

Lekcja 11

Pole elektromagnetyczne a zdrowie

Cel

- Przedstawienie zagadnień dotyczących wpływu pola elektromagnetycznego na organizmy żywe, w tym człowieka.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna zakresy częstotliwości różnych rodzajów promieniowania elektromagnetycznego.
- Uczeń zna wpływ promieniowania jonizującego i niejonizującego na organizmy żywe.
- Uczeń zna typowe częstotliwości oraz moce sygnałów używane we współczesnej telefonii mobilnej.

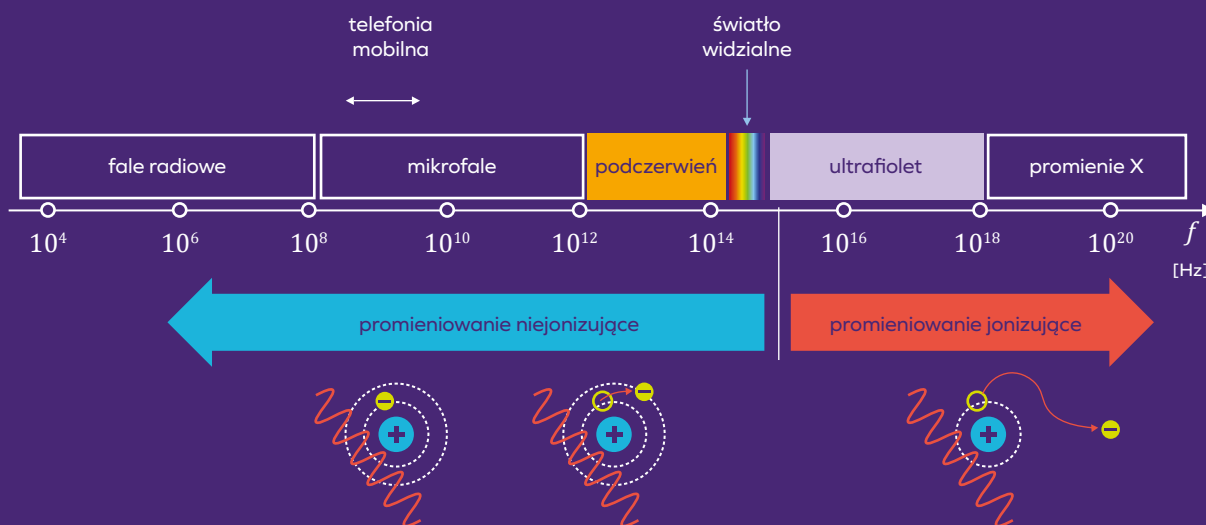


1. Fale EM – zakresy częstotliwości

W ostatniej lekcji zajmiemy się zagadnieniem wpływu fal elektromagnetycznych (EM) na organizmy żywe, w tym człowieka. Wzmoczone wykorzystanie fal EM we współczesnej telekomunikacji mobilnej czasem budzi niepokój, szczególnie, gdy używa się pojęcia **promieniowania**, kojarzącego się z czymś bardzo niebezpiecznym dla zdrowia.

Uporządkujmy fakty. Pole EM wypełnia cały wszechświat, a rozchodzące się w nim zaburzenia mają ogromną liczbę źródeł naturalnych, jak i sztucznych, czyli powstałych na skutek działalności człowieka. Zaburzenia te nazywamy falami EM lub promieniowaniem EM. Jak pamiętamy z poprzednich lekcji, rozchodzącej się fali możemy przypisać częstotliwość (lub długość fali) i amplitudę, którą można bezpośrednio powiązać z energią (lub mocą) przenoszoną przez falę. Jeżeli pytamy o wpływ fali EM na organizmy żywe, musimy zdać sobie sprawę, że w wysokim stopniu zależy on właśnie od tych dwóch parametrów – częstotliwości f oraz energii.

Przypatrzmy się najpierw pierwszemu z nich. Na Rys. 1 przedstawiono zakresy częstotliwości dla podstawowych typów promieniowania EM (warto zaznaczyć, że granice pomiędzy nimi są umowne i że skala na osi jest wykładnicza – przejście z punktu na punkt oznacza dziesięciokrotny wzrost częstotliwości). Fale o najniższych częstotliwościach, poniżej 10^8 Hz, utożsamiamy z falami radiowymi. Następny zakres – tzw. mikrofales – zawiera typowe częstotliwości spotykane w telefonii mobilnej (ok. 10^9 – 10^{10} Hz) lub w kuchenkach mikrofalowych. Zakres podczerwieni w dużej mierze pokrywa się z tzw. promieniowaniem cieplnym (o tym powiemy szerzej w ostatnim etapie niniejszej lekcji). Fale EM z zakresu $4 \cdot 10^{14}$ – $8 \cdot 10^{14}$ Hz to doskonale nam znane światło widzialne – od koloru czerwonego (najmniejsza częstotliwość) do fioletowego (największa częstotliwość) poprzez wszystkie kolory tęczy. Zakres powyżej światła widzialnego nazywany jest ultrafioletem (promieniowanie ultrafioletowe ze słońca odpowiada m.in. za naszą opaleniznę), zaś powyżej częstotliwości 10^{18} Hz fale EM nazywane są promieniowaniem X lub rentgenowskim (stosowanym w medycynie do prześwietlania tkanek).



