

16s2028: マクロな粒子とミクロな粒子はどのように分けられるのか。明確な線引きがないのであれば両方の性質が出る場合があるのか。 M: サイズで一律に分けられるものではないし、明確な境界線があるものでもない。しかし明らかに古典力学に従うマクロな物体と、量子力学的な現象を示すミクロな粒子はある。現象・対象ごとに考えればいいのでは? // 分類することが重要なのではなく、理解することが重要なのでは?

16s2040: 教科書にでてくる演算子はエルミートであるとされていますが、よく使われる名前のついた演算子でエルミートではないものはあるのでしょうか? M: えーと、それを聞いてどうするのか? // 教科書の表 4.1 や 仮説 2' 参照

17s2007: Stern-Gerlach の実験で二点のみという結果が得られると、なぜ電子がスピンしているということの証拠になるのでしょうか。 M: 論理が変。講義での説明を理解していただけなくて残念。// “スピンする (回転運動する)” などしていない。// そのような実験結果となる理由は、通常の自由度 3 では説明できない。そこで電子に第四の自由度を導入し、これをスピンと呼んだ。// 19s2025 参照

17s2028: 「電子のスピンは、実際に電子が自転しているわけではない」との解説や、「スピン変数には古典的に対応する量がない。(教科書 p.309)」との記載が見られますが、結局のところどのような物理現象が起きているのでしょうか? 具体的なイメージが出来ません。また、なぜシュルテン=ゲルラッハの実験で、Ag 原子のような他電子原子 (つまり複雑な系) で、綺麗な実験結果が得られたのでしょうか? M: スピンは第四の自由度なのであって、物理現象ではない。もちろん、三つの自由度である 縦・横・高さ (x, y, z) または 動径・緯度・経度 (r, θ , ϕ) 等も、何らかの物理現象なわけではない。// Ag の電子配置は $[\text{Kr}]4d^{10}5s^1$ で、Stern-Gerlach の実験ではその $5s^1$ を検出していた。

17s2029: スピン量子数を導入するという考えは、当時すんなりと受け入れられたのか。 M: 「スピンはめぐる」を読んでみればいいのでは?

17s2037: 電子、陽子、中性子がフェルミ粒子であること、また光子、ヘリウム核がボース粒子であることはどのようにして解明されたのですか。 M: フェルミ粒子 (フェルミオン) とボース粒子 (ボソン) とでは、従う統計が異なる (前者が フェルミ-ディラック統計, 後者が ボース-アインシュタイン統計)。すなわち挙動が異なる。

17s2045: フェルミ粒子は陽子、中性子、電子でボース粒子が、光子なのはなぜですか? M: 17s2037 参照

17s2047: シュレーディンガー方程式で説明できない現象にはどのようなものがあるか。また、その現象はどのような方法で解決しているか。 M: 19s2020 参照 // 解決とは?

17s2051: 特にありませんでした。 M: 質問が記載されていない。

18s2004: 固有関数 α 、 β は規格化直行しているのは、どのような理由で定義できますか。 M: 言葉づかいがヘンテコ。論理学を復習する必要がある? // 定義するのに理由は関係ない。好きに定義すればいい。ただし他と論理的整合性が取れるように、矛盾が無いように定義しないと意味がないけど。

18s2006: 粒子 1 と粒子 2 が衝突したときに、エネルギーが発生したり、粒子それぞれに変化が起きたりすることはあるのでしょうか。 M: 本気か? 正気か? 力学の基礎を復習する必要があるのでは? // 粒子が衝突したときにエネルギーが発生するとは、エネルギー保存則との関係は??

18s2009: 電子が複数ある系の場合、どの電子がどのスピンオービタルに入るのかはミクロな 2 粒子の

衝突と同様に区別できなく、特定できても次の瞬間にはまたわからなくなるのか? M: 本気か? // どの電子がどのオービタルに入ったかがわかるということは、電子が区別できるということか?

