

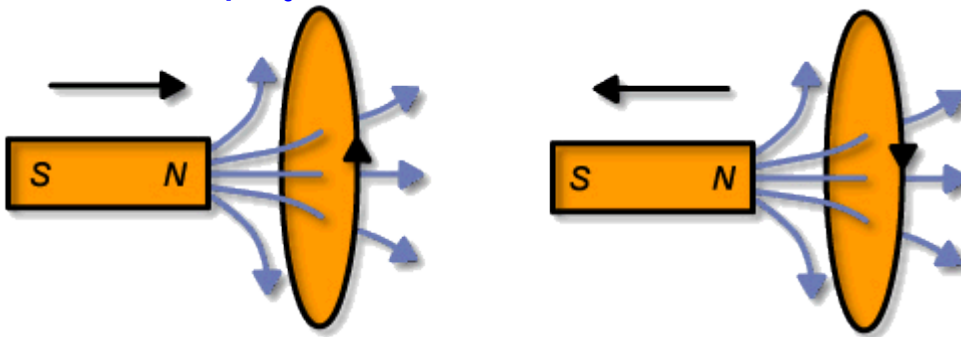
Podstawy fizyki – sezon 2

5. Pole magnetyczne II

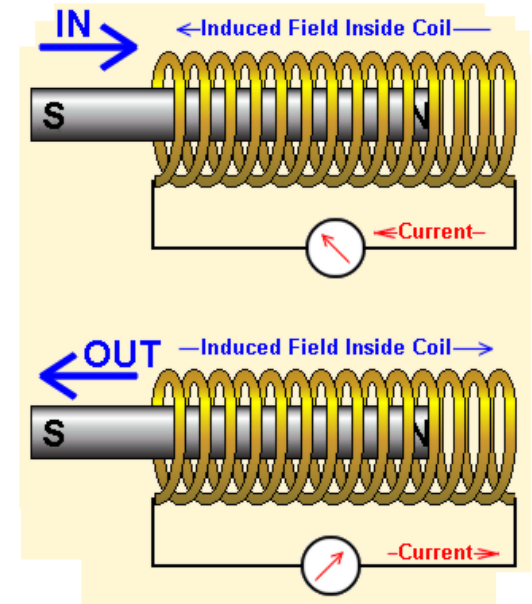
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Michael Faraday

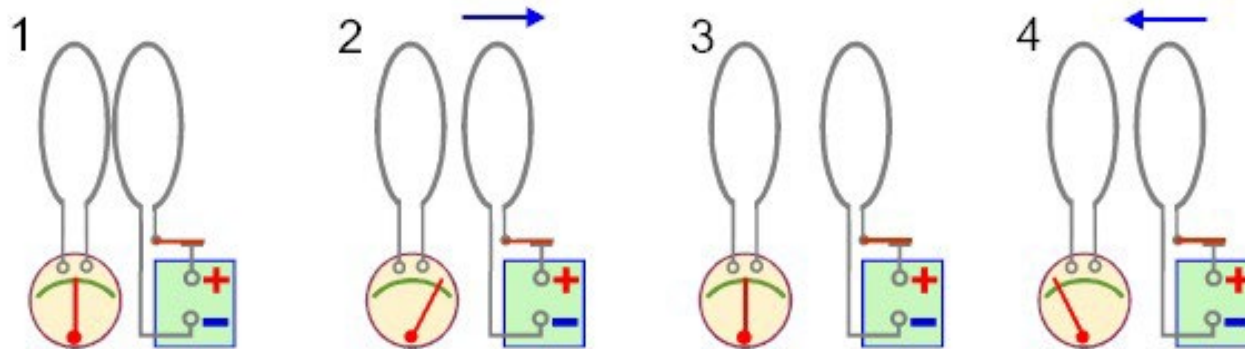
- ❑ 1833 – M. Faraday wykazał, że jeżeli obwód z przewodnika **włożymy w zmienny strumień pola magnetycznego**, to popłynie w tym obwodzie **prąd**.



- ❑ 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?

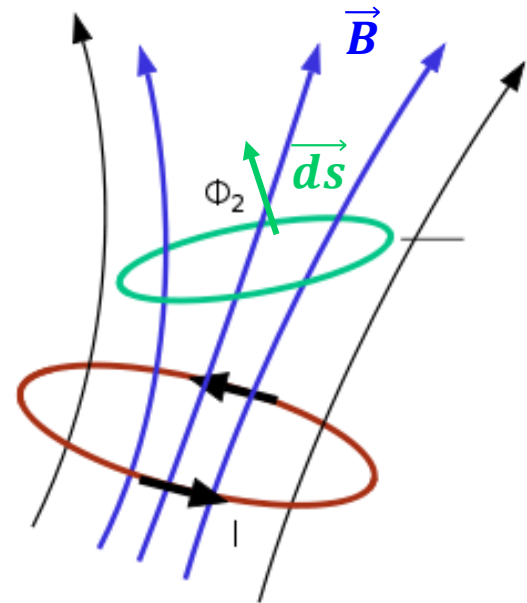
Strumień pola magnetycznego

- ❑ 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...

