

Lekcja 2

Pole elektromagnetyczne jako nośnik informacji

Cel

- Zaznajomienie ucznia z możliwymi zastosowaniami pola elektromagnetycznego (EM) w zakresie przesyłania informacji.

Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi wytłumaczyć, dlaczego fale EM są obecnie szeroko stosowanym nośnikiem informacji.
- Uczeń potrafi wyjaśnić podstawowy mechanizm generowania fal EM.
- Uczeń potrafi korzystać z prawa opisującego ilościowo spadek wartości natężenia pola elektrycznego oraz natężenia fali EM wraz z odległością od źródła.



1. Pola fizyczne o dużym zasięgu

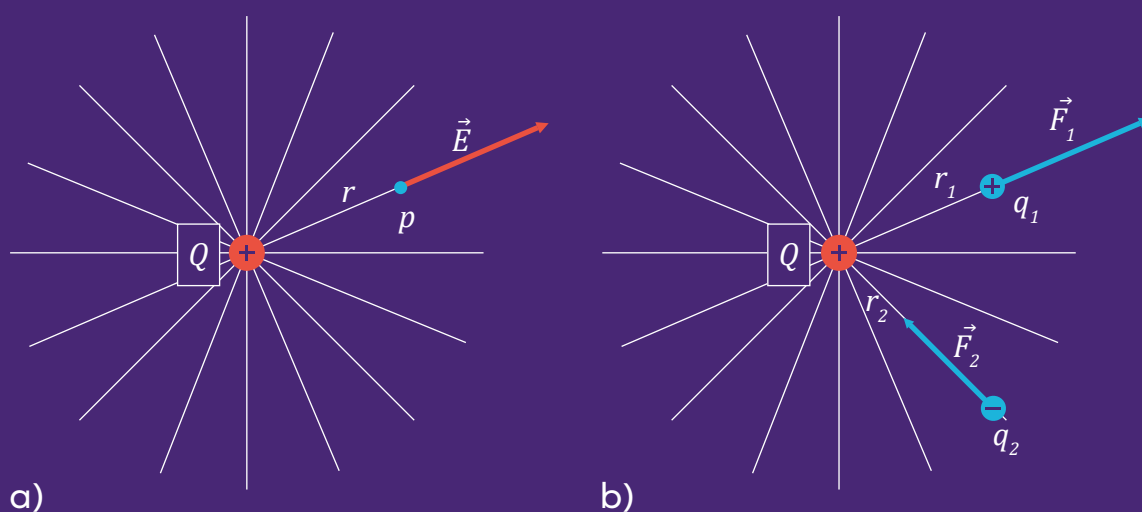
W Lekcji 1 zapoznaliśmy się z zagadnieniem przesyłania informacji i analizowaliśmy komunikat głosowy jako jeden z podstawowych sposobów wymiany informacji w życiu codziennym. Bezpośrednia komunikacja głosowa ma jednak dużą wadę – bardzo ograniczony zasięg. Telefonii klasyczna w dużej mierze jest tej wady pozbawiona, wymaga jednak połączenia przewodowego pomiędzy nadawcą i odbiorcą. Do komunikacji mobilnej, bezprzewodowej, konieczne jest wykorzystanie pól fizycznych o dużym zasięgu. W fizyce znamy dwa takie pola: grawitacyjne oraz elektromagnetyczne.

Pole grawitacyjne jako nośnik informacji byłoby idealne – o ile wiemy, nie ma możliwości jego ekranowania, przenika zatem przez wszystkie przeszkody i może dotrzeć do dowolnego miejsca we Wszechświecie. Niestety, oddziaływania grawitacyjne pomiędzy masami, które możemy łatwo kontrolować, są niezwykle słabe. Zgodnie z prawem grawitacji Newtona siła przyciągania dwóch ciężarków o masie $m = 10 \text{ kg}$ znajdujących się w odległości $r = 1 \text{ m}$ wynosi (G – stała grawitacji):

$$F = G \frac{m \cdot m}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{10 \cdot 10}{1} \text{ N} = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ N}$$

Jest zatem niezwykle mała nawet przy niewielkich odległościach i trudno by siła tego rzędu wywołała możliwą do wykrycia reakcję w odbiorniku informacji. Znaczące efekty grawitacyjne obserwujemy dopiero przy masach porównywalnych z małymi księżycami. Takie masywne obiekty trudno jednak zmusić do określonego ruchu w nadajniku informacji. Nie widzimy zatem możliwości wykorzystania pola grawitacyjnego jako praktycznego nośnika informacji, przynajmniej przy obecnym stanie wiedzy.

Inaczej jest w przypadku **pola elektromagnetycznego** (w skrócie – **EM**), którego źródłem są ładunki elektryczne.



Rys. 1. Pole elektryczne wokół dodatniego ładunku elektrycznego: a) wektor natężenia pola w punkcie p ; b) siły działające na ładunki próbne q_1 i q_2 .

