

# 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、地球上に温度をもたらし、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光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。

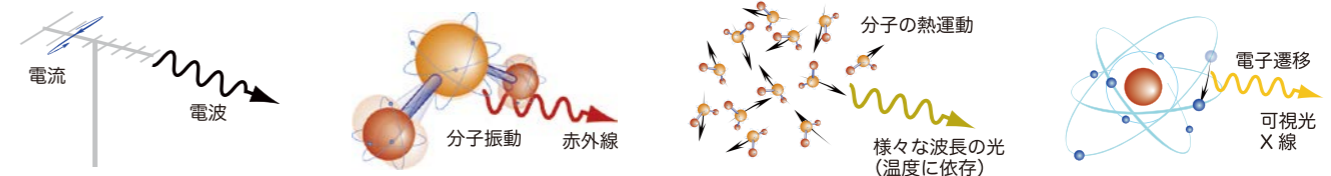
ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線で加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子核から発生するγ線などはすべて、光のなかまです。

この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

## 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)は電子が加速度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、低い周波数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、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。温度と光の周波数は対応します。分子の振動はランダムですので、熱が発する光(黒体放射)は単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。原子の内殻の電子が遷移するとX線が生まれます。

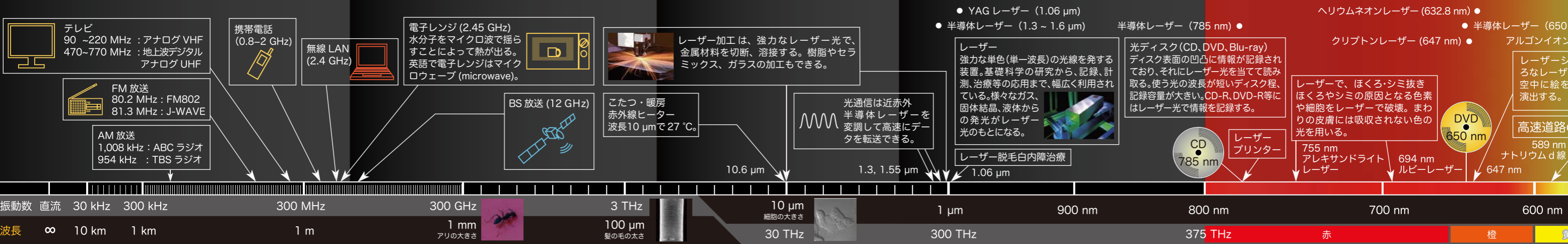


## 波としての光

光は横波で、振動数は1秒間の振動の回数です。振動数と距離のかけかけで波長が関係なく一定です。

## 粒としての光

光子は粒子として振動数(エネルギー)に相当するエネルギーを持っています。ちょうど、光が明るい暗い光子の振動数(エネルギー)に相当するエネルギーを持っています。



## 電波領域 (電波も光)

アンテナで送受信

- ラジコンは、電波 (radio wave) でコントロール。
- ICカード
- レーダー
- NMR / MRI (核磁気共鳴)
- 速度取締り

## 遠赤外線

低温の黒体放射

電波望遠鏡

テラヘルツ波は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技術として期待されている。

テラヘルツ波で検出した封筒の中の薬物

## 中赤外線

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

二酸化炭素 (C=O 基) : 4.3 μm  
水・アルコール (O-H 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

監視カメラ (ナイトビジョン)

センサー・赤外線通信 (IrDA)

## 近赤外線

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光通信に使われる)

血液の赤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。静脈では黒っぽい色になる。波長 800 nm で入れかわる吸収率から、近赤外線を使って血中酸素濃度を計測することができる。

3次元ナノ加工は、近赤外パルスレーザー光を用いて、光の波長よりも遙かに小さい100 nmの分解能で立体加工を実現。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでグリーン発電。

リサイクル識別

近赤外光イメージング

赤外線温度計 / 体温計

白熱灯 (2,500℃) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

## 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移

紅葉

クラゲやサンゴは蛍光を発する物質を持っている。生きた細胞が光るネズミの作製に利用された。

光合成では、クロロフィルという色素が主に 650 ~ 700 nm の光を吸収し、二酸化炭素と水から炭水化物を合成する。

半導体量子ドット

直径数 nm の半導体粒子で蛍光を発する。小さい粒子ほど短い波長で光る。

スタンダードグラスの色は金属の色であり、永遠に褪せない。金は数ナノメートルの小ささになると赤く色づく。形や大きさを変えるだけで可視から近赤外まで色が変化する。このような科学は「プラズモニクス」と呼ばれ、がん治療や太陽電池、ナノ回路、ナノ顕微鏡に使われる。

