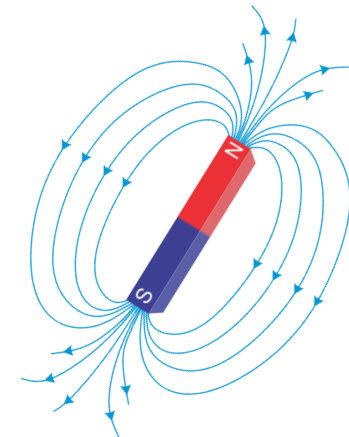
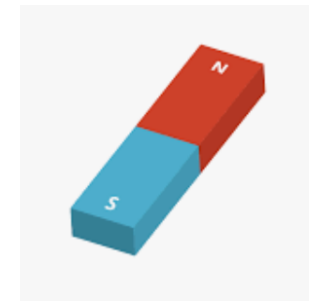
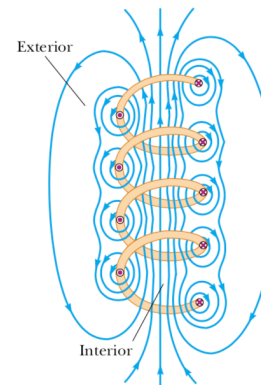
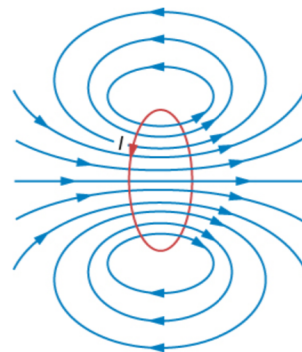
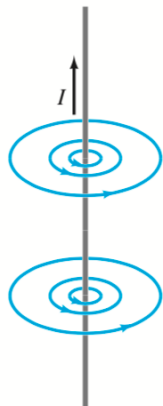
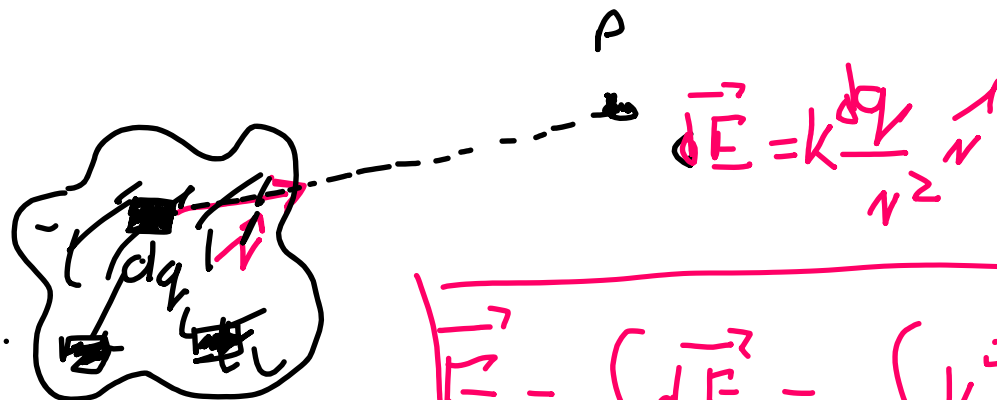
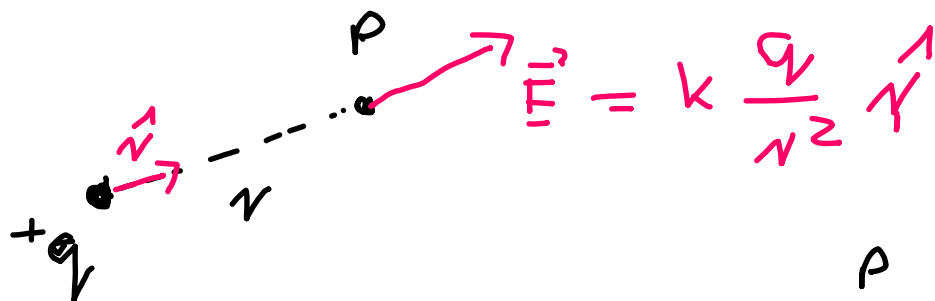


Wykład 15

Źródła pola magnetycznego, prawo Biota-Savarta, prawo Ampera, magnesy trwałe



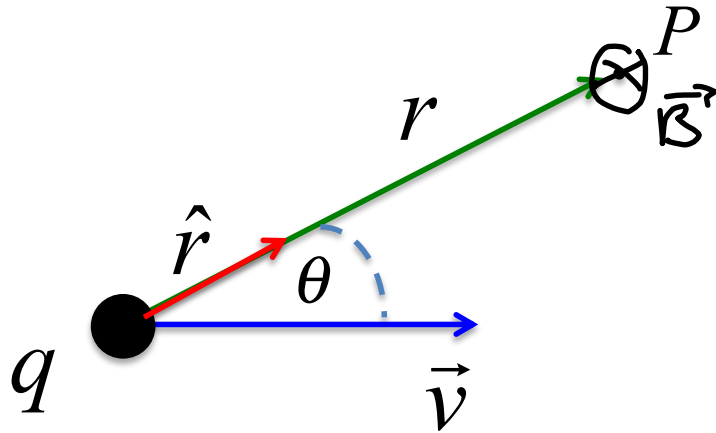


$$\vec{E} = \int d\vec{E} = \int k \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez poruszający się ładunek punktowy

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r}$$



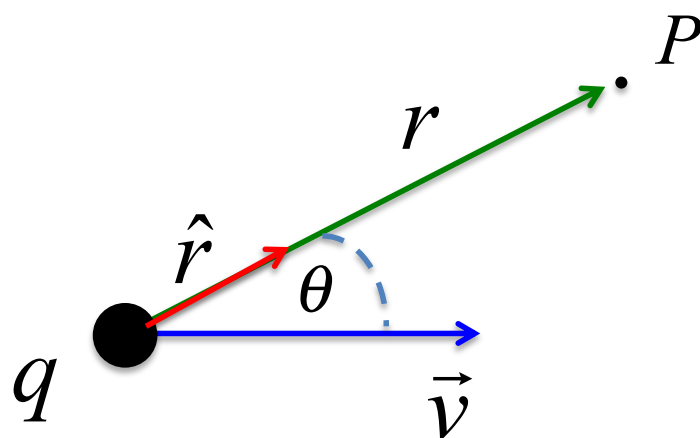
$$v \ll c$$

$$\vec{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \cdot \frac{q}{r^2} \underbrace{(\vec{v} \times \hat{r})}_{\text{il. w dkt.}}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^2} v \sin \theta$$

Źródła pola magnetycznego:

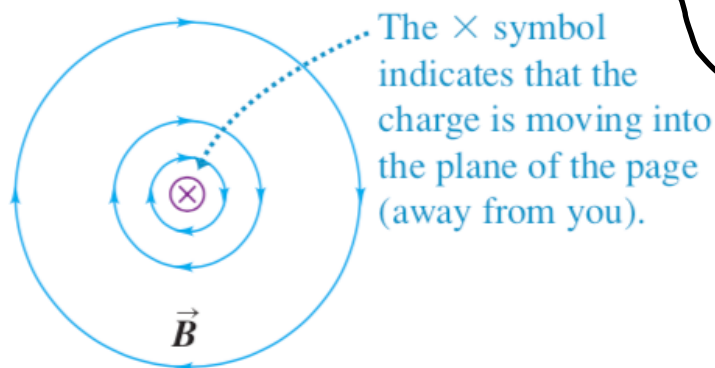
pole magnetyczne wytwarzane przez poruszający się ładunek punktowy



Wektor indukcji magnetycznej w punkcie P wytworzony przez poruszający się punktowy ładunek elektryczny jest prostopadły do prędkości ładunku oraz do wektora w kierunku łączącym ładunek z punktem P .

