

ELEKTROMAGNETYCZNE PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

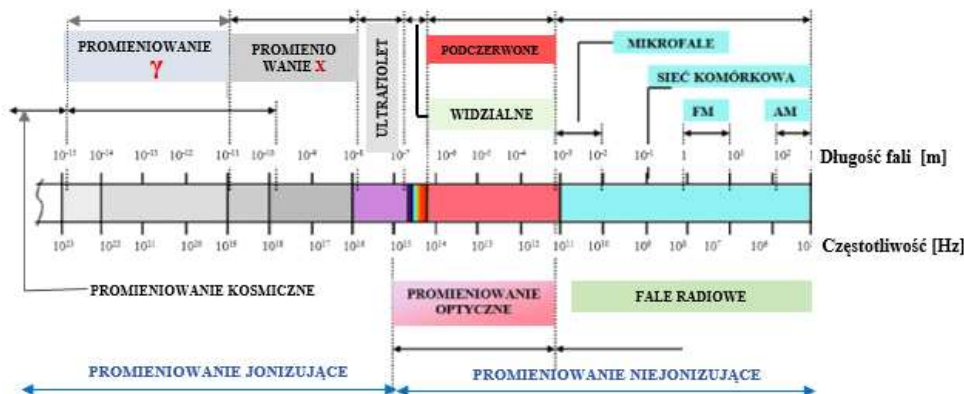
ppłk w st. spocz. dr inż. Marian Rabiega



Promieniowanie elektromagnetyczne jest energią przenoszoną przez fale elektromagnetyczne, które są oscylującymi polami elektrycznymi i magnetycznymi. Promieniowanie elektromagnetyczne obejmuje różne zakresy częstotliwości i długości fal, takie jak fale radiowe, mikrofae, promieniowanie podczerwone, widzialne światło, ultrafioletowe, rentgenowskie i gamma.

Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące jest promieniowaniem, którego energia umożliwia jonizację ośrodka materialnego, tj. oderwanie przynajmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki albo wybicie go ze struktury krystalicznej. Energia fali o częstotliwości wyższej niż $3 \cdot 10^{15}$ Hz jest wystarczająca do tego, żeby wybić elektron z powłoki atomowej przekształcając ten atom w jon.

W ogólności można powiedzieć, że im większe jest natężenie elektromagnetycznego promieniowania jonizującego i czasu jego oddziaływania, tym większe jest prawdopodobieństwo jonizacji atomów ośrodka.



Rys. 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego.

Źródło: na podstawie <http://szkodliwepromieniowanie.pl/?p=26>

Tak więc za elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące uznaje się promieniowanie, którego fotony mają energię większą od energii fotonów światła widzialnego (początek promieniowania UV).

Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące, ze względu na sposób powstawania oraz przenoszoną energię, dzieli się na:



Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące

- promieniowanie rentgenowskie (promieniowanie X),
- promieniowanie gamma (γ).

Oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z materią jest bardzo skomplikowane.

Wiąże się to z tym, że promieniowanie to może oddziaływać zarówno z elektronami jak i z jądrami, a oddziaływanie to może prowadzić do całkowitej absorpcji lub też do elastycznego i nieelastycznego rozpraszania. Wiele spośród możliwych procesów zachodzi z bardzo małym prawdopodobieństwem, tak że praktyczne znaczenie mają trzy zjawiska:

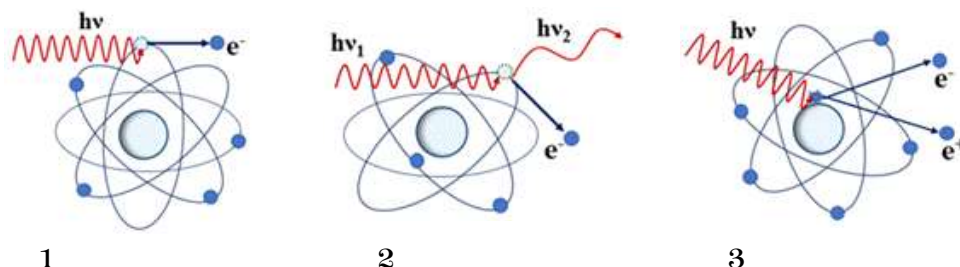
1. Zjawisko fotoelektryczne, polegające na oddziaływaniu promieniowania X i γ z elektronami

związanymi w atomie i prowadzące do całkowitej absorpcji kwantów tego promieniowania i oderwania elektronu od atomu.

2. Rozproszenie Comptona, czyli nieelastyczne rozpraszanie kwantów promieniowania X i γ przez elektrony swobodne i słabo związane, w którym foton zmienia zarówno swój kierunek ruchu jak i energię.

3. Zjawisko tworzenia par, w którym foton ulega całkowitej absorpcji, a pojawia się para elektron-pozyton.

Każdemu z tych oddziaływań towarzyszy zmiana energii i kierunku lub tylko energii.



Rys. 2. Podstawowe oddziaływania promieniowania rentgenowskiego i gamma z materią.

Źródło: Podstawy oddziaływania promieniowania jonizującego z materią. Wojciech Głuszewski Zakład Chemii i Techniki Radiacyjnej, Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie (ICHTJ) https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/019/39019973.pdf

Przy opisie przechodzenia promieniowania elektromagnetycznego przez materię stosuje się pojęcie strumienia cząstek. Pod pojęciem strumienia rozumiemy liczbę kwantów gamma przechodzących (lub padających) w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku ich ruchu.

Bardzo ważnym zagadnieniem przechodzenia promieniowania elektromagnetycznego przez materię jest omówienie jednego z podstawowych praw dozymetrii jakim jest prawo osłabienia wiązki promieniowania elektromagnetycznego.

Zasadnicza różnica między fotonem a kwantem polega na tym, że foton jest cząstką elementarną, nośnikiem oddziaływań elektromagnetycznych



podczas gdy kwant jest pojęciem opisującym minimalną, niepodzielną porcję danej wielkości fizycznej np. energii. Elektron jest obiektem kwantowym. Cecha obiektów kwantowych (np. fotonów czy elektronów) polega na przejawianiu, w zależności od sytuacji, właściwości falowych lub korpuskularnych.

Zjawiska oddziaływania fotonów promieniowania elektromagnetycznego z materią to zjawiska losowe. Kwestią przypadku jest to, czy dany foton przejdzie przez warstwę materii absorbentu, czy też spowoduje jedno ze zdarzeń w wyniku, którego zostanie usunięty z strumienia wiązki fotonów. Ubytek liczby fotonów z monoenergetycznego strumienia ΔN , po przebyciu warstwy absorbentu Δx jest więc wprost proporcjonalny do liczby wszystkich fotonów padających na tę warstwę N oraz do grubości warstwy Δx :

$$\Delta N(x) = -\mu \cdot \Delta x \cdot N \quad (1)$$

gdzie:

μ – liniowy współczynnik osłabienia wiązki strumienia promieniowania X lub γ , zależny jest od rodzaju i gęstości materiału oraz od długości fali promieniowania.

Znak minus oznacza, że fotonów ubywa wiązki. Wymiarem μ jest $[\text{cm}^{-1}]$.

Całkowity liniowy współczynnik osłabienia μ jest sumą liniowych współczynników osłabienia:

μ_f – związanego ze zjawiskiem fotoelektrycznym,

μ_C – związanego z rozpraszaniem Comptona,

μ_p – związanego ze zjawiskiem tworzenia par

$$\mu = \mu_f + \mu_C + \mu_p$$

Oprócz liniowego współczynnika używa się także masowego współczynnika osłabienia, który jest równy:

$$\mu_d = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma \cdot N}{\rho} = \frac{\sigma}{m_A}$$

gdzie:

μ_d – masowy współczynnik pochłaniania $[\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}]$,

ρ – gęstość materiału $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$,

m_A – jest masą cząsteczek materiału ośrodka.

Przekształcenie matematyczne (całkowanie) powyższego wzoru prowadzi do równania:

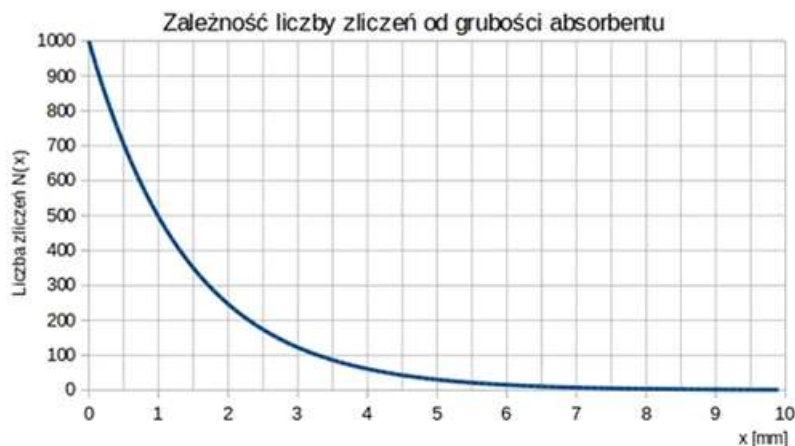
$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2)$$

gdzie:

N_0 – liczba fotonów padających na warstwę absorbentu na jednostkę powierzchni w czasie $[s]$,

$N(x)$ – liczba fotonów, która pozostała w wiązce po przejściu przez absorbent o grubości x .





Rys. 3. Prawo osłabienia wiązki promieniowania elektromagnetycznego, wzór (2).
Źródło: <http://zasobyip2.ore.edu.pl/pl/publications/download/9074>

Liczba fotonów przy przejściu przez materię zmniejsza się więc wykładniczo ze wzrostem grubości absorbentu x (rys. 3).

Współczynnik osłabienia wiązki dla danego materiału można by wyznaczyć ze wzoru (2), gdybyśmy mogli zmierzyć liczbę fotonów gamma $N(x)$ po przejściu przez absorbent o grubości x , oraz liczbę fotonów bez absorbentu, N_0 . Niestety nie jest to możliwe gdyż promieniowaniu gamma towarzyszy promieniowanie beta. Jeśli wykonamy pomiar bez absorbentu, otrzymamy łączną liczbę fotonów gamma i cząstek beta. Jednak najcieńsza nawet płytka absorbentu całkowicie pochłania promieniowanie beta. Wykonując pomiary z absorbentami, otrzymujemy więc informację tylko o liczbie fotonów gamma.

