

第3回 「停止・低速停止・低速不安定核を用いた核分光研究」研究会

超流動ヘリウム中に植え込まれた原子の超微細構造と  
核構造研究への応用

理化学研究所 仁科加速器研究センター  
本林重イオン核物理研究室

古川 武

Collaborators

松尾由賀利<sup>1</sup>, 畠山 温<sup>2</sup>, 伊藤龍浩<sup>3</sup>, 太田嘉穂<sup>3</sup>,  
藤掛浩太郎<sup>3</sup>, 福山祥光<sup>4</sup>, 小林 徹<sup>1</sup>, 下田 正<sup>5</sup>

<sup>1</sup>理研, <sup>2</sup>東大・総合文化, <sup>3</sup>明治大・理工, <sup>4</sup>Spring-8, <sup>5</sup>阪大・理

# Contents

1) Introduction : 超流動ヘリウム中でのレーザー分光  
~ 核モーメント測定を目指した測定法開発 ~

2) Experiment : 超流動ヘリウム中での超微細構造測定  
~ レーザー・マイクロ波二重共鳴法を用いて ~

3) Result : 超微細構造準位間共鳴スペクトル測定  
~ アルカリ金属 $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{85,87}\text{Rb}$  ~

4) Discussion : 核モーメント導出、超微細構造異常項  
~ 真空中とのズレ、元素・同位体依存性 ~

5) Conclusion

# Scientific Motivation

目標：短寿命不安定核の系統的核モーメント測定法開発

原子核の電磁気モーメント      原子核の構造を強く反映

しかし...

ドリップライン近傍の短寿命不安定核

- 低収量
- 低純度
- 低偏極度

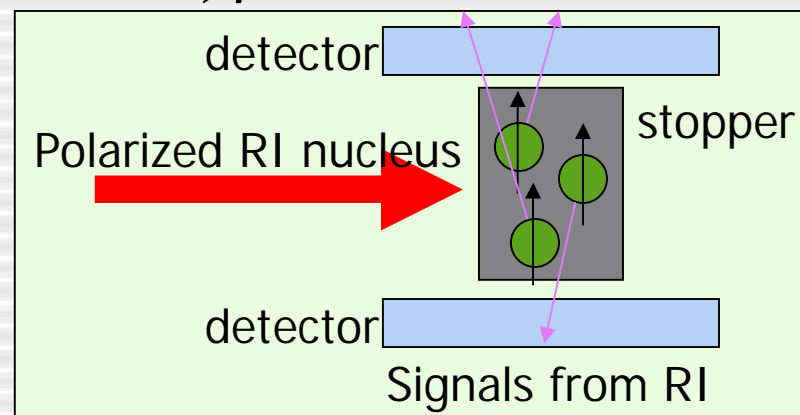
→ 核モーメント測定が困難

そこで...

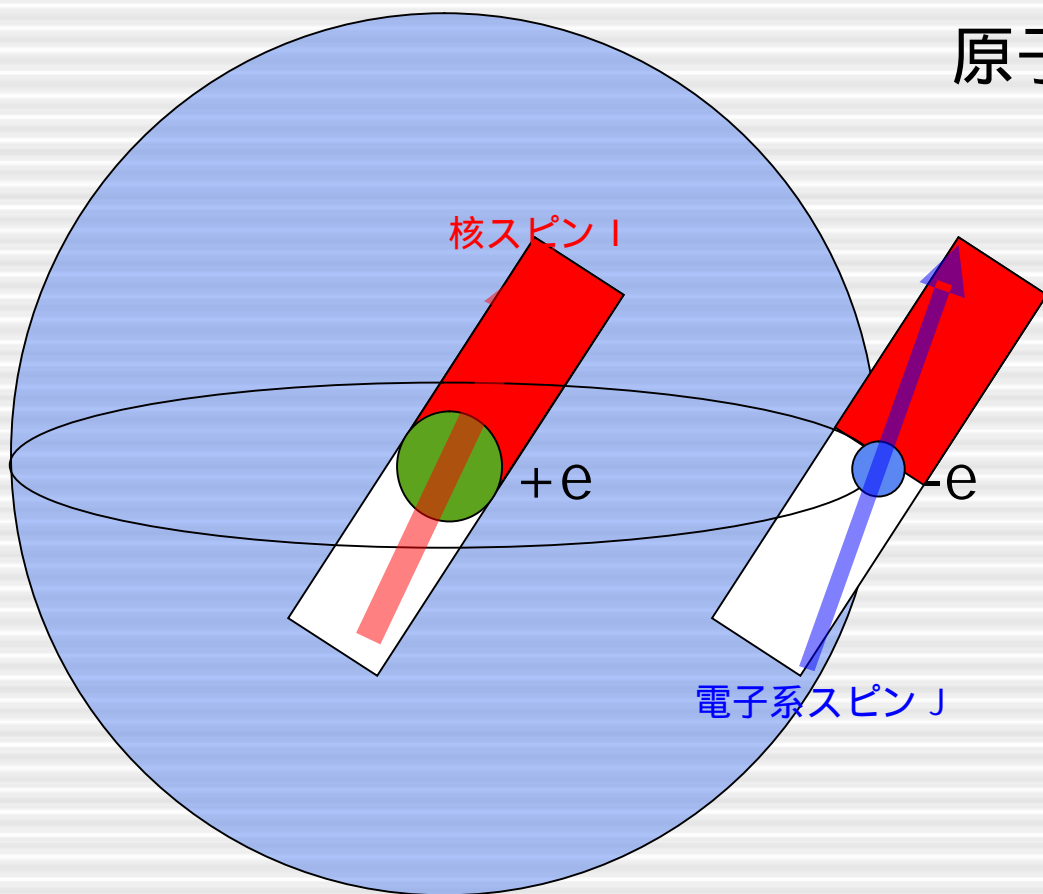
『超流動ヘリウム中に停止したRI原子のレーザー分光法』

に着目

ex)  $\beta$ -NMR method



# Hyperfine structure



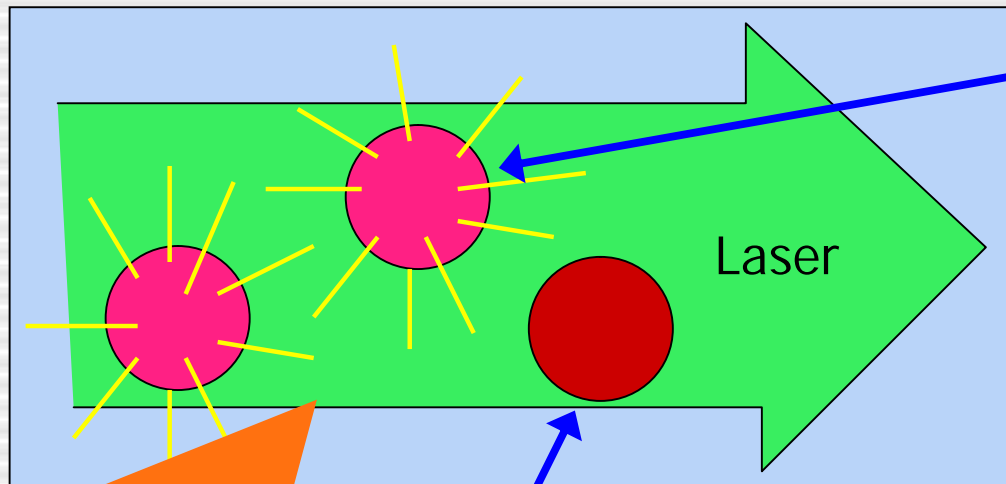
原子（核外電子系）準位

電子と原子核の相互作用

- 電荷
- スピン・軌道相互作用  
Fine structure
- スピン・スピン相互作用  
(磁気双極子相互作用)
- 電気四重極相互作用  
・  
・  
hyperfine structure

