



**Proszę o uwagę**

# 19. Magnetyzm materii

---

- prawo Ampera,
- właściwości pola magnetycznego,
- magnetyczny moment dipolowy,
- własności magnetyczne materii,
- diamagnetyki, paramagnetyki, ferromagnetyki



# Wprowadzenie do prawa Ampera

Najważniejszą różnicą pomiędzy polami elektrostatycznym i magnetostatycznym jest to, że pole elektrostatyczne jest polem zachowawczym a pole magnetyczne takim polem nie jest.

Oznacza to, że cyrkulacja pola magnetycznego wzdłuż zamkniętego konturu jest bardzo często różna od zera podczas gdy cyrkulacja pola elektrostatycznego jest zawsze równa zeru.

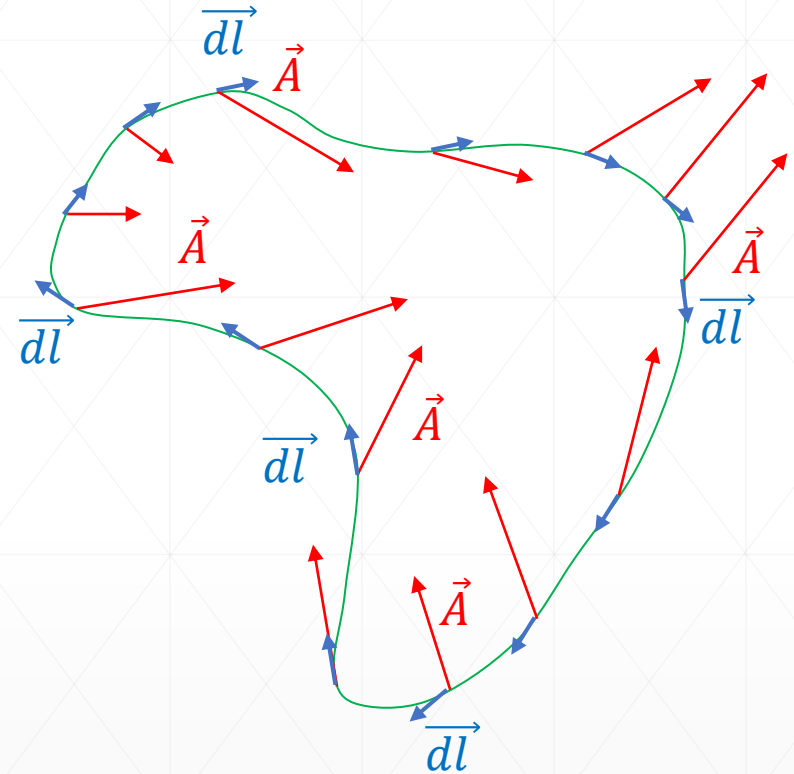
Przypomnijmy sobie co to jest cyrkulacja pola wektorowego.

# Cyrkulacja pola wektorowego

Dla danego pola wektorowego  $\vec{A}(x, y, z)$  wybieramy sobie dowolny kontur  $C$ .

Wówczas cyrkulacją pola  $\vec{A}$  po konturze  $C$  nazywamy skalar będący posumowanymi (scałkowanymi) iloczynami skalarnymi pola  $\vec{A}$  oraz bardzo krótkich wektorów  $\vec{dl}$  stycznych do konturu  $C$ .

Sumujemy składowe styczne do konturu  $C$  pola wektorowego  $\vec{A}$



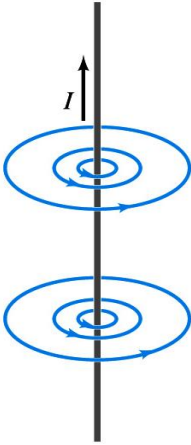
$$\oint_C \vec{A} \cdot \vec{dl} = \oint_C A \cdot dl \cos \alpha(\vec{A}, \vec{dl})$$

Kółko oznacza że krzywa, po której liczymy cyrkulację jest zamknięta

Zmiana kierunku liczenia cyrkulacji nie powoduje jej zmiany.

# Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem

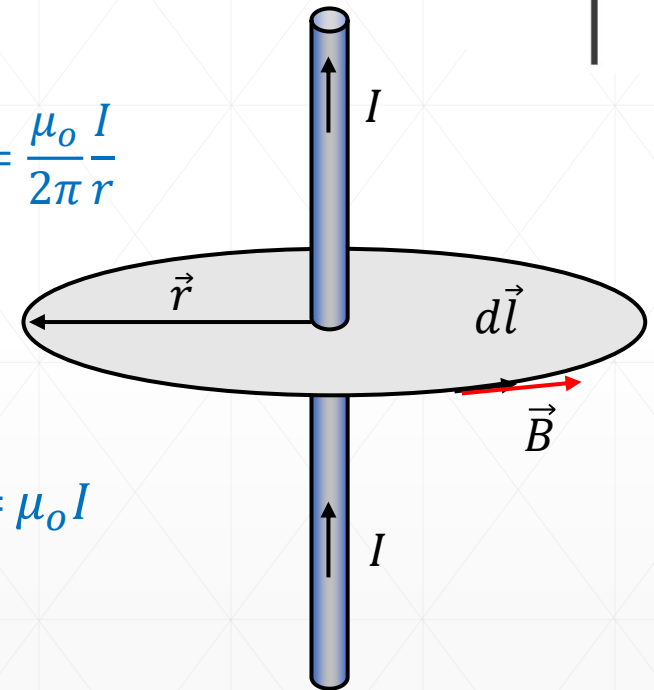
Rozważmy nieskończenie długi przewód prostoliniowy w którym płynie prąd  $I$



Wyznamy cyrkulacja wektora  $\vec{B}$  po okręgu:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_{\vec{B} \parallel d\vec{l}} B dl =_{B=\text{const.}} B \oint dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

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



Okazuje się, że wyrażenie to jest słuszne nie tylko dla okręgu.

# Prawo Ampera

Pozwala wyznaczyć pole magnetyczne w przypadku symetrii układów prądów

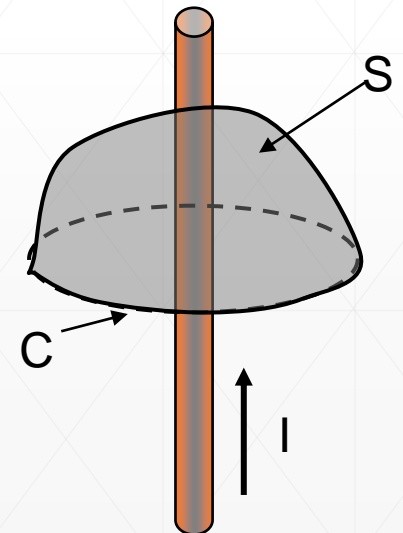
Cyrkulacja wektora indukcji magnetycznej jest równa sumie algebraicznej natężeń prądów płynących wewnątrz konturu całkowania pomnożonych przez przenikalność magnetyczną ośrodka

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r \sum_{i=1}^n I_i = \mu_0 \mu_r I_C$$

w przypadku prądu niejednorodnego:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

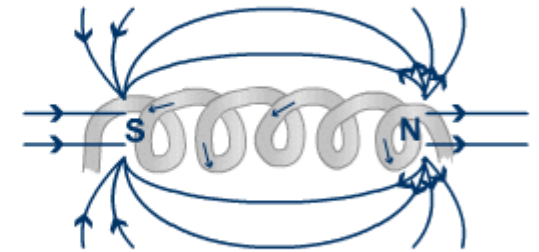
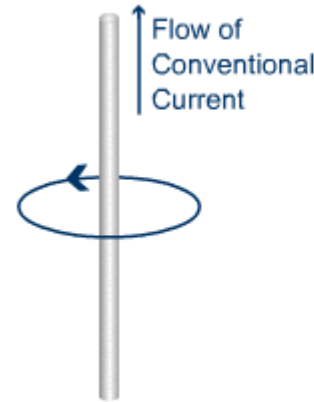
gdzie powierzchnia  $S$  jest rozpięta na konturze  $C$



# Właściwości pola magnetycznego

- Pole magnetyczne **nie jest** polem zachowawczym, ponieważ cyrkulacja wektora  $\vec{B}$  po konturze zamkniętej jest różna od zera

