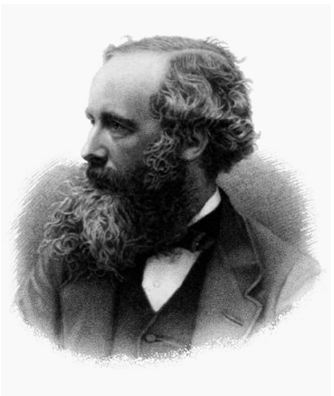
RÓWNANIA MAXWELLA:

PRZEWIDZIANE I OBSERWOWANE FALE ELEKTROMAGNETYCZNE\*

Streszczenie

Ponowne ogłoszenie równań Maxwella.

Szkot James Clerk Maxwell (1831-1879) jest uważany za największego fizyka teoretycznego XIX wieku. (Zobacz Rysunek 1.) Pomimo że umarł młodo, Maxwell nie tylko sformułował kompletną teorię elektromagnetyzmu, opisywaną przez **równania Maxwella**, ale również rozwinął teorię kinetyki gazów i poczynił znaczący wkład w zrozumienie widzenia kolorowego i natury pierścieni Saturna.



Rysunek : James Clerk Maxwell, XIX wieczny fizyk, opracował teorię, która wyjaśniała związek pomiędzy elektrycznością i magnetyzmem oraz poprawnie przewidywała, że światło widzialne wywoływane jest przez falę elektromagnetyczną. (przyp. G. J. Stodart)

Maxwell połączył w całość prace znakomitych fizyków, takich jak Oersted, Coulomb, Gauss oraz Faraday, oraz dodał swoją własną interpretację, aby opracować najważniejszą i nadrzędną teorię elektromagnetyzmu. Równania Maxwella są tutaj przytoczone w formie słownej, ponieważ ich postać matematyczna jest poza poziomem tego podręcznika. Jednakże obrazują one w jaki sposób pozornie proste matematycznie twierdzenia mogą w elegancki sposób połączyć i wyrazić mnogość pojęć – dlaczego właśnie matematyka jest językiem nauki.

:

1. **Linie pola elektrycznego** mają swój początek na ładunkach dodatnich, a koniec na ładunkach ujemnych. Pole elektryczne jest zdefiniowane jako siła działająca na jednostkowy ładunek dla ładunku próbnego oraz wielkość tej siły jest powiązana ze stałą elektryczną , również znaną jako przenikalność elektryczna pustej przestrzeni (próżni). Z pierwszego równania Maxwella można otrzymać szczególną postać prawa Coulomba znanego również jako prawo Gaussa dla elektryczności.
2. **Linie pola magnetycznego** są ciągłe i nie posiadają ani początku, ani końca. Nie istnieją monopole magnetyczne. Wielkość siły magnetycznej jest powiązana ze stałą magnetyczną , również znaną jako przenikalność magnetyczna próżni. Drugie równanie Maxwella jest również znane jako prawo Gaussa dla magnetyzmu.
3. Zmienne pole magnetyczne indukuje siłę elektromotoryczną (emf) oraz skutkiem tego pole elektryczne. Zwrot siły elektromotorycznej jest przeciwny do miejsca, w którym znajduje się ładunek. Trzecie prawo Maxwella jest prawem indukcji Faradaya i zawiera się w nim prawo Lenza.
4. Pola magnetyczne są generowane przez poruszające się ładunki lub poprzez zmiany pola elektrycznego. To czwarte prawo Maxwella obejmuje prawo Ampere’a i wprowadza kolejne źródło magnetyzmu – zmienne pole elektryczne.

Równania Maxwella obejmują główne prawa elektryczności i magnetyzmu. Symetria jaką Maxwell wprowadził w swojej strukturze matematycznej nie jest do końca oczywista. Szczególnie ważne jest dodanie przez niego hipotezy, że zmienne pole elektryczne tworzy pole magnetyczne. Jest to dokładnie analogiczne (i symetryczne) do prawa indukcji Faraday’a. Hipoteza ta przez pewien czas była uważana za podejrzaną, ale doskonale pasuje do równań Maxwella.

Symetria jest zjawiskiem oczywistym w naturze w wielu sytuacjach. W przypadku współczesnych badań, symetria odgrywa kluczową rolę w poszukiwaniu cząstek elementarnych z użyciem ogromnych międzynarodowych akceleratorów takich jak Wielki Zderzacz Hadronów (ang. Large Hadron Collider, LHC) w CERN-ie.

