

# コヒーレント原子波光学

2006年3月28日

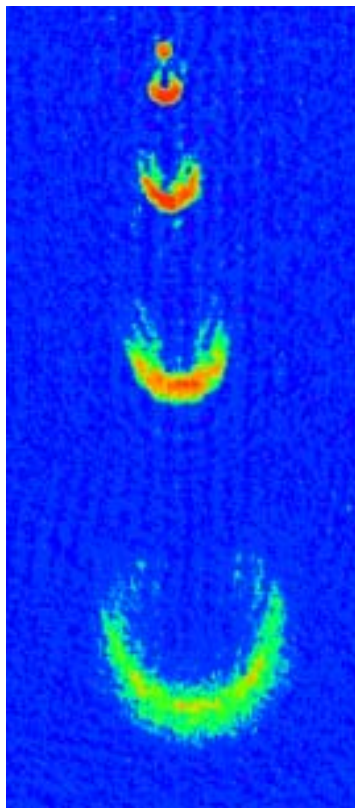
東大院総合 鳥井 寿夫  
共同研究者: 吉川豊 久我隆弘

# 言葉の定義

- ・ コヒーレント原子波
  - ・ ボース凝縮体 (BEC)
  - ・ 原子レーザー
- 本講演では  
すべて同じ意味

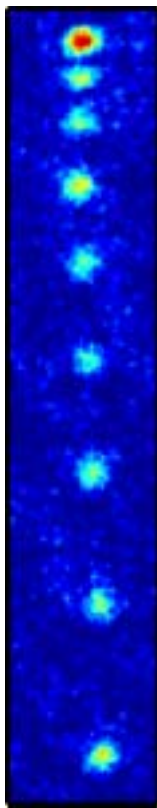
# 色々な原子レーザー (output coupler)

MIT '97



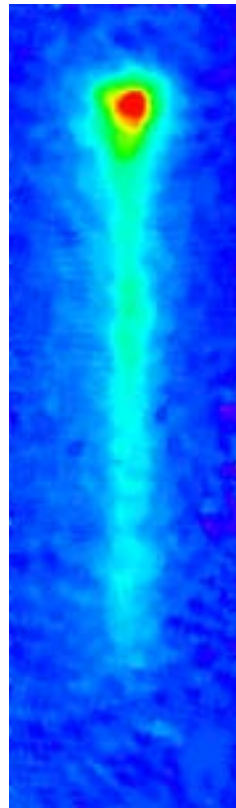
Rf sweep

Yale '98



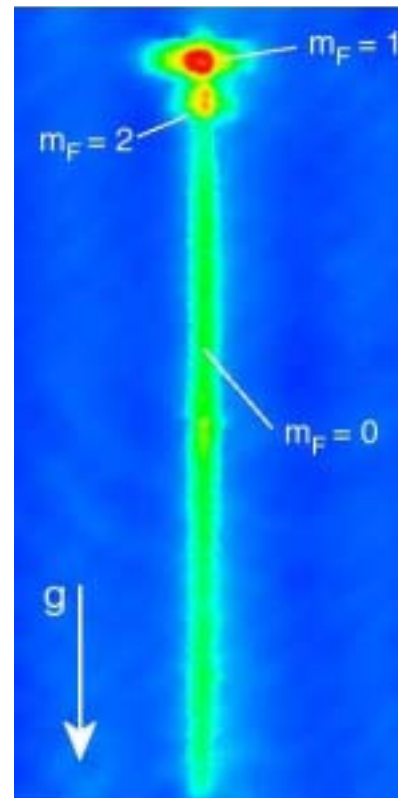
gravity

NIST '99



Bragg pulses

Munich '99



Rf knife

# 背景(現状)

1960年  
光レーザーの実現

非線形分光学

量子情報

精密分光、精密測定

1995年  
原子レーザーの実現

原子波四光波混合  
パラメトリック増幅

量子情報？

超高感度干渉計？  
物理量の超精密測定？

# 本講演で考えたいこと

原子レーザーを用いれば、高感度な原子波干渉計が実現するのだろうか？

原子レーザーは超精密計測に応用できるのか？

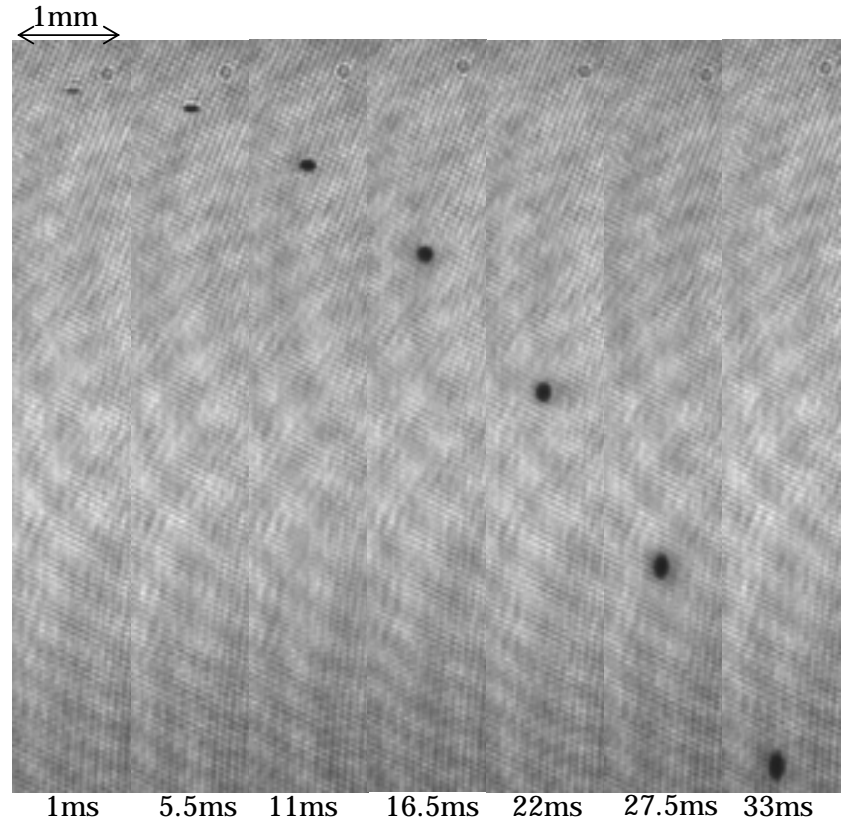
# 原子レーザー (BEC) の特徴

- ・数十秒に一回 ( $10^6$ ) しかできない  
極めて輝度が小さい
- ・重力を受ける
- ・単一の量子状態に縮退している  
非対角長距離秩序が存在  
(コヒーレンス長:  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ )

$$\langle \hat{\Psi}^+(\mathbf{r}) \hat{\Psi}(\mathbf{r}') \rangle = \Psi^*(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}')$$

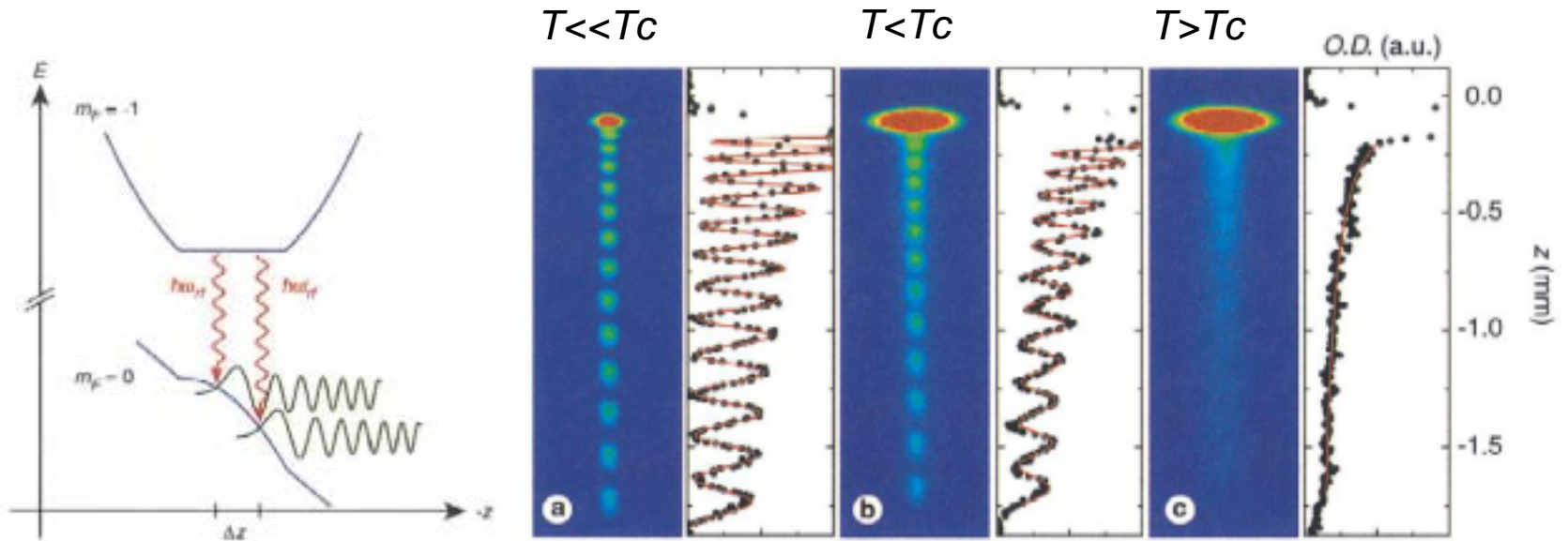
$\Psi(\mathbf{r})$  : 凝縮体の波動関数  
(秩序パラメータ)