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

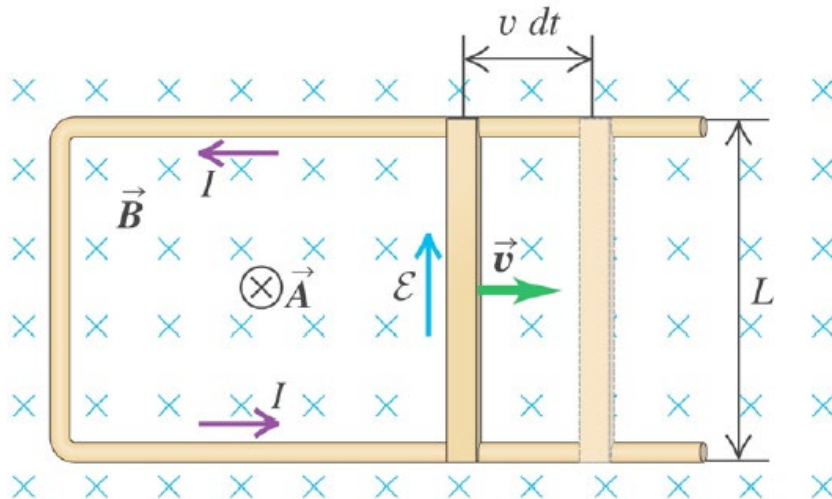
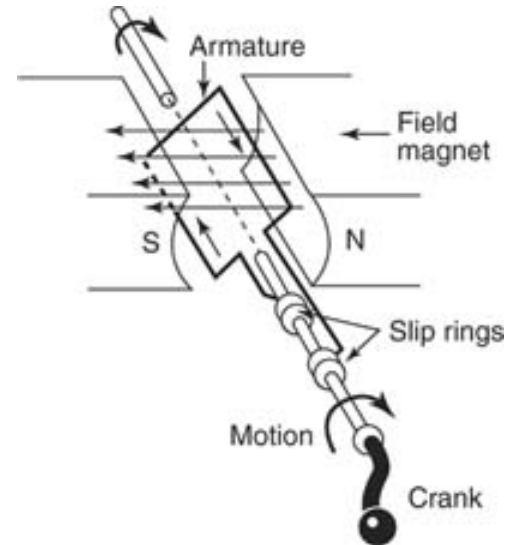
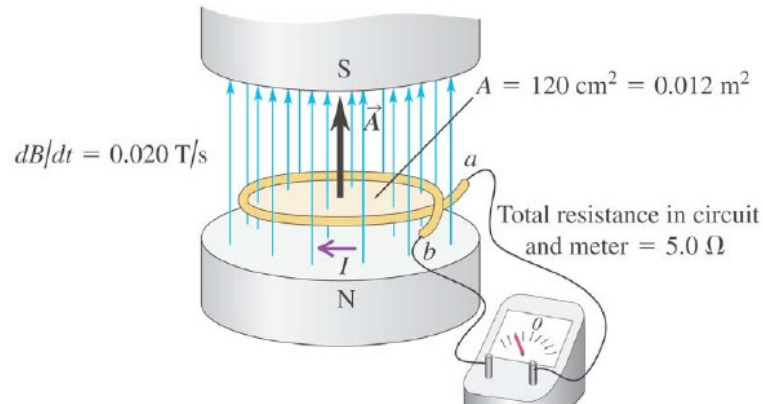
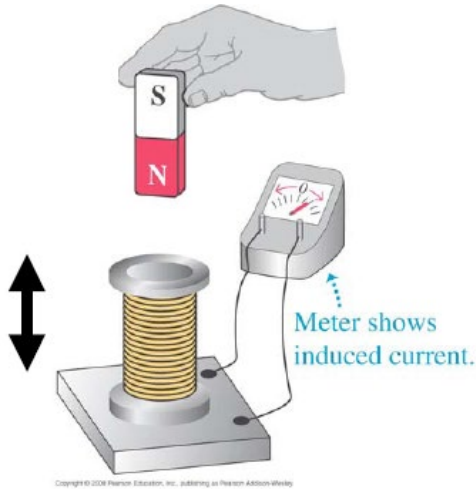
□ Zmiana strumienia magnetycznego, która jest źródłem indukcji SEM może być spowodowana:

- 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...

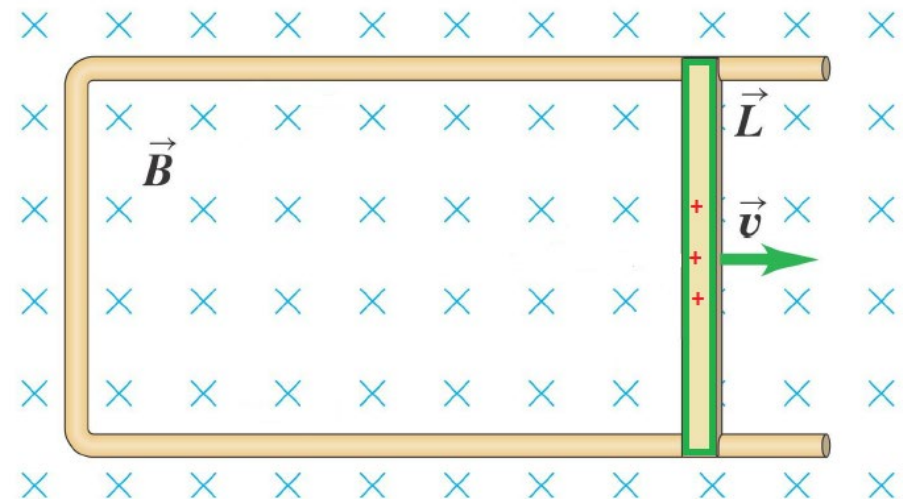
$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$



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

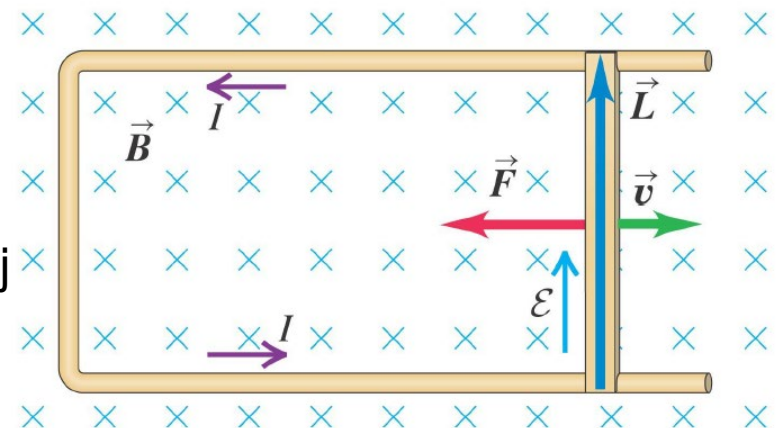
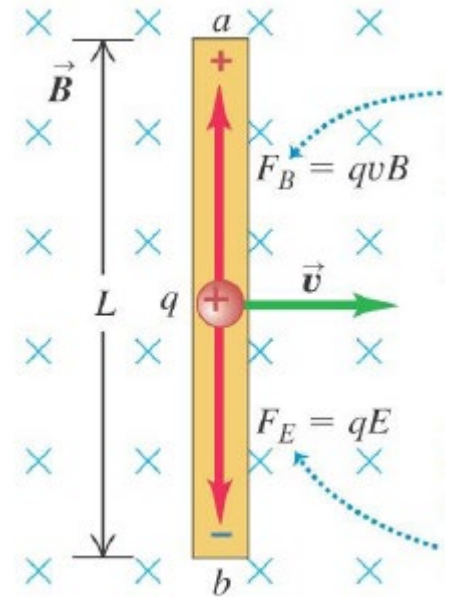
A jak na końcach przewodnika powstanie różnica potencjałów, to....

... 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.

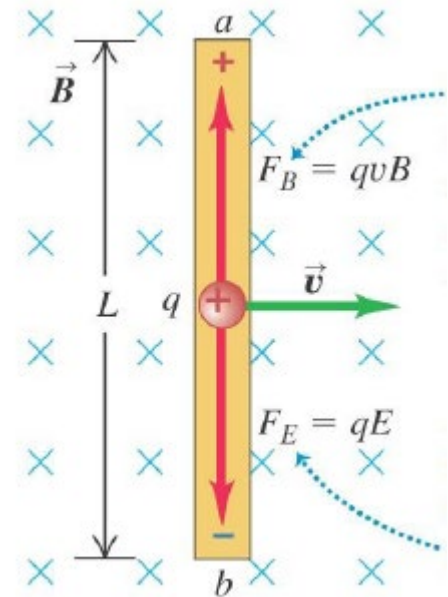
$$\left. \begin{array}{l} F_L = F_E \\ qvB = qE \end{array} \right\} \quad E = vB \quad \text{wiemy, że: } E = \frac{U}{l}$$

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

pamiętamy?

