

- 17S2022:** [前略] トンネル効果の場合、箱の中の粒子問題ではどのようになりますか? M: 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // 状況を整理して、図解してみればいいのでは?
- 18S2003:** 天下に与えられた式の産物として箱の中の粒子の存在確率がゼロになるならある程度理解はできそうですが、自然に導き出されたものからこのような結果が生まれるのはなぜですか? そういうものとしてインプットしなければいけないのでしょうか? M: なぜ天降りだと理解できるのか? 自然に導出なら理解できないのか? // 理解するとはどういうことか?
- 18S2014:** 量子力学において、振幅の意味することとは何ですか。 M: 本気か? 講義で説明したのに理解されていないようで、残念。 // 波動関数は何か? // 教科書 p.87 や参考書をよく読めばいいのでは?
- 18S2018:**  $4\pi$ 電子系で励起が起きた際量子数は 3 と見るのか 2 とみるのかどっちでしょうか。 M: 本気か? // その量子数は何を表しているのか?
- 19S2003:** 期末レポートや読書感想文等提出系の課題は加点法と減点法のどちらで採点していますか? M: それを聞いてどうするというのだろうか? // 例えば減点法で白紙答案は、誤りが書かれていないということで満点なのか? それとも必要なことが書かれていないということで百点減点で零点なのか? (後者であれば、加点法の採点とどこがちがうのだろうか?)
- 19S2004:** 波動関数は連続でなければならないのに粒子が存在しない場所があるとはどういうことですか? M: 本気か? 正気か? 粒子が存在しない点があると波動関数は不連続になるのか?
- 19S2005:** 波動関数の二乗には節が現れ粒子が存在しないということを示しているが、ビー玉のように例を考えた場合には粒子の存在確率が 0 の場所はないという矛盾はどう説明されるのですか。 M: 自分で考えて分からないのはなぜか? そもそもそれは矛盾なのか? // ビー玉は量子力学的に振る舞う粒子なのか?
- 19S2011:** エネルギーの値が、離散的であることは自然であるといえるのでしょうか? M: 20S2047 参照
- 19S2017:** 一次元の箱の中で両端の他の粒子が存在しない部分では粒子はどう通過しますか? M: 20S2002 参照
- 19S2022:** 量子数が大きくなると粒子の存在確率が 0 になる位置が増え続け、最終的には全体が 0 になってしまうことはないのでしょうか。 M: 節と節の間には粒子が存在する場所がある。節と節以外の場所と、どちらが多いか?
- 19S2026:** 波動関数の解釈について、シュレーディンガーは電子かその領域全体にわたり広がっているとイメージしていたが、それでは論理的に難点があるとされたとありましたが、具体的にはどのような難点があったのでしょうか。 M: 本気か? 自分で考えて分からないのはなぜか? // 空間は分割できるが.....
- 19S2045:**  $n$  が量子数であることは自然に導かれたことを授業で教わったが、それ以外で自然に導かれたものはどのようなものがあるのか。また、それは稀なことであるのか。 M: 水素原子の波動関数の角度部分に登場する量子数  $l, m$  も、有意な解であるために必要なことがある。
- 19S2051:** 箱の中の粒子の存在が確率的にみる以外に有用な方法はないのでしょうか M: 確率的に考えるのがボルンの解釈であり、それが一般的である。 // 量子力学には別の解釈もあるが、非主流である。 // 21S2028 も参照
- 20S2001:** 一次元の箱の中に 2 つ以上の異なる質量の粒子が存在した時に、お互いに干渉し合うと思うのですが、それぞれの波動関数はどのようにして求めたら良いのでしょうか? M: 別に、その系についてのシュレーディンガー方程式を作って解けばいいのでは?
- 20S2002:**  $n=2$  のとき  $x=L/2$  のところが節となり粒子が存在する確率が 0 となっていたが、粒子が  $0\sim L/2$  間にある場合、節を通過して  $L/2\sim L$  間に移動することができるのか。 M: 量子力学的粒子は、古典的な粒子のように、軌跡を描くような運動はしない。
- 20S2003:** 一次元の箱の中の粒子モデルは直鎖の共役炭化水素中の  $\pi$  電子に適用できるとありましたが、節の数が増加すると  $\pi$  結合は切れやすくなりますか? M: 教科書 9 章や参考書をよく読んで勉強すれば分かるのでは? //  $H_2$  分子では、結合性オービタルに比べて反結合性オービタルは、エネルギーが高くて不安定でありまた原子間に節を持ちます。原子間に節があれば、その分だけ原子間の電子密度が少ないことにな

