

- 16s2052:** L^2 と L_x または L_y が可換であることはどのような意味を持つのですか M: 自分で考えて分からないのはなぜか? // 普通の意味では?
- 17s2007:** $\langle L_x \rangle$ と $\langle L_y \rangle$ の説明の際に、「本当の値はゼロではないが、平均するとゼロになる」とおっしゃっていましたが、平均値である $\langle L_x \rangle$ と $\langle L_y \rangle$ の値が、正の値も負の値もおそらく存在する中で所々ゼロになるのは、何か理由があるのでしょうか? それとも計算していくと必然的にゼロになるのでしょうか? M: 色々とカン違いの予感。// “平均値の値が、正の値も負の値もゼロもある” は酷い。平均値の意味を理解していないのだろうか?
- 17s2045:** 水素原子中の電子以外、他の原子や分子においてシュレーディンガー方程式が解けないのはなぜでしょうか。変数分離することができないからでしょうか。 M: 自分で考えて分からないのはなぜか? // 多体問題と言ってみるテスト
- 18s2003:** 角運動量の演算子を求める際に、二乗の平方根で代用し $\sqrt{L^2} = L$ としていた部分で、量子力学の観点からして許されるかどうかは微妙と話していましたが、それはなぜですか? M: 20s2047 参照
- 18s2010:** L_x, L_y は $L_z=0$ 以外では不確定性原理での位置と運動量のように一定の値迄でも個々に予測できないのか M: 質問の文がわかりにくい。要するに、何が聞きたいのか? // 不確定性原理 を、キチンと理解していないのでは? 教科書や参考書をよく読んで復習する必要があるのでは?
- 18s2014:** 図 6.1 についてですがこれは電子の運動における存在確率と考えてよいですか M: 本気か? // 図のキャプションに記載されているタイトルの “ $l=1$ の角運動量状態における $m=+1$ の成分。” の意味が理解できないということか?
- 18s2018:** 可換であることのメリットは何でしょうか。 M: 教科書 p.142 や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは?
- 18s2029:** 講義で x, y, z 軸は名称が違うだけで相違はないとのことでしたが、球面調和関数が角運動量の z 成分である L_z の固有関数であるという点で、 z 軸は x, y 軸と相違があるといえるのではないですか? M: 表 6.3 の球面調和関数が $\hat{L}_z$ の固有関数であるというだけで、 $\hat{L}_x$ や $\hat{L}_y$ の固有関数は表 6.3 の線形結合としてそれぞれ作られるというだけのこと。
- 18s2038:** 球面調和関数が L^2 と L^z の両方の固有関数になっていて、 L^2 と L_z の正確な値を同時に決定できることが L^2 と L^z とが可換であることと教科書にあったがこれは教科書にある演算子を入れ替えて作用させたときに等しくなることと同じことを言っているのか 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んで勉強すれば分かるのでは? // “可換” の意味を理解されていないのだろうか?
- 18s2045:** 1) デカルト座標系における「 z 軸が特別な存在かどうか」というのは、角運動量を用いて説明されていた。ここでいう特別な存在というのは要は類似した 3 表現より判断できる (大まかに) という話であった。一方で、極座標系においては、3 つの独立した r, θ, Φ からなり、人間が都合の良いように決めているが、 r, θ, Φ における球面調和関数と動径関数の表現は類似点がみられない。これはどのように解釈すればよいのか。// 2) 観測可能な物理量 (これはずっと出てくるものだが) とは、実際どのように観測するのか。 M: 1) 質問の後半部分の意味が分からない。 “ r, θ, Φ における球面調和関数と動径関数の表現は類似点がみられない” とは、何のことを言っているのか? 球面調和関数と動径関数は別のモノなのは明らかでは? // 2) 物理量によって異なるのでは? 理論的なこととしては教科書 p.132 や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは?
- 18s2046:** デカルト座標系における x, y, z のうちにはどれも特別ではないが、 L_x, L_y, L_z を球面調和関数にのみ限定した場合は L_z は特別と言えるのか。 M: 自分で判断できないのはなぜか? // 球面調和関数は L_z の固有関数か? L_x の固有関数か? (という話を講義で説明したのに、理解されていないようで、残念。)
- 19s2003:** $\langle L_x \rangle$ の意味が正直よく分かりません。 M: 本気か? // 教科書 p.133 や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは?
- 19s2005:** 角運動量について、 L^2 と 1 成分の値を同時に正確に観測することはできるが他の 2 成分を同時に観測することはできないというのを図に表していますが、円錐という形自体に意味はあるのですか M: 20s2016 参照
- 19s2007:** 角運動量は二乗の平方根で「代用する」とありましたが、二乗の平方根で完璧でないのはどうしてですか。 M: 20s2047 参照
- 19s2011:** 可換な演算子は角運動量やスピン角運動量の他には、どのようなときに使われるのでしょうか? M: 18s2018 のコメント参照
- 19s2017:** L_x と L_y の同時に正確な値を観測できないことには不確定性原理は関わっていますか? M: 自分で判断できないのはなぜか? // 演算子の可換・不可換と、不確定性原理との関係は? 教科書や参考書をよく読んで復習する必要があるのでは?
- 19s2022:** 可換であることのメリットは何ですか。 M: 18s2018 参照
- 19s2026:** 球面調和関数のプロットの解答例で、原点が (0, 0) では無かったのはどういうことですか。 M: 何かの勘違いでは? // (0,0) の点のことを原点というのでは??
- 19s2029:** デカルト座標系において、 x, y, z の 3 つの軸は名称、ラベルが違うだけで z 軸が特別な存在であるわけではないが、角運動量の成分になった時、 z 成分のみが球面調和関数の固有値となるのには何が影響しているのか。 M: 18s2029 参照
- 19s2031:** 球面調和関数は L_z の固有関数でありましたが、 L_x と L_y の固有関数ではありませんでした。デカルト座標系では X 軸・ Y 軸・ Z 軸は等価な存在であるの対し、なぜ L_x と L_y が球面調和関数の固有関数になることができなかったのでしょうか? M: 18s2029 参照
- 19s2040:** 球面調和関数で $l=2, m=1$ と $l=2, m=2$ のグラフが $\Phi=0$ のときに同じ形になるのはなぜですか。 M: 何かの勘違いでは? // $\Phi=0$ ということは、 xz 面での断面の話でしょ?
- 19s2045:** 球面調和関数の実数化は何を目的として行っているのか? M: 自由空間にある孤立原子の場合には、同じ l (軌道角運動量子数) の値を持つ $2l+1$ 個の原子オービタルが縮重しているので、どの形の関数であっても固有関数であることには違いないが、外場が存在しているとき (分子中に存在しているときなど) は、実関数が固有関数になっている (cf. 縮重のある系の摂動). 結局、孤立原子であっても原子オービタルを実関数で表しておいて何の不都合もない。
- 19s2046:** 球面調和関数のプロットでは原点からの距離を関数の値として設定しましたが、関数の値が負の値である場合は物理的にど

