

初めて学ぶ物理学

2007/6/18

量子論

金谷 和至

数理物質科学研究科 物理学専攻

現代物理学の2つの柱

古典物理学（～19世紀）

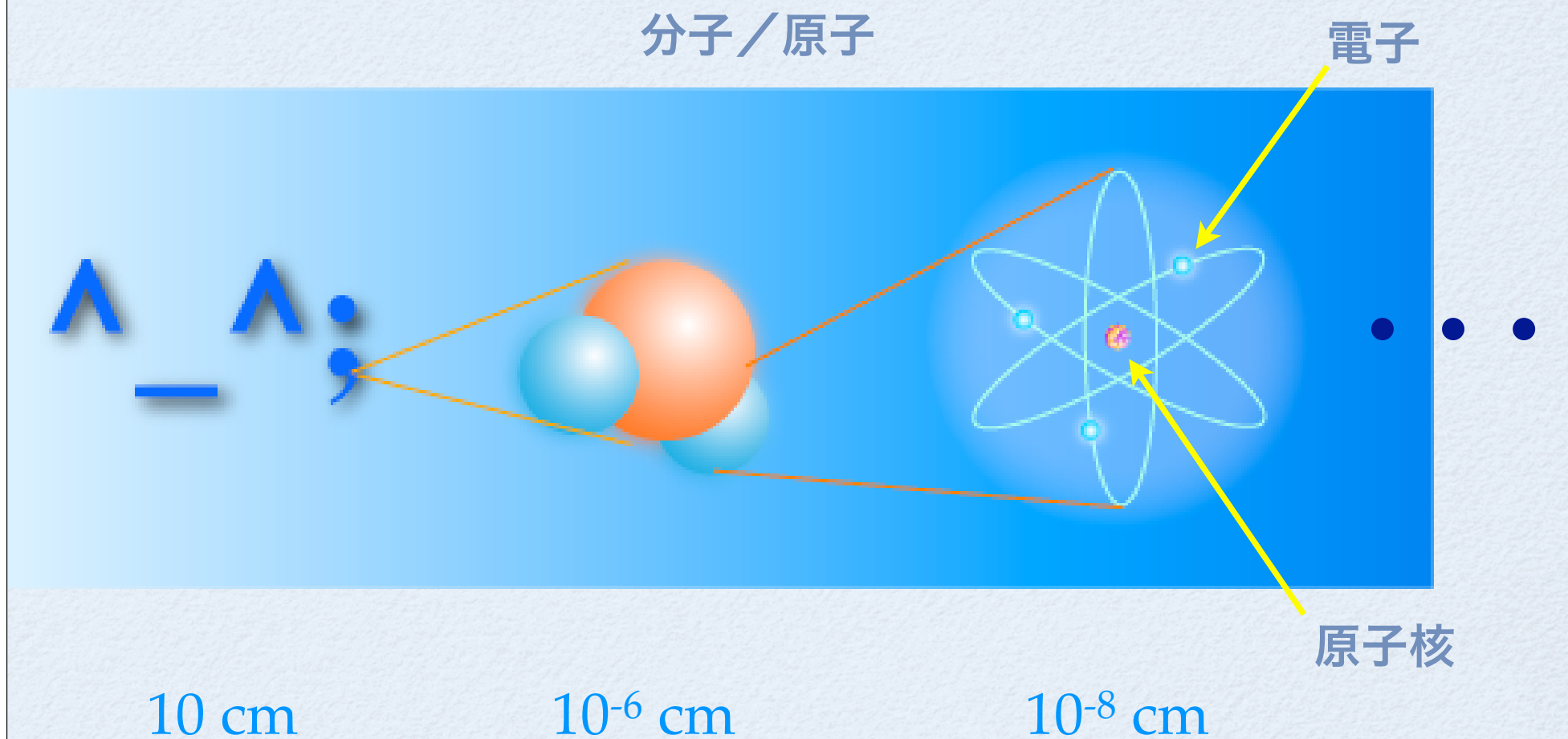
- Newton力学
 - 身の回りの物体の運動
- 電磁気学
 - 電気と磁気
- 熱・統計力学
 - 多数の物体の集団
 - 平均としてどう振る舞うか

現代物理学（20世紀）

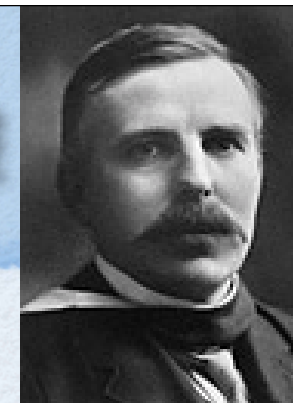
- **相対論**
 - 高速な運動
 - 時間と空間の概念の変革
- **量子論**
 - ミクロな物質の力学
 - 不確定性
 - 状態の概念の変革

人間は直感を自然から学び直さねばならない。

物質はどこまで分解できる？

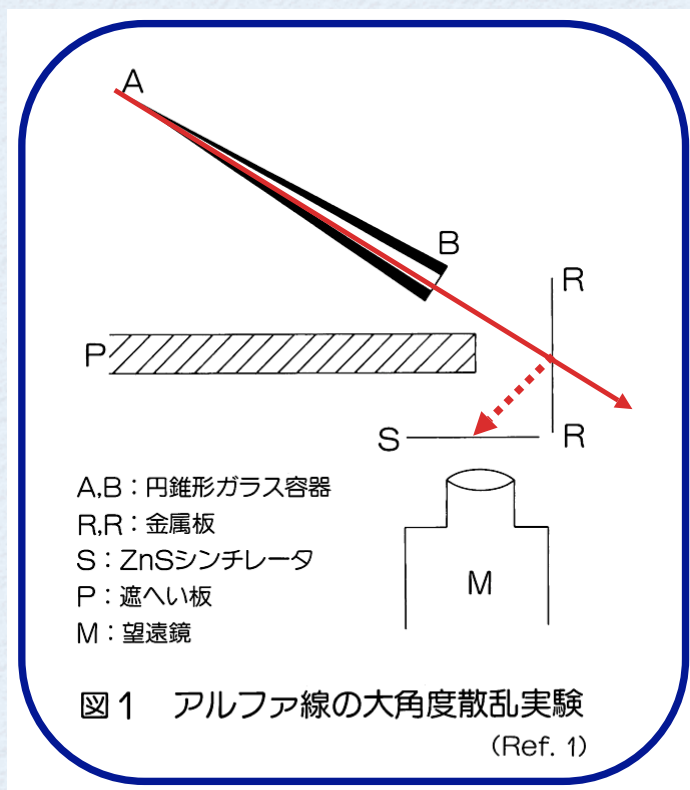


原子の構造を探る：ラザフォードの実験



Ernest Rutherford
(1871-1937)

