

「量子力学」序論

§ 1 量子力学の世界

§ 2 量子力学の誕生と進化

§ 3 量子現象と量子効果

光の「粒子性」、粒子の「波動性」

§ 4 量子力学の理論構成

§ 5 量子力学とその関連領域

§ 6 巨視的世界で量子効果が現れない理由

Filename=quantum-mechanics-introduction20190409A.ppt

§ 1 量子力学の世界

物質粒子はある場合には波動のように振る舞い、別の場合には粒子のように振舞う！

← 電子ビームの干渉実験

光は伝播する場合には波動(電磁波)として振る舞い、電子など物質粒子と相互作用する場合には粒子(光子)として振舞う！ ← 光電効果、コンプトン散乱

原子の〔励起〕エネルギーはとびとびの値をとる-エネルギーの量子化←-原子スペクトルの規則性、フランク・ヘルツの実験

不確定性関係

粒子の位置座標と運動量を同時には正確に決めることができない！水素原子がつぶれないのも不確定性関係のおかげ

同種の粒子は原理的に区別できない！

すべての電子の基本的性質〔質量、電荷、スピン、磁気モーメント〕は極めて高い精度で同じである！

パウリの排他原理

量子数(の組)で指定される量子状態には電子は1個しか占有できない！

→ 分子をあまり近くに接近させられない理由もパウリの排他原理である。

パウリの排他原理は化学の法則の基礎である

→ ゆえに生命の基礎である

量子力学をわからなくても No problem !

「量子力学をわかったという人は実はよく理解していないのだ」

R. P. ファインマン

§ 2 量子力学の誕生と進化

基礎的実験事実

熱放射とプランクのエネルギー量子説

光電効果と光子

水素原子のスペクトルの規則性と
安定性

コンプトン散乱

電子の二重スリット実験

ド・ブローイの物質波説と電子線回折

低温における固体の比熱

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (\text{アインシュタインの関係})$$

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad p = \hbar k, \quad (k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}) \quad (\text{ド・ブローイの関係})$$

光電効果とコンプトン散乱

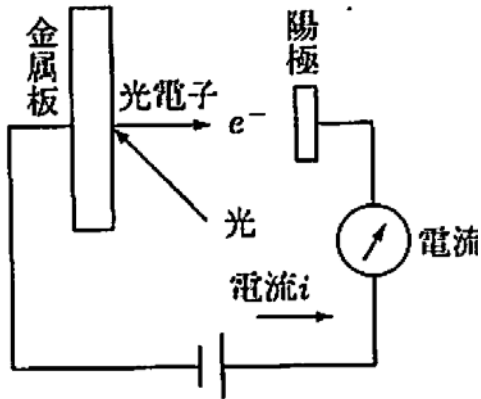


図 光電効果

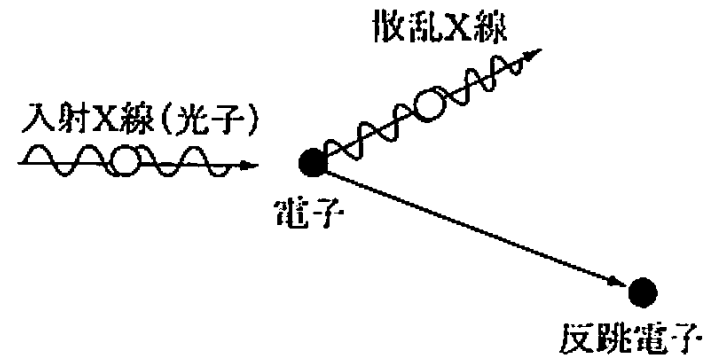
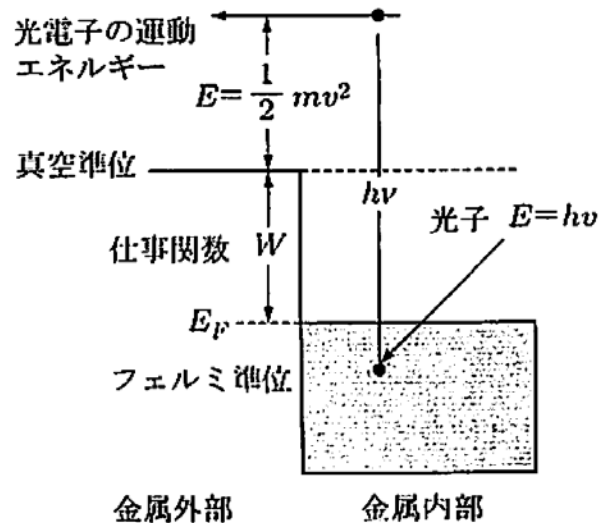
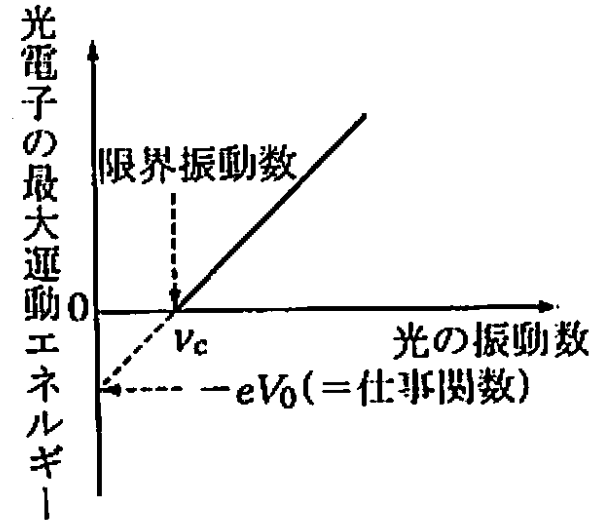
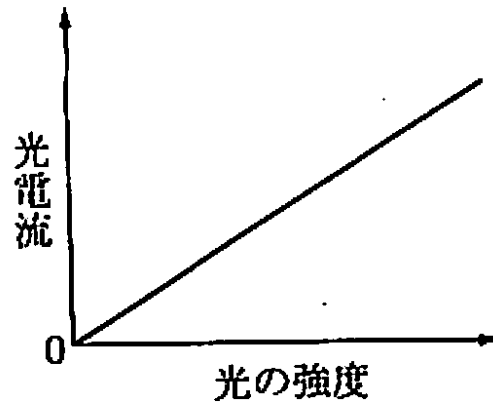


