

# Podstawy fizyki – sezon 2

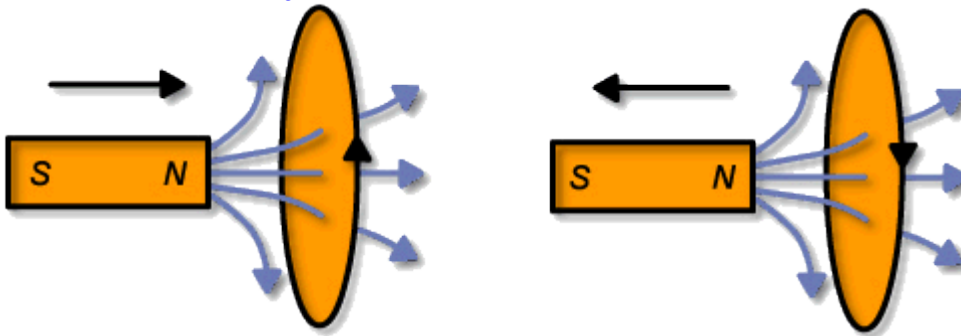
## **5. Pole magnetyczne II**

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

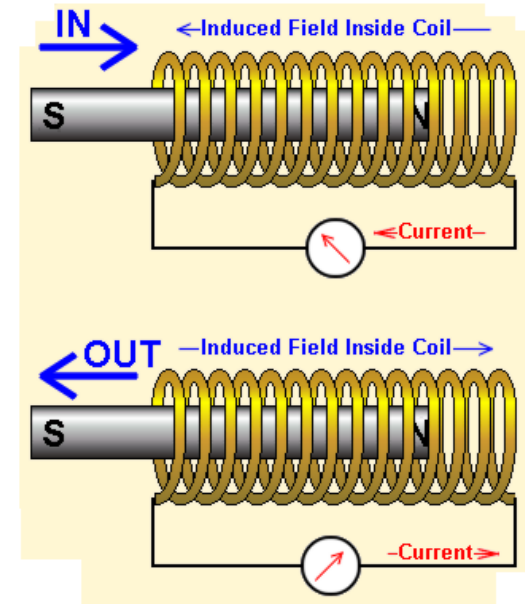
AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 106  
amucha@agh.edu.pl  
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

# Michael Faraday

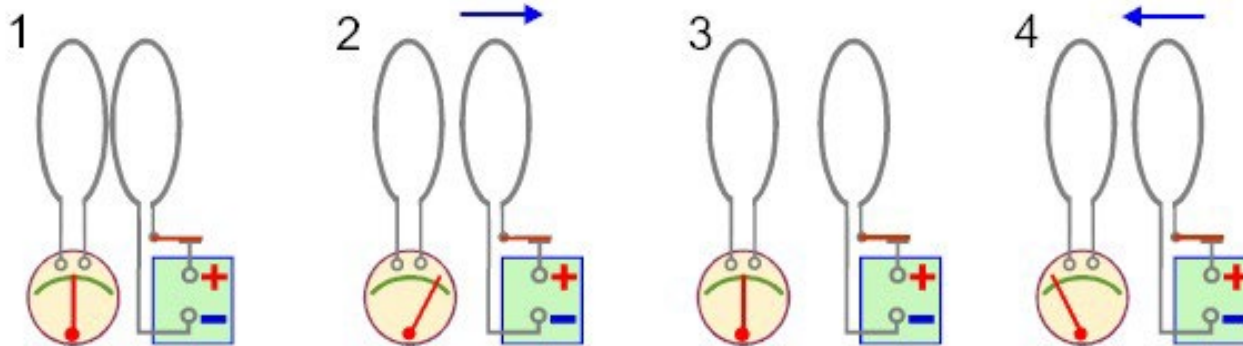
- ❑ 1833 – M. Faraday wykazał, że jeżeli obwód z przewodnika **włożymy w zmienny strumień pola magnetycznego**, to popłynie w tym obwodzie **prąd**.



- ❑ 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?

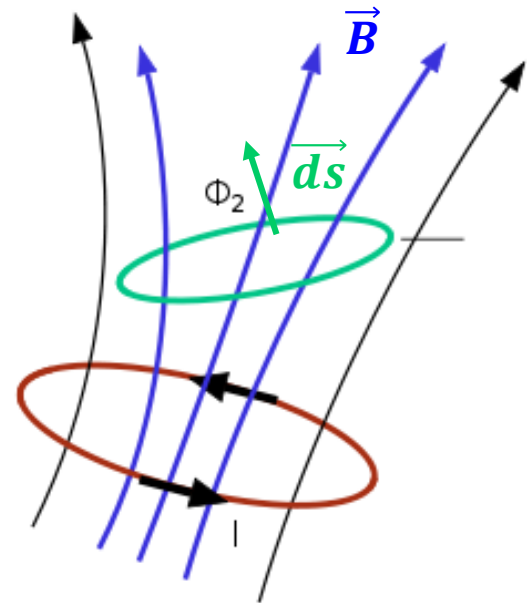
# Strumień pola magnetycznego

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

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

- ❑ 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

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

- ❑ 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...

