

栄中日文化センター講座
2023年4月23日, 5月21日, 6月25日



名古屋・栄 中日文化センター

量子もつれとは何だろうか？

量子力学の基礎から

2022年のノーベル物理学賞まで

谷村 省吾

名古屋大学大学院 情報学研究科

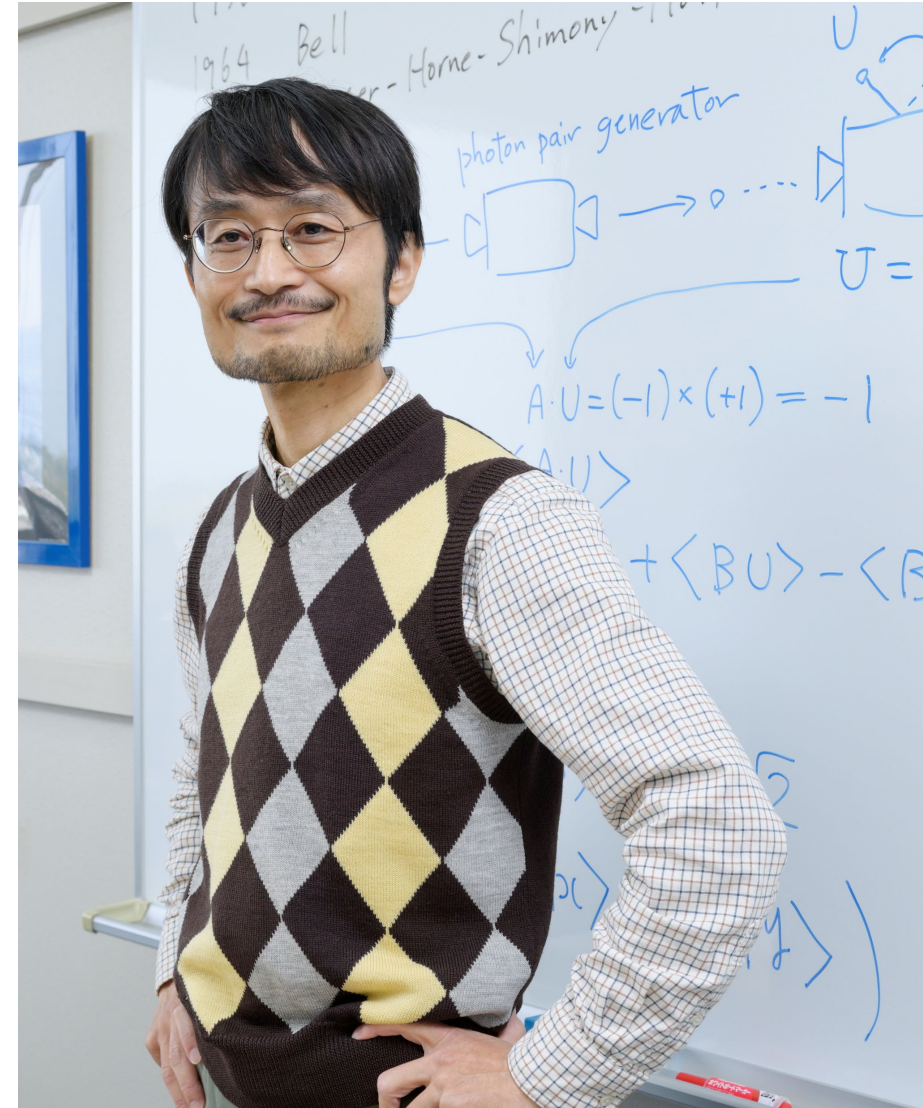
twitter @tani6s

資料を私の[ウェブサイト](#)で公開しています。「谷村省吾」で検索 または QRコード→



自己紹介：谷村省吾（たにむら・しょうご）

- 名古屋生まれ、名古屋育ち。
- 1990年 名古屋大学工学部応用物理学科卒業
- 1995年 名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻修了、博士（理学）取得。
- 大学院はE研（素粒子論研究室）。2008年にノーベル物理学賞を受賞した小林誠氏と益川敏英氏は同じ研究室の大先輩。
- 職歴：東京大学・京都大学・大阪市立大学・京都大学、2011年から名古屋大学。
- 専門：量子基礎論・量子情報理論・圏論や微分幾何の応用・AIの研究



2022年のノーベル物理学賞授賞対象

量子もつれ光子を用いた、ベルの不等式の破れの検証実験と量子情報科学の先駆的実験

for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science (<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/>)