図 コンプトン散乱

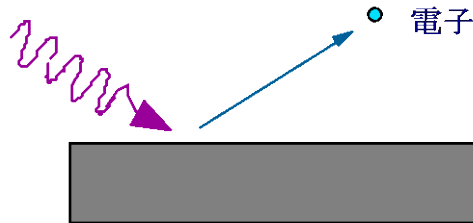
図 光電効果における光子エネルギーのキャッチボール

光電効果の現象

現象(マクロな系(巨視的な系))

1895年 レナールドの実験

紫外線や波長の
短い可視光線



実験結果のまとめ

- 1) 金属にあてる光の振動数 ν がその金属に特有なある値(限界振動数) ν_0 より小さいと、どんなに強い光をあてても電子は飛び出さない。
- 2) この限界振動数よりも大きい振動数の光を金属に当てると電子が飛び出す。飛び出した電子はいろいろな大きさの運動エネルギーをもつが、最大の運動エネルギー K_{\max} は、光の強さに無関係で光の振動数 ν だけで決まり、

$$K_{\max} = h\nu - h\nu_0$$

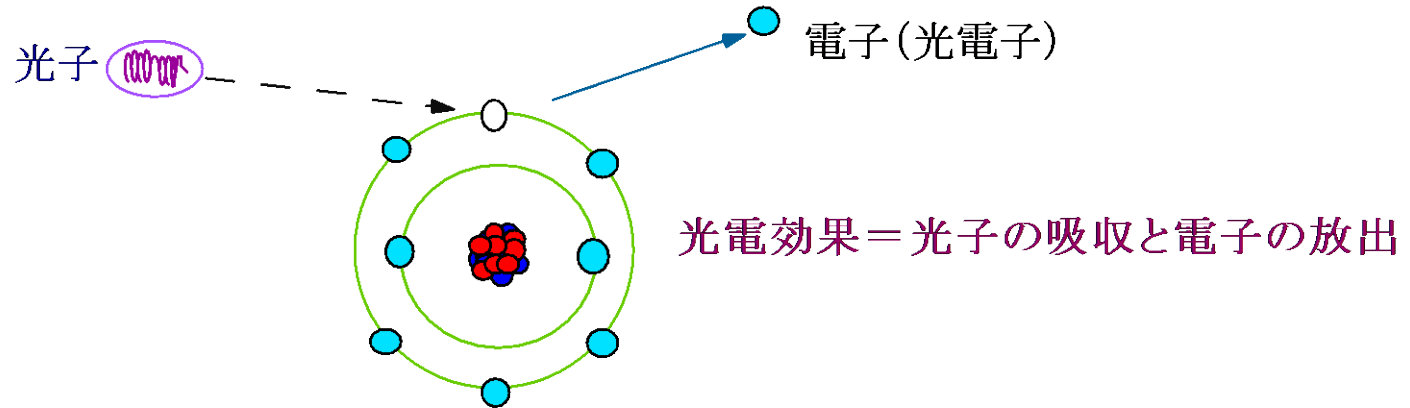
表される。ここで h はプランク定数よばれる普遍定数である。

- 3) 金属にあて光を強くすると、飛び出す電子の数はあてた光の強さに比例して増加。
- 4) どんなに弱い光でも、光の振動数が限界振動数よりも大きければ、光をあてるとただちに電子が飛び出す。

光が波動であると考えると、3) は理解できるが、1, 2, 4) は理解できない。

ミクロな系 (要素的過程) についてのアインシュタインの考え 1905年

振動数 ν の光は $h\nu$ という大きさエネルギーをもつ粒子(光子)の流れであって、光電効果ではこの光子が金属中の電子に衝突すると、そのエネルギーは一度に電子に吸収される。



- (1) 電子が金属表面から飛び出すのに必要な最小限のエネルギーを $h\nu_0$ とすると、振動数が ν_0 以下の光では必要なエネルギーを電子にいっぺんに与えることができないので光電効果は起こらない。
- (2) 金属内部の電子はさまざまなエネルギーをもっているが、その中で最大の運動エネルギーをもつ電子は光子から $h\nu$ のエネルギーをもらい、 ν が ν_0 よりも大きい場合には表面から飛び出るために $h\nu_0$ のエネルギーを使うので、残りのエネルギー ($h\nu - h\nu_0$) を運動エネルギーとしてもらって金属の外に飛び出す。

