

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2012, 井上 慎

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Inoue Shin

絶対零度への挑戦

光量子科学研究センター

井上慎



THE UNIVERSITY OF TOKYO



Photon Science Center
of the University of Tokyo

目次

(i) 前回のミニッツレポートから

(ii) アインシュタインの予言

(iii) レーザー冷却と蒸発冷却

(iv) 冷却分子

目次

(i) 前回のミニッツレポートから

(ii) アインシュタインの予言

(iii) レーザー冷却と蒸発冷却

(iv) 冷却分子

<講義全体について>

- ・文系に配慮された進行で助かった
- ・理系でも聞いたことがない話が多く面白かった
- ・一つのものに対する認識の変遷を追うのは人文系ではよくあるが、それを光の科学的理解について追うのが新鮮だった
- ・勉強しようと思った(物理、解析力学)
- ・もっと詳しいことが知りたくなった

<その他>

- ・高校の物理で習った式や法則の一つ一つが過去の大発見であることに驚いた
- ・科学史の授業に通じるものが多く面白かった。
「常識で考えて」という反証はいけないのか。
- ・理系科目は発見的手法と経験的手法のいずれかで教えられているが、今日の講義は歴史的手法と位置付けるべき新しい手法ではないか。
- ・科学は割と感情的なものかもしれない。天動説を「信奉」していたというように、現代でも思い込みが邪魔することがある気がする。
- ・小さく見れば近傍の経路の距離と同じという考えはほかの分野にも応用できそう
- ・科学における実験の重要性を再認識することができた

<疑問に思ったところ>

- ・フェルマーの定理は納得できないことでもないが、いつも疑問に思う
- ・未だに光が波という考えに慣れない
- ・アラゴの実験、実際見てもやはり信じられない
- ・理屈は理解できても実際に見ると不思議に思う
- ・ポアソンが計算して中央の輝点に気付いたのに「常識でありえない」と考えてしまったこと
- ・まだ粒子であって波動であるのに納得できない

ものすごく「お勧め」

Feynman and Hibbs,
*Quantum Mechanics
and Path Integrals*,
McGraw-Hill, 1965.

『量子力学と経路積分』
北原和夫訳、みすず書房、
1995年



Fermilab

<http://www.fnal.gov/pub/news/feynman.html>

Feynman, et al.,
*The Feynman Lectures
on Physics*, vol. 2:
*Mainly
Electromagnetism and
Matter*, Addison–Wesley,
1964.

『ファインマン物理学 III
電磁気学』宮島龍興訳、
岩波書店、1986年

ファインマン経路積分：
最小作用の原理がどのように量子力学と
自然につながるかを明確にした

<疑問に思ったところ>

- ・フェルマーの定理は納得できないことでもないが、いつも疑問に思う
- ・未だに光が波という考えに慣れない
- ・アラゴの実験、実際見てもやはり信じられない
- ・理屈は理解できても実際に見ると不思議に思う
- ・ポアソンが計算して中央の輝点に気付いたのに「常識でありえない」と考えてしまったこと
- ・まだ粒子であって波動であるのに納得できない

→12/20, 1/10 小芦教授

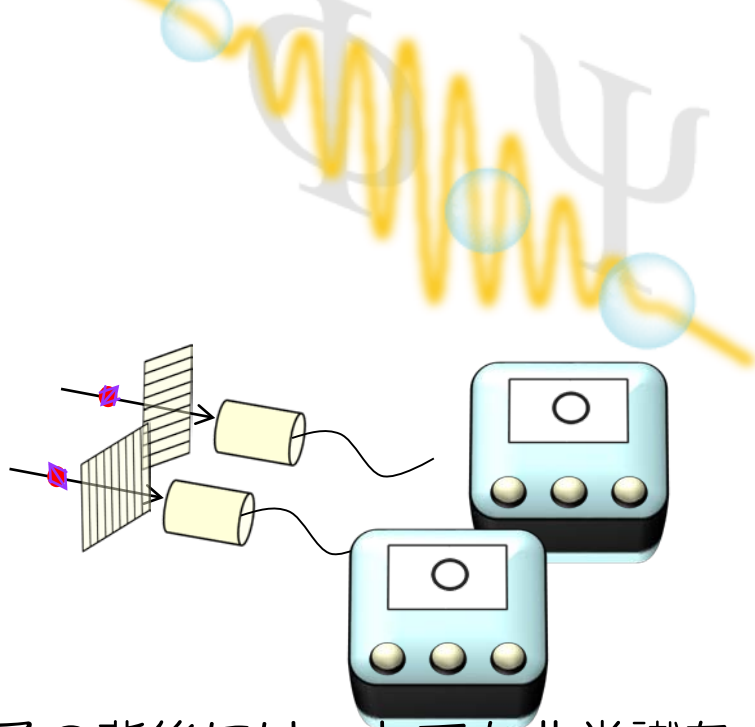


第10回(12/20): 光の正体と量子論の不思議
第11回(1/10): 微弱光を用いた究極の暗号

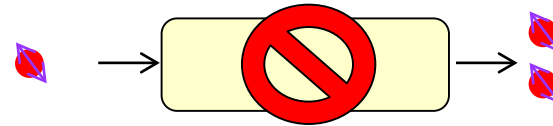
微かな光の不思議な世界

小芦 雅斗(工学部)

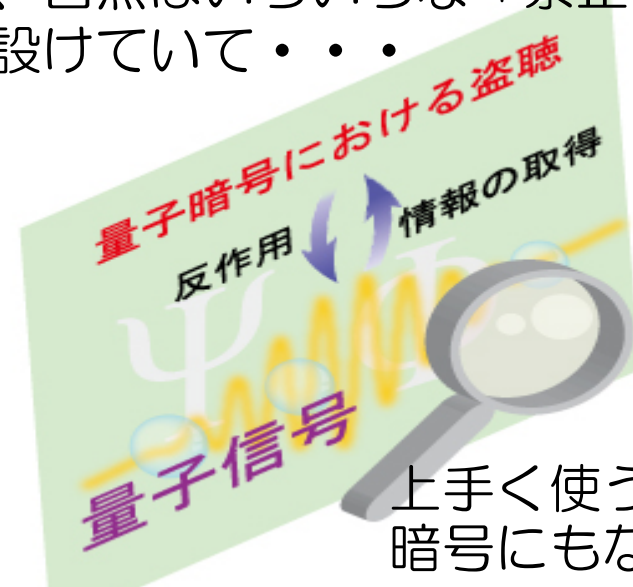
波でもあり粒子でもある
「光」って何者でしょうか？



その背後には、とても非常識な
「からくり」が潜んでいます。



その非常識が現実世界に現れないよう
に、自然はいろいろな「禁止事項」
を設けていて・・・



上手く使うと究極の
暗号にもなるのです。

禅問答のような話に聞こえますが、わかりやすく説明しますのでお楽しみに！

Q:なぜ異なる波長の光を混ぜると白色光になるのか。
波長が変わるのか、人間の視覚の問題か

A:視覚の問題です。波長は変わりません。(後述)

Q:目がぼやけてものが二重に見えるのは複屈折か

A:おそらく違います。部分反射やレンズのゆがみです。

Q:反射型望遠鏡ではなぜ光は分解されないのか

A: 屈折角は物質によりますが、反射角は物質によらないからです。

Q:光が波だとして、いったい何を伝わっているのか

A:媒質はありません。何かの物質の位置が変位しているわけではありません。

Q:フレネルレンズの実際の見え方が気になる。凸レンズと同じなのか

A:似ているがレンズ自体は縞々に見えます。

Q:プリズムが通常のレンズと異なり白色光のスペクトルの分解を観測しやすいのは
屈折率が大きいためか？

A:屈折率は同じです。入れる角度を浅くしています。

Q:輝点ができる理由が知りたい

Q:輝点の実験、白色光で行うと焦点距離によって輝点の色も変わるのではないか

A:基本的には中心では常に波が強めあうからです。

Good!

Q:ホイヘンスの原理は波面を構成するものの相互影響で新たな波面が構成されるという考えだが、では光子一つをガラスに向けて出した場合、どのように進むのか

A:光子1つでも同じです。見ていない間は波として振舞います。

Q:光子には質量があるのか

A:質量は厳密にゼロです。

Q:ホイヘンスの原理は光が「束」であるときに限るのではないか。

「一本」の光でも屈折がおこるのかどうか

A:「1本」の光でも同じです。

Q:ラグランジアンがなぜああなると説明できるのか

A:形は唯一ではありません(対称性からの制限あり)。

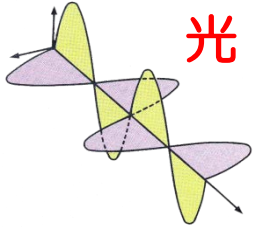
Q:(屈折率の大きい)物質中で光の速度が遅くなるのはなぜか

Q:なぜ三原色に屈折角の差が出るか

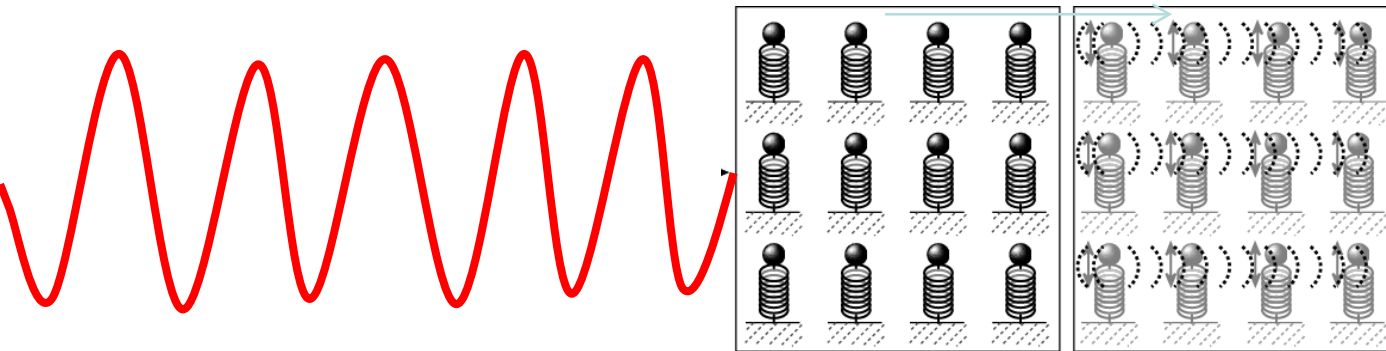
A:次のスライド参照

物質中を進む光

光：電磁場
=電荷を動かす力



物質：電荷をもった粒子
の集まり

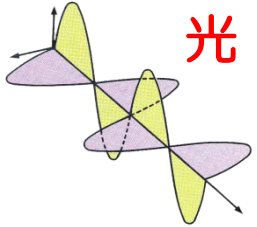


光が電荷を振動させる。

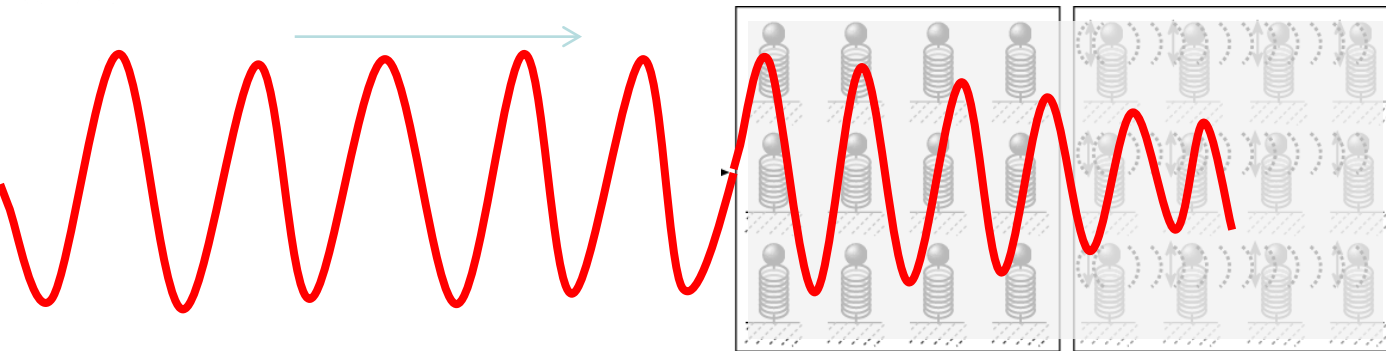
振動する電荷が光を出す。

物質中を進む光

光：電磁場
=電荷を動かす力



物質：電荷をもった粒子
の集まり



光が電荷を振動させる。

振動する電荷が光を出す。

光のエネルギーが失われていく。

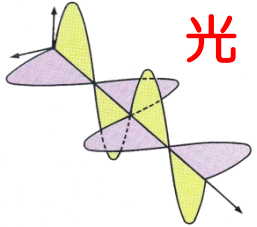
波面の進む速さが変わる。

(吸収係数)

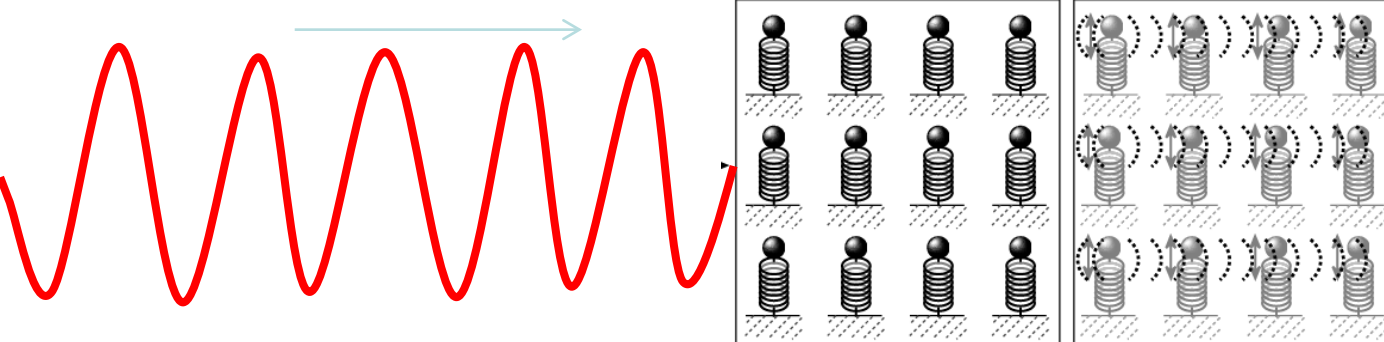
(屈折率)

