

● 太陽光を用いた水の電気分解（人工光合成）により得られた  $H_2$  を核融合での  $H \rightarrow He$  の変換に使用してエネルギーを取り出すという話があったが、核融合には高温高压が必要で、それを実現するためには電力が必要であるから、その電力が仮に火力発電によるものだとすれば、それを実現するには  $CO_2$  が発生しているため、クリーンなエネルギーとは言えないという解釈でよいのでしょうか（核融合装置の原理を理解してないだけだったらすみません）。

→ 太陽光の利用の話で、太陽光のエネルギーを用いて水を電気分解して生じた水素はカーボンニュートラル（発生段階で二酸化炭素を生じていないため、環境中を循環する炭素総量の増加に寄与しない）であるという話と、化石燃料に依存しない新エネルギーとして、核融合のプロジェクトが動いていますよという話がごちゃ混ぜになっていませんか。

核融合（や現状の核分裂型の原子炉）では、ある段階で電力の投入が必要だとしても、トータルとしてエネルギーを取り出すことができる場合には、火力発電による電力はトータルとして不要でしょう。

● 最先端のエネルギー発電の研究開発は、どんな人がどんな規模で行っているのか。

→ たとえば人工光合成については、ウィキペディア「人工光合成」

<https://ja.wikipedia.org/wiki/人工光合成>

にもよくまとめられています。ご一読下さい。

「日本発の夢技術「人工光合成」はここまで来た」東洋経済オンライン、2018/08/30

<https://toyokeizai.net/articles/-/235204>

なども検索ででてきたページですが、面白そうですよ。

国際熱核融合実験炉（ITER）については、2025年の初プラズマ達成、2035年の重水素-トリチウム運転開始をそれぞれ予定として、着々と準備が進められているところです。規模等については、やはりウィキペディア「ITER」（<https://ja.wikipedia.org/wiki/ITER>）などを参照してください。

● エネルギー、運動量が量子化されているとはどういうことだろう。そもそも量子化とは・ここら辺がわからなかった。

→ 連続量をとらず、離散的な値しかとらないことを量子化と言います。つまり、エネルギーの量子化とは、ある系のエネルギーは連続的に増えたり減ったりするのではなく、はしごの段を上がったたり降りたりするように不連続的な値しか取れないという意味です。原子核の  $1s, 2s, 2p$  などの軌道エネルギーは知ってますよね。

● 光電効果をもって「光は粒子性をもつ」と考えることを理解できた気がしないです。

→ 粒子性とは主に、光のエネルギーは波長によって決まってくる最小単位を持っていて、それ以上小さい量にわけるとはできないという意味です。金属などの仕事関数よりも  $h\nu$  の小さい光は、どれだけ連続して金属に照射しても、また、光の強度を（通常の範囲内で）上げていっても、光電子が飛び出してくることはありません。一方、金属の仕事関数よりも  $h\nu$  の大きい（波長の短い、振動数の高い）光は、光量が少なくても光電子が観測されます。これは、水道水のような連続したエネルギーとして光が金属にあたっているのではなく、雨のようにバラバラの粒が五月雨式に金属にあたっているのだと考えることで説明できるでしょう。

通常光源からは  $1\text{ cm}^2$  あたり毎秒  $10^{15}$  個程度の光子が供給されています。この数値をもとに計算すると、ベンゼン程度のサイズの分子を  $25\text{ \AA}^2$  ( $25 \times 10^{-20}\text{ m}^2$ ) を考えたときでも、毎秒  $10E19 \times 25E-20 = 2.5$  個/秒程度の光子しか衝突しません。原子1個を  $1\text{ \AA}^2$  と近似してしまえば、平均して10秒に1個程度の光子しか衝突してこないということになります。

ここから、アインシュタインの光当量則（「分子や原子と光の相互作用において、一つの原子や分子は、ただ一個の光量子のみを吸収する」というもので、レーザー光源のように特に光量子密度の高い光源をもちいた場合には例外もあります）という経験則が成立しています。

● 干渉波実験のやり方（質問者氏に確認したところ、光子を一つずつ別々に発生させるのはどうするのか、ということでした）。

● 授業の最後で説明していた干渉実験のやり方や、この実験でどのようなことがわかるかがわかりません。→ この干渉実験では、光を使っても電子を使っても同じ結果（結論）を得ることになります。さらにはもっと大きな分子やウイルスなどの（いわゆる通常は粒子として考えることの多い）ものでも同様だそうです。

光で説明しましょう。光の量を絞る（光源に対し、フィルターで減光する）ことで、単位時間当たりにスリットに入射する光子の量を減らしています。どこに光子が到達したのかを調べるためのスクリーンには、一度の検出ごとに一つの光子しか到達しない程度にまで光量を絞ることが可能です。そして、その場合でも、スクリーン上には2つのスリットを同時に通った波による干渉模様が生じます。

