

we wnętrzu księżycy. Żelazo-niklowe jądro księżycy otoczone jest półpłynnym, miękkim płaszczem z krzemianowych skał. Skorupa o grubości około 25 km jest złożona ze skał bazaltowych oraz dużej ilości minerałów siarkowych i siarki. Gdy księżyc pędzi po orbicie, olbrzymia siła grawitacyjna Jowisza przesuwa i rozgrzewa miękką materię krzemianową we wnętrzu Io. Materia ta w postaci lawy jest wyrzucana na zewnątrz. We wnętrzu księżycy zachodzą więc przypływy i odpływy ku powierzchni. Skutek jest taki, że w rejonie przyrównikowym powierzchnia „faluje”, cyklicznie unosząc się i opadając o kilkadziesiąt metrów – tak jak falują powierzchnie oceanów na Ziemi w czasie przypływów i odpływów. Silne i obracające się pole magnetyczne Jowisza działa też na cząstki atmosfery księżycy. Część cząsteczek jonizuje się i tworzy naelektryzowaną plazmę, która razem z księżycem pędzi wokół Jowisza. Tworzy ona jakby „torus” i jej ruch można uznać za prąd elektryczny płynący wokół Jowisza. Natężenie tego prądu przekracza nawet 2 mln A.

Gdy z powierzchni Io spoglądamy na Jowisza, widzimy go jeszcze większego niż poprzednio z powierzchni Ganimedesa. Średnica kątowna olbrzyma wynosi około 38 średnic tarczy słonecznej dostrzeganej z Ziemi. Tu z jeszcze większym podziwem, pokorą i obawą oglądamy ogromne cyklony w atmosferze, kaskady błyskawic i pulsujących barwami zórz.

Z czterech dużych księżyców Europa jest najmniejsza – ma 3140 km średnicy.

Sprawdźmy jeszcze, jakie warunki panują na Europie. Księżyc ten krąży wokół Jowisza w odległości około 0,67 mln km, czyli pomiędzy Ganimesem a Io,

z okresem 9,55 dób ziemskich. Powierzchnia jest tylko lekko pofałdowana, nie widać większych gór, rowów i kraterów. Europę pokrywa lód, którego grubość może sięgać nawet 4 km. Pod tą lodową skorupą kryje się ocean wody o głębokości sięgającej być może nawet 100 km. Zawiera on 2 razy więcej wody niż wszystkie oceany Ziemi. We wnętrzu księżycy woda przemieszcza się ciągle pod wpływem grawitacji Jowisza. Wskutek tych oddziaływań pływowych woda w oceanie się podgrzewa. Przypuszcza się, że w tym oceanie mogą istnieć organizmy, które nie potrzebują do metabolizmu światła, a jedynie składników mineralnych. Przecież tak funkcjonujące organizmy żyją na bardzo dużych głębokościach w ziemskich oceanach, gdzie światło słoneczne już nie dochodzi.

Odwiedzamy jeszcze czwarty wielki księżyc Jowisza – Kallisto, który znajduje się najdalej od Jowisza, bo w odległości 1,88 mln km i obiega go w czasie 16,7 dni ziemskich. Jest prawie takiej wielkości jak planeta Merkury. Kallisto jest kulą lodową z wieloma kraterami uderzeniowymi. Pod grubą skorupą znajduje się wodny ocean, a w centrum – skaliste jądro. Temperatura na powierzchni wynosi nieprzyjemne minus 140°C.

Spoglądamy na niebo. Gdzieś w oddali widać jaskrawą tarczkę Słońca, która jest około 5 razy mniejsza niż ta widoczna z Ziemi. Pobliski Jowisz świeci znacznie jaśniej niż Księżyc w pełni na ziemskim niebie. Czasem, gdzieś w okolicach Słońca, można dostrzec Marsa jako poranną lub wieczorną „gwiazdkę”. Ziemi – znajdującej się bliżej tarczy słonecznej – nie widać. Ale obieramy kurs na Ziemię. Czas wracać do domu.

