

- 16s2052:** ボース粒子とフェルミ粒子の違いによる性質的な差はどのようなものが出てくるのでしょうか M: 20s2051 参照
- 17s2045:** ハートリーフォック方程式を計算して求めたイオン化エネルギーは実験値に近い値となっていますが、電子の数が増えても実験値に近い値をとりますか? M: 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // 図 8.1 にある範囲 (原子番号 55 程度まで) では、近い値になっているように見えますが.....? これではダメなののでしょうか?
- 17s2051:** 電子に色はないとおっしゃっていましたが、電子や中性子は無色なのか? それとも光吸収値が小さすぎて区別できないだけなのか? M: 本気か? // モノに色がついて見えるのは、なぜか?
- 18s2003:** ボース粒子とフェルミ粒子について、2 粒子の交換に対して対称、反対称とありましたが、実験的、観測的にその違いが分かるものはありますか? M: 20s2051 参照
- 18s2014:** 反対称波動関数をパウリの排他原理と表現しないのはなぜですか M: 本気か? 何か誤解しているのか? // パウリの排他原理を満足する波動関数と言っているのでは?
- 18s2018:** 定義して行うことでそうなるものとして計算できるのはわかりましたがその定義が間違えている場合どんな事で気づくことができますか。 M: 本気か? 論理学を復習する必要があるのでは? // “定義が間違えている” とは、どういうことか? 例えば “650 nm の波長の光の色を 青 と定義する” この定義は間違えているか? // 背理法とはどんな証明の方法か?
- 18s2038:** 二つの波動関数の差で表すことができ、和で表すことができないのは電子の波動関数は反対称ということが必要であるためか。 M: 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 電子はフェルミ粒子か? フェルミ粒子の波動関数はどんな性質を持つか?
- 18s2045:** 1) 三次元空間における自由度が 4 であることについて、電子のスピンは xyz に全く依存しないという認識で良いのか。 // 2) パウリの排他原理を満足するのであれば、本日の講義で出てきた同種の粒子は区別できないに対し、ナトリウムの 2 つの D 線についての先日の話とは矛盾が生じるのではないだろうか。これに対してどのような解釈を与えるべきなののでしょうか。 M: 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 不斉磁場を通過する前まで全く同じように三次元空間内を運動してきた電子について、不斉磁場を通過した後の進路が、ある電子は up 別な電子は down と進行方向が分かれる。この現象を記述するためには、電子の進行方向の違いについての情報を電子が持っていないといけない。さもなければ (電子が第四の自由度を持たないならば)、不斉磁場を通過する前まで全く同じように運動してきた電子は、不斉磁場通過後も全く同じように運動するはずであり、すなわち電子によって進行方向が up と down に分かれるはずがない。/// なぜ Na の 2 本の D 線について矛盾が生じるのか? どんな矛盾が生じるのか? 教科書 pp.332-334 や参考書をよく読めばいいのでは?
- 18s2046:** ミクロの同種粒子が区別できない理由として全く同じ電荷、質量、スピンを持つためであったが我々が何か電子に修飾して区別することは出来ないのか。それとも、その修飾がどちらの電子にも施されて結局変わらないのか。 M: 本気か? // 20210722 の 20s2048 参照
- 19s2005:** 教科書 p.310 には (8 磁 34) と (8 磁 35) ではヘリウム原子の基底状態の波動関数として後者を採用しなければならないことが実験的に知られているとあるが、これはどのような実験結果によるものなのか。 M: 20s2051 参照 // 超流動
- 19s2007:** 反対称である陽子と中性子でできている質量数 4 のヘリウム核が対称なのは どうしてですか。 M: 20s2049 参照
- 19s2011:** 量子数が定義されるのに、なぜ電子の波動関数が区別できないのでしょうか? M: 意味不明。何を聞きたいのか? “量子数が定義される” とは、何の話か? それと波動関数の区別とが、何の関わりがあるのか??
- 19s2017:** 第 4 の自由度としてスピン量子数がありますが、これ以降の自由度が新たに出てくる可能性はあるといえますか? M: 20210722 の 19s2046 参照
- 19s2026:** SCF 法を用いたときに波動関数が収束しない場合、SCF 法は解法に適していないということでしょうか。それとも近似的に解が求まったとすべきなののでしょうか。 M: 本気か? 収束していないのに、近似的に買いが求まったとは、どういうことか? // もちろん収束しない原因によるだろうし、そもそも絶対に収束しないと言えるだろうか?
- 19s2031:** 基底電子状態の項の記号の決定にはフントの規則を使うと教科書にありますが、励起状態での項決定は何を用いるのですか? M: 正気か? 自分が何を言っているのか、その意味をよーく考えればいいのでは? // 基底状態、励起状態とは何か?
- 19s2040:** 共鳴積分と交換積分は異なるものですか? M: 本気か? 自分で判断できないのはなぜか? // 字が違う :-p // 数式を見れば自明では?
- 19s2045:** 水素分子がフェルミ粒子と分類されるのはなぜか。分子となると原子核と電子から成り立つが、水素分子の核と電子のそれぞれのスピンの影響はないのか。 M: だれがそう言ったのか? 言った人に聞けばいいのでは? // ^4He 核は複合粒子だし、そもそも陽子ですら複数のクォークによってできている複合粒子だ。
- 19s2046:** 波動関数の対称性は、同種粒子の場合のみに限定された性質なのですか? 陽子と中性子など異種の粒子同士では対称性は見られないのでしょうか? M: “対称性” の意味を理解していない予感。// 対称操作をする前と後とで区別がつかないとき、その操作についての対称性があるという。陽子と中性子との交換操作は、好感の前後で区別がつくのでは? // アイソスピン対称性.....(!)
- 19s2047:** 励起状態の分子の電子は同じ方向を向いている時がありますが、その時にも反対称波動関数は対応しているのですか。 M: 微妙に誤解の予感 // 反対称性波動関数とは、スピンの向きが反対という意味ではない。また電子がどんなオービタルに入っているかとも関係ない。“任意の二電子の交換” としか言っていない。
- 19s2049:** 良い質問が思いつかなかった。 M: そうですか
- 19s2051:** フェルミ粒子が互いに同じ量子状態にはならない原因は何でしょうか? M: 自然がそうできている、としか言いようがない。
- 19s2053:** もし電子が区別できるようになればどのようなことがわかり始めますか? また現在区別しようという研究はあるのでしょうか? M: 20210722 の 20s2048 参照

