量子力学A

物理学・宇宙物理学専攻
物理第二教室
原子核理論研究室
萩野浩一

シラバス

1. 序論：古典力学の困難と前期量子論（第1～2週）
2. 量子力学と波動関数（第3～7週）　量子力学の基礎
3. 1次元固有値問題（第8～12週）　1次元問題を解いてみる
4. 半古典近似（第13～14週）　古典力学とのつながり

量子力学A

物理学・宇宙物理学専攻
物理第二教室
原子核理論研究室
萩野浩一

講義の進め方

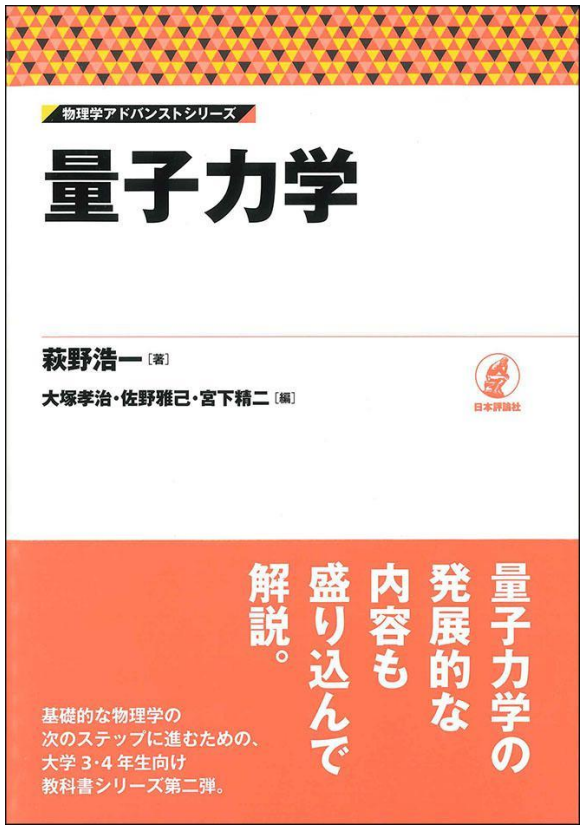
✓ 講義（板書）＋演習レポート　← 今日だけスライドで概要を説明

- 演習レポートはおおよそ隔週で出します。
- KULMSを使って提出→手書きでもOK。その場合、ファイルが読めるように確認してから提出を。
- 〆切は2週間後。〆切後に解答例をアップロードします。
- 来週、1回目の問題を出します。

✓ 成績は期末試験＋レポートを平均してつける。

教科書・参考書

おおよそ、「量子力学」（日本評論社アドバンストシリーズ）
に従って講義を進めます。



その他の参考書や洋書のおススメは KULMSを見てください。

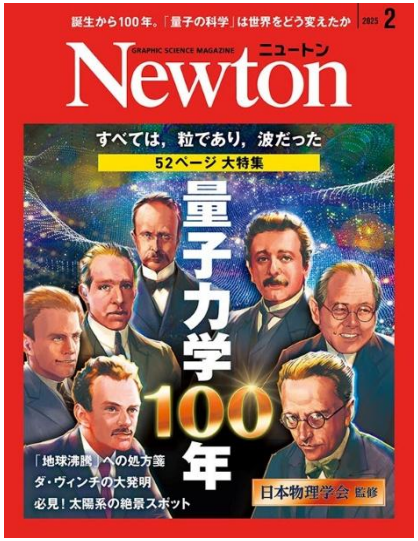
＊今日の回の内容は野村泰紀さんの Youtube もおススメ

りょうし　りきがく

量子力学

2025年は量子力学100周年

1925年 : ハイゼンベルクの行列力学
1926年: シュレーディンガー方程式



りょうし　りきがく

量子力学

＝ quantum mechanics

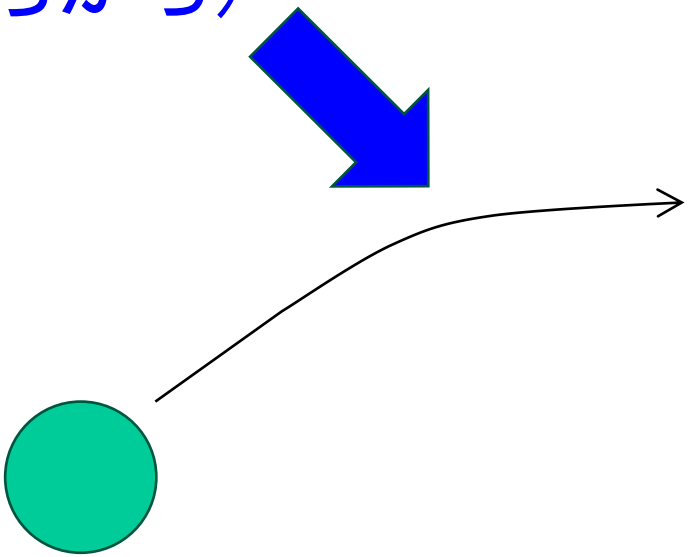
- もともとはラテン語の “quantus”（どれだけ（の量）?）
- アインシュタインなどがエネルギーなどの「つぶ」という意味で「quantum（量子）」という言葉を使い始めた。
- quantum を「量子」と訳したのは長岡半太郎（1911年）
- 「量子力学」はボルンによる造語（1924年）

りょうし　りきがく

量子力学

力（ちから）

力（ちから）の学問



力を受けると運動が変わる

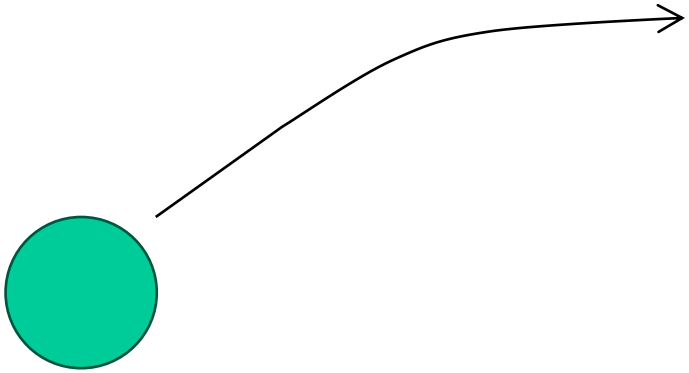
$$ma = F$$

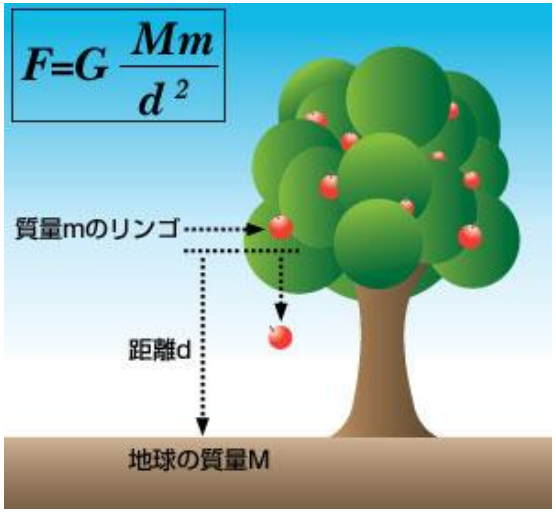
力学＝力(ちから)の学問

$$ma = F$$

どんな力が?

- 重力(万有引力)
- 電磁気力

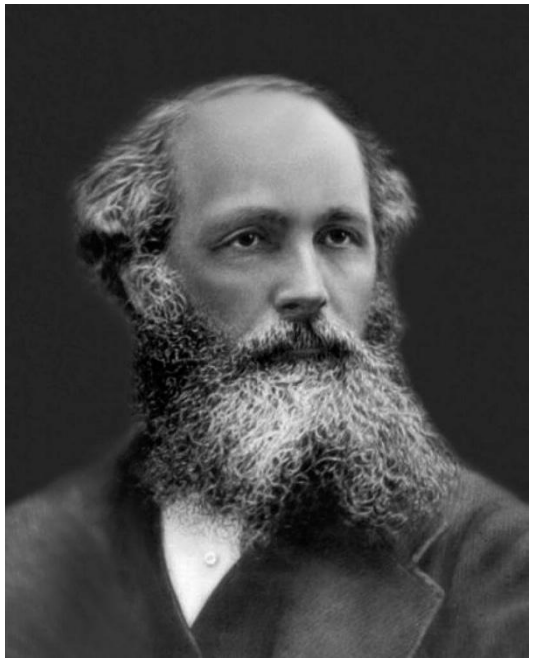




JAXAのページより

Wikipedia

電磁気力

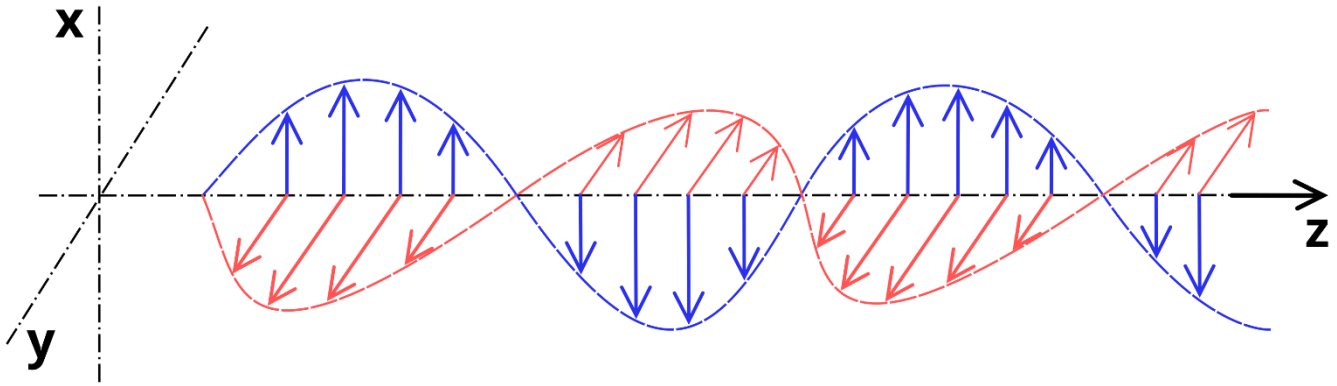


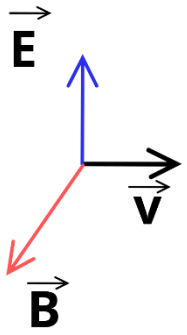
マクスウェル（1831-1879）

Wikipedia

マクスウェル方程式

「光は波（電磁波）である」

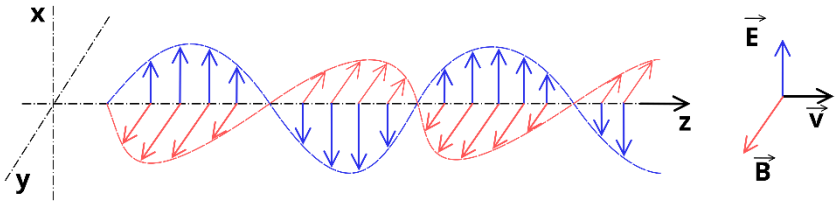


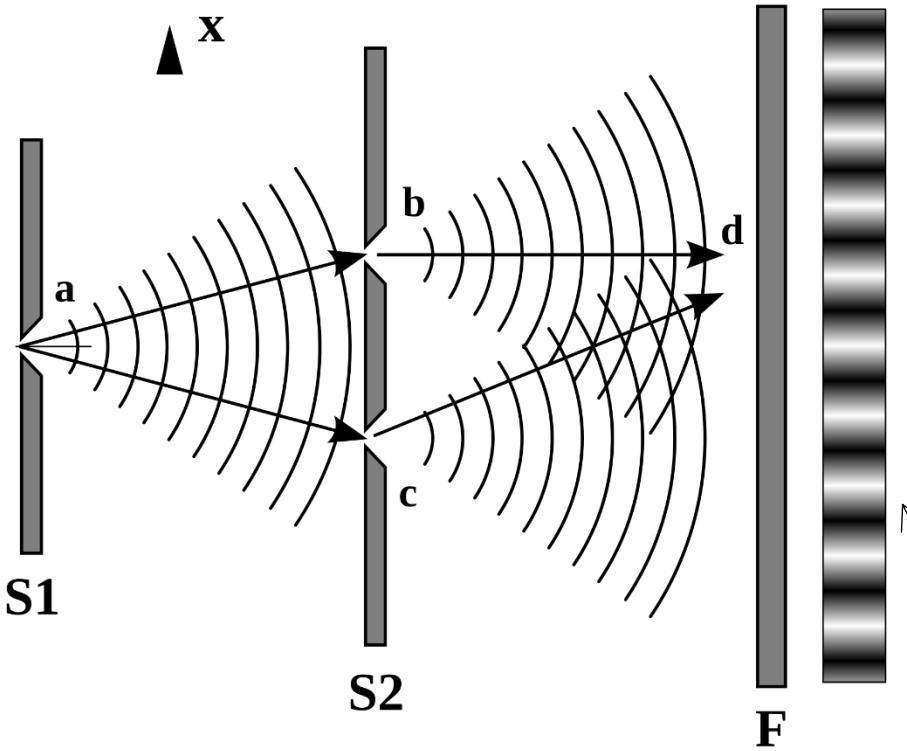


電磁気力

マクスウェル方程式

「光は波（電磁波）である」



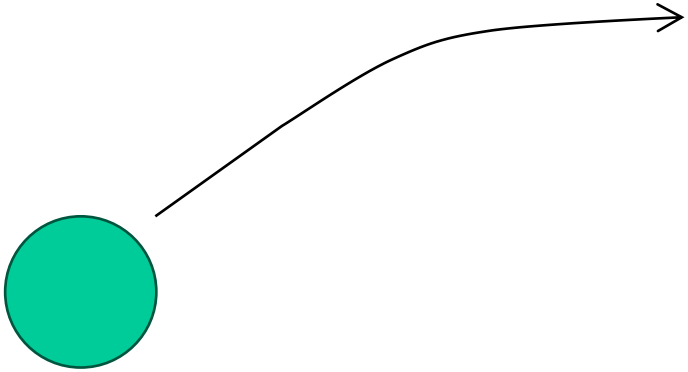


ヤングの干渉実験
（二重スリットの実験）

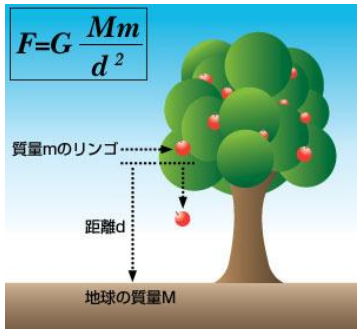
濃いところと薄いところが
現れる（干渉縞）

力学＝力(ちから)の学問　　$ma = F$

どんな力が?



