

量子って何？

のむら やすのり

野村 泰紀

カリフォルニア大学
バークレー校



ローレンスバークレー
国立加速器研究所



理化学研究所
数理創造プログラム

iTHEM.S^o

東京大学カブリ
数物連携宇宙研究機構



物理って何？

— この世界はルールに従って動いている

— ルールは地上でも「天界」でも同じ

なぜリンゴは落ちるのに、月は落ちてこないのか？

→ 月も落ちている（万有引力）



コペルニクス

https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Copernicus



ガリレイ

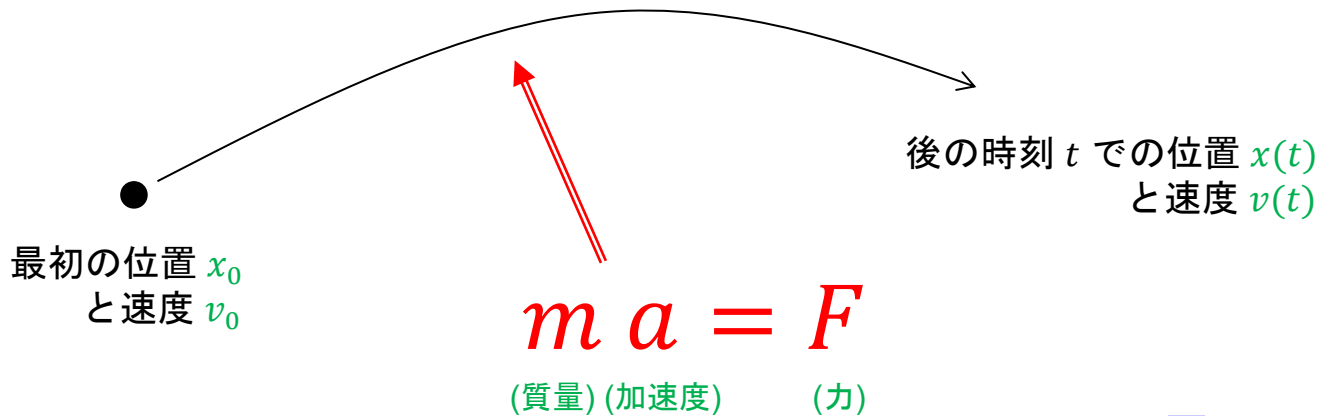
https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei



ニュートン

https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton

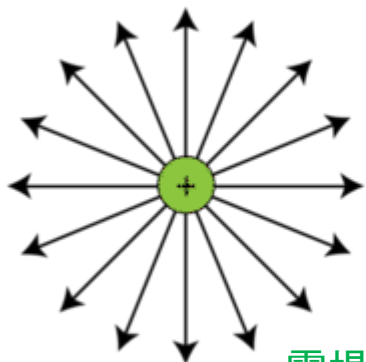
将来が予測できる！



... ニュートン力学

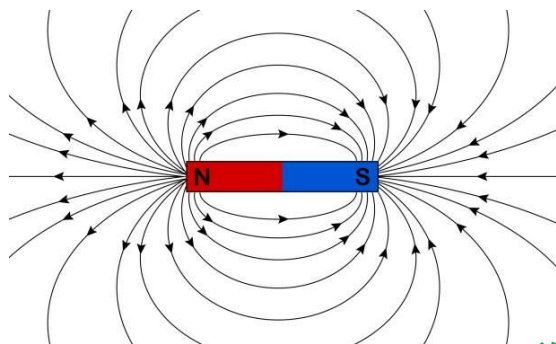
(17~18世紀)

どんな力が？ → 電磁気学 (18~19世紀)



電場

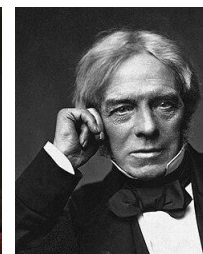
<https://www.ck12.org/c/physical-science/electric-fields/lesson/Electric-Fields-MS-PS/>



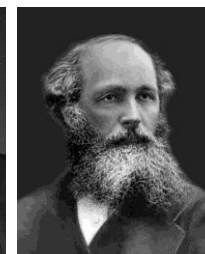
磁場



クーロン



ファラデー

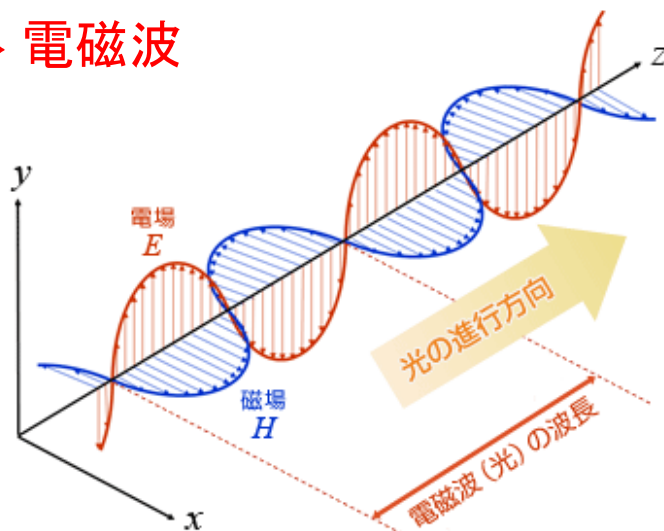


マクスウェル

<https://ja.wikipedia.org/wiki/>

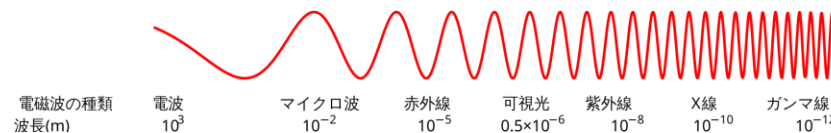
電場と磁場をつかさどる方程式 (マクスウェル方程式)

→ 電磁波



<https://ifs.or.jp/ifs-cs/electro-magnetic-wave-03/>

→ 光の正体 !!



Inductiveload, NASA. Translation by t7o7k

... 物理学、完成！(?)

おかしい、全然合わない!!

熱した物体から放射される電磁波（黒体放射）のスペクトラム

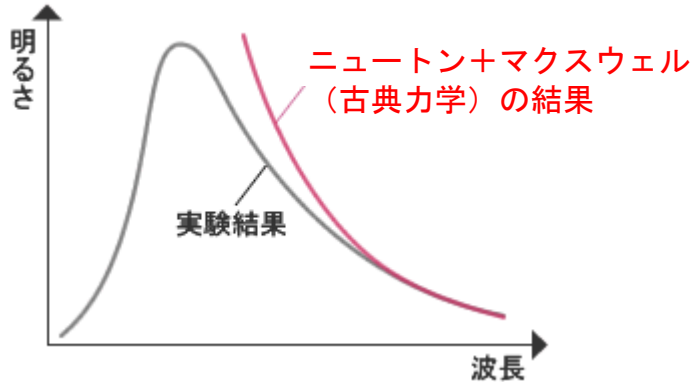
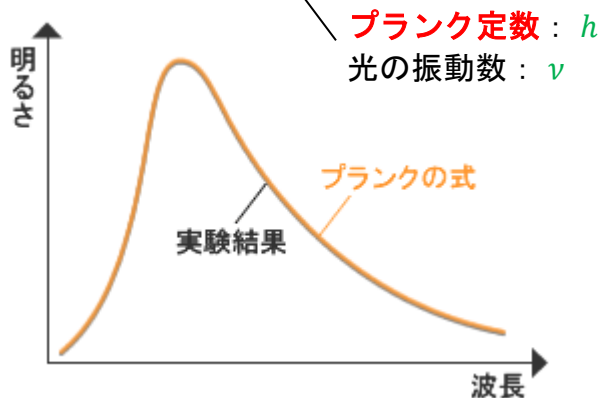


photo: Nobel Foundation archive

エネルギー量子仮説 — マックス・プランク (1900)

物体が光を放射／吸収する際、そのエネルギーは連続的な値を取らず、一定の単位量 ($h\nu$) の整数倍になる



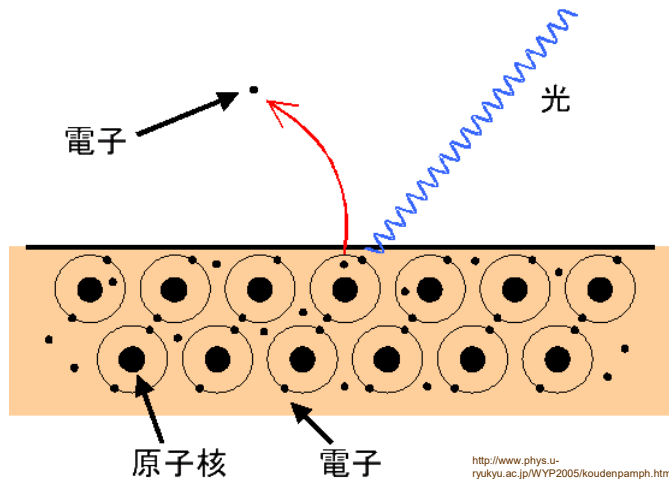
... 物理なのに「とびとび」!!?

