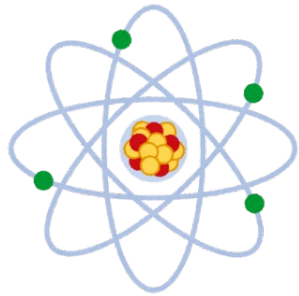


量子力学の世界



萩野浩一
京都大学大学院理学研究科 教授



5/30(土) 「量子力学の100年」
6/27(土) 「量子力学のこれから」

量子の不思議な世界のことをお話ししたいと思います。

簡単な自己紹介

名前: 萩野浩一 (はぎのこういち)

生まれ: 宮城県仙台市

育ち: 神奈川県平塚市、
北海道札幌市、
千葉県銚子市

略歴:

- ・銚子市立銚子高校
→ 東北大学理学部
- ・ワシントン大学研究員
- ・京都大学助手
- ・東北大学理学部准教授
- ・京都大学理学部教授 (2019-)

専門: 理論物理 (原子核の理論)

趣味: 歴史散歩
先祖調べ
くずし字
日本酒

最近の注目: 狛犬



簡単な自己紹介

これです！

名前：
生まれ：
育ち：

略歴：

専門：



散歩
ベ
コ

狛犬

芦屋神社 2026年5月30日

この講座のテーマ:

りょうし りきがく

量子力学

2025年は量子力学100周年

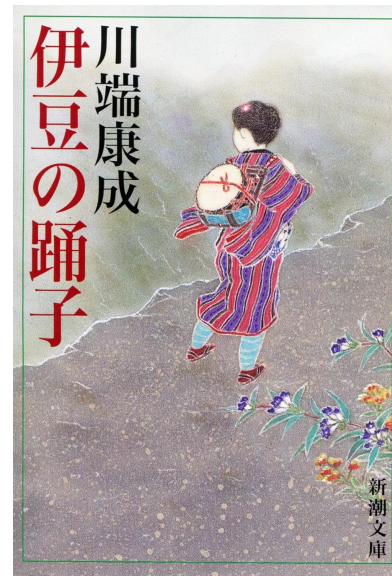
1925年: ハイゼンベルクの行列力学

1926年: シュレーディンガー方程式



1926年＝大正15年/昭和元年

川端康成が伊豆の踊り子を発表する



<https://www.britannica.com/biography/Kawabata-Yasunari>

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



この講座のテーマ:

りょうし りきがく
量子力学

= quantum mechanics

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



この講座のテーマ:

りょうし りきがく
量子力学

= quantum mechanics

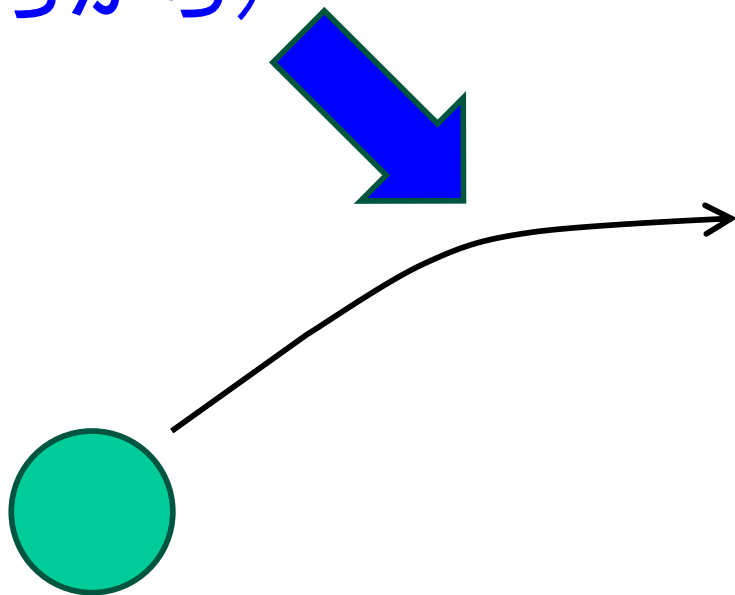
- もともとはラテン語の“quantus”（どれだけ(の量)?)
- アインシュタインなどがエネルギーなどの「つぶ」という意味で「quantum(量子)」という言葉を使い始めた。
- quantum を「量子」と訳したのは長岡半太郎(1911年)
- 「量子力学」はボルンによる造語(1924年)

この講座のテーマ:

りょうし りきがく
量子力学

力(ちから)

力(ちから)の学問



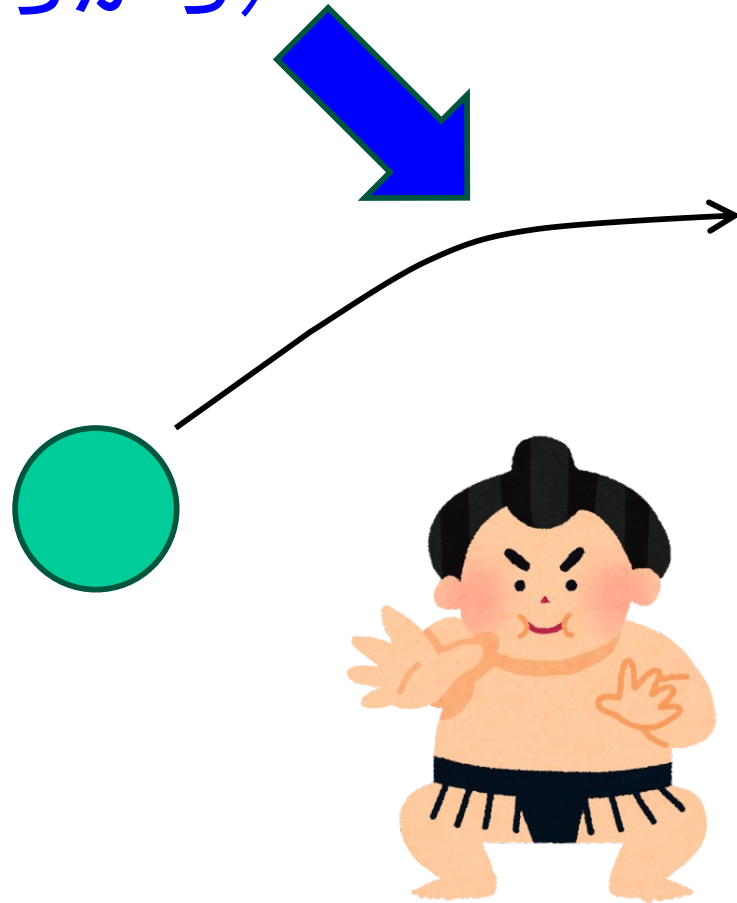
力を受けると運動が変わる

$$ma = F \quad \text{力}$$

重さ 速度の変化

力学=力(ちから)の学問

力(ちから)



力を受けると運動が変わる

$$a = \frac{F}{m}$$

速度の変化
(加速度)

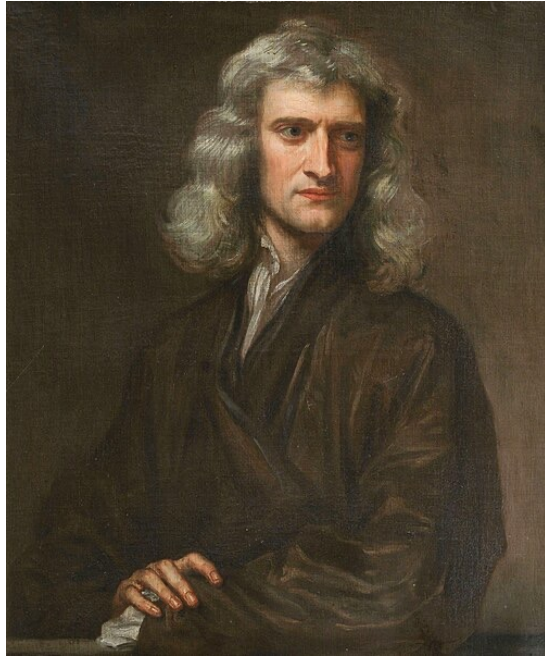
力

重さ



同じ大きさの力で押しても、力士の運動は変わりにくく、
風船の運動は変わりやすい

力学=力(ちから)の学問 $ma = F$



ニュートン (1642-1727)

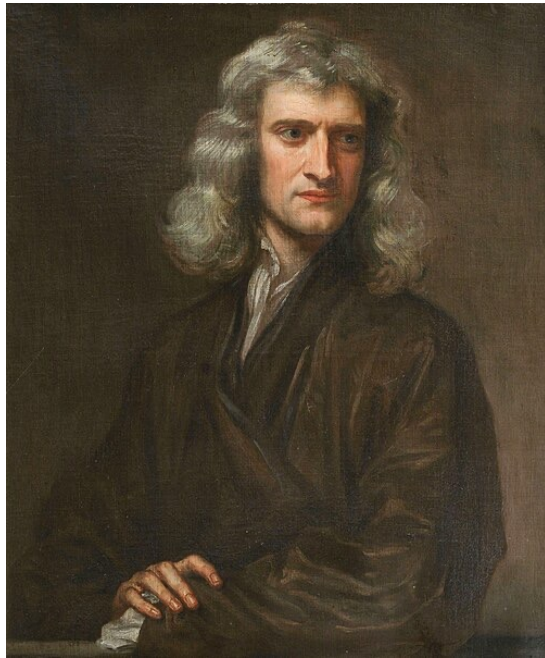
寛永19年～享保12年



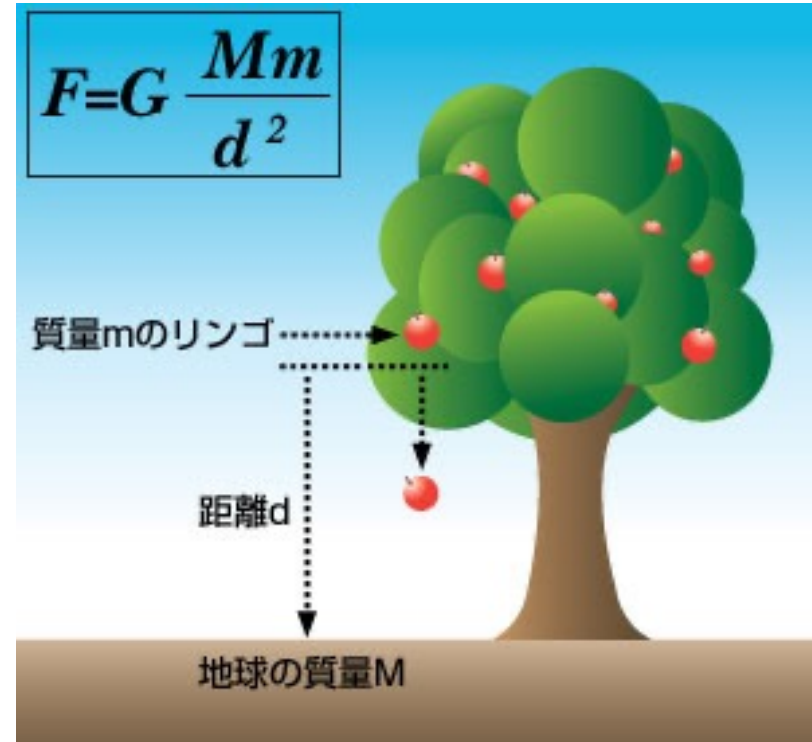
吉良上野介は寛永18年生まれ
浅野内匠頭の刃傷事件はニュートン
が59歳のとき

力学=力(ちから)の学問

$$ma = F$$



ニュートン (1642-1727)

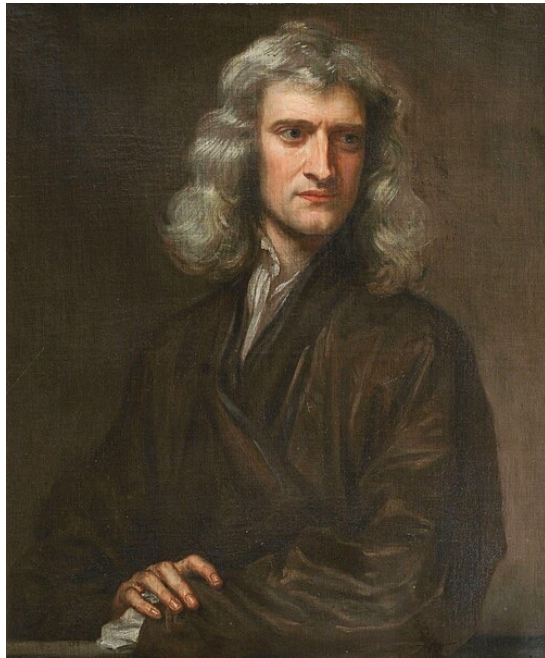


JAXAのページより

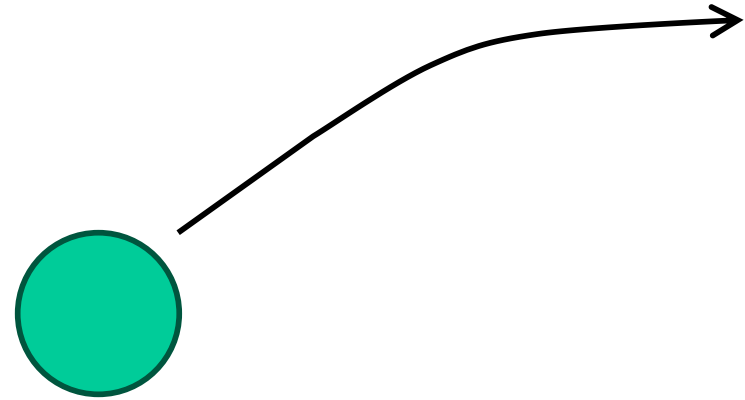
万有引力の法則

力学=力(ちから)の学問

$$ma = F$$



ニュートン (1642-1727)



力が分かれば、物の運動を
全て予測できる

(例えば)

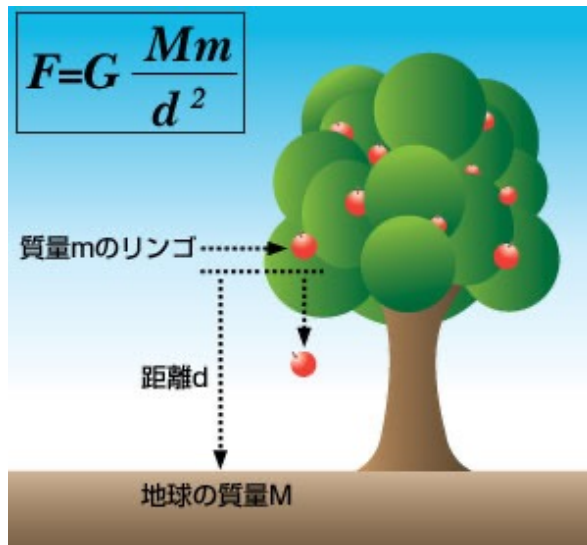
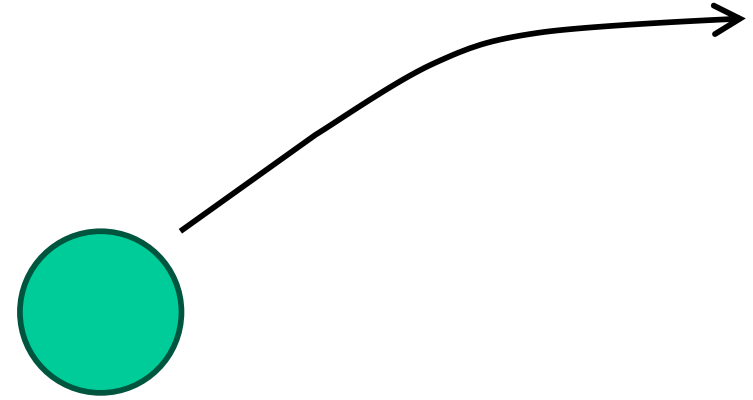
12:00 に北東方向に時速 4 km で動いていたボールが
13:00 にどの方向にどのくらいの速さで動いているか?