磁気トラップから開放されたRb原子BECの時間発展



cf)  $1 \mu\text{K}$ の原子集団の熱的ドブロイ波長:  $0.1 \mu\text{m}$

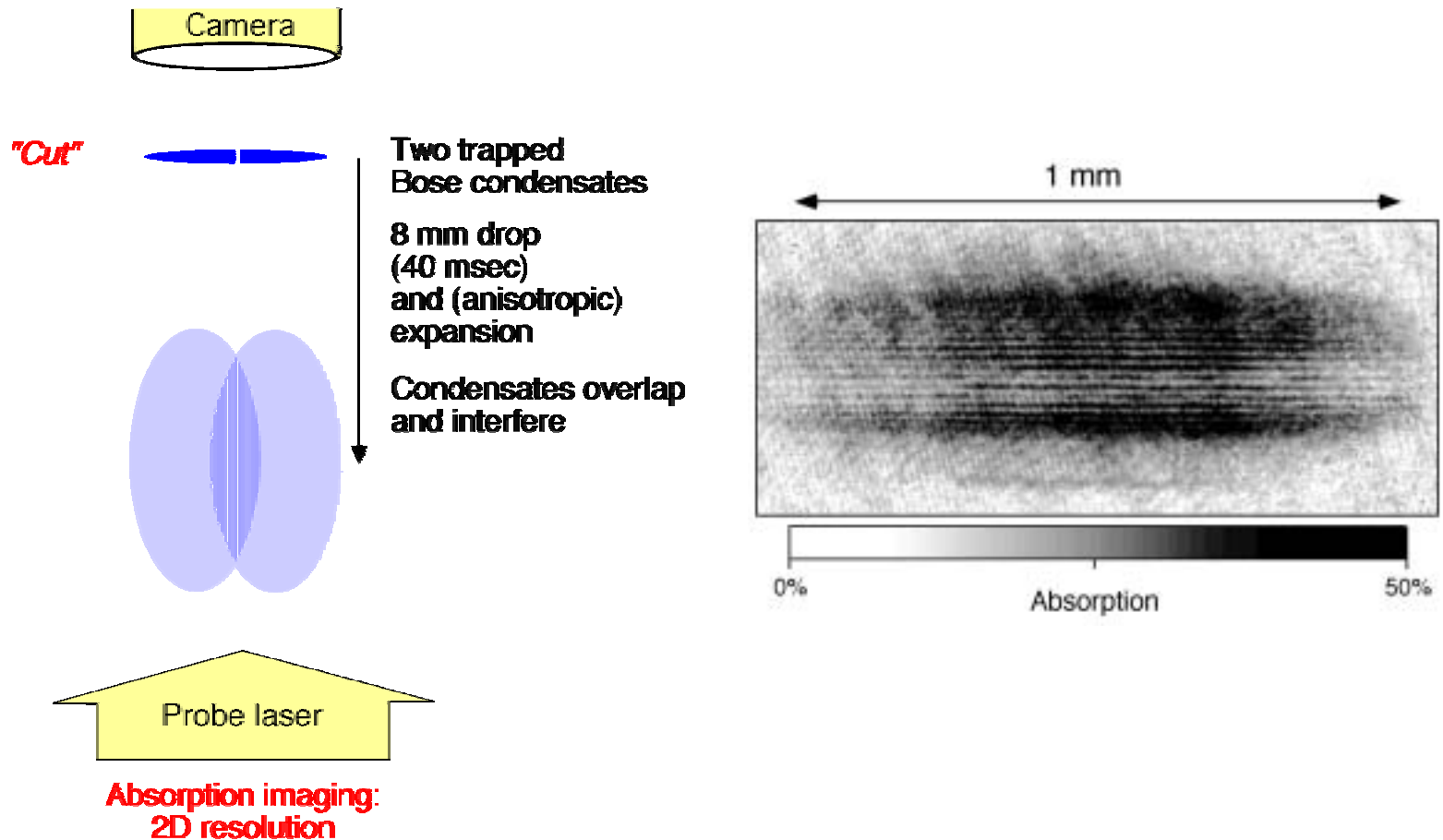
# 非対角長距離秩序の確認



I. Bloch, T. W. Hänsch, and T. Esslinger: Nature **403**, 166 (2000).

# 独立なBEC間の干渉

## Interference of two condensates





# 原子レーザーの特徴

## 原子間相互作用

時間に依存しない(定常状態の)グロス・ピタエフスキー方程式

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{trap}(\mathbf{r}) + U_0 |\Phi(\mathbf{r})|^2 \right] \Phi(\mathbf{r}) = \mu \Phi(\mathbf{r})$$

平均場エネルギー

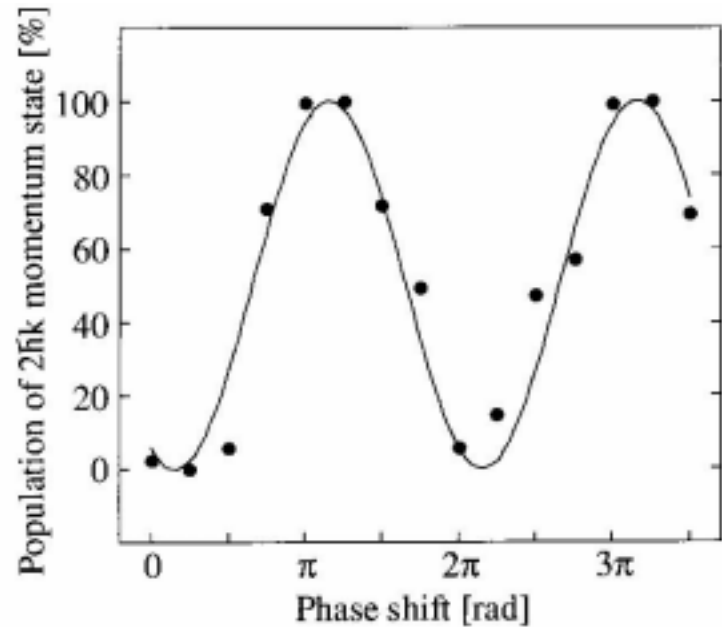
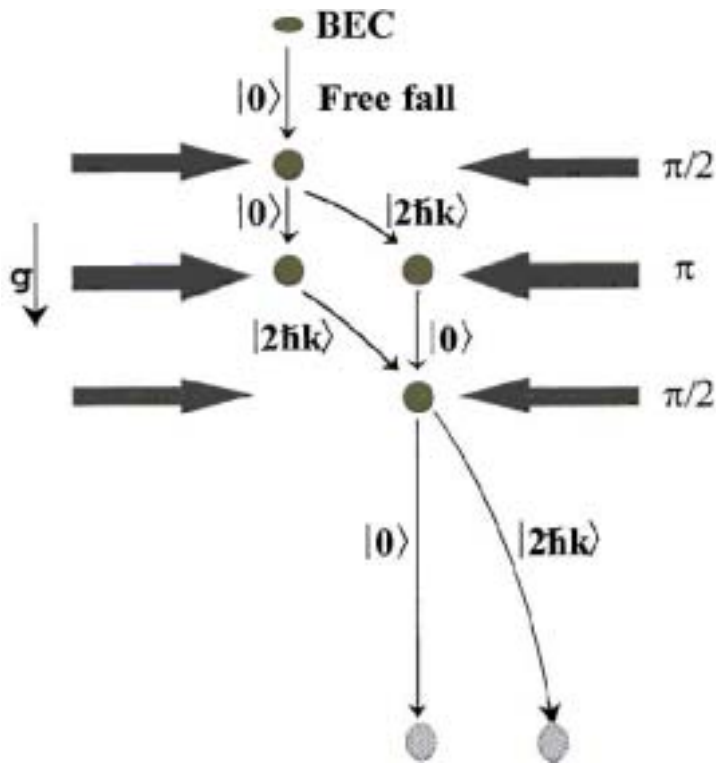
$$U_0 = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m}, \quad a: \text{S波散乱長}$$