→ 量子物理の萌芽

アインシュタインの慧眼

謎は黒体放射だけではない！

→ **光電効果**（物質に光が当たると、中の電子が飛び出てくる現象）



光を通常の波だと思いと説明できない

例) 電子の放出はある一定以上大きな振動数の光でないと起こらない

光量子仮説 — アルベルト・アインシュタイン (1905)

振動数 ν 、波長 λ の光は、
エネルギー $E = h\nu$ 、
運動量 $p = \frac{h}{\lambda}$ を持った**粒子**の集まりである

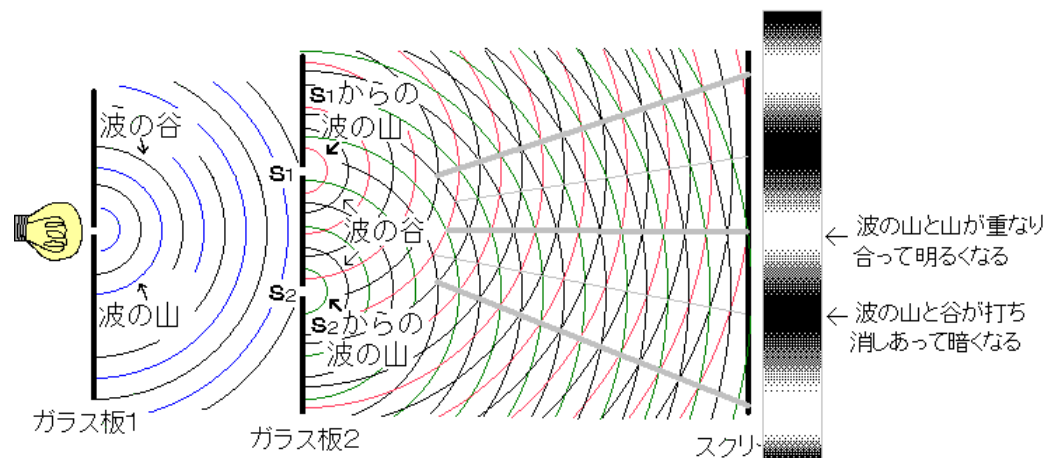
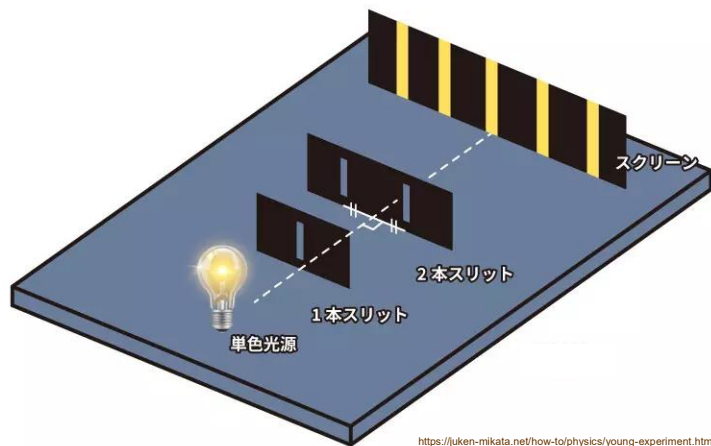


The Albert Einstein Archives,
The Hebrew University of Jerusalem

(h : プランク定数)

あれ、でも光って波じゃなかったっけ？

ヤングの干渉実験 (19世紀初頭)



- 波の性質（回折、干渉、...）を示す
- 電磁波として多くの性質（伝播速度を含む）が説明できる

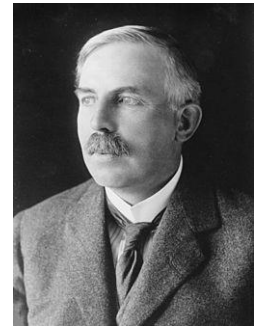
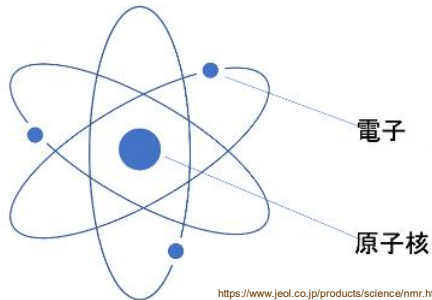
→ 光は波でもあり粒子でもある??

古典物理学の破綻Ⅱ

「原子」の理解の進展

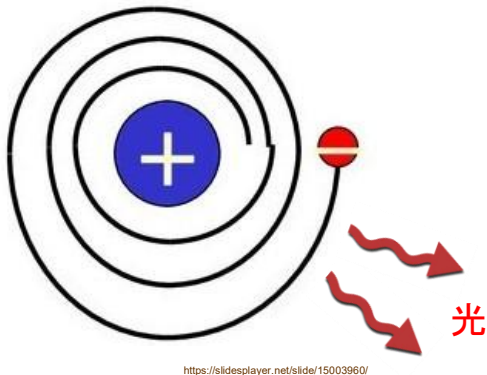
- すべてのはものは原子で出来ている
- 原子にも構造がある

中心に硬い「芯」(原子核)があり、その周りに電子が回っている



アーネスト・ラザフォード
George Grantham Bain Collection (Library of Congress)

問題点：(古典物理学によれば) そんな構造は存在しえない！



電子は光を放出しながら、中心にある原子核に向かって落ち込んでいってしまう

... 原子が壊れるまでの時間は 0.00000000001秒ほど！

ボーアの原子模型

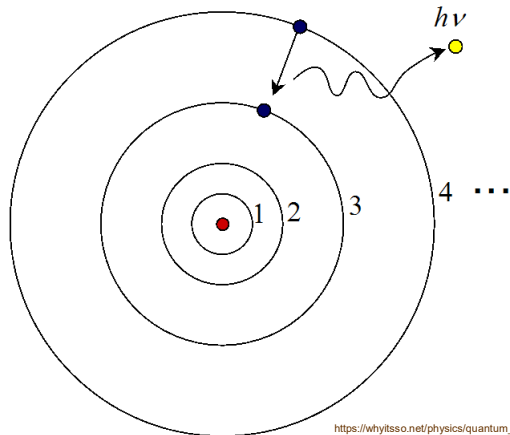
... 電子の軌道の半径は、とびとびの値に限られる

量子条件 — ニールス・ボーア (1913)

軌道1周の長さに電子の運動量を掛けた値は
プランク定数 h の整数倍となる



photo: Nobel Foundation archive



- 電子がこれらの軌道を回っているとき、
電子は一定のエネルギー状態を保っており、
光（電磁波）を放出することはない
- 電子がある軌道から別の軌道に移るとき、
エネルギーの差分を光として放出／吸収する

→ 大きな成功を収める

「原子から発せられる（に吸収される）光の波長は
特定のとびとびの値を取る」という謎の現象を説明

...でも、なぜ？

ド・ブロイの物質波 (1924)

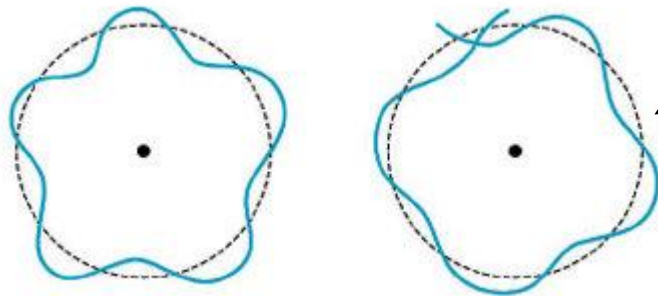
波である光が粒子の性質も持つように、
粒子である電子も波の性質を持つ

運動量 p をもつ電子は、
波長が $\lambda = \frac{h}{p}$ の波の性質を示す



https://www.physics.umd.edu/courses/Phys420/Spring2002/Parra_Spring2002/HTMPPages/whoswho.htm

→ 電子の軌道の一週の長さは、電子の波長の整数倍



(でなければ打ち消し合って消えてしまう)

とびとびの軌道

→ ボーアの量子条件!