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)

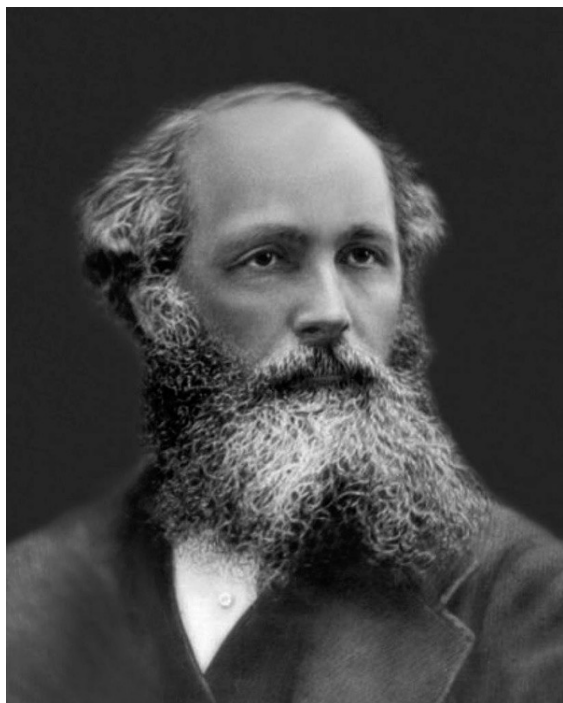


JAXAのページより



Wikipedia

電磁気力(電気や磁石の力)



Wikipedia

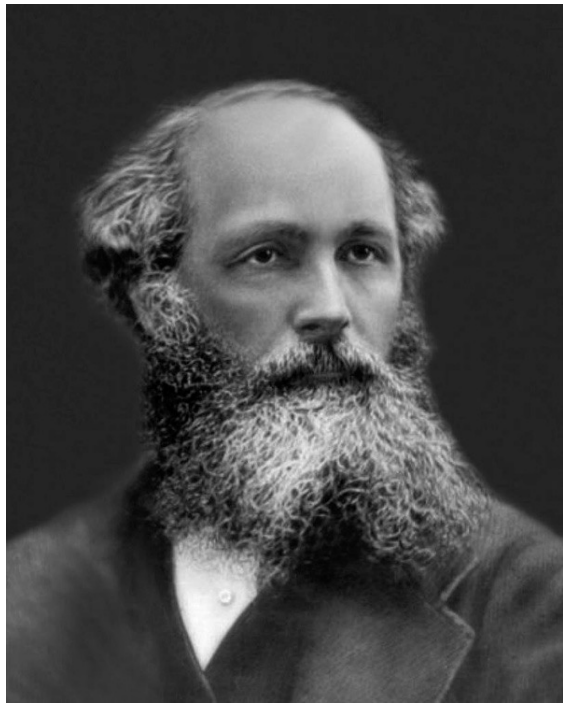
マクスウェル(1831-1879)

天保2年～明治12年



吉田松陰は
天保元年生まれ

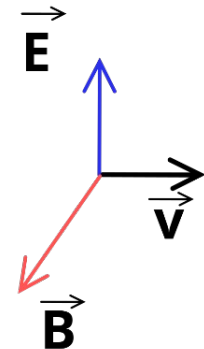
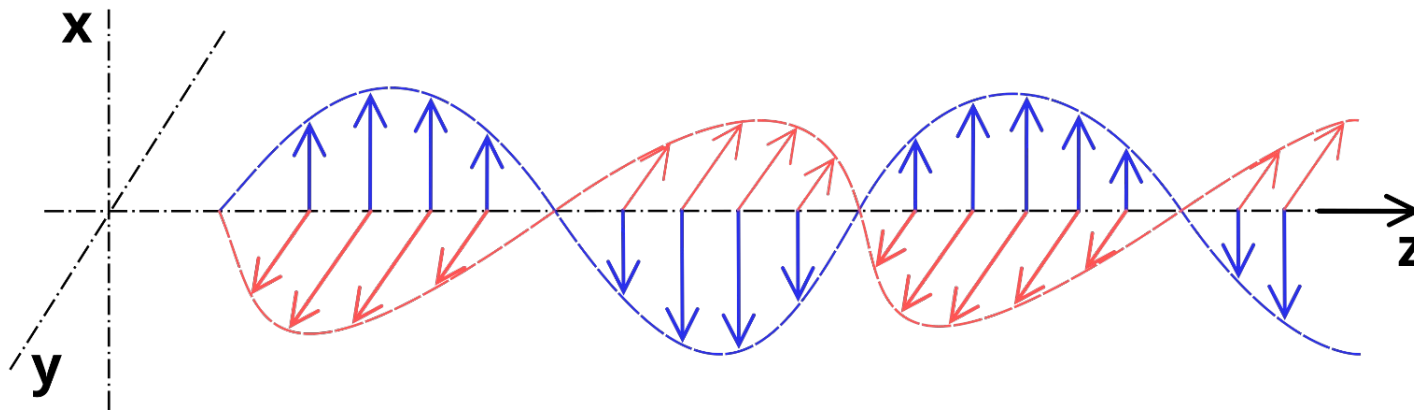
電磁気力(電気や磁石の力)



マクスウェル方程式

「光は波(電磁波)である」

マクスウェル(1831-1879)



電磁気力(電気や磁石の力)

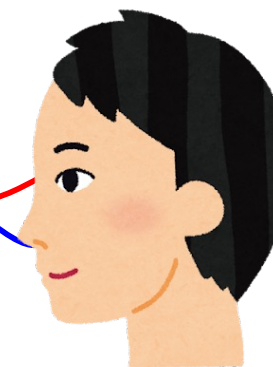
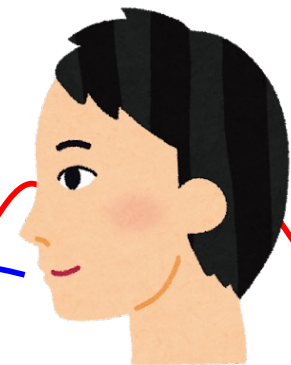
波の性質:重ね合わせ



2つのスピーカー



YAMAHA MS101-4



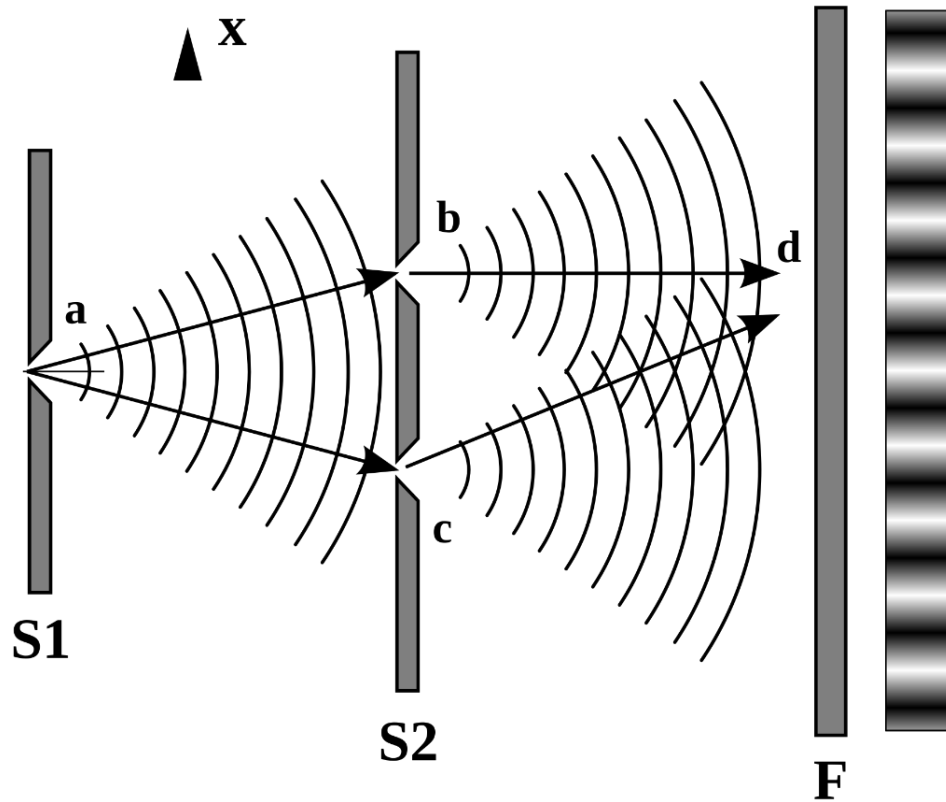
聞く場所によって音の
大きさが変わる

2つの音(波)が強め合ったり
弱め合ったりするから

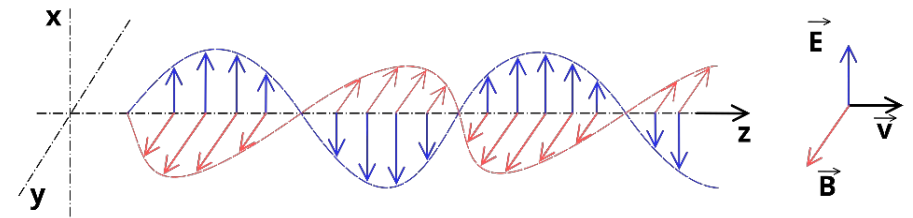
電磁気力(電気や磁石の力)

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)



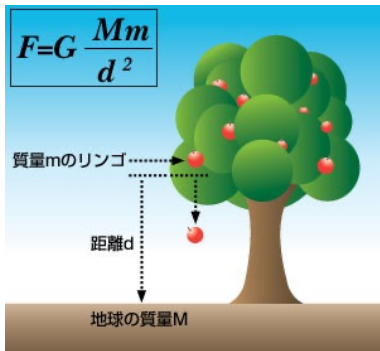
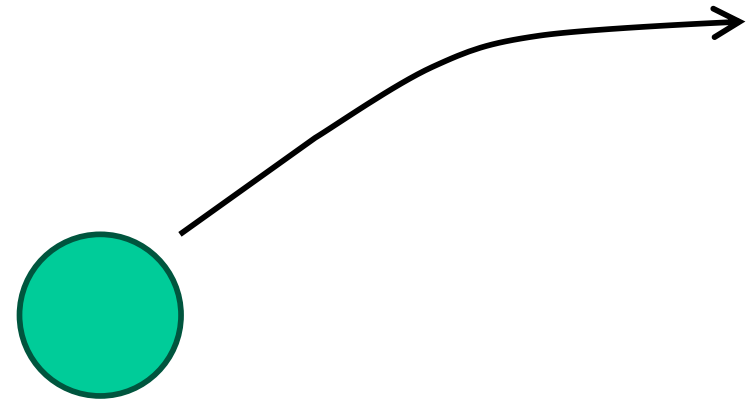
濃いところと薄いところが
現れる(干渉縞)

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)



○○力学は他にも:

- 熱力学
- 統計力学
- 流体力学

など

JAXAのページより

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

量子力学ことはじめ

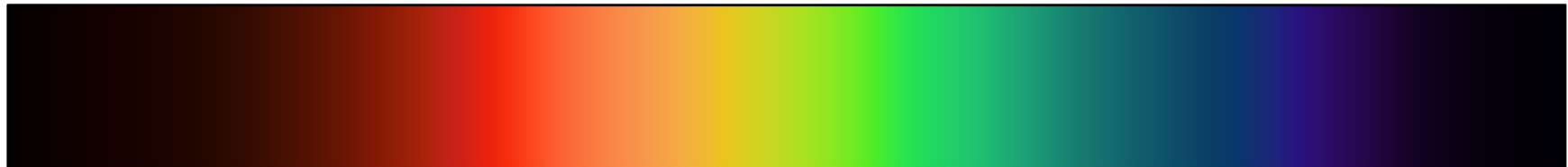


鉄鋼炉の色を見て鉄の温度を知りたい

<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

太陽光に様々な波長(周波数)の光が混ざっているように

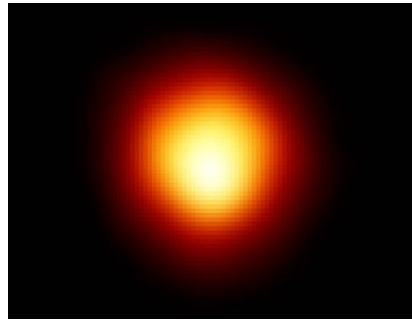


鉄鋼炉からの光にも様々な波長(周波数)の光が混ざっている

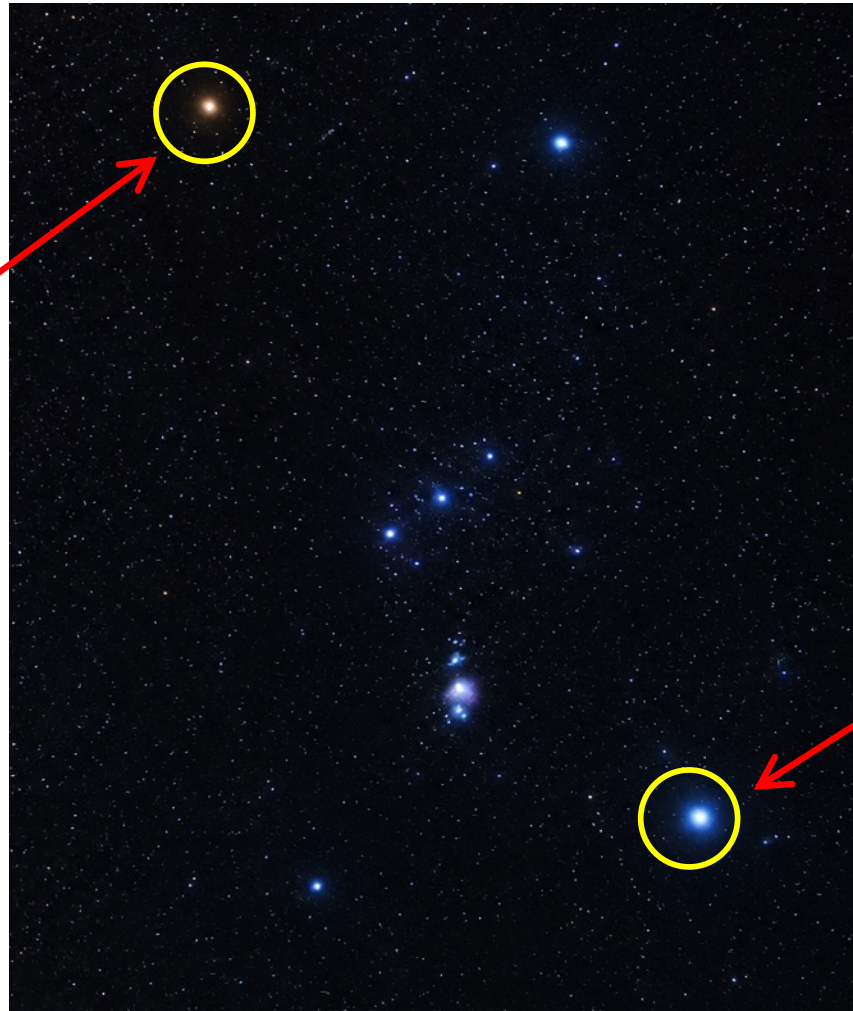
光の波長と色



星の場合：
オリオン座



ベテルギウス
約 3,500 °C
→赤く光る



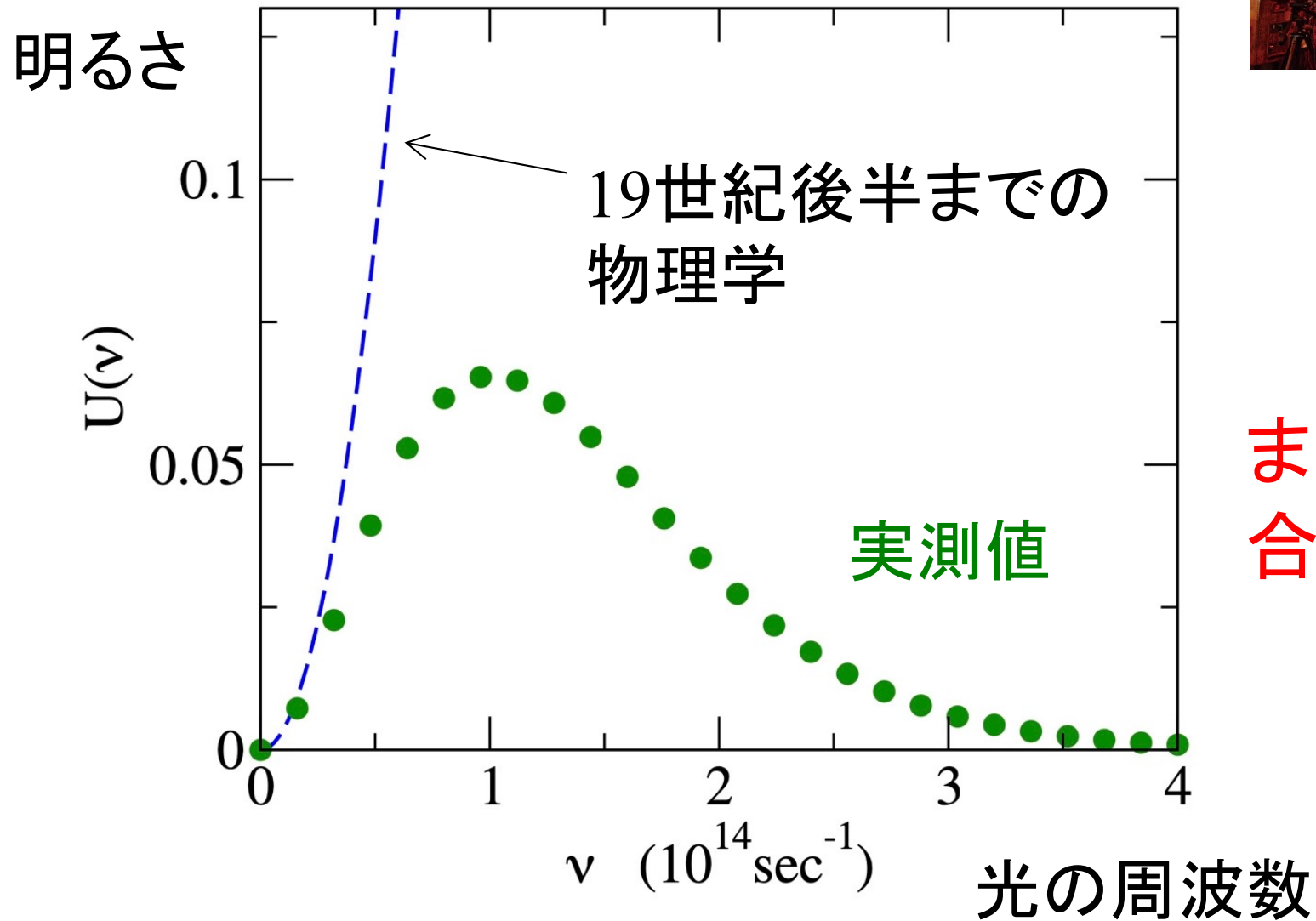
リゲル
約 11,000 °C
→青白く光る

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。。。

温度: 1449°C



まったく
合わない！

量子力学ことはじめ

➤ 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
(1858-1947)

