

量子力学

quantum mechanics

量子 = quantum 「とびとび」という意味 (量子力学の ひとつの側面)

(「量子」とよばれる物理的対象 (たとえば粒子) が あるのびはる)

- ▷ Newton 力学
- ミクロな物体, 天体の運動を正確に記述 (ただし 速度 \ll 光速)
 - 分子・原子など ミクロな対象のふるまいを記述できない。



- ▷ 量子力学
- 1900 ~ 1927
- 分子・原子の状態や運動を記述・予言できる。
 - ミクロの極限では Newton 力学に一致。 → Newton 力学を含む

古典物理

Newton 力学, 電磁気学, 相対論, ...



量子物理 (量子論)

量子力学, 場の量子論, ...

物理系の状態と時間変化についての
今のところもっとも根本的な枠組

量子力学 なぞではの「物理」

- 波動性と粒子性の二重性
- 状態の重ね合わせ
- 不確定性原理
- 我々をめぐり (いかに不思議な) 現象や考え方
- エンタングルメント (量子的からみ合い) と非局所性

▷ 20世紀

ミクロな物理, 固体物理への量子力学の応用

これらを見つめてみて

▷ 21世紀

これらを積極的に利用

量子情報, 量子コンピュータ, ...

<三波動性生と粒子性生>

3

▶ 入門書 (高校の教科書?) によくある説明

- 光は「波」だと思われていたが 実は「粒子」でもあった!
- 電子は「粒子」だと思われていたが 実は「波」でもあった!
- 光も電子も「波」でもあり「粒子」でもある!! ← じゃあ?

「波」も「粒子」も マクロな世界での 経験にもとづいて つくられた概念

ミクロな対象が「波」か「粒子」かという 肉にイミはるい!

光も、電子も、他のすべてのものが、別に「波」でも「粒子」でもなく、

量子論で記述される対象

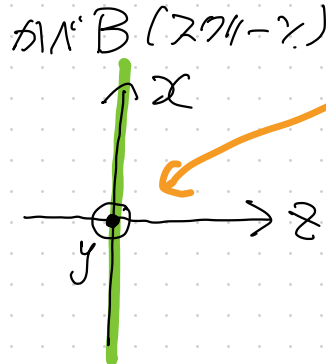
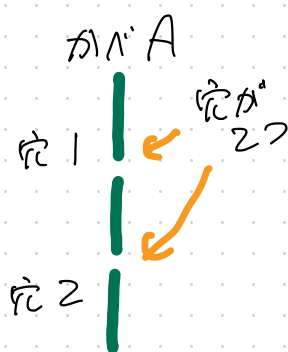
これをちゃんと学び!

本質を見するための3つの(思考)実験 ⇒

ボールを用いた実験



方向はバラバラ



原点 (0,0,0)

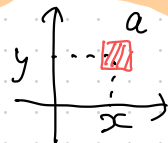
実験

- ボールを1回に1つ打ち出す (方向はある範囲でランダム, ボールは分裂しない)
- ボールはカバ A で反射 OR 穴 1 OR 2 を通ってカバ B へ
- カバ B にボールが当たったら, その位置 (x, y) を記録

