

● $p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$ をすると、p 軌道が球になるところがよくわからない。

→ 原子軌道 Ψ は、動径波動関数 $R(r)$ と球面調和関数 $Y(\theta, \phi)$ の積で表されます。動径波動関数 $R(r)$ は、主量子数 n と方位量子数 l のみに依存して式の形が決まり、動径 r のみをパラメータに持ちます。つまり、同じ主量子数の p は p 間で、d は d 間で、f は f 間で、磁気量子数に関わらず（それが p_x なのか p_y なのか p_z なのかなどに関わらず）共通の動径波動関数を持ちます。球面調和関数の二乗和は授業中にもやって見せたように、そして、ハンドアウトにも示しているように定数になってしまいます。つまり、同じ主量子、軌道の形を決める方位量子数（軌道角運動量量子数）をもつ組（たとえば $2p_x, 2p_y, 2p_z$ ）の二乗和は、式からパラメータ θ, ϕ が消えて、 r のみに依存する式になるわけです。つまり、これは、これらの軌道に同数の電子が入った状態では電子の分布が完全に球の対称性に従っているということを意味します。また、空間の中で（外部からの電場や磁場がないとき） x, y, z 軸の方向をどのように設定しようと関係ない（任意に軸を選び直すことができる）ことを示しています。

● フェムト秒単位で起こる事象は他に何がありますか。

→ 光でさえ数百ナノメートルしか進まない時間です。また、原子核の位置はほとんど変化しないとみなせるくらいの短い時間です。なので、この程度の時間内に完了できるのは、軽くて速い粒子（量子）の状態変化がメインだろうと思います。

● 太陽の光と LED の光は同じ光子なのに、太陽の光の方があたたかいのはなぜか。

→ 2 つの要因が考えられますが、一つは光量の問題、もう一つは波長の分布の問題です。

絶対的な明るさという観点で条件がそろっているかどうかというところを、まずはじめに検討する必要があります。ヒトの眼は少々暗いからと言ってすぐに見えなくなったりしないよう、明るいところでは瞳孔を閉じ、暗いところでは瞳孔を開くような調整機構を持っています。そのため、LED や蛍光灯のような人工照明の下で昼間の太陽と同じ明るさのように感じてしまっている、実際にはその数百から千分の一の明るさでしかないなどということがあり得るのです。カメラに親しむ人なら、そのあたりはよくご存じかもしれません。適正な露光を得るために、同じ ISO 感度の設定、同じ絞り値でも室内外でシャッター速度は大きく変化します。

次に波長の分布の問題です。つまり、どの波長の光を我々の体が吸収し、どの波長の光を反射するのか、ということにも依存します。大雑把な言い方になりますが、我々の体は大量の水を含んでおり、その水が（ある波長範囲の）赤外線をよく吸収します。その結果、我々は赤外線の照射で暖かいと感じます。そのため赤外線を熱線などと表現することもあります。これまた大雑把な話ですが、赤外線の光子のエネルギーは物体の振動順位間の遷移に相当します。一方で、X 線などは体の組織を素通りしてしまい、吸収されないの、一つずつの光子が大きなエネルギーを持っていても、暖かいと感じないということになります。もちろん、どんな波長であっても光子はエネルギーを持っており、吸収された光のエネルギーは、一部の例外を除いて最終的に熱エネルギーに変換されます。しかし、可視光は一部しか吸収されません。可視光をすべて吸収してしまう物体は真っ黒で見えないはずですが。

● 波動関数？シュレディンガーの波動方程式？に対する理解があいまいなままこの学年までできてしまいました。まだ間に合うなら勉強しなさいたいのですが、どうすればいいですか。

→ もちろん間に合います。なにがとも、たとえ 50 才、60 才、70 才になっても死ぬまで遅すぎるということはありません。むしろ、時間の経過とともに若返ることはない、学ぶのにより良いのは来年より今年、明日より今日です。とはいえ、今日は別にやらないといけなことがあるなら、それもやらないといけませんが。

どうすればよいですか、という質問ですが、まずは手を付けることです。その上で、学校に在籍している間は勉強を助けてくれるために教員がいます。勉強してわからないところは質問すればよいと思いますよ。

● 波動方程式がわからなかったです。

● 時間依存のシュレディンガー方程式がよくわからん...