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

Linie indukcji magnetycznej tworzą okręgi wokół kierunku prędkości:



Wartość indukcji magnetycznej w punkcie P :

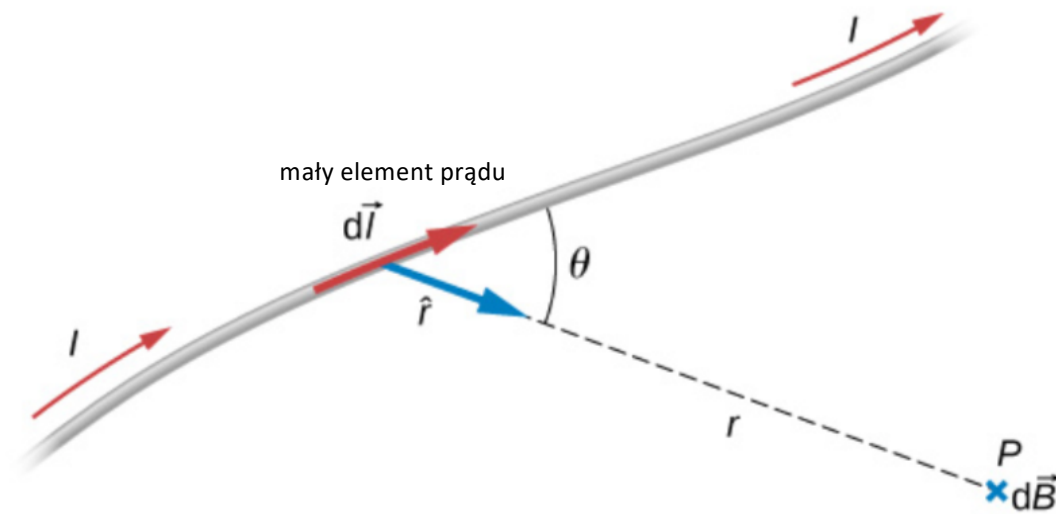
$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{qv \sin \theta}{r^2}$$

przenikalność magnetyczna próżni: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez przewodnik liniowy z prądem

Pole wytworzone przez mały element prądu:



$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{dq(\vec{v} \times \hat{r})}{r^2}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I(\vec{v}dt \times \hat{r})}{r^2}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{(Id\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

Pole wytworzone przez cały przewodnik:

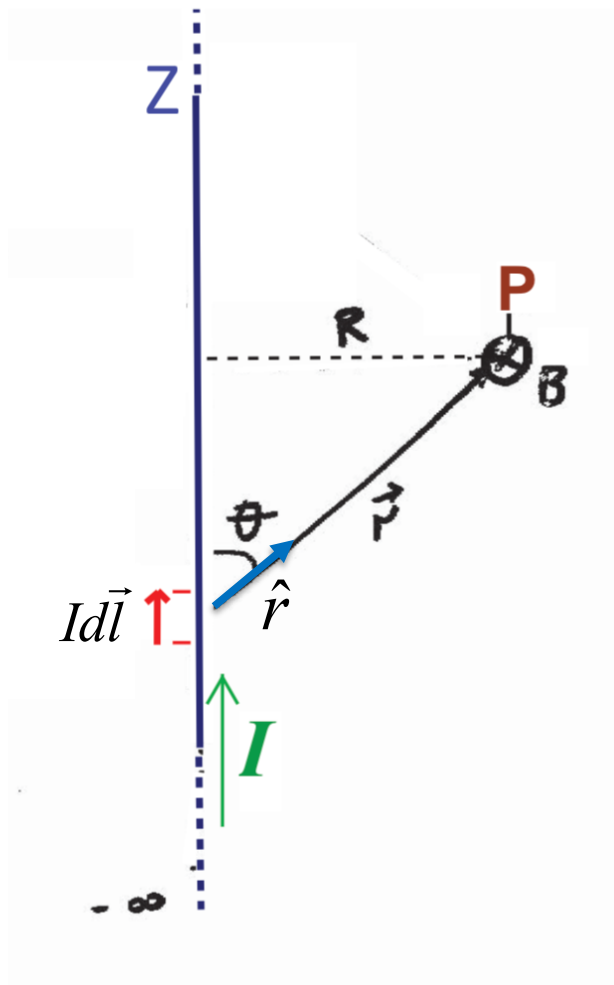
$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \int_{\text{cały przewodnik}} \frac{I(d\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

(Prawo Biota – Savarta)

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane nieskończony prostoliniowy przewodnik z prądem

Przykład zastosowania prawa Biota - Savarta:



$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{(Id\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

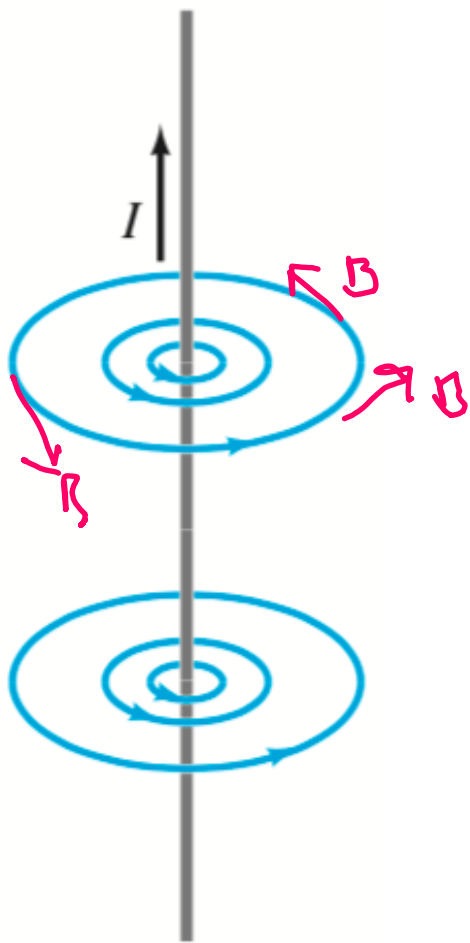
$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \theta, \quad \sin \theta = \frac{R}{r}, \quad dl = dz,$$

$$r = \sqrt{z^2 + R^2},$$

$$B = \int dB = \frac{\mu_o IR}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dz}{(z^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

Prawo Biota – Savarta możemy wykorzystać do policzenia pola magnetycznego w dowolnym punkcie przestrzeni (przynajmniej przy pomocy komputera) – co pozwala skonstruować szkic linii pola wokół przewodnika:



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$R = 10 \text{ cm}$$

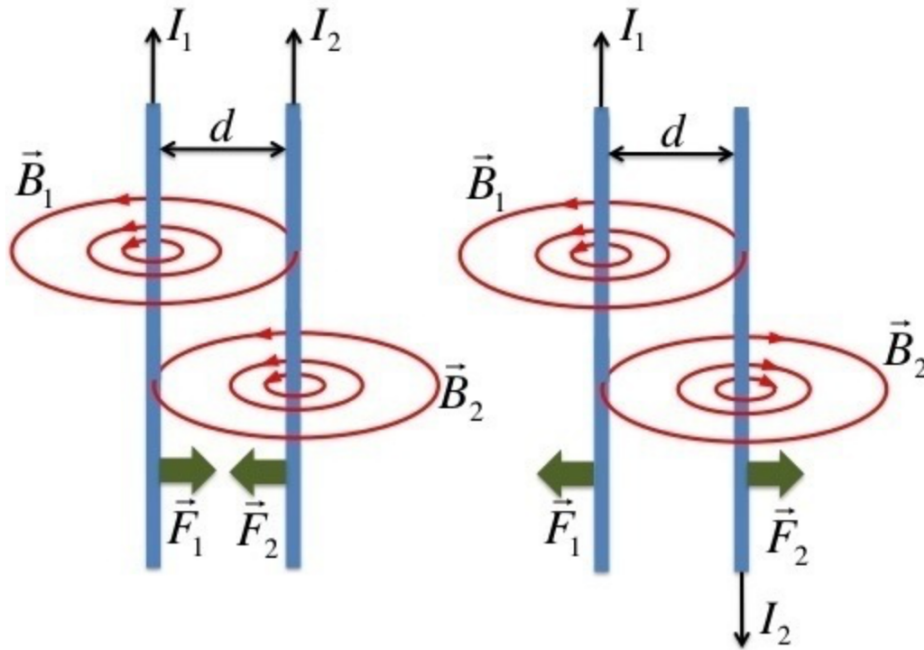
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}}$$

$$B = 2 \times 10^{-6} \text{ T}$$

$$B_{\text{lim.}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$\left| \begin{array}{l} I = 100 \text{ A} \\ R = 10 \text{ cm} \end{array} \right. \Rightarrow \underline{B} = 2 \times 10^{-4} \text{ T}$$

Siła oddziaływania dwóch prostoliniowych przewodników z prądem o długości l



$$F_1 = I_1 B_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l = F_2$$

Siła na jednostkę długości:

$$\frac{F_1}{l} = \frac{F_2}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

