

16s2052: 波動関数の規格化は確率の和を 1 にする以外にどのような意味があるのですか M: 波動関数を規格化してもしなくても (波動関数が定数倍だけ異なっても) 同じ状態をあらわす波動関数なのだから、規格化したくなくればしなればよいのでは? 波動関数の二乗 ($\psi^*(x)\psi(x)dx$) が微小空間 dx における粒子の存在確率に比例するわけだが、その比例定数が 1 でなければならないという規則・制限はないので、好きにすればいいのでは? // (*) 線形代数とか (ベクトル空間とか) 関数空間とか言ってみるテスト。空間の基底としては、やっぱり規格化直交系を選ぶのがわかりやすいし都合がよい。

18s2006: 確率分布を使えば色々な物理量の平均値と標準偏差を求められますが、位置や運動量以外の物理量ではどんなものが求められますか。 M: 教科書 p.126 や参考書をよく読めば分かるのでは?

18s2010: 箱の粒子の運動量の向きと量の分布を求めることは出来るか M: 箱の中の粒子の問題では自明では? // 自分で考えて分からないのはなぜか?

18s2014: 運動量の平均値と位置の平均値をかける意味は何ですか M: 二つの値の積という意味があると思われるが、この程度のことも自分で考えて分からないのでしょうか? // どこでそんな積を計算していたのか?

18s2045: 運動量をはじめとした物理量を仮定し、波動関数を逆に求める手法というのも可能か。 M: 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // できそうな気もしますが、具体的な手法は知りません。そもそも逆演算で答えが一意に求まるだろうか?

18s2046: 今回は波動関数を規格化した事で一般解と厳密解の両方が正しいと見なされたが規格化されなかった場合はその一般解自身が正しくないということなのか。 M: 一般解とか厳密解とか、用語の意味を理解していないのでは? // 規格化された解と規格化されていない解と一般解との関係は?

19s2003: 粒子を見つける確率のグラフで、 n の数を極限まで増やすと古典的に振る舞うということ、教科書では対応原理と呼んでいたが、これから先対応原理に通ずる内容は出てくるのか。 M: そもそも対応原理とは何か? 何と何とが対応しているのか? 対応とは一致するということか? 対等原理はどこで使われるのか?

19s2005: なぜ空間の中で場所によって存在確率が変化するのですか M: それが量子力学的粒子の振る舞いの特徴。

19s2011: 粒子の存在確率は、なぜ場所により変化するのでしょうか? M: 19s2005 参照

19s2012: 運動量の平均値を求めるとき、運動量の演算子を作用させたあとの式に $-i\hbar$ が抜けていると思ったのですが、ない状態が正しいのですか。 M: 板書の誤りでしょうか? どうしてその場で言っただけなかったのでしょうか? // 計算を確認してください。

19s2013: 今回は不確かさを標準偏差として解釈して計算することで結果が不確定性定理が成立することを示していましたが、不確かさの解釈を別のものにしても計算結果が不確定性原理が成立することを示すことがあるのですか。 M: 解釈というコトバの使用法に少し違和感があります。// ハイゼンベルクのオリジナルの議論を調べてみればいいのでは? // それ以外の考え方についても存在しないと断言できるだろうか?

19s2017: 不確かさにはなぜ分散、標準偏差を用いられるのですか? M: 自分で考えて分からないのはなぜか? // 分散や標準偏差の意味を理解していないのでは?

19s2018: 箱の中の粒子の運動量の平均が 0 であることなどは運動量保存の法則なども関係しているの

でしょうか M: 本気が? // 法則の意味などを確認すればわかるのでは? 物理学の基礎を復習する必要があるのでは?

19s2024: σ_x がハイゼンベルクの不確定性原理に直接関係しているのは不確定性原理が位置と運動量のばらつきから成り立つため、分散 σ_x が関係しているからか。3 章で記載されていたのは何故なのか。 M: 言葉づかいがヘンテコな予感。それとも不確定性原理についての理解不十分? // 自分で考えて分からないのはなぜか? // 著者に聞けばいいのでは?

19s2026: 物理量の平均値の求め方は、シュレーディンガー方程式と同じように、何かから導出されたものではなく、こういうものであると定められたものなのですか M: 固有値方程式 $\hat{A}\psi = a\psi$ の両辺に左から ψ^* をかけて全空間に渡って積分する。// 教科書 pp.132–134 や参考書をよく読めば分かるのでは?