1つ目のスリットに入射した光子は、スリットにより回折し、放射状に広がります。これは、細いスリットを通る波の性質です。粒子だとするならば（すくなくともスリットに粒子の縁が引っかかって（おそらく内側に）軌道が変わるようなものを除くと）直進するところです。さらに2つ目のスリットに到達したとき、この光子はもし皆さんがよく知っている粒子であるならば、どちらかのスリットを通り、もう一方は通らないという結果を予想させます。しかし、実際には、一つずつの光子がどちらか一方のスリットを通ったのではなく、両方のスリットを同時に波として通りぬけ、その結果としてできる2つのスリットの出口から広がる同心円状の波の干渉模様を生じているのです。

● ヤングの実験の他に同じような実験を行ったものはいるか。

→ 「二重スリット実験」などをキーワードに調べてみて下さい。いろいろなバリエーションがあります。

● 光子とはどのような性質をもっていて、どのようなものなのか。

● 光は粒子と波の性質2つをもつことは知っていたが、粒子としての性質はどのようなものかと考えるとうまく答えられない。

● 光の量子性や波動性を示す実験のくわしい方法を知りたい。

● 光の二面性についてもう少しくわしく教えてほしいです。

→ おおざっぱに言って、多くの場合、光の吸収など1つの原子や分子を相手に起きるので、相互作用をするときには1点であるかのように振る舞います。つまり非常に小さいボールを投げて衝突したかのように見えるわけです。

粒子は基本的には直進します。細いスリットを通ったからといって、同心円状に広がったりすることはありません。しかしながら、空間を伝わったりしている電子や光子などは、スリットを通るときに同心円状に広がったり、2つの離れたスリットを同時に通って干渉を起こしたりします。つまり、観測される前は波として存在しています。

このような粒子としての振る舞いと、波としての性質を併せもつことを二面性と表現しています。「場合によって波になったり粒子になったりする」という説明をしているウェブサイトなどもあるのですが、波と粒子とが何等かのタイミングで切り替わっているわけではありません。有機化学の共鳴構造（極限構造）と、実在する共鳴混成体の構造の関係のように、単なる波だったり、単なる粒子なのではなく、それぞれの性質を併せ持つものなのです。量子化されていて、あたかも粒のように最低単位があって、それ以上小さく切り分けることができなく、同時に空間の中に広がった波でありながら、相互作用する相手が原子や分子（で一つだけ）の場合にはあたかもはじめから一ヶ所に存在していてそこで衝突したかのように思えるだけ、というイメージではないのでしょうか。

● 光子は光が電子のような粒子のかたちをしているというイメージで合っていますか。

→ 少なくとも光子に形はありません。電子にも形はありません（大きさも分かっていません）。

● 「光をさえぎると影ができる」とこと、「光の二面性」の関連について教えてください。

→ 太陽光のように、光源から平行に直進しているような光であっても、影との距離が遠いとき、影の縁がぼやけていたり、親指と人差し指で輪を作るようにして、指先を少し離して影を作らせた場合も、影の縁が合流してしまったり、など、光が波として進んでいるために起きた回折現象を見ることができます。

● 光の波動性と粒子性はどちらが強いとかはありますか。

→ 波長の短いものほど、回折の度合いが小さくなりますから、直進性が高いと言っても良いでしょう。これを持って、波長の短い高エネルギーな光ほど粒子性が高いという表現をすることがあります。

● 人間の目は光を粒子として観測するのか、波としてなのかがよく分からなかったです。

→ 光電効果の説明のときのように、粒子であるかのように相互作用としているという捉え方の方が多いのではないのでしょうか。むしろ、「波として観測する」ということについて、質問者がどうイメージしているのかがわかりません。

ヒトの眼が光を感知する際、眼の中の錐体細胞と桿体細胞中のレチナールが光子を吸収するところが最初の過程になります。上の方の光電効果についての質問にもありましたが、一度に一つの分子が吸収できる光子はただ1つです。通常光源からの光子は、雨粒のように不連続に降り注いでいて、一つの分子程度の面積に対しては、1秒に数個程度しか注がないからです。つまり量子化されていて、粒子のように見えるという意味です。

錐体細胞の方は光の三原色に対応した異なる波長の光を吸収することができるようになっています。つまり光の波長に対し、異なる振る舞いをするようにはできているわけです。

● 電磁波の正体というか、感覚がいまいちよくわかりません。

→ 授業配布資料の一番下（時間がなくてきちんと説明していません）を参照してみてください。コンデンサのように向かい合った対となる電極に電圧を掛けると、電場が生じます。この電極を双葉が開くように開いていき、そして、交流電圧をかけたとき、2枚1対の電極間の電場の向きが（交流の周波数と同じサイクルで）入れ替わります。この電場の変化により、誘導磁場が生じます。電場自体が交流電場なので、誘導磁場も時間変化しますが、これが更に近傍に誘導電場を生じます。このように、誘導磁場と誘導電場が互いに誘起しあいながら継続していくものが電磁波、または電波です。

