

Podstawy fizyki – sezon 2

6. Indukcja magnetyczna

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 111

amucha@agh.edu.pl

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

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

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

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

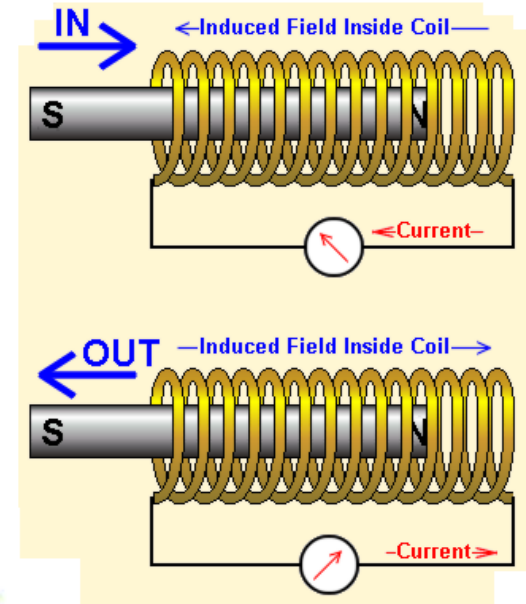
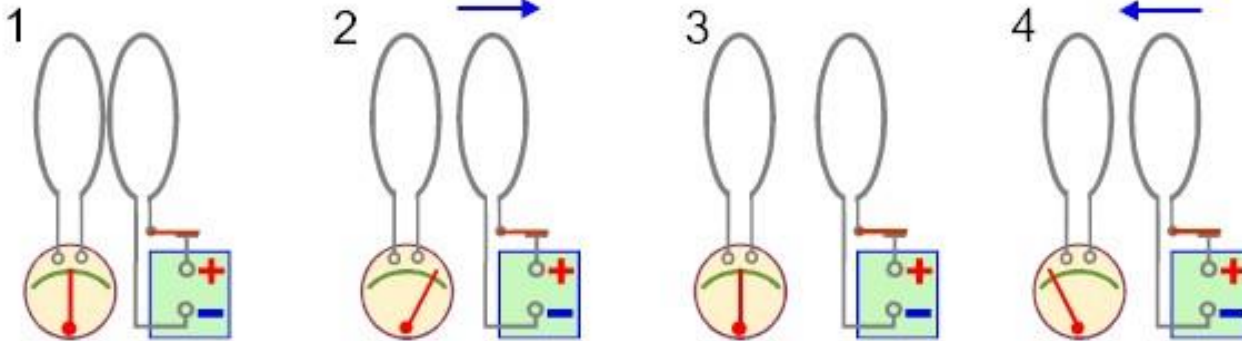
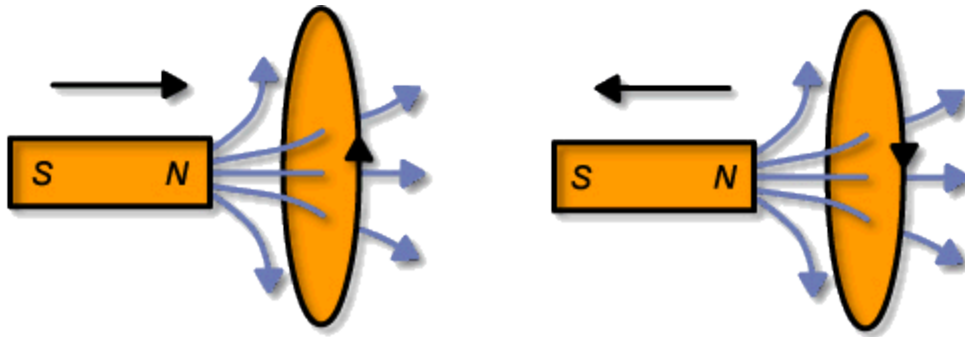


Czy źródłem pola magnetycznego może
być zmienny w czasie strumień pola
elektrycznego?

