

# Własności magnetyczne materii

Ośrodek materialny wypełniający solenoid (lub cewkę) wpływa na wartość indukcji magnetycznej, strumienia, a także współczynnika indukcji własnej solenoidu.

Trzy rodzaje materiałów: **diamagnetyki**, **paramagnetyki** i **magnetyki silne** (ferromagnetyki, ferrimagnetyki i antyferromagnetyki)

Diamagnetyki osłabiają pole magnetyczne solenoidu o czynnik rzędu  $10^{-5} \div 10^{-6}$

$$\text{dla bizmutu } B = \mu_r B_0 = 0,99999865 B_0$$

Paramagnetyki wzmacniają pole magnetyczne solenoidu o czynnik podobnego rzędu

$$\text{dla aluminium } B = \mu_r B_0 = 1,00000065 B_0$$

Współczynnik  $\mu_r$  nazywamy **względną przenikalnością magnetyczną** materiału

Współczynnik  $\chi = \mu_r - 1$  nazywamy **podatnością magnetyczną** materiału:

dla diamagnetyków jest ujemna (w miarę stała w zależności od  $B_0$ )

dla paramagnetyków jest dodatnia (w miarę stała w zależności od  $B_0$ )

dla ferromagnetyków jest dodatnia i może osiągać duże wartości (zmienia się nieliniowo w zależności od  $B_0$ )

# Skąd biorą się własności magnetyczne materii

## Orbitalny moment magnetyczny.

Z orbitalnym momentem pędu elektronu wiąże się dipolowy moment magnetyczny. Natężenie prądu od jednego elektronu:

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

$e$  - ładunek elektronu

$v$  - prędkość elektronu

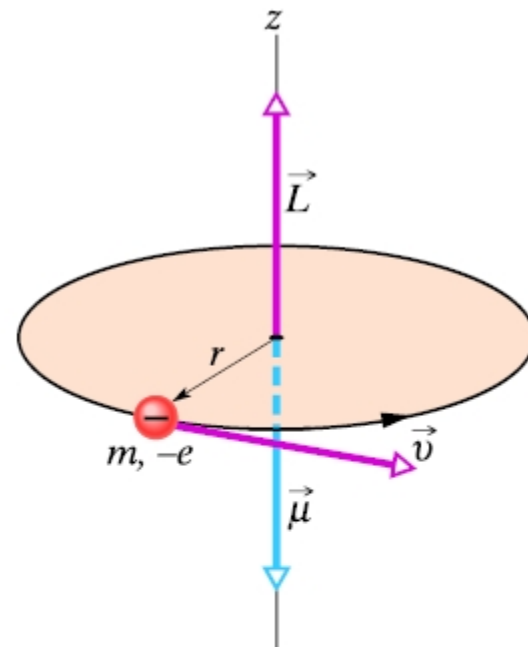
$r$  - promień orbity elektronu

Moment magnetyczny:

$$\mu_{orb} = I A = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{e}{2m} m v r$$

$$\vec{\mu}_{orb} = - \frac{e}{2m} \vec{L}_{orb}$$

ładunek elektronu jest ujemny



Rys. 41.3. Klasyczny model przedstawiający cząstkę o masie  $m$  i ładunku  $-e$  poruszającą się z prędkością  $v$  po okręgu o promieniu  $r$ . Poruszająca się cząstka ma moment pędu  $\vec{L}$  równy  $\vec{r} \times \vec{p}$ , gdzie  $\vec{p}$  jest pędem  $m\vec{v}$ . Ruch cząstki jest równoważny pętli z prądem, z którą związany jest moment magnetyczny  $\vec{\mu}$  skierowany przeciwnie do momentu pędu  $\vec{L}$