Rys. 1. Zakresy różnych typów promieniowania elektromagnetycznego.

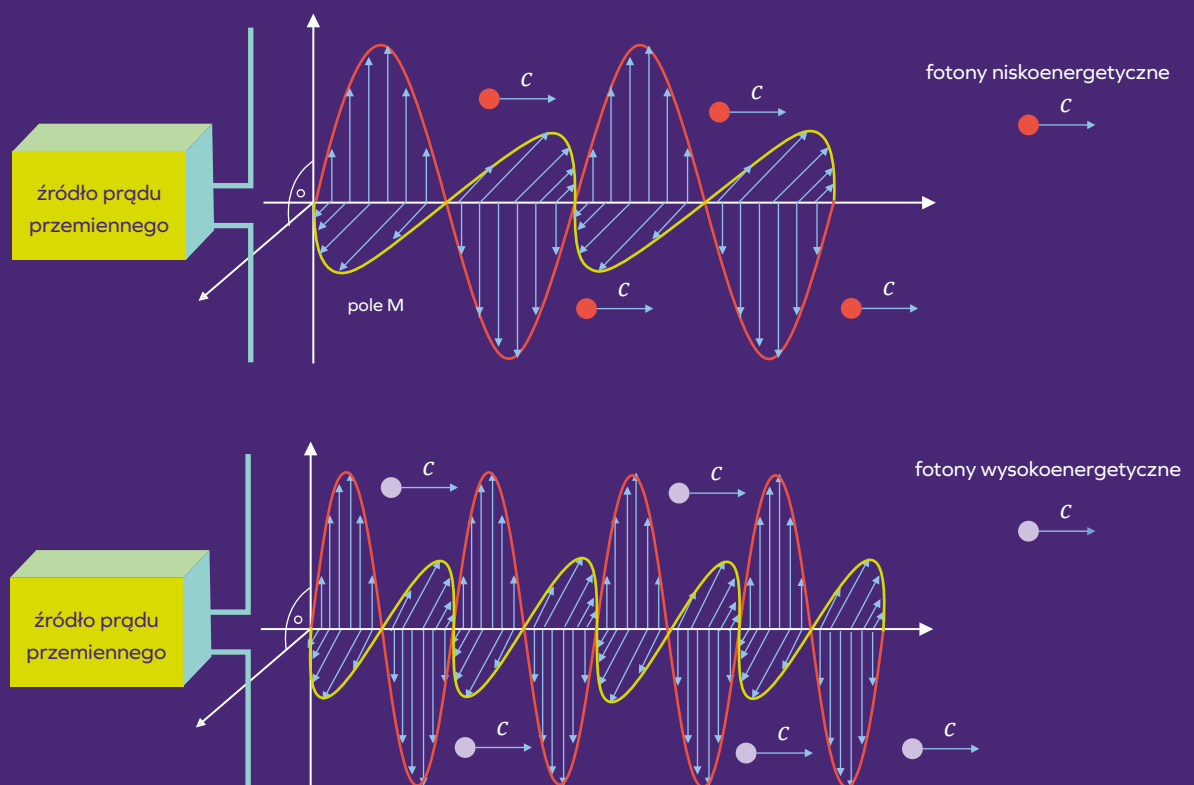
Promieniowanie poniżej 10^{15} Hz określamy jako **niejonizujące**, zaś powyżej – jako **jonizujące**. Podział ten ma ogromne znaczenie z punktu widzenia wpływu na organizmy żywe.

2. Promieniowanie jonizujące i niejonizujące

Aby lepiej zrozumieć oddziaływanie fal EM z atomami i cząsteczkami, z których zbudowana jest materia, w tym istoty żywe, warto wiedzieć, że oprócz znanego nam już opisu falowego promieniowanie EM wymaga także przyjęcia, że składa się ono z cząstek, tzw. **fotonów** (patrz Rys. 2). Fotony, podobnie jak fala EM, poruszają się z prędkością światła c , nie mają masy i cechują się jedynie energią E zależną od częstotliwości f fali EM wg bardzo prostego wzoru:

$$E = hf$$

gdzie współczynnik h to tzw. stała Plancka (czytaj: „Planka”), równa $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. To właśnie energia fotonu decyduje o tym, co stanie się w momencie przejścia fali EM przez atom. Zmiana amplitudy fali prowadzi do zmiany liczby fotonów emitowanych przez źródło, ale nie zmienia energii pojedynczej cząstki.