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):

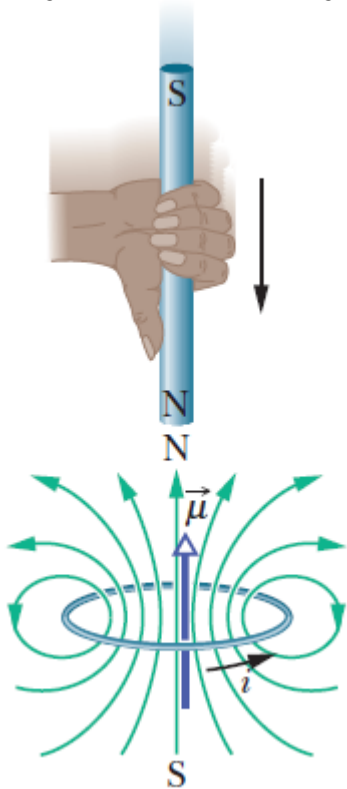
Indukowany prąd płynie w takim kierunku, że wytworzone pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która wywołała ten prąd

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

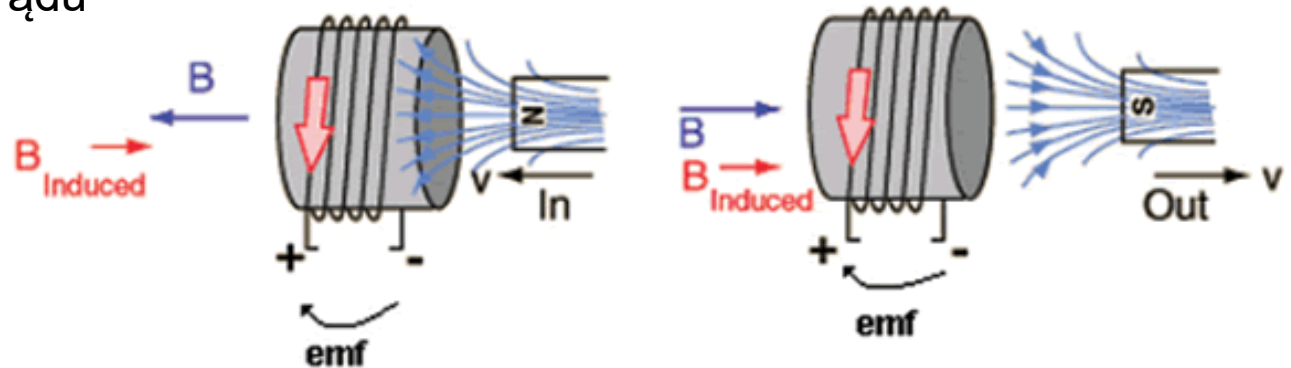
- ❑ Procedura wyznaczania kierunku indukowanego prądu (potrzebna głowa i dwie ręce):
 - określ potencjalną przyczynę wyindukowania prądu (ruch magnesu, cewki, zmiana prądu w obwodzie-źródle),
 - określ kierunek zmiany – przybliżanie, oddalanie magnesu, narastanie, zmniejszanie się prądu,
 - zaznacz kierunek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

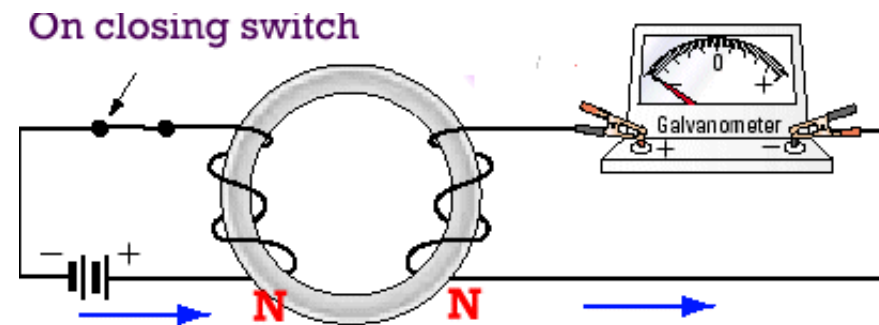
1. Ruch magnesu powoduje, że w obwodzie wytworzyło się pole magnetyczne przeciwdziałające temu ruchowi, zmienny strumień pola mag. wywołał przepływ prądu



Wyjaśnij!