# Skąd biorą się własności magnetyczne materii

## Spinowy moment magnetyczny.

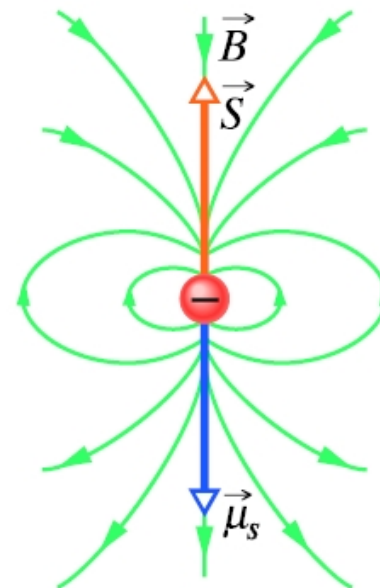
Elektron posiada „własny” moment pędu – spin  $\vec{S}$ . Dlatego ma własny moment magnetyczny spinowy:

$$\vec{\mu}_{spin} = - \frac{e}{m} \vec{S}$$

O własnościach magnetycznych całego atomu decyduje **suma wektorowa wszystkich momentów magnetycznych wszystkich elektronów**.

Przeważnie większość tych momentów „znosi się” w przypadku elektronów wewnętrznych atomu – elektrony są „sparowane” na całkowicie wypełnionych powłokach elektronowych.

Tylko zewnętrzne elektrony mogą być „niesparowane” i dawać wkład do niezerowego momentu magnetycznego atomu.



Rys. 32.6. Spin  $\vec{S}$ , spinowy moment magnetyczny  $\vec{\mu}_s$  i wektor indukcji pola  $\vec{B}$  dipola magnetycznego dla elektronu przedstawionego jako kulka o rozmiarach mikroskopowych

# Diamagnetyzm

Jeśli momenty magnetyczne wszystkich elektronów kompensują się, wówczas materiał wykazuje własności diamagnetyczne.

Dwa elektrony poruszając się po takiej samej orbicie, ale w przeciwnych kierunkach. W obecności zewnętrznego pola magnetycznego jeden elektron „zwalnia” drugi „przyspiesza”.

Siła Coulomba  $F_C$  stanowi siłę dośrodkową utrzymującą elektron na orbicie.

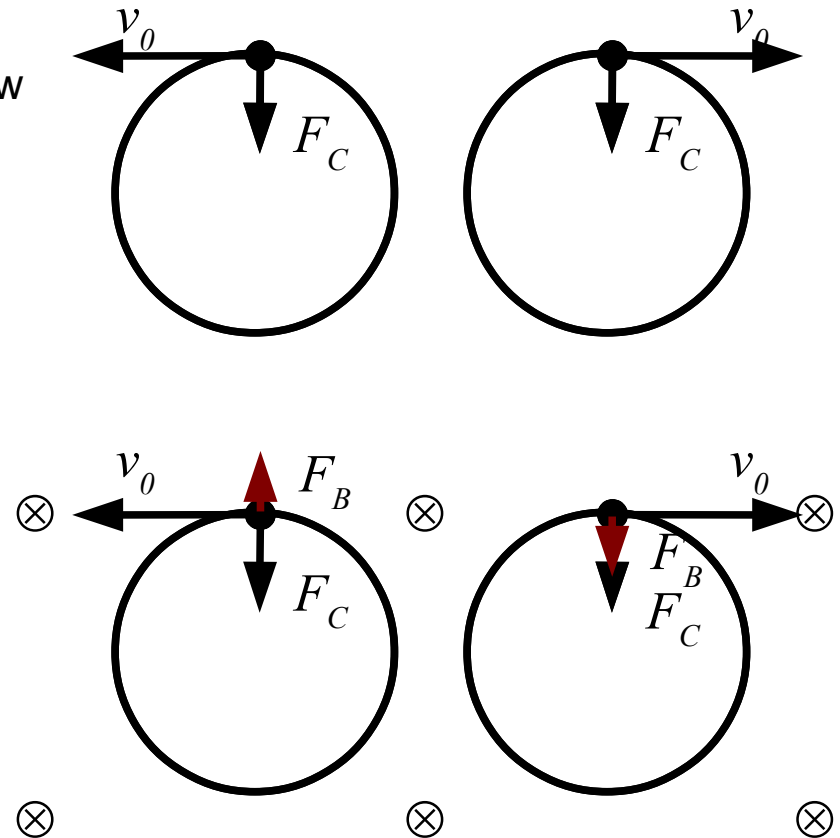
$$F_C = m \omega_0^2 r$$

$\omega_0$  jest prędkością kątową,  $m$  masą elektronu,  $r$  promieniem orbity.

