

化学基礎

第二回オンライン講義

阿部穰里

2020年5月20日

9歳の娘が描いた絵です。
(腹筋だけ私が書いてます。)



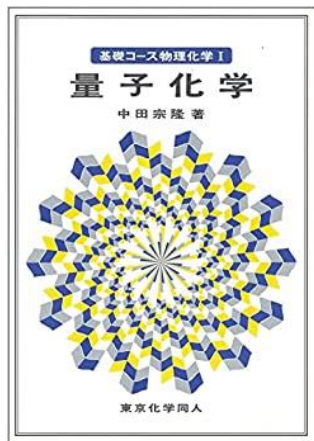
阿部が昔、
赤点とって読んで
心入れ替えた本(絶版)
(中田先生は農工大の先生)

数式の細かい疑問が
ほぼすべて書いてある

参考書のおすすめはこれだ!



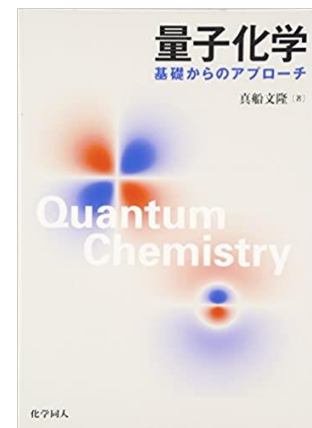
量子化学
基礎コース物理化学I
中田宗隆



量子化学
基本の考え方16章
中田宗隆



量子化学
基礎からのアプローチ
真船文隆



今日のアウトライン

- 先週の緊急課題の答え合わせ
- 光について
- 今回の小テスト: 波の問題について
- 次回の小テスト: 演算子について

緊急課題

真空の誘電率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$ ← A: アンペア = C / s

電子の質量 $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

電子の電荷の大きさ(電気素子) $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ← C: クーロン

プランク定数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$

光速 $c = 2.999 \times 10^8 \text{ m} / \text{s}$

$$E_n = - \left(\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \right) \frac{1}{n^2}$$

ボーアモデルの式から、

$E_6 - E_2$, $E_5 - E_2$ のエネルギーに相当する光の波長を nm で有効数字3桁求めよ。ただし波長 λ は $E = hc / \lambda$ の関係を用いよ。まず E がエネルギーの単位の次元をもつか確認せよ。電卓、エクセルなど使用可。google formより回答。また、この答えの意味について述べよ。



数学者
バルマー
60歳
女子高の先生

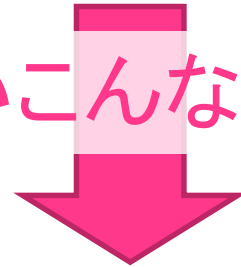
410, 434, 486, 656

365で割ってみよう



1.797, 1.332, 1.189, 1.123

だいたいこんな感じか？



1.800, 1.333, 1.190, 1.125

$9/5, 4/3, 21/25, 9/8$

$$364.56 \frac{(n+2)^2}{(n+2)^2 - 2^2}$$

先週のアウトライン

$$E_4 - E_2$$

$$E_5 - E_2$$

水素原子の放電から出る光の

$$E_3 - E_2$$

$$E_6 - E_2$$

434nm

410nm

486nm

656nm

化学基礎って何！？より



『なぜ、水素原子からは特別な波長の光しか出てこないのか？』

ボーアモデルで計算すると、
水素原子の光の波長が説明できる！
ボーアモデルは正しいのか？

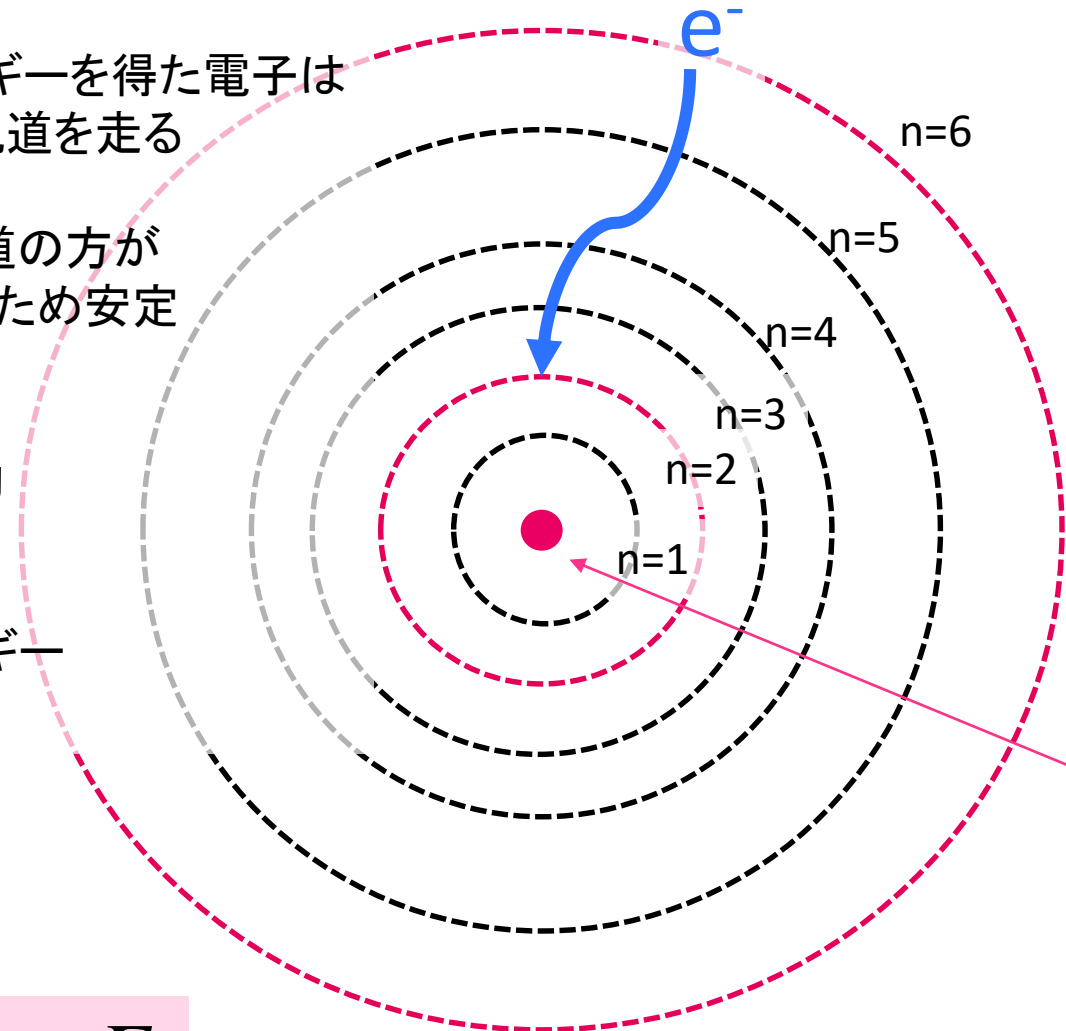
ボーアモデル＝水素原子モデル

放電によりエネルギーを得た電子は
n=6という外側の軌道を走る

↓
しかし、内側の軌道の方が
エネルギーが低いため安定

↓
光を放出し
内側の軌道に移動

なので、
とびとびのエネルギー
の光しか持たない



$$E_n = -\left(\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}\right) \frac{1}{n^2}$$

$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} n^2$$

原子核
+e

$\Delta E = E_6 - E_2$ のエネルギーの光が見えている。

それが410nm ボーアモデルすごい！

今日のアウトライン

- 今回の波の問題
- 先週の緊急課題の答え合わせ
- 光について

突然ですが...