2. Pole elektryczne i prawo Coulomba

Każdy ładunek elektryczny jest źródłem pola elektrycznego rozciągającego się od ładunku do nieskończoności. W dowolnym punkcie p przestrzeni wokół ładunku Q możemy wprowadzić **wektor natężenia pola elektrycznego** \vec{E} , którego kierunek dla nieruchomego ładunku określony jest przez prostą łączącą punkt p z ładunkiem Q , natomiast zwrot dla ładunku dodatniego dobieramy tak, by wektor był skierowany od ładunku do nieskończoności (Rys. 1a). Wielkość wektora \vec{E} (czyli jego moduł E) obliczamy z **prawa Coulomba**:

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

gdzie $k = 9 \cdot 10^9 \text{ [N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}]$ jest pewną stałą fizyczną dla próżni. Ładunek elektryczny mierzymy w jednostkach układu SI zwanych *kulombami* (C). Natężenie pola elektrycznego maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości r punktu p od ładunku Q . Oznacza to, że zwiększając dwukrotnie odległość od ładunku, zmniejszamy natężenie pola czterokrotnie. Z drugiej strony, natężenie pola jest proporcjonalne do wartości ładunku będącego jego źródłem (dwukrotnie zwiększając ładunek, dwukrotnie zwiększamy natężenie pola). Jeżeli ładunek umieścimy w ośrodku innym niż próżnia, wartość stałej k może być inna (dla powietrza różnice są nieznaczne).

Wstawiając do prawa Coulomba wartość ładunku Q w kulombach, zaś odległość r w metrach, otrzymamy wartość natężenia pola w N/C (niutonach na kulomb), ale często używamy też innej, równoważnej jednostki – wolt na metr:

$$[E] = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Pole elektryczne obrazujemy rysując tzw. **linie pola**, czyli linie rozpoczynające się w ładunku i skierowane zgodnie z kierunkiem wektora natężenia pola w danym punkcie przestrzeni. Dla nieruchomego ładunku oznacza to, że linie pola są półprostymi rozchodzącymi się promieniście od źródła do nieskończoności (Rys. 1). Jeżeli ładunek porusza się ruchem niejednostajnym obraz linii pola może się znacznie skomplikować, co zobaczymy w dalszej części lekcji.

Znajomość wektorów natężenia pola pozwala nam znaleźć siłę działającą na inne ładunki umieszczone w polu elektrycznym (Rys. 1b). Jeżeli umieścimy w polu ładunek q , to wartość siły działającej na niego obliczymy ze wzoru:

$$\vec{F} = \vec{E}q$$

$$F = Eq = k \frac{Qq}{r^2}$$

bardzo podobnego do prawa grawitacji, przy czym zamiast mas oddziałujących obiektów pojawiają się tu ładunki elektryczne.

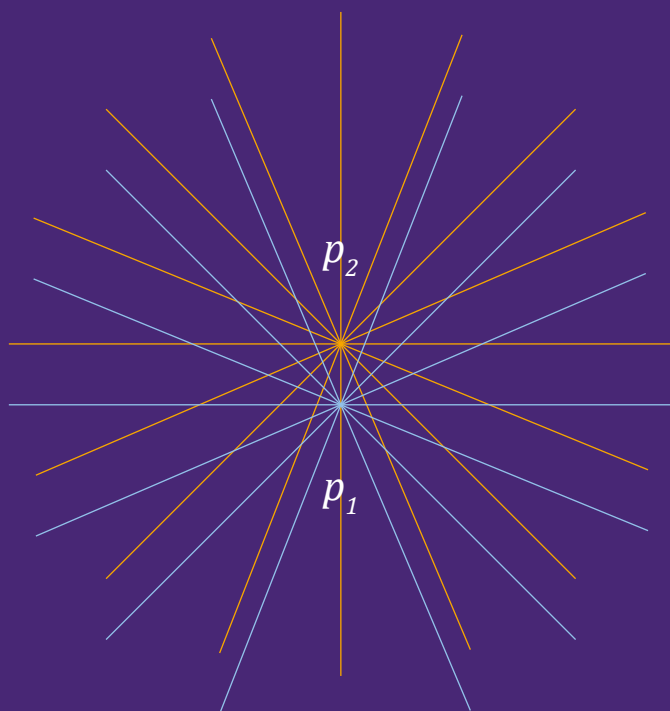
3. Wytwarzanie fali EM

Tak jak w przypadku dźwięku informacja zawarta jest w drganiach ośrodka (np. powietrza), tak samo może być reprezentowana przez drgania pola EM. Oczywiście, w tym przypadku żaden ośrodek nie jest potrzebny.

Spróbujmy na poziomie poglądowym wytłumaczyć powstawanie rozchodzącego się zaburzenia pola EM, które będziemy także nazywać falą EM, analogicznego do fali akustycznej w powietrzu. Trzeba tutaj zaznaczyć, że dokładna analiza tego zjawiska nie jest prosta i wymaga dość zaawansowanej matematyki do rozwiązania, tzw. równań Maxwella. Postaramy się pominąć te zawiłości, nie tracąc fizycznej istoty samego zjawiska.

