

- 17S2022:** 位置の平均値を求める際、位置の演算子 x は Ψ^* と Ψ の前であるのに対し、運動量の平均値を求める際、運動量の演算子は Ψ^* と Ψ の間に入れるのはどうしてですか？ M: 本気か？ どの話か？ // 教科書 p.133 や参考書をよく読めばいいのでは？
- 18S2003:** 1, 一次元の箱の中の粒子のポテンシャルについて、箱の壁にあたる $x=0, l$ の場合について記述しなかったのはなぜですか？ // 2, 非線形演算子は量子の分野では取り扱わないのでしょうか？ M: “記述しなかった” とは、どういうことか？ 箱の中の $x=2$ 等の場合についても、特別には記述しませんでしたか (?) //
- 18S2014:** 線形演算子による固有値と固有関数を求めるときに固有関数は自然対数のみにになりますか。 M: 激しく誤解の予感。 // なぜ自然対数になるのか？
- 18S2018:** ポテンシャルエネルギーが無限大になるような状態は現実ではどのようなことが当てはまりますか。 M: 正気か？ // 現実には、ポテンシャルに限らず、エネルギーが無限大になることはあるのか？
- 19S2004:** 箱の中に存在する粒子は 1 つのなののでしょうか？複数の粒子が存在するとしたら粒子が互いに作用し合い、シュレディンガー方程式は変化するのでしょうか？ M: あなたが考えている系はどんなものか？ // 教科書 p.86 や参考書をよく読めばいいのでは？ // シュレディンガー方程式の意味、ハミルトニアンの意味をよく考えれば分かるのでは？
- 19S2005:** 演算子には可換なものそうでないものがあるが、どのような場合に演算子を交換するのでしょうか。 M: 勉強すれば分かるのでは？ // 量子力学では物理量と演算子が対応している (教科書 4 章参照). ある系について二つの物理量を測定するとはどういうことだろうか？
- 19S2011:** シュレディンガー方程式は原子または分子の種類により、適用できない場合があるのでしょうか M: 正気か？ // だれが適用するのか？ できる・できないを、誰が決めるのか？ できる・できないの判断が分かれる基準は何だろうか？ // もしも適用できない原子や分子があったとして、適用できる原子や分子と何が違うのだろうか？ 構成粒子 (たとえば電子) の性質が違ってもいいのか？ そんなことがあり得るのか？
- 19S2017:** 2 つの演算子が一般には交換しないとあるが、可換である場合その必要性というのは何 ですか？ M: 19S2005 参照
- 19S2022:** 一次元の箱の粒子のモデルは、直鎖の共役炭化水素の π 電子に応用する以外に何か活用できるのでしょうか。 M: 自分で考えてみればいいのでは？
- 19S2026:** ハミルトニアン中にポテンシャルエネルギーの項がありましたが、実際にこれを用いて計算を行うときには、その粒子の状態に応じてポテンシャルエネルギー項が決まるということですか。 M: 自分で判断できないのはなぜか？ // 系が異なってもポテンシャルエネルギーは同じだということか？
- 19S2045:** 演算子をシュレディンガー方程式に使うのはなぜですか。 M: “演算子” は単なる見方なので。 // シュレディンガー方程式を取り扱うのに、線形代数のツールをそっくりそのまま使える。
- 19S2051:** 演算子が複数のものを考えるときに関数に作用させる順番に決まりなどはありますか？ M: 19S2005 参照
- 20S2001:** 一次元の箱の中に、粒子以外の物質が存在していた場合、シュレディンガー方程式は変化するのでしょうか？ M: その物質が問題の粒子とどのように関係しているのか？
- 20S2002:** 量子力学では線形演算子しか用いないのはなぜか。また、2 つの演算子が可換である時とない時の違いは何か。 M: 20211130 の 21S2005 参照 // 19S2005 参照
- 20S2003:** 教科書の 87 ページにある、マックスボルンはシュレディンガーのこの解釈には理論的な難点があることに気がつき、とありますがそれはどのような難点だったのですか？ M: 本人に聞けばいいのでは？ : -p // 教科書や参考書をよく読んで、自分でよーく考えてみればいいのでは？ // “電子がその領域全体にわたって広がっている” というイメージは現実的か？
- 20S2010:** 固有関数であること、また固有関数でないことはどんなことを意味しているのですか。 M: 本気か？ // もしもハミルトニアンの固有関数でなければ、それはシュレディンガー方程式の解と言えるか？ あなたは何をしたいのか??

