

# 極低温SrLi極性分子を用いた 電子EDM探索の可能性



東京大学大学院総合文化研究科  
鳥井寿夫、青木貴稔、生駒大輔、大坪望

2009/8/4 Fundamental Physics using Atoms

去年

# 原子集団のディッケ状態と その応用



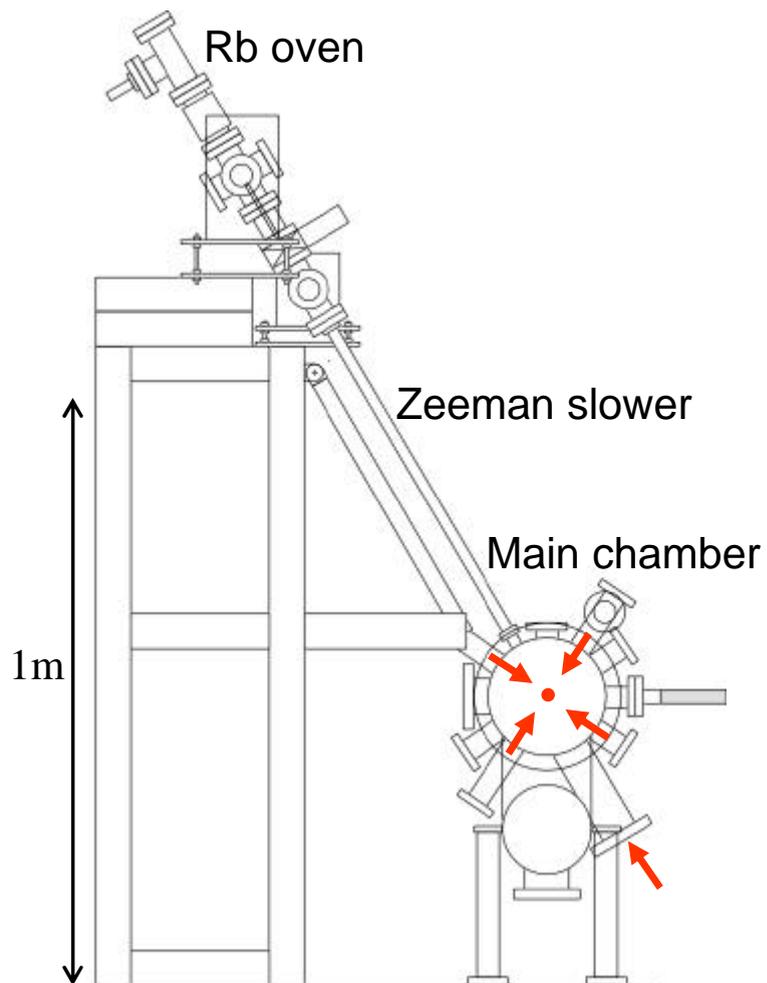
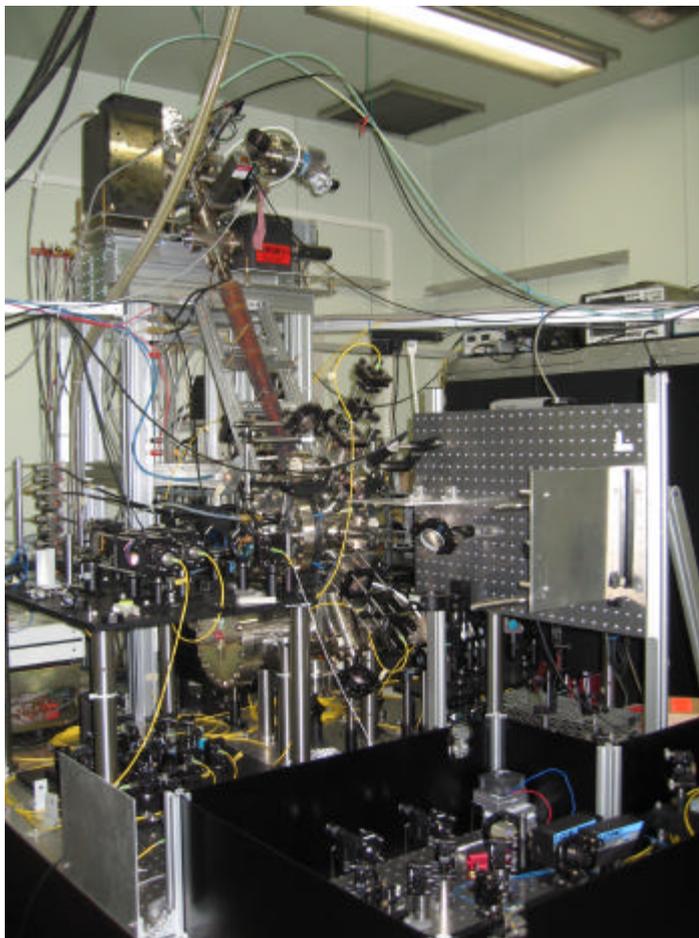
東京大学大学院総合文化研究科  
鳥井寿夫、吉川豊、中山和之、久我隆弘

# Outline

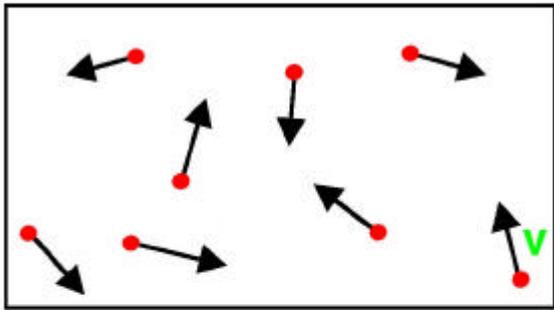
- 原子気体BECの作り方、観測法
- BECにおける超放射レイリー散乱
- Dicke状態による超放射の説明
- 熱的原子集団における超放射散乱
- BECの超放射 (ディッケ状態) を利用した光パルスの多重保存

やり残した

# Rb原子ボース凝縮体生成装置@駒場



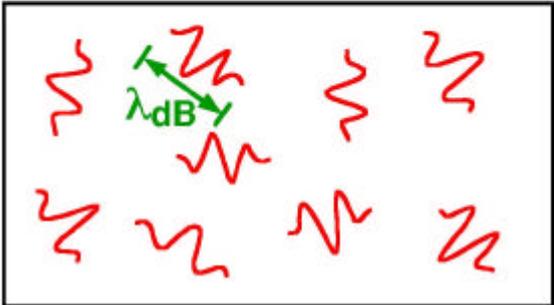
$T \sim 300\text{K}$   
 $dB \sim 0.1\text{\AA}$   
 $\sim 10^{-12}$



原子は粒子のように振舞う

**レーザー冷却**

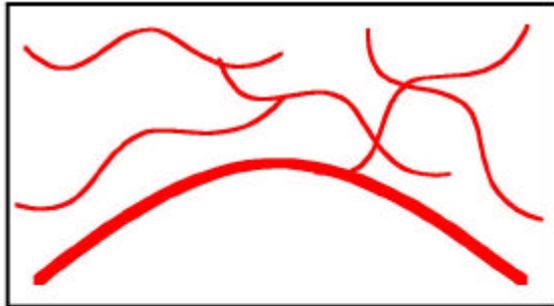
$T \sim 10\ \mu\text{K}$   
 $dB \sim 10\text{nm}$   
 $\sim 10^{-6}$



粒子の波動性が顕著になる

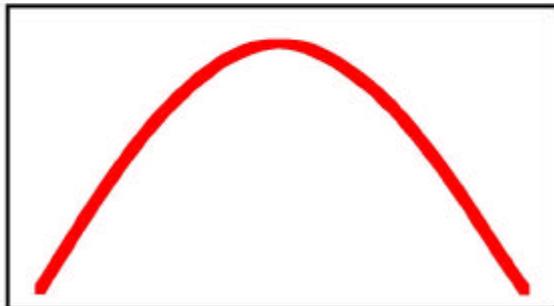
**蒸発冷却**

$T \sim 1\ \mu\text{K}$   
 $dB \sim 100\text{nm}$   
 $\sim 1$



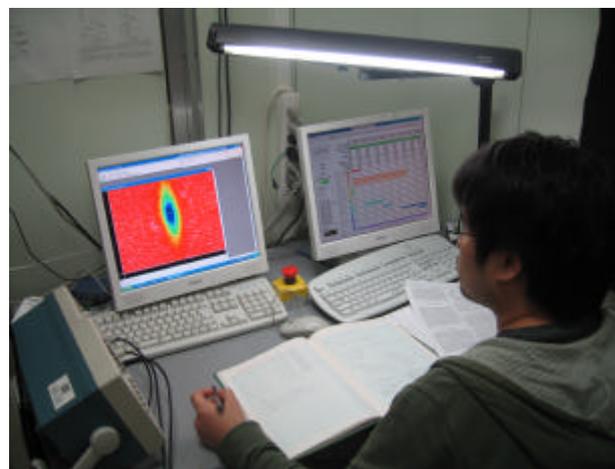
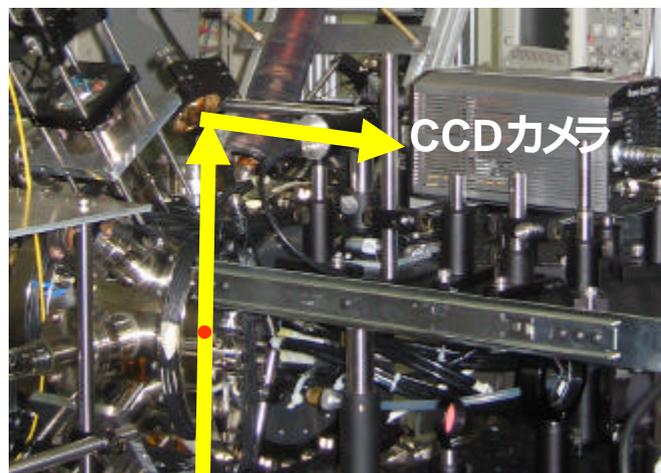
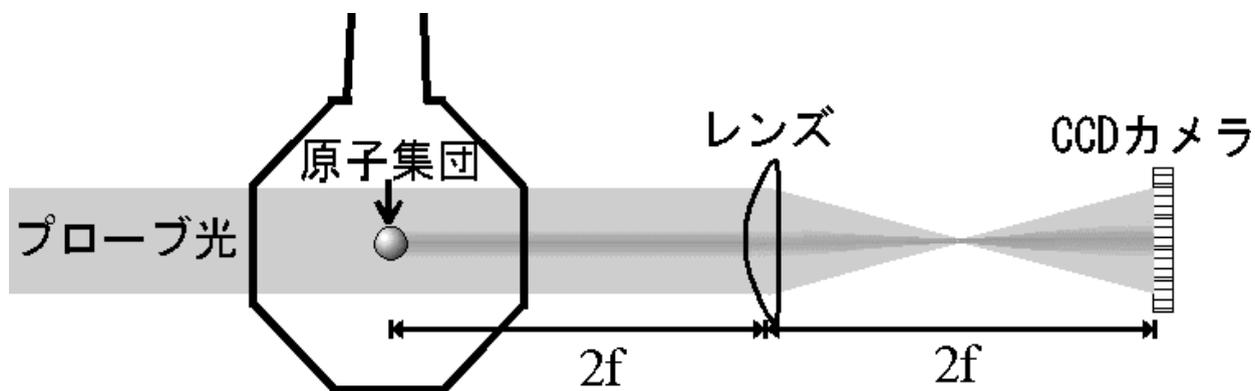
波が重なり始める  
(ボース統計性が顕著になる)

$T \sim 100\text{nK}$   
 $dB \sim 1\ \mu\text{m}$   
 $\sim 10^6$



一つの巨大な波  
(ボース・アインシュタイン凝縮)

# BEC相転移の確認 (吸収イメージング法)

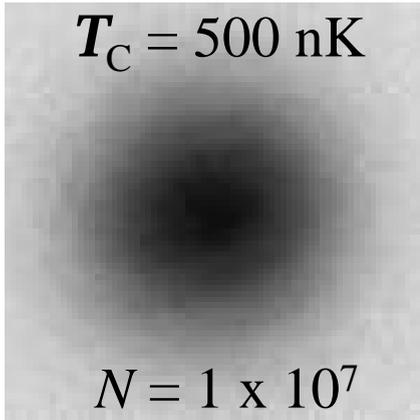


# BEC Phase Transition

(52-ms time-of-flight absorption images)

thermal cloud at  $T_C$

$$T_C = 500 \text{ nK}$$

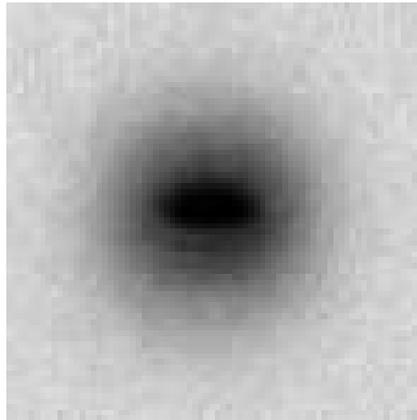


$$N = 1 \times 10^7$$

2mm

$$\nu_{\text{rf}} = 1.24 \text{ MHz}$$

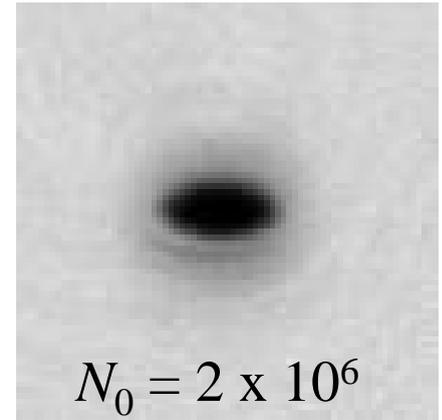
bimodal (thermal + BEC)



$$N_0 = 2 \times 10^6$$

$$\nu_{\text{rf}} = 1.20 \text{ MHz}$$

Pure BEC



$$\nu_{\text{rf}} = 1.16 \text{ MHz}$$

# Comparison between ordinary and superradiant emission

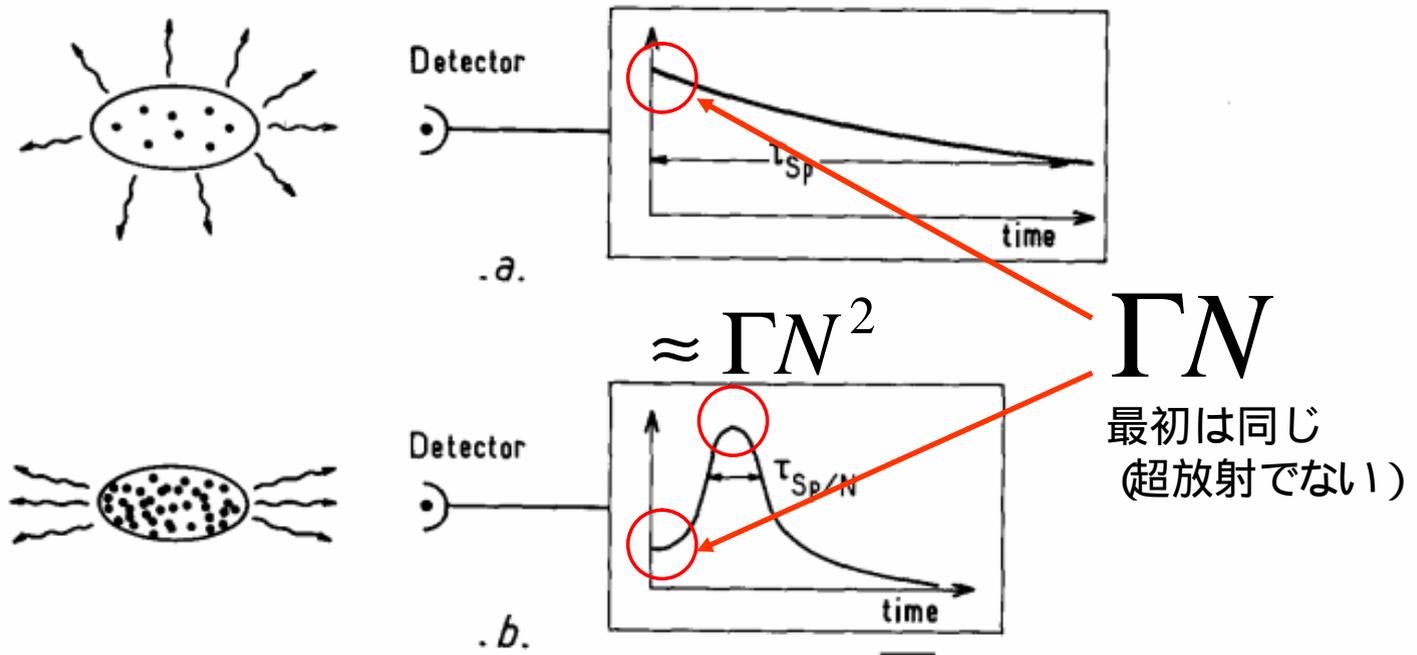
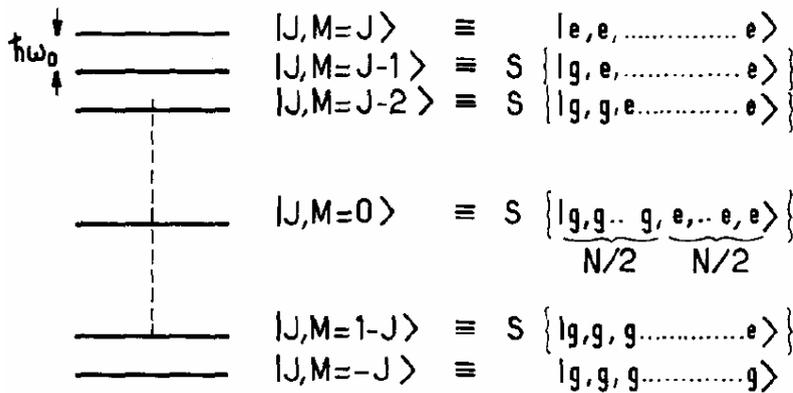


Fig. 1. Comparison between the general characteristics of ordinary fluorescence and superradiance experiments. (a) Ordinary spontaneous emission is essentially isotropic with an exponentially decaying intensity (time constant  $\tau_{sp}$ ). (b) Superradiance is anisotropic with an emission occurring in a short burst of duration  $\sim \tau_{sp}/N$ .