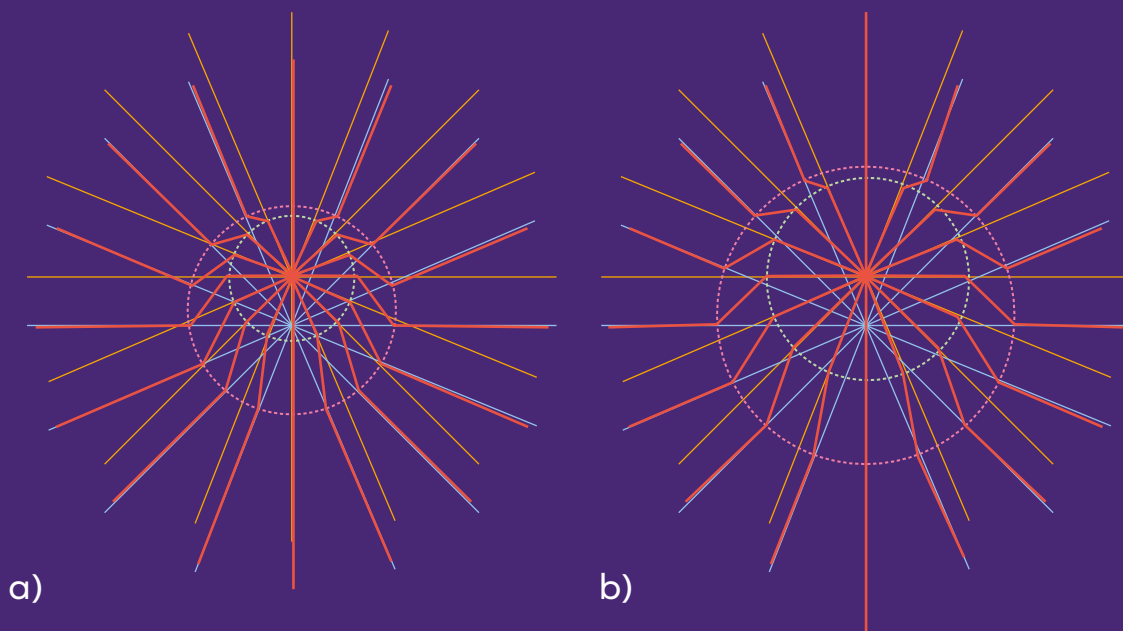
Wyobraźmy sobie pewien nieruchomy ładunek elektryczny umieszczony w punkcie p_1 (Rys. 2). Linie pola elektrycznego wytwarzanego przez ten ładunek oznaczmy kolorem niebieskim. W pewnym momencie ładunek przemieszcza się do góry w kierunku punktu p_2 i ponownie nieruchomieje. Gdyby tkwił tam bardzo długo, linie pola powinny przebiegać tak jak te, oznaczone kolorem pomarańczowym.

Dlaczego musimy zaznaczyć, że tak będzie dopiero po długim czasie? Wynika to z tego, że żaden sygnał nie może przenosić się szybciej niż maksymalna prędkość, którą utożsamiamy z prędkością światła próżni, oznaczaną zwyczajowo przez c i równą $3 \cdot 10^8$ m/s. Zauważmy, że linie pola, jako półproste rozchodzące się promieniście od ładunku do nieskończoności, zawierają w sobie informację o położeniu ładunku. Nawet w odległym zakątku Wszechświata, gdzie przecież linie pola także docierają, możemy wziąć dwie różne linie pola, wyznaczyć ich punkt przecięcia i dokładnie w tym miejscu spodziewać się ładunku elektrycznego. Gdyby przemieszczenie ładunku z punktu p_1 do punktu p_2 spowodowało równoczesne przemieszczenie wszystkich linii pola na miejsce oznaczone kolorem pomarańczowym, natychmiastowo dowiedzielibyśmy się w odległym zakątku Wszechświata o tym, że ładunek się przesunął.



Rys. 2. Linie pola ładunku umieszczonego w punkcie p_1 oraz linie pola tego samego ładunku przemieszczonego do punktu p_2 (po odpowiednio długim czasie).

Byłoby to zatem sprzeczne z istnieniem ograniczonej prędkości przenoszenia informacji. W rzeczywistości informacja o ruchu ładunku powinna dotrzeć do odległych punktów z opóźnieniem, tym większym, im większa jest odległość punktu obserwacji od poruszającego się ładunku.



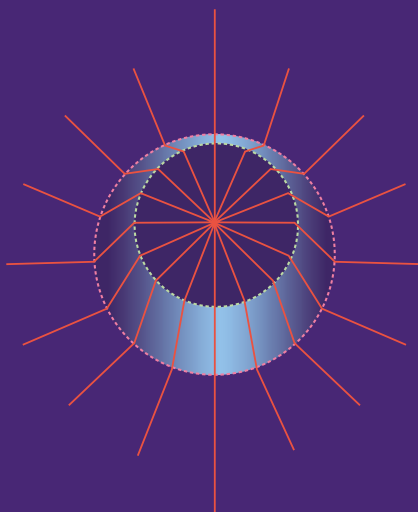
Rys. 3. Przebieg linii pola elektrycznego po przesunięciu ładunku elektrycznego po pewnej chwili (a) oraz po nieco dłuższym czasie (b).

Jak to zatem będzie wyglądać naprawdę? Załóżmy, że ładunek przemieścił się do punktu p_2 i spójrzmy na linie pola po bardzo krótkim czasie. Informacja o nowym położeniu ładunku zacznie rozchodzić się z prędkością c tak, że obejmie ona wszystkie punkty wewnątrz okręgu zaznaczonego na Rys. 3a na zielono. Linie pola wewnątrz tego okręgu możemy zatem skierować zgodnie z liniami pomarańczowymi odpowiadającymi nowemu położeniu ładunku (linie czerwone). Jednak informacja o ruchu ładunku nie mogła jeszcze dotrzeć do punktów na zewnątrz okręgu oznaczonego kolorem różowym. Promień tego okręgu uzależniony jest od czasu, jaki upłynął od chwili, w której ładunek zaczął się poruszać. Na zewnątrz okręgu czerwone linie pola muszą zatem przebiegać wzdłuż linii niebieskich (początkowych).

