

MENA 1001; Materialer, energi og nanoteknologi- Kap. 2

# Krefter, felt, stråling

VGS Fysikk 2

Krefter og bevegelse

Arbeid

Kinetisk & potensiell energi

Krefter og felt

Gravitasjonelt

Elektrisk

Magnetisk

Stråling



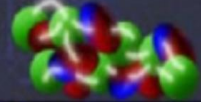

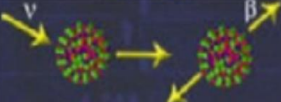

Truls Norby  
Kjemisk institutt  
Senter for Materialvitenskap og Nanoteknologi (SMN)  
Universitetet i Oslo

FERMIO  
Forskningsparken  
Gaustadalleen 21  
NO-0349 Oslo

truls.norby@kjemi.uio.no

MENA 1001 – Materialer, energi og nanoteknologi

# 4 fundamentale krefter

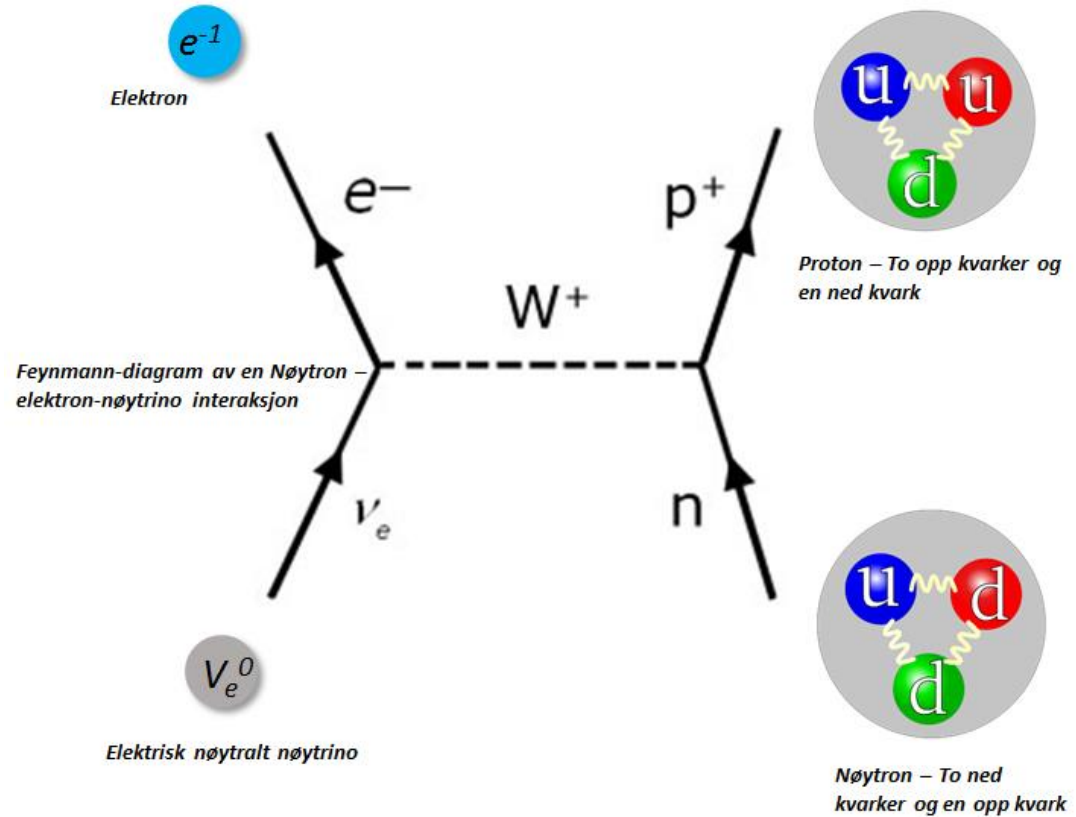
FORCE NAME	ILLUSTRATION	STRENGTH	RANGE (m)
<b>Strong</b>		<b>1</b>	$10^{-15}$ Diameter of a medium sized nucleus
<b>Electromagnetic (Coulombic)</b>		$\frac{1}{137}$	<b>Infinite</b>
<b>Weak</b>		$10^{-5}$	$10^{-17}$ 0.1% of the diameter of a proton
<b>Gravity</b>		$6 \times 10^{-39}$	<b>Infinite</b>

# Svak kjernekraft

- Radioaktivitet
  - *Beta*-Stråling
- Virker på avstander mindre enn ett proton
- $W^+$  - boson
  - Ladning +1
- Ned-kvark
  - Ladning -1/3
- Opp-kvark
  - Ladning +2/3

## Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
mass		$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge		2/3	2/3	2/3	0	0
spin		1/2	1/2	1/2	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
		<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

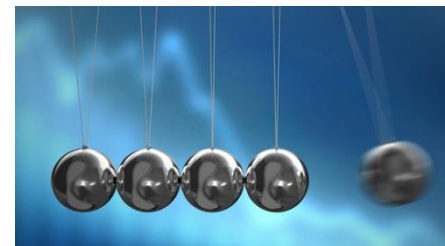
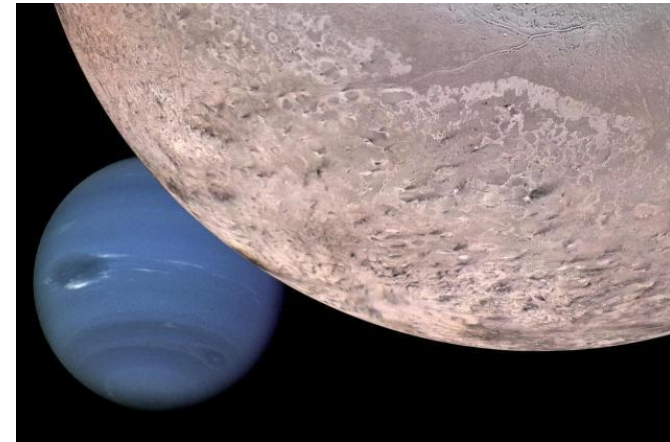
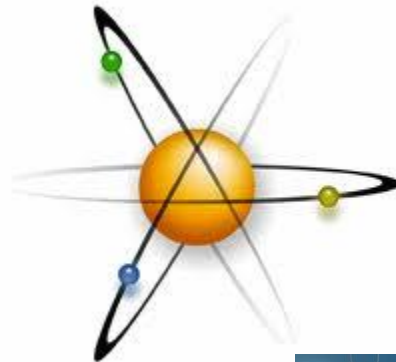


Definisjon:

- **Nøytrino:**  
En elektrisk nøytral nesten masseløs partikkel.

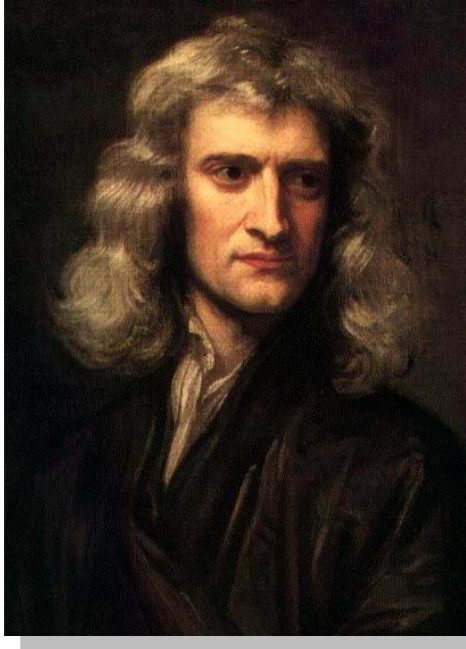
# I dette kapitlet skal vi lære om...

- Krefter som virker på og mellom legemer
    - Store legemer (f.eks. kloder, satellitter, biler, menneskekropper)
    - Små legemer (f.eks. elektroner eller protoner)
  - Felt som påvirker legemer med kraft
    - Gravitasjon
    - Elektrisitet
    - Magnetisme
  - Energi
    - Potensiell energi
    - Kinetisk energi
  - Arbeid
- Stråling
    - Elektromagnetiske bølger
    - Fotoner





# Newton's lover om bevegelse

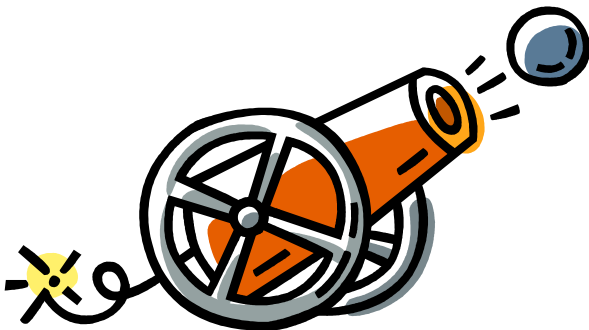


Sir Isaac Newton  
1642-1727

•An object at rest remains at rest and an object in motion continues with a constant velocity in a straight line unless an external force is applied to either object.

•The acceleration of an object is directly proportional to the net force acting on it, while being inversely proportional to its mass.

For every action there is an equal and opposite reaction.



- 1. lov: Om et legeme i ro:
  - Vektorsummen av alle krefter som virker på et legeme i ro er null
- 2. lov: Om et legeme der vektorsummen *ikke* er null:
  - Endringen per tidsenhet i bevegelsesmengden til gjenstanden er proporsjonal med (netto) kraft som virker på den og har samme retning

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{m d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

- 3. lov: Om to gjenstander som utøver krefter på hverandre:
  - Krefter fra en gjenstand til en annen opptrer alltid i par; kraft (fra A til B) og en like stor og motsatt rettet motkraft (fra B til A).

# Krefter og bevegelse

Noen begreper om en gjenstand med masse  $m$  i bevegelse:

Posisjon  $r$  og hastighet  $v$  ved tid  $t$ :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Bevegelsesmengde (moment)  $p$ :

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Akselerasjon  $a$ :

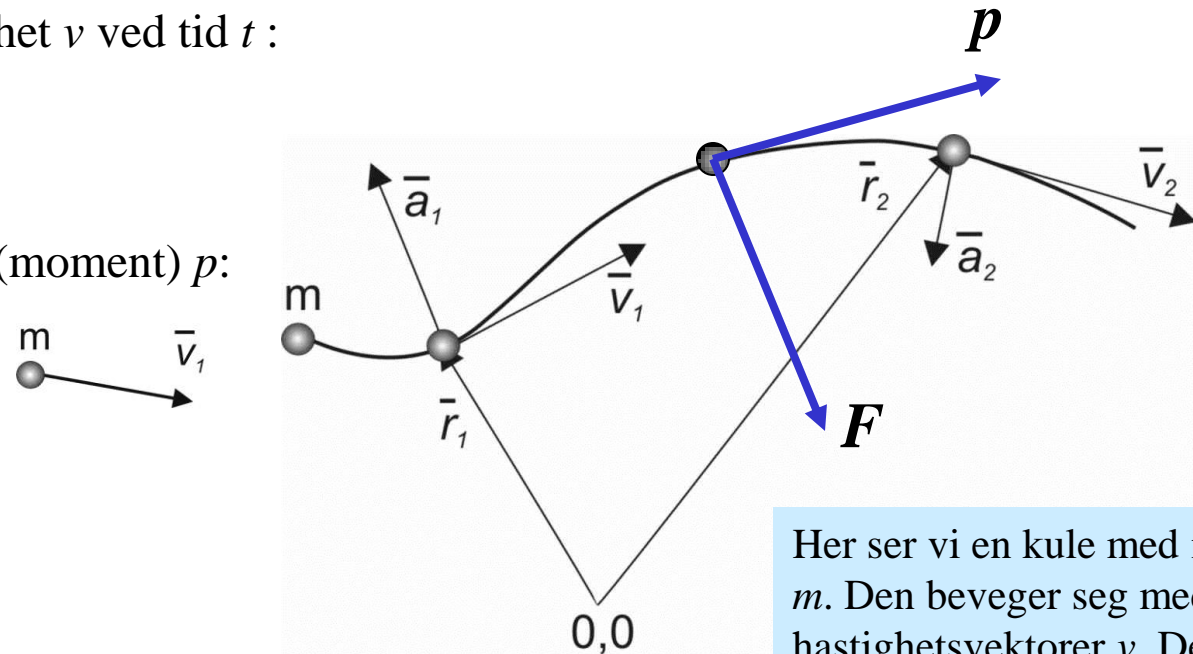
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

Kraft  $F$ :

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{eller} \quad \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Impuls:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$



Her ser vi en kule med masse  $m$ . Den beveger seg med hastighetsvektorer  $v$ . Den har moment  $p$ . Hvis den utsettes for en kraft  $F$  opplever den akselerasjon  $a$ , og derfor endres  $v$  (hastighet og/eller retning).

