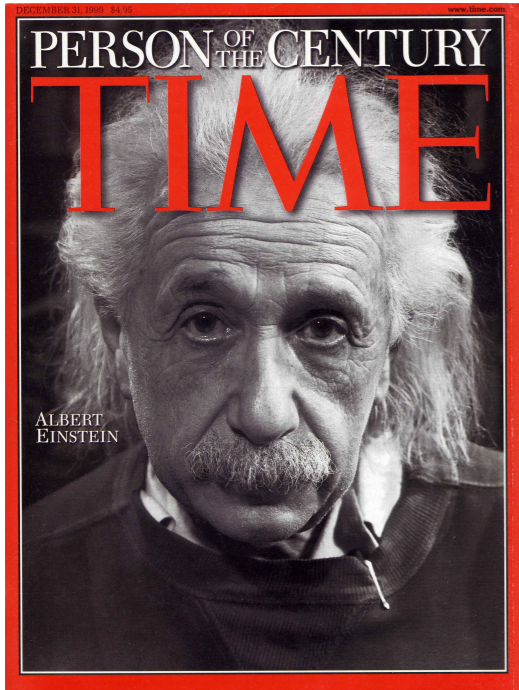


相対論と量子論 アインシュタインの成功と失敗



Time
1999/12/31

1. 1905年の3つの業績
2. 一般相対性理論
3. 量子論
4. アインシュタインとボーアの論争

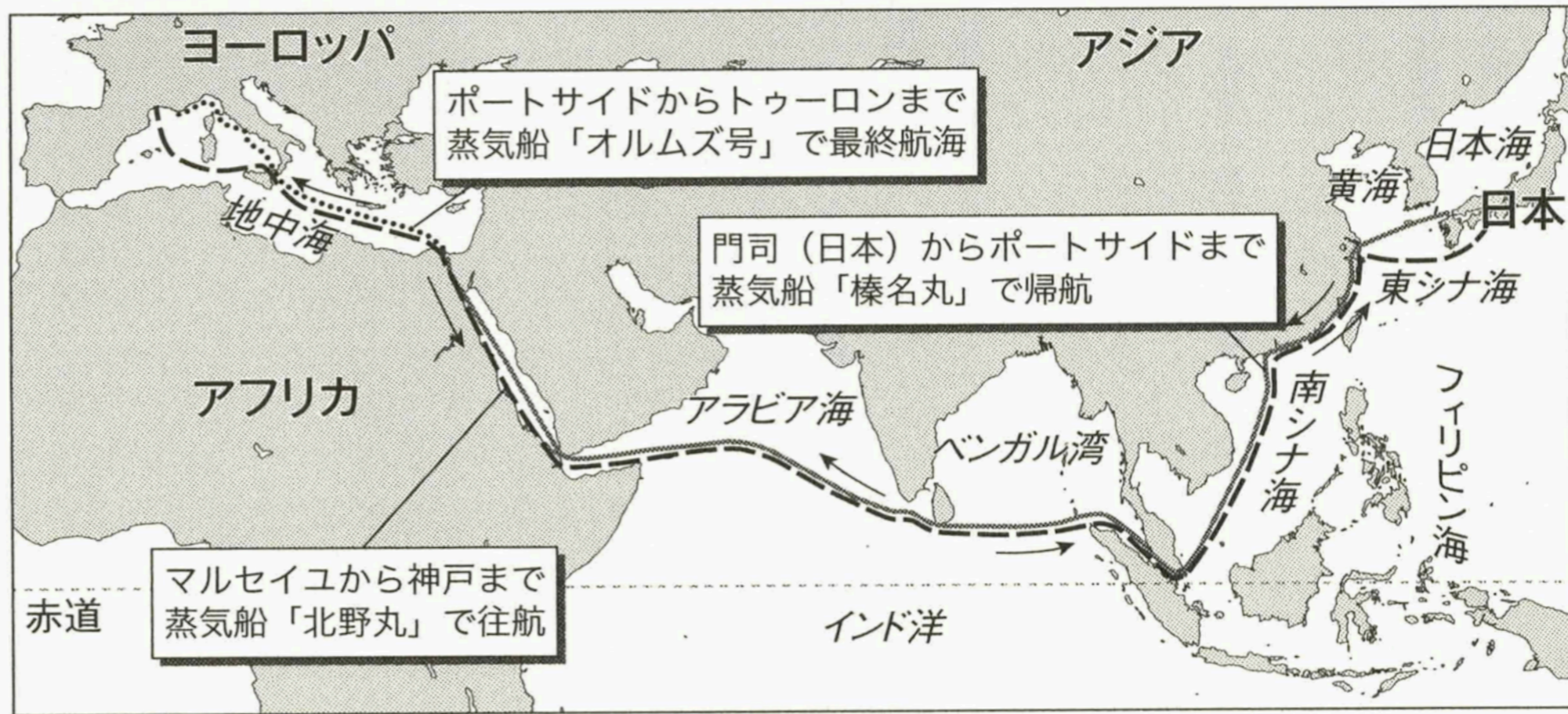
真貝寿明(しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授
理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



アインシュタイン 1922年来日 (11/17—12/29)



10月 8日 マルセイユを「北野丸」で出航

11月 9日 香港着

11月13日 上海着 **ノーベル賞受賞の知らせを受け取る**

11月17日 神戸着

京都, 東京(11/19), 仙台(12/2), 名古屋(12/7), 京都(12/10)

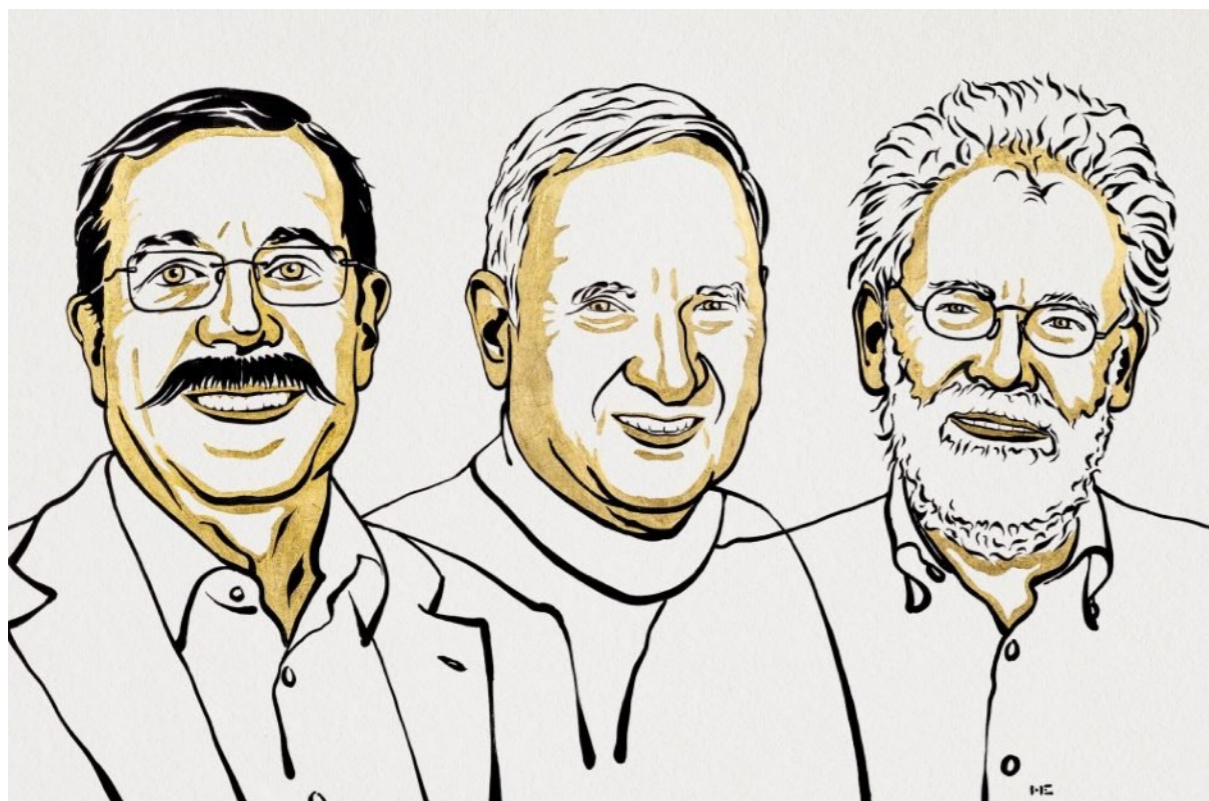
大阪・中央公会堂(12/11), 奈良(12/18), 福岡(12/25)

12月29日 門司発 「榛名丸」 帰国へ

2022年のノーベル物理学賞 受賞者

<http://www.nobelprize.org/>

“量子もつれの実験, Bell不等式の破れの確認による量子情報科学の創始”
量子もつれ (エンタングルメント, entanglement)



The Nobel Prize in Physics 2022 was awarded to **Alain Aspect**, **John F. Clauser** and **Anton Zeilinger** “for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”.

Their results have cleared the way for new technology based upon quantum information.

Alain Aspect

Université Paris-Saclay and
École Polytechnique, Palaiseau, France

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
Walnut Creek, CA, USA

Anton Zeilinger

University of Vienna, Austria

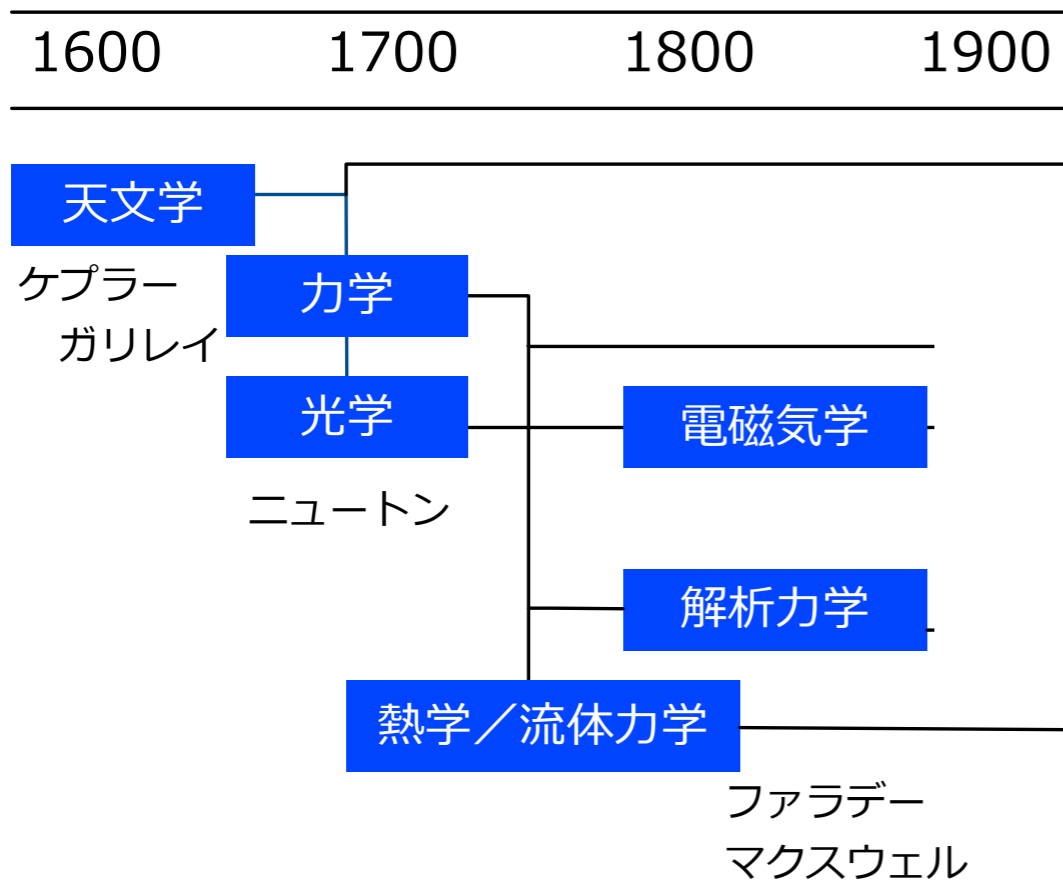
アラン・アスペ (75) 仏パリ・サクレ大

ジョン・クラウザー (79) 米 クラウザーアソシエイツ社

アントン・ツァイリンガー (77) オーストリア・ウィーン大

近代物理学から現代物理学へ

近代物理学の進展



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

ISBN978-4-320-03405-5
C3042 ¥2300E
定価(本体2,300円+税)

9784320034055
1923042023006

現代物理学が描く宇宙論
真貝寿明 著

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

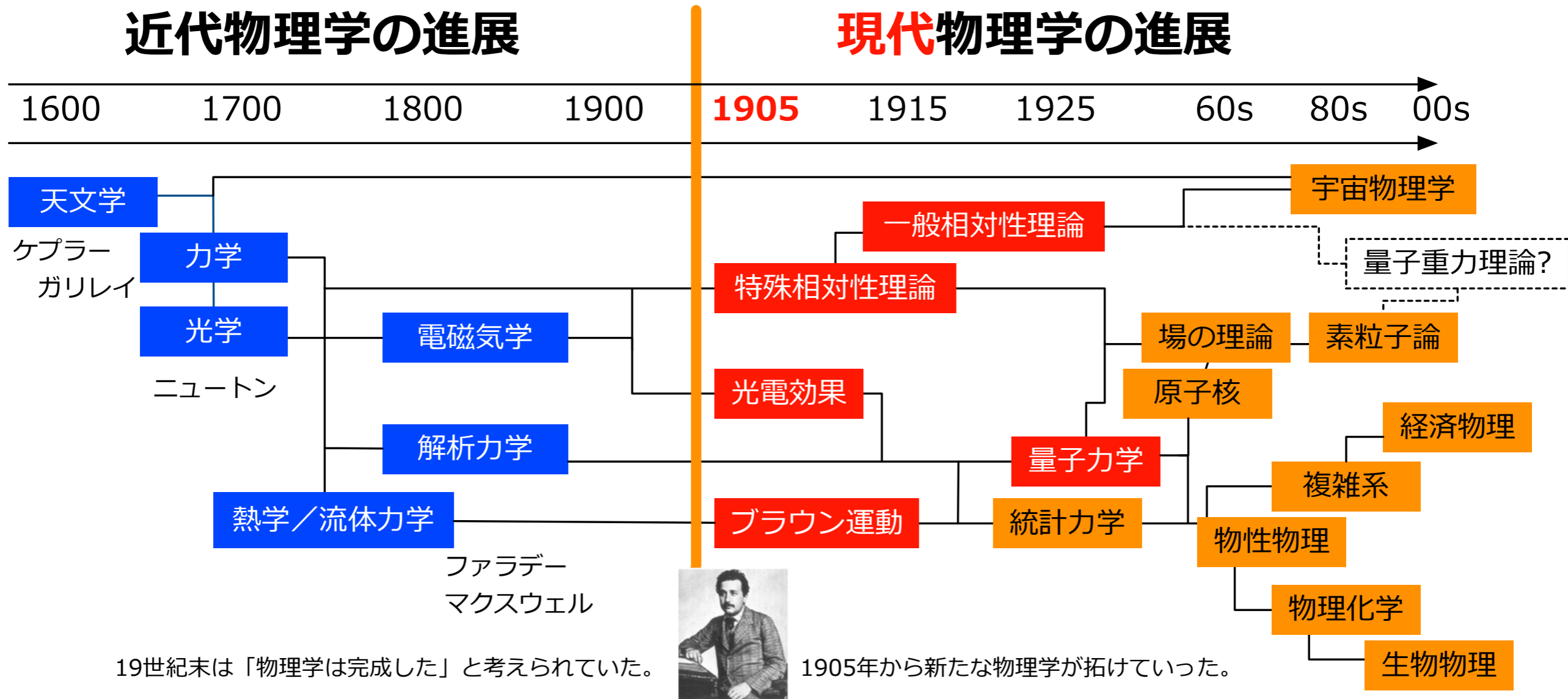
Frontiers of Physics: Relativity, Quantum Theory, and Cosmology
Hisaaki Shinkai

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

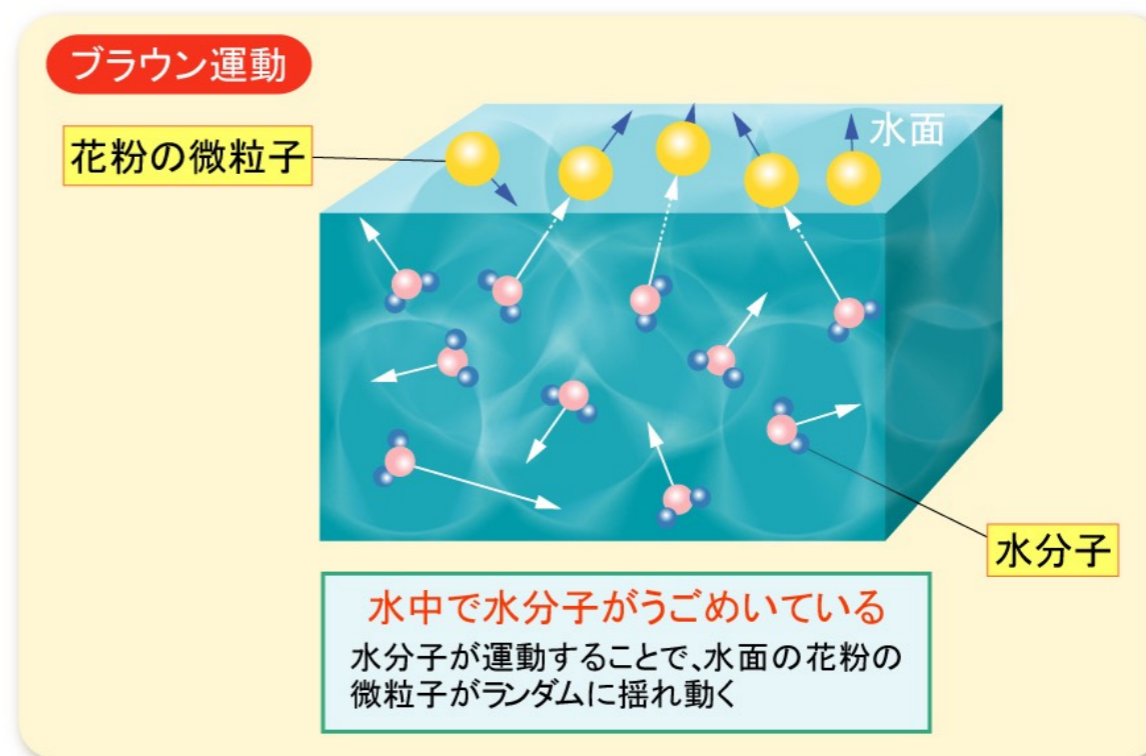
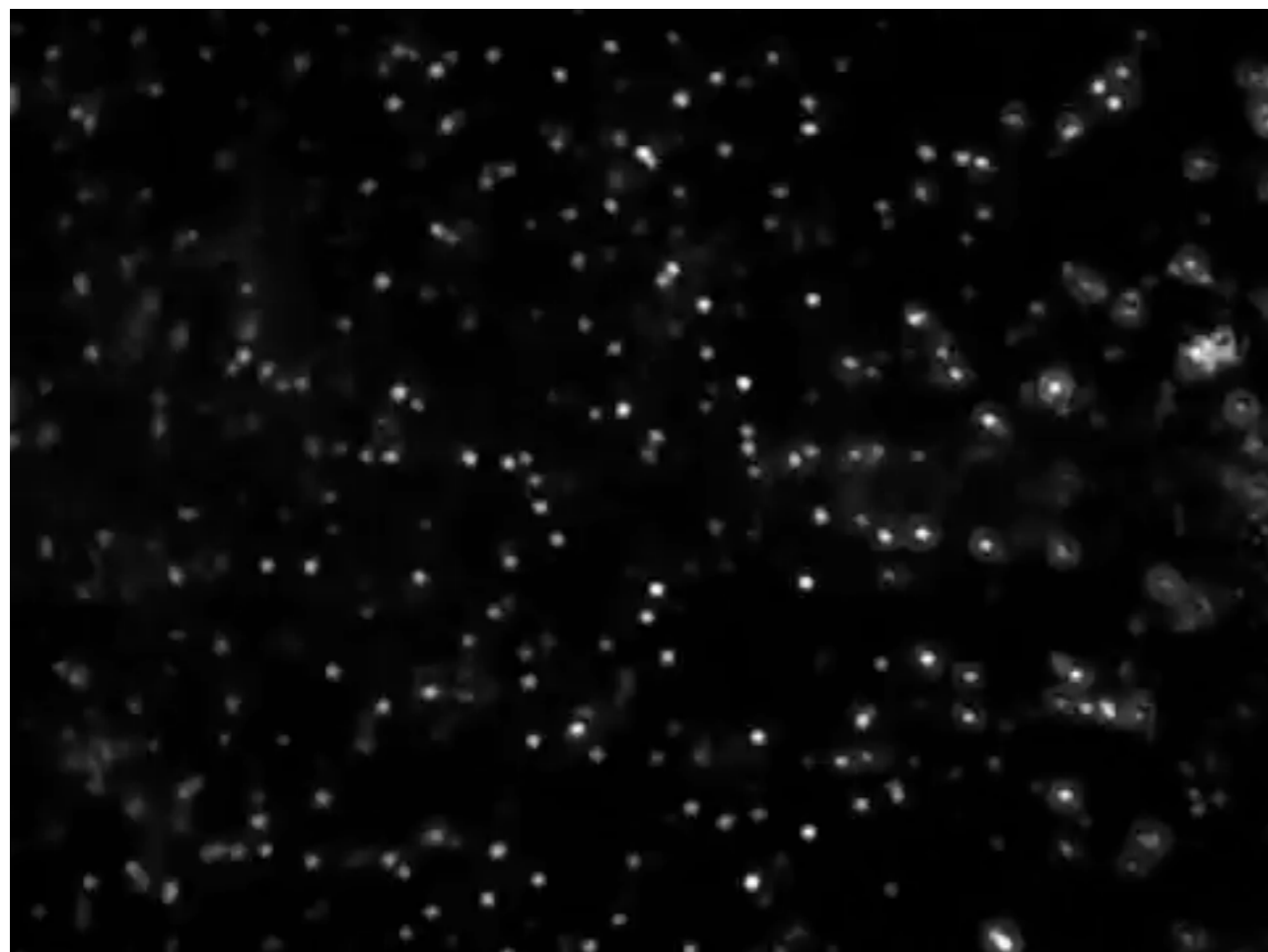
真貝寿明 著

