**Efekt Halla** – [zjawisko fizyczne](http://pl.wikipedia.org/wiki/Zjawisko_fizyczne) polegające na wystąpieniu różnicy potencjałów w przewodniku, w którym płynie [prąd elektryczny](http://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C4%85d_elektryczny), gdy przewodnik znajduje się w poprzecznym do płynącego prądu [polu magnetycznym](http://pl.wikipedia.org/wiki/Pole_magnetyczne). Napięcie to, zwane napięciem Halla, pojawia się między płaszczyznami ograniczającymi przewodnik, prostopadle do płaszczyzny wyznaczanej przez kierunek prądu i wektor [indukcji pola magnetycznego](http://pl.wikipedia.org/wiki/Indukcja_magnetyczna). Jest ono spowodowane działaniem [siły Lorentza](http://pl.wikipedia.org/wiki/Si%C5%82a_Lorentza) na ładunki poruszające się w polu magnetycznym.

Zjawisko zostało odkryte w [1879](http://pl.wikipedia.org/wiki/1879) roku przez [Edwina H. Halla](http://pl.wikipedia.org/wiki/Edwin_Herbert_Hall) (wówczas doktoranta).

Niech przewodnik będzie prostopadłościanem o bokach *a, b, c*. Jeśli wzdłuż przewodnika (równolegle do *a*) płynie prąd o natężeniu *I* (nadając nośnikom prądu[prędkość unoszenia](http://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C4%99dko%C5%9B%C4%87_unoszenia) {\vec v_u}), zaś prostopadle do powierzchni przewodnika (równolegle do *c*) skierowane jest pole magnetyczne o indukcji {\vec B}, to na nośniki prądu o[ładunku](http://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%81adunek_elektryczny) *q* w kierunku *b* działa siła Lorentza:

{\vec F} = q {\vec v_u} \times {\vec B}

odchylając te ładunki do jednej ze ścianek. W ten sposób między tą ścianką a ścianką do niej przeciwną wytwarza się różnica gęstości ładunków, a więc i [pole elektryczne](http://pl.wikipedia.org/wiki/Pole_elektryczne) o natężeniu {\vec E}, które może być wyrażone przez różnicę [potencjałów](http://pl.wikipedia.org/wiki/Potencja%C5%82_elektryczny). Na kolejne nośniki działa też zatem siła kulombowska. Wypadkowa siła jest równa:

{\vec F} = q {\vec v_u} \times {\vec B} - q {\vec E}

W stanie równowagi, kiedy siła Lorentza i kulombowska równoważą się. Co prowadzi do równania:

 {\vec v_u} \times {\vec B} = {\vec E}U_H = \frac{1}{nq}\frac{IB}{c} = R_{H}\frac {IB} c

lub gdzie:

*n* – [koncentracja](http://pl.wikipedia.org/wiki/Koncentracja_(fizyka)) nośników,

*q* – ładunek nośnika prądu (elektrony bądź dziury)

*c* – grubość płytki, wymiar w kierunku pola magnetycznego,

*I* – natężenie prądu,

*RH* – stała zależna od materiału (tzw. [stała Halla](http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Sta%C5%82a_Halla&action=edit&redlink=1)).

*B* – wartość indukcji magnetycznej,

Napięcie U_H, powstałe pomiędzy ściankami przewodnika, nazywane jest **napięciem Halla**.

Stałą Halla wyraża się przeważnie przez m3/[C](http://pl.wikipedia.org/wiki/Kulomb) Ω·cm/[Gs](http://pl.wikipedia.org/wiki/Gaus" \o "Gaus) lub jednostkach pokrewnych.

Efekt Halla umożliwia pomiar znaku ładunków poruszających się w przewodniku oraz ich [koncentrację](http://pl.wikipedia.org/wiki/Koncentracja_(fizyka)).