- 重力(万有引力)
- 電磁気力(電気や磁石の力)



JAXAのページより

○○力学は他にも:

- 熱力学
- 統計力学
- 流体力学

など

19世紀の終わり頃までにはこれらの理論が整備
→　物理学はこれで完成したと思われていた

量子力学ことはじめ

19世紀の終わり頃までにはこれらの理論が整備
→　物理学はこれで完成したと思われていた

そのようなことは決してなかった！

時は19世紀の終わり、ドイツ。

第2次産業革命、起こる

→鉄鋼業が盛んになる

フェルクリンゲン製鉄所（ドイツ）
Wikipedia

量子力学ことはじめ

第2次産業革命、起こる

→鉄鋼業が盛んになる

フェルクリンゲン製鉄所（ドイツ）
Wikipedia

鉄鋼炉の色を見て鉄の温度を知りたい

https://www.japanmetal.com/wordpress/wp-content/uploads/2022/10/682d71961d047cebb087cbe33ee37bed.jpg

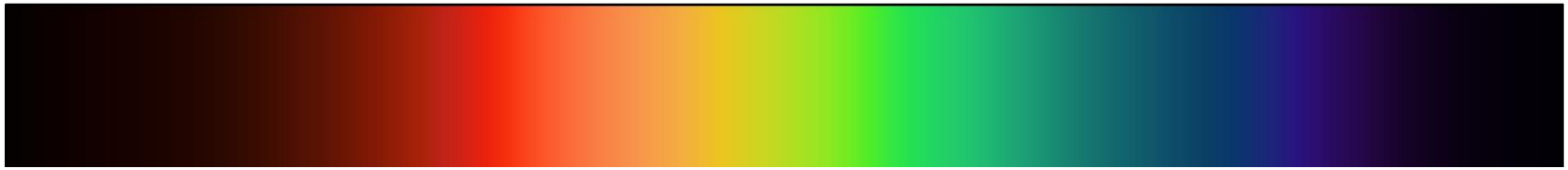
量子力学ことはじめ

鉄鋼炉の色を見て鉄の温度を知りたい

https://www.japanmetal.com/wordpress/wp-content/uploads/2022/10/682d71961d047cebb087cbe33ee37bed.jpg

実際には、鉄鋼炉から発せられる光を見る

太陽光に様々の波長（周波数）の光が混ざっているように

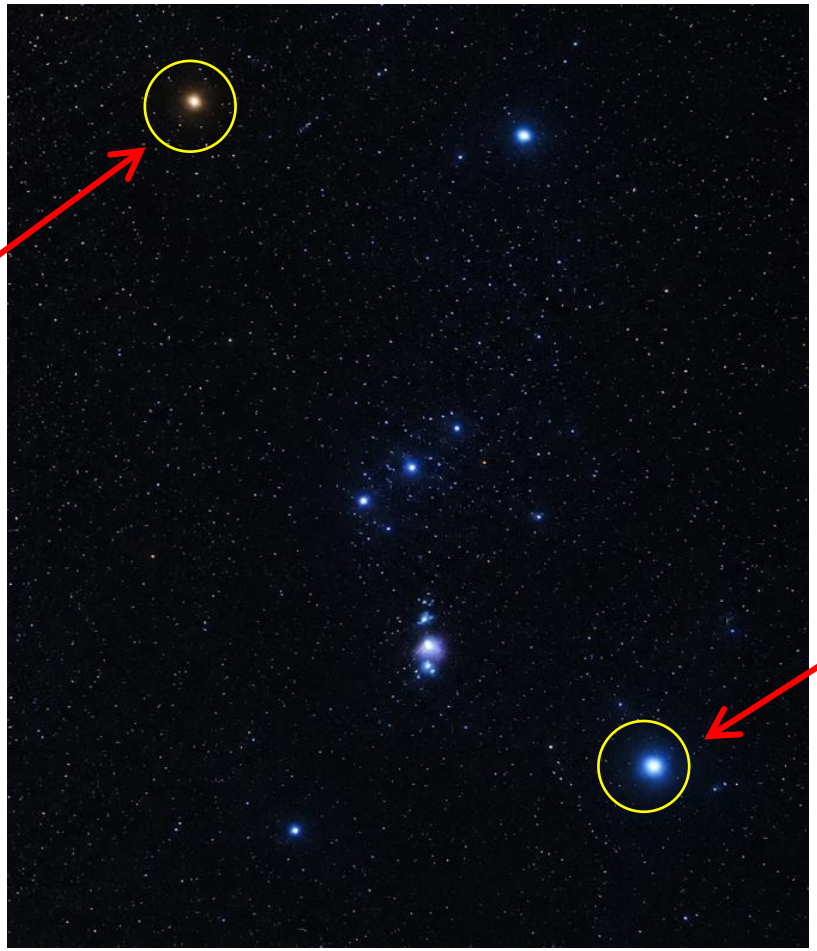


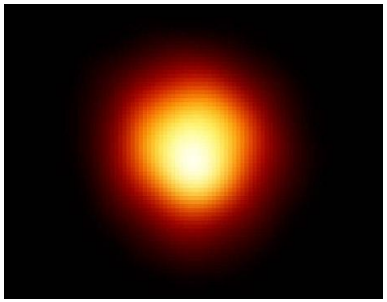
鉄鋼炉からの光にも様々な波長（周波数）の光が混ざっている

光の波長と色

星の場合：

オリオン座

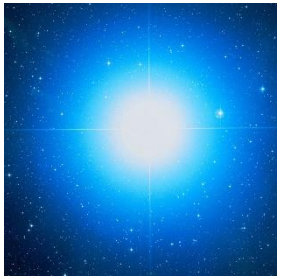




ベテルギウス

約 3,500 ℃

→赤く光る



リゲル

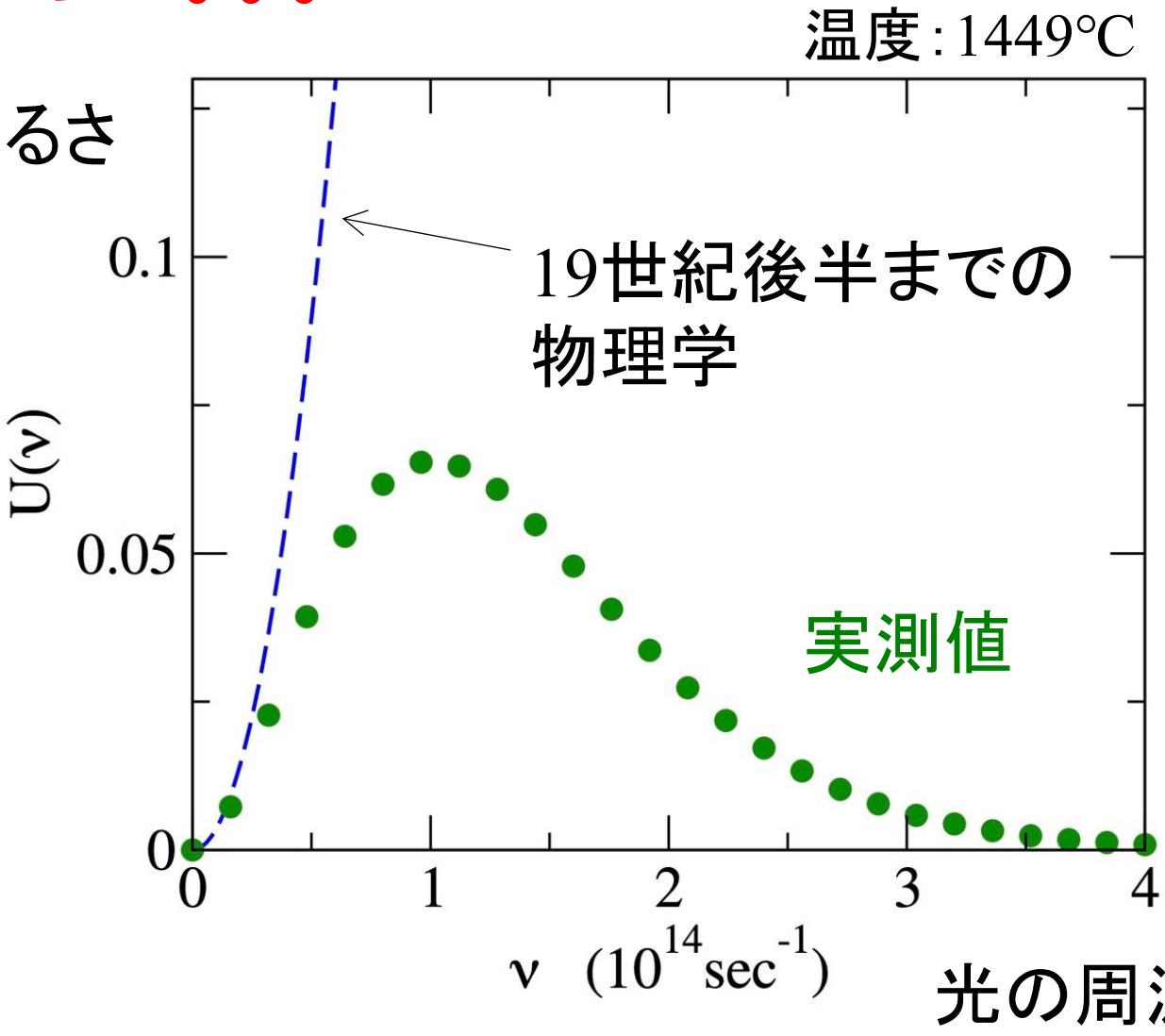
約 11,000 ℃

→青白く光る

鉄鋼炉の場合も、光の波長がどう混ざっているのかを見れば温度が分かるはず！

量子力学ことはじめ

ところが。。。



まったく
合わない！

量子力学ことはじめ

マックス・プランク
(1858-1947)

- 19世紀後半までの物理学

  エネルギーは連続的に変化する

10.72円
などなんでも

- マックス・プランク　「エネルギー量子」(1900年)

