



## El.mag. er grunnlag for:

- Kretselementer (motstand, kond., spole, diode, transistor)
- Kretsteknikk
- Elkraftforsyning: Generatorer og overføring
- Motorer
- Elek. apparater / elektronikk / datamaskiner
- El.magn. stråling, eks. lys-, radio- og  $\mu$ bølger
- Telekommunikasjon
- Magnetisk materiale
- Atomet. Kjemiske bindinger.
- Atmosfæriske forhold
- m.m.m.

### **Fire fundamentale krefter i naturen:** (sortert ut lengde etter Newton):

1. **Gravitasjonskraft** – tiltrekning mellom masser
2. **Elektromagnetisk kraft** – frastøtning/ tiltrekning mellom like/ulike elektriske ladninger
3. Sterk kjernekraft – kraft mellom subatomære partikler
4. Svak kjernekraft – kraft mellom subatomære partikler under spesielle radioaktive prosesser.

## Pensum

Pensumliste på emnets nettsider:

<http://home.phys.ntnu.no/brukdef/undervisning/tfy4155>

(lenke fra It's learning)

1. Forelesninger (95% dekket i Young & Freedman)
2. Fem ekstra notatark (utover læreboka).
3. Øvinger.
4. Laboratorieoppgaver.

### 13 regneøvinger (minst 8 må godkjennes)

- Veiledning i grupperom i Realfagbygget.
- Innlevering i bokser utenfor Aud-R1.
- Løsningsforslag (ingen gjennomgåing).
- Godkjenningslister på nettet.
  
- Nettside:
- [home.phys.ntnu.no/brukdef/undervisning/tfy4155/ovinger](http://home.phys.ntnu.no/brukdef/undervisning/tfy4155/ovinger)

### Laboratoriekurs (obligatorisk):

- Følg med på labens nettsider
  - Første grupper starter uke 5 (31.jan), siste uke 7
  - Påmelding på nettsidene man 17.jan – fre 21.jan
  - Lab.hefte i salg om ca ei uke.
- **OBS:**
  - *Øvingstimene ligger i kollisjon med labtidspunkt for noen studieprogram, slik at du må velge annet labtidspunkt enn du er satt opp på øvinger.*

### Bruk av matematikk:

- Vektorregning
- Integrasjon
- Differensiallikninger
- Nabla-operator  $\nabla$
  
- Kort repetisjon fra matematikken dersom behov.

### Kap. 21

### Elektrisk ladning og felt

#### Vi skal se på:

- Elektrisk ladning  $Q$
- Coulombs lov
- Superposisjonsprinsippet
- Elektrisk felt og feltlinjer  $E$
- Elektrisk dipol.

## Elektrisk ladning

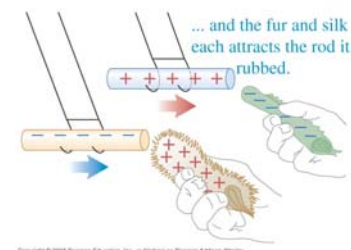
### Observasjoner:

- Gnidning skaper elektrisitet: 700 f.Kr.  
 rav = ηλεκτρον = elektron
- Elektrisk ladning = skalar (+ / -)  
 Benjamin Franklin 1700-tallet
- Totalladning i isolert system konstant
- Ladning overføres ved kontakt
- 1785: Coulombs lov  $\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r}$   
 Kraftvirkning.  
 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$   
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$
- Elektriske ladninger er kvantiserte. Millikan 1909
- Superposisjonsprinsippet.
- Maxwells likninger. James Clerk Maxwell samlet elektromagnetismen i 1873

## Elektrisk ladning

### Observasjoner:

- Gnidning skaper elektrisitet: 700 f.Kr.  
 rav = ηλεκτρον = elektron  
 islandsk: elektrisitet = rafmaan



## Gravitasjon

- Newtons gravitasjon har samme likningsform som Coulombs lov:

- Coulomb:  $\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r}$  (frastøtende eller tiltrekkende)

- Newton:  $\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \hat{r}$  (minus: alltid tiltrekkende)

## Coulombs lov i ulike enhetssystemer

SI:  $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r}$

cgs (Gauss):  $\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r}$

HL (Heaviside-Lorenz):  $\vec{F} = \frac{1}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r}$

### Oppgave: Hvor stor er 1 coulomb ?

- Du og din kamerat/venninen holder hver ei kule med ladning +1,0 C. Dere beveger dere mot hverandre fra uendelig i et ellers elektrisk nøytralt rom.
- Hvor nærme kan dere komme hverandre?  
Anta dere greier å trykke med kraft  $F_{\max} = 500$  N hver.

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

$$r_{\min} = \sqrt{k \frac{q_1 q_2}{F_{\max}}} = \sqrt{9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{1,0\text{C} \cdot 1,0\text{C}}{500\text{N}}}$$

$$= 4,24 \text{ km} = \underline{\underline{4,2 \text{ km}}}$$

### Størrelser for frie ladninger

- ”Laboratorie”størrelser:  $\mu\text{C}$  og  $\text{nC}$
- van der Waal-kula:  $Q = 1,0 \mu\text{C}$  ved 100 kV
- Store ladninger:
  - Tordenskyer: 0,1 kC
  - Jordkloden: -0,6 MC
  - Batterier:  $\sim 1 \text{ Ah} = 1 \text{ C/s} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ kC}$  (kjemisk lagra!)

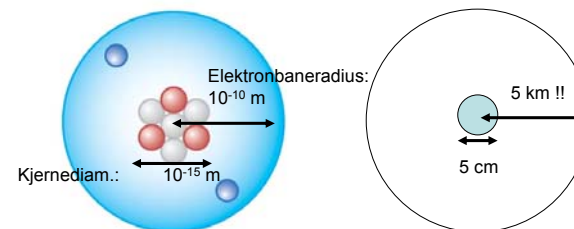
### Måltall og enheter

- $s = 3,0 \text{ m}$
- $s =$  fysisk størrelse
- $3,0 =$  måltall:  $\{s\} = 3,0$
- $m =$  enhet (dimensjon):  $[s] = \text{m}$
- OBS: Fysisk størrelse i *kursiv (italic)*, enhet opprettet (roman)  
(I skikkelige teknisk litteratur, vanskeligere i håndskrift.)
- Eksempler fra elmagen:
  - $q = 3,4 \text{ C}$
  - $I = 2,5 \text{ A}$
  - $V = 30 \text{ V}$  ( $V =$  symbol for spenning,  $V =$  volt)
  - $C = 30 \text{ nF} = 30 \text{ nC/V}$   
( $C =$  symbol for kapasitans,  $C =$  coulomb)

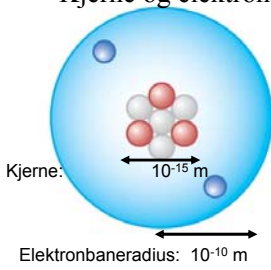
### Størrelsesforhold:

Kjerne og elektron:

Tennisball og ”tennisbane”:



Kjerne og elektron:



Elektrisk kraft mellom kjerne og elektron:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{e \cdot e}{r^2} = 20 \text{ nN}$$

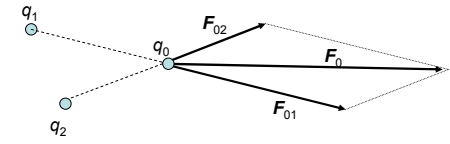
Dette er  $10^{20}$  ganger elektronets vekt!

