

QSECセミナー  
2002.10.21

# リュードベリ原子を用いた 共振空洞での単一光子検出と ダークマターアクシオン探索への応用

山本克治

(京都大学 工学研究科 原子核工学専攻)



# 1 . 光子数測定 (特にマイクロ波領域)

古典的測定: 古典電磁場の測定

- ヘテロダイン法 (信号波と基準波の混合 周波数ビート)

$$\overline{E} \cos \theta = \langle \alpha | E | \alpha \rangle, \quad |\alpha\rangle : \text{コヒーレント状態}$$

$$S (\text{信号}) = n (\text{光子数})$$

$$N (\text{雑音}) = \Delta n (\text{量子揺らぎ}) + kT / \hbar \omega (\text{温度雑音})$$

$$\Delta n = \sqrt{n}, \quad \Delta n / n \ll 1 (n \gg 1)$$

しかし,

$$S / N \approx n / \Delta n \ll 1 \quad (n \ll 1) \text{ たとえ, } kT \ll \hbar \omega \text{ でも !!}$$

## 長時間測定

平均1個よりずっと少ない光子数を計るためには。

量子的測定： 光子数のみを計る (位相は測定しない)

量子限界を超える：  $n \approx 0$  ( 不定)

## ● リュードベリ原子単一光子検出

リュードベリ原子 (~ 2 準位系) - 量子測定素子

リュードベリ原子を用いて光子を1個1個検出する。

$S$  ( 信号 ) =  $n$  ( 光子数 )

$N$  ( 雑音 ) =  $e^{-\hbar\omega/kT}$  ( 温度雑音 )  $\ll 1$  (  $kT < \hbar\omega$  )

$S/N > 1$  たとえ ,  $n \ll 1$  でも !!

$e^{-\hbar\omega/kT} \approx 10^{-5}$  ,  $T \approx 10\text{mK}$  ,  $\omega/2\pi \approx 2.4\text{GHz}$  (  $\hbar\omega \approx 10^{-5}\text{eV}$  )

## 超高感度短時間測定

平均1個よりずっと少ない光子数を計る。

## 2 . リュードベリ(Rydberg) 原子とは

主量子数  $n$  の非常に大きな電子状態に励起した原子のこと。

$n \sim$  数10 - 100以上

特に、最外殻電子が1個のアルカリ原子は、 $n \gg 1$ では、  
水素原子で非常に良く近似できる。

原子半径が大きい

$$R \propto n^2 \quad (n = 50, R = 1.3 \times 10^{-7} \text{ m})$$

結合エネルギーが小さい

$$E_n = -R/n^2$$

エネルギー準位間隔が小さい

$$\Delta E_n = E_{n+1} - E_n \propto 1/n^3$$

電磁場との結合が強い

遷移電気双極子モーメント

$$d \propto 1/n^2$$

寿命が長い

$$\tau \propto n^3$$

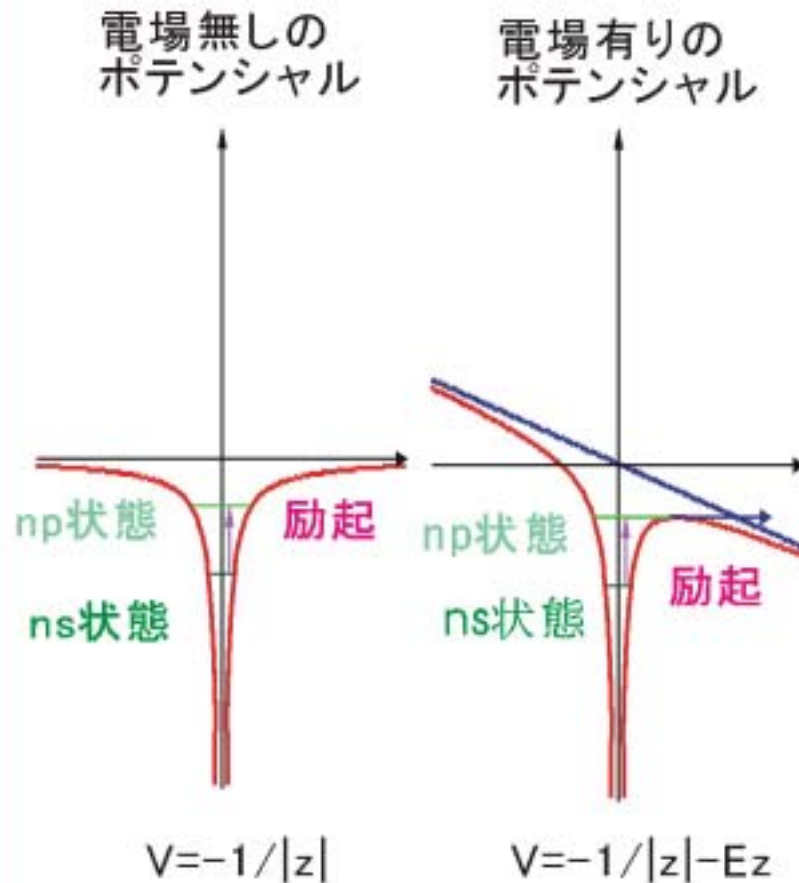
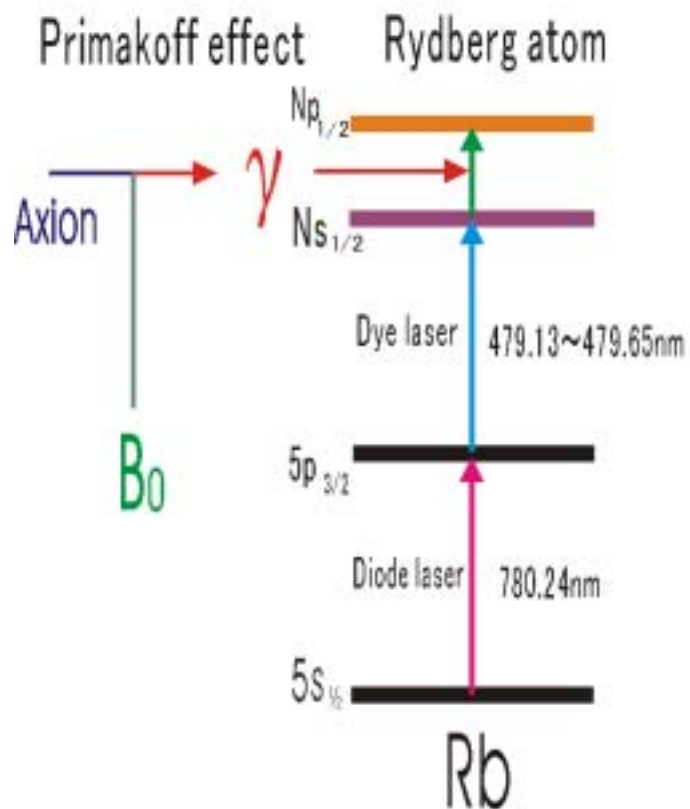