(アインシュタインの光量子仮説: $p = \frac{h}{\lambda}$)

⇒ 光や電子を含む全てのものは
粒子と波の性質をあわせ持つ「量子」!!

(粒子でも
波でもない!)

量子の従う方程式は？ (ニュートン力学でいうところの $ma = F$)

— ハイゼンベルクの行列力学 (1925)

... 「行列」と「ベクトル」を使った定式化



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

photo: Nobel Foundation archive

— シュレーディンガーの波動力学 (1926)

... 波動方程式 (シュレーディンガー方程式)
を使った定式化

... 数学的に等価 → 正準形式の量子力学
(量子現象の予測が可能に！)

物質波 (波動関数) の意味は？

— 波動関数は複素数 (2乗して負になり得る数) の値をとる

— その絶対値の2乗 (必ず正) が粒子をそこに見出す確率を与える

... ボルンの「確率解釈」 (1926)



マックス・ボルン

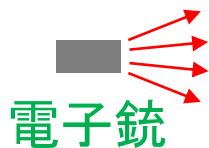
photo: Nobel Foundation archive

⇒ 量子力学の確立

量子力学の(不思議な)性質

電子の二重スリット実験

電子を一発ずつスクリーンに向けて撃っていく

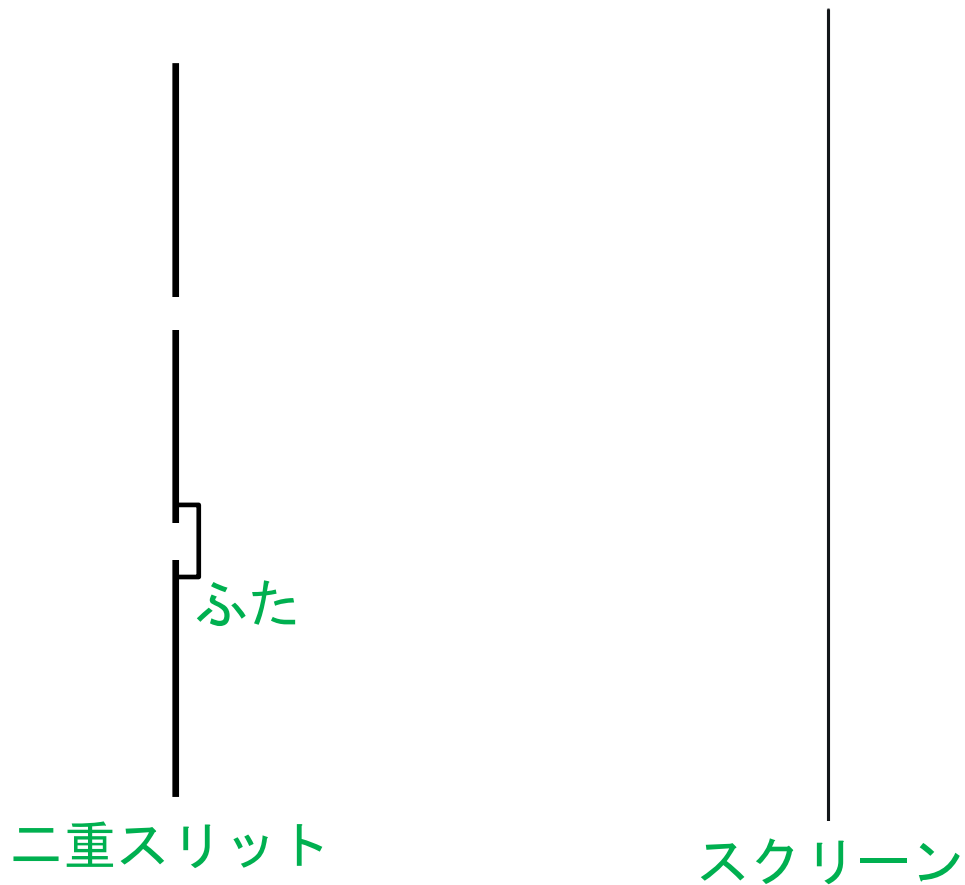
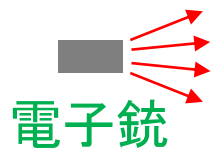


二重スリット

スクリーン

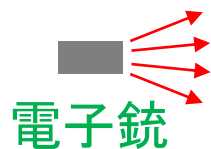
電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：下のスリットにふた



電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：下のスリットにふた



電子銃



ふた

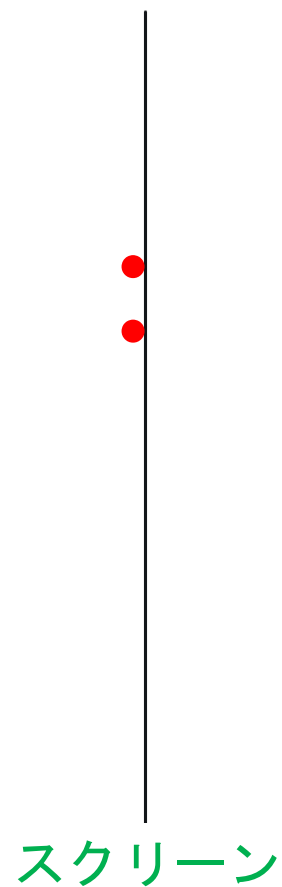
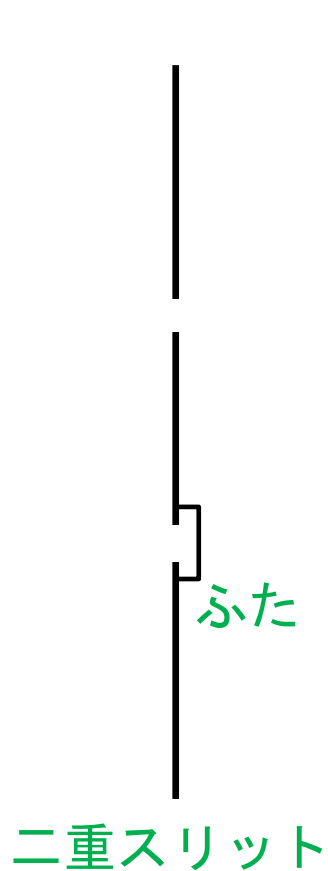
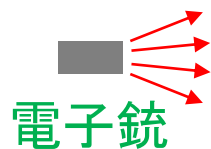
二重スリット



スクリーン

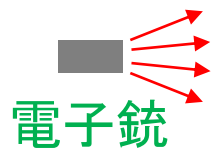
電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：下のスリットにふた



