

光を使った科学

著者	浅川 誠
雑誌名	理工学と技術 : 関西大学理工学会誌 = Engineering & technology
巻	16
ページ	43-48
発行年	2009-12-01
その他のタイトル	Introduction to Photon Science
URL	http://hdl.handle.net/10112/846

光を使った科学

浅川 誠*

Introduction to Photon Science

Makoto ASAKAWA

1. はじめに

科学技術の面から見ると、19世紀は機械の時代、20世紀は電子の時代と言われています。そして私たちが生きている21世紀は光の時代と言われています。皆さんもお世話になったことがあるレントゲン撮像はX線を利用しています。X線は光の一種ですのでこれは光を使った科学技術です。テレビでは盛んに光通信の商業流が流れています。広い意味では携帯電話で使っているいわゆる電波も光です。目立ちませんがCD/DVD再生装置の中にもレーザーが組み込まれています。現在の日常生活で活用されている光技術は主に情報関連の分野のものが多のですが、実際には皆さんの目の届かない工場での精密加工などの分野でも光は広く活用されています。でもまだ21世紀は始まったばかりです。これからどのような光技術が生まれてくるのでしょうか。本稿では一般には知られていないけれども現在研究が進められている新しい光技術を、大雑把ではありますが紹介したいと思います。特に社会的な関心が強いエネルギー問題や医療工学の分野の科学技術について紹介しますので、普段あまり光について学習しない学科・専攻の人も目を通してみてください。物理学をあまり学習する機会がない人にも、光についての基礎知識が持てるように工夫したつもりです。

2. 電波—可視光—X線

物理学では光を「電磁波」と「光子」の二つの考え

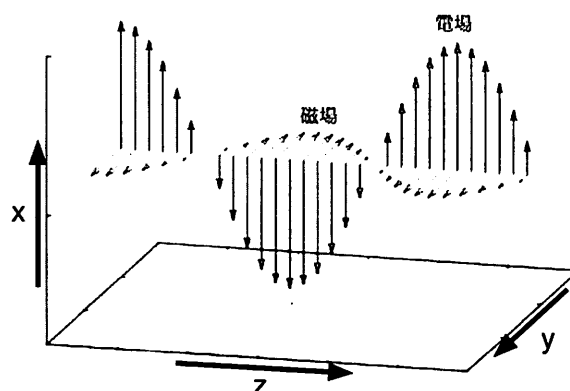


図1 電磁波の電場と磁場。電磁波は電場 \vec{E} 磁場 \vec{H} の外積 $\vec{E} \times \vec{H}$ の向きに光速 c で進む。図では z 軸正の向き。この外積はポインティングベクトルと呼ばれ、その大きさ電磁波の電力密度を表す。

方で記述します^{[1,2]}}。電磁波としての記述には電磁気学、光子としての記述には量子力学が対応します。図1は電磁波の様子を示します。光は電場と磁場の波であり、これが 3×10^8 [m/s] という速さで進んでいます。光の速さは物理学の中でも最も重要な物理量であり小文字の“ c ”と書かれることが多いです。

この波の1周期の長さが波長と呼ばれます。周波数はある地点で観測したとき電磁波の山谷が1秒間に何回変化するかであり、周波数 f [Hz] と波長 λ [m] の間には

$$c = f\lambda$$

という関係が成立します。強い光というのは電場や磁場が強い電磁波をさします。電力 P [W] の光を断面積 S [m²] に集光した場合、電場の平均的な強さ \bar{E} は

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{2P}{c\epsilon_0 S}}$$

となります。ここで $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [\text{A}^2\text{s}^2/\text{Nm}]$ は真空の誘電率と呼ばれる物理定数です。講義などで良く見かける赤色のレーザーポインターは電力が 100mW、直径が 4mm 程度ですから平均的な電場強度は 2.4kV/m となります。赤い光の端から端までの電位差は、この電場強度に直径 4mm をかけて大体 10V 程度ということになります。

