

# 宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論**
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

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

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>

# 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」

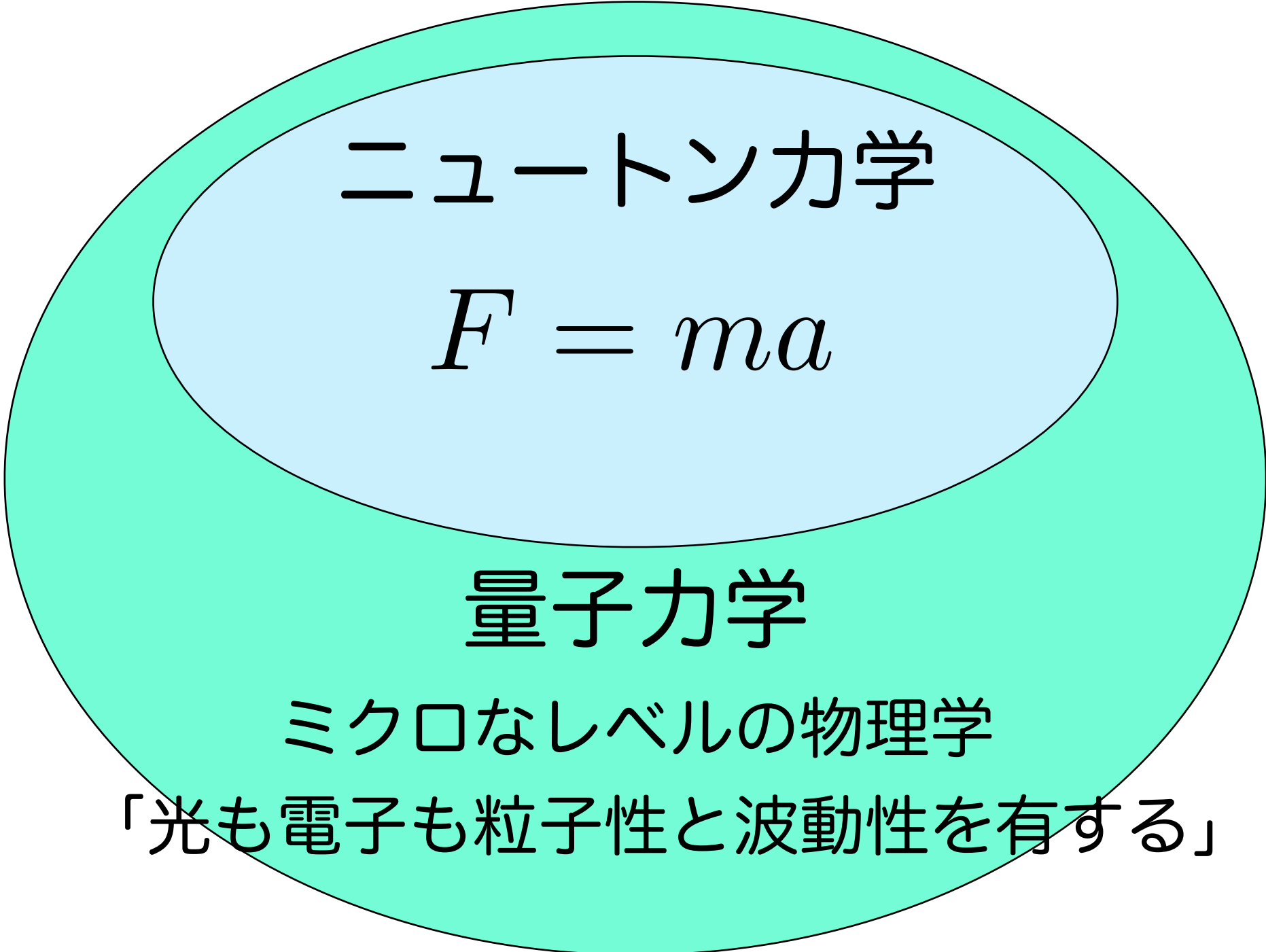
## 特殊相対性理論

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

$$F = ma$$



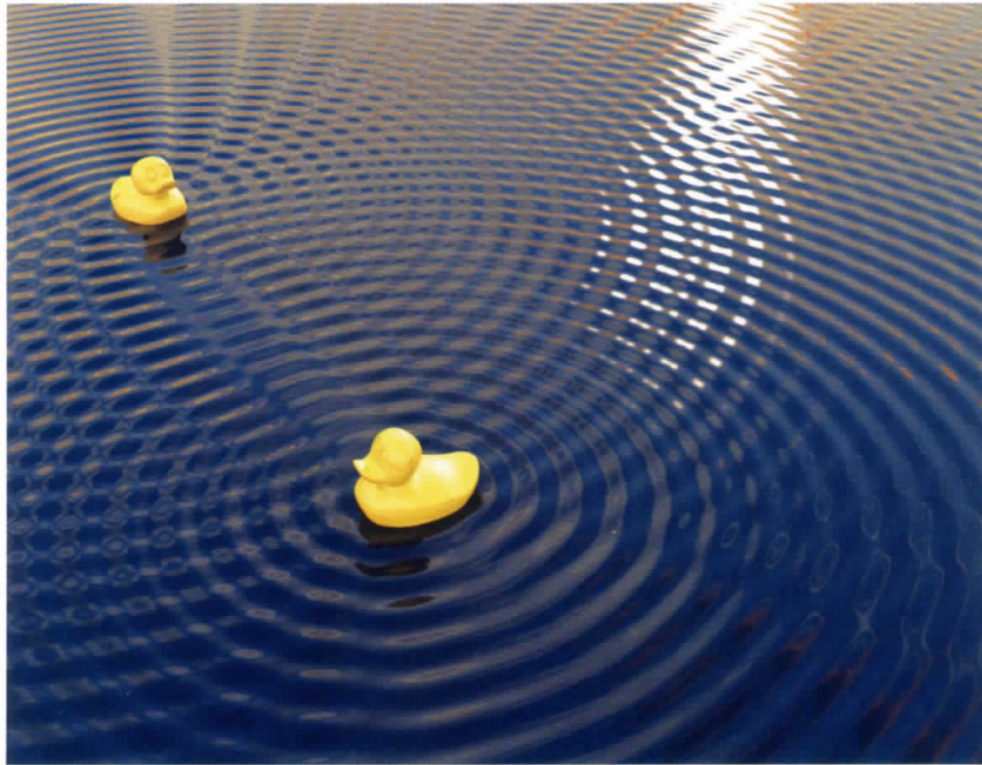
ニュートン力学

$$F = ma$$

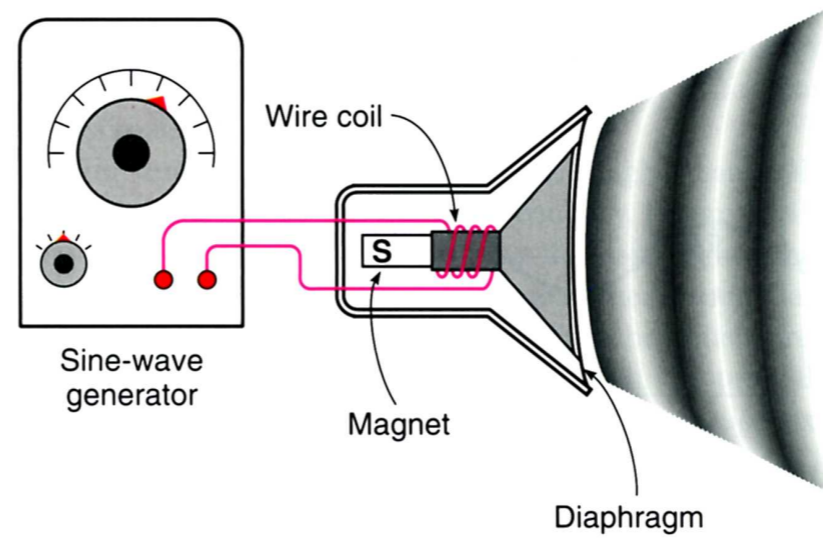
量子力学

ミクロなレベルの物理学

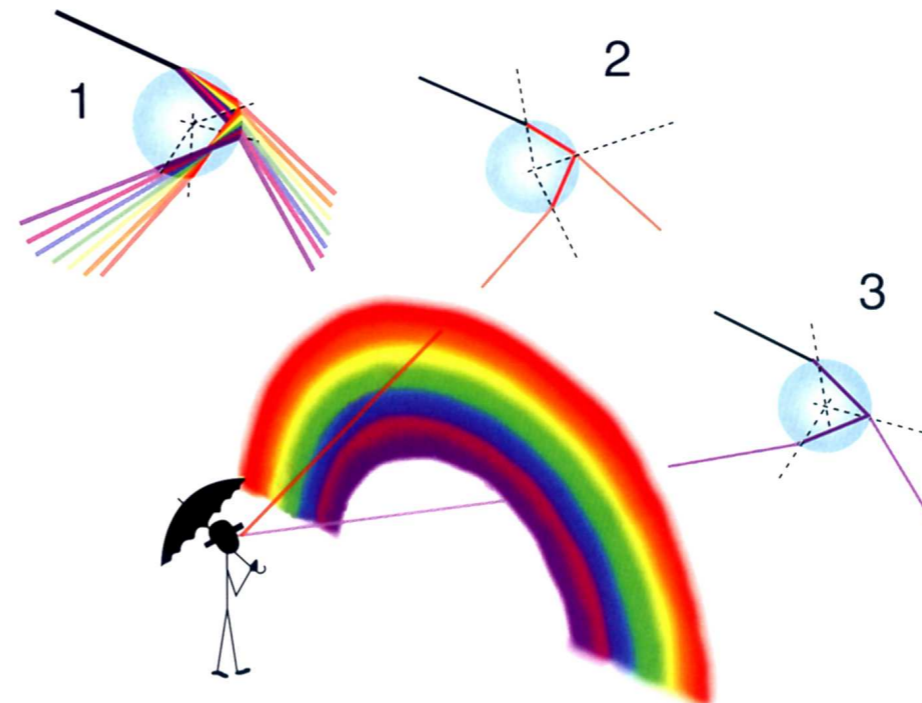
「光も電子も粒子性と波動性を有する」



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



**figure 15.15** An oscillating current applied to the coil of wire attached to the diaphragm of a speaker makes the diaphragm oscillate as it is attracted to or repulsed by the magnet, generating a sound wave.

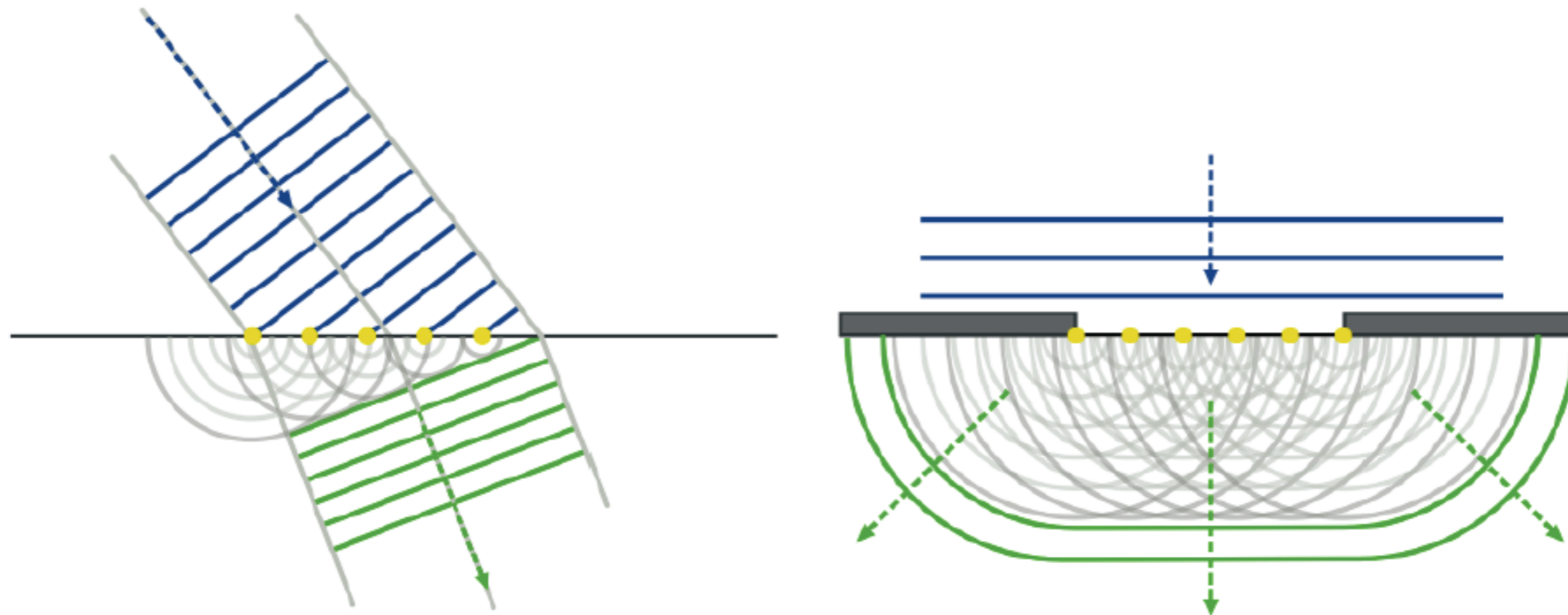


**FIGURE 2.19** ► How the rainbow forms. Each water droplet, schematically represented by a sphere, is penetrated by white light, which is dispersed, then partly refracted outside the droplet, partly internally reflected.

# 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)



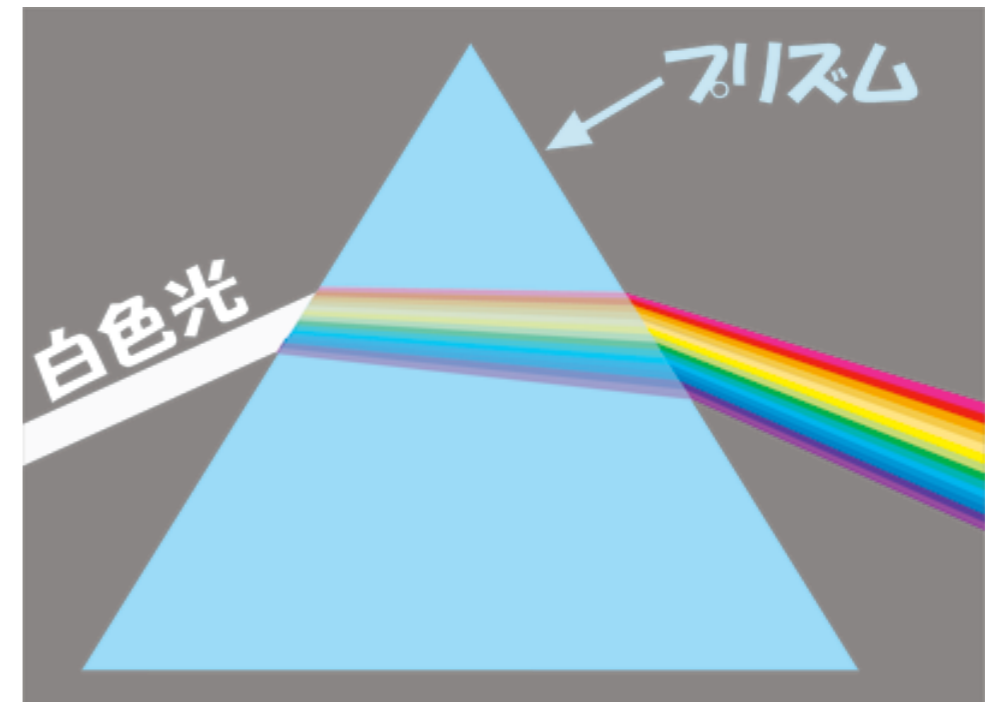
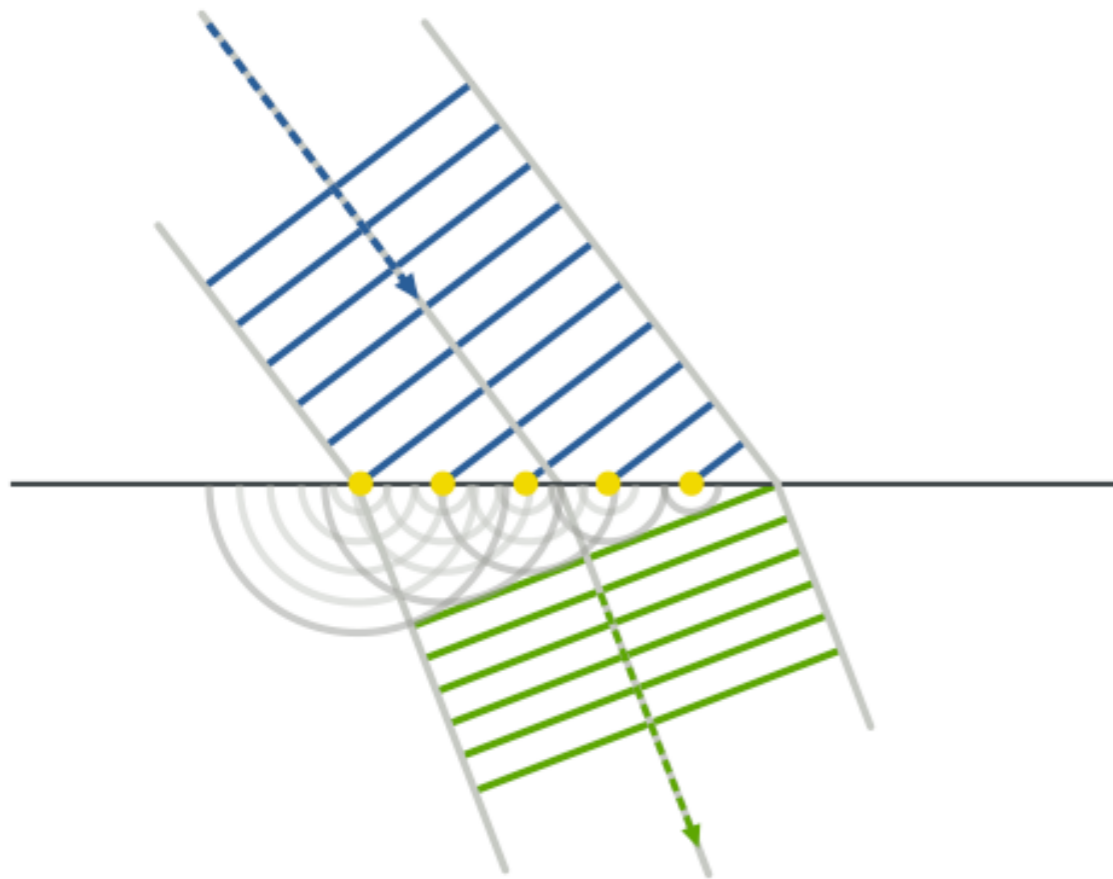
Christiaan Huygens  
(1629–95)



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

# 屈折 (refraction)

媒質が異なるところへ進むとき、波は**屈折**する。



波は素元波の合成である  
(ホイヘンス)

# 重ね合わせ (superposition)

- 同じ位相の波を重ね合わせるとき 波は強め合う。

山 + 山 = 強め合う

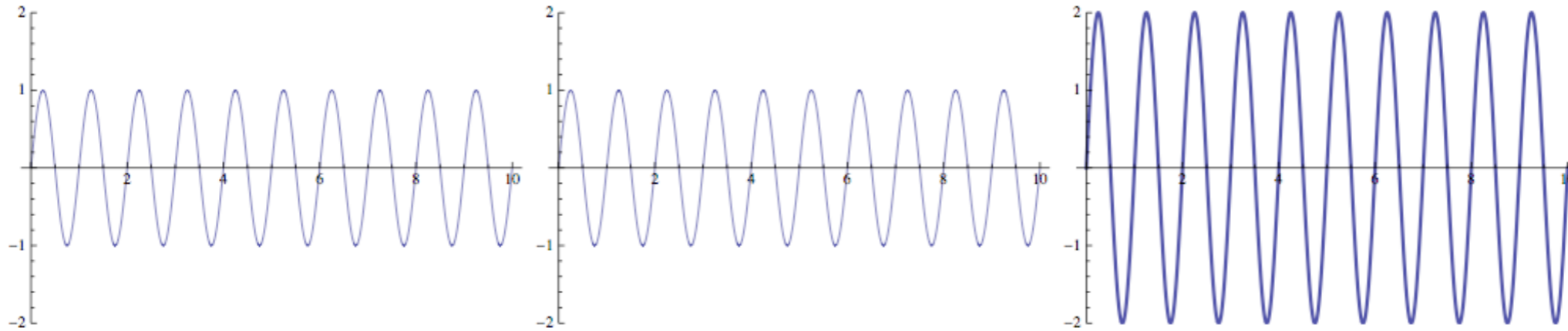


図 31: 左 2 つの波を足すと右の波になる.  $y_1(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $y_2(t) = y_1(t)$  としたときの,  $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$  の図.