空洞量子電気力学 (Cavity QED) における様々な応用

光子検出    光子状態操作    量子情報

特にエネルギー準位間隔がマイクロ波領域に属するものもあり、  
マイクロ波の検出に適している。    /2    ~ GHz,  $n \sim 100$

### 3. リュドベリ原子単一光子検出法の原理



# 原子準位励起の量子論的取り扱い

原子 - 光子相互作用ハミルトニアン

$$H_{\text{int}} = \vec{d} \cdot \vec{E}(\vec{x}) = \hbar[\Omega(\vec{x})D_+c + \Omega(\vec{x})^* D_-c^\dagger]$$

電場演算子 (空洞内共振モード)

$$\vec{E}(\vec{x}) = (\hbar\omega / 2\varepsilon_0V)^{1/2}[\vec{\varepsilon}(\vec{x})c + \vec{\varepsilon}^*(\vec{x})c^\dagger]$$

遷移電気双極子モーメントと原子 - 光子結合定数

$$\vec{d} = \langle e | e\vec{x} | g \rangle, \quad \Omega(\vec{x}) = \hbar^{-1}(\hbar\omega / 2\varepsilon_0V)^{1/2} \vec{d} \cdot \vec{\varepsilon}(\vec{x})$$

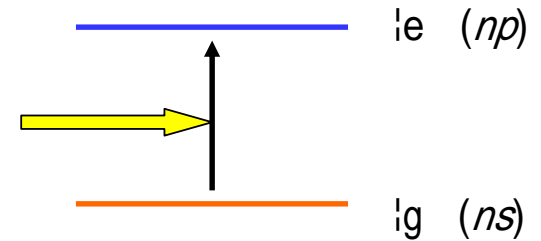
$$|e\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |g\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad D_+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_- = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$



原子 - 光子系の量子的時間発展



光子検出感度: 空洞から出てくる励起原子数 / 単位時間



リュドベリ原子による光子の吸収

$\vec{x}$ : 原子の位置,

$V$ : 空洞の体積

$\omega = (E_e - E_g) / \hbar$ : 共振周波数

$\vec{\varepsilon}(\vec{x})$ : 偏極ベクトル

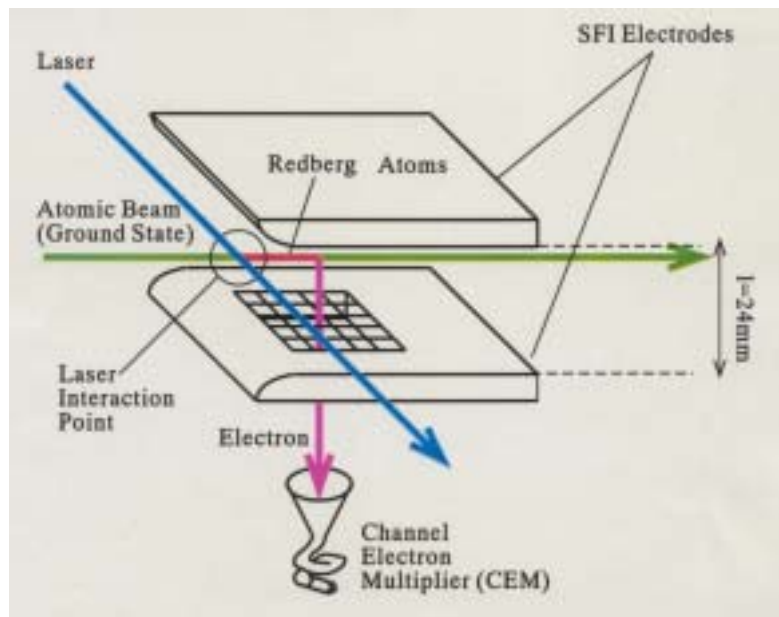
←  $|e (np)$  のみを選別!

