

FIZYKA II

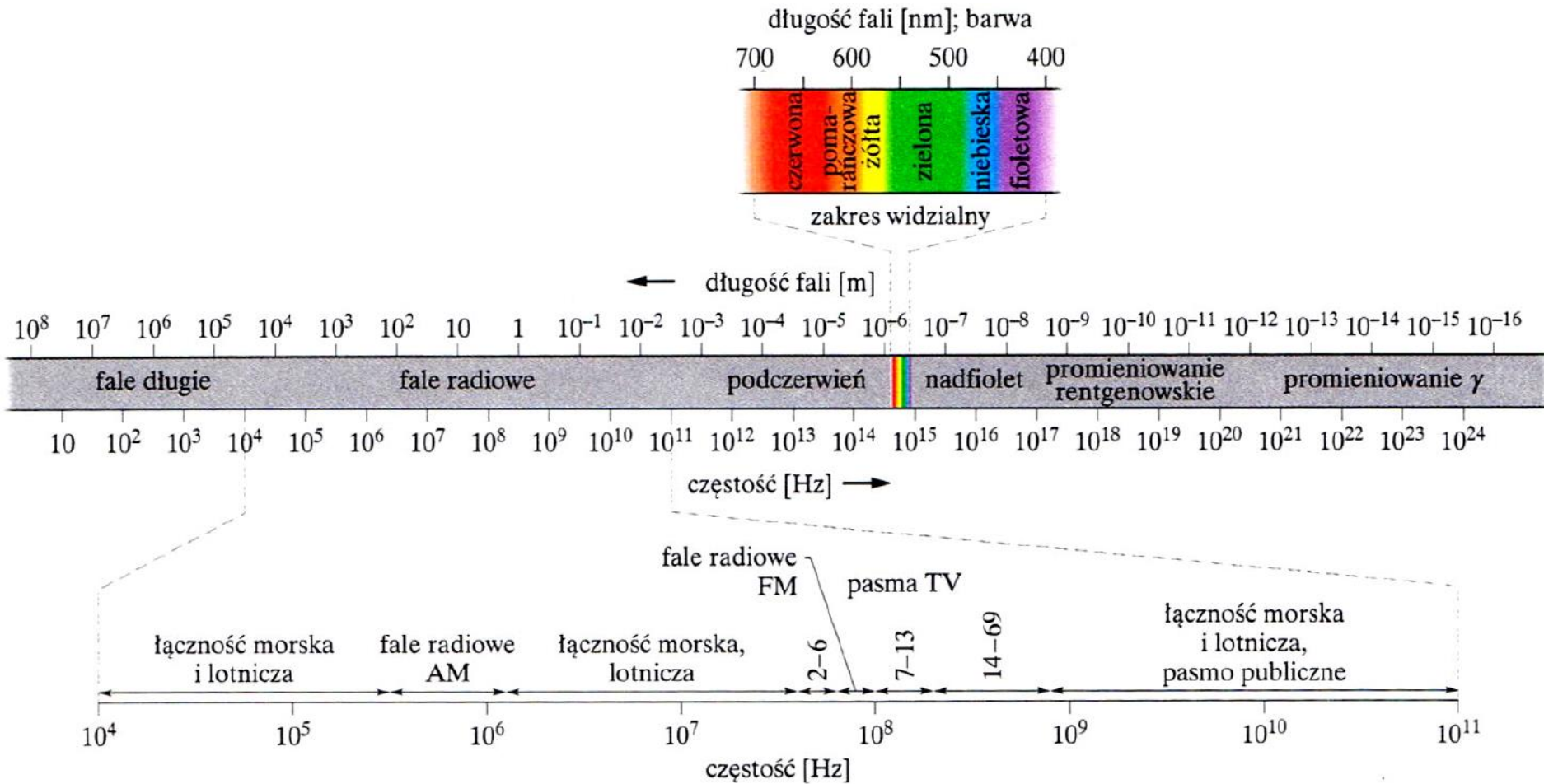
Vitalii Dugaev

*Katedra Fizyki i Inżynierii Medycznej
Politechnika Rzeszowska*

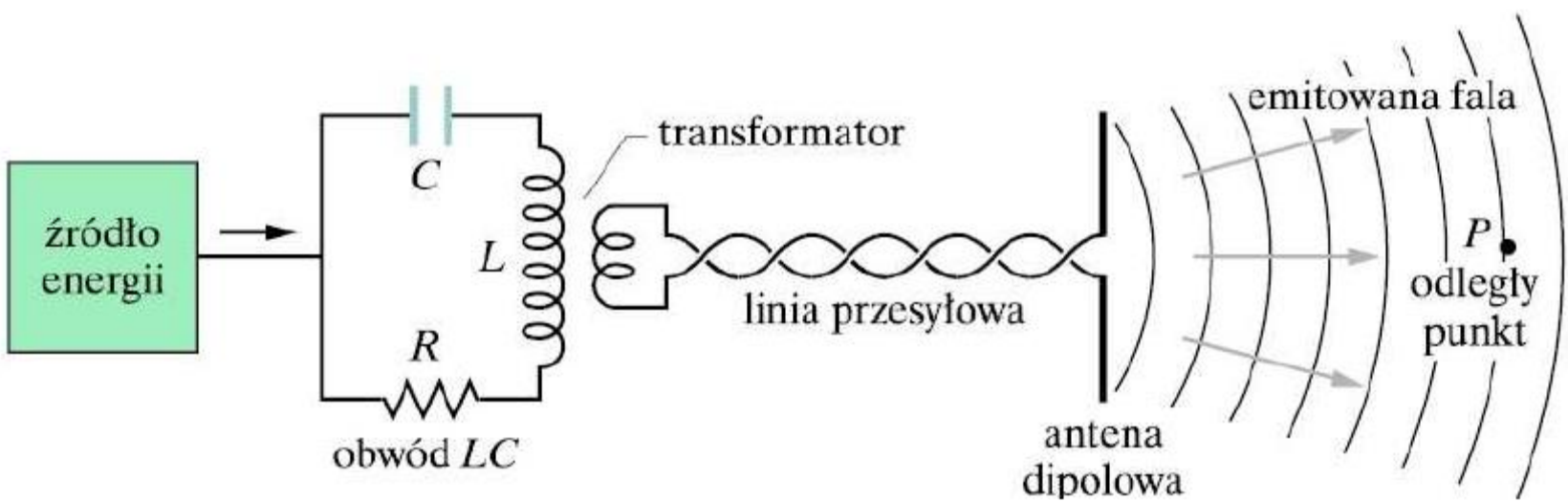
Semestr letni, rok 2017/2018



Fale elektromagnetyczne



Widmo promieniowania elektromagnetycznego



Tworzenie fali elektromagnetycznej w układzie RLC

Pole elektryczne i magnetyczne w fali

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

W każdy moment czasu: $\frac{E}{B} = c$

Prędkość rozchodzenia się fali:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Fale elektromagnetyczne