- 逆位相の波を重ね合わせるとき 波は弱め合う。

山 + 谷 = 弱め合う

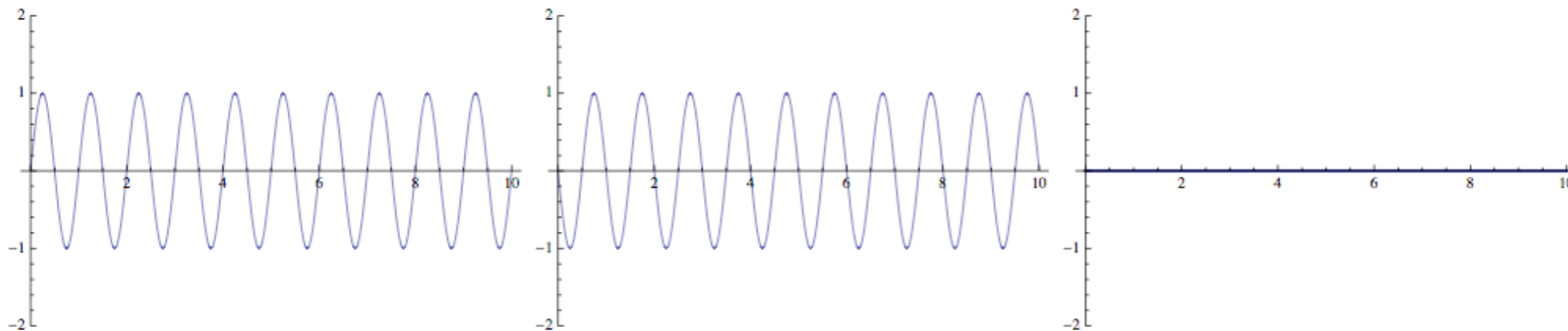
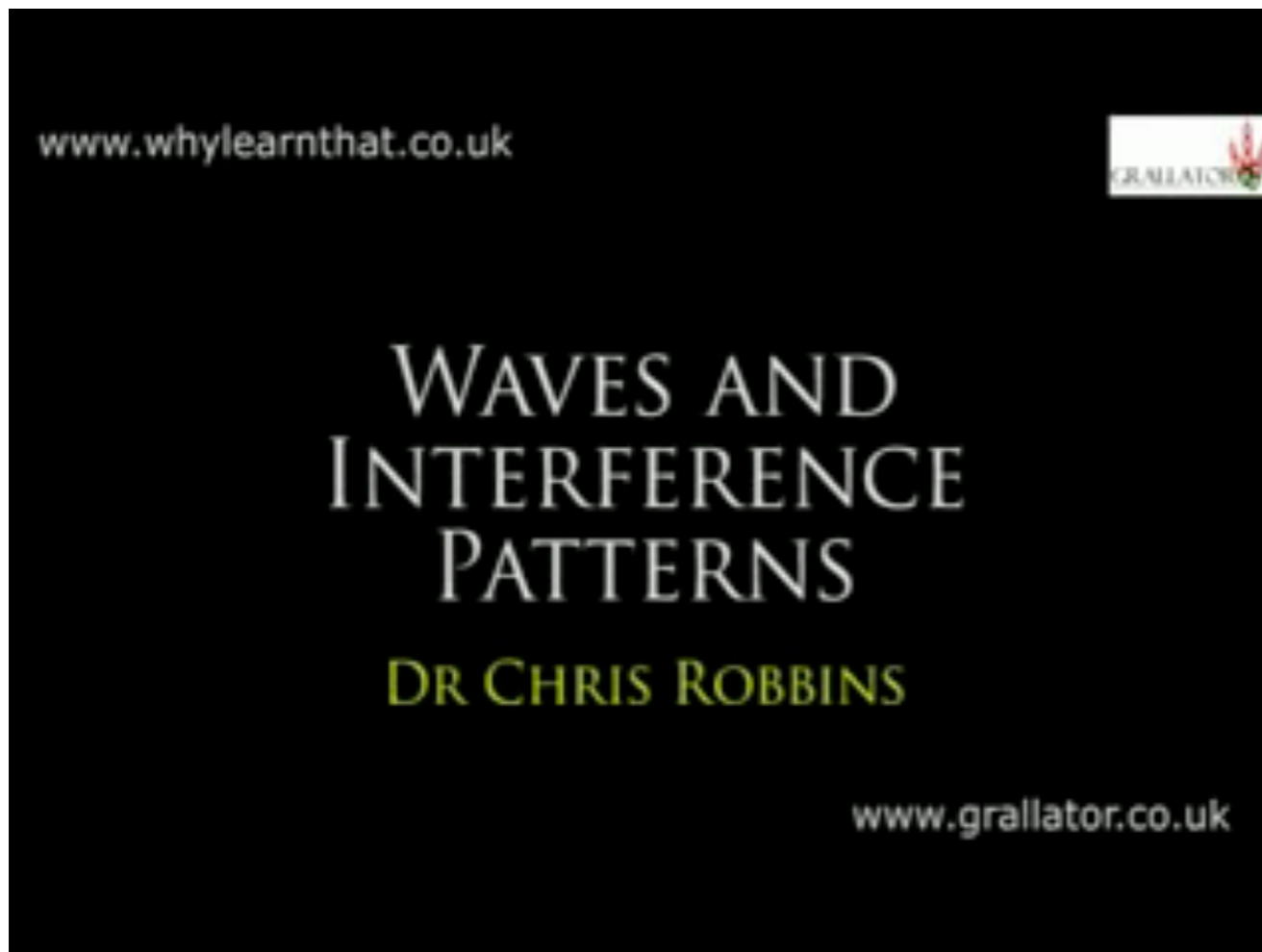
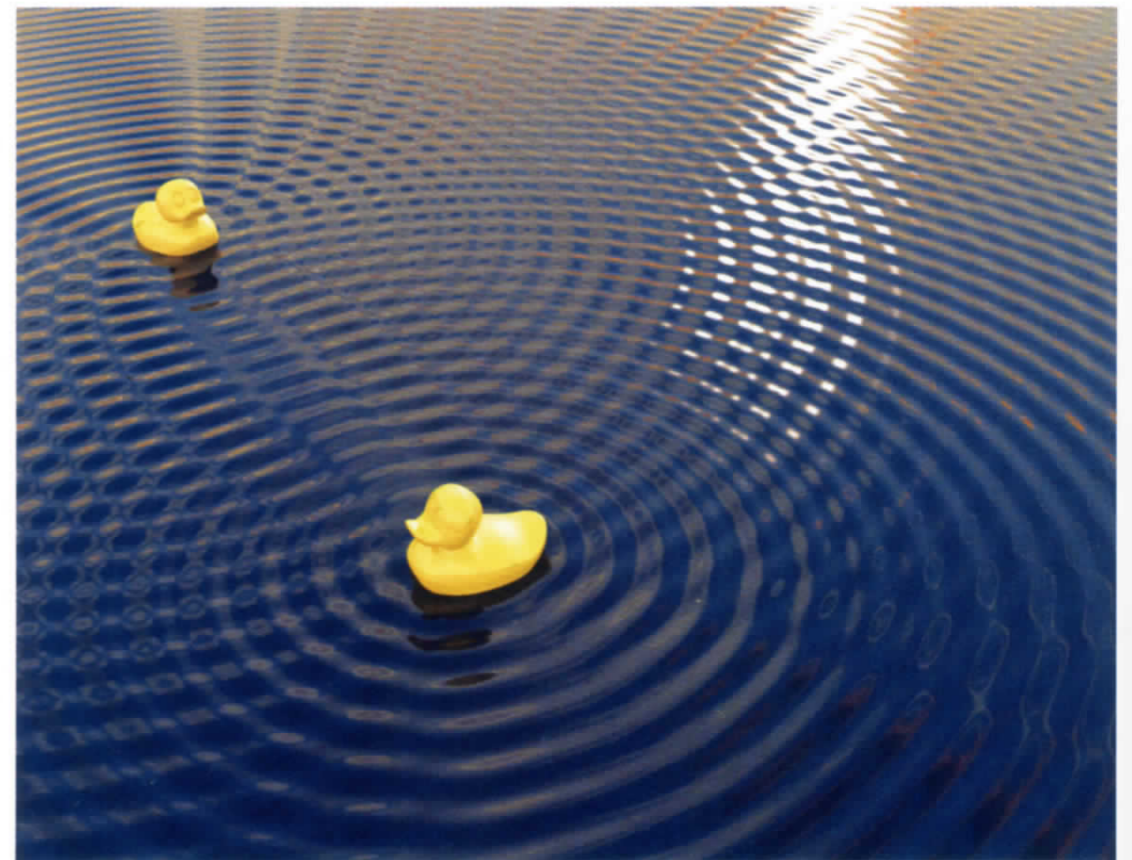


図 32: 左 2 つの波を足すと右の波になる.  $y_1(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $y_2(t) = -\sin(2\pi t)$  としたときの,  $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$  の図.

# 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。

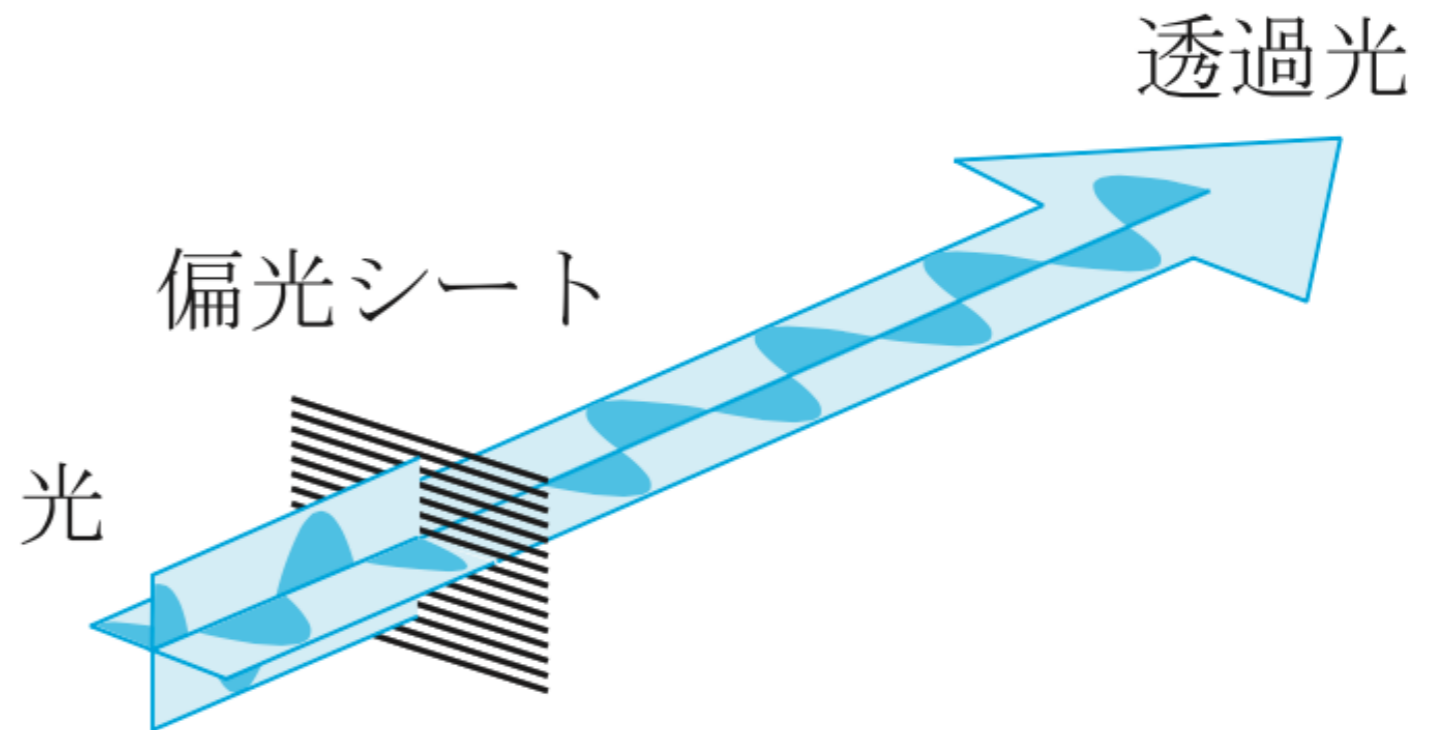
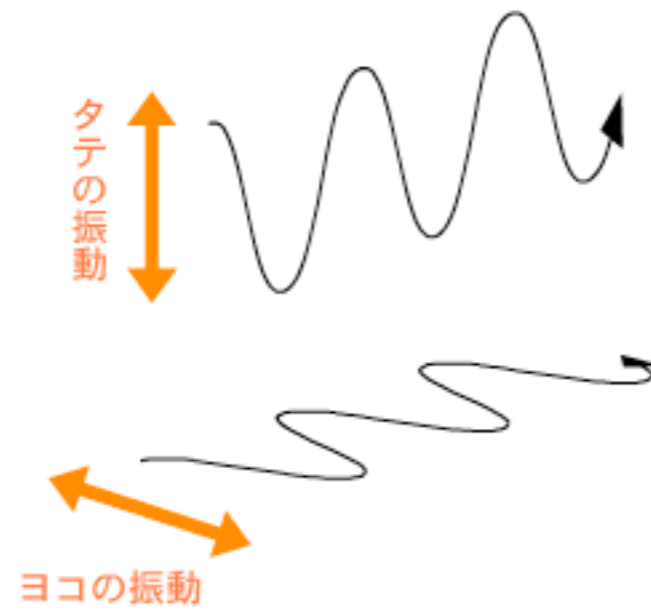


# 光は横波である

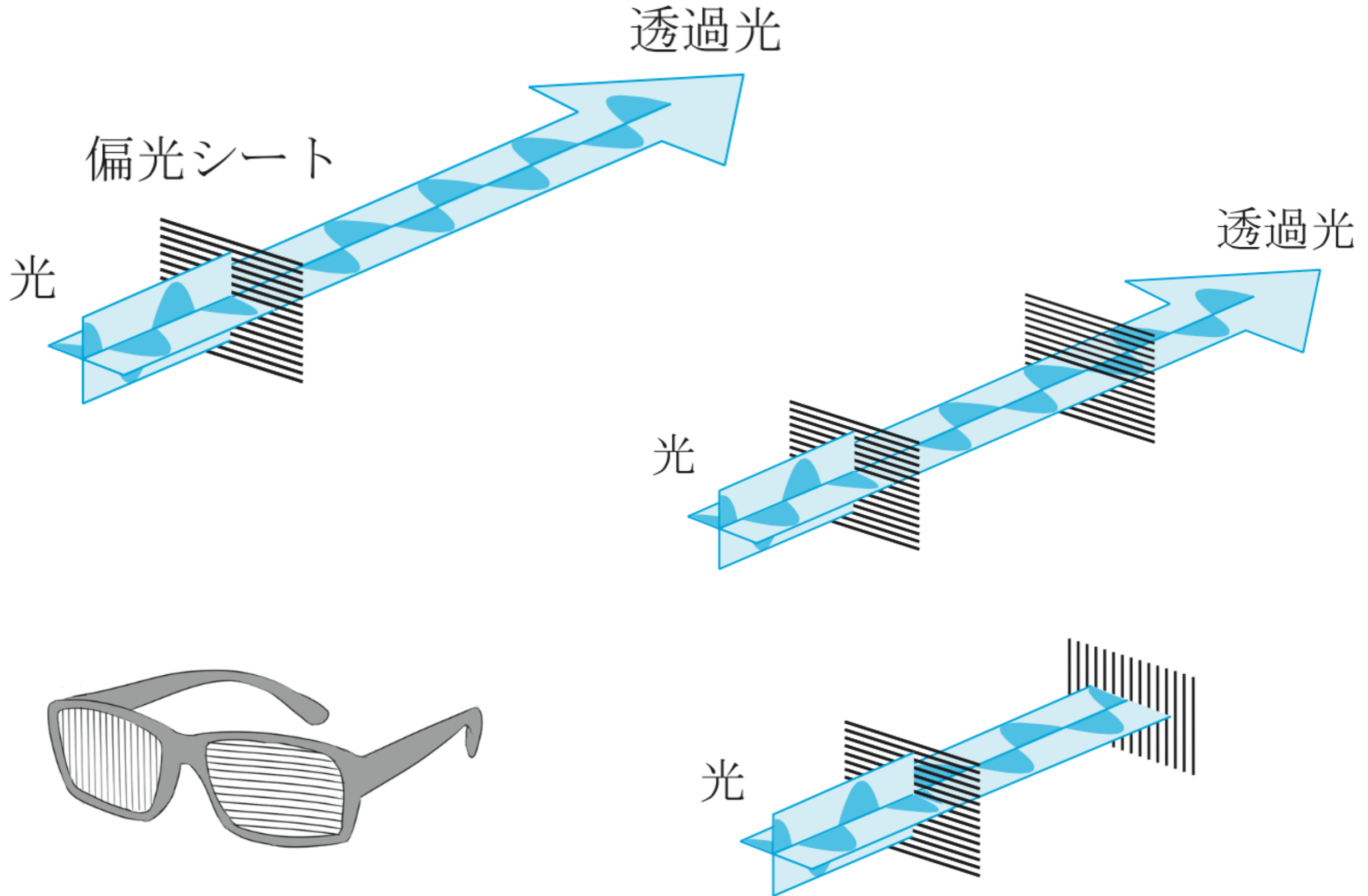
自然光



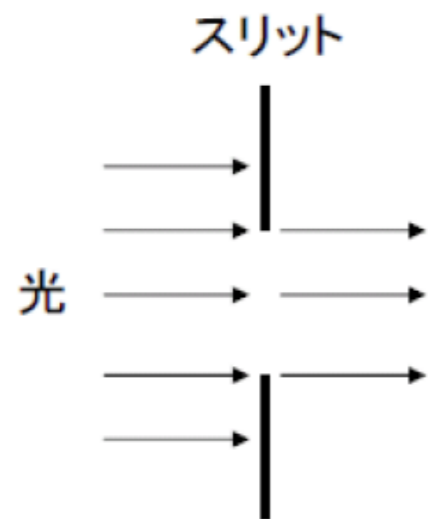
偏光



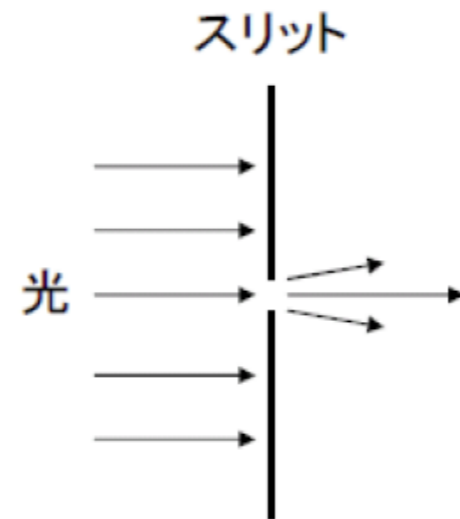
# 光は横波である 偏光板で確かめよう



# 光の回折と干渉



スリットの幅が広い場合

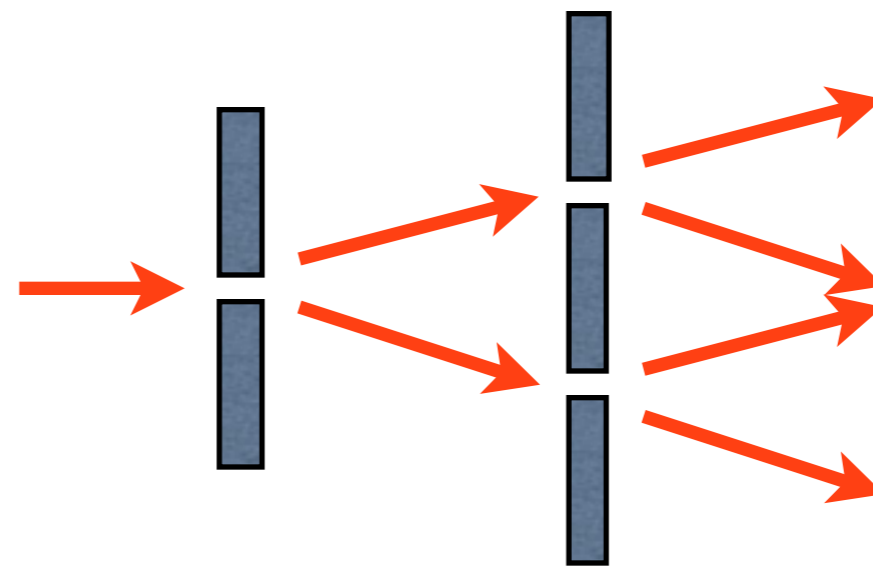


スリットの幅が狭い場合

狭いスリットを  
通ると回折する

図3 光の回折

2重スリットを  
通ると??



