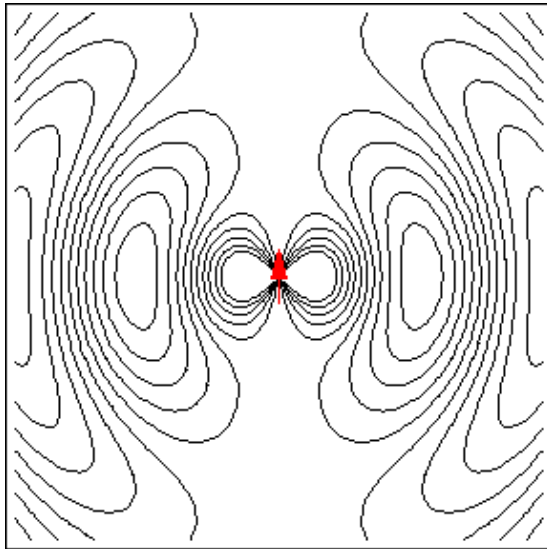




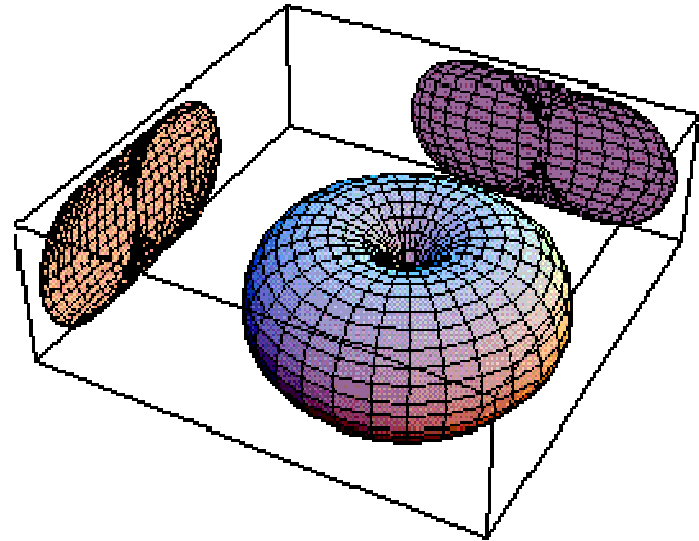
宇宙で最も冷たい物質 レーザー冷却技術が拓く物理

東京大学 大学院総合文化研究科
鳥井 寿夫

光(電磁波)の源は電気の振動



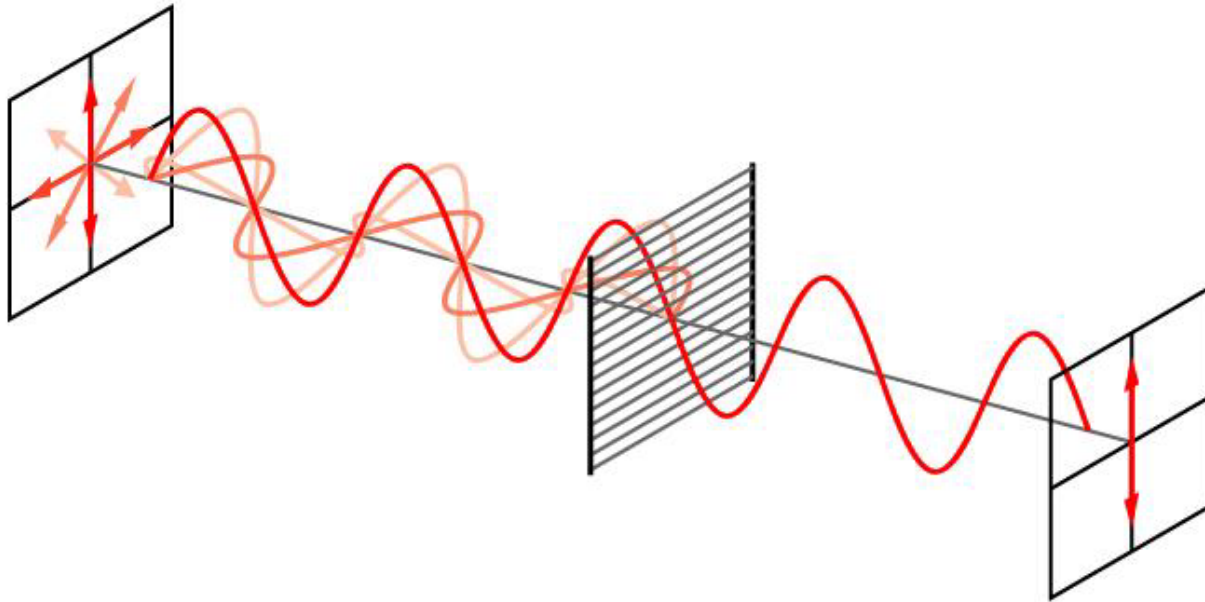
双極子アンテナから
放射される電気力線



放射強度の方向依存性

電場の向き(偏光の向き)は進行方向に対して垂直(横波)

偏光板とは



<http://ja.wikipedia.org/wiki/偏光板>

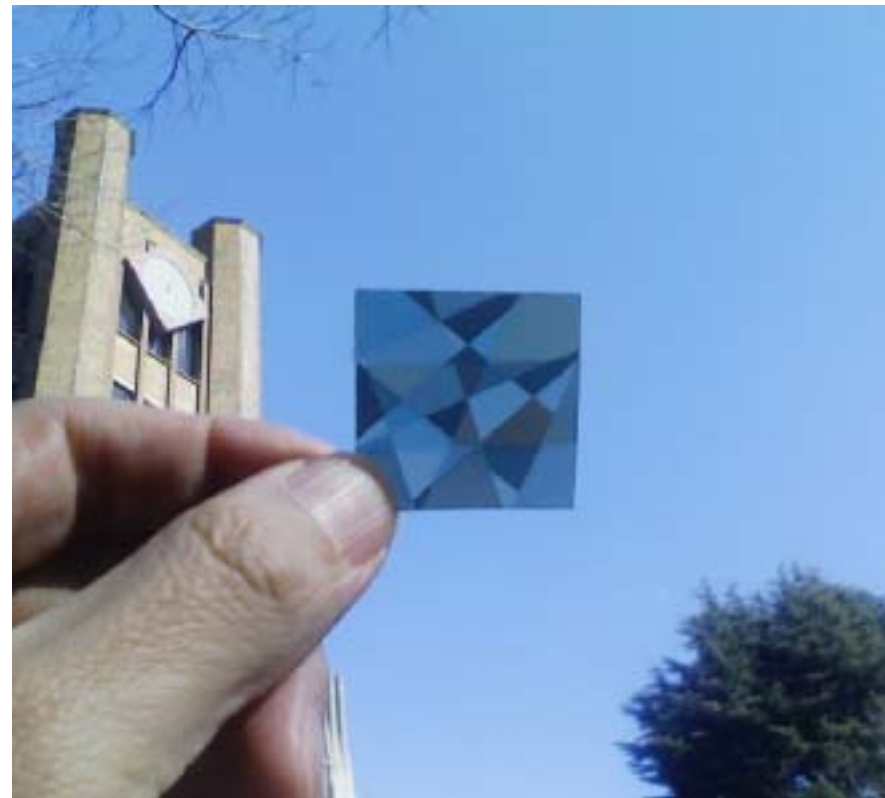
偏光板内の電子が振動できる方向の偏光成分のみが吸収される
(入射光によって電子が振動し、入射光を打ち消す光を放射する)

ここで実験：マイクロ波を使って偏波を確認しよう

2012年2月3日正午の空



時計台から正門を見る(南向き)

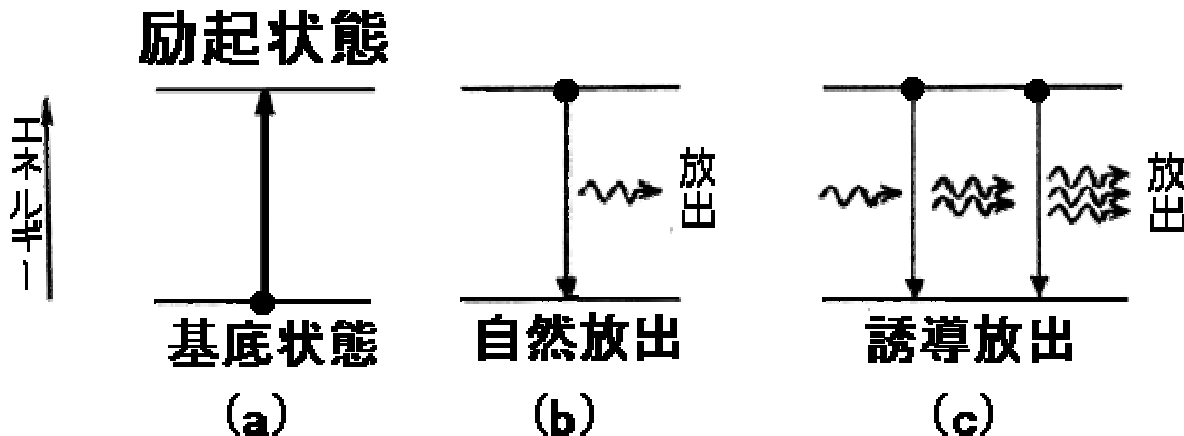


時計台を見上げる

Laser (Maser) とは

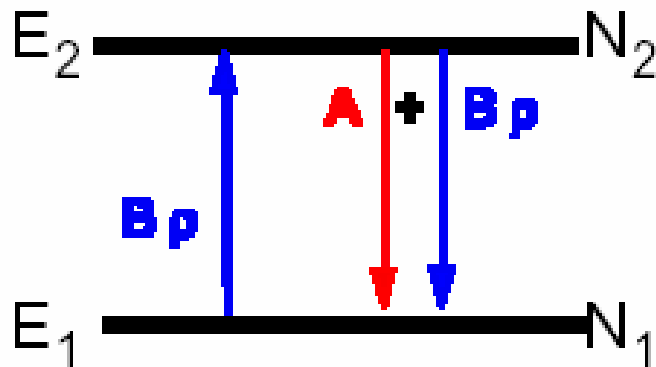
Light (Microwave) Amplification by
Stimulated Emission of Radiation

輻射の誘導放出による光(マイクロ波)の増幅

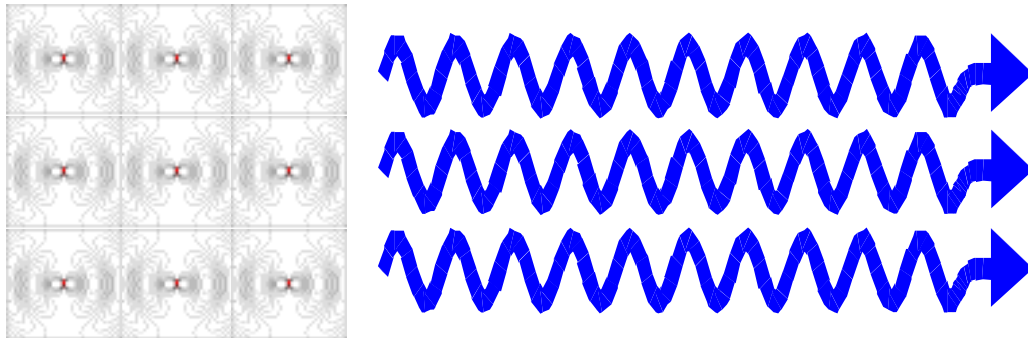
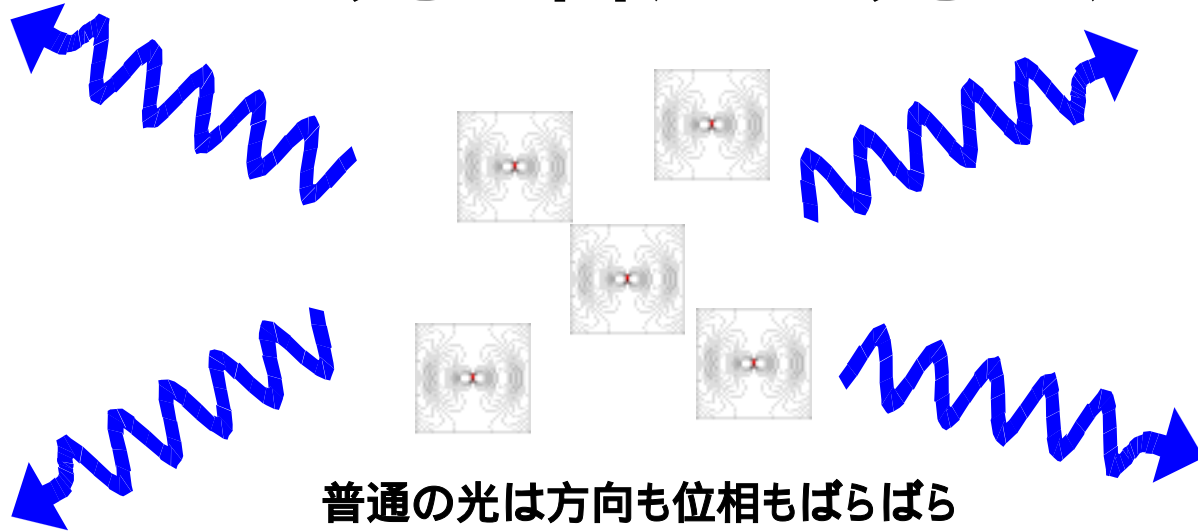


Einstein's 1917 paper (アインシュタインのA係数、B係数)

“We introduce the following quantum-theoretical hypothesis. Under the influence of a radiation **遷移確率の導入** make an [upward] transition from state n to state m by absorbing radiation energy ... We similarly assume that a [downward]* transition m to n associated with a liberation of radiation **誘導放出の概念** the influence of the radiation field, and that it satisfies the [same] probability law ... ”

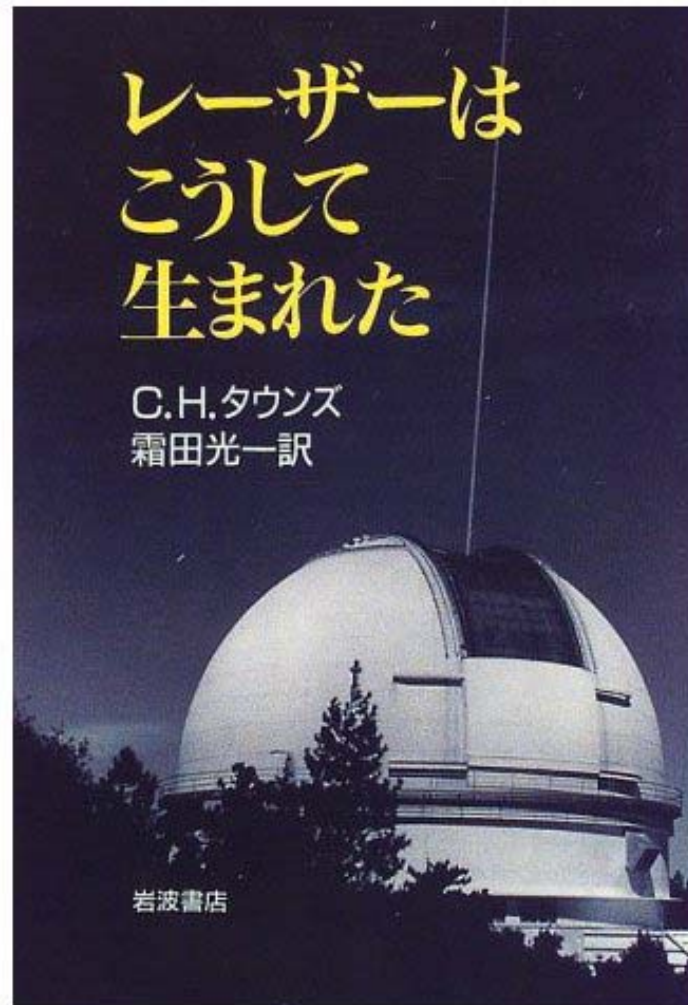


レーザー光と普通の光の違い



レーザー光は指向性があり、位相がそろっている(コヒーレント)

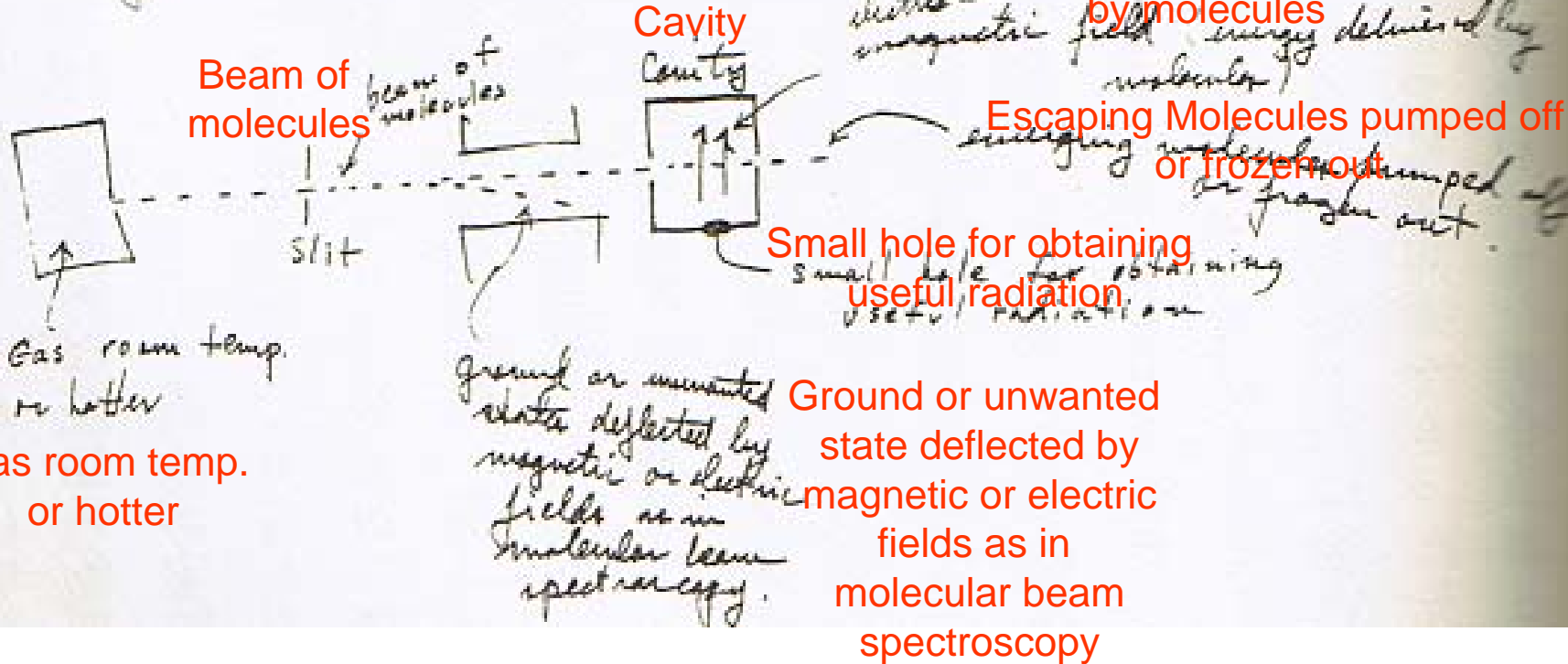
How the laser happened (by Charles H. Townes)