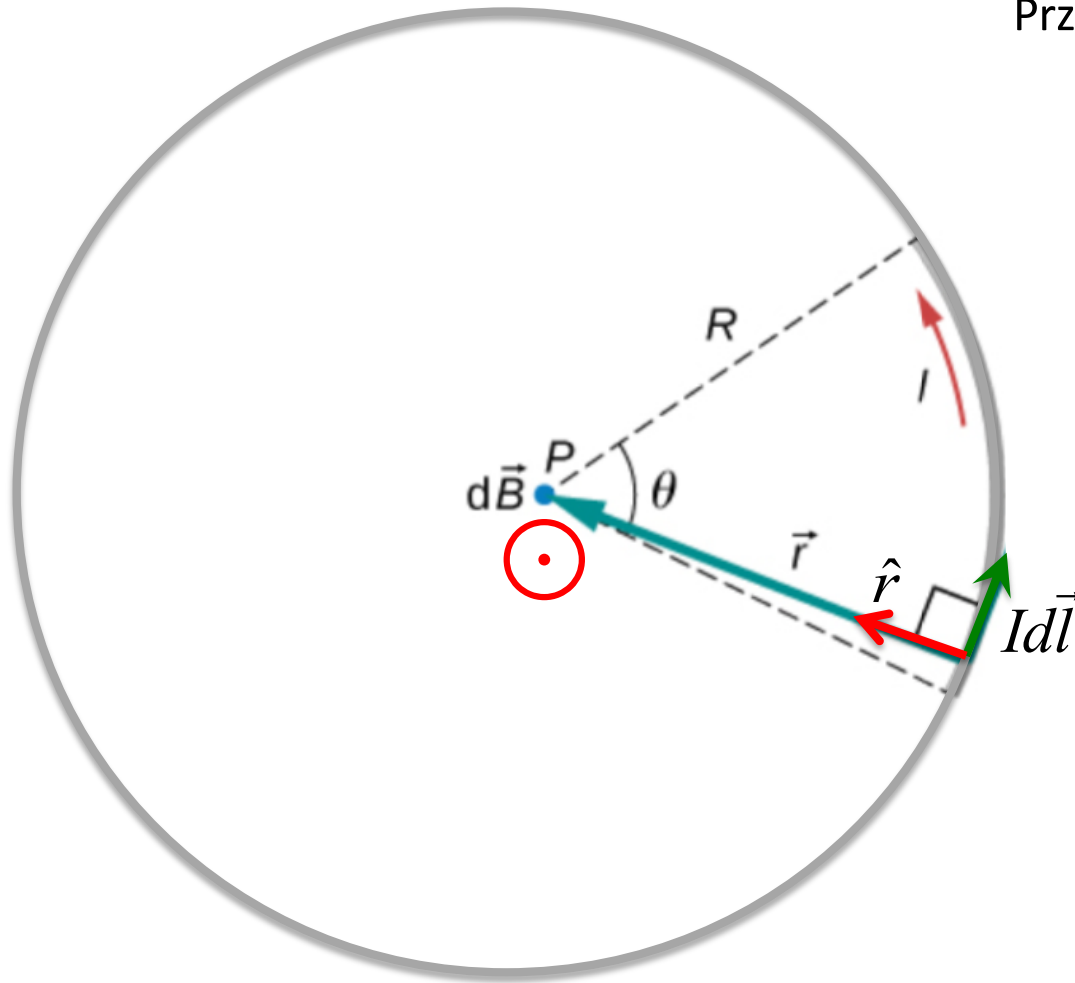
Oficjalna definicja jednostki natężenia prądu (Ampera):

„1 amper to niezmienny się prąd elektryczny, który płynąc w dwóch równoległych, prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o znikomo małym przekroju kołowym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie, spowodowałby wzajemne oddziaływanie przewodów na siebie z siłą równą 2×10^{-7} N na każdy metr długości przewodu”

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane w środku pętli kołowej z prądem

Przykład zastosowania prawa Biota - Savarta:



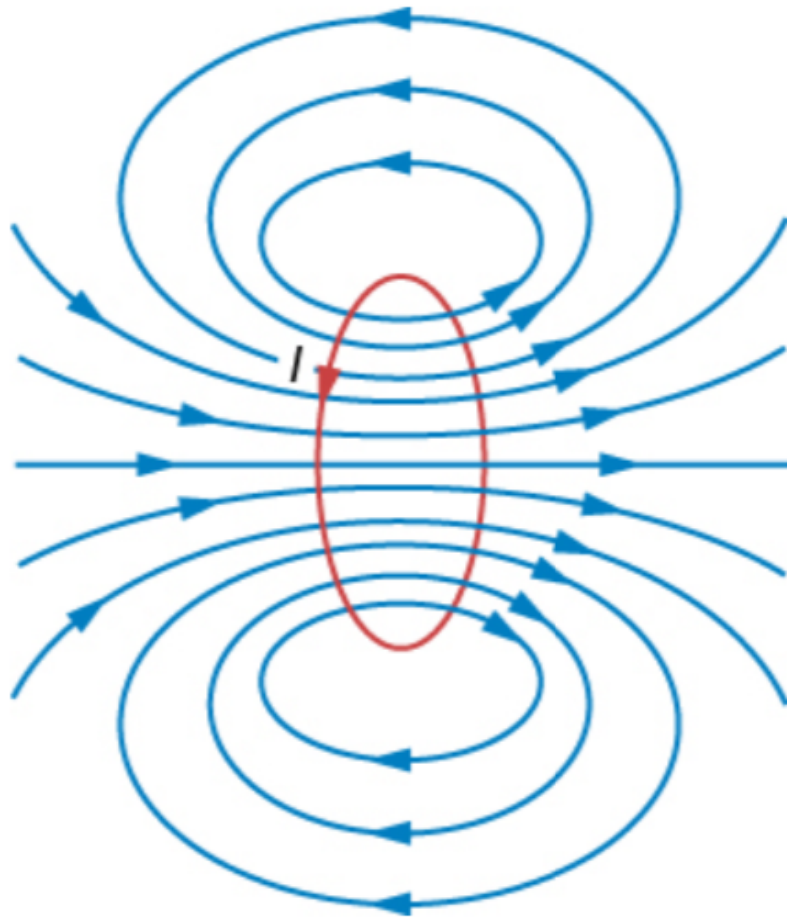
$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I(d\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{Idl}{R^2}, \quad r = R$$

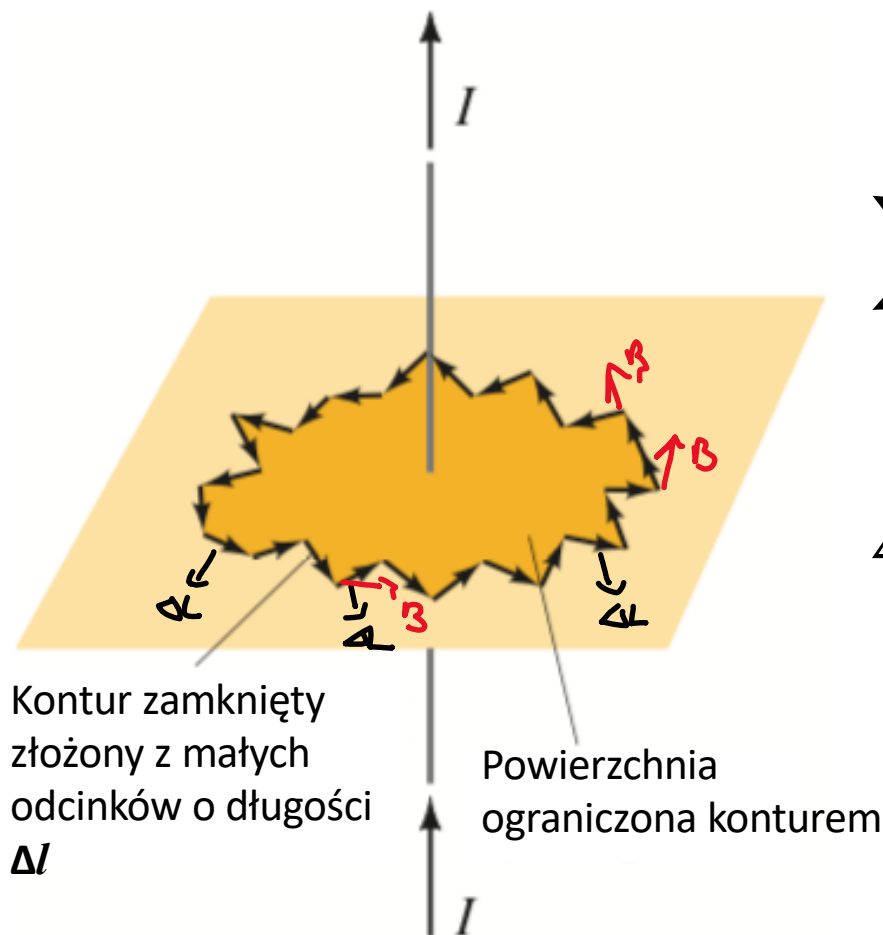
$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi R^2} \int dl = \frac{\mu_o I}{4\pi R^2} 2\pi R$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2R}$$

Prawo Biota – Savarta możemy wykorzystać do policzenia pola magnetycznego w dowolnym punkcie przestrzeni (przynajmniej przy pomocy komputera) – co pozwala skonstruować szkic linii pola wokół przewodnika:



Prawo Ampère'a



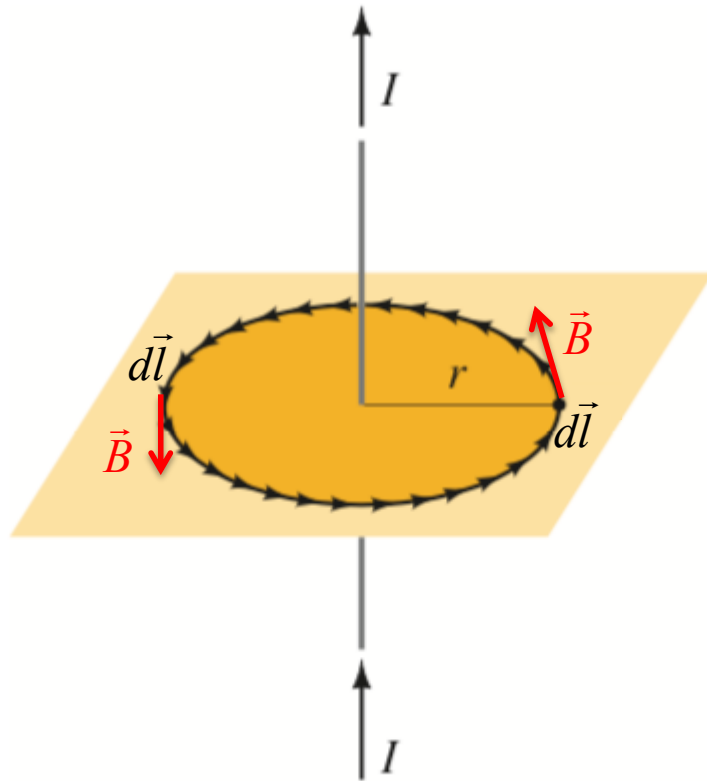
$$\sum \vec{B} \cdot \Delta \vec{l} \approx \mu_0 I$$

$$\Delta l \rightarrow 0 \Rightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

Słuszne dla dowolnego konturu
zamkniętego wokół przewodnika z
prądem.