誰の家でしょう？クイズ

わかったら、チャット欄に
プライベートメッセージで
答えを書いてください

スイス ベルン

1. この通り沿いのアパート
2. 1階は現在
その人の名前のカフェ



2018年秋、阿部訪問

3部屋しかない小さなアパート(トイレなし)



特許庁に就職して、少しばかり生活が楽 になったころの家。子供も生まれる



ここに住むわずか数年の間に 2つの大発見をし、1つはノーベル賞





Einstein, Hans Albert & Albert Einstein, 1918



Albert & Hans Albert Einstein



Albert, Hans Albert & Einstein, 1928

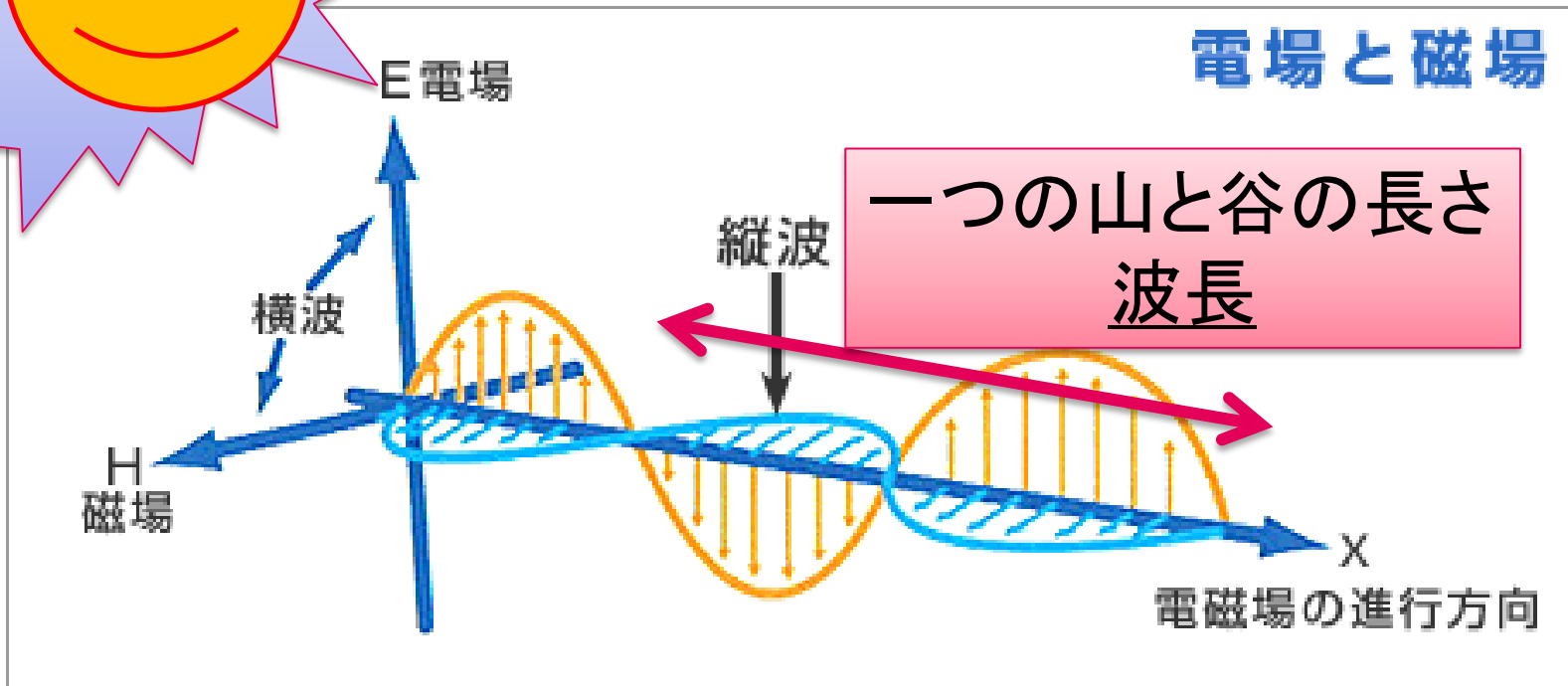
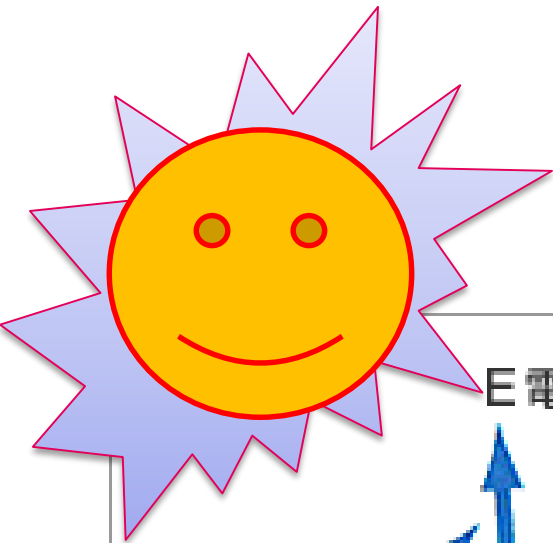
アインシュタインでした～☺

今日の話は光です

“光とは何か？”

チャット欄に思いつく限り、
書いてみてください
(公開設定で)

光とは何か？

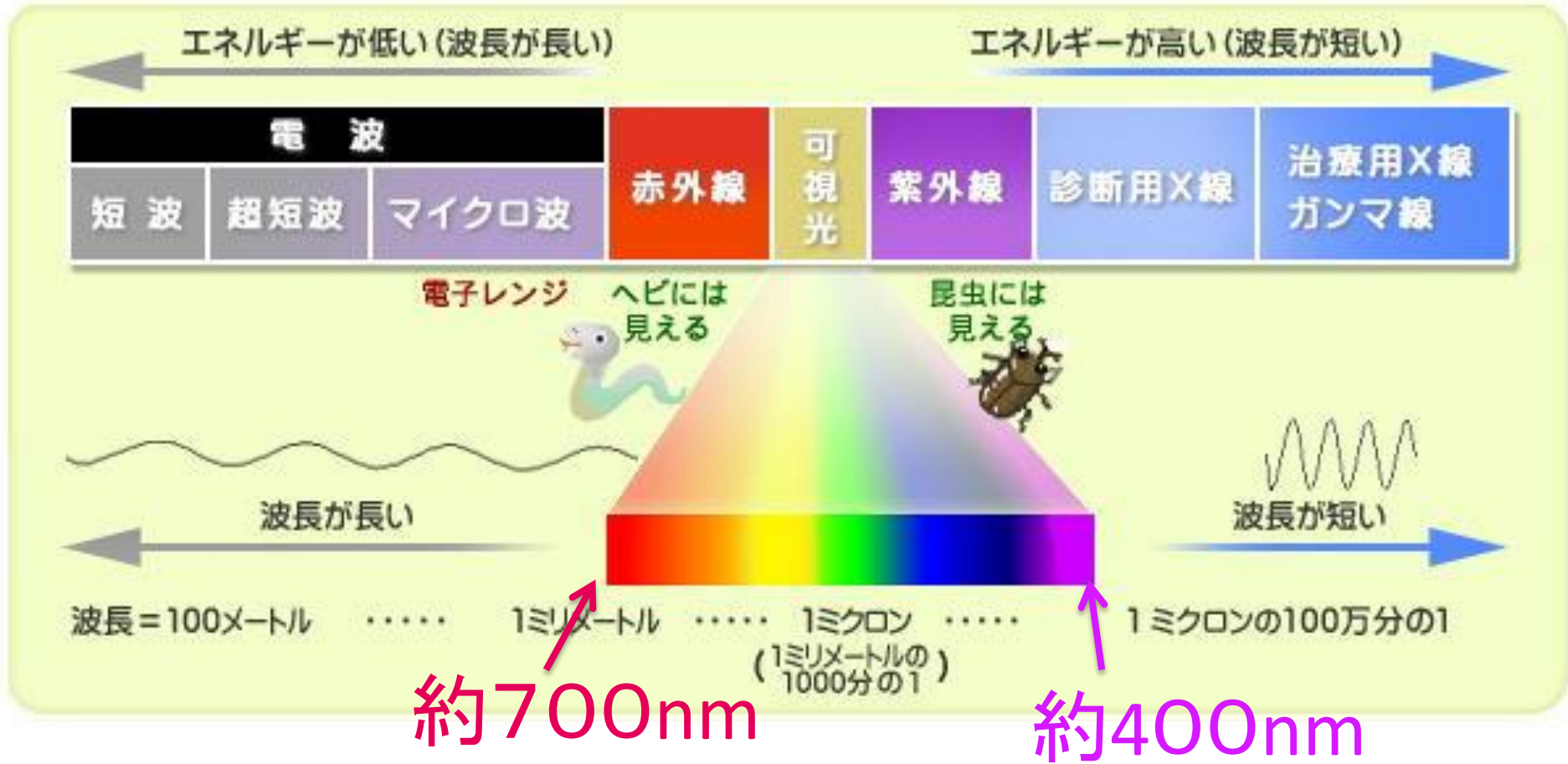


電磁波の一種です
真空中でも伝わる
(音とは違う)

