

# アクション探索実験について ～CARRACK実験～

時安 敦史

東北大学 電子光物理学研究センター

2017. 1. 28

# 目次

---

## 1. 物理的動機

- アクシオンとは何か？
- 検出原理
- 他施設での研究状況

## 2. CARRACK実験

- 実験装置
- 研究実施状況
- 開発事項

## 3. 今後の計画、およびその他の話題

# アクシオンとは

## ☆Strong CP問題

QCD LagrangianでCP対称性を破る項( $\theta$ 項)  $\mathcal{L}_{\text{strong CP}} = \bar{\theta} \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{a\mu\nu} \tilde{G}_a^{\mu\nu}$

↔ 実験的には強い相互作用でCPは保存

$\theta < 10^{-11}$  (中性子EDMの結果より) ←なぜこんなに小さい値なのか?

## ☆PQ対称性を仮定

対称性が破れることによって動的に $\theta$ を打ち消す。

破れによって生じる南部ゴールドストーンボソン→アクシオン

## ☆アクシオンの性質

- 非常に軽い ( $< 1$  eV)
- 相互作用が弱い ( $g \sim 10^{-10}$ )
- 二つの $\gamma$ に崩壊(結合定数  $g_{a\gamma\gamma}$ )
- $Q=0, J^P = 0^-$

検出が困難  
未発見

### アクシオンの呼称

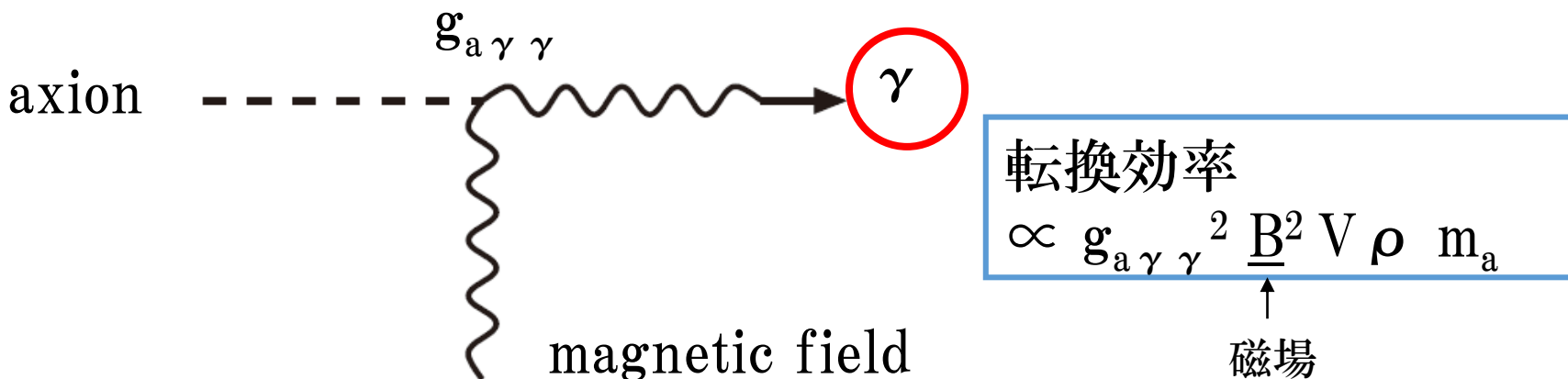
~100 keV : 標準アクシオン  
(実験で否定)