定常解は、

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \exp\left(-i\frac{\mu}{\hbar}t\right)\Phi(\mathbf{r}), \quad \mu = \frac{U_0 \int n(\mathbf{r})^2 d\mathbf{r}}{N} : \text{化学ポテンシャル}$$

通常のBEC ( $N \sim 10^6$ ) では、 $\frac{\mu}{\hbar} \approx 2\pi \times 1 \text{ kHz}$  原子時計における衝突シフトに対応

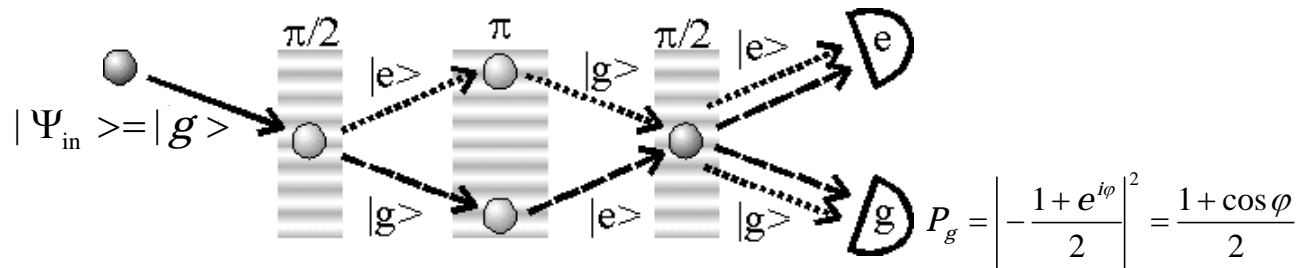
# 原子レーザー (BEC) を用いた マッハツェンダー干渉計



# BEC干渉計の動作原理

- ・干渉計に一つずつ原子を入力した場合 (熱的原子の場合)

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\pi} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix} \xrightarrow{|g\rangle\text{に位相差}\varphi} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -e^{i\varphi} \\ -1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\pi/2} -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+e^{i\varphi} \\ 1-e^{i\varphi} \end{pmatrix}$$



- ・BECを入力した場合 (粒子間相互作用なし)

$$\begin{aligned} |\Psi_{\text{in}}\rangle_N &= \prod_{i=1}^N |g\rangle_i \rightarrow |\Psi_{\text{out}}\rangle_N = \exp\left[-\frac{i}{\hbar} \int_0^T dt' \hat{H}(t')\right] \cdot |\Psi_{\text{in}}\rangle_N \\ &= \exp\left[-\frac{i}{\hbar} \int_0^T dt' \sum_{i=1}^N \hat{h}_i(t')\right] = \prod_{i=1}^N (t|g\rangle_i + r|e\rangle_i) \\ & \qquad \qquad \qquad t = -\frac{1+e^{i\varphi}}{2}, \quad r = -\frac{1-e^{-i\varphi}}{2} \end{aligned}$$

# BEC干渉計の位相感度

出力原子数の期待値

$$\langle n_g \rangle = N |t|^2 = N \frac{1 + \cos \varphi}{2}$$

干渉計に一つずつ原子を  
入力した場合のN倍

出力原子数の分散

$$\langle (\Delta n_g)^2 \rangle = N |t|^2 |r|^2 = |r|^2 \langle n_g \rangle = \frac{N}{4} \sin^2 \varphi$$

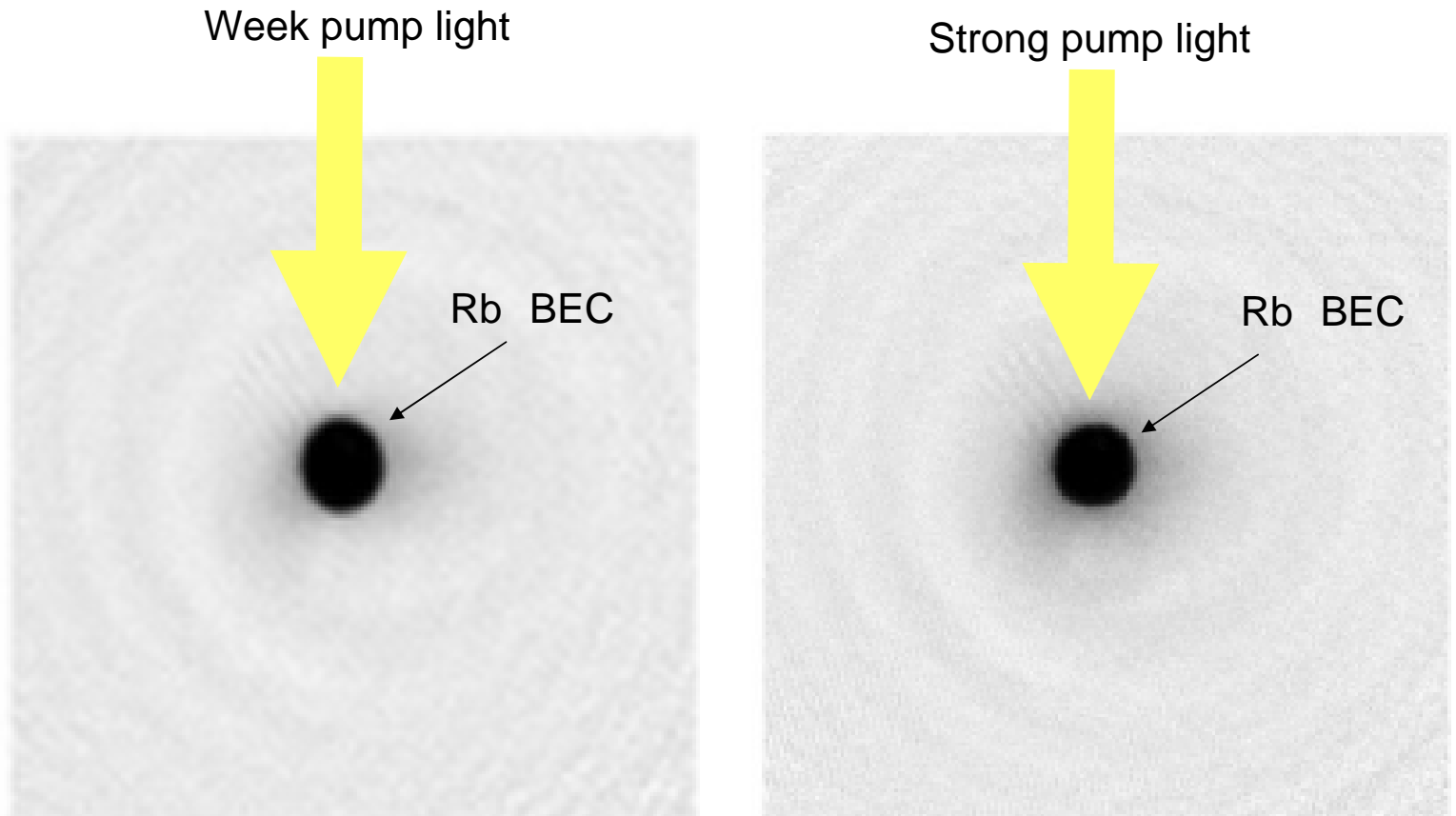
位相感度

$$\Delta \varphi = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \langle n \rangle} \right| \langle \Delta n \rangle = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