原子からの光の線スペクトルと ボーアの水素原子モデル

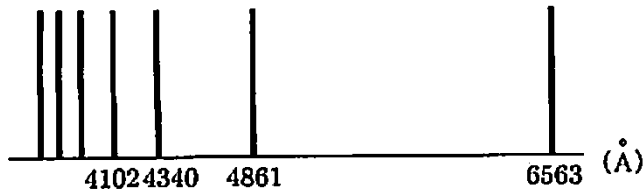


図 1-10 水素原子の輝線スペクトル

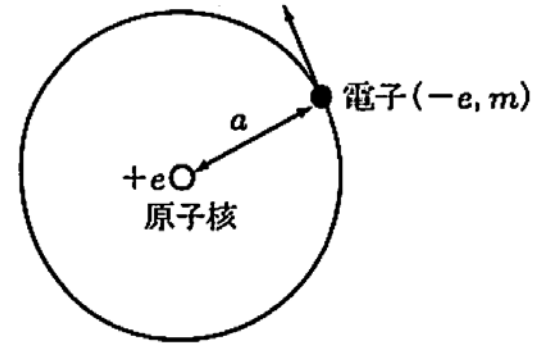


図 ラザフォードの水素原子模型

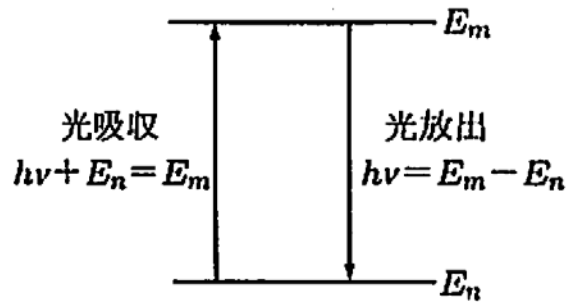


図 定常状態間の遷移とボーアの振動数条件

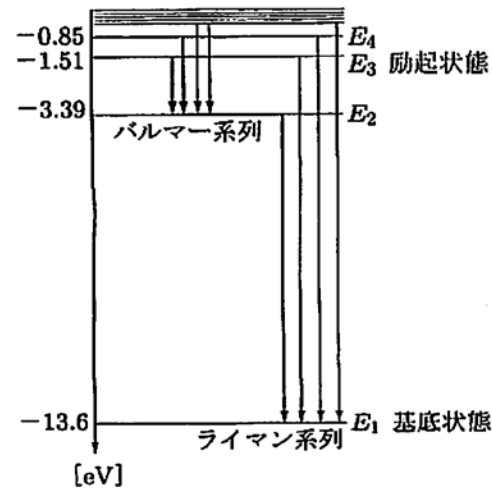


図 水素原子のエネルギー準位と輝線スペクトル

粒子と波動に対する二重スリット実験

—波動性の証拠としての干渉縞—

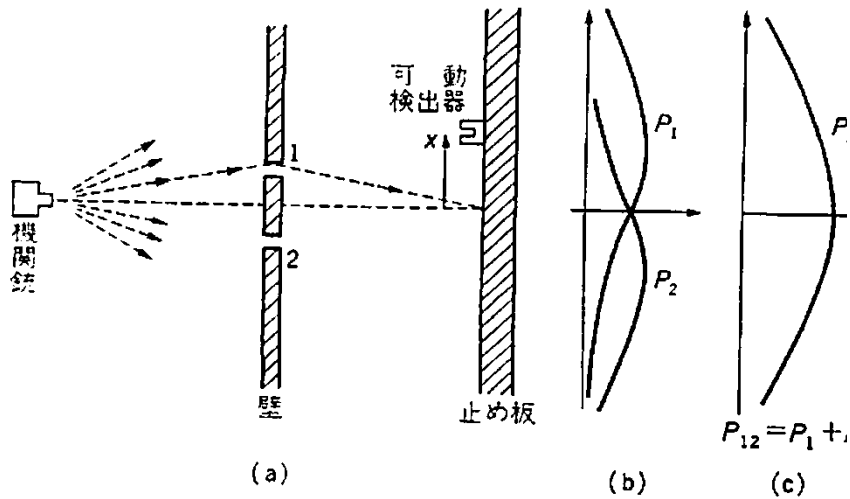


図 弾丸をつかった干渉実験

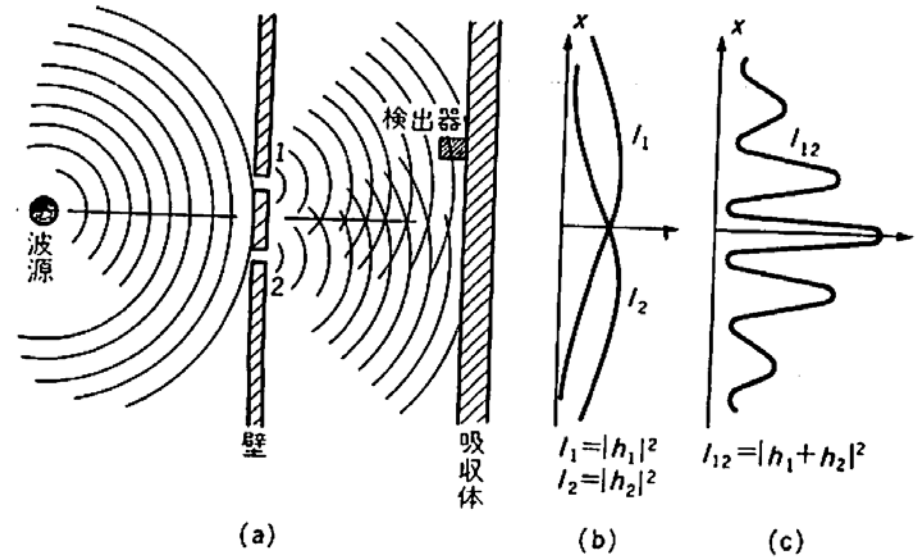


図 水の波をつかった干渉実験