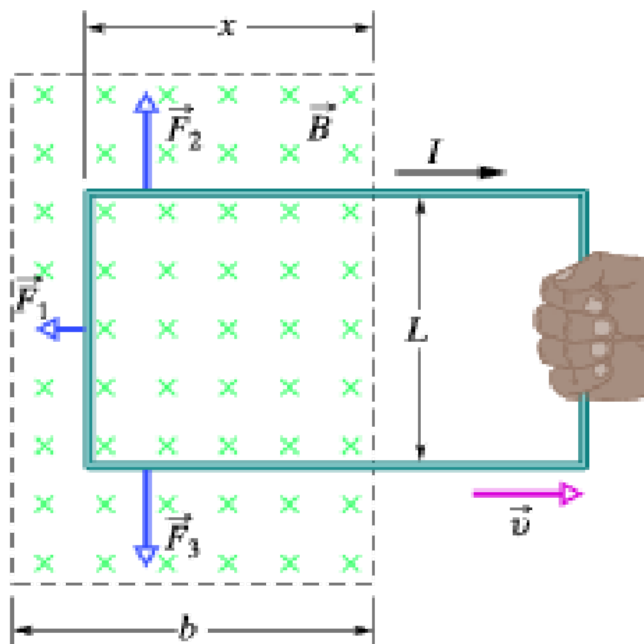
$$U = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{to prawo Faradaya jest w postaci:}$$

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



Prąd indukowany w ramce

❑ Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

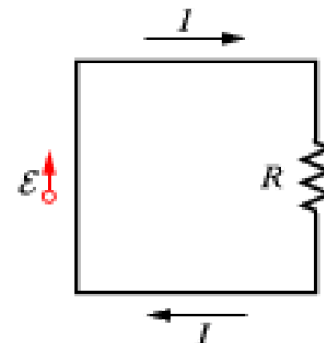


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

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

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

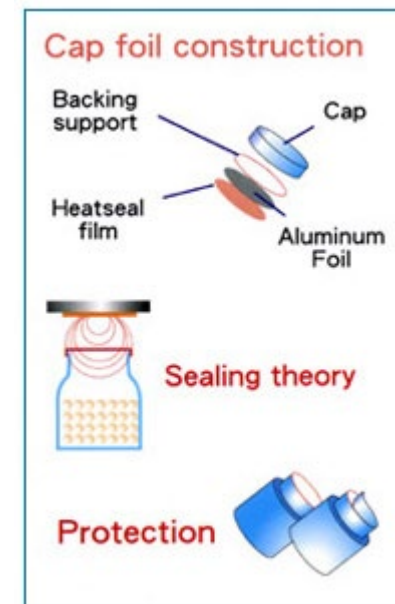
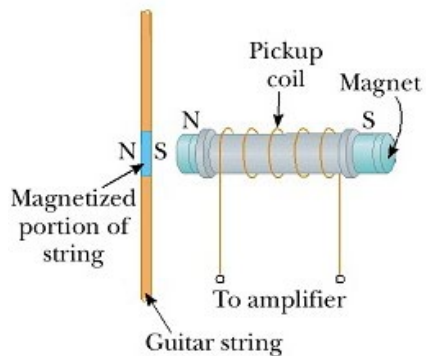
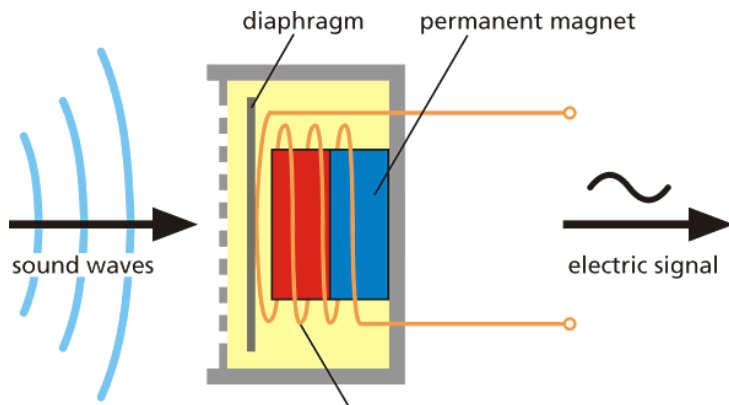
jest to zatem model układu elektrycznego:



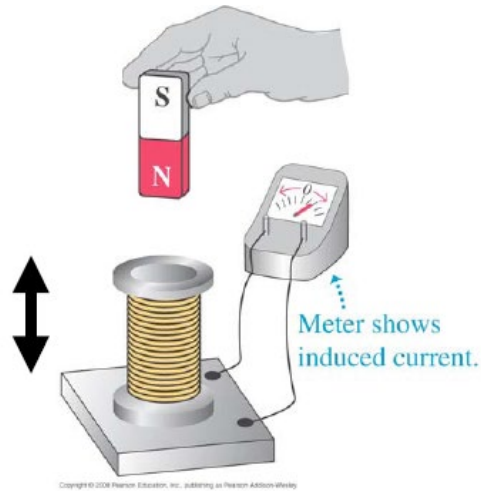
$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

moc: szybkość wykonania pracy,
wyzdzielania ciepła

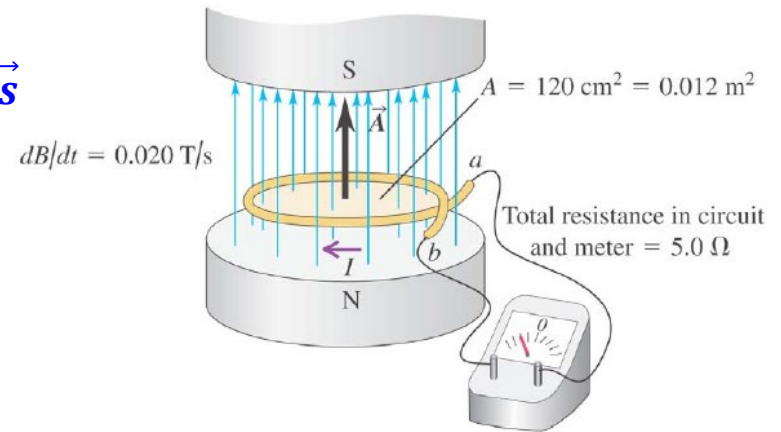
Indukcja elektromagnetyczna - zastosowania