~meV : 太陽アクシオン

~ $\mu$ eV : 宇宙アクシオン

# 検出原理

## 1. プリマコフ効果でアクシオンを光子に転換



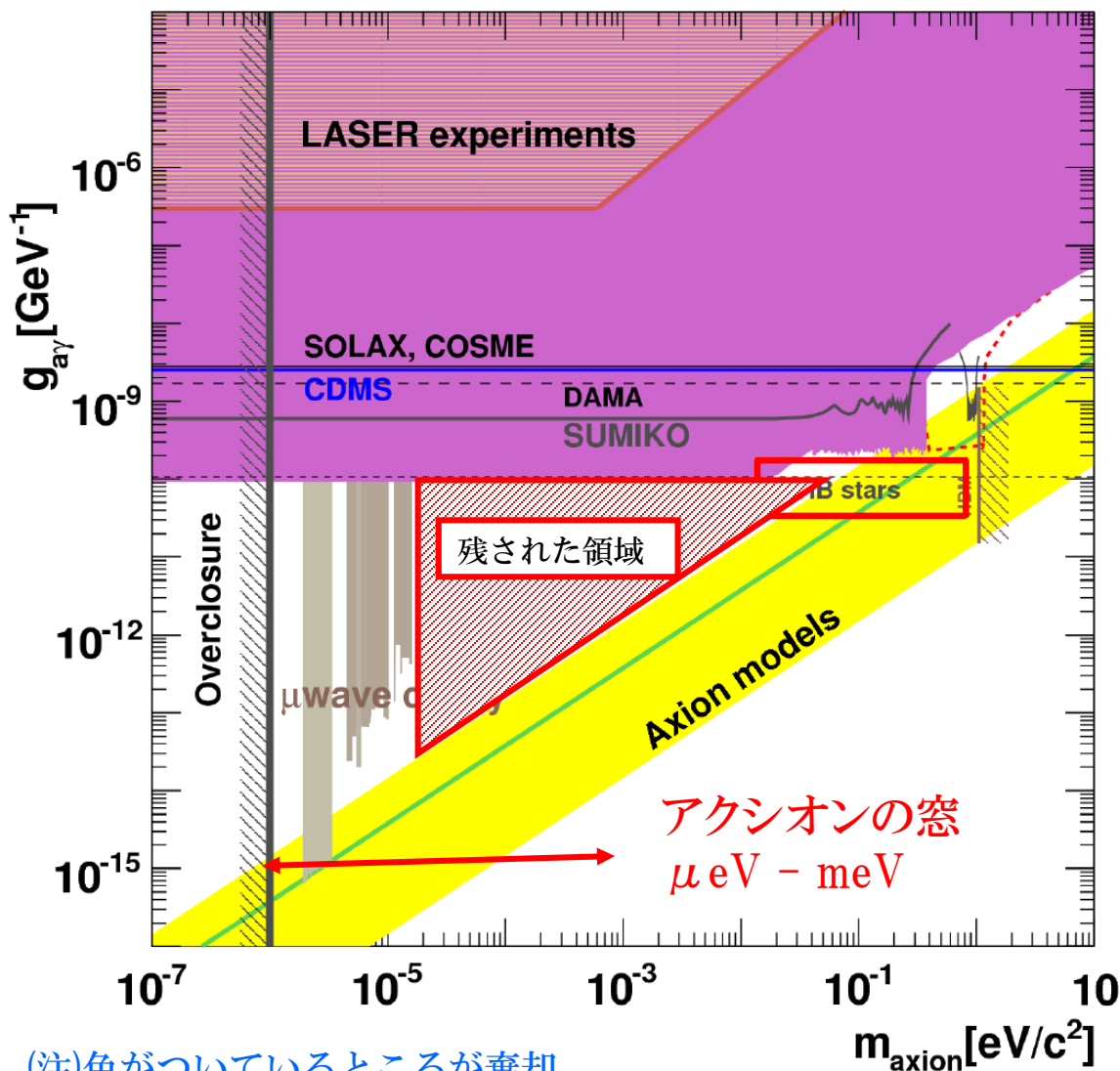
## 2. 光子を検出

- X線領域 (太陽アクシオン)  
半導体検出器 (CAST, SMICO)
- マイクロ波領域 (暗黒物質アクシオン)  
CARRACK Rydberg原子ビーム (後述)  
ADMX マイクロ波アンプ

