

17 Magnetiska fält (magneetikenttät)

Lärandemål:

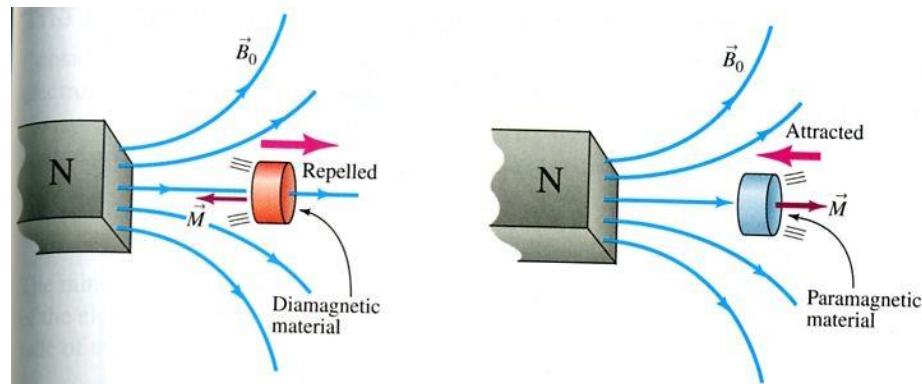
- Kunna beräkna 3D magnetiska fältet från en laddning i rörelse eller från elektrisk ström
- Kunna använda en kompass för att bestämma storleken och riktningen av strömmen i en ledning
- Kunna relatera det magnetiska fältet från en magnet till dess magnetiska dipolmoment



- ◆ Magneter attraherar eller repellerar varandra
- ◆ Livet på jorden skyddas från laddade rymdpartiklar av jordens magnetfält
- ◆ Fenomenet **norrsken** (Aurora Borealis) sker då energetiska protoner och elektroner kolliderar med jordens atmosfär vid polerna
- ◆ En kompass pekar nästan rakt mot nordpolen



- Vad är magnetfält?
- Hur påverkas kroppar av magnetfältet?
- Hur beräknar man magnetfältet?
- Finns motsvarande fenomen som polarisation för elfältet också för magnetfält?



Hur kan "magnetisk polarisation" ge repulsiv kraft?

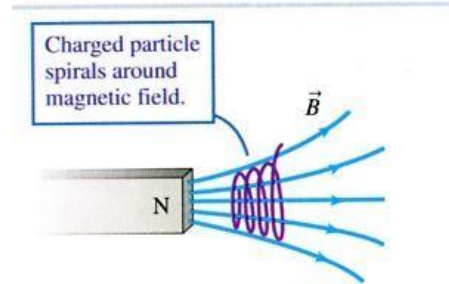
En laddad partikel i ett magnetfält känner kraften:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

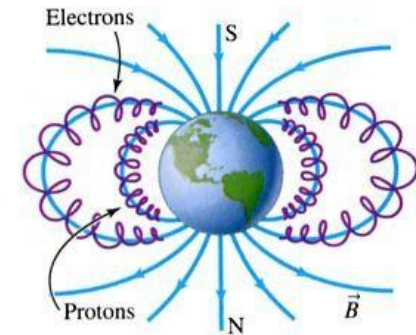
Laddade partiklar börjar röra sig i spiralbana i jordens magnetfält

→ Livet på jorden skyddas från laddade rymdpartiklar av jordens magnetfält

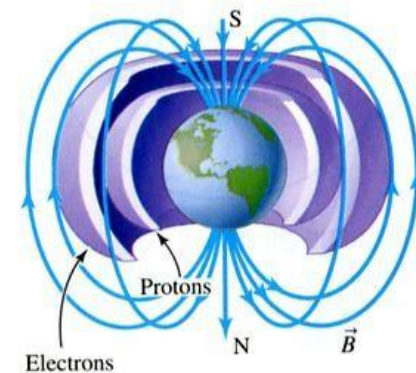
Laddad partikel i magnetfält



(a)



(b)



Norrsken uppstår då elektroner och protoner ($\sim 1-100$ keV) (från solen och rymden) börjar åka i spiralbanor längs med jordens magnetfält och träffar atmosfären nära nordpolen (på sydpolen kallas fenomenet *Aurora australis*)

Kollision med syre ger mest **grön** och **röd** ljus, kollision med kväve ger **röd** och **blå/violett** ljus



Aurora Borealis as seen over Canada at 11,000 m

Solens massa minskar med ca. 2 miljarder kg/s
($3 \cdot 10^{-14}$ MSun/yr) \rightarrow ger ca. $2 \cdot 10^{26}$ W

Aurinkotuuli tuo heliumia Kuuhun

Kuu muodostui, kun vieras planeetta neljä miljardia vuotta sitten iskeytyi Maahan ja Maan kuoresta irtosi isoja kappaleita. Osa materiaasta palasi Maahan, osa taas kasautui Kuuksi. Yhteisestä menneisyydestä huolimatta Kuussa on huomattavasti enemmän helium-3:a kuin Maassa.

KUULLA ei Maan tavoin ole suojaavaa magneettikenttää, joten aurinkotuulen hiukkaset pommittavat sitä jatkuvasti. Helium-3:a on siksi levinnyt kaikkialle Kuun pinnalle.

MAAN ulompi ydin koostuu nestemäisestä nikkelistä ja raudasta. Se luo Maan ympärille magneettikentän, joka taivuttaa aurinkotuulta niin, että se ei osu Maahan.

Aurinko

Aurinkotuulen taipuminen

Aurinkotuuli

Magneettinen akseli

Maa

Kuu

P Protoni

Helium-4

Helium-3

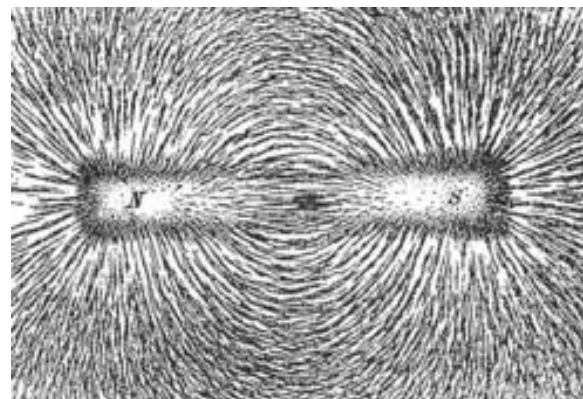
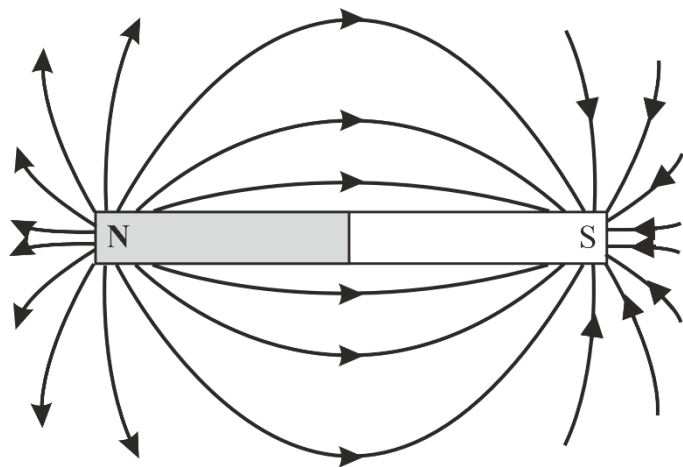
AURINKOTUULI on sähköisesti varautuneiden hiukkasten virta, joka syntyy Auringon pinnalla ja levittäytyy koko Aurinkokuntaan. Aurinkotuuli etenee 1–2 miljoonaa kilometriä tunnissa. Se koostuu pääasiassa protoneista ja heliumin isotoopista 4, mutta siinä on myös hieman helium-3:a.

