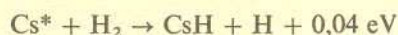


Śnieg laserowy

Dr Krzysztof ERNST, mgr Jacek HOFFMAN

Co to jest?

Nazwa „śnieg laserowy” pojawiła się po raz pierwszy w 1976 roku na Międzynarodowej Konferencji Elektroniki Kwantowej w Amsterdamie, gdzie pod takim właśnie tytułem W. Happer przedstawił wyniki doświadczenia wykonanego w Uniwersytecie Columbia. Oświetlał on mianowicie komórkę zawierającą pary cezu, wodór i hel światłem lasera argonowego o długości fali 458 nm. W komórce pod wpływem światła powstawały zawieszony w gazie cząstki o rozmiarach rzędu 1 μm . Cząstki te, dobrze widoczne dzięki rozproszeniu na nich światła (tego samego lasera argonowego), opadały na dno komórki stwarzając wrażenie padającego śniegu. Stąd też nazwa zaobserwowanego efektu. Podana przez Happera interpretacja zjawiska jest następująca: Światło laserowe absorbowane jest przez atomy cezu, co można stwierdzić obserwując jego pochłanianie przy przejściu przez komórkę lub świecenie wzbudzonych atomów cezu. W zderzeniach wzbudzonych atomów cezu z cząsteczkami wodoru zachodzi reakcja chemiczna



Powstające w niej cząsteczki CsH mogą następnie łączyć się w drobne kryształki $(\text{CsH})_n$, które są obserwowane jako śnieg.

W okresie ostatnich lat ukazało się wiele dalszych prac dotyczących powstawania śniegu laserowego w rozmaitych ośrodkach gazowych ($\text{NO}_2 + \text{SO}_2$, SF_6 , CS_2 , UF_6) pod wpływem światła laserowego o różnych długościach fali. Rozmiary obserwowanych cząstek zmieniały się w granicach 0,5–3 μm , natomiast szybkość ich produkcji była na ogół niewielka (np. w przypadku CS_2 rzędu 10^{-6} g/h), co stanowiło istotną trudność w zastosowaniu metod analizy chemicznej do określania składu chemicznego cząstek śniegu.

Śnieg laserowy jest jednym z interesujących a równocześnie bardzo efektywnych przejawów intensywnie ostatnio badanych reakcji chemicznych indukowanych światłem laserowym.

Dlaczego laser?

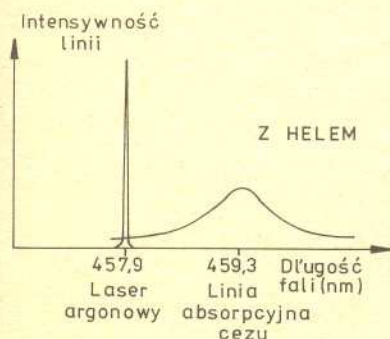
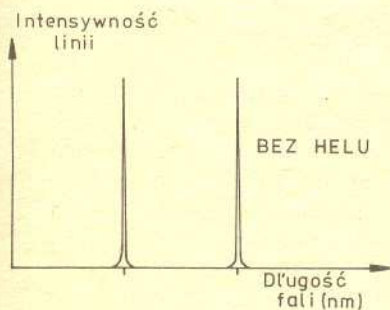
Reakcje fotochemiczne, czyli reakcje chemiczne indukowane przez światło, znane były już na długo przed skonstruowaniem pierwszego lasera. Ich wykorzystanie doprowadziło na przykład do powstania techniki fotograficznej. Stosowana była też od dawna w fotochemii metoda fotolizy błyskowej, w której badaną substancję w stanie gazowym naświetlano światłem silnych lamp błyskowych. Dlaczego więc laser stał się czynnikiem stymulującym rozwój badań reakcji fotochemicznych?

Korzyści wynikające z zastosowania laserów wiążą się z pewnymi cechami charakteryzującymi światło laserowe. Należą do nich przede wszystkim: wąska linia widmowa, możliwość strojenia oraz duże natężenie wiązki. Możliwość wyboru długości fali w szerokim zakresie pozwala na przygotowanie atomów lub cząsteczek w ściśle określonym stanie wzbudzonym, duża zaś moc zapewnia uzyskanie wysokiej ich koncentracji.