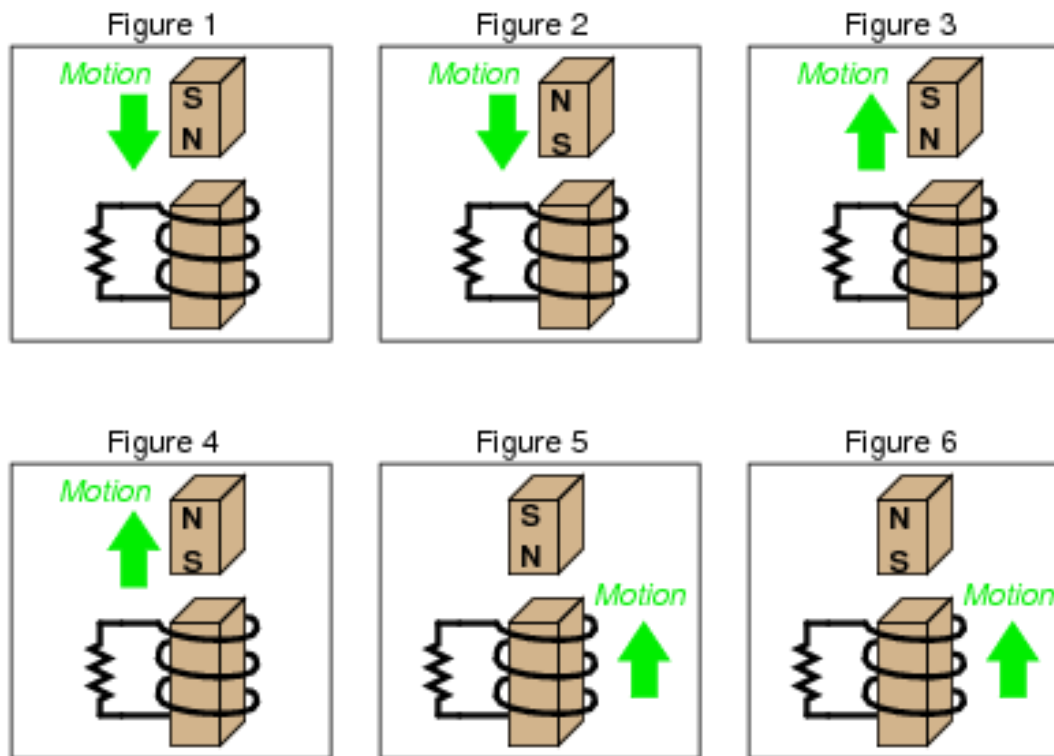


2. Zamknięcie przełącznika – wzrost prądu, indukowane pole ma przeciwdziałać przyczynie



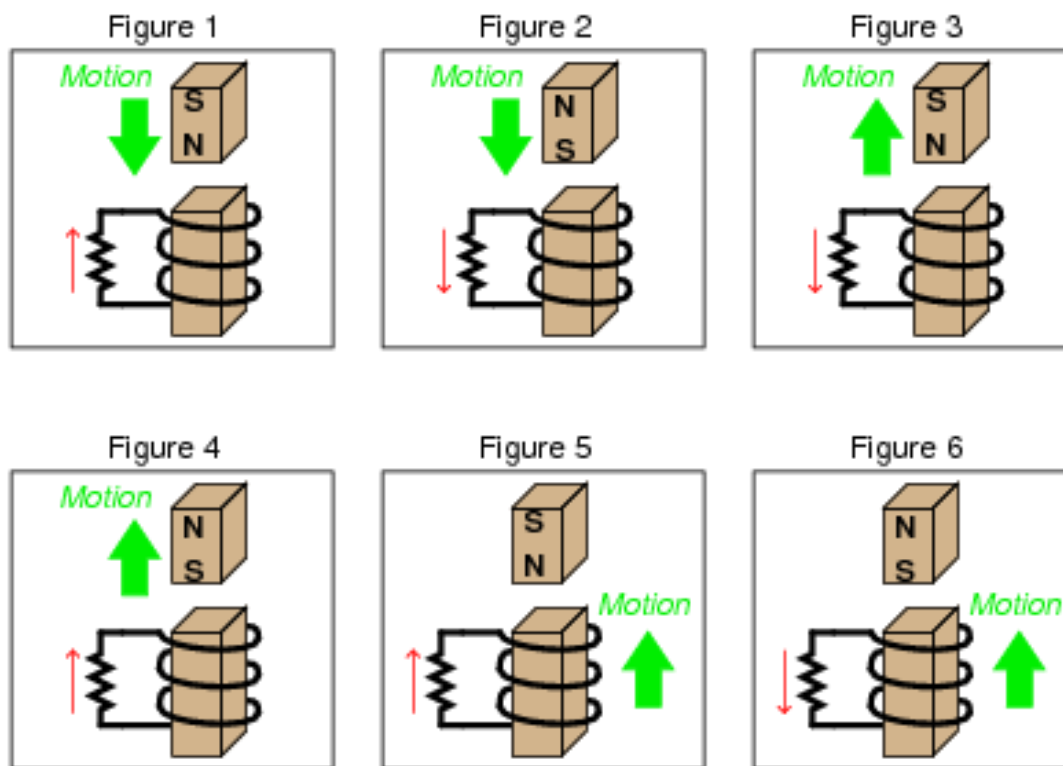
Quiz

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



Quiz

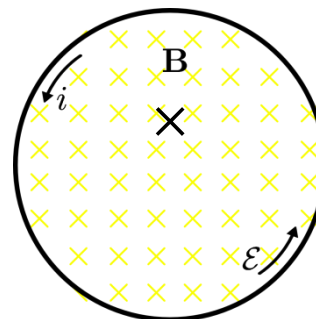
❑ A teraz sprawdź wynik!



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

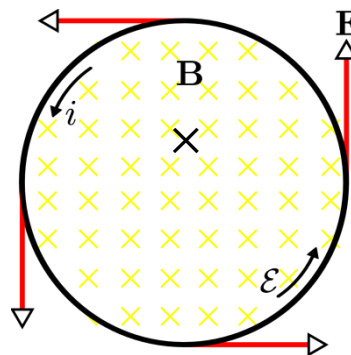


$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

□ Wynika stąd wniosek, że:

zmienne pole magnetyczne
wytworza pole elektryczne

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

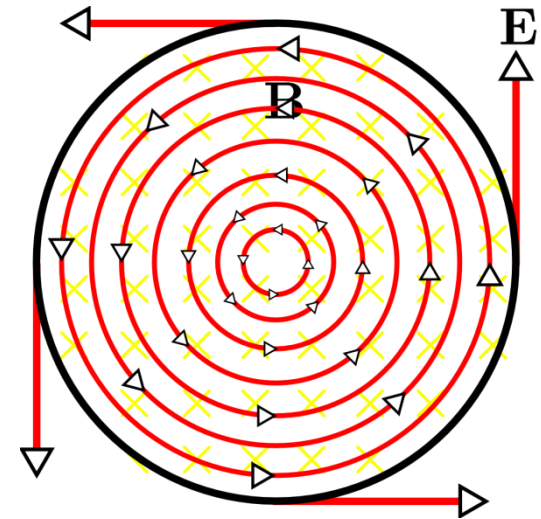