透過性の強い α 線(陽子線)を薄い金箔にぶつけたら

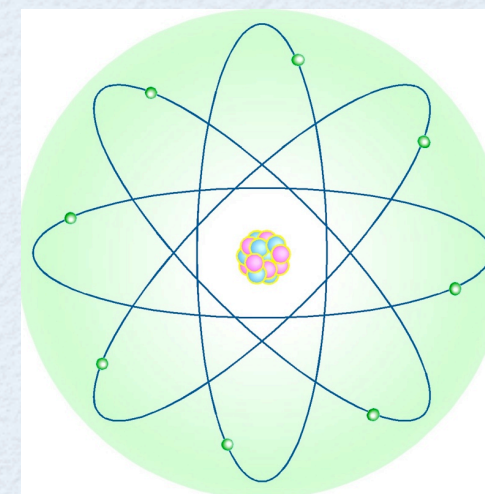


- ❖ ほとんどまっすぐ透過したが
- ❖ たまに後ろに跳ね返った

ちり紙で弾丸が跳ね返された！



ほとんどすかすかだが、
たまに非常に重い固まり
にぶつかる

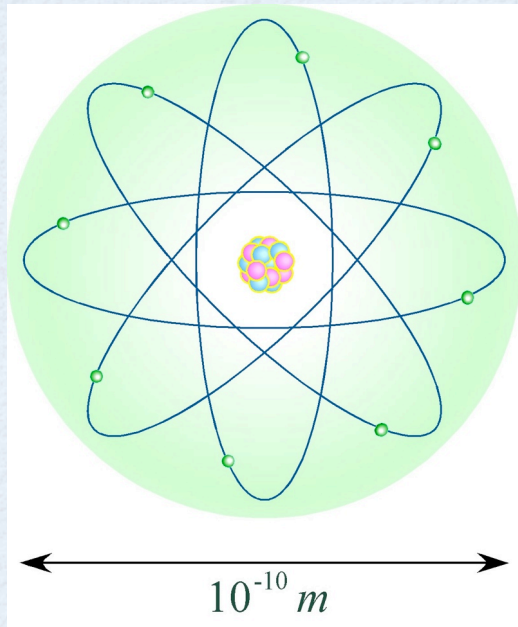


$10^{-8}cm$

原子核 $\sim 10^{-12}cm$

ラザフォード・ガイガー・マースデンの
散乱実験 (1909)

原子はなぜ安定に存在できる？



- 長岡の土星型原子模型

<= 高速に回転運動する電荷は電磁波を出して、急速にエネルギーを失うはず（古典電磁気学）

- ボーアの原子模型

電子は決まった軌道 ($n = 1, 2, 3, \dots$) にだけ入れ、そこなら安定。
=> 原子の線スペクトルを説明。

- ★ 安定である理由：

ミクロの世界では、物質は新しい物理法則（量子力学）に従う。



長岡半太郎
(1865-1950)



Niels Bohr
(1885-1962)

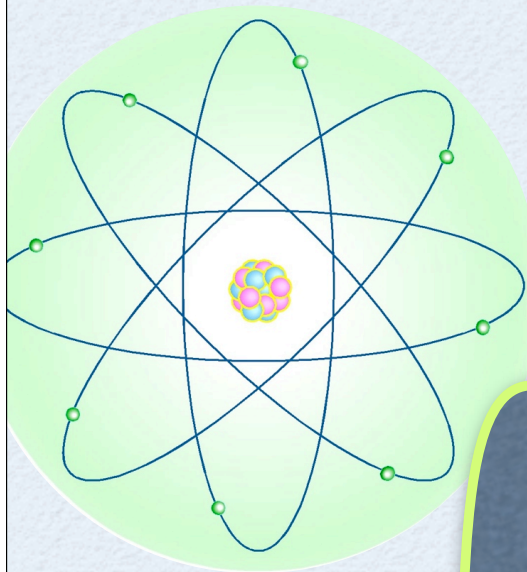
量子力学

- ミクロの世界（原子の世界）では、物質は新しい物理法則（量子力学）に従う。
 - 粒子でもあり、波でもある。
 - 不確定性（我々の状態に関する知識は、古典力学では無かった限界がある。）
- 物質の化学的性質は、電子の量子的性質から導かれる。
 - 原子の周期律表
 - 化学結合、化学反応、・・・

粒子性と波動性

ミクロの世界は不思議の国

原子・分子の世界では、
物質（電子、陽子、中性子など）は、
粒子の性質と波の性質を同時に持つ。

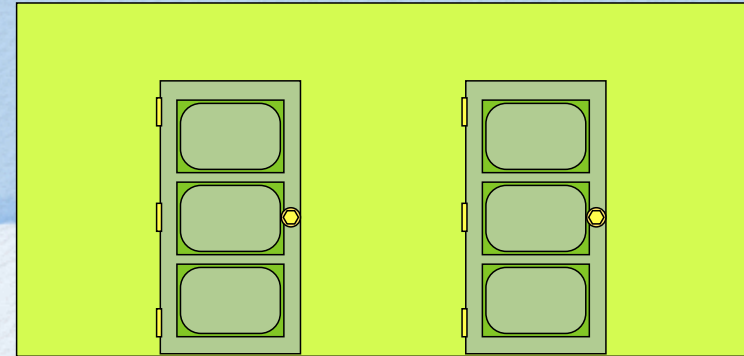


この漫画は、
原子のひとつの側面しか
表していない。

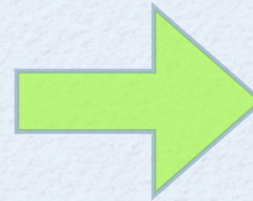
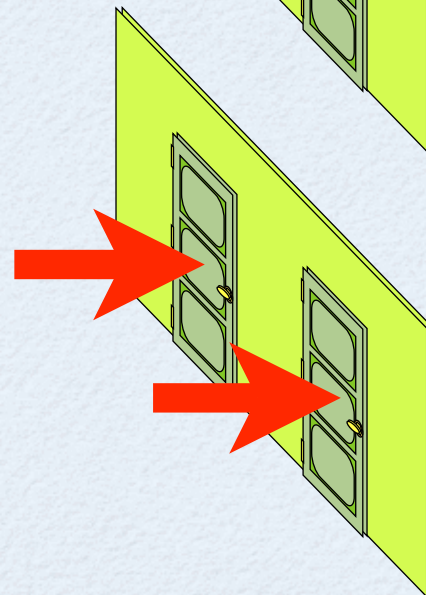
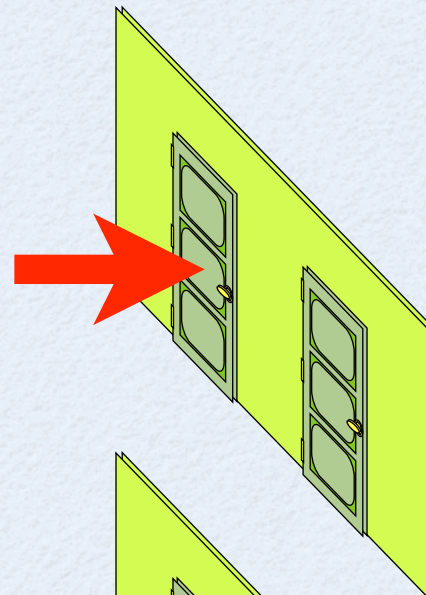
粒子性と波動性

