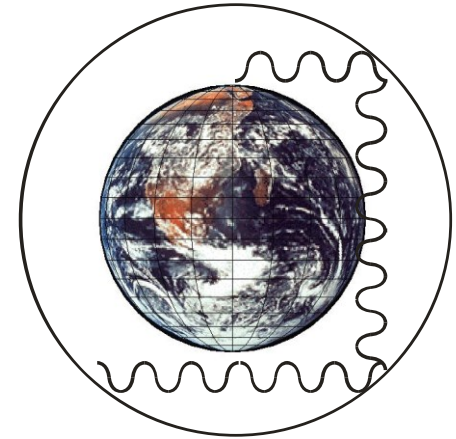


Radiovågor:

$$f = \text{kHz} - 1 \text{ GHz}, \quad \lambda = 1 \text{ km} - 1 \text{ m}$$

VLF (very low frequency) Navigation, långa till korta
radiovågor VHF och UHF radio
TV, mm.

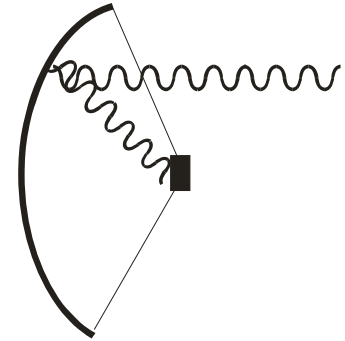


- Kräver långa antenner
- Information kan inte skickas riktigt snabbt
- Lång räckvidd, försvagas inte nämnvärt av luft
- Kan gå runt jorden genom att spridas i jonosfären (50-300 km) som är en del av övre atmosfären som utgörs av plasma, och har alltså hög elektrondensitet



Mikrovågor:

$$f = 1 \text{ GHz} - 100 \text{ GHz}, \quad \lambda = 1 \text{ m} - 1 \text{ mm}$$



Dessa vågor fås från vakuumrör eller halvledarantennerna. Mottagning sker via metallantennerna eller fokuserande konkava sfäriska ytor (satellitantenn) som reflekterar och fokuserar mikrovågor till en mottagare (kan också skickas på detta sätt)

Används vid satellitkommunikation, radar, TV och telekommunikation

En viss mikrovåglängd (12 cm) får speciellt vattenmolekylerna som är elektriska dipoler att vibrera kraftigt, vilket används för att värma livsmedel



5G

5G is divided into three frequency bands (low, mid, and high). Each band has different capabilities: the low band (less than 1 GHz) has greater coverage but lower speeds, the mid band (1 GHz–6 GHz) offers a balance of both, and the high band (24 GHz–40 GHz) offers higher speeds but a smaller coverage radius.

5G Range. The trade-off for speed at mmWave frequencies is limited range. Testing of 5G service range in mmWave has produced results **approximately 500 meters** from the tower, meaning a huge propagation of MIMO-enabled antenna arrays would be required for pure standalone 5G deployment.



Infraröd- eller värmestrålning:

$$f = \sim (10^{12} - 4 \times 10^{14}) \text{ Hz}, \quad \lambda = 1 \text{ mm} - 800 \text{ nm}$$

Infraröd strålning utges bl.a. av oscillerande och kolliderande atomer och molekyler (atomernas oscillationsfrekvens $\sim 10^{13}$ Hz).

Denna strålning kallas också för värmestrålning, eftersom ju varmare ett ämne är, desto mera infraröd strålning avger den.

Människan upplever den långvågiga infraröda strålningen som 'värme'



Synligt ljus:

$$f = \sim (4 \times 10^{14} - 8 \times 10^{14}) \text{ Hz}, \quad \lambda = (800 - 400) \text{ nm}$$

Människan har känsliga 'detektorer' (ögon) för att uppfatta elektromagnetiska vågor i detta mycket smala frekvensområde. Solens yttemperatur ca. 6000 K gör att den avger maximi strålningsintensitet (svartkroppsstrålning) vid ~ gult ljus.

Människan har två olika ljusdetekterande celltyper i ögonen:

- Tappar: känsliga för färg (våglängd)
- Stavar: känsliga för intensitet (mörkerseende)

Människan kan urskilja grön färg bäst (varför?)

Ögonen är inte väldigt känsliga för blå färg.



Ultraviolett:

$$f = \sim (8 \times 10^{14} - 10^{17}) \text{ Hz}, \lambda = (400 - 1) \text{ nm}, E > 3 \text{ eV}$$

Osynligt för människan, men vissa insekter kan se ultraviolett ljus (reflekteras från vissa blommor)

Ultraviolett fotonens energi $> 3 \text{ eV}$, är i det energiområde som dissocierar molekyler, $\rightarrow$ för mycket solande 'bränner' huden.

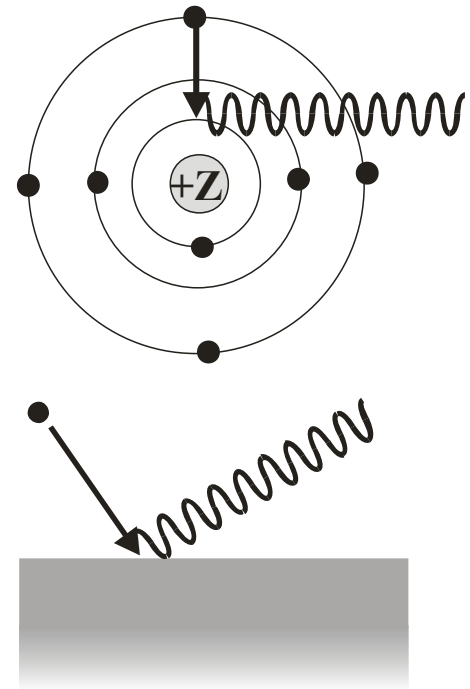


Röntgenstrålning:

$$f = \sim (10^{17} - 10^{19}) \text{ Hz}, \quad \lambda = (10^{-9} - 10^{-11}) \text{ m}$$