Aby uzyskać wykres z rys. 3 w dogodniejszej formie należy zlogarytmować obie strony równania (2). Korzystając z własności logarytmów, otrzymamy:

$$\ln N = \ln N_0 - \mu x \quad (3)$$

Wzór ten przedstawia funkcję liniową $y = ax+b$, gdzie:

$$\begin{aligned} y &= \ln N, \\ a &= -\mu, \\ b &= \ln N_0 \end{aligned}$$





Rys. 4. Prawo osłabienia wiązki promieniowania elektromagnetyczne w skali półlogarytmicznej, wzór (3).

Źródło: <https://zasobyip2.ore.edu.pl/pl/publications/download/9074>

Promieniowanie rentgenowskie

Promieniowanie rentgenowskie jest elektromagnetycznym promieniowaniem jonizującym powstającym podczas oddziaływań wiązki wolnych elektronów o wystarczająco wysokiej energii z atomami ośrodka. Promieniowanie X może być emitowane także w wyniku wychwytu elektronu, tj. gdy jądro przechwytuje elektron znajdujący się na powłoce K, w wyniku czego powstaje wolne miejsce, na które spadają elektrony z wyższych powłok i następuje emisja kwantu promieniowania rentgenowskiego.

Należy podkreślić, że promieniowanie rentgenowskie X nie jest promieniowaniem jądrowym gdyż w odróżnieniu od promieniowania gamma nie powstaje w wyniku przemian lub rozpadu jąder pierwiastków promieniotwórczych.

Promieniowanie rentgenowskie zmniejsza swoje natężenie z kwadratem odległości od źródła.

W widmie fal elektromagnetycznych promieniowanie rentgenowskie znajduje się za nadfioletem, pokrywając się z zakresem promieniowania gamma i mieści się w granicach:

- twarde promieniowanie rentgenowskie – długość fali od 10 do 100 pikometrów (piko = 10^{-12}),
- miękkie promieniowanie rentgenowskie – długość fali od 0,1 do 10 nanometrów (nano = 10^{-9}).

Nie ma powszechnie akceptowanej, ścisłej definicji granic długości fal pasma rentgenowskiego λ , ale przyjmuje się, że cały zakres długości fal promieniowania X mieści się w przedziale od 10 pikometrów do 10 nanometrów. Często energię kwantów tego promieniowania wyraża się w elektrono-



Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące

woltach ($1 \text{ eV} \sim 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Wynika to z zależności pomiędzy energią kwantu a długością fali fotonu:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

gdzie:

E – energia kwantu promieniowania rentgenowskiego w J,

h – stała Plancka równa $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,

ν – częstotliwość promieniowania emitowanego w $\text{Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$,

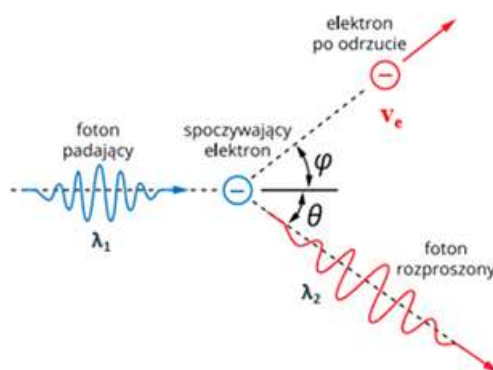
c – prędkość światła w próżni równa $2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

λ – długość fali fotonu w m.

Wzór (4) opisuje wartość energii, jaką może posiadać pojedynczy foton o częstotliwości ν . Natomiast strumień kwantów promieniowania gamma i rentgenowskiego przenosi energię będącą całkowitą wielokrotnością energii pojedynczego fotonu.

Efekt Comptona

Zjawisko Comptona polega na rozpraszaniu strumienia fotonów promieniowania rentgenowskiego lub gamma, które może „zderzać” się z elektronami atomów ośrodka. W wyniku zderzenia fotonu o energii $h\nu_1$ z elektronem walencyjnym (słabo związanym) może on przejąć, zależną od kąta, część energii i pędu padającego fotonu. W ten sposób elektron uzyskuje pewną ilość energii kinetycznej (energia odrzutu) i staje się elektronem swobodnym. Jednak jeśli elektron jest silnie związany z atomem ośrodka lub gdy energia padającego fotonu jest za mała wówczas elektron nie zostanie oderwany od atomu. Natomiast foton tracąc część swej energii pierwotnej staje się kwantem $h\nu_2$, który zmienia kierunek pierwotnej propagacji zgodnie z zasadą zachowania pędu. Kąt rozproszenia θ fotonu może wynosić od 0° do



Rys. 5. Comptonowskie rozproszenie fotonu na elektronie słabo związanym z atomem.
Źródło: <https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w32/main32e.html>



180° przy czym dla fotonów pierwotnych o stosunkowo małych energiach względne natężenie promieniowania rozproszonego ma wyraźne minimum przy kącie rozproszenia $\theta = 90^\circ$. Z kolei elektron po zaabsorbowaniu pewnej energii fotonu uzyskuje pewną prędkość skierowaną pod kątem θ do pierwotnego kierunku rozchodzenia się promieniowania.

Zwiększenie długości fali rozproszonego fotonu zwane przesunięciem Comptona, zależy od kąta rozproszenia fotonu zgodnie ze wzorem:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_C (1 - \cos \theta); \lambda_C = \frac{h}{m_e \cdot c^2} \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta\lambda$ – zmiana długości fali fotonu (przesunięcie Comptona),

λ_1 – długość fali padającej,

λ_2 – długość fali rozproszonej,

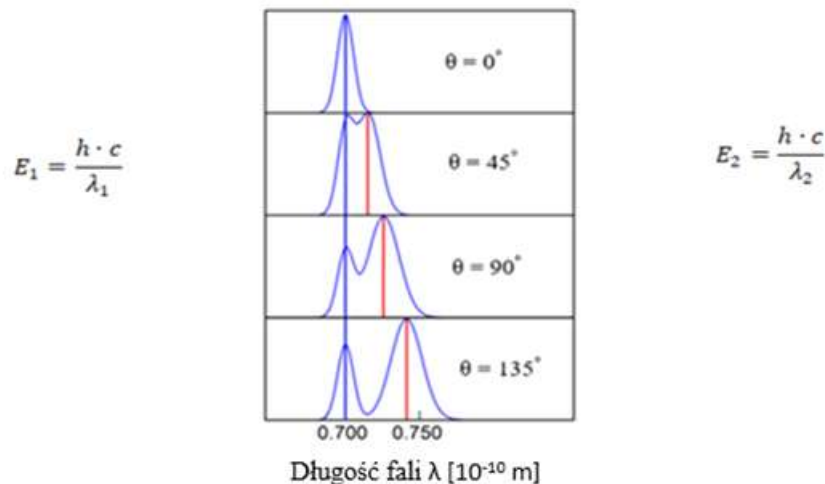
λ_C – comptonowska długość fali elektronu ($\lambda_C = 2,4263 \cdot 10^{-12}$ m),

θ – kąt rozproszenia fotonu,

φ – kąt pod jakim porusza się elektron po odrzucie,

m_e – masa spoczynkowa elektronu, a c – prędkość światła w próżni.

Maksymalna zmiana długości fali $\Delta\lambda \approx 0,5 \cdot 10^{-11}$ m występuje dla kąta 180° (rozproszenie wsteczne). Energia E_2 fotonów rozproszonych w zjawisku Comptona zależy od energii pierwotnej E_1 i kąta rozproszenia θ . W wyniku tego procesu następuje zwiększenie długości fali promieniowania i zmienia



Rys. 6. Wyniki doświadczeń Comptona. Linia po lewej odpowiada długości fali λ_1 , a po prawej λ_2 .
Źródło: <https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w32/main32e.html>



się kierunek jej propagacji. Energię E_2 kwantu rozproszonego opisuje równanie:

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_e \cdot c^2 \cdot (1 - \cos \theta)}} \quad (6)$$

W przypadku gdy energia rozpraszanych fotonów jest znacznie mniejsza od energii wiązania elektronów, rozpraszanie zachodzi na całym atomie i jest to przypadek tzw. rozpraszania Rayleigha. Energia wzbudzenia wypromieniowana jest w postaci kwantu o nie zmienionej częstotliwości. Zmianie ulega tylko jego kierunek. Prawdopodobieństwo rozproszenia pod danym kątem zależne jest od energii kwantu.

Efekt fotoelektryczny

Zjawisko uwalniania elektronów przez elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące z powierzchni rozmaitych substancji nazwane jest efektem fotoelektrycznym zewnętrznym. Efekt fotoelektryczny polega na przekazywaniu całej energii h padających fotonów pojedynczym elektronom. Elektron zostaje wyrzucony poza obręb atomu z energią kinetyczną będącą różnicą energii fotonu i energii wiązania elektronu w atomie:

$$E_k = h\nu - W \quad (7)$$

gdzie:

W – praca wyjścia – minimalna energia (rzędu eV) jaką należy dostarczyć, aby elektron wybić z atomu,

E_k – energia kinetyczna swobodnego elektronu,

$h\nu$ – energia padającego kwantu.

Aby zjawisko fotoelektryczne zaszło musi być spełniony warunek $h\nu > W = E_k$

W efekcie fotoelektrycznym wewnętrznym energia fotonu też jest całkowicie pochłaniana przez elektron, ale elektron nie jest uwalniany, jak to ma miejsce w zjawisku fotoelektrycznym zewnętrznym tylko przenosi się on do pasma przewodnictwa, zmieniając tym samym własności elektryczne materiału (fotoprzewodnictwo).

Zjawisko fotoelektryczne dominuje w obszarze niskich energii padających fotonów, a prawdopodobieństwo zajścia zjawiska fotoelektrycznego rośnie wraz z liczbą atomową Z ośrodka jak Z^4 . Prawdopodobieństwo zajścia zjawiska fotoelektrycznego maleje szybko z energią fotonu, jak $1/E^3$.

Gdy energia fotonu osiąga energię wiązania elektronów na danej orbicie, prawdopodobieństwo procesu gwałtownie wzrasta, gdyż pojawiają się dodat-



kowe elektrony, które można wybić z atomu. Energie, przy których to zachodzi noszą nazwę krawędzi absorpcji.