## 4 . 選択的電場イオン化法(Selective Field Ionization)

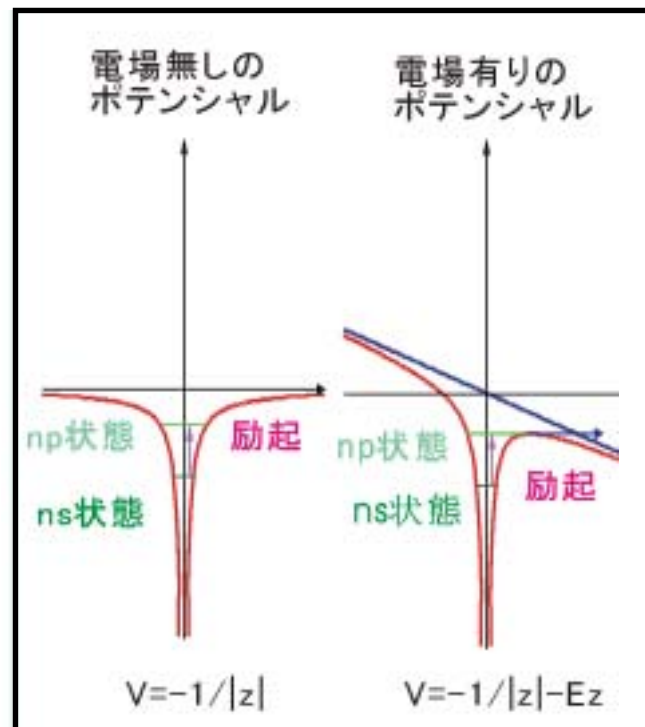
→ 原子順位の正確なキャラクタリゼーション

超高感度マイクロ波光子検出のためには、  
非常に接近した2つの準位を識別する必要がある。  
そのために、適当な電場をかけてそれらを選択的にイオン化する。

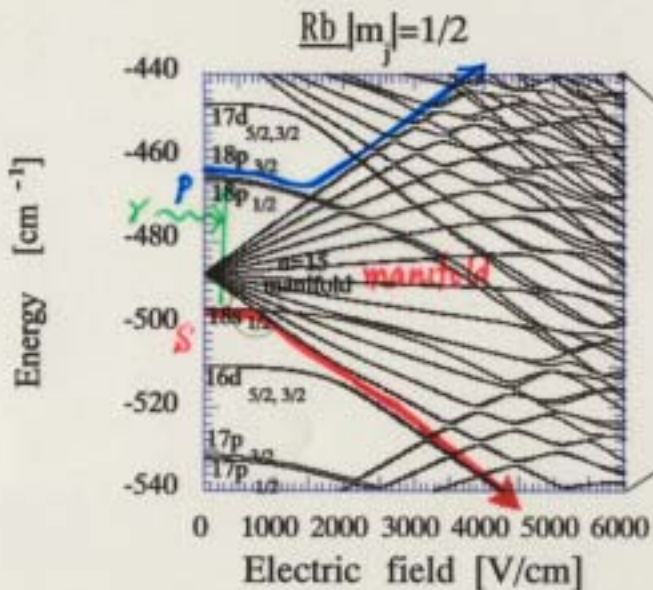
$n=80 \sim 150$ の高励起状態で方法を確立した



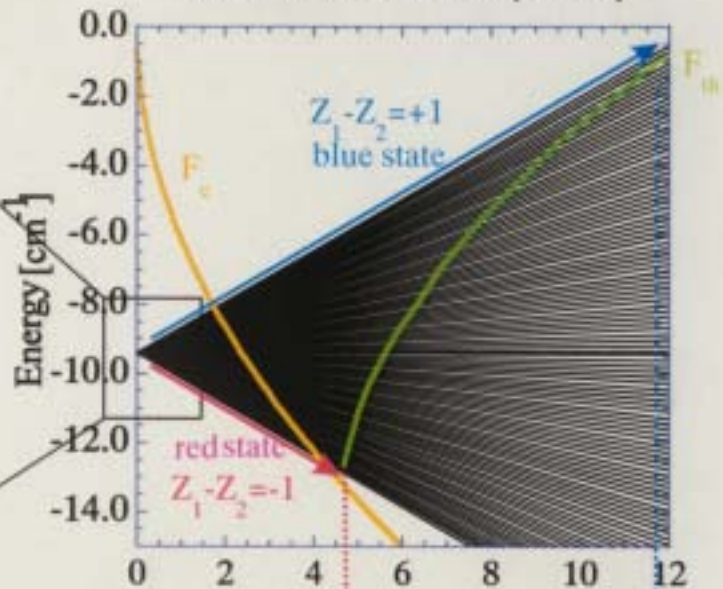
選択的電場イオン化法の概略図



# Rydberg原子: Rb



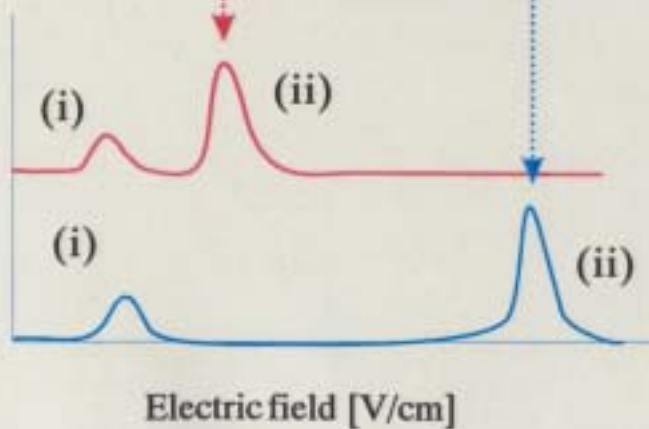
# Ionization Threshold (n=108)



## ion化過程

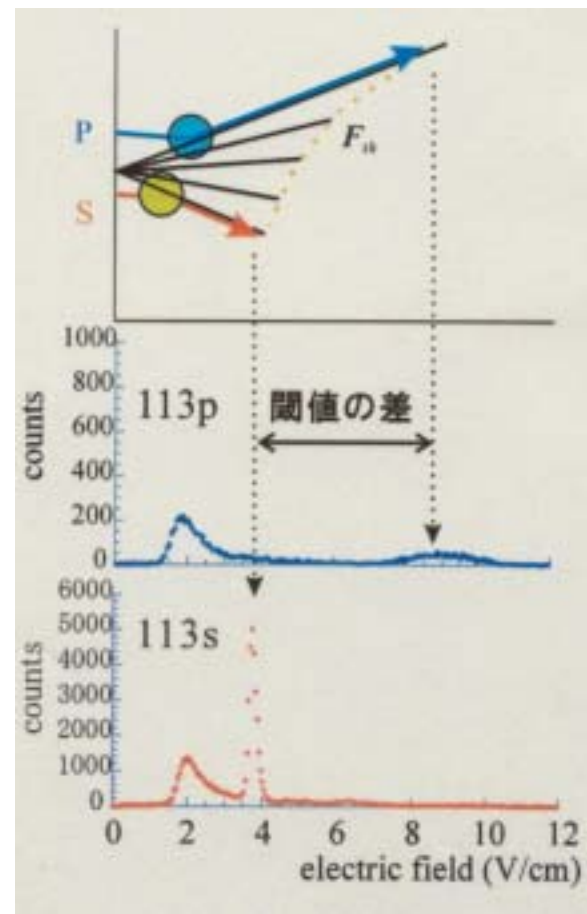
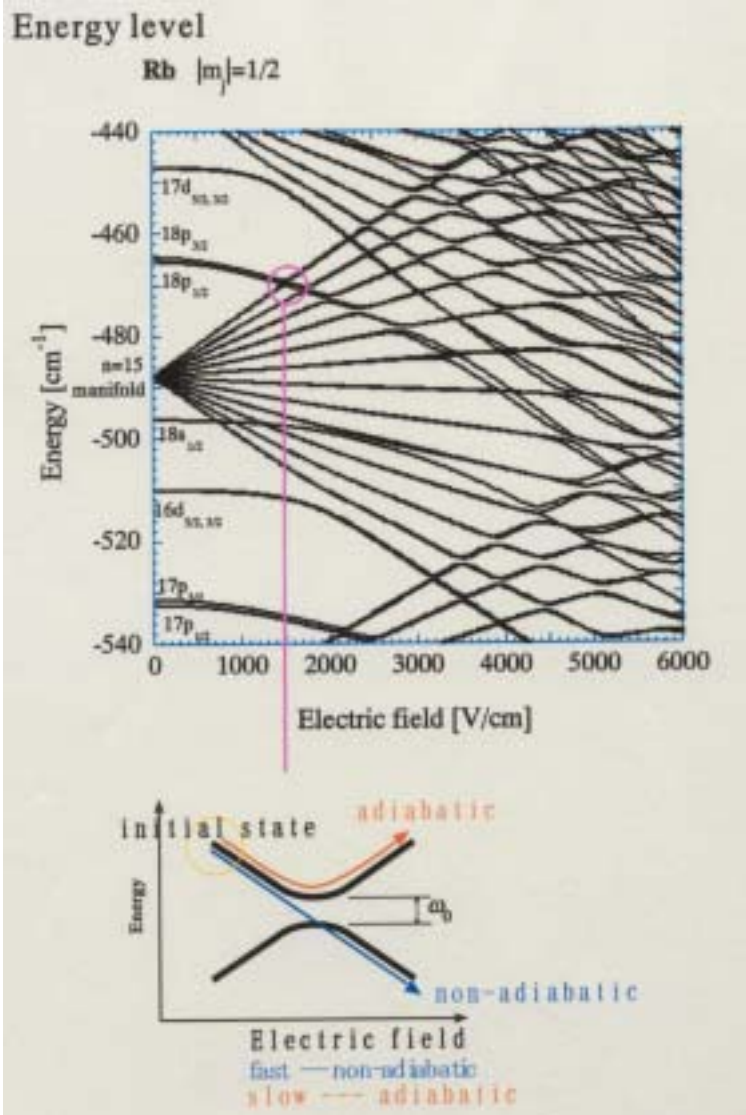
(i) autoionization-like