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r I_c$$



- Pole magnetyczne jest polem **wirowym**
- Pole elektrostatyczne jest polem bezwirowym, bo jest polem zachowawczym:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

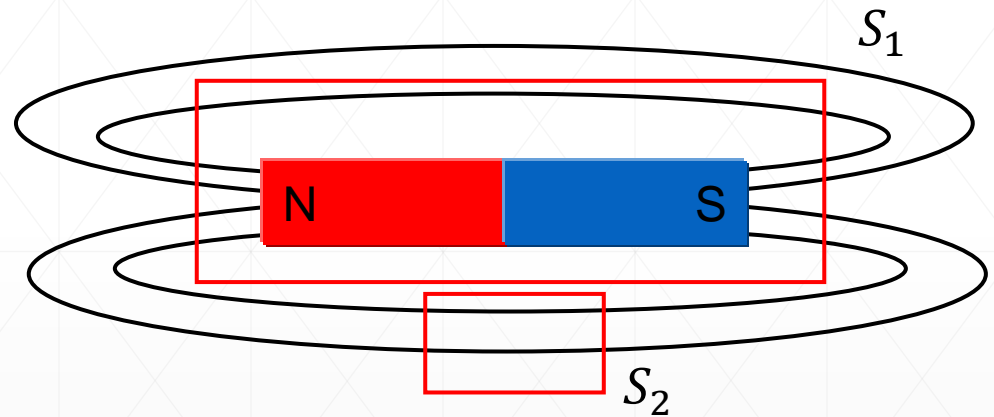
# Strumień magnetyczny

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Tw. Gaussa: Strumień magnetyczny przez dowolną zamkniętą powierzchnię równa się zero

$$\Phi_B = 0$$

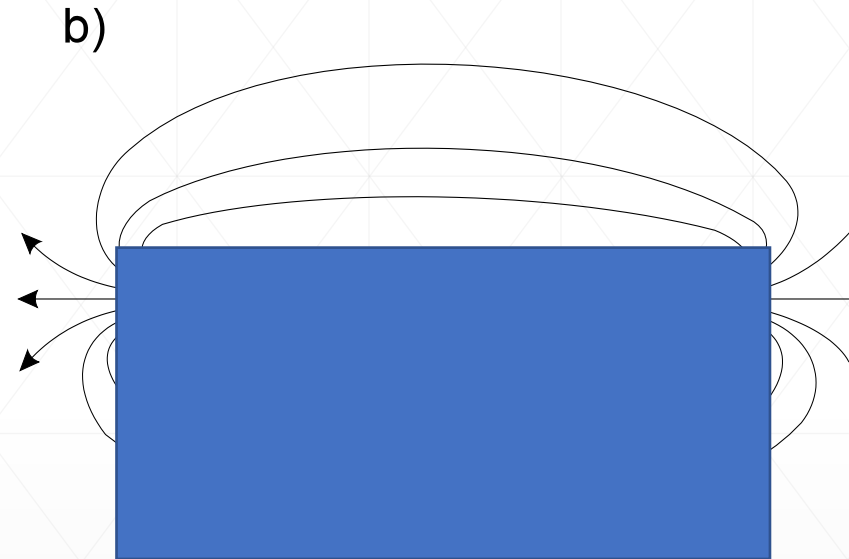
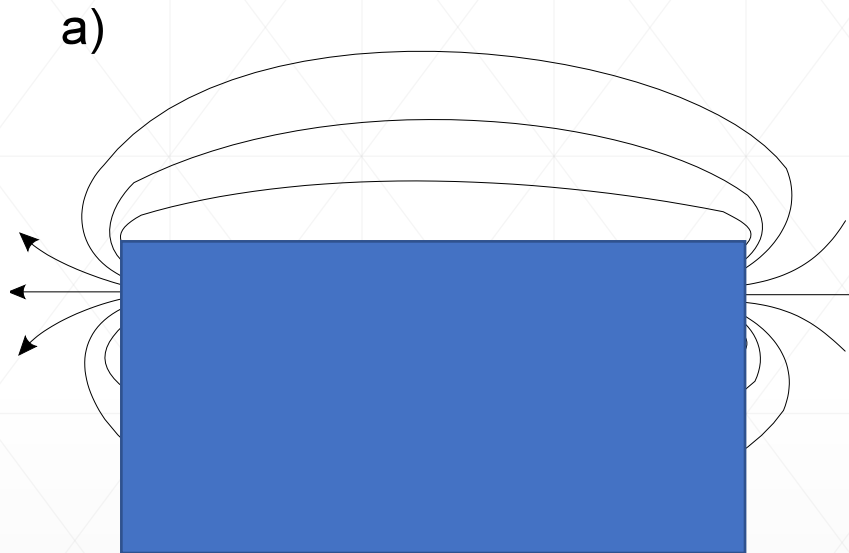
$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$



- linie pola magnetycznego są zawsze zamknięte
- w przyrodzie nie występują ładunki magnetyczne
- pole magnetyczne jest bezźródłowe
- jednostka strumienia weber  $\text{Wb} = \text{Tm}^2$



# Obwód z prądem, a magnes stały



Skąd wynika podobny kształt linii sił pola magnetycznego magnesu stałego (a) i solenoidu (b)?

# Magnetyczny moment dipolowy

Występowanie biegunów magnetycznych  $N$  i  $S$  rozsuniętych na odległość  $d$  kojarzy się z pojęciem dipola magnetycznego. Właściwości dipolowe w czasie przepływu prądu mają zarówno solenoid, jak i obwód kołowy czy pojedyncza ramka

Pojedynczy zamknięty obwód o powierzchni przekroju  $S$  przez który płynie prąd o natężeniu  $I$  charakteryzuje się dipolowym momentem magnetycznym  $\vec{p}_m$ :

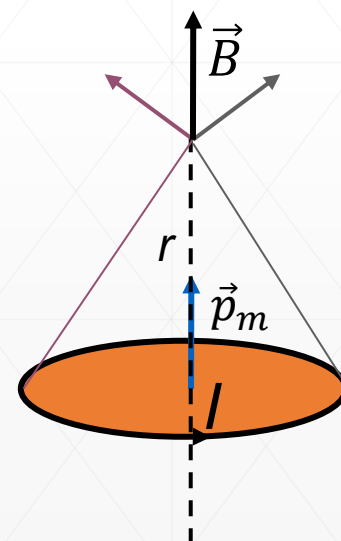
$$\vec{p}_m = I \cdot \vec{S} \quad [\text{Am}^2] = [\text{J/T}]$$