- 20S2011:** 演算子はなぜ左ではなく右のみに作用するのか。 **M:** 本気か? 何点ねらいの質問か? // そう決めたから. 計算や表記の規則に従わなくても罰則は無いが、それであなたの考えが他人に伝わるか? // なぜ“ $2+3$ ”と、2 と 3 の合計を求める計算式を $+$ を用いて、それを二つの数の間に書くのか?
- 20S2012:** 交換可能な演算子などで 2 つの演算子を例として出していたが、シュレーディンガー方程式では 1 つの演算子しかないのに、なぜここで 2 つの演算子の話が出てくるのか。 **M:** 19S2005 参照
- 20S2018:** シュレーディンガー方程式は箱の中の粒子の他に原子や分子に当てはめることができますが、その中に例外的に当てはまらない原子や分子はあるのでしょうか。 **M:** 19S2011 参照
- 20S2021:** 2 つの演算子が可換であれば同時固有関数を持つことができるが、非可換であればどうなるのですか? **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // できるできないを暗記するのが勉強ではない。
- 20S2024:** 教科書 p. 81 にふつう演算子は大文字の上に何か記号を付けて表すとありますが、これではどのような記号でもよいということになってしまいます。どのような記号でもいいのでしょうか? もしくはなにか一定の条件があるのでしょうか? **M:** 原文は “We usually denote an operator by a capital letter with a caret over it, e.g., $\hat{A}$.” なので、誤訳でしょう。
- 20S2026:** 演算子が可換であることを求めると物理学的にどのような意味があるのか。物理量を任意の制度で同時に測定できることなのか **M:** 19S2005 参照
- 20S2028:** 2 つの演算子が可換な演算子、また不可換な演算子であるという区別を付けられますが、それはどういう場面で応用できますか? **M:** 19S2005 参照
- 20S2029:** 井戸型ポテンシャルは複数の電子もモデルになりますか **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 問題としている系にあるモデルを当てはめて考えるのは、誰なのか?
- 20S2030:** 時間に依存するシュレーディンガー方程式と時間に依存しないシュレーディンガー方程式とでは、どのような点が違い、どのような場合で用いることができるのですか? **M:** 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // 式を見比べれば含まれている変数の違いなど、自明では? 含まれている変数の違いで、表現できる現象の性質も違うのは明らかでは?? // 21S2045 参照
- 20S2031:** 演算子を作用させるためにはその対象、つまり関数が必要であると講義ではあったが、演算子に演算子を作用させることはおかしいことか。 **M:** 本気か? “演算子” とは何か?
- 20S2033:** 箱を 1 次元と捉えても 2 次元として捉えても結果は同じなのでしょう。 **M:** 本気か? 自分で考えてみればいいのでは?
- 20S2035:** 量子力学では、線形演算子だけを扱うとありますが、非線形演算子はなぜ扱わないのか? **M:** 20211130 の 21S2005 参照
- 20S2036:** トンネル効果は、エネルギーの高い壁を通り抜けているという表現が用いられているが、実際に通り抜けているのか。通り抜けているという表現だと、境界条件を満たしていない瞬間が起こるため不完全ではないでしょうか。 **M:** 本気か? // “実際に通りぬけている” とは、何を言いたいのか? 実際には通りぬけていないとすると、壁の向こう側にも存在確率があることをどう考えるのか? 壁の中での粒子の存在確率は? // “境界条件を満たしていない瞬間” とは、どの瞬間のことか? その時の境界条件とは??
- 20S2037:** 1 次元調和振動子の固有値問題を解いたときに $(n+1/2) \hbar$ となりませんが、 $n=0$ を基底状態とよびそれが安定と言える理由はなんなのでしょう。 **M:** 本気か? // “基底状態” の定義は? “安定” の意味は??
- 20S2038:** 可換できるということから何が言えるのでしょうか。また、この事実をどのようなことに利用することが出来るのでしょうか。 **M:** 19S2005 参照
- 20S2039:** 波動関数は規格化することが必要ですが、系内の粒子の存在確率を 1 に規格化できない場合はあるのでしょうか? **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 規格化の意味を考えればいいのでは?
- 20S2040:** 講義内で箱の中から粒子が飛び出すためにはエネルギーが必要と仰られていました。この箱の中から出るということは基底状態から励起状態へ電子が移ることだと私は解釈しそのときの具体的なエネルギーは光を吸収することだと私の調べる限りでは記載されていました。私の調べ不足かもしれませんが光を吸収すること以外の具体的なエネルギー供給方法があれば教えて頂きたいです。 **M:** あなたの希望は