➤ マックス・プランク 「エネルギー量子」(1900年)



10円



20円



30円

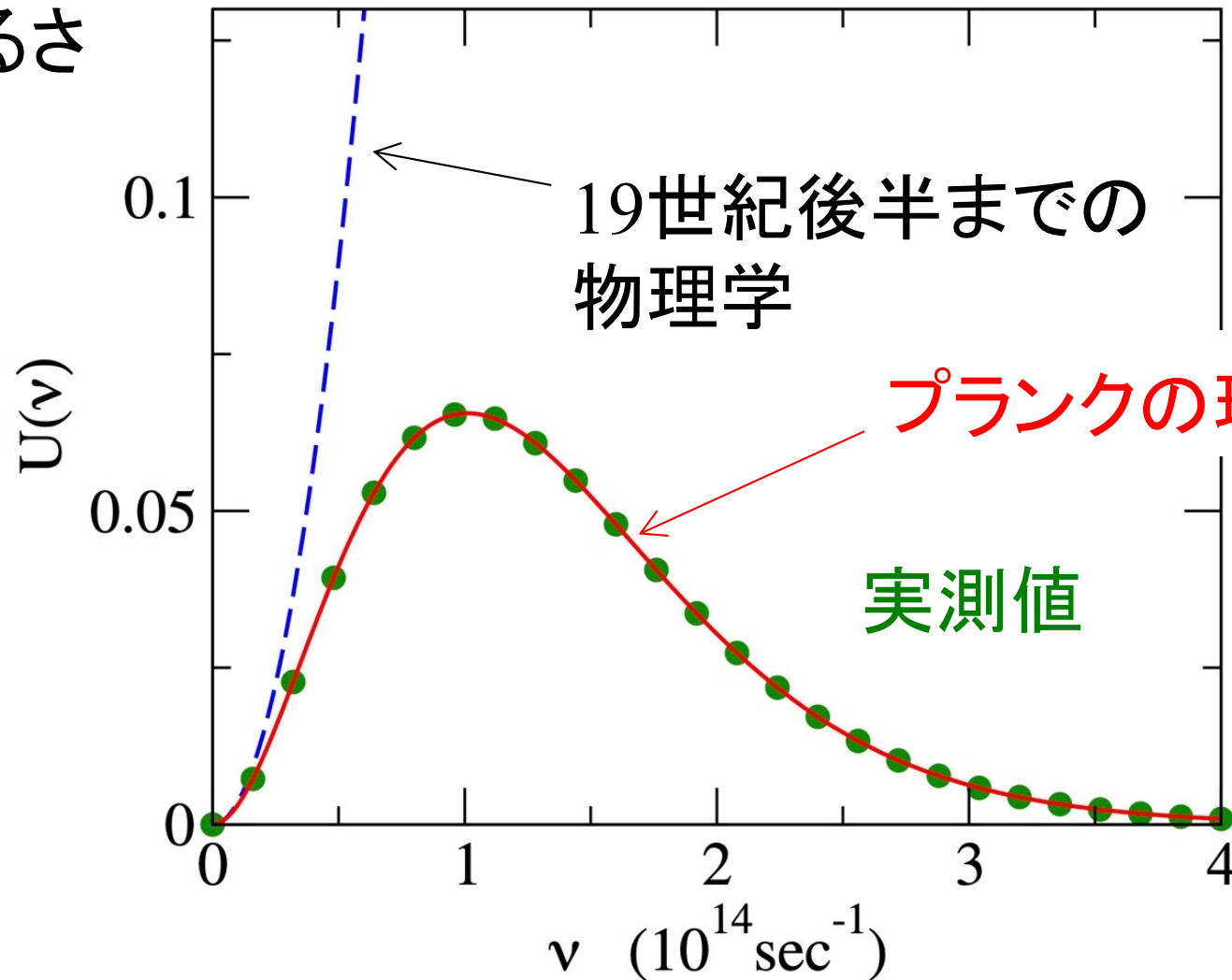
エネルギーは「とびとび」の値のみ許される

量子力学ことはじめ



温度: 1449°C

明るさ



19世紀後半までの物理学

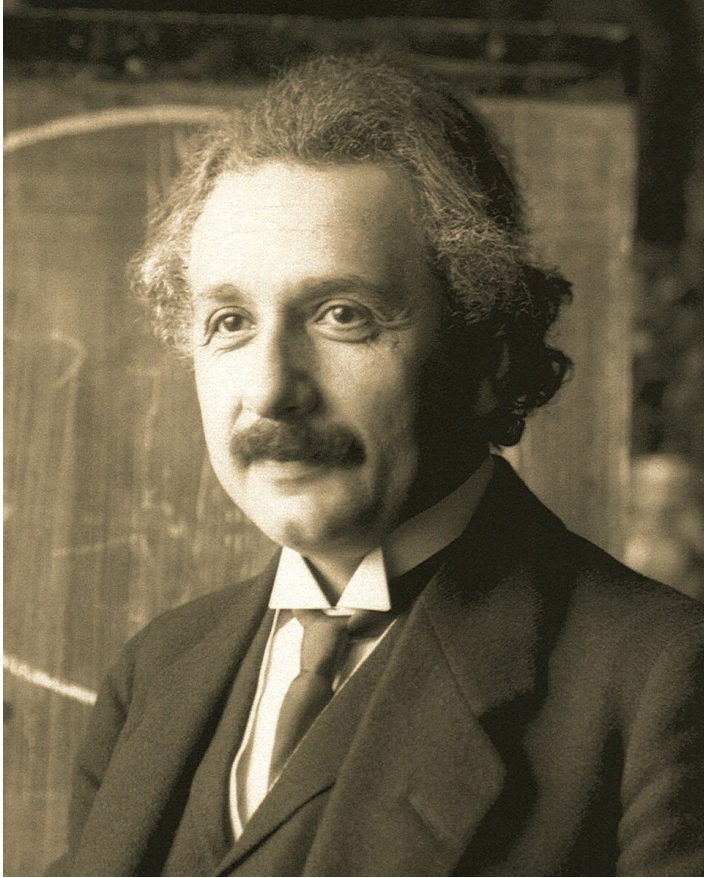
プランクの理論

実測値

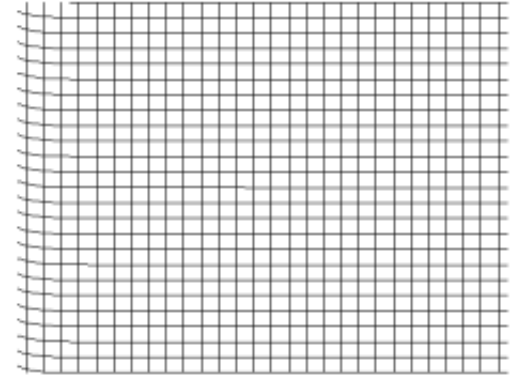
ぴったり
合った!

光の周波数

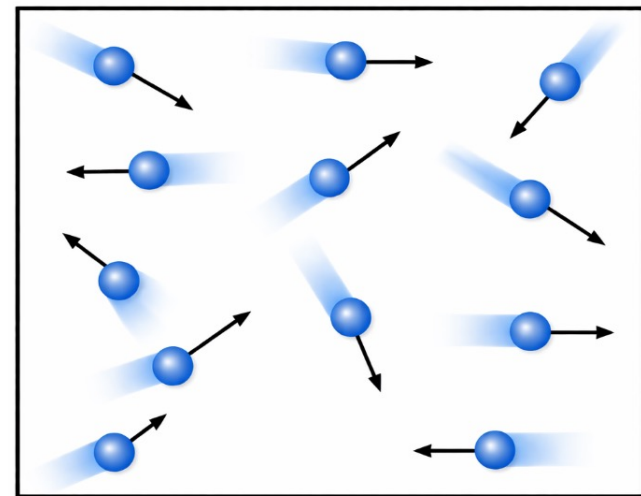
光量子仮説



アルバート・アインシュタイン
(1879-1955)

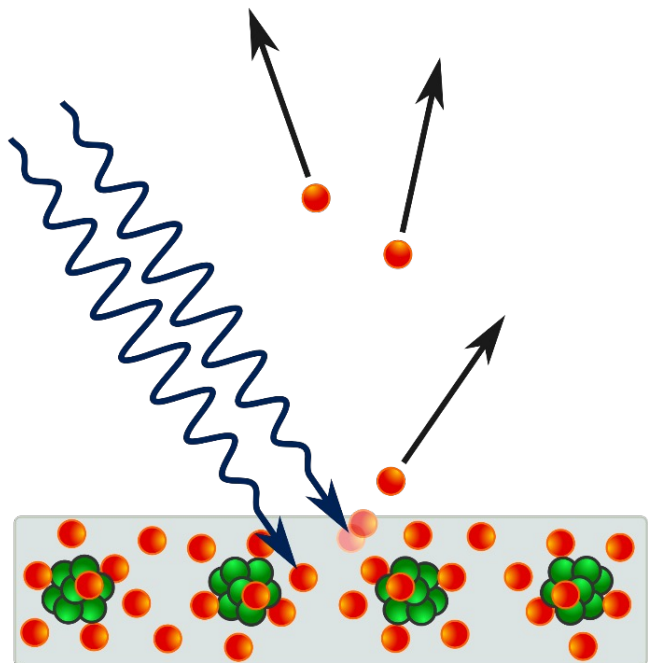


光量子仮説: 光は波ではなく粒子である(1905年)



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

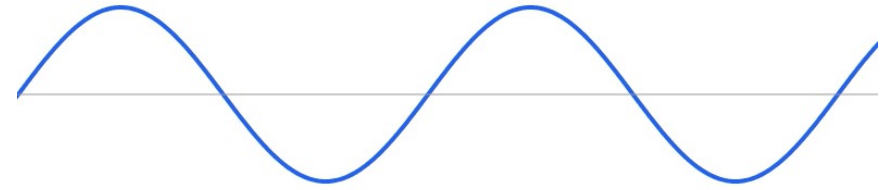
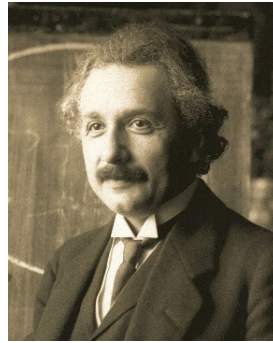
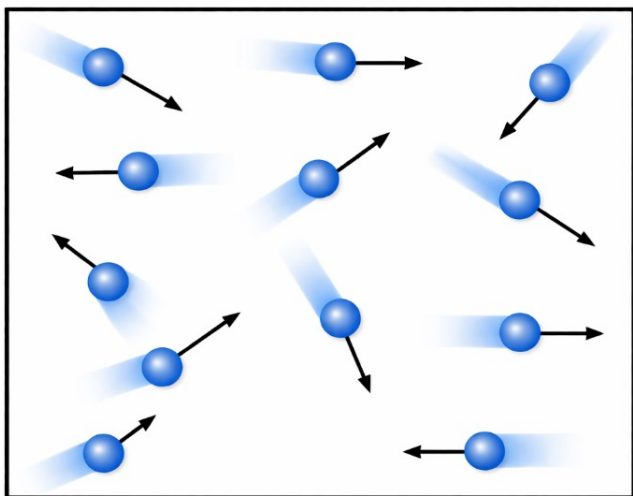
これによってアインシュタインは
ノーベル物理学賞を受賞(1921年)



量子力学ことはじめ



「光を波ではなく粒子
だと思ふ」(1905年)



光の波は波長 λ で特徴づけられる

$$y(x, t) = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} ct - \frac{2\pi}{\lambda} x \right)$$

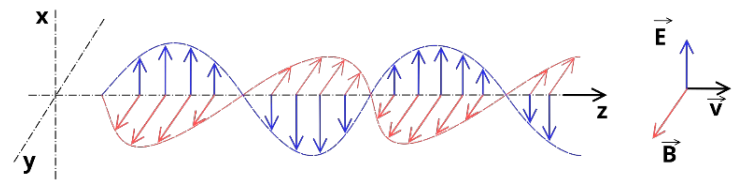
→運動量を $p = \frac{h}{\lambda}$ で定義し、

(h はプランク定数とよばれる数)

波長 λ の波がある
= 運動量 p の粒子がある

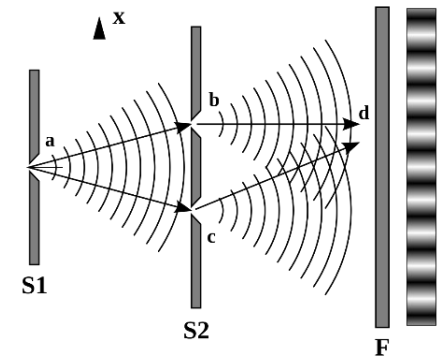
と考える(「光子(フォトン)」)

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??

ここまでのまとめ

光はある時は波(電磁波)であり、
ある時は粒子(光子)である??

当時の人も大混乱

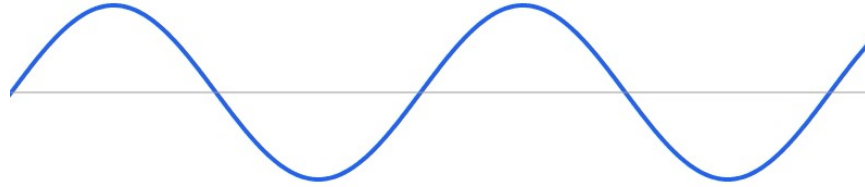


当時のジョーク

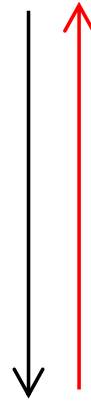
「午前中は光を粒子と考え、午後は波動と考える」
「1週間のうち、月水金は光を波動と考え、
火木土は粒子と考える」

ド・ブロイ波

波



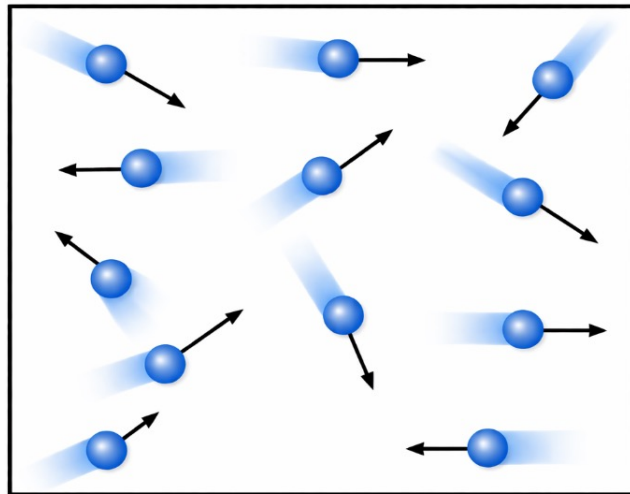
光



電子など

「ド・ブロイ波」

粒子



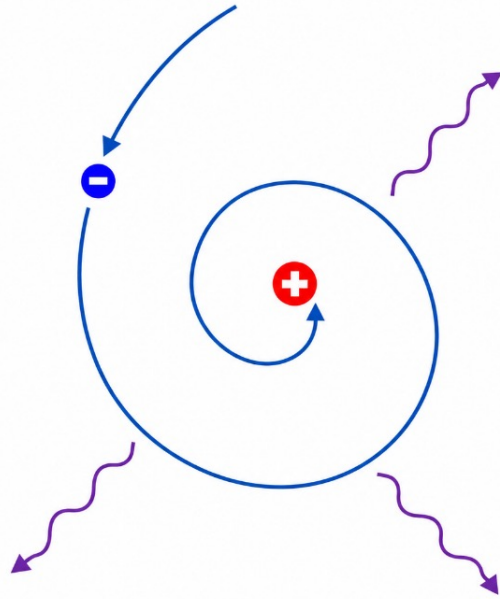
ルイ・ド・ブロイ
(1892-1987)

ノーベル物理学賞
(1929年)



ド・ブロイ波

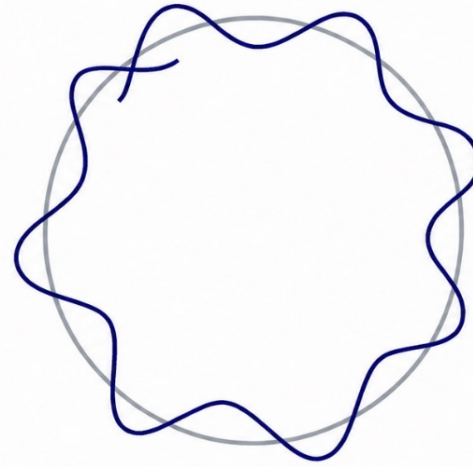
原子の安定性



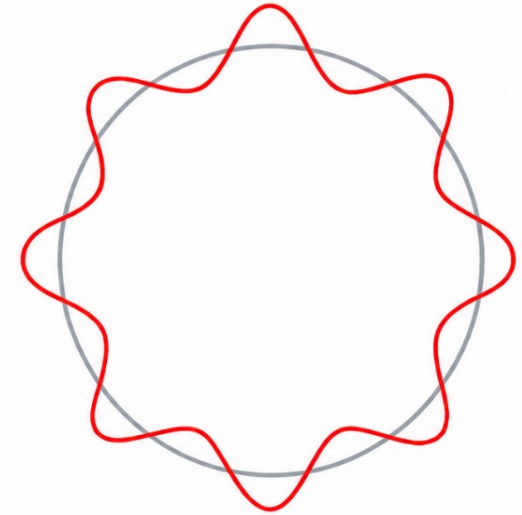
(古典力学では)
軌道を回る電子
→電磁波を放出して半径が収縮

0.000000000001秒 (10^{-11} 秒) で原子が消失!