	身近な例	どう数える？	どこにいる？	入口がいくつもあったら？
粒子	小石, ボール	1個、2個 ・・・	空間の1点 に局在して いる	
波	水の波, 音, 電磁波	個数は数え られない。 強さはある	空間に拡 がっている	

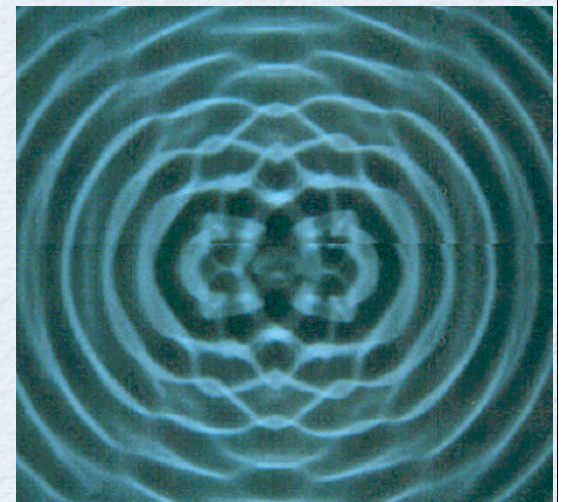
波の性質



	入口がいくつもあったら？
粒子	どれかひとつだけ通る
波	全部通り、合流すると重なり合う



干渉



光とは何か

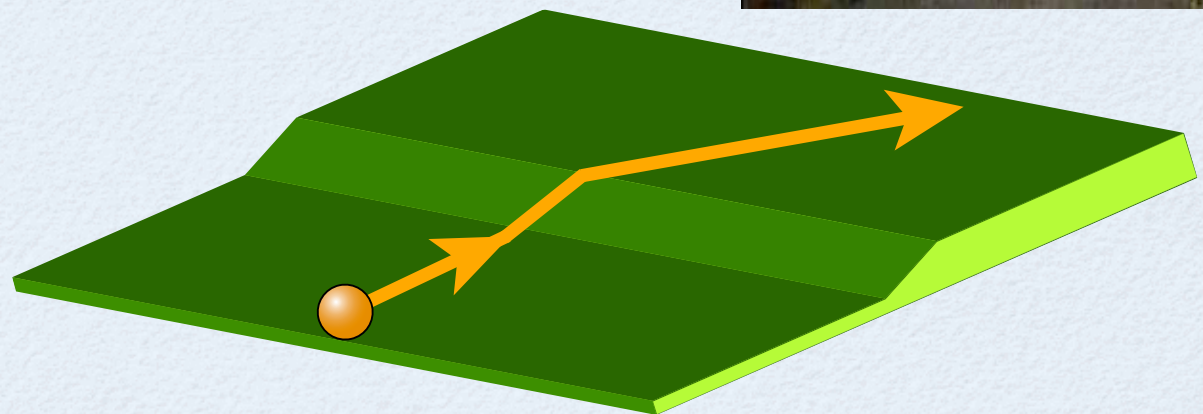
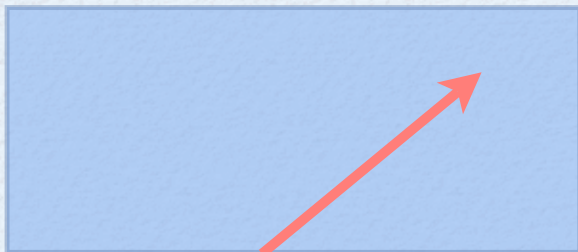
- 波？ 粒？

昔はよくわからなかった。

ニュートンは「粒子」だと思っていた。

例えば、屈折

～ 位置エネルギーの違う場所に飛び込む。



光とは何か

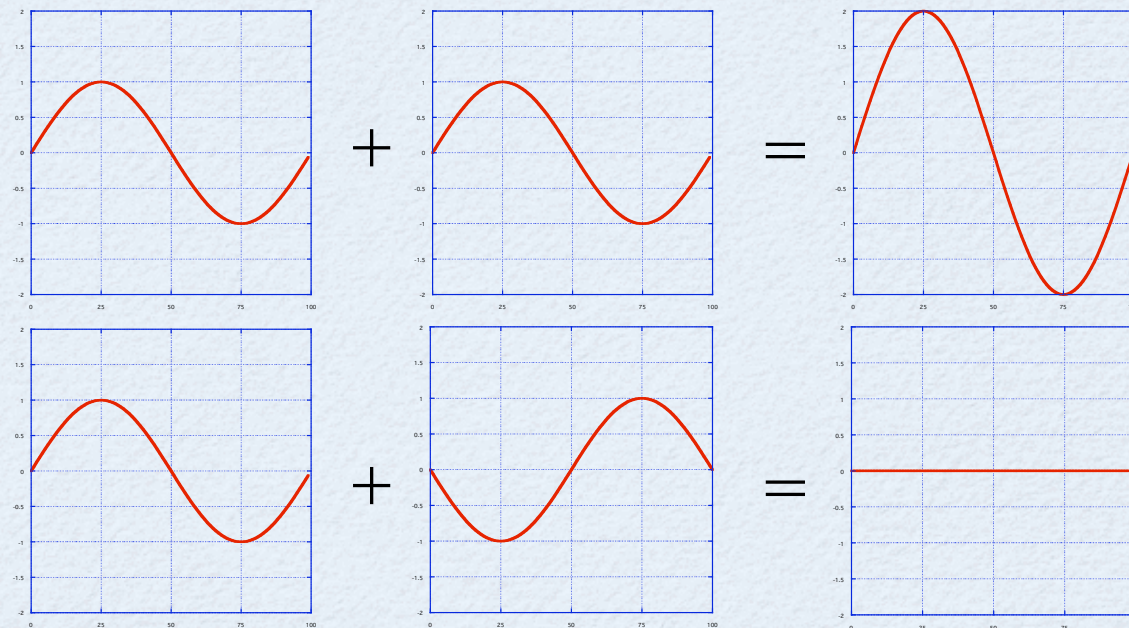
- 波？ 粒？

ヤングの干渉実験



Thomas Young
(1773-1829)

