

- 17S2022:** 8章でパウリの排他原理の基本的な表現として反対称波動関数の話で、二つの電子が同一の4種の量子数をもつと0になるとありますが、4つとも同じになることはないのはなぜですか。 **M:** 教科書を表面的に眺めて分かったつもりになるのではなく、自分の手を動かして計算してみれば良いのでは? スレーター行列式で考えてみれば良いのでは? 二つの電子が同一の四つの量子数を持つなら、その状態を表す波動関数は  $\psi(1,2) = |\phi_{n,l,m,m_s}(1)\phi_{n,l,m,m_s}(2)|$  である。// もしかして波動関数の意味を理解していないのか? 波動関数の二乗が粒子の存在確率に比例するのだが (公理1), もし波動関数の値が恒等的に (空間内のどの位置においても) ゼロなら、粒子の存在確率 (あるいは二電子がそういう状態を取る確率) はどのくらいだろうか?
- 18S2010:** 時間で変化する関数が時間によって行儀よくならない場合に、行儀よい部分の関数は波動関数として使用できるか現実の現象でこのようなことはあるか **M:** 現実になんかあるのか、私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // 波動関数として使用できるかどうか、自分で判断できないのはなぜか? 波動関数として使えるのは行儀のよい関数だと教科書にも書いてあるのだが.....
- 18S2014:** 定理が変更されることはないのでしょうか。 **M:** そりゃ、前提が変われば変わるかもしれませんね。
- 18S2018:** 波動関数において一過有限連続であることが必要であります、それ以外に影響を与える要素というものはありますか。 **M:** 必要ではあるが、常にそれで十分という訳ではない。個別の系では境界条件というものがある。
- 19S2003:** 本日の講義では、映像がぼやけていたため、手書きの講義内容の画像を Teams に上げてもらえると助かります **M:** 講義サポート web ページに置いてあります。// しかし、質問が記載されていません。
- 19S2004:** 公理5で時間に依存するシュレディンガー方程式を使うと書いていましたが、条件によっては時間に依存しないシュレディンガー方程式を使うことはないのでしょうか? **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 教科書3章では何をやっていたか?
- 19S2011:** 一価、連続、有限の条件から外れる関数の中に、量子力学で意味のある関数は存在するのでしょうか **M:** 20S2018 参照
- 19S2017:** 1 価、連続、有限の関数の条件から外れる関数はどのような場面で用いられますか? **M:** 20S2018 参照 // 必要なところで用いられるのでは?  $f(x) = 1/x$  や  $g(x) = x^2 - 10x$  という関数は、どのような場面で用いられるか?
- 19S2022:** もしも四次元空間が存在した場合、波動関数はどうなるのでしょうか。 **M:** 21S2049 参照
- 19S2026:** 講義内で縮退という単語が出てきましたが、これは混成軌道の概念などに用いられている縮退と同じ意味の言葉ですか。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // それぞれで、どんな意味かを考えれば良いのでは?
- 19S2045:** 公理は歴史の中で間違っていると見なされ、途中で訂正され新たな公理を立てることはあったのか。 **M:** 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // 理論体系として、何を公理として何を定理とするかの自由度はあるらしいです。
- 19S2051:** 波動関数が直交している状態とはどのようなになっているのでしょうか。 **M:** 直交は直交。教科書 pp.138-140 や参考書をよく読めばいいのでは。
- 20S2001:** 不確かさに論文として使う際、基準はあるのでしょうか? **M:** 意図不明、意味不明。何の基準の話をしているのか? // 事実として “不確かさは〇〇だった” とか “標準偏差は〇〇だった” と書くことの、どこに何の基準が必要なのか? // もしも基準とやらがあったとして、基準以下に修正することや、基準以上だったから言わない (有ったことを無かったことにする) といったことをするつもりなのか?
- 20S2002:** 量子力学の観点で一価、連続、有限の行儀のよい関数の条件から外れる関数の中で意味のあるものはありますか。 **M:** 20S2018 参照 19S2017 参照
- 20S2003:** 教科書の 125 ページに、本書で考察するすべての系および化学の分野で興味あるほとんどすべての系に対して十分対応できるとありますが、どのような系が対応しないのですか? **M:** 時間に依存する現

象 (ハミルトニアンが時間に依存するポテンシャルを含む) だと何度も言っているのだが、どこが理解できないのだろうか。

**20S2006:** どんな複雑な演算子でも二重縮合すればある程度簡単に表すことができますか? **M:** 質問の意味不明・意図不明 // “二重縮合” とは? “演算子を簡単に表す” とは?

**20S2007:** 状態関数はなぜ規格化された関数だけが許容なのか? **M:** 勘違いの予感. どこにそんなことが書かれていたのか? // 規格化されていない関数はシュレーディンガー方程式の解 (波動関数・状態関数) にならないのか?