Ingen av disse begrepene er energi.



Eksempel 2-1: Et svevetog veier 10 000 kg og beveger seg i en lineær bane uten friksjon med en hastighet på 360 km/h. a) Hva er togets bevegelsesmengde? b) I løpet av 60 s ønsker vi å stanse fartøyet helt ved en elektromagnetisk brems som setter opp en kraft mellom toget og underlaget. Hvor stor netto kraft må bremsen yte i fartsretningen? c) Hvor stor er akselerasjonen? Avrund svarene til antall gjeldende sifre.

Løsning: a) (2.1) gir  $p = 10\,000\text{ kg} \cdot 360\text{ km/h} \cdot 1000\text{ m/km} / 3600\text{ s/h} = 1\,000\,000\text{ kg}\cdot\text{m/s}$ . b) Siden vi skal motvirke hele bevegelsesmengden  $p$  har vi fra (2.4) at  $\Delta p = 1\,000\,000\text{ kg}\cdot\text{m/s} = F \cdot 60,0\text{ s}$ , slik at  $F = 16\,667\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2 = 16\,667\text{ N}$ . c) Fra (2.3) har vi  $a = F/m = 16\,667\text{ N} / 10\,000\text{ kg} = 1,6667 = 1,67\text{ m/s}^2$ . (Dette er absoluttstørrelsene; hva med retning (fortegn)?)

Øv. 2-1. En bil veier 2000 kg. Hvor stor kraft må hjulene tilsammen skyve fra med mot underlaget for å akselerere bilen jevnt fra 0 til 100 km/h i løpet av 10 sekunder? (Hint: bruk for eksempel impuls  $\Delta P$ .)

Se på eksempelet, evt. kontrollregne. Løs så Øvelsen.  
Fasit/løsningsforslag bak i kompendiet.



# Bevegelse i sirkelbane

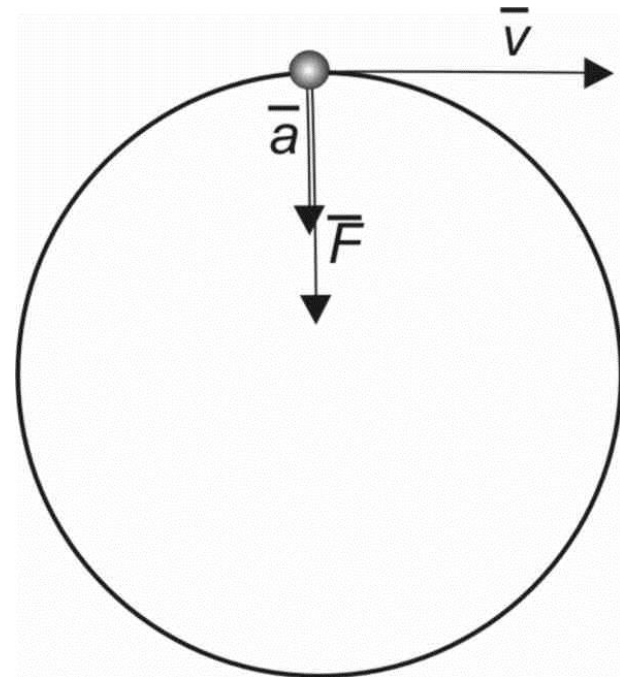
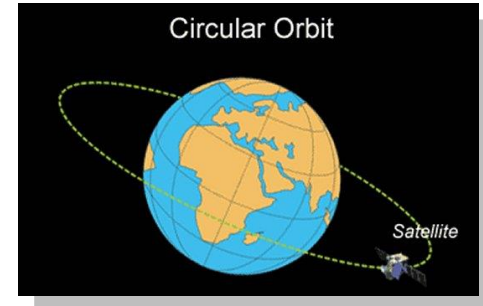
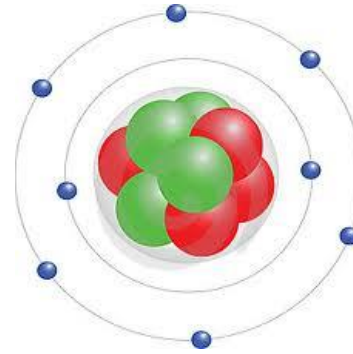
- Sirkelbevegelse er et spesielt viktig tilfelle. Vi skal ikke utlede det, men legge merke til karakteristiske trekk.
- Hvis banehastigheten er konstant i en sirkelbevegelse, har vi

- Konstant akselerasjon,  $a$ ;

$$a = \frac{v^2}{r}$$

- Konstant kraft,  $F$ ;

$$F = ma = m \frac{v^2}{r}$$



# Sirkelbane

Eks. 2-2. En kule på 1 kg roteres om et sentrum holdt av en snor. Snora er 1 m lang og omløpstiden er 1 sekund. Hva er kraften i snora?

Løsning: Banehastigheten på kula finner vi fra omkretsen på banen og tiden:  $v = 2 \cdot 3.14 \cdot 1 \text{ m} / 1 \text{ s} = 6,28 \text{ m/s}$ . Fra (10) og (11) har vi  $F = 1 \text{ kg} \cdot (6,28 \text{ m/s})^2 / 1 \text{ m} = 39,4 \text{ N}$ .

Øv. 2-2. Anta at et elektron går i en sirkelbane rundt en atomkjerne i en avstand av 1 Å ( $10^{-10} \text{ m}$ ) og at banehastigheten er lik lyshastigheten. Bruk data fra tabellen for konstanter bakerst i kompendiet til å regne ut kraften som holder elektronet i bane basert på klassisk mekanikk.

$$a = \frac{v^2}{r}$$

$$F = ma = m \frac{v^2}{r}$$

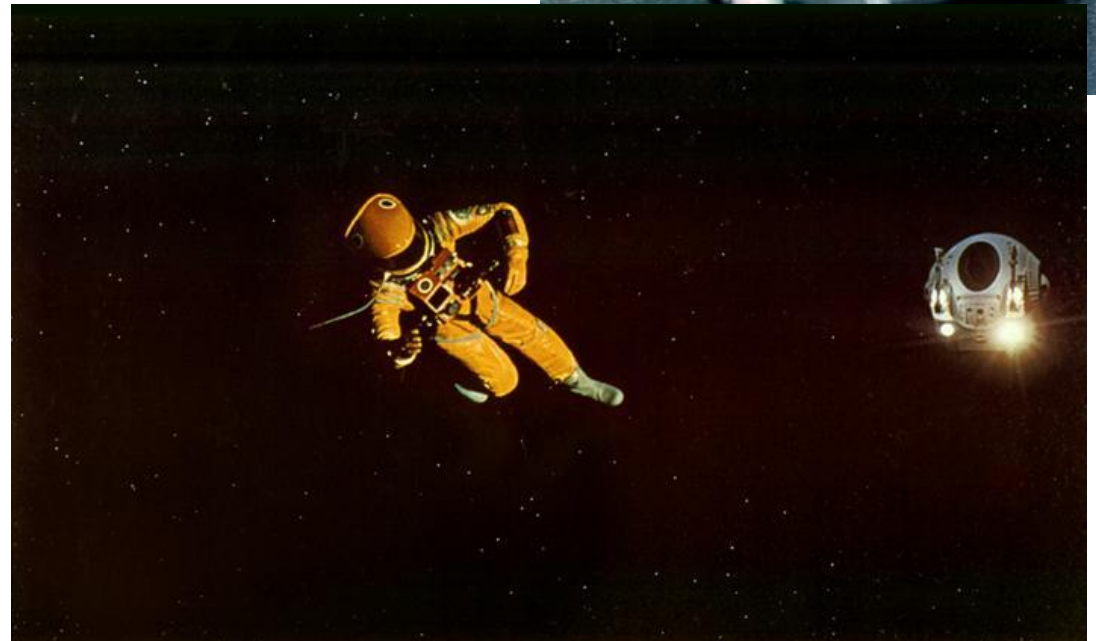
# Kinetisk energi

- Kinetisk energi

$$E = \frac{1}{2} mv^2$$

Skalar størrelse

Enhet for energi: J (joule)



# Elastisk og uelastisk støt

- Ved støt mellom to legemer: Bevegelsesmengden bevares (alltid):

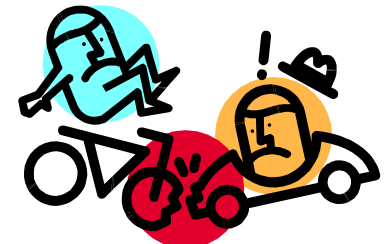
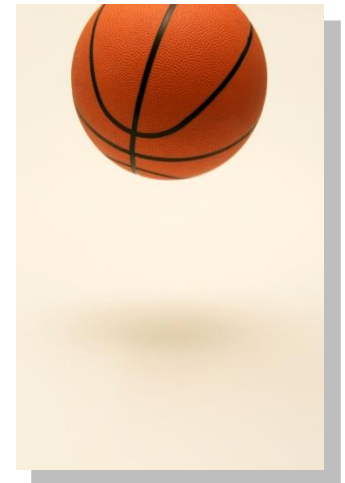
$$m_A \vec{v}_{A,0} + m_B \vec{v}_{B,0} = m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B$$

- Elastisk støt: Kinetisk energi bevares:

$$\frac{1}{2} m_A \vec{v}_{A,0}^2 + \frac{1}{2} m_B \vec{v}_{B,0}^2 = \frac{1}{2} m_A \vec{v}_A^2 + \frac{1}{2} m_B \vec{v}_B^2$$

- Uelastisk støt: Kinetisk energi bevares ikke.

- Men *totalenergien* bevares (Energibevaringsloven):  $E_{etter} = E_{før}$





# Kinetisk energi

Eks. 2-3. Hvor mye energi omdannes når bremsen i Eks. 2-1 stanser toget?

Løsning: Energien må tilsvare togets kinetiske energi før oppbremsingen: (12) gir  $E = \frac{1}{2} \cdot 10\,000 \text{ kg} \cdot (360 \text{ km/h} \cdot 1000 \text{ m/km} / 3600 \text{ s/h})^2 = \frac{1}{2} \cdot 10\,000 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m/s})^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ J} = 5 \cdot 10^3 \text{ kJ} = 5 \text{ MJ}$ .

Øv. 2-3. Hvor mye energi kreves for å akselerere bilen i Øv. 2-1 fra 0 til 100 km/h?

## Støt

Øv. 2-4. Bilen i Øv. 2-1 kolliderer etter akselerasjonen (utrolig nok...) front mot front med en like tung bil med samme hastighet. Kollisjonen er uelastisk. Hva er den totale bevegelsesmengden til de to bilene før og etter kollisjonen? Hva er den totale kinetiske energien før støtet og hvordan kan energien foreligge etter støtet?