何度もくり返す → 当たった位置のデータ → (x, y) にボールが当たる確率密度 $P(x, y)$

ボールがちょうど1点にあたる確率はゼロ

(1) (ボールが (x, y) を囲む小さな面積の範囲にあたる確率) $\approx P(x, y) a$

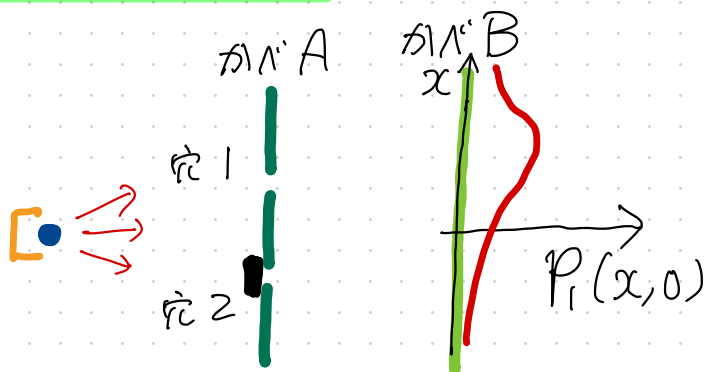


(2) (ボールが領域 S にあたる確率) $= \iint_{(x, y) \in S} dx dy P(x, y)$

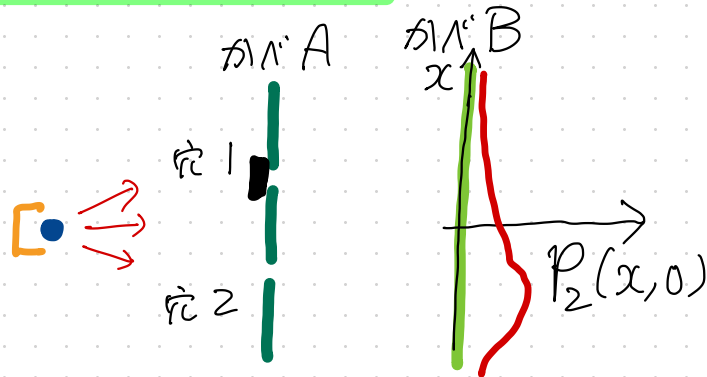


石確率密度のふりま

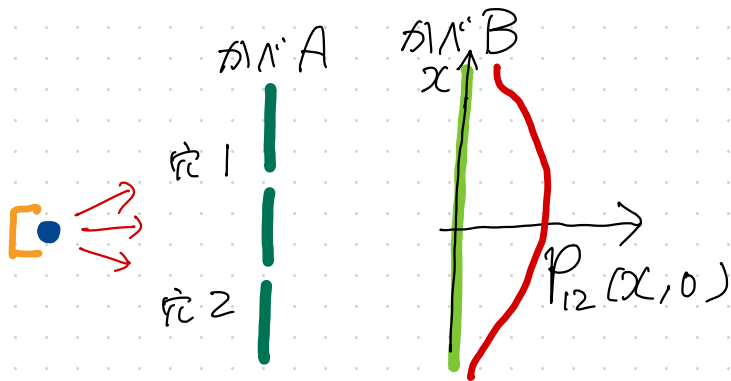
穴1のみが空いている



穴2のみが空いている $P_2(x, y)$



穴1と穴2が空いている $P_{12}(x, y)$



もしも

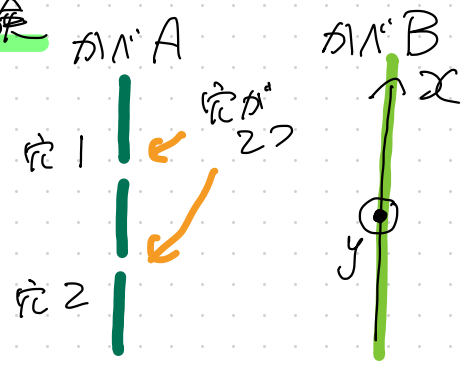
$$(1) P_{12}(x, y) = P_1(x, y) + P_2(x, y)$$

1を通った

2を通った

音波を用いた実験

音源
単一の周波数のサイン波



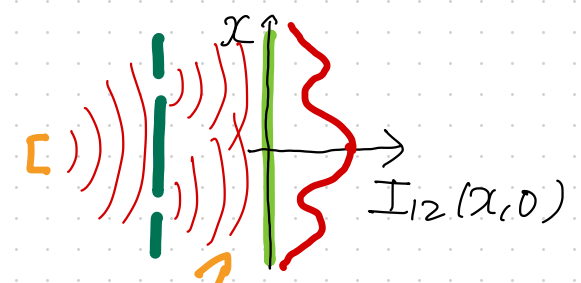
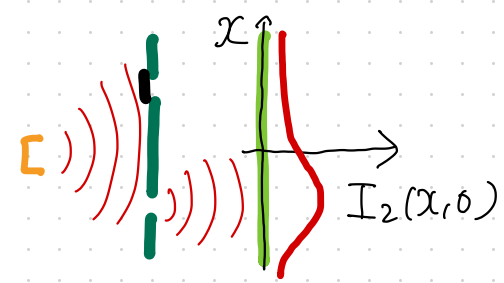
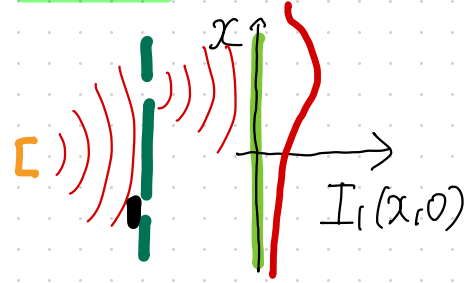
かバの上のすば2の点 (x, y) 2"
音の強さ $I(x, y)$ を測定

単位時間・単位面積あたりの入射エネルギー

穴1のみ $I_1(x, y)$

穴2のみ $I_2(x, y)$

穴1と穴2 $I_{12}(x, y)$



三波の干渉のために

干渉!!

