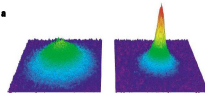


# 極低温分子を用いた電子EDM 探索に向けて

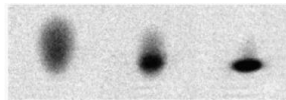
東京大学大学院総合文化研究科  
大坪望 (D2)、生駒大祐 (M2)、山中優輝  
(M2)、井上恵美子 (M2)  
青木貴稔、鳥井寿夫

## 研究背景：極低温分子の物理

2003年 分子のボース・アインシュタイン凝縮 (JILA, MIT, Innsbruck)

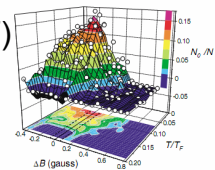
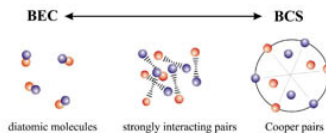


Nature 426, 537 (2003)



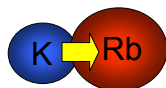
PRL 91, 250401 (2003)

2004年 冷却フェルミ気体のBCS超流動 (JILA, MIT)



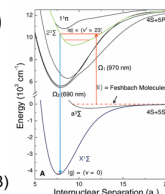
PRL 92, 040403 (2004)

2008年 基底状態の極低温極性分子の生成 (JILA)



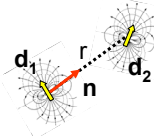
0.566(17) Debye

Science 322, 231 (2008)



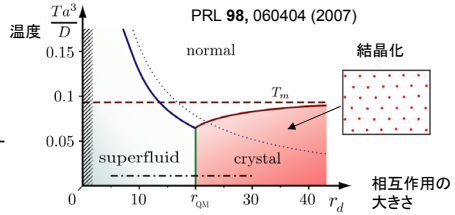
# 極低温極性分子の応用

## ①新しい量子多体系の研究

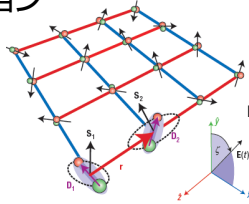


$$\frac{d_1 d_2 - 3(d_1 n)(d_2 n)}{r^3}$$

長距離かつ異方的な双極子-  
双極子相互作用

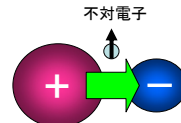


## ②量子シミュレーション



Nature Phys. 2, 341 (2006)

## ③電子の永久双極子モーメント(EDM)の測定

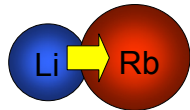


cf)  $E \sim 100 \text{ kV/cm}$ ,  $R=895$  for Fr  
 $\rightarrow E_{\text{eff}} = R E \sim 0.1 \text{ GV/cm}$

実効内部電場  $0.8 \text{ GV/cm}$  for LiSr  
(阿部さん@首都大による計算)

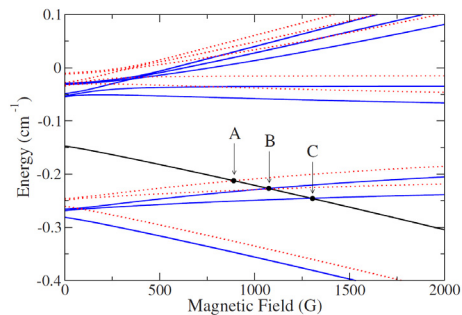
# 極低温Rb-Li分子

## ①大きな電気双極子



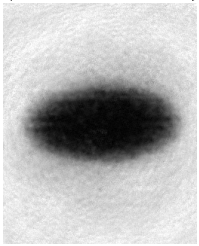
molecule	dipole moment [Debye]
Li-Na	0.56
Li-K	3.6
Li-Rb	4.2
Li-Cs	5.5
Na-K	2.8
Na-Rb	3.3
Na-Cs	4.6
K-Rb	0.6
K-Cs	1.9
Rb-Cs	1.2

## ②大きなフェッシュバツハ共鳴 (分子の生成に有利)

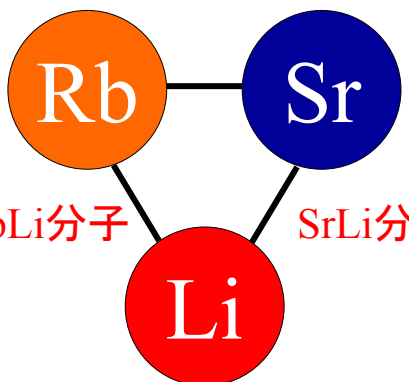


	$B_0$	$\Delta B$	
87Rb  1,1>, 6Li  1/2,1/2>	882.02G	1.27G	p wave
87Rb  1,1>, 6Li  1/2,1/2>	1066.92G	10.62G	s wave