19s2043: 一次元の箱の粒子で、ポテンシャル障壁がどの程度だとトンネル効果は現れるのか M: 教科書 p.154 の問題 4.35 や参考書をよく読めば分かるのでは?

19s2045: 存在確率がその場所によってバラバラなのはなぜですか? M: 19s2005 参照

19s2049: 箱の中に 2 つ以上粒子が存在すると仮定した場合、確率についてはどう規格化すれば良いか。 M: 波動関数の引数の数、粒子の位置を記述するための変数は何個必要か? 系の自由度はいくつか?

19s2050: 不確定性原理は今回の授業で習ったこと以外にも使われることがあるのですか。 M: 習ったこと以外は何もできない、習ったことしかできない、なんてことで良いわけがない。

19s2051: 箱の中で粒子が存在する確率を観測できる実験はありますか? M: 本気が? // 普通に粒子の位置を観測すればいいのでは? で、それを多数回おこなう。

19s2052: なぜ時間は一方向にしか進めないのかという問題を解決するためには、どのような知識が必要になってくるのだろうか? M: 化学熱力学 :-) // 覆水盆に返らず

20s2001: 規格化をしてもしなくても、シュレーディンガー方程式に代入すればどちらも正しいことが分かりますが、規格化することによって、数がわかりやすくなる以外のメリットはあるのでしょうか? M: 16s2052 参照

20s2003: 確率密度で、どの程度粒子数が大きくなれば、粒子が古典的に振る舞うようになるのですか? M: 意味不明。ここでどうして“粒子数”が問題になるのか? 一個の粒子の系を考えているのに...??

20s2004: 教科書の P.97 にある不確定性原理の説明に従えば、片方の不確かさを無くすることが出来た時は値が 0 となりプランク定数の値を下回るのではないのですか。 M: 本気が? “極限”というものを知らないのか? // 片方の不確かさを限りなくゼロに近づけると.....

20s2005: 式 $3 \cdot 2.5$ の積分の部分を $\int [x = 0, a] \sin(n \pi x/a) dx$ の $\wedge 2$ と板書していましたが、この積分からは $a/2$ という値は導出できないのではないのでしょうか。 M: 本当にそんな板書をしていたのですか? もしそうなら、なぜその場で指摘していただけなかったのでしょうか? // 教科書や参考書をよく読んで自分で勉強すればいいのでは?

20s2006: 規格化するとはつまりどういうことですか? 確率を求めることが規格化するということですか? M: 本気が? 教科書や参考書をよく読んで考えてもわからなかったのでしょうか? 国語力不足か? // $\int \psi^*(x)\psi(x)dx = 1$ となるように波動関数 $\psi(x)$ を決める (定数倍して調整する)。

20s2007: なぜ分散を求めるのですか? M: 著者に聞けばいいのでは? :-p // 国語力不足か? 物理量 (の期待値) を求める方法の説明をするときの例示でしょ (?) ついでにそれを用いて不確定性原理の説明も行ったということでは (?)

20s2008: 箱の中の粒子が、古典力学的に不十分なエネルギーしか持っていないくても壁をすり抜けて出てしまうことがあると知りました。すり抜けるとはどういうことですか？一つの同じ粒子がエネルギーが足りないのにどうやって壁の中を進んでいけるのですか？それとも壁の右側にいる粒子と左側にいる粒子は別物ですか？波のように伝わるとしたら、その壁が媒質の役割を果たすことによって壁の向こう側へ行けるということですか？ **M:** たいていの教科書などには“壁をすり抜ける”ように書かれているが、量子力学的粒子は軌跡を持つような運動をしないので、理解不十分な人には誤解を与えてしまうかもしれない。また“波のように伝わる”も同様。量子力学的粒子は媒質を振動させて伝わるのではない。// トンネル効果については、“壁の向こう側で粒子を観測する確率がゼロではない”というのが正確な表現。どうしてそうなるか古典的なイメージで理解しようとすれば、“すり抜ける”という表現になるのだろう(古典的には、壁の向こう側で観測されたならば、トンネルを通るなどして通り抜けたと考えるしかないのだ)。