物質中を進む光

光：電磁場
=電荷を動かす力



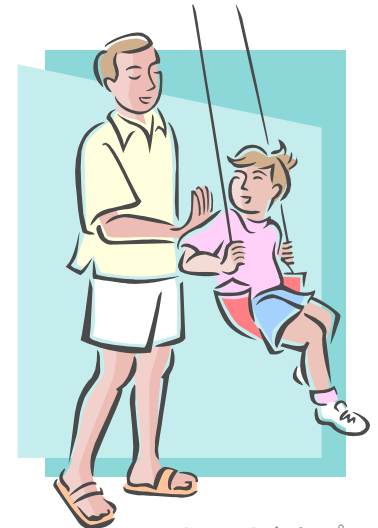
物質：電荷をもった粒子
の集まり



光が電荷を振動させる。

振動する電荷が光を出す。

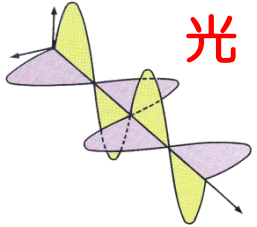
この相互作用の大きさは、同じ物質でも
光の波長（揺する速さ）によって異なる。



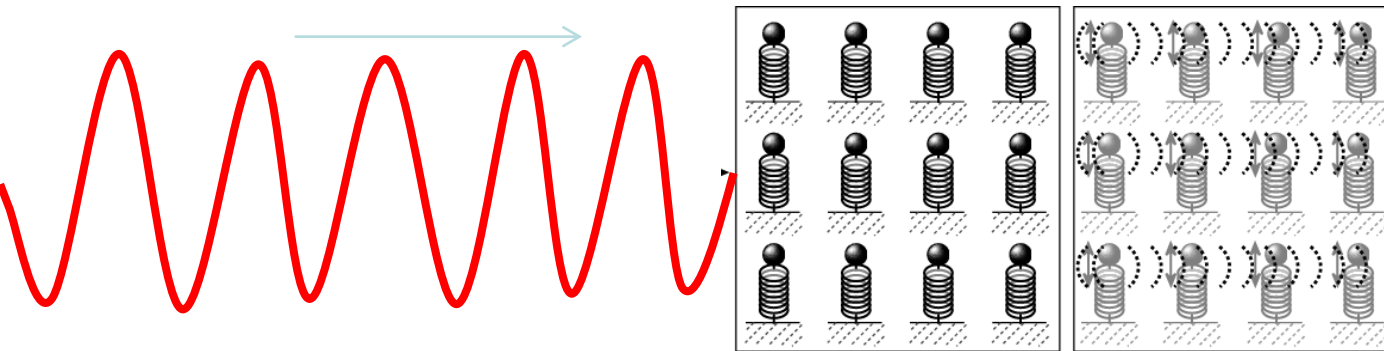
Microsoft クリップアート

物質中を進む光

光：電磁場
=電荷を動かす力



物質：電荷をもった粒子
の集まり



光が電荷を振動させる。

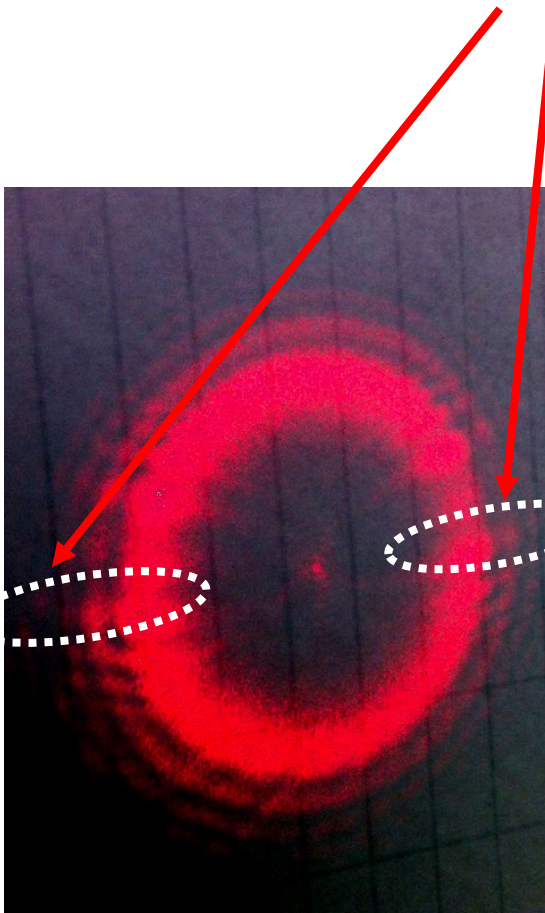
振動する電荷が光を出す。

この相互作用の大きさは、同じ物質でも
光の波長（揺する速さ）によって異なる。

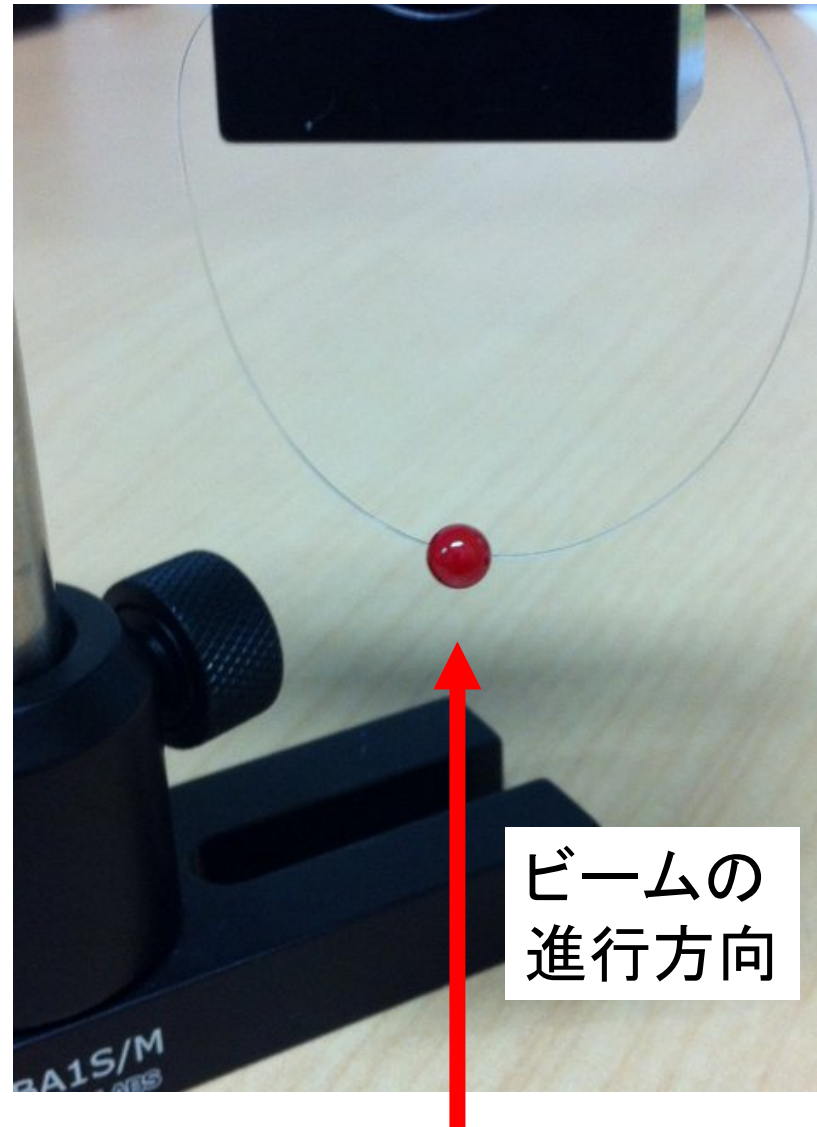
光の波長によって、
吸収の度合いが変わる。
(吸収スペクトル)
屈折の度合いが変わる。
(分散)

色とりどりの世界

Q: 実験で、輝点から線が生えているように見えるのは何か

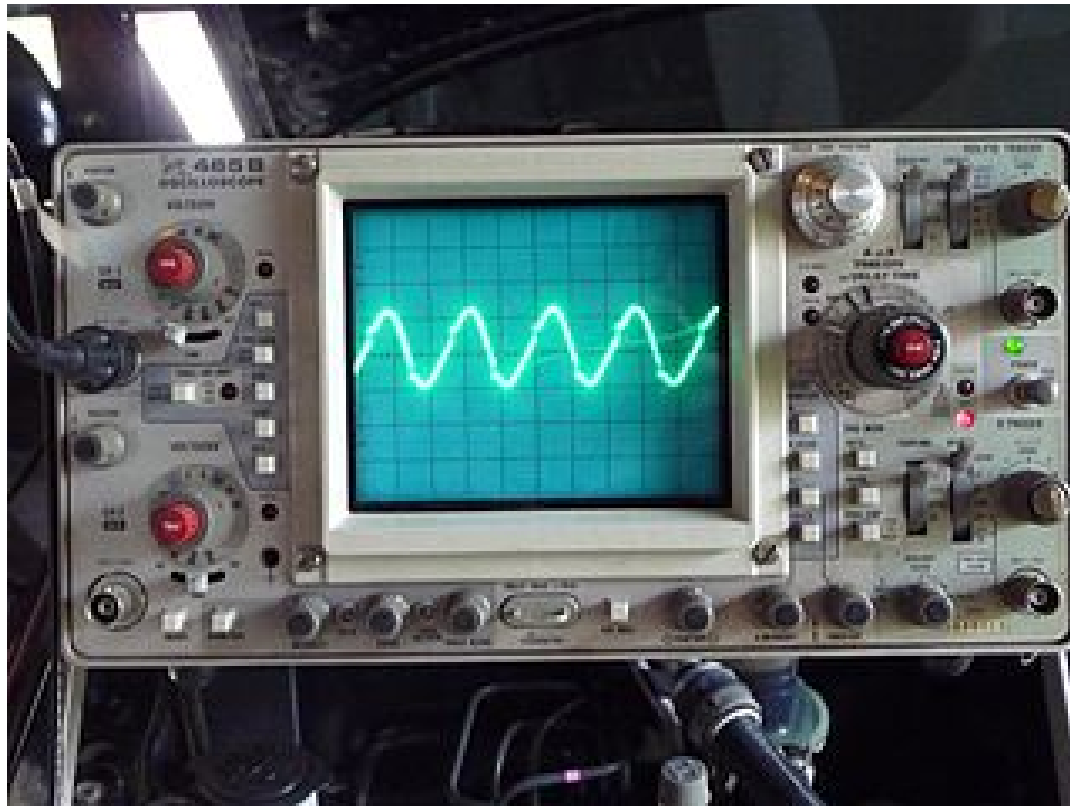


A. 糸の影でした



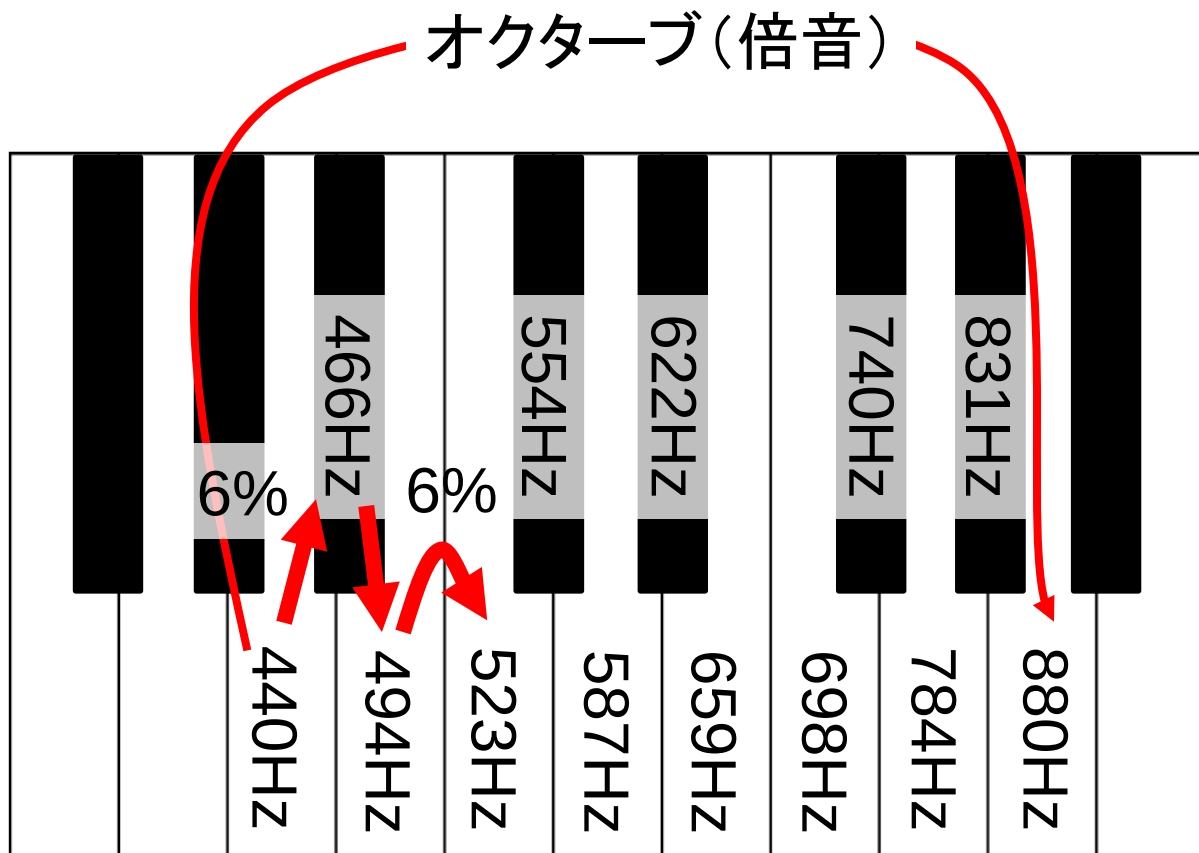
Q: なぜ異なる波長の光を混ぜると白色光になるのか。
波長が変わるのか、人間の視覚の問題か