り、これは原子間の結合に関与する電子が少ないことになります。すなわち結合は弱いと考えられます。

- 20S2006:** 量子数が無限大まで大きくなれば、存在確率密度がゼロになる回数が増えて、ほとんど存在しない、ということになる可能性はあるのでしょうか？ **M:** 21S2052 参照
- 20S2007:** シュレディンガー方程式から求められたエネルギーの  $n$  は量子数であるとわかったが、この量子数とは具体的に何を表しているのか **M:** 量子数は量子数で、それ以上でもそれ以下でもない。// 量子数は状態を識別する簡単な整数であって、エネルギーなどの議論の対象としている物理量がその量子数を用いて離散的な値として表現される。
- 20S2010:**  $\psi$  の二乗で粒子の存在確率が表されるのはどうしてですか。 **M:** 21S2028 参照
- 20S2011:**  $n$  は量子数であることがわかりました。量子数には主量子数、方位量子数、磁気量子数がありますが、主量子数以外の二つの量子数はエネルギーを考える上で使う必要はないのか？また、それはなぜか。 **M:** 微妙に勘違いの予感。// “主量子数、方位量子数、磁気量子数” はどこで用いられる量子数か？ありとあらゆる場合に用いられる普遍的なものなのか？
- 20S2012:** 存在確率が 0 の点を粒子は通過しますか？ **M:** 20S2002 参照
- 20S2016:** 教科書 p.87 に波動関数はある意味で粒子の振幅を表していると書かれていますが、これは波動関数が物理的な意味をもたないということと矛盾しているのではないのでしょうか？ **M:** 断言するのではなく“ある意味で”と言っている。ある意味とはどんな意味なのだろうか？// また“粒子の振幅”とは何だろうか？物理的な意味を持つ実体が存在するだろうか？
- 20S2018:** 粒子の存在確率が節ではゼロになるとおっしゃっていましたが、節とは  $X$  座標でいうどのような点を言うのですか。 **M:** 何を期待した質問なのか想像できない。// 節は波動関数の値がゼロな点、波動関数の符号の正負が切り替わる点であって、それは  $x$  座標が何か特殊な値だという訳ではない。(箱の中の粒子についていえば、対称性からくる要請はあるが...)
- 20S2021:**  $E_n = h^2 n^2 / 8ma^2$  とすると  $n=1,2,3...$  によって離散的な値をとりますが、このエネルギー間隔はより粒子が軽く、より狭い空間に閉じ込めると大きくなりますか？ **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？// エネルギーが数式で与えられているのだから、それに基づいて考えればいいのでは？(エネルギー差は  $\Delta E = E_{n+1} - E_n = \dots$ )
- 20S2024:** 箱の中の粒子についてシュレディンガー方程式をたて、解きましたが、箱の中に粒子がないということを考える場合、それは箱の中が真空ということとは違うのでしょうか **M:** 本気か？自分で判断できないのはなぜか？// ここで“真空”とはどんな意味か？
- 20S2026:** 私が読んだ参考書には箱の中の粒子が古典力学的に不十分なエネルギーしか持っていなくても壁をすり抜けて出てしまうことがあると記述されていました。これはどういうことでしょうか。エネルギーが不十分でも進むことができるのでしょうか。 **M:** 書かれている通りなのだが、何が分からないのか？// 古典力学的には壁の高さを越えるエネルギーが無ければ壁を越えて向こう側に行くことはできない。しかし量子力学的粒子ならば、エネルギーが不十分でも壁の向こう側の領域にも存在する。これは壁を通りぬけたと考えるしかないのでは？
- 20S2028:** 波動関数が三角関数を含まないことはありますか？また三角関数を絶対に含む場合、波動関数の量子数は絶対に自然に決まると思うのですがどうでしょうか？ **M:** そりゃあるかもしれませんが、勉強すれば分かるのでは？// 調和振動子や水素原子のオービタルなど
- 20S2029:** 1次元の無限大の井戸型ポテンシャルに不確定性原理の式を計算したら、量子数が 1 の時しか成り立たないのは物理的な意味はありますか **M:** 何かの勘違いでは？具体的にどんな計算をしたのだろうか？// 教科書 pp.93-97 や参考書をよく読めばいいのでは？
- 20S2030:** ポテンシャルエネルギーの平均値はどのような場合でも半分になるのですか？ **M:** 本気か？// 自分で計算すれば分かるのでは？
- 20S2031:** 波動関数のように物理的意味のないものに何か作用させると物理的意味をもつことは物理学的によくあることなのか。また、なぜそのようなことが起こるのか。 **M:** 何かの勘違いでは？// “波動関数のように物理的意味のないものに何か作用させると物理的意味をもつ”とは、何のことを言っているのか？