Co dzieje się pomiędzy okręgami zielonym i różowym? Niestety, jest to dość skomplikowane. W tym obszarze dochodzi do szybkiej zmiany pola elektrycznego, a tym samym do generowania pola magnetycznego (do tej pory pomijaliśmy je w naszej dyskusji). Jest to obszar, który możemy utożsamiać z **zaburzeniem pola EM – falą elektromagnetyczną** rozchodzącą się od poruszającego się ładunku ku nieskończoności. Ponieważ promienie obu okręgów powiększają się z prędkością c , taka też jest prędkość przemieszczania się fali EM. Dla uproszczenia zaznaczymy linie pola elektrycznego w obszarze zaburzenia łącząc odpowiadające sobie linie pola koloru niebieskiego i pomarańczowego w jedną linię łamaną (pamiętajmy jednak o umowności tego obrazu).

Po nieco dłuższej chwili oba okręgi powiększą się i obszar zaburzenia pola przemieści się dalej od ładunku wytwarzającego pole (Rys. 3b). Po odpowiednio długim czasie okrąg zielony wyjdzie poza obszar rysunku, zatem linie pola będą przebiegać dokładnie wg linii pomarańczowych jak na Rys. 2.

Energia fali EM jest największa tam, gdzie zmienność pola jest największa. Możemy te miejsca zidentyfikować w przybliżeniu nawet na podstawie uproszczonego obrazu z Rys. 3, jako obszar zawierający najbardziej „załamane” linie pola. Jak widzimy, linie pola skierowane wzdłuż prostej, po której poruszał się ładunek (linii pionowej), nie są załamane w ogóle. W tym kierunku nie dochodzi do emisji energii. W kierunku prostopadłym do kierunku poruszania się ładunku obserwujemy za to największe załamanie linii pola – tutaj emisja energii jest największa. Na Rys. 4 przedstawiono różnice w rozkładzie energii fali EM w obszarze zaburzenia pola poprzez różne zacieniowanie obszaru.



Rys. 4. Zacieniowanie obszaru zaburzenia pola EM odpowiada energii fali (im obszar ciemniejszy, tym większa energia).

Widzimy zatem, że poruszający się po linii prostej ładunek nie emituje energii równomiernie we wszystkich kierunkach. Choć często będziemy się odwoływać przy analizie fal EM do analogii fal na powierzchni wody czy fal akustycznych, pamiętajmy, że pod tym względem fala EM różni się od rozchodzącej się na powierzchni wody fali kolistej. Jest to bardzo ważny wniosek z punktu widzenia konstrukcji anten, do których przejdziemy w dalszej części lekcji.

4. Natężenie fali EM oraz jej zmienność z odległością od źródła

Musimy zaznaczyć, że powyższą analizę przeprowadziliśmy dla uproszczenia w jednej płaszczyźnie (płaszczyźnie rysunku). W rzeczywistości linie pola rozchodzą się od ładunku promieniście we wszystkich kierunkach przestrzeni trójwymiarowej, zaś koła oznaczone na Rys. 3 i Rys. 4 są tak naprawdę sferami o rosnących w czasie promieniach. Przypatrzmy się jaki to ma wpływ na zmienność energii fali EM w czasie i przestrzeni, gdy oddala się ona od źródła.

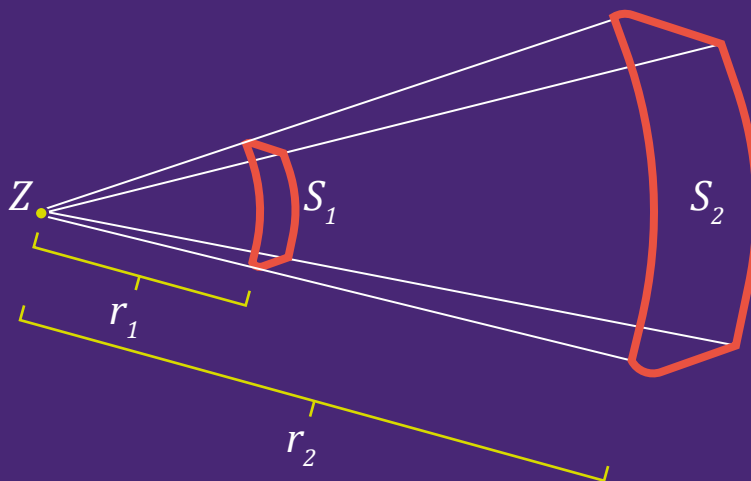
Jak już wspomnieliśmy wcześniej, energia fali EM skupiona jest pomiędzy sferami zieloną i czerwoną (tak już je teraz nazywajmy). To zaburzenie pola EM wywołane przez ruch ładunku elektrycznego oderwało się niejako od tego ładunku i rozpoczyna swoją wędrówkę ku nieskończoności. Energia fali, jeżeli nie jest pochłaniana przez ośrodek, w którym się rozchodzi (np. w próżni do pochłaniania nie dochodzi, ale w materii już może), musi być niezmienna zgodnie z zasadą zachowania energii. Sfery, na których ta energia jest rozłożona (nierównomiernie!) z każdą chwilą powiększają się jednak w czasie. Jeżeli wybierzemy jakiś punkt sfery (np. zielonej), to w trakcie jej powiększania energia fali w tym punkcie musi maleć. Jako pewną analogię możemy tu przywołać smarowanie chleba masłem. Biorąc określoną ilość masła, jeżeli będziemy rozsmarowywać ją na coraz to większych kromkach chleba, to ilość masła w wybranym miejscu (np. środku kromki) będzie coraz mniejsza.