From M. Gross and S. Haroche, Phys. Rep. **93**, 301 (1982)

# N-atom spontaneous emission

N-atom system      N spin-1/2 system with the total spin  $J = N/2$   
 (assumption: *Indiscernability* of the atoms with respect to photon emission)



Spontaneous emission rate of the N-atom system:

$$\begin{aligned}
 \Gamma_N &= \Gamma \langle J, M | J_+ J_- | J, M \rangle \\
 &= \Gamma (J + M)(J - M + 1) \\
 &= \Gamma N_e (N_g + 1)
 \end{aligned}$$



Enhancement by the number of photons already emitted

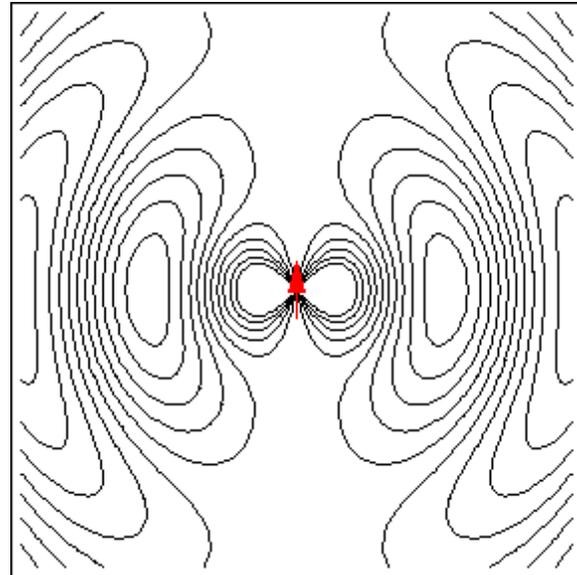
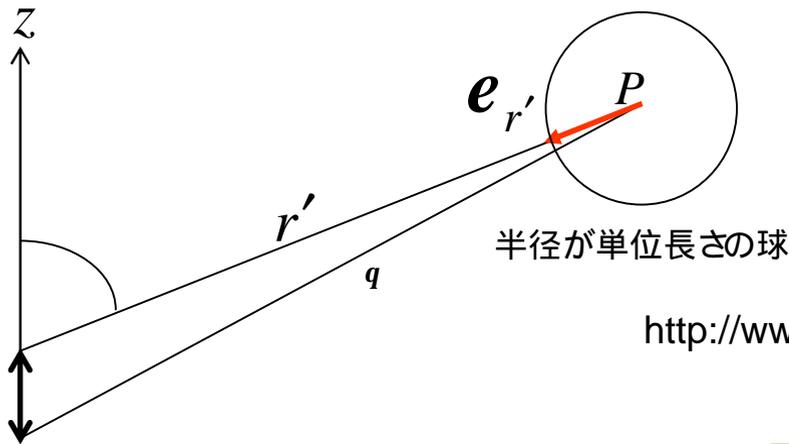
R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99 (1954)

# (問題1) 電気双極子モーメントが振幅 $p$ 角周波数 $\omega$ で振動している。単位時間に放射されるエネルギーを求めよ

ファインマンの教科書より

振動する電気双極子から放射される電磁場

$$\mathbf{E}_{\text{rad}} \cong -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{e}_{r'} \right]_{t-\frac{r'}{c}}$$



<http://www.eto.titech.ac.jp/contents/sub04/chapter02.html>

振動する電気双極子

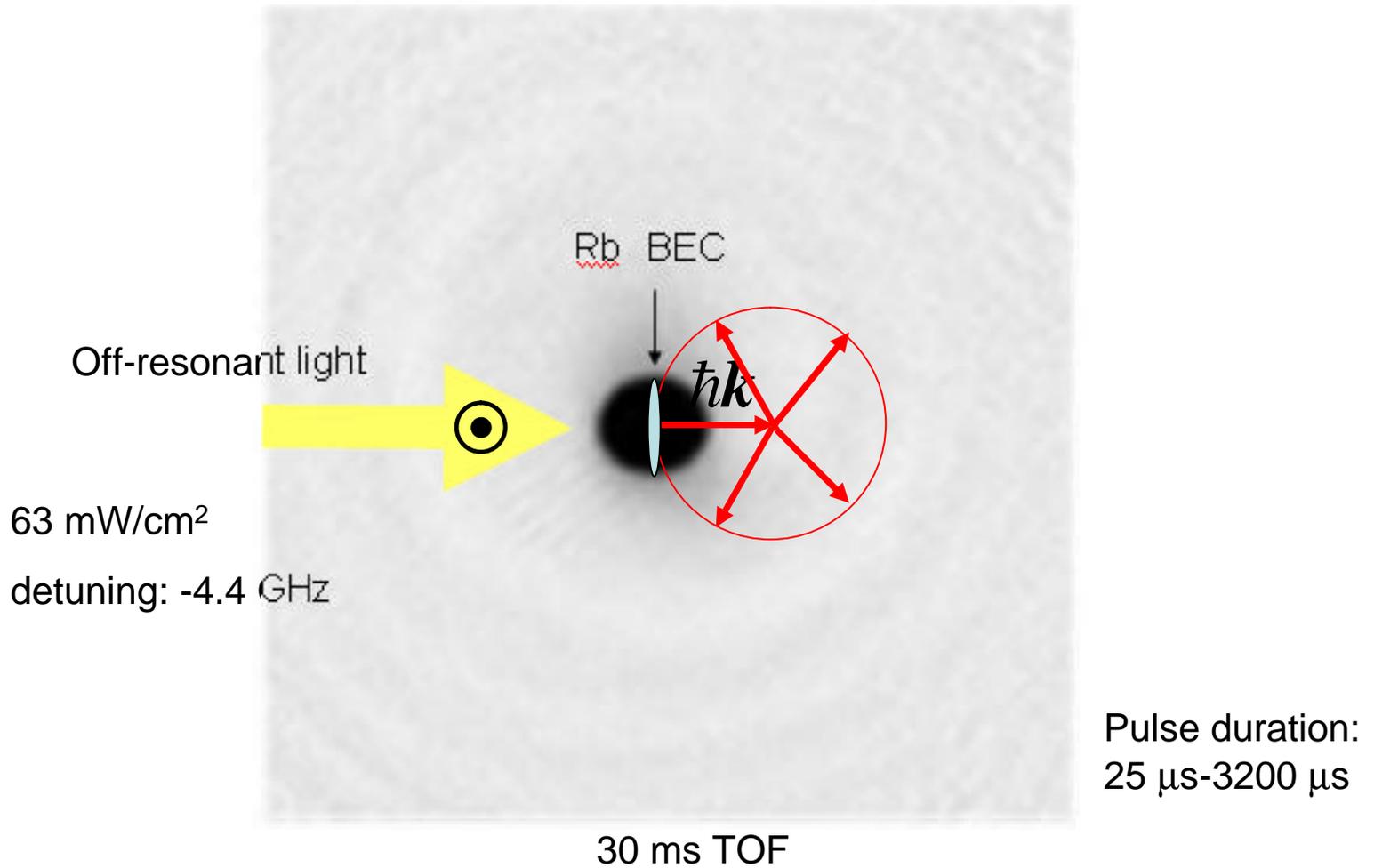
$$p(t) = p_0 \cos \omega t$$

**N<sup>2</sup>依存性**

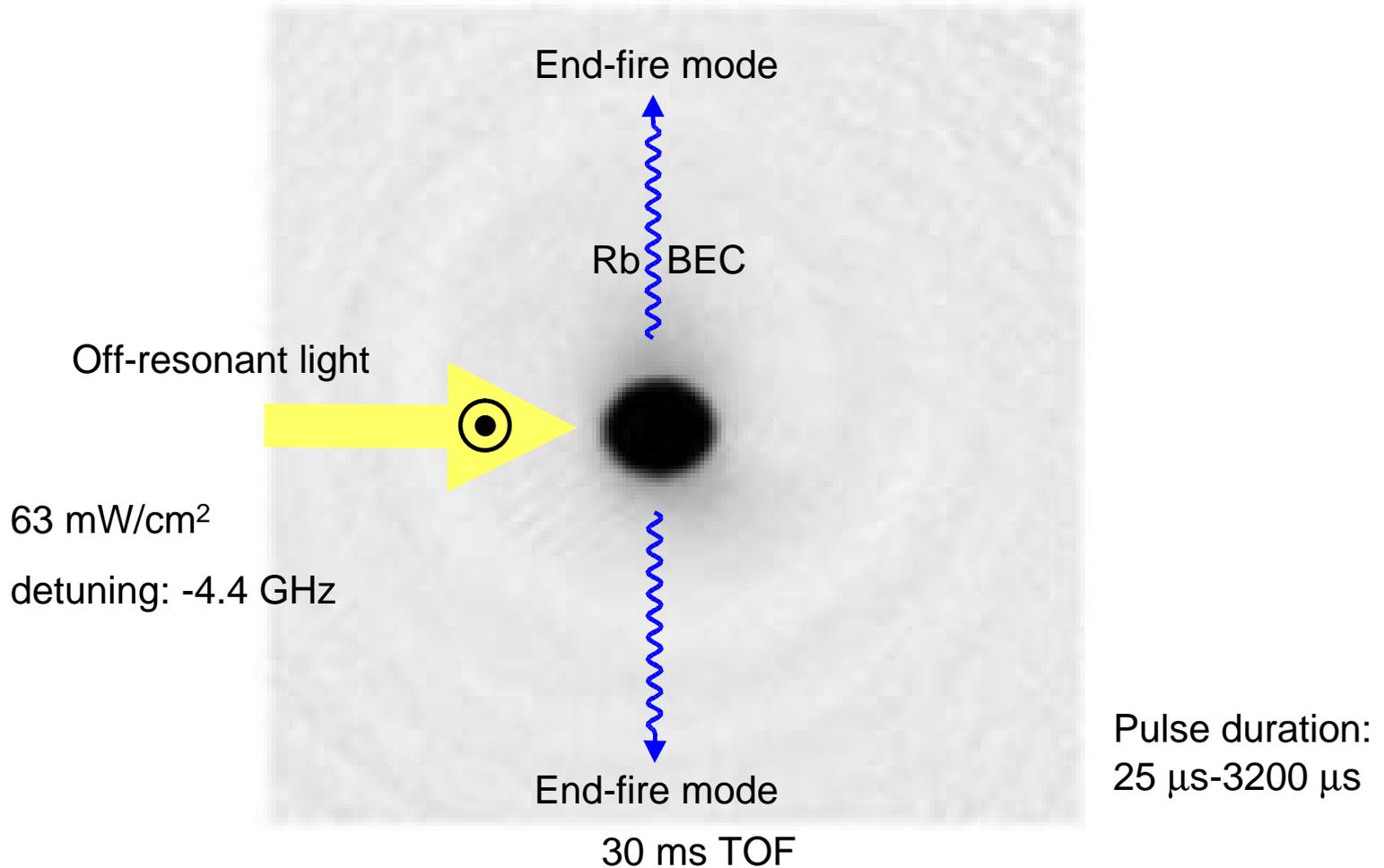
(答え) 
$$P = \frac{p_0^2 \omega^4}{12\pi\epsilon_0 c^3} \text{ (SI)} = \frac{p_0^2 \omega^4}{3c^3} \text{ (Gauss)}$$

# BECにおける 超放射レイリー散乱

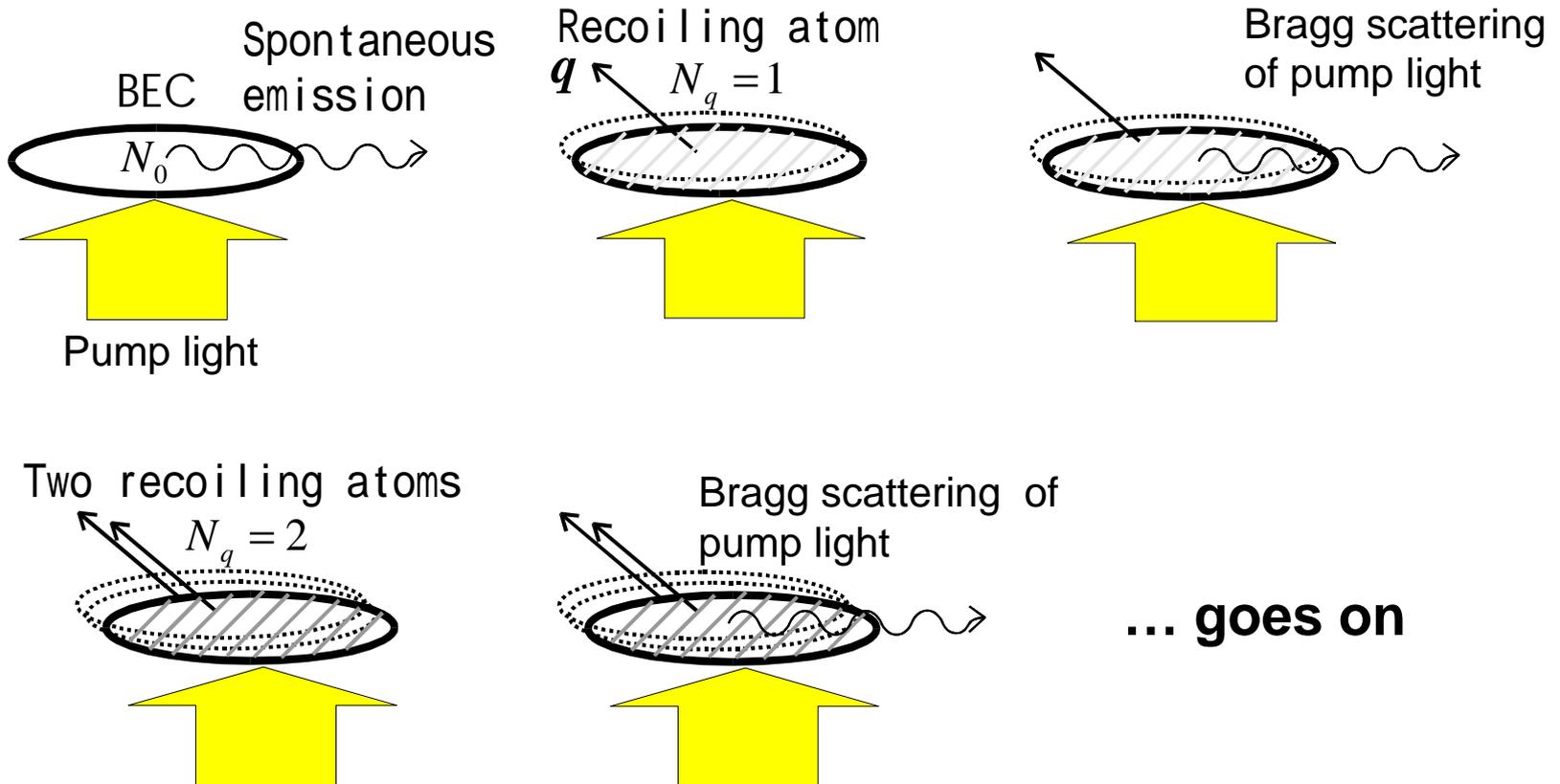
# Rayleigh scattering in a Rb BEC



# Rayleigh scattering in a Rb BEC



# Semiclassical interpretation of superradiance



The rate of light scattering is enhanced by the number of recoiling atoms

$$\dot{N}_q \propto N_0 N_q$$

**Amplification of matter-wave**

# 原子波増幅 (超放射) はフェルミオン でも熱的原子でも起こる

VOLUME 86, NUMBER 19

PHYSICAL REVIEW LETTERS

7 MAY 2001

---

## Does Matter Wave Amplification Work for Fermions?

Wolfgang Ketterle and Shin Inouye

*Department of Physics and Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology,  
Cambridge, Massachusetts 02139  
(Received 16 August 2000)*

We discuss the relationship between bosonic stimulation, density fluctuations, and matter wave gratings. It is shown that enhanced stimulated scattering, matter wave amplification, and atomic four-wave mixing do not require macroscopic occupation of a single quantum state. These processes are in principle possible for fermionic or nondegenerate samples, if they are prepared in a cooperative state. In practice, there are limitations due to short coherence times.