18s2014: 今回の講義で出てきた実験値に近づけるためにわざと数値を合わせているのですか M: 数値合わせをどうやってするというのか? シュレーディンガー方程式を解いて得られる答えを、恣意的に操作・改変できるということか??

18s2018: 今回のように、量子力学的と付くことで本来の意味と変わる単語は他にありますか。 M: “本来の意味” とは何か?

18s2027: スピン量子数の符号にはどういった意味があるのでしょうか? M: 章末問題 6.44, 6.45 はオービタル角運動量の話だが、これをスピン角運動量に読み替えて、 $\hat{H} = \hat{H}_0 + \frac{\mu_B B_z}{\hbar} \hat{S}_z$ から磁場中にある電子スピンの系のエネルギーを求める。

18s2029: 電子スピンを考慮すると HF 法にどのような影響があるのか M: クーロン積分や交換積分が生き残るのは、同種のスピン同士となる。

18s2030: Stern-Gerlach の実験では結局電子のスピンが観測されましたが、逆になぜ磁気モーメントを求められなかったのですか? M: Stern-Gerlach の実験で検出しているのは磁気モーメント μ であり、 $\mu = \frac{e}{2m_e} m_S$ でスピン角運動量と関連付けられている。

18s2032: 第 4 の量子数であるスピンも考慮したシュレディンガー方程式はあるのでしょうか? M: 相対論的量子力学の ディラック 方程式とか。あるいはスピンの寄与する項を付け足したシュレーディンガー方程式とか (たとえば p.328)。

18s2034: 講義後半で $C \pm 1$ について、 $C=-1$ はフェルミ粒子、 $C=1$ はボース粒子の 2 種類の粒子があると説明があったが、講義の前半の説明のように粒子は区別することは出来ないのではないのか? M: 国語力不足? $C = \pm 1$ の論理が理解できない?? // 区別できないから $\Psi(1, 2) = c\Psi(2, 1)$ なのだが.....

18s2038: シュレーディンガー方程式でスピンの影響を含めた式をつくることはできないのか。 M: 18s2032 参照

18s2043: Stern-Gerlach の実験で、2 点のみという結果が得られると、なぜ電子がスピンしているという証拠になるのか? M: 17s2007 参照

18s2045: 第四の自由度が量子数であるという仮定はなぜ立つのか M: 勘違いでは? 誰もそんな仮定をしていないが?

18s2046: Stern-Gerlach の実験で Ag を用いたのは Ag には他の原子と違った利点があるためなのか。 M: Stern と Gerlach に聞けばいいのでは? :-p // 17s2028 の後半参照

19s2001: Na の炎色反応は黄色であるのは、D 線が二重線であることと関係ありますか。// フェルミ粒子、ボース粒子の名前の由来は何ですか。 M: 自分で考えてわからないのはなぜか? // エネルギーの絶対値と分裂するかどうかとは独立な話では? // 本気か? 人名

19s2002: 第 4 の自由度を導入した時、電子がスピンしていると例えると、どのような点で都合がよかったのか。 M: 自分で考えないのか? // 三つの自由度で空間内での運動の様子 (位置) は記述できるので、第四の自由度は粒子の内部運動と考えるしかない。惑星の 公転-自転 など。

19s2003: 講義内で「半整数」を「半奇数」ともいうと言っていたが、半偶数と言ってもよいのか。言ってよい場合、どちらの表現の方が用いられやすいのか。 M: 自分で判断できないのはなぜか? // 本気か? $S = \frac{1}{2}$, etc. の表記について、“半偶数”とはどういう数か?

19s2004: 実際には電子は自転していないのに、自転していると例えたのは何故ですか? M: たとえ

た人に聞けばいいのでは? :-p // 19s2002 参照

19s2005: s が大きな値をとれないとなぜスピンは非古典的だと言えるのか **M:** 意味不明. 大きな値うんぬんと、誰が言ったのか?

