

- 17s2001:** 一度目の変数分離をする際に分離定数を $\hbar^2\beta$ としたのはなぜですか? M: 別なものに置いて自分で計算してみれば分かるのでは?
- 17s2003:** 共鳴周波数が分光計がつくる磁場の強度に比例するのはなぜですか? M: 何の話か? // もしも磁気共鳴 (NMR, EPR 等) の話なら, 教科書 14 章や参考書をよく読めば分かるのでは?
- 17s2004:** 水素原子オービタルの角度部分と剛体回転子の波動関数が一致していることが分かったが, これは導出前に分かるものなのか, もしくは計算して分かったものなのか. M: 話の論理展開から自分で判断できないのはなぜか? // 方程式の形が同じなのだが, 解の関数が一致することは, ↓
- 17s2005:** 水素原子オービタルの角度部分は剛体回転子の波動関数であるが, 動径部分は調和振動子の波動関数と関係しているのでしょうか. M: 自分で判断できないのはなぜか? // どんな関係があると予想したのか? その根拠は何か? 『どの段階で分かるのだろうか?』
- 17s2006:** 物理的意味での一般性とはどのようなものですか. M: 特定の系に限定されない.
- 17s2007:** 今回の剛体回転子では水素原子を扱っていましたが, 分子 (H_2O , CO_2 など) も扱うことができるのでしょうか. また, 扱えるとするならば, 分子の sp^3 , sp^2 などは関係あるのでしょうか. M: どういう系をどういうモデルであつかっているのか, 激しく混乱している予感. // 剛体回転 ↓
- 17s2008:** (6.9) が剛体回転子の方程式と同じという事についての利点はありますか? M: 自分で見つければいいのでは? // 一石二鳥 :-p 『予では水素原子を扱っていない.』
- 17s2009:** なぜ極座標系で水素原子を解くのがよいとされているのか. M: 講義で実演したし, 説明もしたのだが, 何が分からなかったのか? // 極座標を用いずに解いてみれば分かるのでは?
- 17s2010:** 境界条件を決めるときに, なぜ, 1 階微分の値を出すことで, なめらかに 接続できるのですか. M: 今更ですか? // 一階の導関数の幾何学的な意味は?
- 17s2011:** 水素原子以外の原子でも剛体回転子の方程式と一致するのですか. M: 水素原子と何が違うのかを考えてみれば? // 多電子原子の章や参考書を読めば分かるのでは?
- 17s2012:** 今回の講義では水素原子についてシュレーディンガー方程式の解を求めましたが, 地球について解を求めようとするときは月のことも考慮しなければならないのですか? M: 地球の何を対象として, どの位の精度で求めようというのか? // 地球科学の専門書などを読めばいいのでは?
- 17s2013:** 角度部分についての式 (6.9) は, なぜ剛体回転子の式と同じものになるのか. M: 共通点は何か? 相違点は何か? 17s2042 も参照
- 17s2014:** 常に初期位相を $\tau = 0$ としてはいけないのか. 物理的に一般性を失わなくても, 数学的に一般性を失ってはいけないのはなぜか? M: 常に初期位相がゼロになる合理的な理由があるのか? // 誤解している予感. (6.20) は物理的には一般性を失っていないが, 数学的には一般性を失っ ↓
- 17s2015:** (6.8), (6.13) には定係数以外にも含まれているが, (6.14) のように解くことはできるのでしょうか. M: 自分で解いてみれば分かるのでは? 『ている.』
- 17s2016:** 水素原子の波動関数において遠心力ポテンシャルを考慮しないのはなぜか? M: 遠心力とはどういうものか, 物理学の基礎 (力学) を復習する必要がある? 『17s2013 参照』
- 17s2017:** 角度部分の方程式と剛体回転子の方程式が同じなのはなぜですか. 計算を進めていったら偶然に同じになったのか, それとも元々同じになることはわかっているのですか. M: ↑
- 17s2018:** 式 6.13 と 6.14 の成立条件は何か? M: 導出過程を吟味すれば分かるのでは?
- 17s2019:** 先生が ϕ の方程式の解を見て「嘘くさい」とおっしゃっていましたが, なぜそう思われたのですか? あと水素原子のシュレーディンガー方程式の角度部分が剛体回転子の式と同じなのは必然ですか? M: どこについてそう言いましたか? // 17s2013 参照
- 17s2020+:** 水素原子の波動関数は, 化学反応ではどのような影響をおよぼすのか. M: 化学反応は原