Wielkość energii niesiona przez falę EM związana jest z tzw. **natężeniem fali** oznaczanym literą I .

Uwaga: nie pomyłmy natężenia fali z natężeniem pola elektrycznego! Dokładna analiza w teorii pola EM wskazuje, że natężenie fali I oraz natężenie pola E związane są zależnością:

$$I \propto E^2$$

tzn. natężenie fali jest wprost proporcjonalne do kwadratu natężenia pola.



Rys. 5. Analiza rozkładu energii na powiększających się wycinkach sfery.

Natężenia pola na wybranych wycinkach powiększającej się sfery są odwrotnie proporcjonalne do powierzchni tych wycinków (Rys. 5):

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

Z drugiej strony, powierzchnie wycinków mają się do siebie tak, jak kwadraty promieni:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Dlaczego? Łatwo to zrozumiemy, gdy przybliżymy wycinki sfer kwadratami. Rozmiary liniowe kwadratu rosną proporcjonalnie do promienia (geometryczne podobieństwo odpowiednich figur). Wiemy, natomiast, że pole kwadratu jest równe kwadratowi jego boku – stąd proporcjonalność pola figury do kwadratu promienia sfery.

Ostatecznie:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \Rightarrow I_2 = I_1 r_1^2 \frac{1}{r_2^2} \propto \frac{1}{r_2^2} \Rightarrow I \propto \frac{1}{r^2}$$

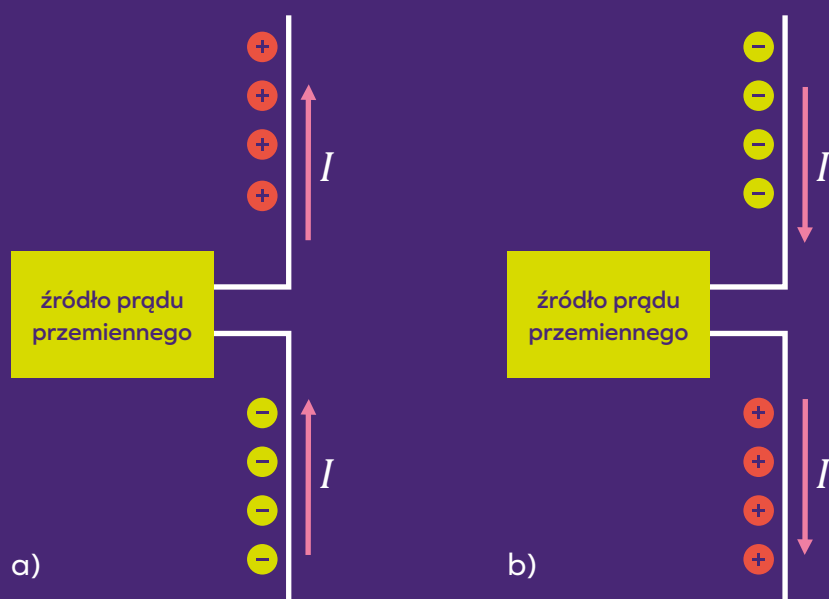
czyli natężenie fali EM spada odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła. Ponieważ, jak wcześniej wspomnieliśmy, natężenie fali jest proporcjonalne do kwadratu natężenia pola, wartość natężenia pola w obszarze zaburzenia pola EM maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości od źródła:

$$E_{fali\ EM} \propto \frac{1}{r}$$

Podkreślmy – przez $E_{fali\ EM}$ rozumiemy wartość natężenia pola (zmienną w czasie) w obszarze fali EM, nie wartość natężenia pola od nieruchomego ładunku elektrycznego, która (jak pamiętamy z prawa Coulomba) maleje odwrotnie proporcjonalnie do **kwadratu** odległości od źródła. Różnica w tej zmienności jest ogromna (patrz „Praca domowa”). Wpływ fali EM na odległe ładunki elektryczne jest dzięki temu znacznie większy, niż by się mogło wydawać na podstawie prawa Coulomba.