: Całkowita i symetryczna teoria Maxwella udowodniła, że siły elektryczne i magnetyczne nie są rozdzielne, ale w inny sposób są przejawem tej samej rzeczy – siły elektromagnetycznej. To klasyczne ujednolicenie sił jest jedną z motywacji dla obecnych prób zunifikowania czterech podstawowych sił występujących w naturze – grawitacyjnej, elektrycznej oraz silnej i słabej siły jądrowej.

Odkąd zauważono, że zmienne pole elektryczne tworzy stosunkowo słabe pole magnetyczne, nie mogło one zostać w łatwy sposób zarejestrowane w czasie, gdy Maxwell stworzył swoją hipotezę. Jednak Maxwell zdawał sobie sprawę, że oscylujące ładunki, jak te w obwodach prądu zmiennego, tworzą zmienne pola elektryczne. Przewidział, że te zmienne pola będą się propagować od źródła jak fale powstające na wodzie w jeziorze po wyskoku ryby.

Fale przewidziane przez Maxwella miały się składać z oscylujących pól elektrycznego i magnetycznego – zdefiniowanych jako fala elektromagnetyczna (fala EM). Fale elektromagnetyczne byłyby zdolne do wywierania sił na ładunkach znajdujących się w dalekiej odległości od ich źródeł, a tym samym mogły by zostać zarejestrowane. Maxwell obliczył, że fale elektromagnetyczne powinny się propagować z prędkością opisaną równaniem:

(1).

Gdy wartości oraz wprowadzimy do równania opisującego , okaże się, że:

(2),

co jest prędkością światła. W zasadzie Maxwell wyciągnął wniosek, że światło jest falą elektromagnetyczną mającą takie długości fal jakie są widziane przez ludzkie oko.

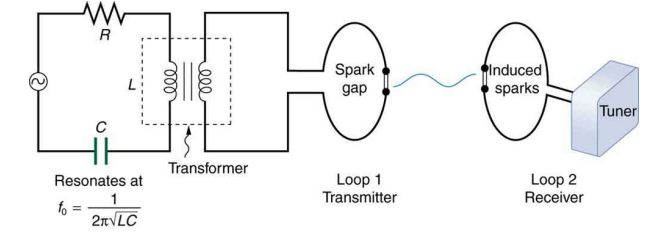
Inne długości fal powinny istnieć – pozostało to do zaobserwowania jeżeli faktycznie by istniały. Jeżeli tak, teoria Maxwella i jego niezwykłe przewidywania zostałyby potwierdzone, największe zwycięstwo fizyki od czasów Newtona. Eksperymentalne potwierdzenie tej teorii pojawiło się kilka lat później, niestety już po śmierci Maxwella.

## 1. Obserwacje Hertza

Niemiecki fizyk Heinrich Hertz (1857-1894) był pierwszą osobą, której udało się wygenerować i zarejestrować pewne typy fal elektromagnetycznych w laboratorium. Zaczynając od 1887 przeprowadził on serię eksperymentów, które nie tylko potwierdziły istnienie fal elektromagnetycznych, ale również stwierdził, że poruszają się one z prędkością światła.

Hertz użył zmiennoprądowego obwodu RLC (opornik-cewka-kondensator), którego częstotliwość rezonansowa to , oraz połączył go z przewodem tworzącym pętlę z przerwą jak pokazano na Rysunku 2. Wzdłuż przerwy indukowane są wysokie napięcia, które powodują przeskoki iskier, będące widocznym dowodem na to, że w obwodzie popłynął prąd co pomogło wygenerować fale elektromagnetyczne.

Po drugiej stornie laboratorium Hertz miał drugą taką pętlę połączoną z kolejnym obwodem RLC, który mógł zostać dostrojony (jak za pomocą pokrętła w radiu) do tej samej częstotliwości rezonansowej co pierwszy obwód, a zatem mógł odbierać fale elektromagnetyczne. Ta pętla również miała przerwę wzdłuż której wytworzone zostały iskry, dając niezbity dowód, że fale elektromagnetyczne zostały zarejestrowane.