Wystąpienie efektu fotoelektrycznego nie zależy od natężenia padającego promieniowania, ale od jego częstotliwości. Jeśli częstotliwość zostanie zmniejszona poniżej minimalnej częstotliwości, to pojedyncze fotony (niezależnie od ich liczby, a więc od natężenia promieniowania) nie będą miały energii wystarczającej do uwolnienia elektronu. Dlatego dla każdego materiału wybicie elektronu wymaga dostarczenia określonej energii. Zjawisko fotoelektryczne mogą wywołać tylko kwanty o odpowiednio wysokiej energii. Istnieje energia krytyczna (częstotliwość progowa) dla danego materiału, poniżej której nie obserwujemy emisji fotoelektronów. Maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy od natężenia światła. Maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów rośnie wraz rosnącą częstotliwością światła.

Przykładowe energie krytyczne elektronów E_k dla kilku substancji

Tabela 1

Substancja	E_k [MeV]	Substancja	E_k [MeV]
węgiel	81,0	żelazo	21,7
azot	91,2	miedź	19,6
tlen	81,2	ołów	7,6
glin	42,2	powietrze	97,6
argon	38,4	woda	81,0

Ilość energii E zawarta w fotonie związana jest z jego częstotliwością następującą zależnością:

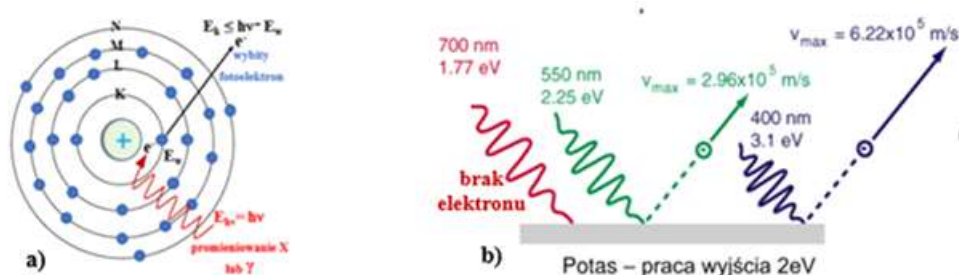
$$E = h \cdot \nu \quad (8)$$

W wewnętrznym zjawisku fotoelektrycznym energia fotonu też jest całkowicie pochłaniana przez elektron, który przeskakuje na wyższą powłokę atomu lub przenosi się do pasma przewodnictwa, ale nie staje się elektronem swobodnym. Zjawisko takie zachodzi wówczas, gdy energia padającego fotonu $h\nu$ jest większa, niż wynosi szerokość pasma wzbronionego (odległość energetyczna między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa).

Jak powiedziano wyżej zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne polega na emisji elektronów pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego. W wyniku absorpcji kwantu przez atom ośrodka kwant jest całkowicie po-



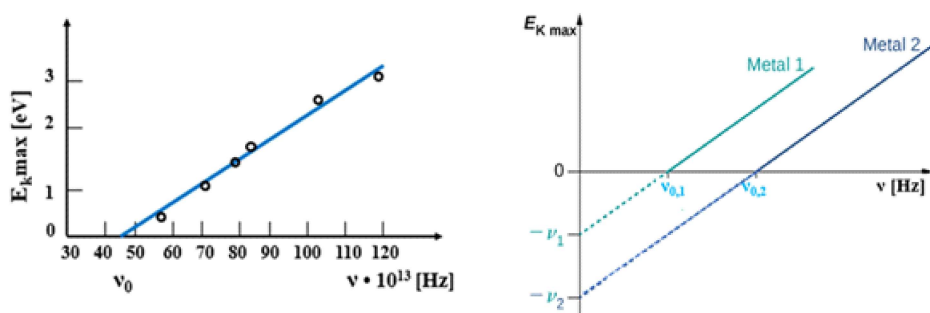
Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące



Rys. 7. Efekty pochłonięcia kwantów energii w zewnętrznym zjawisku fotoelektrycznym, a) po absorpcji kwantu $h\nu$ o odpowiednio dużej energii elektron staje się swobodnym o energii E_k , b) uwalnianie elektronów przez kwanty o różnej energii z płytki pokrytej warstwą potasu.
Źródło: <https://www.slideserve.com/steel-mcfadden/czym-jest-i-czym-nie-jest-fala>
<https://if.pw.edu.pl/~malys/simrF4/simr-2020-w01.pdf>

chłaniany przekazując całą swoją energię jednemu z elektronów na wykonanie pracy wyjścia E_w i nadanie mu energii kinetycznej E_k . Najczęściej wybijane są elektrony z powłok leżących najbliżej jądra. Powstaje swobodny elektron oraz zjonizowany atom. Taki przebieg zjawiska zachodzi z największym prawdopodobieństwem dla elektronów znajdujących się na powłoce K i rzadko na powłoce L. Nigdy natomiast nie zachodzi dla elektronów swobodnych.

Podsumowując, w zewnętrznym zjawisku fotoelektrycznym energia fotonu jest całkowicie pochłaniana przez elektron na wykonanie pracy wyjścia z atomu i nadanie mu energii kinetycznej. Energia kinetyczna emitowanych elektronów nie zależy od natężenia promieniowania, a jedynie od jego częstotliwości. Energia kinetyczna elektronów rośnie liniowo z częstotliwością ν padającego promieniowania.



Rys. 8. Zależność energii kinetycznej wybitego elektronu w funkcji częstotliwości padającego kwantu energii.
Źródło: https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/FizykaII_OO/Zjawisko_fotoelektryczne_zewn%C4%99trzne



Im większa częstotliwość, tym większa energia emitowanych elektronów. Natężenie wybitych fotoelektronów zależy od natężenia strumienia padających elektronów. Istnieje pewna częstotliwość graniczna ν_0 , poniżej której zjawisko nie występuje. Dla różnych ośrodków materialnych ν_0 przyjmuje różne wartości.

Maksymalna energia kinetyczna elektronów w funkcji częstotliwości padającego fotonu zachodzi tylko powyżej częstotliwości progowej ν_0 . Pomiar częstotliwości progowej dają to samo nachylenie prostych na wykresie dla różnych metali. Każdy z metali ma jednak swoją częstotliwość progową.

Zdarzają się przypadki, że energia uwalniana podczas przechodzenia elektronu z wyższej powłoki na niższą, może zostać przekazana elektronowi powłoki walencyjnej, który zostanie „wyrzucony” z atomu. Elektrony takie nazywane są elektronami Auger’a. Energia elektronów Auger’a jest ściśle określona:

$$E_{\text{Aug}} = E_K - E_L - E_M \quad (9)$$

gdzie:

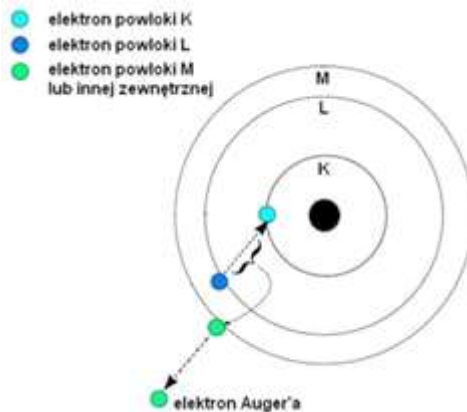
E_K – energia wiązania wybitego elektronu z powłoki K,

E_L – energia elektronu, który przechodzi (spada) na poziom K,

E_M – energia wiązania elektronu opuszczającego atomu.

Energia unoszona jest z atomu tylko w postaci energii kinetycznej elektronu.

Emisja elektronów Auger’a konkuruje z emisją promieniowania X.



Rys. 9. Emisja elektronu Auger’a.

Źródło: https://www.fuw.edu.pl/~skwira/FPJ/FPJ_w4.pdf

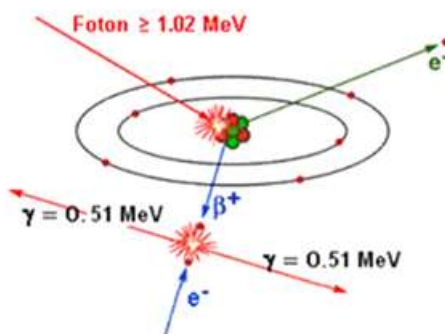
Kreacja par cząstek naładowanych

Kreacja par to tworzenie cząstki subatomowej i jej antycząstki z neutralnego bozonu Z . Kreacja par obejmuje tworzenie elektronu i pozytonu, mionu i antymionu lub protonu i antyprotonu. Produkcja par często odnosi się kon-

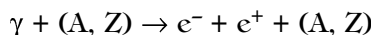


kretnie do fotonu tworzącego parę elektron–pozyton w pobliżu jądra. Ponieważ zasada zachowania energii musi być zachowana, aby mogło dojść do powstania par, energia wejściowa fotonu musi być wyższa od sumy mas spoczynkowych dwóch utworzonych cząstek. Zasady zachowania energii i pędu są głównymi ograniczeniami procesu. Proces ten jest możliwy jedynie, gdy energia fotonu przekracza energią progową. Aby spełnione zostały prawa zachowania energii i pędu, warunkiem koniecznym jest żeby ten proces zachodził z udziałem „trzeciego ciała” jakim może być jądro atomowe lub elektron, nie może natomiast zachodzić w próżni. Przekaz energii i pędu zachodzi za pośrednictwem pola elektrostatycznego (kulombowskiego) jądra lub elektronu. Gdy zachodzi zjawisko kreacji par jądro atomowe otrzymuje pewien odrzut. Wszystkie inne zachowane liczby kwantowe (moment pędu, ładunek elektryczny, liczba leptonowa) utworzonych cząstek muszą sumować się do zera – a więc utworzone cząstki powinny mieć przeciwne wartości. Na przykład, jeśli jedna cząstka ma ładunek elektryczny +1, druga musi mieć ładunek elektryczny -1, lub jeśli jedna cząstka ma dziwność +1, to inna musi mieć dziwność -1.