- 20s2001:** 反対称であるフェルミ粒子と対称であるボース粒子に性質的な違いはあるのでしょうか？ **M:** 20s2051 参照
- 20s2002:** スピンが整数なのがボース粒子でスピンの半奇数なのがフェルミ粒子とあったがこの他にもこの2つの粒子を区別できる性質があるのか。また、あった場合その区別する方法はどのくらいあるのか。 **M:** 20s2051 参照
- 20s2003:** He 原子の核はフェルミ粒子である陽子と中性子で構成されているのになぜボース粒子なのですか？ **M:** 20s2049 参照
- 20s2004:** 電子が区別できないのは、初期条件によってそれぞれの波動関数が2つの電子を表すことが出来るからですか。 **M:** 初期条件とは、どんな条件を想定しているか？初期条件によっては二つの電子を区別できるということか？
- 20s2005:** 電子の交換とは具体的にどのような操作ですか？定数倍の部分が何なのか気になりました。 **M:** 本気か？“交換”の意味が分からないということか？ // 20s2007 も参照
- 20s2007:** 交換した後の電子の波動関数は同じ状態を表し、定数倍違うとあったが、この定数は何を表しているのか。 **M:** 本気か？波動関数を定数倍することの(物理的な)意味は？
- 20s2008:** ・電子には大きさも形もないということは、電子だけを取り出して質量を量ることはできないように感じます。電子の質量はどのようにして量るのでしょうか。そもそも量子化学の世界の粒子の質量を、量りに乗せて量ろうとするような考え方が間違っていますか。・イオン化エネルギーは「原子から電子を1つ取り除いて1価の陽イオンにするのに必要なエネルギー」のように定義されていますが、電子は大きさも形もないのに1つというのはどういうことですか。今更なのですが、大きさも形もないのに1,2,3,...のように数えていいものなのですか。それとも実際に電子を見る手法がないから形がわからないというだけで、本当は形があるということですか。 **M:** 非常に軽い粒子を秤に乗せて(重力の大きさを)測るのは困難だと思われそうですが..... // 質量分析装置で分子(フラグメント)の質量はどうやって測っているか？ // (古典的には素朴な)ミリカンの油滴実験とかをイメージすればいいか？ // “実際に電子を見る手法がないから形がわからないというだけで、本当は形がある”とは、どういうことか？観測されていないものが実在すると考える根拠は？証拠が観測されていないのに実在を信じる根拠は？
- 20s2009:** 今後新たに量子数が増える可能性はありますか？ **M:** 20210722 の 19s2046 参照
- 20s2011:** ミクロな世界の同種粒子は区別できないことがわかりました。そして、パウリの排他的原理より同じ原子の中の二つの電子で4種類の量子数が同じになることはないということを考えると事実上矛盾しています。この矛盾はどのように捉えるべきですか。 **M:** 全く矛盾していない。“同種粒子は区別できない”の意味を誤解している予感。// 二つの電子(仮に電子1と電子2)のそれぞれの量子数が、電子1について(n1, l1, m1, ms1)で電子2について(n2, l2, m2, ms2)であるのと、電子を交換して電子2について(n1, l1, m1, ms1)で電子1について(n2, l2, m2, ms2)であるのとを区別できないという話。
- 20s2012:** スピン $3/2$ は外部磁場に対してどの方向を向いているか。 **M:** 本気か？自分で考えて分からないのはなぜか？ // $\hat{S}_z$ と $\hat{S}_x$ から求めればいいのでは？
- 20s2013:** スピンが半奇数であるフェルミ粒子2個を1組として考えて、スピンの整数のボース粒子とみなすことはできますか？ **M:** クーパー対と言ってみるテスト。20s2049 も参照
