promieniowania podgrzanego ciała. Nierozwiązywalny okazał się problem wyprowadzenia znalezionego doświadczalnie prawa promieniowania – prawa przesunięć Wiena. Jest ono bardzo proste. Mówi tylko tyle, że iloczyn temperatury ciała i długości fali promieniowanej z największym natężeniem jest stały. Wszystkie klasyczne próby wyprowadzenia tej tak prostej zależności zakończyły się niepowodzeniem. Usiłowano wyprowadzić ten wzór posługując się tym, co wiedziano dotychczas. W naszej terminologii możemy powiedzieć, że wyprowadzano go zgodnie ze zdrowym rozsądkiem. Tymczasem postępowanie zgodne ze zdrowym rozsądkiem prowadziło do wyniku bezsensownego. Wzór, jaki wyprowadzono, nie zgadzał się z doświadczeniem, a co gorsza, przewidywał, że ciało powinno wypromieniować przy każdej temperaturze nieskończoną energię – oczywisty bezsens. Tak więc w roku 1900 sytuacja wydawała się beznadziejna. Doświadczenie swoje, a teoria swoje i, co gorsza, nie wiedziano, gdzie tkwi błąd. Opierano się przecież przy wyprowadzeniu na dobrze poznanych zasadach.

Przełom następuje 14 grudnia 1900 roku. Na posiedzeniu Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w Berlinie Max Planck przedstawił wyprowadzenie prawa promieniowania ciała doskonale czarnego. Był ze swego wyprowadzenia niezadowolony. Cóż z tego, że otrzymał poprawny wynik (to znaczy – zgodny z doświadczeniem), jeżeli musiał zrobić bezsensowne i, jak się wydawało, nieuzasadnione założenie. Założył mianowicie, że energia promienista pochłaniana lub wysyłana przez dowolne ciało może być pochłaniana lub wysyłana tylko porcjami. Im większa długość fali, tym mniejsza porcja energii, która może być wyemitowana lub pochłonięta. Pojawiło się pojęcie porcji energii, którą nazwano kwantem energii. Są to narodziny fizyki kwantowej. Sam Planck bardzo niechętnie patrzył na to odejście od fizyki klasycznej i po swym wielkim odkryciu przez wiele lat starał się wyjaśnić zjawisko promieniowania ciała doskonale czarnego na gruncie czysto klasycznym. Po bezowocnych wysiłkach stwierdził później, że mimo wszystko nie uważa, iż trud jego poszedł na marne, bo dzięki wielokrotnym niepowodzeniom przekonał się w końcu, że nie można znaleźć wyjaśnienia mieszczącego się całkowicie w ramach fizyki klasycznej.

Drgania plazmowe

Stanisław MRÓWCZYŃSKI

Plazma to, jak pamiętamy, układ zjonizowanych atomów, czyli dodatnio naładowanych jonów i obdarzonych ładunkami ujemnymi elektronów. W przypadku plazmy wodorowej mamy mieszaninę protonów i elektronów z pewną ilością atomów wodoru, które jednak nie wpływają istotnie na własności plazmy. A własności te są bardzo szczególne i z tego powodu plazma bywa nazywana czwartym stanem materii, po gazach, cieczach i ciałach stałych. Bodaj najbardziej typowym zjawiskiem plazmowym są drgania elektronów względem jonów, zwane drganiami bądź oscylacjami plazmowymi. Ponieważ najlżejszy jon – proton jest blisko 2000 razy cięższy od elektronu, więc możemy myśleć w tym przypadku o jonach jako cząstkach nieruchomych.