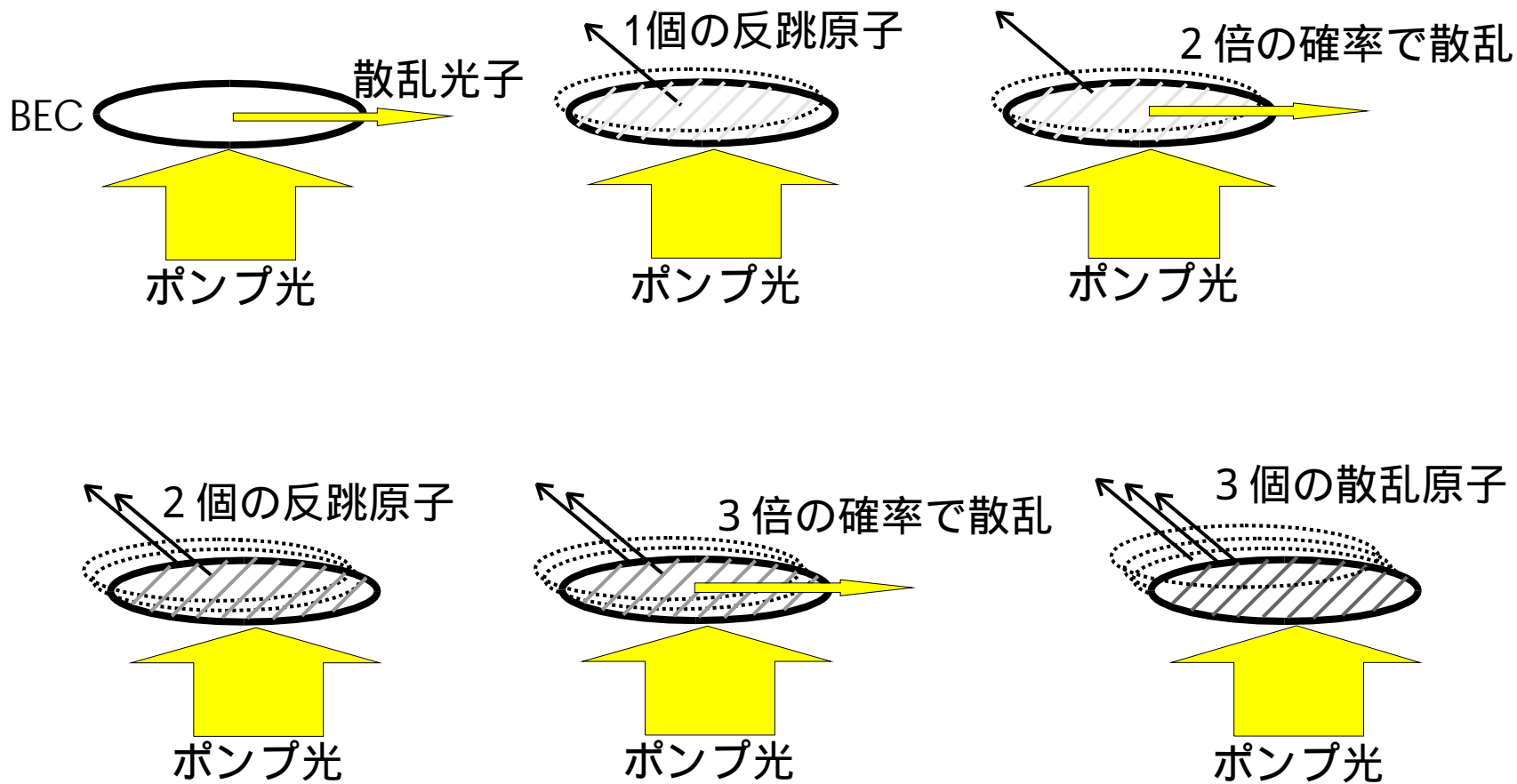
ショット雑音  
(熱的原子の場合と同じ)

BEC干渉計の動作は熱的原子干渉計と本質的に同じ

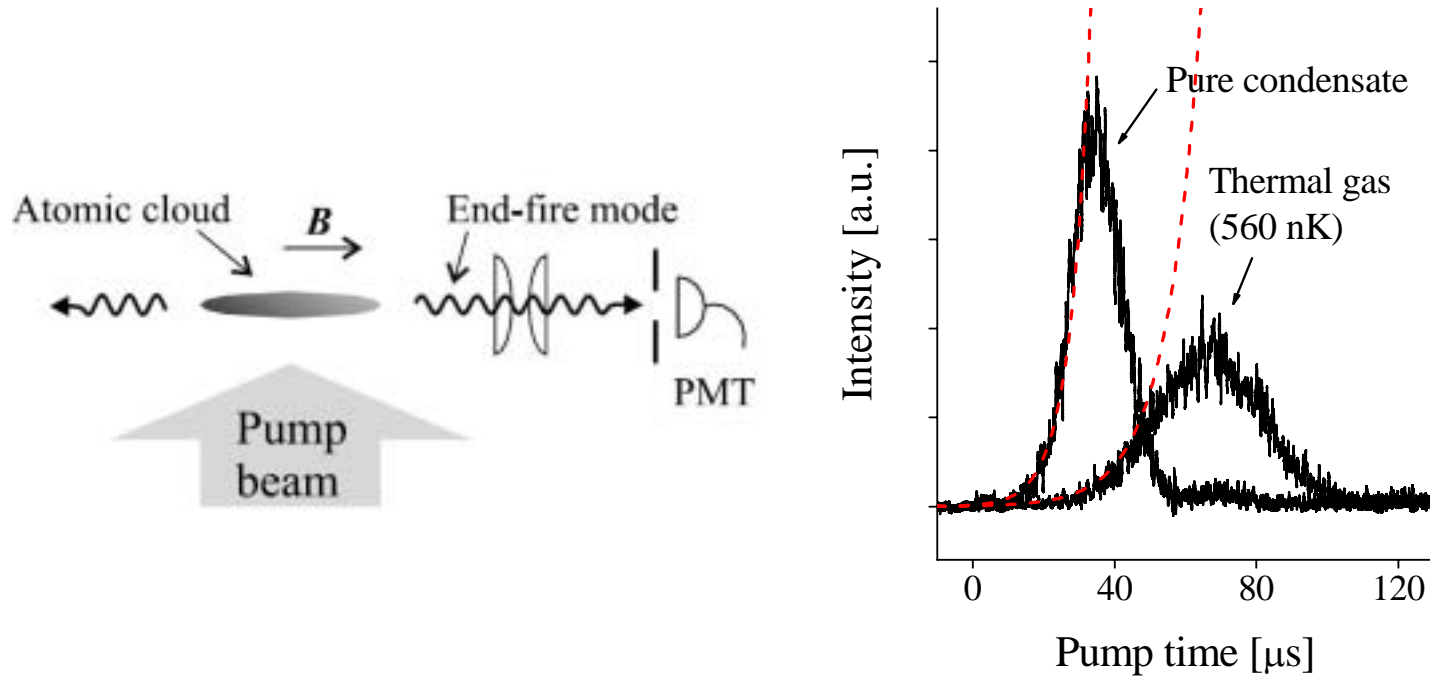
# BECと熱的原子に本質的な差がないことを示す例 (参考) 原子による光の超放射散乱



