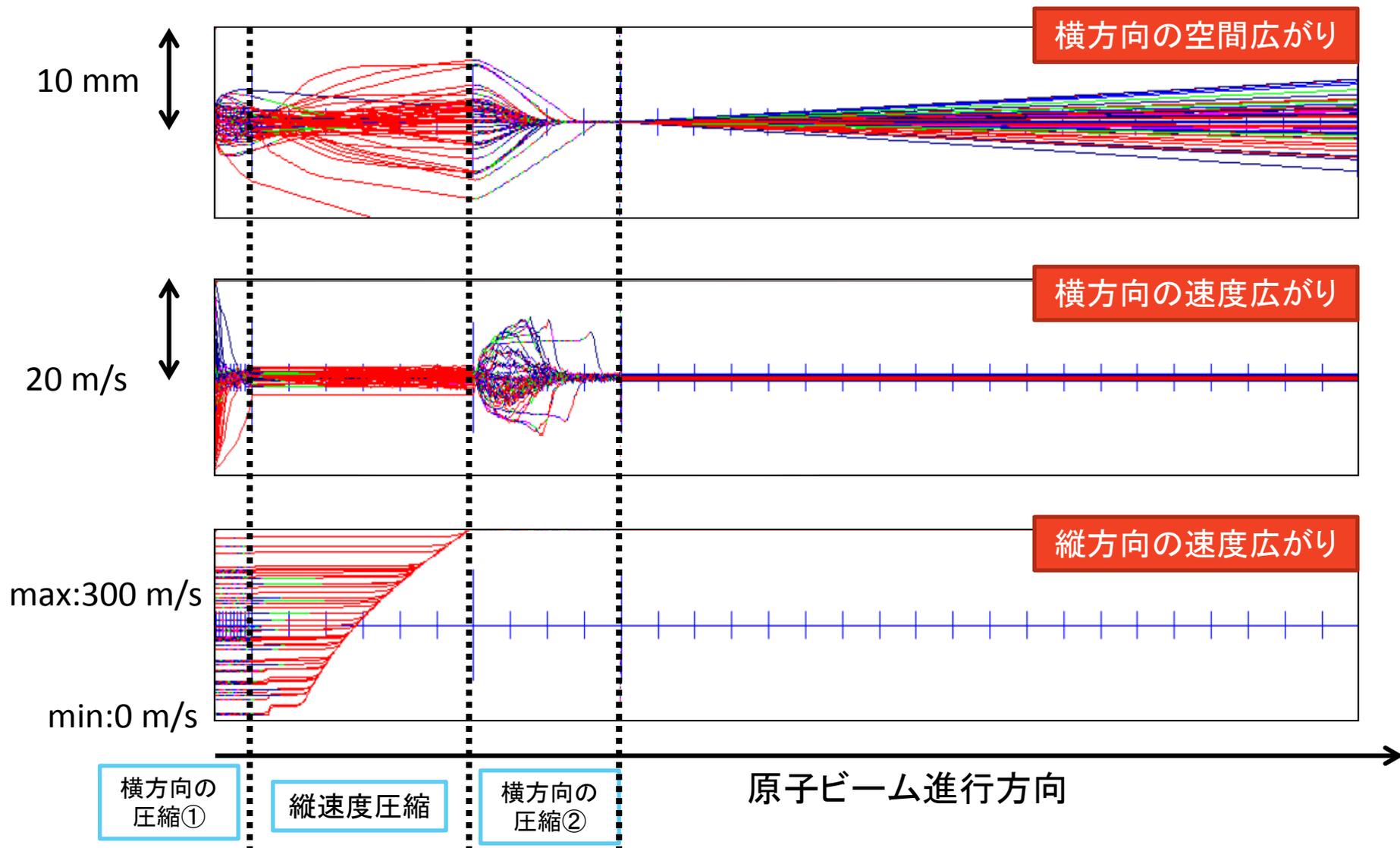
E.J.D. Vredenburg, K.A.H. van Leeuwen, Am. J. Phys. 71, 760 (2003)

