



dr inż. Magdalena Budnarowska



m.budnarowska@we.umg.edu.pl

Teams: Magdalena Budnarowska

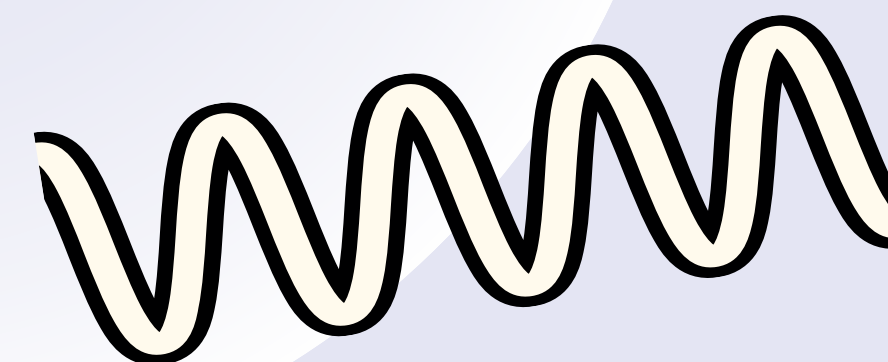
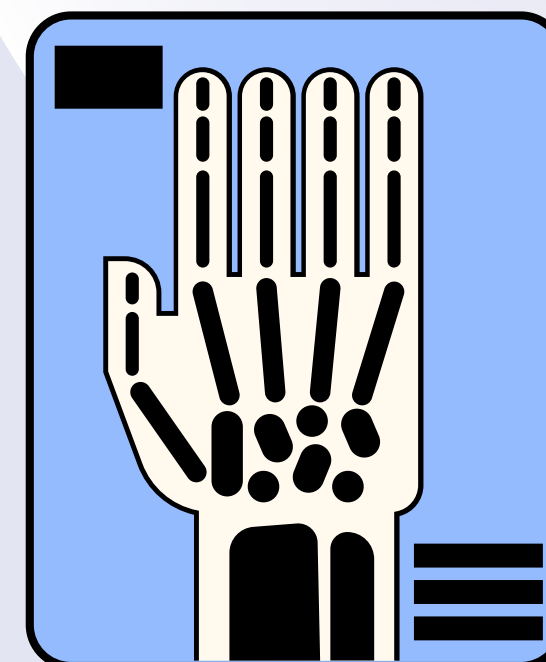
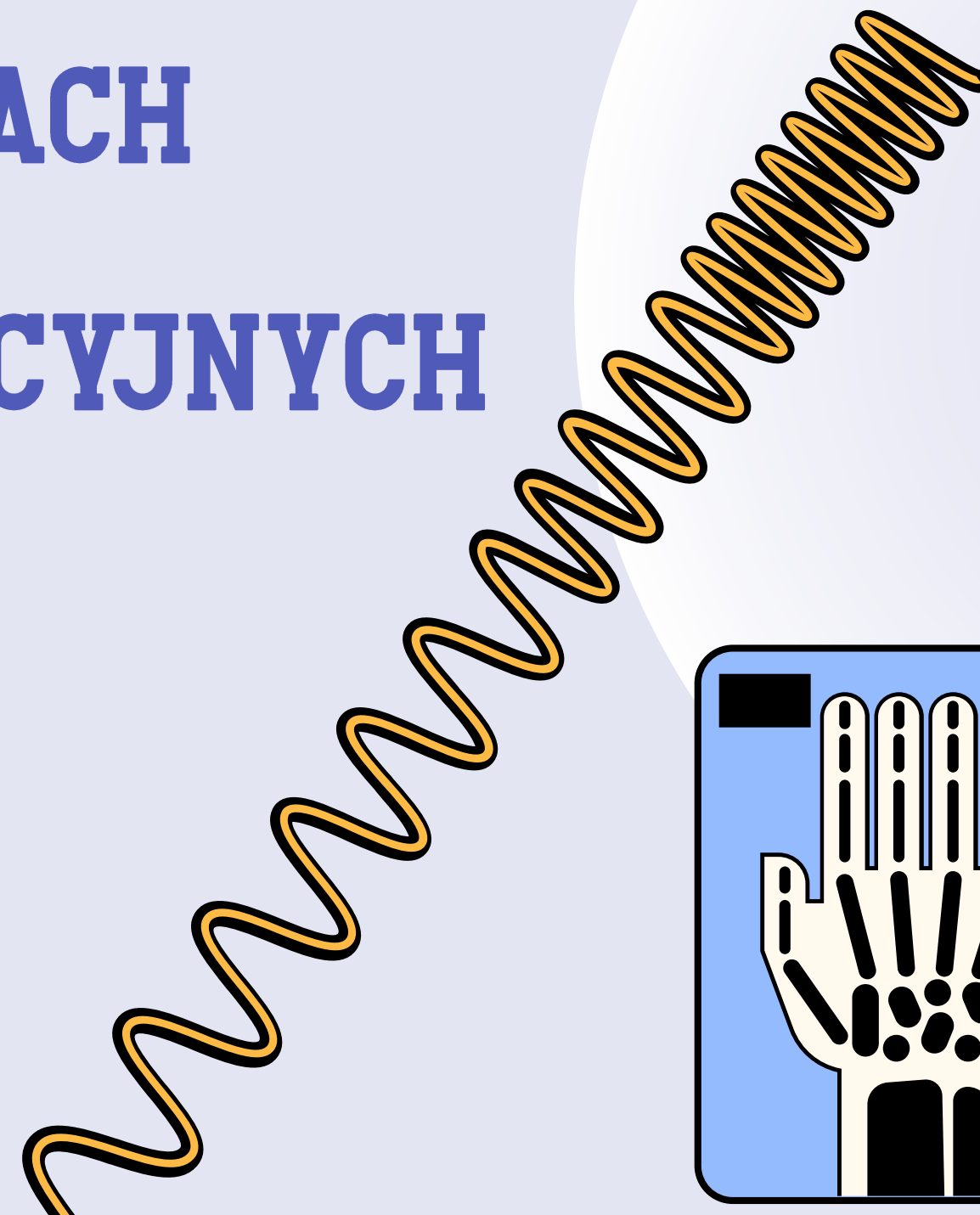
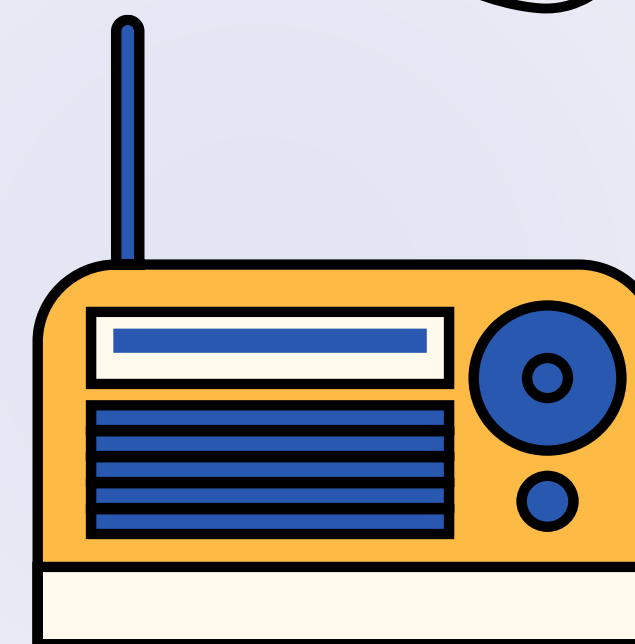
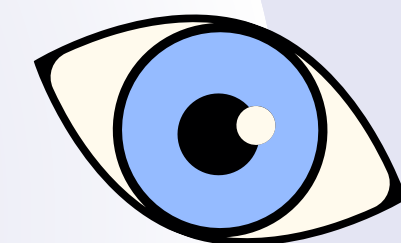
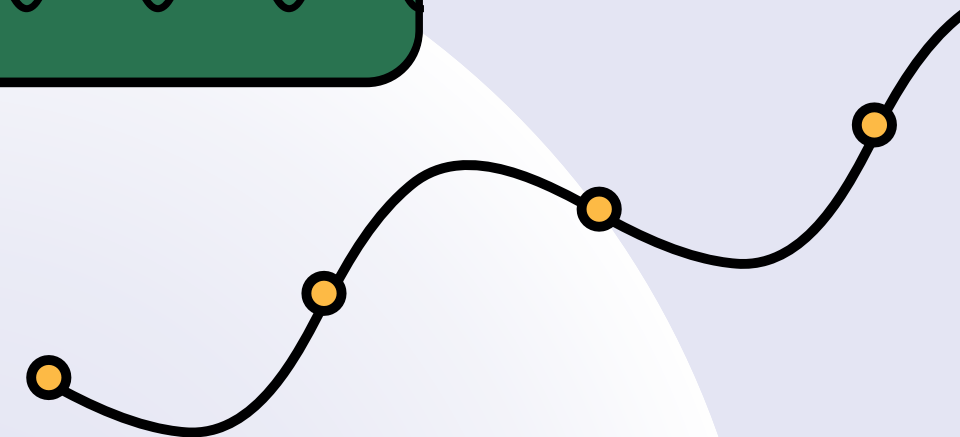
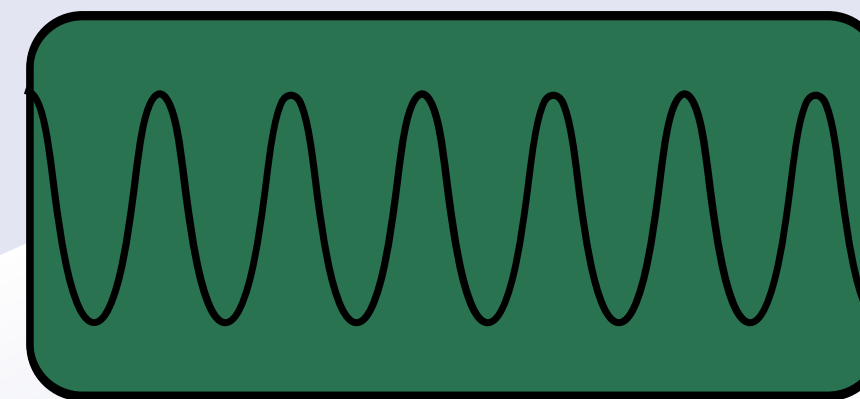
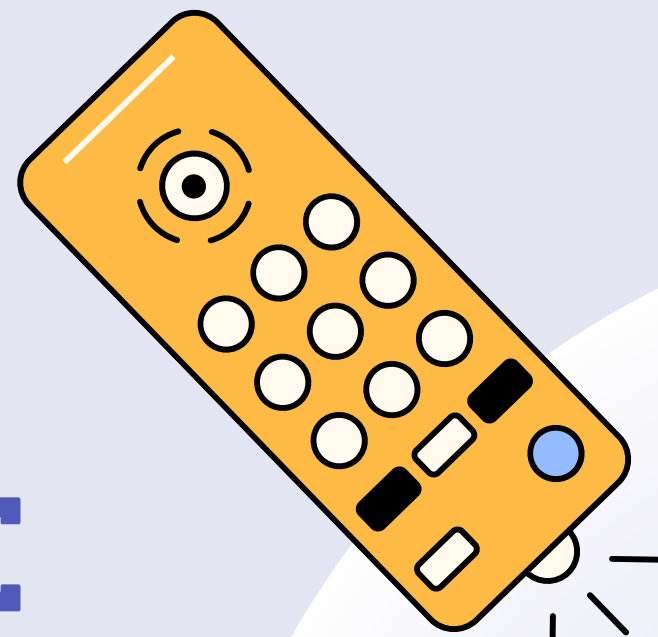
Discord: magdalenabudnarowska

**Ochrona elektroniki
przed atakami
elektromagnetycznymi**

**Skuteczność
ekranowania wnętrza
metalowych obudów
z otworami**

**Metamateriały
jako absorbery
promieniowania EM**

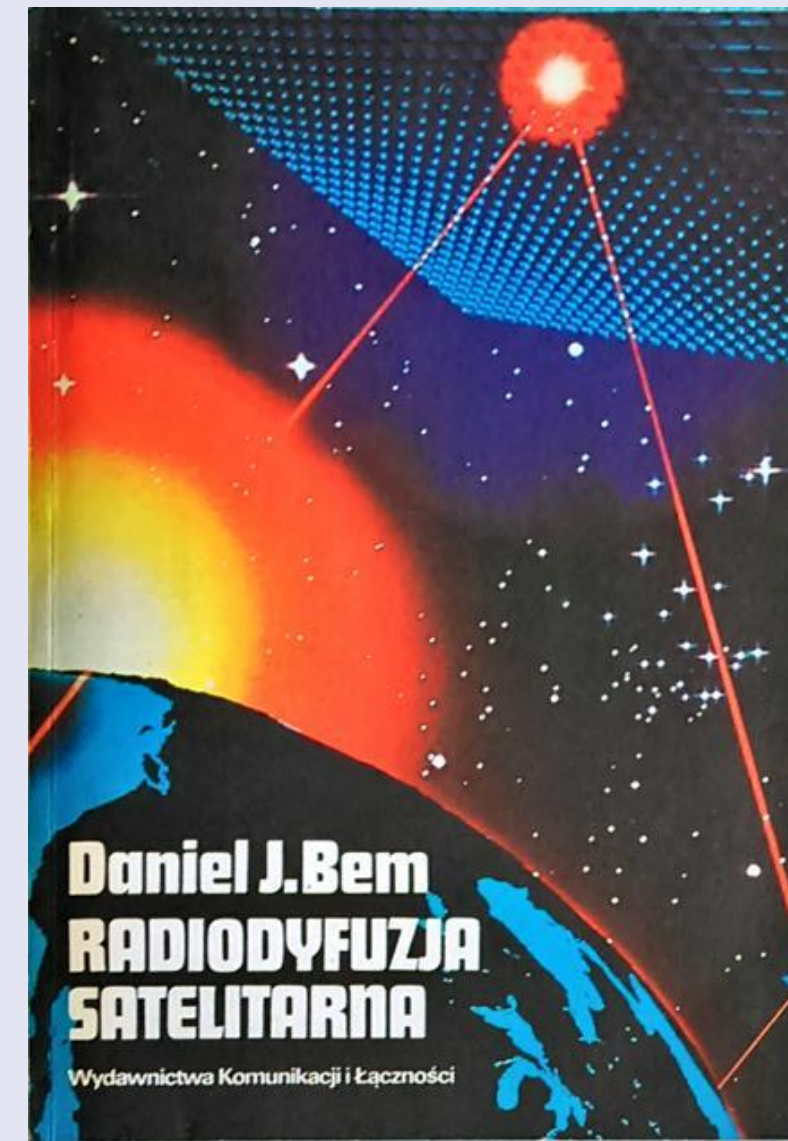
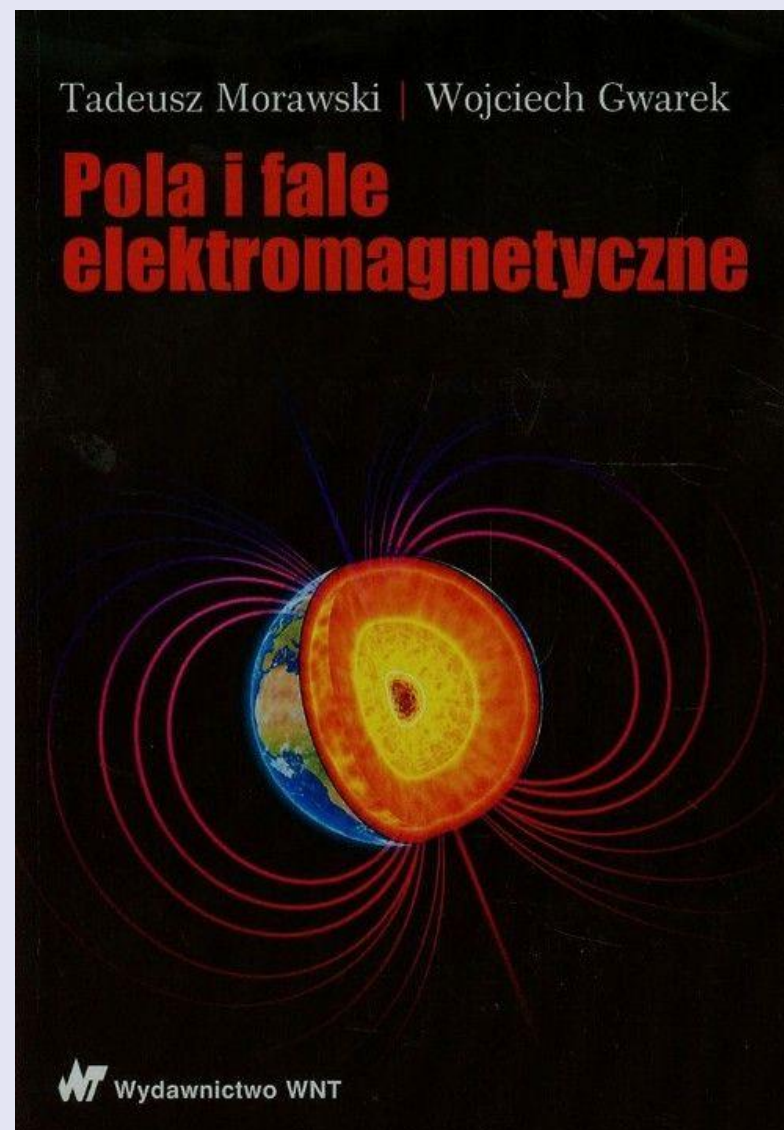
UKŁADY MIKROFALOWE W SYSTEMACH RADIOKOMUNIKACYJNYCH

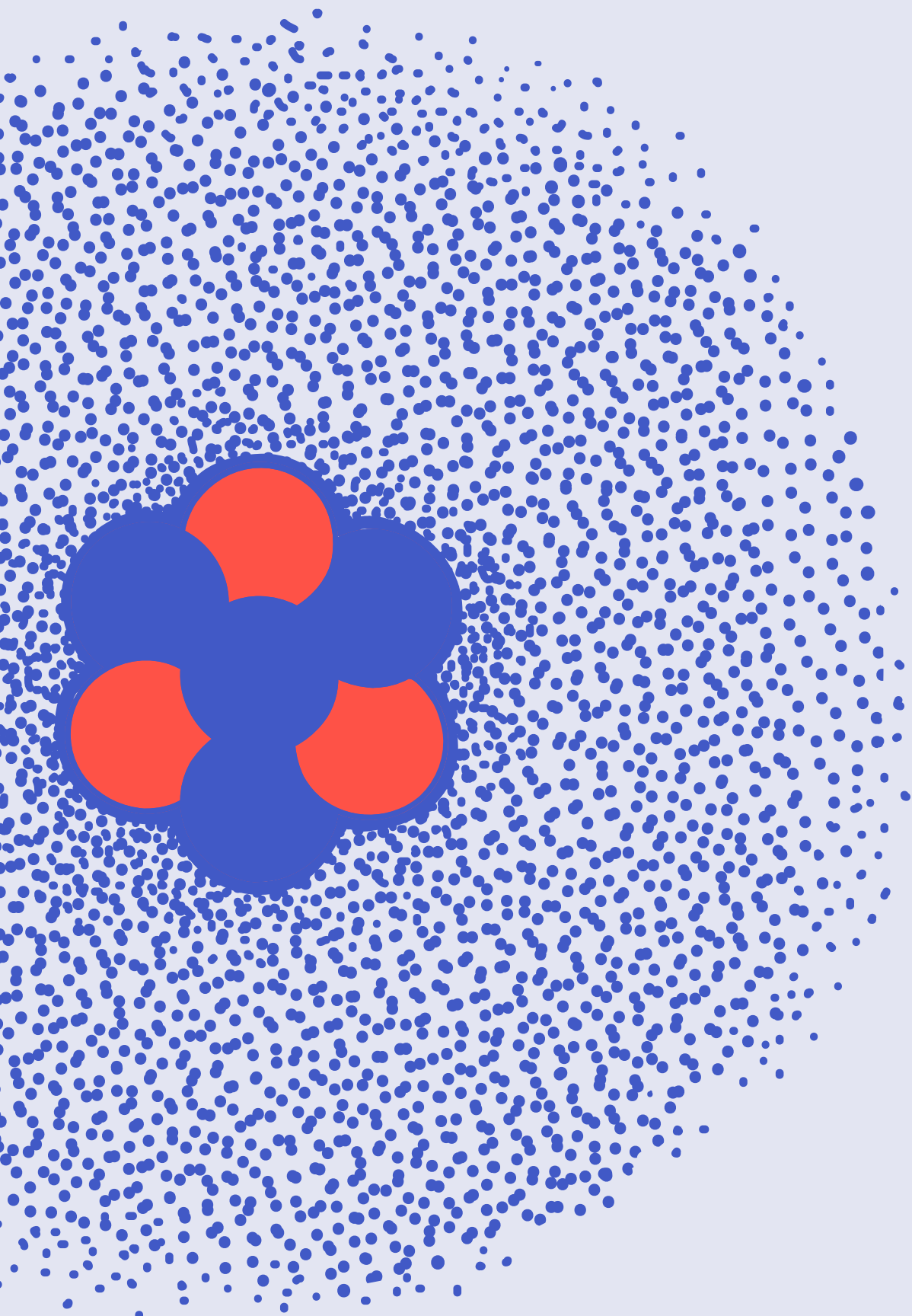


Literatura do przedmiotu UMwSR

1. J. A. Dobrowolski, Technika wielkich częstotliwości, Oficyna Wyd. P. W. , Warszawa 2001
2. T. Morawski, W. Gwarek, Pola i fale elektromagnetyczne, WNT, Warszawa 1998
3. R. Litwin, M. Suski, Technika mikrofalowa, WNT Warszawa 1972
4. W. Czarczyński, Podstawy techniki mikrofalowej, Wyd. P. Wrocław 2003
5. J. Thuery, Microwaves, Industrial, Scientific and Medical Applications, Artech House Boston 1992
6. D. J. Bem, Radiodyfuzja satelitarna, WKiŁ, Warszawa 1990
7. J. Chramiec, Liniowe Elementy i Układy Mikrofalowe, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia, 2010.