波の周波数について

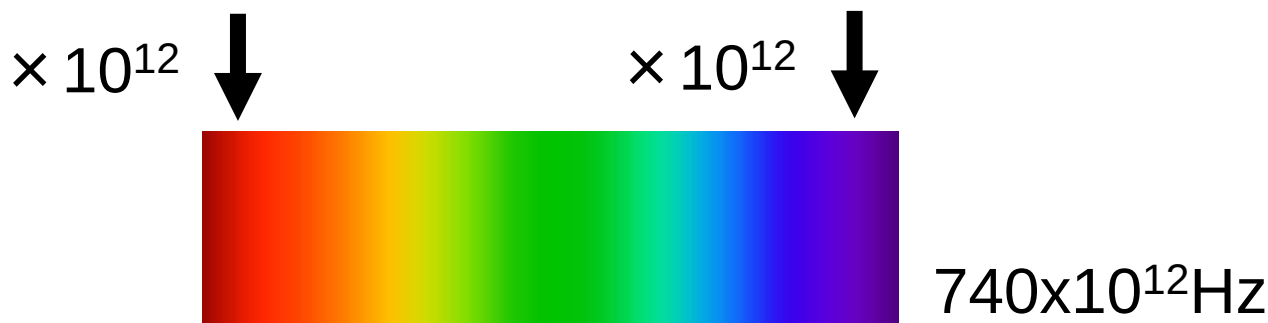


Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RAV4_Tach_750rpm.JPG

音
(空気の振動)



光
(電磁波)



Deborah S Krolls, Wikimedia Commons より転載(2012/12/5)
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectrum4websiteEval.png>
CC BY-SA 3.0

440x10¹²Hz

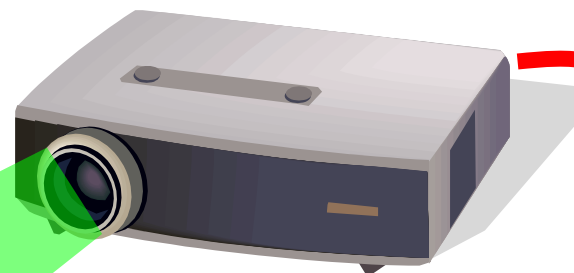
赤 + 緑 + 青 = 白色 : 和音のようなもの

分光器

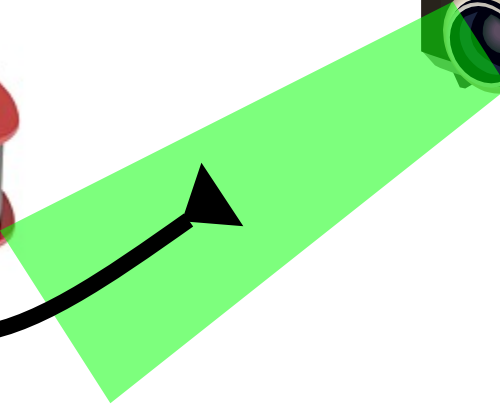


*

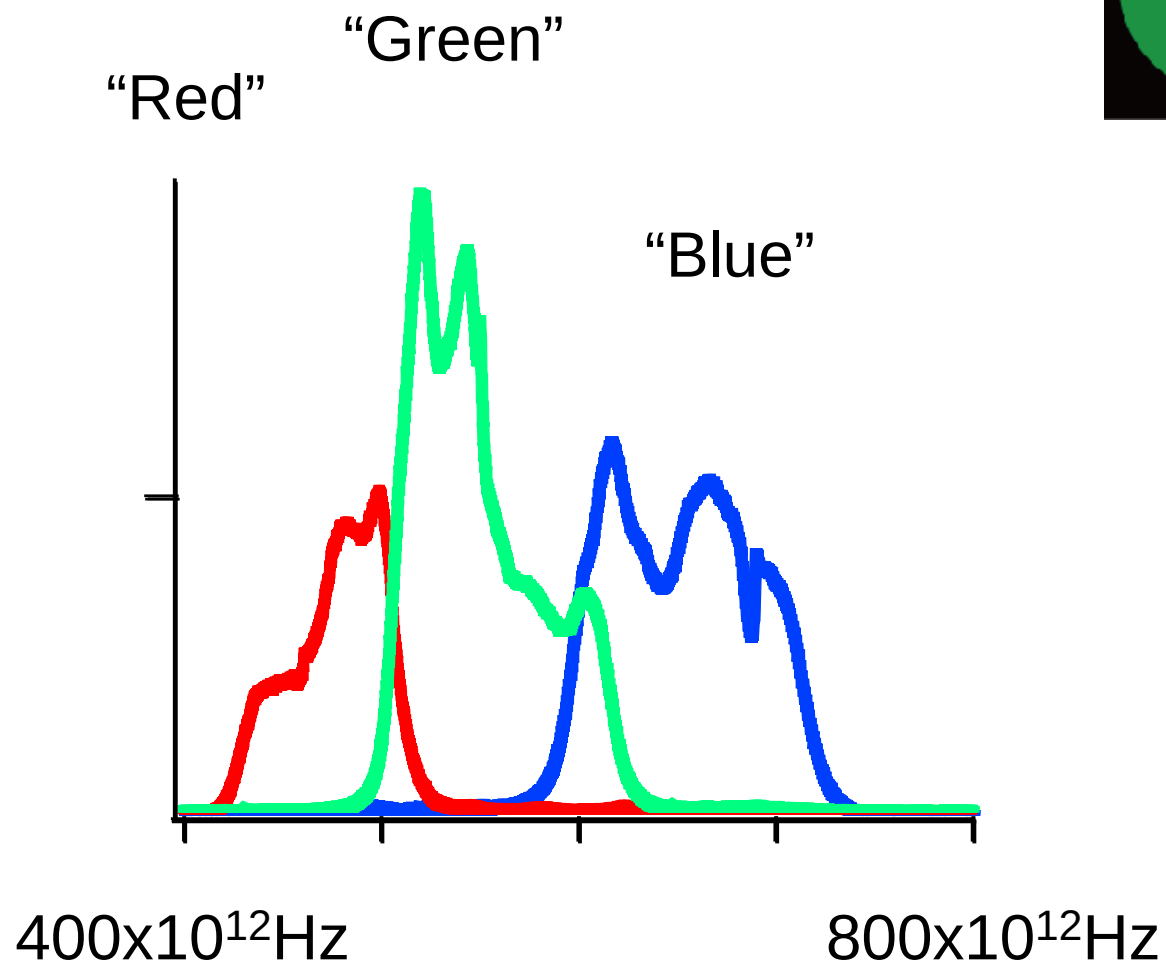
Thorlabs
<http://www.thorlabs.co.jp/thorproduct.cfm?partnumber=ccs100>



Microsoft クリップアート



Microsoft クリップアート



目次

(i) 前回のミニッツレポートから

(ii) アインシュタインの予言

(iii) レーザー冷却と蒸発冷却

(iv) 冷却分子

物理学者の動機のひとつ

極端なケースを想像して
常識を疑ってみる

名人：アインシュタイン

有名な例：

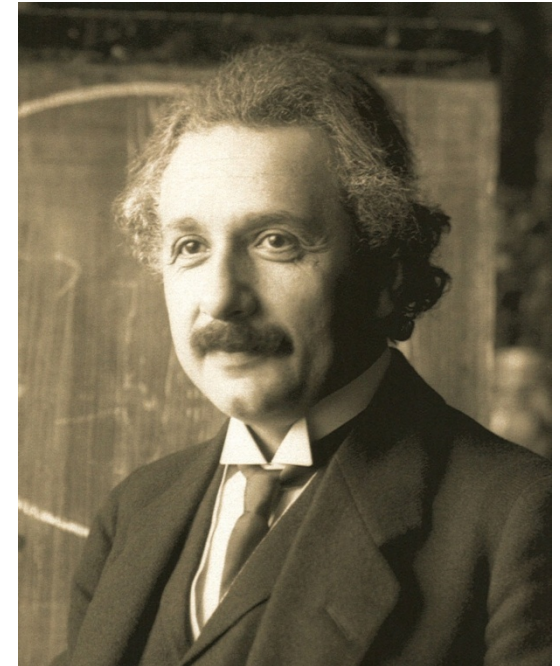
光を追いかけて光速で飛んだら
光が止まって見えるのだろうか？

→特殊相対論



*

(c) Adam Hart-Davis/DHD Multimedia Gallery
http://gallery.hd.org/_c/natural-science/prism-and-refraction-of-light-into-rainbow-AJHD.jpg.html

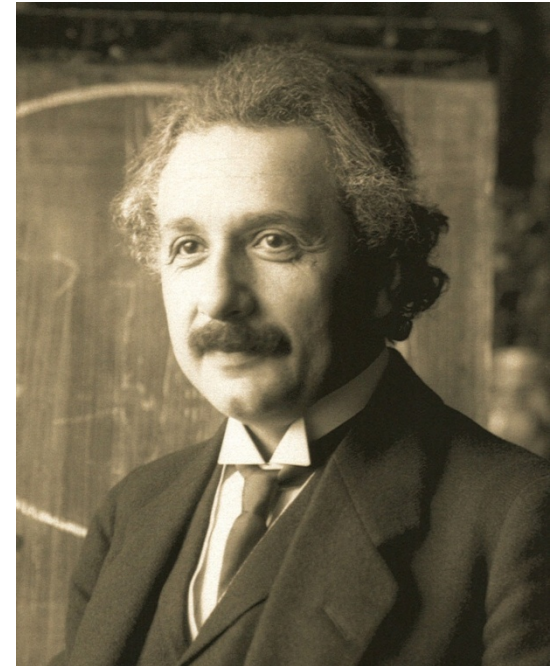


Albert Einstein

Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein1921_by_F_Schmutzer_2.jpg

アインシュタインの疑問のひとつ

理想気体は非常に低い温度で
どのような性質を示すだろう？



Albert Einstein

Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:
Einstein1921_by_F_Schmutzer_2.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein1921_by_F_Schmutzer_2.jpg)

物質の3態：固体、液体、気体



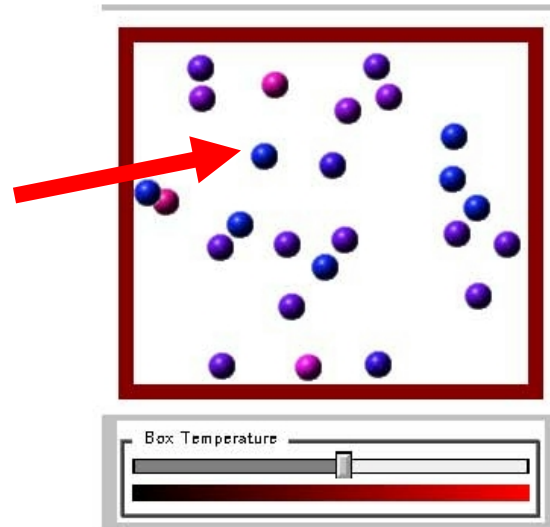
Microsoft クリップアート

相転移において、
原子間の相互作用が無視できない

理想気体を冷却していったらどうなるだろう？

理想気体の状態方程式

窒素分子(N₂)や
酸素分子(O₂)



*

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

$$pV = nRT$$

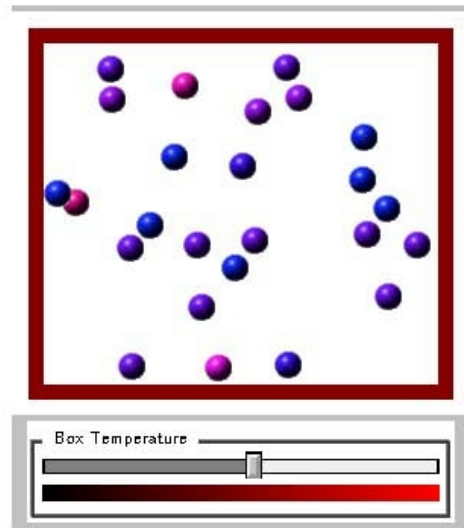
圧力

体積

絶対温度 = (摂氏 + 273) 度

もう少し掘り下げてみよう

温度とは何か？ 圧力とは何か？



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

個々の分子の運動に注目すると...