Kjerne:  $10^{-15} \text{ m}$

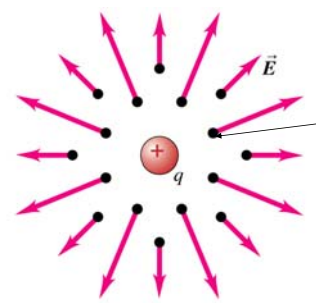
Elektronbaneradius:  $10^{-10} \text{ m}$

## Superposisjonsprinsippet

- Kraft fra flere ladninger kan summeres til totalkraft:
- $\mathbf{F}_0 = \mathbf{F}_{01} + \mathbf{F}_{02}$



Et ladet legeme lager et elektrisk felt i alle punkter i rommet!



Def:  $\mathbf{E}(x,y,z) = \mathbf{F}/q_0$

Vektorfelt:  
 $\mathbf{E}(x,y,z)$   
 $= [E_x(x,y,z), E_y(x,y,z), E_z(x,y,z)]$

Rundt punktladning:  $\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \cdot \hat{r}$  (21.7) = (Coul)

Hvor stort felt rundt 1 coulombs kule?

## Oppgave:

### Hvor stor er 1 coulomb ?

- Du og din kamerat/venninen holder hver ei kule med ladning  $+1,0 \text{ C}$ . Dere beveger dere mot hverandre fra uendelig i et ellers elektrisk nøytralt rom
- a) Hvor nærme kan dere komme hverandre?  
 Anta dere kan trykke med  $F_{\text{max}} = 500 \text{ N}$  hver.
- b) Hvor stort er det elektriske feltet i avstand  $4,2 \text{ km}$ ?

Enklest fra definisjon:  
 $E = F / q = 500 \text{ N} / 1 \text{ C} = 500 \text{ N/C}$

Fra formel (21.7):  
 $E = k q / r^2 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cdot 1,0 \text{ C} / (4,24 \text{ km})^2 = 500 \text{ N/C}$

Overslag ved  $E = 3,0 \text{ MN/C} = 30 \text{ kV/cm}$

### Kap. 21. Elektrisk ladning og felt

- Elektrisk ladning,  $q, Q$ . + eller - Enhet coulomb, C.
- Coulombs lov:  $\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \cdot \hat{r}$  (21.7)
- Superposisjonsprinsippet:  $\vec{E} = k \sum_n \frac{q_n}{r_{0n}^2} \hat{r}_{0n}$  (21.7B)

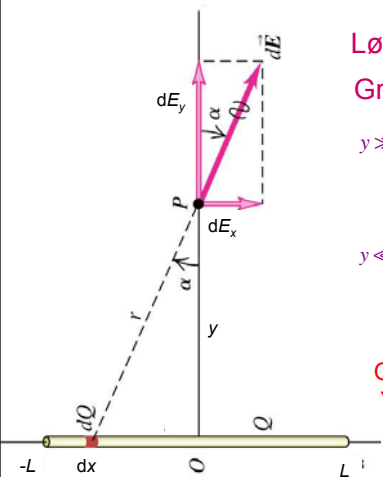
uendelig mange små ladninger  $dq$ :  $\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2} \cdot \hat{r}$  (21.7C)

Eksempler:

- 1)  $+q$   $+q$
- 2)  $-q$   $+q$  (dipol)
- 3) Linjeladning
- 4) Tynn ring
- 5) Flateladninger

**Integrasjon**

### Eks. 3 Linjeladning. = Y&F, Ex. 21.11 (mer i Øving 2)



**Løsning:**  $E_y = k \frac{\lambda}{y} \frac{2L}{\sqrt{L^2 + y^2}}$

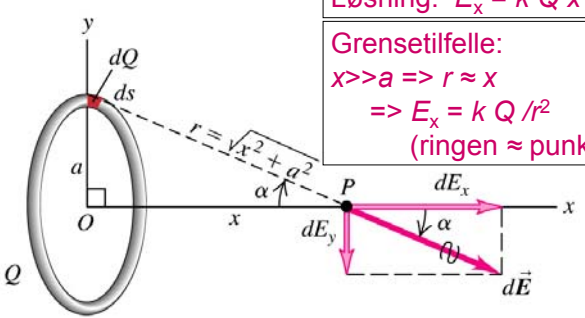
**Grensetilfeller:**

- $y \gg L \Rightarrow E_y = k \frac{2L\lambda}{y^2} = k \frac{Q}{y^2}$  (staven som et punkt)
- $y \ll L \Rightarrow E_y = k \frac{2\lambda}{y}$  (nærme)