Q. 知ってる
電磁波を
言ってみよう



電磁波とは？



- 電子レンジは英語で？ Microwave oven



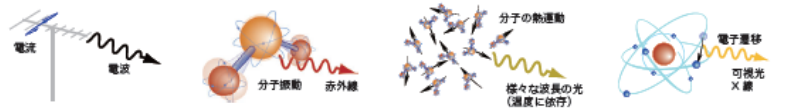
光マップ THE LIGHT MAP

光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上の生態の礎をもたらし、植物の光合成のエネルギーとなります。電灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。

ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線などで加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子爆弾の芯に発生するγ線などすべて、光のなまです。この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でのようににつくられ、どのように使われているのをもとめたものです。

光の起源

光はどこで生まれるのでしょうか。光子（フォトン）は電子が加速を持って動くことによって生まれます。アンテナの中で電子が動くとき、弱い電波の光である電波が出ます。複数の原子から構成されている分子の中で原子が互いに動く（分子振動）とき、原子の中にある電子も一緒に動くので光が生まれます。その光は赤外線です。水や空気の温度が高くなると、水分子が激しく動き回り、電子も共に動くので光が出ます。温度と光の周波数に対応します。分子の振動はランダムですが、熱がもたらす光（黒体放射）は色の光ではなく様々な周波数の光が出ます。原子の周りを回る電子が別の軌道に移ると（電子遷移）、光が出ます。これは振動数の高い可視光です。原子の内側の電子が遷移するとX線が生まれます。

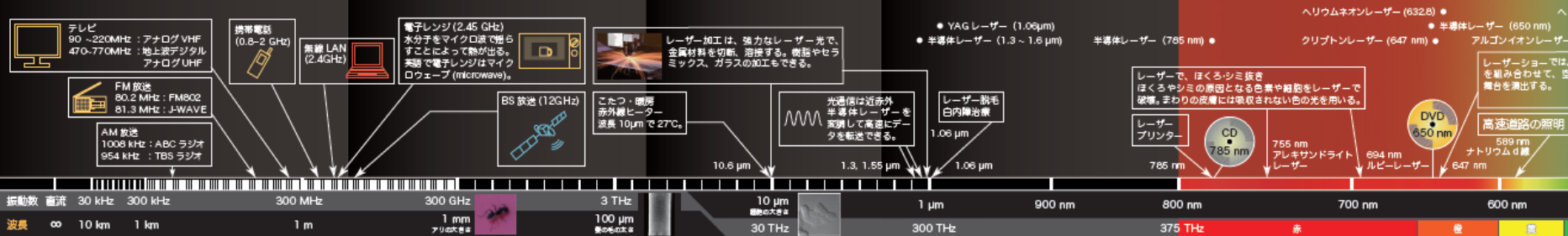


波としての光

光は空間を横断して、波動数（単位長さあたりの振動の数）によって、波長と振動の割合（単位の長さに対する振動数の逆数）が決まります。振動数と波長の積は光速で一定です。

粒としての光

光の強度が大きいほど、光の粒子（光子）の数も多くなります。電気が光が明るいのと同じように（電圧が電流の強さに相当するエネルギー）



遠赤外光

電波領域 (電波も光)

アンテナで送受信

- ラジオ: ラジコン, ICカード
- レーザー: レーザー (電波を照射して反射波を検出し、飛行機の高さを測定したり、飛行機や船を誘導したり)
- NMR/MRI (核磁気共鳴): 磁場と電波を使って体の内部を写し取る。脳腫瘍などの早期発見に有効。
- 超音波: 超音波を取り入れ、レーザーの感度を電波の反射で検出する。

中赤外光

遠赤外光

低周波の黒体放射

- 電波受動機: 波長約1mmから1cmの電波を捕らえる受動機。日本では特に宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星雲などからの電波を観測する。
- 黒体放射: 物体はその温度に応じて様々な波長の光を放射する。この現象を黒体放射という。
- テラヘルツ波: 様々な物質を透過し、X線に比べて人体への影響が少ないため、X線に代わる安全検査装置として期待されている。

近赤外光

中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

- 有機分子の指紋領域: 中赤外光は分子の振動準位が豊富で、有機分子の「指紋領域」と呼ばれる。
- 二酸化炭素 (CO₂): 4.3 μm
- 水・アルコール (OH基): 2.9 μm
- メタン (C-H伸縮): 3.3 μm
- トルエン (ベンゼン環): 6.7 μm

近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光透過に使われる)

- 監視カメラ (ナイトビジョン): 近赤外光を照射し、カメラで検知する。目に見えない波長のため、監視カメラでも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事にも利用される。
- センサー - 赤外線通信 (IrDA): 自動ドアやトイレ、照明用のセンサーや、テレビやステレオのリモコン、パソコンの通信にも近赤外光が使われる。
- 3次元元加工: 近赤外パルスレーザーを用いて、レーザーの深長よりも浅く小さい100nmの分解精度から金属加工を実現。
- リサイクル識別: 様々なプラスチックの種類の近赤外領域の吸収スペクトルを調べることで、リサイクル。
- 血管流量測定、果実熟度計: 様々なプラスチックの種類の近赤外領域の吸収スペクトルを調べることで、リサイクル。
- 赤外線温度計/体温計: 赤外線放射から、非接触で温度を測定する。人の体温で波長約10μm。
- 白熱灯 (2500°C): 黒体放射のピークは、1μm付近。
- サン・モグラフィ: 赤外光の強度から温度を測定する。体温分布計、軍事用に利用される。
- 白熱灯 (2500°C): 黒体放射のピークは、1μm付近。
- 半導体量子ドット: 直径数nmの半導体量子ドットで紫外線から可視光まで幅広い波長で発光。

可視光

近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光透過に使われる)

- 人間の目に見える光、赤外線電子遷移エネルギー
- 血液の色はヘモグロビンの色。動脈は酸素を含んで鮮やかな赤色。静脈では脱酸素した暗い赤色になる。
- 波長800nmで入射する紫外線より、近赤外光を浴びると皮膚がん抑制効果を示すことが出来る。
- 赤外線: 花火の色は、金属陽子の炎反応の色。それぞれ異なる元素特有の色を出して見られる。
- 飛行機ガイドは、発光強度の高い光源として、信号機、パイロットランプ (赤・黄・緑のイルミネーション) や車線表示機 (赤・黄・緑のLED) のヘッドライト (赤外線) などに使用される。
- 太陽が黄色に見えるのは、500nm付近の黒体放射のため、短波長は約6,000°C。
- ホタルの発光は、ルシフェリン。熱やほとんど出さずに発光する。
- 半導体量子ドット: 直径数nmの半導体量子ドットで紫外線から可視光まで幅広い波長で発光。
- 白色をつくるには、青色と黄色が必要。テレビの画面は、赤・黄・青の3色の光の組み合わせでつくられている。
- 光のエネルギー: クリーン発電。
- 光のエネルギー: クリーン発電。
- 光のエネルギー: クリーン発電。