→ 質問の範囲が広すぎて適切な回答ができません。いずれもハンドアウトを参考にもういちど自分で整理した上で、どこがわかってどこがわからないのか整理しましょう。

● 全体的にわからないけどどこがわからないかわからないので、どこがわからないかわかるためにはどうすればいいですか。

→ 整理することです。まず、ハンドアウトなどをフォローしながら、自分でわかっているところを挙げて行きます。自力でその次のステップを導くことができるかどうか確認してみましょう。次が自分で導けるのであれば、その部分は分かっているようです。そのようにして調べて行きます。

● 原子軌道の形を現実にかきめる方法はあるのか。

→ 原子軌道の形というのは、波動関数の式がわかれば導くことができるので計算で可視化することができるのですが、質問者氏は実験的に調べることができるか、という質問をしているのですよね。

なお、軌道は入れもののような形のあるものではなく、その軌道を記述する量子状態にある電子の波の定常波の形です。また、一方で電子を観測するときには、どこか一点に収束してしまいます。このあたりが軌道の形の観測を難しくしていそうです。そんな話を他の先生と話をしているときに言われて気づいたのですが、ひとつは AFM や STM など、原子ひとつずつを個別に見ることのできる顕微鏡は、その原子の最外殻の電子の分布を見ていると言ってよいと思います。

とはいえ、ひとつずつの軌道、特に内殻電子の入った軌道を見ることが可能かということ、なかなか興味深い質問ですが、単に私が知らないだけかもしれませんが、どうすれば良いのかのアイディアがありません。ただ、いま可能ではないことがこの先もずっと不可能だと断定できるかどうかともわかりませんし、そのように切り捨ててしまうことは、とてもつまらないことです。是非質問者氏もこの疑問をわすれないで検討を続けてください。もしかすると科学の新しい発展になるかもしれません。特定の軌道の（その量子状態をとる）電子とのみ相互作用するような現象を見出すとかすればあるいは可能性がでてくるのかもしれませんがね。

● 原子の中の電子が消滅することはあるのですか。この宇宙空間から消えること。

→ 質量エネルギーの保存則が教えてくれるところによると、質量が消滅する際にはそれだけのエネルギーが周囲に放出されなければなりません。原子の中なのかそうでないのかに関わらず、電子が「対消滅」する（反粒子である陽電子と衝突して生じる）と、2～3個の光子の形でエネルギーが放出されるらしいです。これは別に珍しい（というか理論的に予測されているのみで観測されないような類の）事象なのではありません。たとえばナトリウムの放射性同位体 ^{22}Na は γ 線源としても知られるのですが、原子核が β^+ 崩壊によって陽電子を放出し、これが近傍の原子の電子と衝突し、対消滅を起こし光子を放出しています。

当然、逆の過程で高エネルギーが質量に変換されることもあり得ます。「対生成」ではたとえば、電子と陽電子を生成します。なお、陽電子は、電荷がプラスで質量などは電子と同じ粒子です。

このあたりは「ディラックの海」だとか、「ろば電子」などともあわせて調べてみると少しだけ幸せになれるかもしれません。水の中に生じた気泡が、水とは逆の質量を持っているように振る舞い、そこに水が入りこむことで見かけ泡がなくなるように、ディラックの海にみつしりと詰まったロバ電子（負のエネルギーをもった電子）の抜け落ちた穴が陽電子として振る舞うという解釈です。対消滅で陽電子と電子が消滅するという現象を、正のエネルギーをもつ電子が負のエネルギーの空位に落ち込むことだと考えると、質量がエネルギーに変換されるこの過程が、この宇宙空間から消えることであると表現するべきかどうかというところでは異論がでてくるかもしれません。

とはいえ、なににせよ「化学（質量保存則が成り立つ世界での学問）」の範疇を飛び越えてしまいさえすれば、質量がエネルギーになり、エネルギーが質量になるなどということは特に珍しいことではないということになると思われます。