Dla znanych materiałów pomiar napięcia Halla pozwala określić wartość indukcji {\vec B} pola magnetycznego. Przyrządy wykorzystujące efekt Halla do pomiaru tej indukcji nazywają się [hallotronami](http://pl.wikipedia.org/wiki/Hallotron). Są one powszechnie wykorzystywane m.in. różnych czujnikach, np.: ABS, ESP.

Efekt Halla jest również podstawą dzialania [silnika Halla](http://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik_Halla).

Jak pole magnetyczne wpływa na ruch cząstki naładowanej elektrycznie? Odpowiedź na to pytanie  ukaże nam ogromne możliwości jakie stwarza nauce, technice, medycynie itd. zastosowanie pola magnetycznego do sterowania ruchem cząstek naładowanych. Jeszcze większe możliwości wpływu na ruch cząstek naładowanych stwarza wykorzystanie kombinacji pól magnetycznych i elektrycznych.

Na ładunek elektryczny http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H7.gif poruszający się z prędkością http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H8.gif w polu magnetycznym o indukcji http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main1.gif działa siła Lorentza

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/MAIH1.gif. | (2.2.1) |

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/coord.jpg | Ustawmy  układ współrzędnych prostokątnych tak, by oś  ***Z*** pokrywała się z kierunkiem wektora indukcji magnetycznej http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main1.gif; Rys.2.2.1. pokazuje konfigurację geometryczną dla naszego przypadku. Kolorem czerwonym zaznaczono wersory wyznaczające kierunki osi współrzędnych. kolorem niebieskim zaznaczono przykładowy wektor prędkości cząstki, a kolorem fioletowym jego rzuty na osie układu współrzędnych. Przez  http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h3a.gif oznaczono składową prostopadła do wektora http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main1.gif; składowa ta leży w płaszczyźnie ***XY***. Przez http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h4a.gif oznaczono składową prędkości równoległą do kierunku wektora http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main1.gif. Składowa ta równa jest składowej http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h5a.gif. |
| ***Rys 2.2.1.****Wektor indukcji magnetycznej i składowe wektora prędkości cząstki w układzie współrzędnych prostokątnych.* |  |

Szczegółowe rozwiązanie układu równań Newtona dla ruchu cząstki w kierunkach ***X, Y, Z*** [przedstawiamy oddzielnie](http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/rownanie.htm)bowiem wymaga wykonania bardziej złożonych obliczeń. Tutaj podajemy jedynie krótką metodę pozwalającą na wyznaczenie promienia krzywizny i skoku linii śrubowej, po jakiej porusza się cząstka w polu magnetycznym.

Ruch cząstki można opisać jako złożenie dwóch niezależnych ruchów: wzdłuż osi ***Z*** z prędkością http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h5a.gif i w płaszczyźnie ***XY*** z prędkością http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h3a.gif.

**Ruch wzdłuż osi Z:**Kierunek siły Lorentza jest prostopadły do wektora http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main1.gif, a więc składowa siły w kierunku osi ***Z*** wynosi zero. Ruch wzdłuż osi ***Z*** jest więc ruchem jednostajnym z prędkością http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h5a.gif.

**Ruch w płaszczyźnie XY:** Wartość siły Lorentza można zapisać w postaci skalarnej jako

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H1.gif. |  |

Zgodnie z definicją iloczynu wektorowego, siła ta skierowana jest zawsze prostopadle do prędkości http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/obrazki/main.h3a.gif, może więc zmieniać jedynie kierunek prędkości, a nie jej wartość. Siła o takiej własności jest siłą dośrodkową - pod jej wpływem cząstka porusza się po okręgu, którego promień można wyznaczyć z równania

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H2.gif. | (2.2.3) |

gdzie wyrażenie po prawej stronie, to znany wzór na siłę odśrodkową w ruchu po okręgu.