Prawo indukcji Faradaya

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = (E + dE)h - Eh = hdE$$

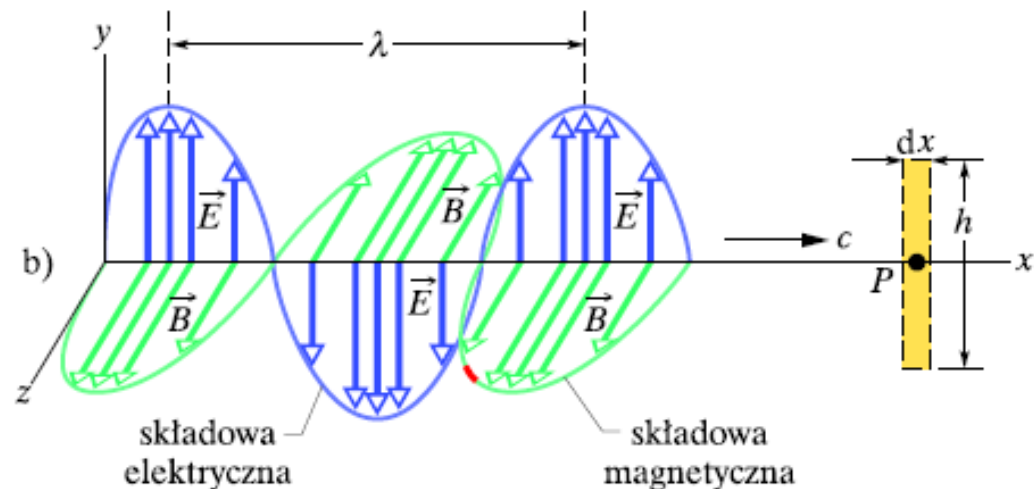
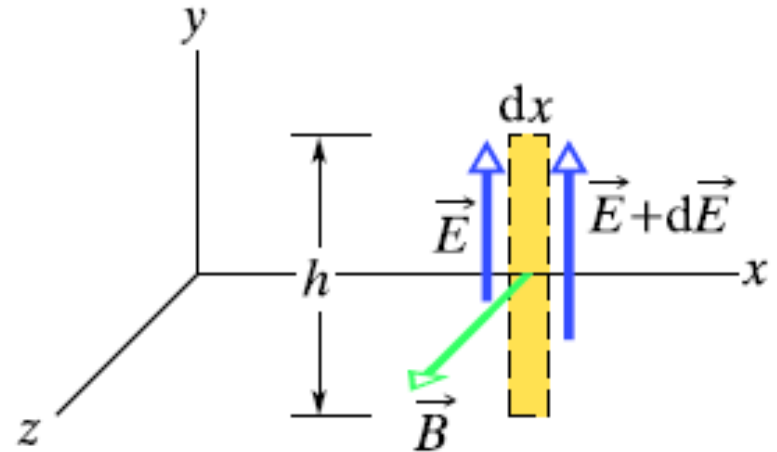
$$\Phi_B = (B)(hdx)$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = hdx \frac{dB}{dt}$$

$$hdE = -hdx \frac{dB}{dt}$$

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$



$$\frac{\partial E}{\partial x} = kE_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$kE_m \cos(kx - \omega t) = \omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\boxed{\frac{E_m}{B_m} = c}$$

Fale elektromagnetyczne

Uogólnione prawo Ampère'a:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

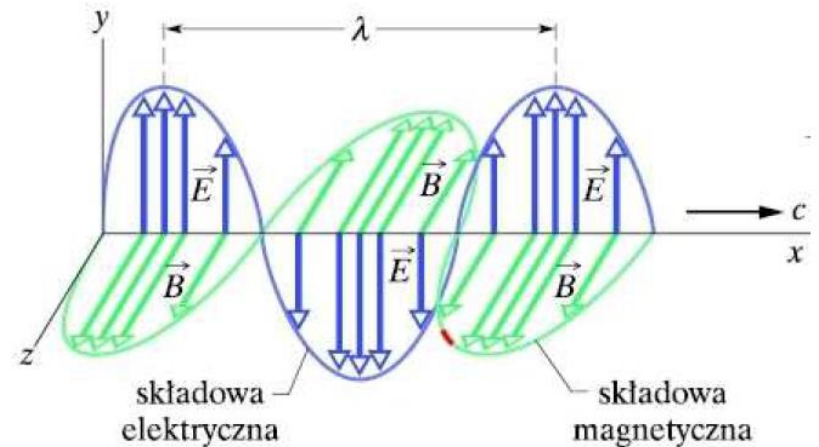
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = -(B + dB)h + Bh = -h dB$$