---

PRL 94, 083602 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
4 MARCH 2005

---

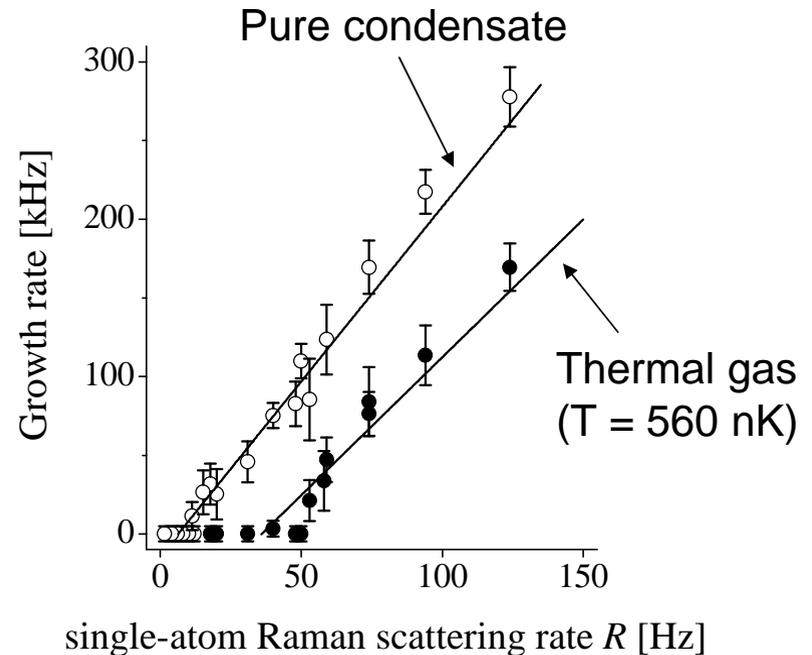
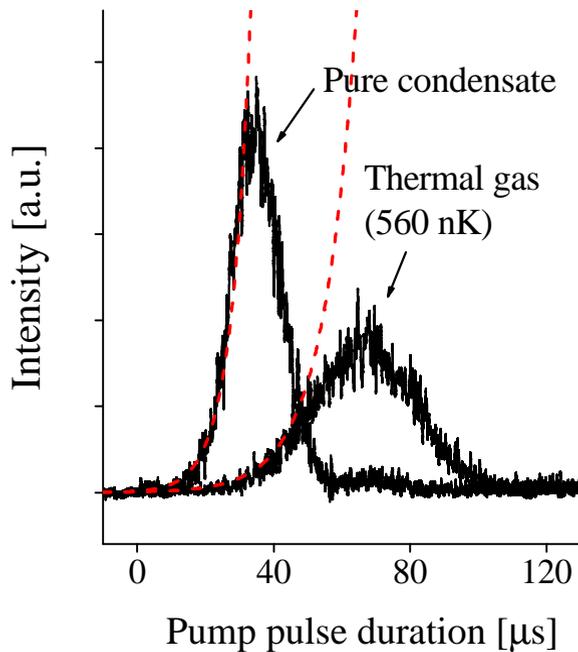
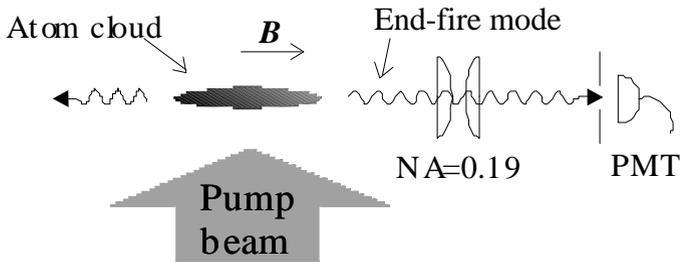
## Superradiant Light Scattering from Thermal Atomic Vapors

Yutaka Yoshikawa,\* Yoshio Torii, and Takahiro Kuga

*Institute of Physics, University of Tokyo, 3-8-1, Meguro-ku, Komaba, Tokyo 153-8902, Japan.  
(Received 12 July 2004; published 4 March 2005)*

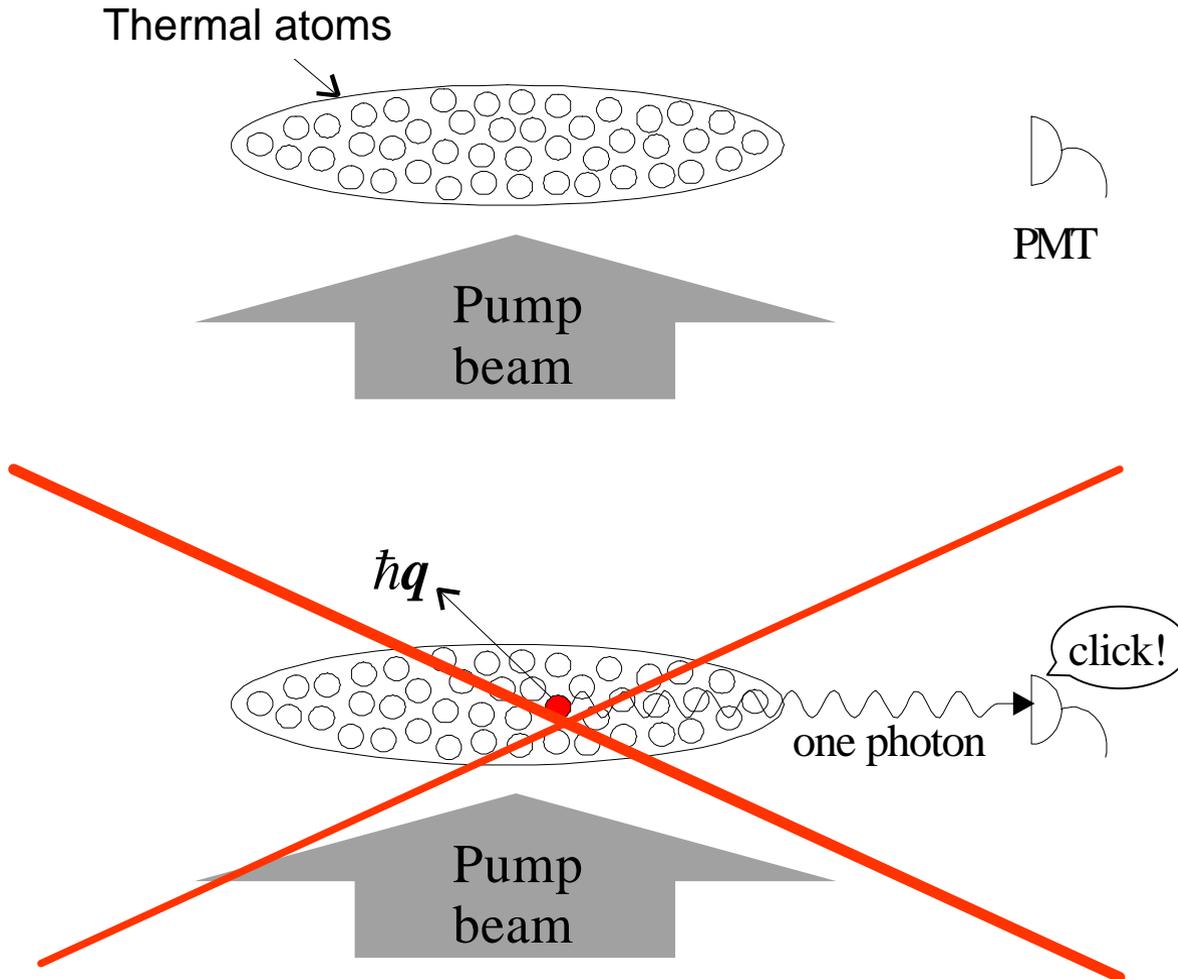
Superradiant light scattering from noncondensed, thermal atomic vapors was experimentally studied. We found that superradiant gain is independent of quantum degeneracy and determined only by the shape of the atomic cloud and a contained number of atoms. Superradiant pump-probe spectroscopy was also developed to measure the atomic correlation function, revealing the Doppler-width-limited coherence time of the thermal gas and sudden buildup of long-lived coherence below the transition temperature.

# Superradiance in a Thermal gas

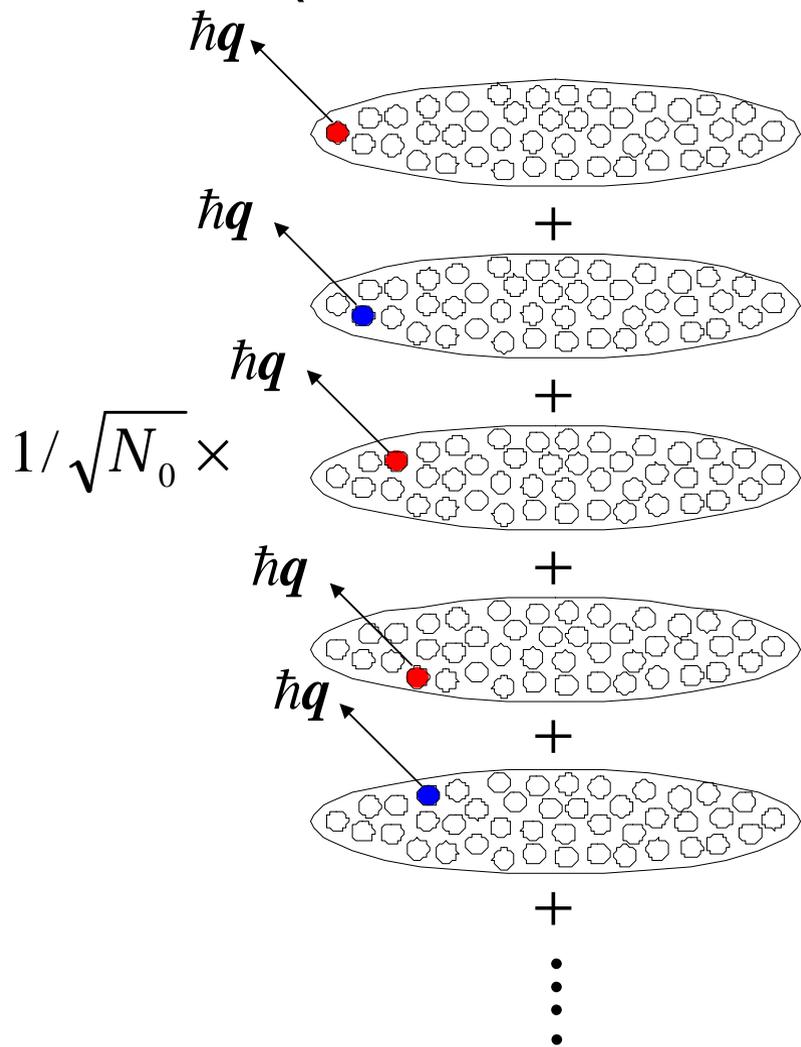


Y. Yoshikawa, Y. T. and T. Kuga, PRL **94** 083602 (2005)

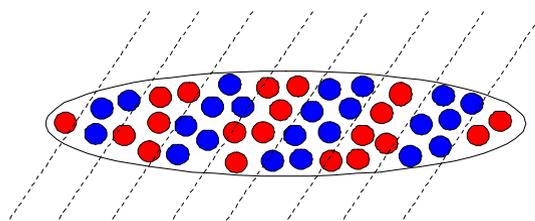
# Where is the grating?



# The origin of the grating (Collective mode excitation)



One atom is excited to the collective atomic mode defined by  $S^+$

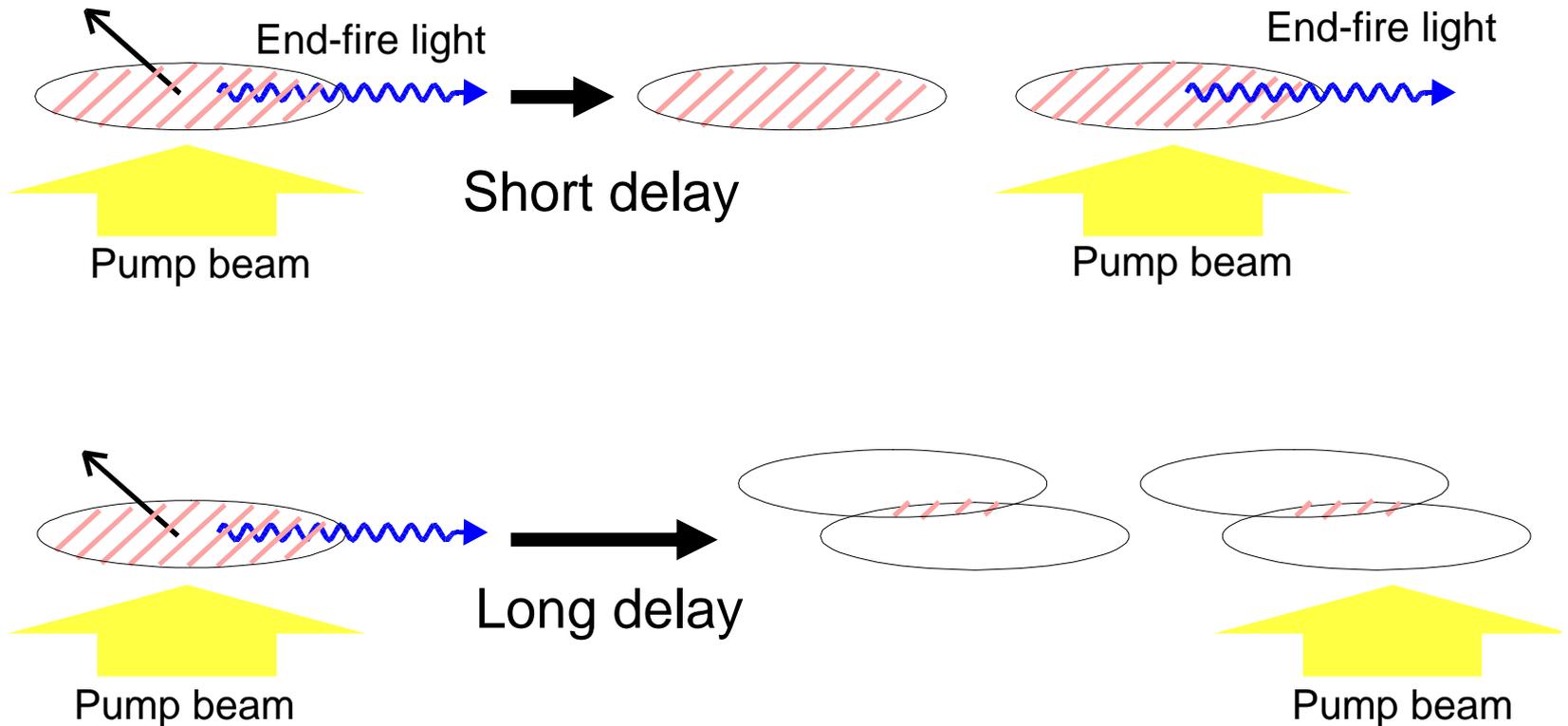


$$S^+ |J, M = -J\rangle = |J, M = -J + 1\rangle$$

$$\left( S^+ \equiv \frac{1}{\sqrt{N_0}} \sum_{i=1}^{N_0} e^{iq \cdot r_i} | \hbar q \rangle_i \langle 0 | \right)$$