のような意味を持つのですか。また負の値であった場合には、値を 2 乗して正の値に直したり、絶対値で表記するなどの処理が必要だったでしょうか？ **M:** 波動関数の定数倍 (−1 倍) にはどんな物理的な意味があるか？ // プロットの仕方について説明したのだが、理解されていなかったようで、残念。

19s2049: 教科書 p.235 における図 6・7 では d_{z^2} 軌道において xy 平面上に存在する円盤状の形は原点と繋がっていないが、今回の課題のプロットにおける d_{z^2} 軌道では原点も範囲に含まれていたはずである。この違いは何か？ **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか？ // それぞれについて、一体全体何をどうプロットしたのか、よーく考えればいいのでは？ // もしも教科書のような図を描いたとすると、 $\theta = \pi/2$ における波動関数 (球面調和関数) の値はいくつだろうか？

19s2051: 剛体において内部のエネルギーの損失などは考慮しなくていいのでしょうか？ **M:** 正気か？ // 剛体とは何か？ // エネルギー損失が発生するとは、内部で何が起きているというのか？

19s2053: 角運動量のベクトル図がコマのような形をしていることから球面調和関数のドーナツ型はコマを倒して回転させたような形であることは納得できますが、 $m=0, l=2$ の時などに生じるエリマキの形は角運動量のベクトルがどのような運動をすることにより形が作られるのですか？ **M:** 著しく勘違いの予感。// “コマを倒して回転させたような形” とはどういうことか？ まったく意味不明なのだが??