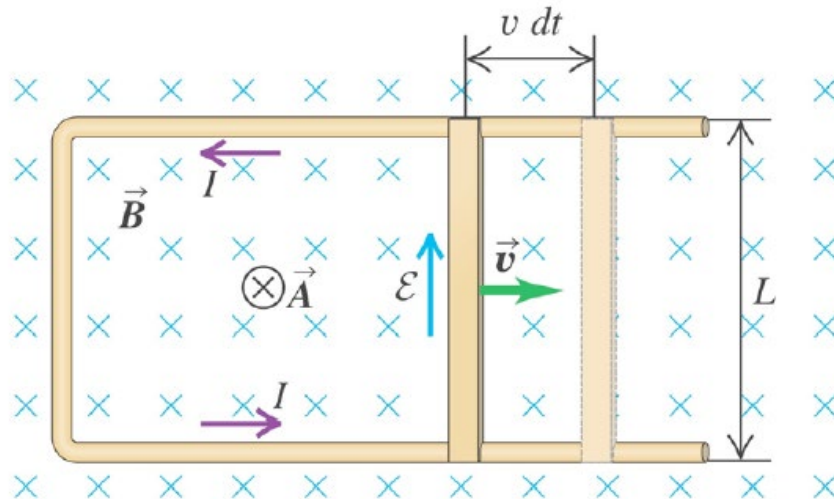
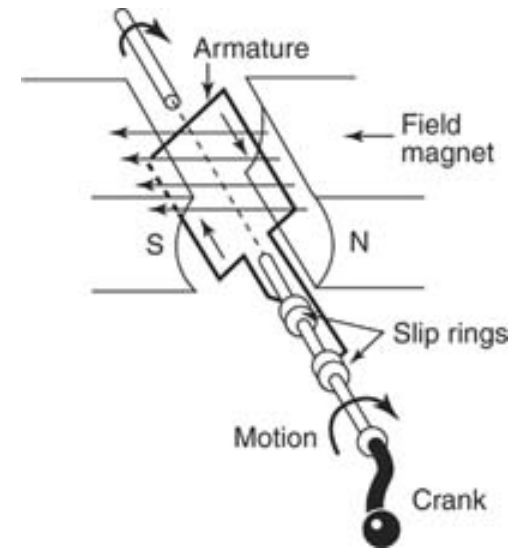
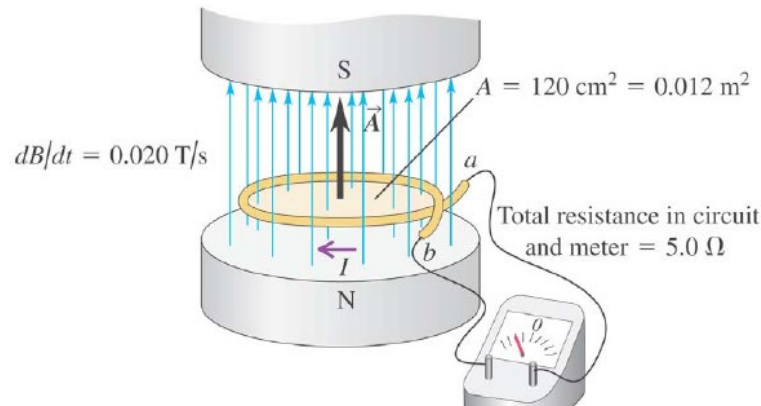
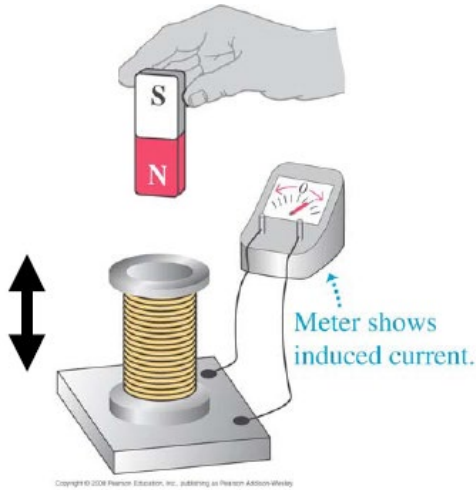
$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

- 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  $\vec{ds}$ ),
  - d) zmianą powierzchni pętli w czasie (zmienne  $s$ )

Lub kombinacją powyższych zjawisk

# Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...

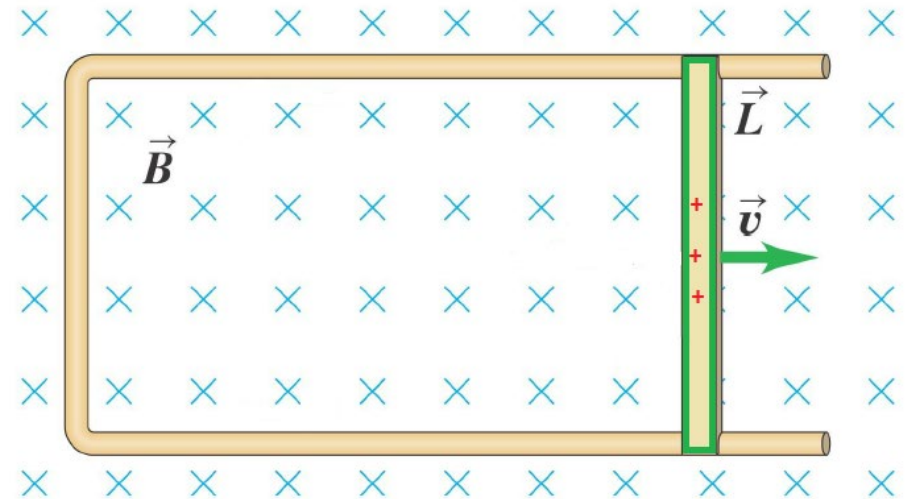
$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$



# 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

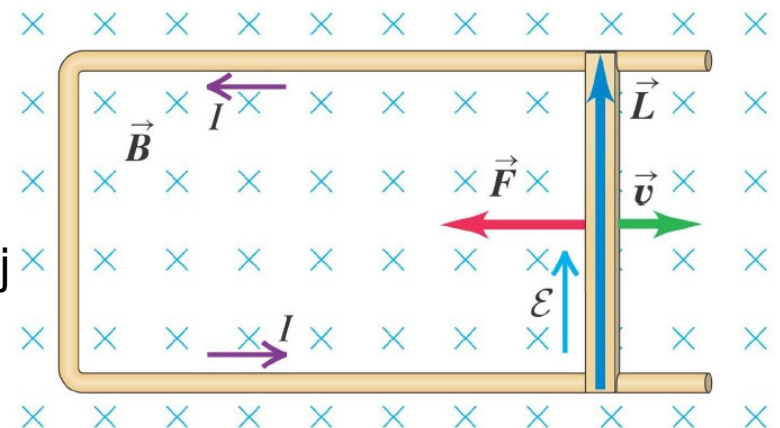
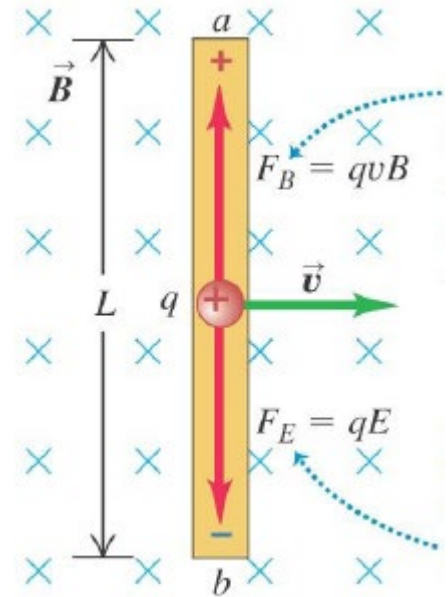
... działa siła Lorentza:  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ ,  
która powoduje rozsuniecie ładunków w przewodzie

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.

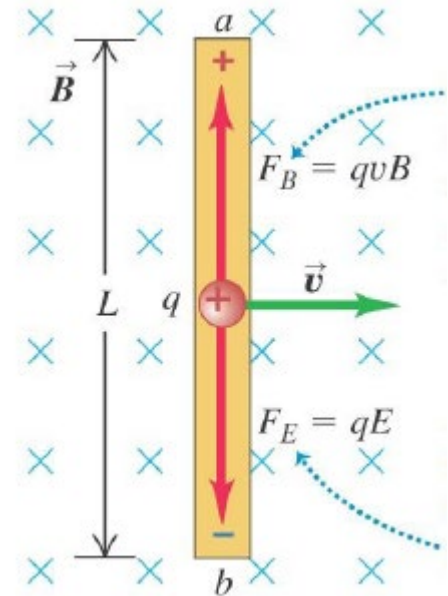
$$\left. \begin{aligned} F_L &= F_E \\ qvB &= qE \end{aligned} \right\} \begin{aligned} E &= vB \quad \text{wiemy, że: } E = \frac{U}{l} \end{aligned}$$

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

pamiętamy?