# Merits in Optical Detection

## 停止RI原子のレーザー分光



RI原子を繰り返しレーザー励起  
→ 脱励起光を繰り返し検出

1 核子から**多数**の信号検出  
**高統計測定可能**

RI beam

他種のRI原子はレーザー光を吸収不可能  
**目的の核種のみ**信号放出 **低B.G測定可能**

# Demerits in Optical Detection

停止RI原子のレーザー分光実験における問題点

・減速、停止、トラップ時の効率

・適応可能な元素の制限

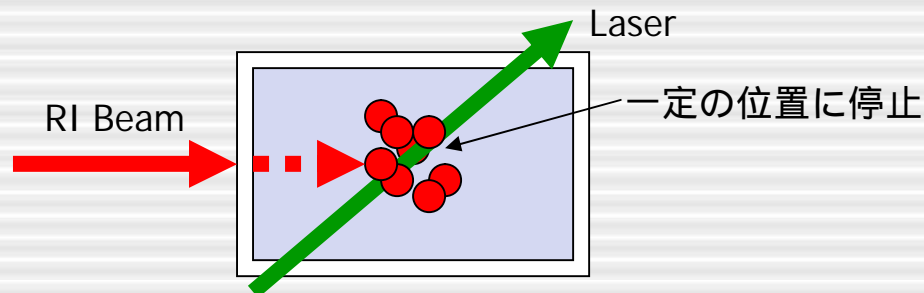
・レーザー散乱光のB.G.

超流動ヘリウム中だと・・・

高密度なHe中に打ち込み  
停止したRI原子をすべて観測  
高効率でRI原子を捕集可能

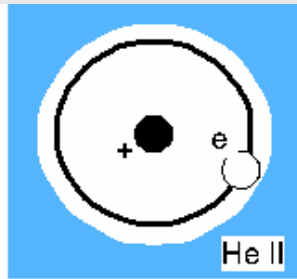
超流動ヘリウム中の  
特異な原子分光スペクトルを利用  
分光実験での問題点を解消

まわりのヘリウム原子が影響



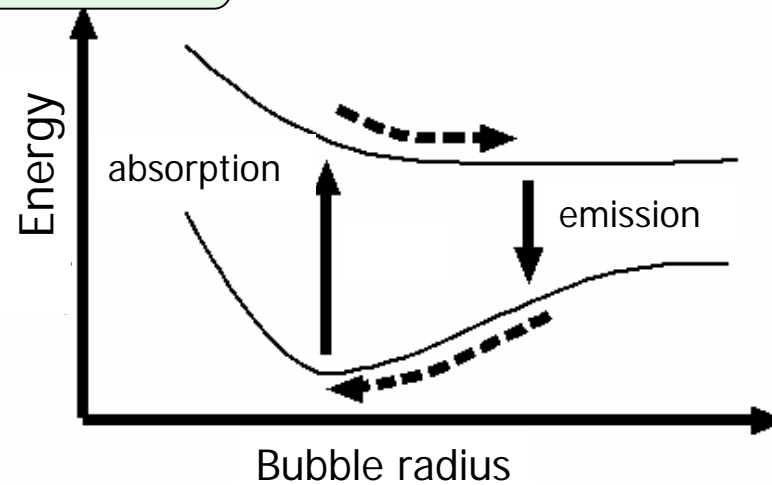
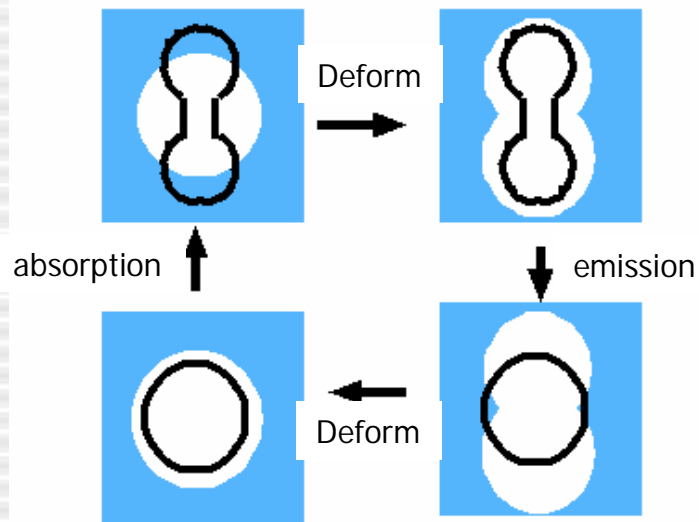
# Effect of surrounding He atoms

原子の励起スペクトル in He II ( 短波長側にシフト  
スペクトル幅が拡大 )



HeII中の原子：まわりのHe原子を押しのける(パウリ原理)

## バブル・モデル



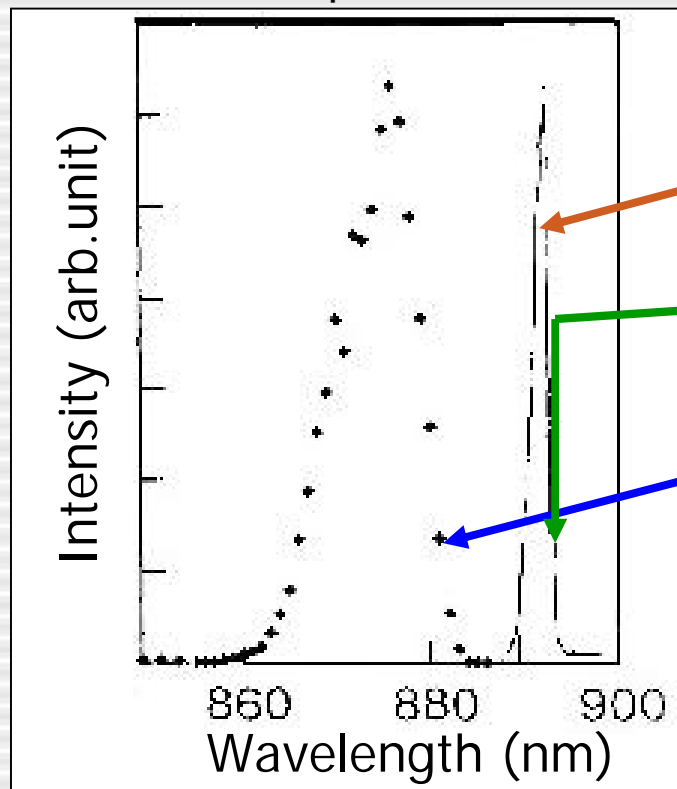
Energy levels in the ground state and excited state as a function of bubble radius.

