1　光の性質

光の時代

光は、よく知られているように、電場と磁場が互いに互いを誘起しながら伝播していく電磁波である。マクスウェル(Maxwell)は、有名な４つの方程式をまとめあげただけでなく、それらを組み合わせることで、波動方程式が導かれることを見つけ、さらにそこからでてくる速度を計算したところ、それまで知られていた光の速度に近いことから、光は電磁波であることを1849 年に見出した。人類が光は電磁波であるということを見つけてまだ 170 年ほどしかたっていない（2021 年時点）ことも驚きだが、マクスウェルの天才ぶりにも驚かされる。光の正体をつきとめたときの興奮はどんなものだったのだろうか。

ちなみに、伝播と伝搬というほとんど同じ意味の言葉が、世の中で使われているが、伝搬（でんぱん）は伝播（でんぱ）が誤って使用されるようになった誤用であるらしい。現在では伝搬も広く使われているが、せっかくなので元々正しいとされる伝播で（できるだけ）この文章は統一していきたい。

21 世紀は「光の世紀」と呼ばれる（らしい、出典不明）。今後、さらに光を用いた技術が主役になっていくようだ。現に、現代の実験科学を眺めると、必ずと言っていいほど光技術が使われているし、我々が日常使う、インターネットは光回線で行われ、多くのデバイスにレーザが組み込まれている。(「光マップ」という、光がどのように役立っているかをまとめたポスターを文科省がネット上で配布している https://www.mext.go.jp/stw/series.html）（個人的には、どんな技術者になるにしても、光技術の知識はめちゃくちゃ役に立つと思っているので、自分のスキルアップという観点からも光の研究はいいテーマだと思う。）

これ以降では、いわゆる平面波(Plane wave)を扱う。平面波は、等位相面が直線（平面）になっているような波のことで、要は普通にイメージされる進行方向と垂直な方向に一様な波のことである。例えば太陽からの光は（十分遠くからやってくるので）平面波と考えて通常差し支えない。平面波でないものの代表格としては、球面波(Spherical wave)がある。こちらは、等位相面が球面になっていて、ちょうど、ある一点から光が全方向にひろがっていくような波のことである。水面に石を落とした時にできる円形の波紋は球面波と言える。

1 次元波の伝播

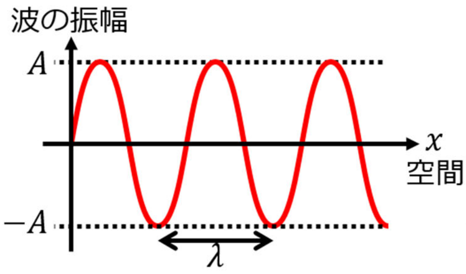
電磁波は、時間的にも、空間的にも振動している。そのため、それを表す関数は、時間tと空間xに依存した形になるはずだが、ここではまず、ある時刻で時間を止めた時の波の形を考えてみよう。すると、（電磁波に限らず）波は、よく知られている以下のような三角関数で書ける。

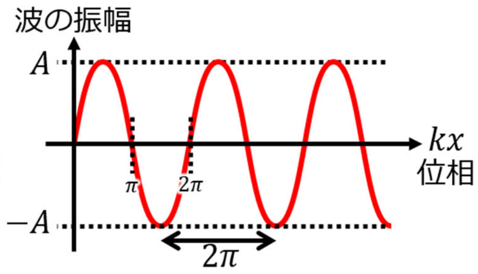
$$A\sin kx$$

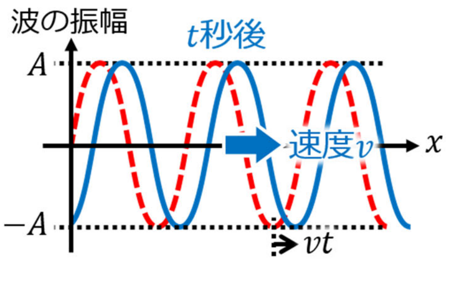
ここでAは振幅(amplitude)、kは波数（空間周波数）(wavenumber)である。波数は波長λ（読み方：ラムダ）(wavelength)を用いて

$$k = 2\pi/\lambda$$

と定義される。これは、ちょうど角周波数（時間的な振動数に2πをかけたもの）の空間バージョンになっている。つまり、2πの長さの中に 1 波長の波が何個はいるか、ということを表している。また、固体物理のバンド理論ででてくる逆格子空間の波数と同じ物理的意味（次元）をもつ物理量である。 結晶と同じように、光は空間的に周期的であるので、このような物理量で特徴づけられる。