# Arbeid. Krefter og felt

- *Arbeid* omsetter en energiform til en annen
- Arbeid gjøres ved bruk av krefter.
- Arbeid er lik kraft x strekning

$$w = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

- Dersom kraft endrer seg med strekning:
- $$w = \int \vec{F} \cdot d\vec{s}$$
- Dersom kraften er konstant og parallell med strekningen:

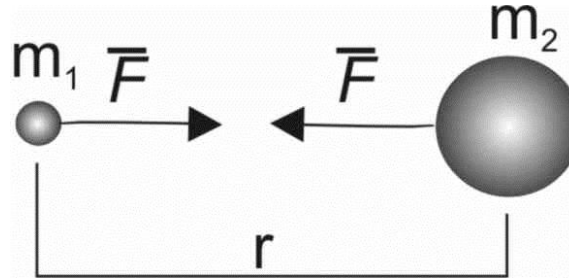
$$w = F \cdot s$$

- Nærkrefter
  - Krefter som virker *mellom* legemer i *kontakt* med hverandre
    - Mekanikk (det vi har sett på hittil)
    - Trykk (virkning av atombevegelser)
- Fjernkrefter
  - Krefter som virker på grunn av et *felt* (en gradient i et potensial)
  - Feltene og kreftene kan formidles i alle medier, også vakuum.
    - Utfordring for fysisk forståelse?
  - To (tre) typer:
    - Gravitasjon
    - Elektromagnetisk felt
      - Elektrisk felt
      - Magnetisk felt

# Gravitasjon

- Newtons gravitasjonslov:

$$F = \frac{\gamma m_1 m_2}{r^2}$$



- Gjenstand med masse  $m$  ved jordoverflaten:

$$F = gm$$

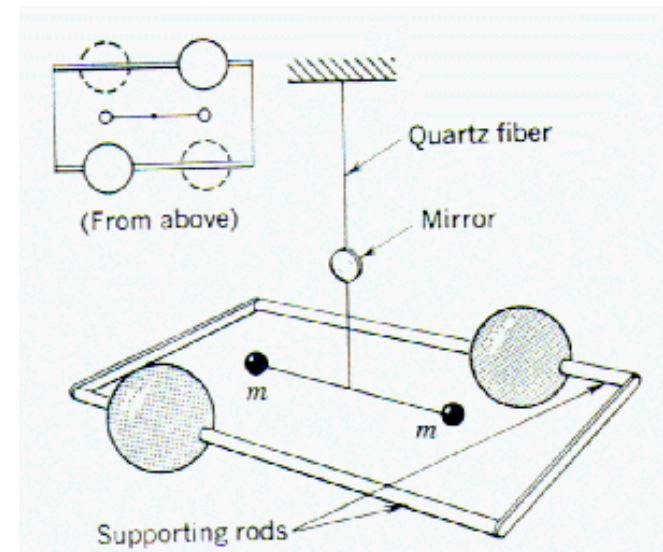
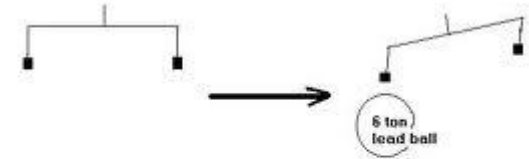
der  $g$  er tyngdeakselerasjonen;

$$g = \frac{\gamma m_{Jorden}}{r_{Jorden}^2} = 9,8 \text{ N/kg} = 9,8 \text{ m/s}^2.$$

- Cavendish målte kraften mellom kjente masser (blykuler) og kjent avstand og fant  $\gamma$ :

$$\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

- Ved dette og jordens radius (fra horisontens krumning: 6371 km) kunne man beregne Jordens masse! ( $=6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ )



# Potensiell energi i gravitasjonsfelt

- **Ved jordoverflaten:** Kraften er konstant:

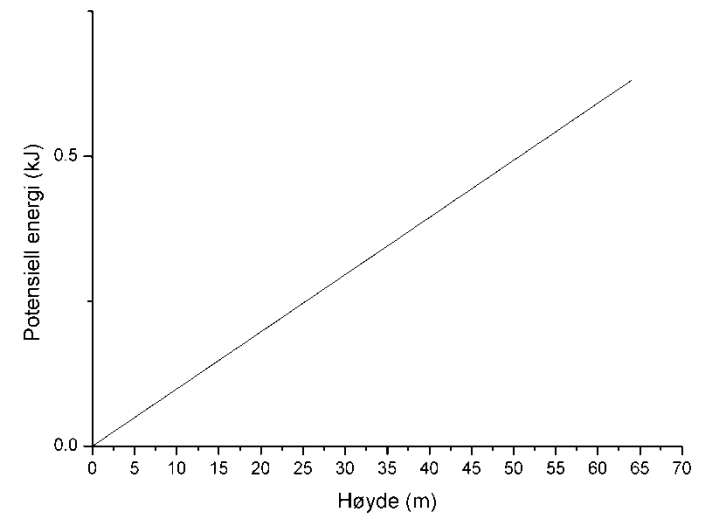
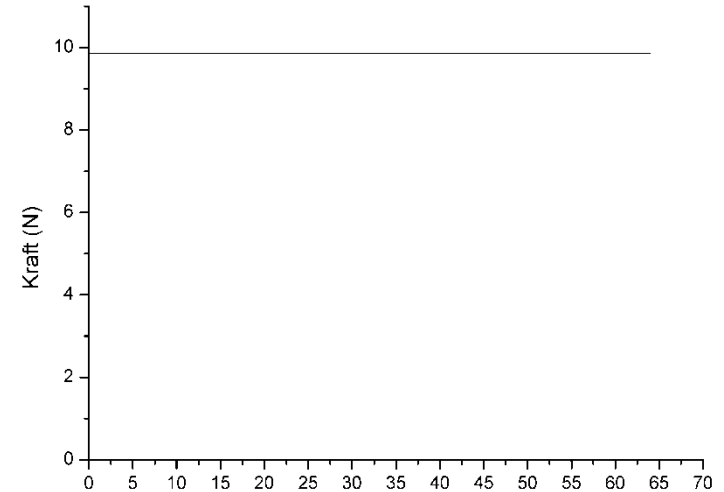
$$F = gm$$

- Arbeid = økning i potensiell energi ved å endre høyde  $h$ :

$$w = \Delta E_p = gmh$$

- Jordens overflate er referansepunkt:

$$E_p = 0 \text{ ved } h = 0.$$





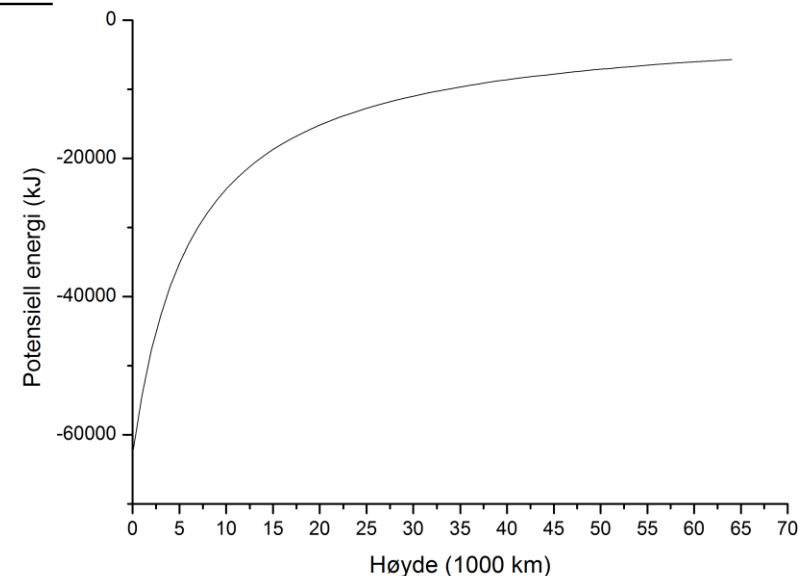
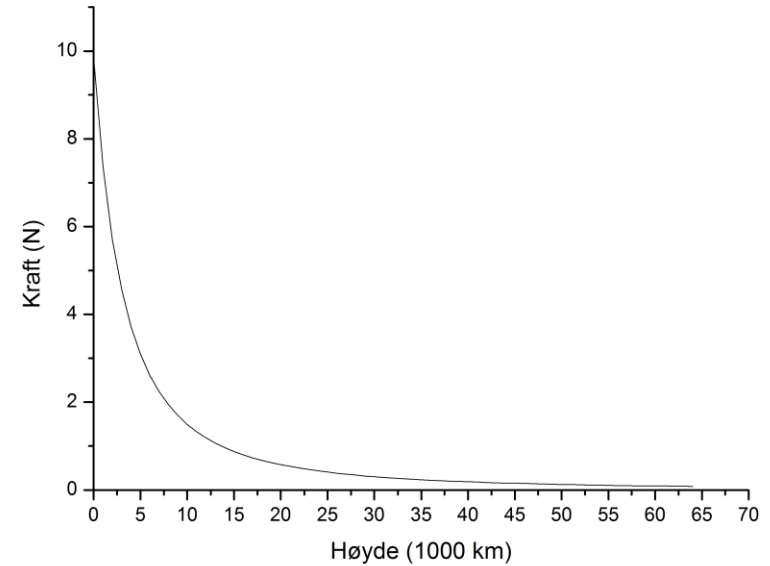
# Potensiell energi i gravitasjonsfelt

- **Høyt over jordoverflaten** og ute i rommet: Kraften varierer:  $F(r)$ . Potensiell energi for legeme med masse  $m_2$  i gravitasjonsfelt til legeme med masse  $m_1$ :

$$\Delta E = \int_{r=\infty}^{r=r} F(r) dr = \int_{r=\infty}^{r=r} \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} dr = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r}$$

- Referansepunkt uendelig langt ute:

$$E_p = 0 \text{ ved } r = \infty$$





# Gravitasjon

Øv. 2-6. En vektløfter holder en manual med masse 10 kg  $\frac{1}{2}$  meter over bakken. Så løfter hun den ytterligere  $\frac{1}{2}$  meter høyere og holder den der i 1 minutt. Deretter slipper hun den. a) Hvor mye energi kreves for løftet? b) Hvor stor kraft trenger hun å bruke for å holde gjenstanden og c) hvor mye energi koster det å holde den i 1 minutt? d) Hva er hastigheten til gjenstanden idet den treffer bakken?

Øv. 2-5. En satellitt på 1000 kg skal skytes ut i det ytre rom. Hvor mye energi kreves som minimum (dvs. for å ende opp med hastighet 0 uendelig langt ute)?