ジョン・クラウザー（アメリカ）

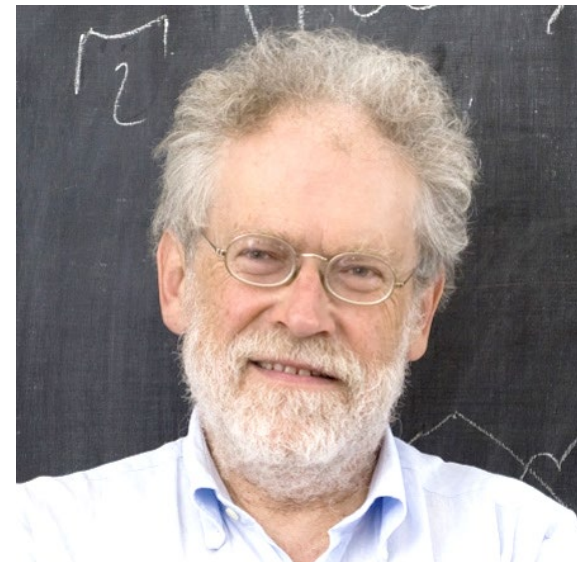
<https://www.johnclausser.com/>

アラン・アスペ（フランス）

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

アントン・ツァイリンガー（オーストリア）

<https://wolffund.org.il/2018/12/11/anton-zeilinger/>



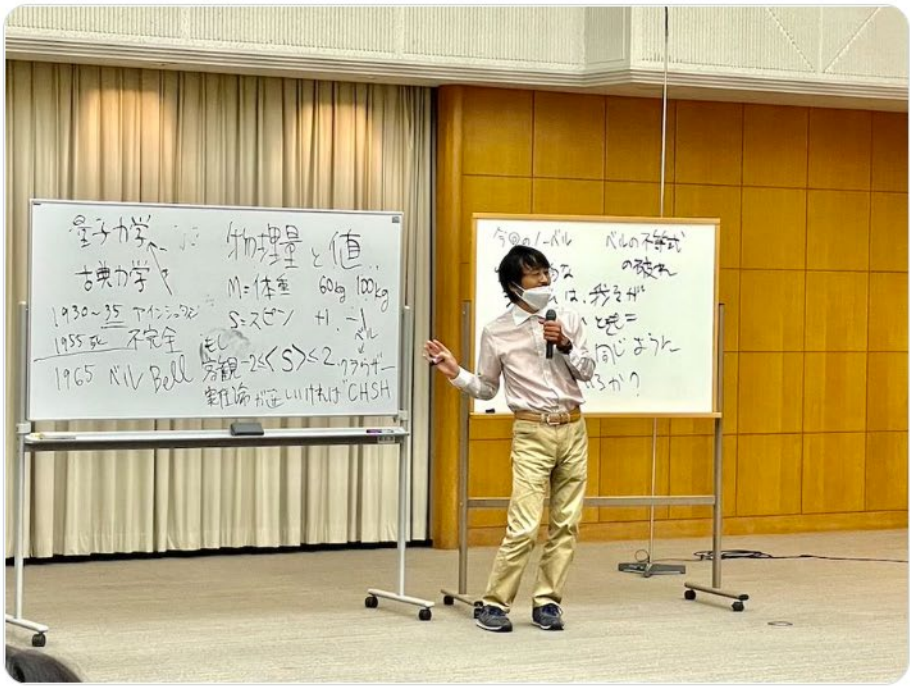
- ホーム
- 話題を検索
- 通知
- メッセージ
- ブックマーク
- リスト
- プロフィール
- もっと見る

ツイートする

ツイート

 **名古屋大学 研究フロントライン**
@Frontline758

谷村先生、ただいまアツ〜く解説していただいています



午後7:33 · 2022年10月4日 · Twitter Web App

30 件のリツイート 3 件の引用ツイート 102 件のいいね

 **TANIMURA Shogo**
@tani6s



スレッド

 **名古屋大学 研究フロントライン**
@Frontline758

昨日のノーベル賞発表は、記者さんたちが集まるホールに杉山総長も駆けつけました。

受賞研究についてレクチャーしてくださった谷村省吾教授@tani6sと総長との豪華解説に、会場は釘付けとなりました。



午後2:18 · 2022年10月5日 · Twitter Web App

20 件のリツイート 2 件の引用ツイート 52 件のいいね

2022年10月4日、自分がノーベル賞をもらったわけでもないのに名大の記者会見会場でノーベル賞の解説をした

一連の講座で話したいこと

- 我々の世界は何でできていて、それらはどのように振る舞っているのか（世界の基本構成要素と物理法則）を知ってほしい。
- 電子や光子などの素粒子でできていて、量子力学の法則に従っている。
- 量子力学を理解しよう。そのために必要な数学を学ぼう。
- 2022のノーベル物理学賞の意義を理解しよう。

ちょっとお尋ねしたいのですが

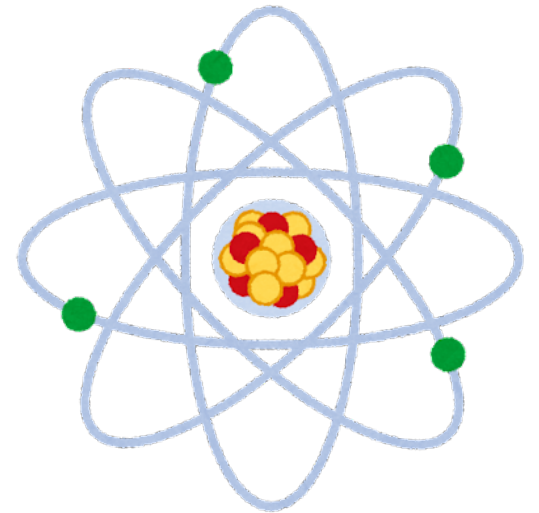
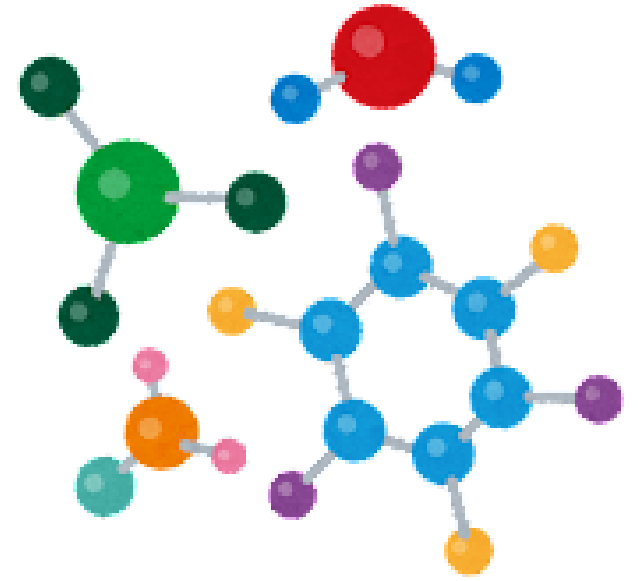
- この中で高校で物理を学んだ人？
- この中で大学で物理を学んだ人？
- 複素数を知っている・扱える人？
- ベクトルと行列を知っている・扱える人？

