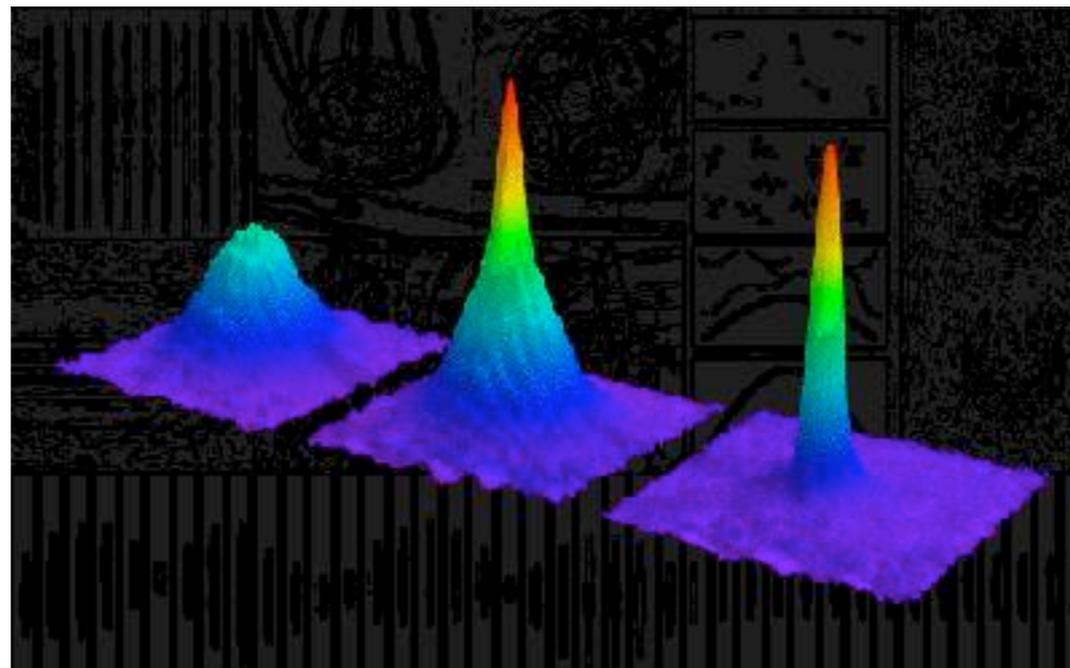


ボース・アインシュタイン凝縮

目で見る極微な力学の世界

藪 博之（都立大理）

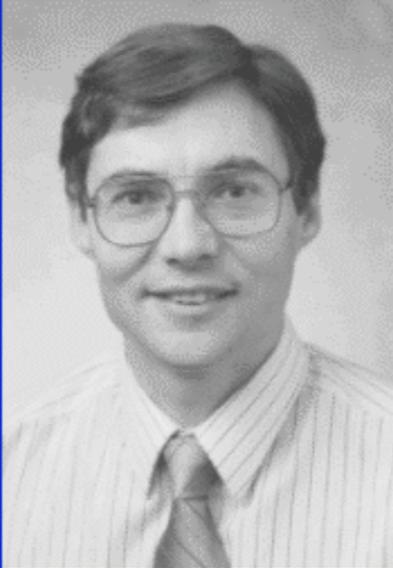


ボース・アインシュタイン凝縮

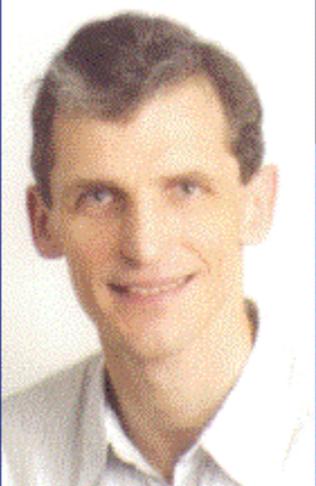
BEC Physicists Win the
2001 Nobel Prize!



Eric Cornell



Carl Wieman



Wolfgang Ketterle

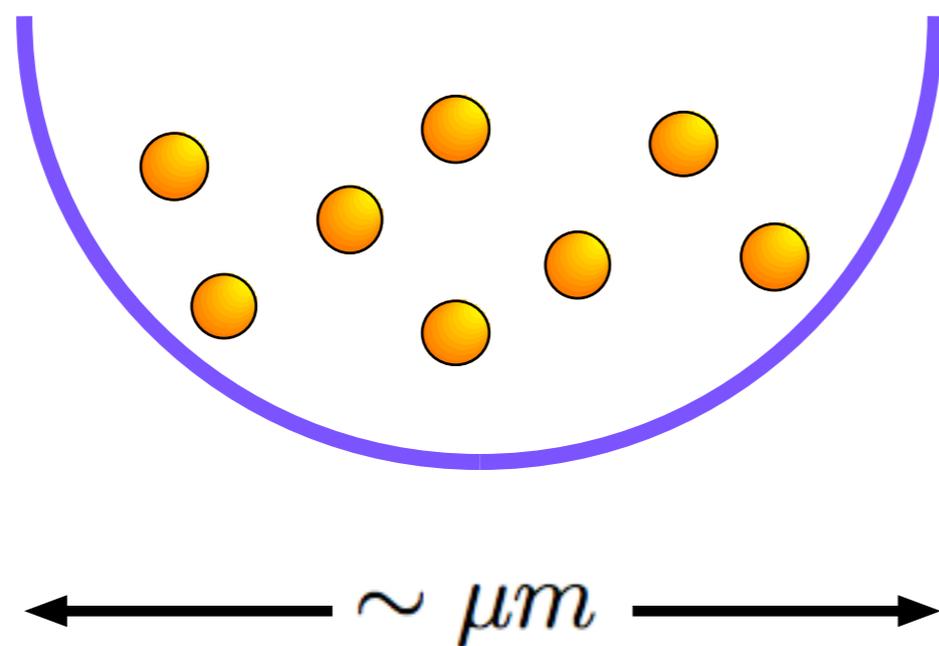


- Eric Cornell (University of Colorado, JILA, Boulder, CO, USA)
- Carl Wieman (University of Colorado, JILA, Boulder, CO, USA)
- Wolfgang Ketterle (Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA)

BEC (Bose-Einstein Condensate)

ボース・アインシュタイン凝縮 (実験) 1

- 原子気体の閉じこめ (レーザー・磁場)



($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{mm}$)

原子個数 : $N = 10^3 \sim 10^9$ 個

原子 : H, He, Li, Na, K, Rb

(ボース粒子 : 後で説明)

H : 水素

He : ヘリウム

Li : リチウム

Na : ナトリウム

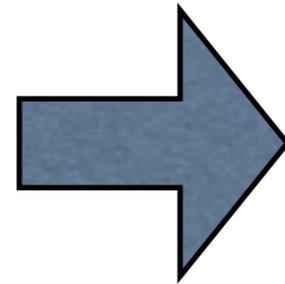
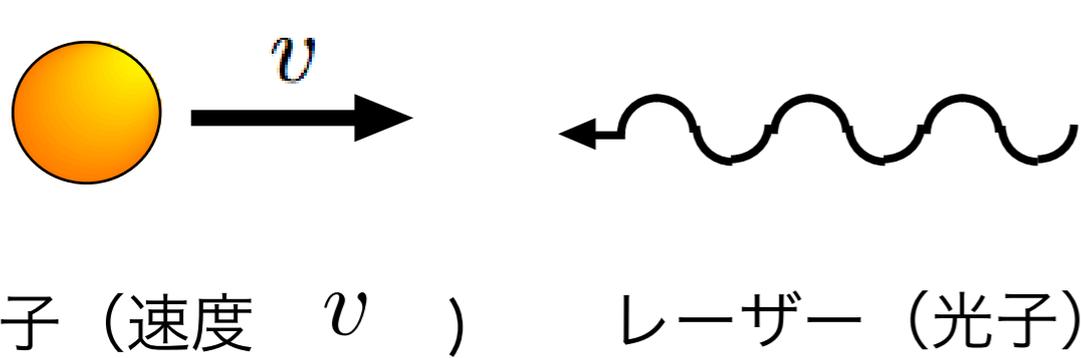
K : カリウム

Rb : ルビジウム

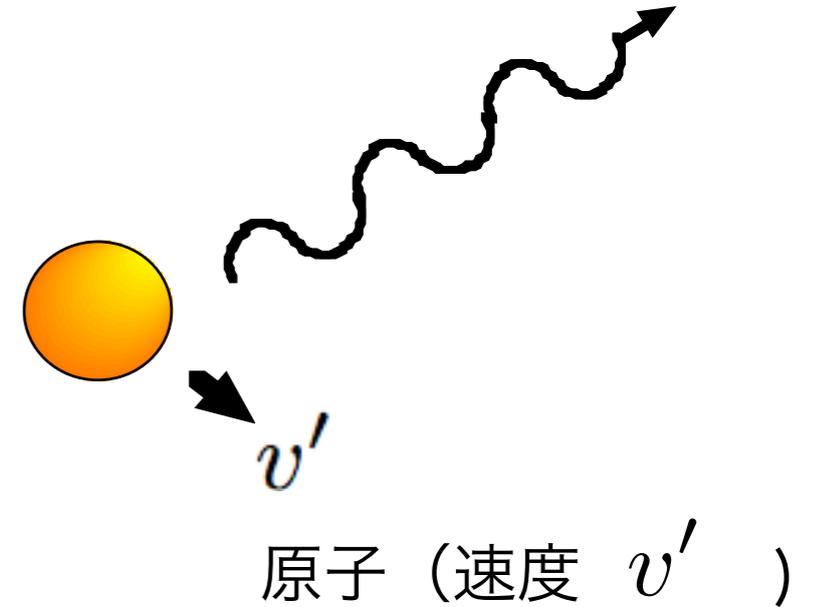
ボース・アインシュタイン凝縮 (実験) 2

- 原子気体の冷却 (レーザー・磁場)

衝突前



衝突後



- 原子にレーザーを衝突させて減速 = 冷却 (レーザー冷却の原理)

- 極超低温 $T = \mu\text{K} \sim \text{nK}$ にまで冷却!

