

Laser na swobodnych elektronach

Ewa CZUCHRY

Jak działa zwykły laser optyczny, każde dziecko wie :-). Zasadę działania oddaje już sama nazwa LASER (od ang. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*); promieniowanie elektromagnetyczne, padając na atomy w jakimś ośrodku materialnym (np. w kryształach), w którym została sztucznie dokonana tzw. inwersja obsadzeń, to znaczy większość atomów znajduje się w stanie wzbudzonym (czyli obsadzone są najwyższe poziomy energetyczne), powoduje wymuszoną emisję promieniowania przez elektrony będące w stanach wzbudzonych. Otrzymane promieniowanie jest spójne, tzn. zgodne w fazie, kierunku rozchodzenia się i polaryzacji.

W laserze na swobodnych elektronach (ang. FEL, od *Free Electron Laser*) – jak wskazuje sama nazwa – mamy do czynienia ze swobodnie poruszającymi się elektronami, niezwiązanymi z żadnymi atomami. Dzięki temu widmo uzyskiwanego promieniowania jest szerokie i nie zależy od własności wzbudzanego materiału, jak jest w laserze optycznym. Większość laserów optycznych daje światło tylko w kilku barwach. Co ciekawsze, zasada działania lasera na swobodnych elektronach jest oparta nie na efektach kwantowych jak w laserze optycznym, lecz na efektach elektrodynamiki klasycznej (przez „klasycyzm” rozumiem tutaj niekwantowość układu, a więc efekty relatywistyczne, o których będzie niżej, są w tej terminologii efektami klasycznymi).

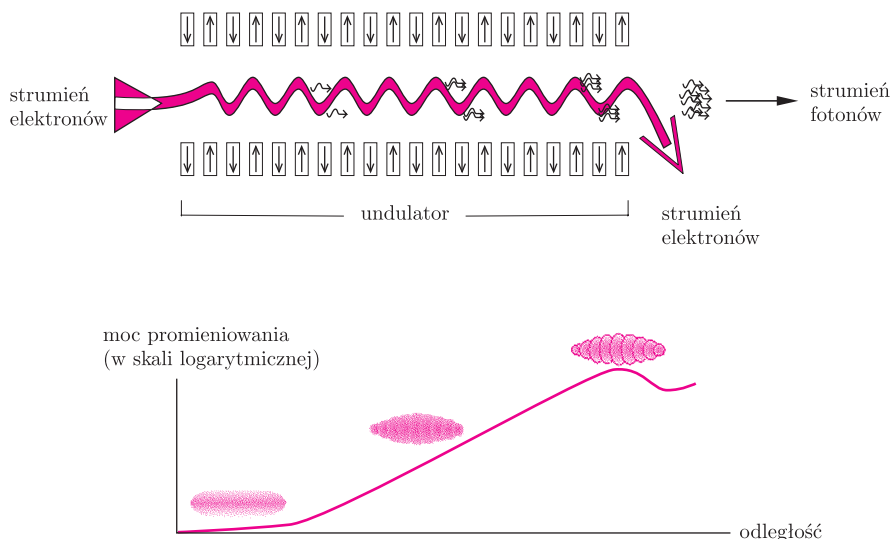
Swobodne elektrony, które będą emitować spójne, zgodne w fazie promieniowanie lasera, są początkowo przyspieszane do prędkości ultrarelatywistycznych w synchrotronie albo akceleratorze liniowym. Prędkość elektronów v jest wtedy bliska c , a czynnik $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ rzędu $10^2 - 10^5$ (co oznacza, że energia elektronów wyraża się w gigaelektronowoltach). Elektrony są emitowane w krótkich wiązках trwających około 100 femtosekund, zawierających około 10^{12} elektronów każda (dane dla konkretnego lasera w projekcie TESLA, Hamburg, Niemcy). Po opuszczeniu akceleratora wiązka ta jest kierowana do (względnie) długiego tunelu (około 30 m), zwanego „po polsku” undulatorem, na którego ścianach po dwóch przeciwnych stronach są umieszczone magnesy, naprzemiennie bieguny północne i południowe. Między jedną parą magnesów elektron jest odpychany w dół, między następną w górę, a więc porusza się on pewnego rodzaju zygawkowatym torem, a dokładniej, torem zbliżonym do sinusoidy. Zatem każdy elektron doznaje przyspieszenia (hamującego albo przyspieszającego) w kierunku prostopadłym do kierunku prędkości. Klasyczna elektrodynamika mówi nam, że w takiej sytuacji jest emitowane tzw. promieniowanie hamowania. Dla prędkości podświetlnych promieniowanie to jest wysyłane w kierunku ruchu elektronu, w obszar stożka o kącie rozwarcia odwrotnie proporcjonalnym do czynnika γ .