**20S2010:**  $H$  を時間に依存しないものとしてシュレーディンガー方程式を変数分離法を用いて解くが、 $H$  が時間に依存するときとはどのようなときなのでしょう。 **M:** 例えば “ポテンシャルエネルギーが時間に依存して変化する” など. 20S2003 参照, 20211214 の 21S2045 参照 // 教科書 pp.563-567 や参考書を読めばいいのでは?

**20S2011:** 仮説 4 において、二次元の場合の平均位置を求めるためには一次元のときと同じように操作を行うことで求めることができるのか。 **M:** 本気か? もしも次元数ごとに異なる計算方法を用いなければいけないなら、新しい状況においてどうすればいいのだろうか?

**20S2012:** 粒子 1 つにつき二つ以上の波動関数がある場合はどういう状態ですか。 **M:** 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // 波動関数は粒子の状態を表しているのだから、複数の波動関数を持つということは、複数の状態をとるということ. 教科書 3 章の一次元の箱の中の粒子の系では、エネルギーの異なる複数の状態・複数の波動関数が得られたが (?)

**20S2016:** 教科書 p.150 に載っているエーレンフェストの定理について、これが運動方程式に似ているのはわかったのですが、どのくらい重要な定理なのですか? **M:** 教科書に載るくらい重要なものでは? :-)

**20S2018:** 行儀の悪い関数は、量子力学の世界では取り扱うことができないのでしょうか。 **M:** 正気か? // 規格化できなかつたり、微分できなかつたりする関数が、どうして (その二乗が存在確率に比例する) 波動関数でありえるのか? シュレーディンガー方程式 (二階線形微分方程式) の解でありえるのか??

**20S2024:** 公理とそこから導出した仮説がもっともらしいことを証明するためには実験などとデータを比較するという以外にはないのか **M:** 本気か? 公理から演繹的に導出された命題なら、その命題は論理的に正しいものなのでは? 導出の過程そのものが証明なのでは? // “証明” という言葉を、どういう意味で用いているか? 数学的な証明、幾何学で二つの三角形の合同の証明、といったような演繹的に厳密に成り立つことを示す証明か、それとももっと大雑把に、例示して “正しそうだ” とを示す” 程度の意味か? // 実験データと照らし合わせて一致していても、偶然かもしれない. その場合には成り立っているかもしれないが、別なデータに対しては成り立つとは限らない. 帰納的に推論してもそれは厳密な意味での証明にはならない.

**20S2026:** 平均値を求める場合は波動関数で観測量を挟んで積分するという方法は理解できるのですが、そもそもなぜそれが平均値を表すのでしょうか。実験値でしょうか。 **M:** 本気か? 実験値は平均値なのか? // 公理 3 に関連して、観測される物理量は固有値に限ると説明したのだが。

**20S2028:** 発散している波動関数は、局在しているが規格化出来ないため、波動関数として成り立たないとしてましたが、観測量の平均を出すときには、規格化されていない波動関数ができました。どういうことですか。 **M:** 本気か? 規格化されていない関数と、規格化できない関数は、同じもののことなのか? // (+) 規格化されていない関数を規格化する (規格化定数を求める) のには、具体的にどんな計算をすればいいのか?

**20S2029:** 粒子が束縛されていない規格化はどうなりますか **M:** 20211221 の 20S2041 参照

**20S2030:** 物理学的要請とは実際にどのような内容なんですか? **M:** 本気か? // 物理学的にあり得ないものは排除する. だって私たちは物の理 (モノノコトワリ) を知りたいのだから、自然界で起こることが興味の対象なのだから。

**20S2031:** 粒子が観測される位置は平均値で確率が高いのか。もしそうならなぜそうなるのか。 **M:** 本気か? 講義で教科書 3 章の一次元の箱の中の粒子が  $n=2$  の状態の時も含めて説明をしたのだが、理解されていないようで残念。