5. Nadawanie i odbieranie sygnału EM

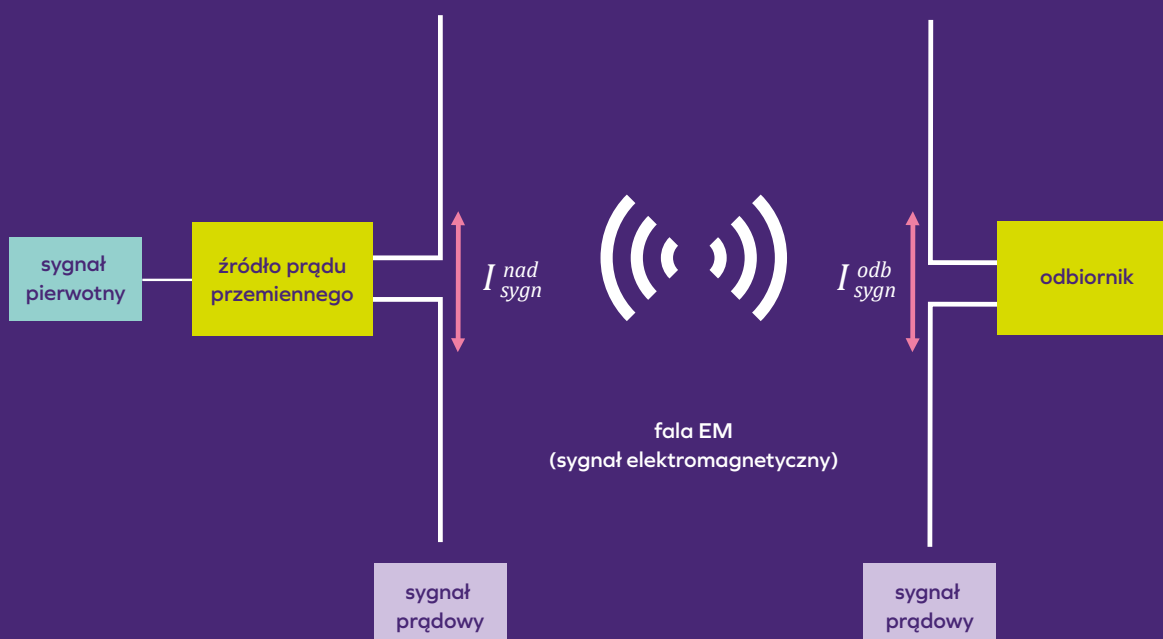
Jak w praktyce konstruujemy nadajniki fal EM? Na Rys. 6 przedstawiono przykład tzw. **anteny dipolowej**, czyli dwóch odcinków przewodu połączonych ze źródłem prądu przemiennego. Odcinki te nie tworzą obwodu zamkniętego, nie jest możliwy zatem przepływ prądu stałego, ale naszym celem jest w tym przypadku tylko wywołanie ruchu ładunków raz w jedną, to w drugą stronę. Rys. 6a przedstawia sytuację, w której prąd płynie w kierunku górnego odcinka ładując go dodatnio. W tym samym czasie ujemnie ładuje się drugi przewód anteny. W kolejnym cyklu prąd płynie w przeciwną stronę i dodatnio ładuje się odcinek dolny anteny (ujemnie zaś górny). Potem cykl się powtarza. Ruch ładunków w antenie staje się dzięki temu ciągłym źródłem fali EM, w przeciwieństwie do pojedynczego, chwilowego ruchu ładunku jak na Rys. 4, gdzie przedstawiono emisję pojedynczego, krótkiego zaburzenia pola.



Rys. 6. Antena dipolowa jako nadajnik fali EM. Przepływ prądu w kierunku górnego odcinka anteny (a) oraz w przeciwną stronę (b).

O tym, jak wykorzystać wzbudzoną falę do przesyłania użytecznej informacji, powiemy w Lekcji 7. Teraz przyjrzyjmy się tylko konstrukcji odbiornika sygnału elektromagnetycznego. Na Rys. 7 widzimy po lewej stronie nadajnik, w którym źródło prądu przemiennego połączone z anteną dipolową sterowane jest przez określony sygnał pierwotny zgodny z informacją, którą chcemy przesłać. W antenie wzbudzony zostanie naprzemienny prąd, który generuje falę EM rozchodzącą się wokół anteny. Jak już wcześniej zauważyliśmy, głównym kierunkiem emisji energii jest kierunek prostopadły do kierunku ruchu ładunków, czyli w tym przypadku jest to kierunek prostopadły do anteny.

Odbiornik jest skonstruowany bardzo podobnie do nadajnika, poza tym, że w miejsce źródła prądu umieszczony jest odpowiedni układ do pomiaru i ewentualnego wzmocnienia odbieranego sygnału. Fala EM docierająca do anteny dipolowej w odbiorniku powoduje pobudzenie ruchu ładunków (elektronów pod wpływem $E_{fali\ EM}$) w przewodach anteny – zostaje w nich zatem wzbudzony prąd przemienny. Jeżeli odbiornik jest daleko od źródła, natężenie pola EM docierającego do anteny może być bardzo małe, po wzmocnieniu jest jednak jak najbardziej mierzalne. W ten sposób sygnał zostaje przekazany bezprzewodowo do odbiorcy i może być dalej obrabiany i interpretowany.



Rys. 7. Nadajnik i odbiornik sygnału elektromagnetycznego.