さて、上の式は、時間を止めたある瞬間の波の様子を空間の関数として表したが、時間を進めると光はその間にどんどん進んでいく。その速度をv(velocity)とすると、t秒後には、vtだけ進むことになる。その時の波の式は

$$A\sin\big(k(x - vt)\big)$$

となる。波が 1 波長分の距離を進むのにかかる時間、周期Tは

$$T = \lambda/v$$

となる。周期Tを使って、周波数（振動数）f(frequency)と角周波数（角振動数）ω(angular frequency)は

$$f = \frac{1}{T}, \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

と書ける。

これらを使って波の式を書き直すと、

$$A\sin\bigl(k(x - vt)\bigr) = A\sin(kx - kvt) = A\sin\left(kx - \frac{\omega}{v}vt\right) = A\sin(kx - \omega t)$$

となり、もっともよく使われる波の式になる。このようにして、時間と空間の両方に対して振動する平面波の式が導かれる。ここで三角関数の中身は無次元であり、位相（phase）と呼ばれる。位相の中身を見てみると、空間変化による位相変化kxと時間変化による位相変化ωtの二項からなっている。ちなみに、ここで出てきた速度vは、厳密に言うと「位相速度(phase velocity)」と呼ばれるもので、ここまで使ってきた物理量を使って表すと

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

と書ける。波長÷周期は一般的な「速さ」の定義と対応する。一方、角周波数と波数の比であることもわかる。速さは、波がもつ時間的な特徴量と空間的な特徴量を結びつける物理量なのである。ここまで、ωを「角」周波数と、正確に読んできたが、現実のディスカッションや論文では、単に「周波数」と言ってしまうことが多い。これ以降も、単に「周波数」と呼ぶことにする。

位相速度のほかに「群速度（group velocity）」と呼ばれる速度がある。これは、波束（パルスをイメージしてほしい）の速度を表す速度であり

$$v_{\mathrm{g}} = \frac{\mathrm{d}\omega(k)}{\mathrm{d}k}$$

で定義される。群速度は、波動がエネルギーや情報を運ぶ速度として理解される。$\omega(k) = ck$の関係が成り立つ波では、位相速度と群速度は一致するが、後に扱うフ分散のある媒質やフォトニック結晶中の光は、より複雑な（k の二次以上の項をもつ）$\omega(k)$の関係をもつため、一般に位相速度と群速度は一致しない。

ここまで、波を表す三角関数として sin を採用したが、当然 cos を採用しても問題はない。これらの違いは結局初期位相の違い（πだけ違う）に帰着される。sin で表した場合に、初期位相δ（読み方：デルタ）を含めて以下のように書くと

$$A\sin(kx - \omega t + \delta)$$

と書け、ここで、δをπ/2とすれば、これは cos 関数になる。このように、平面波の初期位相は一般に不定で、考える状況によって変わるパラメータである。

ここまで、平面波を三角関数によって表現してきたが、様々な教科書や論文で三角関数が用いられることは稀である。その代わりに以下のような複素数表示を用いる。

$$A\exp[i(kx-\omega t+\delta)]$$

この複素数表示は、あくまでも計算の便利さのために導入されているものであって、実際の波形を求める際には、実部をとることを暗に約束している点に注意する必要がある。

つまり、複素数表示をしていても最終的に

$$\mathrm{Re}\{A\exp[i(kx-\omega t+\delta)]\}=A\cos(kx-\omega t+\delta)$$

のようにして、波形が求められる。この複素数表示は、種々の計算や複素屈折率を扱う上で非常に便利であるため広く用いられているが、マクスウェル方程式で扱われる電磁場はあくまで実数であることに気を付ける必要がある。