Pozycje 1-4 zawierają ogólne wiadomości z zakresu UmwSR





PLAN PRZEDMIOTU

- 01** Zasady zaliczenia przedmiotu.
- 02** Wstęp do techniki mikrofalowej w radiokomunikacji.
- 03** Linie transmisyjne w technice mikrofalowej.
- 04** Pasywne elementy mikrofalowe.
- 05** Anteny mikrofalowe. Szyki anten.
- 06** Integracja anten z torami RF.
- 07** Wykres Smitha i dopasowanie linii transmisyjnych.
- 08** Egzamin.

01 Zasady zaliczenia przedmiotu

Egzamin:

- Termin 0:** Egzamin ustny z puli 60 pytań podzielonych na 3 poziomy trudności. Każdy student losuje 3 pytania (po jednym pytaniu z każdego poziomu trudności).
Pula pytań jest znana (dostępna od 10 marca na: mbudnarowska.com.pl)
- Termin 1:** Egzamin pisemny z całego materiału obejmującego wykład (brak puli pytań)
- Termin 2 (poprawkowy):** Egzamin pisemny z całego materiału obejmującego wykład

Fale

Fale to zaburzenia przenoszące energię z jednego miejsca do drugiego.

Fale mechaniczne

Fale mechaniczne, np. fale dźwiękowe, wymagają medium (cząstek) do przemieszczania się. Fale dźwiękowe i wodne są przykładami fal mechanicznych.

Fale elektromagnetyczne

Nie wymagają medium do podróżowania i mogą podróżować przez próżnię. Widoczne światło, fale radiowe i promienie gamma to niektóre przykłady fal elektromagnetycznych.

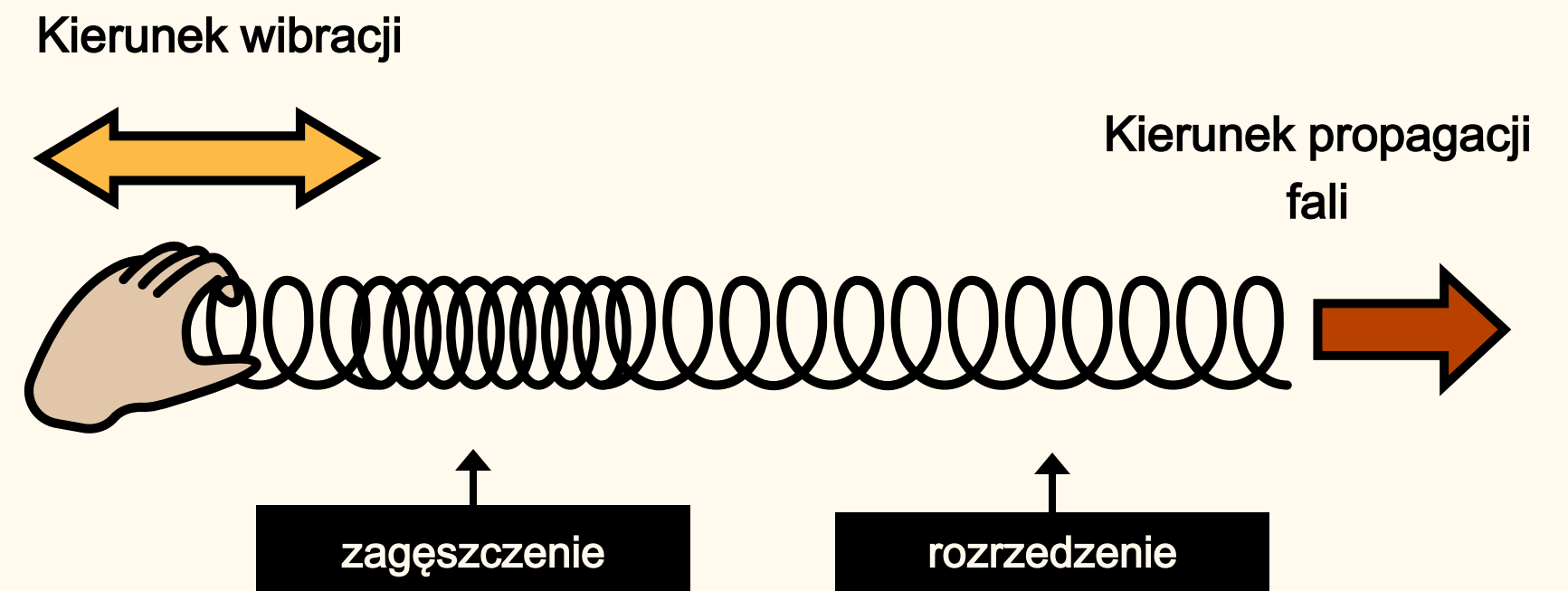
FALE MECHANICZNE:

Podłużne

Fale mechaniczne są ogólnie podzielone na dwa główne typy: **fale podłużne** i **poprzeczne**.

Fale podłużne

- Wibracje występują równoległe do kierunku, w którym porusza się fala
- Obszary **zagęszczenia** i **rozrzedzenia** przemieszczają się przez medium

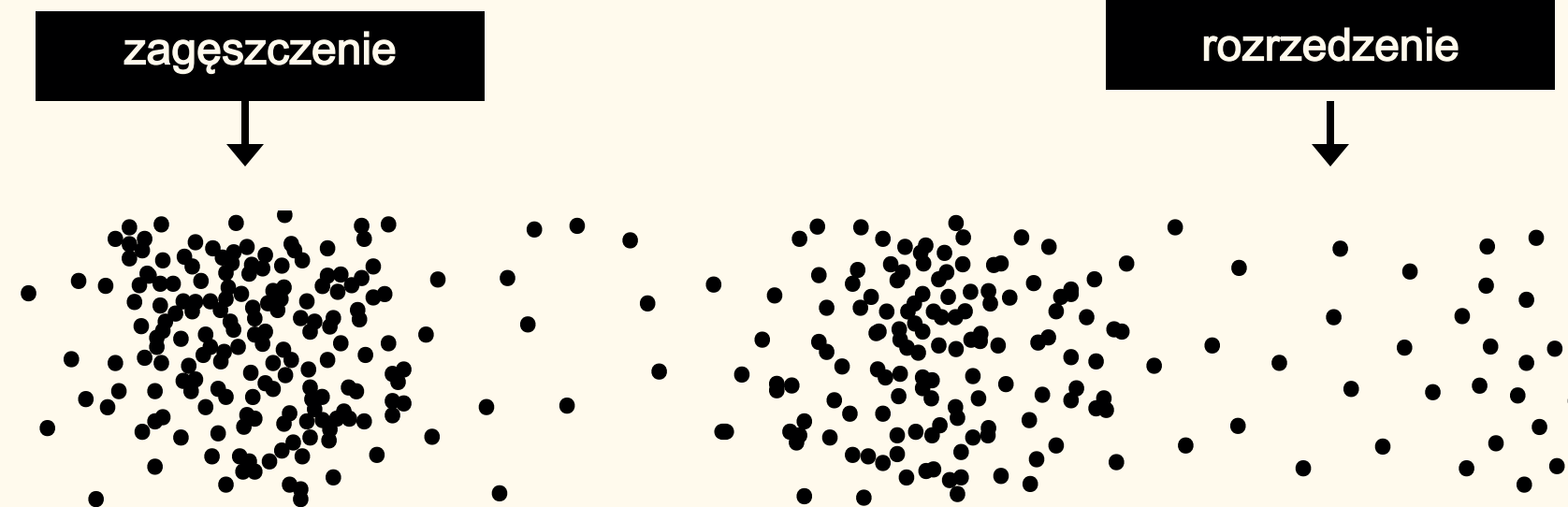


PUSHING A SLINKY BACKWARDS AND FORWARDS
PRODUCES A LONGITUDINAL WAVE.

FALE MECHANICZNE: Podłużne

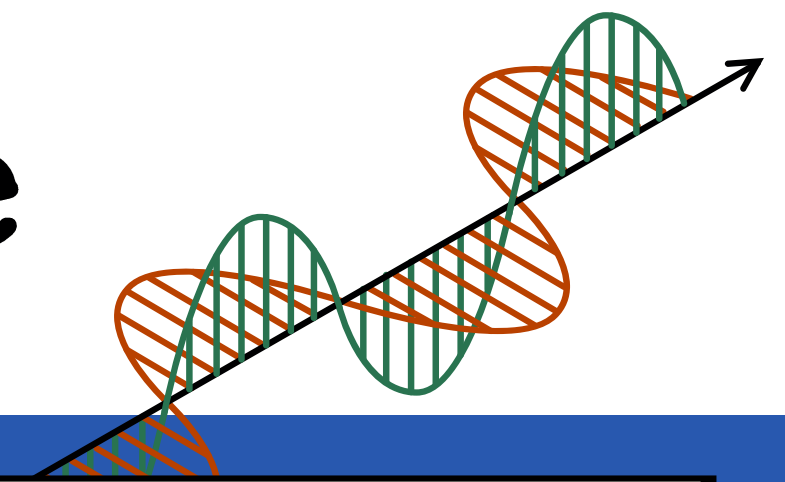
Fala dźwiękowa jest falą podłużną. Powstaje gdy powietrze otaczające wibrujący obiekt również wibruje.

Cząsteczki powietrza wytwarzają szereg zagęszczeń i rozrzedzeń, które przemieszczają się i wchodzą do ucha naszego rozmówcy.



DŹWIĘK PRZEMIESZCZA SIĘ PRZEZ WIBRACJE CZĄSTEK POWIETRZA.

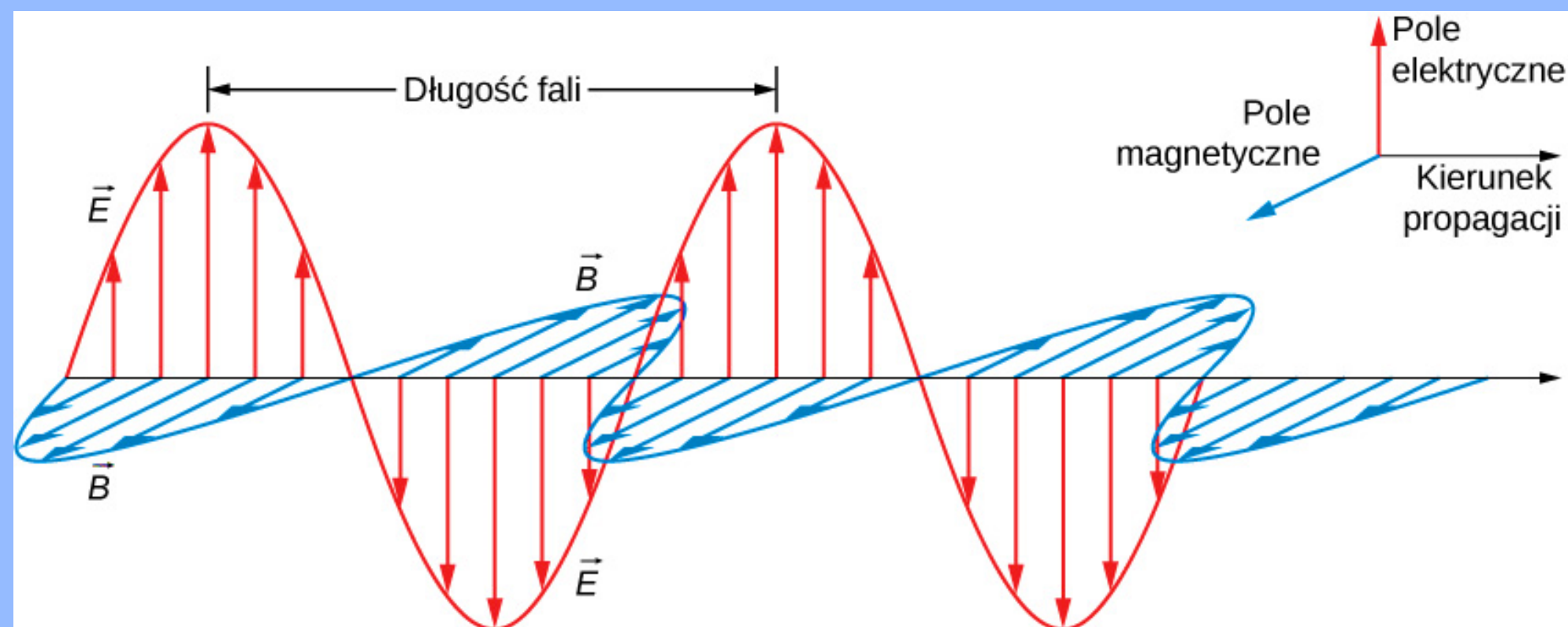
Fale elektromagnetyczne



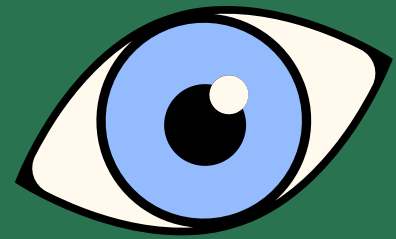
Fale elektromagnetyczne (EM) to fale poprzeczne.

Charakteryzują się oscylującymi polami elektrycznymi i magnetycznymi pod kątem prostym do kierunku propagacji fali.

Fale te przemieszczają się z prędkością $3 \cdot 10^8$ m/s w powietrzu.



Światło też jest falą EM!



Jak to jest z tym światłem?

Światło oczywiście rozchodzi się w próżni. Dociera do nas z niesłychanie odległych galaktyk. Zresztą z kosmosu dociera do nas nie tylko światło, ale i inne rodzaje fal elektromagnetycznych (fale radiowe, podczerwień, promieniowanie rentgenowskie, promieniowanie gamma itd.). Dziś wiemy, że fala elektromagnetyczna nie wymaga do rozchodzenia się żadnego ośrodka.

W szklanym słoju znajduje się dzwonek elektryczny. W miarę wypompowywania powietrza ze słoja dzwonek cichnie, aż staje się całkiem niesłyszalny, co jest dowodem doświadczalnym na to, że fala akustyczna potrzebuje ośrodka.

Natomiast światło rozchodzi się zarówno w powietrzu, jak i w próżni – obraz dzwonnika nie znika, gdy wypompujemy powietrze.



Właściwości fal EM

Przenoszą energię

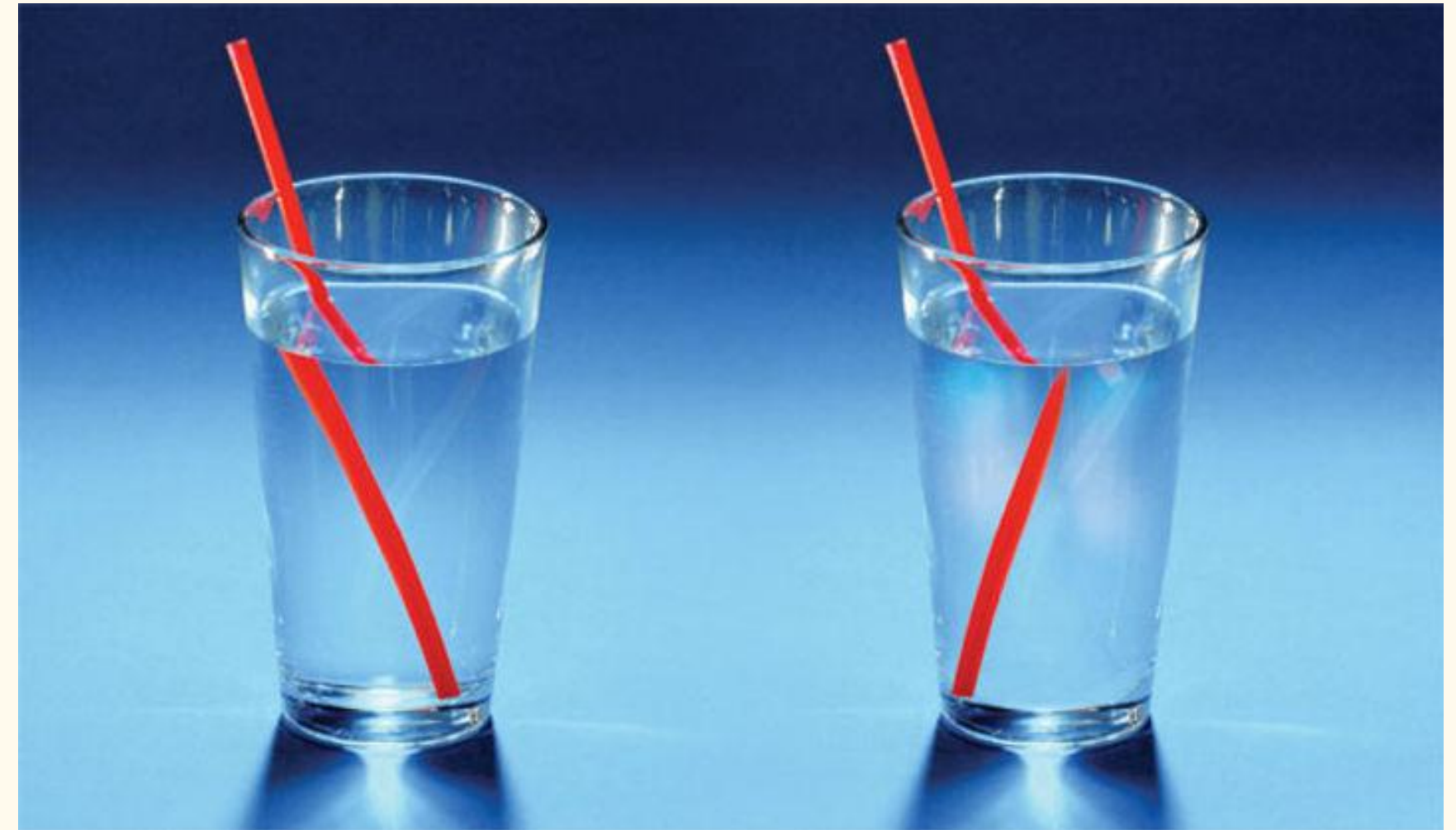
Są falami poprzecznymi

Rozchodzą się w powietrzu z prędkością $3 \cdot 10^8$ m/s

Odbijają się od metali

W pewnych warunkach mogą nakładać się na siebie i w wyniku tego osłabiać lub wzmacniać

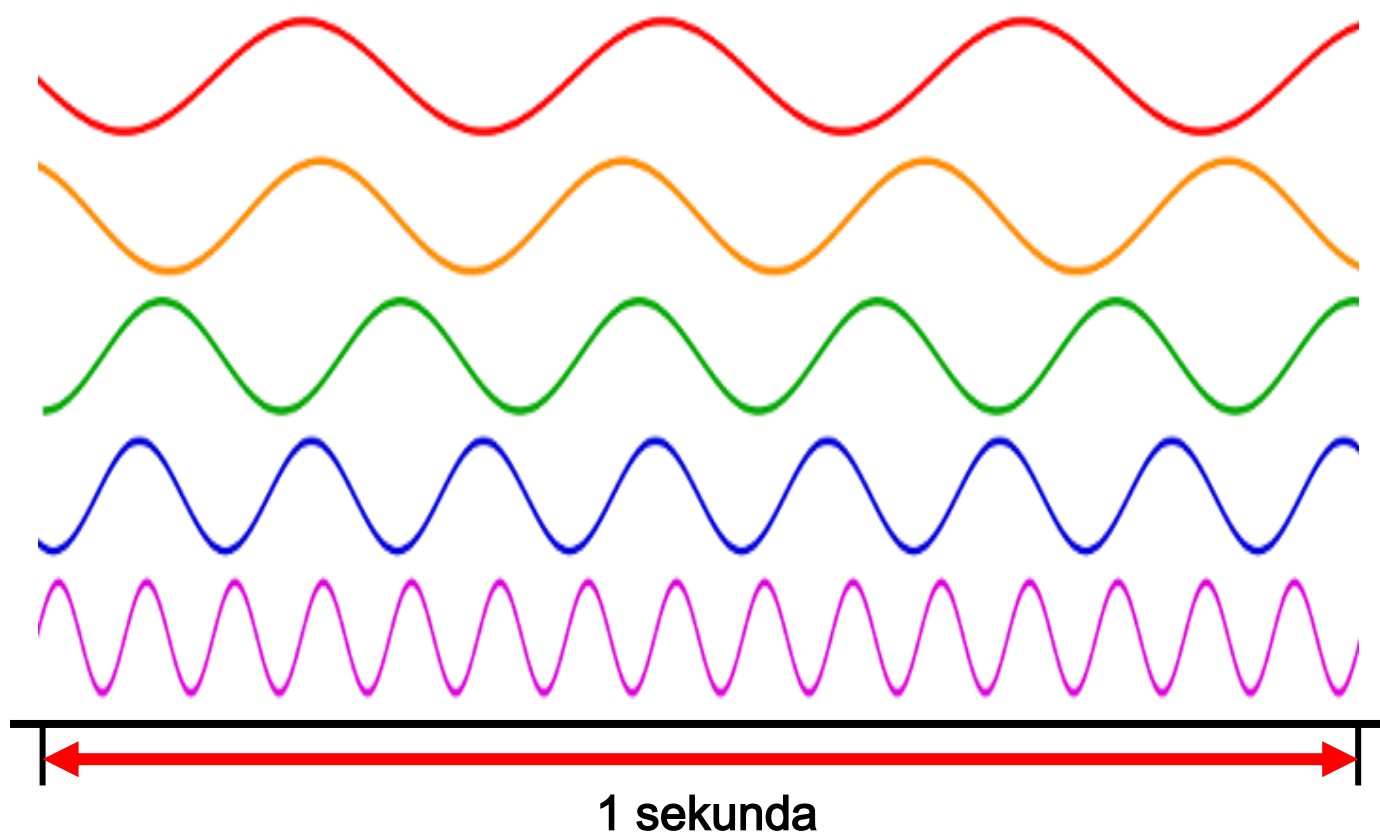
Załamują się przy przejściu między różnymi ośrodkami



Odległość reprezentująca pełny cykl fali. Można go zmierzyć od szczytu do szczytu, od koryta do koryta lub dowolnych dwóch kolejnych punktów w cyklu fali.