Gdy umieścimy atom w polu magnetycznym, pojawi się siła Lorentza

$$F_B = e(\omega r) B$$

Która dla orbity lewej odejmuje się od siły  $F_C$  a dla orbity prawej dodaje się do niej.



# Diamagnetyzm

Elektrony muszą zmienić swoją prędkość aby utrzymać się na orbicie – zmieniają moment pędu – zmieniają swoje momenty magnetyczne.

$$F_C \pm F_B = m \omega^2 r$$

$$m \omega_0^2 r \pm e \omega r B = m \omega^2 r$$

Jeśli podstawimy  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$  i założymy, że  $\Delta\omega \ll \omega_0$  to można będzie napisać:

$$\omega_0^2 - \omega^2 \pm \frac{eB}{m} \omega = 0$$

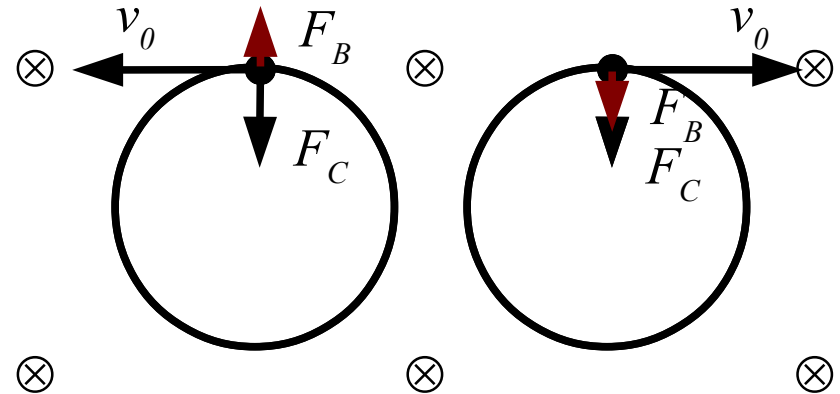
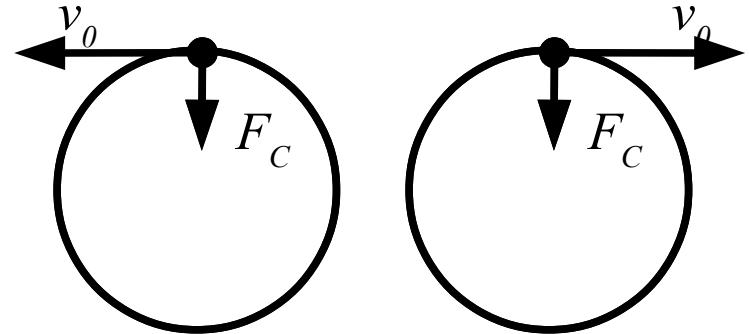
Uwzględniając założenie

$$\omega_0^2 - \omega^2 = (\omega_0 + \omega)(\omega_0 - \omega) \simeq -2\omega \Delta\omega$$

otrzymujemy:

$$\Delta\omega = \frac{\pm eB}{2m}$$

Elektron po lewej orbicie zwalnia o  $\Delta\omega$ , elektron po prawej orbicie przyspiesza o  $\Delta\omega$ .  
Moment magnetyczny dla elektronu po lewej orbicie zmaleje o  $\Delta\mu$ , moment magnetyczny dla elektronu po prawej orbicie wzrośnie o  $\Delta\mu$ .



Od jednej takiej pary elektronów wytworzy się moment magnetyczny równy :

$$2\Delta\mu$$

przeciwnie skierowany do zewnętrznego pola (osłabienie)

# Paramagnetyzm

Model paramagnetyzmu zakłada, że paramagnetyczne atomy mają własny moment magnetyczny i zewnętrzne pole magnetyczne dąży do uporządkowania kierunków tych atomowych dipoli magnetycznych, wbrew przeciwdziałaniu pochodzącemu od bezładnego ruchu cieplnego.

Porządkowanie momentów magnetycznych prowadzi do słabego „magnesowania się” materiału.

Namagnesowanie wyraża się wektorem:

$$\vec{M} = \frac{\textit{suma momentów dipolowych}}{\textit{objętość}}$$

Całkowity wektor indukcji pola magnetycznego w paramagnetyku (i diamagnetyku):

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

tutaj symbol ten oznacza przenikalność magnetyczną próżni

zew. pole mag.