Z wyrażenia (2.2.3) wyznaczamy więc promień okręgu,

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H3.gif | (2.2.4) |

gdzie iloczyn  jest tzw. "składową poprzeczną" pędu cząstki. Okres ruchu wynosi

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H4.gif | (2.2.5) |

Częstość kołowa

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H5.gif | (2.2.6) |

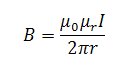
zwana jest**częstością cyklotronową**. Częstość ta nie nie zależy od prędkości cząstki, a jedynie od indukcji pola magnetycznego ***B*** oraz stosunku ładunku cząstki do jej masy ***q/m***.

W kierunku osi ***Z*** tor jest linią prostą, zaś w płaszczyźnie ***XY*** okręgiem. Wobec tego **wypadkowy tor będzie linią śrubową zwaną też helisą.** Skok helisy równy będzie drodze, jaką w kierunku***Z*** przebędzie cząstka w czasie jednego okresu

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w4/segment2/MAIN.H6.gif | (2.2.7) |

Opisane zależności możesz teraz sam sprawdzić korzystając z ilustracji interaktywnej demonstrującej ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym dla zadanych przez Ciebie wartości parametrów. Odpowiedz na zawarte tam pytania

**2.POLE MAGNETYCZNE PROSTOLINIOWEGO PRZEWODNIKA   
Z PRĄDEM**

Taki przewodnik wytwarza pole magnetyczne, którego linie tworzą okręgi leżące w płaszczyźnie prostopadłej do tego przewodnika. Możemy wyznaczyć ich zwrot korzystając z reguły prawej dłoni, która mówi że: gdy obejmiemy prostoliniowy przewodnik z prądem w taki sposób, że wyprostowany kciuk będzie wskazywał kierunek przepływu prądu to pozostałe 4 zgięte palce będą wskazywały zwrot linii pola, magnetycznego które wytwarza objęty przewodnik.   
Możemy obliczyć wartość wektora indukcji magnetycznej w punkcie oddalonym od przewodnika, w którym płynie prąd o natężeniu I o odległość r korzystając ze wzoru:  
  
gdzie μ0oznacza przenikalność magnetyczną próżni i wynosi:   
http://brasil.cel.agh.edu.pl/~10ugbogarz/wzor28.jpg

**Pole magnetyczne solenoidu**

Ważnym zastosowaniem prawa Ampère'a jest wyznaczenie pola magnetycznego wewnątrz **solenoidu**, który stanowi wiele zwojów przewodnika nawiniętych jeden obok drugiego i w takiej liczbie, że jego długość jest znacznie większa od średnicy.  Na rysunku 10.1.2.a)  pokazane są elementy dwóch sąsiednich zwojów oddalone od siebie, by zademonstrować konfigurację pola magnetycznego wokół nich. Rysunek 10.1.2.b) pokazuje pole jednego zwoju solenoidu.

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w10/segment1/obrazki/solen3.gif | http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w10/segment1/obrazki/solen4.gif |
| ***Rys.10.1.2.****Pole: a) fragmentu dwóch sąsiednich zwojów, b) jednego zwoju solenoidu* | |

 Widzimy, że pola pomiędzy sąsiednimi zwojami kompensują się, natomiast pola od strony wewnętrznej  i na zewnątrz solenoidu  dodają się. Pole wewnątrz i na zewnątrz jest symetryczne względem osi solenoidu. Kierunek wektora indukcji magnetycznej pokrywa się z kierunkiem tej osi.

|  |
| --- |
| http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w10/segment1/obrazki/solen2.jpg |
| ***Rys 10.1.3.****Pole magnetyczne solenoidu; strzałki niebieskie  pokazują kierunek pola magnetycznego; ramki i strzałki zielone - obwody po których liczymy cyrkulację* |