- 20s2015:** 式(8・28)について、 $\Psi(x,y,z, \sigma)$ が、 $\phi(x,y,z) \alpha(\sigma)$ や $\phi(x,y,z) \beta(\sigma)$ と因数分解できると仮定したなら、 $\phi(x,y,z)$ の部分が同じなので、 $\alpha(\sigma)$ と $\beta(\sigma)$ は等しいということになってしまうと思うのですが、 α と β が等しいならば、規格化直交系であることが成り立たないのではないですか？(式(8・27)の2つめの式が0ではなくなってしまう) // それとも因数分解した時、 $\phi(x,y,z)$ と同じ表記になっているが、中身は違う関数なののでしょうか？2つの電子は区別できないはずなので、それぞれの電子について波動関数の空間部分が違う関数になるはずはないと思いますが... **M:** (8.28) 式の“または”の意味を理解していないのか？ // α と β が何であるかは、教科書 p.308 に書いてあるのだが、理解していないのだろうか？ // 二つの電子が区別できないとは、二つの電子のそれぞれの波動関数の空間部分が同じという意味ではない。“二つの電子は区別できない”の意味も理解していない予感。
- 20s2016:** 本日の出席コードについて、何故その数字なのか考えてみると面白いかもしれないとおっしゃっていましたが、今までの出席コードについても何か意図があって設定されていたのでしょうか？ **M:** “考えてみると面白いかもしれない”と言われたのに、その答えを聞くのか？自分で考える気は無いということか？
- 20s2017:** ボース粒子とフェルミ粒子は化学反応をするにおいてなにか特徴的なことがあるのか？ **M:** 自分で考えてみればいいのでは？ // ボース粒子とフェルミ粒子が化学反応をするとは、具体的にどの粒子とどの粒子との化学反応を想定しているのか？
- 20s2018:** $\Psi(1,2)=C \Psi(2,1)$ という式の C を求める際に、上の式を元に $\Psi(2,1)=1/C \Psi(1,2)$ と変形して代入してはいけないのですか。 **M:** 自分で判断できないのはなぜか？自分で考えて分からないのはなぜか？単純に代入しただけでは $C/C=1$ という当たり前の結果になるだけだが... // 二つの粒子を入れ替えるという同じ操作に対して、一方で C 他方で $1/C$ と形式上違う係数がつくことになるが、同じ操作による波動関数の変化なので二者は同一、すなわち $C=1/C$ となるので、同じこと。
- 20s2019:** 将来的にミクロな世界の同種粒子を区別できるようになる可能性はありますか、また区別可能になるとできるようになることはありますか **M:** 20210722 の 19s2046 参照
- 20s2021:** ハートリーフォック法で見積もれない誤差である電子相関エネルギーは、すべての励起配置を考慮すれば、空間が広がり電子相関まで考慮できるようになるのか？ **M:** 微妙に言葉の意味を理解せずに話をしている予感。// そもそも電子相関エネルギーは、厳密解と HF 解の差なのだから、HF 以上のことをすれば、その一部といえども考慮できるのは当たり前というか、それが定義。// しかし“空間が広がり”で何を意味しようというのかは、不明。
- 20s2022:** パウリの排他律は常に成立するのでしょうか。具体的な数学的証明はなされているのでしょうか。 **M:** 別の定理などから数学的に証明されるようなものではない。// フェルミ粒子の性質だというだけ。
- 20s2023:** なぜ2電子系では空間部分とスピン部分へ分解できるのか？ **M:** 本気か？ // 自分で計算してみれば分かるのでは？
- 20s2024:** 教科書 p. 315 で HF 計算で得られる種々の副核のエネルギーの順番は中世原子のエネルギーとだいたい一致しているとあるが、これは正電荷、負電荷を持った原子においても一致しているのでしょうか？ **M:** 私は知りません。調べて分かったら、教えてください // てゆーか、文脈を読めなさすぎなのでは?? 教科書の pp.315-317 では中性の原子のオービタルエネルギー