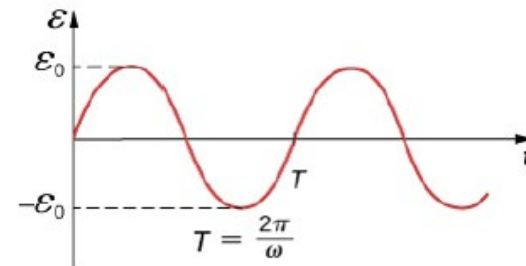
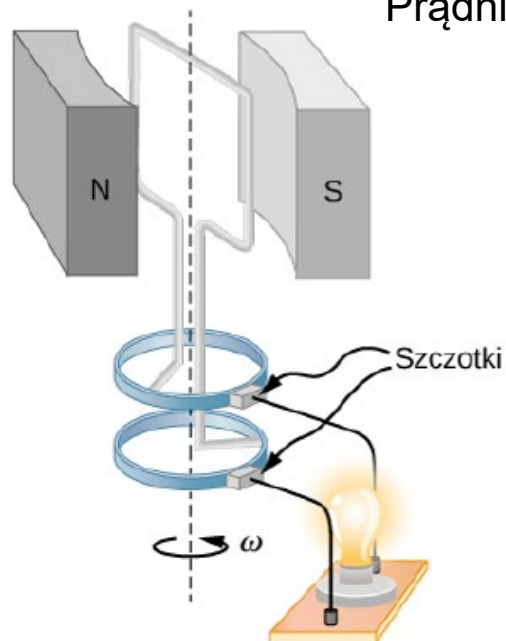
Wiele dróg prowadzi do indukcji prądu...



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

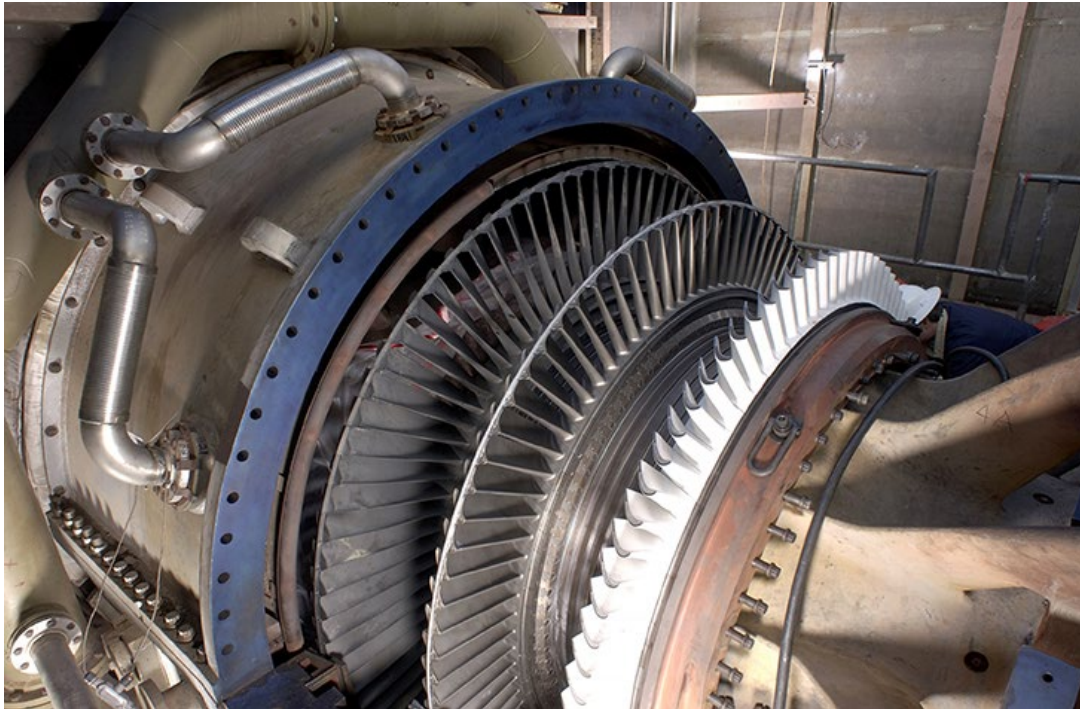


Prądnica



Produkcja prądu

Zmiana energii mechanicznej na energię elektryczną.

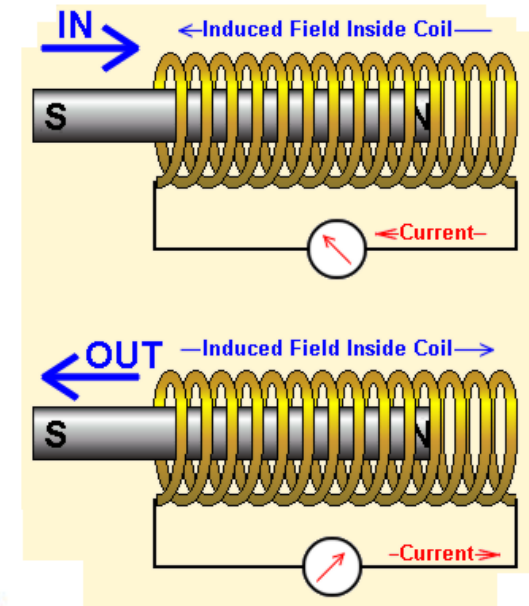
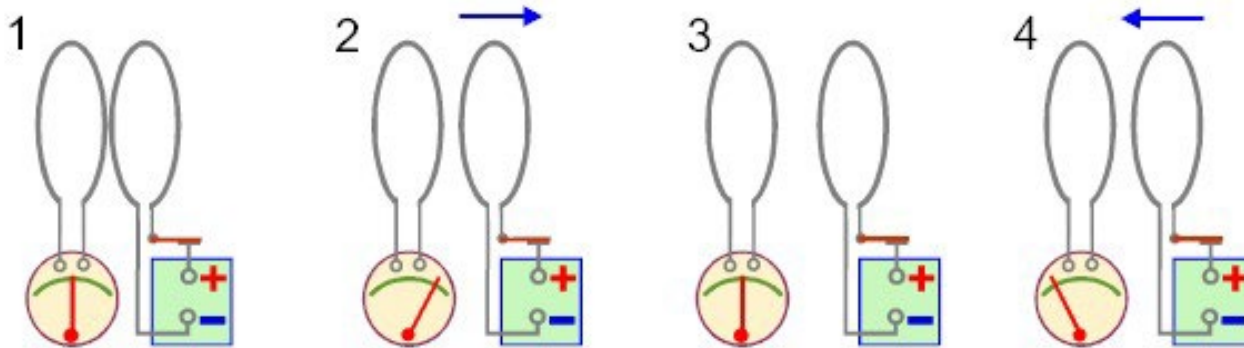
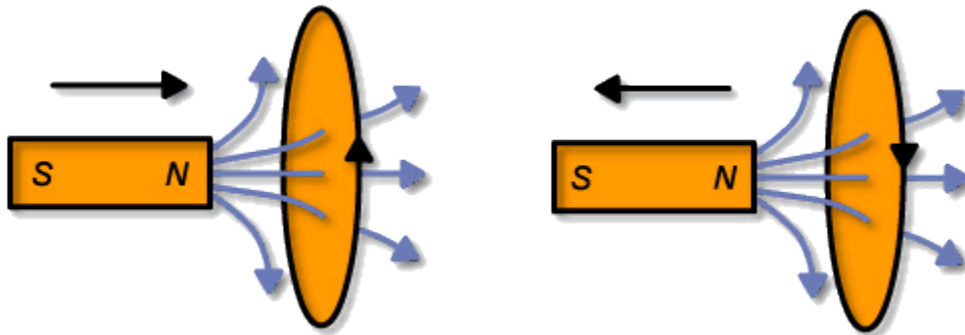