油膜が色づくのは光の干渉

異なる方向から届く光が重なると、互いに干渉し、強め合ったり弱め合ったりします。シャボン玉や水面に反射した油膜の色に見えますが、これは光の干渉と波長と波長の光の干渉です。干渉現象は、単色光よりも複色光の干渉に起こります。

干渉する光は**コヒーレント (同干渉)**であるといえます。レーザーはコヒーレントな光を送る装置です。

空の青色は光の散乱

光が小さな粒子 (分子) に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのその理由は、短い波長の光がよりよく散乱するからです。

自由電子レーザー (FEL): 紫外線から赤外線までの広い領域で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生させたシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大抵大学、東京理科大学などにある。

ハッブル宇宙望遠鏡: 近赤外線から紫外線まで、63年離れた距離でメタンと水を調べ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の地盤にも生物がいるかも！

虹の七色は光の屈折

光が空気から水やガラスに入ると、曲がります。この現象を屈折と呼びます。屈折率は光の波長によって異なります。万力反射の法則 (有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光が様々な色に分かれることを発見しました。虹の光の屈折率の違いが見えるのは、プリズムを通して太陽の光が色に分かれるからです。)

光は回折する

光の経路に障害物を置くと、光は障害物の背後にも回り込んで広がります。細い光線をつくらうとき、光の回折を利用して、遠くまで送ります。

光の回折を利用した、遠くまで送ります。光の回折を利用して、遠くまで送ります。

光子ロケットは光の放射圧

光子物質の境界面でも反射、散乱を繰り返す。光子物質の境界面でも反射、散乱を繰り返す。光子物質の境界面でも反射、散乱を繰り返す。

光子ロケットは光の放射圧。光子物質の境界面でも反射、散乱を繰り返す。

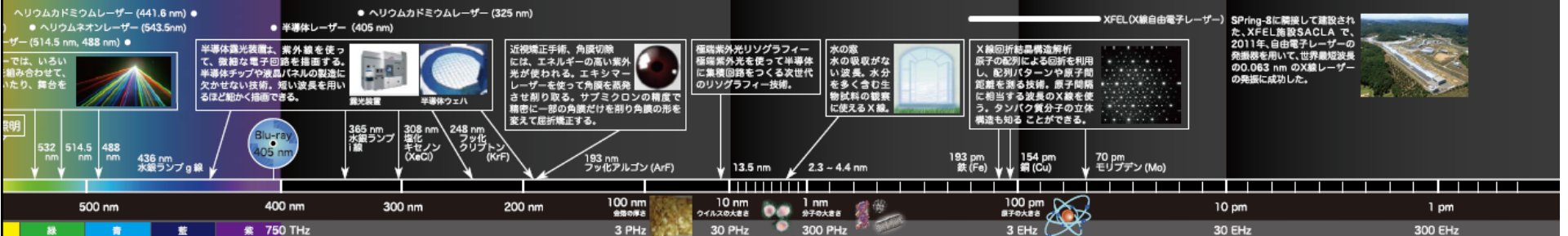
空間を「渡り」として伝わります。精密波（線波）の音波とは異なり、光は必ず、進行方向と直交する方向に電場と磁場が交差し運動する電磁波です。波（単位は Hz）、波長は1回周する間に真空中を進む距離（単位は m）を光が一秒間に進む距離、つまり速度を表します。真空中の光の速度は、定です。

波長が非常に短くなると、光が粒々であることが見えてきます。増える光子（フォトン）といえます。光子は光の粒々がなくさん集まると電流が「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりのようにこの密度で決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長（あるいはギンを持っていて）。

光に関連するノーベル賞

- 1907年 X線の実験 (W. レントゲン)
- 1908年 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイクルソン)
- 1908年 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン)
- 1909年 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウ)
- 1914年 結晶によるX線回折 (M. オーン、ラウエ)
- 1915年 X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ)
- 1918年 X線管の電子管 (M. K. E. リンバーク)
- 1921年 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン)
- 1923年 光電効果の研究 (R. A. ミリカン)
- 1924年 X線分光学 (K. M. G. シーグバーン)
- 1927年 コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン)
- 1930年 ラマン効果の発見 (C. V. ラマン)
- 1932年 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ)
- 1936年 X線、電子回折による分子構造の研究 (P. J. W. デイビ (化学賞))
- 1953年 相対性理論の発見 (E. ツェルヌーク)
- 1954年 選別された統計的解析の提唱 (M. ポル)
- 1954年 中性核反応とγ線の研究 (W. ボー)
- 1958年 相対性理論の効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. 克蘭、I. E. タタ)
- 1961年 γ線の共鳴吸収とメソバリア効果の発見 (R. L. M. スパイアー)
- 1964年 メーザー、レーザーの發明 (C. H. タウンス、N. G. パルス、A. M. プロローフ)
- 1964年 X線回折による生体物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン (化学賞))
- 1965年 電子分光学 (御橋信一、J. シュワバウアー、R. P. ファインマン)
- 1966年 光子ピンパング法による原子の軌道 (A. カスシ)
- 1971年 ホログラフの發明 (D. ガボリ)
- 1974年 電波天文学における発見 (M. ライル)
- 1978年 X線 CT (G. H. ハウンスフィールド、A. M. コーコウ) (生物・医学賞)
- 1981年 レーザー分光学 (N. ブルムバーク、A. M. リョーロー)
- 1981年 高分解能電子分光法 (K. M. シーグバーン)
- 1997年 レーザーリング法の開発 (S. チュ、C. コーエンタウアー、W. D. ファリップス)
- 1999年 フェムト秒化学 (A. H. ズヴェイル (化学賞))

- 2000年 高温/光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. アルフォーコス、H. クレーマー)
- 2002年 宇宙ニュートリノ検出 (R. デビシス、小柴昌俊)
- 2002年 タンパのレーザーイオン化法 (J. B. フォン、田中耕一) (化学賞)
- 2003年 核磁気共鳴画像法 (P. ラウターバー、P. マンスフィールド) (生物・医学賞)
- 2005年 光コヒーレンスの量子技術 (R. J. グラウマン)
- 2005年 光照射が技術などレーザー-超高分光法 (J. L. ホール、T. W. ヘンシェ)
- 2006年 宇宙マイクロ波背景放射の偏光偏光の観測 (D. M. マザー、G. F. スムー)
- 2008年 緑色蛍光タンパク質の発見と発現 (下村博、M. L. チェルフィー、R. Y. チン) (化学賞)
- 2008年 光ファイバーと QD の開発 (C. K. カワ、W. ポール、G. E. R. M. ヌイ)
- 2014年 超解像顕微鏡法の開発 (E. ベック、S. ヘル、W. E. モーナー) (化学賞)
- 2014年 青色発光ダイオードの發明 (天野浩、赤崎勇、中村修二)



XFEL (X線自由電子レーザー)

Spring-8に隣接して建設された、XFEL施設SACLAで、2011年、自由電子レーザーの発光に成功した。

XFELはX線自由電子レーザーの発光に成功した。XFELはX線自由電子レーザーの発光に成功した。XFELはX線自由電子レーザーの発光に成功した。

エネルギー

放射線

α線
放射線は微小な物体を拡大して観察できる。物体の放射線や光線照射。蛍光発光の分布をもとに観察像をつくる。分子の振動や偏光特性を顕微鏡する顕微鏡もある。紫外線近赤外線領域の長い波長の光が使われる。

β線
動物の目は2色で色を見分けることができる。ワニの目は黄色の色素がある。人間は、550 nmの波長を、最も明るく感じる。

γ線
放射線は、放射線の強い波長として、信号機、パワードライヴ、車のヘッドライト、化成産品、多目的に使用される。2014年青色LEDの発明がノーベル賞受賞。

紫外光

紫外線洗浄
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、殺菌に効果的。

紫外線殺菌
熱を必要とせず、水、酸素、殺菌剤などを必要としない。

オゾン層
オゾン層は、紫外線を吸収して、地上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

光陰極管
紫外線を吸収して、電子を放出する。

軟X線 (極端紫外を含む)