Rys. 2. Promieniowanie EM jako zjawisko falowe i strumień fotonów.

W Lekcji 6 mówiliśmy o różnych zjawiskach towarzyszących przechodzeniu fali EM przez materię. Przyjrzyjmy się teraz temu bardziej szczegółowo z punktu widzenia strumienia fotonów (patrz Rys. 3). Foton przelatujący w pobliżu atomu może w efekcie oddziaływania z elektronami spowodować wzbudzenie któregoś z nich na wyższy poziom energetyczny, ale może to zajść tylko wtedy, gdy energia fotonu jest dopasowana do odległości pomiędzy tymi poziomami. W takim przypadku zachodzi zjawisko podobne do rezonansu (patrz Lekcja 5), foton zostaje pochłonięty, a atom przechodzi w stan wzbudzony (Rys. 3b). Jeżeli rezonans nie zajdzie, foton przenika przez atom (Rys. 3a) – oznacza to przejście fali EM przez materię bez żadnych zakłóceń.

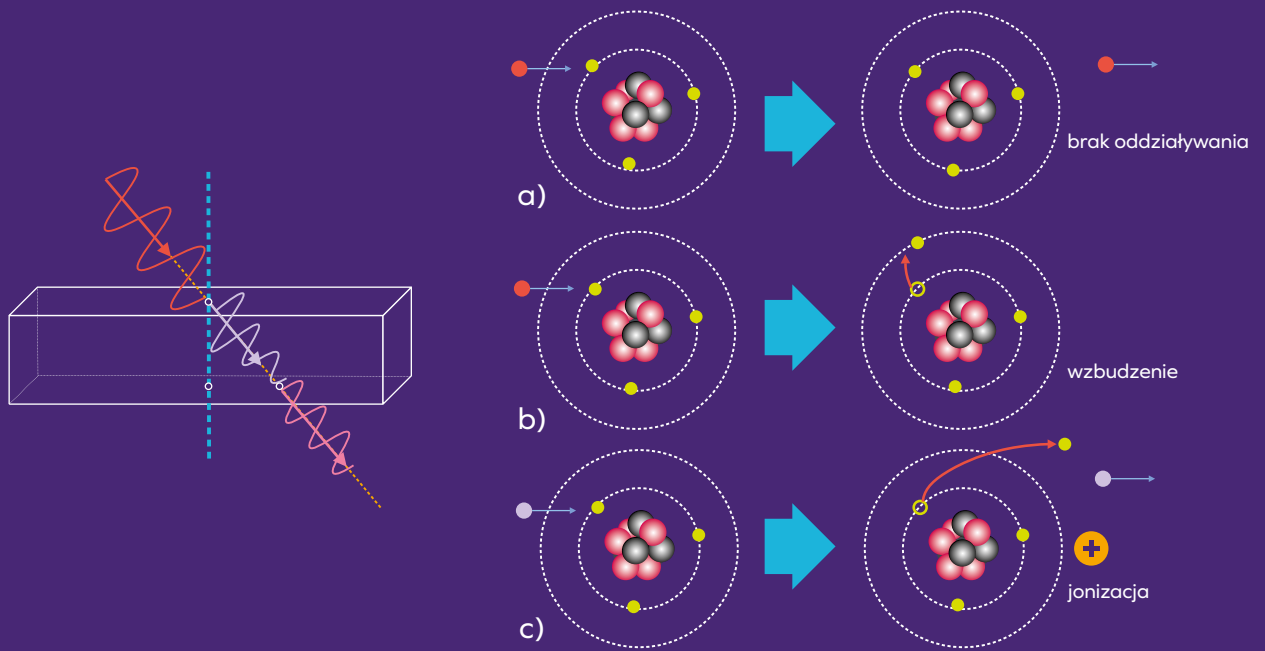
Wysokoenergetyczne fotony tzn. takie, których energia jest wystarczająca do oderwania elektronu od atomu (czyli większa od **energii jonizacji**), wybijają ujemnie naładowany elektron poza atom przemieniając go w **jon** dodatni. Zjawisko to nazywamy **jonizacją** i jest wysoce szkodliwe dla organizmów żywych – może prowadzić do uszkodzenia DNA i zaburzenia funkcjonowania komórek (w tym do rozwoju komórek nowotworowych). Ponieważ możliwość zajścia jonizacji zależy tylko od tego, czy energia fotonu jest większa od energii jonizacji atomów i cząsteczek, a energia fotonu zależy tylko od częstotliwości fali EM, podział na promieniowanie jonizujące i niejonizujące może być dokonany tylko w oparciu o wartość częstotliwości, tak jak zrobiliśmy to na Rys. 1. Czy to oznacza, że moc promieniowania nie ma znaczenia? Jak już wspomnieliśmy wzrost amplitudy fali wiąże się ze zmianą liczby fotonów emitowanych w jednostce czasu. Jeżeli zatem wyobrazimy sobie wysokoenergetyczne fotony jako niebezpieczne pociski, to zmiana mocy promieniowania prowadzi do zwiększenia szybkostrzelności działa. Oznacza to, że więcej komórek ciała może być uszkodzonych w danym przedziale czasu, przy czym nawet pojedynczy pocisk jest w stanie dokonać istotnych zniszczeń (ma to istotne znaczenie przy promieniowaniu jonizującym).