Rb BEC  
0.96 mm




RbSr分子



RbLi分子

SrLi分子

Sr MOT

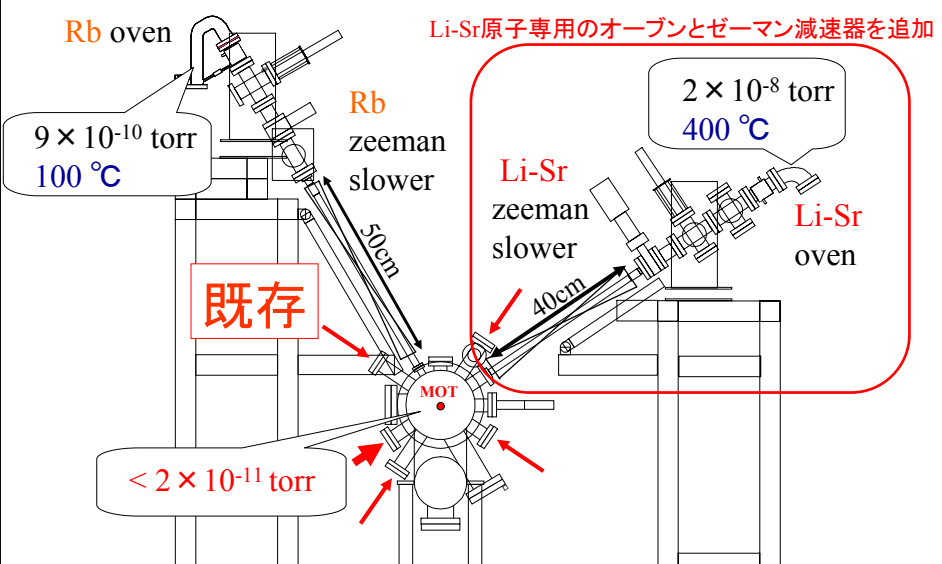


3種類の原子を同時にトラップする  
装置を開発する

5

### 真空装置

Li-Sr原子専用のオープンとゼーマン減速器を追加



Rb oven  
 $9 \times 10^{-10}$  torr  
 $100^\circ\text{C}$

Rb zeeman slower  
50cm

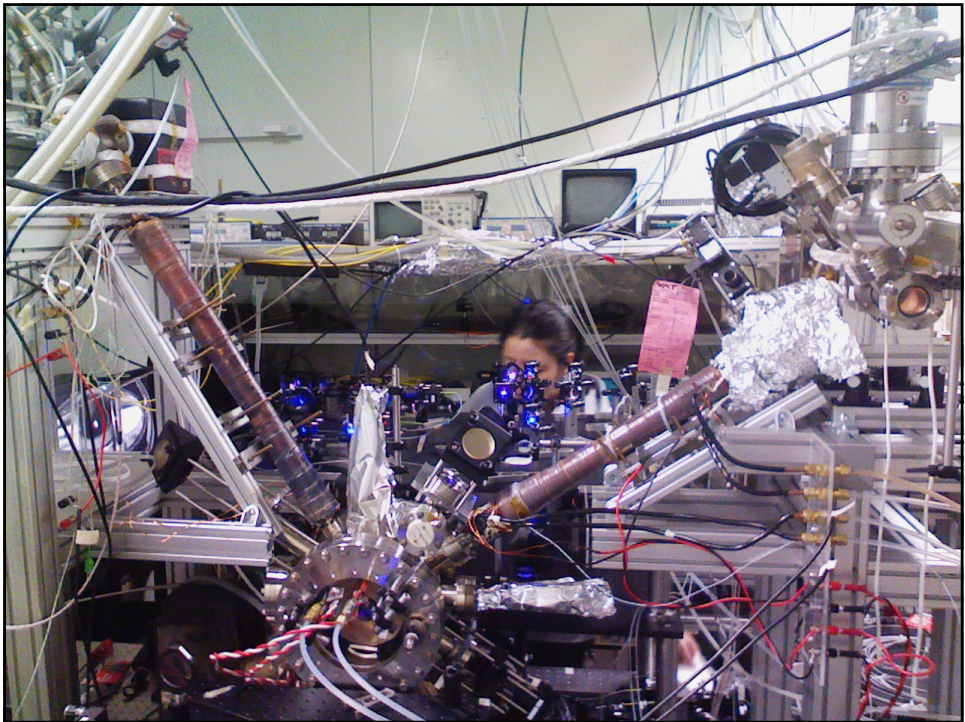
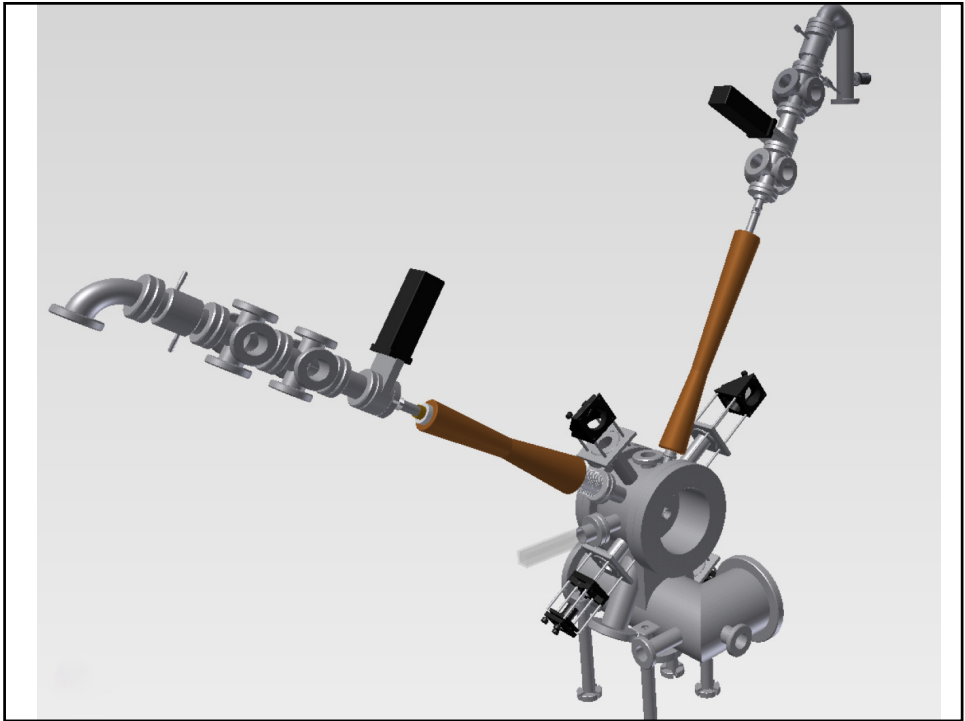
既存