# 超放射散乱の一般的解釈



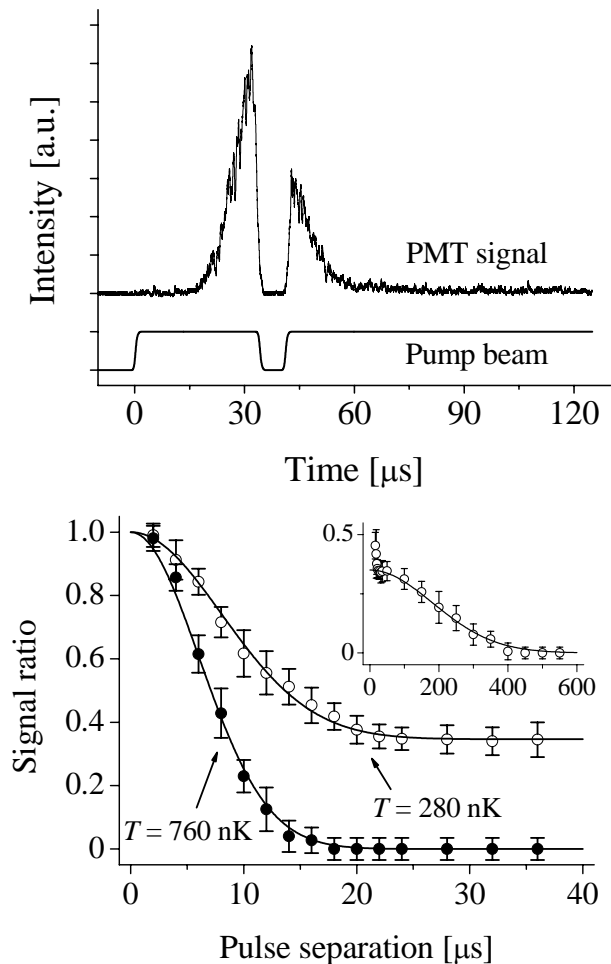
# 熱的原子集団による超放射散乱



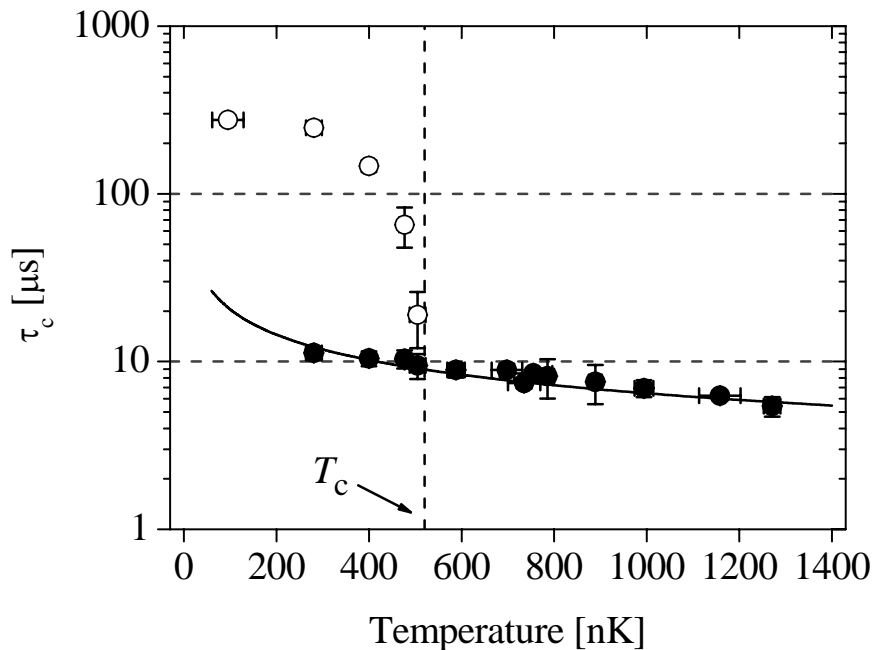
注)  $1 \mu\text{K}$ の原子集団の熱的ドブロイ波長 ( $0.1 \mu\text{m}$ )  $<$  ポンプ光の波長 ( $780\text{nm}$ )

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

# 原子集団のコヒーレンス時間の測定



## コヒーレンス時間の温度依存性





# 干渉計の位相感度限界

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \begin{array}{l} \text{ショットノイズ限界} \\ \text{(工夫すれば破れる)} \end{array}$$

$$\Delta\varphi = \frac{1}{N} \quad \begin{array}{l} \text{ハイゼンベルグ限界} \\ \text{(決して破れない)} \end{array}$$

干渉計の感度を上げたければ

工夫して、ハイゼンベルグ限界を目指す

$N$ を大きくする(輝度を上げる)

# 工夫する (ハイゼンベルグ限界を実現する)

RAPID COMMUNICATIONS

PHYSICAL REVIEW A

VOLUME 56, NUMBER 2

AUGUST 1997

## Heisenberg-limited spectroscopy with degenerate Bose-Einstein gases

P. Bouyer\* and M. A. Kasevich

*Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94035*

(Received 14 March 1997)

We propose an experiment that exploits the quantum interference between two noninteracting ensembles of spatially degenerate Bose-Einstein atoms to measure phase shifts of atomic coherences at the Heisenberg limit.  
[S1050-2947(97)50207-1]

PACS number(s): 03.75.Dg, 03.75.Fi

(ポイント)  
干渉計の入力状態として、二つの独立なBEC、つまり  
Dual Fock State  $|\Psi_{\text{IN}}\rangle = |n_g, n_e\rangle$  を用意する。

$\Delta\phi$  : 干渉計の位相差

$\Delta n \equiv n_e^{out} - n_g^{out}$  : 出力原子数の差

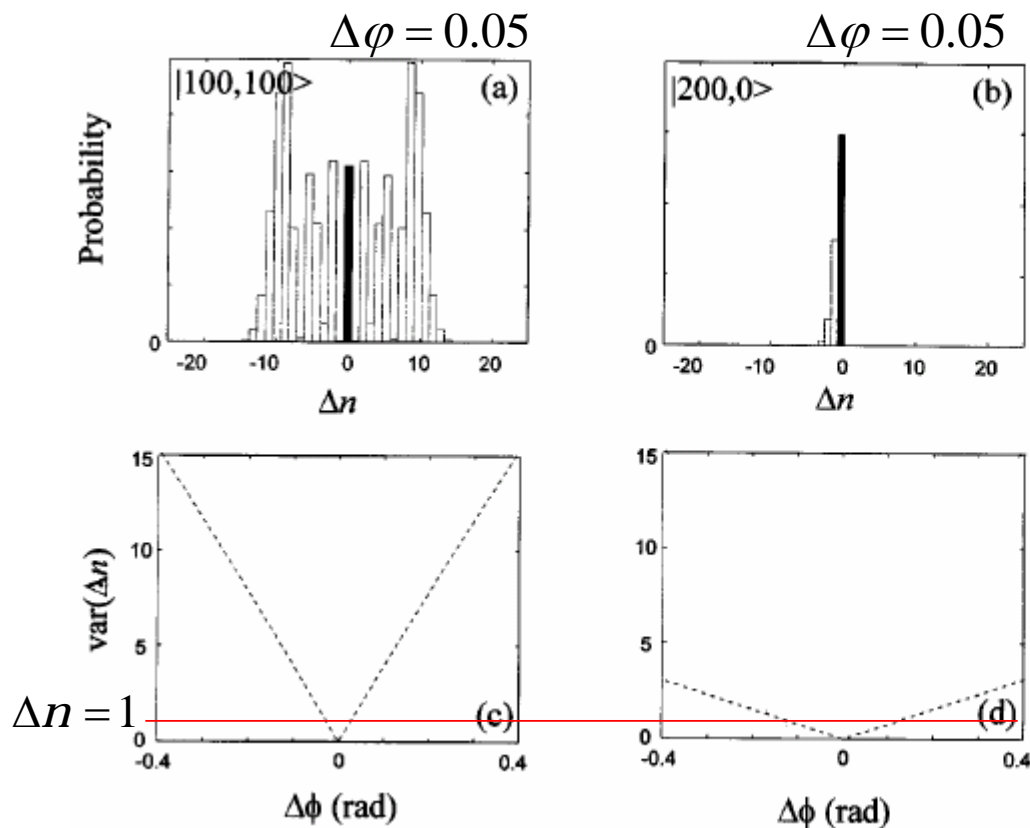
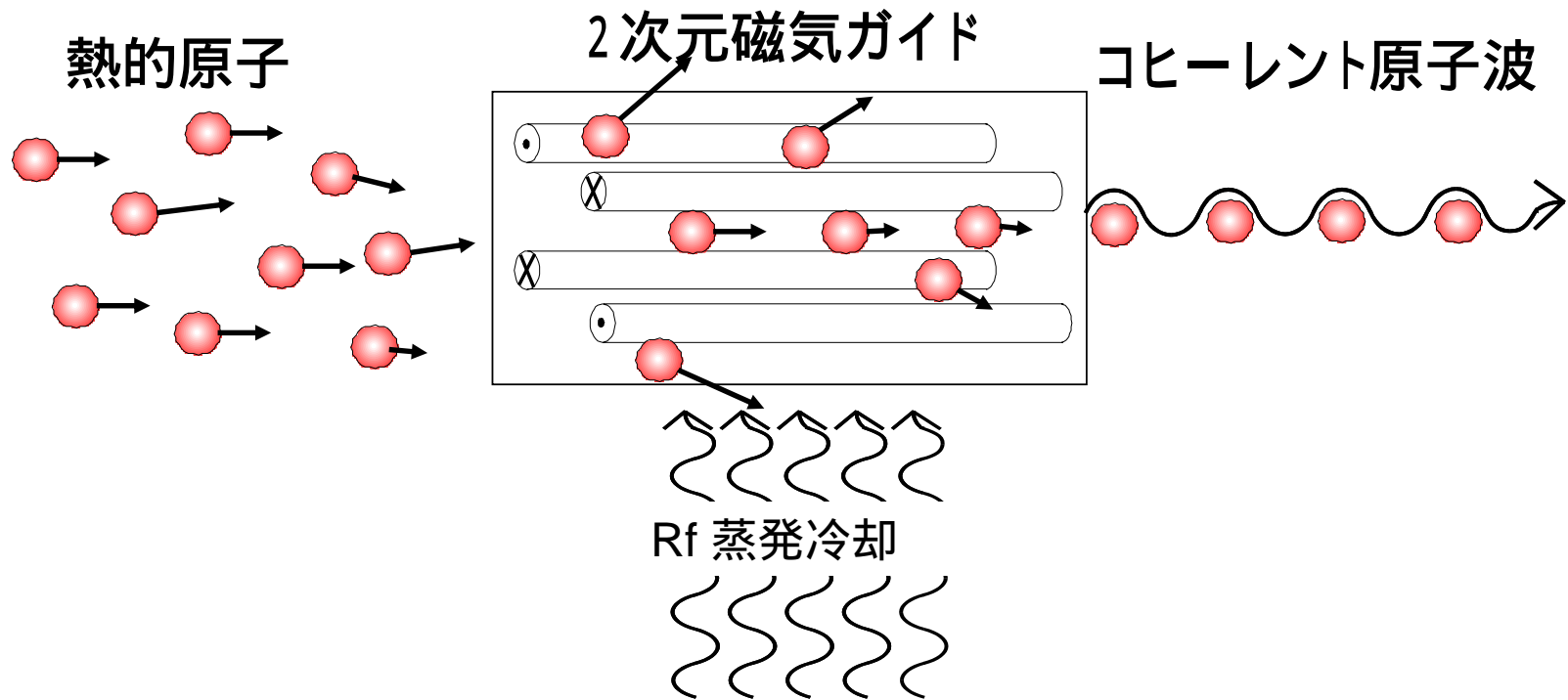


