

# Podstawy fizyki – sezon 2

## 5. Pole magnetyczne II

Agnieszka Obłąkowska-Mucha



opracowane na podstawie:  
Halliday & Resnick, J. Walker „Fundamentals of Physics” extended  
10th Edition, John Wiley & Sons, Inc.

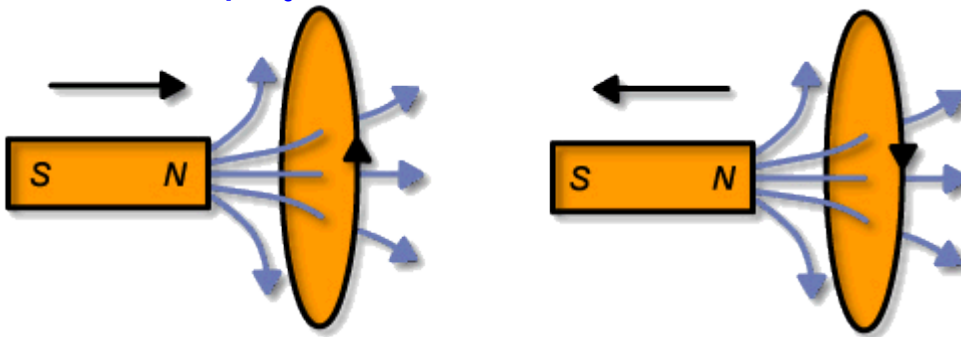
AGH, WFiIS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 106

[amucha@agh.edu.pl](mailto:amucha@agh.edu.pl)

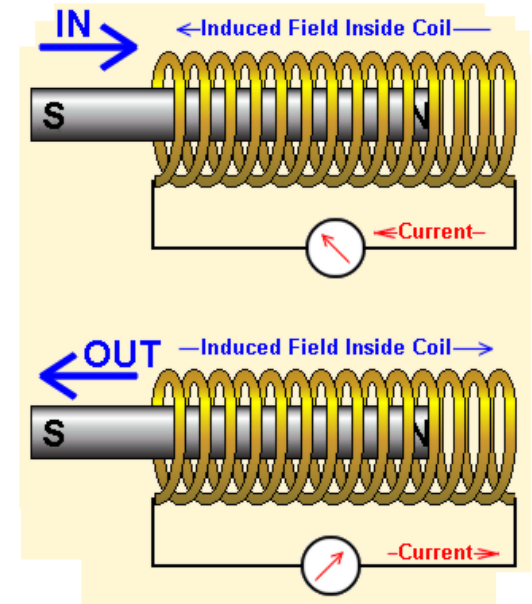
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

# Michael Faraday

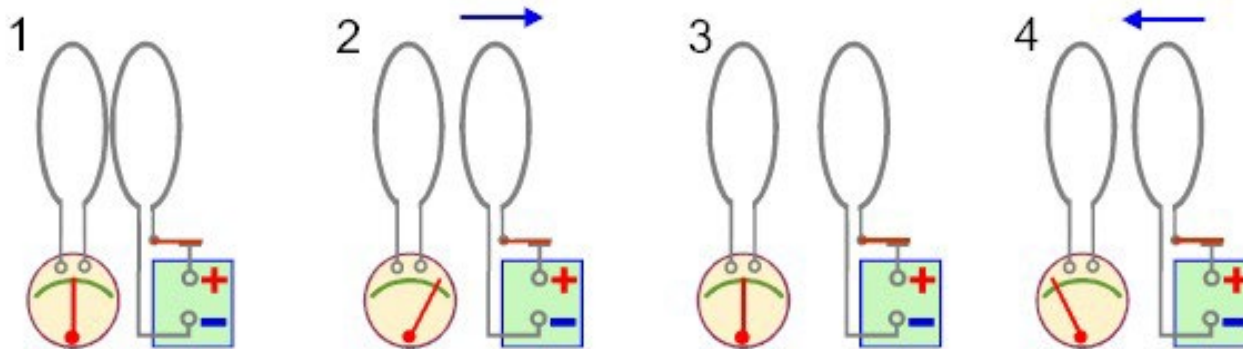
- ❑ 1833 – M. Faraday wykazał, że jeżeli obwód z przewodnika **włożymy w zmienny strumień pola magnetycznego**, to popłynie w tym obwodzie **prąd**.



- ❑ Oznaczało to, że w przewodniku powstała siła elektromotoryczna.
- ❑ Faraday zauważył, że wartość SEM zależy od liczby zwojów cewki i szybkości jej poruszania



# Zabawy (obserwacje) Faradaya



- W drugim obwodzie indukowany był prąd gdy:
- a) do cewki wkładany lub wyciągany z niej był magnes
  - b) poruszaliśmy obwodem z prądem,
  - c) włączaliśmy lub wyłączaliśmy prąd w pierwszym obwodzie

Jaką wspólną cechą mają te obserwacje?

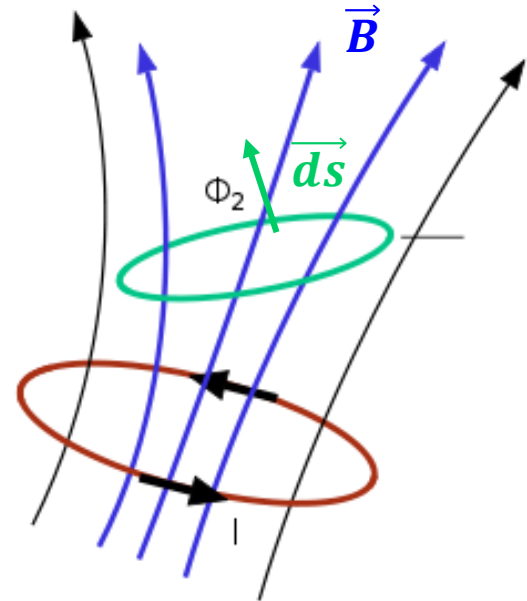
# Strumień pola magnetycznego

- ❑ Strumień pola magnetycznego wytworzonego przez pętlę z prądem  $I$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- ❑ W drugiej pętli popłynie prąd **tylko wtedy**, gdy znajdzie się ona w **zmiennym strumieniu** pola magnetycznego, tzn. w każdej chwili pętla **obejmuje inną liczbę linii pola** magnetycznego wytworzonego przez pierwszą pętlę.