(ii) tunneling

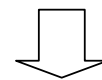


リュードベリ原子の電場中におけるシュタルク構造とイオン化電場



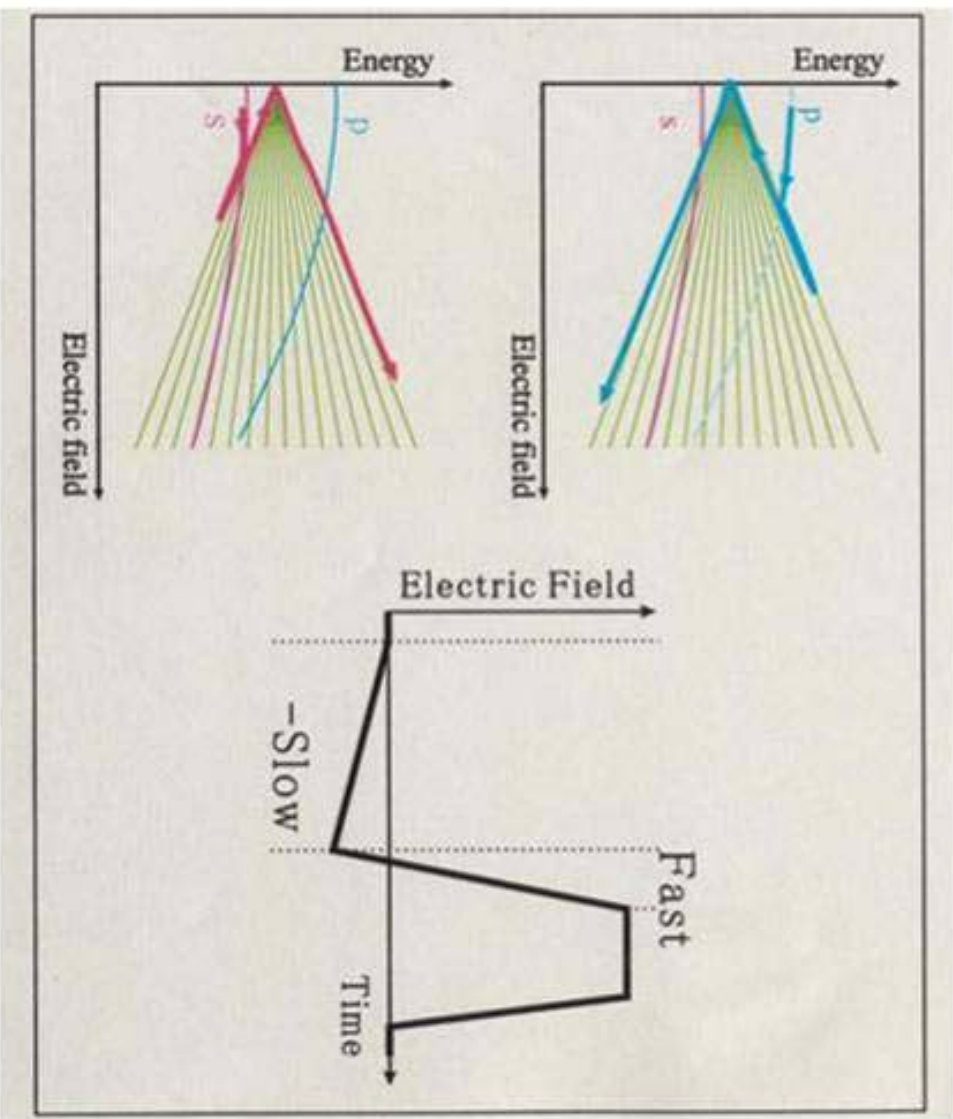
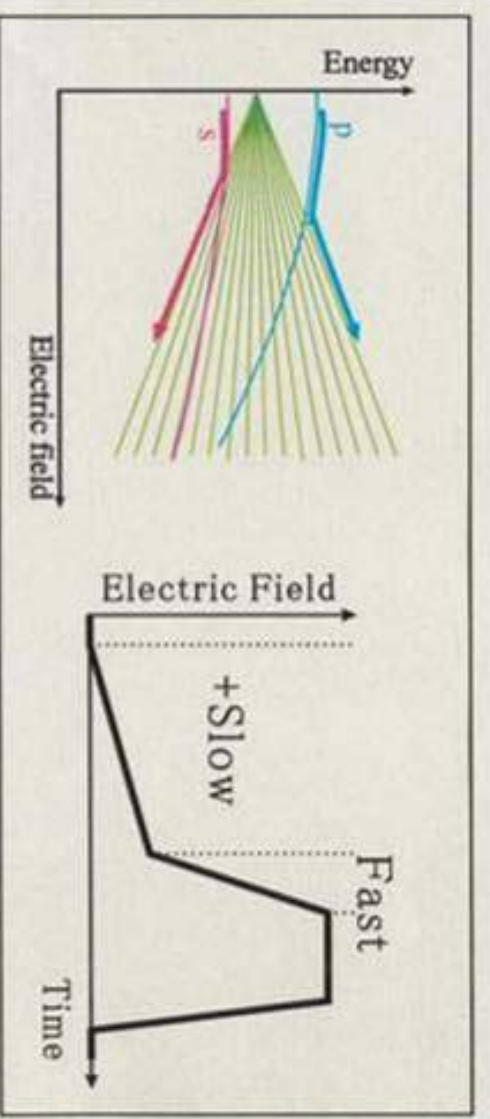