スクリーン

# 光は波である 2重スリットによる干渉実験

コラム

p 85

## コラム 1 (光は波である : 2重スリットの実験)

波は反射・屈折・回折・干渉などの性質をもつ。干渉とは、波が重なると、互いに強めあったり弱めあったりする性質である。

光は波である。鏡に自分の姿が映るのは光が反射しているからだ。夕立後の虹は大気中に散らばる雨滴に太陽光が屈折してできる像である。光が細いスリットを通ると、波のもつ回折の性質によってスリットの後方部分にも広がってゆく。

スリットが2つあれば、2つから広がった光の波が、互いに干渉し、強め合ったり弱め合ったりして後方のスクリーンに明暗の干渉縞をつくる。つまり、2重スリットの実験で干渉縞が見えることは、光が波であることを示す決定的な証拠である。

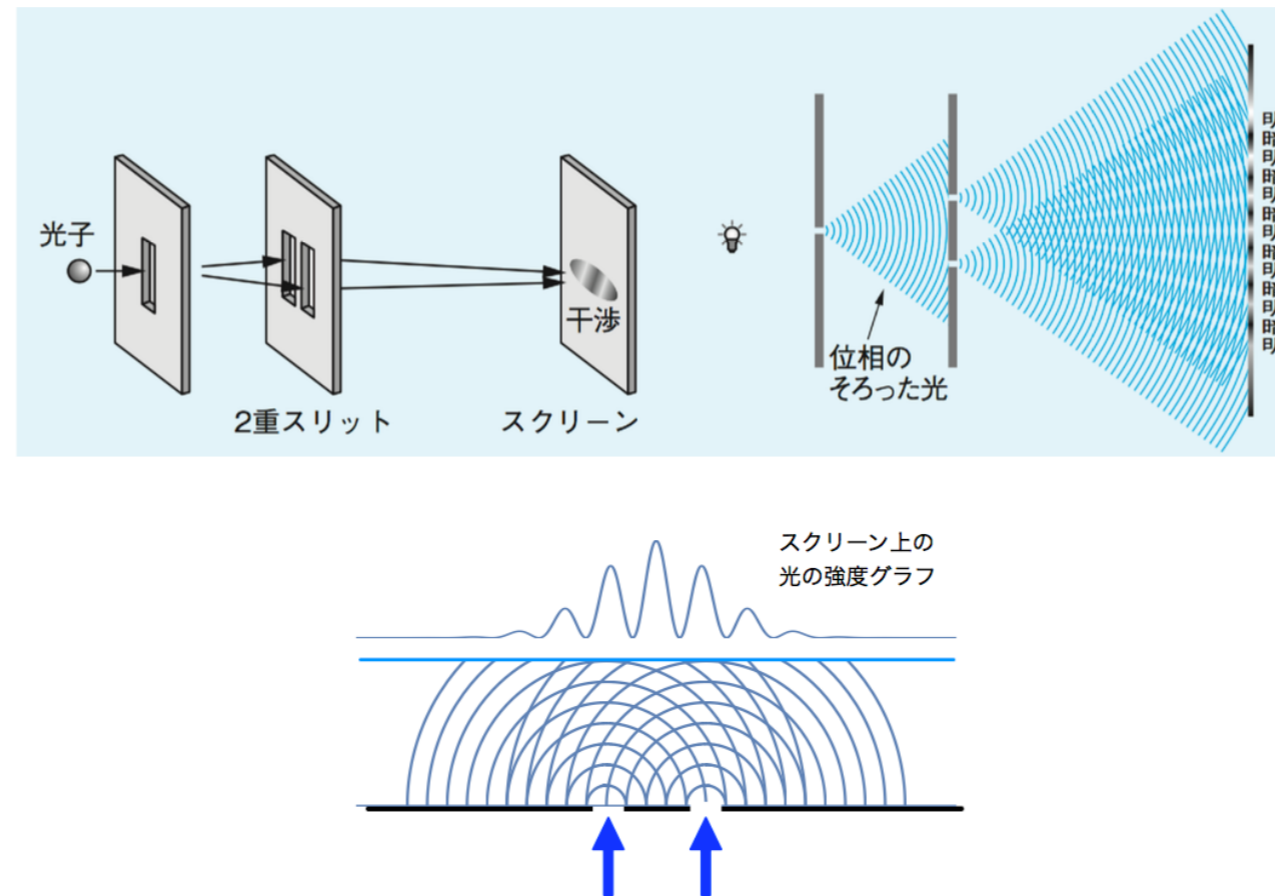


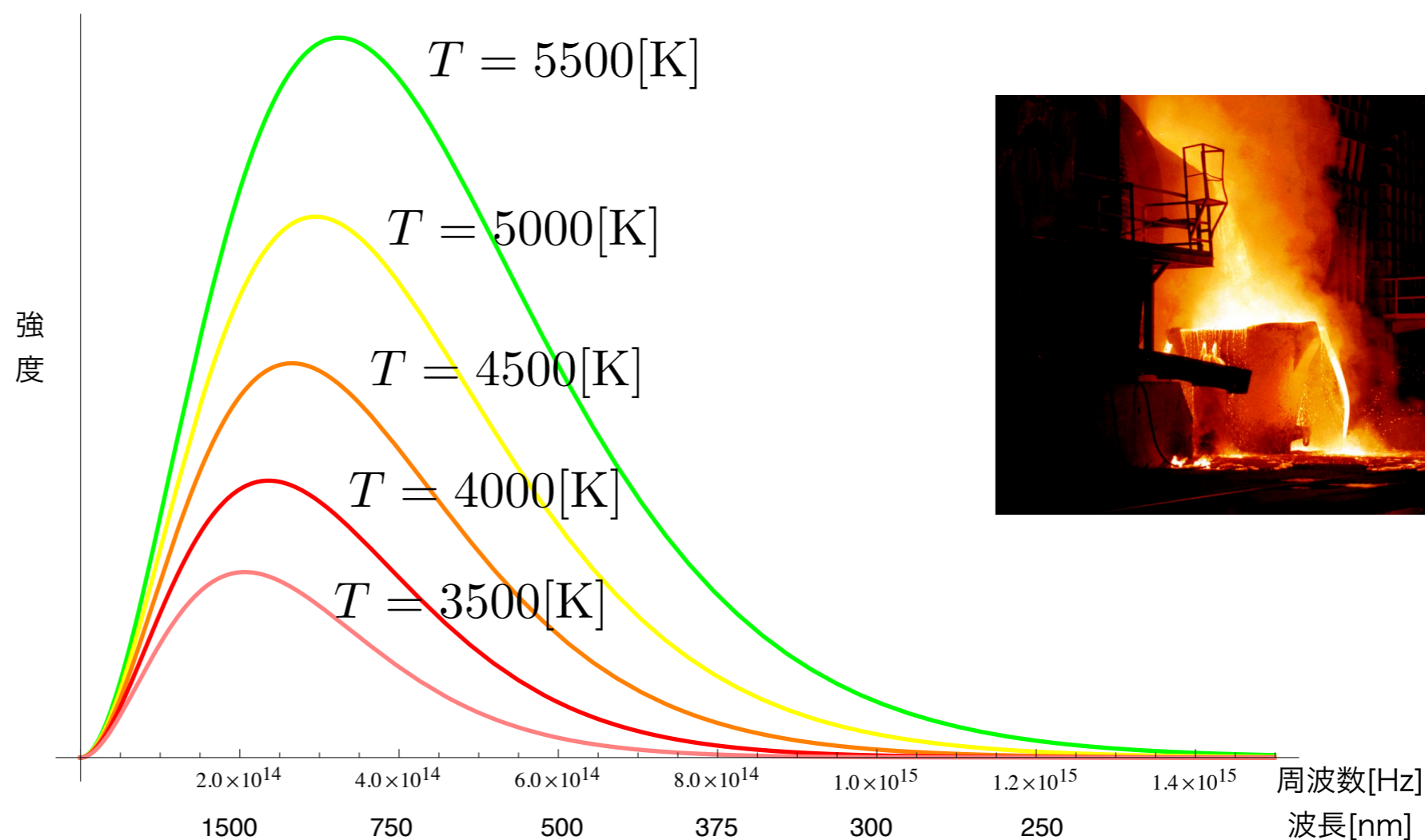
図 5.5: 2重スリットを用いた光の干渉実験。光が波であると考えられるからこそ、スクリーンに生じる明暗の干渉縞を説明できる。

# 5.1 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

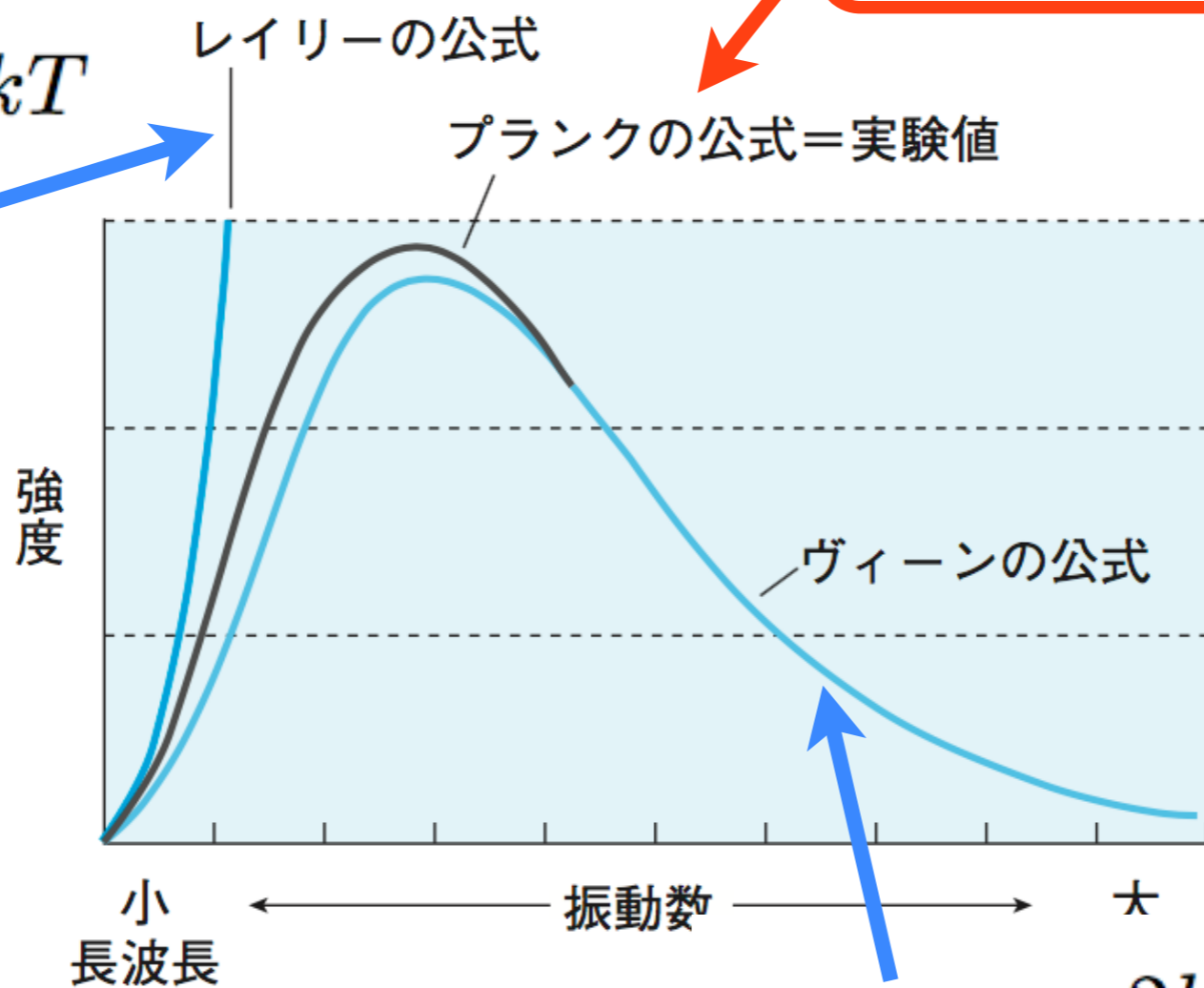
# 5.1 溶鋳炉の温度の問題

## 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。

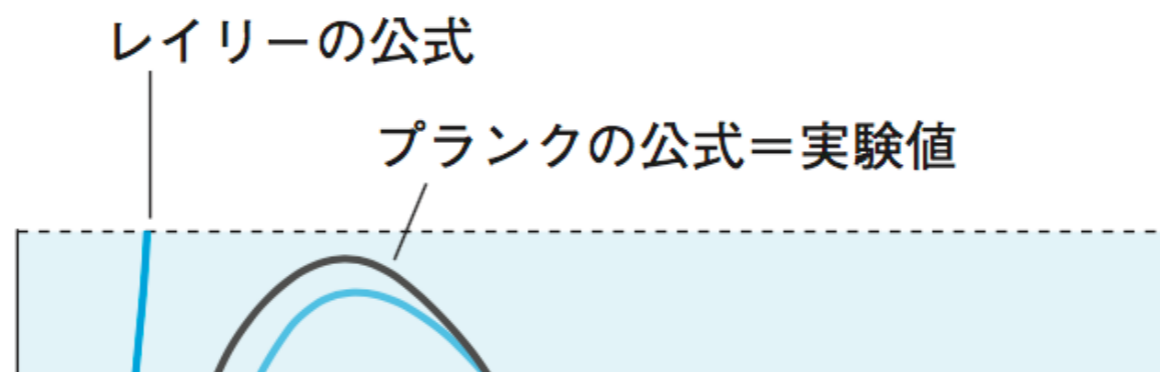
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

## 5.2 プランクの量子仮説

### プランクの法則

「2つの式を合わせるとピッタリ」

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



何か本質が  
隠れていそうだ。

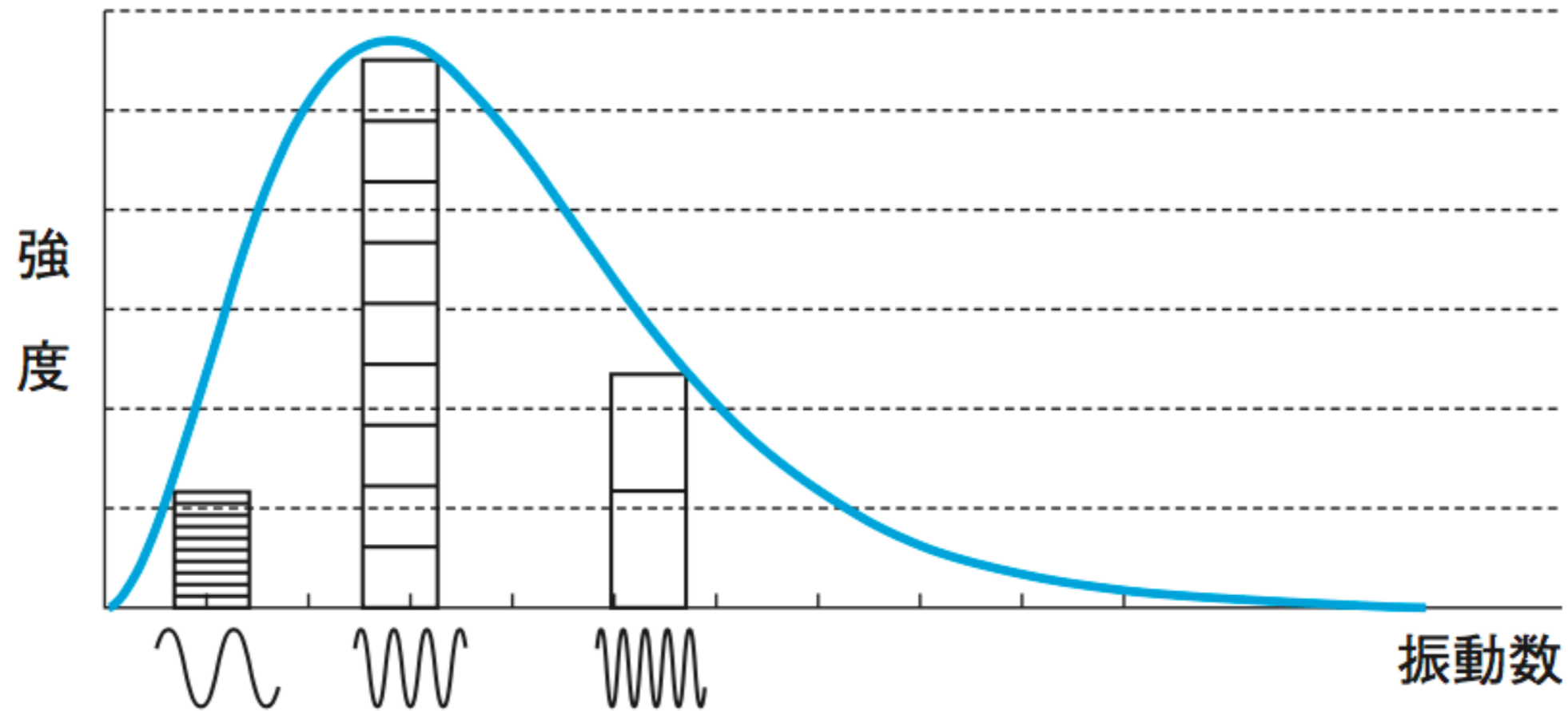
#### プランクの量子仮説 (1900年)

光のもつエネルギーには最小単位があってとびとびの値をとる。その最小単位は、振動数  $\nu$  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、

$$E = h\nu \quad (5.2)$$

光のエネルギー = (定数)  $\times$  (振動数)



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  $\nu$  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、

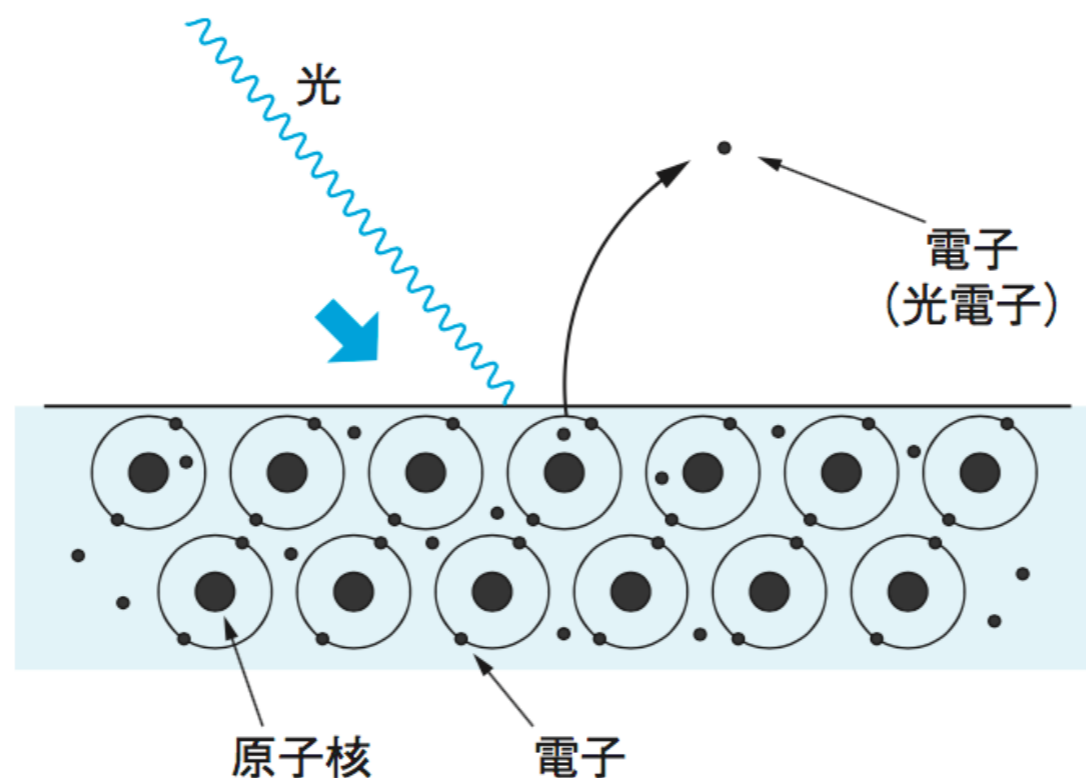
$$E = h\nu \quad (5.2)$$

光のエネルギー = (定数)  $\times$  (振動数)



## 光電効果の問題

金属に光を当てると、電子が飛び出すことがある。

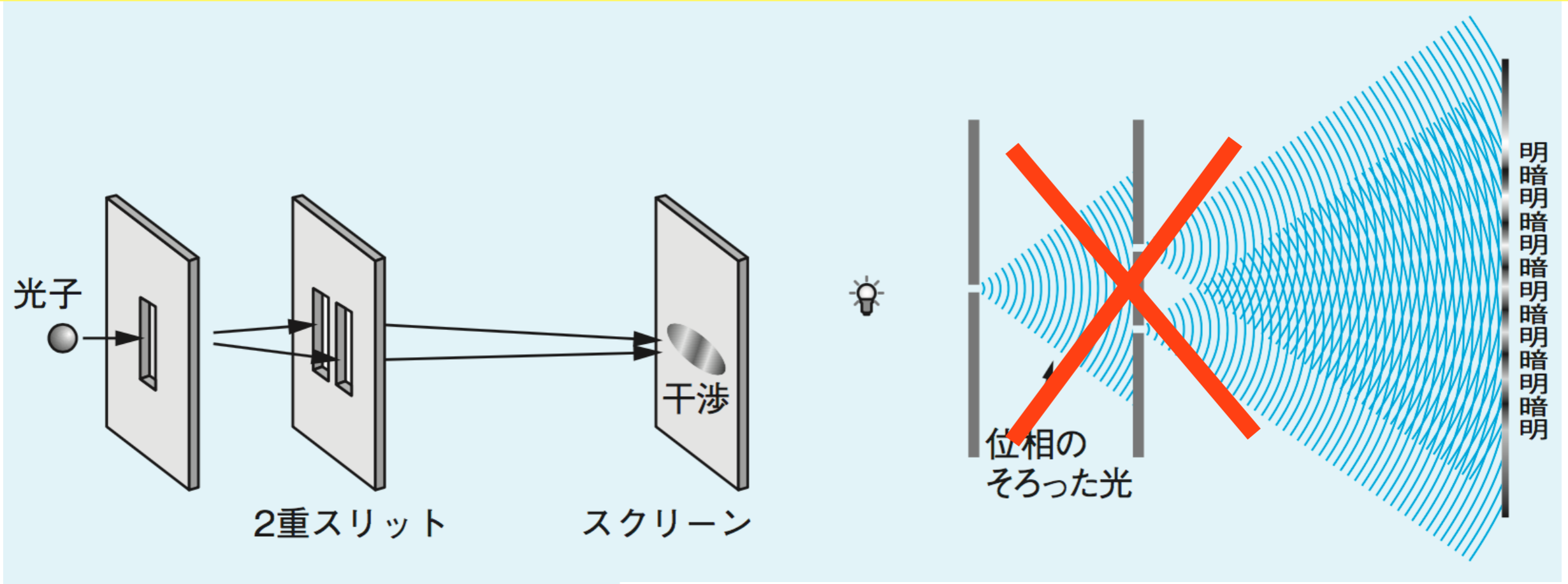


ただし、光の振動数がある値から大きいときに限る。  
そうであれば、どんなに弱い光でも。



**「光が波だと考えると不思議。粒子だと考えよう。」 1905年**

# 光は波である 2重スリットによる干渉実験



Single slit Double slit

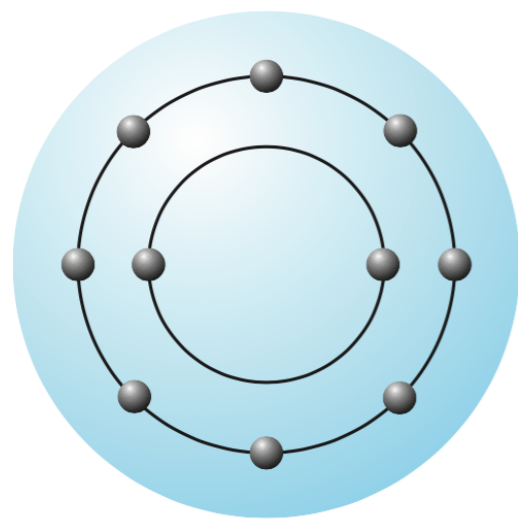
光が粒子だと考えるならば、  
このような干渉縞は生じない。

figure 16.13 When the path difference between the two waves is equal to half a wavelength, the two waves arrive at the screen half a cycle out of phase, producing destructive interference.