10円

20円

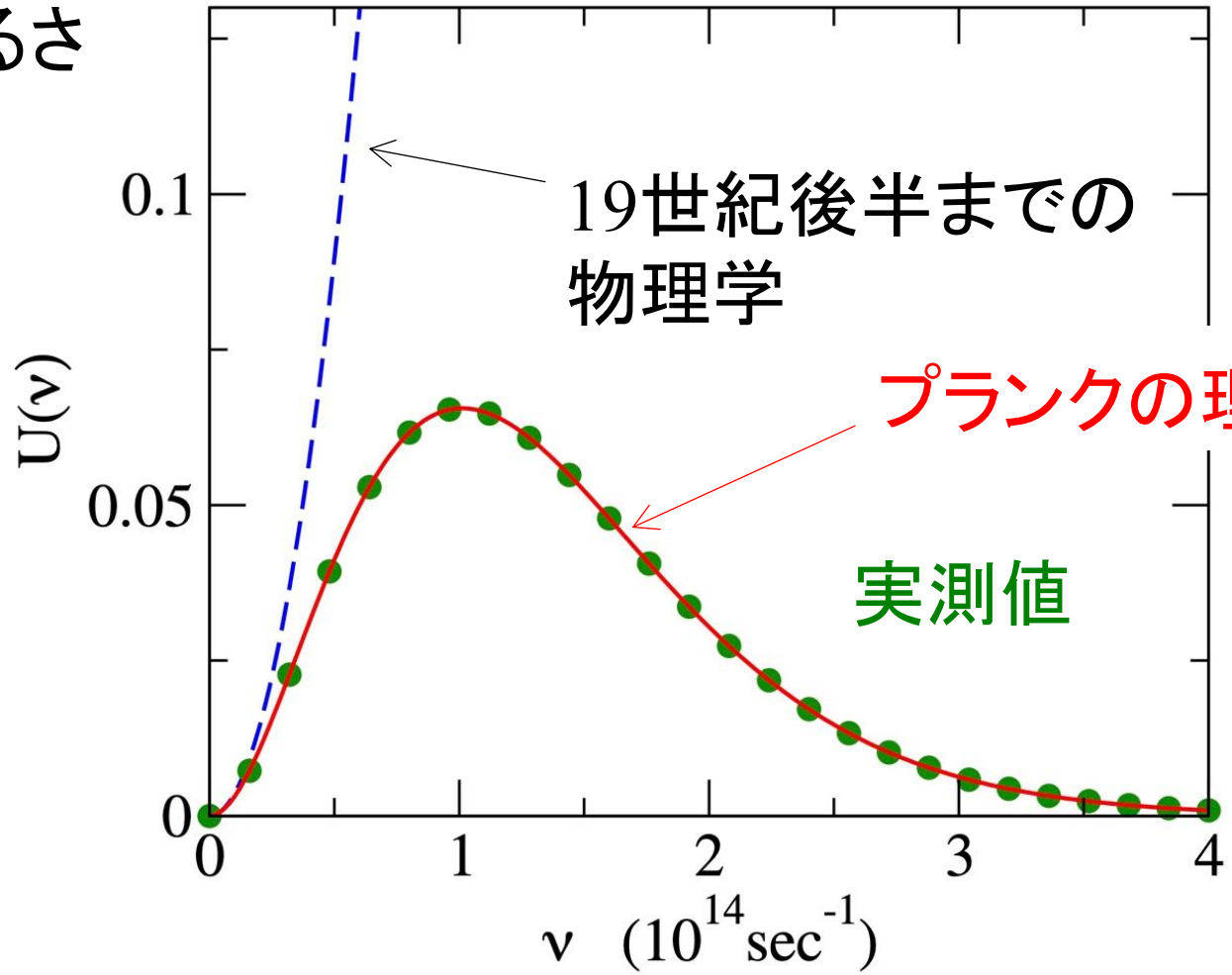
30円

エネルギーは「とびとび」の値のみ許される

量子力学ことはじめ

温度：1449℃

明るさ



19世紀後半までの物理学

プランクの理論

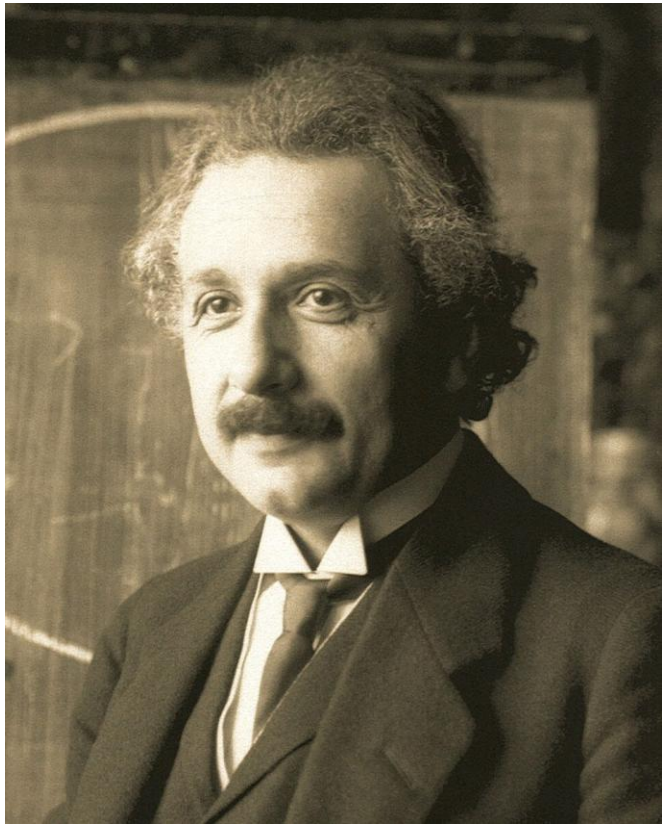
実測値

ぴったり合った！

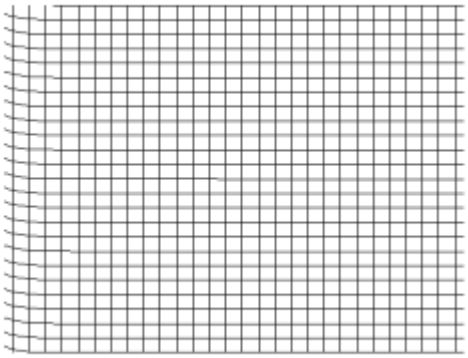
来週もう少し詳しく

光の周波数

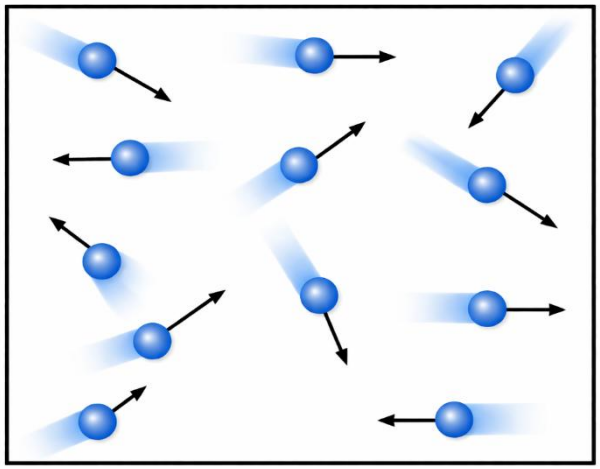
光量子仮説



アルバート・アインシュタイン
(1879-1955)

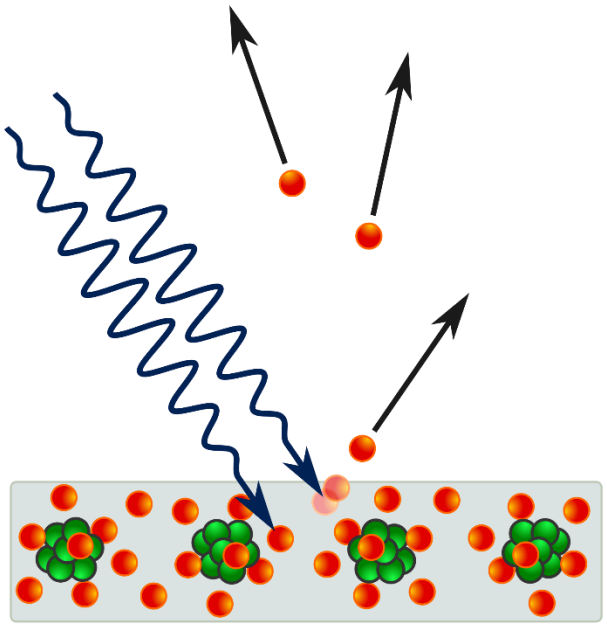


光量子仮説：光は波ではなく粒子である（1905年）



光電効果

光電効果：金属に光をあてて電子を出す



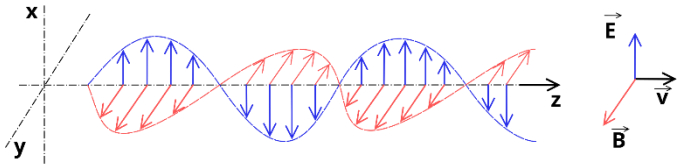
（実験結果）

- 光の振動数（周波数）が小さいと、どんなに強い光をあてても電子はでてこない。
- 電子のエネルギーは光の強さとは無関係。

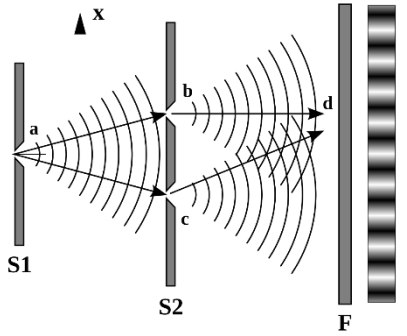
- ✓ 19世紀終わりまでの物理学では説明不可
- ✓ アインシュタインの光量子仮説を使って初めて説明可

これによってアインシュタインはノーベル物理学賞を受賞（1921年）

ここまでのまとめ



- 19世紀の後半まで、光は波（電磁波）と思われていた。
  - ✓ マクスウェルの理論
  - ✓ ヤングの２重スリット実験



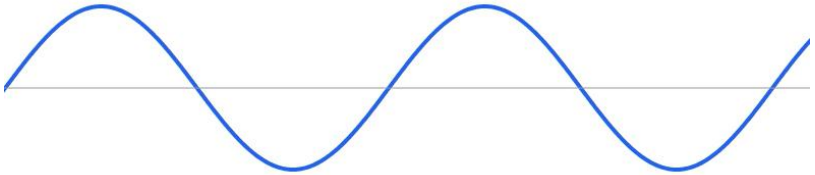
- 20世紀に入り、光は粒子のように振る舞っていることを示唆する実験データが出てきた
  - ✓ プランクのエネルギー量子の考え方
  - ✓ アインシュタインの光量子仮説

「とびとび」

光はある時は波（電磁波）であり、
ある時は粒子（光子）である??

ド・ブロイ波

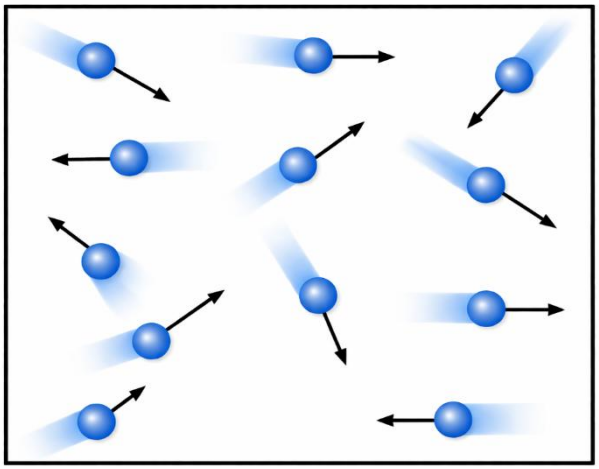
波



光

電子など

「ド・ブロイ波」



粒子

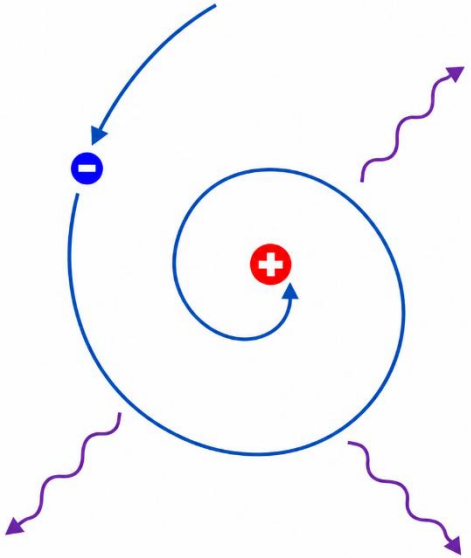
ルイ・ド・ブロイ
(1892-1987)

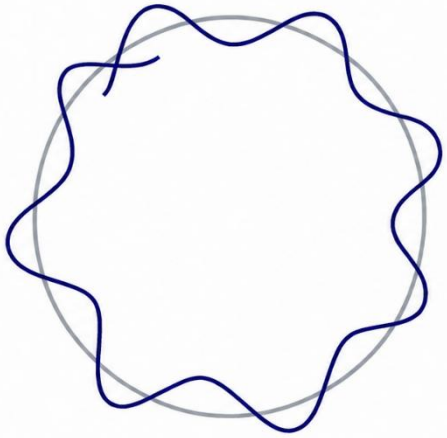
ノーベル物理学賞
(1929年)

ド・ブロイ波

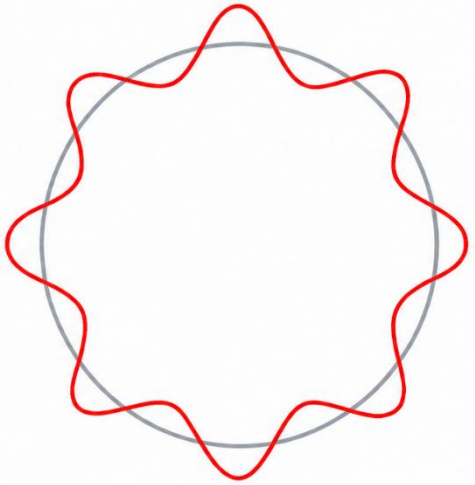
ド・ブロイ波の考え方

原子の安定性





閉じていない



閉じている

1周回った時に波が閉じていないといけない

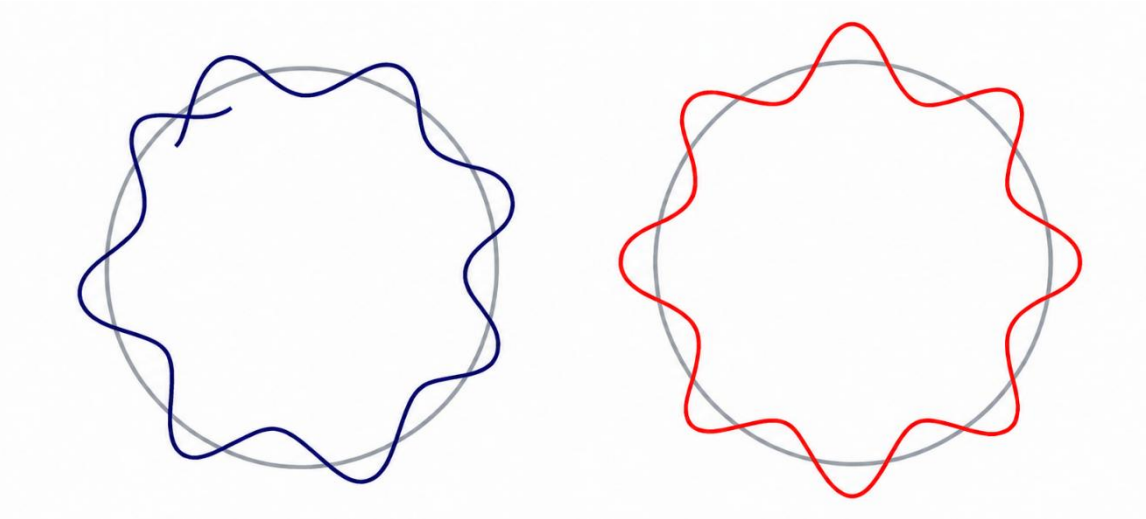
（古典力学では）
軌道を回る電子
→電磁波を放出して半径が収縮

0.00000000001秒（10^{-11}秒）で原子が消失!