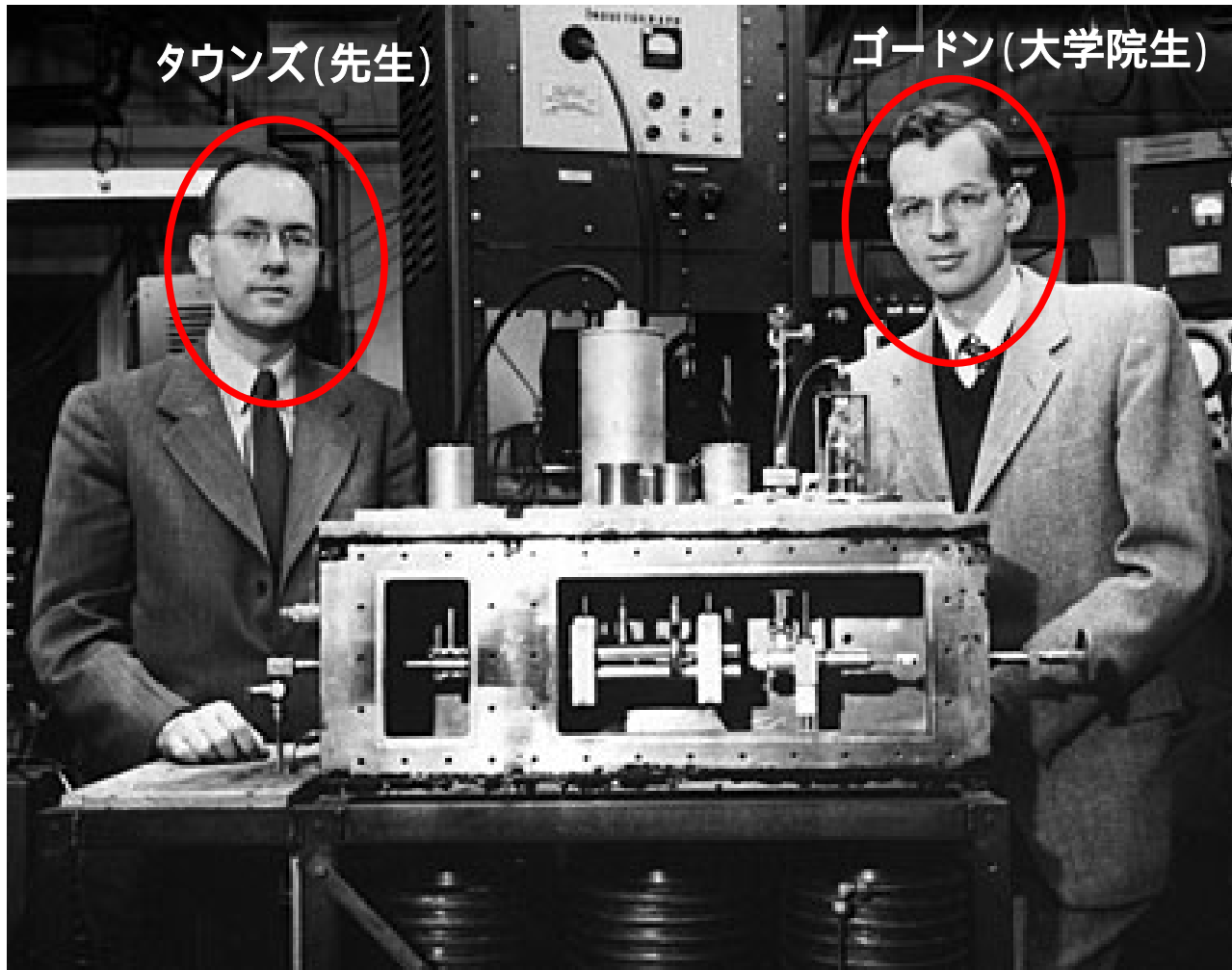
最初にレーザーのアイデアを記載した 1951年5月11日のタウンズのノート

May 11, 1951 Apparatus for obtaining short microwaves from excited atomic or molecular systems

Apparatus for obtaining short microwaves from excited atomic or molecular systems



世界初のレーザー発振(1954)



メーカー発明前のコロンビア大学の 同僚の反応

ラビ(1944年ノーベル物理学賞)

クッシュ(1955年ノーベル物理学賞)

「君はこの研究をやめるべきだ。私たちに
もうまくいかないことは分かっている。君は
研究費を無駄にしている。もうやめたま
え！」

メーザー発明後の大御所の反応

ボーア(量子論の父、1922年ノーベル物理学賞)の反応

「そんなことは不可能だ！」

(説得後)「ああそうか、多分君の言うとおりだろう」

フォン・ノイマン(20世紀最高の数学者の一人)の反応

「そんなはずはない！」

(15分後)「分かった、君の言うとおりだ」

レーザー開発のエピソードが 物語っていること

・レーザーの原理は量子力学の基本(誘導放出)だが、30年以上誰も実現しようと思わなかった

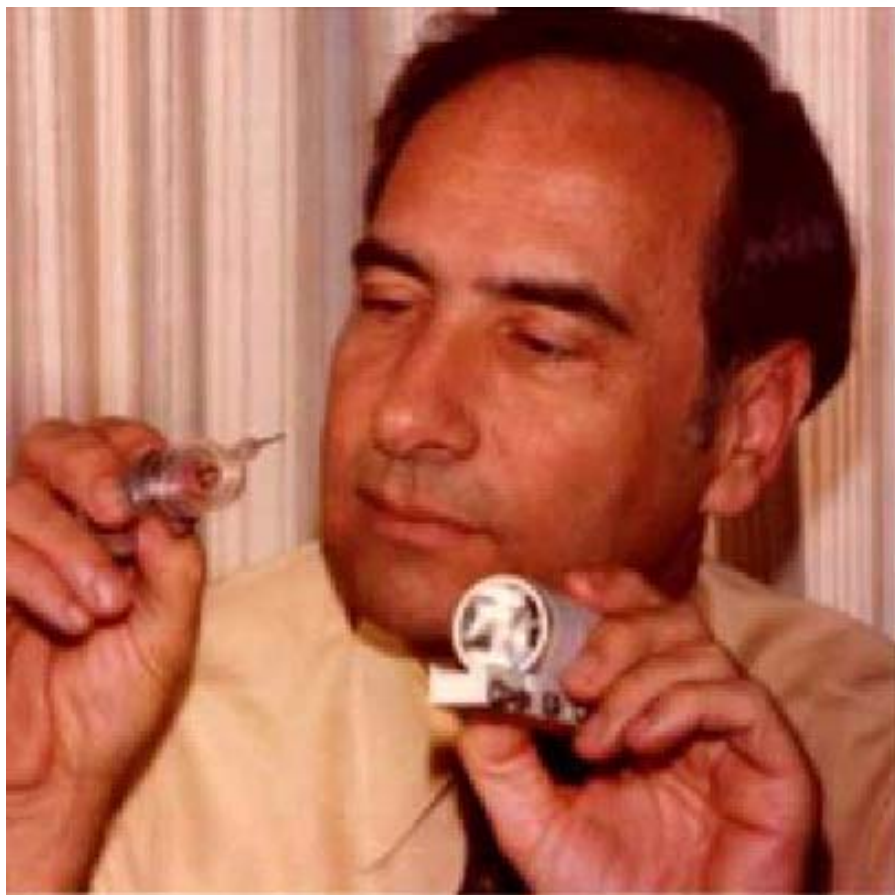
意外と眠っている素晴らしいアイデアがある

(ファインマン曰く、素晴らしいアイデアかどうかは「**僕がそれに気がつくんだった**」と言うかでわかる)

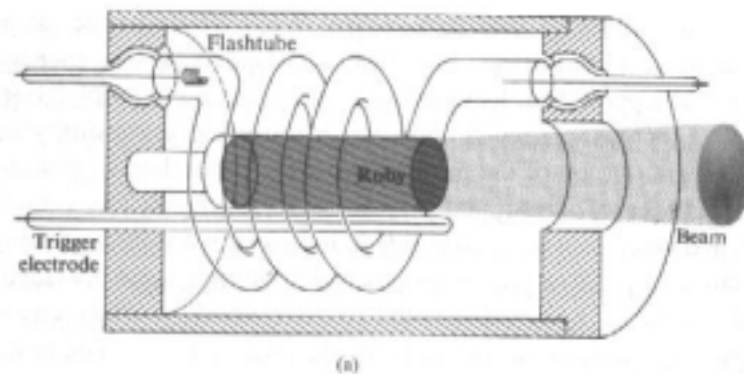
・ボーア、フォンノイマンといった量子力学の大御所が、レーザーが可能であることを(直ぐには)信じられない

偉い先生の言っていることを信用してはならない

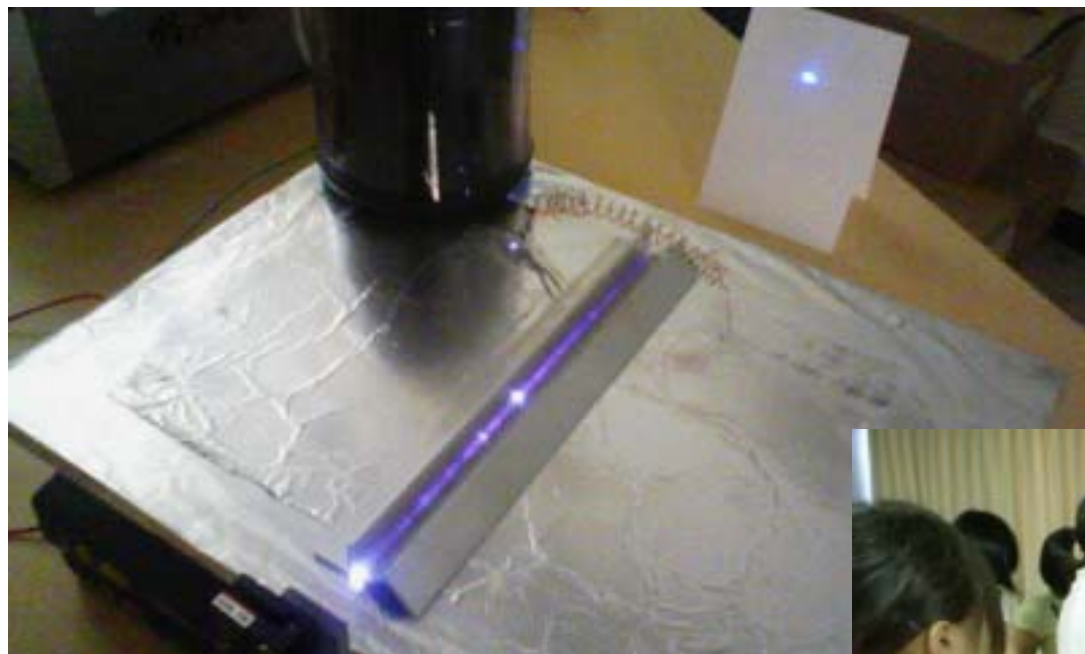
世界初のレーザー T.メイマン(1960)



ルビーレーザーを持つMaiman



おうちでも作れるレーザー



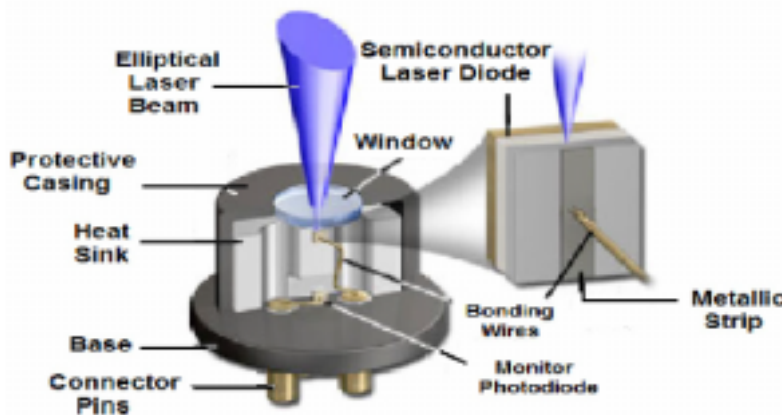
波長337nm(紫外線)

材料：
アルミ箔、OHPシート
アルミ板、コイル
空気(窒素)



女子中高生夏の学校2010年

最も身近なレーザー：半導体レーザー



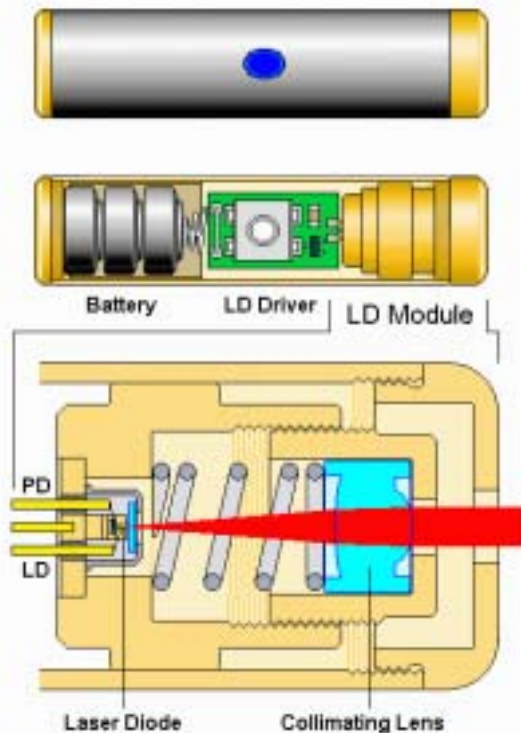
Compound	Wavelength (nm)
InGaN	390–420
ZnSe	460–530
AlGaInP	630–680
GaInP	670
$Ga_{1-x}Al_xAs$	620–895
GaAs	904
InGaAs	980
InGaAsP	1100–1650
InGaAsSb	1700–4400
PbEuSeTe	3300–5800
PbSSe	4200–4800
PbSnTe	6300–29 000
PbSnSe	8000–29 000

紫外光

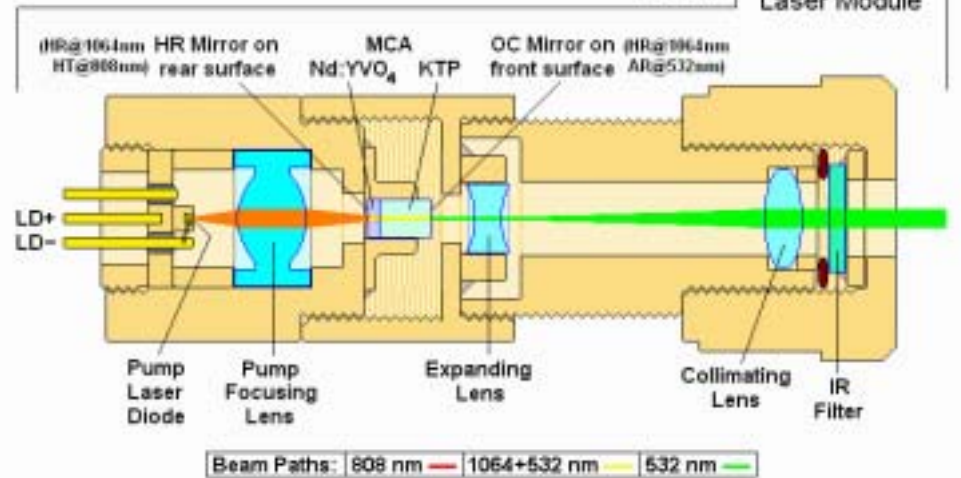
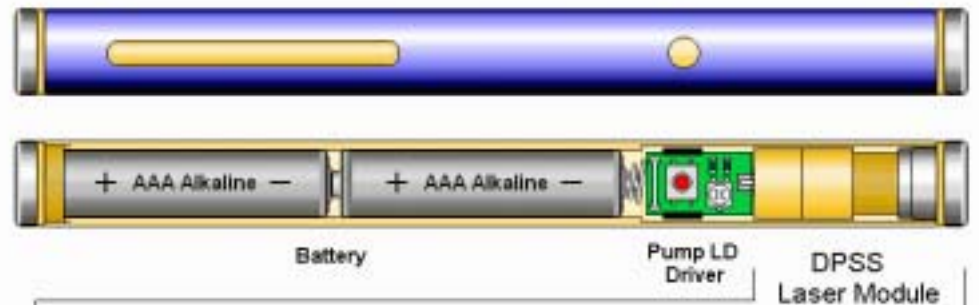
可視光

赤外光

レーザーポインターの中身(赤と緑)



Typical Red Laser Pointer

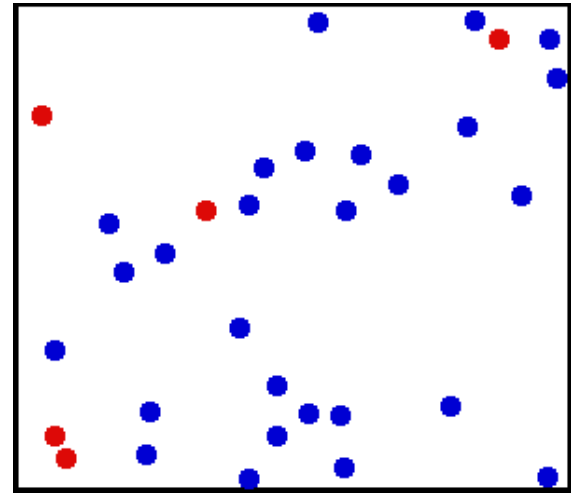


Typical Green DPSS Laser Pointer Using MCA

日常で粒子の波動性が見えない理由

(例) 部屋の中を飛びまわっている N_2 分子

- ・質量 $m = 5 \times 10^{-26}$ kg
- ・温度 $T = 300$ K



状態方程式 $PV = nRT = nN_A k_B T$
より、

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T, \text{ 平均速度は } \bar{v} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} \approx 300 \text{ m/s}$$

ド・ブローイ波長 $\lambda = h/mv = 0.03 \text{ nm} < N_2 \text{ 分子の大きさ}$
(可視光線の波長は $400 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$)

2005年東大入試 物理問題

第3問 レーザー光が原子に与える作用を用いることにより、原子気体を冷却し、なおかつ空間のある領域に保つことができる。そのような冷却原子気体を用いて、原子の波動性を検証する次のような実験を行った。

図3-1のように、鉛直上向きを z 軸とする直角座標系を設定する。レーザー光によって冷却原子気体を点 $(x, y, z) = (0, 0, L + l)$ のまわりに保つ。この点から L だけ鉛直下方に、 y 軸に平行な間隔 d 、長さ a の二重スリットを水平に置く。さらに l だけ鉛直下方に、原子が当たると蛍光を発するスクリーンを水平(xy 面上)に置く。これらはすべて真空中にある。冷却原子気体の空間的広がり、二重スリットの間隔 d 、および長さ a は、 L, l に比べて十分小さいとする。スクリーン上の蛍光のようすは、ビデオカメラによって撮影する。