白色をつくるが必要。テレビ

太陽が黄色なのは、500 nm 黒体放射のため温度は約6,000 K

ホタルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

七色に光るCDの表面

波長の単位:

1 km (キロメートル) = 10<sup>3</sup> m = 1,000 m  
1 m (メートル) = 1,000 mm  
1 mm (ミリメートル) = 10<sup>-3</sup> m = 0.001 m  
1 μm (マイクロメートル) = 10<sup>-6</sup> m = 0.000001 m = 1/1,000 mm  
1 nm (ナノメートル) = 10<sup>-9</sup> m = 0.000000001 m = 1/100 万 mm  
1 pm (ピコメートル) = 10<sup>-12</sup> m = 0.000000000001 m = 1/10 億 mm  
1 fm (フェムトメートル) = 10<sup>-15</sup> m = 1/1,000 pm  
1 am (アトメートル) = 10<sup>-18</sup> m = 1/1,000,000 pm

振動数の単位:

1 Hz (ヘルツ) = 1 秒間に 1 回振動  
1 kHz (キロヘルツ) = 10<sup>3</sup> Hz = 1,000 Hz = 1 秒間に 1,000 回振動  
1 MHz (メガヘルツ) = 10<sup>6</sup> Hz = 1,000,000 Hz = 1 秒間に 100 万回振動  
1 GHz (ギガヘルツ) = 10<sup>9</sup> Hz = 1,000,000,000 Hz = 1 秒間に 10 億回振動  
1 THz (テラヘルツ) = 10<sup>12</sup> Hz = 1,000,000,000,000 Hz = 1 秒間に 1兆回振動  
1 PHz (ペタヘルツ) = 10<sup>15</sup> Hz = 1,000 THz  
1 EHz (エクサヘルツ) = 10<sup>18</sup> Hz = 1,000,000 THz

自由電子レーザー (FEL)

紫外から赤外までの広範囲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したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で63光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも？

すばる望遠鏡

ハワイ島にある日本の大型天体望遠鏡。可視光から中赤外光の光を使って宇宙を探る。直径 8.2 m の反射鏡は世界最大級。

気象衛星ひまわり

10 μm 付近 (大気窓): 黒体放射から雲や地表温度を観測する。  
6 ~ 7 μm (水の吸収): 水蒸気の分布を観測する。

血糖値測定、果実糖度計

赤外線温度計 / 体温計

サーモグラフィ

リサイクル識別

様々なプラスチックの種類を近赤外領域の吸収スペクトルの違いから識別し、リサイクルする。

近赤外光イメージング

生体透過性の高い近赤外光は、脳活動の計測や、皮膚、網膜に用いられる。

白熱灯 (2,500℃) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

さきり座のアンタレスの黒体放射は800 nm付近(3,500℃)。赤く見える。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでグリーン発電。

リサイクル識別

近赤外光イメージング

赤外線温度計 / 体温計

サーモグラフィ

白熱灯 (2,500℃) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

さきり座のアンタレスの黒体放射は800 nm付近(3,500℃)。赤く見える。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

## 油膜が色づくのは光の干渉

異なる方向から伝わってくる光が重なり合うと、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浮かぶ油膜が七色に見えますが、これは膜の表面と裏面とで反射した光が干渉するからです。立体像であるホログラム (1971年ノーベル賞) は、光の干渉を使ってつくります。

干渉する光はコヒーレント (可干渉) であるといえます。レーザーはコヒーレントな光を出す装置です。

## 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。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。

もとの光から色がずれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算 (引き算) されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。

## 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。この現象を屈折といいます。屈折率は光の波長 (色) によって異なります。万有引力の法則で有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光には様々な色が混ざっていることを発見しました。雨上がりの路地に虹が見えるのは空気中の水滴がプリズムとして太陽光を分光するからです。最先端の光科学には、負の屈折率の物質 (逆向きに光が曲がる) を人工的に作る研究が進んでいます。