来週もう少し詳しく

ド・ブロイ波

ド・ブロイ波の考え方



1周回った時に波が閉じていないといけない

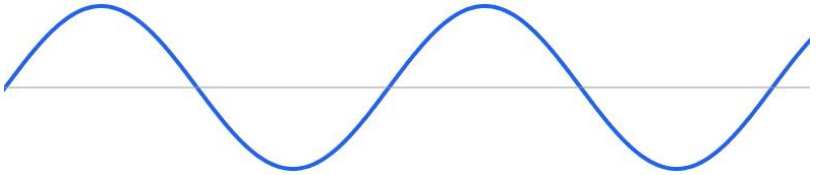
- いくらでも半径が小さくなるわけではない
- エネルギーが「とびとび」になる

cf. ボーアの原子模型（1913年）

ド･ブロイ波

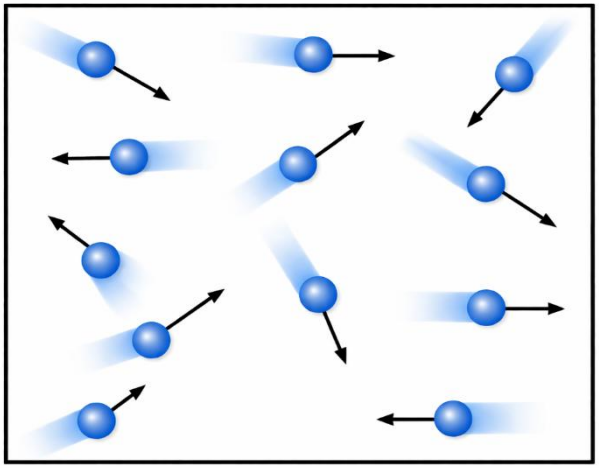
光や電子は波でもあり
粒子でもある

波

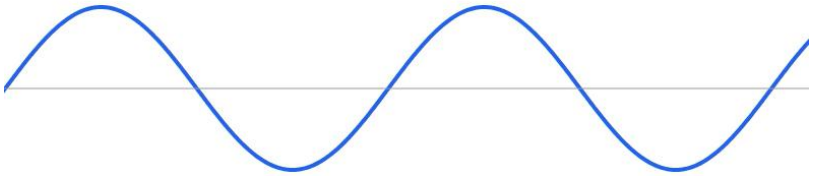


光　電子など
「ド･ブロイ波」

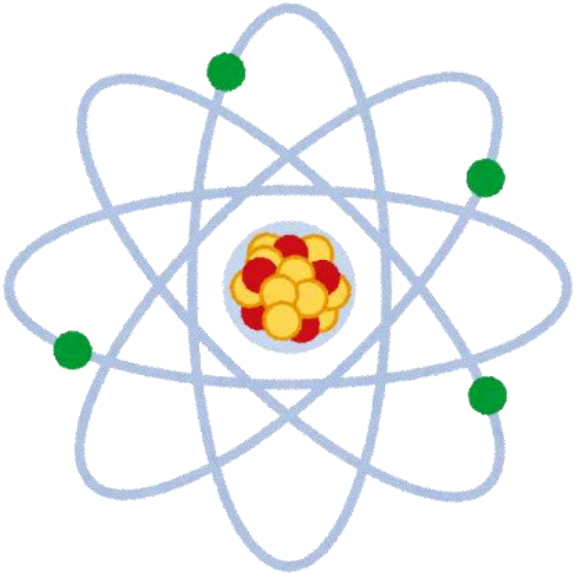
粒子

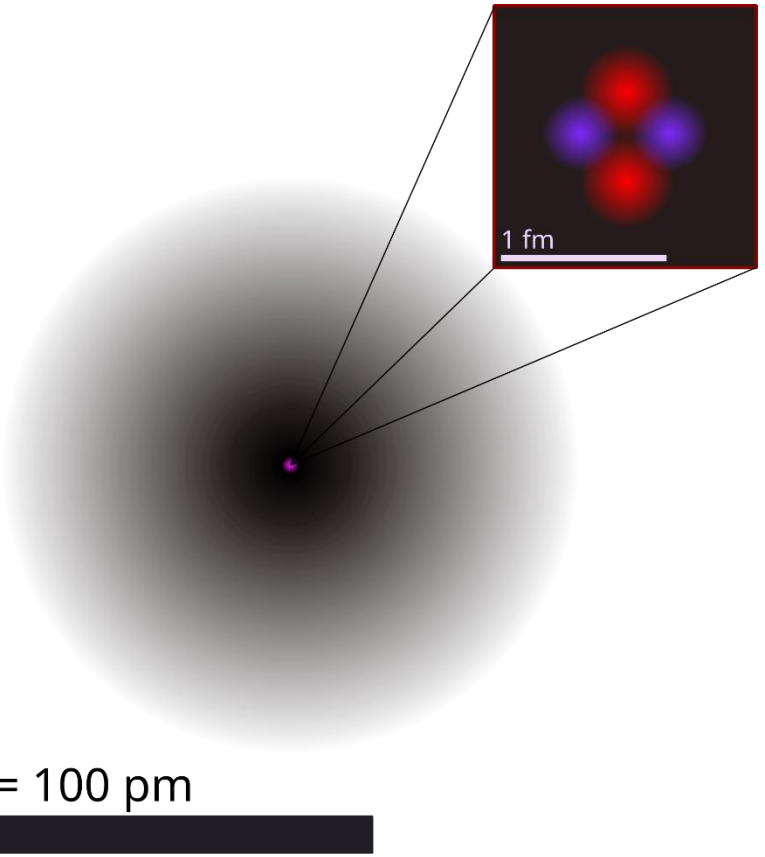


ド・ブロイ波



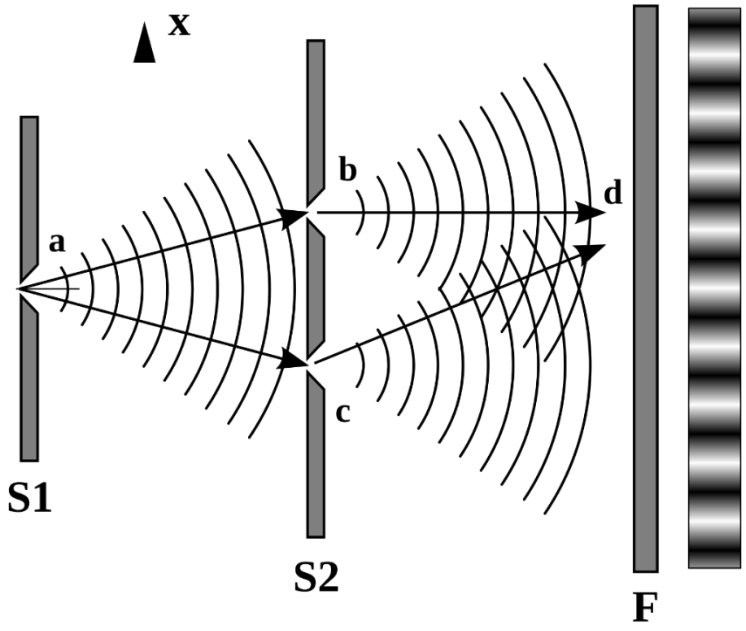
波： 位置が決まっていない



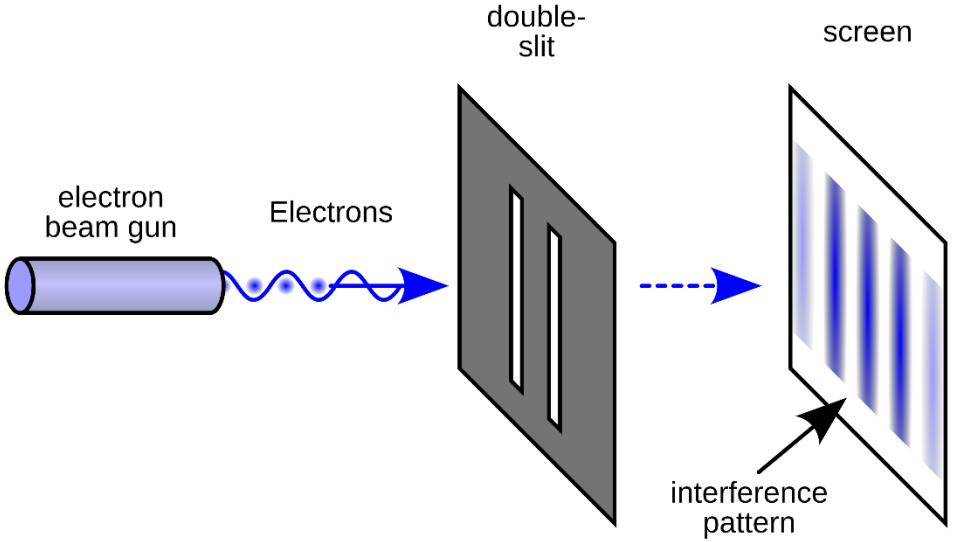


量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題



もし電子も波なのであれば、
電子でも同じような縞々が
できるはず



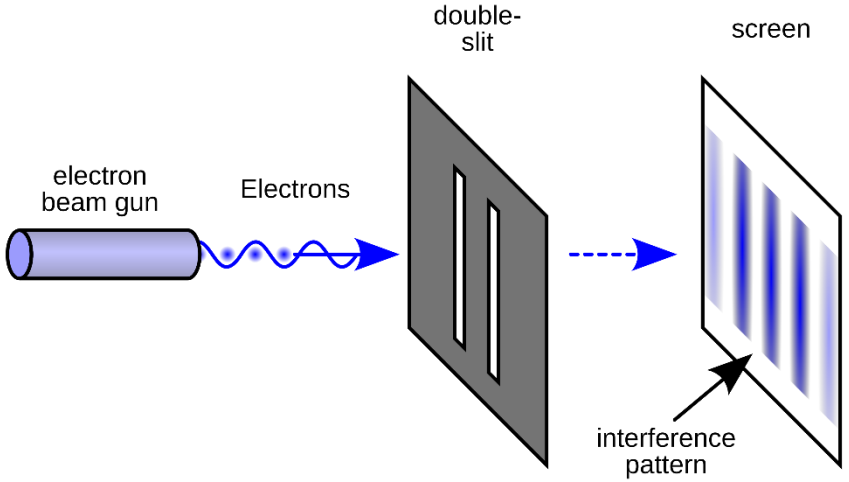
Wikipedia

ヤングの干渉実験
（二重スリットの実験）

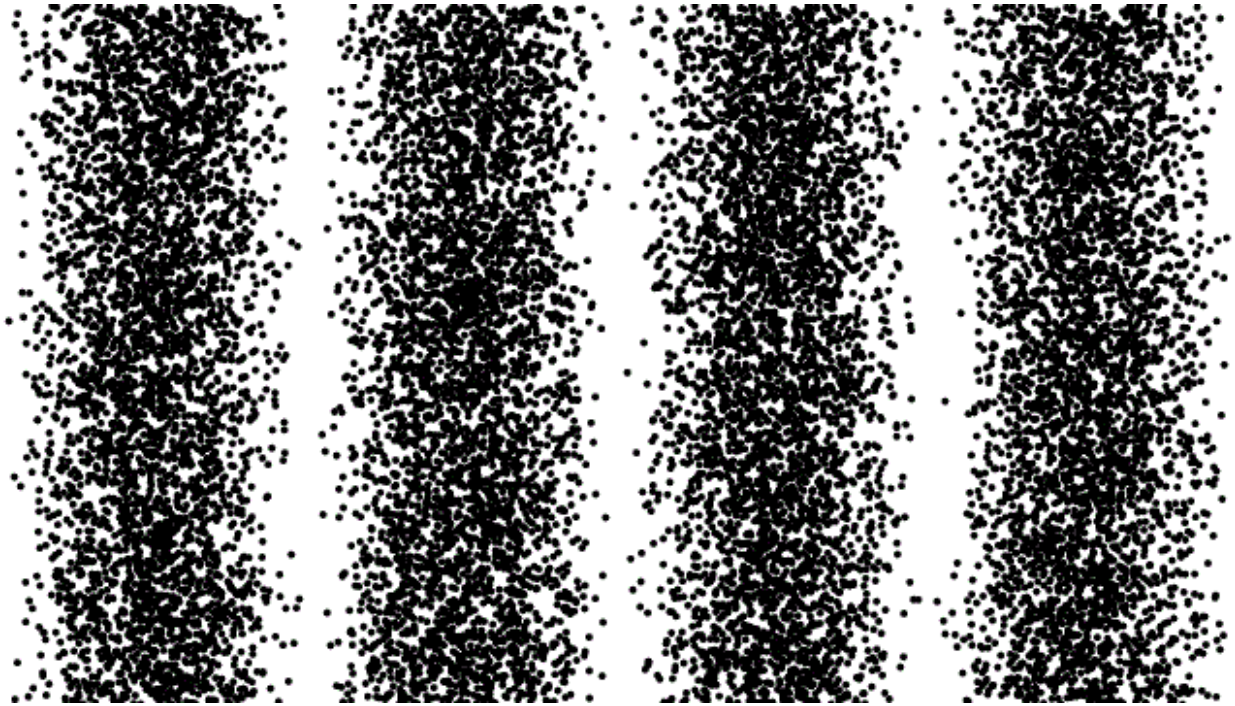
→できます

量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題



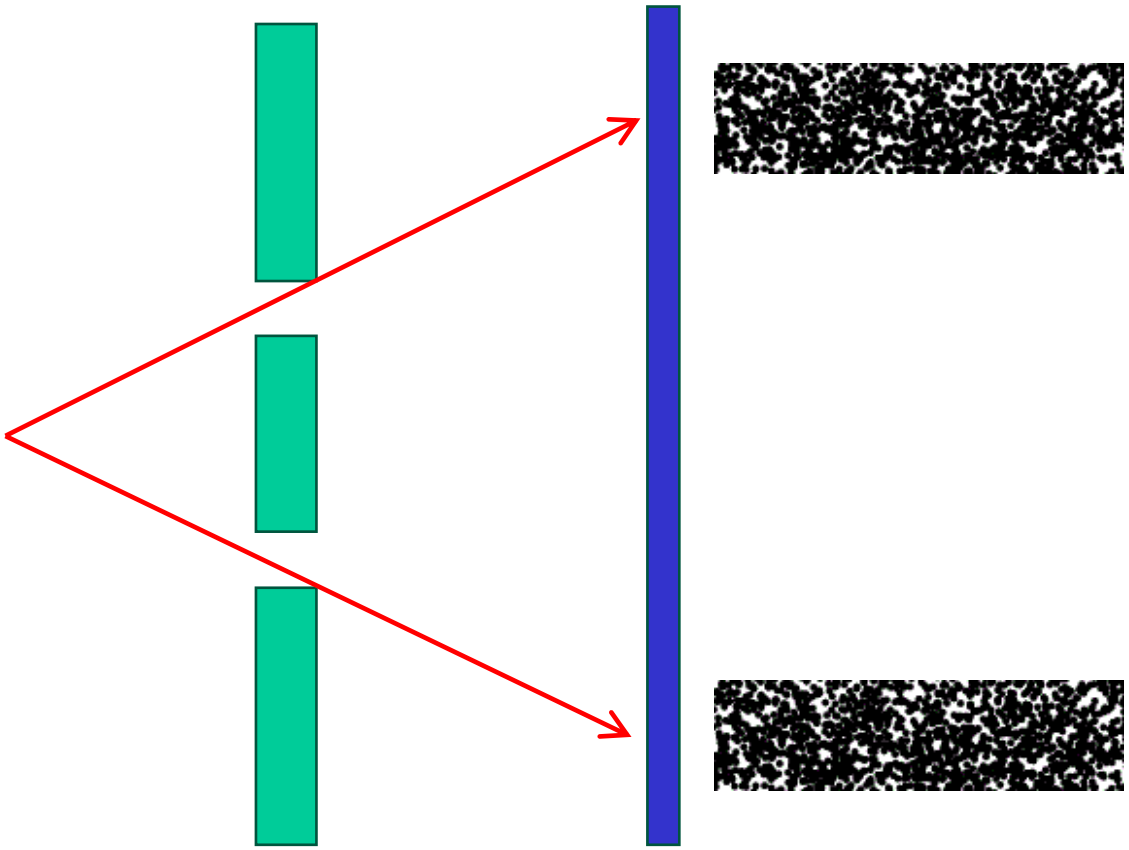
Wikipedia



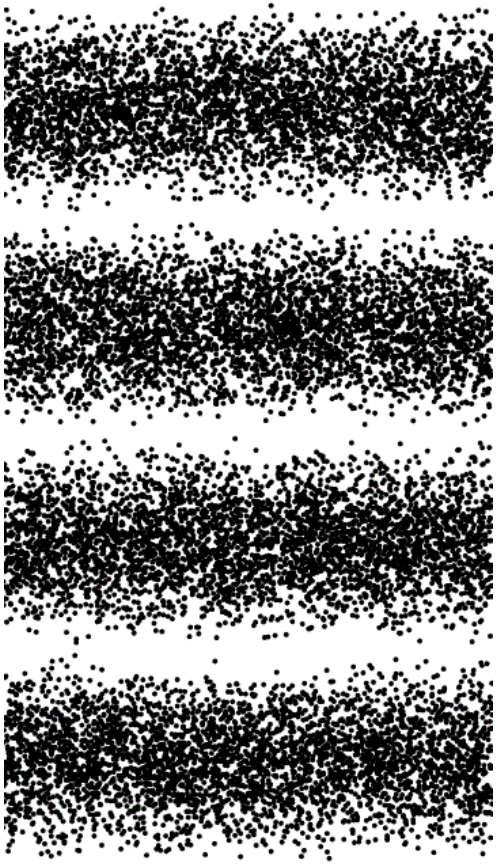
量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題