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez prostoliniowy przewód z prądem



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$\vec{B} \cdot d\vec{l} = B dl$$

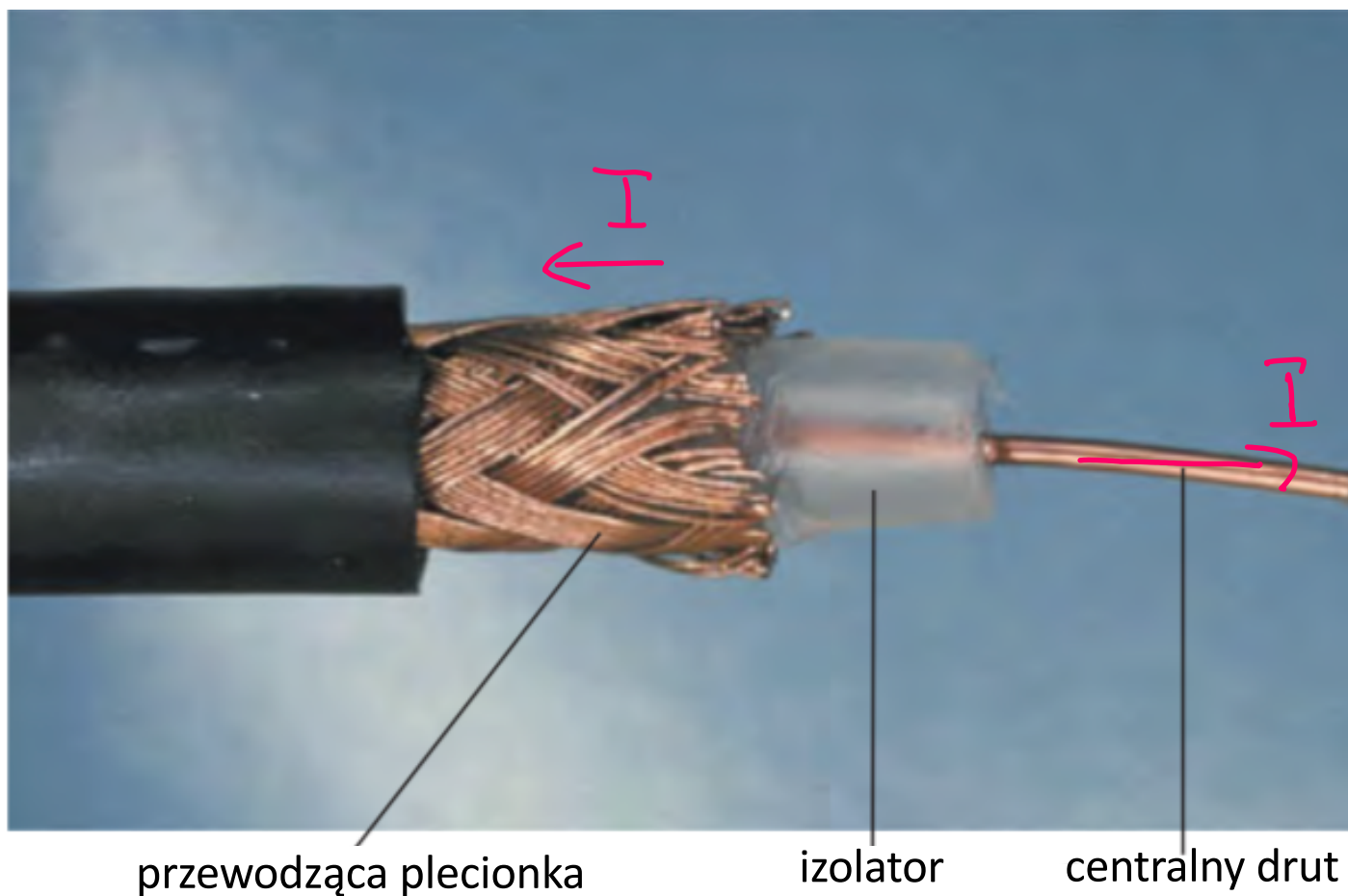
$$B \oint dl = \mu_0 I$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

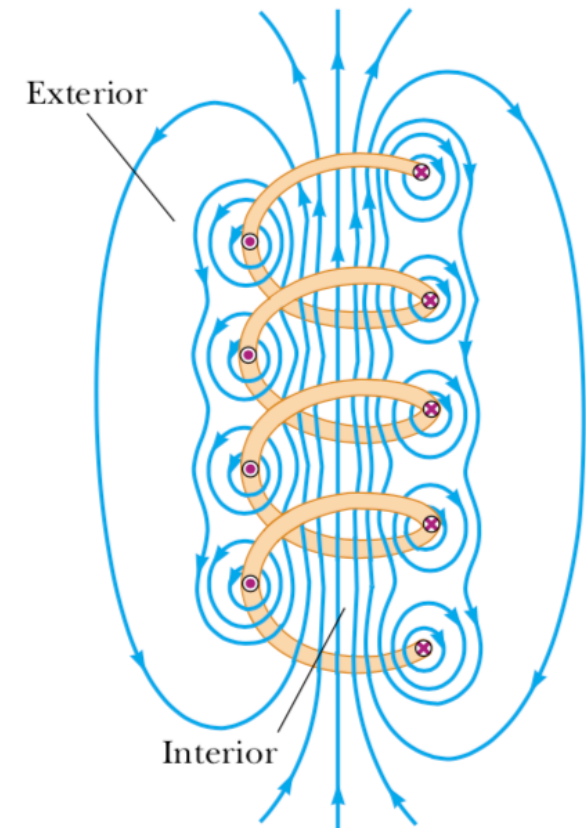
W kablu koncentrycznym prąd I płynie w drucie centralnym. Jednocześnie taki sam prąd I płynie w przewodzącej plecionce, ale w przeciwną stronę.

Ile wynosi pole magnetyczne na zewnątrz kabla?



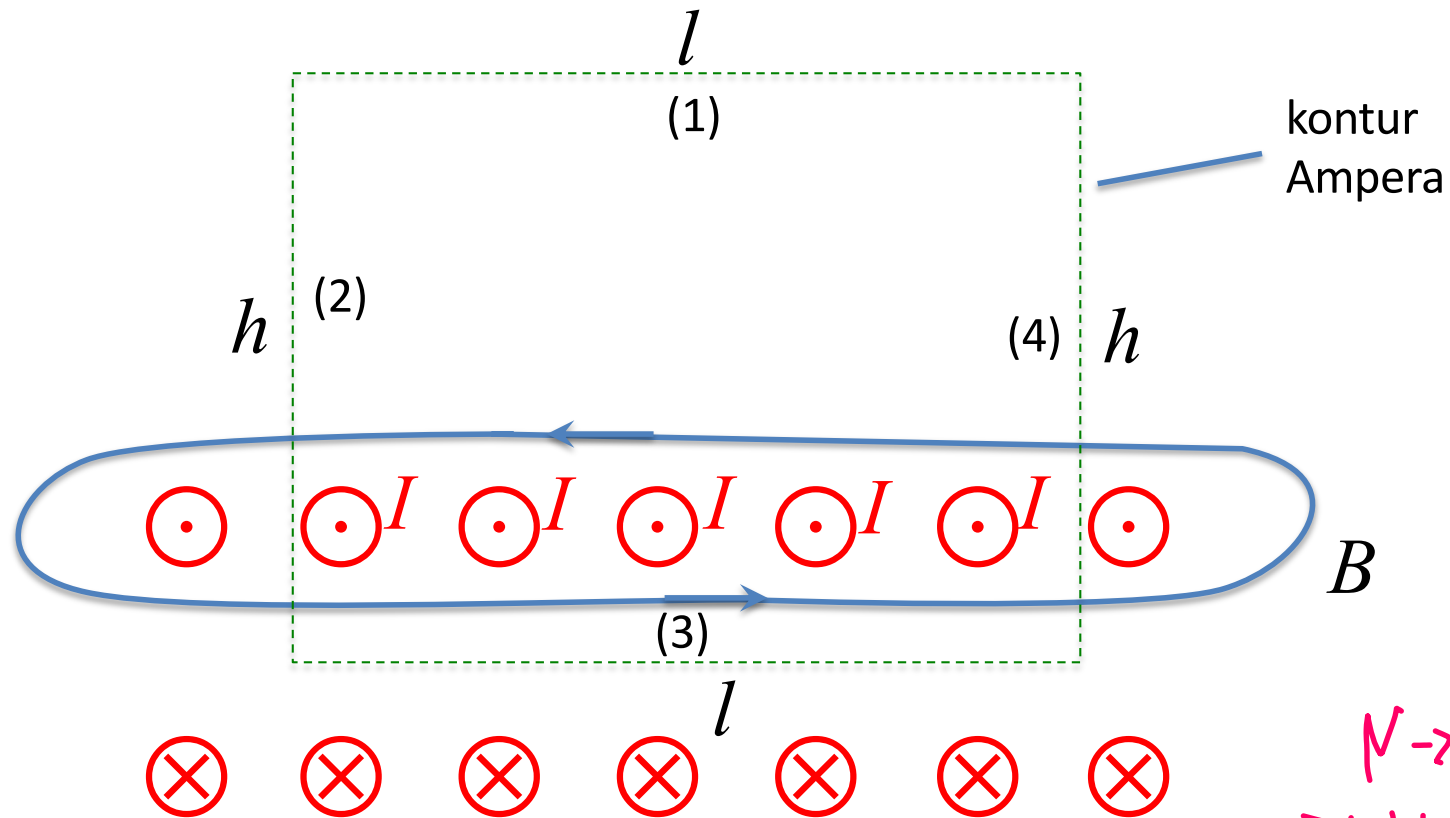
Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid



Pole magnetyczne jest bardzo silne w środku i bardzo słabe na zewnątrz solenoidu.

Źródła pola magnetycznego: pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{u} = \mu_0 I \cdot N$$

$$\int_{(1)} \vec{B} \cdot d\vec{u} + \int_{(2)} \vec{B} \cdot d\vec{u} + \int_{(3)} \vec{B} \cdot d\vec{u} + \int_{(4)} \vec{B} \cdot d\vec{u} = \mu_0 N I$$

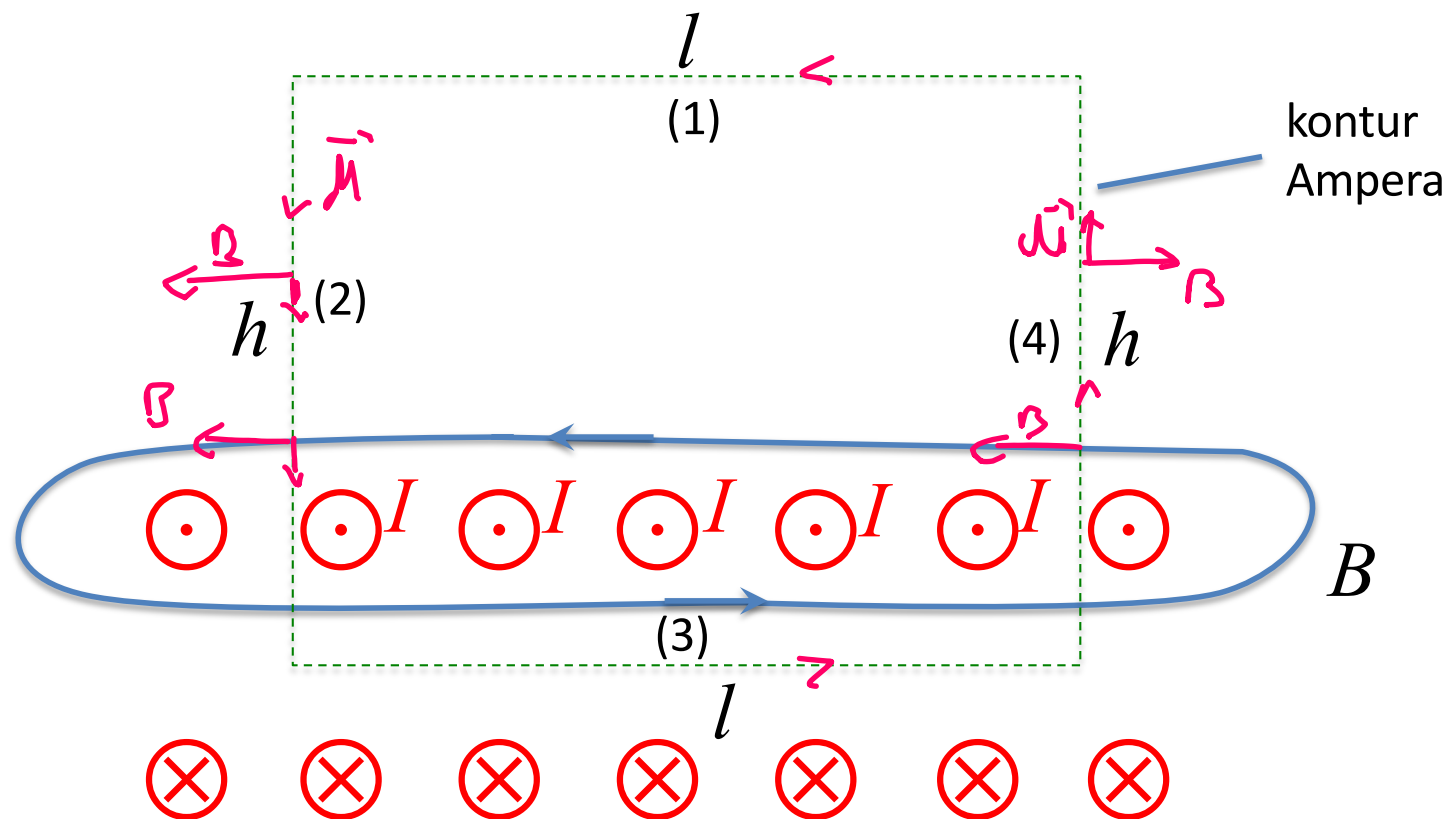
Bok 1:

$$\int_{(1)} \vec{B} \cdot d\vec{u} = 0 \quad \leftarrow$$

h boku drzew $\Rightarrow B \approx 0$

*N → liczba
zwojów zawartych
w konturze
AMPERA*

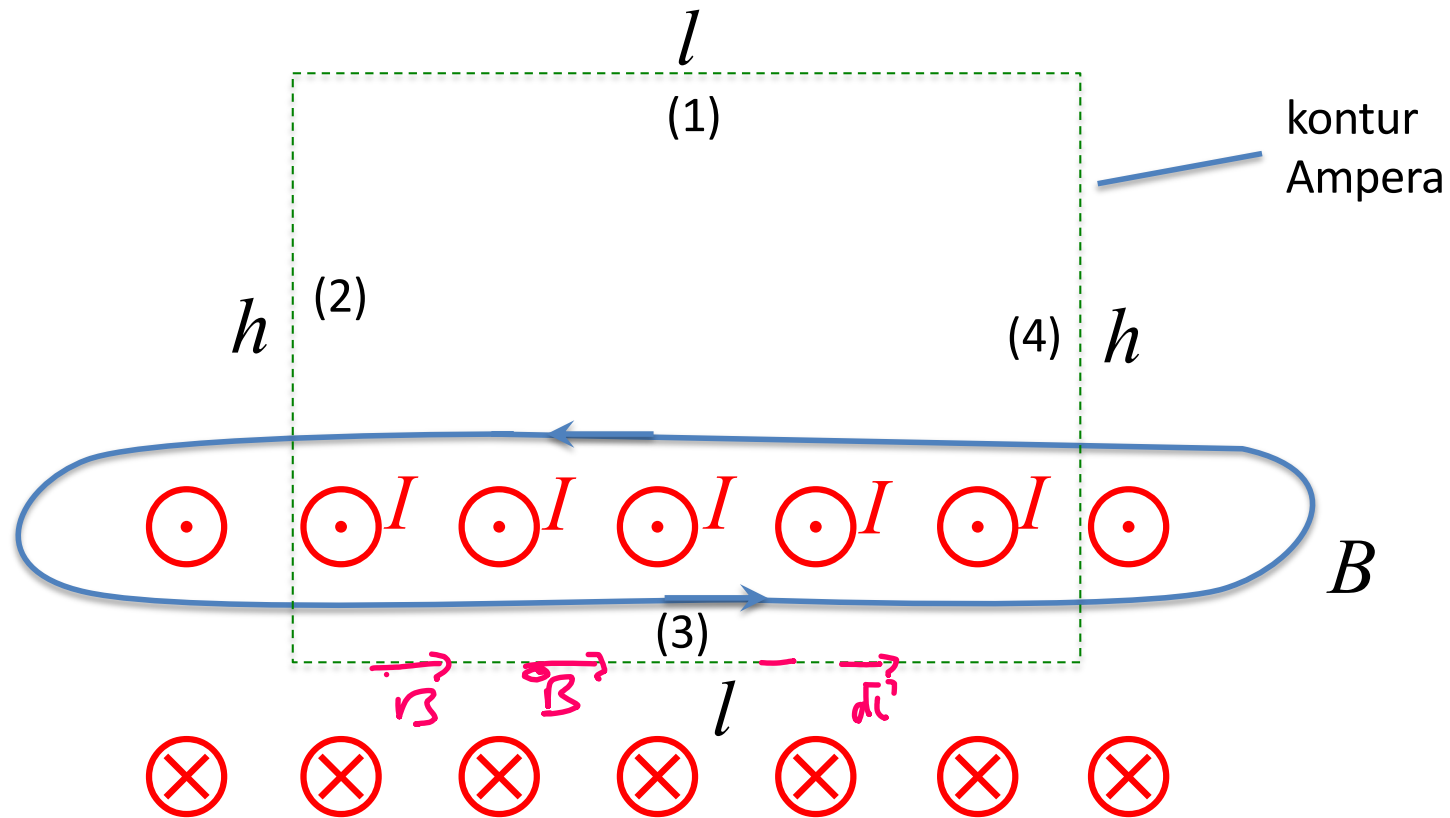
Źródła pola magnetycznego: pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid



Bok 2 i 4: $\vec{B} \perp \vec{J}$, $\vec{B} \circ \vec{J} = 0$

$$\int_{(2)} \vec{B} \circ d\vec{L} = \int_{(4)} \vec{B} \circ d\vec{L} = 0$$

Źródła pola magnetycznego: pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid

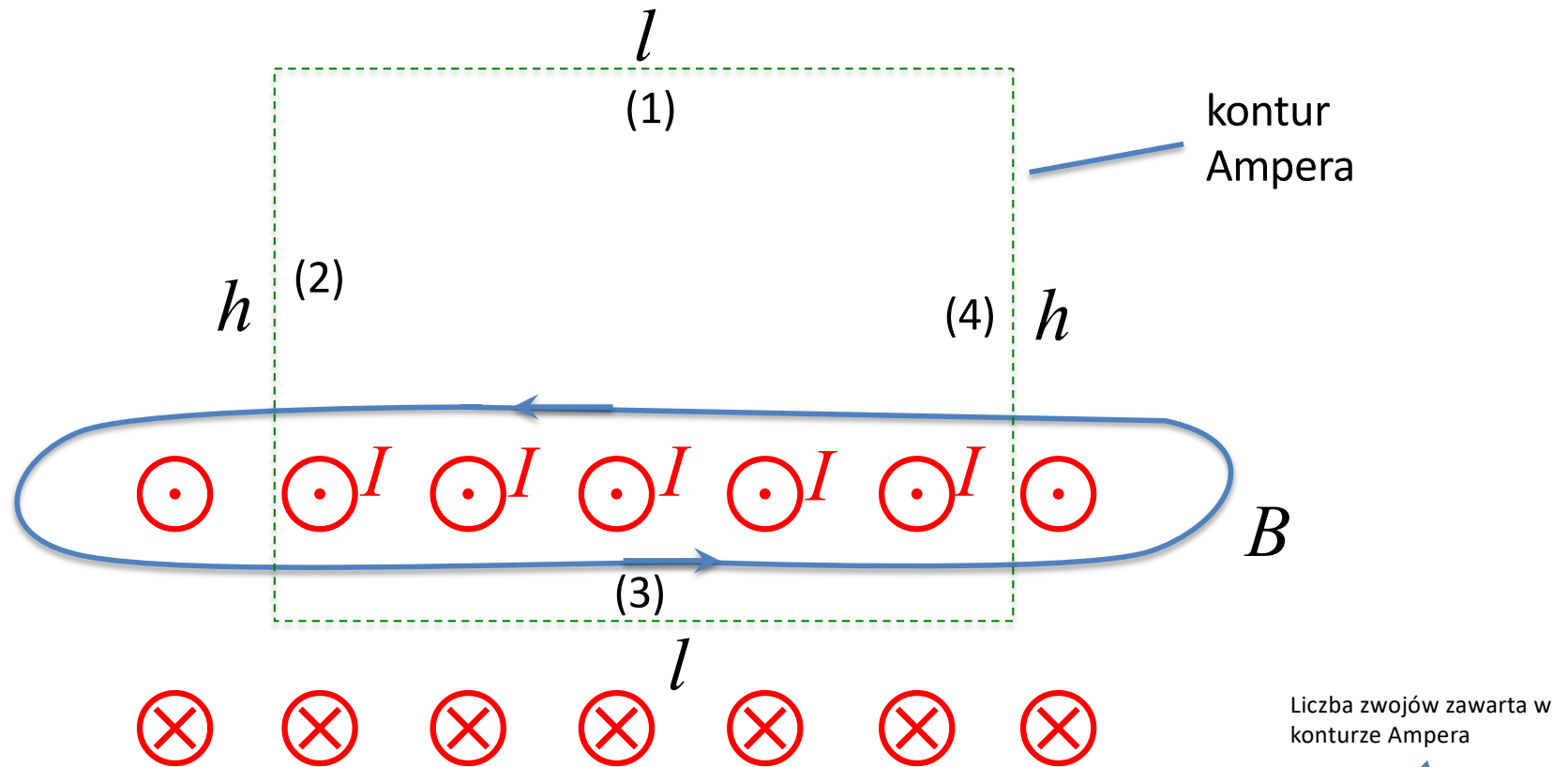


Bok 3: $\vec{B} \parallel d\vec{l}$, $\vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot dl \cdot \cos 0^\circ$

$$\int_{(3)} B \cdot dl = B \int dl = B \cdot l = \mu_0 N I \Rightarrow$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

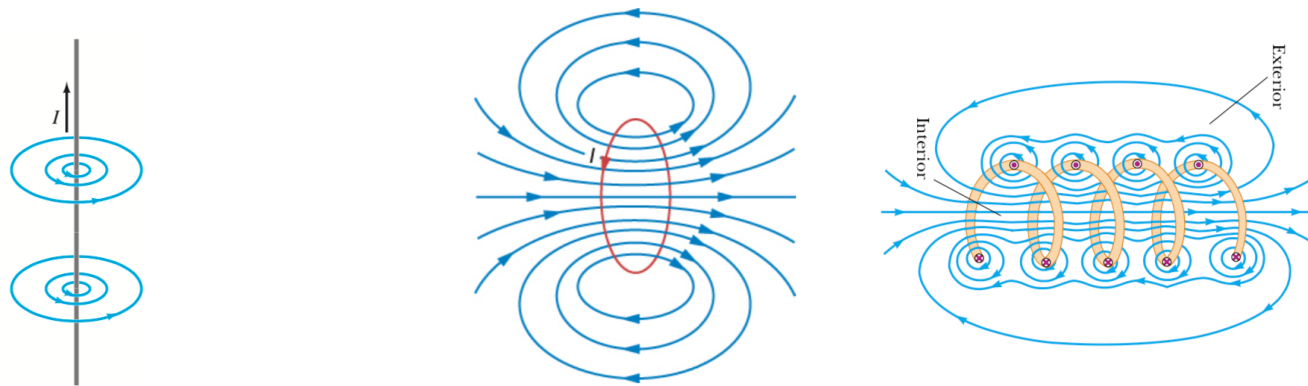
Źródła pola magnetycznego: pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{(1)} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{(2)} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{(3)} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{(4)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 NI$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{(3)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = Bl = \mu_0 NI \Rightarrow \boxed{B = \mu_0 \frac{N}{l} I}$$

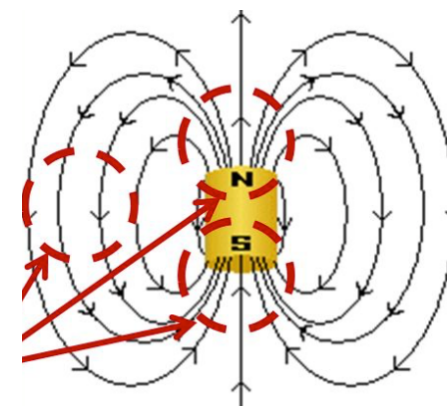
Prawo Gaussa dla pola magnetycznego



Strumień pola magnetycznego przez dowolną powierzchnię zamkniętą zawsze jest równy zero!
Monopole magnetyczne nie istnieją!

$$\phi_B = \oint_{\text{zamknięta powierzchnia}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Strumień pola magnetycznego przez wszystkie powierzchnie zamknięte wynosi zero! „Tyle samo linii wchodzi co wychodzi z obszaru ograniczonego powierzchnią.”



