

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第11回 2023/12/4

第4章 原子・素粒子の理論：原子の構造 (2)

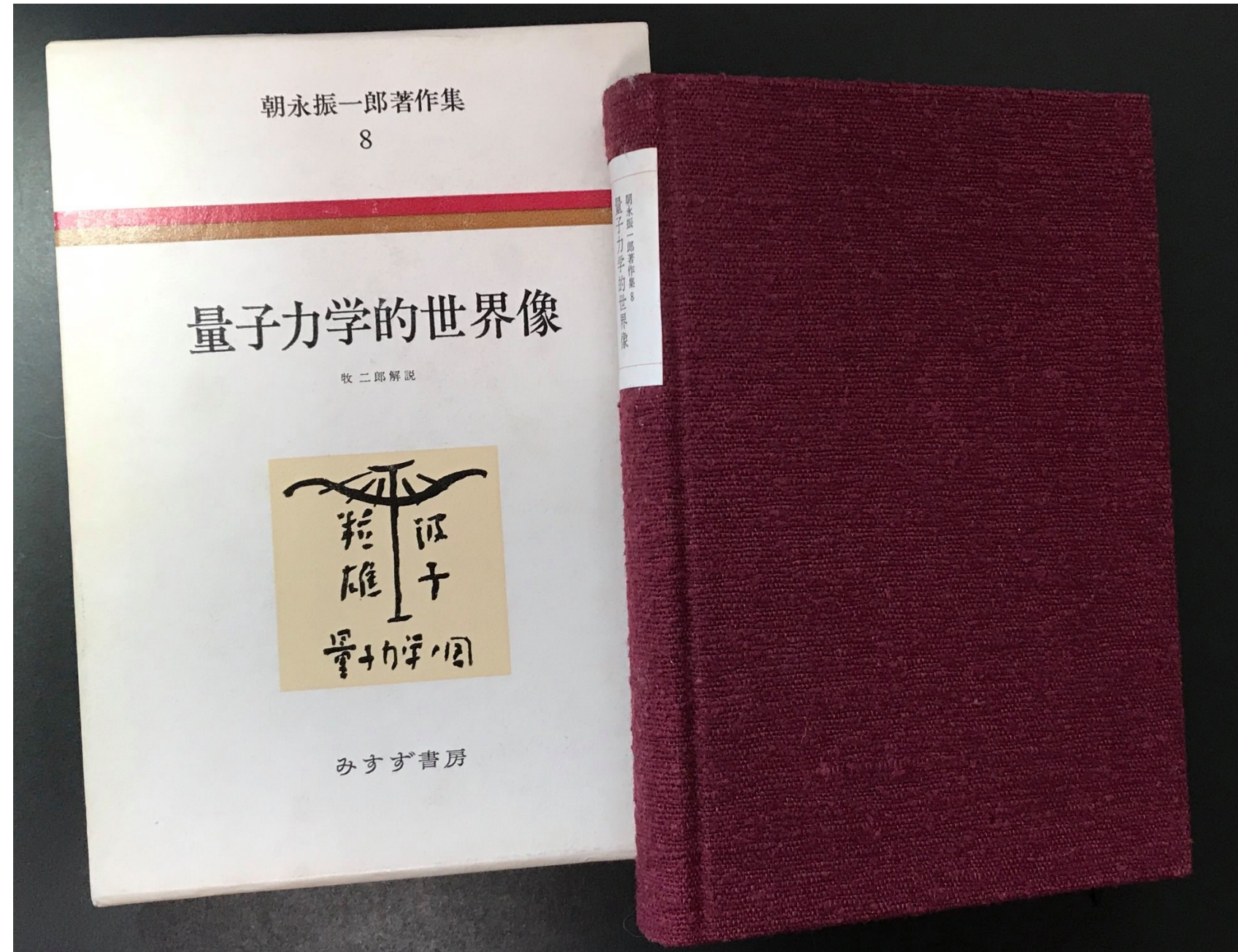
アインシュタイン・ボーア論争

真貝 寿明

Hisaaki Shinkai



<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mukogawa>



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のでしょうか」
 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、私は門のところに行ったのです。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のであります。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過し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 「そのとおりです」

気がつくとい私は、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ひながら、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。

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」

私はこの答にあっけにとられました。一体、一人の被告が二つの窓の両方を一緒に通るなどということが可能でしょうか。検察官もこの論理を無視した答に少なからず心証を害したようです。

検 「被告は二つの窓の両方を一緒に通ったと予審においても一度ならず主張していたが、ここで

課題

- 「光を波と考えるか，粒子と考えるか」の論争点は何か．現状ではどう理解するのが正しいか．
- 朝永振一郎の書いた『光子の裁判』（1949）のプリントを第9回の授業時に配布しています．この要旨をまとめてください．
- そして，次のキーワードから2つ以上を使って，論争点と解決案を説明してください．
『神はサイコロをふらない』『確率解釈』『不確定性原理』『観測問題』『シュレーディンガーの猫』
『EPR パラドックス』『トンネル効果』『コペンハーゲン解釈』『多世界解釈』
- 最後に，皆さんのこの問題に関する感想をお願いします．

作成要領

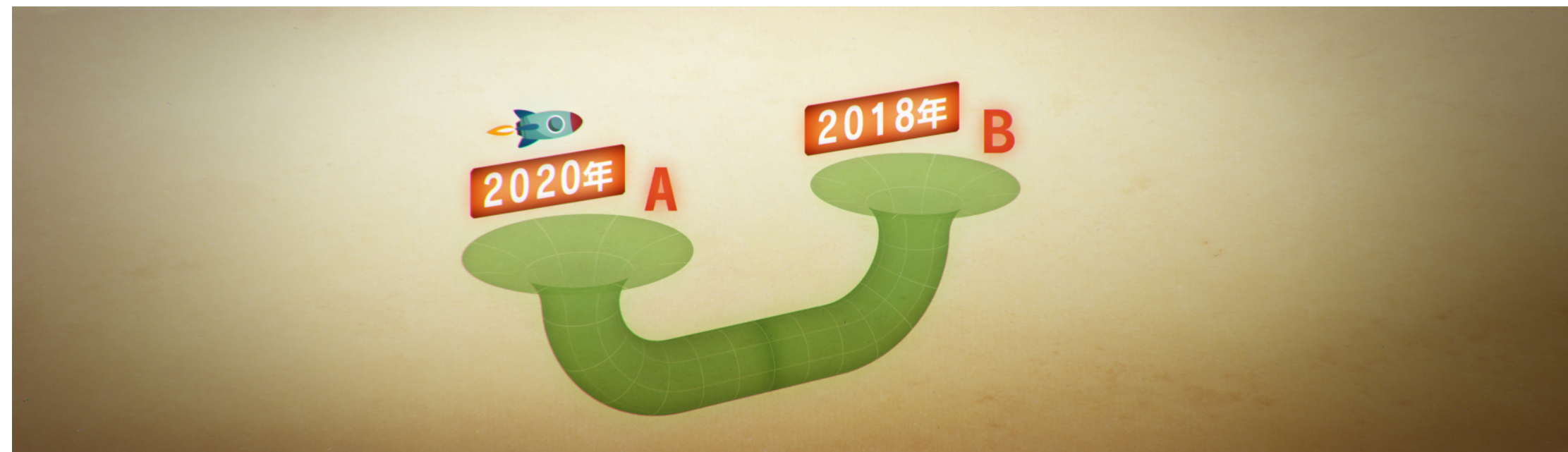
- A4 用紙 3-5 枚程度．表紙は不要．必要であれば，図や表を添付してよい（ページ枚数に含める）．
- 参考とした文献（web ページ含む）は必ず記すこと．（剽窃，無断転載行為が判明したら受理しない．きちんと引用するなら OK）．

提出手順

- Google Classroom の課題として提出．手書きの場合は写真撮影したものを提出．
- 提出〆切は，**2023年12月27日（水） 23:59**
- 提出ファイルの名前は，「Q 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること．（Q は Quantum の頭文字でレポート区別するためのもの，学科は大日/短生など 2 文字で，XXXXXXX は学籍番号，○○○○は氏名）とすること．ファイル名には空白を入れず，学籍番号は半角で．一括ダウンロードして読むため，このファイル名をお願いします．
- ファイル内の初めにも，タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること．
- pdf ファイルが望ましいが，word ファイルでもよい．

前回のミニッツペーパーから

ワームホールか過去へ行くタイムマシンの話に興味をそそられましたが、タイムマシンになり得るためには仮定が多すぎて「なんじゃそりゃ」と思っていました。それはそれとして面白いとは思いますが。



前回の答え合わせの「未来に行くタイムマシン」が両方の相対性理論にあてはまる理由が分からなかったため、もう少し詳しく説明して欲しいです。

(特殊相対性理論の効果)

光速近いスピードのロケットでは時間の進み方が遅くなる

(一般相対性理論の効果)

ブラックホール近傍では時間の進み方が遅くなる



時をかけるな、恋人たち (2023, フジテレビ) 第1話

ワームホールの量子仮説があれから変わった。
ワームホールの夢があれからいいと思った。

前回のミニッツペーパーから

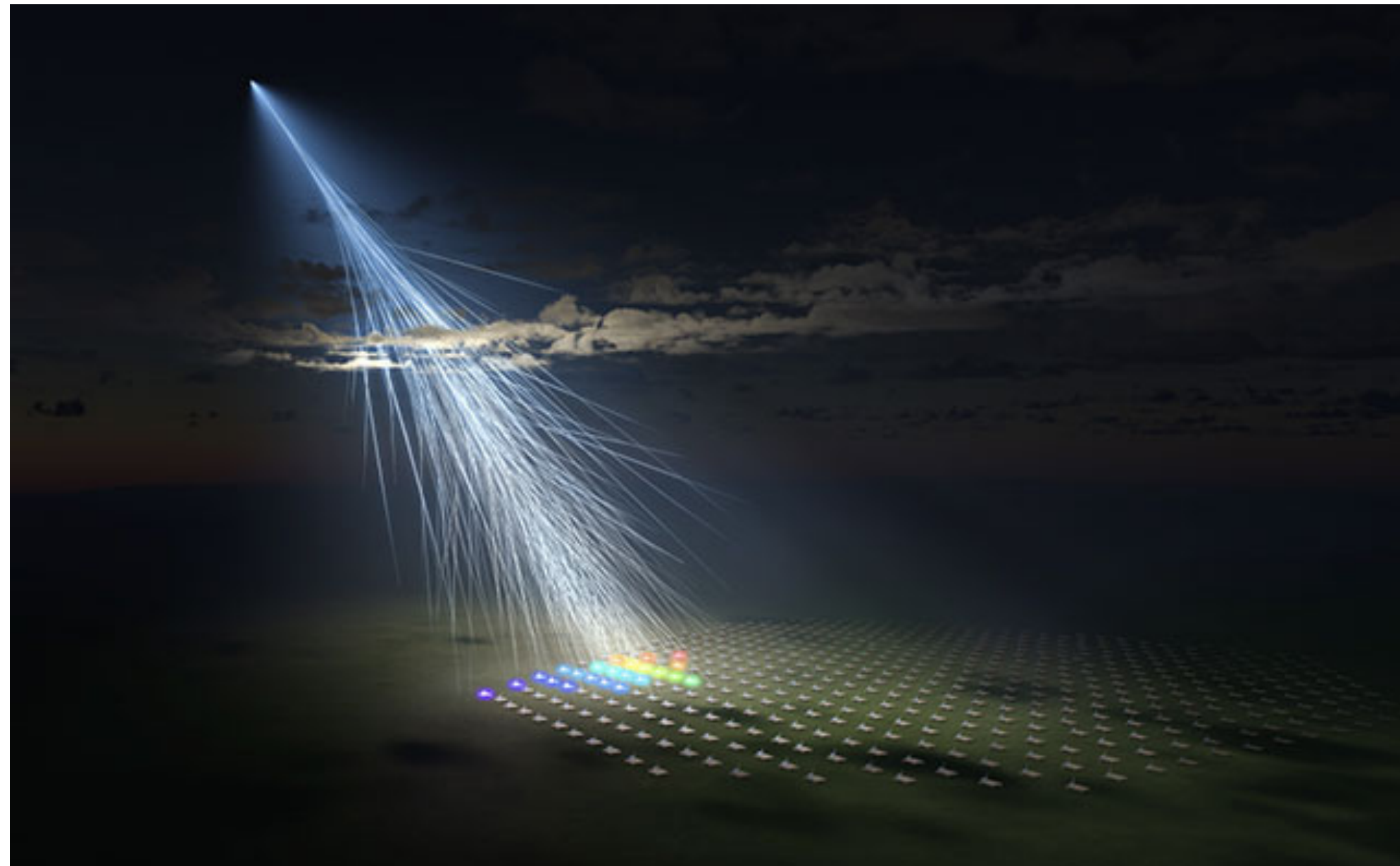
② この授業をとってから宇宙に関するニュースが目にとまるようになりました。最新のニュースで「アマテラス粒子」が発見されたと聞き、自分なりに調べたのですが、なぜニュースになるくらいの大発見なのかあまり分かりませんでした。なにがすごいのでしょうか...。でも、しかし今回の授業のマルチメディア-天文学と関係が深いと思います。

午前中、ひまだったので「ハクリア 銀幕」という映画をみました。とても面白く駄作と評された映画なのですが、ロケット星人という謎の宇宙人が少しかわいかったです。



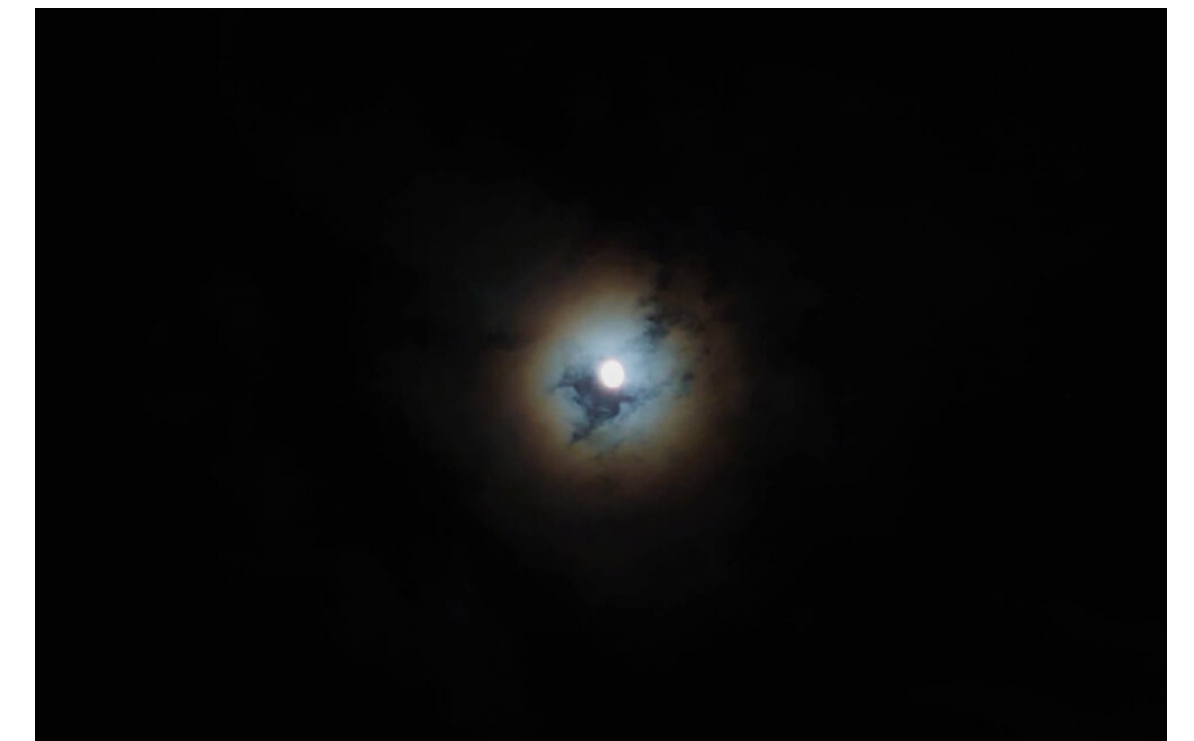
← ロケット星人。

「百折のものほど高直な技術である」という思想をもっているらしい。



「アマテラス(天照)粒子」と名付けられた, 超高エネルギー宇宙線(2021年5月27日)

2.44×10^{20} 電子ボルト



月暈 (つきがさ・げつうん)

]-昨日くらいに、月がすごく明るく見える日があって、その時月の周りにもやんと輪がかのようになっているのを見ていました。あれは空気中の水分に反射していたのがたまたま、気になっています。

前回のミニッツペーパーから

今回も授業の始めにブラックホールの話を聞きました。物語で使われるブラックホールは悪いイメージがあります。宇宙からブラックホールが無くなっても何も害はないのでしょうか？

そういう視点で考えたことはなかった。
遠くにあるブラックホールはあってもなくても害はないです。

フォークの量子仮説があんまり分からなかった。

反射の
原子模型の話もスリットに聞いて高校時代が懐かしくなりました。

2重スリットの実験を見て光が波であることがよくわかりました。

シュレディンガーの猫はとても有名で量子学のことと知らずに知ったので宇宙のことと結びつくのがおもしろいと思いました。確率解釈というところが難しい方程式が出てわけがわからなくなりました。

アインシュタインが光が波かつ粒子であることを反対する
代わりに、光は波であり粒子であると考える。
ここでアインシュタインが自分のたしな理論を反対して「光子」
存在してきたから(笑)

光子の裁判を少し読んでいたので、二重スリットの実験でA・Bを通るとかの話を聞いて、これのことなのかなと思った。

これらは、今日の講義でこれから明らかになります。

4. 現代物理2:原子・素粒子の理論(量子論)

光はドップラー効果を起こす
また, 屈折・回折・干渉 の実験から,
光は**波である**ことは確実である.

しかし
光は**粒子である**, と考える必要が生じた.

2つは矛盾する. どう考えたらよいか.

レポート課題 「量子論の解釈論争」(12月27日締切)

- 光を波と考えるか粒子と考えるかの論争点は何か.
- 解決策は何か.

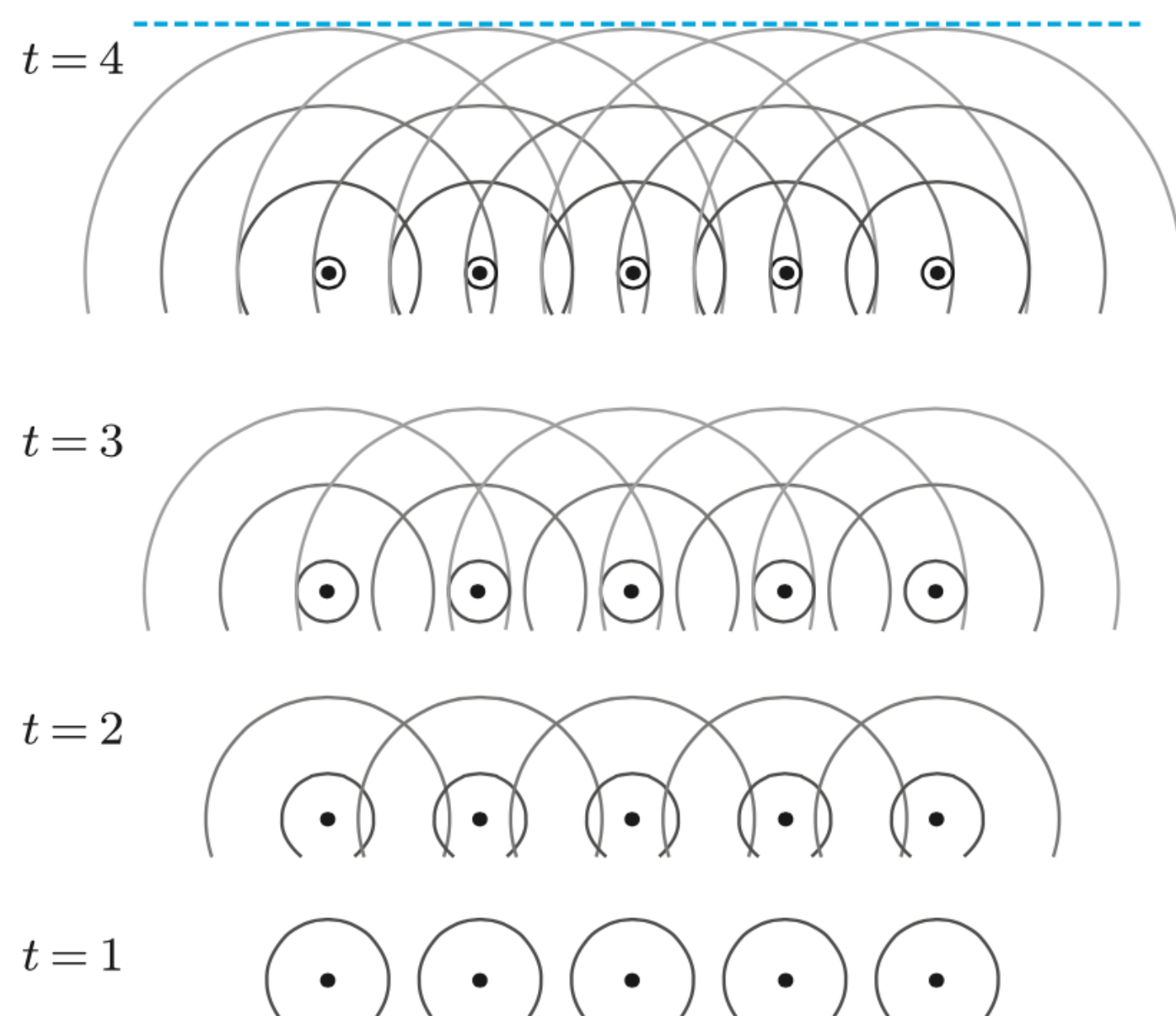
キーワード

確率解釈, 不確定性原理, シュレーディンガーの猫…

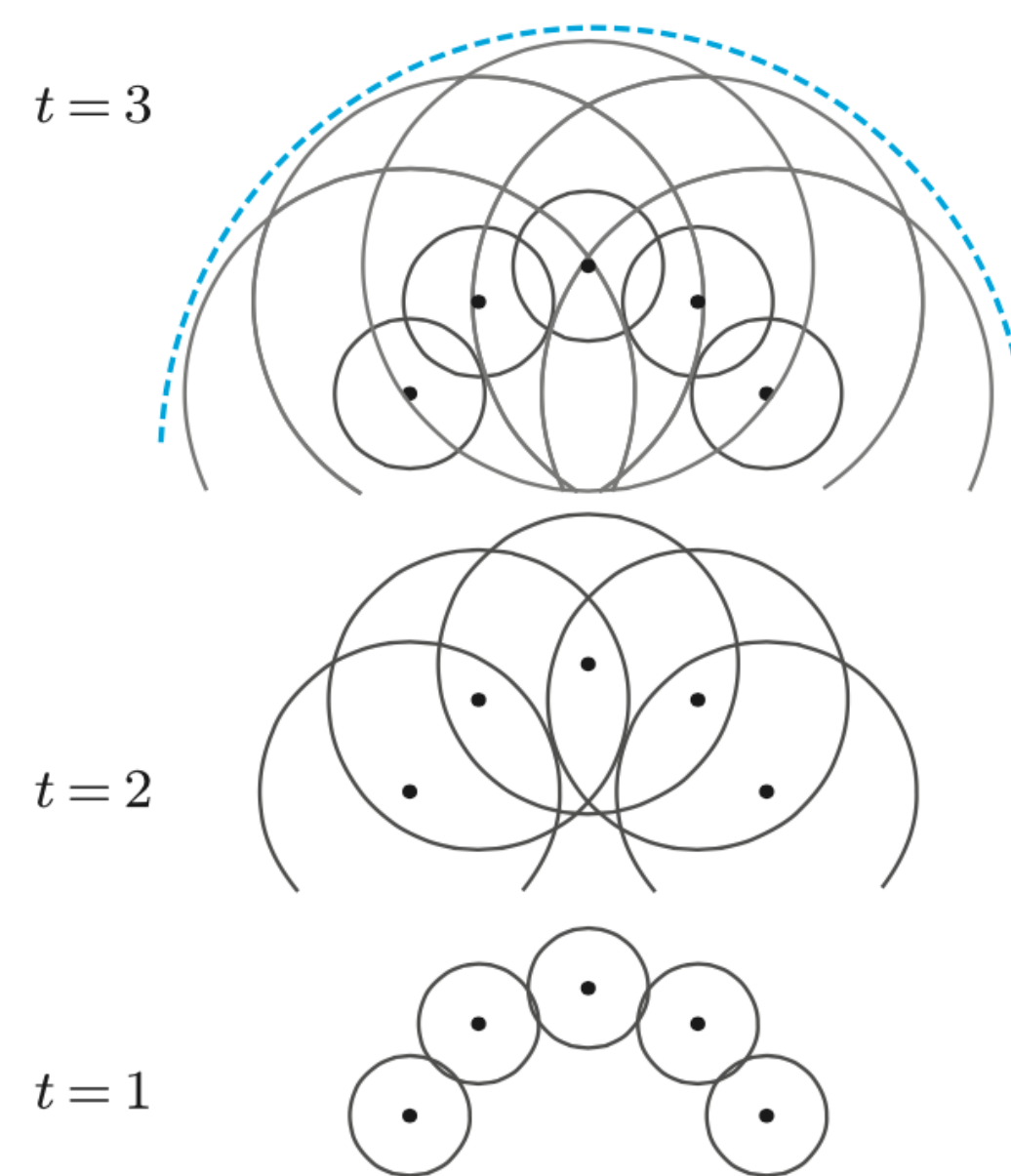
ホイヘンスの原理

法則 ホイヘンスの原理

波面は無数の波源の集まりとみなすことができ、波の各点を波源として球面状に広がっていく波（素元波）の重ね合わせとして、次の瞬間の波面が形成される。



(a) 重ね合った波面は平面状になる



(b) 重ね合った波面は球面状になる

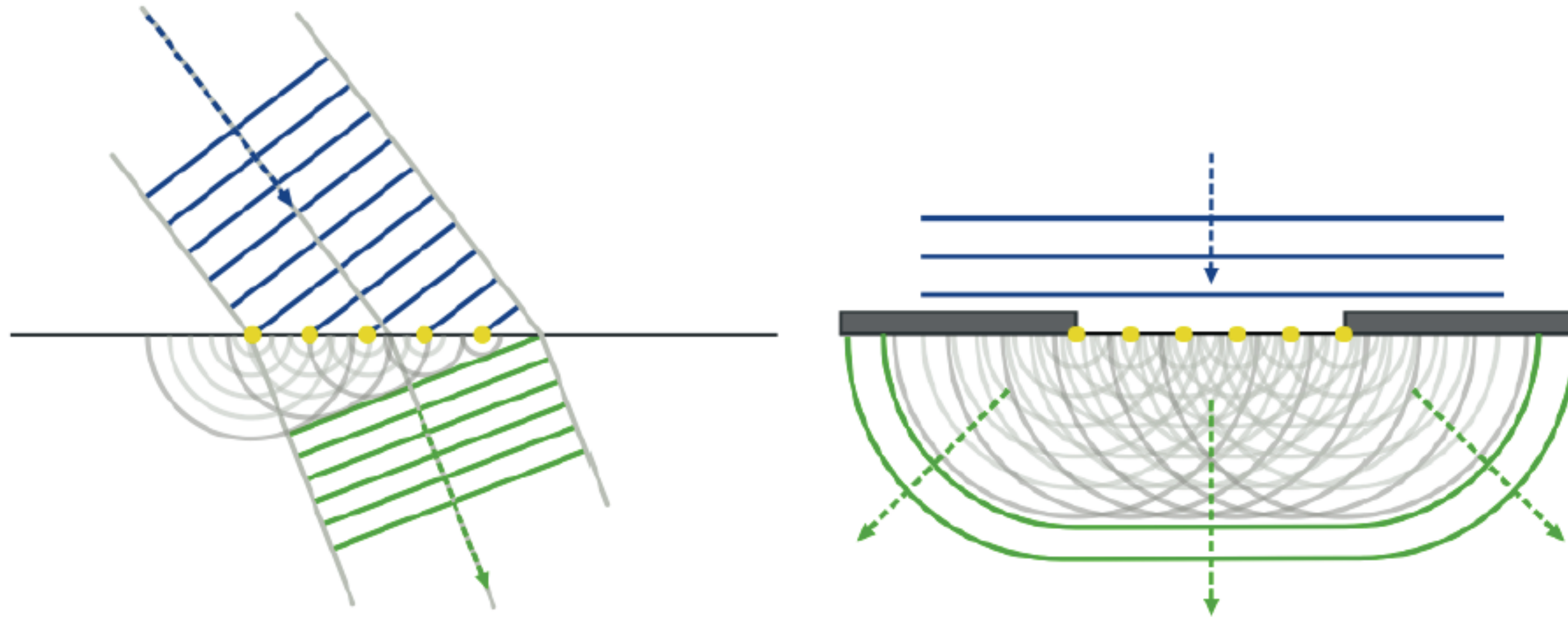
Christiaan Huygens
(1629–95)



屈折 と 回折

波の特徴：屈折と回折

- 波は媒質が異なるところへ進むとき、**屈折**する。(ホイヘンスの原理)
- 波は障害物の後ろにも**回折**して進む。(ホイヘンスの原理)

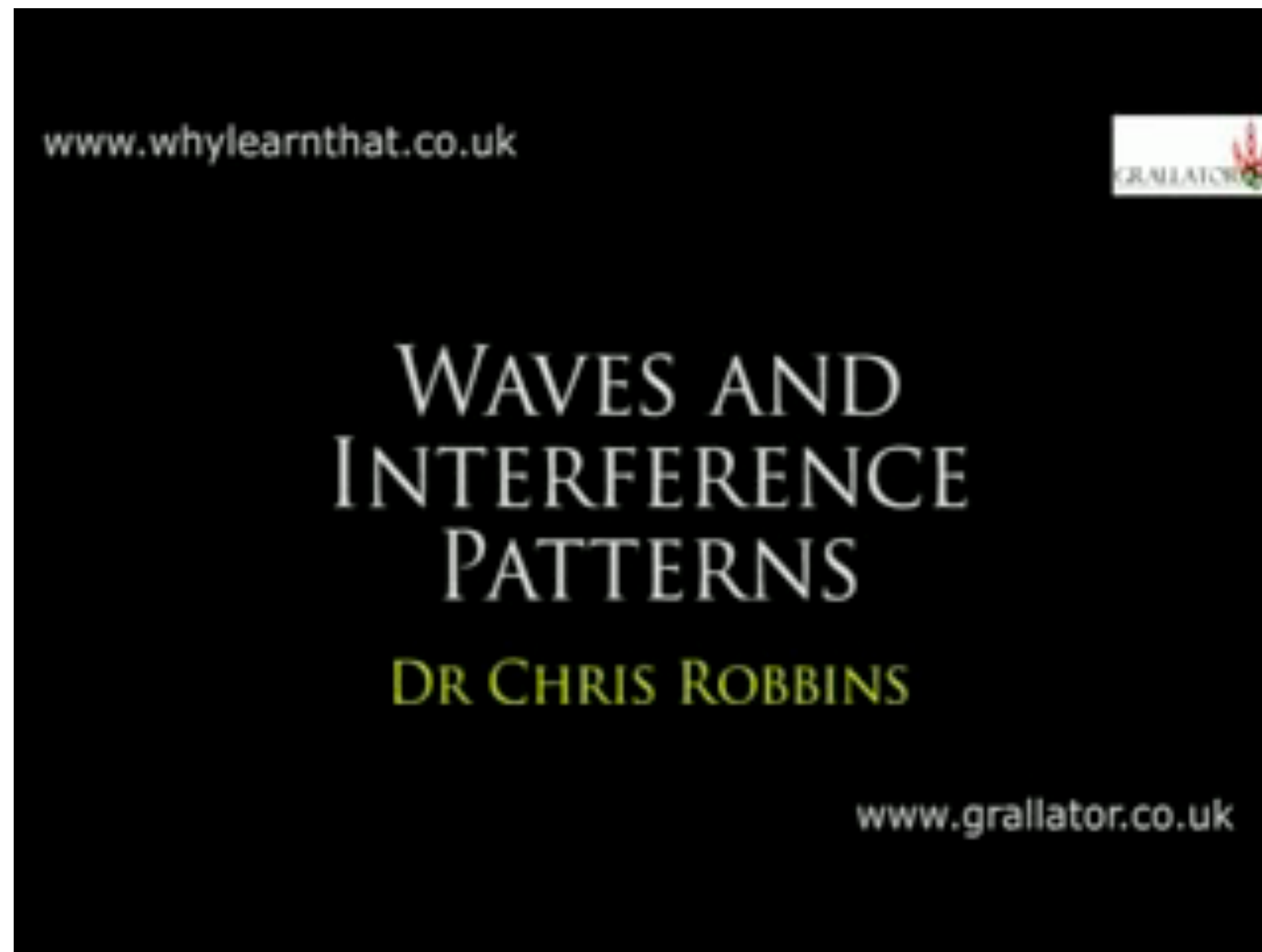


Christiaan Huygens
(1629–95)

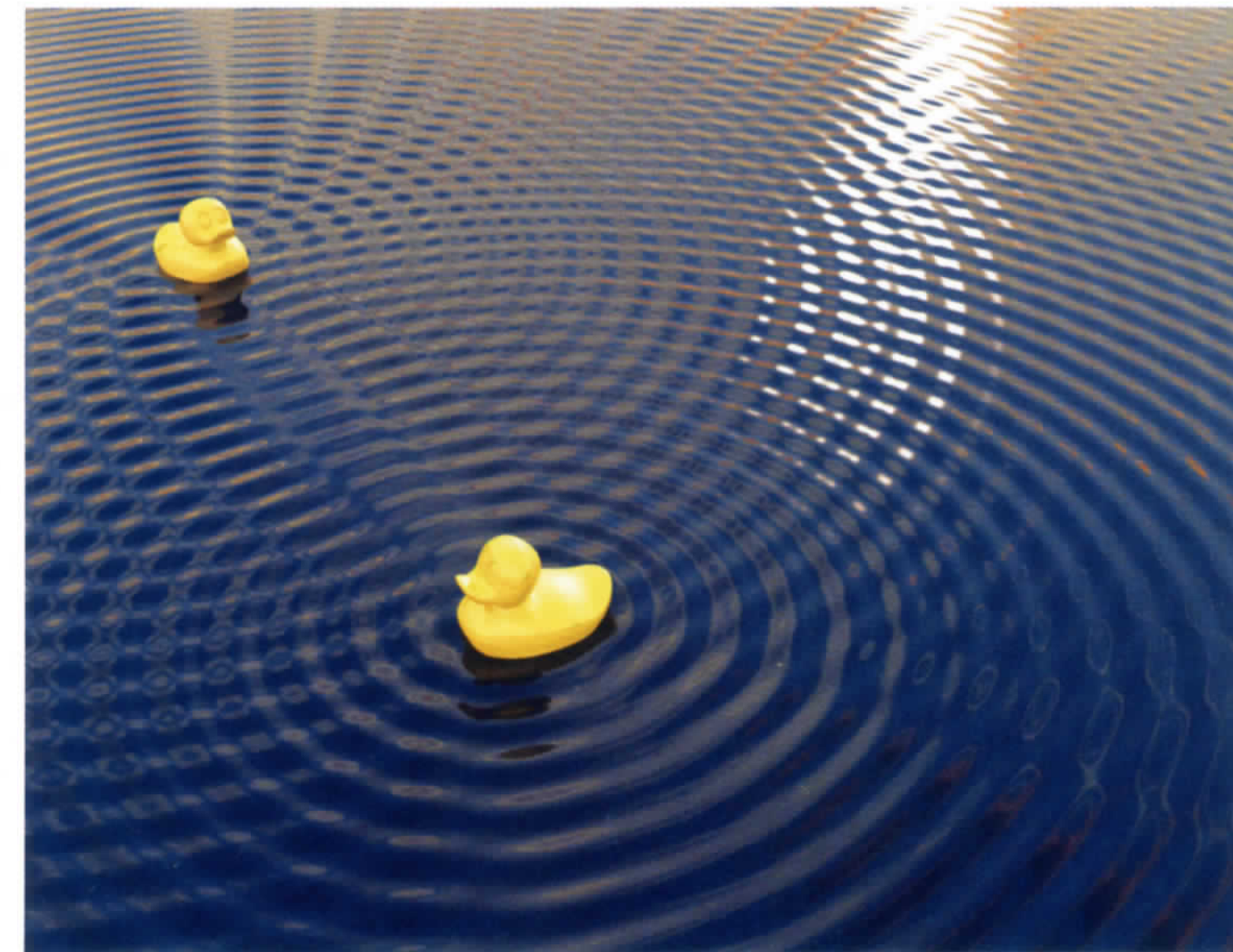


図 5.3 〔左〕屈折. 〔右〕回折. (<http://ja.wikipedia.org/wiki/ホイヘンスの原理>)

干渉 (interference)



<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.