電子が粒子だとしたらこうなるはず

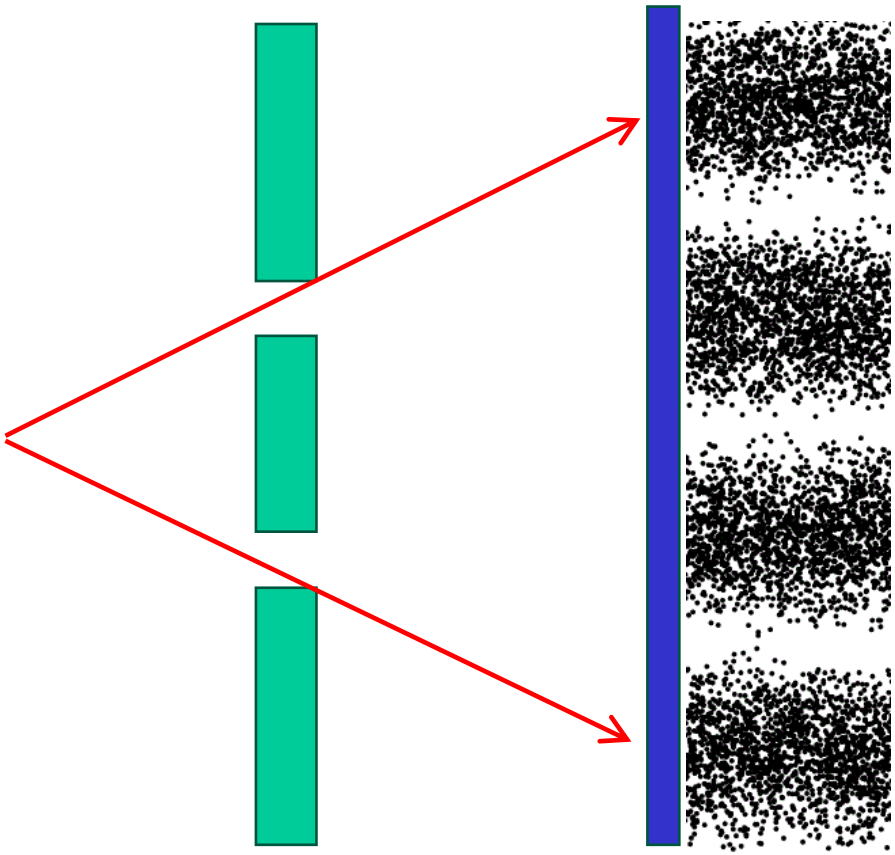


実際には

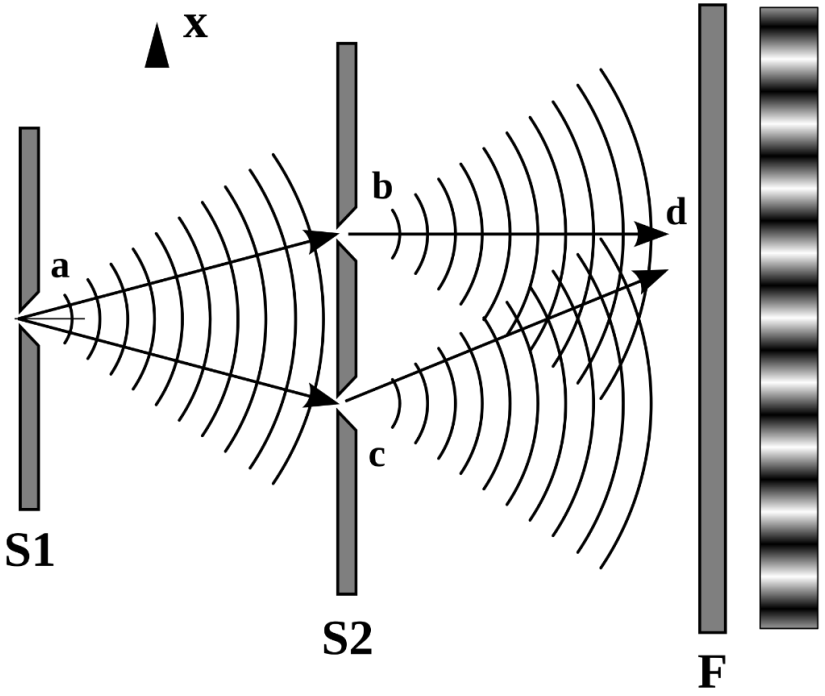


量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題



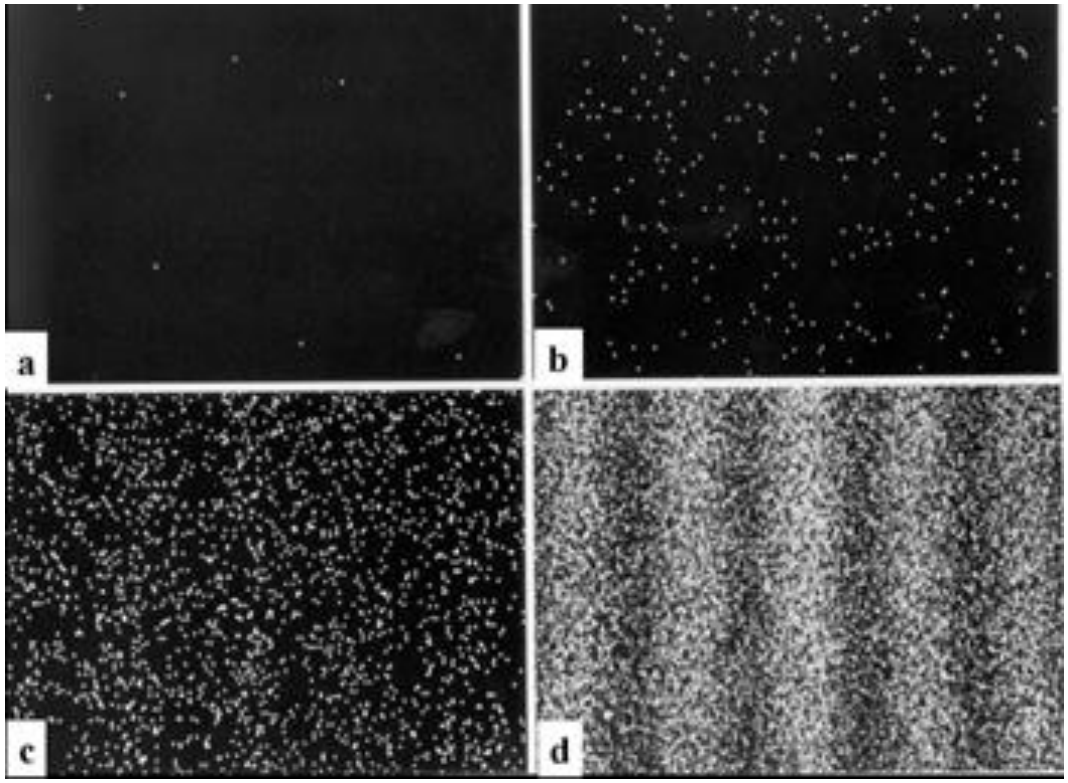
波の干渉のように
振る舞っている



量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題

外村彰氏の実験（1989年）



Wikipedia

外村彰氏
（1942-2012）

日立中央研究所

（ノーベル物理学賞の有力候補と思われていたが、惜しくも亡くなる）

量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題

外村彰氏の実験（1989年）

実際の映像　（7:30あたり）

https://www.youtube.com/watch?v=lp1xgTCLNe0

「世界で最も美しい実験」

外村彰氏
（1942-2012）

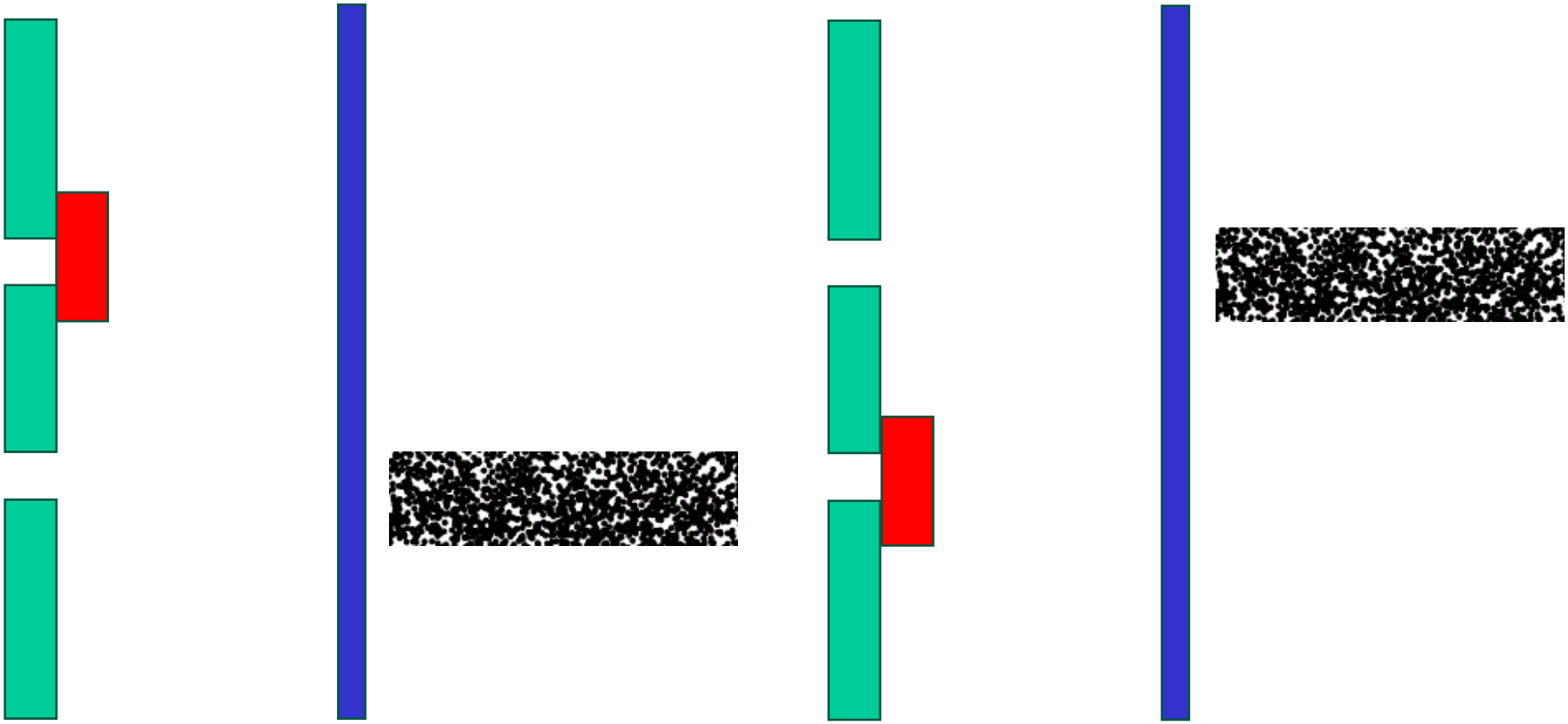
日立中央研究所

（ノーベル物理学賞の有力候補と思われていたが、惜しくも亡くなる）

量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題

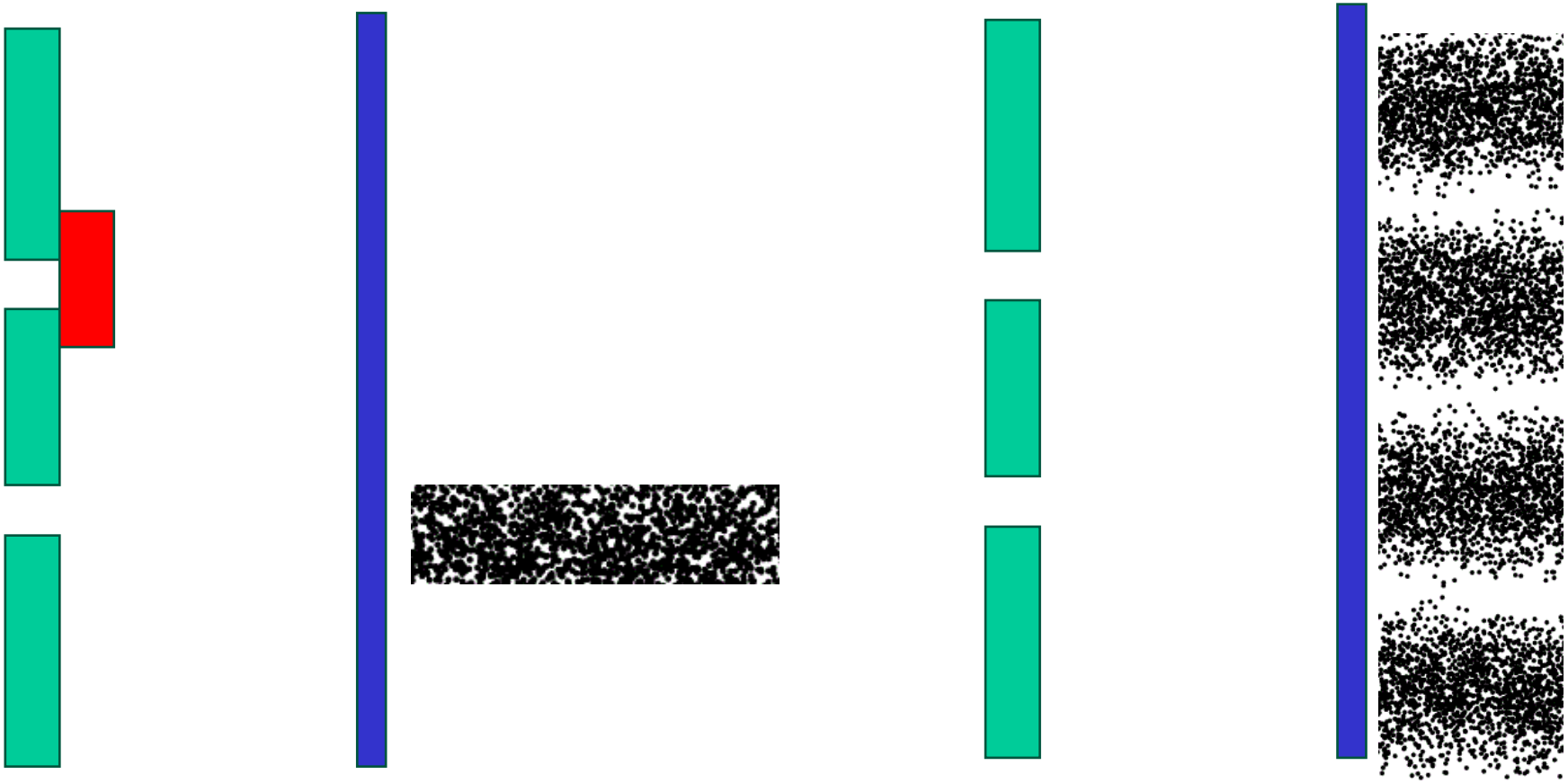
片方のスリットを塞ぐと:



量子力学の不思議な世界

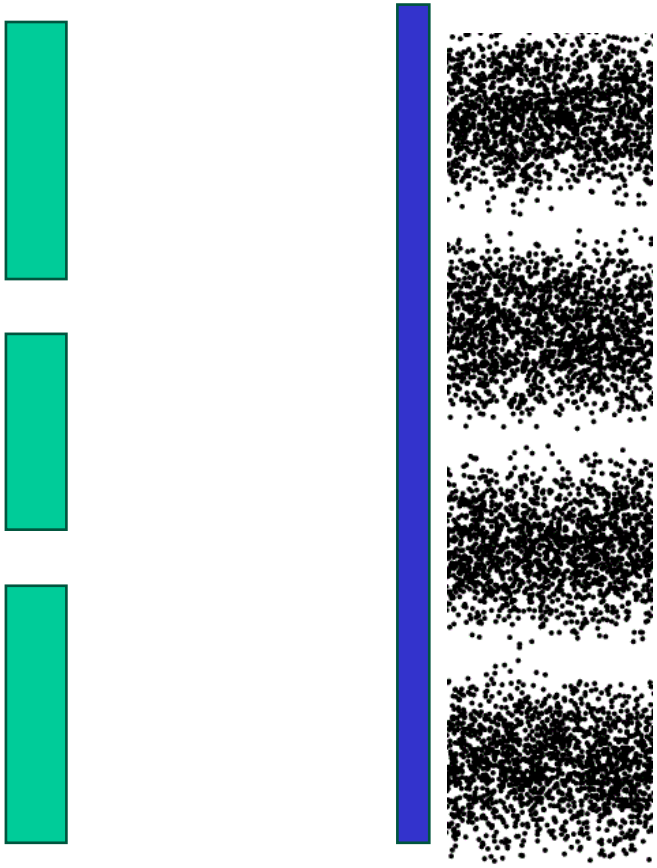
あたかも電子が両方のスリットを同時に通過しているかのように振る舞っている

なぜ電子は穴が2つあるのを知っているのか？



量子力学の不思議な世界

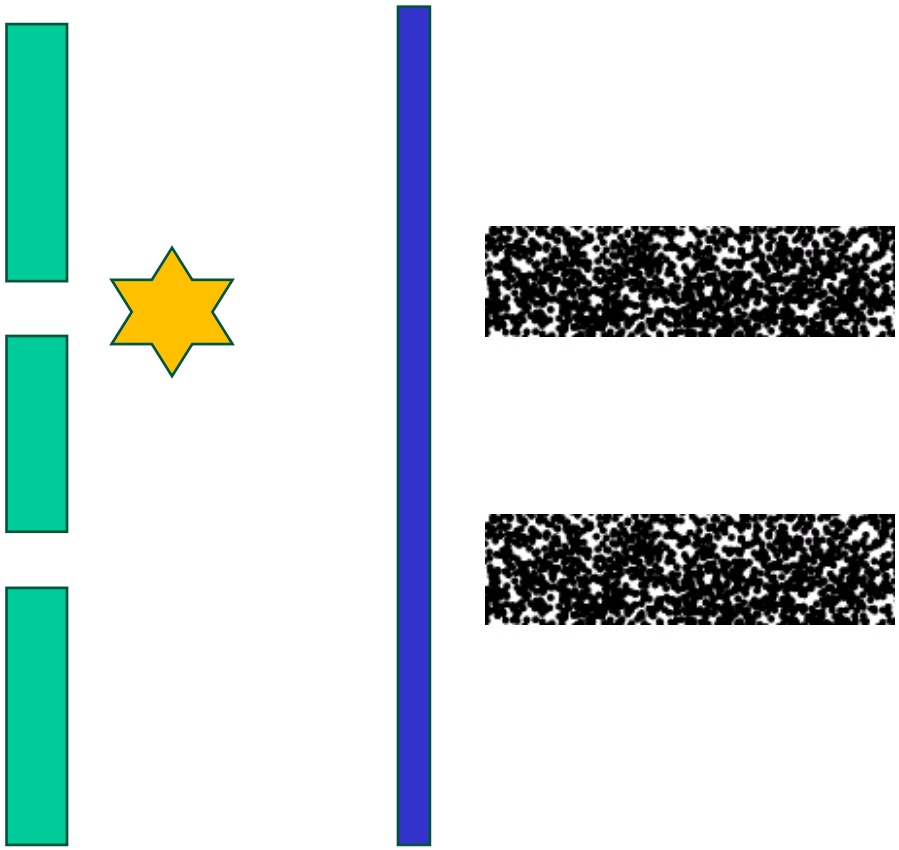
あたかも電子が両方のスリットを同時に通過しているかのように振る舞っている



量子スキーヤー

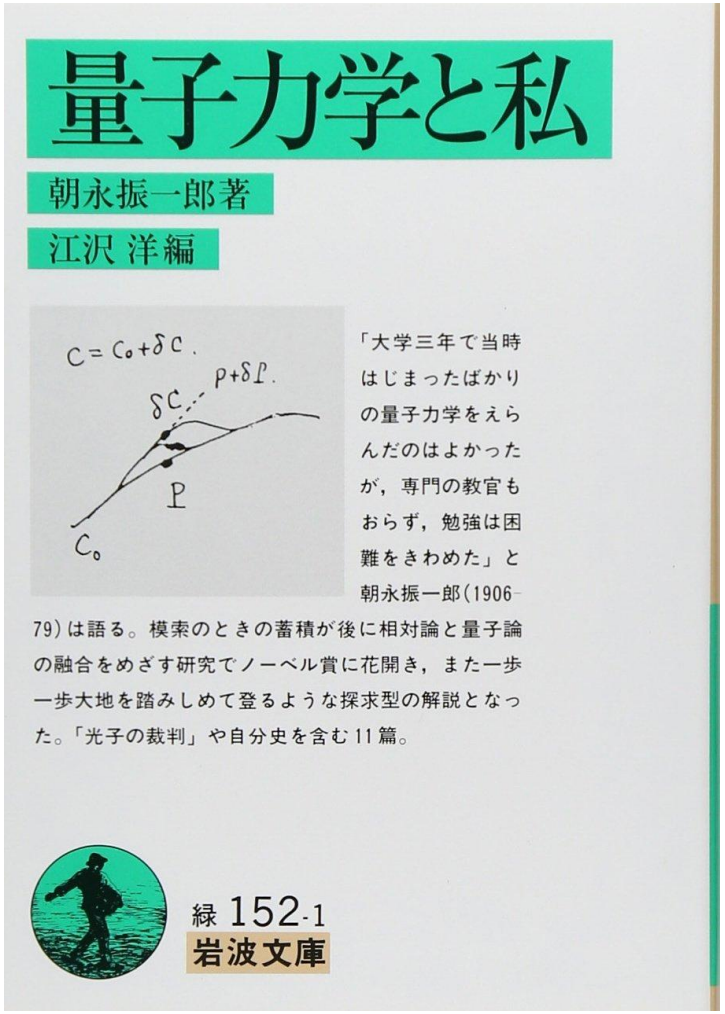
量子力学の不思議な世界

どちらのスリットを通ったのか分かるような
仕掛けをすると。。。。

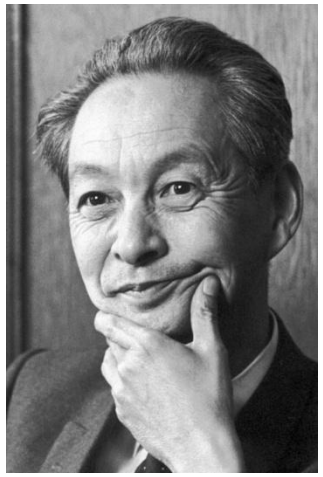


縞々が消えてしまう

量子力学の不思議な世界



「光子の裁判」
朝永振一郎



二重スリットの問題を一般向けに書いた法廷劇

量子力学が日本に入ってきたばかりの時期の様子に関するエッセイも。

勉強したくても専門で知っている人がいなくて苦労した。

→仁科芳雄の存在は大きかった

量子力学の不思議な世界

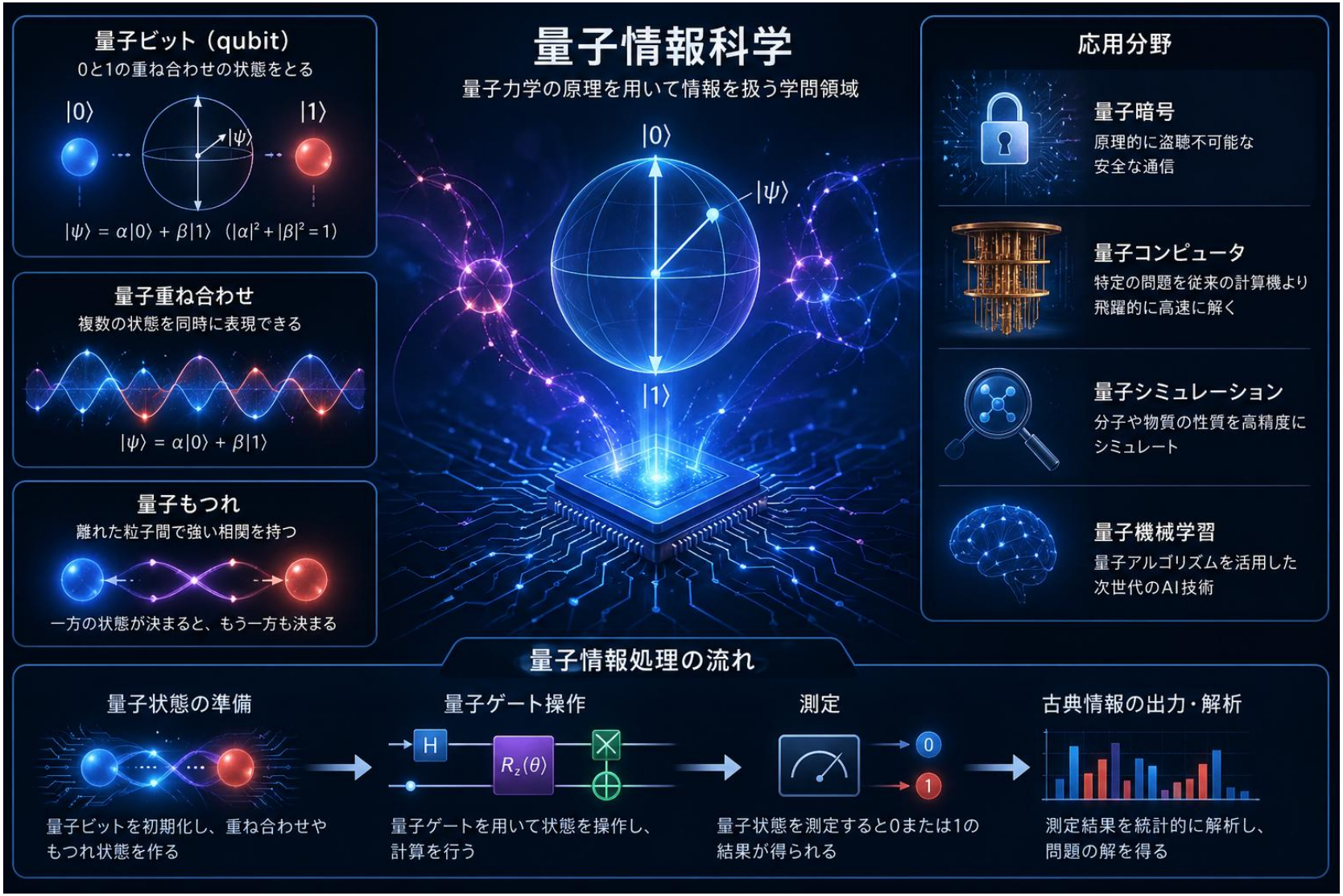
(b) 量子トンネル現象

古典力学：エネルギーが足りないと壁を越えれない
量子力学：エネルギーが足りなくても、ある確率で超える
ことができる

太陽が燃えて光っているのも量子トンネル現象のため

量子力学の発展：量子情報理論

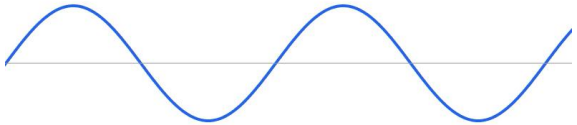
現在、大発展中！

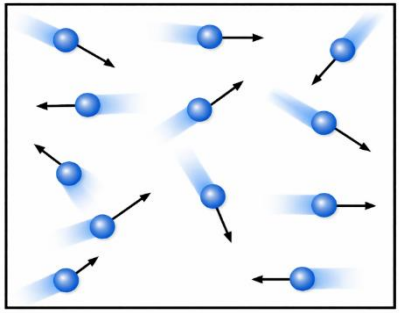


絵：ChatGPT画伯

まとめ

量子力学：光や電子は波でもあり粒子でもある
→我々の世界観を大きく変えた





古典の世界では光は波、電子は粒のように振る舞う
→極微の世界に行って初めて両者の二面性が見えた

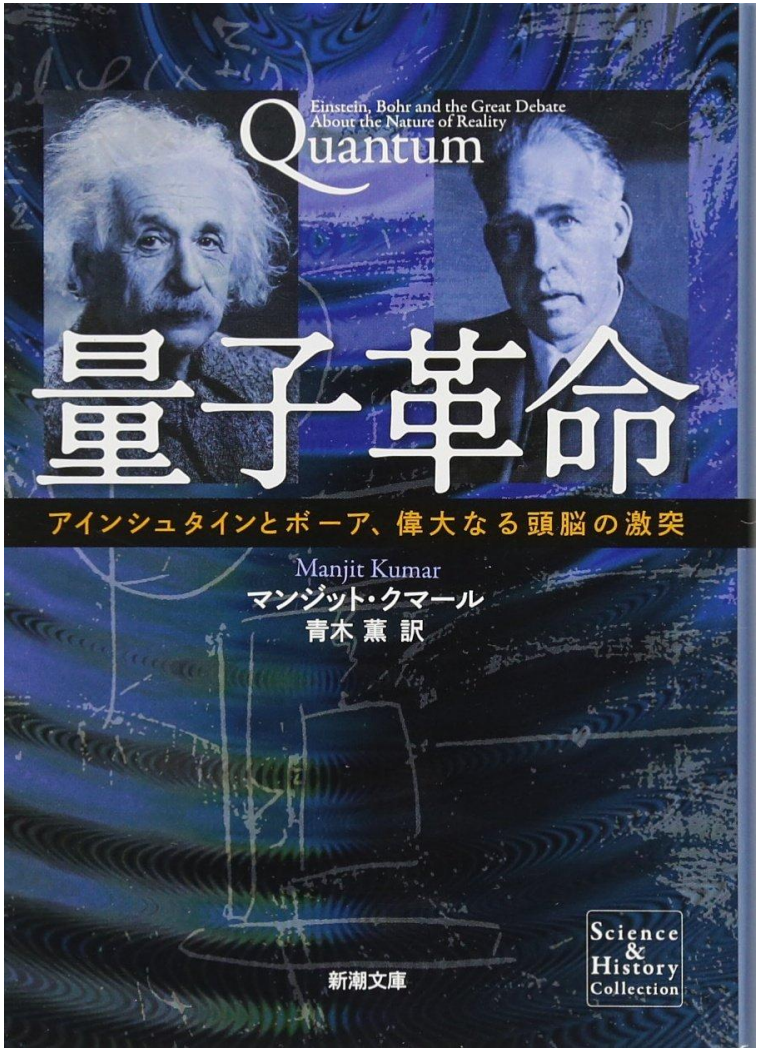
➡ 量子の不思議な世界

- 二重スリットの問題
- 量子もつれ
- 量子トンネル効果

など

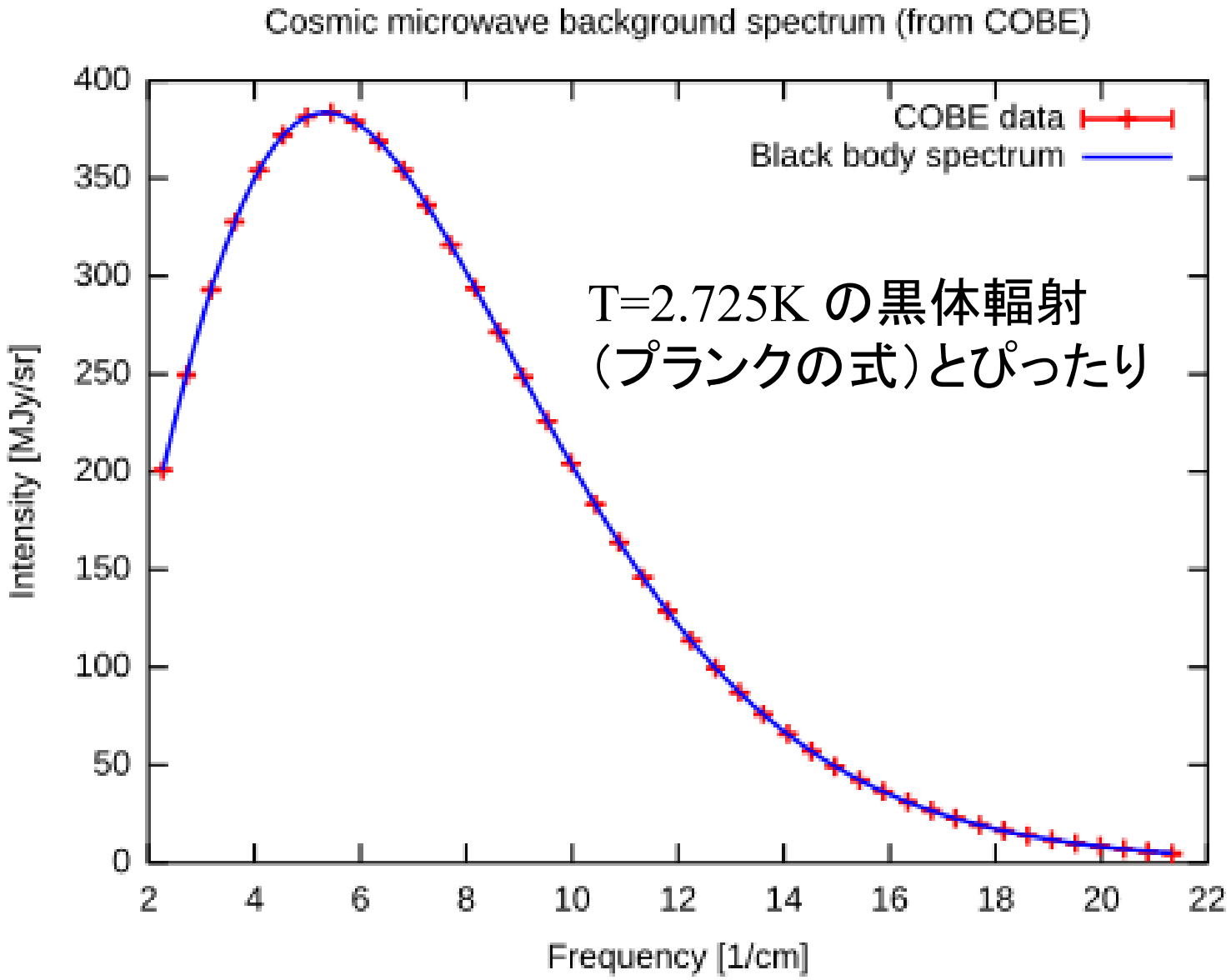
まとめ

量子力学：光や電子は波でもあり粒子でもある
