

Wykład 17: Fala elektromagnetyczna

Dr inż. Zbigniew Szklarski

Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321

szkla@agh.edu.pl

<http://layer.uci.agh.edu.pl/Z.Szklarski/>

Równania Maxwell'a

Prawo:	Postać całkowa	Postać różniczkowa	Próżnia
Gaussa dla elektrostatyki	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$	$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\operatorname{div} \vec{E} = 0$
Interpretacja:	Źródłem pola elektrostatycznego są ładunki. W próżni pole nie ma źródła.		
Gaussa dla magnetyzmu	$\oint_S \vec{B} \circ d\vec{S} = 0$	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$
Interpretacja:	Pole magnetyczne jest bezźródłowe. Nie istnieją pojedyncze bieguny magnetyczne.		

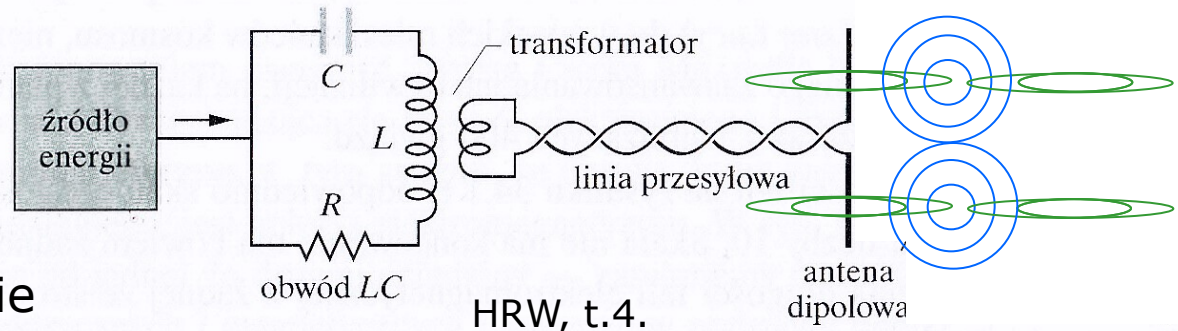
Równania Maxwell'a

Prawo:	Postać całkowa	Postać różniczkowa	Próżnia
Ampere'a- Maxwella	$\oint_C \vec{B} \circ d\vec{l} = \mu_o \left(i + \varepsilon_o \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$	$rot \vec{B} = \mu_o \left(\vec{j} + \varepsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$	$rot \vec{B} = \mu_o \varepsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Interpretacja:	Prąd elektryczny lub zmiana strumienia pola/pola elektrycznego powoduje powstanie wirowego pola magnetycznego.		
Faraday'a	$\oint_C \vec{E} \circ d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$	$rot \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$rot \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Interpretacja:	Zmiana strumienia pola/pola magnetycznego powoduje powstanie wirowego pola elektrycznego.		

Fala elektromagnetyczna w próżni – emisja, propagacja, detekcja

1888r. H. Hertz

Zmienny prąd w obwodzie RLC wywołuje oscylacje ładunku w prętach anteny – związany z tym prąd w antenie sinusoidalnie zmienia swój kierunek i wartość



pojawia się wirowe pole magnetyczne

pojawia się wirowe pole elektryczne

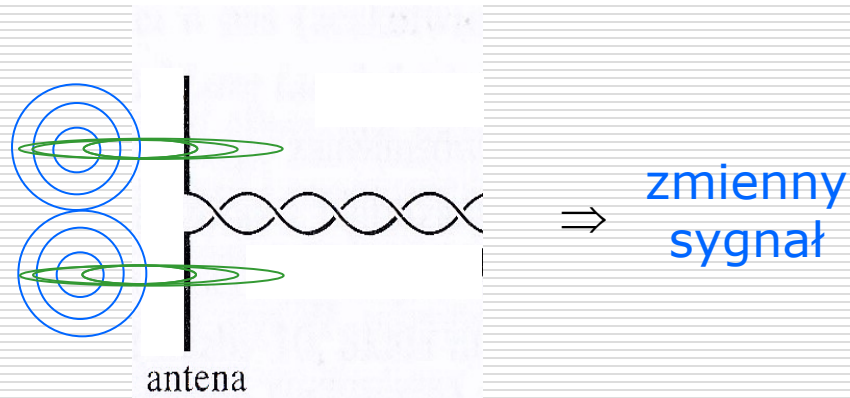
$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} = \text{rot}\vec{B}$$

$$\mu_0 \vec{j} = \text{rot}\vec{B}$$

$$-\frac{d\vec{B}}{dt} = \text{rot}\vec{E}$$

⇒ pojawia się wirowe pole magnetyczne

⇒



pojawia się
wirowe pole
elektryczne



pojawienie się
wirowe pola
magnetycznego



pojawienie się
zmiennego sygnału
elektrycznego w antenie

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} = \text{rot} \vec{B}$$

$$-\frac{d\vec{B}}{dt} = \text{rot} \vec{E}$$



Fala elektromagnetyczna w próżni – równanie falowe

- Fala elektromagnetyczna opisana jest równaniami:

$$E_x = E_z = 0; \quad E_y = E(x,t)$$

$$B_x = B_y = 0; \quad B_z = B(x,t)$$

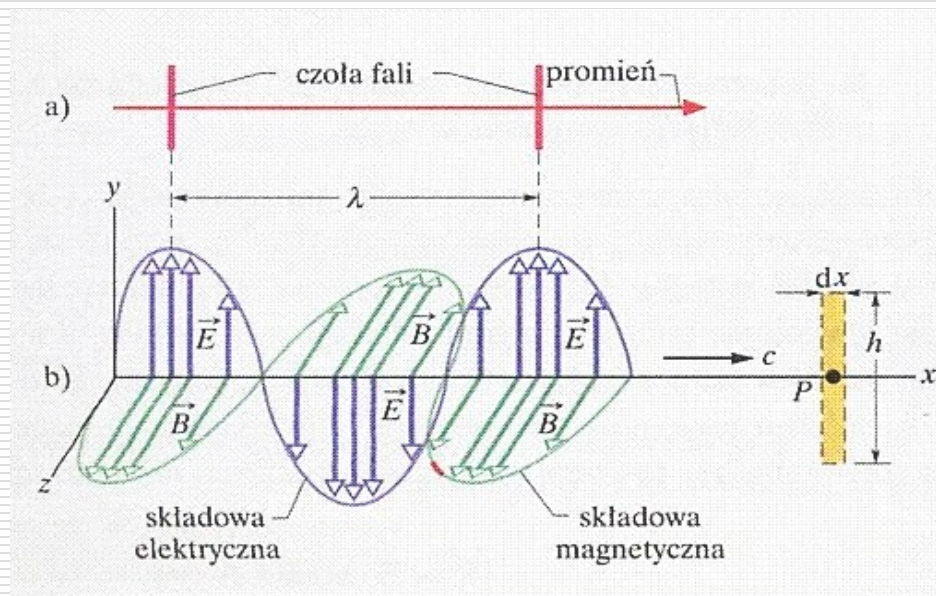
gdzie $E(x,t) = E_m \cdot \sin(\omega t - kx)$

$B(x,t) = B_m \cdot \sin(\omega t - kx)$

i rozchodzi się w kierunku osi OX

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E_y & 0 \end{vmatrix} = \hat{k} \frac{\partial E_y}{\partial x} - \hat{i} \underbrace{\frac{\partial E_y}{\partial z}}_0$$



$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = \hat{k} \frac{\partial E_y}{\partial x}$$



$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\partial B_z}{\partial t} \hat{k}$$



$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

obliczamy drugie pochodne po t oraz x

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

oraz

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial t}$$

$$B_z = B(x, t) = B_m \cdot \sin(\omega t - kx)$$

Z kolei

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & B_z \end{vmatrix} = \hat{i} \underbrace{\frac{\partial B_z}{\partial y}}_0 - \hat{j} \frac{\partial B_z}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial t} \hat{j} \quad -\frac{\partial B_z}{\partial x} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad \Rightarrow$$

obliczamy drugie pochodne po t oraz x

$$-\frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial t} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial t}$$

oraz

$$-\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial t}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

poprzednio:

stąd

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

Dla 3 wymiarów

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$$

jest to "część elektryczna"
równania falowego.

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$$

to równanie jest „częścią
magnetyczną” równania falowego

dla fali elektromagnetycznej w próżni.