- 20S2033:** エネルギーが散乱することがあるとすると量子化しているといえるのですか **M:** 意味不明. “エネルギーが散乱する”とは何のことを言っているのか?
- 20S2035:** 自由粒子の存在確率が場所によって値が異なるのはなぜか? **M:** なぜと言われても, 量子力学によるとそうなっていることがわかる. それが自然なのだから仕方ないのでは? // 量子力学系は量子数が大きい極限では, 古典力学で予想される結果になる. 教科書 pp.92-93 や参考書をよく読めばいいのでは?
- 20S2036:** 量子数が自然に出てくるのはシュレーディンガー方程式の目覚ましい特徴でプランクとボーアの段階では量子数が場当たり導入されたとあるが, やはり自然に導入される方が得られる解の精度が高かったのか. **M:** 本気か? // 自然の振る舞いや自然の法則に人の意志が介入するのか? 人間原理 (?)
- 20S2037:** 井戸型ポテンシャルは離散的なエネルギー状態しか獲得できないですが, 井戸にそれ以外のエネルギーの粒子を入れたらどうなりますか? **M:** “離散的なエネルギー状態しかとり得ない”の意味を理解していないのでは? // 裏を返せば, 決められた以外のエネルギーの粒子は存在できない.
- 20S2038:** 1次元の箱の中で両端のほかの粒子が存在しない部分を粒子はどう通過するんですか? **M:** 20S2002 参照
- 20S2039:** 電子の存在確率はなぜ場所によって異なるのでしょうか? **M:** 20S2035 参照
- 20S2040:** 波動関数の物理的意味は全く無いわけでは無く波動関数の二乗が粒子の存在確率に比例するという意味があるのに物理的意味は無いと言い切ったのはなぜですか. **M:** これ以上は言葉遊びとしか言いようがない. // 波動関数の二乗に意味がある場合, 波動関数に直接的に意味があると言えるのか? // 波動関数の定数倍もまたシュレーディンガー方程式の解になっている. 意味のある波動関数とは何だろうか?
- 20S2041:** シュレーディンガー方程式を解いて求めたエネルギーや, その他量子力学の数式は不確定性原理より完全に正確ではないが人間ができる観測事実と矛盾しない範囲で正しいと結論づけているにすぎないと思うが, 完全に理解される日はくるのだろうか. くるとしたらどんな方法が考えられるだろうか. **M:** 微妙に勘違いの予感. // シュレーディンガー方程式の解は, 数学的に正確な解である (場合によって, 厳密解なのか近似解なのかの違いはあるが). そしてそれが観測事実と矛盾がないので, 物理的な世界を正しく記述していると考えられている (相対論的効果を除く). もちろん不確定性原理とも矛盾は無い. その意味では完全に理解されている.
- 20S2042:** 運動エネルギーが 0 でないのに粒子の存在確率が 0 となる節では, 境界条件と同じで節を越えられないということなののでしょうか. もしくは, 節だけ飛び越えて移動するということなののでしょうか. **M:** 20S2002 参照
- 20S2043:** 全空間の中に, 粒子が一個存在するという規格化の意味は何であるか? **M:** 言葉通りの意味なのだが, 何が分からないのか? // (+) 一粒子の系を考えているので, 全空間内に粒子が一個存在していて, 他二流紙な存在していない. そのとき全空間内に粒子が (一個) 存在する確率は, 1 であるのは当然だと思うのだが.....(?) で, 全空間内の特定の一部の空間内に粒子が存在する確率は, 全空間に存在する確率を基準にして相対的に測られる. このとき基準が 1 であれば話が簡単でしょ (相対値がそのまま絶対的な確率なのだから比を計算する手間が不要).
- 20S2046:** 基底状態でエネルギーはゼロではないとおっしゃっていましたが, 絶対零度でも運動しているのでしょうか. **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 系のエネルギーと温度との関係は? 系のエネルギーはどうなっているか?
- 20S2047:** エネルギーは離散的である, とありますが, それがとびとびの値をとることは自然なことと言えるのですか. **M:** 本気か? // 例えば水素原子の発光スペクトルが離散的なのは, 自然現象ではないというつもりなのか?
- 20S2052:** 箱の中の粒子が実際にサインカーブを描いて運動しているところを実際に見ることができますか **M:** 本気か? // 粒子が実際にくねくね運動しているとしたら, 粒子の進行方向を曲げる力は何か? 一次元の箱の中の粒子が, どのようにくねくね運動するのか?
- 21S2001:** 存在確率が場所によって変わるのはなぜですか? **M:** 20S2035 参照
- 21S2002:** 波動関数の節には粒子が存在しないと説明がありましたが,  $n = \infty$  となるとき, 粒子が無限大に存在

