

質問カードには「良い質問」を書くのであって、ふと思いついた疑問や教科書を読んでいてあなたが理解できなかった点についての質問を書くのではない。この違いを理解していないと思われる質問が多数あるようだ。

16S2008: 座標系を選ぶ上で最も重要なことはなんですか M: 別に、好きに選べばいいのでは? // うまくなければ、別の座標系に選び直せばいいのでは?

16S2052: 核を原点に固定していない系では、核と電子それぞれの運動エネルギーと、核と電子間のポテンシャルエネルギーの和をハミルトニアンとしてシュレディンガー方程式を解くとエネルギーを求められるのですか? M: 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // シュレディンガー方程式の意味をよーーく考えればいいのでは?

17S2037: $H\psi = E\psi$ は、両辺に ψ が入っているが消えないのか。また、 $H=E$ ということなのか。 M: 本気か? // H と E はそれぞれ何か? これらの意味をよーーく考えればいいのでは? これらは同じ種類のものか?

18S2010: 原子核と電子の 2 粒子で計算できればボーアモデルでなくても水素類似原子のシュレディンガー方程式は解くことができるか M: 本気か? 誤解の予感. // ボーアモデルであることが、方程式の解を求める計算にどのような関係があるのか?

18S2018: 原子より分子の形であるものの方が多いにも関わらず水素原子のボーア模型が学ばれる理由はなんですか。 M: 本気か? 激しく誤解の予感. // 個別の分子についての解を多数暗記することが勉強なのではない。基本的な原理を理解し、様々な系に応用できるようになることが重要。

19S2003: 水素類似原子について、モデル上はどの原子でも水素類似原子になれるかのように板書がありましたが、その解釈で合っていますか。また、実験室上 (実際) ではどの原子までが水素類似原子の状態になりますか。 M: 自分で判断できないのはなぜか? どの原子について成り立つのかを、逐一暗記するような勉強は、勉強法として間違っている。どういう構成の何を考えているのかを理解することが重要。// 実際にできるかどうかの境界は、何で決まると予想されるか?

19S2004: 粒子の数が 3 つ以上の時も角度部分の方程式は剛体回転子の方程式と同じになりますか? M: 本気か? 自分で考えて方程式を立ててみればいいのでは? // 三つ以上の粒子の系で、座標変数をどのようにとるのか? 角度変数とは、どこの角度を表すのか?

19S2017: プロトンが原点に固定されていない場合、今回扱っている式に変化はありますか? M: 本気か? 教科書や参考書をよく読んで勉強し、よく考えれば分かるのでは? // 講義でやったことが、全く理解されていないようで残念。

19S2022: 水素類似原子のシュレディンガー方程式の変数を減らす方法としては、相対座標を用いる以外にもあるのでしょうか。 M: 本気か? 講義では少し端折って板書は省略したが、言葉では説明したのに、全く理解されていないようで、残念。// 相対座標を用いたからと言って、変数の数が減ったわけではない。二粒子系での 6 個の変数が、重心の座標に 3 個と相対座標として 3 個に分離され、後者だけを板書した。教科書 5 章では一次元の調和振動子 (二原子分子) について、二つの原子に対応した二つの変数が、重心座標と相対座標の二つに分離されて、それぞれの方程式が記載されている (変数の総数は減っていない!!)。

19S2049: Cs は体に入ると有毒で、K は体の中に必要な元素である。構造上は双方共に最外殻に電子が 1 つあるという点で共通だが、こうも差が出るのは何故か? M: 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // 二つの元素の性質の違いは何か?

19S2051: 教科書の "厳密" に解けるとはどのようなことなのでしょう? M: ここで言う "厳密" とは数学の解析学的手法 (四則演算, 微分・積分, 開平など) を用いるということだと、何度も何度も何度も何度も言っているのだが、全く理解されていないようで残念。いつになったら理解してもらえるのだろうか?

20S2004: 核を中心に固定する考え方でなく、相対座標を用いるのはなぜですか。 M: どちらが現実に近いモデルか? // 誤解の予感。教科書などには正確には何と記載されているか? 核をどこに固定するのか? 原子核を固定するために、どんな力が作用しているのか? 現実の核は、空間内に固定されているのだろうか? 核が固定される特殊な位置があるのか? ニュートンの第一法則は?