量子論・量子力学

- ミクロの世界の物理法則を体系化した理論
- 英語では Quantum Theory
- 量子力学 Quantum Mechanics ともいう。

ミクロの世界

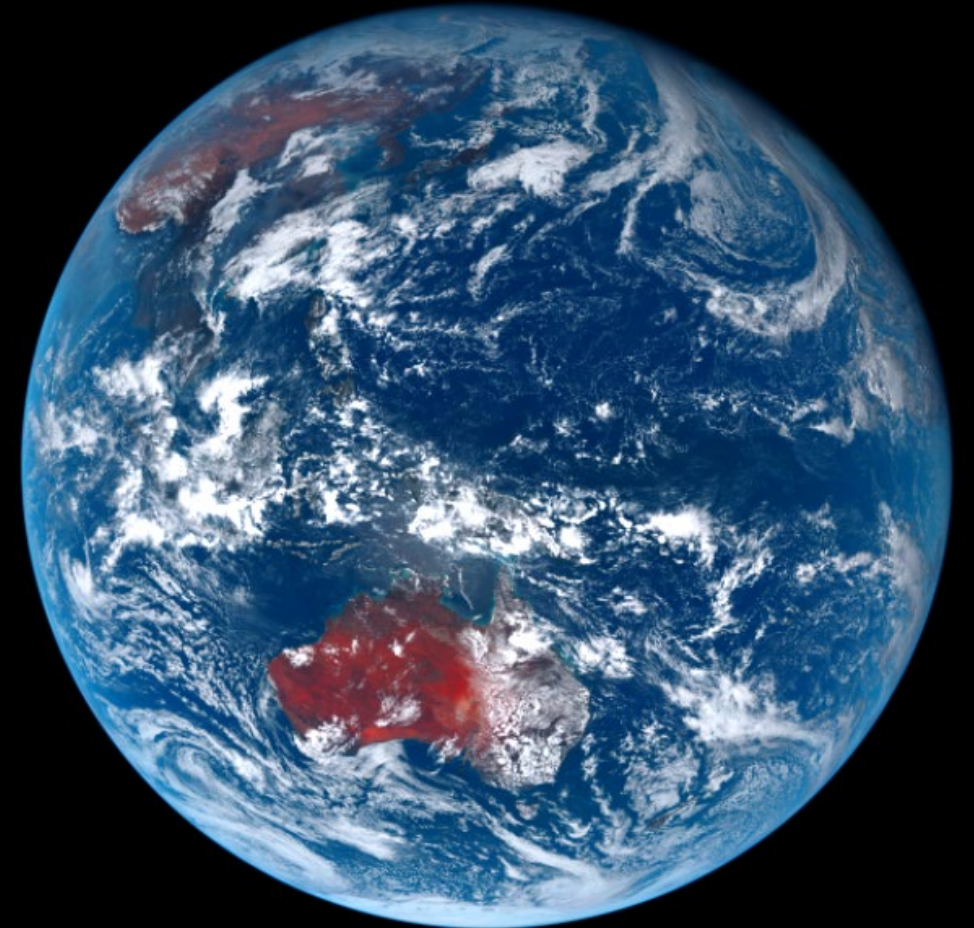
- 分子・原子・電子・原子核・光子・素粒子などの世界
- すべての物質の基本構成要素
- **原子の大きさ、およそ1億分の1cm**
- 見ているはずなのに見えていないことがわからない、指先に触れていることもわからない。