Produceras av excitation av atomers
Inre elektronskal, eller då elektroner
retarderas då de kolliderar med
materia: 'Bremsstrahlung'

Energi $\sim$ keV



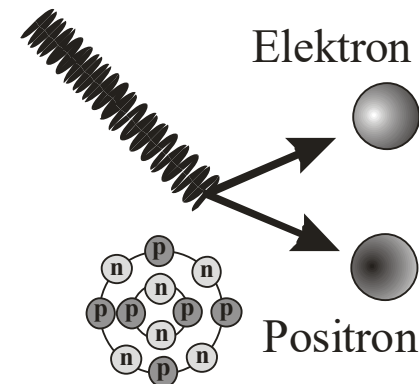
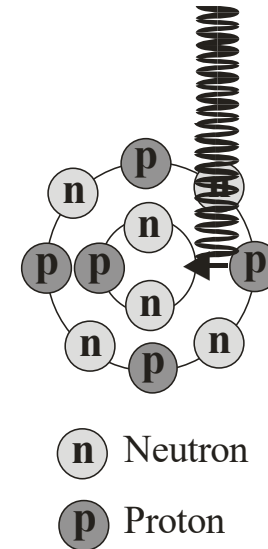
Gammastrålning:

$$f = \sim (10^{18} -) \text{ Hz}, \quad \lambda = (10^{-10} -) \text{ m}$$

Produceras av excitation av atomkärnor eller vid kollision av energetiska partiklar

Energi $\sim$ MeV

Man har observerat mycket starka gamma-strålnings skurar i rymden. Dessa antar man komma från då En neutronstjärna kollapsar till ett svart hål.

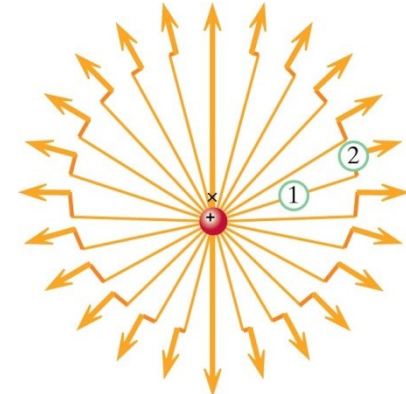
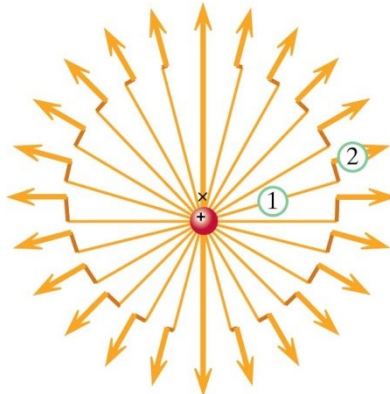
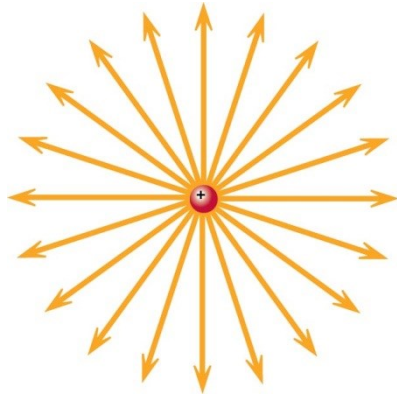


Parbildning;
 $E_\gamma > 2(511 \text{ keV})$



Accelererande laddningar

- ▶ Elektromagnetisk strålning produceras av accelererande laddningar
 - ▶ Betrakta en stationär laddning $+q$, som får en liten spark neråt och fortsätter sedan med konstant hastighet

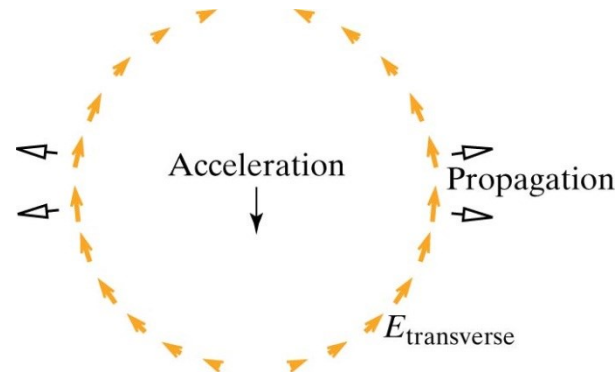
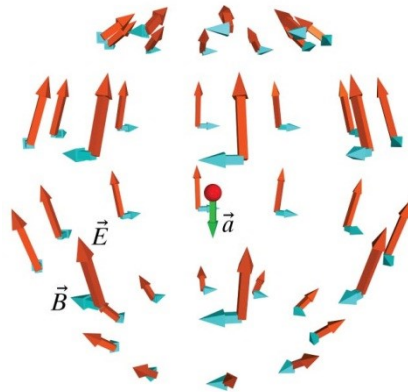


- ▶ En observatör i punkt 2 ser till en början fältet från den stationära laddningen, eftersom störningen framskrider med ändlig fart
- ▶ Först efter en tid $t = r/c$ ser observatören på avståndet r från laddningen ett transversellt fält



Strålningens och fältens riktning

- ▶ Det transversella elfältet $\vec{E}$ åtföljs av ett transversellt magnetfält $\vec{B}$
 - ▶ Magnetfältet pekar utåt från pappret till höger om laddningen och inåt till vänster (för retarderad rörelse skulle det peka åt andra hållet).
 - ▶ (Då laddningen fortsätter med konstant hastighet finns dessutom det vanliga Biot-Savart fältet innanför den expanderande ringen av strålning.)