イオン化経路の制御



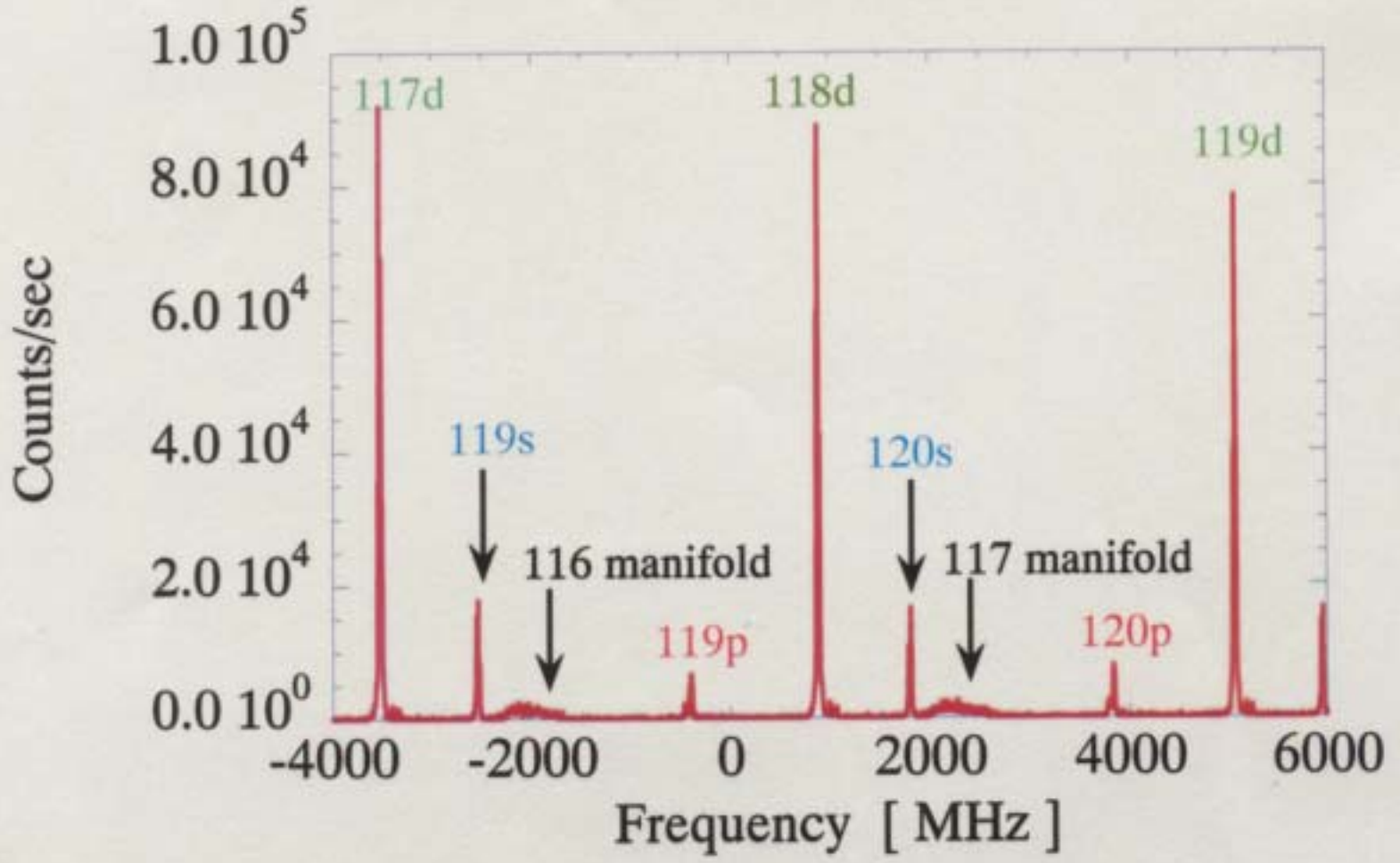
パルス電場によるイオン化

# イオン化経路とパルスの形



# Excitation spectrum

$^{85}\text{Rb}$   $n=116-117$  manifold 近傍



## 5 . ダークマターアクシオンの探索

平成5年～7年： 科研費一般研究(A)

平成9年～14年： 科研費特別推進研究

研究代表者 松木征史 (京都大学化学研究所)

分担者 山本克治 (京都大学工学研究科)

分担者 舟橋春彦 (京都大学理学研究科)

CARRACK Collaboration

F. Funahashi, T. Haseyama, Y. Kishimoto, K. Kominato, A. Masaïke,  
S. Matsuki, I. Ogawa, T. Ooishi, T. Saida, M. Shibata, M. Tada,  
S. Yamada, K. Yamamoto

<http://carrack.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>

アクシオン探索装置

CARRACK I, II (京都大学化学研究所原子核研究施設)

Cosmic Axion Research with Rydberg Atoms in resonant Cavities in Kyoto

# 研究目的

- 宇宙には、全エネルギーの～30%も占めるダークマターが存在している  
その正体は不明であり、その解明は宇宙物理・素粒子物理に関連する最大の課題の一つ
- **ダークマターの最有力候補素粒子アクシオンを探索する**  
我々独自の探索装置を開発し空胴リドベルグ原子単一光子検出法：  
**世界で最も感度が良い方法**
- 理論的に予想されるダークマターとしてのアクシオンの質量領域  $2 \sim 50 \mu\text{eV}$   
**全領域を探索し、この問題に決着をつける**

# 期待される研究成果 学術上の意義・インパクト 研究の必要性

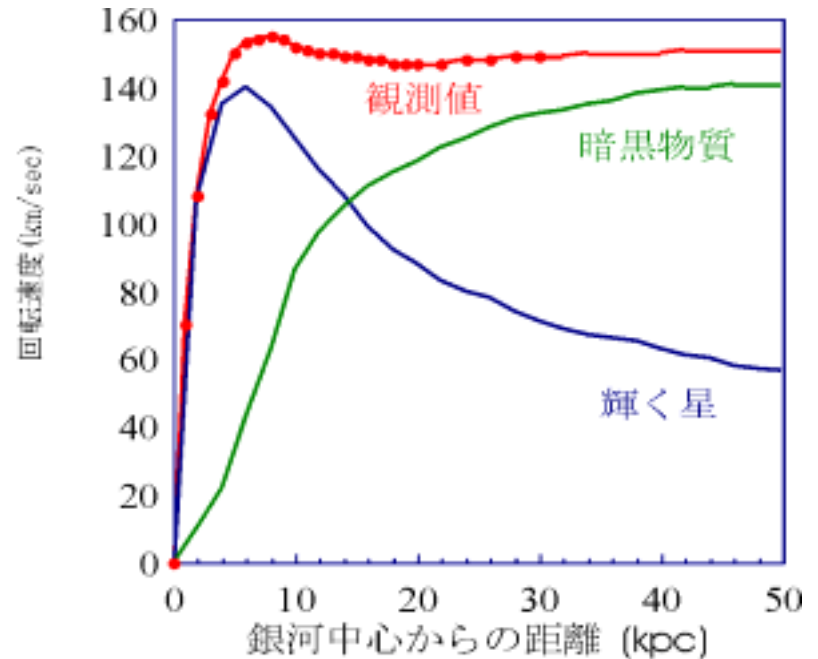
- **ダークマターの解明**  
現在の宇宙物理・素粒子物理における  
**最大の課題**の一つ
- **アクシオンの存在**を明らかにすることで、
  - 1) 宇宙の構造形成など多くの謎が解ける  
(宇宙物理への本質的な寄与)
  - 2) ミクロ世界の時間反転対称性の問題が解決  
(素粒子物理への多大な貢献)
- **世界で2グループのみが追求している  
我々の研究が最もゴールに近い  
継続的な研究が必要**

## ダークマター (暗黒物質) とは

宇宙には、光を放出している星などの十倍から百倍の見えない物質、暗黒物質 (**DARK MATTER**) が存在していることがわかっている。

特に、銀河のまわりに集中して球状に分布していると考えられていて、**ダークハロー**と呼ばれている。

宇宙は、銀河団、超銀河団といった大規模構造からなることが多くの観測から報告されている。この宇宙の構造形成の過程において暗黒物質が中心的な役割をはたしたと考えられている。