20s2009: 箱の中の粒子では時間に依存しないので不確定性原理の $\Delta E \cdot \Delta t = h$ は $\Delta E = h$ となりますか？ **M:** 全然違う。時間に依存しない場合になぜ $\Delta t = 1$ なのか？ // あいかわらず前提条件を正しく理解していない予感。// 教科書 3 章では時間に依存しない系について扱っていて、その例として箱の中の粒子の時間に依存しない状態を考えている。当然だが、箱の中の粒子の時間に依存した振る舞いを考えることもできるだろう(箱の中の粒子に時間に依存した摂動をかける場合とか)。20s2012 も参照

20s2011: なぜ波動関数は規格化されなければならないのですか？ **M:** 16s2052 参照

20s2012: 時間に依存するシュレーディンガー方程式は位置とエネルギーと時間に不確定性原理を考慮するものなのでしょうか？ **M:** シュレーディンガー方程式に不確定性原理が明示的に含まれることはないのでは？シュレーディンガー方程式は等式だが不確定性関係は不等式なので..... // しかし不確定性関係が、時間に依存する系で成り立つとか成り立たないとか、系を選ぶような話ではないはずだが.....(?)

20s2013: 規格化という条件という言い方をしていましたが、境界条件とは別物なのでしょうか？ **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // 条件を表す数式は同じか？条件の与え方は同じか？

20s2015: σ_x と σ_{p_x} はそれぞれ位置と運動量の不確かさを表しているが、これらの積で出る値 $\hbar/2 \times [(\pi^2 \cdot n^2)/3]^{1/2}$ は何を表しているのか。 **M:** 本気が？自分で考えて分からないのはなぜか？ // 不確かさの積

20s2016: なぜ演算子を $\psi^*(x)$ と $\psi(x)$ で挟むのか？積の微分法で $\psi^*(x) \psi(x)$ を微分してしまうと何か不都合があるのか？それともただ単にそういった決まりだからそうするのか？ **M:** 19s2026 参照

20s2017: 電子存在確率などを求めるために、複素共役をかけて実数にするという考えは理解できたのですが、波動関数の中に複素数が含まれていないのにもかかわらず、複素共役と記載されていて意味がわからないのですが、どういった意味なのでしょう？ **M:** 本気が？実数の集合と複素数の集合との関係は？ // $a + ib$ (a, b は実数) の複素共役は？ここで $b = 0$ のときは？ // [翌日提出とは、いくら何でも遅すぎます。当日 18 時締切りのはずです。]

20s2018: 粒子の平均運動量を求めた際に $p = \pm \sqrt{2mE}$ 求めたものの $+$ は右向き確率、 $-$ は左向き確率ということなのでしょうか？ **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // ここで p は確率を表しているのか？

20s2019: 平均や分散を求めていましたが箱の中にどれくらいの数の粒子が含まれているか求めることはできますか？ **M:** 20s2003 のコメント参照

20s2020: 標準偏差を求めることでなにがわかるのですか？ **M:** 本気が？ // 数学の基礎を復習する必要があるのでは？

20s2021: 箱の中の自由粒子の解の接続で、波動関数の複素位相が最後まで決定しなくてもいいのは、位相は観測可能な物理量ではないから位相だけが異なる波動関数は同じ物理状態を表す物として同一視されるためだからですか？ **M:** “解の接続”とか“複素位相”とか、教科書に出てこないような難しい言葉を使っていますね。(意味を理解しているのだろうか？何がどう“接続”なのだろうか?) // 接続だけでは決定されないのは“複素位相”だけではないのだが.....(?) 規格化まで済んだ後のことを“最後”と言っているのであれば、決定されていないのは“複素位相”だが、そもそもこれを決定できる条件などあるのだろうか？

20s2022: 波動関数の規格化がなぜ必要なのですか？ **M:** 16s2052 参照

20s2023: なぜ、演算子が波動方程式に作用するのか、または $2/a \times \int x^2 \sin \pi x/a \times dx$ に作用するのか決めなくてはいけないのですか？ **M:** 誤解の予感。“演算子が波動方程式に作用する”が意味不明。一体全体どこの何の話か??