- 20S2033:** 多価関数がいけない理由として絶対値の二乗が確率密度関数であることが分かりました。しかし観測確率が 2 つあることがいけない理由が分かりません **M:** 正気か? // たとえば, ある地点における粒子の存在確率が 0.1 % であり, 同時に 10 % だったとして, それってどういうことか? 論理的にありえることなのか? 結局, 粒子の存在確率はいくつなのか?
- 20S2035:** 1 価、有限、連続である行儀よい関数ではない関数は量子力学の観点から考えると、無意味な関数となるのか? **M:** 20S2018 参照
- 20S2036:** 教科書 P144 の、1 を掛ける恒等演算子を導入したのはなぜですか。 **M:** 本気か? 等号の意味を理解していない予感 // 等号の両辺は同じものでしょ? “100 g = 100 m” は両辺が 100 という同じ大きさであっても, 質量と距離は異なるものなので, 誤った式である. 4.41 式も両辺が同じもの (演算子) でなければならない. // 何も加えない +0 や, 何も拡大しない  $\times 1$  が存在するのはなぜか?
- 20S2037:** [前略] 場の量子論は連続場を量子化し、その観測量がなぜか粒子の波動関数を用いた期待値表現に似ている なぜ似てるのですか? **M:** 勉強すれば分かるのでは? // 同じ量子論だからでは?
- 20S2038:** 平均値を求める際なぜ規格化されてる必要があるのでしょうか。 **M:** 規格化された波動関数と規格化されていない波動関数とで, 同じ式  $\langle a \rangle = \int \psi^* \hat{A} \psi d\tau$  を用いて求めた平均値の計算結果はどうか?
- 20S2039:** 「1+1=2 を証明せよ」という問題があるようなのですが, そもそも足し算や「1」、「2」のような数は定義であり証明できないし、ましてやこの数式自体が証明困難な公理なのではないかと思うのですがどうなのでしょう? **M:** どういう公理系で話をするのか? 「1」や「2」が定義だというのは、どのように定義されているのか?
- 20S2040:** 意味のある関数であるためには公理に当てはまっていることが前提であるが当てはまらない場合、例えば行儀の良い関数ではない場合などでも意味のあると言える関数が出てくることはありますか。また出てくる場合、条件などは存在しますか。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // 実は一次元の箱の中の粒子において, 箱の両端で波動関数は箱の外 ( $\psi(0) = \psi(L) = 0$ ) とつながるが, 導関数はつながっていない.
- 20S2041:** 扱う波動関数は有限でなければならない。ということについて、規格化ができないとか自然がそうになっているとかでは直接結びついていると考えにくい, ”でなければならない”理由を数学的に記述できるのでしょうか。 **M:** 日本語で記述できるのであれば, 数式という言葉で記述することも可能なのでは? 自分で考えてみないのでしょうか? // たとえば積分  $\int \psi^* \psi d\tau$  が発散する場合には規格化できないが, これが数式での表現なのでは? あるいは特異点では関数の微分ができないとか, 連続でないとき右極限と左極限が違ふとか, 数学の基礎 (解析学) を勉強すればいいのでは? でもって, そういう関数は二階線形微分方程式の解にならないのでは? (これも数学的な表現では?) (ただし  $\pm\infty$  で発散するだけなら, 微分方程式の解になりうるが.....) (また, 全事象の確率 (必ず起こる事象の確率) が 1 であるのは, 自然ではなくて数学だよな?)
- 20S2042:** 公理 5 がなかった場合、時間に依存しないシュレーディンガー方程式は存在しないのでしょうか。また、公理は導出などで求められていないのに公理が正しく使えるというのはどのようにしてわかったのでしょうか。 **M:** 公理 3 は, ハミルトン演算子に対する固有値方程式の存在を述べている. これは時間に依存しないシュレーディンガー方程式そのもの. // 公理 5 が存在しなくても, 数式の存在・非存在とは無関係では? 時間に依存するシュレーディンガー方程式の成り立つ根拠を別に求めなければいけなくなるだけの話なのだが..... 教科書 p.79 には何と書いてあったか?
- 20S2043:** 波動関数の二乗が確率であると、解釈されるのはなぜであるのか? **M:** 教科書 p.87 の記述をよく読めばいいのでは? その記述の何が分からないのか?
- 20S2046:** 公理とは、あることを仮定した上でそれが実際に対応しているから適用されるものということで良いのでしょうか。 **M:** 言葉の意味が分からないのなら, 辞書を見ればいいのでは?
- 20S2047:** 量子力学の公理は証明することは出来ないことについて、あれは今までの研究から導き出した、このように考えればうまくいく、という経験則になるのですか? 自分はこれらがどのようにして導き出されたのか想像もできなかったです。また、このように仮説を定めて、うまくいかなかった事例がないのも不

思議に思いました。 **M:** “経験則だから証明できない, 証明できないから公理という” と考えているのであれば, 全く違う. “このように考えればうまくいく” というのも経験則ではない. // また, 物理理論は初めから現在知られているような形で現れたわけではない.