直径13cmの地球儀



直径1万3千kmの地球



1億倍



原子



1億倍



直径1cmの玉



4mm

1億倍

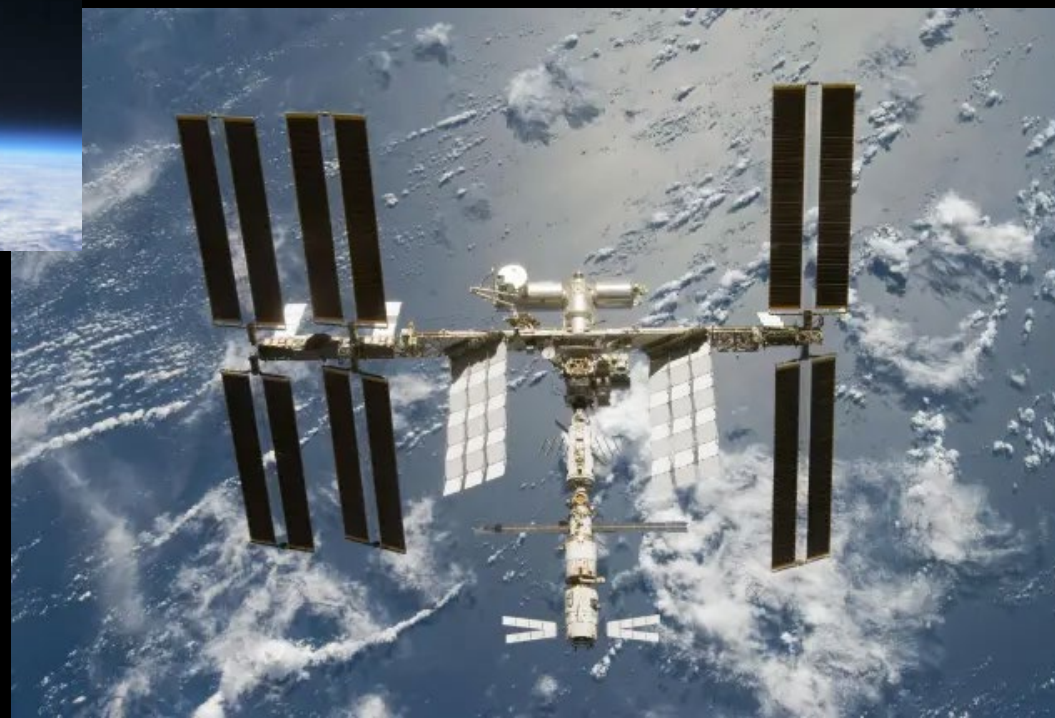


宇宙ステーションの高さ400km

国際宇宙ステーションは地表面から400km離れている。1億分の1にすると 4mm



<https://raag.org/iss-sstv-transmissions-21-26-june-certificate/>



<https://www.themarysue.com/congress-asks-nasa-about-russia/>

すべての物質は原子でできていることを 実感する方法はあるか？

- ものを小さく砕いて原子1個1個の大きさにすることは事実上不可能。
- 薄いものなら作れる：シャボン玉

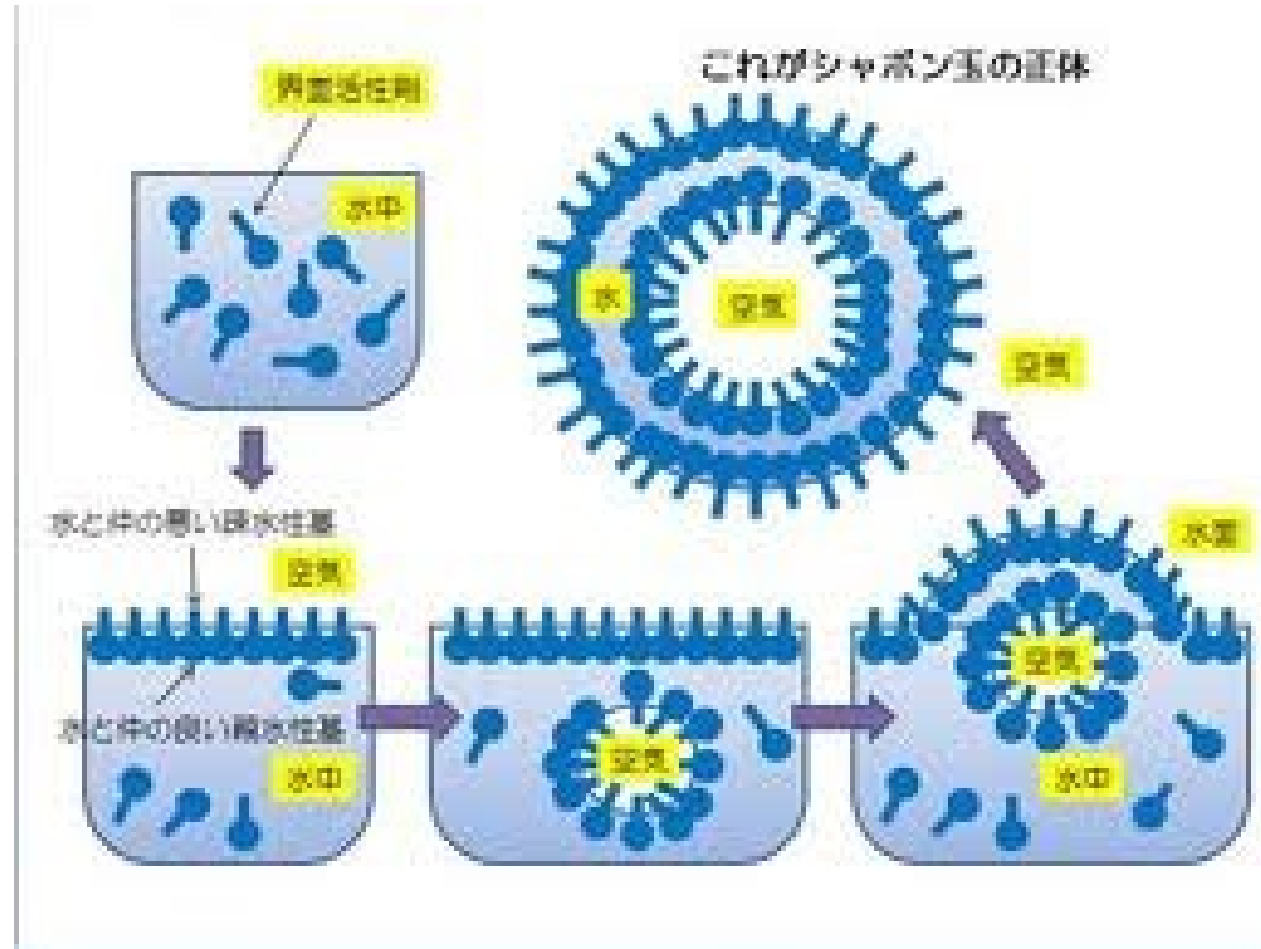


<http://atsunon08.blog.so-net.ne.jp/2008-05-06>



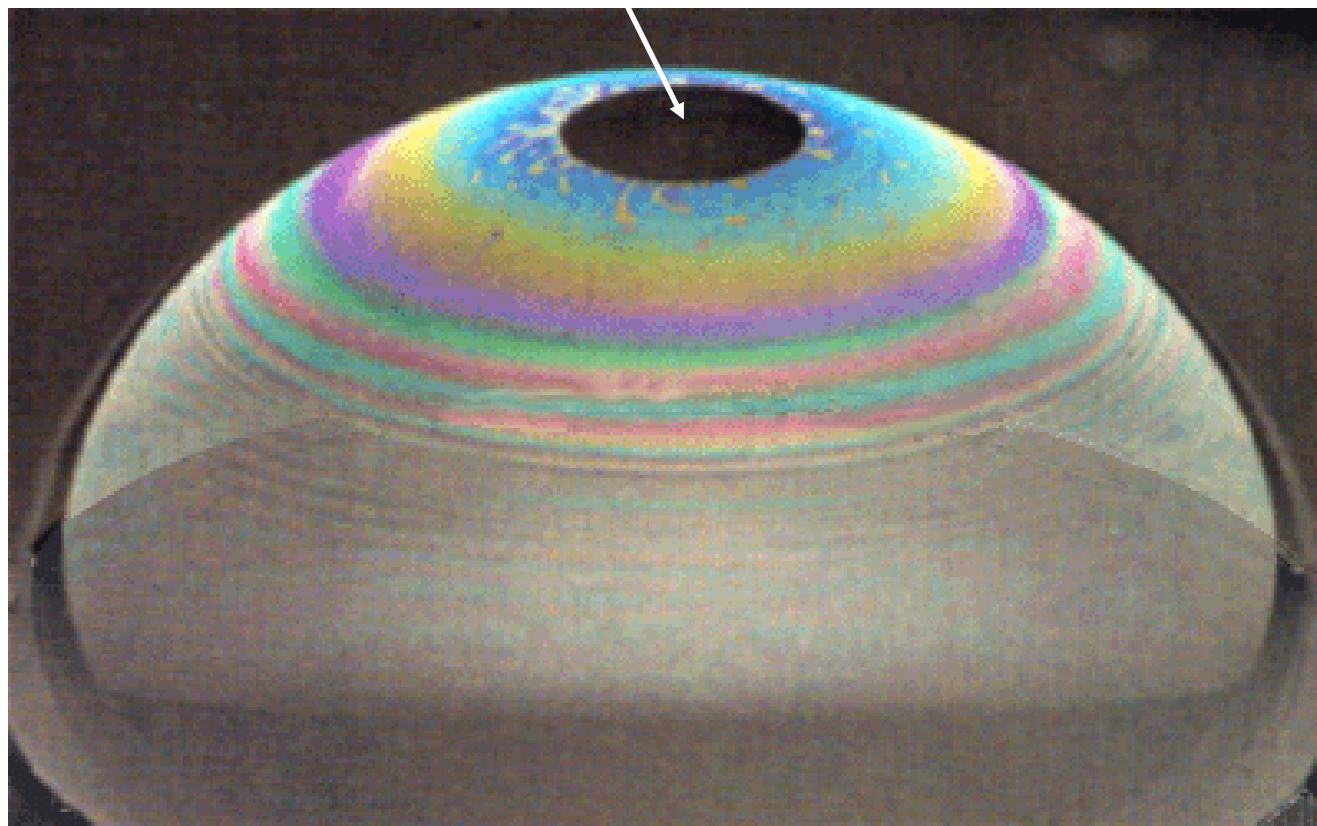
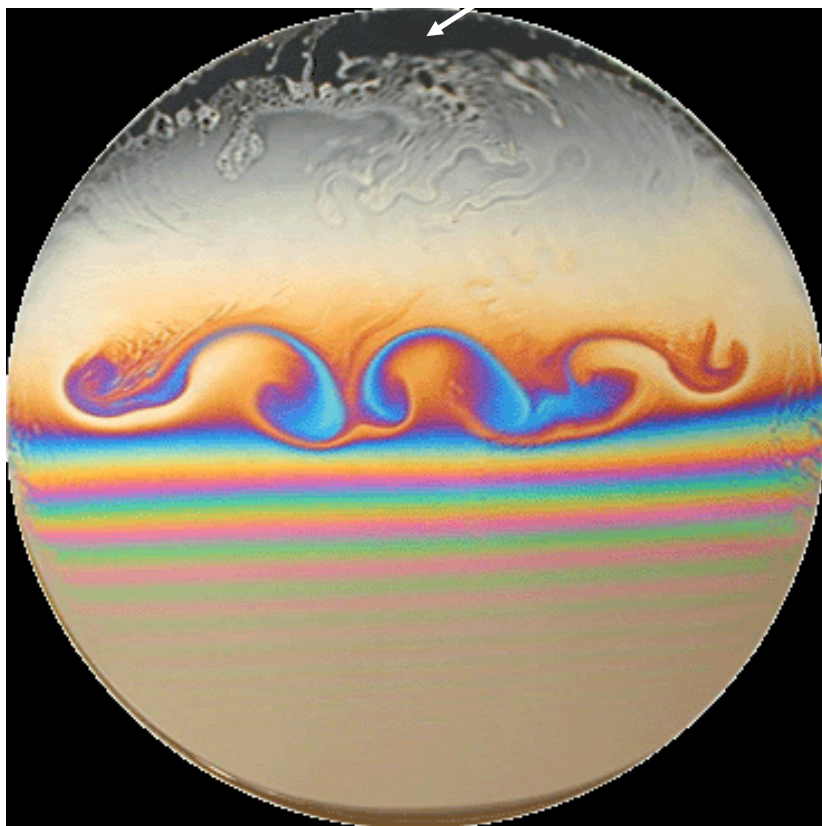
<http://hooktail.sub.jp/wave/interferences1/>