Pole magnetyczne w materiałach często wygodniej jest opisywać za pomocą **wektora natężenia pola magnetycznego**:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

co prowadzi do wyrażenia:

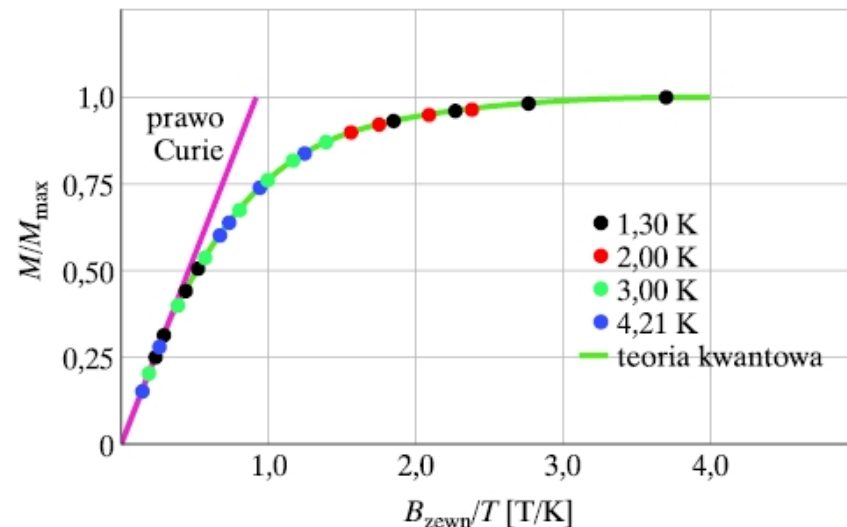
$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

# Paramagnetyzm

Wektor namagnesowania, podobnie jak dla dielektryków polarnych, wg teorii Langevina i P. Curie :

$$M = C \frac{B_0}{T}$$

gdzie  $C$  – stała wartość,  $B_0$  pole magnetyczne zewnętrzne,  $T$  temperatura w skali bezwzględnej



Rys. 32.9. Krzywa magnesowania dla siarczanu chromowo-potasowego (soli paramagnetycznej). Na wykresie przedstawiono stosunek namagnesowania  $M$  soli do maksymalnego możliwego do osiągnięcia namagnesowania  $M_{\max}$ , jako funkcję stosunku indukcji magnetycznej  $B_{\text{zewn}}$  przyłożonego pola do temperatury  $T$ . Dane po lewej stronie wykresu są zgodne z prawem Curie; wszystkie dane są zgodne z teorią kwantową (z pracy W. E. Henry'ego)

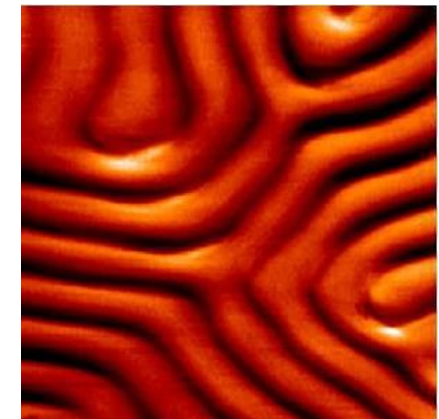
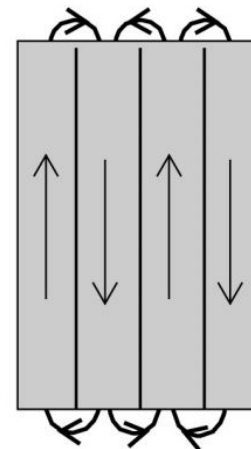
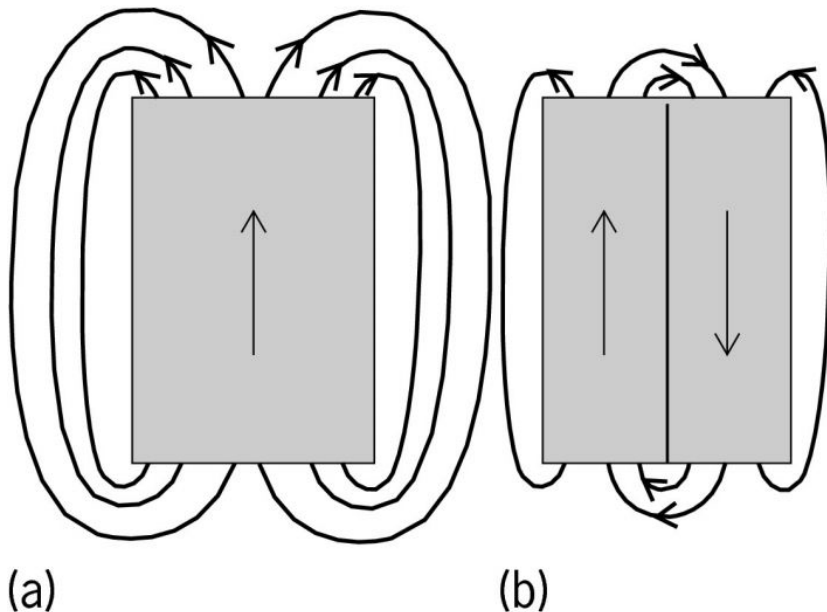
# Ferromagnetyzm