一方、光を光子として考えると、周波数 f の光は

$$\text{エネルギー} = hf$$

$$\text{運動量} = \frac{hf}{c}$$

を持った粒子であると記述されます。ここで h はプランク定数と呼ばれる定数であり、 $h = 6.6 \times 10^{-34} [\text{J}\cdot\text{s}]$ です。周波数にプランク定数をかけると単位が J (ジュール) になることを確認してください。光のエネルギーを議論するときジュールという単位を使うのは不便です。物体に光を当てると物体中の電子が最初に影響を受けますから、電子に 1V の電圧を加えた時の運動エネルギーを基準とする単位であるエレクトロンボルト (eV) を光子エネルギーの単位として採用しましょう。こうするとプランク定数は $h = 4.1 \times 10^{-15} [\text{eV}\cdot\text{s}]$ となります。ちなみに電子は大変軽く ($9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$)、1V の電圧をかけるだけで $6 \times 10^5 \text{m/s}$ 、すなわち光の速さの 0.2% にまで簡単に加速されます。音速が 350m/s 程度であることを考えると随分速いことがわかります。光子で記述した場合、強い光は光子の個数密度が高い光のことをさします。赤色の光の光子エネルギーは 1.5eV 程度です。電力 100mW = $6.2 \times 10^{17} \text{eV/s}$ のレーザーは 1 秒間に 4×10^{17} 個の光子を出力しています。ものすごい数です。これを直径 4mm に集光すると光子密度は $3 \times 10^{22} \text{個}/\text{m}^2$ となります。

さて光の特徴といえば、その色を真っ先に思い浮かべるのではないのでしょうか。色の違いは周波数あるいは波長の違いによるものです。また目に見えない光は電波、赤外線、紫外線、X 線というように名前がついています。図 2 に光の波長・周波数・エネルギーと呼び名の関係を示します。可視光と呼ばれる目に見える光は、赤色が波長 $0.8\mu\text{m}$ であり、紫色が波長 $0.35\mu\text{m}$ です。 $1\mu\text{m}$ とは 10^{-6}m 、すなわち 1000 分の 1 mm です。周波数でいうと可視光は 380THz から 860THz の間です。1THz とは 10^{12}Hz です。光子エネルギーとしては 1.5eV から 3.5eV に対応します。乾電池 1、2 個分の電圧程度ですね。またエネルギー hf はボルツマン定数 $k_B = 8.6 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ により絶

対温度 $T[\text{K}]$ と、 $k_B T = hf$ と関係づけられます。可視光に対応する光を温度換算すると赤色で 1700K、青色で 4000K となります。低温の星は赤く、高温の星は青く見えるというのはこのことです。物体の温度と光の周波数の正確な話は後節で紹介します。可視光から離れてみると電波と呼ばれるのは周波数が 0.01THz 程度までであり、波長が 3cm より長い光です。X 線と呼ばれるのは光子のエネルギーが 100V を超えるような光で、波長は $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ より短くなります。比較のために記しておく、原子の大きさは大体 0.1nm 程度です。こうしてみると人は光の極一部しか目で見ることができないことに気づくでしょう。しかしながら様々な科学技術を使って、人はあらゆる光を測定することができます。

X 線も電波も物理学的には同じ電磁波/光子であると説明してきましたが、それらの性質、特に物体に与える影響は大きく異なります。エネルギーが 1eV を越えるような光は光子としての性質を強く示します。人間の目に可視光が入ると、網膜にある受光タンパク質の電子状態が変わり、これが電気信号として脳に伝わり映像として処理されます^[3]。少し脱線して地表で見た太陽光の色別の強さを見てみましょう。図 4 に横軸を光子エネルギーにとり縦軸にその光強度をとったグラフを示します。太陽は電波領域から X 線領域にの広い領域にわたって強い光を発生しているのですが、地球の大気のおかげで生命に有害な X 線は地表にはほとんど届かずに、光子エネルギーが 0.5eV から 4eV の間にある光だけが地表に届きます。一番強いのは 2eV (黄色) から 2.5eV (緑色) の光です。人間の視覚が地表に強く降り注ぐ 1.5 から 3.5eV の領域を使っている所に、生命の進化の巧みさを感じます。地表には届かない X 線は物体を突き抜けようとする性質が強く、受光タンパク質に吸収されにくいので目には見えませんが、光子エネルギーが高いため物体の状態を変える能力は可視光より大きいです。また電波は光子エネルギーが低いので物体の状態を変える力は弱いのですが、電磁波の性質を強く示しコンクリートなどの絶縁体の中を波として伝わります。

3. 光を使った科学技術

現在研究が進められている先端的な光科学技術の例として始めにレーザー核融合を紹介します^[4,5,6]。前述のように光は運動量を持った粒子ですから、光を当てることで物体に圧力を与えることができます。レーザー核融合では 10PW (ペタワット) という莫大な電力の光を直径 1mm 程度の水素を封入したプラスチック球に四方八方から照射し、この水素を圧縮し核融合反応