電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：下のスリットにふた



電子銃



ふた

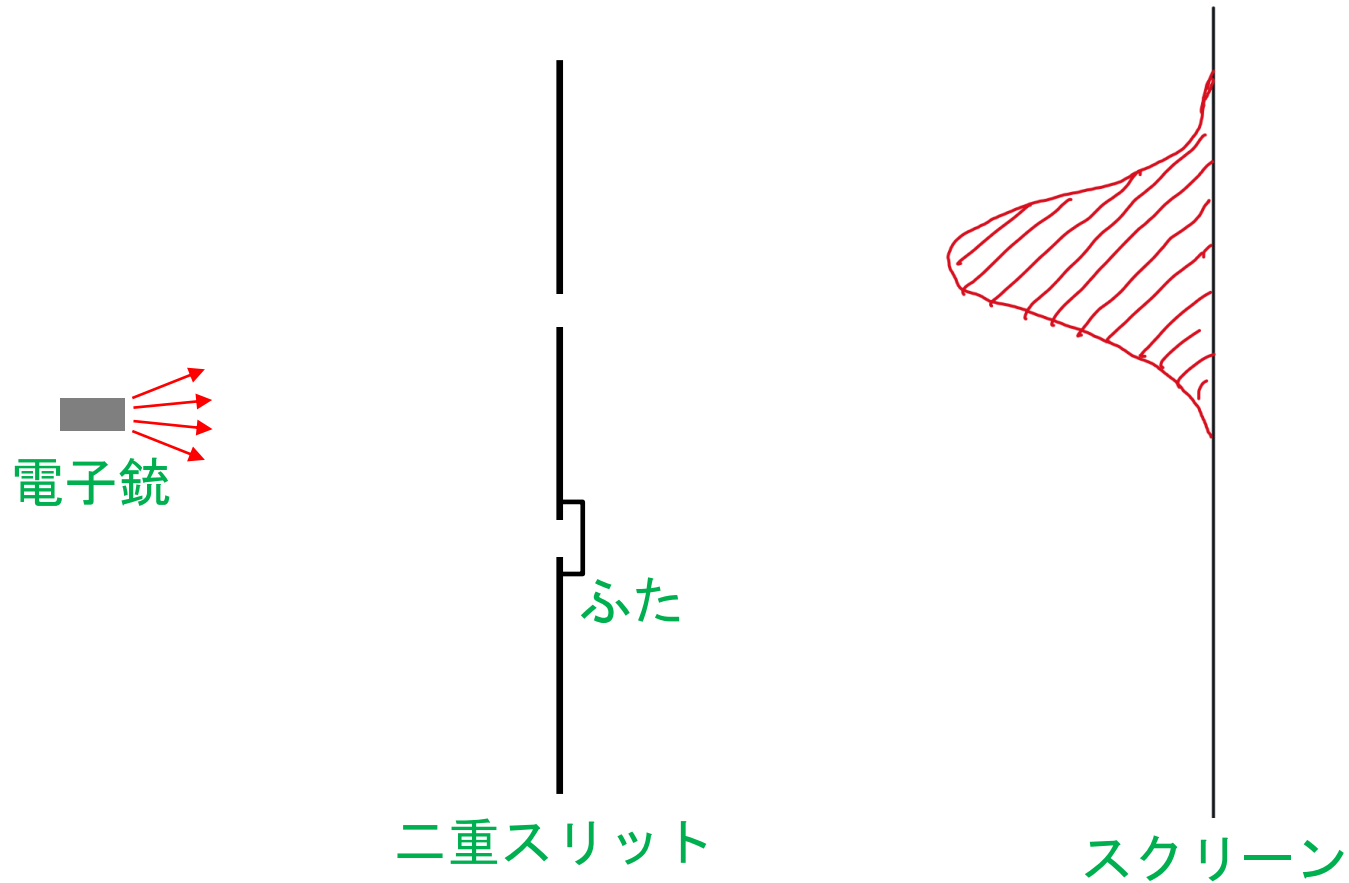
二重スリット



スクリーン

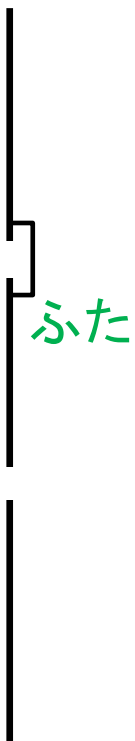
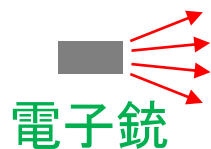
電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：下のスリットにふた

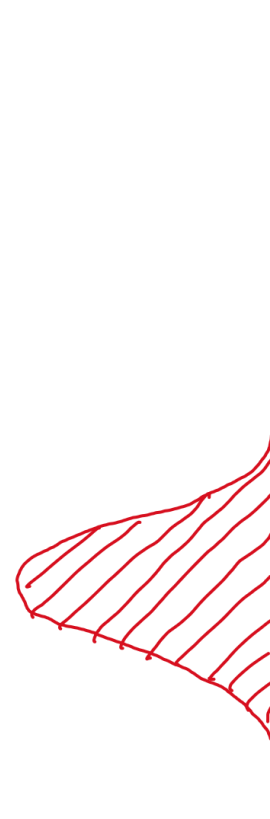


電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：上のスリットにふた



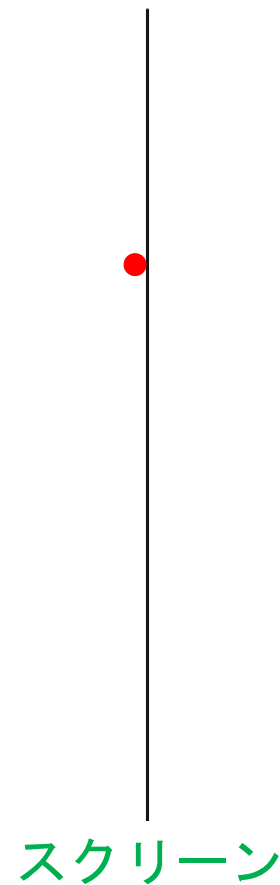
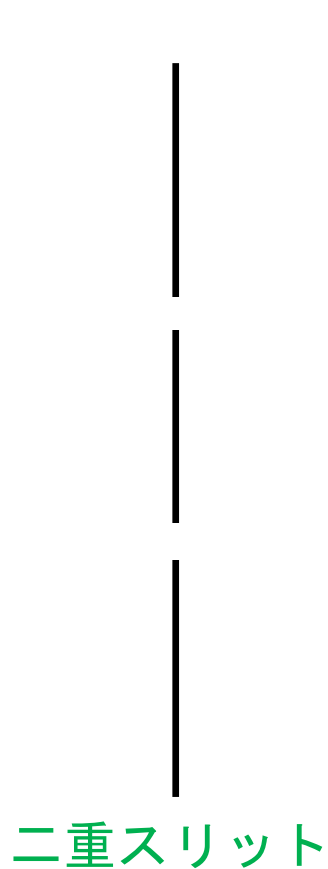
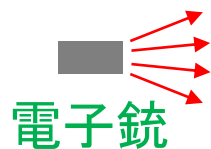
二重スリット



スクリーン

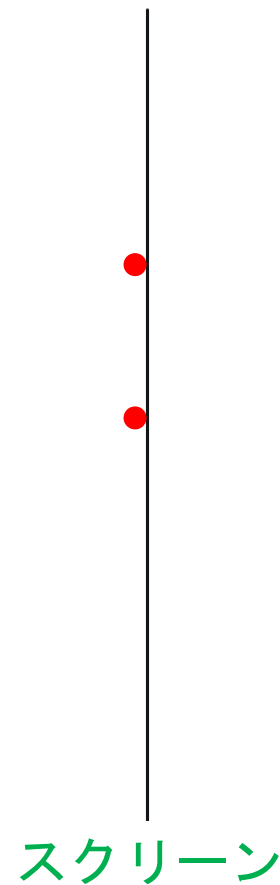
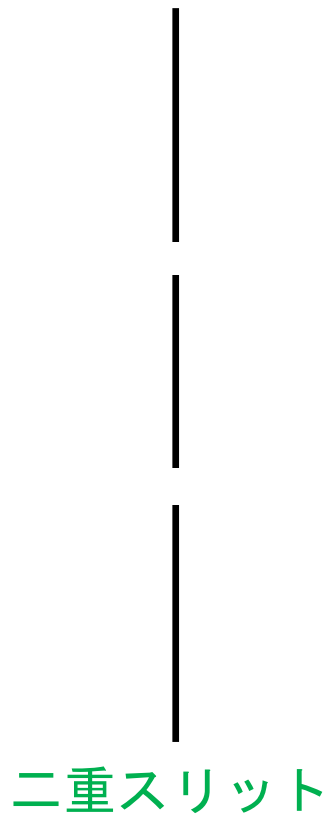
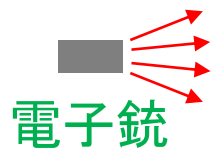
電子の二重スリット実験