## 5.5 原子模型

トムソン模型

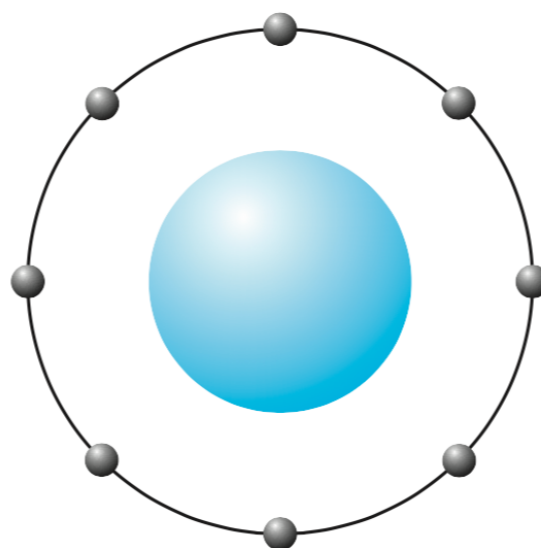
1903



トムソンの  
原子模型

長岡模型

1903



長岡の  
原子模型



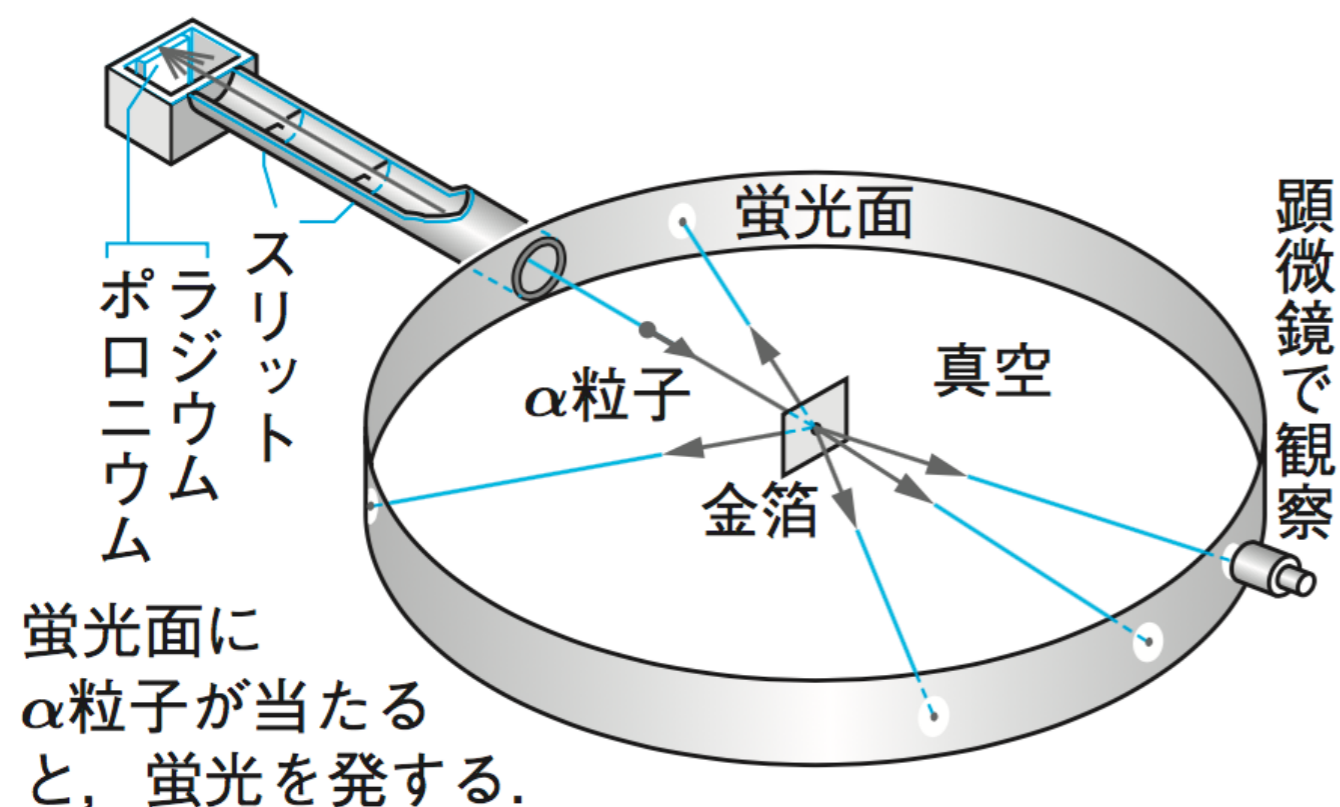
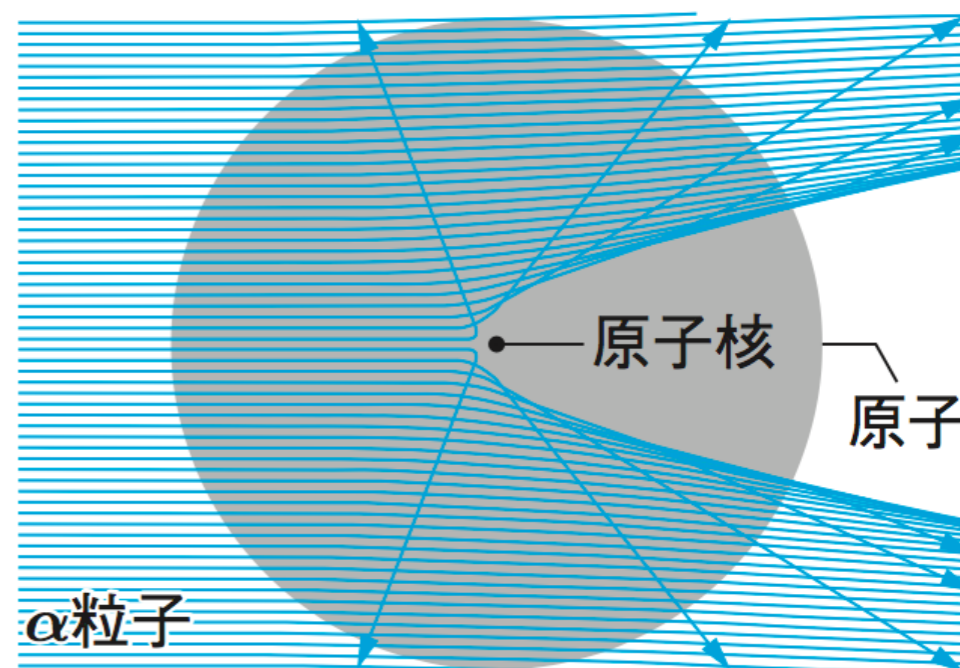
長岡半太郎

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 $\alpha$ 粒子（He原子核）を照射原子核のそばを通る $\alpha$ 粒子の軌跡

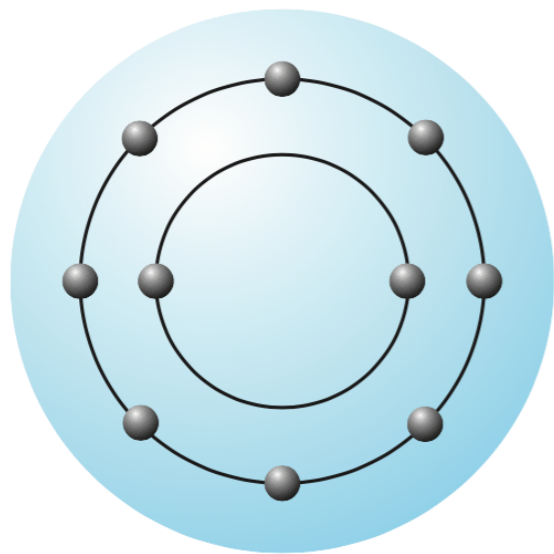
ときどき大きな反射角で散乱する

→→ 中心に「核」があるにちがいない。

# 5.5 原子模型

トムソン模型

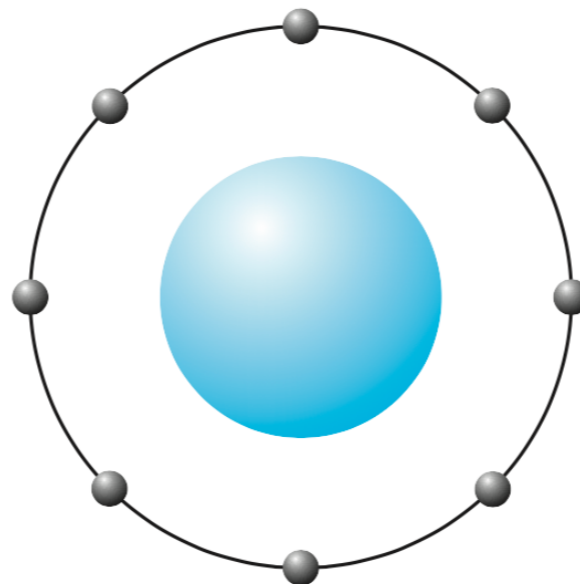
1903



トムソンの  
原子模型

長岡模型

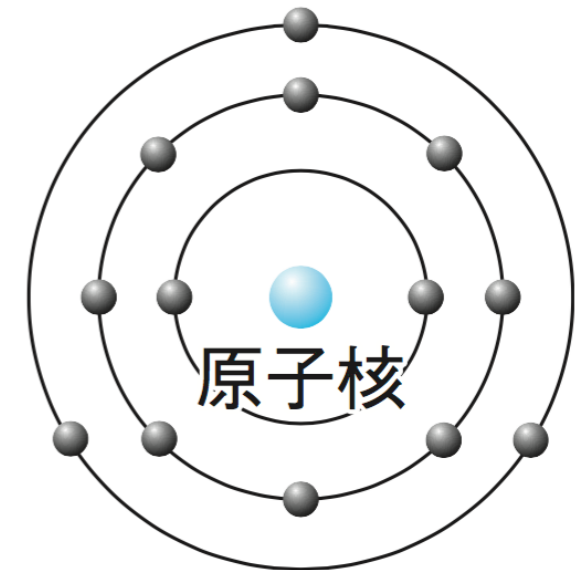
1903



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

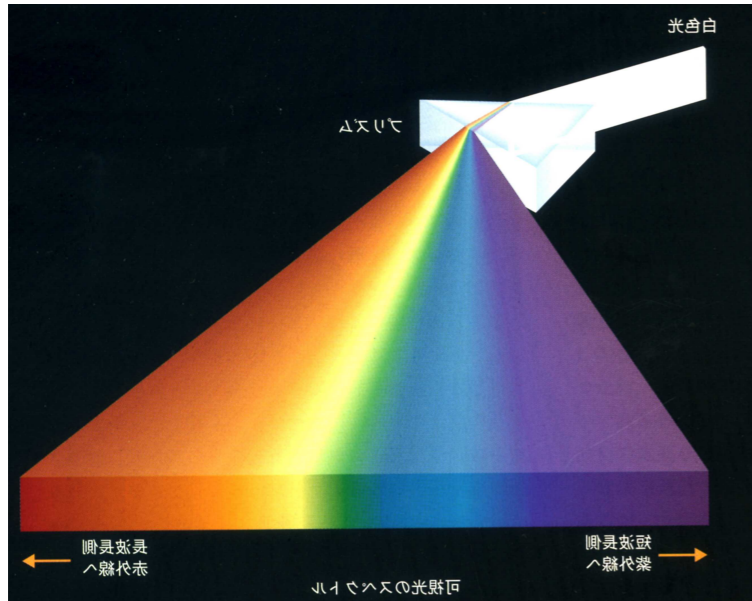
問題点あり

「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」

やっぱり  
問題は残る

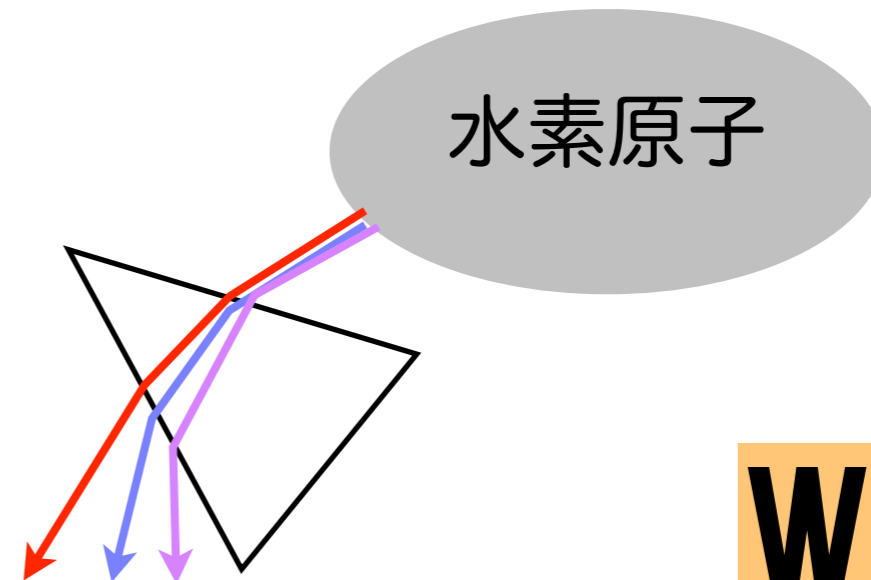
**Why?**

# 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

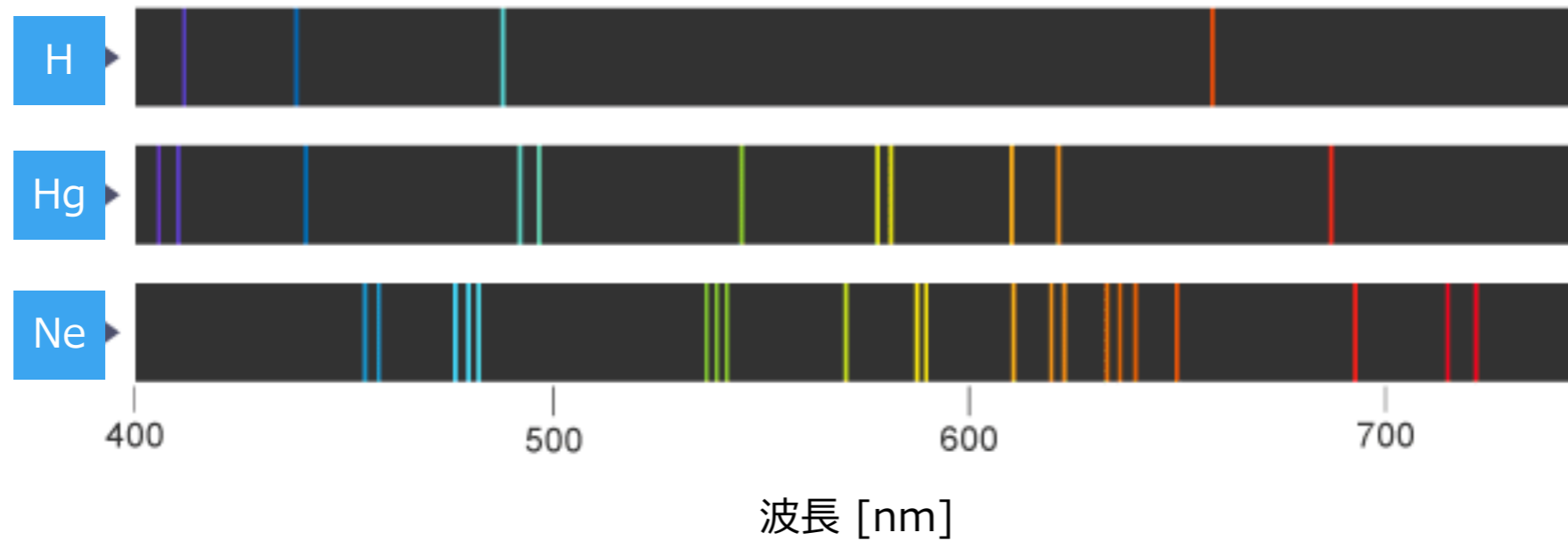


Why?

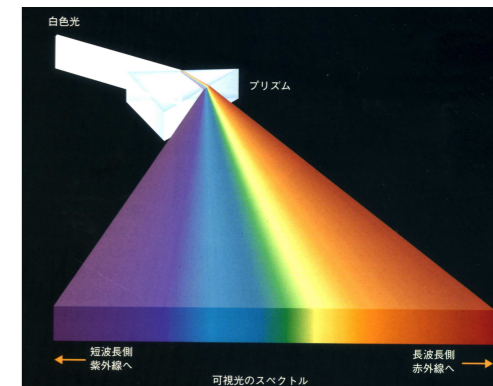
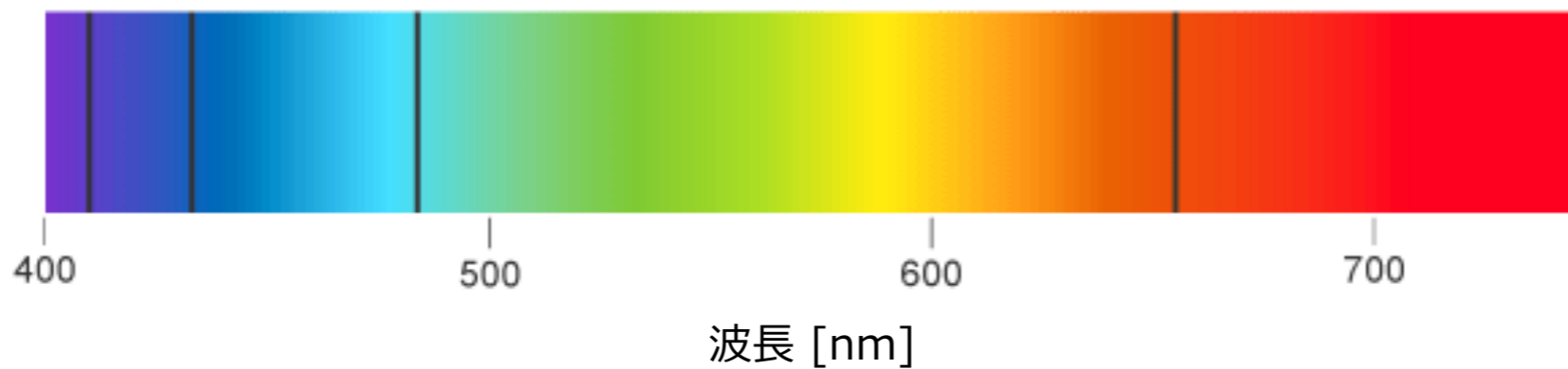


# 輝線スペクトル・連続スペクトル

(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。

# 水素原子から出る輝線



**パッシェン(1908)**

**バルマー(1885)**

**ライマン(1906)**

表 4.1 水素の線スペクトルの波長  $\lambda$  [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	



# 水素原子から出る輝線

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

実験結果を式にすると、  
こうなった！

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

表 4.1 水素の線スペクトルの波長  $\lambda$  [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	

Why?