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \Rightarrow \text{pole elektryczne}$$



# Prawo indukcji Faradaya

- ❑ Zmienny w czasie strumień pola magnetycznego powoduje powstanie SEM w przewodniku

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

prawo Faradaya

?? (za chwilę)

- ❑ Siła elektromotoryczna  $\mathcal{E}$  powstająca w obwodzie jest proporcjonalna do **szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej** obejmowanego przez ten obwód

$$\mathcal{E}_{ind} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \qquad \mathcal{E}_{ind} \rightarrow I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R}$$

- ❑ SEM zatem może być indukowane gdy:
  - porusza się źródło pola magnetycznego (magnes, pętla, cewka)
  - zmienia się wartości indukcji  $B$  pola magnetycznego (np. przez zmienny prąd wytwarzający pole magnetyczne)

## Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...

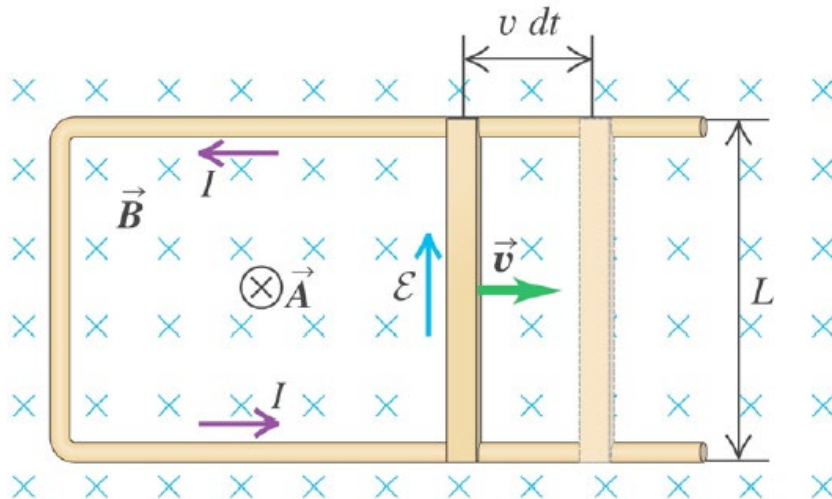
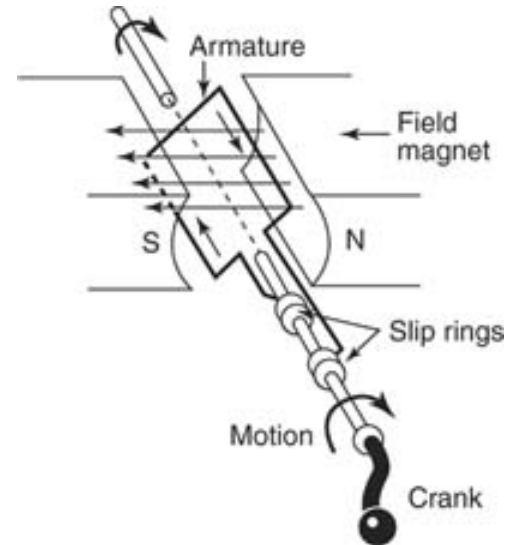
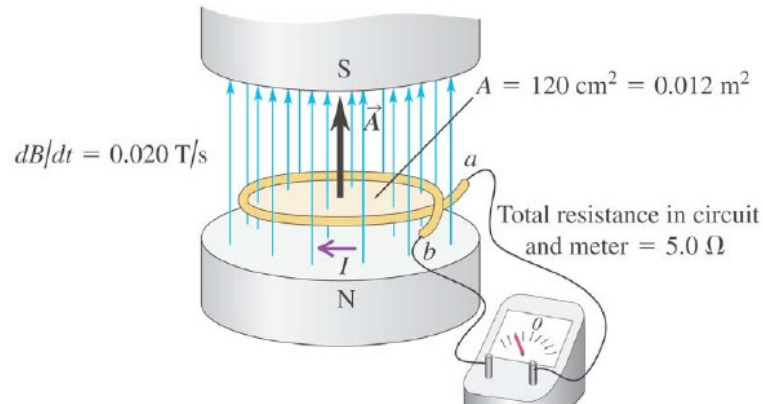
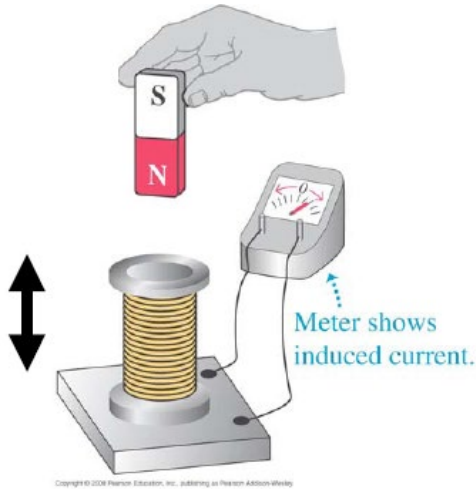
$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- Zmiana strumienia magnetycznego, która jest źródłem indukcji SEM może być spowodowana:
- a) poruszaniem magnesu lub przewodem z prądem w pobliżu przewodzącej pętli – powstaje niejednorodne, zależne od czasu, pole magnetyczne (zmienne  $\vec{B}$ ),
  - b) umieszczeniem przewodzącej pętli w zmiennym polu magnetycznym (zmienne  $\vec{B}$ ),
  - c) obracaniem pętli w stałym i jednorodnym polu magnetycznym (zmienne ustawienie wektorów  $\vec{B}$  i  $d\vec{s}$ ),
  - d) zmianą powierzchni pętli w czasie (zmienne  $s$ )

Lub kombinacją powyższych zjawisk

# Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...

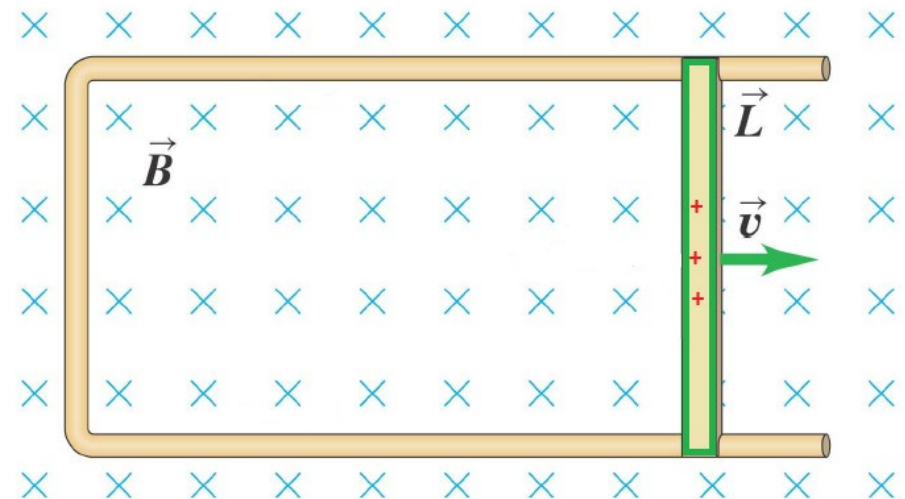
$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$



# Zjawisko indukcji elektromagnetycznej - wyjaśnienie

- ❑ W celu zrozumienia, dlaczego **wywołanie SEM pod wpływem zmiennego w czasie strumienia pola magnetycznego**, rozważmy układ:

ruchomy przewód o długości  $L$   
porusza się z prędkością  $v$  w  
jednorodnym polu magnetycznym  
o indukcji  $B$  (o zwrocie za  
rysunek)



- ❑ Jako doświadczeni fizycy zrobimy analizę procesu:

mamy zamknięty obwód w polu magnetycznym,  
gdy przewód nie porusza się – prąd nie płynie, ale!