レーザープラズマ光源
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体露光装置。

軟X線のレンズ
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も低くはない。薄い金属膜でX線の進行方向を変えて光を出す。

フォトルソープ
ゾーンプレートでX線を回折して焦点を結ぶ。フォトルソーププレートでX線を回折して焦点を結ぶ。

X線

レントゲン写真
レントゲン写真が影と透過して、骨を見ることはバリウム造影剤を使う。

X線CT
横断方向でX線を照射して測定した数値から、コンピュータ解析によって断面像を取得する。

X線天文衛星
X線は大気層で吸収されるため、宇宙衛星を飛ばして観測する。

XPS (X線光電子分光)
X線を照射して出てくる光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

γ線

PET (ポジトロン断層法)
PETは、陽子線や電子線を利用したコンピュータ断層撮影法。放射線分子イメージングに、放射線の診断や、がんの診断に用いられる。

γ線放射線治療
強い放射線。強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

γ線滅菌
強い放射線。強い放射線を使えば、がん細胞を死滅させる。

光は横波

水面や金属の表面、鏡や壁の面に垂直に反射する。電場が反射面に垂直な方向に振れる光がよく反射され、光の振る方向に偏りが生じます。これを偏光といいます。

偏光フィルターは、特定の方向に振れる光だけを透過させ、他の方向の光を遮断します。偏光メガネやカメラのフィルターに使われます。テレビやパソコンの液晶ディスプレイは偏光を利用した表示装置です。電圧で液晶分子の向きをそろえ、光の透過を偏光制御します。

光の速度は

真空中で1秒間に30万km。これは1秒間に地球を7周半回することができる長さです。月までは1.3秒、太陽までは8分33秒かかります。光の速度は1年かかる距離は1光年です。月までは1.3秒、太陽までは8分33秒かかります。光の速度は1年かかる距離は1光年です。

太陽の七変化

太陽の色は、黄色がかった白色に見える。太陽の黒点放射で発生した様々な色の光が見えるからです。しかし、目には見えない。太陽の黒点は赤く見えます。黒点が光が空気を通して屈折する。短波長の光が赤く見え、長波長の光が青く見える。つまり、太陽の色は、黒点の放射によって赤く見え、黒点の放射によって青く見える。つまり、太陽の色は、黒点の放射によって赤く見え、黒点の放射によって青く見える。

色の見え方

人間は600万~1000万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサー(ワシ)と色を認識する網膜があります。網膜には、赤、緑、青の3つの光が網膜に入るの3つの色を認識するセンサーがあります。この3色は、赤、緑、青の3色です。網膜の色は、赤、緑、青の3色です。網膜の色は、赤、緑、青の3色です。網膜の色は、赤、緑、青の3色です。

解説の光学 (日本分光学会 編著 定法シリーズ38) 河内啓爾 第2版 (学会出版センター、2002年)、「レーザーハンドブック」レーザー学会 編著 第2版 (オーム社、2005年)、「物性物理学辞典」第3版 (岩波書店、1976年)

電磁波を特定するには？

- 波長 λ (ラムダ) [m] ...長さの単位

他の特定法

- 周期 T [s] ...時間の単位
- 振動数 ν [Hz] ...1秒に何個波が来るか？ s^{-1} の単位
- 波数 ω (オメガ) cm^{-1} ... 1cm中に波が何個あるか？

Q. 周期 T 、振動数 ν 、波数 ω を
光速 c と λ で表現してみよう。

電磁波を特定するには？

- 波長 λ (ラムダ) [m] ...長さの単位

他の特定法

- 周期 T [s] ...時間の単位 λ / c
- 振動数 ν [Hz] ...1秒に何個波が来るか？ s^{-1} の単位
- c / λ
- 波数 ω (オメガ) cm^{-1} ... 1cm中に波が何個あるか？
- $0.01 / \lambda$

Q. 周期 T 、振動数 ν 、波数 ω を
光速 c と λ で表現してみよう。

光とは何か？（昔）

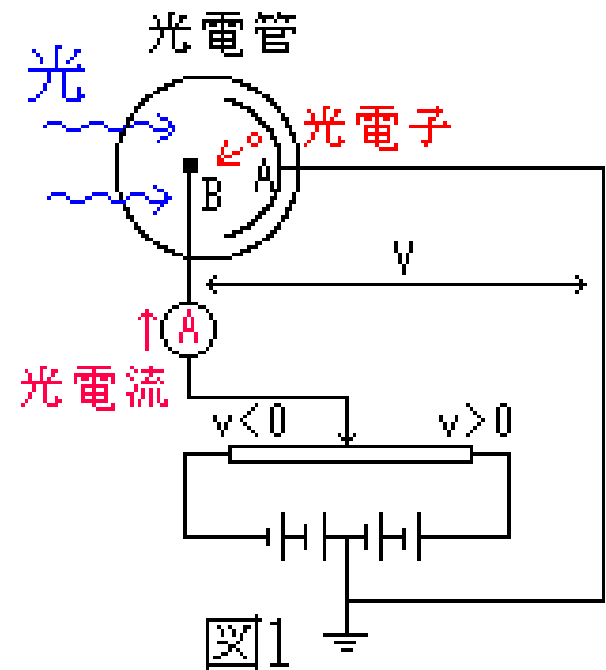
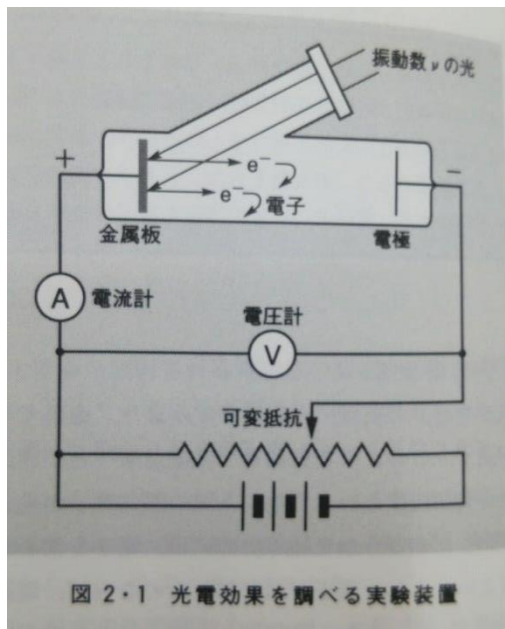


まっすぐ進むし、
反射するから粒子でしょ
(ニュー●●さん)

重ね合わせがきくから、
波でしょ
(ホイ○○○さん)



