

Podstawy fizyki – sezon 2

6. Indukcja magnetyczna

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

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

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

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

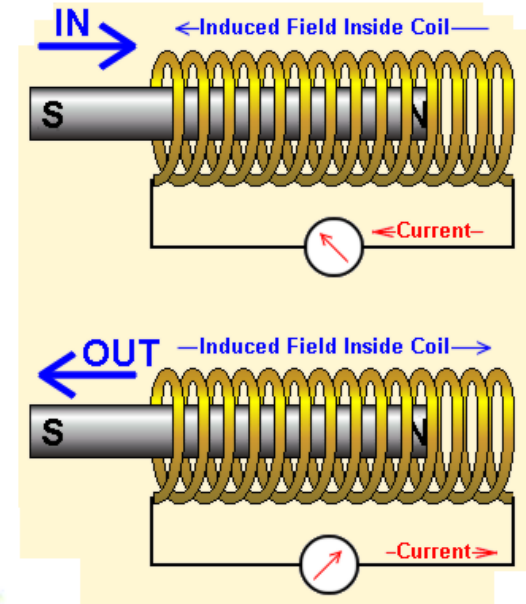
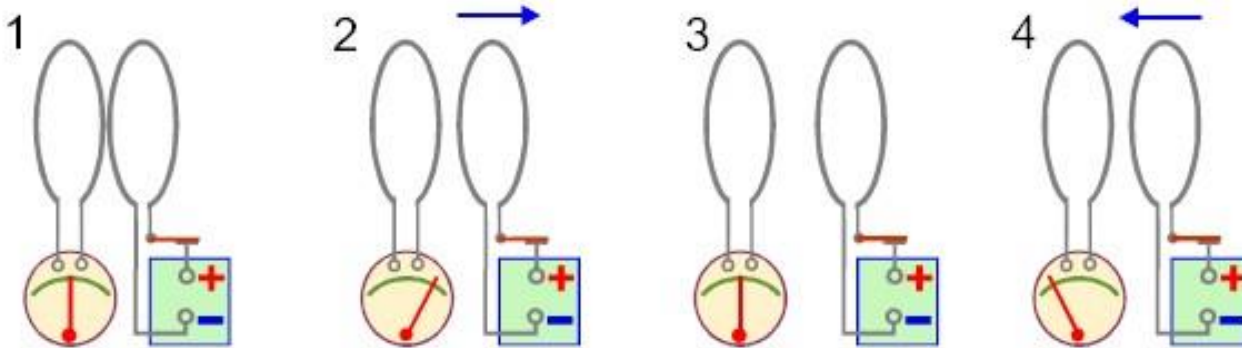
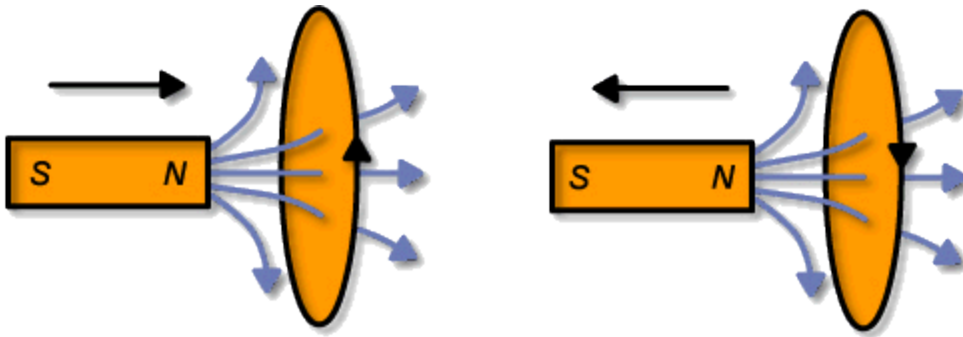


Czy źródłem pola magnetycznego może
być zmienny w czasie strumień pola
elektrycznego?

Źródłem pola elektrycznego
jest **zmienny w czasie
strumień** pola
magnetycznego.

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):

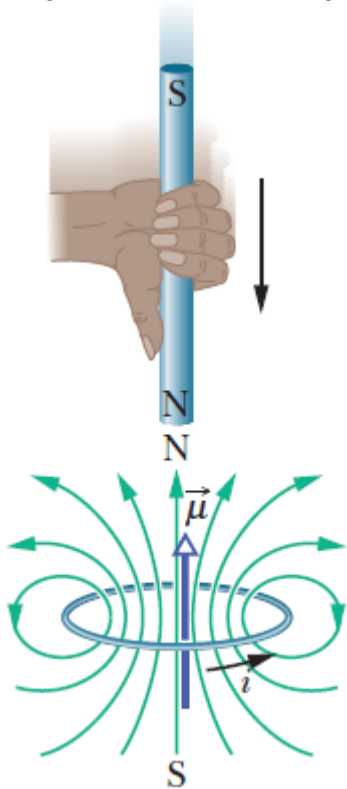
Indukowany prąd płynie w takim kierunku, że wytworzone pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która wywołała ten prąd