## 光は回折する

光の進路に障害物を置くと、光は障害物の裏側にも回り込んで伝わっていきます。細い光線をつくらうとして細い穴に光を通して、すぐ広がってしまいます。光の回折を利用して光を選択することができます。細かい周期構造に光を照射すると、それぞれの構造で回折した光が干渉し、角度によって違う色が見えます。CD や DVD の表面が七色に見えるのは、記録ビットの列が回折格子として働くためです。タマムシやチョウの羽、貝殻も、表面に周期構造があって七色に見えます。このように回折で現れる色のことを構造色といえます。

## 光子ロケットは光の放射圧

光が物質の境界面で屈折や反射、散乱すると、物質に力がかかります。光の放射圧は、400年前に予言されたといわれています。天文学者のケプラーは彗星 (ほうき星) の尾がいつも太陽と反対側にのびのを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティーブン・チュールは光の放射圧で原子を冷却する技術を発明しノーベル賞を受賞しました。SF小説には放射圧で飛び光子ロケットが出てきます。JAXA やアメリカでは実際にソーラーセイル宇宙船を研究しています。

空間を「波」として伝わります。粗密波（縦波）の音波とは異なり、光は直進します。進行方向と直交する方向に電場と磁場が交流して振動する電磁波です。波数（単位は Hz）、波長は1回振動する間に真空中を進む距離（単位は m）は、計算は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、一定です。

強度が非常に弱くなってくると、光が粒々であることが見えてきます。粒子を光子（フォトン）といいます。光は光子の粒々がたくさん集まって電流が「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりのように。密度で決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長（あるいはエネルギー）を持っています。

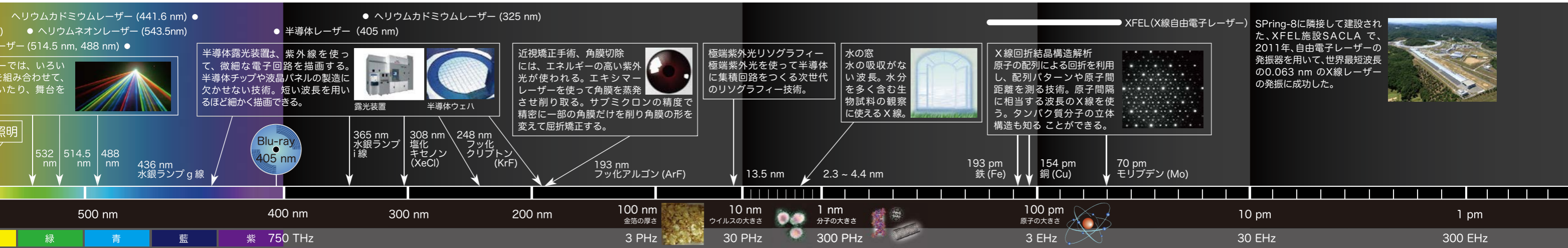
### 光に関連するノーベル賞

- 1901年 X線の発見 (W. レントゲン)
- 1907年 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイケルソン)
- 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. ブラウン)
- 1914年 結晶によるX線回折 (M. フォン・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 エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク)
- 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、電子線回折による分子構造の研究 (P. J. W. デバイ) (化学賞)
- 1953年 位相差顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ)
- 1954年 波動関数の統計的解釈の提唱 (M. ボルン)
- 1954年 原子核反応とγ線に関する研究 (W. ボーテ)
- 1958年 チェレンコフ効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. フランク、I. E. タム)
- 1961年 γ線の共鳴吸収とメスバウアー効果の発見 (R. L. メスバウアー)

- 1964年 M-レーザー、レーザーの発明 (C. H. タウンズ、N. G. バソフ、A. M. プロホロフ)
- 1964年 X線回折法による生物物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン) (化学賞)
- 1965年 量子電磁力学 (朝永振一郎、J. シュウィンガー、R. P. ファインマン)
- 1966年 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ)
- 1971年 ホログラフィーの発明 (D. ガボア)
- 1974年 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル)
- 1979年 X線 CT (G. N. ハウンズフィールド、A. M. コーマック) (生物・医学賞)
- 1981年 レーザー分光学 (N. ブルムバーク、A. L. ショーロー)
- 1981年 高分解能光電子分光法 (K. M. シーグバーン)
- 1997年 レーザークーリング法の開発 (S. チュー、C. コーエンタヌージ、W. D. フィリップス)
- 1999年 フェムト秒化学 (A. H. スズエイル) (化学賞)