- 20S2006:** 極座標系とデカルト座標系の違いとはなんですか？ **M:** 本気か？ 教科書 D 章や参考書をよーよく読んで勉強すれば分かるのでは？
- 20S2010:** 水素原子のハミルトン演算子に出てくる、ラプラス演算子に物理的な意味はありますか。あるのであればどのような意味があるのでしょうか。 **M:** 電磁気学では何と呼んでいたか？ その他の物理分野や数学分野では、何と呼んでいたか？ (なるべく多数の参考書を参照せよ)
- 20S2021:** ルジャンドル多項式の直交は何を表すのですか？ **M:** 本気か？ // 直交は直交以外の何物でもないのでは？
- 20S2027:** 水素原子のシュレディンガー方程式を解くとき、換算質量と相対座標を用いた場合と教科書のようにプロトンを原点とした場合で、計算結果に違いはありますか？ **M:** 本気か？ // 自分で計算してみれば分かるのでは？
- 20S2036:** ハミルトニアンで、教科書では陽子の座標を原点として変数を減らし、参考書では陽子の質量が電子と比べて充分大きく無視できるとして、授業では換算質量を持ちして変数を減らしていた。3通りを比べた時に、どれも問題ないように思うが、これは好みの問題でしょうか？ **M:** 正気か？ “充分大きく無視できる”とは、一体全体どういう近似なのか？ “概数”とか“概略”ということの意味を理解していないのか？ // 19S2022 参照, 20S2027 参照
- 20S2037:** ボーアの量子論をアインシュタインは最後まで否定したそうですが先生はどう思われますか？ **M:** 個人の意見を聞いて、どうするのだろうか？ // その話は読んだことありますが、それが何か？
- 20S2042:** ボーアモデルでは、原子核を中心に固定しその周りを電子が円運動していますが、原子核が中心以外に固定されること、また電子が円ではなく楕円形に運動することはあるのでしょうか。その場合シュレディンガー方程式や解き方はどのように変わるのでしょうか。 **M:** 本気か？ “モデル”とは何か？ 抽出された特徴は何か (逆に捨てられたものは何か)？ 何のためにモデルを用いるのか？ // “ボーア・ゾンマーフェルトの量子化条件”, “ゾンマーフェルトによる楕円軌道の量子化”, “離心率 $\sqrt{1 - (l^2/n^2)}$ の楕円”と試してみるテスト. 高度な参考書も参照.
- 20S2046:** どんなに構造が複雑な分子でもの水素原子のシュレディンガー方程式が元になっているんですか。 **M:** 勉強すれば分かるのでは？
- 20S2047:** 構造物理 I の授業を履修している時に疑問に思ったのですが、光電効果について色々調べていて、光電効果はあらゆる物質で起こるのに、教科書においては対象物質を金属のみと記載しているのはなぜなのでしょう？ 金属など、幅広い種類の物質で起こる、と記載すれば良いのではないのでしょうか？ **M:** 著者に聞けばいいのでは？ // 金属以外の物質から電子を叩き出すのに必要な光の振動数は？
- 20S2051:** 極座標系に似た座標系が用いられている例として GPS が挙げられていたが、デカルト座標系に似たもので方位が近いと考えたが、それ以外に日常的に使われているものはあるか？ **M:** “方位”とは？ それこそ極座標 (二次元, しかも角度のみ) であって、どこがデカルト座標系なのだろうか？
- 20S2052:** 自分で仮定してたてた式が手計算でも機会でも上手く解けなかった場合は、自分の仮定したものは間違いであるということになるのでしょうか **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // 方程式が系を記述できていることと、それが (上手に) 解けることとは、論理的に独立な話では？
- 20S2053:** デカルト座標系の方が式が簡単に見えるが、なぜ極座標系を用いるのですか。 **M:** あなたがそう思うのなら、デカルト座標系を用いて式を記述し、解を求めればいいのでは？
- 21S2001:** 原子の中で水素が一番シンプルなので水素原子として学んでいるのだと思いますが、今回学ぶものに当てはまらないような例外の原子、分子などはあるのでしょうか？ **M:** 本気か？ 何がどう例外になるのか？ // 原子や分子, それらの構成粒子は、一体何なのか？ それらの粒子は、どのように振る舞うのか？ その規則は？ 規則に例外はあるのか？
- 21S2002:** 今日の講義だけの話ではありませんが、量子の運動を考えると、地球に対する万有引力は考えなくてもよいのでしょうか？ **M:** あなたが必要だと思うならば、考えに入れればいいのでは？ // 21S2016 も参照
- 21S2003:** 極座標系やデカルト座標系がありますがその他にも座標系があるのでしょうか？ 相対座標、重心座