19s2006: 波動関数における粒子の交換で、反対称なフェルミ粒子と対称なボース粒子に性質的な違いはあるのか。 **M:** 17s2037 参照

19s2007: 粒子の交換に対して波動関数の符号が反転するかしないかわかることでどんないいことがあるのですか。 **M:** 17s2037 参照

19s2009: スピン量子数の符号は電子が上向きか下向きかによって決まるものなのでしょうか? また、電子が軌道に入るときに上向きの電子が優先して入るのは何故ですか? **M:** “スピン” がたとえであるのと同じく, “上向き/下向き” も二つの状態を区別する以上の意味はない. 量子数の符号は磁気モーメント $\mu = \frac{e}{2m_e} m_S$ として, あるいはエネルギーとして物理的な意味があるが..... // 19s2019 も参照

19s2010: 量子数の取りうる値が整数に制限される場合と、半整数、半奇数の角運動量が導入された場合では反応にどれほど影響が出るか。 **M:** 状態の数に影響を与える.

19s2011: マクロな (古典的な) 粒子について波動関数で表すと、どのようになるのですか **M:** 別に, 自分で考えてみればいいのでは? // 普通に考えることの, どこに支障があるのか? ちなみにド・ブローイの式から波長が計算されるが?

19s2012: フェルミ粒子が電子や陽子、中性子などであり、ボーズ粒子が光子などであるということは、どのようにして求められたのですか。 **M:** 17s2037 参照

19s2013: スピンオービタルを $\Psi(x,y,z, \sigma) = \Psi(x,y,z) \alpha(\sigma)$ または $\Psi(x,y,z) \beta(\sigma)$ と書くことありましたが, $\alpha(\sigma)$ や $\beta(\sigma)$ の具体的な形が不明でもスピンオービタルを求めることができるのですか。 **M:** 言葉づかいに注意. 例示されたスピンオービタルは何かから求められたのではなく, そう書いただけ. // いまさらながら function (関数) の意味を理解していないのか? 数学の基礎を復習する必要があるのでは?

19s2014: 他電子系では水素型原子の時と違って、動径分布関数からわかるような電子の軌道の形が電子の相互作用によって変形していると考ええることは出来ますか? **M:** 自分で判断できないのはなぜか? // 考えるだけなら, 自由にできるのでは? それが他と矛盾しないかどうかは知らないが.

19s2015: どうして形式的な関数 σ が必要となるのか? **M:** 本気か? 変数なしに, 関数や積分をどう表式化するのか?

19s2018: 波動関数が反対称か対称によって粒子の種類が分けてあるが、実際の観測上でフェルミ粒子とボース粒子は違いがあるのですか? **M:** 17s2037 参照

19s2019: どの原子においても、電子のスピンの回転軸の方向は常に一定なのですか。 **M:** “たとえ” であって, それ以上の意味はない. 本当にスピン (回転運動) をしているわけじゃない.” が理解できないのでしょうか? 回転運動していないので, 回転軸の方向などは無意味です. 上向き/下向き, up/down, 平行/反平行, α/β など, 単に二つの状態を区別するための名前. 19s2009 も参照

19s2020: シュレーディンガー方程式では説明できない現象として、ナトリウムの原子スペクトルの黄色い二重線がありましたが、他にはどのような現象があるのでしょうか。また、他の現象について説明できない原因は全て明らかになっているのでしょうか。 **M:** 17s2029 も参照 // 通常のシュレーディンガー方程式にはスピンが含まれていないし, 非相対論的ではある. それ以上については, そもそも私たちは 万物理論 TOE を知らないで, 自然について全てを明らかにしたとは言えないのでは?

19s2021: 波動関数が二つの電子の交換に対して反対称か対称かの違いで何が変わるのでしょうか。 **M:** 本気か? // 一方は電子についての正しい記述になっていない. 正しい波動関数, エネルギーが得られない.