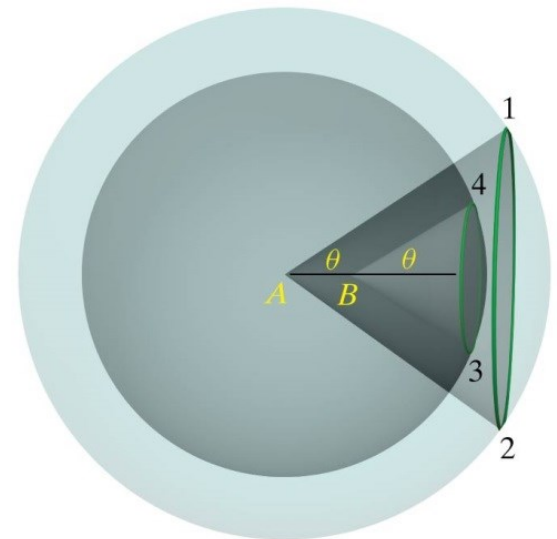
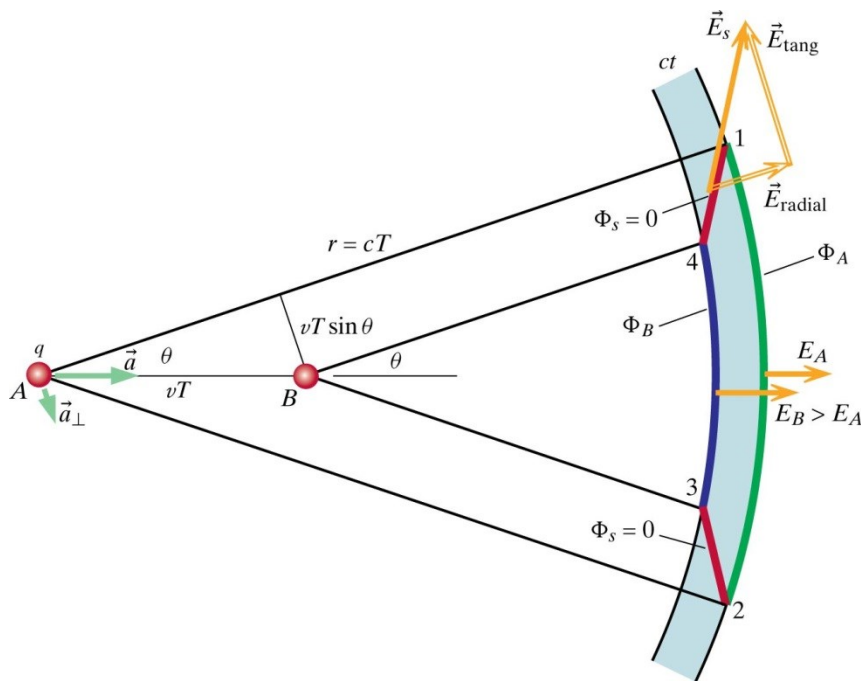


- ▶ Den *elektromagnetiska strålningens riktning* ges av $\vec{E} \times \vec{B}$

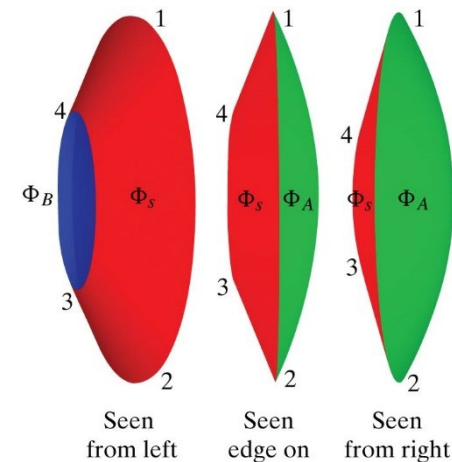
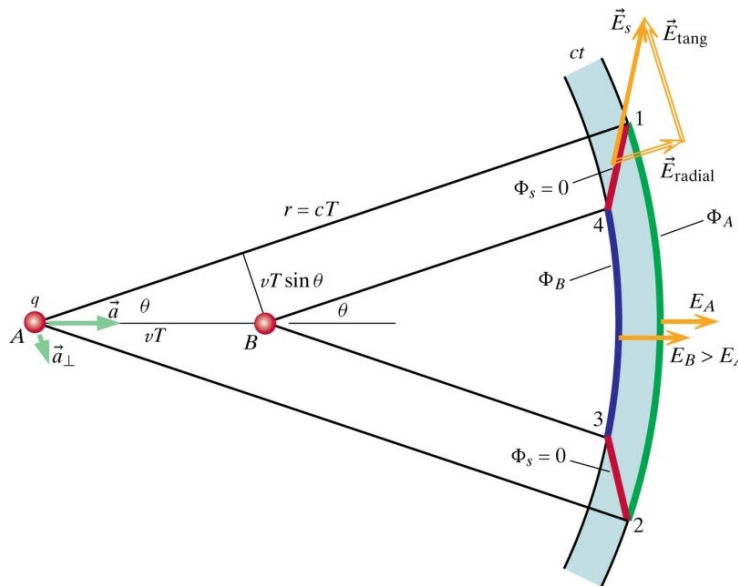


Bestämning av elfältet (Inte till tenten)

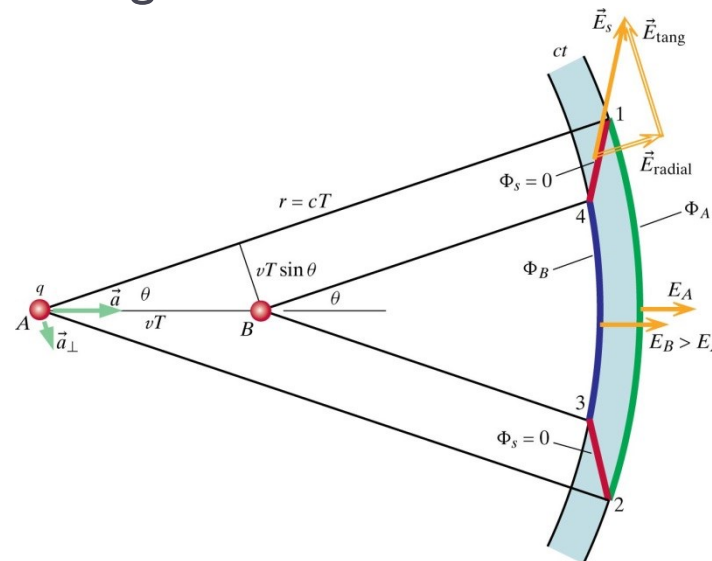
- ▶ Vi använder Gauss lag för att bestämma elfältets styrka och riktning
- ▶ Vi tänker oss en laddad partikel i punkt A, som accelereras under en kort stund t , och rör sej sedan framåt med konstant hastighet $v \ll c$, så att den passerar punkt B efter en tid T