子間の化学結合が切れたり生成したりすることと言える. すなわち分子内の電子の運動状態や分布が変化するということ. これは電子の波動関数と密接に関係している! 『ことなのか?』

- 17s2021:** 境界条件で $\Phi(\phi + 2\pi)$ とあったが, $\Phi(\phi + 2\pi n)$ (n は整数) と表さないのか? M: 表したければ表せばいいのでは? // 一周回って同一であることと, n 週回って同一であることは, 違う ↑
- 17s2022:** 境界条件のなめらかにつながるところがよくわからなかったのですが, どこを学び直せばよいですか? M: 教科書 4 章の前半, 波動関数に求められる要件.
- 17s2023:** 水素原子以外の原子のシュレーディンガー方程式を解く上で, 今回のように 1 体問題に置き換え, 考える上で何が障害となるのですか. M: 物理学の基礎を復習する必要がある? 多体問題と言ってみるテスト 『参照してください.』
- 17s2024:** 水素原子の動径部分の方程式 (6.8) はどのようにして解くのですか. M: 教科書では結果だけ示しています. 詳しい解法は, サポート web ページでも紹介している, より上級の参考書を ↑
- 17s2025:** 境界条件を自分で考えないといけない場合があると話していたが どのようにして自分で考えないといけないと判別するのだろうか. M: 明示的に与えられていない場合.
- 17s2026:** 多体問題は二体問題と違い厳密には解けない. つまり水素原子以外は厳密に解くことができないということですが, He^+ や Li^{2+} などの水素類似型のイオンならば厳密に解けるのではないのでしょうか. M: そうですね. 本によっては“水素類似原子 Hydrogen-like atom”などと称して書かれているものもあります. いずれも核と電子の二体系です. 水素原子の方程式のどこをどう修 ↓
- 17s2027:** $c_1(1 - e^{2\pi mi}) + c_2(1 - e^{-2\pi mi}) = 0$ の式から $1 - e^{\pm 2\pi mi}$ [原文ママ] となるのがモヤモヤします. 他の値があるような気がするのですが どうなのでしょう. M: 他人に言われただけではモヤモヤが残るでしょう. 自分で考えないと. 『正すればよいでしょうか?』
- 17s2028:** 球面調和関数について, 水素原子の球面の膜の振動と角度にはどのような関係があるのでしょうか? M: 水素原子に球面の膜があるとは初耳です. もしかして誤解しているのでは?
- 17s2029:** (6.13) 式を解くときに考えるルジャンドル方程式がいろいろな問題に出てくると教科書に書いてあるがなぜなのか? M: 事実として出てきているのだから, 何故もないのでは? // 新しい問題を解こうと考えるときに, 既知の方程式に帰着させるという考え方は, とても有用.
- 17s2030:** 水素原子の場合は電子が 1 つで, 2 体 → 1 体として考えやすいのですが, その他の原子で考える場合は, 複数体 → 1 体として考えることは可能でしょうか. M: 17s2023 参照
- 17s2031:** 三角関数の形での議論から任意定数が 1 つになるのは理解できたが, (けっこう悩んでいたことなのでとても勉強になった) 指数型に直したとき, $Ae^{im\phi} + Ae^{-im\phi}$ mama と線形結合にならないのはなぜか. M: え? 記載の式は, 単なる余弦関数でしょ?
- 17s2032:** 水素原子のシュレーディンガー方程式の解についてですが, 原子核の位置にあたる原点での波動関数は 0 ですか? M: 原子オービタルの式 (表 6.5 または 表 6.6) 参照
- 17s2033:** 指数関数のままで三角関数を合成して導いた答えを出すことはできないのでしょうか. M: オイラーの式を用いて..... という説明を講義中にしたのだが, 伝わってなくて残念.
- 17s2034+:** 指数関数型の場合の $\Phi(\phi) = A_m e^{im\phi}$ はどこから導き出したのですか. M: 特殊解 (の定数倍) のとしては, 普通に導いた. ただしこれを“一般解”と称している教科書の記述には疑問が残る. という説明を講義でもしたのだが, 伝わってなくて残念 (;_;))
- 17s2035+:** 水素原子の波動関数を求めるとき, 原子核と電子で換算質量を用いたが, このとき, 換算質量を用いる前後で距離と電荷に依存するクーロンポテンシャルが変わることはないのか. M: 換算質量を用いて考えると, 核と電子間の距離が変わるのか? // 換算質量は視点の変換・数式の変形であって, 実体は何も変わらない.
- 17s2036:** 水素原子を剛体回転子として換算質量を用い, 角度部分は剛体回転子の波動関数でもあると

分かったが、動径部分について同じようにならないのはどうしてですか。 **M:** “同じ” とは、何と何とが同じという話か? // それぞれの系でどんなモデルを考えていたか? その相違点は?

