

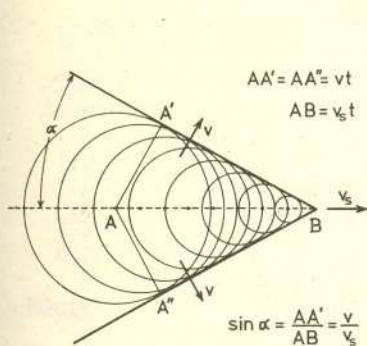
Tak na przykład badając nieliniowe oddziaływanie fali lasera z falami plazmowymi (o różnych długościach fal) dochodzimy do wniosku o istnieniu efektywnego mechanizmu przekazywania energii od fali lasera do plazmy. Na podstawie skomplikowanych rachunków mechanizm ten można sobie wyobrazić jako tworzenie się obszarów o obniżonej gęstości, które podczas ewolucji kurczą się gwałtownie. Zaburzenia zaś o małych wymiarach (krótkie fale) szybko się rozpadają (dysypują), a ich energia przechodzi w energię termiczną plazmy. Omówiliśmy tutaj ten przykład dosyć szczegółowo ze względu na jego znaczenie przy próbach otrzymania kontrolowanej reakcji termojądrowej na drodze grzania plazmy laserem. Jednak niestabilności omawianego typu odgrywają istotną rolę i w innych działach fizyki. Wydaje się, że zjawiska takie jak turbulencja i przejścia fazowe są wywołane podobnym mechanizmem. Widzimy więc, że omawiane oddziaływanie rezonansowe jest z jednej strony pięknym przykładem dziwnego zachowania układów nieliniowych, a z drugiej strony występuje w wielu zjawiskach fizycznych.

## Promieniowanie Czerenkowa

Doc. dr Jerzy BARTKE



Promieniowanie noszące obecnie nazwę promieniowania Czerenkowa ma bardzo interesującą historię. Maria Skłodowska-Curie i inni badacze promieniotwórczości zaobserwowali już na początku naszego stulecia, że roztwór soli radu oraz różne substancje przezroczyste umieszczone w pobliżu silnych preparatów promieniotwórczych emitują niebieskawe światło. Wiedzano już wtedy, że pod wpływem promieniowania ciał radioaktywnych wiele substancji świeci (zjawiska fluorescencji i fosforescencji), toteż nie przywiązywano do tego świecenia specjalnej wagi. Dopiero w 1934 r. P.A. Czerenkow rozpoczął systematyczne badanie tego zjawiska i odkrył szereg interesujących jego własności. Stwierdził on, że świecenie powstaje we wszystkich przezroczystych cieczach i ciałach stałych i że jest silnie asymetryczne — emitowane w kierunku promieniowania padającego. Własności te oraz polaryzacja badanego świecenia wskazywały na to, że nie jest to żaden ze znanych rodzajów luminescencji. Ponadto Czerenkow dowiódł, że świecenie powodowane jest przez elektrony wybijane z atomów przez promieniowanie gamma — tzw. elektrony komptonowskie (od nazwiska angielskiego fizyka Comptona), i natężenie świecenia jest proporcjonalne do długości przebiegu elektronów w ośrodku. I.M. Frank i I.E. Tamm podali w 1937r. teorię tego zjawiska opartą na klasycznej elektrodynamice. Pokazali oni, że mamy tu do czynienia z nowym rodzajem promieniowania, które jest emitowane w przypadku, gdy cząstka naładowana porusza się w ośrodku z prędkością większą niż prędkość rozchodzenia się światła (a więc fali elektromagnetycznej) w tym ośrodku. Z podobną sytuacją, w której również źródło zaburzenia porusza się w ośrodku szybciej niż powodowane przezeń zaburzenie, spotkaliśmy się już w aerodynamice, na przykładzie ruchu ciała w powietrzu z prędkością większą od prędkości dźwięku (pociski, samoloty ponaddźwiękowe). Była o tym mowa w numerze 10/1975 Delt. Sytuację wyjaśnia rys. 1.



Rys. 1

W aerodynamice stożek ten nosi nazwę stożka Macha.