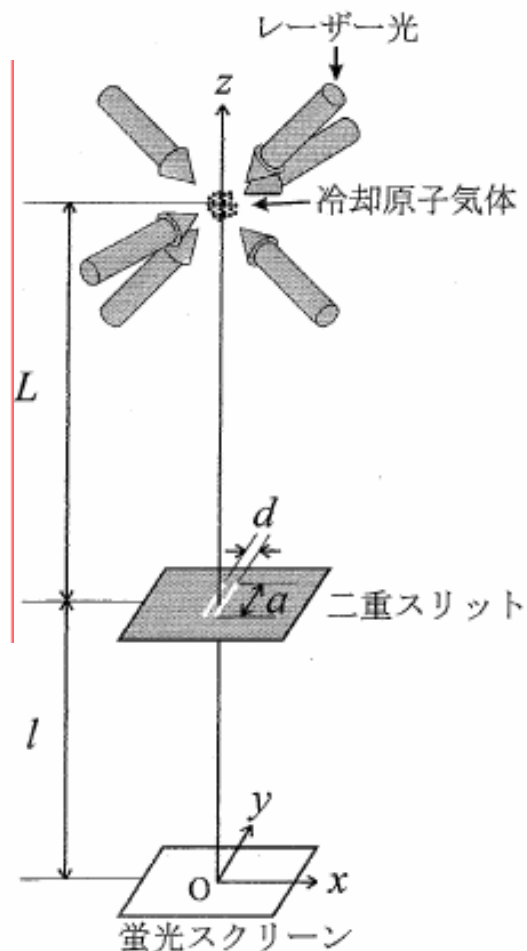


図3-1

東大で実際に行われていた(1992)

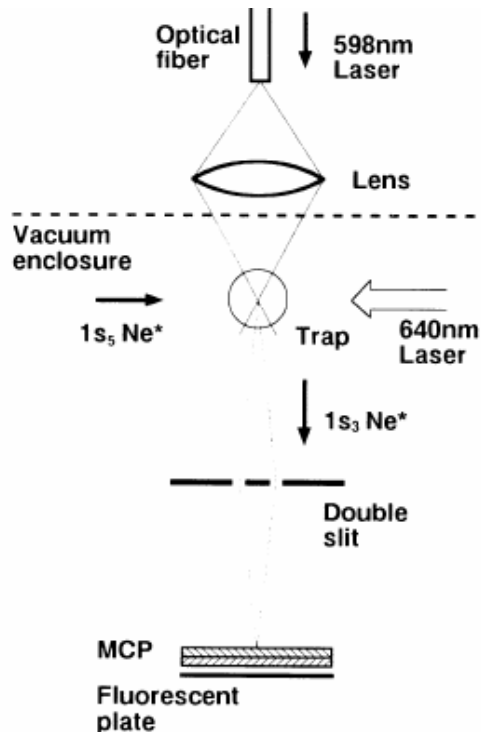
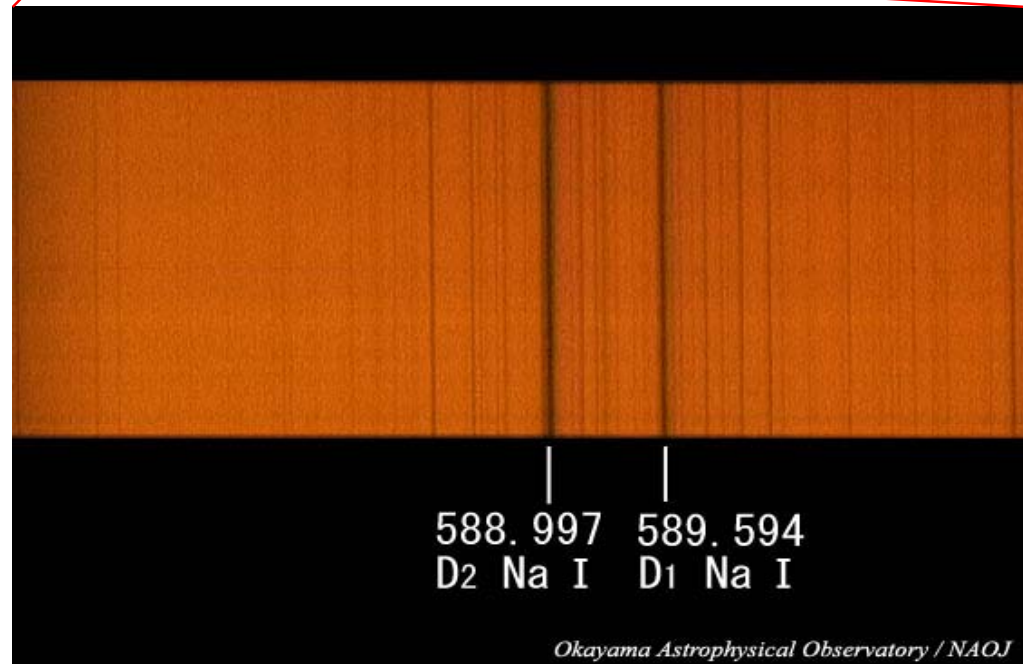
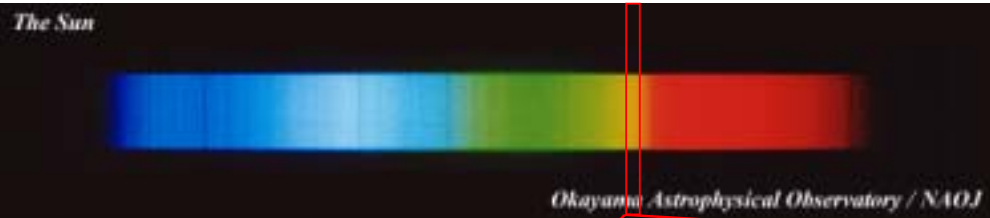


FIG. 1. Schematic experimental configuration. Details of the trap are not shown.



FIG. 2. The interference fringe pattern on the MCP for atoms with the initial velocity of approximately zero. The vertical length of the slit image is 2.8 mm. The spatial resolution of the picture is 20 and 32 μm for the horizontal and vertical directions, respectively. The narrowing of the fringe separation on the upper part is due to the damage of the double-slit structure. This figure contains approximately 6×10^3 atomic counts.

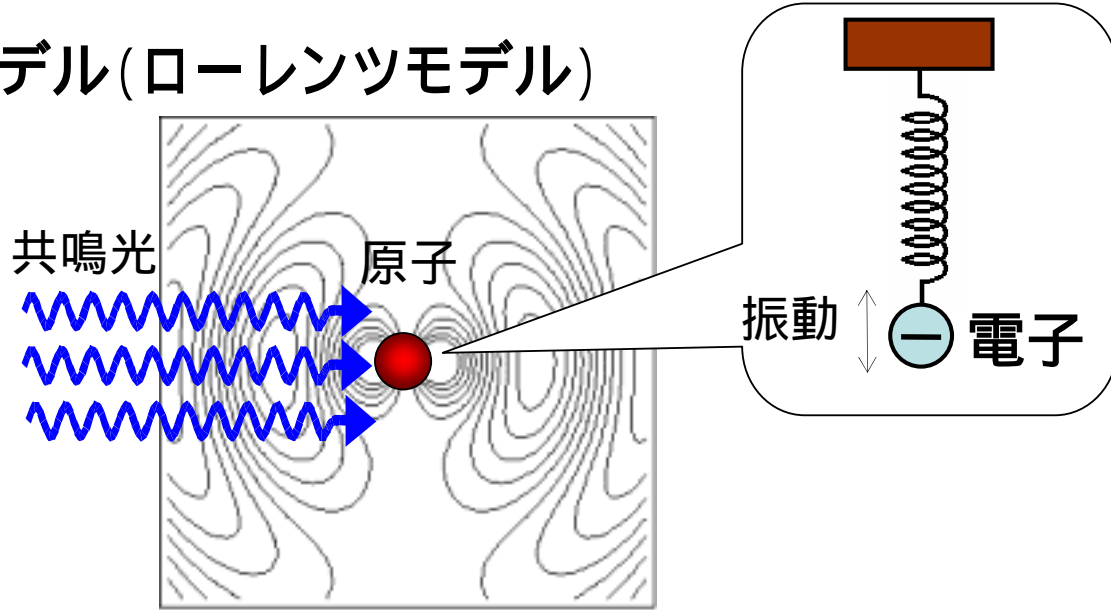
NaのD線 (フラウンフォーファー線)



http://www.oao.nao.ac.jp/stockroom/extra_content/sun/sun.htm

原子には固有振動数がある

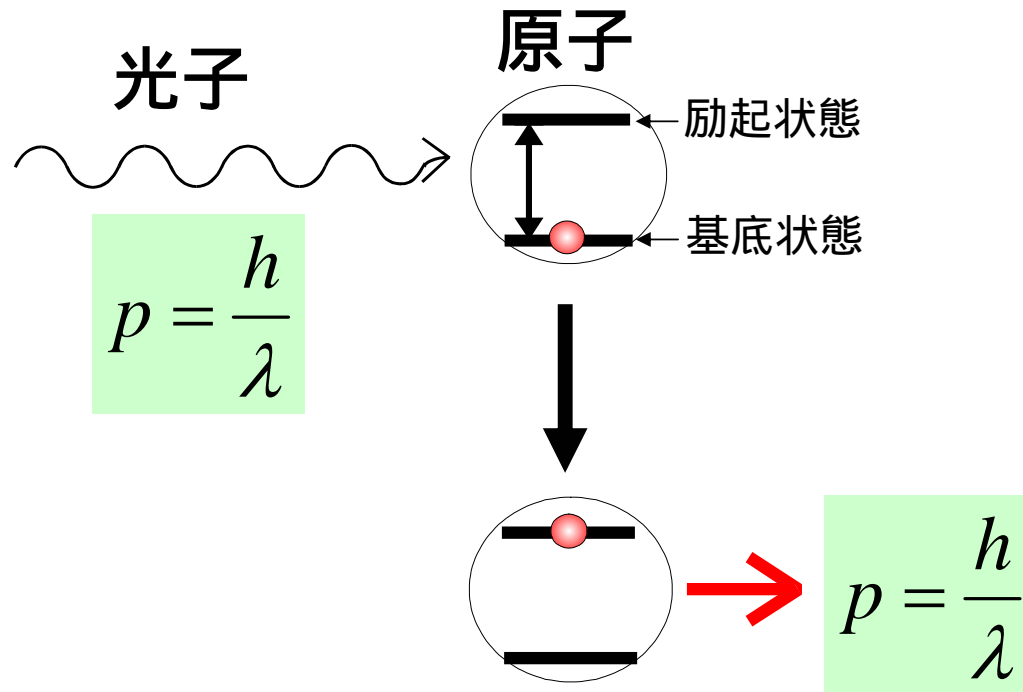
原子の古典モデル(ローレンツモデル)



ボーアの原子模型(とびとびのエネルギー状態)

