



## W poszukiwaniu najniższych temperatur

Adam Wojciechowski  
Zakład Fotoniki IF UJ

Przestrzeń kosmiczna jest bardzo zimna. Wszyscy wiemy, że gwiazdy są gorące, ale stanowią one bardzo mały jej ułamek. W przestrzeni międzygwiazdnej temperatura spada do około 3 K, czyli  $-270^{\circ}\text{C}$ . Takie temperatury są jednakże osiągalne także na Ziemi. Kriostaty pracujące z ciekłym helem pozwalają naukowcom na rutynowe chłodzenie próbek do temperatury kilku kelwinów, a najbardziej zaawansowane urządzenia, w których wykorzystywana jest mieszanina helu-3 i helu-4, pozwalają na osiąganie temperatur rzędu 1 mK, czyli zaledwie jednej tysięcznej stopnia powyżej absolutnego zera. W tak niskich temperaturach możliwe jest badanie niezwykle ciekawych zjawisk: nadprzewodnictwa (zaniku rezystancji) oraz nadciekłości helu (zaniku lepkości).

Rozwój technik laserowych w ostatnich latach otworzył drogę do prowadzenia pomiarów w gazach i molekułach w jeszcze niższych temperaturach. Chłodzenie laserowe rozrzedzonych gazów atomowych pozwala na osiąganie temperatur rzędu kilku mikrokelwinów zaś poprzez dodatkowy proces, który nazywany jest *odparowaniem*, osiąga się nawet pojedyncze nanokelwiny. Mamy zatem na Ziemi laboratoria, w których występują najzimniejsze miejsca w znanym nam Wszechświecie. Wkrótce jednak ma się to zmienić – NASA planuje stworzenie jeszcze chłodniejszego miejsca na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) pod koniec 2016 roku [1, 2]. Dlaczego właśnie na stacji kosmicznej, a nie w laboratorium? Na to pytanie postaram się odpowiedzieć w dalszej części artykułu.

### Chłodzenie laserowe

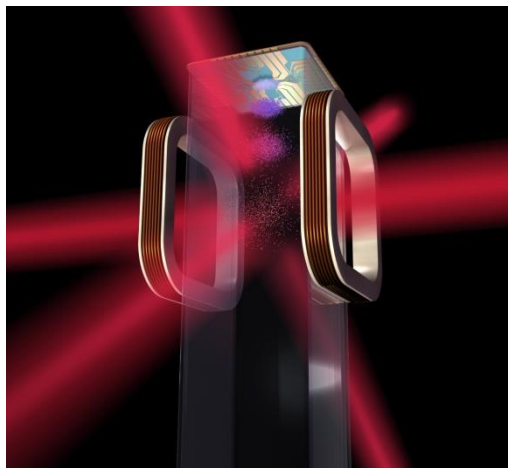
Technika laserowego chłodzenia atomów rozwinęła się w latach 90. ubiegłego wieku. W 1997 roku Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji oraz William Phillips zostali uhonorowani Nagrodą Nobla właśnie za wprowadzenie metod chłodzenia i pułapkowania atomów światłem.

Na czym polega wspomniane powyżej chłodzenie atomów? Rozrzedzony gaz atomowy oświetlany jest wiązkami laserowymi o energii bliskiej, ale nieco mniejszej niż odpowiadająca przejściu pomiędzy poziomami energetycznymi w danym pierwiastku. Fotony z wiązki laserowej są absorbowane głównie przez atomy poruszające się w ich stronę, gdyż na skutek efektu Dopplera stają się one rezonansowe, czyli dokładnie dopasowane do różnicy energii poziomów atomu. Inaczej ujmując, deficyt energii fotonu jest uzupełniany przez część energii kinetycznej atomu. Następnie, po wzbudzeniu atom powraca do stanu podstawowego emitując spontanicznie foton o energii rezonansowej. Wielo-