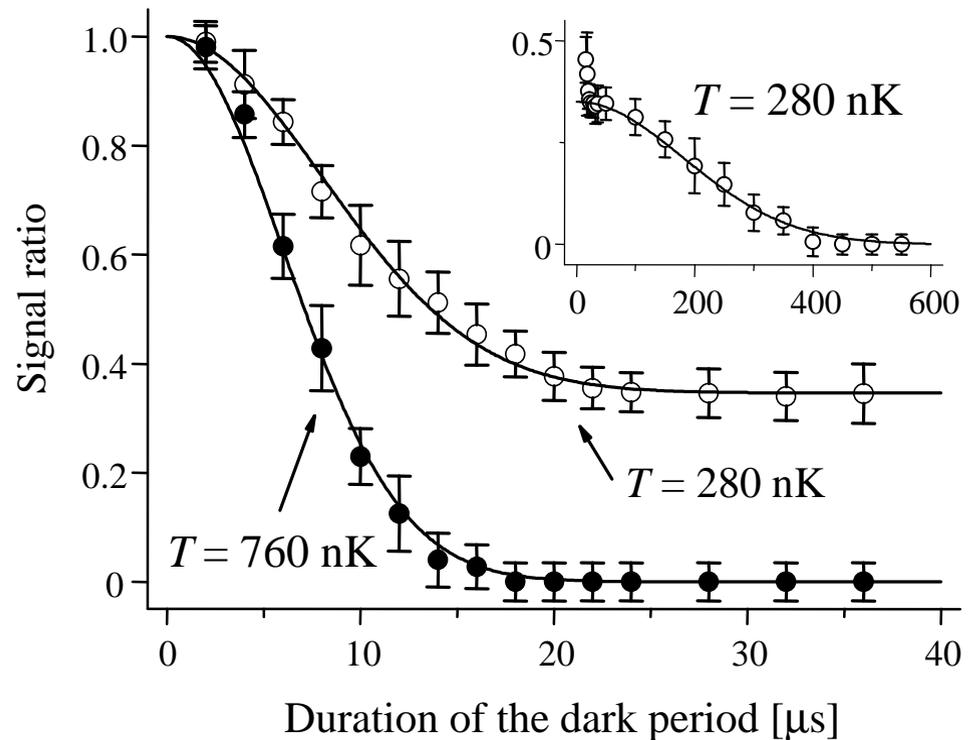
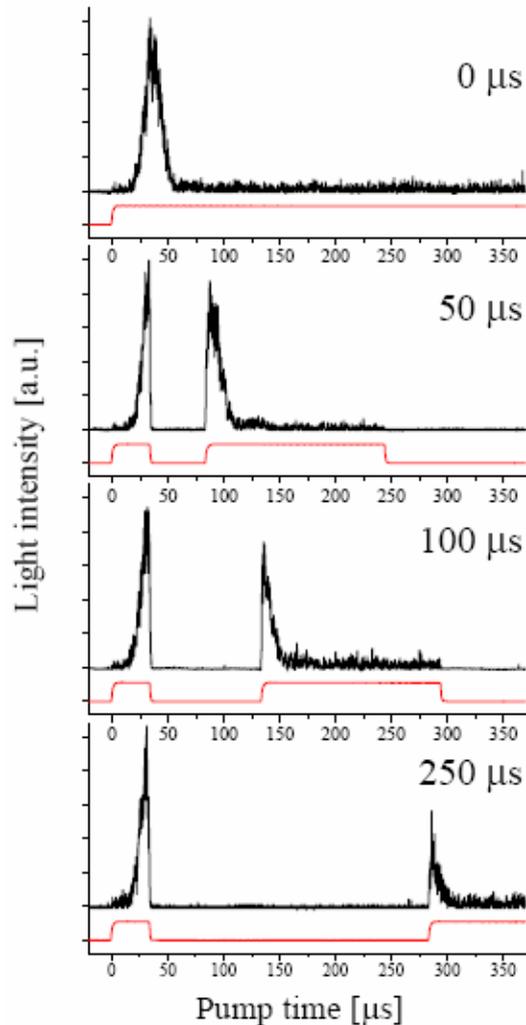
原子の位置に依存する位相因子

# How long does the grating survive?



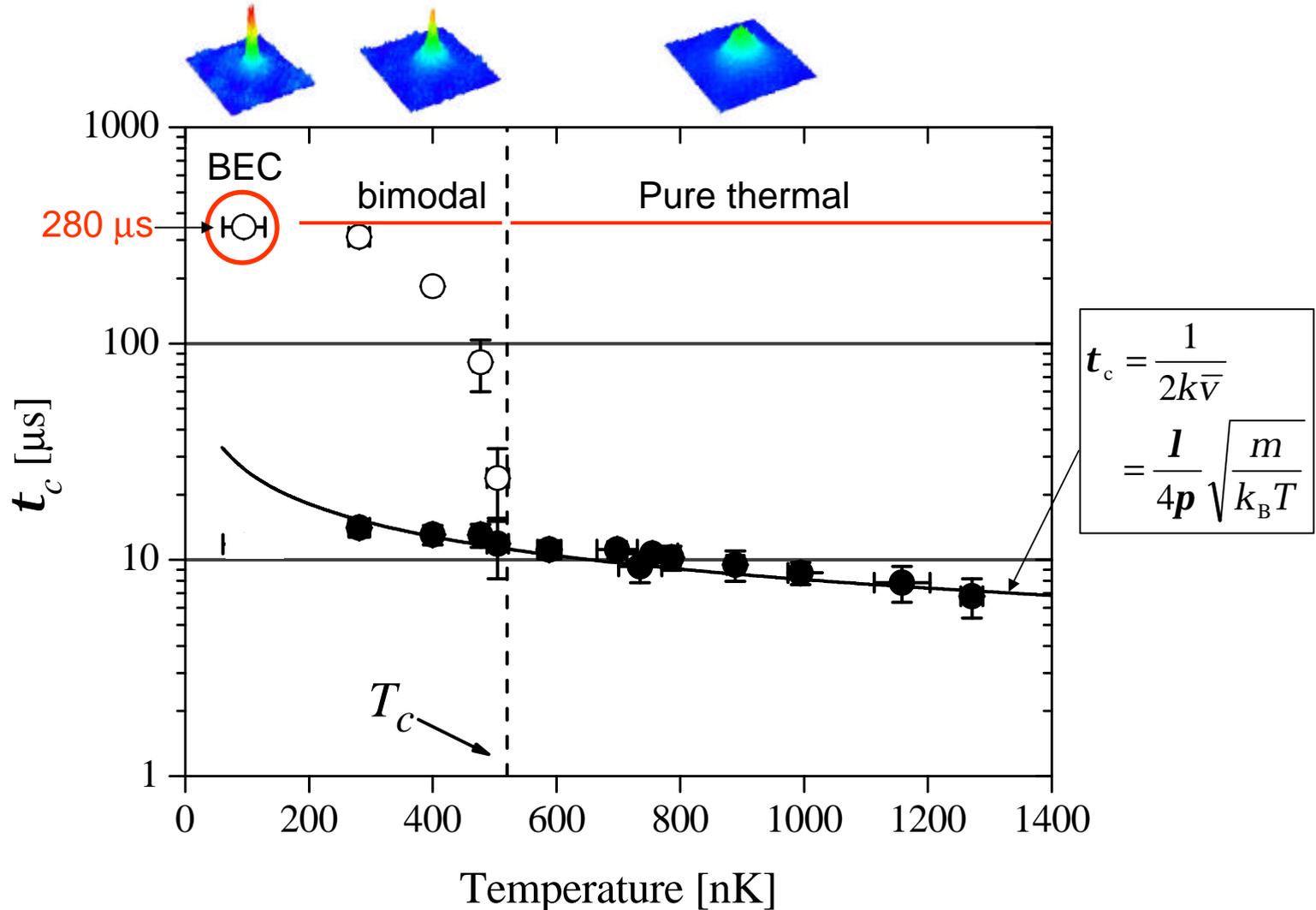
Storage (coherent) time of the grating is limited by the size of the wavepacket

# Storage (coherence) time measurement



Y. Yoshikawa, Y. T. and T. Kuga, PRL **94** 083602 (2005)

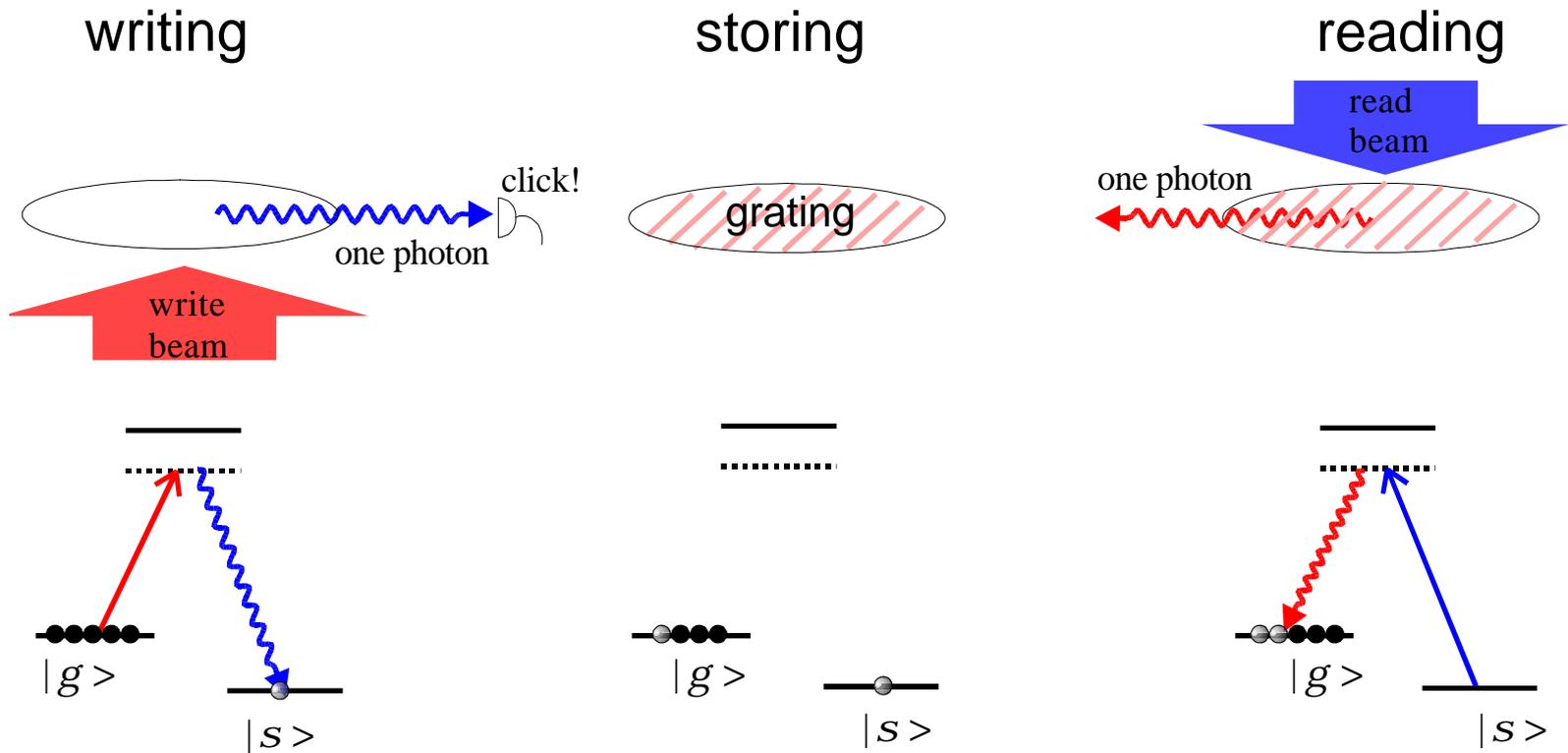
# Storage time vs. temperature



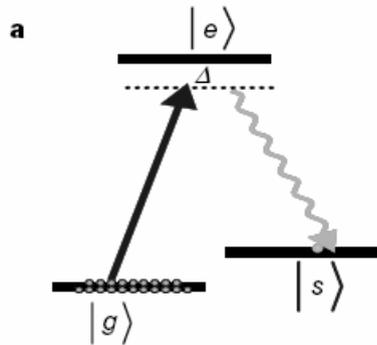
# Dicke状態の応用

## 単一光子の保存と再生

# Writing, storing, and reading of a single photon

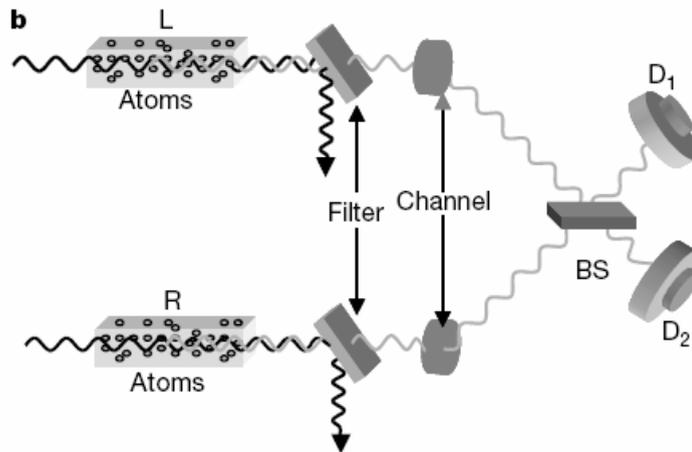


# Motivation: DLCZ protocol (long distance quantum network)



Detection of a forward-scattered photon results in the excitation of the symmetric collective mode defined by

$$S^+ \equiv \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N |s\rangle_i \langle g|$$



Box 1

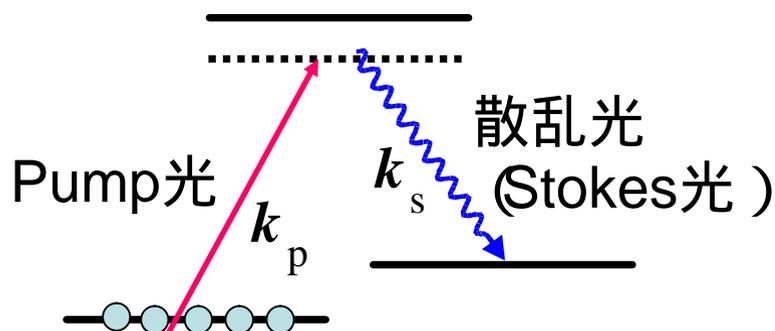
## Collective enhancement

Long-lived excitations in atomic ensembles can be viewed as waves of excited spins. We are here particularly interested in the symmetric spin wave mode  $S$ . For a simple demonstration of collective enhancement, we assume that the atoms are placed in a low-finesse ring cavity<sup>25</sup>, with a relevant cavity mode corresponding to forward-scattered Stokes radiation. The cavity-free case corresponds to the limit where the finesse tends to 1 (ref. 17). The interaction between the forward-scattered light mode and the atoms is described by the hamiltonian

