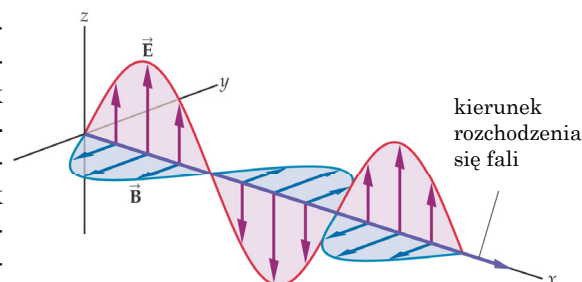


Promieniowanie to trzeci, obok przewodnictwa i konwekcji (unoszenia), sposób przenoszenia energii, który może odbywać się przez emisję cząstek ze źródła promieniotwórczego (np. cząstek alfa lub beta), bądź też fal elektromagnetycznych. Wyróżnia się on tym, że nie wymaga istnienia ośrodka materialnego pomiędzy źródłem emisji a odbiornikiem. W niniejszym opracowaniu postaramy się pokrótce omówić własności promieniowania elektromagnetycznego.

Poruszając końcem patyka po wodzie, wzbudzamy na jej powierzchni fale mechaniczne. Podobnie poruszający się w tę i z powrotem ładunek elektryczny, wytwarza w przestrzeni **falę elektromagnetyczną**. Poruszający się ładunek oznacza bowiem przepływ prądu elektrycznego, a jak wiadomo, w otoczeniu prądu elektrycznego pojawia się pole magnetyczne. Gdy prąd jest zmienny, pole magnetyczne również jest zmienne. Z kolei zmienne pole magnetyczne indukuje zmienne pole elektryczne (prawo Faradaya), a zmienne pole elektryczne indukuje zmienne pole magnetyczne (prawo Maxwella). Jeśli jedno pole wykonuje drgania, to drga również drugie pole (zawsze w płaszczyznach do siebie prostopadłych). Te drgające pola wzajemnie się odtwarzają i przyczyniają się do powstania fali elektromagnetycznej (rys. 1), która rozchodzi się od drgającego ładunku. Prędkość rozchodzenia się obu pól jest taka sama, dzięki czemu pozostają one w idealnej równowadze, wzajemnie na siebie oddziałując. Istotna różnica między falami mechanicznymi a elektromagnetycznymi polega na tym, że do rozchodzenia się fal mechanicznych, np. dźwięku, potrzebny jest ośrodek materialny, np. powietrze. Natomiast fale elektromagnetyczne nie wymagają obecności ośrodka i mogą się rozchodzić również w próżni. Cechą charakterystyczną tych fal jest także to, że rozchodzą się w próżni ze stałą prędkością $c=299\,792\,458\text{ m/s}$. W ośrodkach materialnych prędkość ta jest zawsze mniejsza (równa c/n , gdzie n - współczynnik załamania) i zależna od rodzaju danego ośrodka oraz od częstotliwości fali.



Rys. 1 Fala elektromagnetyczna

Falę elektromagnetyczną, jak każdą falę mechaniczną, charakteryzuje:

- **częstotliwość ν** , czyli liczba pełnych zmian pola magnetycznego i elektrycznego w ciągu jednej sekundy, wyrażona w hercach (Hz),
- **okres zmienności T** , zdefiniowany jako odwrotność częstotliwości: $T=1/\nu$, czyli czas, w którym nastąpi powrót do tej samej fazy pola elektrycznego i magnetycznego,
- oraz **długość fali λ** , czyli odległość między sąsiednimi punktami, w których pole elektryczne i magnetyczne mają taką samą fazę.

Wielkości te są ze sobą związane: im większa jest częstotliwość, tym długość fali jest mniejsza ($\nu=c/\lambda$).