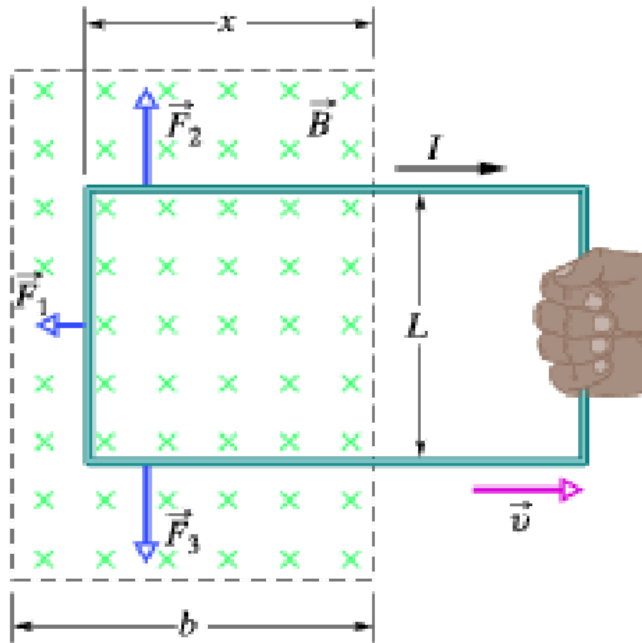
$$U = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{to prawo Faradaya jest w postaci:}$$

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



# Prąd indukowany w ramce

❑ Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

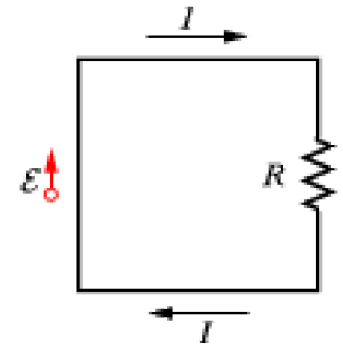


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

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

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

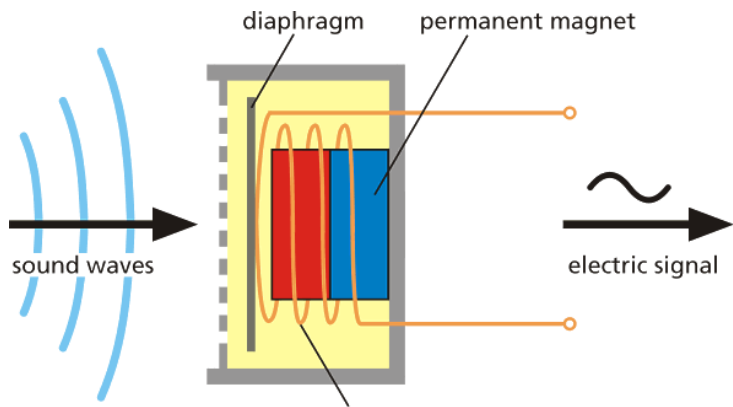
jest to zatem model układu elektrycznego:



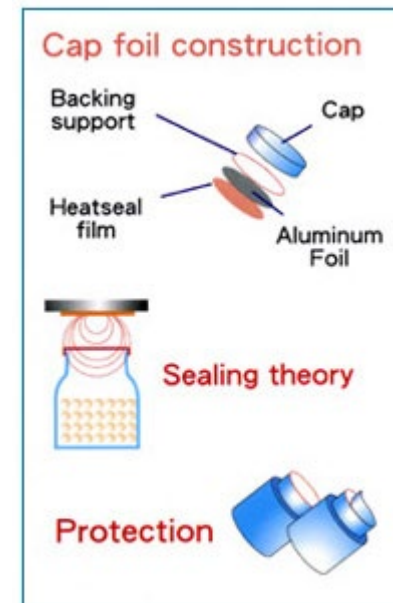
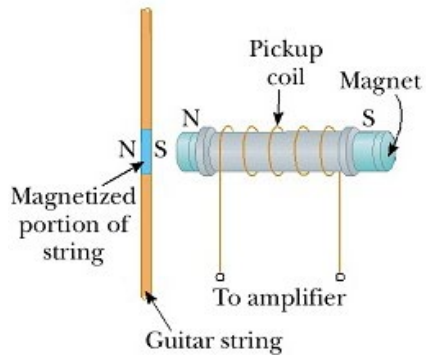
$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy, wydzielania ciepła

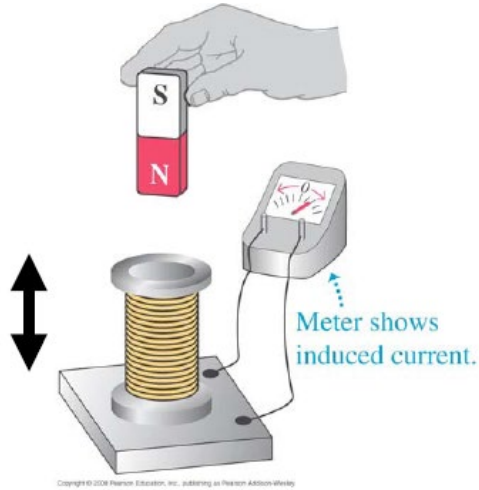
# Indukcja elektromagnetyczna - zastosowania



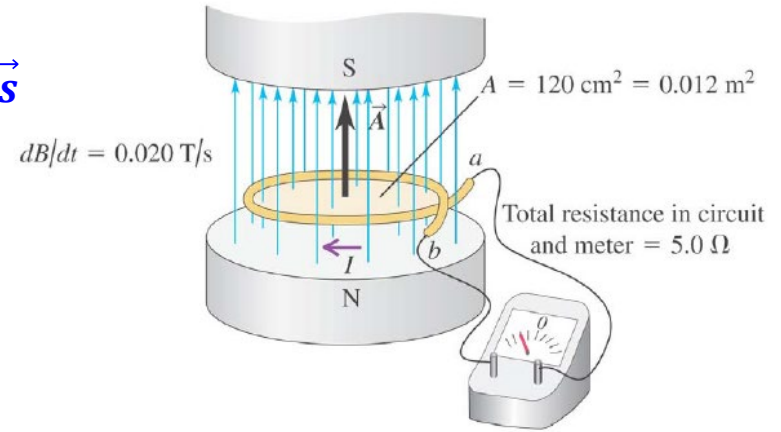
[dreamstime.com](http://dreamstime.com)



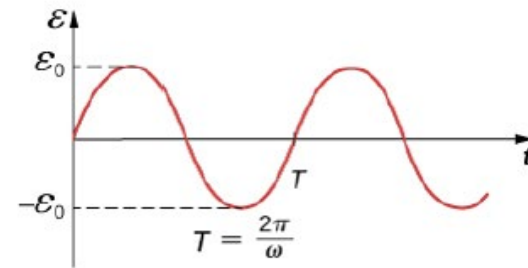
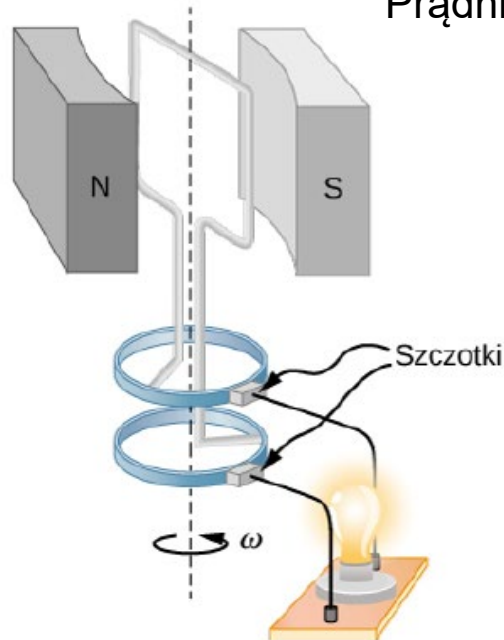
# Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...



