

第 11 回 講義内容

2025/12/1

お知らせ

- 第 9 回 (11/17) にレポートを出しています。締め切りは 12 月 28 日 (日) 23:59 です。今回の講義後半から始まるアインシュタイン・ボーア論争の部分を理解してもらうことが大切です。今回使うスライドの一部のコピーは、前回配布のプリントについています。

配布物

- 11.Cosmology_contents.pdf このファイル Google classroom, web
- 11.Cosmology2025_Viewgraph.pdf スライド Google classroom, web
スライドファイルは当日朝に。

講義内容 (予定)

- §4.1 光は波なのか, 粒子なのか
プランクの量子仮説, アインシュタインの量子仮説
- §4.2 原子の構造
原子模型, 水素原子から出る輝線, ボーアの水素原子モデル
- §4.3 量子力学の誕生
パウリの排他律, 物質波, 量子力学の完成
- §4.4 確率解釈と不確定性原理
確率解釈, 不確定性原理, コペンハーゲン解釈, シュレーディンガーの猫
- §4.5 アインシュタイン・ボーア論争

本日の復習課題例

こんなことを観たり, 調べたり, 考えてもらったら面白いかな, という程度のおまけ。

- 太陽光のスペクトルに暗線が見られるのはなぜか。
- アインシュタインとボーアの論争点は何か。
- 量子計算機, 量子暗号とはどんなものだろうか。

次回の予習項目

次回から宇宙論に入ります。こんなことを調べてもらったら面白いかな, という程度の課題。

- アインシュタインが導入した宇宙項とは何か。
- ビッグバン宇宙論の名付け親は誰か。
- 宇宙が高温高压の火の玉だったことがわかる証拠は何か。

4. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.3 量子力学の誕生 教科書 p130

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？

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。

Wolfgang Pauli
1900-1958

「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

なぜ、排他律？

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

34

4. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.3 量子力学の誕生 教科書 p132

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？

1924 ド・ブロイ, 物質波仮説
「電子も波である」

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

L-V. de Broglie
1892-1987

粒子である
波である
どちらもあり??

【図 4.2】 (左) 物質波。 (右) コンプトン効果。どちらも光を扱うと電子の飛び出す現象であるが、コンプトン効果は、光のエネルギーが失われて、物質電子にエネルギーが完全に渡されることのないように見えるようになる。

35

4. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.3 量子力学の誕生 教科書 p135

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。

38

量子力学完成 (1925年)

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
 $F = ma$

40

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裏証。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. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.4 確率解釈と不確定性原理 教科書 p136

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。この理論からたどる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 (ボーン, 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

45

4. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.4 確率解釈と不確定性原理 教科書 p137

4.4.2 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。
⇒ 電子のものをしているわけではない ⇒ 電子の位置を測定するには光を照射
⇒ ミクロには、常にうらやんでいるのでは？

Werner Heisenberg
(1901-76)

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

【図 4.3】 水素原子の電子軌道。水素原子であたかも雲に放射線が飛び込むと、空気の中心部をイメージし、その中心が水素原子の中心に位置する。水素原子の中心に位置する。

46

4. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.4 確率解釈と不確定性原理 教科書 p138

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 ($\Delta x \rightarrow 0$ とすると) 運動量の幅が無大限になってしまいます。逆に運動量を精度よく決めようすると ($\Delta p \rightarrow 0$ 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、不確定性原理で表わさ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「精密に決めるようにすると」運動量がわからなくなる。あるいは逆に運動量を「精密に決めるようにすると」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、人間の意思や主観が入る余地はなく、だからこそ客観的な論議ができてきた。もし誤解が生じるのであれば、それは人間の観測・計測が引き起こす不確定性であり、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原理は、原理的なものであるという。どんなに計測技術を進ませても、位置と運動量を正確に知ることはできないという。はたしてそのような粒子は客観的な物理対象といえるのだろうか。

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

47

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密閉的な広がりをもつ、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。