# 原子模型

## ● ラザフォードらの実験

$\alpha$ 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わず)

## ● 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？

## 5.6 ボーアの原子モデル

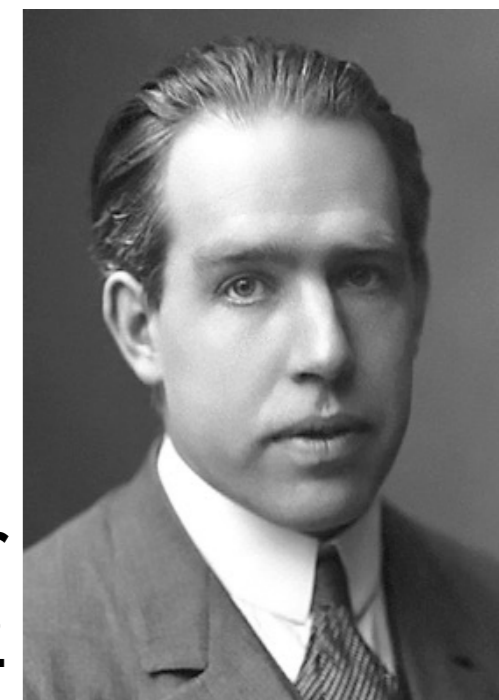
## ボーアの仮定 1 : 量子条件 (1913 年)

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，

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.3)$$

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

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (5.4)$$

である．

## 5. 光は波か粒子かー 量子論

### 5.6 ボーアの原子モデル

#### ボーアの仮定 1：量子条件 (1913 年)

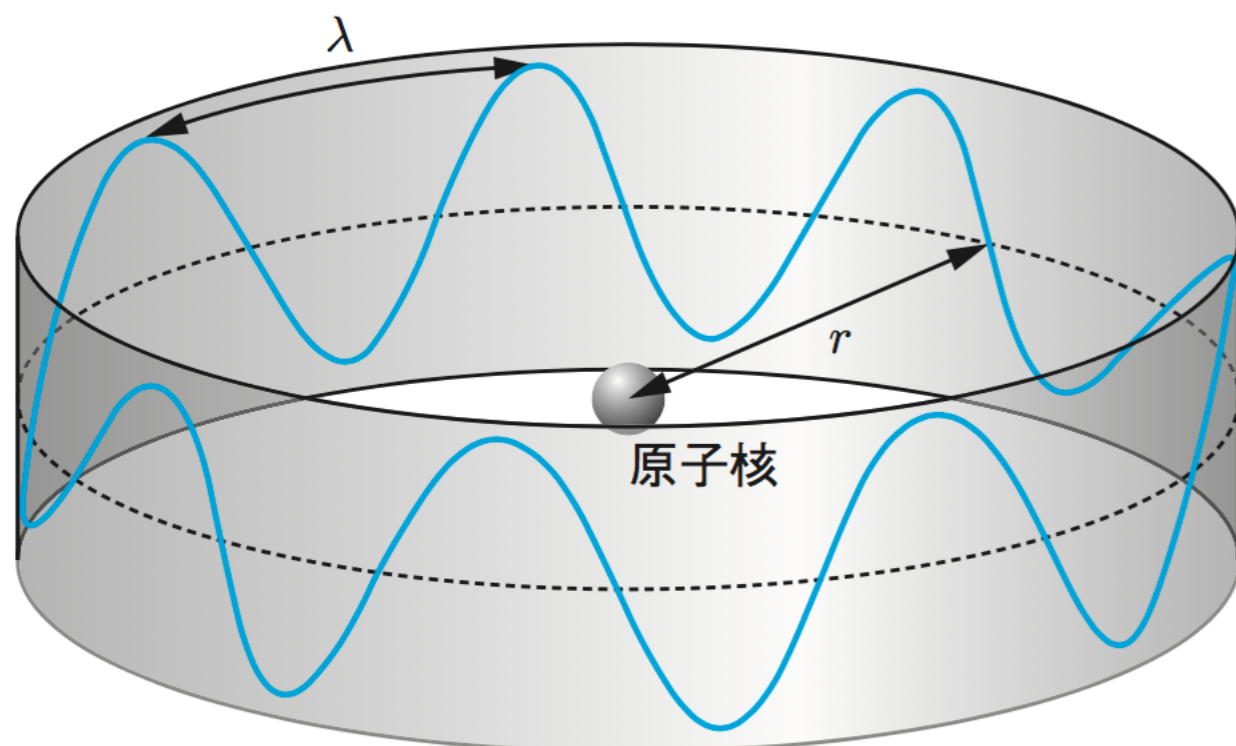
原子には定常状態があり，定常状態では電磁波を出さず安定であって，これまでの力学が成り立つ．定常状態は，電子の角運動量  $L$  が， $n$  を整数として，

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.3)$$

の条件をみたすときである．



Niels Bohr  
1885-1962



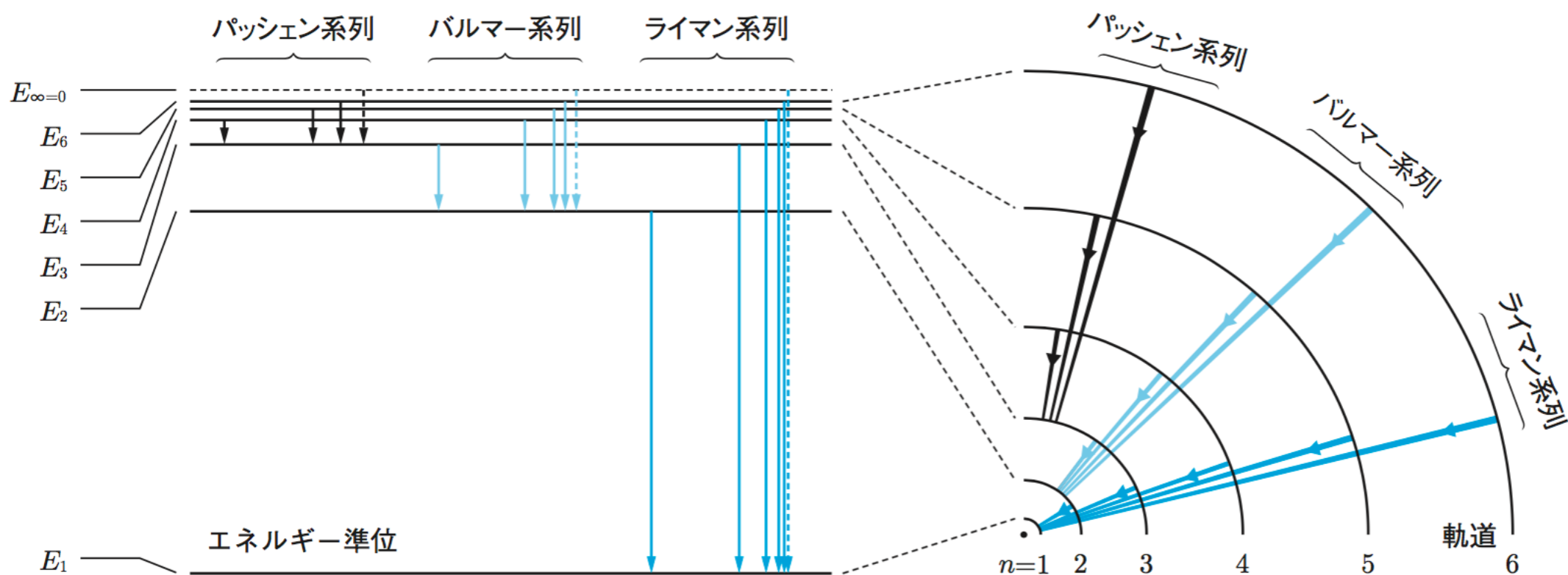
#### ◆ Advanced ボーアの量子条件

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) ( $\Rightarrow$  §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」 $\lambda$  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」 $\lambda$  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．

# 5.6 ボーアの原子モデル



## 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

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (5.4)$$

である．

# 水素原子から出る輝線

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

実験結果を式にすると、  
こうなった！

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

表 4.1 水素の線スペクトルの波長  $\lambda$  [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	

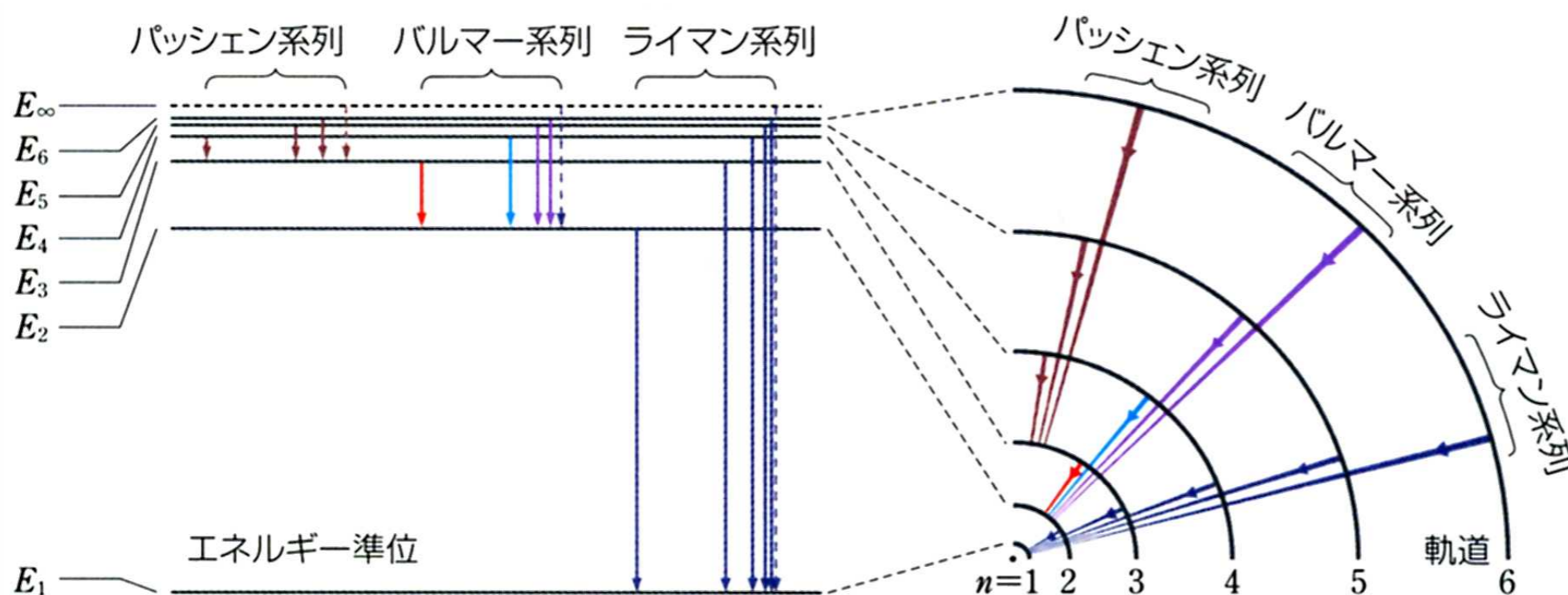
Why?



$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 k_0 m e^2} n^2$$

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \frac{1}{n^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{E_n - E_{n'}}{ch} = \frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{ch^3} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



Niels Bohr  
1885-1962

# 原子模型

## ● ラザフォードらの実験

$\alpha$ 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わず)

→ 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

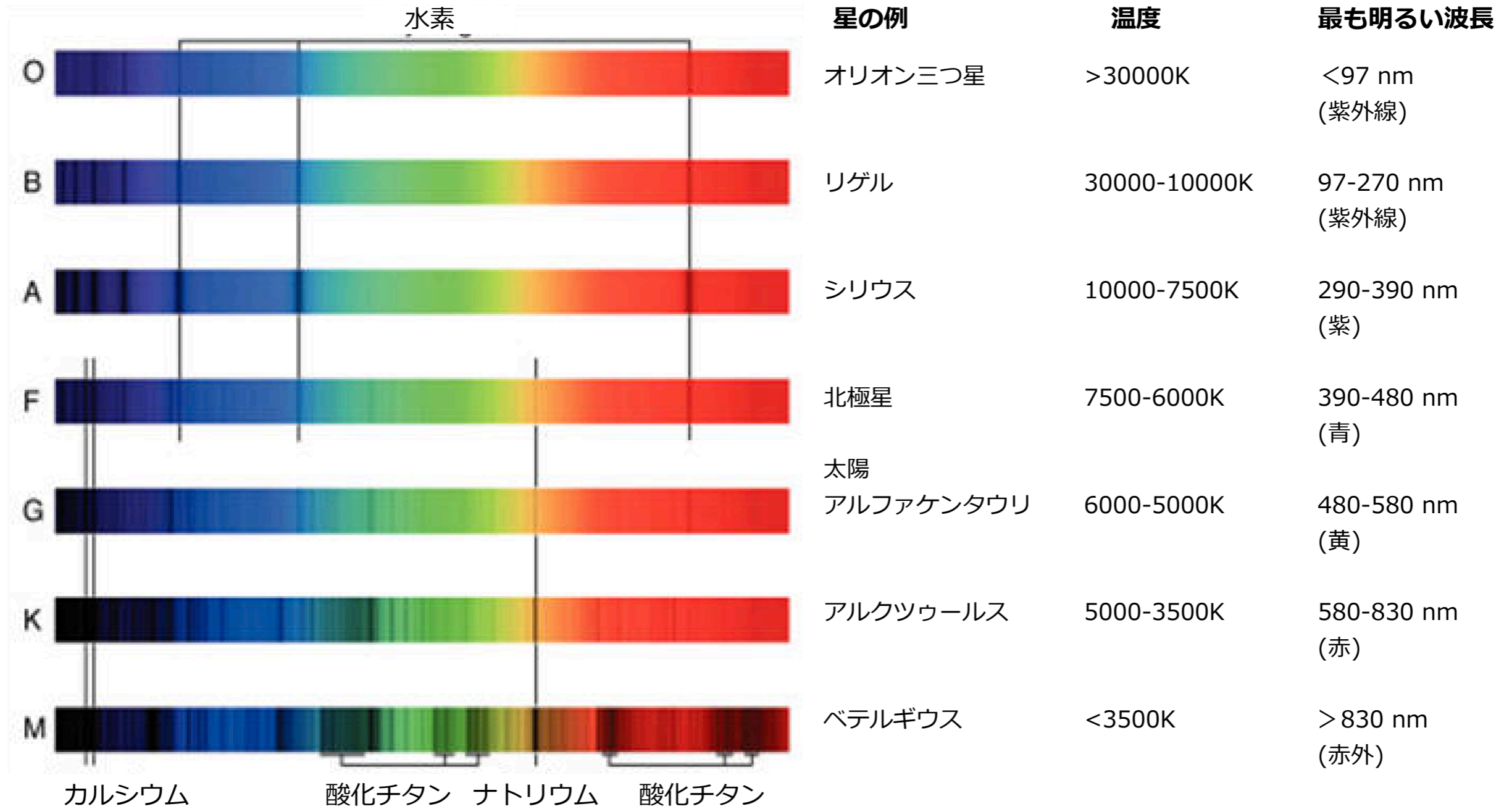
決まった振動数 (波長) の光が発せられる。

→ 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)



# 星のスペクトル型 OBAFGKM



Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me.

Period	1	1A											18	VIII A		
	1	1s	1	2												2
	2	2s	3	4											10	
	3	3s	11	12											18	
	4	4s	19	20											36	
	5	5s	37	38											54	
	6	6s	55	56											86	
7	7s	87	88											118		

原子番号	29	+2,1	← 通常できるイオンの価数
元素記号	Cu		← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素
元素名(日本語)	銅		
元素名(英語)	copper		
	63.55		← 原子量

↑ 非金属元素	↓ 金属元素	↑ 非金属元素	↓ 金属元素
常温で気体	単体は半導体	常温で液体	単体は強磁性体
			放射性同位体のみからなる元素

3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	II B
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
スカンジウム	チタン	バナジウム	クロム	マンガン	鉄	コバルト	ニッケル	銅	亜鉛
scandium	titanium	vanadium	chromium	manganese	iron	cobalt	nickel	copper	zinc
44.96	47.87	50.94	52.00	54.94	55.85	58.93	58.69	63.55	65.41

3d	3d	3d	3d	3d	3d	3d	3d	3d	3d
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
イットリウム	ジルコニウム	ニオブ	モリブデン	テクネチウム	ルテニウム	ロジウム	パラジウム	銀	カドミウム
yttrium	zirconium	niobium	molybdenum	technetium	ruthenium	rhodium	palladium	silver	cadmium
88.91	91.22	92.91	95.94	98	101.1	102.9	106.4	107.9	112.4

† 5d	† 5d	† 5d	† 5d	† 5d	† 5d	† 5d	† 5d	† 5d	† 5d
57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
ランタノイド	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg
lanthanides	ハフニウム	タンタル	タングステン	レニウム	オスマウム	イリジウム	白金	金	水銀
	hafnium	tantalum	tungsten	rhenium	osmium	iridium	platinum	gold	mercury
	178.5	180.9	183.8	186.2	190.2	192.2	195.1	197.0	200.6

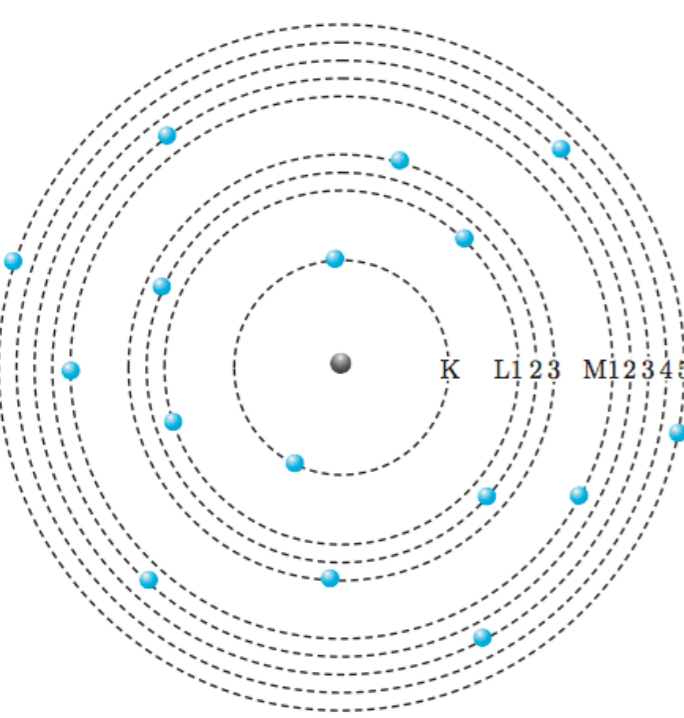
‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d	‡ 6d
89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
アクチノイド	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn
actinides	ラザホージウム	ドブニウム	シーボーギウム	ボーリウム	ハッソウム	マイタネリウム	ダームスタチウム	レントゲニウム	コペルニシウム
	rutherfordium	dubnium	seaborgium	bohrium	hassium	meitnerium	darmstadtium	roentgenium	copernicium
	261	262	266	264	277	268	281	272	285

† 4f	† 4f	† 4f	† 4f	† 4f	† 4f	† 4f	† 4f	† 4f	† 4f
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
ランタン	セリウム	プラセオジウム	ネオジウム	プロメチウム	サマリウム	ユウロピウム	ガドリニウム	テルビウム	ジスプロシウム
lanthanum	cerium	praseodymium	neodymium	promethium	samarium	europium	gadolinium	terbium	dysprosium
138.9	140.1	140.9	144.2	145	150.4	152.0	157.3	158.9	162.5

‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f	‡ 5f
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf
アクチニウム	トリウム	プロトアクチニウム	ウラン	ネプツニウム	プルトニウム	アメリシウム	キュリウム	バークリウム	カリホルニウム
actinium	thorium	protactinium	uranium	neptunium	plutonium	americium	curium	berkelium	californium
227	232.0	231.0	238.0	237	239	243	247	247	251



# 周期表 (periodic table)

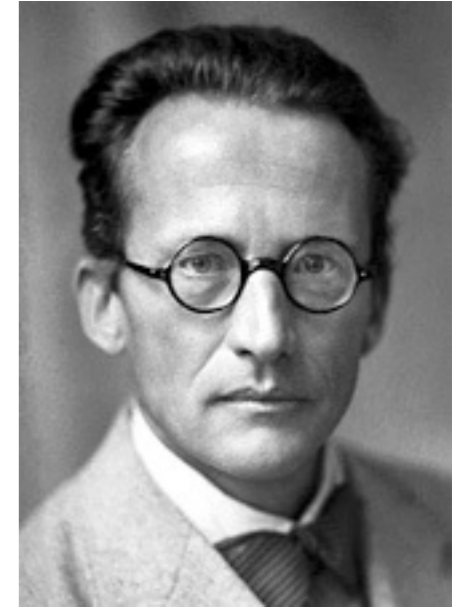
# 粒子性と波動性

- 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」  
と考えるを得ない  
→ 観測問題 → 物理的実在とは何か

## 5.7 量子力学の解釈をめぐる論争

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)