$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

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

Pole magnetyczne z elektrycznego

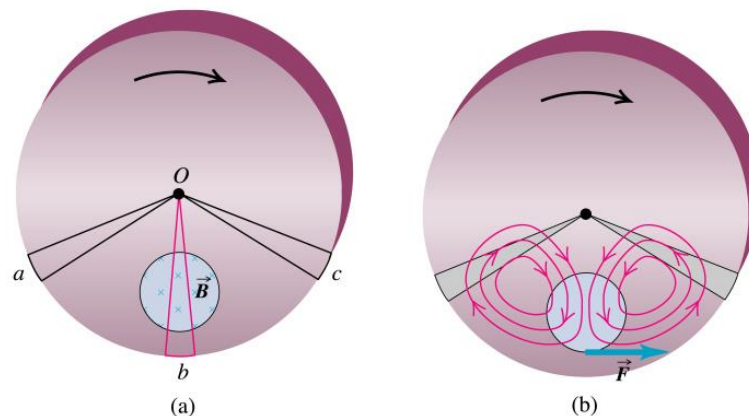
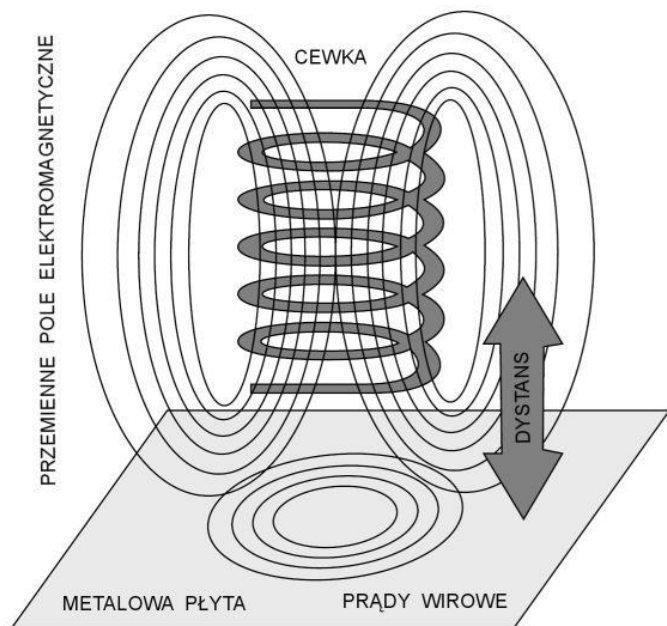
- ❑ Zmienne pole magnetyczne wywołalo wirowe pole elektryczne (zmienne pole magnetyczne zmienilo przestrzen wytwarzajac w niej pole elektryczne!)
- ❑ Pola magnetyczne i elektryczne sa ze soba zwiazane.
- ❑ Indukowane pole elektryczne rozni sie od pola wytworzonego przez stacjonarne ladunki:
 - ma zamknietae linie,
 - nie mozna okreslic dla niego potencjalu (bo jak linie sa zamknietae, 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