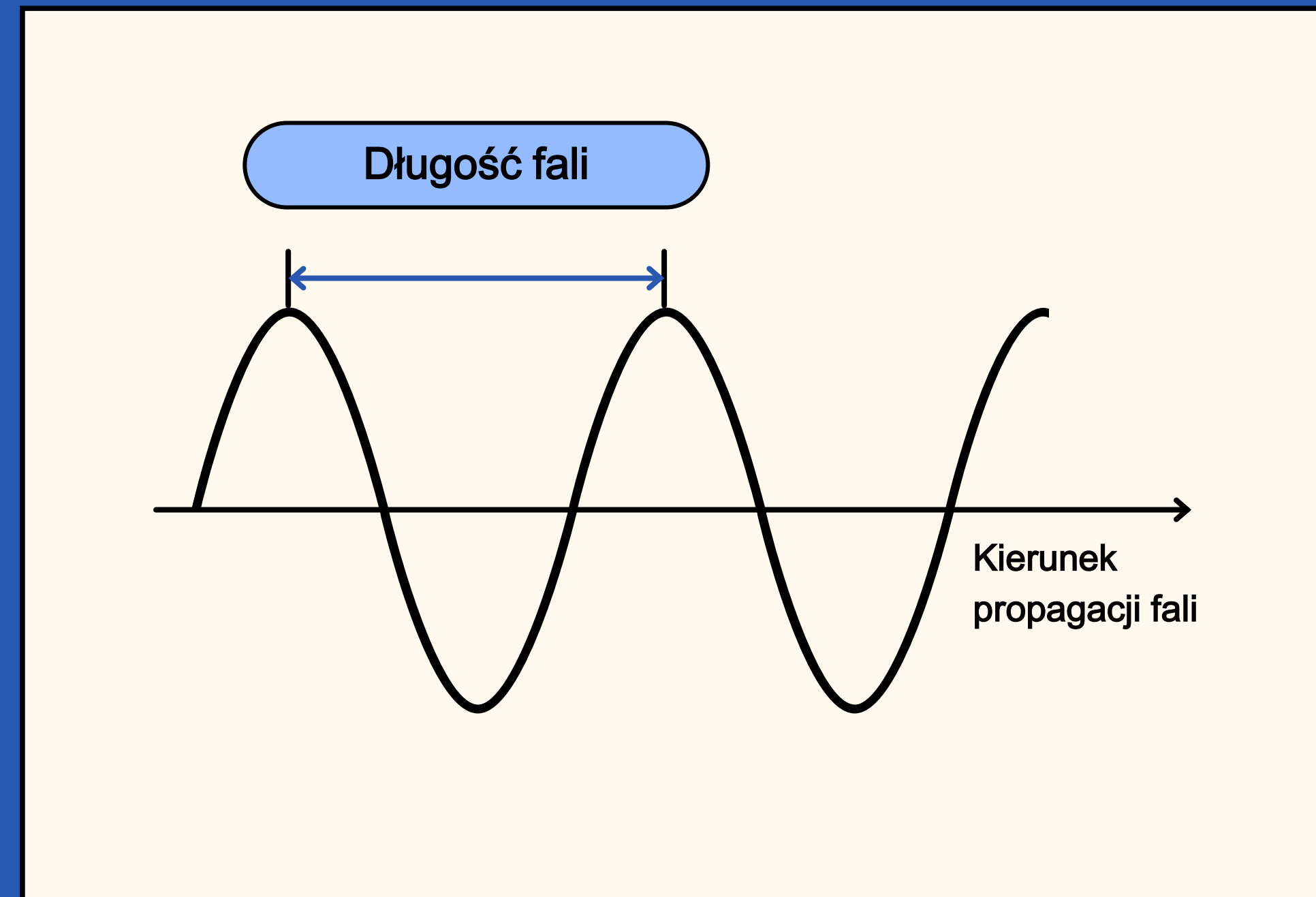
Jednostką długości fali jest metr (m).

Częstotliwość fal EM



Długość fali

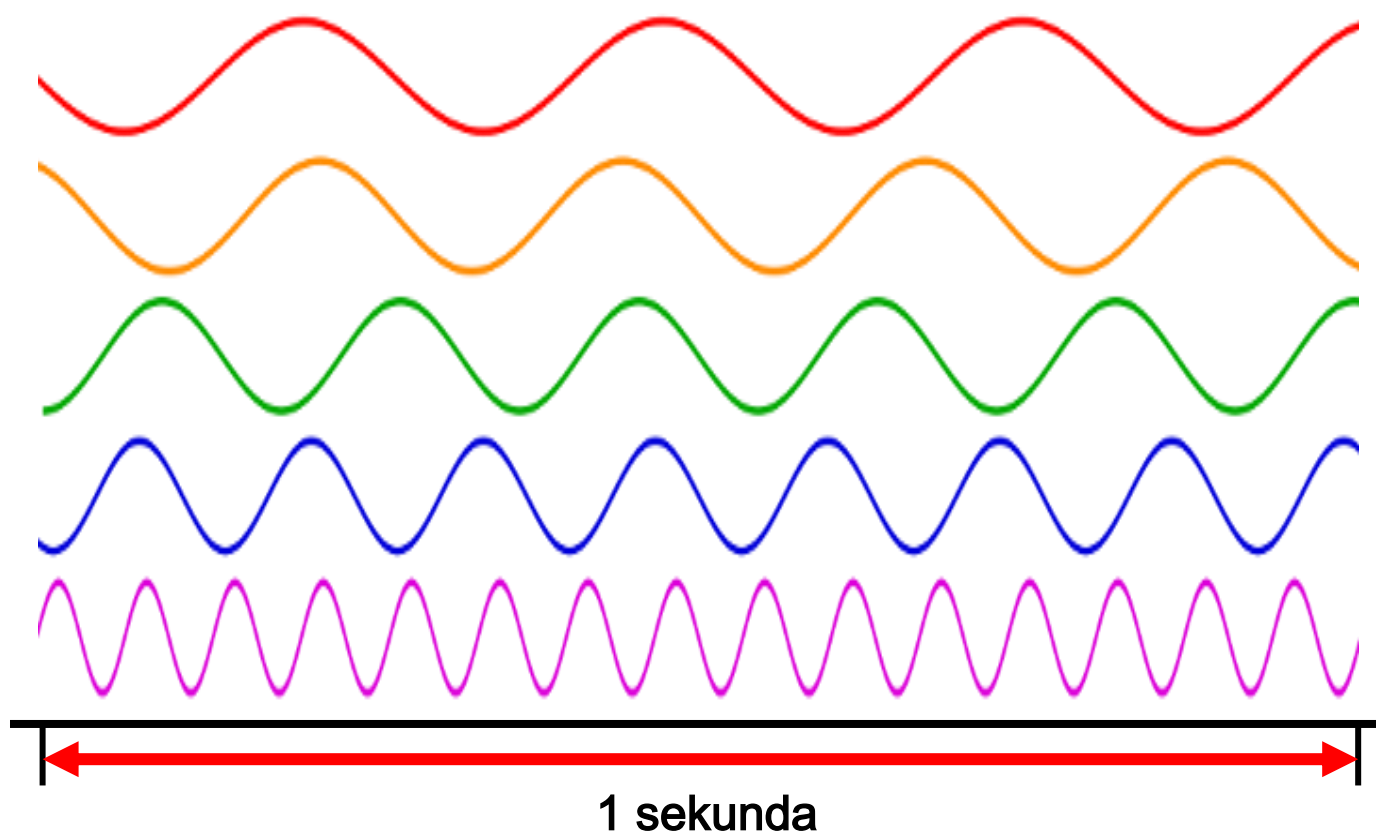
(λ , grecka litera lambda)



Jest to liczba fal przechodzących przez określony punkt na sekundę.

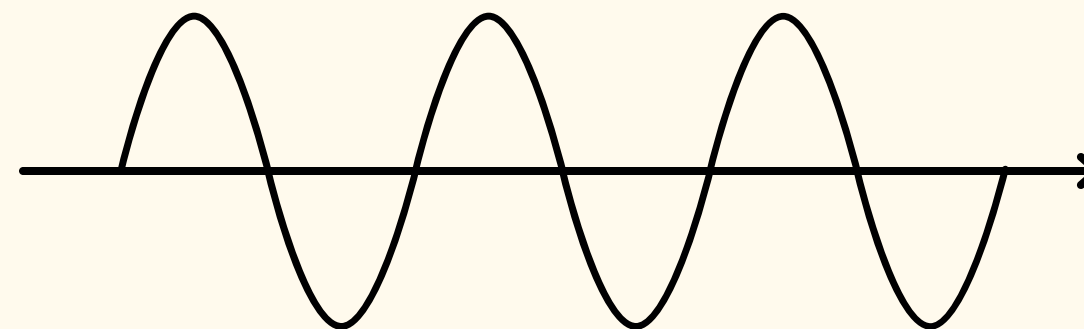
Jednostką częstotliwości jest herc (Hz), który jest równy 1 cyklowi na sekundę (1 / s).

Częstotliwość fal EM

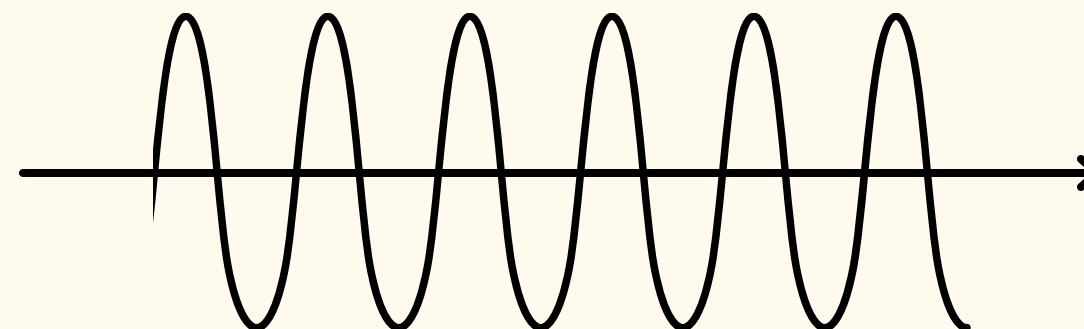


Częstotliwość

Niska częstotliwość



Wysoka częstotliwość

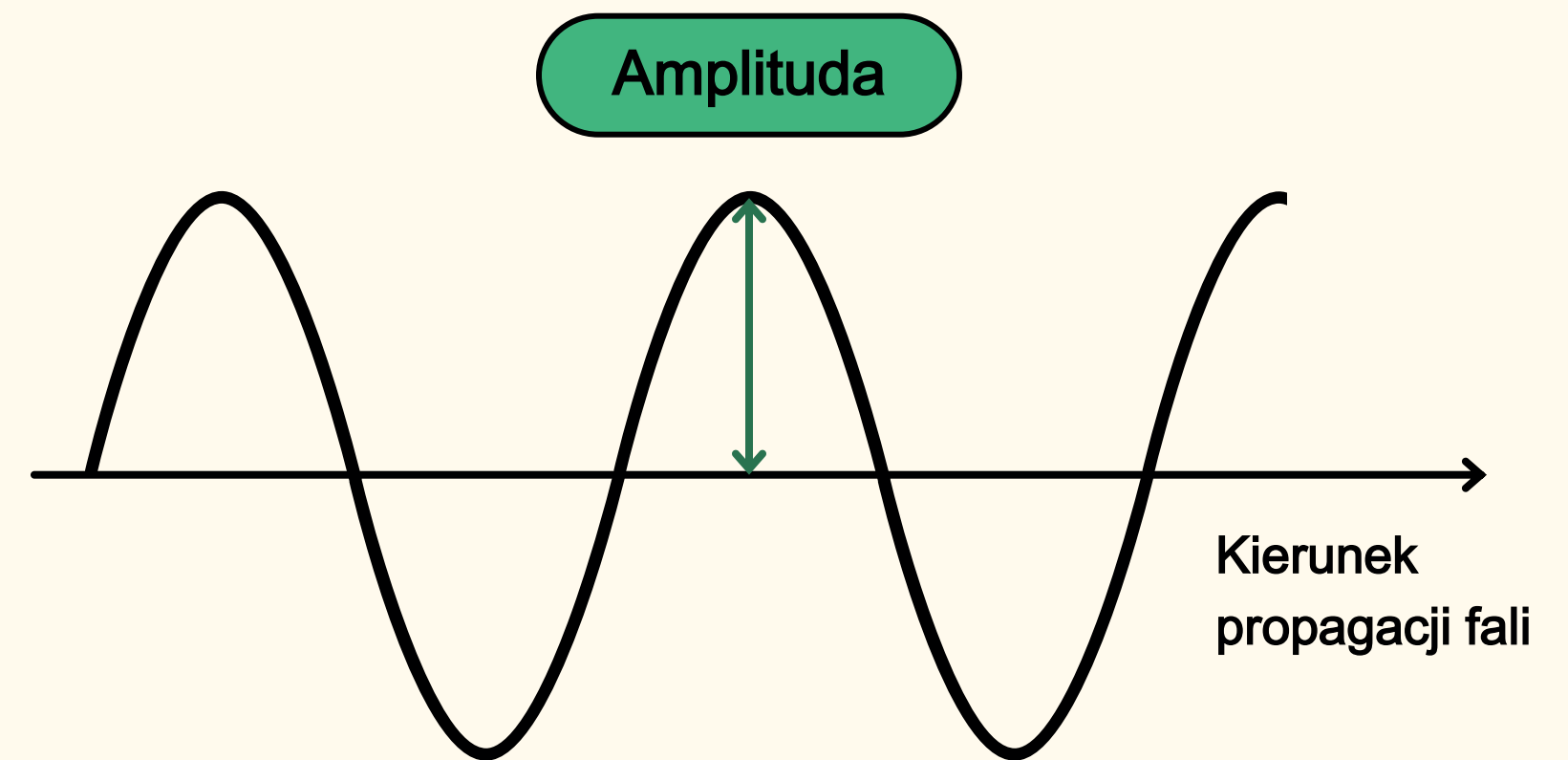


Amplituda

Jest to maksymalne wychylenie fali od jej pozycji spoczynkowej.

Reprezentuje wysokość fali.

Jednostką amplitudy (A) są metry (m).

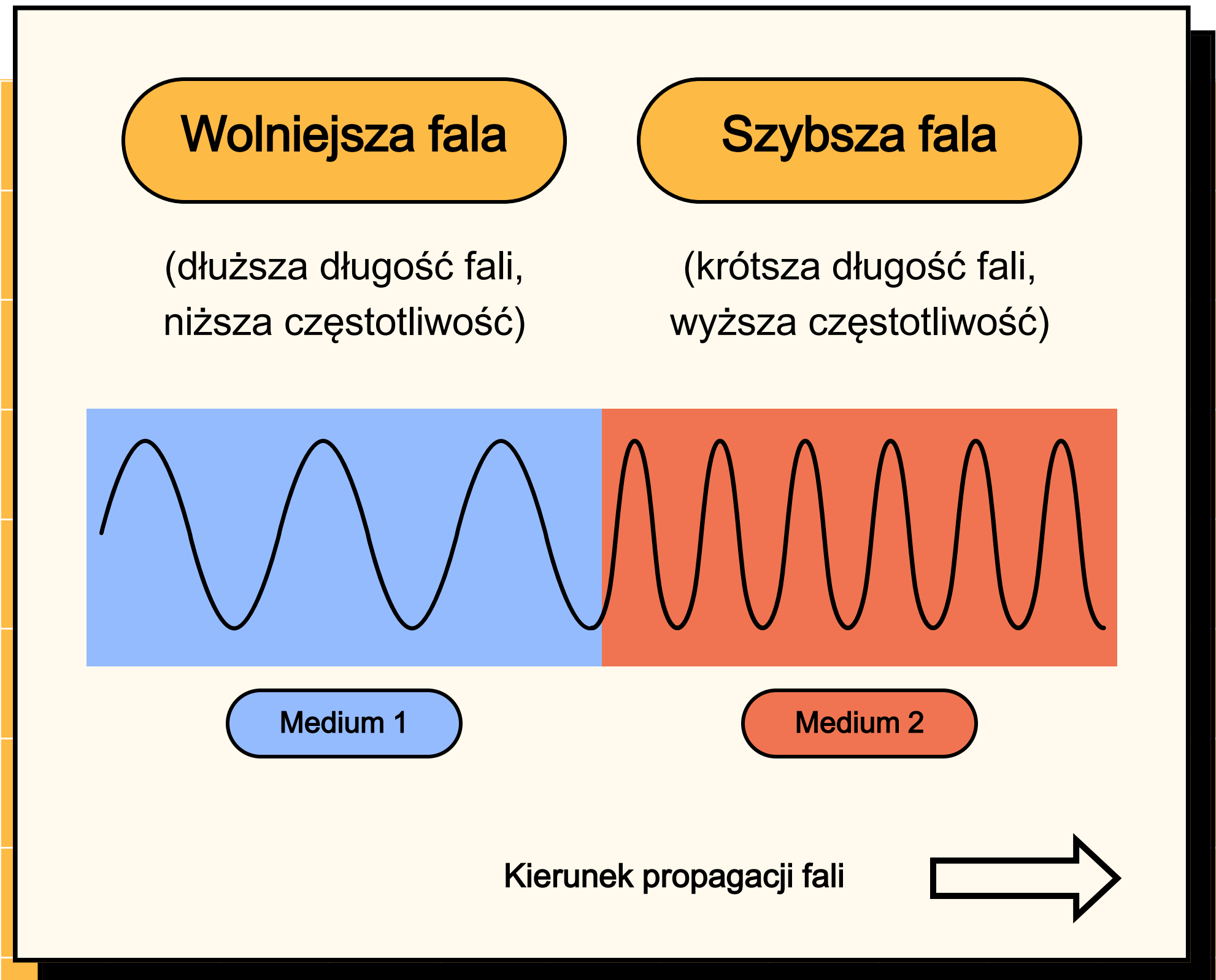


Prędkość fali

Prędkość fali lub prędkość falowa jest definiowana jako odległość, jaką fala pokonuje na sekundę.