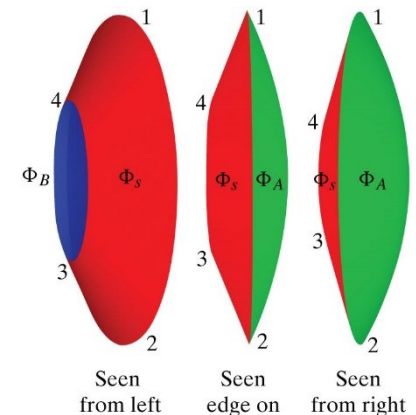
- ▶ Vi väljer en integrationsvolym som har ritats av de röda, blå och gröna sträckan
- ▶ Fältet E_A på utanför skalet (längre bort än sträckan cT) ser ut som det då partikeln ännu var vid punkt A
- ▶ Fältet E_B på innanför skalet är större, eftersom det är fältet orsakat av partikeln då den är i punkt B, som ligger närmare



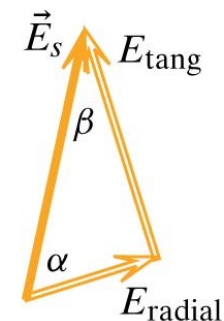
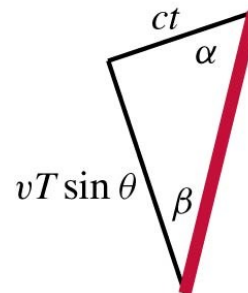
- ▶ Vi antar nu att vinkeln θ är så stor att det gröna området utgör en tiondel av hela arean på sfären
- ▶ då är flödet $\Phi_A = 0.1 q/\epsilon_0$
- ▶ vinkeln vid punkt B är densamma, så flödet genom blåa delen är densamma, men motsatt riktad (innåt i integrationsvolymen)
- ▶ (fälten har olika magnitud, men arean är också olika, och dessa tar ut varandra)



- ▶ Eftersom integrationsvolymen inte innehåller laddningar, och $\Phi_A + \Phi_B = 0$, måste flödet Φ_S genom röda delen vara lika med noll
- ▶ Från symmetrin ser vi att elfältet därför måste vara parallellt med dessa ytor.
 - ▶ Hur än vi roterar bilden kring symmetriaxeln måste det se likadant ut
- ▶ Vi delar upp fältet i komponenter som på bilden. Detta ger



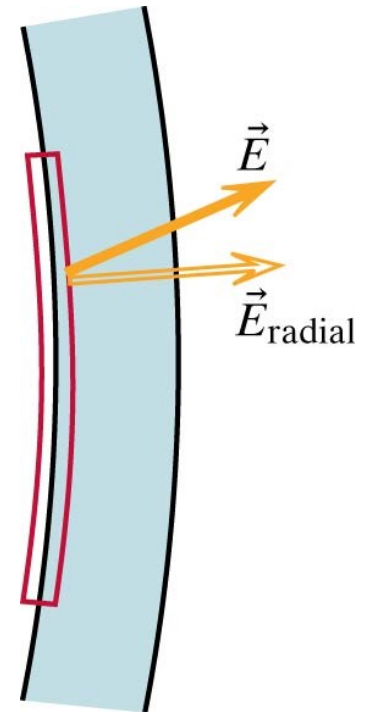
$$\tan \alpha = \frac{E_{tang}}{E_{radiell}} = \frac{vT \sin \theta}{ct}$$



Radiella fältet

- ▶ Vi kan bestämma $E_{radiell}$ genom att betrakta en liten del av sfären
- ▶ Vi väljer en Gauss yta som på bilden, och gör approximationen att avståndet från laddningen till sfären är r
- ▶ Övre och nedre ytorna är så små att flödet genom dem kan försummas
- ▶ Då måste flödet genom vänstra och högra ytorna vara samma
- ▶ Mao. är fältet på vänstra och högra sidan samma, och lika med fältet från laddningen som finns i punkt B

$$E_{radiell} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$



Transversella fältet

- ▶ Detta ger (då $\frac{v}{t} = a$ och $T = r/c$):

$$\frac{E_{tang}}{E_{radiell}} = \frac{vT \sin \theta}{ct}$$

$$\Rightarrow E_{tang} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{vT \sin \theta}{ct} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qa \sin \theta}{c^2 r}$$

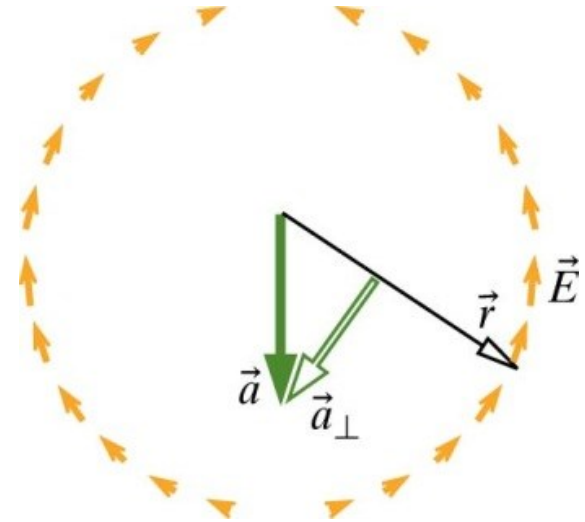
- ▶ Radiella fältet är det vanliga Coulomb fältet orsakat av laddningen, medan det transversella fältet är radiativa fältet som uppkom pga laddningens acceleration.
 - ▶ Vi kan beteckna $a \sin \theta \equiv \vec{a}_\perp$ (den vinkelräta komponenten av accelerationen)