Okazuje się jednak, że nie jest to jedyny z możliwych opisów promieniowania elektromagnetycznego, gdyż promieniowanie to możemy traktować również jako strumień małych porcji energii (kwantów), nazywanych **fotonami**. Należy jednak pamiętać, że do opisu ruchu cząstek korzystamy z takich wielkości jak pęd i energia cząstki a nie długość fali czy częstotliwość. Muszą więc istnieć ściśle relacje między wielkościami opisującymi cząstkę i falę. Zgodnie z tzw. relacjami de Broglie'a, pojedynczy foton niesie energię $E=h\nu=hc/\lambda$ oraz pęd $p=h\nu/c=h/\lambda$. I uwaga, tak opisany foton jest cząstką bez masy! Stała h to stała przyrody, nazywana stałą Plancka, o wartości liczbowej wynoszącej: $h=6,626\cdot10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ [dżul · sekunda] = $4,136\cdot10^{-15}\text{ eV}\cdot\text{s}$ [elektronowolt · sekunda]. Wciąż pozostaje niezrozumiałe to, dlaczego światło w niektó-



ELEKTRONOWOLT

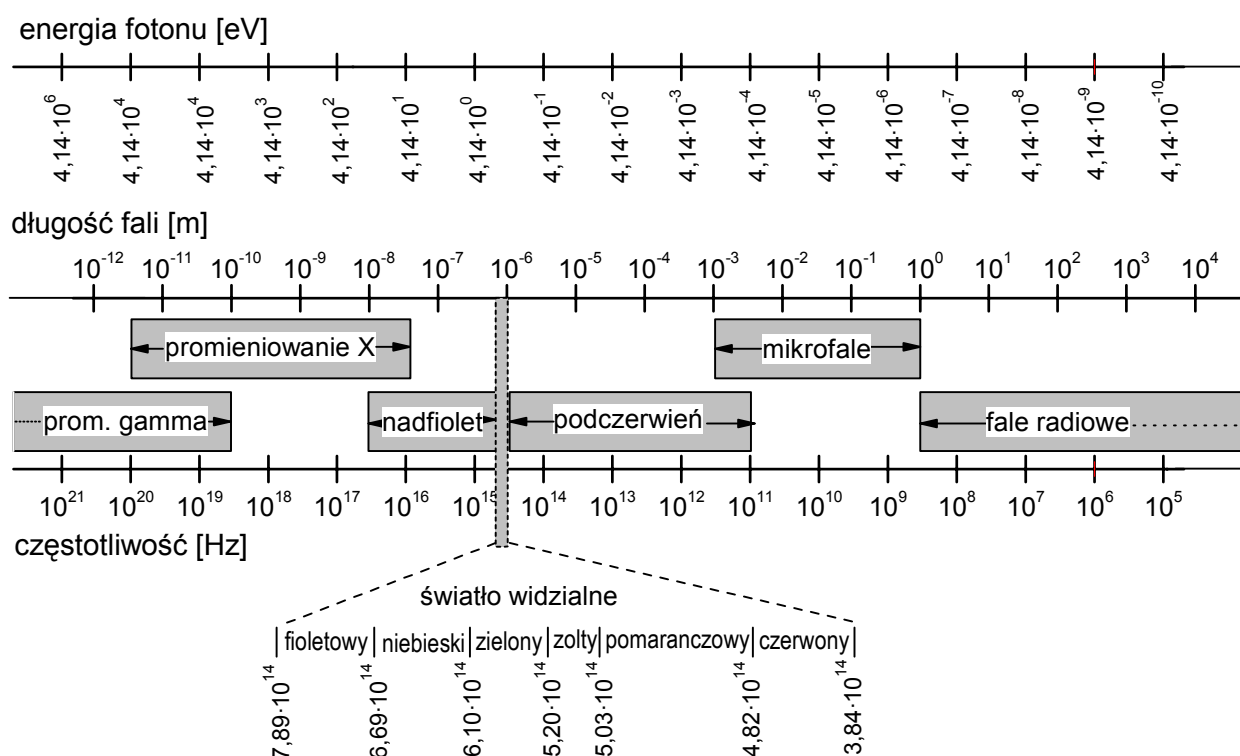
Zastosowana w powyższym wyrażeniu jednostka energii — elektronowolt (eV), nie jest jednostką z Układu SI, ale została dopuszczona do użycia, jako bardzo wygodna w atomistyce i fizyce jądrowej. Jej definicja jest następująca: elektron poruszający się pomiędzy okładkami kondensatora próżniowego o przyłożonym napięciu 1 V (wolta) uzyskuje energię kinetyczną 1 elektronowolta, $1\text{ eV} = 1,602\cdot10^{-19}\text{ J} = 0,16\text{ aJ}$ [1 attodżul = 10^{-18} J].