$$\Phi_E = (E)(h dx)$$

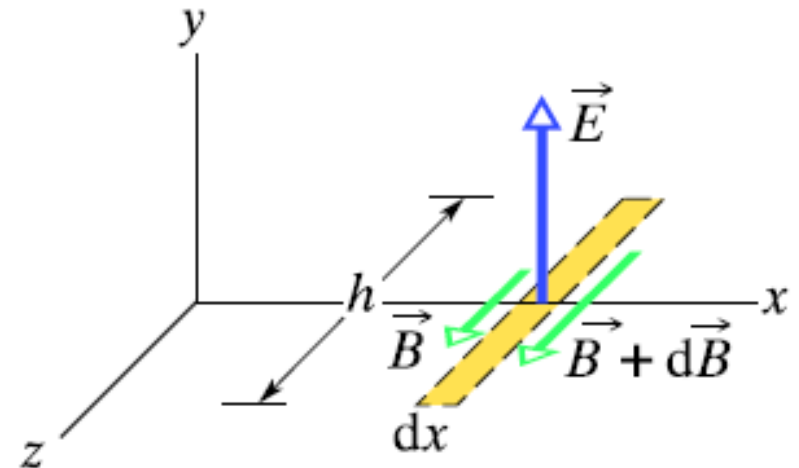
$$\frac{d\Phi_E}{dt} = h dx \frac{dE}{dt}$$

$$-h dB = \mu_0 \epsilon_0 \left(h dx \frac{dE}{dt} \right)$$

$$-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$



Pola \vec{E} i \vec{B} w fali elektromagnetycznej (HRW)



$$-k B_m \cos(kx - \omega t) = -\mu_0 \epsilon_0 \omega E_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 (\omega/k)} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Przepływ energii i wektor Poyntinga

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

- wektor Poyntinga

Jednostki:

$$S = \left(\frac{\text{energia/czas}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{\text{chw}} = \left(\frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{\text{chw}}$$

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

- chwilowa szybkość
przepływu energii

$$B = E/c$$

$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2$$

Kierunek wektora Poyntinga fali elektromagnetycznej jest kierunkiem rozchodzenia się fali i przepływu energii

$$I = S_{\text{śr}} = \left(\frac{\text{energia/czas}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{\text{śr}} = \left(\frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{\text{śr}}$$

$$I = S_{\text{śr}} = \frac{1}{c\mu_0} [E^2]_{\text{śr}} = \frac{1}{c\mu_0} [E_m^2 \sin^2(kx - \omega t)]_{\text{śr}} \quad E_{\text{śr.kw}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Materiały magnetyczne

Elektron ma ***orbitalny moment magnetyczny*** i ***spinowy moment magnetyczny***. Wszystkie momenty magnetyczne elektronów dodają się wektorowo.

Trzy główne rodzaje magnetyzmu:

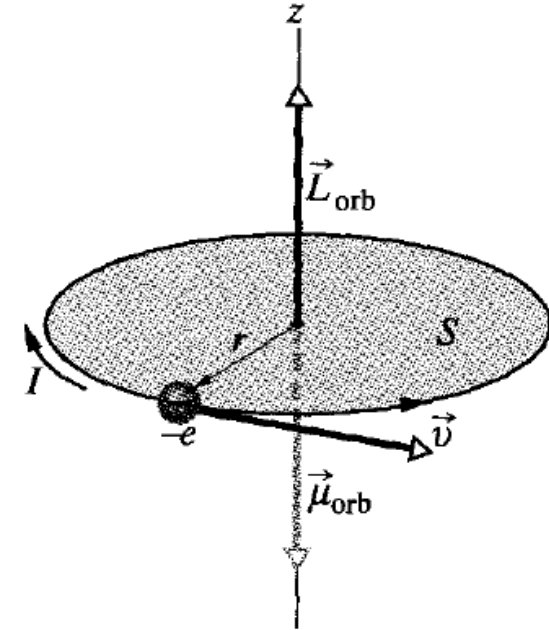
- ***Diamagnetyzm*** – słaby moment magnetyczny jest indukowany polem magnetycznym \mathbf{B}_{zewn}
- ***Paramagnetyzm*** każdy atom ma trwały moment magnetyczny, ale momenty różnych atomów są zorientowane przypadkowo – materiał jako całość nie wytwarza wypadkowego pola magnetycznego. Zewnętrzne pole \mathbf{B}_{zewn} częściowo prowadzi do uporządkowania momentów magnetycznych. Paramagnetyzm ma miejsce w materiałach zawierających pierwiastki przejściowe i ziem rzadkich
- ***Ferromagnetyzm*** – momenty magnetyczne elektronów są uporządkowane. Namagnesowanie istnieje bez pola \mathbf{B}_{zewn} .