法則 波の特徴：干渉

合成された波が，互いに強めあったり弱めあったりする現象を，干渉という。

前回のミニッツペーパーから

【10-2】 光が波である証拠をあげよ。

屈折、回折、干渉あることが出来るから。
2重スリットによる干渉実験によって「光が粒子だ」と考えたと
実験結果である干渉縞は生じないことがわかった。

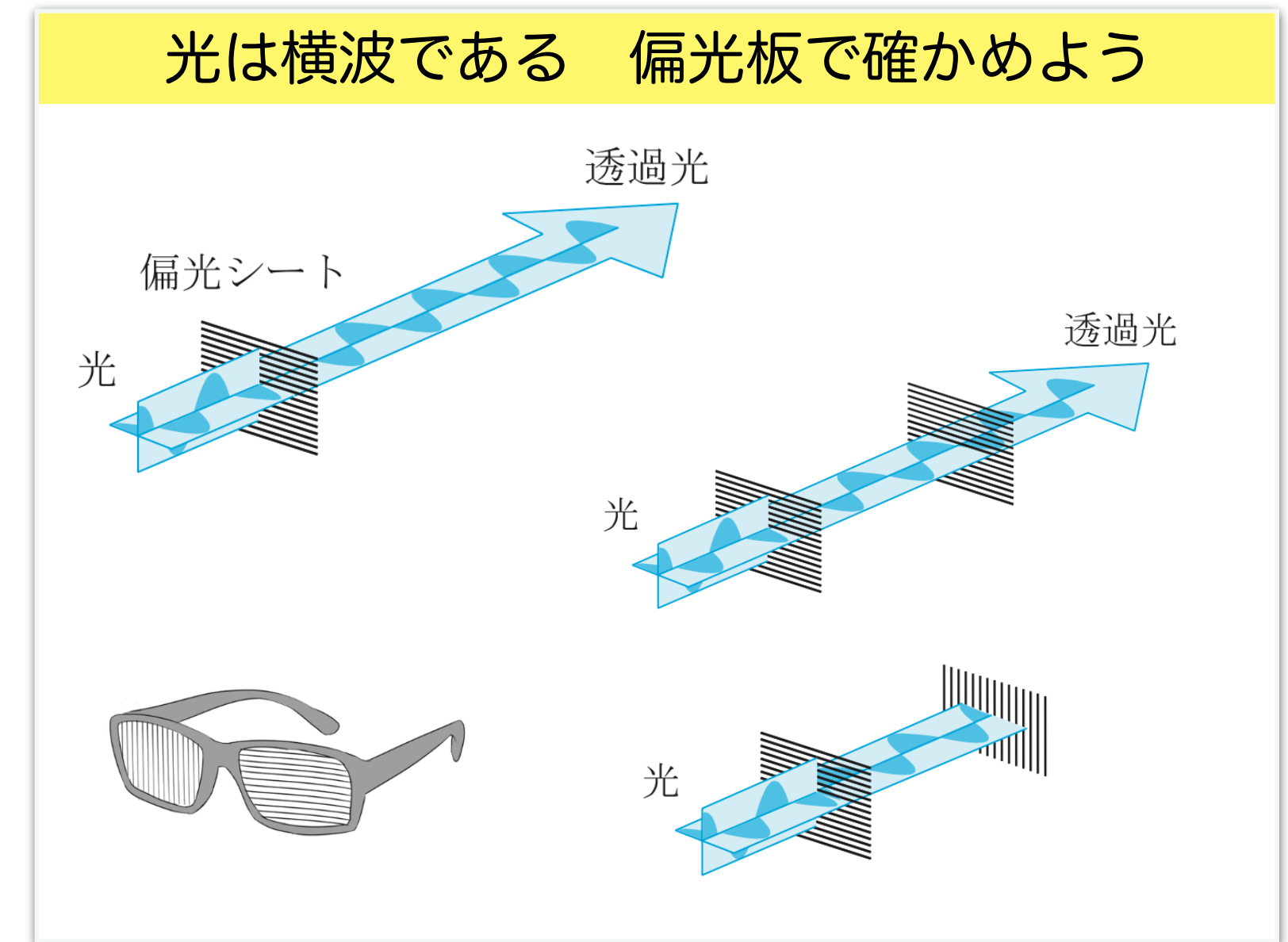
・ヤングの二重スリット実験 → 光は干渉を起こす。
・ 光は媒質がなくても伝わる。
・ 電磁波の伝わる速度と光速度が等しい。

・ 2重スリット実験
・ 光は屈折する、回折する

ドップラー効果、屈折と回折、干渉縞

] 音の波のように屈折・回折する、立体×中"糸の縦じまと横じまを合わせると
光が波の粒子、干渉する など

屈折・回折・干渉



ドップラー効果

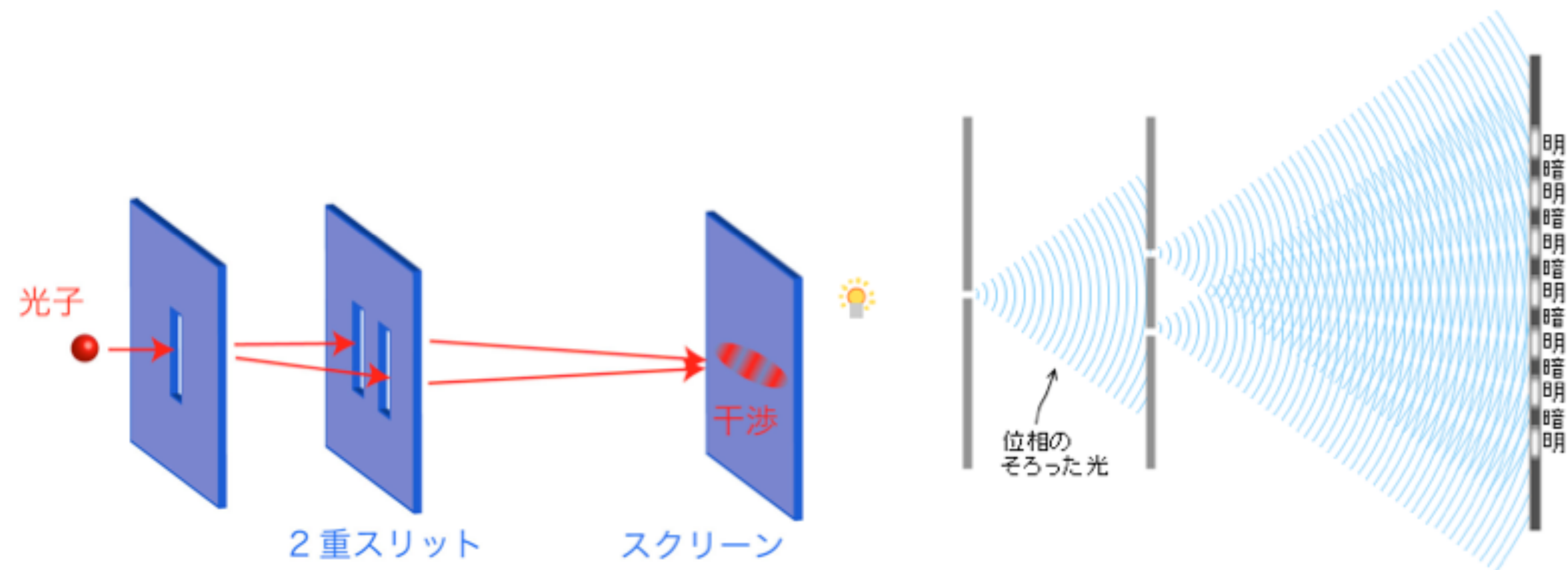
偏光

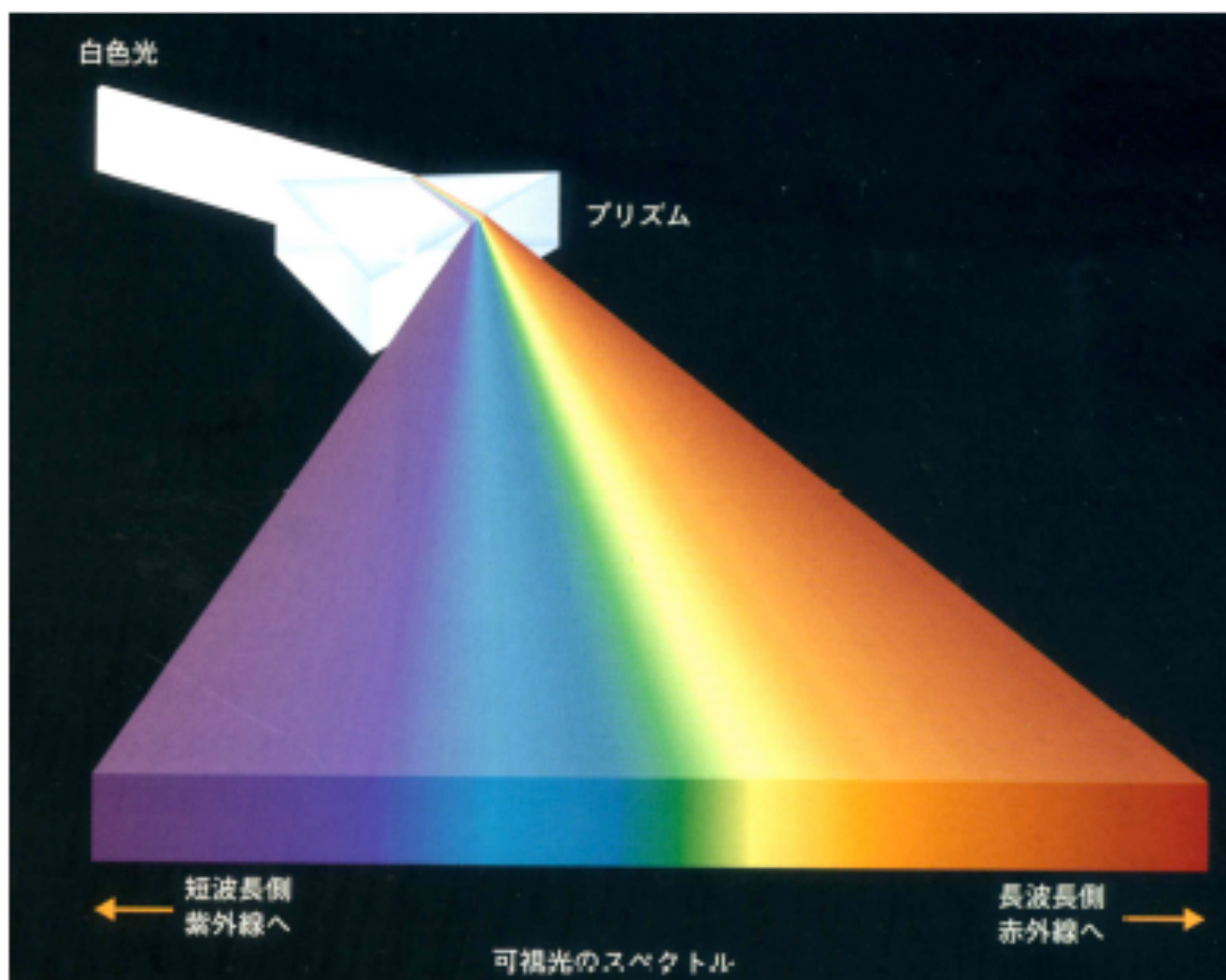
前回のミニッツペーパーから

【10-2】 光が波である証拠をあげよ。

・ 2重スリット実験
・ 光は屈折する、回折する

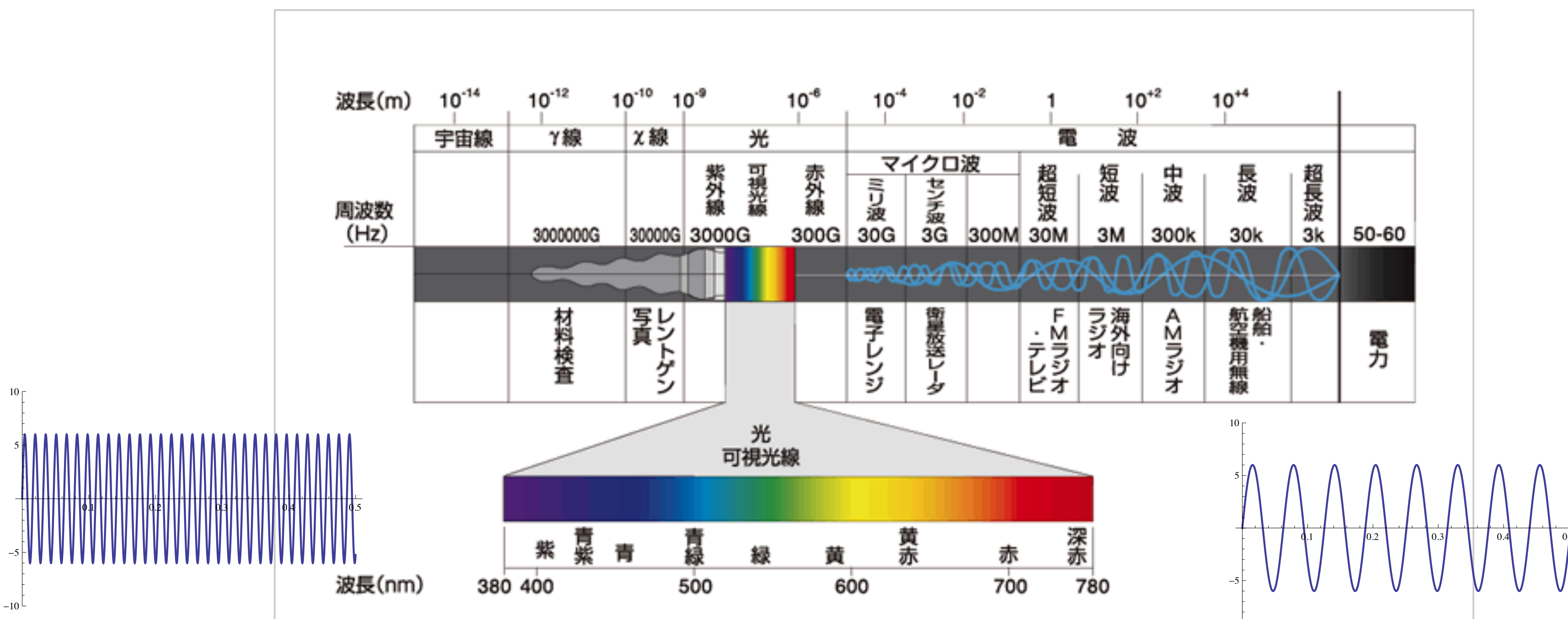
・ ヤングの二重スリット実験 → 光は干渉を起こす。





●電磁波の分類

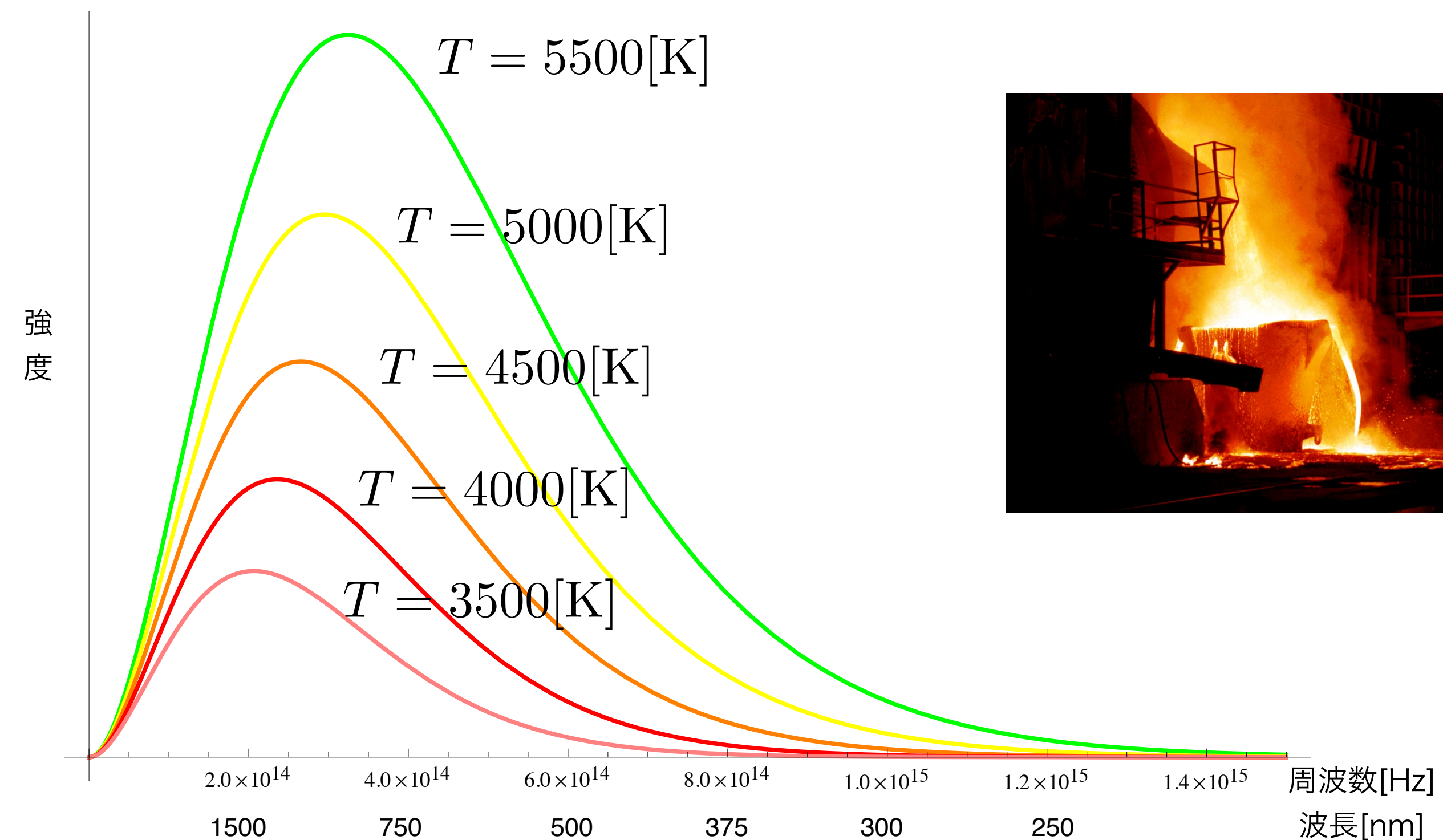
名称	波長(振動数)	おもな利用例	
γ線	$1 \times 10^{-10} \text{m}$ 以下	食品照射, 医療	
X線	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m}$	X線写真, 医療	
紫外線	$1 \times 10^{-9} \sim 3.8 \times 10^{-7} \text{m}$	殺菌, 化学作用の利用	
可視光線	$3.8 \times 10^{-7} \sim 7.7 \times 10^{-7} \text{m}$	光学器械	
赤外線	$7.7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m}$	赤外線写真, 暖房	
電波	マイクロ波	$10^{-4} \sim 1 \text{m}$ ($3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12} \text{Hz}$)	携帯電話, 電子レンジ
	超短波	$1 \sim 10 \text{m}$ ($3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8 \text{Hz}$)	FMラジオ放送, テレビ放送
	短波	$10 \sim 10^2 \text{m}$ ($3 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7 \text{Hz}$)	短波ラジオ放送
	中波	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$ ($3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6 \text{Hz}$)	AMラジオ放送
	長波	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$ ($3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 \text{Hz}$)	飛行機の通信, 電波時計
	超長波	$10^4 \sim 10^5 \text{m}$ ($3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{Hz}$)	



4.1.1 溶鉱炉の温度の問題

「色と温度が関係ありそうだ」
温度が上がると赤，さらに上がると白

光のエネルギー
の大きさ



赤い色←



→青い色

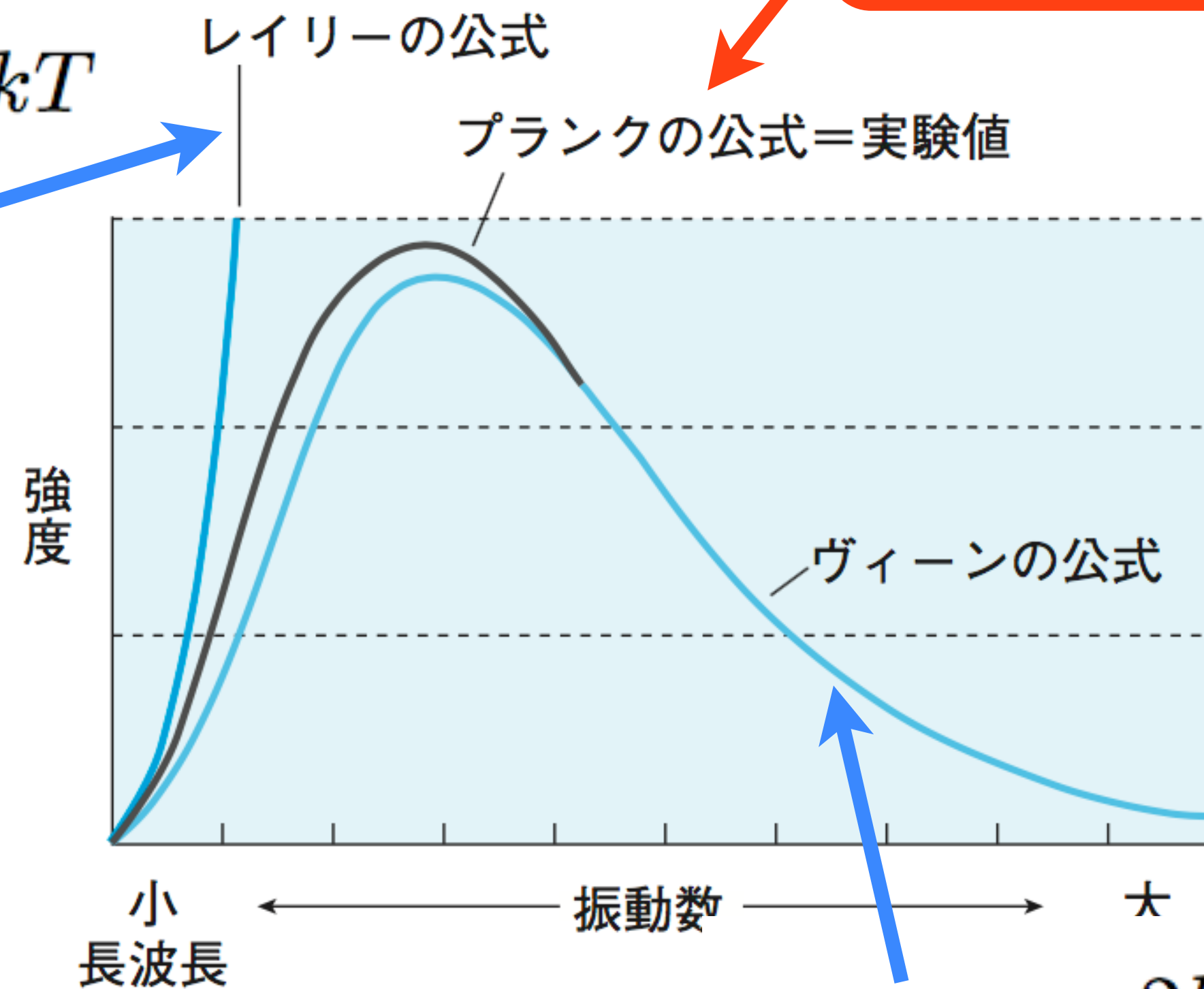
4.1.1 溶鉱炉の温度の問題

プランクの法則

「2つの式を合わせるとピッタリ」

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

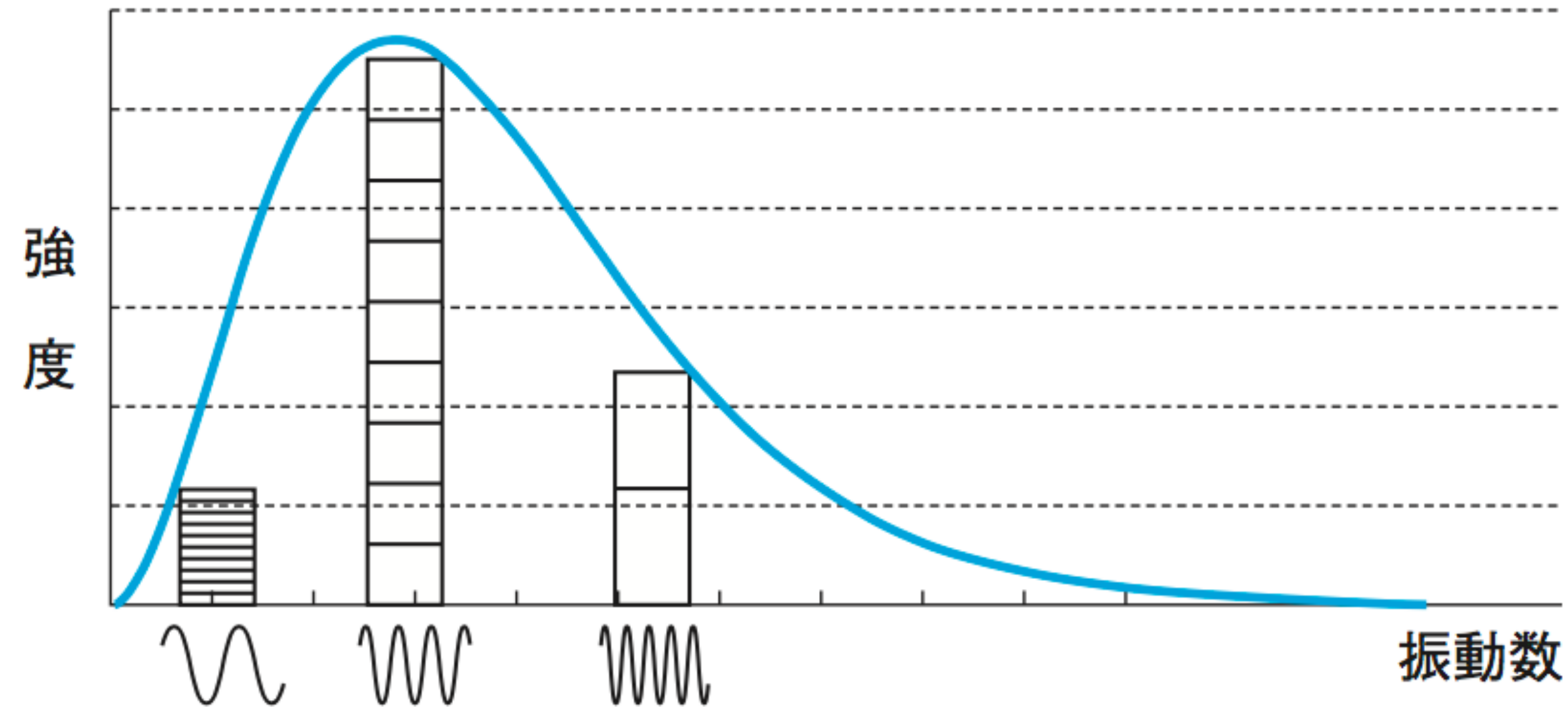
$$I(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT$$



何か本質が
隠れていそうだ。

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

4.1.2 プランクの量子仮説



プランクの量子仮説 (1900年)

光のもつエネルギーには最小単位があつてとびとびの値をとる。その最小単位は、振動数 ν に比例して変わる。

式で表すと、光のエネルギー E が、比例定数を h として、

$$E = h\nu \quad (4.6)$$

4.1.3 アインシュタインの光子仮説

光電効果

= 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。

なぜ？
 光が波ならこうはならない。

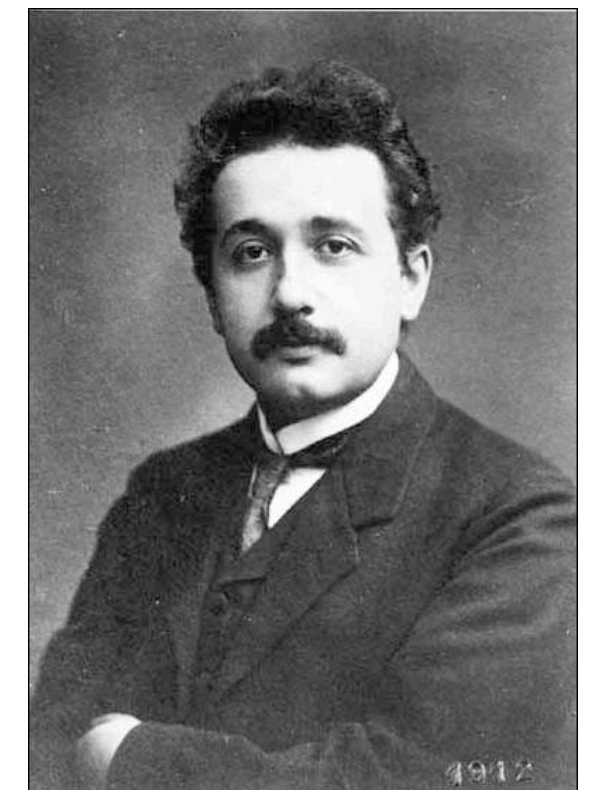
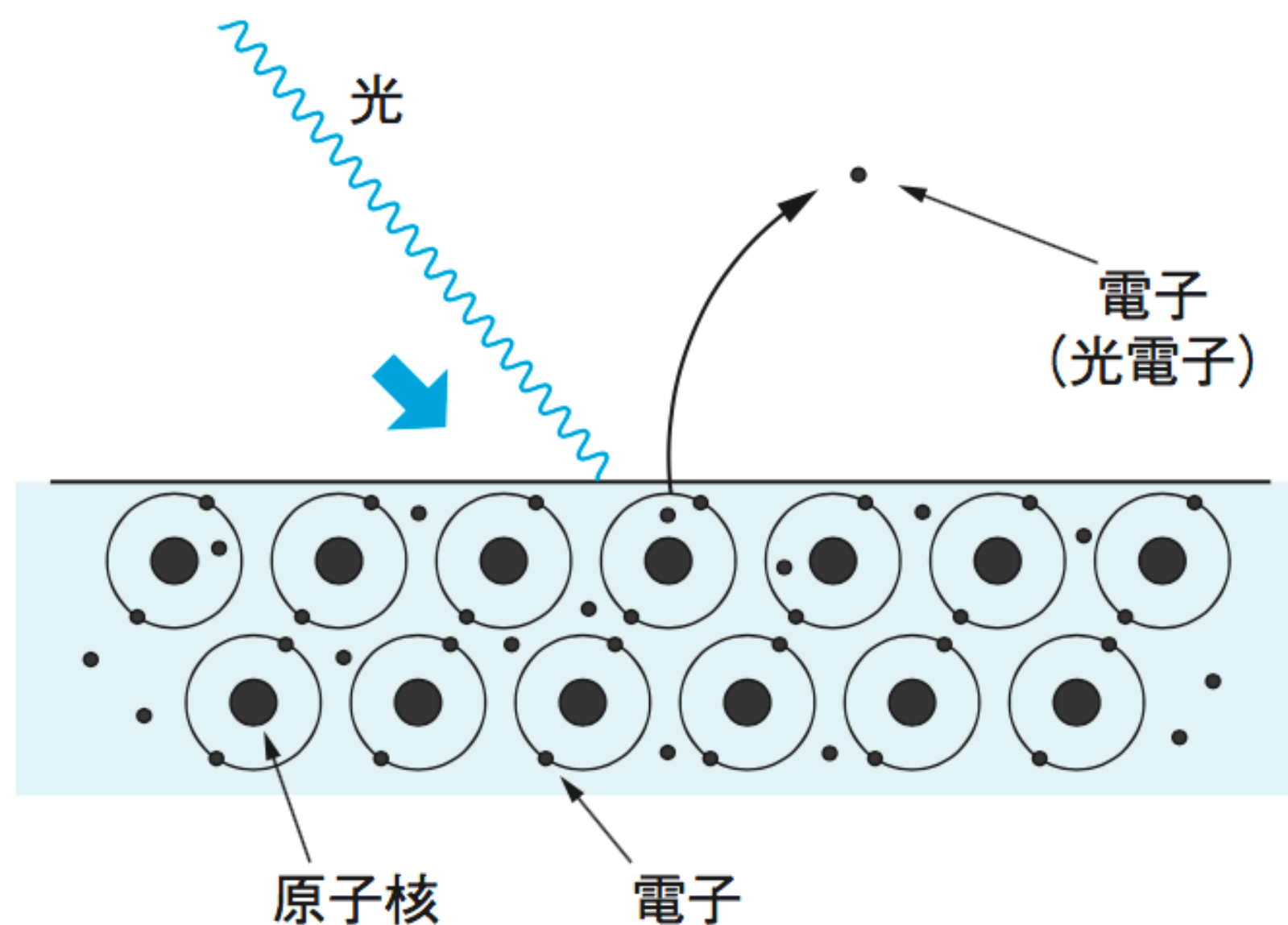
「光が波だと考えると不思議。

粒子だと考えよう。」 1905年

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])

そう考えると、ある程度エネルギーの大きな光を
 照射すれば電子が飛び出すことになる。



Albert Einstein
 (1879-1955)

光粒子仮説（光を粒子と考える理由）

● 溶鉱炉の温度の問題

光のエネルギー分布は、光のもつエネルギーには最小単位があると考えると理解できる（プランク、光量子仮説）

● 光電効果の理論

金属に光を当てると電子が飛び出す。

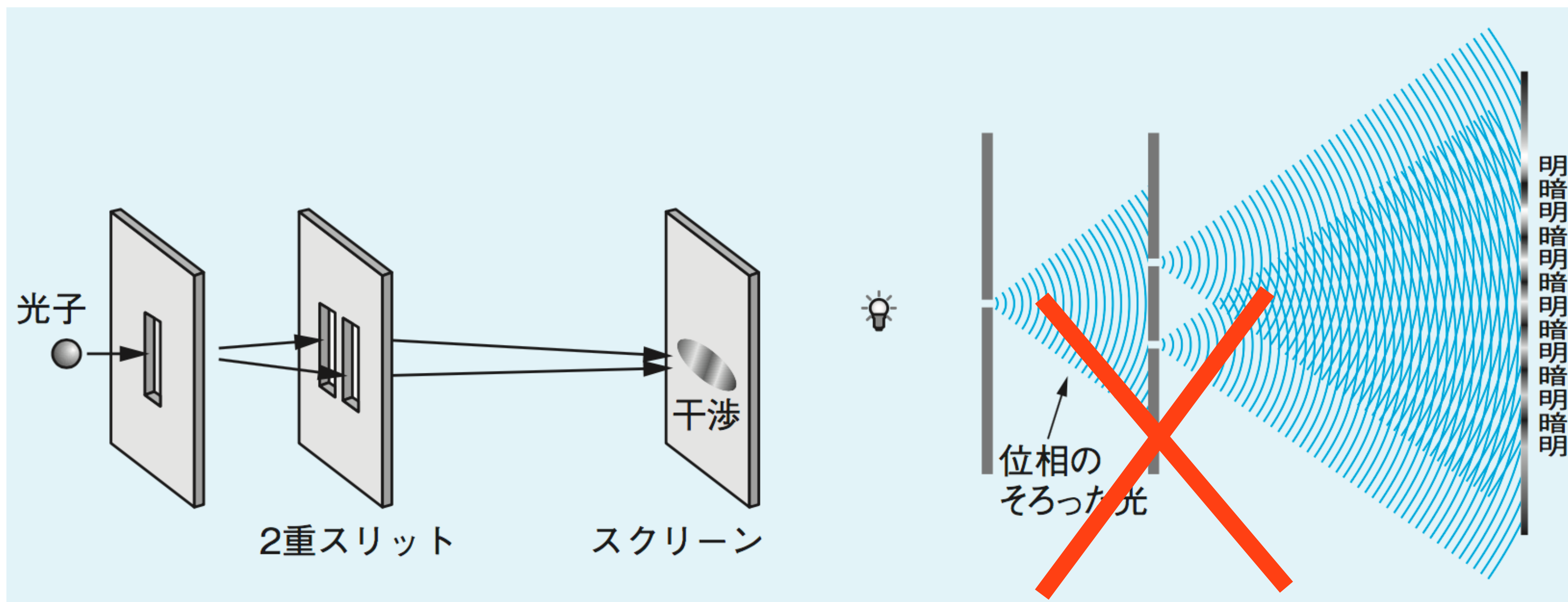
どんなに弱い光でも、ある周波数以上の光ならOK.