(1) $I_{12}(x, y) \neq I_1(x, y) + I_2(x, y)$

あとでちゃんと計算

電子を用いた(思考)実験

電子源

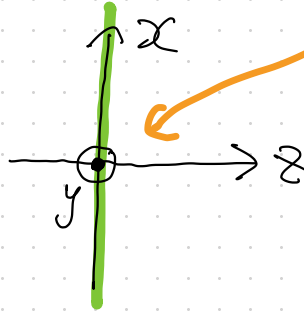
かバ A

穴 1

穴 2

穴が 2 つ

かバ B (検出器)



原点 (0,0,0)

思考実験

- 電子を 1 回 = 1 つ打ち出す (弱い電子源)
- かバ B に電子が当たったときの位置 (x, y) を記録

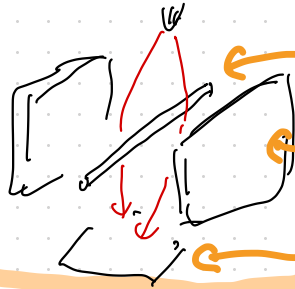
何度もくり返す → 当たった位置のデータ → (x, y) に電子が当たった確率密度 $P(x, y)$

実際の実験

Tomomura, Endo, Matsuda, Kawanaki, Ezawa 1989 (三井本 p71)

電子線

パイプライン



糸状の電極 (太さ $\leq 1 \mu\text{m}$)

金庫板

検出器

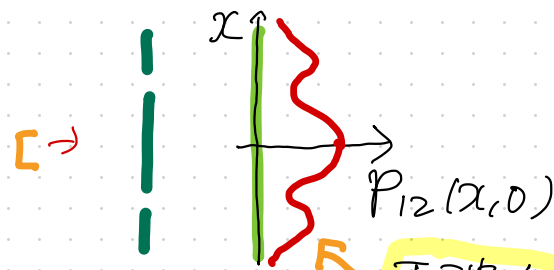
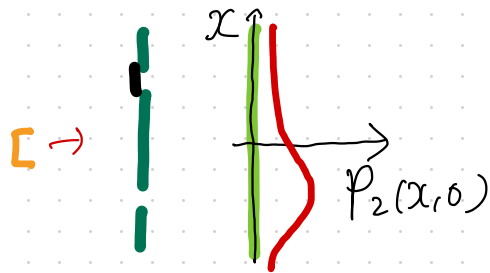
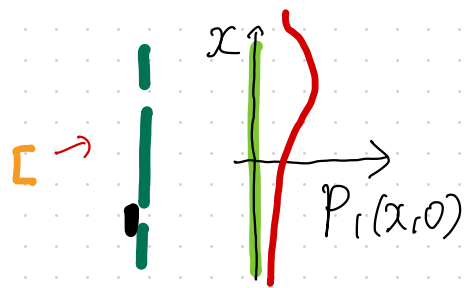
電子が当たった位置の重なり

→ YouTube

(思考) 実験の結果

8

△ 穴1のみあける $P_1(x, y)$ △ 穴2のみあける $P_2(x, y)$ △ 穴1と穴2をあける $P_{12}(x, y)$



$$(1) P_{12}(x, y) \neq P_1(x, y) + P_2(x, y)$$

干渉!

何が起きてるのさ?

事実

- 電子は2つ以上に分裂したりしない
- 電子が検出されるときは B 上の 1 点でみえる。

常識的な推論

電子は穴1か穴2のどちらかを通った $\Rightarrow (2) P_{12}(x, y) = P_1(x, y) + P_2(x, y)$

穴1を通った 穴2を通った

しかし実験結果は (2) には合わない!!

外村実験でも干渉がみえる!!!

ここまででわかったこと

9

- かつ B 上で 電子は「粒子」のように検出される
- 電子が B 上に到達する位置はランダム → 電子源にランダムさは不要
- 確率密度 $P(x, y)$ には「波」の強度のよる干渉がみられる.

量子力学

電子は「波」とも「粒子」とも異なる なんらかのルールに従っている.