Obrót turbiny może pochodzić z:

- 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):

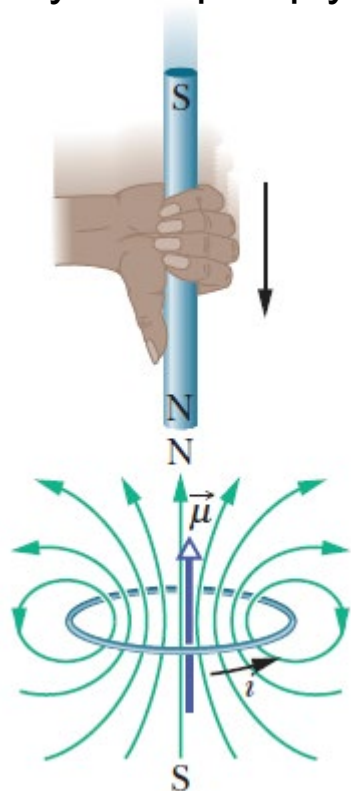
Indukowany prąd płynie w takim kierunku, że wytworzone pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która wywołała ten prąd

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

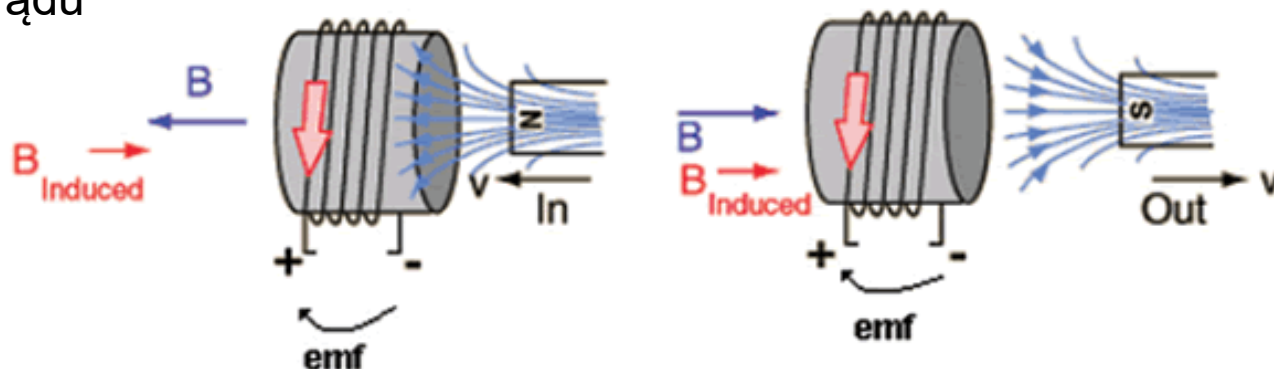
- ❑ Procedura wyznaczania kierunku indukowanego prądu (potrzebna głowa i dwie ręce):
- określ potencjalną przyczynę wyindukowania prądu (ruch magnesu, cewki, zmiana prądu w obwodzie-źródle),
 - określ kierunek zmiany – przybliżanie, oddalanie magnesu, narastanie, zmniejszanie się prądu,
 - zaznacz kierunek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

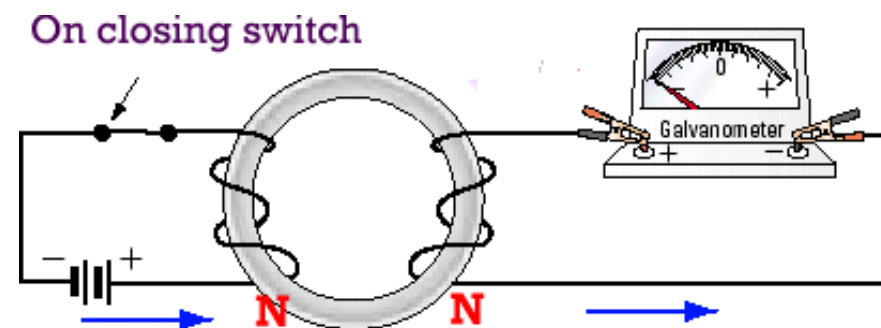
1. Ruch magnesu powoduje, że w obwodzie wytworzyło się pole magnetyczne przeciwdziałające temu ruchowi, zmienny strumień pola mag. wywołał przepływ prądu



Wyjaśnij!