ナノフォトニクスでは、マクスウェル方程式（波動方程式）とシュレーディンガー方程式の相似性を用いた研究が行われているが、シュレーディンガー方程式の波動関数が本質的に複素数である（シュレーディンガー方程式自体に複素数が入っている）のに対して、それと対をなす電磁場は実数である。一方、通常の研究で、電磁場が実数であることを意識しなければいけない機会はそれほどなく、複素表示の波がむしろスタンダードに使われる。

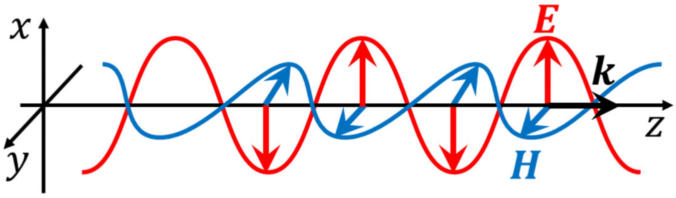
これまでの議論では、位相部分を$kx-\omega t$で定義してきた。一方で、$\omega t-kx$のように、符号を反転させて定義しても、実は問題ない。しかし、物質に光が入射するような場合には、この定義によって、物質の光学定数の虚部等のいくつかの物理量の符号の取り方が変わってしまう。（この点については屈折率の項で詳しく扱う）また、この符号の定義の仕方は、歴史的な背景から、分野によって異なる。ナノフォトニクスを扱うような物理の分野では$kx-\omega t$の定義が用いられるが、電波や回路を扱う電気・工学の分野では、逆の$\omega t-kx$の定義が用いられることが多いようだ。これは、論文を読む際に非常に重要なので、注意されたい。（ちなみに、COMSOL の RF モジュールは、もともと電波の計算をするものであるため、電気・工学の方の定義が用いられている。例えば、誘電率の虚部の符号が負と時、損失を表す）

最後に、波数がベクトルになった場合について触れておく。ここでまでは一次元方向にのみ進む波を考えたが、現実世界の波は 3 次元空間で伝播する。その場合、x,y,zの各方向の波数（単位距離当たりの位相の進み具合）を成分に取った波数ベクトル(wavevector)$\boldsymbol{k}=(k_x,k_y,k_z)$を用いる。この波数ベクトルを用いると、これまでの波の式は

$$A\exp[i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t+\delta)]$$

のように書き直せる。$\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}=k_x x+k_y y+k_z z$はスカラー量であることに注意しよう。また、波の進行方向は一般に、波数ベクトルと同じ向きになる。これで 3 次元空間を進む波を表現できた。

電磁波とは



図は、マクスウェル方程式から導かれる電磁波の伝播の様子を示している。この図でEおよびBはそれぞれ電場、磁場(正確には磁束密度)を示している。電磁波では$\boldsymbol{E}$と$\boldsymbol{B}$は互いに垂直で、同位相である。また、進行方向のベクトル$\boldsymbol{k}$の向きは$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$と同じ向きになる。電磁場の電場と磁場が、なぜ図のようになるのかは、マクスウェル方程式を使って丁寧に考えると理解することができる。（https://www.youtube.com/watch?v=W1cTpqM9DaU&t=281s がわかりやすいのでぜひ見てほしい）電磁波の進行方向は、$\boldsymbol{E}$と$\boldsymbol{B}$に垂直であるため、光の進行方向に対しては$E=B=0$となる。このような波は横波(transverse wave)と呼ばれる。（真空中の電磁波は横波であるが、物質中では一般に縦波(longitudinal wave)も存在し得る）

自由空間における光速は、現在では、それ自体が定義値となっていて、「正確に」

$$c=2.99792\times10^8\ \mathrm{m/s}$$

である。現在ではこの値から、メートルなどが定義される。これは相対性理論によって光速度普遍の原理が築かれ、現状それが非常にうまくいっているからである。ここで興味深いのは、この光の速度は、光の波長や周波数に依存しないことである。例えば、生き物の走る速さは、体の大きさ等に強く依存することを考えれば、非常に不思議な話である。これは、光が質量をもたない粒子だからなんだろうな、と思うが詳しくは知らない。