20s2024: 教科書 97 ページにおいて領域の長さ a を 0 にして粒子を局在化すると 3.41 式より運動量の不確かさが無限大になると書かれていますが、なぜそう判断できるのですか。分子が 0 になり不定形で分からなくなってしまいます。 **M:** 20s2004 参照

20s2025: 粒子は $x=0$ と $x=a$ にある壁以外には何も見ないとあるがそれはつまりどういうことなのだろうか。 **M:** 擬人化なのですが、理解できませんか。// 領域の両末端に存在する壁以外に、粒子の運動に影響を与えるものとして、何が存在しているのでしょうか？

20s2026: 代入すること以外に、波動関数がどちらも正しいことを証明する方法はありますか。 **M:** 勉強すれば分かるのでは？ // 簡単にわかる方法が既知なのに、一体全体なにが不満なのでしょう？

20s2027: 自由粒子を厳密に局在化して位置の不確かさをなくしたとき、運動量の不確かさが無限大になるとありますが、粒子を有限なエネルギーの中に閉じ込めることはできないと考えてよいでしょうか？ **M:** 前半の記述(教科書の記述)から後半の記述(あなたの理解内容)への論理展開が理解できない。どうしてそういう話の流れになるのか？

20s2028: 粒子の運動量の平均値が 0 という値が出ましたが、箱の中に閉じ込められている粒子は箱にぶつかってベクトルの向きが変化し続けると思うのですが、それを考慮した上で 0 の値が出るのでしょうか？ **M:** 講義でも説明したのに、全く理解されていないようで、残念。// 運動量が正の値である確率と負の値である確率が、ともに存在する(ゼロでない)のはなぜだろうか？

20s2029: 粒子を見いだす確率は波動関数の二乗で表されるのは何故ですか。 **M:** 波動関数の二乗が粒子の強度を表すと教科書に書かれている。粒子の強度の解釈について、シュレーディンガーやボルンがどう考えたか、これについても教科書に書いてある。// 確率解釈はあくまでも“解釈”なので、正解だと決まっているわけではないが、最も妥当で実験事実と矛盾がなく広く受け入れられている主流の解釈ではある。あえて異を唱える必要性がない。

20s2030: 二次元の箱の中の粒子の問題を取り扱っていないのはなぜか。 **M:** 著者に聞けばいいのでは？ :-p // 自分で考えてみればいいのでは？ // あらゆる系について教科書に盛り込むことは非現実的では？ あらゆる系について答えを暗記する(暗記していない系については答えがわからない)というのは、大学での勉強方法として間違っている。

20s2031: 全空間の中に粒子が一個存在するという規格化の意味は何ですか **M:** 16s2052 参照

20s2032: 規格化された波動関数は規格化されていない波動関数よりも詳しく記述されているので、規格化された波動関数の方が規格化されていない波動関数よりも、よく使われるのではないかと私は

思うのですが、実際はどのようなのですか。 M: 16s2052 参照

20s2033: B= $\sqrt{2/a}$ であるのに代入などする必要があるのはどうしてでしょうか初歩的な質問ですみません M: 意味不明. 何をどこに代入する話か?

20s2034: 時間に依存しないシュレーディンガー方程式と依存するシュレーディンガー方程式はどの点で違っているのか M: 本気か? // 時間に依存するかしないかという点で違う :-p // 教科書や参考書を読んで勉強すれば分かるのでは?

20s2035: 規格化された波動関数について、シュレーディンガー方程式の解である ψ に任意の定数を掛けたもの解であるとありますが、そうすると存在確率も変化するということですか? M: 教科書の記述や講義での説明を全く理解されていないようで残念. // “波動関数の二乗が粒子の存在確率に比例する” のどこが理解できないのでしょうか?

20s2036: なぜ標準偏差が不確かさの尺度になるのですか M: 別に、したくなければ尺度にしなくてもいいけど. // 標準偏差 は、どういう意味か? 精度との関係は?

20s2037: もしも非定常状態で確率密度も時間依存するとしたらどうなるのでしょうか。 M: 普通に時間に依存する系だというだけで、別にどうもならない. 系の状態は時間に依存するシュレーディンガー方程式で記述される. // 時間に依存する系について、教科書や参考書を読んで勉強すればいいのでは?