圧力は壁を押す力 → 速いほど大きい

温度は(運動)エネルギー → 速いほど大きい

大事なものは粒子の速さ！

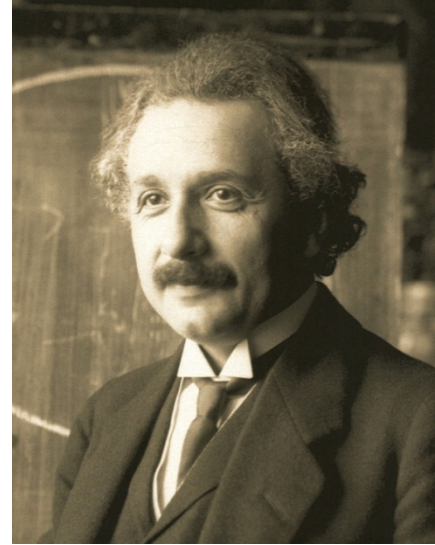
Einsteinは $T \rightarrow 0$ での熱平衡に注目した

Einsteinの予言



Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AatyenBose1925.jpg>

Satyendra Nath Bose

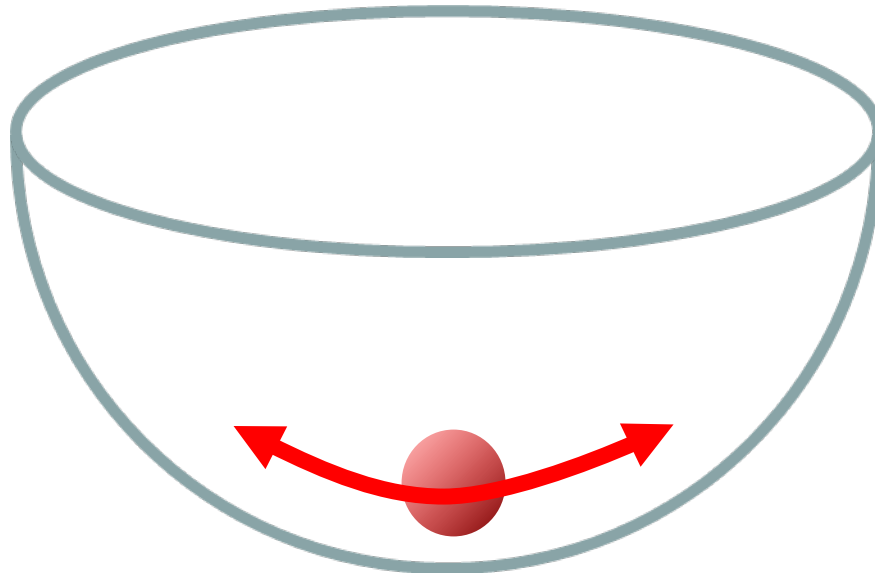


Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein1921_by_F_Schmutzer_2.jpg

Albert Einstein

インドの物理学者Boseのアイデアを拡張した
Einsteinは、1925年に不思議な現象を発見した。

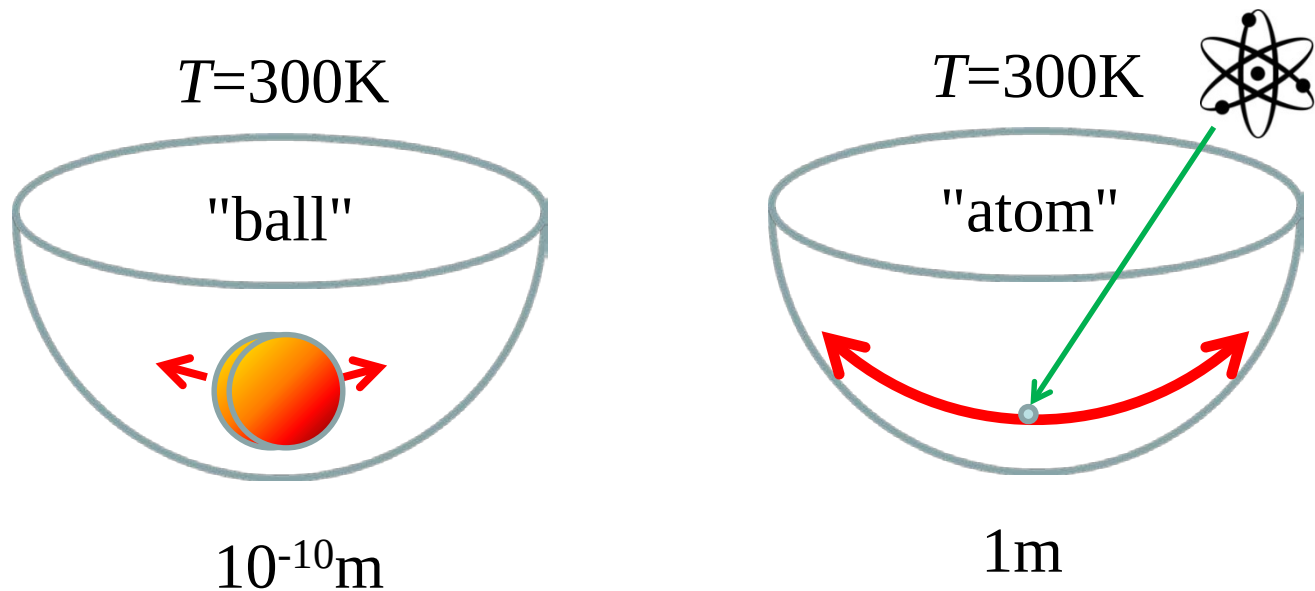
大雑把な議論(1)



$$U = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$$

$$\omega = 2\pi \times 1 \text{ Hz}$$

大雑把な議論(1)



$$x \sim \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

$T=300\text{K}$ は コインにとっては「低温」
原子にとっては「高温」

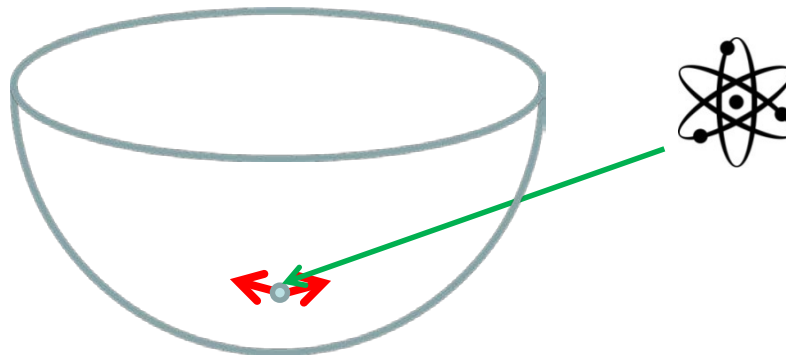
では $T \rightarrow 0$ (絶対零度) で $\Delta x_{\text{atom}} \rightarrow 0$?

Δx はゼロになるか？

ハイゼンベルグの不確定性

$$\Delta x \cdot \Delta(mv) > \frac{\hbar}{2} \quad \hbar \sim 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$$

Δx と v は $\Delta x = 10\mu\text{m}$ and $v = 10\mu\text{m/s}$ でバランスする



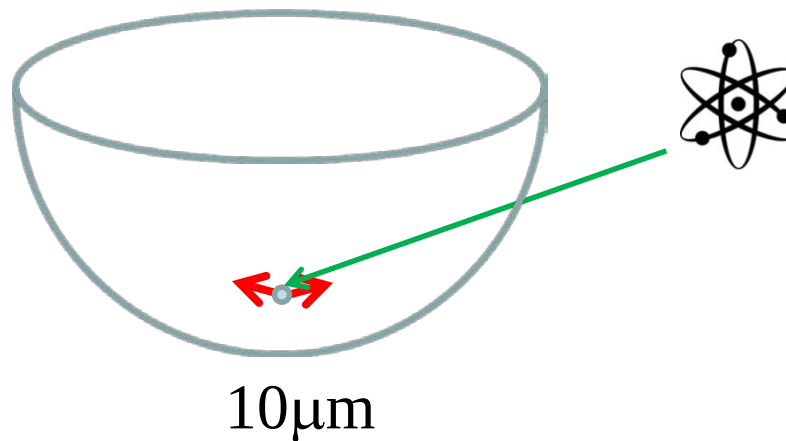
量子力学極限 $10\mu\text{m}$

どんなに冷やそうが、 Δx は $10\mu\text{m}$ より小さくならない(量子力学的極限)

どこまで冷やせば $\Delta x = 10\mu\text{m}$ になるか？

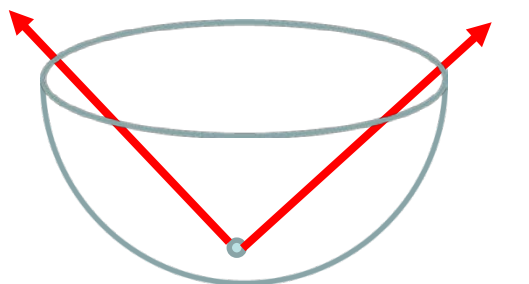
Δx と v は $\Delta x = 10\mu\text{m}$ and $v = 10\mu\text{m/s}$ でバランスする

$$\frac{1}{2}m\omega^2(\Delta x)^2 = \frac{1}{2}m(\Delta v)^2 = 0.000\,000\,03\text{ K} = 30\text{ nK}$$

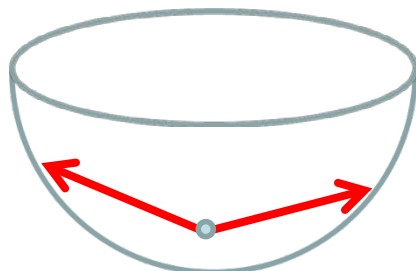


$T_{\text{limit}} = 30\text{ nK}$ まで冷やせば量子力学的極限に到達するはず

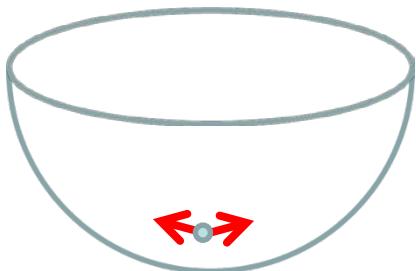
原子1個の場合



$1000\mu\text{m}=1\text{mm}$



$100\mu\text{m}$



$\Delta x_{\text{limit}}=10\mu\text{m}$

極限への冷却

$T=3 \times 10^{-4}\text{K}$

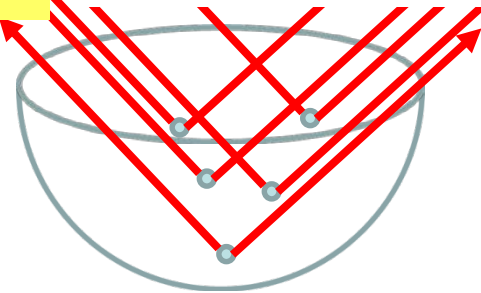


$T=3 \times 10^{-6}\text{K}$

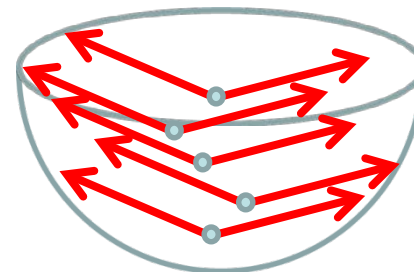


$T_{\text{limit}}=3 \times 10^{-8}\text{K}$

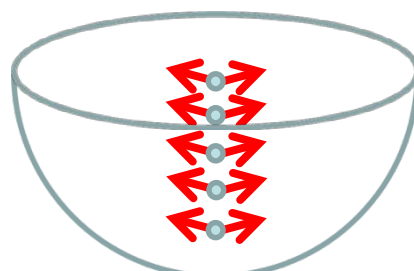
原子N個の場合



$1000\mu\text{m}=1\text{mm}$



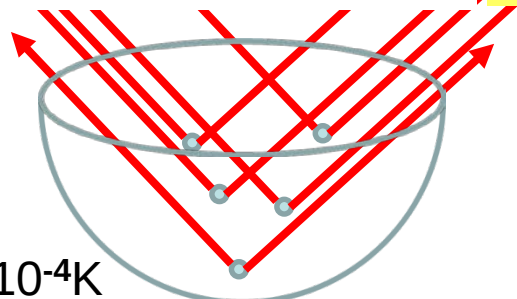
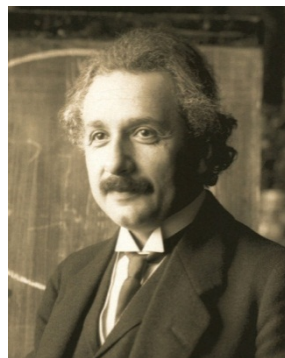
$100\mu\text{m}$



$10\mu\text{m}$

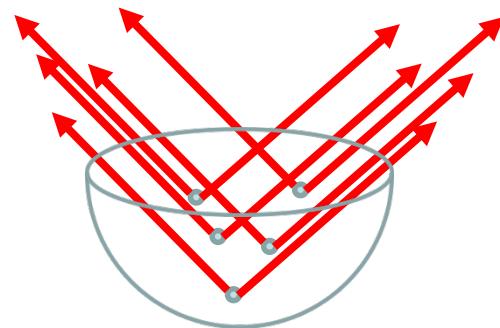
原子 $N=10^6$ 個の場合

アインシュタインの結果

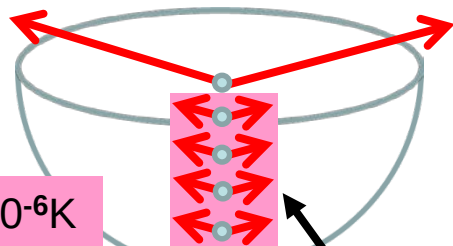


$T=3 \times 10^{-4}\text{K}$

$1000\mu\text{m}=1\text{mm}$



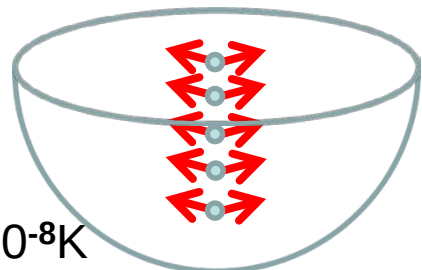
$1000\mu\text{m}=1\text{mm}$



$T_c=3 \times 10^{-6}\text{K}$

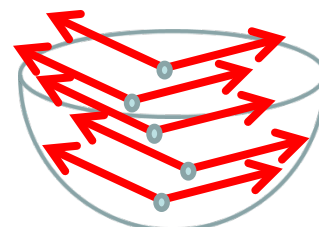
ちょっと $\Delta x=100\mu\text{m}$

ほとんど $\Delta x=10\mu\text{m}$

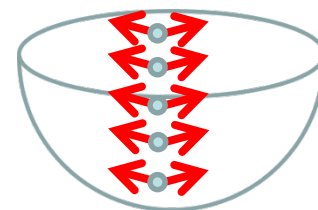


$T=3 \times 10^{-8}\text{K}$

$\Delta x=10\mu\text{m}$



$100\mu\text{m}$



$10\mu\text{m}$

$$T_c = N^{1/3} \times T_{\text{limit}}$$

で相転移が起こる

(相互作用もないのに)

(突然)

ほとんどの原子が
「最小運動状態」になる

ボース・アインシュタイン凝縮体
(Bose-Einstein Condensate)