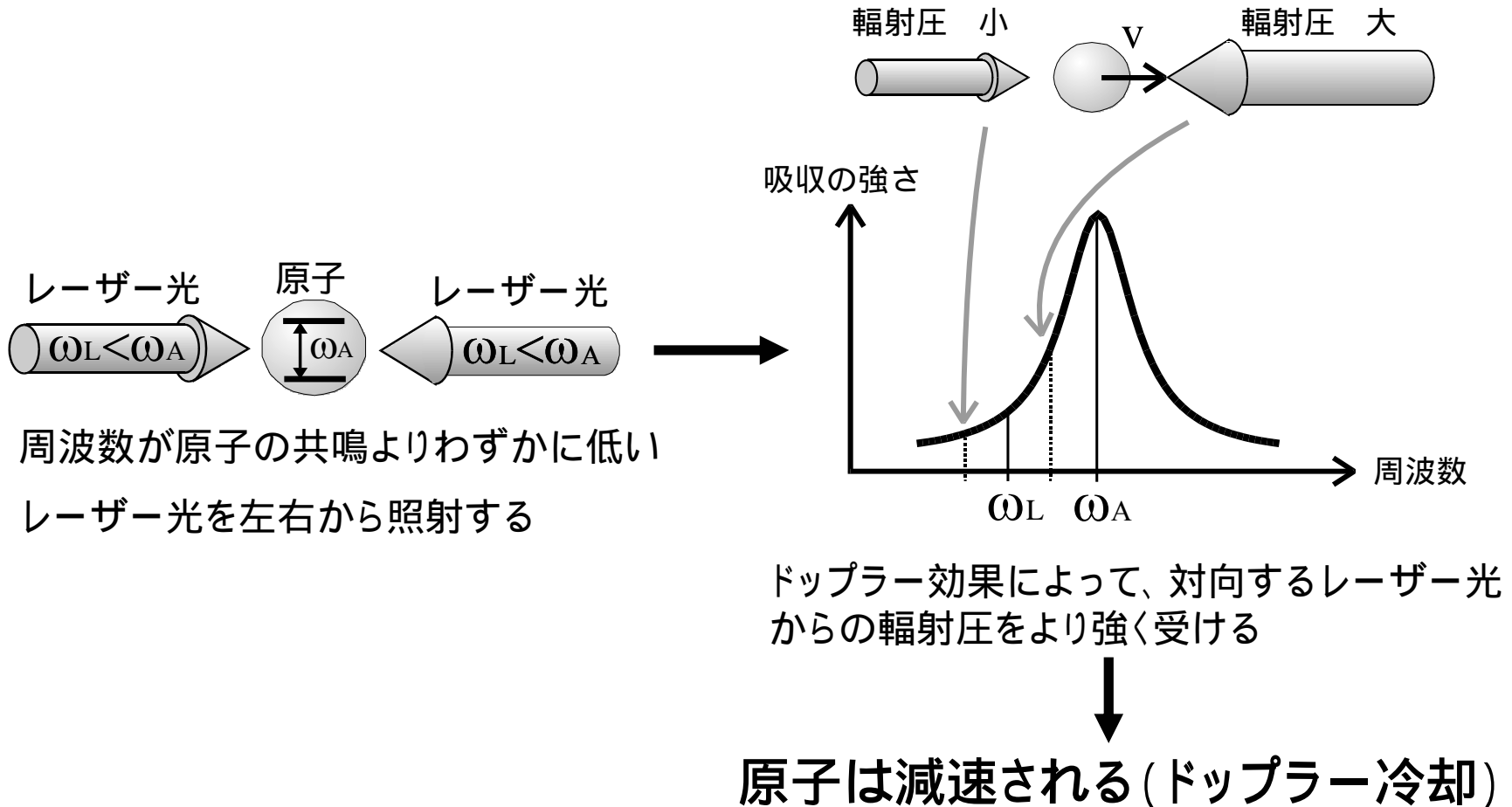


輻射圧：光子吸収による運動量変化

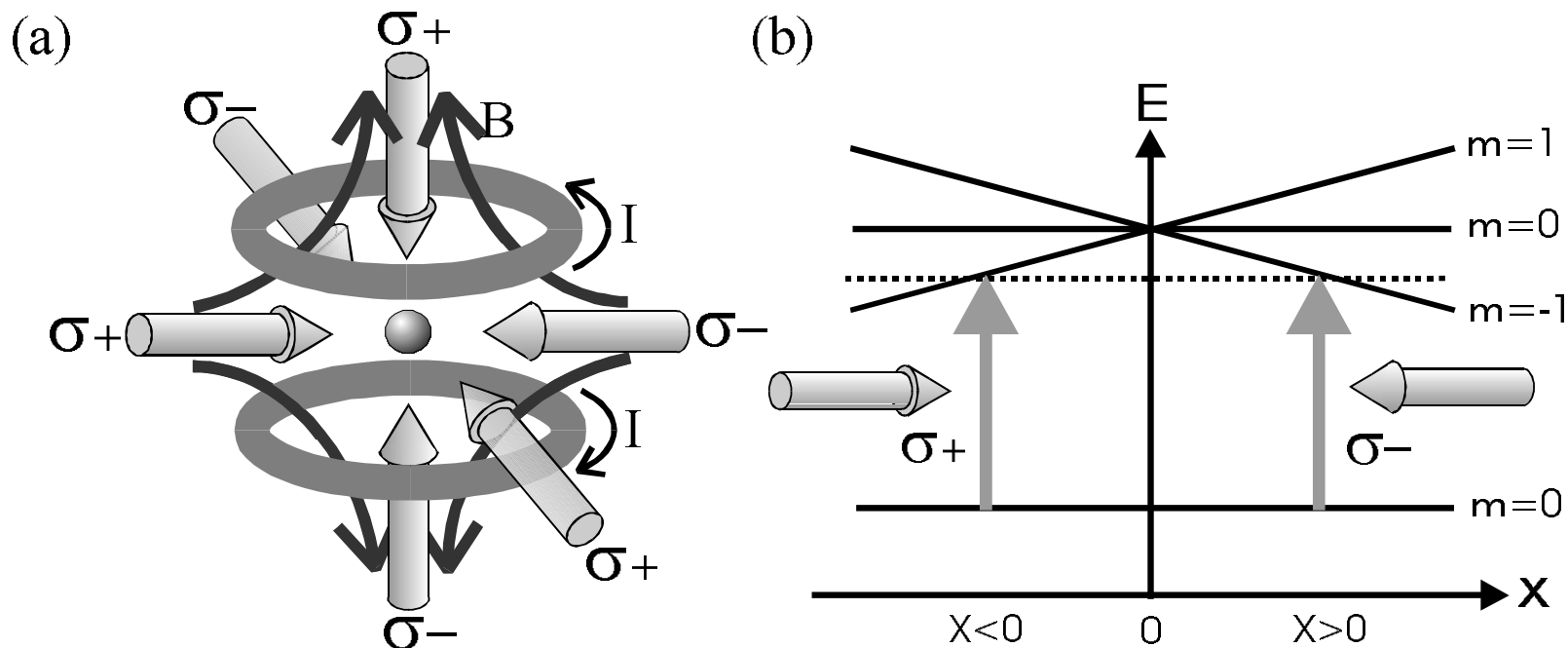


原子は励起状態になり、反跳運動量 $p = h/\lambda$ を受ける

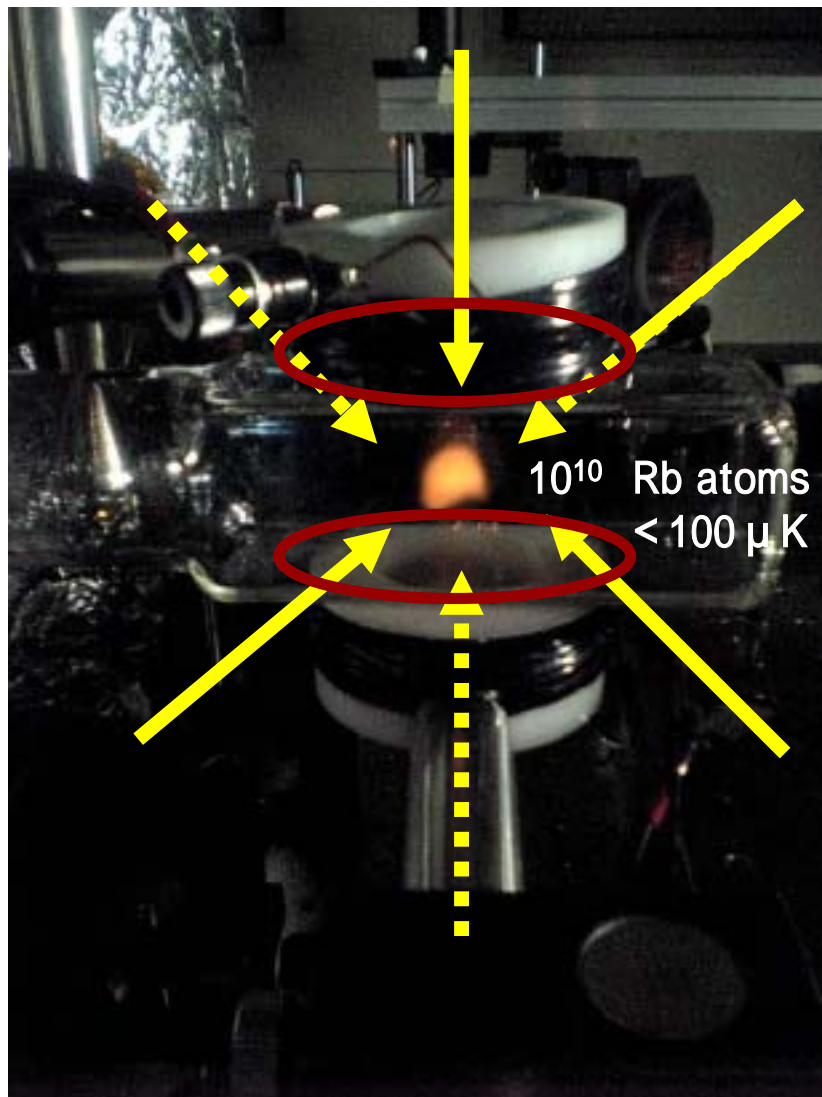
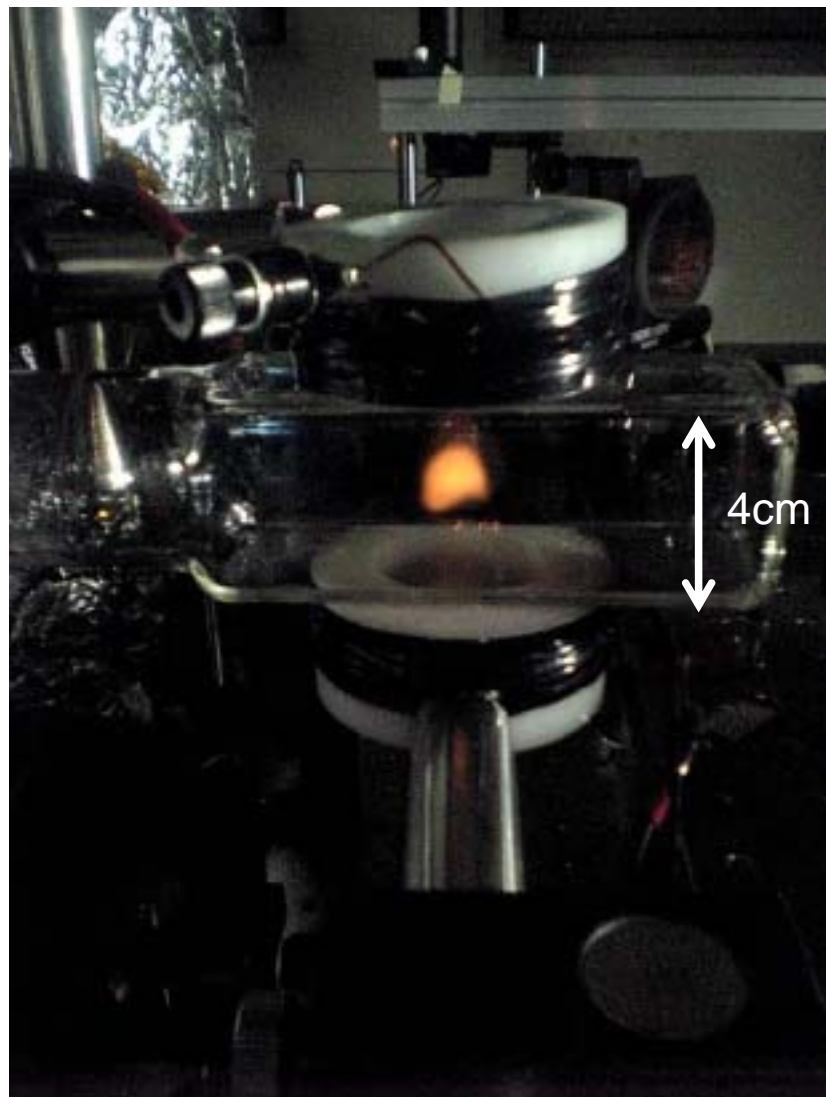
ドップラー冷却の原理



磁気光学トラップ (Magneto-optical Trap: MOT)



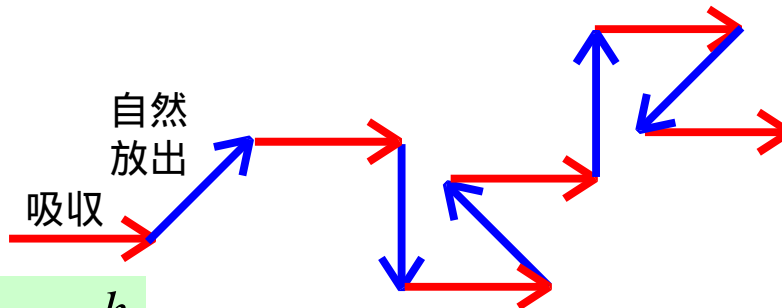
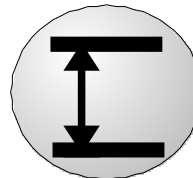
Rb原子のレーザー冷却@鳥井研



レーザー冷却の限界：光子の反跳

共鳴光

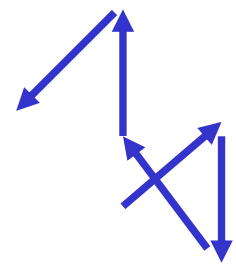
原子



$$p = \frac{h}{\lambda}$$



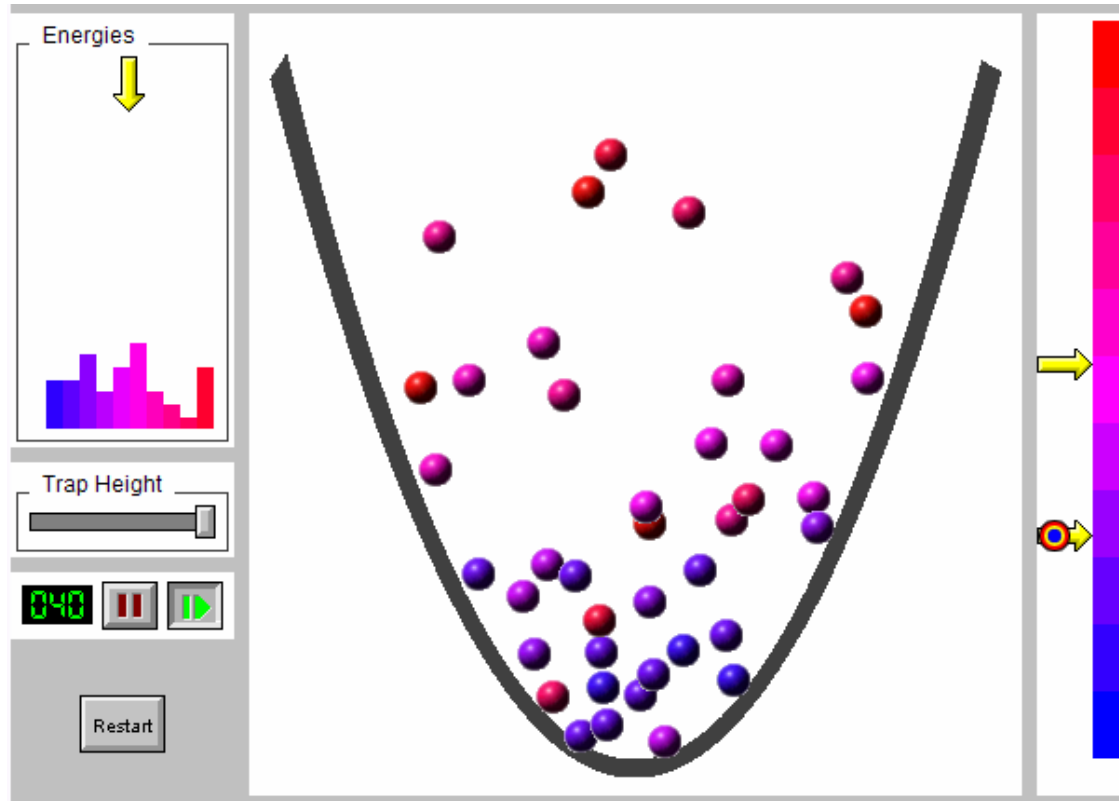
+



輻射圧 冷却効果

ランダムウォーク(酔歩) 加熱効果

蒸発冷却の原理



<http://www.colorado.edu/physics/2000/applets/bec.html>

何か入れ物(トラップ)が必要

グラファイト(黒鉛)の磁気浮上



原子も反磁性を持つ状態に用意すれば、磁場から反発力を受けてトラップできる

2000年イグノーベル賞



アンドレ ガイム
(Andre Geim)



生きたカエルを磁気浮上させる実験画像。アンドレ・ガイムとマイケル・ペリー卿はこの実験で力士の磁気浮上にも成功し、2000年イグノーベル物理学賞を受賞した。なおマイケル・ペリー卿はイギリス王立協会会員であり、量子力学におけるベリー位相を命名した科学者である。また、ガイムはイグノーベル賞に続いてノーベル物理学賞も受賞した史上初の人物である(2010年)。

Wikipedia日本語版より

Diamagnetically stabilized magnet levitation

M. D. Simon^{a)}

Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, California 90095

L. O. Heflinger

5001 Paseo de Pablo, Torrance, California 90505

A. K. Geim

Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, United Kingdom^{b)}

(Received 13 November 2000; accepted 5 April 2001)

Stable levitation of one magnet by another with no energy input is usually prohibited by Earnshaw's theorem. However, the introduction of diamagnetic material at special locations can stabilize such levitation. A magnet can even be stably suspended between (diamagnetic) fingertips. A very simple, surprisingly stable room temperature magnet levitation device is described that works without superconductors and requires absolutely no energy input. Our theory derives the magnetic field conditions necessary for stable levitation in these cases and predicts experimental measurements of the forces remarkably well. New levitation configurations are described which can be stabilized with hollow cylinders of diamagnetic material. Measurements are presented of the diamagnetic properties of several samples of bismuth and graphite. © 2001 American Association of Physics Teachers.

[DOI: 10.1119/1.1375157]

Table I. Values of the dimensionless susceptibility χ in SI units for some diamagnetic materials. The measurement method for the graphites is discussed in a later section.

Material	$-\chi(\times 10^{-6})$
Water	8.8
Gold	34
Bismuth metal	170
Graphite rod	160
Pyrolytic graphite \perp	450
Pyrolytic graphite \parallel	85

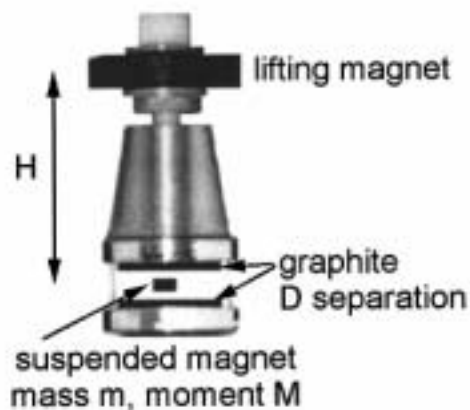


Fig. 4. Diamagnetically stabilized magnet levitation geometry for one compact implementation.

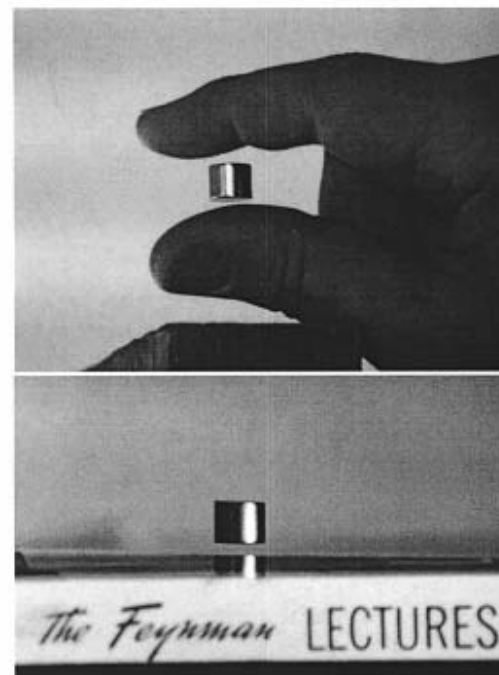


Fig. 1. (Top) Levitation of a magnet 2.5 m below an unseen 11-T superconducting solenoid stabilized by the diamagnetism of fingers ($\chi \approx 10^{-5}$). (Bottom) Demonstrating the diamagnetism of our favorite text explaining diamagnetism.

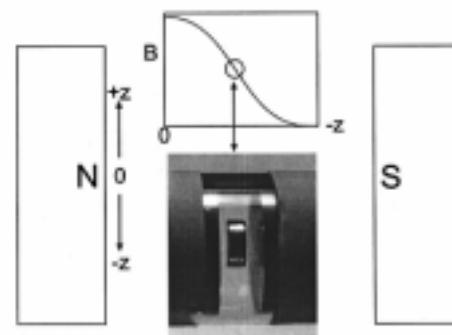
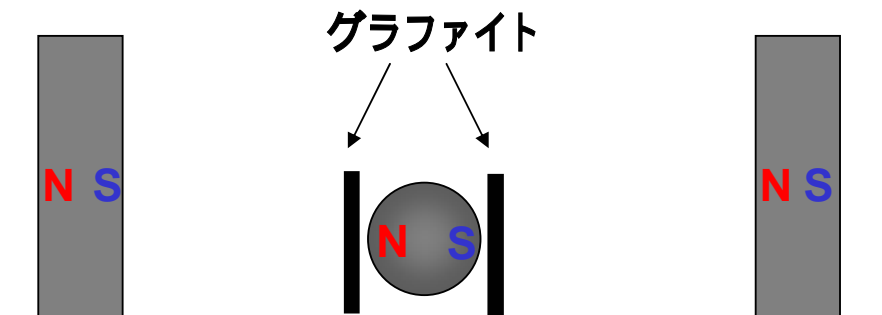
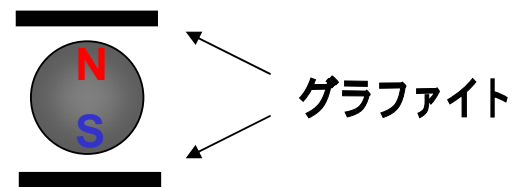
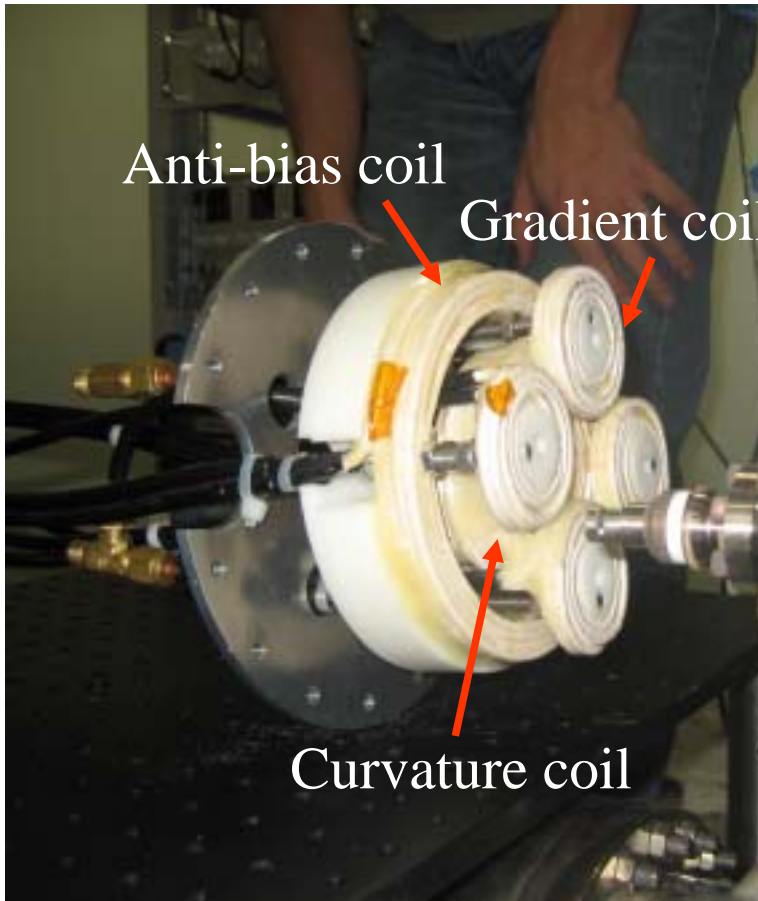


Fig. 11. Graphite plates stabilize levitation of a magnet below the centerline between two pole faces and just above the inflection point in the field magnitude. Not shown in the picture but labeled N and S are the 25-cm-diam pole faces of an electromagnet spaced about 15 cm apart. The poles can be from permanent or electromagnets.