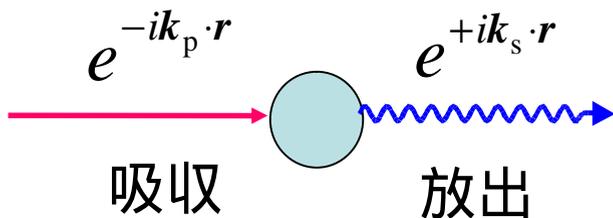
$$H = \hbar \left( \sqrt{N_s} \Omega g_c \Delta \right) S^+ b^\dagger + h.c.$$

where  $h.c.$  is the hermitian conjugation,  $b^\dagger$  is the creation operator for cavity photons,  $\Omega$  is the laser Rabi frequency, and  $g_c$  the atom-field coupling constant. In addition to coherent evolution, the photonic field

# 前方ラマン散乱と誘導 2光子放出

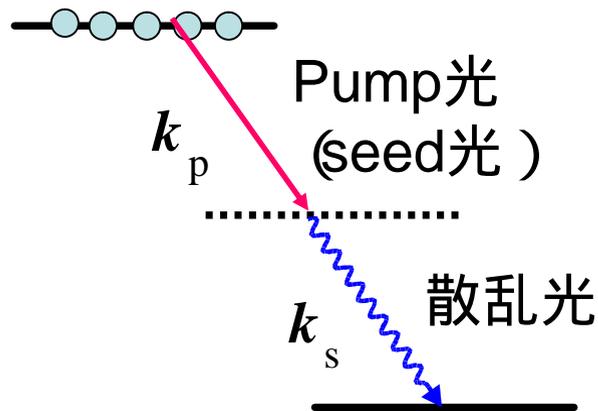


散乱振幅の位相因子

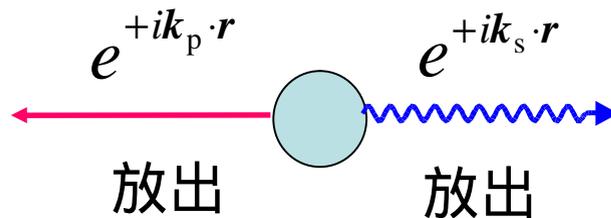


$$e^{-ik_p \cdot r} \cdot e^{+ik_s \cdot r} = 1$$

位置に依存しない  
collectiveに干渉



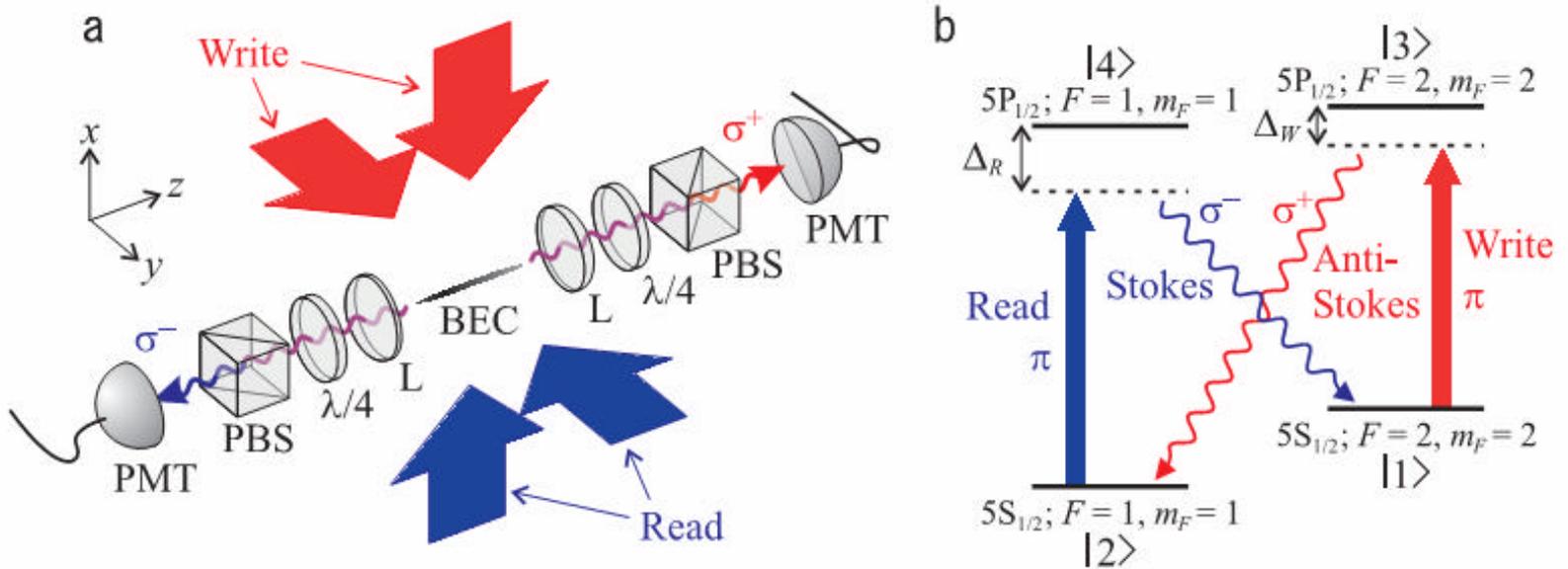
散乱振幅の位相因子



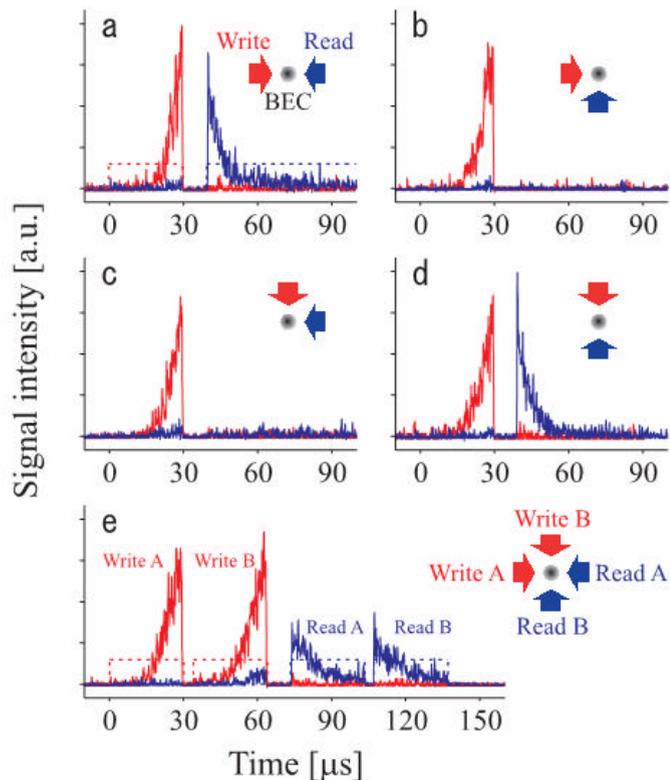
$$e^{+ik_p \cdot r} \cdot e^{+ik_s \cdot r} = 1$$

位置に依存しない  
collectiveに干渉

# BECを用いた単一光子の保存と再生



# 予備実験： BECを用いた光パルスの保存と再生



## 応用

- 任意光子発生器
- 多重量子メモリ
- 量子原子光学実験  
(2原子干渉など)

Y. Yoshikawa, K. Nakayama, Y. T. and T. Kuga,  
Phys. Rev. Lett. **99**, 220407 (2007).

# 極低温SrLi極性分子を用いた 電子EDM探索の可能性



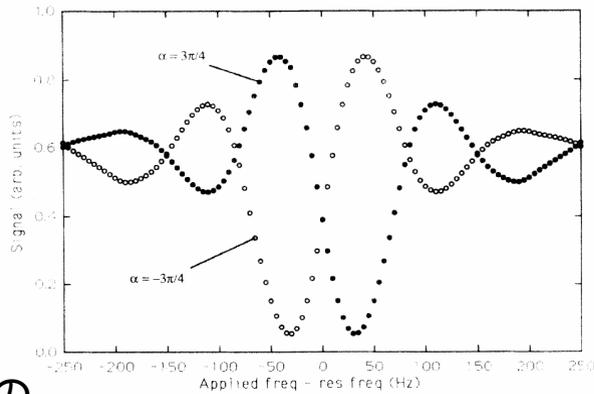
東京大学大学院総合文化研究科

鳥井寿夫、青木貴稔、生駒大輔、大坪望

# 電子EDM探索

原子を用いた電子EDM測定

$$\Delta U = -\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} = -Rd_e \frac{F}{F} \cdot \mathbf{E}$$



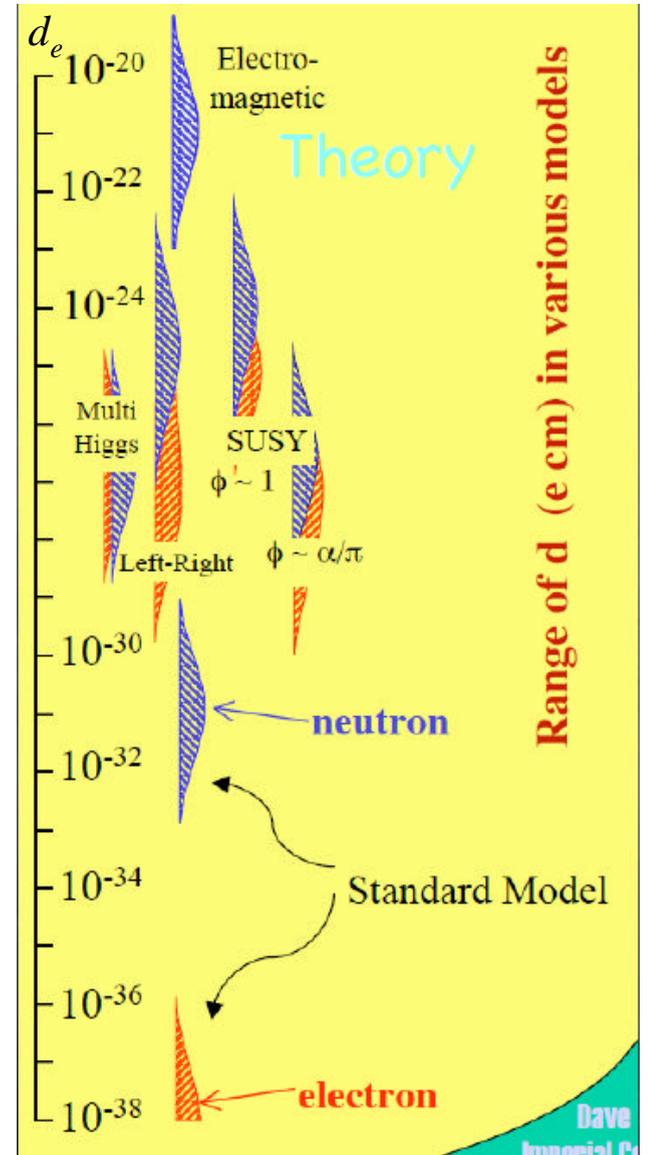
現在の実験での  
感度限界

Commins, Ross, DeMille, Regan

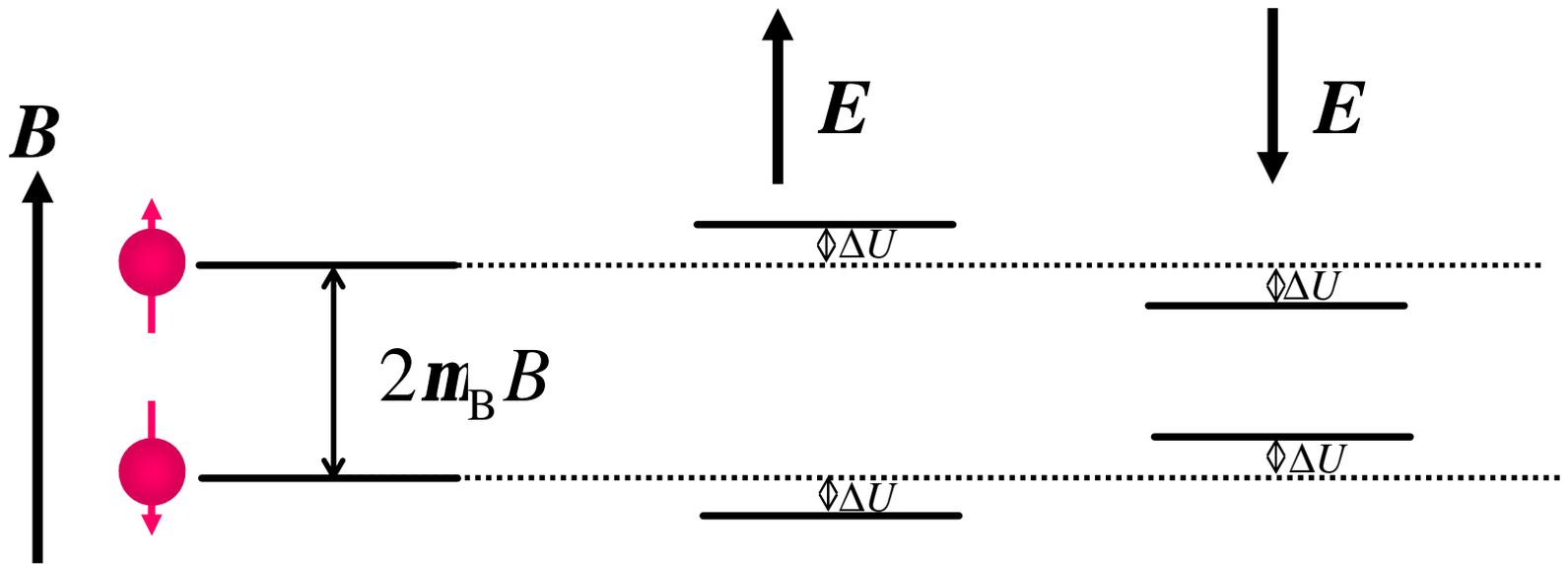
TI 原子  $d_e < 1.6 \times 10^{-27}$  e cm

まだEDMは見つかっていない

これ以下の感度で  
測定しなければならない

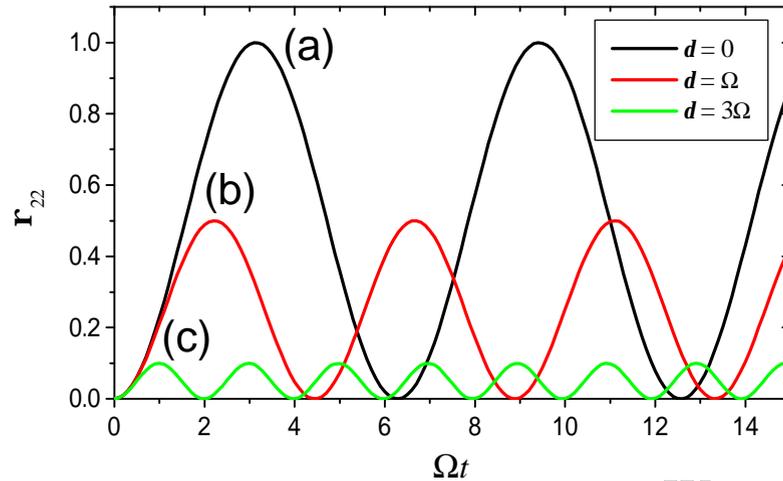


# EDM測定の実理



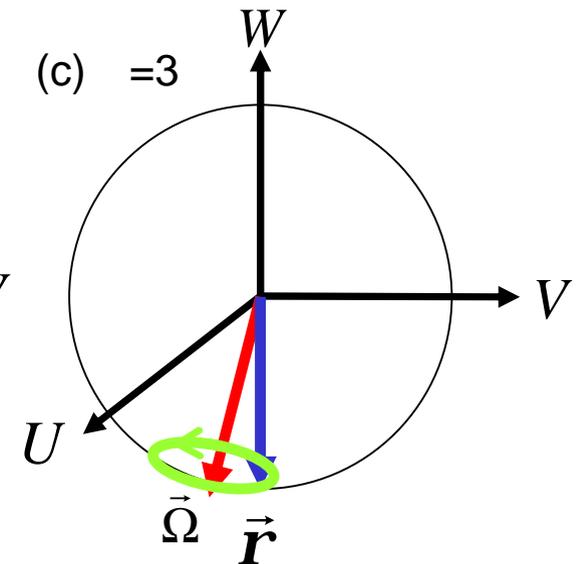
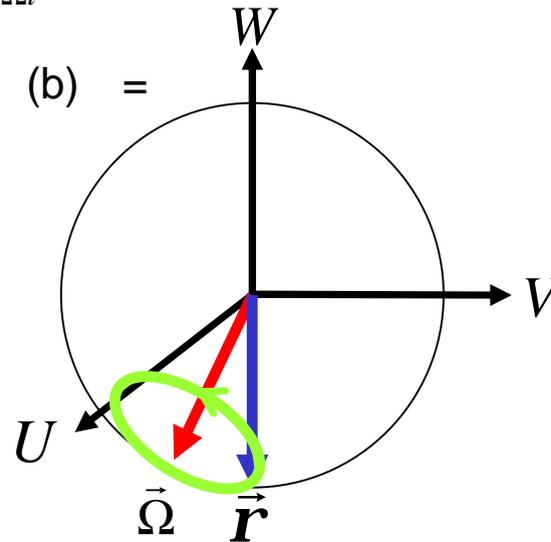
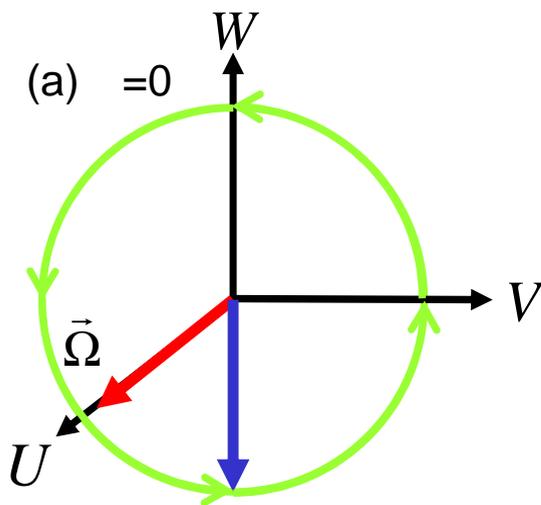
電場による遷移周波数のシフト  $\mathbf{d} = \frac{2\Delta U}{\hbar} = \frac{2Rd_e}{\hbar} \frac{F}{F} \cdot \mathbf{E}$