**Ferromagnetyzm** jest cechą ciała stałego – cechą zbioru wielkiej liczby atomów szczególnego rodzaju w uporządkowanym ułożeniu wzajemnym

Spośród pierwiastków w postaci ciał stałych ferromagnetykami są Fe, Co, Ni, Gd i Dy. A także wiele stopów, związków intermetalicznych i związków chemicznych

Gdy atomy są regularnie ułożone w sieci krystalicznej, dochodzi spontanicznie do **sprzężenia atomowych momentów magnetycznych** – efekt ten tłumaczy dopiero fizyka kwantowa

Poniżej pewnej temperatury (temperatura Curie) sprzężenie to powoduje równoległe ustawienie wszystkich momentów atomowych w pewnych obszarach zwanych **domenami**.



Magnetic force microscopy (MFM)

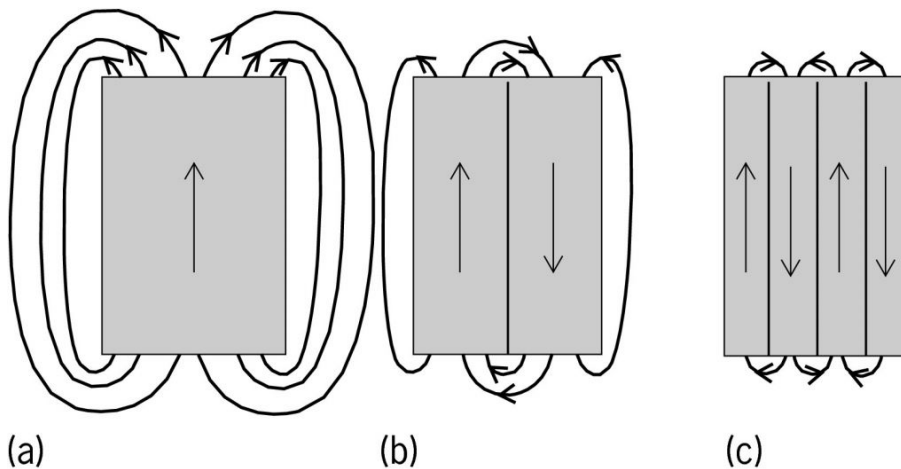


# Ferromagnetyzm

Powyżej temperatury Curie drgania sieci są silniejsze od sił porządkujących i powodują zanik uporządkowania domenowego. Ferromagnetyk staje się wówczas paramagnetykiem.

W stanie równowagi orientacja domen (bez zewnętrznego pola magnetycznego) jest taka, aby zapewnić minimum energii - wtedy pole magnetyczne wokół jest minimalne.