20s2002: L^2 と L_x は可換、 L^2 と L_y は可換、 L^2 と L_z は可換と言っていたが、 L^2 の値がわかった時点で L_x, L_y, L_z の 3 成分が求められると言うことですか。 **M:** 論理不明。 L^2 が分かると、どうしてすぐに 3 成分が求められるというのか？

20s2003: 角運動量が出てくるのになぜ、ポテンシャルエネルギーには遠心力が含まれなかったのですか？ **M:** 本気か？ // 物理学の基礎 (力学) を復習する必要があるのでは？

20s2004: 同時固有関数であることの利点はありますか。 **M:** 講義で説明したのに、伝わっていないで残念。// 教科書や参考書をよく読めばいいのでは？ // 同時固有関数があるとき、それらの演算子間の関係は？

20s2005: 球面調和関数から原子オービタルの形が求められるのは分かったが、その形が実際の原子オービタルの形と同じかどうかはどのようにして確かめるのか。 **M:** (+) 個別の原子オービタルの形は、観測可能な物理量だろうか？ 一般に複数の電子を有する原子の、特定の電子が入っているオービタルだけを、他の電子のそれと区別して観測することはできるだろうか？ そもそも“観測”とは、どのような行為だろうか？

20s2006: 式 6-33 と式 6-38 は、同じものなのでしょうか？ **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // それぞれの式の前後の説明文が理解できないということでしょうか？ // 式を一字ずつ見比べてみればいいのでは？

20s2007: L は円錐の表面積を自由に動いているということですか？ **M:** 意味不明。“表面積を動く”とは、どういうことか？ // L^2 , L_z , $\langle L_x \rangle$, $\langle L_y \rangle$ が分かった時に、これら全体を通して矛盾のない説明は？

20s2008: ・軌道角運動量について質問です。例えば $l=1$ の時は $l(l+1)=2$ となるので $l=-2$ も解になると思うのですが、ここで l を非負整数と限定しているのは単純にその方が便利だからですか？ $l=1$ であっても $l=-2$ であってもどちらも全く同一であるということですか。もし本当は l の値によって少し違いが生じる場合、どういうときにその状態が区別されますか。// ・電子スピン角運動量 S の定義は軌道角運動量 L からの類推であると本に書いてありました。 $L=r \times p$ ですが、 S の場合は何の外積になるのでしょうか。 **M:** 論理がめちゃくちゃ。 $l(l+1)=2$ を解いて $l=1$ が得られたわけではない。// $\beta = l(l+1)$ (ここで l は非負の整数) がそもそも何であったのか、なぜそうでなければならなかったのか、すっかり忘れてしまったのでしょうか？ // 国語力不足か？ どのレベルで何をどう“類推”したのか？

20s2009: 教科書 p222 の「3 方向を区別できないということが $(2l+1)$ 重の縮退度を説明する」とはどういうことですか？ **M:** 20s2015 参照

20s2011: 球面調和関数が角運動量の x 成分と y 成分の演算子の固有関数とならないことは例題 6.6 から分かりました。ここで、具体的に考えると x, y, z 成分を極座標系で表した際に、 z 成分では ϕ だけの関数となります。その一方で、 x, y 成分では θ と ϕ の 2 つの関数が混在しています。その影響で x, y 成分は固有関数とならないのですか？ **M:** 座標系は人が恣意的に選んでいる。物理現象や数学的性質は、そんな人の意思に左右されないのでは？ // 18s2029 参照

20s2012: 角運動量の測定を行うとき、 L_z と L_x は可換でないために確定値をとらないので様々な値が出るはずですが。実験するたびに一つの状態に対して同じ測定を行うとするとどのように元の状態に戻すのでしょうか。 **M:** 微妙に勘違いの予感。二つの演算子が可換であるかどうかと測定値が確定値をとるかどうかは、これだけでは説明不十分で、直接はつながらない。// 二つの演算子が可換でないならば、同時固有関数を持たない。すなわち $\hat{L}_z$ の固有関数 ψ は $\hat{L}_x$ の固有関数ではないので、 ψ で表される状態について L_x を測定しようとすれば測定ごとに様々な値が得られ、その平均値は $\langle L_x \rangle = 0$ となる。// 多数回の測定については、教科書では“ $\hat{A}$ に対応した観測量を測定するように計画されたどんな実験においても (p.132)”と記述しているので、実験系に応じて適切なやり方で元の状態に戻せばいいのでは？ -p 参考書によっては、同じ状態の系を複数用意して、それぞれについて測定を実行するように記載されているものもある。確率論なので、どちらでもいいのでは？ 思考実験なら何も気にしないでよいのだが.....