Magnituden av det transversella elfältet

- ▶ Transversella elfältets storlek och riktning ges av

$$\vec{E}_{rad} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q\vec{a}_{\perp}}{c^2 r}$$

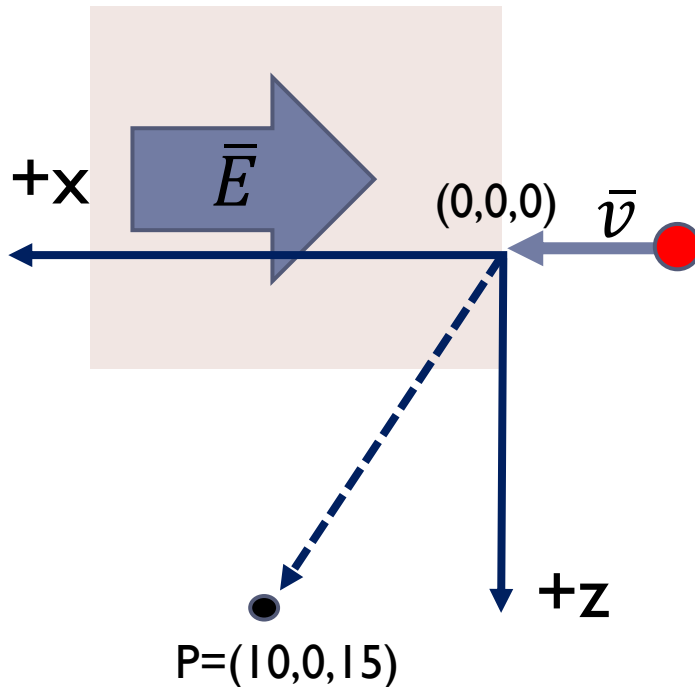


- ▶ $|E|$ avtar som $1/r$ vilket är mycket långsammare än det vanliga fältet från stationära laddningar, som avtar enligt $1/r^2$
- ▶ Märk att om laddningen är negativ pekar alla fält i dessa bilder åt andra hållet, men strålningsriktningen är densamma

En proton med hastigheten v i $+x$ riktning kommer vid tiden $t=0$ till punkten $(0,0,0)$ där ett konstant elfält finns i $-x$ riktning (inget elfält finns för $x < 0$)

$$\vec{E}_{rad} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q\vec{a}_\perp}{c^2 r}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$



- Vid vilken tid T ser man ett transversellt elfält vid punkten $P=(10,0,15)$ m ?
- Vad är det transversella elfältets storlek och riktning vid tidpunkten T och platsen P ? Vad är storleken och riktningen för B ?

Är detta en EM-våg?

Har vi ett Biot-Savart magnetfält? I vilken riktning är den?



Varför är atomer stabila?

- ▶ Som vi just sett producerar en accelererad laddning elektromagnetisk strålning (laddningen förlorar energi)
- ▶ Elektronerna som är i accelererad rörelse kring atomkärnan borde alltså utstråla energi, och därmed förlora rörelseenergi
- ▶ Hur kommer det sej att atomer då är stabila?!

→ Lösningen till paradoxen ges av kvantmekaniken:

Endast vissa energinivåer är tillåtna, och det finns en lägsta energinivå under vilken en partikel inte kan gå.

En partikel i lägsta energinivån kan inte stråla, medan en partikel i en högre nivå kan emittera strålning, och gör det också, samtidigt som den hoppar till en lägre energinivå



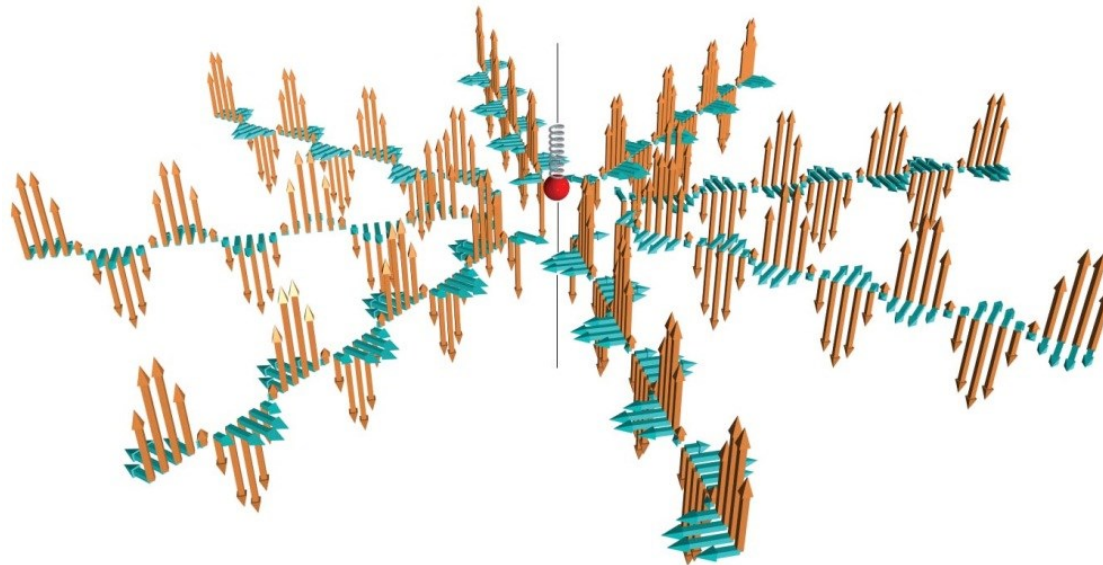
Sammanfattning

- ▶ En stationär laddning ger upphov till ett $1/r^2$ elfält men inget magnetfält.
- ▶ En laddning i konstant rörelse ger upphov till ett $1/r^2$ elfält och ett $1/r^2$ magnetfält.
- ▶ En accelererad laddning ger förutom dessa också upphov till elektromagnetisk strålning med ett $1/r$ elfältskomponenten och ett $1/r$ magnetfältskomponent