☆1997年度のノーベル物理学賞
レーザー冷却

$$1 \mu\text{K} = 10^{-6} \text{ K}$$

$$1 \text{ nK} = 10^{-9} \text{ K}$$

$$0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$$



S. Chu



C. Cohen-Tannoudji

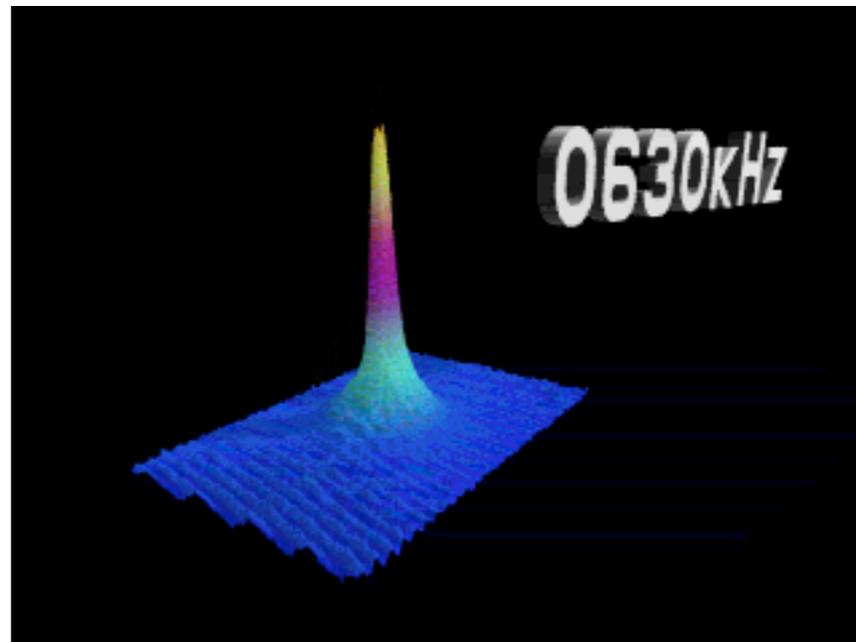


W.D. Phillips

ボース・アインシュタイン凝縮 (movie)

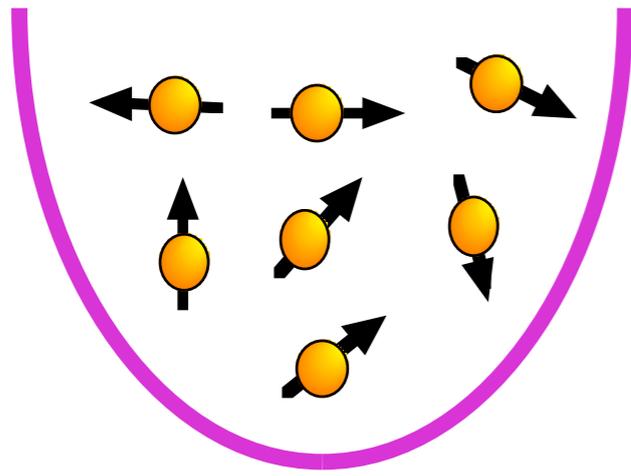
MITグループの実験 (Na原子)

- ・ 閉じこめられた原子の密度分布 (平面への射影) の冷却による変化



ボース・アインシュタイン凝縮 (実験) 3

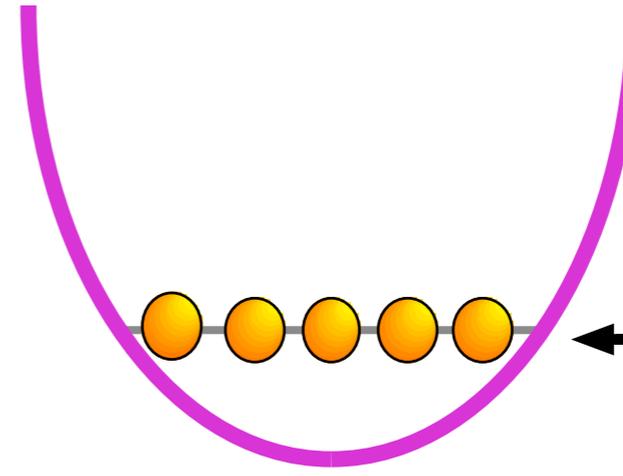
高温状態



$$T > T_C$$

原子はでたらめな運動状態
(熱運動)

低温状態



最低エネルギーの
ミクロな状態

$$T < T_C$$

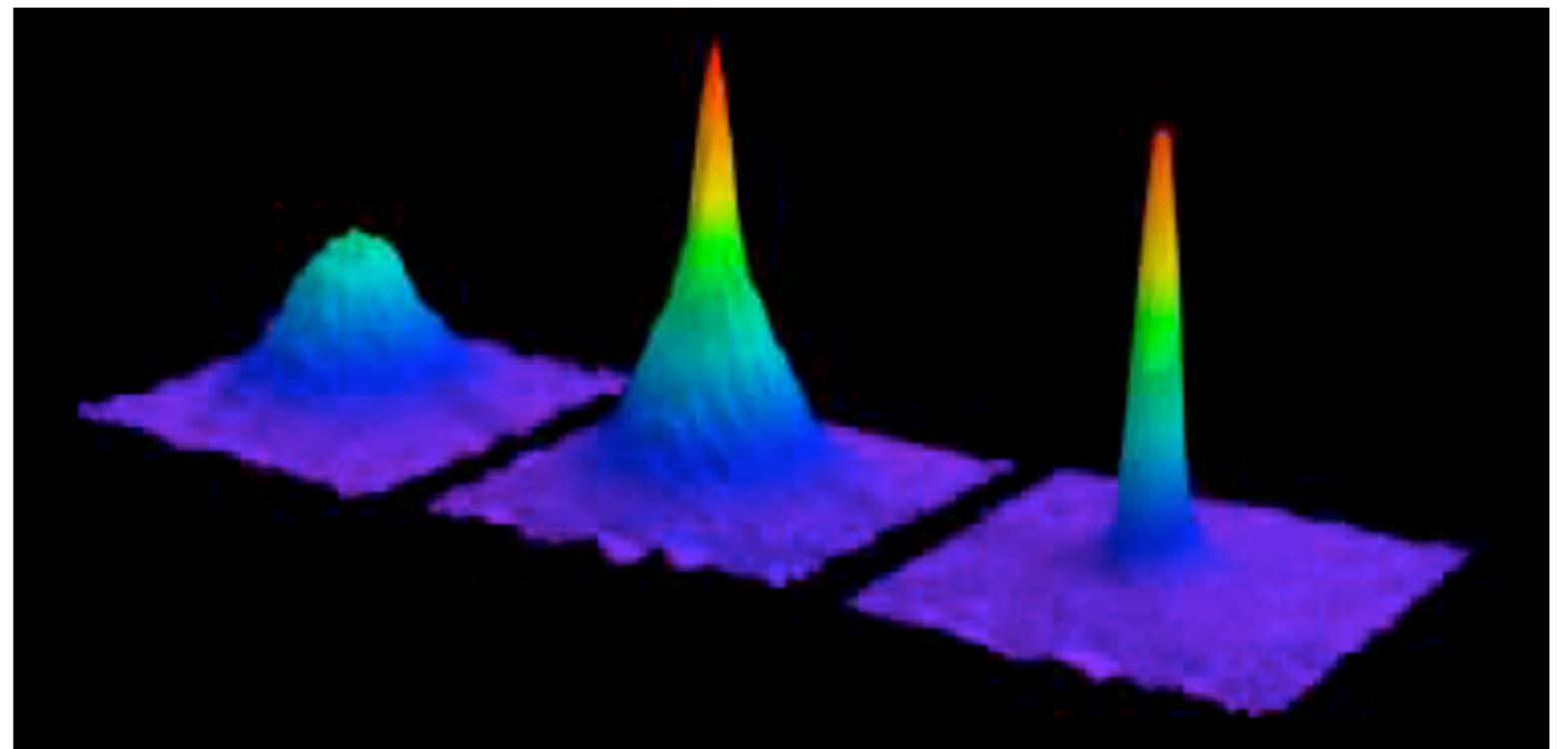
ほぼすべての原子が同じ状態
(ボース・アインシュタイン凝縮)

T_C : BECの転移温度

T_C は原子の質量や個数で異なる

先程のMIT実験では

$$T_C \sim 2 \mu K$$



ボース・アインシュタイン凝縮のおもしろいところ

ボース・アインシュタイン凝縮では
ミクロな物理がマクロな世界で見えている！

◎マクロな世界（長さのスケール $\text{mm} \sim \mu\text{m}$ ）

- ・ 日常の物理世界（高校物理）
- ・ 古典物理学（17C~19C）

◎マクロな世界（長さのスケール $\sim \text{nm}$ ）

- ・ 原子（あるいはそれ以下）の世界
- ・ 量子物理学（20C）

☆ミクロの世界は他にも時々マクロな世界で垣間見える
（超伝導・超流動 などなど）

原子気体のボース・アインシュタイン凝縮は、ミクロな法則を非常に純粋に
映し出しているという点で独特な現象である

ボース・アインシュタイン凝縮とは何か

- ・ どうして、すべての原子が同じ状態になるのか？
- ・ それはどのような状態なのか？

☆それに答えるための物理理論

- ・ 量子力学 ミクロな世界の力学
- ・ 統計力学 多数の粒子の全体の振る舞いを記述

※これらの理論の特色

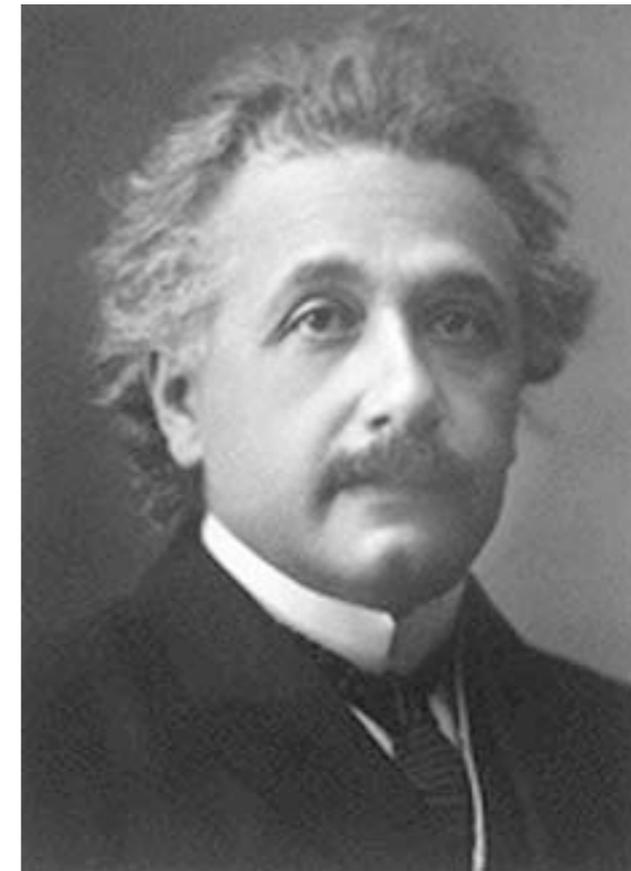
確率の考え方を用いる

ボース・アインシュタイン凝縮 (History)

- 1924 光子の統計に関する論文 (S.-N. Bose)
- 1924 ボースの理論を原子気体に適用。ボース・アインシュタイン凝縮を予想 (A. Einstein)
- 1997 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の実験的成功



Bose, Satyendranath
(1894-1974)

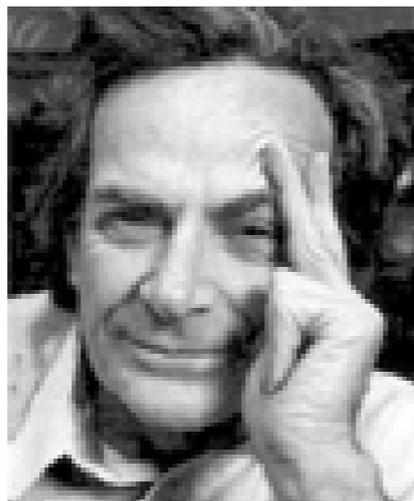


Einstein, Albert
(1879-1955)

原子事実（原子仮説）

もし何か大異変が起こって、科学知識が全部なくなってしまう、たった一つの文章だけしか次の時代の生物に伝えられないということになったとしたら、最小の語数で最大の情報を与えるのはどんなことだろうか。私の考えでは、それは原子仮説だろうと思う（R.P. Feynman, ファインマン物理学より）