粒は、重ねると常に足しあわさって強くなる。
波は、山と山を重ねると強めあい、
山と谷を重ねると打ち消しあう。



光とは何か

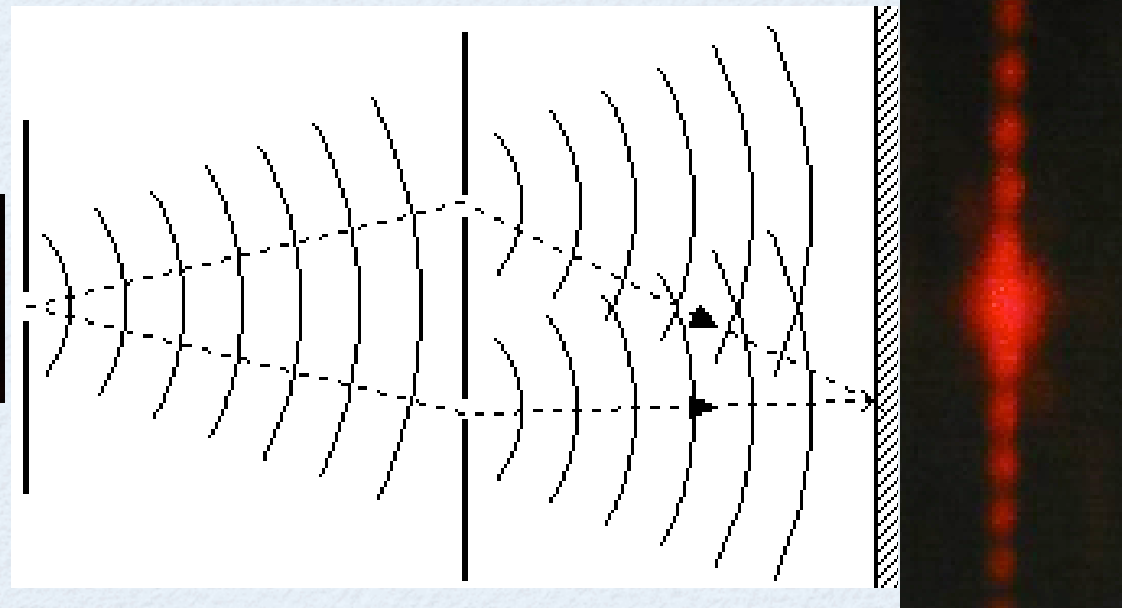
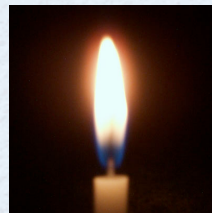
- 波？ 粒？

ヤングの干渉実験 => 波



Thomas Young
(1773-1829)

粒は、重ねると常に足しあわさって強くなる。
波は、山と山を重ねると強めあい、
山と谷を重ねると打ち消しあう。



電子はもちろん粒子だが、波でもある。

粒子 \Leftarrow 電荷の単位の存在
(ミリカンの実験)

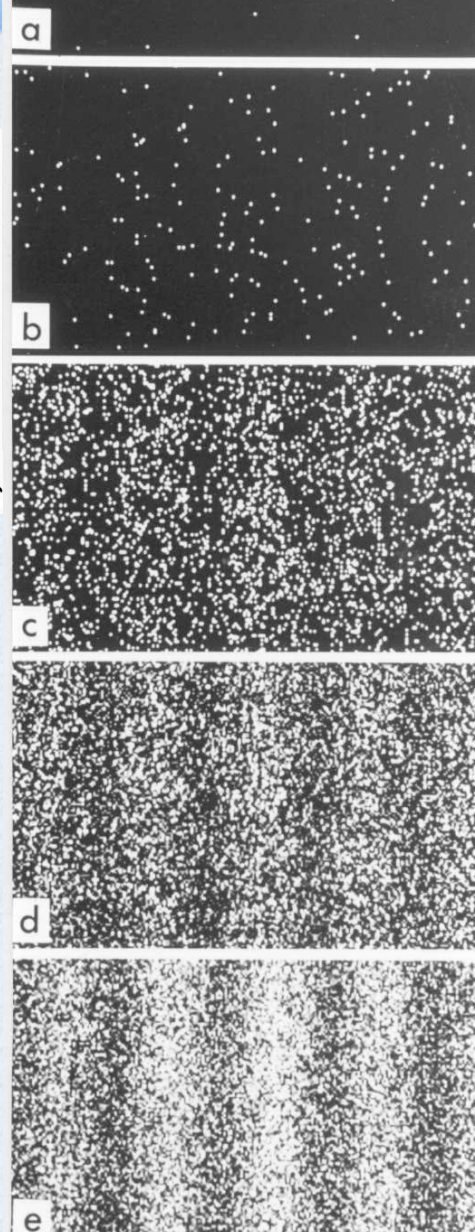
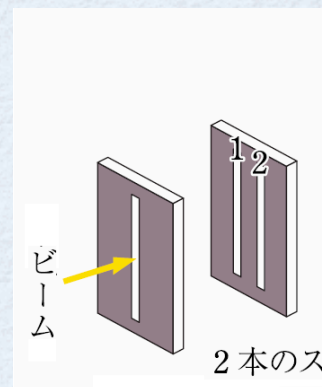
電子線によるヤングの実験

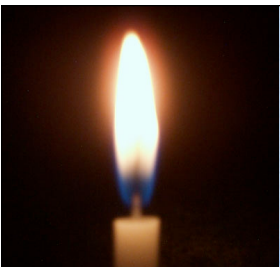


外村彰
日立製作所基礎研究所

微弱な電子ビームを当てると、
最初は、スクリーンに
粒子としての点が記録される。

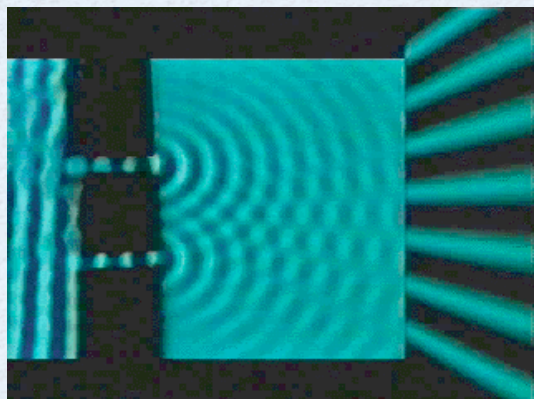
長時間ビームを当て続けると、
やがてこの点が多数集まって、
全体として干渉縞を示す。