3. Efekt termiczny

Wspomnieliśmy, że jednym z możliwych efektów oddziaływania elektronów z fotonem jest wzbudzenie atomu na wyższy poziom energetyczny (Rys. 3b). Taki wzbudzony atom (lub cząsteczka) może oddać energię na dwa sposoby:

- wypromieniować energię w postaci fotonu – elektron powraca wtedy na poziom wyjściowy, a fala EM zostaje odbita (Rys. 4a);
- zderzyć się z innym atomem i przekazać mu nadmiar energii w formie energii kinetycznej – dochodzi wtedy do pochłonięcia fali EM, a atomy lub cząsteczki danego obiektu zwiększają intensywność ruchu lub drgań (Rys. 4b).

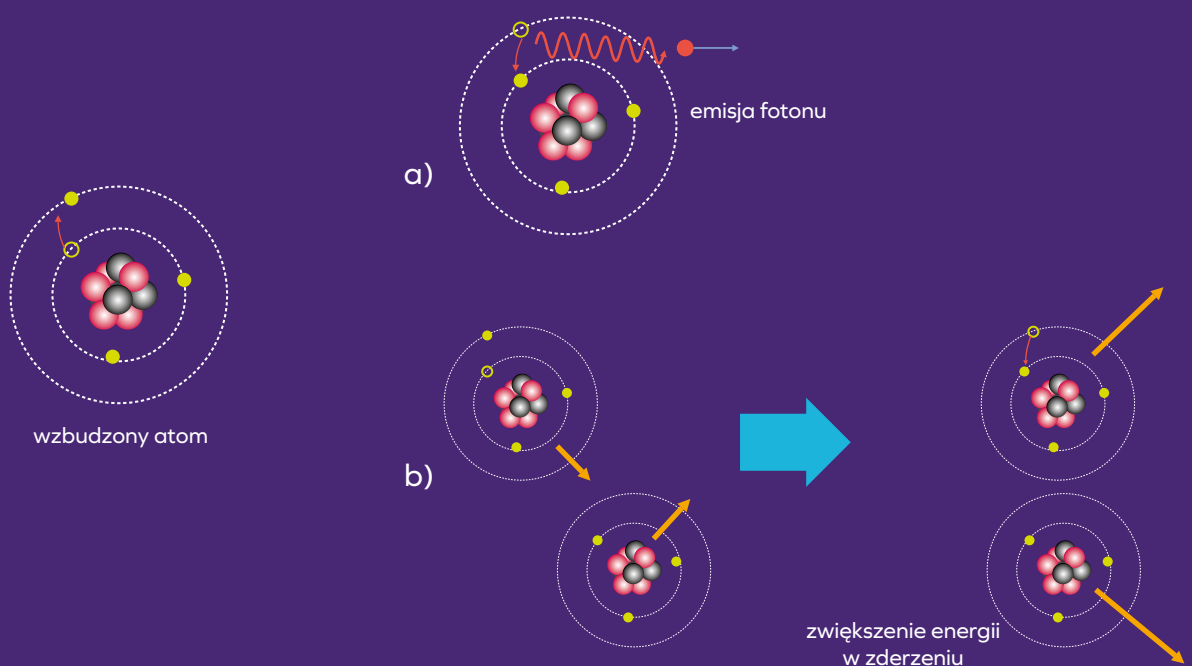
Z punktu widzenia wpływu na organizm żywy, bardziej interesująca jest ta druga ścieżka. Zwiększenie intensywności ruchu lub drgań atomów i cząsteczek danego ciała jest niczym innym, jak zwiększeniem temperatury. Dochodzi zatem w tym przypadku do podgrzania ciała, dlatego zjawisko to nazywane jest **efektem termicznym**. Aby efekt termiczny był istotny musi więc dochodzić do rezonansowego pochłaniania fotonów, przejścia wzbudzonego atomu do stanu o większej energii kinetycznej i zwielokrotnienia wzrostu temperatury przez zasypanie obiektu „morzem” fotonów. Skala efektu zależy w tym przypadku zatem istotnie od mocy promieniowania i od rodzaju materii poddanej działaniu fali EM.