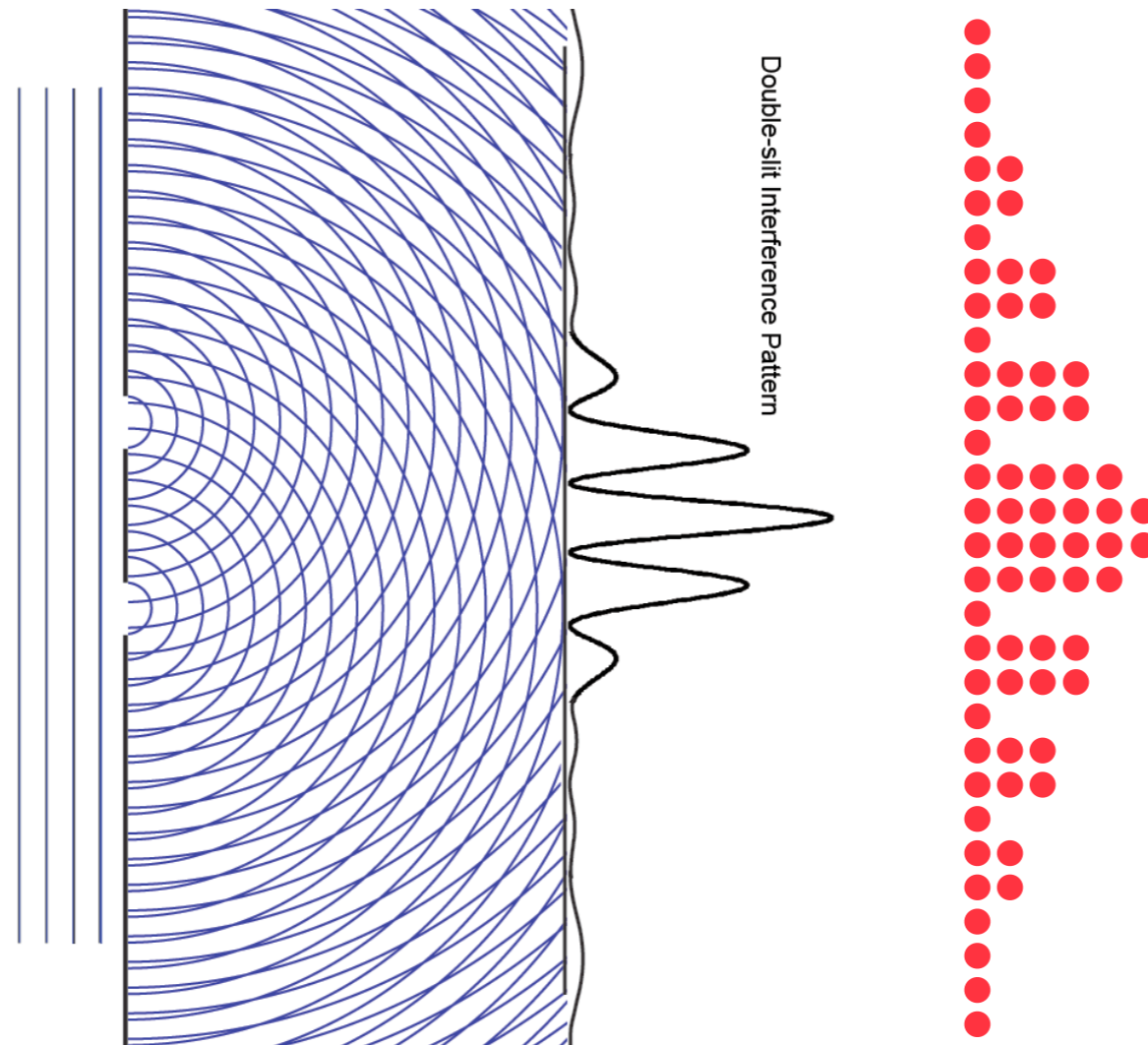
Max Born  
(1882-1970)

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、 $\psi$  は確率振幅と呼ぶべき量である。

## 5.7 量子力学の解釈をめぐる論争



Max Born  
(1882-1970)

波動関数は確率振幅である (ボルン, 1926年)

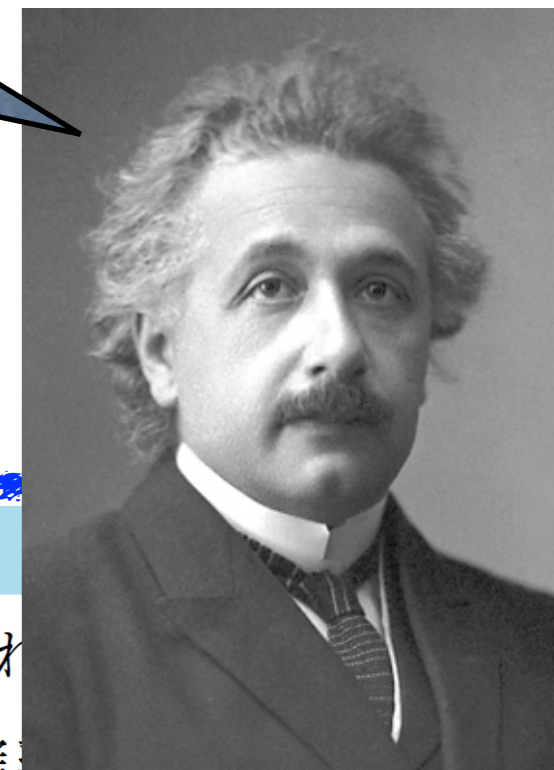
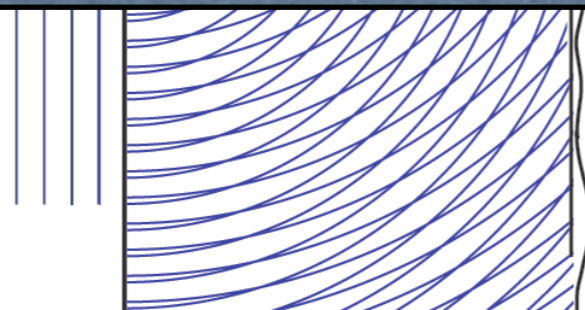
ある粒子の振る舞いを表す波動関数  $\psi(x, y, z, t)$  が求められたとすると, その粒子が時刻  $t$  に位置  $(x, y, z)$  に存在する確率は,  $|\psi(x, y, z, t)|^2$  に比例する. すなわち,  $\psi$  は確率振幅と呼ぶべき量である.

## 5.7 量子力学の解釈をめぐる論争

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、  
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、 $\psi$  は確率振幅と呼ぶべき量  
である。

# 不確定性原理

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?



モナズ石による放射線の飛跡

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

## 霧箱実験

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。



Werner Heisenberg  
(1901-76)

# 不確定性原理

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。

## 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

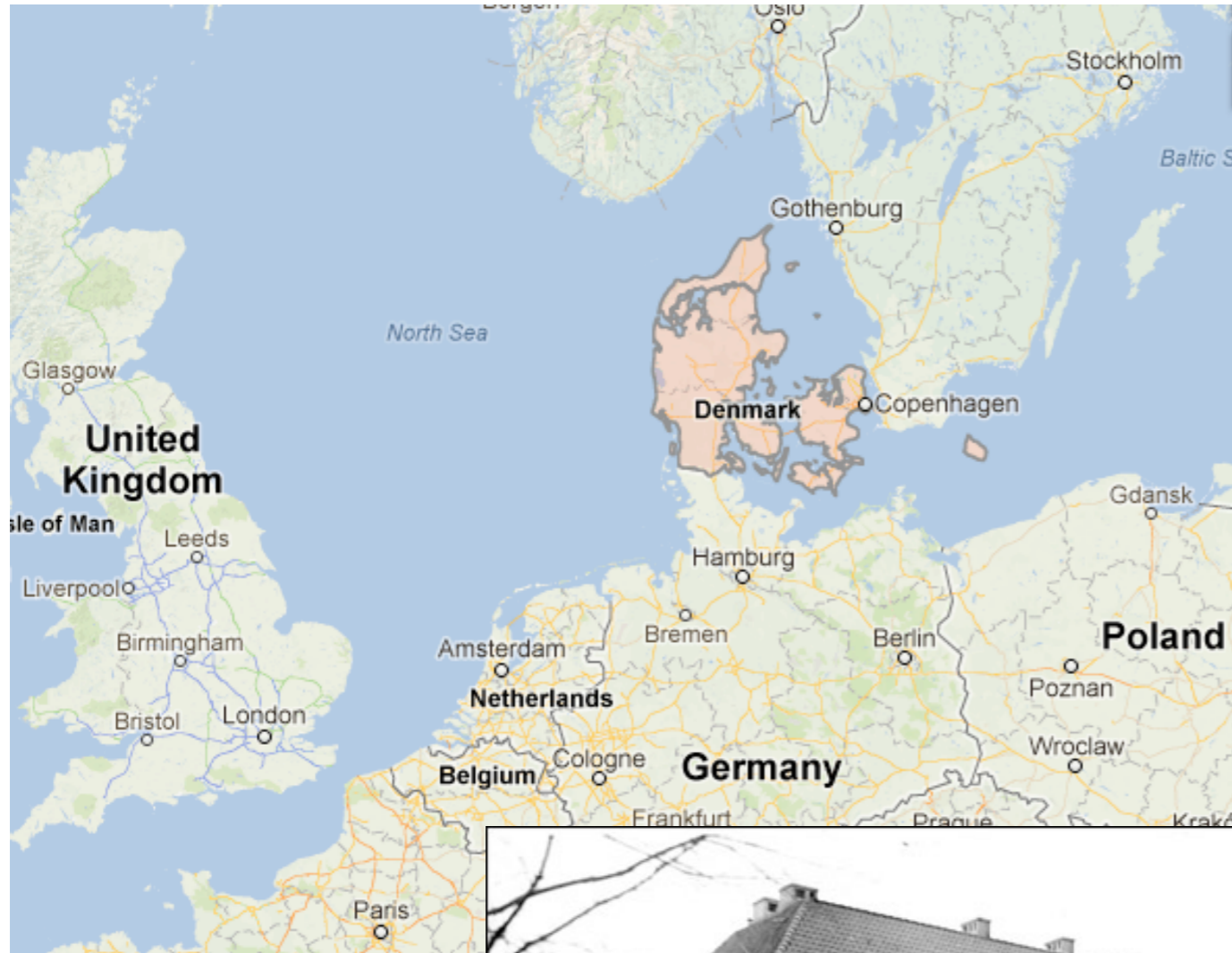


Werner Heisenberg  
(1901-76)



# 5. 光は波か粒子かー 量子論

## コペンハーゲン解釈



1922



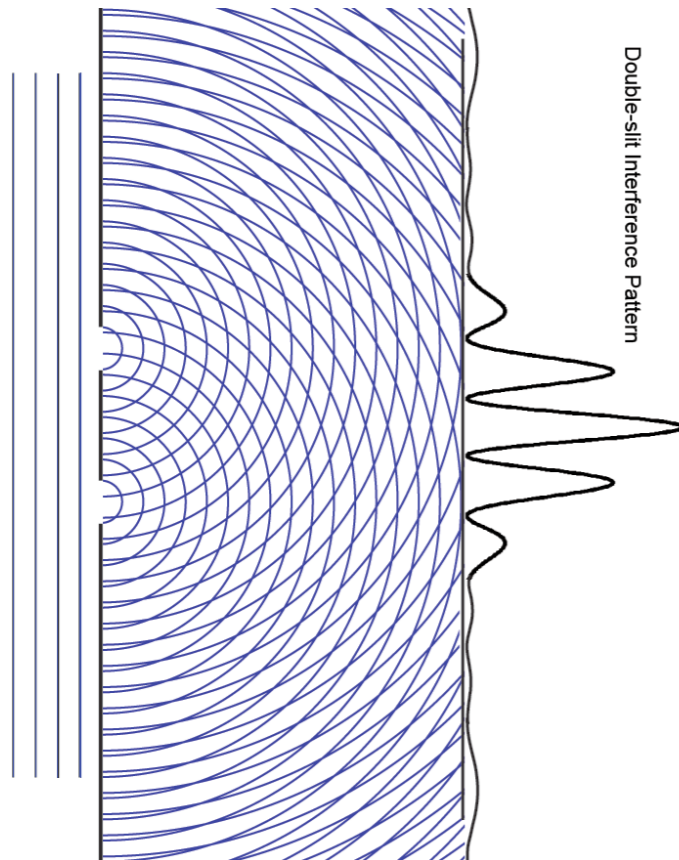
1962



Niels Bohr Institute  
Copenhagen, Denmark

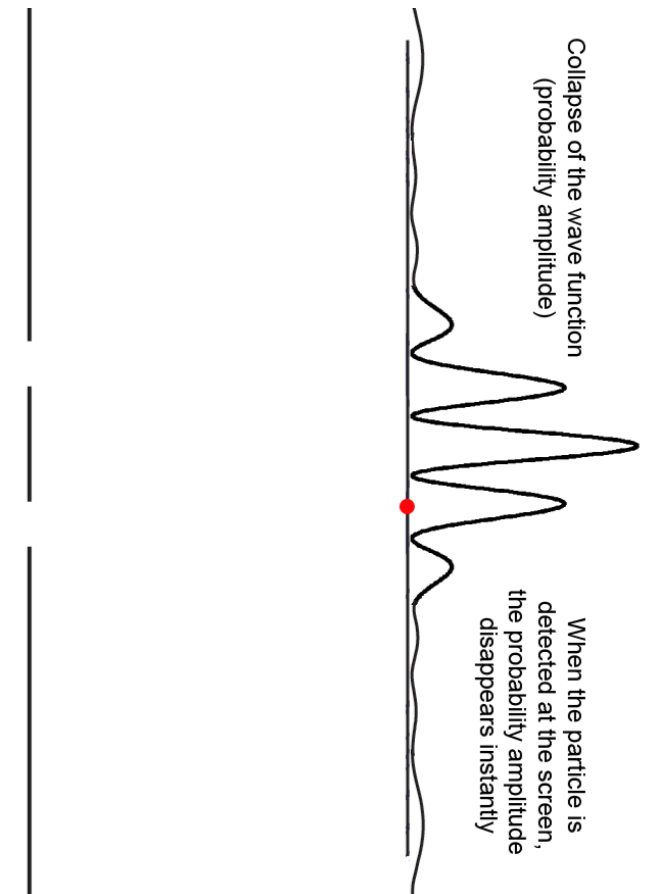
## コペンハーゲン解釈

- 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。



## シュレーディンガーの猫

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)



Max Born  
(1882-1970)