	横位置広がり[mm]	横速度広がり[m/s]	縦速度広がり[m/s]
要請	4	1	1
シミュレーション結果	5	0.8	1

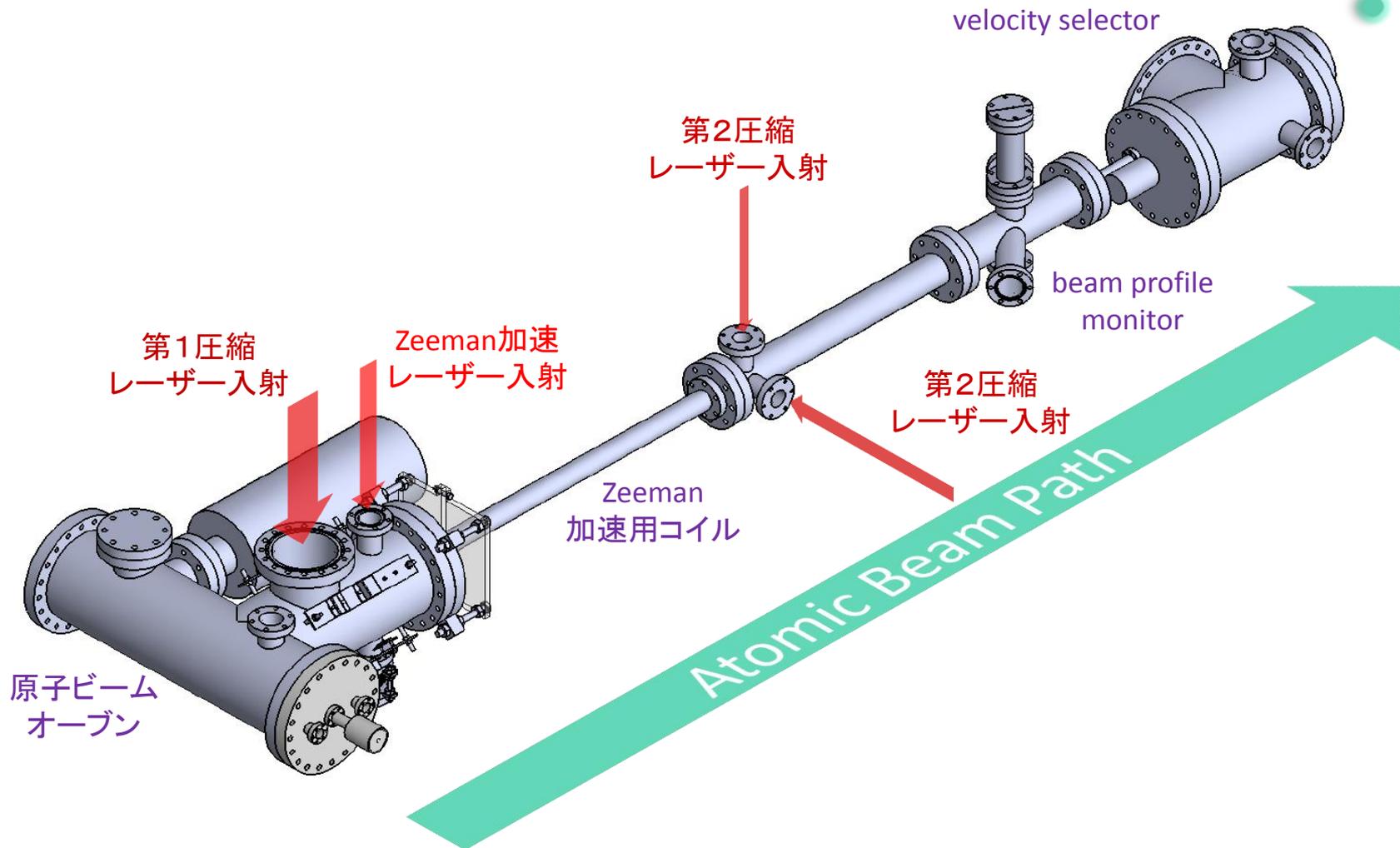
第2圧縮終了後の空間・速度分布(シミュレーション) ⇒ 以後は2mの自由空間



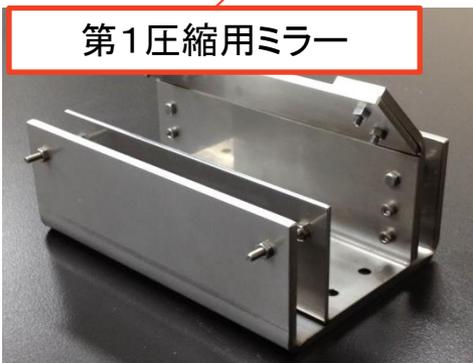
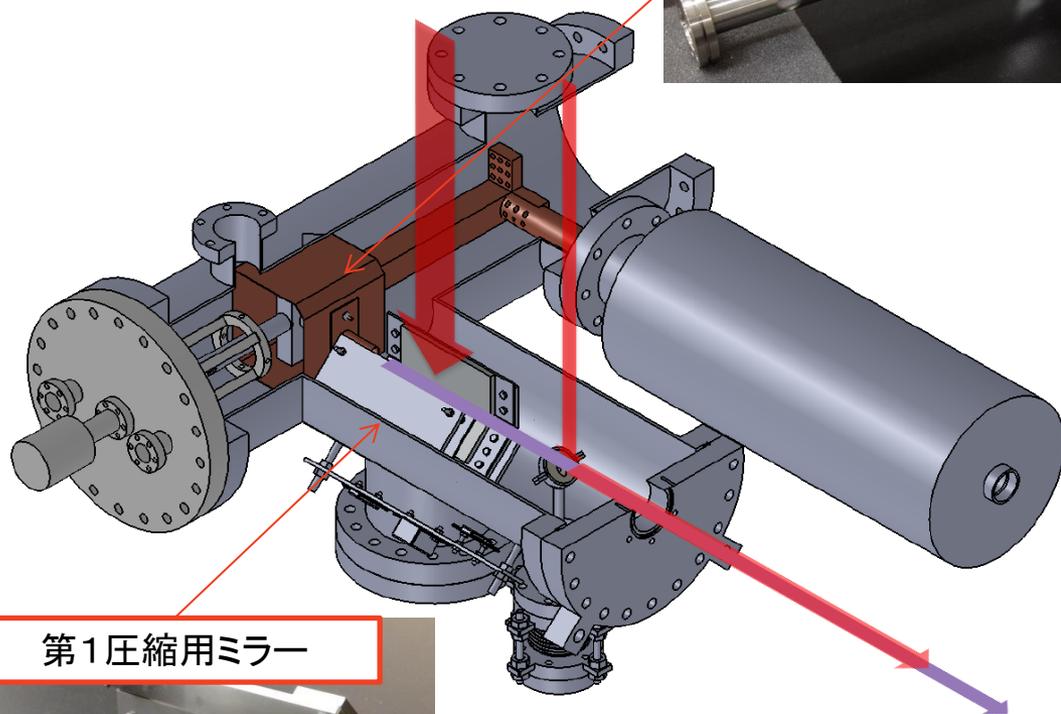
# 原子ビームシミュレーション



# バンチ化原子ビーム生成装置の設計



# 原子ビームオーブン～第1圧縮



# まとめ

## □ ダークマターアクシオン探索実験装置CARRACK

- ◆ Rydberg原子を単一光子検出器として使用することで、SQLを超える観測が可能である。

## □ 最後に残った雑音源である浮遊電場対策

### ◆ ターゲット質量領域の変更

- $m_a = 0.1 \text{ meV}$  近傍をターゲットとする
- 浮遊電場の影響の低減、BBR photonの低減が期待できる。

### ◆ $^{39}\text{K}$ Rydberg原子ビーム実現のためのレーザー系の開発

- 二段励起用の2台のレーザー(ECDL)と波長制御システムの製作・整備を行った
- 2段目励起レーザーの発振波長をモニターするための簡易波長計の製作を行った。

### ◆ 浮遊電場の動的制御のためのバンチ化原子ビーム生成装置の開発

- 原子ビームのバンチ化・高輝度化を目指して原子ビームシミュレーションを行った。
- 上記の結果をもとに、レーザー圧縮・加速に必要な磁場の設計を行い、装置の設計・開発を進めた。