→ 光を粒子を考える（アインシュタイン、光子仮説）

→ 光は質量ゼロの粒子

光のエネルギーEは、 $E=h\nu$

光は波である 2重スリットによる干渉実験



光が粒子だと考えるならば、
このような干渉縞は生じない。

Light source

Path difference = $\frac{1}{2}\lambda$

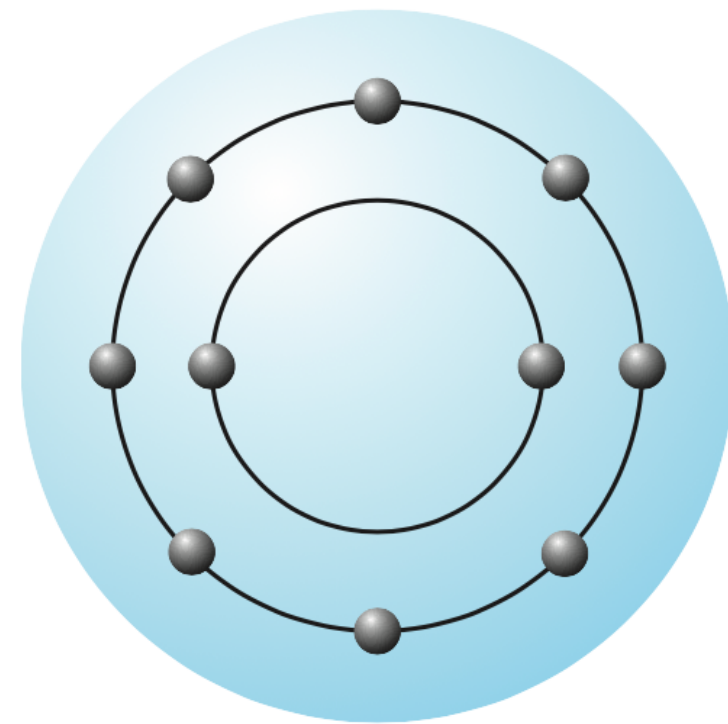
Observation screen

4.2.1 原子模型

原子の構造はどうなっているのか？ プラスとマイナスの電気が存在していることは既知。

トムソン模型

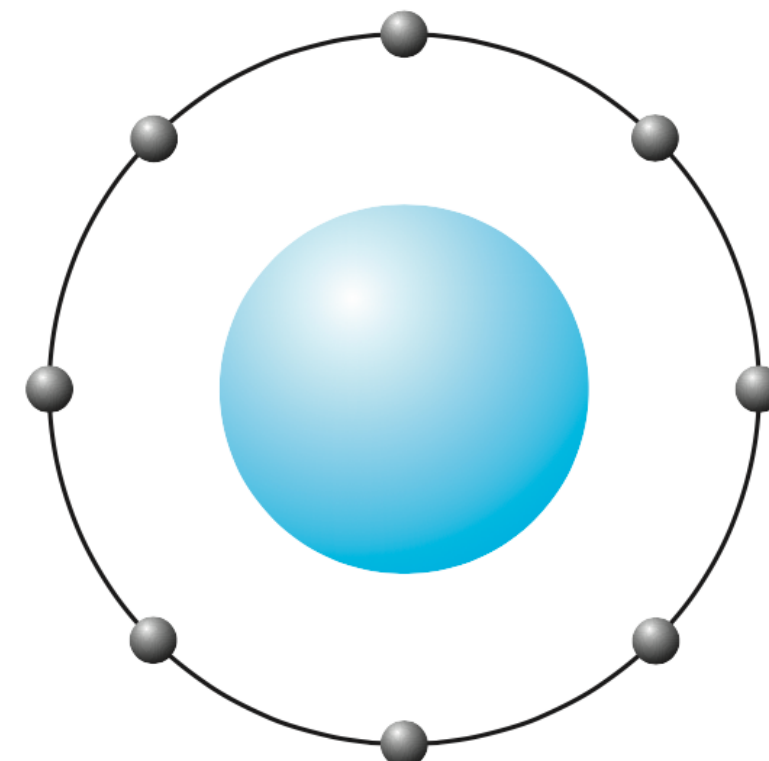
1903



トムソンの
原子模型

長岡模型

1903



長岡の
原子模型



長岡半太郎

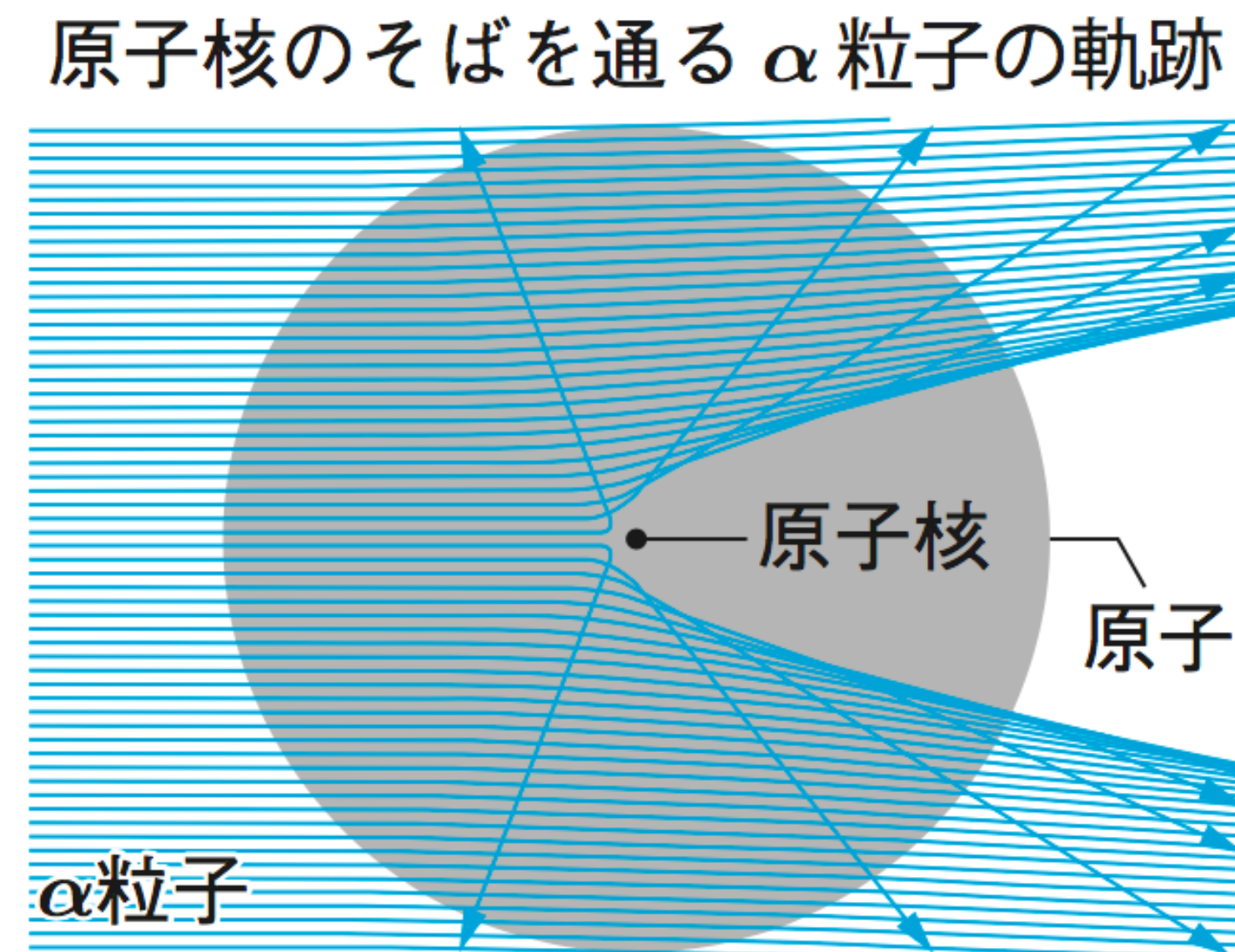
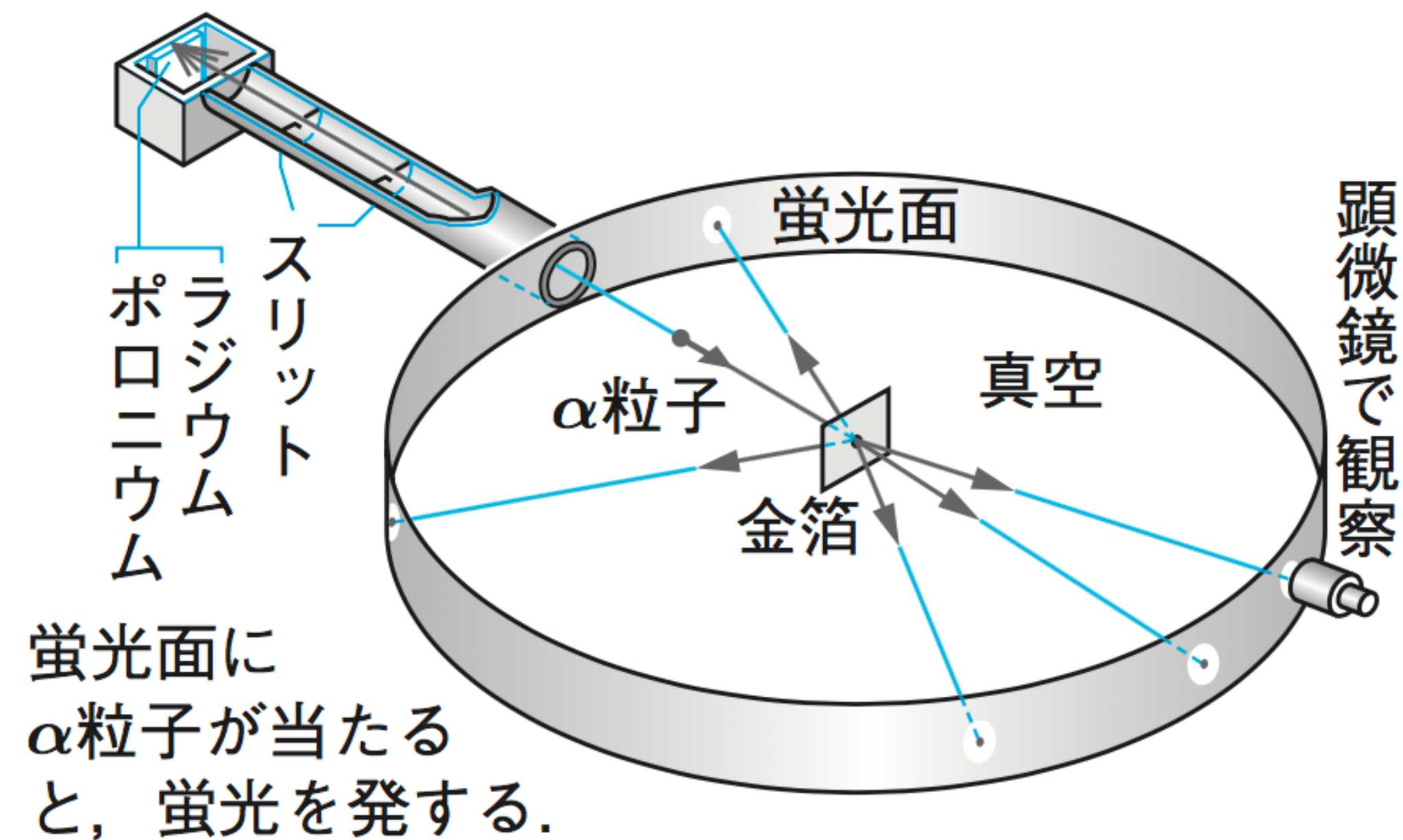
1865-1950

問題点あり

「加速度をもって飛び回る電子は、電磁波を放射してエネルギーを失っていくはずなのに、何故回り続けていられるのか」

ガイガーとマースデンの実験(ラザフォードの実験)1909

金箔に α 粒子 (He原子核) を照射



ときどき大きな反射角で散乱する

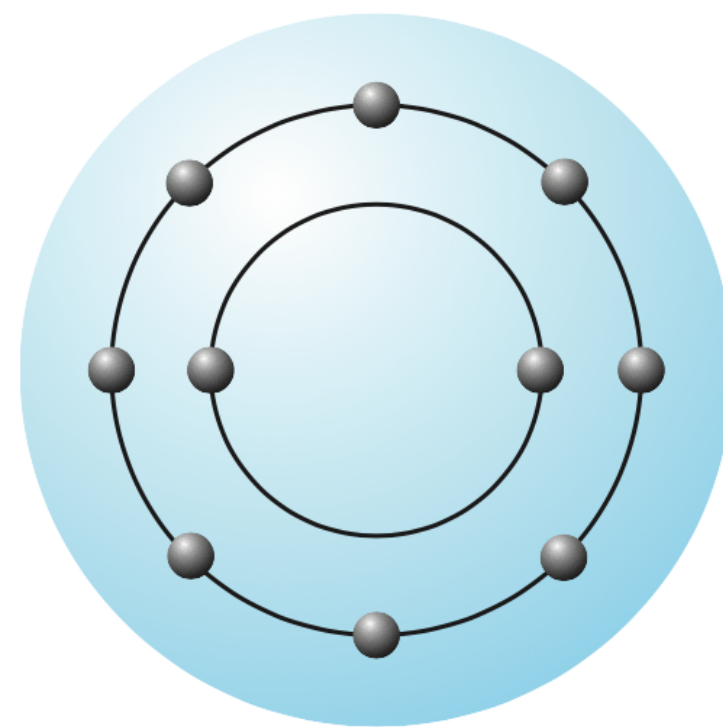
→→ 中心に「核」があるにちがいない。

4.2.1 原子模型

原子の構造はどうなっているのか？ プラスとマイナスの電気が存在していることは既知.

トムソン模型

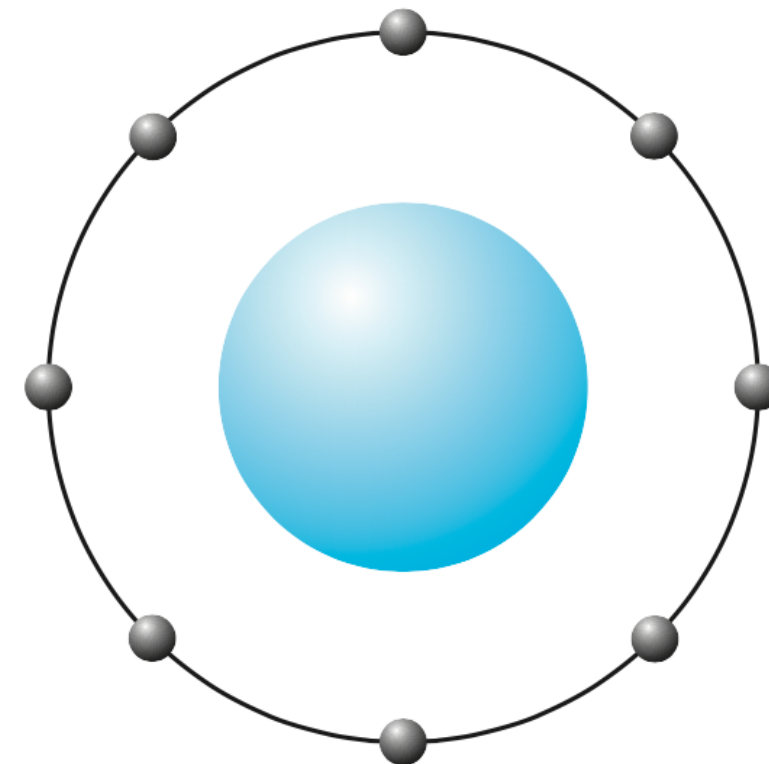
1903



トムソンの
原子模型

長岡模型

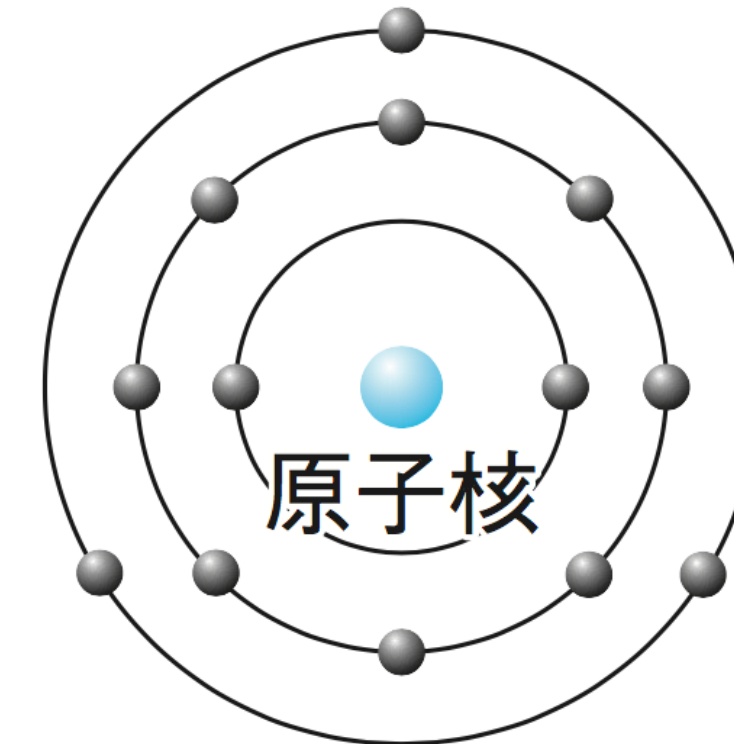
1903



長岡の
原子模型

ラザフォード模型

1909



ラザフォードの
原子模型

やっぱり
問題は残る

WHY?

問題点あり

「加速度をもって飛び回る電子は、電磁波を放射してエネルギーを失っていくはずなのに、何故回り続けていられるのか」

原子模型

● ラザフォードらの実験

α 粒子を当てると、散乱角が大きいときがある。

→ 原子には、核がある。

→ 電子が核のまわりを回り続けるのは何故か？
(すぐに落ち込んでしまうはず)

● 光の輝線スペクトルの発見

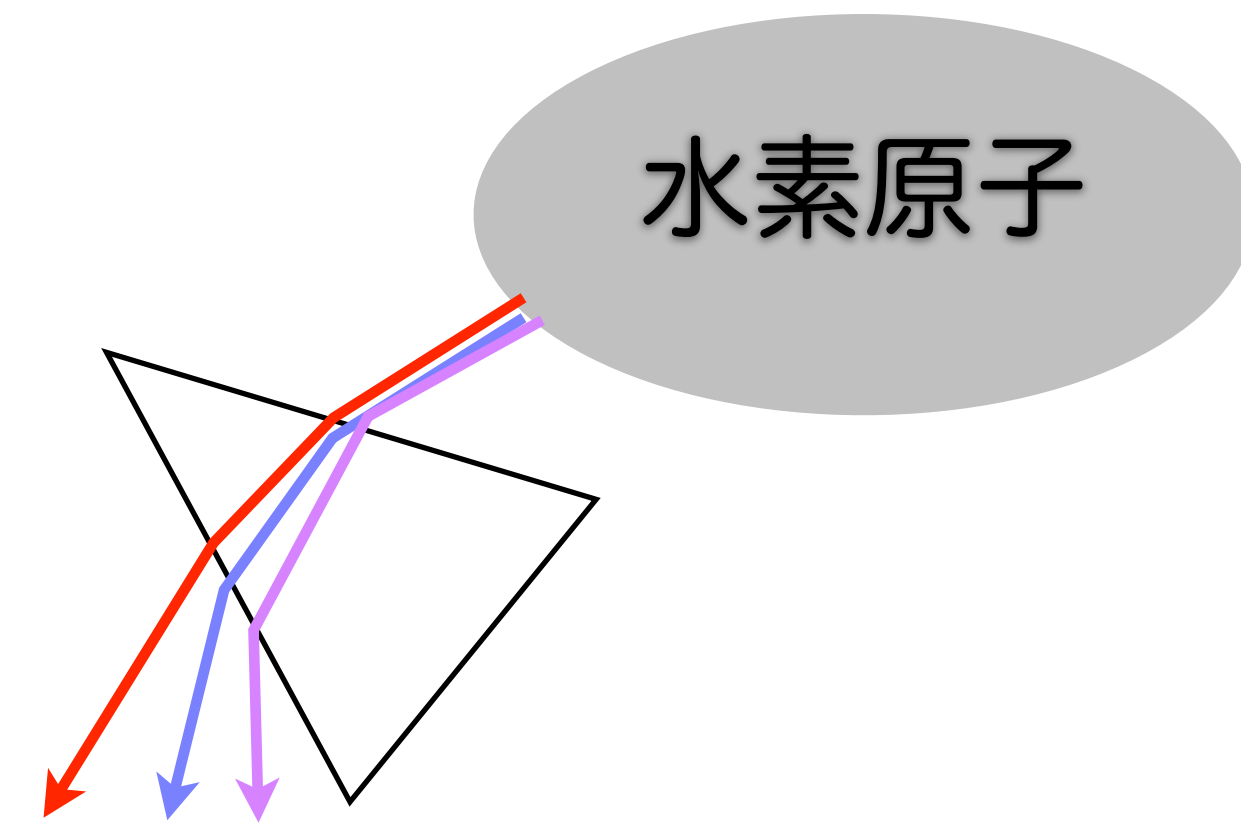
決まった振動数（波長）の光が発せられる。

→ 何故か？

4.2.2 水素原子から出る輝線

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



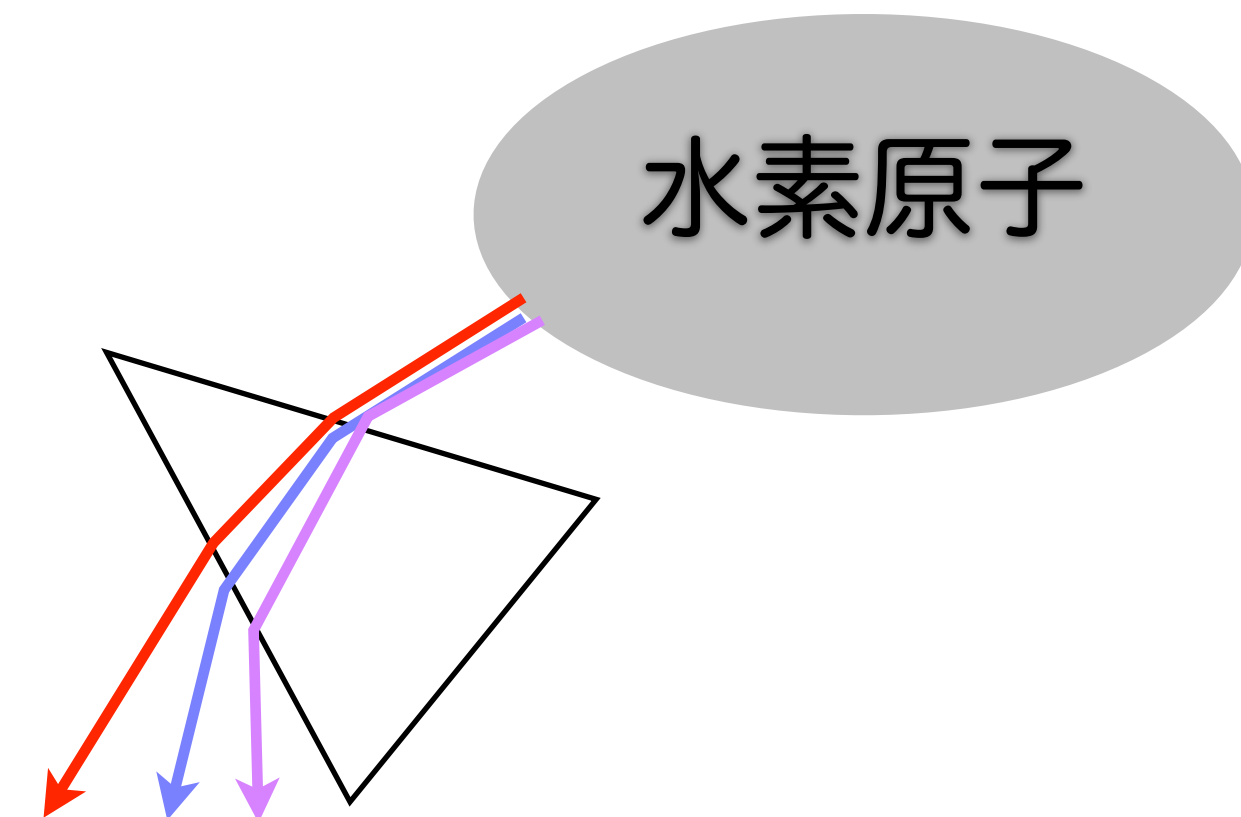
WHY?

4.2.2 水素原子から出る輝線

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列 $n' = 1$	バルマー系列 $n' = 2$	パッシェン系列 $n' = 3$...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
⋮				
$n = \infty$	91.2	365	820	

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



WHY?



4.2.2 水素原子から出る輝線

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列 $n' = 1$	バルマー系列 $n' = 2$	パッシェン系列 $n' = 3$...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
\vdots				
$n = \infty$	91.2	365	820	

Johann J Balmer
(1825-1898)Johannes Rydberg
(1854-1919)

実験結果を式にすると、
こうなった！

WHY?

$$\lambda = 3.65 \times 10^{-7} \times \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (n = 3, 4, 5, 6, \dots)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \left(\begin{array}{l} n' = 1, 2, 3, \dots \\ n = n' + 1, n' + 2, n' + 3, \dots \end{array} \right)$$

4.2.3 ボーアの原子モデル

ボーアの仮定 1 : 量子条件 (1913 年)

原子には定常状態があり, 定常状態では電磁波を出さず安定であって, これまでの力学が成り立つ. 定常状態は, 電子の角運動量 L が, n を整数として,

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.9)$$

の条件をみたすときである.



Niels Bohr
(1885-1962)

ボーアの仮定 2 : 振動数条件 (1913 年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり, そのときには, 軌道間のエネルギー差 (各軌道のエネルギー準位の差) に相当する光子を吸収あるいは放出する. n 番目と n' 番目の軌道を遷移するとき, エネルギー差は次式で与えられる.

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (4.11)$$

4.2.3 ボーアの原子モデル

ボーアの仮定 1 : 量子条件 (1913年)

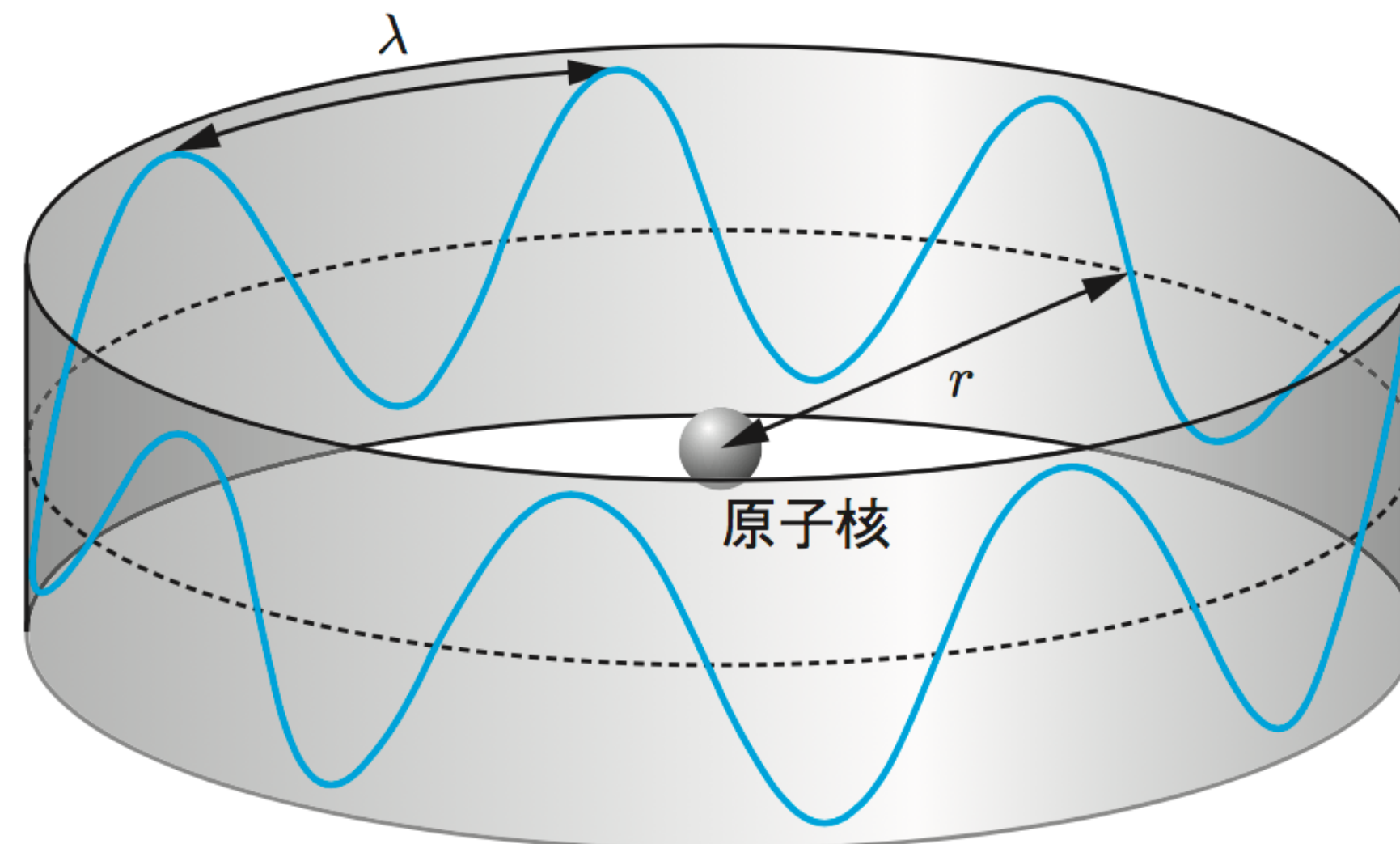
原子には定常状態があり, 定常状態では電磁波を出さず安定であつて, これまでの力学が成り立つ. 定常状態は, 電子の角運動量 L が, n を整数として,

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.9)$$

の条件をみたすときである.



Niels Bohr
(1885-1962)



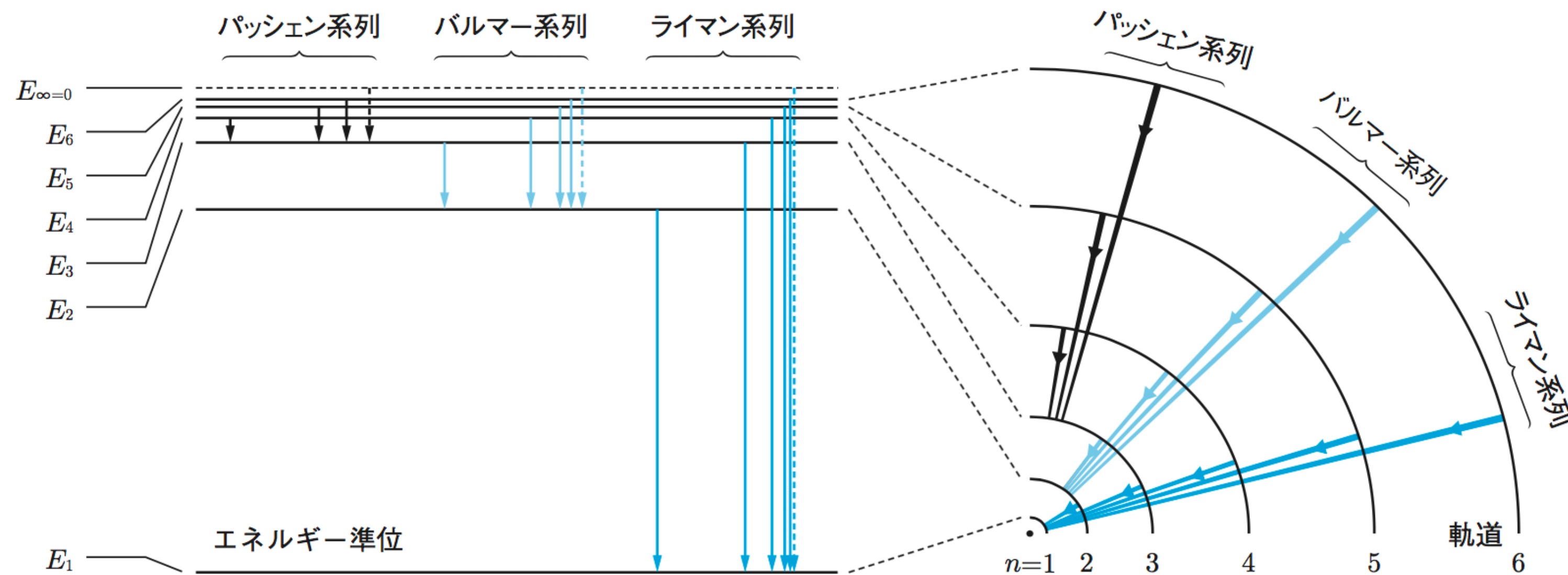
◆ Advanced ボーアの量子条件

ボーアが提案した (4.9) 式は, のちにド・ブロイが提案した「物質波」の考え (1923年) (⇒§4.3.2) でようやく意味付けがされた. ド・ブロイは大胆にも電子の運動は波のように振る舞うと考えて, 電子の「波長」 λ が $\lambda = \frac{h}{mv}$ で与えられるものとした. この考えを使うと, (4.9) 式は

$$2\pi r = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.10)$$

と書くことができる. これは, 電子軌道の1周の長さ $2\pi r$ が, 電子の「波長」 λ の整数倍である, という式である. つまり, 電子に許される軌道半径 r は, 図 4.13 のように, 「ちょうど1周したときに, 波形が元の波形につながる」ときだ, ということになる.

4.2.3 ボーアの原子モデル



Niels Bohr
(1885-1962)

ボーアの仮定 2 : 振動数条件 (1913 年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり，そのときには，軌道間のエネルギー差（各軌道のエネルギー準位の差）に相当する光子を吸収あるいは放出する． n 番目と n' 番目の軌道を遷移するとき，エネルギー差は次式で与えられる．

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (4.11)$$

原子模型

● ラザフォードらの実験

α 粒子を当てると、散乱角が大きいときがある。

→ 原子には、核がある。

→ 電子が核のまわりを回り続けるのは何故か？

(すぐに落ち込んでしまうはず)

→ 電子は軌道が決まっている (ボーア)

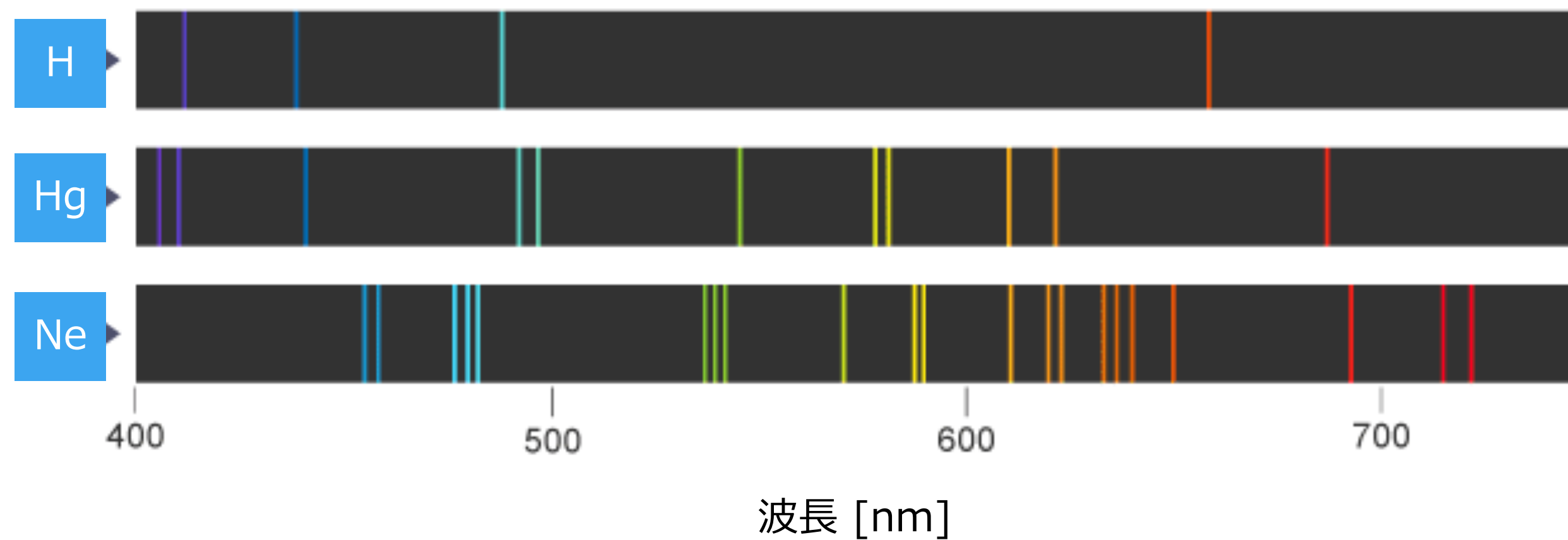
● 光の輝線スペクトルの発見

決まった振動数 (波長) の光が発せられる。

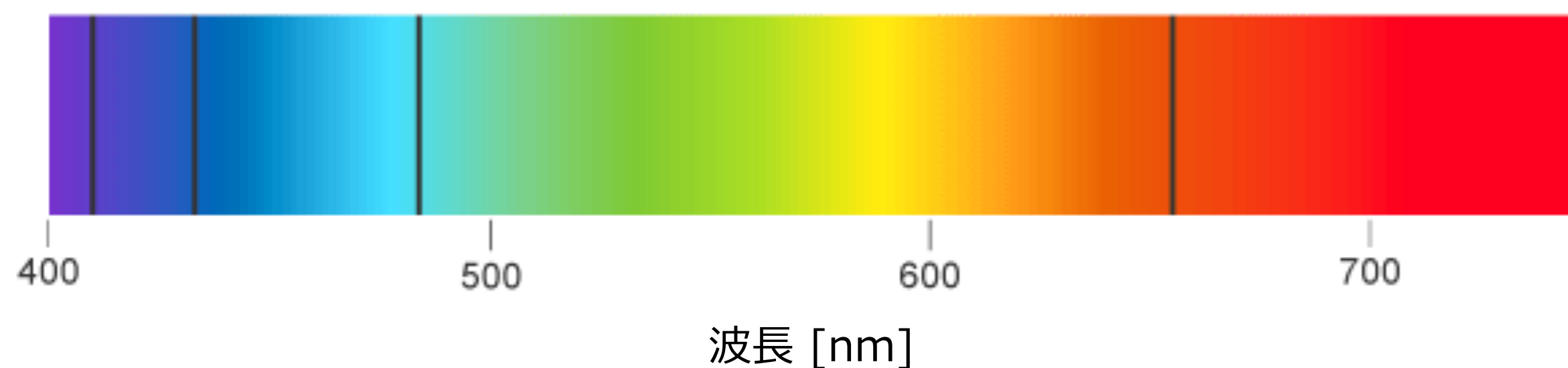
→ 何故か？

→ 電子が軌道間を遷移することで、光を発したり、吸収する。 (ボーア)

(a) 元素が放つ輝線スペクトル

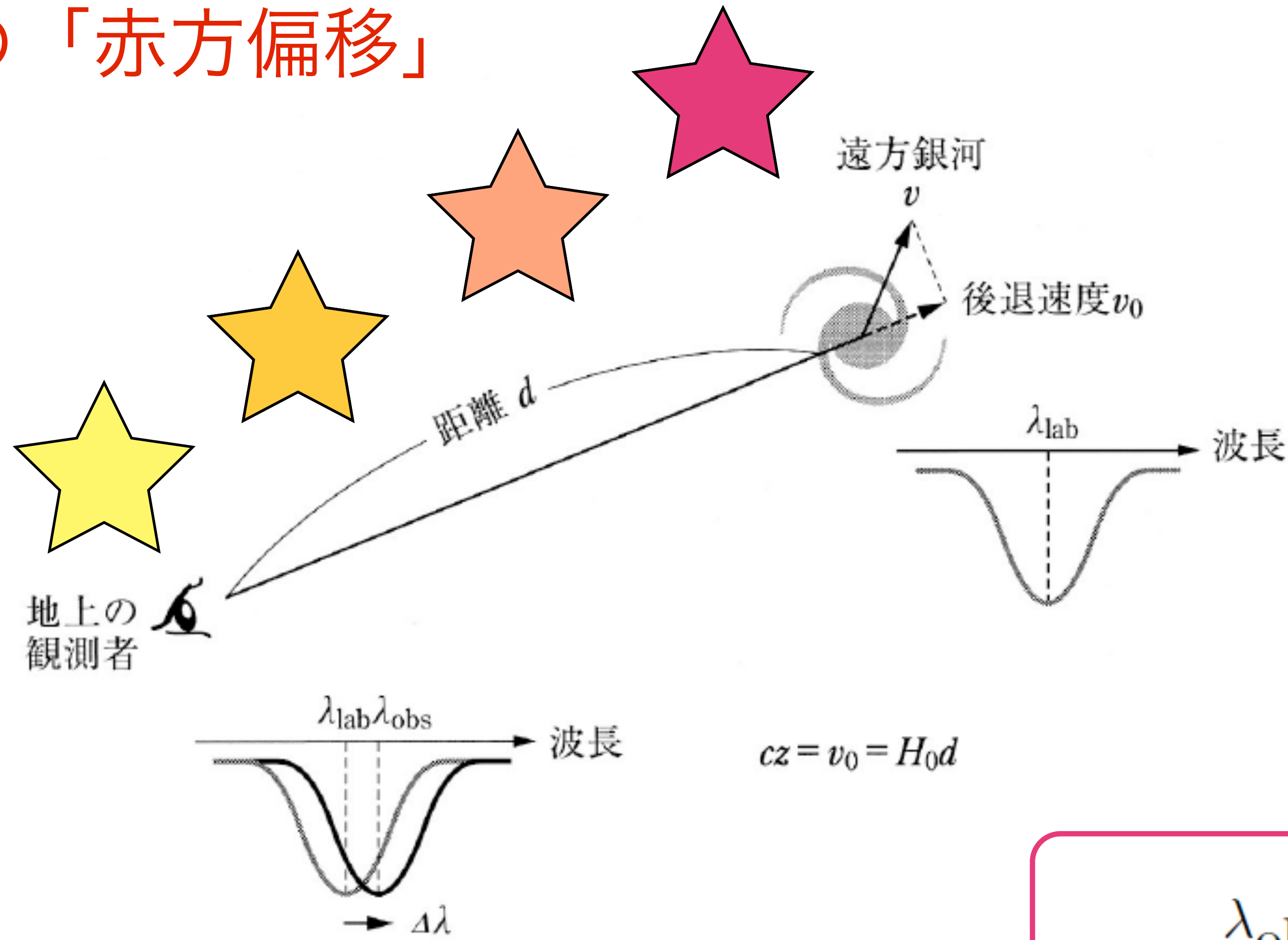


(b) 水素原子による暗線（吸収線）が見られる連続スペクトル



問題 太陽光のスペクトルに暗線(吸収線)がみられる理由は何か.