Rys. 3. Różne typy oddziaływania fotonów z elektronami w atomach.

Kuchenka mikrofalowa jest doskonałym przykładem działania efektu termicznego. Częstotliwość emitowanych fal, bliska $2,45 \text{ GHz} = 2,45 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ (czyli z zakresu używanego w telefonii mobilnej), jest wystarczająco blisko częstotliwości rezonansowego pochłaniania przez cząsteczki wody, by pobudzić je do silnego drgania, a tym samym doprowadzić do ogrzania żywności, w której te cząsteczki się znajdują. Moc promieniowania typowej kuchenki sięga przy tym 1000 W.

O ile jonizacja może zajść tylko dla promieniowania w zakresie powyżej 10^{15} Hz , czyli przy częstotliwościach 100000 razy większych od tych stosowanych w telefonii mobilnej, to z efektem termicznym na pewno trzeba się liczyć i uwzględnić w normach bezpieczeństwa, których spełnienie uzależnione jest od mocy emitowanych sygnałów.



Rys. 4. Różne sposoby uwolnienia energii przez wzbudzony atom.

4. Współczynnik SAR

Nauczeni przykładem kuchenki mikrofalowej powinniśmy z dużą ostrożnością podchodzić do stosowania mikrofal w telefonii mobilnej. Nadmierne podgrzanie żywej tkanki może być naprawdę niebezpieczne, szczególnie, że składa się ona w większej części z wody wyjątkowo podatnej na pochłanianie promieniowania EM w tym zakresie częstotliwości.

Z tego powodu wprowadzono odpowiednie normy prawne regulujące, zależnie od częstotliwości, poziomy dopuszczalne w miejscach ogólnie dostępnych. W zakresach częstotliwości telefonii mobilnej największy dopuszczalny poziom natężenia promieniowania EM – **10 W/m²** – oraz natężenia pola elektrycznego – **61 V/m**. Ponieważ same te wielkości nie wyrażają bezpośrednio stopnia pochłaniania energii przez żywą tkankę, wprowadzono dodatkowo współczynnik tzw. absorpcji swoistej nazywany w skrócie **SAR** (od angielskiego skrótu *specific absorption rate*), który mierzony jest w W/kg i pozwala oszacować jaka moc promieniowania EM pochłaniana jest w przeliczeniu na kilogram masy ciała.

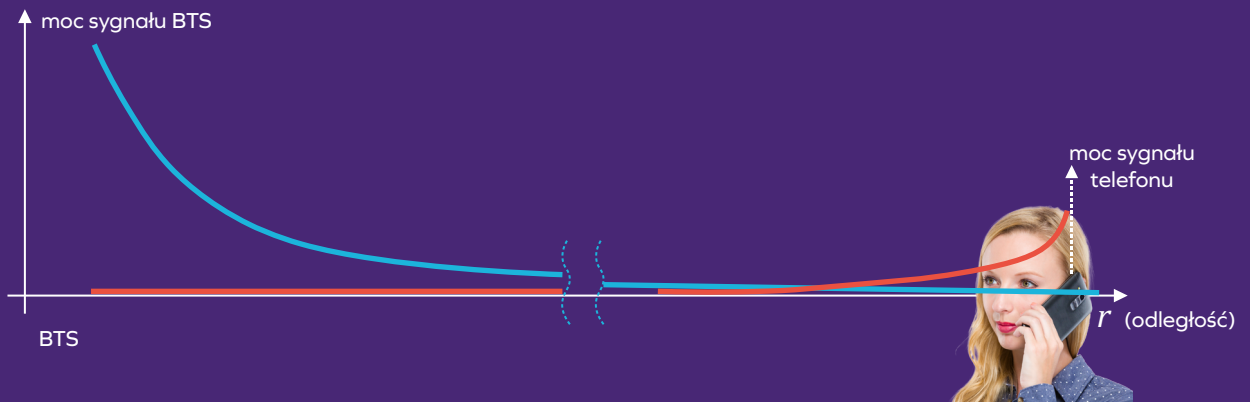
Przyjęta w Europie bezpieczna wartość SAR jest na poziomie **2 W/kg** i zapewnia, że temperatura tkanki nie zostanie podniesiona bardziej niż o 1 °C.

Chociaż to zazwyczaj stacje bazowe budzą najwięcej kontrowersji i obaw dotyczących wpływu na zdrowie mieszkańców znajdujących się w ich sąsiedztwie, zwróćmy uwagę, że ich moc nadajnika nie przekracza zazwyczaj 40 W, a natężenie fal EM przez nie generowanych dość szybko spada wraz z odległością. Jeżeli zestawimy to z mocą nadajnika w telefonie, która nie przekracza 2 W, ale również faktem, że telefon w trakcie rozmowy trzymany jest zwykle przy samej głowie, okazuje się, że to właśnie fale EM wytwarzane w naszym własnym telefonie mają decydujące znaczenie (patrz Rys. 5). Zwróćmy przy tym uwagę, że moc nadajnika telefonu jest kilkaset razy mniejsza od mocy kuchenki mikrofalowej.