シャボン玉は、水がせっけん分子の二重膜ではさまれてできている



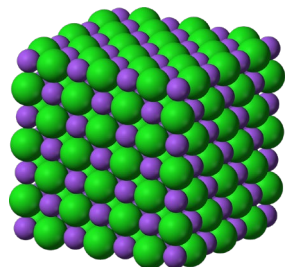
原子の存在の間接的証拠

シャボン膜がこれより薄くならないぎりぎりの厚み（光の波長より薄いので干渉縞を生じない） = 分子サイズ



原子の存在の間接的証拠

塩や砂糖や酸化鉄の結晶。原子が規則正しく並んでいる、と思える。もしもゼリーのような「いくらでも小刻みにできる物体」だったらこのような形が自然にできる理由がない。



<https://ja.wikipedia.org/wiki/塩化ナトリウム>

<https://ameblo.jp/anmasahitomasa/entry-12516417783.html>

<https://www.okatsune.jp/>

<https://sites.google.com/site/fluordoublet/>

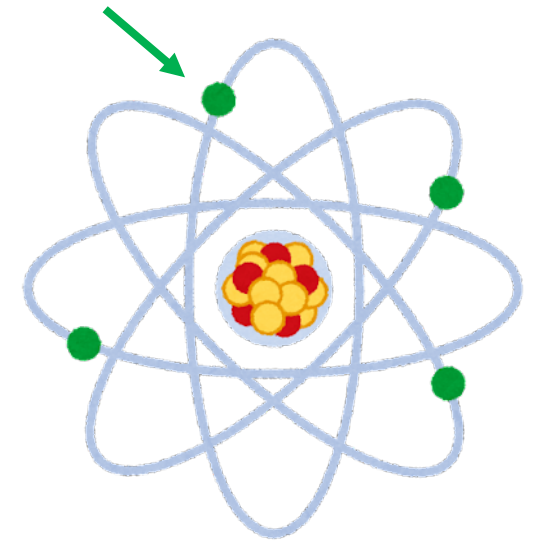
電子 electron

- 陰極線管
Cathode Ray Tube, CRT
マイナス極から
電子を発射している。
- 百年ちょっと前に発見された

<https://www.lymart.com/crookes-tube-cathode-ray-tube-demonstrator-cathode-ray-tube-with-maltese-c-ross-2-product/>

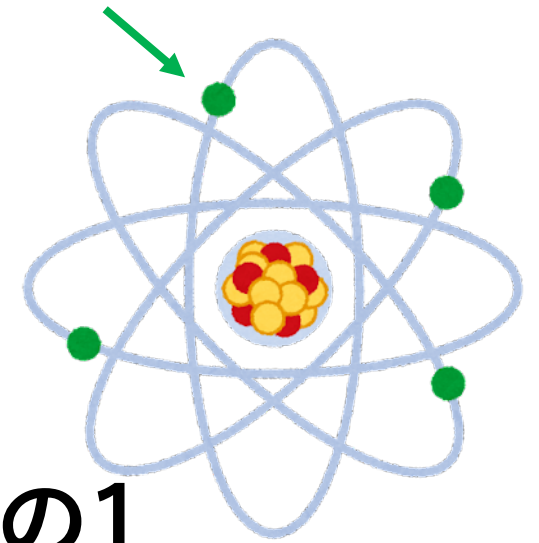


電子の働き



- テレビのブラウン管・蛍光灯・LED
- 電子レンジ・アンテナ
- 金属中の電流は「電子の流れ」
- 発電機やモーターは電子が磁場から受ける力で動いている
- たいていの化学反応は電子の移動によって誘起された原子の並び替え
- 光合成も消化も呼吸も神経伝達も電子の動き