MOT

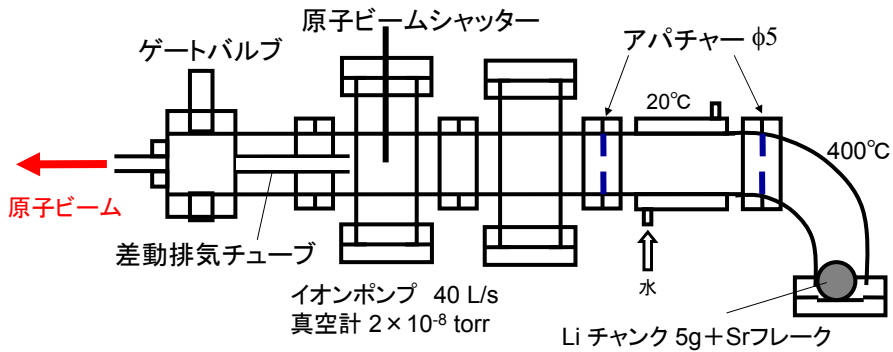
$< 2 \times 10^{-11}$  torr

Li-Sr oven  
 $2 \times 10^{-8}$  torr  
 $400^\circ\text{C}$

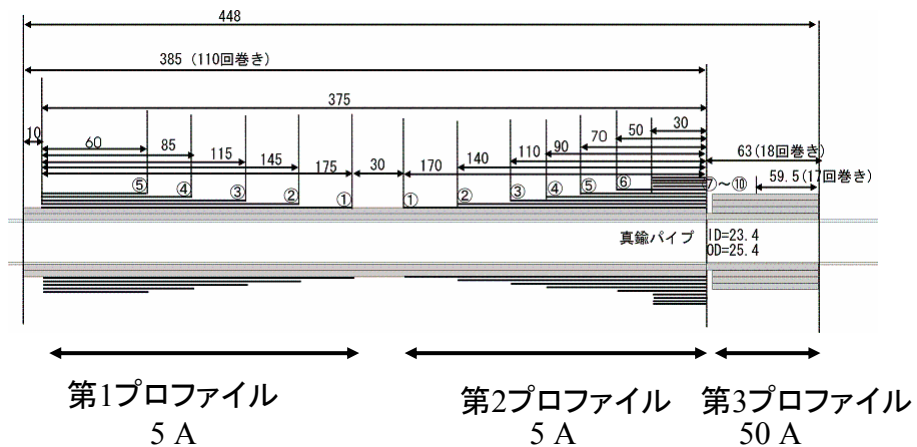
Li-Sr zeeman slower  
40cm



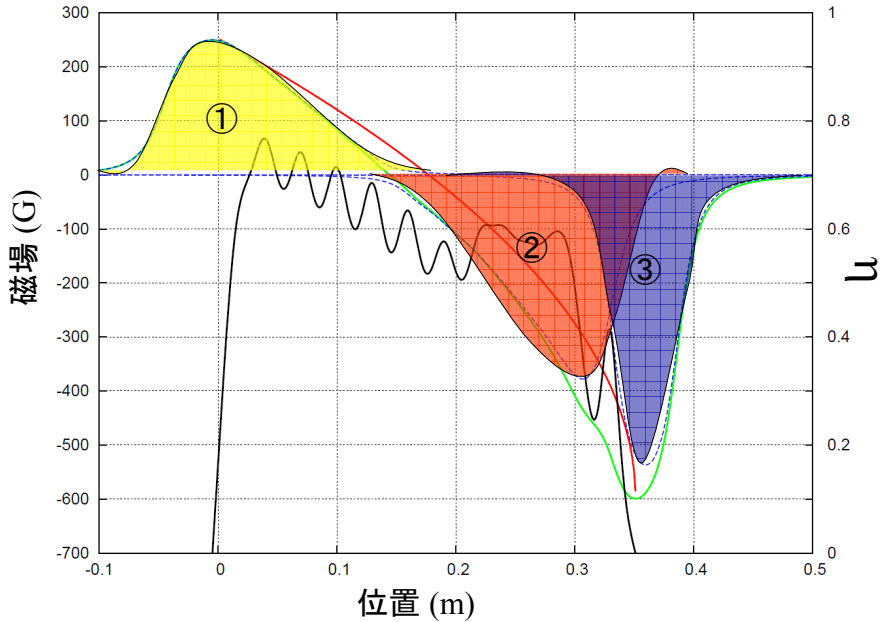
# Li-Sr原子オーブン



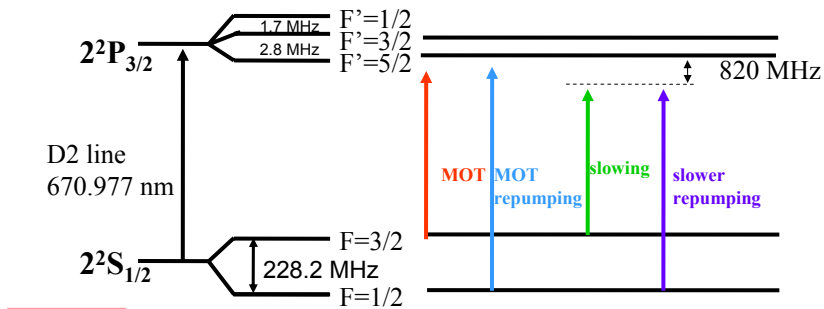
