

# Lite om ljus

9 december 2019

Beroende på vad vi gör med ljus uppvisar det strål-, våg- eller partikelegenskaper. För att beskriva ljus och förklara ljusfenomen använder vi därför olika modeller.

## Strålmодellen för ljus (antiken-)

När vi använder strålmодellen för ljus ser vi ljus som strålar (av energi) som utbreder sig rätlinjigt. Med en strålmодell för ljus kan till exempel fenomen som reflektion och spegelbilder förklaras. Nedan visas en bild från Newtons *Opticks* från 1730<sup>1</sup> där uppkomsten av spegelbilder förklaras.

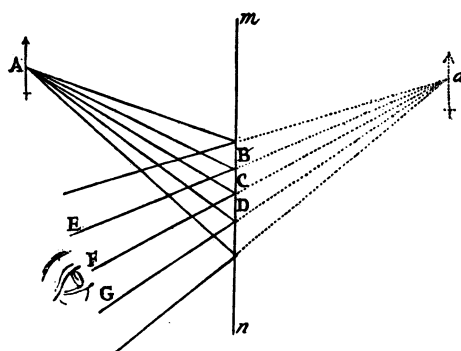
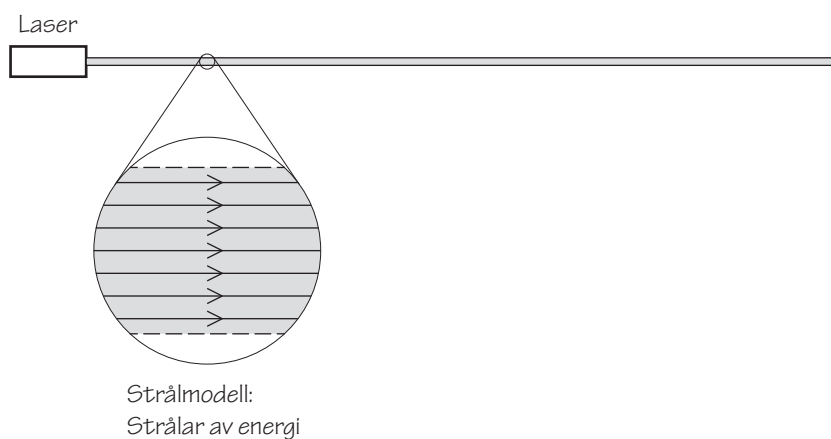


FIG. 9.



<sup>1</sup>Fjärde upplagan, återutgiven 1979 av Dover Publications. Första upplagan kom 1704.

## Lite om frekvens

Innan vi går vidare behöver vi sticka in lite om storheten frekvens. Om något svänger fram och tillbaka (eller rör sig runt, runt) kan vi beskriva hur ofta det svänger med storheten frekvens (betecknas  $f$ ). Om vi anger frekvensen i antalet svängningar per sekund får vi frekvensen i SI-enheten som är 1 Hz (Hertz). Det är alltså så att  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ .

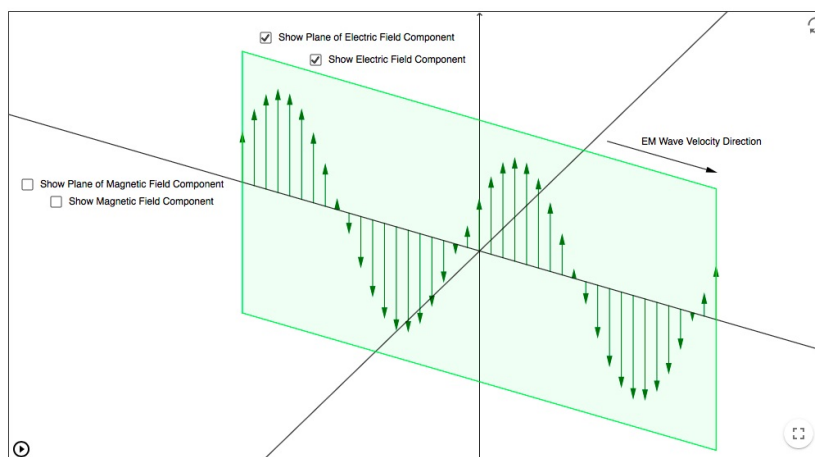
Om till exempel en pendel i form av en vikt i ett snöre (som på laborationen i våras) gör 3 hela svängningar på en sekund så är pendelns frekvens 3 Hz. Om en annan pendel gör 72 svängningar på 30 sekunder så är dess frekvens  $f = \frac{72}{30 \text{ s}} = 2,4 \text{ Hz}$ . Detta betyder att den senare pendeln gör 2,4 hela svängningar per sekund.

1. Låt din arm pendla fram och tillbaka. Bestäm rörelsens frekvens i enheten Hz (räkna antalet svängningar under ett tidsintervall, till exempel en minut, och dividera sedan med tidsintervallets längd i sekunder).