アルベルト ボスマによる銀河の回転曲線の測定



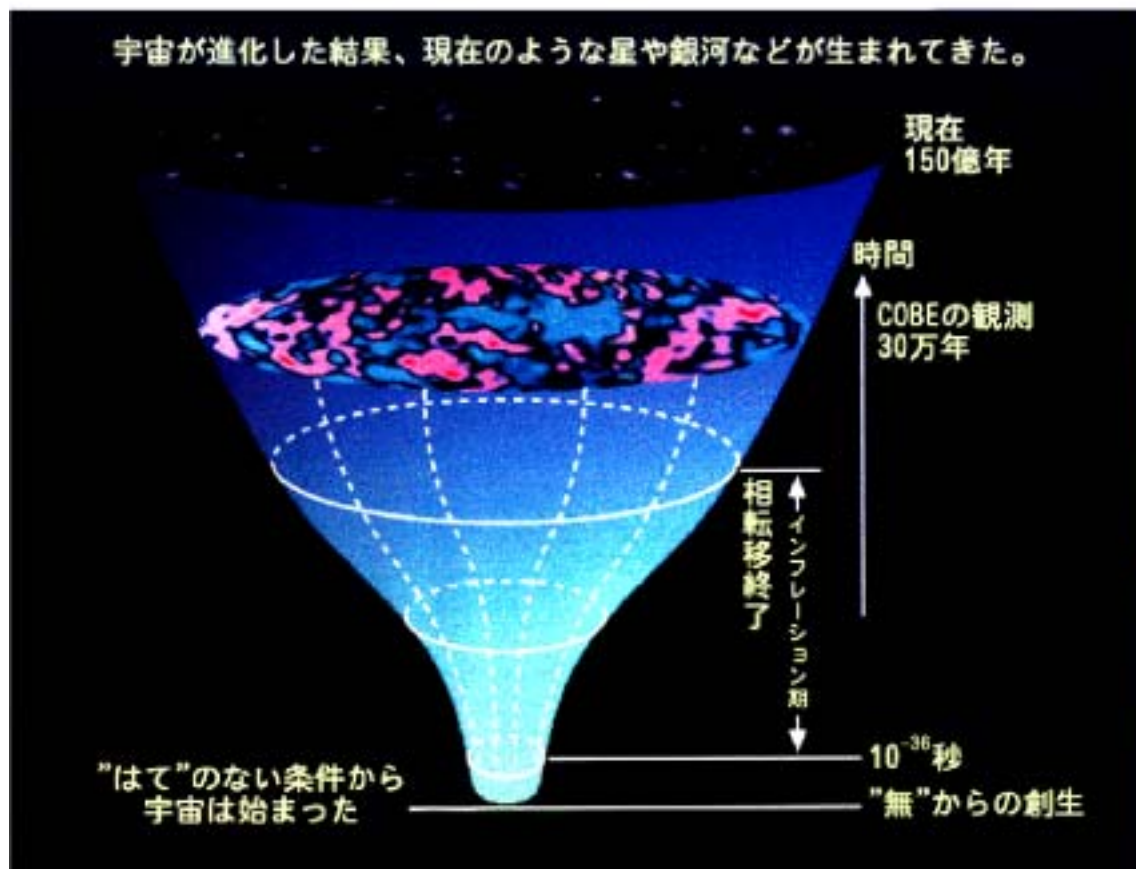
# ダークマターと宇宙の進化

冷たいダークマターが種となって、  
現在の宇宙の構造が出来上がった

宇宙の組成 Omega



宇宙が進化した結果、現在のような星や銀河などが生まれてきた。



渦巻き銀河の例

佐藤勝彦（東大理）



# 宇宙論的 必要性

## 構造形成

銀河, 銀河団,      ダークハロー  
背景輻射...

$> 10^{20} m$



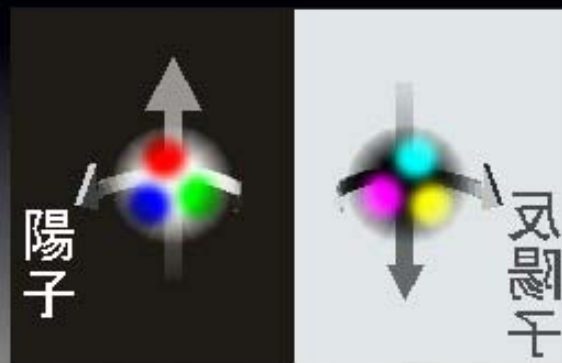
# アクシオン

$\sim 10^{13}$  個/cm<sup>3</sup> の  
アクシオン

## 素粒子論的 必要性

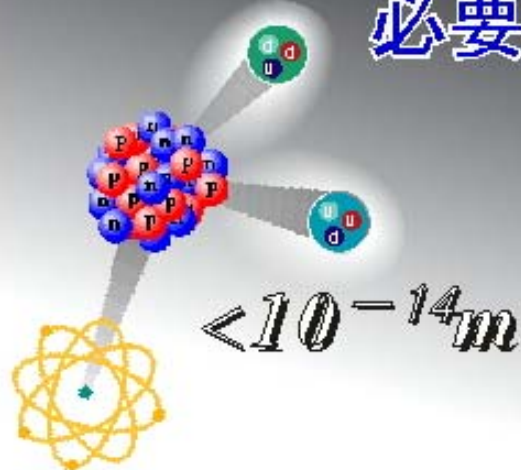
### 基本的対称性

C: 物質 ⇄ 反物質  
P: 右 ⇄ 左  
T: 時間反転



### CP対称性

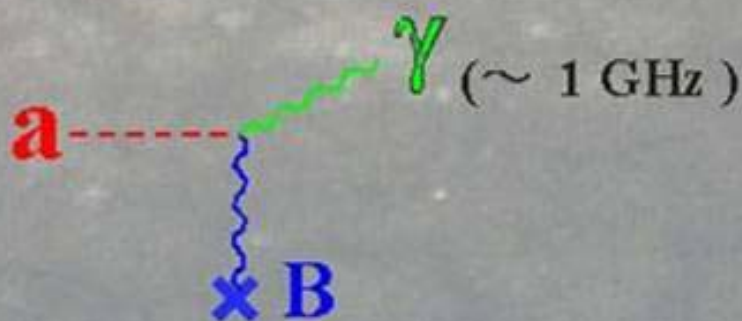
(=時間反転対称性) が 何故ほとんど  
破れていないのか?



# アクシオンとは？

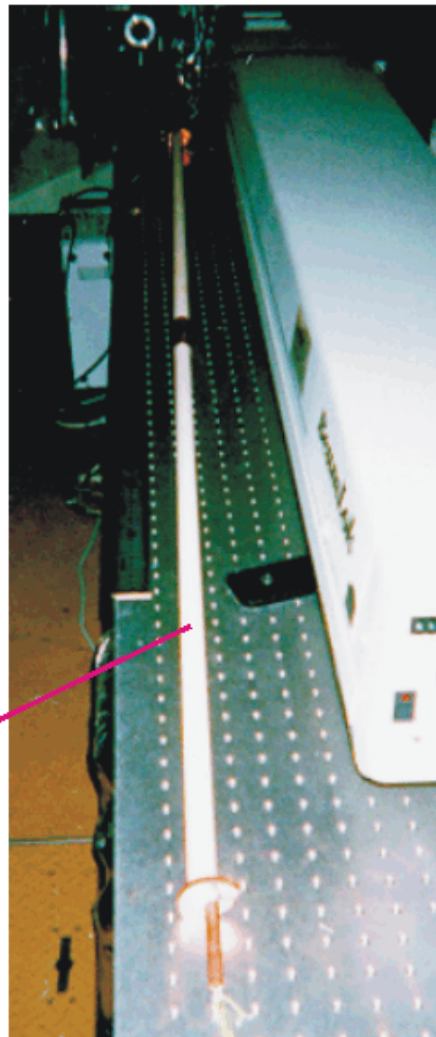
パイ中間子(湯川理論)との比較

	質量	崩壊	光子との結合	寿命
パイ中間子	$10^8 \text{ eV}$	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	1	$10^{-17}$ 秒
アクシオン	$10^{-5} \text{ eV}$	$\mathbf{a} \rightarrow 2\gamma$	$\sim 10^{-13}$	宇宙年齢 以上