波長	3mm	300μm	30μm	3μm	0.3μm	0.03μm	3nm
電波・マイクロ波							
		テラヘルツ光					
			赤外線		可視光	紫外線	X線
周波数	0.1THz	1THz	10THz	100THz	1,000THz	10,000THz	10,000THz
光子エネルギー	0.4meV	4meV	40meV	0.4eV	4eV	40eV	400eV
温度	4.8K	48K	480K	4,800K	48,000K	480,000K	4,800,000K

図2 光の波長・周波数・光子エネルギー・温度と呼び名。

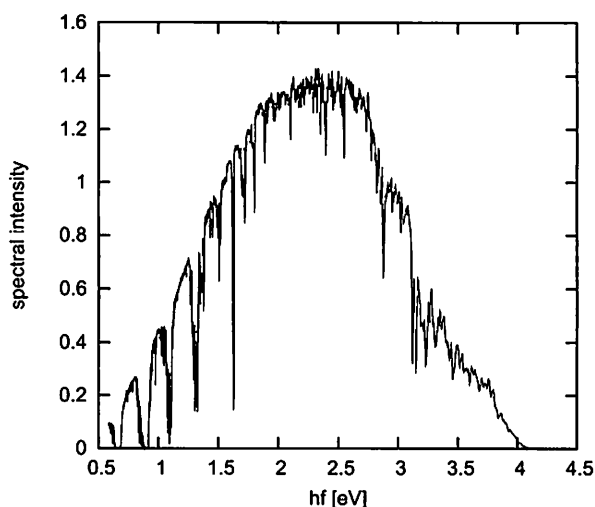


図3 地表で観測した太陽光の光子エネルギー別光強度（スペクトル）。所々急激に光強度が弱くなっているのは大気中の水や酸素分子が、そのエネルギーの光子を強く吸収するためである。

を起こさせようというものです。非常に短い時間（1ps = 10×10^{-12} 秒）ではありますが、平成7年兵庫南部地震を凌ぐ電力を直径1mmの空間に集中させるのですから、その時の光圧力は想像を絶するものです。地上に小さな太陽を作るこの研究は、原子力発電に取って代わる新しい発電所を目標に行われています。研究の鍵はこのような大出力レーザーを開発することです。レーザー核融合発電所が建設されるのはまだまだ先のことですが、この研究の過程で開発されたレーザーダイオードなどの技術は既に日常生活の中で活用されています。また太陽光を使って動作する大出力レーザーを宇宙空間に建設し、地上でこのレーザー光を受けてエネルギー源として利用することも提案されています。

波動であるという性質のため、光は波長程度の直径までにはしか集光できないという性質があります。したがって微細加工をするためには短波長の光が必要です。CPUという言葉を知っているでしょうか。これはコ

ンピュータの心臓部にあたる装置で現在のCPUの中には線幅が40nm程度の微細な電子回路がぎっしり詰まっています。さらにコンピュータの処理能力を向上させるために線幅20nmのCPU開発が計画されています。これを実現するために波長13nmのレーザー開発が必要とされています。近年になって自由電子レーザー（Free-Electron Laser; FEL）という方式の装置で13nmレーザー発振が初めて実現されました。図4は自由電子レーザーの構成図です^[7,8]。始めに電子をほぼ光速まで加速しておき、この電子を周期的に強度が変化する磁場空間に入射して光を発生させます。発生する光の波長は磁場の周期を λ_w とすると

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2}$$

で与えられます。ここで γ は相対論因子と呼ばれるものであり、電子の運動エネルギーをKeVとすると、おおよそ $\gamma = K/0.5 \times 10^6$ で与えられます。13nm FELでは電子を1GeV = 10^9 eVまで加速しますので γ は2000となります。この電子の速さは光速の実に99.99999%に達します。装置全体の長さは500mを越えるような巨大なものであり、まだまだ産業応用に使えるものではありませんが、今までに例のないような微細加工研究を可能としています。この研究をさらに発展させ波長が原子の大きさよりも短いX線FELも開発が進められています。この種のレーザーは1fsという大変短い時間だけ光を発生させることもあり、物質が作られる様子、例えば水素原子2個と酸素原子1個が結合し水分子ができる過程の動画を撮影することが可能となります。自然科学に与えるインパクトが大変高い研究です。

周波数がテラヘルツ帯の光を使った研究も重要視されています。ここで温度を持つ物体から放出される光について説明します。この現象は黒体放射と呼ばれプランクの法則で記述されます^[1,2]。温度 T の物体から放出される周波数 f の光出力密度 $W_T(f)$ は