Na poruszające się ładunki w polu magnetycznym ....

... działa siła Lorentza:  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$



# Zjawisko indukcji elektromagnetycznej - wyjaśnienie

... działa siła Lorentza:  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ ,  
która powoduje rozsuniecie ładunków w przewodzie

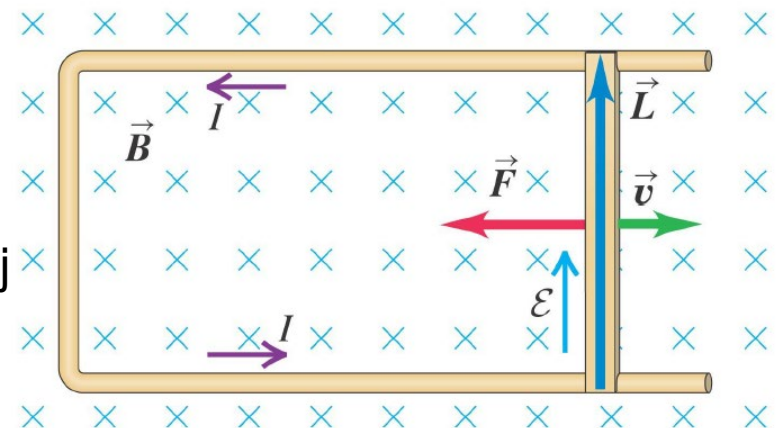
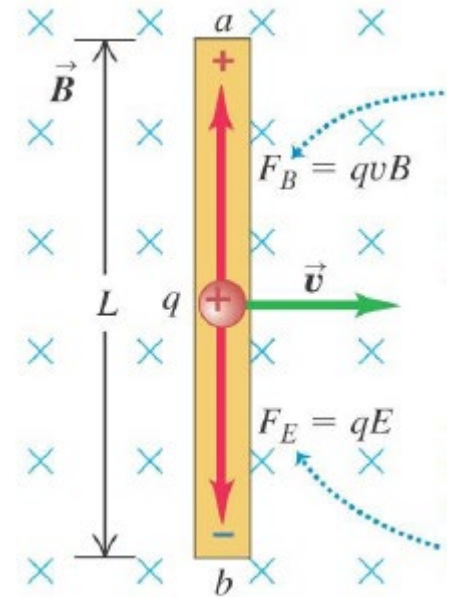
A jak na końcach przewodnika powstanie różnica potencjałów, to....

... powstanie siła elektryczna:  $\vec{F}_E = q\vec{E}$

... i popłynie w nim prąd:  $\mathcal{E}_{ind} \rightarrow I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R}$

A na przewodnik z prądem w polu magnetycznym działa **siła Lorentza**  $\vec{F}$ , której zwrot jest przeciwny do zwrotu prędkości przewodnika (przewodnik hamuje, aż do pewnej prędkości granicznej).

...



# Zjawisko indukcji magnetycznej

- Gdy przewodnik przesuwamy w polu  $\mathbf{B}$ , na ładunek  $q$  w ruchomej części przewodnika działa siła Lorentza.
- Spowoduje ona przemieszczanie się ładunków tak długo, aż powstałe pole elektryczne zrównoważy działanie siły Lorentza.

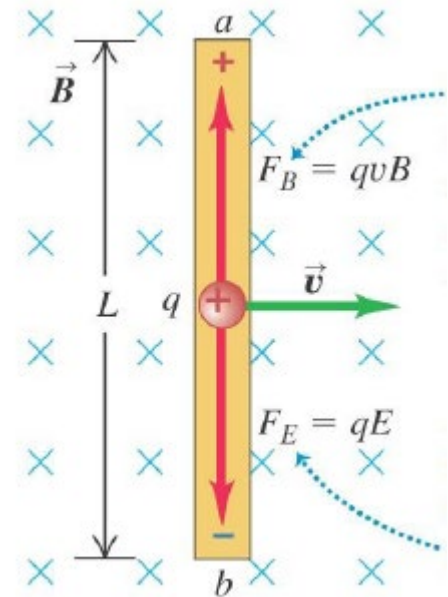
$$\left. \begin{array}{l} F_L = F_E \\ qvB = qE \end{array} \right\} \quad E = vB \quad \text{wiemy, że: } E = \frac{U}{l}$$

$$U \equiv \mathcal{E} = E l = vB l = \frac{dx}{dt} B l = B \frac{dS}{dt} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

pamiętamy?

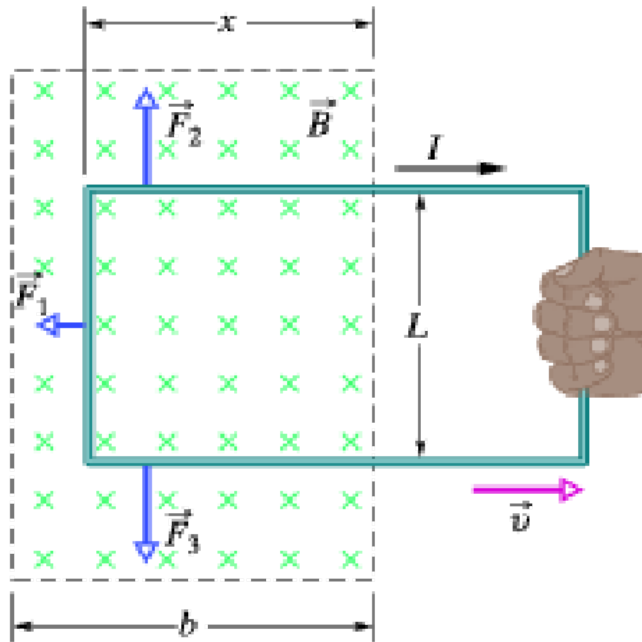
$$U = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{to prawo Faradaya jest w postaci:}$$