# Li用ゼーマンコイルの設計 (D2大坪君)



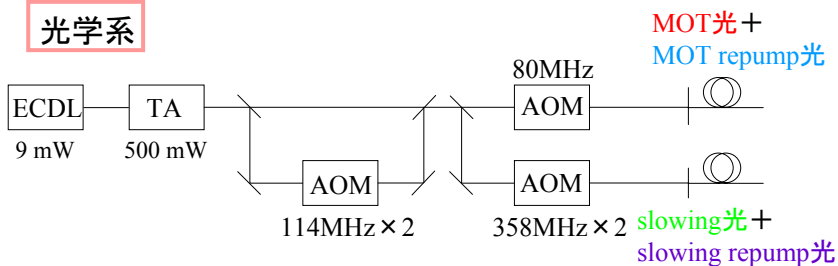
# ゼーマン減速器の磁場プロファイル



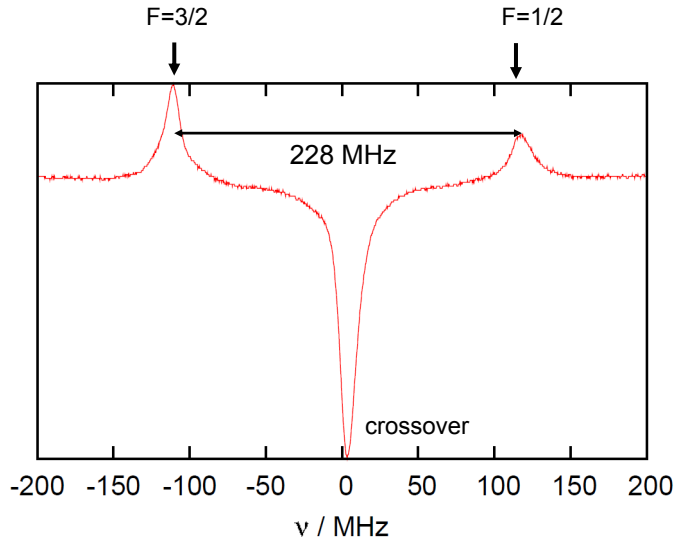
# 6Liの超微細構造とレーザー遷移



光学系

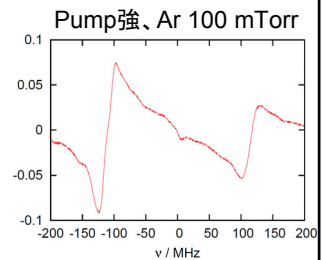
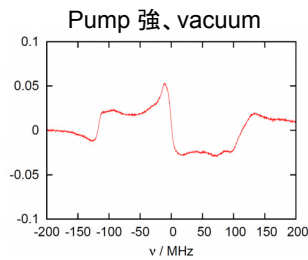
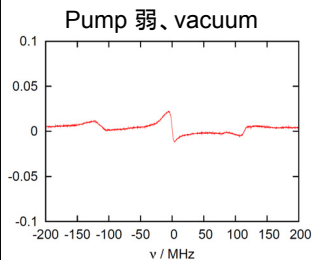
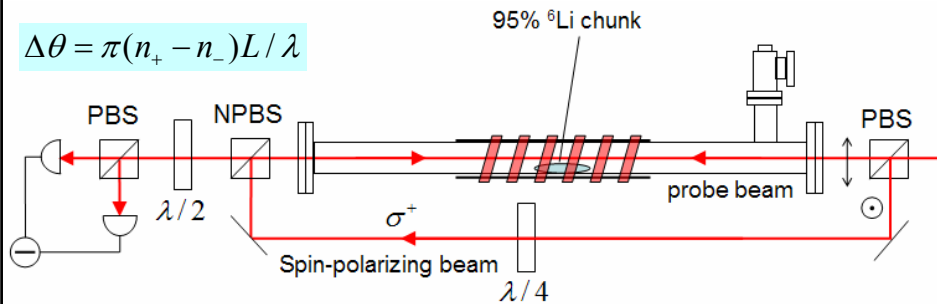