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

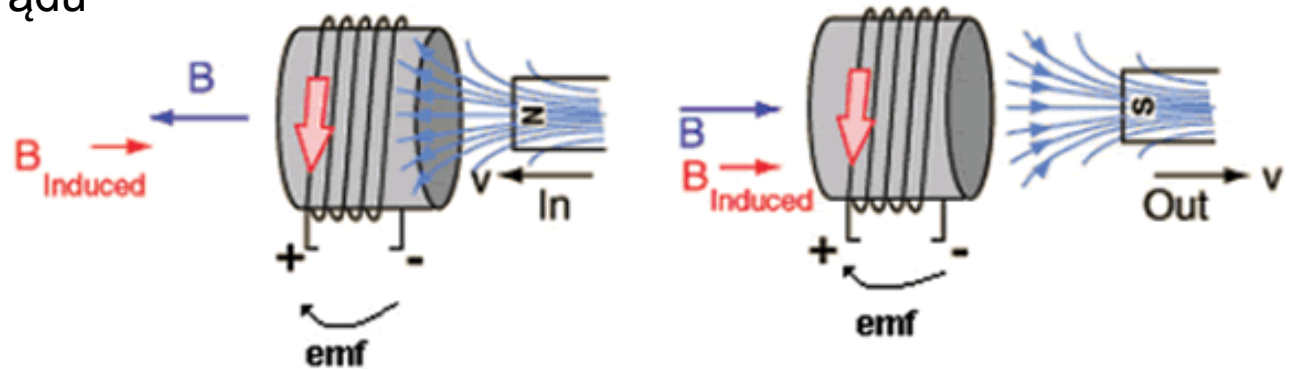
- ▶ Procedura wyznaczania kierunku indukowanego prądu (potrzebna głowa i dwie ręce):
 - określ potencjalną przyczynę wyindukowania prądu (ruch magnesu, cewki, zmiana prądu w obwodzie-źródle),
 - określ kierunek zmiany – przybliżanie, oddalanie magnesu, narastanie, zmniejszanie się prądu,
 - zaznacz kierunek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

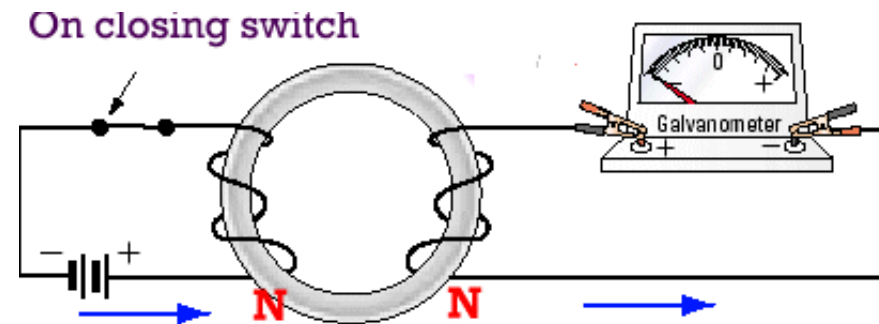
1. Ruch magnesu powoduje, że w obwodzie wytworzyło się pole magnetyczne przeciwdziałające temu ruchowi, zmienny strumień pola mag. wywołał przepływ prądu



Wyjaśnij!