電子線をつかった干渉実験—電子の波動性—

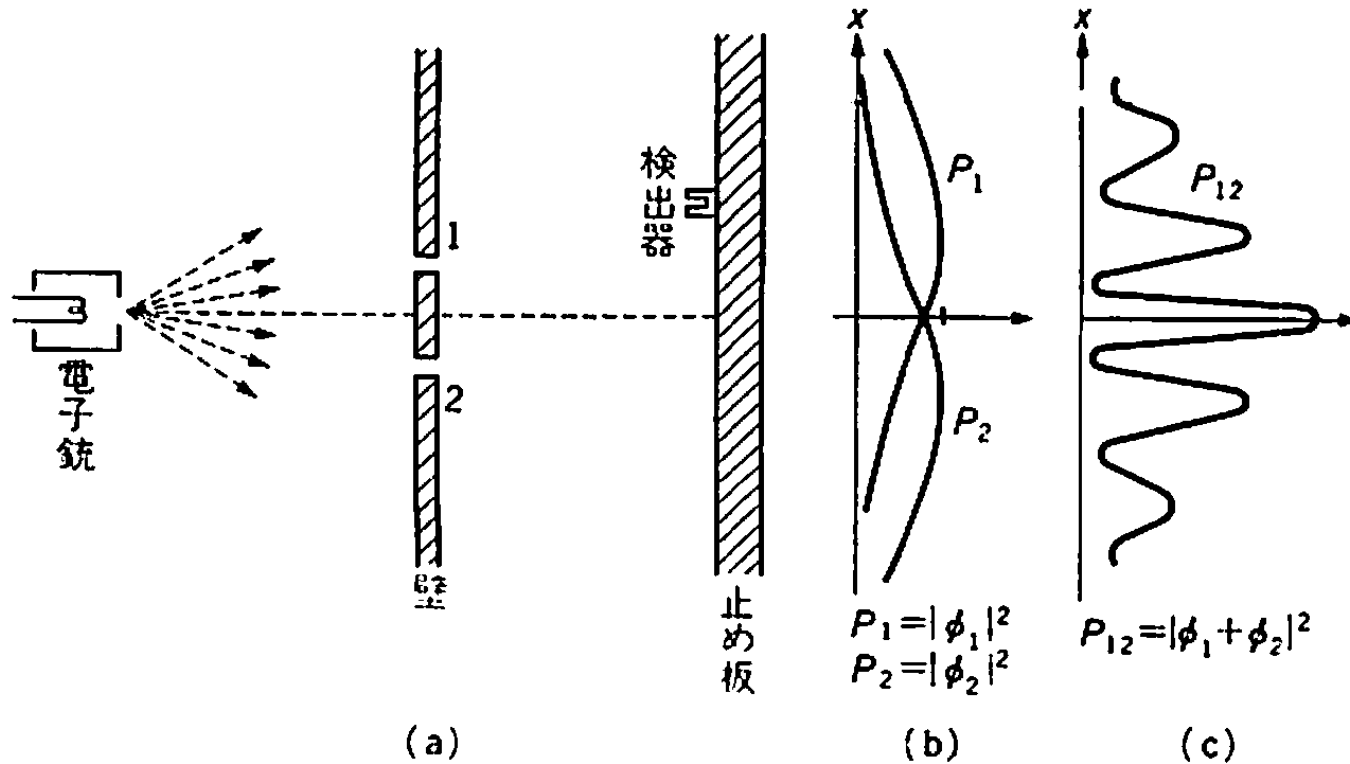


図 電子をつかった干渉実験

ヤングの実験の再考

フォトンカウンティング領域における「ヤングの干渉実験」

正会員 土屋 裕[†], 正会員 犬塚 英治[†]
杉山 優[†], 正会員 黒野 剛弘[†]
正会員 堀口 千代春[†]

テレビジョン学会誌 Vol. 36, No. 11 (1982) 1010 (50)

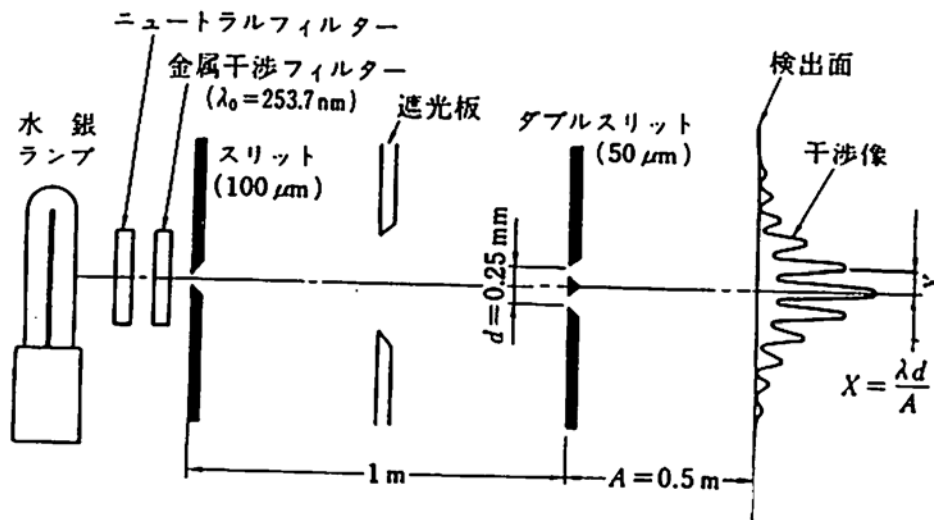


図3 実験装置の構成

Schematic diagram of the experimental arrangement.

光子で考えた場合のヤングの実験の意味

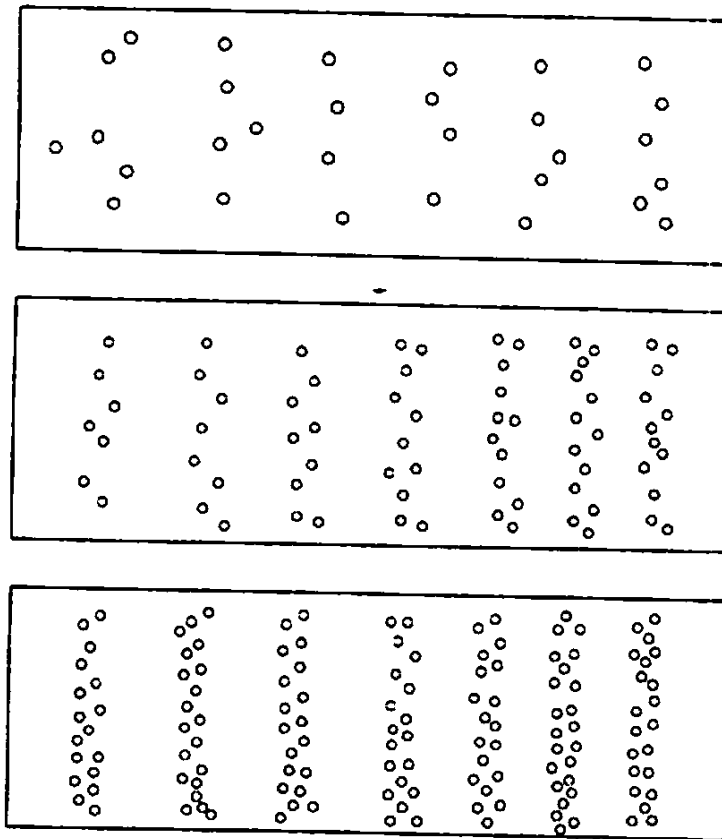
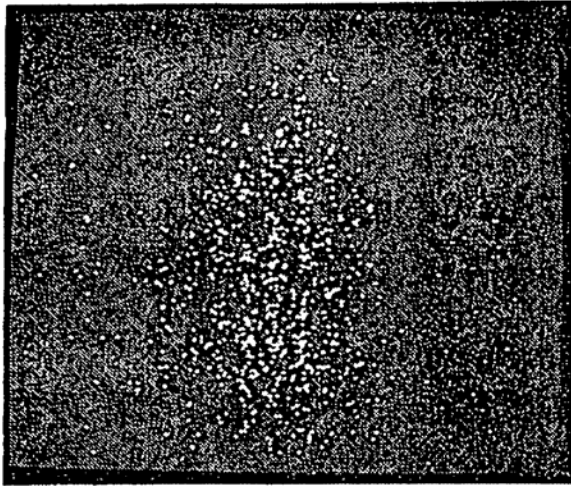