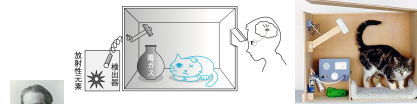
観測・測定は、
波束の収縮である。

49

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

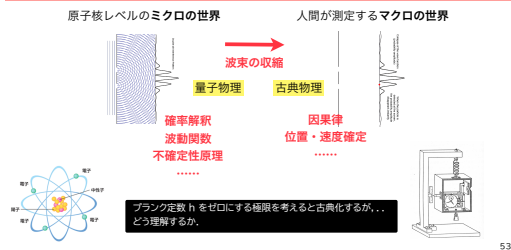
猫は「生きている状態」と「死んでいる状態」の重ね合わせである。



Bohr

51

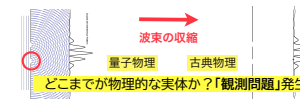
観測問題: 「観測する」のはどの時点での話なのか



53

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。



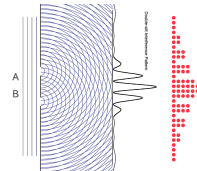
Bohr

「測定をすること」自体が波束の収縮を引き起こすのだ。

54

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どちらかを通過したかがわからなくなり、干渉縞は生じない。

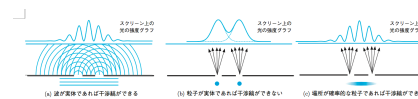


【パラドクス】シュレーディンガーの猫

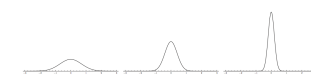
結局、粒子はA,B どちらかを通過したのかはわからない、と考える。
量子力学では、確率的にしか予測できない。[「光子の裁判」レポート課題]

57

2重スリットの実験はどう理解したらよいのか? 教科書 p141



【4.2】 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。



【4.2】 波束の収縮のイメージ。位置 $y=0$ 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。

58

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
「光電効果の説明」

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
「原子構造の説明」

59

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。

61

不確定性原理に反対するアインシュタイン

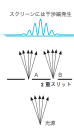
因果律を用いて反論

不確定性原理は因果律を破っているのでは正しくない。
二重スリットの実験で、スクリーンに光が当たった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時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。
波動関数は個々の粒子の位置の確率を表している。

1927年ソルベール会議



62

不確定性原理に反対するアインシュタイン

不確定性原理への反論

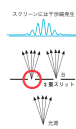
位置と運動量の不確定性 $\Delta x \cdot \Delta p \simeq h$

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。
装置にゆがみが生じるため、光の位置と運動量を同時に決めることはできない。

1927年ソルベール会議



63

不確定性原理に反対するアインシュタイン

不確定性原理に関する反論

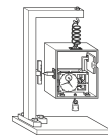
時間とエネルギーの不確定性 $\Delta t \cdot \Delta E \simeq h$

光で満たされた箱があり、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。

1930年ソルベール会議



64

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

量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン

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「物理的実在」を持っており、測定する以前から位置や運動量は決定していた。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

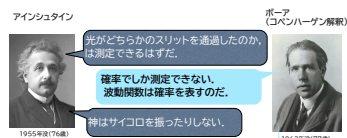
72

アインシュタインは友人バ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」



73

アインシュタイン・ボーア論争 まとめ (3)



1955年没(76歳)

アインシュタイン

1962年没(77歳)

ボーア (コペンハーゲン解釈)

EPRパラドクスを提案

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

74

EPR論争の決着へ

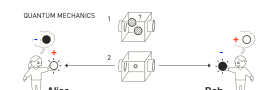
ベルの不等式 (1964)



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

$$-2 \leq \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle \leq 2$$

何回も2組の粒子を発生させ、測定側のスイッチを切り替えて測定を繰り返す。+と-を同時に持った値を乗じた値の平均値を $\langle A_i B_j \rangle$ とする。同様に、 $\langle A_i B_i \rangle$ 、 $\langle A_i B_j \rangle$ 、 $\langle A_i B_i \rangle$ の平均値を測定アークから求める。

75