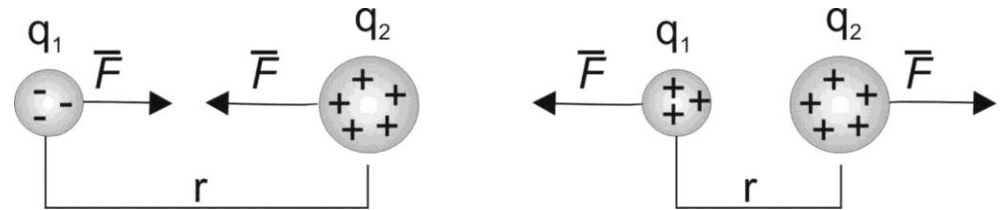
# Elektrisk felt



- Charles de Coulomb;
- *Kraft* mellom to ladde partikler:

$$F = -\frac{k_e q_1 q_2}{r^2}$$

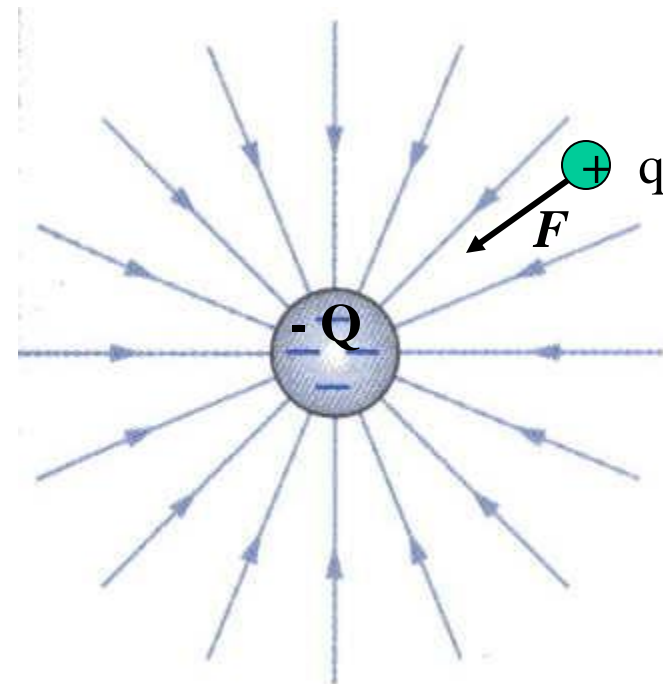
- $k_e = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .
- 1 C (Coulomb) = 1 A·s
  - ladningen som passerer når 1 A strøm går i ett sekund



- *Feltstyrke* (her rundt  $-Q$ ): Den kraft en ladet partikkel (her  $+q$ ) føler per enhet ladning  $q$ :

$$E = \frac{F}{q}$$

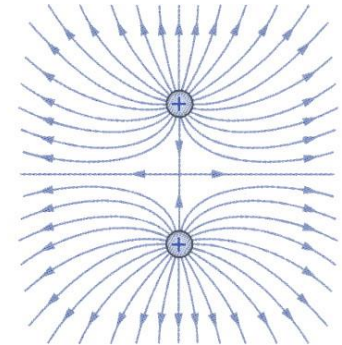
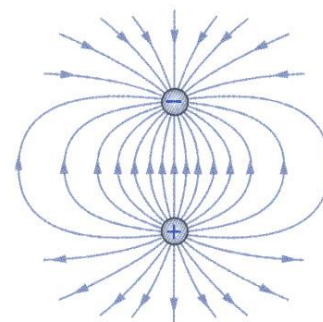
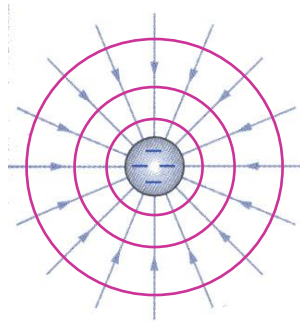
- Retning fra + til -.



# Elektriske feltstyrkelinjer

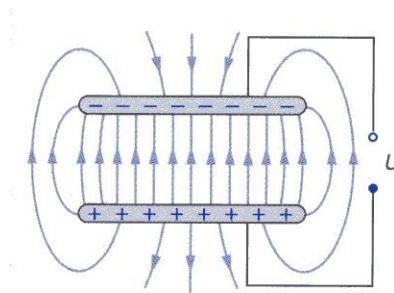
- Feltstyrkelinjer
  - Vektorer (fra + til -) vinkelrett på ekvipotensielle elektrostatiske linjer

- Inhomogene felt
  - Eks. kulesymmetrisk felt



- Felt mellom to ladde partikler

- Homogent felt
  - Platekondensator



# Kulesymmetrisk elektrisk felt

Ladning  $q$  i kulesymmetrisk felt rundt ladning  $Q$ :

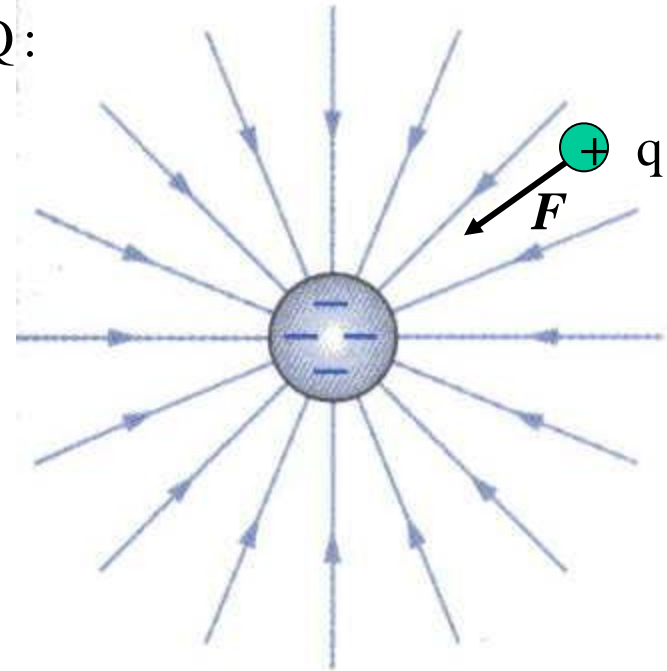
$$F = -\frac{k_e Q q}{r^2}$$

Feltstyrken blir da:

$$E = \frac{F}{q} = -\frac{k_e Q}{r^2}$$

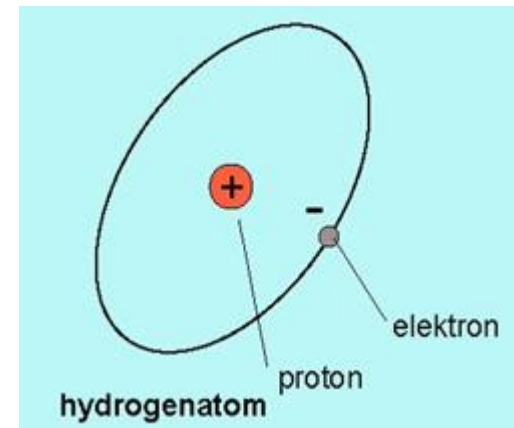
Potensiell energi:

$$E_p = \frac{k_e Q q}{r}$$



(NB; beklagelig vis samme symbol for feltstyrke og energi, men ikke samme enhet!)

# Hydrogenatomet



Øv. 2-7. Klassisk betraktning av et elektron rundt et proton, dvs. et hydrogenatom:

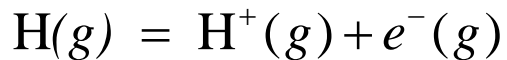
- i) For at elektronet skal holde seg i en konstant bane må sentripetalkraften (fra (11)) utgjøres av kraften i det elektriske feltet (fra (22)). Sett de to lik hverandre og løs uttrykket mhp elektronets hastighet  $v$ . Sett inn konstanter fra tabellen bak i boka og regn ut den klassiske verdien til  $v$ .
- ii) Sett opp et uttrykk for den totale energien til elektronet (kinetisk og potensiell). Sett inn uttrykket (ikke verdien) for  $v$  og finn et uttrykk for den totale energien til elektronet – klassisk sett. Sett inn konstanter og regn ut verdien.

# Ioniseringsenergi basert på klassisk betraktning av hydrogenatomet

Total energi for hydrogenatomet:

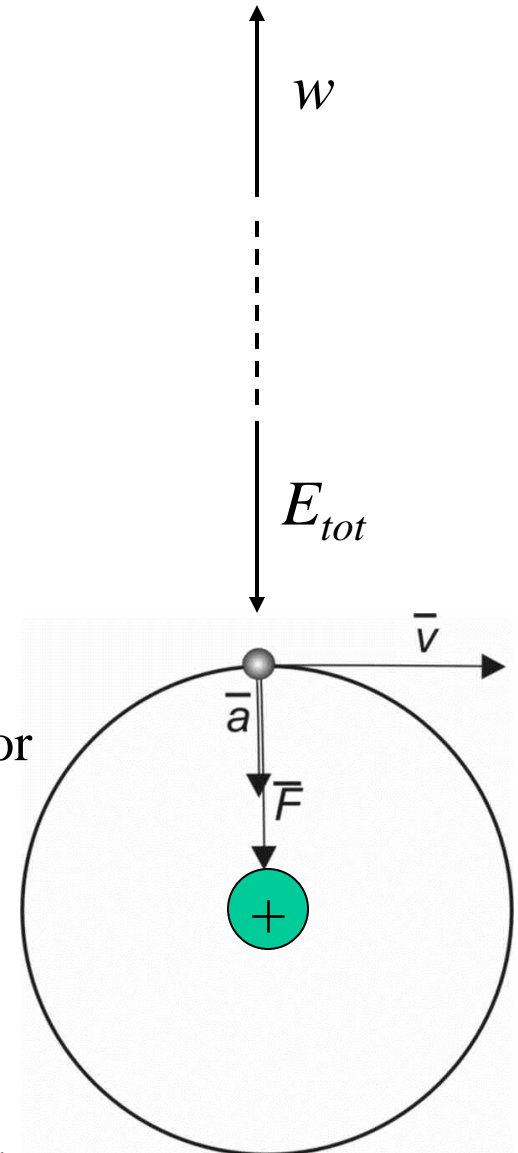
$$E_{tot} = E_{kin} + E_{pot} = -\frac{k_e e^2}{2r}$$

Ionisering er prosessen



Energien for denne prosessen er lik arbeidet som kreves for å fjerne elektronet uendelig langt ut:

$$w = -E_{tot} = +\frac{k_e e^2}{2r}$$

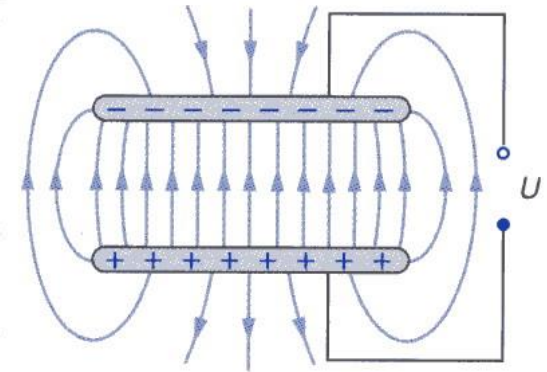


# Plat Kondensator; Homogent elektrisk felt

Tilnærmet homogent elektrostatisk felt mellom platene

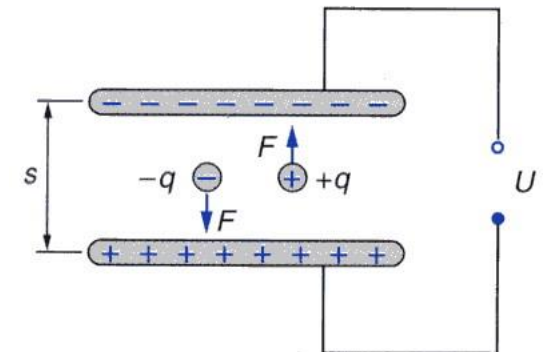
Feltstyrkelik spenning per lengdeenhet:

$$E = -\frac{U}{s} = \frac{F}{q}$$



Kraft på ladning  $q$  i homogent felt blir derved:

$$F = qE = -\frac{qU}{s}$$



Denne kraften er konstant uavhengig av avstand til platene

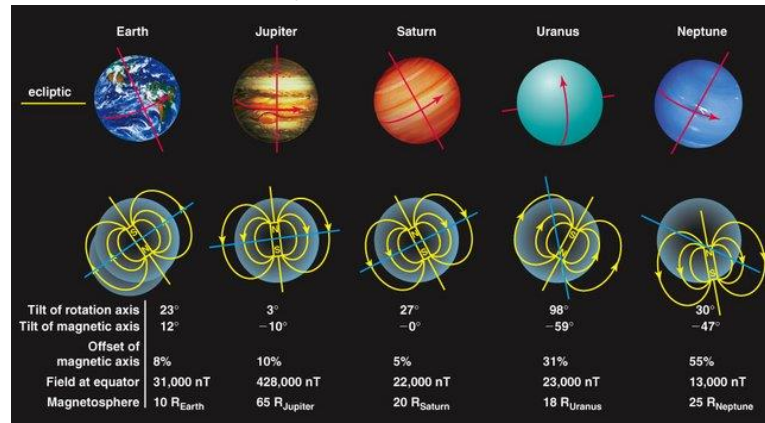
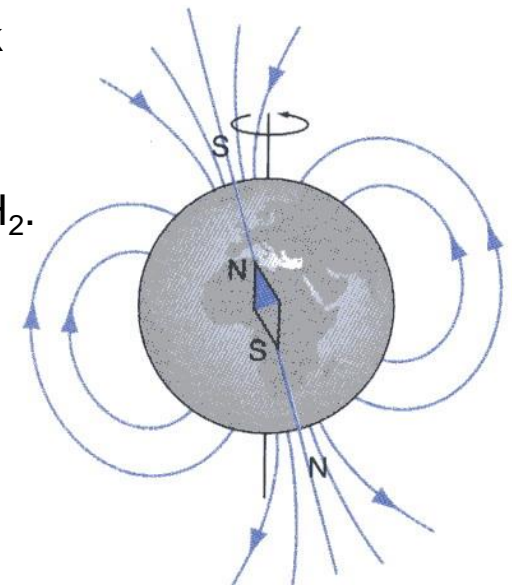
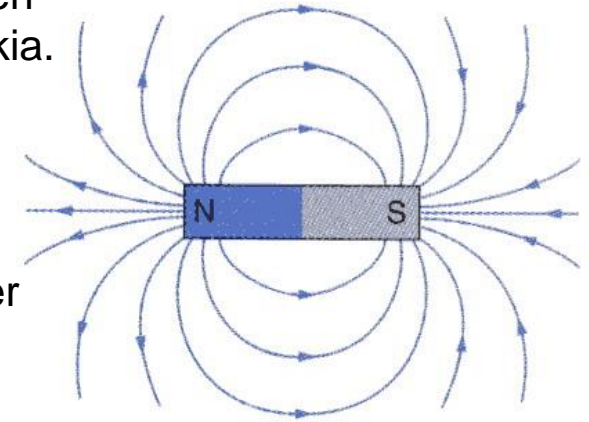
(i motsetning til i det kulesymmetriske feltet).

Øv. 2-8. Et elektron befinner seg i vakuum mellom to parallelle plater 1 mm fra hverandre. Det ligger 1 V over platene. Hva er akselerasjonen for elektronet? Hvis elektronet starter stillestående fra den ene platen, hvor lang tid vil det ta før det har nådd frem til den andre platen?



# Magnetfelt

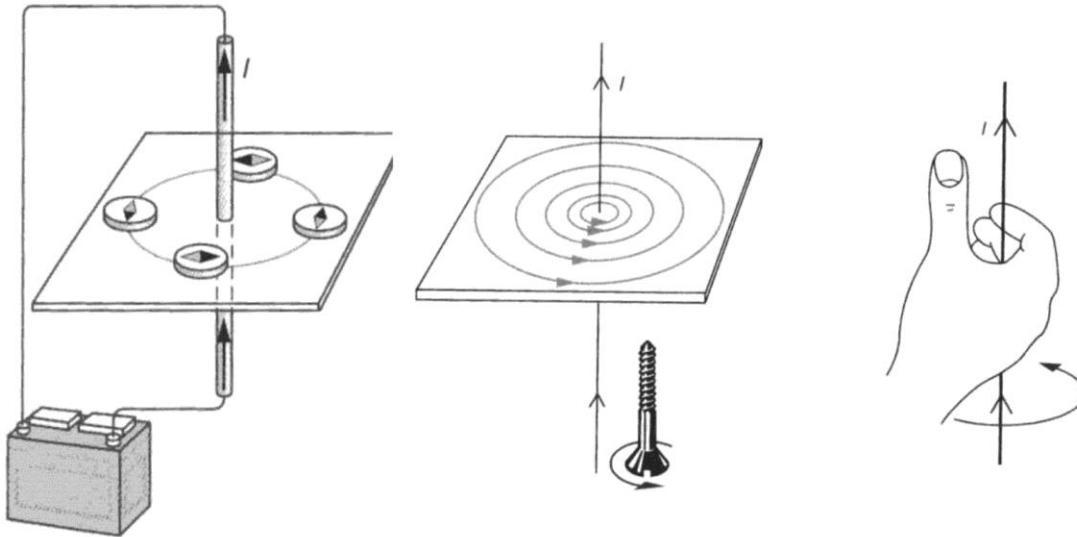
- Magnetiske mineraler har vært kjent og brukt i kompasser siden oldtiden, bl.a. i mineralet magnetitt ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) fra Magnesia i Tyrkia.
- Permanente magneter og induserbare magneter.
- Magneter omgir seg med et magnetisk felt – feltstyrkelinjene er definert å gå fra N (nordpol) til S (sydpol).
- Ulike poler tiltrekker hverandre. Like poler frastøter hverandre.
- Jorden er en magnet. Skyldes rotasjon i jernkjernen. N (magnetisk nordpol) ligger nær den geografiske Sydpolen.
- Magnetfelt på enkelte andre planeter skyldes rotasjon i metallisk  $\text{H}_2$ .



Figurer: Ekern, Isnes, Nilsen: Univers 3FY.

# Elektromagnetisme

- Hans Kristian Ørsted, 1820: "Elektrisk strøm inducerer magnetisk felt!"



Hans Christian Ørsted  
1777-1851



André-Marie Ampère  
1775-1836

Michael Faraday  
1791-1867



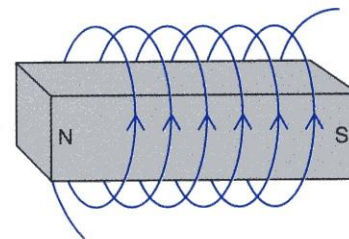
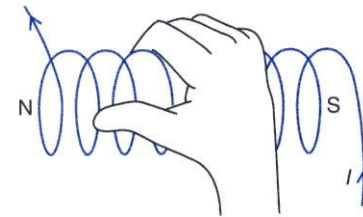
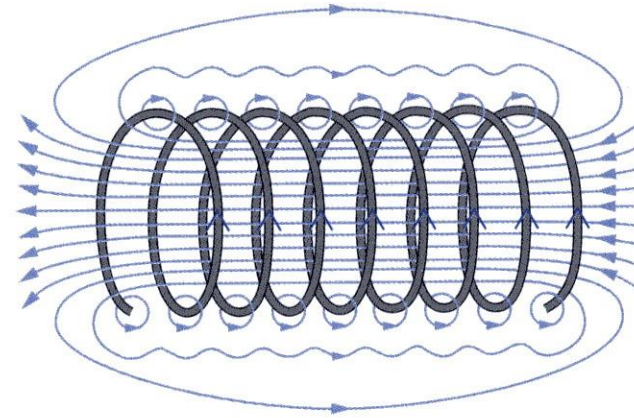
- *Elektrisitet og magnetisme hører sammen; Elektromagnetisme.*
- Mer generelt:
  - \* Ladninger i bevegelse inducerer magnetfelt!
  - \* Magnetfelt påvirker ladninger med en kraft!
- Mange eksempler og viktige bruksområder...

James Clerk Maxwell  
1831-1879



# Spoler

- Spiralformet leder forsterker feltet.
- Magnetiserbar kjerne forsterker feltet ytterligere; elektromagnet.
- Brukes i elektromagneter, motorer, generatorer, og transformatorer.



# Ladning i magnetfelt

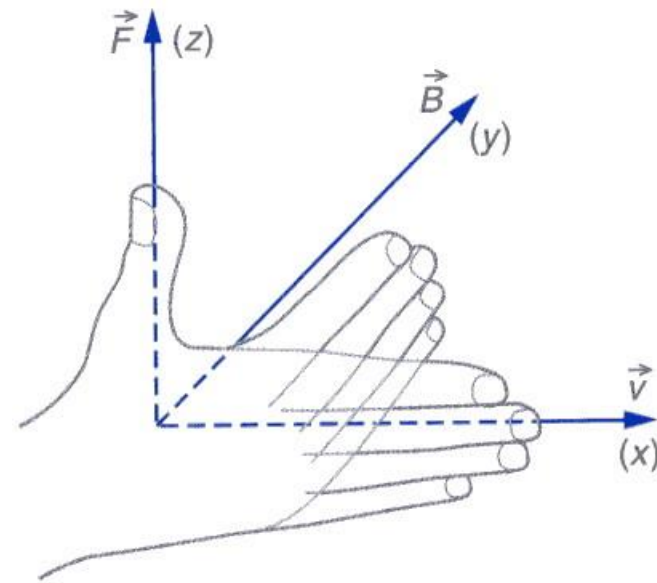
En ladning som beveger seg i et magnetfelt føler en kraft :

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Hvis magnetfeltet  $B$  og farten  $v$  er vinkelrette på hverandre står kraften vinkelrett på dem begge, følger

høyrehåndsregelen, og har verdien  $F = qvB$

I partikkelakseleratorer brukes dette til å holde ladde partikler i faste sirkelbaner. Akselerasjon av ladningene fører til avgivelse av elektromagnetisk stråling og tap av energi - som må tilføres kontinuerlig.

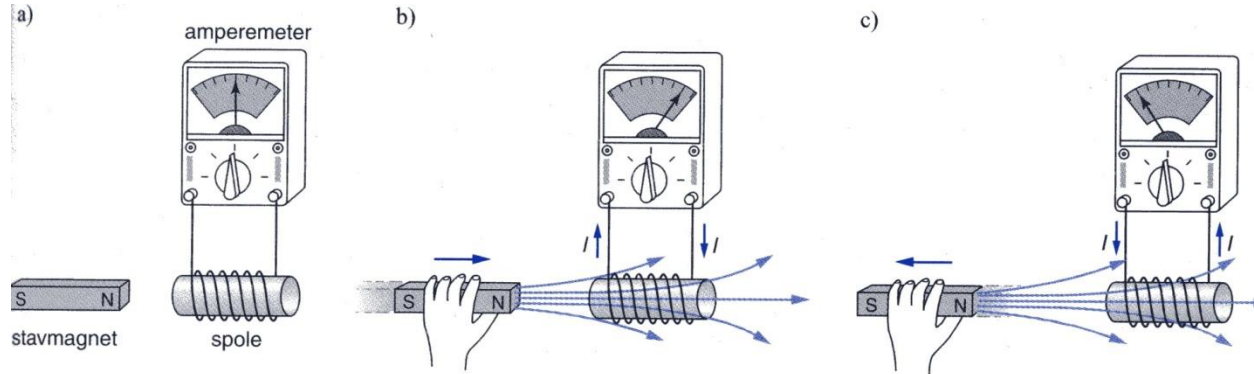


Elektrisk strøm  $I$  i en leder med lengde  $\vec{l}$  vil tilsvarende utøve en kraft på en magnet med magnetfelt  $\vec{B}$  :

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

Elektromotor!

# Induksjon



Dersom en leder beveger seg gjennom et magnetfelt får vi induisert en spenning. Hvis magnetfeltet står vinkelrett på både lederen og hastigheten, blir spenningen:

$$U = lvB$$

Hvis det går en strøm som resultat av spenningen (forbruk av energi) må vi tilføre arbeid til bevegelsen.