ド・ブロイ波の考え方



閉じていない

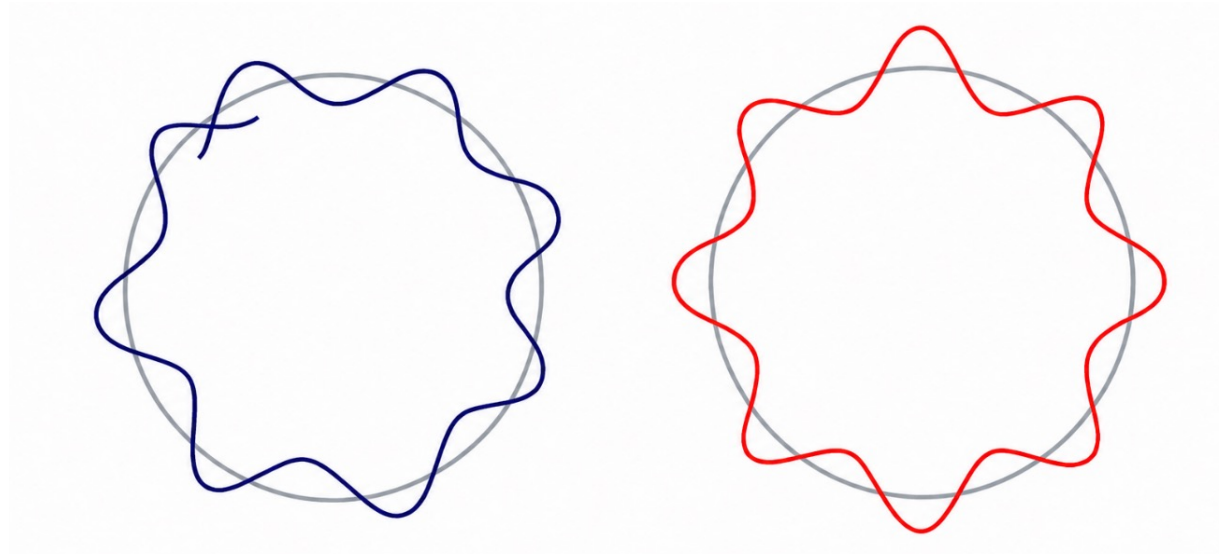


閉じている

1周回った時に波が閉じていないといけな

ド・ブロイ波

ド・ブロイ波の考え方



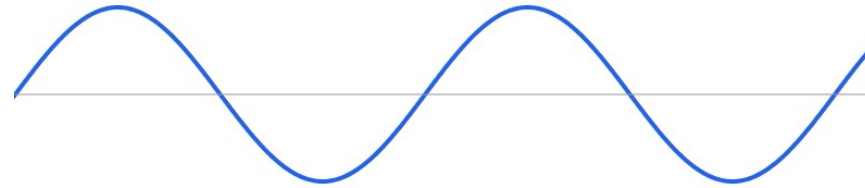
1周回った時に波が閉じていないといけない

- 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

波



光や電子は波でもあり
粒子でもある

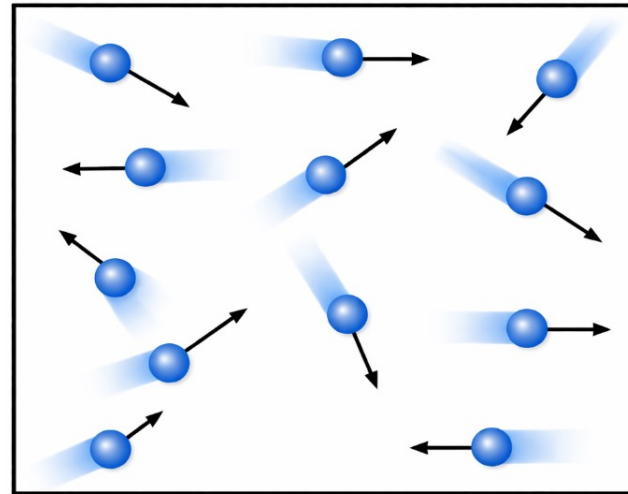
光

電子など

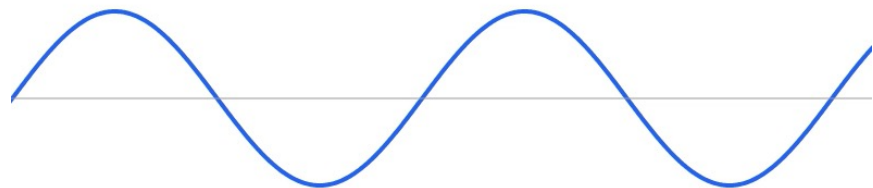
「ド・ブロイ波」



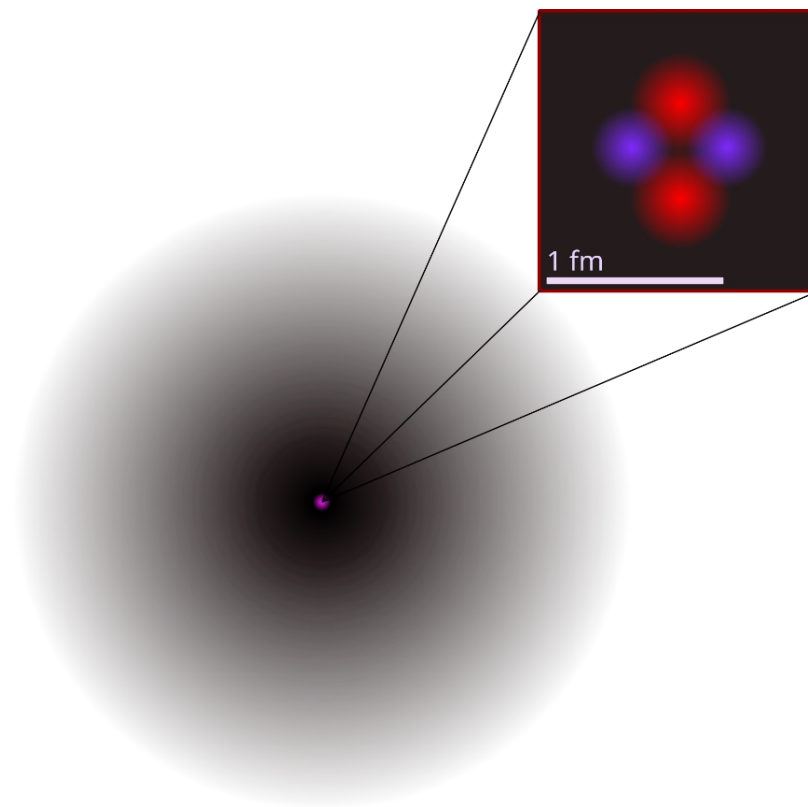
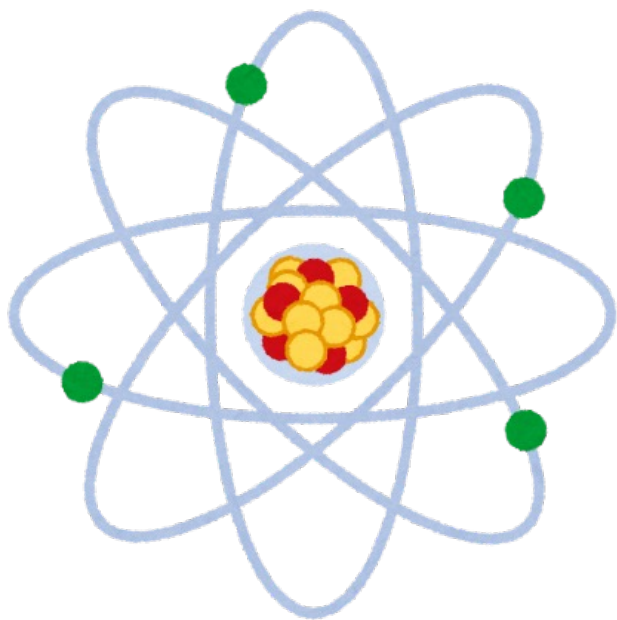
粒子



ド・ブロイ波



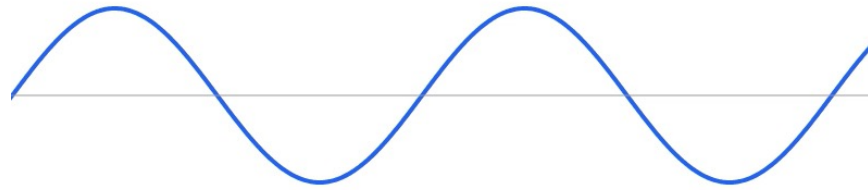
波： 位置が決まっていない



$1 \text{ \AA} = 100 \text{ pm}$



ド・ブロイ波



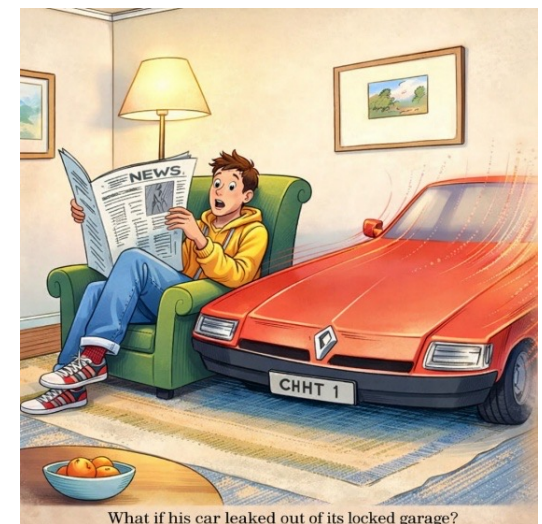
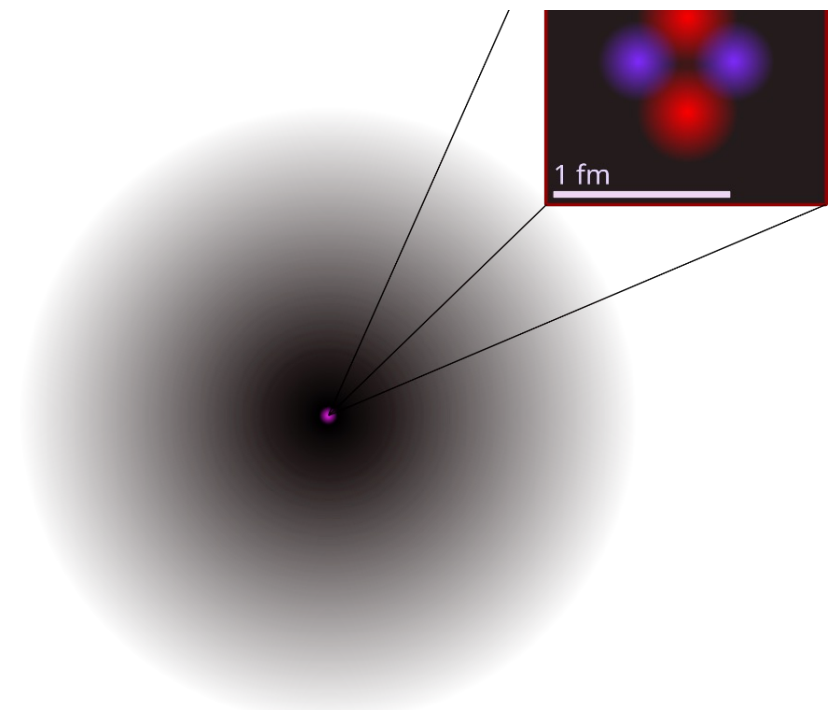
波： 位置が決まっていない



ヴェルナー・ハイゼンベルク
(1901-1976)

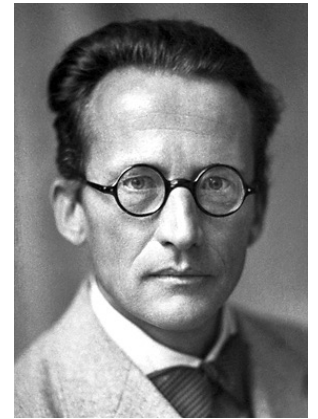
「不確定性原理」

粒子の位置と運動量(速度)を同時に決めることはできない。



量子力学

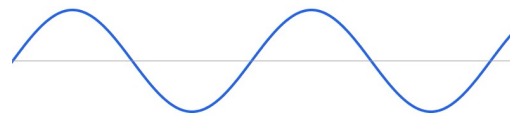
↔ 古典力学



シュレーディンガー方程式 (1926年)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \psi(\mathbf{r}, t)$$

波動関数



(波の振幅に相当
: 粒子の状態を表す)

マックス・ボルン (1926年)

$|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ は粒子が時刻 t で位置 r にいる
確率を表す。

(確率解釈)



量子力学

シュレーディンガー方程式 (1926年)

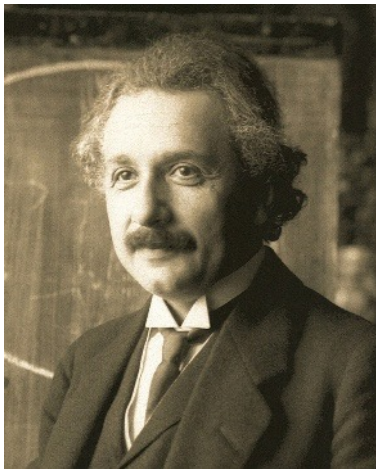
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \psi(\mathbf{r}, t)$$



ニールス・ボーア

観測すると $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ の確率で粒子を見出す。

(確率解釈、コペンハーゲン解釈)



アインシュタイン

「神はサイコロを振らない」

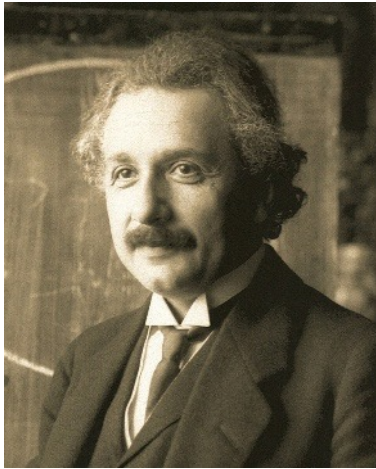
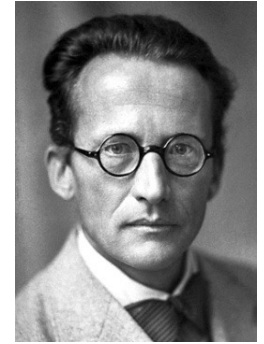
確率が出ないような理論を展開
(隠れた変数理論)

今では隠れた変数理論は否定されている(ベルの不等式)

量子力学

シュレーディンガー方程式 (1926年)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \psi(\mathbf{r}, t)$$



アインシュタイン

「神はサイコロを振らない」

確率が出ないような理論を展開
(隠れた変数理論)



ニールス・ボーアの反論

「神に何をなすべきか、何をなさざるべきかを貴方が語るなかれ」

量子力学

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \psi(\mathbf{r}, t)$$

量子力学の成立に関わった人々

ノーベル賞受賞者



- マックス・プランク
- アルバート・アインシュタイン
- ニールス・ボーア
- ルイ・ド・ブロイ
- ヴェルナー・ハイゼンベルク
- エルヴィン・シュレーディンガー
- ポール・ディラック
- エンリコ・フェルミ
- ヴォルフガング・パウリ
- マックス・ボルン
- リチャード・ファインマン