共立出版

近代物理学から現代物理学へ



ブラウン運動の理論



<https://rika-net.com/>



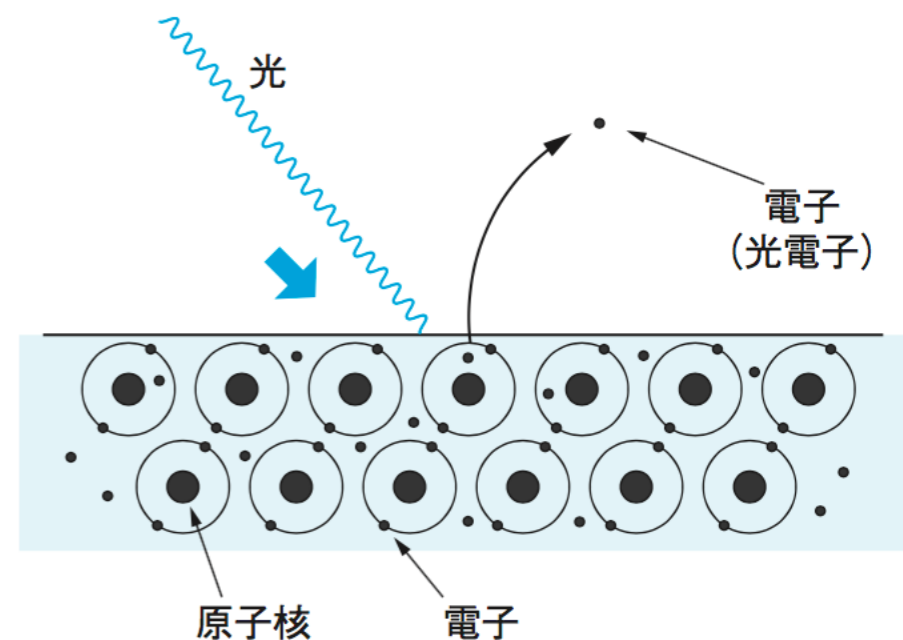
「水が分子でできていて、微粒子を常に動かす」と考えられる。
「ブラウン運動をする粒子の運動を測定すれば、原子(分子)
の存在が結論づけられる」

- ⇒ 後に、水が H_2O の分子であることが確認される。
- ⇒ 「確率過程」の基礎を与えた。

光電効果の理論

金属に光を当てると、電子が飛び出すことがある。

ただし、光の振動数がある値から大きいとき(青い色のとき)に限る。
そうであれば、どんなに弱い光でも電子が飛び出す。



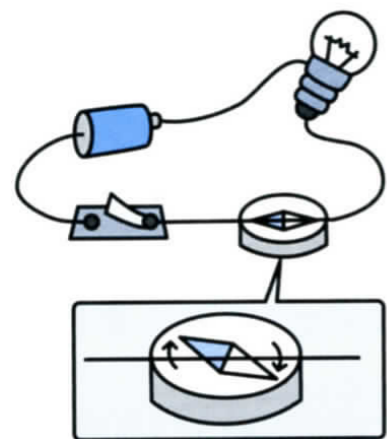
「光が波だと考えると不思議。 粒子だと考えよう。」

光が1つ2つと数えられる粒子(光子)と考える。
光子1つの持つエネルギーが $E = h\nu$ と考える。
(ν は振動数[Hz])

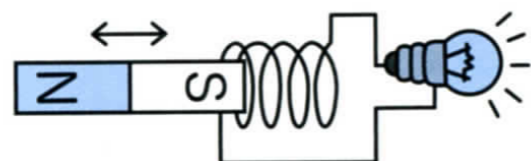
そうであれば、 ν がある程度大きければ、
電子が飛び出してくる理由が説明できる

- ⇒ この研究でノーベル物理学賞を受賞した。
- ⇒ 「量子論」の基礎を与えた。

相対性理論(特殊相対性理論)



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

電磁誘導現象の発見(1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ(1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



マクスウェル

Eは電場, Bは磁場
cは光速??

誰が測った光速???

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0. \end{aligned}$$

光の速さは誰が測っても同じ, と考えてみよう

時間の進み方は, 相対的だ. 測定する人の運動状態によって異なる.

⇒ 「時間と空間の概念」を変えた.



相対性理論(特殊相対性理論) $E = mc^2$

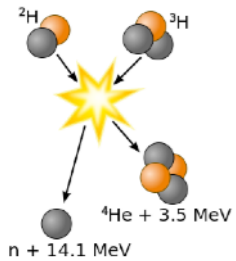


3次元空間と時間をあわせて、**4次元時空で物理を考える。**
エネルギー保存則から、

$$E = mc^2$$

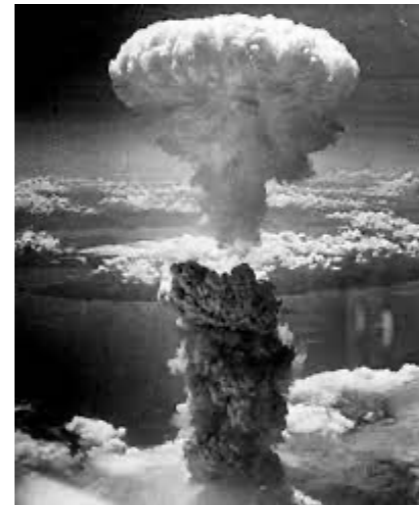
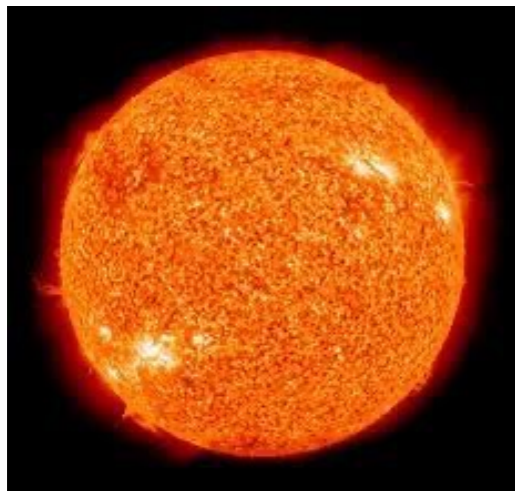
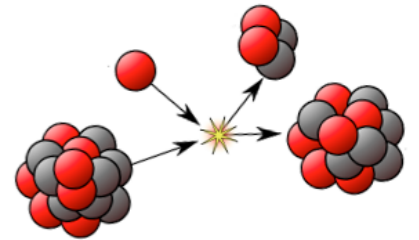
質量はエネルギーと等価であることがわかる。

原子核反応によって、わずかな質量が莫大なエネルギーに変化する！



核融合
(nuclear fusion)

核分裂
(nuclear fission)



星が燃えるメカニズム, 水素爆弾

原子爆弾, 原子力発電

これまでの物理学を否定せず、拡張した理論！

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

一般相対性理論

強い重力場での時空の力学
「空間が歪むのが重力の正体である」

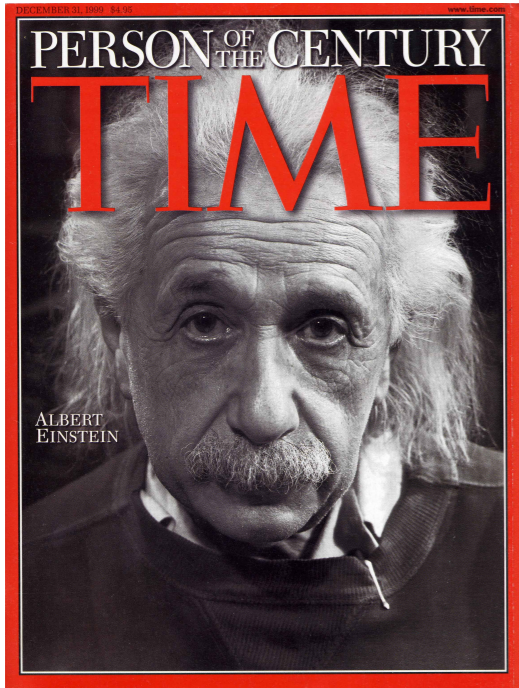
特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

相対論と量子論 アインシュタインの成功と失敗



Time
1999/12/31

1. 1905年の3つの業績
2. 一般相対性理論
3. 量子論
4. アインシュタインとボーアの論争

真貝寿明(しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授
理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



ニュートン：リンゴはなぜ落ちる？

重力があるからだ！



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>

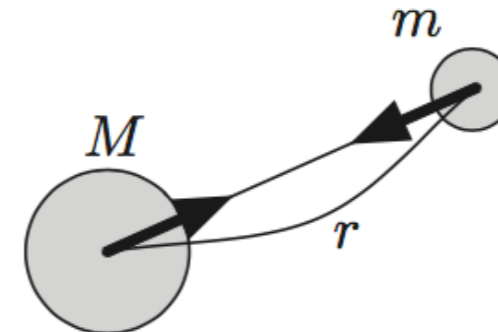
すべてのものは、引力で引き合う
(万有引力がある)と、考えることで解決！

◆ Advanced 万有引力の法則

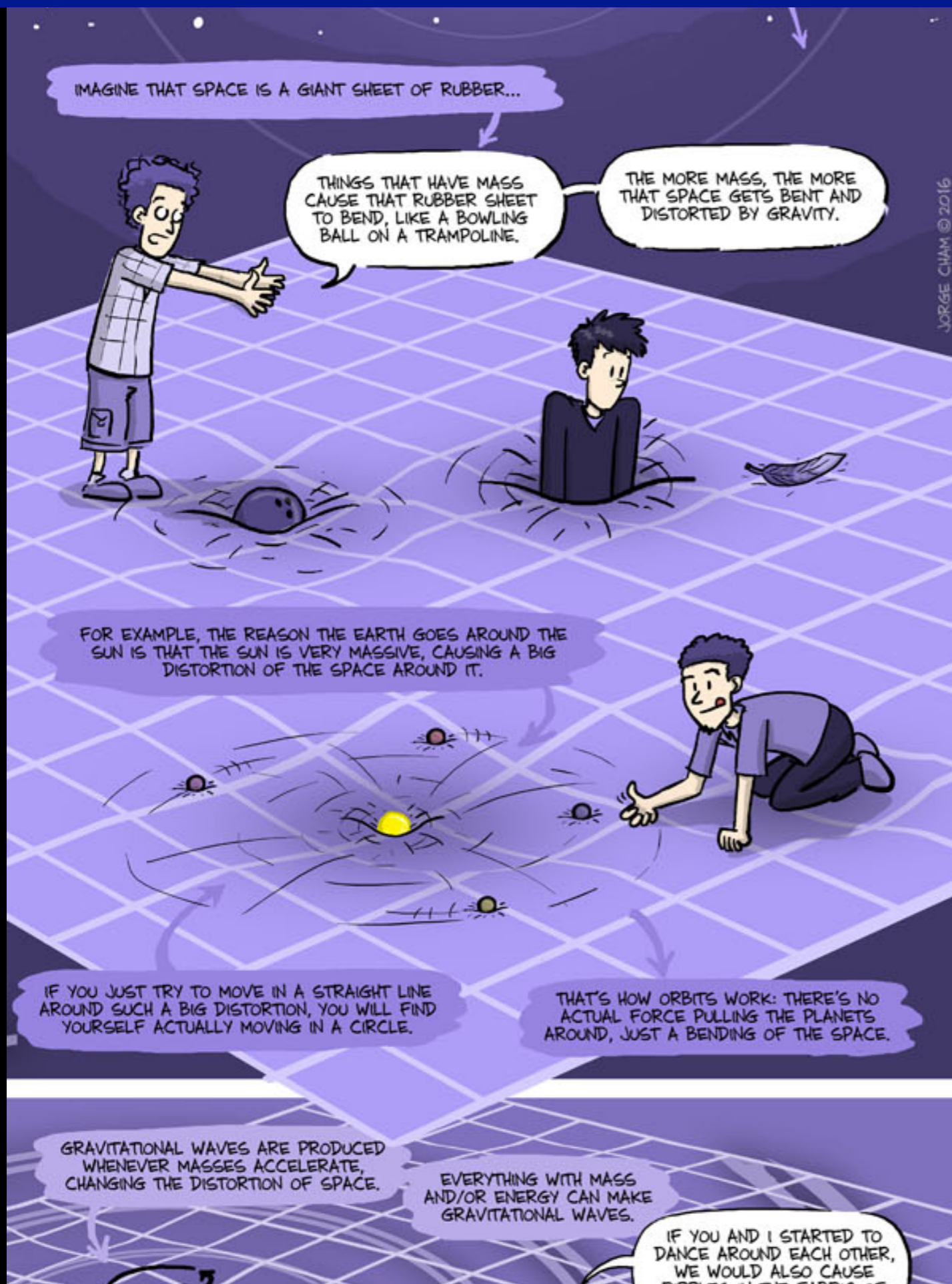
質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



一般相対性理論

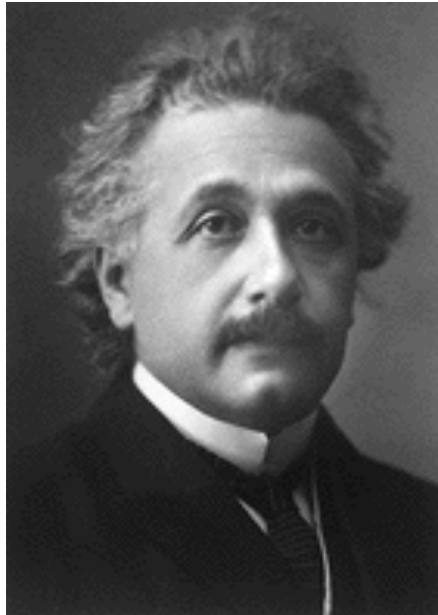


空間のゆがみが重力の原因だ

光や物体は、まっすぐ進んでいるつもりでも、曲がって進む

重力を力ではなく、
場として考える

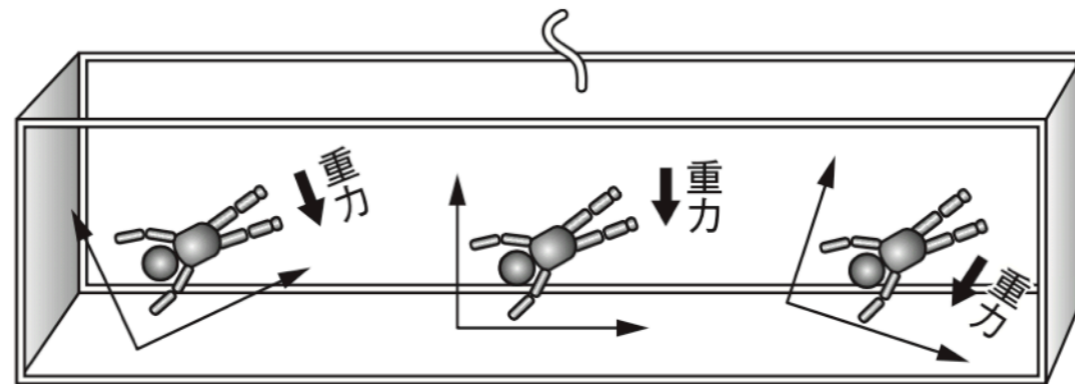
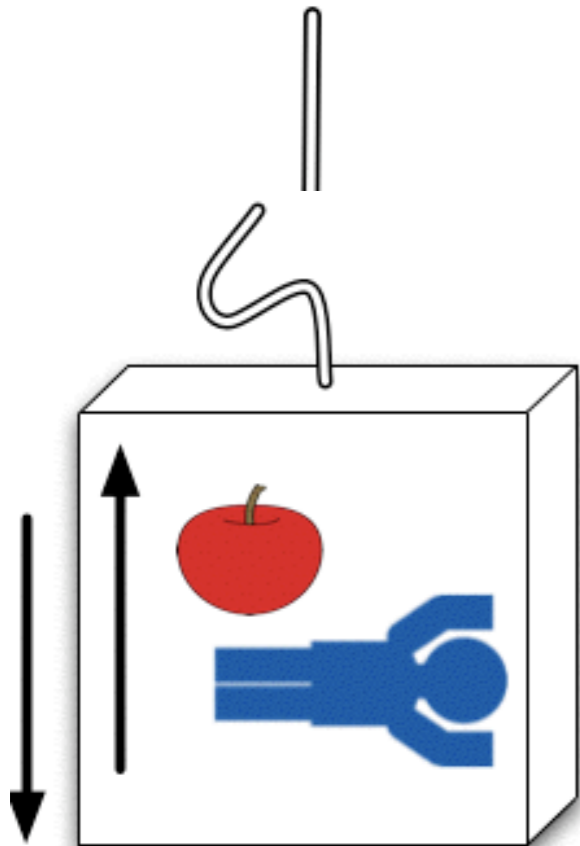
一般相対性理論(1915年)