$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{innen}}}{\epsilon_0}$$

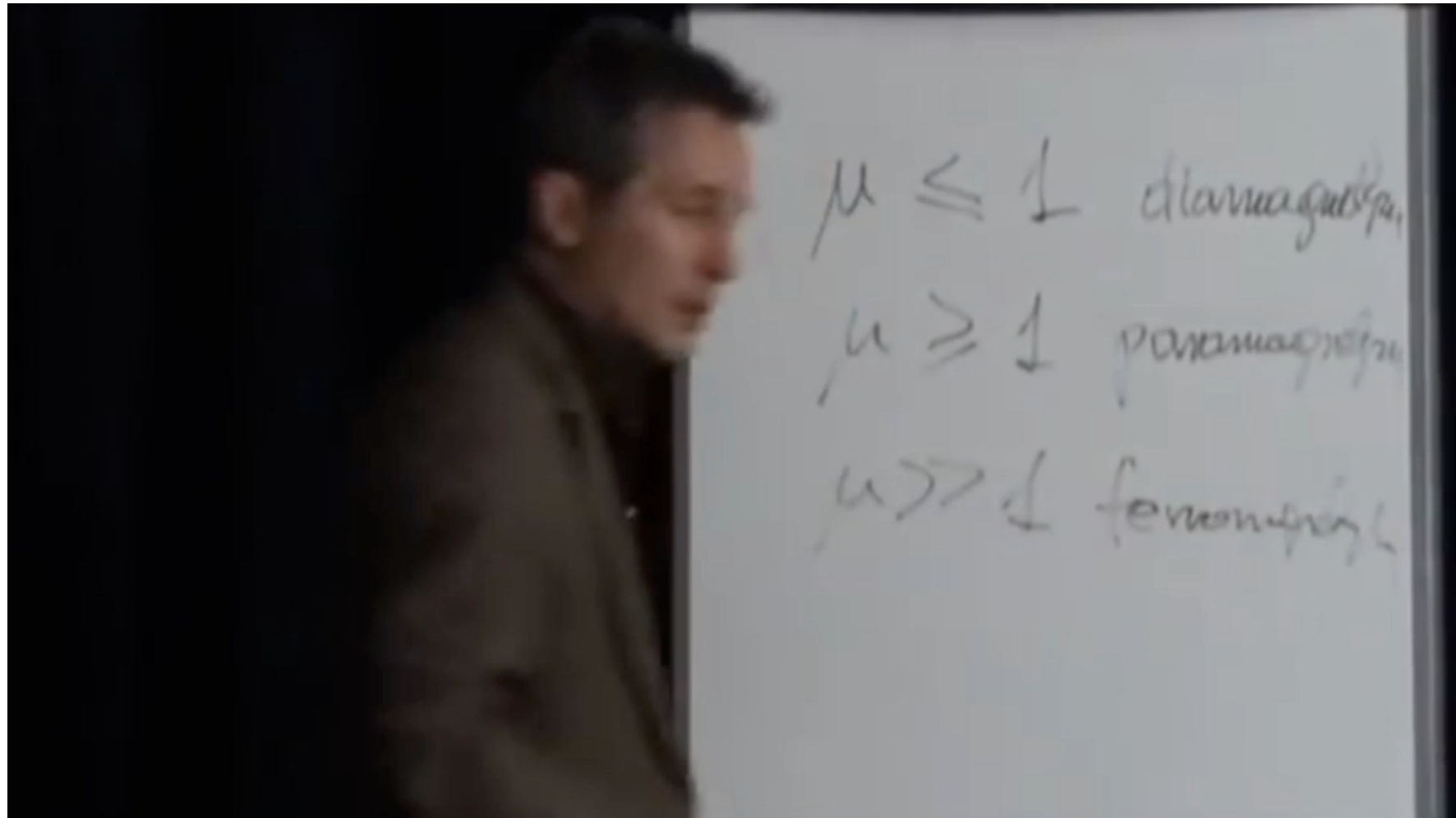
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

(ist nur
innere
Ladung)

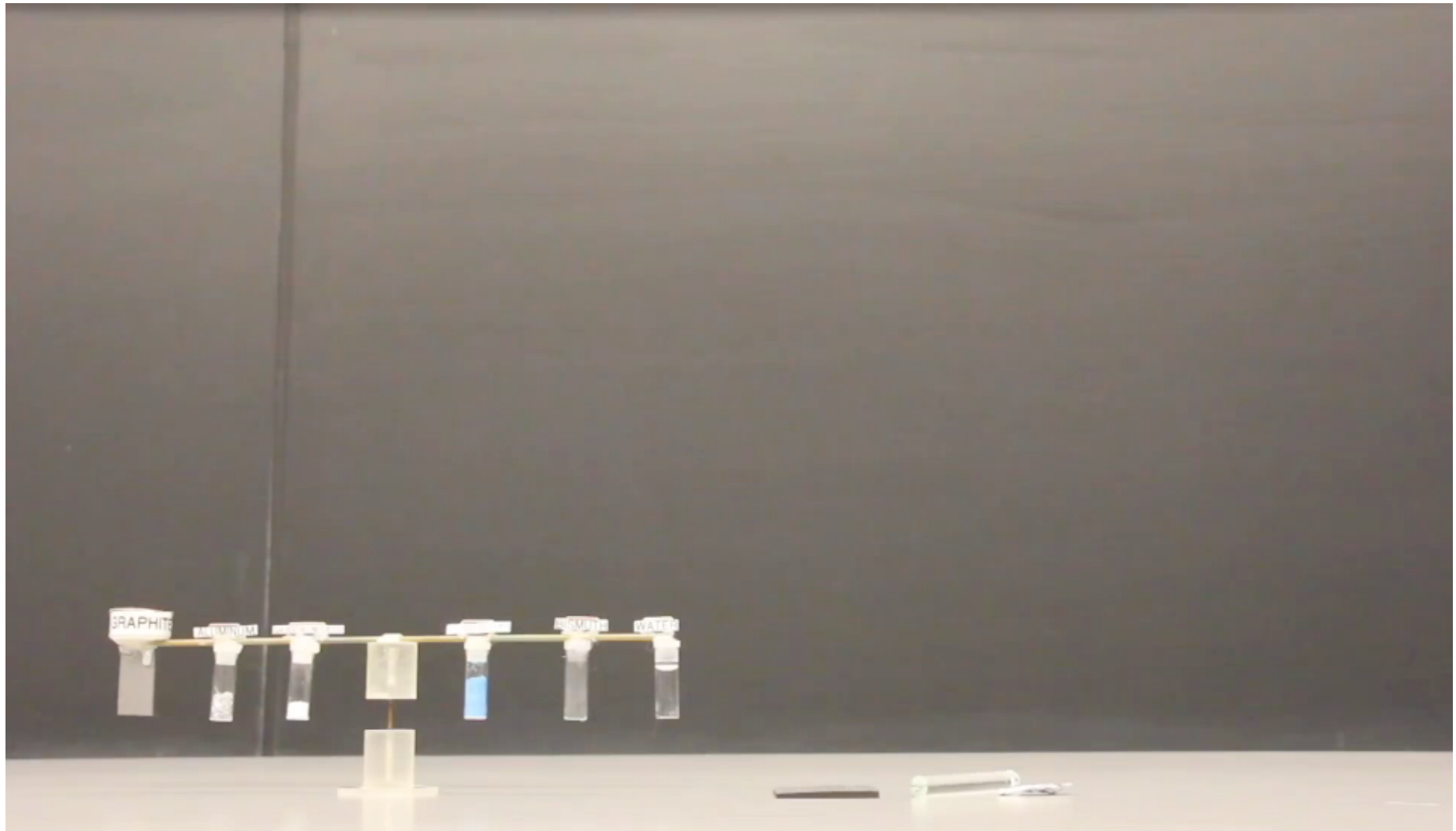


(keine Ladung,
nur magnetische
Feldlinien)

Ferromagnetyki, paramagnetyki, diamagnetyki



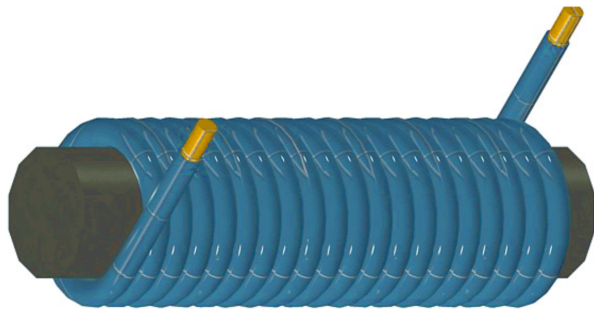
Ferromagnetyki, paramagnetyki, diamagnetyki



<https://www.youtube.com/watch?v=u36QpPvEh2c>

Materiały magnetyczne

Do tej pory rozważaliśmy przewody z prądem umieszczone w powietrzu lub w próżni. Jednak w praktycznych zastosowaniach przewody przewodzące prąd są często umieszczane wokół rdzenia z litego żelaza. Obecność żelaza lub innych materiałów ferromagnetycznych zwiększa pole magnetyczne i często sprawia, że jest ono kilka tysięcy razy silniejsze niż bez rdzenia.



cewka z rdzeniem ferromagnetycznym
(elektromagnes)

Podatność magnetyczna:

$$\chi = \frac{B_{\text{rdzen}}}{B_{\text{przewód}}}$$

Całkowite pole wewnątrz solenoidu:

$$\vec{B}_{\text{tot}} = \vec{B}_{\text{przewód}} + \vec{B}_{\text{rdzen}} = \vec{B}_{\text{przewód}} + \chi \vec{B}_{\text{przewód}} = (1 + \chi) \vec{B}_{\text{przewód}}$$