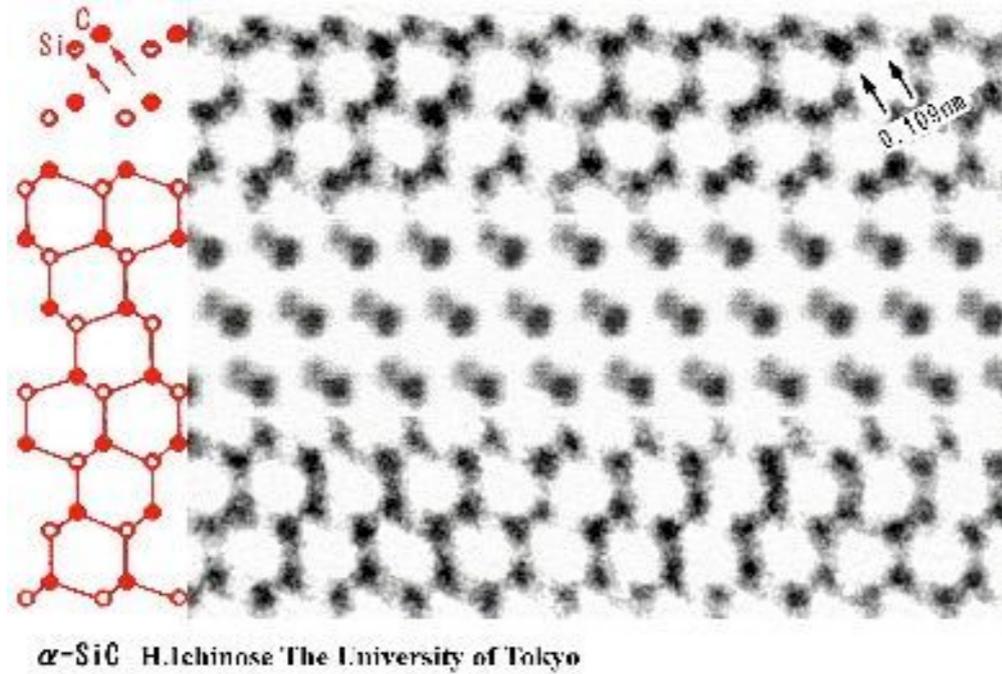
すべてのものはアトム—永遠に動き回っている小さな粒で、近い距離ではお互いに引きあうが、あまり近づくとお互いに反発する—からできている



Richard P. Feynman

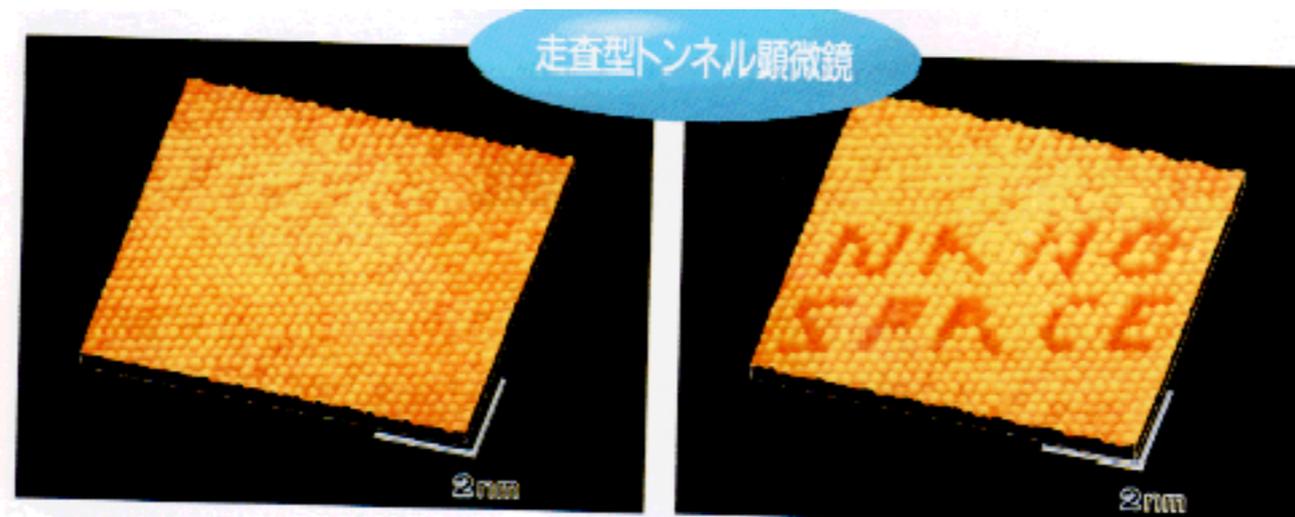
原子の存在の可視化

- 電子顕微鏡による結晶構造



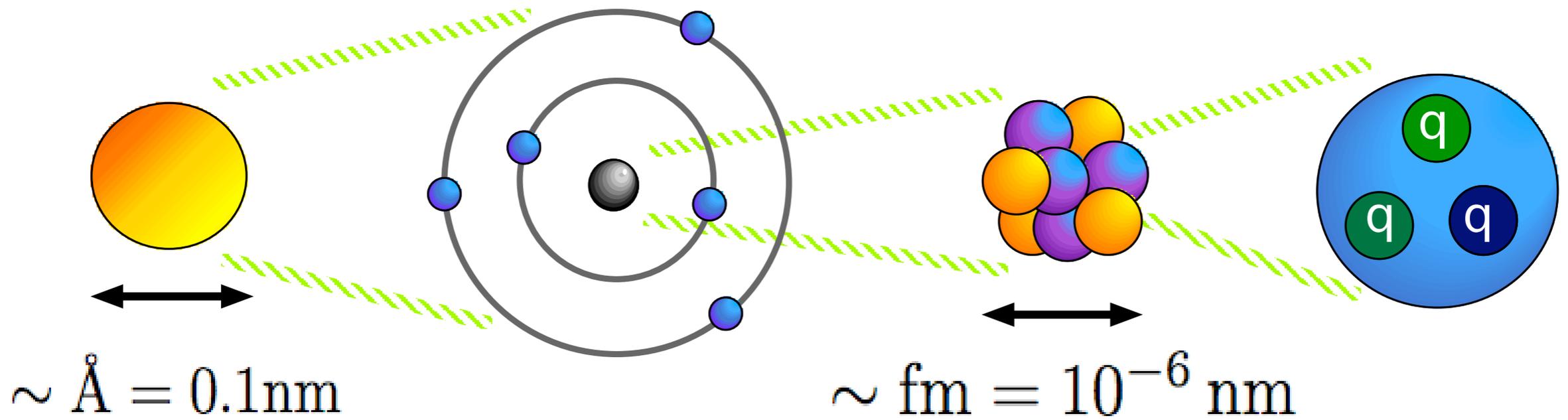
超高压電子顕微鏡によるSiC結晶
(東京大学)

- ナノテクノロジー : 原子レベルでの制御技術



原子で書いた世界最小の文字
(日立製作所 中央研究所)

原子とその構造 (物質の階層構造)



原子

原子の構造

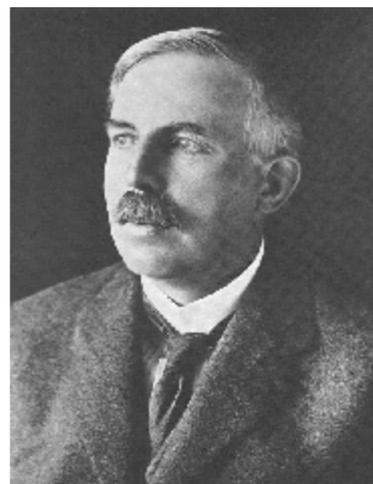
原子核

核子の構造

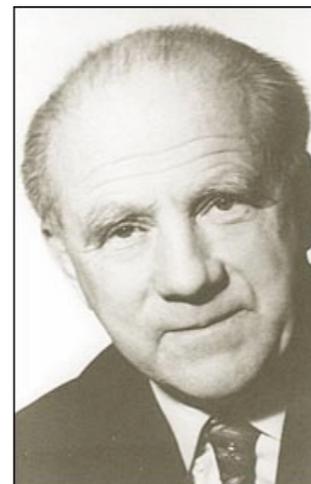
重い原子核の周りを
軽い電子が運動

原子核は核子から
構成される

核子はクォークから
構成される



E. Rutherford



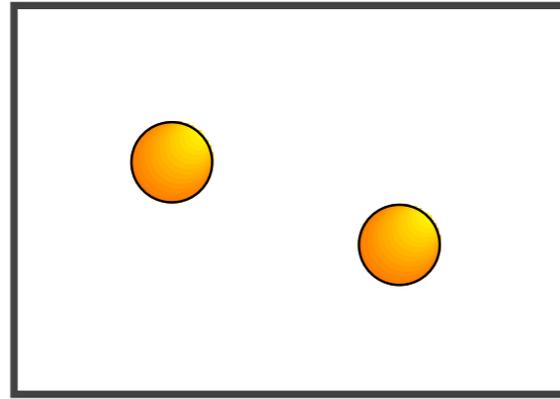
W. Heisenberg



M. Gell-Mann

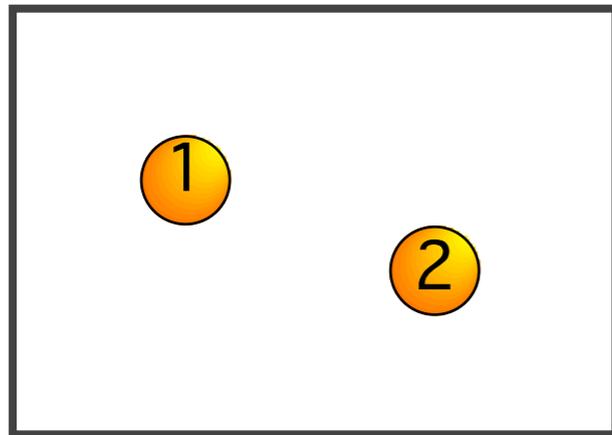
量子力学における同種粒子の性質

◎同じ粒子（原子）が2個以上ある状態を考える

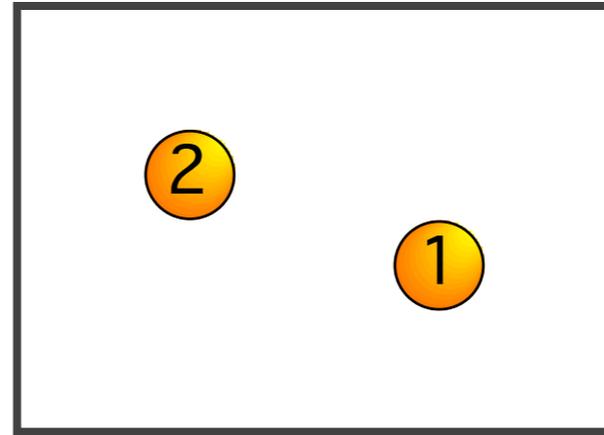


(同種粒子他体系)

1) 同種粒子はお互いに区別できない! ?



と



は同じ状態!

