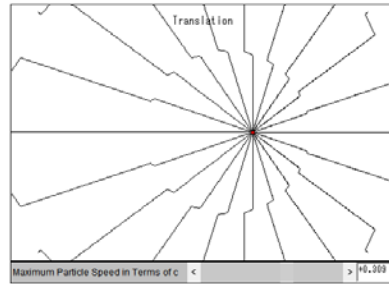


【解説】

Illust. 32.1 電磁波の発生

http://www.compadre.org/Physlets/optics/illustration32_1.cfm

このアニメーションは、正電荷から発する電気力線が示される。アニメーションを開始すると、下部のスライダースイッチの表示が0のとき、この電荷は静止している。荷電粒子の運動は、translation(並進)とoscillation(振動)のいずれかを選択でき、その速さ(振動のときは最大の速さ)をスライダースイッチで随時変更できる。



光や赤外線やラジオ波のような電磁波は、荷電粒子の加速度運動によって発生する(他の発生原因はない)。発生する電磁波の強さは荷電粒子の加速度が大きいほど大きい(電磁波の強さ“電場の2乗に比例”と加速度の2乗が比例する)。

まず、並進モードでアニメーションを動かし、途中で突然に速度を変え、電気力線が変化の様子を観察せよ。電荷に隣接する部分の電気力線が電荷に引きずられて変化し、その変化が光の速さで伝わり、遠方ではその効果が後から現れる。電気力線の形が変わり、変化の伝わる方向と垂直な方向の成分が生じたとき、それが電磁波の電場となる。

一方、電荷の運動は、瞬間的には直線電流なので、その周囲に運動方向と直交する磁場が生じている。運動が加速度を持ち速度の符号や大きさが変われば周囲の磁場の符号や大きさが変わり、これが光の速さで伝わる。加速度運動による電場の変化と磁場の変化は同時におきて、その変化がいっしょになって空間をつたわる。

つぎに、振動モードでアニメーションを動かし、電気力線がうねりながら伝わる様子を観察せよ。電荷が振動する周期と、ある位置で観測する電気力線のうねり(横波の通過)の周期が同じになる。

電荷が加速度運動をするとき、外部からその加速度を発生するための力(したがって電場)が加わる。この力は仕事をして荷電粒子にエネルギーを与える。そのエネルギーが(荷電粒子の力学的エネルギーになる以外として)電磁波のエネルギーとなって空間に広がる。

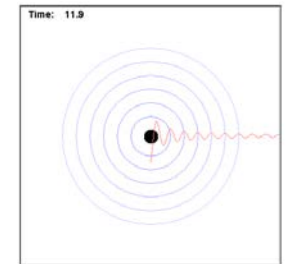
荷電粒子が電磁波を出し続けるには、外部からエネルギーを注入し続ける必要がある。スマホのアンテナから電磁波を出し続けるために、電池に蓄えたエネルギーを使い続けるのである。

【解説】

Illust. 32.2 波の山谷、球面波として伝わる電磁波

http://www.compadre.org/Physlets/optics/illustration32_1.cfm

荷電粒子の加速度運動により電場と磁場の波がつくりだされることは19世紀に知られたが、これは不思議な波であり(音波が気体や液体や固体を、水の表面波が水面を伝わるような意味で)それを伝える媒質が何か不明であった。現在は何もない空間すなわち真空を伝わる波と理解されている。



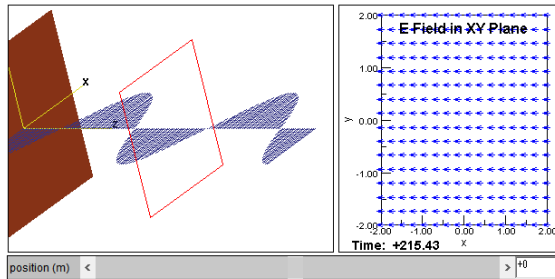
だが波というからには、波としての性質は他の波と同様であり、一点から放出される波は球面波(位相が等しい位置=波の山とか谷をつなげた面が球面)となる。球面上にエネルギーが分布するので、中心から遠ざかるほどエネルギーが弱まり振幅も減る。さらに、電磁波の波としての分類は横波である。すなわち、電場と磁場のベクトルが波の進行方向と垂直な面内において振動する。これらの様子を示したのがアニメーションである。