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、 $\psi$  は確率振幅と呼ぶべき量である。

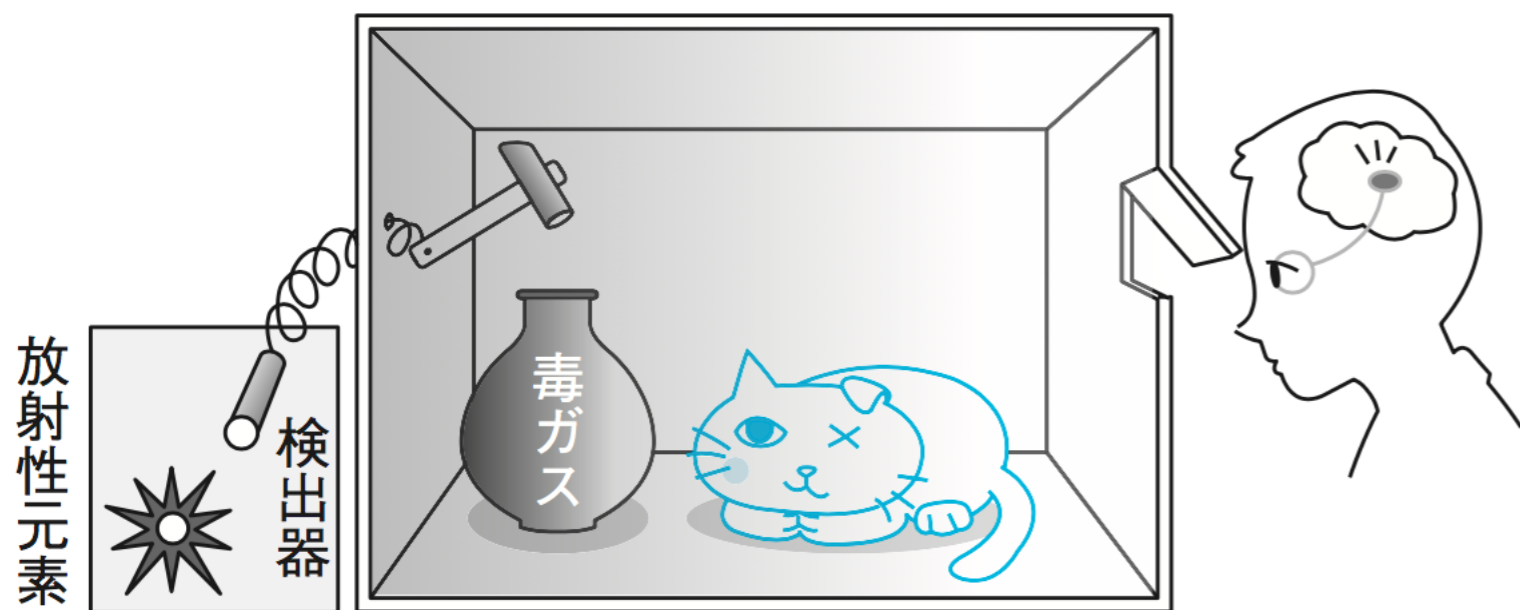
# シュレーディンガーの猫

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？



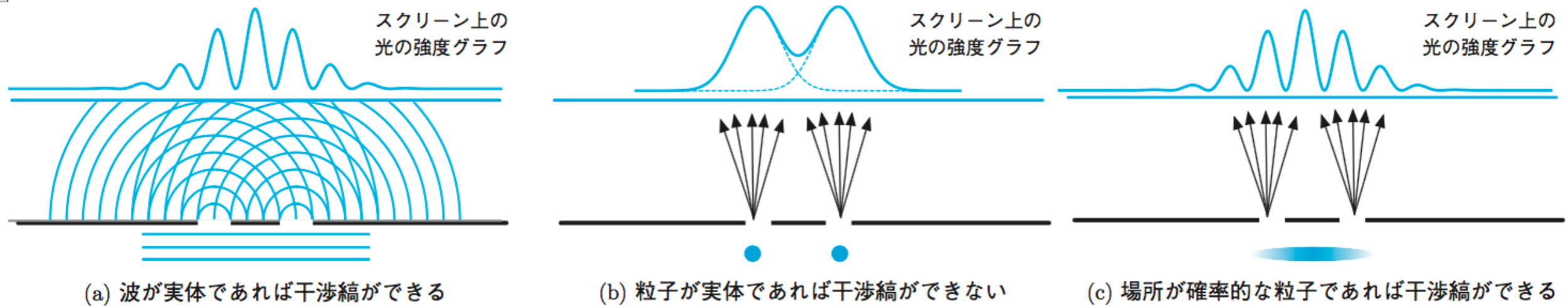
Schroedinger



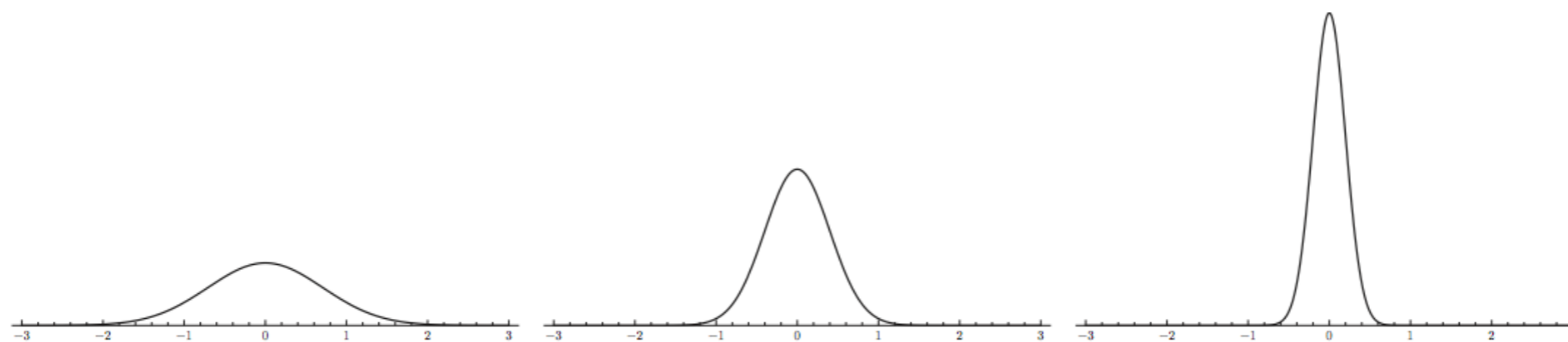
Bohr

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。





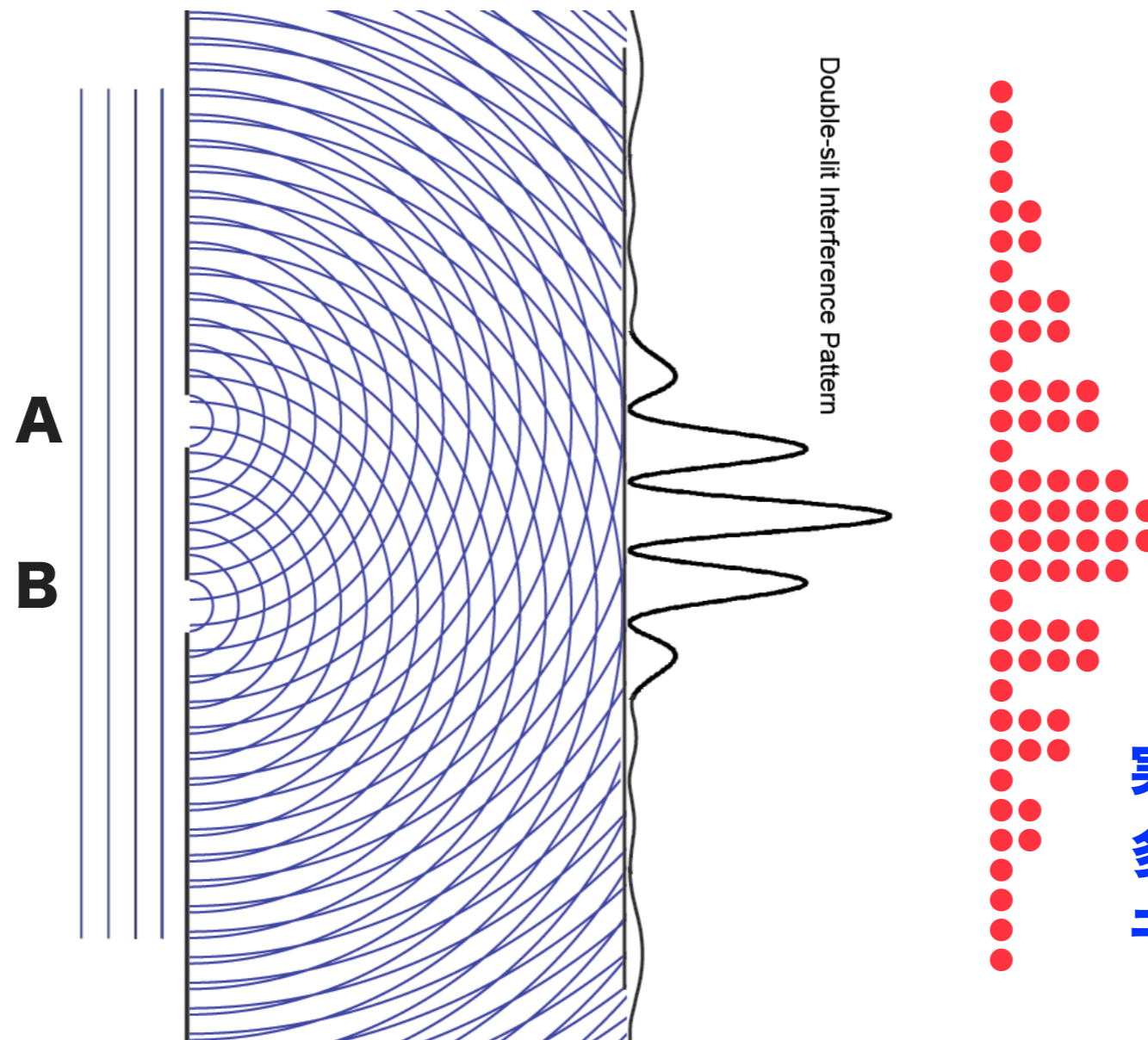
**図 4.27** コペンハーゲン解釈による 2 重スリット問題の解釈. 光が粒子であれば干渉縞が生じないはずだが, 実際には干渉縞が生じている. そこで, 粒子ではあるが, ミクロの世界では, 確率的にしか場所が特定できないもの, と考える.



**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.

# 結局、2重スリット実験の解釈は？

**【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。  
量子力学では、確率的にしか予言できない。**

# 光子の裁判 (朝永振一郎, 1949)

## 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*

1

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。私が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、私は門のところにいたのです。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過って窓のところに歩き、その窓から室内に侵入し、そして室

3

光子の裁判

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やっ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」

私はこの答にわけにとられました。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答においても一度ならず主張していたが、ここで

4

またそれをいはいはろうとするのか、そのような奇妙なことをいはいはっても誰がそれを信ずるであろう。被告ははっきりとした不可分の一個体であって、未だかつて被告が同時に二つの異なる場所にいたなどという奇妙な状況におめにかかったものはない。しかもこのことは被告自身すでに認めたことである。なぜなら被告はさきほど門衛のところから室内にはいなかったと称してアリバイを主張したではないか。被告が主張するように二つの窓の両方を一緒に通ることが出来るくらいなら、被告は門のところと室内の両方に一緒にいることも出来たはずである。それとも被告はこのアリバイの主張を引込めるつもりか」

なるほど、門のところにいたから室内にいなかったと被告が主張する以上、一方の窓を通ったなら他方の窓を通らないということを認めねばなりません。それなのに被告は両方一緒に通ったというのです。さすがに検察官だ、被告のすきを鋭くついたものだと思は感心しました。ところが、論理の矛盾をつかれてあわてると思った被告は少しも動じません。

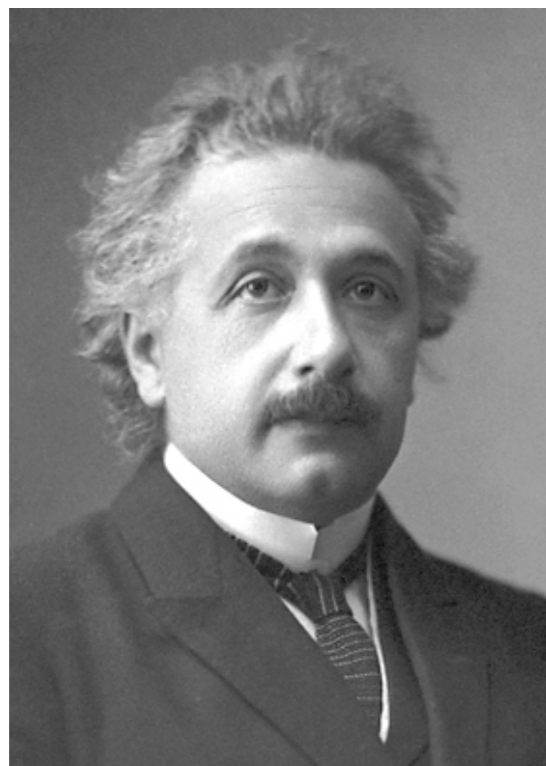
被 「そうおっしゃっても私は二つの窓の両方を一緒に通って部屋に入ったのです。しかも私は前のアリバイを引込めるつもりありません」

私はこの答弁を聞いて、一体被告は正気なのかしらと思ひました。そしてこんなコルサコフ氏病めいた答弁をする被告はどんな顔のやつかと思ひ、傍聴席からのり出して被告席をじっと見ました。ところで私は、今、被告がどんな顔をしていたか、どんな姿をしていたか、どうしても思ひ出せないの

光子の裁判

5

アインシュタイン・ボーア論争



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」



1927年時 45歳

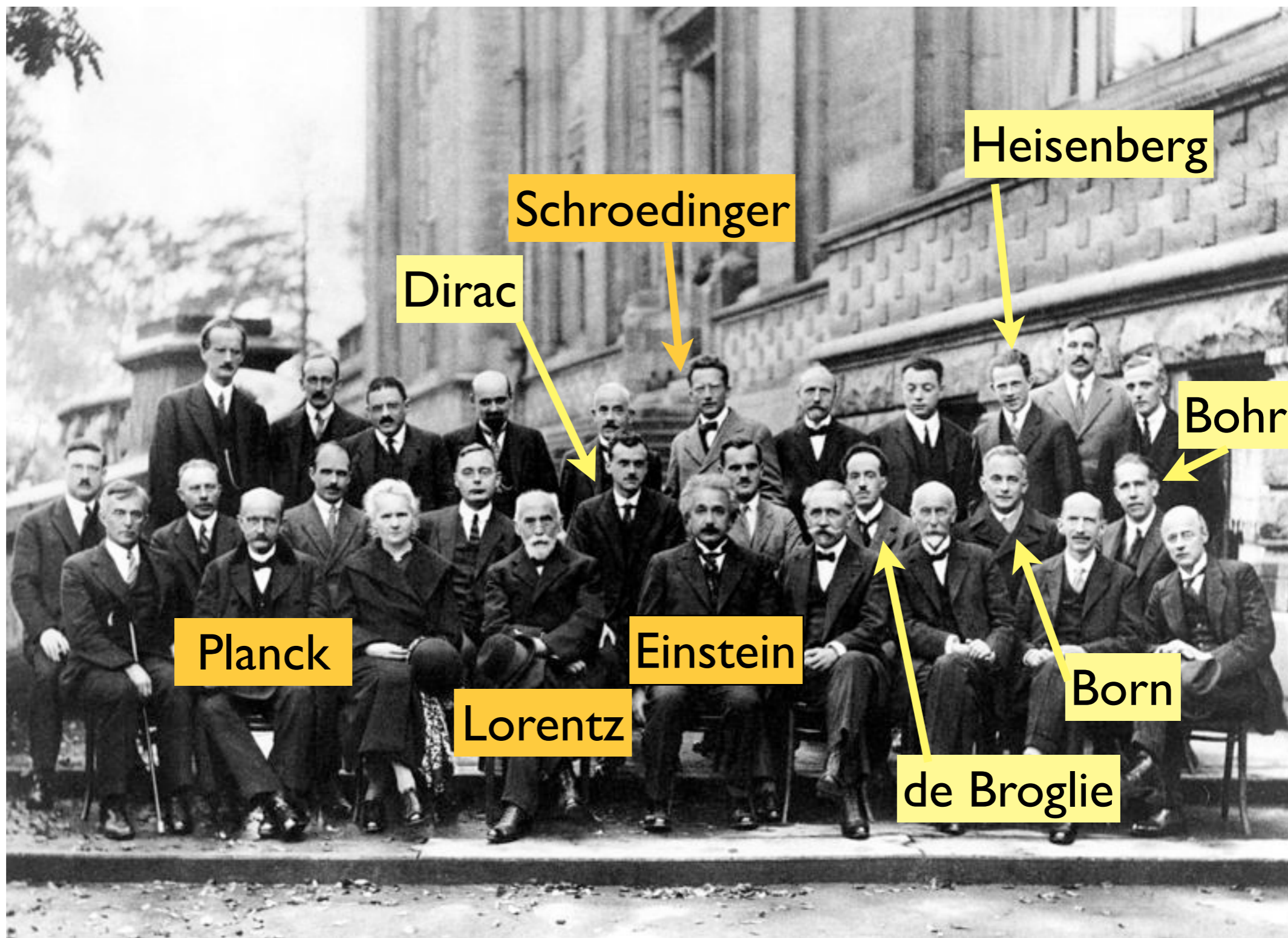
**原子物理学のゴッドファーザー**

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

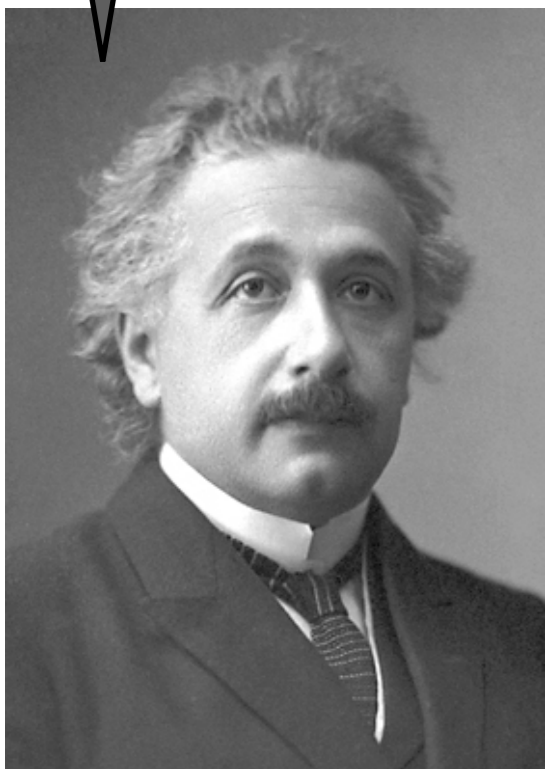
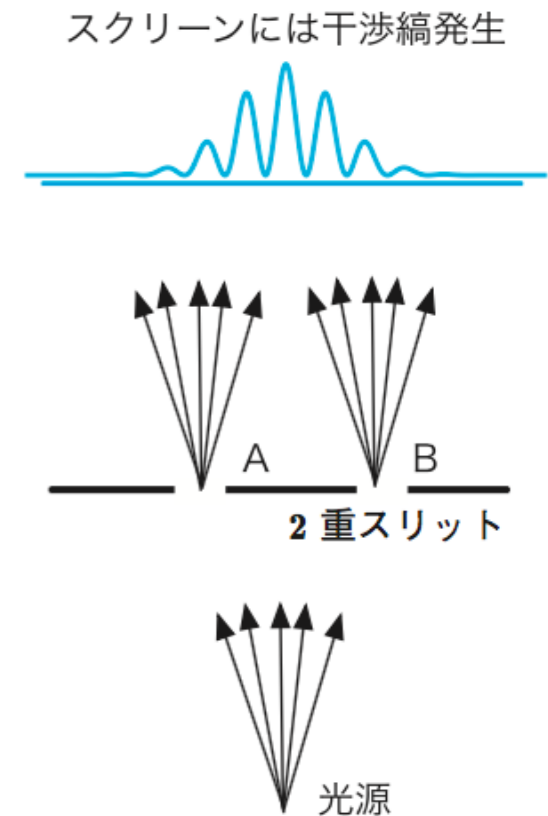


# 量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン（1）

1927年ソルベー会議

## 確率解釈に関する反論

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である。波動関数は個々の粒子の位置の確率を表している。

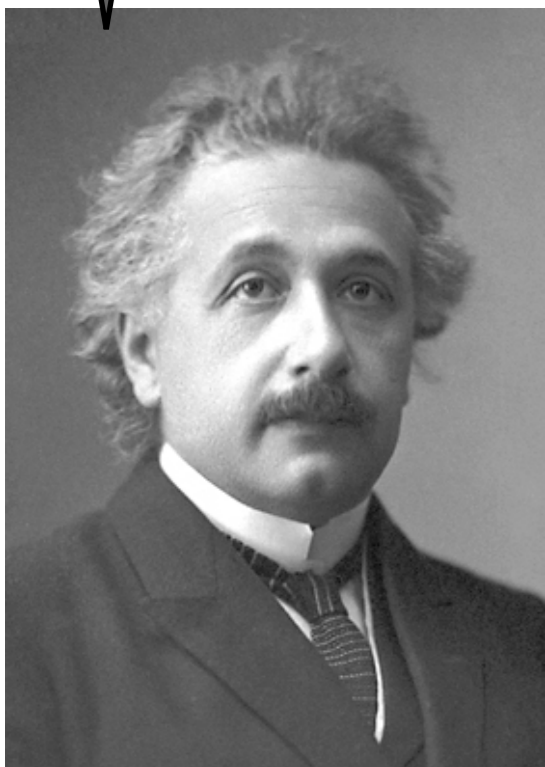
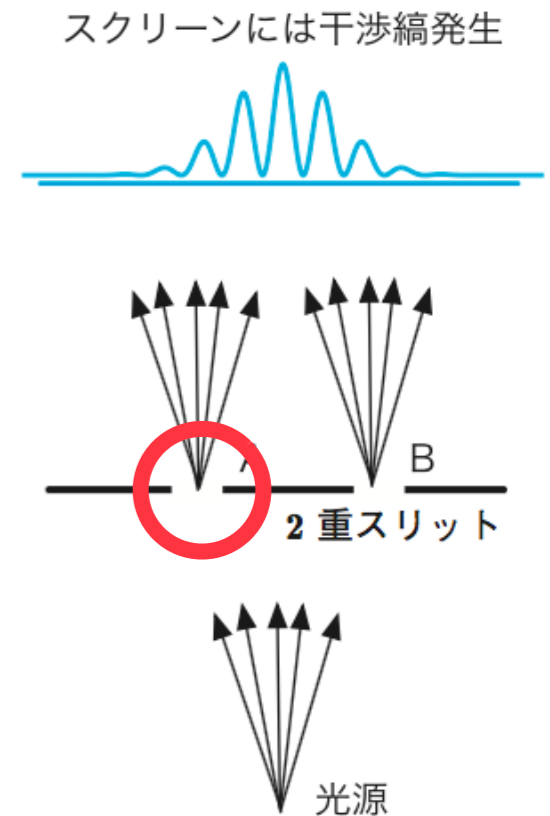
# 量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン（2）

1927年ソルベー会議

## 不確定性原理に関する反論

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っていて、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。

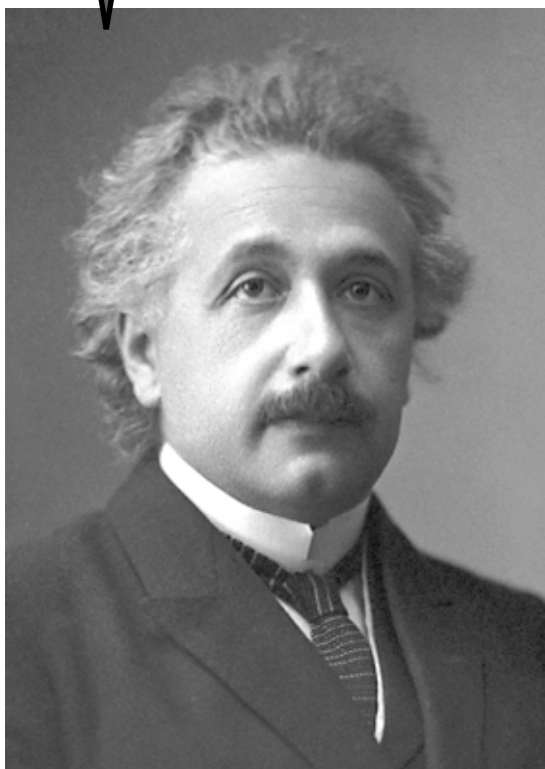
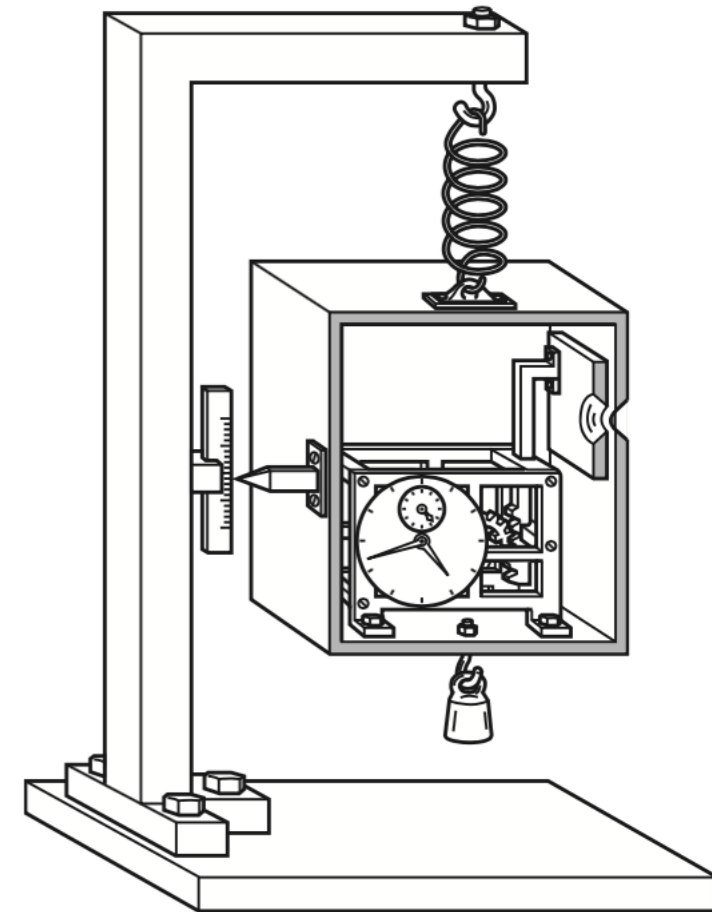
# 量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン（3）

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  $\Delta t \cdot \Delta E \simeq h$

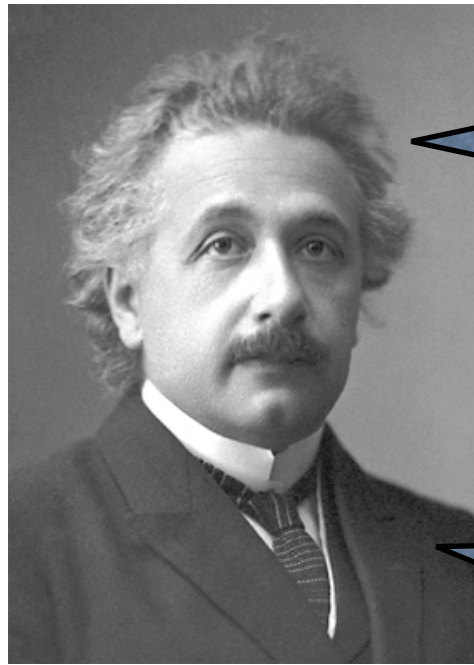
光でみたされた箱があり、シャッターを付けた小さい穴がある。ある時刻でシャッターが一瞬だけ開き、光の粒子が1つ飛び出す。その前後の箱の質量を測ることで**エネルギーも時間も別個に測定可能だ。**