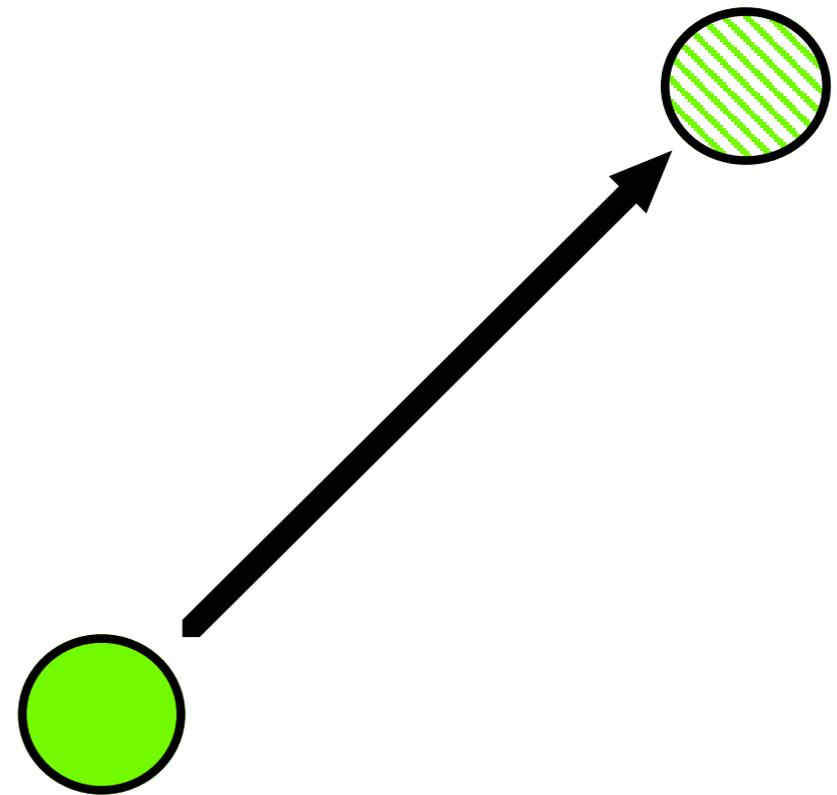
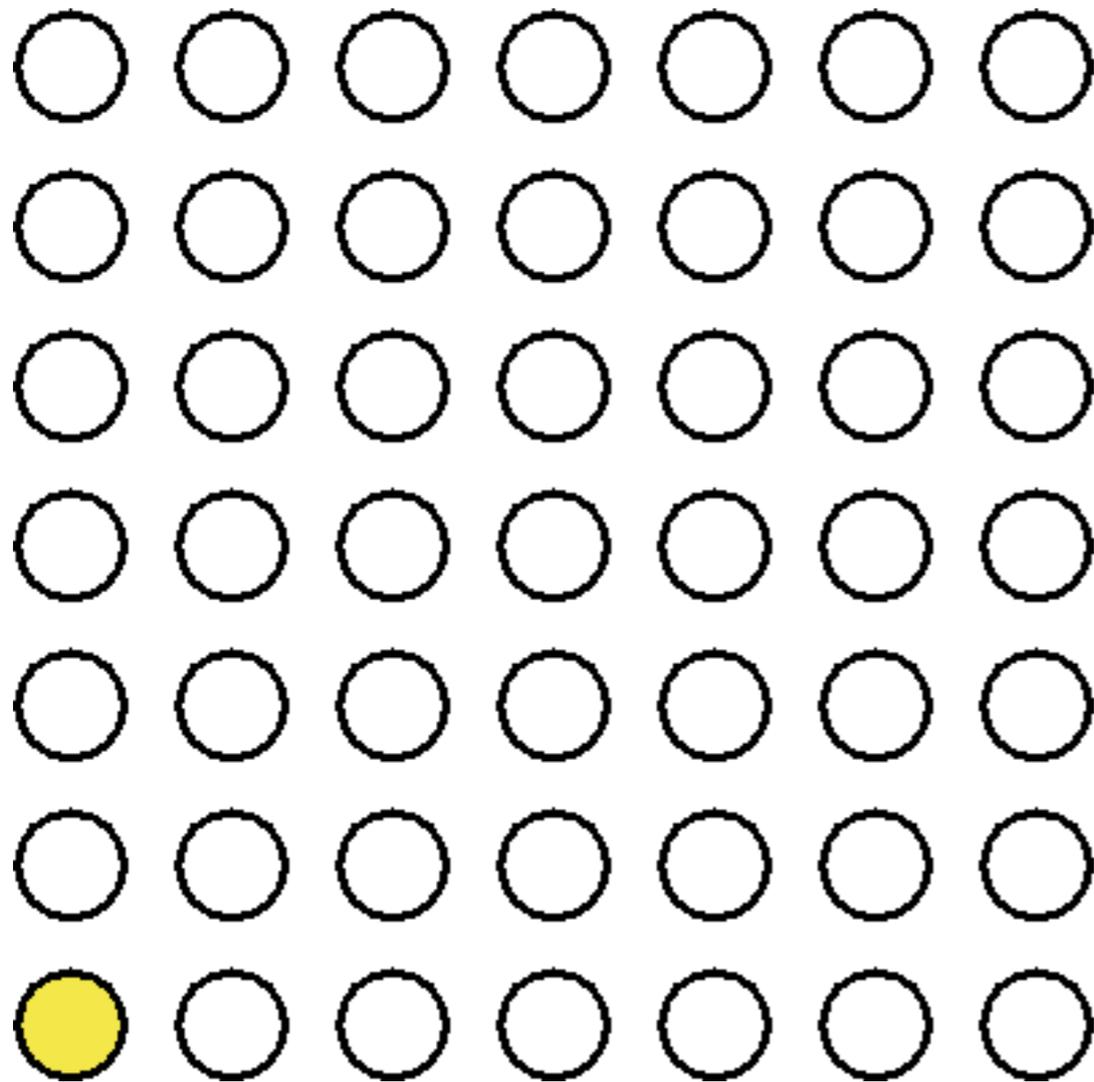
2) ボース粒子とフェルミ粒子

- ・ボース粒子 : 2個以上の粒子が同じ状態をとれる
- ・フェルミ粒子 : 一つの状態を1個の粒子しかとれない

量子力学での粒子の考え方

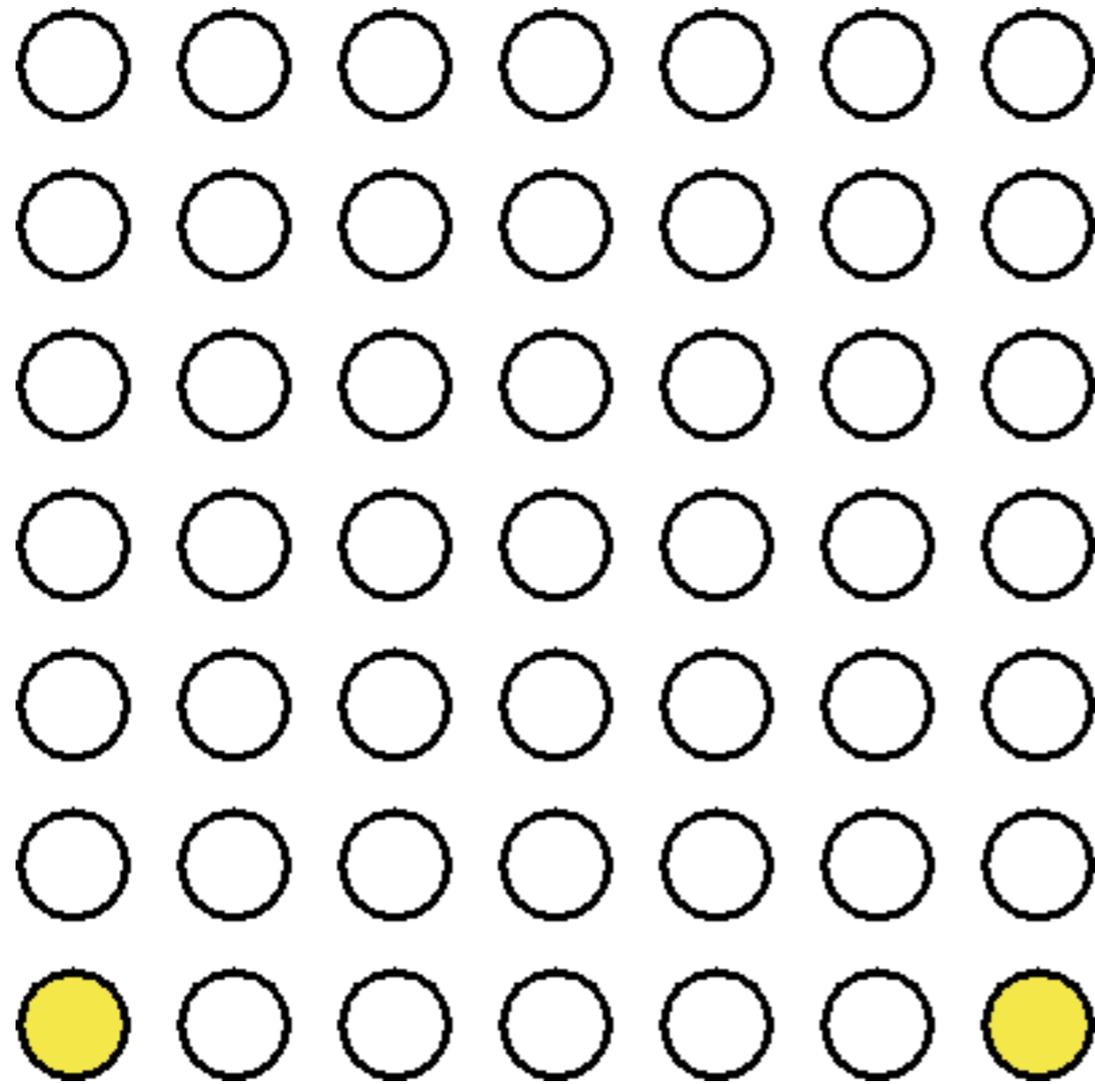
電光掲示板の電球と類似

- ・ 電球オン 粒子が存在
- ・ 電球オフ 粒子が不在

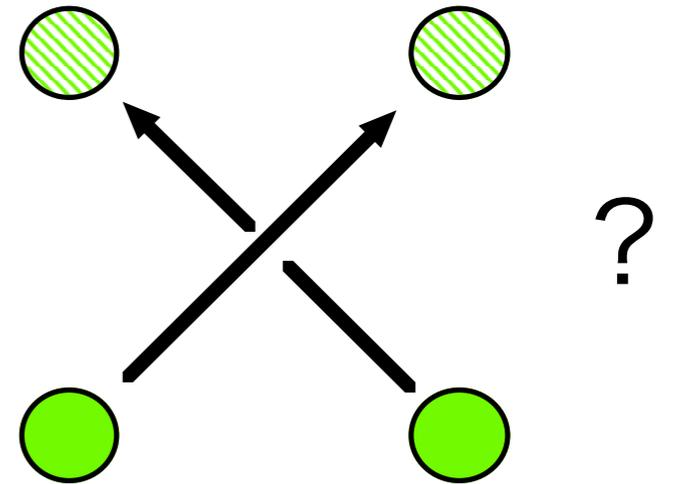


右上に動く粒子

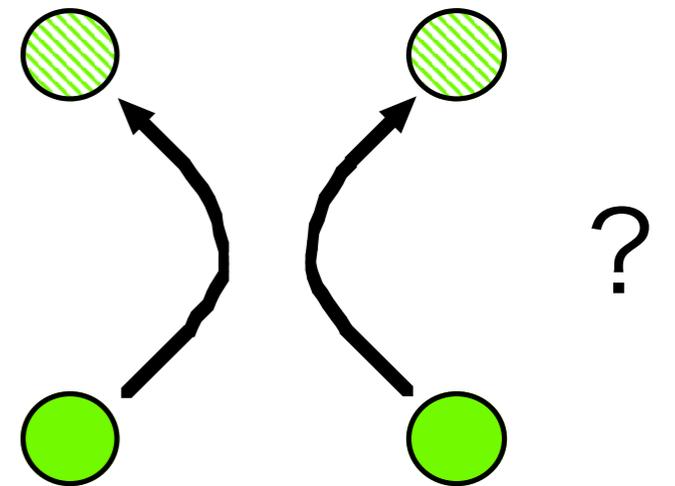
電光掲示板での粒子の衝突 (ボース粒子の場合)