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



# Prąd indukowany w ramce

❑ Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

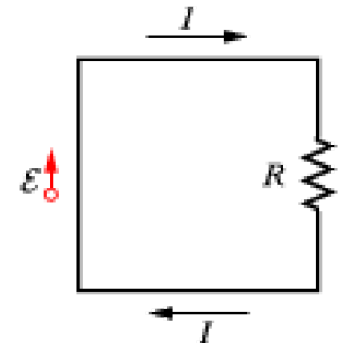


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

$$\Phi_B = B S = B L x$$

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = BL \frac{dx}{dt} = BLv$$

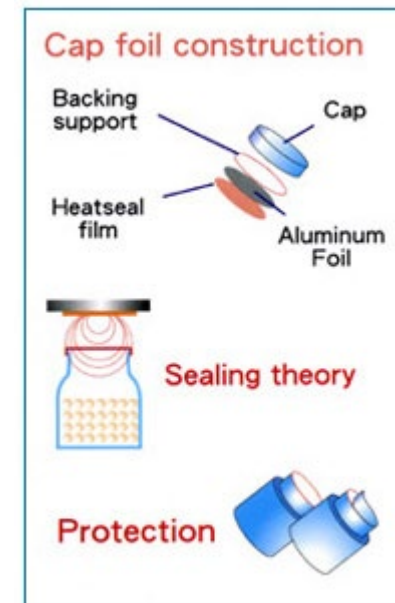
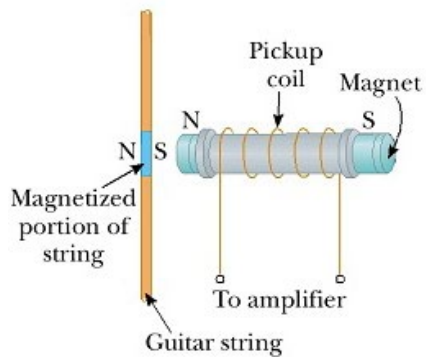
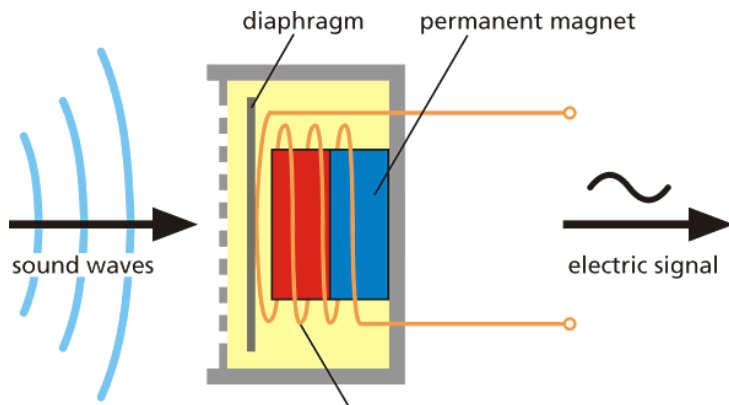
jest to zatem model układu elektrycznego:



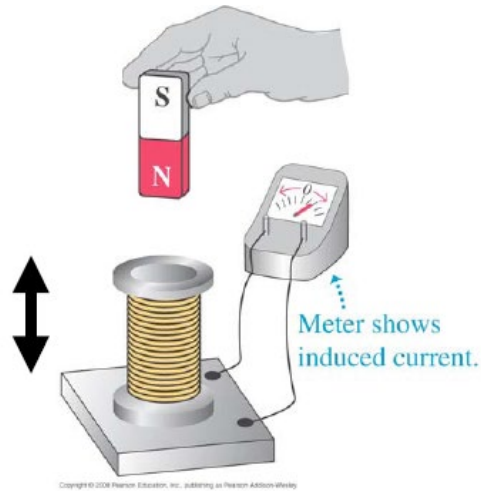
$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy,  
wyzdzielania ciepła

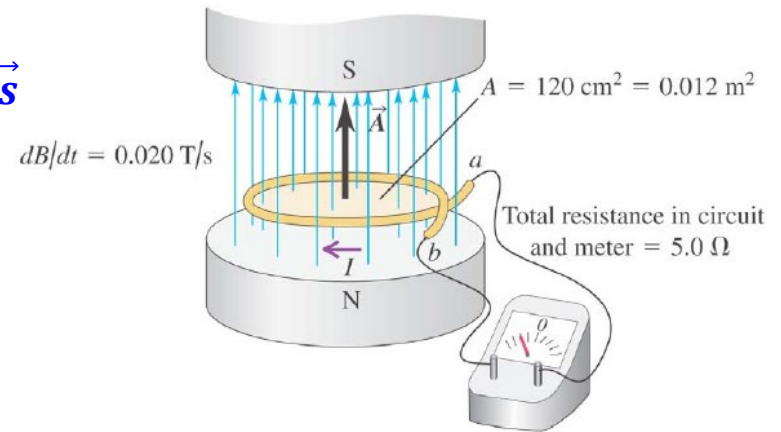
# Indukcja elektromagnetyczna - zastosowania



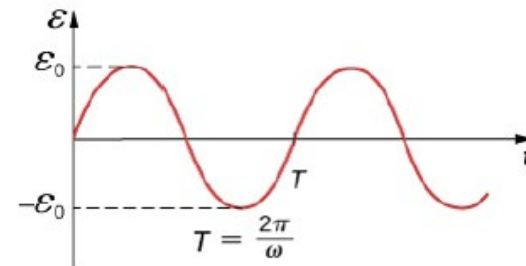
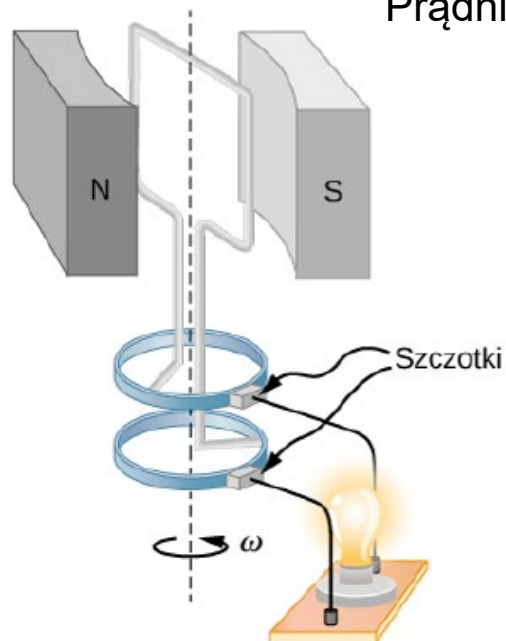
# Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...



$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$



Prądnica





# Produkcja prądu

Zmiana energii mechanicznej na energię elektryczną.