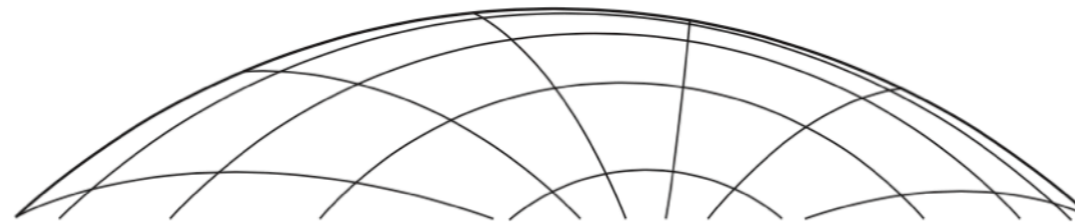
1905年の相対性原理では、等速運動しか扱っていない。
加速度運動する場合の相対性理論はどうなるだろうか。

加速度運動する代表が重力のはたらきだ。
重力の正体はなんだろうか。

自由落下するエレベータ内では、重力がはたらいていることを感じない。
重力は局所的には消すことができるが、大域的には消せない。



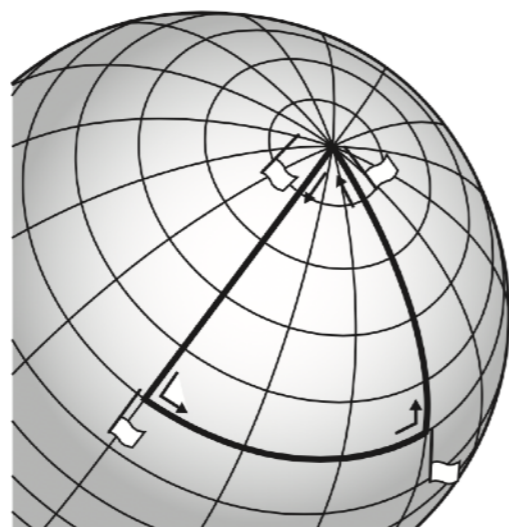
地球の半径ていどの大きさのエレベータだと重力の向きがちがうので、全体で重力を打ち消すことができない。



重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

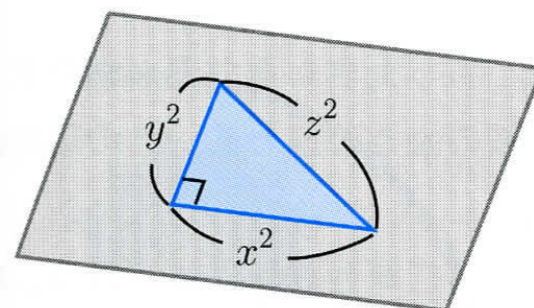
一般相対性理論(1915年)



正の曲率 (地球表面)

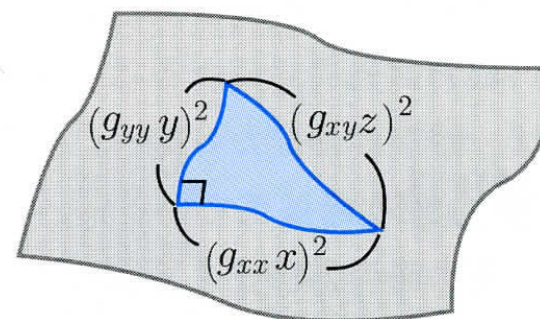
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



$$(g_{xx}x)^2 + (g_{yy}y)^2 - (g_{xy}z)^2 = 0$$

このように、曲がり具合は関数 $g_{\mu\nu}$ に押し付けて表すことができる。アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり $g_{\mu\nu}$ を解く方程式である。

重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが重力の正体だ

重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915年)

重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時空の歪み}} = \frac{8\pi G}{c^4} \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{質量の分布}}$$

左辺はリーマン幾何学にもとづいて時空がどのように曲がっているのかを表している。右辺は物体がどのように分布しているのかを表す量である。

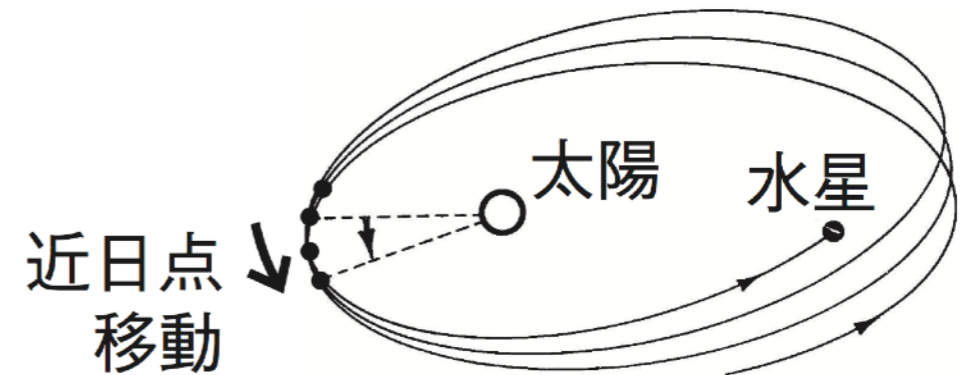
一般相対性理論が説明するもの



水星の近日点移動の問題 (ルベリエ, 1854)

100年で574秒ずれる。2250世紀で完全な「ばら模様」。
→→金星の影響で277秒, 木星で153秒, 地球で90秒,
その他の惑星で10秒分の説明が可能。

残りの43秒は???



重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

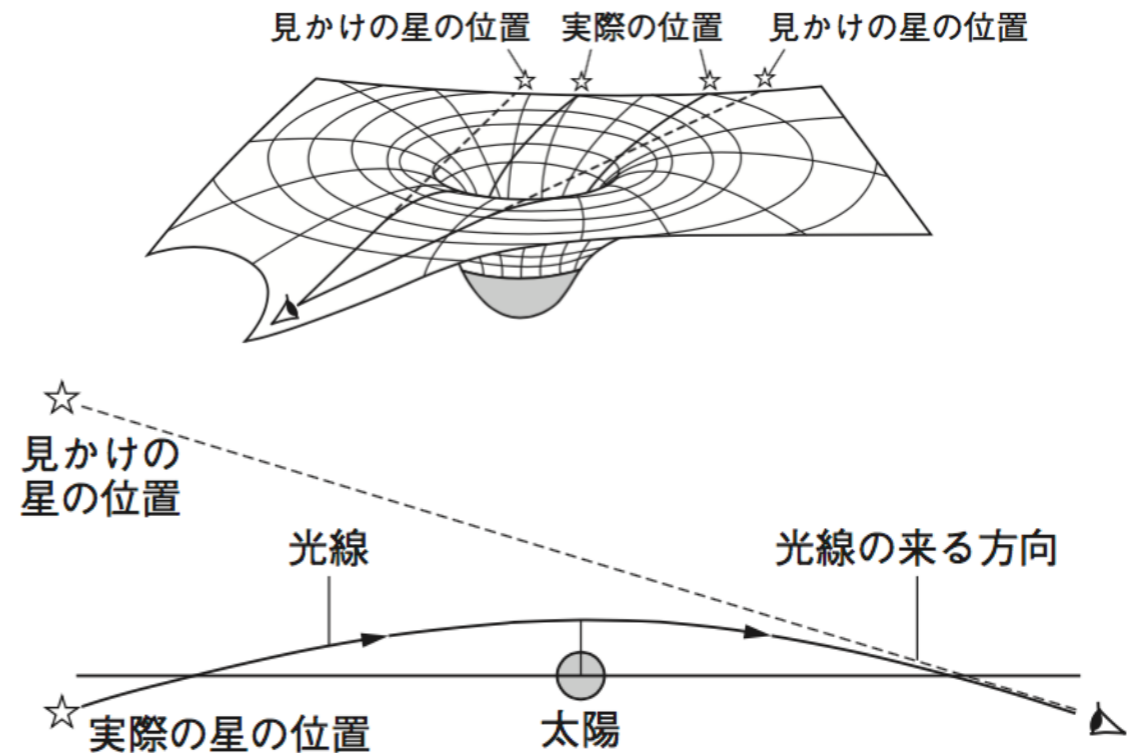
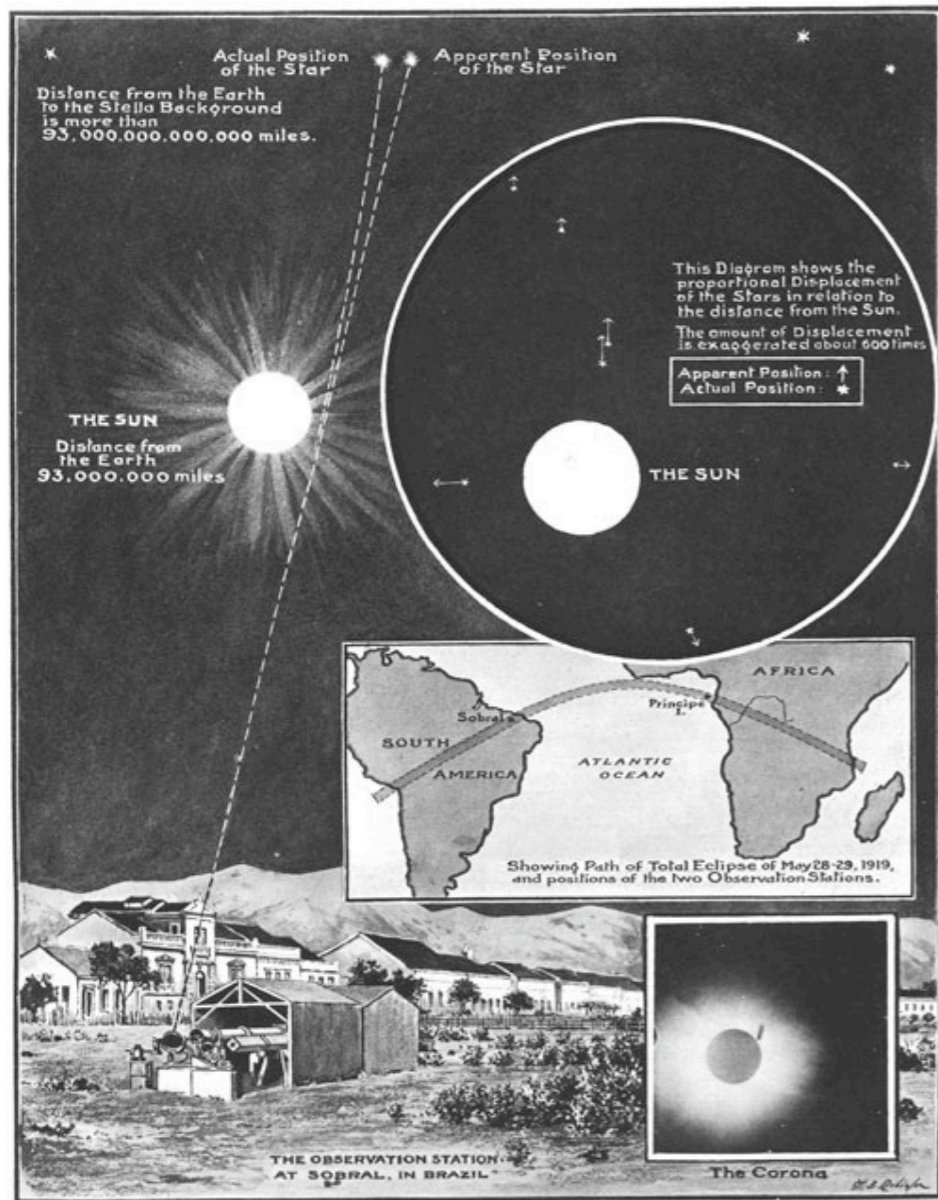
1915年, アインシュタインが, できたばかりの一般相対性理論を適用すると, 「43秒の歳差運動」が出てきた。

一般相対性理論が予言したもの

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる
- 重力によってゆがんだ空間では, 時間の進み方は遅くなる。
- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける。
- 宇宙全体は動的でなければならない。
- 重力波が宇宙空間を伝わる

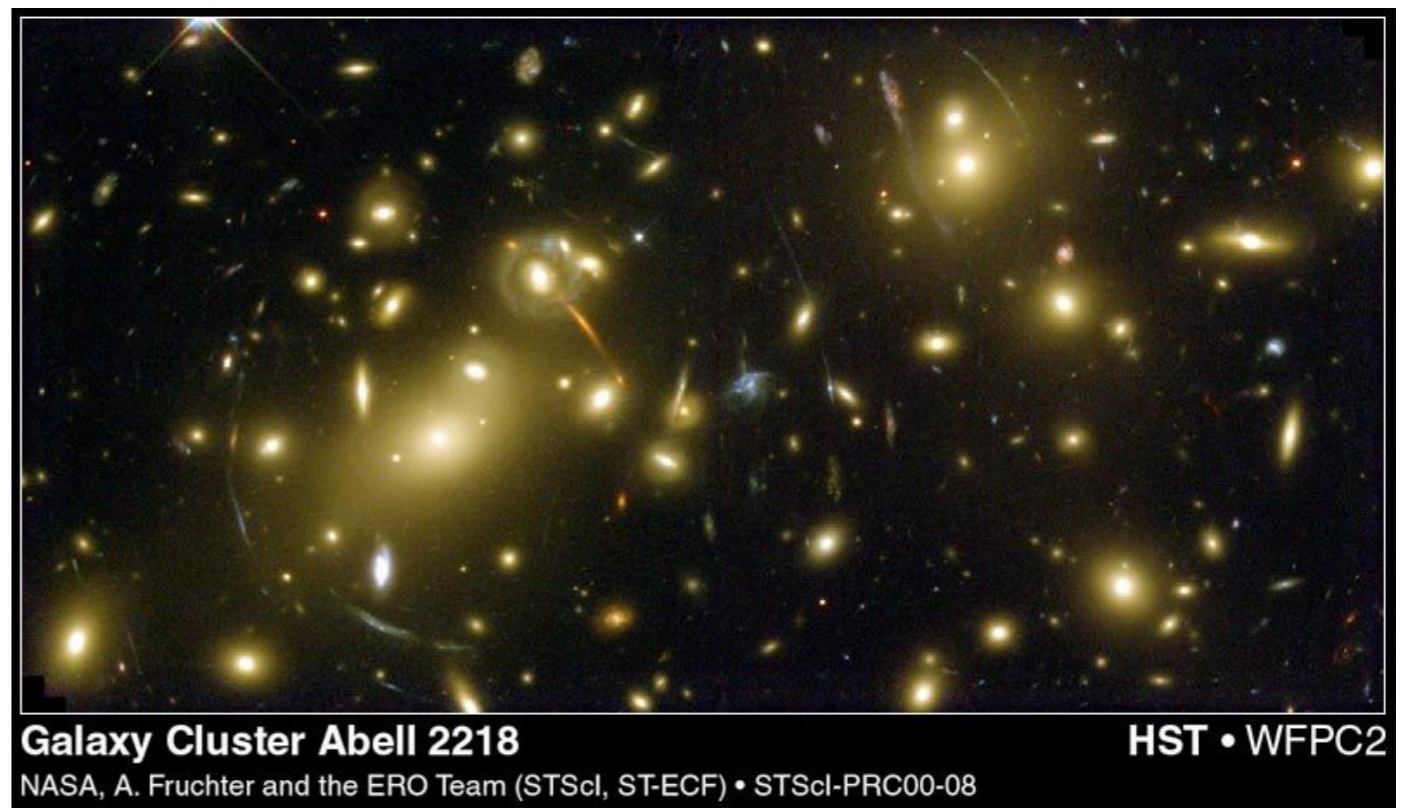
一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

- 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる



1919年5月の皆既日食で
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が
普段の位置とずれていた

重力レンズ効果として観測される▶



一般相対性理論が予言したもの

- 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる

皆既日食で確認された。重力レンズ効果としても観測される。

- 重力によってゆがんだ空間では、時間の進み方は遅くなる。

飛行機, 人工衛星, 地上での検証すすむ。

スカイツリー実験

100年経っても計測は無理

- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける。

ブラックホールの存在

銀河中心のブラックホール

ブラックホールのような特異点があるはずない

- 宇宙全体は動的でなければならない。

宇宙は未来永劫不変なもの

膨張宇宙の発見

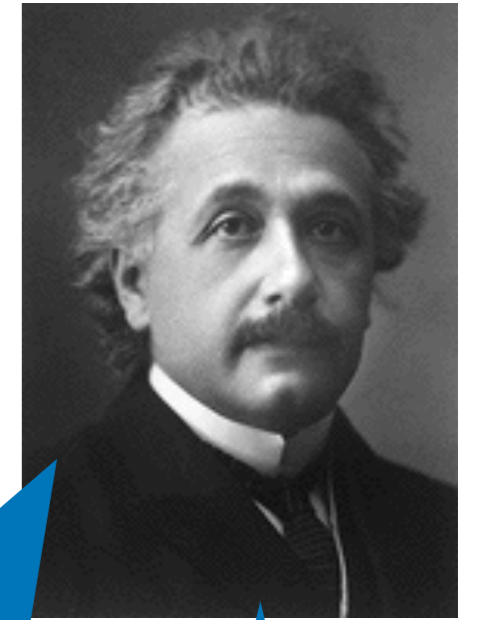
ビッグバン宇宙モデルの成功

- 重力波が宇宙空間を伝わる

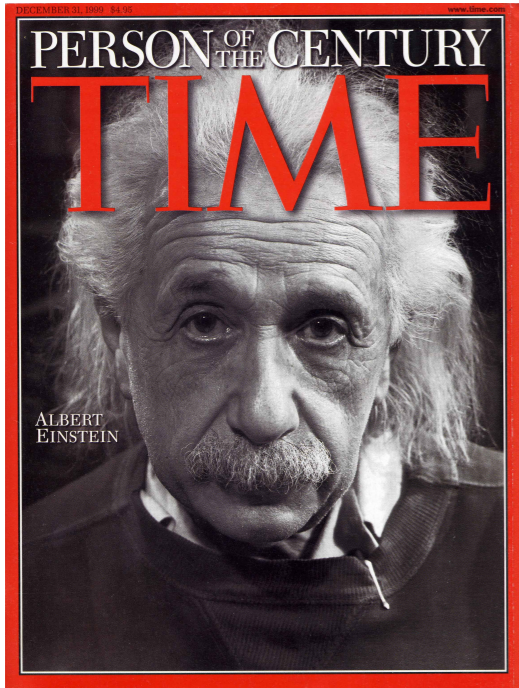
時空のさざ波の伝播

重力波観測

重力波なんて存在しないかも



相対論と量子論 アインシュタインの成功と失敗



Time
1999/12/31

1. 1905年の3つの業績
2. 相対性理論
3. 量子論
4. アインシュタインとボーアの論争

真貝寿明(しんかい ひさあき)
大阪工業大学 情報科学部 教授
理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

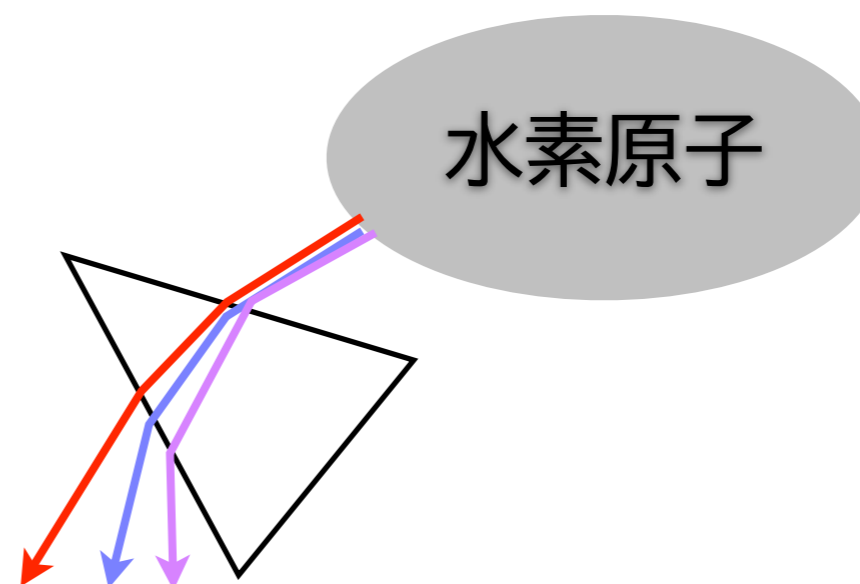


水素原子の輝線スペクトルの謎



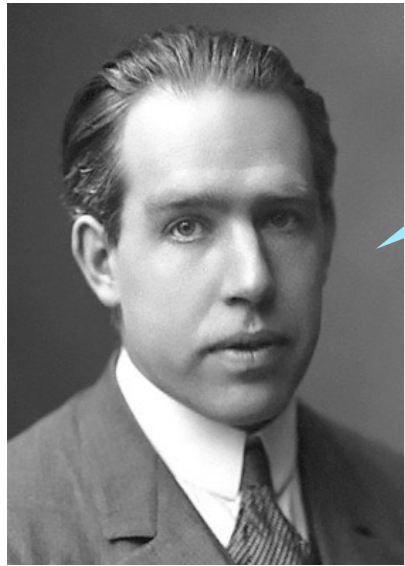
太陽光をプリズムに通すと
連続スペクトルに分解されるが、...