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



Prądnica



# Produkcja prądu

Zmiana energii mechanicznej na energię elektryczną.

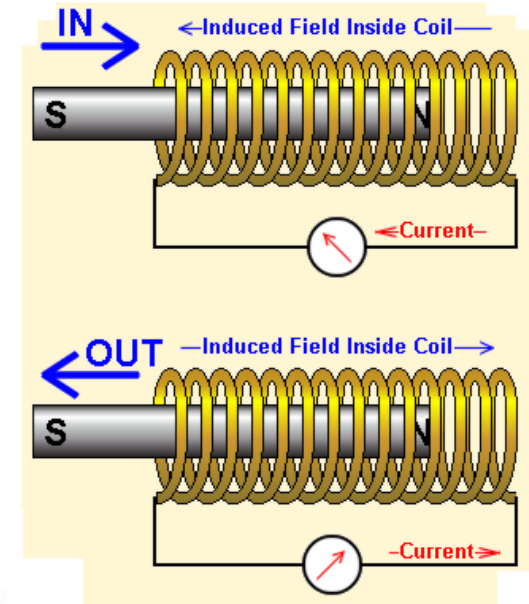
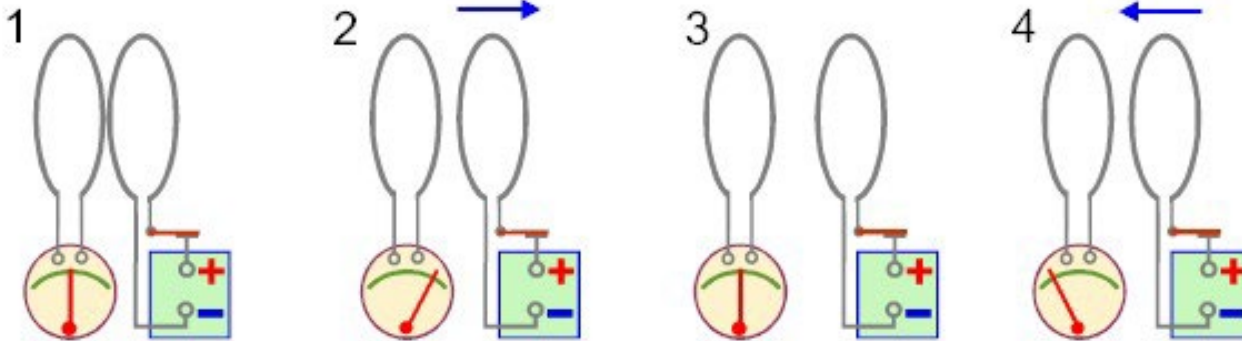
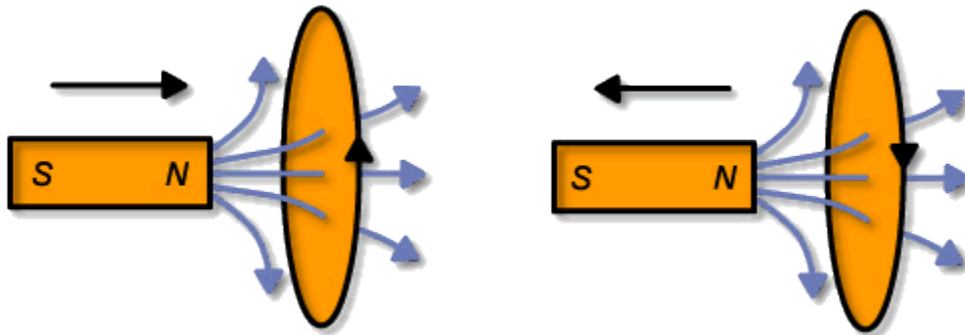


Obrót turbiny może pochodzić z:

- 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):

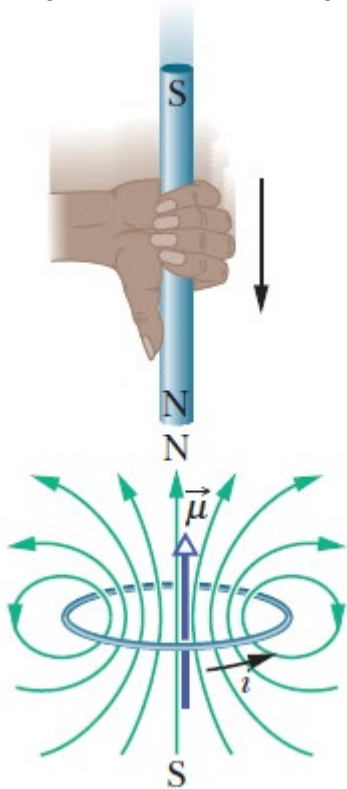
Indukowany prąd płynie w takim kierunku, że wytworzone pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która wywołała ten prąd

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

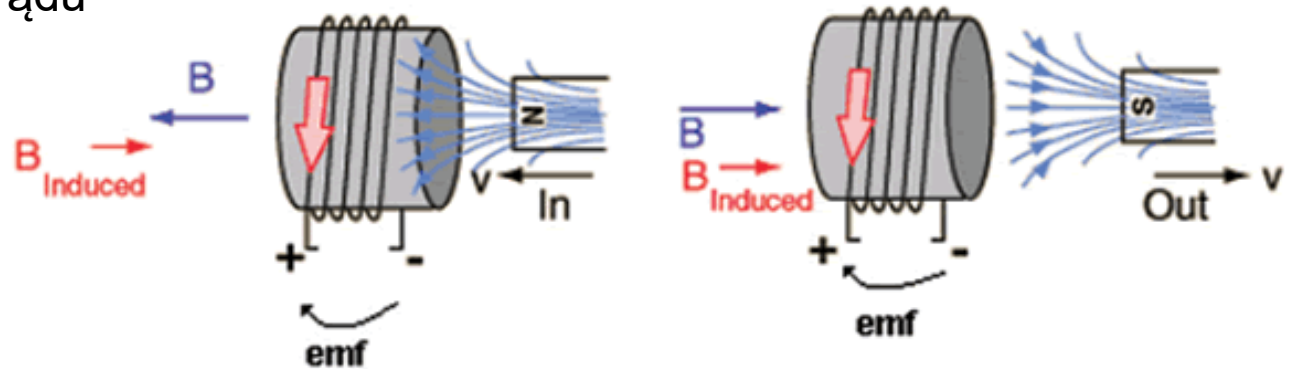
- Procedura wyznaczania kierunku indukowanego prądu (potrzebna głowa i dwie ręce):
  - określ potencjalną przyczynę wyindukowania prądu (ruch magnesu, cewki, zmiana prądu w obwodzie-źródle),
  - określ kierunek zmiany – przybliżanie, oddalanie magnesu, narastanie, zmniejszanie się prądu,
  - zaznacz 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