krotne powtarzanie cyklu absorpcji fotonów o nieco za niskiej energii oraz późniejszej emisji spontanicznej fotonów o energii rezonansowej (a więc wyższej) przez atomy gazu powoduje, że energia kinetyczna atomów maleje z czasem. Ponieważ energia kinetyczna atomów jest związana z temperaturą, powoduje to chłodzenie próbki do coraz mniejszej temperatury. Istotne jest tutaj, że cały cykl musi polegać na absorpcji fotonów głównie z wiązki laserowej oraz ich późniejszej emisji spontanicznej (bez emisji wymuszonej). Gdyby sąsiedni atom absorbował rezonansowe fotony emitowane spontanicznie przez inny atom, mielibyśmy do czynienia z podgrzewaniem ośrodka. Taka sytuacja jest typowa, gdy oświetlamy laserem makroskopowe przedmioty – wiemy, że laser może być używany do cięcia, znakowania czy choćby „wypalania” płyt CD. Aby unikać takiego podgrzewania wiązką światła w laboratorium chłodzony jest rozrzedzony gaz o ciśnieniu około  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  mbar, czyli gaz o ciśnieniu odpowiadającym warunkom wysokiej próżni. Jego rozrzedzenie powoduje, że fotony emitowane spontanicznie mają niewielką szansę być ponownie zaabsorbowane. Ponadto, wysoka próżnia izoluje schłodzony gaz od warunków zewnętrznych – zazwyczaj aparatura próżniowa jest utrzymywana w temperaturze pokojowej, a mimo tego zimny gaz w jej środku nie ogrzewa się.

Typowym układem stosowanym do chłodzenia atomów jest pułapka magneto-optyczna (*magneto-optical trap*, MOT) [3]. Oprócz mechanizmu chłodzenia atomów realizuje ona jeszcze jeden ważny cel – pułapkuje (lokalizuje) chmurę atomów w małym obszarze w przestrzeni. Dzieje się tak dzięki odpowiedniemu uformowaniu pola magnetycznego w komorze próżniowej i zastosowaniu wiązek laserowych o odpowiednich polaryzacjach, dopasowanych do kształtu pola magnetycznego.

Pułapki magneto-optyczne stały się w ostatnich latach bardzo powszechnym narzędziem i pozwalają na rutynowe uzyskiwanie próbek liczących  $10^7$ – $10^9$  atomów, schłodzonych do temperatur rzędu 1–100  $\mu$ K. Są one wprawdzie znacznie mniejsze (obejmujące mniej atomów), ale za to znacznie zimniejsze niż w kriostatach. Dalsze obniżanie temperatury z udziałem światła bliskiego rezonansowi jest już niemożliwe. Z tego względu pułapka magneto-optyczna jest wykorzystywana jako praktyczne narzędzie do wstępnego schładzania atomów, natomiast ich dalsze oziębianie odbywa się już w pułapkach innego typu – pułapkach magnetycznych (jak w przypadku wspomnianego projektu NASA) lub optycznych pułapkach dipolowych. Oba typy pułapek posiadają szereg zalet i wad, natomiast łączy je ważna wspólna cecha – są to pułapki konserwatywne (zachowujące energię), a zatem same w sobie nie powodują dalszego chłodzenia atomów. Chcąc uzyskać niższe temperatury należy znaleźć mechanizm, który pozwoli na dalsze wytracanie energii atomów. Jednym z takich procesów jest opisane poniżej chłodzenie próbki poprzez *odparowanie* najgorętszych atomów.