Jeśli foton znajduje się w pobliżu jądra atomowego i ma energię wyższą niż suma energii mas spoczynkowych elektronu i pozytonu ($2 \cdot 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$, – wymagana długość fali fotonu $1,2132 \cdot 10^{-12} \text{ m}$) to może on zostać przekształcony w parę elektron–pozyton. Proces ten przebiega następująco:



Rys. 10. Kreacja pary elektron – pozyton w polu jądra atomowego.
Źródło: https://www.fuw.edu.pl/~skwira/FPJ/FPJ_w6_b.pdf



Jeżeli kreacja par elektron–pozyton zachodzi w polu jądra atomowego, to energia progowa wynosi:

$$E_\gamma \geq 2 m_e \cdot c^2 + 2 \frac{m_e^2}{m_i} \cdot c^2 \quad (10)$$



Ponieważ $m_j \gg m_e$ drugi człon w powyższym wzorze można zaniedbać. Wówczas energia progowa przybierze postać:

$$E_\gamma \geq 2 m_e \cdot c^2 \approx 2 \cdot 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV} \quad (11)$$

Jeżeli proces kreacji par zachodzi w polu elektrostatycznym elektronów to energia progowa fotonu wynosi:

$$E_\gamma \geq 2m_e + 2 \frac{m_e^2}{m_e} \cdot c^2 = 4m_e \cdot c^2 \quad (12)$$

Proces ten jest jednak znacznie mniej prawdopodobny niż konwersja w polu jądra.

Zasada nieoznaczoności pozwala na krótkotrwałe pojawienie się energii, która może wystąpić w postaci pary cząstka – antycząstka. Taka wirtualna para cząstek żyje przez czas ograniczony zasadą nieoznaczoności w postaci:

$$\Delta t \cdot \Delta E \leq h \quad (13)$$

gdzie:

Δt – czas, na jaki pojawia się energia,
 ΔE – pojawiająca się energia,
 h – stała Plancka.

Z powyższego wzoru wynika, że im masywniejsze są wirtualne cząstki, tym krócej żyją. Istnienie wirtualnych cząstek wyjaśnia niektóre zjawiska kwantowe. Nie istnieje możliwość bezpośredniej obserwacji powstających par wirtualnych cząstek, jednak istnieją pośrednie dowody zachodzenia tego zjawiska.

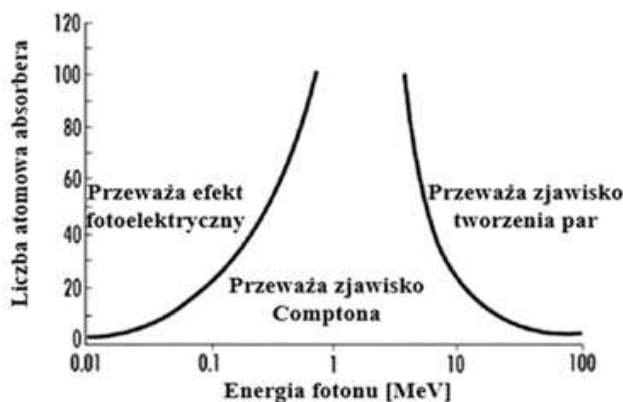
Wszystkie wyżej omówione zjawiska elektromagnetycznych oddziaływań fotonów z materią dobrze ilustruje wykres obszarów dominacji różnych rodzajów oddziaływań fotonów z materią w zależności od energii fotonów i liczby atomowej absorbentu.

W przypadku materiałów o średniej i dużej liczbie atomowej, zjawisko fotoelektryczne dominuje dla fotonów o niskich energiach (poniżej ok. 1 MeV), efekt Comptona przeważa dla średnich energii fotonów (ok. 1–5 MeV). Wysokoenergetyczne kwanty promieniowania γ (powyżej 5 MeV) ulegają głównie kreacji par elektron-pozyton.

Obszar dominacji efektu fotoelektrycznego obejmuje najniższe energie padających fotonów, ale sięga tym wyższych wartości, im liczba atomowa ośrodka jest większa. Efekt Comptona przeważa dla średnich energii fotonów i mieści się w obszarze ograniczonym wartościami ok. 1–5 MeV.

Efekt kreacji par pojawia się dla energii powyżej 5 MeV i szybko zaczyna dominować dla grupy pierwiastków o dużej liczbie atomowej.





Rys. 11. Obszary dominacji różnych efektów oddziaływania fotonów z materią w funkcji energii fotonów i liczby atomowej absorbentu.

Źródło: <https://if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mjf/wyklad/w2/segment3/main.htm>

Na rys. 11 widać, że przypadku materiałów o średniej liczbie atomowej, zjawisko fotoelektryczne dominuje dla niewielkich energii fotonów (poniżej ok. 1 MeV), efekt Comptona przeważa dla średnich energii fotonów (ok. 1–5 MeV), a wysokoenergetyczne kwanty promieniowania γ (powyżej 5 MeV) ulegają głównie kreacji par elektron-pozyton.

Promieniowanie hamowania

Promieniowanie hamowania jest promieniowaniem elektromagnetycznym powstającym podczas hamowania cząstki obdarzonej ładunkiem elektrycznym w polu elektrostatycznym jąder atomowych i elektronów materii lub tylko jąder atomowych. Promieniowanie to jest jedną z dróg utraty energii przez poruszającą się naładowaną cząstkę. Energia cząstek naładowanych w polu elektrycznym równa jest iloczynowi ładunku i różnicy potencjałów pomiędzy początkowym i końcowym punktem ruchu cząstki.

Gdy cząstka porusza się w pobliżu jądra atomowego wtedy ulega zmianie kierunku lotu cząstki, następuje emisja fotonu i zmniejsza się energia cząstki. Zdolność hamowania zależy od energii i masy cząstek spowalnianych w danym ośrodku.

Energia unoszona przez wyemitowane w tym procesie fotony proporcjonalna jest do:

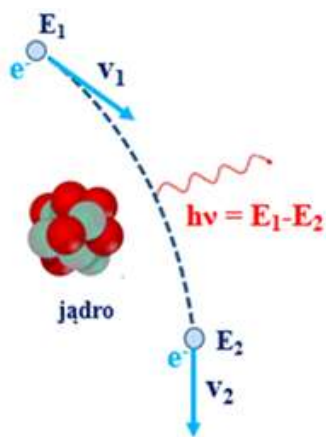
$$\left(\frac{E}{m_0 \cdot c^2} \right)^4 \quad (14)$$

gdzie:

E – energia cząstki,

m_0 – masa cząstki.





Rys. 12. Ilustracja procesu hamowania elektronów w polu elektrycznym jądra atomowego.
Źródło: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bremstrahlung.svg>

Przy danej energii cząstki, straty energii na promieniowanie są wielokrotnie większe dla cząstek lekkich (mała wartość w mianowniku ułamka równania 14) niż dla cząstek o większych masach. Proces ten odgrywa zasadniczą rolę dla elektronów o dużych energiach podczas gdy jest zupełnie pomijalny dla ciężkich cząstek naładowanych takich jak np. protony lub cząstki alfa. Przykładem promieniowania hamowania jest promieniowanie rentgenowskie, promieniowanie synchrotronowe; emisja promieniowania hamowania zależy głównie od przyspieszenia cząstki (wzrasta wraz ze wzrostem bezwzględnej wartości przyspieszenia) oraz od masy cząstki (maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu masy cząstki). Promieniowanie hamowania posiada ciągły rozkład energii fotonów, którego górna granica określona jest przez energię wyhamowywanych elektronów. Im wyższa energia elektronów tym wyższa jest częstotliwość wyemitowanych fotonów.

Zakres częstotliwości wyemitowanych fotonów rozciąga się od zera do częstotliwości maksymalnej:

$$\nu_{\max} = \frac{E_k}{h} \quad (15)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna elektronów,

h – stała Plancka.

Strata energii elektronów na jednostkę przebytej przez nie drogi słabo zależy od energii elektronów, w przypadku gdy ich energia kinetyczna jest dużo mniejsza od ich energii spoczynkowej. Dla elektronów ultra relatywistycznych, gdy ich energia znacznie przewyższa spoczynkową, straty są proporcjonalne do energii.

Gdy energia elektronu jest większa od tzw. energii krytycznej, straty



energii na promieniowanie hamowania są większe od strat na jonizację. Energia krytyczna zależy od rodzaju substancji ośrodka.

Promieniowanie hamowania jest emitowane w wąskim stożku w kierunku ruchu elektronów.

Im większa jest prędkość elektronów, tym mniejszy jest kąt rozwarcia stożka θ . Widmo promieniowania hamowania jest w przybliżeniu równomierne w całym zakresie częstotliwości.

Dwa mechanizmy odpowiedzialne są za emisję promieniowania elektromagnetycznego w lampie rentgenowskiej:

- emisja promieniowania hamowania mającego ciągły rozkład energii fotonów,
- emisja promieniowania charakterystycznego o widmie dyskretnym.

Energia kinetyczna elektronów jest częściowo lub całkowicie zamieniana na energię promieniowania rentgenowskiego. W zależności od rodzaju zderzenia elektrony tracą różne ilości energii i dlatego energia powstających kwantów promieniowania rentgenowskiego $h\nu$ obejmuje szeroki zakres wartości tworząc widmo ciągłe. Widmo to rozpoczyna się od pewnej progowej wartości i jest to tzw. krótkofalowa granica widma $\lambda_{\min}$, niezależna jest od materiału tarczy, natomiast zależy od energii kinetycznej elektronów:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U = h \cdot \nu_{\max} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\min}} \quad (16)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U} \quad (17)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna elektronów,
 m – masa elektronu,
 v – prędkość elektronu,
 U – napięcie przyspieszające elektrony,
 h – stała Plancka,
 λ – długość fali,
 ν – częstotliwość fotonu.

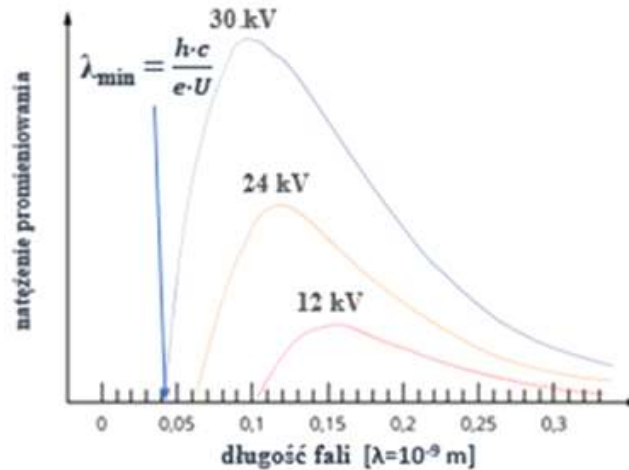
Widoczne maksimum widma ciągłego występuje w obszarze $\lambda = 1,5\lambda_{\min}$, a całkowita intensywność spektrum jest proporcjonalna do U^2 .