# Excitation Spectrum in He II

原子の励起スペクトル in He II (

短波長側にシフト  
スペクトル幅が拡大

<sup>133</sup>Cs atomic spectra in He II



emission : 中心 ~892 nm, 幅 ~3 nm

(in vacuum: 894.347nm)

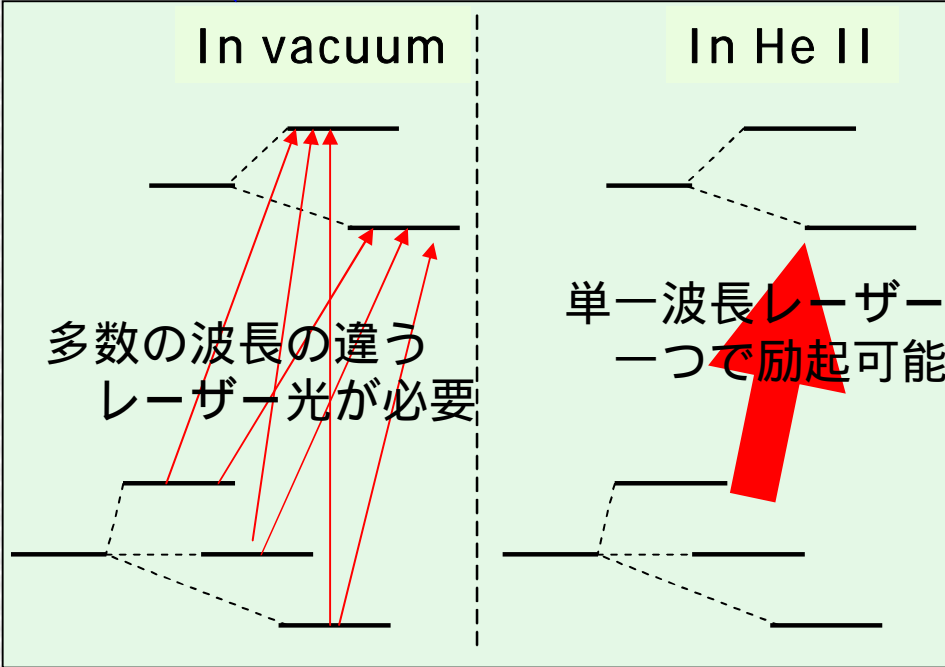
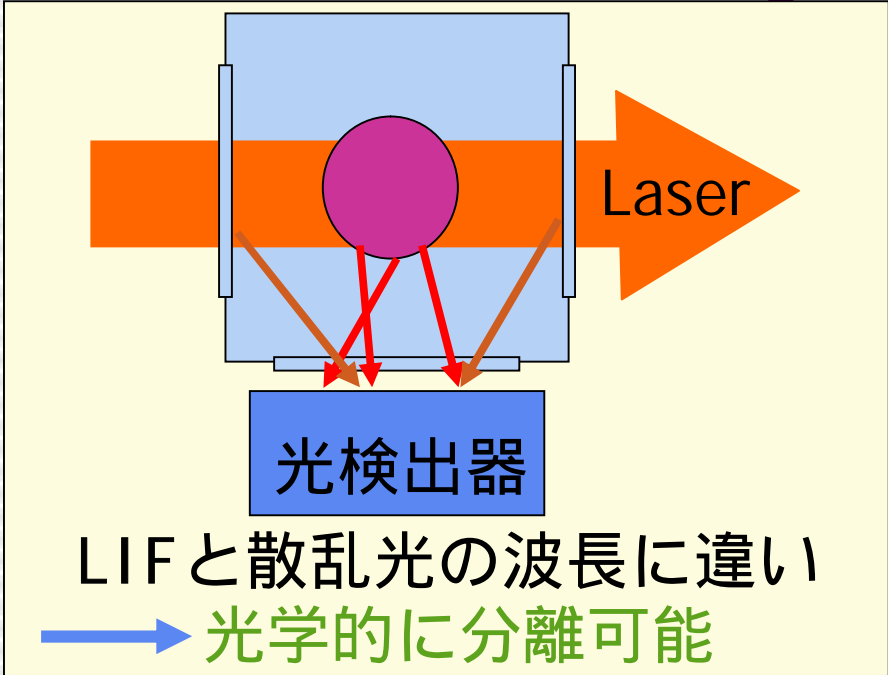
absorption : 中心 ~876 nm, 幅 ~15 nm

吸収波長 発光波長

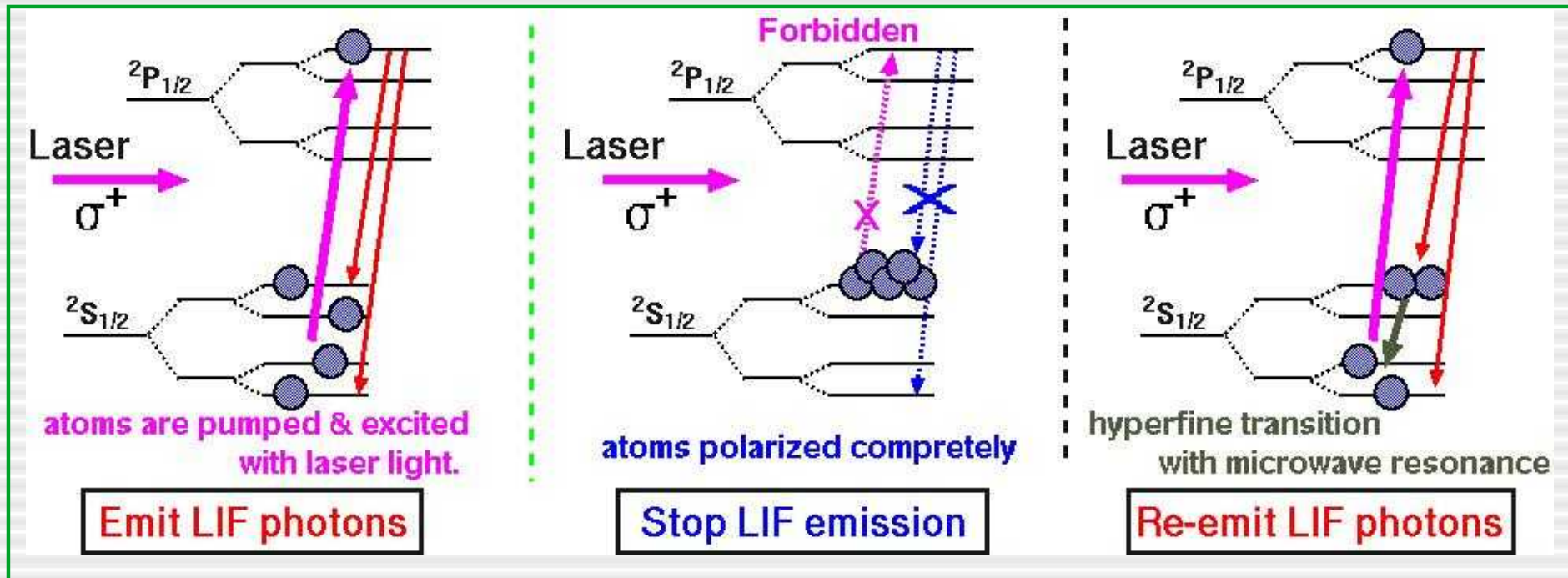


# Merit in He II

原子の励起スペクトル in He II ( 短波長側にシフト  
スペクトル幅が拡大 )