**OBS:**  
Y&F motsatt aksestystem x-y

### Eks. 4: Ladet ring.

= Y&F: Ex. 21.10 (fig. 21.2)



**Løsning:**  $E_x = k Q x / r^3$  (21.8)

**Grensetilfelle:**  
 $x \gg a \Rightarrow r \approx x$   
 $\Rightarrow E_x = k Q / x^2$   
 (ringen  $\approx$  punkt)

### Integrasjonsmetoder i fysikken:

1. Infinitesimale størrelser ( $dq$ ) brukes i formler som gjelder punkter.
  - Utnytt symmetri
2. Setter sammen med sup.pos.prinsippet, der  $\sum \rightarrow \int$
3. Vanlige integrasjonsregler og derivasjonsregler, f.eks. substitusjon.

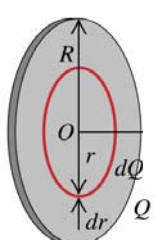
**Eks. 5: Ladet sirkulær plate.**  
 = Y&F: Ex. 21.12 (fig. 21.23)

= sum av mange tynne ringer =  $\int dE_x$ , med  $dE_x$  fra forrige eksempel

Løsning:  $E_x = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (R/x)^2}} \right)$  (21.11)

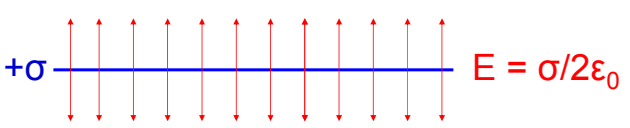
med  $\sigma = Q/\pi R^2$

Grensetilfeller:  
 $x \gg R \Rightarrow$  skiva  $\approx$  punkt  
 $x \ll R \Rightarrow E_x = \sigma/2\epsilon_0$



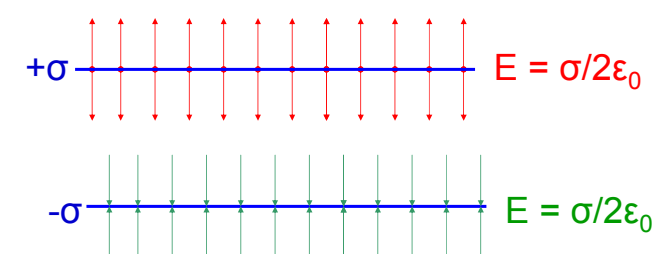
Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley

**Eks 6: Nærme en flateladning**



$E = \sigma/2\epsilon_0$

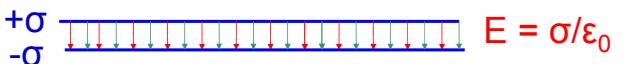
**Eks 7: To parallelle plater**



$E = \sigma/2\epsilon_0$

$E = \sigma/2\epsilon_0$

**Eks 7: To parallelle plater**  
 nærme (eller: uendelig store)



$E = \sigma/\epsilon_0$

**Resultat: E-felt kun mellom platene**

### Randeffekter for *ikke nærm*e plater

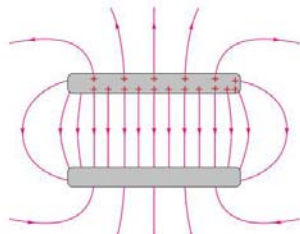
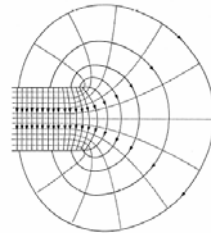
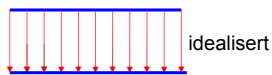