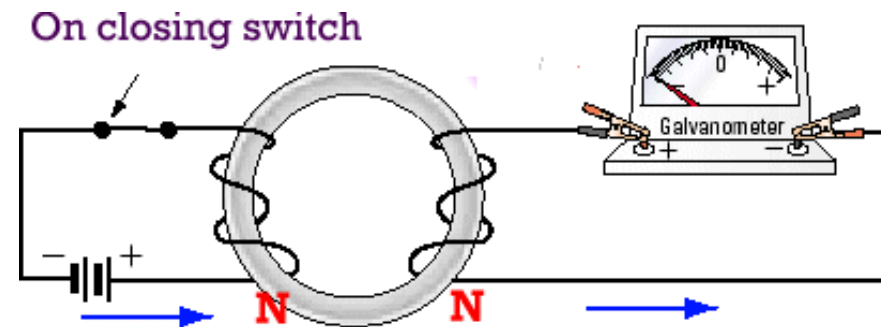
1. Ruch magnesu powoduje, że w obwodzie wytworzyło się pole magnetyczne przeciwdziałające temu ruchowi, zmienny strumień pola mag. wywołał przepływ prądu



Wyjaśnij!

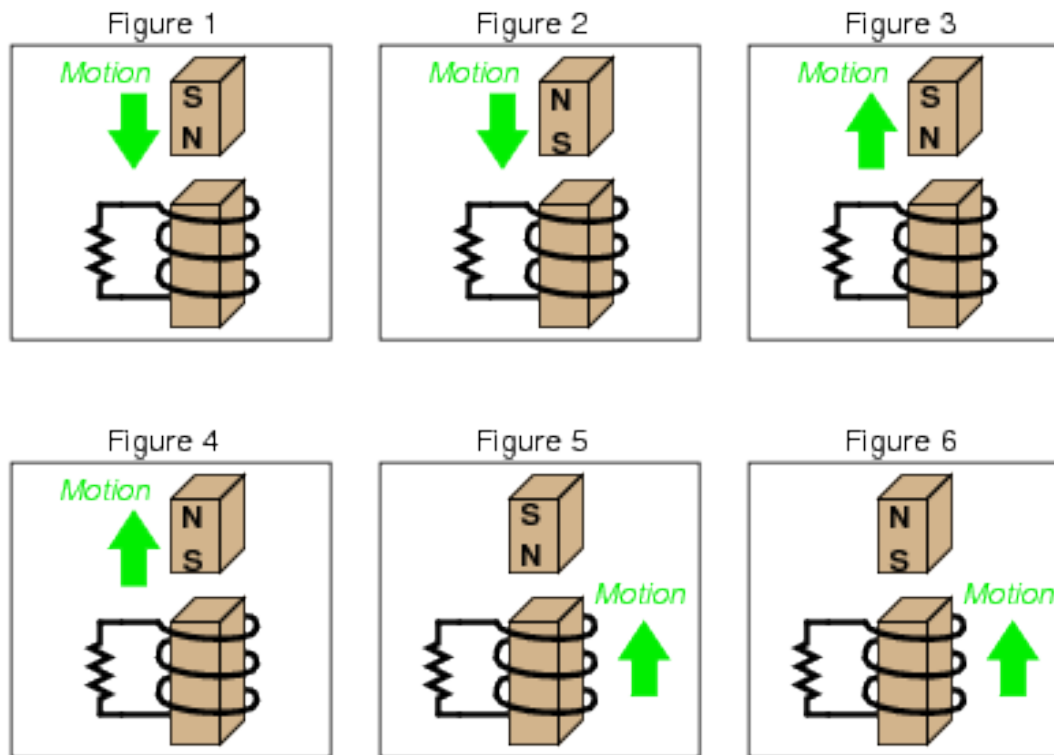


2. Zamknięcie przełącznika – wzrost prądu, indukowane pole ma przeciwdziałać przyczynie



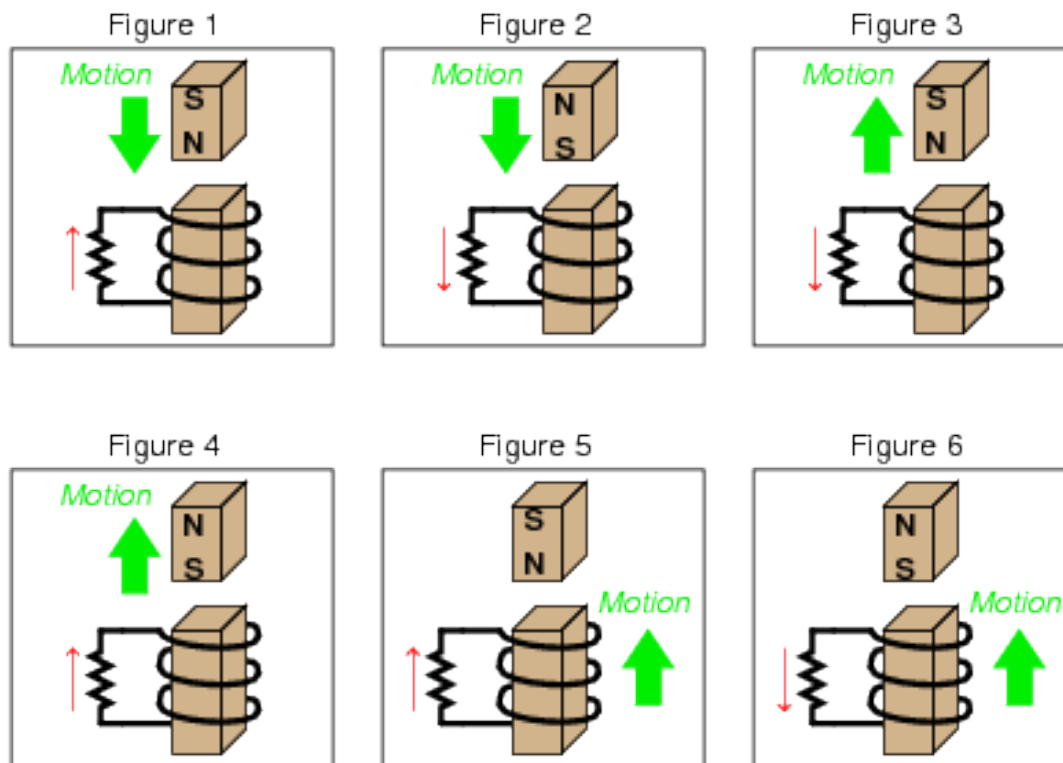
# Quiz

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



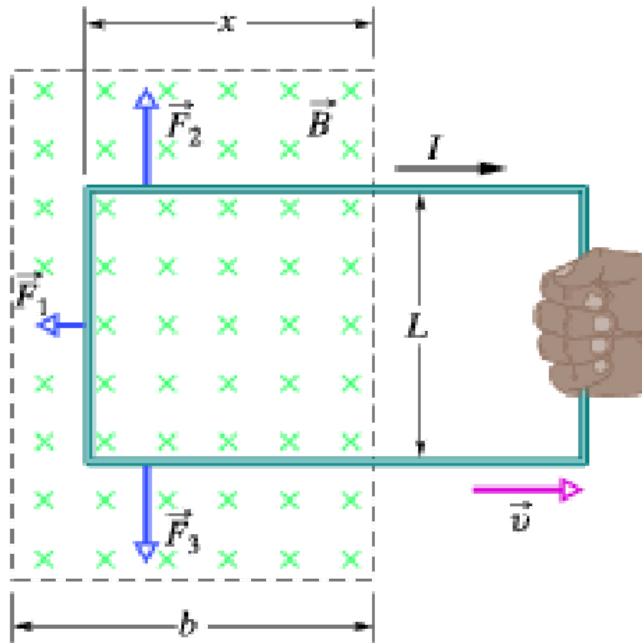
# Quiz

❑ A teraz sprawdź wynik!



# Prąd indukowany w ramce

❑ Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

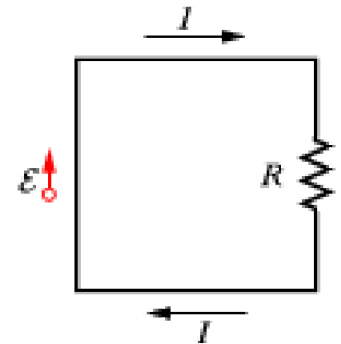


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

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

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

jest to zatem model układu elektrycznego:



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R}$$

$$F = ILB$$

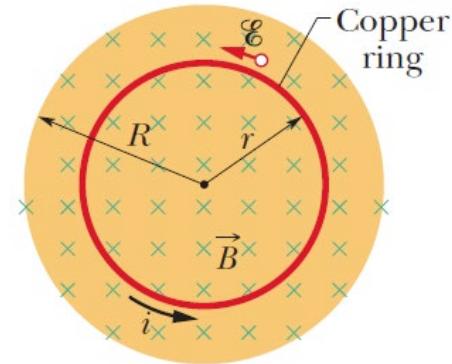
$$P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy, wydzielania ciepła

# Pole elektryczne z magnetycznego

□ Umieszczamy przewodzący pierścień w polu magnetycznym  $B$ .