前節の波の式を使うと、電磁波の電場と磁場はそれぞれ

$$E=E_0\exp[i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t+\delta)]$$
$$H=H_0\exp[i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t+\delta)]$$

と書き表すことができ、真空中では

$$E=cB$$

の関係が成り立つことをマクスウェル方程式から導くことができる。波の位相速度の式を思い出すと、自由空間における電磁波の周波数ωと波数kは

$$c = \frac{\omega}{k} \leftrightarrow \omega = ck$$

という関係を持ち、光速cを介して一対一対応している。つまり、波長を決めれば周波数が、周波数を決めれば波長が決まる。

ここで、電磁波が運ぶエネルギーについて考えよう。電磁波が運ぶエネルギー密度は、その方向も含めて以下で定義されるポインティングベクトル（Poynting vector）$\boldsymbol{S}$によって計算できることが知られている。

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}$$

光の電場と磁場の外積になっているので、波数ベクトルと同じ向きになり、光の進行方向と等しくなる（電磁波が異方性のある媒質中を伝播するときは、ポインティングベクトルの向きと波数ベクトルの向きが一致しない場合もある）。ポインティングベクトルは、単位面積・単位時間あたりに電磁波が運ぶエネルギーの流れを表している。

偏光とその表現方法

ここでは、光がもつ重要な自由度である、偏光（polarization）について説明しよう（偏光は偏波（へんぱ）とも呼ぶ）。偏光とは、光の電場（磁場）の振動方向の自由度である。空間を伝播する光は横波であるため、例えば z 方向に進行する光の電場ベクトルは、x,y 面内のベクトルになり、x,y の 2 成分をもつ。したがって、光電場がベクトルであることを考慮した、光の波の式は

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \exp[i(\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{r} - \omega t)] = \begin{pmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{pmatrix} e^{i(\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{r} - \omega t)} = \begin{pmatrix} E_x e^{i\delta_x} \\ E_y e^{i\delta_y} \end{pmatrix} e^{i(\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{r} - \omega t)}$$

と書ける。電場ベクトル部分を表す$\boldsymbol{E}_0$をジョーンズベクトルと呼ぶ。ここで、$\tilde{E}_x$, $\tilde{E}_y$は x,y 方向の電場成分で、一般に複素数であるため、振幅と位相に分けて書いた。本資料では、波の位相の符号を$\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{r} - \omega t$と定義しているため、位相δ が増加すると、位相が時間的にどんどん遅れていくことに注意しよう。実際のある瞬間の電場の値は実部をとったものであることに注意したい。電場強度Iは

$$I = I_x + I_x = E_x^2 + E_y^2 = \left|\tilde{E}_x\right|^2 + \left|\tilde{E}_y\right|^2 = \tilde{E}_x \tilde{E}_x^* + \tilde{E}_y \tilde{E}_y^*$$

と書けるが、これを 1 として規格化することが多いので、さらに$E_x = \cos\Psi$, $E_y = \sin\Psi$とおくことができる。また、現実に測定されるのは、各成分の相対位相であるので$\Delta = \delta_y - \delta_x$とおくと、最終的に

$$\boldsymbol{E}_0 = \begin{pmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Psi \\ \sin\Psi\exp(\mathrm{i}\Delta) \end{pmatrix}$$

となる。

　具体的な、偏光状態とそのジョーンズベクトルを見てみよう。まず、x,y 方向の直線偏光は

$$\boldsymbol{E}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{E}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