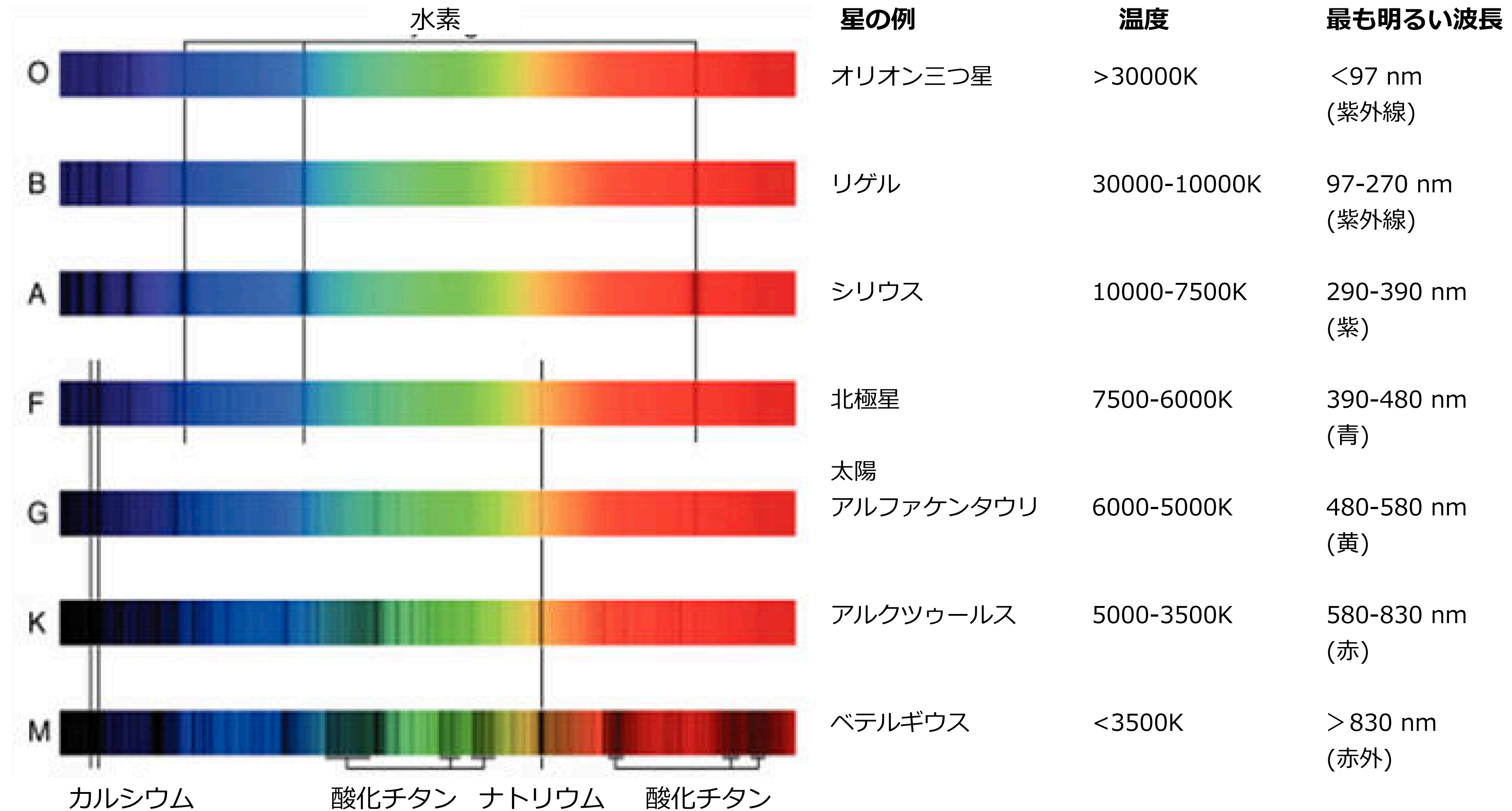
光の「赤方偏移」



赤方偏移パラメータ

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_S}{\lambda_S}$$

星のスペクトル型 OBAFGKM



問題

遠方の星が赤方偏移していることから宇宙膨張が発見されたが、遠方(宇宙初期)には赤い星が多い、と考えなかった理由は何か。

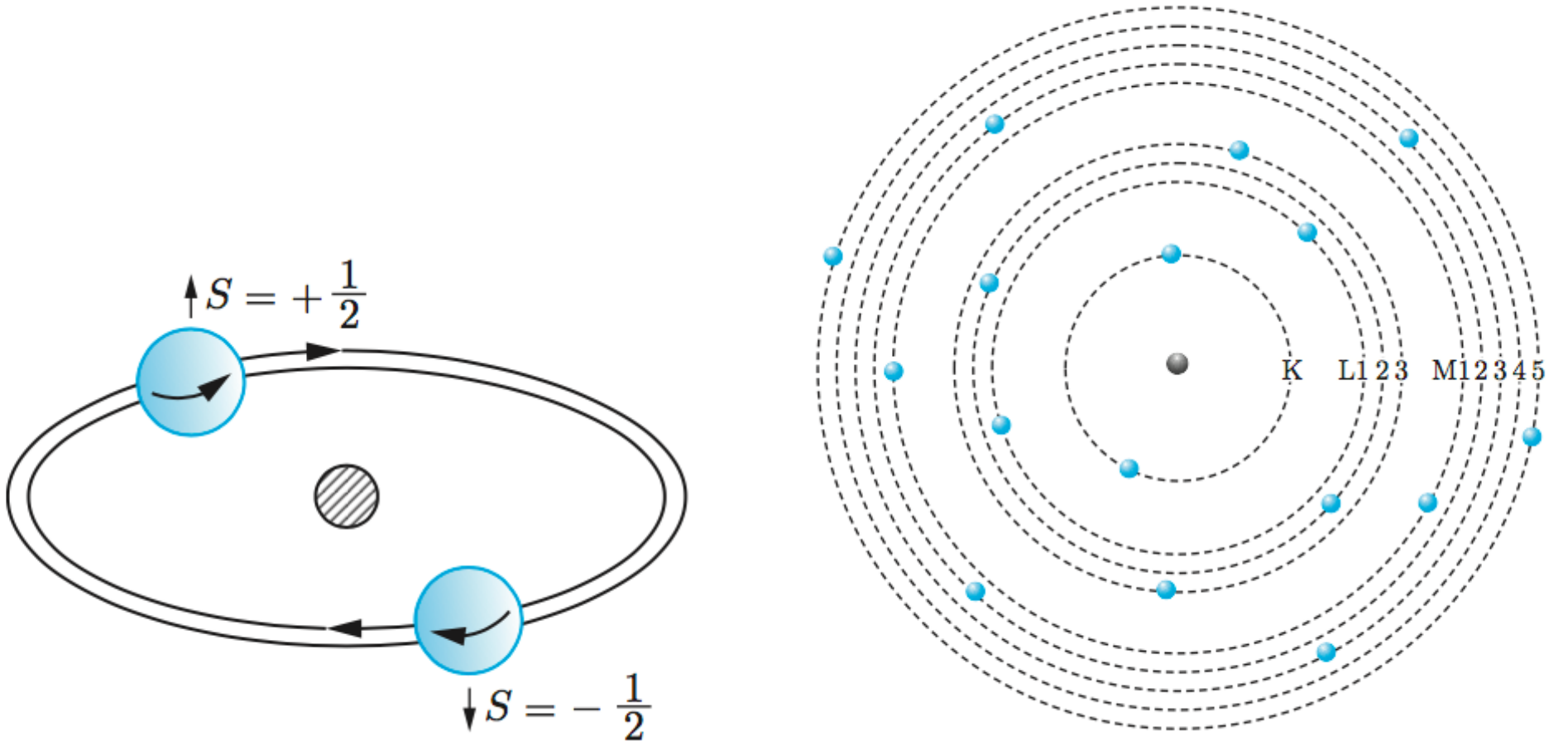
4.3.1 パウリの排他律

なぜ、電子は基底状態にすべて集まらないのか？



Wolfgang Pauli
1900-1958

排他律 (1925年)
原子に許される電子軌道のそれぞれには、最大でも2つの電子しか存在できない。



なぜ、排他律？

「スピンの方向が互いに反対の電子の対だけが、1つの軌道に入る」



P.A.M. Dirac
1902-1984

4.3.2 物質波の提案, 実験による確認

1905 アインシュタイン, 光子仮説
 1923 コンプトンの実験により確認される.
「光は粒子である」

だとすれば, 逆もあるのでは?



L-V. de Broglie
 1892-1987

1924 ド・ブロイ, 物質波仮説
「電子も波である」

1927 デイヴィソンとジャマーの実験で確認.
 ▶ ボーアの原子模型の「量子条件」の説明がついた

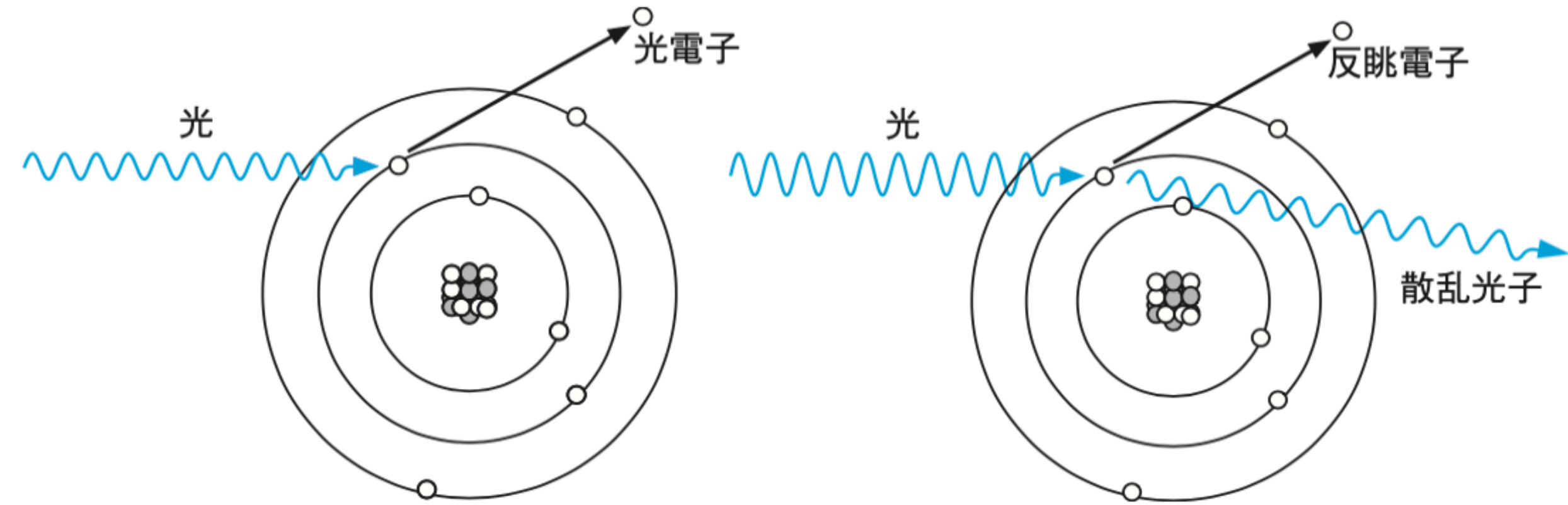


図 4.21 [左] 光電効果. [右] コンプトン効果. どちらも光を当てると電子が飛び出す現象であるが, コンプトン効果は, 光のエネルギーが大きくて, 軌道電子にエネルギーが完全に吸収されないときに見られるようになる.

**粒子である
 波である**

どちらもあり??

量子力学の完成 1925年

何らかの指導原理が必要

(1) ハイゼンベルクの行列力学

観測されているものとそうでないものを区別

原子があたかも無限個の振動子で構成されていて、その1つの振動数が時折放出されて観測されるのだ、と考えた。そのために、位置や運動量が行列で表される、とした。

$$q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \cdots \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \cdots \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \quad p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

行列の積は非可換で、次の条件を仮定。

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} I$$

行列!? 複素数!?



Werner Heisenberg
(1901-76)

量子力学の完成 1925年

何らかの指導原理が必要

(2) シュレーディンガーの波動方程式

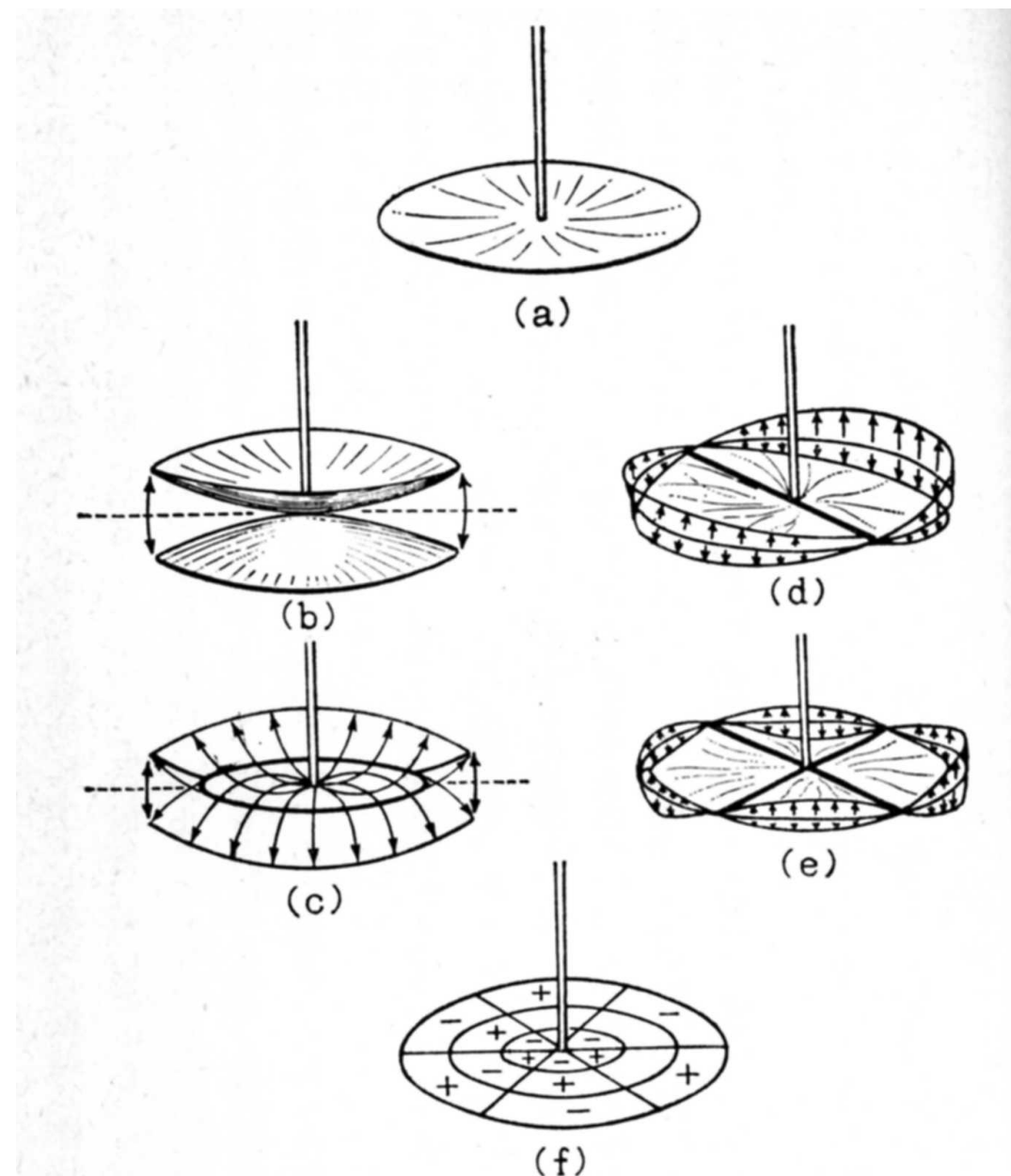
電子のふるまいを波と考えて解く式

$$i\frac{h}{2\pi}\frac{d}{dt}\psi = H\psi$$

複素数!?

Erwin Schroedinger
(1887-1961)波動関数 ψ ?

(何が振動しているのか? 不明)



量子力学の完成 1925年

何らかの指導原理が必要

(1) ハイゼンベルクの行列力学

(2) シュレーディンガーの波動力学

- 仮定したスタートラインも, 用いた数学もまったく異なっていたが, まったく同じ結果を出した.
- どちらの理論も, それまで信じられてきたニュートン力学の考えを「古典力学」と断じ, 何らかの方法で古典力学から決別して生まれている.
- プランクの量子仮説・ボーアの量子条件は, 現象を説明するアイデアにすぎなかったが, **ミクロの世界では, 粒子的な性質と波動的な性質が混在する** とする考えをもとにすれば, 「不連続とびとびのエネルギー準位」は自然な形で説明できることになった.

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

$$F = ma$$



アインシュタイン
(36歳)



アインシュタイン(26歳)

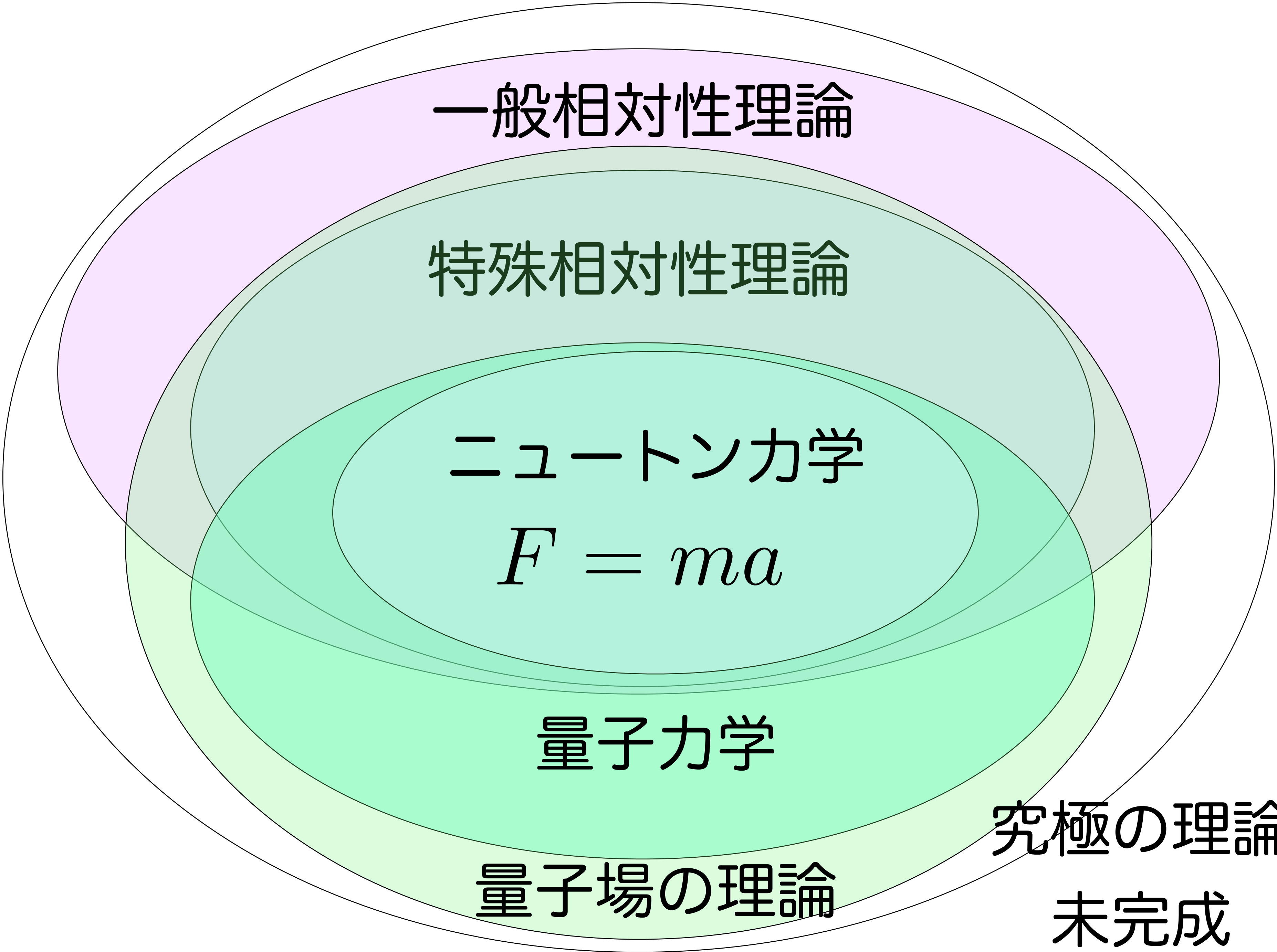
量子力学

ミクロなレベルの物理学

「光も電子も粒子性と波動性を有する」

ニュートン力学

$$F = ma$$



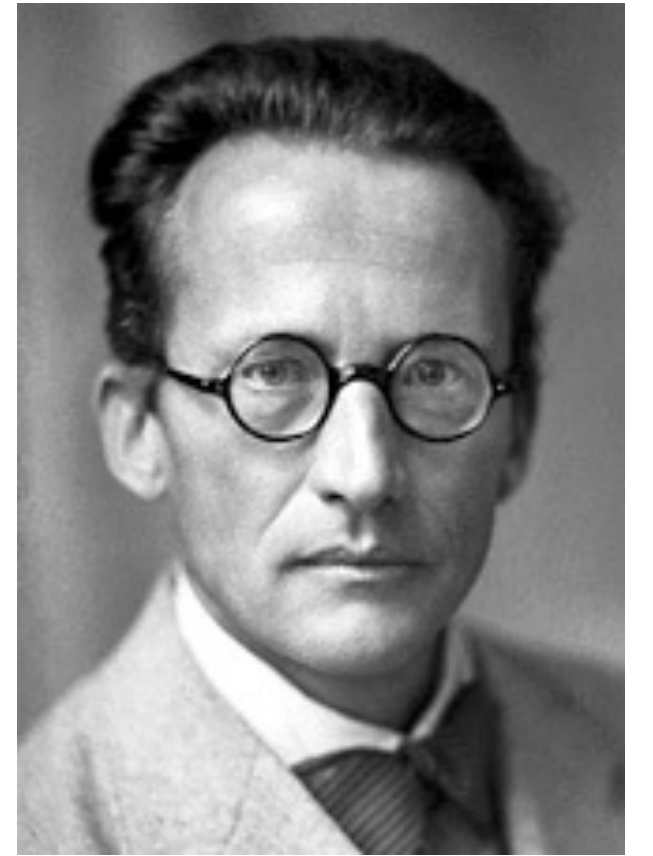
粒子性と波動性

- **原子の構造から，光も物質も**
「波の性質も，粒子の性質も両方有する」と考える
- **2重スリットの実験**
光や電子が波であることの実証。粒子性に矛盾
→ **波動関数，確率解釈**
- **粒子では位置や運動量が決まるはず**
波では 位置や運動量が決まらない
→ **不確定性原理 「両方同時に測定できない」**
と考えざるを得ない
→ **観測問題** → **物理的実在とは何か**

4.4.1 確率解釈

電子が波であると考えて、波動方程式を出した。
電子の密度を表している式が出たと思う。

$$i \frac{h}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi = H \psi$$



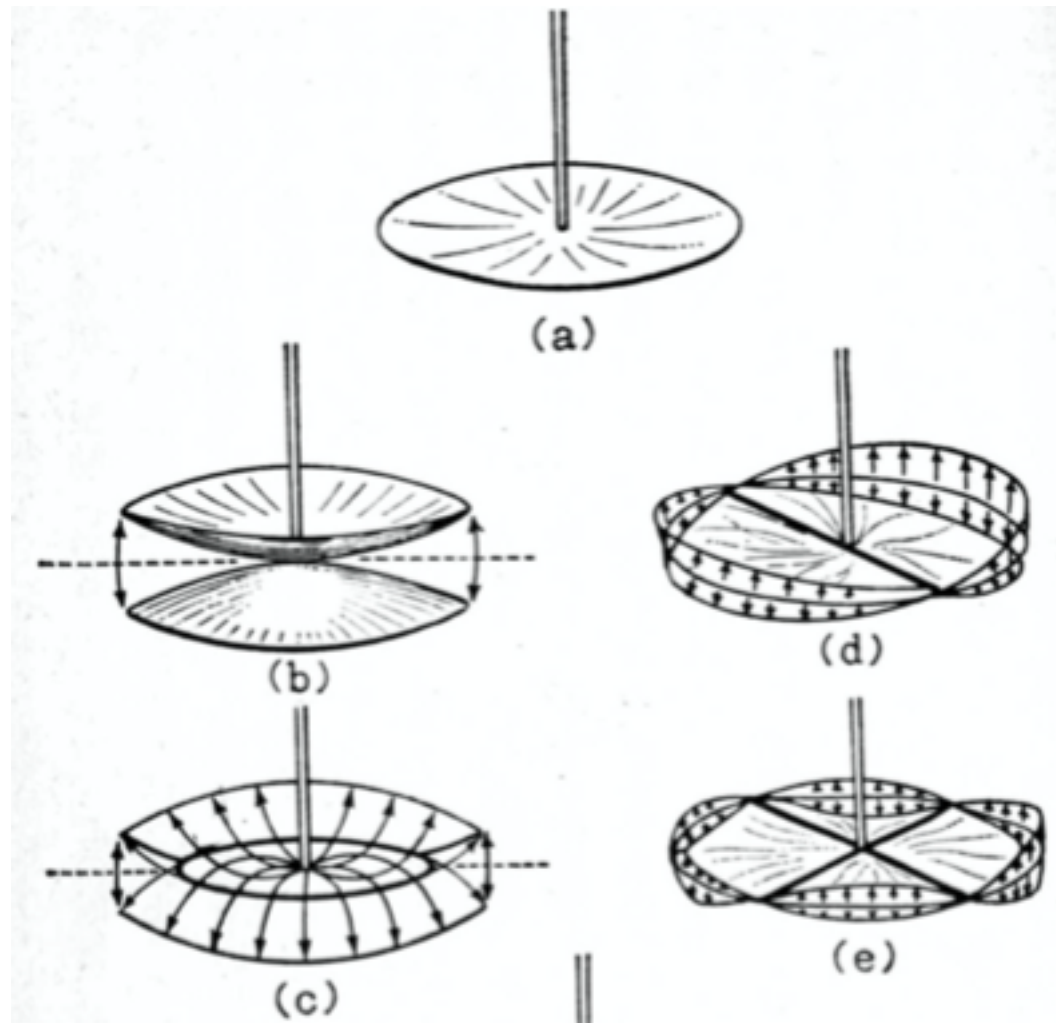
Schroedinger
(1887-1961)

シュレーディンガー方程式は、粒子の存在する確率を与えているのだ！

波動関数は確率振幅である (ボルン, 1926年)

ある粒子の振る舞いを表す波動関数 $\psi(x, y, z, t)$ が求められたとすると、その粒子が時刻 t に位置 (x, y, z) に存在する確率は、 $|\psi(x, y, z, t)|^2$ に比例する。すなわち、 ψ は確率振幅と呼ぶべき量である。

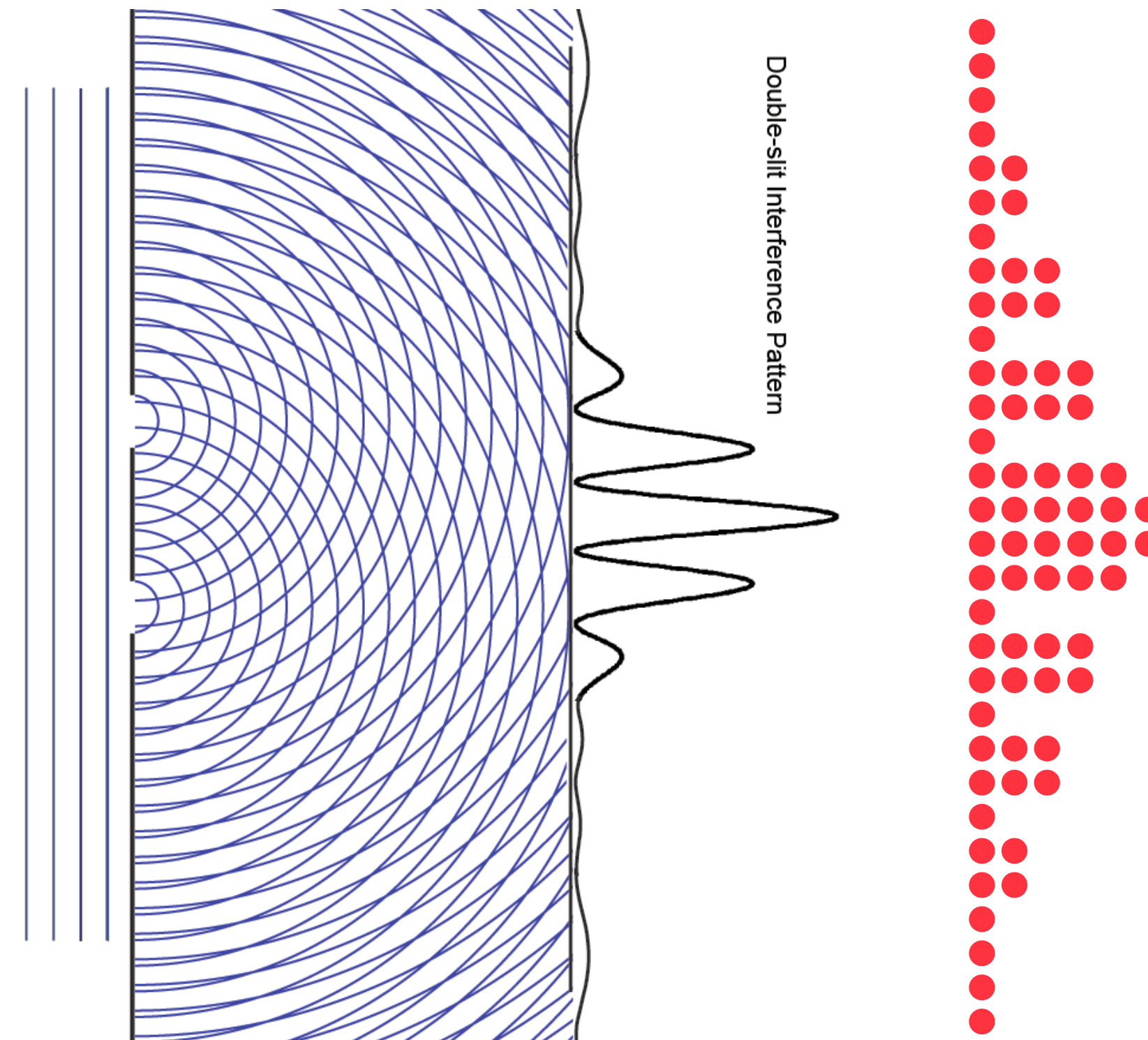
$|\psi|^2$ が確率を表す 説



Max Born
(1882-1970)

4.4.1

確率解釈



Max Born
(1882-1970)

波動関数は確率振幅である (ボルン, 1926 年)

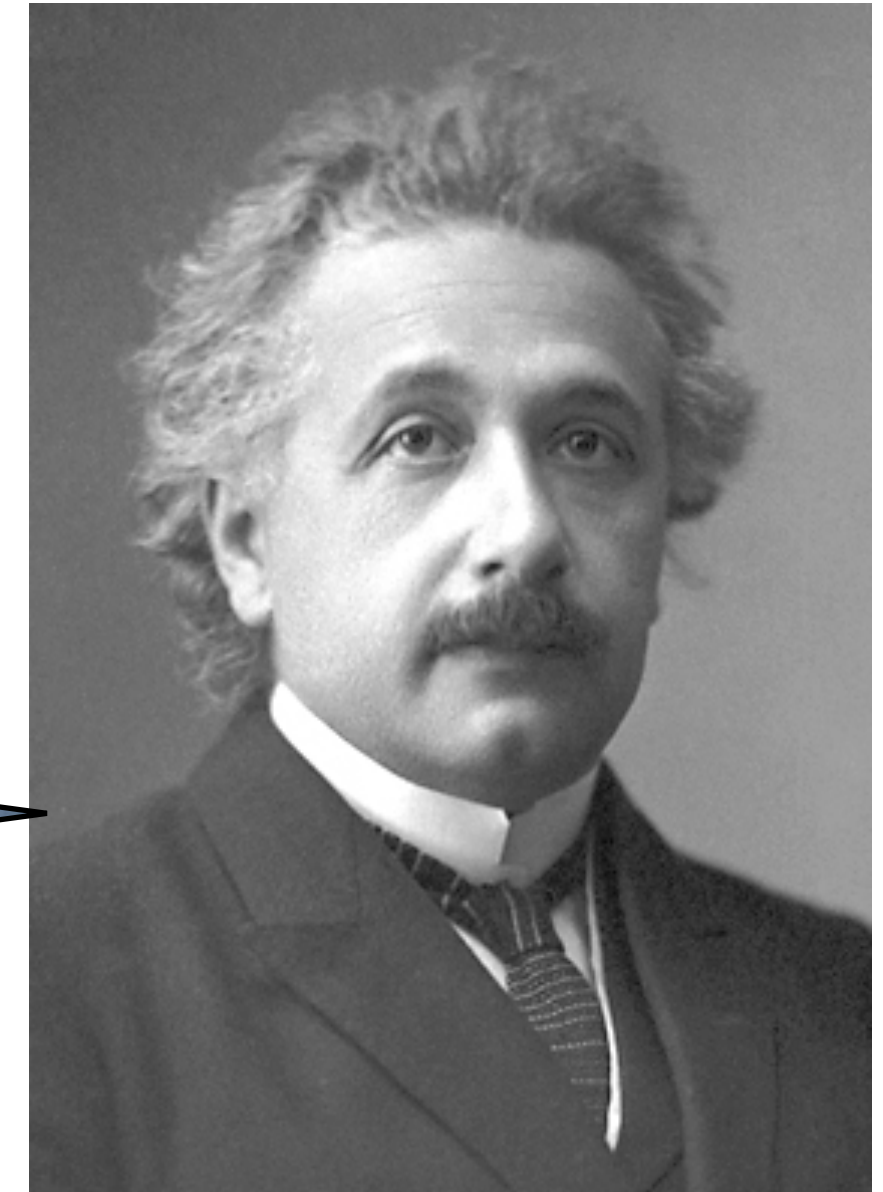
ある粒子の振る舞いを表す波動関数 $\psi(x, y, z, t)$ が求められたとすると, その粒子が時刻 t に位置 (x, y, z) に存在する確率は, $|\psi(x, y, z, t)|^2$ に比例する. すなわち, ψ は確率振幅と呼ぶべき量である.