20s2013: 球面調和関数の位相の表し方について、マッカーリー流よりコンドン・ショートレー流の方が昇降演算子との整合性の点で表しやすいと、調べた所行き着いたのですが合っているでしょうか？ **M:** あなたが行き着いた所に何が書いてあったかわからないので、何とも言えない。// あとは、自分で計算などすれば分かるのでは？

20s2015: 教科書 p.222 で、「すなわち、この 3 方向を区別できないということが $(2l+1)$ 重の縮退度を説明するのである。」とあるが、 L_z を表す式が L_x あるいは L_y の式よりもずっと単純になるように z 方向を選んで、計算していった結果、縮退度が $2l+1$ であることが分かったのであって、このように、しっかりと 3 方向を区別して縮退度が分かったということはこの一文はおかしいと思いませんか？ 先生はどう思いますか？ **M:** 勘違いの予感。“3 方向を区別できない”ので、 $l=1$ の $m=0, \pm 1$ が同じエネルギーを持っている (=区別できない) ことを説明している。xyz でも $m(=0, \pm 1)$ でも、自由度は 3 で同じであることに注意。// 例えば L_x が最も簡単になるように座標系を選ぶこともできる。これは 3 方向を区別できないことと同じことである。

- 20s2016:** 〈Lx〉と〈Ly〉の平均値が0になることから図6・1のような円錐を表したが、この形になったことは他に何かを意味するのですか？ **M:** 歳差運動
- 20s2017:** オービタルは、 n, l, m の3個の量子数によってエネルギーや形がわかるが、スピン量子数は一切関与しないのですか？ **M:** 20s2043 参照
- 20s2018:** Lx, Ly については平均値であるとおっしゃっていましたが、Lz の平均値も x, y と同じように0となるのですか？ **M:** 本気か？ // 自分で計算してみれば分かるのでは？ // 量子力学の基礎を復習する必要があるのでは？
- 20s2019:** デカルト座標系において特別ではない Lz のみが球面調和関数を固有関数とするのは θ と ϕ のとり方の問題ですか？ **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // 18s2029 参照
- 20s2020:** 球面調和関数は $\hat{L}^2$ の固有関数であり、 $\hat{L}^2 = \hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 + \hat{L}_z^2$ です。しかし、球面調和関数は $\hat{L}_x^2$ と $\hat{L}_y^2$ の固有関数ではないのはなぜですか。また、球面調和関数は $\hat{L}_z$ の固有関数です。そのとき、球面調和関数は $\hat{L}_z^2$ の固有関数でもあるのですか。(数式が moodle 上だとうまく反映されませんでした。) **M:** 18s2029 参照 // 自分で計算してみれば分かるのでは？
- 20s2021:** Lx, Ly で m が変化することは $Y_{m,l}$ が演算子の固有状態になっていないことを示し、一つの方向の成分に着目して、固有状態をつくると他方向の成分までは決まらなくなってしまうが、力として中心力しかない場合は、特別な方向がないために z 軸の選び方は勝手、となっているのか？ **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // // 安心感を得るだけで情報は全く変わらない質問に、意味はあるのか？ 他人に承認してもらわなければ何もできないようでは困るのでは？
- 20s2022:** なぜ電子は次々と高い軌道にはいっていくのでしょうか？シュレディンガー方程式において問題がないならば、一番エネルギーの低い軌道に全ての電子がはいれるとおもうのですが。 **M:** 電子はフェルミ粒子だから。
- 20s2023:** デカルト座標系において x 軸は見方を変えることによって y 軸や z 軸にもなり得るので x 軸、 y 軸、 z 軸に違いはないと言うことですか？ **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んで考えればいいのでは？
- 20s2024:** 教科書 222 ページの最後の段落において本日の講義で先生がおっしゃっていた直交座標において z 軸が特別ではないということについて書かれていますが、最後の部分の x 、 y 、 z を区別できないことが $(2l+1)$ 重の縮退度を説明するところはどういうことを言っているのでしょうか？ **M:** 20s2015 参照
- 20s2026:** 球面調和関数を利用すれば水素原子のモデル以外に何を求めることができるのか **M:** 20210427 の 19s2011 参照
- 20s2027:** 角運動量は円錐形をつくりますが、 s 軌道が球形なことに矛盾はないのですか？ **M:** 本気か？ それぞれ何をどう表しているのか？ // 別なものを表しているのだから、別な形になっても不思議はないのでは？
- 20s2028:** デカルト座標に関して特例的なものはあるのでしょうか。X 座標について説いていたので気になりました。 **M:** 20s2042 参照
- 20s2029:** 振動が多いことと運動量が多いことは同値ですか。 **M:** “振動が多い”とは、どういう意味か？ // 自分で考えて分からないのはなぜか？ // 振動数と運動量との関係は？
- 20s2030:** L と Lz が同一方向を向けないのはなぜか？ **M:** 本気か？ 自分で考えて分からないのはなぜか？ // 幾何学的に考えれば自明では？
- 20s2031:** 球面調和関数において $l=1$ は p オービタルを表していて、その方向性は m の値に依存しているのか。 **M:** 教科書や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは？
- 20s2032:** 波動関数の2乗や角運動量の2乗は大きな意味を持つ。量子力学という学問において、2乗に大きな意味を持つものが多いのはなぜか。 **M:** 多いかどうか、統計をとったことがないので私は知りません。
- 20s2033:** いい質問を考えつくことができませんでした。しかしながら出席確認も兼ねているとのことでこのようなナンセンスな回答をしてしまいました。本当にすみません。 **M:** そうですか。しかし質問が記載されていません。
- 20s2034:** 二つの演算子が可換であると、正確な値が同時に決定できるほかに特徴はあるのか。 **M:** 同時固有関数について、教科書や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは？
- 20s2035:** 図6.1について l と m が増加しても円錐という形が変わらないのは何かと関係があるのですか？ **M:** 本当に同じ円錐なのか？もう少し緻密に考える必要があるのでは？
- 20s2036:** 教科書 P222 に、 x 、 y 、 z の三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あるが、なぜなのでしょう。 **M:** 20s2015 参照
- 20s2039:** 球面調和関数は水素原子以外にも対応させることができるのでしょうか **M:** 20s2026 参照
- 20s2040:** 水素原子の角運動量の値を作図すれば円錐型になるが他の元素では形は変わりますか？また軌道が変わることは運動量に影響を与えますか？ **M:** どちらについても、自分で考えて分からないのはなぜか？ // 教科書と同様の論理で作図すればいいだけでは？ // 物理量の値が必要ならば、普通の手順で計算すればいいだけでは？
- 20s2041:** z 軸が特別でなく3方向を区別できないことと縮退度 $(2l+1)$ の関係とは何か。 $l=1$ の時 $m=0,1,-1$ の3つということ以上の意味があるのか。 **M:** 20s2015 参照
- 20s2042:** L^2 と Lz の正確な値を同時に観測できるとのことですが、 L^2 と Lx、 L^2 と Ly の2成分の場合も正確な値を同時に観測できるのでしょうか。できる場合、Lz には平均値が存在するのでしょうか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // “ z 方向に関して何も特別なことはない(教科書 p.222)”ことを理解できないのでしょうか？
- 20s2043:** 量子数のうち、主量子数、角運動量子数、磁気量子数の3つがオービタルに依存するとある一方、スピン磁気量子数がオービタルに影響しないのはなぜなのか？ **M:** “スピン”とは何か？ // 電子の運動(軌道運動)の自由度はいくつか？ // スピン磁気量子数が、オービタルの形やエネルギーに関与しないのは、式を見れば明らかでは？
- 20s2044:** 角運動量の三成分の説明の式にあった、 $\cot \theta$ とは何ですか。 **M:** 分からなければ、調べればいいのでは？または三角関数の復習が必要か？ // コタンジェント
- 20s2045:** xyz 方向の角運動量のうち、 z 方向だけ固有値を決定できるという点で、 xy と差があるように思いますが、 xyz 方向の角運