$$m_a = 10 \mu\text{eV} \\ \rightarrow 2.4 \text{ GHz}$$

$$m_a = 100 \mu\text{eV} \\ \rightarrow 24 \text{ GHz}$$

# 現在までの探索結果



(注)色がついているところが棄却

- 天体観測からの制限
  - 1987A
  - 赤色巨星
- Laser実験
  - PVLAS
  - ALPS
- 太陽アクシオン ( $\sim meV$ )
  - CERN CAST
  - SMICO
  - IAXO (計画中)
- 宇宙アクシオン ( $10^{-5}eV$ )
  - CARRACK (Kyoto, 日本)
  - ADMX (Washington大, 米)
- $10 \mu eV - 50 \mu eV$ の領域での実験
  - ADMXGen2 (Washington大, 米)
  - ADMX-HF (Yale大, 米)
  - CULTASK (CAPP, 韓国)

→ within several year

# 理論計算からの示唆

## ☆Planck, BICEP2後、宇宙論からの予測値

(Phys. Rev. Lett 113(2014)011801, Phys. Rev. Lett. (2014)011802  
, Phys. Rev. D 90 (2014) 043534)

- CDMの異方性の精密測定。→インフレーションの知見。
- アクシオンの予測質量:  $70 - 120 \mu\text{eV}$

## ☆格子QCDによる計算 (S. Borsanyi, Nature 539 69-71)

- アクシオンがインフレーションの後にできたと仮定。
- アクシオンの予測質量:  $50 - 1,500 \mu\text{eV}$
- アクシオンがインフレーション前に出来たというシナリオでは質量は計算不可。(10  $\mu\text{eV}$ 程度のアクシオンの存在を否定したわけではない。)

- 理論的に重い領域 ( $m_{\text{axion}} > 50 \mu\text{eV}$ ) が注目されつつある。

# 50 – 100 $\mu$ eV領域での探索実験

☆現時点で遂行中の実験は無い。

☆ 将来計画（この質量領域では2例のみ。他：CASPer, IAXO…）

– ARIADNE (CAPP, 韓国) [arXiv,1611.05876v1, 1611.04549v1]

手法 : NMR (magnetometry)

質量領域: 1 – 600  $\mu$  eV

現状 : 実験提案段階。data taking start in 2019.

– MADMAX (Max-Planck研究所、ドイツ) [arXiv,1611.05876v1, 1611.04549v1]

手法 : disk haloscope

質量領域: 40 – 400  $\mu$  eV

現状 : 設計中。1<sup>st</sup> result within several years.

**この領域の実験は5年は出ないだろう！**

**→ CARRACK実験の新目標**

# 目次

---

## 1. 物理的動機

- アクションとは何か？
- 検出原理
- 他施設での研究状況

## 2. CARRACK実験

- 実験装置
- 研究実施状況
- 開発事項

## 3. RCNPにおける研究計画



# 検出原理(再掲)

1. アクシオンを強磁場でマイクロ波光子に転換
2. マイクロ波光子の検出 (High-Q空洞)
3. 磁場に対する計数率の変化を測定すればアクシオン

Background: 黒体輻射

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

$T_s$  : Systemの温度 希釈冷凍機で  $T = 10 \text{ mK}$

# CARRACK実験

Cosmic Axion Research with Rydberg Atoms in Cavities in Kyoto. (from 1993)