Rys. 1. Logo projektu Cold Atom Laboratory [1] i jednocześnie główna części pułapki do chłodzenia gazów atomowych. Widoczne są przecinające się pary wiązek laserowych i cewki magnetyczne pułapki MOT. U góry znajduje się chip z nadrukowanymi ścieżkami, które tworzą cewki pułapki magnetycznej. Wewnątrz szklanej komory pokazana jest chmura zimnych atomów

Jeżeli z pułapki usunie się grupę atomów niosących najwięcej energii (odparowanie), to średnia energia przypadająca na atom pozostający w pułapce się obniży. Taki układ, po pewnym czasie, dochodzi do stanu równowagi termodynamicznej odpowiadającego obniżonej temperaturze. Wielokrotnie powtarzając proces usuwania najgorętszych atomów z pułapki możemy zatem osiągnąć coraz niższą temperaturę. Nie istnieje ograniczenie na najniższą możliwą do uzyskania w tym procesie temperaturę, natomiast należy wziąć pod uwagę, że czas potrzebny na to, by układ doszedł do stanu równowagi termodynamicznej wydłuża się wraz z obniżaniem temperatury próbki. Zatem dalsze chłodzenie wymaga coraz to większego czasu, a ponadto wiąże się z ciągłym ubytkiem atomów. Istnieje także szereg procesów, które powodują podgrzewanie atomów w pułapce, np. zderzenia z atomami tła w aparaturze próżniowej czy też niestabilność pól pułapki. W konsekwencji udaje się osiągnąć temperatury w zakresie 10–100 nK. W takich warunkach atomy odkrywają swoją prawdziwie *kwantową* naturę.

#### **Atomy w ultraniskich temperaturach i kondensat Bosego-Einsteina**

W 1995 roku Eric Cornell i Carl Wieman oraz niezależnie Wolfgang Ketterle otrzymali nowy stan materii nazywany kondensatem Bosego-Einsteina, za co później również otrzymali Nagrodę Nobla. Schładzali oni w pułapkach magnetycznych atomy rubidu-87 (Cornell, Wieman) oraz sodu-23 (Ketterle). Są to bozony, czyli atomy, których moment pędu jest liczbą całkowitą. Gdy temperatura atomów była rzędu 100 nK atomy przechodziły w stan, który odpowiadał

pojedynczej fali materii. Zjawisko kondensacji bozonów zostało przewidziane już w roku 1924 przez Satyendrę Bosego i Alberta Einsteina.

Atomy w pułapce, mimo bardzo niskiej energii kinetycznej, nie zastygają, lecz nieustannie zderzają się z sobą. Gdy średnia odległość między cząsteczkami jest mniejsza niż długość fali materii de Broglie'a (odwrotność pędu), uwiadcniają się zupełnie „dziwaczne” prawa rządzące materią w skali atomowej i takie gazy przyjęło się nazywać gazami kwantowymi. W ultraniskich temperaturach możliwe jest zarówno obserwowanie atomów jako pojedynczych cząstek, jak też w postaci spójnych fal materii. Jednym z pierwszych doświadczeń wykonanych z kondensatem było jego rozdzielenie na dwie części i ponowne połączenie. Przy ponownym zbliżaniu dwóch chmur kondensatu do siebie, atomy nie mieszały się jak typowe gazy, lecz interferowały w sposób charakterystyczny dla fal: atomy dodane do atomów produkowały prążki interferencyjne - cienkie obszary materii przedzielone pustą przestrzenią.

Obecnie prowadzone na świecie badania zimnej materii obejmują nie tylko atomy bozonowe, ale także fermiony, mieszaniny atomów podlegających obu statystykom oraz proste cząsteczki. Głównym kierunkiem prowadzonych w tej dziedzinie badań jest modelowanie oddziaływań znanych z fizyki materii skondensowanej przy wykorzystaniu atomów umieszczonych w tzw. sieciach optycznych, czyli w potencjałach powstających z interferencji wiązek laserowych. Duża swoboda w dobieraniu geometrii (topologii) tych potencjałów pozwala na symulowanie interesujących układów fizycznych. Dla przykładu atomy w sieci o wzorze typu plaster miodu (*honeycomb*) mogą przejawiać cechy bezmasowych cząstek Diraca, podobnie do elektronów w grafenie. Drugim istotnym zastosowaniem zimnej materii jest bardzo precyzyjna metrologia, w szczególności niezwykle dokładne pomiary pól elektromagnetycznych, grawitacji i czasu. Bardzo ciekawymi badaniami są także studia nadciekłości, kwantowego efektu Halla, magnetycznych stanów sfrustrowanych, reakcji chemicznych zachodzących przy najniższych możliwych energiach, czy też tworzenie koherentnych źródeł fal materii – atomowych laserów.