ギーを話題にして、HF 計算結果を実験値と比べている。イオンについては何も言っていない。じゃあ何も分からないのかというと、そんなことも言っていない。そもそも科学なのだから、中性原子とそれ以外（イオンや分子まで）とで、計算手法や計算精度が著しく異なると考える方がどうかしてる。現に、教科書の後ろの方を見れば、各種の分子についても、HF 法による計算で実験値とよく一致した結果が得られていることが記載されている。

20s2025: パウリの排他原理やフントの規則を満たさないものはあるのか。またあるとしたらなぜ満たされないのか。 **M:** 正気か？パウリの排他原理を満たす電子と満たさない電子があるとでもいうのか？ ある原子中の電子は満たすが、別の原子中の電子は満たさないとかいうつもりか？ すなわち環境によって、パウリの排他律を満たしたり満たさなかったりと、電子の振る舞い・性質が変わるとでも?? // ある場面での電子の振る舞いがどちらであるか、どうやって知なのか？ 予想する方法があるのか？ // パウリの排他原理は“任意の二電子の交換”と言っているが、では、パウリの排他原理を満たす原子上の電子と満たさない原子上の電子の、これら二つの電子の交換については、波動関数はどう振る舞うのだろうか？

20s2026: 多原子系でパウリの排他原理が成り立つことは証明できますか **M:** 20s2022 参照

20s2027: 教科書に 爾 2 電子系では空間部分とスピン部分へ分解できるが、一般には分解できないことは重要である璽 とありますが、どのように重要なのですか？ **M:** 本気か？ 国語力不足か？ 教科書をちゃんと読んでいるのか？ // 教科書のそのパラグラフは、そもそも何を話題にしていたか？ “7.1 節や 8.2 節でヘリウム原子を扱った時、波動関数のスピン部分を無視できたのはなぜかを考えよう。”と書かれてあるのだが、理解できないのだろうか？

20s2028: フェルミ粒子のスピンは半奇数であることから、フェルミ粒子が偶数個存在するとスピンの数が整数になるので、ボース粒子になるということはあるですか？ **M:** 20s2013 参照

20s2030: エネルギーが主量子数のみに依存するのはなぜですか？ **M:** 本気か？ 自分で勉強して分からないのはなぜか？ // 水素原子について、ボースモデルやシュレーディンガー方程式の厳密解を復習する必要があるのでは？ // しかし HF レベルでは、副殻のエネルギーは違う（エネルギーは主量子数のみに依存するわけではない）。

20s2031: ボース粒子とフェルミ粒子の符号の違いはどのような意味なのか。 **M:** 何の符号の話か？ // 任意の二粒子の交換に対する波動関数の符号であれば、波動関数の定数倍の物理的な意味は？ // そもそも二粒子の交換に対する符号が違いうように波動関数を組み立てるということは、波動関数そのものを比べるとどうだということだろうか？ 教科書の (8.34) と (8.35) を見比べて、よーく考えればいいのでは？

20s2032: もともと行列式が多電子原子の問題を解くために作られたものではないはずである。それなのに、行列式がパウリの排他原理の様々な性質を表現できているのはなぜか。 **M:** そもそも、なぜ数学は自然をうまく記述することができるのだろうか？ // 自然をうまく記述できる数学が存在しなかったとき、科学者はどうしたか？ 物体の運動の様子（位置や速度の微小な変化など）を記述する数学が無い時、ニュートンはどうしたか？ // 科学史を勉強するのも面白いのでは？