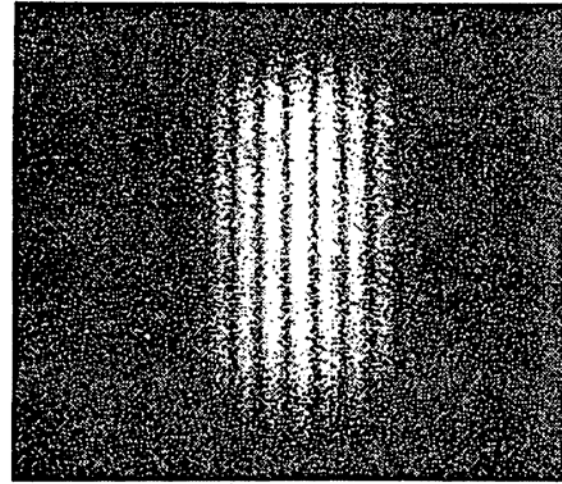
図 光子で考えた場合の2スリット干渉実験の干渉縞の意味

スクリーン上で検出された光子の数が十分大きい場合には、個数分布が古典的な波の干渉縞と同じになる



(a) Exposure time; 10 sec, Total counts; 10^3

計測開始後 10 秒経過すると写真 1 (a) に示すようなフォトンカウンティング像が得られる。画面全体に対する計数値は 10^3 、ピーク部の計数値は 2 カウントである。この画像は 10^3 個の量子から構成されていると考えられるが、全体の形はまだ不明確である。



(b) Exposure time; 10 min, Total counts; 6×10^4

写真 1 フォトンカウンティング像の例 (ダブルスリット)
Examples of the photon-counting images obtained by using a double slit.

写真 1 (b) は計測開始後 10 分経過した時の画像を示す。全画面に対する計数値は 6×10^4 、ピーク部の計数値は 9 カウントである。この写真から明らかに干渉縞が認められる。

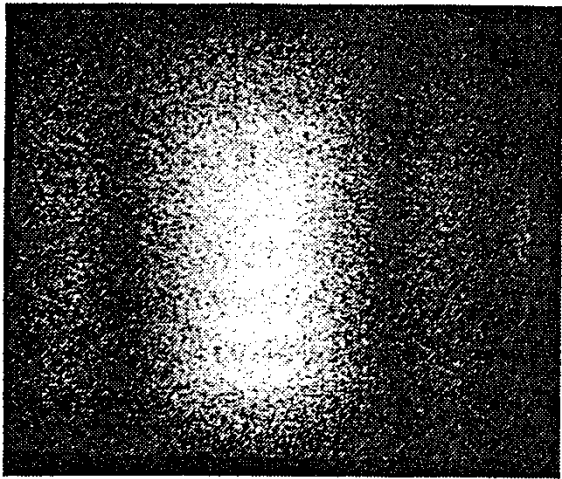


写真 2 フォトンカウンティング像の例 (シングルスリット)
An example of the photon-counting images
obtained by using a single slit.

また、写真 2 は、図 3 に示したダブルスリットの片方を閉じて、20 分間計測した時の画像である。写真からも明白なように、干渉縞は全く認められず、スリットによる回折像のみが認められた。

なお、写真 1 (b) に示した画像をフレームメモリーから読出して求めた輝度分布は、図 3 に示した系で 2 つの光束が干渉するものとして計算した 2 光束干渉の結果に一致することを確認してある。

これらの結果は、光子を粒子あるいは波動のいずれかであると考えたと説明できない。つまり、粒子であれば 1 個のスリットしか通過できず、干渉縞を作ることとはできない。また、波動とすれば、1 個 1 個の輝点

として観測されることはない。

これらのことから、この実験は光子の持つ粒子と波動という二重性を端的に示したものと考えられる。

光子は単純な粒子でも、波でもない！

ヤングの実験の古典的解釈→光の「波動性」

マックスウェル方程式→電磁波の伝播を記述

光電効果、コンプトン散乱→光の「粒子性」

光子はエネルギーと運動量をもつ

光は伝播する場合には「波動」として振る舞い、

物質粒子(電子など)と相互作用する場合には「粒子」として振舞う！

「光子は決して小さく局在するひとかたまりのものではありえない。

エネルギーの面でひとかたまりであっても、空間的にもひとかたまりである
ということにはならない。光子は単純な粒子とはいえない。

光子は単純な波ともいえない」(『アドバンス物理』、イギリス高校物理の教科書)

ヤングの実験の現代的解釈→光の「波動性」=光子の長時間露出

電子など「粒子」の「波動性」は量子化で理解できた:(粒子の)量子力学

光=電磁場の「粒子性」はどう理解できるのか？

→場の量子論(第二量子化、量子場理論)

電子の粒子・波動の二重性の実証

市ノ川竹男（早稲田大・理工学部）

「岩波講座現代物理学の基礎（第版）月報No. 1（1978.1）」

実験は電子を用いて行い、電子のエネルギーは 15,000 eV で、その波長は非相対論的自由電子とすると $\lambda = h/\sqrt{2mE} = 1.23 \times 10^{-7}/\sqrt{E}$ cm であり、約 0.1 Å になります。この程度の波長の電子を用いて干渉の実験を行うには、よく思考実験で考えられている、2つのスリットによる干渉の実験はきわめて困難です。そこで天然に存在する結晶格子を用いての回折の実験を行うことにしました。ここではアルミニウムの蒸着薄膜（多結晶薄膜）を用いました。

よく知られているように多結晶体物質に X 線または電子線をあてて、その回折像をとると Debye-Scherrer 環の同心円の回折図形がえられます。図1はその回折図形を一般の写真法で撮影したものです。この図をみただけでは波長が約 1 Å をもった波動による回折現象を示すだけで、古典的な波動の回折と本質的に相違がないように見えます。

図1: A 1 蒸着膜の電子回折図形

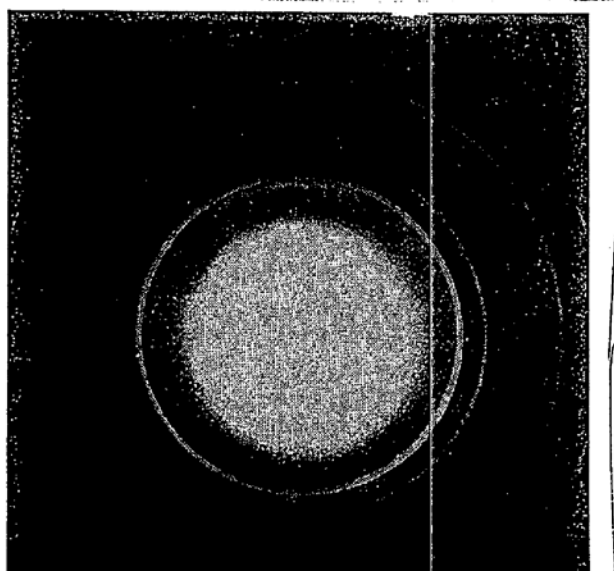


図2: A1 蒸着膜の電子回折図形

(露出時間依存性)