**20S2052:** 演算子を用いることのメリットはなんですか **M:** 演算子に関するありとあらゆる数学的ツールを使える.

**21S2001:** 「行儀よく」という言葉に違和感があるのですが、どういう意味で解釈すればいいのかわかりません。

**M:** そうですか. しかし質問が記載されていません. // 教科書 p.128 の記述の, どこが理解できないのか?

**21S2002:** 相対性理論を用いて考えると、電子のスピンは光速より速いため質量を持たないと聞いたことがあるのですが、電子の運動エネルギーなどの観測量に対する線形演算子は存在するのでしょうか。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // 相対性理論では, 質量を持たないものであっても光速を超えることはできないのでは? // 電子のエネルギーは, 電子についてのシュレーディンガー方程式を解けば求めることができるのでは?

**21S2003:** 1 価、有限、連続の行儀のよい関数に  $e^{-1} (0, \infty)$  がありますがこの関数は無限という点で条件から外れていないのですか? // また行儀のよい関数の条件から外れる関数はどのような場面で使われますか? **M:** 自分で自分の言っていることの意味を理解しているのか? // 質問で取り上げられている関数は有限なのか無限なのか? // そもそも関数なのか? /// 19S2017 参照

**21S2004:**  $\oint \psi^* \psi dx = 1$  の積分範囲はいつでも全空間でやらなければいけないのですか? **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 教科書 p.127 をよく読めば分かるのでは? ここで, 必ず成り立つ全事象 (確率 1 の事象) は何か?

**21S2005:** 波動関数で  $\psi(x)$  は行儀よくなければならないということがわかりましたが、連続でも微分不可能な場合があるときは波動関数ではないということですか? **M:** 20S2040 参照

**21S2007:** 行儀よい関数が一価で連続で有限であるということは、行儀よくない関数は、多価で不連続で無限であると思うのだが、行儀よくない関数はどのようなときに使われるのか。 **M:** 20S2018 参照

**21S2008:** “波動関数が行儀良い関数でなければならない” についてです。有限でなければならない理由がいまいち理解できないのですが、無限では何故だめなのですか? **M:** 正気か? (確率)=(個別事象の数)/(全事象の数) で, 全事象の数に対応する全空間に渡る積分が無限大だと, 確率はどうなる?

**21S2009:** 宇宙が膨張する速度は光速よりも速いとされていますが、それだとアインシュタインの相対性理論に反することになりませんか? **M:** 勉強すれば分かるのでは? // 空間の膨張速度と空間内の物体の移動速度を同等に扱うのはどうかと.

**21S2010:** 講義中の言葉で、「自然は連続が多い」というような旨の内容をおっしゃっていたと思うのですが、先生はこれは何故だとお考えになりますか。 **M:** あなたはどう考えるのか? 自然は連続だと考えるか? もしそうなら, それはなぜだと考えるか? /// 経験から私たちは自然が連続的に振舞うことを知っていて, したがって新しく体験することもそうだと考えているので, その期待を裏切るような突飛なことが起こると非常に驚く. (その点から, 量子力学の発見は人類に非常に大きな驚きをもたらしたことだろう.) 上述の経験とは具体的に何だろうか? もちろんボールが飛んでいくときにワープ等することなく連続的に位置を変えていくような軌跡をとることもそうだが, もっと根本的に, 過去から現在に至るまで, 圧倒的に連綿と自然が存在し続けてきていることが大きいのではないだろうか. すなわち私たちは自然の恒常性を身をもって体験していると言えるだろう. もう少し科学に寄せた言葉で言えば, 自然は概ね個別の系のエネルギーが最も小さくなる方向に変化し, エネルギーが最も低い状態を“安定な状態”という. すなわち個別の系は, それが安定な状態であれば, それ以上の変化はしないのが普通である. そこで小さな摂動がかかったとしても, 系の状態はほとんど変化しない. その小さな摂動によって系のエネルギーが少し増加したとしても, 系はその余分なエネルギーを放出して再び安定な状態になろうとする. そもそもそれが力の定義であるし ( $f = -\text{grad } V(x)$ ), 安定な状態というコトバの意味でもある. このような自然観から, ニュートンはその運動の法則のひとつとして運動方程式を発見したが, 彼は同時に微分・積分の発明者でもある. これは自然が微分可能, すなわち連続でなめらかであることを暗に含んでいる. 物理理論とはいえ, 人間の思考の産物で