標では xyz どれで計算してもいいのでしょうか？ **M:** 極座標系, デカルト座標系 と, 相対座標, 重心座標は, 性質というか種類というかが全く異なる. // 例えば重心座標を記述するのに, 極座標系を用いるかデカルト座標系を用いるかさらに別な座標系を選ぶかは, 状況によって決めるということになる.

21S2004: ルジャンドル方程式を解いて有限解を得られなかった場合何かが間違っているということですか？

M: 別に. 数学的には有限じゃない解が得られたというだけでは? // しかしそれは, あなたが方程式を解こうとする目的に合っているのか?

21S2005: ラプラス演算子の二乗の式において, 角度の文字 θ と ϕ で項の係数が異なるのはなぜか. **M:** 演習問題 (教科書 p.188 参照) にもなっていることだし, 自分で計算してみれば分かるのでは? 違うのは項の係数だけじゃない. // こういう問いの答えを暗記しても意味はない. 理解して自分で導出できるようになることの方が遥かに重要.

21S2007: 教科書に角度部分の解を説明し, つぎに動径部分の解に進むとあるのだが, これは, 絶対にこの順番で解かなければいけないのか. **M:** 本気か? 教科書に書いてあることを暗記するのではなく, 理解することが重要. // そもそも教科書は解き方の例を示しているだけで, そうしなければいけないなどと強制するわけではない. 数学的に正しい範囲で, またはさらに物理的に正しい範囲で, 好きにすればいいのでは? 特に, 変数分離した後, 得られた方程式をどの順で解くかなど, 好きにすればいいのでは? そもそも何のために分離したのか? 不都合があれば, また別の順番で解き直せばいいのでは?

21S2008: 教科書による動径方程式の説明にて「水素原子オービタルの半径方向の依存性を与える式」とあるがここにおける“依存性を与える”とはどういうことか? **M:** 言葉の意味が分からなければ, 辞書を見ればいいのでは?

21S2009: 講義では水素類似原子のモデルを用いて波動関数を求めましたが, それよりも大きなモデルで考える場合, 運動量やポテンシャルエネルギーを考慮すれば解くことは出来ますか. **M:** 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // “それよりも大きなモデル”とは, 具体的に例えば何のことか?

21S2010: 厳密に解くことが出来ない波動関数がそうになっているのには, 本講義で行ったような上手な変数の減らし方が通用しない, ということが大きく関与していることもあるのでしょうか. **M:** 意味不明. “そうになっている”とは何を指しているのか? // 多体問題としてみるテスト // 19S2022 参照

21S2012: 教科書 p232 の図 6・5 にある水素原子オービタルについて, 1s オービタルと 2s オービタルは共存しているのですか. それとも 2s オービタルの中心付近の, 電子の存在確率が高い部分は 1s オービタルなのですか. **M:** 本気か? もしも 2s オービタルの一部として 1s オービタルが含まれていたとすると, Li の電子配置 $(1s)^2(2s)^1$ とは何か? 2s オービタルには一体何個の電子が配置されているというのか? または, 最外殻電子の数とは何か?

