

- 17s2001:** 角運動量の 2 乗は何を意味するのですか? M: 角運動量の 2 乗
- 17s2003:** ヘリウム原子のシュレーディンガー方程式とはけないと聞いたことがあるのですがそれはどうしてですか? M: 多体問題としてみるテスト 『// 自分で考えてみればいいのでは?』
- 17s2004:** ボーアモデルは軌道上で運動するということが誤りだったのにエネルギーは誤りではないのはなぜか。また角運動量以外にもボーアモデルに誤りがあるか。 M: ある意味、不思議ですね。↑
- 17s2005:** 水素原子の二つの波動関数が直交していることは具体的に水素原子のどのような性質を示しているのですか。 M: 別に。水素原子には電子は一つしかありませんから。
- 17s2006:** 公転運動していないというのは電子が確率で付近に存在しているということでしょうか? M: 電子の存在確率密度分布については、波動関数を見れば自明では?
- 17s2007:** 球面調和関数 負の無限大と正の無限大は存在するのでしょうか。 M: 何が無限大になる↓
- 17s2008:** 6.3 のタイトルの文は、 \hat{L}_z を先に測定しないとけないということを表しているのですか? M: 別に。知りたいことを (先に) 測定すればいいのでは? 『話? // 波動関数は無限大に...』
- 17s2009:** \hat{L}_x の期待値の計算で $\langle \hat{L}_x \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (Y_1^{-1}) \hat{L}_x Y_1^{-1} \sin\theta d\theta d\phi$ の $\sin\theta$ はどこからきたのか。 M: 極座標系での積分について、数学の基礎を復習する必要があります?
- 17s2010:** 球面調和関数の三次元のグラフをかいた時に使ったフリーソフトを教えてください。 M: gnuplot ですけど。
- 17s2011:** $\langle \hat{L}_x \rangle$ と $\langle \hat{L}_y \rangle$ はどうして 0 になるんですか。 M: 自分で計算してみればいいのでは?
- 17s2012:** 電磁波は、電荷が運動することで発生する。交互に有機される磁場と電場の時間的変化のことで、光も電磁波の一つですが、なぜ時間的変化するものが反射するのですか? 私には波であることが想像できません。互いに垂直になっている電場と磁場が広がっていくだけのようには思います。 M: 伝播していく波が反射するだけですか? // 物理学の基礎を復習する必要があります?
- 17s2013:** なぜ \hat{L}_x , \hat{L}_y の期待値 (平均値) を求めるのか。 M: 理解を深めるため。
- 17s2014:** \hat{L}_x と \hat{L}_y と \hat{L}_z を同時に決定できないことと、電子の正確な位置を決定できないことに関連性はあるか。// 球面調和関数をプロットした時、x 軸と y 軸でそれぞれ軌道が左右対称になるのは、 $\langle \hat{L}_x \rangle = \langle \hat{L}_y \rangle = 0$ であるからか。 M: 同時に決定できないわけではない。不確定性原理について復習する必要があります? // 電子密度分布と角運動量とは、関係あるだろうか?
- 17s2015:** 可換である、可換ではないという違いがよくわかりませんでした。どういった違いがありますか? あと、 $\cot\theta$ は何と読むのですか? M: 重症ですね。構造物理化学 I の内容をよく復習する必要がありますと思われる。// 本気か? コタンジェント 『めば分かるのでは?』
- 17s2016:** 演算子の可換性是对応する 2 つの物理量が同時に確定するための必要十分条件であるという理解でよいのでしょうか? M: 自分で判断できないのはなぜか? // 教科書や参考書をよく読↑
- 17s2017:** 角運動量の式で $l=0$, $L_{\min}=0\hbar$ で軌道運動していないとき、電子はどのような状態で存在しているのですか。 M: 別に。運動エネルギーも核によるクーロンポテンシャルエネルギーも持っている状態でしょ。自分で色々と考えてみればいいのでは?
- 17s2018:** 6.34 式において l の値が増えていくということは 何を表すのか。 M: 軌道角運動量の 2 乗と量子数との関係でしょ? 『値』の平均値なだけでしょ。
- 17s2019:** 角運動量の平均値とはどのようにして測定されたものですか? M: 別に。物理量 (測定↑)
- 17s2020:** 陽子は、なぜ反発し合わずにくっついていられるのか。また、陽子と中性子が原子核として一緒にくっつくことができるのですか。 M: クーロン力の反発は必ずある。しかしそれを上回る引力で結合している、ハズ。原子核物理学や素粒子物理学を勉強すれば分かるのでは?