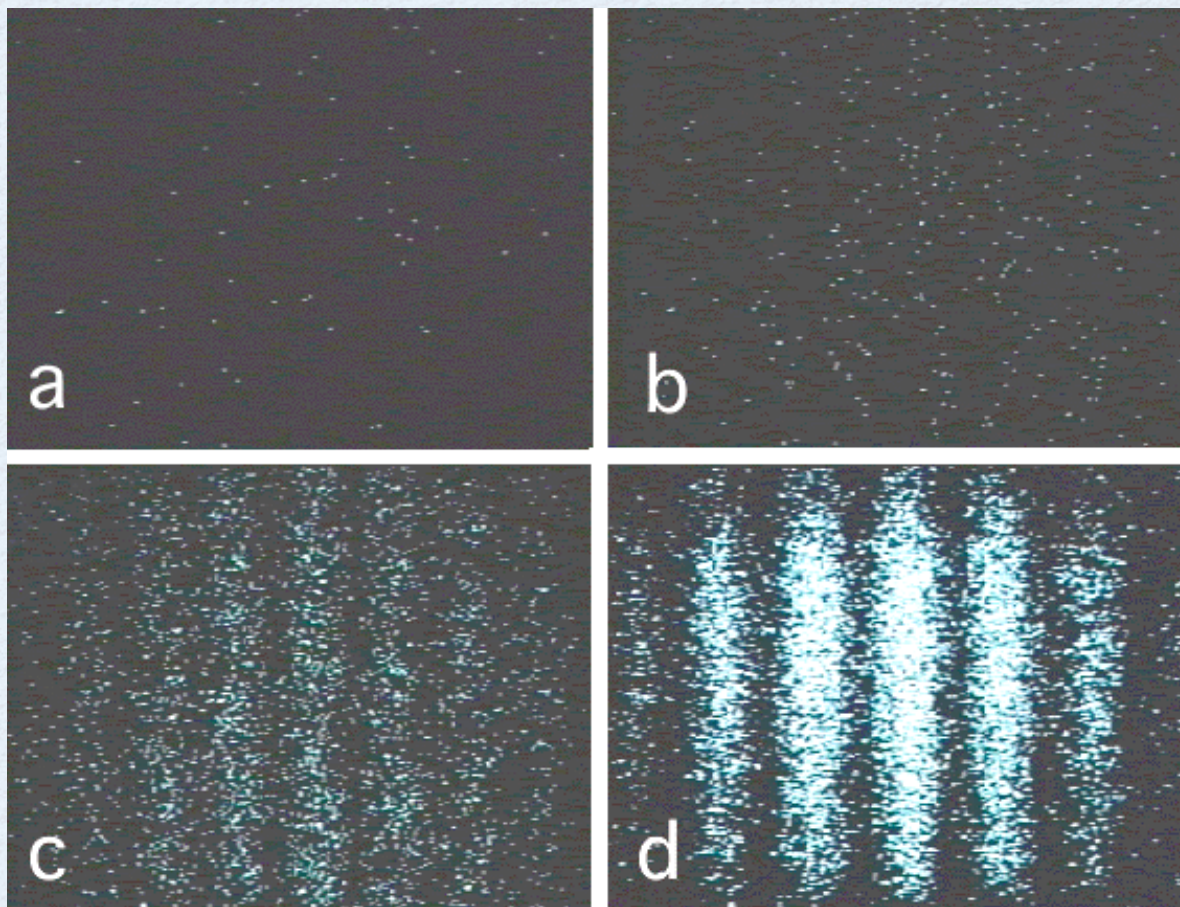


光はもちろん波だが、粒子でもある

ヤングの実験で
入射光を非常に
弱くしてみる。



スクリーンには、
薄い縞模様ではなく、
点が現れる！



浜松ホトニクス中央研究所

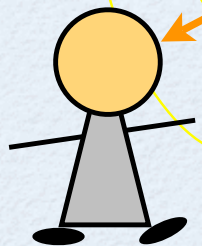


光はもちろん波だが、粒子でもある

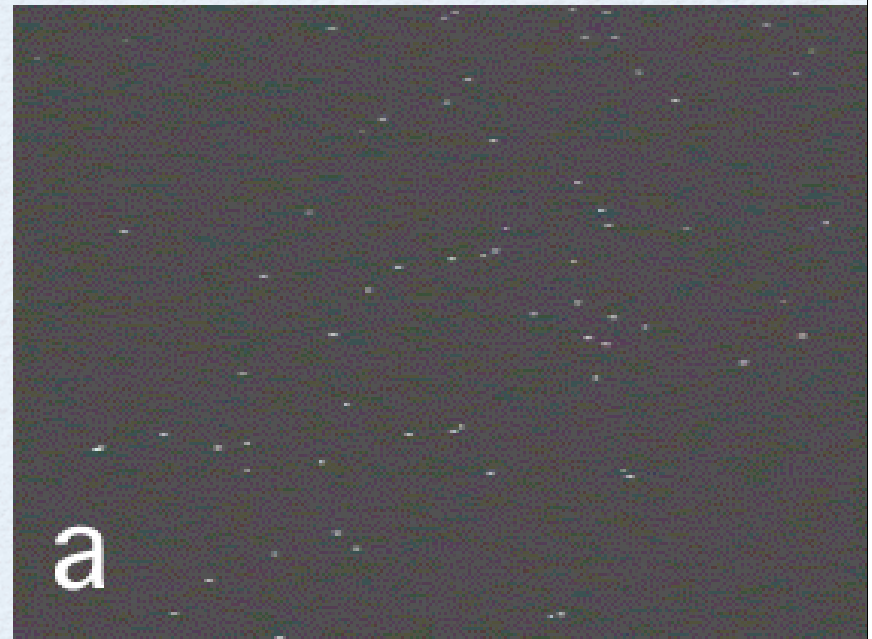


遠方の星が見えるわけ：

星からの光が、数十～数百万光年もの膨大な距離で拡散しきってしまわないで、粒子として固まったエネルギーで視神経を刺激するから。



この光の粒子を
「光子」と呼ぶ。



粒子性と波動性 (2)

