

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・ボア論争の部分を理解してもらうことが大事です。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。
- 宇宙が高温高圧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 原子力学の誕生 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

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

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 原子力学の誕生 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？

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。
► ポアの原子模型の「量子条件」の説明がひいた

量子力学の波である
波である どちらもあり？？

35

4. 現代物理2: 原子・素粒子の理論(量子論) 4.3 原子力学の誕生 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、「不連続とひとつのエネルギー準位」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. 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。この理論からたくさん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つたりなどしないと信じている。

Albert Einstein

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

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。
⇒ 電子そのものを見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、常にゆらいでいるのでは？

Werner Heisenberg (1901-1976)

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

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

位置の測定誤差 × 運動量の測定誤差はゼロにはならない

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

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

この式は、位置を精度よく決めようすると $(\Delta x \rightarrow 0)$ すると、運動量の値が無限大にならざるを得ない。逆に運動量を精度よく決めようとすると $(\Delta p \rightarrow 0)$ すると位置が決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

これまですべての物理法则には、人間の意志や主張が入る余地はなく、だからこそ客観的な議論ができるべきだ。もし意志が生じるのであれば、それは人間の願望・目的の間で起こる現象であつて、原則的なものではない。にわかわらず、量子力学に存在する不確定性原理は、原則的なものであるといふ。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測定することはできないといふ。はたしてそのような粒子は客観的な現象であるといふのかどうか。

量子力学が示す確率論および理屈的な解釈に関する論争は、この点から始まった。

47

4.4.3 コベンハーゲン解釈

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1点に絞られた(波束の収縮)と解釈する。

波束の収縮する位置は、波動関数が律半解釈することで得られる。とする。

教科書 p140

49

4.4.4 シュレーディンガーの猫

確率と考えるなら、パラドックスを提案する。

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?

教科書 p143

Schrodinger

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。

51

観測問題: 「観測する」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

波束の収縮

量子物理

確率解釈

波動関数

不確定性原理

古典物理

因果律

位置・速度確定

.....

ブランク定数 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。

教科書 p140

53

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

どこまでが物理的な実体か? 「観測問題」発生

片方のスリットに検出器を設置

粒子が通過したことわかる → → 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。

教科書 p140

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どちらを通ったかが明らかになり、干渉線は生じない。

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

58

4.5 アインシュタイン・ボア論争

アインシュタインとボア

Albert Einstein

1927年時 48歳

孤高のスパースター

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」

教科書 p145

59

アインシュタイン・ボア論争

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おかげが導かれるかもしれません。これが、これによって、この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して通過したのか、は測定できるはずだ。

教科書 p145

61

アインシュタイン・ボーア論争 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。

1927年ソルベ会議

スクリーンに光が発生する
二重スリット
光波

62

アインシュタイン・ボーア論争 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 $\Delta x \cdot \Delta p \simeq \hbar$
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。

1927年ソルベ会議

スクリーンに光が発生する
二重スリット
光波

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。

63

アインシュタイン・ボーア論争 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 $\Delta t \cdot \Delta E \simeq \hbar$

光でみたされた箱があり、シャッターを開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量ることでエネルギーも時間も別個に測定可能だ。

1930年ソルベ会議

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。

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

アインシュタイン・ボーア論争 量子力学の矛盾を指摘するアインシュタイン

量子力学の不完全性を突く反論 EPRパラドクス

我々は他方を私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」を持つており、測定する以前から位置や運動量は確定していた。といひる。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」という考え方で理解しよう。
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

1935年(76歳)

1942年(77歳)

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)

アインシュタイン
ボーア (コペンハーゲン解釈)

1955年(76歳)

1962年(77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。
確実でしか測定できない
波動関数は確率を表すのだ。
神はサイコロを振つたりしない。
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

ベルの不等式 (1964)

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間に上限が存在する。(ベル不等式)

John S. Bell (1928-1990)

量子力学
Alice
Bob

EPRが正しければ、この不等式は成立
量子論の考え方では、この不等式は破れる
 $-2 \leq (A_x B_z) + (A_z B_x) + (A_x B_y) - (A_y B_x) \leq 2$
何度も 2 つの粒子を発射させ、測定値のスイッチを切り替えて測定結果を取る。
+と-を同時に測った結果をもじの平均値をA-Bとして、同時に、A-B、A-Bの平均値を測るデータを取る。

75