FIG. 1. (a) Probability distribution for  $\Delta n \equiv n_e^{out} - n_g^{in}$  obtained by numerical diagonalization the matrix defined by Eqs. (3) and (4). The input is a dual Fock state with 100 atoms in each condensate. Open bars indicate the distribution resulting from a phase shift of  $\Delta\phi = 0.05$  rad during the free evolution interval. For comparison, the solid bar indicates the distribution of  $\Delta n$  for  $\Delta\phi = 0$ . (b) Probability distribution for a single Fock state input with 200 atoms, with phase shifts  $\Delta\phi = 0.05$  rad (open bars) and  $\Delta\phi = 0$  (solid bar). (c) Variance of the distributions for  $\Delta n$  as a function of the phase shift  $\Delta\phi$  for the input state  $|100,100\rangle$ . (d) Variance of the distribution for  $\Delta n$  for the input state  $|200,0\rangle$ .

# 何が必要か？

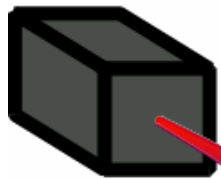
- 二つの独立なBEC (Dual Fock state)  
斥力相互作用 + 二重井戸ポテンシャル
- 量子効率が100%に近い原子検出器  
Cavity QED (微小共振器)

# 輝度を上げる (連続的なBECの生成)

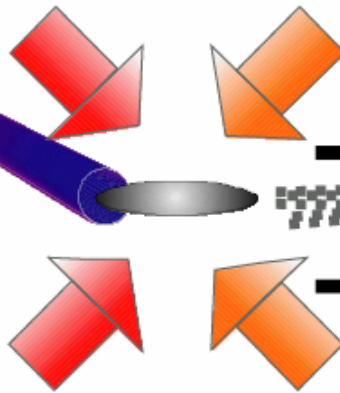


# 連続BEC生成のためのスキーム

Rb オープン  
300m/s

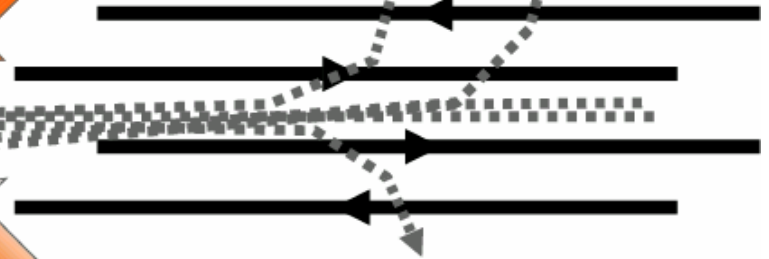


ゼーマン減速器  
20m/s



MOT  
数cm/s

磁気ガイド



# CW原子レーザーのための実験装置 @ENS

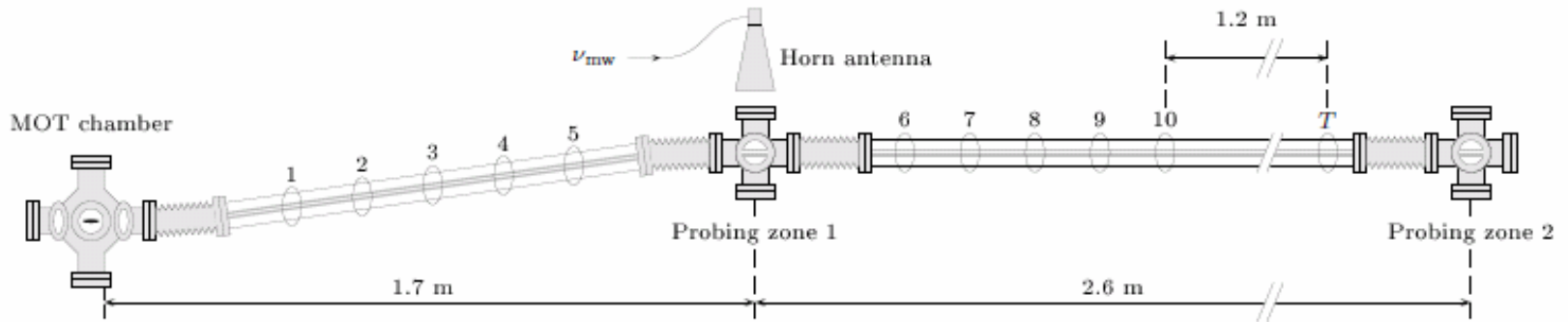
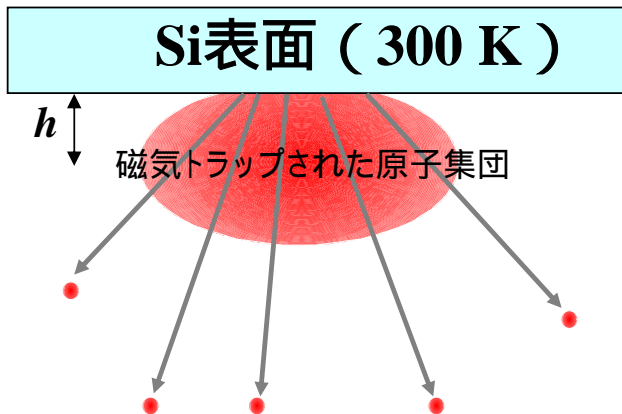


FIG. 1: Simplified sketch (not to scale) of the magnetic guide. The first 1.7 m of the guide is slightly tilted upwards by  $h_0 = 22 \pm 1$  mm, while the remaining part is horizontal within  $\pm 1$  mm. The guide sits inside glass tubes so that radio-frequency (RF) waves can be shone on the atomic beam. Two probe beams, one just after the slope, the other close to the end of the guide, can be used to detect the atoms. The beam in the *Probing zone 1* can also be used as a marking beam for longitudinal time of flight measurements (see text). The ellipses numbered from 1 to 10 represent the RF antennas used for the evaporative cooling of the beam; the one labelled *T* represents the RF antenna used to measure the beam temperature.

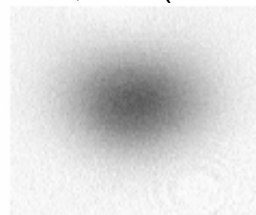
T. Lahaye, Z. Wang, G. Reinaudi, S. P. Rath, J. Dalibard,  
and D. Guéry-Odelin, cond-mat:/0505709.

# Si 表面による蒸発冷却

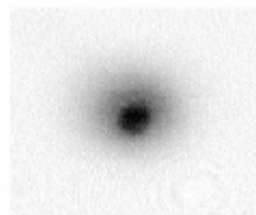
D. M. Harber, et al. J. Low Temp. Phys. 133, 229(2003)



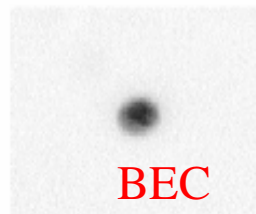
運動エネルギーの大きい原子が選択的にSi 表面に衝突し、磁気トラップから脱落(蒸発)