Możemy również zdefiniować prędkość fali jako szybkość, z jaką energia jest przenoszona przez medium.

Jednostką prędkości fali są metry na sekundę (m/s).



Prędkość fali EM w różnych ośrodkach

Prędkość fali EM w danym materiale można obliczyć ze wzoru:

$$v = \frac{c}{n}$$

gdzie:

c – prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^8$ m/s),

n – współczynnik załamania ośrodka.

Współczynnik załamania n zależy od **przenikalności elektrycznej** ϵ_r i **przenikalności magnetycznej** μ_r

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

gdzie:

• ϵ_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka,

• μ_r – względna przenikalność magnetyczna ośrodka.

Ponieważ w większości materiałów $\mu_r \approx 1$ to **współczynnik załamania jest głównie zależny od ϵ_r .**

ośrodek	ϵ_r
próżnia	1
powietrze	1,0006
lód	100
papier	3,5
alkohol metylowy	30

Im większy współczynnik załamania, tym **wolniejsza** fala EM w danym ośrodku.

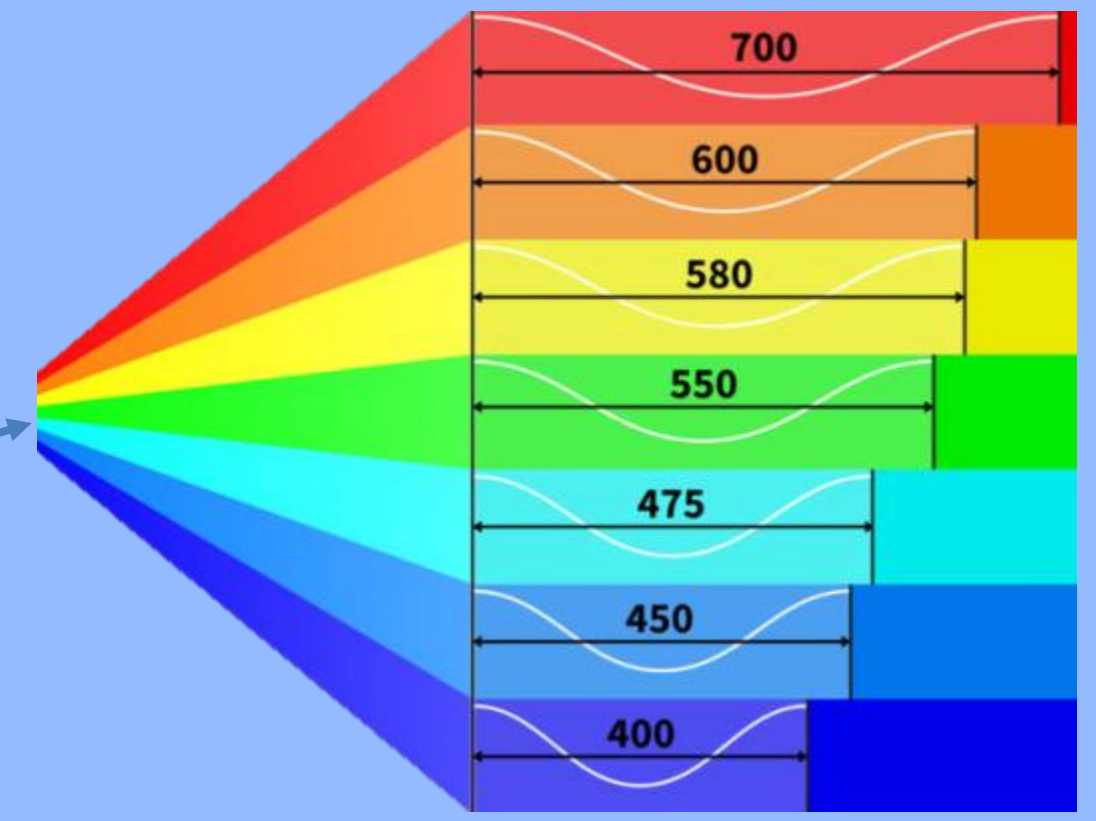
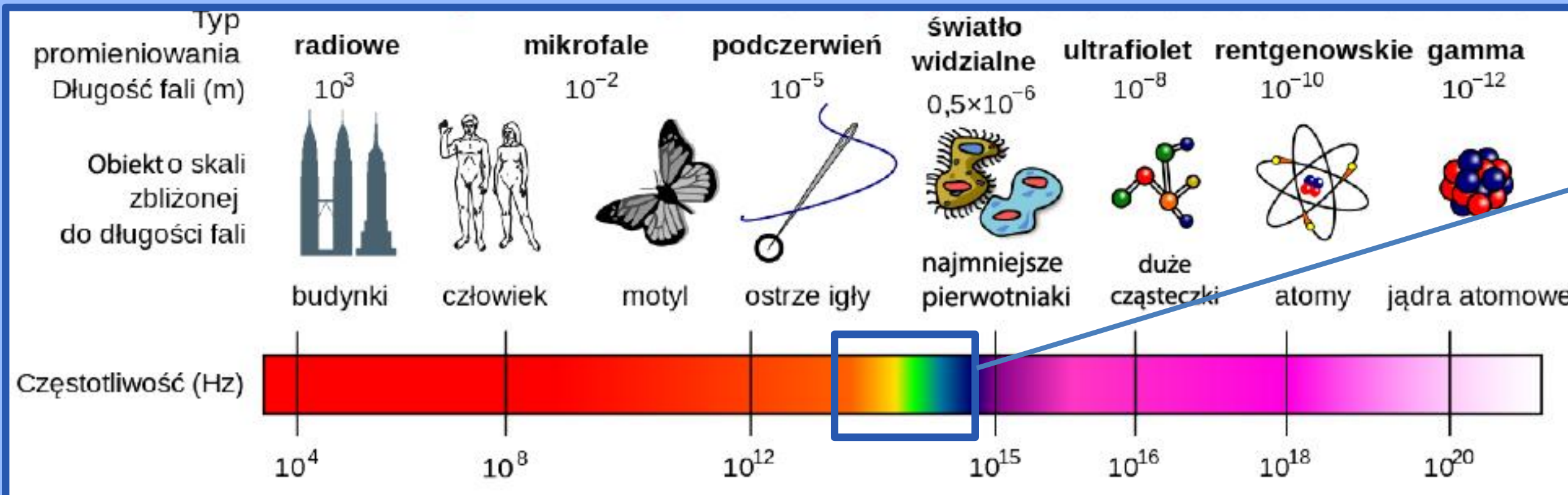
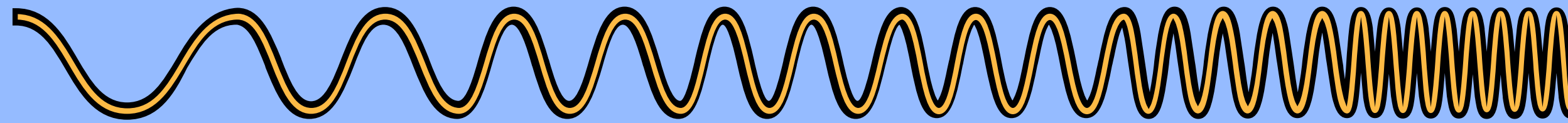
Częstotliwość fali EM pozostaje stała, gdy fala przechodzi z jednego ośrodka do drugiego, ale **zmienia się jej długość fali.**

Fale elektromagnetyczne

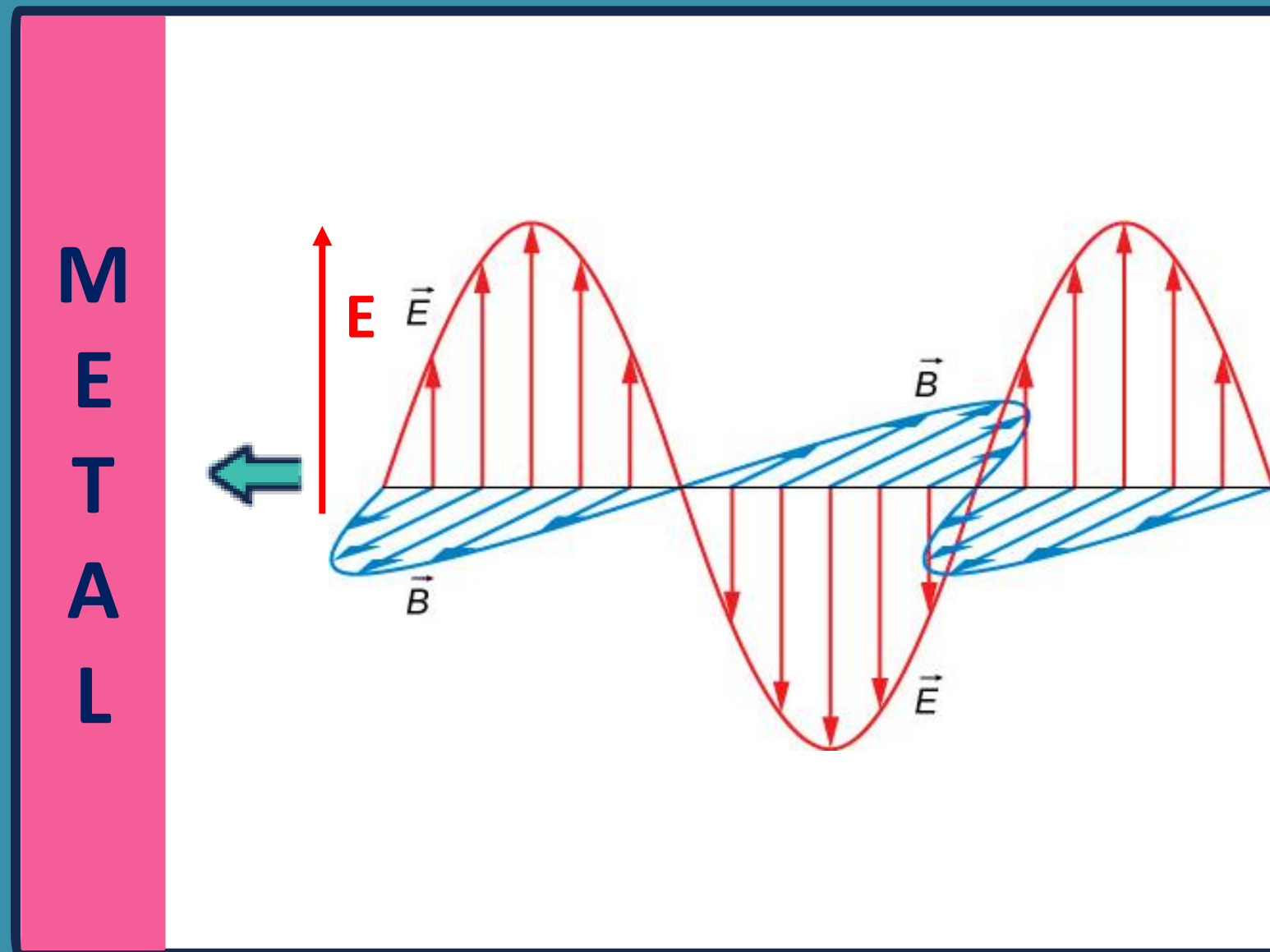
Widmo elektromagnetyczne dzieli fale EM na grupy w zależności od ich częstotliwości.



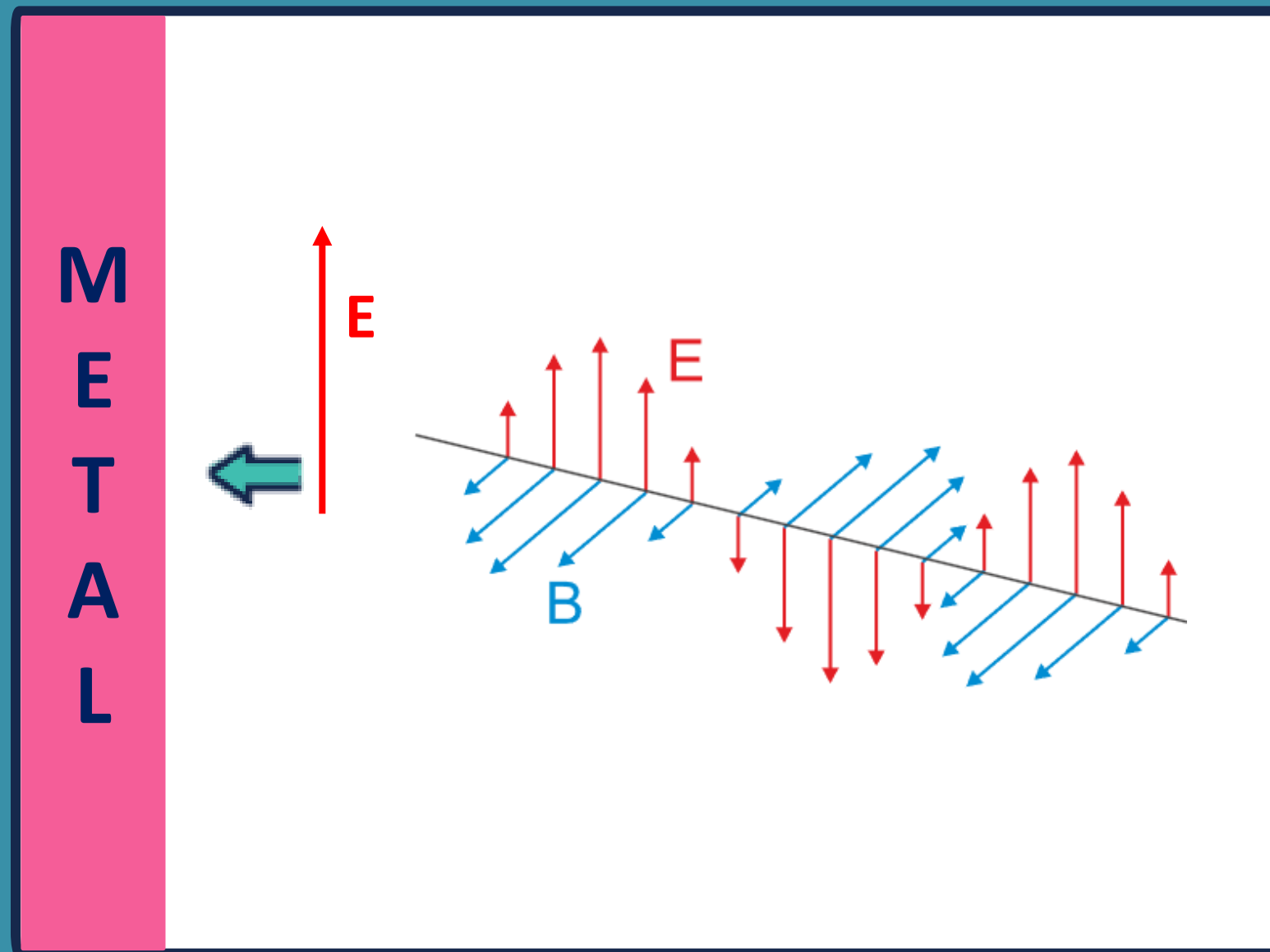
Podział na niektóre grupy jest wyraźny, ale niektóre pasma nakładają się (np. podczerwień, widzialność i ultrafiolet)



