

- 18S2003:** 両端が固定されている弦や、振動する膜の波動方程式について解いてきましたが、いろんな弦や膜が個別に持つ物理的性質は考慮されないのでしょうか？ M: 自分で判断できないのはなぜか？ 考慮したければ、すればいいのでは？ // いろんな弦や膜が個別に持つ物理的性質とは、具体的にどんなもののことを言っているのか？
- 18S2018:** 二重縮退とはどのような状態を表しますか。 M: 本気か？ 教科書 p.58 や参考書の説明の、どこが分からないのか？ // 異なる振動モードが同じ振動数を持っている。
- 19S2004:** 定常状態の時に時間に依存しないシュレディンガー方程式を使えるということは、箱の中の粒子が自由粒子であればよいということですか？ M: 著しく勘違いの予感。何でそうなるのか、全く想像できない。// “定常状態” とか “時間に依存しない” の意味を全く理解していない予感
- 19S2005:** シュレディンガー方程式は他の定理などから導出されるものではないと言っていたが、式がもっともらしいことはどのように示されたのですか。 M: 19S2045 参照
- 19S2011:** 空気の振動を考える際には、境界条件は例えばどのような条件があるのでしょうか。 M: 本気か？ // 固定端でも自由端でも、状況に応じて好きにすればいいのでは？ (リコーダーや開管・閉管内の気柱の鳴動)
- 19S2026:** シュレディンガー方程式の中の $\Psi(x)$ が、あるポテンシャル場の中で運動する質量 m の粒子を記述するとありましたが、運動しているにも関わらず時間に依存しないとはどういうことですか。 M: 時間に依存しない現象について考える。例えば、系の全エネルギーは時間に依存しない (なぜなら、エネルギーの保存則 という大原則があるから)。
- 19S2045+:** 教科書には、シュレディンガー方程式は根本的な基本仮説であり、導出することはできないと書かれていますが、それが確かであることを示すにはどのようにしたら良いのか。 M: 他の理論 (古典的波動方程式, ド・ブローイの物質波) との整合性があることは、教科書に記載のように確認される。// 物理理論の正しさは、実験結果を説明できるかと実験結果を予言できるかで確認される。
- 19S2051:** 不確定性原理を考えるとときに量子の揺らぎが発生すると他の参考書に書かれてました。量子の揺らぎの範囲を実測できるものはありますか？ M: 自分で色々と思いを絞って考えてみればいいのでは？
- 20S2002:** シュレディンガー方程式は天下一に与えられるものとあったが、これは古典的波動方程式やドブローイの物質波に辻褄が合うように定められたのか。 M: 初めにどういう発想だったのか、シュレディンガー本人に聞けばいいのでは？
- 20S2003:** 教科書で使われている基礎物理定数に電子の静止質量がありますが、電子の静止しているときの質量と動いているときの質量には違いがあるのですか？また、この質量の違いが原因で理論値と実験値に違いが生じることはありますか？ M: 本気か？ // 相対性理論 と言ってみるテスト
- 20S2012:** シュレディンガー方程式では 2 電子以上の物質については正確に求められないですか？ M: 21S2026 参照 // ここで言う “正確” とは、どういう意味か。例えば有効数字が 100 桁あれば “正確” と言えるか？
- 20S2018:** シュレディンガー方程式で用いられる演算子とプログラミングで用いられる演算子はどのように違うのでしょうか。 M: プログラミングで用いられる演算子が具体的に何を指しているのか分かりませんか？ 全く違うものとは思われませんか？ // 自分で判断できないのはなぜか？
- 20S2021:** 波動関数を時間で微分して $i\hbar$ を掛ければエネルギーの値が外に飛び出してくるが、重ね合わせの状態の関数を時間で微分してもいいのでしょうか？ M: 自分で判断できないのはなぜか？ // “波動関数を時間で微分して $i\hbar$ を掛ければエネルギーの値が外に飛び出してくる” とは、本当なのか？ 教科書や参考書のどこに書いてあったのか？
- 20S2024:** シュレディンガー方程式には虚数が出てきていますが、虚数にはどのような物理的な意味があるのでしょうか。 M: 自分で判断できないのはなぜか？ // 現実 (real) の物理的な世界に虚数 (imaginary number) はどんな意味があるのか？
- 20S2026:** 水素のシュレディンガー方程式は正確に解けるが、それ以外の原子は解けないのは何故でしょう