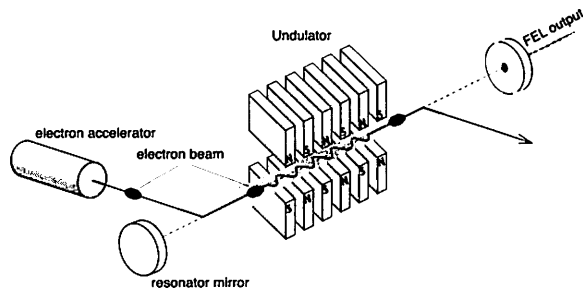


図4 自由電子レーザーの構成図。電子加速器 (electron accelerator) で 10^9eV にまで加速した電子をアンジュレータ (undulator) に入射し、電子にジグザグ運動させて光を発生する。

$$W_T(f) = 4 \frac{h}{c^3} \frac{f^3}{1 - \exp(-\frac{hf}{k_B T})} \quad [\text{W/m}^3/\text{Hz}]$$

と与えられます。温度と光出力密度の関係を図5に示します。図中の強度が最大となる周波数 f_{max} は温度 T と

$$hf_{max} = 2.8k_B T$$

という関係にあります。室温 ($T = 300\text{K}$) の場合、 $hf_{max} = 72\text{meV}$ 、 $f_{max} = 20\text{THz}$ であり、私たちを取り巻く環境にはテラヘルツ光で満たされているといえます。テラヘルツ光が生命の進化の過程にどのような影響を及ぼしたのかは定かではありませんが、生命を司るタンパク質・酵素分子の振動はテラヘルツ帯に集中しており、生体化学反応もこの程度のエネルギーで行われます。皆さんも知っての通り、温度が上がりがすぎても下がりがすぎても生命活動は停止してしまいます。このようにテラヘルツ光は生体科学と密接な関係にあり、医療研究、新薬開発研究などの分野でのみならず生命科学で注目されています。また現在の CPU 速度は 0.01THz 、通信速度が 0.1THz であり、次世代の情報技術は 1THz で行われるということもあり、電子産業の分野でもテラヘルツ光研究は重要になっています。しかしながら、テラヘルツ領域の光科学研究は、電波や可視光領域の研究と比べて立ち後れているのが現状です。これは、これまでテラヘルツ光を発生できるレーザーが開発できなかったためです。現在のテラヘルツ光科学では、テラヘルツ光発生装置の開発研究と並行して、テラヘルツ光に対する物質の反応調査を進めているのが現状です。発生装置性能の向上にともない、新しい興味深い現象が少しずつ発見されています。

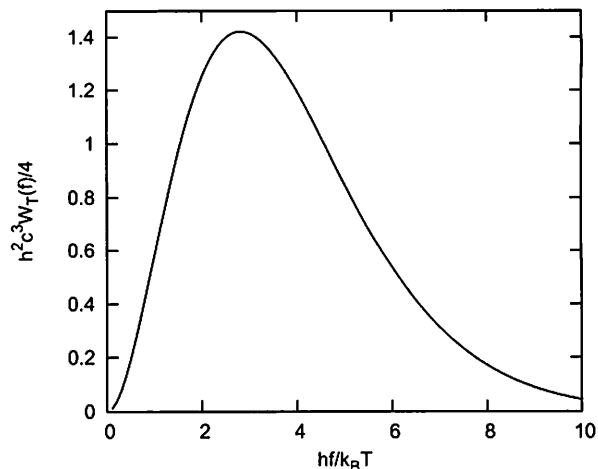


図5 黒体放射のスペクトル。横軸は物体の温度に対する光子エネルギーの比。

4. テラヘルツ光科学

テラヘルツ光は電磁波の性質を強く示す電波領域と光子の性質を強く示す可視光領域の狭間にあり、電磁波と光子の両方の性質を示します。電磁波として絶縁体の中を伝わりながら、光子として物質に吸収されます。これに加えて、物質によって良く吸収する光の周波数が異なることを利用してテラヘルツ・イメージングという技術が研究されています^[9,10]。この領域の研究として最も有名な川瀬グループによる薬物のテラヘルツ・イメージング研究を紹介しましょう^[11,12]。粉末状の禁止薬物2種と解熱剤(アスピリン)を入れた封筒を用意し、 1.32THz から 1.98THz の光をこれらのサンプルがどれくらい吸収するのかを比較し、封筒をあけることなく中の薬物の種類を同定するという実験です。アスピリンは 1.39THz と 1.98THz の光を良く吸収し、ある種の禁止薬物は 1.46THz から 1.84THz の光を良く吸収しました。別の種の禁止薬物は 1.32 から 1.98THz の光を全域にわたって強く吸収します。このような吸収する周波数のパターンから隠された物質を見つけることができるのです。空港での所持品検査はもちろんのこと、様々な業種の工場の生産ラインにおける品質管理技術としての応用が期待されています。X線によるレントゲン撮像はどちらかと言えば金属のような重い物を見ることは得意ですが、薬物や生体分子を見ることは不得意です。テラヘルツ・イメージングは生体分子の種類をサンプルを切り開くこと無く調べることができるので、新しい医療診断技術としての可能性も秘めています。