→我々の世界観を大きく変えた

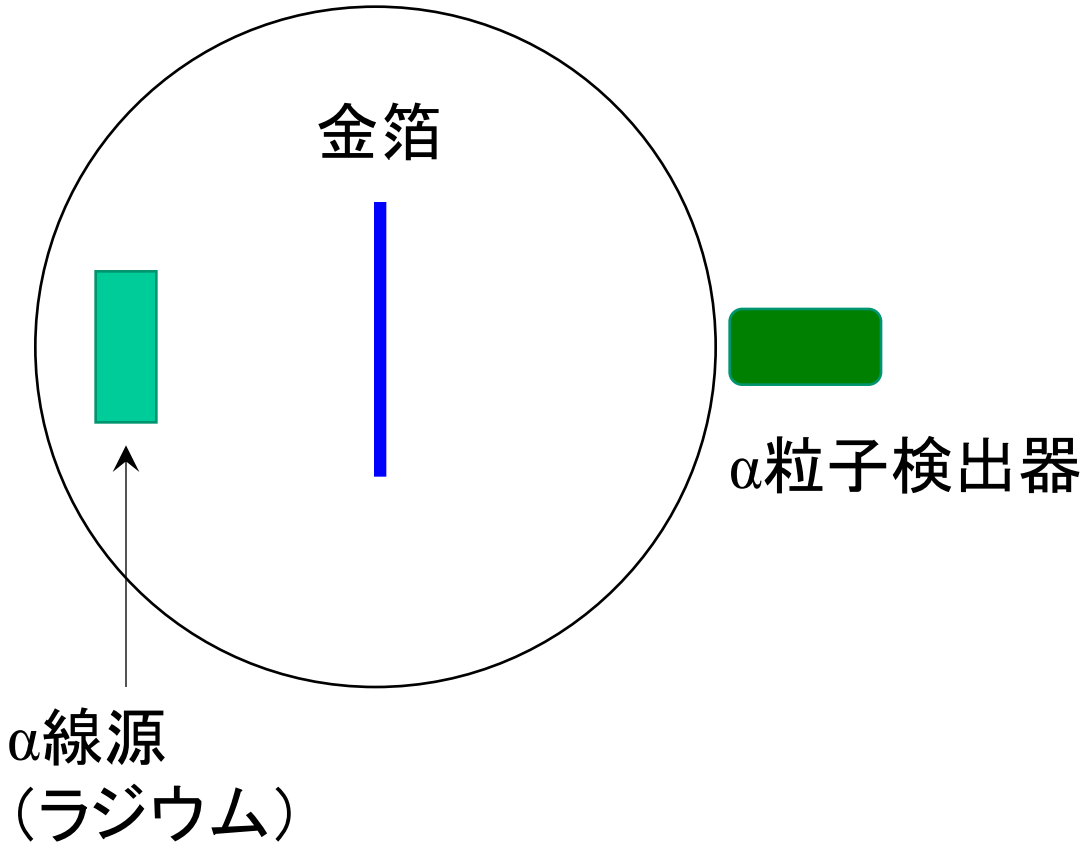


「量子革命」
マンジット・クマール著
青木薫訳
（新潮文庫）

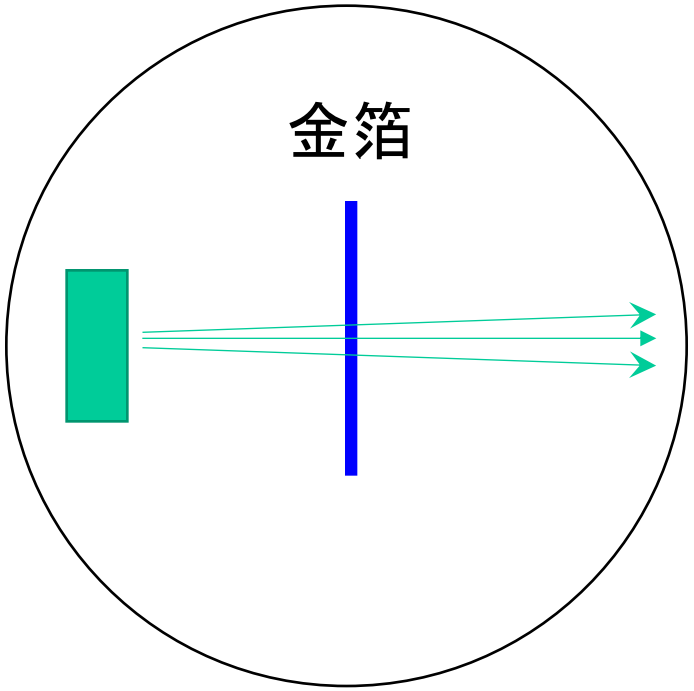
宇宙マイクロ波背景輻射（3度K輻射）



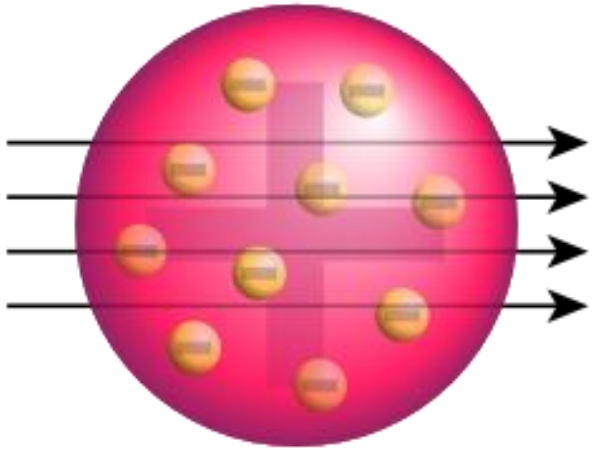
ラザフォード散乱 （ラザフォード、ガイガー、マースデン：1909年）



ラザフォード散乱 （ラザフォード、ガイガー、マースデン：1909年）



α粒子検出器

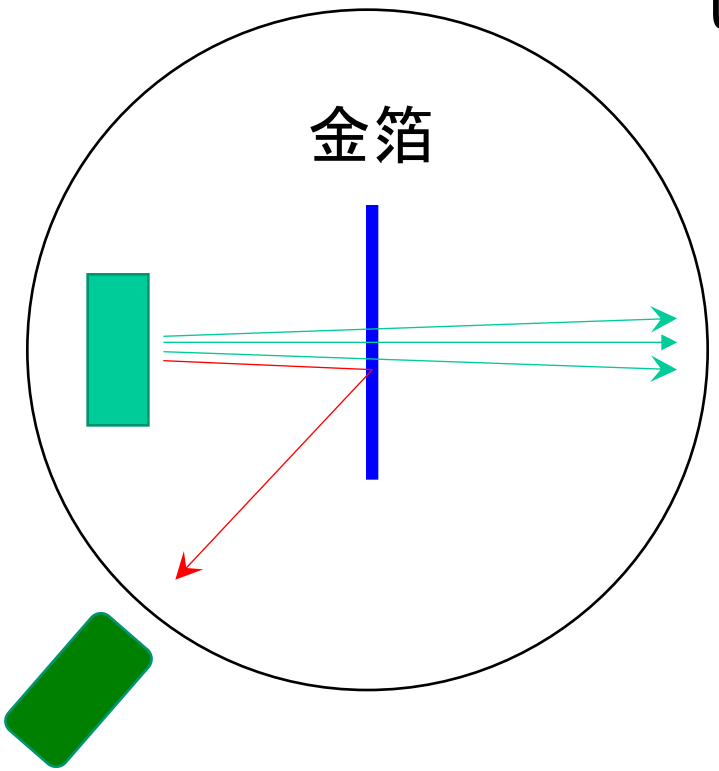


J.J.トンプソンのブドウパン模型を検証したい

散乱の角度は高々 0.01 度

観測：たいていのα粒子はほとんど曲げられずに検出器に入る
→ブドウパン模型は正しそうだ(?)

ラザフォード散乱 （ラザフォード、ガイガー、マースデン：1909年）

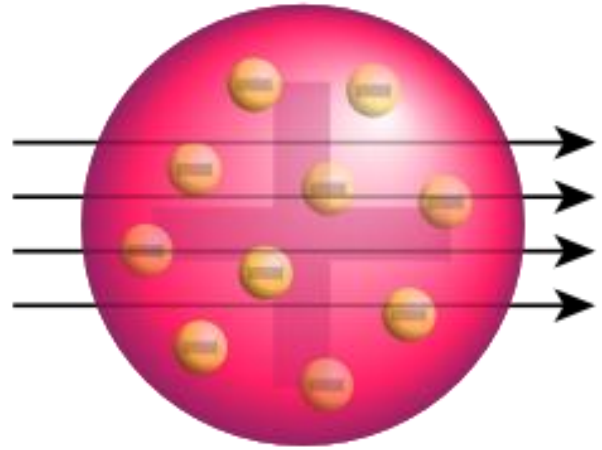


試しに検出器を後方角度に置いて見た
（ブドウパン模型が正しければ、何も観測しないはず）

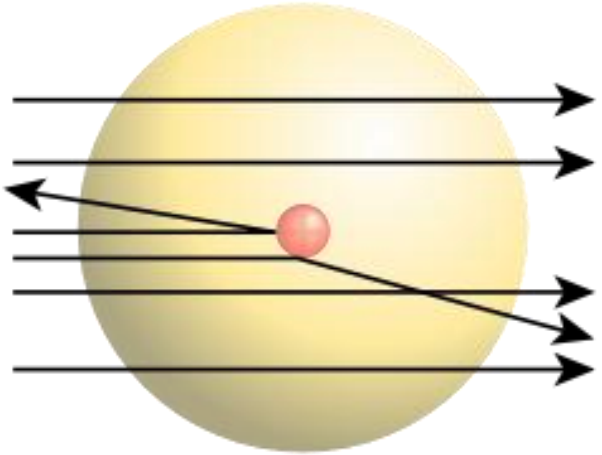
約8千個に1個の割合で後方に跳ね返ってくるα粒子を観測
（驚愕の事実）

「砲弾をティッシュペーパーに向かって撃ったところ、跳ね返されてきた」

ラザフォード散乱 （ラザフォード、ガイガー、マースデン：1909年）



J.J. トムソンのぶどうパン模型



ラザフォードの有核原子模型

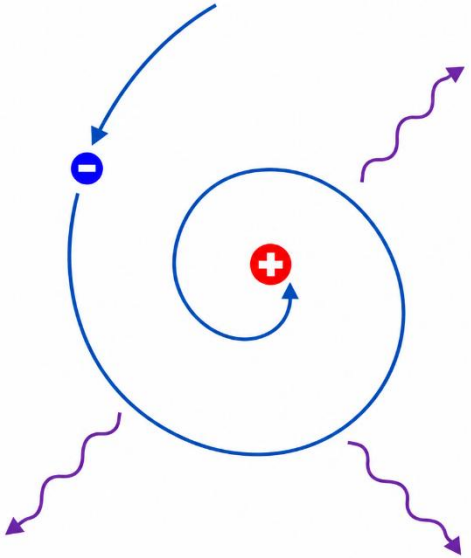
（原子核を点状粒子とみなした解析）

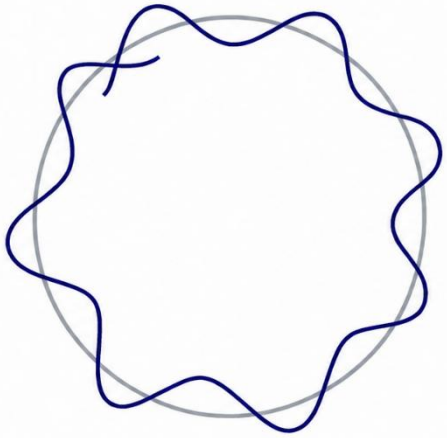
→ 原子核の大きさは約 2×10^{-14} m 以下

ド・ブロイ波

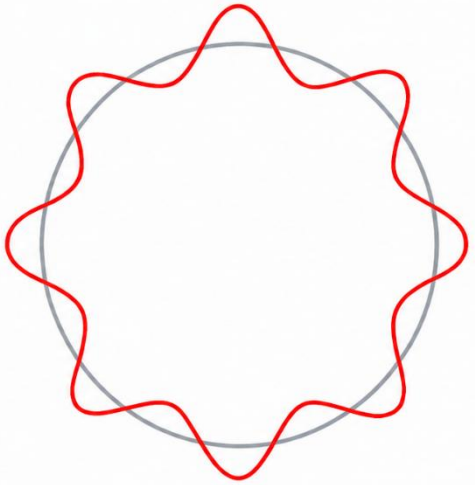
ド・ブロイ波の考え方

原子の安定性





閉じていない



閉じている

1周回った時に波が閉じていないといけない

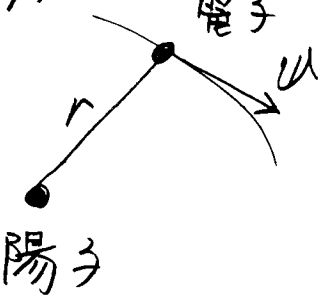