Tieteen Kuvalehti 3/2



En magnets ändor kallas för **magnetiska poler, sydpol och nordpol**

Nordpol kallas den magnetiska polen som svänger sig mot norr (norrsökande pol) i jordens magnetfält



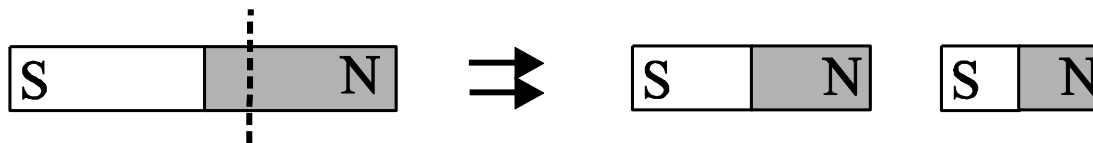
En **magnetisk dipol** kallas en magnet som har två poler

Lika poler repellerar varandra, olika poler attraherar varandra

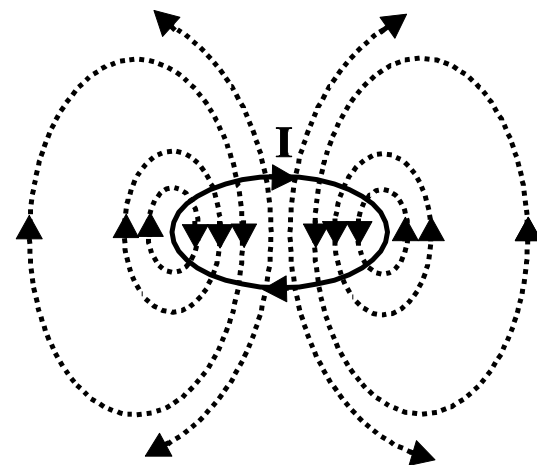
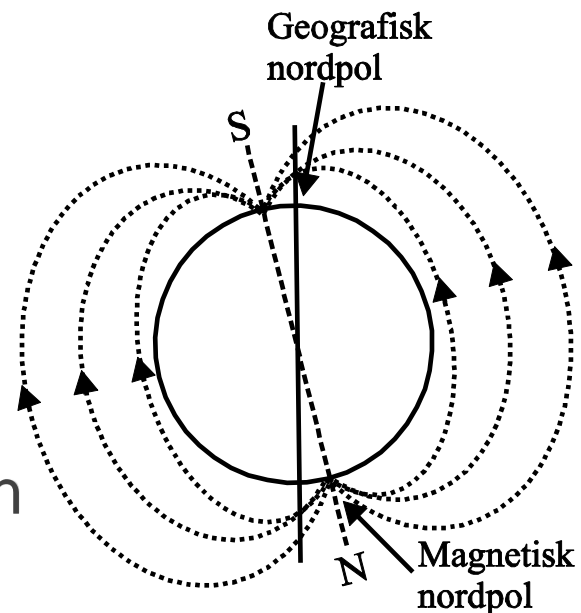


Hur kan man skilja den magnetiska kraften från den elektriska?

Ifall en stavmagnet bryts av, blir båda delarna en ny stavmagnet med syd- och nordpol



Jorden är en stor magnet, med den magnetiska sydpolen nära den geografiska nordpolen och vice versa. Det magnetiska fältet från jorden uppkommer från metalliska magmaströmmar inne i jorden. Under tidernas lopp har magmaströmmen varit olika, vilket också betyder att det magnetiska fältet för jorden har varierat.

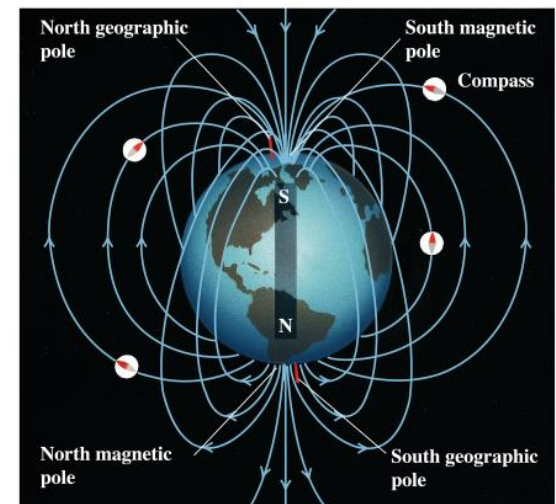
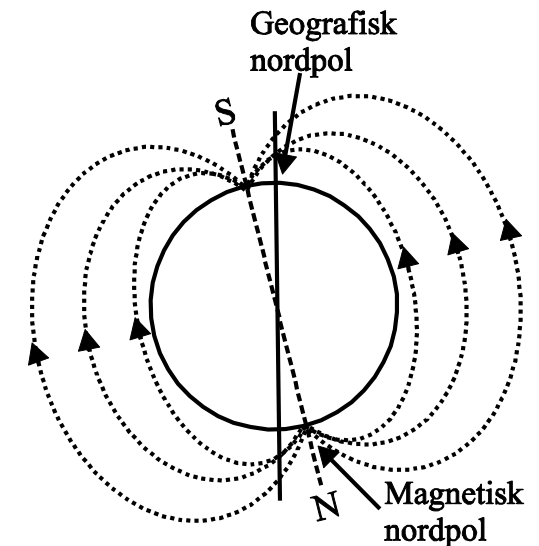


Det magnetiska fältet runt en strömslinga påminner om magnetfältet runt jorden.