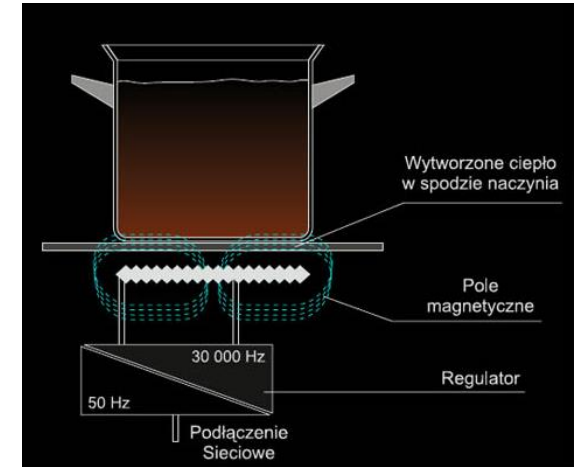
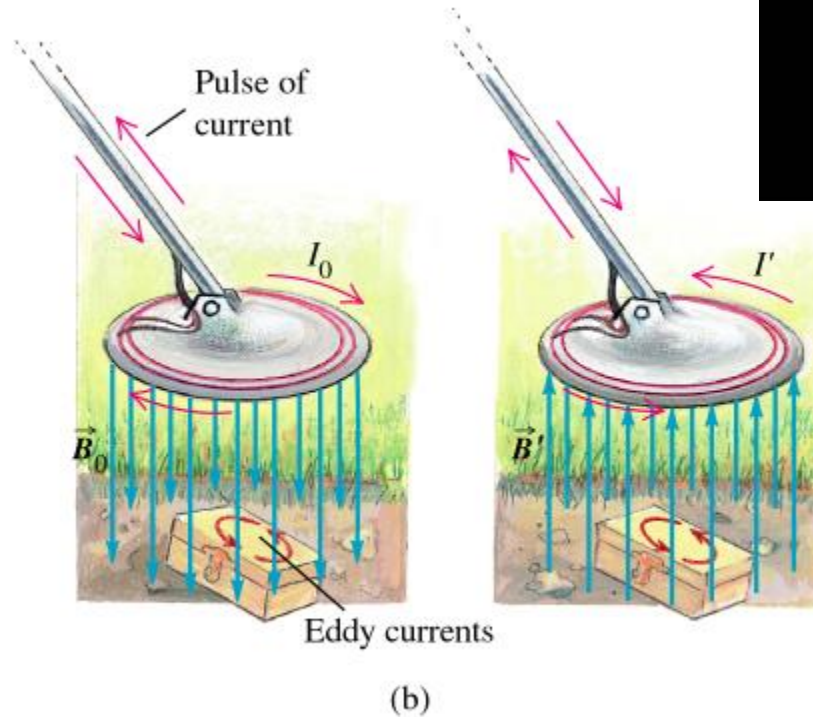
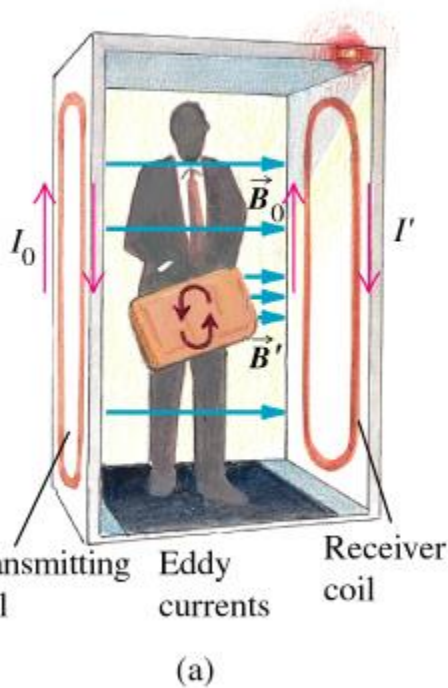
- ❑ W płytach metalowych znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym, indukowane prądy mają kształt wiru i często są szkodliwe (rozpraszają energię).
- ❑ Takie prądy nazywamy **prądami wirowymi**.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Prądy wirowe