気体から発せられる光は
いくつかの線スペクトルである



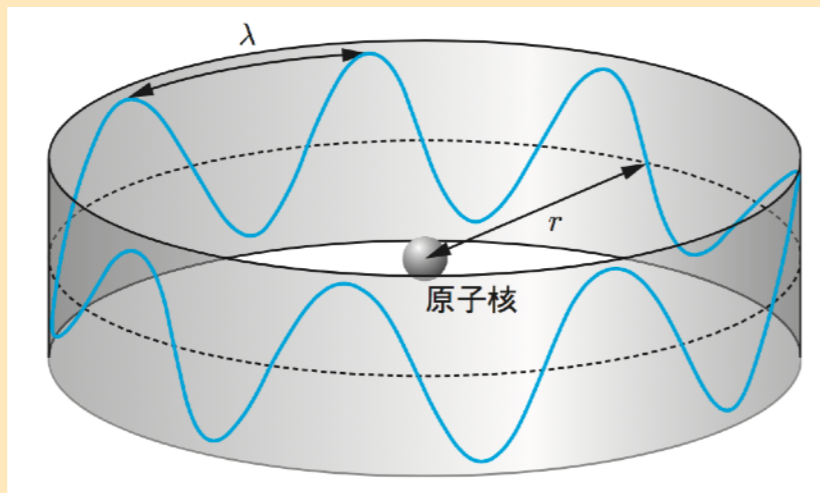
ボーアの原子モデル (1913年)

原子は、原子核のまわりを電子が回る構造だ。
つぎの2つの仮定を考えるとすべてうまく説明できる。

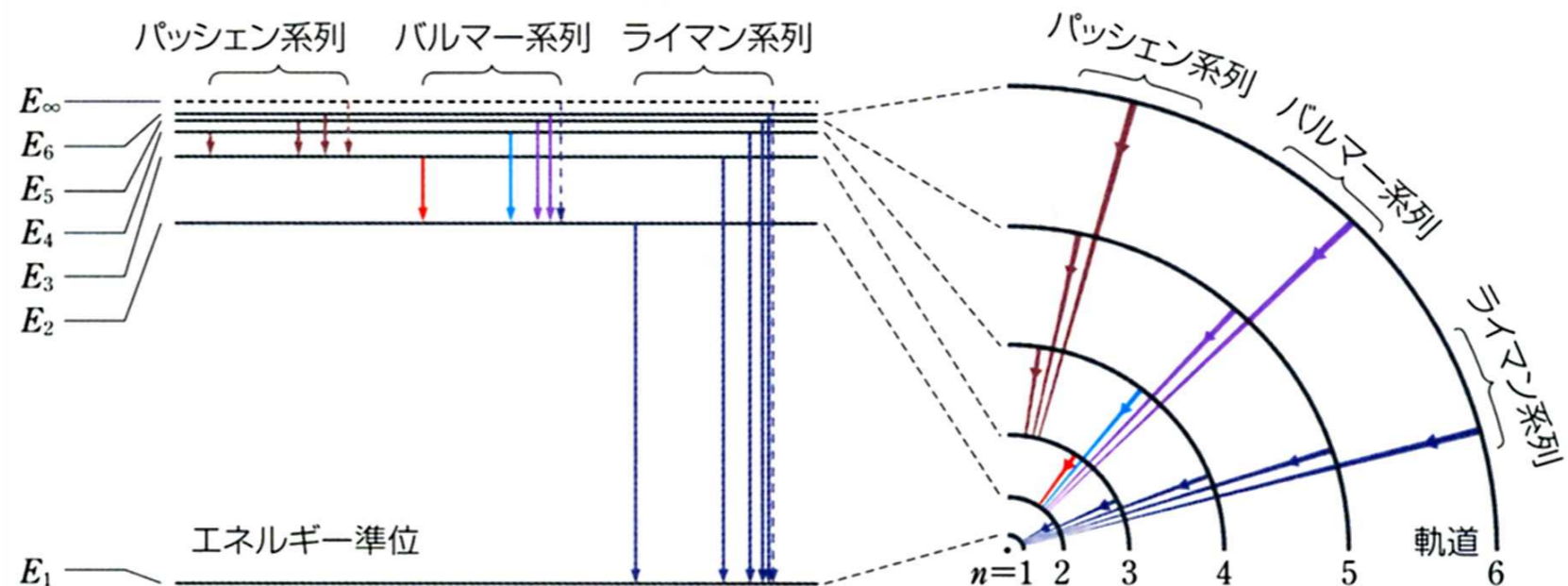
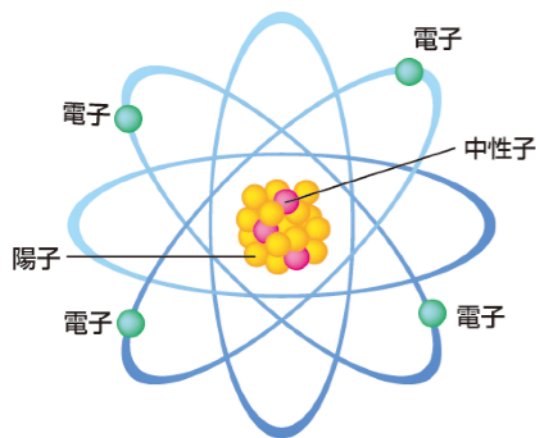
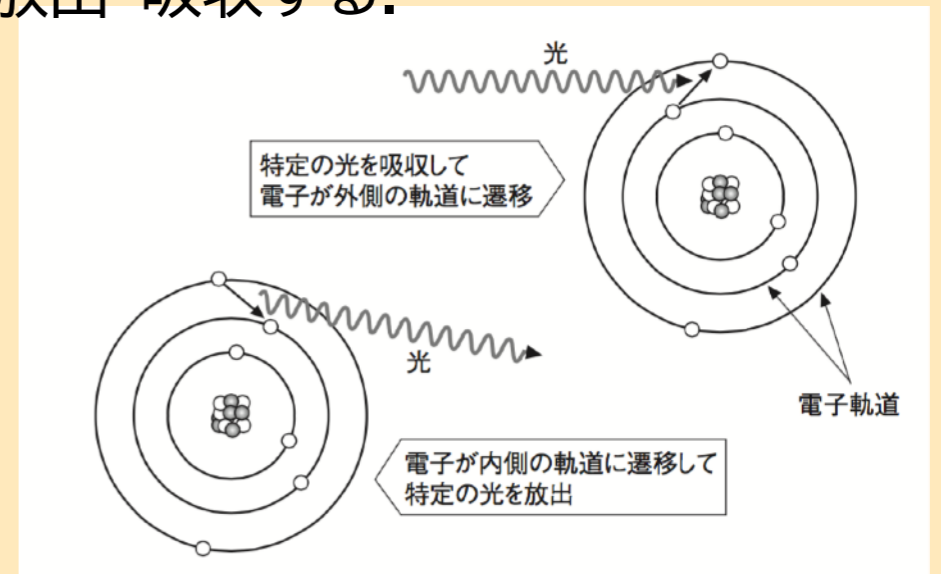


ボーア
1885-1962

電子軌道の半径はとびとびの値しか許されない。

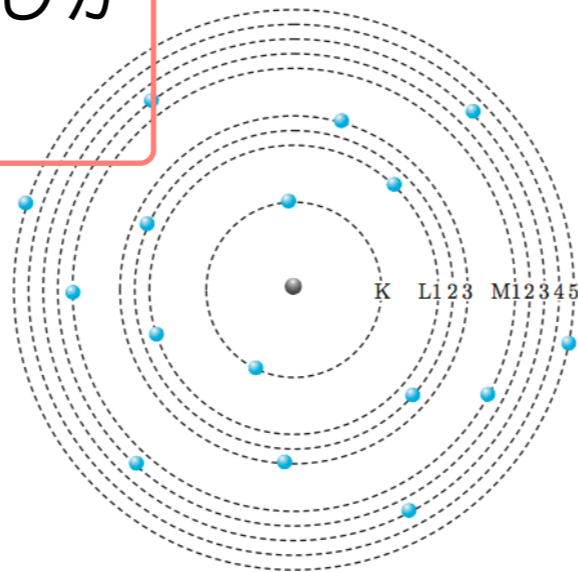
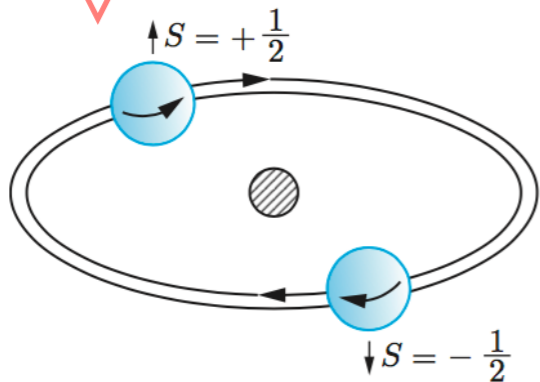