$$U = -\vec{B} \cdot \vec{p}_m$$

indukcja pola na osi obwodu w odległości  $r$  wynosi

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{\vec{p}_m}{2\pi r^3}$$

analogia do dipola elektrycznego

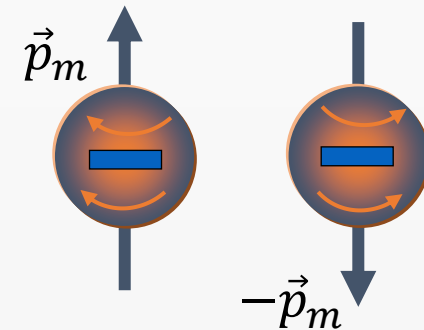
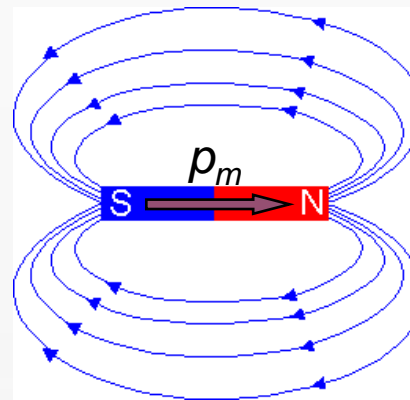
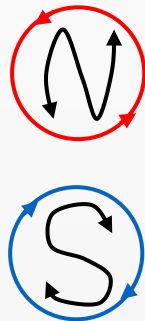
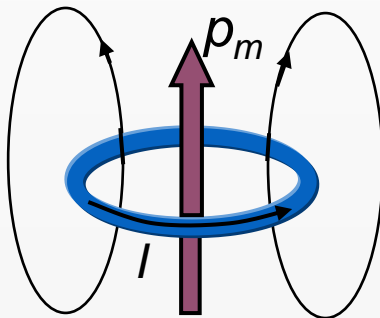
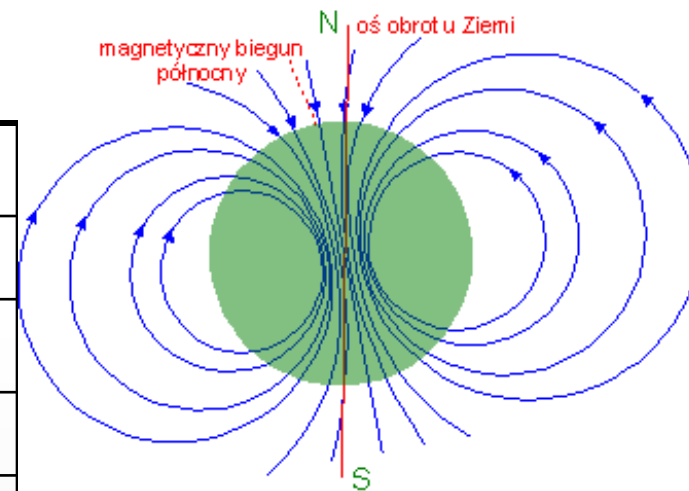
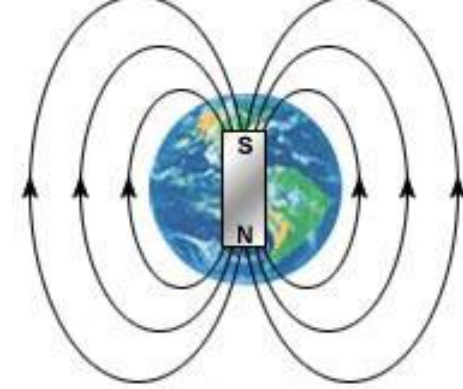


$$\vec{p}_m = I \cdot \vec{S}$$

# Dipole magnetyczne

Przykładowe wartości niektórych dipolowych momentów magnetycznych

cewka z prądem	1 [J/T]
magnes sztabkowy	5 [J/T]
Ziemia	$8,0 \cdot 10^{22}$ [J/T]
proton	$1,4 \cdot 10^{-26}$ [J/T]
elektron	$8,0 \cdot 10^{-24}$ [J/T]



# Wektory charakteryzujące pole magnetyczne

Wektor indukcji pola magnetycznego  $\vec{B}$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

$$[B] = \left[ \frac{N}{A \cdot m} \right] = [T]$$

Wektor natężenia pola magnetycznego  $\vec{H}$

$$[H] = \left[ \frac{A}{m} \right]$$

Wektor indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  silnie zależy od właściwości ośrodka (od przenikalności magnetycznej  $\mu$  tego ośrodka).

Wektor natężenia pola magnetycznego  $\vec{H}$  nie zależy od ośrodka. Jest taki sam w próżni jak i w ośrodkach materialnych.

Dla pola elektrycznego w dielektryku wektor polaryzacji elektrycznej  $\vec{P}$

$$\vec{P} = n\vec{p} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{p}_i = \chi \epsilon_0 \vec{E}$$

podatność elektryczna materiału

Analogicznie dla pola magnetycznego **wektor namagnesowania  $\vec{M}$**

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{p}_{mi} = \chi_M \vec{H}$$

podatność magnetyczna materiału

# Jednostki w polu magnetycznym

1T jest to bardzo duża wartość indukcji pola magnetycznego. Jest to taka indukcja, która na ładunek 1C poruszający się prostopadle do linii sił pola magnetycznego działa siłą 1N.

Źródło	B
Średnia wartość indukcji magnetycznej Ziemi przy jej powierzchni	31,9 $\mu$ T
10 cm od długiego przewodnika z prądem o wartości 100 A	0,6 mT
W pobliżu magnesika na lodówkę indukcja wynosi	5 mT
W pobliżu magnesu neodymowego indukcja jest równa	1,25 T
Magnesy nadprzewodzące w LHC w laboratorium CERN pod Genewą	do 8 T
Magnesy pułapki magnetycznej w ITER mają mieć	do 13 T
Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN (pole impulsowe)	42 T
Los Alamos National High Magnetic Field Laboratory (pole impulsowe)	100 T

LHC – Large Hadron Collider

CERN - Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor

# Ze względu na właściwości magnetyczne ciała dzielimy na:

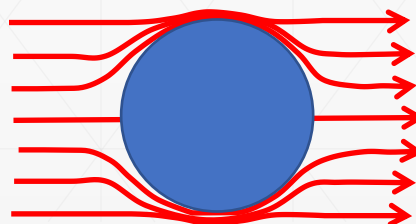
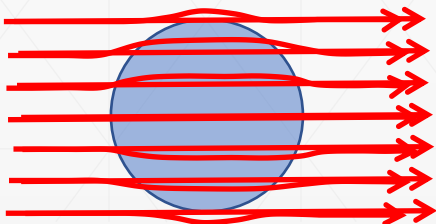
- **diamagnetyki** ( $\mu_r < 1$ ) momenty indukowane, przeciwnie skierowane do pola zewnętrznego bo  $\chi_M < 0$ , wypychane z silniejszego pola, wszystkie ciała (szczególnie z  $p_m = 0$ )  
np. woda  $\mu_r = 0,999991$
- **paramagnetyki** ( $\mu_r > 1$ ) uporządkowane momenty własne  $p_m$  zgodnie z zewnętrznym polem, paramagnetyk jest wciągany do obszaru silniejszego pola  
np. glin  $\mu_r = 1,000008$
- **magnetyki** (np. **ferromagnetyki**) ( $\mu_r \gg 1$ ) kryształy z budową domenową, powstaje silny moment magnetyczny  
np. stal  $\mu_r = 300$  (zależy od natężenia pola)  
krzywa magnesowania w kształcie pętli histerezy

$$\mu_r = 1 + \chi_M$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

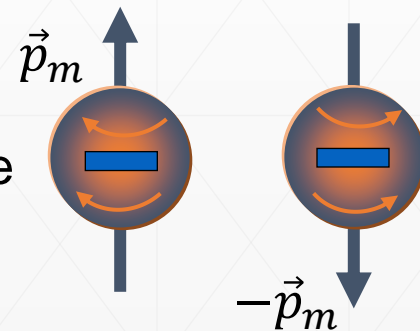
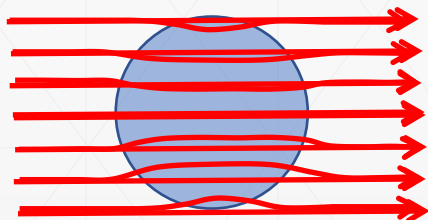
# Diamagnetyki

- diamagnetyki to ciała dla których wypadkowy moment magnetyczny każdego atomu jest równy zero
- zewnętrzne pole magnetyczne modyfikuje stany elektronów w atomach, tak aby dodatkowe pole magnetyczne związane z tymi modyfikacjami było przeciwnie skierowane względem pola wywołującego (konsekwencją reguły Lenza)
- indukowany moment magnetyczny jest zawsze proporcjonalny do pola zewnętrznego i jest do niego przeciwnie skierowany
- podatność magnetyczna  $\chi_M$  jest ujemna
- „wypychają” pole magnetyczne ze swojej objętości, nadprzewodnik jest idealnym diamagnetykiem