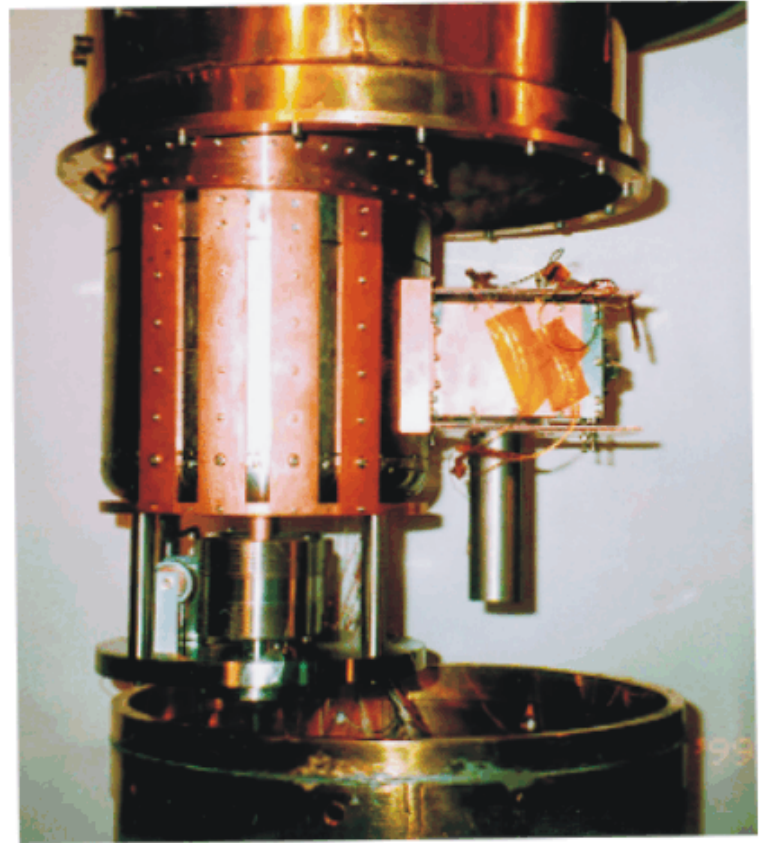
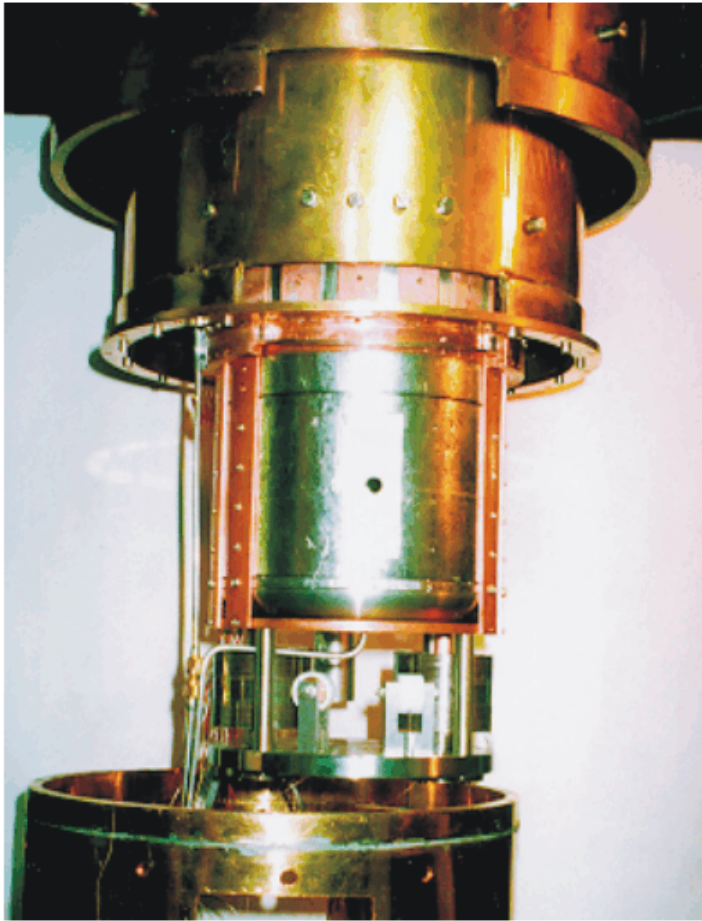
轉換空腔