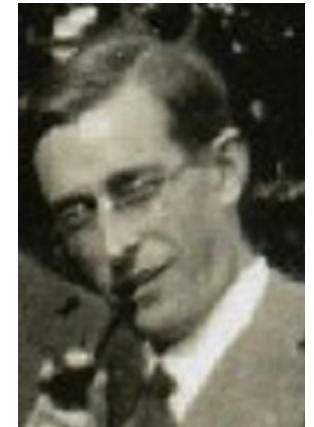
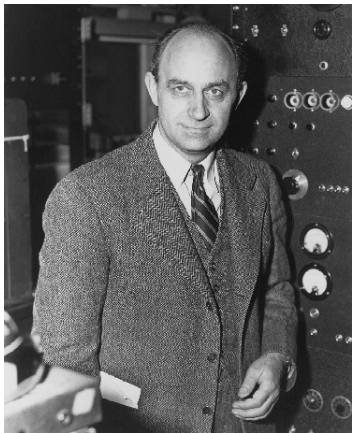
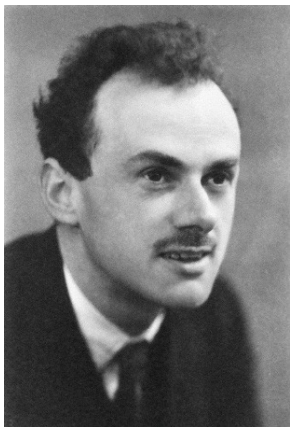
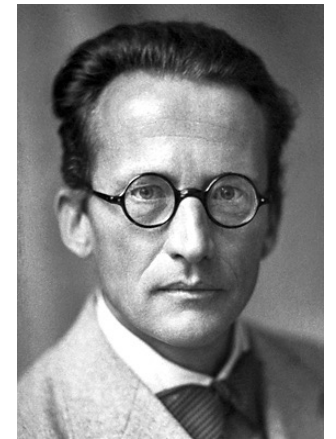
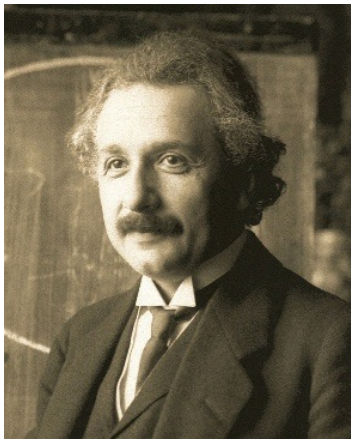
このほかにも

- G. ガモフ
- A. ゾンマーフェルト
- O. クライン
- 仁科芳雄

など

量子力学

量子力学の成立に関わった人々



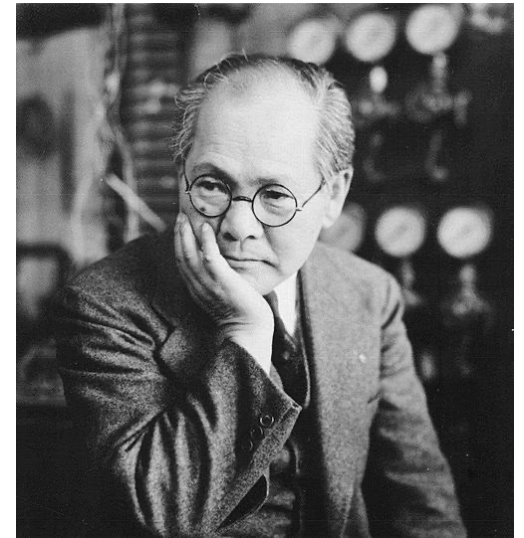
など、実に大勢

cf. 相対性理論

→アインシュタイン

仁科芳雄

日本現代物理学の父



- 1890年(明治23年)岡山県里庄町生まれ
- 東京帝国大学卒
- 1921年～1928年 ヨーロッパ留学

ニールス・ボーアの下で量子力学
の誕生に立ち会った

→日本に量子力学を持ち帰り、それを広めた

1929年:ハイゼンベルクとディラックを招聘(東京、京都)

1931年に京大で量子力学の講義

当時京大の副手(大学院生相当)であった

湯川秀樹、朝永振一郎が仁科の講義を聞きにきた

- 帰国後、理化学研究所に在籍し、様々な研究を行う。
- 1951年 没

仁科芳雄

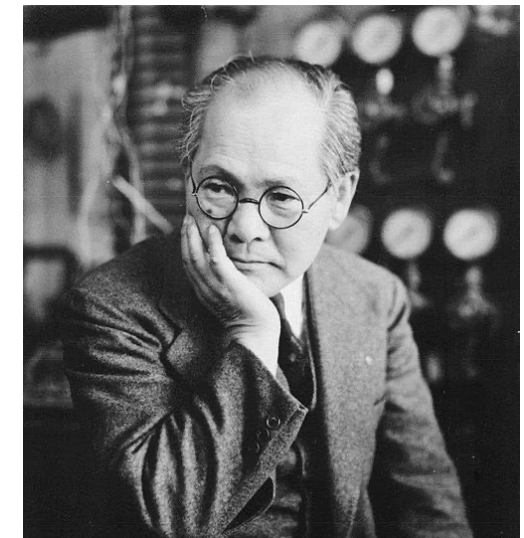
日本現代物理学の父

➤ 仁科の名を冠した研究所



理化学研究所
仁科加速器科学研究センター

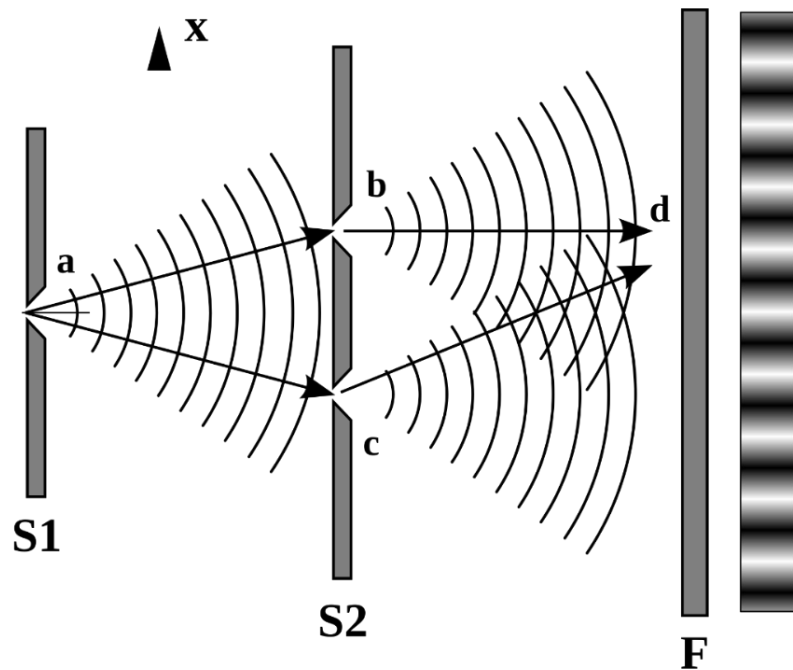
➤ 仁科の科学史的伝記



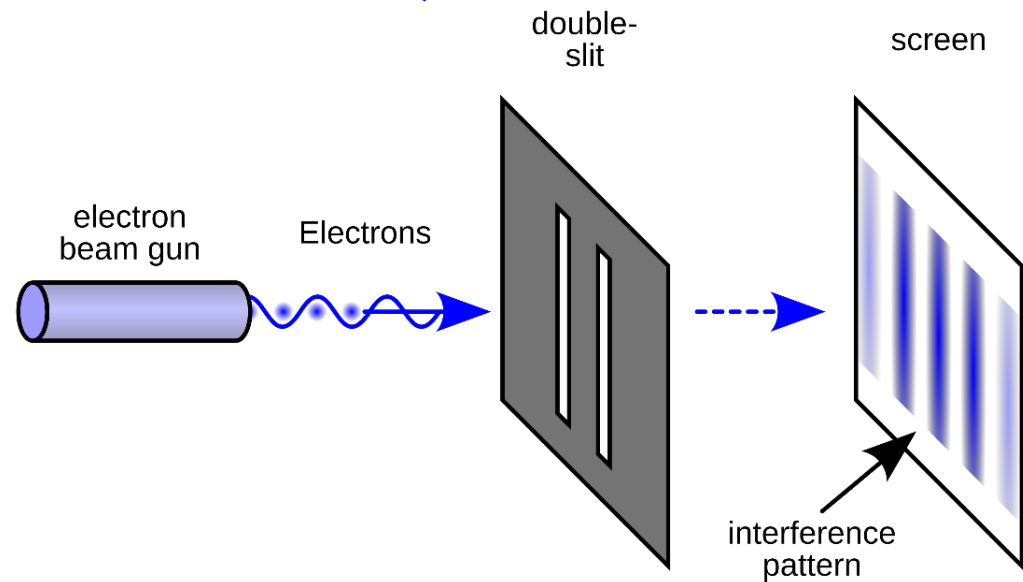
「励起」
伊藤憲二著
(みすず書房:2023年)

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



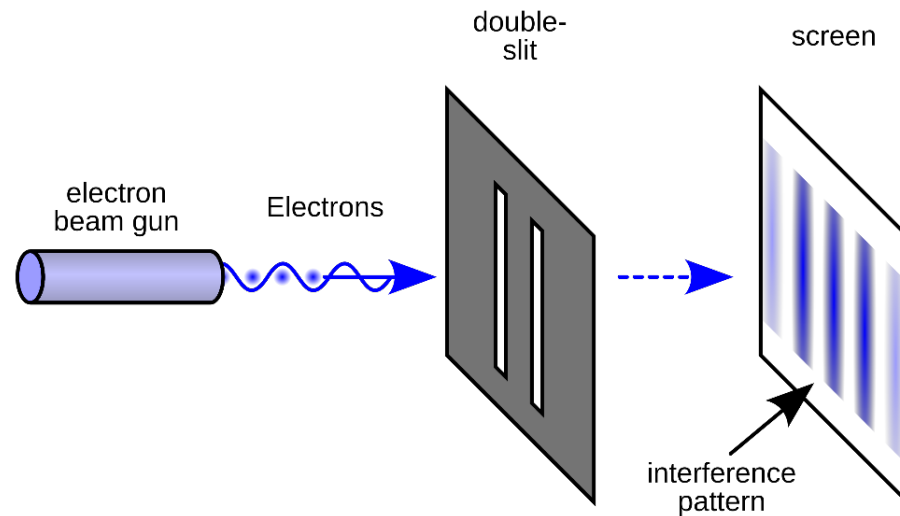
ヤングの干渉実験
(二重スリットの実験)