19s2022: ミクロな粒子は絶対に区別することができないのですか。あるいは例外はあるのでしょうか。 **M:** 本気か? 物理理論を何だと思っているのか? もしかして “区別できない” の意味も理解できていないのでは?

19s2023: 電子は粒子の交換に対し、波動関数の符号が反転する、フェルミ粒子であることを理解しました。また、中性子もフェルミ粒子であると知った上で中性子 2 個の場合はスピンの 1 になると思い、対称になると思うのですが波動関数は粒子の入れ替えに対して対称になるのでしょうか。 **M:** その場合は, 二つの中性子を互いに交換するのではなくて, 中性子二個一組を別の二個一組と交換することになる. // 超伝導の BCS 理論は, 二個の電子が クーパー対 と呼ばれるペアを作り, これがボース粒子として振る舞うという考え.

19s2024: シュレーディンガー方程式では満足に説明できない現象の 1 つとして、Na の原子スペクトル中のことを述べていたが、他にはどのような現象があり、そして、なぜ満足に説明できなかったのだろうか。 **M:** 19s2020 参照

19s2025: スピン量子数が半整数なのは何故ですか? 実験的に求められたものですか? **M:** 状態の数が 2 個なので, $2S + 1 = 2$ を満足するためには $S = \frac{1}{2} (m_S = \pm S)$ になる. // 実験事実としては Stern-Gerlach により, 磁気モーメントの取り得る値は二通りに限る と示された.

19s2027: $\phi(1,2) = c \Psi(2,1)$ とあるが、どうして同じ状態をあらわすのに定数をかけるのですか。 **M:** 波動関数の意味が分からなければ, 教科書 4 章や参考書をよく読めばいいのでは? // 定数倍異なる波動関数は, 異なる状態を表しているか?

19s2028: シュレーディンガー方程式からナトリウム原子スペクトルの黄色の線が二重線であることを導けなかったのはなぜですか? **M:** 19s2020 参照

19s2029: 計算結果を近似したときに、十分に近似していることを確かめるにはどのようにすると良いのですか? **M:** “十分” かどうかの基準は何か? 良いかどうかを誰が判断するのか?

19s2030: スピンを考慮したシュレーディンガー方程式を立てることは可能なのか? **M:** 18s2032 参照

19s2031: 電子スピンに対して半整数の角運動量を導入したのはなぜですか? **M:** 19s2025 参照

19s2032: 電子以外のフェルミ粒子やボース粒子において、スピン量子数が $\pm 1/2$ 以外の値をとることはありますか。 **M:** ボース粒子のスピン角運動量量子数は整数. // m_S の取り得る値は $S, S-1, S-2, \dots, -S$ の $2S+1$ 通り.

19s2033: ある原子があった時その原子のスペクトルが何重になるのかは観測する以外にどのような方法がありますか? **M:** 原子の項を考えればいいのでは?

19s2034: 第 4 の自由度であるスピン量子数はなぜ独立しているのか。磁場勾配とは何か。 **M:** 三つの変数 x, y, z はなぜ独立しているのか? // 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?

19s2035: 電子のスピン角運動量はなぜ非古典的概念なのか。 **M:** 古典的概念で説明してみれば分かるのでは? //

19s2036: 電子と同じように、フェルミ粒子は全てスピンしているのですか? // [以下省略] **M:** 19s2019 参照

19s2037: 電子スピンは、観測結果によって回転運動をしていると考えられたのではなくて、実験結果

によってその結果を説明するための考え方として提唱されたということでしょうか。 **M:** 「回転運動していると考えerとうまく説明できる」 ではない。 // 19s2019 のコメント参照