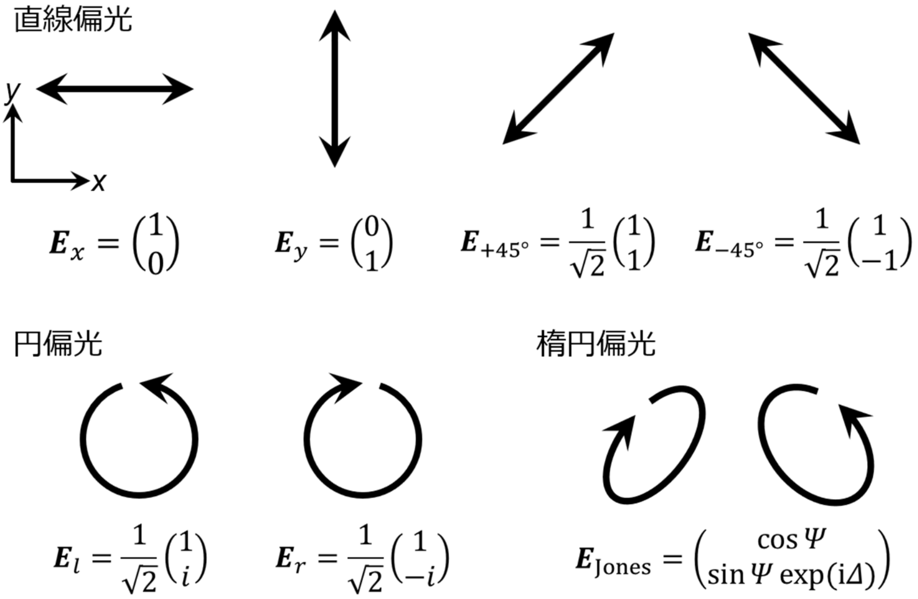
と書ける。また、±45 度の直線偏光は

$$\boldsymbol{E}_{+45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{E}_{-45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

となる。直線偏光は、x,y 成分の位相差Δがゼロであり、Ψによってその傾きが決まる。さらに、x,y 成分に位相差がある場合は、（楕）円偏光になる。特に、$\Delta = \pm\pi/2$, $\Psi = \pi/4$ の時は

$$\boldsymbol{E}_l = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \boldsymbol{E}_r = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$

左右の（完全に丸い）円偏光になる。ここで、位相差$\Delta = \delta_y - \delta_x$が、「y 成分が x 成分からどれだけ遅れているか」を表すことに注意すると、$\Delta = \pi/2$の時に左回り、$\Delta = -\pi/2$の時に右回りになることがわかる。円偏光の左右の定義は、波の位相の定義や位相差の定義によって変わってしまうということを、頭の片隅に置いておこう。



この偏光を表すベクトルに、ジョーンズベクトルという名前がわざわざついているのは、これを用いると、偏光光学素子に光を通した後の偏光状態を便利に計算できるからである（これをジョーンズ計算法と言う）。この計算法では、偏光光学素子を、ジョーンズ行列と呼ばれる2×2 の行列で表す。偏光光学素子に、ある偏光$\boldsymbol{E}$を入射した際に出てくる偏光状態$\boldsymbol{E}'$の計算は、ジョーンズ行列$\overleftrightarrow{\mathrm{M}}$とベクトルから

$$\boldsymbol{E}' = \overleftrightarrow{\mathrm{M}}\boldsymbol{E}$$

と計算できる。光学素子が複数ある場合、そのジョーンズ行列を左から次々とかけていくだけで、最終的な偏光状態を求めることができる。（偏光光学素子の種類や機能、ジョーンズ行列に関しては、「分光エリプソメトリ第 3 章」を読んでみてほしい。）

ここまでは、ジョーンズベクトルを用いた偏光の表現を学んだが、実はもうひとつ、ストークスベクトル（Stokes vector）を用いた方法がある。ストークスベクトルは、ストークスパラメータS_0, S_1, S_2, S_3と呼ばれる 4 成分をもつベクトルであり、各偏光成分の光強度を用いて以下のように定義される。

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ I_x - I_y \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_r - I_l \end{pmatrix}$$

ここでの添え字は、ジョーンズベクトルの時と同じ偏光を表している。は、光強度を表しており、そのほかは直交する偏光同士の引き算になっている。ジョーンズベクトルの時に見た、偏光状態をストークスベクトルで表すと

$$\boldsymbol{S}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{S}_y = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{S}_{+45^\circ} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{S}_{+45^\circ} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{S}_r = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{S}_l = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