電子を一発づつスクリーンに向けて撃っていく：ふたをはずす



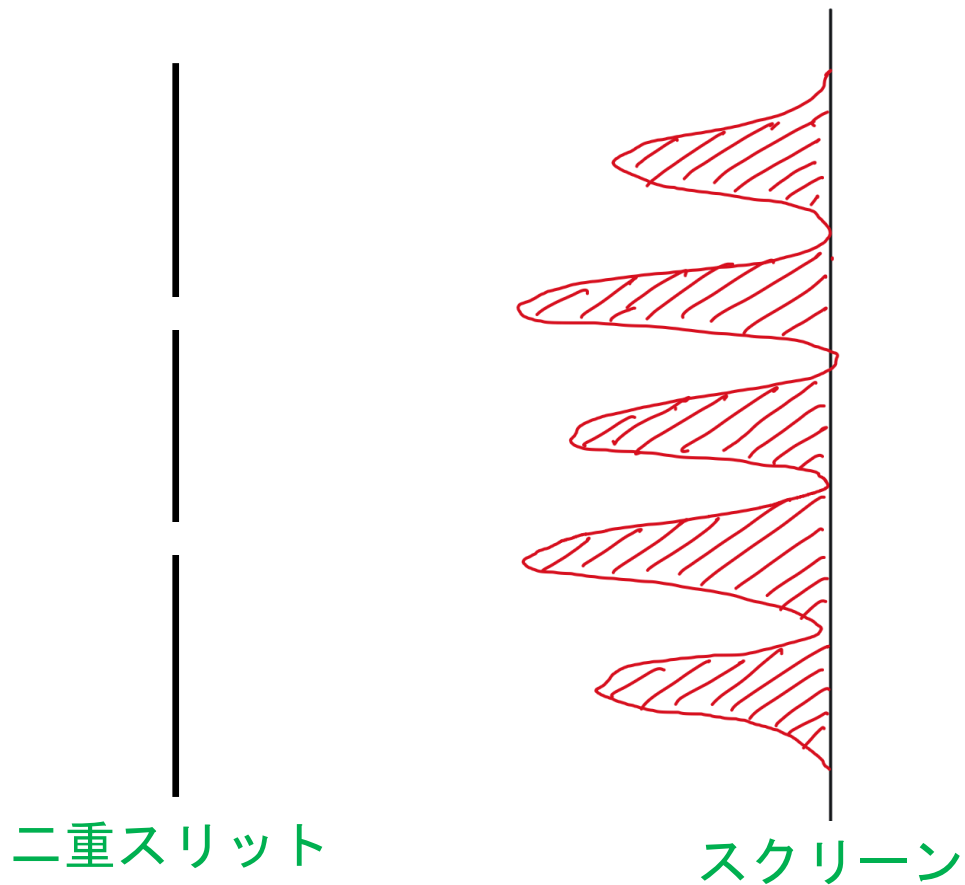
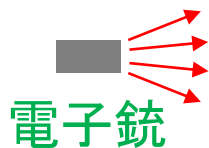
電子の二重スリット実験

電子を一発ずつスクリーンに向けて撃っていく：ふたをはずす



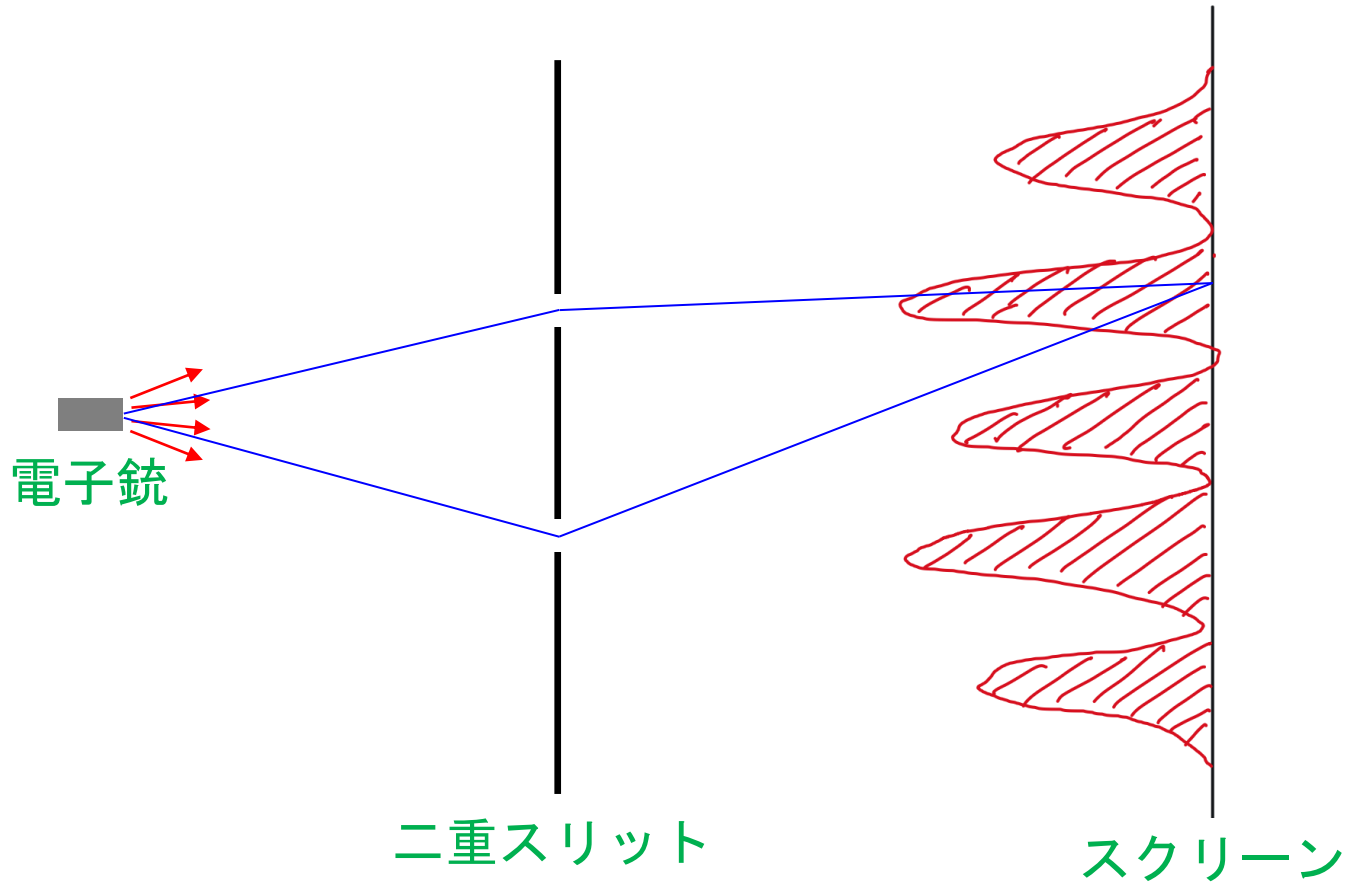
電子の二重スリット実験

電子を一発ずつスクリーンに向けて撃っていく：ふたをはずす



電子の二重スリット実験

電子を一発ずつスクリーンに向けて撃っていく：ふたをはずす

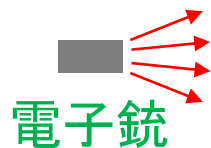


干渉模様が現れる！

→ 一つの電子が上を通った世界 (可能性) と下を通った世界が干渉!!