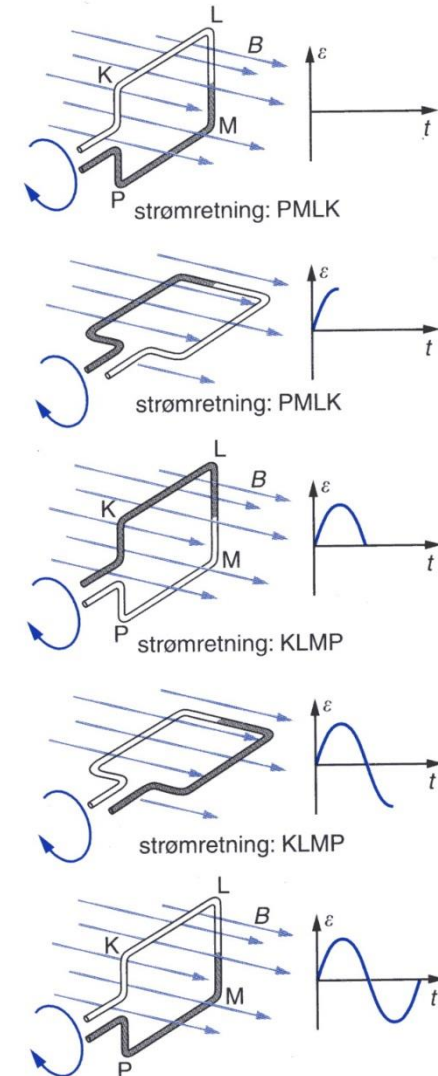
Mer generelt: Spenning induseres ved å endre fluksen:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BA)}{dt}$$

Dette kan oppnås ved å endre feltet, flukstettheten eller arealet.

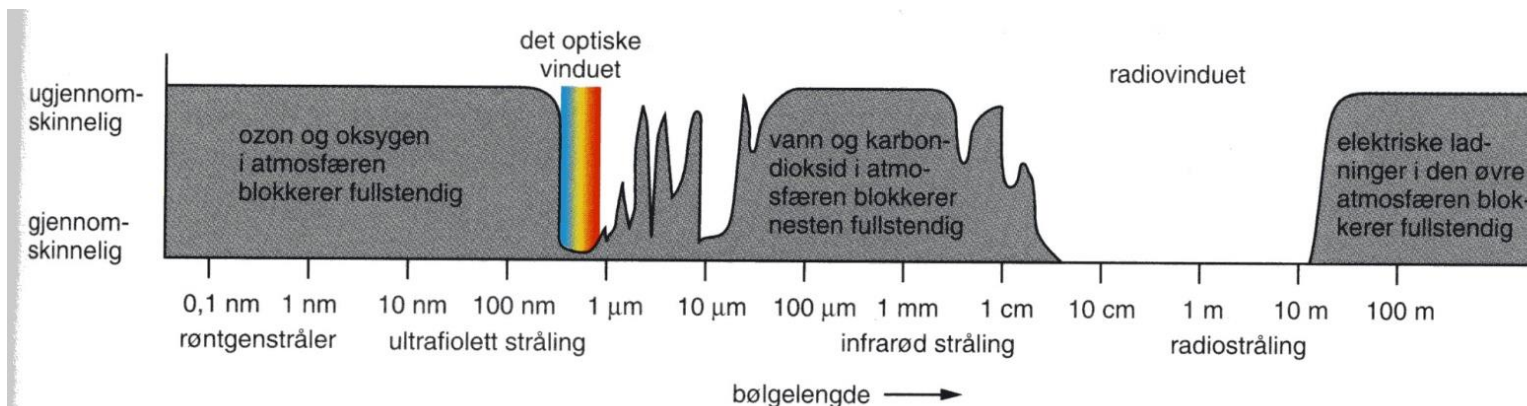
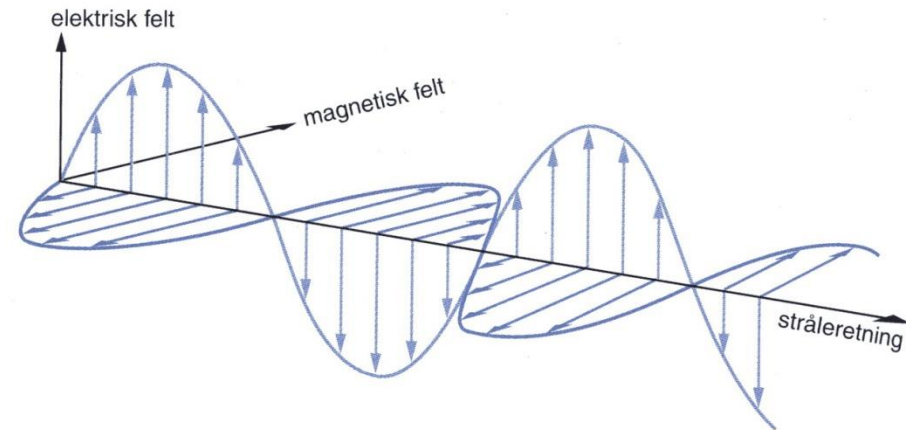
# Vekselstrømsgenerator

- Bruker induksjonsloven (forrige side) til å omsette roterende bevegelse (mekanisk arbeid) til elektrisk vekselstrøm.
- Arbeidet kan komme fra vannkraftturbin, gassturbin, bilmotor, sykkelhjul, osv.
- (Kraftverk basert på brenselceller eller solceller vil produsere likestrøm.....)



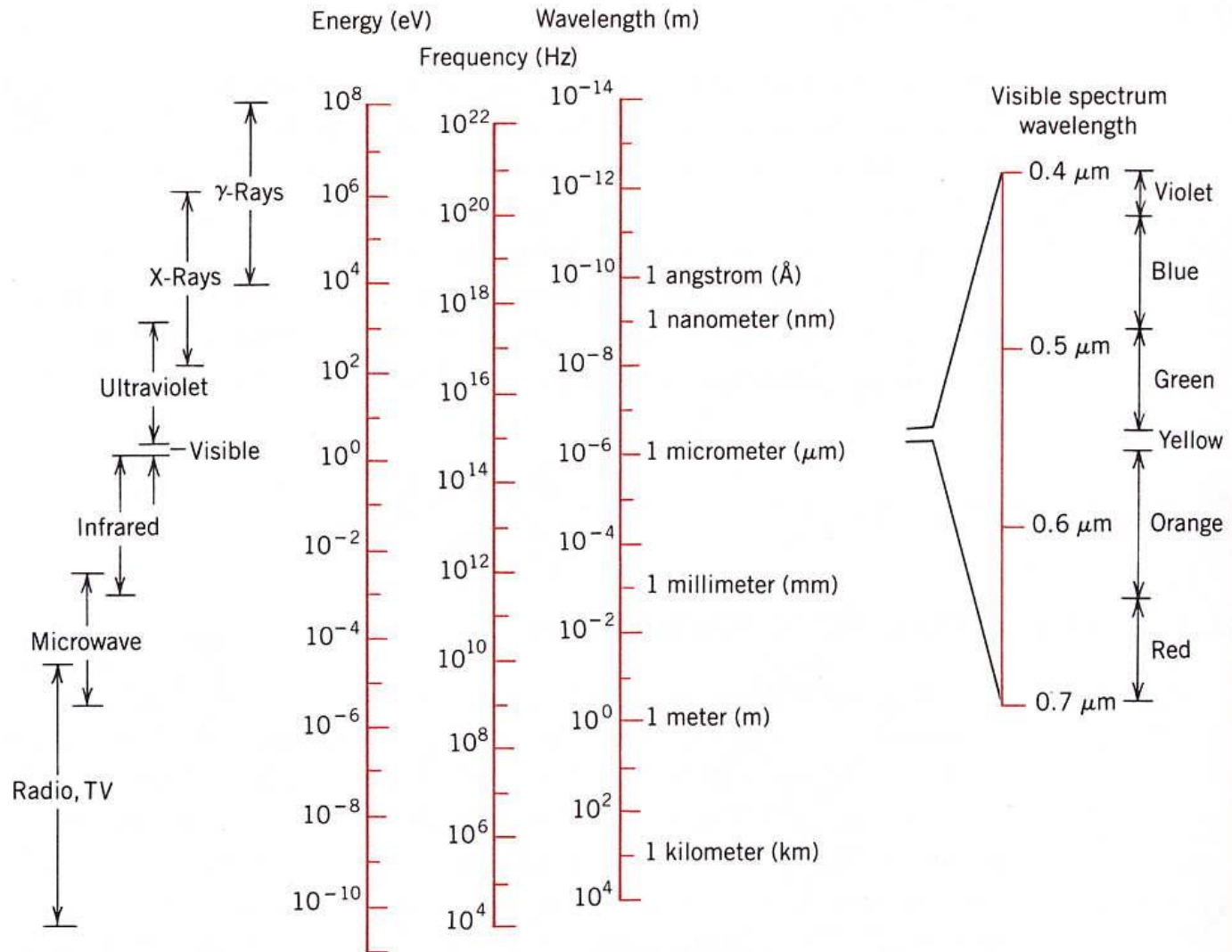
# Stråling (elektromagnetisk)

- Elektromagnetisk stråling består av svingende magnetiske og elektriske felt, vinkelrett på hverandre og på stråleretningen.
- Forskjellige typer stråling
  - Røntgen, UV, synlig, IR, radio
  - Sendes ut av elektroner i bevegelse; varme (ovn), elektrisk signal (antenne))
- men alle er elektromagnetiske
- Gasser i atmosfæren absorberer stråling
- Optisk vindu og radiovindu



# Elektromagnetisk stråling – mange mål for energien

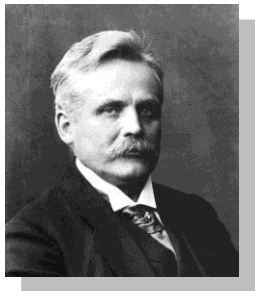
$$f = \frac{c}{\lambda}$$





# Stråling fra sort legeme; Wiens og Stefan-Boltzmanns lover

- Strålingsintensitet fra et sort legeme, som funksjon av frekvens (eller bølgelengde).



Wilhelm Carl Werner  
Otto Fritz Franz Wien  
1864-1928

- Maksimumet finnes ved Wiens forskyvningslov:

$$\lambda_m = \frac{a}{T}$$

- Mens den totale intensiteten er gitt ved Stefan-Boltzmanns lov:

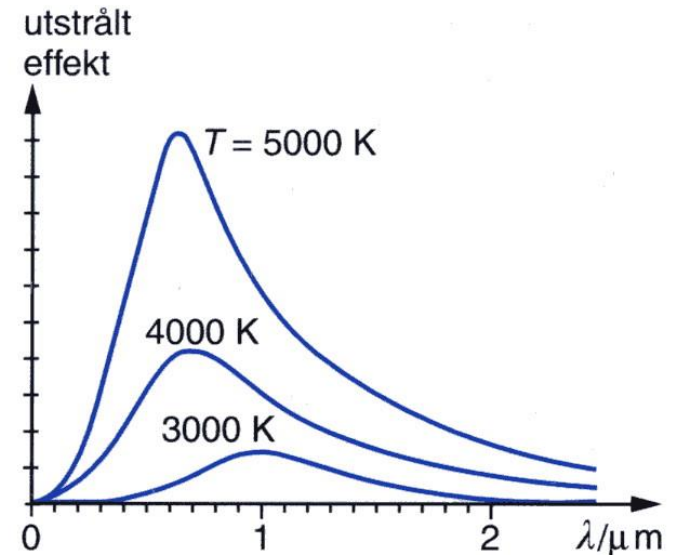
$$M_e = \sigma T^4$$



Josef Stefan  
1835-1893



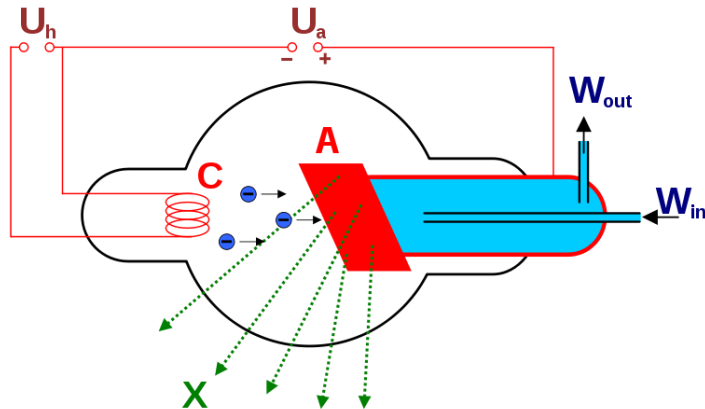
Ludwig Boltzmann  
1844-1906



Figur: Ekern, Isnes, Nilsen:  
Univers 3FY.