Wspomniane powyżej kierunki badań stanowią jedynie niewielki, subiektywnie wybrany zbiór z dziedziny badań ultrazimnej materii, która przeżywa w ostatnich latach gwałtowny rozwój. Wobec tak bogatej możliwości prowadzenia doświadczeń w warunkach ziemskich pojawia się pytanie – dlaczego wysłać układ doświadczalny na stację kosmiczną? Odpowiedzią jest brak przyciągania ziemskiego, a ściślej mikrogravitacja. Już teraz prowadzi się badania zimnych atomów w warunkach bliskich nieważkości – na pokładach samolotów i raket poruszających się po paraboli spadku swobodnego w ziemskim polu grawitacyjnym. Pozwala to na „wyłączenie” grawitacji na krótkie chwile, za cenę ograniczonego czasu i wysokich kosztów prowadzenia takich doświadczeń. Stacja kosmiczna oferuje natomiast mikrogravitację na co dzień.

### **Zimne atomy a międzynarodowa stacja kosmiczna**

Podstawowe reguły termodynamiki powodują, że rozprężający się adiabatycznie gaz równocześnie się ochładza. Można się o tym łatwo przekonać przyciskając dłużej końcówkę sprayu, np. dezodorantu. Podobne zjawisko zachodzi także dla gazów kwantowych. W przypadku planowanego eksperymentu NASA rolę puszki sprayu będzie pełnił pułapka magnetyczna. Osłabianie pola magnetycznego pułapki prowadzi do zmniejszenia potencjału pułapkującego i adiabatycznej ekspansji gazu. Na Ziemi pułapka musi być na tyle silna, by przeciwdziałała grawitacji i podtrzymywała atomy. W przypadku mikrogravitacji na stacji kosmicznej proces osłabiania pułapki i możliwego ochładzania można prowadzić znacznie dalej. Temperatura gazu atomowego możliwa do uzyskania w takich warunkach jest szacowana na około 100 pK. Długość de Broglie'a dla atomów rubidu i potasu, które będą schładzane na pokładzie ISS, odpowiada w takiej temperaturze grubości ludzkiego włosa, a więc jest gigantyczna w skali atomowej. Otwiera to drogę do tworzenia zupełnie makroskopowych fal materii kwantowej, które mogą być wykorzystywane do niezwykle precyzyjnej interferometrii i tworzenia kwantowych sensorów.

### **Podsumowanie**

NASA wybrała już siedem projektów naukowych, z których pięć będzie prowadzonych na pokładzie stacji kosmicznej w laboratorium zimnych atomów (Cold Atom Laboratory, CAL). Dwa wspomagające projekty będą realizowane w naziemnych laboratoriach i posłużą planowaniu przyszłych doświadczeń na stacji. Pośród zespołów badawczych, które będą je realizować, jest trzech laureatów Nagrody Nobla. Konsekwencje tych eksperymentów mogą być niezwykle interesujące. Zawsze bowiem „otwarcie” nowego zakresu dostępnych parametrów wiąże się z szeregiem odkryć. NASA już teraz ogłosiła projekt hasłem *The Coolest Spot in the Universe*.

### **Źródła:**

- [1] Strona projektu Cold Atom Laboratory <http://coldatomlab.jpl.nasa.gov/>
- [2] NASA ScienceCasts: The Coolest Spot in the Universe [http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/30jan\\_coldspot/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/30jan_coldspot/)
- [3] *Fizyka zimnych atomów: temperatury niższe niż w kosmosie*, W. Gawlik, *Postępy Fizyki* 53D (2002), [http://postepy.ptf.net.pl/tl\\_files/postepy/pdf/2002/pf53zds54.pdf](http://postepy.ptf.net.pl/tl_files/postepy/pdf/2002/pf53zds54.pdf)