Przypominając równanie 3-wymiarowej fali płaskiej: $\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \xi}{dt^2}$

zauważymy, że dla fali elektromagnetycznej w próżni

$$\frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0 \Rightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{E_m}{B_m}$$

Fala elektromagnetyczna w ośrodku

Równania fali dla ośrodka:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$$

gdzie $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ gdzie ϵ — przenikalność ośrodka
 ϵ_r — względna przenikalność

zatem $\frac{1}{v^2} = \mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r = \mu \epsilon \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \left(c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \right)$

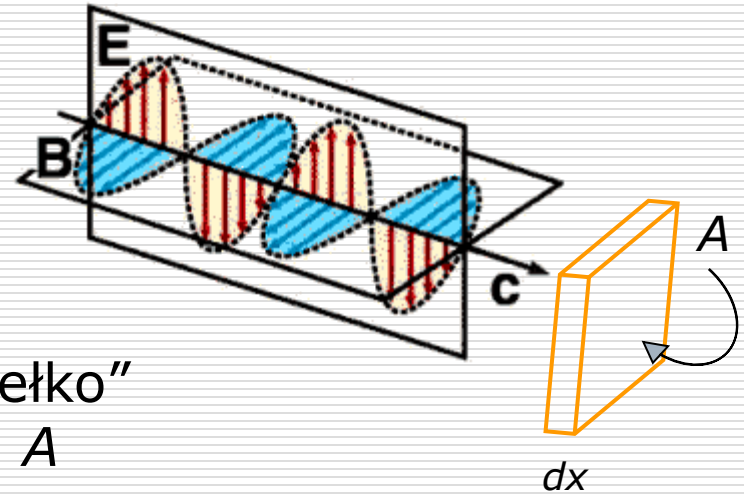
Bezwzględny współczynnik załamania fali elektromagnetycznej: $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$

Energia fali elektromagnetycznej

Gęstość energii pola E $u_E = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$

Gęstość energii pola B $u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$

Energia fali przechodząca przez „pudełko” o grubości dx i powierzchni czołowej A



$$dW = dW_E + dW_B = (u_E + u_B)A \cdot dx$$

$$dW = \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) A \cdot dx$$

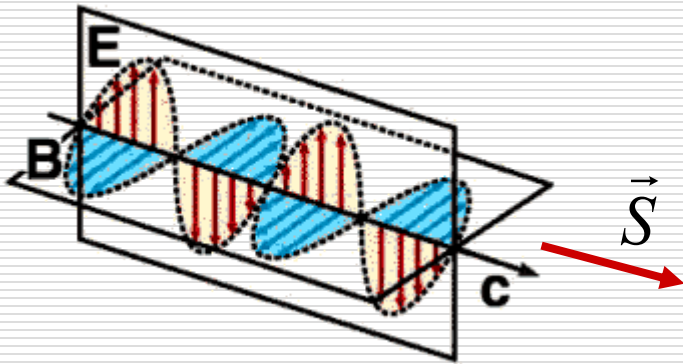
$$dW = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} EB \cdot A \cdot c \cdot dt$$

Szybkość przepływu energii przez jednostkową powierzchnię A

$$\frac{dW}{dt \cdot A} = \frac{1}{\mu_0} EB = S \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

jest opisana przez wektor Poyntinga

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$



jest związana z szybkością przepływu energii przez jednostkową powierzchnię w jednostce czasu, a jego kierunek jest kierunkiem rozchodzenia się fali i kierunkiem przepływu energii.

Dla dużych częstotliwości E i B użyteczna jest *średnia wartość* S .

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB = \varepsilon_0 c E^2 \quad \text{zatem} \quad \bar{S} = \varepsilon_0 c \overline{E^2}$$

Dla sinusoidalnie zmiennych E i B $\overline{E^2} = \frac{E_0^2}{2}$ podobnie jak dla prądu zmiennego

$$\text{Zatem} \quad \bar{S} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2} \frac{c}{\mu_0} B_0^2 = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0}$$

Promieniowanie słoneczne dostarcza do górnych warstw atmosfery z szybkością $1350 \text{ J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$. Zakładając, że jest to pojedyncza fala sinusoidalna obliczyć maksymalne wartości E oraz B .

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2 = 1350 \frac{\text{J}}{\text{sm}^2} \quad \text{stad} \quad E_0 = \sqrt{\frac{2\bar{S}}{\varepsilon_0 c}} = 1,01 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

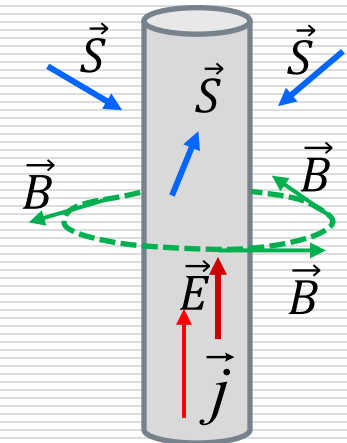
Zadanie

W nieskończenie długim przewodniku o promieniu R i przewodnictwie właściwym σ , płynie prąd o gęstości j (jednakowej w całym przekroju poprzecznym przewodnika). Oblicz:

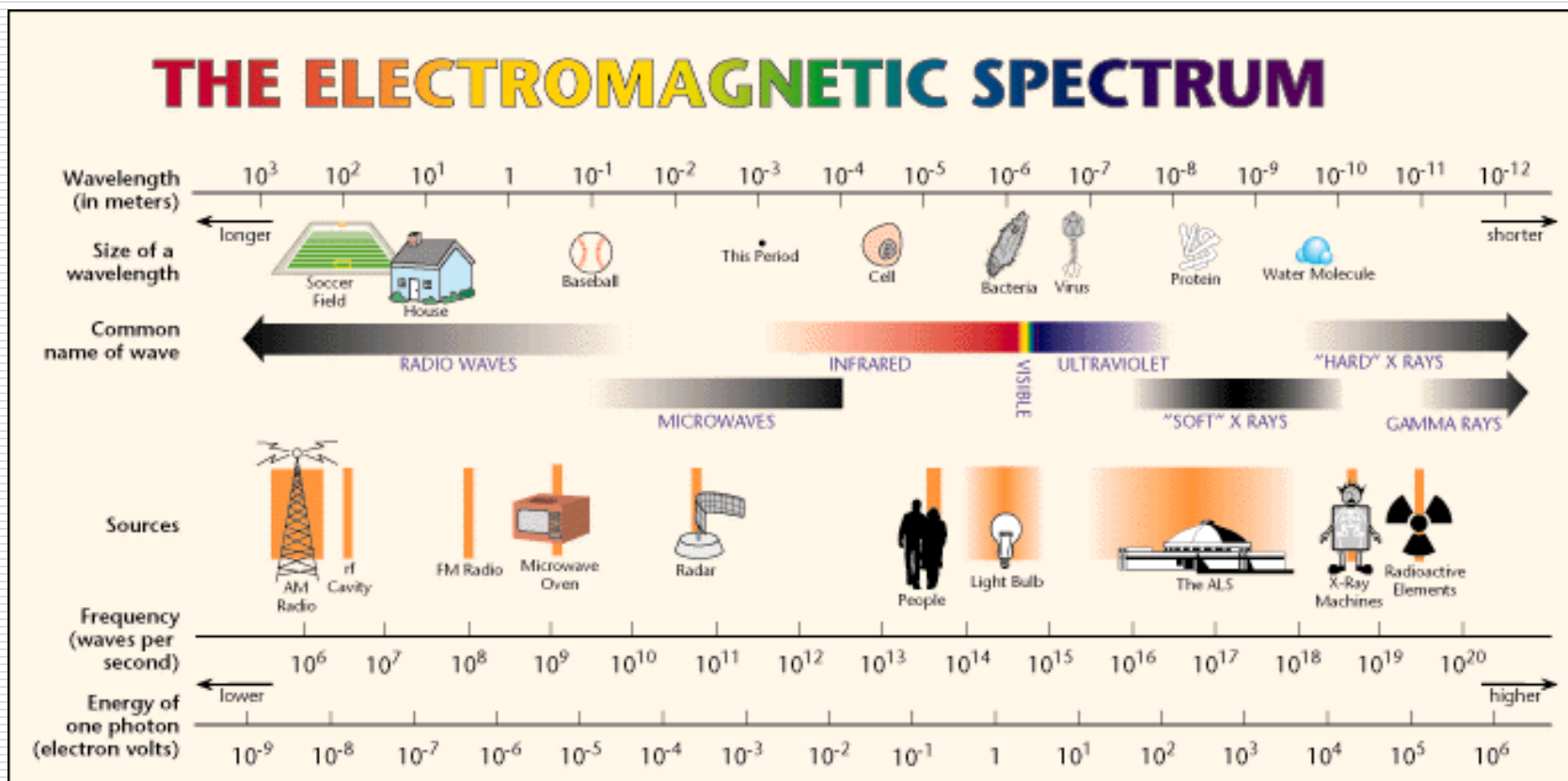
- natężenia pól E i B na powierzchni tego przewodnika.
- wartość wektora Poyntinga na powierzchni tego przewodnika.
- Uzupełnij rysunek przewodnika z prądem o wektory \vec{E} , \vec{B} , \vec{S}

$$\rho = \frac{E}{j} \Rightarrow E = \frac{j}{\sigma} \quad \oint B dl = \mu_0 i \quad i = \pi R^2 j \Rightarrow B = \frac{\mu_0 j R}{2}$$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}) \quad S = \frac{1}{\mu_0} \frac{j}{\sigma} \frac{\mu_0 j R}{2} = \frac{j^2 R}{2\sigma}$$