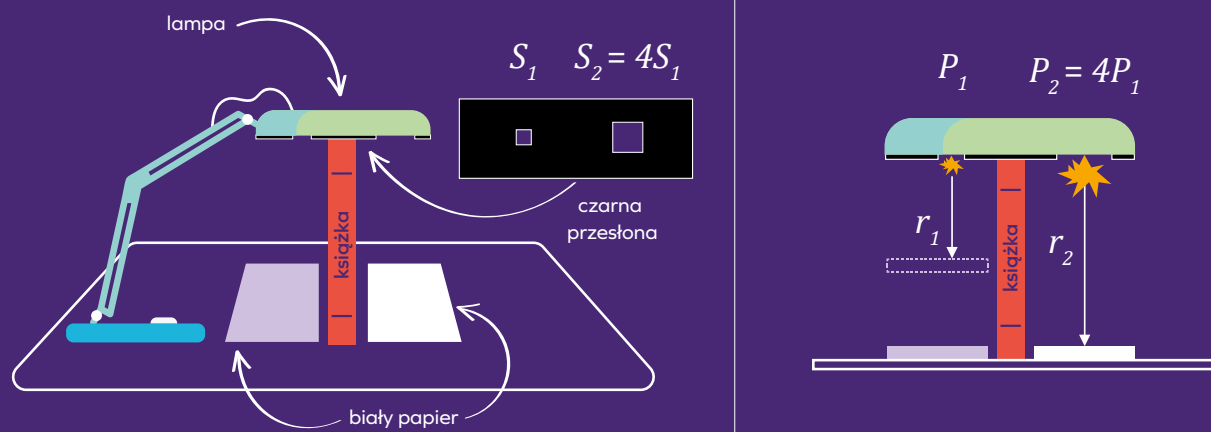
Szerokie zastosowanie pola elektromagnetycznego w przesyłaniu informacji możemy zatem uzasadnić następującymi powodami:

- łatwością generowania fal EM i kształtowania ich zgodnie z zawartością informacyjną,
- dalekim zasięgiem fal EM oraz brakiem ośrodka do ich transportu (rozchodzą się nawet w próżni),
- możliwością łatwego odbioru fal EM nawet o bardzo małych natężeniach.



Doświadczenie

Celem doświadczenia jest potwierdzenie ilościowej zależności natężenia fali od odległości od źródła. Doświadczenie możemy wykonać na biurku z lampą na wysięgniku i długą świetlówką. Lampa będzie pełniła rolę źródła fali EM (o tym, że światło faktycznie jest falą EM powiemy w Lekcji 6). Lampę owijamy czarnym kartonem, w którym wycinamy dwa kwadratowe otwory, jeden o boku 1 cm, drugi o boku 2 cm (Rys. 8). Dzięki temu pole powierzchni drugiego otworu jest czterokrotnie większe niż pierwszego.



Rys. 8. Schemat doświadczenia.

Na biurku stawiamy pionowo grubą, dużą księżkę, po czym przysuwamy lampę do księżki tak, by światło wychodzące z obu otworów przesłony z kartonu oświetlało tylko obszar leżący po odpowiedniej stronie księżki. Na biurku po obu stronach księżki kładziemy dwie białe kartki papieru, po czym zaciemniamy pomieszczenie tak, by lampa była jedynym źródłem światła.

Powinniśmy zauważyć, że kartka po stronie mniejszego otworu jest oświetlona wyraźnie słabiej. Otwory w przesłonie grają rolę wtórnych źródeł światła, przy czym ich moc jest proporcjonalna do powierzchni otworu. Ponieważ powierzchnia prawego otworu jest czterokrotnie większa niż pierwszego, moc źródła światła po prawej stronie również jest czterokrotnie większa, a skoro kartki znajdują się w tej samej odległości od źródeł, natężenie fali padającej na kartkę po stronie lewej jest tyle samo razy mniejsze.

Ustawmy się teraz przed biurkiem tak, by łatwo nam było ocenić stopień oświetlenia obu kartek. Zaczniemy powoli unosić kartkę po lewej stronie cały czas porównując stopień oświetlenia obu kartek. Kiedy uznamy, że obie kartki oświetlone są w tym samym stopniu, zmierzmy odległość r_1 pomiędzy uniesioną kartką i przesłoną i porównajmy ją z wysokością księżki (równą r_2 , czyli odległości prawej kartki od przesłony).

Czy stosunek tych odległości jest bliski $\frac{1}{2}$, innymi słowy, czy kartka została uniesiona w przybliżeniu do połowy wysokości książki?

Zauważmy, że zgodnie z prawem zmniejszania się natężenia fali z odległością, powinno ono maleć odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości. Z drugiej strony spodziewamy się wprost proporcjonalnej zależności natężenia fali od mocy źródła P . Powinno zatem być:

$$I = a \frac{P}{r^2}$$

gdzie a jest pewnym stałym mnożnikiem. Natężenie fali (oświetlenia) obu kartek wyliczymy zatem jako:

$$I_1 = a \frac{P_1}{r_1^2}, \quad I_2 = a \frac{4P_1}{r_2^2}$$

askoro oba natężenia są sobie równe (przy uniesionej lewej kartce), otrzymujemy:

$$I_1 = I_2 \Rightarrow a \frac{P_1}{r_1^2} = a \frac{4P_1}{r_2^2} \Rightarrow \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{1}{4} \Rightarrow \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{2}$$



Słowniczek

Antena dipolowa (dipol) – układ dwóch symetrycznie ułożonych przewodów; przy zasilaniu prądem przemiennym generuje falę EM, przy czym kierunkiem o największym natężeniu emitowanej fali jest kierunek prostopadły do osi, wzdłuż której umieszczone są przewody; może też służyć jako odbiornik fal EM.

Fala elektromagnetyczna (EM) – zaburzenie pola elektromagnetycznego wywołane przez poruszające się z przyspieszeniem ładunki elektryczne.

Linie pola – linie w przestrzeni skierowane zgodnie z kierunkiem wektora natężenia pola; w przypadku nieruchomego ładunku elektrycznego są to półproste zaczepione na ładunku i rozchodzące się promieniście do nieskończoności.