Kontinuerlig strålning

- ▶ En laddning som får en spark ger upphov till en strålningspuls
- ▶ En laddning i svängningsrörelse (t.ex. sinusvåg) ger upphov till kontinuerlig strålning



Strålning från materia

- ▶ Växelverknningen i en atom mellan elektroner i elektronmolnet och atomkärnan kan approximeras som kraften från en fjäder
- ▶ Detta ger upphov till sinus oscillationer
- ▶ Laddningens position ges alltså av

$$y = y_{max} \sin(\omega t)$$

- ▶ Då kan vi räkna ut accelerationen:

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \omega y_{max} \cos(\omega t)$$
$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -\omega^2 y_{max} \sin(\omega t)$$

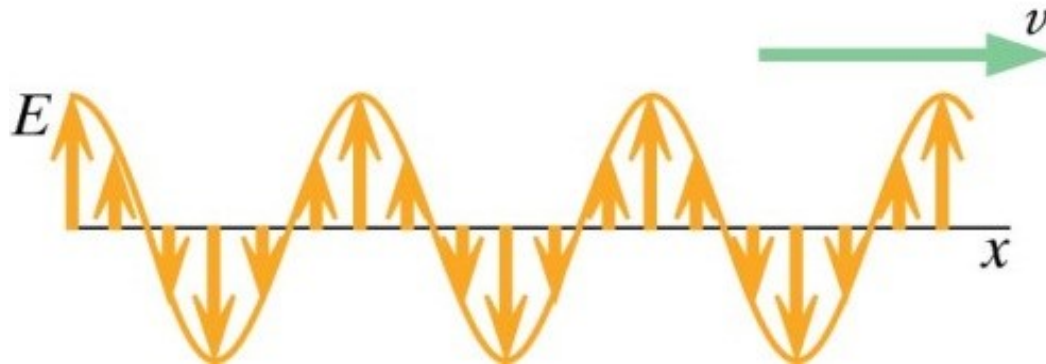


Sinusvågen

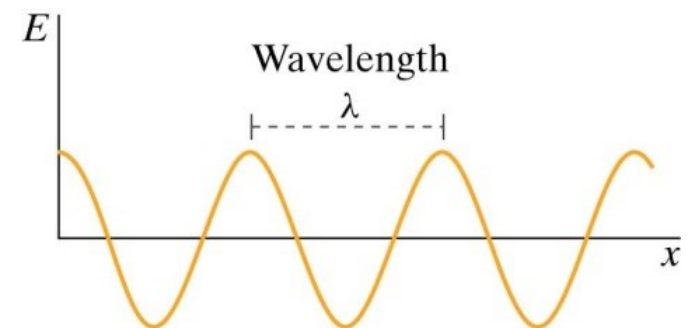
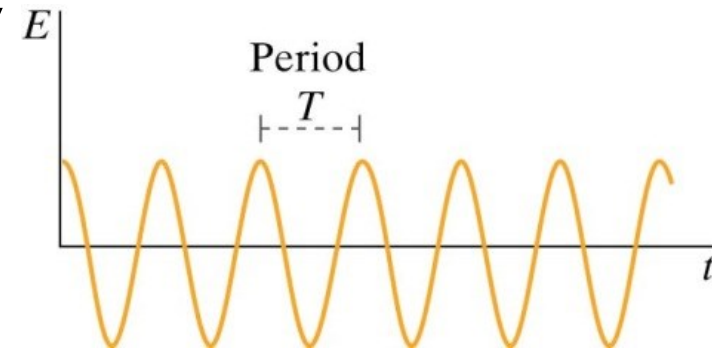
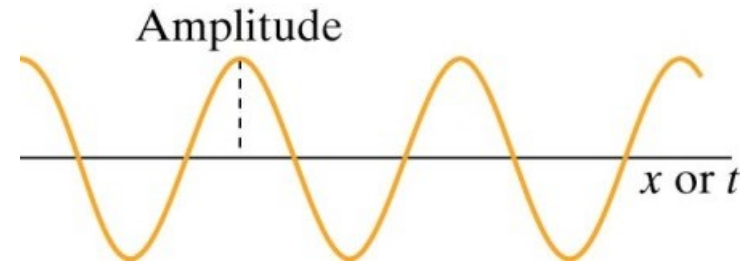
- ▶ Den elektromagnetiska strålningen från accelerationen a_y blir

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-qa_y}{c^2 r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q\omega^2 y_{max}}{c^2 r} \sin(\omega t)$$

- ▶ I ett visst ögonblick ser fältet ut så här:



- ▶ *Amplituden* ger höjden på vågen
- ▶ *Perioden* T är tiden det tar för en svängning
- ▶ *Frekvensen* är antalet vågkrön som passerar per tid, eller m.a.o. inversen av perioden $f = 1/T$
- ▶ *Våglängden* är avståndet mellan två vågkrön $\lambda = cT = c/f$
- ▶ *Hastigheten* kan ses som hastigheten av ett vågkrön $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$



Energi och rörelsemängd i strålning

- ▶ Elektromagnetisk strålning innehåller både energi och rörelsemängd, och kan överföra dessa till materia
- ▶ Betrakta en stationär laddning fast i en fjäder, som utsätts för en puls av elektromagnetisk strålning