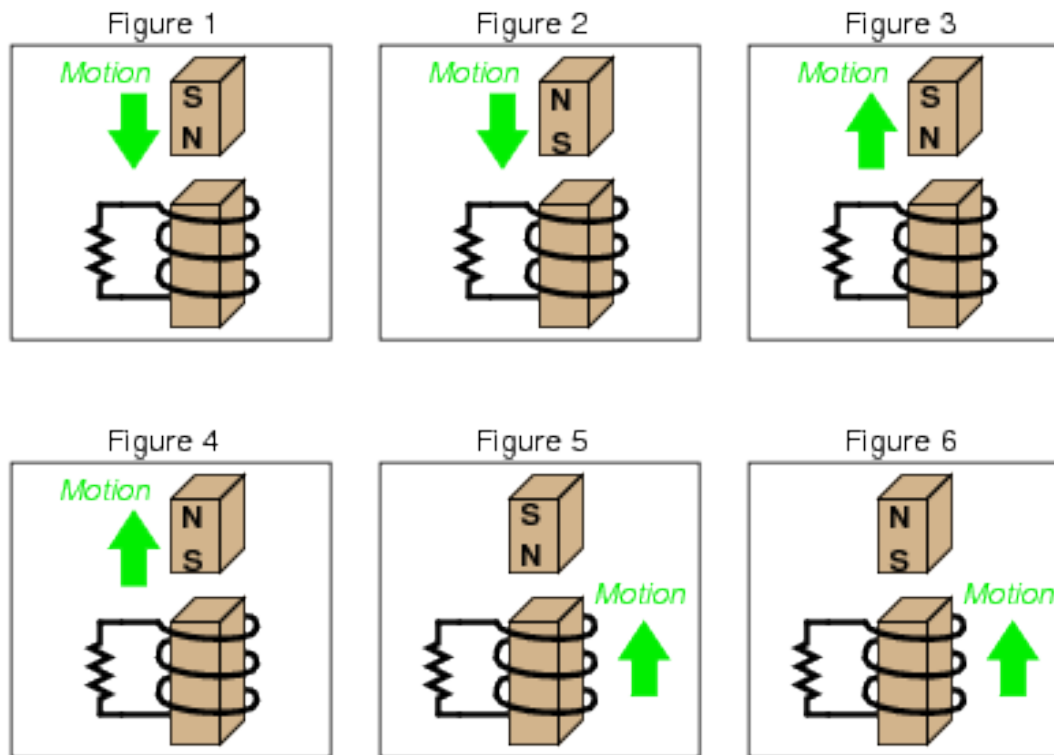


2. Zamknięcie przełącznika – wzrost prądu, indukowane pole ma przeciwdziałać przyczynie



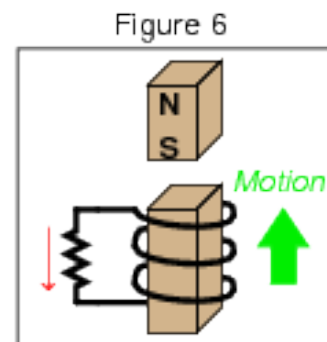
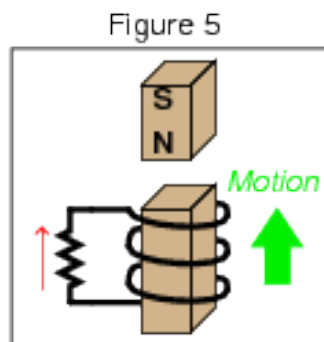
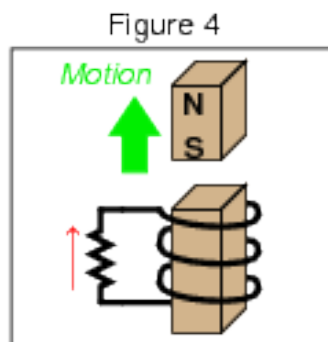
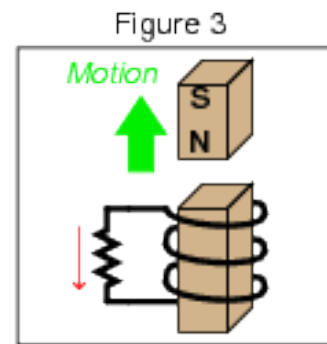
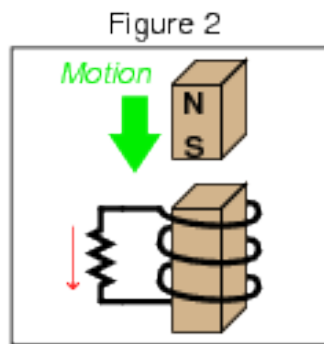
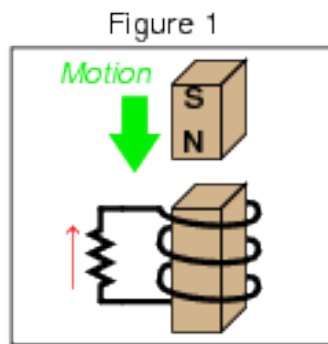
Quiz

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



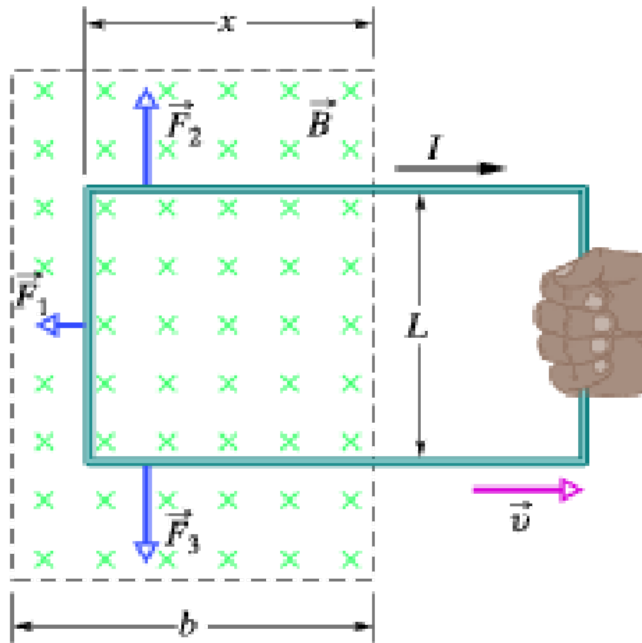
Quiz

❑ A teraz sprawdź wynik!



Prąd indukowany w ramce

❑ Ruch ramki z przewodnika w polu magnetycznym:

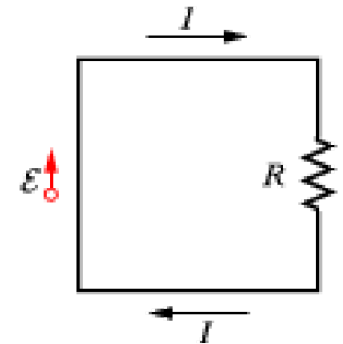


Ramka jest wysuwana z pola magnetycznego – maleje strumień pola objęty przez ramkę – jest to przyczyna indukcji prądu w ramce (kierunek!).

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

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

jest to zatem model układu elektrycznego:



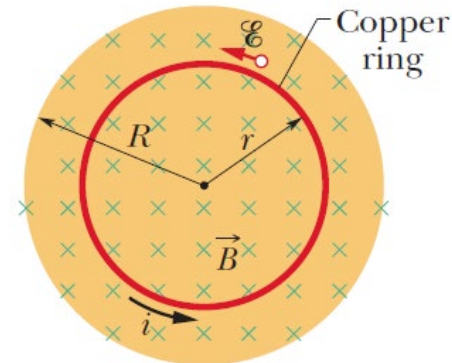
$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R} \\ F &= ILB \end{aligned} \right\} P = F v = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