21S2013: 電子数が 2 つ以上の原子のシュレーディンガー方程式を解くとき, 水素原子との考え方にどのような違いがありますか **M:** 教科書 8 章や参考書を読んで勉強すれば分かるのでは? // 多体問題としてみるテスト

21S2014: 変数の数が 6 という話なのですが, なんで 6 かは理解できたのですが, 外側の電子は動き回っていますが, 中心の原子核は動いてるイメージはないのに変数があるのが不思議に思いました. どう思いますか? **M:** あなたがイメージするのは勝手ですが, 現実があなたのイメージ通りであるとは限らない. // 20S2004 参照

21S2015: 教科書 P207 に, 原点に水素原子のプロトンを固定とあるが, 固定されているのにプロトンの持つ運動エネルギーが 0 とならないのはなぜですか. **M:** 20S2004 参照

21S2016: ハミルトニアン演算子は運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和となっています. この時, クーロンポテンシャルエネルギー以外に引力に由来するポテンシャルエネルギーを考えないのは, 授業で用いているボーアモデルでは考える必要がないからですか? 引力が小さすぎて無視できるものだからですか? **M:** あなたがここで言っている引力とは何のことか? // 微妙に誤解の予感. “ボーアモデルでは考える必要がない [圏点は引用者]” ではない. 20S2042 参照 // ポテンシャルエネルギーを計算してみれば分かるのでは?

- 21S2017:** 水素原子の波動関数について、水素の同位体（例えばトリチウム）はそれぞれ原子半径が異なりますが、扱うことはできるのでしょうか。 **M:** 意味不明. 水素の同位体は本当に原子半径が異なるのか? // 自分で扱って、計算してみればいいのでは? 自分で考えて分からないのはなぜか?
- 21S2018:** 水素類似原子のエネルギーの値は水素原子のエネルギーの値とどのくらい違いますか **M:** 自分で計算してみれば分かるのでは?
- 21S2019:** 今日の講義の最後辺りでやった 6,8 式と 6,9 式をそれぞれ定数 $-\beta$ と β でイコールを結ぶ意味が分かりません。 **M:** そうですか、しかし質問が記載されていません。 // 変数分離法についてよーよく復習する必要があるのでは?
- 21S2020:** 今日の講義では水素の類似模型を例としてあげていましたが他の原子模型だとどのように方程式が変わりますか **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // 他の原子模型とは、具体的にどんな模型か? 21S2013 参照
- 21S2022:** 電子が増えた場合は式が単純に長くなるのでしょうか? **M:** 式 (何の?) の構成を理解すれば自明では? // 長さはどうやって測るのか? 単純か単純でないかは、どう区別するのか?
- 21S2023:** 教科書の式 (6・8)、(6・9) に出てきた定数 β には何か条件はありますか。 **M:** その式の説明で (β を導入したところで) 説明されていませんか? // 変数分離法をよくよく復習する必要があるのでは?
- 21S2024:** 水素類似原子はどこまでの原子までが成り立ちますか **M:** “どこまで” とは、何のことか? // 19S2003 参照
- 21S2025:** 極座標系の式の記号の r と θ と Φ の意味ってあるんですか? **M:** 何を意図して、何を聞きたいのか、全く分からない。記号の意味としては、それが表す物理量のことだし。一方で意味と記号の対応は、シニフィアン・シニフィエ問題だし。
- 21S2026:** 水素原子の原子核と電子の質量を考慮すると、クーロンポテンシャルのほかに万有引力も働くと考えたのですが、万有引力も式に加える必要はありますか。 **M:** 21S2002 参照
- 21S2028:** (6.8) 式の水素原子オービタルの半径方向の依存性を与えるとはどういう意味でしょうか。 **M:** 21S2008 参照
- 21S2029:** Θ は何を表すのですか。教科書を読みましたがわかりませんでした。 **M:** 教科書のどこをどう読んだのでしょうか? 国語力不足か? // θ を変数とする関数以上でもそれ以下でもない。波動関数の角度 θ 依存性を表す。
- 21S2030:** 相対座標は調和振動子以外にも使うことはあるのか。 **M:** 意味を理解せずに暗記学習ばかり行なっていることの弊害でしょうか? 相対座標の意味を全く理解していない予感。 // 導出過程を吟味して、その物理的な意味をよーよく考えてみれば良いのでは? とことん考え抜いてみれば良いのでは? // 動いてる列車の中でボールを投げるとか、惑星の運動と衛星の運動とか。
- 21S2031:** 多電子原子のシュレーディンガー方程式は厳密に解けないようですが、近似的に解いた時に、実際の値との差が出やすいものと出にくいものはあるのか。あるとすればその規則を見つけることで実際の値に近づくように補正できないのか。 **M:** 近似の精度を系統的に高める方法は知られている。 // 微妙に誤解がある予感。シュレーディンガー方程式の解は実験値と比べるべきものではあるが、ここでいう近似値とは厳密解に対する近似である。そしてもちろん、方程式の厳密解と実験値とは、論理的に全く別のモノだ。
- 21S2032:** 教科書 (6・10) の式と (5・55) の式は同じと言うことから水素原子オービタルの半径方向の角度部分は剛体回転子の波動関数とわかりましたが、これがわかった結果そこから何が変わったのでしょうか。 **M:** 別に、何も変わらないが? てゆーか、変わる前が何だったというのだろうか? // “半径方向の角度部分” とは何のことか? 極座標系の変数を用いて言えば、半径方向とは r が大きくなったり小さくなったりする方向であり、角度部分とは θ や ϕ に関係する話だから全く別のことだし.....
- 21S2033:** 教科書本文中のモデルでは原点にプロトンを固定するモデルを考えていますが、講義で取り扱うモデルでは原点にプロトンを固定しないのはなぜか。 **M:** 別に。20S2004 参照
- 21S2034:** 水素類似原子は 1s 軌道について考えていると思うのだが、2s、3s 軌道などの同じ球体の軌道になるものでも、同じ考えを使うことが出来るのか。それとも調べたい軌道よりも内側にある軌道の遮蔽など