分かりました。しかし質問が記載されていません。// エネルギーには、どんな種類のエネルギーがあるか？
本気で分からないのか？物理学の基礎を復習する必要があるのでは？

20S2041: p85 に演算全てが両立型であることが必要とあるが、何故か。 **M:** “両立型” に対応する原文は “compatible” なのだが、ここの所はよくわからない記述だと思われる。// 訳注としては “commutable (可換)” として説明している。// しかし、“ $\hat{A}$ と $\hat{B}$ の両方が作用することができるような関数” というのではないかと。

20S2042: 演算子が可換かどうかで任意の精度で物理量が同時に測定できるか否かを知ることができるが、可換かどうかを知ることで他に知ることができるものはあるのか。 **M:**

20S2043: 「量子力学では線形演算子のみ扱う」とあるのだが、どうしてであるか？ **M:** 20211130 の 21S2005 参照

20S2046: 時間に依存するシュレーディンガー方程式と依存しないシュレーディンガー方程式はどう使い分けるんですか。 **M:** 20S2030 参照

20S2047: 1 次元の箱の中の粒子モデルで、 π 電子をもつブタジエンの吸収スペクトルの説明があらかた出来る、とありますが、厳密に、ブタジエンが直線型分子でないとして論理を進めるなら、今までのようにエネルギー準位図等を書いて計算することはできないのですか。 **M:** 言語明瞭, 意味不明瞭。// “今までのように” って、何のことを言っているのか？// 自分で計算してみれば分かるのでは？

20S2052: ポテンシャルが無限大のとき粒子の存在確率が 0 になるのはなぜですか **M:** 本気か？ 粒子が無限大のエネルギー (ポテンシャルエネルギー) を持つことは可能か？ ありえるのか？

21S2002: 不確定性原理から位置と運動量の二つの演算子は可換ではないと考えられるが、ハミルトニアン演算子を運動エネルギー演算子ではなく、位置エネルギー演算子として計算することで同時に測定することはできないのか。できないのだとしたら、それはなぜか。 **M:** 本気か？ 自分で計算してみればいいのでは？// “ハミルトン演算子を位置エネルギー演算子として計算する” とは、たとえば具体的にどんな計算をすることか？

21S2003: 量子力学では、線形演算子だけを取り扱うとありますがなぜですか？ **M:** 20211130 の 21S2005 参照

21S2004: シュレーディンガー方程式から固有値、固有関数を求めることで、何が解るようになるのですか？ **M:** 20S2010 参照

21S2007: 演算子が 2 つの場合は、2 通りの方法で計算をして、一致したら可換で、一致しなかったら可換ではないとなっていたが、演算子が 3 つになった場合において、6 通りの方法で計算をして、すべてが一致したら可換で、すべてが一致しなかったら可換ではないと考えたののだが、もし一部が一致し、残りが一致しない場合は、どのように考えるのか。 **M:** 本気か？ All or nothing なのか？ 中間はありえないのか？// “3 個の演算子が可換” とは、どういうことか？

21S2008: 一次元の箱の中の粒子の問題において直鎖型の分子に適応することはなんとなくイメージ出来たが、直鎖以外の枝分かれ型の分子構造には利用できないのか？ **M:** 本気か？ 自分で判断できないのはなぜか？// 電子の位置を示す変数はいくつ必要か？

21S2009: 先生は講義の最後に、「一次元の箱の中の粒子の問題は直鎖の炭化水素の周りに存在する電子にあてはめることができる。」という風におっしゃっていました。三次元の箱まで拡張して考えた場合、箱の中の粒子の運動は理想気体中の運動と同じであると言えるのでしょうか。 **M:** 本気か？ 自分で判断できないのはなぜか？