光電効果からわかる光の性質は？



量子化学
基本の考え方16章
中田宗隆 著 より

光電効果 金属に光を当てると電子が飛び出す

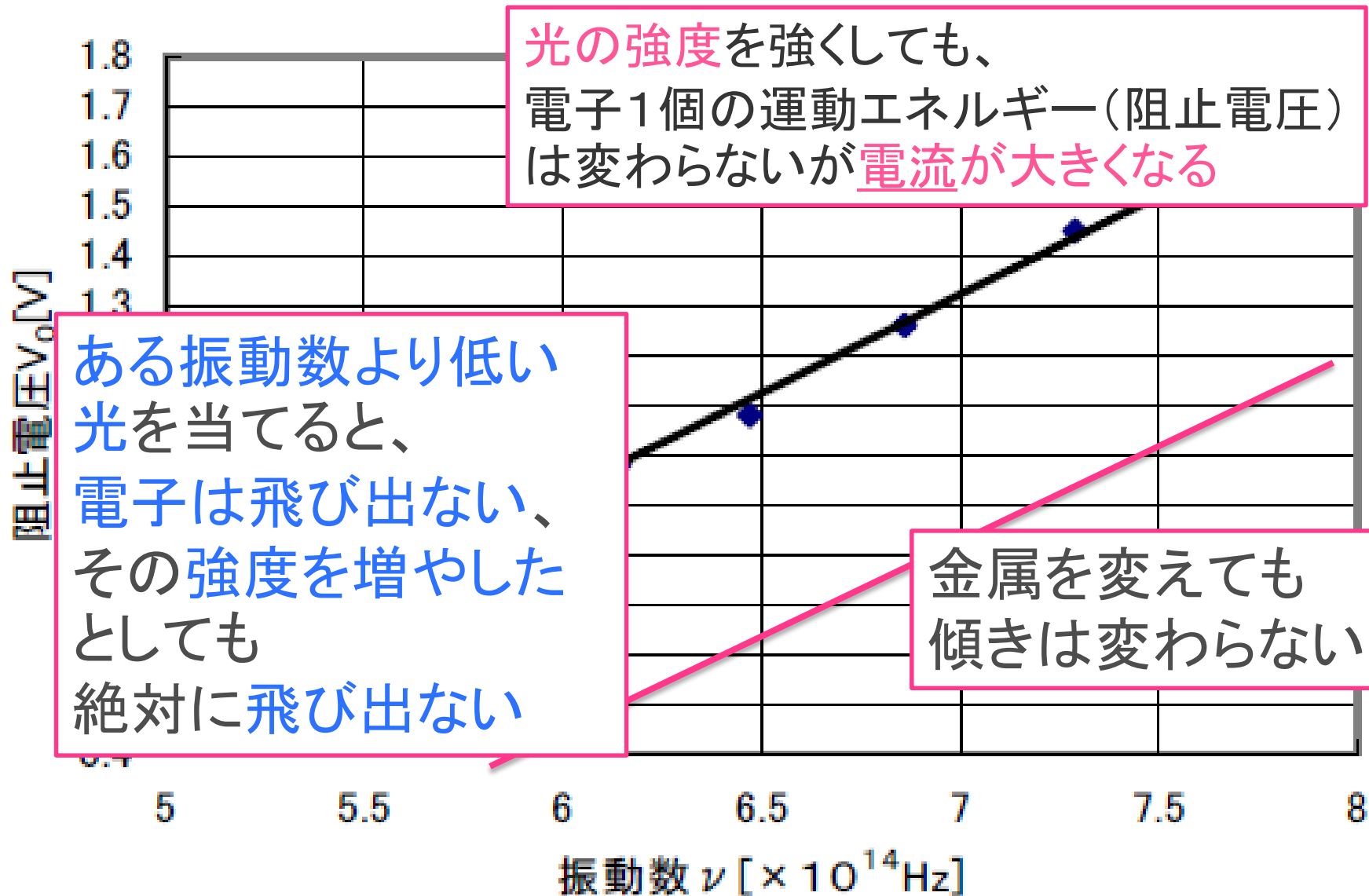
波 長 [nm]	振 動 数 [$\times 10^{14}$ Hz]	
[359]	8.34	紫 外
386	7.78	
411	7.29	紫
437	6.86	青
463	6.47	
489	6.14	
514	5.83	緑
539	5.56	
564	5.31	黄
589	5.09	
[614]	4.88	橙
[639]	4.70	赤

阻止電圧 → 電子の運動エネルギー

振動数 ν [$\times 10^{14}$ Hz]	阻止電圧 V_0 [V]
7.78	1.65
7.29	1.45
6.86	1.26
6.47	1.08
6.14	0.98
5.83	0.83
5.56	0.74
5.31	0.68
5.09	0.59

光電効果からわかる光の性質は？

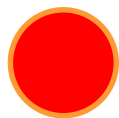
チャット欄(プライベート阿部宛で書いてね)



わかること

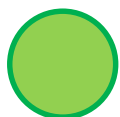
- 光は振動数に比例するエネルギーを持つ
- 比例係数(h)は実験に使う金属によらない
- 電子が飛び出す下限の振動数があり、その値は金属に依存する
- 光の強度を大きくしても、下限以下の振動数では絶対に電子は飛び出ない
- 光のエネルギー $E=h\nu$
- 光の強度：飛び出す電子の数を決定。
- 電子1つを動かす“光1つ”という概念が存在。