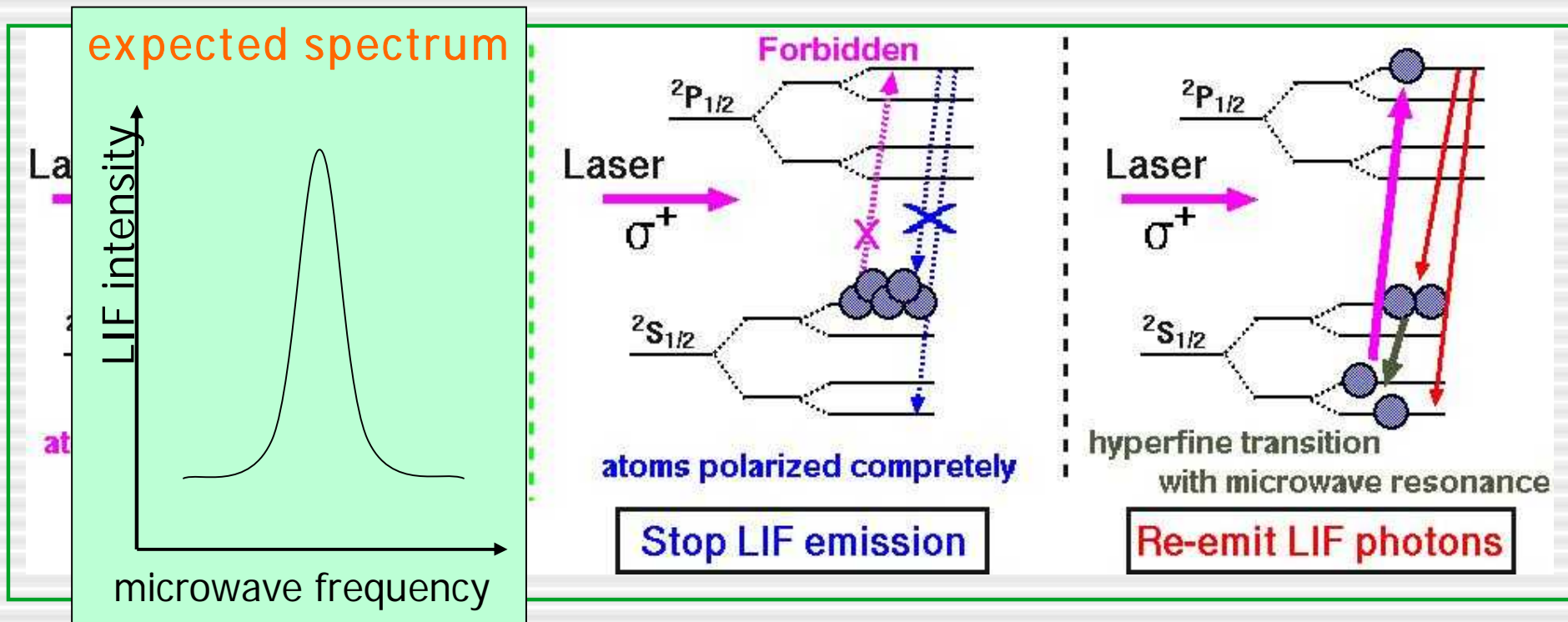
# Double Resonance Method



Polarized atoms : Can not absorb circularly polarized laser light.

$$\text{LIF Intensity} = 1 - P_z$$

# Double Resonance Method

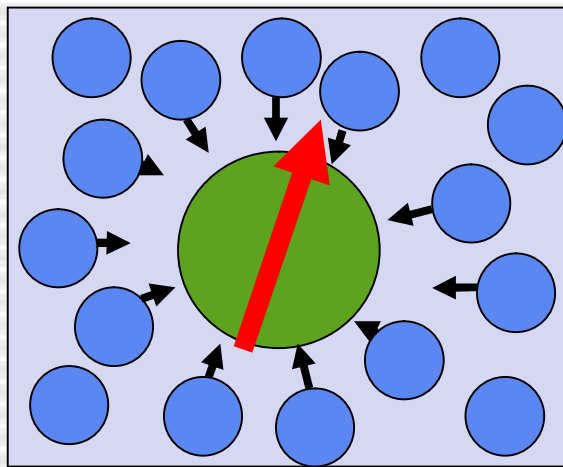


Polarized atoms : Can not absorb circularly polarized laser light.