Vinkeln mellan de magnetiska fältlinjerna och jordytans horisontella plan kallas för **inklination**

Magnetfältets inklination vid ekvatorn är 0° och vid polerna 90°

Man antar att vissa djur, exempelvis flyttfåglar kan känna, magnetfältets inklination och magnetfältets storlek. På detta sätt är det möjligt att bestämma både nord-sydlig och öst-västlig riktning



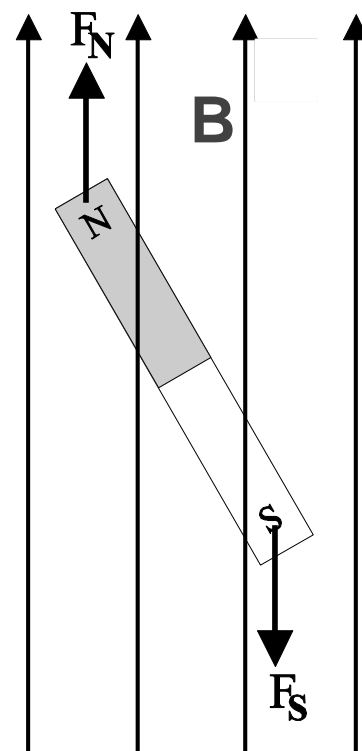
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Sätter man en stavmagnet att flyta på en träbit i vatten, så kommer magneten att rotera tills den är i syd-nord riktning

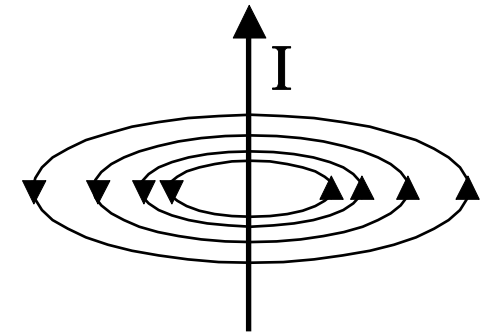
Runt magneten finns ett **magnetfält** som jorden åstadkommer

Nordpolen av magneten känner en kraft längs med magnetfältet och sydpolen mot magnetfältet.

Eftersom bara en vridkraft och ingen horisontell rörelse har observerats, är krafterna på syd- och nordpol lika stora.

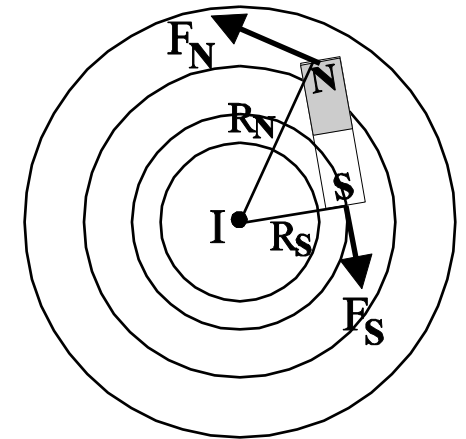


Runt en ledning med strömmen I , uppstår ett magnetiskt fält



En stavmagnet sätts på en roterande skiva

Kraftmomentet motsols: $|F_N|R_N$
medsols: $|F_S|R_S$



→ Skivan roterar i den riktning som har det största kraftmomentet

$$M \equiv |F_N|R_N - |F_S|R_S \equiv 0 \rightarrow |F_N|R_N \equiv |F_S|R_S$$

→ Magnetiska kraften runt en strömbärande ledning: $\propto \frac{I}{R}$



Kompassnålen pekar i det totala magnetiska fältets riktning

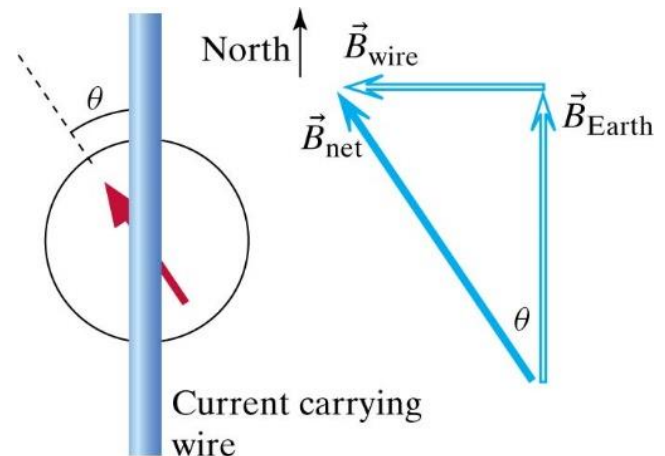


En strömledning med ström i syd-nord riktning ovanför en kompass ger ett magnetfält i västlig riktning vid kompassen.

Jordens magnetfält vid kompassen är $\sim 2 \times 10^{-5} \text{ T}$ mot norr.

Vad är magnetfältets storlek från strömledningen vid kompassen om kompassen pekar 10° mot nordväst?

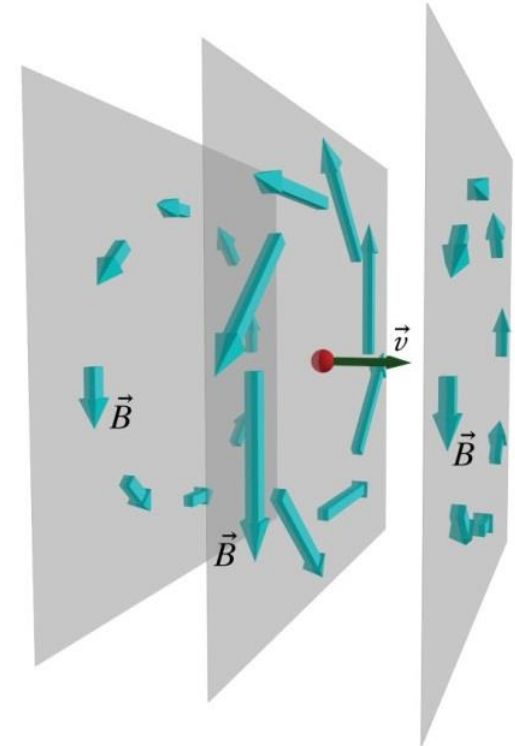
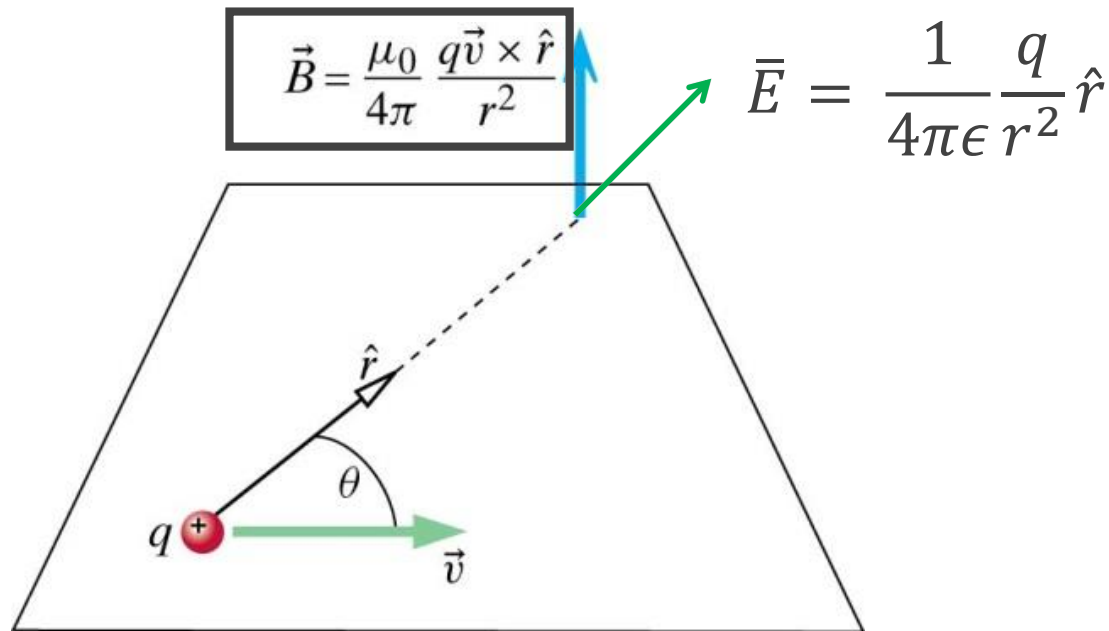
$$\tan(\theta) = \frac{B_{\text{ledning}}}{B_{\text{jorden}}}$$



$$\rightarrow B_{\text{ledning}} = \tan(\theta) B_{\text{jorden}} \approx \underline{\underline{3.5 \cdot 10^{-6} \text{ T}}}$$