起こったのは、



あるいは



このふたつを区別することは無意味
2つの電球がついているだけである

これが、同種粒子が区別
できないという意味

ボース粒子とフェルミ粒子

ボース粒子：光子、水素原子などの原子

フェルミ粒子：電子、核子、三重水素などの原子

※フェルミ粒子が偶数個くっつくとボース粒子になる

原子をつくるフェルミ粒子は、電子+陽子+中性子

電子数=陽子数（中性原子）なので中性子数が偶数の原子はボース粒子

ボース・アインシュタイン凝縮を起こすのはボース粒子

たくさんのボース粒子（多体系）の性質

ボース粒子はお互いに引きつけあい、同じ状態に入ろうとする♥♥

（これによりボース・アインシュタイン凝縮がおこる）

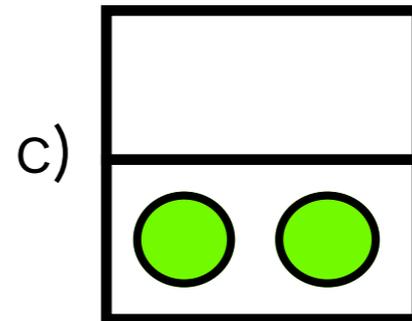
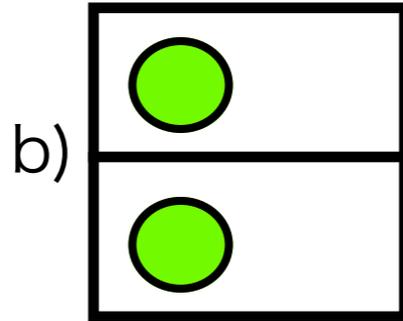
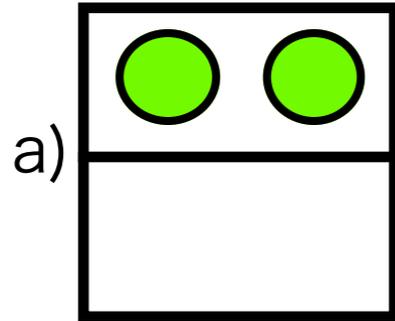
このことは、確率を用いた考え方により理解できる

2個の状態（部屋）に2個の粒子の場合



1) ボース粒子（電球）の場合

可能な状態：
(3通り)



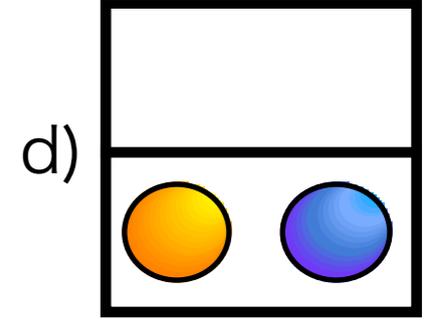
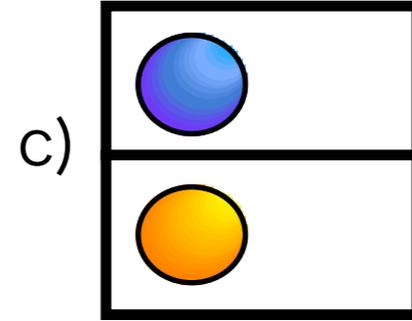
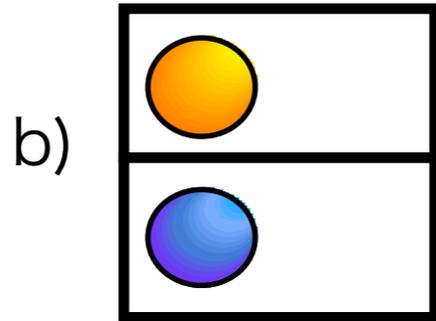
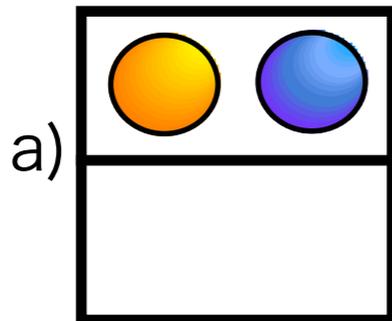
同じ状態に2個ある状態：a) と c)

☆同じ状態にある確率：

$$P_{\text{bose}} = \frac{2}{3}$$

2) 区別できる粒子（球）の場合

可能な状態：
(4通り)



同じ状態に2個ある状態：a) と d)

☆同じ状態にある確率：

$$P_{\text{norm}} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{P_{\text{bose}}}{P_{\text{norm}}} = \frac{4}{3} > 1 \quad \text{: 同じ状態にある確率はボース粒子の方が高い!}$$

m個の粒子をN個の状態に詰める場合

$$P_{\text{norm}} = N \frac{1}{N!} \quad P_{\text{bose}} = N \frac{m!(N-1)!}{(N+m-1)!}$$

計算結果

N	$P_{\text{bose}}/P_{\text{norm}}$
10	108250.8822
100	2345533.974
1000	3469615.719
10000	3612512.232

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P_{\text{bose}}}{P_{\text{norm}}} = m!$$

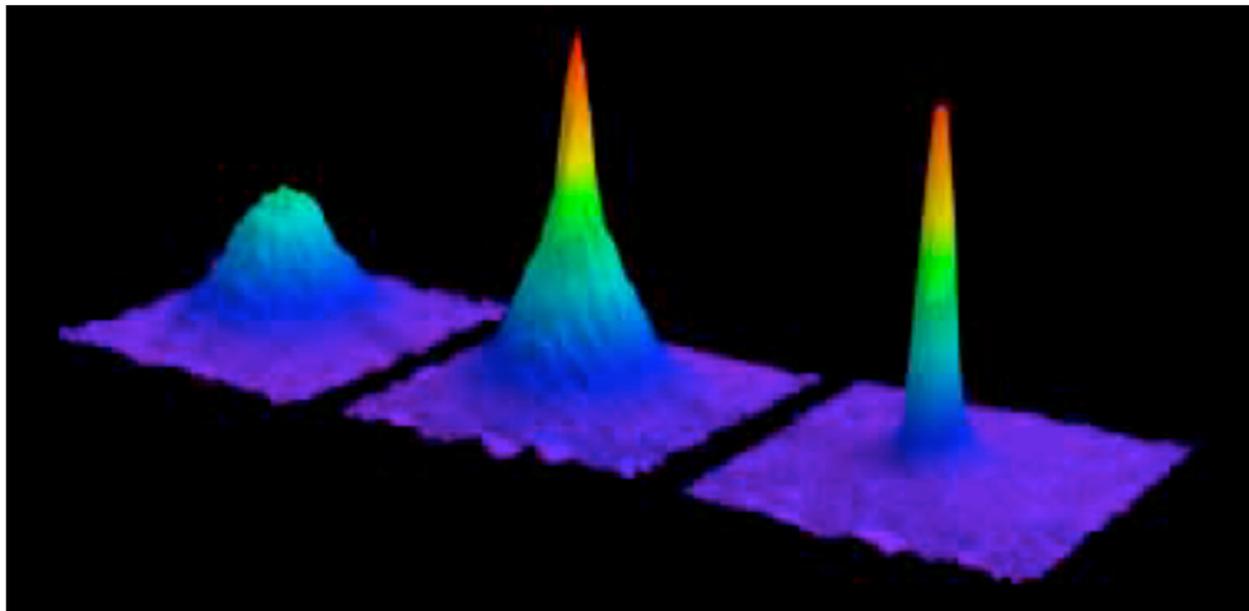
$$10! = 3628800$$

状態数・個数が大きければ、すべてのボース粒子が同じ状態を取る確率は非常に大きくなる

ボース粒子とボース・アインシュタイン凝縮 まとめ

- ♡ボース粒子は引きつけあい、同じ状態に入ろうとする
- ♠有限温度では熱運動によりバラバラな状態になるろうとする

- ・高温 $T > T_C$ では熱運動により普通の気体
- ・低温 $T < T_C$ では引きつけあう力が打ち勝ってボース粒子は同じ状態になる
(ボース・アインシュタイン凝縮)