か？電子の数が関係しているとは思いますが **M:** 教科書 8 章や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは？

20S2028: シュレディンガー方程式は時間以外に依存する点がありますか？ **M:** 本気か？方程式に含まれる変数は？ // ひとつの方程式 (五文字で書ける方程式) で、多くの系に適用できるのはなぜか？

20S2030: 進行波についても二次元の波動方程式で記述することができるのですか？ **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // 進行波とは何か？進行波は何次元か？

20S2031: 演算子において、運動量演算子では複素数 i が入っていることにはどんな意味があるのか。 **M:** 運動量演算子の固有関数と固有値 (運動量) を求めてみればわかるのでは？

20S2033: 時間に依存しない波動というものがいまいっぴんときません。 **M:** そうですか。しかし、質問が記載されていません。 // 本気か？古典的波動方程式の位置変数についての解 $X(x) = c_1 \cos \frac{n\pi x}{l} + c_2 \sin \frac{n\pi x}{l}$ は時間に依存しないが、これは波動ではないとの認識か？

20S2035: 偏微分方程式を変数分離法で解くときに意味ある解がない場合は、仮定が間違っているのか、それとも変数分離法では解けないということなのでしょう。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか？ // “あり得ないことを除去したとき、残ったものは、ありそうにないことでも、真実にちがいない” // ここで言う“解く”とは、一般解の話？それとも特殊解の話？

20S2036: 教科書では、実際に値を代入したうえで縮退が起きていることを説明しているが、縮退が起こるかどうかを、値を代入せずに予測することは可能なのか？ **M:** まさに教科書に示されているように、予想が可能な系もある。 // 教科書の例では $a = b$ すなわち“正方形の膜”という対称性がある。

20S2038: Hハットの式はどのように導出されたのでしょうか。 **M:** 意味不明。どの式の話か？

20S2041: 箱の中の粒子を考える際に無限大のポテンシャル障壁とは何を示しているのか。また、無限大でなくとも障壁とは粒子がそのエネルギーより大きければ乗り越えられる障害物のような認識でいいのでしょうか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？物理学の基礎を復習する必要があるのでは？ // 箱の中に閉じ込められているとは、どういう状況か？ // ポテンシャル障壁が、例えば重力 (万有引力) によるものだとすると、ポテンシャルエネルギーとはいわゆる位置エネルギーと言い直した方がわかりやすいか。ここでの有限の大きさのポテンシャル障壁があったとして、これを乗り越えるためには、粒子はどうすればいいか？

20S2042: 波の重ね合わせにより一般の波、任意の波形をフーリエ級数を用いて表現できるのは何故でしょうか。また、式の 3.4 にてド・ブローイの物質波の考えを導入するのは何故でしょうか。 **M:** フーリエ級数について勉強すれば分かるのでは？ // そこでやっているのは何のための式変形なのか、教科書や参考書をよく読んでよーく考えればいいのでは？

20S2043: 時間に依存しないシュレディンガー方程式の解である定常状態の波動関数は、時間に依存するシュレディンガー方程式においても矛盾しないのか？ **M:** 何をもって“波動関数が矛盾しない”と言いたいのか謎だが..... // 矛盾しないかどうかを教わり、その事を暗記するのではなく、自分で計算して確かめてみればいいのでは？

20S2046: t について境界条件はないとおっしゃっていましたが、 $t = 0$ のとき弦は静止していないのでしょうか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // “両端が固定されている弦”ということ以上に、どんな制限があるというのか？今取扱っている問題をよーく考えてみればいいのでは？ // もしも $t=0$ で静止している弦なのであれば、動き出す (振動を始める) ための力は何か？

20S2052: シュレディンガー方程式で運動の速さについて考慮しないのはなぜですか **M:** 本気か？ // 勘違いの予感 // 運動エネルギーについて考えるときに、運動速度は関係ないのか？