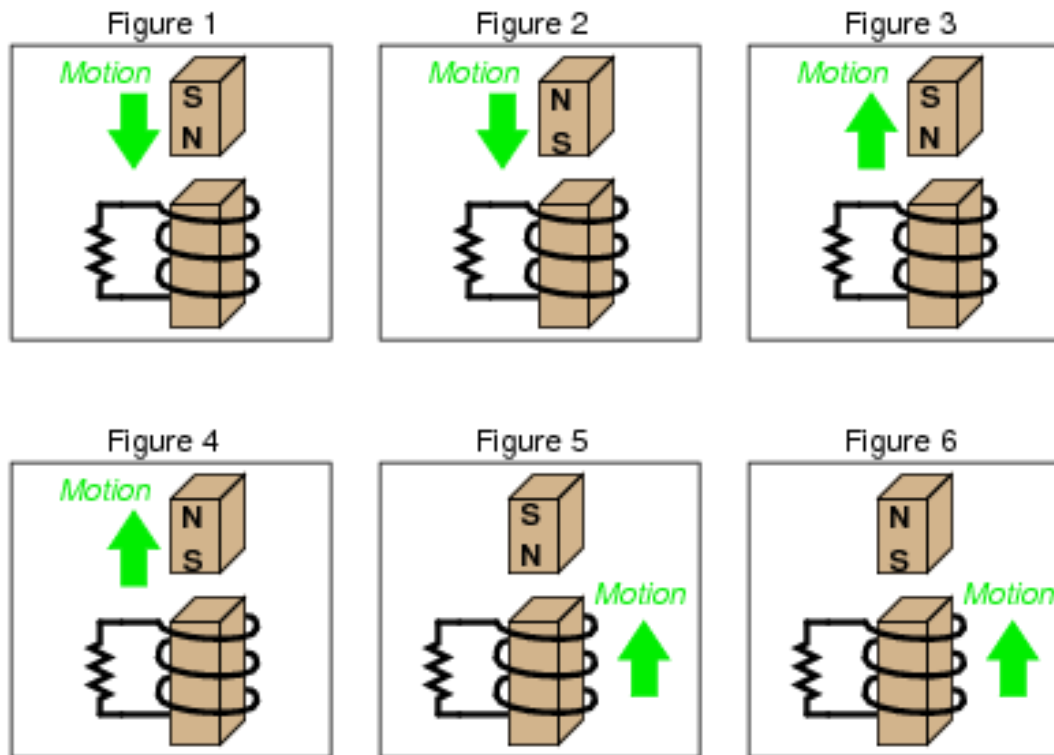


2. Zamknięcie przełącznika – wzrost prądu, indukowane pole ma przeciwdziałać przyczynie



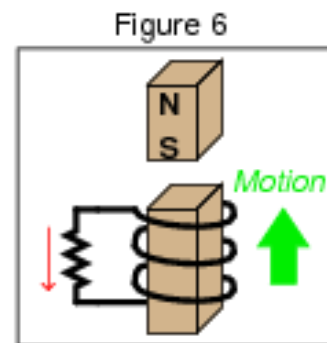
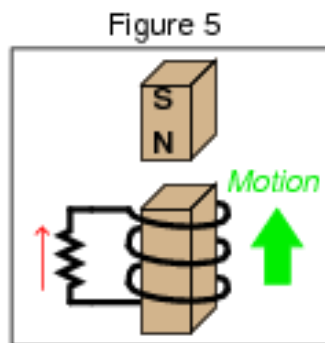
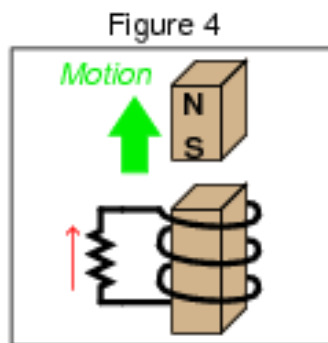
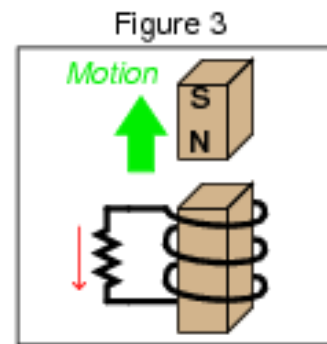
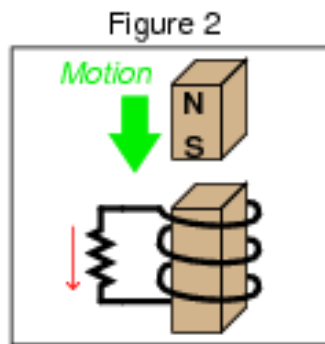
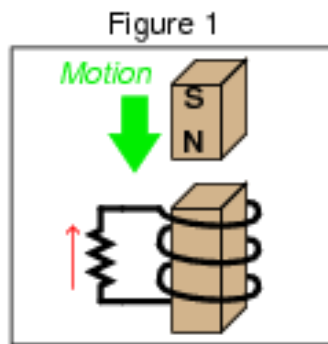
Quiz

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



Quiz

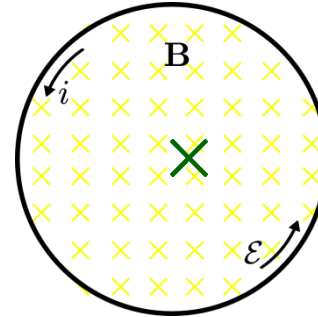
- A teraz sprawdź wynik!



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

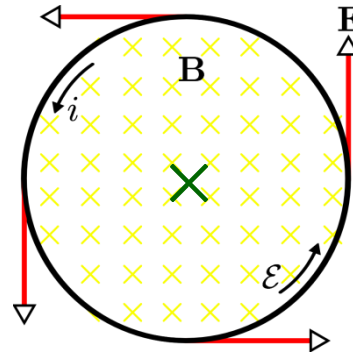


$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- ▶ Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytwarza pole elektryczne