電子が軌道を遷移するとき、光を放出・吸収する。

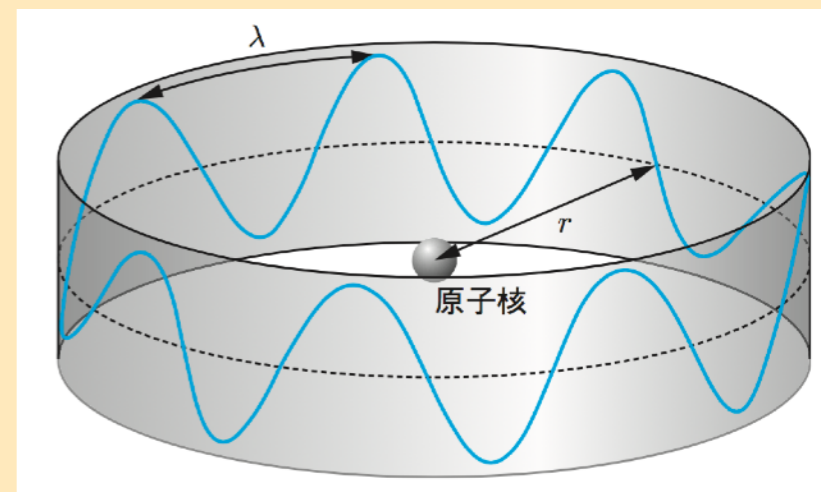


元素の周期表が説明できる

電子軌道1つには最大2つしか電子が存在できない。



電子軌道の半径はとびとびの値しか許されない。

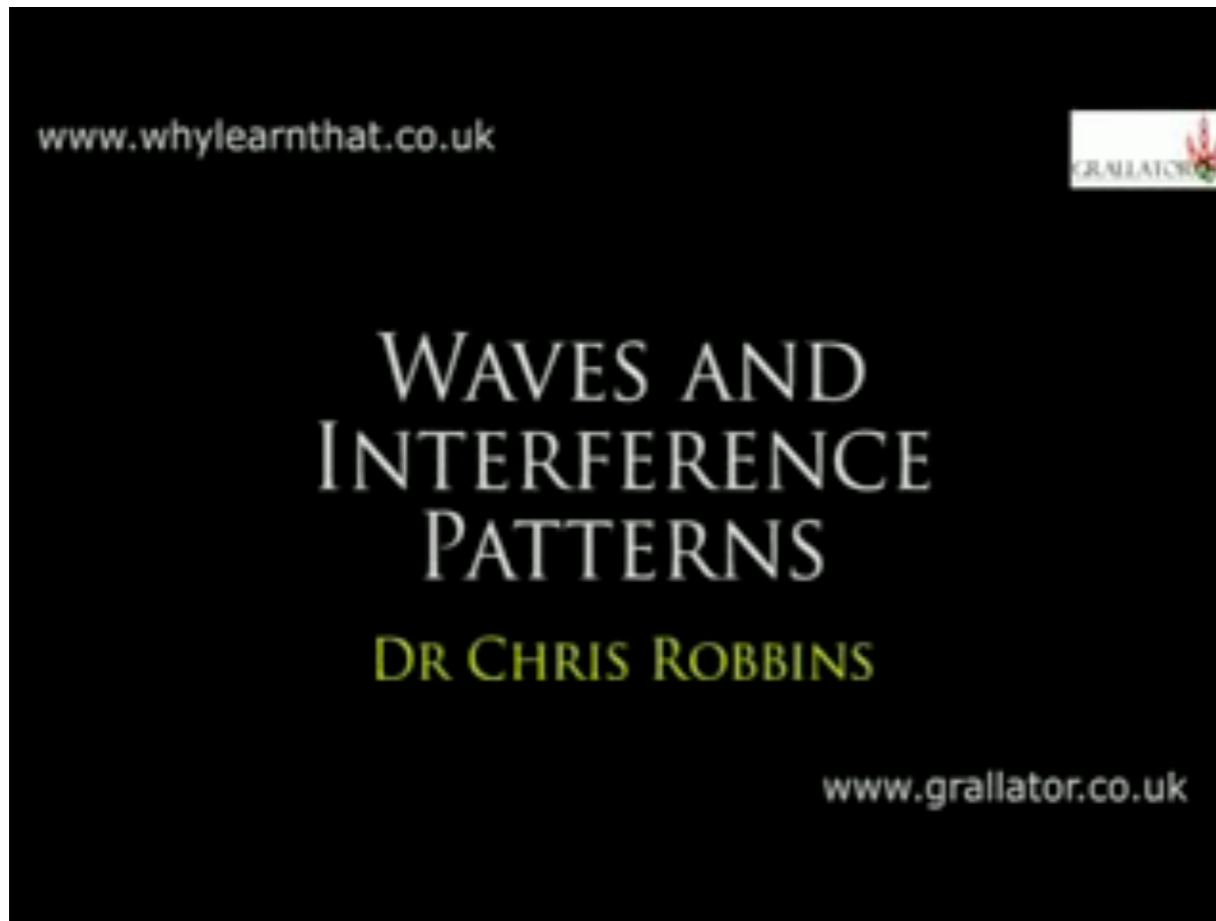


電子は、粒子のようにも波のようにもふるまう

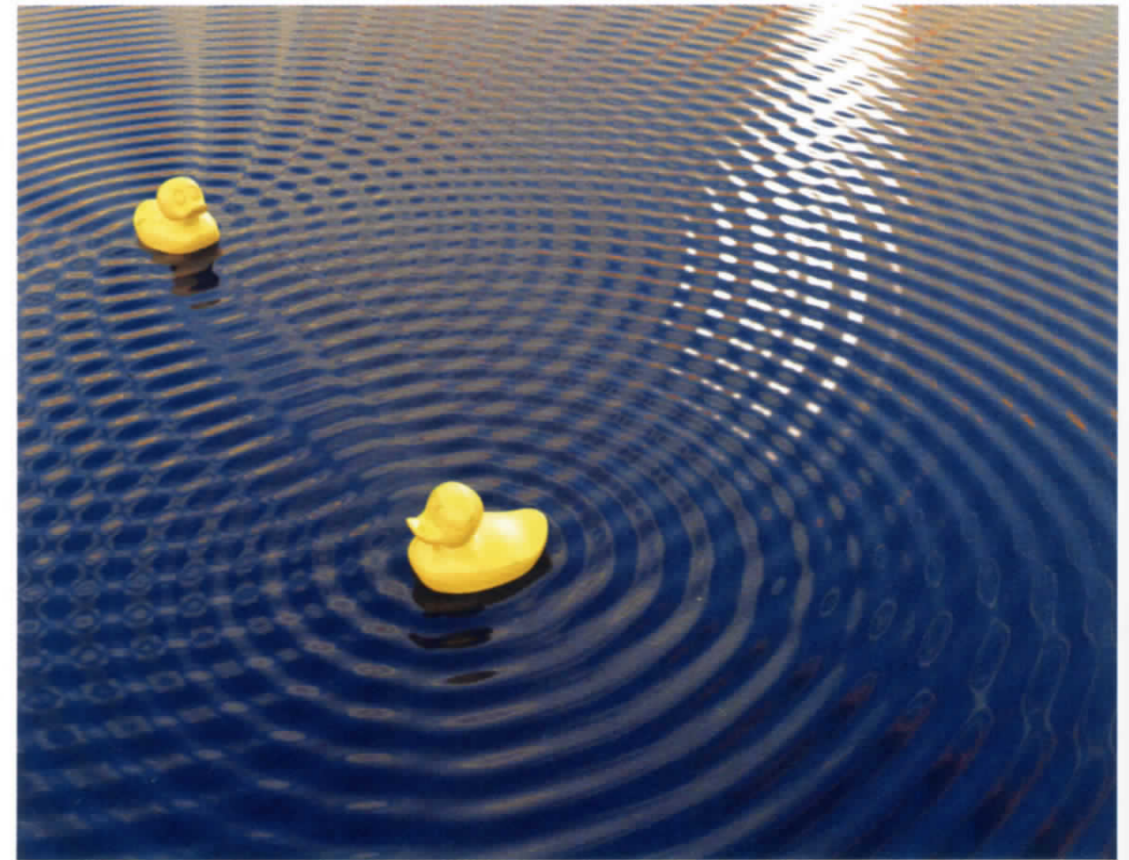
| Period | 1 IA | 2 IIA | 3 III B | 4 IV B | 5 V B | 6 VI B | 7 VII B | 8 VIII B | 9 VIII B | 10 VIII B | 11 IB | 12 IIB | 13 III A | 14 IV A | 15 VA | 16 VIA | 17 VII A | 18 VIII A |
|--------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|---|------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|--|---|---|--|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 1 H 水素 hydrogen 1.008 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He ヘリウム helium 4.003 |
| 2 | 3 Li リチウム lithium 6.941 | 4 Be ベリリウム beryllium 9.012 | | | | | | | | | | | 5 B ホウ素 boron 10.81 | 6 C 炭素 carbon 12.01 | 7 N 窒素 nitrogen 14.01 | 8 O 酸素 oxygen 16.00 | 9 F フッ素 fluorine 19.00 | 10 Ne ネオン neon 20.18 |
| 3 | 11 Na ナトリウム sodium 22.99 | 12 Mg マグネシウム magnesium 24.31 | | | | | | | | | | | 13 Al アルミニウム aluminum 26.98 | 14 Si ケイ素 silicon 28.09 | 15 P リン phosphorus 30.97 | 16 S 硫黄 sulfur 32.07 | 17 Cl 塩素 chlorine 35.45 | 18 Ar アルゴン argon 39.95 |
| 4 | 19 K カリウム potassium 39.10 | 20 Ca カルシウム calcium 40.08 | 21 Sc スカンジウム scandium 44.96 | 22 Ti チタン titanium 47.87 | 23 V バナジウム vanadium 50.94 | 24 Cr クロム chromium 52.00 | 25 Mn マンガン manganese 54.94 | 26 Fe 鉄 iron 55.85 | 27 Co コバルト cobalt 58.93 | 28 Ni ニッケル nickel 58.69 | 29 Cu 銅 copper 63.55 | 30 Zn 亜鉛 zinc 65.41 | 31 Ga ガリウム gallium 69.72 | 32 Ge ゲルマニウム germanium 72.64 | 33 As ヒ素 arsenic 74.92 | 34 Se セレン selenium 78.96 | 35 Br 臭素 bromine 79.90 | 36 Kr クリプトン krypton 83.80 |
| 5 | 37 Rb ルビジウム rubidium 85.47 | 38 Sr ストロンチウム strontium 87.62 | 39 Y イットリウム yttrium 88.91 | 40 Zr ジルコニウム zirconium 91.22 | 41 Nb ニオブ niobium 92.91 | 42 Mo モリブデン molybdenum 95.94 | 43 Tc テクネチウム technetium 98 | 44 Ru ルテニウム ruthenium 101.1 | 45 Rh ロジウム rhodium 102.9 | 46 Pd パラジウム palladium 106.4 | 47 Ag 銀 silver 107.9 | 48 Cd カドミウム cadmium 112.4 | 49 In インジウム indium 114.8 | 50 Sn スズ tin 118.7 | 51 Sb アンチモン antimony 121.8 | 52 Te テルル tellurium 127.6 | 53 I ヨウ素 iodine 126.9 | 54 Xe キセノン xenon 131.3 |
| 6 | 55 Cs セシウム cesium 132.9 | 56 Ba バリウム barium 137.3 | 57-71 ランタノイド lanthanides | 72 Hf ハフニウム hafnium 178.5 | 73 Ta タンタル tantalum 180.9 | 74 W タングステン tungsten 183.8 | 75 Re レニウム rhenium 186.2 | 76 Os オスmium osmium 190.2 | 77 Ir イリジウム iridium 192.2 | 78 Pt 白金 platinum 195.1 | 79 Au 金 gold 197.0 | 80 Hg 水銀 mercury 200.6 | 81 Tl タリウム thallium 204.4 | 82 Pb 鉛 lead 207.2 | 83 Bi ビスマス bismuth 209.0 | 84 Po ポロニウム polonium 209 | 85 At アスタチン astatine 210 | 86 Rn ラドン radon 222 |
| 7 | 87 Fr フランシウム francium 223 | 88 Ra ラジウム radium 226 | 89-103 アクチノイド actinides | 104 Rf ラザホージウム rutherfordium 261 | 105 Db ドブニウム dubnium 262 | 106 Sg シーボーギウム seaborgium 266 | 107 Bh ボヘリウム bohrium 264 | 108 Hs ハッソニウム hassium 277 | 109 Mt マイトネリウム meitnerium 268 | 110 Ds ダームスタチウム darmstadtium 281 | 111 Rg レントゲニウム roentgenium 272 | 112 Cn コペルニウム copernicium 285 | 113 Nh ニホニウム nihonium 284 | 114 Fl フレロビウム flerovium 289 | 115 Mc モスコビウム moscovium 288 | 116 Lv リバモリウム livermorium 292 | 117 Ts テネシウム tennessine 293 | 118 Og オガネソン oganesson 294 |

- 電子軌道1つ
- 電子軌道1つ+3つ
- 電子軌道1つ+3つ
- 電子軌道1つ+3つ+5つ
- 電子軌道1つ+3つ+5つ
- 電子軌道1つ+3つ+5つ

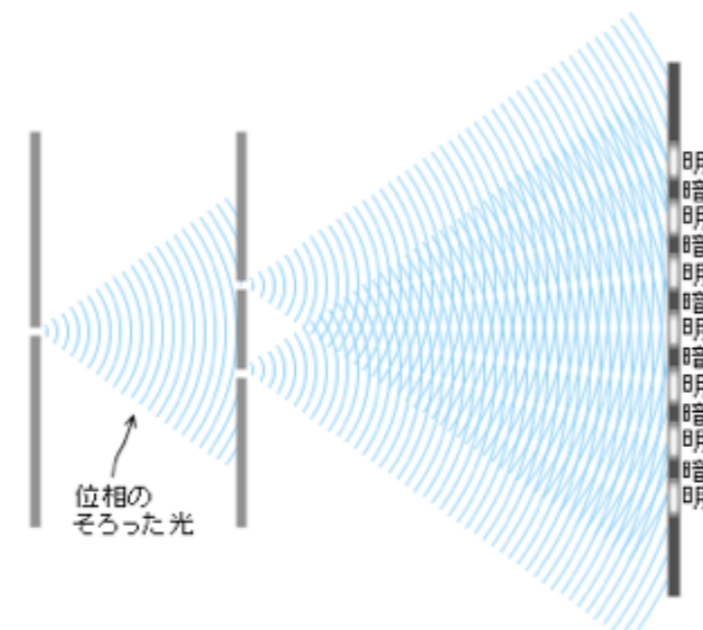
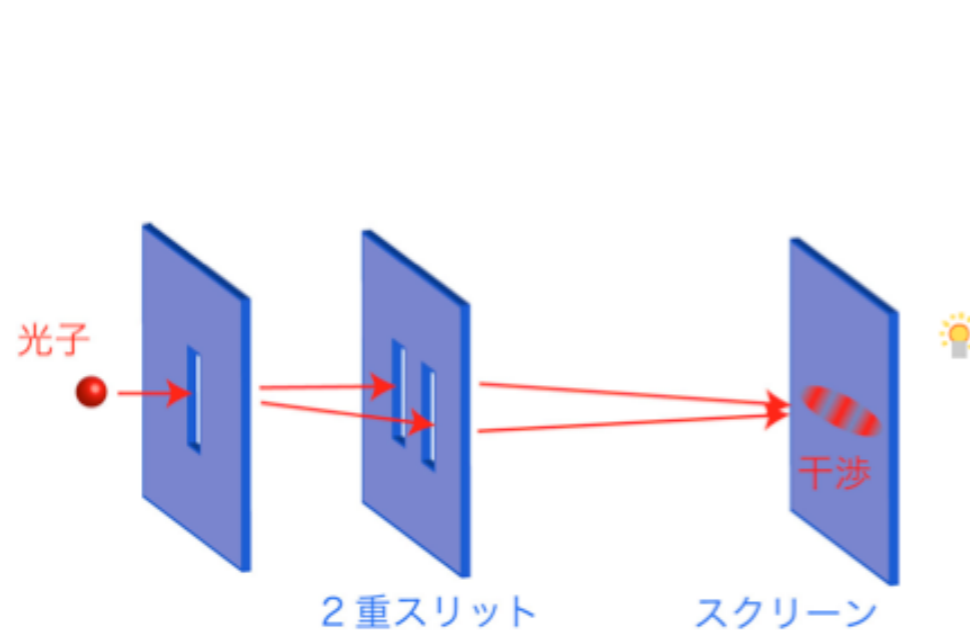
粒子なのか, 波なのか? 波であれば干渉縞ができる



<https://www.youtube.com/watch?v=dNx70orCPnA>

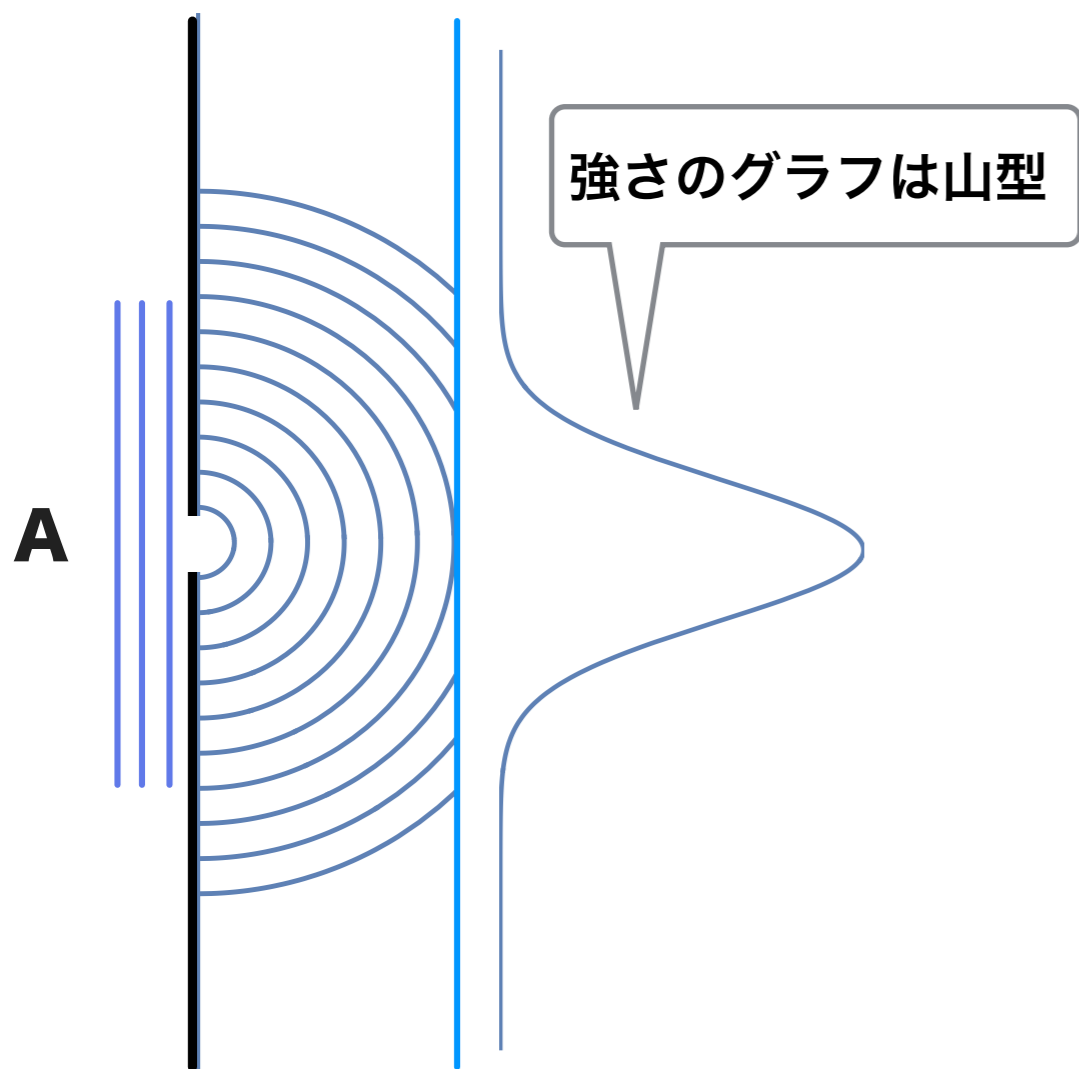


Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

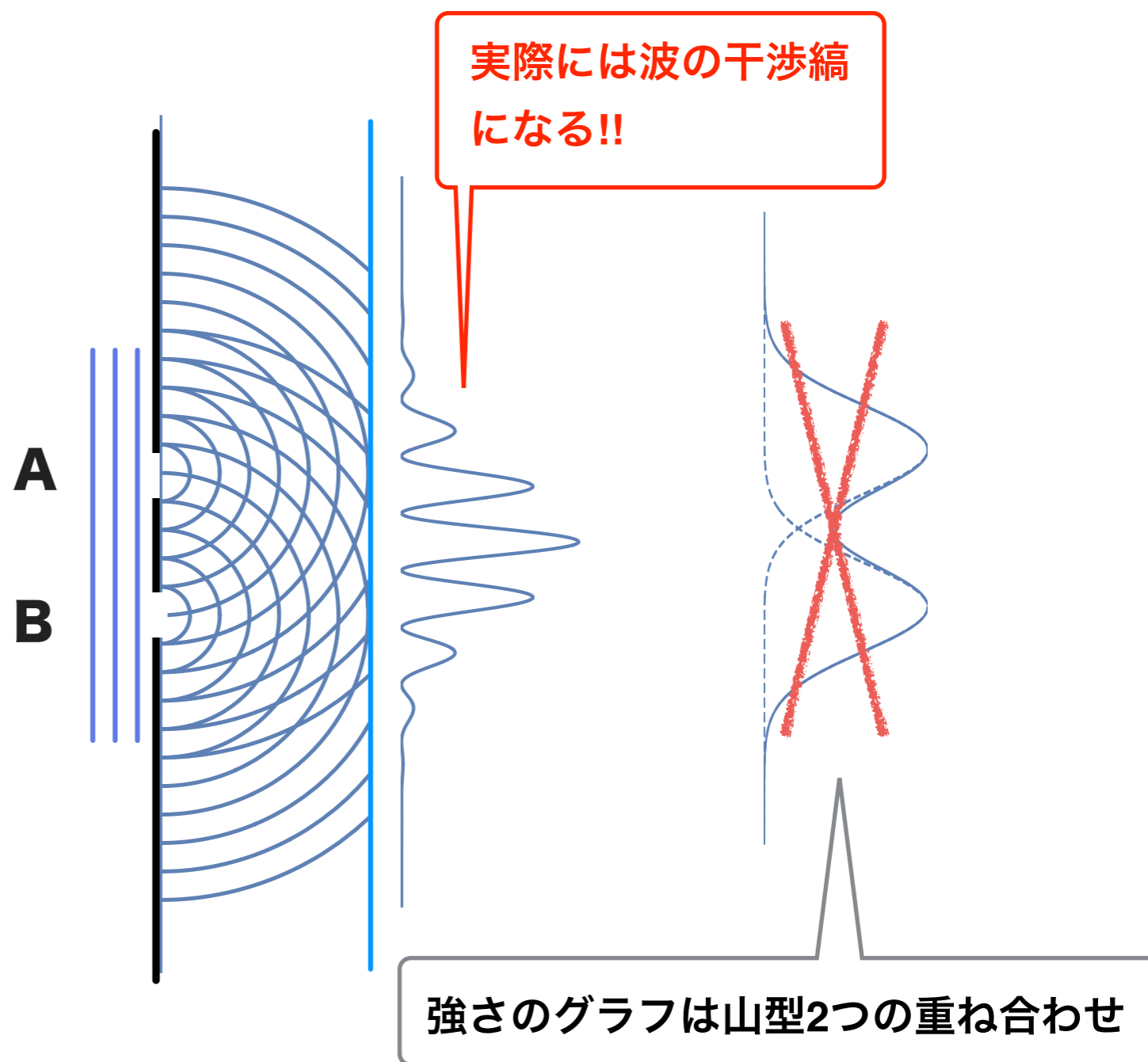


粒子なのか, 波なのか? 粒子であれば干渉縞ができない

単スリットの場合



2重スリットの場合



粒子だと考えると, A/Bどちらを通ったかが明らかになるので, 干渉縞は生じないはず.

量子論の考え



ボルン

量子論の式は「粒子の存在確率」を与える。



ボーア

A/Bどちらを通ったかは確率でしかわからない。
A/Bどちらかを通過したことがわかれば、干渉縞は生じない。

確率解釈

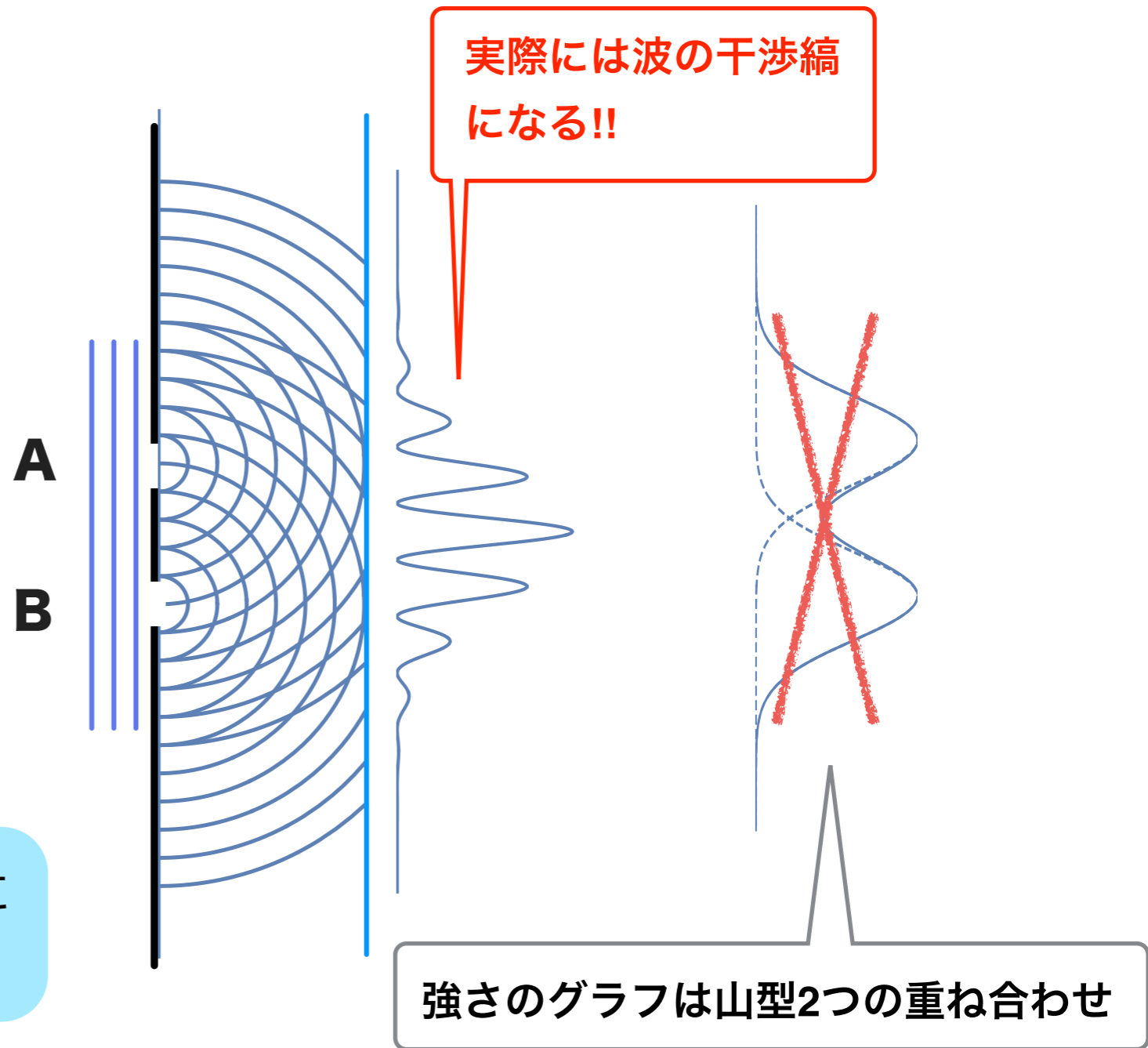


ハイゼンベルグ

粒子の位置と運動量は、同時に精度よく決められない。

不確定性原理

2重スリットの場合



粒子だと考えると、A/Bどちらを通ったかが明らかになるので、干渉縞は生じないはず。

『光子の裁判』 (1949) 朝永振一郎



朝永振一郎 (ノーベル賞 1965)

「超多時間理論」と「くりこみ理論」, 量子電磁力学分野の基礎的研究

jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman "for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles".