20s2034: スピン量子数が整数の場合はパウリの排他原理に従わないのか。 **M:** 本気か？ // パウリの排他原理はどの粒子に対する規則か？ あらゆる粒子（ミクロ粒子）が従う規則なのか？

20s2035: パウリの排他原理から考えると Stern Gerlach の実験において銀原子以外の原子を用いても 2 点のみに到達しますか？ **M:** 自分で考えて分からないのはなぜか？ // 銀原子が二点のみに到達したことを、パウリの排他原理からどのように説明するのか？

20s2038: スピンの整数と半奇数というのはどのようにして判断できますか。 **M:** 自分で考えてみればいいのでは？ // スピン磁気量子数 m_S の値は何通りか？ スペクトル線は何本か？

20s2040: フェルミ粒子とボース粒子の言葉の意味を調べた際フェルミ粒子が物質を構成し、ボース粒子がフェルミ粒子の相互作用を媒介すると述べている文献があり、このことが起こるのは粒子の交換の際波動関数の符号が変化することは関与していますか。 **M:** このことが起こるとは、何が起こる話か？

20s2041: 例として水素分子はフェルミ粒子として考えられると理解したが、分子となると原子核と電子雲と陽子のそれぞれからなるわけで、核と電子のそれぞれでスピンの影響はないのか。 **M:** 本気か？ 何をどう理解すると水素分子がフェルミ粒子になるのか？ // 分子が原子核と電子雲と陽子からなるとは？？

20s2042: スピン量子数が $1/2$ で m_s が $\pm 1/2$ を取ることはフェルミ粒子と関係あるのでしょうか。 **M:** 教科書や参考書も良く読めばいいのでは？ // 講義でもフェルミ粒子とボース粒子の性質の違いについて説明したのだが、理解されていなくて残念。 20s2013 参照

20s2043: 2 電子の交換に対する反対称とは、具体的にどんな操作をして、電子を入れ替えることができるのか？ **M:** 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ

20s2044: ボース粒子か、フェルミ粒子かは実験的に分かるのですか？ **M:** 20s2051 参照

20s2045: 教科書では電子が $+\hbar/2$ の角運動量 z 成分を持っていると考えられますが、この $+\hbar/2$ という値は何に由来するものですか。もしくは何かしら都合がいいからというだけで、値自体に特別な意味はないのですか。 **M:** 本気か？ オービタル角運動量の時はどうだったか？ $\hbar$ と量子数にはどんな意味があったか？ // 新規な“スピン角運動量”について、既知の知識を発展・援用することの重要性は？

20s2046: ボース粒子のスピンが半奇数では無く整数になるのは何故ですか。 **M:** 私たちの住む宇宙・自然がそうなっている。

20s2047: 無機化学で d 軌道内の電子が反転によって位相が + から - に変わることがありましたが、これと 2 電子を交換することによって波動関数の符号が反転することには関係があるのですか。 **M:** 本気か？ 自分で判断できないのはなぜか？ // “d 軌道内の電子が反転”とは、何のことか？ // 符号とか交換とか反転とか、似たような言葉を使っているからと言って、感覚的に似てることにはしちゃダメでしょ。きちんと言葉の定義を確認して考える必要があるのでは？

20s2048: 同じ電子を何年間で保存するにはどうするのですか？ **M:** 別に、箱に入れておくでも何でも好きにすればいいのでは？ // ところで、保存されていた電子が以前と同じもの、同一の電子だどうやって判定するのだろうか？ ;-)

20s2049: α 粒子はボース粒子ですが、同時に陽子 2 個と中性子 2 個という複数個のフェルミ粒子から構成されている。フェルミ粒子のみで構成された粒子ならばフェルミ粒子であるのが自然だと思うのだが、ボース粒子のようなふるまいをするのはなぜか。

M: 何を自然と感じるかはあなたの勝手だが、 ${}^4\text{He}$ 核がボース粒子であることは間違いない。// それを言うなら、陽子自体も 3 個のクォークによる複合粒子である。

20s2050: ボース粒子は交換に対して対称であるということは、同じエネルギー順位に 2 つ以上の粒子を所有できるということでしょうか？ **M:** エネルギー順位とは何か？ // 20s2051 のこと？

20s2051: ミクロな粒子がボース粒子なのかフェルミ粒子なのかはどのようにして決められたのか？ **M:** 集団の挙動が異なる。前者はボース・アインシュタイン統計に従い、後者はフェルミ・ディラック統計に従う振る舞いをする。