Widmo fali elektromagnetycznej



Mikrofale

Popularnie:

3 mm – 0,3 m

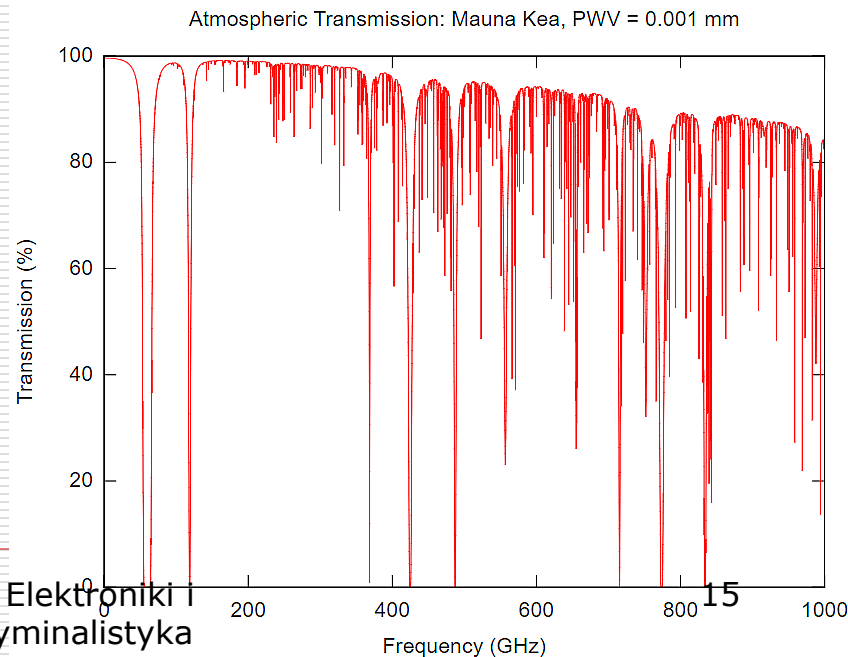
Przewidziane przez

J.C.Maxwella, odkryte przez H.Hertza (1886), szersze badania – dopiero XX w – radary.

Zastosowanie:

Radary (militarne, meteo, antykolizyjne), łączność radio- liniowa punkt-punkt (b.słaba dyfrakcja), radioastronomia, nawigacja, energetyka, kuchenki mikrofalowe.

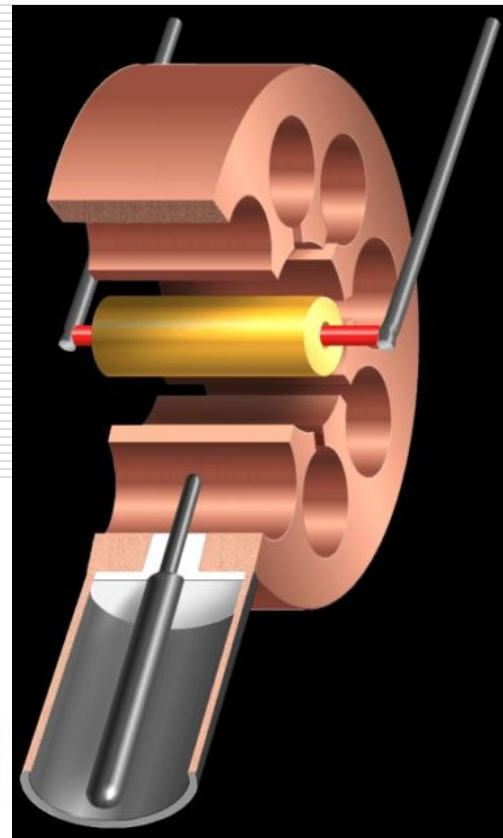
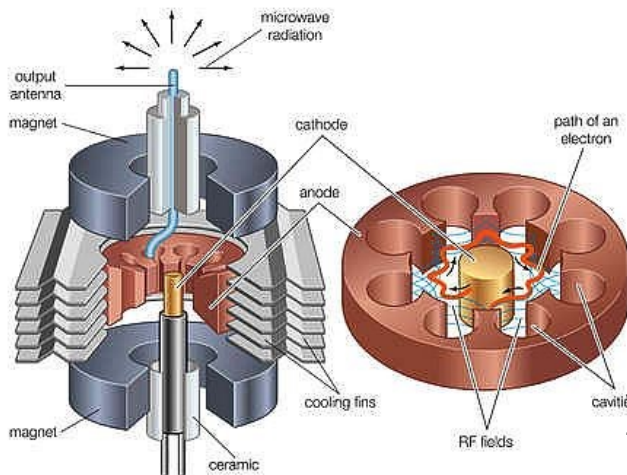
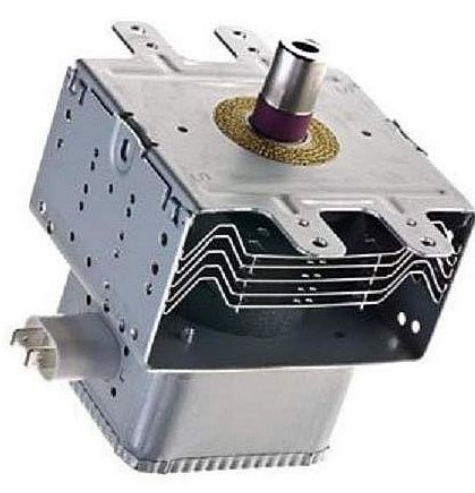
Electromagnetic spectrum			
Name	Wavelength	Frequency (Hz)	Photon energy (eV)
Gamma ray	< 0.02 nm	> 15 EHz	> 62.1 keV
X-ray	0.01 nm – 10 nm	30 EHz – 30 PHz	124 keV – 124 eV
Ultraviolet	10 nm – 400 nm	30 PHz – 750 THz	124 eV – 3 eV
Visible light	390 nm – 750 nm	770 THz – 400 THz	3.2 eV – 1.7 eV
Infrared	750 nm – 1 mm	400 THz – 300 GHz	1.7 eV – 1.24 meV
Microwave	1 mm – 1 m	300 GHz – 300 MHz	1.24 meV – 1.24 μ eV
Radio	1 m – 100 km	300 MHz – 3 kHz	1.24 μ eV – 12.4 feV



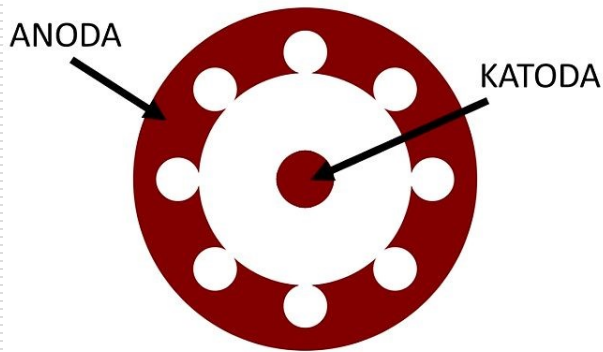
Emisja mikrofal.

Źródła mikrofal wykorzystują ruch balistyczny elektronów w próżni pod wpływem pól elektrycznych i magnetycznych. Są to np. magnetrony (stosowane w kuchenkach mikrofalowych), czy klistrony (wąskopasmowa lampę mikrofalowa).

400 kW klistron

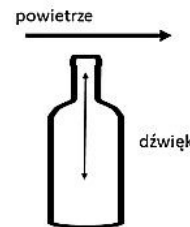
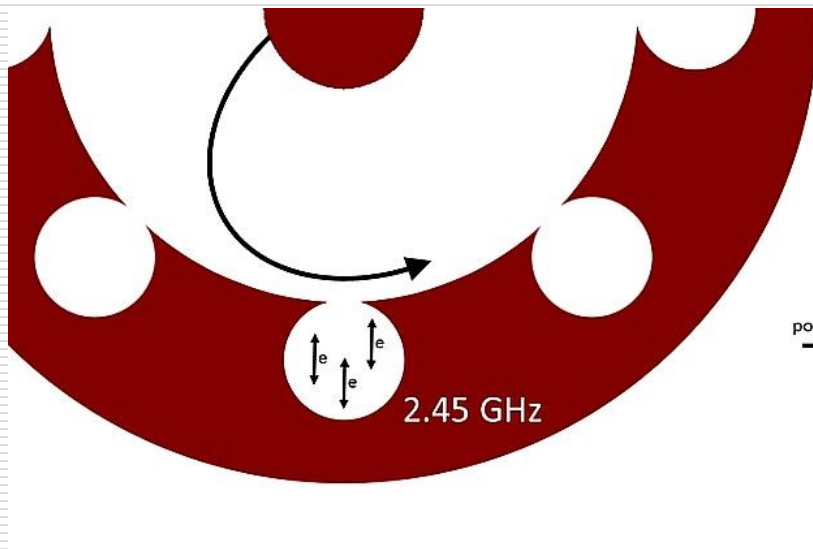
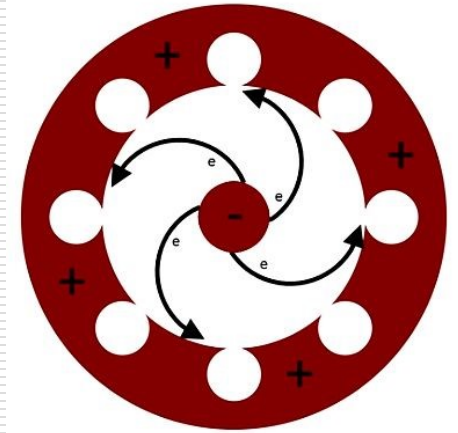


Zasada działania magnetronu



Tor elektronów jest zakrzywiany polem magnetycznym.