電子はどんなもの？



- 電子の質量

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg} = 0.0000 \dots 00091 \text{ kg}$$

0.9グラムの1億分の1の1億分の1の1億分の1

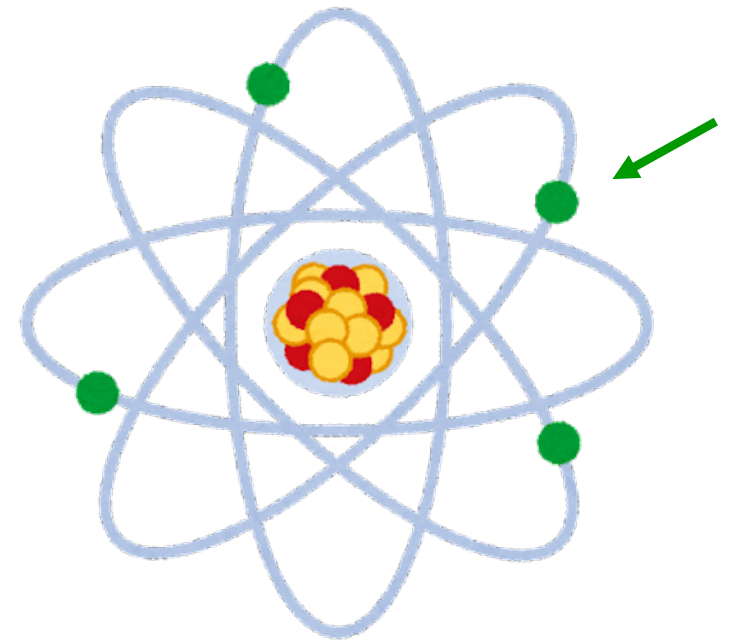
- きわめて軽い・小さい
- 通常のアトミの質量の約4千分の1が電子の質量
- **あなたの体重が60kgなら、15gの電子が入っている**
- **膨大な個数の電子**
- 電子が動くことによって筋肉も神経も脳も活動している。

原子や電子の物理法則

- ボールや車などマクロ物体の運動をつかさどる物理法則は知られていた：ニュートン力学
- 原子や電子のふるまいを調べると、**原子は「たんにボールを小さくしたもの」**ではないことがわかってきた。
- **根本的に新しい物理理論が必要だということになり、1900～1926年頃に量子論が作られた。**
- アインシュタインも量子論の初期の立役者