(a), (b), (c) および (d) の順に露出時間は長くなる。

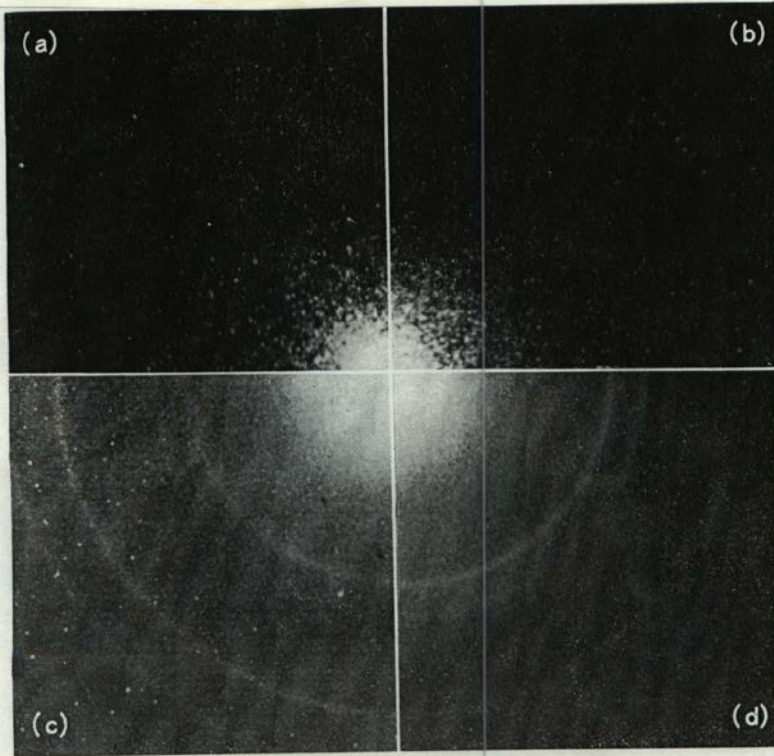


図2 A1 蒸着膜の電子回折図形, (a), (b), (c) および(d)の順に露出時間は長くなる。

しかし量子力学的な効果は入射ビームの強度を弱くしていくと現われてきます。この量子力学的効果を示すような実験は前述したように電子1つ1つによるパルス信号でBraun管上に回折図形を画くという方法で行いました。図2は1つの回折図形を4つの部分に分割し、それぞれ(a), (b), (c)および(d)とします。(a)は1回の走査像で撮影したもので

あり、(b)はそのような画面の10枚分を一緒に撮影したもの、(c)は(b)をさらに10枚分重ね焼きし、(d)は(c)をさらに10枚分重ね焼きしたものです。(d)では殆んど写真乾板で撮影されたものと同様な回折像になっています。

なぜ量子力学(と量子場理論)を学ぶべきか

工学技術への応用: 領域は増大、重要性は着実に高まっている。

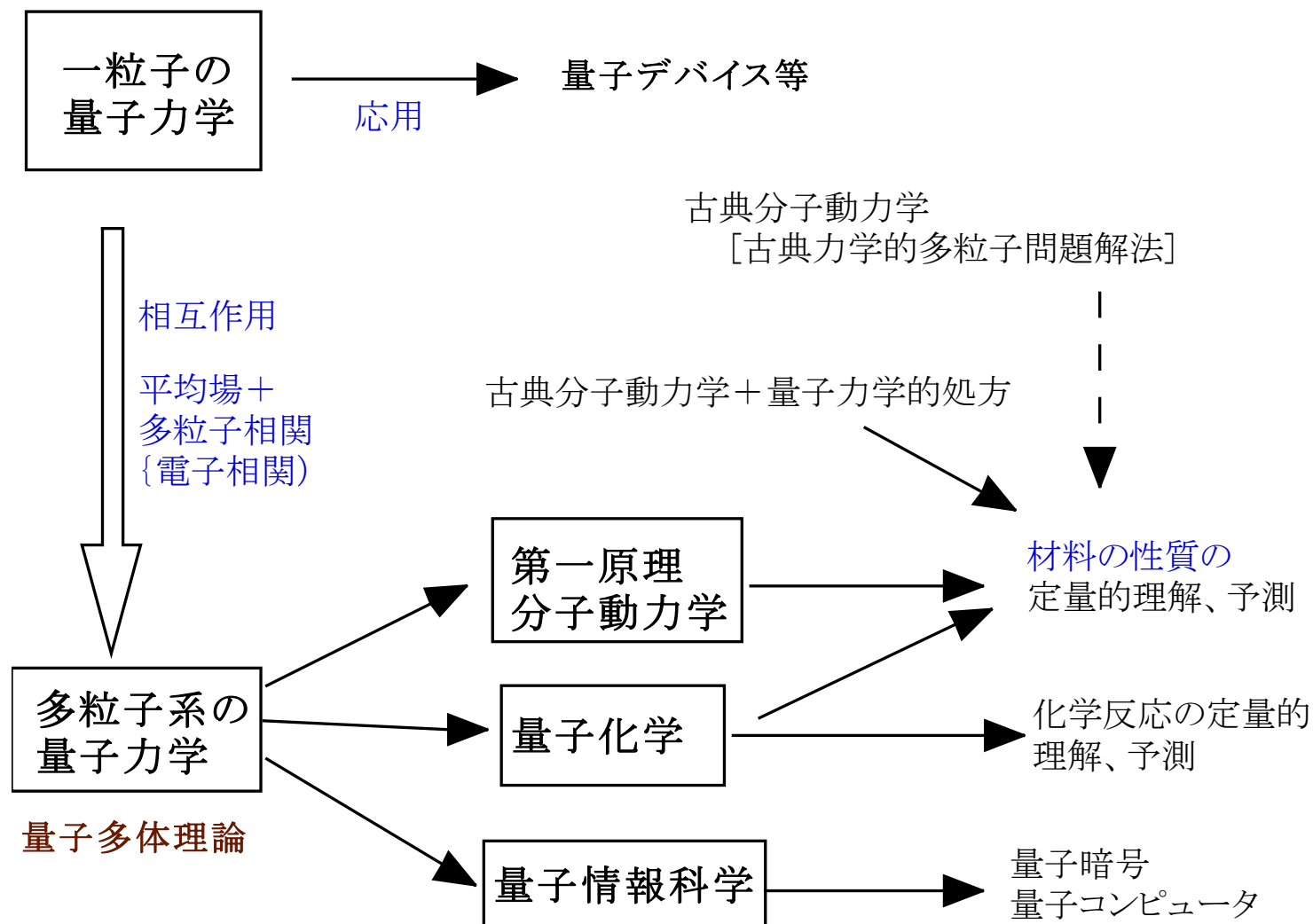
基礎的な応用: 量子力学は量子化学、量子生物学にも不可欠。
特に、近年は量子光学、原子光学、量子情報科学への応用が著しい。