# ブロッホ球上の運動

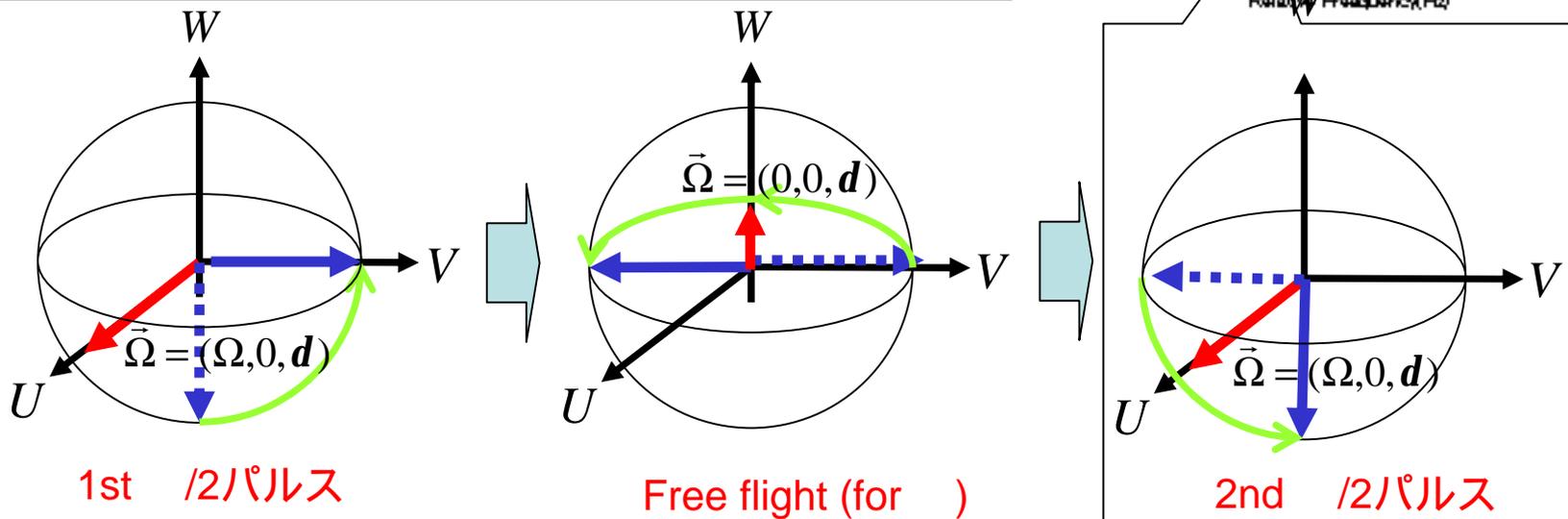
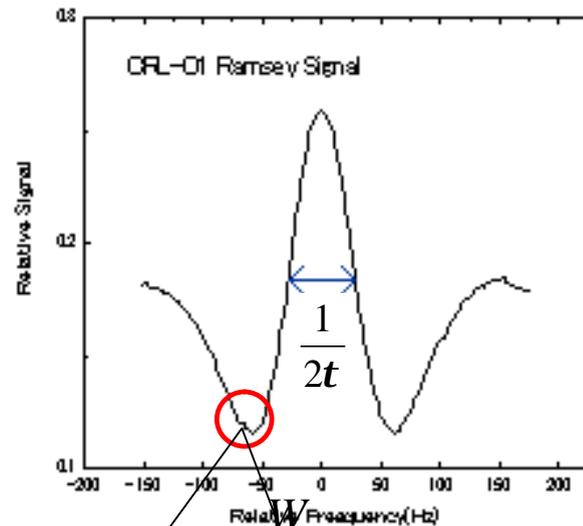
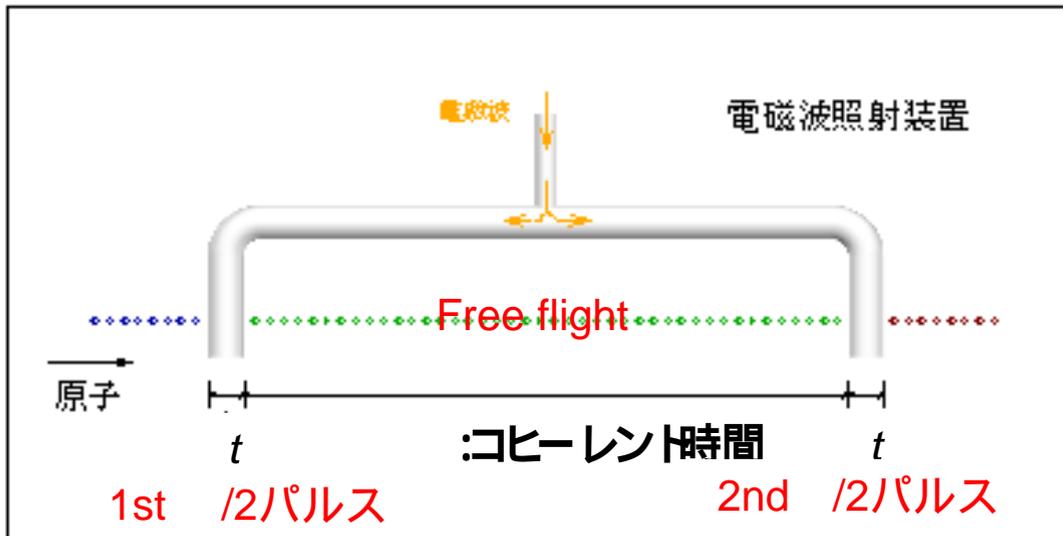


$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

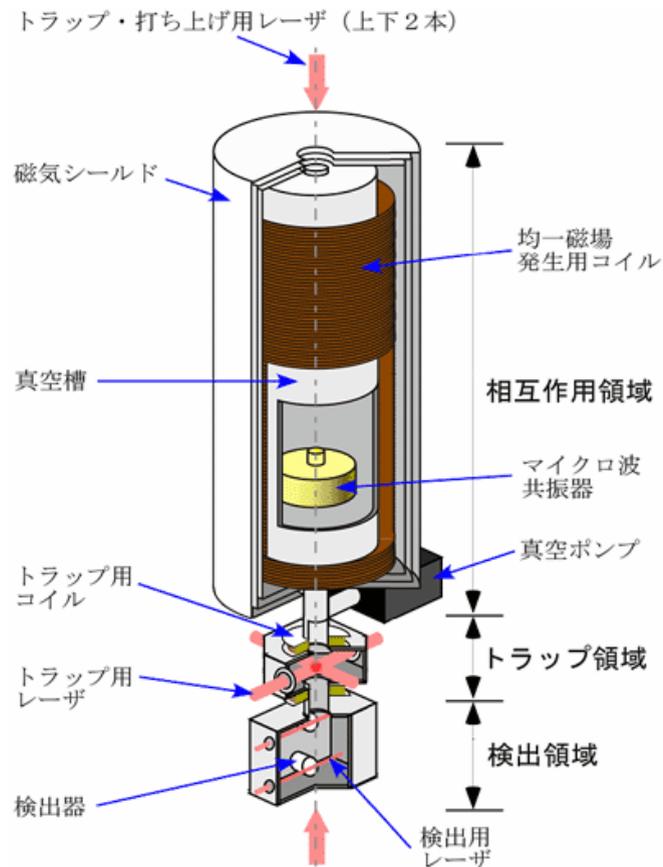
$$\vec{\Omega} = (\Omega_0, 0, d)$$



# ラムゼー共鳴法

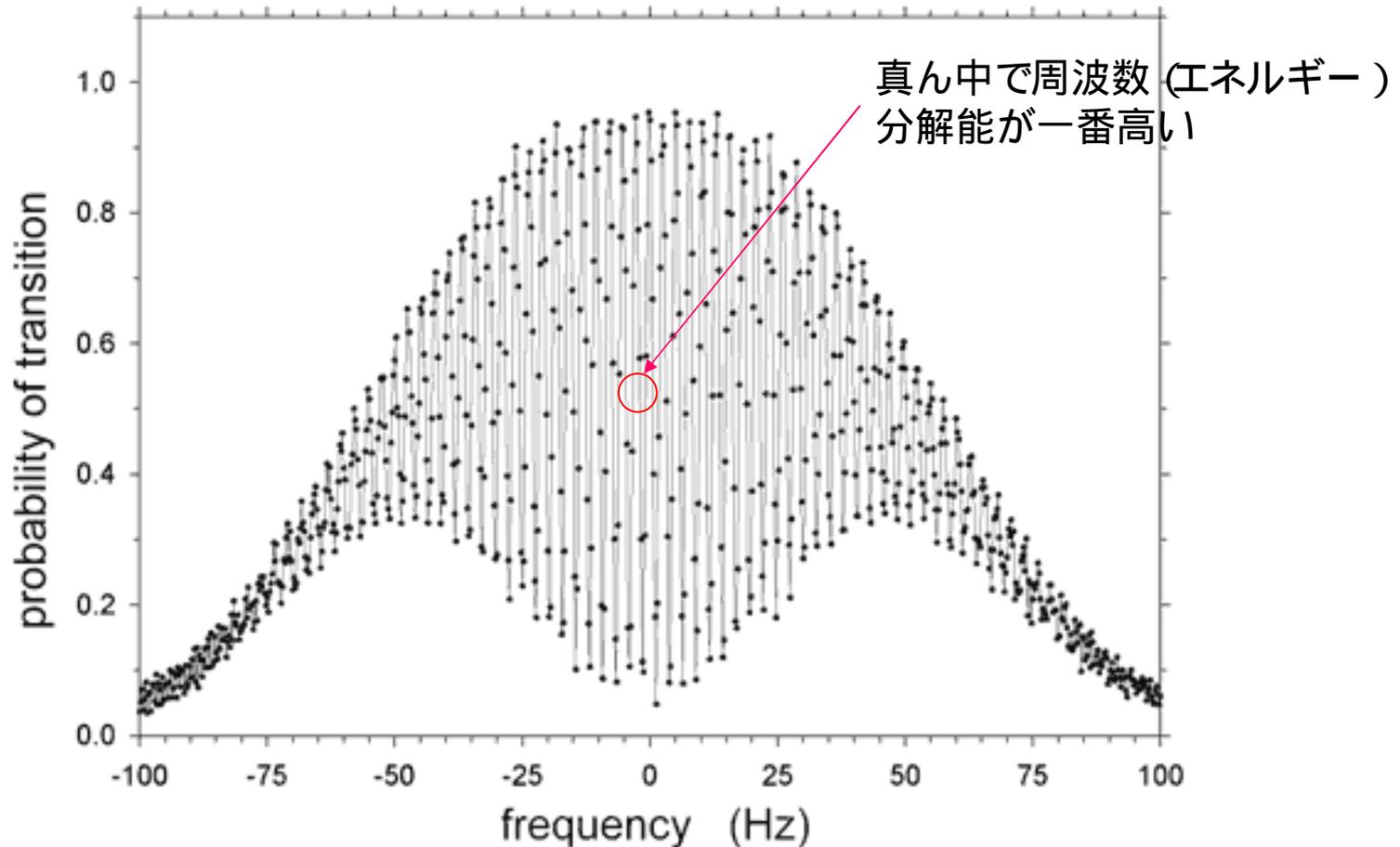


# 原子泉方式セシウム原子時計

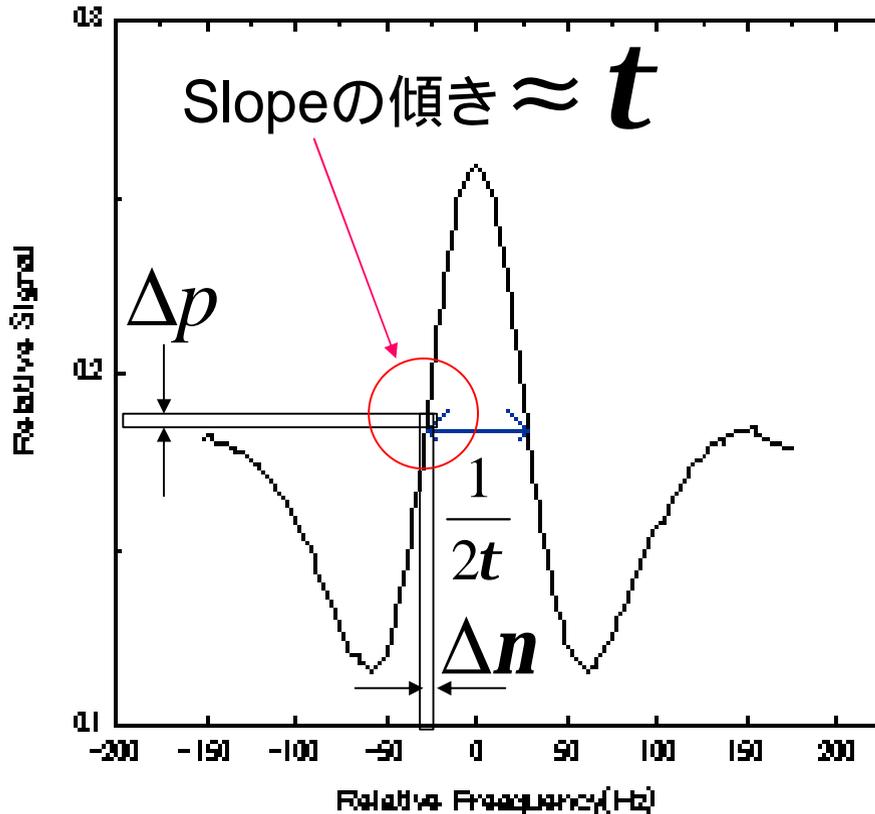


# 原子泉を用いたラムゼーフリンジ

$|F=3, m=0\rangle$  to  $|F=4, m=0\rangle$



# ラムゼー共鳴法の周波数弁別感度



トラップされた原子・分子を用いた場合 (間欠的な測定)

一回の測定に  
用いる原子数  $N$

一回の測定に  
かかる時間  $t$

全観測時間  
(積算時間)  $T$

$$\text{確率の不確かさ } \Delta p = 1 / \sqrt{N \cdot \frac{T}{t}} \rightarrow \Delta n = \frac{\Delta p}{t} = \frac{1}{\sqrt{NTt}}$$