Górna granica fotonów promieniowania hamowania określona jest przez energię wyhamowywanych elektronów. Pamiętając, że energia cząstek naładowanych w polu elektrycznym równa jest iloczynowi ładunku i różnicy potencjałów pomiędzy początkowym i końcowym punktem ruchu cząstki to wiadać, że maksymalna energia fotonów emitowanych przez lampę rentgenowską jest zależna od napięcia przyłożonego pomiędzy katodę i anodę lampy.

Natężenie promieniowania hamowania wzrasta wraz z liczbą atomową materiału anody i energią padających elektronów.

Drugim elementem promieniowania rentgenowskiego jest emisja tzw. promieniowania charakterystycznego o widmie dyskretnym. Mechanizm





Rys. 13. Widmo ciągłego promieniowania hamowania dla różnych wartości napięcia na anodzie lampy RTG.

Źródło: <https://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mjf/wyklad/w2/segment7/main.htm>

emisji tego promieniowania związany jest z procesami wzbudzenia i jonizacji atomów anody przez uderzające w anodę elektrony.

Energia fotonu wyemitowanego przy przejściu elektronu pomiędzy powłokami M i N wynosi:

$$h\nu = E_M - E_N \quad (18)$$

gdzie:

- E_M i E_N – energie elektronów na powłokach M i N,
- ν – częstotliwość emitowanej fali elektromagnetycznej,
- h – stała Plancka,
- $h \cdot \nu$ – energia wyemitowanego fotonu.

Jeżeli między częstotliwością i długością fali elektromagnetycznej zachodzi związek:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (19)$$

to możemy wyrażenie na długość fali odpowiadającej emisji fotonu o energii $h \cdot \nu$ zapisać w postaci:

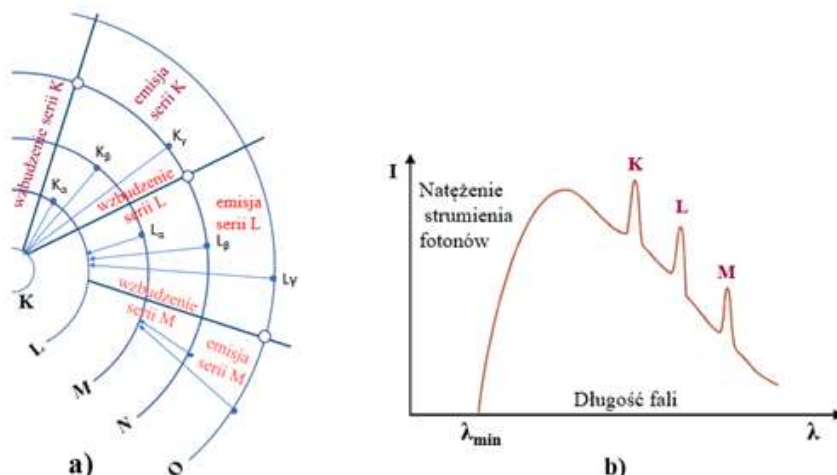
$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_M - E_N} \quad (20)$$

Złożony kształt widma jest rezultatem nałożenia się dwóch efektów emisji promieniowania hamowania (widmo ciągłe) oraz emisji promieniowania charakterystycznego (linie odpowiadające emisji fotonów o energiach dyskretnych). Widmo charakterystyczne emitowane jest wtedy, gdy padający



Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące

o dużej energii elektron wybija elektron z wewnętrznej powłoki atomu, a następnie elektron z wyższej powłoki atomu „spada” na powłokę K emitując kwant promieniowania. Dyskretne wartości energii fotonów odpowiadają przejściom elektronów na różne powłoki atomowe oznaczone na rys. 14 literami K, L i M.



Rys. 14. Promieniowanie hamowania,

a) mechanizm emisji promieniowania charakterystycznego,

b) przykładowy kształt widma fotonów emitowanych z lampy rentgenowskiej.

Źródło: <https://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w2/segment7/main.htm>

Promieniowanie gamma

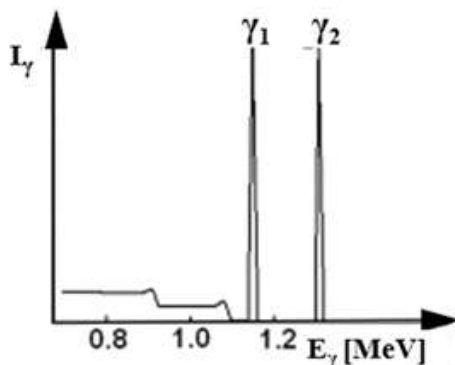
Promieniowanie gamma jest promieniowaniem elektromagnetycznym emitowanym w wyniku różnych procesów jądrowych lub zderzeń cząstek subatomowych. Jednym z takich procesów jest np. emisja kwantów gamma przez jądra w stanie wzbudzone. Po wypromieniowaniu nadmiaru energii tzw. energii wzbudzenia jądra wracają do stanu podstawowego.

Promienie gamma są najbardziej energetyczną formą promieniowania elektromagnetycznego, fizycznie taką samą jak wszystkie inne formy promieniowania elektromagnetycznego, ale na ogół mają wyższą energię fotonów ze względu na krótszą długość fali. Jądra promieniotwórcze często emitują promieniowanie gamma w zakresie energii od kilku keV do ok. 10 MeV, co odpowiada typowym poziomom energii w jądrach o dość długim czasie życia. Takie źródła promieniotwórcze zazwyczaj wytwarzają widma liniowe promieniowania gamma.

Różnica między promieniowaniem gamma a promieniowaniem rentgenowskim jest nieco zatarta. Promienie gamma pochodzą zawsze z przemian jąder atomów i są monoenergetyczne, podczas gdy promieniowanie rentgenowskie jest generowane elektrycznie i ma szeroki zakres energii.



Emisja promieniowania gamma nie powoduje zmiany liczby protonów i neutronów w jądrze, w związku z tym nie zmienia się jego liczba masowa. Położenie pierwiastka w układzie okresowym przy emisji promieniowania gamma, także nie ulega zmianie. Emisję promieniowania gamma można opisać na podstawie ogólnej teorii promieniowania elektromagnetycznego Maxwella.



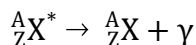
Rys. 15. Liniowe widmo energetyczne promieniowania gamma.
źródło: https://www.fuw.edu.pl/~skwira/FPJ/FPJ_w9.pdf

Promieniowaniu gamma towarzyszy zmiana momentów elektrycznych jądra, polegająca na zmianie rozkładu ładunków elektrycznych w jądrze, lub zmiana układu jego spinowych i orbitalnych momentów magnetycznych.

Źródłem promieniowania gamma mogą być takie procesy jak np. reakcje jądrowe, nukleosynteza, anihilacja, odwrotne rozpraszanie Comptona. Promieniowanie γ jest promieniowaniem elektromagnetycznym o najkrótszej długości fali, składa się więc z fotonów o energii wyższej niż 10 keV, co odpowiada częstotliwości większej od 2,42 EHz, a długości fali mniejszej od 124 pm. Zakres ten częściowo pokrywa się z zakresem promieniowania rentgenowskiego. W wielu publikacjach rozróżnienie promieniowania gamma oraz promieniowania rentgenowskiego opiera się na źródłach ich powstawania, a nie na długości fali czy energii kwantów. Jak już wspomniano promieniowanie gamma wytwarzane jest w wyniku jądrowych przemian promieniotwórczych albo zderzeń jąder lub cząstek subatomowych, a promieniowanie rentgenowskie – w wyniku oddziaływania elektronów z atomami.

Emisja promieni gamma następuje w czasie przejścia jądra z wyższego do niższego poziomu energetycznego i w ten sposób jądro wzbudzone pozbywa się nadwyżki energii.

Promieniowanie gamma towarzyszy prawie każdej przemianie jądrowej. Ogólnie przemianę γ możemy opisać następującym równaniem:



gdzie:

${}^A_ZX^*$ – jądro w stanie wzbudzonym.



Przykładem przemiany jądrowej, podczas której emitowane są tylko kwanty gamma jest drugi etap rozpadu kobaltu – 60. Najpierw ^{60}Co przekształca się w ^{60}Ni w wyniku przemiany beta:



Powstałe jądro niklu jest wzbudzone, czyli ma energię większą od energii tego jądra w stanie podstawowym. Po pewnym, bardzo krótkim, czasie jądro przechodzi do stanu podstawowego emitując dwa fotony o dużej energii (1,17 i 1,33 MeV), będące kwantami promieniowania gamma:



Do emisji kwantów gamma dochodzi gdy energia wzbudzenia jądra atomowego jest mniejsza od energii wiązania ostatniego nukleonu. W przypadku gdy energia wzbudzenia jądra jest znacznie większa od energii wiązania ostatniego nukleonu, to wtedy w większości przypadków następuje rozpad jądra i emisja nukleonu (lub nukleonów). Badając energie i pędy cząstek rozpadu jądrowego można określić czy rozpad odbywa się jednoetapowo, czy jest to kilka następujących po sobie rozpadów.

Po emisji kwantu gamma liczba i ładunek cząstek w jądrze nie zmienia się. Również liczba masowa i atomowa pozostają takie same. Taki proces nazywany przejściem izomerycznym.

Za promieniowanie gamma uznaje się promieniowanie o energii kwantu większej od 10 keV, co odpowiada częstotliwości większej od 2,42 EHz, a długości fali mniejszej od 124 pm. Zakres ten częściowo pokrywa się z zakresem promieniowania rentgenowskiego. W wielu publikacjach rozróżnienie promieniowania gamma oraz promieniowania rentgenowskiego opiera się na źródłach ich powstawania, a nie na długości fali czy energii kwantów. Jak powiedziano promieniowanie gamma wytwarzane jest w wyniku jądrowych przemian promieniotwórczych albo zderzeń jąder lub cząstek subatomowych, a promieniowanie rentgenowskie w wyniku oddziaływania elektronów z atomami.