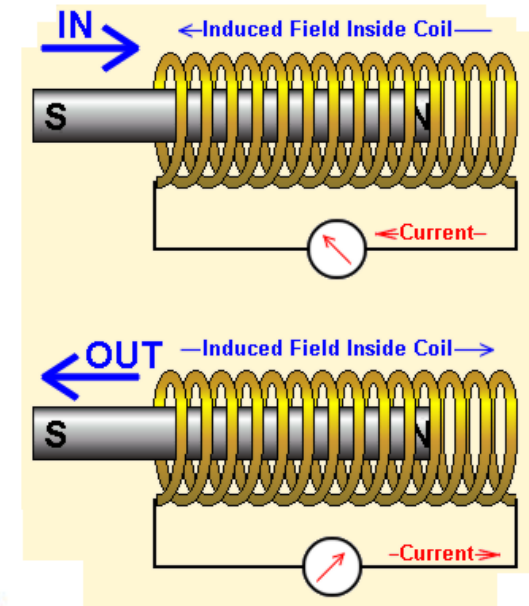
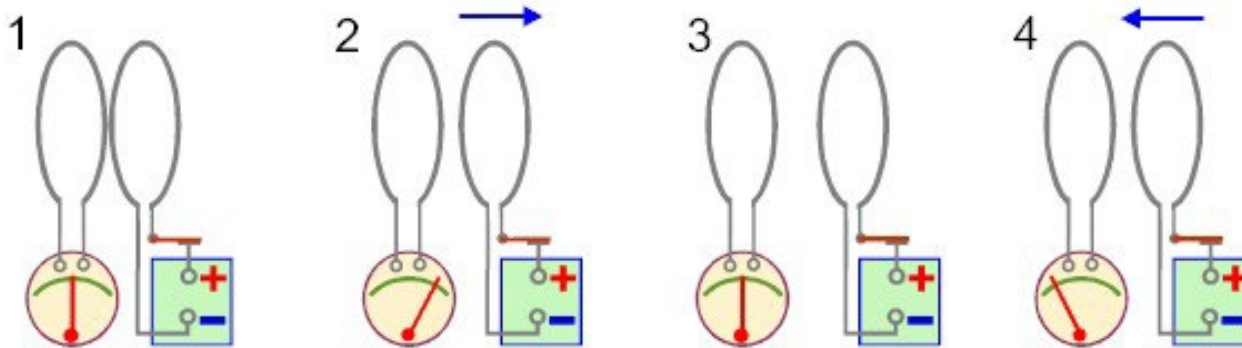
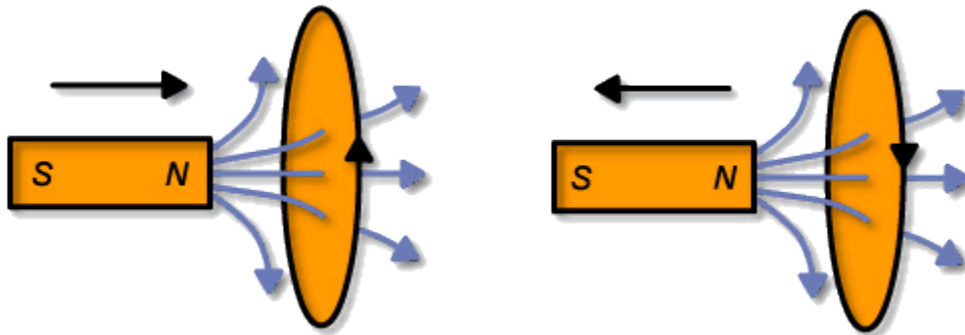


Obrót turbiny może pochodzić z:

- spadającej wody (hydroelektrownie),
- obrotu wiatraka,
- spalania węgla i innych paliw,
- podgrzewania wody w elektrowni jądrowej

# Michael Faraday

- ❑ 1833 – M. Faraday wykazał, że jeżeli obwód z przewodnika **włożymy w zmienny strumień pola magnetycznego**, to popłynie w tym obwodzie **prąd**.



<http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w12/wstep/main.htm>

# Prawo indukcji Faradaya

- ❑ Zmienny w czasie strumień pola magnetycznego powoduje powstanie SEM w przewodniku

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

prawo Faradaya

- ❑ Siła elektromotoryczna  $\mathcal{E}$  powstająca w obwodzie jest proporcjonalna do **szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej** obejmowanego przez ten obwód

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

- ❑ SEM zatem może być indukowane gdy:
  - porusza się źródło (lub obwód) pola magnetycznego (magnes, pętla, cewka)
  - zmienia się wartości indukcji  $B$  pola magnetycznego (np. przez zmienny prąd wytwarzający pole magnetyczne)



# Reguła Lenza

- ❑ H.F. Lenz – reguła pozwalająca na wyznaczenie kierunku prądu indukowanego w obwodzie (jest to właściwie zasada zachowania energii):

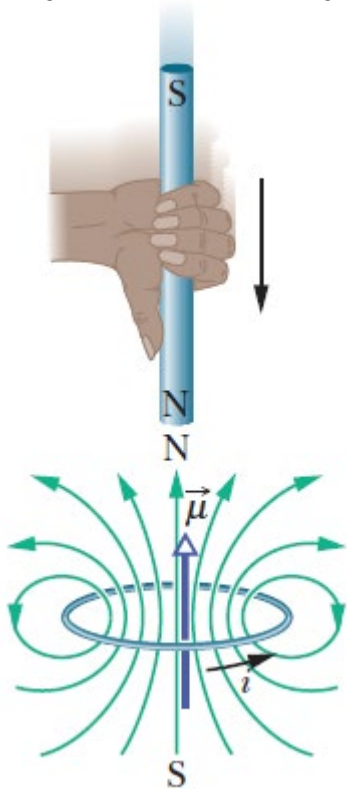
Indukowany prąd płynie w takim kierunku, że wytworzone pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która wywołała ten prąd