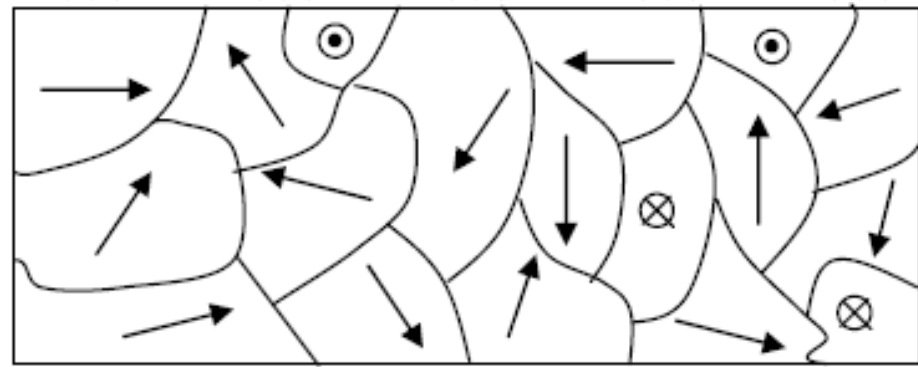
# Paramagnetyki

- atomy ciała stałego mają różny od zera i ustalony co do wartości moment magnetyczny
- zachodzi to dla powłok niecałkowicie wypełnionych – metale przejściowe i pierwiastki ziem rzadkich
- kierunek momentu magnetycznego zmienia się pod wpływem wzbudzeń cieplnych
- przy braku pola zewnętrznego kierunki te są przypadkowe
- w obecności pola momenty magnetyczne porządkują się i powstaje wypadkowy moment magnetyczny o kierunku zgodnym z kierunkiem pola zewnętrznego
- podatność magnetyczna  $\chi_M$  jest dodatnia
- „wciągają” pole magnetyczne w siebie – ale niezbyt silnie



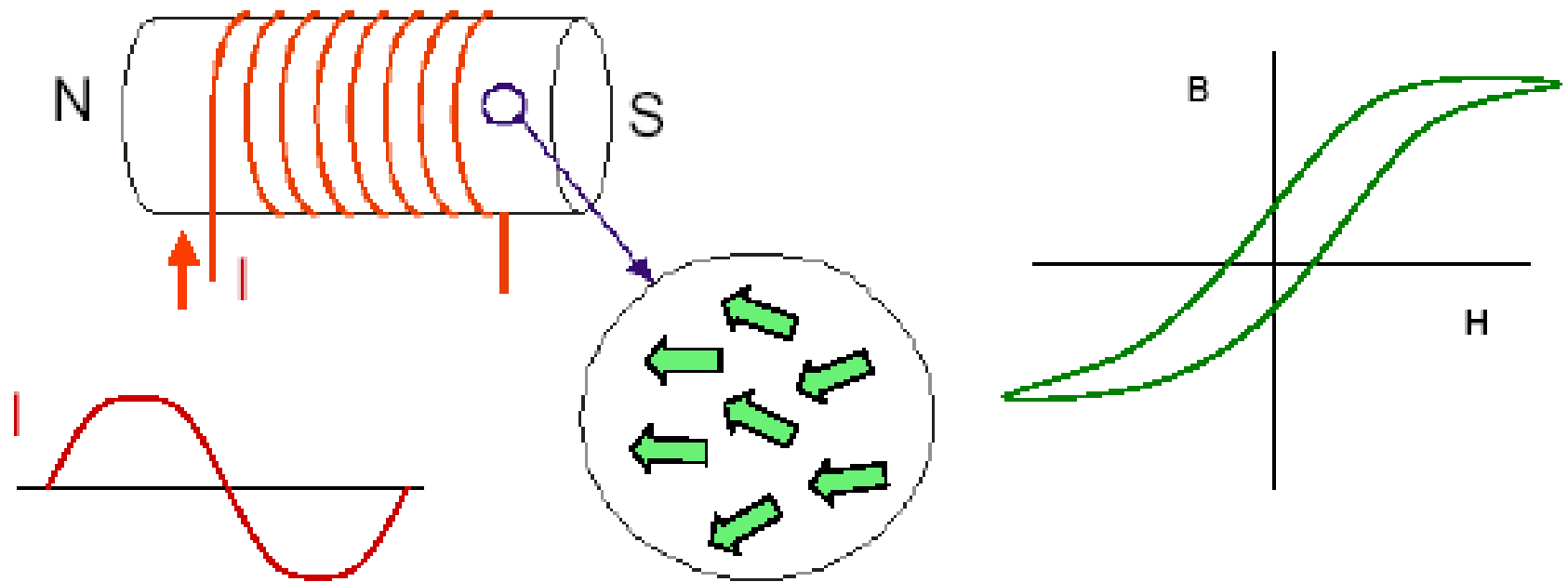


# Ferromagnetyki

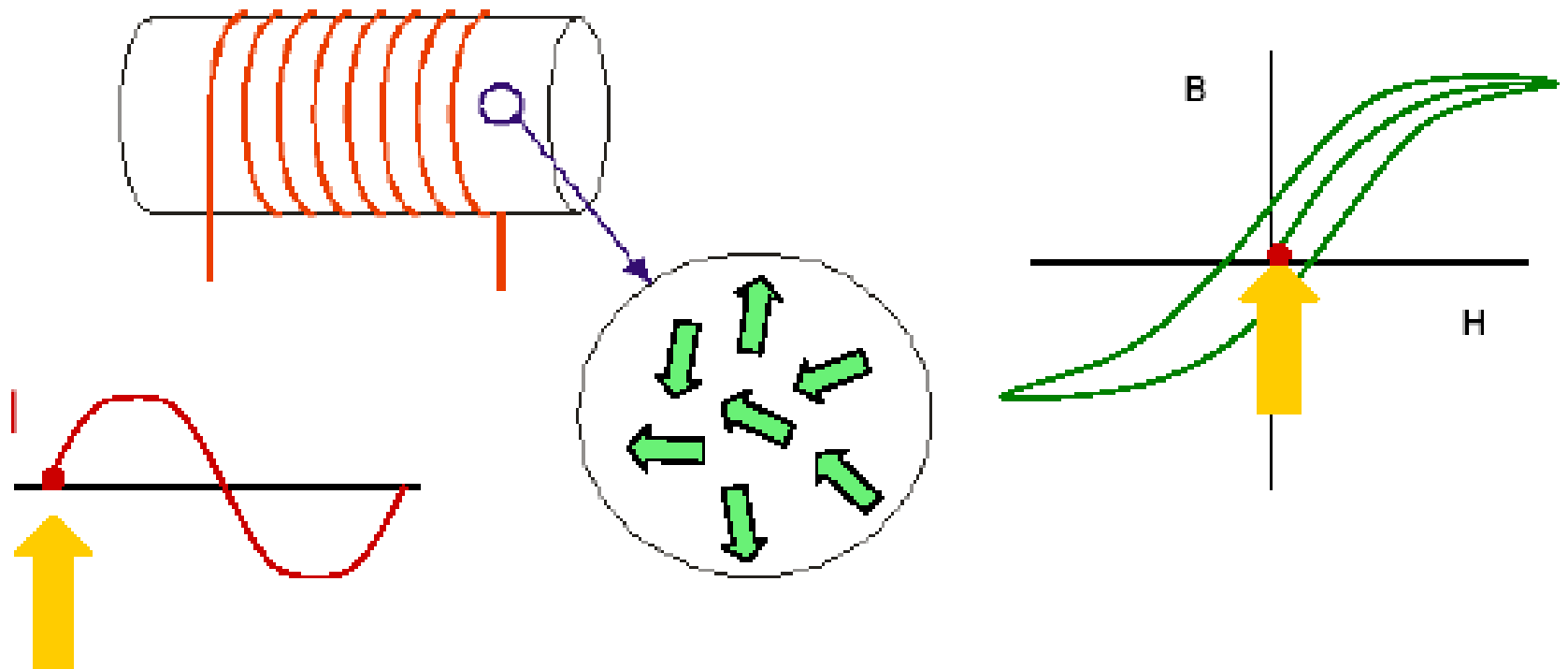


- spontaniczny moment magnetyczny – występuje nawet bez przykładania zewnętrznego pola magnetycznego
- tzw. oddziaływanie wymienne – odpowiedzialne za uporządkowanie magnetyczne w tzw. domeny magnetyczne
- mają dodatnią i dużą podatność magnetyczną  $\chi_M$
- wykazują trwałe namagnesowanie również po wyjęciu z pola magnetycznego  $H$
- ferromagnetyzm znika powyżej temperatury Curie
- krzywe namagnesowania charakteryzują się pętlą histerezy: magnetyki twarde i miękkie
- żelazo, kobalt, nikiel – magnesy sztabkowe