$|\psi|^2$ が確率を表す 説

4.4.1

確率解釈

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導か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。



Max Born
(1882-1970)

波動関数は確率振幅である (ボルン, 1926年)

ある粒子の振る舞いを表す波動関数 $\psi(x, y, z, t)$ が求められたとすると、その粒子が時刻 t に位置 (x, y, z) に存在する確率は、 $|\psi(x, y, z, t)|^2$ に比例する。すなわち、 ψ は確率振幅と呼ぶべき量である。

$|\psi|^2$ が確率を表す 説

4.4.2 不確定性原理



Werner Heisenberg (1901-76)

行列力学では一直線に飛んで行く電子の軌跡にはならない。

- ⇒ 電子そのものを見ているわけではない！
- ⇒ ミクロには、常にゆらいでいるのでは？

⇒ 電子の位置を測定するには光を照射しかし、光を照射すれば電子は動く。



霧箱実験 モナズ石による放射線の飛跡
 水蒸気で満たした容器に放射線が飛び込むと、
 空気中の原子をイオン化し、そのイオンが
 水蒸気を集めるために放射線の軌跡が記録される。

不確定性原理
 粒子の位置と運動量は、同時に値を決めることはできない

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

位置の測定誤差 x 運動量の測定誤差 はゼロにはならない

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

4.4.2 不確定性原理

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

この式は、位置を精度よく決めようとするとき ($\Delta x \rightarrow 0$ とすると) 運動量の幅が無限大になって定まらず、逆に運動量を精度よく決めようとするとき ($\Delta p \rightarrow 0$ とすると) 位置が定まらないことを意味する。つまり、

不確定性原理

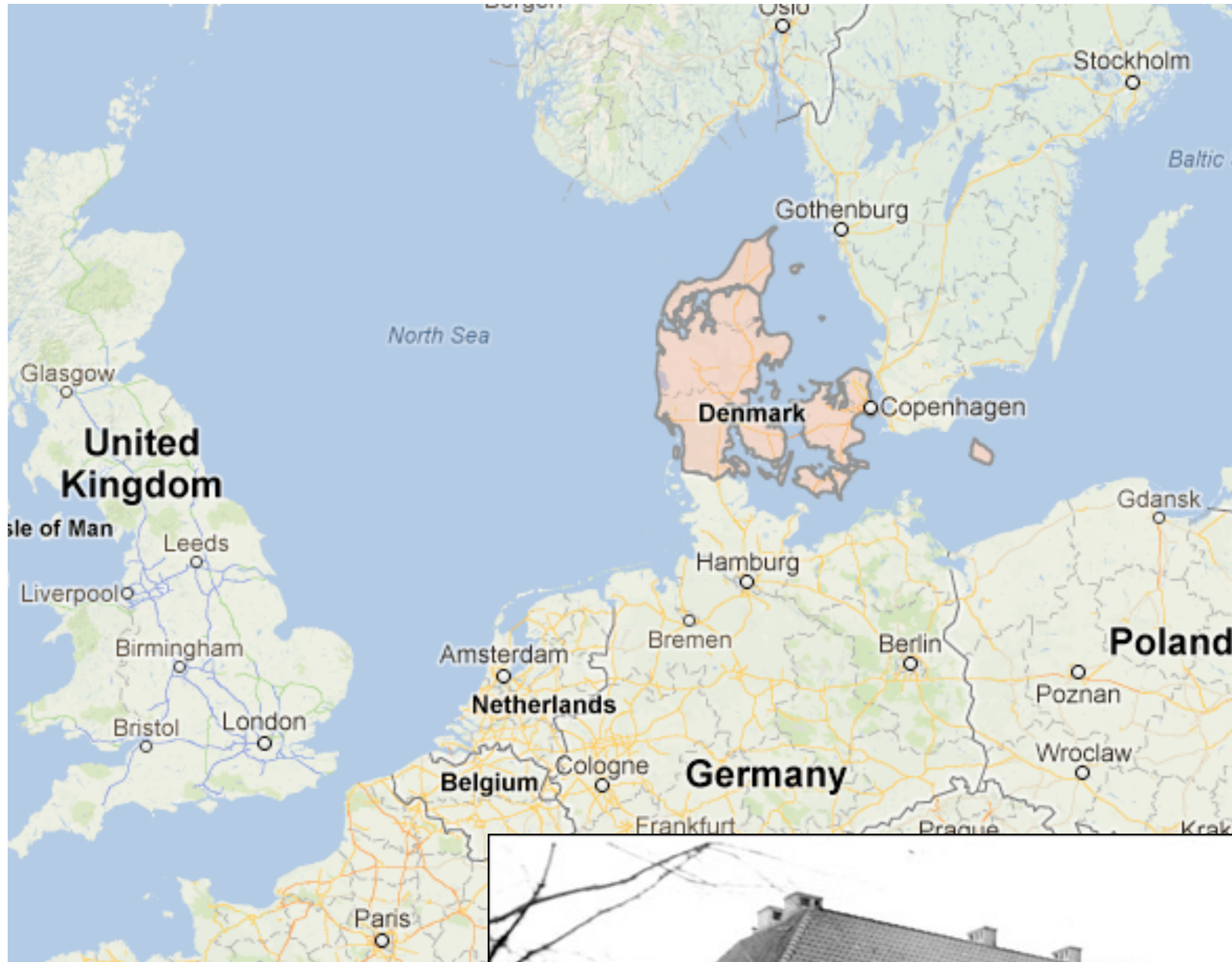
粒子の位置と運動量は、同時に値を決めることはできない

とも解釈できる。私たちは、位置と運動量の知り得る精度に限界があり、不確定性関係で限られた範囲でしか知り得ないことになる。しかし、この性質は、物理法則としては奇妙な印象を与える。位置を「精密に決めようとするとき」運動量がわからなくなる、あるいは逆に運動量を「精密に決めようとするとき」位置がわからなくなる、という文脈では「…」の部分に観測しようとする人間が介在しているようだ。

これまですべての物理法則には、人間の意志や主観が入る余地はなく、だからこそ客観的な議論ができてきた。もし誤差が生じるのであれば、それは人間の観測・計測が引き起こす測定誤差であり、原理的なものではない。にもかかわらず、量子力学に存在する不確定性関係は、原理的なものであるという。どんなに計測技術を向上させても、位置と運動量を正確に知ることができないという。果たしてそのような粒子は客観的な物理対象といえるのかどうか。

量子力学をめぐる認識論および原理的な解釈に関する論争は、この点から始まった。

4.4.3 コペンハーゲン解釈



1922



1962

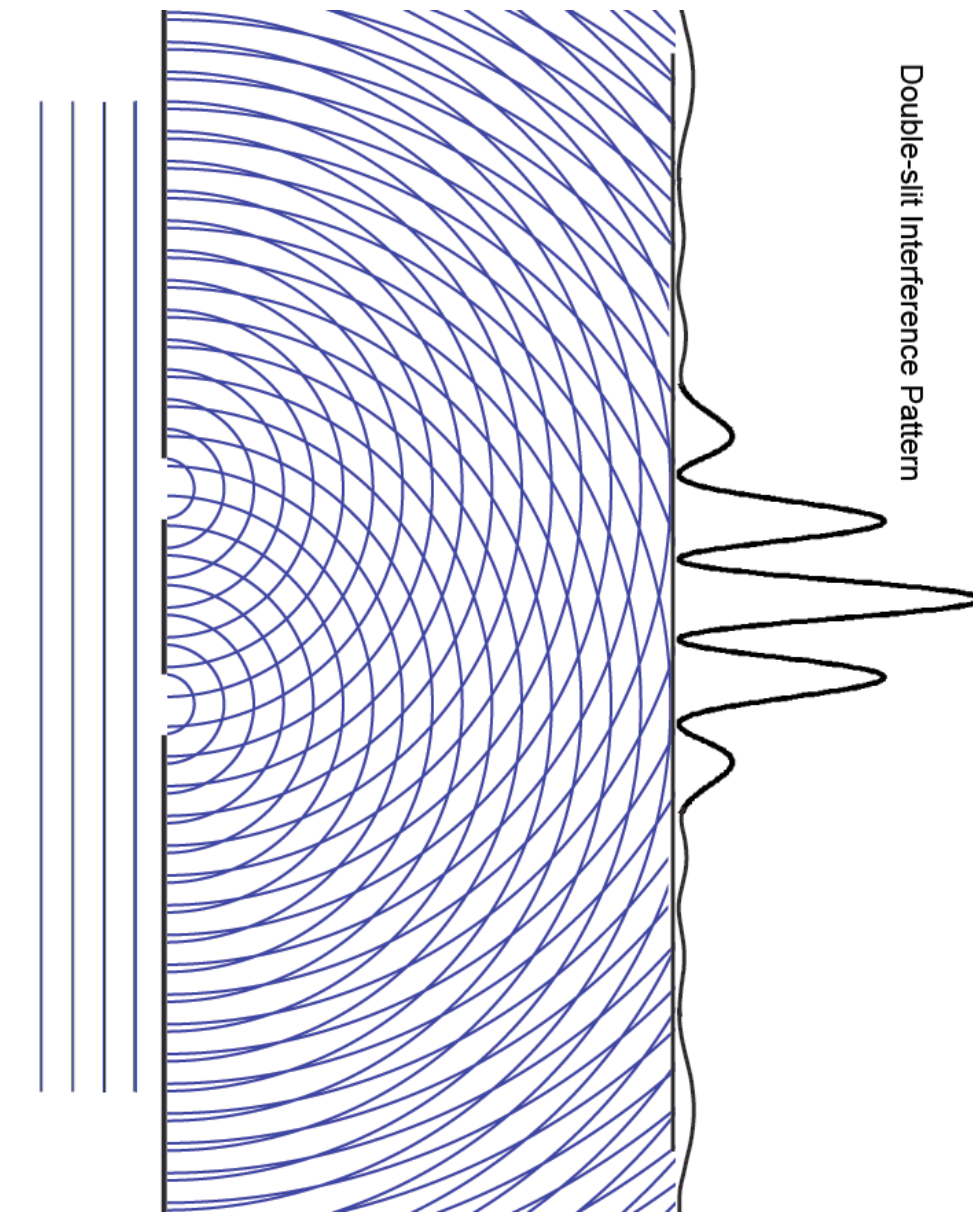


Niels Bohr Institute
Copenhagen, Denmark

4.4.3 コペンハーゲン解釈

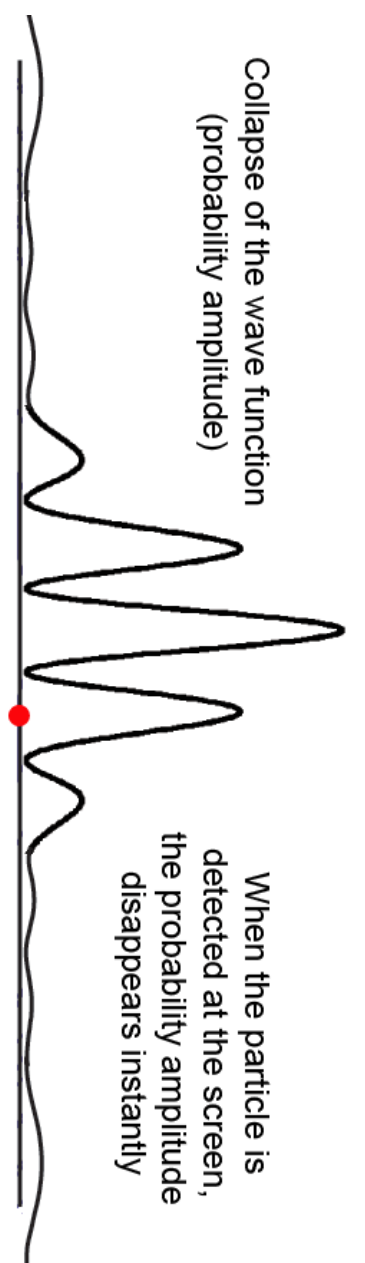
コペンハーゲン解釈

- 量子力学的な粒子は、観測される前には、波動関数にしたがった空間的な広がりをもつ、と解釈する。(波動関数は波を表し、波は重ね合わせができる。したがって、観測結果はいろいろな状態の重ね合わせである、と解釈する.)
- 観測や測定により、粒子の位置や運動量がある領域に制限されて定まることは、波動関数の示す波が1点に収縮した(波束の収縮)と解釈する。
- 波束の収縮する確率は、波動関数を確率解釈することで得られる、とする。



粒子は波である。
波動関数は確率である。

観測・測定は、
波束の収縮である。



4.4.1 確率解釈

電子が波であると考えて、波動方程式を出した。
電子の密度を表している式が出たと思う。

$$i \frac{h}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi = H \psi$$



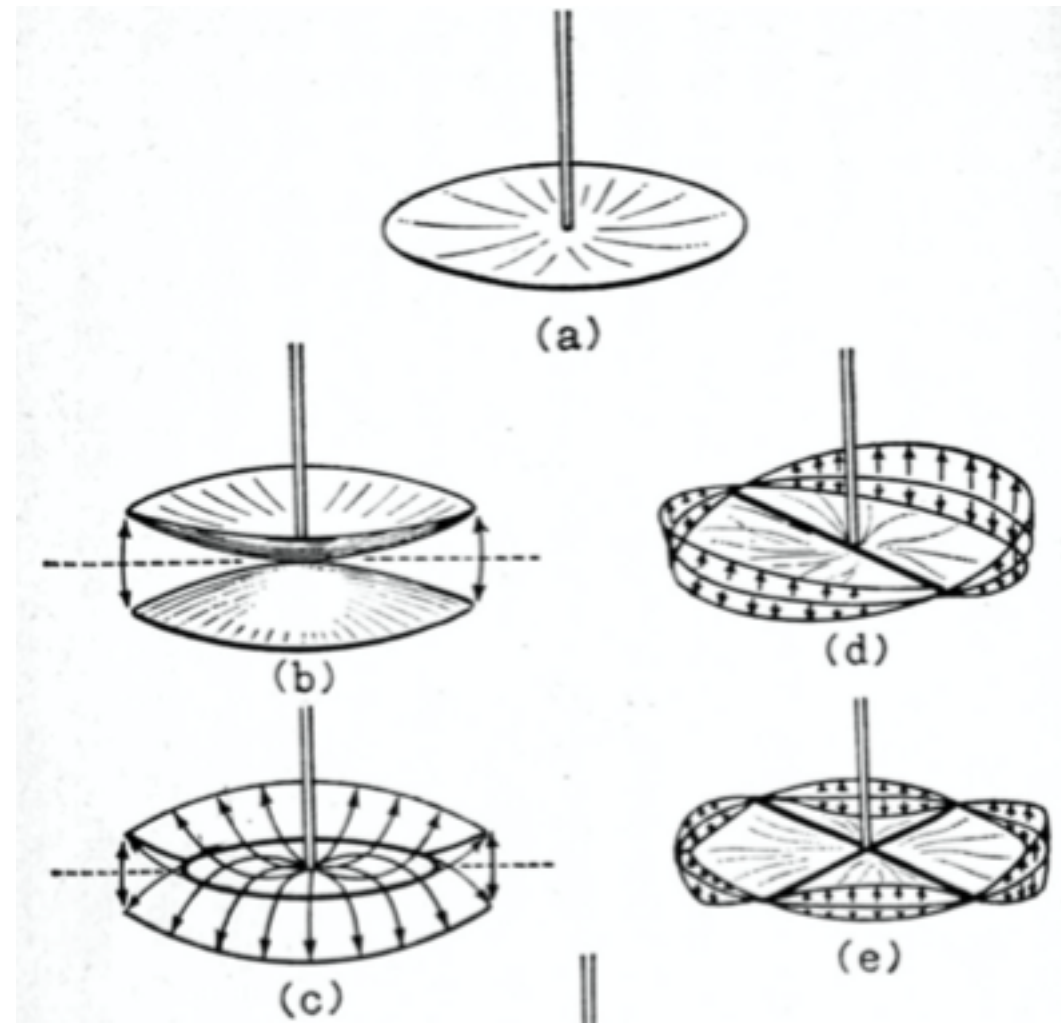
Schroedinger
(1887-1961)

シュレーディンガー方程式は、粒子の存在する確率を与えているのだ！

波動関数は確率振幅である (ボルン, 1926年)

ある粒子の振る舞いを表す波動関数 $\psi(x, y, z, t)$ が求められたとすると、その粒子が時刻 t に位置 (x, y, z) に存在する確率は、 $|\psi(x, y, z, t)|^2$ に比例する。すなわち、 ψ は確率振幅と呼ぶべき量である。

$|\psi|^2$ が確率を表す 説

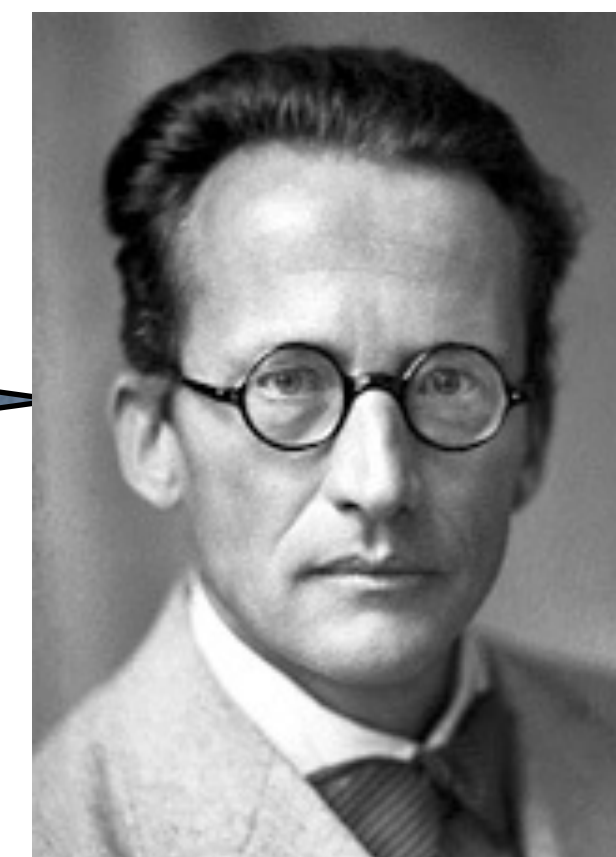


Max Born
(1882-1970)

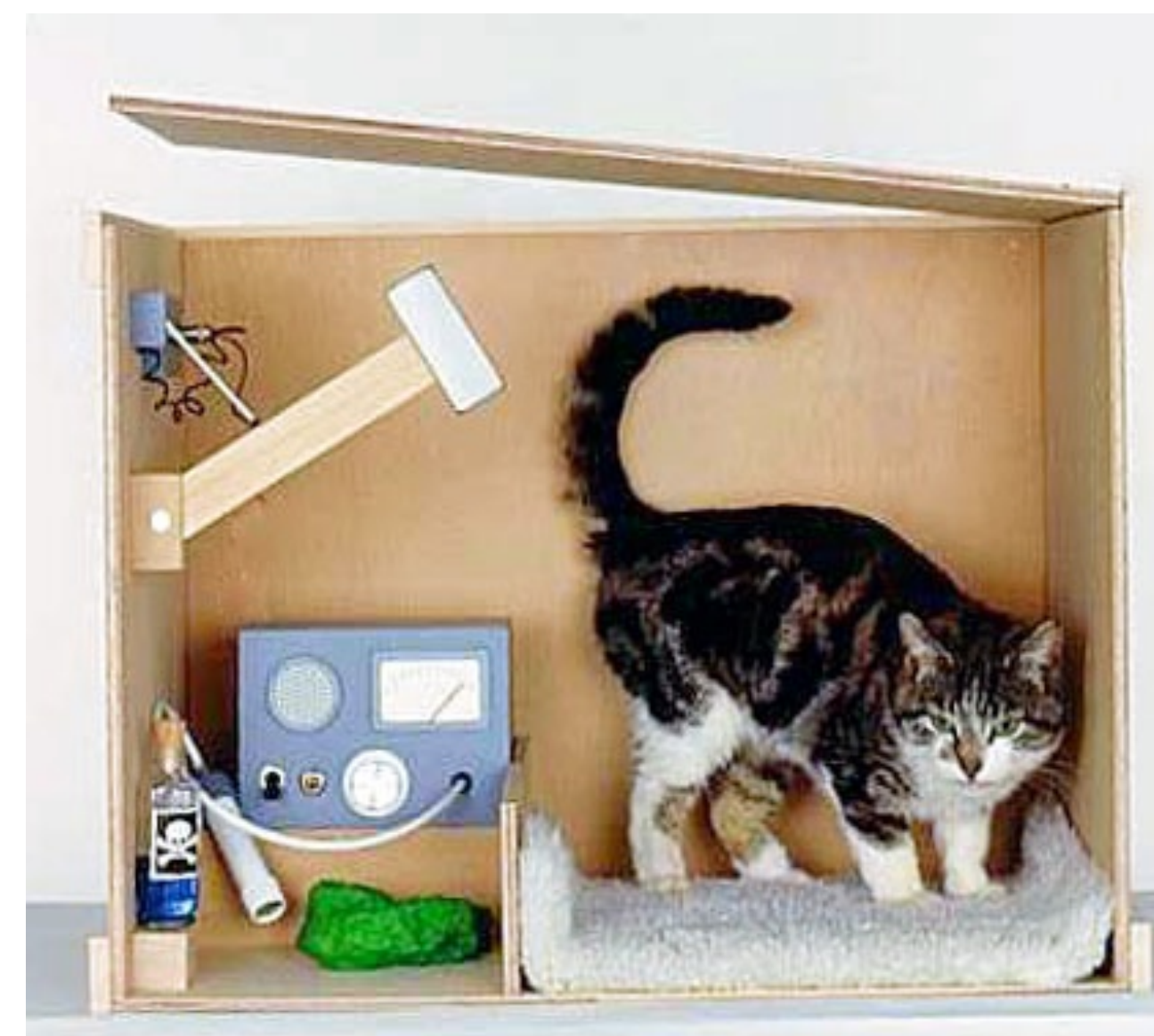
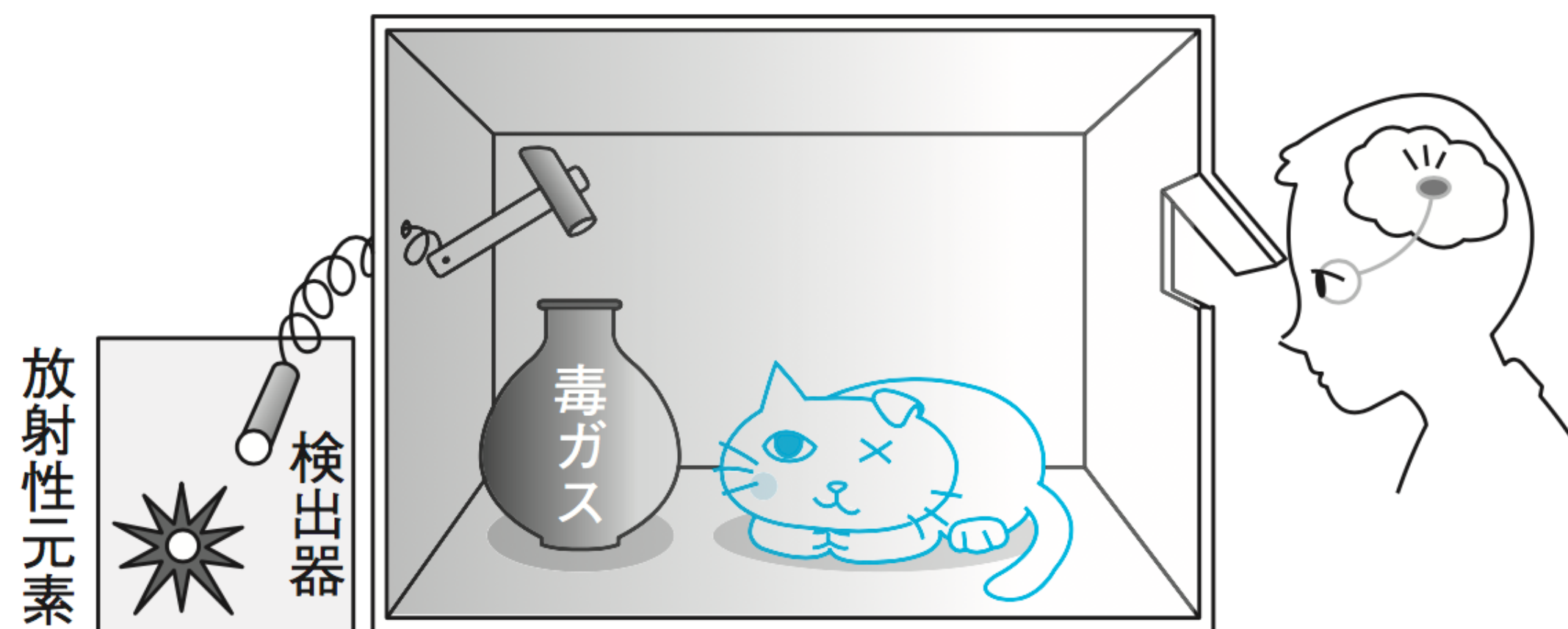
4.4.4 シュレーディンガーの猫

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



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。

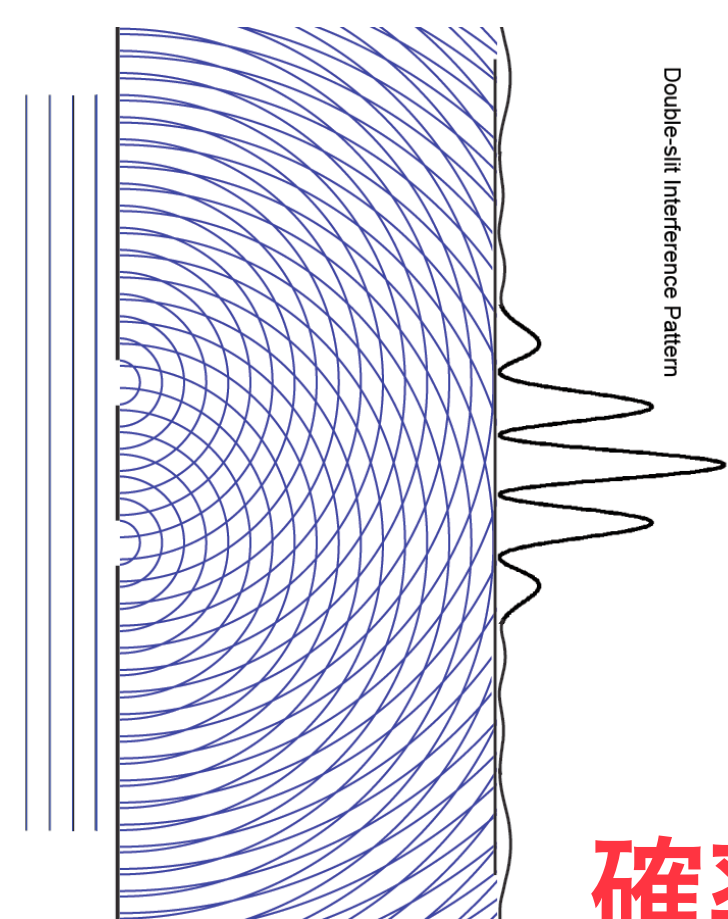


Bohr

観測問題:「観測する」のはどの時点での話なのか

原子核レベルのミクロの世界

人間が測定するマクロの世界



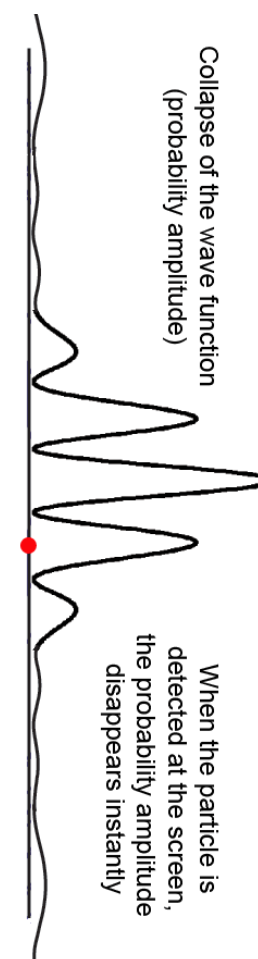
Double-slit interference pattern



波束の収縮

量子物理

古典物理



Collapse of the wave function (probability amplitude)

When the particle is detected at the screen, the probability amplitude disappears instantly

確率解釈

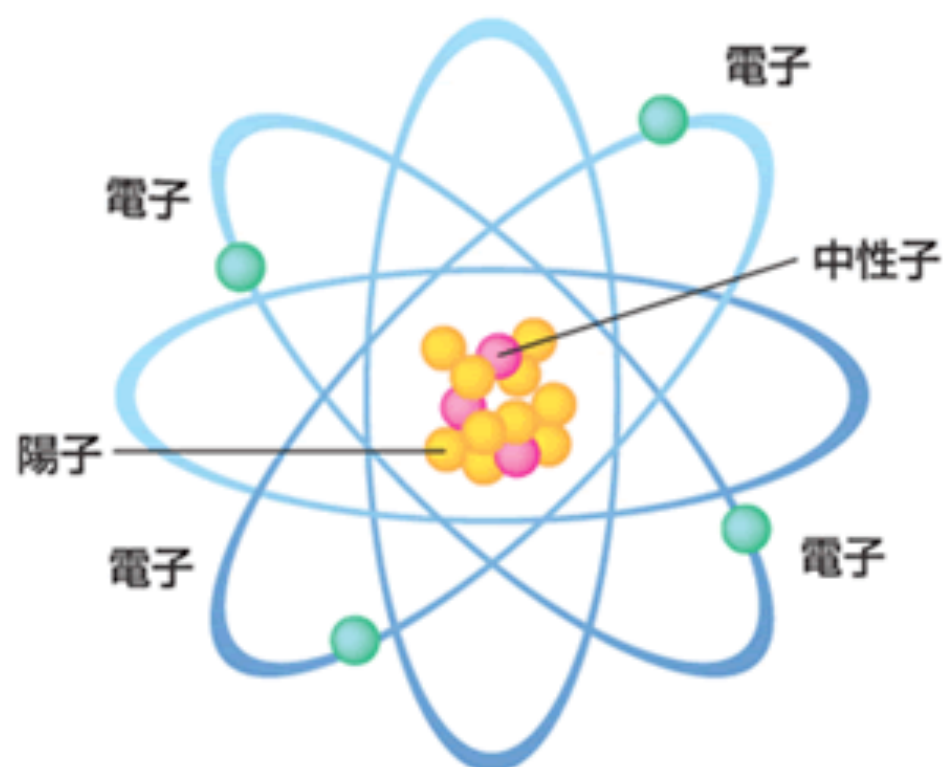
因果律

波動関数

位置・速度確定

不確定性原理

.....



電子

電子

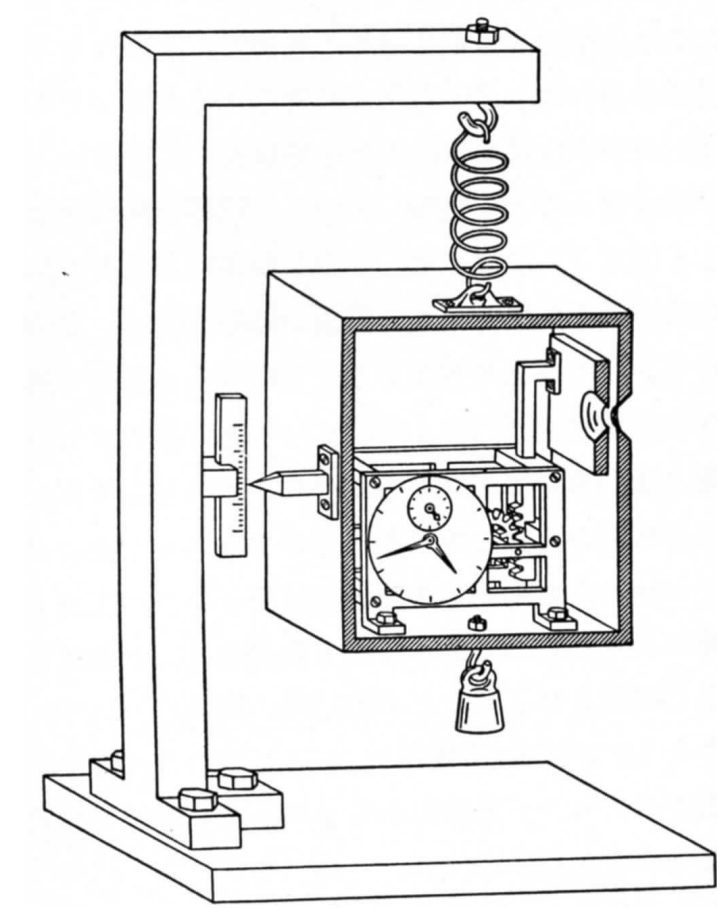
中性子

陽子

電子

電子

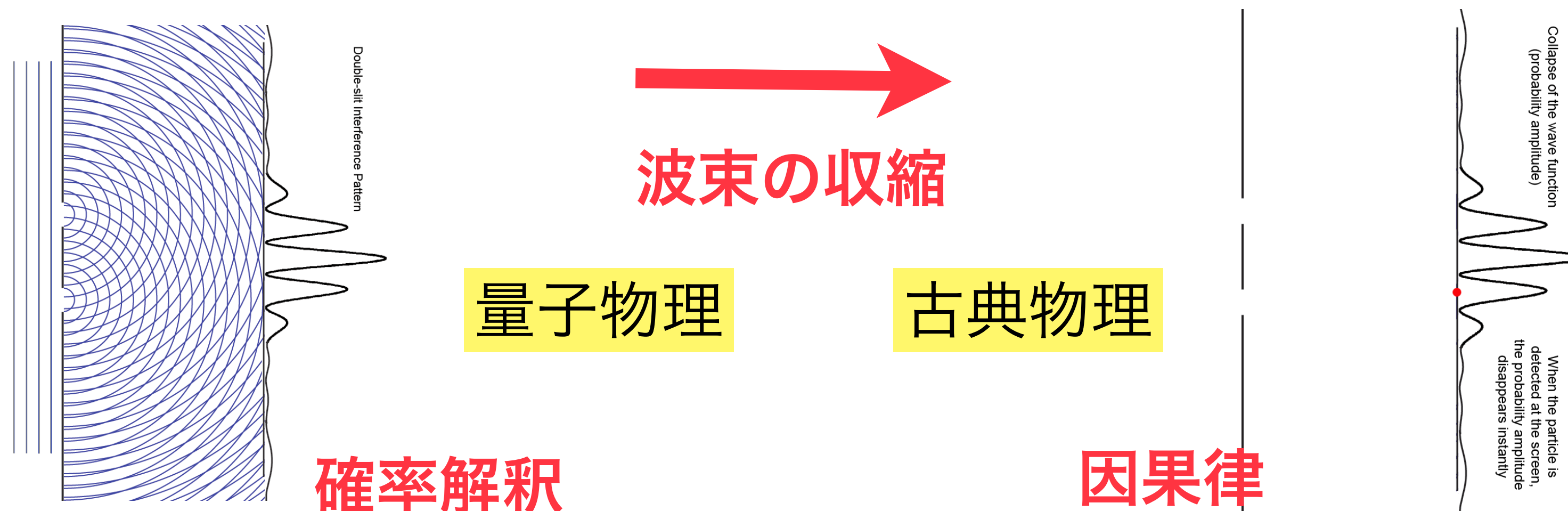
プランク定数 h をゼロにする
極限を考えると古典化するが、
どうやって理解するか。



観測問題: 「観測する」のはどの時点での話なのか

原子核レベルのミクロの世界

人間が測定するマクロの世界



確率解釈

波動関数

不確定性原理

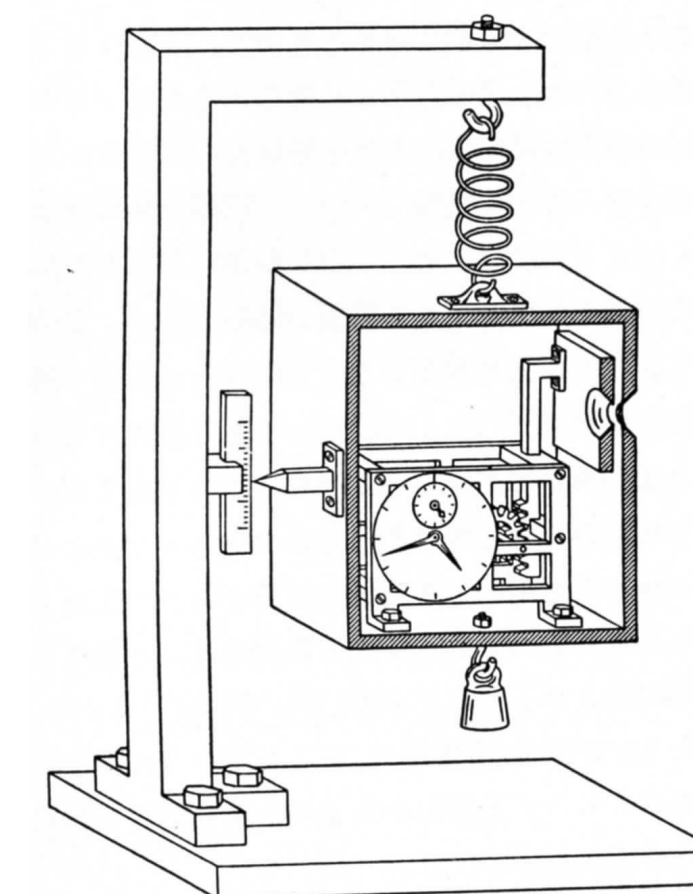
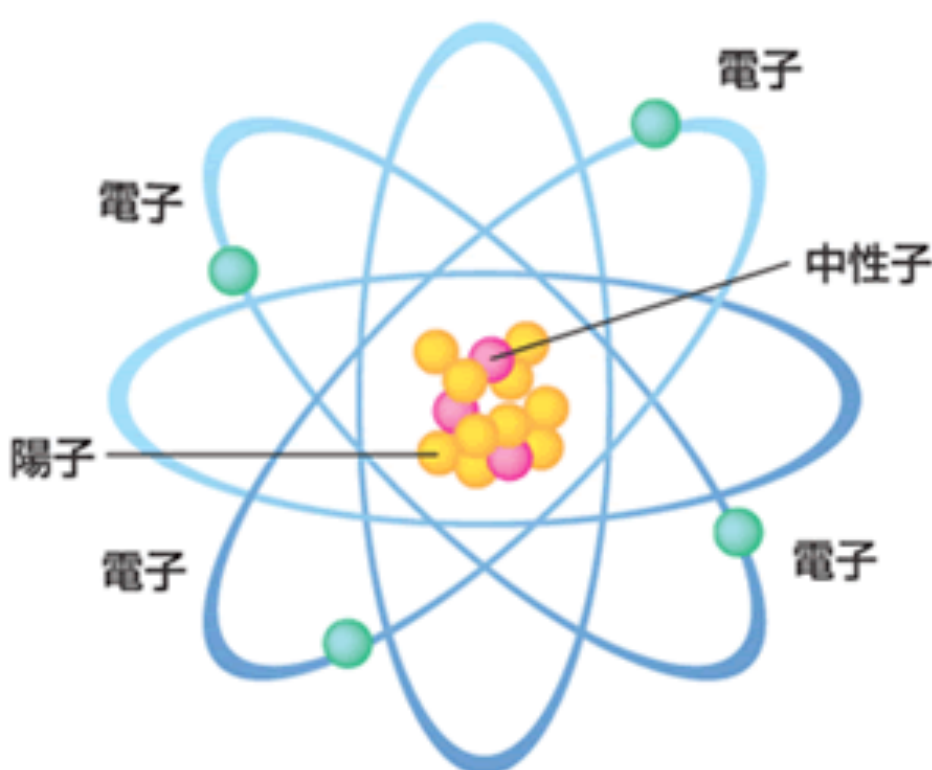
.....