Biot-Savarts lag

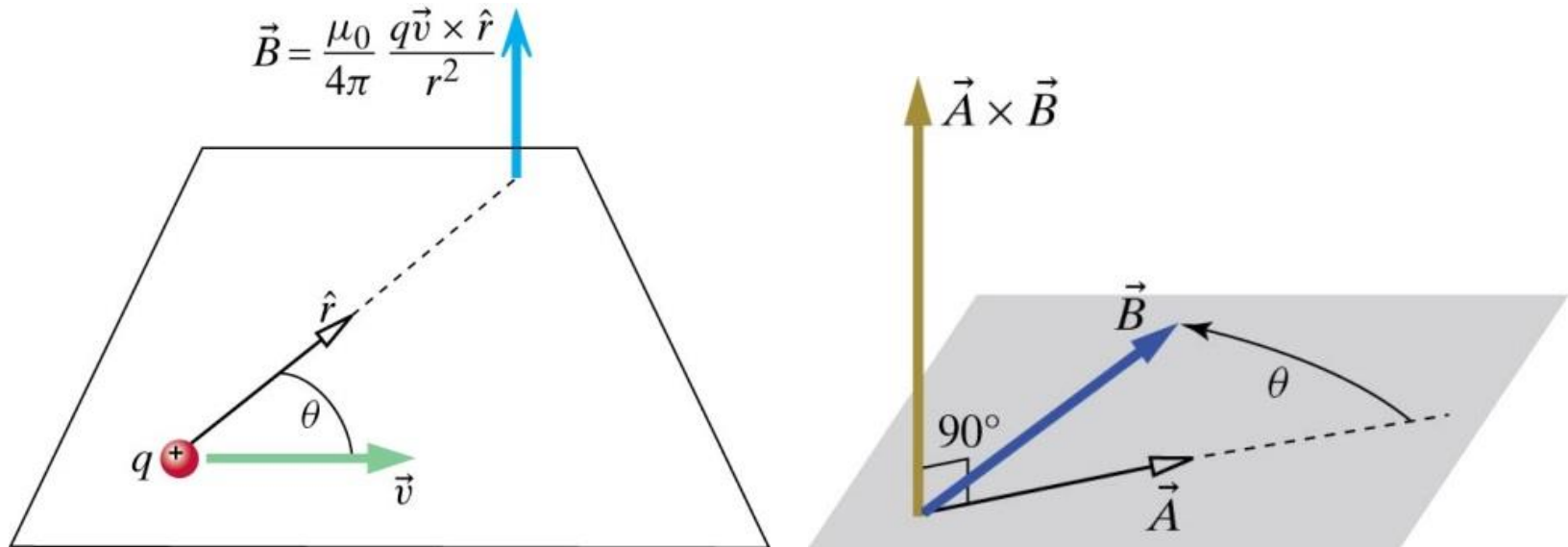
Magnetiskt fält $|\mathbf{B}| = \text{Tesla}$



$$\frac{\mu_0}{4\pi} \equiv 1 \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}^2}{\text{C} \cdot \text{m/s}}$$

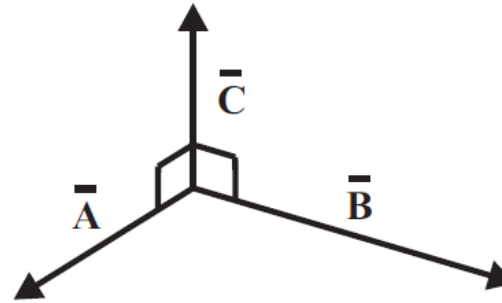


Biot-Savarts lag



Vektorprodukt eller kryssprodukt av vektorer

Kryssprodukten $\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$ är en vektor, där längden $|\vec{C}| = |\vec{A}| |\vec{B}| \sin(\alpha)$



$$\vec{A} \times \vec{B} = -\vec{B} \times \vec{A}$$

$$\hat{i} \times \hat{i} = 0$$

$$\hat{i} \times \hat{j} = \hat{k}$$

$$\hat{k} \times \hat{i} = \hat{j}$$

$$\hat{j} \times \hat{k} = \hat{i}$$

$$\vec{A} \times \vec{B} = (A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k}) \times (B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k})$$

$$= A_x B_x \hat{i} \times \hat{i} + A_x B_y \hat{i} \times \hat{j} + A_x B_z \hat{i} \times \hat{k} + \dots$$

$$= (A_y B_z - A_z B_y) \hat{i} + (A_z B_x - A_x B_z) \hat{j} + (A_x B_y - A_y B_x) \hat{k}$$



Relativistiska effekter

1) Laddning med $v = 0$ i stillastående koordinatsystem:



$$\bar{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

2) Samma laddning sett från ett koordinatsystem som rör på sig med hastigheten v relativt till laddningen i vila:

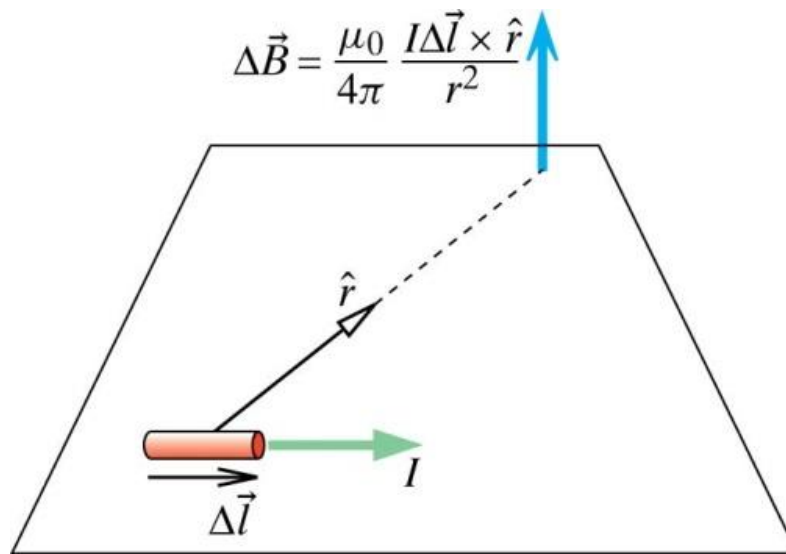


$$\bar{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad ?$$

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



Biot-Savarts lag för strömmar



$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \times \hat{r}}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \left(\frac{d\vec{l}}{dt} \right) \times \hat{r}}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}}$$