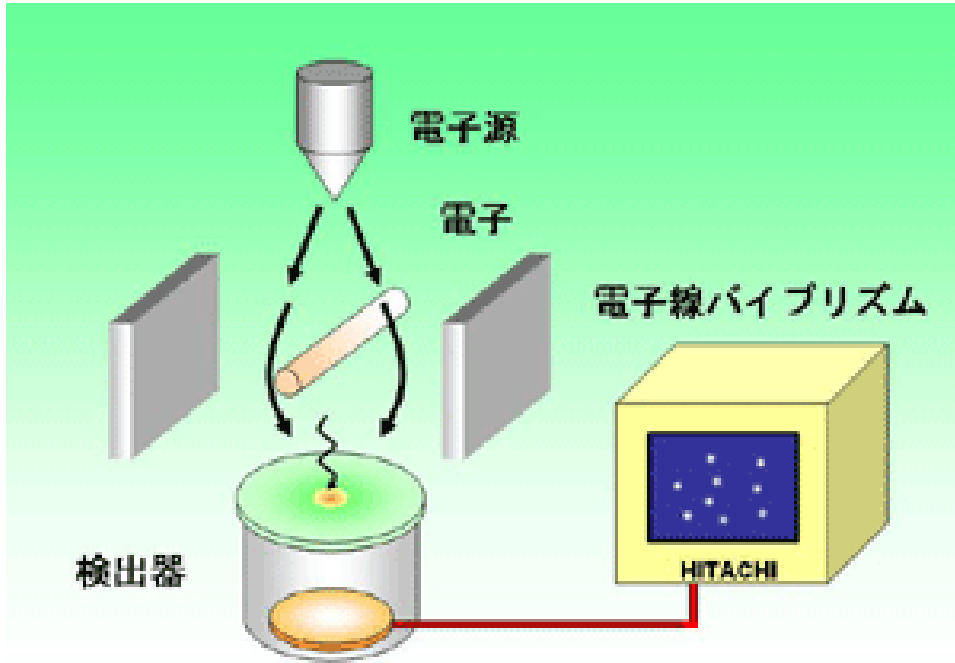
量子論らしさ

- 電子は粒子か？
- 電子は決まった質量と電荷を持っている
- 電子は1つ2つと数えられる
- 電子は割れない



電子のダブルスリット実験

日立の電子線ホログラフィー（外村彰）



<https://www.hitachi.co.jp/rd/research/materials/quantum/doubleslit/index.html>

この実験のどこが不思議か？

- 電子はぽつりぽつりと、ほとんどランダムに当たる
- 1個2個と数えられる粒子のように見える
- しかし、累積すると、波のような濃淡のパターンが浮かび上がる



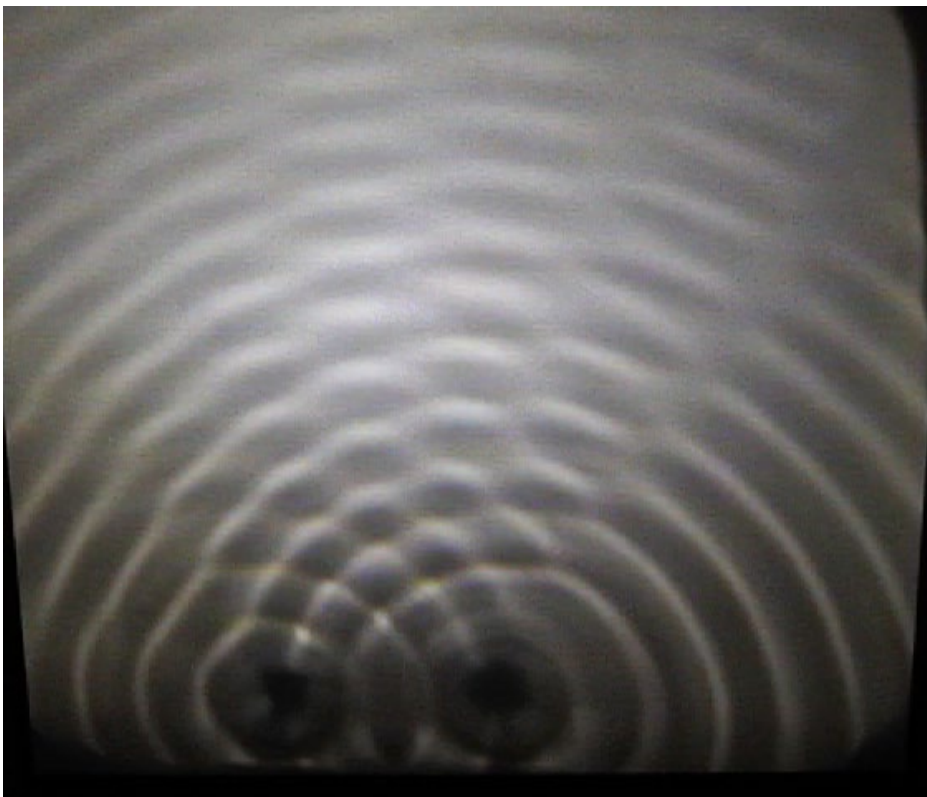
水面波の実験

<https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0&t=260s>

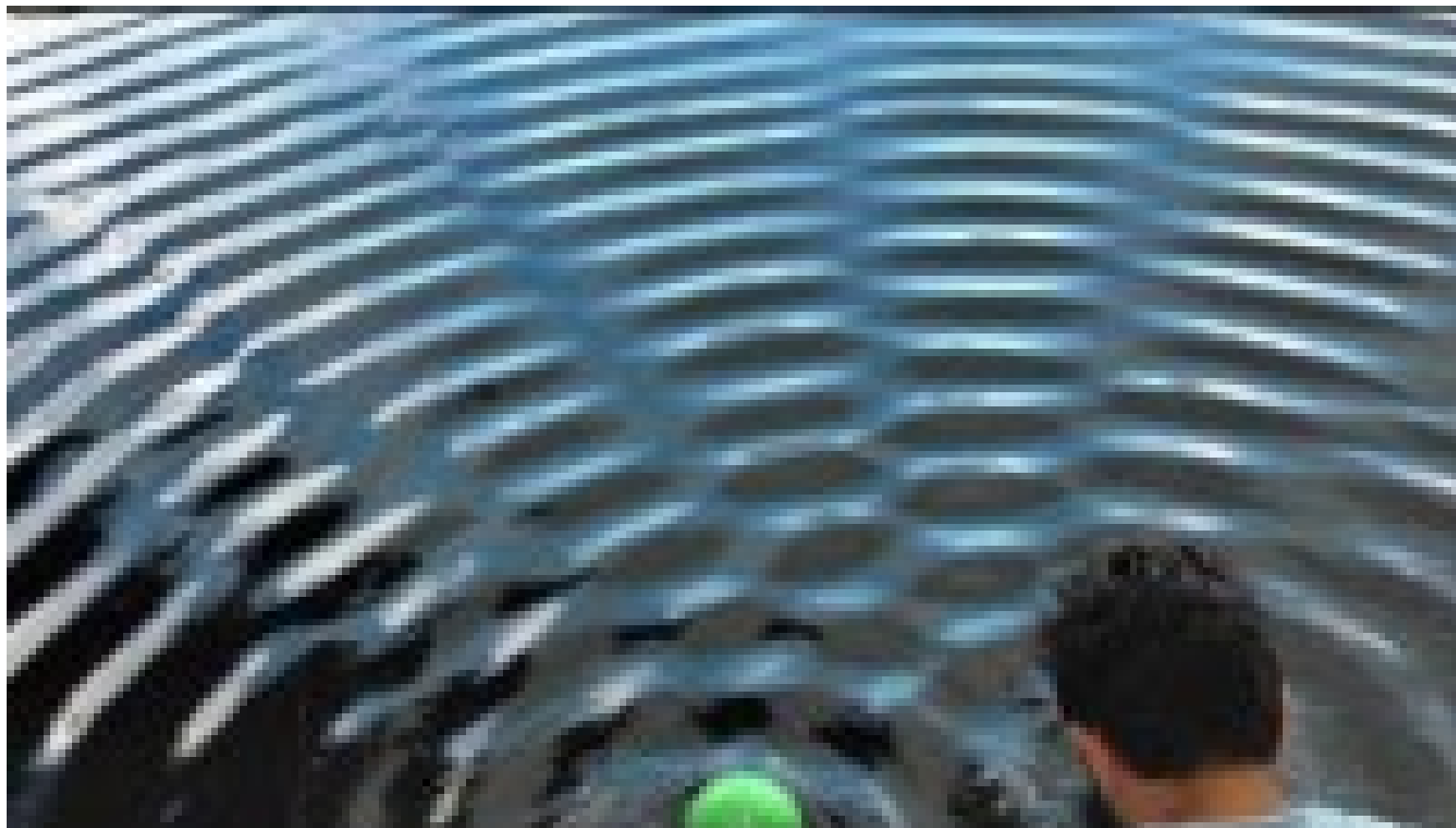


波動の干渉効果

2箇所から発生した水面波



<https://lab.mints.ne.jp/assist/4/kanshou2.htm>

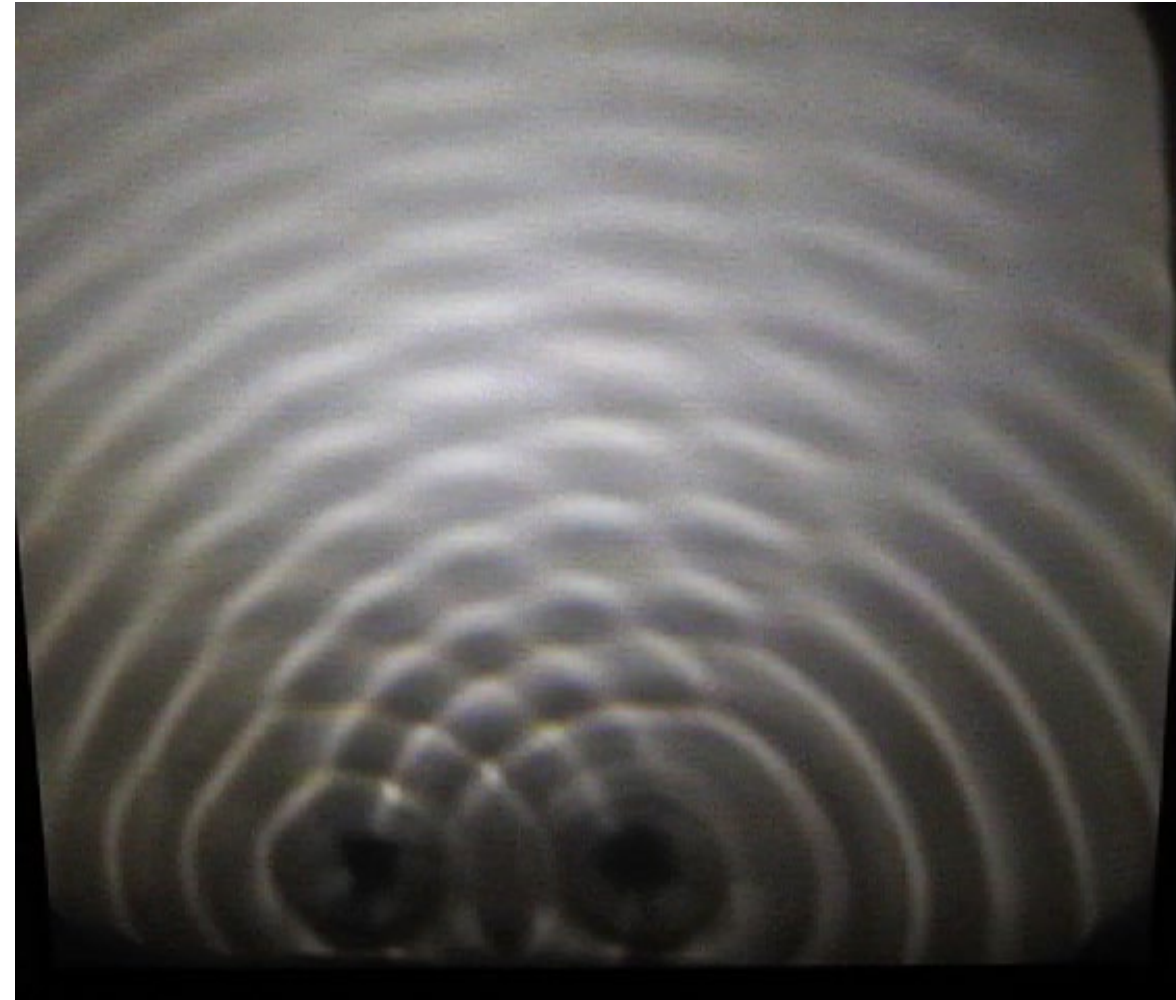


<https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0&t=260s>

4:25 あたりから観る

波動の干渉

- 山と谷が交互に生じて伝わって行くのが波。
- 波は空間的に広がる。
- 波同士が重なり合うと、強め合ったり、打ち消し合ったりする。



電子の波動性と粒子性

- 飛んでいる電子は一箇所に局在せず、**波動**のように広がって進んでいる、ように見える。
- 電子の波は重なり合って、強め合ったり、弱め合ったりする。
- 強め合った場所に電子は大きな確率で現れる。
- 現れるときは**粒子**のように現れる。電子の「半分のかけら」は決して見つからない。