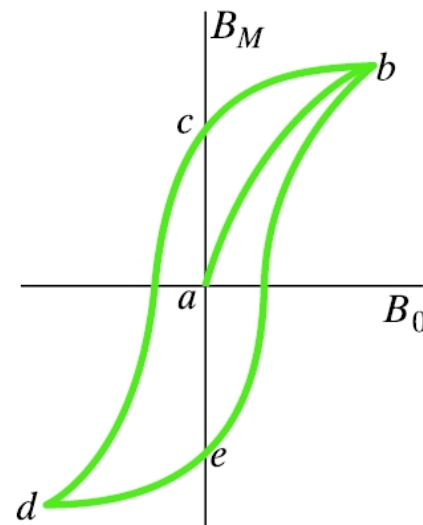
Namagnesowanie sąsiadujących domen ma taki kierunek, któremu odpowiada minimalne pole na zewnątrz próbki



Gdy do ferromagnetyka przykładamy pole magnetyczne, domeny „ustawiają się” wzdłuż linii pola, zwiększając namagnesowanie materiału.

Przy późniejszym zmniejszaniu pola mag. namagnesowanie wykazuje *pozostałość magnetyczną* (remanencję) – domeny pozostają częściowo uporządkowane - ferromagnetyk staje się magnesem.

Namagnesowanie zależy o historii próbki, mniej od wartości zew. pola mag.

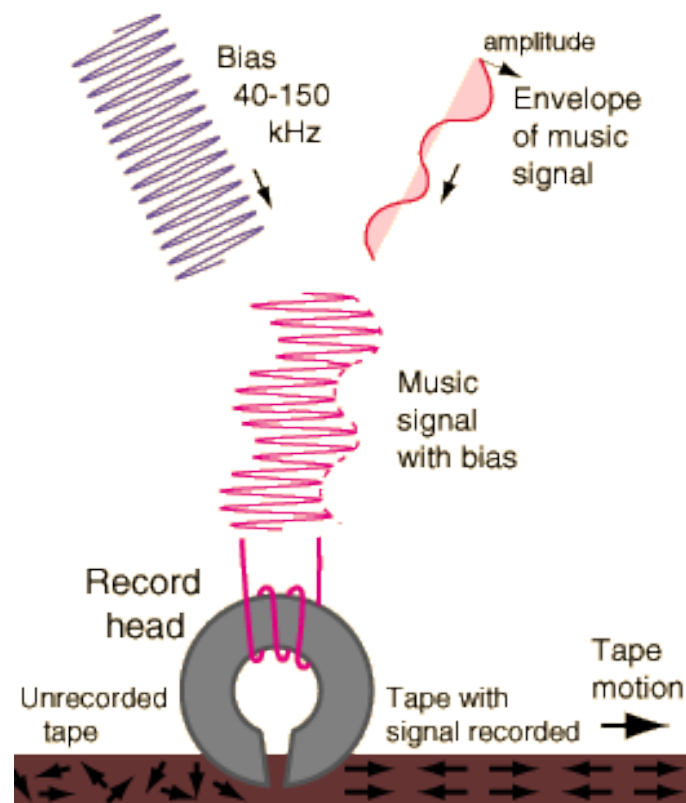
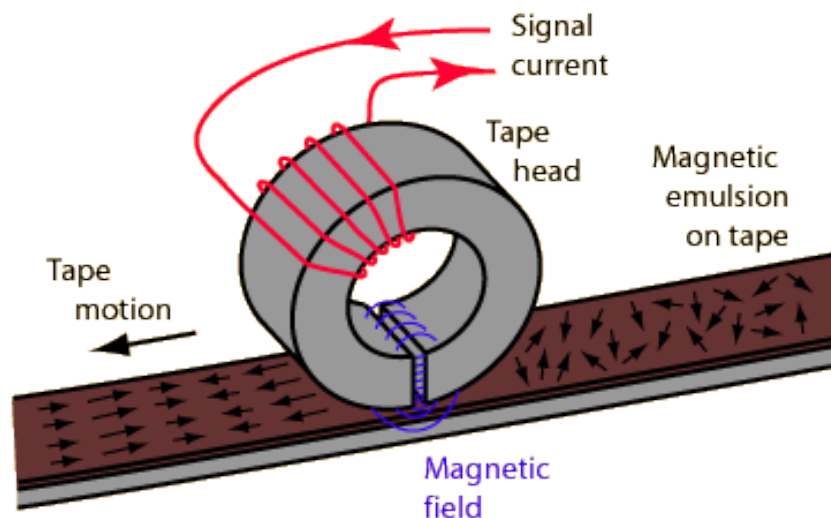