あるので、人の思想的背景を反映せざるを得ないのである。

**21S2012:** 教科書 P.142 に、可換な演算子に対応した物理量は任意の精度で同時に測定できるとある。正確に同時に測定できる場合、任意の精度とは記載しないと思うが、これは正確には測定できないということですか。 **M:** 国語力不足か？ // 任意の精度と記載してはイケナイ決まりはないと思うのだが？ 任意の精度とは、例えば有効数字 1 桁でも、無限の精度 (正確な値) でも、好きに得られるという意味では？

**21S2013:** 量子力学演算子が線形性に依存していることについて二重縮退の場合以外でも考えることができるのでしょうか **M:** 質問の意図が分からない。 // 縮重してもしなくても、量子力学的演算子が線形であるのは 公理 2 を勉強すれば分かるのでは？

**21S2014:** 規格化されていない時の波動関数から得られる平均値の式は、なぜ粒子の存在確率を表す式で割っているのでしょうか？ **M:** 本気か？ 波動関数が規格化されていないとき、その式の分母はいくつになるか？ 20S2028 参照

**21S2015:** 古典力学と異なる振る舞いをする量子力学が 観測量=線形演算子 となり、関連付けられるのはなぜですか。 **M:** 誤解の予感。 // 古典物理学的振舞いをする系でも量子力学的振舞いをする系でも、観測量は観測量であることに変わりはない。量子力学の理論においても、観測量と線形演算子は等しくない。公理 2 をよーく勉強する必要があるのでは？

**21S2018:** 式 4.2 について、どうして 1 になるのでしょうか **M:** 教科書でその式の直前の説明文 “粒子を空間のどこかに見いだす全確率は 1 になるはずである。” のどこが理解できないのか？ // 私たちは 1 粒子の系、すなわち空間内に 1 個だけ粒子が存在している系を考えている。ということは、空間内のすべての場所を調べれば、必ずそのどこかに粒子は存在している。必ず起こる事象の確率は.....

**21S2019:** 「 $\hat{A}$  に対応した観測値の測定値は必ず固有値のどれかになる」という法則の理由が分からなかったです。 **M:** そうですか、しかし質問が記載されていません。 // 物理量は量子化されていて離散的な特定の値しかとらない。その離散的な値は、もちろんその物理量に対応した演算子の固有値のこと。

**21S2020:** 行儀良いとは具体的にどういう事ですか **M:** 本気か？ 教科書 p.128 の “これらの要請をまとめて、 $\psi(x)$  は行儀よくなければならないという。” を読んでいないのか？ この文のどこの意味がわからないのか？

**21S2021:** P136 にある時間に依存しないシュレーディンガー方程式に使われている分離定数  $E$  が意味するのはなんですか？ **M:** 本気か？ 自分で考えて分からないのはなぜか？ // 教科書の 4 章や表 4.1 や参考書をよく読めば分かるのでは？

**21S2022:** あたかも公理 4 は公理 3 から派生したもののように教科書に記載されているが、公理は「大前提としておくようなもの」という解釈でよいのでしょうか。教科書がミスリードしてるようにも思われる。**M:** “公理” という言葉の意味が分からないなら、辞書や専門書を見ればいいのでは？ // 関連し、派生したもののように記載されているが、平均値の求め方を公理 4 に示したようにして求めなければいけないという必然性までがあるわけではないし、必然性について演繹的な証明を行なっているわけでもない。 // 公理は論理の前提としておくものではあるが、正しいと考えられる命題でなければ意味がない。明らかに誤った命題を公理として採用してしまえば、そこから導き出される定理に何の意味があるというのだろうか？ しかし公理の中には、一目で明らかに正しいと判断できないようなものもある。その時にその正しさは、公理なので、他の公理や定理から証明されるようなものでもない。そういうときであっても、その公理がもっともらしいと思えるような説明はあっていいだろう。というか、必要だろう。教科書ではそれを述べている。