ポスト

アクシオンが轉換空腔の中で光子に轉換する。アルミナのポストにより空腔の共振周波数を調整する。





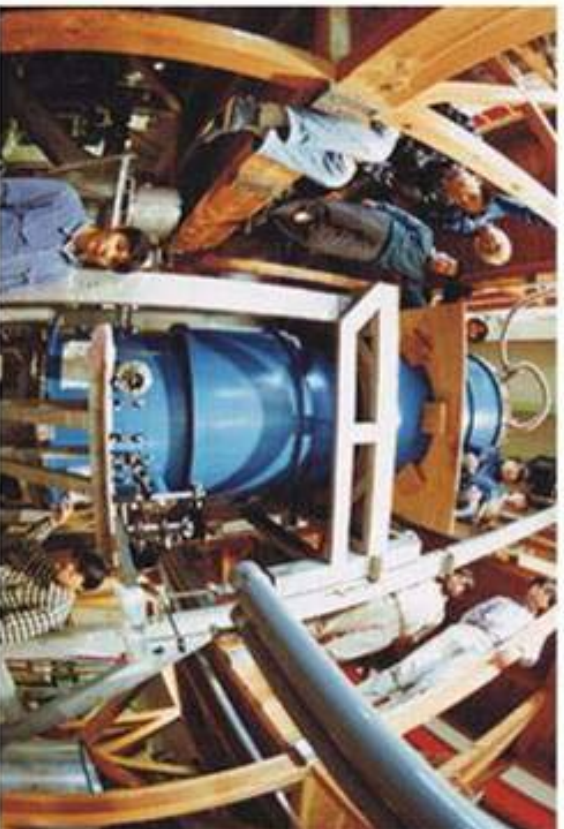
共振空洞下部

アクシオン転換光子は検出空洞でリドベルグ原子を励起させる。励起したリドベルグ原子は選択的フィールドイオン化ボックスで選択的に電離され検出される

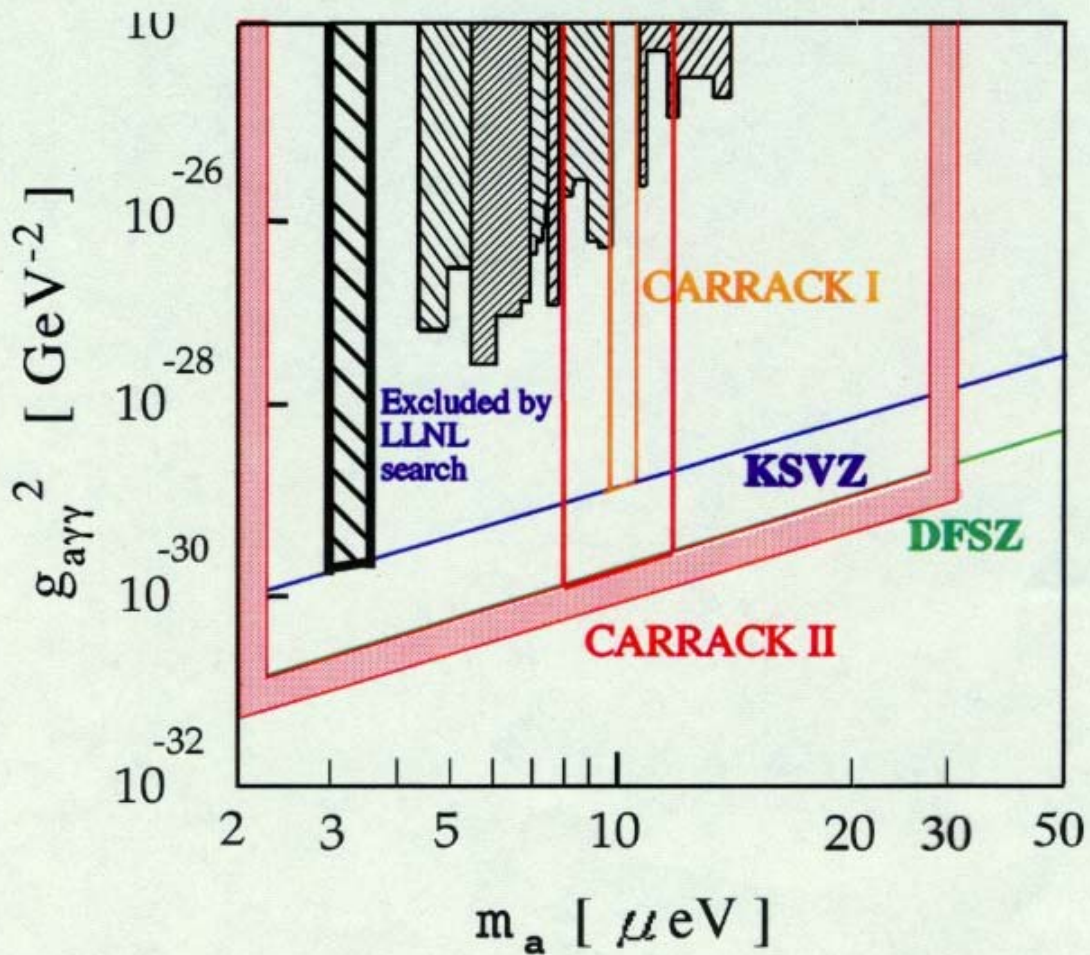


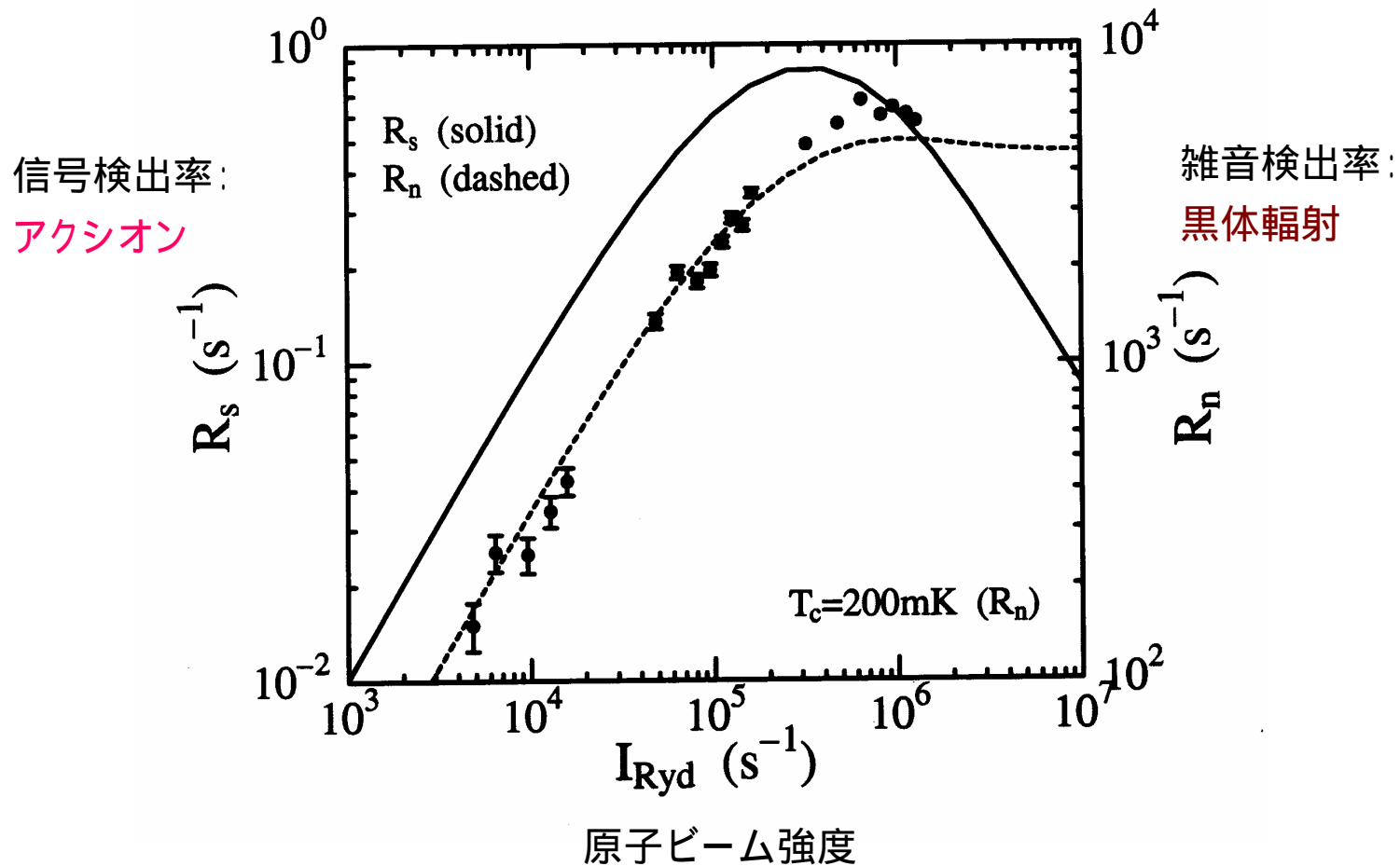
実験装置全体図





実験メンバー (<http://carrack.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>)





空洞内黒体輻射光子(noise)の測定 ( $T_c = 200\text{mK}$ ): preliminary result



## 6 . まとめ

リュードベリ原子を用いた共振空洞でのマイクロ波領域単一光子検出法の確立

リュードベリ原子 - 量子測定素子

$S / N > 1$  ( $T_c \sim 10 \text{ mK}$ ): 古典的方法の量子限界を超える

リュードベリ原子 ( $n \sim 100$ ) のレーザー 2 段励起による生成

選択的電場イオン化 - リュードベリ準位 ( $n = 80 \sim 150$ ) の正確な選別

ダークマターアクシオンの探索

探索装置 CARRACK の建設

検出効率評価のための量子理論的計算の確立

- 装置のデザイン、実験の最適条件

広域探索:  $8 \mu\text{eV} \sim 30 \mu\text{eV}$

検出技術の Cavity QED に関する様々な応用

光子数測定、光子状態制御 - 量子情報など