ネオジム磁石の磁気浮上:2つの配置



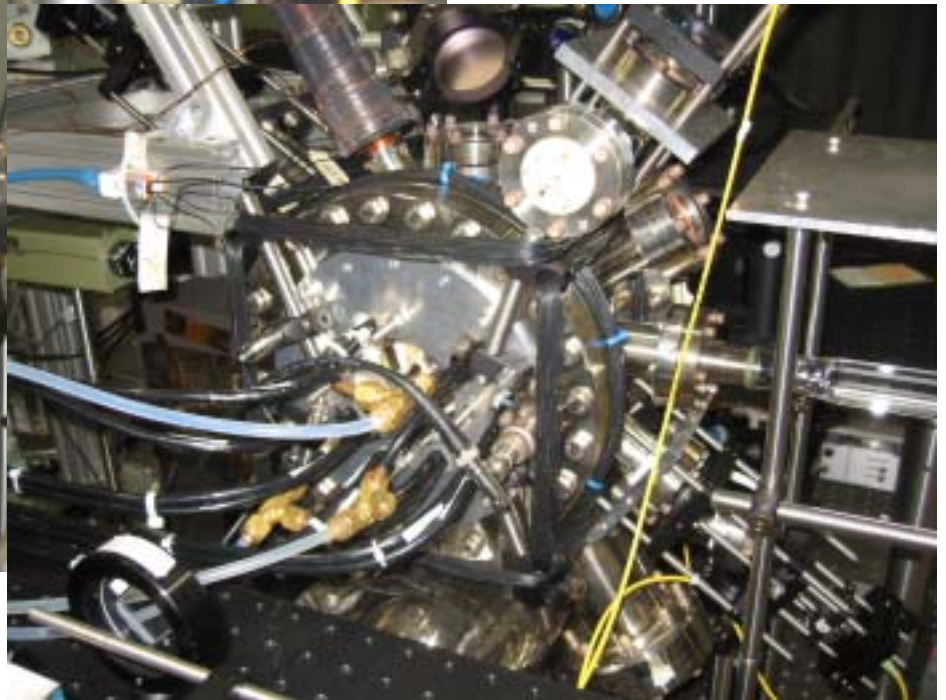
原子の磁気浮上のためのコイル



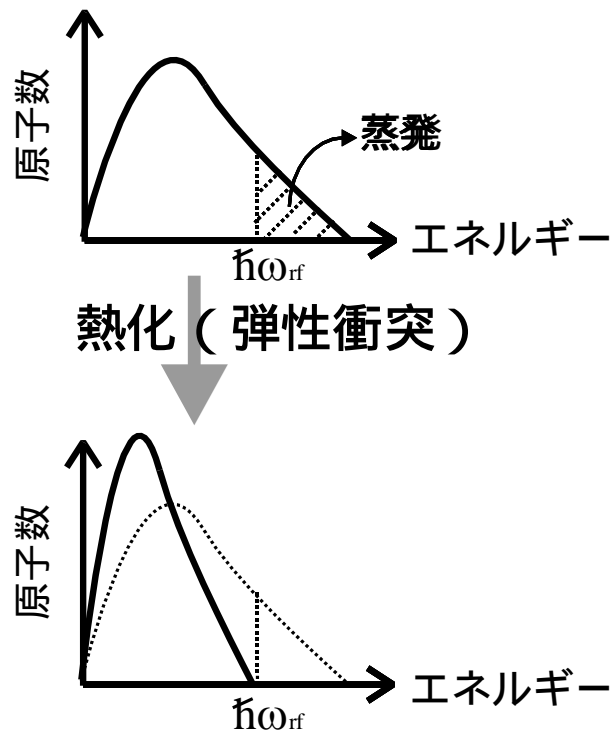
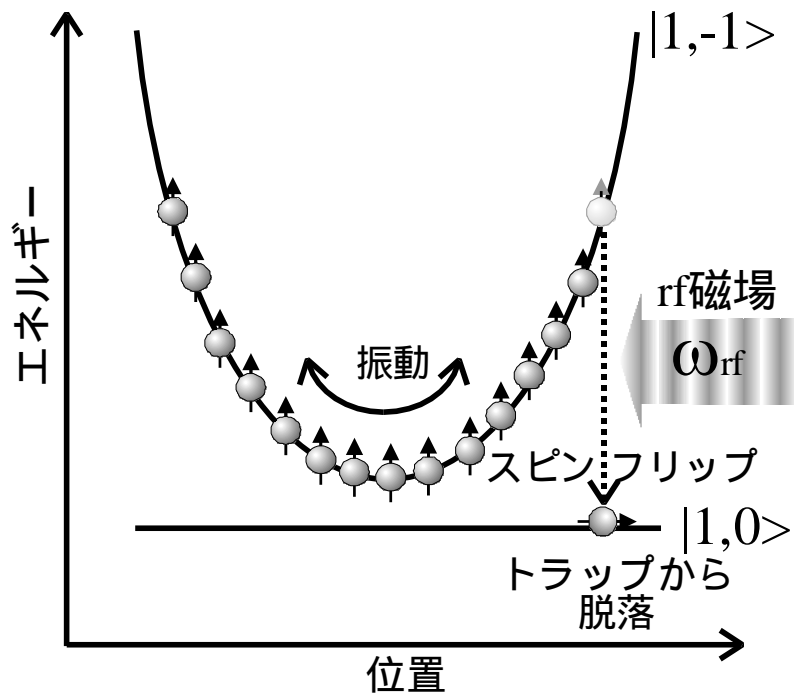
$$B_{\rho}' = 217 \text{ G/cm} @ 300 \text{ A}$$

$$B_z'' = 70 \text{ G/cm}^2 @ 120 \text{ A}$$

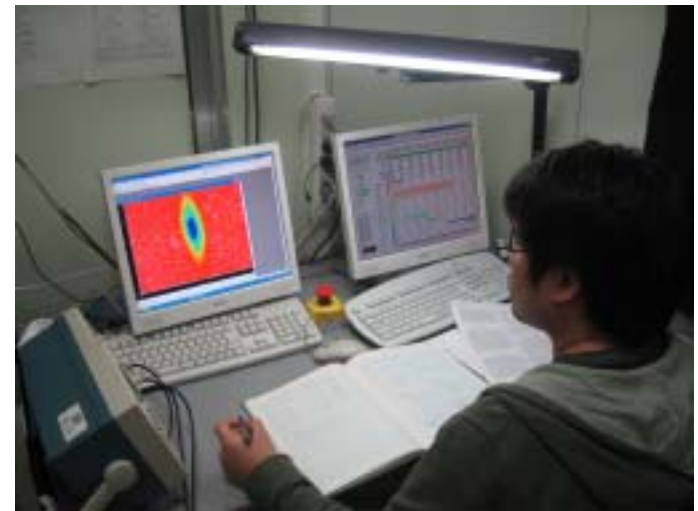
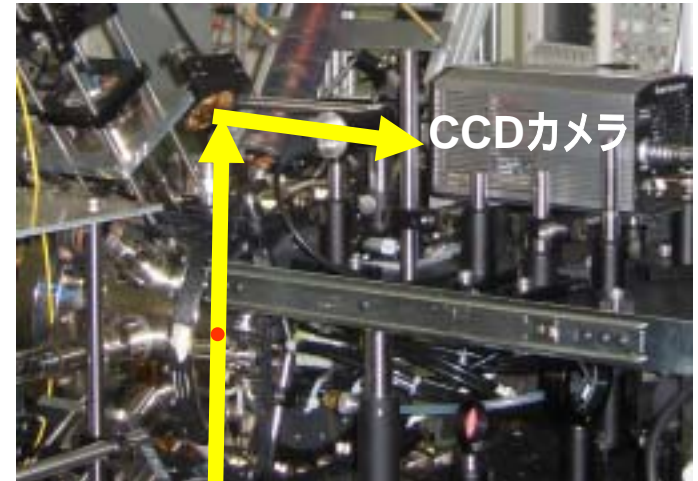
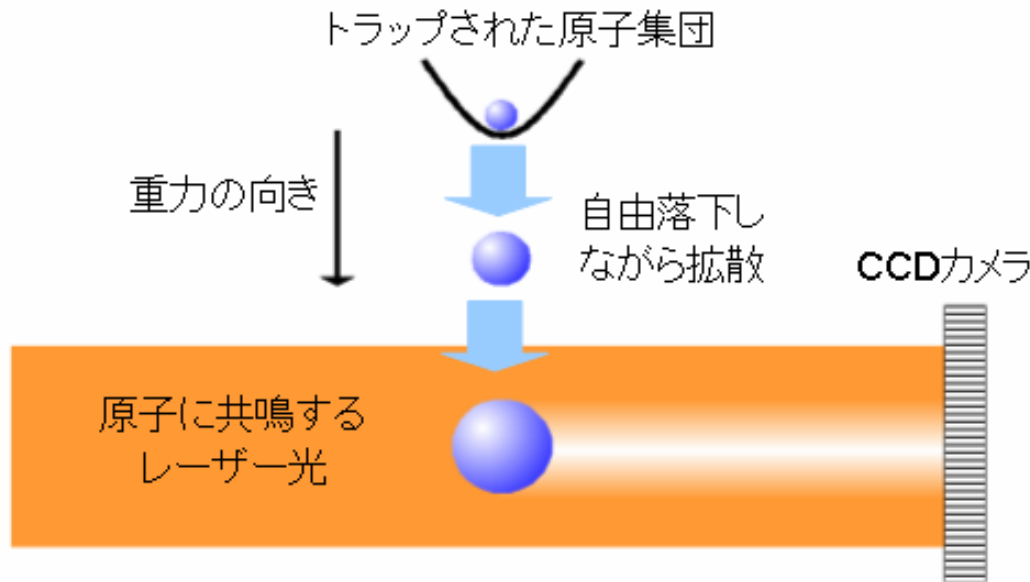
$$B_0 = 1.6 \text{ G}$$



ラジオ波 (rf) による蒸発冷却



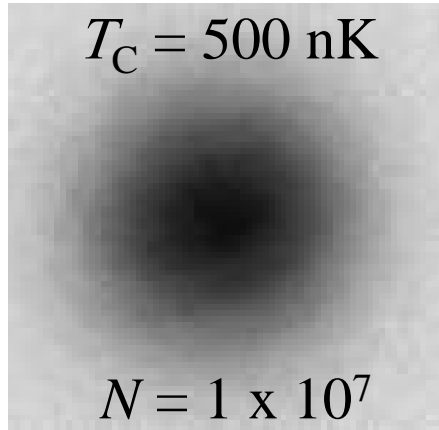
吸収イメージング法



ボース凝縮相転移の様子

磁気トラップ解放から52ms後の吸収画像

熱運動している原子集団



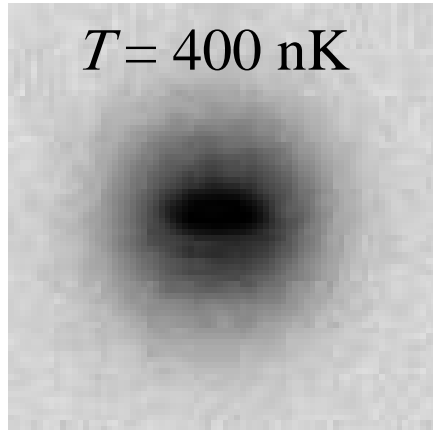
$T_C = 500 \text{ nK}$

$N = 1 \times 10^7$

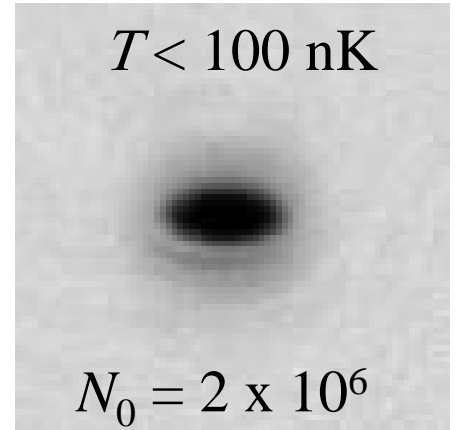
← 2mm →

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

$T = 400 \text{ nK}$



純粋な凝縮体



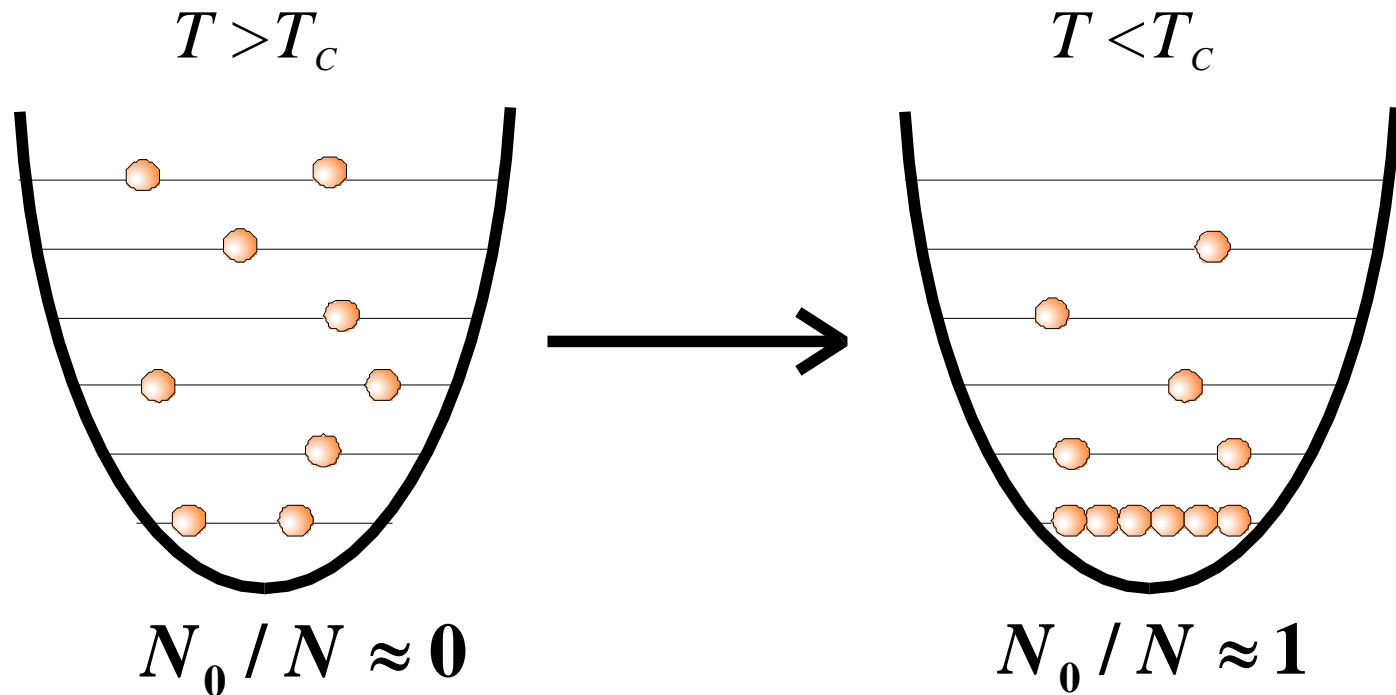
$T < 100 \text{ nK}$

$N_0 = 2 \times 10^6$

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

ボース・アインシュタイン凝縮とは

ボース粒子の集団を、ある温度以下に冷却すると、最低エネルギー状態を占める粒子数が突然マクロな数になる現象 (1925年にアインシュタインが予言)



量子力学における粒子の特徴

- 全ての粒子はボゾンかフェルミオンに分類され、同種粒子は原理的に区別できない(不可弁別性)

ボゾン

- スピンの大きさが整数
- 一つの量子状態に複数の粒子が占有できる

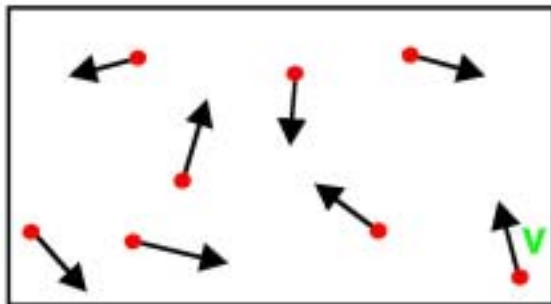
(例) 光子、 ^4He 、 ^7Li 、 ^{23}Na 、 ^{87}Rb

フェルミオン

- スピンの大きさが半整数
- 一つの量子状態に一つの粒子しか占有できない

(例) 電子、陽子、中性子
 ^3He 、 ^6Li

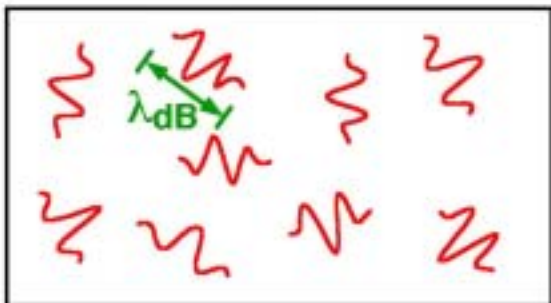
$T \sim 300\text{K}$



原子はパチンコ玉のように振舞う

レーザー冷却

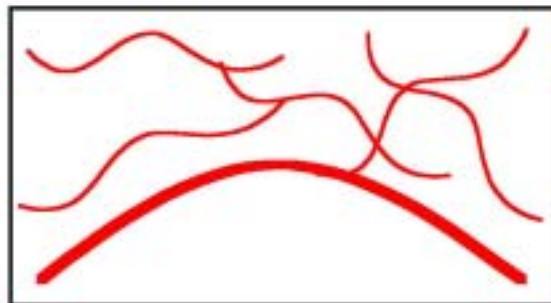
$T \sim 100\ \mu\text{K}$



原子の波動性が見え始める

蒸発冷却

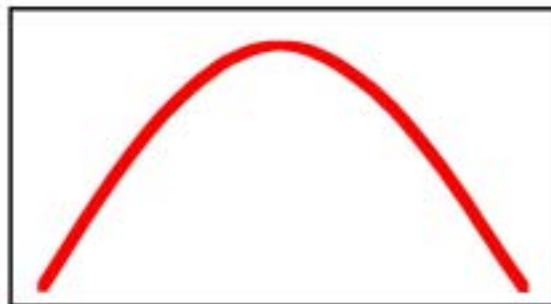
$T \sim 1\ \mu\text{K}$



お互いの波が重なり始める

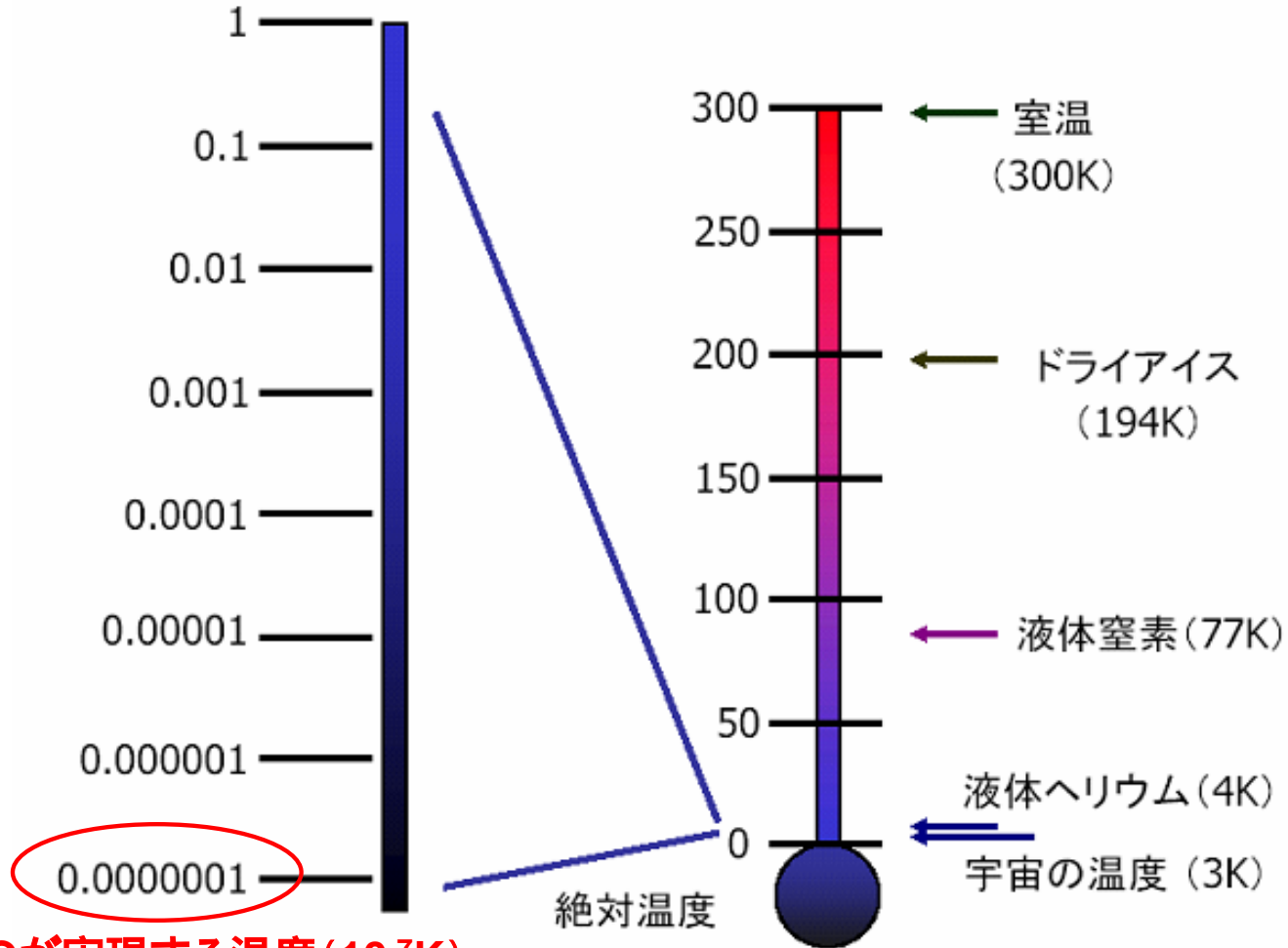
蒸発冷却

$T \sim 100\text{nK}$



巨大な原子の波
ボース・アインシュタイン凝縮体
(原子レーザー)