動量が等価であることと矛盾は無いのですか。 **M:** 微妙に勘違いの予感。角運動量演算子の交換関係を復習する必要があるのでは？

20s2046: なぜ角運動量の二乗の平方根＝角運動量が量子力学的には微妙なのですか。 **M:** 20s2047 参照

20s2047: 角運動量 L を求める時に、 $\sqrt{L^2} = L$ が成り立つかどうか量子力学的には微妙と仰っていましたがどのような条件をもって微妙と判定しているのですか？ **M:** 量子力学的には「観測されたもののみが実在する」です。「誰も見ていないときに月は存在するか？」という問題です。// L^2 は観測されました (固有値を求めることができました) が、 L についてはそうではない。

20s2048: 粒子のもつ電荷はどのように決定するのですか？// 球面調和関数のプロットで虚数 i をそのまま用いる時、具体的な値はどう導くのですか？ **M:** 普通に測ればいいのでは？ 電子の電荷はどのように決定されたのか？ 読書感想文 (仮) のネタ？// 別に、関数が与えられていれば計算すれば数値が得られるのでは？

20s2049: z 軸は特別ではないのは理解できましたが、逆に特別な軸 (特別な座標) というのは存在するもんあのですか。 **M:** 本気か？自分で考えて分からないのはなぜか？

20s2050: 中性子の数が違う重水素や三重水素のシュレディンガー方程式は、厳密に解けるのですか？ **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？// 軽水素のシュレディンガー方程式と、どこが違うか？

20s2051: 「この 3 方向を区別できないということが (2l+1) 重の縮退度を説明する」 (p.222) とあるが、なぜ説明できるのか？ **M:** 20s2015 参照

20s2052: 運動量の期待値はどこでつかいますか **M:** そりゃ、必要なところで使うでしょ。// 量子化学を勉強すればわかるのでは？
:-p