

**第 10 回 講義内容**

2023/11/27

**配布物**

- 10\_Cosmology\_contents.pdf      このファイル      Google classroom, web  
第 4 章のまとめスライド付き.
- 10\_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)**

- §3.3 一般相対性理論  
重力波, タイムマシン
- §4.1 光は波なのか, 粒子なのか  
溶鉱炉の温度の問題, 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

**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.
- 光を波と考えなければならない事実はどんなものがあるか.
  - 光を粒子と考えなければならない事実はどんなものがあるか.
  - 上記 2 つは, なぜ矛盾するのだろうか.

**次回の予習項目**

- 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.
- 水素のイオン化エネルギー
  - シュレーディンガーの猫

### 第4章 「量子論」の説明スライドから

#### 光粒子仮説 (光を粒子と考える理由)

- 溶鉱炉の温度の問題  
光のエネルギー分布は、光のもつエネルギーには最小単位があると考えると理解できる (プランク, 光量子仮説)
- 光電効果の理論  
金属に光を当てると電子が飛び出す。  
どんなに弱い光でも、ある周波数以上の光ならOK。  
→ 光を粒子を考える (アインシュタイン, 光子仮説)

→ 光は質量ゼロの粒子  
光のエネルギーEは、 $E=h\nu$

#### 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

#### 原子模型

- ラザフォードらの実験  
 $\alpha$ 粒子を当てると、散乱角が大きいときがある。  
→ 原子には、核がある。  
→ 電子が核のまわりを回り続けるのは何故か? (すぐに落ち込んでしまうはず)  
→ 電子は軌道が決まっている (ボーア)
- 光の輝線スペクトルの発見  
決まった振動数 (波長) の光が発せられる。  
→ 何故か?  
→ 電子が軌道間を遷移することで、光を発したり、吸収する。(ボーア)

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  
4.4.1 確率解釈 教科書 p136

電子が波であると考えて、波動方程式を出した。電子の密度を表している式が出たと思う。

$$i\frac{\hbar}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi = H\psi$$

Schroedinger (1887-1961)

シュレーディンガー方程式は、粒子の存在する確率を与えているのだ!

波動関数は確率振幅である (ボリン, 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、 $\psi$  は確率振幅と呼ぶべき量である。

Max Born (1882-1970)

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  
4.4.2 不確定性原理 p138

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!  
⇒ ミクロには、常にゆらいているのでは?  
⇒ 電子の位置を測定するには光を照射し、光を照射すれば電子は動く。

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 x 運動量の測定誤差 はゼロにはならない

Werner Heisenberg (1901-76)

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  
観測問題: 「観測する」のはどの時点での話なのか p140

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

確率解釈      因果律  
波動関数      位置・速度確定  
不確定性原理      .....

プランク定数  $\hbar$  をゼロにする極限を考えると古典化するが、どうやって理解するか。

#### 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

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。

「測定をすること」自身が波束の収縮を引き起こすのだ。

Bohr

粒子が通過しなかったことがわかる → → 波ではなくなる。?

#### 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

波束の収縮

観測者も測定器も、すべてミクロな要素から成り立っているのだから、ミクロもマクロも区別せず、すべてがミクロな量子力学の対象としてよい。

John von Neumann (1903-57)      Eugene Wigner (1902-95)

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

4.4.4 シュレーディンガーの猫 p142

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？

放射線発生  
検出器  
毒ガス  
猫

Schroedinger

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。

結局、2重スリット実験の解釈は？

【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。

実験でも多くの粒子を重ねると、干渉縞が再現する。

【パラドクス】シュレーディンガーの猫  
結局、粒子はA,Bどちらかを通ったかはわからない。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】

ウィグナーの友人 パラドクス

Wignerの友人 (物理を知らない)

Wigner先生 (電話で結果を確認)

波束の収縮はどこで生じたのか？

ノイマン・ウィグナーの観測理論は、このパラドクスで破綻した。

並木美喜雄 (1925-2010)

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

4.5 アインシュタイン・ボーア論争 p145

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」

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」

不確定性原理に反対するEinstein

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思っている。

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、干渉縞の出現は消滅する。

不確定性原理に反対するEinstein

位置と運動量の不確定性  $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$   
時間とエネルギーの不確定性  $\Delta t \cdot \Delta E \approx h$

不確定性はない。時間を決めて箱から放射光を出す。前後の質量を測ることができる。別個の測定だ。

質量を測るのは重力。重力場で、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。

4. 現代物理2：原子・素粒子の理論 >> 4.5 アインシュタイン・ボーア論争

EPRパラドクス

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Footnote for Advanced Study, Princeton, New Jersey*  
(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function is not complete.

量子力学は不完全だ。我々は他方を乱すことなく測定できる。だから、はじめから系は「物理的な実在」を持っており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。

アインシュタイン・ボーア論争

アインシュタイン

ボーア (コペンハーゲン解釈)

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。

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  
物理的な実在が存在し、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できる物理学  
ベルの不等式の破れが確認され、こちらが正しい