- ・フェルミ粒子は低温でも凝縮しない

どんな状態に凝縮？

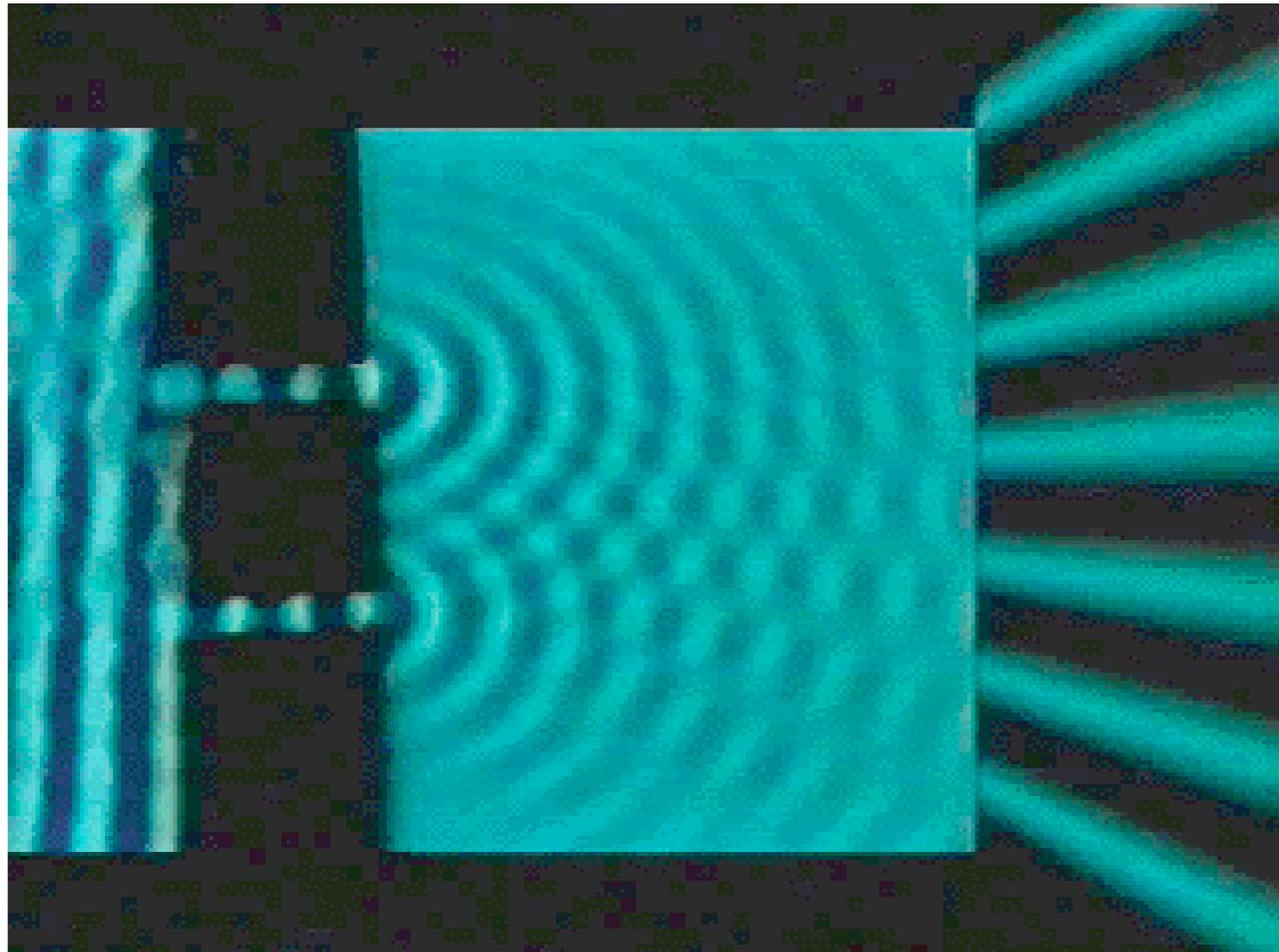
- ・量子力学の状態の理解が必要

量子力学における状態—波動性と粒子性

現代物理学における光の姿：

光は波動性（電磁波）と粒子性（光子）を合わせ持つ

・ 光の波動性（干渉実験）

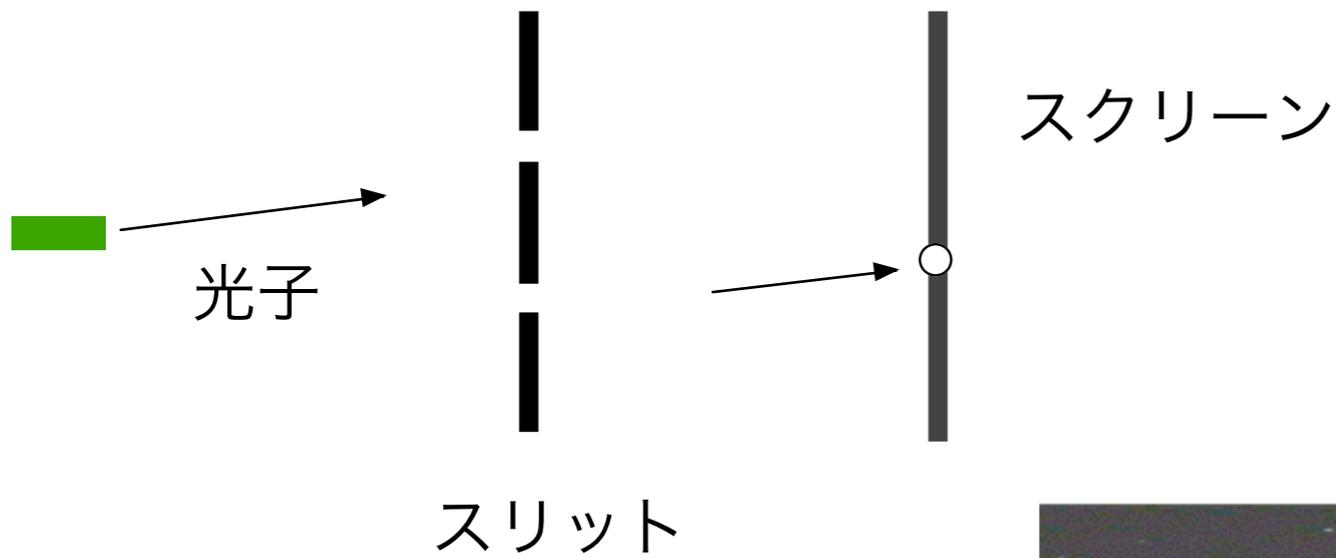


二つのスリットを通った波は干渉し、
強めあったり弱めあったりする



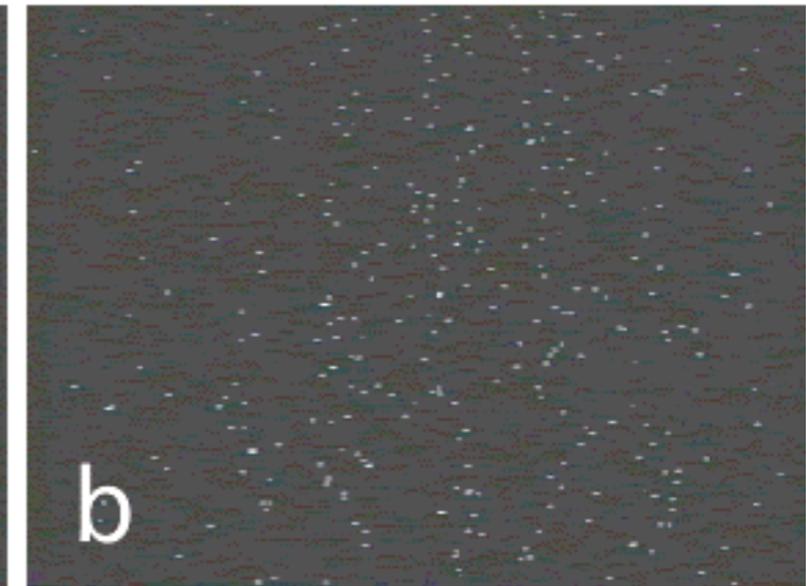
C. Huygens

・ 光の粒子性 (干渉実験)



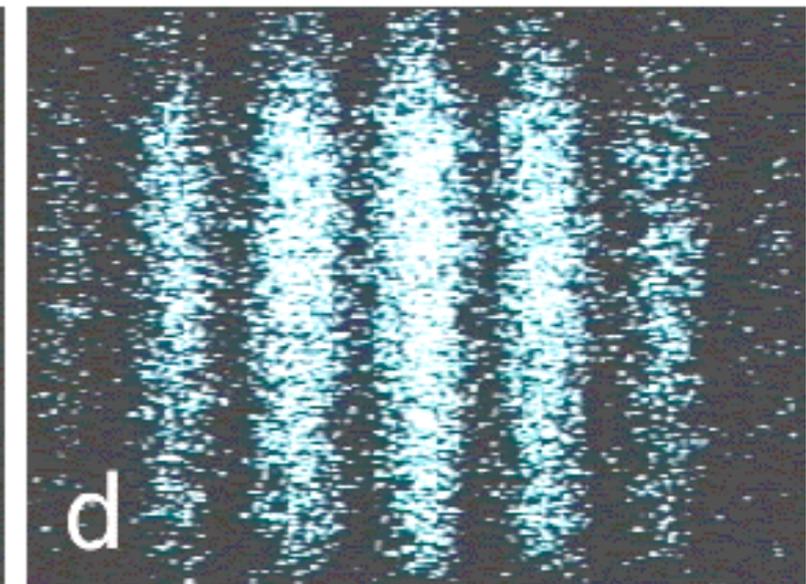
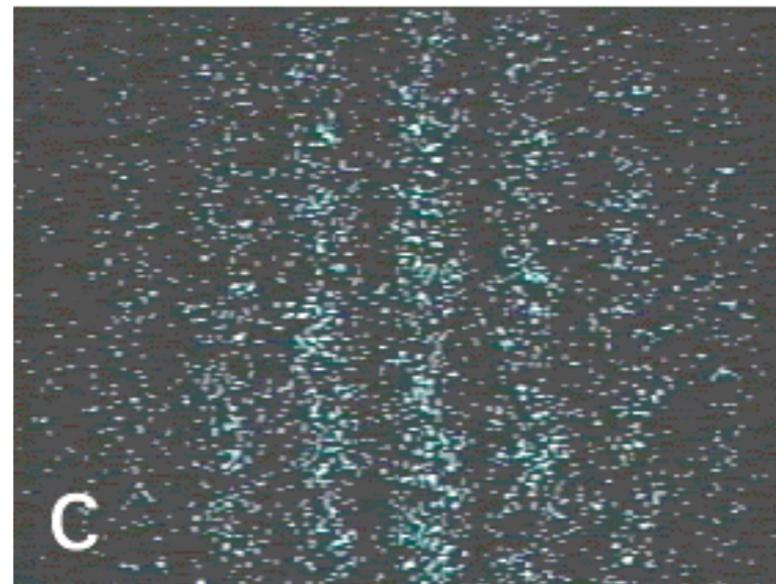
A. Einstein

a 光子がスクリーンに衝突してできた点々。光子の到達点はランダムに分布。



b-c 実験を繰り返して、光子の到達点を重ねて記録

d 光の干渉パターンが再現



(浜松ホトニクス)

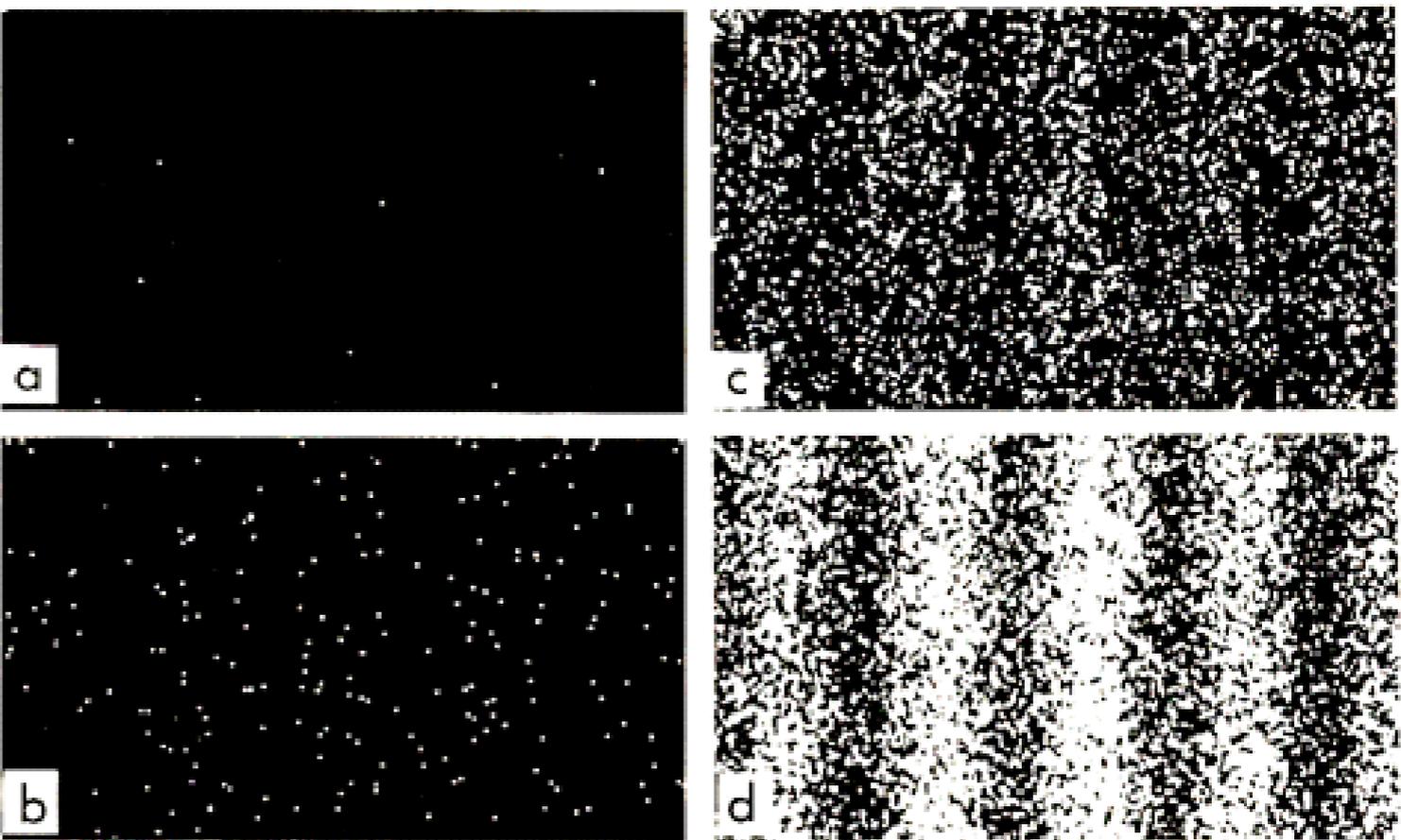
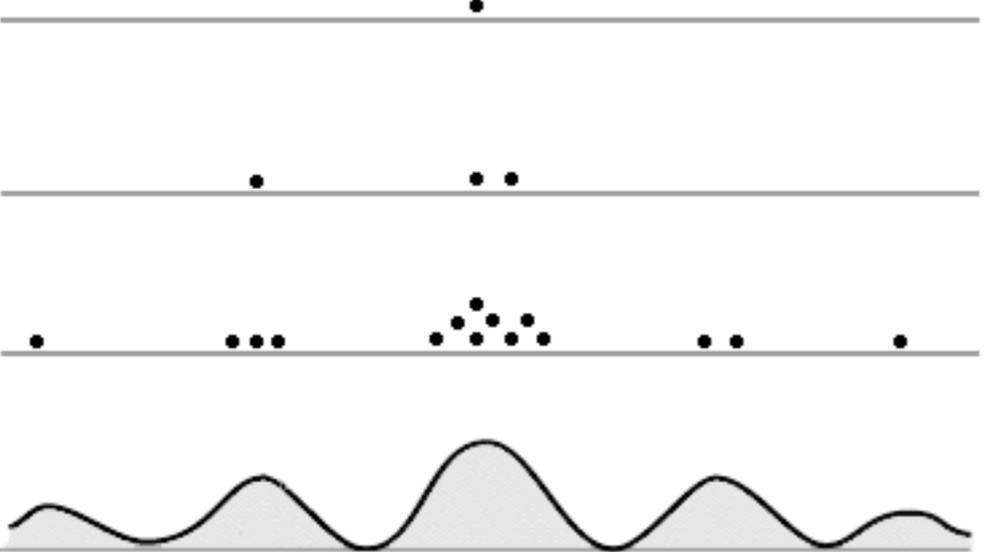
量子力学における状態一波動性と粒子性