により変わってくるのか。 **M:** 激しく誤解の予感。 // ボーア理論による水素原子のオービタルは、1s に対応するオービタルだけが存在していたか? // 水素 (類似) 原子において、2s, 2p, 3s, 等のオービタルに電子が存在するとき、何が何を遮蔽しているのか?

21S2035: 水素原子以外の原子についてシュレーディンガー方程式を考えた場合、角度部の方程式は剛体回転子の方程式と等しくなるのか。 **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?

21S2036: 電子が 2 個以上あるときも、水素原子のシュレーディンガー方程式のように一体問題に変換して解くことができるのでしょうか。 **M:** 21S2010 参照

21S2037: p209 から、分離定数が磁気量子数と一致するのはなぜですか? (それとも、ここでの分離定数を磁気量子数として扱っているだけなのですか?) **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // 変数分離法をよーよーく復習する必要があるのでは? 分離定数を磁気量子数と一致するように選んだり、磁気量子数を分離定数に用いるとか、そういったことを行なっているのか?

21S2038: p208 の依存性とはどういう意味でしょうか? **M:** 21S2008 参照

21S2039: r だけの関数、 θ Φ だけの関数に分けた時、ある定数 β を用いて、2 つの式に分けるが、動径方程式の方を $-\beta$ にするのはなぜですか? **M:** 別に、気に入らないなら符号を逆にすればいいのでは?

21S2040: 波動方程式は変数分離法で解を求めることができるから好都合だとそのまま進めています、他の方法からのアプローチは紹介されないのですか。変数が複数含まれているから変数分離法を用いて解ける形にしていくのは自然なことだと思うのですが、他にも考え方があるのでしょうか。 **M:** 意味不明というか論理不明。“波動方程式は変数分離法で解を求めることができるから好都合だ”と、どうしてそう言えるのか? どこにそのような記述があるのか? // まさかシュレーディンガーの波動方程式を用いる理由を理解していないのか?

21S2041: 1 s 軌道と 2 s 軌道の形状は同じなので Na 原子などの最外殻が s 軌道かつ 1 電子の原子の最外殻電子について水素原子と同様のモデルを使用して厳密に波動関数を求めることはできますか。 **M:** あなたがここで言っている“形状が同じ”とはどういうことか? // 本当に 1s オービタルと 2s オービタルとは、同じ形 (相似形? どの方向に定数倍?) なのか? // Li, Na, K, 等では最外殻電子が s オービタルに 1 個の原子であるが、これらは内殻にも電子が存在しているが、それらは無視していいのか? // 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?