# 電子EDM測定感度

スピンの角度変化

$$q \propto \Delta U t = -R d_e E_z t$$

R: 電子EDM増幅度  
Fr原子で1150

電子EDM

温度が低い (相互作用時間  $\tau$  長い)



Tl原子

$$d_e < 1.6 \times 10^{-27} \text{ e cm}$$

レーザー冷却



Fr 実験

Error

$\mathbf{v} \times \mathbf{E}$  効果の減少

EDM測定感度

大

# 電子EDM測定感度

スピンの角度変化

$$q \propto \Delta U t = -R d_e E_z t$$

R: 電子EDM増幅度  
Fr原子で1150

電子EDM

温度が低い (相互作用時間  $t$  長い)

電場

$E$

強い

原子  
ビーム

レーザー冷却



トラップ  
原子

Fr 実験

分子  
ビーム

YbF 実験  
PbO 実験

EDM測定感度

大

# 極性分子における有効電場 (内部電場)

現在の実験技術限界  
 $E \sim 100 \text{ kV/cm}$

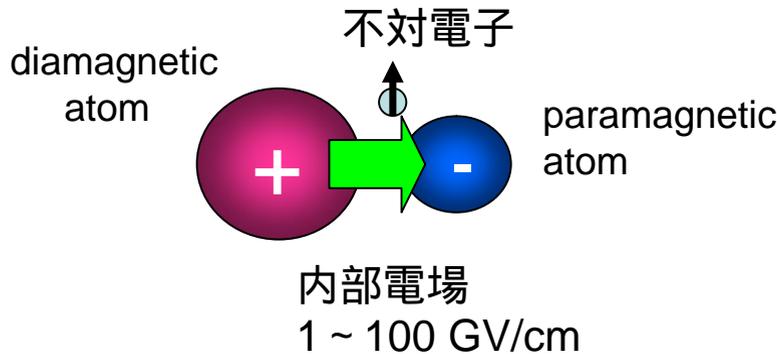
極性分子内の内部電場  
 $E \sim 1 \sim 100 \text{ GV/cm}$

電場が  
 1000 ~ 1000000倍に向上する

スピンの角度変化

$$q \propto \Delta U t = - d_e E_{eff} t$$

paramagnetic molecule



電子EDM

$$dd_e = \frac{\hbar}{|P| E_{eff} \sqrt{t N T}}$$

$P$ : 偏極率

$E_{eff}$ : 内部電場  $\times R$

$t$ : 相互作用時間

$N$ : 一回の測定 of 分子数

$T$ : 積算時間

異なる原子からなる分子内の電子は、  
 どちらかの原子に少し偏った分布となり、  
 内部電場が発生する。

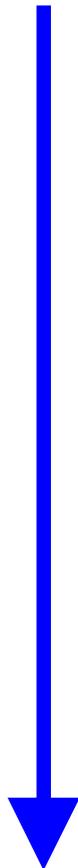
# 分子の有効電場

	Species: state	理論値		実験中	
		$E_{eff}$ (GV/cm)	lifetime		
基底状態の 分子	BaF : $X^2\Sigma^+$	7.4	基底	Sussex	} 分子ビーム
	YbF : $X^2\Sigma^+$	26	基底		
	PbF : $X^2\Sigma^+$	-29	基底		
	HgF : $X^2\Sigma^+$	99	基底		
準安定状態の 分子	PbO : a(1) $^3\Sigma^+$	26	80 <i>ms</i>	Yale, Harvard	
	ThO : a $^3\Delta^+$	100	1 ms	Harvard	
分子イオン	HfF <sup>+</sup> : $^3\Delta^+$	10	1 s	JILA	

温度が低い (相互作用時間 長い)



電場  
強い



レーザー冷却



Fr 実験



レーザー冷却



次世代の  
EDM探索候補

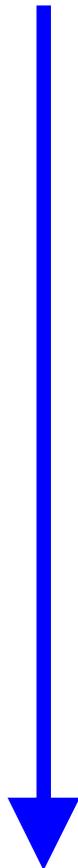
YbF 実験  
PbO 実験

EDM測定感度  
大

温度が低い (相互作用時間 長い)



電場  
強い



レーザー冷却



Fr 実験



フェッシュバツハ共鳴



レーザー冷却

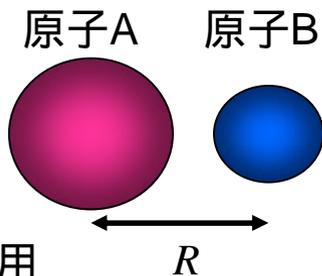


次世代の  
EDM探索候補

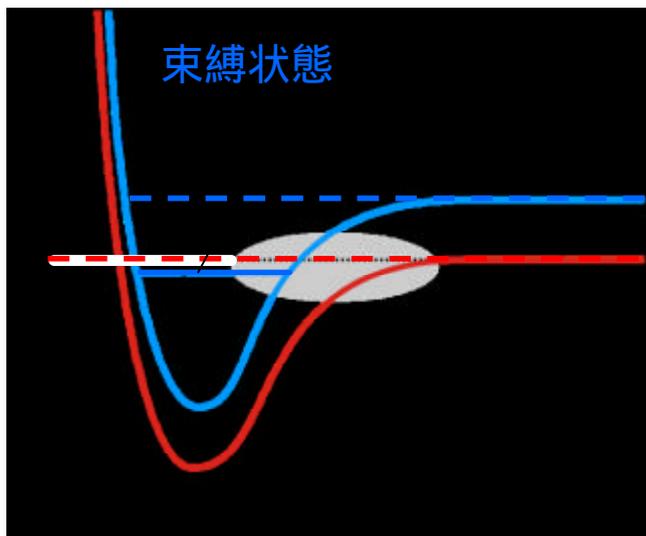
YbF 実験  
PbO 実験

EDM測定感度  
大

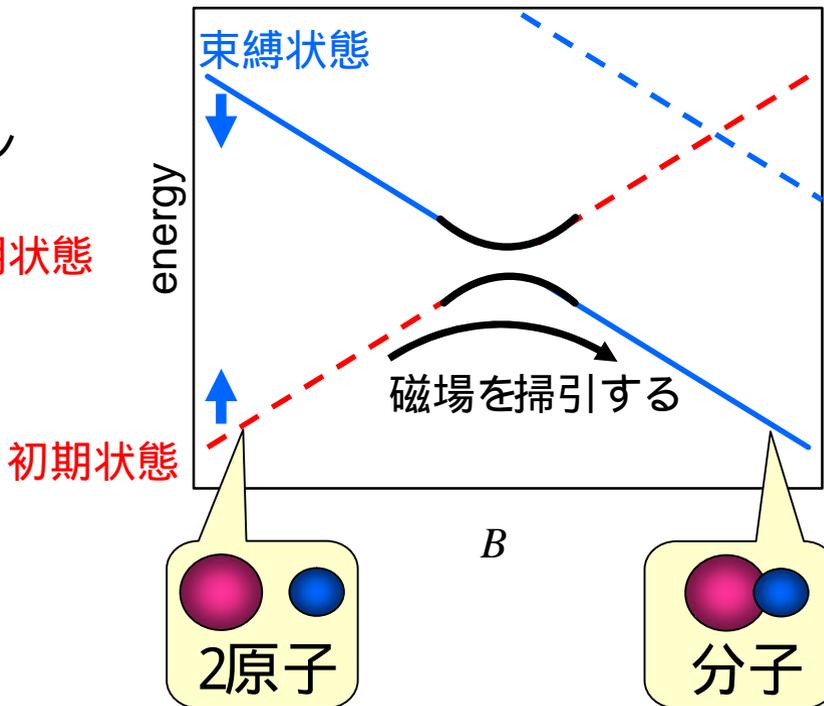
# フェッシュバツハ共鳴と分子生成



2原子の初期状態でのエネルギー (open channel) と、スピンの異なる状態(closed channel)での束縛状態エネルギーが等しいとき、共鳴が起こる。



$\Delta E=0$ のとき共鳴



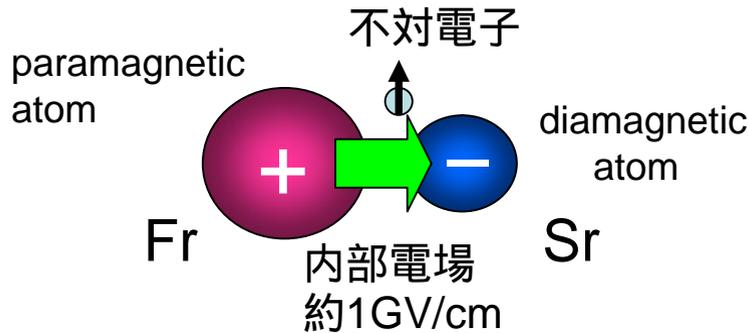
スピンの異なる状態は、ゼーマンエネルギーの磁場依存性が異なるため、磁場を用いて $\Delta E$ をコントロールでき、ある磁場でエネルギーが等しくなる。磁場を断熱的に掃引すると、原子状態から分子状態へ移行する。

# 次世代の電子EDM探索の候補：

フェッシュバツハ共鳴により生成された極低温極性分子

## 電子EDM感度

$$dd_e = \frac{\hbar}{|P| E_{eff} \sqrt{t N T}}$$



東北大 酒見研、東大 青木

Fr原子：

R最大のparamagnetic原子

Sr原子：

レーザー冷却が最も成功している  
diamagnetic原子

### 冷却・トラップされた極性分子を準備する方法

現在、極性分子を直接冷却したりトラップするのは難しい (相互作用時間  $t \sim 1$  ms)

•Fr原子とSr原子を別々にレーザー冷却・トラップ

フェッシュバツハ共鳴による分子生成

(光トラップ中での分子と電場の相互作用時間  $t \sim 1$  s、極性分子)

if 1 GV/cm,  $t = 1$  s,  $N = 10^5$

$\sim 10^{-27}$  e cm @ 10 s integration

$\sim 10^{-28}$  e cm @ 1000 s integration

$\sim 10^{-29}$  e cm @ 1 day integration

# Internal electric fields and sensitivity of molecules

Species: state	theory $E_{eff}$ (GV/cm)	lifetime	experiment	sensitivity (value from paper)	calculation (future plan) @ 1 day integration
<b>ground state</b>					
BaF : X <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup>	7.4	ground			
YbF : X <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup>	26	ground	Sussex	6x10 <sup>-26</sup> e cm	10 <sup>-29</sup> e cm
PbF : X <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup>	-29	ground			
HgF : X <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup>	99	ground			
<b>metastable state</b>					
PbO : a(1) <sup>3</sup> Σ <sup>+</sup>	26	80 <i>ms</i>	Yale, Harvard	10 <sup>-26</sup> e cm	10 <sup>-29</sup> e cm
ThO : a <sup>3</sup> Δ <sup>+</sup>	100	1 ms	Harvard		
<b>molecular ions</b>					
HfF <sup>+</sup> : <sup>3</sup> Δ <sup>+</sup>	10	1 s	JILA		10 <sup>-29</sup> e cm
<b>ultracold molecules</b>					
FrSr : X <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup>	1-100 ?	ground	Tokyo/Tohoku		10 <sup>-29</sup> - 10 <sup>-31</sup> e cm

# 極性分子内の有効電場

$$H_{EDM} = -d_e \cdot E_{eff} \quad E_{eff} \sim (10-100) \times 10^9 \text{ V/cm} \times \left(\frac{Z}{80}\right)^3$$

D. DeMille et al.,  
Phys. Rev. A **61**, 052507(2000)

分子内のZが

大きい方の原子

Z

$E_{eff}$  (GV/cm)

実際の分子の計算値

		Z	$E_{eff}$ (GV/cm)	実際の分子の計算値
レーザー冷却	Rb	37	1.0 - 10	
	Sr	38	1.1 - 11	
	Cs	55	3.2 - 32	
	Yb	70	6.7 - 67	YbF 26 GV/cm
	Hg	80	10 - 100	HgF 99 GV/cm
	Tl	81	10.4 - 104	
	Pb	82	10.8 - 108	PbF -29 GV/cm, PbO 26 GV/cm
東北大	Fr	87	12.8 - 128	
	Th	90	14.0 - 140	ThO 100 GV/cm

→ 相手の原子によって、電場の値は異なる

# e-EDM探索の極低温分子研究における 国内外の動向 **実験が先行している**

実験 (有効電場の値はまだわかっていない)

FrSr	東北大-東大	Fr, Srのレーザー冷却
YbRb	Düsseldorf	Yb-Rbのphotoassociation
YbLi	京都大、Washington	Yb、Li原子の同時トラップ

## 理論の提案

e-EDM探索のために、レーザー冷却された2種類の原子から  
Photoassociation などを用いて極低温分子を人工的に生成する。

E. Meyer et al.,  
Phys. Rev. A **80**, 042508(2009)

→ 有効電場を計算する代わりに、分子の双極子モーメントに着目する

# 分子の電気双極子モーメント (理論値)

Electric dipole moments (for vibrational ground state  $\nu=0$ ):

molecule	dipole moment [D]
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

MIT

Max-Planck

鳥井研 Tübingen

Chicago

JILA、東大

Innsbruck

$1 D = 1 \text{ debye} = 10^{-18} \text{ esu} \approx 3.336 \cdot 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$

M. Aymar and O. Dulieu, J. Chem. Phys., 122, 204302 (2005)

上記の分子では  
電子EDMは測定できない



他の組み合わせではどうなるのか？

# 電気陰性度

電気陰性度の差が大きい原子から成る2原子分子は、大きな電気双極子モーメントを持つ

族 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H 2.20																	He
2	Li 0.98	Be 1.57											B 2.04	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98	Ne
3	Na 0.93	Mg 1.31											Al 1.61	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16	Ar
4	K 0.82	Ca 1.00	Sc 1.36	Ti 1.54	V 1.63	Cr 1.66	Mn 1.55	Fe 1.83	Co 1.88	Ni 1.91	Cu 1.90	Zn 1.65	Ga 1.81	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96	Kr 3.00
5	Rb 0.82	Sr 0.95	Y 1.22	Zr 1.33	Nb 1.6	Mo 2.16	Tc 1.9	Ru 2.2	Rh 2.28	Pd 2.20	Ag 1.93	Cd 1.69	In 1.78	Sn 1.96	Sb 2.05	Te 2.1	I 2.66	Xe 2.6
6	Cs 0.79	Ba 0.89	*	Hf 1.3	Ta 1.5	W 2.36	Re 1.9	Os 2.2	Ir 2.20	Pt 2.28	Au 2.54	Hg 2.00	Tl 1.62	Pb 2.33	Bi 2.02	Po 2.0	At 2.2	Rn
7	Fr 0.7	Ra 0.9	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
ランタノイド	*	La 1.1	Ce 1.12	Pr 1.13	Nd 1.14	Pm 1.13	Sm 1.17	Eu 1.2	Gd 1.2	Tb 1.1	Dy 1.22	Ho 1.23	Er 1.24	Tm 1.25	Yb 1.1	Lu 1.27		
アクチノイド	**	Ac 1.1	Th 1.3	Pa 1.5	U 1.38	Np 1.36	Pu 1.28	Am 1.13	Cm 1.28	Bk 1.3	Cf 1.3	Es 1.3	Fm 1.3	Md 1.3	No 1.3	Lr		

衝突で不安定



レーザー冷却できている原子

wikipedia

# 電気陰性度の差と電気双極子モーメント

電気陰性度の差

paramagnetic atoms

	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr	
diamagnetic atoms	Ca	0.02	0.07	0.18	0.18	0.21	0.3
	Sr	-0.03	0.02	0.13	0.13	0.16	0.25
	Yb	0.12	0.17	0.28	0.28	0.31	0.4

↑  
(2段目のレーザー冷却が  
できている原子)