Natężenie pola elektrycznego – wektor, którego wartość zależy od siły, z którą pole działa na jednostkowy dodatni ładunek próbny; obliczane z prawa Coulomba; jego jednostką w układzie SI jest [V/m].

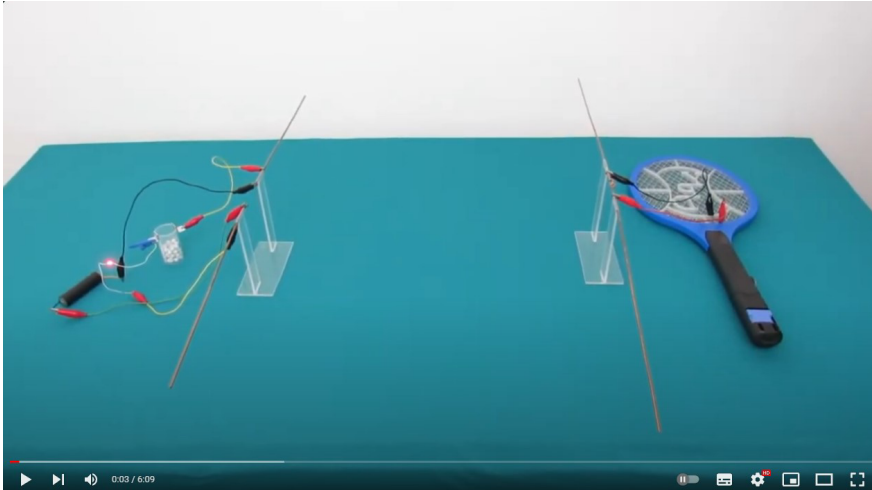
Natężenie fali elektromagnetycznej – wielkość opisująca energię niesioną przez zaburzenie pola EM. Jednostka – W/m^2 (wat na metr kwadratowy).

Pole elektromagnetyczne (EM) – pole fizyczne o zasięgu nieskończonym wytwarzane przez ładunki elektryczne.



Materiały zewnętrzne

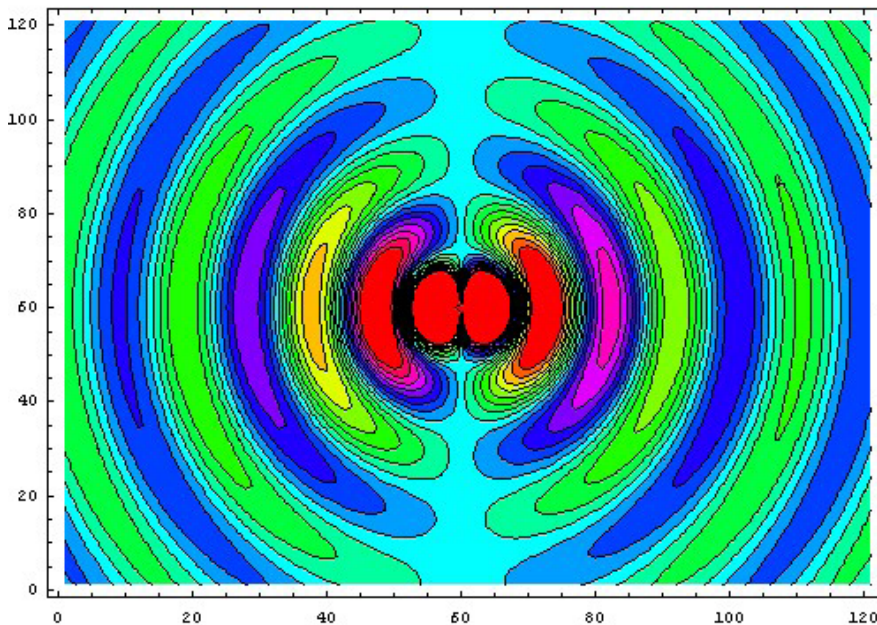
1. Prosty eksperyment demonstrujący przesyłanie fal EM (tytuł w języku angielskim: *Science Project – Easy experience to detect electromagnetic waves*).



Zeskanuj QR kod



2. Animacja obrazująca emisję fali EM przez antenę dipolową. Źródło: Wikipedia. Nazwa pliku: Dipole.gif



Zeskanuj QR kod





Praca domowa

1. Porównaj zmienność typu $1/r$ ze zmiennością typu $1/r^2$. Oblicz wartości tych wyrażeń dla różnych r i wypełnij poniższą tabelkę. Czy uzyskane wyniki pozwalają ci porównać w dużej odległości od ładunku wartość natężenia pola nieruchomego ładunku (obliczoną z prawa Coulomba) do wartości w obszarze fali EM wywołanej chwilowym ruchem tego ładunku?

r	1	2	5	10	100	1000
$1/r$						
$1/r^2$						

2. Narysuj przebieg linii pola dla ładunku, który w pewnym momencie zaczyna się przemieszczać z miejsca przecięcia linii niebieskich do miejsca przecięcia linii żółtych. Promień okręgu czerwonego powiększa się z prędkością c od momentu rozpoczęcia ruchu ładunku, zaś promień okręgu powiększa się z tą samą prędkością od momentu dotarcia ładunku do punktu docelowego (rysunek analogiczny do Rys. 3):