Energię fotonu gamma E oblicza się ze wzoru:

$$E_\gamma = h \cdot f \text{ lub } E_\gamma = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (21)$$

gdzie:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,135667 (25) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s},$$

f – częstotliwość fali w Hz,

λ – długość fali w m,

c – prędkość światła w próżni $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Emisja promieniowania gamma w postaci strumienia fotonów gamma może być wywoływana przez:

- zmiany w stanie jądra atomowego lub podczas przejścia atomu lub cząsteczki ze stanu wzbudzonego do stanu o niższej energii,



- zmiany stanu oscylacyjnego i rotacyjnego cząsteczek; oscylacja cząsteczki (gwałtowne zwiększenie bądź zmniejszenie długości wiązania) wywołuje zmianę prędkości jej obrotu,
- zmiany pędu cząstek naładowanych (głównie wysokoenergetycznych elektronów) poruszających się w silnym polu elektrycznym (np. jąder atomowych) bądź polu magnetycznym (promieniowanie hamowania, promieniowanie synchrotronowe),
- anihilację par elektron-pozyton, czyli oddziaływanie cząstki z odpowiadającą jej antycząstką, podczas którego cząstka i antycząstka zostają zamienione w dwa fotony o energii równoważnej ich masom (proces zamiany materii na promieniowanie elektromagnetyczne),
- rozpad nietrwałych cząstek elementarnych, np. mezonów π (pionów),
- odwrotne rozpraszanie Comptona – rozpraszanie promieniowania elektromagnetycznego na elektronach relatywistycznych (o prędkościach bliskich prędkości światła w próżni); zderzenie elektronu o wysokiej energii z fotonem o niskiej energii skutkuje wzrostem energii fotonu (zmianą w wysokoenergetyczny foton gamma); zjawisko występujące np. po wybuchach supernowych.

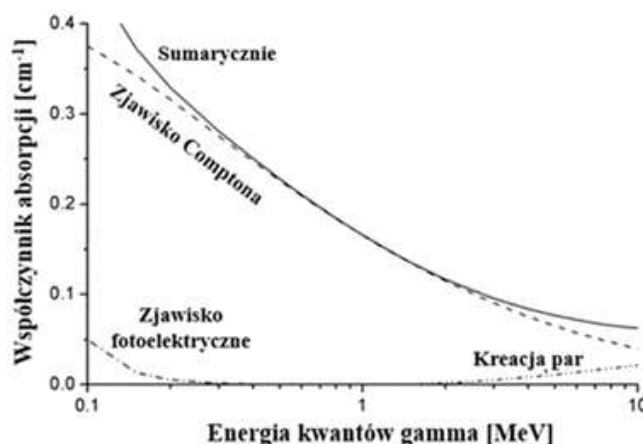
Własności oddziaływania promieniowania gamma z materią są takie same jak omawiane już własności oddziaływania z materią promieniowania rentgenowskiego, bowiem oba rodzaje promieniowania są promieniowaniem elektromagnetycznym. Różnica jest jedynie w długościach fali z czym związane jest różne prawdopodobieństwo zachodzenia różnych procesów. I tak dla promieniowania gamma dominującym procesem jest kreacja par elektron-pozyton.

Oddziaływanie promieniowania gamma z materią:

- zjawisko fotoelektryczne – ważne przy niskich energiach kwantów (mniejszych niż kilkaset keV). Polega na przekazaniu całej energii kwantu elektronowi z powłoki atomowej. Energia ta zostaje użyta do wykonania pracy wyjścia elektronu E_w oraz na nadanie elektronowi energii kinetycznej E_k ,
- zjawisko Comptona – ważne przy pośrednich energiach (od kilkuset keV do kilku lub kilkunastu MeV) przy czym górna granica energii maleje wraz z liczbą atomową jądra. Zjawisko Comptona polega na niesprężystym rozproszeniu kwantu gamma na swobodnych elektronach (lub związanych w powłoce atomu jeżeli energia wiązania E_w jest mała w stosunku do energii kwantu),
- kreację par jest związana z całkowitym pochłonięciu kwantu gamma w pobliżu jądra i jego przemianie w parę elektron i pozyton. Utworzenie pary elektron-pozyton jest możliwe tylko wtedy, gdy energia kwantu gamma jest większa od energii odpowiadającej sumie dwóch mas elektronu (w jednostkach energii jest to 1,022 MeV),
- reakcje fotojądrowe – w tym oddziaływaniu promieniowanie gamma oddaje energię jądrum atomowym, wzbudzając je i przy odpowiednio wysokiej energii fotonu, tworzy nowe cząstki.

Wzbudzone jądro atomowe może wypromieniować kwant gamma, ulec





Rys. 16. Współczynniki absorpcji promieni gamma dla ołowiu.
Źródło: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pb-gamma-xs.svg>

rozpadowi lub rozszczepieniu. Przekrój czynny takiej reakcji jest zazwyczaj niewielki, może być jednak rezonansowo zwiększony jeżeli energia kwantu gamma odpowiada dokładnie energii wzbudzenia jądra.

Absorpcję promieniowania gamma w materii opisuje równanie różniczkowe, którego uproszczonym rozwiązaniem jest funkcja wykładnicza (wzór 2):

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

gdzie:

N_0 – liczba fotonów padających na warstwę absorbentu na jednostkę powierzchni w czasie s ,

$N(x)$ – liczba fotonów, która pozostała w wiązce po przejściu przez absorbent o grubości x .

μ – całkowity liniowy współczynnik absorpcji promieniowania, który ma wymiar m^{-1} i zależy od Z .

Liczba fotonów przy przejściu przez materię zmniejsza się więc wykładniczo ze wzrostem grubości absorbent x .

Całkowity współczynnik absorpcji ołowiu dla promieni gamma w funkcji energii promieniowania gamma i udział w nim trzech efektów przedstawiono na rys. 16.

Efekt fotoelektryczny dominuje przy niskiej energii, ale powyżej 5 MeV zaczyna dominować kreacja par. Udział zjawiska fotoelektrycznego i rozpraszania comptonowskiego w całkowitej absorpcji maleje wraz ze wzrostem energii na rzecz wzrostu udziału kreacji par elektron-pozyton. Przy małych energiach, dominuje zjawisko fotoelektryczne.



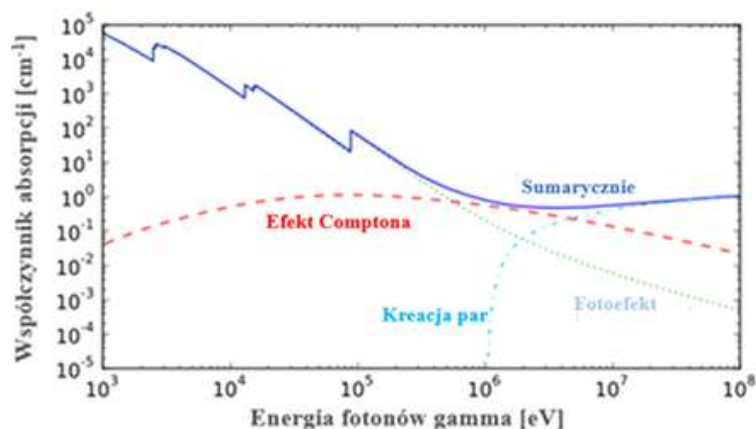
Liniowe współczynniki osłabienia promieniowania gamma przez ołów, wodę i beton dla
wybranych energii promieniowania

Tabela 2

Energia [MeV]	Współczynnik osłabienia [cm^{-1}]		
	ołów	woda	beton
0,5	1,72	0,0970	0,194
0,7	1,12	0,0885	0,167
1,0	0,79	0,0706	0,141
2,0	0,51	0,0493	0,100

Źródło: B. Gostkowska, Wielkości, jednostki i obliczenia stosowane w ochronie radiologicznej, CLOR Warszawa 1991.

<http://fizyka.umk.pl/~lab2/tables/gamma1.html>



Rys. 17. Wykładniczy charakter absorpcji promieniowania gamma w aluminium. Liniami przerywanymi zaznaczono poszczególne składowe odpowiedzialne za pochłanianie promieniowania.

Źródło: Promieniowanie gamma. Oddziaływanie z materią (Absorpcja).

https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_gamma

Intensywność promieniowania, które wpada w materię, dla dużych wartości współczynnika μ , spada praktycznie do zera na względnie krótkim odcinku drogi x . Szybkość procesu pochłaniania promieniowania gamma zależy od współczynnika osłabienia wiązki promieniowania μ . Zależy on od liczby porządkowej Z atomów ośrodka, od gęstości materii, która jest naświetlana i od energii promieniowania.

Promieniowanie gamma odznacza się bardzo dużą przenikliwością – zdolne jest pokonywać nawet grube warstwy ciężkich materiałów. Zdolność promieniowania gamma do jonizacji ośrodka jest znacznie mniejsza od promieniowania alfa lub beta.



Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące

Liniowe współczynniki osłabienia promieniowania gamma w podstawowych materiałach budowlanych

Tabela 3

Energia promieniowania [MeV]	Materiał				
	Al	Pb	Beton	Żeliwo	Woda
	Gęstość [$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$]				
	2 700	11 340	7 200	2 300	1 000
	Współczynnik osłabienia [cm^{-1}]				
0,25	0,296	6,58	0,86	0,252	0,127
0,50	0,228	1,72	0,60	0,194	0,097
1,00	0,166	0,79	0,43	0,141	0,0706
1,50	0,137	0,58	0,35	0,116	0,0576
2,00	0,117	0,51	0,30	0,100	0,0493

Źródło: B. Gostkowska, Wielkości, jednostki i obliczenia stosowane w ochronie radiologicznej, CLOR Warszawa 1991.