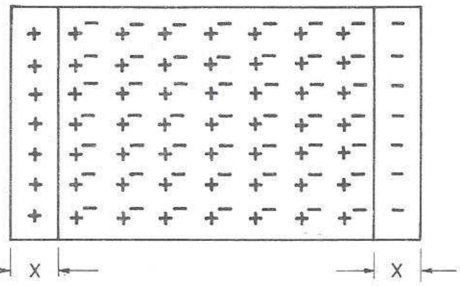
Wyobraźmy sobie prostopadłościenny, dla prostoty naszych rozważań, obszar zajmowany przez plazmę. Środek ciężkości elektronów został, na skutek jakiegoś zaburzenia, przesunięty względem środka ciężkości jonów o x. Przyjmijmy dalej, że gęstości elektronów ρ_e i jonów ρ_j są stałe w obszarach zajmowanych odpowiednio przez elektrony i jony. Ponieważ plazma jako całość jest elektrycznie neutralna, więc

$$Z\rho_e = \rho_j\,,$$

gdzie Z jest liczbą ładunkową jonu, tzn. Ze jest jego ładunkiem. Przesunięcie elektronów względem jonów sprawia, że pojawiają się niezneutralizowane ładunki (patrz rys.), a zatem powstaje pole elektryczne. Obliczmy, jakie to pole. Ponieważ ładunki odpowiedzialne za jego wytworzenie znajdują się tylko na brzegu obszaru, więc nasze zadanie jest identyczne z zadaniem o polu elektrycznym w prostopadłościennym kondensatorze. Zastosowawszy twierdzenie Gaussa znajdujemy pole (w układzie jednostek CGS)

$$E = 4\pi\frac{Q}{S} = 4\pi e\rho_e x\,,$$

gdzie Q jest całkowitym ładunkiem je wytwarzającym, a S przekrojem poprzecznym rozważanego obszaru.



Znając pole elektryczne możemy wyznaczyć ruch elektronów. Drugie prawo Newtona przyjmuje postać

$$Nm\frac{d^2x}{dt^2} = -4\pi Ne^2\rho_e x\,; \tag{1}$$

N oznacza liczbę elektronów, a m masę elektronu. Znak minus pojawia się po prawej stronie dlatego, że pole stara się przeciwdziałać rozsuwaniu ładunków dodatnich i ujemnych.

Równanie (1) można zapisać następująco

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_p^2 x, \tag{2}$$

gdzie wielkość $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 \rho_e}{m}}$ zwana jest częstością plazmową.

Zależąc jedynie od gęstości i dwóch stałych ($e^2 = \frac{1}{137}$ i $m = 0,5$ MeV/c^2) jest ω_p jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących plazmę.

Równanie (2) jest szczególnie lubianym przez fizyków równaniem oscylatora harmonicznego, którego rozwiązaniami są funkcje

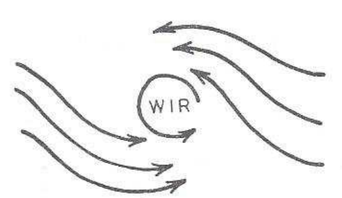
$$x(t) = A\sin(\omega_p t + \varphi), \tag{3}$$

gdzie A jest amplitudą drgań, a φ fazą początkową. Widzimy więc, że wychylone względem jonów elektrony zaczynają oscylować i robią to bardzo szybko. Gęstość plazmy wytworzonej w urządzeniach mających doprowadzić do kontrolowanej syntezy termojądrowej waha się w granicach $10^{13} - 10^{17}$ cm^{-3}, co daje częstotliwość drgań $\nu = 2\pi\omega_p$ rzędu $10^{11} - 10^{13}$ s^{-1}.

Na podstawie postaci rozwiązań (3) stwierdzilibyśmy, że raz wywołane drgania plazmowe nigdy nie zanikają. Jest to jednak wynik naszego bardzo uproszczonego opisu, który uwzględnia jedynie oddziaływanie elektronów z polem elektrycznym. Można natomiast oczekiwać, że przemieszczanie się elektronów względem jonów wywoła siłę podobną do siły tarcia, która będzie tłumić oscylacje plazmowe prowadząc do ich zaniku. Rzeczywiście, tak się często dzieje. Bywa jednak i tak, że wspomniana siła tarcia nie odgrywa poważnej roli, a amplituda drgań nie zanika z czasem, lecz narasta. Mamy wówczas do czynienia z tzw. niestabilnościami plazmowymi, które sprawiają, że zachowanie plazmy trudno przewidzieć, a jeszcze trudniej nad plazmą zapanować. Niestabilności plazmowe, o których opowiem następnym razem, są właśnie główną przeszkodą na drodze do kontrolowanej reakcji termojądrowej.