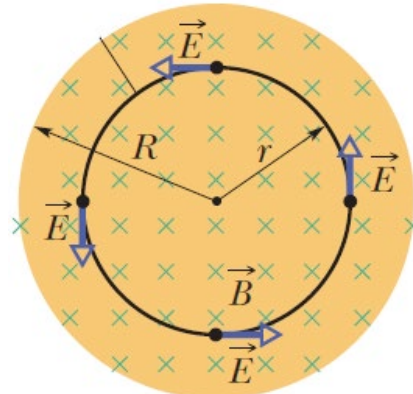
- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd  $i$ .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne  $E$ ! → dyskusja



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

□ Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne  
wytworza pole elektryczne



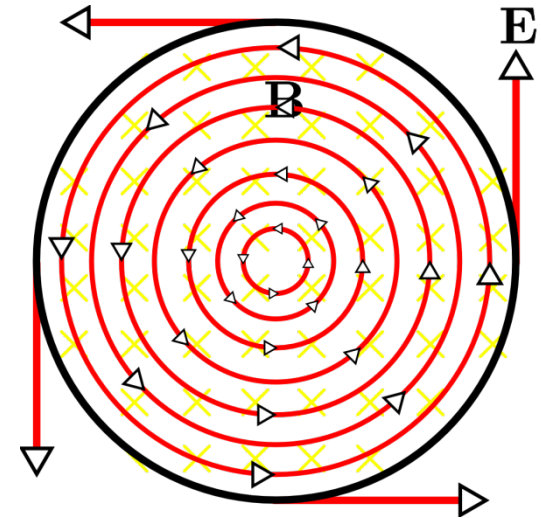
$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

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

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

# Pole magnetyczne z elektrycznego

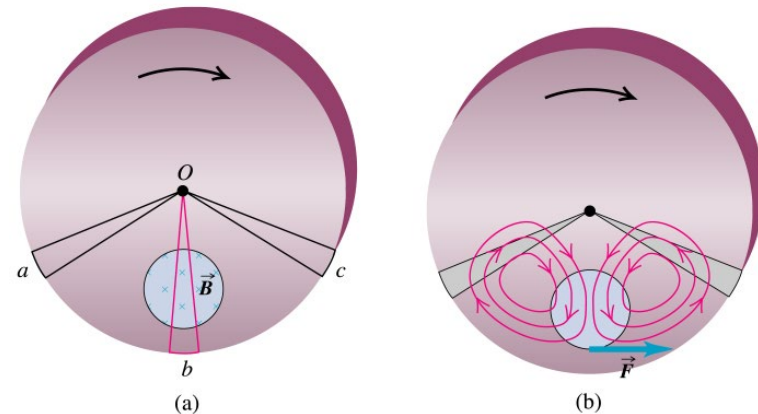
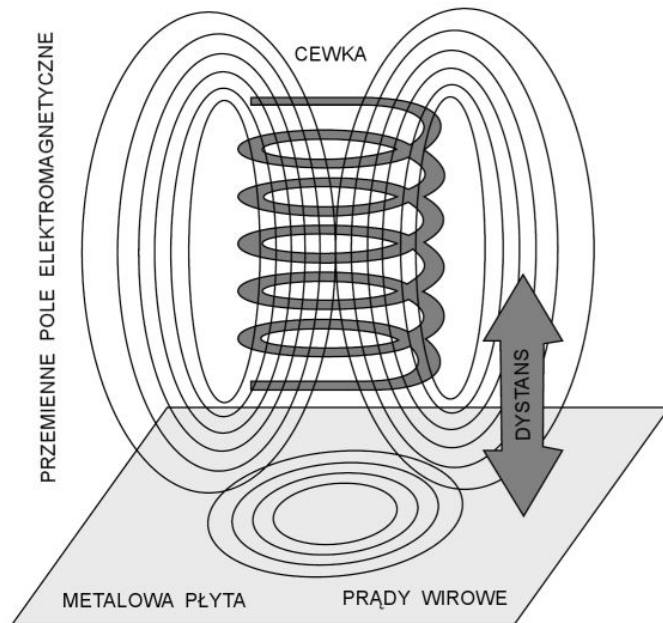
- ❑ Zmienne pole magnetyczne wywołalo wirowe pole elektryczne (zmienne pole magnetyczne zmienilo przestrzen wytwarzajac w niej pole elektryczne!)
- ❑ Pola magnetyczne i elektryczne sa ze soba zwiazane.
- ❑ Indukowane pole elektryczne rozni sie od pola wytworzonego przez stacjonarne ladunki:
  - ma zamknieta linie,
  - nie mozna okreslic dla niego potencjalu (bo jak linie sa zamknieta, to powinno byc:  $W = q\Delta V = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ , 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**.