0 (10)  $\mu\text{eV}$ のアクシオン探索  
→ 0 (1) GHz の  $\gamma$  線測定

☆ Rydberg原子ビームを用いた単一光子検出  
→ 量子限界(SQL)以下の実験感度

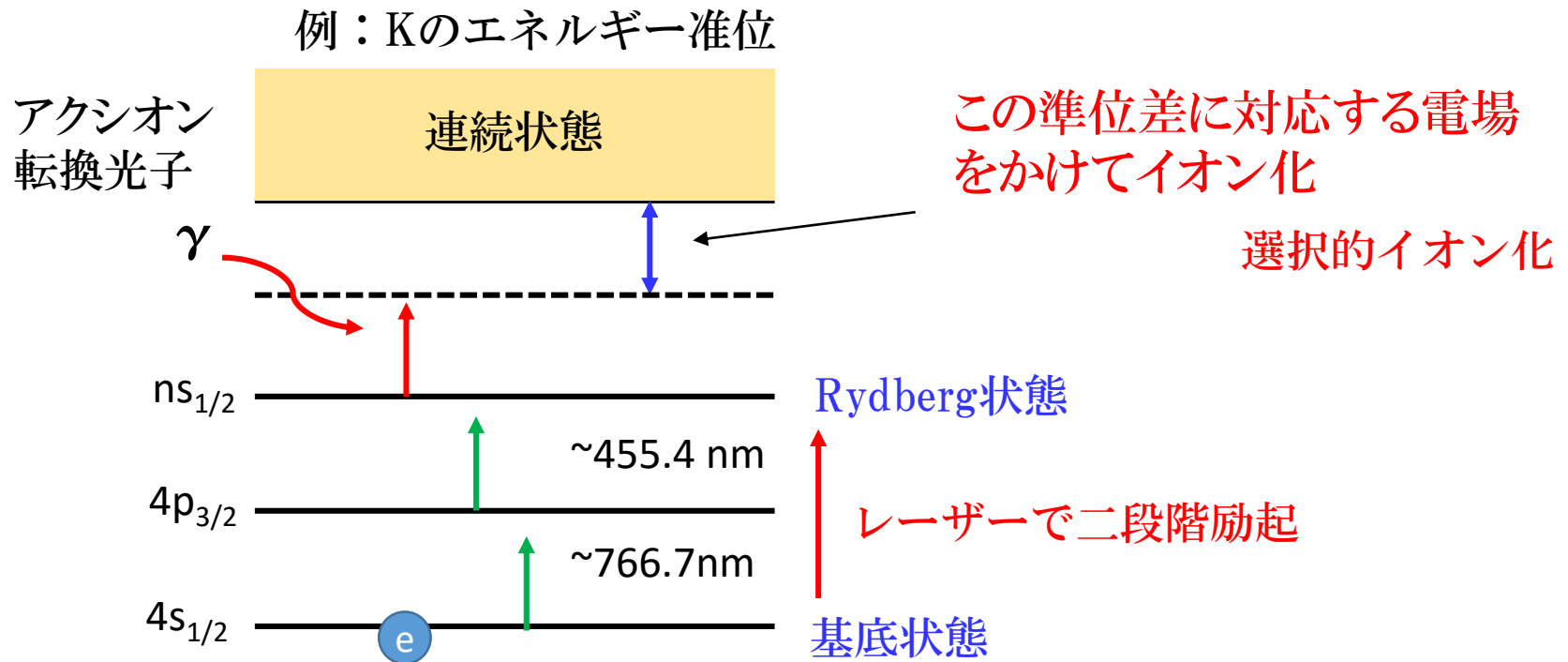
# 共同研究者

- 時安 敦史 (東北大学 助教)
  - 小川 泉 (福井大学 准教授)
  - 中島 恭平 (福井大学 特命助教)
  - 舟橋 春彦 (京都大学 教授)
  - 松原 明 (京都大学 准教授)
  - 今井 憲一 (京都大学 名誉教授)
  - 松木 征史 (京都大学 元教授)
  - 中野 貴志 (RCNP 教授)
- + 学部、修士学生 (2名程度)