量子論の不思議 1：偶然まかせ

- 量子論は事象が起こる**確率**しか予測できない
- 「次の電子がスクリーンのどこに現れるか」を量子論は予測できない。と言うか、それは誰にもわからない。
- **アインシュタイン「神はサイコロを振らない (God does not play dice)」**：電子などの究極的な要素が偶然まかせで動いているとは信じられない。

量子論の不思議 2：見ると見ないで違う

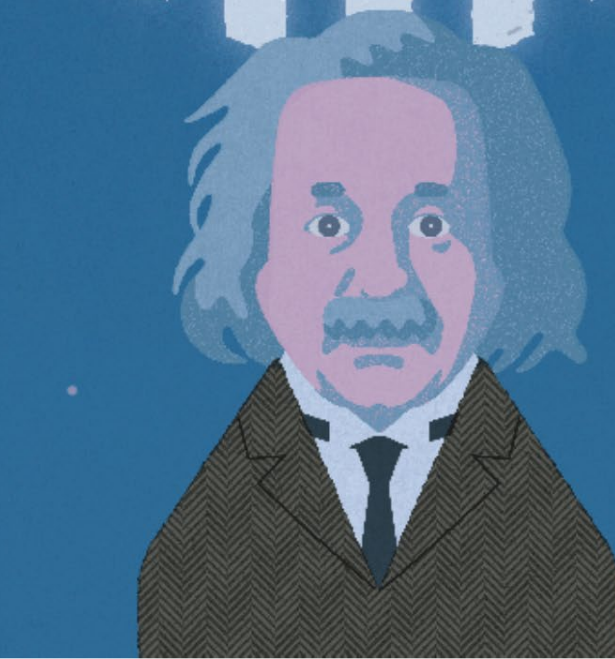
- 電子を探せば必ず「ひとつぶ」の粒子として見つかる。
- 電子を探していないときは、電子は波動のように広がり、同時に2箇所窓を通過して、重なって強め合ったり弱め合ったりしているかのように振る舞う。
- 見たときだけ粒子なのか？

アインシュタインのクレーム

- 電子は見ているときと見ていないときで別物なのか？
- 「空を見上げたときにだけ月があると君は信ずるのか？

Do you really believe that the moon exists only when you look at it ?

(アインシュタインがパイースと散歩中に言った)



さて、量子力学はこの奇妙な原子や電子の振る舞いをどう記述し、どう予測するのか？

- 物理学は、「電子とはこういうものです」ということを説明するよりは、「電子にこういうことをすれば、こういうことが起こります」という規則性を記述し予測する。
- 「**電子の正体**」は説明できない。
- 「**電子の状態**」を書き表すのに必要な数学的記号と、「**電子が引き起こす現象**」を予測するのに必要な数学的理論を提供する。

具体的にはどういう数学を使うの？

- 複素数 (complex number)
- 確率 (probability)
- ベクトル (vector)
- 行列 (matrix)

ここからホワイトボードでレクチャー

- 複素数 (complex number)
- 確率 (probability)
- ベクトル (vector)
- 行列 (matrix)