ミクロの世界は不思議の国

粒子性と波動性は
どのように両立しているのか？



ミクロの世界は不思議の国

「波」：「粒子」として検出される
確率をあらわす。

振幅が大きい = 存在確率が高い

素粒子は「波」として飛行し
「粒子」として検出される



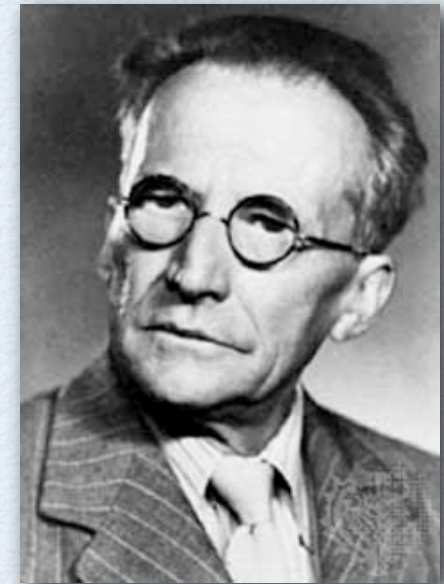
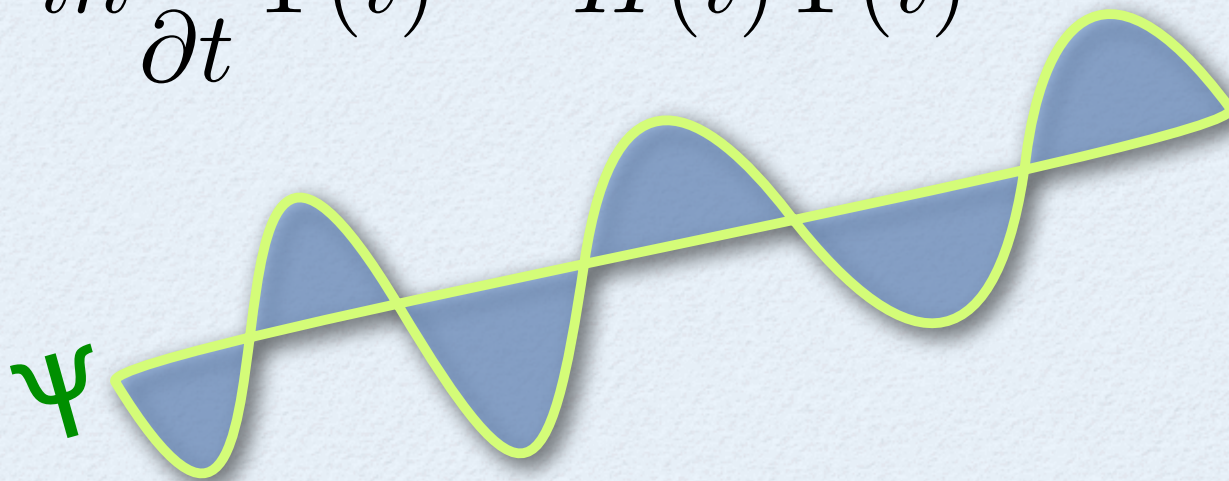
浜松ホトニクス
中央研究所

ミクロの世界は不思議の国

素粒子は「波」として飛行し
「粒子」として検出される

波の伝搬：シュレーディンガーの波動方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(t) = H(t) \Psi(t)$$



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

不確定性

- 波動性のひとつの帰結：

ハイゼンベルグの不確定性関係（不確定性原理）

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

Δx : 位置に関する観測精度（知識の限界）

Δp : 運動量($p = mv$)に関する観測精度

$\hbar = 1.05 \times 10^{-34}$ J · sec : プランク定数

両方を同時に確定できない。



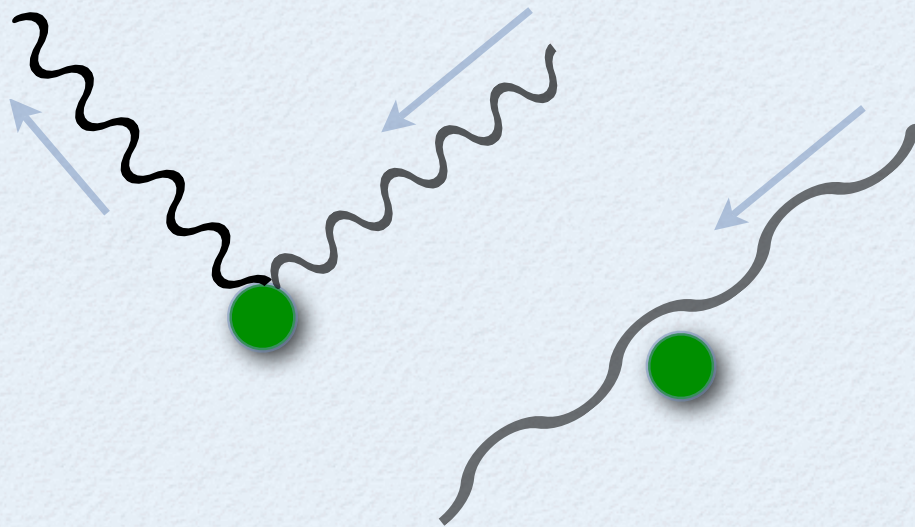
Werner Heisenberg
(1901-1976)