Rysunek Przyrząd użyty przez Hertza w 1887 roku do wygenerowania i zarejestrowania fal elektromagnetycznych. Obwód RLC połączony z pierwszą pętlą powoduje powstanie iskier wzdłuż przerwy w pętli i generuje fale elektromagnetyczne. Iskry wzdłuż przerwy w drugiej

[Resonates at - Rezonuje dla

Transformer – Transformator

Spark gap – przerwa, w której powstają iskry

Induced spark – wytworzone iskry

Loop1 Transmitter – Pętla 1 Nadajnik

Loop2 Receiver – Pętla 2 Odbiornik

Tuner - Tuner]

Hertz analizował również odbicie, załamanie i pola interferencyjne fal elektromagnetycznych, które generował, tym samym udowadniając ich naturę falową. Był on w stanie określić długość fali z zarejestrowanego rozkładu pola interferencyjnego i znając ich częstotliwość mógł obliczyć prędkość propagacji używając równania (prędkość – lub szybkość – równa się częstotliwość pomnożona przez długość fali). A zatem Hertz mógł udowodnić, że fale elektromagnetyczne przemieszczają się z prędkością światła. Na jego cześć jednostką częstotliwości w układzie SI jest Hertz (1Hz = 1okres/1sekunda).

## 2. Podsumowanie paragrafu

* Fale elektromagnetyczne składają się z oscylujących pół elektrycznego i magnetycznego oraz propagują się z prędkością światła *c*. Zostały one przewidziane przez Maxwella, który również pokazał, że:

(3),

gdzie jest przenikalnością magnetyczną próżni oraz jest przenikalnością elektryczną próżni.

* Przewidywania Maxwella dotyczące fal elektromagnetycznych były wynikiem sformułowania kompletnej i symetrycznej teorii elektryczności i magnetyzmu, znanej jako równania Maxwella.
* Te cztery równania są sparafrazowane w tym tekście, a nie ujęte matematycznie i obejmują główne prawa elektryczności i magnetyzmu. Pierwsze to prawo Gaussa dla elektryczności, drugie to prawo Gaussa dla magnetyzmu, trzecie to prawo indukcji Faraday’a zawierające prawo Lenza, natomiast czwarte to prawo Ampere’a w symetrycznym sformułowaniu, które dodaje kolejne źródło magnetyzmu – zmienne pole elektryczne.

## 3. Zagadnienia i ćwiczenia

**Ćwiczenie 1**

Wykaż, że otrzymamy prawidłową wartość prędkości światła *c*, gdy wstawimy prawidłowe wartości przenikalności elektrycznej i magnetycznej ( oraz ) do równania .

**Ćwiczenie 2**

Pokaż, że jeżeli wstawimy jednostki SI odpowiadające oraz , to jednostki dane po prawej stronie równania w ćwiczeniu powyżej są w m/s.

**Słowniczek**

**Definicja 1: fale elektromagnetyczne**

promieniowanie w postaci fal energii elektrycznej i magnetycznej

**Definicja 2: równania Maxwella**

zestaw czterech równań, które składają się na kompletną, nadrzędną teorię elektromagnetyzmu

**Definicja 3: obwód RLC**

obwód elektryczny, który składa się z opornika, cewki i kondensatora

**Definicja 4: hertz**

jednostka układu SI opisująca częstotliwość fali elektromagnetycznej w ilości okresów na sekundę

**Definicja 5: prędkość światła**

w próżni, takiej jak kosmos, prędkość światła jest stałą 3 x 108 m/s

**Definicja 6: siła elektromotoryczna (emf)**

energia produkowana przez jednostkowy ładunek wyrwany ze źródła, które wytwarza prąd elektryczny

**Definicja 7: linie sił pola elektrycznego**

wzór wyimaginowanych linii, który rozciąga się pomiędzy źródłem elektrycznym i naładowanymi obiektami w jego otoczeniu i który posiada strzałki skierowane od dodatnio do ujemnie naładowanych obiektów. Im więcej jest linii we wzorze, tym silniejsze jest pole elektryczne w danym obszarze

**Definicja 8: linie sił pola magnetycznego**

wzór ciągłych wyimaginowanych linii wychodzących z jednego bieguna magnetycznego i wchodzących do drugiego (przeciwnego). Gęstość linii oznacza wielkość pola magnetycznego