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

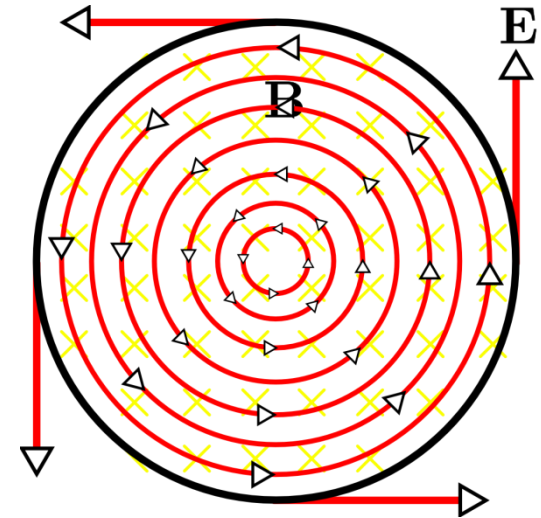


$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

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

Pole magnetyczne z elektrycznego

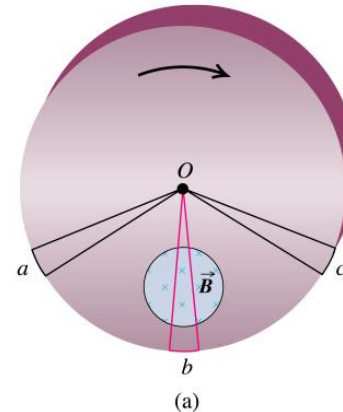
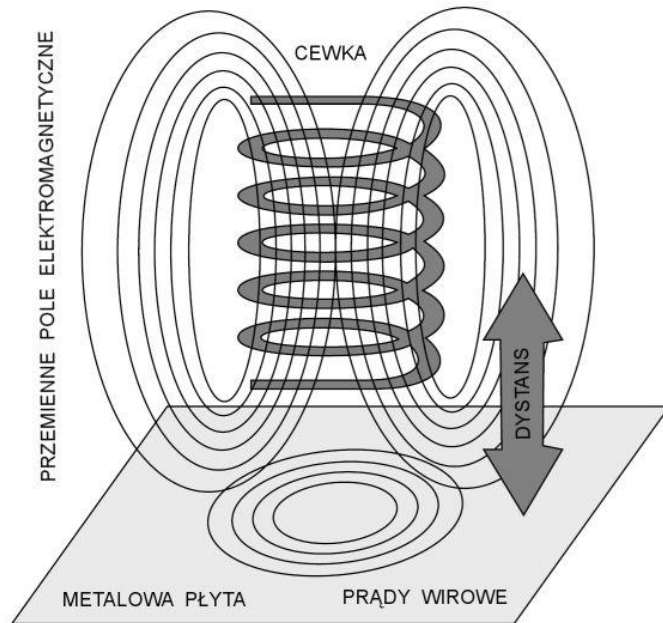
- ▶ Zmienne pole magnetyczne wywołalo wirowe pole elektryczne (zmienne pole magnetyczne zmieniało przestrzeń wytwarzając w niej pole elektryczne!)
- ▶ Pola magnetyczne i elektryczne są ze sobą związane.
- ▶ Indukowane pole elektryczne różni się od pola wytworzonego przez stacjonarne ładunki:
 - ma zamknięte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



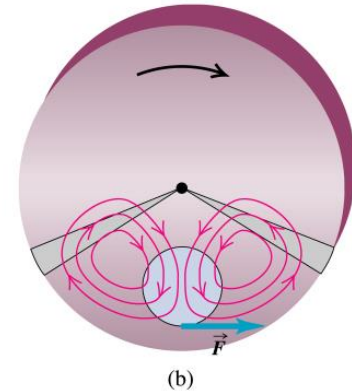
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

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**.

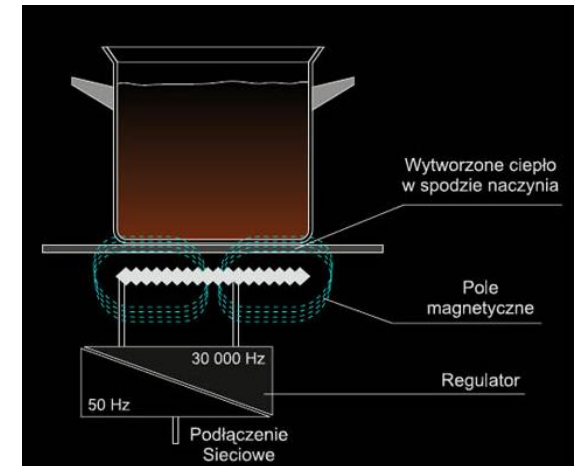
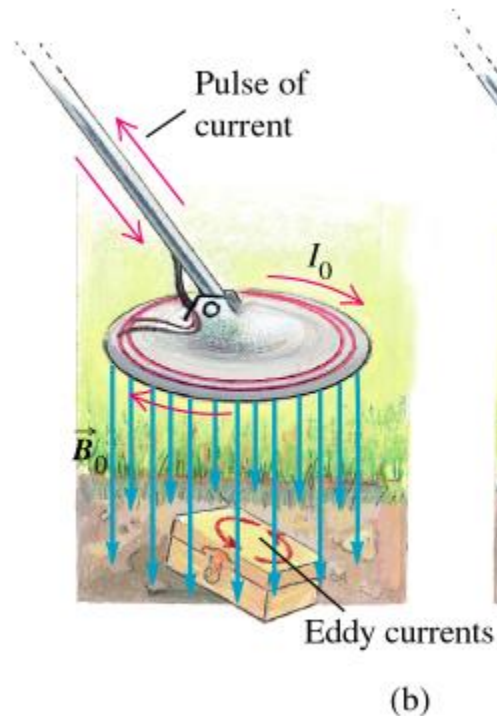
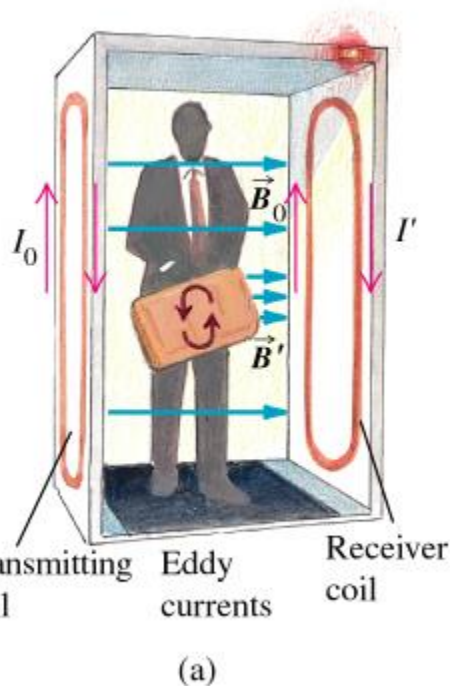