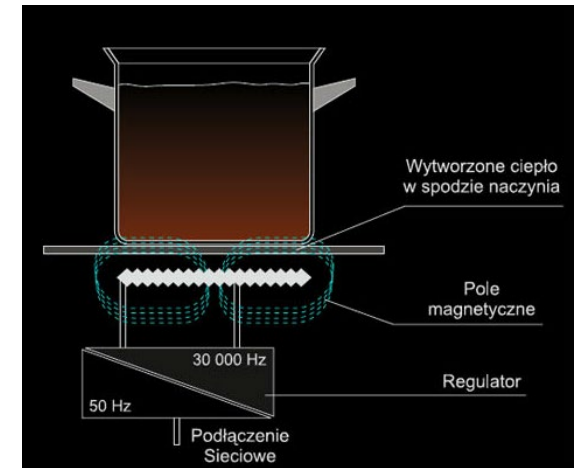
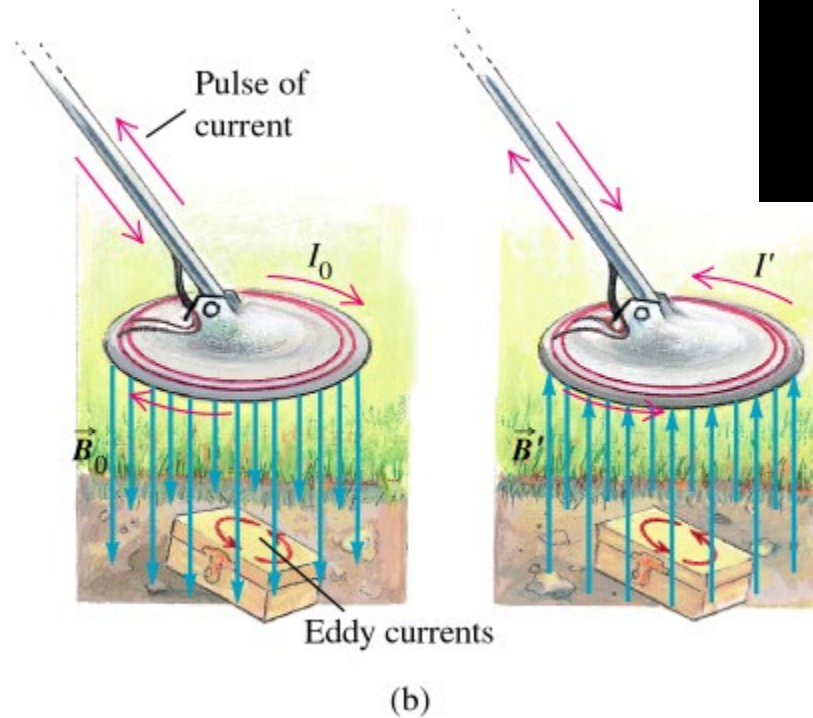
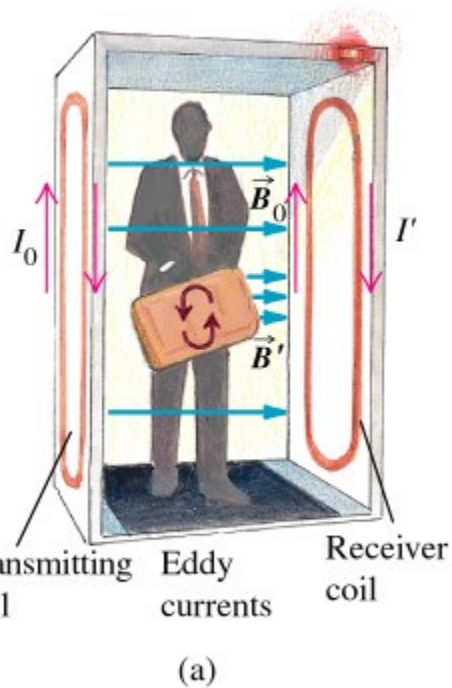


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



# 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:

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

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

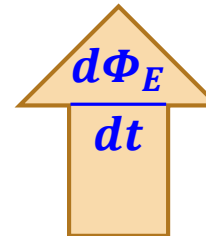


równania niezależne od czasu,  
stacjonarne,  
pola elektryczne i magnetyczne  
są niezależne od siebie

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

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**?

# Pole elektryczne z magnetycznego - powtórka

❑ Umieszczamy przewodzący pierścień w polu magnetycznym  $B$ .

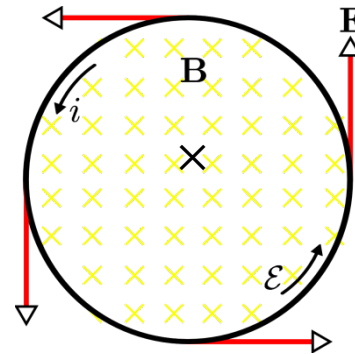
- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd  $i$ .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne  $E$  !

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

❑ 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).

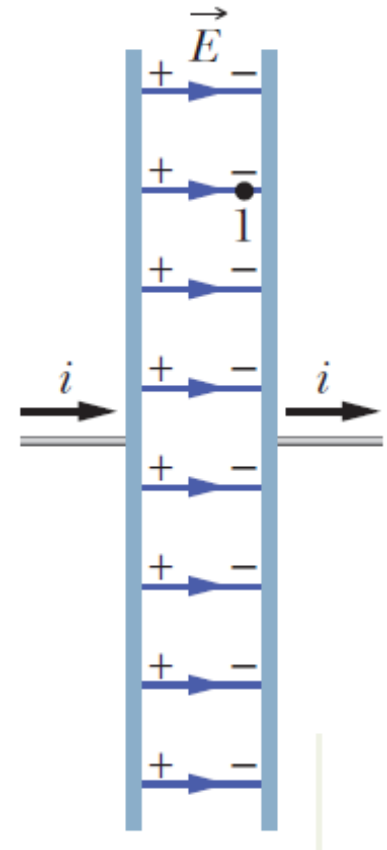
# Pole magnetyczne z elektrycznego

- Czy zamiana w poprzednich równaniach liter  $B$  na  $E$  da równania opisujące obserwowane zjawiska?

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \propto \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Mamy płaski kondensator o kołowych okładkach.

- Ładujemy kondensator stałym prądem  $I$  – ładunek na okładkach zwiększa się ze stałą szybkością.
- Rośnie zatem natężenie pola elektrycznego (ze stałą szybkością) pomiędzy okładkami.