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

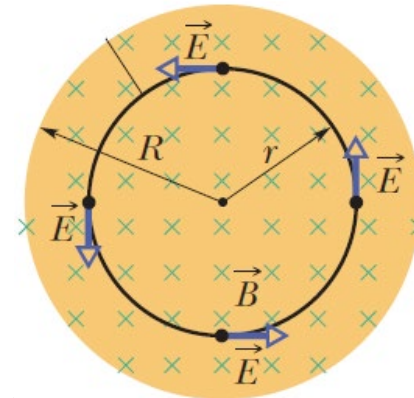


$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

❑ Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytwarza pole elektryczne

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

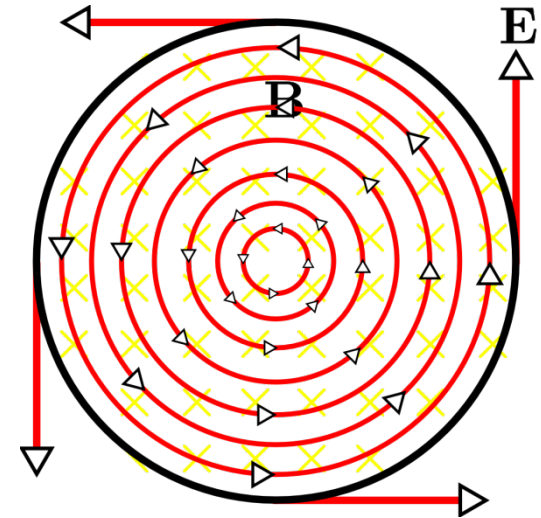


$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

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

Pole magnetyczne z elektrycznego

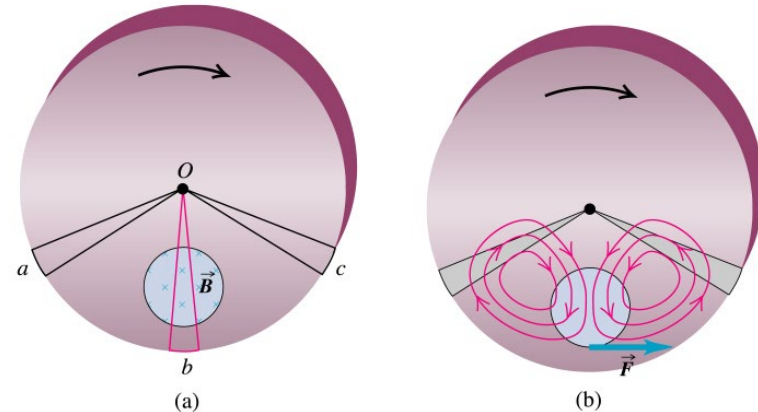
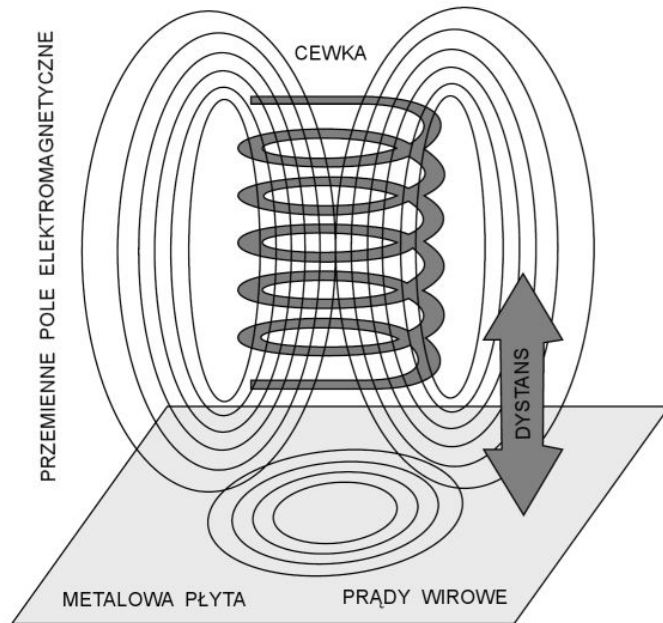
- ❑ Zmienne pole magnetyczne wywołalo wirowe pole elektryczne (zmienne pole magnetyczne zmieniało przestrzeń wytwarzając w niej pole elektryczne!)
- ❑ Pola magnetyczne i elektryczne są ze sobą związane.
- ❑ Indukowane pole elektryczne różni się od pola wytworzonego przez stacjonarne ładunki:
 - ma zamknięte 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

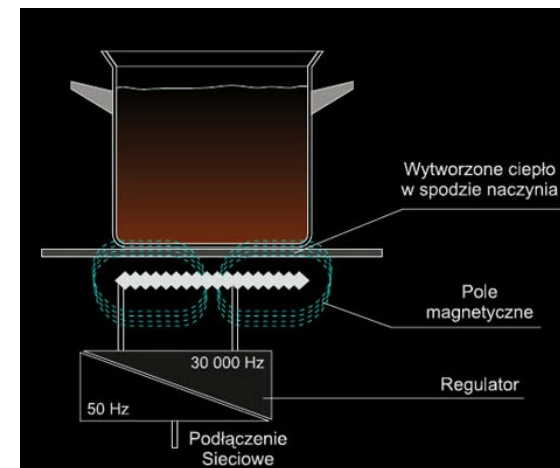
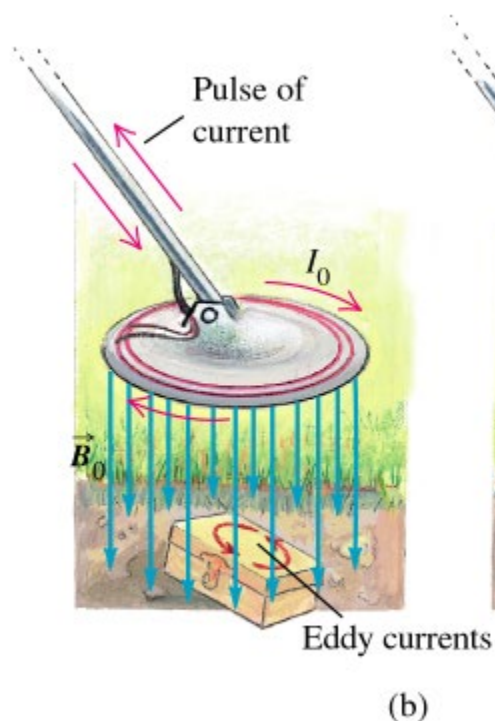
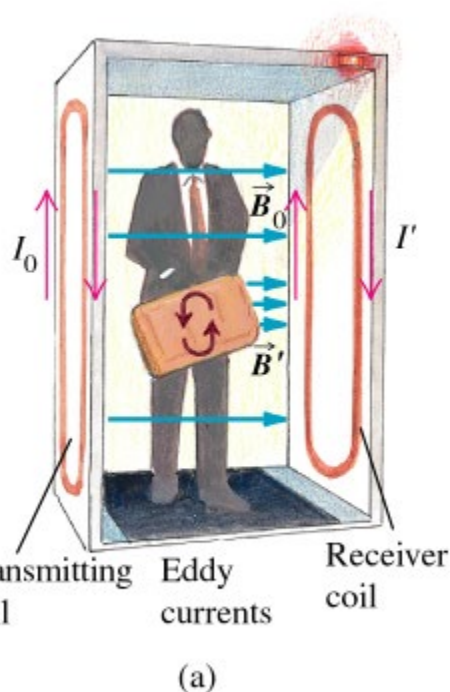
- ❑ W płytach metalowych znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym, indukowane prądy mają kształt wiru i często są szkodliwe (rozpraszają energię).
- ❑ Takie prądy nazywamy **prądami wirowymi**.