$$\text{LIF Intensity} \propto 1 - P_z$$

# Spin relaxation in HeII

HeII中の問題点：スピン偏極の緩和速度が未知



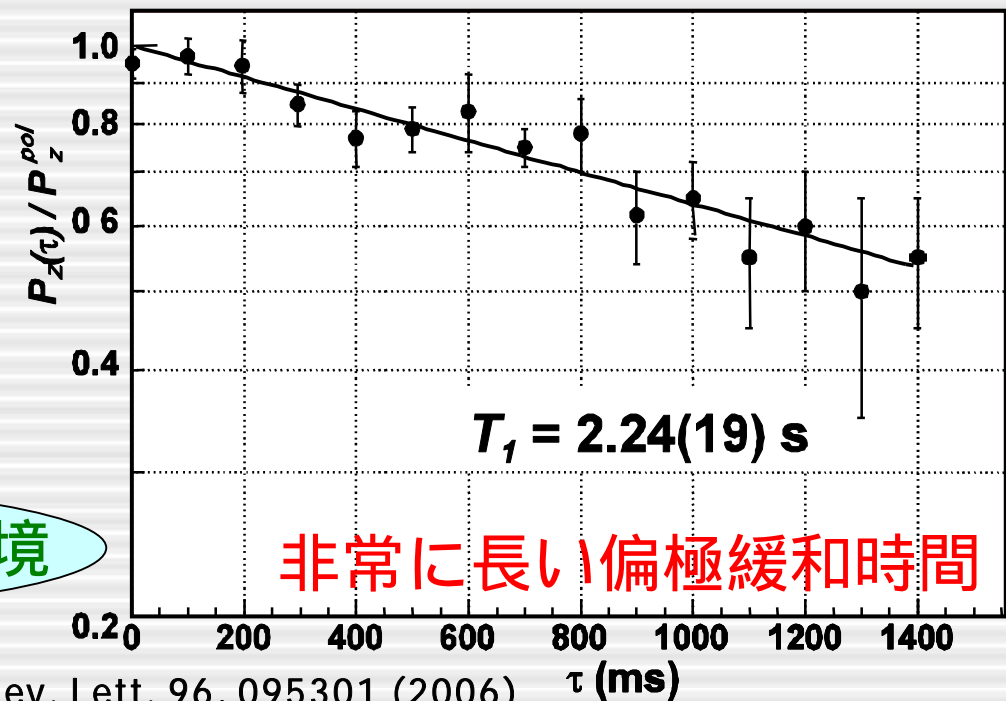
He II 中の原子

周りのヘリウム原子からの相互作用

スピンレス  
小さな分極率  
低温環境

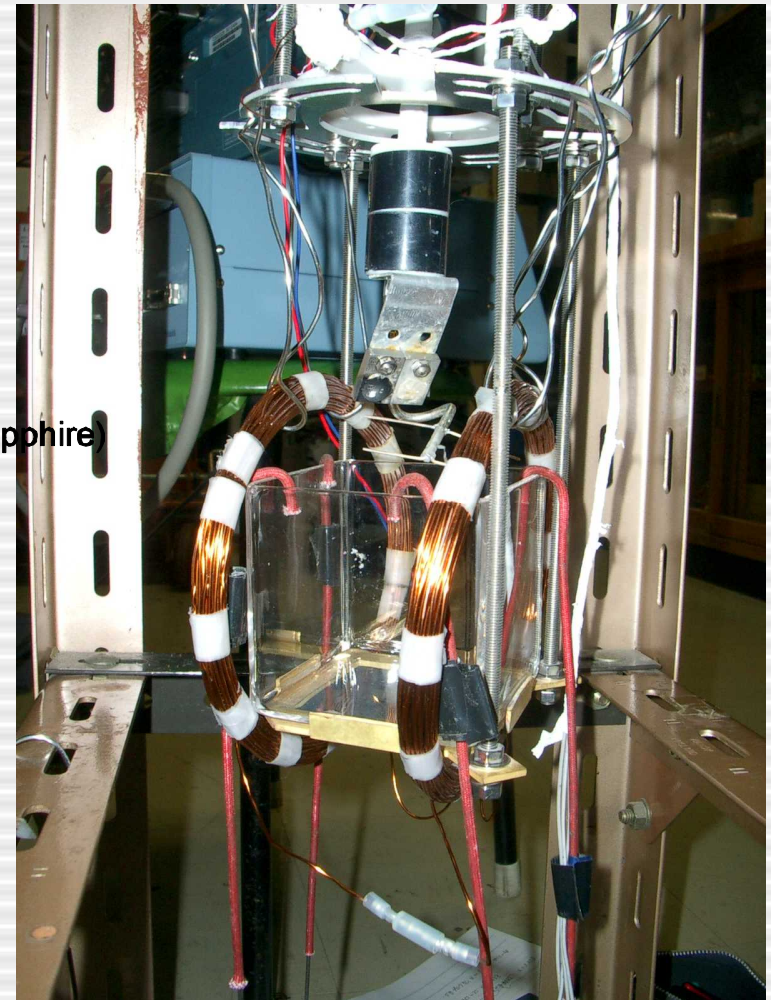
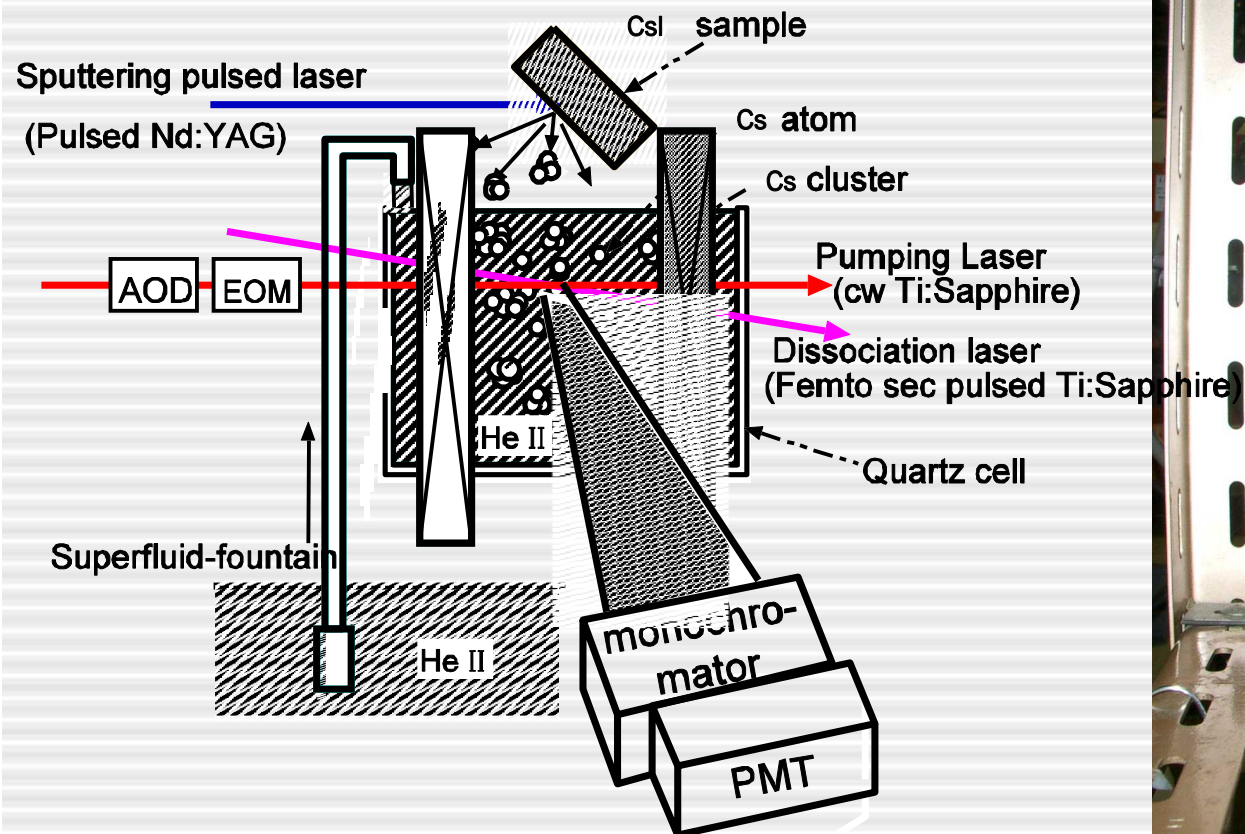
実際に測定： $^{133}\text{Cs}$ 原子

偏極生成・測定に適した環境



非常に長い偏極緩和時間

# Experimental Setup





# Double resonance peak in He I

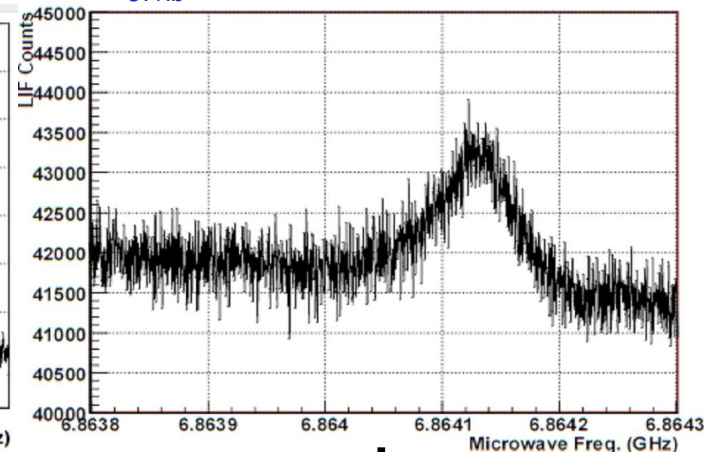
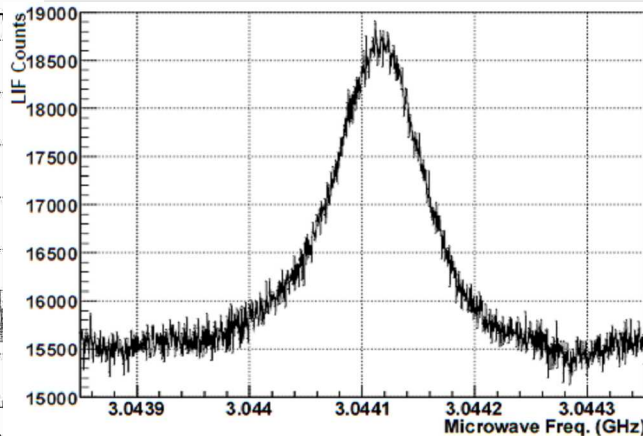
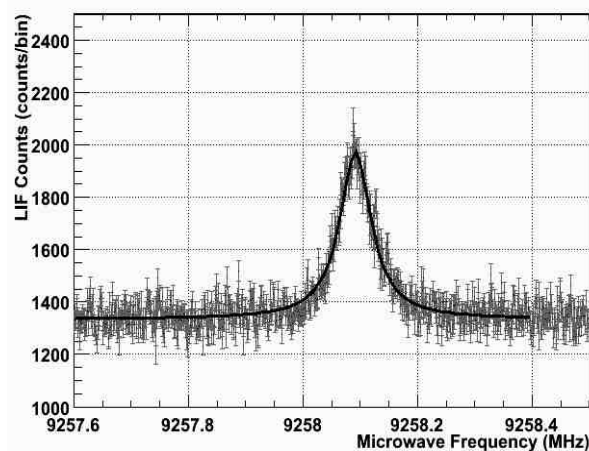
二重共鳴法を用いて実際に超微細構造を測定：安定核 $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{85,87}\text{Rb}$

## 測定された二重共鳴ピーク

$^{133}\text{Cs} = 9.2580915 (4) \text{ GHz}$

$^{85}\text{Rb} = 3.0441141 (2) \text{ GHz}$

$^{87}\text{Rb} = 6.86414 (10) \text{ GHz}$



$A_{^{133}\text{Cs}} = 2.312\,76(2) \text{ GHz}$   
(Preliminary)