Gdy elektrony omiatają te szczeliny, indukują pole radiowe wysokiej częstotliwości w każdej wnęce rezonansowej.



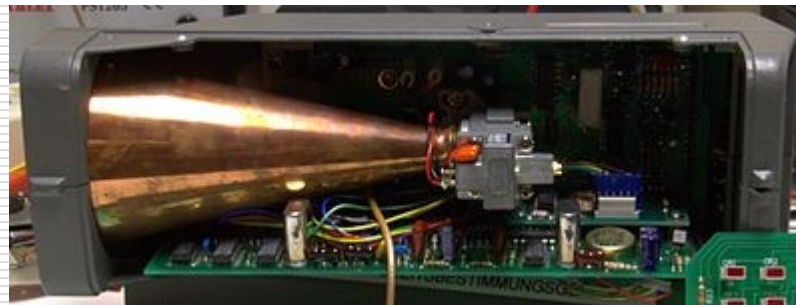
Prądy oscylacyjne przepływające wokół wnęk powodują powstawanie dużych ilości energii mikrofalowej o częstotliwości radiowej we wnękach. Wnęki są otwarte na jednym końcu, więc cały mechanizm tworzy pojedynczy, większy oscylator mikrofalowy.

Część energii o częstotliwości radiowej jest wydobywana przez krótką antenę, która jest podłączona do falowodu (metalowa rura, zwykle o przekroju prostokątnym). Falowód kieruje wydobytą energię RF do obszaru, którym może być komora gotowania w kuchence mikrofalowej lub antena w przypadku radaru.



Źródła mikrofalowe małej mocy

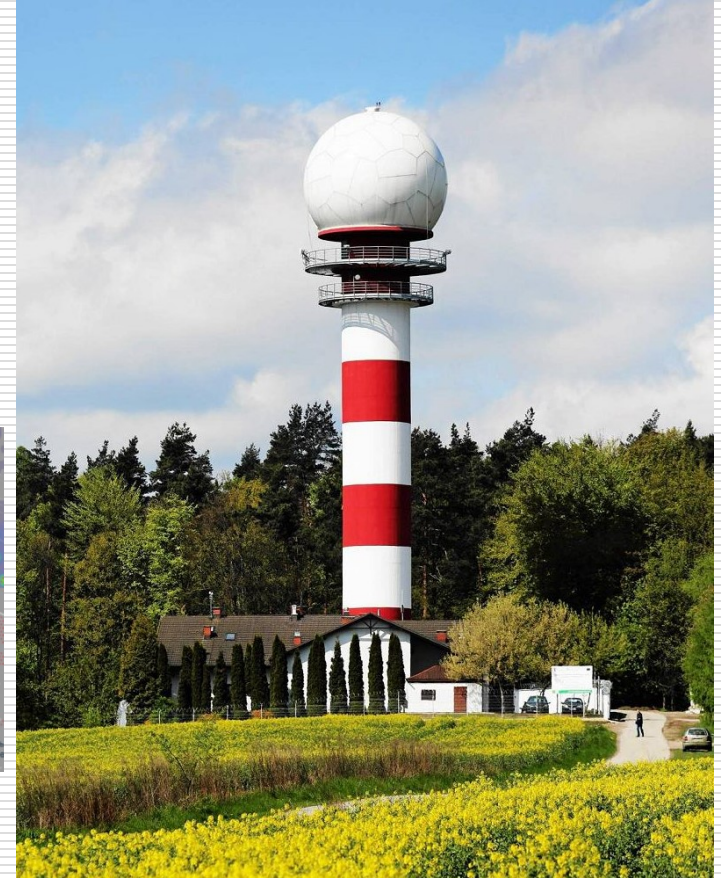
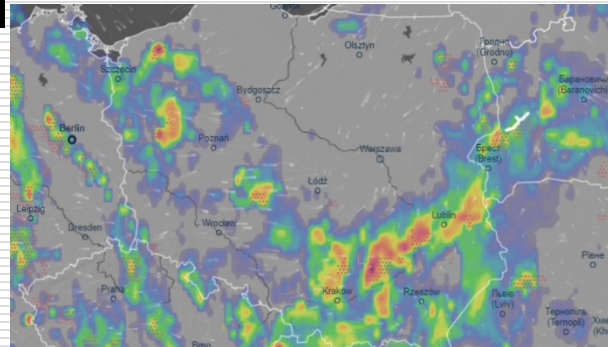
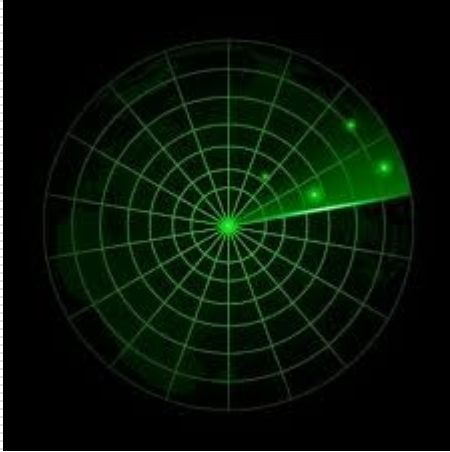
Tranzystory polowe, diody tunelowe, diody Gunna, diody IMPATT, „Dioda” Gunna (GaAs) składa się z dwóch bardzo silnie domieszkowanych obszarów typu „n” i cienkiego obszaru między nimi o niskiej koncentracji domieszek.



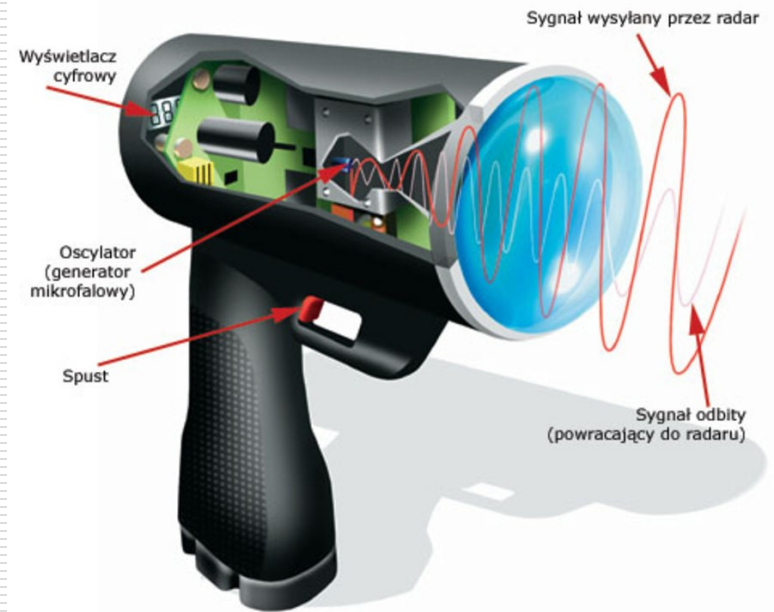
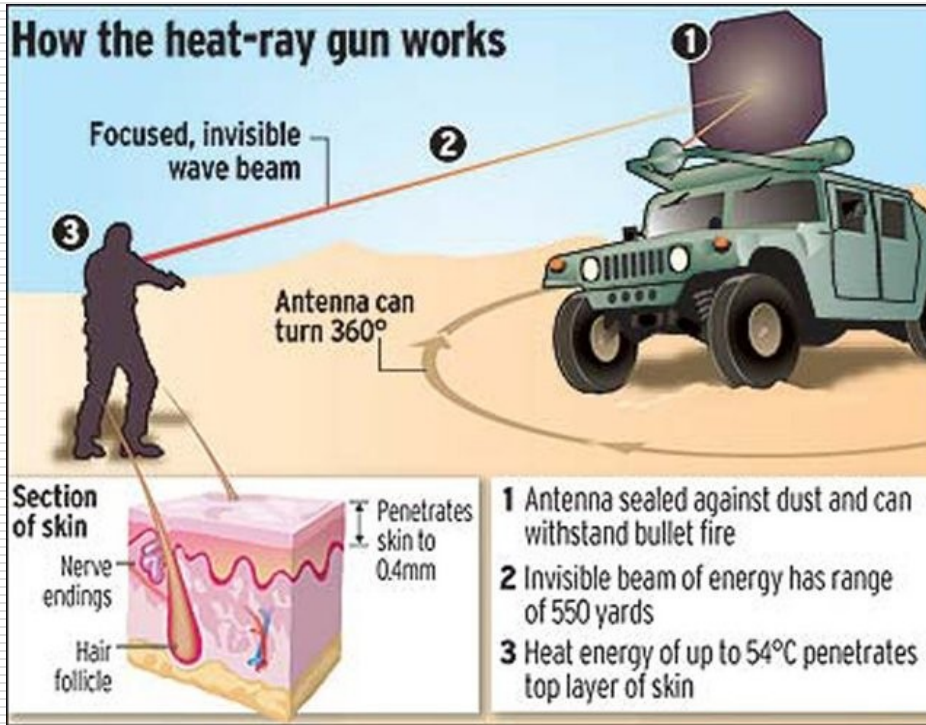
Radarowy miernik szybkości z diodą Gunna