SrLi のみが電気陰性度の差が負

つまり、他とは逆向きの電気双極子を意味する

強い束縛の分子が期待できる。我々はSrLiの研究を始めた

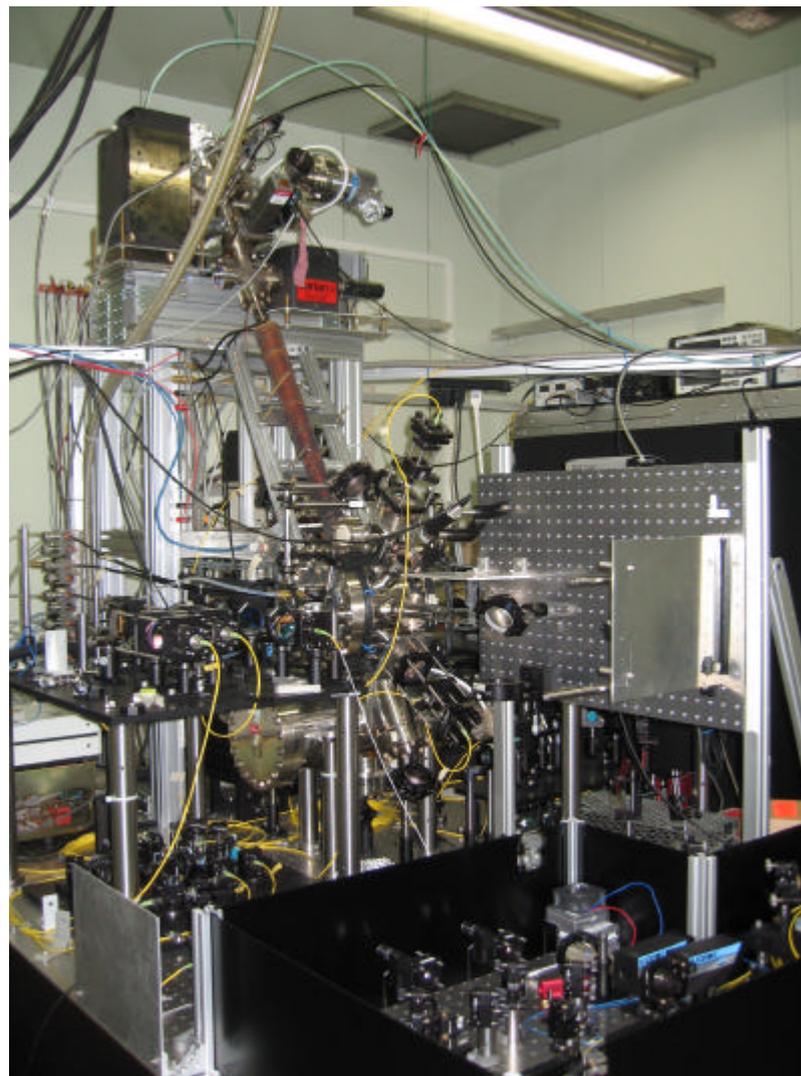
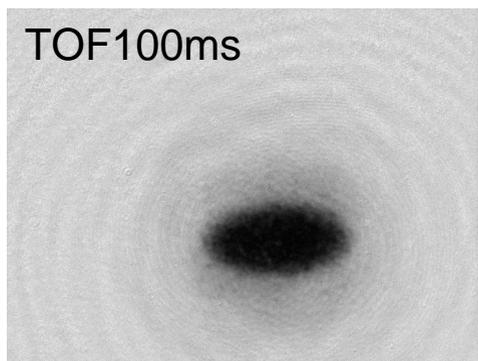
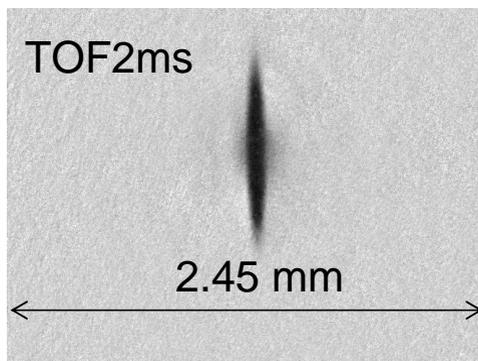
電気双極子モーメント $d$  (計算値)

SrLi 0.34 D

arXiv:1007.1892 [physics.atm-clus] 12 Jul 2010

→ 有効電場の理論値の計算が強く望まれる

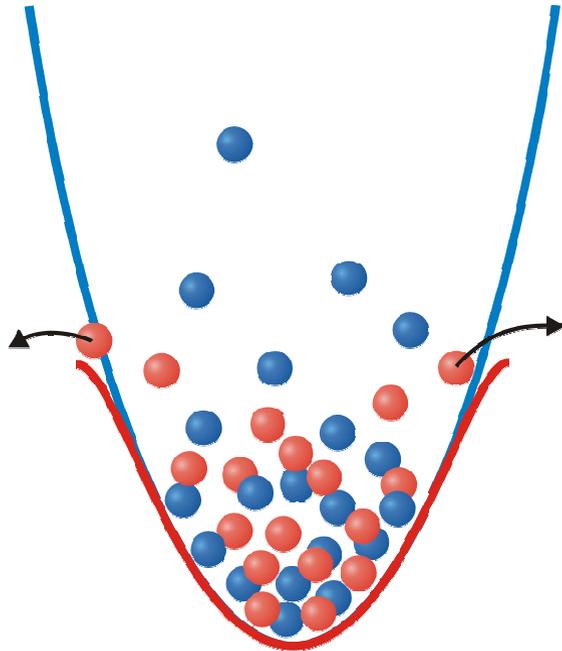
2008年 Rb原子BECで世界最大の原子数  
 $10^7$ 個 実現  
(東大 鳥井研)



Rb BEC  $N=10^7$

# Sympathetic cooling

The basic idea of our experimental strategy is to sympathetic cool a small cloud by a large Rb cloud.



## Principle of sympathetic cooling:

- **species A:** evaporatively cooled
- **species B:** cooled by thermal contact with A

## In a mixture experiment:

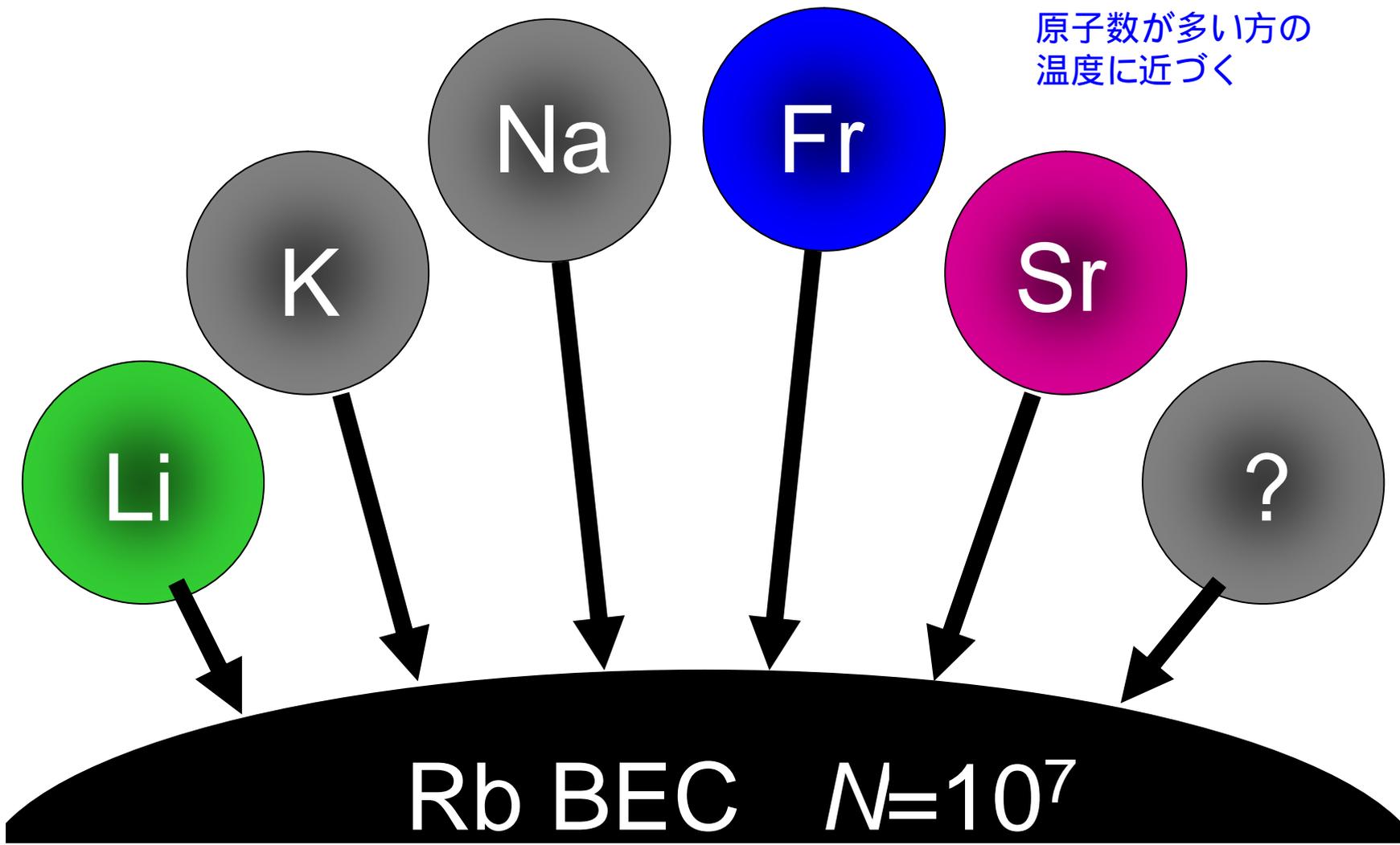
- **species A:** e.g.  $^{87}\text{Rb}$
- **species B:** e.g.  $^6\text{Li}$

# Rb原子で他の原子を協同冷却する

到達温度

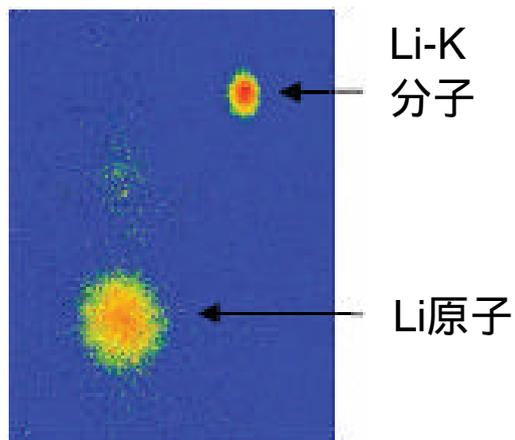
$$T_f = \frac{N_1 T_1 + N_2 T_2}{N_1 + N_2}$$

原子数が多い方の  
温度に近づく

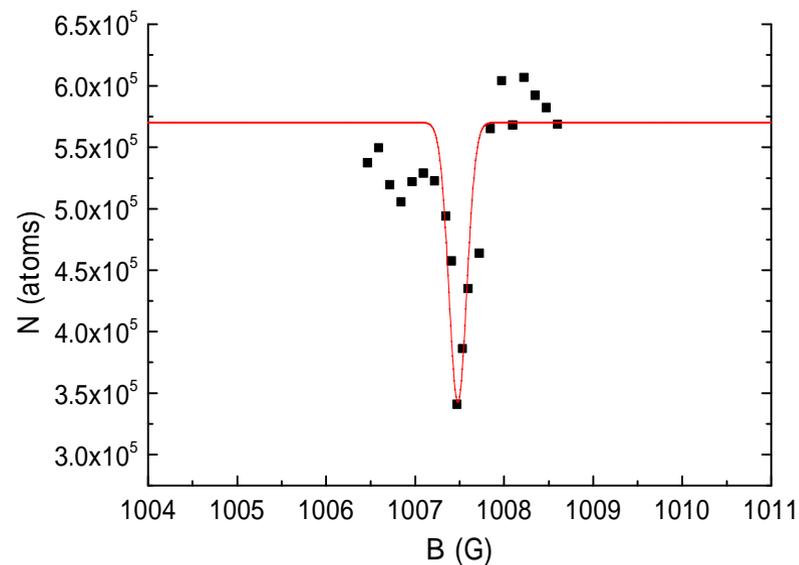


# フェッシュユバツハ共鳴実験

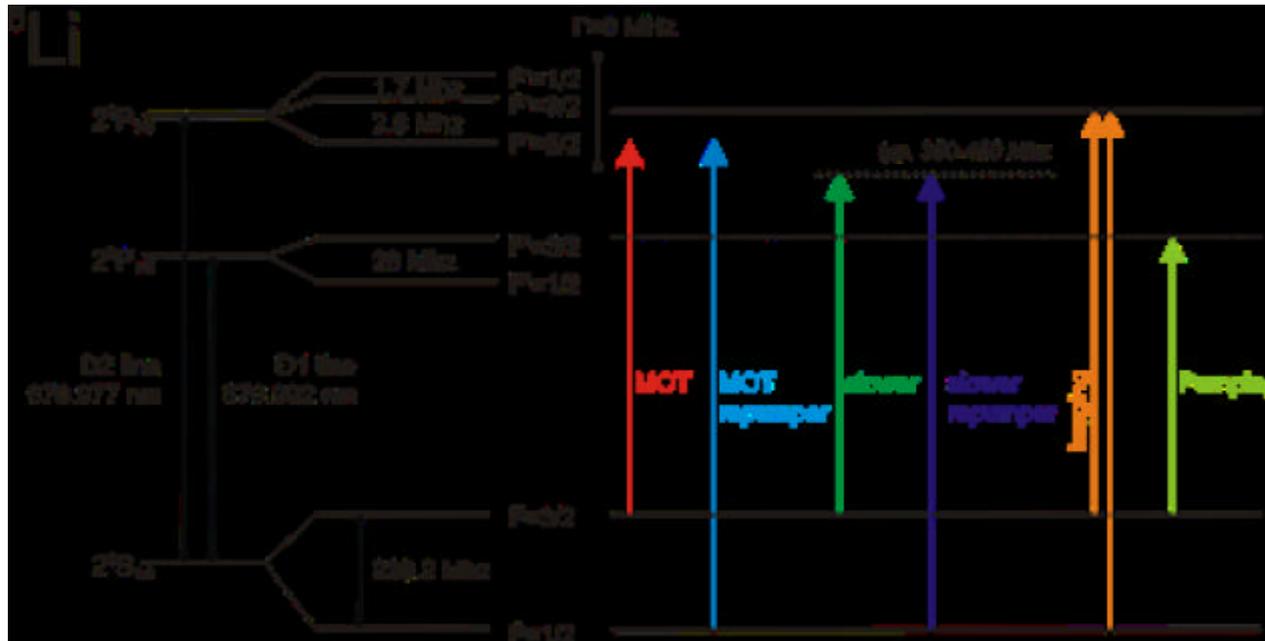
2008年  
Li-K 分子生成に成功 ( $T = 0.4T_F$ )  
(Max-Planck、ドイツ)



2009年  
Rb原子のフェッシュユバツハ共鳴観測  
(東大) ( $T = 200$  nK)

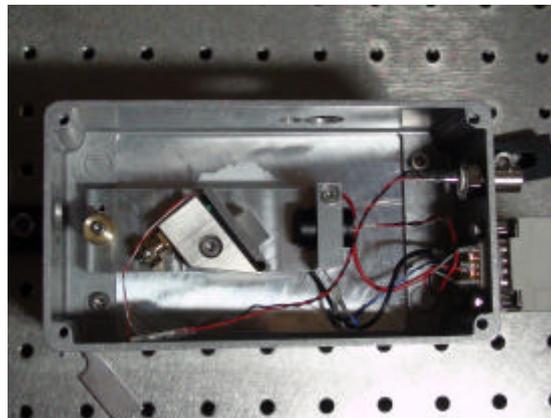


# Li原子のエネルギー準位とレーザー冷却用遷移



Li原子のレーザー冷却のためのECLD作製

671nmで発振@70



# まとめ

極性分子による電子EDM探索

内部電場 $10^4$ - $10^6$  倍

・フェッシュバツハ共鳴による分子生成

極低温トラップ分子

$10^{-29}$  -  $10^{-31}$  e cm

・電気陰性度と電気双極子モーメント

SrLi分子  $d = 0.34$  D

・Rb原子との協同冷却

極低温SrとLi原子を生成する

・Li原子のレーザー冷却

ECLD作製

・Sr原子のレーザー冷却

(poster 青木)