# Li原子の飽和分光

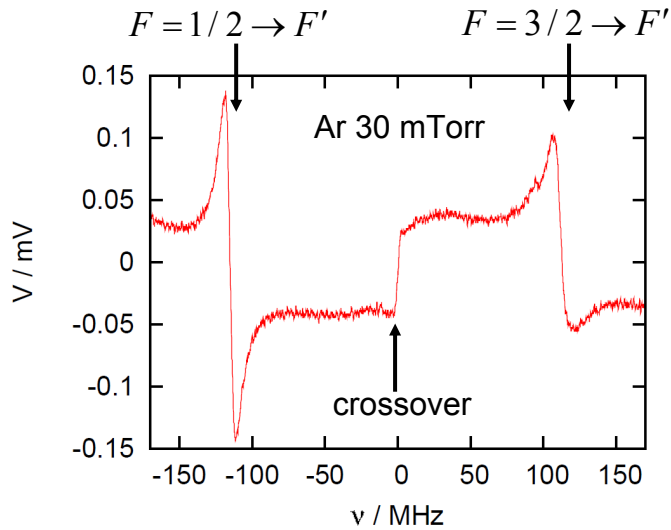


# Li原子の偏光分光 (D2大坪君)

$$\Delta\theta = \pi(n_+ - n_-)L / \lambda$$

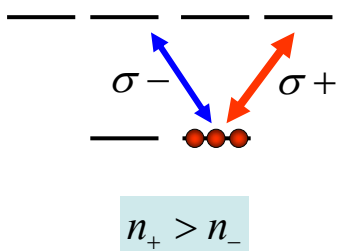


# 周波数ロックに用いた偏光分光信号

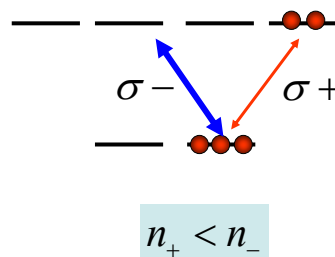


# 円偏光複屈折の2つの起源

①  $\sigma+$ ポンプ光による  
スピン偏極

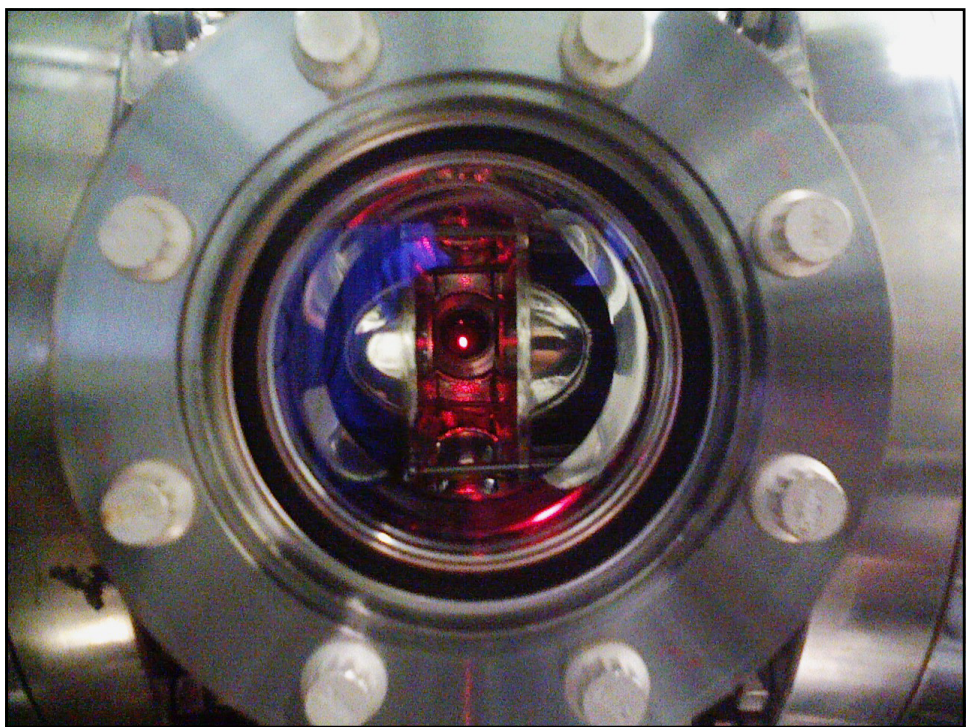
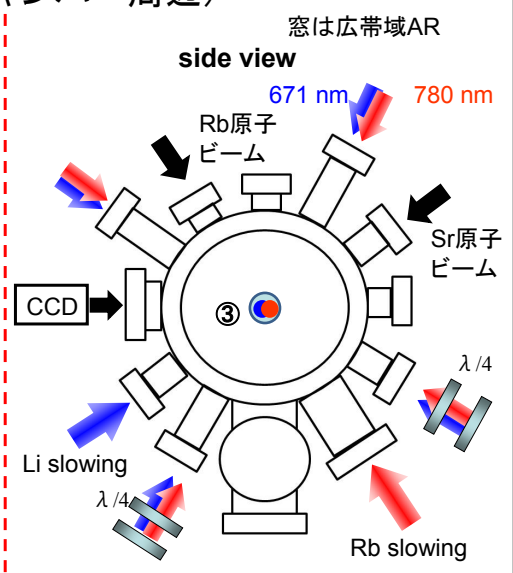
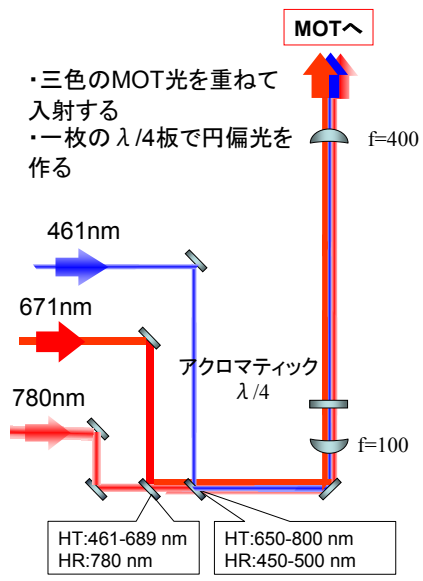