Model klasyczny diamagnetyzmu

Model pętli z prądem:

$$\mu_{\text{orb}} = IS = \frac{e}{2\pi r/v} \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

$$I = \frac{\text{\textit{ładunek}}}{\text{\textit{czas}}} = \frac{e}{2\pi r/v}$$



Orbitalny moment pędu:

$$L_{\text{orb}} = mrv \sin 90^\circ = mrv$$

Z tych równań dostajemy związek

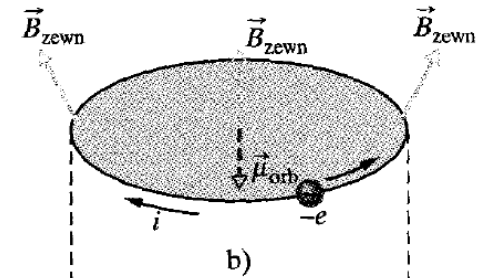
$$\vec{\mu}_{\text{orb}} = -\frac{e}{2m} \vec{L}_{\text{orb}}$$

Ten wzór jest poprawny dla opisu elektronu w atomie chociaż to wynik **klasyczny**

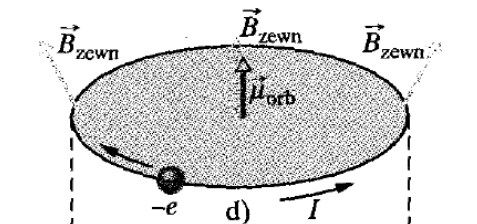
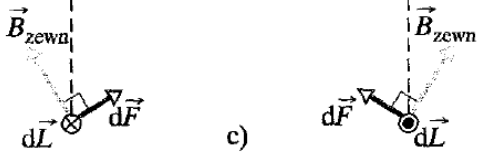
$$\vec{\ell} = m(\vec{r} \times \vec{v})$$

Model pętli w polu niejednorodnym

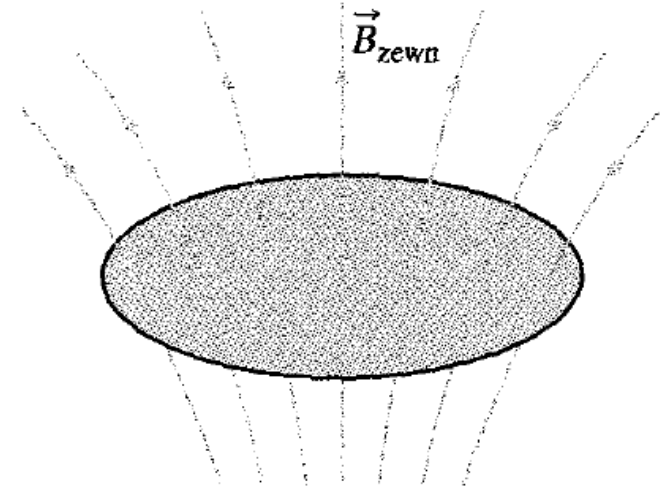
Model pętli z prądem dla elektronu krążącego w atomie, umieszczonym w niejednorodnym polu zewnętrznym:



– siła działa do góry

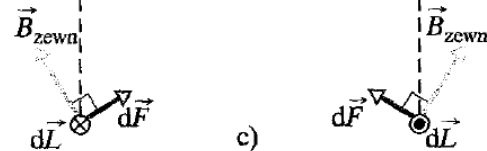
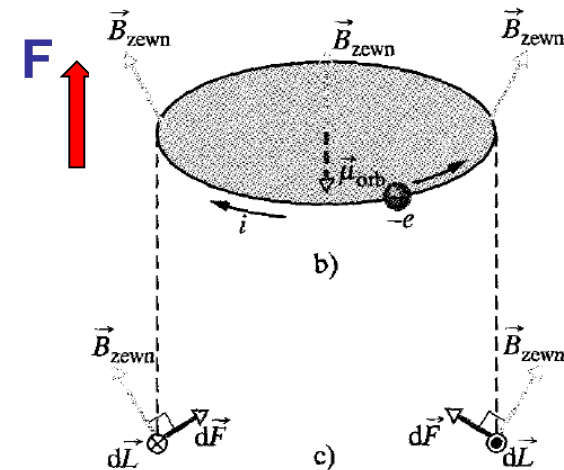
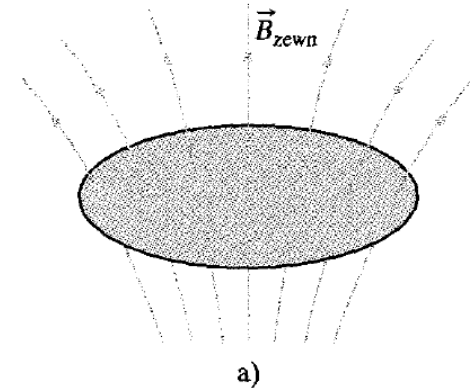


– siła działa w dół



Diamagnetyzm

- Zakładamy, że atom nie ma wypadkowego momentu magnetycznego przy $\vec{B}_{zewn}=0$
- Tyle samo elektronów krąży w każdym kierunku przy $\vec{B}_{zewn}=0$
- Włączamy niejednorodne pole magnetyczne
- Pole \vec{B}_{zewn} rośnie z czasem
- Powstaje indukowane pole elektryczne \vec{E} i prąd \vec{I}
- Jeśli prąd \vec{I} rośnie, to $\vec{\mu}_{orb}$ rośnie i siła \vec{F} skierowana do góry także rośnie
- Jeśli prąd maleje, to $\vec{\mu}_{orb}$ maleje i siła \vec{F} skierowana do góry także maleje



- W diamagnetyku umieszczonym w pole \mathbf{B}_{zewn} powstaje moment magnetyczny μ_{orb} skierowany przeciwnie do \mathbf{B}_{zewn}
- Jeżeli pole \mathbf{B}_{zewn} jest niejednorodnym, to materiał diamagnetyczny jest wypychany z obszaru silniejszego pola magnetycznego do obszaru słabszego pole
- Zjawisko diamagnetyzmu wyjaśnia możliwość lewitacji w polu magnetycznym



Lewitacja żaby (A. Geim, Antynobel 2000)