量子力学は現代物理学の理論的支柱のひとつ(または中心)

量子力学の理論の核心部は既存の認識論にも衝撃を与えている。
不確定性関係、非局所性

2012年2月、小沢正直教授が近年提唱した新しい不確定性関係が実験的に満たされるが、1926年のハイゼンベルクの不確定性関係は満たされないことが判明した。

量子力学とその関連領域



コンピュータと遺伝子は一見関係がないように見えるが、ほぼ1世紀前の基礎科学におけるある一つの跳躍に共通の起源を持っている。知性におけるその巨大な出来事は、1920年代ハイゼンベルグとシュレーディンガーによって切り開かれた量子力学である。量子力学は、波と粒子は別のものであるという当時不動の考えに挑戦して、両者は切り離せないものであるとしたのである。ハイゼンベルグとシュレーディンガーは、波と粒子は実際には同じコインの別の面であるという考えを用いて、エネルギーの量子化、すなわちエネルギーは、当時考えられていたような連続的な形にではなくて、ある固まりとして受け渡されると説明した。量子力学は抽象的で不可解に見えるが、それが物質とエネ

ルギーの基礎に与えた洞察は、科学のより実際的な領域に驚くべき意味を与えてきた。トランジスタやレーザーのような先端材料、従って究極的にコンピュータ、は量子力学に依拠している。同じように生物学でも、原子を操作する能力をきっかけとして現在出現しつつある遺伝子操作の芸当は、共に量子力学に源を持つ分子結合論やX線結晶学の知識に依っている。

量子力学によるこのドミノ効果は、前世紀の何世代もの科学者や工学者に仕事を与えてきて、同時代の他の分野もこれに関与し、その更なるこだまを期待したのである。しかし、量子力学とそれが産みだした種々の科学の変革は、一回限りのものだったのだろうか？

量子力学の発見・構築 1925-26年

↓
原子・分子・固体への応用

↓
半導体 (semiconductor) の量子物理学

↓
量子デバイスの発明

↓
二極素子 (diode, ダイオード)

二極真空管

↓
LED (Light Emitting Diode、発光ダイオード) の発明

↙ ↘
赤色、緑色LEDの発明

青色LEDの発明 2014年ノーベル物理学賞：赤崎勇、天野浩、中村修二

「明るくエネルギー消費の少ない白色光源を可能にした高効率な青色LEDの発明」
「20世紀は白熱灯が照らし、21世紀はLEDが照らす」

LEDが光るしくみ：

<http://optica.cocolog-nifty.com/blog/2010/01/led1-d068.html>

§ 4 量子力学の理論構成

物理量は演算子である！

座標 $x \Rightarrow \hat{x}(= x)$

運動量 $p_x \Rightarrow \hat{p}_x = \frac{\hbar}{i} \frac{d}{dx}$

(波動関数の) 傾きとしての運動量

h : プランク定数

$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$: デイラック定数

$i \equiv \sqrt{-1}, i^2 = -1$

シュレディンガー方程式

1925-1926 Ervin Schroedinger

ハミルトニアン

$$\hat{H} \equiv -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + U; (U : \text{ポテンシャル})$$

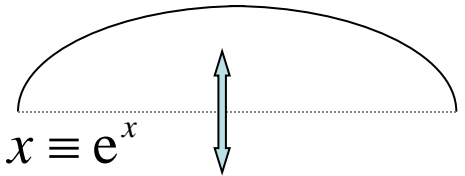
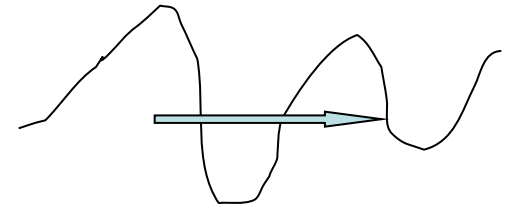
\hat{H} が時間に依存する場合

$$\hat{H}\Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x,t)$$

\hat{H} が時間に依存しない場合

$$\hat{H}\psi(x) = E\psi(x)$$

$$\Psi(x,t) = \psi(x) \exp\left(-\frac{iEt}{\hbar}\right), \exp x \equiv e^x$$



「われわれが体験している“日常の世界”は、透き通ったように簡単ではないけれども、われわれが今描いたほど複雑ではない。

必要な成分は、電子、光子、核子、 π 中間子、ミュー粒子、ニュートリノと比較的に少ないのである。残るものは、われわれの認識の世界の拡大を作り出す技術的能力と、われわれの景観から隠されている実在の縁を心に描くわれわれの想像力に制約されながら姿を現してくる、一層深い階層である。われわれの日常生活で遭遇する実在のもっと近いところに、なお多くの驚きが存在するのである。」

[ウォレス1989]

アインシュタインの量子論不信が開いた新世界 長年の論争に決着「量子論が正しく、局所实在論は誤り」

・アインシュタインの量子論への不満

[谷村2019]

- 1) 量子論はものごとが起こる確率を予測するだけで、
確実なことは予測できないという面。(非決定論)
- 2) 観測されていないものは観測されたときと同じように挙動していることを
量子論は保証しないという面。(非实在論)。
アインシュタインは「君は、君が見上げているときだけ月が存在していると
本当に信じるのか？」

「物理量の値の实在性」という限られた問題を相手にしている。

・局所实在論なら成り立つはずのベルの不等式(1964年):

ジョン・スチュアート・ベル(John Stewart Bell,1990死去)

- ・1982年, フランスのアスペが非常に信頼度の高い実験を行い、ベルの不等式の破れを実証.