となる。ここでジョーンズベクトルの時と同じように、強度は 1 に規格化した。これを見ると、

$S_1 \rightarrow \mathrm{x}$ 偏光ぽいか、y 偏光ぽいかを判定

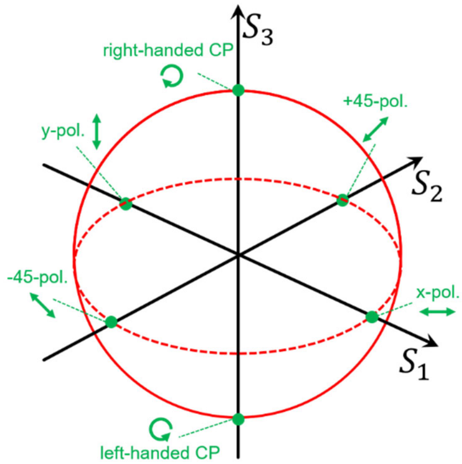
$S_1 \rightarrow +45$ 度偏光ぽいか、ー45 度偏光ぽいかを判定

$S_3 \rightarrow$ 右円偏光ぽいか、左円偏光ぽいかを判定

していることがわかる。各強度は、実際に測定で直接得ることが可能であり、ストークスパラメータは、実験により直接観測が可能な量である。（測定方法は、「分光エリプソメトリ第 3 章」を読んでみてほしい。）

この規格化されたストークパラメータS_1, S_2, S_3,を、それぞれx, y, z座標に割り当てて 3 次元球面上にプロットしたものをポアンカレ球（Poincaré sphere）と呼ぶ。ポアンカレ球は、赤道

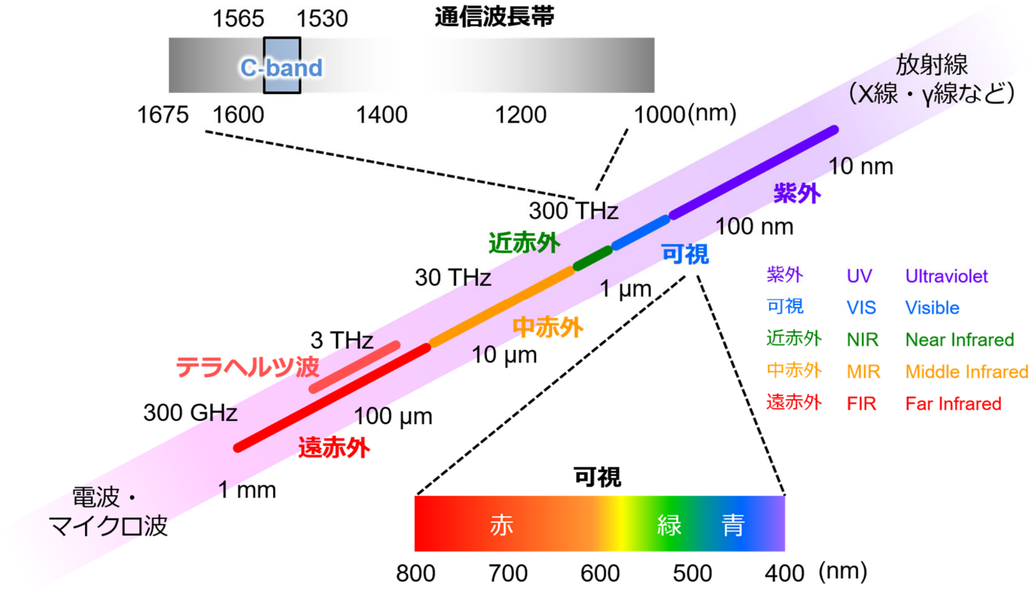
上が直線偏光を表し、そこからずれると楕円偏光を、さらに北極と南極が円偏光を表す。この球場に偏光状態をプロットすることで、偏光状態を視覚的に理解することができる。ポアンカレ球は、固体物理のスピンで出てくるブロッホ球と非常に似た概念で、光の偏光自由度が、電子などのスピン自由度と対応することをよく表現している。