Niektóre zastosowania mikrofal

- Radary ($f = 300 \text{ MHz} \div 300 \text{ GHz}$; $\lambda \approx 300 \div 7,5 \text{ mm}$)



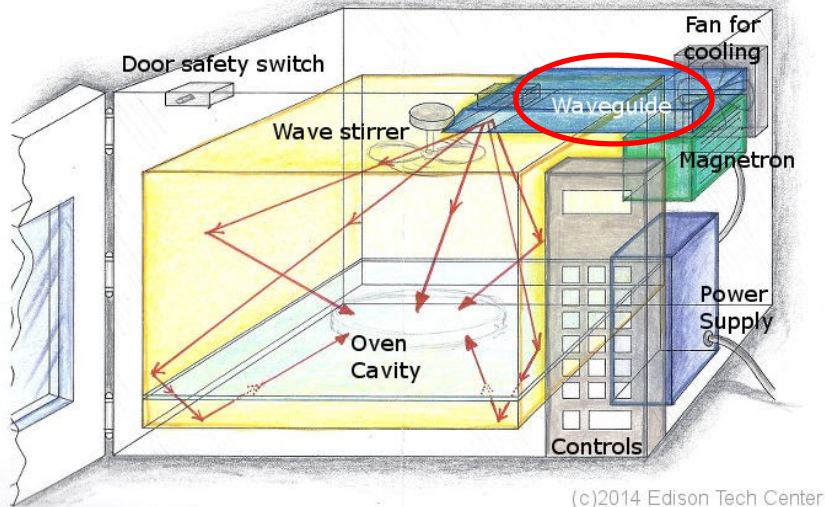
- Pomiar prędkości ($f = 24,125 \text{ GHz}$; $\lambda \approx 12,5 \text{ mm}$; zasięg max.ok. 800 m).
- Broń mikrofalowa ($f = 94 \text{ GHz}$; $\lambda \approx 3 \text{ mm}$; zasięg ok. 500 m).
- Kuchenka mikrofalowa ($f = 2,45 \text{ GHz}$; $\lambda \approx 12,2 \text{ cm}$; wnikanie ok. 2,5 cm).



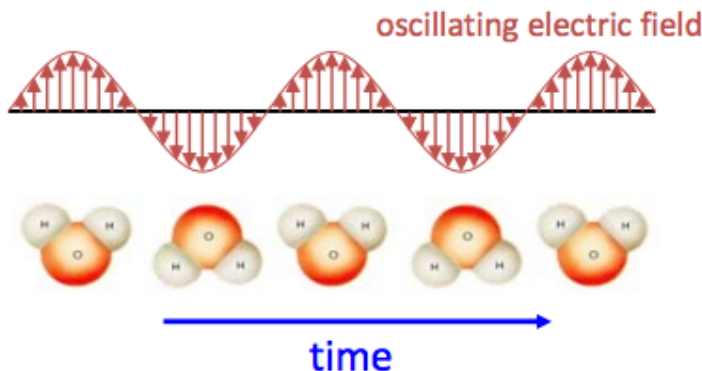
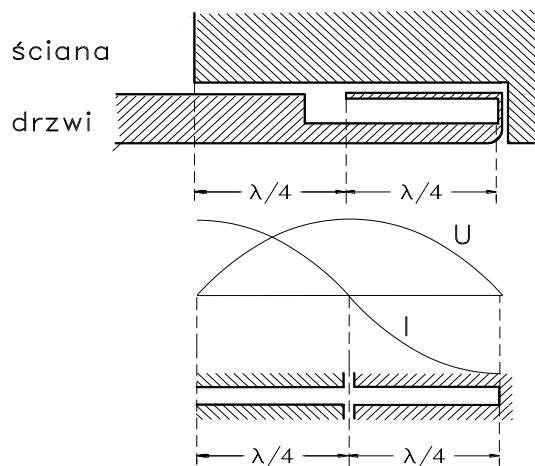
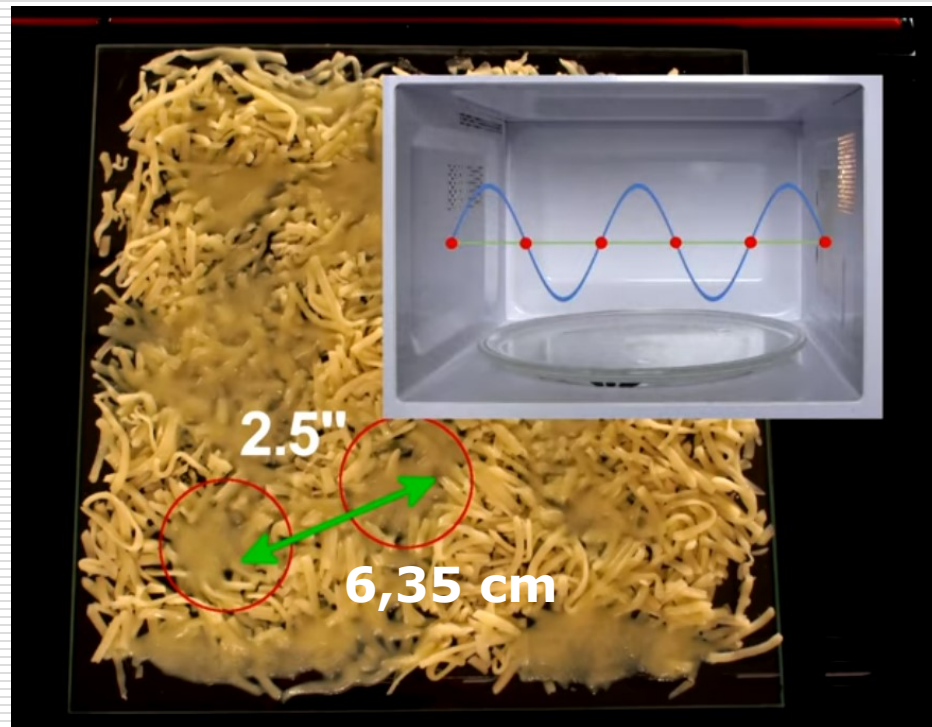
1933 r. Westinghouse na Wystawie Światowej w Chicago. (60 MHz, 10 kW)

Komercyjna z lat `60 1,6 kW, 1,7 m wys., cena ówczesna 3 000\$ (odpowiada ok. 20 000\$ w 2019)





(c)2014 Edison Tech Center



$$\lambda/2 = 6,35 \text{ cm}$$

$$f = 2,45 \text{ GHz}$$

$$V = f \cdot \lambda =$$

$$2,45 \cdot 12,7 \cdot 10^7 \text{ m/s} =$$

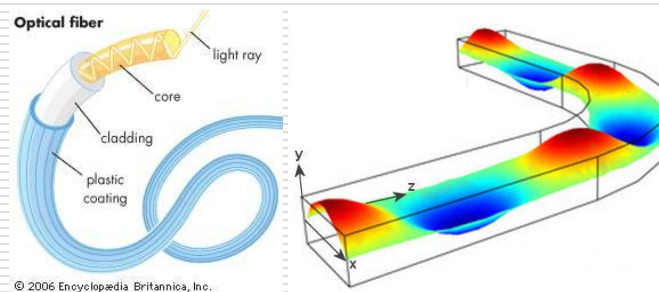
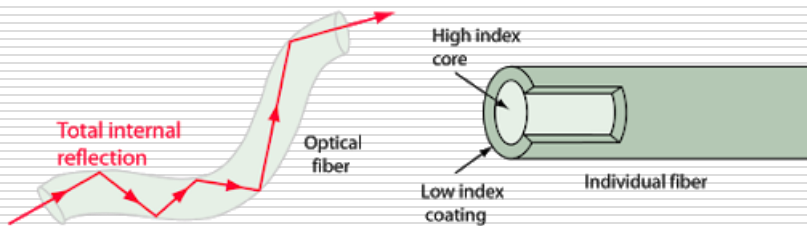
$$3,11 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx c$$

Falowód

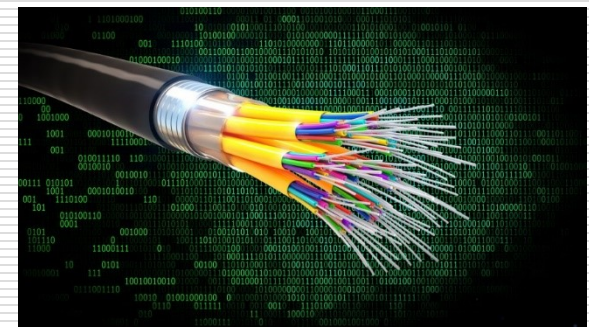
kanał do prowadzenia w przestrzeni **fal** mechanicznych lub elektromagnetycznych wzdłuż określonej drogi.