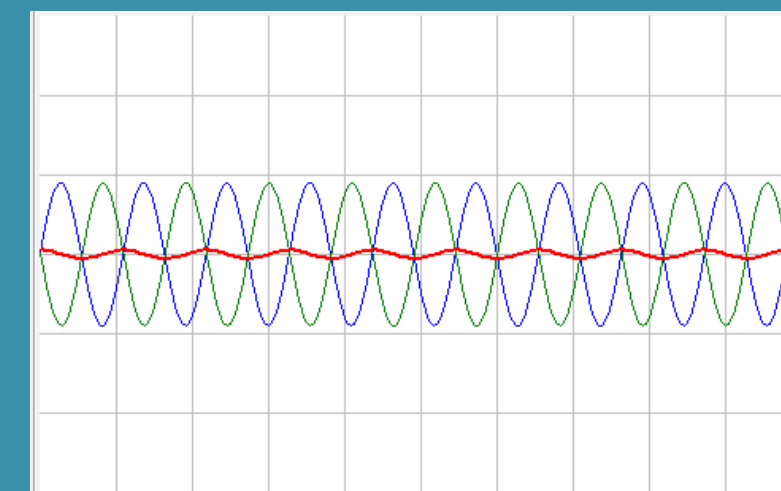
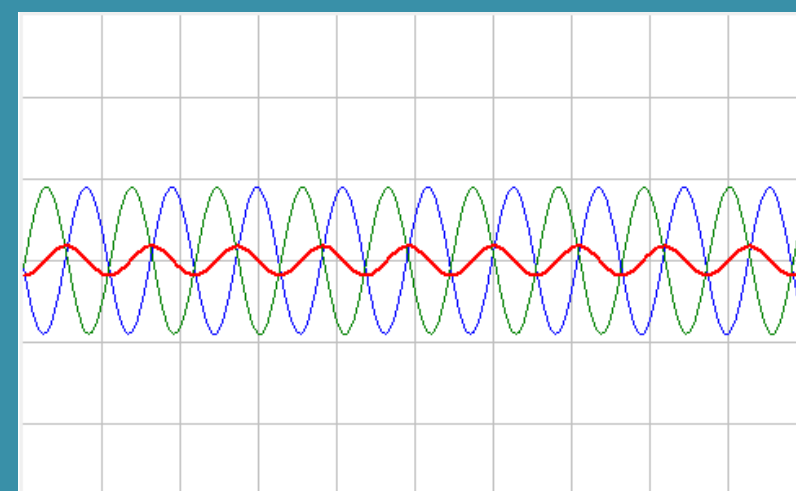
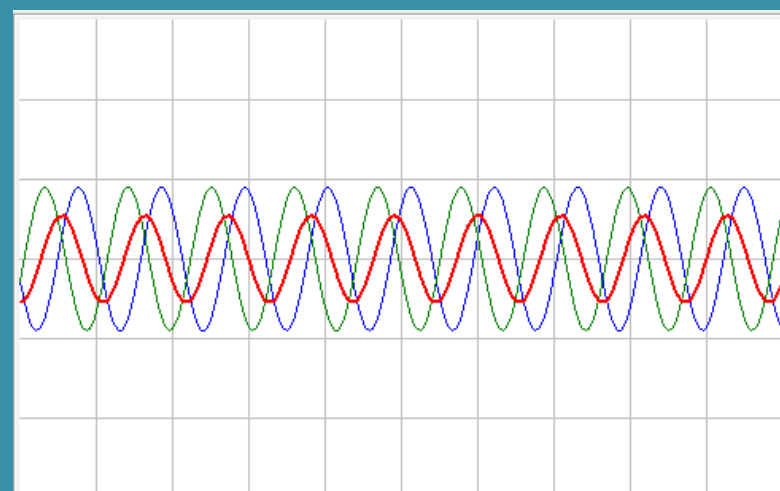
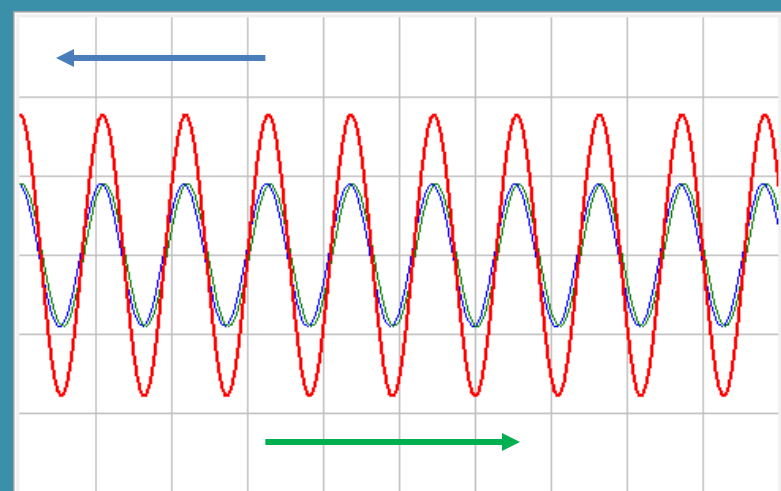
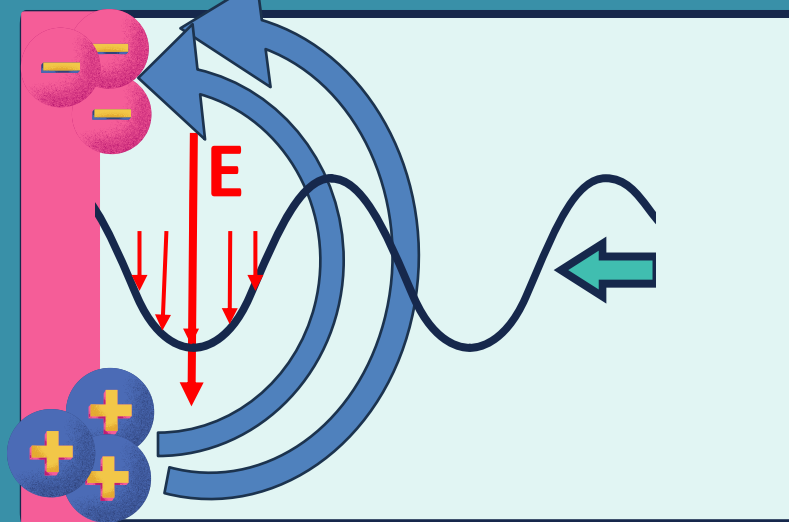
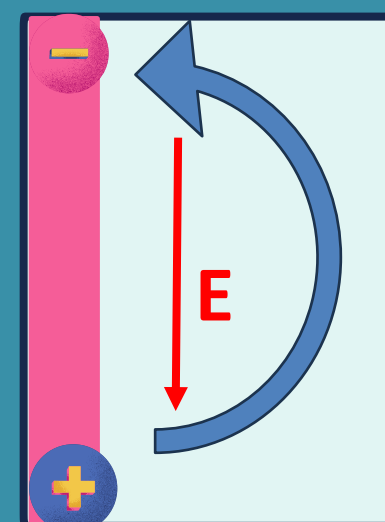
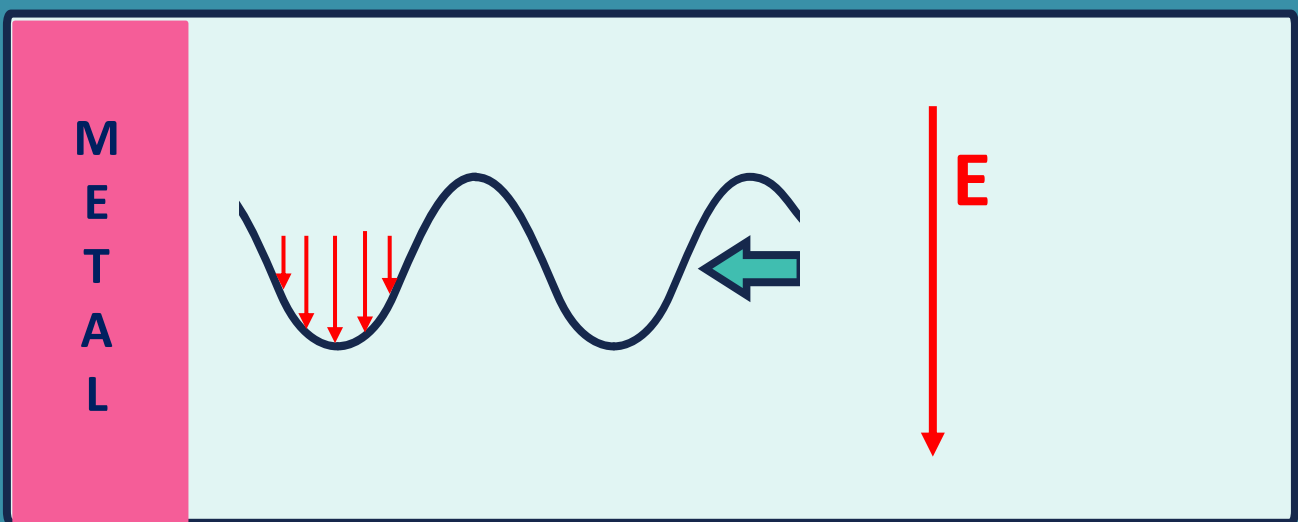
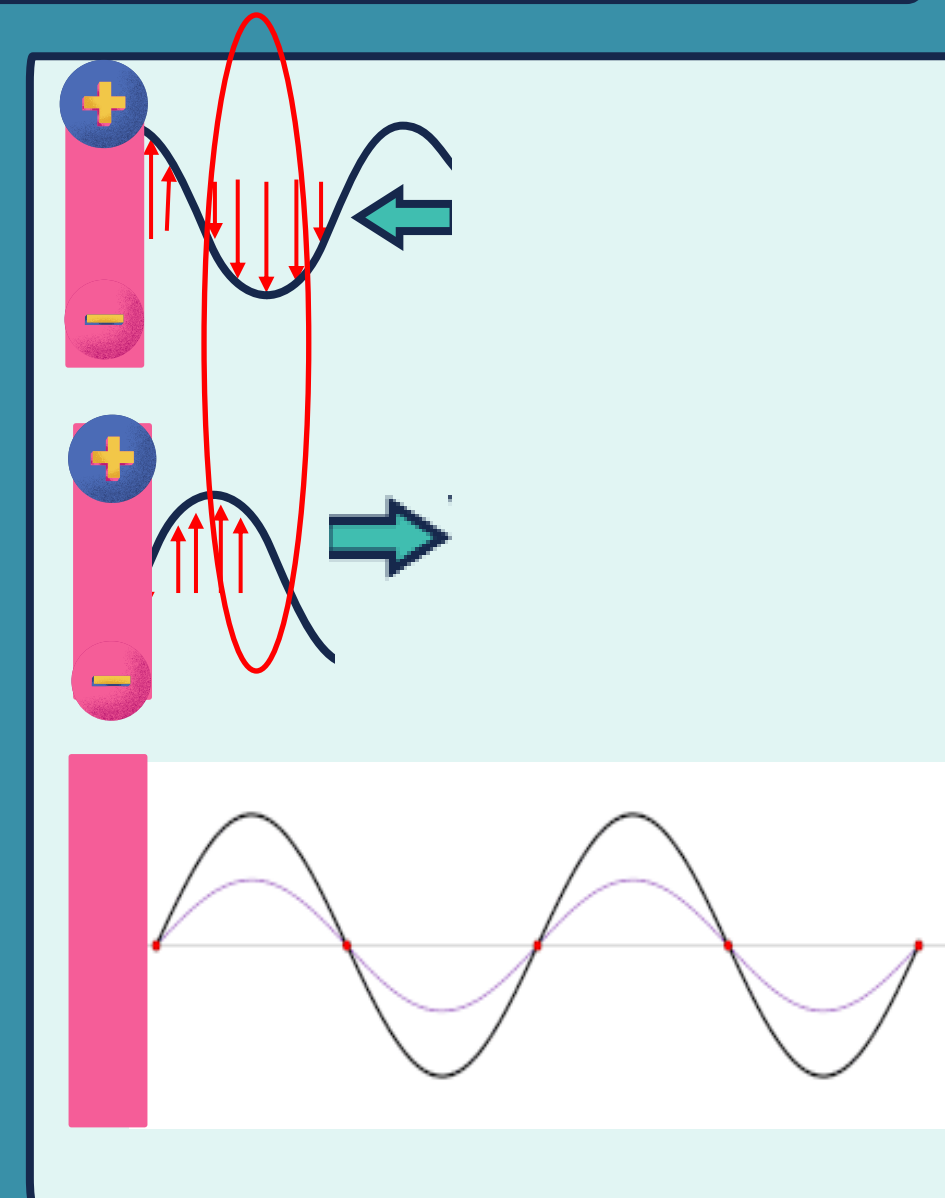
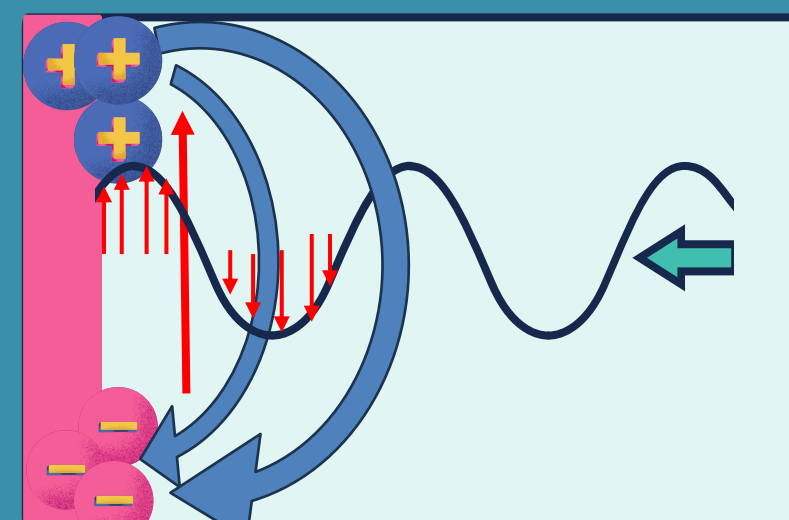
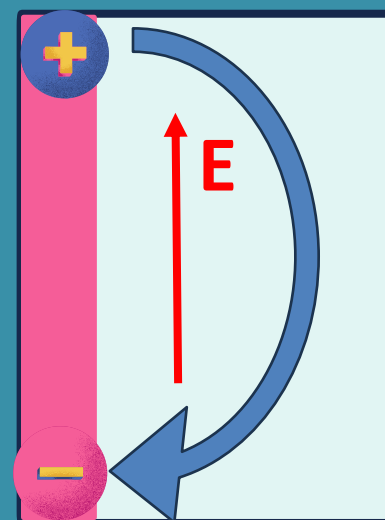
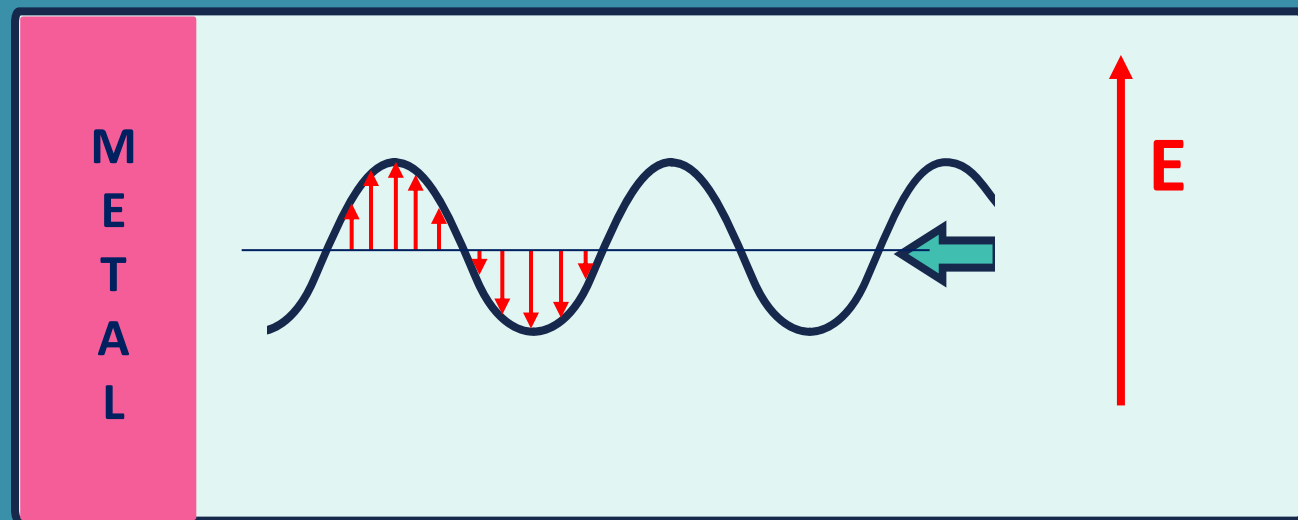
ODBIJANIE SIĘ FALI EM OD POWIERZCHNI METALOWEJ



ODBIJANIE SIĘ FALI EM OD POWIERZCHNI METALOWEJ



ODBIJANIE SIĘ FALI EM OD POWIERZCHNI METALOWEJ



Typowe oznaczenia i jednostki układu SI

częstotliwość f	1 Herz = 1 Hz = 1/s
potencjał elektryczny, napięcie U	1 Volt = 1 V
natężenie prądu I	1 Amper = 1 A
gęstość powierzchniowa prądu J_s	1 A/m ²
praca lub energia W	1 Joule = 1 J = 1 V*A*s
moc P	1 Watt = 1 W
powierzchniowa gęstość mocy p , S	1 W/m ²
objętościowa gęstość mocy p_v	1 W/m ³
ładunek elektryczny q , Q	1 Culomb = 1 C = 1 A*s
objętościowa gęstość ładunku ρ_v	1 C/m ³
objętościowa gęstość energii „ w ”	1 J/m ³ = 1 V*A*s/m ³



Typowe oznaczenia i jednostki układu SI

powierzchniowa gęstość ładunku q_s	1 C/m ²
liniowa gęstość ładunku	1 C/m
natężenie pola elektrycznego E	1 V/m
natężenie pola magnetycznego H	1 A/m
indukcja elektryczna D	1 C/m ² = 1 A*s/m ²
indukcja magnetyczna B	1 Tesla [T] = 1 Wb/m ² = 1 V*s/m ²
pojemność elektryczna C	1 Farad = 1 F = 1 A*s/V
przenikalność elektryczna ϵ	1 F/m = 1 A*s/V*m
indukcyjność L	1 Henr = 1 H = 1 V*s/A
przenikalność magnetyczna μ	1 H/m = 1 V*s/A*m
wektorowy potencjał magnetyczny A	1 Weber/m = 1 Wb/m = 1 V*s/m
rezystancja R	1 Ohm = 1 Ω = 1 V/A
rezystywność ρ	1 Ω /m
przewodność (konduktywność) σ	1 Siemens/m = 1 S/m = 1/ Ω *m



Mikrofale

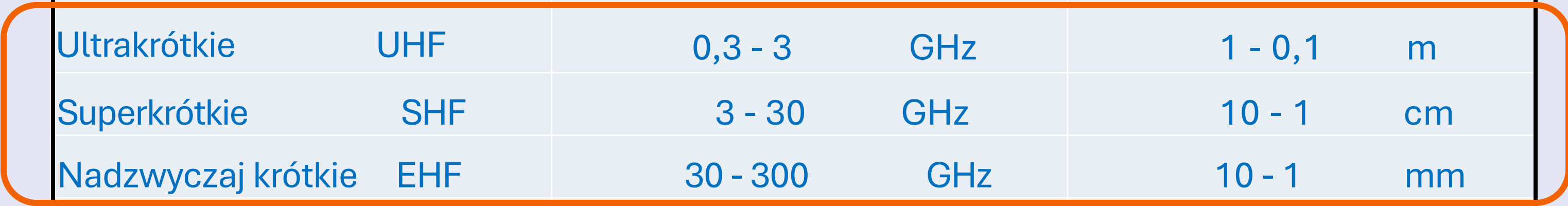
Nazwa pasma		Częstotliwość (f)		Długość fali	
Bardzo długie	VLF*	0 - 30	kHz	∞ - 10	km
Długie	LF	30 - 300	kHz	10 - 1	km
Średnie	MF	300 - 3000	kHz	1000 - 100	m
Krótkie	HF	3 - 30	MHz	100 - 10	m
Bardzo krótkie	VHF	30 - 300	MHz	10 - 1	m
Ultrakrótkie	UHF	0,3 - 3	GHz	1 - 0,1	m
Superkrótkie	SHF	3 - 30	GHz	10 - 1	cm
Nadzwyczaj krótkie	EHF	30 - 300	GHz	10 - 1	mm
Quasi optyczne		300 - 3000	GHz	1 - 0,1	mm

Mikrofalami nazywamy, dość umownie zresztą, fale długości od 1 metra do 1 milimetra, czyli o częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz.

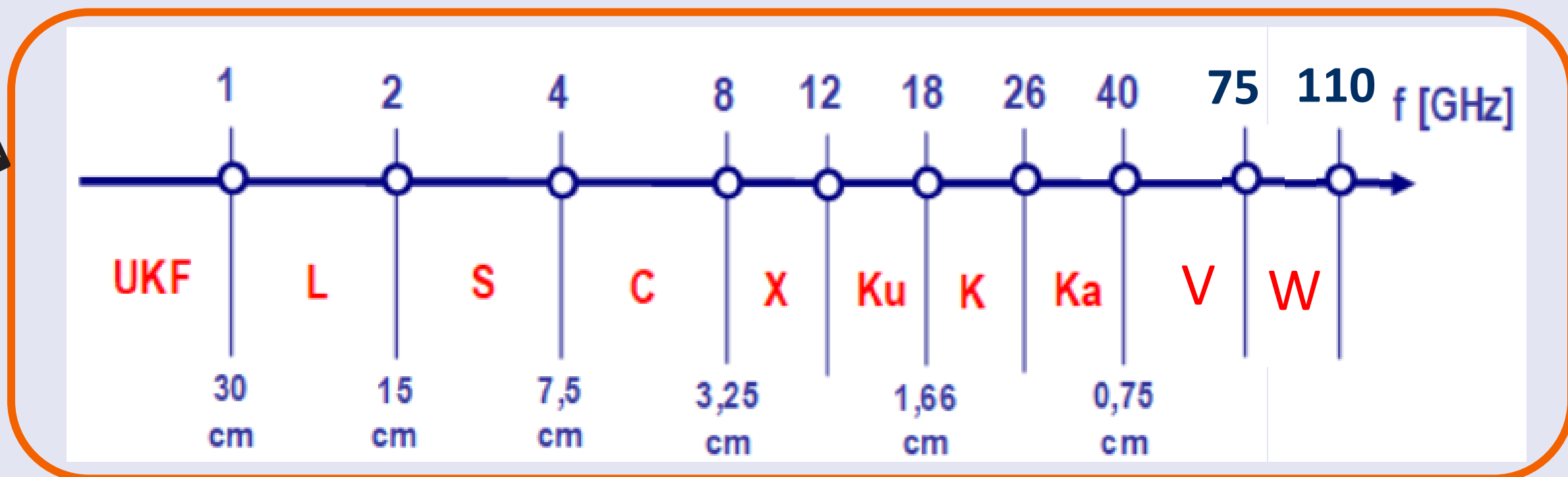
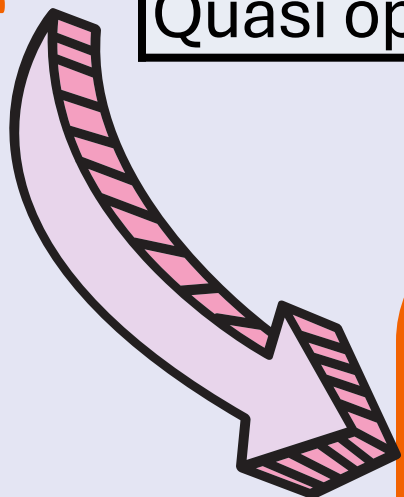
Na dolnym końcu tego zakresu środki techniczne nie będą się różniły od tych, które są stosowane w paśmie UKF, natomiast na górnym będą zdradzały wyraźne podobieństwo do urządzeń optycznych. Z tego też powodu, biorąc pod uwagę metody opisu zjawisk, **terminem „mikrofale” będziemy określali przedział częstotliwości, w którym stosowane przez nas układy będą miały wymiary porównywalne z długością fali.** „Porównywalne” w tym przypadku oznacza, że ich istotne wymiary są nie mniejsze niż $0,1 \lambda$. Dlatego pierwszym krokiem przy wyborze metody rozwiązywania danego problemu powinno być oszacowanie występujących w nim wymiarów liniowych i ich stosunek do długości fali bez względu na częstotliwość.