$d = 30\text{cm}$ Laddningen upplever en kraft

$F = qE$ under den korta tiden $\Delta t = d/c$

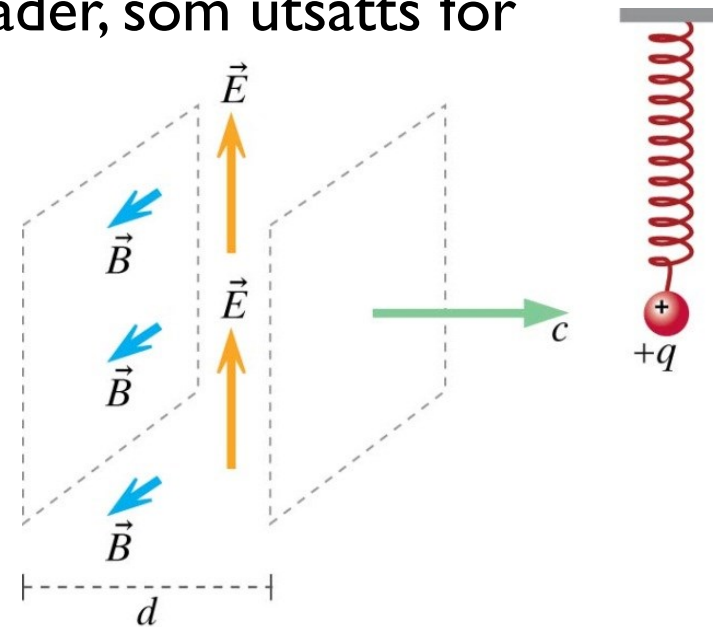
Under den tiden får den rörelsemängden Δp

$$\Delta p = p - 0 = F\Delta t = (qE)(d/c)$$

Den tillförda kinetiska energin blir då

$$\Delta K = K - 0 \approx \frac{p^2}{2m} = \left(qE \frac{d}{c}\right)^2 \left(\frac{1}{2m}\right)$$

- ▶ Alltså $\propto E^2$



Energidensitet

- ▶ Vi hade tidigare att energidensiteten i elektriska och magnetiska fält ges av

$$\frac{\text{Energi}}{\text{Volym}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} B^2$$

- ▶ För elektromagnetisk strålning är $E = cB$

$$\frac{\text{Energi}}{\text{Volym}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{E}{c} \right)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \left(1 + \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c^2} \right) = \epsilon_0 E^2$$

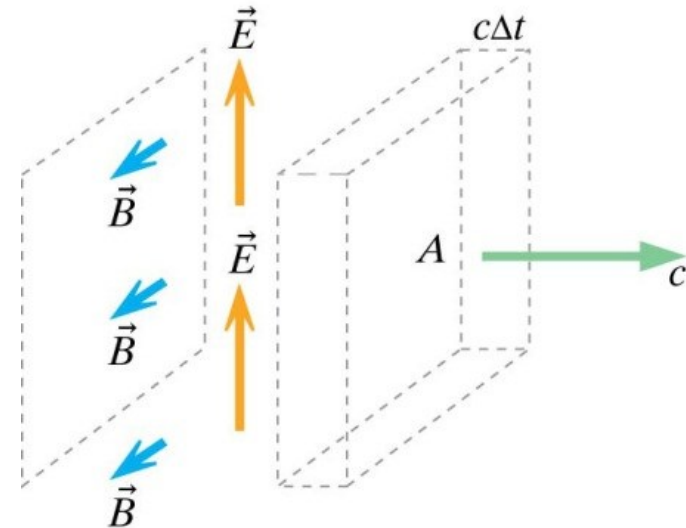
- ▶ Elektriska och magnetiska energidensiteten är alltså lika stora (totala energidensiteten är dubbla den elektriska...)



Poynting vektorn

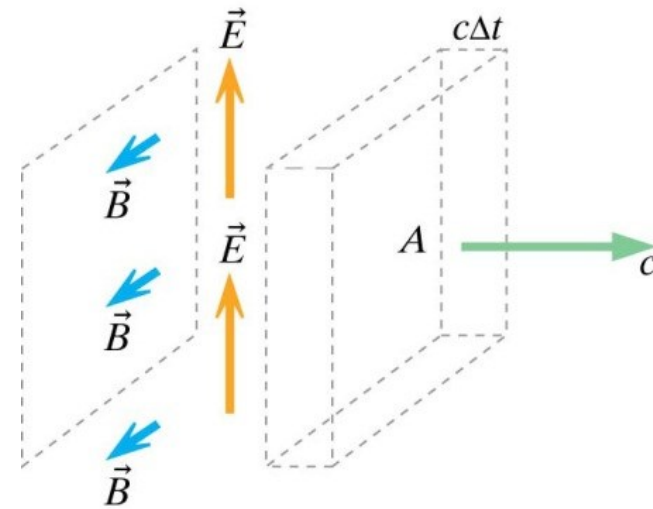
- ▶ Energi densitet är relaterat till energi "flöde", dvs. hur mycket energi som flödar genom en yta
 - ▶ Enheten är J/sm^2 eller W/m^2
- ▶ På tiden Δt kommer en volym $A(c\Delta t)$ att passera ytan A
- ▶ Mängden energi som passerar denna yta i samma tid är då $\varepsilon_0 E^2 (Ac\Delta t)$ och energiflödet är $\varepsilon_0 E^2 c$
- ▶ Eftersom $E = cB$ och $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/c^2$, kan vi skriva