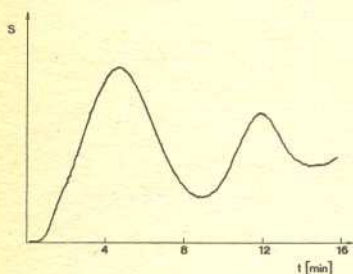
Własności chemiczne wzbudzonego atomu lub cząsteczki mogą różnić się zasadniczo od ich własności w stanie podstawowym. Na przykład, cząsteczka nie wykazująca aktywności chemicznej w stanie podstawowym staje się aktywna po zaabsorbowaniu kwantu światła o odpowiedniej energii.

Tak właśnie dzieje się w zdecydowanej większości przypadków prowadzących do powstania śniegu laserowego. Reakcje inicjujące wszelkie dalsze procesy wymagają przygotowania atomów lub cząsteczek gazu w określonym stanie. Jest to więc zjawisko o charakterze rezonansowym.

I tak na przykład w przypadku wzbudzenia linią 458 nm lasera argonowego, która jest nieco przesunięta względem linii absorpcyjnej cezu, Happer musiał dodać do komórki hel pod ciśnieniem kilku atmosfer. Rozszerzenie linii absorpcyjnej cezu pod wpływem tego ciśnienia pozwoliło na wzbudzenie go linią nie będącą dokładnie „w rezonansie”.



W laserach barwnikowych osrodkami czynnymi są roztwory barwników organicznych. Charakteryzują się one szerokim, do kilkudziesięciu nm, pasmem fluorescencji, a tym samym możliwością generacji wiązki laserowej w szerokim obszarze widma. Generacja tylko określonej długości fali uzyskiwana jest przez zastąpienie jednego ze zwierciadeł lasera odbiciową siatką dyfrakcyjną ustawioną pod odpowiednim kątem. Długość fali generowanego światła można regulować obracając siatkę (dlaczego?)



Podobne doświadczenie powtórzone zostało niedawno przy użyciu lasera barwnikowego. Możliwość dokładnego dostrojenia się do rezonansowej długości fali cezu pozwoliła na użycie jedynie cezu i wodoru.

Istnieje wiele interesujących efektów zarówno chemicznych jak i fizycznych związanych z powstawaniem śniegu. Jednym z ciekawych, a jednocześnie dość zaskakujących są opisane poniżej oscylacje.

Oscylacje czasowe światła rozproszonego na cząstkach

Zmiany w czasie natężenia światła (S) rozproszonego na cząstkach śniegu wytwarzanych w parach dwusiarczku węgla przedstawione są na rysunku. Aby wyjaśnić krótko obserwowane oscylacje można posłużyć się następującym jakościowym modelem zjawiska. Wzrost rozmiarów cząstek w wyniku efektów kondensacji i koagulacji produktów reakcji fotochemicznej prowadzi również do wzrostu rozpraszania. Z drugiej jednak strony, w miarę zwiększania swoich rozmiarów, a tym samym i masy, cząstki te zaczynają opadać coraz szybciej i wypadać z obszaru produkcji. Ubytek cząstek i to tych decydujących o natężeniu światła rozproszonego, bo największych, powoduje, że natężenie światła rozproszonego maleje. Kiedy duże cząstki zrobią po sobie miejsce w obszarze produkcji, może rozpocząć się ponownie proces narastania nowych cząstek prowadzący do wzrostu rozpraszania i rozpoczęcia kolejnego cyklu oscylacji. Należy zwrócić tu uwagę na bardzo istotny dla powyższego modelu fakt, że w obszarze, w którym cząstki zostały już wytworzone, cząsteczki powstające jako produkt reakcji chemicznej „przyklejają się” do tych już istniejących i nie zachodzi proces tworzenia cząstek nowych.

Efekt podobny do opisanego powyżej obserwowano również przy produkcji cząstek śniegu w sześciofluorku uranu wzbudzonym laserem barwnikowym.