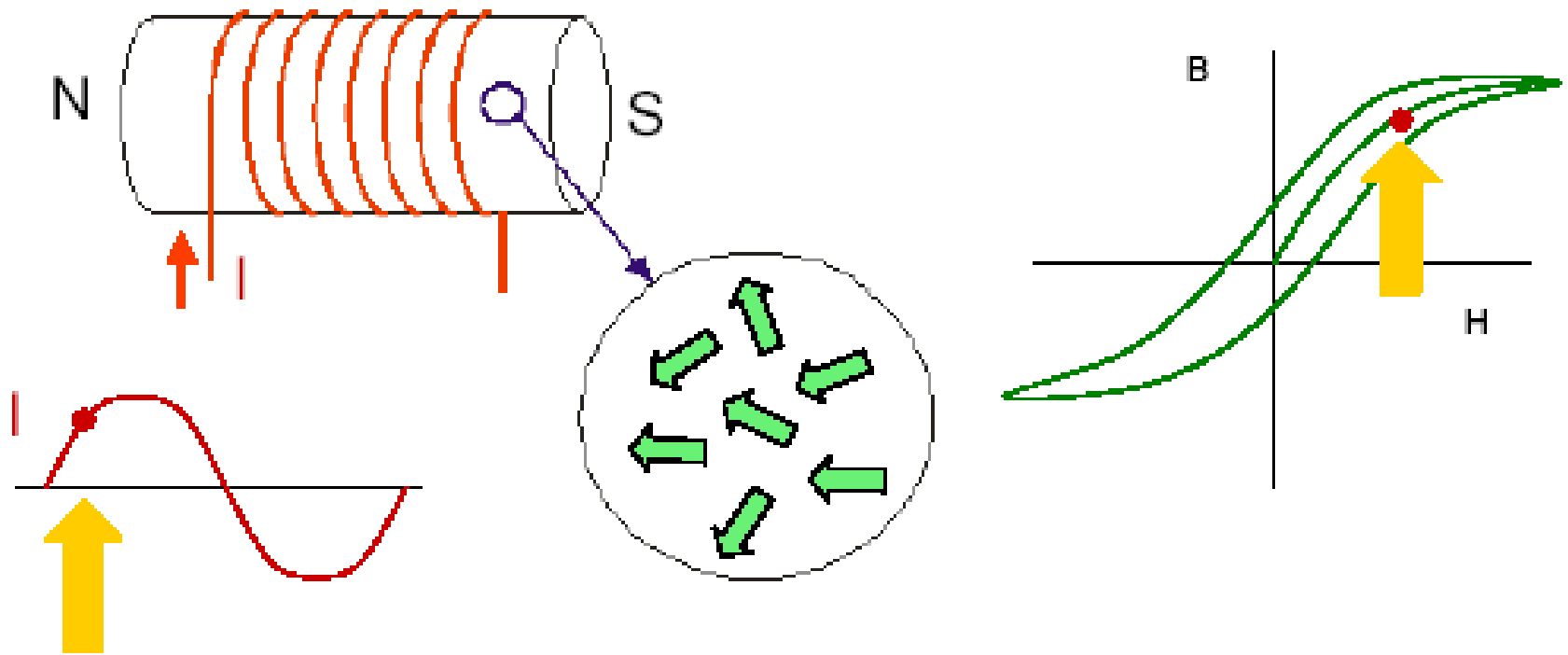
# HISTEREZA



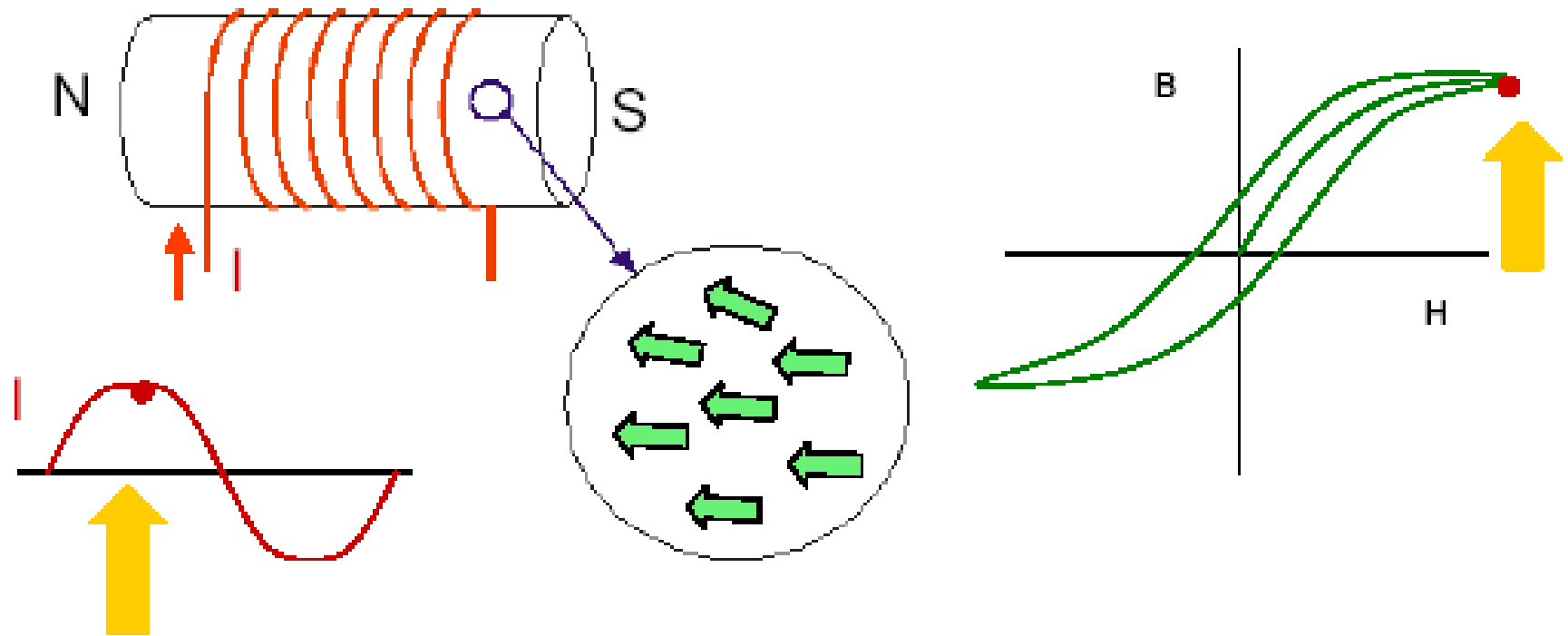
# HISTEREZA



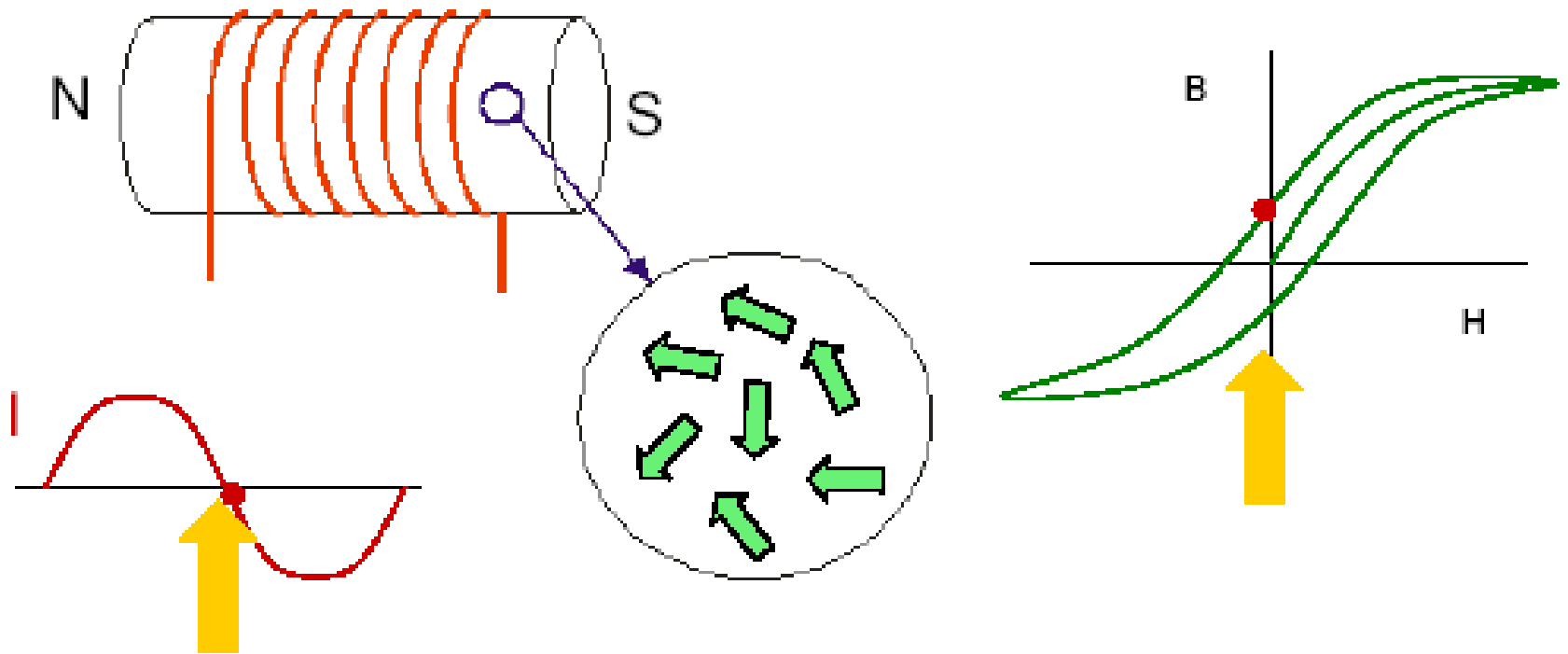
# HISTEREZA



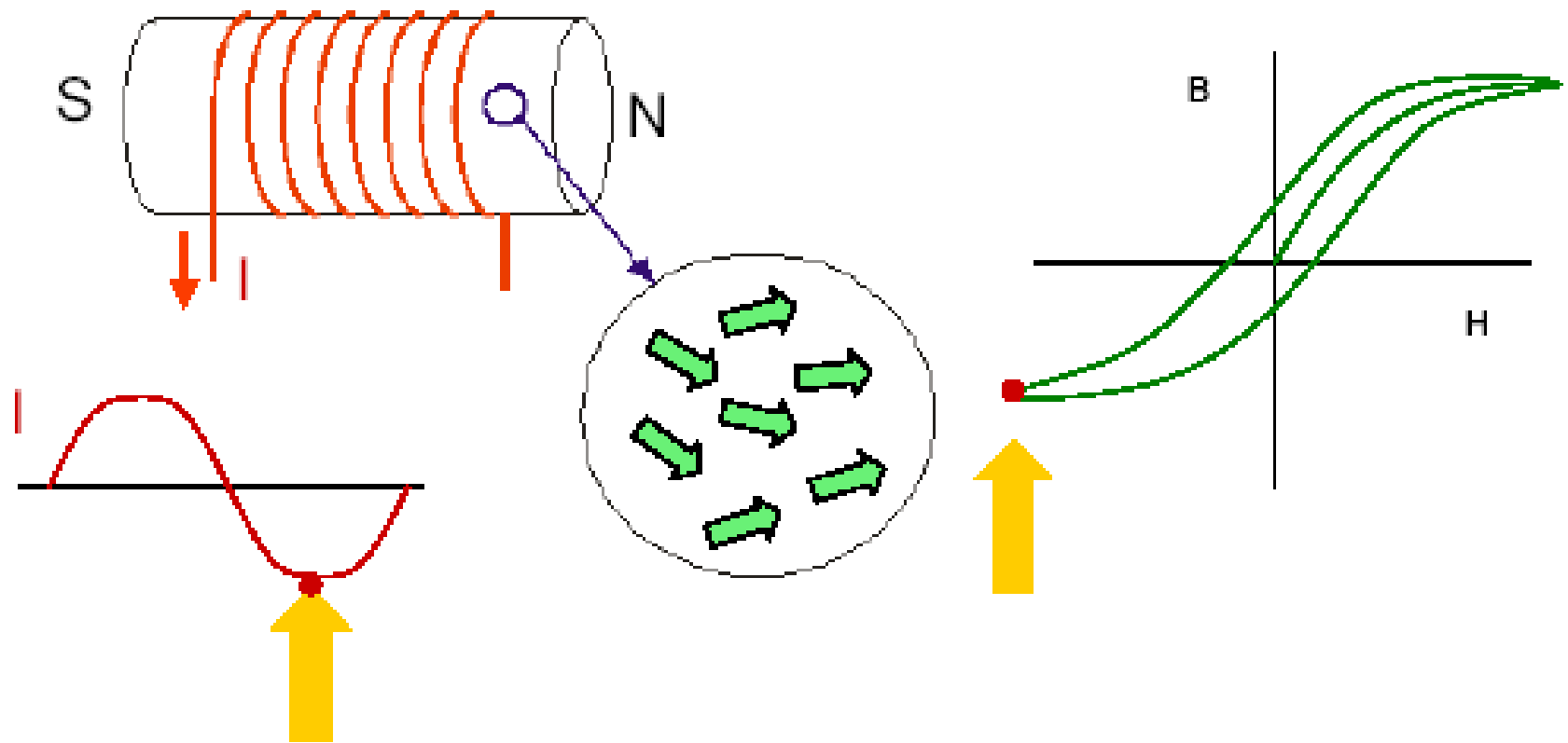
# HISTEREZA



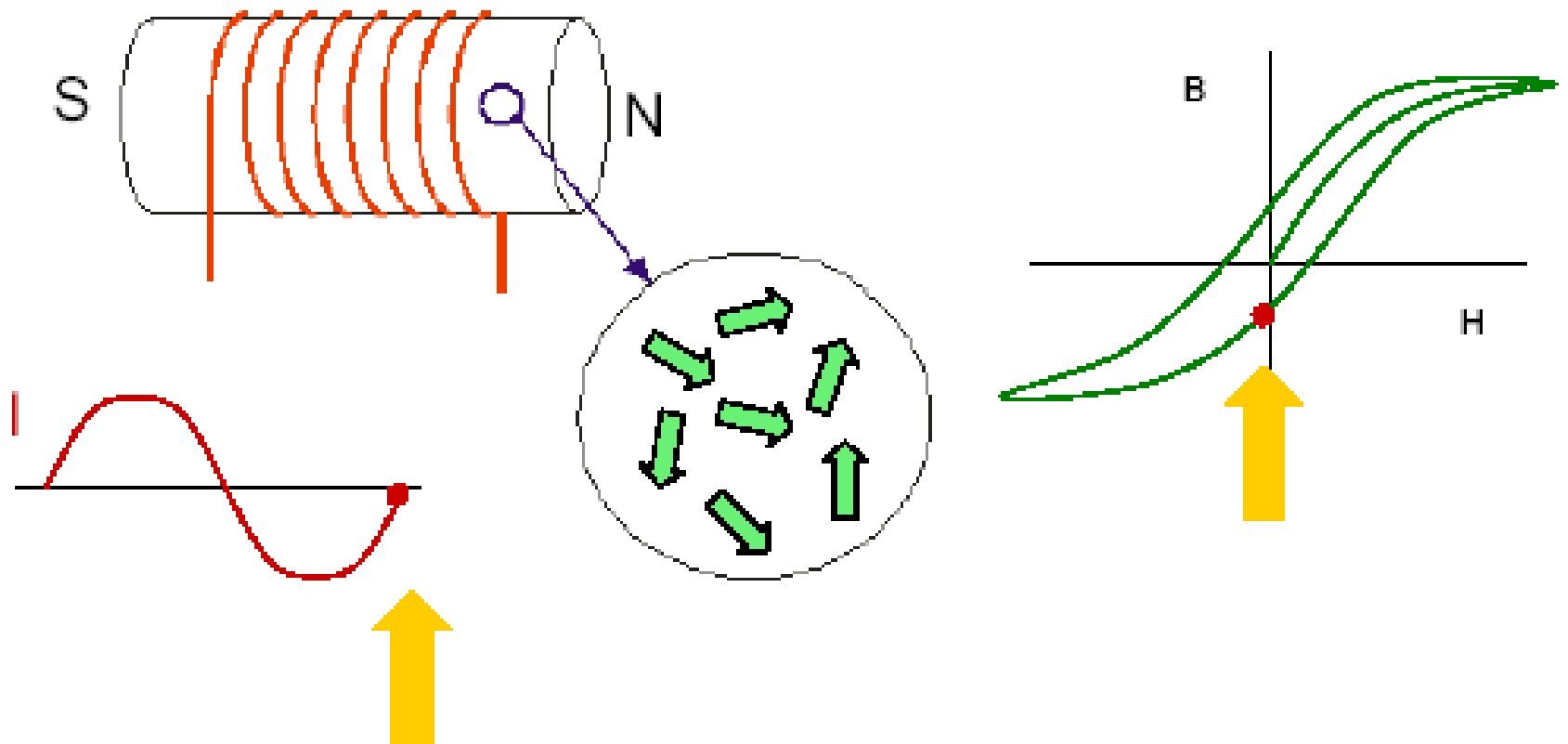
# HISTEREZA



# HISTEREZA

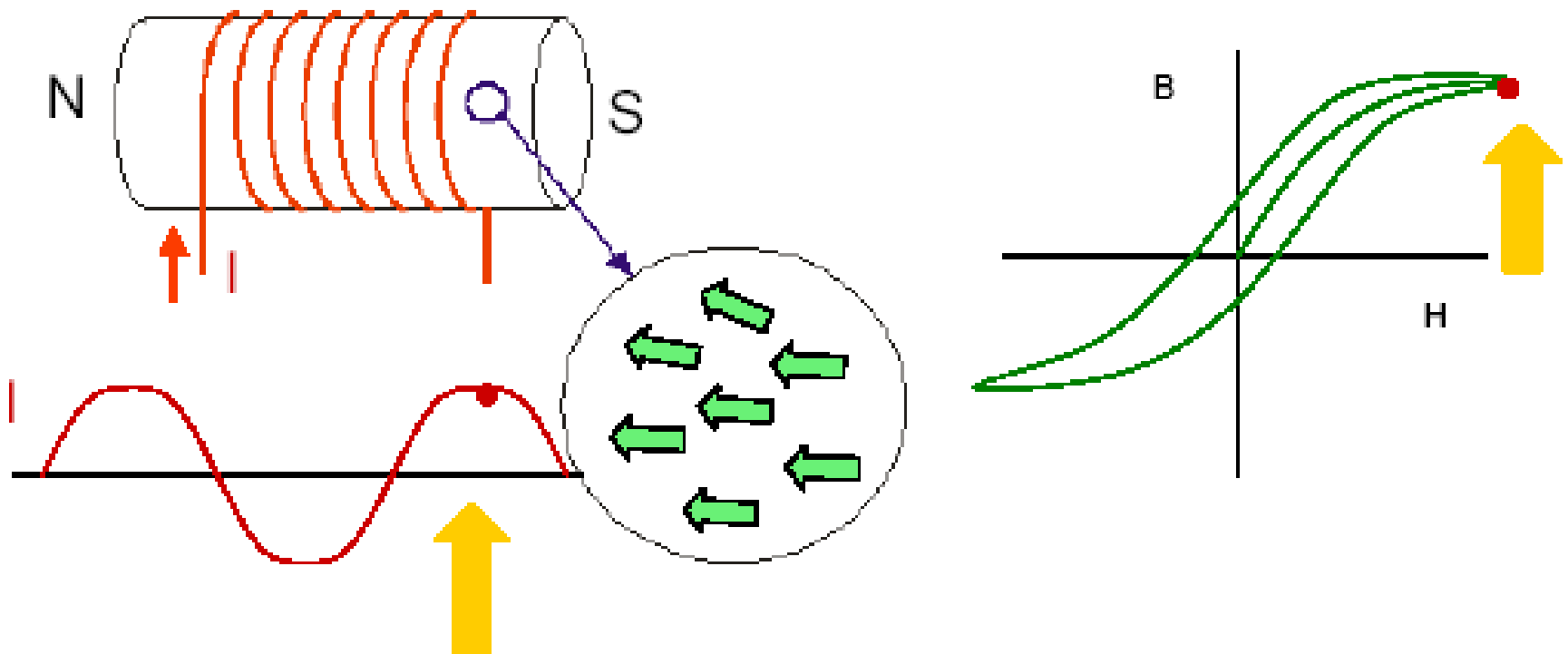


# HISTEREZA

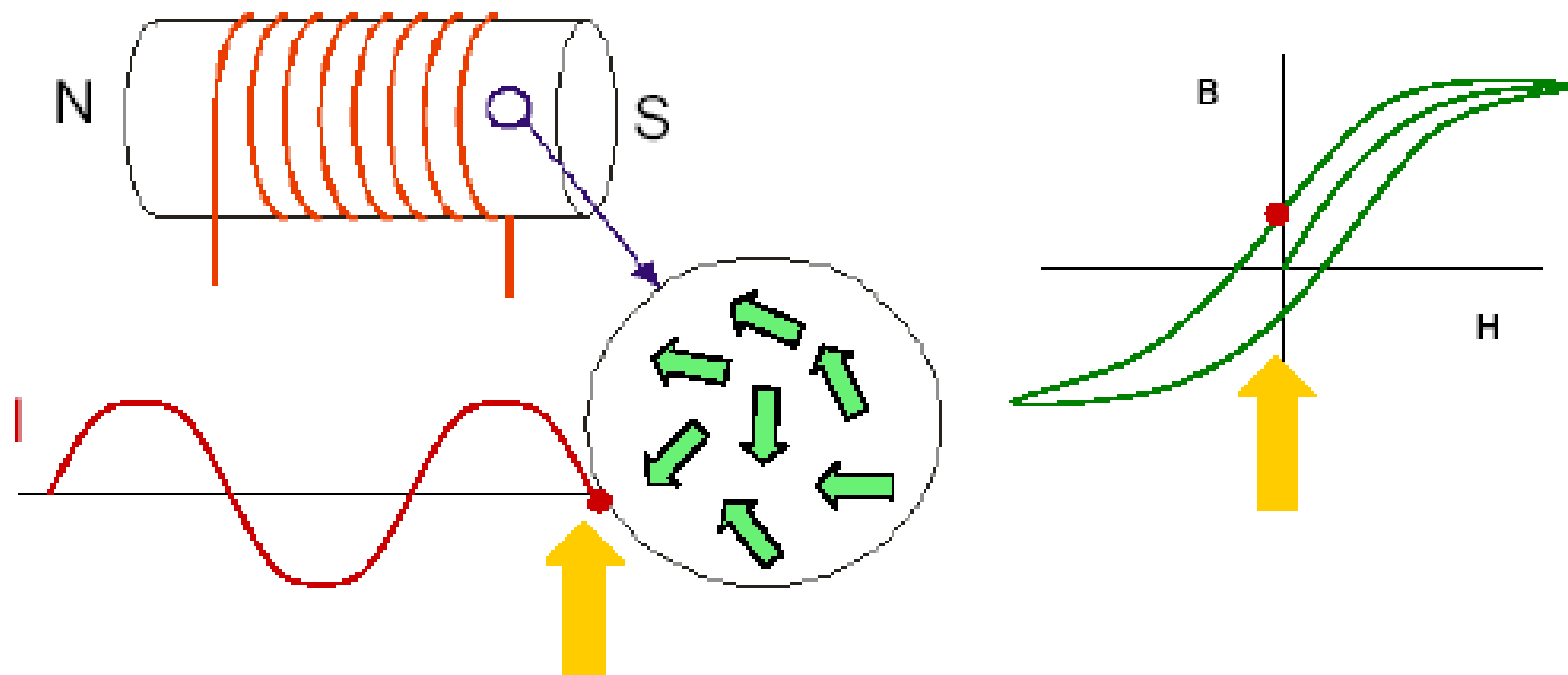




# HISTEREZA



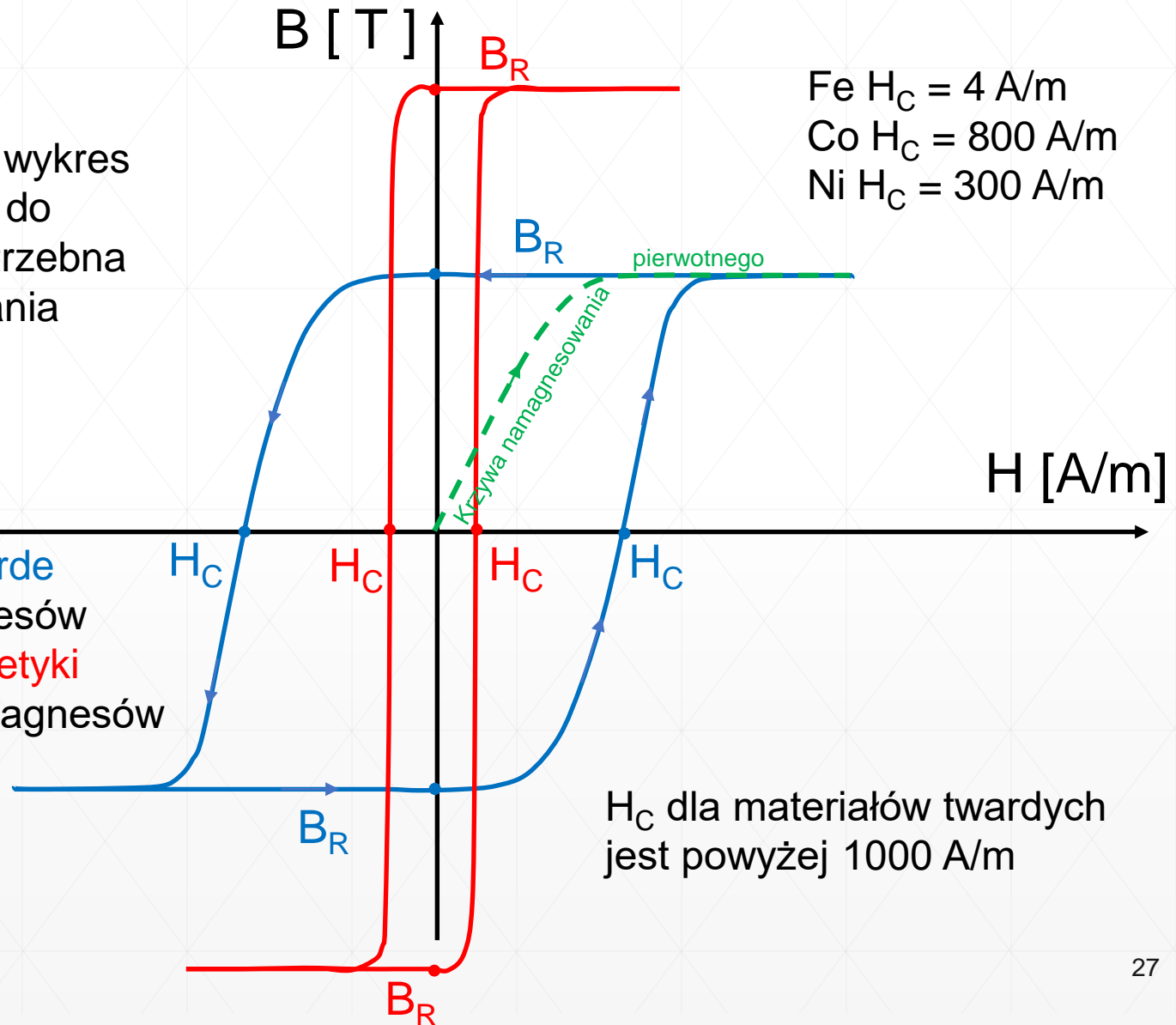