確率密度を定めるルール (ネタバレ)

複素数値をとる関数 $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$

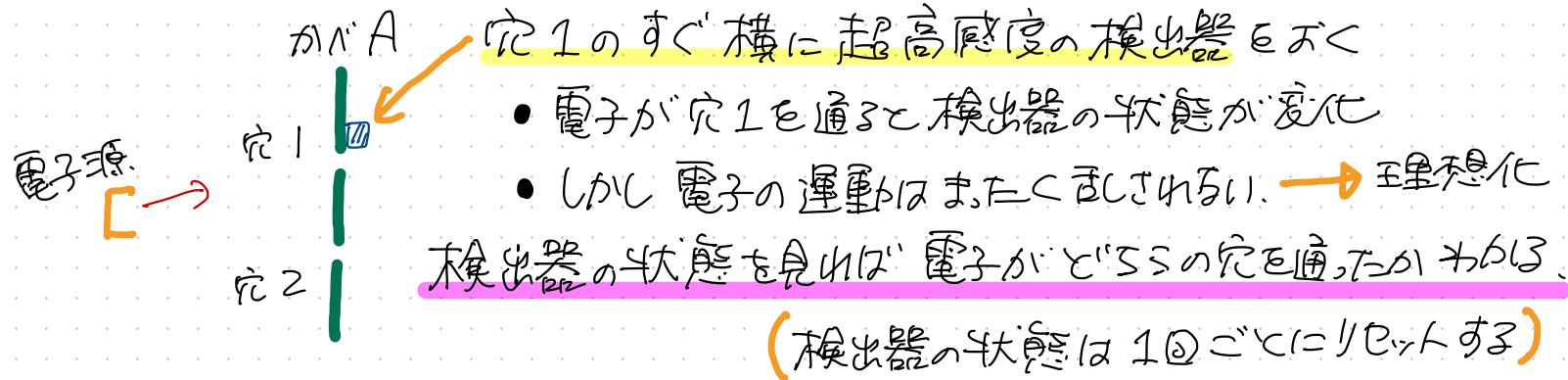
$$(1) P_1(x, y) = |\varphi_1(x, y)|^2 \quad (2) P_2(x, y) = |\varphi_2(x, y)|^2$$

$$(3) P_{12}(x, y) = |\varphi_1(x, y) + \varphi_2(x, y)|^2$$

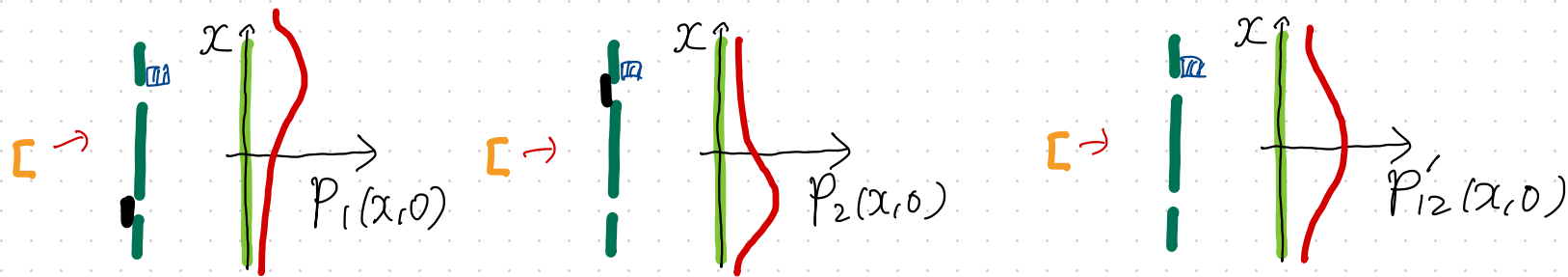
▶ 電子のふたつ1)の背後には「複素数の確率」がある!!

▶ 2)の場合 (穴1 穴2)の足し算は $P_{12} = P_1 + P_2$ ではなく (3)で決まる!!!

(外村実験 (4) $\varphi_1(x, y) = A e^{-ikx}$, $\varphi_2(x, y) = A e^{ikx}$ k は正の定数, A 定数)



\triangle 穴1のみあける $P_1(x, y)$ \triangle 穴2のみあける $P_2(x, y)$ \triangle 穴1と穴2をあける $P'_2(x, y)$



干渉は生じない!

$$(1) P'_2(x, y) = P_1(x, y) + P_2(x, y)$$

ボールと同じように

本質は 電子と検出器の状態のエンタングルメント \rightarrow 量子力学.