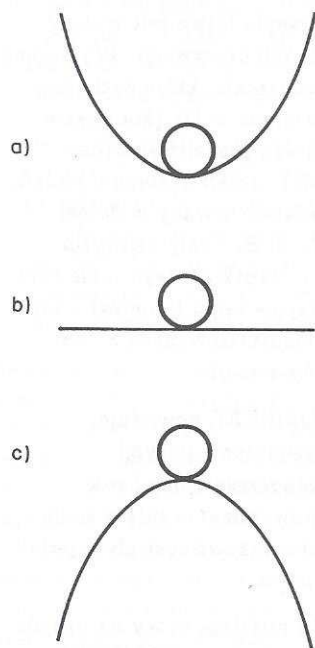


Niestabilności plazmowe

Stanisław MRÓWCZYŃSKI

Stan stacjonarny to taki stan, który nie zmienia się z upływem czasu; quasistacjonarny zaś zmienia się na tyle wolno, że w rozważanym czasie uważamy go za niezmienny.



Rys. 1

Zacznijmy od wyjaśnienia pojęcia niestabilności. Wyobraźmy sobie w tym celu układ w stanie stacjonarnym bądź quasistacjonarnym, który poddajemy niewielkiemu zaburzeniu. Gdy po pewnym niewielkim czasie układ wróci do pierwotnego stanu, mówimy, że układ jest stabilny ze względu na zaburzenie. Stan układu może ulec nieznacznej zmianie. Może również stać się i tak, że na skutek małego zaburzenia stan układu ulega całkowitej zmianie. Mamy wtedy do czynienia z układem niestabilnym, zjawisko zaś określamy jako niestabilność. Te trzy możliwe sytuacje ilustruje zachowanie się kulki z rysunku 1a, 1b oraz 1c, którą lekko wychylimy z położenia równowagi.

Plazma, czyli układ obdarzonych ładunkami ujemnymi elektronów i dodatnich jonów, jest układem szczególnie niestabilnym. Można powiedzieć, że historia fizyki plazmy to historia odkryć coraz to nowych niestabilności. Niestabilności są również główną przeszkodą na drodze do przeprowadzenia kontrolowanej syntezy termojądrowej, gdyż nawet niewielkie zaburzenia stanu plazmy, w którym reakcje syntezy jądrowej mogą zachodzić, rozbijają ten stan, sprawiając, że jego średni czas życia jest niezmiernie krótki.

W *Delcie 2/1993* pisałem o oscylacjach plazmowych, które mają miejsce wtedy, gdy w jakimś fragmencie obszaru zajmowanego przez plazmę powstaje nadwyżka ładunków dodatnich bądź ujemnych. Jak pamiętamy, plazma jako całość jest elektrycznie obojętna. Pojawienie się nie zneutralizowanego ładunku prowadzi do powstania pola elektrycznego, które z kolei oddziałuje na elektrony i jony. Z oscylacjami plazmowymi wiąże się pewien szczególny typ niestabilności, zwany mikroskopowym lub kinetycznym, który poniżej opiszę.

Wyobraźmy sobie, że w plazmie powstało zaburzenie rozkładu ładunków i, zgodnie z tym co pisałem w *Delcie 2/1993*, zostało wytworzone zależne od czasu i położenia (t, \vec{x}) pole elektryczne

$$(1) \quad \vec{E}(t, \vec{x}) = \vec{A} \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x}),$$

gdzie \vec{A} jest amplitudą pola, ω częstością drgań, \vec{k} zaś wektorem falowym (odwrotność modułu \vec{k} jest długością fali λ). Jeśli amplituda fali maleje z czasem, to układ jest stabilny ze względu na zaburzenie, które wywołało drganie. Jeśli natomiast amplituda rośnie, to mamy do czynienia z niestabilnością. Aby stwierdzić, która sytuacja jest realizowana, musimy ustalić, co dzieje się z elektronami w polu fali (1). Jony możemy w naszych rozważaniach pominąć, gdyż są one dużo cięższe od elektronów i nie nadążają zwykle reagować na szybkie zmiany pola elektrycznego. Na początek zastanówmy się, jak fala (1) działa na spoczywający elektron. Fala przemieszcza się z prędkością fazową $v_\phi = \frac{\omega}{|\vec{k}|}$. Tak więc, przez połowę okresu fali

$(T = \frac{\lambda}{v_\phi})$ elektron oddziałuje z polem o jednym znaku, a przez drugą połowę o przeciwnym znaku. Początkowo fala rozpędza elektron przekazując mu energię, później spowalnia go odbierając energię. Średnio rzecz biorąc nie następuje przekaz energii między falą a elektronem. Po krótkim zastanowieniu dojdziemy do wniosku, że podobnie będzie i dla elektronów poruszających się, pod warunkiem, że prędkość elektronu nie jest bliska prędkości fazowej fali.

Rozważmy teraz przypadek elektronu o prędkości \vec{v} równej $\vec{v}_\phi = \frac{\omega}{|\vec{k}|} \cdot \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|}$.

Elektron porusza się razem z falą, odczuwa więc przez cały czas pole elektryczne o stałym znaku. A zatem zależnie od znaku pola albo jest przyspieszany, albo spowalniany. Tak więc w przypadku $\vec{v} = \vec{v}_\phi$ elektron albo zyskuje energię, albo ją traci w zależności od tego, na jaką fazę fali elektron trafia. Ponieważ w plazmie mamy zwykle wiele elektronów o prędkości $\vec{v} = \vec{v}_\phi$ i jedne są rozpędzane, a drugie spowalniane, wymiana energii między elektronami i falą nie występuje.