光電効果



小さな振動数の光 (例200Hz)
エネルギー低い

何も起こらない



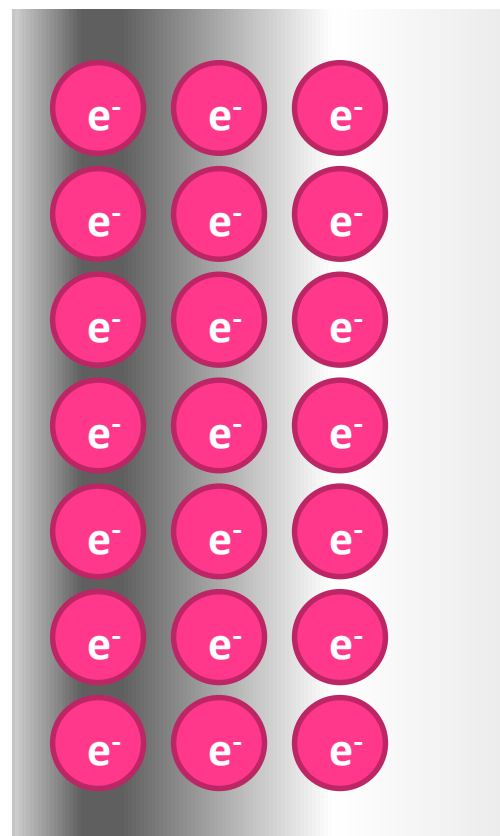
大きな振動数の光 (例400Hz)
エネルギー高い

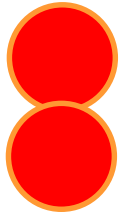
光はなくなり
電子が飛び出す



さらに大きな振動数の光 (例500Hz)
エネルギー高い

光はなくなり
電子はさらに速く飛び出す

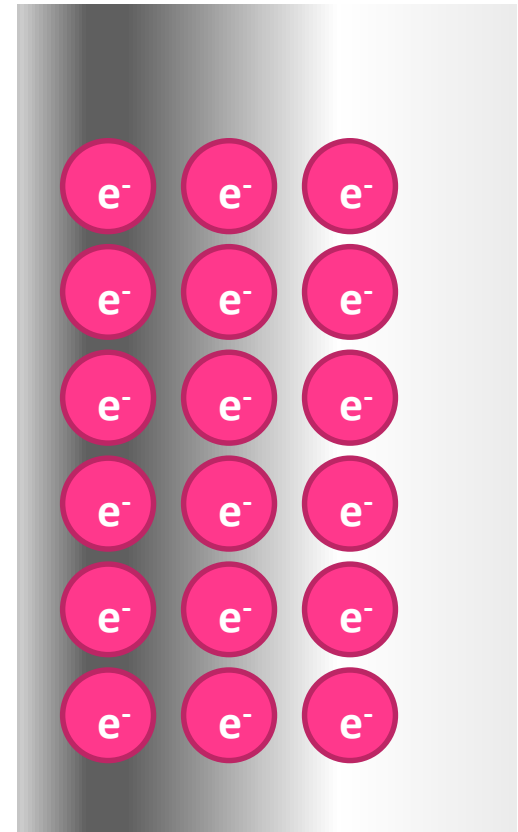


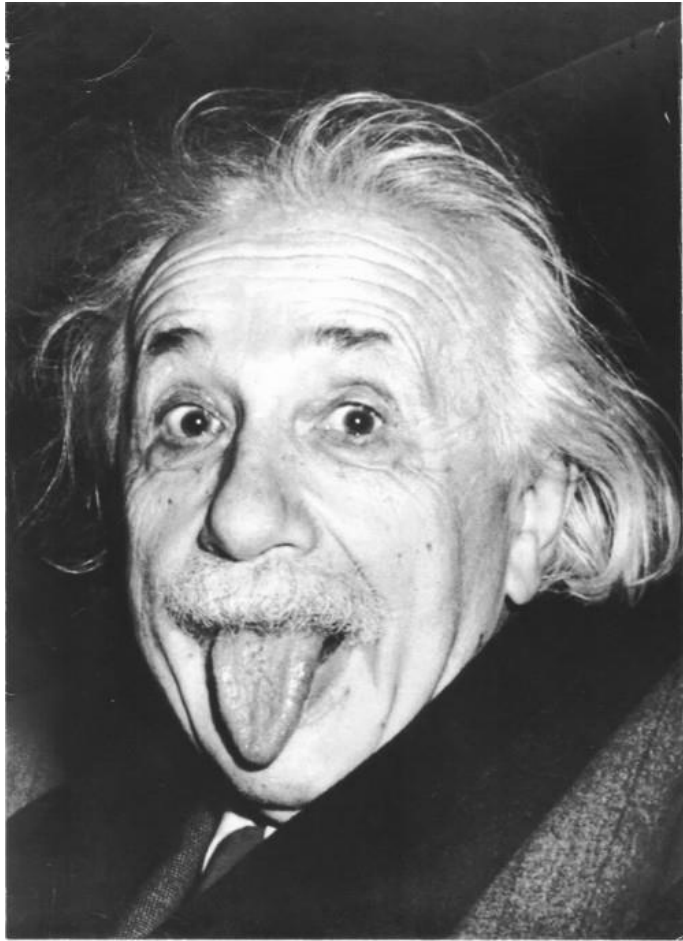


小さな振動数の光 2つ (強度2倍)
(例 $200\text{Hz} \times 2 = 400\text{Hz}$ 分?)

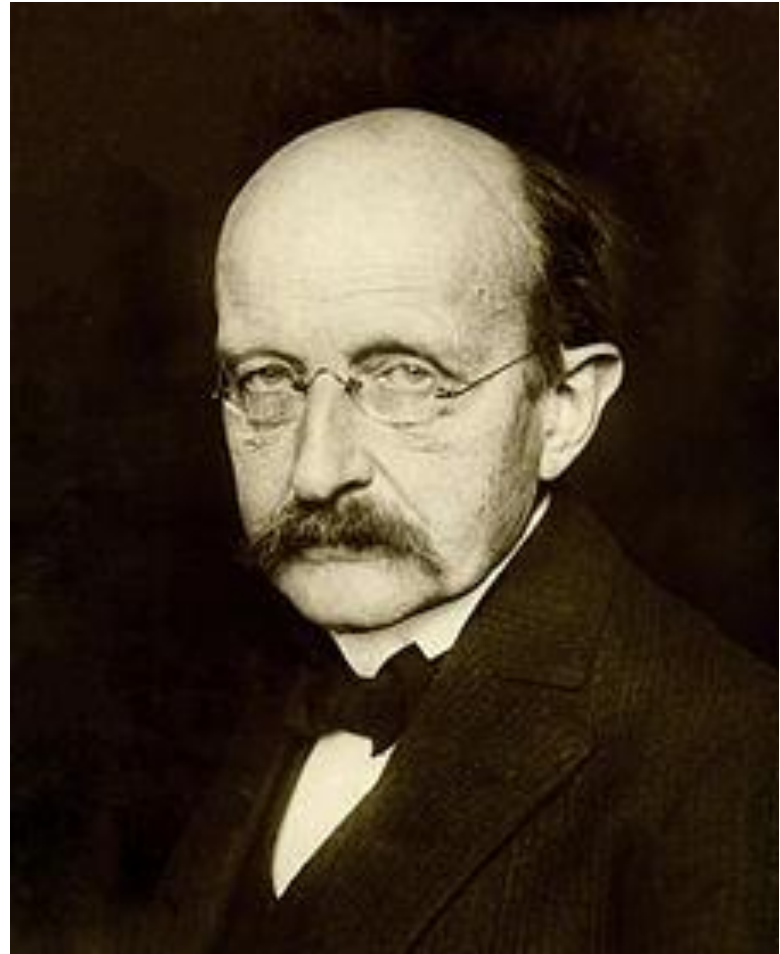
2倍にしても(2つあっても)
やっぱり何も起こらない!

電子1つに対する、
光1つという概念が存在する



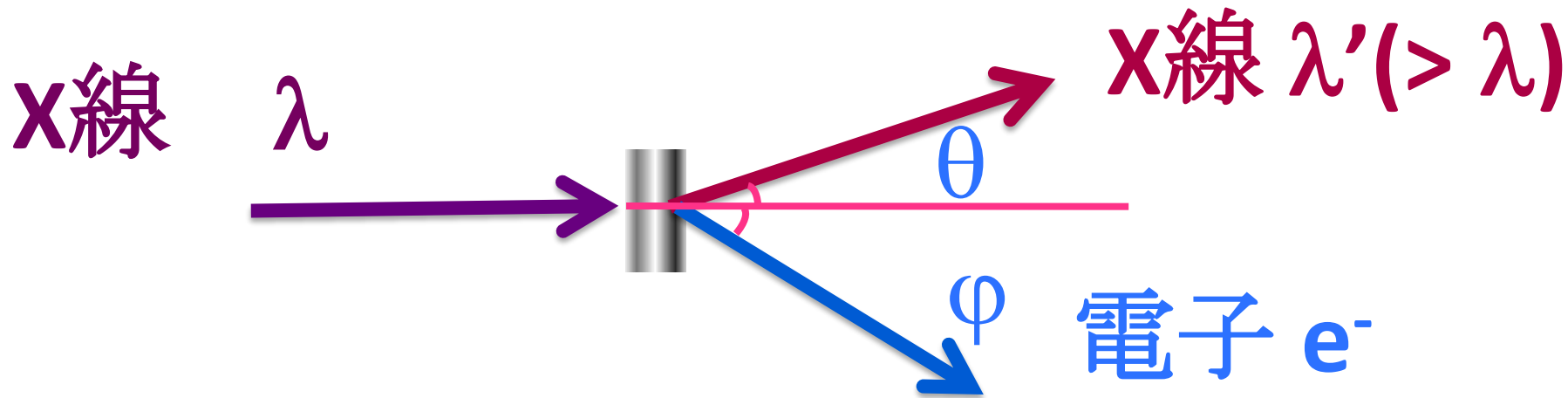


アインシュタイン
光電効果の解釈で
ノーベル賞



プランク 黒体放射の問題で
 $E=h\nu$ をすでに予言。
hはプランク定数
(ボーアモデルのhと同じ値)