Każdy telefon charakteryzuje się przypisaną mu wartością SAR zazwyczaj podawaną oddzielnie dla głowy i dla całego ciała. Telefony nie spełniające normy bezpieczeństwa (tzn. naruszające warunek $SAR < 2 \text{ W/kg}$) nie są dopuszczone do sprzedaży. Typowe wartości SAR popularnych telefonów są znacznie mniejsze niż 2 W/kg.

Warto zaznaczyć, że podane przez producenta wartości SAR są wartościami maksymalnymi tzn. zmierzonymi w warunkach, w których telefon nadaje sygnał z największą możliwą mocą. Zazwyczaj moc nadawanego sygnału jest znacznie mniejsza. Uzależniona jest ona od takich czynników jak odległość od stacji bazowej, rodzaju przeszkód dla sygnału pomiędzy telefonem a stacją, a nawet sposobu trzymania telefonu.

Od czasu do czasu można spotkać się z głosami o szkodliwym wpływie promieniowania EM o charakterze innym niż jonizacja lub efekty termiczne, ale trzeba wyraźnie podkreślić, że jak na razie żadne z tych doniesień nie zostało potwierdzone przez solidne badania naukowe.

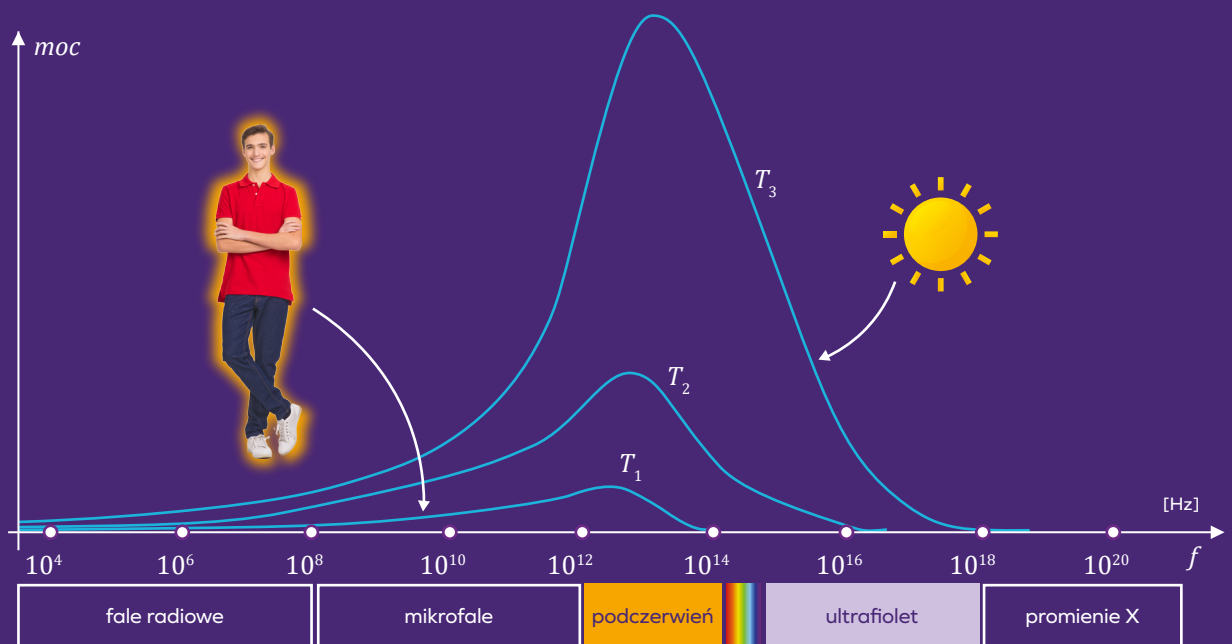


Rys. 5. Poziom mocy sygnału nadawanego przez BTS i telefon w zależności od odległości od anteny.

5. Promieniowanie termiczne

Na koniec, aby podkreślić, że generowanie promieniowania EM nie jest niczym tajemniczym, ani nie ogranicza się do ludzkich osiągnięć cywilizacyjnych (takich jak telefonia mobilna), zauważmy, że każdy z nas jest nadajnikiem fal EM!

Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego (0 K) jest źródłem tzw. promieniowania termicznego (lub ciepłego) zawierające teoretycznie składowe o każdej możliwej częstotliwości (patrz Rys. 6). Zgodnie z prawem promieniowania ciepłego jego moc dla częstotliwości małych i bardzo dużych jest znikoma, istnieje natomiast jedno maksimum, które jest tym wyższe i tym bardziej przesunięte w kierunku dużych częstotliwości im większa jest temperatura ciała.