L. de Broglie

物質波：物質粒子も波動性と
粒子性を合わせ持つ
(電子、核子、原子 等々)

電子線の干渉実験 (光子との類似性に注意)



(外村彰氏による)

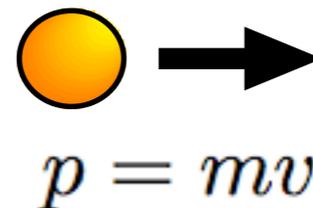
物質波における粒子性・波動性の関係

・粒子性

(m 質量)

運動量：
$$p = mv$$

エネルギー：
$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$$

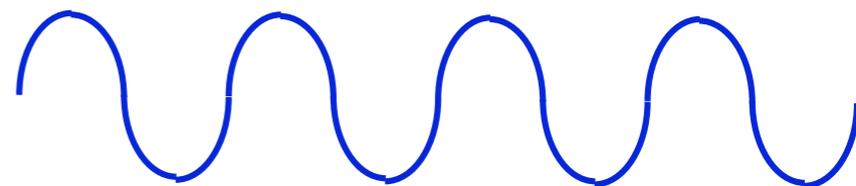


・波動性

$$\cos(kx - \omega t)$$

波数 (空間的周期性)： k

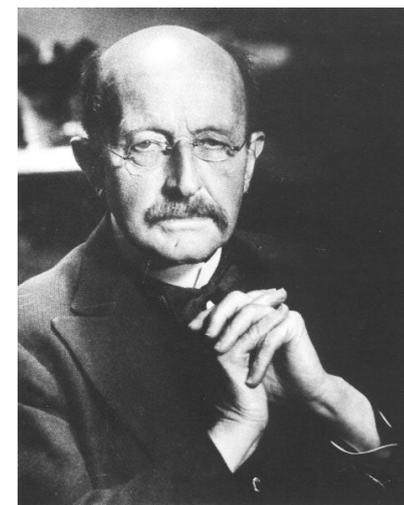
振動数 (時間的周期性)： ω



◎物質波における粒子性と波動性の関係式

$$p = \hbar k \quad E = \hbar\omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

$$\hbar = 1.054571596 \times 10^{-34} \text{ Js} \quad (\text{プランク定数})$$



M. Planck

ボース・アインシュタイン凝縮体の波動性

(MITグループによる実験)

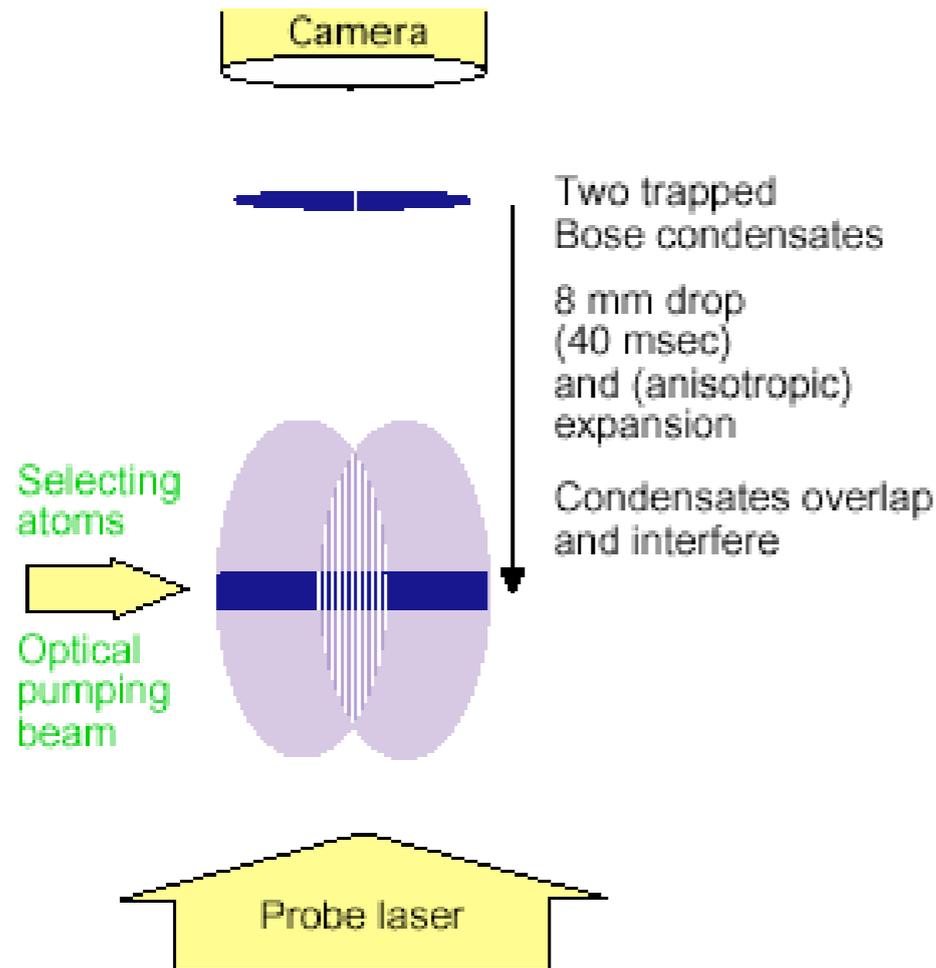
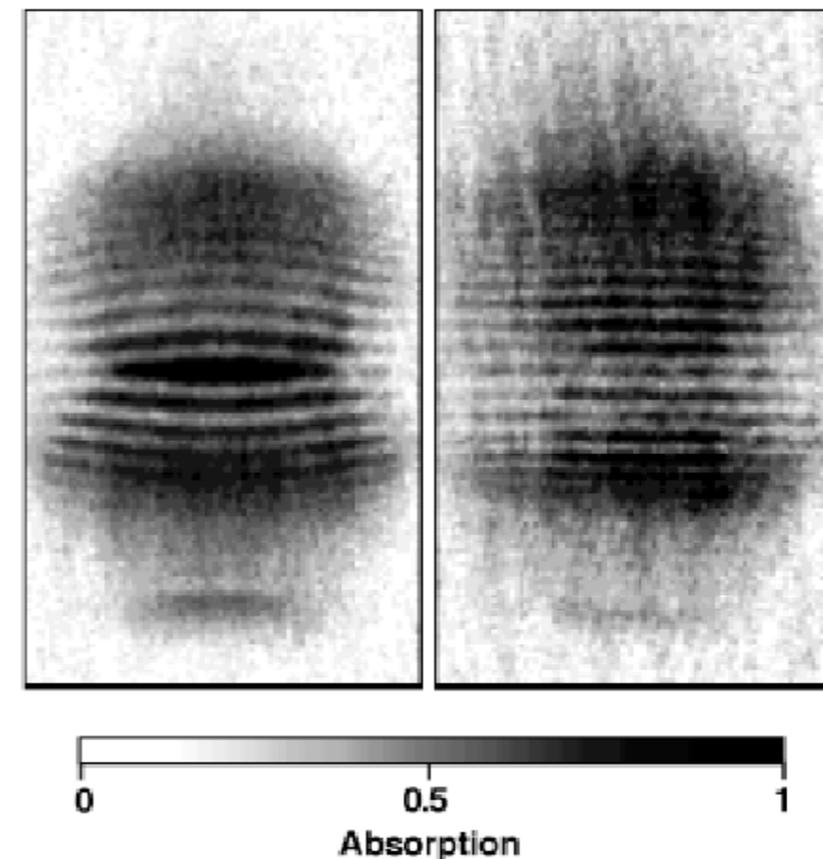
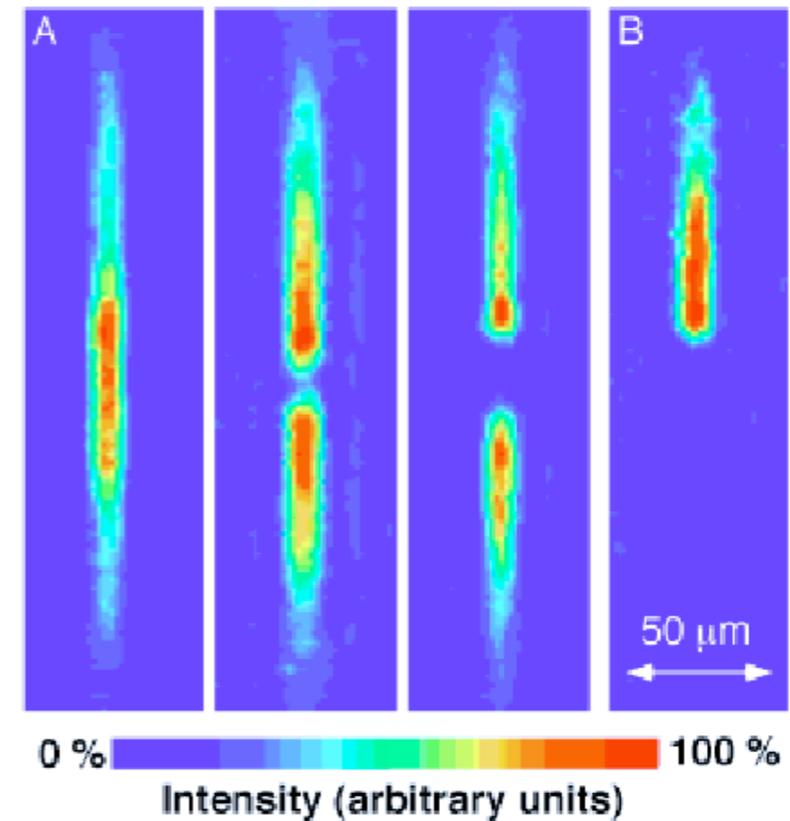


Fig. 13. Schematic setup for the observation of the interference of two Bose condensates, created in a double well potential. The two condensates were separated by a laser beam which exerted a repulsive force on the atoms. After switching off the trap, the condensates were accelerated by gravity, expanded ballistically, and overlapped. In the overlap region, a high-contrast interference pattern was observed by using absorption imaging. An additional laser beam selected absorbing atoms in a thin layer by optical pumping. This tomographic method prevented blurring of the interference pattern due to integration along the probe laser beam.