Rysunek 10.1.3. przedstawia w przekroju fragment solenoidu który będziemy traktować jako nieskończenie długi.  Dla wyznaczenia wartości wektora  indukcji skorzystamy z prawa Ampere'a obliczając całkę z wektora http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w10/segment1/obrazki/MIN.H12.gif wzdłuż zamkniętego konturu zgodnie ze wzorem (10.1.2). Dla uproszczenia naszych rozważań nadamy konturowi postać prostokątnej ramki, której boki***a*** i ***c*** ułożone są równolegle do osi solenoidu, a boki ***b*** i ***d*** są do tej osi prostopadłe. Zauważamy natychmiast, że całka ta liczona zarówno dla ramki znajdującej się całkowicie wewnątrz solenoidu jak i dla tej na zewnątrz równa jest zeru, bowiem w obu przypadkach ramki nie obejmują przewodników z prądem. (Co nie znaczy bynajmniej, że nie ma tam pola magnetycznego.) Zauważany też, że wkład do całki od boków **b** i **d** jest we wszystkich przypadkach równy zeru, bowiem wektor http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w10/segment1/obrazki/MIN.H12.gif jest prostopadły do tych boków i iloczyn skalarny we wzorze (10.1.2) równy jest zeru. Wynika z tego bardzo ważny wniosek. Wkłady od boków ***a*** i ***c***kompensują się wewnątrz i na zewnątrz solenoidu co oznacza, że panuje tam jednorodne pola magnetyczne.

Wniosek ten zawiera faktycznie dwa stwierdzenia. Pierwsze, że **pole magnetyczne w całej przestrzeni wewnątrz solenoidu jest jednorodne, czyli takie samo co do wartości i kierunku.** Drugie, że pole w całej przestrzeni zewnętrznej też jest jednorodne. Brzmi to paradoksalnie, bowiem przestrzeń ta rozciąga się do nieskończoności. Oczekiwalibyśmy raczej, że pole zmniejsza się ze wzrostem odległości od solenoidu. Co więcej - pamiętamy, że linie wektora indukcji magnetycznej są  zamknięte i ten sam skończony strumień przenika przez ograniczoną powierzchnię przekroju poprzecznego wewnątrz solenoidu, co i przez nieskończoną powierzchnię wokół solenoidu na zewnątrz. Oba te warunki mogą być spełnione równocześnie tylko wtedy, kiedy **pole magnetyczne na zewnątrz solenoidu równe jest zeru**.

Pamiętajmy jednak, że rozważamy tu solenoid o nieskończonej długości. W rzeczywistych solenoidach o długościach skończonych występują też składowe pola wzdłuż boków ***b*** i ***d***. Pole na zewnątrz rzeczywistego solenoidu nie jest więc dokładnie równe zeru, choć znacznie mniejsze niż wewnątrz. Wartość tego pola zależna od położenia punktu względem osi i środka solenoidu.

Powróćmy do wyznaczenia wartości indukcji magnetycznej wewnątrz solenoidu o nieskończonej długości. W tym celu umieśćmy ramkę tak by jej bok ***a*** znajdował się wewnątrz solenoidu, a bok ***c*** na zewnątrz. Wiemy już teraz, że niezerowy wkład wnosi wyłącznie bok ***a***.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Przyjmijmy, że na jednostkę długości solenoidu przypada ***n*** zwojów. W takim przypadku wzór (10.1.2) sprowadza się do całkowania wzdłuż tego tylko boku w rezultacie czego otrzymujemy wzór na **wartość wektora indukcji magnetycznej wewnątrz solenoidu**   |  |  | | --- | --- | | http://www.if.pw.edu.pl/~wosinska/am2/w10/segment1/obrazki/wpe3.gif. | (10.1.5) |   Pole magnetyczne wewnątrz solenoidu proporcjonalne jest do natężenia prądu i gęstości zwojów solenoidu. Ten prosty wzór obowiązuje ściśle dla solenoidu o nieskończonej długości. W praktyce, przybliża on nieźle wartość indukcji pola magnetycznego  punktach znajdujących się w środkowej części solenoidów o długościach skończonych. |