しながら無限大に存在しないということになると思うのですが、どう考えればよいのでしょうか **M:** 意味不明。“粒子が無限大に存在”するとはどういうことか??

**21S2003:**  $n$  が自然数の以外では量子はいないということですか? **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? //  $n$  が自然数でないとき、波動関数はどうなっているのか? そのような粒子はあり得るのか?

**21S2004:** 箱の中に閉じ込めていても、存在確率がゼロの時はある場所では必ず粒子がないということですか? **M:** 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 量子力学に従えば、そういうことになる。

**21S2005:** 今回の講義で、「ミクロな世界において粒子は運動エネルギーが 0 にならない、すなわち静止しない」と言っていたが、どういうことか? **M:** 言葉通りなのだが、何が分からないのか? // 基底状態 (最もエネルギーが低い状態) のエネルギーがどうなるかは、求めることができ、式で与えられている。それが最も低い値をとるときにいくつになるかも、計算すれば分かり、ゼロにならないことも分かるのでは? そしてポテンシャルがゼロ  $V=0$  なので、エネルギーはすべて運動エネルギーということになる。ゼロでない運動エネルギーということは、運動速度がゼロでない、すなわち静止せずに動いているということになるのは当然では?

**21S2007:** 箱の中の粒子はエネルギーをもつため、縮重が起こると思うのだが、主量子数が大きくなると、縮重をして基底状態になるまでの時間は長くなるのか。また、基底状態でも縮重が起こることはあるのか。**M:** 本気か? 微妙に誤解の予感。// “縮重”という言葉の意味を誤解している予感。

**21S2009:** ハイゼンベルクの運動方程式とシュレーディンガー方程式の 2 つの式を 1 つにまとめれば、電子の存在確率と遷移する確率を同時に求めることもできるのでしょうか。 **M:** 自分で考えて計算してみればいいのでは? // ちなみに、ハイゼンベルクの運動方程式とは何か? シュレーディンガー方程式との関係は?

**21S2010:** 本日の講義で学んだ内容の中に、基底状態の粒子にも運動エネルギーがあり、静止していないという話がありました。しかし、常に粒子が動き続けるためのそのエネルギーを常に供給することができるのはなぜなのでしょう。今回の話では粒子は 1 つなので、粒子と粒子の相互作用 (電荷によるクーロン力等でしょうか) もなく、もちろん粒子が永久機関であるわけもないので、動き続けるということがとても不思議に思えました。 **M:** 本気か? 力学の基礎を復習する必要があるのでは? // ポテンシャルがゼロなので ( $V = 0$ ), 粒子に力は働いていない。ニュートンの運動の第一法則

**21S2012:** 教科書の図 3-2 の (b) の確率密度についてです。計算で存在確率が導き出されましたが、0% の部分や確率が高い部分がありますが、粒子の状態を調べる時にはどの部分を重視するのですか。 **M:** 教科書 p.133 や参考書を読んで勉強すればいいのでは?