## Vågmodellen för ljus (1800-talet-)

Under 1800-talet blev det tydligt att en vågmodell för ljus måste användas för att förstå en del fenomen, till exempel bryning av ljus som passerar en väldigt smal spaltöppning (mer om detta i Fy 2-kursen). Man kom fram till att ljus kunde beskrivas som en vågrörelse i elektriska och magnetiska fält, och man pratar om ljus som en elektromagnetisk (EM) vågrörelse.

Det är inte så lätt att göra sig en bild av en EM-våg, men GeoGebra-animeringen “Electromagnetic Waves”<sup>2</sup> är riktigt bra tycker jag. Den visar elektrisk fälstyrka-vektorer längs en linje som visar utbredningsriktningen för en EM-våg:



Jag rekommenderar verkligen att sitta några minuter och begrunda den här animationen (klicka dock bort “Show Plane of Magnetic Field Component” och “Show Magnetic Field Component”).

<sup>2</sup>[www.geogebra.org/m/xhYwXSsH](http://www.geogebra.org/m/xhYwXSsH) eller [www.tinyurl.com/geogEMvag](http://www.tinyurl.com/geogEMvag)

Notera hur en vågrörelse uppstår när elektriska fältstyrka-vektorer svänger på ett speciellt sätt (med samma frekvens.. Avståndet mellan två vågtoppar (eller vågdalar) kallas våglängd, och betecknas  $\lambda$  (grekiska bokstaven lambda). Ljus med olika våglängd uppfattar våra ögon (och hjärna) som ljus med olika färger. Mäniskoögon kan se ljus med våglängder från 400 nm (blått ljus) till 700 nm (rött ljus). Frekvensen varmed elektrisk fältstyrka-vektorerna svänger är det vi brukar kalla ljusets frekvens. Notera dock att vågbergen i verkligheten rör sig med ljusfarten ( $2,998 \cdot 10^8$  m/s), att våglängden (i synligt ljus) är av storleksordningen 500 nm, och att frekvensen varmed den elektriska fältstyrkan svänger är av storleksordningen  $10^{15}$  Hz. Animeringen är alltså en kolossal förstoring i extrem slowmotion.

Som vi ska se mycket mer av i Fy 2-kursen hänger utbredningsfart, våglängd och frekvens i en EM-våg ihop. Sambandet mellan dem kan skrivas

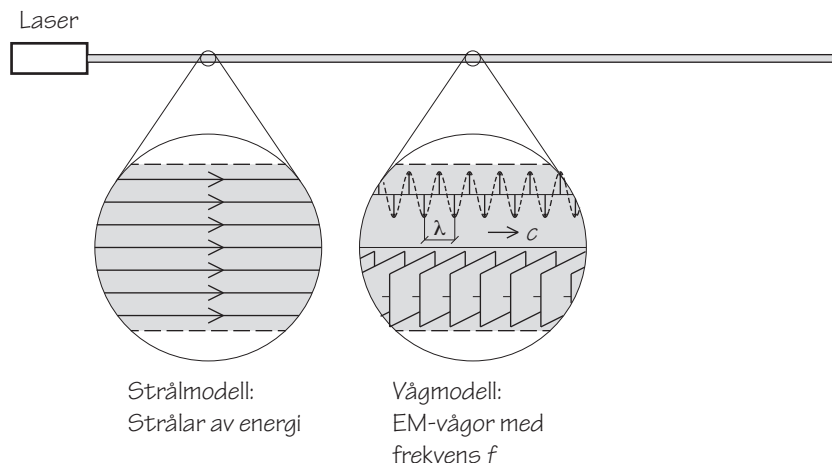
$$c = f\lambda.$$

Här är  $c$  ljusfarten,  $f$  är ljusets frekvens och  $\lambda$  är ljusets våglängd.

- 
2. (a) Bestäm frekvensen i (blått) ljus med våglängden 400 nm.  
 (b) Bestäm frekvensen i (rött) ljus med våglängden 650 nm.
- 

En sak till vi behöver ta med oss är att alla vågrörelser förflyttar energi. En elektromagnetisk vågrörelse bär med sig strålningsenergi.

