

質問カードには「良い質問」を書くのであって、ふと思いついた疑問や教科書を読んでいてあなたが理解できなかった点についての質問を書くのではない。この違いを理解していないと思われる質問が多数あるようだ。

16S2052: どの原子の核もフェルミ粒子の陽子と中性子の組み合わせでできているのに、なぜ 4He の核だけボース粒子となるのでしょうか M: 他の元素・同位体が全てフェルミ粒子なわけじゃない。 ^4He だけがボース粒子なのではない。ボース粒子の例としてひとつを挙げただけ。

18S2010: 現在未発見である重力子が、すでにボース粒子だと言われているのは何故か M: 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // 力を媒介する粒子はボース粒子。例えば光子。

18S2014: 非対称な関数でも規格化すると値は 1 になりますか。 M: 本気か? 自分で考えて分からないのはナゼか? // 規格化できない関数は、どんなものか? // そもそも“規格化”の意味を理解していないのか?

18S2018: フェルミ粒子とボーズ粒子は両方とも粒子が区別できない同種粒子に対して考えられているが、異なる原子同士の場合これらに比べどのような変化がありますか。 M: 意味不明。何を想定しているのか分からない。// そもそも例えば H と He の原子核は、互いに区別できるでしょ。それを交換したら、別の状態になるが、それがどうかしたのか??

19S2004: なぜフェルミ粒子は互いに同じ量子状態をとれないのですか? M: 造物主に聞けばいいのでは? :-p // 私たちの世界・宇宙がそうなっているという話。あるいは、そういう種類の粒子をフェルミ粒子と名付けた。

19S2022: ミクロな同種粒子が区別できる場合も存在するのでしょうか。 M: 本気か? 正気か? // 二つの電子をどうやって区別するというのか? 色の違う名札でも付けますか?

19S2049: スペクトルの本数と原子の最外殻電子の数に関係はあるか? M: 本気か? // 例えば水素原子の輝線スペクトルの本数は何本か?

19S2051: 電子スピンの回転していないのに、磁気モーメントなどが発生するのはなぜでしょうか? M: それが電子の基本的な性質であるとしか言いようがない。

20S2001: フェルミ粒子とボース粒子は交換することによって対称、反対称になることの他に違いはあるのでしょうか? M: スピンが半奇数か整数かの違いがあると説明したのだが、理解されていないようで残念。

20S2004: 第 4 の量子数として粒子のスピンでないものを用いることは出来ますか。また、コマの回転による電子のスピンを表記する手法は、電子の粒子の面を抜き出したモデルを用いて表示することが適切でないのですか。 M: 用いてもいいけど、そうすると例えば Stern-Gerlach の実験結果の説明や Russell-Saunders 結合とかは、別のモノになる (あたりまえ)。そんなことをする意味はあるのか? メリットは有るのか? 「スピンはめぐる」を読んでみれば良いのでは? // “電子の粒子の面を~”以降は意味不明。

20S2006: 第 4 の量子数としてスピン量子数が挙げられているが、今後第 5、第 6 の量子数がでてくるとなるとどのようなものがでてくるとおもいますか? M: 私は知りません。調べて分かったら、教えてくださいネ // 今のところ、電子に対して第 5 の量子数を必要とする現象は観測されているのだろうか? // 21S2017 も参照

20S2010: Stern & Gerlach の実験で金属の中でも銀原子が用いられたのはなぜでしょうか。 M: 彼らに聞けばいいのでは? // 現在ではこうして銀の話だけがスピンと関連して注目されているが、当時他の元素・金属についての実験を行わなかったと考える理由があるだろうか? 科学ってそういうものなの?

20S2021: P316 にはクーブマンズの近似で得られた計算値とハートリー・フォック計算で得られた近似の値が記載されていますが、より実験値に近いハートリー・フォック計算の方が有用に見える。現在ではクーブマンズの近似は必要なのか? M: 考え方は、今でも有用。基底状態について計算するだけで、イオン化エネルギーを推定できる。光吸収による化合物の色を HOMO-LUMO のエネルギーギャップから推定するのも同じ原理と言えらるだろう。// 一方、ハートリー・フォック計算と呼んでいる手法は、具体的にはなにをどう計算するのだろうか? どうすればいいだろうか?