ある物質が良く吸収する周波数の大変強いテラヘル

ツ光を照射すれば、その物質だけを選択的に変質・破壊することもできます。動脈硬化の原因となる血管中のコレステロールに、52.2THzの光を照射し、無害な水溶性のコレステロールに変質させることができることが実験で実証されています^[13]。以上のように医療分野だけを見てもテラヘルツ光科学が秘めている可能性は大変大きいものです。この可能性を更に広げるとともに、テラヘルツ光科学を実用化するための鍵となるのは光源です。光の周波数を精密に調整できる高パワーのテラヘルツ・レーザーの開発が重要です。薬物同定研究で用いられた光源は現在のテラヘルツ光科学研究の中心的役割を果たす装置ですが、これは10μWの出力しかだせません。弱い光を使うので現在テラヘルツ・イメージング像を撮影するには大変長い時間が必要です。物質変質の実験で用いられた光源は前節で紹介した自由電子レーザーであり、出力は0.1W（瞬間的には1MW）に達しますが全長が50mもあるような巨大な装置であり、しかも世界に10機しかないような高価な装置です。これではとても実用化できません。

テラヘルツ光を発生できるレーザーの開発が難しいのは、テラヘルツ光が電磁波と光子の間にあるため、電磁波を作る技術も、光子を作る技術も適用することが難しいからです。現在のテラヘルツ光源開発研究では様々な方式のレーザーが研究されています。光子側からのアプローチとしては半導体レーザー技術とナノテクを駆使した量子カスケードレーザーが、電波側からはトンネル効果ダイオードなどの半導体電子回路（携帯電話を発展させた類いのものです）や電子ビームを用いたレーザーが研究されています。どの方式が一番うまくいくのかなんて今はわかりません。それぞれ異なった利点を持っており、科学者は自分のアイデアを突き詰めて研究しています。

筆者は現在、光の速度の半分程度まで加速した電子を使って強いテラヘルツ光を作る研究を主に行っています。この方式の特徴は、電子の速さを調整することで自由自在に光の周波数をかえることができる点です。皆さんも音波の現象として良く知っているドップラー効果を光の分野で利用しています。少し専門的な話になりますが、速さ v で直進運動する電子の周りには

$$\phi(\vec{x}, t) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{r}(t')| \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)}$$

という電位ができます。ここで、 \vec{r} は電子の位置ベクトルを、 θ は電子の進む方向と観測点 \vec{x} のなす角度を表します。この式を眺めていると、もし分母の $1 - \frac{v}{c} \cos \theta$ を0にすることが出来れば、電位を無限にすることができます。大変強い電磁場を作ることが

できるはずですが、この現象はチェレンコフ放射と呼ばれるものです。このためには $\frac{c}{v} = \cos \theta$ という状況を作らなければなりません。 $\cos \theta$ は必ず1より小さいのですから、光の速さを電子の速さより遅くすれば良いことになります。屈折率という言葉を知っていると思います。これは通常の光速 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ と物体中の光の速さの比であり

$$\text{屈折率} = \frac{3 \times 10^8}{\text{物質中の光速}}$$

と定義されています。水中では光の速さは遅くなり、屈折率は1.5です。一般に光速は誘電体と呼ばれる電流を流さない物質の中では遅くなります。シリコンはテラヘルツ光に対して屈折率3.4を持ちますから、シリコン中で光速は通常の30%にまで遅くなります。ここに通常の光速の30%以上の速さで進む電子を打ち込めばチェレンコフ放射光が発生します。シリコンの中に作ったトンネル中に無数の電子を連続的に打ち込み、光を発生させます。発生した光は、シリコンの両端に配置した鏡のために閉じ込められ、次々と打ち込まれる電子が発生する光と重ね合わされ強くなって行きます。このアイデアを数式で表現し、計算した結果を図