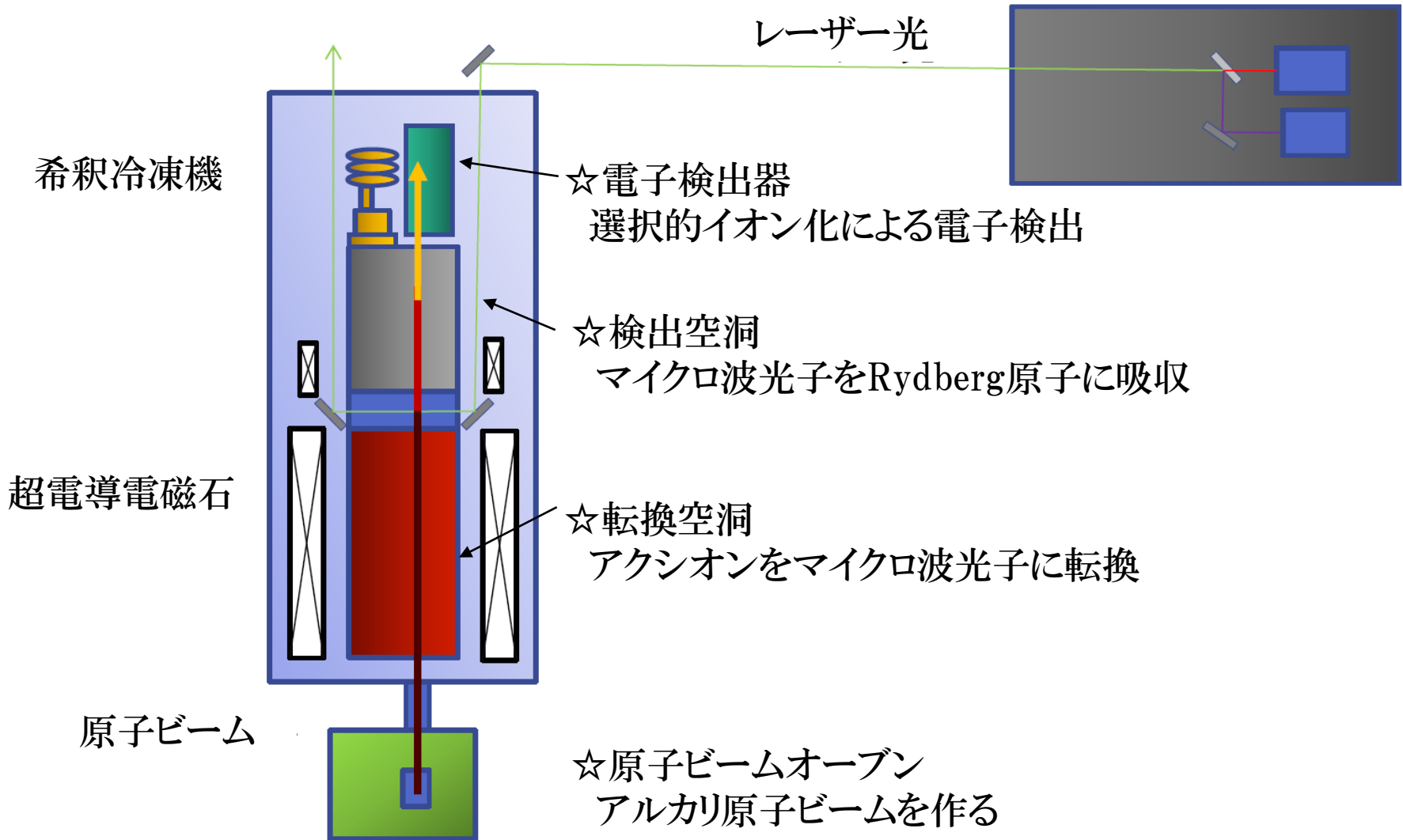
# 単一光子検出：選択的イオン化

## ☆Rydberg原子

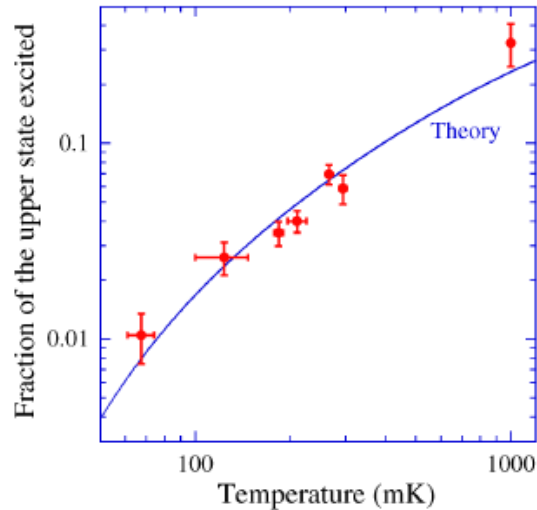
- 主量子数  $n \sim 100$ 状態に励起した原子
- マイクロ波光子に対する高い反応性