【解説】

Illust 32.3 平面波として伝わる電磁波

http://www.compadre.org/Physlets/optics/illustration32_3.cfm

アニメーションの左側には、z 方向に伝わる平面波の電磁波の様子を 3D で表した（マウスのクリック - ドラッグで視点を変えて波の様子をみる



ことができる）。右側は、赤枠の面内（z 座標はスライダースイッチで変えられる）の電場ベクトルを表示している。

平面波とは、波面（波の位相＝山とか谷の様子を詳細に表す数値＝が同じ位置をつなげてできる面）が平面となる波である。真空中の電磁波が平面波となると、波が進む方向と波面は直交し、電場ベクトルと磁場ベクトルが波面と平行になる。さらに電場と磁場は互いに直交する。

平面波は波面内の電場ベクトル（また磁場ベクトル）はどこでも同じ大きさ同じ向きである。球面波（絞り込まれていく波）は、焦点面で等位相面が平面だがこの平面上で電場の強度が一様ではない。より一般的には、真空中のある位置で等位相面が平面となりその平面上で電場の強度が異なるとき、この波は平面波にはなりえない。

アニメーションの左側のサイン波形は、ある時刻（Time）に z 軸上（x=0, y=0）の電場の大きさと向きを示す。波面は進行方向の z 軸に垂直すなわち xy 平面と平行なので、x=0, y=0 のところの電場は z さえ同じなら他の x y でも同じ大きさと向きである。赤枠（z 方向の位置を下部のスライダースイッチで変更できる）で示した面が x y 平面と平行な面であり、その面上の様々な位置で電場ベクトルを矢印で表したのが右図である。

このアニメーションでは、数値の単位は長さが m、時間が ns(ナノ秒, 10⁻⁹s)である。

アニメーションを観察して、電磁波の波長を求めるには、時間を止めて赤枠を移動し、振幅が 0 の位置を観測する。周期を求めるには、赤枠の位置を固定し、時間を動かして振幅が 0 になる時刻を観察する。周波数（振動数）ν は周期 T の逆数である。周波数 ν と波長 λ の積が波の速さ c を与える。

実際に測定すると、 $T = 6.7 \times 10^{-8} \text{ s}$, $\nu = 1.5 \times 10^7 \text{ Hz} = 15 \text{ MHz}$, $\lambda = 20 \text{ m}$, $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ となる。

電磁波が真空中で伝わる速さ c は、周波数や振幅によらず一定である（物質中では必ずしも一定でない）。どんな波形の電磁波も単一周波数の波を重ね合わせて作ることができる（フーリエ変換）。どの周波数成分が同じ速さで進むから、もとの波形は形を変えずに進む。

ニュートン力学で習った物体の速さは、観測する人の速さによって変化するが、電磁波の速さはどのような速さの観測者が見ても同じである。このことがアインシュタインの相対性理論の根幹となった。

z 軸方向に進む電磁波の電場ベクトルが x 軸方向に振動するとき、電場ベクトル $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ は

$$E_x = 0, E_y(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz), E_z = 0$$

と表せる。ここで

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} (\text{角周波数}), k = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{波数})$$