Koncepcja porcji energii odwrotnie proporcjonalnej do długości fali wymagała wprowadzenia stałej proporcjonalności. Planck wprowadził do fizyki nową stałą przyrody, nazwaną później stałą Plancka. Stała Plancka pomnożona przez częstość drgań odpowiadającą danej fali równa się energii kwantu. Wielkość liczbowa tej stałej jest bardzo mała i to właśnie tłumaczy, dlaczego na co dzień nie odczuwamy tego, że światło dociera do nas porcjami. Mówimy „zalało nas światło”, a nie „spadł na nas deszcz kwantów”. A tak naprawdę światło to strumień kwantów energii promienistej. Tyle tylko, że są to bardzo małe porcje energii i zazwyczaj jest ich bardzo, bardzo dużo. Odkrycie kwantów promieniowania pozwoliło rozstrzygnąć iście salomonowo dawny spór między zwolennikami teorii falowej światła i zwolennikami teorii cząsteczkowej światła. Okazało się, że światło jest i falą, i strumieniem cząstek – kwantów, które nazywamy fotonami. W jakich doświadczeniach światło zachowuje się jak strumień cząsteczek, opowiem następnym razem. Okaże się, że ogromna fala nie może naruszyć nabrzeża, a potrafi to mała, byle dostatecznie krótka. Ale kamykiem nabrzeża będzie elektron, a nabrzeżem płytka metalowa.

Rozwiązanie zadania F 851.
Siła Coriolisa powoduje, że ruch ciał nie jest prostoliniowy. Na półkuli północnej ciała zbaczają w prawo, w wyniku czego pędzące na siebie strumienie powietrza (a tak jest w niżu) odchylają się jak na rysunku. Powoduje to powstawanie częściej wirów kręcących się w lewo.



Na półkuli południowej sytuacja jest odwrotna – wir niżowy będzie kręcił się w prawo.

Rozwiązanie zadania M 659.
Jeśli n jest parzyste i n razy wykonamy ruch opisany w treści zadania, za każdym razem nie poruszając innej filiżanki, to w efekcie każdą filiżankę odwrócimy $n-1$ razy. Spowoduje to odwrócenie wszystkich filiżanek do góry dnem, gdyż $n-1$ jest nieparzyste.

Niech teraz n będzie liczbą nieparzystą. Wyobraźmy sobie, że w każdej prawidłowo stojącej filiżance umieszczona jest liczba $+1$, w każdej zaś filiżance odwróconej dnem do góry – liczba -1. Przed wykonaniem pierwszego ruchu iloczyn wszystkich liczb jest równy 1. Każdy ruch zmienia położenie $(n-1)$, czyli parzystej liczby filiżanek; oznacza to, że iloczyn liczb umieszczonych w filiżankach jest stale równy $+1$. Nie można więc odwrócić wszystkich filiżanek do góry dnem, bo wtedy iloczyn wszystkich liczb musiałby przybrać wartość -1.

Rozwiązanie zadania M 660.
Ponieważ współczynnik wielomianu przy najwyższej potędze jest równy 1, więc iloczyn jego pierwiastków jest równy wyrazowi wolnemu, czyli 1, ich suma zaś jest liczbą przeciwną do współczynnika przy x^{19}. Zatem, jeśli a_i (dla $i = 1, \ldots, 20$) oznaczają pierwiastki wielomianu, to

$$\frac{a_1 + a_2 + \ldots + a_{20}}{20} = 1 = \sqrt[20]{a_1 \cdot a_2 \cdot \ldots \cdot a_{20}},$$

czyli w nierówności (nieostrej) między średnią arytmetyczną a geometryczną zachodzi równość. Jak wiadomo, jest to możliwe jedynie wtedy, gdy dla wszystkich i mamy $a_i = 1$.