# HISTEREZA



# Ferromagnetyki miękkie i twarde

Pole powierzchni obejmowane przez wykres jest proporcjonalna do energii jaka jest potrzebna do przemagnesowania próbki.

Ferromagnetyki twarde stosujemy do magnesów stałych a **ferromagnetyki miękkie** do elektromagnesów i transformatorów.

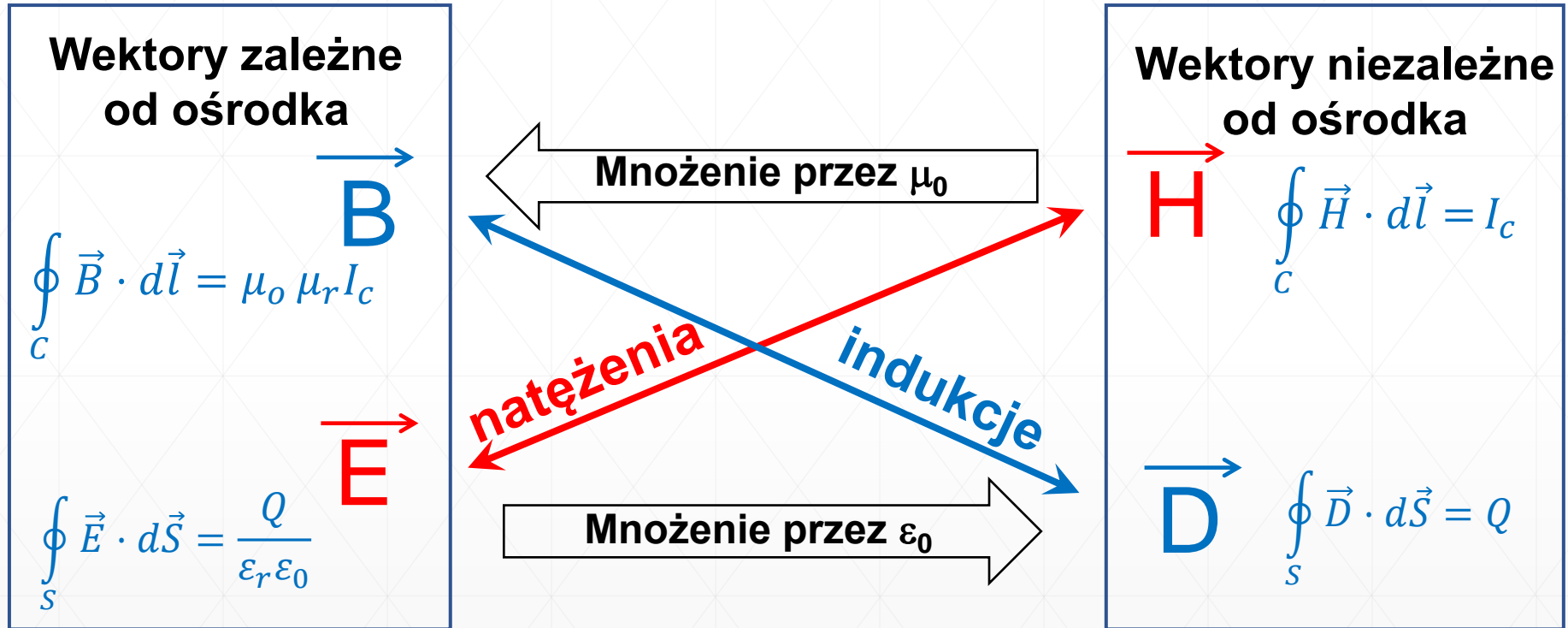


# Zastosowanie magnetyków

- w transformatorach, elektromagnesach, magnesach trwałych
- pamięci magnetyczne
  - w jednodomenowych układach ferromagnetycznych stan podstawowy jest podwójnie zdegenerowany, obydwa stany oddziela wysoka bariera energetyczna, zapis bitu informacji (magnetyczne pamięci RAM)
  - magnetoopór anizotropowy (AMR) – opór elektryczny zależny od kierunku prądu względem kierunku namagnesowania – analiza oporu pozwala uzyskać informacje o stanie magnetycznym danej komórki (główki odczytujące)
- magnetyczne materiały amorficzne w postaci taśm magnetycznych

# Analogie z polem elektrycznym

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_M \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_M) \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$



$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi_E \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi_E) \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$

# Podsumowanie

- Prawo Ampera - cyrkulacja wektora  $\vec{B}$
- Pole magnetyczne: wirowe, bezźródłowe, niezachowawcze
- Własności magnetyczne ośrodka - wektor namagnesowania, względna przenikalność magnetyczna  $\mu_r$
- Budowa i właściwości diamagnetyków, paramagnetyków i ferromagnetyków.



**Dziękuję za uwagę**