Rys. 32.13. Krzywa magnesowania (ab) dla próbki ferromagnetyka i zwią-

# Zapis informacji na nośnikach magnetycznych

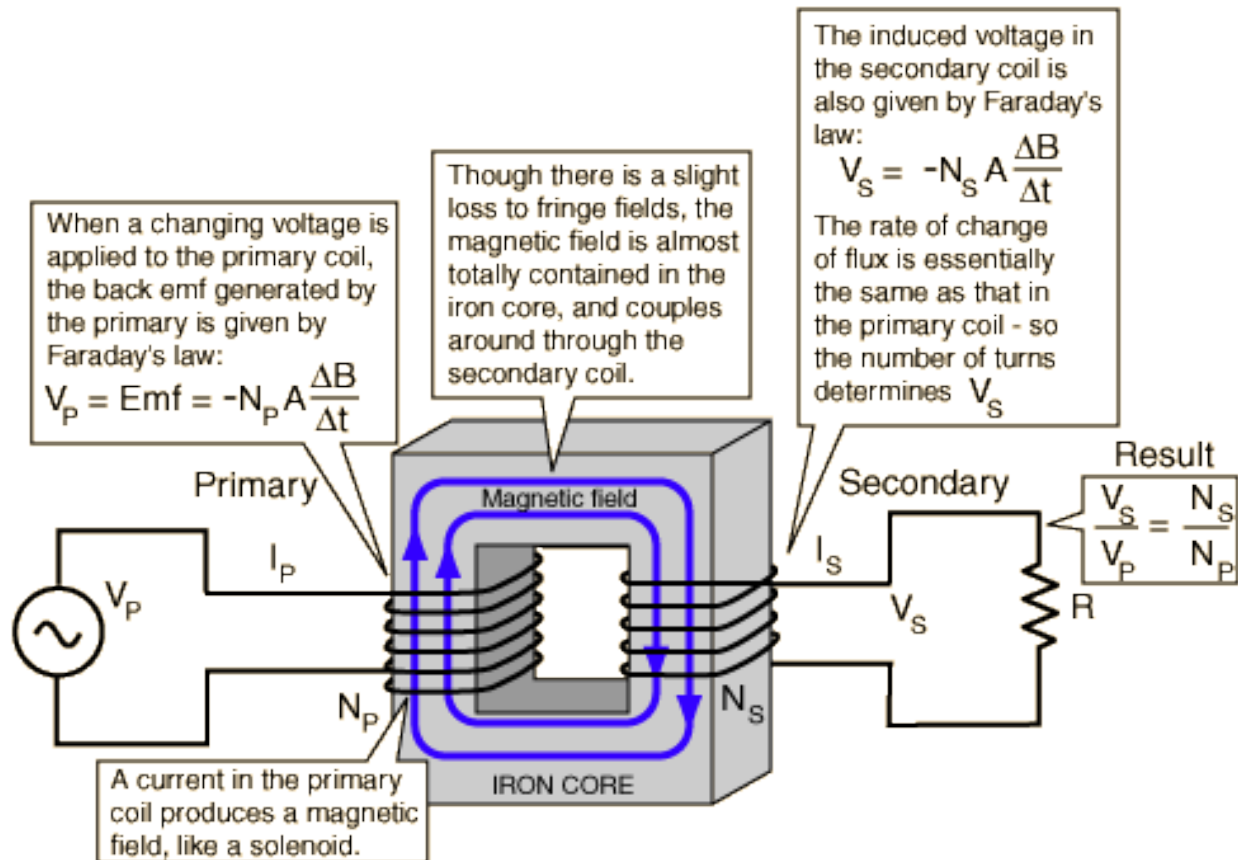
Im „czystszy” materiał ferromagnetyczny tym szerokość pętli histerezy mniejsza. Defekty w kryształach przeszkadzają w przesuwaniu się ścianek domenowych.

Materiały o małej wartości pozostałości magnetycznej nazywane są **magnetycznie miękkimi**. Natomiast niektóre stopy, materiały o dużej koncentracji defektów, mają szeroką pętlę histerezy (**materiały magnetycznie twarde**)



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

# Transformatory



# Elektromagnesy