**21S2013:** 箱の中の粒子が確率ではなく、正確に位置がわかるにはどのようにするのですか **M:** 別に。普通に粒子の位置を測定すれば、測定精度の範囲内で正確に位置が分かるのでは? // 時間に依存しないシュレーディンガー方程式を用いたのでは、求めることはできない。粒子の位置が時間に依存せずに一定値なのであれば、それは粒子が静止しているという意味である。

**21S2014:** 境界条件で領域内に粒子を制限する為に領域の端の波動関数を 0 としたのに、なぜ二乗しないと物理的意味を持たないのでしょうか? 領域の端は波動関数の二乗も 0 になるということでしょうか? **M:** 21S2028 参照 // 境界条件により領域の端における波動関数の値がゼロのときに波動関数の二乗がいくつになるか、自分で計算して分からないのはなぜか?

**21S2015:** なぜ、波動関数の強度が確率密度であると言う解釈で受け入れられているのですか? **M:** 21S2028 参照

**21S2016:** 今回の波動関数で量子数  $n$  が自然と導き出されましたが、1 は原子核の電子における方位量子数ですか? **M:** どこで出てきた 1 の話か? 自分で考えて分からないのはなぜか?

**21S2017:** トンネル効果はエネルギー保存則と矛盾しないのですか? **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか? // ポテンシャル障壁の中 (トンネルの中) と、それ以外では、それぞれどうでしょうか?

**21S2018:** 確率密度について調べた時に、「粒子の存在確率を全空間で積分すれば 1 になる。つまり、粒子は全空間のどこかに必ず 1 個だけ存在する。」とあったのですが、この全空間というのは 1 次元の箱の中と同じ状況ですか? **M:** “同じ状況”とは、何のどんな状況を言っているのか? // それぞれの問題で、何を全