→ できます

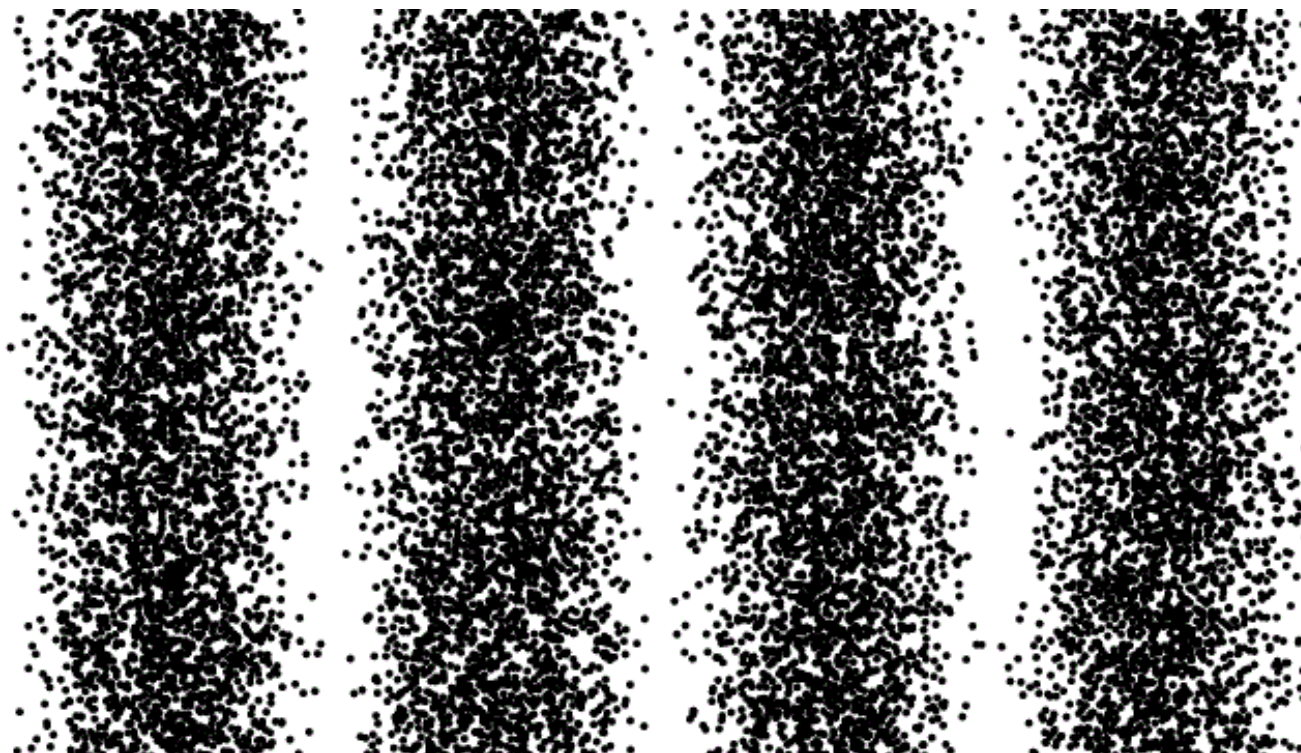
Wikipedia

量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題



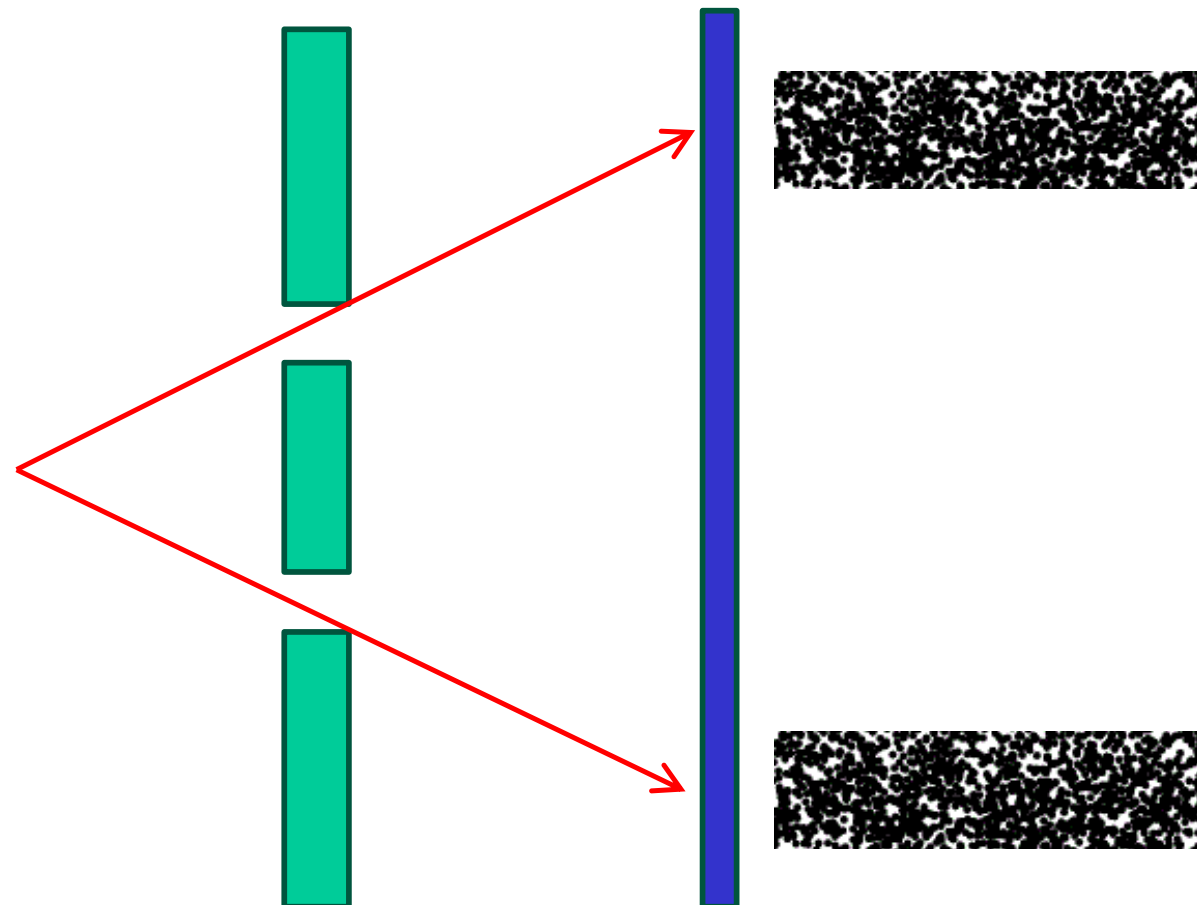
Wikipedia



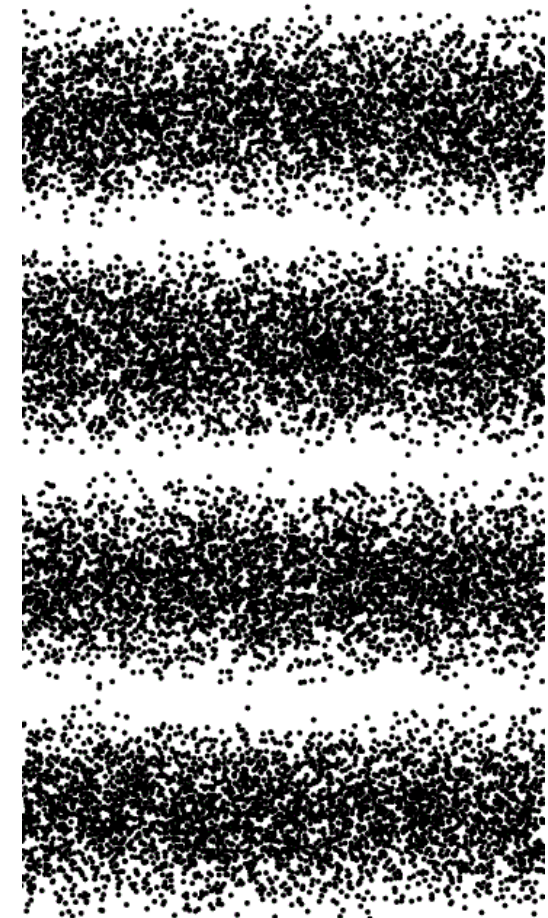
量子力学の不思議な世界

(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

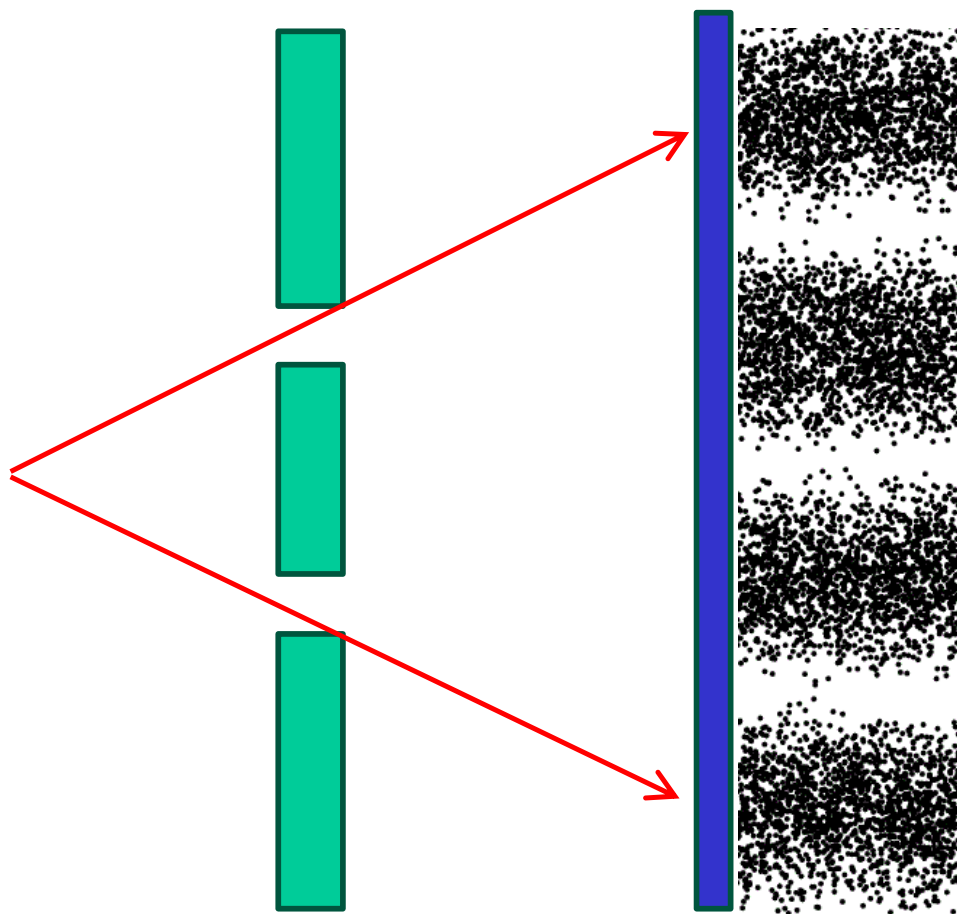


実際には

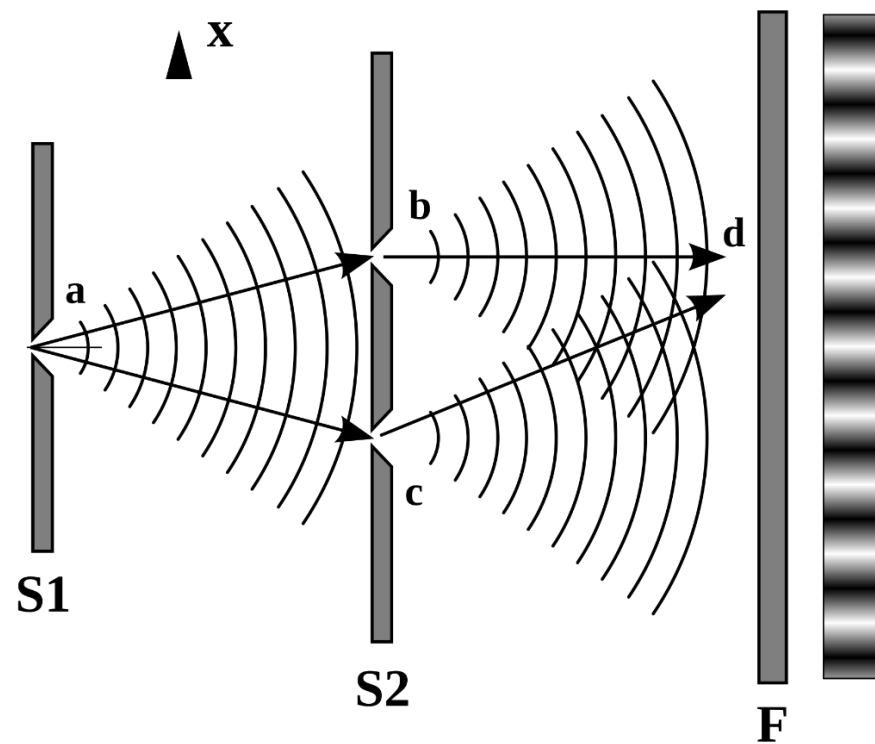


量子力学の不思議な世界

(a) 二重スリットの問題



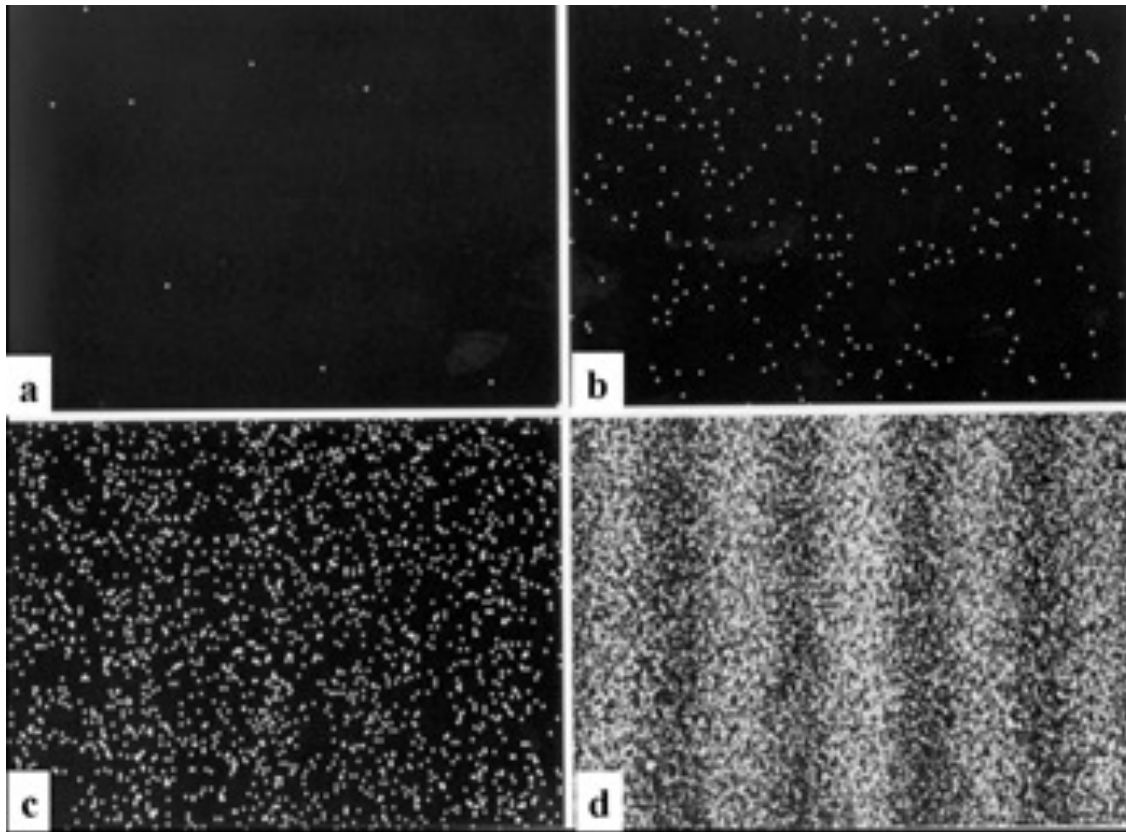
波の干渉のように
振る舞っている



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)

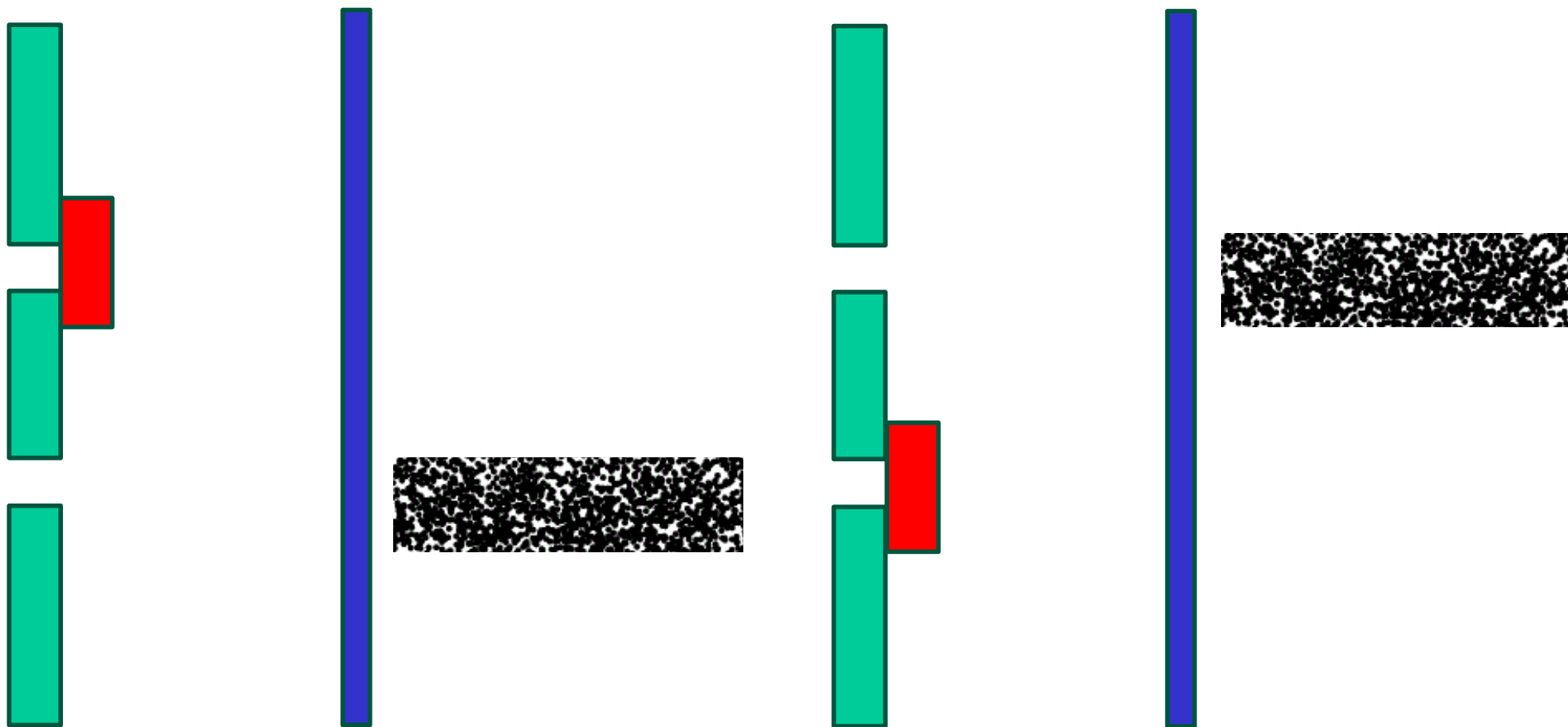
日立中央研究所

(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

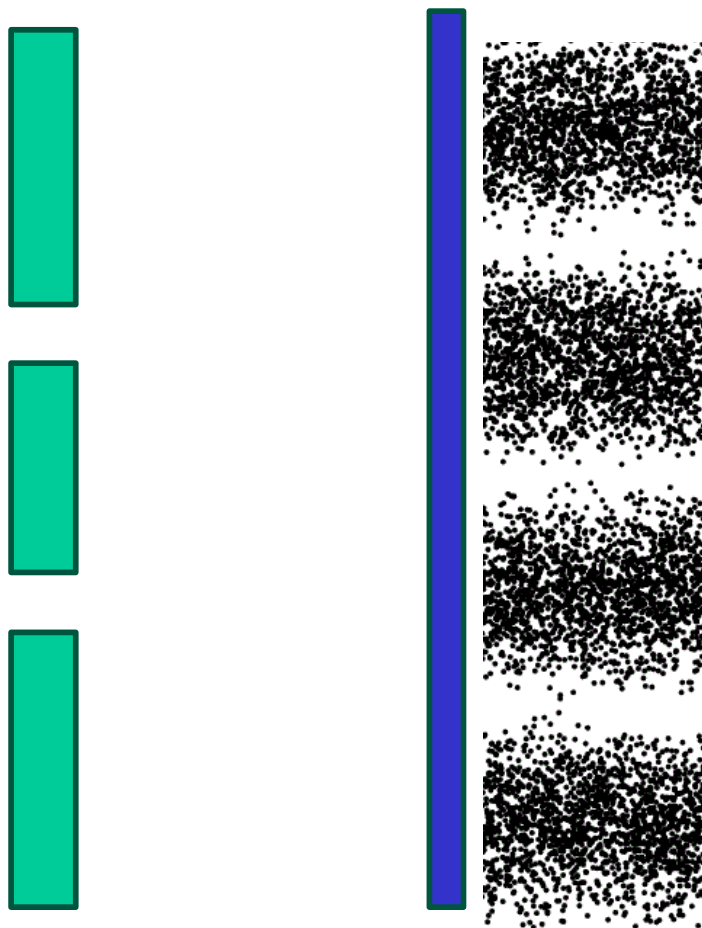
あたかも電子が両方のスリットを同時に通過しているかのように振る舞っている

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

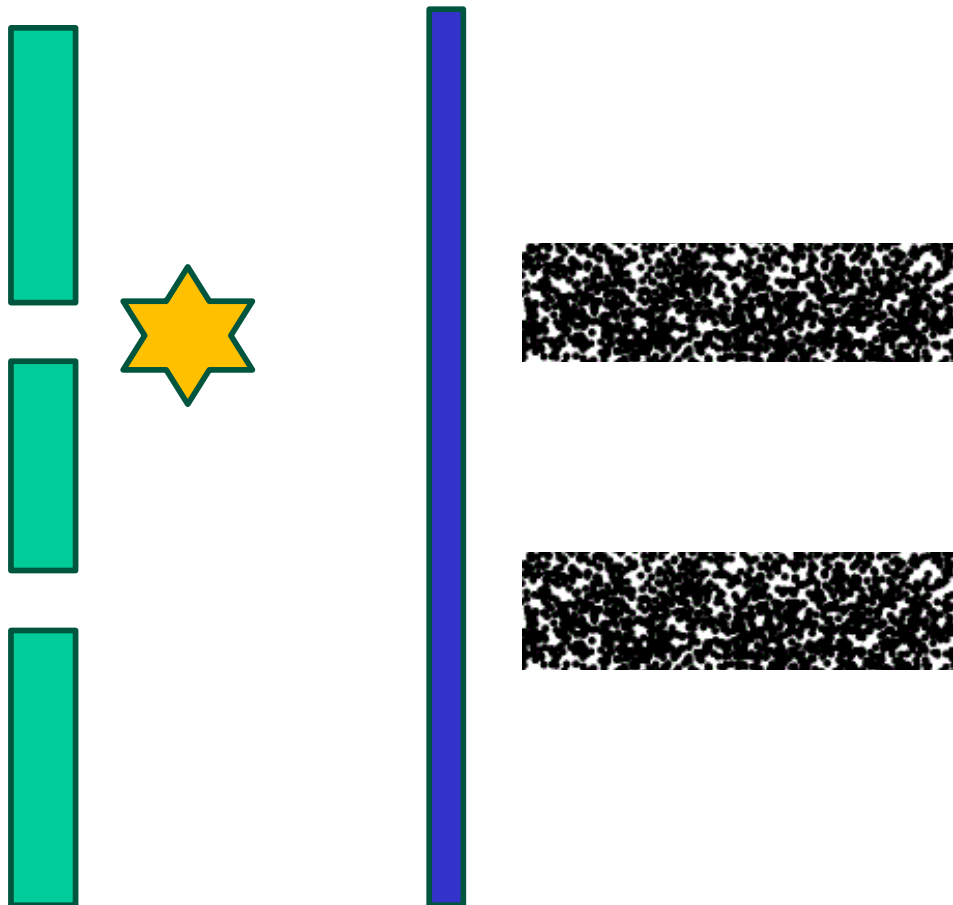
あたかも電子が両方のスリットを同時に通過しているかのように振る舞っている



量子スキーヤー

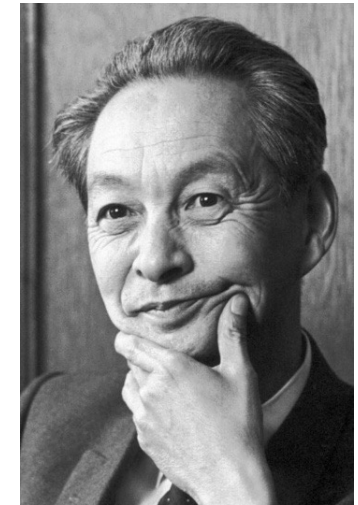
量子力学の不思議な世界

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

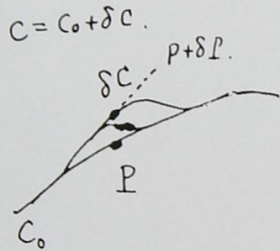
量子力学の不思議な世界



量子力学と私

朝永振一郎著

江沢 洋編



「大学三年で当時はじまったばかりの量子力学をえらんだのはよかったが、専門の教官もおらず、勉強は困難をきわめた」と朝永振一郎(1906-

79)は語る。模索のときの蓄積が後に相対論と量子論の融合をめざす研究でノーベル賞に花開き、また一步一步大地を踏みしめて登るような探求型の解説となった。「光子の裁判」や自分史を含む11篇。