②  $\sigma+$ ポンプ光による  
飽和効果

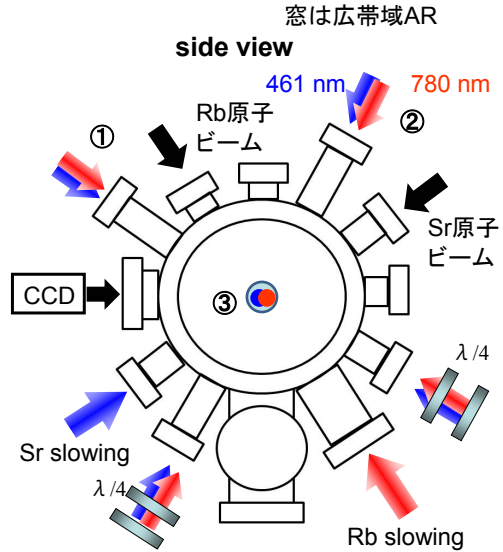
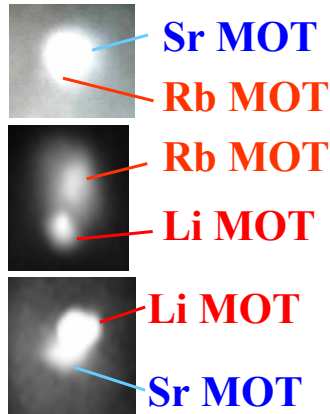




# 実験系: 光学系(メインチャンバー周辺)



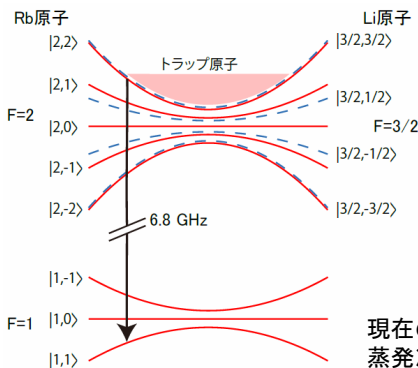
## 同時MOTに成功！



## ${}^6\text{Li}$ 原子のRb原子による協同冷却

フェルミオンである ${}^6\text{Li}$ 原子は単体で蒸発冷却が働かない  
Rbを蒸発冷却しLi原子を協同冷却したい

Liを残しRbのみを削りたい



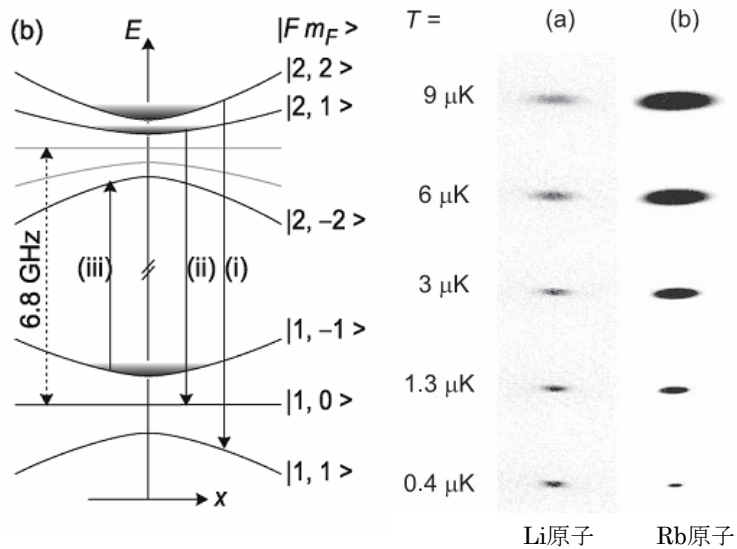
g因子はLi原子の方が大きいため

RFで蒸発冷却させようとする  
Rb原子より先にLi原子を削る

Rb原子 $F=1 \rightarrow F'=2$ 間の遷移にあたる  
6.8 GHzのマイクロ波を照射することで  
Rb原子のみを蒸発することができる。