(cf.) ニュートン力学：

初期条件として、位置と運動量(速度)が必要。

不確定性

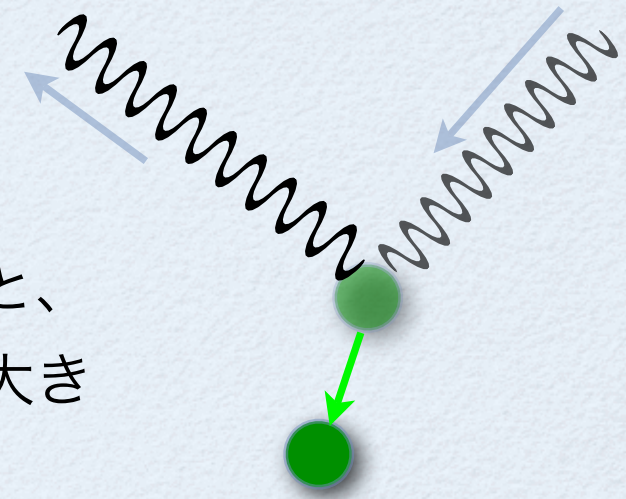
位置と運動量(速度)を同時に確定できない。



粒子の位置を測定するためには、
光を当てて反射光を調べる。

波長より細かいものは見えない。

精密に測定するために、波長を短くすると、
光の粒子性のために光子のエネルギーが大き
くなって、散乱で相手の運動量を乱す。

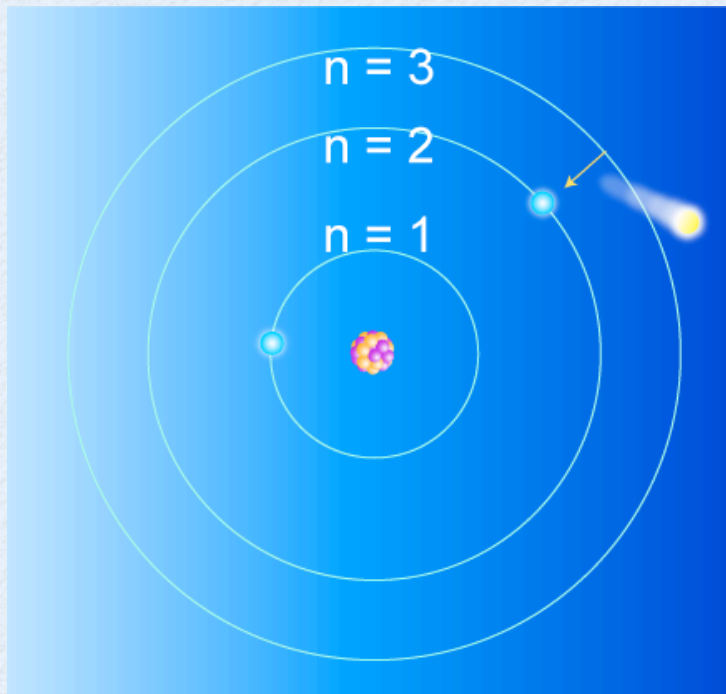


相手の状態を乱さない観測は出来ない。(透明人間も目は不透明。)

物質の化学的性質

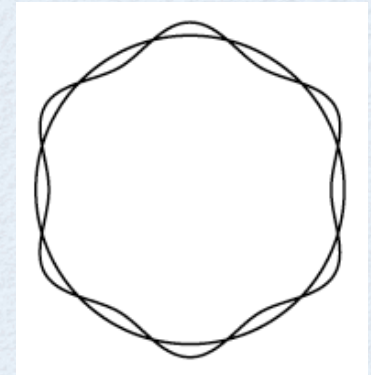
- ボーアの原子模型

電子は決まった軌道 ($n = 1, 2, 3, \dots$) にだけ入れる。



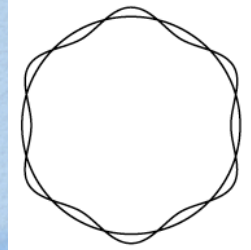
波としての電子が、定在波を作るような軌道だけが許される。

- 電子は、エネルギーの低い内側から詰まってゆく。
- 外側の電子が化学結合に効く。



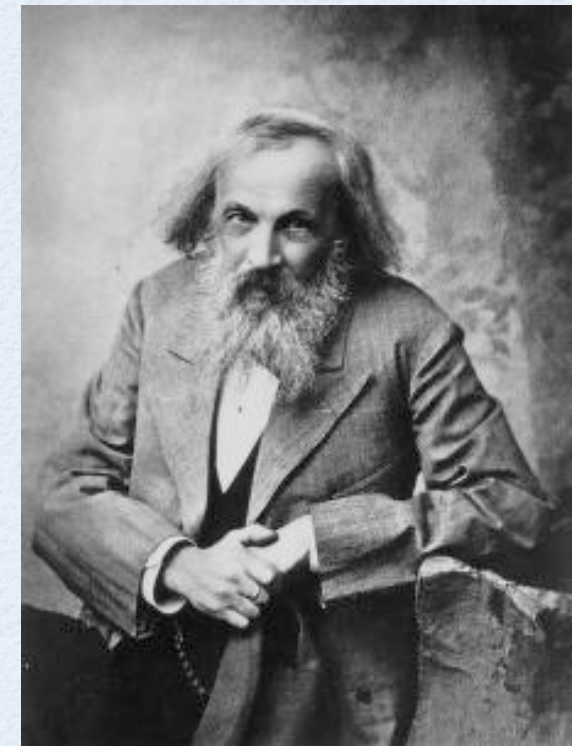
外側の軌道の性格と、そこに電子が何個どう入っているかで、原子の化学的性質が決まる。

物質の化学的性質



- 元素の周期律

1																	18
1 H	2											13	14	15	16	17	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
*1 ランタノイド:		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
*2 アクチノイド:		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	



Дмитрий Иванович Менделеев
(1834-1907)