・局所实在論のどこが間違っているのか:

局所性と实在性のどちらをあきらめるべきだろうか?

これについては物理学者の間でも意見が分かれる

- ・量子論を疑っていたアインシュタインのアイデアを発展させたところから量子コンピューターが発案され、これらの検証実験の技術は量子通信の基盤技術になっている

§ 6 巨視的世界で量子効果が現れない理由

- ・微視的世界の秩序としての量子効果
- ・巨視的世界では一体何が量子的な振る舞い(=量子効果)を壊しているのか？

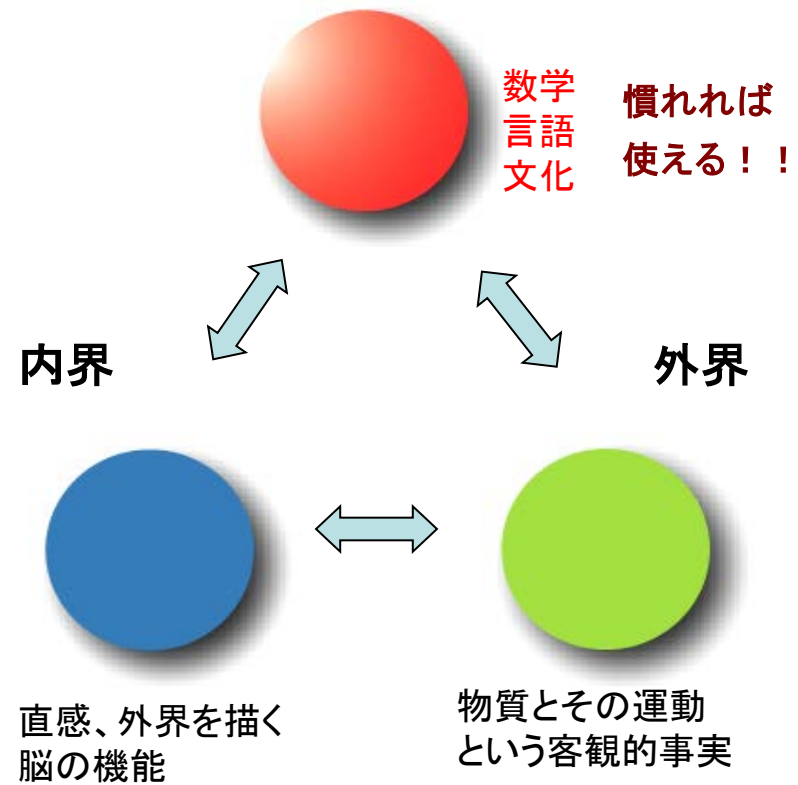
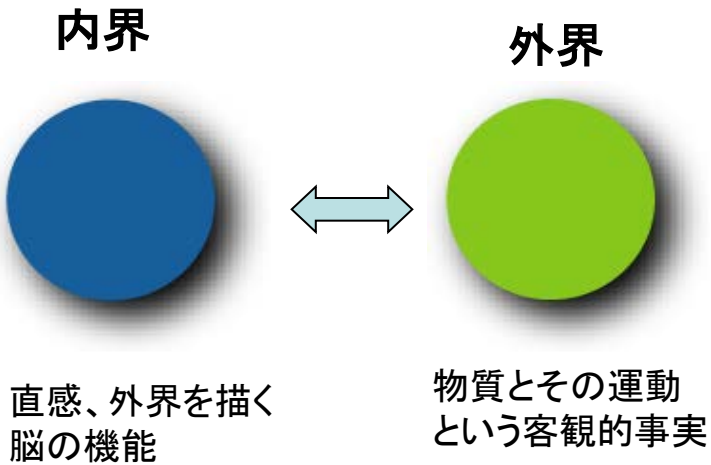
その答えは、大きい「マクロな」物体の中で粒子がどのように並び、どのように動いているかに関係している。原子や分子は、生きていない固体の中ではランダムに散らばって不規則に運動していることが多い。液体や気体の中ではさらに、熱のために絶えずランダムな運動をしている。分散(=散逸?)や振動や運動(=並進運動?)といった、これらのランダムな要因によって、粒子の不安定な量子的な性質はあっという間に消えてしまう。物体を構成する全ての量子的粒子の作用が組み合わさって、それぞれ互いが互いを「量子測定」する。それによって、我々の身の回りの世界は正常に見えているのだ。量子の不気味さを観察するには、普段と違う場所(太陽の内部など)に行くか、ミクロの世界を深くまでのぞき込む(電子顕微鏡などの装置を使って)か、または量子的粒子を慎重に並べ、歩調を合わせて振る舞う(=それぞれの量子的粒子の波動関数の位相の建設的な干渉性が強まる)ように仕向けるしかない。[カリーリ2015]のp. 23.

莫大な個数の原子分子のランダムな運動による相互の「量子測定」によるそれぞれの量子的粒子の波動関数の位相の干渉性の破壊

ものを理解するには、「内界」、「外界」と「第三の世界」が必要

思い込み

実は 第三の世界



参考書

[ウォレス1989] P.R.ウォレス「量子論にパラドックスはない」、シュプリンガー・フェアラーク東京、1989年。特に、pp.85-86.

[グリーンフィールド2008] S.グリーンフィールド「未来の私たち」
NPO科学技術社会研究所, 2008年. pp.181-182. 著者は英国ケンブリッジ大学教授,
脳神経生理学者.

[原1985] 原 康夫「量子の不思議—不確定性原理の世界—」中公新書,1985年.

[カリーリ2015] ジム・アル-カリーリ, ジョンジュ・マクファデン
「量子力学で生命の謎を解く」SBクリエイティブ, 2015年.

[谷村2019] 谷村省吾, アインシュタインの量子論不信が開いた新世界
長年の論争に決着「量子論が正しく、局所实在論は誤り」
理論物理学者. 朝日新聞WEBRONZA
2019年03月18日.