緑 152-1
岩波文庫

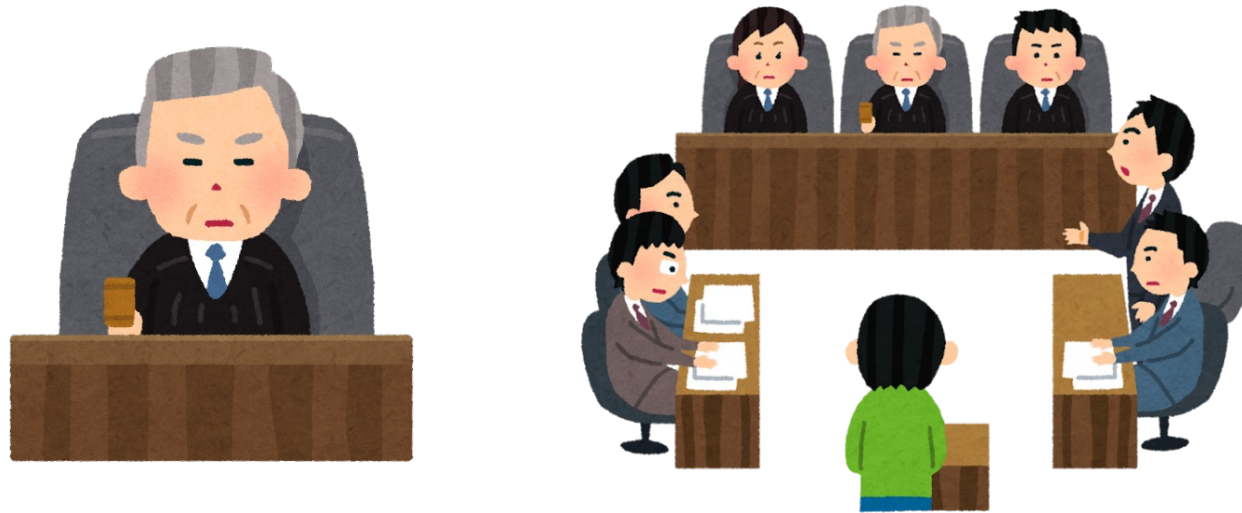
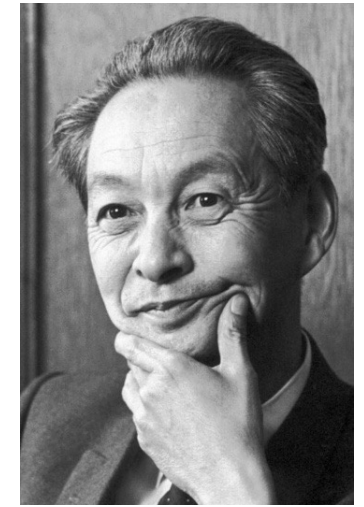
二重スリットの問題を一般向けに書いた法廷劇

「光子の裁判」 朝永振一郎

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

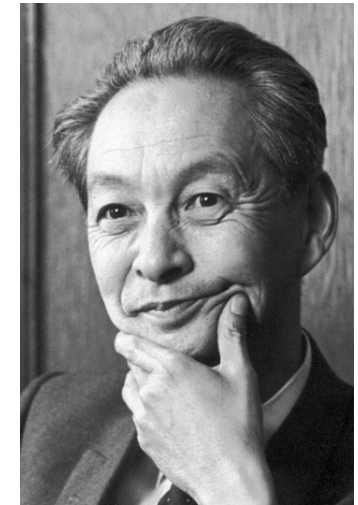


検「その部屋には二つの窓が前庭にむいて並んでいる。被告はそのどちらの窓から侵入したのか。この点は非常に重要なことだから、はっきりと答弁してほしい」

これに対する被告の答は、はなはだ奇想天外なものでありました。

被「私は二つの窓の両方を一緒に通って室内に入ったのです」

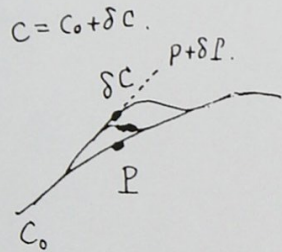
量子力学の不思議な世界



量子力学と私

朝永振一郎著

江沢 洋編



「大学三年で当時はじまったばかりの量子力学をえらんだのはよかったが、専門の教官もおらず、勉強は困難をきわめた」と朝永振一郎(1906-

79)は語る。模索のときの蓄積が後に相対論と量子論の融合をめざす研究でノーベル賞に花開き、また一步一步大地を踏みしめて登るような探求型の解説となった。「光子の裁判」や自分史を含む11篇。



緑 152-1
岩波文庫

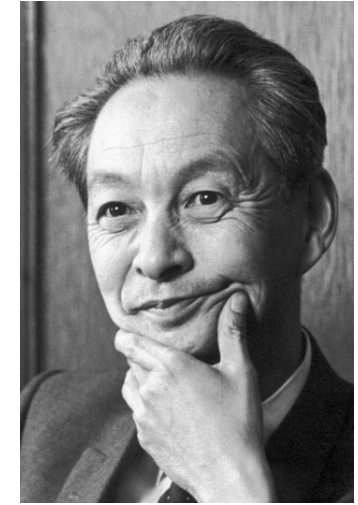
「光子の裁判」
朝永振一郎

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



量子力学が日本に入ってきたばかりの時期の様子も：

「大学三年で専門として当時はじめたばかりの量子力学をえらんだのはよかったが、何しろ新しい学問で専門の指導教官もおらず、勉強に困難を極めた。」

(「回想の朝永振一郎」より)

量子力学の不思議な世界

(b) 量子もつれ

波の重ね合わせ

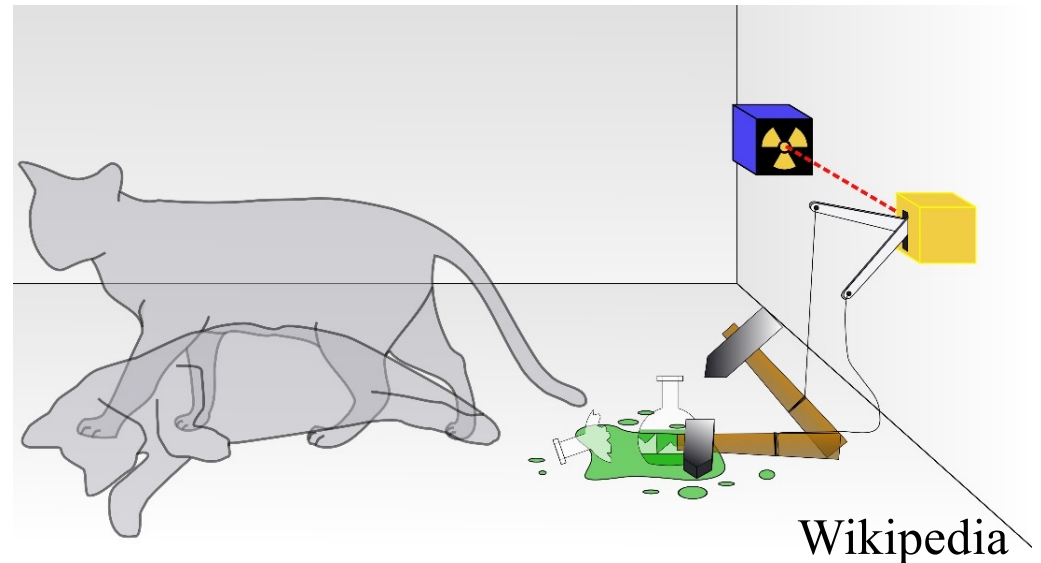


Wikipedia

量子力学でも:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

2つの状態の重ね合わせ



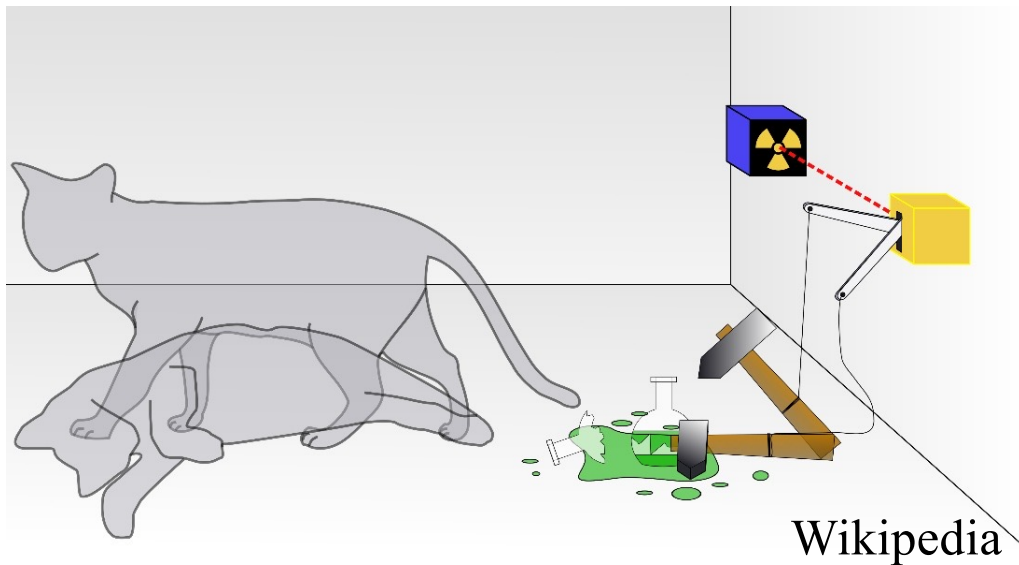
シュレーディンガーの猫

猫が生きている状態と死んでいる状態の重ね合わせ

量子力学の不思議な世界

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

2つの状態の重ね合わせ



シュレーディンガーの猫

猫が生きている状態と死んでいる状態の重ね合わせ

観測をすると、ある確率で状態1が、ある確率で状態2が観測される

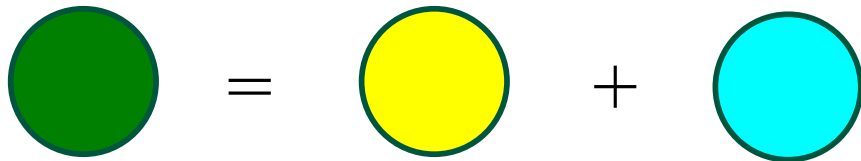


量子力学の不思議な世界

(b) 量子もつれ

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

2つの状態の重ね合わせ



観測をすると、ある確率
で状態1が、ある確率で
状態2が観測される



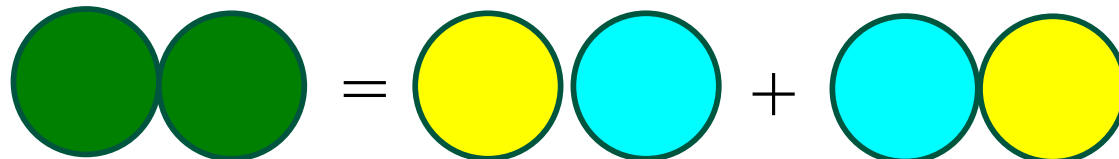
量子力学の不思議な世界

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

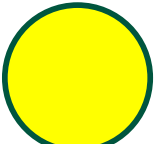
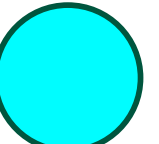
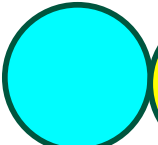
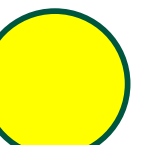
2つの状態の重ね合わせ

コインが2つある場合:

 と  がペアな状態をつくってみる

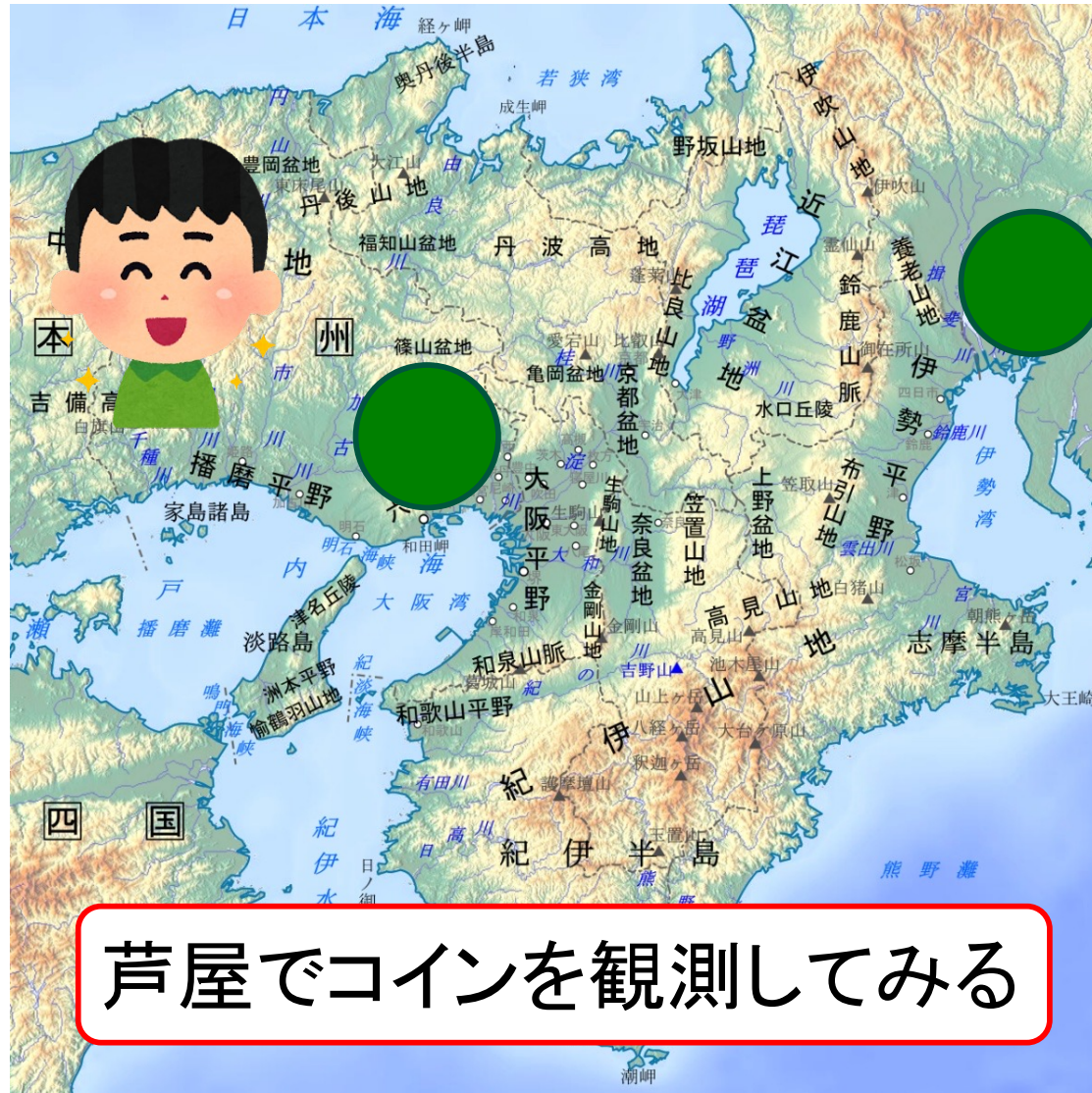
$$\text{観測前} \quad \text{観測前} = \text{観測前} + \text{観測前}$$