である。

コサインの引数 $\omega t - kz$ がその位相であり、時刻 t と位置 z を決めると波の位相が定まる。たとえば位相が 0 の時刻と位置の関係は

$$(\omega t - kz) = 0 \rightarrow z = \frac{\omega}{k} t$$

で移動する。言い換えると、位相が 0 の波面が速さ $\frac{\omega}{k}$ で移動する。波面が移動する速度を位相速度という。電磁波では

$$c = \frac{\omega}{k} = \lambda\nu$$

となる。

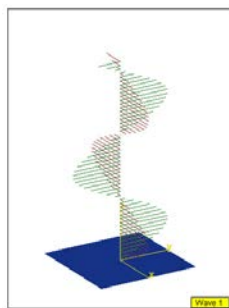
【解説】

Illust 32. 電磁波, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$

http://www.compadre.org/Physlets/optics/illustration32_4.cfm

真空中の電磁波は電場と磁場の波であり、両者には緊密な関係がある：

1. 波の進行方向 \perp 電場 \perp 磁場, 進行方向 // $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$
2. MKSA 単位系では $|\vec{E}| = c|\vec{B}|$
3. 電場のエネルギーと磁場のエネルギーが等しい



このアニメーションは # 1 (# 2) が z 軸正 (負) 方向に進む平面波の電磁波を表している。

1 の電場 (赤?) と磁場 (緑) は $E_0 = cB_0 (> 0)$ として

$$\vec{E} = (E_x(z, t), 0, 0), \quad \vec{B} = (0, B_y(z, t), 0),$$

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz), \quad B_y(z, t) = B_0 \cos(\omega t - kz)$$

2 の電場 (赤?) と磁場 (緑) は $E_0 = cB_0 (> 0)$ として

$$\vec{E} = (E_x(z, t), 0, 0), \quad \vec{B} = (0, B_y(z, t), 0), \quad |E_x| = c|B_y|,$$

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(\omega t + kz), \quad B_y(z, t) = -B_0 \cos(\omega t + kz)$$

波の速さ $c = \frac{\omega}{k}$ である。

このアニメーションのように電場や磁場の様子をサイン波形で表示することが多い。その表現の意味を誤って理解している場合が見受けられるので注意する。図のサイン波形は z 軸上の各点の電場と磁場を表している。平面波の波面は z 軸に垂直な平面であり、 z で指定された平面上の電場と磁場は、その平面上のどの位置においても向きと大きさが等しい。

なお、このアニメーションのように、電場あるいは磁場のベクトルの方向が常に一定の状態を、直線偏光あるいは直線偏波という。観測者が定めた

x y 軸を基準にして、電場が x 方向に振動するものを x 偏波などということもある。

同じ周波数、同じ振幅の電磁波が同じ方向に進むときにも、偏光の向きが 2 通りある。

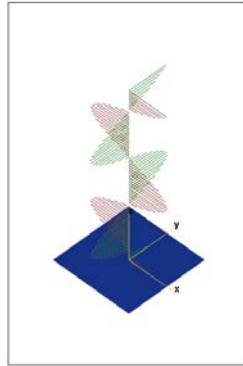
直交する偏光の 2 つの電磁波あり、しかも同じ周波数、同じ振幅のとき、同じ位相で両者を重ねる (同時に存在させる) と、45 度傾いた偏光となる。位相差を 90 度 (一方がサインなら他方がコサイン) として重ねると、電場ベクトルと磁場ベクトルが回転し、円偏光という状態になる。

【問題】

Prob. 32.1 電磁波の電場と磁場

http://www.compadre.org/Physlets/optics/prob32_1.cfm

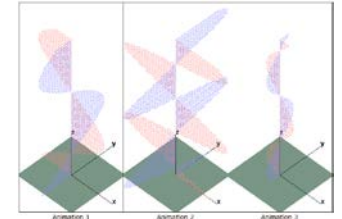
このアニメーションは z 方向に伝わる電磁波を表す。クリック・ドラッグで表示の視点を変えることができる。電場と磁場の波は、それぞれどの色で示したものか？
注意: このアニメーションでは電場と磁場の振幅を等しい大きさで表しているが、MKSA 単位系では磁場（磁束密度）を c（光速度）倍すると電場と等しくなる。