21S2010: 本日の講義で登場した演算子についてです。例えば演算子 $\hat{A}$ が 2 をかける、であるとか 0~1 範囲を x で積分するというような演算子だとすると、それをわざわざ数式の中であて $\hat{A}$ として表記することの意味が薄いような気がしました。もちろんハミルトニアンのように複雑な演算子であれば 1 文字で表せるということは便利な点だろうとは思いますが、演算子を数式の中で使う際に 1 文字で簡単に表せるという見た目上の利便の他に、なにか演算子として置かなくてはならない理由はあるのでしょうか。 **M:** 本質が全く理解されていない予感。一文字で書くという形式の問題ではない。

- 21S2012:** シュレディンガー方程式では、同時に多くの粒子の存在確率を求めることができるのですか。
M: 勉強すれば分かるのでは？
- 21S2013:** 量子力学で物理量が線形演算子以外で表されることはあるのですか **M:** 20211130 の 21S2005 参照
- 21S2014:** 粒子が箱の外に出ないようにする為には、井戸の高さを無限に高くするのはわかりますが、ポテンシャルエネルギーの x の範囲における値がなぜ ∞ と 0 になるのかが理解できませんでした。なぜ箱の外に V を ∞ にするのですか？ **M:** 本気か？“井戸の高さを無限に高くする”のは分かるのに、 V を ∞ にするのが分からないのはなぜか？
- 21S2015:** 量子力学では、線形演算子だけを取扱うとありますが、なぜ非線形演算子を取り扱わないのですか。
M: 20211130 の 21S2005 参照
- 21S2016:** 波動関数などの式はグラフや図に書き起こすことはできないんですか？ **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？//自分で図を描いてみればいいのでは？
- 21S2017:** マックスボルンの気がついた、シュレディンガーの波動関数の強度への解釈に対する論理的な難点とは何ですか。 **M:** 20S2003 参照
- 21S2018:** 不確定性原理で波数がある値の波について もしシュレディンガー方程式の解が $C \exp(ikx - itE/\hbar)$ のとき $t=0$ では $C \exp(ikx)$ となるそうですが、この波が無限に広く分布してる時 C は 0 となることが望ましいですがその場合波動関数の係数として相応しいのでしょうか？ **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？// $C=0$ となる波は、どんな波か？
- 21S2019:** シュレディンガー方程式の $-\hbar^2/2m$ がどのように導出されるのかわからないです。 **M:** そうですか。しかし質問が記載されていません。//では、 $\frac{d^2}{dx^2}$ や $V(x)$ は分かるのですね？//運動量を用いて運動エネルギーを表す。
- 21S2020:** 古典物理学的ではないような物理量とはなんですか **M:** たとえば スピン角運動量
- 21S2021:** シュレディンガー方程式で出てくる複素数を表す i は物理的には何を表しているのですか？ **M:** 本気か？//現実の物理量が複素数ということはあるのか？
- 21S2022:** 3・4 の解説において、数学的考え方として 0 **M:** [文が途中で意味不明です]
- 21S2023:** 箱が二次元になるとシュレディンガー方程式はどのようになりますか。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか？//一次元の古典的波動を二次元への拡張は、どうやったか？
- 21S2024:** 箱の中が無遠慮ではなくてもシュレディンガーの式に当てはまりますか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？//“箱の中が無遠慮”とは、どういうことか？
- 21S2025:** 粒子は波動の性質ももっていて、この波動がドブロイ波でその波動方程式はシュレディンガー方程式を解いて導けるようですが光も光子という粒子の波なので同じように波動方程式を出すことができるのですか？ **M:** 本気か？物理学の基礎を復習する必要があるのでは？//マクスウェル方程式
- 21S2026:** 3.2 のタイトルについて、古典物理学的ではない物理量とは **M:** 21S2020 参照
- 21S2028:** 量子力学的に考えた時、箱の中の粒子のエネルギー E **M:** [文が途中で意味不明です]
- 21S2029:** ハミルトン演算子はどのような場面で使われるのですか。 **M:** 量子力学では物理量と演算子が対応している (教科書 4 章参照)。
- 21S2031:** シュレディンガー方程式が固有値問題として定式化できるなら、波動関数を行列のように固有ベクトルで扱えるのでしょうか。また、扱えるなら滑らかな関数をどのように 1 つ 1 つの数で表せるのでしょうか。 **M:** 行列力学
- 21S2032:** 井戸型ポテンシャルのボールを出す話がわかりやすく、面白かったのですが他にも井戸型ポテンシャルのように比喩を使って表されるものはありますか。 **M:** 教科書や参考書をよく読んで、自分で比喩を考えればいいのでは？
- 21S2033:** 教科書 p87 に書かれている「粒子の強度」とは何を表しているのですか？ **M:** 21S2041 参照
- 21S2034:** 井戸型ポテンシャルで、中の粒子に無限大の運動エネルギーを加えて井戸自体を破壊して出す方法はダメなのだろうか。 **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？//粒子に無限大のエネルギーを与