20S2027: パウリの排他原理で氏纏劫稜汎梓悞瑤呂垢戮毒ぐ佞 2 電子の交換に対して反対称でなければならない獅 C 箸△蠅坪靴燭☒☒纏劫汎韻献佞厶褊瀘鎧劫任△譴估瑛佑寮☒舛鮎☒弔里任垢☒ M: 講義では、

フェルミ粒子とボース粒子の何がどう違うかを説明したのだが、理解されていないようで残念。

20S2036: スピン量子数を量子化した $2S + 1$ という式と磁気量子数を量子化した $2S + 1$ という式は完全に一致しているが、これはただの偶然か、それとも何かしらの関係があるのか。 **M:** 意味不明. “量子数を量子化する” とは、どういうことか?

20S2037: 波動関数の反対称性は粒子が同じ状態をとれないこと以外に何をもたらすのですか。 **M:** 教科書や参考書を読んで勉強し、自分で考えればいいのでは? // フェルミ・ディラック統計に従った振舞いをするのも、波動関数が反対称で複数の粒子が同じ状態をとることができないから。全ては“反対称-同じ状態を取れない”に帰着する。// 21S2008 参照

20S2042: スレーター行列式により得られた波動関数の空間部分の最適な形を決定するのにつじつまの合う場の方法を用いるとあるが、この方法を用いる際にスピン関数などで考慮することはあるのでしょうか。 **M:** 本気か? 説明の言葉を理解できないのだろうか? // 空間部分とスピン部分に変数分離された形の波動関数なのに、空間部分の形にスピン関数はどう影響を与えると考えられるのだろうか??

20S2046: 原子核の場合、核子数が偶数のものがボース粒子であると目にしたのですが、核子数が奇数のものはパウリの排他原理に従うため、2 粒子交換の際に波動関数の符号が変わるのでしょうか。それとも、また違う法則か何かがあるのでしょうか。 **M:** 本気か? 正気か? // ボース粒子とフェルミ粒子以外の、第三の種類の粒子が存在するということか? $c^2 = 1$ の答えが、“ $c = 1$ と $c = -1$ 以外”に存在するのか?

20S2047: 第 4 の自由度が授業で取り上げられていましたが、電子の存在の仕方が複雑になればなるほど、それに応じて第 5、第 6 の自由度も存在してくるのでしょうか? **M:** 本気か? “電子の存在の仕方が複雑になる” とは、具体的にどういう事か? // 20S2006 も参照

20S2051: 光子はボース粒子で、電子、陽子、中性子はフェルミ粒子に分類されるが、なぜこのようになるのか理論的には判明しているのか? **M:** 19S2004 参照 18S2010 も参照

20S2052: 反対称になっているスピンは実験的にわかりますか? **M:** 激しく誤解の予感. // “スピンが反対称になる” とは意味不明. どういうつもりで言っているのか?

20S2053: ミクロな粒子は衝突しても反発しないが、どの程度の大きさになれば反発し合うのか。それとも粒子は全てミクロだからという考え方なのか。 **M:** 意味不明. 激しく誤解の予感. // “ミクロな粒子は衝突しても反発しない” は本当なのか? 電荷を持つミクロ粒子に対してクーロンポテンシャルを考えていることは、クーロン力を考えていることに等しく、同種の電荷のときにはそれって反発のことじゃないのか?

21S2002: 教科書 p.313 に、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、と書かれているが、因数分解ができるようになることのほかに、重要と言われる理由はあるのでしょうか。 **M:** 本気か? 国語力不足か? // 教科書の文章は、そこで何が重要であると述べているのか?

21S2003: オービタルの概念を放棄した試行関数で厳密なエネルギーの値を得ることができるのですか **M:** 正気か? 言葉の意味が分からないのなら、辞書や専門書を見ればいいのでは? // “厳密なエネルギーの値” とは、何を意味するか?

21S2004: 磁気量子数が $\pm 1/2$ というのはどういう意味を持つのですか? **M:** 教科書や参考書を読んで勉強すればいいのでは? // 例えば教科書 6.3 節や章末問題 6.43 から 6.47 参照

21S2005: スピン角運動量演算子は軌道運動量演算子と同じ交換関係を満たすのか。 **M:** 本気か? // 教科書 pp.308-309, 345-348 や参考書を読んで勉強すれば分かるのでは?