21S2002: 弦のような 1 次元の波を考えるときは円運動を用いることができましたが、膜のような二次元での波は円運動を使って計算することができるのでしょうか。また、同様にして縮退の様子を表すことはできるのでしょうか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // “円運動を使って計算する”とはどういうことか？ // 自分で計算してみれば分かるのでは？

21S2005: 教科書に「量子力学では線形演算子だけを取扱う」とあるが、それはなぜですか。 **M:** 線形演算子とは、どんなものか？よーく考えればいいのでは？線形でない演算子 (非線形演算子) の具体例は？

// 波の重要な性質を考えてみればいいのでは？

21S2007: 原子がエネルギーをもった状態で、縮退しているときとしていないときでエネルギーが低くなるまでの時間に違いはあるのか。 **M:** 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // 縮重した系の遷移確率がどうなるのか..... 始状態が二重縮重していたとして、二つの始状態のそれぞれから終状態へ遷移する遷移確率は等しいだろうか？

21S2009: なぜ“箱の中”なのに三次元ではなく、一次元なのでしょう。自由粒子が存在する“空間”がある以上、領域は必ず三次元になると思うのですが。 **M:** 本気か？勘違いの予感 // 一次元空間、二次元空間、四次元空間、.....、無限次元空間 というものは考えられないのでしょうか？ // 物理や数学の基礎以前のセンスが欠けている??

21S2010: 本日講義に登場した時間に依存するシュレディンガー方程式の中には虚数が登場していました。シュレディンガー方程式が $F=ma$ のような公理であるということは飲み込めるのですが、シュレディンガー方程式が現実の系を記述するという以上、その式の中に虚数が含まれているというのが不思議に思えてしまいました。このシュレディンガー方程式の中に含まれる虚数というのは、ただ単に数学的に便利だから用いられているのでしょうか、それともそこには物理的な意味が存在してるのでしょうか。 **M:** 便宜上導入されているのではない。// 虚数に物理的な意味はあるのか？ 現実には虚数か？

21S2012: なぜシュレディンガー方程式には、量子数が自然に現れるのですか。 **M:** 意味不明。何の話か？ // 方程式は状態ではない。

21S2013: 正方形の膜以外に他の形で縮重は起きるのですか **M:** 正方形以外にどんな時に縮重が起きるのか、考えてみると面白いのでは？

21S2015: シュレディンガー方程式は、他の定理から導かれるものでなく、かつこれが正しいと言う基で使われるとあったが、なぜ方程式が正しいと言えるのですか？ **M:** 19S2045 参照

21S2020: 量子力学では線形演算子だけを取り扱うのはどうしてですか **M:** 21S2005 参照

21S2023: 三次元の波動方程式を考えると、縦波と横波を考慮する必要がありますか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // 縦波・横波とはどういうものか？ // 波動方程式であつまっているのは、縦波なのか横波なのか？

21S2026: シュレディンガー方程式を水素以外に適用することは可能ですか。また、もし水素以外に適用する場合は最外殻電子は1つなら、それより内側の電子を1つと近似できますか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // “量子力学における基本方程式”が、水素原子というただ一つの系だけにしか適用できないと考える理由は何か？ // 近似するのは誰か？出来るかどうか、誰が判断するのか？

21S2031: シュレディンガー方程式自体が実際にどんな物理的な状況を意味しているのですか。 **M:** 本気か？ // 波の振る舞いを記述している、あたりまえだが。

21S2032: 中学生の時に音楽の先生から「音楽には10以上の次元が存在する。」と言われました。物理でも同じなのでしょう。また、10次元は一体どのようなものなのでしょう。 **M:** 言った本人に聞けばいいのでは？ // 21S2009 のコメント参照