光子の裁判 —ある日の夢—

"We must now describe the photon as going partly into each of two components into which the incident beam is split."

P. A. M. Dirac, *Principle of Quantum Mechanics*

一

光子の裁判

検 「それでは被告にたずねるが、被告は前から室内にひそんでいたのではないというのであるか」
 被 「そうです。私とその直前に部屋の外にいたということには確かな証拠があります。現にその直前、私は門のところでした。すなわちそこで門衛が私をつかまえて、入門の手続きをとらせただけであります。このことはさきほど門衛の証言で明らかにされたとおりでです」
 検 「なるほど。門衛の証言によってその点についてはアリバイが成立しているとせねばなるまい。それでは聞くが、被告は門から前庭を通って窓のところに行き、その窓から室内に侵入し、そして室内の壁のところで捕えられたというのだね」
 被 「そのとおりでです」

気がつくとは私は、何かの裁判を傍聴しているようです。法廷はよく写真などで見たように、正面に判事長が威儀を正して坐っており、中央の被告席には何の犯罪かよくわからないけれども、何かの犯行をおかしたらしい被告が神妙にひかえています。今尋問をしているのは検察官らしく、犯行の模様をいちいち念をおすように聞きだしているのです。

私は、いつのまにこんなところに来てきたのでありましょう。それをいぶかりながらも、これは何か面白い事件らしいぞと思いつつ、一生懸命に聞き耳をたてていました。検察官はさらに尋問をつづけました。

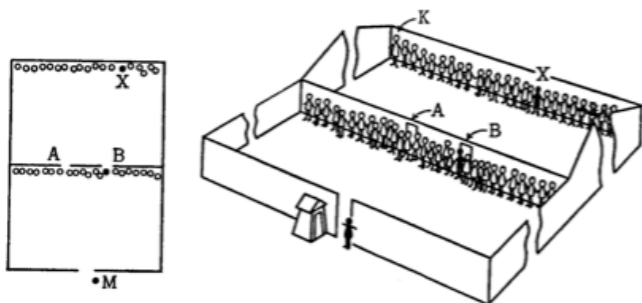
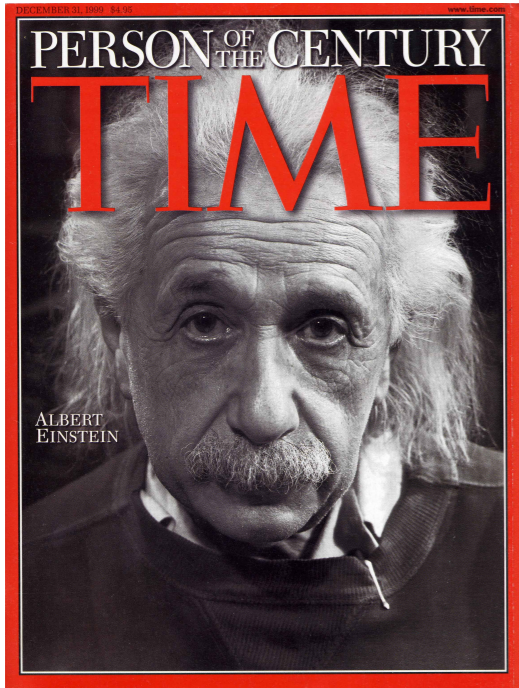


図5 警官の配列。黒坊は被告をとらえた者、被告は門から窓Bを通り、壁のXの位置までやって来ている。

相対論と量子論 アインシュタインの成功と失敗



Time
1999/12/31

1. 1905年の3つの業績
2. 相対性理論
3. 量子論
4. アインシュタインとボーアの論争

真貝寿明(しんかい ひさあき)

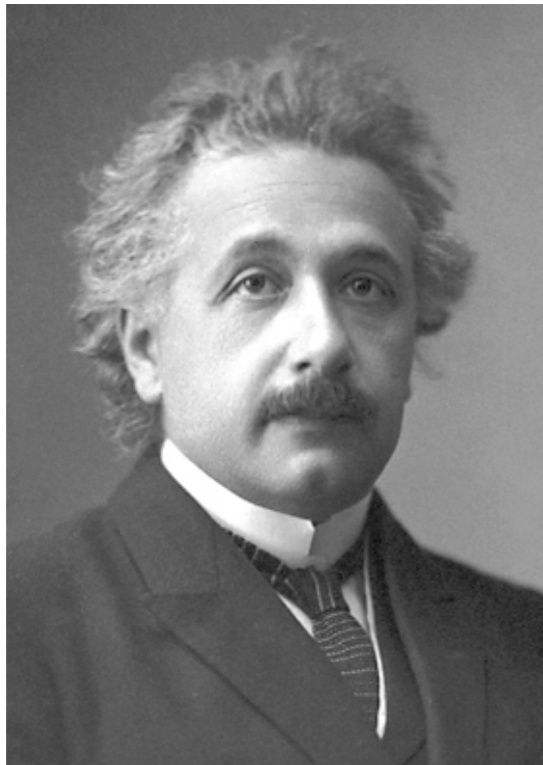
大阪工業大学 情報科学部 教授
理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



アインシュタイン と ボーア

Albert Einstein



孤高のスーパースター

1921年ノーベル物理学賞
「光電効果の解明」

受賞時 42歳

Niels Bohr



原子物理学のゴッドファーザー

1922年ノーベル物理学賞
「原子構造の解明」

受賞時 40歳

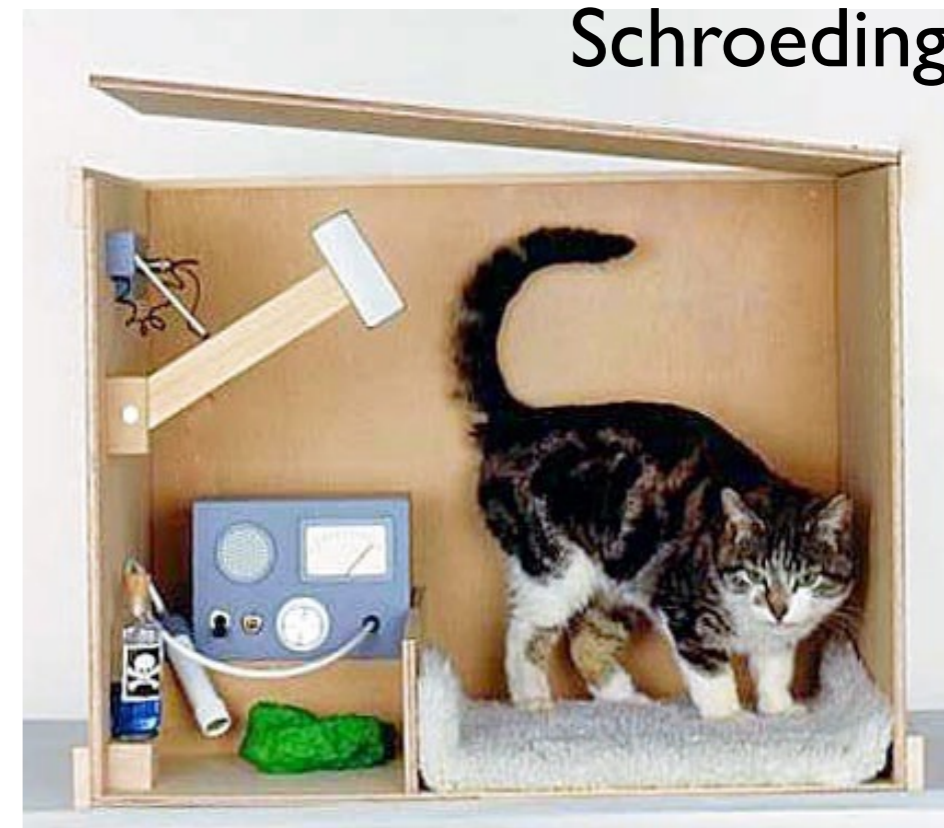
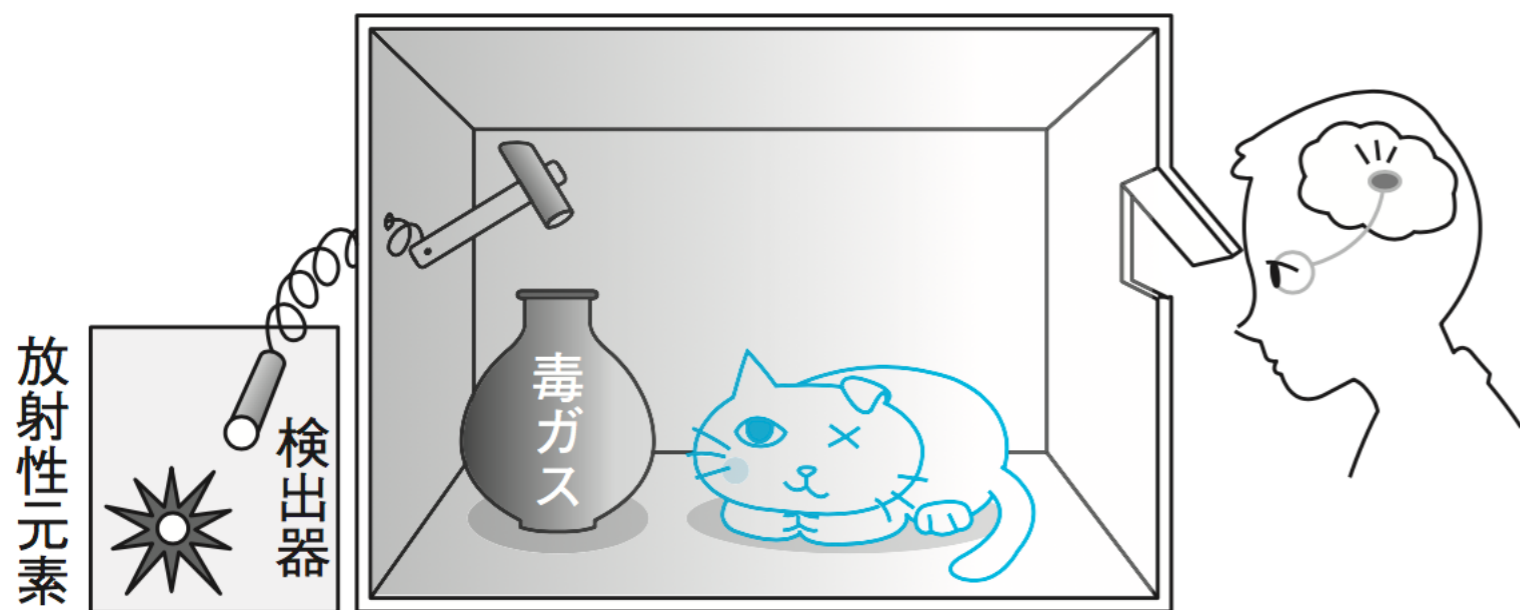
シュレーディンガーの猫

確率と考えるなら、パラドクスを提案する。

確率的に毒ガスが出るとする。しかし、猫は生きているのか、死んでいるのかどちらかだ。矛盾では？



Schroedinger

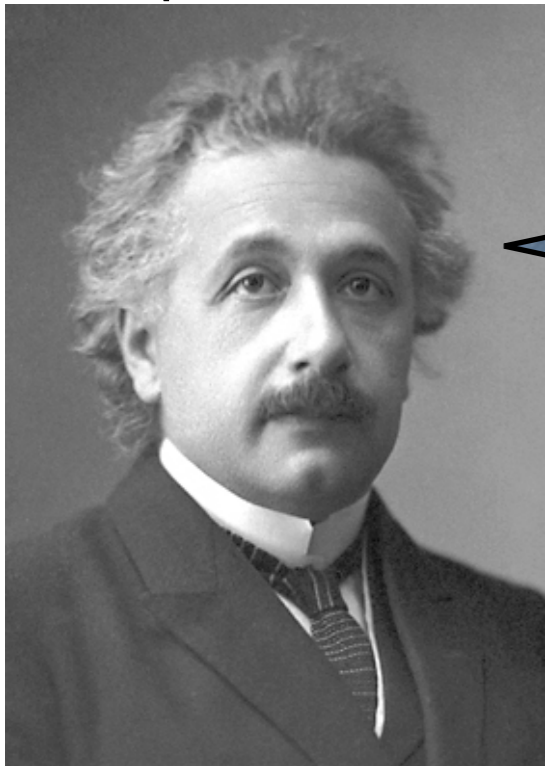


Bohr

猫は「生きている状態」と「死んでいる状態」の重ね合わせである。

確率解釈に反対するEinstein

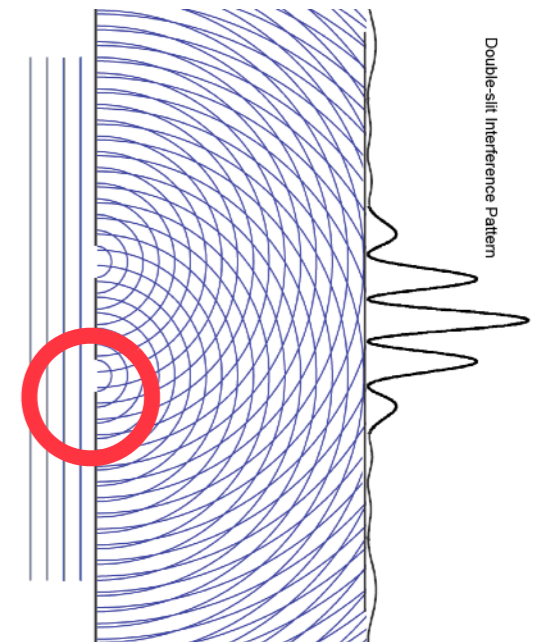
確かに量子力学は重視するに値する。しかし、私の内なる声が言うのです。これは本物ではない。この理論からたくさんの結果が得られるかもしれないが、これによって神の秘密に近づくことは不可能だ。私は神がサイコロを振ったりなどしないと信じている。



光がどちらかのスリットを通過したのか、は測定できるはずだ。



光の経路が検出されたならば、干渉縞の出現は消滅する。



量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン(1)

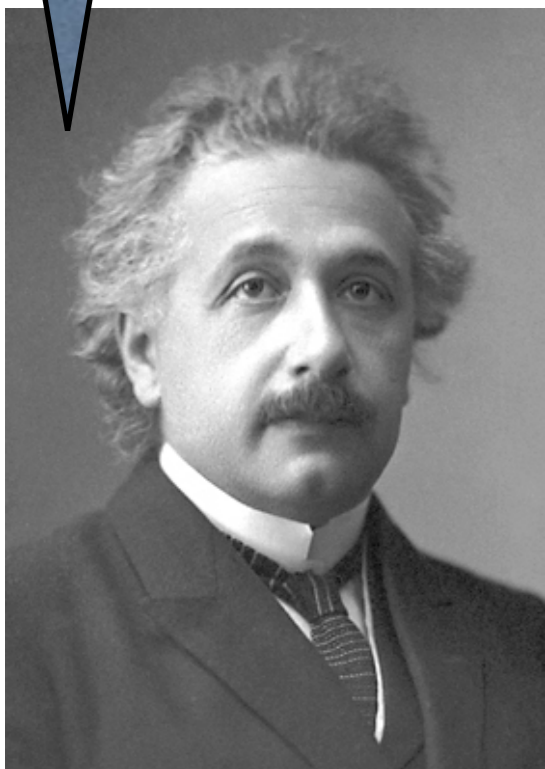
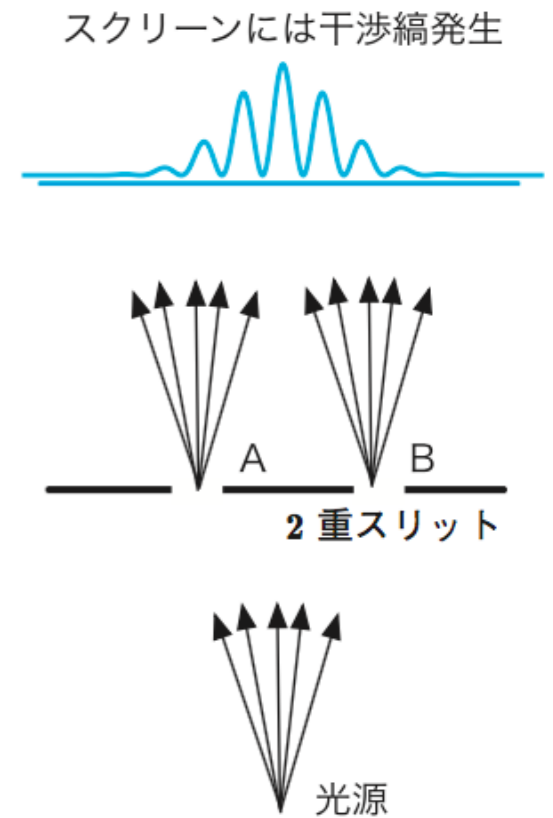
因果律を用いて反論

1927年ソルベー会議

不確定性原理は因果律を破っているので正しくない。

二重スリットの実験で、スクリーンに光が当たることを確認した瞬間に、それまで広がっていた波動関数が1点に収縮する、と考えるのは情報が瞬間的に伝わることを意味し、**因果律と矛盾する**。

波動関数は確率ではなく、多数の粒子の位置の統計を表している。



波動関数は現象を説明するための数学的なツールだ。

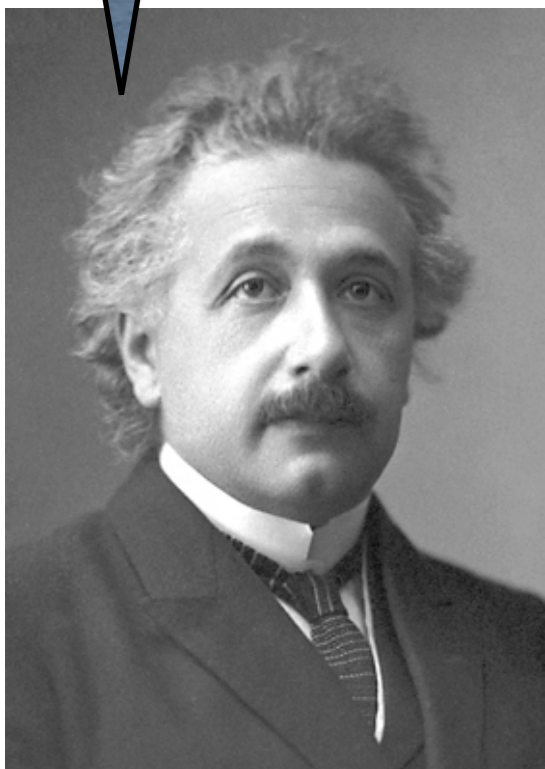
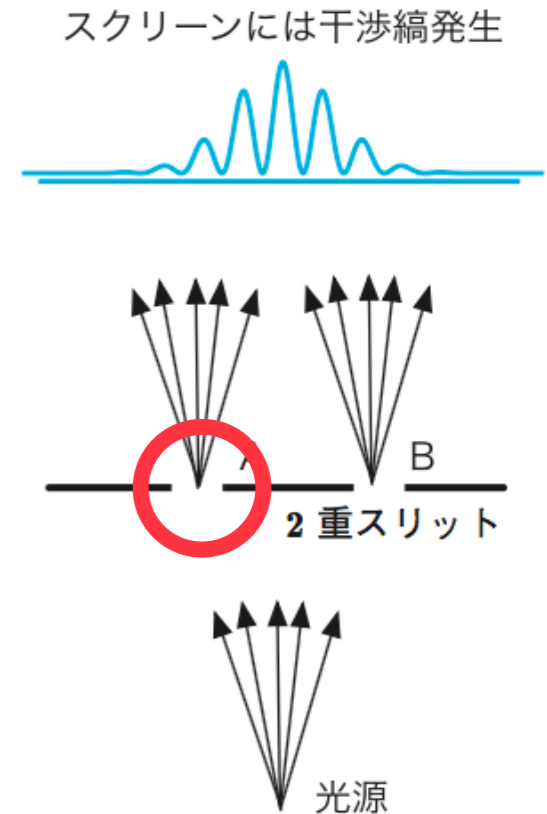
量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン(2)