# CARRACK実験装置

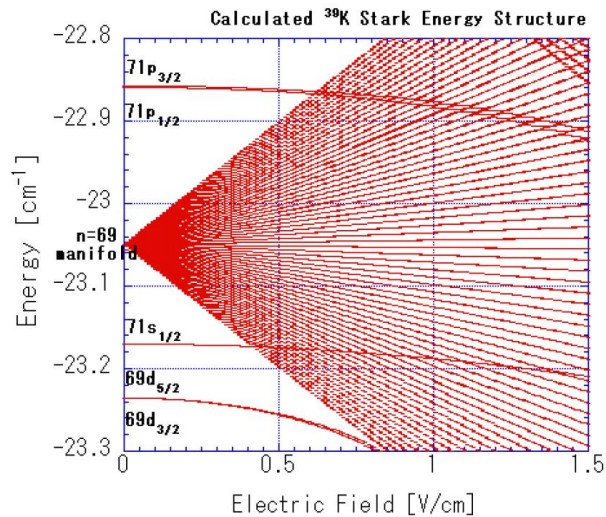


# 現時点での研究実施状況



70mKの黒体輻射測定に成功！

原理検証は終了



残る問題点 : 浮遊電場  
→ 解決策の考案、開発。

But...

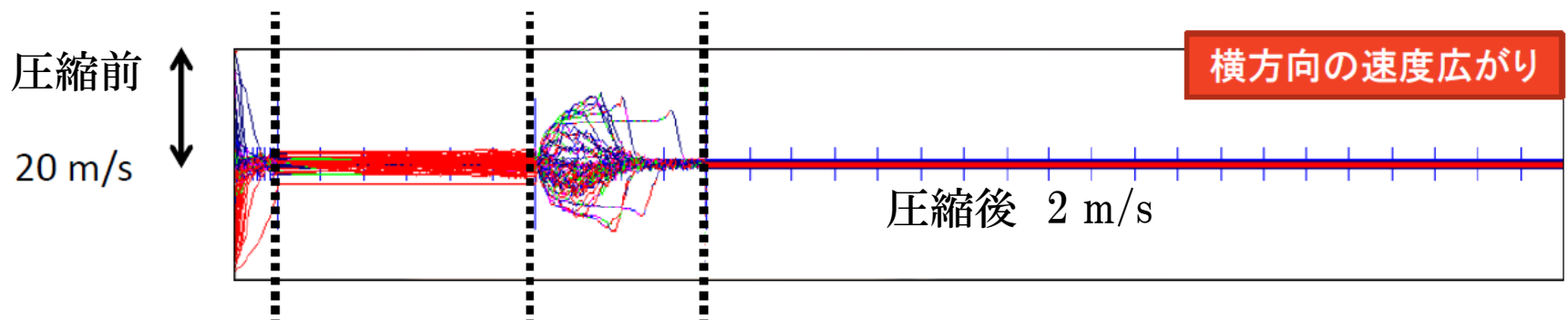
実験所の閉鎖により実験の一時中断 (2014)

# CARRACK実験の戦略

- 大阪大学核物理研究センター(RCNP)において新プロジェクト申請中(代表:小川、時安)。
- 探索質量の変更:  $10 \mu\text{eV} \rightarrow 50 - 200 \mu\text{eV}$
- どうするか?
  - 高次モード $\text{TM}_{030}$ の利用 + バンチ化Rydberg原子ビーム
  - 新手法(光イオン化)
- 場所に関しては未定(地下?)