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Prądy wirowe

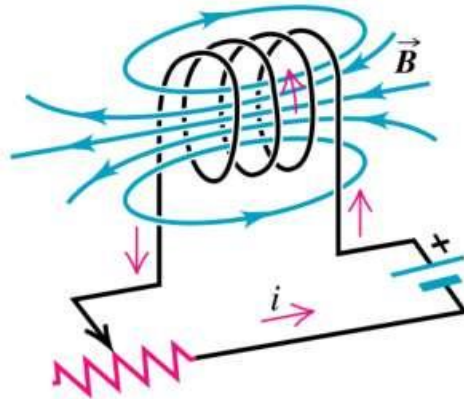
- ▶ Prądy wirowe są również wykorzystane w technice – pomiary struktur, kuchnia, wykrywacze metalu....



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

Indukcyjność

- ▶ Cewka (zwinięty drut) służy do wytwarzania pola magnetycznego.



- ▶ Prąd przechodzący przez uzwojenie cewki wytwarza strumień magnetyczny Φ_B
- ▶ Indukcyjność cewki określamy jako:

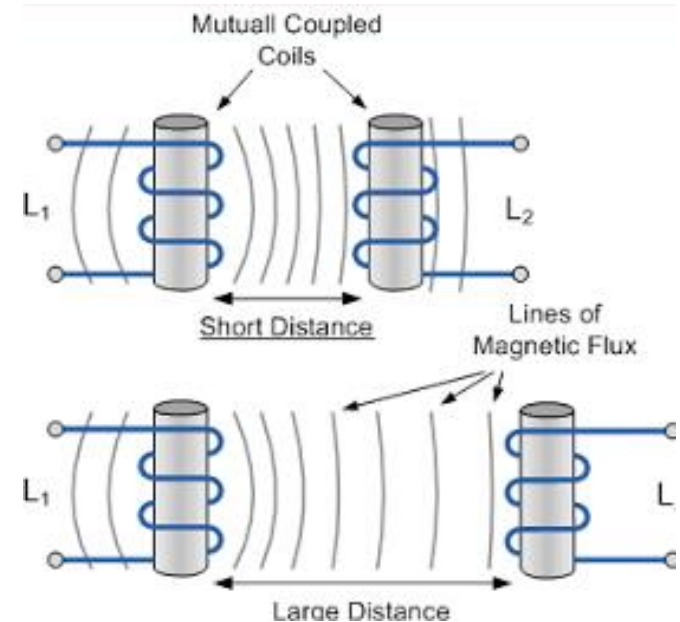
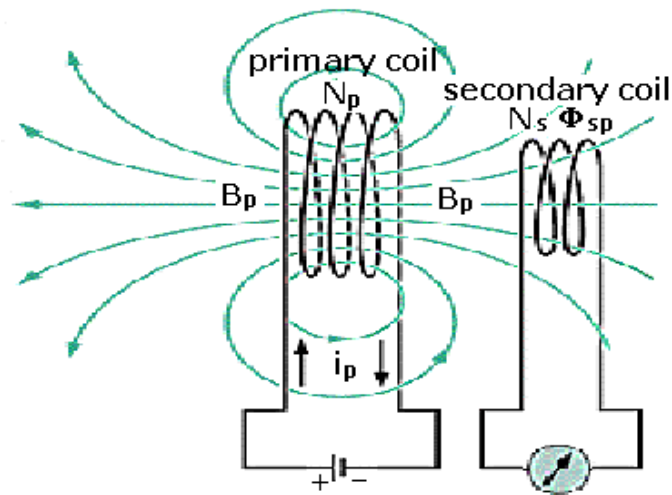
$$L = N \frac{\Phi_B}{I}$$

$$\Phi_B = L N I$$

Indukcyjności policzymy na ćw.