Oslabienie natężenia promieniowania gamma przez osłony

Tabela 4

Grubość warstwy osłabiającej natężenie promieniowania gamma o połowę		
Materiał	Grubość [mm]	
	Energia 662 keV	Energia 284 keV
Ołów	63,5	35,6
Stal	172,7	94,0
Beton	533,4	355,6

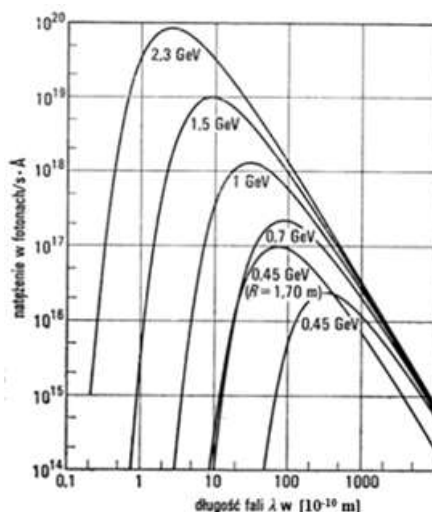
Źródło: Promieniowanie gamma – Wikipedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_gamma

Promieniowanie synchrotronowe

Promieniowanie synchrotronowe jest promieniowaniem elektromagnetycznym o energii rzędu GeV o charakterze nietermicznym, które wytwarzają naładowane cząstki (głównie elektrony) podczas ruchu po zakrzywionym torze w polu elektrycznym wzbudzonym w szczelinach rezonatorów wnękowych o częstotliwości radiowej (100 MHz) synchronicznie do czasu ich obiegu. Ponadto wnęki rezonansowe kompensują straty energetyczne wiązki elektronów, a dwie pasywne wnęki Landaua o częstotliwości 300 MHz, wydłużają pakiety elektronowe, a co za tym idzie – ich czasu życia w pierścieniu akumulacyjnym. Elektrony wytwarzane są w dziale elektronowym, skąd trafiają do akceleratora liniowego. Promieniowanie synchrotronowe wytwarzane jest



w szczególnym typie akceleratora cyklicznego tzw. synchrotronie. Tor ruchu elektronów po obwodzie wewnątrz pierścienia akumulującego synchrotronu jest wymuszony przez potężne pola elektromagnetyczne. Aby elektrony poruszały się po torze zamkniętym, ich tor jest zakrzywiany przez 12 bloków elektromagnesów. W miejscach zakrzywienia ich toru powstaje promieniowanie elektromagnetyczne zwane światłem synchrotronowym. W miarę wzrostu energii przyspieszanych elektronów, wartość pola magnetycznego jest zwiększana, aby zachować stały promień ich obiegu. Krążące wewnątrz pierścienia akumulującego elektrony poruszają się z prędkościami rzędu $3 \cdot 10^6$ okrążeń na sekundę w warunkach bardzo wysokiej próżni rzędu $10^{-10} - 10^{-11}$ mbara. Światło synchrotronowe wyprowadzane na zewnątrz synchrotronu najpierw trafia do tzw. linii badawczych, a następnie na stanowiska pomiarowe, gdzie jest wykorzystywane do badań naukowych. W synchrotronie można uzyskać energię elektronów do 23 GeV, protonów zaś do 1 TeV.



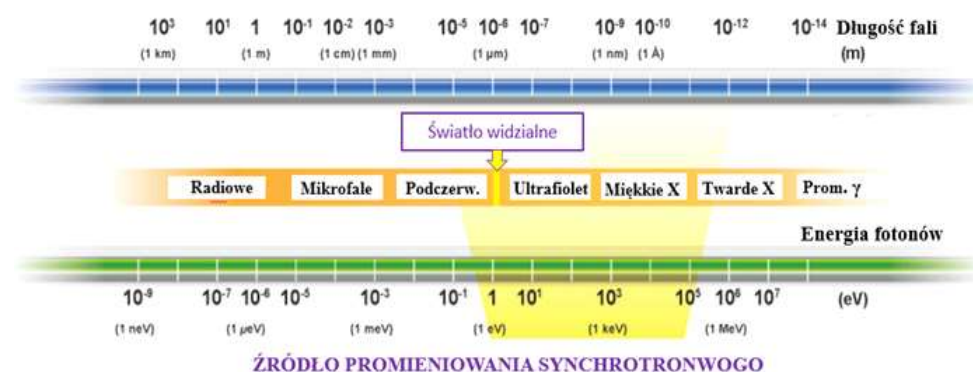
Rys. 18. Wykres natężenia fotonów o różnych energiach w funkcji długości fali.
Źródło: https://www.fuw.edu.pl/~skwira/FPJ/FPJ_w5_all.pdf

Zakres długości fal promieniowania synchrotronowego prawie zawsze zawiera pasma podczerwone, widzialne, ultrafioletu oraz rentgenowskie miękkie i część twardego. Trudno znaleźć w literaturze jednoznaczny zakres granic długości fal lub częstotliwości promieniowania synchrotronowego, ale zazwyczaj przyjmuje się, że promieniowanie to ma długość fal w granicach od $7,8 \cdot 10^{-7}$ m do $5 \cdot 10^{-12}$ m.

W Polsce w latach 2010–2015 powstało Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS. Budynek, w którym znajduje się synchrotron, zlokalizowany jest w Krakowie na terenie Kampusu 600-lecia Odnowienia Uniwersytetu Jagiellońskiego.



Elektromagnetyczne promieniowanie jonizujące

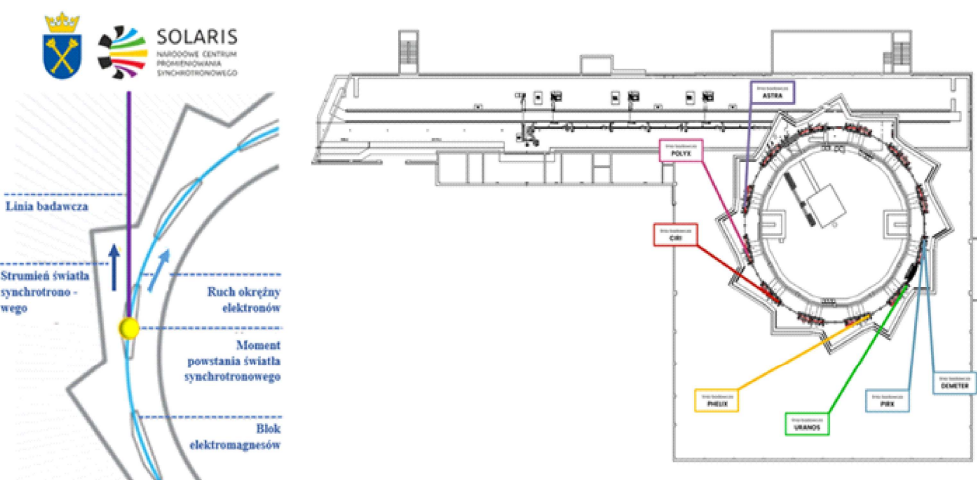


Rys. 19. Skala długości fal i zakres energii kwantów promieniowania synchrotronowego.
Źródło: <https://studylibpl.com/doc/1434684/promieniowanie-synchrotronowe-i-jego-zastosowania>

Unikalne właściwości światła synchrotronowego to m.in. ogromna intensywność światła w wiązce – jest ono miliony razy jaśniejsze od światła, które dociera do Ziemi ze Słońca.

To niezwykle jasne światło umożliwia badanie materii żywej jak i nieożywionej. Znakomite parametry synchrotronu SOLARIS stawiają go w czołówce urządzeń tego typu na świecie. SOLARIS jest synchrotronem III generacji.

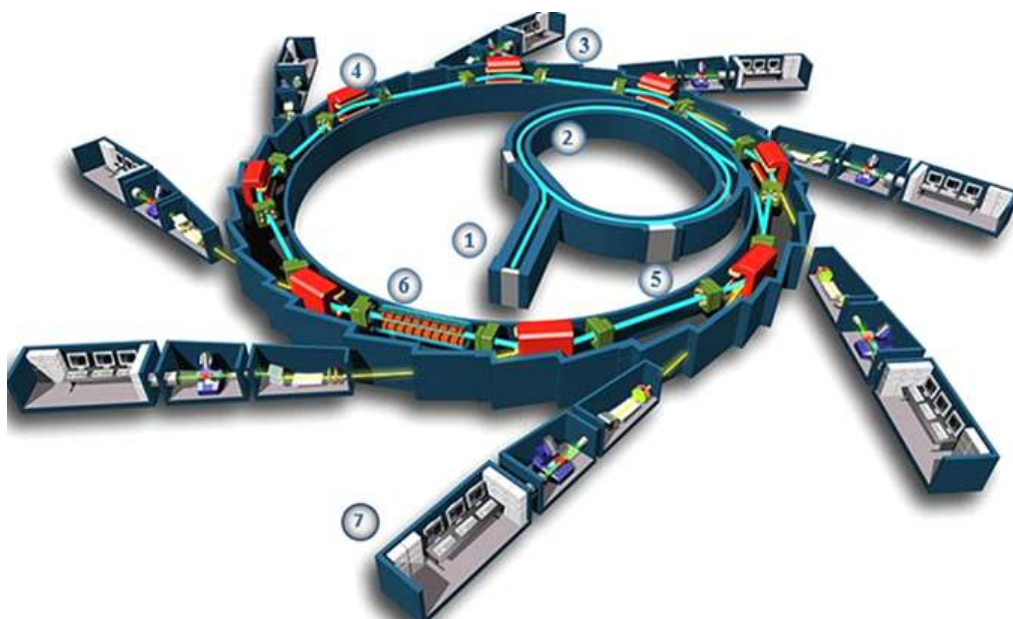
Z kolei we Francji na płaskowyżu Saclay w Saint Aubin powstał ośrodek badawczy SOLEIL, („Source Optimisée de Lumière d’Energie Immédiate du LURE”). Bardzo szeroki zakres energii światła synchrotronowego wytwa-



Rys. 20. Schemat synchrotronu SOLARIS w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego z działającymi liniami badawczymi.

Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Solaris_\(synchrotron\)#/media/Plik:_Schemat_linie_2023_jo-anna_kowalik.png](https://pl.wikipedia.org/wiki/Solaris_(synchrotron)#/media/Plik:_Schemat_linie_2023_jo-anna_kowalik.png)





Rys. 21. Ogólny schemat synchrotronu SOLEIL.

Źródło: <https://www.synchrotron-soleil.fr/fr/propos-de-soleil/nous-connaître/quest-ce-que-soleil/soleil-en-3-questions>

rganego w SOLEIL, umożliwia prowadzenie badań w wielu dziedzinach nauki.

W tym ośrodku badawczym prowadzonych jest szereg zaawansowanych prac w takich dziedzinach biologia, astrofizyka, fizyka akceleratorów cząstek, struktury elektroniczne i molekularne, nanoobiekty i jeszcze wiele innych badań w zakresie najnowszych technologii.

Promieniowanie synchrotronowe jest światłem emitowanym przez elektrony krążące z prędkością zbliżoną do prędkości światła w próżni, o bardzo wysokiej energii. Promieniowanie emitowane jest w postaci niezwykle cienkiej wiązki, stycznie do trajektorii elektronów, które zakrzywiane są przez pole magnetyczne (siła Lorentza).

Ogólne zasady działania synchrotronu SOLEIL:

1. Cienka wiązka elektronów, emitowana przez działło elektronowe, jest najpierw przyspieszana w akceleratorze liniowym LINAC o długości 16 m. Elektrony osiągają tam pierwszy poziom energetyczny o wartości 100 MeV.