Beräkna magnetfältet i mitten av en cirkulär krets med N varv, radien R och strömmen I

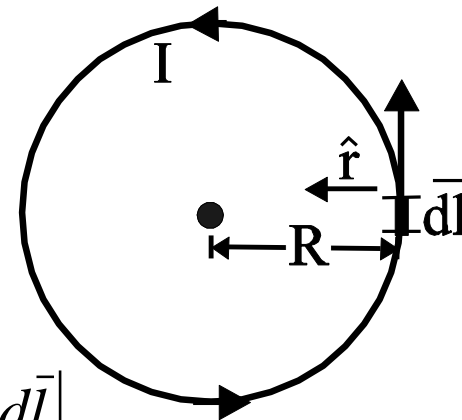
$$\overline{dB} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \hat{r}}{4\pi r^2}$$

Rotationssymmetrisk \rightarrow Biot-Savarts lag

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

$|r| = \text{konstant } (=R)$

$$|d\vec{l} \times \hat{r}| = |d\vec{l}| |\hat{r}| \sin(\theta) = |d\vec{l}| |\hat{r}| = |d\vec{l}|$$



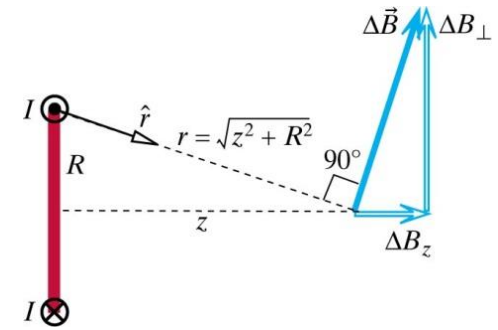
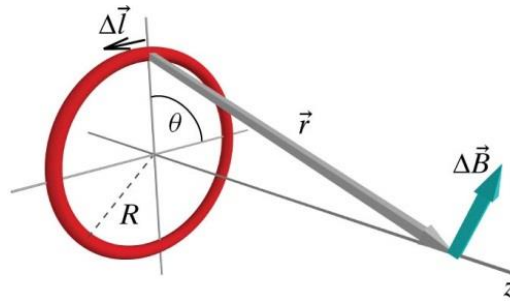
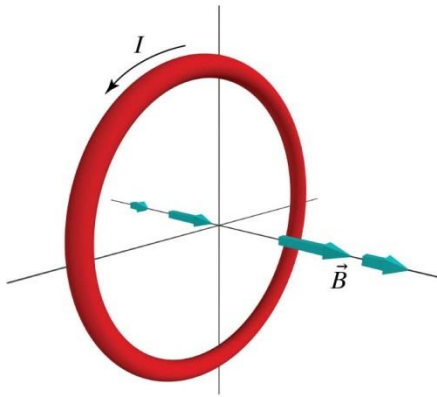
$$\rightarrow |\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{|d\vec{l} \times \hat{r}|}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

$$\rightarrow \boxed{|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I N}{2R}}$$

Riktning ut från cirkeln



Biot-Savarts lag för strömmar

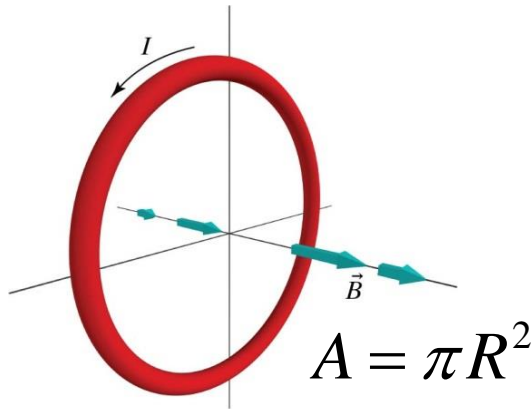


$$\Rightarrow |\bar{B}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

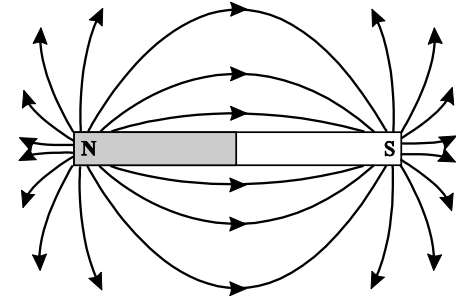
$$|\bar{B}|(z = 0) = \frac{\mu_0 I}{2R}$$



Magnetisk dipolmoment



$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}$$



$$|\vec{B}|(z \gg R) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu}{z^3}$$

Magnetisk dipolmoment:

$$\mu = IA$$

Arean behöver inte vara cirkulär!

Inga monopoler har hittats!



Magnetiska material

Varför attraherar magneter exempelvis nålar, men inte plast?

Varför har vissa ämnen magnetiska egenskaper, en järn spik kan fungera som kompassnål, men inte en aluminium spik?

Hur kan man förklara supraledarnas magnetiska egenskaper?

Hur fungerar hårddiskivorna i datorn? Vilka material lönar det sig att använda i elektriska motorer eller transformatorer?

Alla dessa egenskaper kommer från atomernas inre egenskaper, och hur dessa atomer formar molekyler och fasta ämnen



Magnetiska dipolmomentet för en atom

1. Elektronen kretsar kring atomkärnan
2. Elektronen är en magnetisk dipol, spin
3. protonerna och neutronerna är magnetiska dipoler, och kan också "ha banor" i kärnan

Anta att elektronen kretsar kring atomen som planeterna kring solen

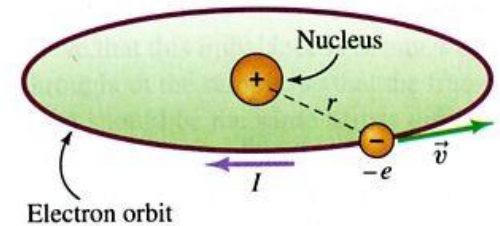
Strömmen kring atomkärnan blir:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{-e}{T} = \frac{-ev}{2\pi r}$$

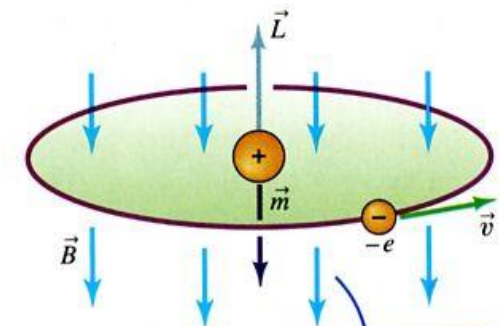
Perioden för rotationen:
 $T = 2\pi r/v$

Magnetiska dipolmomentet för atomen är:

$$\mu = I \cdot Area = I \cdot \pi r^2 = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{1}{2} evr$$



(a)