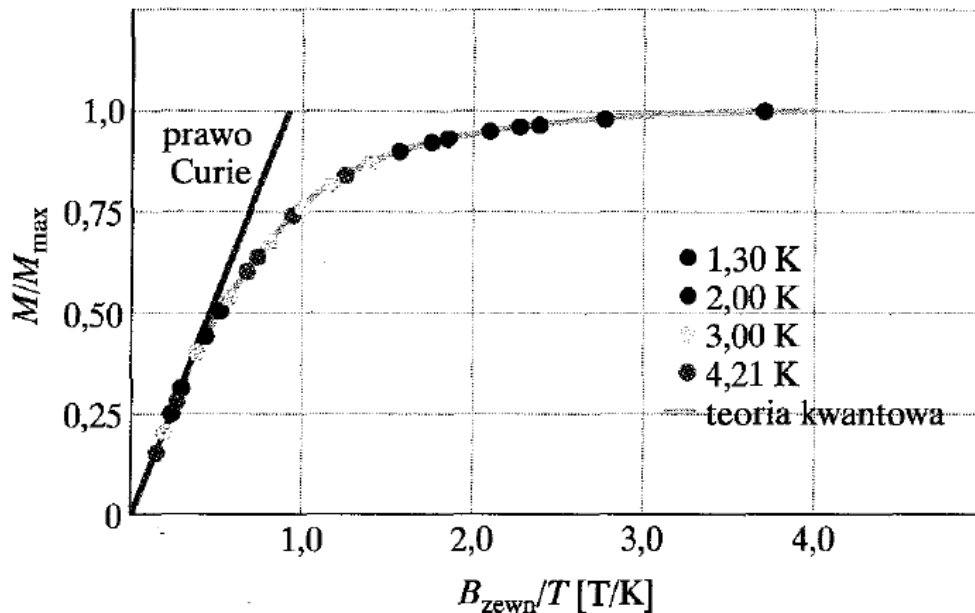
Paramagnetyzm

- W materiale paramagnetycznym w polu \mathbf{B}_{zewn} powstaje moment magnetyczny skierowany zgodnie z \mathbf{B}_{zewn}
- Jeżeli pole jest niejednorodne, to materiał paramagnetyczny jest przyciągany do obszaru silniejszego pola magnetycznego
- Namagnesowanie próbki M (moment magnetyczny na jednostkę objętości)

$$M = C \frac{B_{zewn}}{T}$$

– prawo Curie

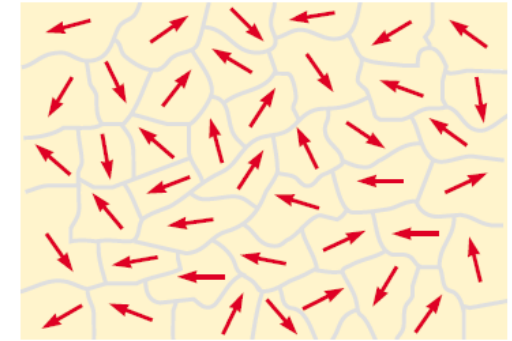
C – stała Curie



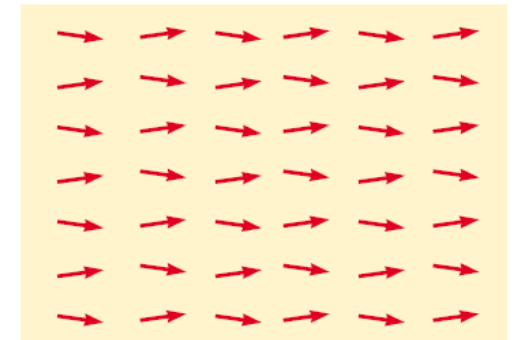
- Zwiększanie B_{zewn} powoduje wzrost uporządkowania atomowych momentów magnetycznych
- Zwiększanie T zmniejsza uporządkowanie

Ferromagnetyzm

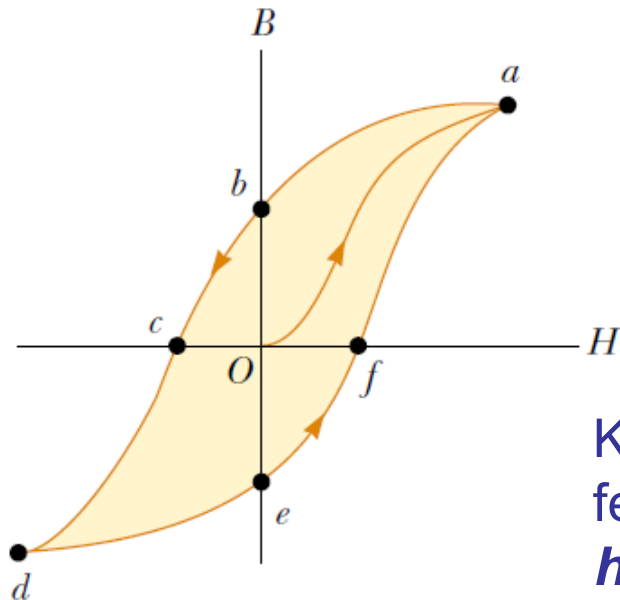
- Jeżeli $T < T_c$, to momenty magnetyczne są uporządkowane
- T_c – **temperatura Curie**
- Powstaje silny moment magnetyczny wewnętrzny
- Jeżeli zewnętrzne pole niejednorodne, ferromagnetyk jest przyciągany do obszaru silniejszego pola



(a)



B_0
(b)



Krzywa magnesowania ($0a$) dla próbki ferromagnetyka i związana z nią **pętla histerezy** ($abcdefa$)