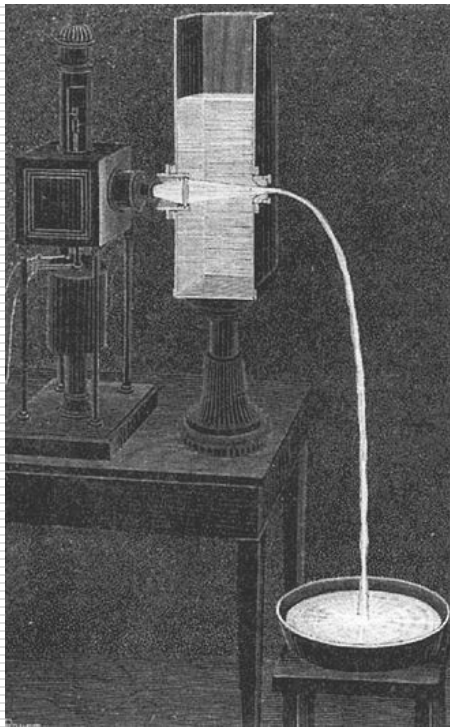
- akustyczny: mniejsze tłumienie, możliwa koncentracja energii gdy przekrój maleje. Istnieją naturalne falowody np. w oceanach – propagacja fal o małych częstotliwościach na setki kilometrów.
- fal elektromagnetycznych – gdy poprzeczne rozmiary falowodu $\geq \lambda$
 - zamknięte – rury, - otwarte – przewód metalowy, pręt/rurka z dielektryka
 - dla dużych częstotliwości (radar, niskie radiowe/mikrofałe) – metalowe rury
 - dla wysokich częstotliwości radiowych – falowody dielektryczne
 - dla fal świetlnych – włókna światłowodowe.



Światłowód



1842 – D. Colladon
– „*light pipe*”



1930 – pierwsza próba wykorzystania światłowodu do badań medycznych, ale dopiero w 1956 – pierwszy gastroskop.

1970 – zmniejszono tłumienie do 20 db/km, a 1977 – pierwszy światłowód telekomunikacyjny dł. 9 km w Turynie.

W Polsce – wytworzono pierwszy kabel światłowodowy w 1978r.

Szybkość przesyłu danych: 2013r. – 1,05 Pbit/s (10^{15} !)
Najdłuższy światłowód – 39 000 km Europa-Azja-Australia.

W Polsce największa sieć – Orange – o długości ponad 100 tys. km.

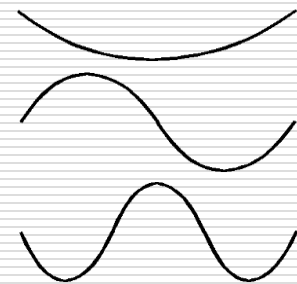


Zasada działania:

Modulowana wiązka z lasera rozchodzi się wewnątrz włókna – szklanego, plastikowego lub półprzewodnikowego w sposób zależny od średnicy włókna:

- średnica większa od długości światła (powyżej $50\ \mu\text{m}$ – współczynnik załamania światłowodu jest większy niż osłony \Rightarrow bieg prostoliniowy wiązki tzw. światłowód wielomodowy – *MMF* (skokowy)
- jw. ale współczynnik załamania rdzenia o budowie warstwowej zmienia się w sposób ciągły (największy na osi), co powoduje krzywoliniowy bieg światła – światłowód gradientowy (też wielomodowy)
- średnica porównywalna lub mniejsza od długości światła ($8\div 10\ \mu\text{m}$) – światło rozchodzi się jak fala rozchodząca się prawie równoległe do osi światłowodu – jednomodowego – *SMF*.

Mod fali - określona długość wzbudzonej fali, gdy rezonator pobudzany jest do drgań przez fale z pewnego zakresu długości.

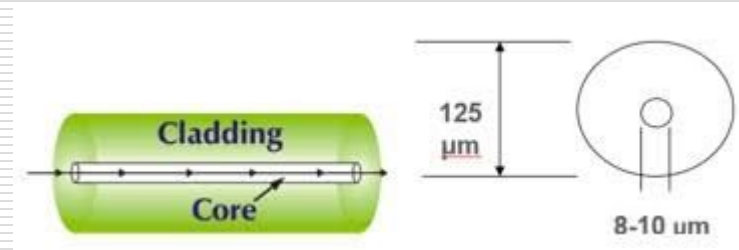
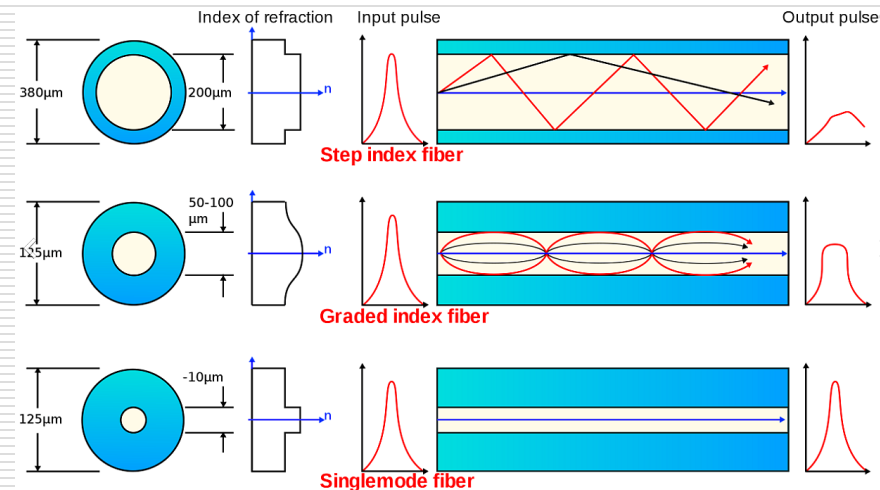


W światłowodzie wielomodowym fala o takiej samej długości fali może rozchodzić się wieloma drogami, zwanymi modami.

Różna prędkość modów w falowodzie \Rightarrow rozmycie paczki falowej – zniekształcenie i ograniczenie szybkości transmisji.