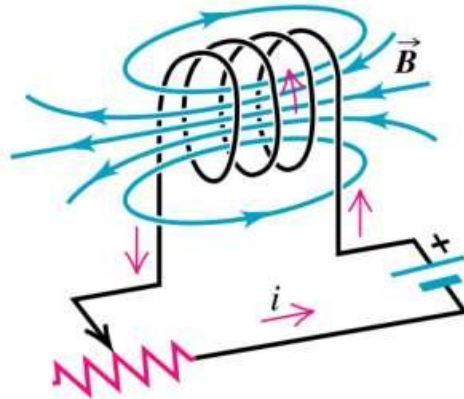
- Prądy wirowe są również wykorzystane w technice – pomiary struktur, kuchnia, wykrywacze metalu....



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

Indukcyjność

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



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

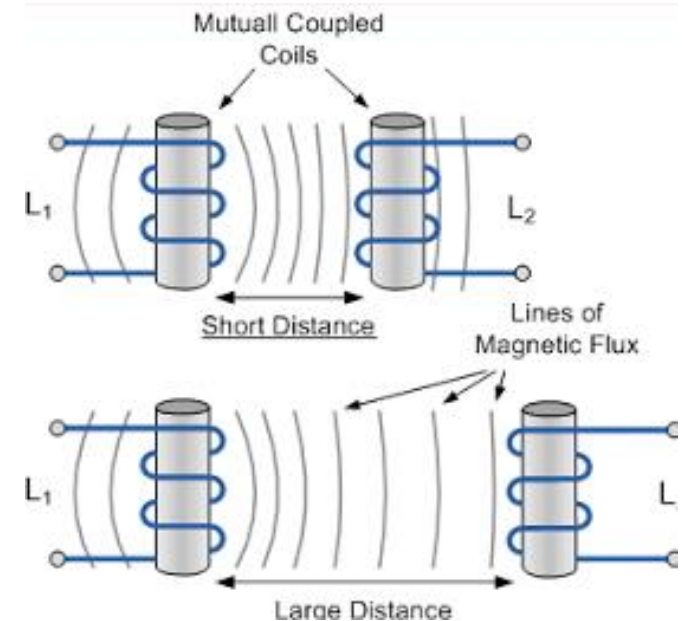
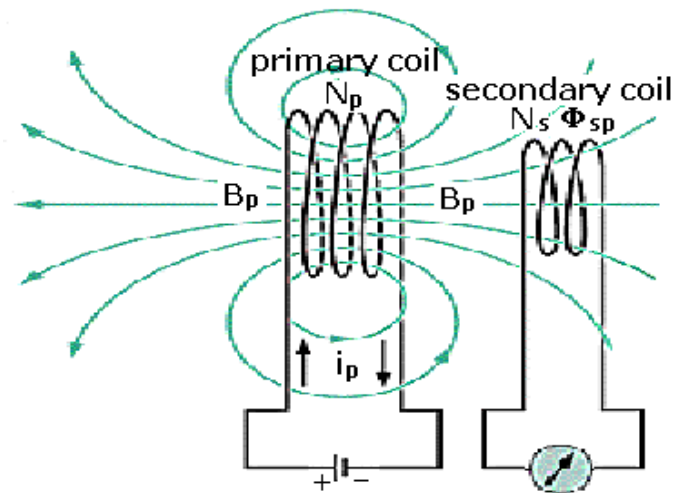
$$L = N \frac{\Phi_B}{I}$$

$$\Phi_B = L N I$$

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:

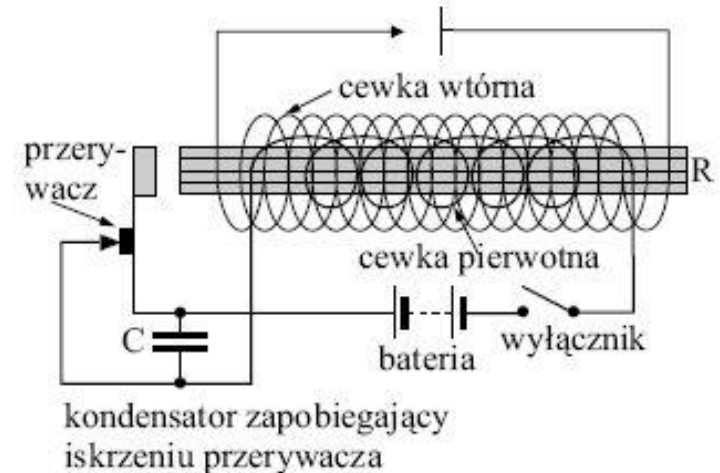
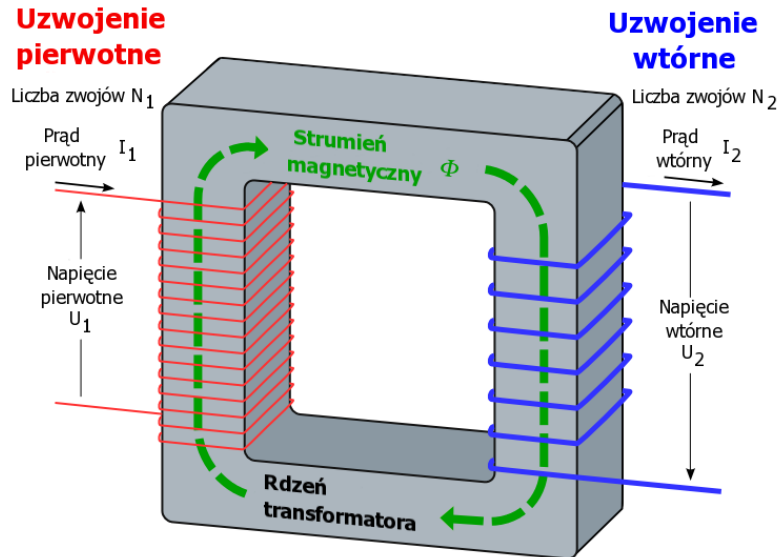
$$M_{21} = N \frac{\Phi_{21}}{I_1}$$

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:



Schemat induktora Ruhmkorffa

skoro:

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

$$\varepsilon_L = N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

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

dla transformatora idealnego

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Dotychczas pokazaliśmy:

- Równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

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

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

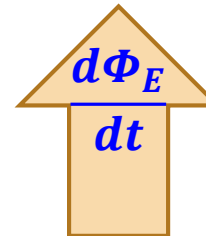


równania niezależne od czasu,
stacjonarne,
pola elektryczne i magnetyczne
są niezależne od siebie

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

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 .

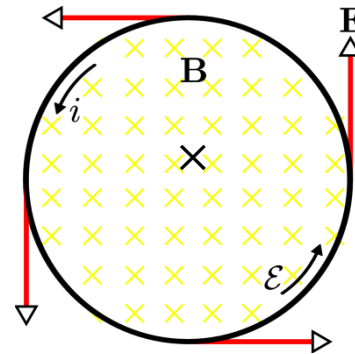
- Pole narasta – pojawia się SEM, płynie prąd i .
- Skoro jest prąd, musi być i pole elektryczne E !

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

❑ 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).

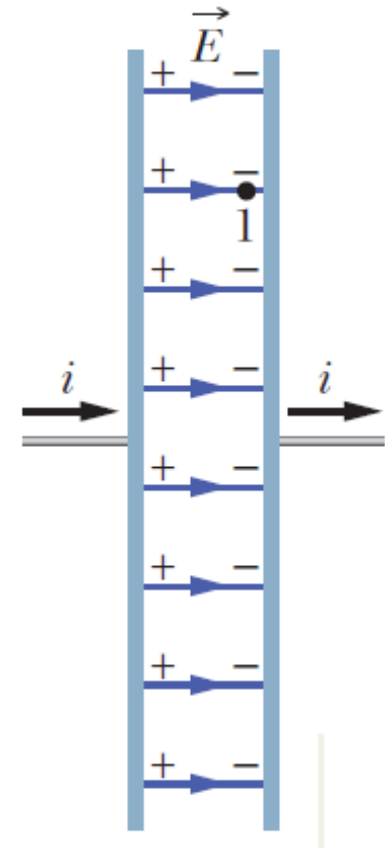
Pole magnetyczne z elektrycznego

- 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...

