

procesie jest równa różnicy energii między początkowym i końcowym stanem, a ponieważ jest to konkretne i bardzo dobrze zdefiniowane, ilość energii, która może być zaabsorbowana przez atom, jest skwantowana (tzn. ograniczona do pewnych konkretnych wartości). Ten stan wzbudzenia atomu jest krótkożyłowym zjawiskiem rezonansowym. Zwykle po około 10^{-8} lub 10^{-9} s wzbudzony atom spontanicznie powraca do niższego stanu, najczęściej do stanu podstawowego, tracąc po drodze energię wzbudzenia. To zrzucenie energii może nastąpić w postaci emisji światła lub (zwłaszcza w gęstych ośrodkach) przez jej konwersję do energii cieplnej na skutek zderzeń międzyatomowych w ośrodku. (Jak wkrótce zobaczymy, skutkiem tego drugiego mechanizmu jest absorpcja światła w pobliżu częstotliwości rezonansowej oraz transmisja lub odbicie pozostałych częstotliwości – proces ten jest odpowiedzialny za większość kolorów widzianych w otaczającym nas świetle.)

Jeżeli przejścia atomowe następują łącznie z emisją światła (tak jak w rozrzedzonym gazie), to **energia fotonu jest równa skwantowanej energii spadku poziomu wzbudzenia atomu**. Związane jest to z konkretną częstotliwością, przy użyciu wyrażenia $\Delta\mathcal{E} = h\nu$, częstotliwością związaną zarówno z przejściem fotonu, jak i atomu między dwoma różnymi stanami. Jest to tzw. **częstotliwość rezonansowa** (ang. *resonance frequency*), jedna z kilku (każda ze swoim własnym prawdopodobieństwem wystąpienia), w pobliżu których atom bardzo wydajnie absorbuje oraz emituje energię. Atom wypromieniowuje kwant energii, który najprawdopodobniej powstaje spontanicznie i miejscowo przez przejście elektronu między stanami energetycznymi.

To co dzieje się w czasie przejścia atomowego 10^{-8} s nie jest do końca jasne, ale pomocne może być wyobrażenie sobie, że orbitujący elektron w jakiś sposób wykonuje swoje energetyczne przejście w dół przez stopniowo tłumiony ruch drgający o konkretnej częstotliwości rezonansowej. Wypromieniowane światło można sobie wtedy wyobrazić w półklasyczny sposób. Przyjmijmy, że jest wyemitowane w krótkim oscylującym kierunkowym impulsie lub **ciągu falowym** (ang. *wavetrain*), trwającym mniej niż około 10^{-8} s – jest to obraz zgodny z pewnymi obserwacjami eksperymentalnymi (zobacz p. 7.4.2 oraz rys. 7.36). Dobrze jest pamiętać, że impuls elektromagnetyczny jest w pewien nierozzerwalny sposób związany z fotonem. Impuls jest jakby półklasyczną reprezentacją natury falowej fotonu. Nie są to jednak pojęcia równoważne pod każdym względem: elektromagnetyczny ciąg falowy jest klasycznym tworem, opisującym propagację i przestrzenny rozkład światła z niesłychaną dokładnością. Jednak jego energia nie jest

skwantowana, a to z kolei jest cechą charakterystyczną fotonu. Jeżeli więc rozważamy ciągi falowe fotonów, to pamiętajmy o tym, że tkwi w tym coś więcej niż tylko klasyczny oscylujący impuls fali elektromagnetycznej. Oczywiście wprowadzenie pojęcia emisji ciągów falowych służy jedynie do tego, by mieć podstawę do rozważań na temat częstotliwości światła. To z kolei jest być może kluczowym zagadnieniem w każdym naiwnym modelu fotonu: Jak manifestuje się częstotliwość?

Widma emisji pojedynczych atomów lub rozrzedzonych gazów, których atomy nie oddziałują mocno ze sobą, składają się z ostrych „linii”, tzn. dokładnie zdefiniowanych częstotliwości charakterystycznych atomów. Zawsze występuje pewne poszerzenie częstotliwości tego promieniowania ze względu na poruszanie się atomów, ich zderzenia itd.; w związku z tym nie jest ono do końca monochromatyczne. Ogólnie jednak przejście atomowe z jednego poziomu na drugi jest charakteryzowane przez emisję dobrze zdefiniowanego wąskiego zakresu częstotliwości. Z drugiej strony, widma ciał stałych i płynów, w których atomy wchodzą ze sobą w częste interakcje, są rozciągane do postaci szerokich pasm częstotliwości (ang. *wide frequency bands*). Gdy dwa atomy znajdują się blisko siebie, wynikiem jest niewielkie przesunięcie ich wzajemnych poziomów energetycznych – wpływają one wzajemnie na siebie. Cała masa atomów pozostających ze sobą w interakcjach w ciele stałym tworzy ogromną ilość takich przesuniętych poziomów energetycznych, w efekcie rozszerzając oryginalne położenia poziomów oraz zlewając je docelowo w pewne ciągłe pasma. Ośrodki tego typu emitują i absorbują promieniowanie w szerokim zakresie częstotliwości.

Schładzanie optyczne

Liniowy pęd przenoszony przez fotony może być przekazany poruszającym się atomom lub jonom przy jednoczesnej znacznej zmianie ich ruchu. Po około 10 tysiącach cykli absorpcji i natychmiastowych emisji atom, który początkowo poruszał się z prędkością 700 m/s może być spowolniony do niemal zerowej prędkości. Ponieważ temperatura ogólnie jest proporcjonalna do średniej energii kinetycznej cząsteczek stanowiących pewien system, proces ten jest nazywany **schładzaniem optycznym** lub **laserowym** (ang. *optical* lub *laser cooling*). Dzięki temu osiągalne są temperatury w zakresie mikrokelwinów. Schładzanie laserowe stało się podstawą wielu zastosowań, np. zegara atomowego, interferometru atomowego oraz ogniskowania wiązek atomowych. W pewien fascynujący i praktyczny sposób łączy to zagadnienia z p. 3.3.4 i 3.4.4.