$$\text{energi flödet} = \varepsilon_0 E B c^2 = \frac{1}{\mu_0} E B$$

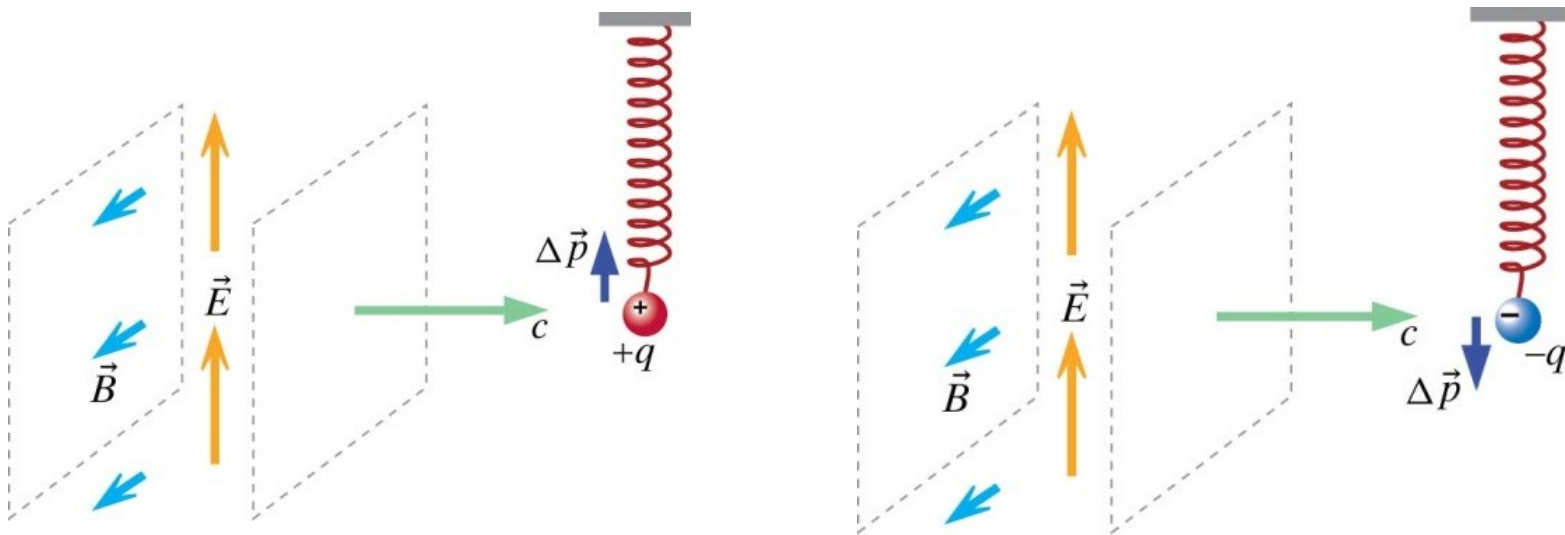


- ▶ Energiflödet ligger i riktningen av strålningen, dvs i riktning av $\vec{E} \times \vec{B}$
- ▶ $\vec{E}$ och $\vec{B}$ är vinkelräta mot varandra så $|\vec{E} \times \vec{B}| = EB$
- ▶ Vi kan nu definiera *Poynting vektorn* $\vec{S}$ som ger energiflödet i elektromagnetisk strålning

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$



- ▶ En laddning påverkas av en kraft från elfältet i elektromagnetiska strålningen
- ▶ **Blir det kraft på laddningen från magnetfältet?**



- ▶ Så fort laddningen sätts i rörelse påverkas den också av en kraft från magnetfältet enligt $q\vec{v} \times \vec{B}$
- ▶ Oberoende av laddningens tecken kommer denna kraft att vara riktad till höger, och kallas *strålningstrycket*



Strålningsstrycket

- ▶ Strålningsstrycket påverkar all materia, också neutral materia, eftersom den består av laddade elektroner och atomkärnor
- ▶ Effekten är dock mycket liten
- ▶ Vi kan estimerar magnituden enligt följande:

- ▶ En laddning q får en hastighet v från en strålningspuls
- ▶ Medelhastigheten är då $v/2$
- ▶ Medelkraften från magnetfältet blir då

$$|q\vec{v} \times \vec{B}| = q \left(\frac{v}{2}\right) B \sin(90^\circ) = q(v/2)(E/c)$$

- ▶ Förhållandet mellan kraften från elfältet och kraften från magnetfältet blir

$$\frac{\overline{F_m}}{F_e} = \frac{q(v/2)(E/c)}{qE} = \frac{1}{2} v/c$$

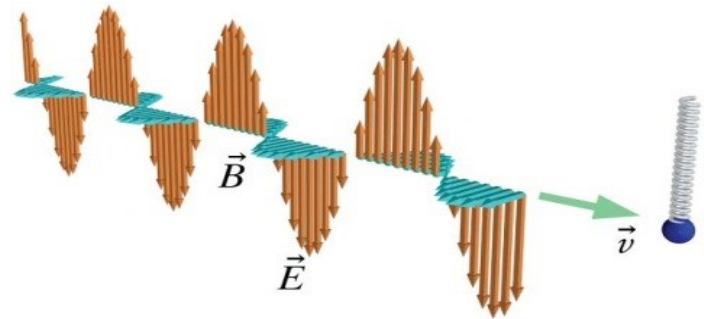
- ▶ Oftast är hastigheten v mycket liten jämfört med c



Rörelsemängden i strålningen

- ▶ En laddad partikel som utsätts för EM strålning kommer inte att få en nettorörelsemängd vinkelrät mot strålningen, eftersom elfältet kommer att omväxlande accelerera partikeln i motstående riktningar
- ▶ Däremot kommer rörelsemängden i strålningens riktning, orsakat av magnetfältet, att öka
- ▶ Eftersom energi och rörelsemängd för fotonen (och alltså strålningen) är relaterade till varandra enligt den relativistiska formeln $E = pc$, ges rörelsemängdsflödet ($[\Delta p/\Delta t]/m^2 = N/m^2$) eller trycket som

$$\frac{\vec{S}}{c} = \frac{1}{\mu_0 c} \vec{E} \times \vec{B}$$



En liten dammpartikel i rymden skuffas ut ur solsystemet om solens strålningstryck överskrider solens gravitationskraft. Vilken diameter måste dammkornet ha för att solens strålningstryck och gravitationskraft skall balansera varandra om dammkornets täthet är 1500 kg/m^3 ? Solen massa är $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ dess totala strålningseffekt är $4 \times 10^{26} \text{ W}$. Gravitationskonstanten $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ och anta att all strålning som träffar dammkornet reflekteras. Vad betyder detta för små och stora dammpartiklar i vårt solsystem?

dammpartikel=pölyhiukkanen, skuffa=työntää, överskrider=ylittää

Rörelsemängdsflödet ($[\Delta p / \Delta t] / \text{m}^2 = \text{N/m}^2$)

$$\frac{\vec{S}}{c} = \frac{1}{\mu_0 c} \vec{E} \times \vec{B}$$

$$E = pc$$

$$|S| = \frac{P_{Sol}}{4\pi R^2}$$

Svar: Diameter $\sim 1.6 \text{ } \mu\text{m}$