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

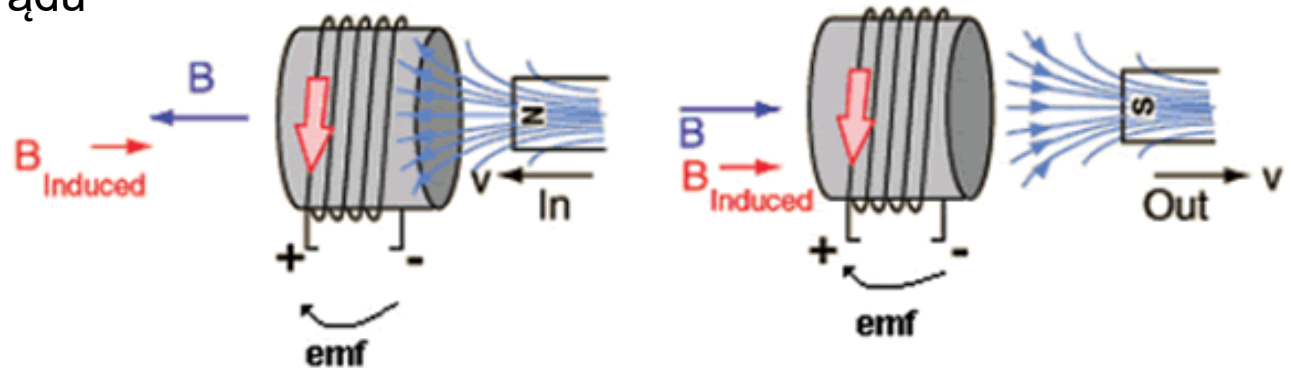
- ❑ Procedura wyznaczania kierunku indukowanego prądu (potrzebna głowa i dwie ręce):
- określ potencjalną przyczynę wyindukowania prądu (ruch magnesu, cewki, zmiana prądu w obwodzie-źródle),
  - określ kierunek zmiany – przybliżanie, oddalanie magnesu, narastanie, zmniejszanie się prądu,
  - zaznacz kierunek (zwrot) indukcji magnetycznej w nowym obwodzie (ma przeciwdziałać przyczynie, która ją wywołała, tzn, odpychać lub przyciągać)
  - znając zwrot  $\vec{B}$ , określ kierunek indukowanego prądu.

# Reguła Lenza - praktyka

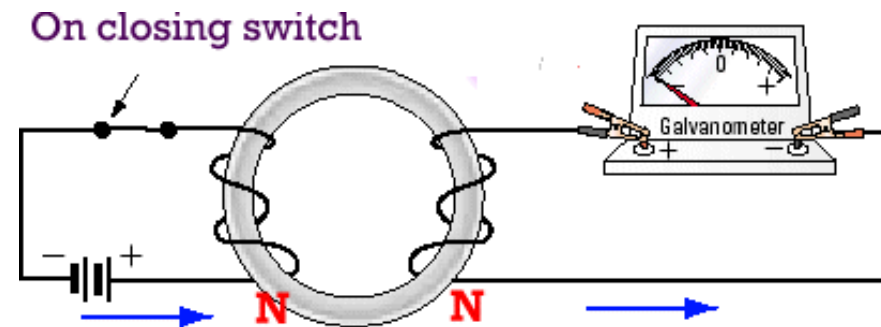
1. Ruch magnesu powoduje, że w obwodzie wytworzyło się pole magnetyczne przeciwdziałające temu ruchowi, zmienny strumień pola mag. wywołał przepływ prądu



Wyjaśnij!

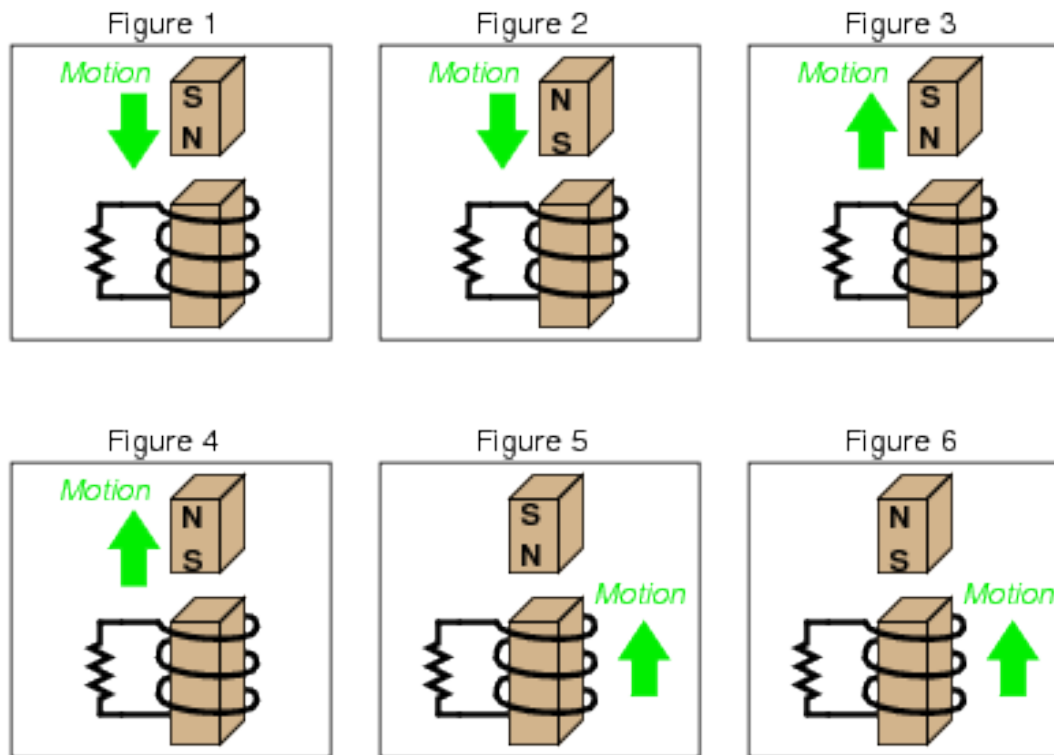


2. Zamknięcie przełącznika – wzrost prądu, indukowane pole ma przeciwdziałać przyczynie



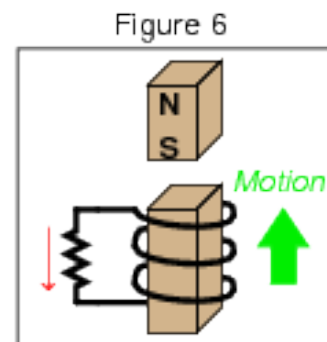
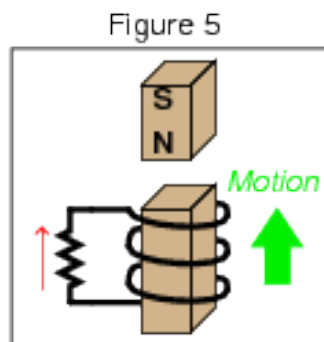
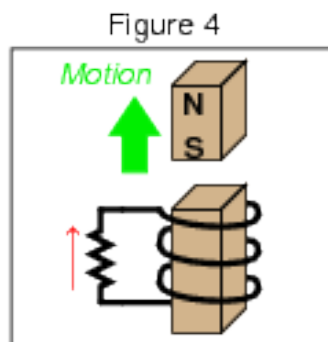
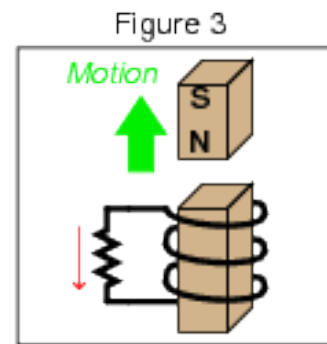
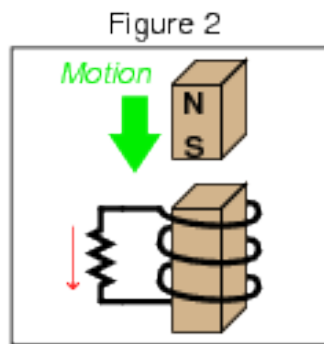
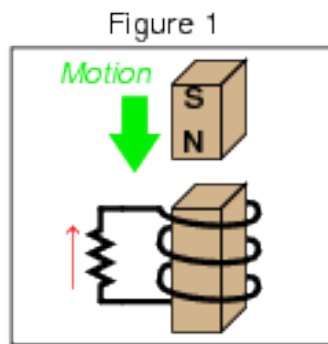
# Quiz

❑ Sprawdź, czy potrafisz określić kierunek indukowanego prądu...