現在の真空チャンバーの外からマイクロ波を照射し  
蒸発冷却が可能か検証をする必要がある。

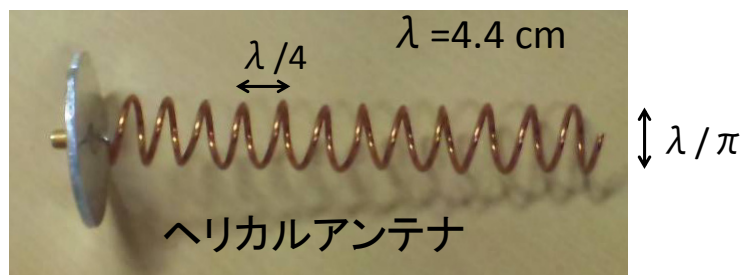
## Quantum-Degenerate Mixture of Fermionic Lithium and Bosonic Rubidium Gas (PRL **95**, 170408 (2005))



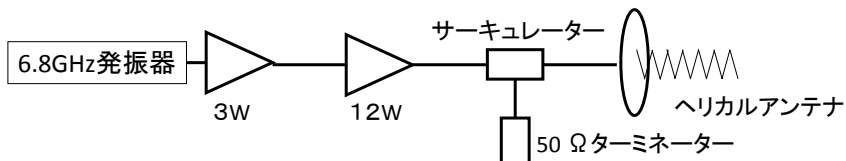
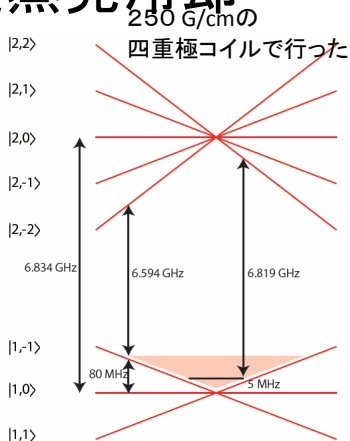
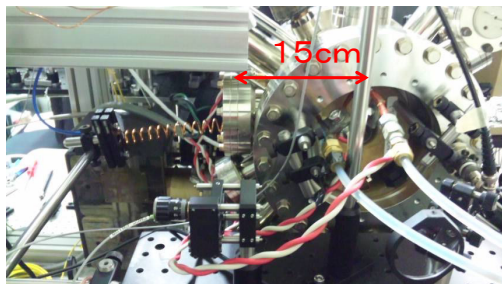
## マイクロ波アンテナの作製

チャンバーの外からマイクロ波を照射したい(15 cm)

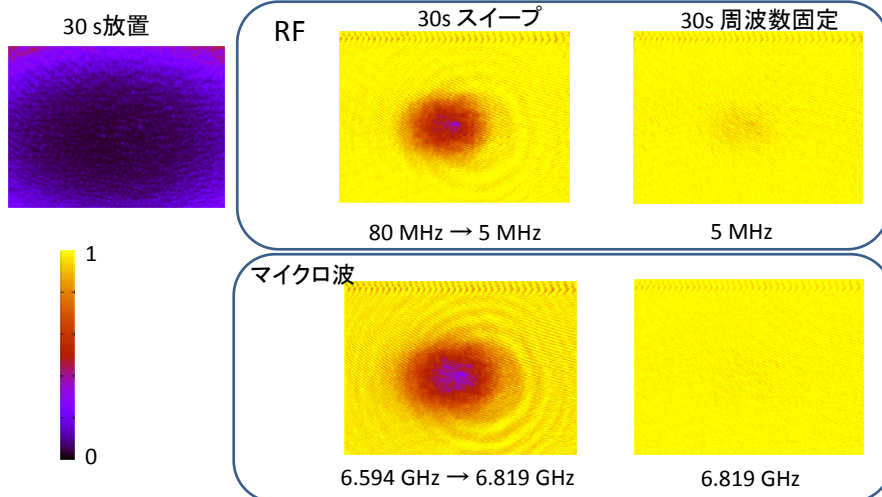
→ 指向性の高いアンテナを使いたい



# Rbのマイクロ波蒸発冷却

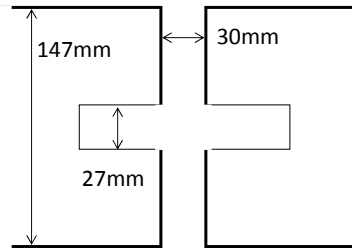
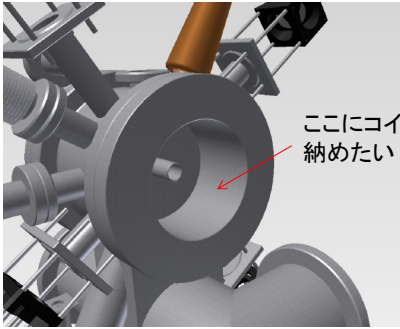