Sześćdziesiąt lat niepewności. Feynman w poszukiwaniu rekoneksji

*Jakub KOPYCIŃSKI**

*Doktorant, Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Cierpliwość. Tego nie można odmówić fizykom. Wyobraźmy sobie, że na potwierdzenie istnienia niektórych zjawisk trzeba czekać dziesiątki lat. Dziś przyjrzymy się dokładniej jednemu z nich. Przekonajmy się, co się stanie, jeśli będziemy mieszać bardzo zimny gaz, a potem nim potrząśniemy.

Wybermy się na chwilę w podróż do najchłodniejszego miejsca we Wszechświecie. Czy przyda nam się do tego rakietę i skafander kosmiczny? Nie, bowiem znajduje się ono tu, na Ziemi. I to nie jedno, a ponad setka. W tyłu bowiem laboratoriach rozsiansych po całym świecie naukowcy są w stanie schłodzić atomy. Chłodzą je do temperatur miliardy razy niższych niż temperatura wypełniającego kosmiczną pustkę relikowego promieniowania tła.

Eksperyment zaczynamy od złapania gazu w pułapkę. Następnie obniżamy jego temperaturę, aż stanie się ona bardzo bliska zera bezwzględnego. Żeby uniknąć przejścia do stanu ciekłego lub stałego, nasz gaz musi być bardzo rozrzedzony.

Kiedy obniżamy temperaturę, widzimy, że klasyczny opis atomów jako kul zawodzi. I tu z pomocą przychodzi nam fizyka kwantowa ze swoim zestawem narzędzi. Okazuje się, że z dobrym przybliżeniem możemy powiedzieć, że wszystkie cząstki w naszym układzie zajmują najniższy energetycznie stan o praktycznie zerowym pędzie.

Więcej o tych wyrafinowanych metodach chłodzenia atomów można przeczytać w artykule Krzysztofa Pawłowskiego pt. „Kondensat Bosego-Einsteina: o najzimniejszych atomach świata”, Δ_{14}^{10}

Obsadzenie przez wiele cząstek tego samego stanu o najniższej energii jest możliwe tylko w przypadku atomów o spinie całkowitym – te atomy nazywamy bozonami. Przypadek atomów o innym spinie (tj. półowkowym), zwanych fermionami, jest nieco trudniejszy. Wtedy pod pojęciem cząstki kryje się para luźno związanych atomów, zwana parą Coopera.

Takie niemal całkowite obsadzenie najniższego poziomu energetycznego zwie się kondensacją Bosego-Einsteina. Ta faza materii ma niezwykle ciekawe właściwości, nieobecne w naszym życiu codziennym. Jedną z nich jest nadciekłość. Co ten termin oznacza? W skrócie – brak tarcia. W fazie nadcieklej zanika lepkość i taki gaz jest w stanie poruszać się bez strat energii.

Zastanówmy się, co się stanie, jeżeli kondensat Bosego-Einsteina zaczniemy mieszać. Nasza intuicja wskazuje na to, że w układzie wytworzy się wir. Nie zawiedzie nas ona, bo ten wir zobaczymy. W dodatku niejeden. Im szybciej ten układ mieszamy, tym więcej wirów widzimy w naszym kondensacie (por. rys. 1).



Rys. 1. Kondensat z wirami – widok z góry. Przechodzimy z wolno obracającego się układu (lewa strona) do układu obracającego się szybciej (prawa strona). Liczba wirów, widocznych jako białe, puste przestrzenie, ulega zwiększeniu

Okazuje się bowiem, że wytworzenie kilku małych wirów jest energetycznie korzystniejsze niż obecność jednego, ale dużego. Między innymi za badania tego zaskakującego kwantowego efektu rosyjski fizyk Aleksiej Abrikosow otrzymał w 2003 roku medal noblowski.