rych zjawiskach wykazuje naturę falową (odbicie, załamanie, interferencja, dyfrakcja, polaryzacja), a w innych korpuskularną (efekt fotoelektryczny, zjawisko Comptona). Dwoistość natury promieniowania elektromagnetycznego nazywamy **dualizmem korpuskularno-falowym** i trzeba ją przypisywać raczej brakom naszego aparatu pojęciowego, który swe wyobrażenia wytworzone w obcowaniu z makroświatem zmuszony jest przenosić na zjawiska mikroskopowe. Obraz falowy opisuje wystarczająco dobrze rozchodzenie się fal radiowych (duże długości fal), a zjawiska świetlne wymagają posługiwania się już dwoma opisami. Im promieniowanie elektromagnetyczne ma większą częstotliwość (mniejszą długość fali), tym efekty korpuskularne przejawiają się coraz silniej i opis korpuskularny jest niezbędny. Naturę światła wyjaśnia obecnie elektrodynamika kwantowa.



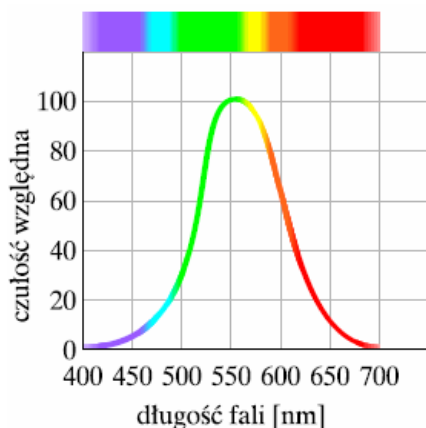
PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE MOŻEMY TRAKTOWAĆ ZARÓWNO JAKO FAŁĘ ELEKTROMAGNETYCZNĄ, KTÓRĄ DEFINIUJEMY JAKO ROZCHODZENIE SIĘ W PRZESTRZENI ZMIENNYCH PÓŁ ELEKTRYCZNYCH I MAGNETYCZNYCH, BĄDŹ TEŻ JAKO STRUMIEŃ MAŁYCH PORCJI ENERGII ZWANYCH FOTONAMI.

Na rys. 2 przedstawione jest **widmo** promieniowania elektromagnetycznego. Zawiera ono oprócz informacji o długości fali (w skali logarytmicznej) i częstotliwości także informacje o energii fotonów wyrażone w elektronowoltach. Widmo, będące uporządkowanym zbiorem długości fal (częstotliwości lub energii), nie ma końców, gdyż nie ma żadnego naturalnego ograniczenia długości fali elektromagnetycznej z żadnej strony. Niektóre jego zakresy opatrzone są nazwami, np. promieniowanie rentgenowskie (X) czy fale radiowe. Odnoszą one z grubsza zdefiniowane zakresy długości fal, w których powszechnie używa się pewnych źródeł i detektorów. Mają one również charakter historyczny. Stopniowo jak odkrywano kolejne rodzaje fal przypisywano im konkretne nazwy.