21S2042: 水素原子は複雑な原子や分子の雛形とみなされると説明されていますが、水素原子の考えでより複雑な原子のシュレーディンガー方程式は厳密に解けるようになりますか? **M:** 21S2013 参照

21S2043: ボーアモデルは、水素原子の場合では説明することができるのにヘリウムのように電子が 2 つあり、陽子と合わせて 3 つの三体問題のときに説明できないのはなぜですか。このような三体問題の時は万有引力の法則を用いて求めるのが有効なのでしょう。 **M:** 21S2013 参照 // 多体問題 (三体問題) とか、物理学を激しく誤解している予感。

21S2045: 水素以外の原子でシュレーディンガー方程式を考えた場合でも、角度部分の方程式は剛体回転子の方程式と同じになるのでしょうか? **M:** 21S2035 参照

21S2046: 講義中の変数分離法において、左辺は半径について、右辺は角度について表していると思うのですが、左辺がそのまま偏微分となっていました、角度に依存しなくなったことを示すために偏微分ではなくなる必要はないのですか。 **M:** 偏微分でないもの (常微分 (?)) は、他の変数に依存しないことを示すためにあるのか? 偏微分は他の変数に依存する事を示すためにあるのか? (何が依存するという話か?) // 常微分で書けるところを偏微分で書いたとして、計算結果が異なったり等の不都合や論理的な不整合が生じるか? // 私の板書が間違っていたら、どうしてその場で指摘してくれなかったのでしょうか? 間違いがその場で訂正されれば、クラスみんなに恩恵があるのに.....

21S2047: 式 (6・10) が剛体回転子の波動関数の方程式と同じなのは同様のモデルを考えてるからだとは思いますが、例えば剛体回転子の方ではクーロン力が作用しておりません。このように同様のモデルではあるが働いてる作用が違うのに最終的な式が同じになるのはなぜか。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? 何と何が同じなのか? “同様のモデル”とは、どんなモデルか? その中にクーロン力は含まれるの

か? // 水素原子のオービタルの全体 $\psi(r, \theta, \phi)$ と剛体回転子の波動関数 $Y(\theta, \phi)$ とが完全に一致しているのか? 21S2048 参照

21S2048: 剛体回転子の方程式の解が水素原子のオービタルと密接に関係しているのはなぜか。 **M:** 剛体回転子のモデルと水素原子のオービタルの角度部分についてのモデルとを比べて考えればいいのでは?

21S2049: 多電子の系ではシュレディンガー方程式が厳密には解けないのはなぜですか **M:** 21S2010 参照

21S2050: どういうときに空間の次元数が 4 になりますか? **M:** 正気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // 物理的に実在する (かもしれない) 四次元空間を, 三次元空間にいる私たちが認識することはできない。しかし実在として認識できなくても表現として必要ならば, 次元の数を増やせばいいのでは? 例えば超ひも理論では 10 次元時空が必要だったりするらしい。// 抽象的な空間であれば, 人の思考が許す限り, いくらかでも好きな次元数を考えればいいのでは? 例えば講義で考えた 2 粒子系で変数が 6 個ある状況であれば, 6 次元空間における一粒子の話だと考えてもいいのでは?

21S2051: 今日の講義で説明していたモデルの話のように, これまでの授業の中で思い違いをしやすいような物がありますか? **M:** 今日の講義で何度も手を上げてもらったが, その様子から想像すると, 思い違いをしていない事項の方が少ないのではないかという考えが拭いきれない。

21S2052: 教科書 p.209 より、「式 (6.10) が剛体回転子の方程式 (5.55) 完全に同じであることがわかる」とあり、確かに式を見ると明らかではありますが、これは実験的にも明らかなのでしょう。 **M:** 実験的に何が一致すれば, 2 つの方程式が一致すると言えるのだろうか? そもそもこれらの式は, 実験的に求められた式なのだろうか? 2 つの系で, それぞれ理論的に導出された式が同じ形式をしている時, 一体何が起きているのだろうか? その 2 つの系の関係はどうなっているというのだろうか?