Czy śnieg może „padać do góry”?

Zwiększenie ciśnienia gazu może prowadzić do zaniku obserwowanych oscylacji. Jest to związane ze zjawiskiem konwekcji. W obszarze, przez który przechodzi wiązka światła laserowego i w którym zachodzi absorpcja promieniowania, następuje ogrzewanie gazu. Prowadzi to do wytworzenia się gradientu temperatury i związanego z nim gradientu gęstości w komórce. Pojawia się więc siła wyporu działająca na ogrzany gaz. Jej wartość rośnie wraz z ciśnieniem w komórce powodując ruch gazu mieszający cząstki. Utrudnia to powstanie oscylacji polegających na periodycznym opadaniu cząstek śniegu.

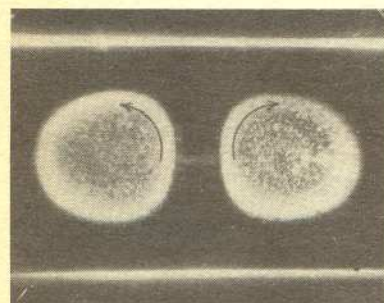
Wpływ konwekcji gazu na zachodzące w komórce procesy można zresztą w prosty sposób zaobserwować śledząc ruch wytworzonych cząstek śniegu. Dobranie odpowiedniej mocy lasera może spowodować, że cząstki w obszarze wiązki pozostaną nieruchome. Dzieje się tak wtedy, kiedy prędkość opadania śniegu względem gazu jest równa prędkości ruchu gazu do góry. Jeśli teraz zmniejszymy natężenie wiązki lub ją wyłączymy, śnieg zaczyna opadać, jeśli natomiast zwiększymy, zaczyna unosić się ku górze.

Szybkość ruchów konwekcyjnych można zwiększyć przez zogniskowanie wiązki laserowej. Pozwala to również na obserwowanie efektownych wirów konwekcyjnych. Przykład takich wirów przedstawiony jest na zdjęciu. Pokazany jest na nim poprzeczny przekrój komórki zawierającej pary dwusiarczku węgla. Wzbudzająca wiązka z lasera azotowego rozczołdzi się prostopadle do płaszczyzny zdjęcia i zogniskowana jest w jego środku. Powstałe cząstki śniegu widoczne dzięki rozproszonemu na nich światłu lasera helowo-neonowego ułożone są w dwa wyraźnie widoczne wiry, a naniesione na zdjęcie strzałki wskazują kierunek ich obrotu.

Wykorzystanie śniegu do badania ruchów konwekcyjnych w gazie jest jednym z możliwych jego zastosowań. Są również inne, z których jedno, najbardziej chyba obiecujące, pragniemy przedstawić na zakończenie.

Laserowa separacja izotopów

Jak wiadomo, izotopy danego pierwiastka różnią się między sobą liczbą neutronów w jądrze atomowym, a stąd także rozmiarami i masą jądra. Oba te czynniki wpływają na widmo atomowe powodując przesunięcie poziomów energetycznych, a tym samym linii absorpcyjnych jednego izotopu względem drugiego.



Przesunięcia te są szczególnie duże dla pierwiastków lekkich (H, He, Li) i ciężkich (U). Mimo niewielkich wartości przesunięcia izotopowego, możliwe jest uzyskanie warunków (w stanie gazowym, pod niezbyt dużym ciśnieniem), w których szerokości linii absorpcyjnych obu izotopów będą mniejsze od ich wzajemnego przesunięcia. Stosując przestrajany laser o dostatecznie wąskiej linii, co jest obecnie w pełni realne, możemy wzbudzić tylko jeden określony izotop, a więc uzyskać śnieg o określonym składzie izotopowym. Następnie można oddzielić od gazu cząstki śniegu wykorzystując jego opadanie lub działanie pola elektrycznego (jeśli cząstki obdarzone są ładunkiem). Uzyskanie ze śniegu czystego pierwiastka metodami chemicznymi jest już stosunkowo proste. Ze względu na pewne procesy uboczne (np. przekazywanie energii wzbudzenia w zderzeniach atomów różnych izotopów), wzbogacenie nie może być stuprocentowe.