目次

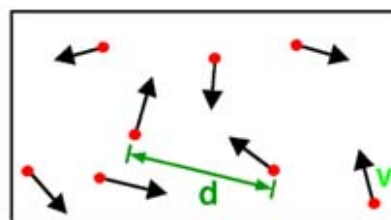
(i) 前回のミニッツレポートから

(ii) アインシュタインの予言

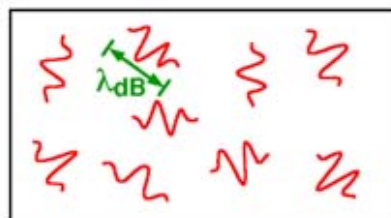
(iii) レーザー冷却と蒸発冷却

(iv) 冷却分子

絶対零度の気体は量子力学と統計力学に支配される



High
Temperature T:
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



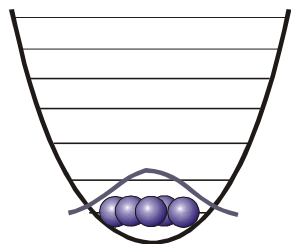
Low
Temperature T:
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"

*

Courtesy of Wolfgang Ketterle
http://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/intro/whatbec/whatisbec.html

ボソン

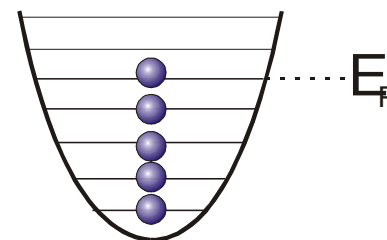
(陽子 + 中性子 + 電子 = 偶数)



すべての粒子は
ボソンかフェルミオンに
分類される

フェルミオン

(陽子 + 中性子 + 電子 = 奇数)



「ボース粒子は相転移を
起こして突如としてレーザー
のように振舞いだす(1925年)」



Bose



Einstein

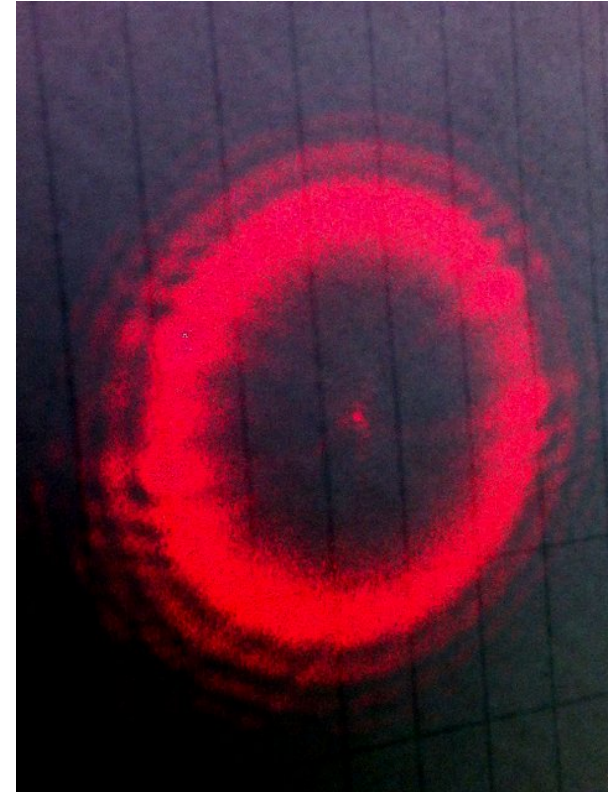


Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein_patentoffice.jpg

Condensate(BEC)

物理学の信念

「全ての理論は
実験によって
検証される」



ボース凝縮を実験で実現してみよう！

大きな問題点

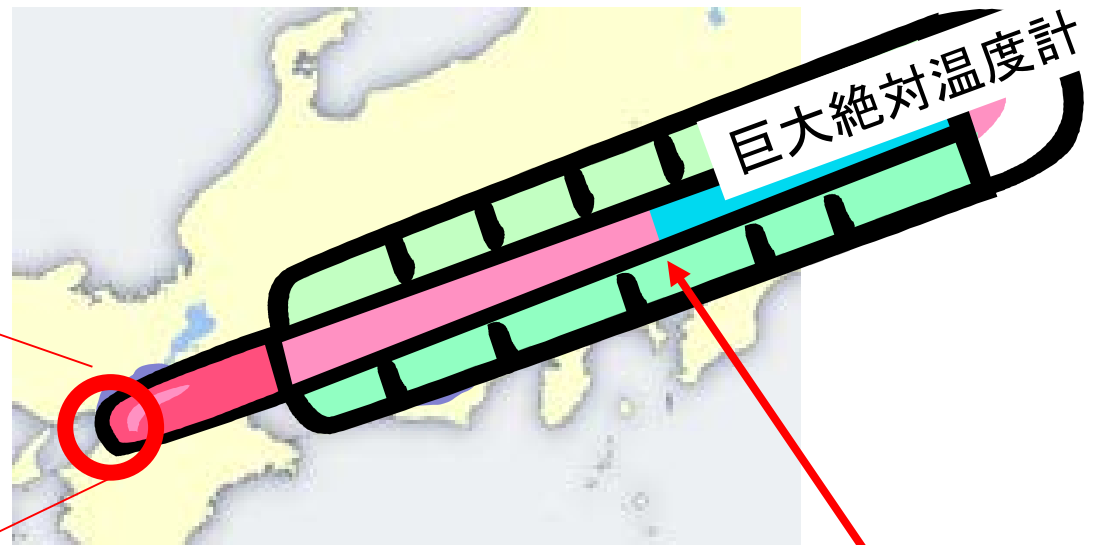
ボース凝縮の転移温度

絶対温度で $0.000\,000\,1$ 度

転移温度 = 鉛筆の先くらい

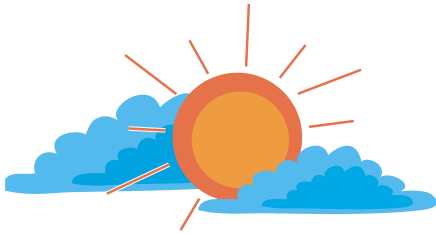


Microsoft クリップアート



室温 = 東京

気体に光をあててみよう



Microsoft クリップアート

(太陽)



Microsoft クリップアート

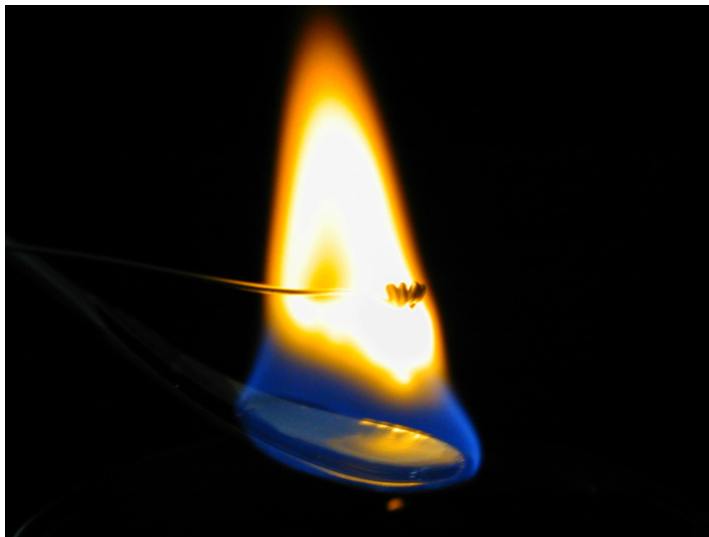
(レーザーメス)

通常、物質は光からエネルギーを受け取り、熱くなる

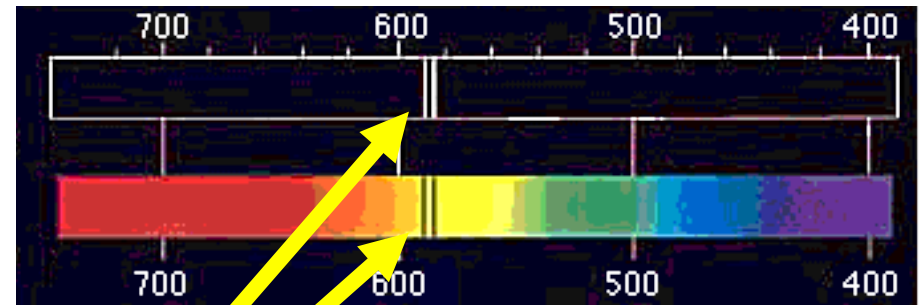
原子と光の相互作用

原子は光を吸収し、また放出する

ただし、波長(色)は原子によって決まっている



* 出典: ~不思議な色の世界~ 1-12 炎色反応
[http://iromizu.com/flame1_set\(II\).html](http://iromizu.com/flame1_set(II).html)



ナトリウムの発光、吸収スペクトル

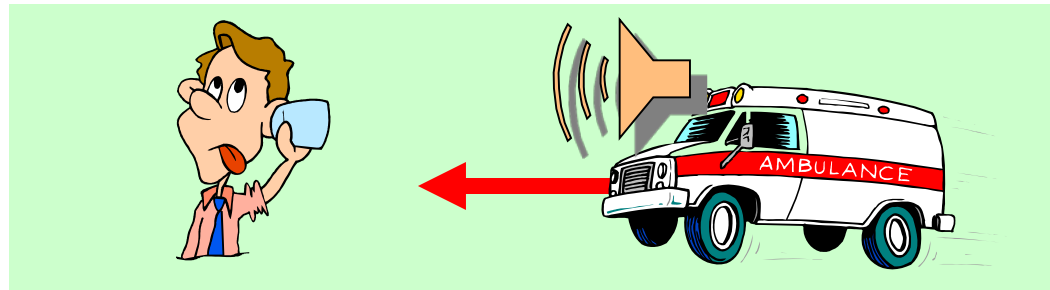
* NASA
<http://imagine.gsfc.nasa.gov/YBA/M31-velocity/spectra-more.html>

ナトリウムは黄色しか吸わない、黄色しか吐かない

黄色のレーザーをナトリウム原子にあてれば
冷却(減速)できるという主張

鍵はドップラー効果

音のドップラー効果

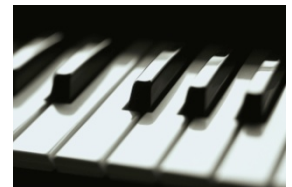


Microsoft クリップアート

$$36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$$

10m/s は 音速(340m/s) の 3%
-> 音階の半分くらい？

光のドップラー効果？



Microsoft クリップアート

$$2^{1/12} = 1.06$$

向かってくる光＝高い周波数に見える？
追いかけてくる光＝低い周波数に見える？

$$10 \text{ m/s} \div (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 3 \times 10^{-8} \text{ (すごく小さい！)}$$

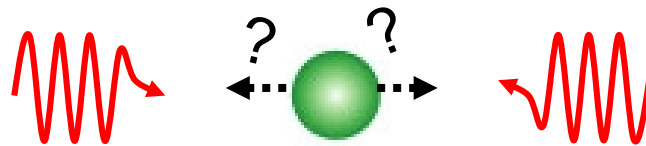
我々の眼では違いが分からない...

黄色のレーザーをナトリウム原子にあてれば
冷却(減速)できるという主張

原子には違いが分かる！

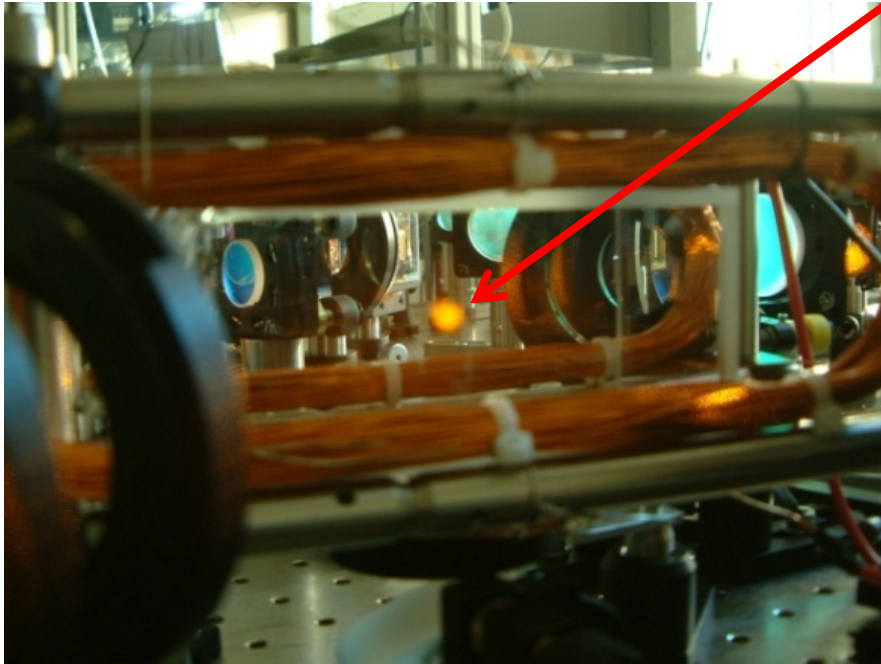
向かってくる光＝高い周波数に見える
追いかけてくる光＝低い周波数に見える

では共鳴より低い周波数の光を四方八方から当てると...