（古典力学では）
軌道を回る電子
→電磁波を放出して半径が収縮

0.00000000001秒（10^{-11}秒）で原子が消失!

来週もう少し詳しく

四 原子の安定性

水素原子



古典力学 : $m\ddot{\vec{r}} = -\frac{e^2}{r^2}\vec{e}_r$

$\rightarrow |\ddot{\vec{r}}| = \frac{e^2}{mr^2}$

荷電粒子が加速度運動
→ 電磁放射によるエネルギー消失

単位時間当たりのエネルギー消失 (電磁気)

$S = -\frac{dE}{dt} = \frac{2}{3}\frac{e^2}{c^3}\ddot{\vec{r}}^2$ (erg/s)

$= \frac{2e^6}{3m^2c^3r^4}$

(note) $E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{e^2}{r} = -\frac{e^2}{2r}$

$\searrow \dot{E} = \frac{e^2}{2r^2}\dot{r} = -\frac{2e^6}{3m^2c^3r^4}$

$\searrow r^2\dot{r} = -\frac{4e^4}{3m^2c^3}$

$\| \quad \frac{1}{3}\frac{d}{dt}r^3$

$\rightarrow r^3(t) = r_0^3 - \frac{4e^4}{m^2c^3}t$

(ビリアル定理)

$V(r) = ar^{n+1}$ のとき

$\langle T\rangle = \frac{n+1}{2}\langle V\rangle$

$n=-2 \rightarrow \langle T\rangle = -\frac{\langle V\rangle}{2}$

$\downarrow$

$E = \frac{1}{2}\langle V\rangle$

→ 半径が小さくなっていく

$r(t) = 0$ となるのは $t = \frac{m^2c^3}{4e^4}r_0^3$

$r_0 = 1\text{Å} = 10^{-10}\,m = 0.1\,nm$ とすると $t \sim 10^{-10}$ sec.

古典力学では原子の寿命は 10^{-10} 秒