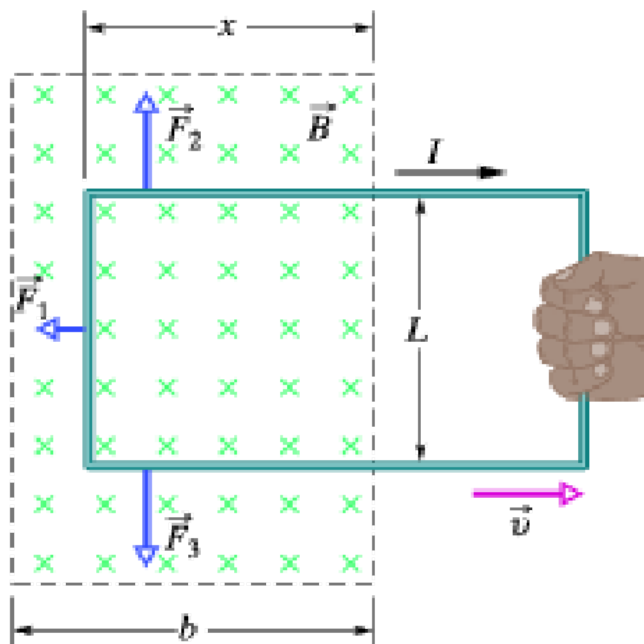
# Quiz

❑ A teraz sprawdź wynik!



# Prąd indukowany w ramce

❑ Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

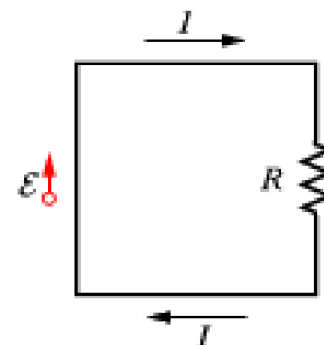


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

$$\Phi_B = B S = B L x$$

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = BL \frac{dx}{dt} = BLv$$

jest to zatem model układu elektrycznego:



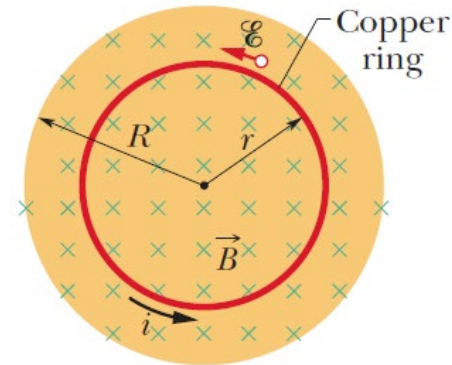
$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy,  
wyzdzielania ciepła

# Pole elektryczne z magnetycznego

❑ Umieszczamy przewodzący pierścień w polu magnetycznym  $B$ .

- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd  $i$ .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne  $E$  ! → dyskusja

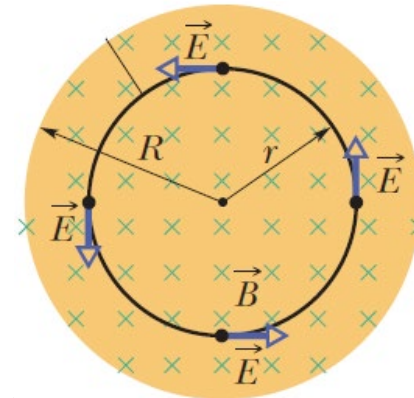


$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

❑ Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne  
wytworza pole elektryczne

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

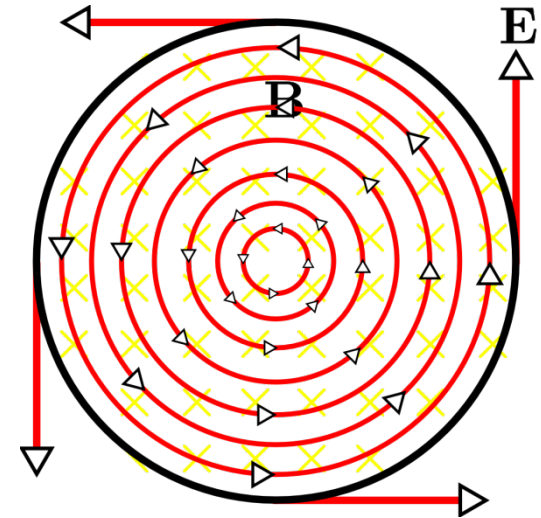


$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

pole elektryczne jest indukowane niezależnie, czy w zmiennym polu jest przewodnik, czy nie (obwód pozwala jedynie sprawdzić, czy pole jest).