(b)



$$\mu = \frac{1}{2} e v r = \frac{e}{2m_e} m_e v r = \frac{e}{2m_e} L$$

där L är elektronens rörelsemängdsmoment

$$\bar{\mu} = g_L \bar{L} \quad \begin{array}{l} g_L \text{ kallas för} \\ \text{gyromagnetiska} \\ \text{koefficienten} \end{array} \quad g_L = -e / 2m_e$$

Allt detta **klassisk fysik**, som inte gäller vid atomistiska system → **Kvantmekanik**

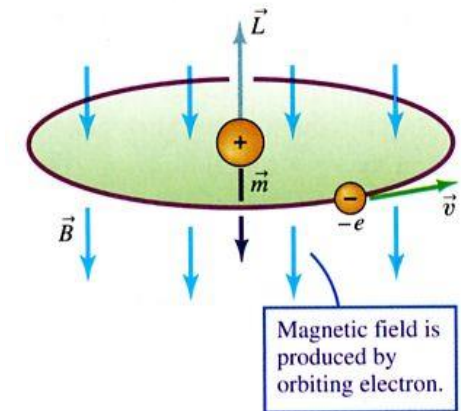
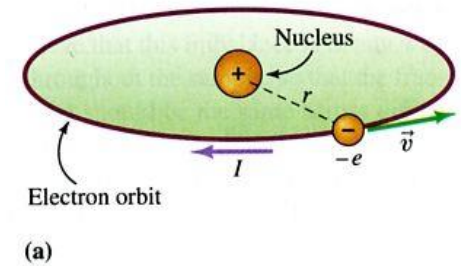
Kvantmekaniken säger att rörelsemängdsmomentet L (=mvr) inte kan få vilka värden som helst, utan måste vara ett heltal gånger

$$L = l\hbar \quad \longrightarrow \quad \mu = \frac{e\hbar}{2m_e} l = m_B l$$

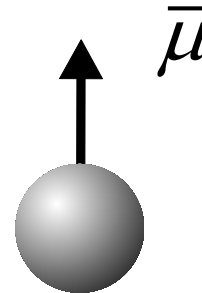
$$\hbar \approx 1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

m_B kallas **Bohr magneton**

$$m_B \approx 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$



Förutom magnetisk dipolmoment som elektronens bana kring atomen orsakar, har en elektron också **inre magnetisk dipolmoment, elektronen är en liten magnet!**



Magnetiska material

Magnetiska egenskaper kommer från atomernas inre egenskaper, och hur dessa atomer formar molekyler och fasta ämnen

Materialens magnetiska egenskaper indelas ofta i följande tre grupper

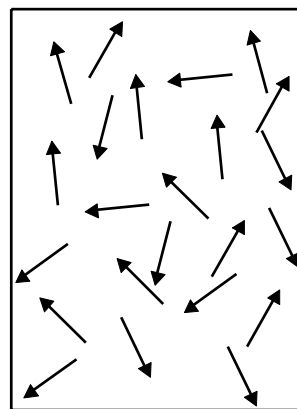
1. Paramagnetiska
2. Diamagnetiska
3. Ferromagnetiska



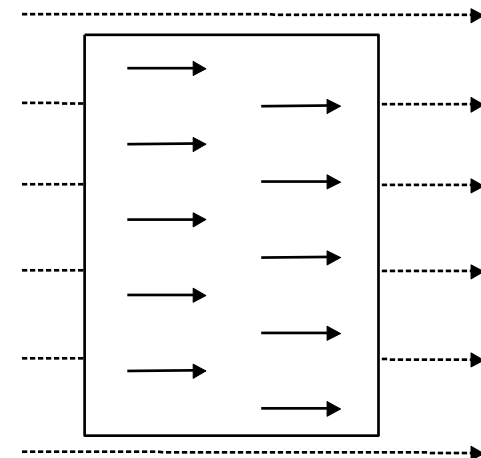
Paramagnetiska material

Paramagnetiska material har permanenta magnetiska dipoler (Ex: aluminium)

$$B_{\text{inne}} \equiv B_{\text{yttre}} + B_{\text{magnetiska dipolerna}}$$



$B = 0$



$B > 0$

$$B_{\text{magnetiskadipolerna}} = \chi_m B_{\text{yttre}}$$

χ_m Materialets magnetiska susceptibilitet

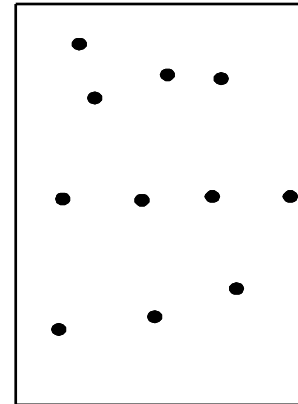


$$B_{\text{inne}} = B_{\text{yttre}} + \chi_m B_{\text{yttre}} = (1 + \chi_m) B_{\text{yttre}}$$

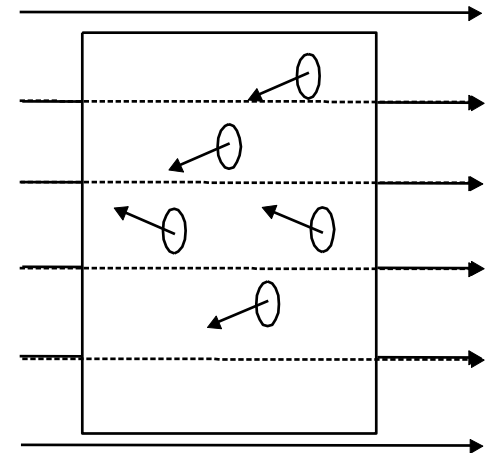


Diamagnetiska material

Inga permanenta magnetiska dipoler
(Ex: H₂O, Cu, Ag)



$B = 0$



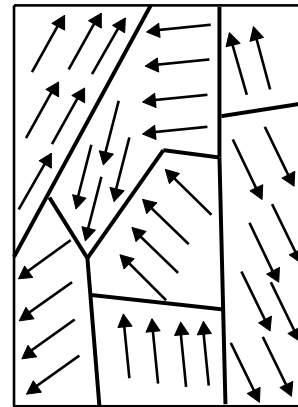
$B > 0$

De inducerade magnetiska dipolerna är riktade emot det yttre magnetfältet, magnetfältet försvagas i diamagnetiska material.