実はここまでの偏光の議論は、$1 = S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$となるような「完全偏光」のみを扱ってきた。完全偏光とは、光が一つの偏光状態のみをもつような純粋な偏光状態であり、ポアンカレ「球面上」の１点として偏光が表現できる。現実には、部分偏光や無偏光（非偏光）といった、複数の偏光状態がまざった偏光状態も存在する。部分偏光の場合は、$1 = S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$となり、ポアンカレ球の「内部」の点で表現される。また、無偏光状態とは、太陽の光やランプなどからの熱放射のように、完全にバラバラの偏光がまざった状態であり、時間平均するとすべてのストークスパラメータがゼロになるため、原点で表現される。このように、ストークスベクトルは、ジョーンズベクトルとは異なり、完全偏光以外の偏光状態も表現することができる。

完全偏光に対するストークスベクトルと、ジョーンズベクトルは完全に一対一対応する。そのため、ジョーンズベクトルを表現するために用いた、$\tilde{E}_x, \tilde{E}_y$やΔ, Ψを用いて表現することもできる。また、ここでは紹介しないが、方位角や楕円率といったパラメータを用いても表現できる。（詳細は例によって、「分光エリプソメトリ第３章」にある。）

電磁波の分類



図は、各領域の電磁波につけられている名前を、波長と周波数ごとにまとめたものである。ごく一般的な意味での「光」は、目に見える可視光領域の（周波数の）電磁波を指すものとして使われている。一方、研究界隈においては、目に見えない波長域であっても「光(light)」と呼ぶ。大雑把な感覚としては、紫外～可視～赤外あたりの周波数の光は、だいたい、「光(light)」という言葉が使われる気がする。一方、それよりも低い周波数帯（長い波長帯）は、マイクロ波（micro wave）や電波(radio wave)と呼ばれる領域で、我々が普段の通信で大変お世話になっている電磁波たちだ。（ちなみに、日本の電波法では、周波数 3 THz 以下の電磁波を伝播と定義しているようだ）また、光よりも高い周波数帯（短い波長帯）は、X 線やγ線（ガンマ線）などの放射線に相当する領域で、レントゲンなどでお世話になっている。比較的最近、遠赤外域の中でも 1~数十 THz の領域は「テラヘルツ波（THz wave)」と呼ばれ、化学物質の判定技術や 6G 通信技術への応用可能性から注目されている。　歴史的にあまり使用されてこなかった周波数領域であるため、TH z 用の光学素子やデバイスが未発達で、研究の舞台としても盛んになっている。

これらの名称は人間が勝手につけたものであって、どの電磁波も、周波数（波長）以外は全く同じものである。ではなぜ、わざわざいろいろな名前を付けているかというと、「物質」の方の電磁波に対する応答が、周波数によってかなり異なるからで、それによって応用される範囲が異なり、それぞれの用途ごとに名前が振り分けられている。例えば、目に見える光は壁を

透過しないが、電波のような光は壁を通り抜けたり回り込んだりできるので、通信に用いられる。

「光」の領域は、紫外（10～400 nm あたり）、可視（400～800 nm あたり）、近赤外（800 nm～2.5 μm あたり）、中赤外光（2.5~4 μm あたり）、遠赤外（4~1000 μm あたり）とわけられる。この領域では伝統的に、周波数ではなく波長を使って分類されることが多い。「光学領域（optical region）」というと、可視と近赤外をまとめた領域を指すことが多い。通信波長帯と呼ばれる光通信で用いられる波長はだいたい 1500 nm 前後にあり、特に 1550 nm はよく用いられる通信波長である（通信波長帯は、もっと細かく C バンドとか T バンド等と名前がついている）。フォトニック結晶（やメタマテリアル）といった人工構造による光物性（ナノフォトニクス）分野は、そのアイデアが、広い周波数域にわたって適用可能であることが多く。デバイス作製の簡便さ（デバイスサイズは波長にスケールして大きくなる）から、長い波長の領域（THz やマイクロ波など）で原理実証的な実験が行われた後に、短波長化していき、光学領域での実験が報告される、という流れがよくある。つまり、光領域だけでなく、長い波長域（時には音波などの別の波動系）の研究も我々の研究に深く関わっており、フォローしていく必要がある。