2. Po tym pierwszym przyspieszeniu wiązka elektronów kierowana jest do drugiego akceleratora kołowego o nazwie Booster, który doprowadza ich energię do wartości roboczej synchrotronu SOLEIL, czyli 2,75 GeV.

3. Na tym poziomie energetycznym elektrony są wstrzykiwane do pierścienia akumulacyjnego o obwodzie 354 metrów (lub 113 metrów średnicy) i krążą tam po torach kołowych przez kilka godzin.



4. W pierścieniu akumulacyjnym urządzenia magnetyczne takie jak dipole, magnesy zginające, falowniki lub wigglerzy oraz undulatory przyspieszają i formują strumień elektronów. Undulatory i wigglerzy zwiększają intensywność promieniowania synchrotronowego. Wigglerzy to rzędy zmiennych magnesów dipolowych, umieszczonych jeden za drugim w naprzemiennej orientacji północ-południe. Wigglerzy odchylają trajektorię elektronów lub wprowadzają je w drgania. Ze względu na specjalny układ magnetyczny, przechodząca cząstka zmuszana jest do poruszania się po sinusoidalnym torze.

W rezultacie cząstka emituje promieniowanie synchrotronowe w swoim średnim kierunku poruszania się. Właściwości promieniowania silnie zależą od długości poszczególnych magnesów, siły pola magnetycznego oraz prędkości, ładunku i masy cząstki. Przyspieszone do prędkości bliskich prędkości światła w próżni elektrony tracą energię w postaci światła zwanego promieniowaniem synchrotronowym.

5. Energia tracona przy każdym zwrocie elektronów emitujących promieniowanie synchrotronowe jest kompensowana przez wętki o częstotliwości radiowej.

6. Promieniowanie synchrotronowe, wytwarzane w magnesach zginających i elementach wprowadzających (wigglerach lub falownikach), jest kierowane, selekcjonowane i kondycjonowane przez układy optyczne do stanowisk doświadczalnych na liniach badawczych.

7. Każda linia badawcza posiada oddzielny ośrodek przystosowany do przygotowania i analizy badanych próbek oraz przetwarzania zebranych informacji. Spośród 43 możliwych linii badawczych w SOLEIL, 29 linii jest otwartych. Każda linia badawcza zawiera instrumenty naukowe, programy eksperymentów naukowych itp.

Impuls elektromagnetyczny

Impuls elektromagnetyczny (pol. IEM) (ang. Electromagnetic Pulse – EMP) – powstawanie i rozprzestrzenianie się promieniowania elektromagnetycznego o szerokim widmie stosunkowo niskich częstotliwości, krótkim czasem trwania i bardzo dużym natężeniu. Impuls indukuje w urządzeniach elektrycznych wzrost napięcia do setek a nawet tysięcy woltów. Zwiększone napięcie powoduje skokowy wzrost natężenia prądu elektrycznego i wydzielanie dużych ilości ciepła. Gwałtowny wzrost energii cieplnej powoduje uszkodzenia elementów elektronicznych, obwodów elektrycznych, a nawet linii przesyłowych. Należy nadmienić, że w zwykłej elektronice półprzewodnikowej wykorzystuje się napięcia od 5 do 15 V, a w mikroprocesorach nawet poniżej 3 V. Impuls elektromagnetyczny zmienia własności jonosfery zaburzając łączność radiową. Impuls elektromagnetyczny powstaje podczas silnych eksplozji (szczególnie bomby jądrowej), podczas zdarzeń wywołujących gwałtowne zaburzenia ziemskiego pola magnetycznego. Impuls powstający podczas wybuchu jądrowego przenosi większość energii w falach elektromagnetycznych o częstotliwościach w zakresie od 3 Hz do 30 kHz.



Rozwój nuklearnego EMP polegał na optymalizowaniu energetycznego rozkładu promieniowania w ten sposób, by jego zdecydowana większość była przekazywana w tzw. impulsie E1, czyli krótkotrwałym, ale bardzo intensywnym polu elektromagnetycznym. E1 to efekt promieniowania gamma z eksplozji nuklearnej, które jonizuje atomy w górnych warstwach atmosfery (tzw. zjawisko Comptona). Elektrony zmierzają ku powierzchni Ziemi z prędkościami bliskimi prędkości światła. Jest to potężny pionowy impuls prądu elektrycznego. Pole magnetyczne planety odbija je jednak pod kątem, wywołując w tym momencie impuls elektromagnetyczny. Wykorzystanie EMP jako broni może spowodować, że wszystkie nasze urządzenia elektroniczne i elektryczne zostaną poważnie uszkodzone lub przestaną właściwie funkcjonować.

LITERATURA

- Chemia radiacyjna*: praca zbiorowa pod red. J. Kroha. PWN Warszawa 1970.
- Comptona zjawisko, [w:] Encyklopedia PWN [online] [dostęp 2021-07-22].
- Definicja kwantu. Foton i jego energia – Efizyka*. net.pl.
<https://efizyka.net.pl/definicja-quantu-foton-i-ego-energia>.
- Enge H.A., Wehr M.R., Richards J.A., *Wstęp do fizyki Atomowej*, PWN Warszawa 1983.
- Enge H., *Wprowadzenie do fizyki jądrowej*, H Enge (Addison-Wesley, 1966).
- England J.B., *Metody doświadczalne fizyki jądrowej*. Warszawa, PWN 1980.
- Evans R.D., *The atomic nucleus*. New York, McGraw-Hill Book Company 1955 [3]
- Massalski J., *Fizyka dla inżynierów. Część II*. Warszawa, WNT 1975.
- Ginsburg V.L., Syrovatskii S.I., *Developments in the Theory of Synchrotron Radiation and its Reabsorption ARAA*, 1969.
- Golański A., *Broń EMP – jak działa i czym grozi humanitarny postrach naszych czasów?*
<https://www.dobreprogramy.pl/bron-emp-jak-dziala-i-czym-grozi-humanitarny-postrach-naszyczasow,6628340455151233a>
- Gurewicz, Władimir (2019). *Ochrona sprzętu elektrycznego: Dobre praktyki zapobiegania uderzeniom impulsów elektromagnetycznych na dużych wysokościach*. Berlin: De Gruyter.
- Halliday D., Resnick R., Walker J., *Podstawy fizyki, tom 5*, PWN Warszawa 2003.
- Hryniewicz A. i E. Rokita E. (redakcja), PWN Warszawa 2000.
- Hryniewicz, red. *Człowiek i promieniowanie jonizujące*, PWN Warszawa, 2001.
- Jaracz J., *Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2001.
- Kroh J., Praca zbiorowa „*Technika radiacyjna*”, WNT Warszawa 1971.
- Lederer C.M., Hollander J.M., Perlman L.: *Table of isotopes*. New York, John Wiley and Sons 1968.
- Maher K i inne wikibooks. „*Basic Physics of Nuclear Medicine*”. Wersja elektroniczna dostępna na stronie
[http://en.wikibooks.org/wi,,ki/Basic Physics of Nuclear Medicine](http://en.wikibooks.org/wi,,ki/Basic%20Physics%20of%20Nuclear%20Medicine)
- Massalski J.: *Detekcja promieniowania jądrowego*. PWN, Warszawa 1959.
- Massalski J.: *Fizyka dla inżynierów. Część II*. Warszawa, WNT 1975.
- Mayer-Kuckuck T., *Fizyka jądrowa*. Warszawa 1987.



- Norwood J., *Fizyka współczesna*, PWN, Warszawa 1982.
- Oddziaływanie promieniowania gamma z materią – Nukleo.* [https://bing.com/search? q=jak+promieniowanie+rentgenowskie+oddzia%C5%82uje+z+atomami](https://bing.com/search?q=jak+promieniowanie+rentgenowskie+oddzia%C5%82uje+z+atomami).
- Podgorsak E.B., „*Radiation Oncology Physics*”.
- Wersja elektroniczna na stronie: http://www-pub.iaca.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf
- PROMIENIOWANIE Rentgenowskie.* Definicja, pojęcia – ekologia.pl
<https://www.ekologia.pl/wiedza/slowniki/leksykon-ekologii-i-ochrony-srodowiska/promieniowanie-rentgenowskie>.
- Sobkowski J., *Chemia radiacyjna i ochrona radiologiczna*. Warszawa, Wydawnictwo Adamantan, 2009, s. 90-91, ISBN 978-83-7350-135-
- Skrzypczak E., Szepliński Z., *Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych*, PWN Warszawa 2002.
- Skutki broni jądrowej. Opracowane i zredagowane przez Samuela Glasstone’a i Philipa J. Dolana.* Wydanie trzecie Przygotowane i opublikowane przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych oraz Administrację Badań i Rozwoju Energii 1977.
- Strzałkowski A., *Wstęp do fizyki jądra atomowego*. Warszawa, PWN 1978.
- Synchrotron SOLARIS.
<https://synchrotron.uj.edu.pl/documents/1457771/114907010/broszura-solaris-PL.pdf/cec6c1f1-2b9e-490a-8040-ed710e8ff0b2>.
- SYNCHROTRON JAKO NARZĘDZIE: ZASTOSOWANIA PROMIENIOWANIA...* <https://www.synchrotron.org.pl/publ/biulet/vo053/145-Kisiel.pdf>
- Szczeniowski S., *Fizyka doświadczalna. Część VI Fizyka jądra i cząstek elementarnych*. Warszawa, PWN 1974.
- Sztuczne PEM najgroźniejsze* – <https://www.femibelly.com/baza-wiedzy/pem-co-to-jest-zrodla-wplyw-na-czlowieka/>
- Wiązania chemiczne między atomami – Copernicium.*
<https://copernicium.pl/2020/07/02/wiazania-chemiczne-miedzy-atomami/>.
- Wichman E.H., *Fizyka kwantowa*, (Berkleyowski kurs fizyki), PWN Warszawa 1973.
- What is synchrotron radiation? NIST. Physical Measurement Laboratory
<https://www.nist.gov/pml/sensor-science/what-synchrotron-radiation>
- Wróblewski A.K., Zakrzewski J.A., *Wstęp do fizyki*, PWN Warszawa 1984.
- Wróblewski A.K., *Historia fizyki. Od czasów najdawniejszych do współczesności*, Warszawa, PWN 2007.
- Zienkowicz J., *Encyklopedia techniki. Energia jądrowa*. red. Jan Zienkowicz. Warszawa, WNT, 1970. (pol.).