空間と考えるのか？

- 21S2019:** シュレディンガー方程式はなんのために実用されていますか？ **M:** 何が聞きたいのか分からない。  
// シュレディンガー方程式 (量子化学) は、分子の性質を理解するために用いられていて、それが必要だからカリキュラム上の必修とされているのだが.....(?)
- 21S2020:** 身の回りのものは全て粒子でできているが、粒子の存在確率がゼロの点では何も存在しないのか。  
**M:** 21S2004 参照
- 21S2022:** 教科書の中に「 $\psi(x)$  は粒子の位置の目安になるので、 $\psi(x)$  は連続関数でなければならない」とありますが、宮本先生のお話では「連続関数であると考えたことによって、 $|\psi(x)|^2$  が粒子の存在確率に比例すると考えられるようになった。」と言うように解釈しました。どっちが考え方の根底にあるのですか？  
**M:** 方程式と解の波動関数と、どちらが先か？
- 21S2023:** マックスボルンが指摘した「シュレディンガーの解釈の論理的な難点」とは具体的に何ですか。  
**M:** 19S2026 参照
- 21S2024:** 波動関数の二乗で求められた存在確立の波はその他の存在確立の波と重ね合わさり、干渉した波を形成しますか。 **M:** 本気か？自分で考えて分からないのはなぜか？ // 何の存在確率の波の話をしているのか？ // たとえば、一番の粒子の波動関数の振幅が大きいところと二番の粒子の波動関数の振幅が大きいところが同符号で重なって波が強め合った場合、何の存在確率が増加したと言えるのか？ また、逆符号で重なって波が打消し合った場合、何の存在確率が減少したと言えるのか？
- 21S2026:** 微小な世界でエネルギーが離散的であった場合、極大の世界でもエネルギーは離散的になるという考え方をを用いるとビー玉にも存在しない場所があるということにはならないでしょうか **M:** 自分で判断できないのはなぜか？ // “ある仮定の下で論理的に得られる結論” の話なんですよ？ 論理展開に誤りなければ、だれでも同じ結論に到達するはずでは??
- 21S2028:** なぜ波動関数の絶対値の二乗が粒子の存在確率を表していると言われているのでしょうか。 **M:** 教科書 p.87 や参考書をよく読めばいいのでは？ 教科書 p.87 の説明のどこが分からないのか？ // 波動関数はある意味で粒子の振幅; 波動関数の二乗は粒子の強度 (古典的波動と類似). // 波動関数の二乗が存在確率を表すのは、自動的に自然に決まっているのではなく、一般的に採用されている解釈. // 粒子の強度を確率と解釈するのはボルンの提案だが、教科書 B 章の二次のモーメントを考えると、二乗が確率ということとつじつまは合うような.....
- 21S2029:** なぜ波動関数は規格化されなければならないのですか。 **M:** 別に、規格化しなくてもいいのでは？ ただしその場合、波動関数は一意には決まらない. // 20S2043 も参照
- 21S2030:** 一次元の箱の中で両端の他の粒子が存在しない部分を粒子はどのように通過するのか。  
**M:** 20S2002 参照
- 21S2031:** 波動関数の 2 乗で粒子の存在確率を表していたが、存在確率が 0 の部分を粒子は通過できないのか。もしそうなら、どうやって電子が軌道を移動するのか。 **M:** 20S2002 参照
- 21S2032:** 波動関数の物理的意味はないのですが、二乗は粒子の存在確率に比例するという意味があります。これは人が勝手に意味付けたものでしょうか。 **M:** 数式の意味とは、数式自体に内在しているモノなのか？ // 21S2028 参照
- 21S2033:** 今回解いたシュレディンガー方程式は粒子が一つの場合についてだったが、二つ以上の場合はどうなりますか？任意定数 B について最終的な答えではそのままだったが、B は求めなくてよいのか？  
**M:** 多粒子系の例として、多電子原子については教科書 8 章や参考書を読んで勉強すればいいのでは？ // 教科書 pp.91, 126 や参考書を読んで勉強すればいいのでは。
- 21S2034:** 物質が光よりも早い速度で動いた時には、過去や未来に行くことが出来るのでは、という考えがあるらしいが、仮に光より早く移動することができるとしたらタイムマシンを作ることが可能か？ **M:** 過去や未来に行くことができると考えている人に聞けばいいのでは？ // “チェレンコフ放射” と言ってみるテスト
- 21S2036:** 粒子が、粒子の存在確率ゼロの部分を超えて移動するとき、どのように動いているのでしょうか。

M: 20S2002 参照

**21S2037:** 節の位置で量子力学的粒子の存在確率が 0 になることは分かりました。分子軌道において、節面で電子の存在確率が 0 になると考えることができると思うんですが、電子は節面を通過しないでどのように軌道全体を移動してるのですか？ M: 20S2002 参照

**21S2038:** P87 で筆者は「つまり、たぶん～というイメージをもってた。」と書いているが、その式・意味にたどりつくまでの過程(考え方)を勝手に解釈していいものか、それとも余り気にする必要はないのか？

M: 誤解しているのか国語力不足か？ そもそもそれは勝手な解釈なのか？ // 教科書の記述は、著者の想像であることが明白にわかる記述であるし、他人の頭の中を想像してはイケナイという規則や倫理などない。また、シュレーディンガーの最初の解釈を拡張すれば ( $x \sim x+dx$  という微小空間における解釈を全空間に拡大する)、筆者の言うイメージに到達するのでは？ そこに論理のひねりやギャップは無いと思うが...?

**21S2039:** 基底状態においてもエネルギーを持つということは、絶対温度においても原子はエネルギーを持ち静止していないのですか？ M: 本気か？ 自分で判断できないのはなぜか？  $V=0$  であるときに自由粒子の持つエネルギーの内訳は？ // “絶対温度において”とは、どういうことか？ 系の温度を絶対温度で測ろうがセルシウス度で測ろうが、ものさし(単位系)が違うことで系の状態が違ってしまっはオカシイのでは??