因果律

位置・速度確定

.....

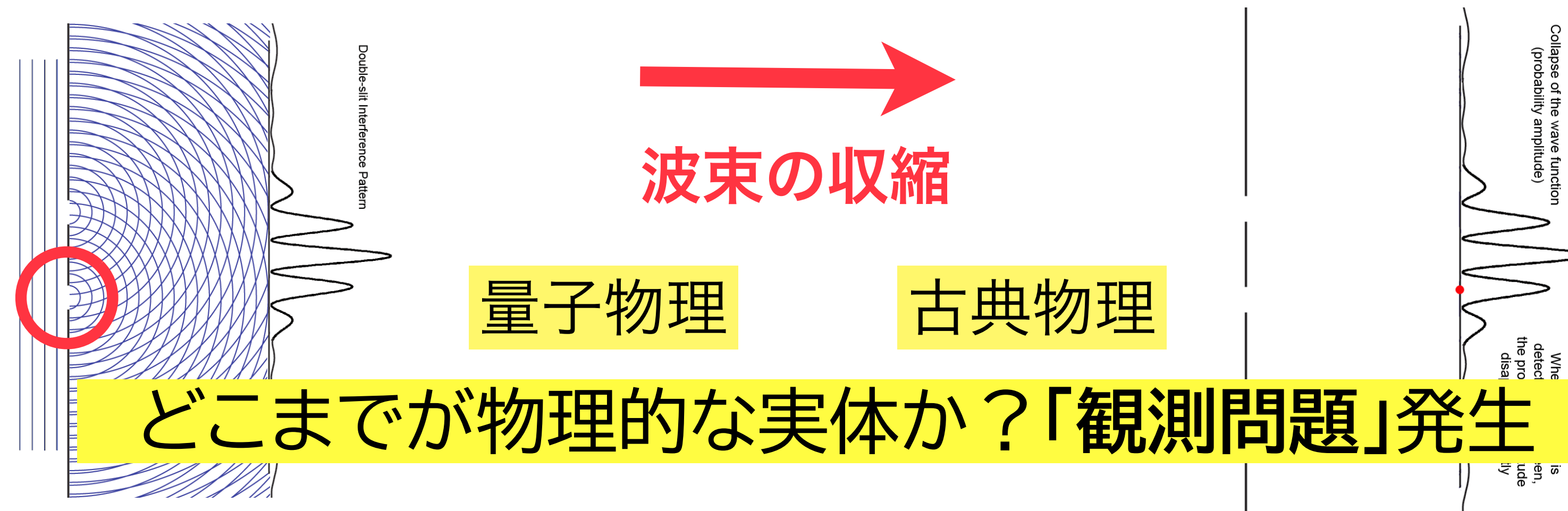
プランク定数 h をゼロにする極限を考えると古典化するが、...
どう理解するか.



2重スリット通過の Yes/No 判定問題

原子核レベルのミクロの世界

人間が測定するマクロの世界



片方のスリットに検出器を設置

粒子が通過したことがわかる → → 波ではなくなる.

粒子が通過しなかったことがわかる → → 波ではなくなる.



「測定をすること」自体が波束の収縮を引き起こすのだ.

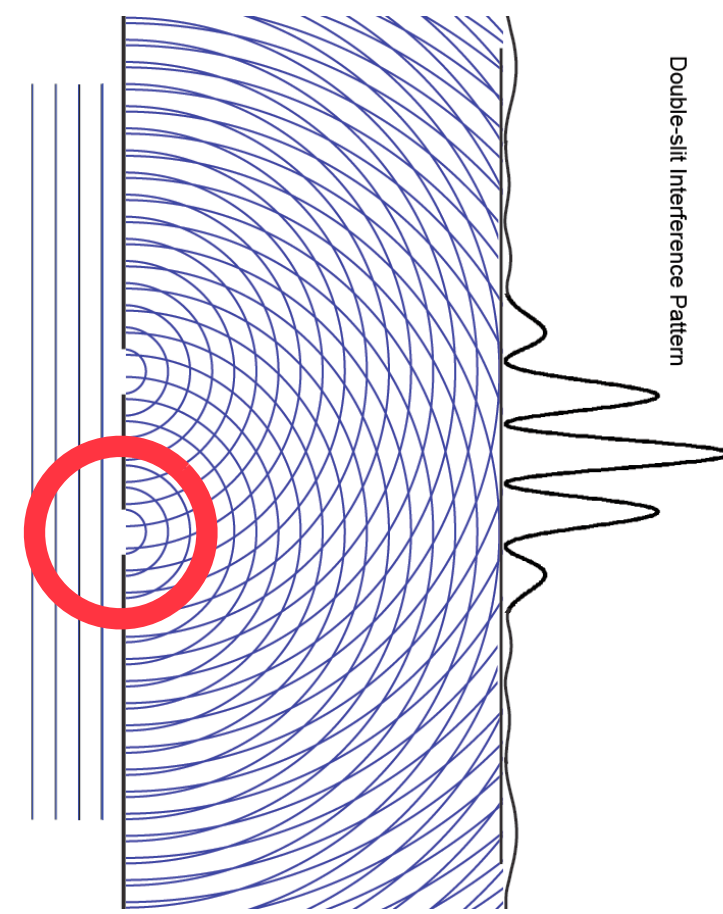


Bohr

2重スリット通過の Yes/No 判定問題

原子核レベルのミクロの世界

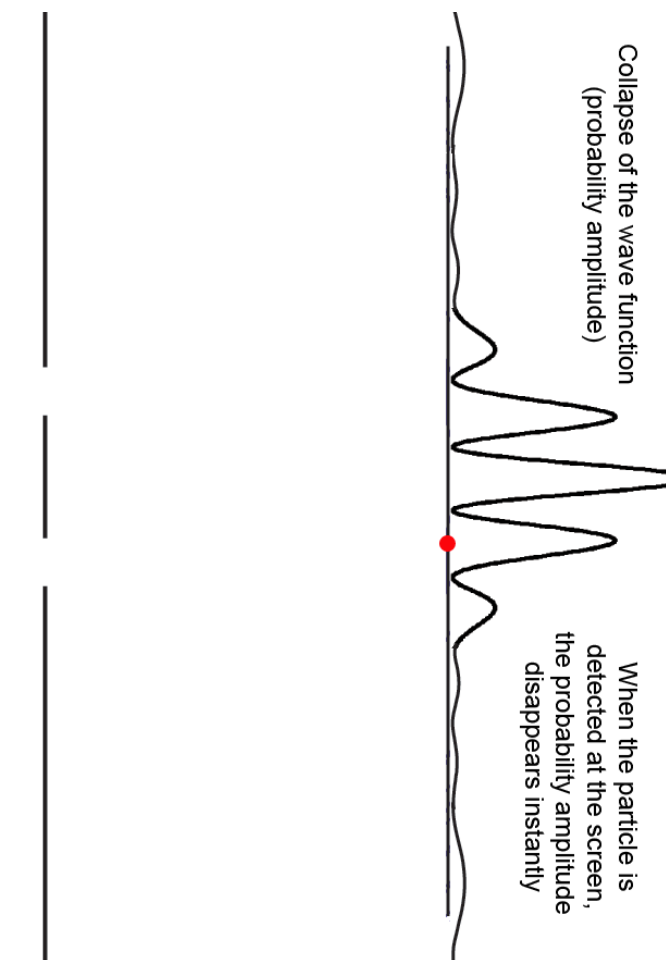
人間が測定するマクロの世界



波束の収縮

量子物理

古典物理



John von Neumann
(1903-57)



Eugene Wigner
(1902-95)

観測者も測定器も、すべてミクロな要素から成り立っているのだから、ミクロもマクロも区別せず、すべてがミクロな量子力学の対象としてよい。

ウィグナーの友人 パラドクス

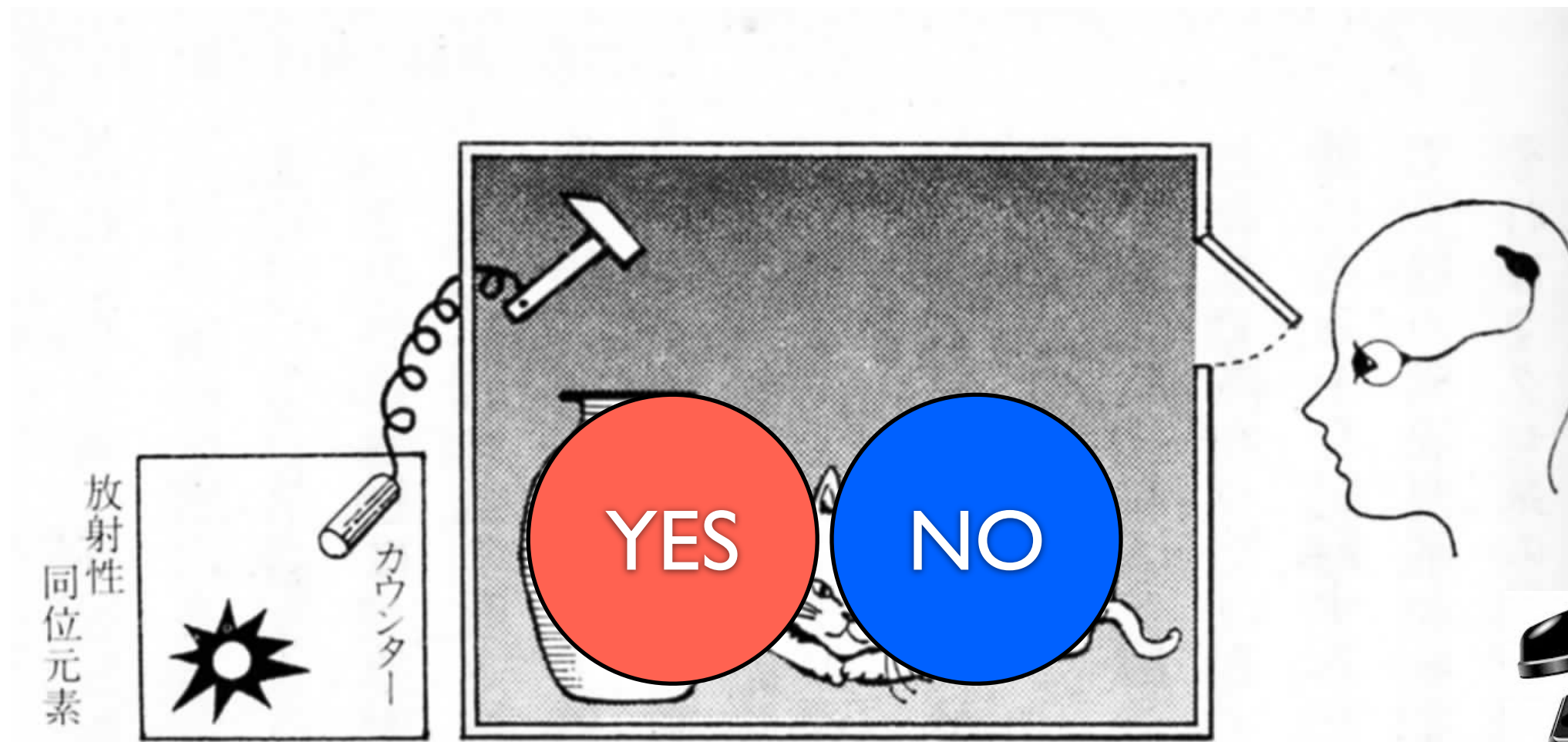


図 6.1 シュレーディンガーの猫



Wigner の友人
(物理を知らない)



Wigner先生
(電話で結果を確認)

波束の収縮はどこで生じたのか？

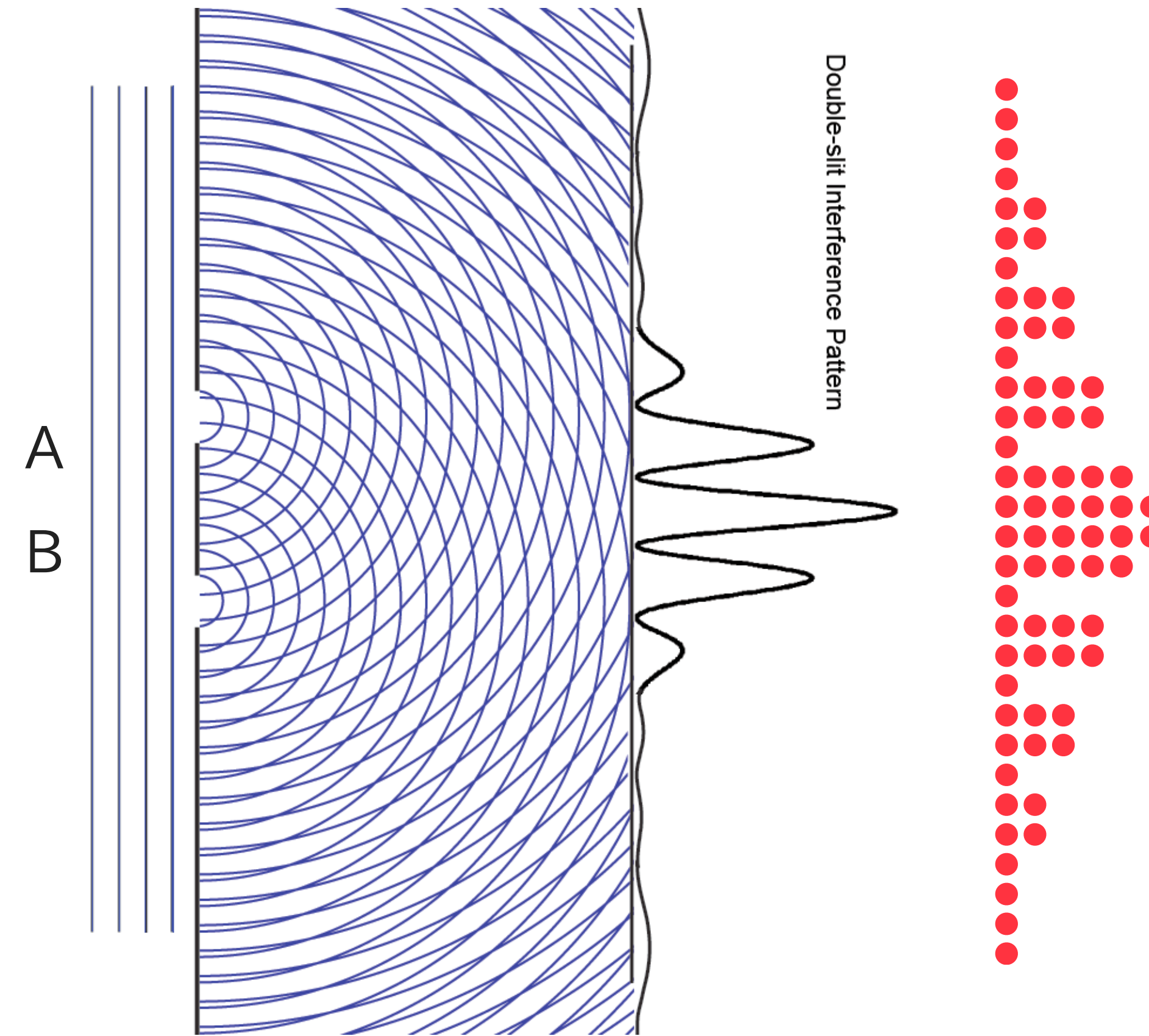
ノイマン・ウィグナーの観測理論は、このパラドクスで破綻した。



並木美喜雄 (1925-2010)

結局, 2重スリット実験はどう理解したらよいのか？

【問題】粒子だと考えると, A,Bどちらを通ったかが明らかになり, 干渉縞は生じない.



【パラドックス】シュレーディンガーの猫

結局, 粒子はA,B どちらかを通ったのかはわからない, と考える.

量子力学では, 確率的にしか予言できない. 【「光子の裁判」レポート課題】

2重スリットの実験はどう理解したらよいのか？

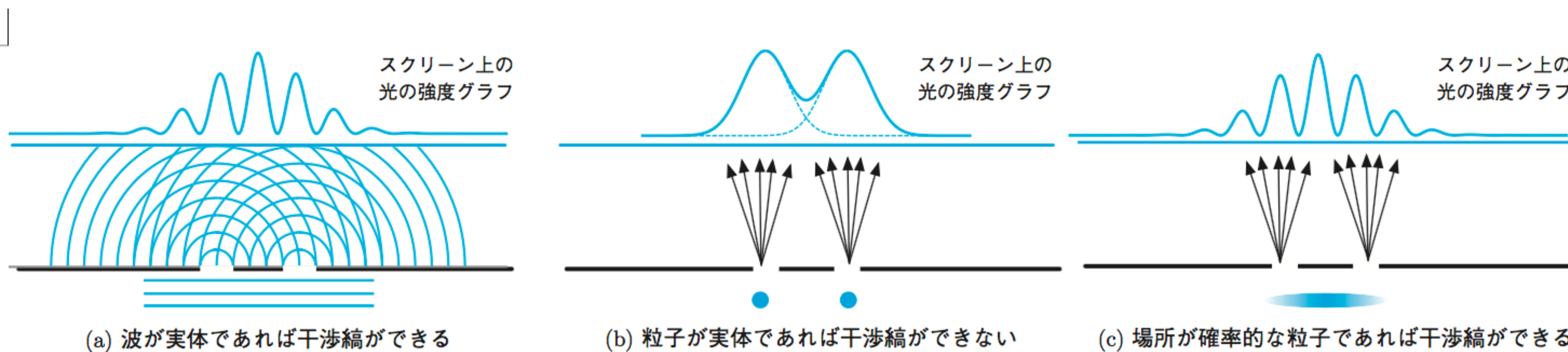


図 4.27 コペンハーゲン解釈による 2 重スリット問題の解釈. 光が粒子であれば干渉縞が生じないはずだが, 実際には干渉縞が生じている. そこで, 粒子ではあるが, ミクロの世界では, 確率的にしか場所が特定できないもの, と考える.

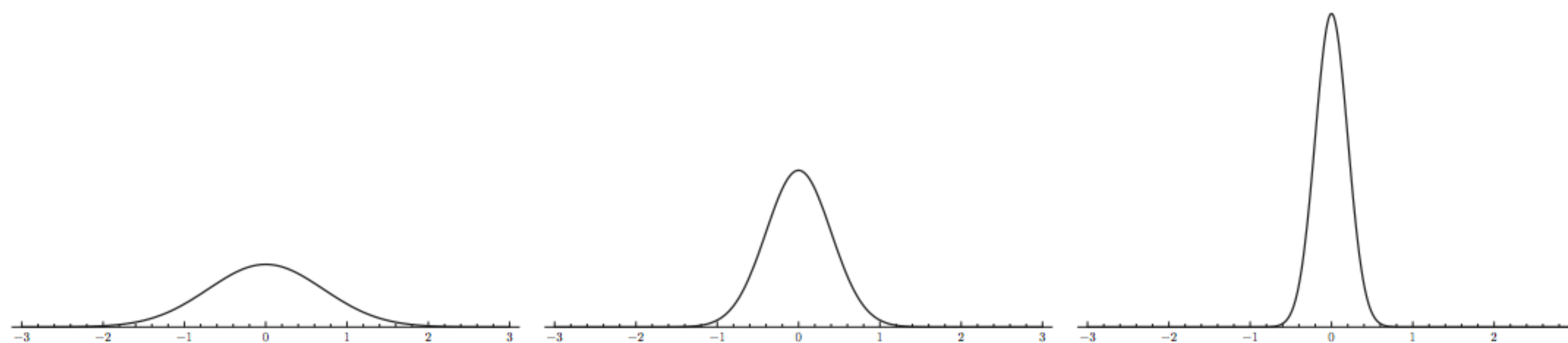
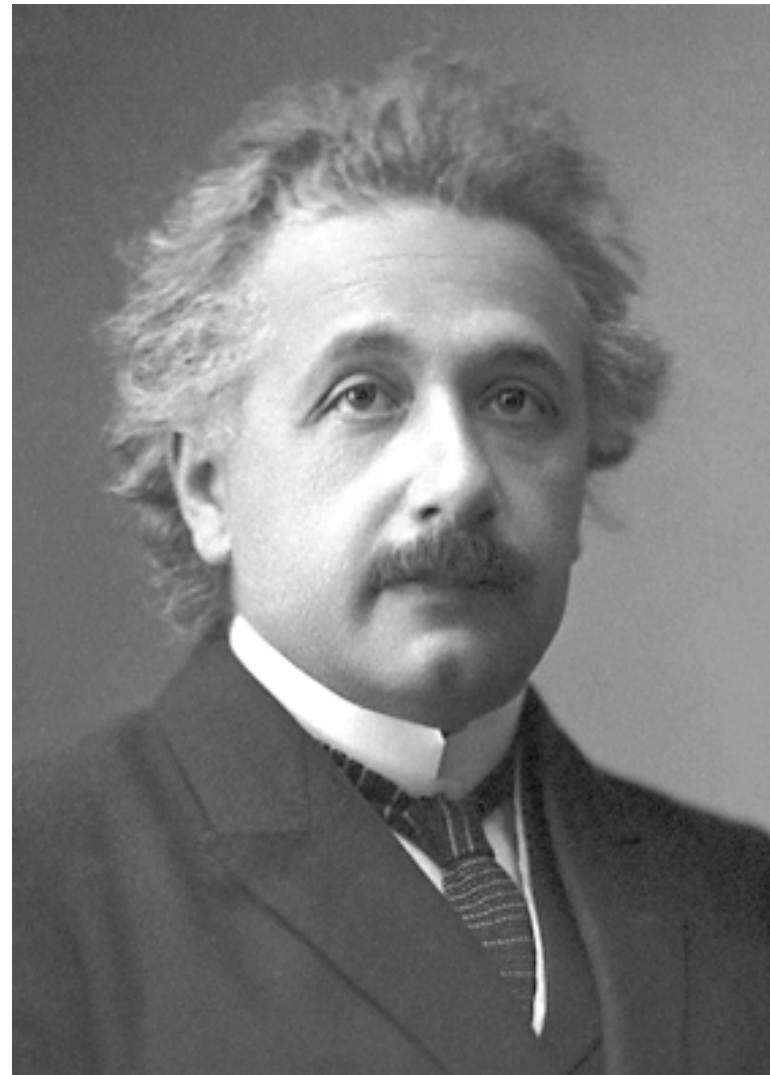


図 4.28 波束の収縮のイメージ. 位置 $x = 0$ の場所に粒子が存在することがわかったとたんに, それまで広がっていた波動関数が収縮し, 確率が 1 になる.

アインシュタイン と ボーア

Albert Einstein



1927年時 48歳

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」

Niels Bohr

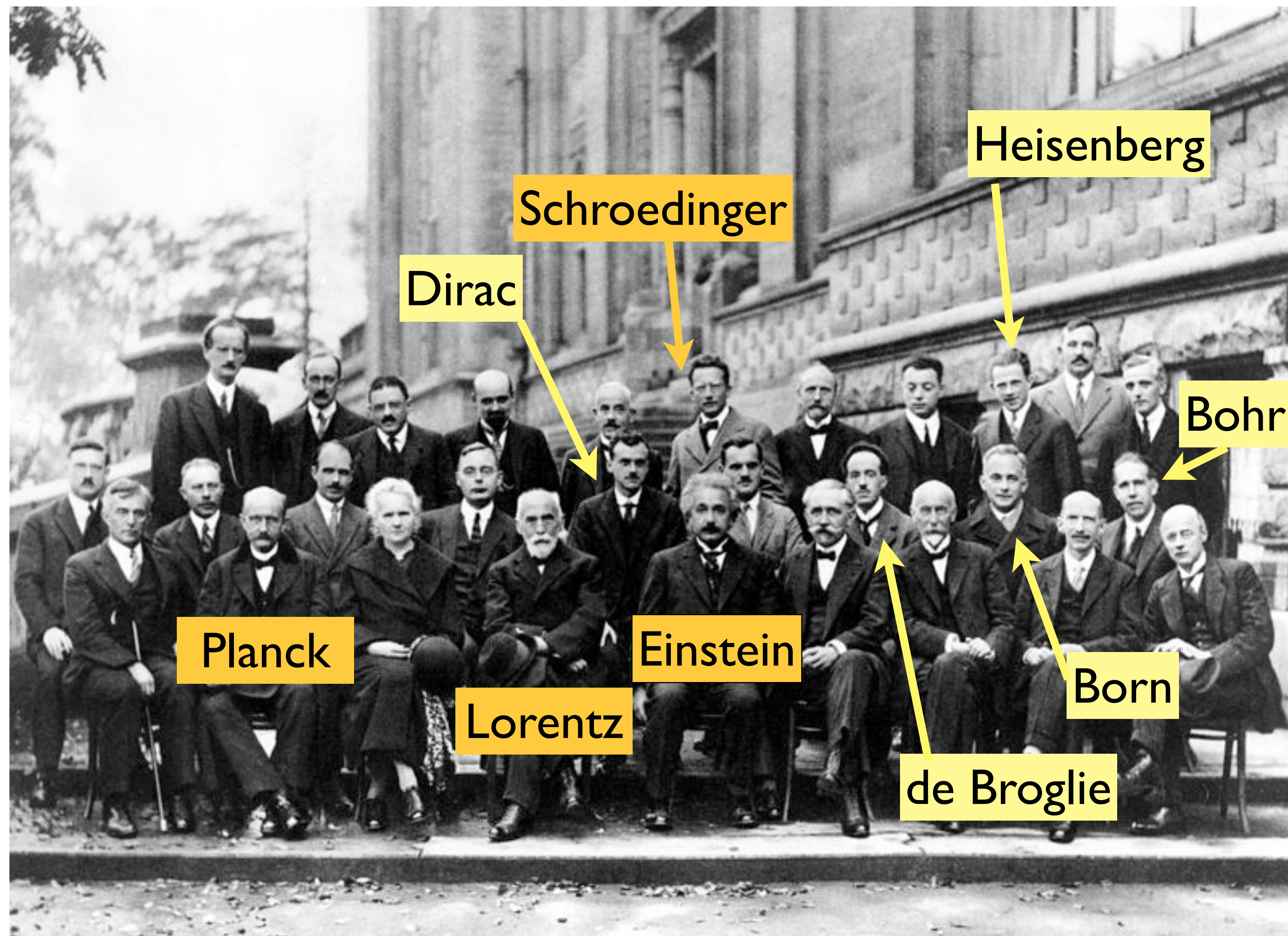


1927年時 45歳

原子物理学のゴッドファーザー

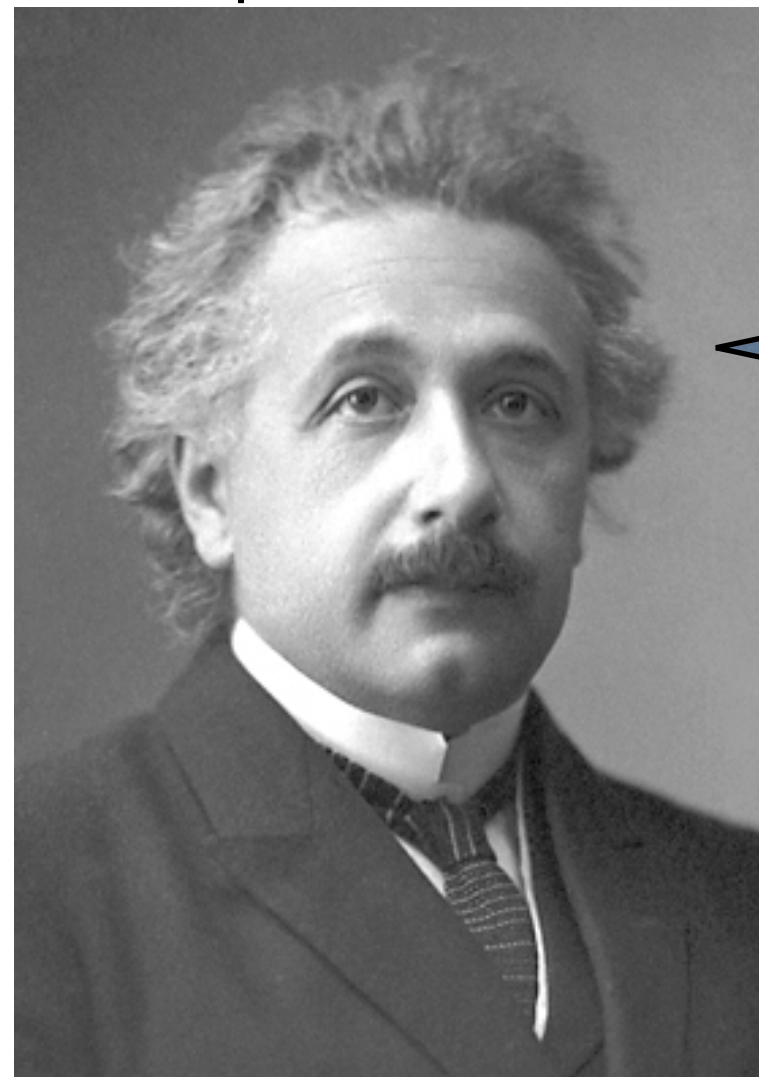
1922年ノーベル物理学賞
「原子構造の解明」

1927年のソルヴェイ会議



確率解釈に反対するアインシュタイン

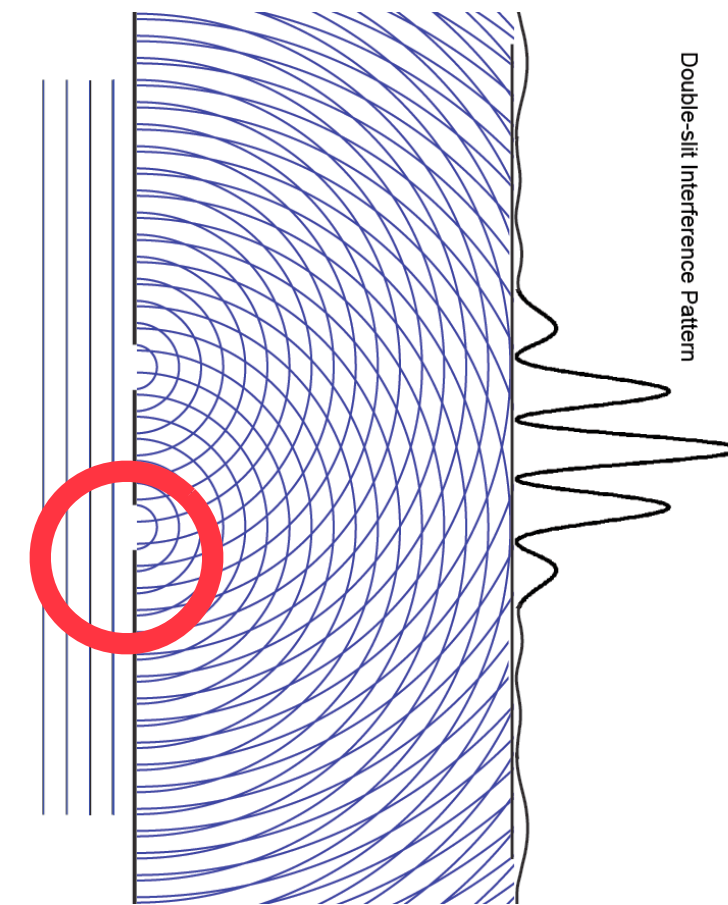
確かに量子力学は重視するに値する。しかし、私の内なる声が言うのです。これは本物ではない。この理論からたくさんの結果が導かれるかもしれないが、これによって神の秘密に近づくことは不可能だ。私は神がサイコロを振ったりなどしないと信じている。



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、干渉縞は出現しない。



因果律を用いて反論

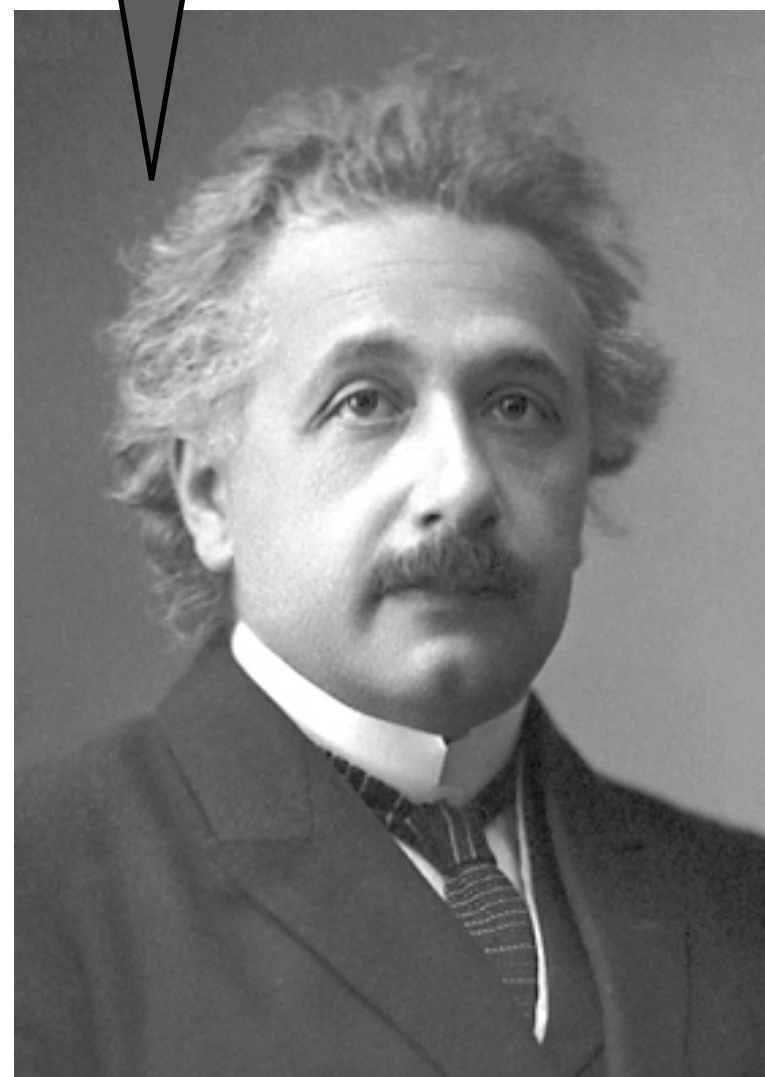
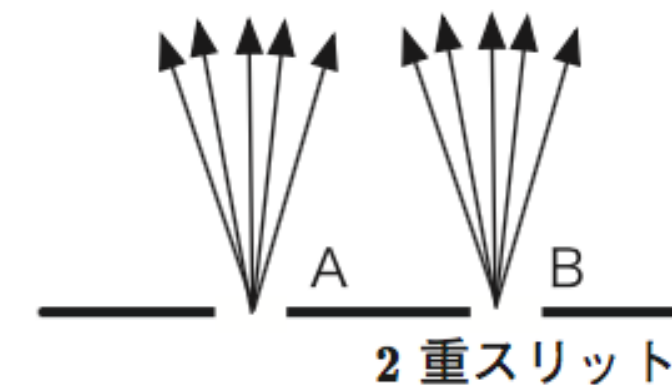
1927年ソルベー会議