- 
3. En laser är märkt "0,1 mW". Hur mycket strålningsenergi avger lasern under en sekund? Under en minut?
- 



## Tidiga fotonmodellen för ljus (1905-)

År 1900 föreslog Max Planck att strålningsenergi bara kunde avges i “paket”, eller *kvanta*. För ljus med en viss frekvens  $f$  är den minsta energipaket-storleken  $hf$ , där  $h$  är en naturkonstant som kallas Plancks konstant. Plancks konstant har värdet

$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$$

År 1905 tog Einstein kvant-tänket ett (stort) steg vidare. Han antog att själva ljuset i sig var kvantiserat. I en artikel där han använder den här idén för att förklara den fotoelektriska effekten (mer om fotoelektrisk effekt i Fy 2-kursen) skriver han (i engelsk översättning):<sup>3</sup>

*... can be understood better if one assumes that the energy of light is discontinuously distributed in space. According to the assumption to be contemplated here, when a light ray is spreading from a point, the energy is not distributed continuously over ever-increasing spaces, but consists of a finite number of energy quanta that are localized in points in space, move without dividing, and can be absorbed or generated only as a whole.*

Dessa energikvanta, eller ljuskvanta, kom senare att benämnas *fotoner*. Fotonenergin,  $W_f$ , i ljus med frekvensen  $f$  kan beräknas med

$$W_f = hf,$$

där  $h$  är Plancks konstant. Ofta anges fotonenergier i enheten elektronvolt ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).

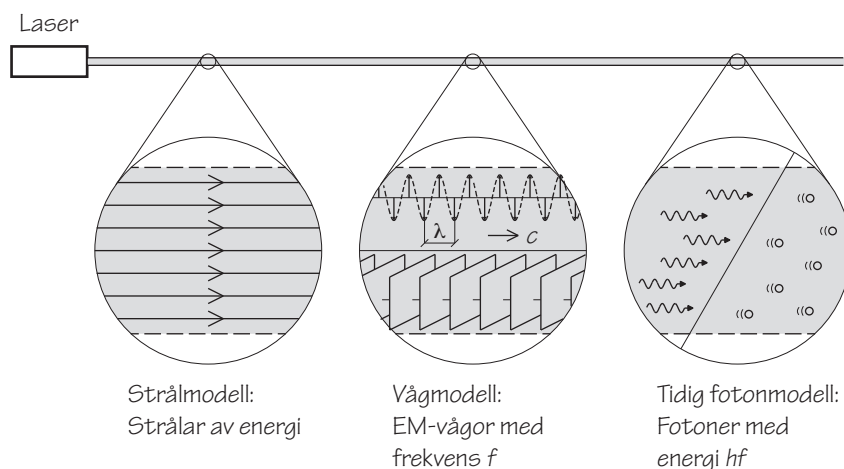
- 
4. (a) Bestäm fotonenergin i (blått) ljus med våglängden 400 nm. Svara i både J och eV.  
(b) Bestäm fotonenergin i (rött) ljus med våglängden 650 nm. Svara i både J och eV.

5. En grön laser ger ljus med våglängden 540 nm. Lasern är märkt “1 mW”.

- (a) Hur stor energimängd avger lasern under en minut?  
(b) Bestäm ljusets frekvens.  
(c) Bestäm fotonenergin.  
(d) Hur många fotoner avger lasern under en minut?
- 

<sup>3</sup><https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/101> Originalen på tyska finns på <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/101>. Här är ett litet utdrag:

**Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.**

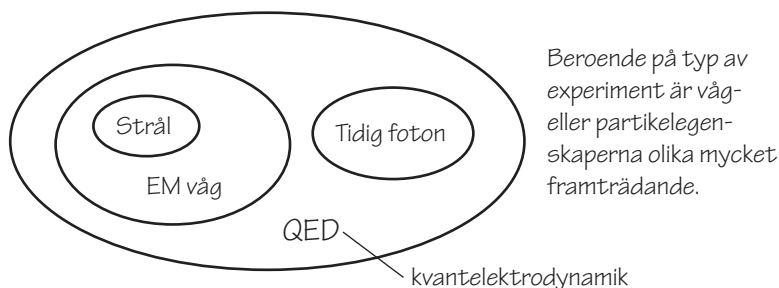


## Men vad är ljus?

Det kan verka märkligt att ljus har både våg- och partikelegenskaper. Men detta beror återigen på våra begränsade erfarenheter. Hade vi varit atom-små, eller om Plancks konstant varit mycket större, hade vi antagligen inte tyckt att det varit något konstigt (men då hade vi nog haft en massa andra bekymmer).

Från 1920-talet och framåt utvecklades kvantelektrodynamiken (QED) som är en kvantteori för elektromagnetism. I denna är ljus något som verkligen *har* både partikel- och vågegenskaper. Matematiken i QED är alldeles för avancerad för oss, men Richard Feynman har skrivit en riktigt bra populärvetenskaplig bok som jag rekommenderar för den som vill veta mer: *QED The Strange Theory of Light and Matter*.

Även om man idag, i och med QED, har tillgång till en fullständig teori för ljus, används de tre modellerna som vi presenterat ovan (strål-, våg- och tidiga foton-modellen) fortfarande i situationer där de fungerar bra.<sup>4</sup> Ungefär som när vi använder Newtonsk mekanik i många situationer, även om det är så att den inte ger oss hela bilden.



<sup>4</sup>Se Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, avsnitt 26-1, för en fin beskrivning av de olika modellernas giltighetsområden. Finns på nätet: [www.feynmanlectures.caltech.edu/I\\_26.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_26.html)