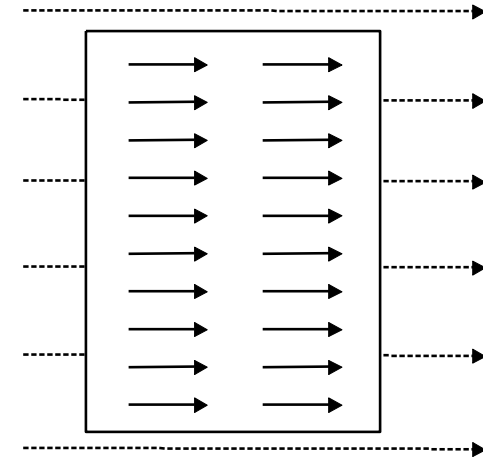
$$B_{inre} = (1 + \chi_m) B_{yttre} \quad \chi_m < 0$$

Ferromagnetiska material

Då ferromagnetiska material sätts i magnetfält, förblir de permanenta magneter fastän det yttre magnetfältet tas bort (Ex: Fe, Ni, Co)

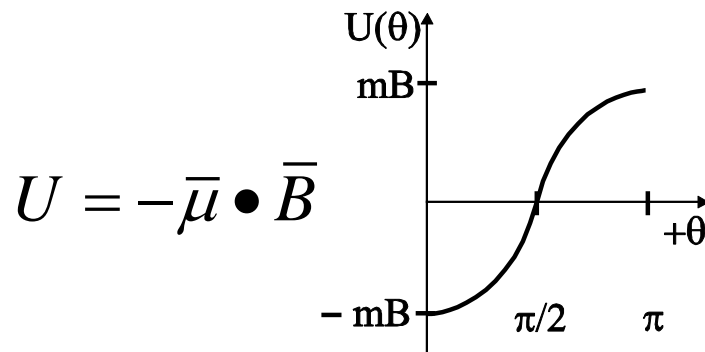


$B = 0$



$B > 0$

Magnetfältet från de närliggande permanenta magnetiska dipolerna påverkar varandra



$$B_{inne} = (1 + \chi_m) B_{yttre} \approx \chi_m B_{yttre}$$

$$\chi_m \approx 1000$$

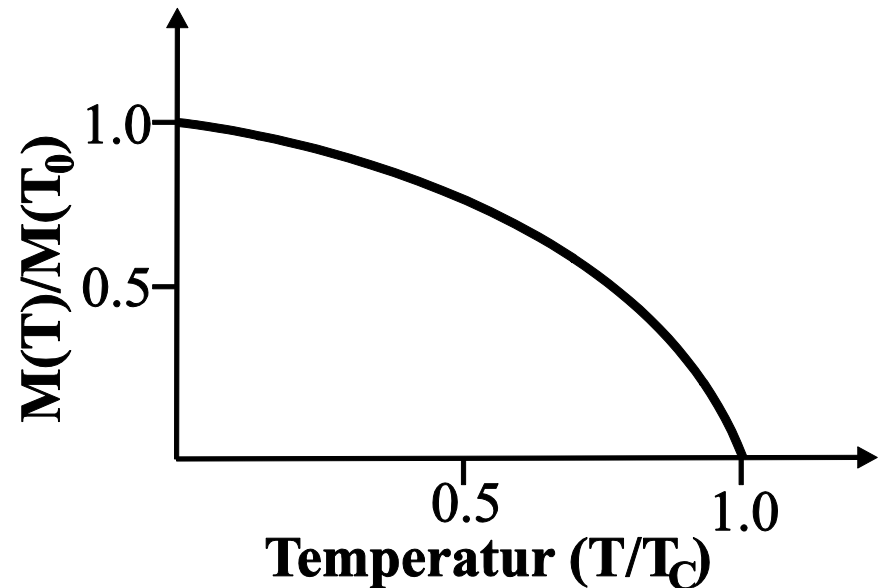
Ferromagnetiska material: Curie temperatur

Ifall en ferromagnets temperatur ökar för mycket, kommer värmerörelsen att oordna dipolmomentena. →
Ferromagneten har blivit en paramagnet

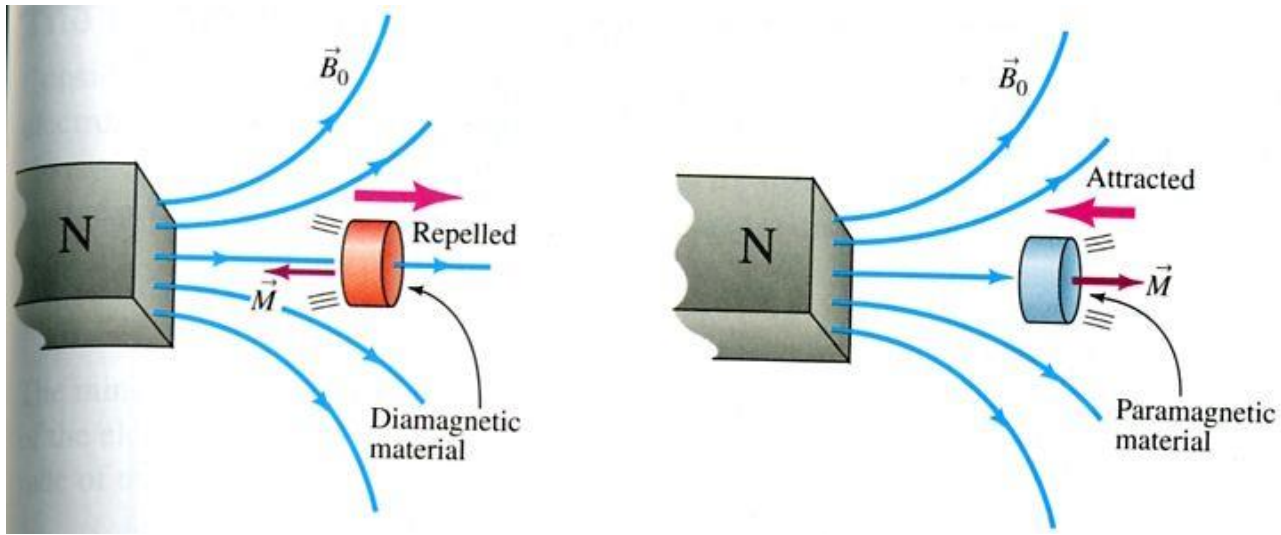
Temperaturen där de ferromagnetiska egenskaperna förloras, kallas för **Curie temperaturen**

Vid låga temperaturer får paramagnetiska material ferromagnetiska egenskaper

Curie temperaturen för järn ~ 1043 K



Magnetiska material

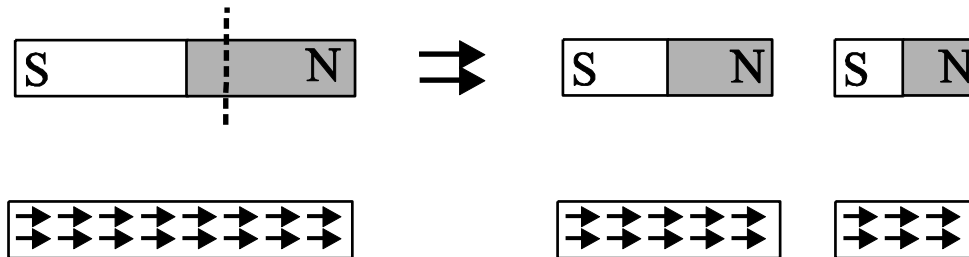


Magnetiska kraften på valda material nära en stark magnet

Material	Kraften på materialet (per massa)
Koppar (Diamagn.)	- 1.3×10^{-3}
Natrium (Paramagn.)	+ 10×10^{-3}
Järn (Ferromagn.)	+ 20

Magnetiska material

Nu förstår vi varför då en stavmagnet bryts av, blir de båda delarna en ny stavmagnet med syd- och nordpol



Ifall man bryter en stavmagnet på mitten, blir magnetiseringen på de två bitarna större än, mindre än eller lika med magnetiseringen på den ursprungliga magneten?