電子の二重スリット実験

どっちを通ったか、確認すればいいんじゃないよね？



電子銃



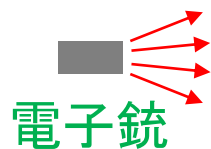
発光装置

二重スリット

スクリーン

電子の二重スリット実験

どっちを通ったか、確認すればいいんじゃないよね？



電子銃



発光装置

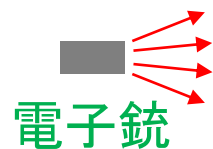
二重スリット



スクリーン

電子の二重スリット実験

どっちを通ったか、確認すればいいんじゃないよね？



電子銃



二重スリット



発光装置

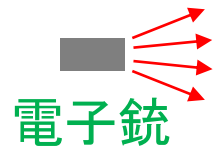


スクリーン



電子の二重スリット実験

どっちを通ったか、確認すればいいんじゃないよね？



電子銃



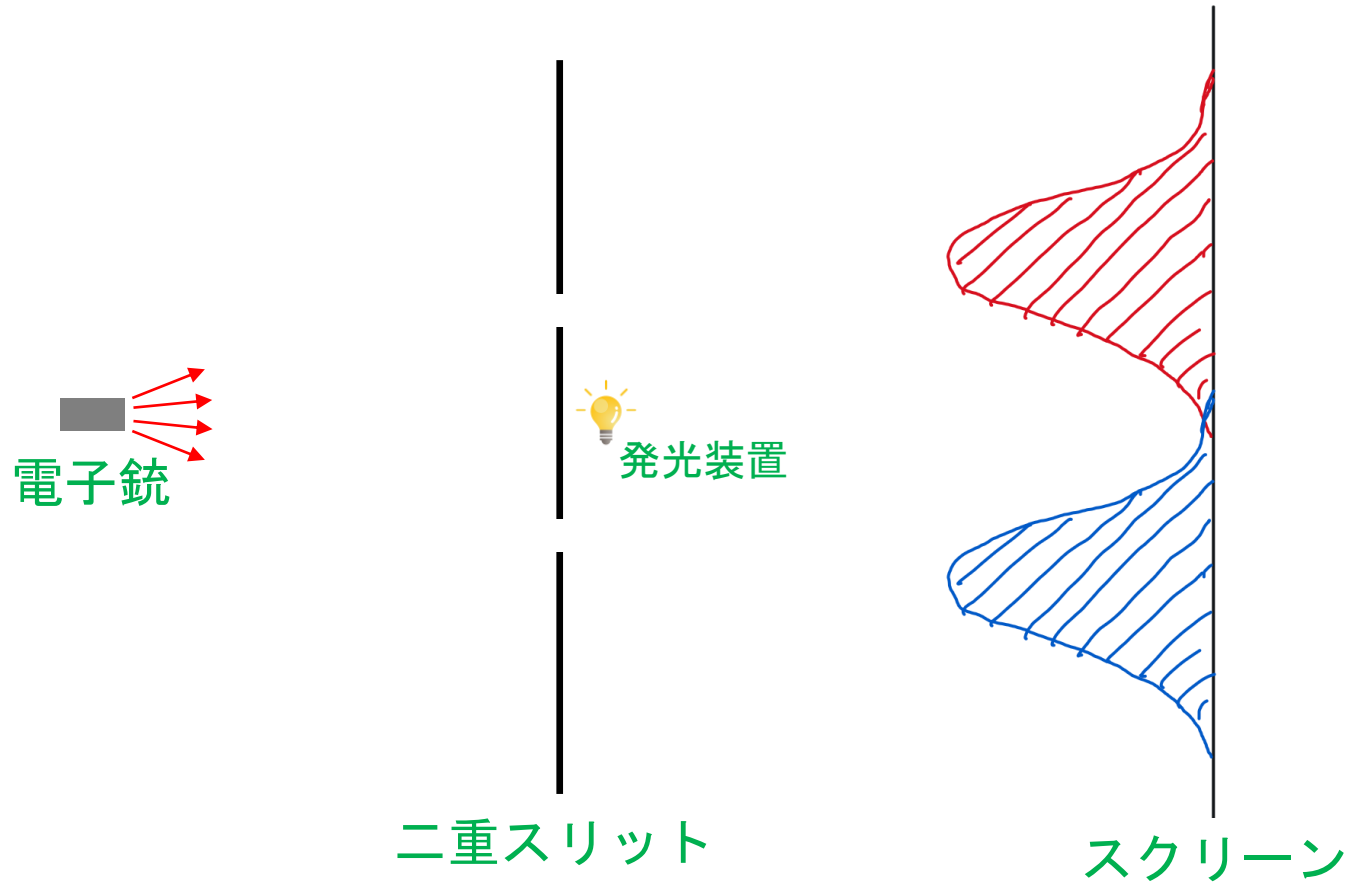
二重スリット



スクリーン

電子の二重スリット実験

どっちを通ったか、確認すればいいんじゃないよね？



干渉模様は消える!!

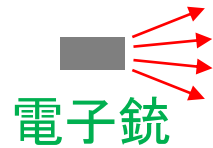
人間が宇宙の法則に影響を与える！??

人間が宇宙の法則に影響を与える！??

→ さすがに、そんなことはない

電子の二重スリット実験

どっちを通ったか確認はできるが、しない(見ない)