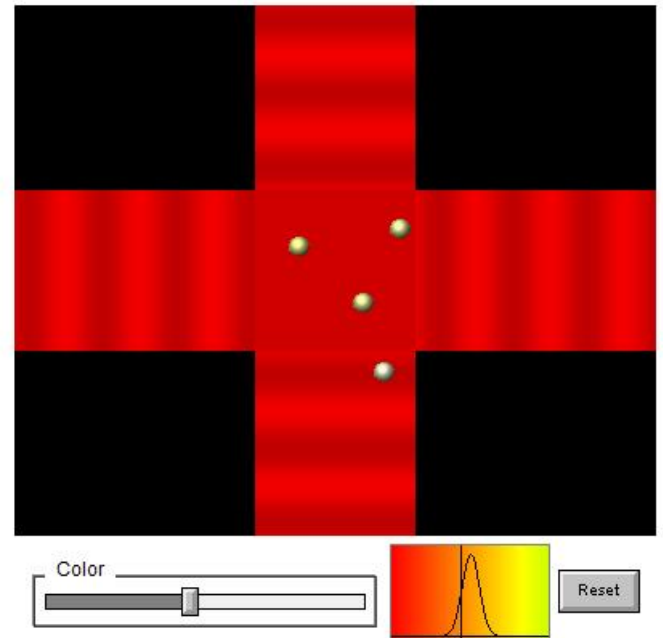


どちらに動いても押し戻される->減速->冷却!!

レーザー冷却された原子！



Laser Cooling and Trapping: Optical Molasses



* Physics 2000
<http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/lascool4.html>

冷却法を組み合わせる？

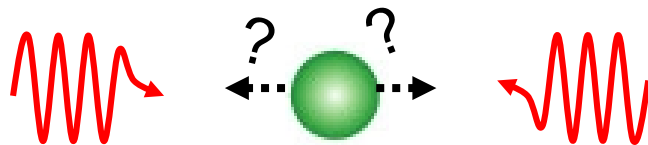
レーザー冷却



300 K to $100\mu\text{K}$

... ドップラー効果を使う

共鳴より低い周波数の
レーザー光を当てる



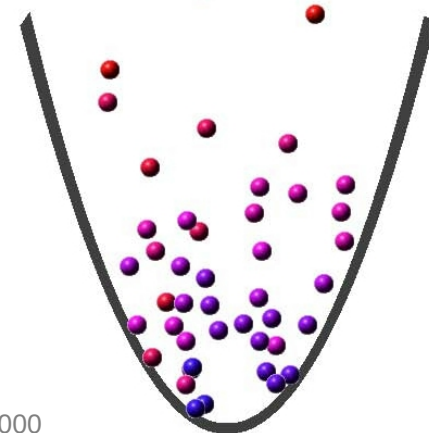
蒸発冷却



$100\mu\text{K}$ to 100 nK

... 熱平衡を使う

熱い原子を取り除く



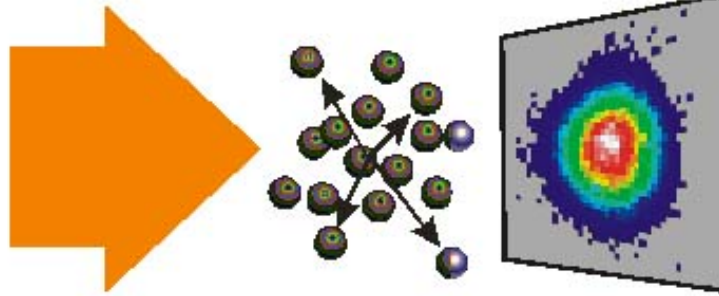
*

Physics 2000

http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/evap_cool.html

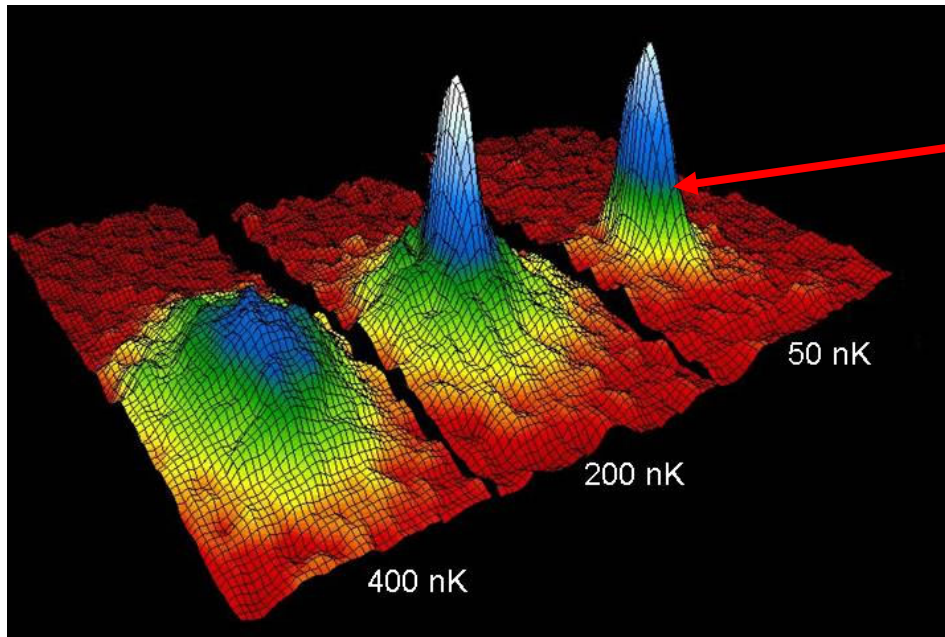
-> 人類が作った最低温度*

ボースアインシュタイン凝縮



原子の速度分布の診断：
トラップから原子を解放し、
一定時間待ってから写真をとる

* Courtesy of Deborah Jin Group at JILA
<http://jila.colorado.edu/~jin/research/history.html>



突然、ほとんど全ての
原子が量子力学的に
許される最低速度
状態に落ち込む

↓
ボース凝縮！

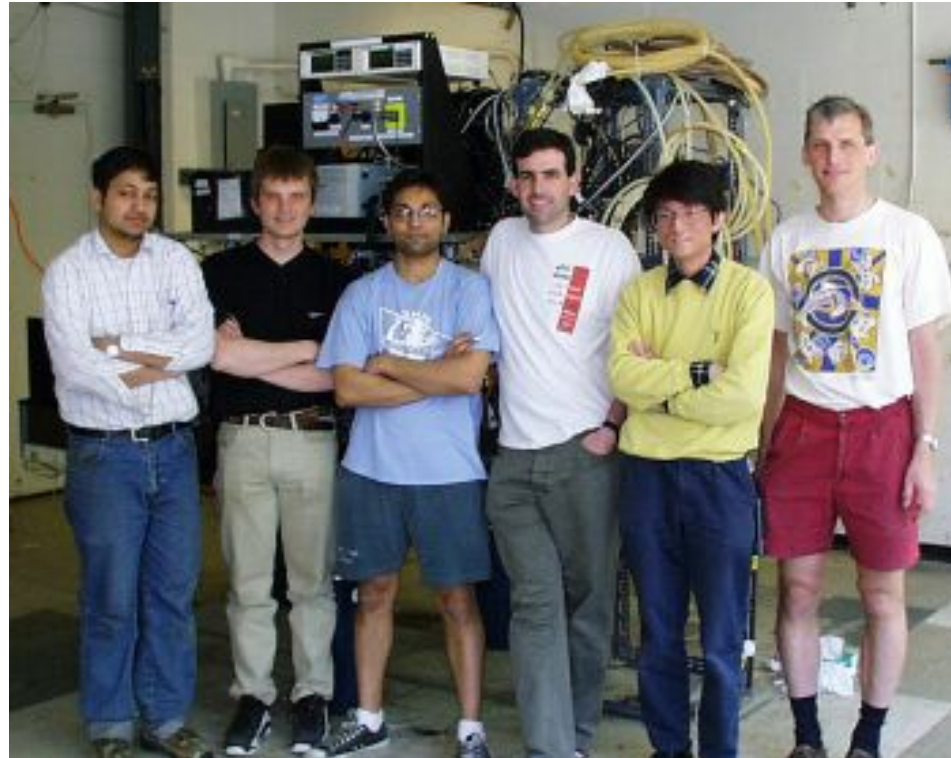


NIST/JILA/CU-Boulder

Wikipediaより転載

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bose_Einstein_condensate.png

ドイツ人の若い准教授を中心とする、 国際色豊かなチームに参加



*

Courtesy of Wolfgang Ketterle
http://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/group_info/Group%20photos/Group_photos.htm