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。

# アインシュタイン・ボーア論争

アインシュタイン



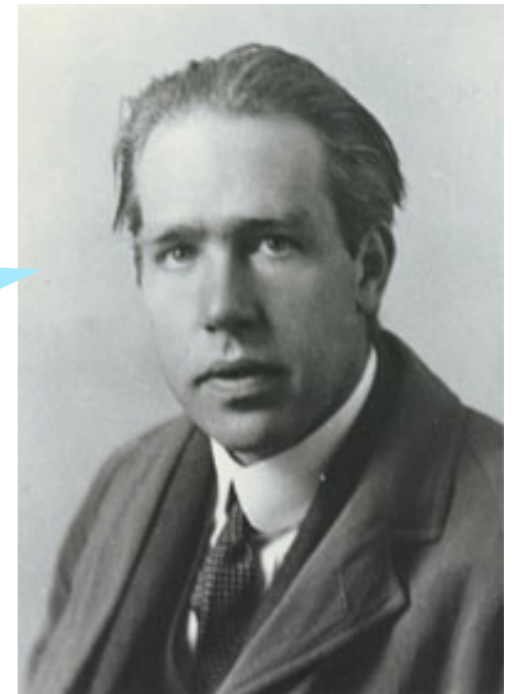
光がどちらかのスリットを通過したのか、は測定できるはずだ。

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)



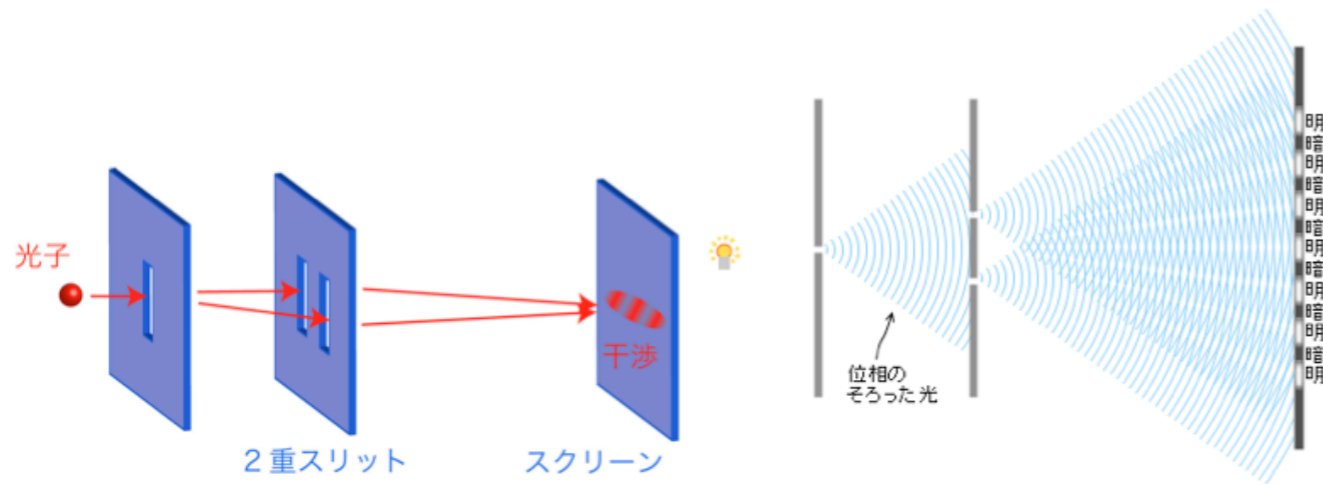
## EPRパラドックスを提案

不確定性原理を認める量子力学は誤っている

# 2重スリットによる電子線の干渉実験

## 複スリットによる 電子線の干渉

© 外村彰（日立製作所）

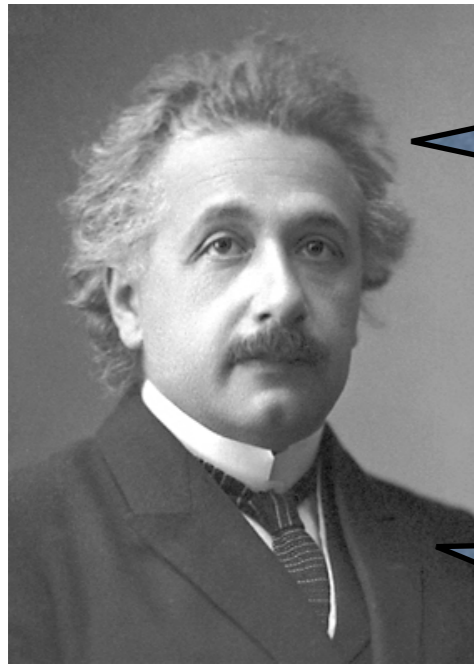


Start on Click, I'10''

数研出版「物理図録」CDrom

# 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



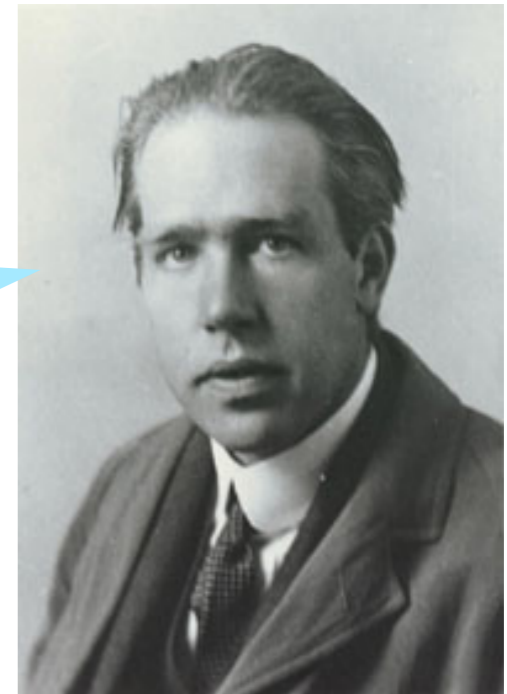
光がどちらかのスリットを通過したのか、は測定できるはずだ。

**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。

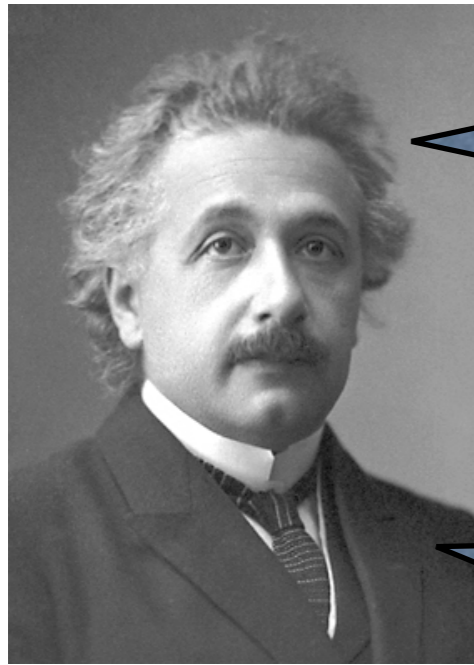
## ボーア

(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



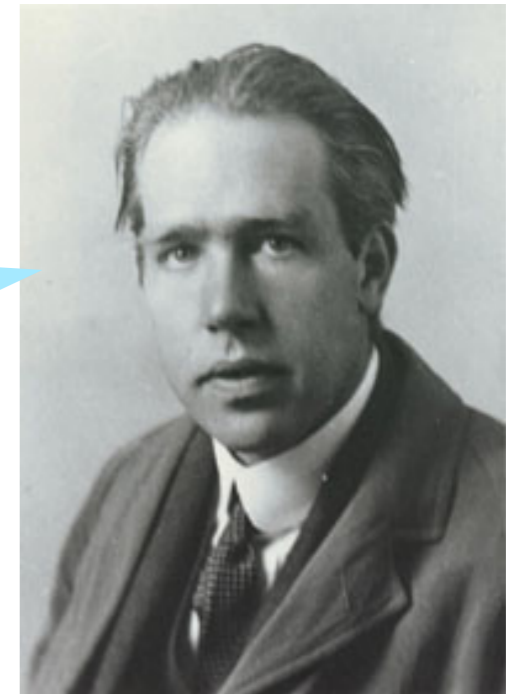
光がどちらかのスリットを通過したのか、は測定できるはずだ。

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



# 量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン（4）

1935年EPR論文

## 量子力学の不完全性に関する反論

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

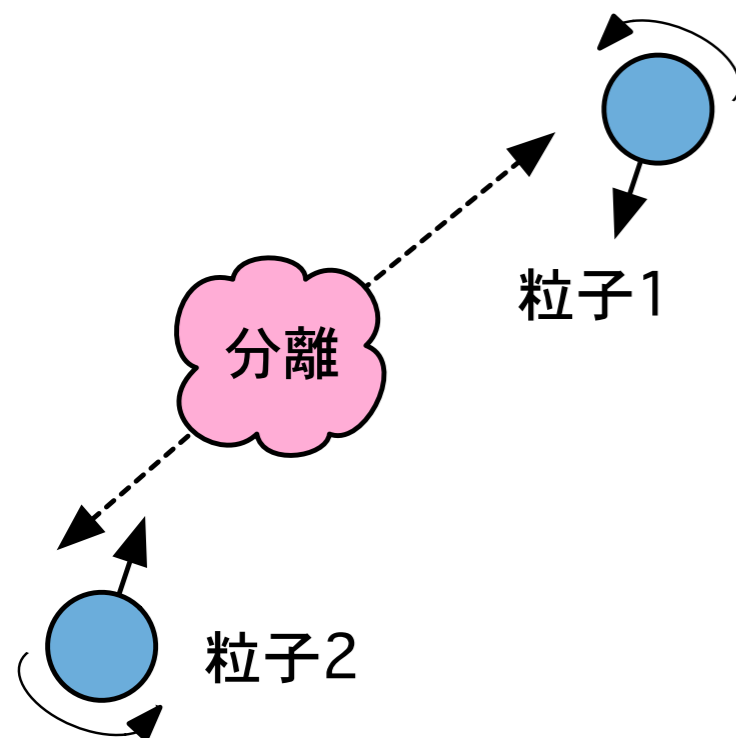
### Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

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

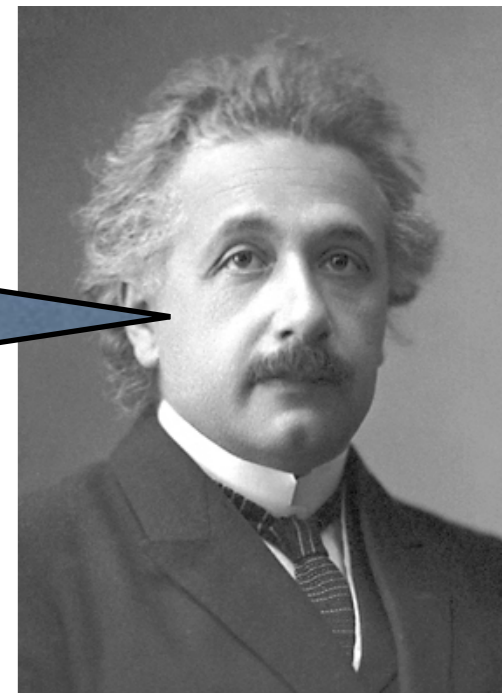
(Received March 25, 1935)

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

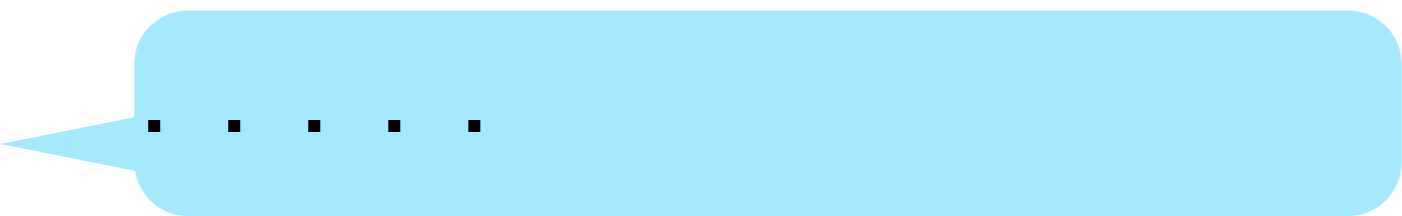
quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then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



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。

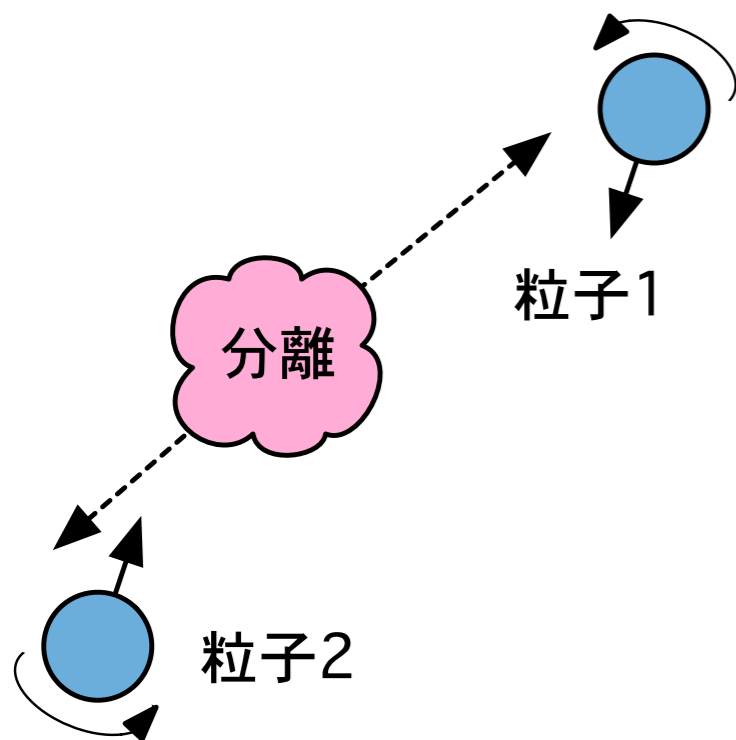


# EPRパラドクス

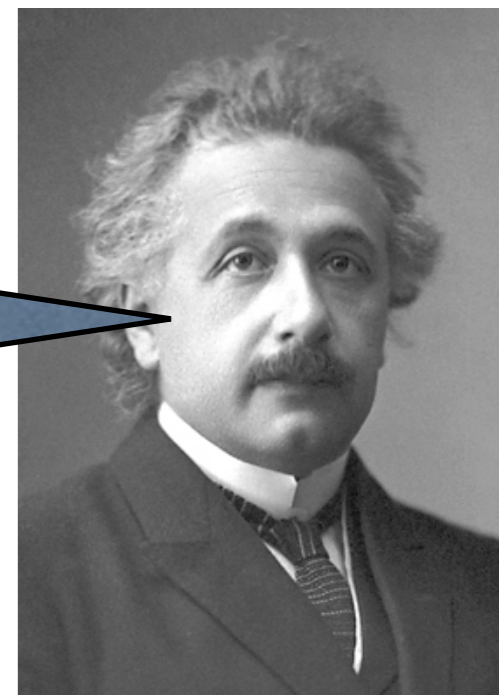


**実在は重要ではなく、観測する現象を説明するのが物理学**

**物理的実在が存在し、我々はそれを観測する**



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。



# EPR論争の決着：量子力学は正しかった



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**)

1990年  
実験結果 「ベル不等式は破れている」



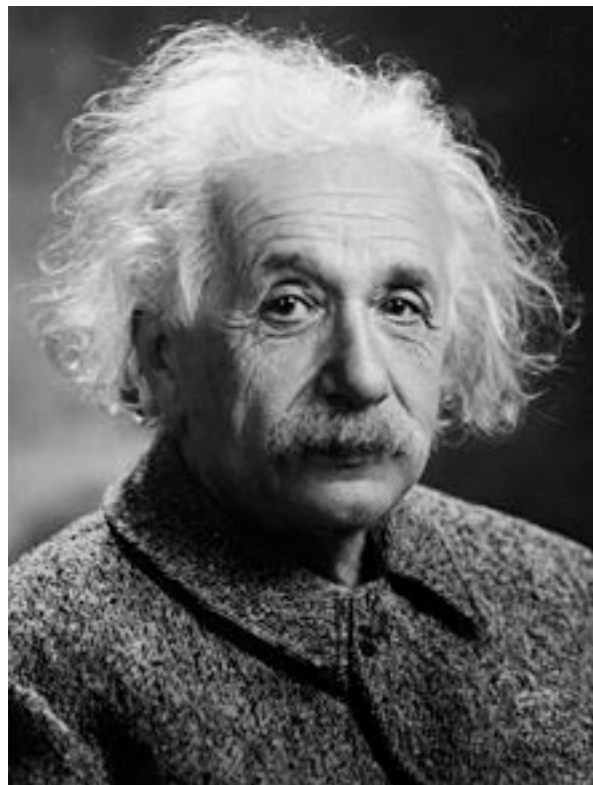
Alain Aspect  
(1947--)

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，  
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。



Albert Einstein  
(1879-1955)



Abraham Pais  
(1918-2000)

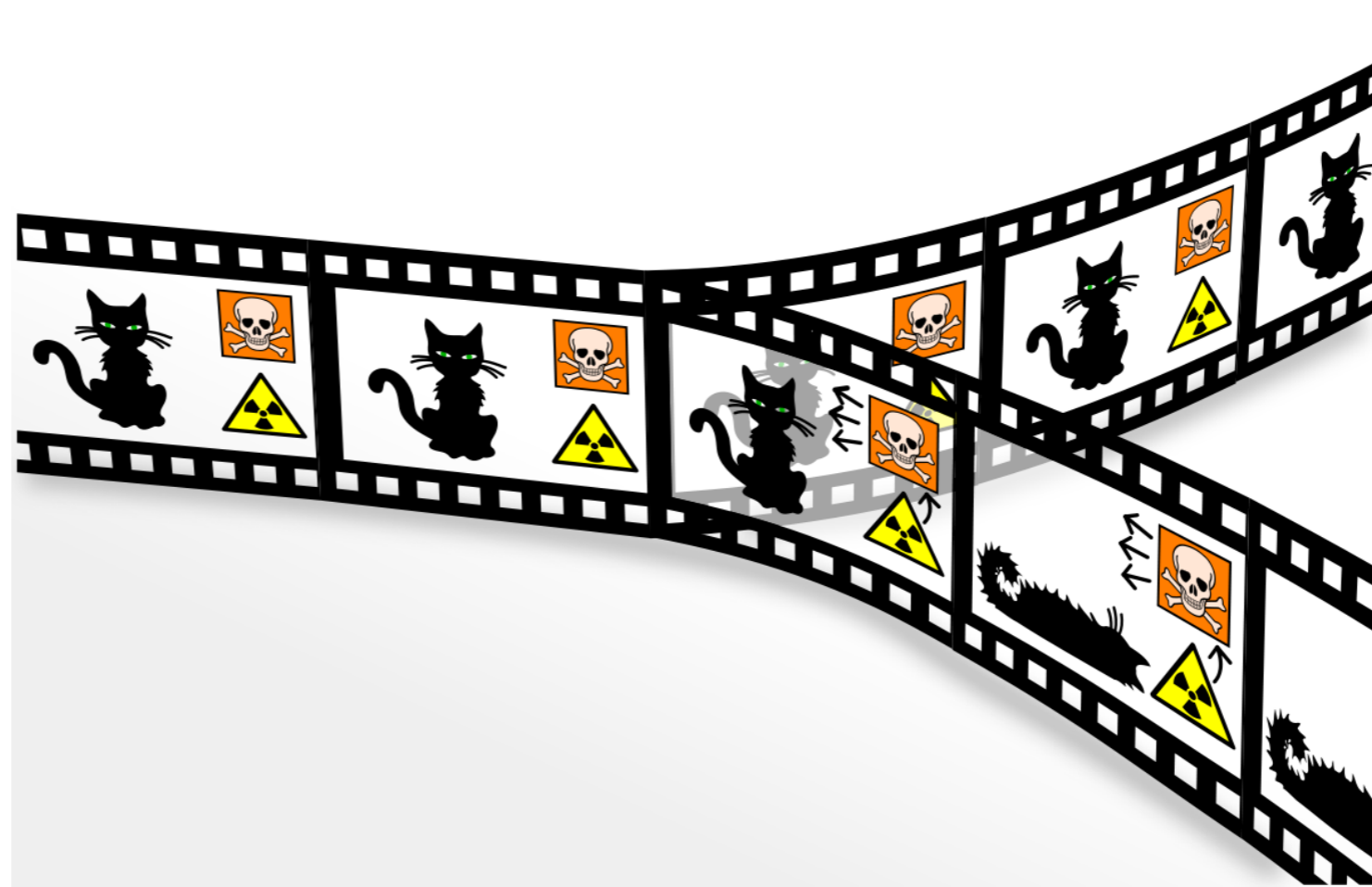
# 観測問題の解釈の1つ：多世界解釈

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”

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