$h = 23 \mu\text{m}$



$h = 17 \mu\text{m}$



$h = 10 \mu\text{m}$

BEC

$\sim 5 \times 10^5$  atoms

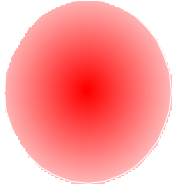
300 ~ 500 nK

## 連続的な蒸発冷却に容易に応用可能



# 表面蒸発冷却 + 磁気ガイド 連続BEC ?

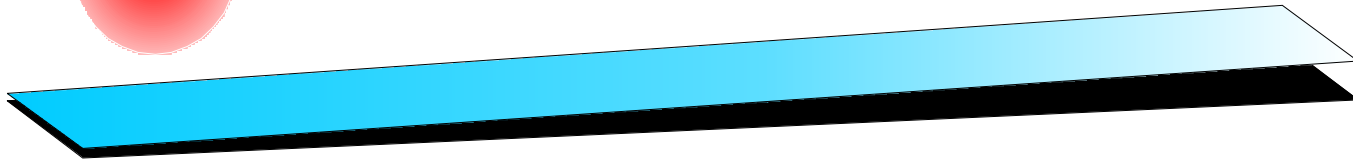
冷却された原子集団



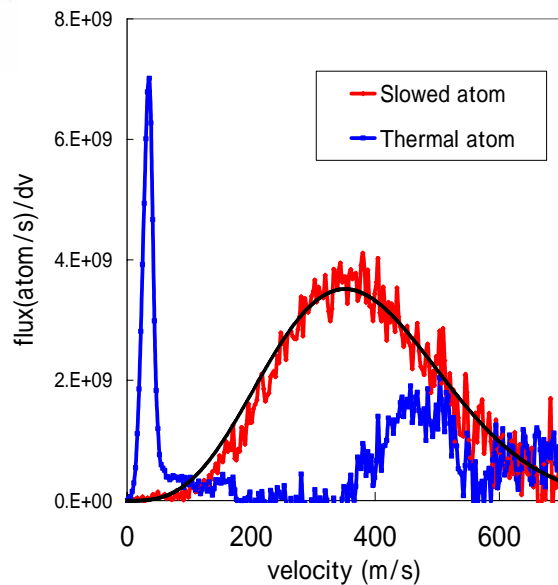
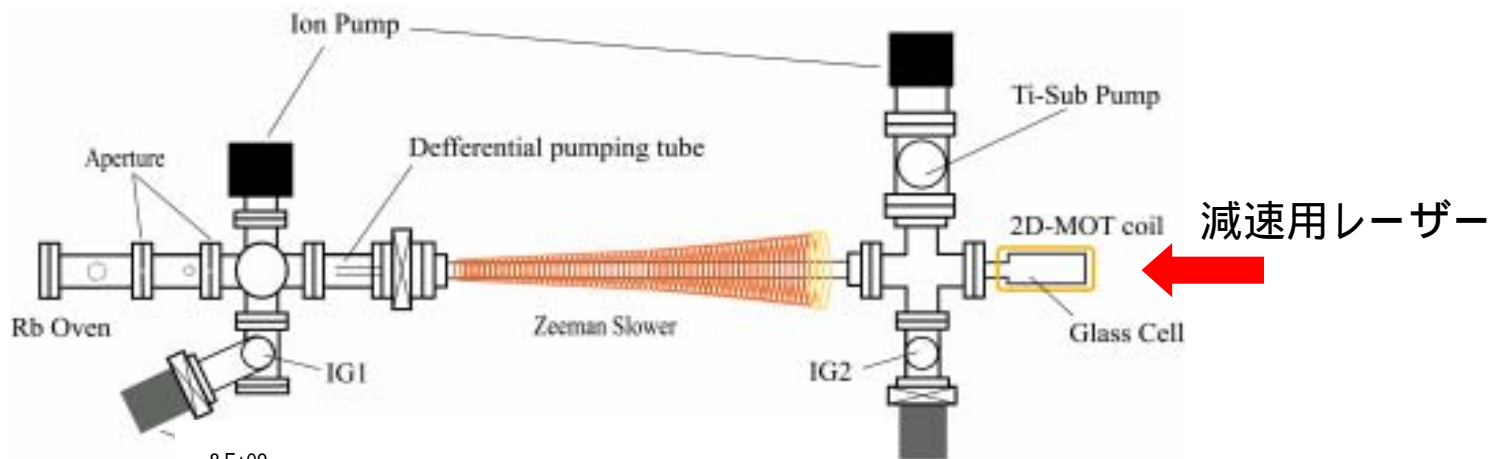
2次元磁気ガイド



BEC

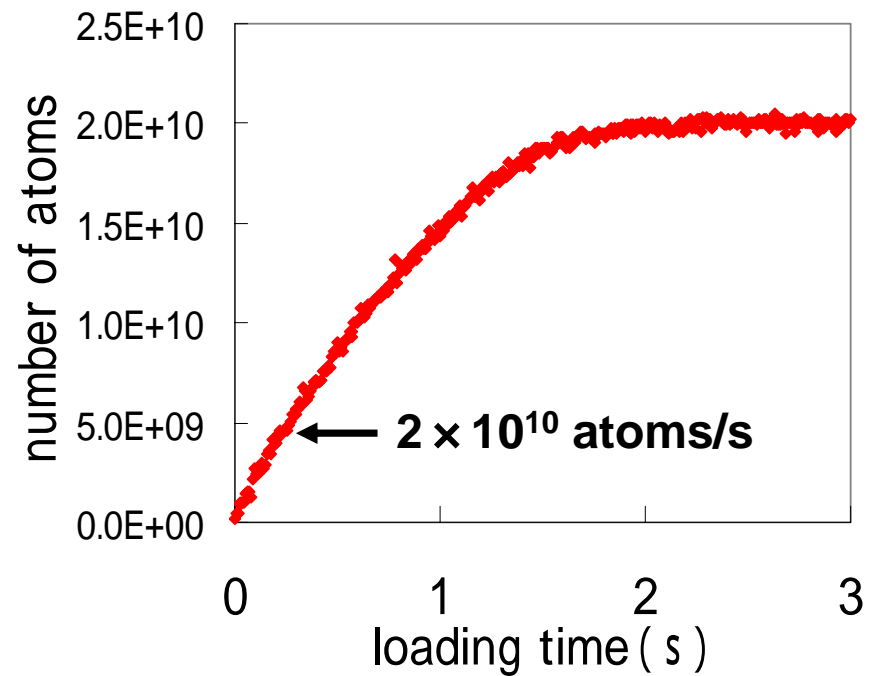
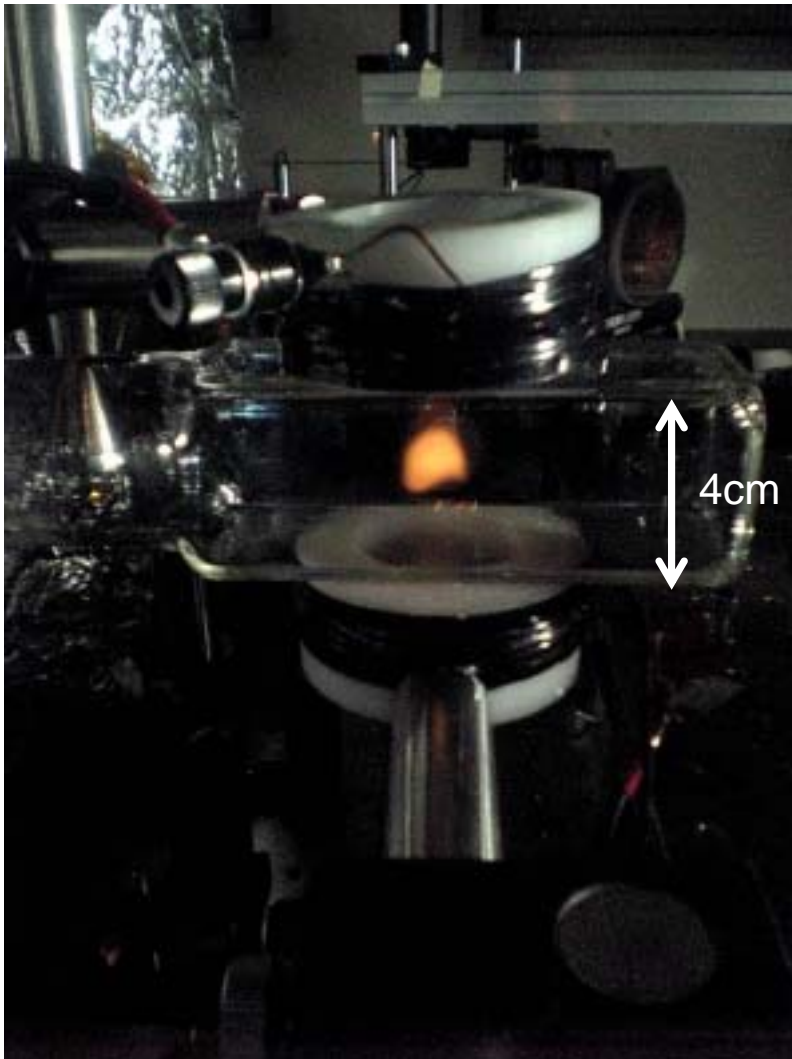