# Röntgenstråling [X-rays]

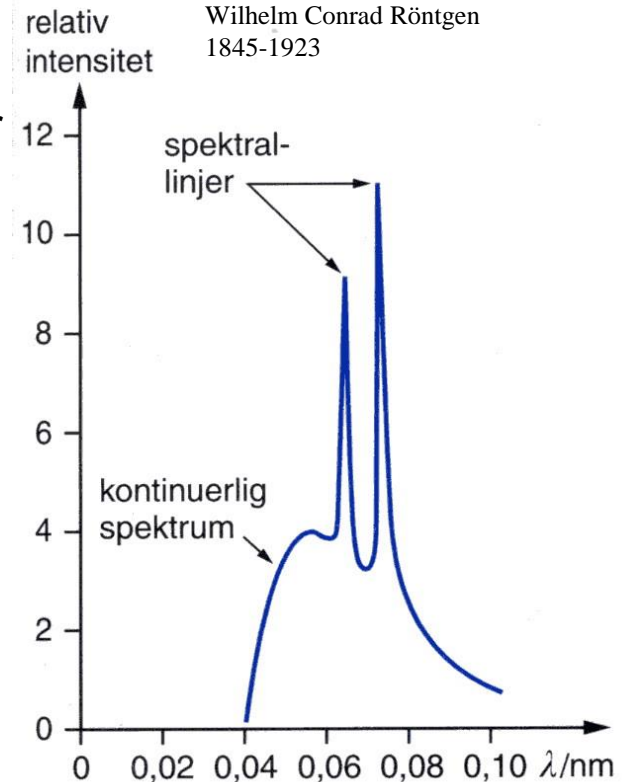
- Kortbølget (høyenergetisk) elektromagnetisk stråling
- Penetrerer de fleste materialer
- Gjør skade på molekyler og strukturer
- Dannes når elektroner akselereres mot og kolliderer med anodematerialer i en katodestrålerør (Röntgenrør).



- Kontinuerlig stråling (bremsestråling)
- Karakteristisk stråling (for anodematerialet).



Wilhelm Conrad Röntgen  
1845-1923



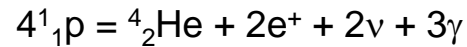
Figurer: WikiFree; Ekern, Isnes, Nilsen: Univers 3FY.

# Stråling fra Solen

- Solen

- Hydrogenbrenning

Totalreaksjon: 4 protoner blir til en heliumkjerne + 3 typer partikler/stråling:



+ varmestråling.

Solen gir fra seg energi som stråling og mister litt masse i hht. Einstein:

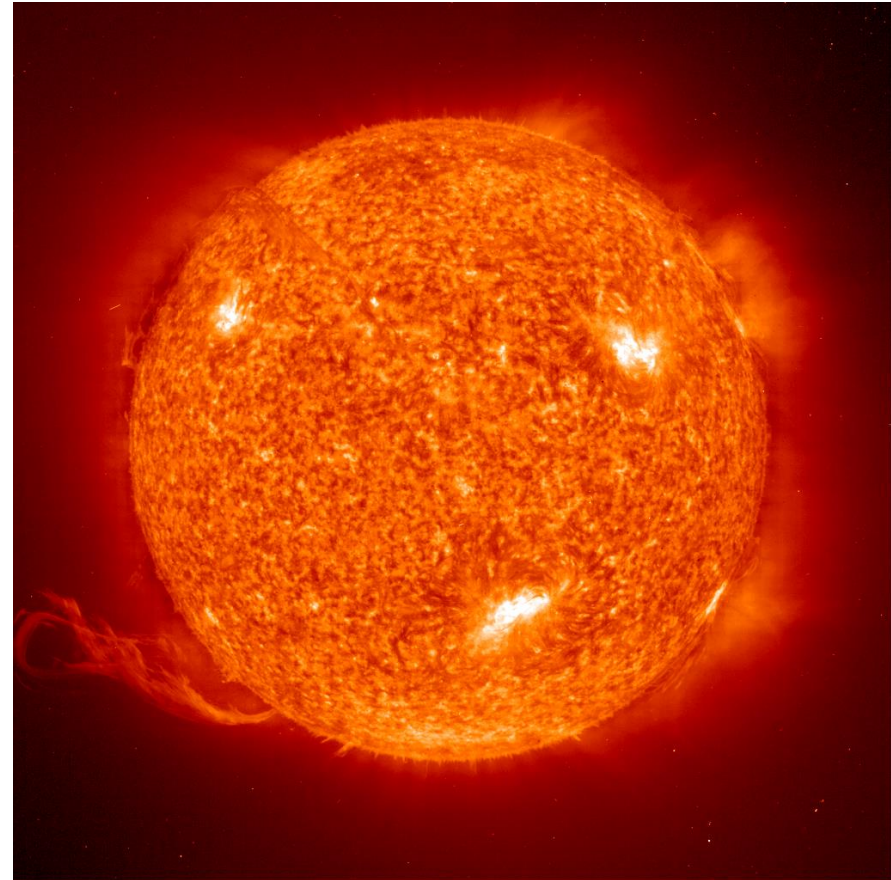
$$E = mc^2$$

Total effekt:  $3,86 \cdot 10^{26}$  W

Temperaturen i kjernen:  $T = 15\,600\,000$  K

Temperaturen på overflaten:  $T = 5800$  K

$$\lambda_{max} = 0.1 - 1 \mu\text{m}$$



# Stråling til Jorden

- Jorden

1,496\*10<sup>11</sup> m (150 millioner km) fra Solen

Effekten pr m<sup>2</sup> (solarkonstanten *S*) avtar med kvadratet av avstanden.

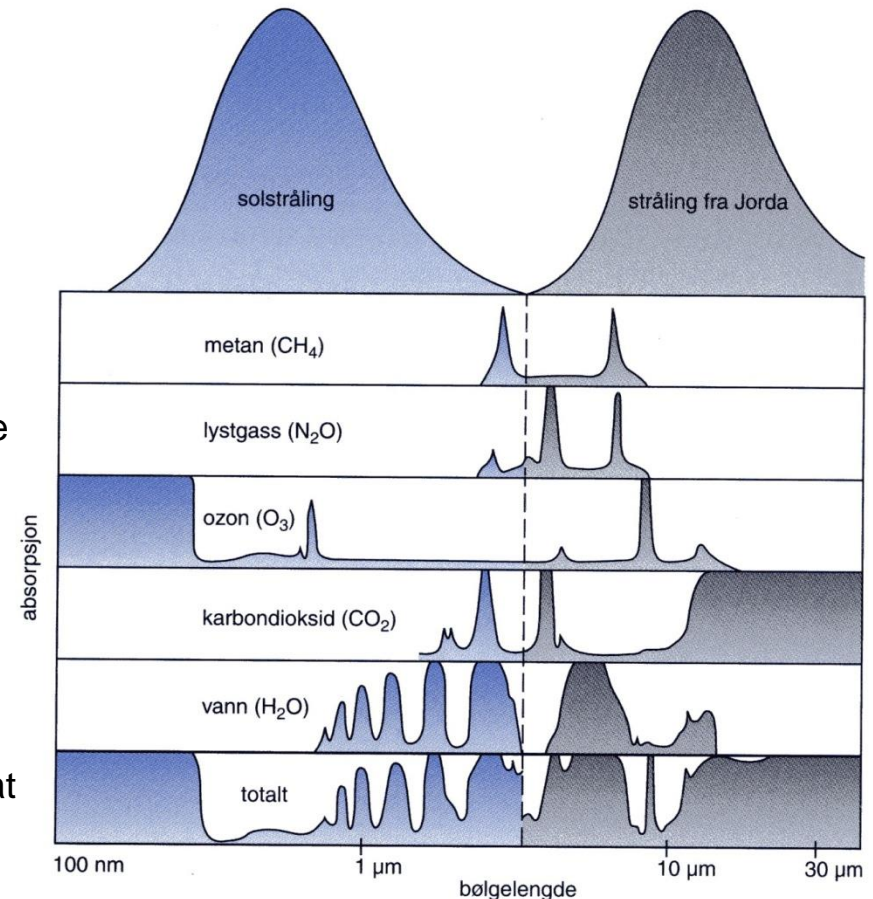
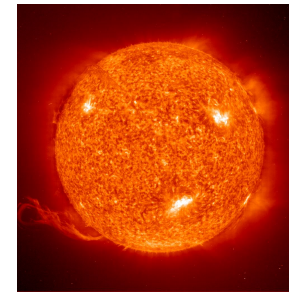
*S* (på jordens solside) = 1370 W/m<sup>2</sup>

30% reflekteres direkte (albedoen), 70% absorberes (på solsiden)

Stråling fra Jorden skjer fra hele overflaten på alle sider. Derfor kan Jorden avgi all stråling den mottar, selv om temperaturen er lav. I følge Stefan-Boltzmann burde temperaturen på jordoverflaten være omlag -20°C;

$\lambda_{max}$  = ca 15  $\mu$ m (infrarødt)

Imidlertid sørger CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O for mer absorpsjon i dette området enn for sollyset (synlig og ultrafiolett område; O<sub>3</sub> og H<sub>2</sub>O), slik at temperaturen på overflaten er høyere for å oppnå energibalanse.



Figur: Ekern, Isnes, Nilsen:  
Univers 3FY.