- 17s2021:** \hat{L}_x の期待値を求める際、二重積分で表したとき なぜ $\sin\theta$ が加わるのか? M: 17s2009 ↓
- 17s2022:** 3 次元のグラフはなんてソフトを使ってかいたのですか? M: 17s2010 参照 『参照』
- 17s2023:** 球面調和関数の直交性とありましたが、球面調和関数が直交するとはどういうことですか。また、どんな球面調和関数の組でも直交するのですか。 M: 教科書 p.214 や参考書をよく読めば分かるのでは?
- 17s2024:** $\langle \hat{L}_x \rangle$ や $\langle \hat{L}_y \rangle$ が 0 になり、球面調和関数の直交性を表しているということは原子のオービタルについてどのようなことを意味しているのですか。 M: 17s2005 や 17s2014 の後半など参照
- 17s2025:** $l=1$ の角運動量状態における $m=+1$ の成分で x 成分と y 成分を指定できないと、どうして角運動量は円錐を作るのでしょうか。 M: $L_x = \pm\hbar$ 以外の値をとらないという制限はない。
- 17s2026:** レポートの内容について質問です。僕が作図したのはあくまでも角度部分のみで、実際の形はそこに動径部分をかけることで成り立つと思われませんが、動径部分をかけるのであれば、変わるのは軌道の大きさのみになるのですか? M: 教科書 p.232 や参考書をよく読めば分かるのでは?
- 17s2027:** $m=1$ のときのプロットがよくわかりませんでした。 ϕ のあつかい方がよくわかりませんでした。 M: ϕ についての波動関数は (6.20) 式だが、複素数の絶対値が分からないのでしょうか?
- 17s2028:** コーン状のグラフは水素原子の何を表した形状ですか? M: 教科書 p.221 や参考書をよく読めば分かるのでは?
- 17s2029:** もし角運動量の 3 成分の値を同時に正確に測定することができたら、何かに利用することはできるのか? M: そりゃできるでしょうね。自分で利用法を考えてみればいいのでは?
- 17s2030:** プロットしたものは対称性のものが見られたが、非対称なものは存在するの、また非対称なものがあったとしたら同じ式を適用できるのか。 M: 球面調和関数の式は分かっているのだから、自分で考えればいいのでは?
- 17s2031:** 課題について。たとえば $l=1, m=0$ のとき、 $Y_0^1 = \left| \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \cos\theta \right|$ をプロットしたら模範解答のようなグラフになると思うが、なぜ Y は絶対値といえるのか。 $|Y|$ が原点からグラフの上の点までの距離であって、 Y そのものは距離ではなくあくまで極座標でいう r “座標” ではないのか。 M: もともと $r = |Y_l^m|$ とする課題でしょ。// 質問の後半は意味不明。極座標について誤解してる?
- 17s2032:** 球面調和関数で $l=m$ の場合は直交しないのですか。 M: 自分で計算してみれば分かる↓
- 17s2033:** 球面調和関数はシャボン玉の膜のようなものの振動を表す、と言っていましたが Y_l^m をプロットしてできた図形は その振動の伝わる部分を表している。という事ですか? M: 振動の様子、関数の値が “変位” を表す。 『ののでは?』
- 17s2034:** \hat{L}_x や \hat{L}_y の期待値についての話で $\langle \hat{L}_x \rangle = \int (Y_1^{-1})^* \hat{L}_x Y_1^{-1} d\tau$ という式は、なぜこのような式になるのですか。 M: 本気か? 物理量の平均値の求め方について、教科書 4 章や参↓
- 17s2035:** 球面調和関数 $Y_l^{|m|}(\theta, \phi)$ について、 l の値を大きくしていくと、まだ知られていない原子オービタルの形があったならば、計算により予測できるのか。 M: シュレーディンガー方程式の解が得られたことから、原子オービタルの形は全て明らかになった。未知の原子オービタルなど、もはや存在しない。論理のチカラを侮るな! 『考書をよく読めばいいのでは?』
- 17s2036:** \hat{L}^2 と \hat{L}_z は可換であり、同時固有関数であるので、 \hat{L}_x , \hat{L}_y も \hat{L}^2 と可換であるということは、 \hat{L}_x , \hat{L}_y も同時固有関数になるのですか? M: 微妙に誤解の予感。演算子は関数ではない。教科書や参考書をよく読んで考えてみればいいのでは?
- 17s2037:** x 成分, y 成分についての固有関数が決定できるのはどんな場合ですか。 M: 別に。いつでも固有関数を決める (求める) 事はできるでしょ?