電子銃



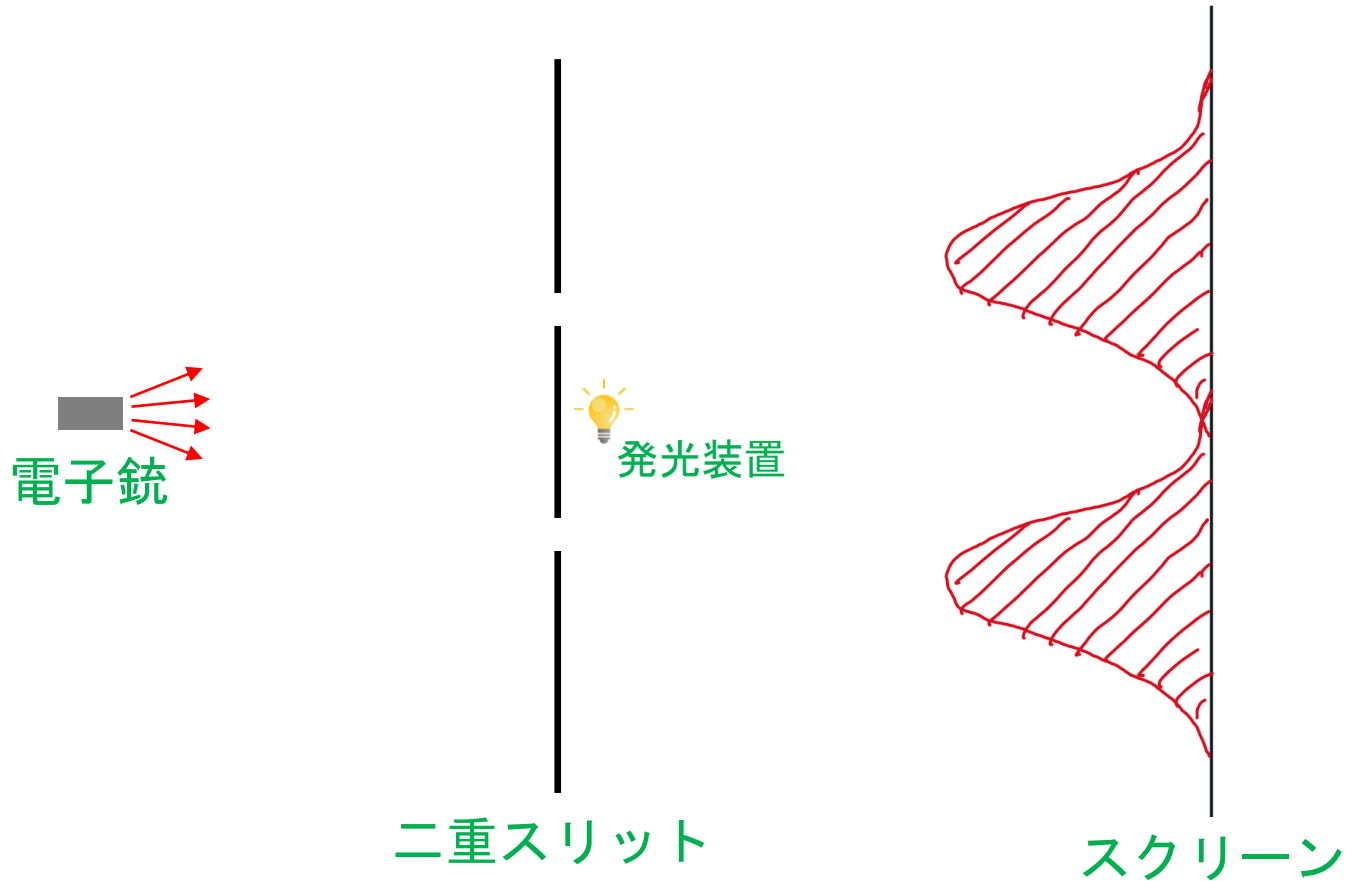
発光装置

二重スリット

スクリーン

電子の二重スリット実験

どっちを通ったか確認はできるが、しない(見ない)



やっぱり干渉模様は消える!!

→ 人間が見ているかどうかは関係ない(原理的に区別がつくかが重要)

発光装置を置いた段階で別の実験 → (当然) 実験結果は変わる

... 一般に観測の影響は無視できない

(無視できる古典力学の方が「特別」)

⇒ 量子力学は、この (避けがたい)
観測の影響が織り込まれた理論になっている

(量子力学的) 並行世界：パラレルワールド

- 電子 (素粒子) は並行世界と干渉できる
- 私たちが並行世界を感じることはない

ご都合主義すぎじゃない？

(量子力学的) 並行世界：パラレルワールド

- 電子 (素粒子) は並行世界と干渉できる
- 私たちが並行世界を感じることはない

ご都合主義すぎじゃない？ → そうではない

... ものを構成する粒子の数が多くなれば、
量子力学的効果 (例えば干渉の効果) は、無視できる

量子力学には、私たちのようなマクロな物体が
⇒ 並行世界の影響 (量子的重ね合わせの影響)
を受けないメカニズムが組み込まれ込められている

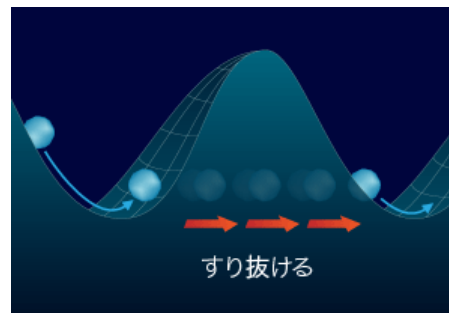
世界は量子力学で動いている!!

(古典力学は、その特別な場合として自動的に現れる)

さらなる面白い現象

ー トンネル効果

... 古典力学的には行けないはずの
ところに「すり抜け」られる



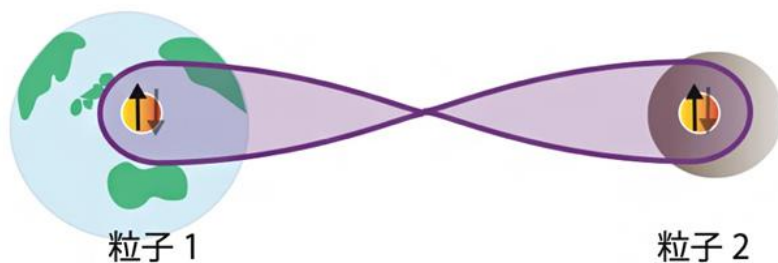
<http://www.pstap.eng.osaka-u.ac.jp/undergraduate/research/quantum.html>

ー スピン

... 「点」なのに「自転」できる
→ 粒子の統計的な性質を決定する

ー 量子もつれ

... 重ね合わせの特別な場合（「非局所的」な相関）



https://www.riken.jp/press/2020/20200908_2/index.html

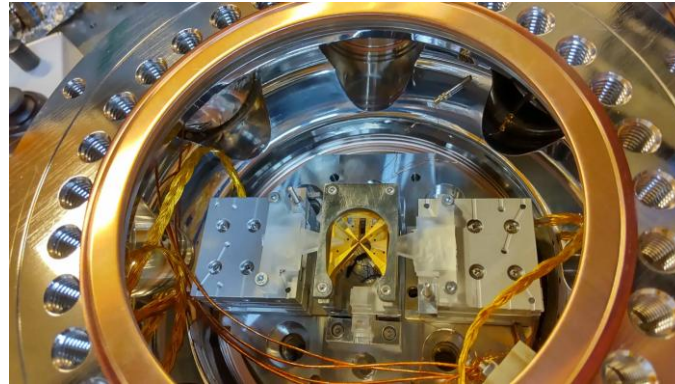
例 1 : 量子コンピューター

～ パラレルワールドコンピューター



超伝導量子ビット

理化学研究所



イオントラップ型

Qubitcore / 沖縄科学技術大学院大学

...

→ 圧倒的な計算力 (古典スーパーコンピューターより約13,000倍速い Google (2025))

— 自然界のシミュレーション (新物質のデザイン、創薬、...)

— 暗号解読 (素因数分解、離散対数問題、...)

例 2 : 量子テレポーテーション



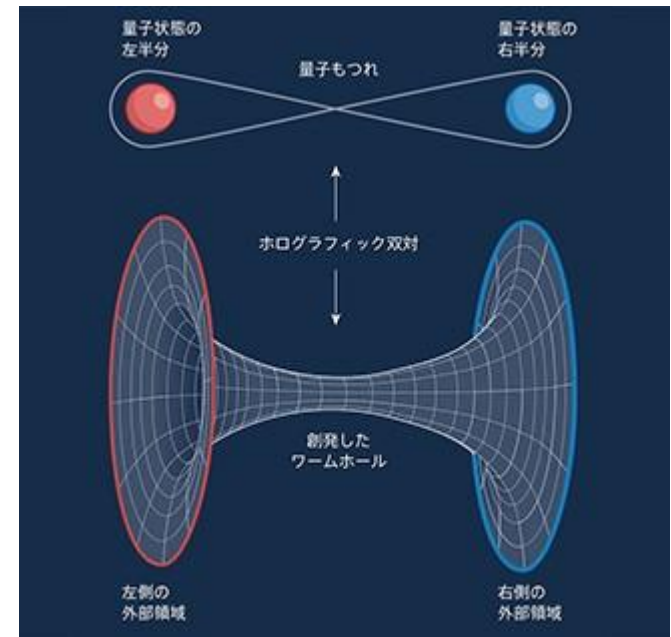
... 途中の空間を通らずに情報が伝達できる！

cf. 2022年ノーベル物理学賞

= ワームホール



<https://coinpost.jp/?p=278747>



Nature Japan

S Fは無理 (行ったことある所のみ、光速度は超えない、...)