Rys. 2 Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Dla nas szczególnie ważnym zakresem widma jest oczywiście **zakres widzialny**. Na wiązkę światła białego składają się wszystkie barwy z zakresu widzialnego widma. Do rozdzielania światła białego na barwy składowe służy pryzmat. Na czym polega to zjawisko? Prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku zależy od rodzaju ośrodku opisywanego przez współczynnik załamania, ten zaś zależy od częstotliwości fali. Ponieważ każda składowa światła białego ma inną częstotliwość w związku z tym załamuje się inaczej. Światło fioletowe odchylane jest bardziej niż czerwone. Granice obszaru widzialnego trudno określić, gdyż



Rys. 3 Względna czułość przeciętnego ludzkiego oka na fale elektromagnetyczne

względna czułość ludzkiego oka jest różna dla różnych długości fali (rys. 3). Środek obszaru widzialnego przypada przy długości fali około 555 nm, czemu odpowiada wrażenie barwne, które zwiemy barwą żółtozieloną. Krzywa czułości oka dąży do zera zarówno po stronie fal dłuższych jak i krótszych. Jeżeli przyjmiemy na przykład, że granicę taką stanowi poziom, przy którym czułość oka spada do 1% jej wartości maksymalnej, to granice te wynoszą wtedy 430 nm i 690 nm.

Największe długości fal mają oczywiście **fale radiowe**. Mają szerokie zastosowanie w radiofonii i telewizji, komunikacji radiowej i do bardziej wyspecjalizowanych celów. Te o najdłuższych długościach fali stosowane są w radionawigacji morskiej ze względu na słabe tłumienie przez oceany i atmosferę.

Mikrofale. Zakres długość tych fal to 1 mm - 30 cm. Od czasu drugiej wojny światowej na szerszą skalę stosuje się je w technice. Najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami, w których są one wykorzystywane, to radary (długość fali najczęściej 3 cm) oraz kuchenki mikrofalowe. Mikrofały są używane także do obserwacji astronomicznych w radioteleskopach.



TELEFONY KOMÓRKOWE

Nasze telefony komórkowe pracują na częstotliwości 900 oraz 1800 MHz (megaherc = 1 000 000 herców). Długość fali emitowanego przez nie promieniowania przypada na mikrofały. Zatem dlaczego nasz mózg w trakcie rozmowy nie gotuje się, skoro w mikrofalówkach, które używają tego samego rodzaju fal, możemy podgrzewać jedzenie? Odpowiedź jest prosta. Różnica między tymi urządzeniami jest taka, że emitują one promieniowanie o *różnej mocy*¹. Moc telefonów komórkowych jest rzędu ułamka wata, z kolei mikrofalówek 1 kW (kilowat = 1000 wat). Dlatego promieniowanie wyemitowane przez nasze telefony komórkowe, ze względu na małą energię jaką niesie, nie jest w stanie znacząco podgrzać naszej głowy.

Fale z zakresu od 1 mm do 0,7 μm stanowią **promieniowanie podczerwone** zwane inaczej **ciepłnym** lub krótko **podczerwienią**. Emitowane są przez rozgrzane ciała w wyniku wzbudzeń ciepłych atomów wewnątrz substancji. Im niższa temperatura tym mniejsze natężenie i dłuższe fale. Ciała w temperaturze pokojowej wysyłają fale o długości 45 μm . Ciała o temperaturze do około 400°C wysyłają praktycznie tylko podczerwień. Ten zakres widma może służyć do zbierania informacji o temperaturze emitujących je przedmiotów. Znanymi przyrządami są tu noktowizory i kamery termowizyjne. Inne zastosowania to także: odczyt płyt CD laserem emitującym fale o długości 650-790 nm, przekaz danych w światłowodzie, przekaz danych w powietrzu, zdalne sterowanie pilotem telewizora czy np. bramy garażu, a także komunikacja w standardzie IrDA (ang. **I**nfrared **D**ata **A**ssociation).