観測前

観測すると→ $\left\{ \begin{array}{l} \text{確率50\%で} \\ \text{確率50\%で} \end{array} \right.$  
   が観測される。

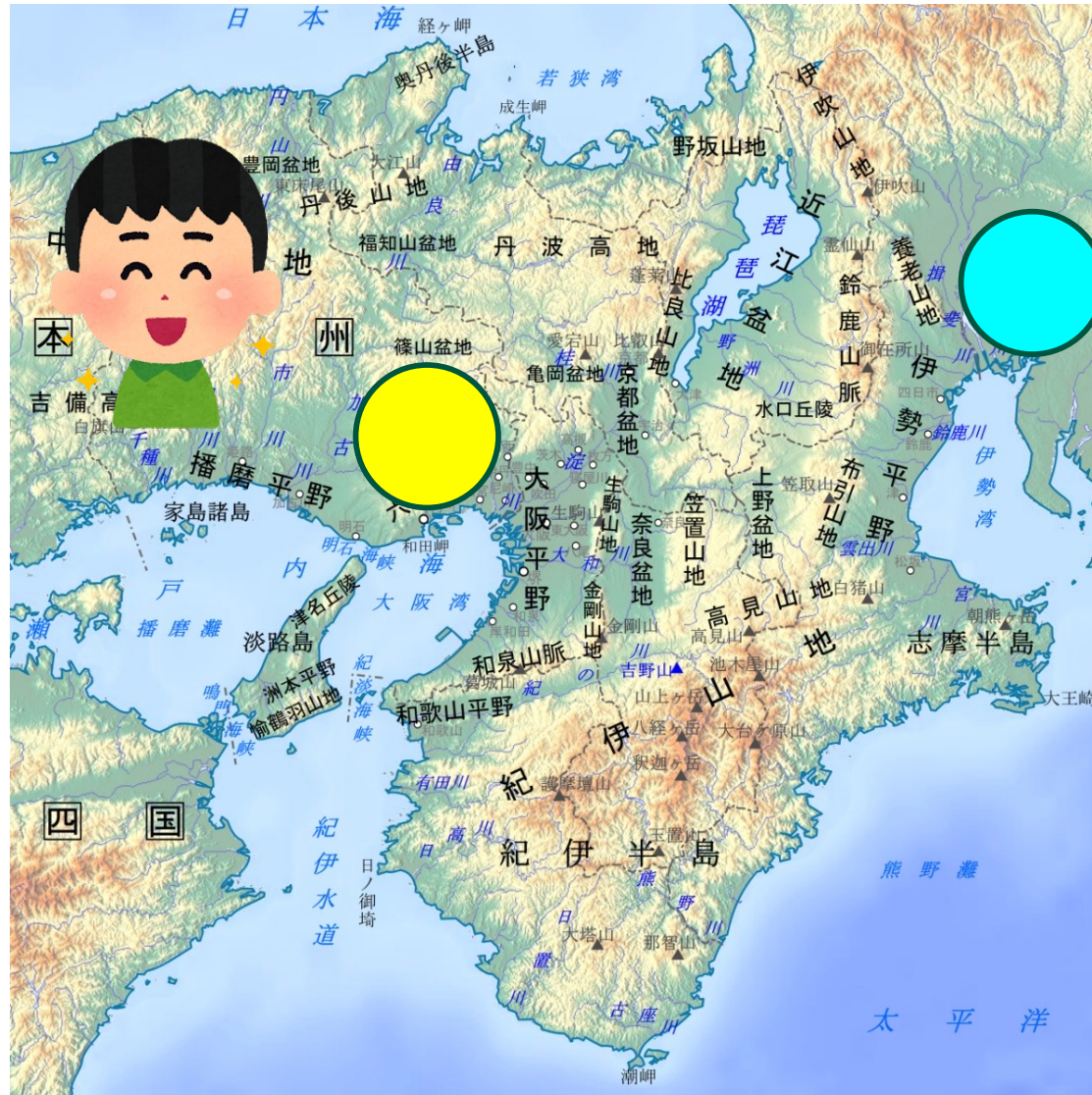
量子力学の不思議な世界

片方のコインが芦屋に、もう片方が名古屋にあったとする



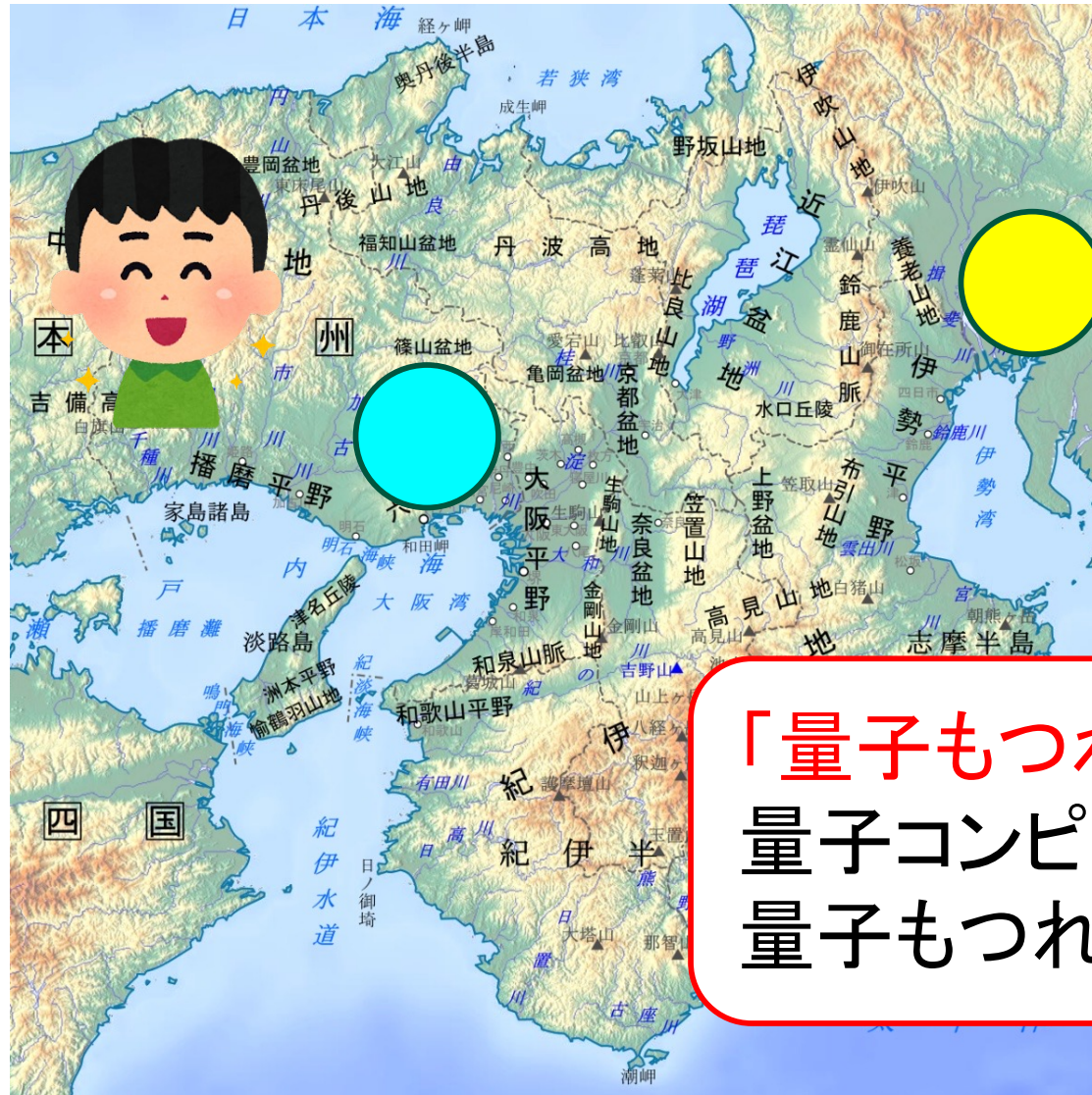
量子力学の不思議な世界

芦屋で黄色を観測した瞬間、名古屋は青になる。



量子力学の不思議な世界

芦屋で青色を観測した場合：瞬間的に名古屋は黄色になる



「量子もつれ」

量子コンピュータでも
量子もつれが使われる

量子力学の不思議な世界

(c) 量子トンネル現象



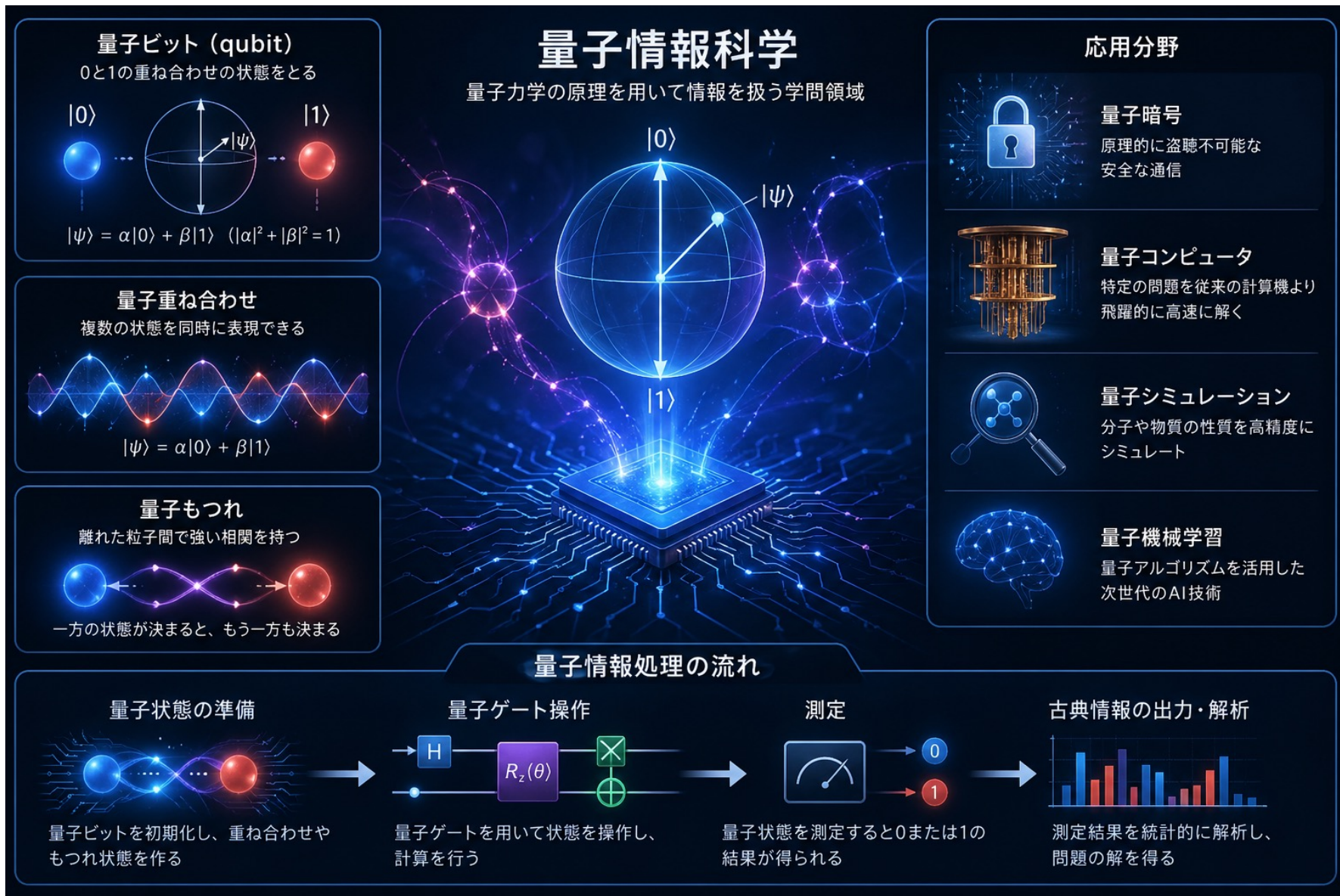
古典力学：勢い（エネルギー）が足りないと壁を越えられない
量子力学：勢いが足りなくても、ある確率で超える
ことができる

太陽が燃えて光っているのも量子トンネル現象のため

次回詳しくお話しします

量子力学の発展: 量子情報理論

現在、大発展中！



絵: ChatGPT画伯

量子力学の発展: 量子情報理論

量子コンピュータの原理

10進法

0

1

2

3

....

9

10

11

....

99

100

2進法

0 = 0

1 = 1

10 = 2

11 = 3

100 = 4

101 = 5

110 = 6

111 = 7

....

コインが表か裏かで量子状態を作る



$$= |100\rangle = 4$$



$$= |001\rangle = 2$$

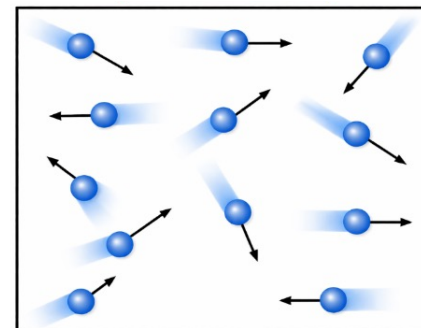
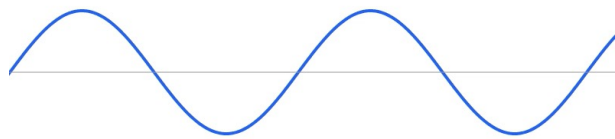
このような状態を重ね合わせる(足す)

$$|\Psi\rangle = \sum_k C_k |k\rangle$$

→ 複雑な計算をあっという間にすることができる

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



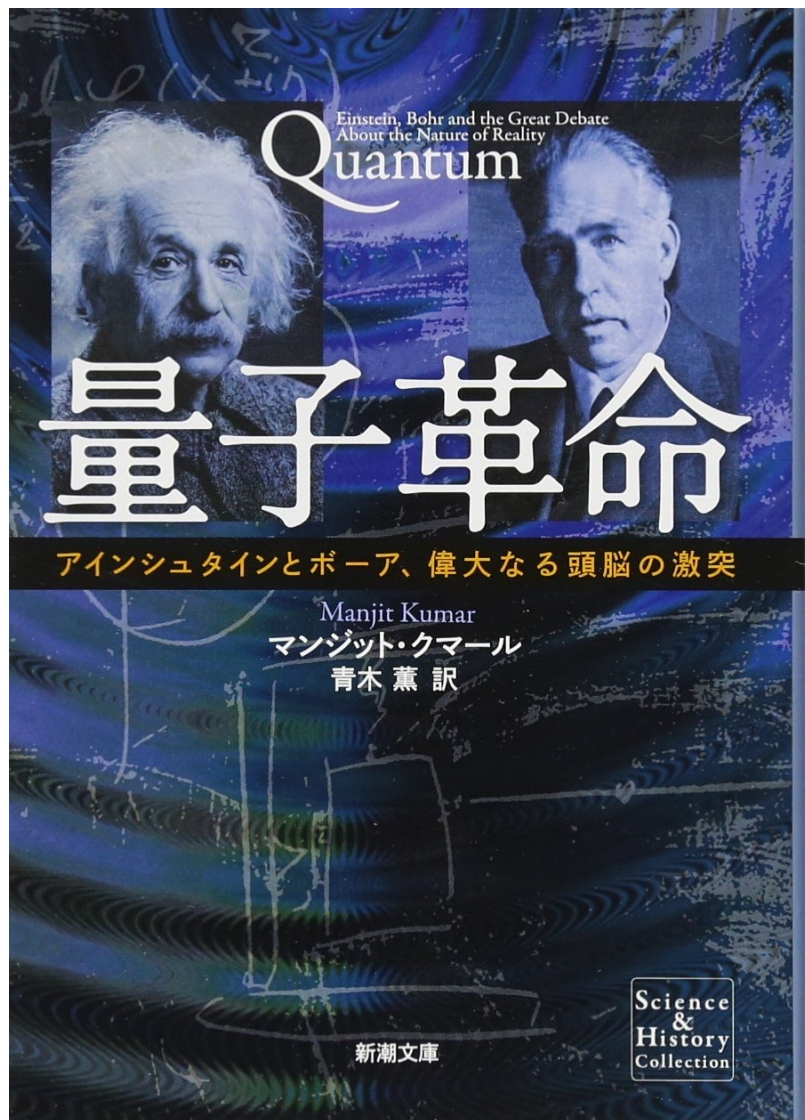
量子の不思議な世界

- 二重スリットの問題
- 量子もつれ
- 量子トンネル効果
など



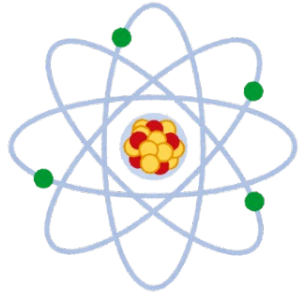
まとめ

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)

次回予告！



量子力学の世界



5/30(土) 「量子力学の100年」

6/27(土) 「量子力学のこれから」

量子力学で見る元素の世界

- 量子トンネル現象
- 星の中での核融合反応
- どうやって宇宙の中で元素は作られるのか？
- ニホニウムのはなし



など