Dwie cewki

- ▶ Jeśli jedną cewkę z prądem umieścimy w pobliżu drugiej (bez prądu), to w tej drugiej wyindukuje się prąd.
- ▶ Zjawisko takie nazywamy **samoindukcją**.



- ▶ A opiszemy poprzez zdef. **indukcyjności wzajemnej** cewki 2 względem 1:

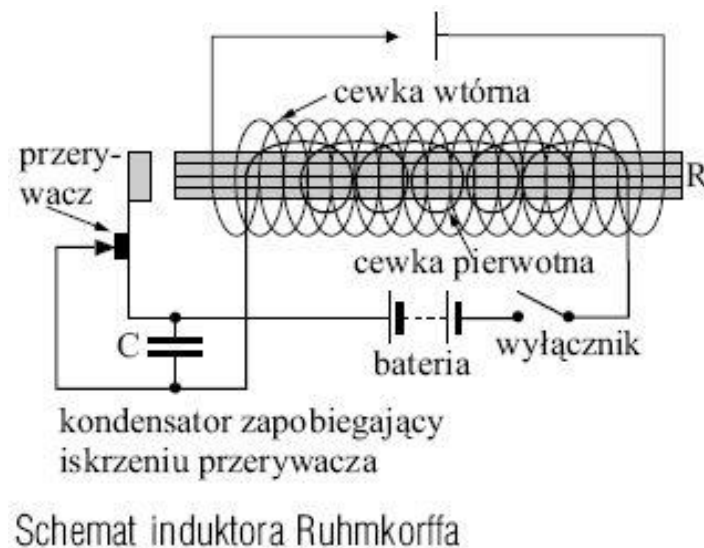
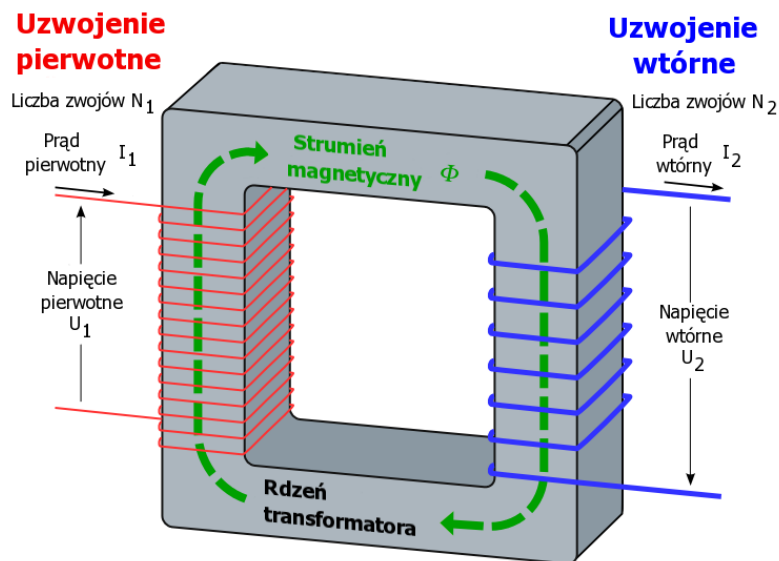
$$M_{21} = N \frac{\Phi_{21}}{I_1}$$

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

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt}$$

Indukcja wzajemna

- Dwie cewki mogą być nawinięte na jeden rdzeń (żelazny) lub jedna w drugiej:



skoro:

$$\left. \begin{aligned} L &= N \frac{\Phi_B}{I} \\ \varepsilon_L &= N \frac{d\Phi_B}{dt} \end{aligned} \right\} \varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$$

dla transformatora idealnego

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Dotychczas pokazaliśmy:

- Równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

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

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

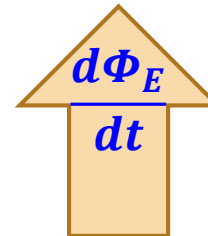


równania niezależne od czasu,
stacjonarne,
pola elektryczne i magnetyczne
są niezależne od siebie

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

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 .

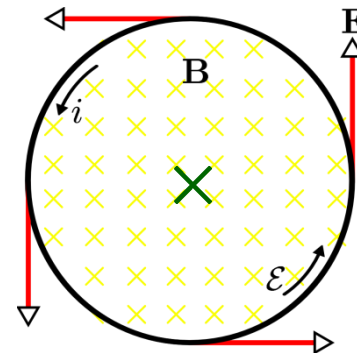
- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd i .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne E !

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

► Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytwarza 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).