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。

スクリーンには干渉縞発生



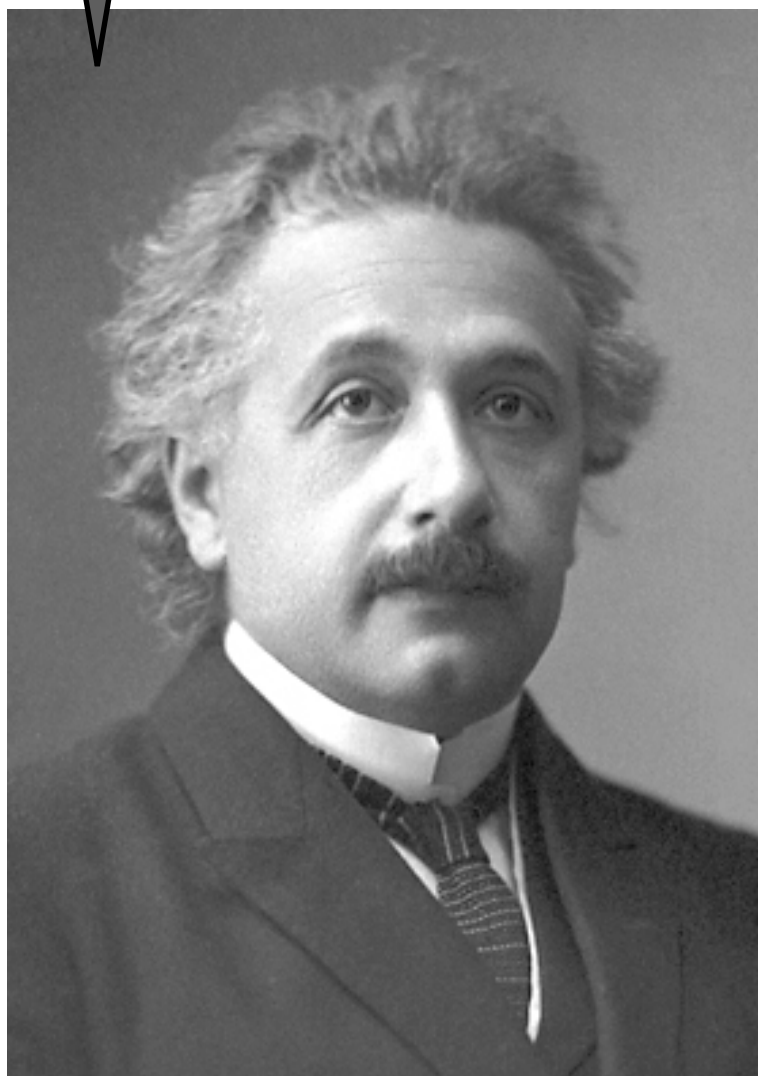
波動関数は現象を説明するための数学的なツールだ。
波動関数は個々の粒子の位置の確率を表している。

1927年ソルベー会議

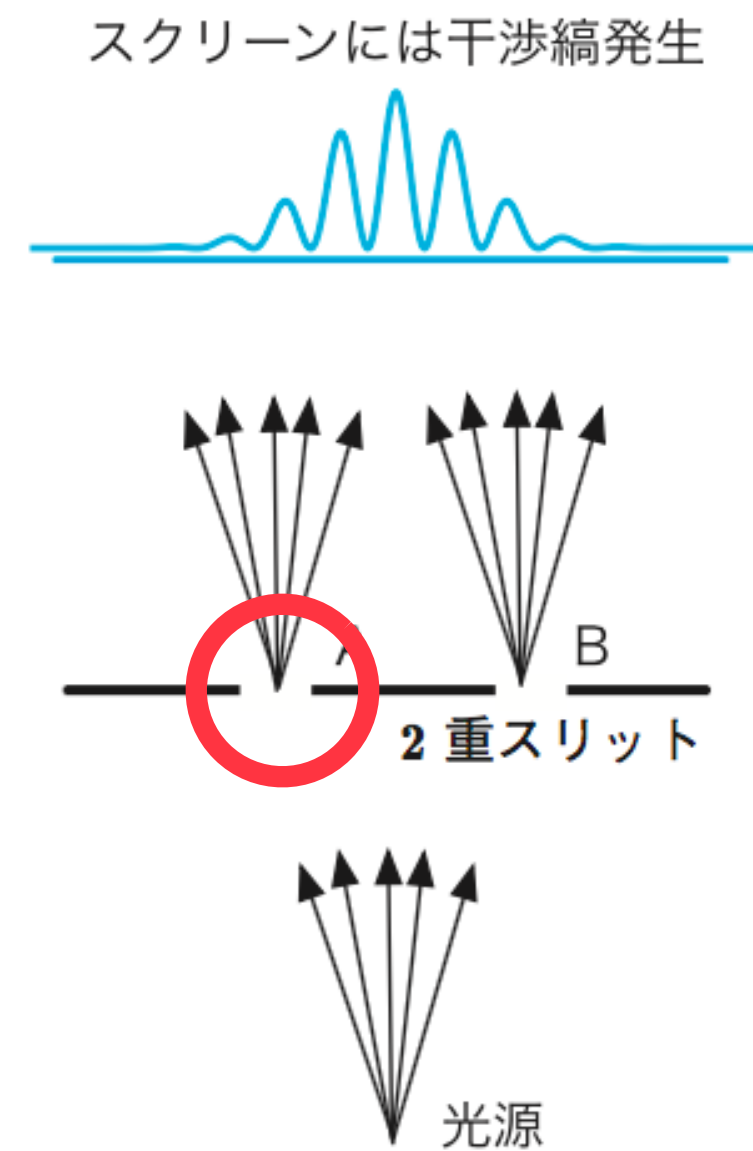
不確定性原理への反論

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.**



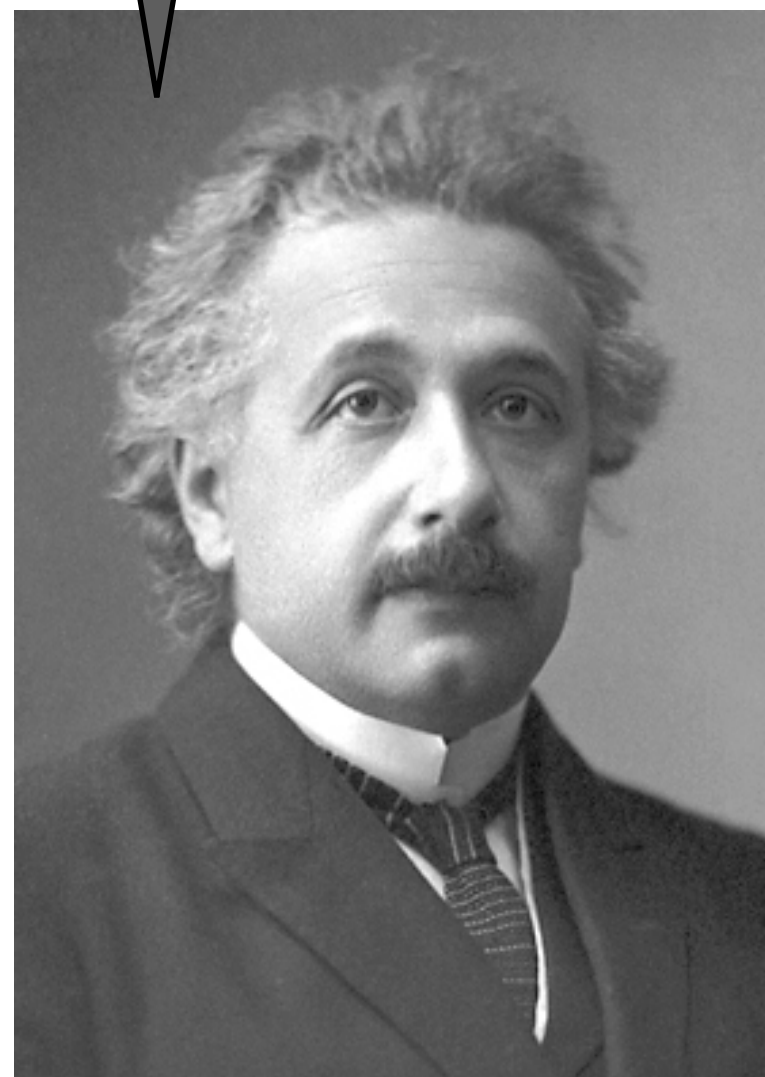
測定するときには, 何らかの力学的な反応を使う.
装置にゆらぎが生じるため, 光の位置と運動量を同時に決めることはできない.



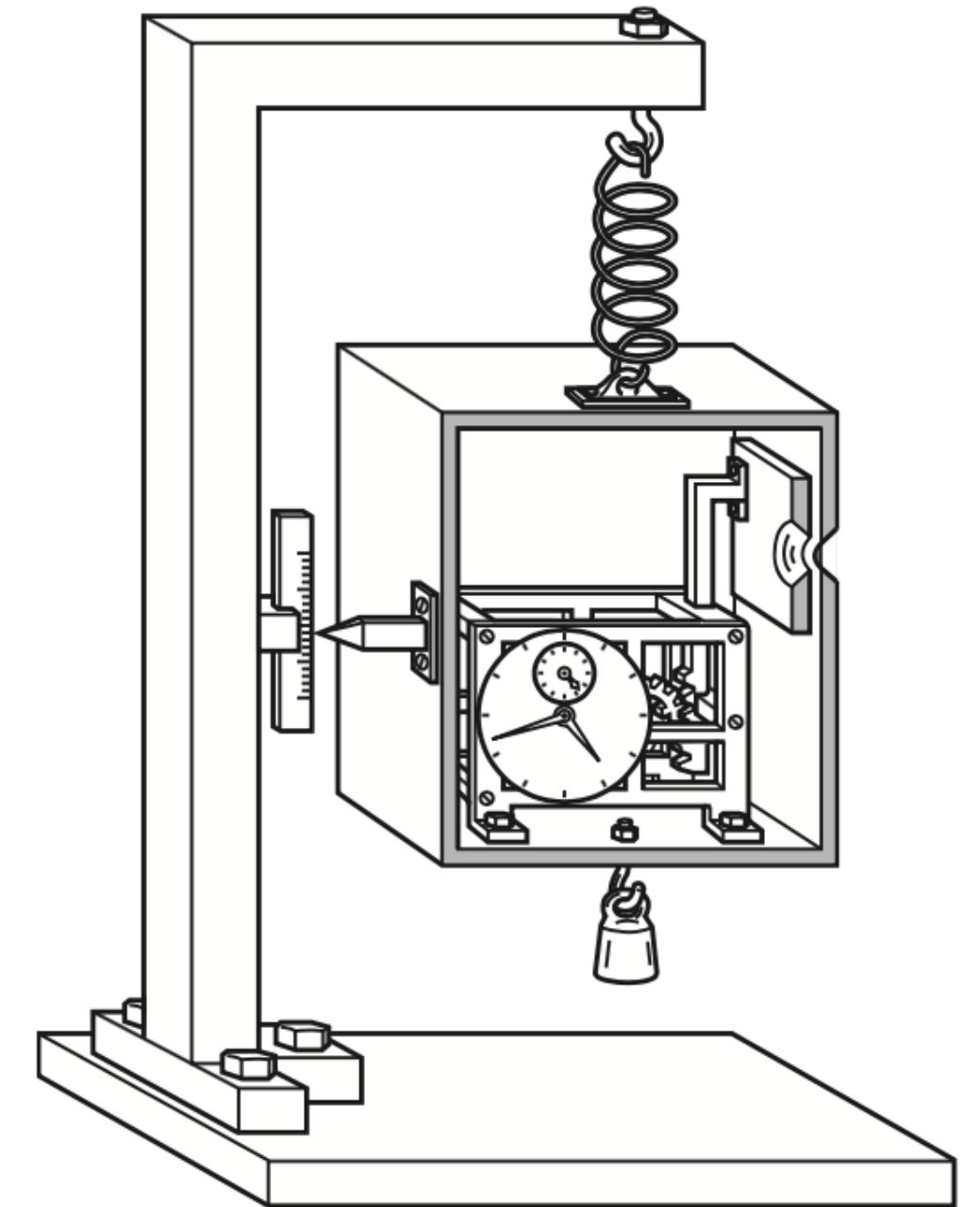
不確定性原理に関する反論

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。**

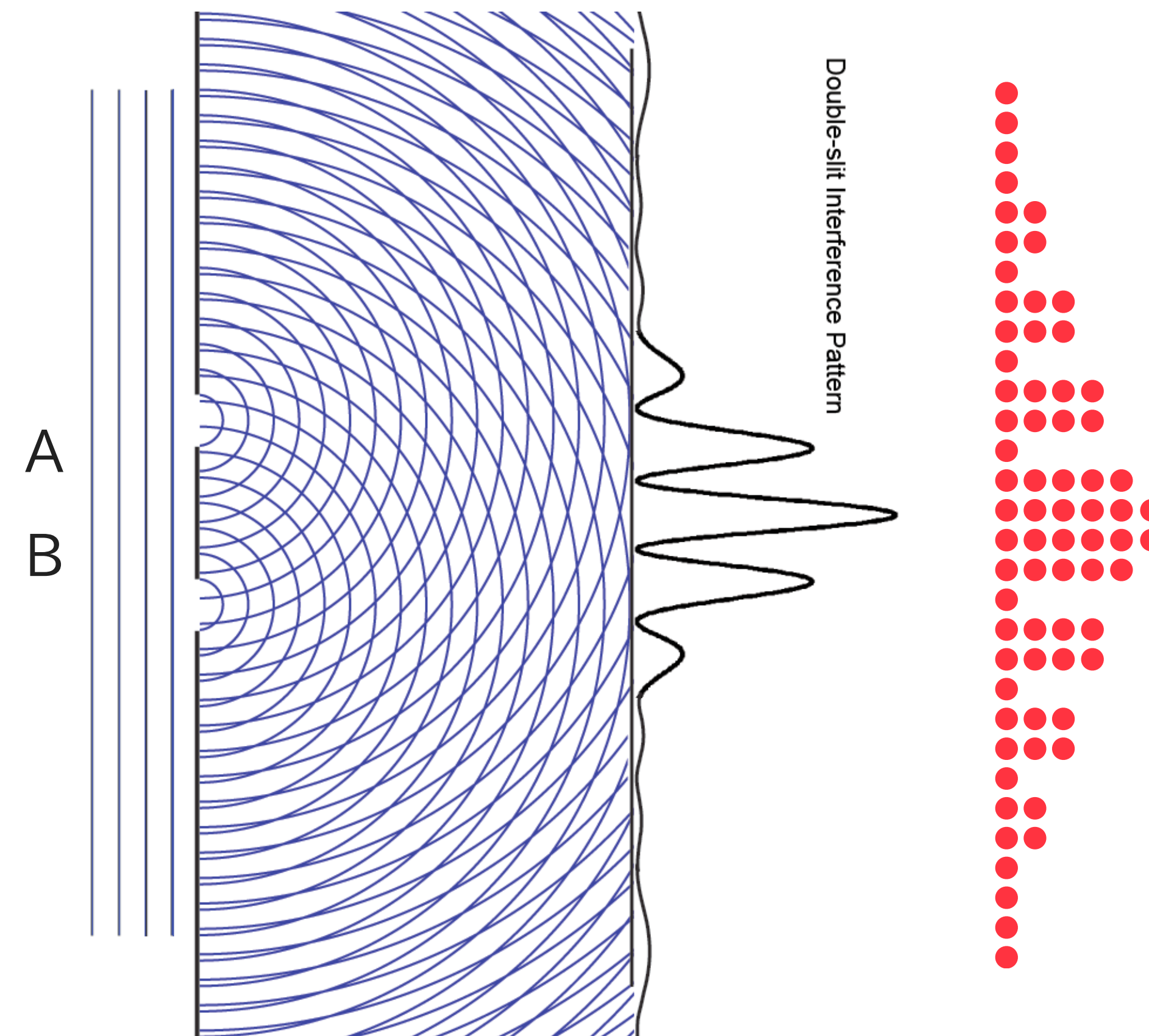


質量を測るのは重力。シャッターの開閉で重力場が変動すれば、時間が変化することを示したのは、あなたではないですか。



結局, 2重スリット実験はどう理解したらよいのか？

【問題】粒子だと考えると, A,Bどちらを通ったかが明らかになり, 干渉縞は生じない.

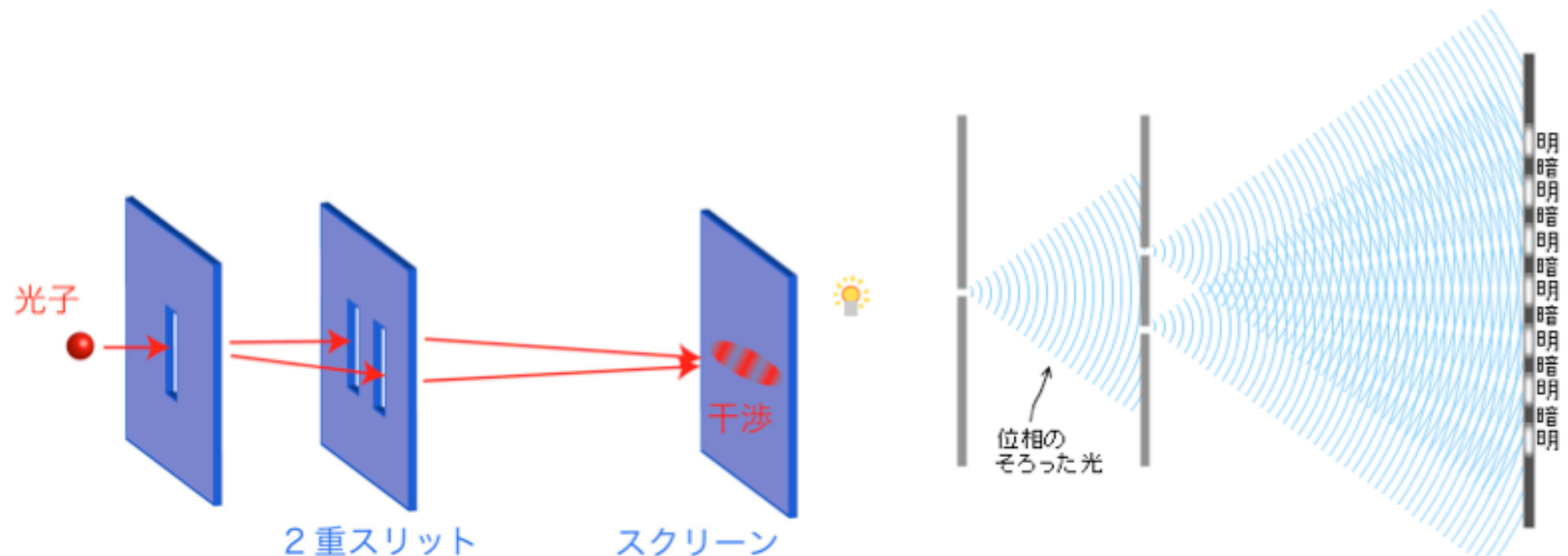
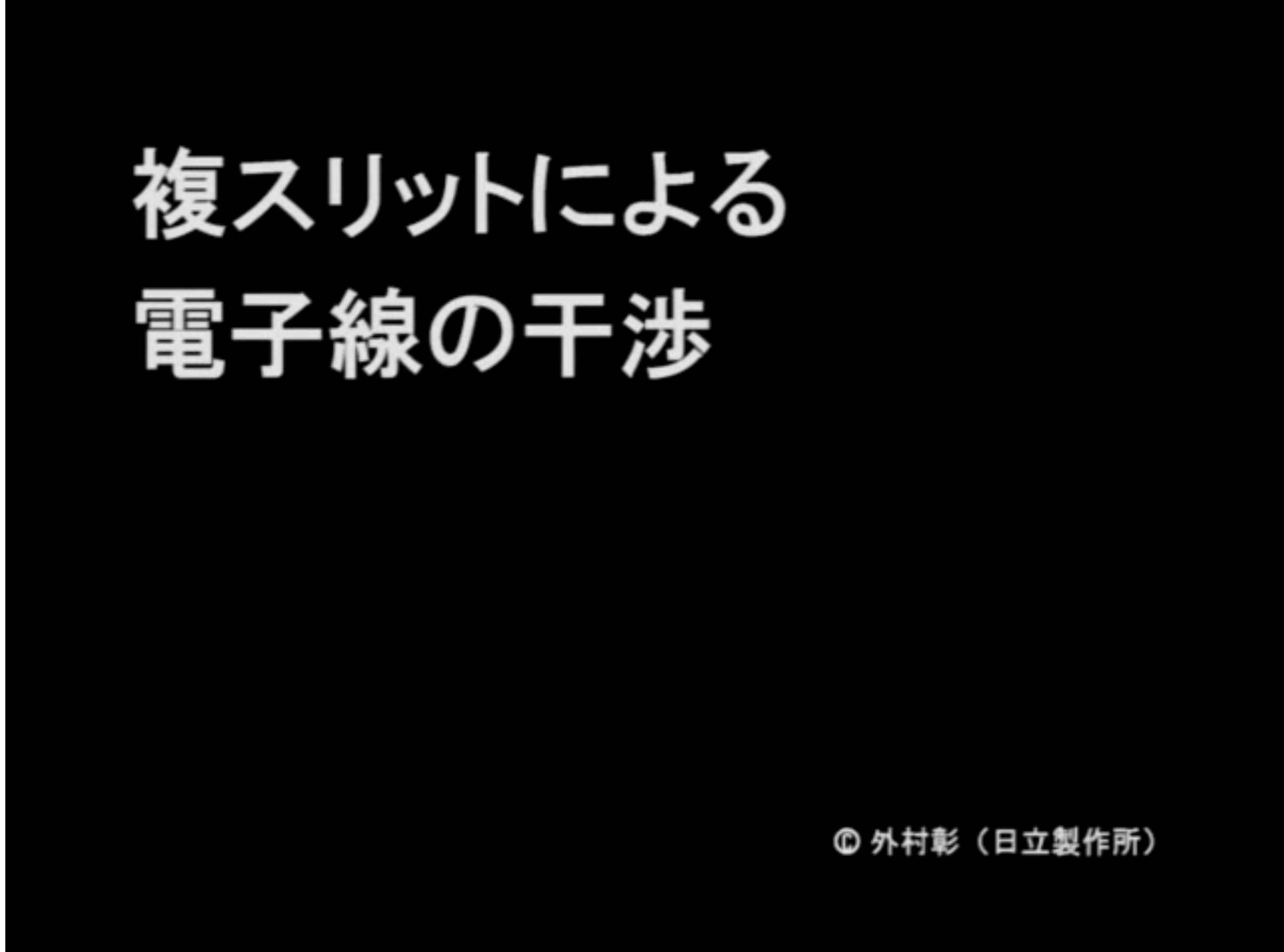


実験でも
多くの粒子を重ねると,
干渉縞が再現する.

【パラドックス】シュレーディンガーの猫

結局, 粒子はA,B どちらかを通ったのかはわからない, と考える.

量子力学では, 確率的にしか予言できない. 【「光子の裁判」レポート課題】



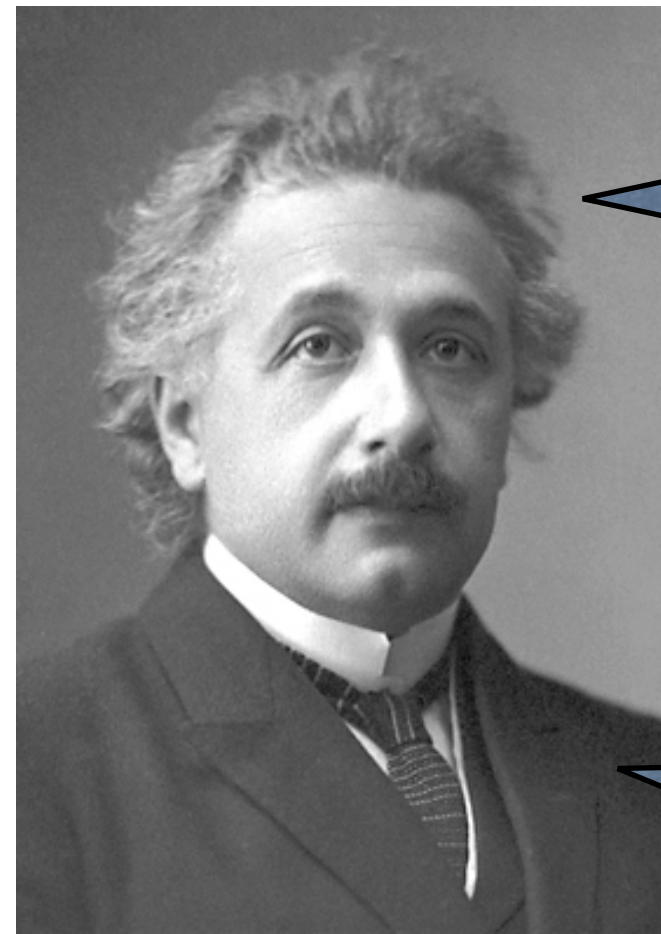
Start on Click, I'10''
 数研出版「物理図録」CDrom

粒子性と波動性

- **原子の構造から，光も物質も**
「波の性質も，粒子の性質も両方有する」と考える
- **2重スリットの実験**
光や電子が波であることの実証。粒子性に矛盾
→ **波動関数，確率解釈**
- **粒子では位置や運動量が決まるはず**
波では 位置や運動量が決まらない
→ **不確定性原理 「両方同時に測定できない」**
と考えざるを得ない
→ **観測問題** → **物理的実在とは何か**

アインシュタイン・ボーア論争 まとめ (1)

アインシュタイン

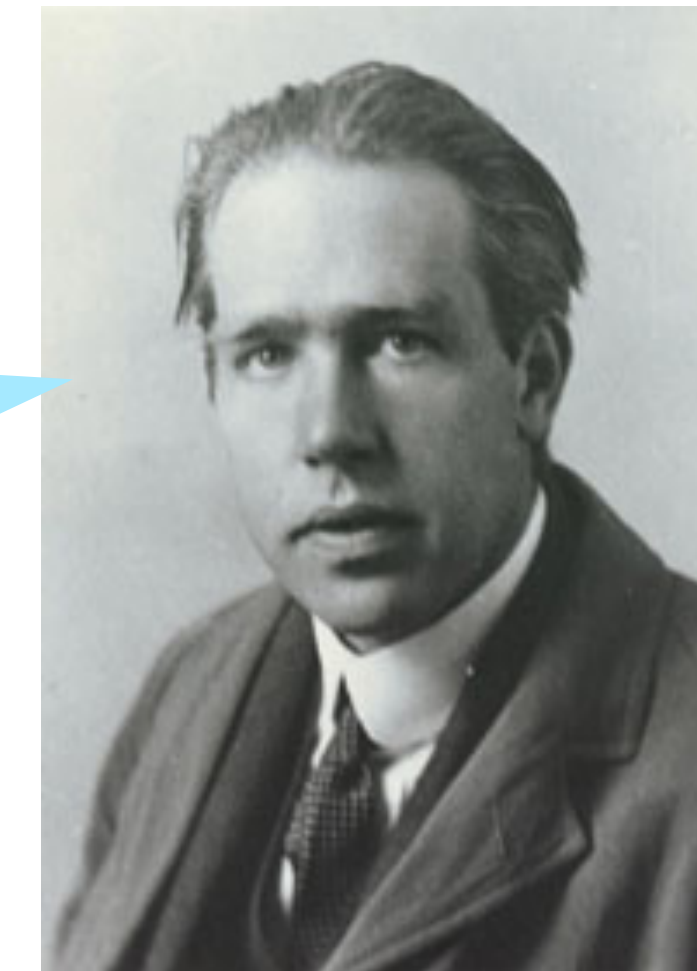


光がどちらかのスリットを通過したのか、
は測定できるはずだ。

確率でしか測定できない。
波動関数は確率を表すのだ。

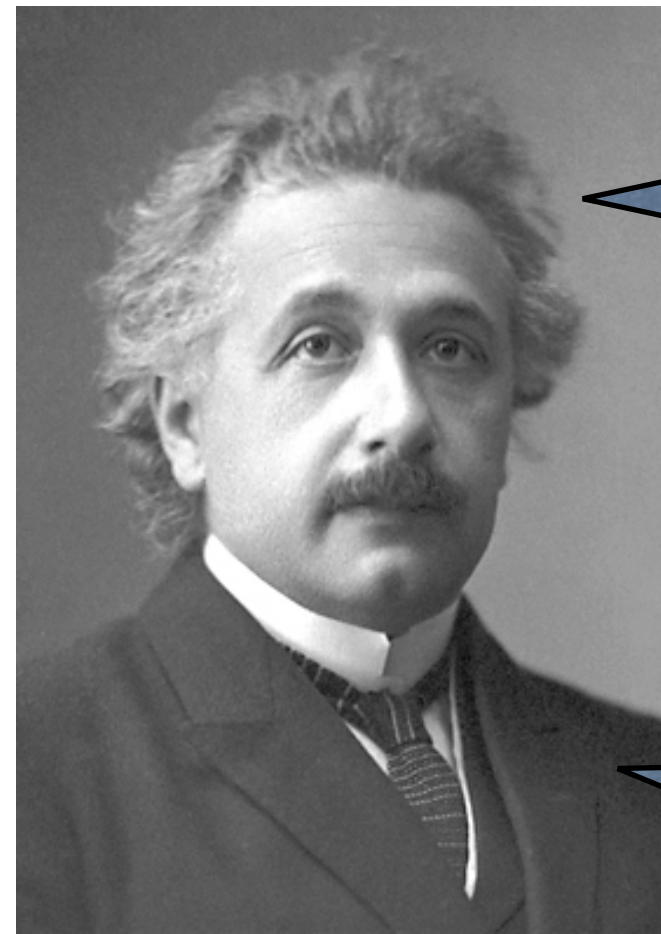
神はサイコロを振ったりしない。

ボーア
(コペンハーゲン解釈)



アインシュタイン・ボーア論争 まとめ (2)

アインシュタイン

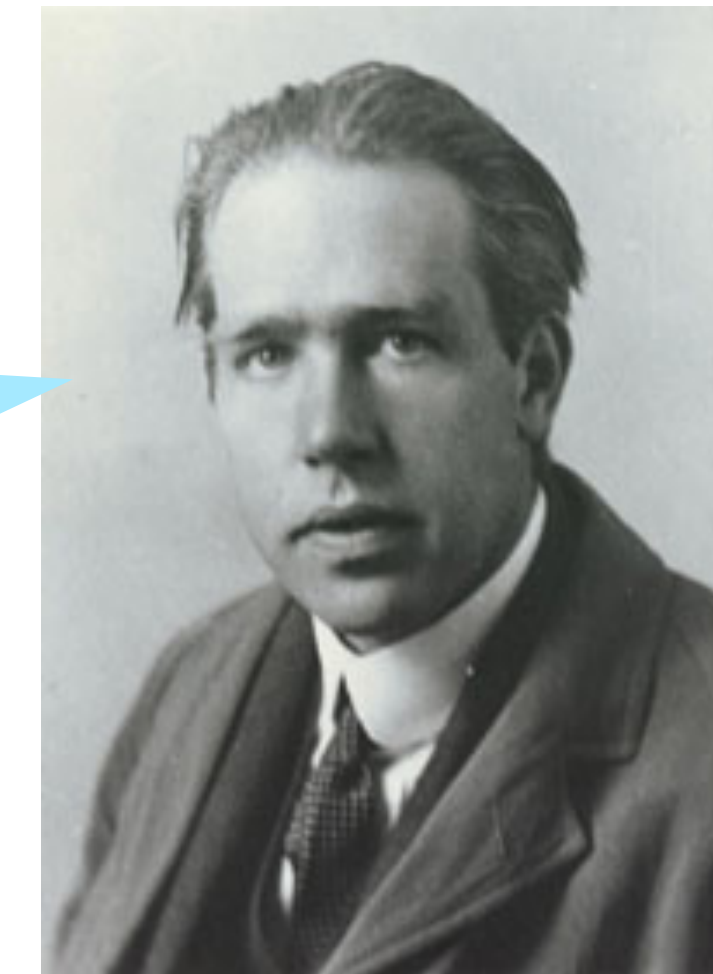


光がどちらかのスリットを通過したのか、は測定できるはずだ。

確率でしか測定できない。
波動関数は確率を表すのだ。

神はサイコロを振ったりしない。

ボーア
(コペンハーゲン解釈)

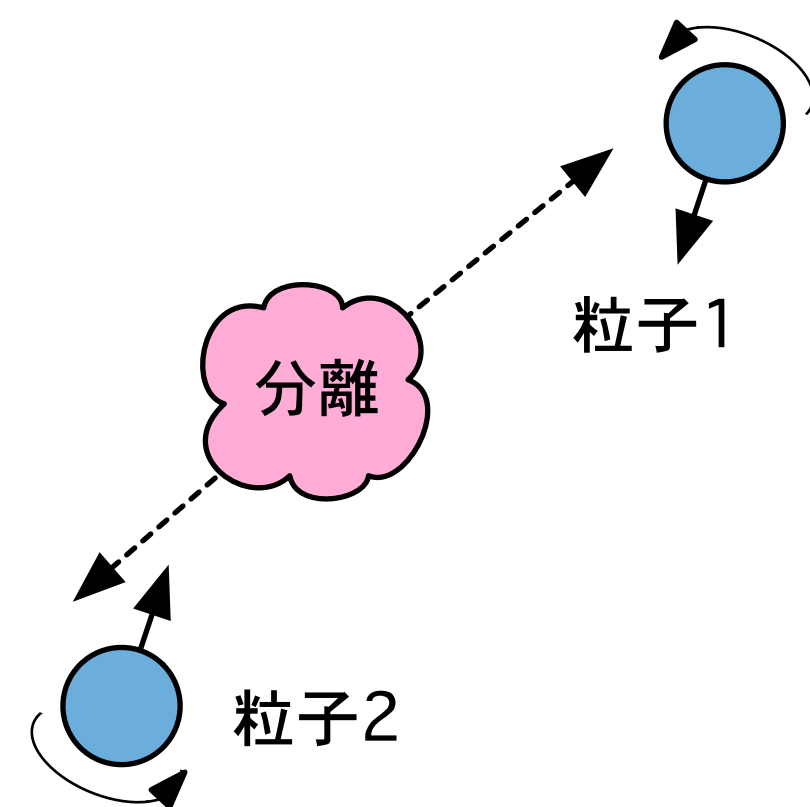


EPRパラドックスを提案

不確定性原理を認める量子力学は誤っている

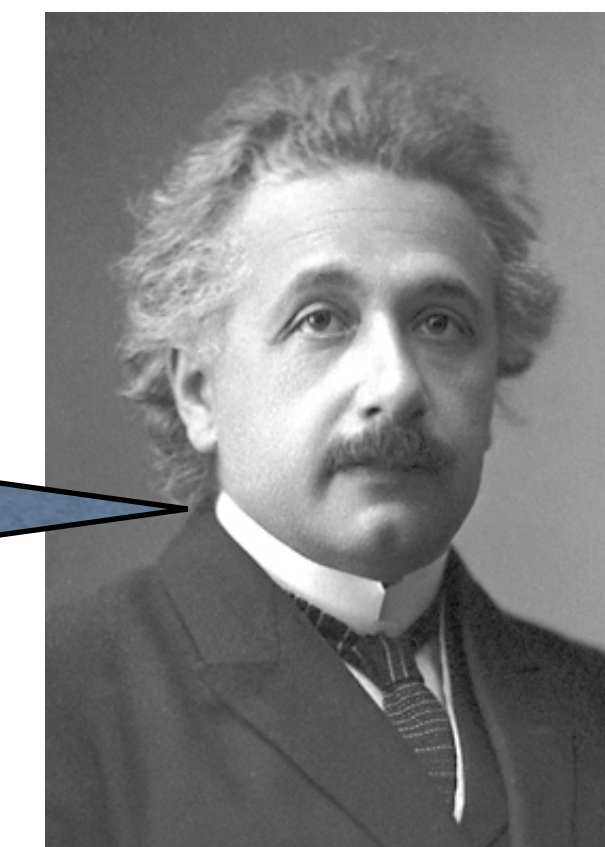
量子力学の不完全性を突く反論

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。



「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?