- 2000年 高速/光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. I. アルフォーロフ、H. クレーマー)
- 2002年 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr.、小柴昌俊)
- 2002年 タンパクのレーザーイオン化法 (J. B. フェン、田中耕一) (化学賞)
- 2003年 核磁気共鳴画像化法 (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理論 (R. J. グラウバー)
- 2005年 光周波数コム技術などレーザー精密分光法の開発 (J. L. ホール、T. W. ヘンシュ)
- 2006年 宇宙マイクロ波背景放射の黒体放射 (J. C. マザー、G. F. スムート)
- 2008年 緑色蛍光タンパク質の発見と開発 (下村脩、M. L. チャルフィー、R. Y. チェン) (化学賞)
- 2009年 光ファイバーと CCD の開発 (C. K. カオ、W. ボイル、G. E. スミス)
- 2014年 超解像蛍光顕微鏡の開発 (E. ベツィグ、S. ヘル、W. E. モーナー) (化学賞)
- 2014年 青色発光ダイオードの発明 (天野浩、赤崎勇、中村修二)



### 多エネルギー

光学顕微鏡は微小な物体を拡大して観察できる。物体の反射率や光吸収、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観察する顕微鏡もある。紫外から近赤外の広い波長範囲の光が使われる。

動物の目には2色から4色を見分けるセンサーがあり、それらに入る光のバランスで色を認識する。人間は、550 nmの波長を、最も明るく感じる。

ジーンズの色 インディゴ（藍色）で染めたのはほとんど害虫よけのため。

発光ダイオードは、発光効率の高い光源として、信号機、パイロットランプ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目的に使用される。2014年に青色LEDの発明がノーベル賞を受賞。

青信号の色 日本人は緑色のことをしばしば「青色」という。

ビール・酒の瓶は茶色や緑色。紫外線が透過しないように着色し、お酒の劣化を防ぐ。

### 紫外光

誘虫灯で昆虫を引き寄せ、電気ショックで駆除する。紫外線は昆虫の可視域。

昆虫の可視域 ミツバチの可視域は紫外から黄色の光まで。人間には見えない花の模様が見える。

ブラックランプの発する紫外線は目に見えないが、周りの物質を発光させる。

オリオン座のリゲルの黒体放射のピークは 300 nm 付近 (10,000 °C)。青白く見える。

日焼け止めやファンデーションは紫外線を吸収し、皮膚を紫外線から守る。

### 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。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡 「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

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、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。

ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。フレネルゾーンプレート

反射には、Mo/Si や Cr/Sc などの多層膜が用いられる。

### X線

レントゲン写真 からだが透けて見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム（造影剤）を飲む。空港の手荷物検査もX線。

X線CT（コンピュータ断層撮影） 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。

X線天文衛星すざく X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。

XPS（X線光電子分光） X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

静電気除去 空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

### γ線

PET（ポジトロン断層法）陽電子検出を利用したコンピュータ断層撮影技術。放射性分子をマーカーにして、脳機能の診断や、がんの診断に用いられている。

γ線バースト 太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。

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。

放射線治療 弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌 弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。

### 光は横波

水面や金属の表面、照葉樹の葉の表面で反射すると、電場が反射面に垂直な方向に揺れている光がよく反射され、光の揺れる方向に偏りが生じます。これを偏光といいます。

### 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周半回ることができる速さです。月までは1.3秒、太陽までは8.3分かかります。光の速さで1年かかる距離を1光年といいます。

### 太陽の七変化

太陽の色は、黄色がかった白色に見えます。太陽の黒体放射で発生した様々な色の光が混ざっているからです。しかし日の出、日の入りの太陽は赤く見えます。陽が傾くと光が大気を通る距離が増え、短波長の光がチリや水滴に散乱されて届かなくなるからです。

### 色の見え方

人間は 600 万～1,000 万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサーしかありません（犬、猫は2色、鳥は4色）。このセンサーに入る光のバランスで色を認識しています。