$A_{^{85}\text{Rb}} = 1.01702(2) \text{ GHz}$   
(Preliminary)

$A_{^{87}\text{Rb}} = 3.43517(4) \text{ GHz}$   
(Preliminary)

# Pressure effect in HeII

## Hyperfine coupling constant

	HeII (GHz)	vacuum (GHz)	HeII/vacuum ratio
$^{133}\text{Cs}$	2.31276(2)	2.29815794	1.00635(1)
Rb	85	1.01702(2)	1.00505(2)
	87	3.43517(4)	1.00522(1)

$$A = \mu_I \langle H \rangle / I \cdot J$$

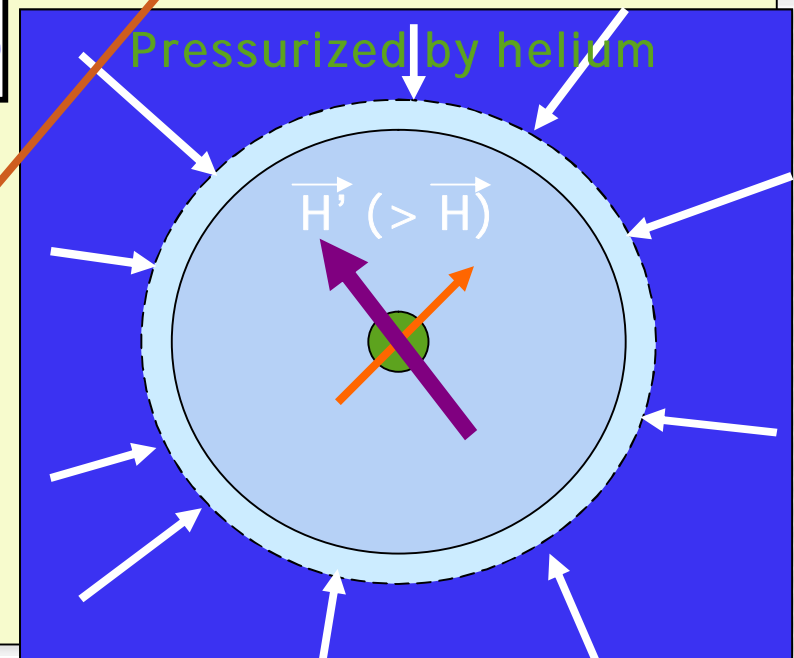
He II 中の  $\langle H \rangle$  の差

周りのHe原子が原子を押しつぶす  
核外電子軌道に影響

Csの受ける摂動 > Rbの受ける摂動

< 1% の増加

Csの変化量 > Rbの変化量



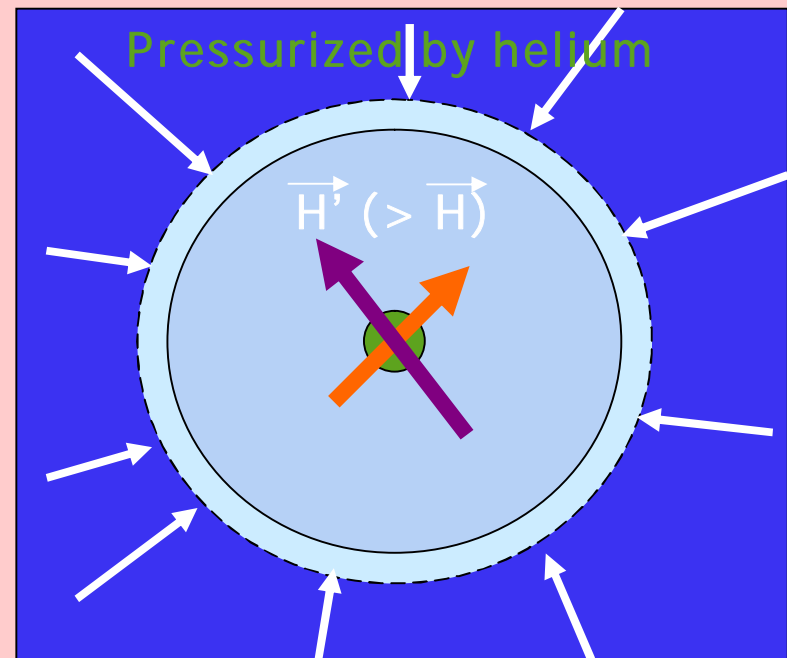
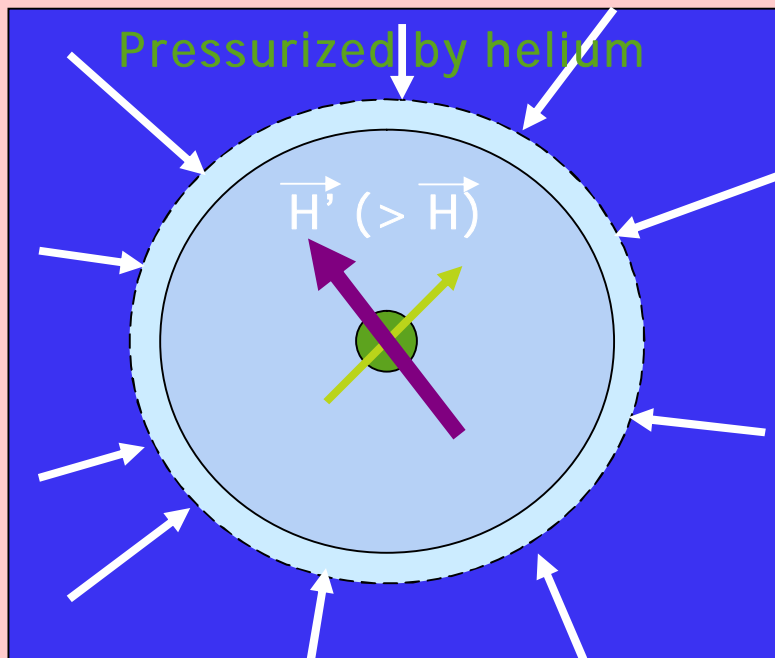
# Determination of $^{85}\text{Rb}$ moment

$^{87}\text{Rb}$ 核の磁気モーメントを参照として $^{85}\text{Rb}$ 核のモーメントを導出

$^{85}\text{Rb}$

$$A = \mu_I \langle H \rangle / I \cdot J \quad g_I \langle H \rangle$$

$^{87}\text{Rb}$



同位体なら・・・

$$A^{85\text{Rb}} / g_I^{85\text{Rb}} = A^{87\text{Rb}} / g_I^{87\text{Rb}}$$



# Determination of $^{85}\text{Rb}$ moment

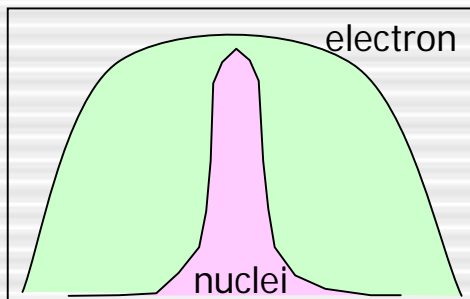
$^{87}\text{Rb}$ 核の磁気モーメントを参照として $^{85}\text{Rb}$ 核のモーメントを導出

$$\mu_I^{85\text{Rb}} = g_I^{85\text{Rb}} I^{85\text{Rb}} = I^{85\text{Rb}} g_I^{87\text{Rb}} \times \frac{A^{85\text{Rb}}}{A^{87\text{Rb}}} = \underline{1.35784(1)\mu_N}$$

(ただし、 $g_I^{87\text{Rb}} I^{87\text{Rb}} = 2.751818(2)\mu_N$ を用いた)