Przypatrzmy się teraz elektronom, których prędkość jest bliska prędkości fazowej. Jeśli $|\vec{v}| > |\vec{v}_\phi|$ i elektron jest rozpędzony, to fala szybko przestaje mu przekazywać energię, gdyż dla większej różnicy prędkości $|\vec{v} - \vec{v}_\phi|$ coraz szybciej następują zmiany znaku pola fali odczuwanego przez elektron. Tak więc efektywny przekaz energii następuje wtedy, gdy $|\vec{v}| < |\vec{v}_\phi|$ i pole rozpędza elektron oraz wtedy, kiedy $|\vec{v}| > |\vec{v}_\phi|$ i pole spowalnia elektron. W pierwszym przypadku fala energię traci, w drugim – zyskuje. Który z efektów dominuje, zależy od tego, czy mamy więcej elektronów z prędkością większą od \vec{v}_ϕ czy mniejszą od \vec{v}_ϕ . Niech $f(\vec{v})$ oznacza liczbę elektronów z prędkością \vec{v} . Jeśli $f(\vec{v}_\phi - \delta\vec{v}_\phi) > f(\vec{v}_\phi + \delta\vec{v}_\phi)$, gdzie $\delta\vec{v}_\phi$ jest niewielką częścią prędkości \vec{v}_ϕ , to następuje przekaz energii od fali do elektronów, jeśli zaś $f(\vec{v}_\phi - \delta\vec{v}_\phi) < f(\vec{v}_\phi + \delta\vec{v}_\phi)$, to elektrony tracą energię na rzecz fali. W pierwszym przypadku fala zanika, w drugim amplituda fali rośnie.

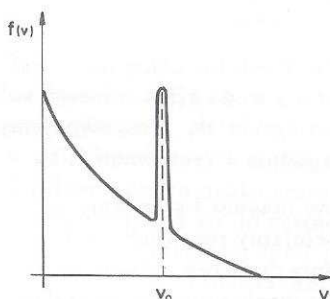
W ten sposób doszliśmy do bardzo ważnego kryterium. Jeśli $f(\vec{v}) > f(\vec{v} + \delta\vec{v})$ dla wszelkich prędkości, to oscylacje plazmowe będą tłumione. Jeśli natomiast istnieje taka prędkość \vec{v}_0 , że $f(\vec{v}_0) < f(\vec{v}_0 + \delta\vec{v}_0)$, to amplituda drgań z prędkością fazową $\vec{v}_\phi = \vec{v}_0$ będzie wzrastać z czasem. Z przedstawionego kryterium wynika, że jeśli rozkład prędkości elektronów jest malejącą funkcją prędkości, to układ jest stabilny ze względu na drgania plazmowe. W szczególności dotyczy to układu znajdującego się w stanie równowagi termodynamicznej, gdyż rozkład prędkości elektronów jest, jak pamiętamy, proporcjonalny do $e^{-m\vec{v}^2/2kT}$, gdzie m jest masą elektronu, a T temperaturą układu.

Istnienie niestabilności ma ogromne znaczenie dla badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową. Plazma wytworzona w urządzeniach do przeprowadzania takiej syntezy, np. w tokamakach, nie jest zwykle w stanie równowagi termodynamicznej, a rozkład prędkości elektronów nie jest malejący. A zatem będą powstawać niestabilne drgania, które prowadzą do gwałtownych zmian stanu uniemożliwiających panowanie nad plazmą.

Niestabilności mogą również odgrywać pozytywną rolę. Jednym z problemów przy syntezie termojądrowej jest podgrzewanie plazmy. Można to osiągnąć kierując na plazmę wiązkę szybkich elektronów. Wówczas, nawet wtedy gdy plazma znajduje się w stanie równowagi, rozkład prędkości elektronów w układzie plazma plus wiązka (z prędkością \vec{v}_0) jest niemonotoniczny i wygląda jak na rysunku 2. A zatem będą powstawać silnie niestabilne drgania o prędkości fazowej $\vec{v}_\phi = \vec{v}_0$. Ponieważ energia fali rośnie kosztem energii kinetycznej wiązki, następuje efektywny przekaz energii do plazmy, czyli jej podgrzewanie. Przekaz energii następuje również wskutek zderzeń elektronów wiązki z elektronami i jonami plazmy. Mechanizm taki jest jednak znacznie mniej efektywny niż mechanizm, związany z niestabilnymi drganiami.

Opisałem tutaj pewien szczególny typ niestabilności plazmowych. Gdyby chciał przedstawić problem niestabilności wyczerpująco, powstałaby nader opasła książka, bo szybko rozwijająca się od lat dwudziestych fizyka plazmy to w znacznej mierze fizyka niestabilności.

Stabilność stanu równowagi termodynamicznej wynika w rzeczywistości z przyczyn bardziej ogólnych niż, przedstawione obok. Równowaga termodynamiczna jest stanem układu o maksymalnej entropii. Jeśli więc w jakikolwiek sposób zaburzymy ten stan, to entropia zmaleje, lecz później, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, entropia wzrośnie, a układ wróci do stanu równowagi.



Rys. 2