21S2007: Stern Gerlach の実験で第 4 の自由度を用いていたが、第 5 の自由度を用いることはできないのか。また、第 5 の自由度を用いることができた場合、実験の精度は上がるのか。 **M:** 使いたければ使えばいいのでは? 5 個も自由度は必要ないし、そもそも第 5 の自由度が何かわからないけど。それとも 4 を使わずに飛ばしてスピンを 5 番目と数えるという意味か? // 20S2006 も参照

21S2008: ボース粒子、フェルミ粒子は何をもって区別されているのか **M:** 講義でも説明したのに、理解されていないようで残念. 教科書や参考書を読んで勉強すれば分かるのでは? 自分で調べたり考えたりしないのか? // 同種粒子の交換に対して波動関数が対称/反対称 $\equiv$ 同種粒子が同じ状態を取ることができる/で

きない ≡ 従う統計的な挙動が違う; スピンが整数/半奇数 // 20S2037 参照

21S2010: 一般相対性理論と量子論は全く別のことをしているという旨の話を聞いた事があります。前から少し疑問だったのですが、同じ物理学的な内容をやっているのに、ミクロな話になると突然理論が変わるといふのあまりにも異質なことのよう to 思ひます。先生はマクロでもミクロでも全てに使える統一的な理論が存在すると思ひますか。 **M:** 個人の意見を聞いてどうするといふのだらうか? 個人の意見が普遍的理論だとでも? // 科学史を勉強すればいいのでは? 科学理論はどのように発展するのかわ? // マクロな理論とミクロな理論が別の理論でなければいけないといふのは、論理的にオカシイのでは? 中間のサイズのときにどうするのかわ? どこで切り替わるのかわ? 切り替わる直前と直後で、物体・物質の振舞ひが急に変わるのは合理的だらうか?

21S2012: スピン量子数は第 4 の自由度とされているが、第 5 以降の自由度が存在する可能性はあるのですか。 **M:** 20S2006 参照

21S2013: スピン量子数の符号はどのような意味を持つのですか **M:** 意味不明、何の話かわ? // その量子数は、どんな固有値方程式の固有値に用いられているかわ?

21S2015: 今後、電子において第 4 の自由度に次ぐ新たな量子数が提唱又は発見される可能性はあると思ひますか。 **M:** 20S2006 参照

21S2016: 量子コンピュータの計算が速いといふ理由を調べました。量子の存在確率を量子フーリエ変換を行うために必要なゲート操作の回数は、1 番目の量子ビットに n 回、2 番目の量子ビットに $(n-1)$ 回といふようにし、最後に SWAP 操作を全て合わせると $O(n^2)$ 回である。(オーダー記法) 一方、古典コンピュータでフーリエ変換を行う高速フーリエ変換は、同じ計算を行うのに $O(n2^n)$ の計算量を必要とする。この意味で、量子フーリエ変換は、古典コンピュータで行う高速フーリエ変換に比べて「高速」と言えるらしいです。計算量が減らすことができたのに実用化出来ないのは、なぜですか? **M:** アルゴリズムが既知であることと、それを実装できることとは別の問題です。そのアルゴリズムを実行できる機械は存在するのでしょうか? 量子ビットをどのようにして制御するのでしょうか?

21S2017: 「第 4 の自由度」とは 4 次元とは違うものなののでしょうか? 違うもののだとしたら、今後第 5 の自由度なども設ける場合があるのでしょうか? **M:** ある面では同じだが、ある面では別のモノ。// 例えは非直線形の N 原子分子の振動の自由度は $3N-6$ で、分子の振動状態を記述したければ $3N-6$ 次元を考えることになる。しかし電子に対する第 4 の自由度とはそういう話じゃない。// 電子に対する「第 4 の自由度」とは、三次元空間内を運動する電子の挙動を記述するのにいくつの自由度が必要かといふ話で、普通の粒子(質点)は三個で必要十分なのだが、電子には四個目が必要といふこと。

21S2018: 電子スピンにおいて、角運動量は半整数(半奇数)であるが他にこのような形を取るものはありますか **M:** 本気かわ? 自分で考えて分からないのはなぜかわ? // スピンが半奇数であるのは、どのような粒子かわ?