えることは可能か？

21S2036: $A \times f(x)=g(x)$ (A は演算子) のような式があり、 A が x の関数であったとき、 $f(x)$ のほうを演算子とみることはできますか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // $f(x) \times A(x) = g(x)$ で $g(x) = B(x)$ と置き直すと、 $f(x) \times A(x) = B(x)$.

21S2037: 教科書 p81 で $\Psi(x)$ の正確な性質は不明確であるとして書いてあります。関数として表されてるにも関わらず、性質がわからないというのに疑問を感じたのですが、どういうことですか？ **M:** 教科書のその部分の説明 (や参考書) をよく読めばいいのでは？ // 勉強すれば分かるのでは？

21S2038: p132 の仮説 3 の「満足する」という言葉は固有値のどこまでを表しているのでしょうか？ **M:** 本気か？ 国語力不足？ // ちなみに原文は “In any measurement of the observable associated with the operator $\hat{A}$, the only values that will ever be observed are the eigenvalues a_n , which satisfy the eigenvalue equation $\hat{A}\psi_n = a_n\psi_n$.”

21S2039: 箱の中の粒子で 0 **M:** [文が途中で意味不明です]

21S2040: 同じエネルギー準位を持つことを縮重しているとするならば、二重縮重は何を意味しているのでしょうか。縮重について難しく考えているせいかもしれませんが、「状態が同じ」ところが二重に存在しているというのがよく分かりません。エネルギー準位が同じというのは安定であることと同義と考えてもいいのですか。縮重についてもう少し詳しい解説がほしいです。 // [後略] **M:** 教科書や複数の参考書をよく読んで考えればいいのでは？ // 二つの異なる状態が同じエネルギーを持っている。(教科書 p.58 も参考に)

21S2041: 教科書 P87 の 10 行目に「 $\phi(x)$ はある意味で粒子の振幅を表している。」とありますが、 $V(x) = 0$ なので粒子自体が振動しているわけではないと思います。この場合の「粒子の振幅」とは何のことでしょうか。 **M:** 教科書 p.87 や参考書のボルンの解釈をよく読めばいいのでは？

21S2044: 固有値を決めることで何かわかるのですか **M:** 勉強すれば分かるのでは？ // 教科書 p.132 や参考書をよく読めばいいのでは (?)

21S2045: 教科書 3 章の冒頭に、「本章では、時間に依存しないシュレディンガー方程式を提示して (中略) 質量 m の自由粒子に適用する」とあるのですが、時間によって位置が変わる自由粒子のシュレディンガー方程式を時間に依存していないとみなせるのはなぜですか？ **M:** 時間に依存しない現象をあつかう。例えば力学的エネルギーは時間に依存して変化することは無い。 // 20S2030 参照

21S2046: ラプラシアンは物理学的な意味は何ですか。また、さまざまな系についてシュレーディンガーの方程式を適用とすると、デカルト座標を用いない方がいいのは何故ですか。 **M:** 関数の曲率 // 別に、座標系は物理的実体とは独立に人が勝手に決めるものなので、好きにすればいいのでは...(?)

21S2047: 一次元の箱の中の粒子の問題の結果が直鎖の共役炭化水素の π 電子に適用できるとあるが、なぜ π 電子だけなのか。 **M:** 本気か？ 自分で考えて分からないのはなぜか？ // π -電子の σ -電子と比べた特徴は？

21S2048: 線形演算子は化学的にどのような問題につかわれているのか。 **M:** は？ 化学に限らず、科学的な現象について考えるときに、まずは線形と考えるのは普通でしょ.....(?)

21S2049: 量子力学で非線形演算子を用いないのはなぜでしょうか。 **M:** 20211130 の 21S2005 参照

21S2050: ハミルトン演算子は波動関数をかけてシュレディンガー方程式を得ること以外に何かに使うことはあるのでしょうか **M:** 21S2044 参照

21S2052: ある 2 つの物理量に対応する演算子同士が可換である場合、何か特別な意味を持ちますか？ **M:** 19S2005 参照