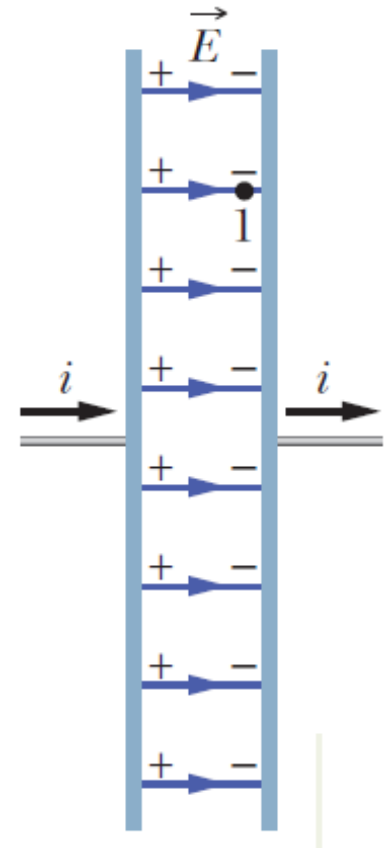
Pole magnetyczne z elektrycznego

- 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...

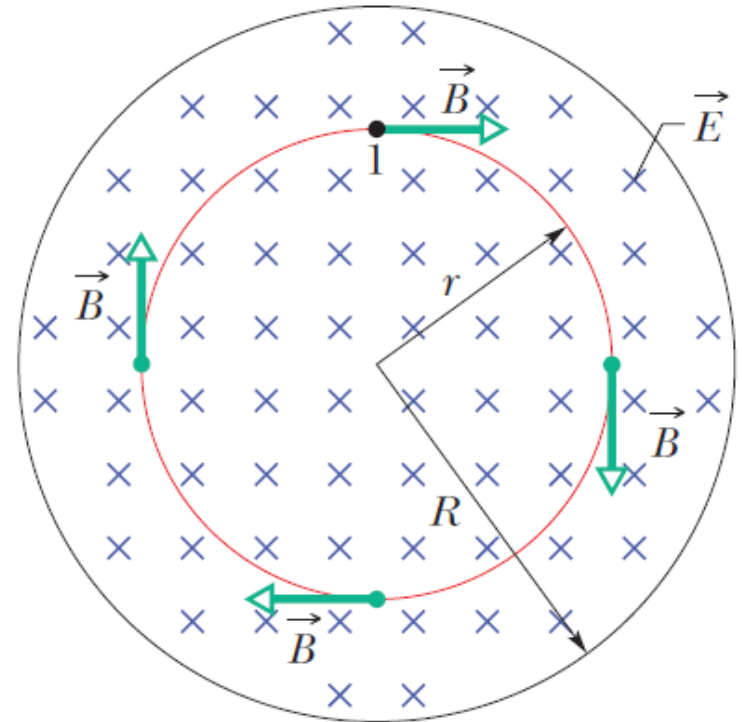
zmienne pole elektryczne
wytwarza pole magnetyczne

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!

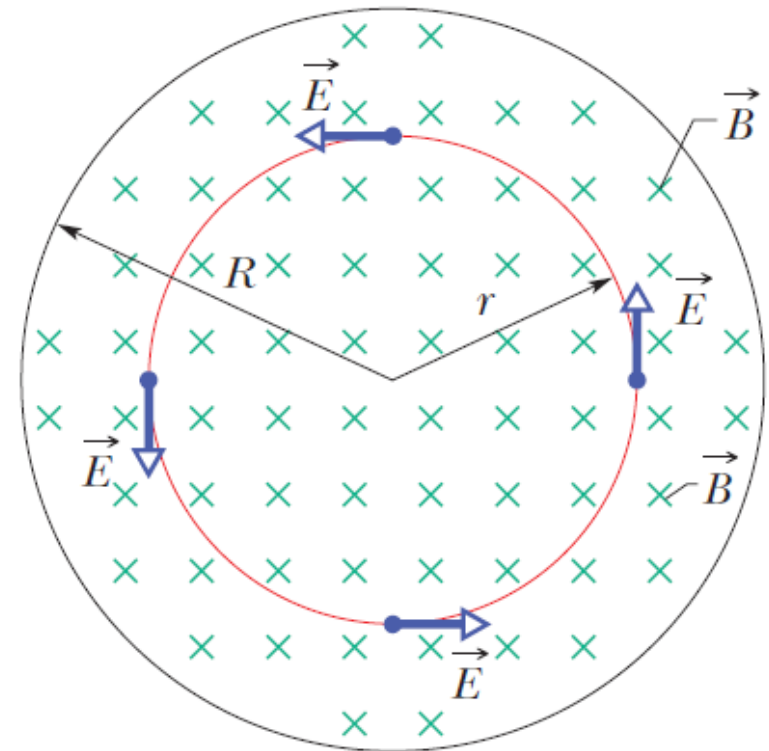
- ▶ Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

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 „-” ! 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:

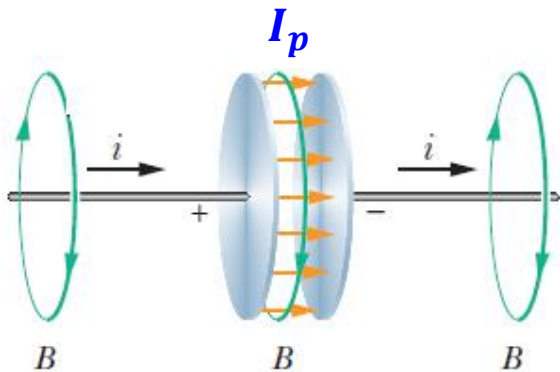
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- ▶ 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)