Rys. 6. Moc promieniowania ciepłego dla różnych częstotliwości w zależności od temperatury obiektu.

Dla człowieka (temperatura ok. 37°C) to maksimum przypada w zakresie promieniowania podczerwonego, które nie jest dla nas widoczne. Można je za to doskonale obserwować przez kamery termowizyjne.

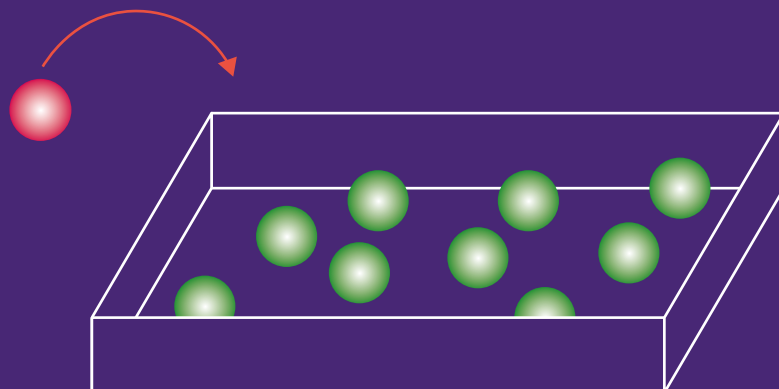
Ciała podgrzane do odpowiednio dużej temperatury zaczynają świecić (np. rozpalony – jak to mówimy – „do czerwoności” metal). Wynika to z tego, że wyrzucenie krzywej promieniowania zaczyna wchodzić w zakres promieniowania widzialnego.

Słońce, o temperaturze powierzchni bliskiej 5500°C , emituje nie tylko promieniowanie podczerwone i widzialne – duża część fal EM przypada na zakres ultrafioletu, co jest miłym dodatkiem dla każdego amatora opalania.



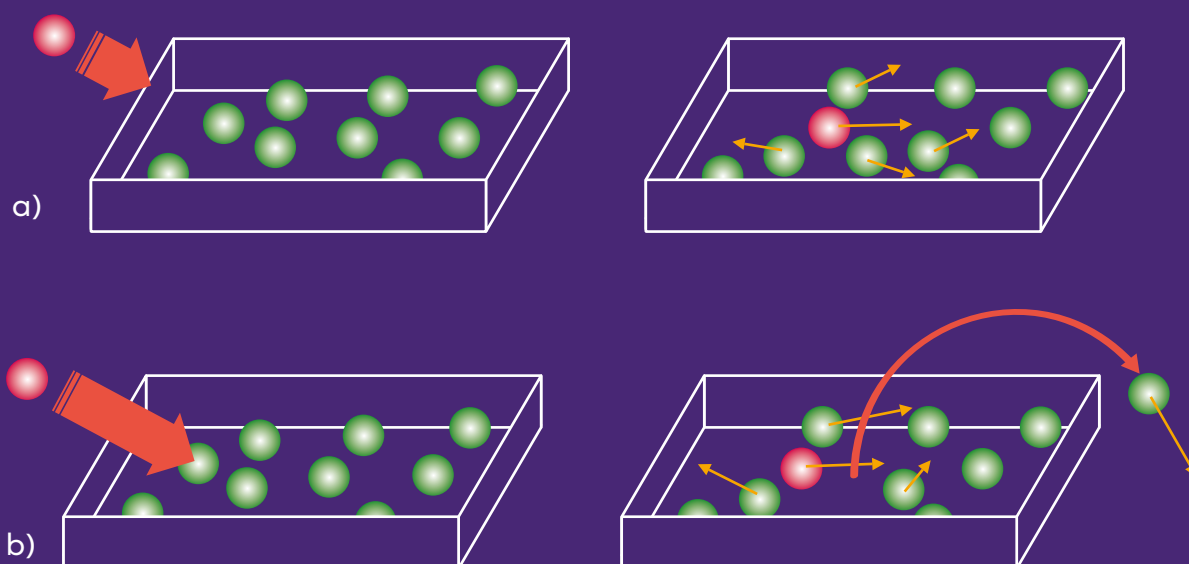
Doświadczenie

Przeprowadzimy doświadczenie, które pozwoli nam niejako zasymulować zjawisko jonizacji oraz efekt termiczny. Przygotujmy otwarte pudełko o raczej niewysokich ściankach i umieśćmy w nim kilka małych piłek (np. tenisowych) – patrz Rys. 7. Zamknięte wewnątrz ścianek piłki będą modelem elektronów, które nie mogą opuścić pudełka, dopóki nie zostanie im dostarczona odpowiednio duża energia. Weźmy do ręki jedną piłkę, która będzie odpowiednikiem fotonu.