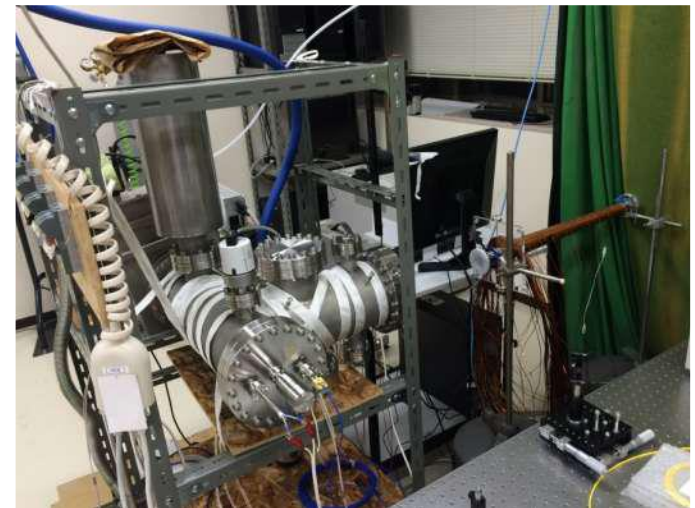
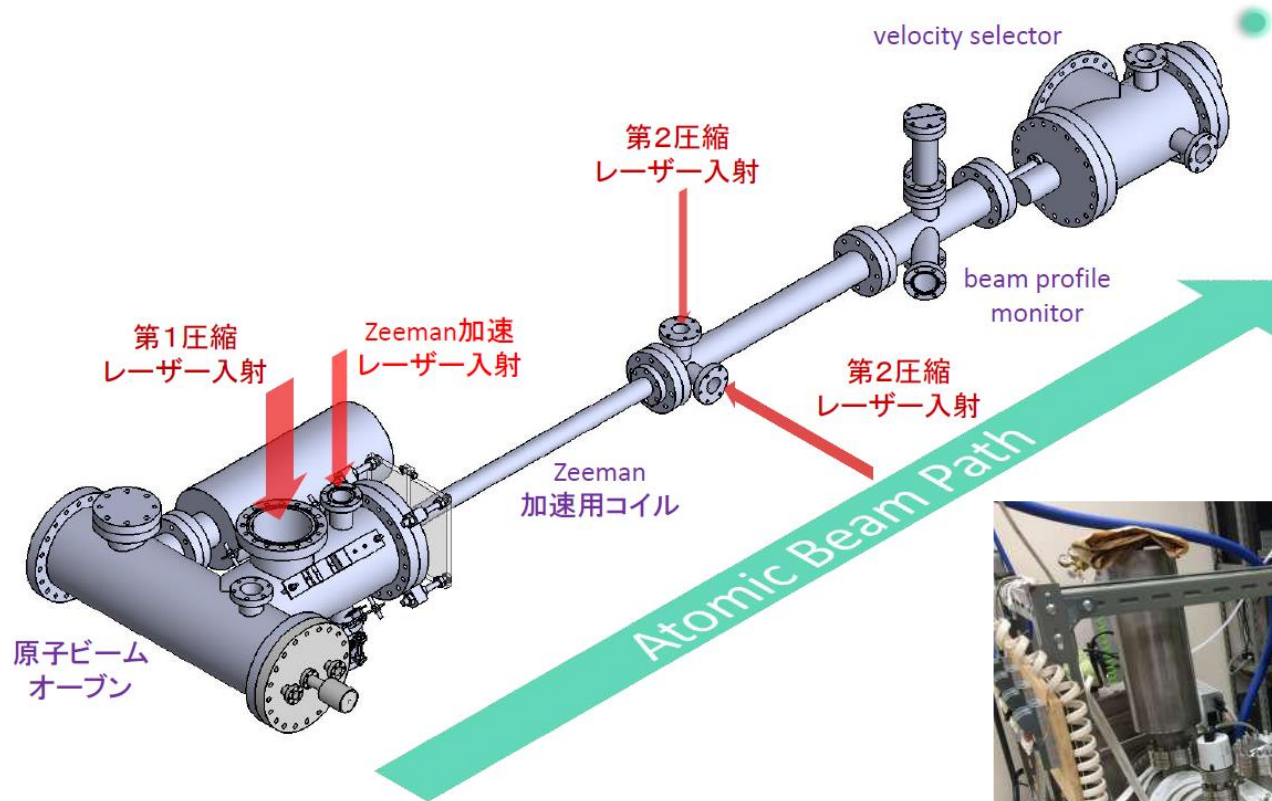
# Rydberg原子ビームのバンチ化