Laserowa separacja izotopów wydaje się szczególnie interesująca z punktu widzenia wzbogacania uranu w izotop ^{235}U . Produkcja śniegu laserowego zawierającego uran (a taki właśnie otrzymano wzbudzając sześćiofluorek uranu laserem barwnikowym) może przynieść obiecujące rozwiązania.



Rozwiązanie zadania F 96. Najprostsze rozwiązanie tego zadania można uzyskać przechodząc od układu odniesienia związanego z powierzchnią stołu do układu związanego z końcem sprężyny. Jest to przejście z jednego układu inercjalnego do drugiego, gdyż koniec sprężyny porusza się ze stałą prędkością względem powierzchni stołu. W układzie odniesienia związanym z końcem sprężyny koniec ów spoczywa, a klocek w chwili początkowej porusza się z prędkością $-v$ (rys. 2). Gdy wydłużenie sprężyny będzie maksymalne, prędkość klocka w tym układzie odniesienia wyniesie oczywiście zero (rys. 3). Ponieważ powierzchnia stołu jest idealnie gładka, otrzymaliśmy bardzo proste zadanie na wykorzystanie zasady zachowania energii!!! Energia kinetyczna klocka w chwili początkowej jest równa energii potencjalnej sprężyny w momencie jej największego wydłużenia:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{k(\Delta x_{\max})^2}{2}, \text{ gdzie } \Delta x_{\max} \text{ maksymalne wydłużenie sprężyny. Stąd } \Delta x_{\max} = v \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Oczywiście możliwe jest rozwiązanie zadania w układzie odniesienia związanym z powierzchnią stołu. Oto przykład takiego rozwiązania. Na układ klocek-sprężyna działa nierównoważona, zmienna w czasie siła $F(t)$. Siła ta po czasie t od chwili rozpoczęcia swego działania nadaje układowi pęd $p = \int_0^t F(t') dt'$; $p = mv_k$, gdzie v_k prędkość klocka w chwili t .

Zatem

$$(1) \quad \int_0^t F(t') dt' = mv_k \quad (\text{Patrz rys. 4})$$

W chwili t energia układu jest sumą energii potencjalnej sprężyny i kinetycznej klocka. Jest ona równa pracy, którą wykonała siła $F(t)$ do chwili t . (W chwili początkowej energia układu jest równa zero). W małym odstępie czasu Δt koniec sprężyny, a zatem punkt przyłożenia siły $F(t)$ przebywa drogę $v \cdot \Delta t$. Na drodze tej wykonuje ona pracę elementarną $\Delta W = F(t) \cdot v \cdot \Delta t$.

$$\text{Do chwili } t \text{ siła ta wykona pracę równą } \int_0^t F(t') v dt' = v \int_0^t F(t') dt'.$$

Stąd

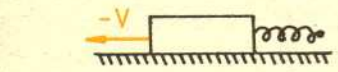
$$(2) \quad v \int_0^t F(t') dt' = \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{mv_k^2}{2}$$

$$\text{Podstawiając (1) do (2) dostajemy } v mv_k = \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{mv_k^2}{2}$$

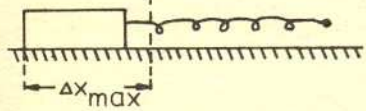
$$(\Delta x)^2 = -\frac{m}{k} v_k^2 + \frac{2mv}{k} v_k$$

Łatwo widać, że funkcja $(\Delta x)^2(v_k)$, będąca funkcją kwadratową, osiąga maksimum dla $v_k = v$. Dotyczy to oczywiście także funkcji $\Delta x(v_k)$. Zatem $\Delta x_{\max} = v \sqrt{\frac{m}{k}}$.

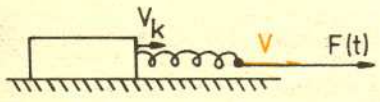
Korzyści płynące z doboru odpowiedniego układu odniesienia dla uproszczenia niektórych problemów widać w tym zadaniu jak na dłoni.



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4