**21S2023:** 行儀の良い関数の条件を満たしていない関数はどのような時に用いられるのですか。 **M:** 本気か？ 19S2017 参照

**21S2024:** 箱の中の粒子が満杯になっている時でも存在確率を満たしますか。 **M:** 本気か？ 満杯とはいくつのことか？ 満杯であるか否かはどうやって判断するのか？ 存在確率とは、何のどういう存在確率の話か？

**21S2025:** 光の二重性について 量子の波動方程式は、量子の存在確率を表していると聞いたことがあるのですが、光の横波はあくまで存在確率としての波なのですか？ **M:** 本気か？ 物理学の基礎 (電磁気学) を復習する必要があるのでは？

**21S2026:** 一価・連続・有限の行儀のよい関数の条件から外れてしまう関数は、どんなときに用いられるので

すか **M:** 19S2017 参照

**21S2030:** 固有値を実数にする際にエルミート以外の演算子を用いてもできるのか **M:** “エルミート演算子の固有値は実数である”ことの証明をよく吟味すれば、“固有値が実数な演算子はエルミート演算子である(前述の命題の逆)”が成り立つかどうか、ヒントが得られるのでは?

**21S2031:** 同じ周期の無限に続く波は積分した値が決められないと思うんですがこのような波動関数はどのように規格化するのですか **M:** それはどんな粒子を表しているか? // 20211221 の 20S2041 参照

**21S2032:** 一次元なら  $x$ , 二次元なら  $(x,y)$  ですが、四次元ならこのような記号は存在しますか。また四次元はどのような記号を置きますか。 **M:** 別に、アルファベットの別の文字でも,  $x_1, x_2, x_3, \dots$  でも好きにすればいいのでは?

**21S2033:** 公理 2 と公理 3 に関して観測量という言葉が出てきましたが同じものなののでしょうか? **M:** 何と何とが同じという質問か? // 自分で判断できないのはなぜか?

**21S2034:** 公理は勝手にこうだと決めてしまっているから、何かしらのズレが生じてくる気がするのだが、そういうことは無いのか? **M:** そりゃ、現実離れた公理とか矛盾した公理を考えることは可能でしょうネ

**21S2036:** 波動関数を考えるにあたって、1 価祉  $n$  祉  $l$  造箸い 魴鋳鯔 燭垢發里鯢咆靴茲ご愼瑤箸靴沅靴 燭 召両賁未砲 い氏咆靴茲ご愼瑤任△襪燭垢両魴 儂鋳襪海箸呂△蠅沅垢 **M:** 本気か? 専門用語の意味(定義)が場面によって変わること、何かメリットはあるだろうか? あるいはデメリットは?

**21S2037:** 時間に依存するシュレーディンガー方程式は、時間とエネルギー間の不確定性原理に反しないのですか? **M:** どうして不確定性原理に反すると考えたのか? 時間に依存しないシュレーディンガー方程式は、位置と運動量との間の不確定性原理に反するのだろうか?

**21S2039:** 二重に縮退した固有値問題は注意しなければならないとおっしゃっていましたが、 $\Phi_1$  と  $\Phi_2$  の他に  $c_1 \Phi_1 + c_2 \Phi_2$  も同じ固有値を持つことで結局何に注意しなければならないのでしょうか? **M:** 本気か? 勉強してよーく考える必要があるのでは? // 結局、固有関数は何か? (二重縮重なので、異なる状態を表す異なる固有関数が二つあり、それ以上は存在しないはず(もしも二つ以上存在するのなら二重縮重じゃなく三重四重縮重などとなるはず))

**21S2040:** 日常生活でエネルギーが連続的に観測されるのは使用している単位のオーダーが量子化されている粒子のエネルギーより大きく、そのエネルギーの間隔を観測できるほどの精度で観測しているからということか。そう考えると、量子化とはミクロの世界だけではなく、マクロの世界でも起こると考えていいのか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか? // 私たちは日常的に様々なマクロな物体の振舞いを見ているが、その物体はミクロな原子や分子から構成されている。マクロな物体の性質を観測する時、それを構成している原子や分子は量子力学的な振舞いをしないのだろうか? 原子や分子は、古典か量子か、測定の種類を察知して、その振舞いを変えるのだろうか? // 教科書 p.19 の例題 1.6 についてよーく考えてみれば良いのでは?