21S2020: 電子に対する第 4 の自由度が用いられているシュレーディンガー方程式にはどのようなものがありますか **M:** 電子常磁性共鳴法におけるスピンハミルトニアン

21S2022: 2 つの粒子の交換が対称、反対称であるといふ違いによって、化学的な現象や性質にどのような影響があるのでしょうか。 **M:** 自分でどれだけ調べたといふのでしょうか? // 20S2037 参照

21S2023: 講義では、第 4 の自由度が取り上げられていましたが、第 5 の自由度や第 6 の自由度といったものは存在するのですか。 **M:** 20S2006 参照

21S2024: パウリの排他原理に例外はありますか **M:** 本気かわ? 正気かわ? // フェルミ粒子でもなくボース粒子でもない粒子といふこと? 任意の二粒子の交換に対して、波動関数が対称でも反対称でもないといふこと? それとも対称・反対称がランダムに起こるといふこと?

21S2026: ボース粒子とフェルミ粒子は対称、反対称になることのほかに、相違点は何がありますか。 **M:** 自分で調べたり考えたりしないのか? // 21S2008 参照

21S2028: p309 の s が大きな値を取れないといふどういうことでしょうか。 **M:** 日本語力不足かわ? // 教科書には直前に“ l は 0 から無限大まで変わり得たが、 s は $s=1/2$ という値しかとれない。”と書いてあるのだが、そののどこが分からないのか?

- 21S2029:** スレーターの規則のように、構造物理化学の授業では無機化学で学んだ内容がよく出てくる気がするのですが、この二つは化学の分野の中でも特に深く関係しているのでしょうか。 **M:** 教科書 10 章には sp , sp^2 , sp^3 等の混成オービタルについて書かれているし、14 章の NMR は有機化学では必須のツールだ。// 有機化学や無機化学と物理化学との関係は？
- 21S2031:** 電子スピンはよく上向きや下向きと表現されるが、何を基準に向きを決定しているのか。 **M:** 本気か？ スピン角運動量 S とスピン角運動量の成分 m_S について、理解していない (?) // Stern-Gerlach 実験 (外部静磁場の方向に対する電子スピンによる磁気モーメントの方向)
- 21S2033*:** スピンについて、外部磁場を加える方法以外でスピンの向きを揃えることはできるのでしょうか。 **M:** 向きをそろえる方法は、最終的には“向きがそろっていた方がエネルギーが低い (安定だ)”を利用するでしょう。つまり揃っていない時よりも揃っている時の方が安定になるように、それぞれの状態のエネルギーに違いを生じさせる。そのうちのひとつが外部磁場をかけることで、外部磁場に対するスピン磁気モーメントの向きに応じたポテンシャルエネルギーを持つ。// 他の方法を調べて分かったら、教えてくださいネ。21S2031 も参照
- 21S2034:** 光より早い速度で動くことが出来ないのは何故か、現在の科学力などではできないだけなのか、それとも何がどうしても不可能なのか。 **M:** 本気か？ 正気か？ // 相対性理論を勉強すれば分かるのでは？
- 21S2035:** フェルミ粒子とボース粒子に交換によって対称、反対称になる以外に違いはあるのか治 **M:** 21S2008 参照
- 21S2036:** ボース粒子とフェルミ粒子では、実際どのような性質の違いがあるのでしょうか。 **M:** 21S2008 参照
- 21S2037:** ハートリー-フォック法で、電子間に相関がないとはどういうことですか？ // ボース粒子、フェルミ粒子があるように、論理に反した観測結果が得られたと考えているが、得られた観測結果から論理が間違っていると考えることはないのですか？ **M:** 講義でも説明したのに、全く理解されていないようで、残念。// HF 法で採用されている近似で重要なものは独立粒子近似 (または平均場近似) で、ある一電子の運動状態について考えるときに、それ以外の電子がどこに存在しているかに依存しない (もちろんクーロンポテンシャルは考慮するが)。すると、同一空間・位置に複数の電子が存在することを許してしまっている。// “ボース粒子、フェルミ粒子があるように、論理に反した観測結果” とは何か？ どこが論理に反した結果なのか？ 物理理論の正しさは、実験事実で検証するしかない。逆に理論で説明できない事実が発見されれば、理論を修正する必要があることになる。
- 21S2038:** スピンについて古典的物理量と対応するしかないのはなぜか？ **M:** 意味不明
- 21S2039:** 二電子を交換した際に波動関数の符号が変わるか変わらないかはどのようにして分かるのでしょうか。 **M:** 本気か？ 正気か？ ある波動関数を -1 倍すると、物理的な意味はどう変わるか？ // 波動関数を定数倍した、その定数は観測可能な量か？
- 21S2040:** 式 (8・28) は空間部分とスピン部分に分解できるため、多電子系で一般的に用いることはできないのでしょうか。 **M:** 本気か？ 国語力不足か？ // 教科書の記述がベストだとは思わないが、そこで述べているのは一電子波動関数のこと。教科書の次の文で“完全な一電子波動関数をスピンオービタルという”と記されているのだが、そのどこが理解できないのでしょうか？
- 21S2041:** 4 つの量子数全てを導けるシュレーディンガー方程式はあるのか。 **M:** 勉強すれば分かるのでは？
- 21S2042:** 321 ページの 2 つの電子が等価ではないオービタルを占めているからとありますが、もし混成軌道などを考える場合はどういった対応がとられますか **M:** 本気か？ 混成軌道の軌道角運動量はどう考えればいだろうか？ // (*) 孤立した原子を考えているので、混成する要因はない。カノニカルなオービタルだけを考えている。
- 21S2043:** パウリの排他原理より、2 つ以上のフェルミ粒子は同一座標上に存在できないのに、ブラックホールは点になるのはなぜですか。 **M:** 本当にブラックホールは点なのか？ どうやって観測したのか？ 観測できるのか？ // 普通はシュバルツシルト半径をブラックホールの大きさというのでは？
- 21S2044:** シュレーディンガーの概念が適応できず、スピン角運動量について考える必要があるのはどのような