# Indukowane pole magnetyczne

□ Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

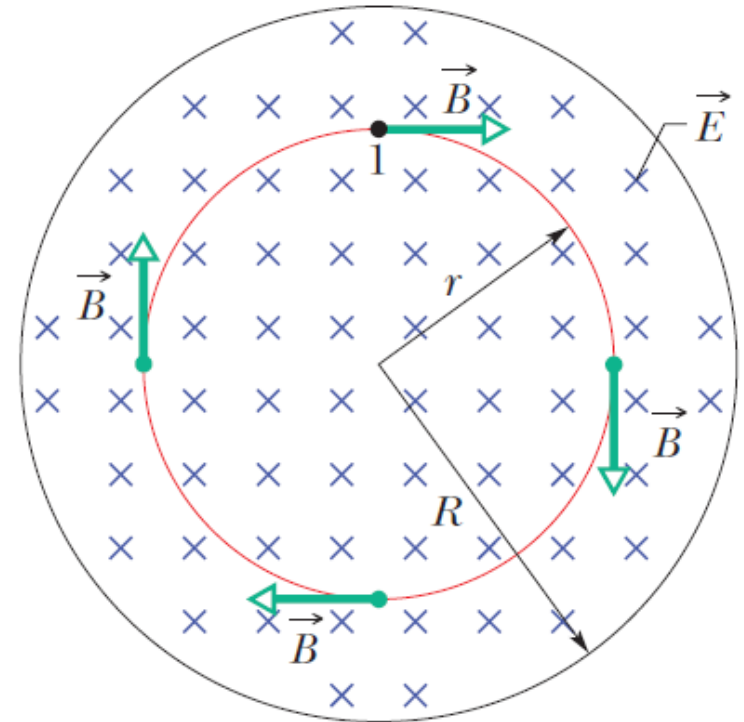
zmienne pole elektryczne  
wytwarza pole magnetyczne

Dokładniej:

- przez dowolny kontur przechodzi zmienny strumień pola elektrycznego  $\frac{d\Phi_E}{dt}$  – jest on przyczyną indukcji pola magnetycznego

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

Uwaga! Brak „-” !



# Indukowane pole magnetyczne – porównanie!

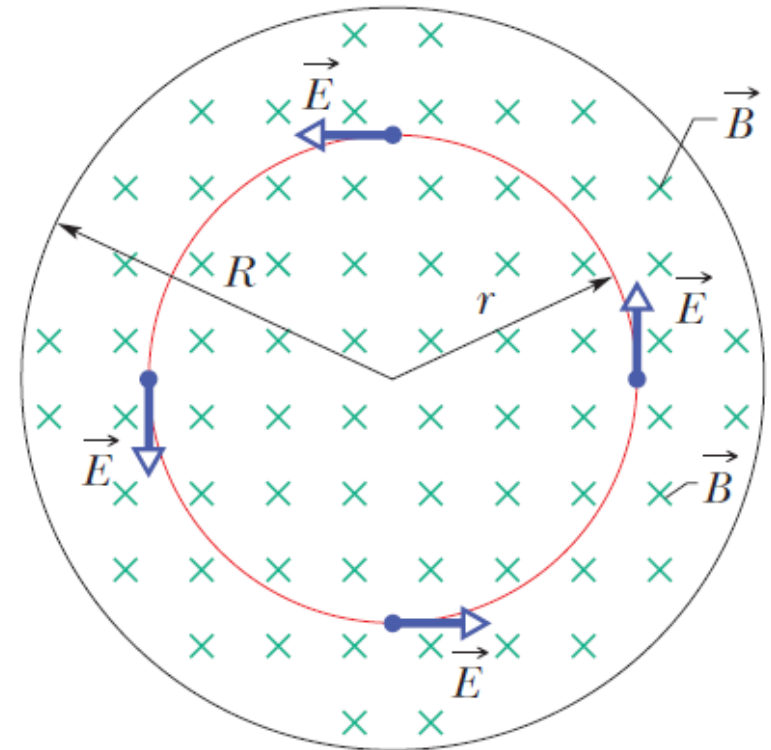
- ❑ Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

zmiennie pole elektryczne  
wytworza pole magnetyczne

Dokładniej:

- przez dowolny kontur przechodzi zmienny strumień pola elektrycznego  $\frac{d\Phi_E}{dt}$  – jest on przyczyną indukcji pola magnetycznego

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



Uwaga! Brak „-” ! Oznacza, że pole magnetyczne indukowane jest polem elektrycznym w przeciwną stronę niż elektryczne magnetycznym .....

# Prąd przesunięcia

❑ Czy ktoś pamięta prawo Ampera?

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

❑ A teraz mamy:

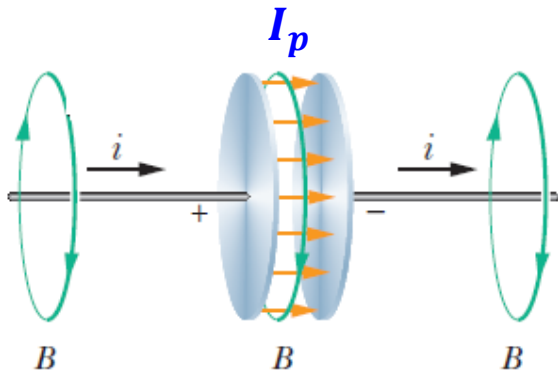
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

❑ Co daje razem:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}_{I_p} + \mu_0 I$$

uogólnione prawo Ampera

umownie nazywamy ten czynnik „prądem przesunięcia”  $I_p$



pole magnetyczne jest wytworzone przez rzeczywisty prąd  $I$  wokół przewodnika

oraz

przez umowny prąd przesunięcia  $I_p$  w kondensatorze, ale

zawsze obowiązuje reguła „prawej dłoni” w wyznaczeniu zwrotu  $B$

# Równania Maxwella – postać całkowa

- ❑ Źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne - strumień pola elektrycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy całkowitemu ładunkowi objętemu tą powierzchnią (prawo Gaussa).
- ❑ Pole elektryczne jest indukowane zmiennym w czasie strumieniem pola magnetycznego (prawo Faradaya).
- ❑ Nie istnieją monopole magnetyczne - strumień pola magnetycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy zero (prawo Gaussa dla pola magnetycznego).
- ❑ Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienny w czasie strumień pola elektrycznego (uogólnione prawo Ampera)

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

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

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0$$

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I$$



# Równania Maxwella – postać różniczkowa

- ❑ Źródłem pola elektrycznego jest ładunek elektryczny (gęstość ładunku) (prawo Gaussa).

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

operator dywergencji  
opisuje źródłowość pola

- ❑ Źródłem pola elektrycznego jest zmienne pole magnetyczne (prawo Faradaya).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

operator rotacji  
opisuje wirowość pola

- ❑ Pole magnetyczne jest bezźródłowe (prawo Gaussa dla pola magnetycznego).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

- ❑ Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienne pole elektryczne (uogólnione prawo Ampera)

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

# 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.
- Indukcyjność.
- Cewki, indukcja wzajemna.
- Cztery równania elektromagnetyzmu.
- Indukowane pole magnetyczne.
- Uogólnione prawo Ampera, prąd przesunięcia.

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