Nazwa pasma		Częstotliwość (f)		Długość fali	
Bardzo długie	VLF*	0 - 30	kHz	∞ - 10	km
Długie	LF	30 - 300	kHz	10 - 1	km
Średnie	MF	300 - 3000	kHz	1000 - 100	m
Krótkie	HF	3 - 30	MHz	100 - 10	m
Bardzo krótkie	VHF	30 - 300	MHz	10 - 1	m
Ultrakrótkie	UHF	0,3 - 3	GHz	1 - 0,1	m
Superkrótkie	SHF	3 - 30	GHz	10 - 1	cm
Nadzwyczaj krótkie	EHF	30 - 300	GHz	10 - 1	mm
Quasi optyczne		300 - 3000	GHz	1 - 0,1	mm

Mikrofale



Podstawowe podpasma częstotliwości zakresu mikrofal





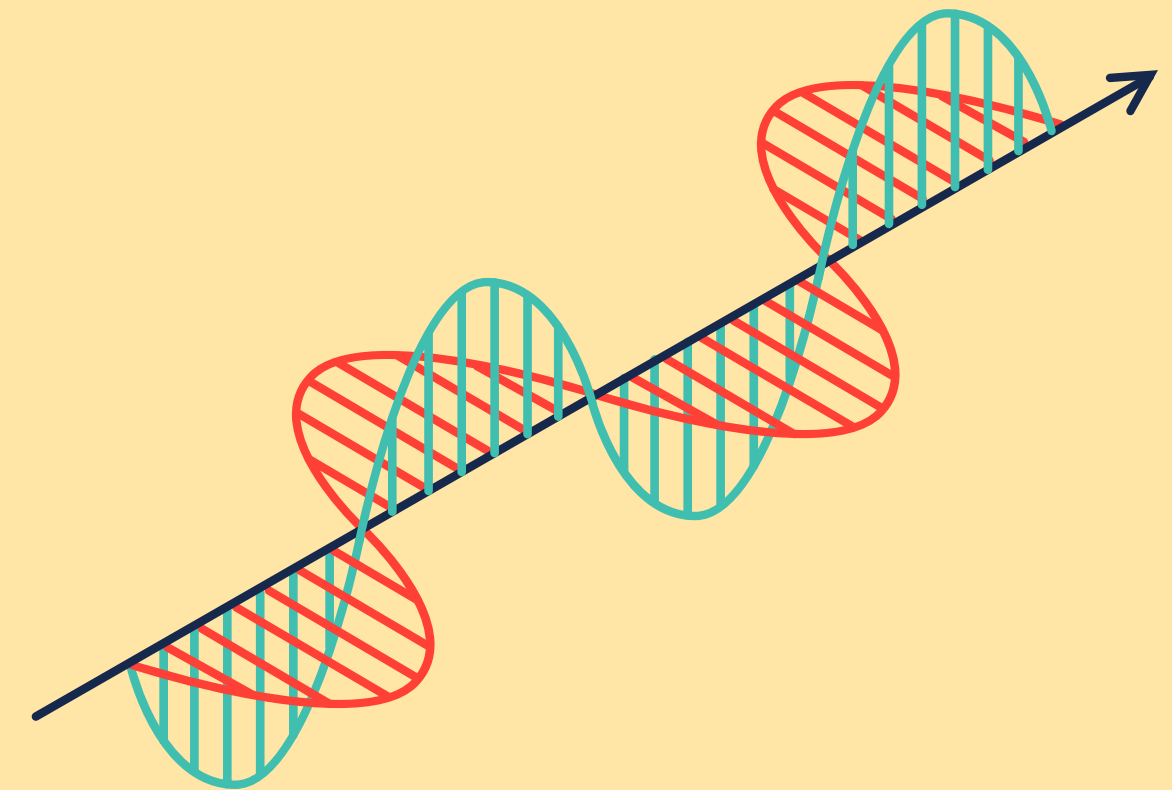
Mikrofale



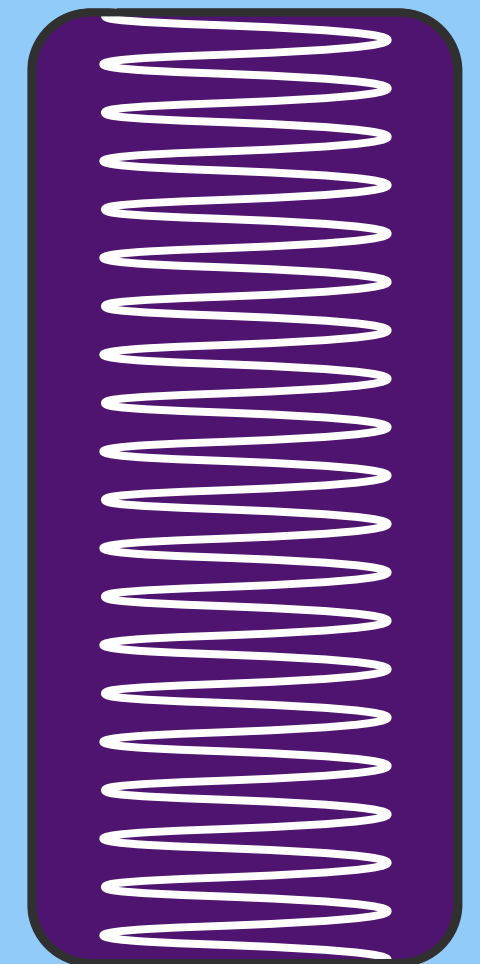
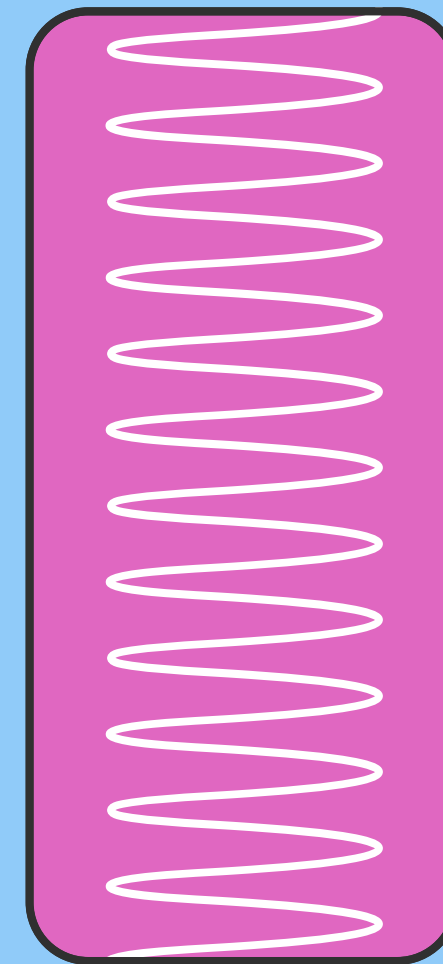
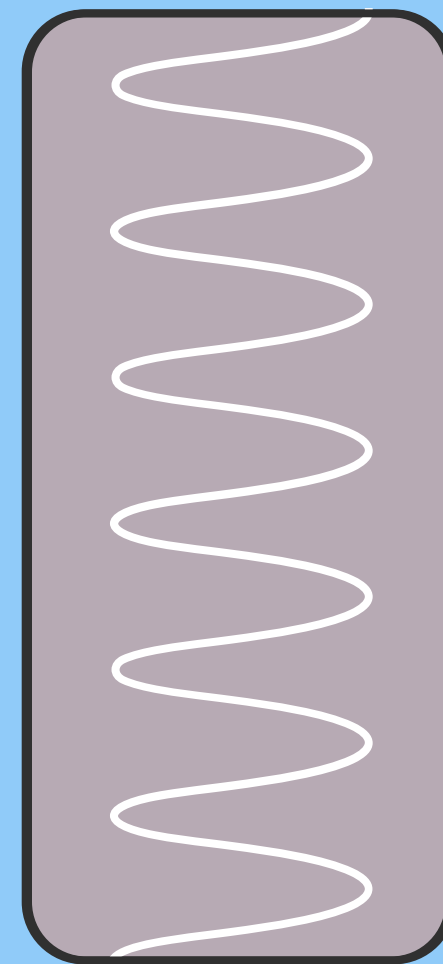
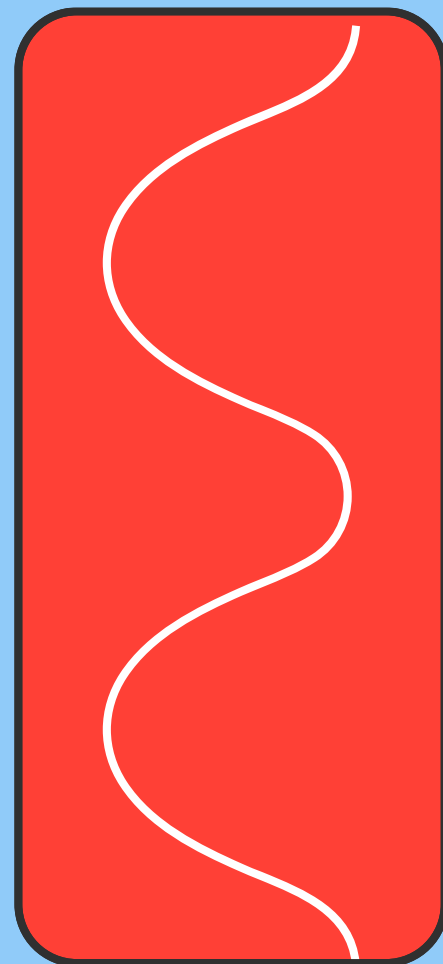
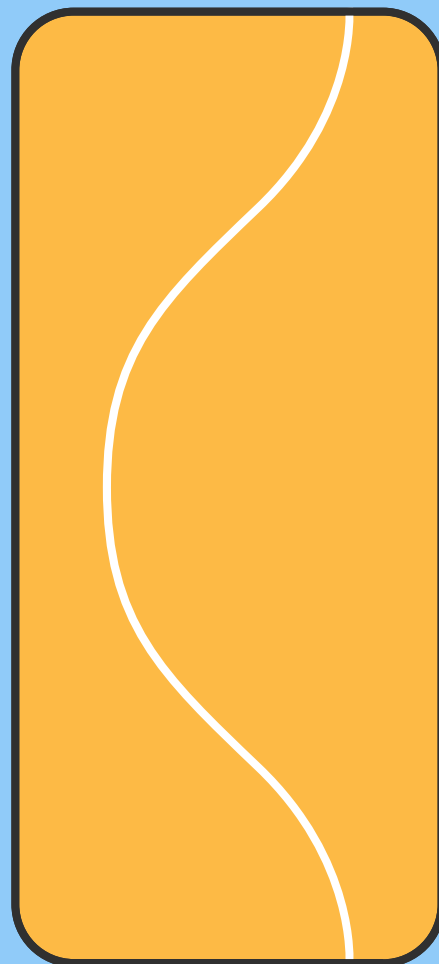
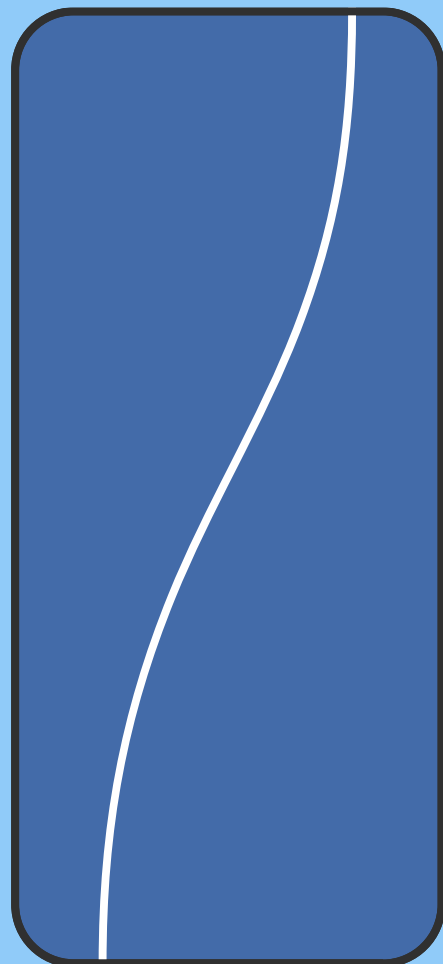
WŁAŚCIWOŚCI MIKROFAL



- Stosunkowo mała długość fali,
- Propagacja prostoliniowa, małe ugięcie nad ziemią;
- Łatwa transmisja przez jonosferę;
- Tłumienie w atmosferze selektywne, rośnie z częstotliwością;
- Rezonanse atomowe, molekularne i jądrowe na częstotliwościach mikrofalowych;
- Silna absorpcja mikrofal przez wodę.



ZASTOSOWANIE MIKROFAL



RADIOLOKACJA

Radary wojskowy i cywilny



Czujniki ruchu

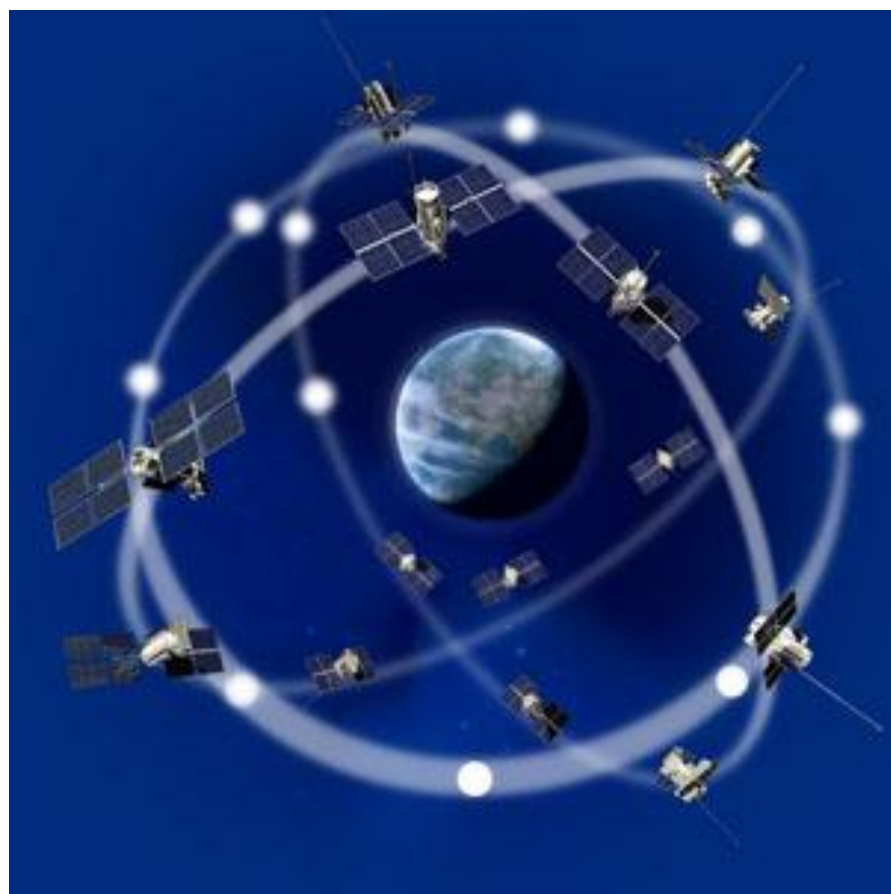


Radary drogowe do pomiaru prędkości



RADIONAWIGACJA

GPS i inne systemy GNSS
(Global Navigation Satellite System)



Systemy naprowadzania
lotniczego



Radiolatarnie morskie i
lotnicze



RADIOKOMUNIKACJA

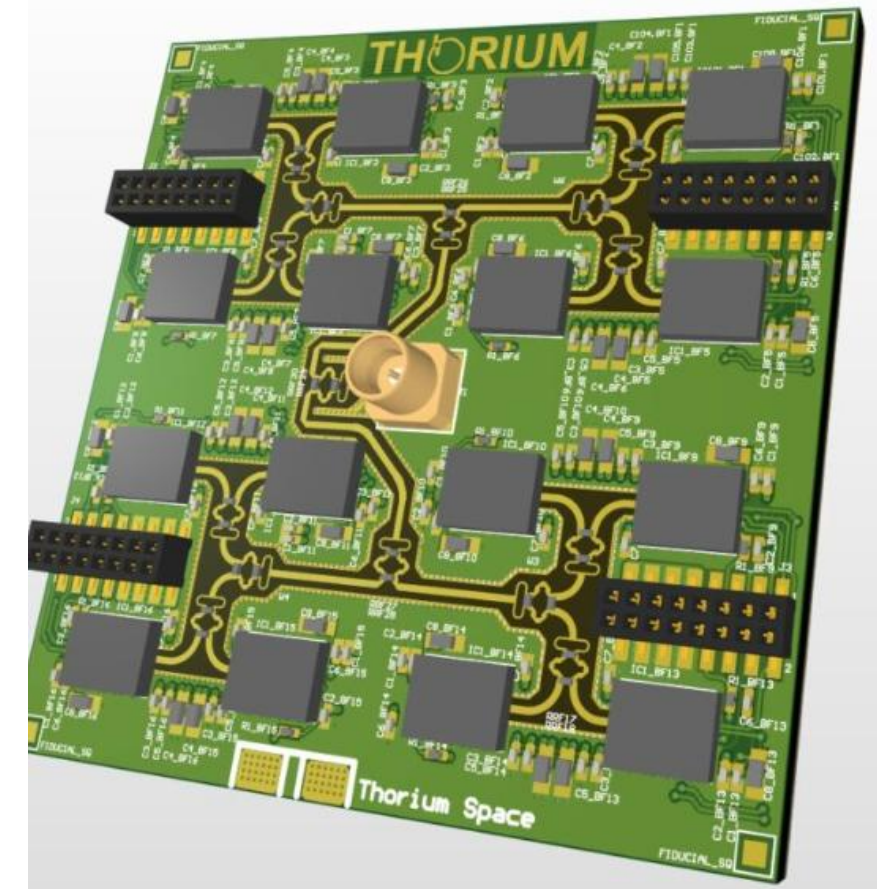
Łączność satelitarna
(telewizja, internet, telefony)



Łączność naziemna
(5G, WiFi, Bluetooth)



Urządzenia mikrofalowe w
komunikacji wojskowej i
kosmicznej



GRZEJNICTWO

Kucharki mikrofalowe



Suszenie materiałów

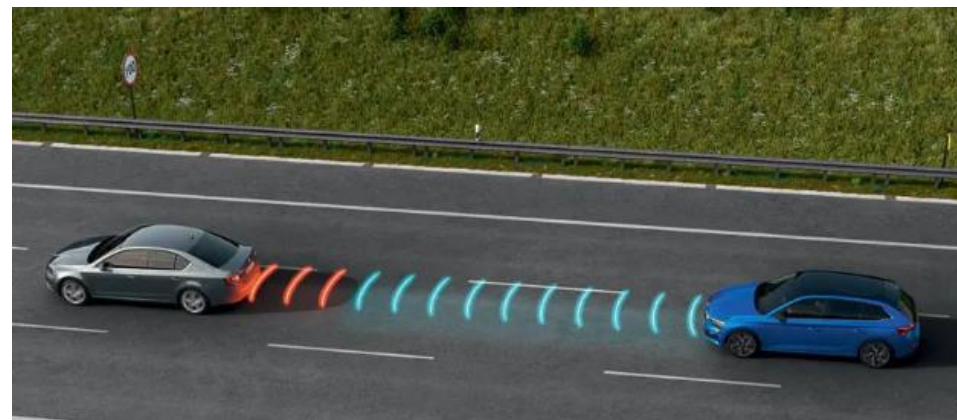


Obróbka termiczna
w przemyśle spożywczym
(pasteryzacja)

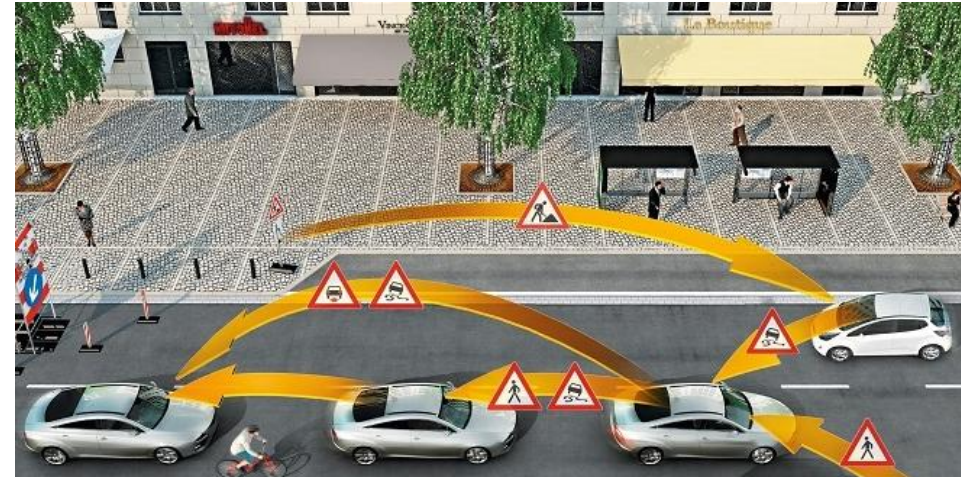


TRANSPORT

Radary w samochodach
(adaptacyjny tempomat)



Komunikacja V2X
(vehicle-to-everything)
dla pojazdów autonomicznych



Mikrofale w systemach
biletowych
(RFID, NFC)



MEDYCYNA

Diatermia mikrofalowa
(leczenie bólu, rehabilitacja)



Mikrofale w diagnostyce
(badania tkanek)



Mikrofale w terapii onkologicznej
(hipertermia)