Wiry, dzięki brakowi sił powodujących rozpraszanie energii, mogą w sposób stabilny istnieć w mieszanym układzie nieskończenie długi czas. Chyba że coś, np. wstrząs, zaburzy ten stan. Zaburzenie gwałtownie zmienia obraz sytuacji wewnątrz układu. Żeby mówić o wirze bardziej obrazowo, możemy utożsamić jego kształt z linią przechodzącą przez jego środek. Wiry po wstrząsie tworzą strukturę przypominającą spaghetti. Płaczą się i drgają, łączą na chwilę tylko po to, by zaraz się rozseparować.

Zjawiska te mają w fizyce swoje nazwy. Pierwsze z nich to fala Kelwina – sytuacja, w której po wirze przebiega fala splątująca go w kształt sprężyny. Drugim z kolei jest rekoneksja. I to właśnie jej przyjrzymy się bliżej.

Jako pierwszy na pomysł istnienia rekoneksji wpadł amerykański fizyk Richard Feynman. Znany był z mało rygorystycznego podejścia do fizyki. Zyskał sobie tym samym miano *najwybitniejszego intuicjonisty naszych czasów*.

W roku 1955 Feynman zamieścił w swojej pracy niezwykle ważny rysunek – szkic rekoneksji (rys. 2). Przedstawiał on dwa wiry, które następnie się łączą i szybko separują. Nie tworzą jednak identycznego ułożenia jak poprzednio. Załóżmy, że początkowo mieliśmy do czynienia z wirami prawym i lewym. W momencie łączenia utworzą one strukturę przypominającą literę X. Po rekoneksji zaś wiry rozłączą się tak, że będziemy widzieli wir górny i dolny.

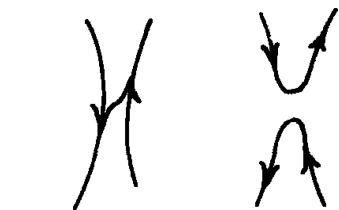
Musiało jednak upłynąć prawie 60 lat od artykułu Feynmana, by eksperymetatorzy potwierdzili jego przewidywania. W 2014 roku grupa naukowców opracowała metodę obrazowania wirów i wreszcie ustaliła, że rekoneksje i fale Kelwina istnieją.

Do kondensatu z wirami badacze dodali domieszkę – inne atomy. Podobnie jak fusy w mieszanej herbacie, te dodatkowe atomy usadziły się we wnętrzu wirów. Naukowcy oświetlili układ światłem o odpowiednio dobranej częstotliwości i zobaczyli jasne punkty. To były właśnie atomy domieszki. Tą metodą eksperymetatorzy uzyskali pierwszy film z widocznymi rekoneksjami.

Warto dodać, że zarówno rekoneksje, jak i fale Kelwina przyczyniają się do wytracania energii przez układ. Nazywamy to efektywną dysypacją. Ostatecznie energia ta przekształca się w ciepło i powoduje ogrzewanie układu.

Tak długi czas oczekiwania na potwierdzenie przewidywań teoretycznych nie jest przypadkiem odosobnionym. Pomiędzy zapostulowaniem istnienia bozonu Higgsa a jego odkryciem minęło niemal pół wieku. 40 lat to z kolei czas, jakiego potrzebowali badacze, aby wykryć zjawisko rozpadu dwuprotonowego.

W fizyce są zjawiska, których istnienie wydaje się dziś realne tylko na kartce papieru. Niektóre z nich, takie jak istnienie rekoneksji, na doświadczalne potwierdzenie musiały czekać kilkadziesiąt lat. Sam Feynman niestety nie doczekał pierwszego eksperymentu, w którym uwidocznił rekoneksje. Ale, jak w *Sto lat samotności* pisał Gabriel García Márquez, „wielkie obsesje silniejsze są niż śmierć”.



Rys. 2. Ilustracja z pracy Richarda Feynmana *Application of quantum mechanics to liquid helium*, w "Progress in low temperature physics" z roku 1955

Obserwacje wirów opisano w pracy: Fonda E., Meichle D. P., Ouellette N., Hormoz S. i Lathrop D. P., *Direct observation of Kelvin waves on quantized vortices*, w "Proceedings of the National Academy of Sciences", nr 111 ss. 4707-4710.