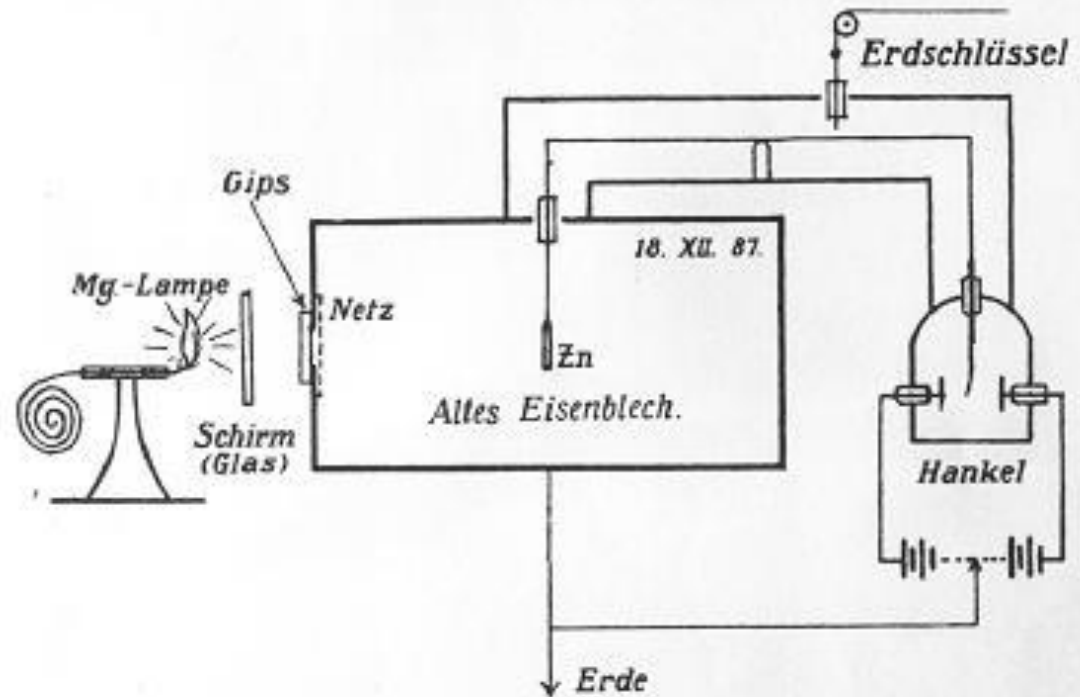
# Kvantemekanikk



A. PICCARD    E. HENRIOT    P. EHRENFEST    Ed. HERZEN    Th. DE DONDER    E. SCHRÖDINGER    E. VERSCHAFFELT    W. PAULI    W. HEISENBERG    R.H. FOWLER    L. BRILLOUIN  
 F. DEBYE    M. KNUDSEN    W.L. BRAGG    H.A. KRAMERS    P.A.M. DIRAC    A.H. COMPTON    L. de BROGLIE    M. BORN    N. BOHR  
 I. LANGMUIR    M. PLANCK    Mme CURIE    H.A. LORENTZ    A. EINSTEIN    P. LANGEVIN    Ch.E. GUYE    C.T.R. WILSON    O.W. RICHARDSON

# Problem 1: Fotoelektrisitet

- Fotoelektrisitet:
  - Hertz & Hallwachs, ca 1880: Når vi bestråler en overflate med ultrafiolett lys, avgis elektroner fra overflaten.
  - Elektronenes energi øker *ikke* med intensiteten til lyset.
  - Over en viss bølgelengde til lyset (under en viss frekvens) avgis ingen elektroner.



*Grundversuch der lichtelektrischen Erregung.*

Fig. 2.

## Problem 2: Stråling fra sort legeme

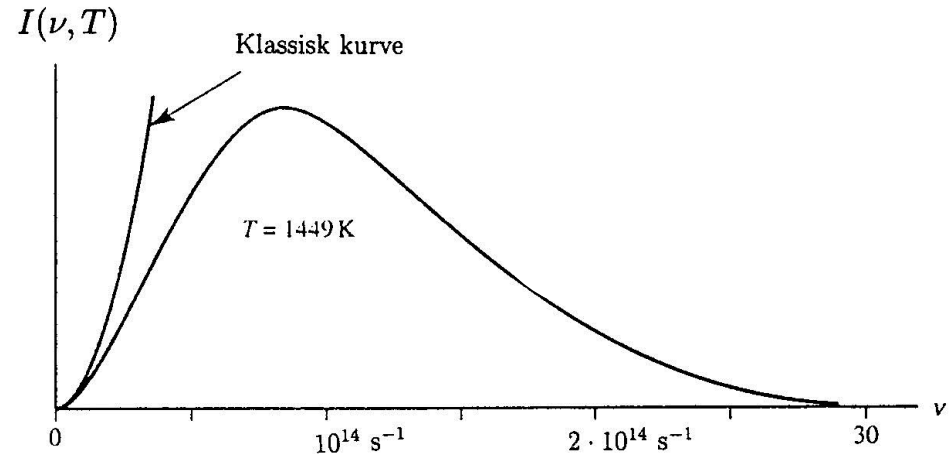
Empiriske sammenhenger :

Wien :

$$\lambda_m = \frac{a}{T}$$

Stefan - Boltzmann :

$$M_e = \sigma T^4$$



Teoretisk klassisk fysikk; Rayleigh - Jeans :

$$I(f, T) = \frac{2\pi f^2}{c^2} kT$$

stemmer ikke med observert intensitetskurve, samt forutsetter at total strålingsmengde går mot uendelig hvis alle frekvenser medregnes ("ultrafiolett katastrofen").

NB : for frekvens brukes både  $f$  og  $\nu$

# Max Planck, 1900: Energien i lyset er kanskje kvantifisert?

Plancks hypotese: Hvis

$$E_{\text{"minstekvartum"}} = hf$$

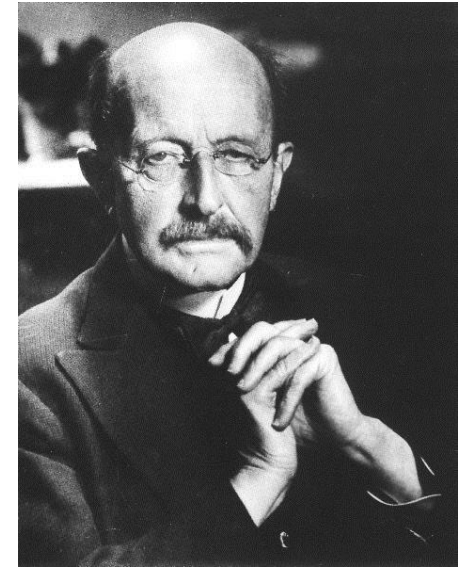
$$E = hf, 2hf, 3hf, \text{ osv.}$$

der  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Js og  $f$  er frekvensen,

så er intensiteten gitt ved

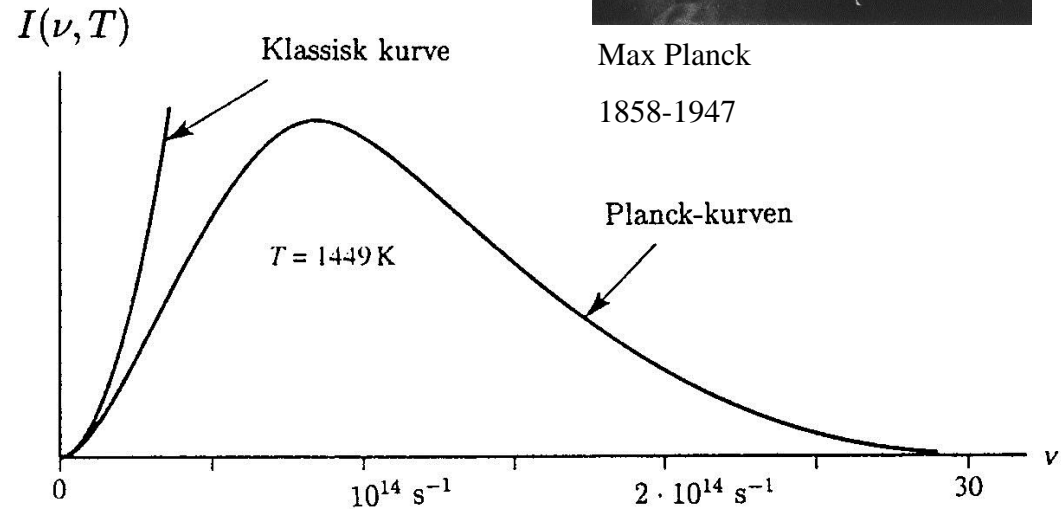
$$I(f, T) = \frac{2\pi f^2}{c^2} \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}$$

(Plancks strålingslov)



Max Planck

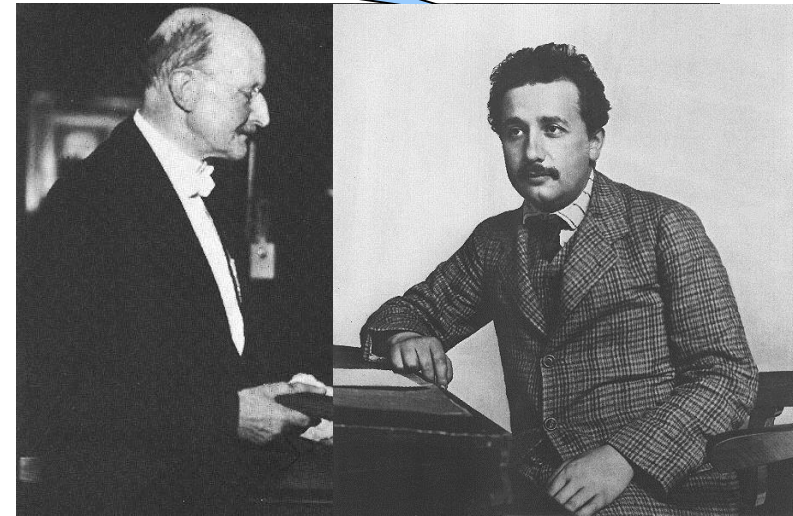
1858-1947





# Wunderbar!

- Einstein: Da kan vi sikkert forklare problemet med fotoelektrisiteten også:
- Lyset (med kvanter  $hf$ ) slår løs elektroner og gir dem samme energi.
- De mister noe energi på vei ut; løsrivningsarbeidet, arbeidsfunksjonen,  $W$ , slik at deres kinetiske energi blir
- $E_k = hf - W$
- Hvis  $hf < W$  blir  $E_k < 0$ ; ingen elektroner unnslipper.
- Med dette hadde Einstein, ved Plancks kvantebegrep, oppklart det fotoelektriske problem.
- Fotoelektrisitet utnyttes i solceller, og i analyseteknikkene XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) og UPS (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy)



Max Planck

Albert Einstein  
1879-1955

$W$  varierer fra materiale til materiale

Oppgis ofte i eV

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

For et mol elektroner:

$$1 \text{ eV} \cdot N_A = 96485 \text{ J/mol}$$

# Partikler og bølger

- de Broglie: En partikkel i høy hastighet har også egenskaper som en bølge:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$\lambda$  = bølgelengde,  $m$  = masse,  $v$  = hastighet,  $h$  = Plancks konstant

- og omvendt: En bølge (eks. elektromagnetisk strålekvant) har også egenskaper som en partikkel (eks. foton).
- Strømmer av elektroner eller nøytroner brukes som bølger, med bølgelengde etter de Broglie, når de benyttes til mikroskopi og diffraksjon.



Louis de Broglie  
1892-1987



# Øvelser

Øv. 2-12. Arbeidsfunksjonen for kalium er  $W = 3.58 \times 10^{-19}$  J. Regn ut største fart fotoelektroner har når overflaten av kalium blir bestrålt med lys med  $\lambda = 436$  nm.

Øv. 2-13. Røntgenstråling med bølgelengde 1 Å (røntgenstråling) kan ses på som lyskvant eller som fotoner. a) Hva blir energien til hvert kvant? b) Hva blir den effektive massen til et slikt foton?

## Oppsummering, kapittel 2

- Krefter – nærkrefter og fjernkrefter
- Energibegrep fra dette kapitlet:
  - Bevegelse; Kinetisk energi
  - Felt; Potensiell energi
  - Arbeid
  - I neste kapittel: Nytt energibegrep; Varme (entalpi)
- Stråling er felt og bevegelse
  - Kvantemekanisk
  - (Relativistisk)





## Kap 2. kontroll

Fra dette kapitlet bør du som minimum kjenne og kunne gjøre kort rede for følgende begrep: *Moment* og *kinetisk energi* for et legeme med masse  $m$  og hastighet  $v$ ; *impuls* og *energibevaring* når legemer møtes; *nærkrefter* (*kraft* og *motkraft*), *fjernkrefter* og *potensiell energi* i *gravitasjonelt* og *elektrisk felt*; *akselerasjon*; *arbeid*; *elektromagnetisk stråling*; *kvantifisert energi*.