この機構で生じる電磁波は、電極に掛けた交流電圧と同じ周波数をもつこととなります。電磁波のうち、ある特定の振動数または波長をもつものは、光（可視光、赤外光、紫外光など）と呼ばれる場合があります。

水面の波を考えたとき、水があることが前提ですが、水があることがそこに波があることを意味していません。これは水面の波の媒体が水であるだけで、波と水は別物だからです。これは、たとえば音のような空気粗密波でも同様のことが言えるでしょう。想像しにくさの原因にもなっているのですが、光（電磁波）の場合は、そのような媒体が存在しませんが、電磁波があって、電場、磁場が振動しているということは、そこにエネルギーがあることは良いですね。電子には質量がある点で光子とは異なりますが、ある観点では質量とエネルギーは等価であると考えてよい ( $E = mc^2$ ) わけですから、粒子としての光子があると言ってもよいです。

● 存在確率（密度）を示した波動関数が波の性質となるのは何故ですか。（確率→波？）

● 波動関数が何なのかよくわかりませんでした。波動関数は具体的なものでなく、あるものを示す係数でいいの。

● 波動関数の二乗が確率存在密度だということは分かったのですが、波動関数そのものがどのようなものを表しているのか、復習の意味もこめて教えてほしいです。

● 存在波は波動関数と考えられる（という解釈で）いいですか。

→ 光子の場合は、上で説明したような具体的に説明できる電波としての波（電場と磁場の相互誘導による振動）があります。電波が波として空間を伝わるイメージ、隙間を回折したり、互いに干渉しあうイメージもよいでしょう。

質量をもつ電子、原子、ひいてはもっと大きな物体も、波でもあり同時に粒子でもある存在だと説明されます。ここで、その波は物質波など呼ばれたりします。電子について波動性をはじめに出てくるのはボーア模型で、原子核から決まった距離のところにある軌道（K 殻、L 殻、M 殻…）に電子が入るのは、その距離で電子の物質波が定常状態を作る必要があるからだという説明をしていくわけです。ボーア模型は荒いモデルであることは確かですが、原子の構造をイメージする第一歩として非常に大事なモデルになります。

光子も、電子、原子などの物質波も、水面の波や空気中の音（粗密波）のように、干渉したりして弱め合ったり、強め合ったりするところがあるように、ある場所では強く観測され、ある場所ではほとんど観測されないということが特定の状況の下でおきてきます。これが存在確率が波で表されている（厳密には、振幅の大きいところ、すなわち波のある瞬間における振幅が正であろうと負であろうと無関係に、振幅の最大幅の二乗に比例した存在確率になる）という意味合いです。これを存在波と呼んだりしますが、その波を表す式が波動関数ということになります。

実際、光子については、存在波（波動関数）は電磁波と一致していると考えてよいと思います。電子などについては、シュレディンガーの波動方程式のところで  $\phi$  や  $\varphi$  などの文字で表すものが存在波を表す波動関数です。電子は空間座標の中で、 $\phi^2$  が値を持つ範囲内に存在していることとなりますので、関数  $\phi^2$  の形のことを、その電子の入る原子軌道、分子軌道などと呼びます。

● 波動関数が粒子の存在確率を調べる上で便利なことはわかったが、具体的に、どんな研究で約に立っているか、粒子の存在がわかることのメリットはなにか。

→ 波動関数という言葉が、原子軌道や分子軌道と置き換えて、自分なりに質問に対する答えを考えてみてください。

● 存在波の観測可能な期待値とは

→ 古典力学では、実験的に観測可能な量はすべて、系のとる状態により一義的に決まる関数として扱うのに対し、量子力学では、状態と量との関係は一義的ではなく、状態から確率的に求められると解釈します。不確定性原理もこの辺りに関係します。すなわち、観測可能量は、それぞれある確率でのみ出現すると表記されるわけです。なお、測定値に出現確率を乗じたものが期待値です。

● 不確定性原理について。位置と運動量を同時にかつ正確に測定できないのはなぜか。

→ いろいろな説明があると思いますが、自分で調べてみると良いと思いますよ。

● 銀塩写真のプロセスの現像の方法

→ 質問者が知りたいことが何なのかわかりません。具体的な銀塩写真の現像の仕方や原理などを知りたいのであれば、まずは自分で調べてみてください。この授業でその部分をテストなどで問題にすることはありません。

● 野球のボールほどの質量をもつものが波の性質を示すとしたら、現実世界はどうなりますか。

→ バットで打ち返すのが難しくなるでしょうから、野球というゲームの内容や規則が変わるでしょうね。

● 英単語とかも覚えた方がいいのですか。

→ 覚えた方が良いに決まっていますが、テストで問うかどうかは別問題です。

● ある程度理解していないと質問できないのでごめんなさい。今回は私にはできません。

→ そのために、必ず質問しましょうと言っているわけです。次は頑張りましょう。