さらなる発展

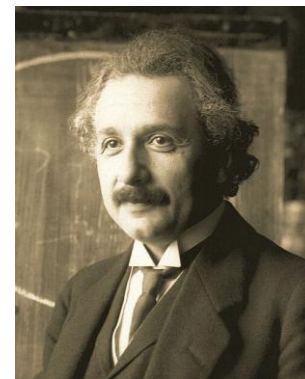
ニュートン力学 (+ マクスウェル)

→ 特殊相対性理論 (アインシュタイン 1905)

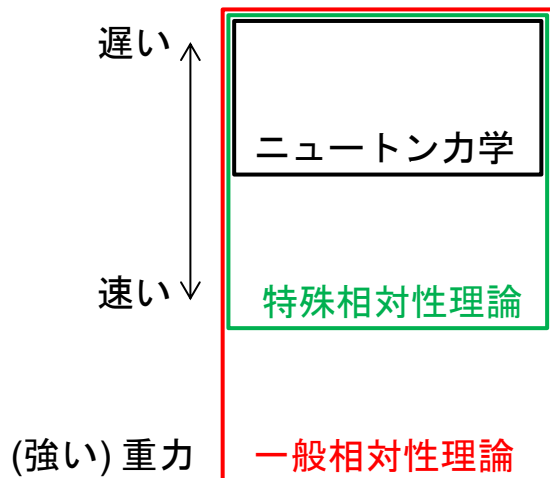
自然界には「絶対的な最高速度」(光速)が存在する

→ 一般相対性理論 (アインシュタイン 1916-1917)

重力とは時空の「歪み」のことである



http://www.bhm.ch/de/news_04a.cfm?bid=4&jahr=2006



さらなる発展

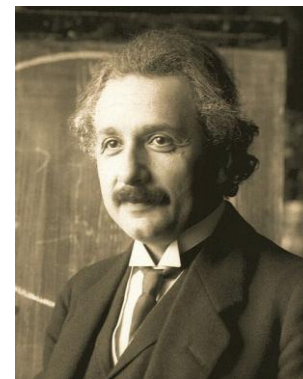
ニュートン力学 (+ マクスウェル)

→ 特殊相対性理論 (アインシュタイン 1905)

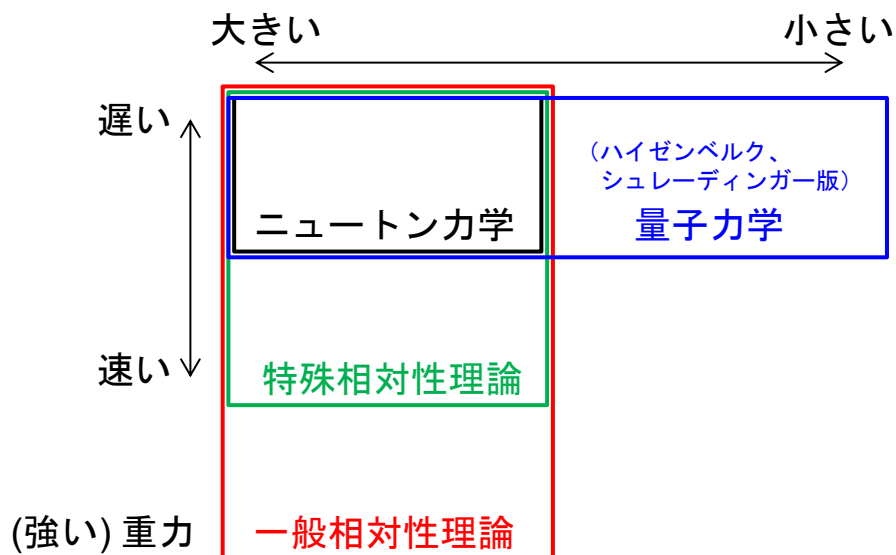
自然界には「絶対的な最高速度」(光速)が存在する

→ 一般相対性理論 (アインシュタイン 1916-1917)

重力とは時空の「歪み」のことである



http://www.bhm.ch/de/news_04a.cfm?bid=4&jahr=2006



さらなる発展

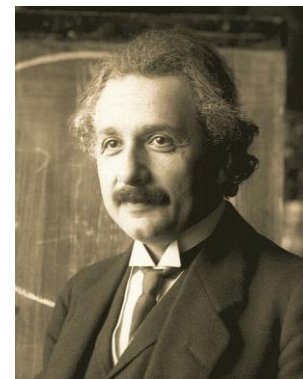
ニュートン力学 (+ マクスウェル)

→ 特殊相対性理論 (アインシュタイン 1905)

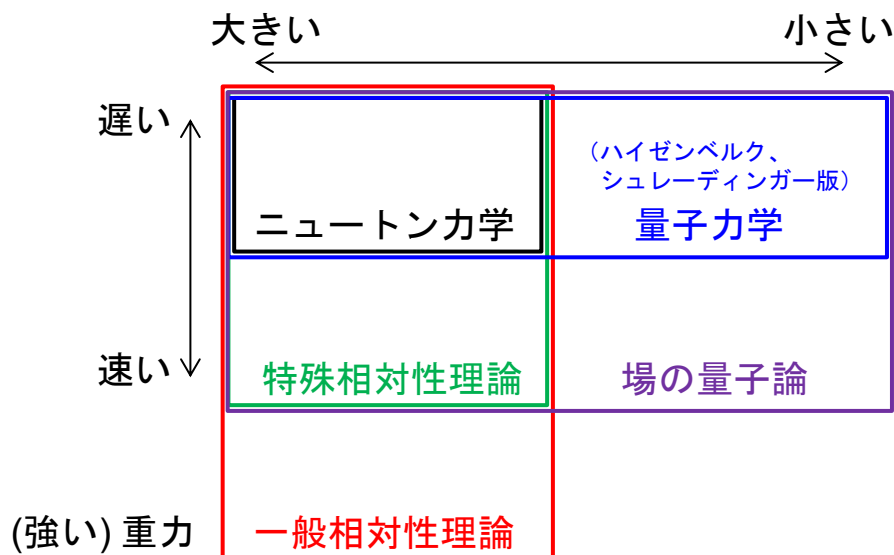
自然界には「絶対的な最高速度」(光速)が存在する

→ 一般相対性理論 (アインシュタイン 1916-1917)

重力とは時空の「歪み」のことである



http://www.bhm.ch/de/news_04a.cfm?bid=4&jahr=2006



→ 素粒子物理学 (Particle physics)

さらなる発展

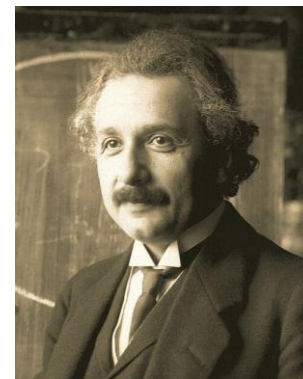
ニュートン力学 (+ マクスウェル)

→ 特殊相対性理論 (アインシュタイン 1905)

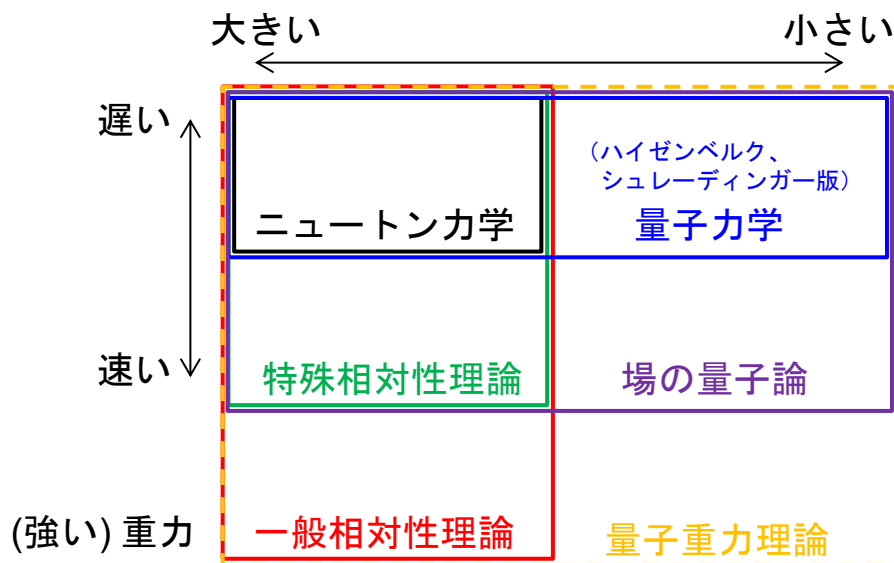
自然界には「絶対的な最高速度」(光速)が存在する

→ 一般相対性理論 (アインシュタイン 1916-1917)

重力とは時空の「歪み」のことである



http://www.bhm.ch/de/news_04a.cfm?bid=4&jahr=2006



→ 素粒子物理学

... まだ完成していない
(超弦理論?)

理論物理学の挑戦は続く...