21S2033: シュレディンガー方程式は、導出することはできないと仰っていましたが、教科書などに書かれている「導出のようなもの」は帰納法によって出されたのでしょうか？ // 動画の中で三角関数を合成していましたが、その状態で計算したところ、(2-20) 式と若干異なった $X(x)=A\sin(2n\pi x/l)$ $n=1,2,3,\dots$ という式が導出できましたがこれも解として考えてもいいのでしょうか？ **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？ // “帰納法”の意味を理解していないのでは？ // 何をどう計算したのか、その過程を知らないのでは何とも言えない。計算間違いの可能性もある。(答え・結果を暗記するのが勉強ではない)

21S2036: 量子力学ではなぜ非線形演算子を扱わないのでしょうか。 **M:** 21S2005 参照

21S2037: 多電子原子の場合では波動方程式を厳密には解けないとありますが、なぜ多電子原子の電子軌道は正確にわかるのですか？それとも正確ではないんですか？ **M:** “正確”と“厳密”のそれぞれの意味は？ // 質問文中で“正確”というコトバが二回出てくるが、それらは同じ意味か？

21S2038: 講義のメモの5枚目の次元は何をあらわすか？は何をあらわしてるんですか。 **M:** 言葉通りの意

味だが、何がわからないのか？ // あくまでもメモなので、メモだけを見て全てが分かるというものではない。どういう流れでその話になったのかは、講義を視聴すれば分かるのでは？ // 先生が与えてくれたものをただ暗記すればいいなんてことはない。そんなのは大学で行うべき勉強じゃない。

21S2039: 原子において縮重は異なる軌道が同じエネルギー状態を取ることと習ったのですが、軌道の波動関数でエネルギーが同じであることと、二次元の波動関数の縮重で同じなのが振動数であるのは同じような事なのでしょうか？ **M:** 自分で書いている通りです。“原子においては～”と“二次元の波動関数～”のように、状況が異なる。何を“縮重”というか、それぞれで定義されているのだから、それ以上でもそれ以下でもない。系に特徴的・特有な値を取り上げているという点で“同じような事”なのでは？

21S2040: 無機化学の講義でも、原子中の複数個の軌道のエネルギーが互いに等しいことをエネルギー準位が縮重していると習った。エネルギーや状態が同じものが存在していることを縮重していると表現するのだと思うが、縮重していると何か良いことがあるのだろうか。今回の講義の中でも縮重という言葉の説明して終わっていたので、疑問に思った。 **M:** 自然は価値観を持つのだろうか？ // ○○の役に立つから原子は縮重したエネルギー準位を持つ…… (?)

21S2041: シュレーディンガー方程式は電子の存在確率を導く方程式ですが、非定常状態のとき外から力などが加わっていないのに確率が時間に依存するのはなぜでしょうか。 **M:** “非定常状態のとき外から力などが加わっていない”は、本当なのか？

21S2044: シュレーディンガー方程式が他の定義や定理と相反する場合はあるのですか **M:** 本気か？ 論理学を復習する必要があるのでは？ // 例えば、互いに矛盾する二つの定義をすることは可能か？ 定義とはどういう意味か？

21S2045: 量子力学で線形演算子だけしか取り扱わないのはなぜですか？ **M:** 21S2005 参照

21S2046: シュレーディンガー方程式において、エネルギー E とハミルトニアンの違いは何ですか。 **M:** 本気か？ 自分で考えて分からないのはなぜか？ // 5 文字で書けるシュレーディンガー方程式 $\hat{H}\psi = E\psi$ において、エネルギーはどれか？ ハミルトニアンはどれか？ 両者は本当に同じものなのか？

21S2047: 波動関数を 2 乗をすると電子の存在確率を表すのは何故か、わざわざ 2 乗する意味とは。 **M:** そう決めたから、そう解釈することに決めたから。これは公理・公準である。(教科書 p.126 参照)

21S2052: $d^2X(x)/dx^2 = KX(x)$ の式で、 $K < 0$ のときに虚数が現れますが、虚数を含む式の弦の運動は、私たちが見ることのできる実数の式の運動とは違うのでしょうか。 **M:** 本気か？ 自分で考えて分からないのはなぜか？ // 虚数を含む式を変形して、三角関数を用いた実数の式が得られるのだが？ 式変形の過程で、運動の仕方が変わってしまうのだろうか？