出身：インド、ドイツ、インド系、ユダヤ系、日本、ドイツ

このチームでたくさん仕事をした！

ボース凝縮体の特長

ボース凝縮体(BEC) = 全ての原子が同じ状態にある
= レーザーの様なもの

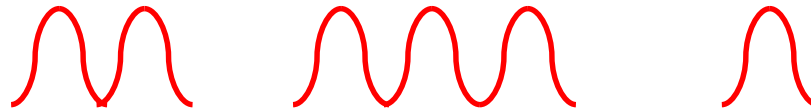
まっすぐ飛ぶ

よく干渉する



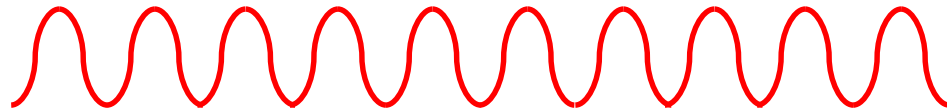
Microsoft クリップアート

電球



普通の
原子

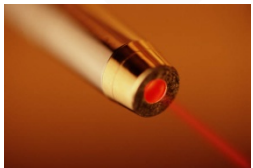
レーザー光



BEC



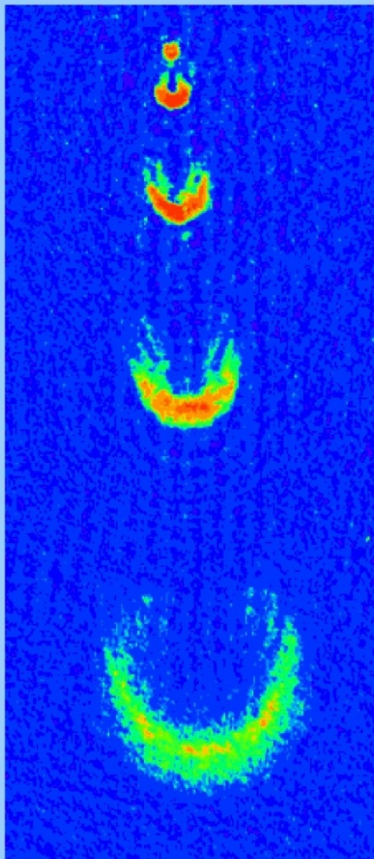
Microsoft クリップアート



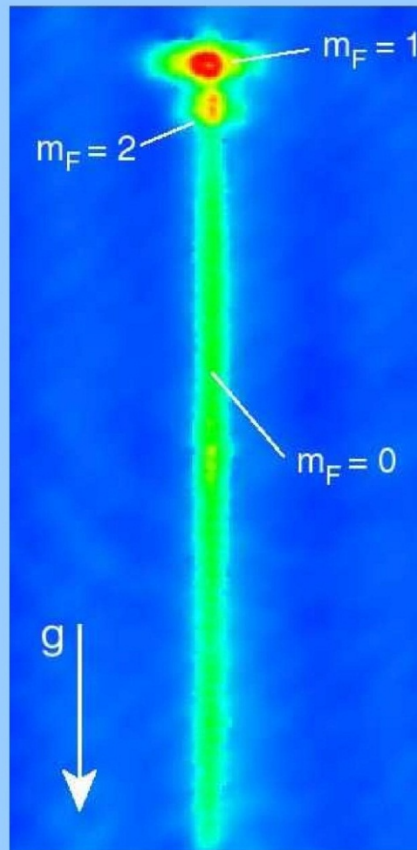
本当に原子気体がレーザーのようになった！？

Atom laser gallery

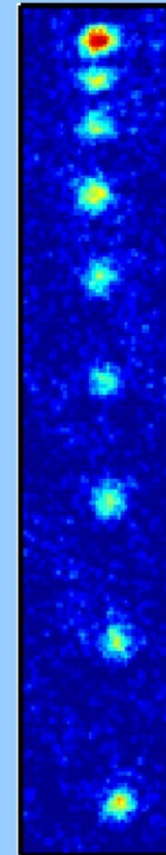
Height:
5, 2, 0.5, 1 mm



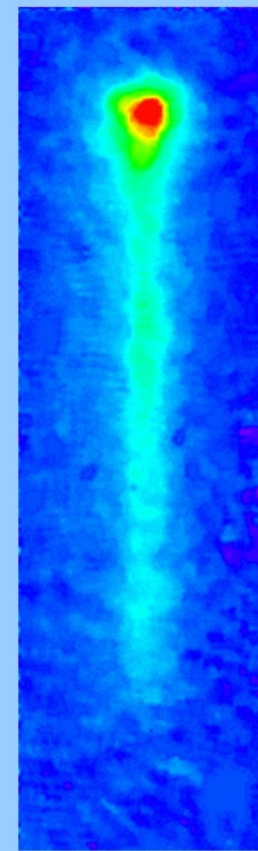
MIT '97



Munich '99



Yale '98



NIST '99

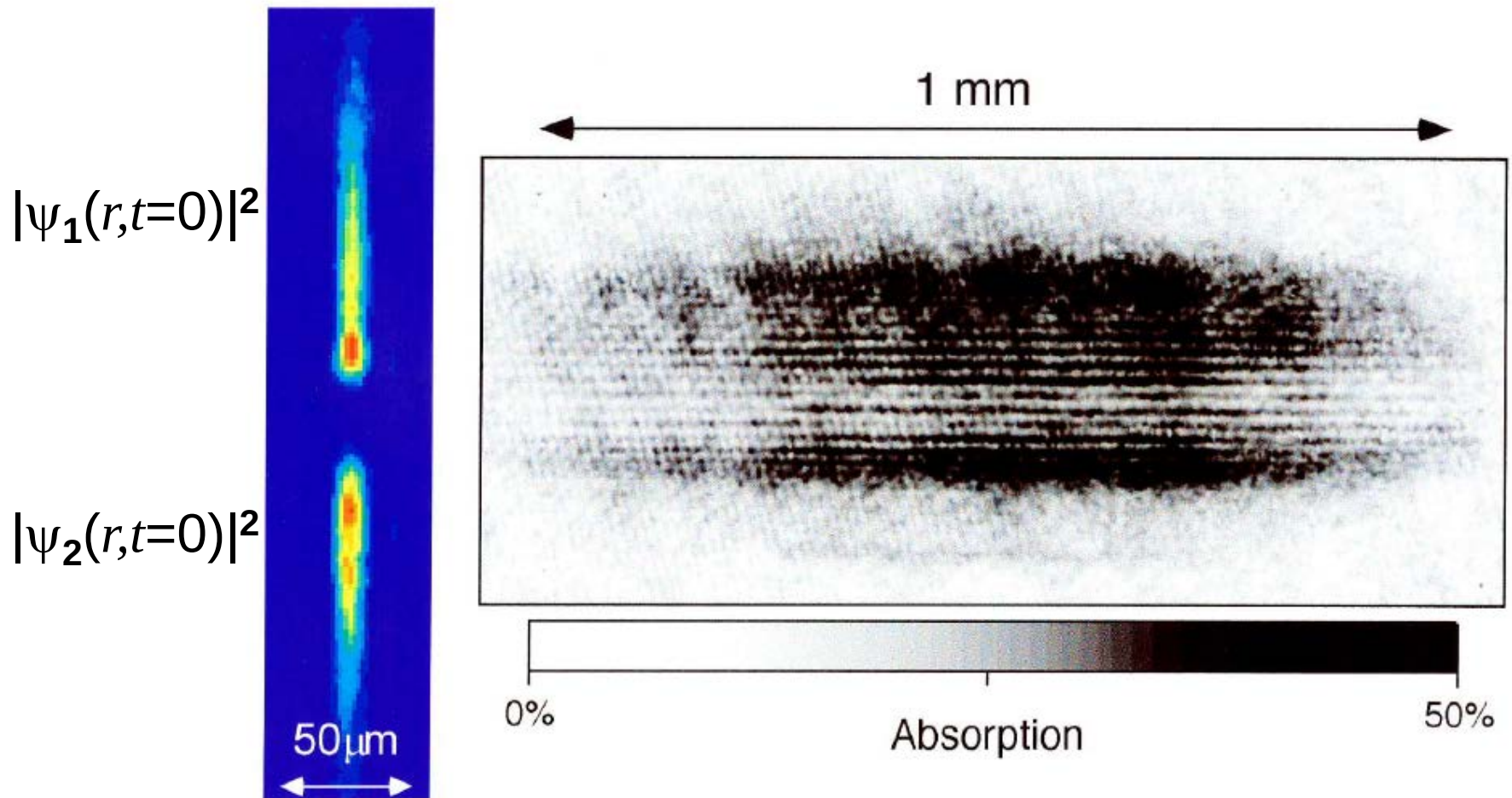


波の特長:干渉

波動
粒子



Two condensates ... interfere!



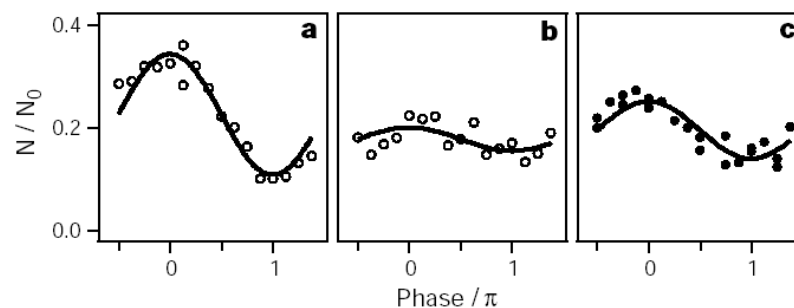
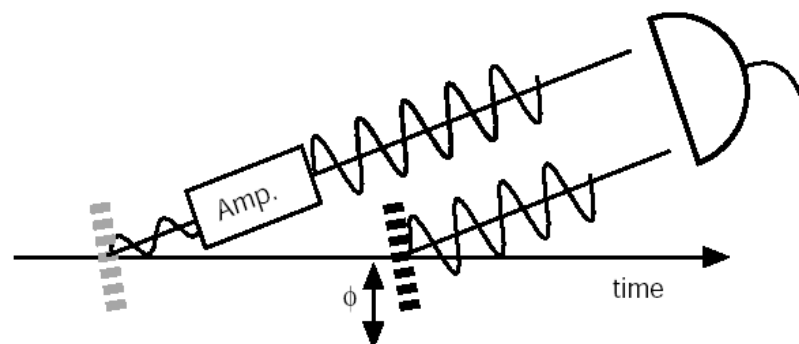
$$|\psi_1(r, t = T) + \psi_2(r, t = T)|^2$$

* Courtesy of Wolfgang Ketterle
http://cua.mit.edu/ketterle_group/Nice_pics.htm

* Courtesy of Wolfgang Ketterle
http://cua.mit.edu/ketterle_group/Nice_pics.htm

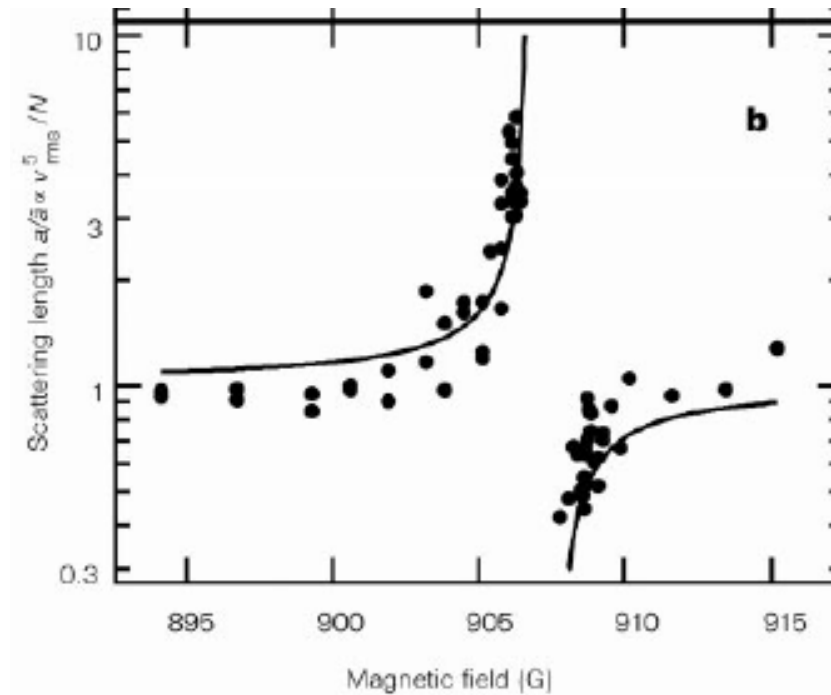
応用へのインパクト: 物質波干渉計

重力や回転の精密測定が可能



* Inouye *et al.* (1999) "Phase-coherent amplification of atomic matter waves,"
Nature 402(6762): 641-644, p.642, Fig.1.

原子のレーザー同士の相互作用を20倍にわたって制御 (世界で初めて)

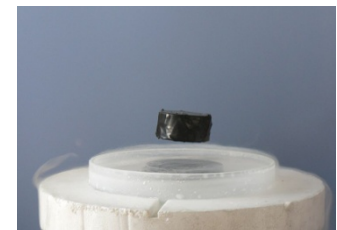


- * Inouye *et al.* (1998) "Observation of Feshbach resonances in a Bose-Einstein condensate," *Nature* 392(6672): 151-154, p.153, Fig.2.

応用: 原子気体を用いた超伝導状態の研究
(2004年、コロラド大学など)

Photo by Mai-Linh Doan, Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meissner_effect_p1390048.jpg

CC BY-SA 3.0



2001 Nobel Prize in Physics (Cornell, Ketterle, Wieman)

Eric A.
Cornell

Wolfgang
Ketterle

Carl E.
Wieman

ノーベル賞授賞式において
賞状とメダルを授与される
Wolfgang Ketterle

目次

(i) 前回のミニッツレポートから

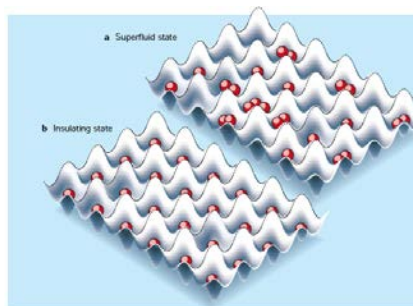
(ii) アインシュタインの予言

(iii) レーザー冷却と蒸発冷却

(iv) 冷却分子

極低温極性分子に注目した理由

長距離相互作用



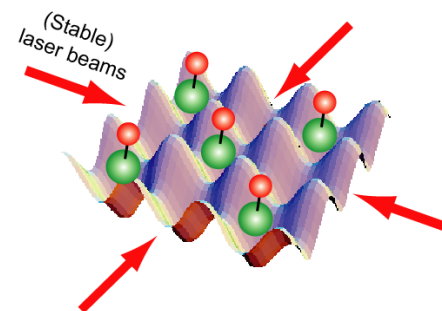
*

異方的相互作用

Reprinted by permission from
Macmillan Publishers Ltd: [NATURE]
Stoof, *Nature* 415(6867): 25-26,
copyright 2002



(不安定)



(安定)

豊富な内部自由度

振動、回転、並進、原子核スピン、電子スピン、電子準位

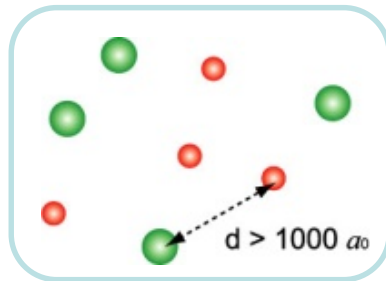
分子波レーザー！？

冷えた分子を作りたい

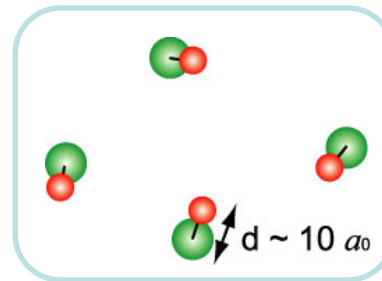
分子にはレーザー冷却が効かない！

->冷えた原子をつなげてしまえ！？

2種類の冷えた原子



分子

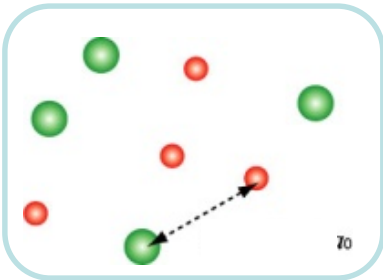


問題点： 小さな運動エネルギー(10^{-7} 度)をそのままにして
大きな結合エネルギー(6003.317026度)を
正確に捨てなくてはならない

3個のパルスを当てるだけで、冷却原子が冷却分子に変換できる！

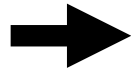
中間状態を入れた

磁気光学トラップ

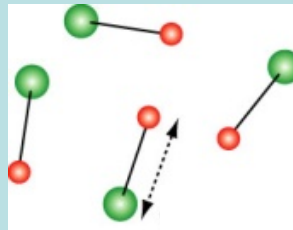


- ・温度 $\sim 10^{-4}\text{K}$
- ・自由

パルス1個



ゆるく束縛した分子

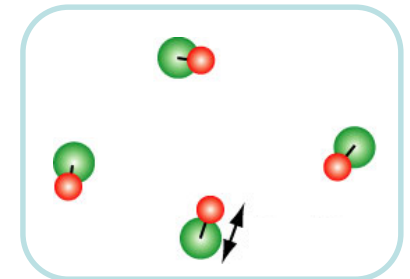


- ・温度 $\sim 10^{-4}\text{K}$
- ・束縛エネルギー $\sim 20\text{K}$

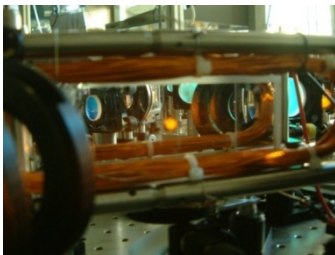
パルス2個



「本当の」分子



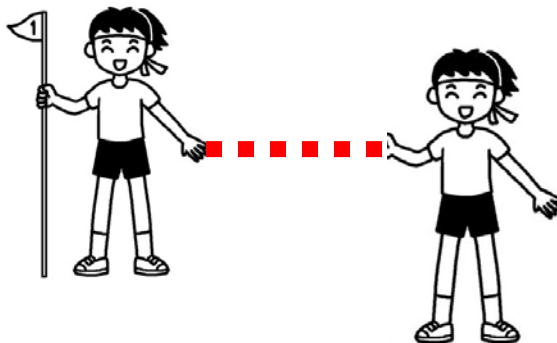
- ・温度 $\sim 10^{-4}\text{K}$
- ・束縛エネルギー $\sim 6000\text{K}$



0.000 000 1K



Rb



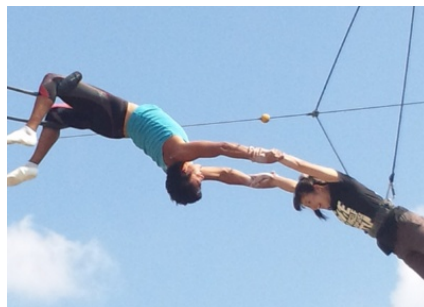
0.000 000 1K



*

K

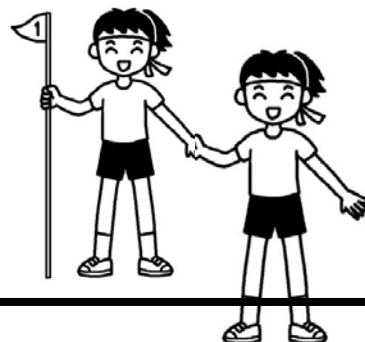
白黒イラスト素材
<http://www.soza.rdy.jp/shirokuro/09/taisou/sozaitech/06.htm>