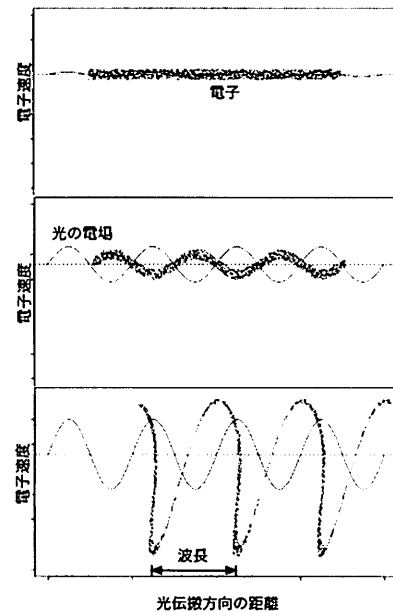


図6 チェレンコフ自由電子レーザーのシミュレーション結果。横軸は光が伝搬する向きの空間的な長さ、縦軸は電子の速さ。図中の曲線は光の電場を表し、点は連続的に入射される電子を表す。ほぼ同じ速さの電子をレーザー装置に打ち込むが（上段図）、光から力を受けるため電子には遅くなるものや速くなるものがある（中段図）。レーザー装置内で光が強くなると電子の大部分は下段図のように、元の速さより遅くなる。この失われた運動エネルギーは光エネルギーに変換されている。

6 に示します。横軸は電子が進む向きの長さで、縦軸は電子の速さです。始め電子は同じ速さでシリコン中のトンネルに打ち込まれますが、光が強くなるにしたがい光の電場から力を受けて加速されたり減速されたりします。最終的には電子は光の波長間隔に並んだ狭い空間に集まり位相のそろった強い光を発生します。位相がそろった光を使うと光の干渉現象などが利用でき、更に高度な光利用技術の創造につながります。筆者らが研究しているチェレンコフ自由電子レーザーのもともとのアイデアは上述の通りとても単純です。物理学はこのアイデアを数式として表し、具体的な数値を求める助けをしてくれます。皆さんも自分のアイデアを具体化するために嫌がらずに物理学を勉強してください。話が逸れてしまいました。現在筆者らが開発している単純な小規模の装置でも 0.1W の出力が見込まれており、この光源が完成すればテラヘルツ光科学に対して大きく貢献できるものと考えています。

5. おわりに

光科学というと電子工学や物理学というイメージが強いと思いますが、現代ではむしろ生物学、化学、医学の分野で盛んに光を利用した科学技術が研究されています。実際、物理・応用物理学科に所属する筆者も医学部の研究者と議論したり共同研究する機会が少なくありません。皆さんが社会で活躍する期間は、正に光科学技術の発展時期に当たります。そして光科学はあらゆる自然科学系学問を組み合わせた、「学際的」なものです。少し専門分野から離れた分野にも興味を持ってください。本稿がそのきっかけになれば幸いです。

参考文献

- [1] 太田浩一、“電磁気学の基礎Ⅱ”、シュプリンガー・ジャパン (2007).
- [2] Rodney Loudon 著、小島忠宣、小島和子訳、“光の量子論 第2版”、内田老鶴圃 (1994).
- [3] “ロドプシン”や“受光タンパク質”というキーワードで調べてみてください。
- [4] 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心ホームページ、<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/>
- [5] 米国 National Ignition Facility ホームページ、<https://lasers.llnl.gov/>
- [6] 中井貞男、“レーザー核融合—21世紀エネルギーへの挑戦”、大阪大学出版 (2001).
- [7] X線自由電子レーザー計画合同推進本部ホームページ、<http://www.riken.jp/XFEL/>
- [8] European XFEL ホームページ、<http://www.xfel.eu/>
- [9] 西澤潤一 編著、“テラヘルツ波の基礎と応用”、工業調査会 (2005).
- [10] テラヘルツテクノロジーフォーラム編、“テラヘルツ技術総覧”、NTG (2007)
- [11] 理化学研究所川瀬独立主幹研究ユニットホームページ、<http://www.riken.go.jp/lab-www/THz/jp/index.html>
- [12] K. Kawase, “Terahertz Imaging”, Optics & Photonics News 39 (2004) 35-39.
- [13] H.Horiike, N.Tsubouchi, K.Awazu, M.Asakawa, M.Heya, “Statatus of the Institute of Free-Electron Laser, Osaka University”, J. Appl. Phys. 41 (2002) 10-14.