実際の核モーメント： $\mu_I^{85\text{Rb}} = 1.3533515(8)\mu_N$

- 核モーメントは目標どおり1%以内の精度で決定可能
- わずかなズレ(~0.3%)はhyperfine anomalyなど高次効果を示唆



核外電子波動関数の原子核位置における不均一性と  
原子核の核子密度ひろがり起因する磁気相互作用

# Hyperfine anomaly in HeII

Hyperfine anomalyまで考慮に入れると...

$$\mu_I^{85\text{Rb}} = g_I^{85\text{Rb}} I^{85\text{Rb}} = I^{85\text{Rb}} g_I^{87\text{Rb}} \times \frac{A^{85\text{Rb}}}{A^{87\text{Rb}}} \frac{1}{(1 + \Delta^{85})}$$

hyperfine anomaly

In HeII

$$\Delta_{\text{HeII}}^{85} = 0.3317(7)\%$$

In vacuum

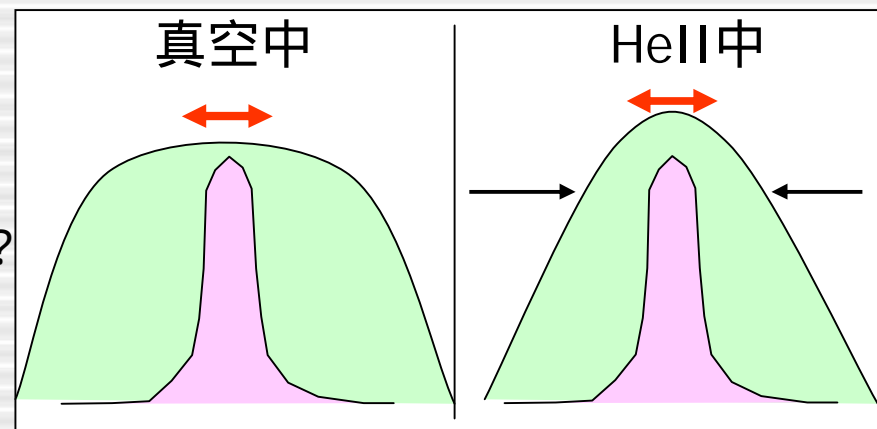
$$\Delta_{\text{vacuum}}^{85} = 0.3487\%$$

~ 5%の差

現在、原因を考察中

まわりから受ける圧力による、  
電子存在確率の不均一性変化が影響？

原子核半径、密度分布に関する  
新しい情報の可能性



# Conclusion

超流動ヘリウム中でのレーザー・マイクロ波二重共鳴法  
安定核 $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{85,87}\text{Rb}$ の超微細構造を測定