FIZYKA

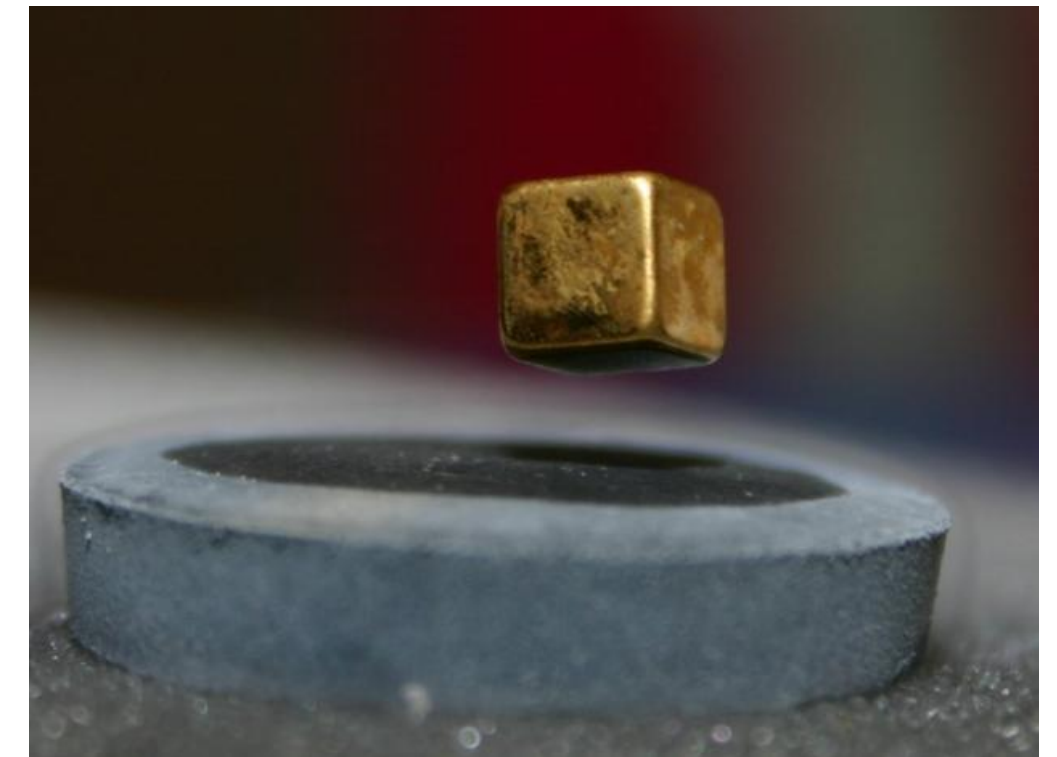
Mikrofale w akceleratorach
cząstek



Spektroskopia mikrofalowa
(badania molekuł)



Doświadczenia
z nadprzewodnictwem,
rezonatorami



MIERNICTWO

Pomiary wilgotności
(drewna, gleby)



Badanie struktur materiałów
(detekcja pęknięć)



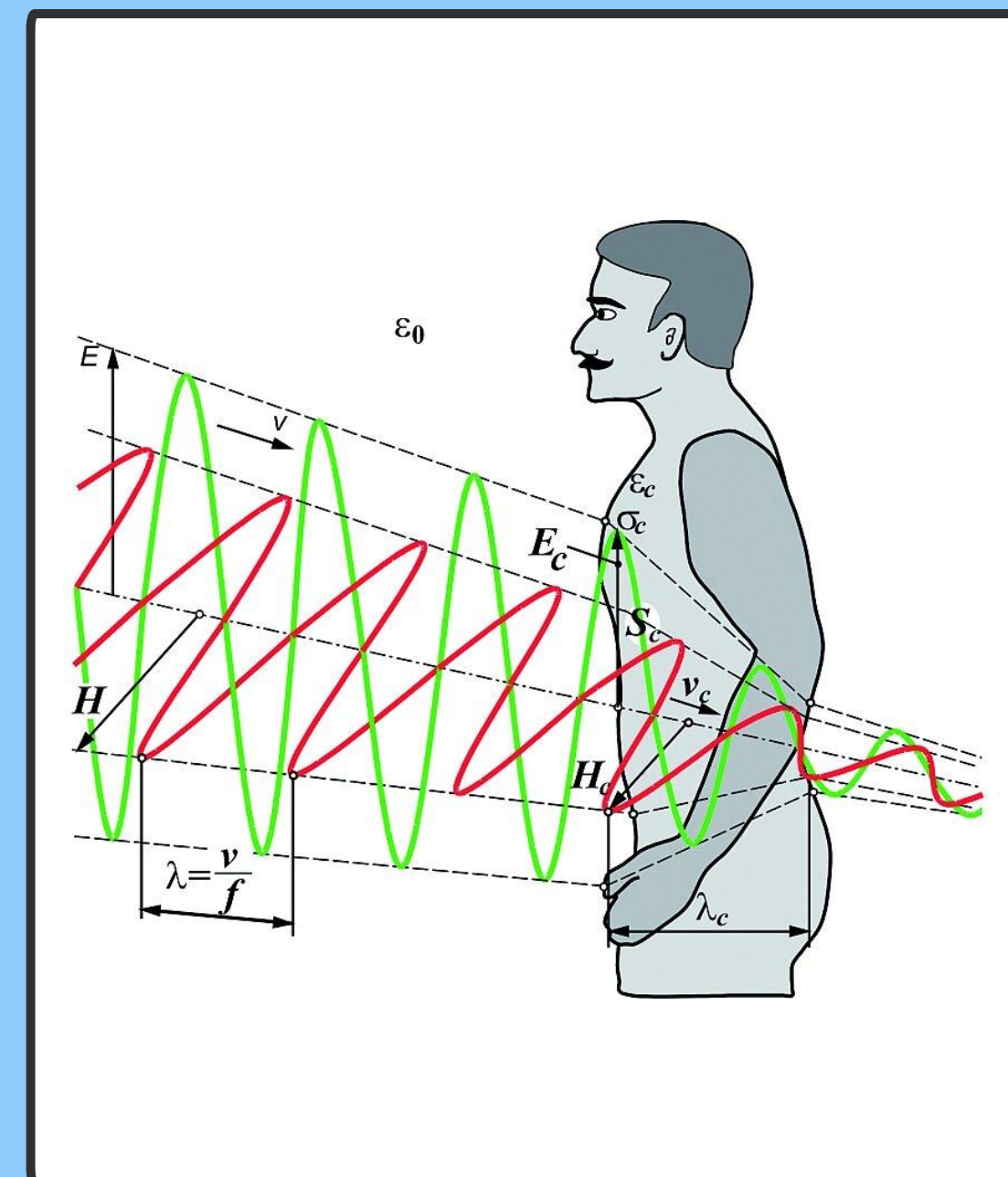
Mikrofale w systemach NDT
(Non-Destructive Testing)



Bezpieczeństwo i zagrożenia w technice mikrofalowej

Z zakresie od 1 GHz do 3 GHz równomierna absorpcja energii fali elektromagnetycznej dochodzi do 90%.

W zależności od kraju (lub instytucji) dopuszczalna wielkość natężenia promieniowania waha się od 0,1 mW/cm² do 10 mW/cm².



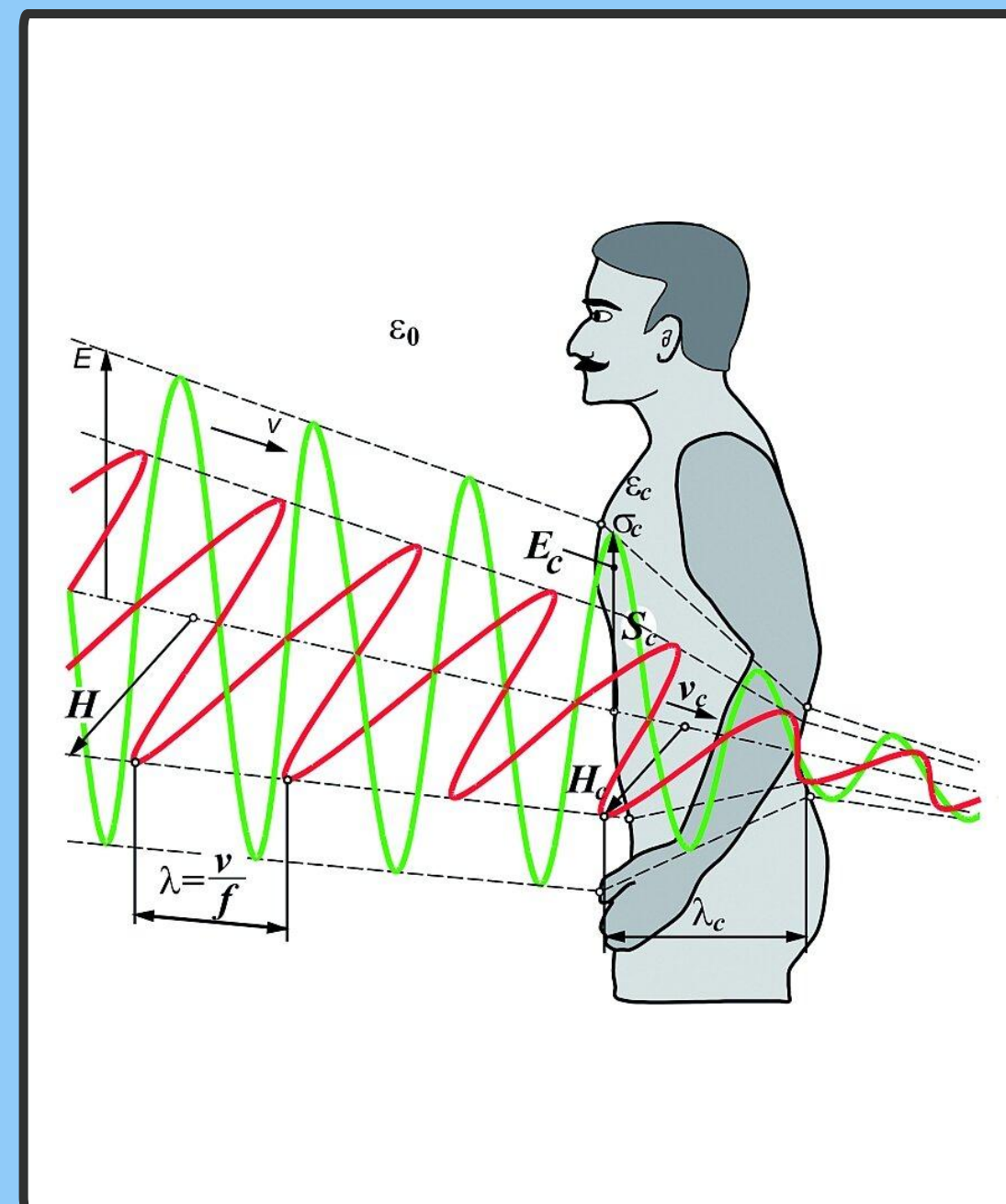
Bezpieczeństwo i zagrożenia w technice mikrofalowej

Promieniowanie mikrofalowe jest silnie pochłaniane przez tkanki zwierzęce i roślinne. To zjawisko, korzystne z punktu widzenia producentów kucharek, stanowi poważne zagrożenie dla organizmów żywych, które znalazłyby się w silnym polu EM o częstotliwości mikrofalowej.

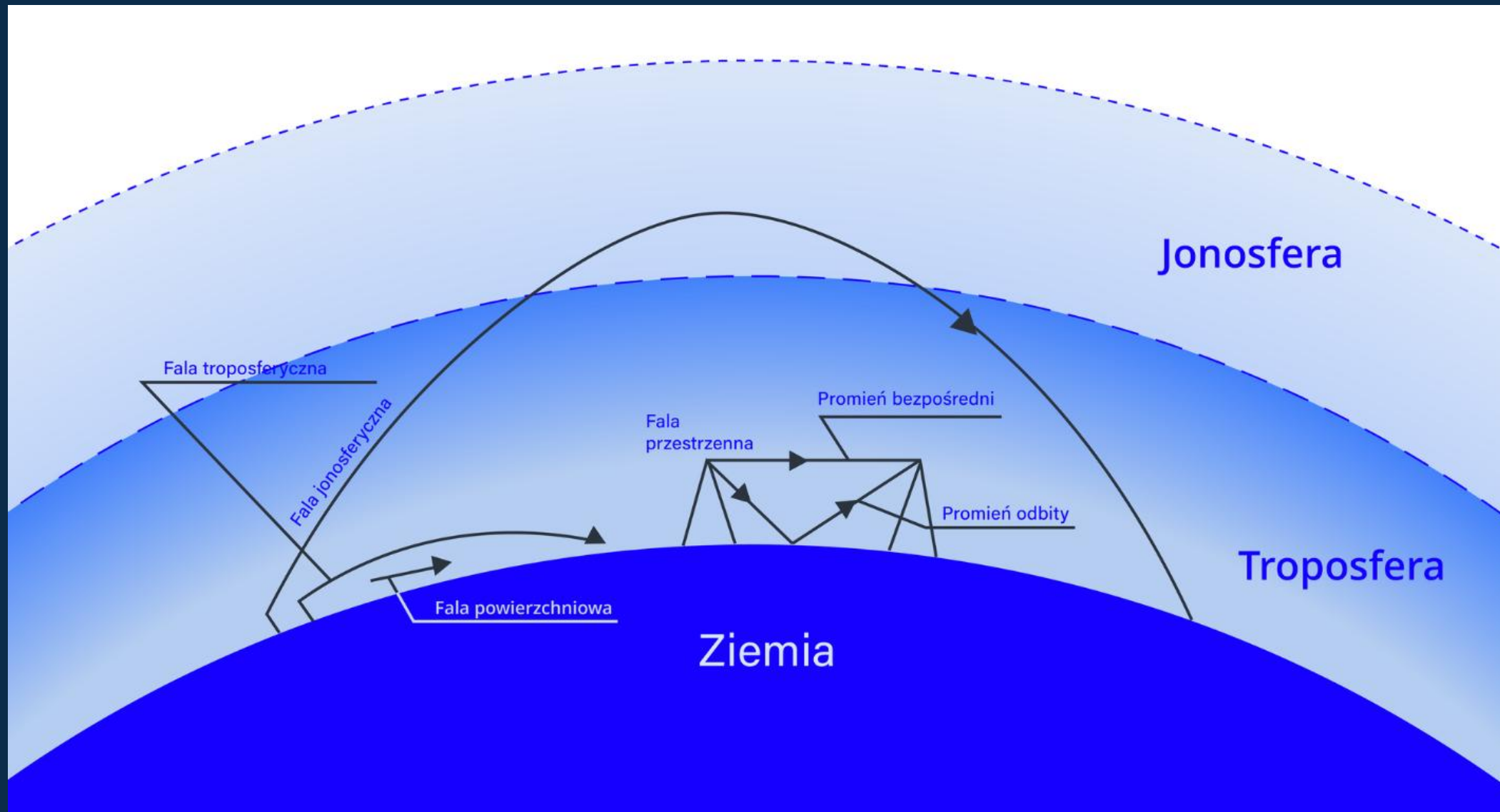
Oprócz tego występuje **specyficzny efekt termiczny**, mianowicie selektywne podgrzewanie poszczególnych narządów i związane z tym objawy fizjologiczne i patologiczne zmiany.

Mikrofalowe pole EM oddziałuje również nietermicznie. Oddziaływanie to dotyka zwłaszcza układ nerwowy, gonady, oczy, gruczoły dokrewne i krew, embriony. Działanie nietermiczne słabych pól mikrofalowych nie jest dobrze poznane i jest przedmiotem sporów.

Również na temat szkodliwego wpływu mikrofal na produkty spożywcze zdania są podzielone.



Propagacja fal w środowisku



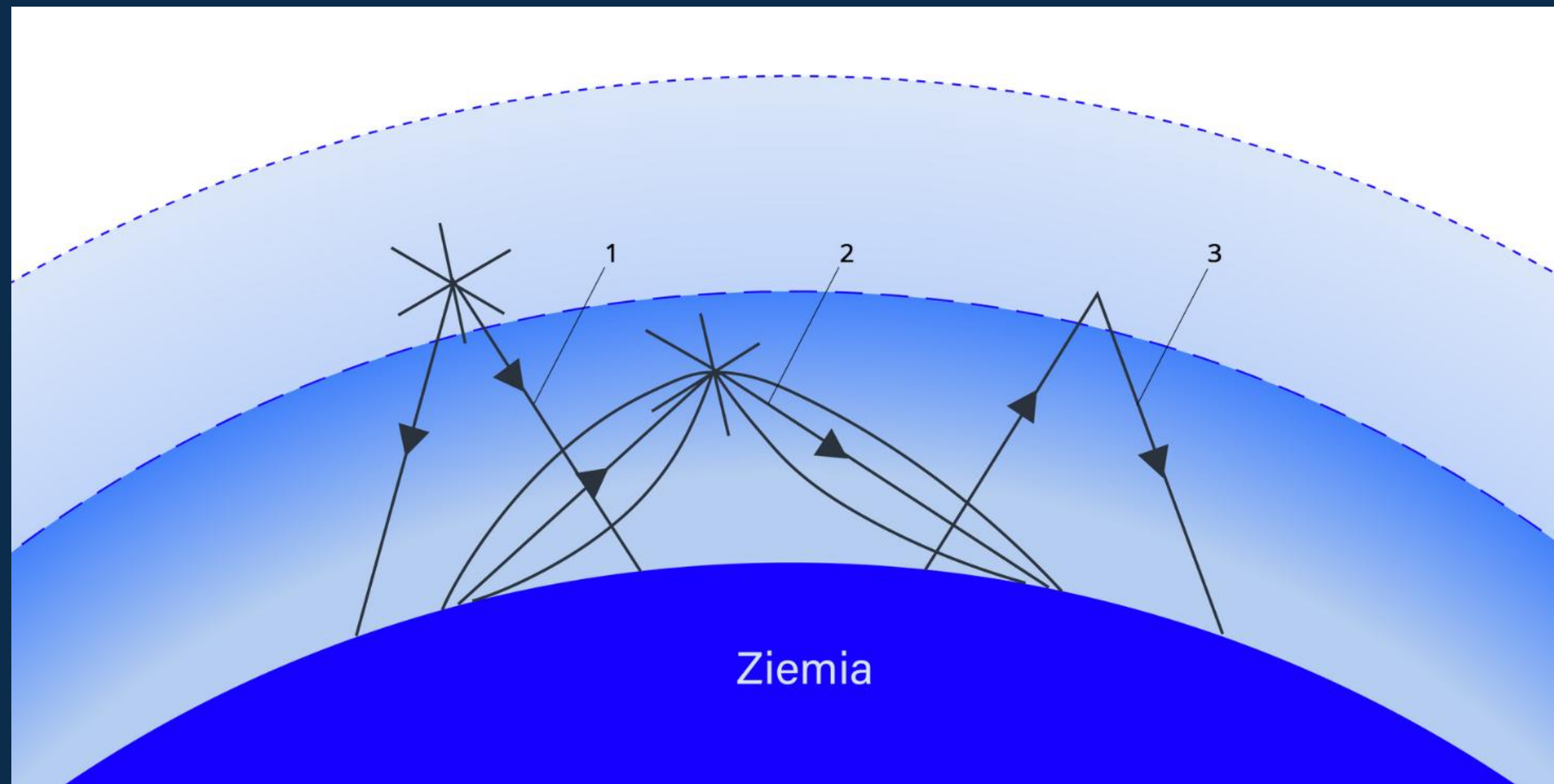
Podział fal:

Fala powierzchniowa, nadawana przez anteny umieszczone nisko na powierzchni Ziemi, która rozchodzi się wzdłuż tej powierzchni.

- Fala przestrzenna, nadawana przez anteny umieszczone nad powierzchnią Ziemi.
- Fala bezpośrednia, rozchodząca się bezpośrednio od nadajnika do odbiornika.
- Fala odbita, docierające do odbiornika po odbiciu się od powierzchni Ziemi.
- Fala jonosferyczna, dociera do odbiornika dzięki istnieniu jonosfery. Wraca na Ziemię po odbiciu od jonosfery lub rozchodzi się w przestrzeni ograniczonej powierzchnią Ziemi i dolną granicą jonosfery.
- Fala troposferyczna, dociera do odbiornika dzięki refrakcji w troposferze.