Promieniowanie nadfioletowe zwane inaczej **ultrafioletowym** obejmuje zakres od 4 nm do 400 nm. Jego naturalnymi źródłami są m.in. ciała o dostatecznie wysokiej temperaturze. Znikome, ale zauważalne ilości tego promieniowania wysyłają już ciała o temperaturze 3000 K, a ze wzrostem temperatury natężenie tego promieniowania wzrasta. Silnym źródłem jest Słońce, którego temperatura powierzchni wynosi 6000 K. Nafiolet emitują także niektóre znane powszechnie urządzenia: latarnie uliczne, testery banknotów, lampy rtęciowe... Promieniowanie nadfioletowe ma silne działanie fotochemiczne (przyspiesza reakcje chemiczne). Przy długości fali poniżej 300 nm wywołuje już **jonizację** i może być zabójcze dla organizmów żywych.



CZYM JEST JONIZACJA?

Jonizacja polega na oderwaniu jednego lub kilku elektronów od atomu, który w wyniku tego staje się jonem dodatnim. Energia jonizacji dostarczana jest do atomu w takich procesach jak: absorpcja promieniowania, zderzenia atomu z elektronami i innymi atomami lub jonami.

¹ moc to ilość energii wypromieniowanej w jednostce czasu, jednostką mocy jest wat; jeżeli dane urządzenie w ciągu jednej sekundy wyemituje energię 1 J, to ma ono moc 1 wata

Przed promieniowaniem nadfioletowym chroni nas warstwa ozonowa, pochłaniająca promieniowanie o długości fali poniżej 290 nm, a także powietrze, które pochłania całkowicie promieniowanie nadfioletowe w zakresie dalekiego ultrafioletu. Ze względu na działanie, docierające ze Słońca promieniowanie, dzieli się na trzy zakresy:

- **UV-A** (320-400 nm), nie jest w normalnych dawkach szkodliwe i stosuje się je klinicznie w leczeniu niektórych dolegliwości skóry, jak np. łuszczycy. Jest także wykorzystywane do stymulowania wytwarzania witaminy D u pacjentów, którzy są uczuleni na preparaty z tą witaminą;
- **UV-B** (290-320 nm), powoduje zaczerwienienie skóry, po którym następuje pigmentacja czyli opalanie się;
- **UV-C** (230-290 nm), jest szczególnie szkodliwe, może powodować choroby skóry, m.in. raka skóry. Normalnie zatrzymywane jest przez warstwę ozonową, ale pojawia się przy jej zubożeniu.

Promieniowanie nadfioletowe ma wiele zastosowań w biologii (badania mikroskopowe tkanek i komórek), mineralogii (analiza minerałów), farmacji (sterylizacja), przemyśle spożywczym (konserwowanie żywności), przemyśle chemicznym (przyspieszanie reakcji) i wielu innych.



„OKNA” ATMOSFERYCZNE

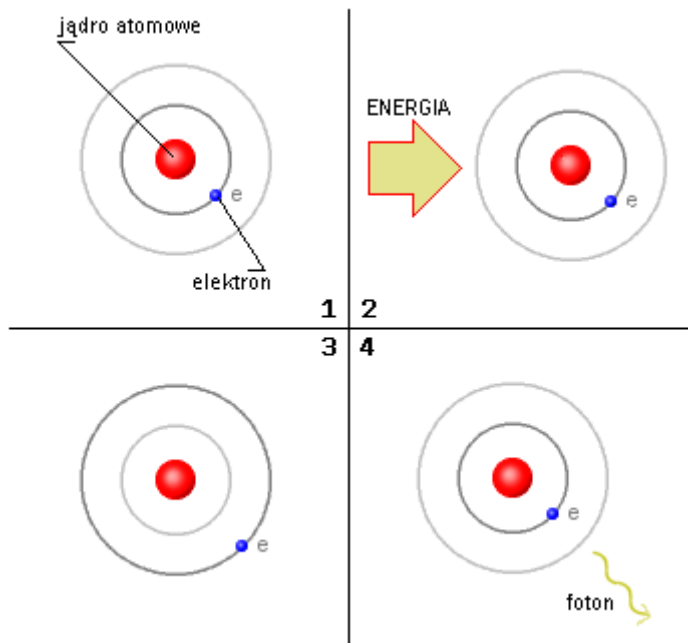
Do zewnętrznych warstw atmosfery dociera promieniowanie elektromagnetyczne z całego widma. Jednak większość tego promieniowania pochłania atmosfera i do powierzchni Ziemi dochodzi tylko niewielka jego część. Przechodzenie fal elektromagnetycznych przez atmosferę jest możliwe tylko dla trzech zakresów („okien”) długości fal:

- „okno” radiowe: obejmuje fale o długości ok. 1 mm — 20 m,
- „okno” optyczne: obejmuje fale o długości ok. 300 nm (0,3 μ m) — 2000 nm (2 μ m),
- „okno” mikrofalowe: obejmuje fale o długości ok. 8 μ m — 13 μ m.

Promieniowanie rentgenowskie odkrył w 1895 roku W.C. Roentgen (pierwszy laureat Nagrody Nobla z fizyki) i nazwał je **promieniowaniem X**. Zakres promieniowania rentgenowskiego pokrywa się częściowo z niskoenergetycznym (tzw. miękkim) promieniowaniem gamma. Rozróżnienie wynika z mechanizmu wytwarzania promieniowania. Promieniowanie gamma powstaje m.in. w przemianach energetycznych zachodzących w jądrze atomowym, natomiast promieniowanie rentgenowskie wytwarzane jest m.in. w lampach rentgenowskich. Przyspieszone w polu elektrycznym elektrony hamowane są przez materiał anody tracąc swoją energię, która zostaje wypromieniowana jako **promieniowanie hamowania**. Promieniowanie rentgenowskie wykorzystuje się w badaniach strukturalnych (rentgenowska analiza strukturalna), w defektoskopii oraz do badania pierwiastkowego składu chemicznego (XRF - rentgenowska analiza fluorescencyjna, pozwala ustalić liczbę atomową Z badanego materiału). Ponadto promieniowanie rentgenowskie szeroko stosuje się w diagnostyce medycznej wykorzystując fakt, że tkanka łączna przepuszcza, a kości pochłaniają promienie X.

Na wysokoenergetycznym końcu widma mamy tak zwane **promieniowanie gamma**. Są to fale elektromagnetyczne o długości krótszej od 10^{-10} m. Źródłem promieniowania gamma są procesy zachodzące w jądrze atomowym (np. rozpad pierwiastków promieniotwórczych zawartych w skorupie ziemskiej lub reakcje jądrowe) oraz promieniowanie kosmiczne powstające podczas procesów jądrowych zachodzących w gwiazdach i galaktykach. Najsilniejszym źródłem kosmicznego promieniowania są tak zwane błyski gamma. Podczas tego zjawiska trwającego raptem kilka sekund, energia emitowana w postaci promieni gamma sięga 10^{46} J! Promieniowanie gamma potrafi wnikać w głąb materii, stąd druga jego nazwa - **promieniowanie przenikliwe**. Podobnie jak promienie rentgenowskie jest ono najsilniej pochłaniane przez substancje o dużej liczbie atomowej i gęstości. Dlatego właśnie ołów stanowi dobry materiał osłonowy (jeszcze lepsza byłaby platyna, gdyby nie... cena). Promieniowanie gamma może uszkadzać zarówno żywe komórki, jak i nowotworowe. Dlatego znalazło szerokie zastosowanie w medycynie (głównie onkologii) do naświetlania chorych tkanek, a także w konserwowaniu żywności. Oprócz tego stosuje się je do wykrywania wad materiałów (defektoskopia).