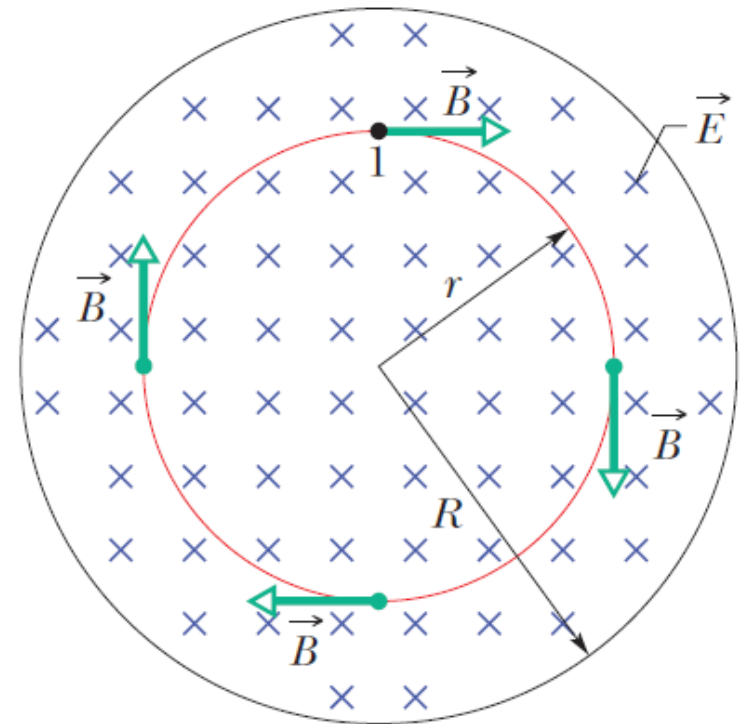
zmienne pole elektryczne
wytwarza pole magnetyczne

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!

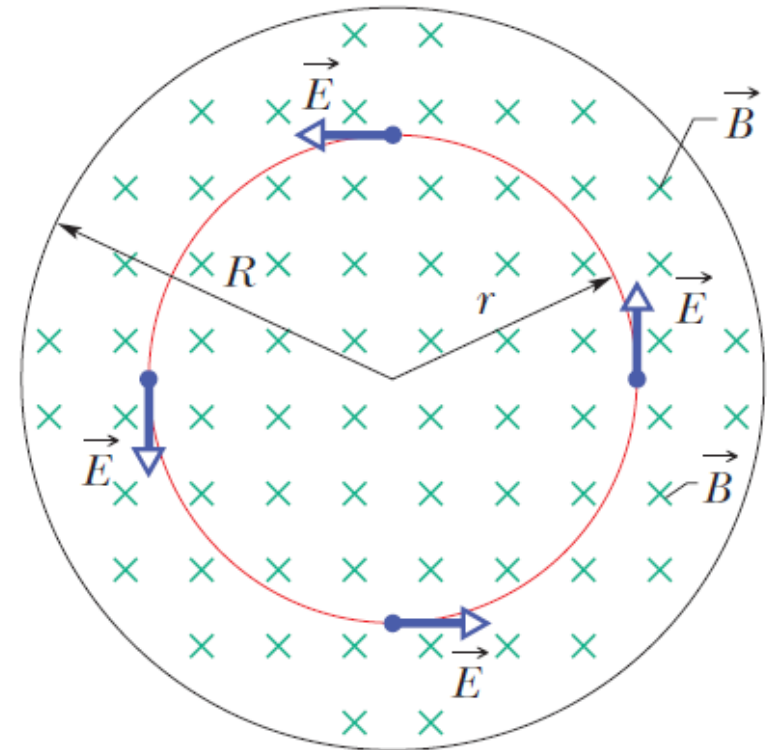
- ❑ Wewnątrz kondensatora indukuje się pole magnetyczne...

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:

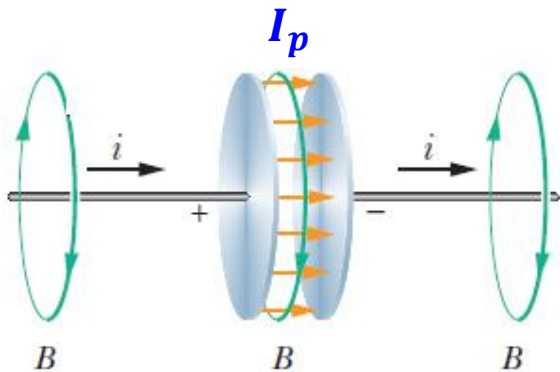
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

❑ Co daje razem:

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

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).

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

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

- 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