どれだけ冷たいのか？



BECが実現する温度 (10^{-7} K)

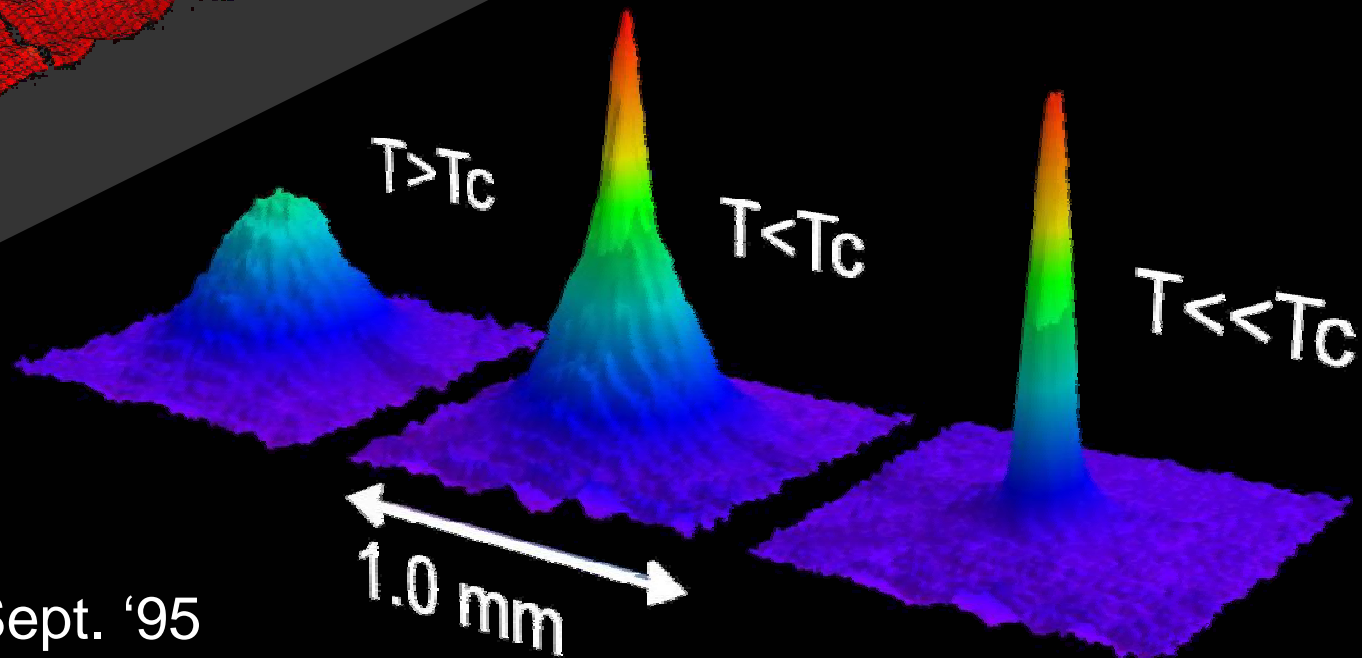
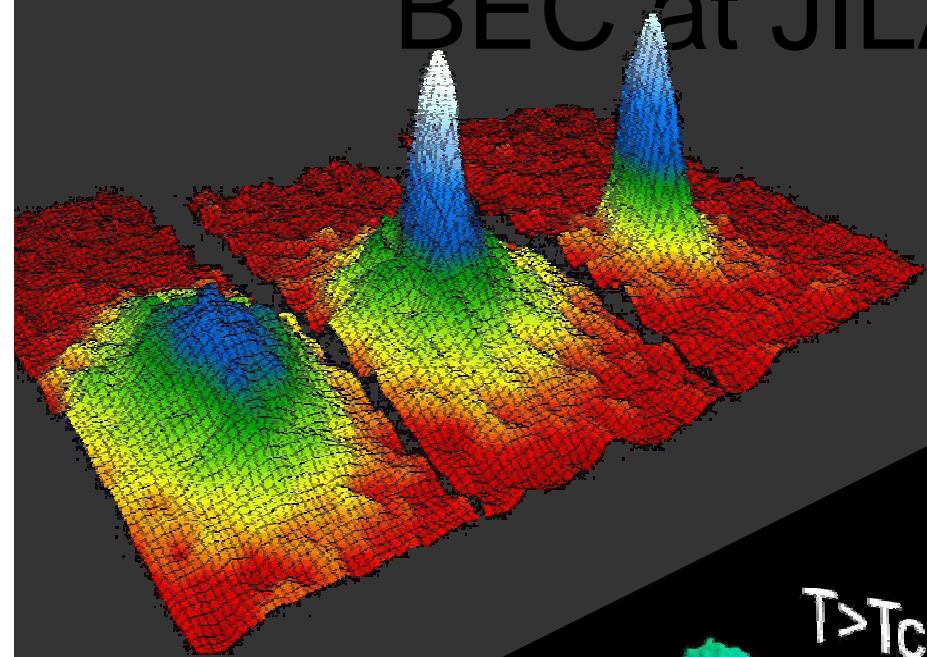
世界記録は450pK (4.5×10^{-10} K) @MIT(2003)

BEC @ JILA, June '95
(Rubidium) Wieman, Cornell

BEC at JILA and MIT



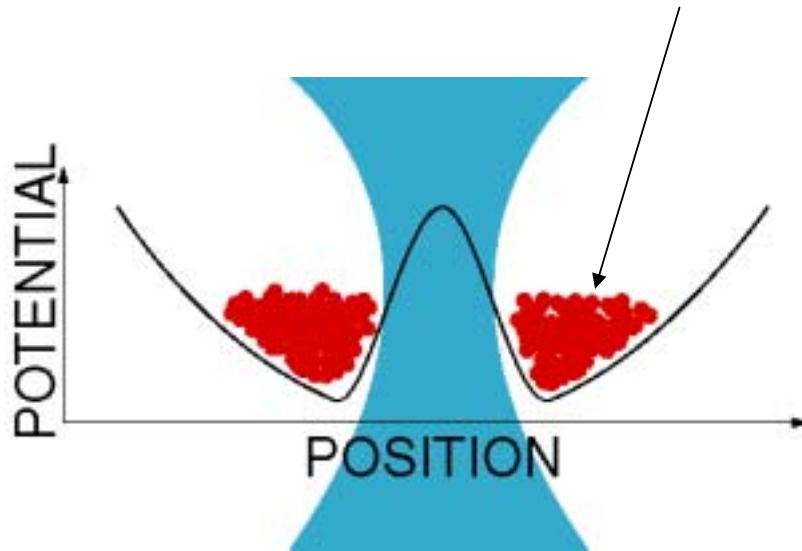
2001年ノーベル物理学賞



BEC @ MIT, Sept. '95
(Sodium) Ketterle

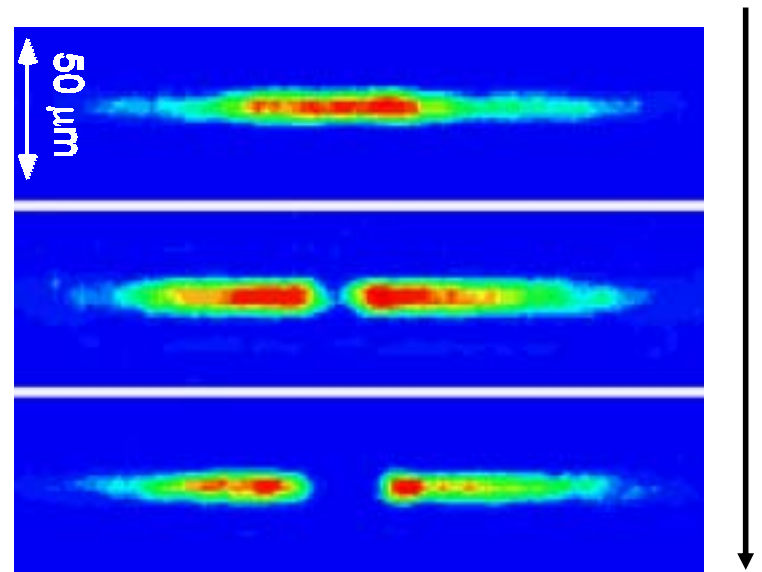
独立なBECの作り方

磁気トラップされたNa原子



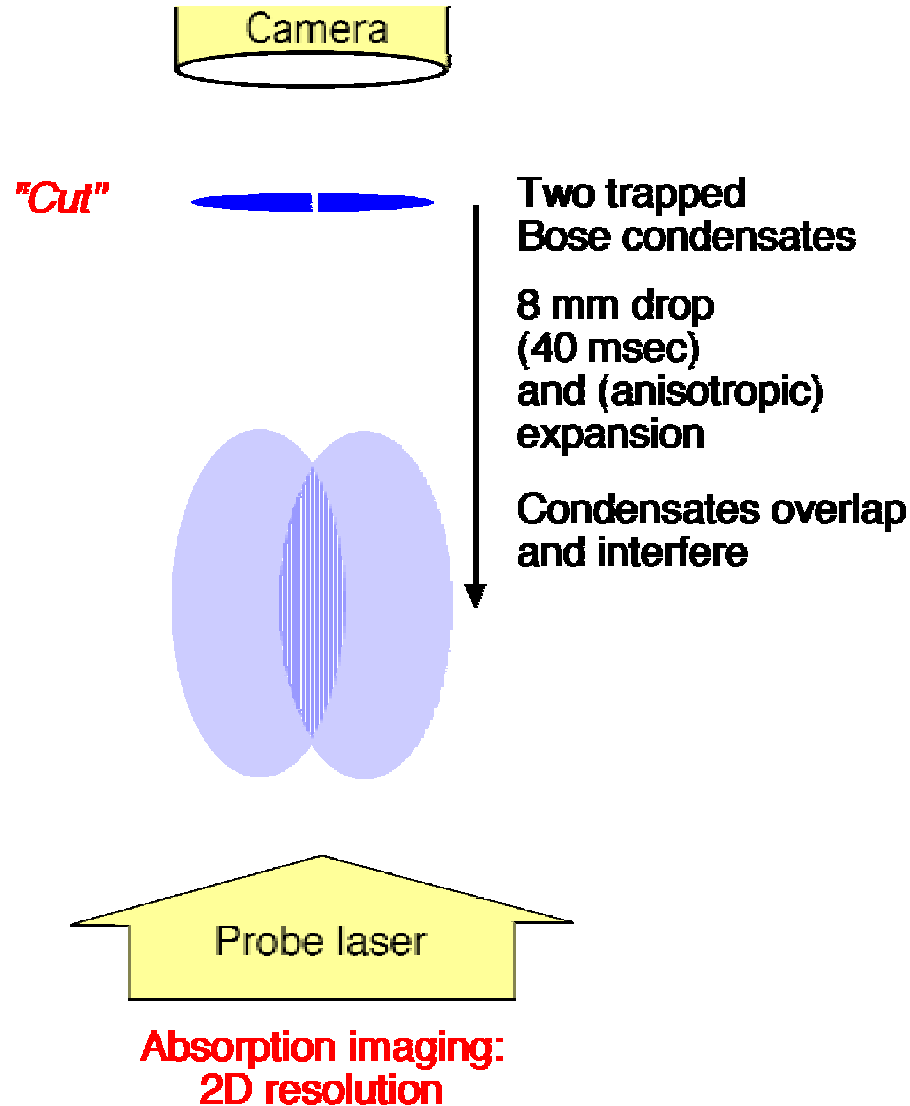
強く絞った非共鳴光 (514nm)
(共鳴波長は589nm)