20s2038: 粒子の平均運動量において、ポテンシャルエネルギーが 0 というのは左右にある粒子のベクトルを平均すると 0 ということの意味しているのでしょうか。 M: 全然違うというか、意味不明というか. // ポテンシャルエネルギーはベクトル (の平均) じゃないし、そもそも“左右にある粒子のベクトル” とは何のことが意味不明だし.

20s2039: 無意味な解とは、地面から垂直にボールを打ち上げ、何秒後に落下するか? という問題で言うところの $t=0$ のようなものであるという解釈であっていますでしょうか? M: 全然違う // 同次連立一次方程式

20s2040: 授業の条件では運動量が 0 となる点は中心でしたがもしこの粒子が加速したり減速したりする運動を不規則に行えば運動量が 0 となる点も変化するという解釈でいいのですか。 M: 自分で考えて全然違うと分らないのはなぜか? // 運動量は位置によって異なるのか? 粒子が加速・減速するために働いている力は何か? とか、もう滅茶苦茶で支離滅裂.

20s2041: 今回の講義で粒子の平均運動量が 0 と分かったが、運動量自体は 0 にならないように理解した。それが粒子の速さ $V = 0$ と考えることと矛盾してるように感じてしまったがどういうわけか。 M: 勘違いでは? // 一体全体、どこのどの粒子の速さがゼロなのか? どこにそんなことが書いてあったのか??

20s2042: 箱の中の粒子の平均運動量が 0 になるのは、粒子が 1 つしかないため平均して動いてないに

等しいということでしょうか。 M: 全然違う. 教科書や参考書をよーく読んで勉強する必要はあるのでは? // “平均して動いてない” という言葉で、どういう状態をあらわしているのか?

20s2043: 規格化は、「ある空間で粒子が 1 つ存在し、それを記述する波動関数 Ψ とすると、 Ψ のノルムに関して $\int |\Psi|^2 dr = 1$ とすること」と定義されているが、粒子が 1 より増えるとなると使えなくなるのか? 使えなくなる場合の対処法となる式や概念、定理などはあるのか? M: 19s2049 参照

20s2044: 定常状態ではない時は、どのように考えるのですか M: 20s2037 参照

20s2045: 境界条件から箱の両端では粒子の存在確率がゼロになっています。だとすると、粒子は箱の中で自由に運動していると言えないのではないんですか? M: 19s2005 参照 // 粒子の運動に制限がない (運動を制限するような力やポテンシャルが作用していない) のだから、それは自由だということ.

20s2046: 境界条件と規格化はどう違いますか。 M: 20s2013 参照

20s2047: 自分で置いた値 B を規格化するとき、 $B^2 = 2/a$ から、B を簡単のために $B = \sqrt{2/a}$ と導く、というような記述がありましたが、それは問題を考えやすくするために B を正の値で出したということでしょうか? また、そうであるならば、負の値も出す必要性はありますか? M: “簡単のために” のどこの意味が分からないのでしょうか? // まあ、何を“簡単” と思うかは主観なので、好きにすればいいのでは?

20s2048: 「量子数が大きい」とは何を基準にしているのでしょうか。理論的に量子力学と古典力学の結果が一致した点を基準にしているのですか。 M: 20s2050 参照 // 19s2003 も参照

20s2049: 電子は観測される前は波のように存在し、観測されるとその瞬間に一点に集まってそれが粒子として観測されるということを本でみたのですが、存在確率はその場所に集まる確率ということですか。 M: 存在確率は存在確率. コトバの意味が分らなければ、辞書や専門書を見ればいいのでは? // 粒子が観測されるなの確率だが、観測によって波が収縮するというのであれば、その地点に収縮する確率とも言える.

20s2050: n をどの程度まで大きくすれば、存在確率を一樣とみなせますか? M: 本気か? “みなす” のに客観的な基準があるのか? // 20s2048 参照

20s2051: 式 (1・26) も式 (3・43) もハイゼンベルクの不確定性原理を表すのに、 $=$ が付くか付かないかで違いがありますが、この違いの要因はなんですか? M: その二つの式は、本当に同じものを表しているのか? 同じことを意味しているのか?

20s2052: 運動量がゼロであるのに、平均をとると運動量が現れるのはなぜですか M: 何かの勘違いでは? // どこの運動量がゼロだということのか?