17s2038*: $L = \sqrt{l(l+1)}$ で $l \geq 1$ のとき $L_{\min} \neq 0$ になりますが、p 軌道以上の軌道が角運動量をもって公転運動しているのは p 以上の軌道には方向があるからでしょうか？ **M:** 因果関係にあるかどうかは知りませんが、相関関係はありそうですね。自分で色々考えてみれば面白そう。

17s2039: \hat{L}^2 と $(\hat{L}_z, \hat{L}_x, \hat{L}_y)$ では可換^[原文ママ]は可能だが、 \hat{L}_z と \hat{L}_x, \hat{L}_y 同志^[原文ママ]での可換はなぜできないのか。 **M:** 自分で計算してみれば分かるのでは？

17s2040: [白紙] **M:** 質問が記載されていない。

17s2041: ルジャンドル方程式で、解が有限でなければならないのは何故ですか？ **M:** 17s2007 参照。
// 波動関数の満たすべき要件は？ 『算子の数の範囲とは何か？ 17s2036 も参照

17s2042: \hat{L}^2 と \hat{L}_z が同時固有関数かつ可換だとあったが、数の範囲はあるのか **M:** 意味不明。演↑

17s2043: 球面調和関数が絶対値で表されるのはなぜでしょう。 **M:** 誤解でしょ。 17s2031 も参照

17s2044: \hat{L}_x と \hat{L}_y の精値がわからないことによって平均値を用いることは理解したが、もし、精値がわかったとしたら円錐の形にどのような変化が起こるのでしょうか？ **M:** “精値”とは？ 変に誤解している予感。それとも国語力の問題か?? // 自分で考えて分からないのはなぜか？

17s2045: 球面調和関数の方程式はどのようにして導き出されますか。 **M:** 教科書よりも少し上級な参考書や、理工系の数学 A の教科書を参照すればわかるのでは？

17s2046: 球面調和関数において、 m, l の数字が分数の場合もあるんですか？ **M:** 球面調和関数についての説明をよく読めば分かるのでは？ 『るでしょ。

17s2047: 今回のレポートを手書きでやったのですが、 $l = 2, m = 0$ のときドーナツ型のグラフが出てきませんでした。どのように計算したら出てくるんですか。 **M:** 別に。普通に計算して出てく↑

17s2048: 教科書 p.217 の (6.38) 式で数式中に $N_{l,m}$ という文字が出てきているが、これは何ですか。 **M:** それ以前の関連する式類似の式と見比べてみて、何が対応しているのか、考えてみればいいのでは？ // 波動関数の形式から、必然的に導入されるものを、論理的に推理すれば分かるのでは？

17s2049: 無機化学では、軌道とは、電子がある確率（授業では 90%）以上に存在する部分のことだと学びましたが、今回の課題で求めた軌道の形は、その中にどれくらいの確率で電子が存在する軌道なのでしょう。 **M:** その無機化学での説明は、かなり古典的イメージに寄せたものですね。本当は、軌道（オービタル, orbital）は、原子や分子に含まれる電子の波動関数のことです。原子核の周囲で運動している電子の経路（軌道, オービット, orbit）のようなものを想定し、それをオービタルと呼んでいます。量子力学的にはそれはシュレーディンガー方程式の解である波動関数のことです。// で、質問自体はナンセンス。ある (θ, ϕ) 方向における $Y_l^{|m|}$ の値が 0.1 だったとして、それは核からのキヨリ r が 0.1 pm を意味しているのか？ それとも 0.1 km のことか?? 『しょうか？

17s2050: 「 $\hat{L}_x, \hat{L}_y, \hat{L}_z$ は規則正しく…」と言っていましたが、板書で「 $\hat{L}_z = x\hat{p}_y - y\hat{p}_x$ 」となっていました。これは例外ですか？ **M:** もしそうなら、おそらく書き間違いでしょう。正しくは、角運動量について物理学の基礎を思いだせば分かるはず。なぜその場で指摘しただけなかったのか？

17s2051: 電子が公転していないとなると古典物理学は成り立たなくなるのではないですか？ **M:** そうですね。ですから、原子のようなミクロな世界を記述するには、量子力学が必要とされる。

16s2006: 角運動量がきれいな円錐をつくっているが、不確定なものがきれいに決められた範囲を動くという意味はなにか。 **M:** 別に。何が不確定なのか、よく考えればいいのでは？

16s2008: 角運動量の 3 成分自体の不確かさは存在しないのか。 **M:** 意味不明。“自体の不確かさ”とは、具体的にどういう事か？ 『要がある？

16s2009: 角運動量演算子 $\hat{L}_x = -i\hbar \left(y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y} \right)$ と表せるのは、成分が異なる同士の外積が、不確定性関係がないため、定数となるからなのか。 **M:** 意味不明。物理学や数学の基礎を復習する必↑