17s2037: 5章の剛体回転子ではラプラス演算子の r についての項が実数であるとして消すことができましたが、水素原子のとき r は計算のときに消さなかったのですが、水素原子では r が実数でなくなる場合があるのですか。 **M:** 著しく勘違いしている予感。正しく理解すれば、普通の計算しかしていないことが分かるはず。 『17s2042 も参照

17s2038: 球面調和関数を用いて地震について考えることができるということでしたが、惑星の地殻は地形や地質の影響で、水素原子と比べると真の球からは遠いように思えます。両者を同じ式で考えたとき、大きな差は生じないのでしょうか? **M:** 当然差は生じますが、それが大きいかどうかは主観でしょう。何をどう議論したいのか、目的に応じて手段や精度を選べばいいだけのことでは? ↑

17s2039: クーロンポテンシャルとは何か? **M:** 物理学の基礎を復習する必要がある?

17s2040: [白紙]

17s2041: 演算子にも単位はあるのか。 **M:** 例えばシュレーディンガー方程式 $\hat{H}\psi = E\psi$ の右辺の E はエネルギーですが、両辺の次元は等しいはずなので.....

17s2042+: 球面調和関数とは何を示している関数なのでしょう。 **M:** あらかじめ関数に物理的な意味が内包されているわけではない。物理的な現象を表現するときに、その場に適切な関数を選んで用いるという論理。// 球状の膜の物理的な振動を表すのなら、球面調和関数の値は平衡位置からの変位だし、(量子力学的) 剛体回転子なら、関数の二乗はその方向 (θ, ϕ) での存在確率に比例するものだし、場合によって色々でしょう。 『ては、意味不明。

17s2043: 規格化することで A_m は求められますか? 物質の破壊における性質、運動、エネルギーの変化、についてです。 **M:** 教科書3章や参考書をよく読んで復習する必要がある? // 後段につい↑

17s2044: p.213の「 θ が物理的に意味のある変数」という文がいまいち理解できません。どういう意味なのでしょう。 **M:** 言葉通りの意味ですが、ちなみに原文では“the variable of physical interest”です。位置の関数である波動関数 ψ の引数は、 $x(= \cos \theta)$ ではなくて θ であるという↓

17s2045: ルジャンドル多項式というのは具体的にどのような場面で使われますか。 **M:** 私は知りません。調べて分かったら、教えてください。 『程度の意味。

17s2046: 今回の内容、変数分離法を使わないでも解くことは可能なのでしょうか? **M:** そりゃあるかもしれませんが、数学やその他の本で調べてみればいいのでは? 『なのでしょう。

17s2047: 水素原子オービタルの角度部分は剛体回転子の方程式と同じだが、動径部分と同じ方程式はあるのですか。 **M:** 解の関数に名前が付いている位ですから、それなりに有名な方程式の形な↑

17s2048: 教科書では電子には質量 m_e が与えられているが、プロトンには質量が与えられていない。この場合換算質量はどうなるのか。 **M:** 別に、普通でしょ。表紙見返しの物理定数に書かれて↓

17s2049: 球面調和関数で近くの振動を考えられるとありましたが、 $Y(\theta, \phi)$ では地殻の厚みを考えることができない気がします。この式で厚みのある膜の振動は計算できますか? **M:** できる・できないって、どういう意味か? // 計算したければすればいいのでは? // 17s2038 参照 『いるが?