- Rydberg原子ビームをバンチ化し、検出領域内で単一速度1バンチのみ存在  
→浮遊電場の影響軽減、Duty Factorの改善。
- Rydberg原子ビームの圧縮バンチ化初の試み。  
→物性への応用
- レーザー冷却、Zeeman加速を用いて縦横両方向の位置と速度を圧縮。回転ディスクでバンチ化。





# Rydberg原子ビームバンチ化装置



- 機器の一部は製作済み。
- テストはまだ。

# 目次

---

## 1. 物理的動機

- アクシオンとは何か？
- 検出原理
- 他施設での研究状況

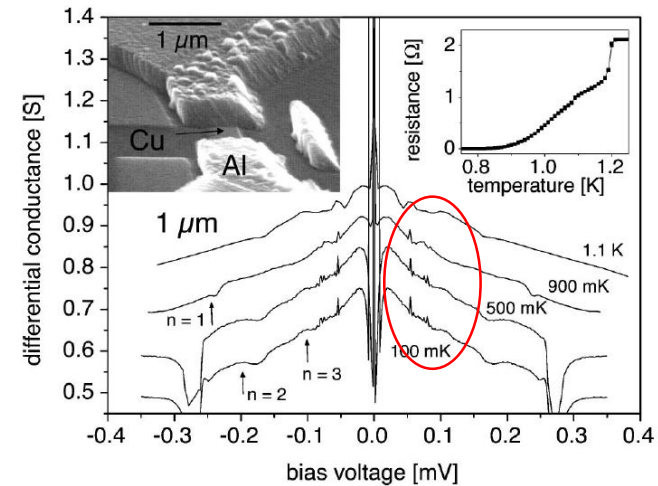
## 2. CARRACK実験

- 実験装置
- 研究実施状況
- 開発事項

## 3. 他の話題

# その他の話題

- ジョゼフソン結合のC-Vカーブで謎のピーク 観測 (PRB70(2004),180503R)
  - アクシオン運動方程式とJJ方程式の類似性に注目 (PRL111(2013)231801)
  - $m_a = (110 \pm 2) \mu eV$
  - $\rho_{DM} = 0.05 GeV/cm^3$



- 追実験を遂行中 (東北大、理研、KEK、デルフト大)
  - Nb-Al-Nbで素子製作。
  - SQUIDを用いた測定系を準備中。
  - 来年度より測定開始。長期runにより季節変動の確認。

# まとめ

- アクシオン:強い相互作用のCP問題の解決。  
暗黒物質の候補。
- $m_{\text{axion}} < 50 \mu\text{eV}$ の領域では強力な実験が遂行中。
- $m_{\text{axion}} > 50 \mu\text{eV}$ に興味を持たれつつある。
- RCNPにおいて新CARRACKプロジェクト申請中。
- SNS素子を使ったアクシオン探索も遂行中(2年以内に結論をつける)。
  
- 展望(私見)
  - 3年後 : 基礎技術の確立(CARRACK)。1<sup>st</sup> Result?
  - 5年後 : 50 — 200  $\mu\text{eV}$ 領域の探索(CARRACK)。  
50  $\mu\text{eV}$ 以下の領域の探索(ADMX)。
  - 10年後 : 既存実験で100  $\mu\text{eV}$ に達成(ADMX)。DFSZまで極限まで達成か?  
選択的フィールドイオン化に移行(CARRACK)。  
探索領域の変更。共振空洞以外の手法の模索。
  
- 厳しいご意見お待ちしております。