# 高輝度原子線源の開発

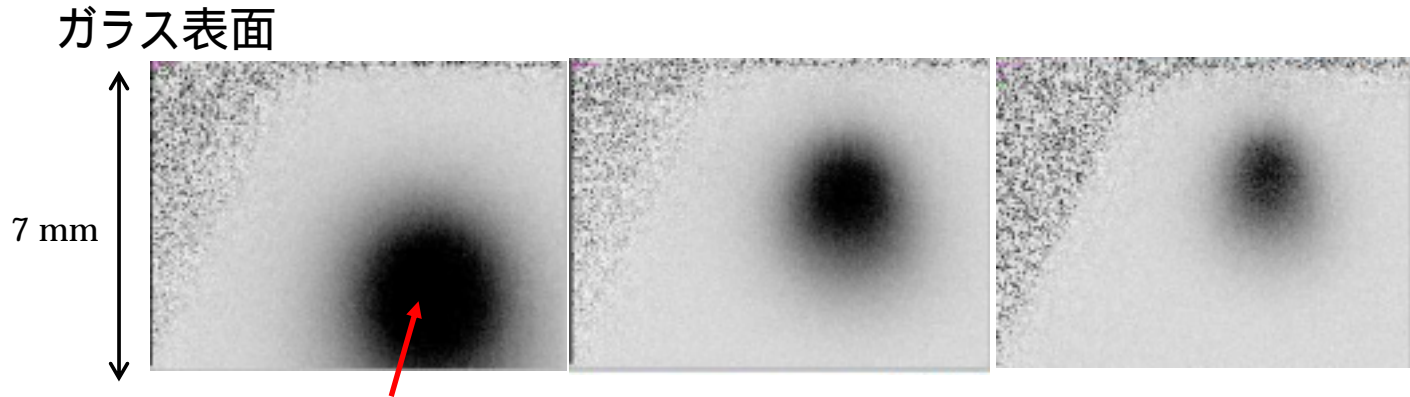


- ・Thermal原子の流量  
~  $10^{12}$  atoms/s
- ・減速された原子の流量  
~  $10^{11}$  atoms/s  
(Thermal原子の約15%)
- ・最終速度 ~ 20 m/s

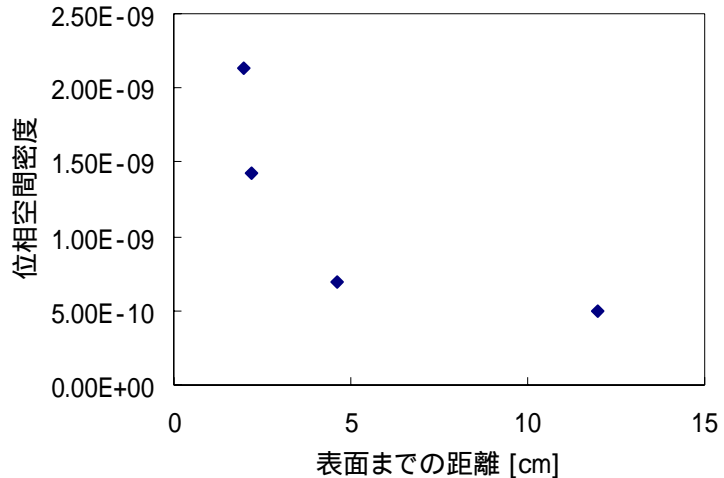
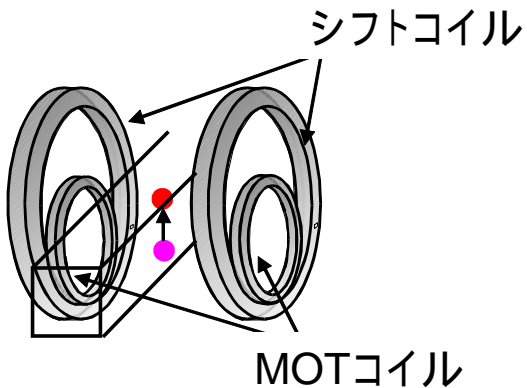
# MOT への高速ローディング



# 予備実験：ガラス表面を用いた蒸発冷却



四重曲磁場により  
磁気トラップされた原子



# まとめ

## 原子レーザー(BEC)用いた干渉計の現状

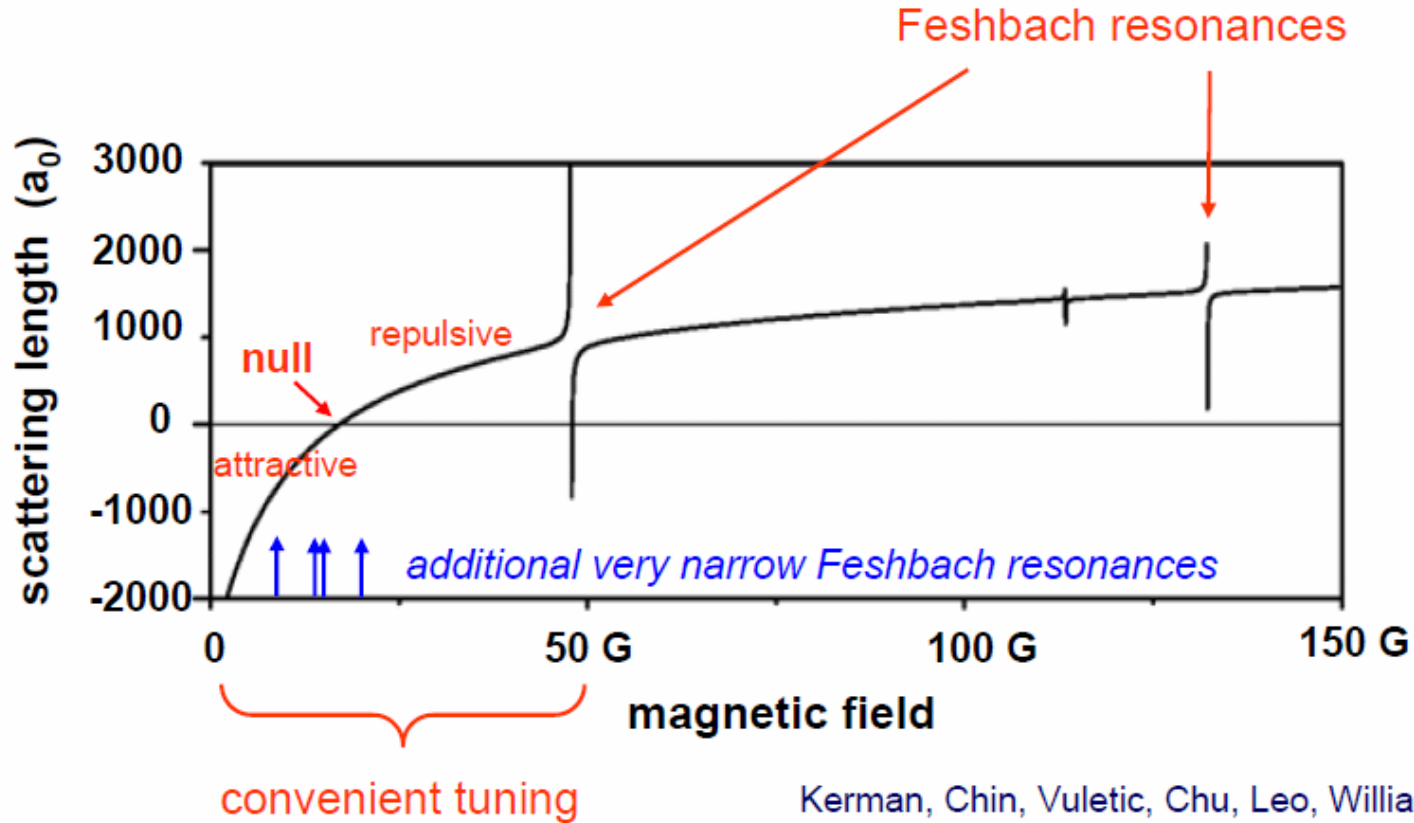
- ・(工夫しなければ)熱的原子と質的に変わらない
- ・粒子間相互作用( $\sim$  kHz)
- ・輝度が小さい( $\sim 10^6$  atoms/s)

## 今後の課題

- ・特殊な量子状態(Dual Fock State)
- ・量子効率の高い単一原子観測(cavity QED)
- ・連続原子レーザーの開発(表面蒸発冷却)
- ・粒子間相互作用のない原子レーザー(Cs  $a=0$ @17G)

# Cs原子のFeshbach共鳴

s-wave scattering length for  $F=3$ ,  $m_F=3$  state:



Kerman, Chin, Vuletic, Chu, Leo, Williams, Julienne,  
proceedings of the Euroconf. in Cargese, July 2000  
C.R. Acad. Sci. Paris 2, IV, 633 (2001)