Promieniowanie to porusza się, oczywiście, trochę szybciej (bo z prędkością c), niż elektron je emitujący, i oddziałuje z elektronami znajdującymi się przed elektronem będącym źródłem tego promieniowania – w undulatorze odchylenie elektronów od głównego kierunku ruchu jest porównywalne z kątem rozwarcia stożka promieniowania. Zależnie od tego, czy dany elektron znajduje się w fazie, czy w przeciwfazie z padającą nań falą elektromagnetyczną, doznaje on przyspieszenia bądź opóźnienia. Faza lub przeciwfaza elektronu oznacza tu, że jest on albo przyspieszany, albo hamowany w kierunku prostopadłym do głównego kierunku rozchodzenia się wiązki; łatwiej to zrozumieć, wyobrażając sobie, że elektron ten porusza się po sinusoidzie, wtedy pojęcie fazy lub przeciwfazy z falą elektromagnetyczną jest bardziej naturalne. Zatem zależnie od położenia części elektronów z przodu wiązki będzie przyspieszana, a część zwalniana pod wpływem oddziaływania z polem elektromagnetycznym emitowanym przez elektrony za nimi. To powoduje, że zaczynają się one gromadzić



w punktach odległych w fazie o 2π , czyli o długość fali emitowanego promieniowania. Im bliżej końca undulatora, tym efekt ten jest bardziej widoczny.

Pamiętamy, że te zgrupowania elektronów dalej poruszają się zygzakowato (po sinusoidzie) pod wpływem pola magnetycznego generowanego w undulatorze i ciągle promieniają. Promieniowanie to jest zgodne w fazie z promieniowaniem emitowanym przez elektrony z tyłu, jeśli dany elektron znajduje się w odpowiedniej fazie z falą padającą. A więc promieniowanie emitowane przez ten elektron jest w takiej samej fazie, jak promieniowanie padające, i w efekcie fala elektromagnetyczna ulega wzmocnieniu. Poza tym elektrony znajdujące się w „nieodpowiednich” miejscach wiązki są albo przyspieszane, albo zwalniane, aż znajdą się w punkcie zgodnym w fazie z padającą falą elektromagnetyczną. A będąc w tym punkcie, emitują z kolei promieniowanie o takiej samej fazie, jak promieniowanie padające, i mamy do czynienia z samonapędzającym się procesem. Schemat działania tego procesu przedstawiony jest na poniższym rysunku.



Na powyższym wykresie, oprócz wykładniczego wzrostu energii emitowanego promieniowania pokazane jest także, jak grupują się elektrony: na początku undulatora wiązka jest rozmyta, przy końcu widać wyraźne zgrupowania. Oczywiście w rzeczywistości (tej „rzeczywistej”, doświadczalnej, jak i teoretycznej) pojedynczych impulsów elektronowych musi być dużo więcej niż jest pokazane na rysunku – wtedy proces jest stabilny i moc uzyskiwanego promieniowania jest odpowiednio duża. Na przykład w TESLI liczba ta wynosi co najmniej 10^5 .

W wyniku tego procesu otrzymujemy na wyjściu undulatora bardzo intensywne promieniowanie spójne, o częstotliwościach znacznie przekraczających częstotliwości optyczne (z zakresu światła widzialnego i nadfioletu), nawet w zakresie promieniowania X – czyli o długości fali rzędu 0,1 nanometra. Dodatkowo, dzięki zmianom pewnych parametrów undulatora, a także energii padającej wiązki, można otrzymywać promieniowanie o prawie dowolnej długości fali. Zależność długości emitowanej fali od czynnika relatywistycznego γ elektronów wyraża się w pierwszym przybliżeniu stosunkiem $1/\gamma^2$.

Tego typu lasery, które zresztą nie przypominają wyglądem i wielkością zwykłych laserów optycznych (mieszczących się w średniej wielkości laboratorium, na stole, a nawet w dłoni – jak popularne wskaźniki laserowe), ze względu na ilość potrzebnej aparatury, a także znaczne rozmiary samego akceleratora produkującego wysokonergetyczne wiązki elektronów, działają już w paru miejscach na świecie. Mają one bardzo szerokie zastosowania, przede wszystkim mają umożliwić badanie procesów atomowych (które mogą być „widziane” w „oświetleniu” promieniowaniem X), a także w chemii, biologii, a nawet w medycynie.