非共鳴光強度

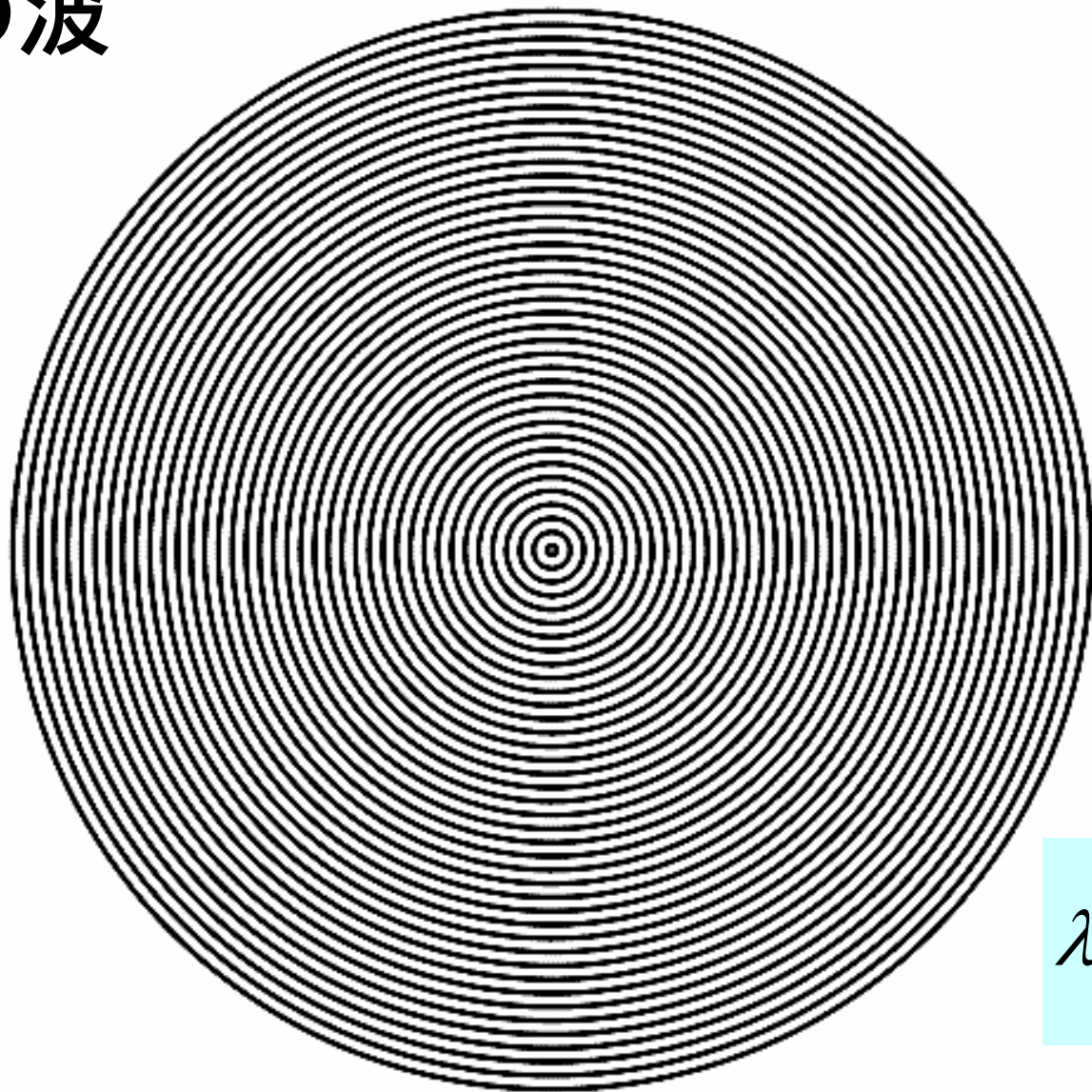


原子集団の非破壊イメージ 大

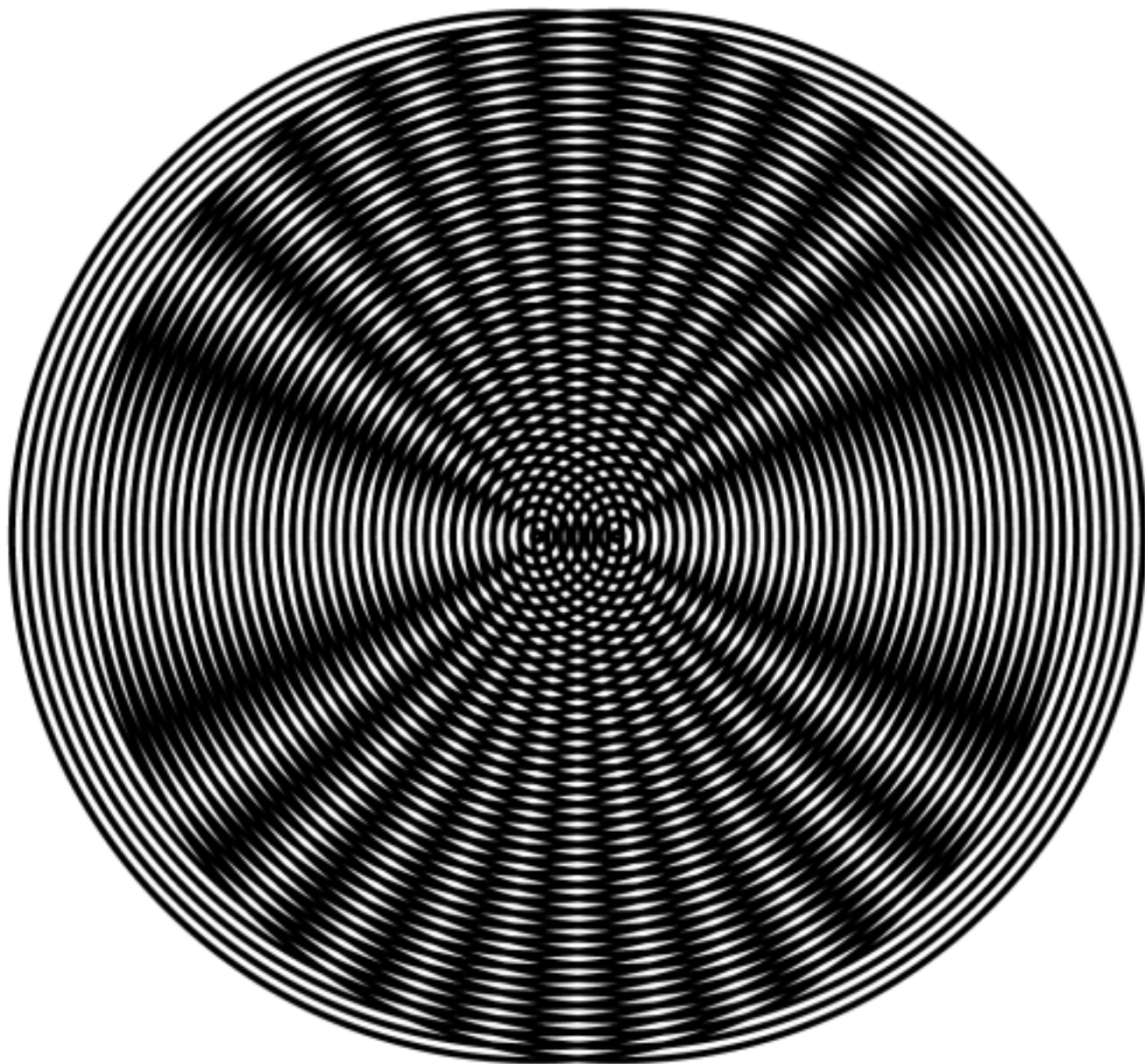
Interference of two condensates



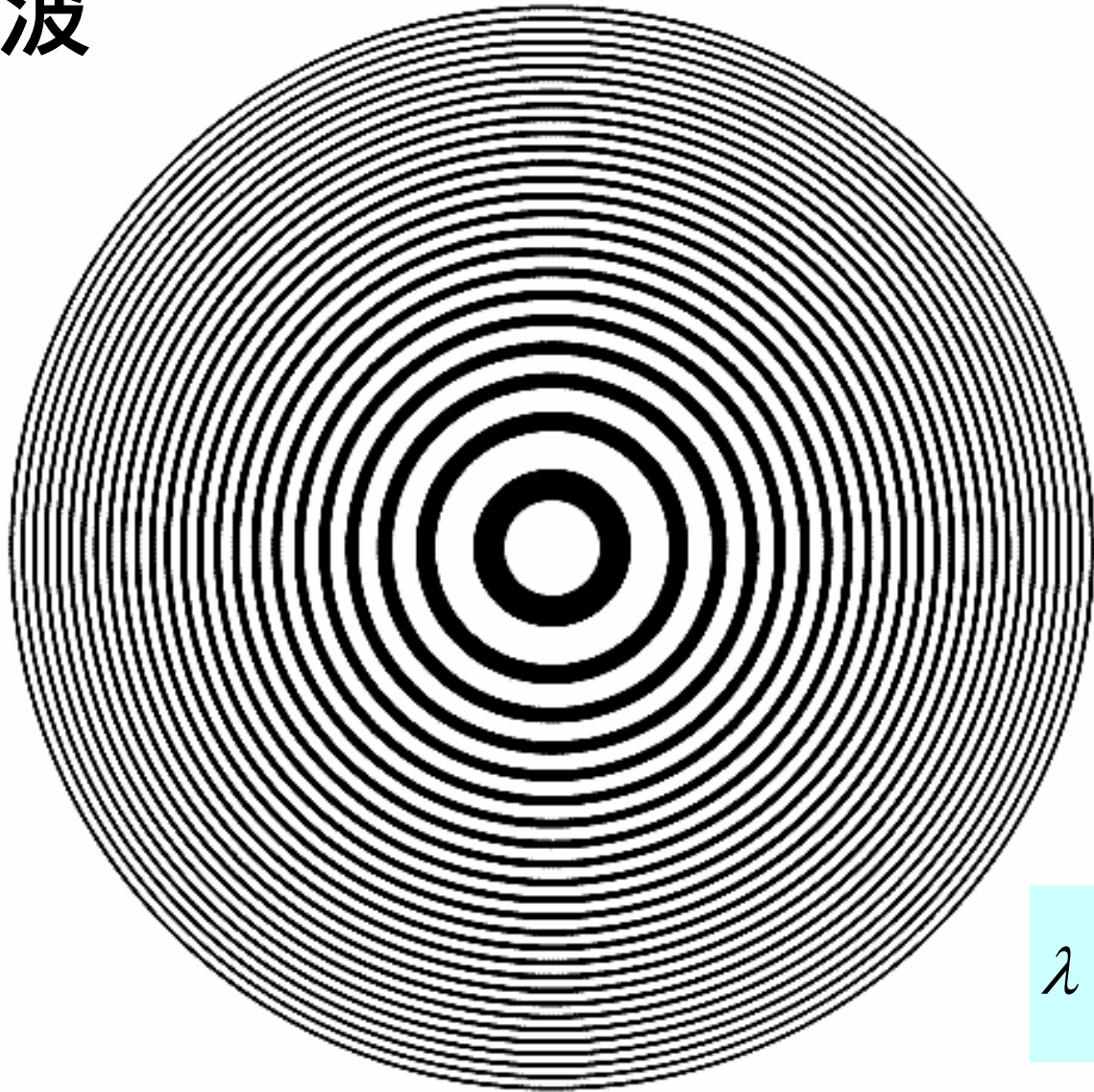
光の波



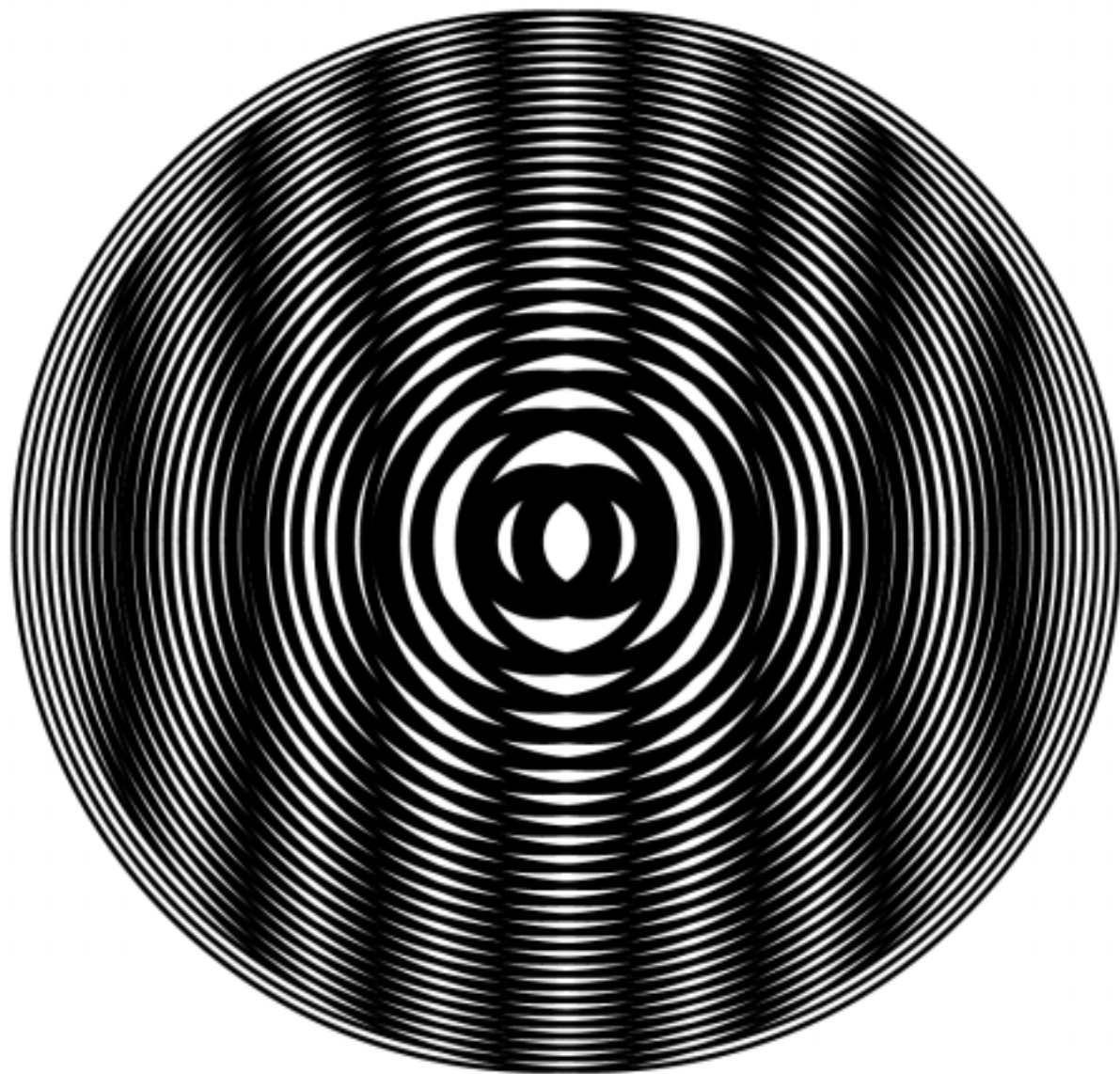
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$



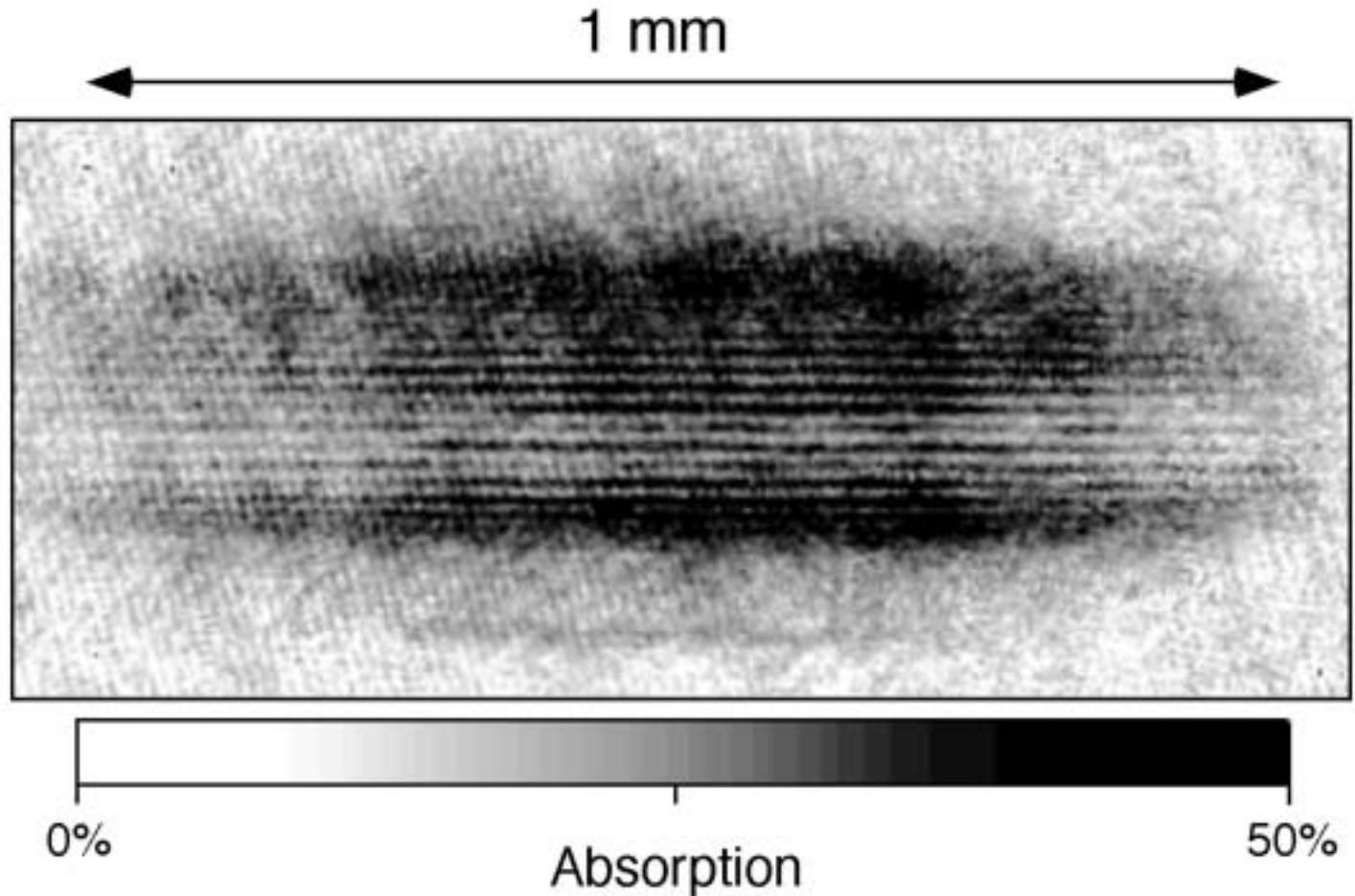
物質波



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$



独立なBEC間の干渉



1 mの定義 (1983年)

1mは、光が真空中を1/299792458秒間に進む距離
(1905年にアインシュタインが提唱した光速度不変の原理を
信じ、光速は299792458 m/sであると定義)

真空中の光速は
 $c = 299,792,458 \text{ m/s (exact)}$

レーザー



Table 1: Fundamental Physical Constants (1998 CODATA recommended values)

Speed of Light	c	$2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s (exact)}$
Permeability of Vacuum	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2 \text{ (exact)}$
Permittivity of Vacuum	ϵ_0	$(\mu_0 c^2)^{-1} \text{ (exact)}$ $= 8.854\,187\,817 \dots \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Planck's Constant	h	$6.626\,068\,76(52) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ $4.135\,667\,27(16) \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$
	\hbar	$1.054\,571\,596(82) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ $6.582\,118\,89(26) \times 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}$
Elementary Charge	e	$1.602\,176\,462(63) \times 10^{-19} \text{ C}$
Bohr Magneton	μ_B	$9.274\,008\,99(37) \times 10^{-24} \text{ J/T}$ $h \cdot 1.399\,624\,624(56) \text{ MHz/G}$
Atomic Mass Unit	u	$1.660\,538\,73(13) \times 10^{-27} \text{ kg}$
Electron Mass	m_e	$5.485\,799\,110(12) \times 10^{-4} \text{ u}$
		$9.109\,381\,88(72) \times 10^{-31} \text{ kg}$
Bohr Radius	a_0	$0.529\,177\,208\,3(19) \times 10^{-10} \text{ m}$
Boltzmann's Constant	k_B	$1.380\,650\,3(24) \times 10^{-23} \text{ J/K}$

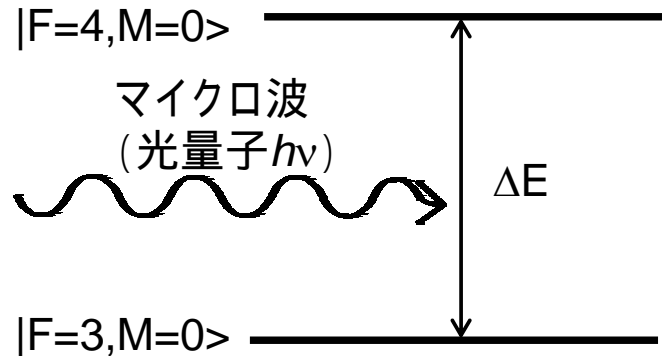
1秒の定義(1967年)

1sは、 ^{133}Cs の基底状態の二つの超微細構造準位 ($F=4, M=0$ および $F=3, M=0$)の間のマイクロ波遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間



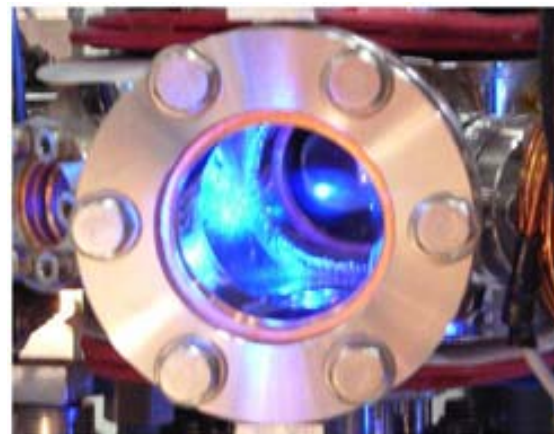
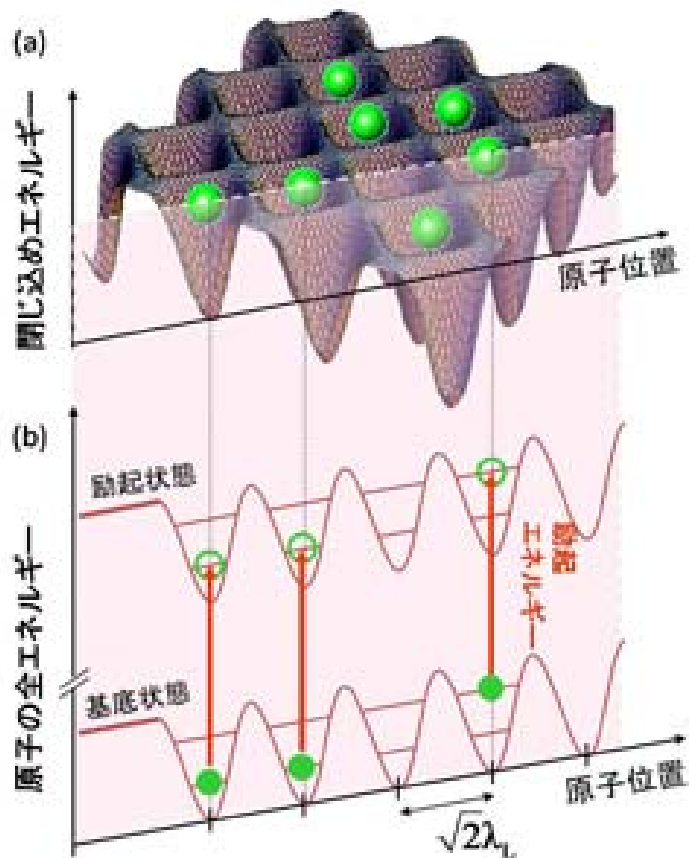
米国立標準技術研究所が開発した超小型原子時計の心臓部 (2004年9月2日朝日新聞より)