19s2038+: $\Psi(1.2)=c \Psi(2.1)$ と $\Psi(2.1)=c \Psi(1.2)$ の c は同じものなんですか？ $c = \pm 1$ ならば分かりますが、等式として片方の係数は $1/c$ にならなければ成立しないと考えました。 **M:** (+) 考えるのはあなたの勝手だが、粒子の交換という論理をきちんと理解していないのでは？ // ふたつの式の後者は前者の両辺を c で除したのではない。どちらもともに、左辺の波動関数で表される状態から二粒子を交換すると得られる右辺の波動関数は、元の関数と (たかだか) 定数倍異なる、という意味。そして、どちらの式においても、同じ 1, 2 の電子を交換したので、定数倍の定数も同じになるはず。

19s2039: 磁場中でゼーマン効果はスピン量子数の異なる粒子のエネルギー準位に影響を与えることがあるのでしょうか。 **M:** 自分で考えてわからないのはなぜか？ // “ゼーマン効果” について調べればいいのでは？ // 18s2027 参照

19s2040: フェルミ粒子とボース粒子の物理的な違いはなんですか。 **M:** 17s2037 参照

19s2041: 素粒子を分割できないゆえに、電子のスピンは力学的に解析できないのですか。(「スピンと呼ばれるもの」でしかないのですか。) **M:** 微妙に誤解している予感。// スピン角運動量という形では力学的な解析が可能なのでは？

19s2042: ボース粒子であるヒッグス粒子のみスピン量子数が 0 とありましたが、これは何故なのでしょう。 **M:** そんなことどこに書いてありましたか？ // 光子のスピン角運動量量子数もゼロですが？

19s2043: ボース粒子の例をみるとボース粒子を構成する要素にフェルミ粒子があるが、要素とどんな関係があって種類は決まるのか **M:** 複合粒子, 角運動量の合成 // 19s2023 参照

19s2044: スピン量子数の影響も考慮したシュレーディンガー方程式を立てることはできないのでしょうか **M:** 18s2032 参照

19s2045: 電子のスピンを日常生活で感じることはあるのか？ **M:** 観測量としては磁気モーメントなので、磁性 (磁石)。

19s2046: フェルミ粒子とボース粒子において、パウリの原理に従うか従わないかの他に相違する点がありますか？ **M:** 17s2037 参照

19s2047: ミクロな同種粒子は区別できないという話のところで量子力学的なミクロ、マクロの意味と言っていましたがこれはどちらも現実の世界にはないような粒子なのですか？ **M:** 何かの勘違いでは？ // 例えば量子力学的なミクロ粒子である電子は現実の世界にないのだろうか？

19s2048: フェルミ粒子とボース粒子はどのような科学的性質によって区別されているのですか？ **M:** 17s2037 参照

19s2049: SCF では仮定した波動関数と得られた波動関数を一致させるために繰り返し計算を行うが、完全には一致しないという状況があるのか **M:** 20200630 の 19s2031 参照

19s2050: なぜスピン変数には古典的に対応する量がないのですか。 **M:** 19s2035 参照 // 三次元空間内で運動している電子を表すのに、いくつの変数が必要か？ 自由度はいくつ必要か？

19s2051: フェルミ粒子がお互いに量子状態をとれないというのは、金属中の電子の場合だとかわりますか？ **M:** 意味不明。トンでもない勘違いの予感。“フェルミ粒子がお互いに量子状態をとれない”とはどういうことか？何が言いたいのか??

19s2052: ナトリウム原子スペクトルのほかにもシュレーディンガー方程式で説明できない現象はいくつかあることがわかったが、これらに共通するものはあるのだろうか？もし共通点があれば、その共通点から新しく法則などを導くことは可能なのだろうか？ **M:** 17s2029 参照

18s6025: 1) 時期量子数はなぜ半整数なのでしょう。他の量子数のように整数 -1 や 1 などではダメなのでしょう。 // 2) 磁気量子数 m_s は磁場の中での電子の振る舞いを決定させることがわかりました。逆に m_s は磁場がかかっていない限り、わからないのでしょうか？ **M:** 1) 19s2032, 19s2025 参照. 2) 原子の項の発生 (pp.317-335)