Paramagnetyki i diamagnetyki

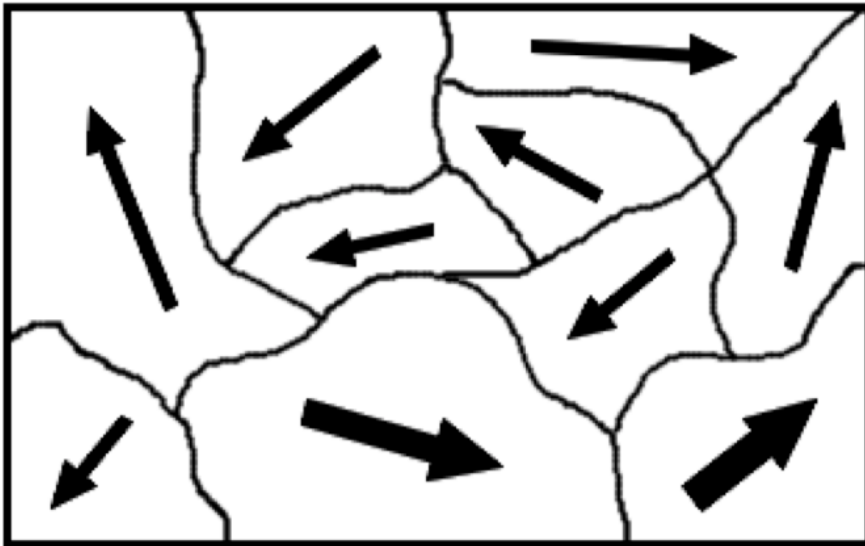
Paramagnetyki magnetyzują się zgodnie ze zwrotem pola zewnętrznego, diamagnetyki magnetyzują się przeciwnie do zwrotu pola zewnętrznego. W obydwu typach substancji efekt magnetyzacji jest bardzo mały ($|\chi| \ll 1$):

Paramagnetic Substance	χ	Diamagnetic Substance	χ
Aluminum	2.3×10^{-5}	Bismuth	-1.66×10^{-5}
Calcium	1.9×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Chromium	2.7×10^{-4}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Lithium	2.1×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Lead	-1.7×10^{-5}
Niobium	2.6×10^{-4}	Mercury	-2.9×10^{-5}
Oxygen	2.1×10^{-6}	Nitrogen	-5.0×10^{-9}
Platinum	2.9×10^{-4}	Silver	-2.6×10^{-5}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}

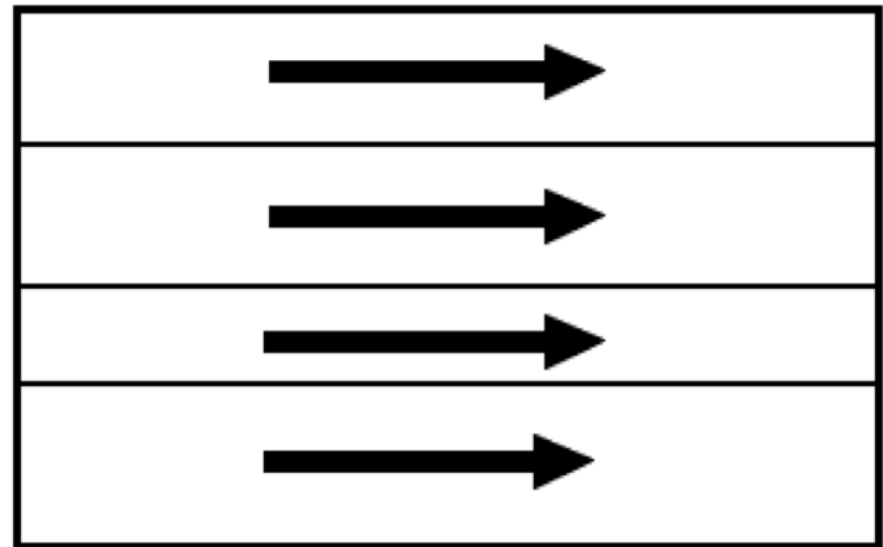
Ferromagnetyki

Ferromagnetyki wykazują ogromną podatność magnetyczną $\chi \gg 1$. Magnetyzują się zgodnie ze zwrotem zewnętrznego pola.

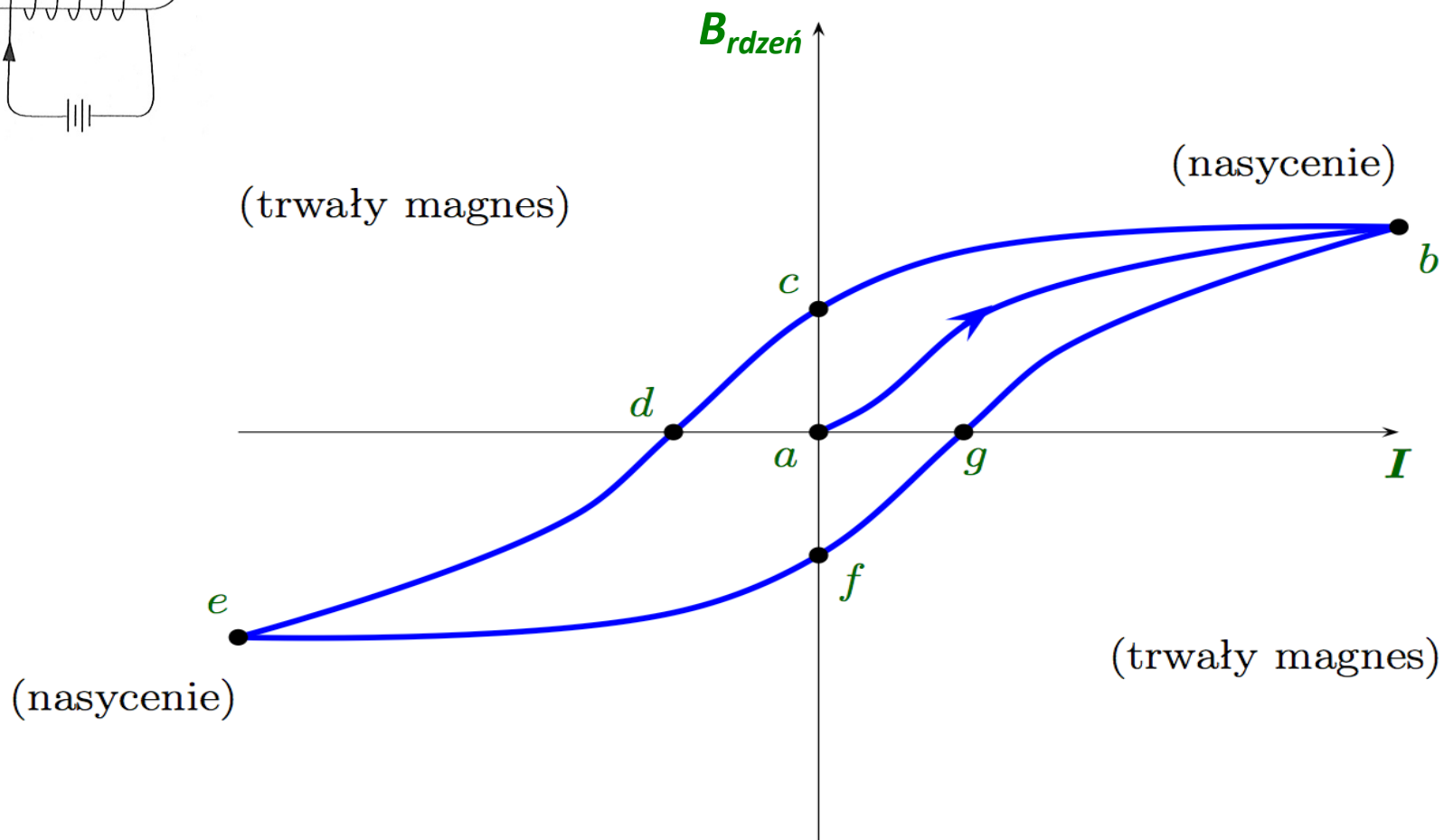
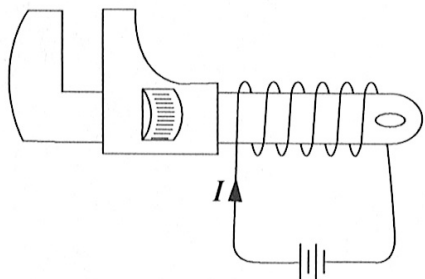
Nieuporządkowane domeny magnetyczne



Uporządkowane domeny po przyłożeniu zewnętrznego pola



Ferromagnetyzm



Pętla histerezy

Jak rozmagnesować ferromagnetyk?

np. namagnesowany śrubokręt?



<https://www.youtube.com/watch?v=SBEaDTyWztU>

Ferromagnetyzm zależy od temperatury



Powyżej pewnej temperatury (tzw. temperatury Curie) domeny magnetyczne przestają istnieć.

<https://www.youtube.com/watch?v=8WjN7PNOxF0>