- 核モーメントを1%以下の精度で決定可能

RF共鳴を用いれば核スピンも決定可能

理論的には電気四重極モーメントも同時に測定可能

- hyperfine anomaly効果も数%の精度で決定可能

真空中の値と~5%のズレ

核内核子の密度分布に対する新しい情報？

~ Next Plan ~

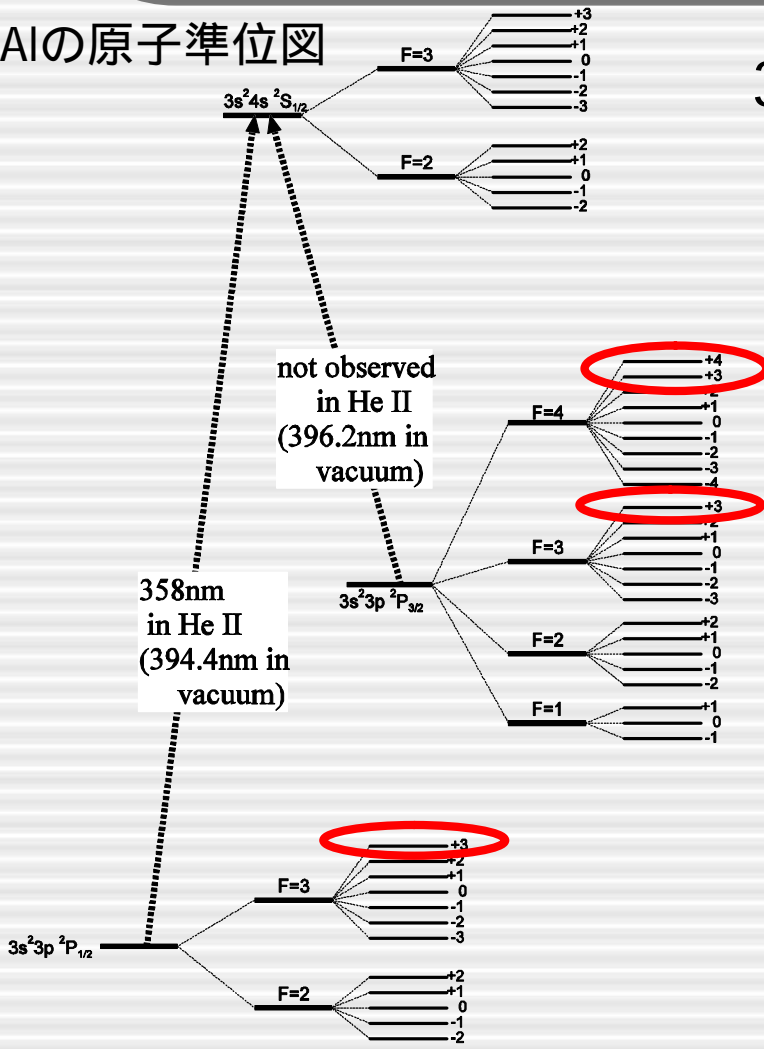
- HeIIの影響について考察

- 不安定核ビームを用いた測定

- Al, Mg原子の光ポンピング

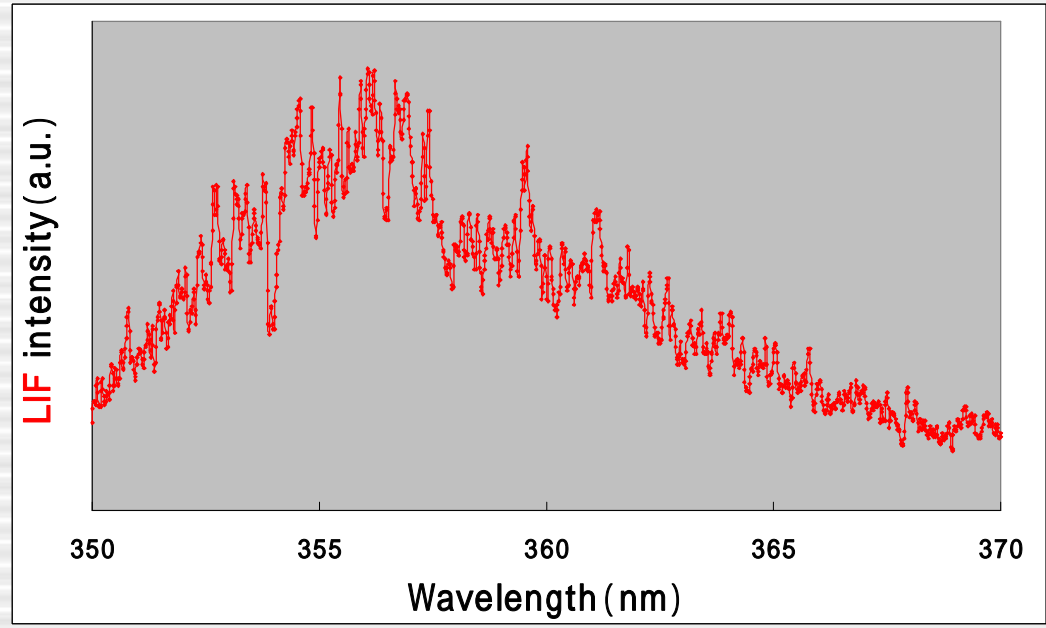
# Optical Pumping of Al atoms

$^{27}\text{Al}$ の原子準位図



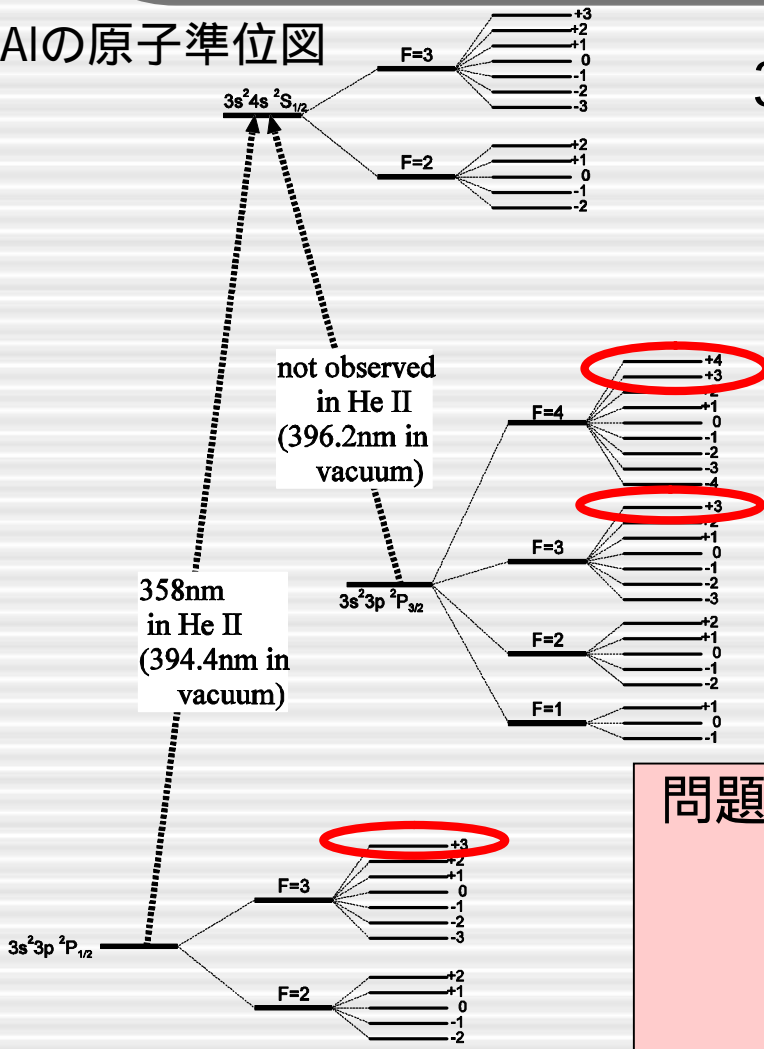
$3s^2 3p \ ^2P_{1/2,3/2}$

$3s^2 4s \ ^2S_{1/2}$  遷移を利用



# Optical Pumping of Al atoms

$^{27}\text{Al}$ の原子準位図



$3s^2 3p \ ^2P_{1/2,3/2}$

$3s^2 4s \ ^2S_{1/2}$  遷移を利用

•  $3s^2 3p \ ^2P_{1/2,3/2}, m_F > +3$ の準位

円偏光(+)を吸収不可能

特定の磁気状態に原子状態が集中  
= 偏極生成可能！！

問題点：基底状態( $3s^2 3p \ ^2P_{1/2,3/2}$ )の偏極緩和時間

$^2P_{3/2}$ ：電子軌道が非対称 緩和しやすい

$^2P_{1/2}$ ：電子軌道が球対称 緩和しにくい

$^2P_{1/2}$ では偏極生成可能？

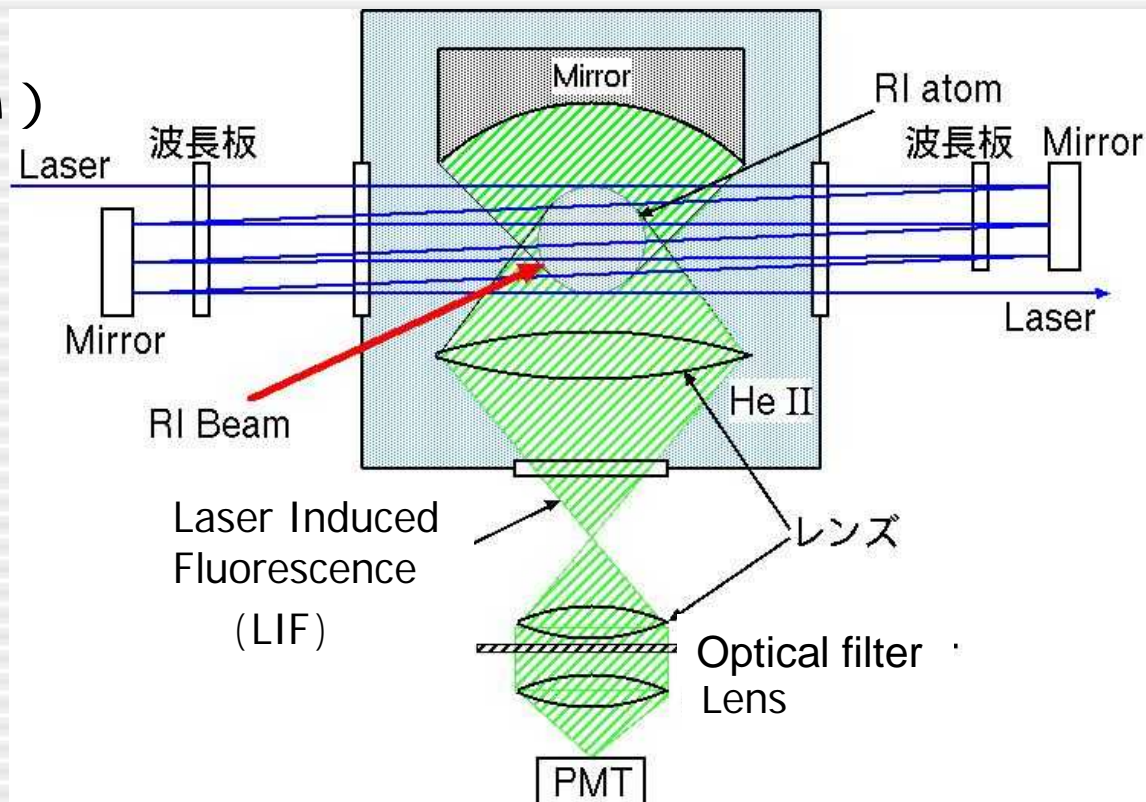
# Double Resonance Method for RI Beam Experiment

RIビームを用いた実験：Cs同位体などでテスト実験

光検出が可能なビーム強度は？

目標：10cps  
(purityは気にしない)

- 立体角の向上
- 検出効率の向上
- その他...



# Conclusion

超流動ヘリウム中でのレーザー・マイクロ波二重共鳴法  
安定核 $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{85,87}\text{Rb}$ の超微細構造を測定

- 核モーメントを1%以下の精度で決定可能

RF共鳴を用いれば核スピンも決定可能

理論的には電気四重極モーメントも同時に測定可能

- hyperfine anomaly効果も数%の精度で決定可能

真空中の値と~5%のズレ

核内核子の密度分布に対する新しい情報？

~ Next Plan ~

- HeIIの影響について考察

- 不安定核ビームを用いた測定

- Al, Mg原子の光ポンピング