17s2050: 読書感想文の右上の数字は何ですか? **M:** メモです。

17s2051: 球面調和関数は完全な球体でなくても用いることができるのでしょうか? **M:** ↓

16s2006: 水素原子オービタルの角度部分が剛体回転子の波動関数でもあるとあるが、剛体回転子と角度にどのような相関性があるのか。 **M:** 17s2042 参照 『17s2049 参照

16s2009: 無機化学等の教科書では、水素原子の 1s 軌道が結合に関わってくるが、マッカーリ&サイモン の教科書の第6章で出てくる水素原子の 2s 軌道以上の軌道は、結合にどのように関わってくるのか。 **M:** 通常は原子間の結合を考えるのに電子が入っている原子軌道を用いるが、反応性と

か物性を考えるときには、空の軌道(エネルギーの高い軌道)を用いることも有る。

16s2014: 聞き逃した可能性があるが、水素原子オービタルの角度部分と剛体回転子が一致するのは何故か。また一致することで何が言えるのか。 **M:** 17s2013 参照

16s2017: 式(6.10)が剛体回転子の波動関数の方程式(5.55)と完全に同じになることは、予想された上での結果ですか? **M:** 17s2013 参照

16s2019: $1 - e^{\pm 2\pi m i} = 0$ から指数関数を使って m は整数であることは求めるか。 **M:** 講義中に導出の流れは説明しましたので、自分で計算してみればいいのでは?

16s2023: 波動関数を変数分離法以外の方法で解くことはできますか。 **M:** 17s2046 参照

16s2026: 教科書に、水素原子のシュレーディンガー方程式は厳密に解けると書いてありますが、ここで用いられている厳密とはどういう意味で用いられているのですか? **M:** 数学用語で“解析的に” というのと同じ意味です。四則演算・微分積分などを使った式変形だけで(近似計算(テイラー展開して高次の項を無視するなど)を一切使わずに)解けるということ。

16s2028: シャボン玉が虹色に見えるのはなぜか? **M:** 本気ですか? // ニュートンリング等を知らないのか? 物理学の基礎を復習する必要がある??

16s2040: $\Phi(\phi) = c_5 \sin(m\phi + \tau)$ の式において $\tau = 0$ とした時なぜ水素分子なら一般性を失わないのでしょうか。 **M:** 誤解では? 水素分子の話はしていないと思うが??

16s2044: $\Phi(\phi)$ の解の中に虚数項があるが、虚数があるということは角度部分 ϕ は実際には観測不能なのか。 **M:** 波動関数 Φ は物理的意味を持たないので、観測可能とは言えない。角度 ϕ には実体があるので普通に観測可能。ということ自分で判断できないのはなぜか?

16s2046: 剛体回転子の波動関数の方程式と完全に同じであるということからどのようなことが言えるか。 **M:** 17s2013 参照

16s2048: 水素原子が最も単純とのことでしたが、他の原子で考えるとどのように複雑になるのですか。 **M:** 教科書6章末、8章や、参考書を読めば分かるのでは?

16s2049: p.207で水素原子のシュレーディンガー方程式は厳密に解けるとあるが、その他の原子は解けないということか? **M:** 自分で判断できないのはなぜか?

15s3007: (6.5)式は原子オービタルの半径方向の依存性を与えるとあったが、この式は半径距離を与えるのではないのか? **M:** 何か勘違いしているのでは? // 微分方程式の解は関数。ここでは r を引数(変数)とする関数が得られる。

15s3014: 例6.1の(6.21)を見ればどういった運動をしているなどすぐ頭に思い浮かぶようなものなのでしょうか。 **M:** 割と簡単な例では?

15s3025: もし、初期位相の値が必要になる場合があるとしたら、どんな場面ですか? **M:** 物理では都合の良い座標系を任意に選ぶのが普通なので、ちょっと思いつきません。

15s3028: 水素原子のシュレーディンガー方程式を平面極座標系に直すとどうなるのか。 **M:** 自分で計算すればいいのでは?

15s3030: 球面調和関数を地球の振動について用いられるのは始めて聞きました。それについて書いてある文献等がありますか? **M:** 私は知りません。調べて分かったら、教えてください。

15s3048: なぜ水素原子オービタルの角度部分は剛体回転子の波動関数と同じになるのか。 **M:** 17s2013 参照

14s3019: 今回求めた波動関数は水素原子だけに当てはまって、他の原子には当てはまらないのか。 **M:** 17s2011 参照

14s3030: 電子は振動、伸張、回転しますがこのエネルギーはハミルトン演算子の中に含まれていますか? **M:** 一部誤解がある予感。// ハミルトン演算子には何が含まれているか?