場合ですか **M:** 意味不明. ここで言っている“シュレーディンガーの概念”とは、何を意味するのか?

21S2045: 波動関数が対称か反対称かではどのような違いが出るのですか? **M:** フェルミ粒子かボース粒子か. 21S2008 参照

21S2046: シュテルンゲルラッハの実験について、不対電子と発光スペクトルには関係性がありますか。

M: 意味不明. Stern-Gerlach の実験では、発光スペクトルなど観測していないが...??

21S2047: p.310 に電子を区別できず、とあるが今後科学が進歩し実験で電子を区別できるようになってもパウリの排他原理は成り立ちますか。 **M:** 本気か? 正気か? // 現在のところ、パウリの排他原理は全く正しく、それに反する事象は観測されていない。この事実は、今後の科学の進歩においても重視されるべきであり、現在成り立っているパウリの排他原理を矛盾なく取り込む必要がある。// さてここで、パウリの排他原理が成り立たなく、なおかつ成り立つ、という風に理論を拡張することが可能だろうか?

21S2048: 反対称波動関数はスレーター行列式だとどのように表現できるのか。 **M:** 本気か? スレーター行列式を全く理解していない予感. または、線形代数 (行列式) を復習する必要があるのでは? // スレーター行列式を展開し、二つの電子を入れ替える操作をし、という計算を、自分の手を動かして実行して考えればいいのでは?

21S2049: 波動関数が電子の交換に対して反対称であるとき、電子の交換は符号が反対のローブに電子が移ることを意味しますか **M:** 量子力学の論理体系を全く理解していない予感. 何をどう勘違いするところなのか? // 最初から徹底的に復習する必要があるのでは?

21S2050: スピン角運動量においての x, y 成分の平均値が 0 になる意味は電子が円錐上にあって固定できないということですか? **M:** 全然違う. // 教科書の図 6.1 を見て、教科書や参考書をよく読んで、考えて、という勉強をする必要があるのでは?

21S2052: フェルミ粒子とボース粒子による、交換によって対称、反対称になることやスピンの整数か半奇数かということの他に違いはあるのでしょうか。 **M:** 21S2008 参照