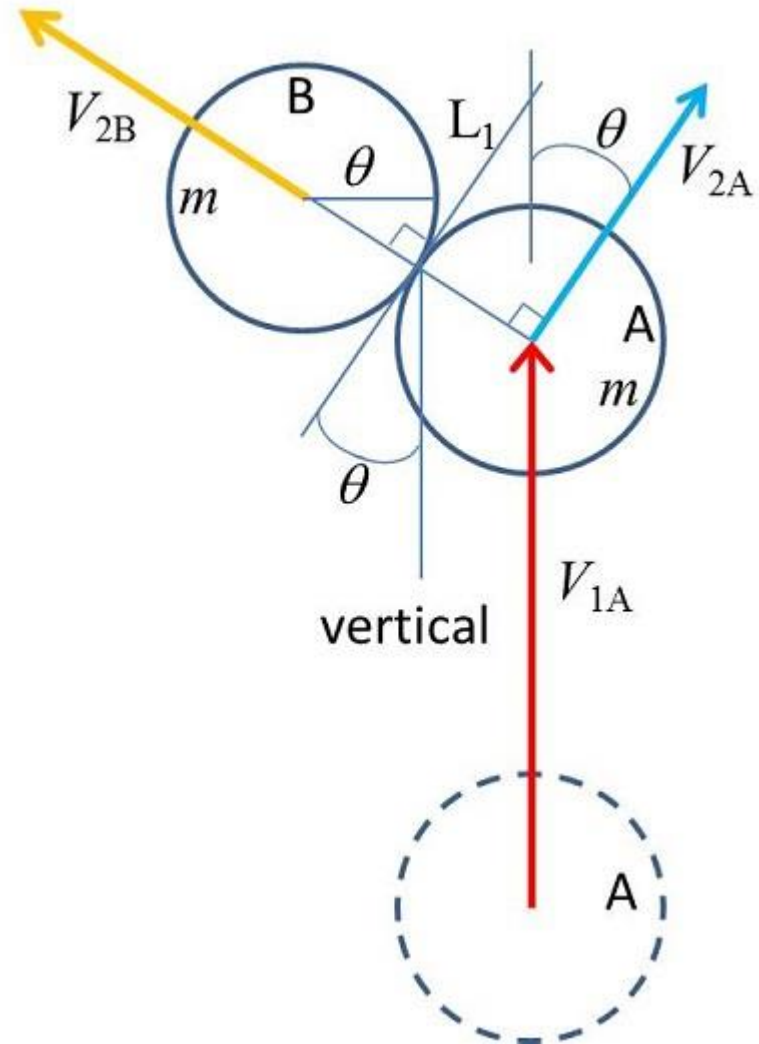
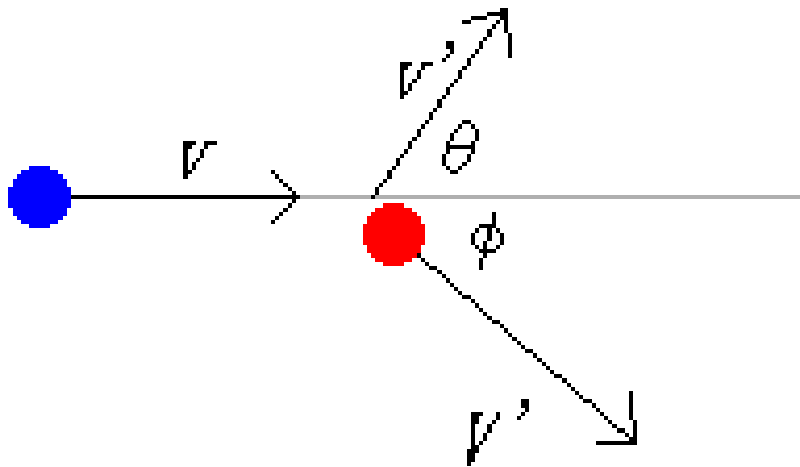
コンプトン効果



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2(h/m_e c) \sin^2(\theta/2)$$

金属にX線を当てると反対側から電子が飛び出す。
電子だけでなく、新しい波長のX線も飛び出す。
新たなX線の波長のずれ $\Delta\lambda$ は、
出力角 θ に依存している。 h :プランク定数, m_e :電子の質量
ここから類推される光の特徴とは？

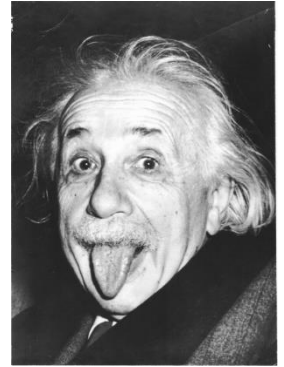
光には運動量が定義できる



光の運動量

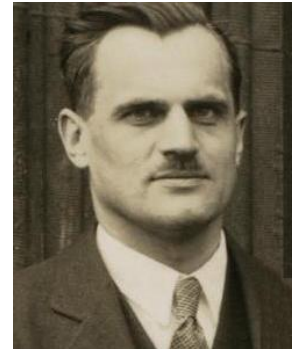
相対論の式

- $E=(m^2c^4+p^2c^2)^{1/2}$ から $m=0$ をし、
さらに $E=h\nu$ を代入して、
 $p= h\nu/c$ を予想



コンプトン効果の実験で、
その予言が正しいことが実証

電子一個とかかわる光を
一粒の粒子のようにとらえれば、
エネルギー保存も運動量保存もイメージしやすい



$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2(h/m_e c) \sin^2(\theta/2)$ の証明

	X線		飛び出した電子	
	運動量	エネルギー	運動量	エネルギー
衝突前	$h\nu/c$	$h\nu$	0	$m_e c^2$
衝突後	$h\nu'/c$	$h\nu'$	p	$(m_e^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2}$

式を3本立てる

1. エネルギー保存則
2. 運動量保存則 水平方向
3. 運動量保存則 垂直方向

	X線		飛び出した電子	
	運動量	エネルギー	運動量	エネルギー
衝突前	$h\nu/c$	$h\nu$	0	$m_e c^2$
衝突後	$h\nu'/c$	$h\nu'$	p	$(m_e^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2}$

エネルギー保存則

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + (m_e^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2}$$

運動量保存則(水平)

$$h\nu/c = (h\nu'/c)\cos\theta + p\cos\varphi$$

運動量保存則(垂直)

$$0 = (h\nu'/c)\sin\theta + p\sin\varphi$$

ここから
 p, φ を消去。
 ν は λ にする。

光とは何か？

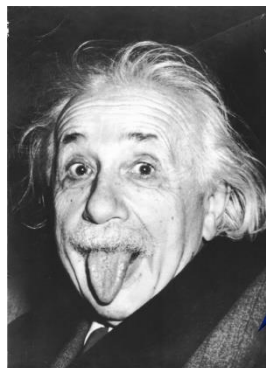


まっすぐ進むし、
反射するから粒子でしょ
(ニュー●●さん)

重ね合わせがきくから、
波でしょ
(ホイ○○○さん)



波とともに
粒子の性質ももち、
 $E=h\nu$ という
エネルギーを持つ。



波とともに
粒子の性質ももち、
 $p=h\nu/c$ という
運動量を持つ。



プ○○○さん

コン○○○さん

次回からのお願い

ホームページより

講義ノートをダウンロード

印刷し、書き込んでもらおうと

スムーズです

(電子的にタッチペンもOK)

3	演算子・固有値・固有関数・極座標 第3回問題 第3回動画(人) (10. 演算子・固有値・固有関数の①、②、③、④、⑤、⑥ 11. 極座標、(参考・補足) 極座標の微小体積) 第3回動画(AD) (10. 演算子・固有値・固有関数の①、②、③、④、⑤、⑥ 11. 極座標 第3回静止画解答 (10-①、10-②③、10-④、10-⑤、 11、11補足、電子版(略解))	シュレディンガー方程式導出 波動関数の性質 (講義ノート)
---	--	----------------------------------

シュレディンガー方程式を導こう!

- 定常波の時の波の微分方程式

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \dots \text{①}$$
- エネルギー保存の式

$$E = \dots \text{③}$$

(運動エネルギー+位置エネルギー)
- ドブロイの波長と運動量の式

$$p = \dots \text{②}$$

⑤と④から p^2 を消すと

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \dots \text{④}$$

$$\dots \text{③} = E\psi(x)$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + U(x) \right] \psi(x) = E\psi(x) \dots \text{⑥}$$

さらに $\frac{2\pi}{h}$ を $\frac{1}{h}$ とおくと

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \dots \text{④'}$$

また③を $m, p, U(x)$ であらわすと


$$E = \dots \text{⑤}$$

また⑤と⑥を見比べると

$$p^2 \Rightarrow \dots = \hat{p}^2 \quad \hat{p} = \dots$$

ハミルトニアン 運動エネルギー演算子 \hat{T} 位置エネルギー演算子 \hat{U}

シュレディンガー方程式 (固有値方程式)



波の問題(今回の小テスト)

$F=ma$ の運動方程式から、
波の微分方程式を導出しました。

波の微分方程式は、来週の講義で使います！