1927年ソルベー会議

不確定性原理への反論

位置と運動量の不確定性 $\Delta x \cdot \Delta p \simeq h$

光が2つのスリットのどちらかを通過したことは、スリットの穴を小さくすることで測定できるはずだ。だから、光の位置と運動量は同時に測定できる。



測定するときには、何らかの力学的な反応を使う。
装置にゆらぎが生じるため、光の位置と運動量を同時に決めることはできない。

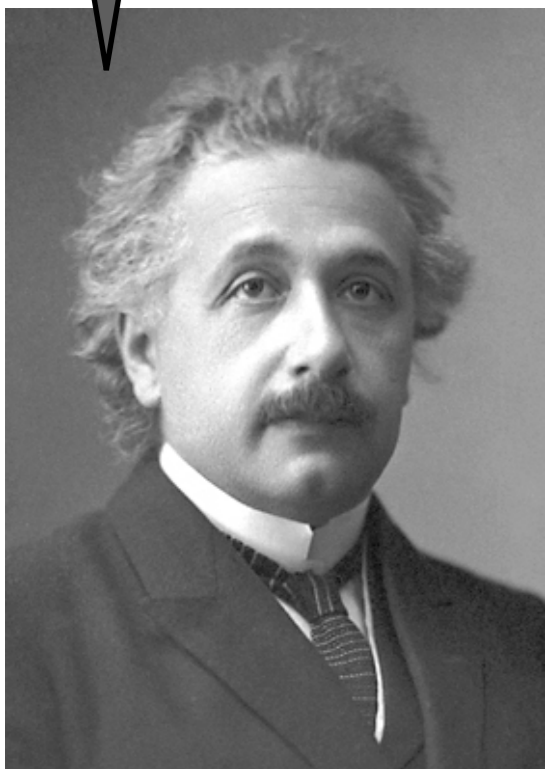
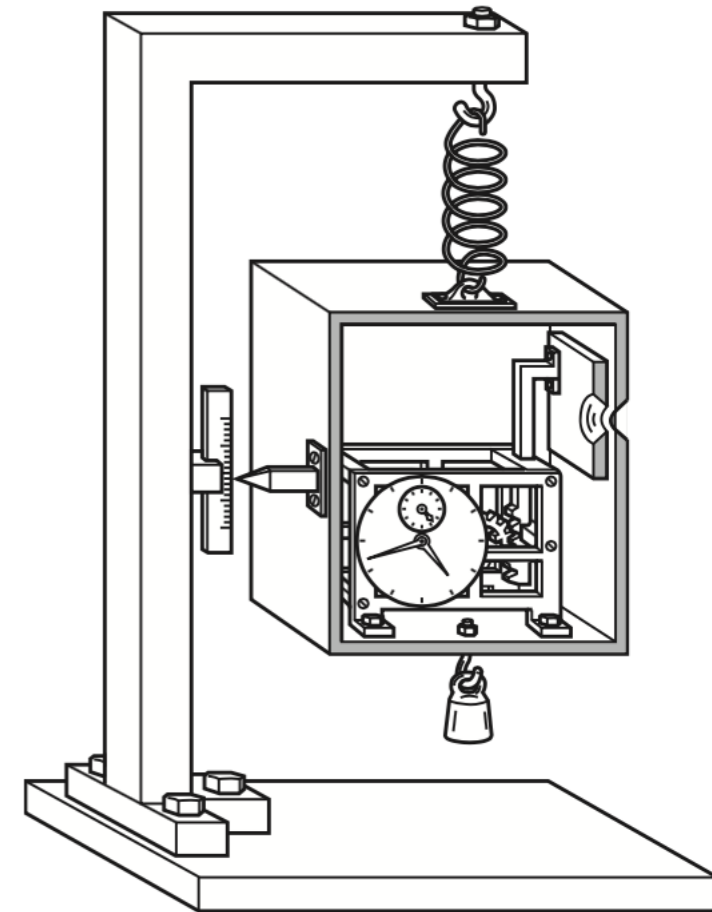
量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン(3)

1930年ソルベー会議

不確定性原理に関する反論

時間とエネルギーの不確定性 $\Delta t \cdot \Delta E \simeq h$

光でみたされた箱があり, シャッターを付けた小さい穴がある. ある時刻でシャッターが一瞬だけ開き, 光の粒子が1つ飛び出す. その前後の箱の質量を測ることで**エネルギーも時間も別個に測定可能だ.**



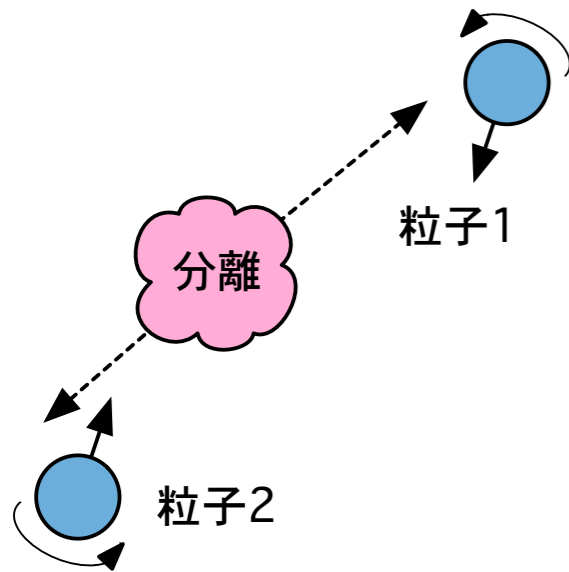
質量を測るのは重力. シャッターの開閉で重力場が変動すれば, 時間が変化することを示したのは, あなたではないですか.

量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン(4)

教科書 p147

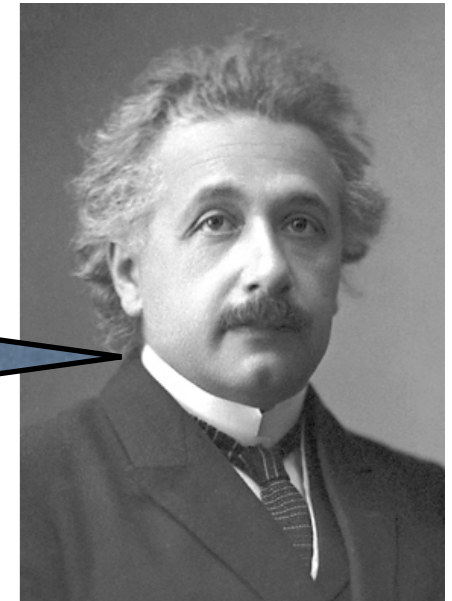
量子力学の不完全性を突く反論

EPRパラドクス



我々は他方を乱すことなく測定ができる。

だから、はじめから系は「物理的な実在」を持っており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。



MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

Phys. Rev. 47 (1935) 777-780

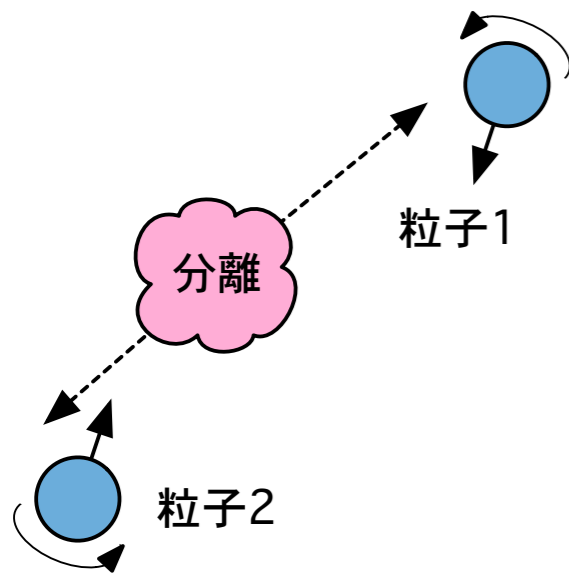
1935年EPR論文

量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン(4)

教科書 p147

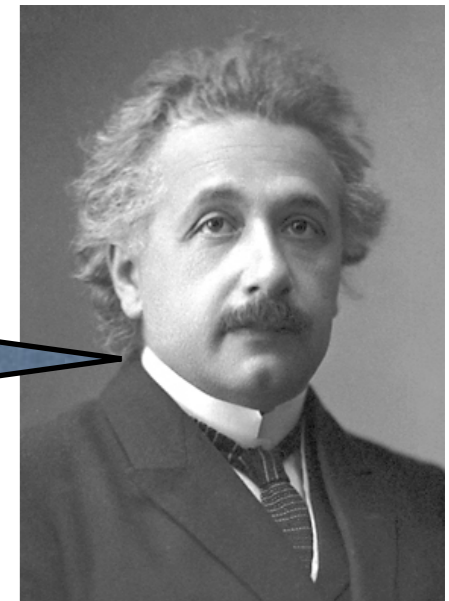
量子力学の不完全性を突く反論

EPRパラドクス



我々は他方を乱すことなく測定ができる。

だから、はじめから系は「物理的な実在」を持っており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。



completeness complementarity

「完全性」ではなく、「相補性」という考えで理解しよう。



Phys. Rev. 48 (1935)
696-702

OCTOBER 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 48

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?

N. BOHR, *Institute for Theoretical Physics, University, Copenhagen*

(Received July 13, 1935)

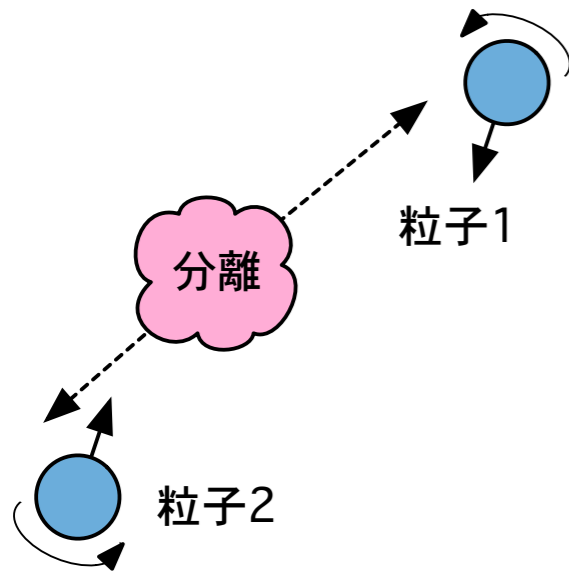
It is shown that a certain "criterion of physical reality" formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed "complementarity" is explained from which quantum-mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness.

量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン(4)

教科書 p147

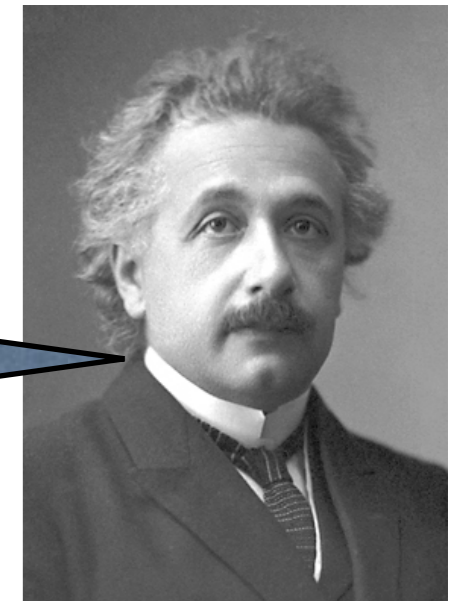
量子力学の不完全性を突く反論

EPRパラドクス



我々は他方を乱すことなく測定ができる。

だから、はじめから系は「物理的な実在」を持っており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。



物理的な実在が存在し、我々はそれを観測する

physical reality

completeness complementarity

「完全性」ではなく、「相補性」という考えで理解しよう。



実在は重要ではなく、観測する現象を説明するのが物理学

physical description

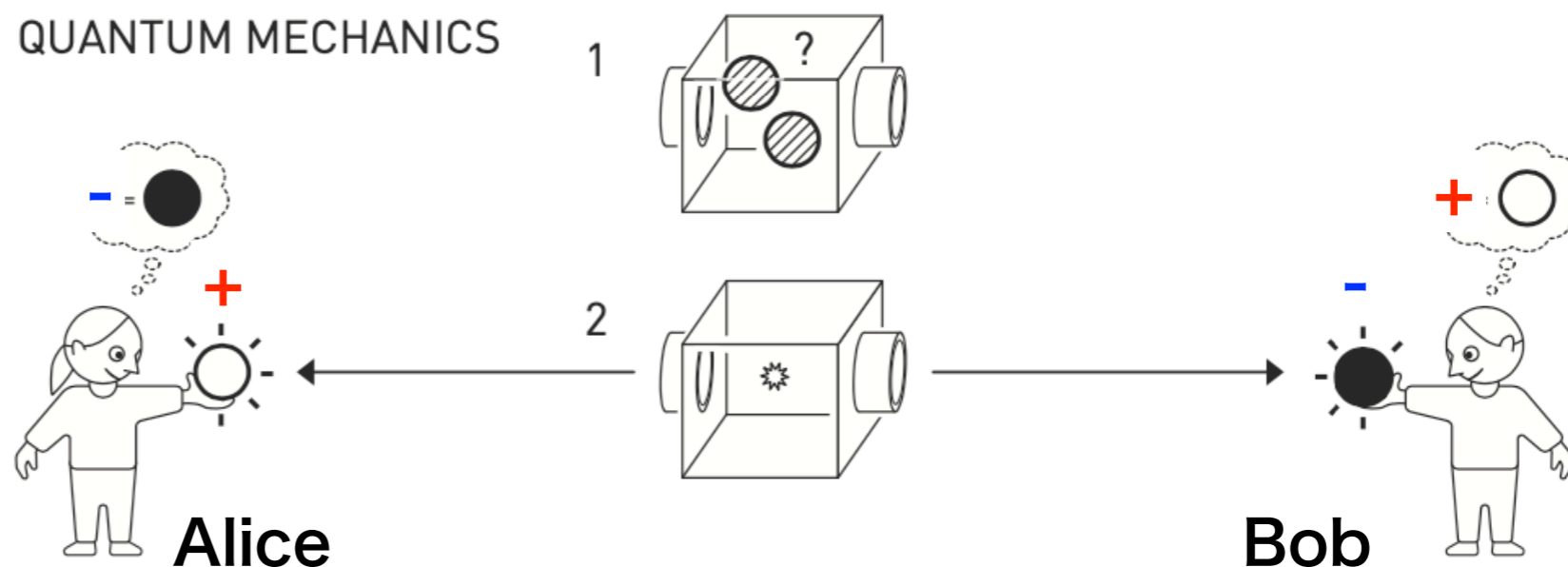
ベルの不等式 (1964)

「EPRは実験で確かめられる」



John S. Bell
(1928-1990)

EPRが仮定した、物理量の局所性と実在性の2つを認めた場合、2つの粒子のスピンの相関に上限が存在する。(ベル不等式)



EPRが正しければ、この不等式は成立

量子論の考えではこの不等式は破れる

$$-2 \leq \langle A_+ B_+ \rangle + \langle A_+ B_- \rangle + \langle A_- B_+ \rangle - \langle A_- B_- \rangle \leq 2$$

何度も2個の粒子を発生させ、測定器のスイッチを切り替えて測定を繰り返す。+と-を同時に測った値を乗じた値の平均値を $\langle A_+ B_+ \rangle$ とする。同様に、 $A_+ B_-$, $A_- B_+$, $A_- B_-$ の平均値を測定データから求める。

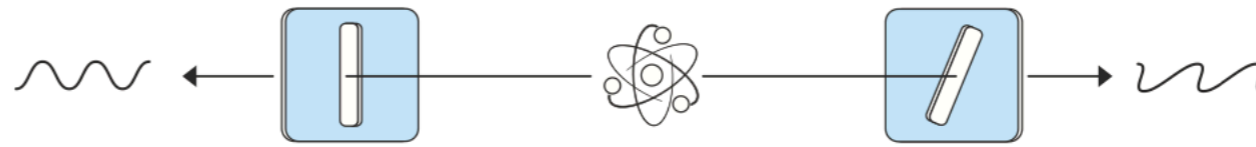
ベルの不等式は破れている！（量子論の考えが正しい）

ノーベル物理学賞2022



1969

ジョン・クラウザー
米

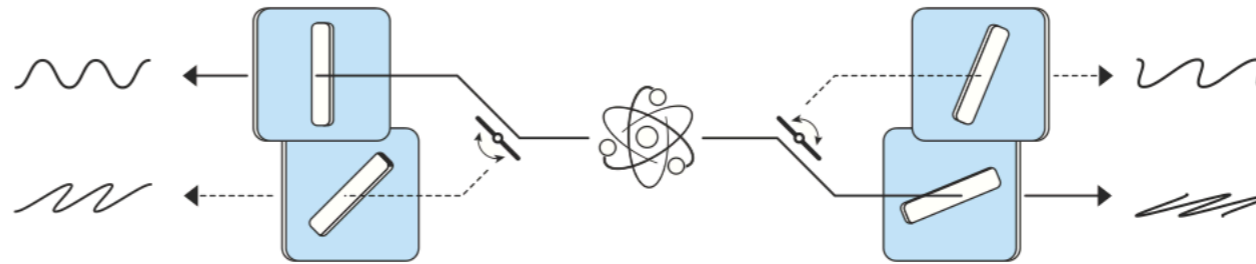


John Clauser used calcium atoms that could emit entangled photons after he had illuminated them with a special light. He set up a filter on either side to measure the photons' polarisation. After a series of measurements, he was able to show they violated a Bell inequality.