Propagacja fal w środowisku

Najistotniejszy wpływ na rozchodzenie się fal radiowych ma powierzchnia Ziemi, troposfera oraz jonosfera

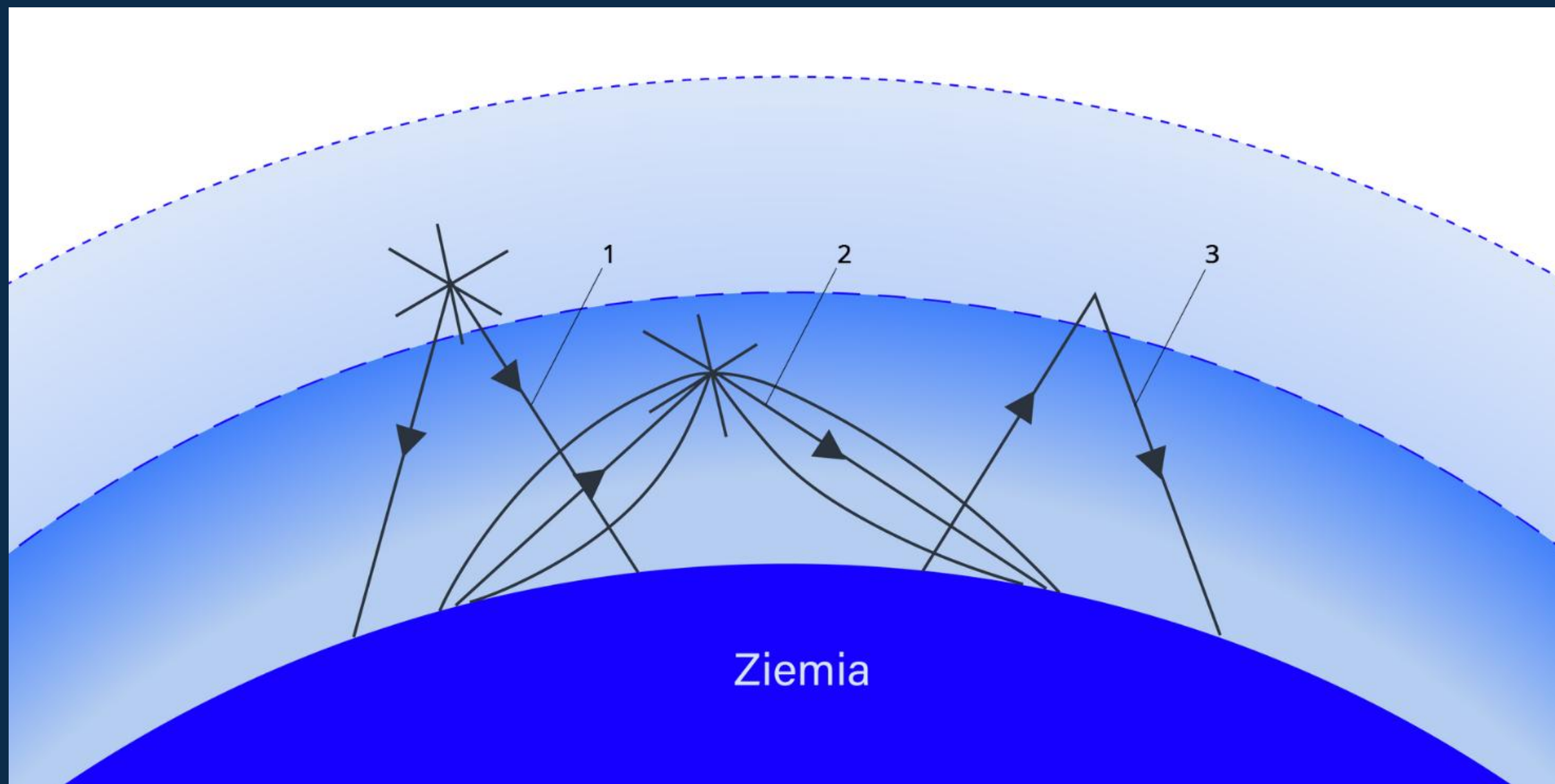


1 – fala rozproszona

2- fala rozproszona troposferyczna

3 – fala odbita os śladu meteorytu

Propagacja fal w środowisku – wpływ powierzchni Ziemi



Praktyczny zasięg fali przyziemnej to:

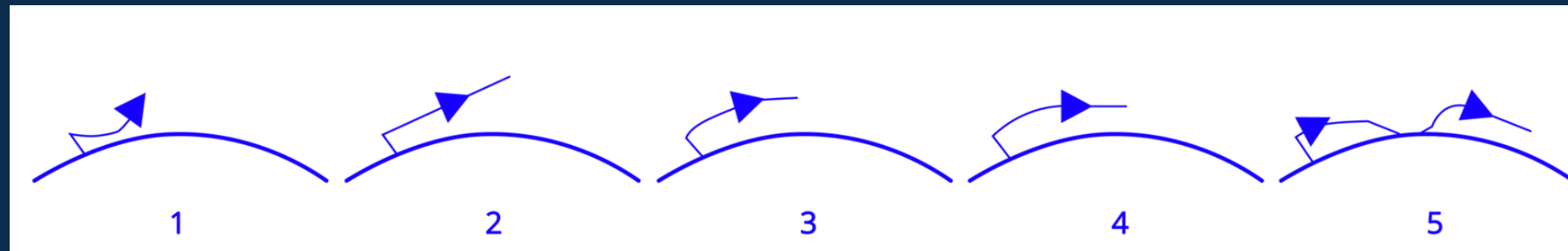
- do kilku tysięcy km dla zakresów VLF i LF,
- do kilkuset km dla zakresu MF,
- do kilkudziesięciu km dla zakresu HF.

Powierzchnia Ziemi ma głównie wpływ na rozchodzenie się fali przyziemnej.

Rozprzestrzenianie się tego rodzaju fali zależy od ukształtowania terenu oraz parametrów elektrycznych warstw powierzchniowych.

Właściwości elektryczne gleby zależą m.in. od temperatury, wilgotności, częstotliwości fali radiowej.

Propagacja fal w środowisku – wpływ troposfery

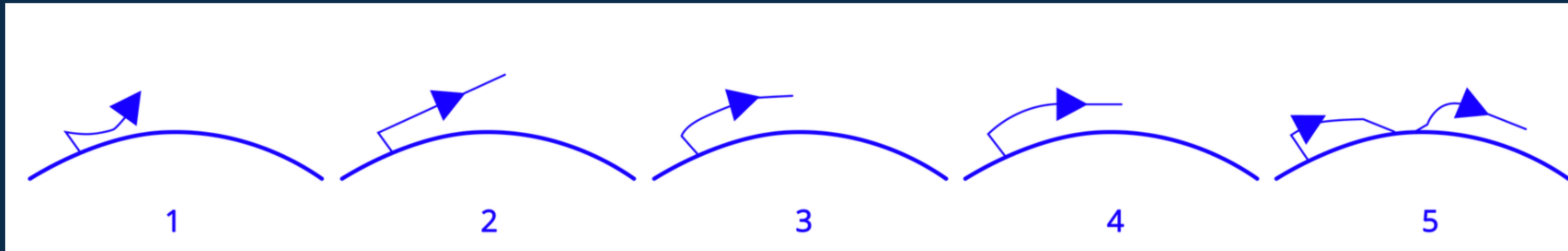


Propagacja fal radiowych w troposferze jest uzależniona głównie od warunków atmosferycznych i odbywa się kanałach falowodowych tzw. duktach. Fale ultrakrótkie i mikrofałe rozprzestrzeniają się tutaj na znaczne odległości przy małym tłumieniu.

Na rozchodzenie się fali wpływ mają następujące zjawiska:

- **refrakcja fal radiowych (rysunek)**, czyli zmiana kierunku propagacji fal wraz z wysokością, wskutek zmian przenikalności elektrycznej;
- **rozpraszanie fal radiowych**, spowodowane ruchami mas powietrza w troposferze, umożliwiające dalekosiężną komunikację na falach ultrakrótkich (zakres VHF),
- **tłumienie fal krótszych od 10 cm**, powodowane opadami atmosferycznymi i absorpcją molekularną w troposferze,
- **tłumienie fal z zakresu bliskiego falom optycznym**, spowodowane rozpraszaniem na cząsteczkach i tłumieniem w cząsteczkach twardych.

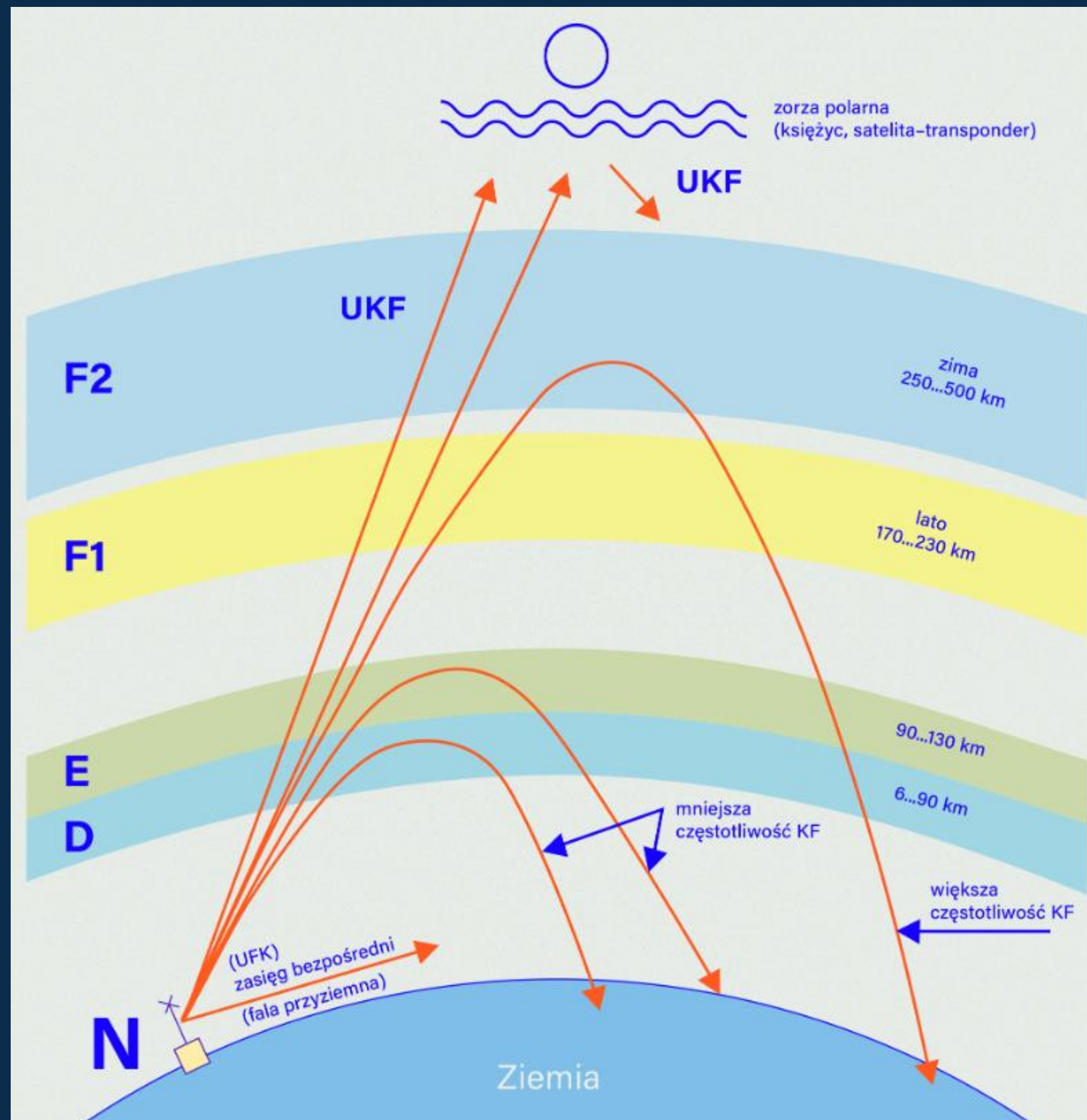
Propagacja fal w środowisku – wpływ troposfery



Refrakcja fal radiowych (rysunek), czyli zmiana kierunku propagacji fal wraz z wysokością, wskutek zmian przenikalności elektrycznej:

- 1 refrakcja ujemna, odchylenie fal od Ziemi,
- 2 refrakcja zerowa, brak refrakcji,
- 3 refrakcja dodatnia, odchylenie fal w stronę Ziemi,
- 4 refrakcja krytyczna, bieg fal równoległe do powierzchni,
- 5 superrefrakcja, powrót fal na Ziemię.

Propagacja fal w środowisku – wpływ jonosfery



Jonosfera składa się z obszarów o różnych właściwościach fizycznych:

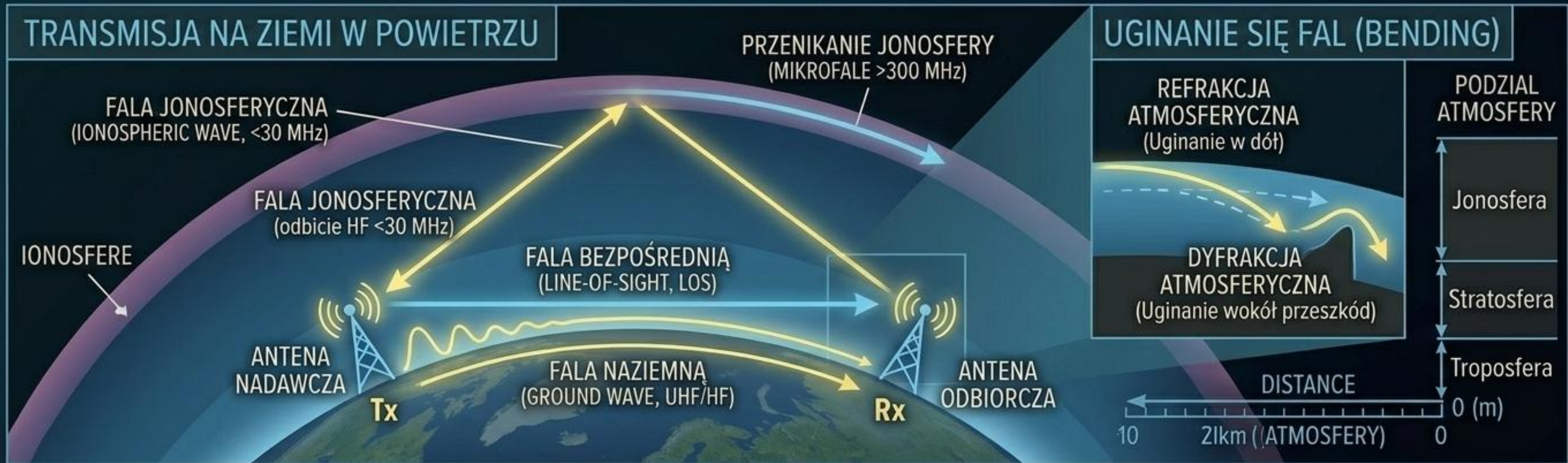
- D (40–60 km),
- E (90–170 km),
- F1 (200–300 km),
- F2 (300–500 km).

Obszary D i F1 występują tylko w ciągu dnia (F1 tylko w porze letniej), pozostałe warstwy wykazują słabsze własności w nocy niż w ciągu dnia.

Przejście fal elektromagnetycznych przez jonosferę jest uzależnione od długości fal i kąta ich padania na tę powierzchnię. Pasma, w których jest możliwa łączność z obiektami w przestrzeni kosmicznej, nazywane są oknami radiowymi.

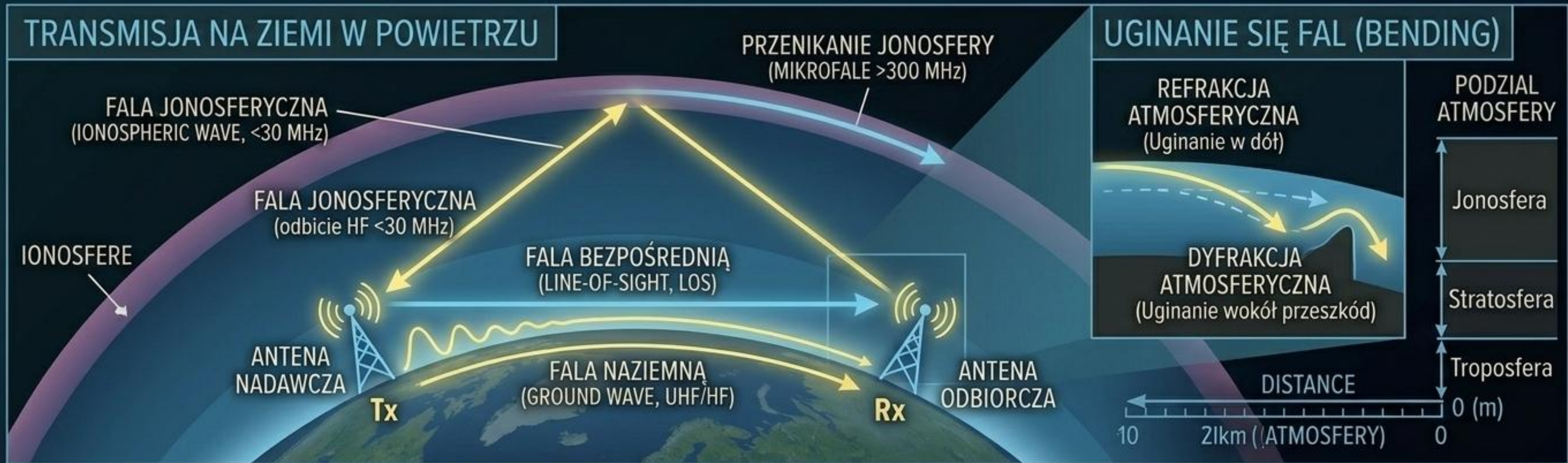
Wielokrotne odbicia fal od jonosfery i powierzchni Ziemi umożliwiają rozchodzenie się na bardzo duże odległości (zasięg globalny).

PROPAGACJA MIKROFAL W ATMOSFERZE ZIEMSKIEJ I PRÓŻNI



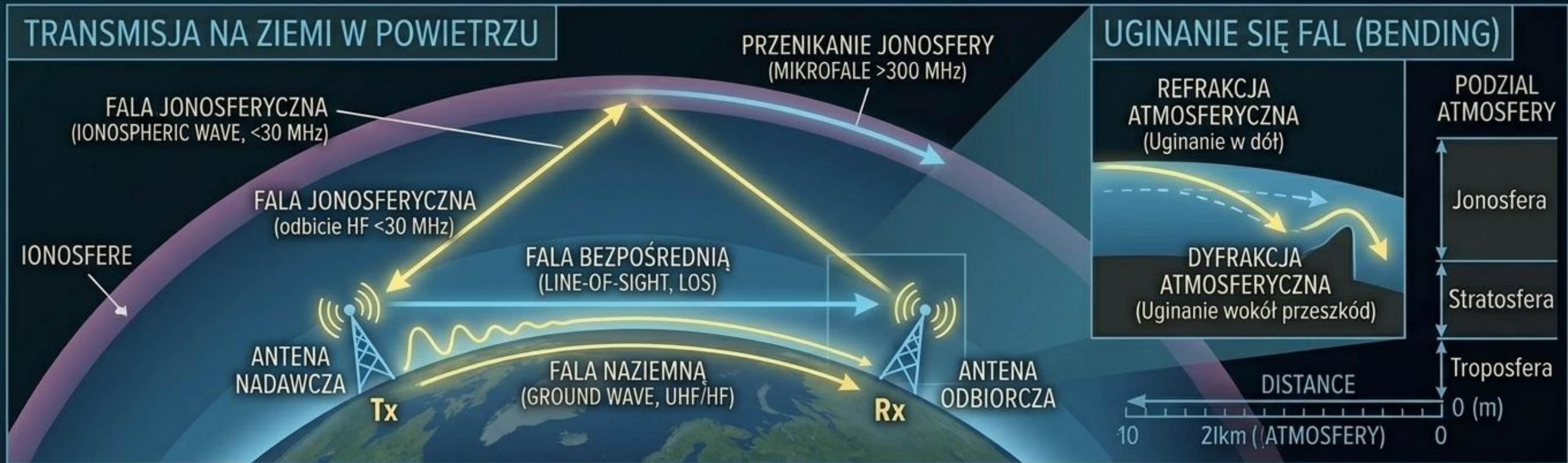
Fale ultrakrótkie rozchodzą się w zasadzie prostoliniowo, podobnie jak światło widzialne. Podlegają one odbiciu od obiektów o dużej gęstości, oraz rozpraszaniu i tłumieniu w atmosferze i innych ośrodkach.

PROPAGACJA MIKROFAL W ATMOSFERZE ZIEMSKIEJ I PRÓŻNI



Gdyby stwierdzenie takie było w stu procentach ściśle ich zasięg powinien ograniczać się do horyzontu optycznego. W rzeczywistości zasięg fal ultrakrótkich jest większy dzięki refrakcji troposferycznej, dyfrakcji, czyli załamaniu toru fali na krawędzi horyzontu czy wzniesień i budynków, no i niekiedy dzięki odbiciom od śladów meteorytów w atmosferze.

PROPAGACJA MIKROFAL W ATMOSFERZE ZIEMSKIEJ I PRÓŻNI



Tłumienie jest spowodowane głównie obecnością wody pod postacią opadów (deszczu, śniegu, gradu, mgły) i pary wodnej. Intensywność tłumienia zależy od długości fali; dla fal poniżej 10 cm (pasmo radarowe) tłumienie gwałtownie rośnie.

ELEMENTY MIKROFALOWE

Linie transmisyjne, anteny

Mieszacze

Filtry, detektory, odbiorniki

Dzielniki mocy, sprzęgacze

Tłumiki, przełączniki, przesuwniki fazy

Wzmacniacze