Prob. 32.3 それぞれ何色の光か？

http://www.compadre.org/Physlets/optics/prob32_3.cfm

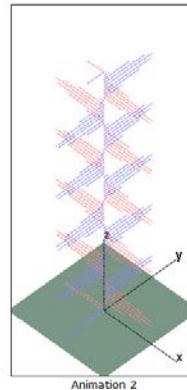
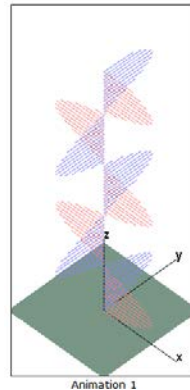
3つのアニメーションは z 方向に伝わる電磁波を表す。クリック・ドラッグで視点を変えられる。これらが緑、赤、紫の色の光だとすると、どれがどの色か？



Prob. 32.2 左のアニメーションが緑色の光なら、右は何色？

http://www.compadre.org/Physlets/optics/prob32_2.cfm

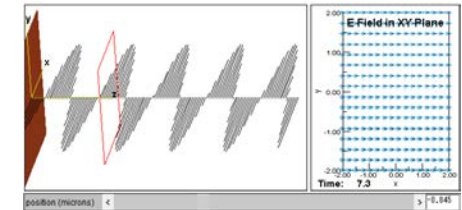
2つのアニメーションはともに z 方向に伝わる電磁波を表す。クリック・ドラッグで視点を変えられる。左のアニメーションが緑の光だとすると、右側は何色か？



Prob. 32.4 どのような電磁波か？

http://www.compadre.org/Physlets/optics/prob32_4.cfm

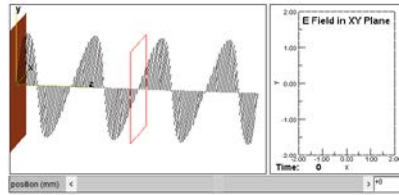
アニメーション下部のスライダースイッチを動かすと画面の赤枠の位置が変わる。右図の矢印は、この赤枠面上の各位置の電場ベクトルを示す。（単位は長さがミクロン [μm , 10^{-6}m], 時間はフェムト秒 [fs , 10^{-15}s].) 磁場は表示していない。
a. 磁場ベクトルの向きを述べなさい。
b. この電磁波の波長, 周波数, 伝播する速さを求めなさい。



Prob. 32.5 どのような電磁波か？

http://www.compadre.org/Physlets/optics/prob32_5.cfm

アニメーション下部のスライダースイッチを動かすと画面の赤枠の位置が変わる。右図の矢印は、この赤枠面上の各位置の電場ベクトルを示す。(単位は長さが mm, 時間はピコ秒[ps,



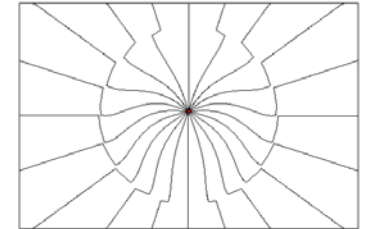
10^{-12} s].) 磁場は表示していない。

- 磁場ベクトルの向きを述べなさい。
- この電磁波の波長, 周波数, 伝播する速さを求めなさい。

Prob. 32.6 振動する電荷がつくる電磁場

http://www.compadre.org/Physlets/optics/prob32_6.cfm

アニメーションを開始すると, まず静止した正電荷から生じる電気力線が描かれる。つぎに”Start the Charge Oscillating” と書かれた部分をクリック



すると, 電荷が振動運動を始める。電気力線は, 正電荷から開始するので電荷に引きずられて動くが, 遠方ではその影響が後から現れる。変化が伝わる速さが光速である。ある位置から点電荷を見る方向と垂直方向に動く電気力線の部分が電磁波の電場である。

電気力線が架空のものであると同様, 電磁波をこのように理解することも事実を正しく反映していないが, 電磁波とその発生の起源を可視化するのに有効である。

- この電磁波の磁場はどの方向に振動しているか。
- 電磁波の電場が最大の方向, および最小の方向は？