**21S2041:** 量子の世界にはトンネル効果や量子もつれなどの物理法則を越えるようにすら思えるような現象がありますが、そのような現象はどのような基準によって今日の講義の波動関数のように「物理的に許容」されているのでしょうか。 **M:** ええと、何が問題なのかが分からないのだが、普通に論理や物理的常識に従って判断すればいいのでは?

**21S2042:** 量子力学演算子に虚数  $i$  が使用されていますが、計算結果に  $i$  が残ってしまった場合どう処理するのでしょうか? **M:** 杞憂では? 実際に計算してみれば良いのでは? 一体全体、どのような時に  $i$  が残るというのか?? :-)

**21S2043:** p137 の文章で、その系の分光的性質を表現するだろうという文の分光的性質とは何ですか。 **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // 教科書に“一つの定常状態から他の定常状態への遷移としてその系の分光学的性質を~”と状態間の遷移の話なので、もちろん吸収・発光スペクトルでしょ。水素原子のボーア模型の所での議論を忘れたのか?

**21S2044:** 観測できない動的関数はあるのですか **M:** 意味不明。“動的関数”とは何のことか?

**21S2045:** 公理は導き出されるものではないとのことでしたが、ではどのようにして公理が正しいと決められ

たのですか？ **M:** 微妙に勘違いの予感 // 論理体系は公理を正しい前提と置いて組み立てられている。

**21S2046:** 定常状態に対するシュレーディンガー方程式では、粒子の存在確率密度が時間に依存しないことから、方程式は時間に依存せず、この方程式の固有値は、粒子の全エネルギーを表し、規格化されると思うのですが、これは公理 5 に反すると思います。時間に依存するシュレーディンガー方程式ではなく、依存しないシュレーディンガー方程式から規格化されるのはなぜですか。 **M:** 定常状態に対するシュレーディンガー方程式について、これのどこが公理 5 に反するというのか？ 時間に依存しないシュレーディンガー方程式は、教科書 p.136 に示されるように、時間に依存するシュレーディンガー方程式から変数分離法により時間変数を取り除いて得られる。ここに数学的な矛盾は一切ない。// もしかして“規格化”の意味を誤解しているのでは？ 質問文中での“規格化”の使い方からは、どのように理解  $\hat{H}\hat{\psi}$  誤解しているのか全く想像できないのだが、使用法に違和感はある。

**21S2047:** 行儀のよい関数があるということは、行儀の悪い関数も存在するのか。それなのか、行儀のよい関数と普通の関数のみしか存在しないのか。 **M:** “病的な関数”というものがある。

**21S2048:** 教科書 p127-128 で述べられている行儀よいという定義は、述べられている要請が一つでも欠けたらどうなるのか。 **M:** 本気か？ // 命題  $A, B, C$  について  $A \cap B \cap C$  と  $A \cap B \cap \bar{C}$  の真偽は同じか？

**21S2049:** 波動関数を 4 次元以上に拡張することは可能ですか。 **M:** 本気か？ 自分で考えて分からないのはなぜか？ 自分で計算してみれば分かるのでは？ // “波動関数の”次元数とは何か？ 粒子の存在する“空間”の次元数と常に同じことか？ // 多粒子系について教科書 p.126 の説明を考えると、“波動関数の”次元数はいくつになるか？

**21S2050:** 無限遠の有限の大きさの区間内で粒子を見いだす確率のある系はありますか **M:** 意味不明。“無限遠の有限の大きさの区間”とは、区間の大きさは有限なのか無限なのか？

**21S2051:** 公理 A というものを証明できてしまえば、その公理 A は公理では無くなるのですか？ **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか？ // “公理”とは？ 公理と定理の関係は？

**21S2052:**  $\hat{A}$  に対応した観測量の具体的な測定値は必ず固有値のいずれかになり、平均値は決まった値になりますが、どうして測定する度に物理量はランダムに決定されるのでしょうか。 **M:** 本気か？ 例えば平均値が 0.5 で観測される値が 0 か 1 の二通りのとき、同じ値が連続して出るという規則があったとすると、二回の測定なら 01, 10 回の測定なら 0000011111 との測定結果になる。さて二回目を測定するとき、全部で何回測定するつもりなのか (二回でおしまいなのか、それとも全部で 10 回測定するのか), あらかじめ自然の系が知る方法があるだろうか？ // そんな方法はないのにもかかわらず平均値が 0.5 になるということは次に出る値が 0 である確率は  $1/2$  であるということ。つまり 0 と 1 がランダムに出るということ。