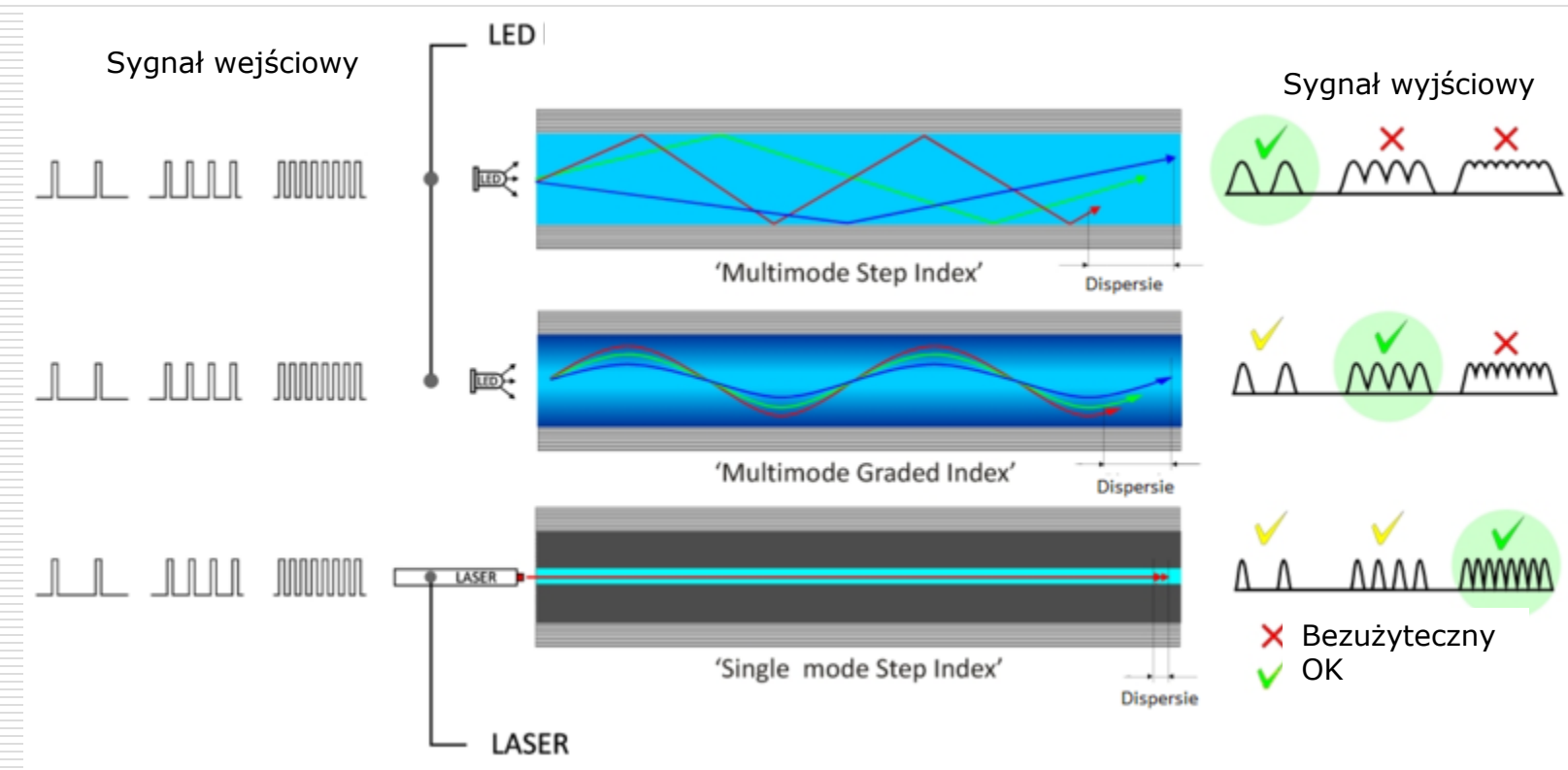
Rozchodzenie się światła w światłowodzie jednomodowym opisują równania Maxwell'a a nie prawa optyki geometrycznej.

Światłowody te stosowane są w dalekosiężnej telekomunikacji, bo do 100 km sygnał nie musi być regenerowany. Tłumienie w światłowodzie ze szkła Corning dla $\lambda = 1500 \text{ nm}$ jest rzędu 0,17 dB/km.



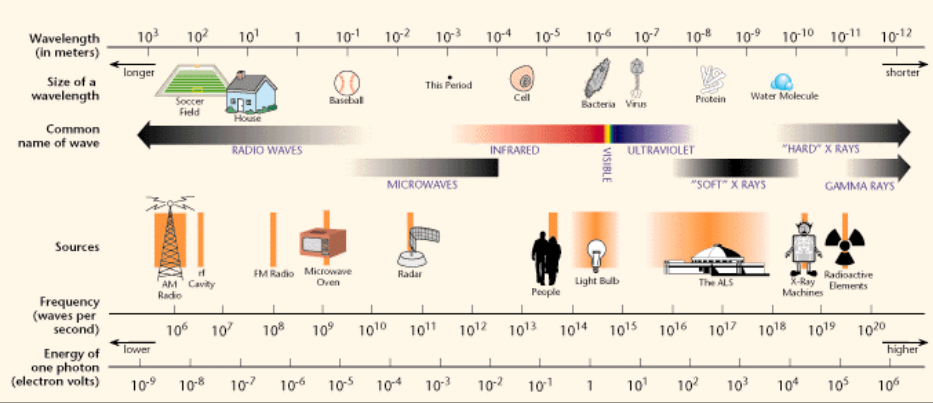
Ograniczenia transmisji światłowodowej:

- rozproszenie światła – fluktuacje gęstości rdzenia;
- uszkodzenia – mikro i makrozgięcia
- dyspersja (tzn. n zależy od f) – rozmycie impulsu

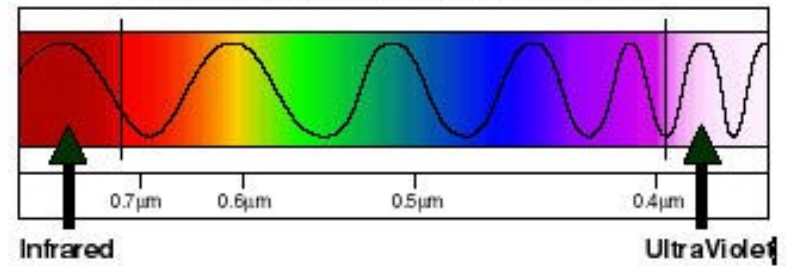


Widmo fali elektromagnetycznej

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

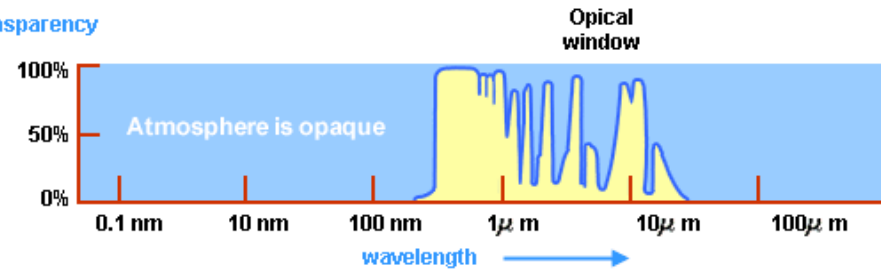


Visible Light Region of the Electromagnetic Spectrum

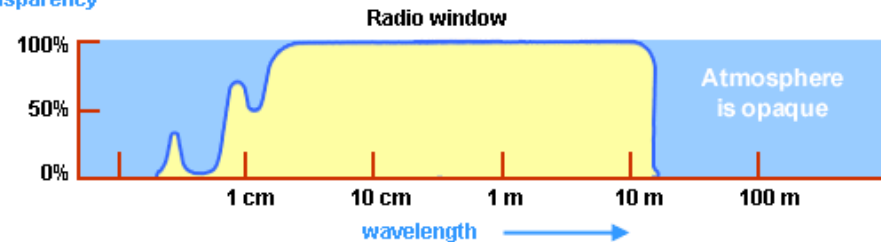


Percentage of radiation which reaches the Earth's surface

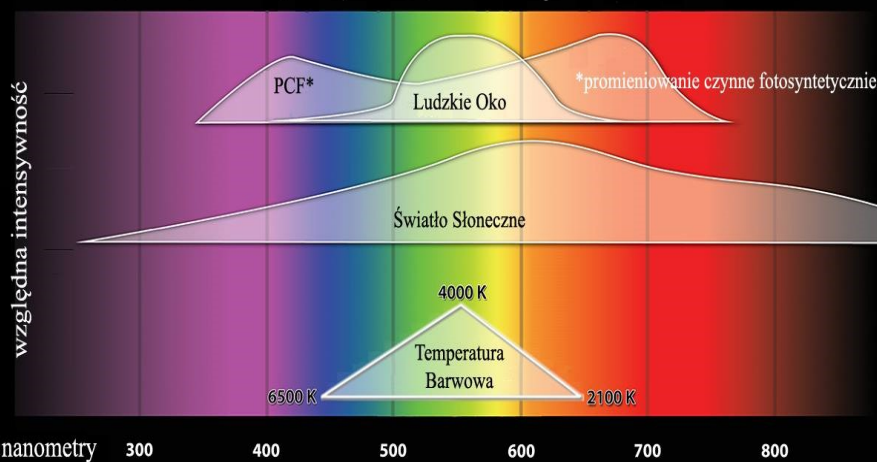
Transparency



Transparency



ultrafioletowy niebieski zielony czerwony podczerwony



Pomiar prędkości światła



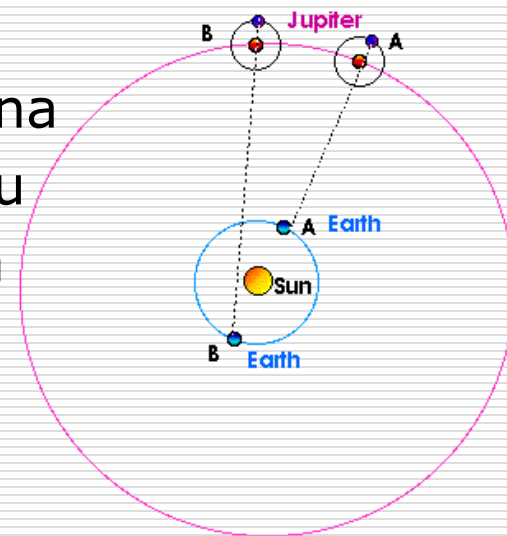
- Galileusz (1600r. ?) latarnie w odległości ok. 1,6 km