# Pole magnetyczne z elektrycznego

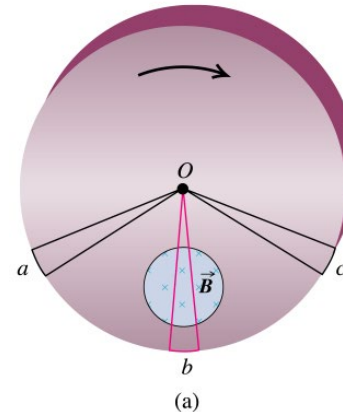
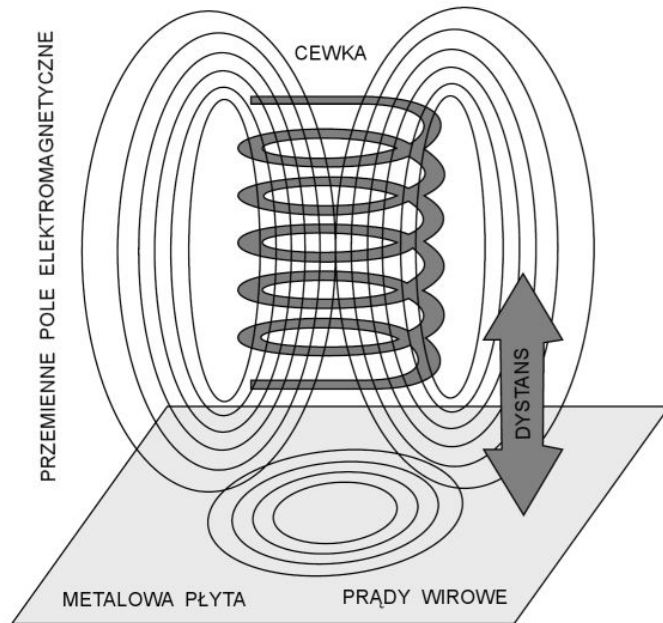
- ❑ Zmienne pole magnetyczne wywołalo wirowe pole elektryczne (zmienne pole magnetyczne zmieniało przestrzeń wytwarzając w niej pole elektryczne!)
- ❑ Pola magnetyczne i elektryczne są ze sobą związane.
- ❑ Indukowane pole elektryczne różni się od pola wytworzonego przez stacjonarne ładunki:
  - ma zamknięte linie,
  - nie można określić dla niego potencjału (bo jak linie są zamknięte, to powinno być:  $W = q\Delta V = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ , a jest:



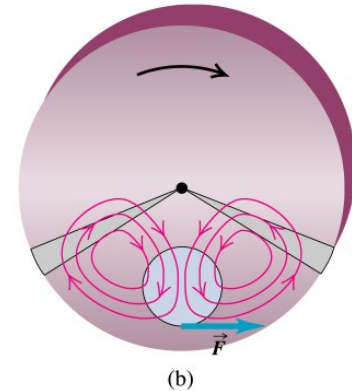
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

# Prądy wirowe

- ❑ W płytach metalowych znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym, indukowane prądy mają kształt wiru i często są szkodliwe (rozpraszają energię).
- ❑ Takie prądy nazywamy **prądami wirowymi**.



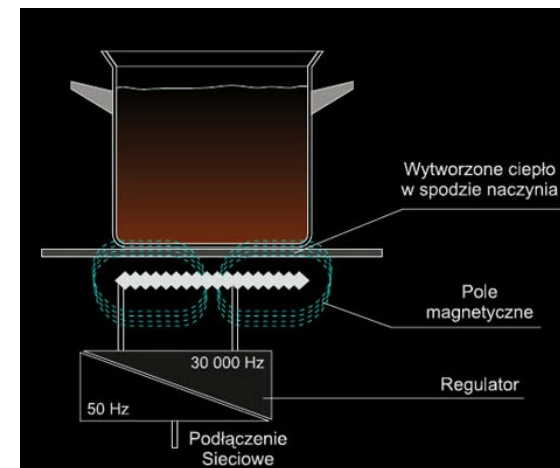
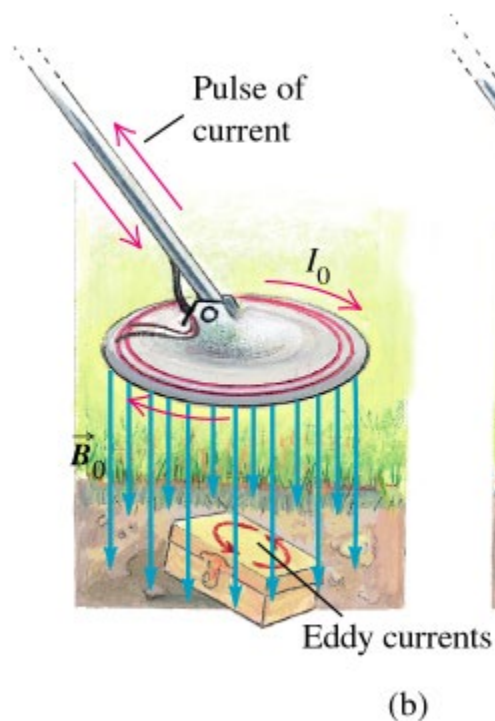
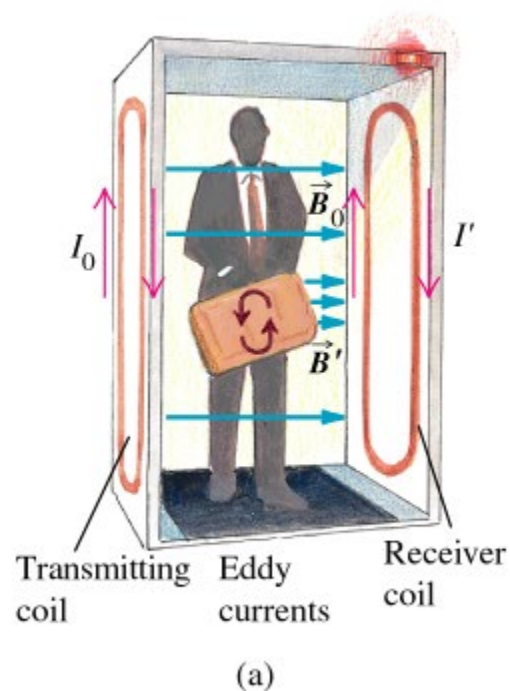
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





# Prądy wirowe

- ❑ Prądy wirowe są również wykorzystane w technice – pomiary struktur, kuchnia, wykrywacze metalu....



Indukowany w przewodniku zmienny prąd prąd jest źródłem własnego, indukowanego pola magnetycznego, rejestrowanego przez drugą cewkę.

## Dotychczas pokazaliśmy:

❑ Równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

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

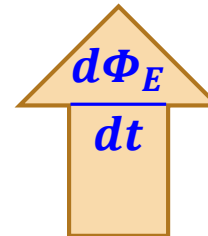


równania niezależne od czasu,  
stacjonarne,  
pola elektryczne i magnetyczne  
są niezależne od siebie

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Źródłem pola elektrycznego  
jest zmienny w czasie  
strumień pola  
magnetycznego.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P + ???$$



Czy źródłem **pola magnetycznego** może  
być **zmienny w czasie strumień pola  
elektrycznego**?

# Podsumowanie

- Pole magnetyczne:
  - źródła: Ziemia, magnesy stałe, elektromagnesy (ciepłe i nadprzewodzące),
  - zastosowania (elektronika, elektrotechnika, medycyna),
  - prawo Biota- Savarte'a
  - prawo Ampera
  - Prawo Faradaya i reguła Lenza – zastosowania.
- Indukowane pole elektryczne.

opracowane na podstawie:

Resnick, Halliday, Walker „Podstawy Fizyki” t.3

Halliday & Resnick, J. Walker „Fundamentals of Physics”

10th Edition, John Wiley & Sons, Inc.