Fig. 22.21 a

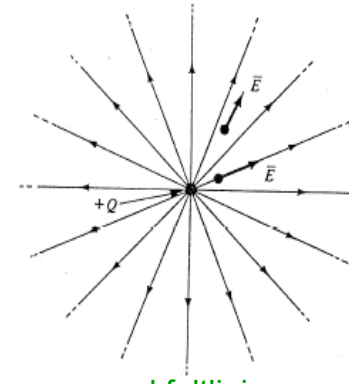


(mer detaljert)



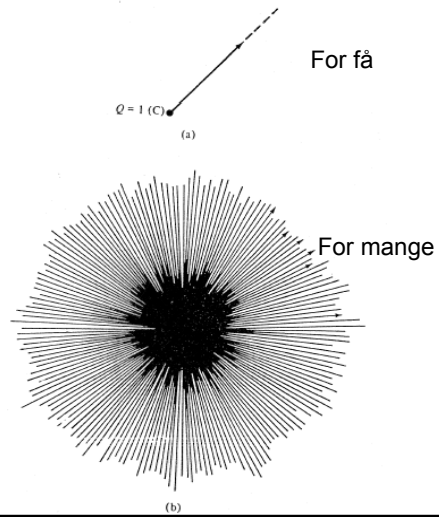
idealisert

### Visualisering elektrisk felt:

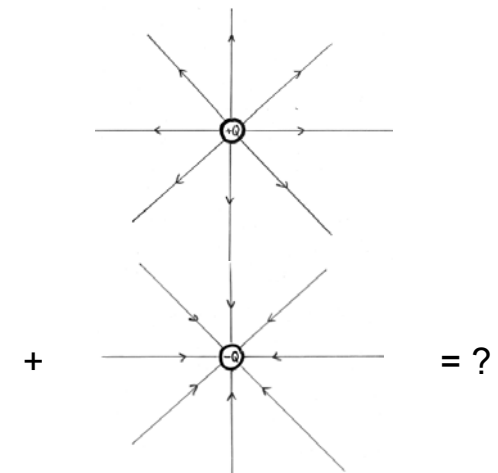


med feltlinjer

Velg et  
høvelig  
antall  
feltlinjer  
!



*E*-feltet kan  
finnes ved  
hjelp av  
feltlinjer:





$E$ -feltet kan finnes ved hjelp av feltlinjer:

OBS:  
 $E$  fra + til - ladning.  
 Dipolmoment  $p$  fra - til + ladning.

Enda et eksempel på  $E$ -feltet ved hjelp av feltlinjer:

### Kap. 21. Elektrisk ladning og felt

Elektrisk ladning,  $q, Q$ . + eller - Enhet coulomb, C.

Coulombs lov:  $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$

Superpos.prinsippet:  $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_n \frac{q_n q_0}{r_{0n}^2} \hat{r}_{0n}$  kont. ladn.fordeling  $\frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{ladning}} \frac{dq}{r^2} \hat{r}$

Elektrisk felt:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$   
def punktledning

Diverse eksempler, bl.a.: Elektrisk dipol med dipolmoment  $p = q a$ .

$E$  visualiseres ved **elektriske feltlinjer**, der  $E$  er tangent til feltlinjene.

Ladningstetthet:

	Symbol:	Infinesimal ladn:	} $\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$
Brukes kap 22	Rom-	$\rho$ (C/m <sup>3</sup> ) $dq = \rho dV$	
Brukt kap 21	Flate-	$\sigma$ (C/m <sup>2</sup> ) $dq = \sigma dA$	
	Linje-	$\lambda$ (C/m) $dq = \lambda dl$	

### Kap. 21. Elektrisk ladning og felt

Viktige eksempler  $\vec{E}$ :

Rundt punktladning:  $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$

Nærme lang stav:  $\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} \hat{r}$

Nærme stor plate:  $\vec{E} = \frac{1}{2\epsilon_0} \sigma \hat{n}$