< ^{133}Cs , 6S軌道のエネルギー準位 >

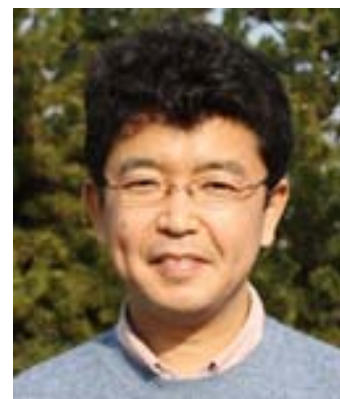


マイクロ波がCs原子と共鳴 ($\Delta E = h\nu$) しているときの周波数を9,192,631,770Hzと定義

未来の1秒の定義？：光格子時計

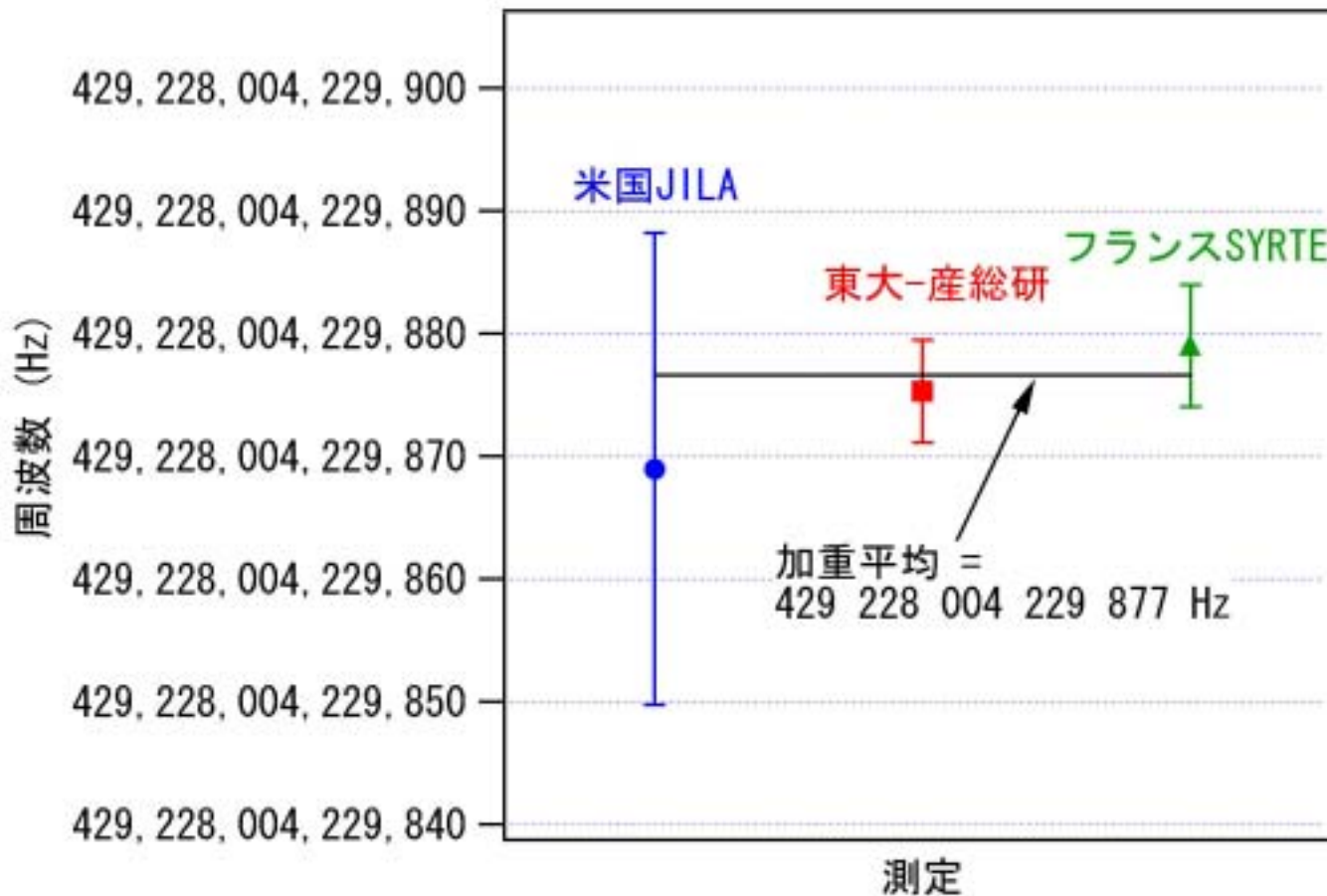


ストロンチウム原子の磁気光学トラップ



発明者の香取さん@東大物工

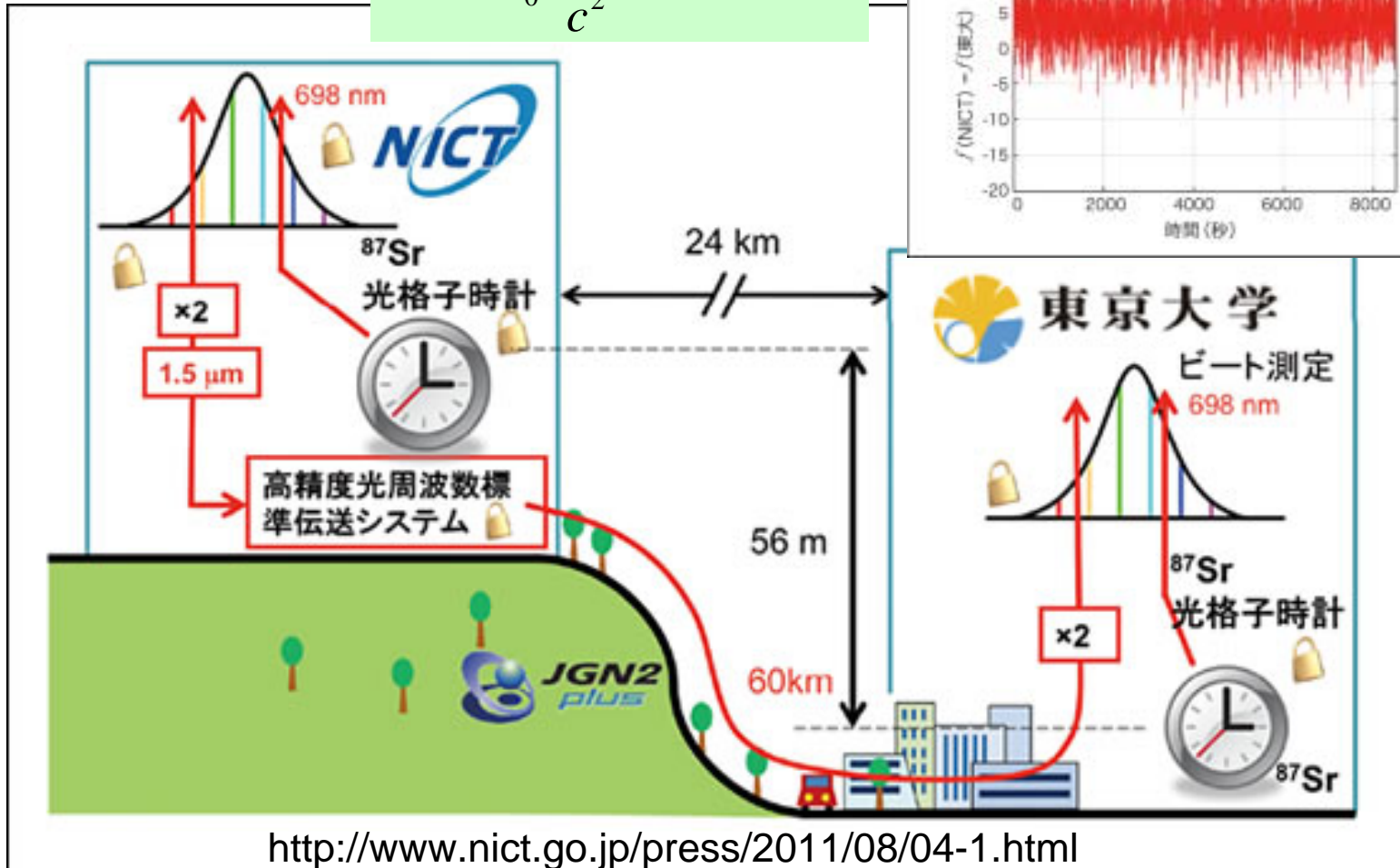
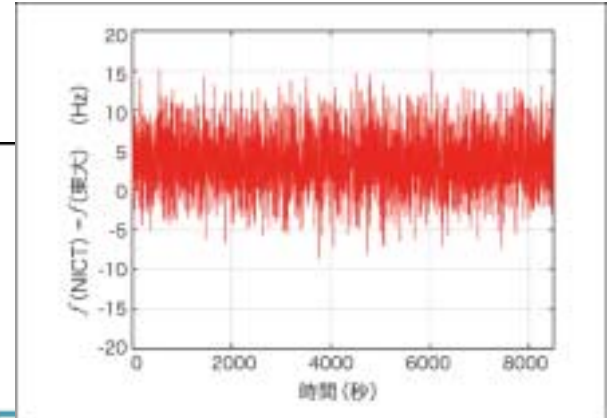
Sr光格子時計の周波数測定



1m程度の長さを原子核1個分精度で測ることに相当

本郷と小金井の時間の進みの違い

$$\Delta\omega = \omega_0 \frac{gH}{c^2} \approx 2\pi \times 3 \text{ Hz}$$



100年で科学が理論に追いついてきた。

相対性理論の実証①—原子時計による比較実験

超高精度の原子時計が開発され、地上設置の時計と宇宙船や人工衛星搭載の時計との比較実験によって、速度や重力の影響で時間の進み方が速くなったり、遅くなったりすることが確認された。現在では、地上において高さが30cm違うだけで、両者に作用する重力の違いによって、上方の原子時計の進み方が若干速いことが確認されている。

応用例=GPS



GPSのしくみ

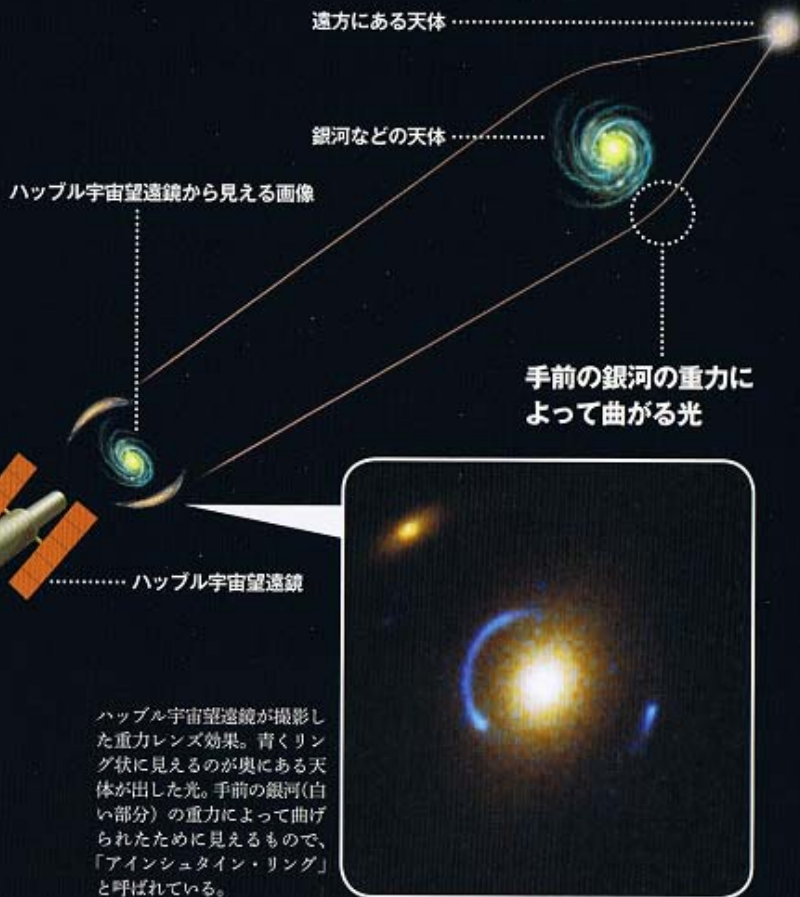
衛星から地球上の車に電波を発信、電波の速度と電波が車に届くまでの時間によって、衛星と車の距離を割り出す（距離=速度×時間）。よって、衛星搭載の時計と地上の時計の時間がずれてしまうと、正しい位置情報を得られない。

GPS衛星の時間

- 衛星は秒速4kmというスピードで地球を周回しているため、1日7.1マイクロ秒遅れる（動くものは時間が遅れる）
- 衛星の軌道は高度約2万km。重力が地上より弱いので、1日45.7マイクロ秒進む（重力の強いところは時間が遅れる）
- 両者を足すと、衛星の時計は1日あたり38.6マイクロ秒だけ進んでしまうことになるので、GPS衛星の原子時計は、この誤差を補正して運用されている

相対性理論の実証②—重力レンズ効果の観察

大気や天候の影響を受けずに高い精度での天体観測が可能なハッブル宇宙望遠鏡が、遠方にある天体からの光が、それよりも手前にある銀河の重力によって曲げられリング状などに見える現象（重力レンズ効果）の観察に成功、「巨大な質量をもつ天体のそばでは、その重力の影響により光が曲げられる」との予言は実証された。



ハッブル宇宙望遠鏡から見える画像

遠方にある天体

銀河などの天体

手前の銀河の重力によって曲がる光

ハッブル宇宙望遠鏡

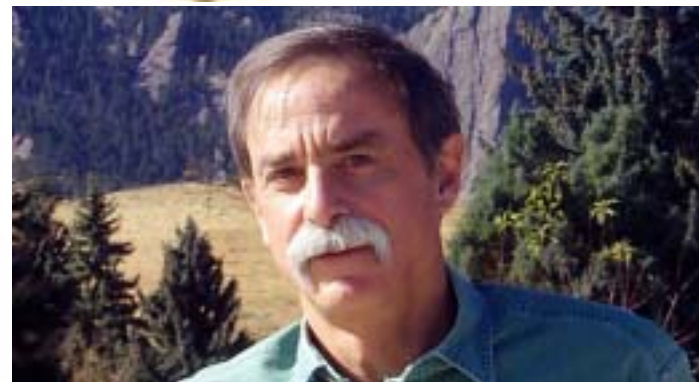
ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した重力レンズ効果。青くリング状に見えるのが奥にある天体が出した光。手前の銀河（白い部分）の重力によって曲げられたために見えるもので、「アインシュタイン・リング」と呼ばれている。

Optical Clocks and Relativity

C. W. Chou,* D. B. Hume, T. Rosenband, **D. J. Wineland** 2012年ノーベル物理学賞



Observers in relative motion or at different gravitational potentials measure disparate clock rates. These predictions of relativity have previously been observed with atomic clocks at high velocities and with large changes in elevation. We observed time dilation from relative speeds of less than 10 meters per second by comparing two optical atomic clocks connected by a 75-meter length of optical fiber. We can now also detect time dilation due to a change in height near Earth's surface of less than 1 meter. This technique may be extended to the field of geodesy, with applications in geophysics and hydrology as well as in space-based tests of fundamental physics.

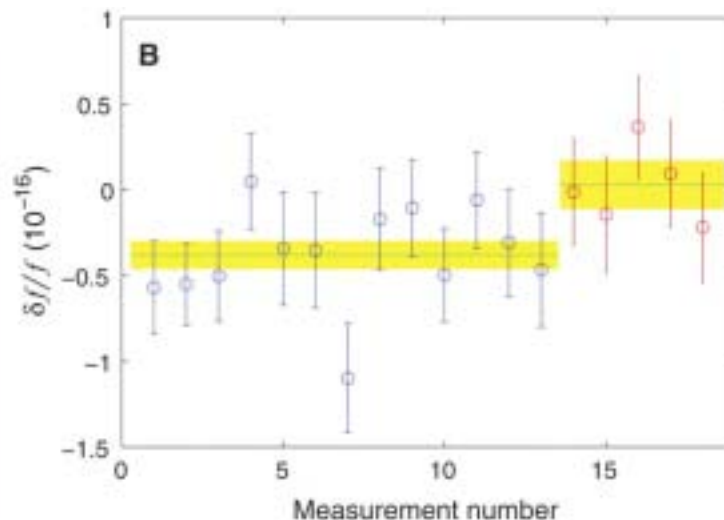
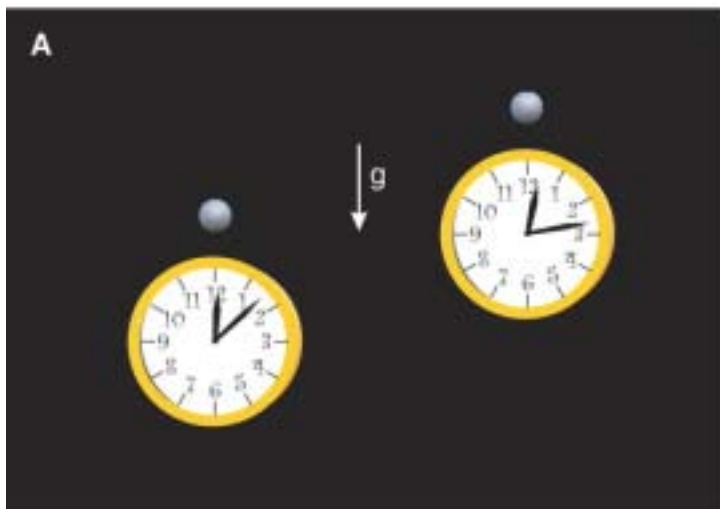


A lbert Einstein's theory of relativity forced us to alter our concepts of reality. One of the more startling outcomes of the theory is that we have to give up our notions of simultaneity.

This is manifest in the so-called twin paradox (*T*), in which a twin sibling who travels on a fast-moving rocket ship returns home younger than the other twin. This "time dilation" can be

0

24 SEPTEMBER 2010 VOL 329 SCIENCE www.sciencemag.org



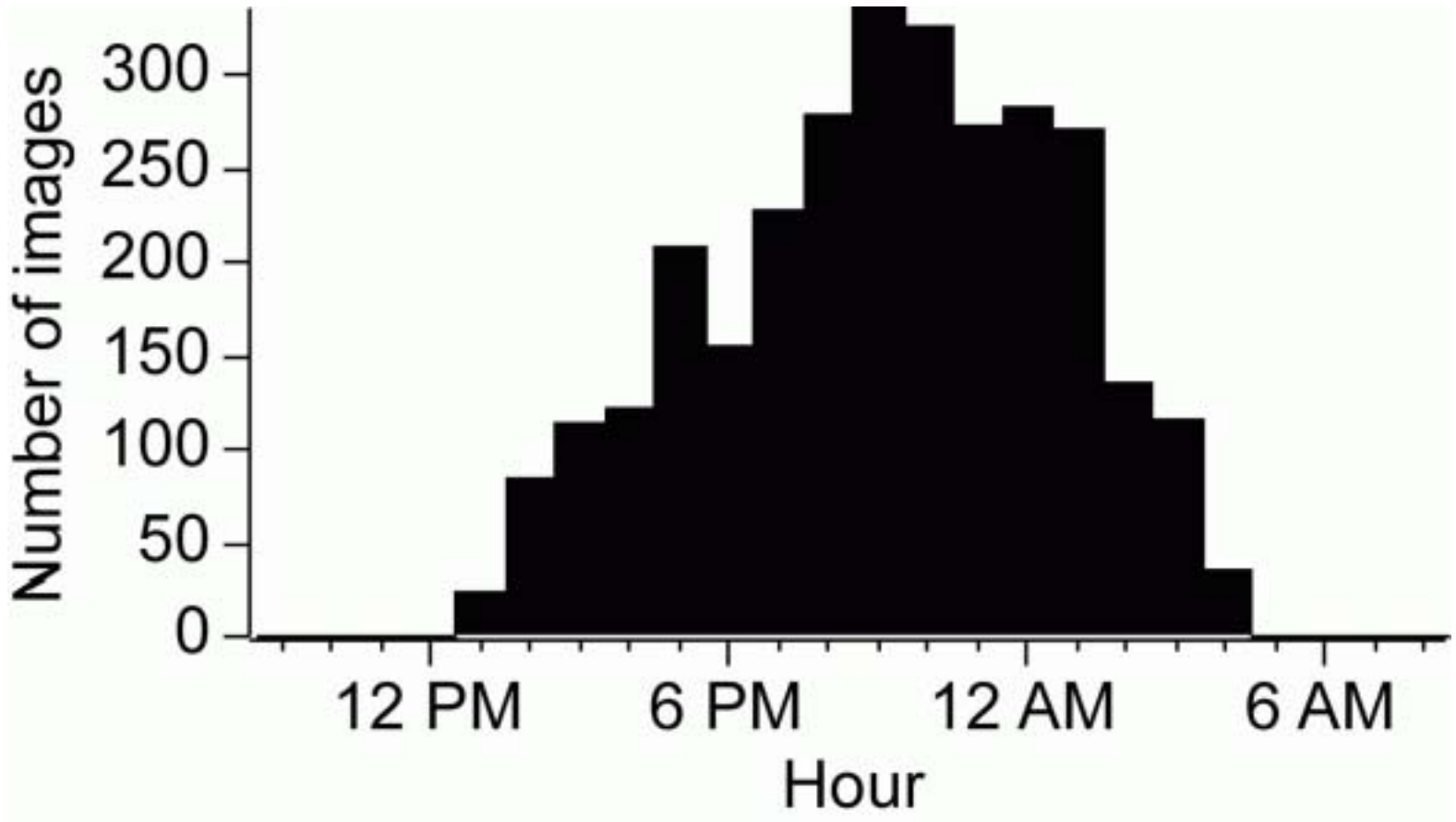
10の17乗の不確かさ

ケタレー先生@MIT (2001年ノーベル物理学賞受賞)





MIT、Ketterle研のグループ写真(2001年10月)



Distribution of the times when data images were taken during one year between 2/98-1/99

MITで学んだこと

- 深夜残業は日本の専売特許ではない(学生はおろか先生まで深夜まで実験する)
- 教員-学生間にバリアがない(教員の部屋はドアは常に開き、鍵はすべて共通)
- 効率も大事だが、「楽しさ」も大事にする。楽しい回り道は大いに結構(モチベーションをキープできる)。
- 日本の学生は確かに優秀である(が、おそらく大学院のシステムの違いで差が出る)。