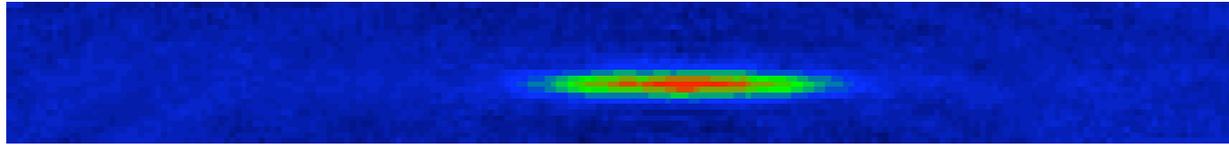
- 凝縮体を二つに分離する
- 閉じこめを無くして落下・膨張させる
- 重なりあう部分を観測すると干渉縞が見える



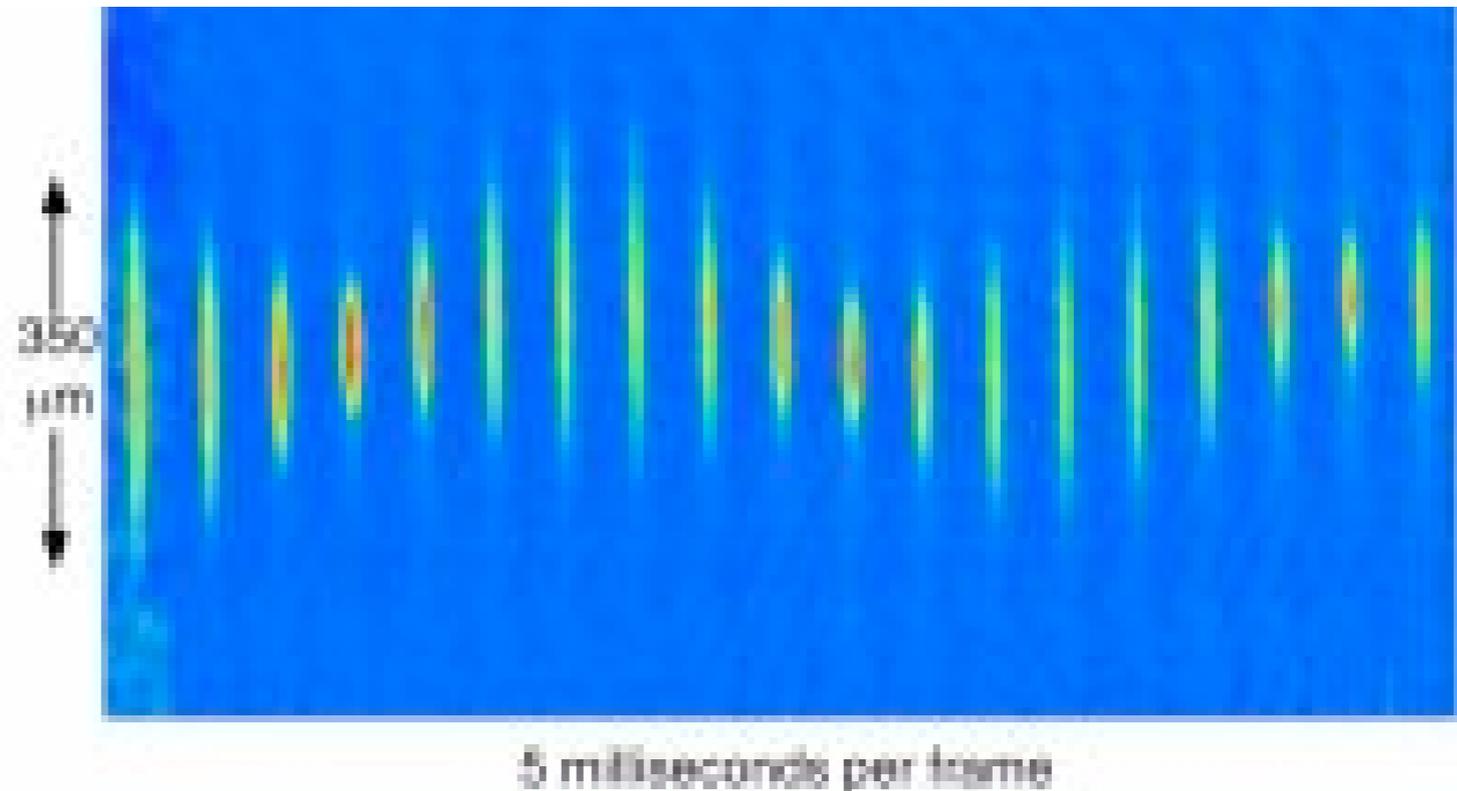
これにより、凝縮体が量子力学的波動性をもつ状態であることがわかる

☆凝縮体の集団振動状態

(MIT group)

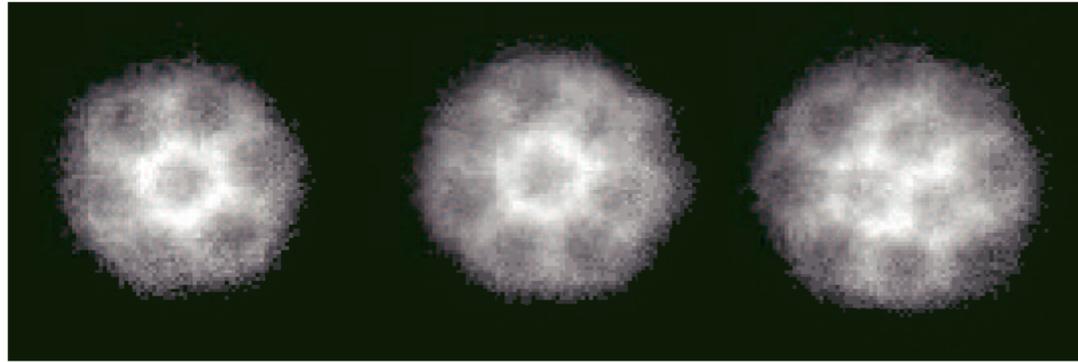


- 凝縮体に外から力を加えて振動させる
- 原子核の振動モードと理論的に関係

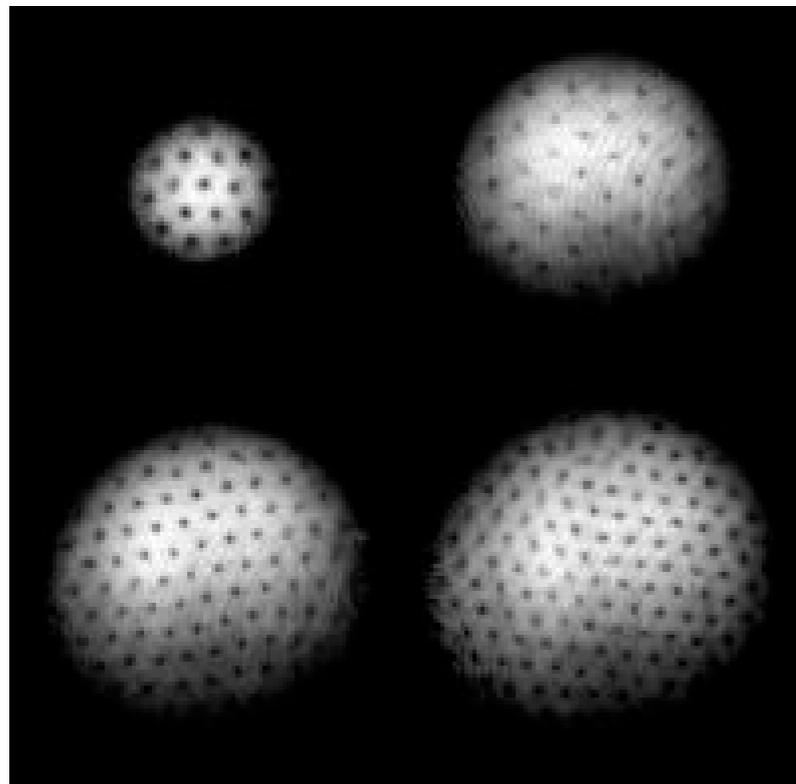


ボース・アインシュタイン凝縮体を使った実験 2

☆量子渦

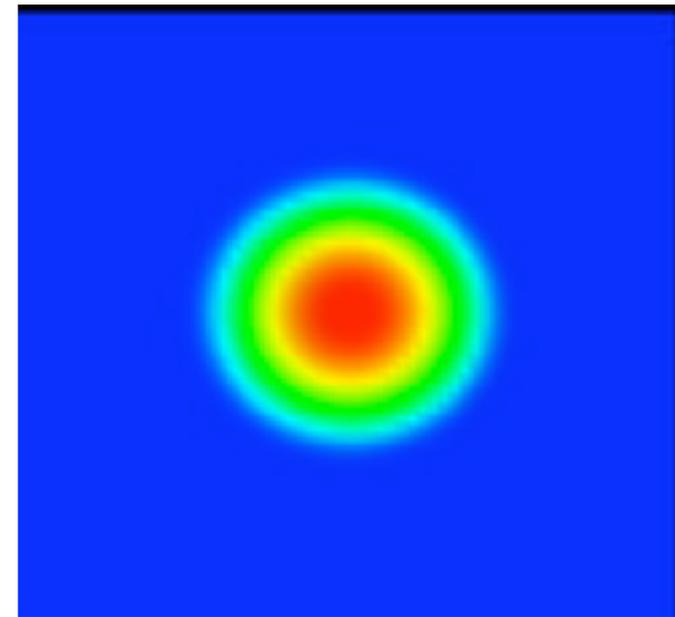


(ENSグループによる実験)



(MITグループによる実験)

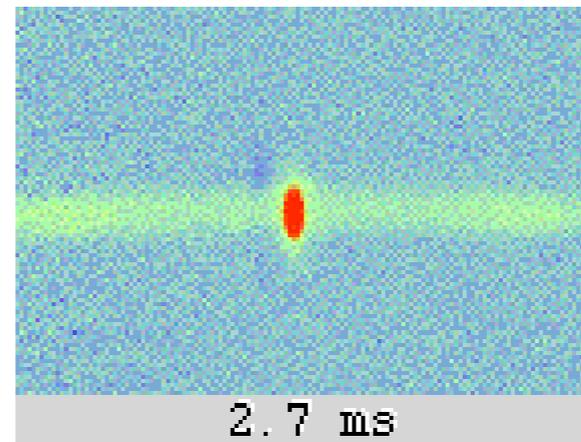
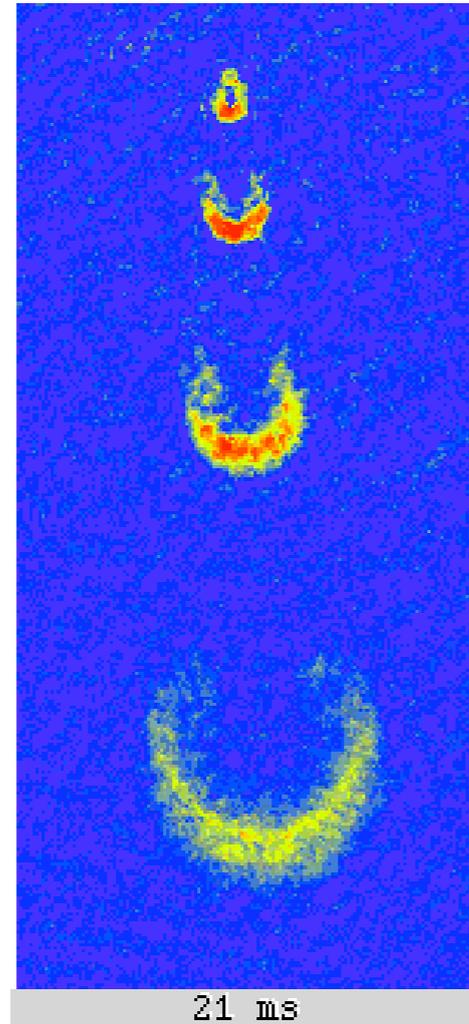
☆量子渦形成の理論的シミュレーション



(大阪市大坪田氏らによる結果)

ボース・アインシュタイン凝縮体を使った実験 3

☆原子線レーザー (MITグループの実験)



凝縮体に運動量を与えてパルス・ビーム
状に外部へ発射させる

まとめ

- ボース・アインシュタイン凝縮体は、非常に多くの原子（ボース粒子）が互いに引きあう力により量子力学的な波動性をもった同じ状態を取った状態である。
- それにより、ミクロな量子力学の性質が極めて純粋な形でマクロに観測される。（ミスマッチなおもしろさ）
- ボース・アインシュタイン凝縮体の研究は、現在も爆発的に進んでおり、様々なおもしろい現象が発見されるとともに、量子多体系理論の新しい発展が生まれている。