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:

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

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

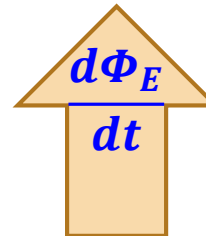


równania niezależne od czasu,
stacjonarne,
pola elektryczne i magnetyczne
są niezależne od siebie

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

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**?

Pole elektryczne z magnetycznego - powtórka

❑ Umieszczamy przewodzący pierścień w polu magnetycznym B .

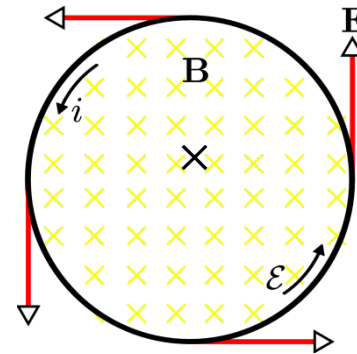
- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd i .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne E !

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

❑ Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytworza pole elektryczne

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



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

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

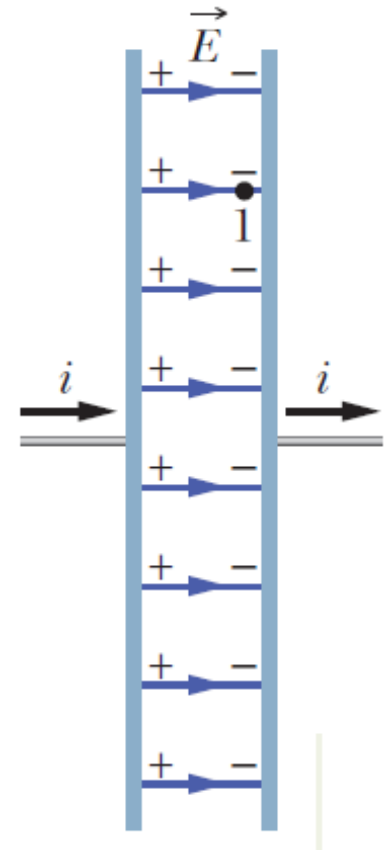
Pole magnetyczne z elektrycznego

- ❑ 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...

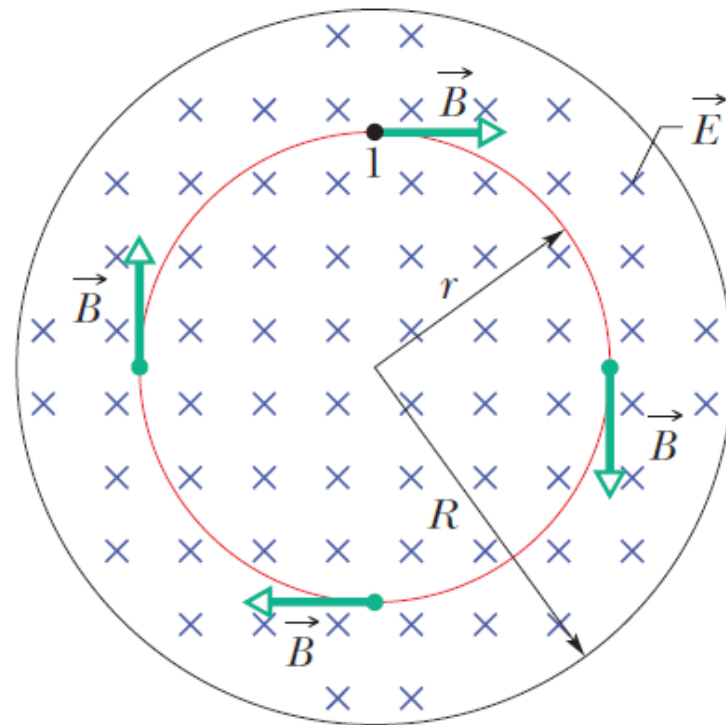
zmienne pole elektryczne
wytworza pole magnetyczne

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 „-” !



Indukowane pole magnetyczne – porównanie!

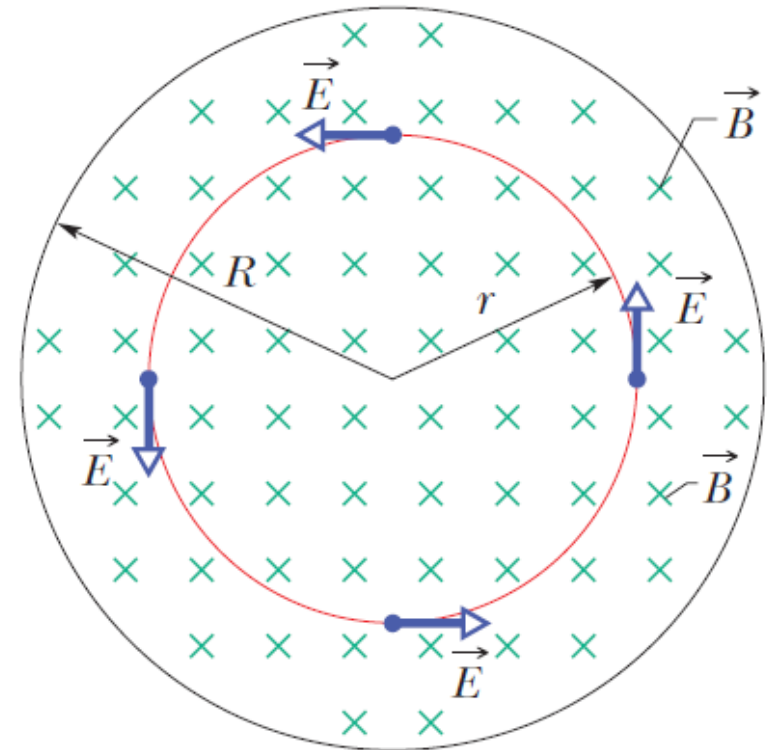
❑ Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

zmienne 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:

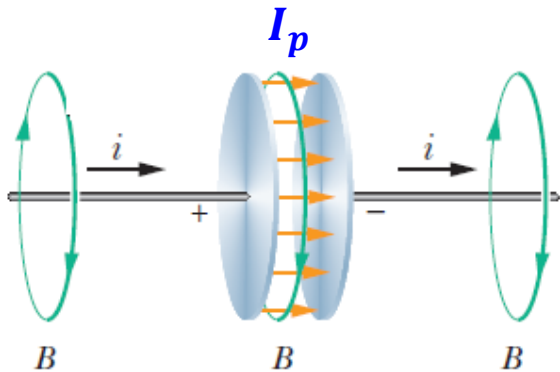
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

❑ Co daje razem:

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

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)

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

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

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

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

Równania Maxwella – postać różniczkowa

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

$$\underbrace{\nabla \cdot \vec{E}}_{\text{operator dywergencji}} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

operator dywergencji
opisuje źródłowość pola

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

$$\underbrace{\nabla \times \vec{E}}_{\text{operator rotacji}} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

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.

opracowane na podstawie:

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

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

10th Edition, John Wiley & Sons, Inc.

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