

第 11 回 講義内容

2024/12/2

お知らせ

- 第 9 回 (11/18) にレポートを出しています。締め切りは 12 月 29 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_Cosmology2023_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. 現代物理学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

4. 現代物理学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」の説明がたった

粒子である 波である どちらもあり??

4. 現代物理学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。

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
 $F = ma$

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. 現代物理学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 (1926年)
ある粒子の振る舞いを表す波動関数 $\psi(x,y,z,t)$ が定められたとすると、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

4. 現代物理学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道にはならない。
⇒ 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、常にゆらいているのでは? したがって、光を照射すれば電子は動く。

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

4. 現代物理学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) 運動量の幅が無限大になって定まらず、逆に運動量を精度よく決めようとする ($\Delta p \rightarrow 0$ 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、位置と運動量の両方同時に精度よく知り、不確定性関係で限ら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、物理法則としては自然な現象を与える。位置を「精密に決めた」とすると運動量がわからなくなる。あるいは逆に運動量を「精密に決めた」とすると位置がわからなくなる。という文脈では「...」の部分で「観測しようとする人間が余計にいじらうのだ」

これまですべての物理法則には、人間の意志や主観が入る余地はなく、だからこそ客観的な議論ができ、また、もし「測定のしにくさ」であれば、それは人間の知能・計測技術の不足による不確定性であり、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関係は、原理的なものであるという。どんなに計測技術を向上させても、位置と運動量を同時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。

量子力学をめぐる議論および解釈に関する論争は、この点から始まった。

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p140

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空間的な広がりをもち、観測される。 (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、観測結果はいくつかの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行われる、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. 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p143

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？

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

Schroedinger

51

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p140

観測問題: 「観測する」の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

量子物理 → 古典物理

波束の収縮

確率解釈
波動関数
不確定性原理
.....

因果律
位置・速度確定
.....

プランク定数 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。

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

量子物理 → 古典物理

波束の収縮

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。

「測定をすること」自身が波束の収縮を引き起こすのだ。

Bohr

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どちらかを通ったのかはわからない、と考える。
量子力学では、確率的にしか予言できない。【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

【4.27】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。

【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ために、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

4. 現代物理2-原子・素粒子の理論(量子論) 4.5 アインシュタイン-ボーア論争 教科書p145

アインシュタイン と ボーア

<p>Albert Einstein</p> <p>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」</p>	<p>Niels Bohr</p> <p>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」</p>
--	---

59

アインシュタイン-ボーア論争

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。

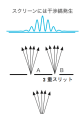
61

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

1927年ソルベー会議

不確定性原理は因果律を破っているのではない。
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、それまで伝わ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だ。波動関数は個々の粒子の位置の確率を表している。

62

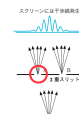
アインシュタイン・ボーア論争 不確定性原理に反対するアインシュタイン

不確定性原理への反論



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

1927年ソルベー会議

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

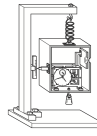
アインシュタイン・ボーア論争 不確定性原理に反対するアインシュタイン

不確定性原理に関する反論



1930年ソルベー会議

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

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。シャッターの間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 教科書 p147

量子力学の不完全性を突く反論 EPRパラドクス

「完全性」ではなく、「相補性」という考えで理解しよう。
completeness complementarity




物理的実在が存在し、我々はそれを観測する physical reality

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

「完全性」ではなく、「相補性」という考えで理解しよう。
completeness complementarity



物理的実在が存在し、我々はそれを観測する physical reality

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ー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」

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

1955年没(76歳)

ボーア (コペンハーゲン解釈)

1962年没(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。

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

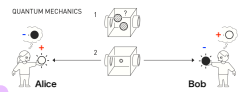
EPR論争の決着へ

ベルの不等式 (1964)

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)

QUANTUM MECHANICS



EPRが正しければ、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

$$-2 \leq (A_1 B_1) + (A_1 B_2) + (A_2 B_1) - (A_2 B_2) \leq 2$$

何れも1部の粒子を発生させ、測定器のスイッチを切り替えて測定を繰り返す。+-を同時に測った結果を計った部分の平均値を求めるとする。例題に、A,B,A,B,A,B,の平均値を算出するデータを示す。

75