Atom jako źródło światła? Rozważmy dla uproszczenia **planetarny model atomu** (rys. 4). Każdy pierwiastek ma określoną liczbę elektronów krążących wokół jądra atomowego. Wiąże się z tym specyficzny dla danego pierwiastka układ orbit elektronowych, czyli stanów energetycznych. Stany te charakteryzują ściśle określone wartości energii. Mówimy, że są one **skwantowane**. Elektron znajdujący się w większej odległości od jądra ma większą energię potencjalną. Jeżeli elektron zostanie przeniesiony na wyższy poziom ener-



Rys. 4 Emisja fotonu

1. Atom w stanie podstawowym
2. Absorpcja energii
3. Atom w stanie wzbudzonym
4. Powrót elektronu do stanu podstawowego i emisja fotonu

getyczny, na przykład poprzez absorpcję energii czy zderzenie z innym elektronem, to powstały stan atomu nazywamy **stanem wzbudzonym**. Każdy układ dąży do osiągnięcia jak najmniejszej energii, także atom. Stąd elektron przebywa w takim stanie na ogół bardzo krótko. W czasie, gdy elektron powraca do stanu o niższej energii, następuje emisja fotonu o energii równej różnicy energii obu stanów. Jeżeli emisja światła następuje w trakcie wzbudzania materiału, mówimy wtedy o **fluorescencji**, jeżeli po - o **fosforescencji**. Sam mechanizm świecenia

(**luminescencji**) jest jednak dość skomplikowany, gdyż opisanie go wymaga poznania procesów pochłaniania promieniowania, wzbudzania elektronów w atomach oraz mechanizmów przekazywania i emitowania energii.

Na koniec kilka słów o **promieniowaniu kosmicznym**, docierającym do powierzchni Ziemi. W skład tego promieniowania, którego źródłem jest zarówno Słońce jak i bardziej oddalone obiekty, jak gwiazdy czy galaktyki, wchodzi:

- promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo różnych długościach fali: od promieniowania radiowego czy mikrofalowego (jak np. promieniowanie reliktoowe, będące echem Wielkiego Wybuchu) przez promieniowanie X do promieniowania gamma o bardzo dużej energii,
- promieniowanie korpuskularne - głównie protony, z niewielką domieszką jonów,
- neutrina, czyli cząstki elementarne o bardzo małej masie (prawdopodobnie ok. 250 tysięcy razy mniejszej od masy elektronu), charakteryzujące się wyjątkowo słabym oddziaływaniem z ośrodkiem, przez który przechodzą.

Protony i fotony o wielkiej energii zderzają się z atomami w górnej warstwie atmosfery ziemskiej, wywołują reakcje jądrowe, których wynikiem jest zarówno rozbitcie jąder atomów powietrza jak i tworzenie nowych cząstek. Głównymi produktami pierwotnych zderzeń są zazwyczaj obdarzone ładunkiem elektrycznym naładowane mezony (piony) $\pi^\pm$ lub pozbawione ładunku elektrycznego mezony π^0 . Owe mezony są to krótko żyjące cząstki elementarne o masie ok. 280 razy większej od masy elektronu. Rozpadają się na naładowane leptony μ (miony) i odpowiednie neutrina mionowe ν_μ . Czas życia mionów jest rzędu 10^{-6} sekundy, ale ze względu na relatywistyczną dylatację (wydłużenie) czasu, miony przechodzące przez atmosferę z bardzo dużą prędkością, dla obserwatora na Ziemi są widoczne jako cząstki o odpowiednio dłuższym czasie życia. Dzięki temu mogą do nas dotrzeć i być zarejestrowane w odpowiednich urządzeniach detekcyjnych. Mają one na ogół energię 5-6 GeV. Przez naszą głowę w każdej sekundzie przelatuje około 5 mionów.

Opracowano na podstawie:

- Hallday, Resnick, Walker „Podstawy fizyki. Tom 4”, PWN 2003,
- Herman, Kaletyński, Widomski „Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie i studentów”, PWN 1999,
- Hewitt „Fizyka wokół nas”, PWN 2001,
- „Słownik fizyki” Prószyński i S-ka 1999,
- L. Łatanowicz, J. N. Natosińska „Promieniowanie ultrafioletowe a środowisko człowieka”,
- <http://fizyka.ckumm.edu.pl/naturaswiatla/naturaswiatla.htm>,
- <http://www.fizyka.net.pl>,
- <http://www.u.lodz.pl/~wibig/maze/fizyka/widmo/widmo.html>.