Rys. 7. Symulacja zjawiska jonizacji i efektu termicznego.

1. Wrzucimy „foton” do pudełka nie nadając mu zbyt dużej prędkości. Zauważmy, że część piłek na skutek zderzenia z „fotonem” zacznie się poruszać i zderzać z innymi piłkami (Rys. 8a). Uzyskujemy w ten sposób pewien model efektu termicznego. Energia przekazana przez piłkę nie była wystarczająca do tego, by wybić „elektrony” z pudełka, ale zwiększyła ich energię kinetyczną.
2. Wrzucimy „foton” ponownie, ale tym razem z możliwie dużym impetem starając się trafić którąś z piłek w pudełku. Przy odrobinie szczęścia powinno się udać wybić jeden z „elektronów” poza ścianki pudełka (Rys. 8b). Oznacza to, że energia „fotonu” była wystarczająca do uzyskania efektu „jonizacji”.



Rys. 8. Różne zachowanie się piłek w zależności od różnej energii początkowej piłki „fotonu”.



Do dyskusji:

- Co w naszym modelu oznaczają ścianki pudełka?
- Czy zwiększenie wysokości ścianek ma wpływ na „jonizację”?



Słowniczek

Efekt termiczny – rozgrzewanie się materii pod wpływem oddziaływania z promieniowaniem elektromagnetycznym.

Energia jonizacji – energia, którą trzeba dostarczyć do atomu lub cząsteczki by dokonać jej jonizacji.

Foton – cząstka promieniowania elektromagnetycznego. Ma zerową masę i niesie energię proporcjonalną do częstotliwości promieniowania.

Jon – dodatnio lub ujemnie naładowany atom. Jon cechuje się nadmiarową lub niedostateczną liczbą elektronów w stosunku do obojętnego elektrycznie atomu.

Jonizacja – przekształcenie obojętnego atomu lub cząsteczki w jon poprzez oderwanie elektronu.

Promieniowanie jonizujące – rodzaj fal elektromagnetycznych o energii wystarczającej do jonizacji atomów i cząsteczek.

Promieniowanie EM – inna nazwa dla fal elektromagnetycznych.

Promieniowanie niejonizujące – rodzaj fal elektromagnetycznych o energii zbyt małej do jonizacji atomów i cząsteczek.

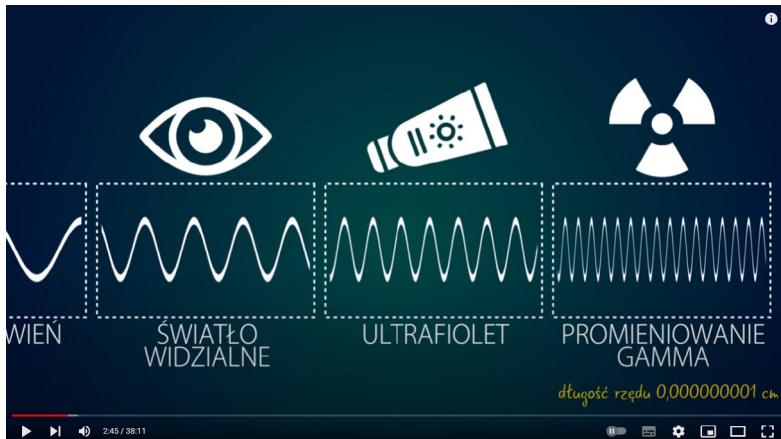
Promieniowanie termiczne (cieplne) – emisja fal elektromagnetycznych przez ciało o temperaturze większej od zera bezwzględnego (0 K).

SAR – współczynnik określający moc promieniowania elektromagnetycznego pochłanianego przez żywą tkankę w przeliczeniu na kilogram masy ciała. Jednostka – W/kg.



Materiały zewnętrzne

1. 5G i telefony komórkowe – czy są dla nas zagrożeniem?



Zeskanuj QR kod



2. 5G a zdrowie – czy szkodzi?



Zeskanuj QR kod



Praca domowa

1. Sprawdź SAR swojego telefonu. W niektórych telefonach można uzyskać tę informację za pomocą krótkiego kodu USSD: *#07#. Jeżeli kod nie zadziała, wpisz w wyszukiwarkę internetową model telefonu oraz słowo kluczowe „SAR”.

2. Oblicz jakiej częstotliwości musi być promieniowanie EM, by dokonać jonizacji cząsteczki tlenu. Aby do tego doszło, energia fotonu musi przekroczyć energię jonizacji. Jaki to rodzaj promieniowania EM? Przyjmij energię jonizacji $E_j = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ oraz stałą Plancka $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Dane:

$$E_j = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J} - \text{energia jonizacji}$$

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} - \text{stała Plancka}$$

Szukane:

$$f = ?$$