16s2017: 今回の球面調和関数のプロットにおいて、極座標系で三次元的に表現するためには、Mathematica などの有料アプリを使わないといけないことが調べていて分かった。調べた限りでは、学生でも気軽に手の届きそうなものは無かったが、お手頃または無料で、上記のようなプロットができるものはあるのだろうか。 **M:** 17s2010 参照 『て復習する必要がある？

16s2019: シュレーディンガー方程式から角運動量の最小値を求めたことでボーアモデルの角運動量 $L = n\hbar$ が誤っていることが分かったが、ボーアモデルの角運動量 $L = n\hbar$ の n は自然数だけではなく 0 も含めることはできないのか。 **M:** 教科書や参考書をよく読んで、ボーアモデルについて↑

16s2023: $l = 2, m = \pm 2, \pm 1, 0$ のときはどのような形になりますか。 **M:** 自分で描いてみれば分かるのでは？ 『ばいいのでは？

16s2028: “量子力学的”とはそもそもどういうことか。 **M:** イマサラですか？ 対義語を考えてみれ↑

16s2040: 角運動量の 2 乗と角運動量の x, y 成分は不確定性関係にあるのでしょうか。 **M:** 講義でも説明したのだが、伝わってなくて残念。// 講義での説明や教科書の記述の、何が分からないのか？

16s2044: 式 (6.9) を整理するときなぜ $\beta = l(l+1)$ と仮定できたのか。 **M:** 微分方程式を解く過程で導入されることが教科書にも書いてあるのだが、何が分からないのか？

16s2046: $P_l(x)$ は l が偶数であれば偶関数、奇数であれば奇関数になるとあるが、こればオービタルにどう影響するか。 **M:** オービタルを表す波動関数の偶奇 『ない= 3 重に縮退

16s2048: $\hat{L}_x, \hat{L}_y, \hat{L}_z$ の 3 方向を区別できないことが $(2l+1)$ 重の縮退度を説明するというのはどういうことか。 **M:** 言葉通りだが？ 国語力不足？ // $l = 1$ の話をしている、3 方向を区別でき↑

16s2049: ルジャンドル多項式が身のまわりで使われている例はありますか？ **M:** 球面調和関数↓

15s3007+: 水素原子の角運動量の二乗の最小が $L^2 = 0\hbar$ で、軌道運動しておらず、それが s オービタルだとありましたが、だったらなぜきれいな円形のオービタルを得るのか。 **M:** 完全な球体（球対称）だから、回転運動していないと言えるのでは？ 『とシャボン玉の膜の振動の話をしたのに？

15s3014: p.221 で \hat{L}_z を決めたときの \hat{L}_x, \hat{L}_y の平均値があるが \hat{L}_x を決めた場合 $\langle L_z \rangle$ は 0 になるが値は $-\hbar, 0, \hbar$ である。図 6.1 のように示そうとするとどのような形になるのか。 **M:** 別に。同じように考えればいいだけでしょ？ 何が分からないのか？

15s3025: p.217 の下の方に「 \hbar が量子力学系における…」とありますが、古典力学系においてだと、異なるのですか？ **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか？ 物理学の基礎を復習する必要がある？

15s3028: 剛体回転子でない場合、 \hat{L}^2 はどうなるか？ **M:** 系に依存するだろうが、私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ

15s3030: 角運動量の 3 成分の演算子の \hat{L}_z について、 $\hat{L}_z = x\hat{p}_y - y\hat{p}_x = -i\hbar \left(x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x} \right) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi}$ とありますが、 $\hat{p}_z \rightarrow \hat{p}_x$ ではないですか？ **M:** 17s2050 参照

15s3048: なぜ \hat{L}^2 と $\hat{L}_z, \hat{L}_x, \hat{L}_y$ は可換だが、 \hat{L}_x と \hat{L}_y などは可換ではないのか。 **M:** 17s2039 参照

14s3019: \hat{L}^2 と \hat{L}_z が可換ということは $l(l+1)\hbar^2 = m\hbar$ なんです。 **M:** 著しく誤解している予感。演算子が可換ということと、固有値が同じということは、全く別の話。// そもそも表す物理量が全く違うのに、それが等しいって、どーゆーこと？

14s3030: ボーアモデルから導かれた角運動量の値と水素原子のシュレーディンガー方程式から導き出される固有値（角運動量の）が異なるのは、ボーアモデルのどこかの条件が間違っているからでしょうか。前者は、ハイゼンベルクの不確定性原理を考えていないからでしょうか。 **M:** 自分で判断↓

記名なし: 角運動量の 2 乗と角運動量の z 成分は同時に決定できるとあるが $\left[\sqrt{\hat{L}^2}, \sqrt{\hat{L}_z} \right]$ でも同じになるか。 **M:** 自分で計算してみれば分かるのでは？ 『できないのはなぜか？ 論理的に自明では？