**21S2041:** 粒子は基底状態でも運動エネルギーは 0 にならないので常に運動し続けますが、粒子が節を越えるときどのように運動するのでしょうか？それともそもそも粒子は波動関数から導かれた波の半波長の範囲から飛び出ることはないのでしょうか？ M: 20S2002 参照

**21S2042:** 未解明の暗黒エネルギーなどにもシュレーディンガー方程式を適用できますか？ M: 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ。// シュレーディンガー方程式はミクロな粒子の振る舞い・波動性を表しているのだが、あなたの言う“暗黒エネルギー”はミクロな粒子か？

**21S2043:** 波動関数のエネルギーが最大となるのは  $n$  を無限大に発散させたときですか。 M: 本気か？ 自分で判断できないのはなぜか？ // エネルギーが数式で与えられたのだから、それに基づいて考えればいだけなのでは？

**21S2044:** 波動関数の二乗についてのシュレーディンガーの解釈の論理的な難点とは何でしょうか M: 19S2026 参照

**21S2045:** シュレーディンガー方程式が「時間に依存する」というのはどのような状態なのでしょうか？ M: 言葉通りなのだが、何が分からないのか？ 講義でも説明したつもりだが、伝わってなくて残念。// A が「時間に依存する」とは、ある時は  $A_1$  であるが別の時は  $A_2$  だったり  $A_3$  だったりするということ。つまり A が時間  $t$  の関数  $A(t)$  になっている。シュレーディンガー方程式についていえば、ハミルトニアンが時間の関数になっていれば、その固有値・固有関数であるエネルギーと波動関数も時間の関数ということになる。簡単な例としては、ポテンシャルエネルギーが時間の関数になっている場合がある。

**21S2046:** 異なる固有関数に関して、固有値が同じになる場合を縮退というと思いますが、これが、三次元において対象が保たれることで成り立つのはなぜですか。 M: 本気か？ // 縮退が生じる理由は、次元数に依存しないのでは？

**21S2047:** 波動関数の 2 乗が電子密度(存在確率)を表し、その時のグラフの結果が原子軌道の形に関係していると思ったのだが、もしそうなのであれば波動関数には動径方向の波動関数と角度方向の波動関数が存在するということなのだろうか。 M: 一電子の原子オービタルについては、教科書 6 章や参考書を読んで勉強すれば分かるのでは？ // 一般の系について、いつも動径方向と角度方向への変数(座標)の分割が適切であるとは限らない。// 以上は波動関数の二乗が電子密度を表していることとは、論理的に無関係では...?

**21S2048:** 波動関数に物理的意味は無く、二乗が粒子の存在確率に比例するのであれば、そもそもの波動関数はなぜ必要なのか。 M: 波動方程式の解としての波を表している。ただしその波自体が実在しているわけではなく、現実には観測されるのは波の強度(振幅の二乗、古典物理学との共通性に注目せよ)だということだけの話。// ということで、波動関数ではなく電子密度分布に基づいた理論、密度汎関数法、というものもある。ここではシュレーディンガー方程式の代わりにそれと類似したコーン・シャム方程式を用いることになる。詳細は専門書を参照してください。

- 21S2049:** 波動関数の節が電子の軌道の節面に対応していて、今回 1 次元で考えたものを 3 次元で考えると電子の軌道が求められるということでしょうか。 **M:** 自分で求めてみれば分かるのでは？
- 21S2050:** 自由粒子のシュレディンガー方程式のエネルギー固有値が負の値をとらないのはなぜですか？  
**M:** 正気か？ // 負の運動エネルギーはあるのか？  $\frac{1}{2}mv^2$  が負になることはあるのか？
- 21S2051:** 粒子の位置は確率で表されていますが、粒子の位置が正確に特定できないのは、まだ見つかっていない法則があるからですか？ **M:** 本気か？ 粒子の位置は測定すれば分かるのでは？
- 21S2052:** 波動関数の節の位置では粒子が存在しないとありますが、 $n$  を無限に大きくした場合、ほぼ全ての位置で粒子が存在しない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？ // 節の地点と節じゃない地点の、どちらが多い・広いか？ :-p