SUMMARY

- ミクロの世界（原子の世界）では、物質は新しい物理法則（量子力学）に従う。

- 電子や光は、波として飛行し、粒子として反応する。

- 不確定性

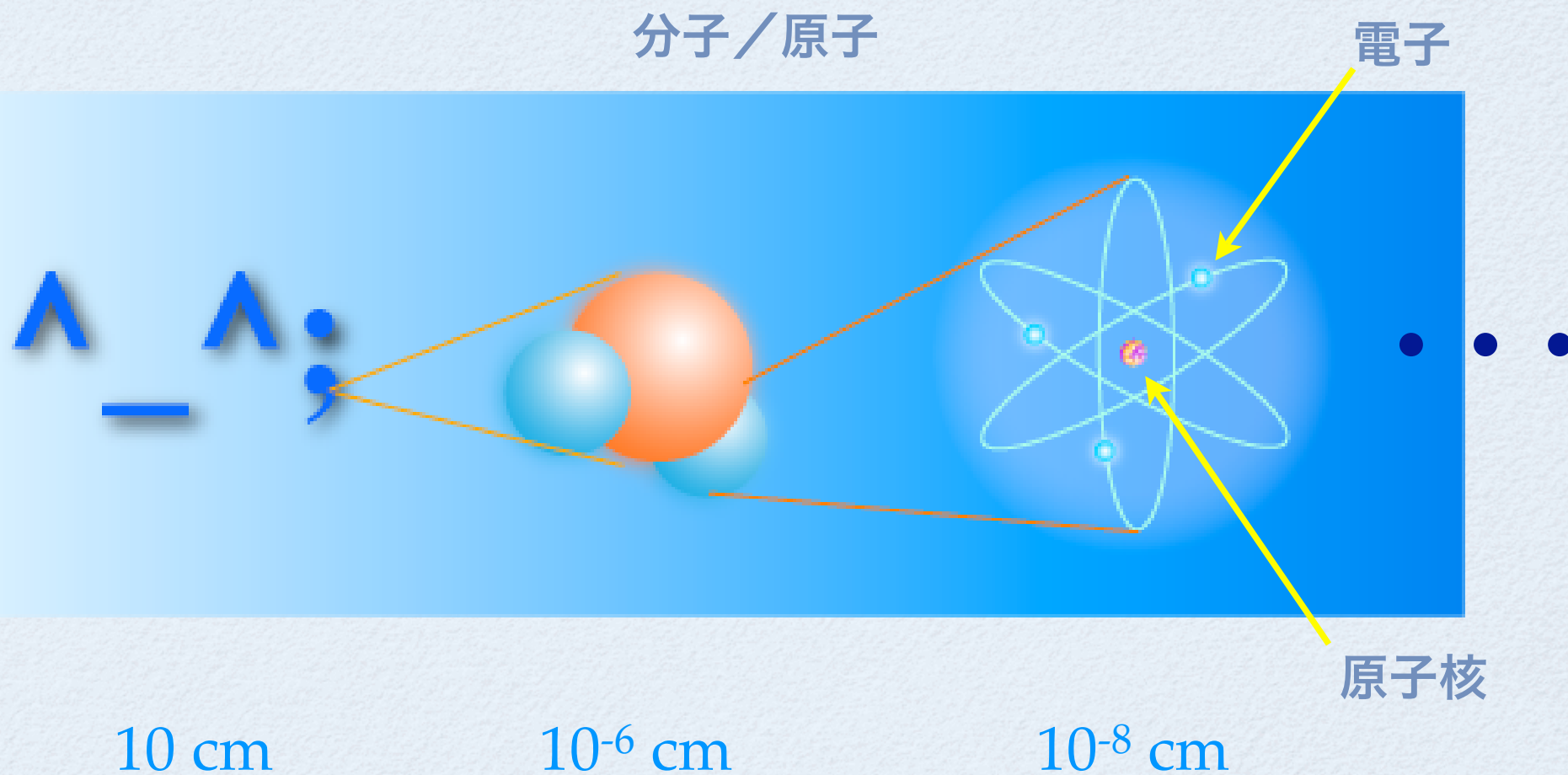
- 物質の化学的性質は、電子の量子的性質から。

- 化学結合、化学反応、元素の周期律表

- 半導体やトランジスタなどの電子部品 . . .

現代生活は量子論で支えられている。

もっとミクロな世界はどんなところ？



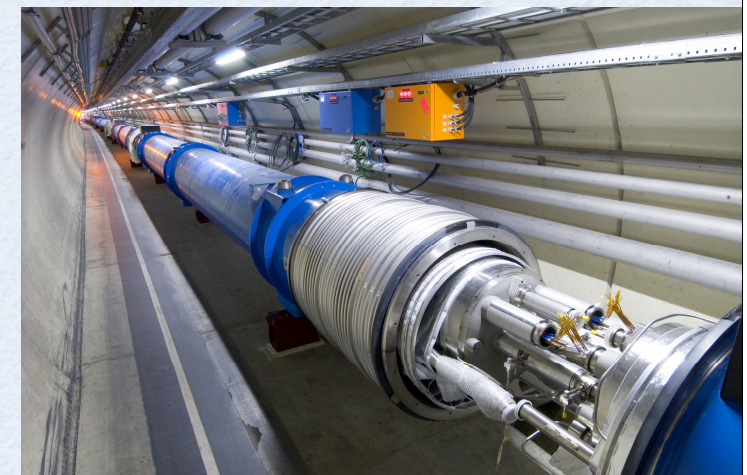
(現状で) 最も高性能な顕微鏡



ラザフォードの実験で、
放射線のエネルギーを
10桁以上高くする。

≡ 放射線の粒子を加速

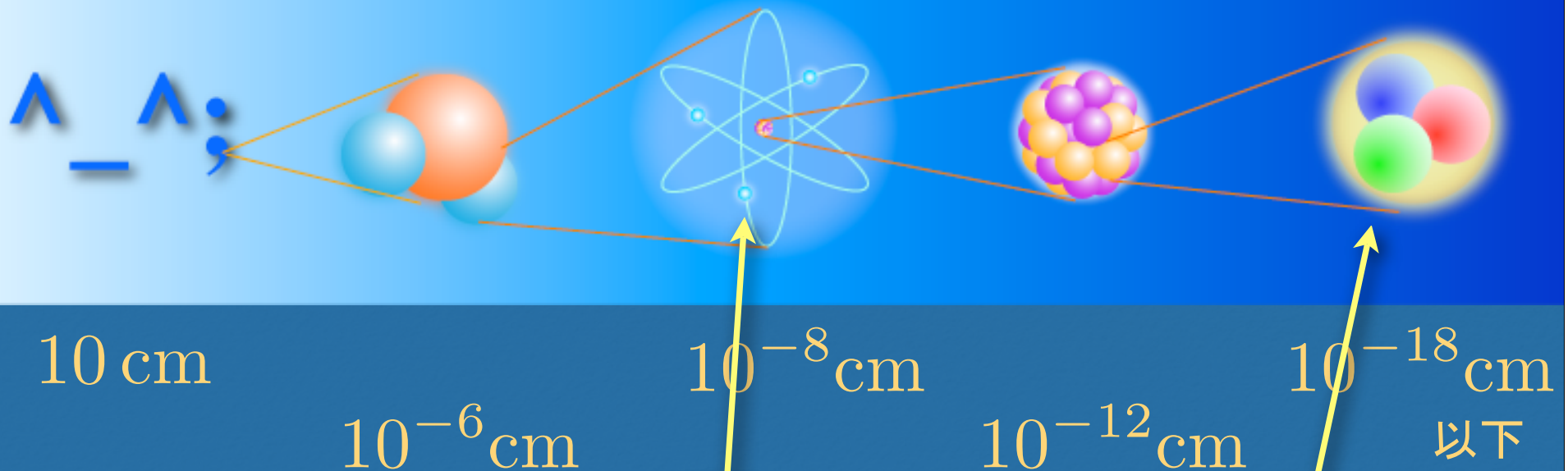
LHC @ CERN
2007年完成予定
円周27km



<http://public.web.cern.ch/>

「素粒子」= 物質を最も細かく分けた 最小の構成単位

現在の技術では： 解像度 $\sim 10^{-18} \text{ -- } 10^{-20} \text{ cm}$



原子 = 原子核 + 電子

原子核 = 陽子 + 中性子

陽子、中性子 = クォーク 3個

素粒子物理学

現代物理学

- **相対論**

高速な運動

時間と空間

- **量子論**

ミクロな物質

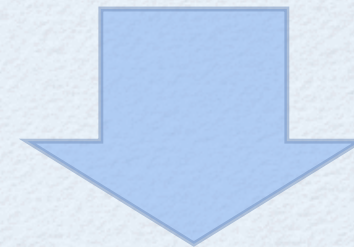
不確定性

場の理論

物質の
生成・消滅

素粒子標準理論

- QCD
- Weinberg-Salam 理論



標準の先

- 超弦理論

• • •

朝永振一郎

(1906-1979)

<http://tomonaga.tsukuba.ac.jp/>