実験で用いる光の“値”

実験で使うレーザ等の光源のスペックを表す際には波長が用いられるのに対して、シミュレーションによるバンド計算では周波数のほうが便利であることが多い。実験屋として、周波数と波長の関係等、扱っているモノの“桁”感覚をもつことは重要なのでここでまとめておきたい。

可視光とはだいたい 500～700 nm くらいの波長の光である。（実は、人によって見える波長域が少し違うらしい）ここで、光の“色”を、周波数ではなく波長で表現したが、物質の中でも不変なのは周波数のほうなので、本当は“色”は周波数でラベル付けする方が無難である。可視光を周波数に直すと、だいたい 400～750 THz くらいで、とんでもなく早い周波数であることがわかる。（ちなみに、電波業界の使う「高周波(high frequency)」は、光の人からするとかなり低周波である）このレベルの早さになると、原子核のような重いものは、ほとんど追従することができず、電子のような軽いものしかよく反応しない。つまり、われわれが普段見ている色や光沢などの特徴は物質中の電子の様子でほぼ決まるといっていい。（電子の様子はもちろん原子核の影響を受ける）オシロスコープでは、数メガ程度の振動をリアルタイムで追

うことができるが、テラヘルツくらいの速さになるとなかなか難しいため検出機器も基本的には電子を利用した CCD などになる。

フォトニクス（光物性）であまり使われることはないが、電子線分光の分野ではよく eV（エレクトロンボルト）というエネルギーの単位が用いられる。eV は、電子一つが 1V で加速されたときに得るエネルギーであり、電子線分光において、電子をどれくらい加速すれば、どの周波数（波長）の光に対応するか、というのを考えるのに便利である。ここで、角周波数ωの光子（フォトン）ひとつがもつエネルギーは$\hbar\omega$（$\hbar$はプランク定数）である。波長を eV に直す式は、波長の単位がμm であることに注意して、おおよそ 1.24/波長(μm)で計算することができる。可視光の波長で計算すると、だいたい数 eV くらいになる。

ラマン分光の分野では、これまで扱ってきた波数（$2\pi/\lambda$）とは異なり、単に波長の逆数$1/\lambda$で定義される「波数」がよく用いられ、単位は伝統的に cm^{-1}（カイザー）が用いられる。

375 THz（波長 800 nm）の 1 周期は約 2.7 fs（フェムト秒）である。f（フェムト）は-15 乗なので、想像できないほど短い時間である。ただ最新のテクノロジーでは、数フェムト秒の時間幅のパルスレーザ（さらに短いアト秒の研究もある！）が実現されていて、まったく人類が扱えない速度ではない。これほど短い時間のパルスになると、電磁場が数回しか振動しないようなパルスが実現される。光が電磁波であるとわかってから 170 年の進歩はすごい。ちなみに、1 周期の間に光は 1 波長分進むので、2.7 fs の間に 800 nm しか光は進めない。光の速度をもってしても、これだけしか進めない時間スケールを人間は扱えるのである。

いわゆるシリコンフォトニクスで最もよく対象にするのは、通信波長帯と呼ばれる 1.5 μm 程度の波長の光である。この 1.5 μm の光は周波数だとおよそ 200 THｚくらいである。(光速を波長で割ることで簡単に計算できるが、1 μm は 300 THz と覚えておくと、それ以外の波長でもだいたいわかる）eV になおすと、1.27/1.5~0.85 eV くらいである。また、周期を計算しておくと、1/200(THz)~5 fs くらいである。つまり、光は、5 fs で 1.5 μm 進むことができる。納富研で、通信波長帯を扱うことが多いのは、もともとＮＴＴでの通信の研究がベースにあるからであり、そこで培った、測定や作製の技術を基盤として研究を行っているためである。