## 蒸発冷却実験の結果



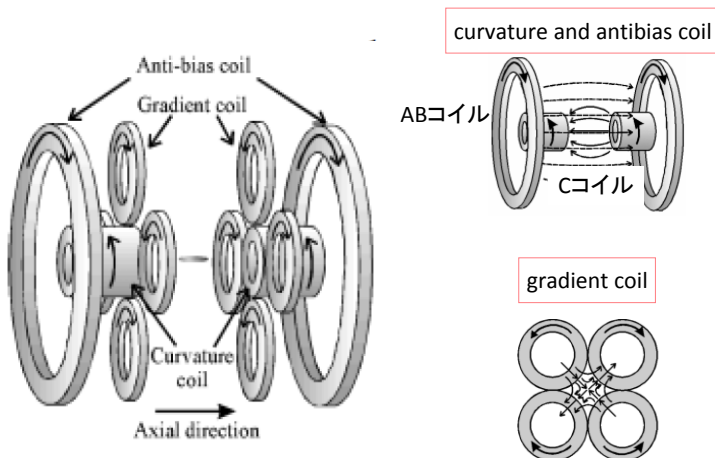
マイクロ波の蒸発冷却でRFと同様の結果が得られた

# コイルの作製



- ・フェッシュバツハに必要な磁場(1100 G)を作る
- ・Li原子の磁気トラップに必要な磁場曲率(200 G/cm<sup>2</sup>)

# クローバーリーフコイル



# コイルに流せる水流と電流

コイルに使う中空導線



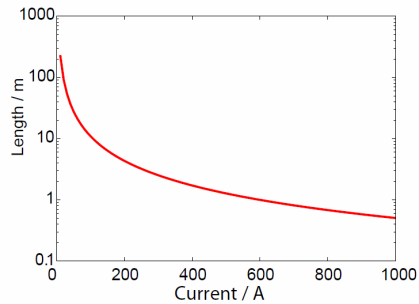
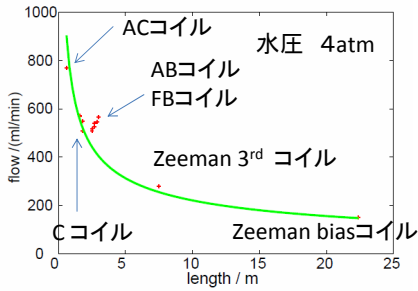
$$F \propto \sqrt{P/l}$$

F: 流量

P: 水圧

l: 同線の長さ

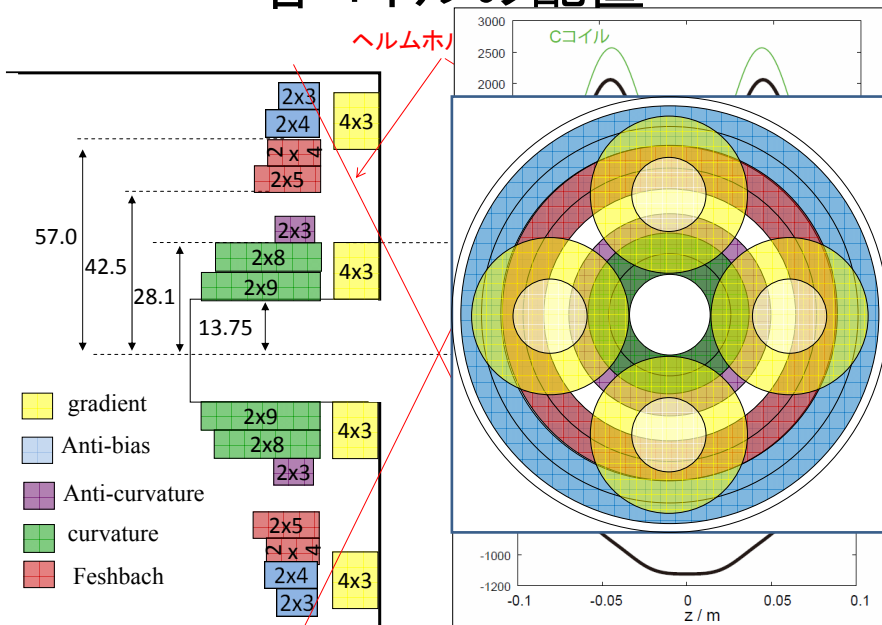
Rev. Sci. Instrum 77, 023106(2006)



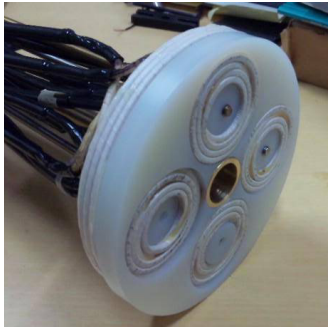
温度上昇を20°C以内に抑えることのできる同線の長さ

コイルには300A流す場合、一つの導線の長さは最大3m

# 各コイルの配置



## 作製したコイル



Gradient コイル	330 G/cm @500 A
Curvatureコイル	250 G/cm <sup>2</sup> @300A
Feshbach 磁場	1100 G @300A

## まとめ

- Rb、Li、Srの同時磁気光学トラップの実現
- ヘリカルアンテナを用いたチャンバー外部からのマイクロ波蒸発冷却の実現。
- Li原子の磁気トラップおよびフェッシュバツハ用のコイルの設計および作製

### <今後の研究計画>

- フェッシュバツハ共鳴を用いたLi-Rb分子の生成
- 光トラップ内でのLi-Sr協同冷却