

Pole elektromagnetyczne (na podstawie Wikipedii)

Pole elektromagnetyczne - pole fizyczne, za pośrednictwem którego następuje wzajemne oddziaływanie obiektów fizycznych o właściwościach elektrycznych i magnetycznych, np. naładowanych cząstek spoczywających lub będących w ruchu, dipoli magnetycznych itp.

Pierwotnie elektryczność i magnetyzm uważano za odrębne, niezwiązane z sobą zjawiska fizyczne. W 1820 roku Oersted odkrył, że prąd elektryczny może wywołać pojawienie się pola magnetycznego, a w 1831 Faraday zauważył, że poruszający się magnes wywołuje prąd elektryczny. Unifikacji elektryczności i magnetyzmu dokonał James Clerk Maxwell w 1856 roku. Konsekwencją tej unifikacji było przewidzenie przez Maxwella istnienia fal elektromagnetycznych, potwierdzonego doświadczalnie w roku 1888 przez Hertza. Te odkrycia pozwoliły połączyć teorię elektryczności, magnetyzmu i optykę w jednolitą teorię elektrodynamiki.

Pole elektromagnetyczne

Opisywane jest przez 5 funkcji wektorowych, zależnych od położenia i czasu:

- **E** - pole elektryczne, [V / m]
- **H** - pole magnetyczne, [A / m]
- **D** - indukcja elektryczna, [C / m²]
- **B** - indukcja magnetyczna, [T]
- **j** - gęstość prądu, [A/m²]

Wielkości te związane są ze sobą przez tak zwane związki konstytutywne:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H}\end{aligned}$$

i równania Maxwella.

Równania Maxwella

Lp.	Postać różniczkowa	Postać całkowa	Nazwa	Fizyczne fakty wynikające z równań
1.	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	prawo Faradaya	Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne
2.	$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\Phi_D}{dt}$	prawo Ampère'a rozszerzone przez Maxwella	Przeptywający prąd oraz zmienne pole elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne
3.	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_V$	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho_V \cdot dv$	prawo Gaussa dla elektryczności	Źródłem pola elektrycznego są ładunki

4.	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	prawo Gaussa dla magnetyzmu	Pole magnetyczne jest bezźródłowe, linie sił pola magnetycznego są zamknięte
----	----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------	--

gdzie:

- \mathbf{E} - pole elektryczne, [V / m]
- \mathbf{H} - pole magnetyczne, [A / m]
- \mathbf{D} - indukcja elektryczna, [C / m²]
- \mathbf{B} - indukcja magnetyczna, [T]
- Φ_D - strumień indukcji elektrycznej,
- Φ_B - strumień indukcji magnetycznej,
- \mathbf{j} - gęstość prądu, [A/m²]
- ρ - gęstość ładunku [C/m³]
- $\nabla \cdot$ - operator dywergencji, [1/m],
- $\nabla \times$ - operator rotacji, [1/m].



Równania Maxwella opisują własności pola elektrycznego i magnetycznego oraz zależności między tymi polami. Z równań Maxwella można wyprowadzić równanie falowe fali elektromagnetycznej propagującej się (rozchodzącej się) w próżni z prędkością światła

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$\epsilon_0 = 1/36\pi * 10^{-9} \quad \mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$$

Szczególne przypadki

W ośrodkach liniowych

W wielu materiałach przy niezbyt dużych natężeniach pola \mathbf{D} i \mathbf{H} zależą liniowo od \mathbf{E} i \mathbf{B} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

gdzie:

ϵ przenikalność elektryczna [F/m]

μ przenikalność magnetyczna [H/m]

W ogólnym przypadku przenikalność elektryczna i magnetyczna jest tensorem, oznacza to że \mathbf{D} do \mathbf{E} lub \mathbf{H} do \mathbf{B} nie są równoległe. Ale w większości przypadków materiały są izotropowe i wówczas ϵ i μ są skalarami (liczbami), wówczas równania Maxwella przyjmują uproszczoną postać.

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \rho$$

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

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

$$\nabla \times \vec{B} / \mu = \vec{j} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

W próżni

Próżnia jest ośrodkiem liniowym, izotropowym. Przenikalność elektryczną próżni oznacza się przez ϵ_0 , a przenikalność magnetyczną próżni przez μ_0 , w próżni nie ma ładunków (ρ) i nie płynie prąd ($j = 0$) wówczas **równania Maxwella** upraszczają się do postaci:

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

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

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

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

Z równań tych Maxwell wywnioskował, że zmienne pole elektryczne w próżni wywołuje zmienne pole magnetyczne a zmienne pole magnetyczne wywołuje zmienne pole elektryczne. Zmiany te, to fala elektromagnetyczna, rozchodzą się z prędkością

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Jest to prędkość światła.