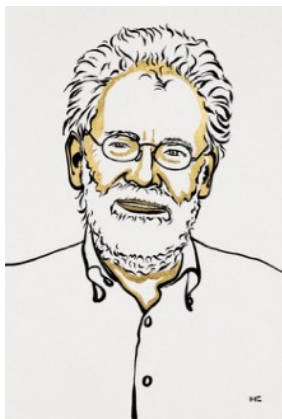


1980s

アラン・アスペ
仏パリ・サクレ大

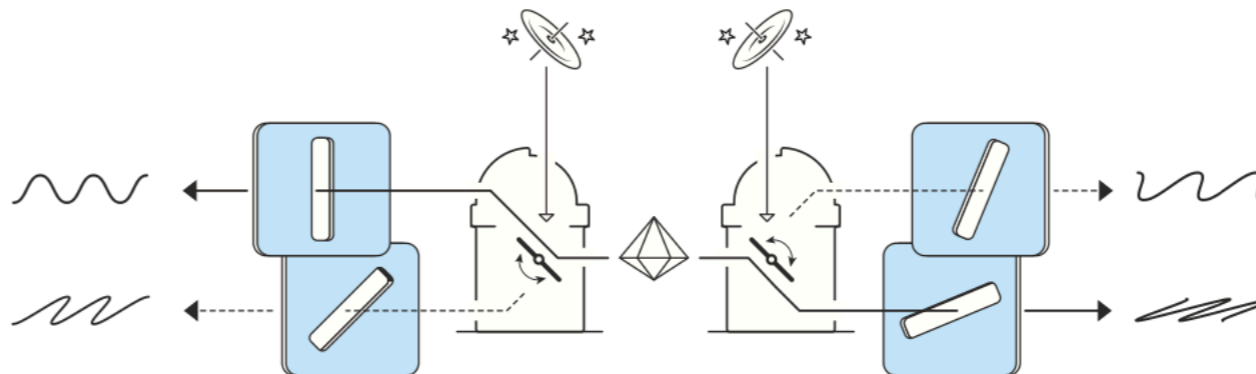


Alain Aspect developed this experiment, using a new way of exciting the atoms so they emitted entangled photons at a higher rate. He could also switch between different settings, so the system would not contain any advance information that could affect the results.

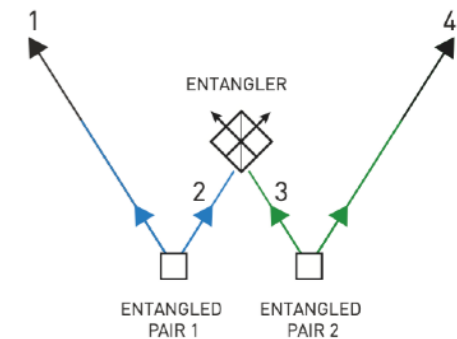


1997
1998

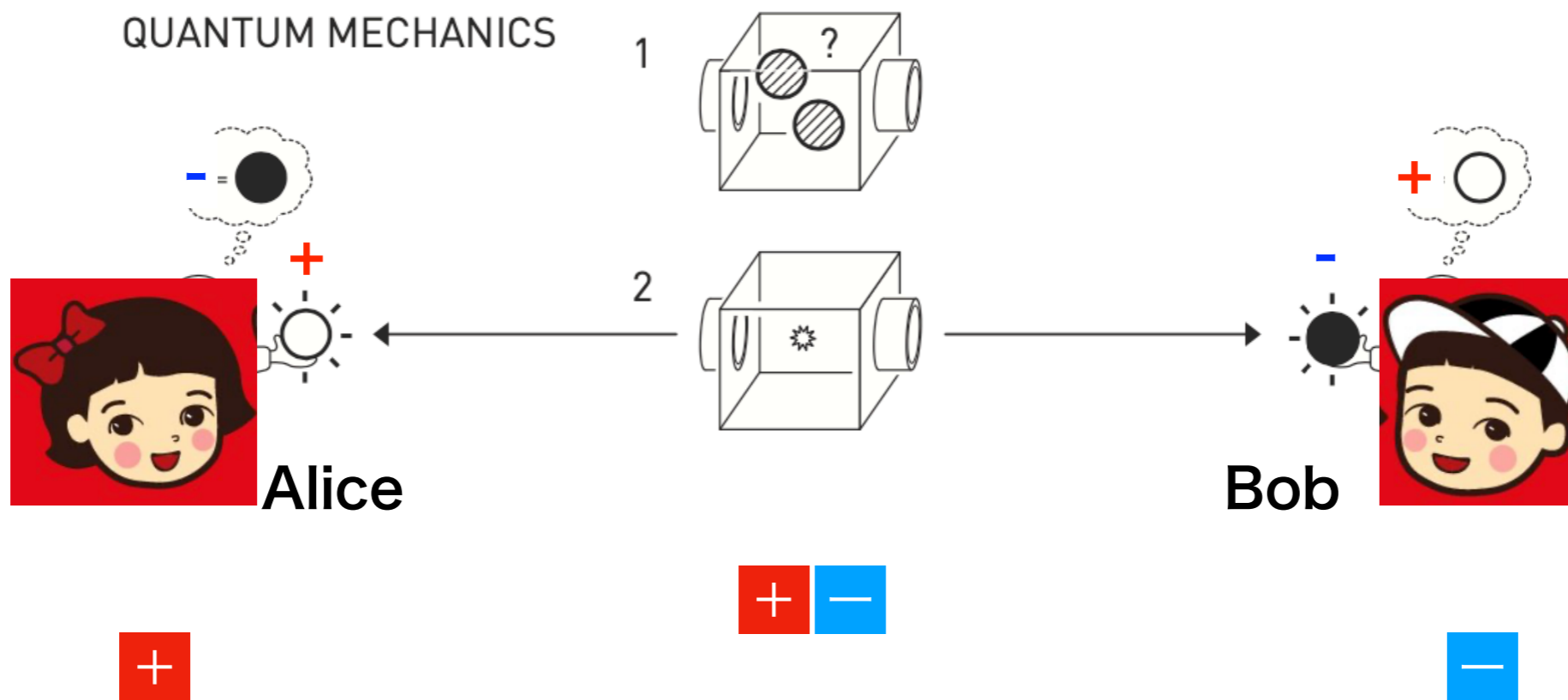
アントン・ツァイリンガー
オーストリア・ウィーン大



Anton Zeilinger later conducted more tests of Bell inequalities. He created entangled pairs of photons by shining a laser on a special crystal, and used random numbers to shift between measurement settings. One experiment used signals from distant galaxies to control the filters and ensure the signals could not affect each other.



量子もつれ (quantum entanglement)



量子状態は絡み合っている = 量子もつれ
一方の状態が判明すれば、遠方のもう一方も。

locality realism

EPRが仮定した、物理量の**局所性**と**実在性**の2つは、同時には成り立たない。

光速を超えて影響は及ばない

たとえ観測しなくても現象は存在する

物理量の局所性と実在性は同時には成り立たない

光速を超えて影響は及ばない

たとえ観測しなくても現象は存在する

アインシュタインは友人パイスに向かって尋ねた。

「月は君が眺めている間だけ実在している, などということを, 本当に信じているのか」

ベルの不等式の破れは, その通りで,

「月は誰も眺めていないとき, そこに実在していない」

ことを結論する。

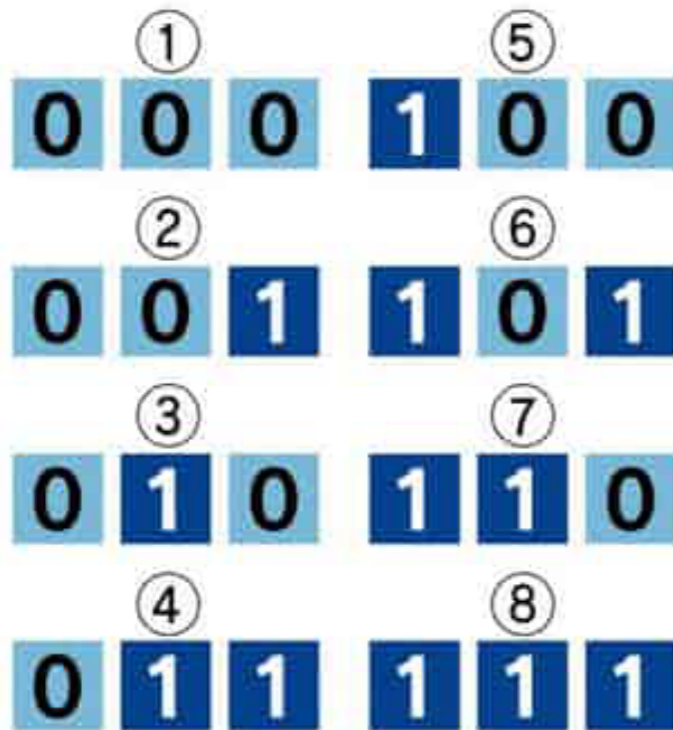


量子もつれ現象を利用した量子コンピュータ

量子コンピュータはまとめて計算できる
(3ビットの場合)

現在のコンピューター

情報を0か1で表現



8通りの情報を1つずつ計算

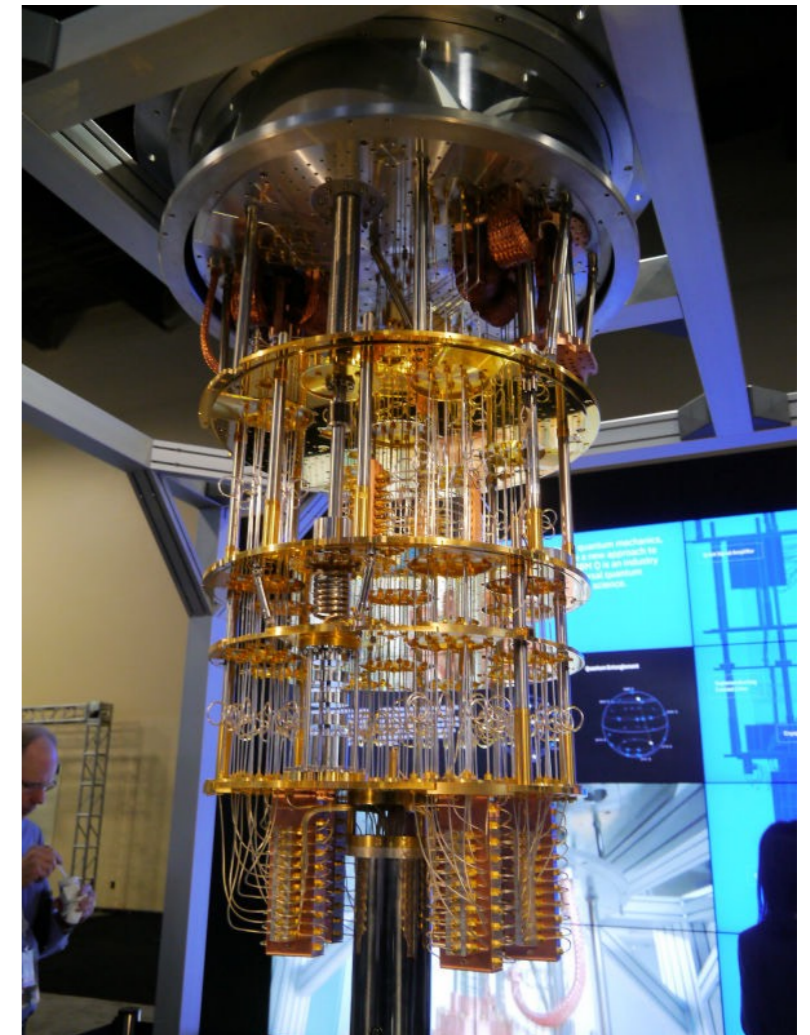
量子コンピューター

0と1の重ね合わせ



8通りの情報を
1度に計算

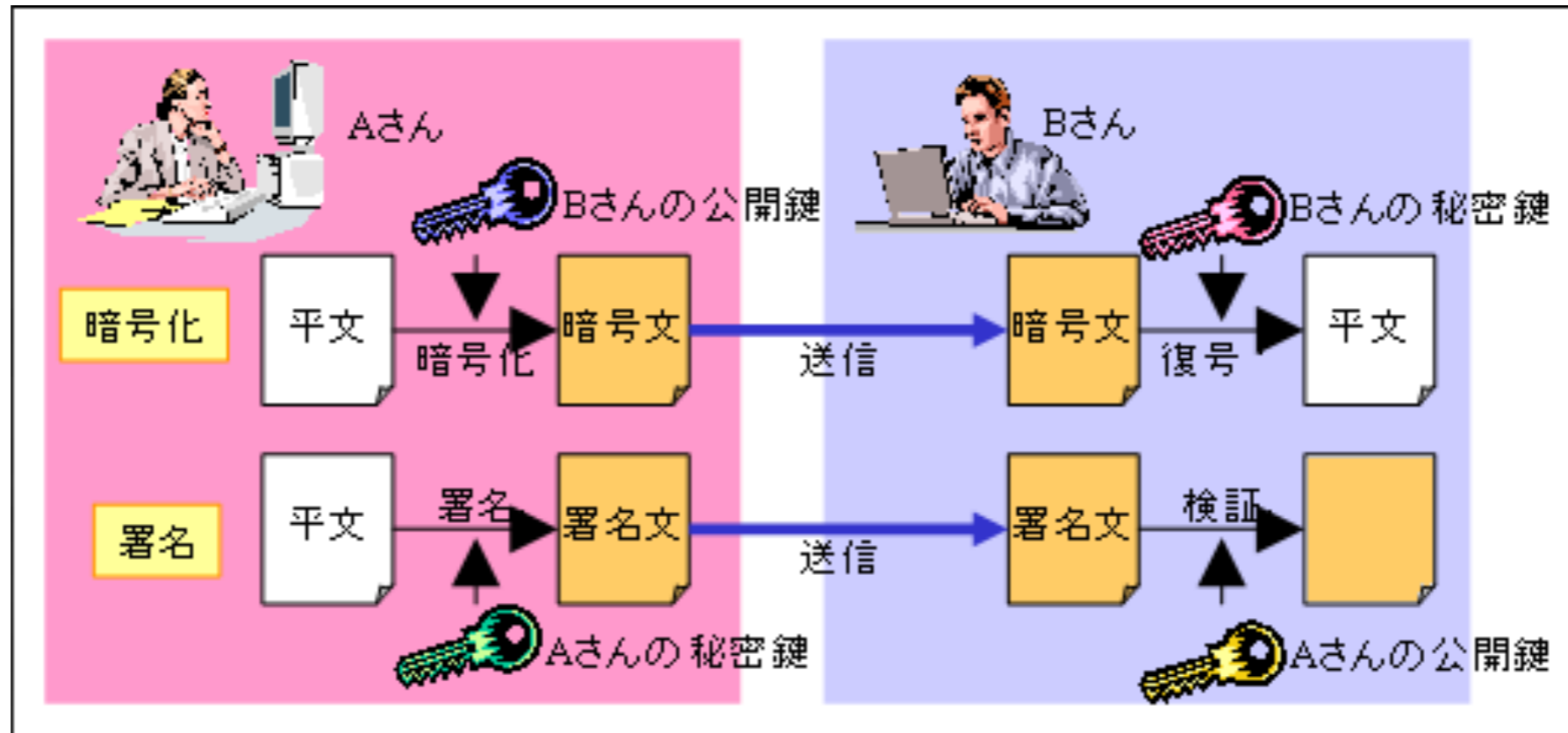
30量子ビットがあれば、10億通り以上の情報を
1度に計算できる



IBMが開発している量子コンピューター

量子もつれ現象を利用した量子コンピュータ

インターネット上の暗号が破られる？



<https://www.ipa.go.jp/security/pki/022.html>

1230186684530117755130494958384962720772853569595334792197
 3224521517264005072636575187452021997864693899564749427740
 6384592519255732630345373154826850791702612214291346167042
 9214311602221240479274737794080665351419597459856902143413

=

3347807169895689878604416984821269081770479498371376856891
 2431388982883793878002287614711652531743087737814467999489

×

3674604366679959042824463379962795263227915816434308764267
 6032283815739666511279233373417143396810270092798736308917

232桁

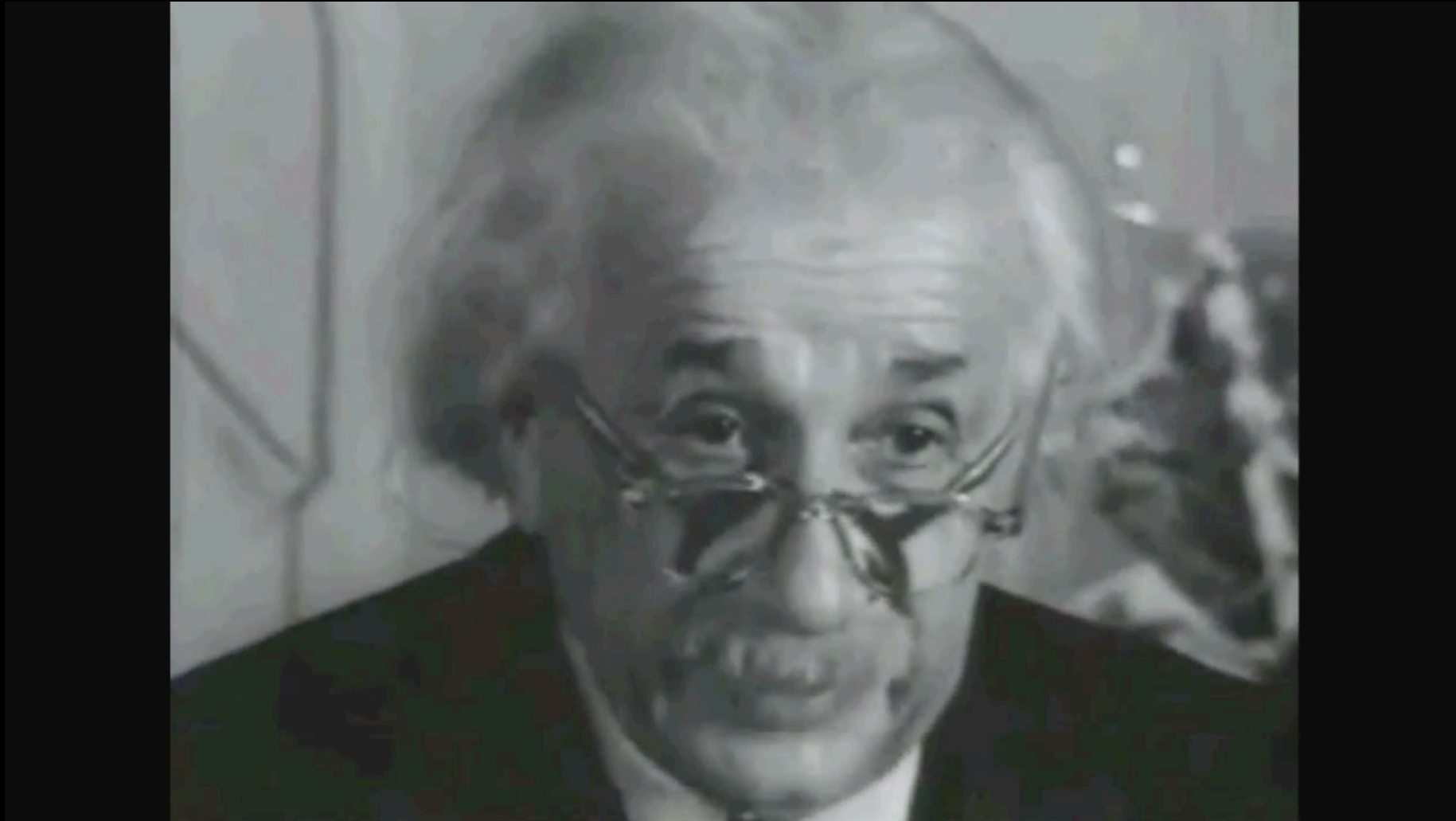
素数

素数

素因数分解がすぐに
解けたら暗号が破られる

<http://www.s.osakafu-u.ac.jp/default/3491.html>

アインシュタイン自身による $E = mc^2$ の説明



Furthermore, the equation $E = mc^2$, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa.

The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before.

This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally.

ことを示す式

$$E = mc^2$$

は、非常に小さな量の質量が非常に大きな量のエネルギーに変換され、その逆も成り立つことを示しました。

前述の式によれば、質量とエネルギーは実際には等価でした。

これは、1932年に Cockcroft と Walton によって実験的に実証されました。

一般相対性理論

特殊相対性理論

ニュートン力学

$$F = ma$$

量子力学

量子場の理論

究極の理論

未完成