Wniosek: Jeśli nie nieskończona to niezwykle duża

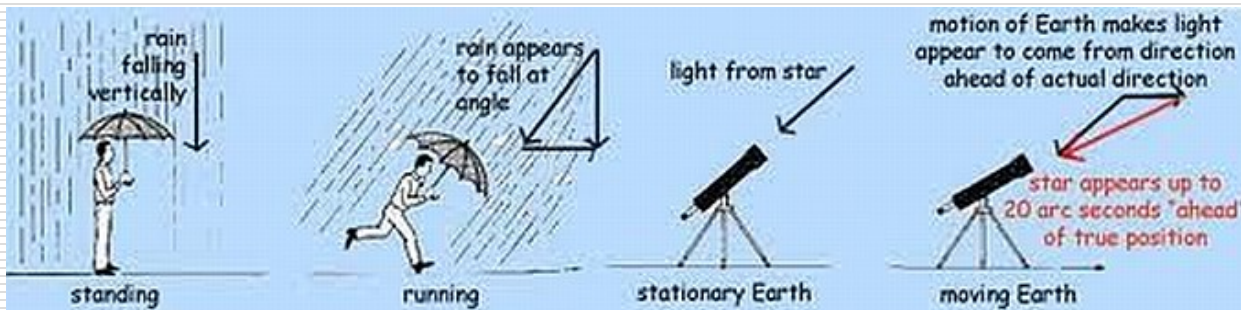
$$(t = 11 \cdot 10^{-6} \text{ s})$$

- O.Roemer (1675r.) - metoda astronomiczna zaćmienia księżyców Jowisza – co pół roku występuje różnica czasu wyjścia Io z cienia Jowisza – ok. 16,5 min.

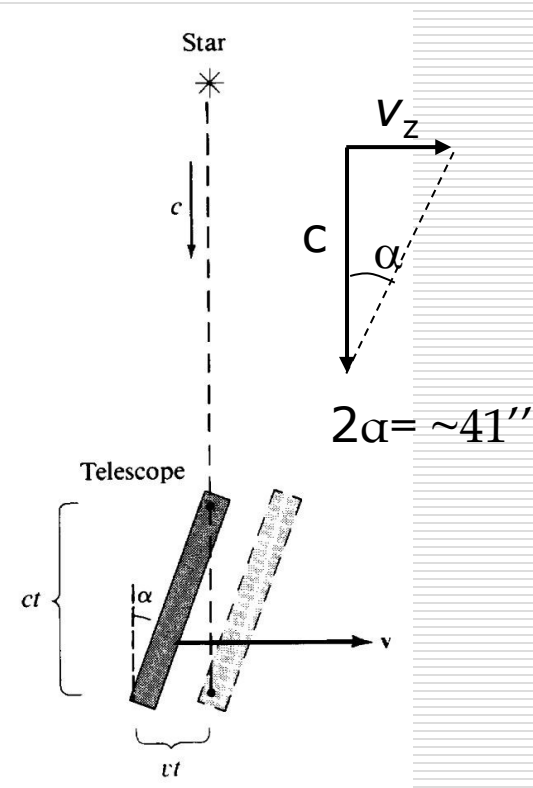


Wynik: ok. 214 000km/s

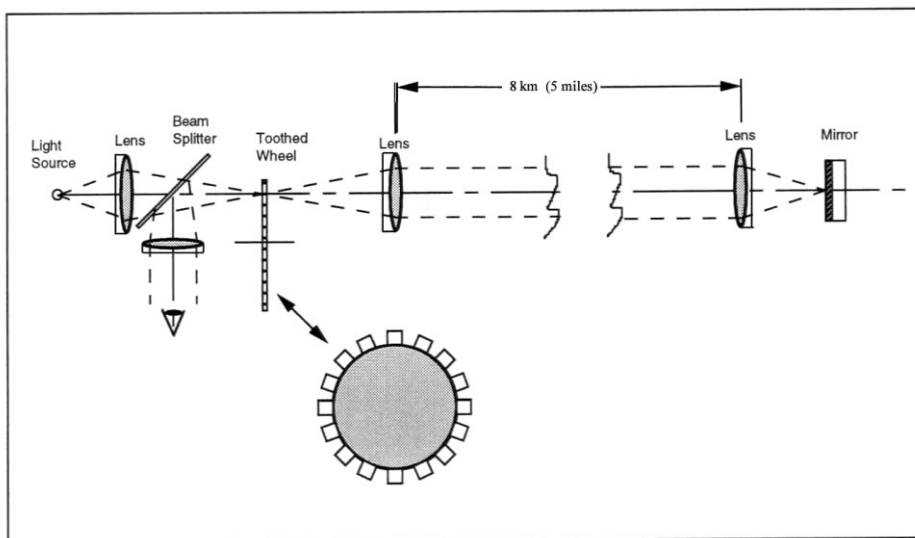
- J. Bradley (1726r.) - metoda astronomiczna – aberracja astronomiczna światła.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_Z}{c} \Rightarrow \text{Wynik: } 301\,000 \text{ km/s}$$



- H.L.Fizeau (1849r.)
obracające się koło zębate.



Wynik: 315 000 km/s

Date	Author	Method	Result (km/s)	Error (km/s)
1676	Olaus Roemer	Jupiter's satellites	214,000	
1726	James Bradley	Stellar Aberration	301,000	
1849	Armand Fizeau	Toothed Wheel	315,000	
1862	Leon Foucault	Rotating Mirror	298,000	+ -500
1879	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,910	+ -50
1907	Rosa, Dorsay	Electromagnetic constants	299,788	+ -30
1926	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,796	+ -4
1947	Essen, Gorden-Smith	Cavity Resonator	299,792	+ -3
1958	K. D. Froome	Radio Interferometer	299,792.5	+ -0.1
1973	Evanson et al	Lasers	299,792.4574	+ -0.001
1983		Adopted Value	299,792.458	

Od 1983 prędkość światła jest powiązana ze wzorcem metra i czasem 1 sekundy i wynosi (ex definitione):

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Źródło: *Review of particle physics*, Physics Letters **B592**, 15 lipiec 2004

Jest to wartość dokładna, służy do definicji metra

1 metr to droga, którą światło przebędzie w próżni w czasie 1/299 792 458 sekundy

	Częstość (Hz)	c (km/s)	
fotony γ	$1,5 \cdot 10^{24}$	299790	± 40
widzialne	$5,4 \cdot 10^{14}$	299792,4562	$\pm 0,0011$
podczerwień	$2,5 \cdot 10^{12}$	299792,2	$\pm 0,6$
mikrofale	10^{10}	299792,5	± 1
radar	$3 \cdot 10^8$	299794,2	$\pm 1,9$
radio	$7,5 \cdot 10^7$	299795	± 30

[wniosek z obserwacji gwiazd rozblyskowych: światło widzialne i fale radiowe dobiegają do Ziemi jednocześnie \Rightarrow prędkość jednakowa z dokładnością 10^{-7}]

Krótką historia światła

V w. pne – pitagorejczycy: bierne obserwacje przyrody + spekulacje filozoficzne, znano podstawy optyki geometrycznej, brak danych o naturze światła,

konieczny eter bo zjawiska nie mogą zachodzić „w niczym”

III w. pne – Ptolemeusz: **Kąt** załamania proporcjonalny do kąta padania,

Arystoteles – teoria barw: światło białe i czarne rozchodzi się w eterze

X/XI w. ne Arabowie: Al.-Hazen obalił prawo Ptolemeusza o kątach padania i załamania; sekcja oka

XIII w. Witelo (PL): odwracalność biegu światła, opis budowy oka, zebranie wiedzy optycznej w jednym dziele.

XVII w. Kartezjusz (F) i niezależnie Snellius (NL)

Od III w pne

Prawo załamania: $\sin\alpha / \sin\beta = \text{const}$

Światło podobnie jak dźwięk jest **falą podłużną** rozchodzącą się w eterze.

XVIII w. Newton (GB) – **teoria cząsteczkowa** światła, rozszczepienie światła w pryzmacie – **nowa teoria barw**

Hook (GB) - **teoria falowa** (analogia dźwięku), brak wyjaśnienia polaryzacji

XIX w. 1817 Young (GB) – **światło jest falą poprzeczną**, rozchodzącą się w eterze

1864 Maxwell (GB) teoria fal elektromagnetycznych (w tym światła), eter nie jest niezbędny

1881 Michelson, Morley (USA) udowodnienie że **eter nie istnieje**

1899 Lenard (D) efekt fotoelektryczny **nie do wyjaśnienia** na gruncie **teorii falowej**

XX w. 1900 Planck (D) – teoria kwantów

1905 Einstein (D) – **teoria fotonów**

1923 Compton (USA) potwierdzenie, że foton, to kwant energii

1924 de Broglie (F) – cechy falowe wykazują wszystkie cząstki materialne

A ZATEM ŚWIATŁO MA CECHY FALI I CZĄSTECZKI JEDNOCZEŚNIE

20... ??? (?) -?