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

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

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

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

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)

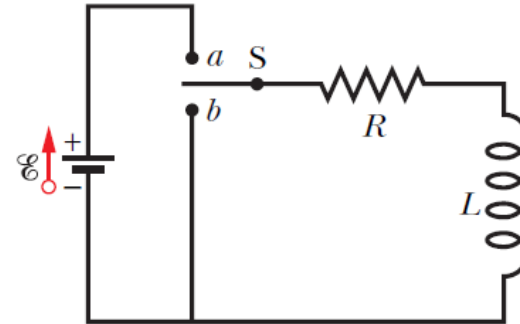
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Podsumowanie

- ▶ Prawo Faradaya i reguła Lenza – zastosowania.
- ▶ Indukowane pole elektryczne.
- ▶ Indukcyjność.
- ▶ Cewki, indukcja wzajemna.
- ▶ Cztery równania elektromagnetyzmu.
- ▶ Indukowane pole magnetyczne.
- ▶ Uogólnione prawo Ampera, prąd przesunięcia.

Układy RL

- ▶ Mamy obwód z opornikiem i cewką:
- ▶ Najpierw (pozycja „a” przełącznika) prąd ze źródła napięcia zaczyna płynąć przez opornik i cewkę.
- ▶ Prąd rośnie, zatem w cewce wytwarza zmienne pole magnetyczne i wyindukowane SEM:
- ▶ Rozwiązaniem tego równania jest:

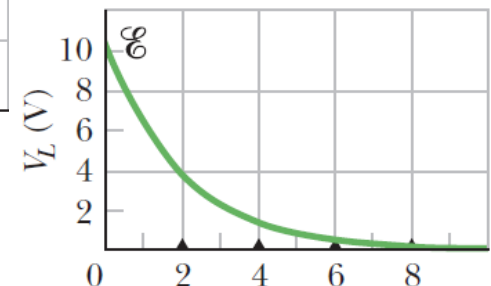
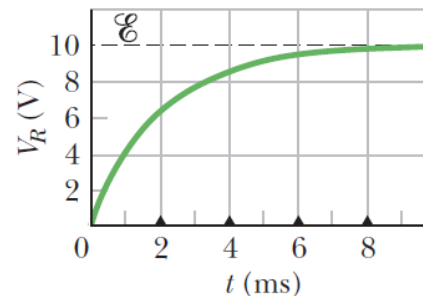


$$L \frac{di}{dt} + Ri = \mathcal{E}$$

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

stała czasowa układów RL:

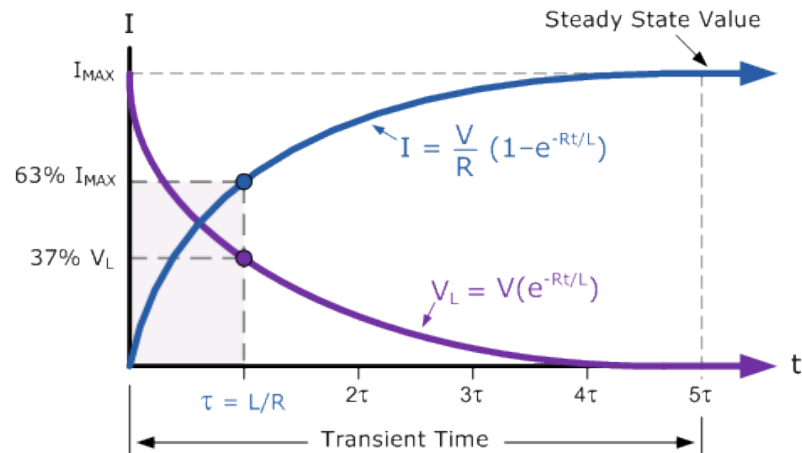
$$\tau_L = \frac{L}{R}$$



Układy RL

- ▶ Prąd w cewce rośnie do wartości maksymalnej

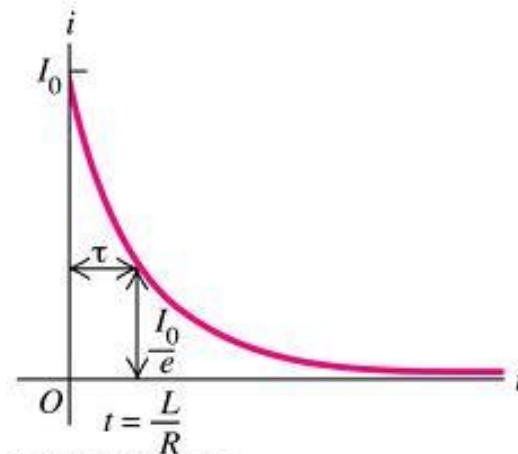
$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$



- ▶ Jeżeli odłączymy źródło:

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0$$

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/\tau_L} = i_0 e^{-t/\tau_L}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.