Hur påverkas material av yttre magnetfält och vilka olika magnetiska material finns det?

Man sätter två stavar mellan en stark magnetisk syd- och nordpol, se figuren. Ifall en av stavarna är paramagnetisk och den andra diamagnetisk, kommer stavarna att repellera eller attrahera varandra, eller blir det ingen kraft mellan stavarna? (motivera ditt svar)
påverkas=vaikuttaa, stav=sauva

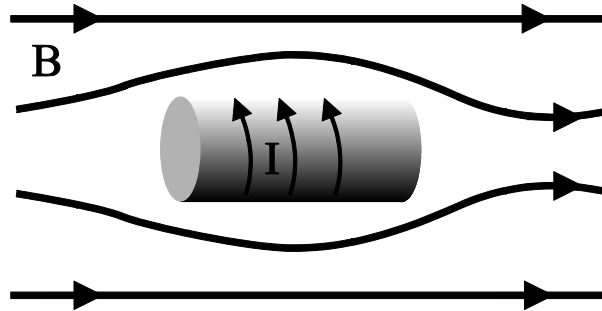


Magnetism och supraledning

Ström kan gå i en supraledare utan någon resistans alls!!

→ Magnetfältet inne i en supraledare är noll

Ytströmmar induceras som motverkar det yttre magnetfältet



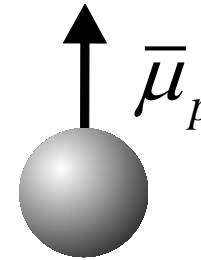
$$B_{inre} = (1 + \chi_m) B_{yttre} = 0 \quad \chi_m = -1$$

En intressant tillämpning av supraledande magneter är **MRI**
Magnetic Resonance Imaging

Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

En proton har inre magnetisk dipolmoment m_p och inre rörelsemängdsmoment S (spin)

$$\bar{\mu}_p = g_p \bar{S} \quad g_p \text{ gyromagnetiska koefficienten}$$



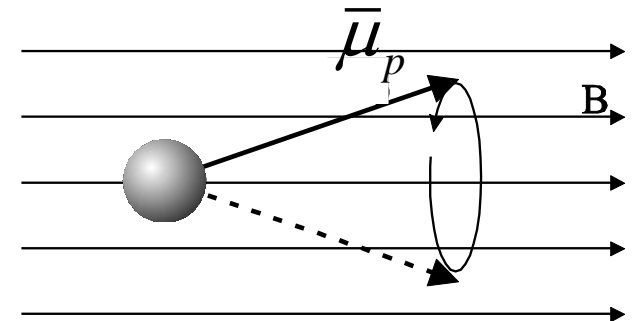
Vad sker med protonen i ett yttre magnetfält?

Den känner ett vridmoment: $\bar{\tau} = \bar{\mu}_p \times \bar{B}$

$$\bar{\tau} = \frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{d\bar{S}}{dt} \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{g_p} \frac{d\bar{\mu}_p}{dt} = \bar{\mu}_p \times \bar{B}$$

Vars lösning ges klassiskt av en precession av μ_p runt riktningen av magnetfältet, med vinkelhastigheten:

$$\omega_0 = g_p \mathbf{B}$$



Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

Kvantmekaniken ger att bara två precesserande riktningar är möjliga: **spin upp**, **spin ner**

Energin för magnetiska momentet i ett magnetfält

$$U = -\bar{\mu}_p \cdot \bar{B}$$

Nu låter man ett oscillerande magnetfält passera atomen. Vanligen sker ingenting, men ifall vinkelfrekvensen för det oscillerande magnetfältet är exakt $\omega_0 = \mathbf{g}_p \mathbf{B}$ (resonans) kan det magnetiska dipolmomentet byta riktning. Magnetfältet ger eller absorberar energimängden: $2\mu_p B$

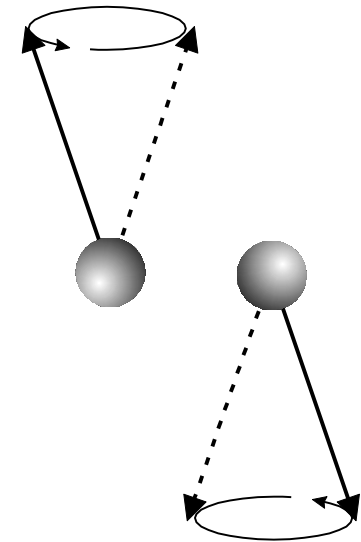
Kärnmagnetisk resonans



Kan till exempel användas för att bestämma en atoms gyromagnetiska koefficient

Proton: $g_p \approx 2.79$

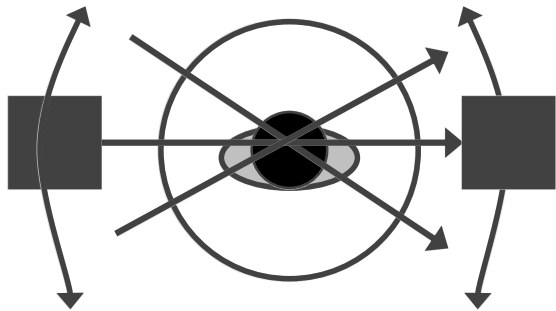
Neutron: $g_n \approx -1.91$



Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

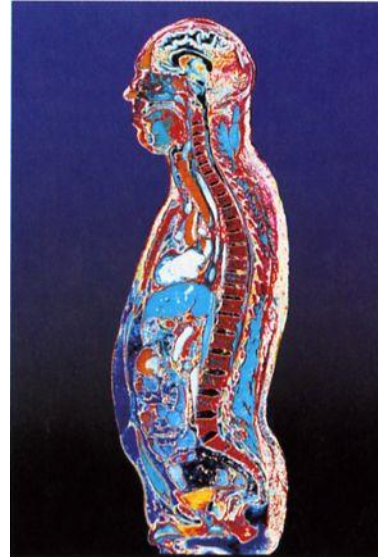
Annan metod att utnyttja NMR: **Magnetic Resonance Imaging (MRI)**

Kroppens olika delar består av olika mängd väte. Fett innehåller mycket väte och musklerna lite väte. Ben innehåller nästan inget väte alls, och syns därför svagt.

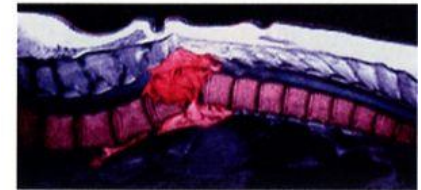


Aluminiumplatta faller i magnetfält

Syrgastub i Magnetfält



(a)



(b)

På bilden (b) syns en tumör mellan kotorna

Lärandemål:

- Kunna beräkna 3D magnetiska fältet från en laddning i rörelse eller från elektrisk ström
- Kunna använda en kompass för att bestämma storleken och riktningen av strömmen i en ledning
- Kunna relatera det magnetiska fältet från en magnet till dess magnetiska dipolmoment