*

株式会社 ひこねスカイアドベンチャー
<http://hikonesky.com/facilities.html>

6000K



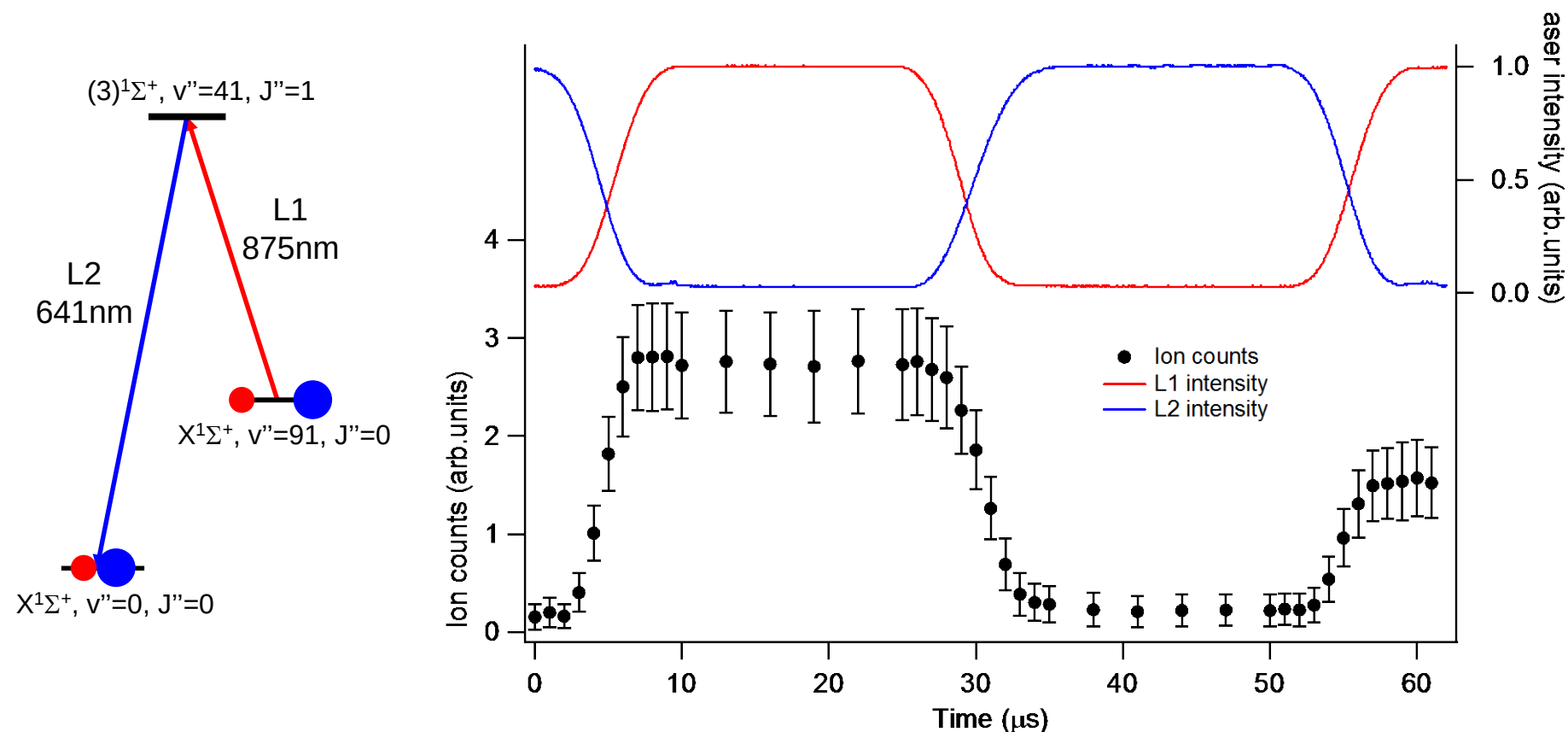
KRb

*

白黒イラスト素材
<http://www.soza.rdy.jp/shirokuro/09/undoukai3/sozaitech/07.htm>

Time evolution during STIRAP

- Monitored the ion counts during multiple transfers
- Recovered 53% after the double STIRAP
- One-way transfer efficiency: 73%

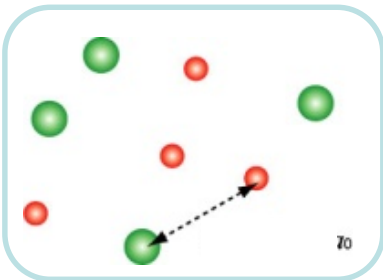


* Aikawa *et al.* (2010) "Coherent Transfer of Photoassociated Molecules into the Rovibrational Ground State," *Physical Review Letters* 105(20), 203001, p.2, Fig.2.

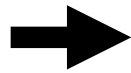
3個のパルスを当てるだけで、冷却原子が冷却分子に変換できる！

磁気光学トラップ(MOT)中で実験を行った

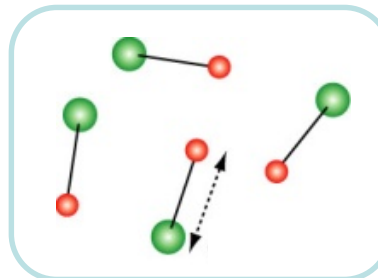
磁気光学トラップ



光会合
(パルス1個)



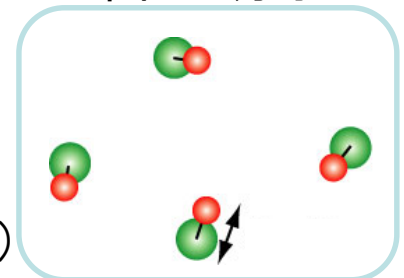
光会合分子



誘導ラマン
断熱遷移

(パルス2個)

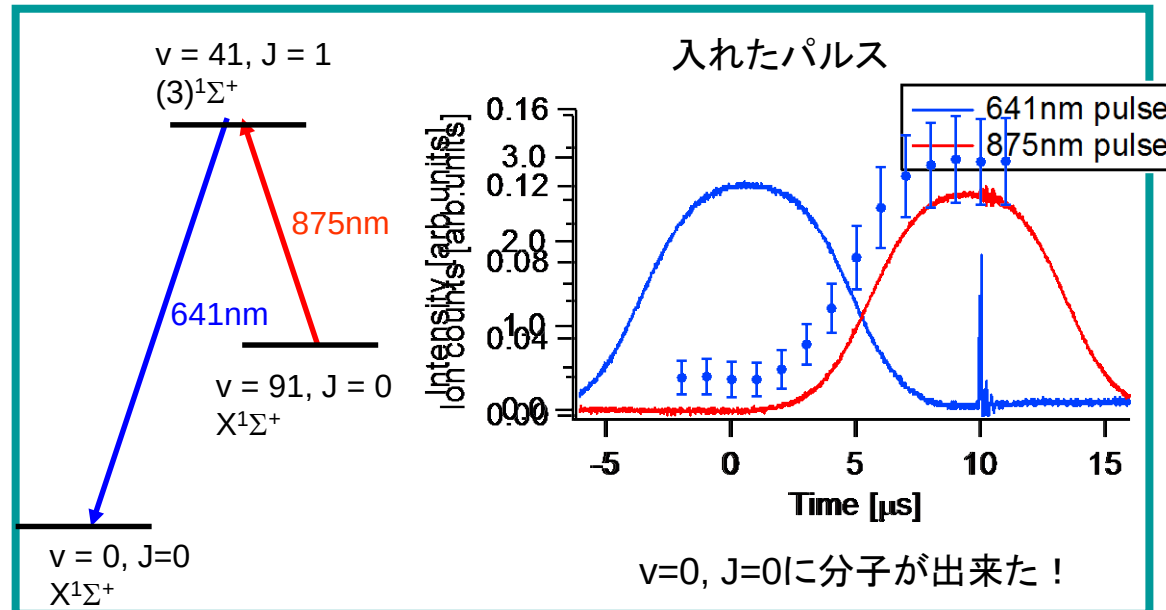
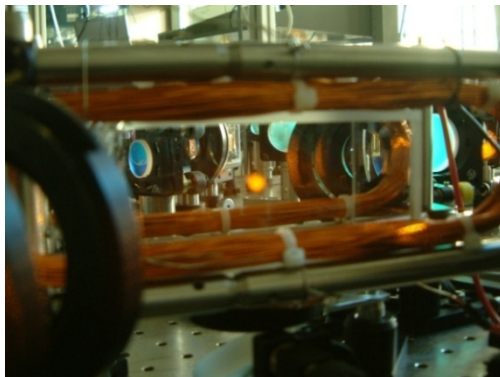
単一の振動回転
準位の分子



- ・温度~100uK
- ・自由

- ・温度~100uK
- ・束縛エネルギー~20K

- ・温度~100uK
- ・束縛エネルギー~6000K



Team members

小林 淳 (助教)

加藤宏平 (D2)

上原城児 (M2)

長田 有登 (M1)

鈴木 皓博 (B4)

大久保 弘樹 (B4)

荻野 敦 (B4)



共同研究:

ERATO上田マクロ量子制御プロジェクト
電気通信大学 岸本研究室

¥¥¥:

上田ERATOマクロ量子制御プロジェクト(JST)
科研費(H21若手A、H23基盤B、H24萌芽)

Past members

赤松大輔 (→産総研)

福原 武 (ERATO研究員)

相川清隆 (→インスブルク大学)

野田開、林正泰、山陸芳之、

藤掛陽輔、大麻浩平、斎藤祐介

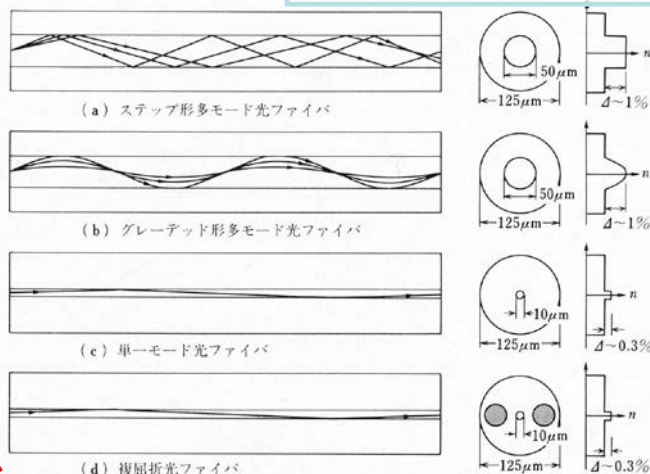


第4回(11/1): 光ファイバの物理と応用

第5回(11/8): 痛みのわかる材料・構造の為の光ファイバ神経網

光を導き、活用する 保立 和夫(工学部)

光通信の低損失伝送路ー 光ファイバの多様性ー 高機能なセンサヘッド



* 大越孝敬編『光ファイバセンサ』オーム社、1986年、p.19、図2・3

光ファイバの導波原理

・1km長光ファイバの透明度は95% ・100Gbit/sの高速通信も可能

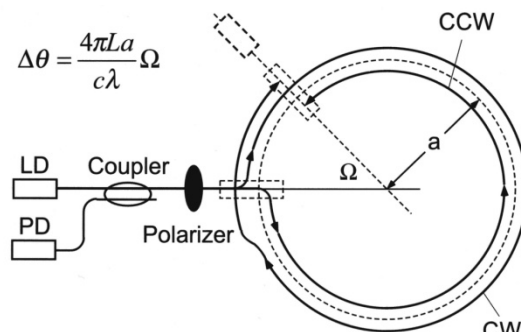


通信用の光ファイバケーブル
(光産業技術振興協会編“やさしい光技術”より)

・1,000本の光ファイバを束ねたケーブル等が、国際海底通信や光加入者網用に敷設されて活躍している。

光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプトロニクス社、1998年、p.24、図1「光ファイバケーブル」

* ご提供: 一般財団法人光産業技術振興協会
株式会社オプトロニクス社

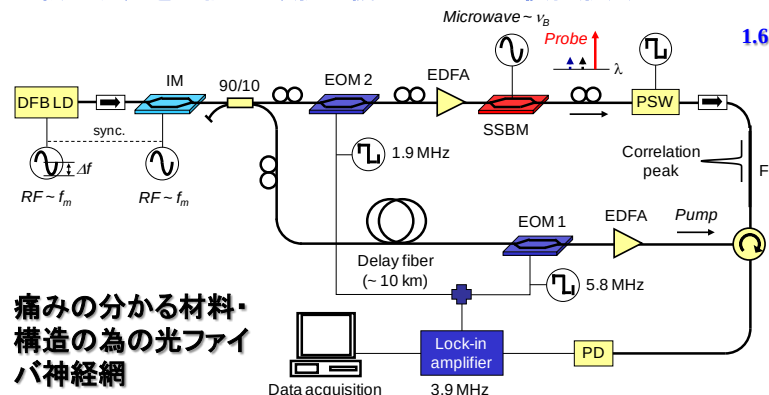


光ファイバジャイロの光学系構成

・長尺光ファイバコイルを左右逆回りに伝搬した2光間には、この系の慣性空間に対する角速度に比例した位相差が現れる(相対論に基づくサニャック効果) ・数年で1回転という極微小回転の測定を可能とし、航空機やロケットの慣性航法センサとして活躍

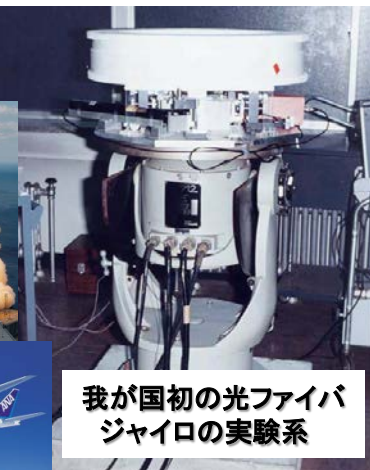
Song et al. (2006) Optics Letters 31(17): 2526-2528, p.2527, Fig.3(a).

1.6mmの空間分解能を実現



痛みの分かる材料・構造の為の光ファイバ神経網

・光ファイバ中で生じる誘導ブリルアン散乱は光ファイバに加わる伸縮歪に比例した周波数シフトを示す。・位置選択的に誘導散乱を発生させる技術によって光ファイバに沿う歪分布を測定可能



我が国初の光ファイバジャイロの実験系