Fala elektromagnetyczna przewidziana przez Maxwella została odkryta przez H Hertza w 1888.

Pola statyczne

Jeżeli wielkości opisujące pola są niezmiennie w czasie, to pola: elektryczne (E,D,J) i magnetyczne (H,B) są od siebie niezależne i można je rozpatrywać osobno.

Elektrodynamika klasyczna



Elektrodynamika klasyczna – dział fizyki zajmujący się własnościami i oddziaływaniem obiektów naładowanych, z pominięciem efektów kwantowych. Elektrodynamika klasyczna opisuje aspekty klasyczne jednego z czterech podstawowych oddziaływań przyrody – **oddziaływań elektromagnetycznych**. Podstawowymi pojęciami elektrodynamiki klasycznej są pole elektryczne, pole magnetyczne, ładunek, oraz prąd. Podstawę teorii tworzą równania Maxwella (James Clerk Maxwell) i prawo zachowania ładunku. Z tych praw można wyprowadzić równanie falowe, prawo Biota-Savarta i inne. Symetria równań Maxwella opisana przez transformacje Lorentza oraz nieudane próby (eksperyment Michelsona-Morleya) potwierdzenia istnienia eteru (klasycznego nośnika fali elektromagnetycznej) doprowadziły do zmiany koncepcji czasu i przestrzeni w szczególnej teorii względności i wyłonienie się koncepcji czasoprzestrzeni Minkowskiego. Niemożność wytłumaczenia przez elektrodynamikę klasyczną promieniowania ciała doskonale czarnego oraz zjawiska fotoelektrycznego doprowadziła do powstania mechaniki kwantowej.

Naładowaną elektrycznie materię opisuje rozkład ładunku elektrycznego ρ_e i płynący prąd elektryczny \mathbf{j} . Są to źródła pola elektromagnetycznego (\mathbf{E} , \mathbf{H}) lub $\mathbf{D}=\epsilon\epsilon_0\mathbf{E}$, $\mathbf{B}=\mu\mu_0\mathbf{H}$). Związki między nimi opisują równania Maxwella:

Elektrostatyka	Magnetostatyka	Przybliżenie kwazistacjonarne	Równania Maxwella
$\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e$
/	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
/	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Podstawą elektrodynamiki są równania Maxwella. W próżni ($\epsilon=1$, $\mu=1$) rozwiązaniem równań Maxwella jest fala elektromagnetyczna. Rozwiązaniem tych równań jest rozkład pola elektrycznego $\mathbf{E}(\mathbf{x},t)$ i magnetycznego $\mathbf{B}(\mathbf{x},t)$ wywołany przez zewnętrzny prąd elektryczny o gęstości powierzchniowej $\mathbf{j}(\mathbf{x},t)$ i odpowiedni rozkład ładunku elektrycznego o gęstości objętościowej $\rho_e(\mathbf{x},t)$. Pola te można opisać za pomocą potencjału skalarnego ϕ i potencjału wektorowego \mathbf{A} :

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

Cząstka o ładunku elektrycznym q "odczuwa" pole elektryczne i magnetyczne jako zewnętrzną siłę (**siła Lorentza**)

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Samo pole elektromagnetyczne niesie energię, pęd i moment pędu:

$$E_{el} = \int d^3r \epsilon_{el} \quad P_{el} = \int d^3r \pi_{el} \quad L_{el} = \int d^3r \lambda_{el}$$

gdzie

$$\epsilon_{el} = \frac{1}{2}(\mathbf{E}\mathbf{D} + \mathbf{B}\mathbf{H})$$

jest gęstością energii pola elektromagnetycznego a

$$\pi_{el} = (\mathbf{D} \times \mathbf{B}) = \epsilon_0\mu_0\mathbf{S}$$

jest gęstością pędu pola elektromagnetycznego ($\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ jest wektorem Pointinga). Gęstość momentu pędu pola elektromagnetycznego to: $\lambda_{el} = \mathbf{r} \times \pi_{el}$.

Wzory te nie są prawdziwe dla małych porcji pola elektromagnetycznego (efekt fotoelektryczny) co doprowadziło do powstania mechaniki kwantowej.