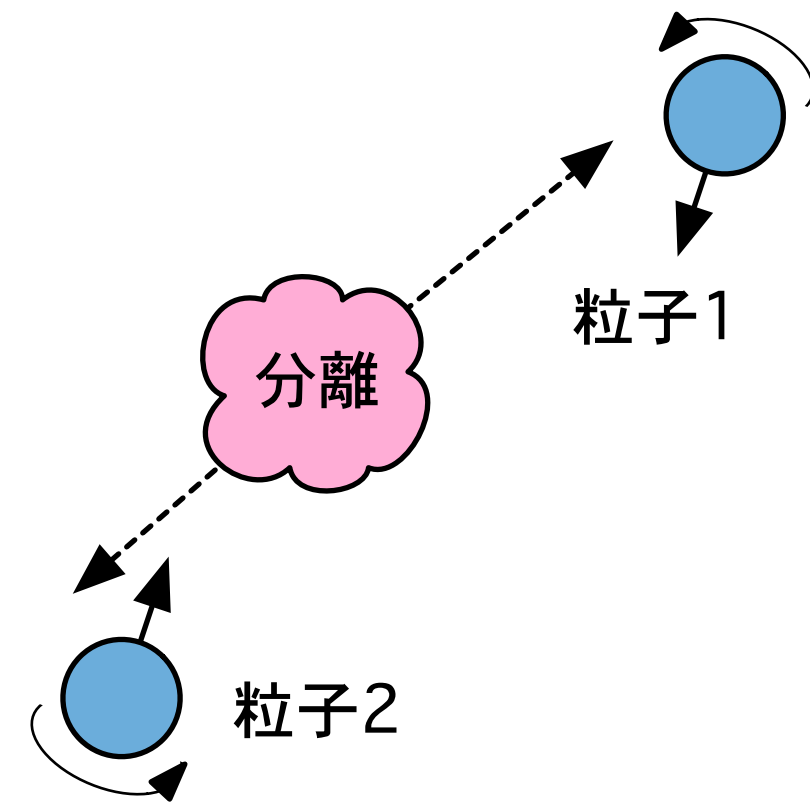
N. BOHR, *Institute for Theoretical Physics, University, Copenhagen*

(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.

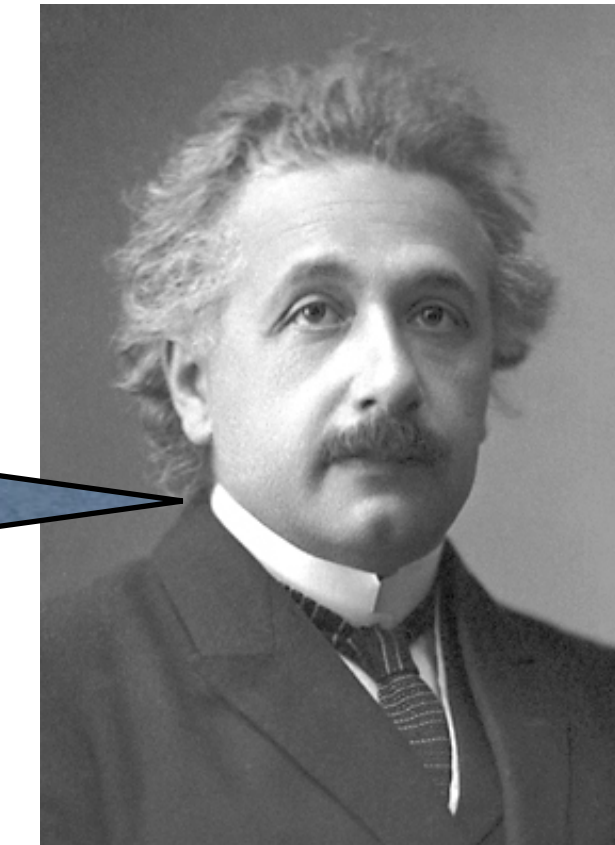
量子力学の不完全性を突く反論

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。



物理的実在が存在し、我々はそれを観測する

physical reality



「完全性」ではなく、「相補性」という考えで理解しよう。

completeness

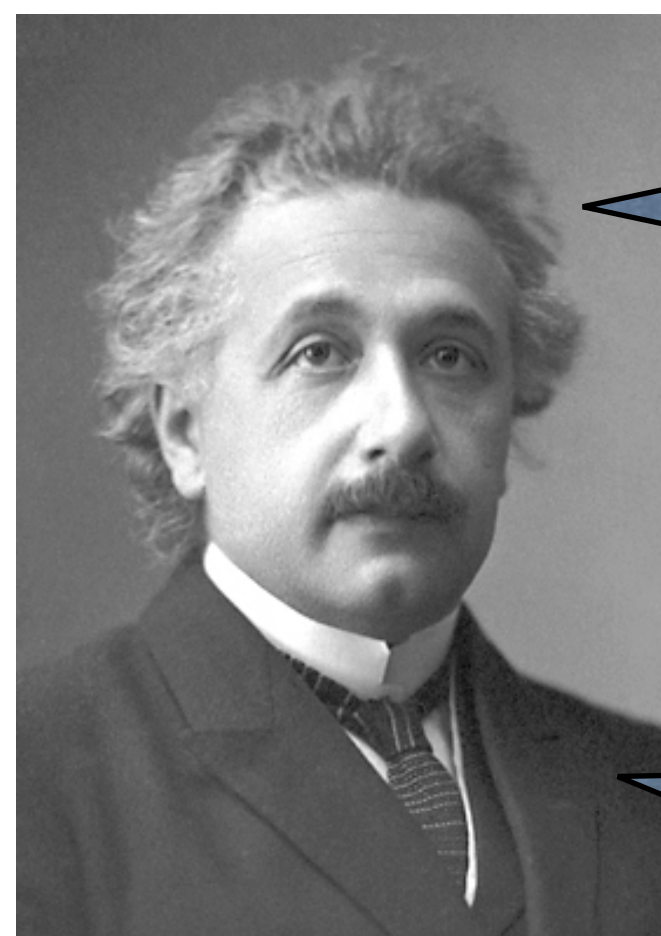
complementarity

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

アインシュタイン・ボーア論争 まとめ (3)

アインシュタイン



1955年没(76歳)

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。

確率でしか測定できない。
波動関数は確率を表すのだ。

神はサイコロを振ったりしない。

EPRパラドックスを提案

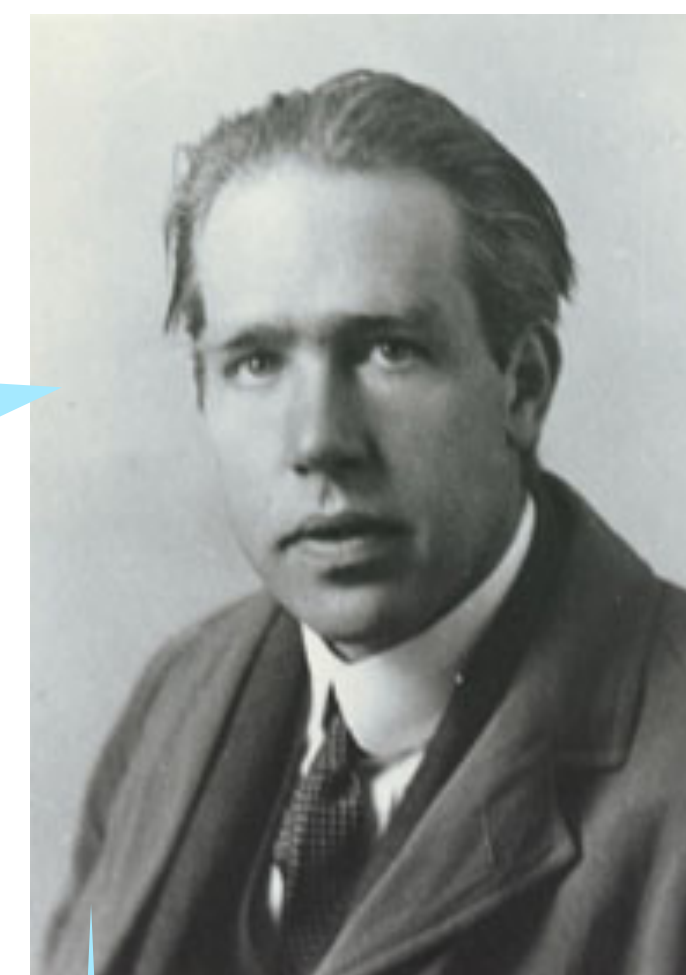
不確定性原理を認める量子力学は誤っている

物理的実在が存在し、我々はそれを観測する

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

ベルの不等式の破れが確認され、こちらが正しい

ボーア
(コペンハーゲン解釈)



1962年没(77歳)

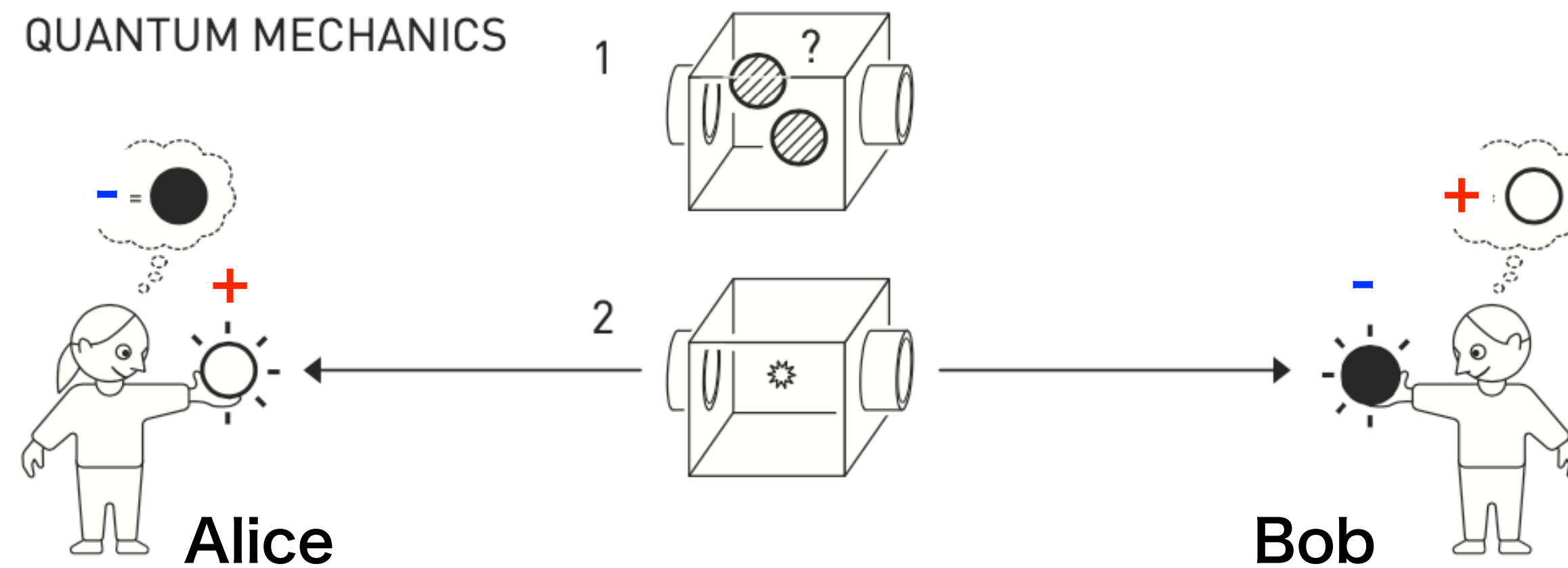
ベルの不等式 (1964)



John S. Bell
(1928-1990)

1964年 「EPRは実験で確かめられる」

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が正しいければ、
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。

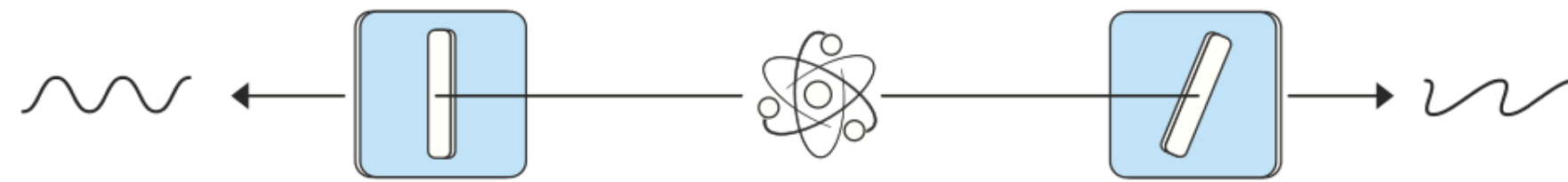
ベルの不等式は破れている！（量子論の考えが正しい）



1969

ジョン・クラウザー
米

Experimenting with Bell inequalities

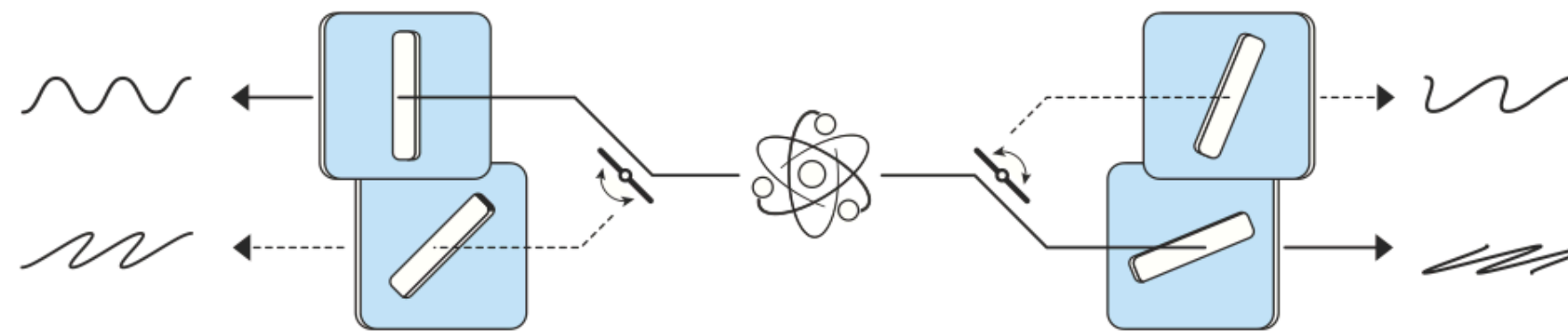


John Clauser used calcium atoms that could emit entangled photons after he had illuminated them with a special light. He set up a filter on either side to measure the photons' polarisation. After a series of measurements, he was able to show they violated a Bell inequality.

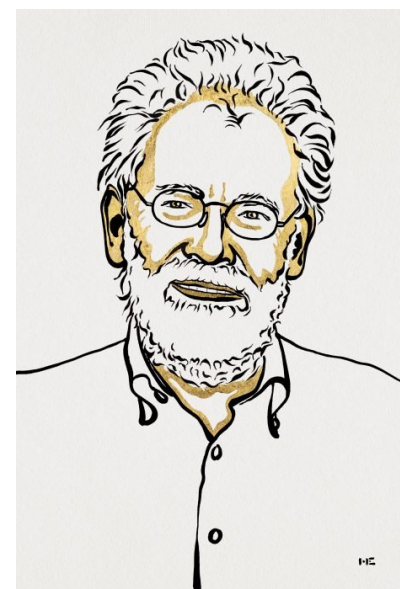


1980s

アラン・アスペ
仏パリ・サクレ大

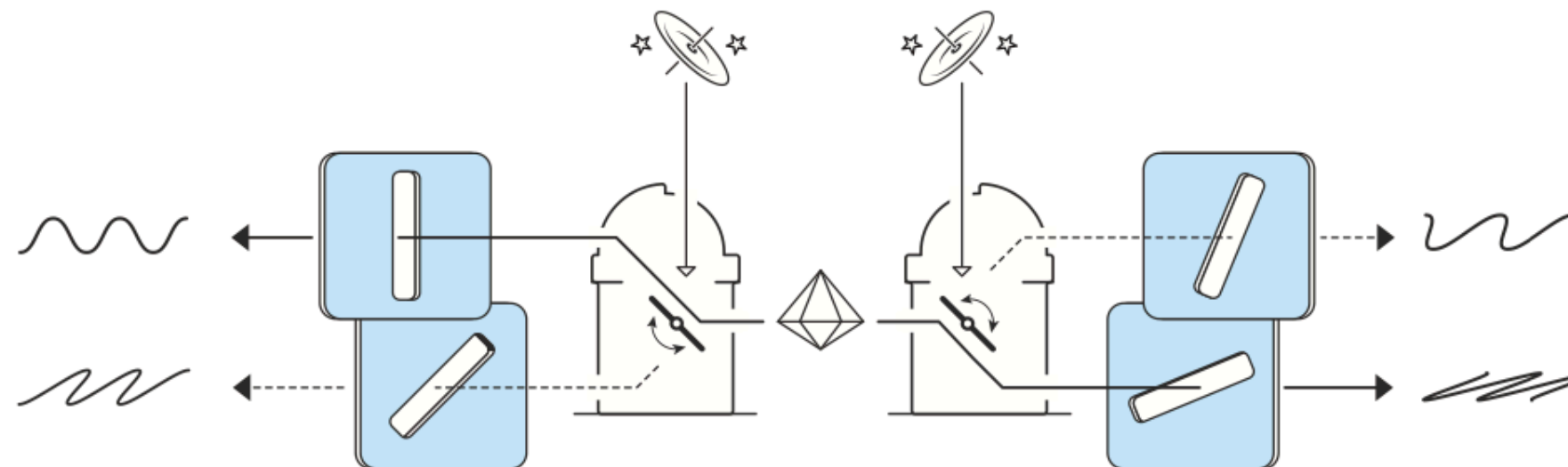


Alain Aspect developed this experiment, using a new way of exciting the atoms so they emitted entangled photons at a higher rate. He could also switch between different settings, so the system would not contain any advance information that could affect the results.

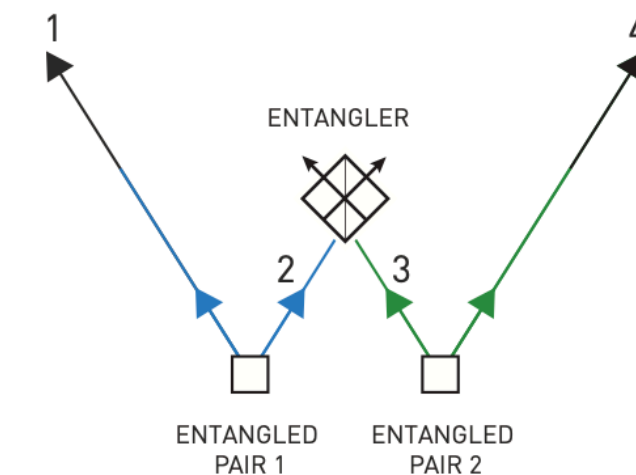


1997
1998

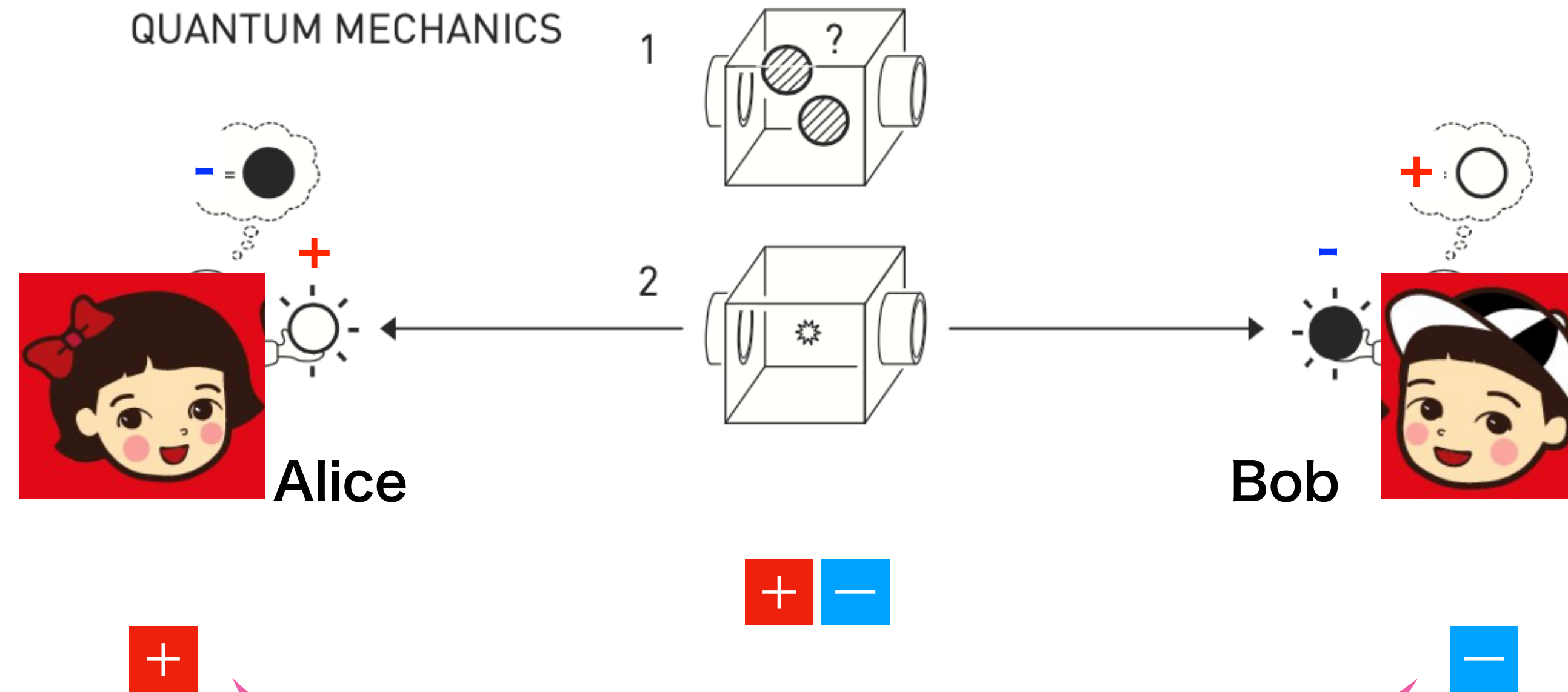
アントン・ツァイリンガー
オーストリア・ウィーン大



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)



たとえ遠方でも量子状態は絡み合っている。
= 量子もつれ

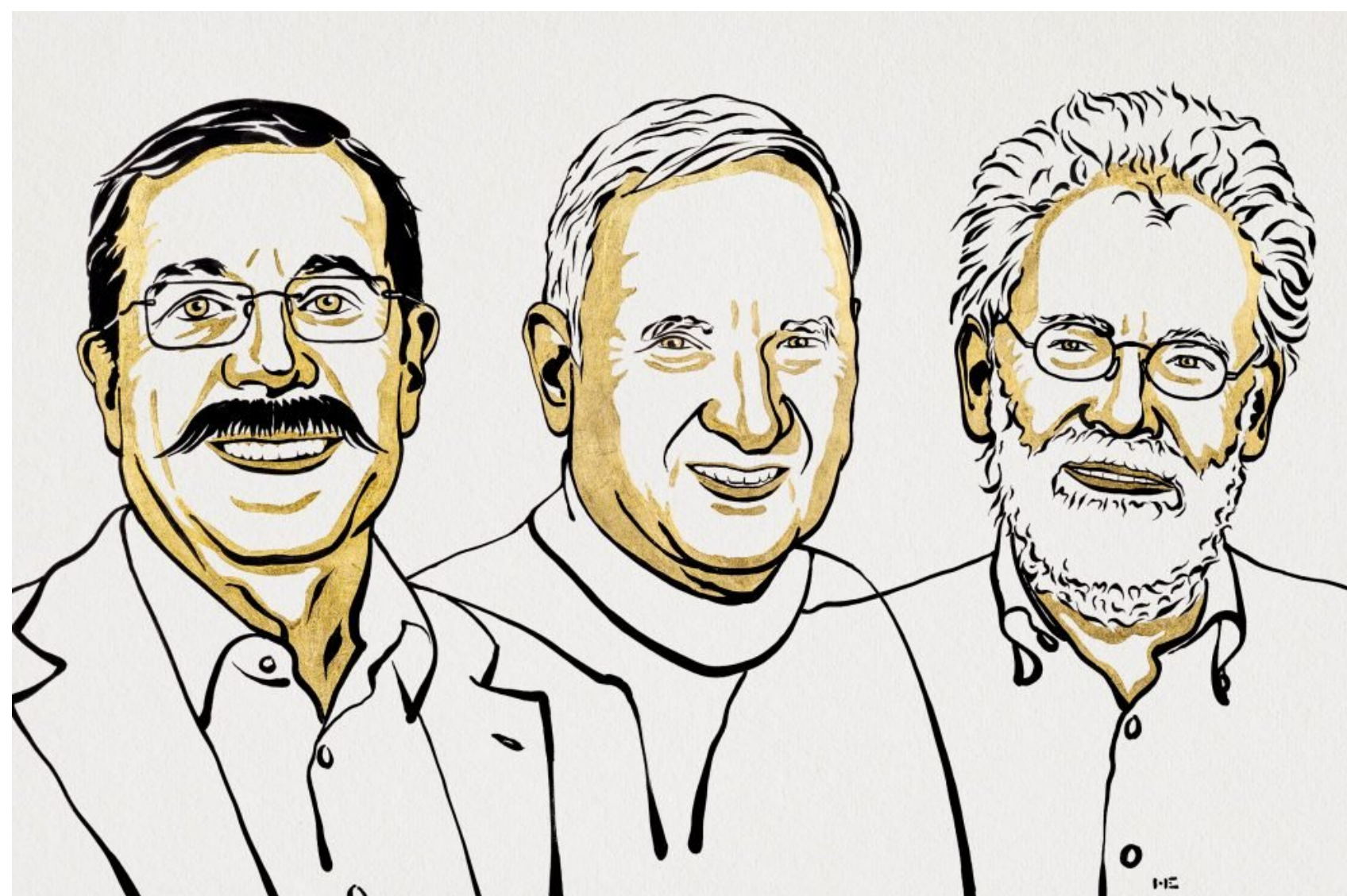
locality realism
EPRが仮定した、物理量の**局所性**と**実在性**の2つは、同時には成り立たない。

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

“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

アインシュタインは友人パイプに向かって尋ねた。

**「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。



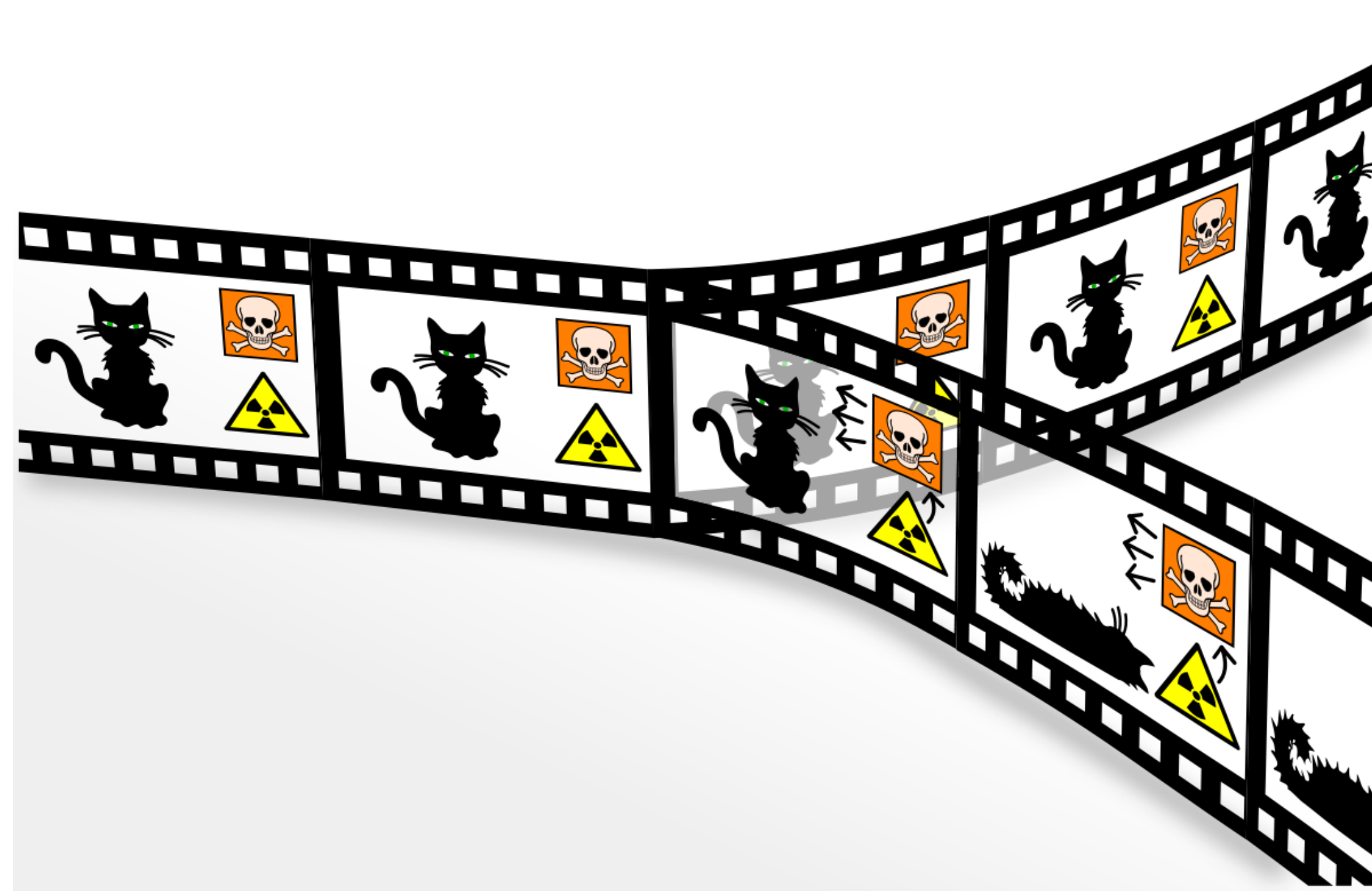
観測問題の解釈の1つ：多世界解釈

Many-worlds interpretation



Hugh Everett
(1930-82)

すべてが決定論的であると考えれば、観測を行うたびに、世界が分岐していくようなものだ。

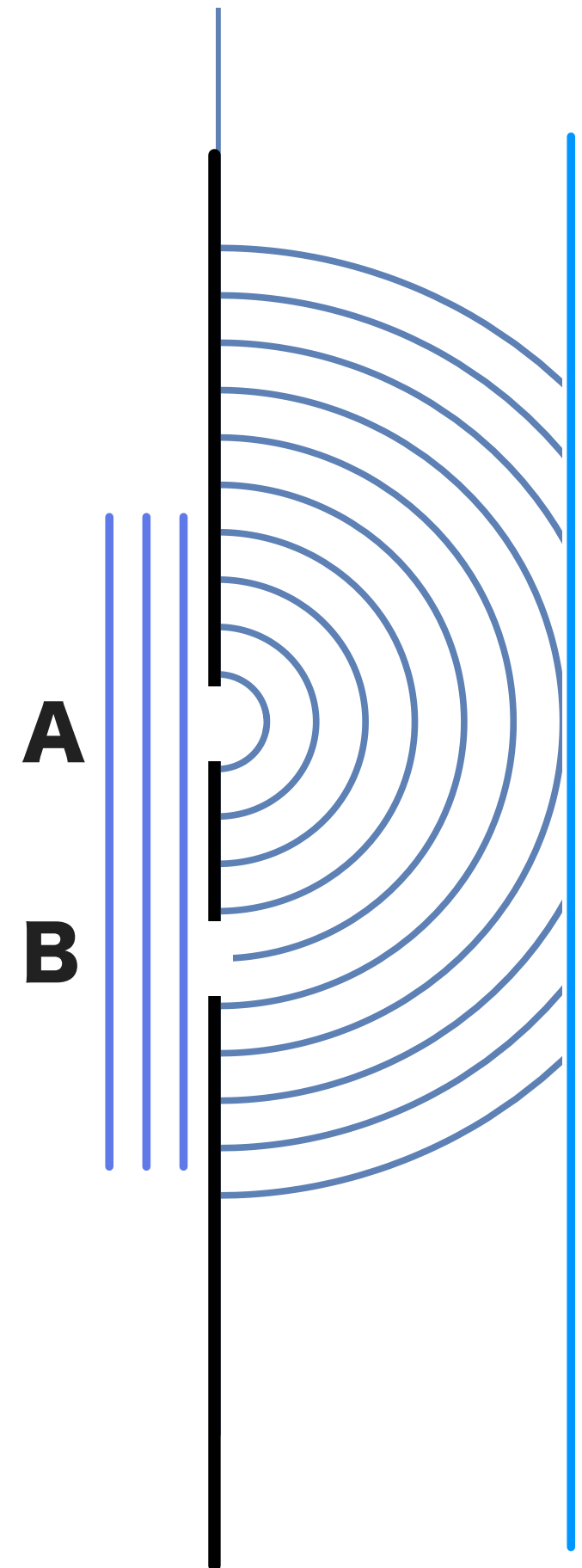


“Parallel world”

2重スリット実験の解釈

Aを通ったことが確実ならば、干渉縞は生じない。1つの山になる。

AとBのどちらを通過したか不明ならば干渉縞は生じる。



A/Bどちらを通過したのかは確率でしかわからない！

確率解釈 (コペンハーゲン解釈)

物理現象は決定論的ではないのか？

(アインシュタイン)

猫は生きているのか死んでいるのか？

(シュレーディンガー)

波と粒子を両立させると、物理量の最小値が決まらない！

不確定性原理

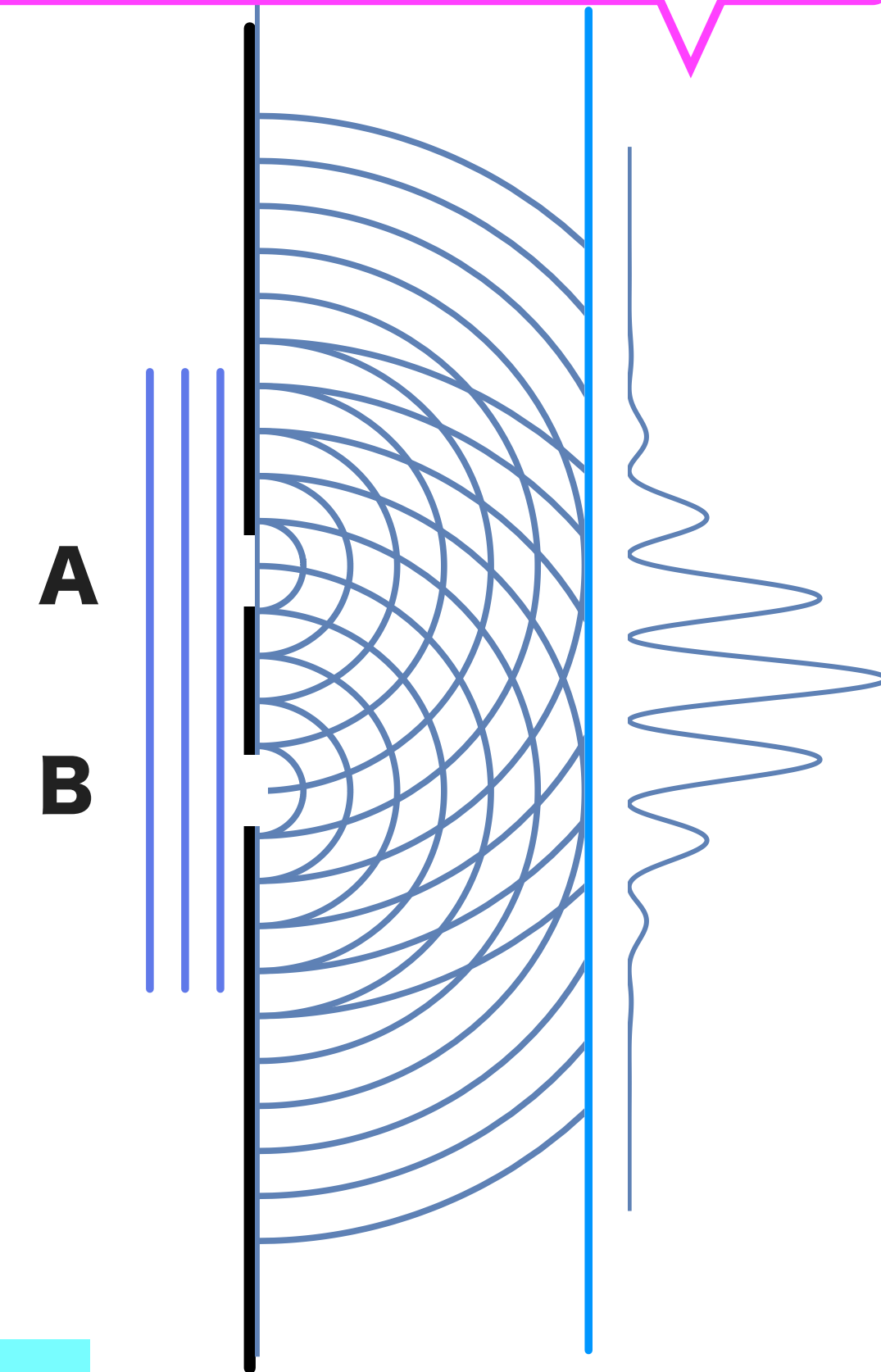
EPRパラドクス (アインシュタイン)

「検知器」を置いたら干渉縞は生じない！

人間が観測する行為が自然界を乱す

観測問題, 多世界解釈 (パラレルワールド)

物理現象は観測者によって変わるのか？



本日のミニツツペーパー記入項目

(本日の講義から)

【11-1】ボーアの考えた原子モデルは2つの仮定から成り立っている. 何と何か.

【11-2】遠方の星が赤方偏移していることから宇宙膨張が発見されたが,
遠方(宇宙初期)には赤い星が多い, と考えなかった理由は何か.

【11-3】アインシュタインは, 光電効果を説明するために,
光が粒子であることを提案したが, 結果的にできあがった
量子論を受け入れなかった. 何が納得いかなかったのか.

(次回から宇宙論です)

【11-4】通信欄. (感想, 講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項
など、何かあれば)

出席票を兼ねます.