Oznaczmy przez  $v_s$  prędkość ruchu źródła, a przez  $v$  prędkość rozchodzenia się fali. Po upływie pewnego czasu  $t$  źródło fali przemieści się z  $A$  do  $B$  (odcinek  $AB = v_s \cdot t$ ), a fala emitowana w punkcie  $A$  dojdzie do punktu  $A'$  (odcinek  $AA' = v \cdot t$ ). Obwiednią wszystkich kolejno emitowanych fal jest stożek, którego oś pokrywa się z trajektoria źródła, a kąt rozwarcia spełnia zależność:

$$\sin \alpha = \frac{AA'}{AB} = \frac{v \cdot t}{v_s \cdot t} = \frac{v}{v_s}$$

Przenosząc te rozważania do przypadku cząstki poruszającej się z prędkością  $v_s = \beta c$  w ośrodku optycznym o współczynniku załamania światła  $n$ , mamy  $v = c/n$ ,  $\sin \alpha = 1/\beta n$ . Kąt emisji promieniowania względem kierunku ruchu cząstki wynosi  $\vartheta = 90^\circ - \alpha$ , mamy zatem

$$\cos \vartheta = \frac{1}{\beta n}$$

Wzór ten nosi nazwę wzoru Czerenkowa.



### Rozwiązanie zadania M 137

Łatwo zauważyć, że jako zbiór  $A$  można przyjąć zbiór liczb parzystych  $P$ , jako  $B$  zaś zbiór liczb nieparzystych  $N$ .

Wykażemy teraz, że dla każdej pary zbiorów  $A, B$  spełniającej warunki zadania jest  $A \cap B = \emptyset$ . Gdyby bowiem istniała liczba całkowita  $c$  należąca do  $A \cap B$ , to dla ustalonej dowolnej liczby całkowitej  $x$  byłoby  $x - c \in A$  lub  $x - c \in B$ . W każdym jednak przypadku  $(x - c) + c = x \in A \cap B$ . Byłoby więc  $Z \subset A \cap B$ , a więc  $A = B = Z$ , skąd wynikałoby, że  $Z - A = Z - B = \emptyset$ , co przeczy warunkom zadania.

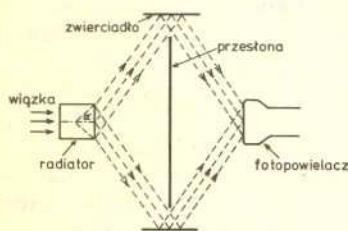
Niech teraz  $p$  będzie dowolną liczbą parzystą.

Ponieważ  $p = \frac{1}{2}p + \frac{1}{2}p$  i  $\frac{1}{2}p$  jest liczbą całkowitą, więc  $p$  jako suma liczb należących do tego samego zbioru należy do  $A$ .

Wykazaliśmy więc, że zawsze jest  $P \subset A$ .

Gdyby do  $A$  należała jakaś liczba nieparzysta  $n_0$ , to ponieważ dla dowolnej liczby nieparzystej  $n$  istnieje taka liczba parzysta  $p$ , że  $n = n_0 + p$ , więc wobec  $n_0 \in A, p \in A$  byłoby  $n \in A$ , czyli  $N \subset A$ , a zatem  $Z = N \cup P \subset A$ .

Wykazaliśmy więc, że  $A = P$ , a ponieważ  $A \cap B = \emptyset, A \cup B = Z$ , zatem  $B = N$ .



Rys. 2



### Rozwiązanie zadania M 136

Oznaczmy wierzchołki czworokąta literami  $A, B, C, D$ . Niech  $BC = a, CA = b, AB = c, DA = d, DB = e, DC = f$ . Wspólną wartością obwodów ścian niech będzie  $x$ . Mamy więc

$$(1) \quad a + b + c = x,$$

$$(2) \quad b + d + f = x,$$

$$(3) \quad c + d + e = x,$$

$$(4) \quad a + e + f = x.$$

Z równań (1) i (2) oraz (3) i (4) wynika

$$a + c = d + f,$$

$$c + d = a + f,$$

skąd odejmując stronami otrzymujemy równość  $a - d = d - a$ , a więc  $a = d$ . Postępując podobnie z równaniami (1) i (3) oraz (2) i (4) otrzymujemy  $b = e$ , a następnie z równań (1) i (4) oraz (2) i (3) wynika, że  $c = f$ .

Udowodniliśmy więc, że przeciwległe krawędzie czworokąta mają równe długości, skąd natychmiast wynika, że ściany są trójkątami przystającymi.

Istnienie takich cząstek nie jest sprzeczne ze szczególną teorią względności pod warunkiem, że cząstki te poruszają się zawsze szybciej niż światło w próżni.

Teoria Franka i Tammy podaje także rozkład widmowy promieniowania i wyjaśnia jego polaryzację (całkowita polaryzacja w płaszczyźnie zawierającej tor cząstki i kierunek emitowanego kwantu światła). Teoria ta została w pełni potwierdzona przez dalsze badania doświadczalne. Czerenkow, Frank i Tamm otrzymali w roku 1958 nagrodę Nobla.

Fakt, że promieniowanie Czerenkowa zachodzi tylko dla cząstek poruszających się z prędkością większą od pewnej prędkości granicznej (równej prędkości rozchodzenia się fali świetlnej w ośrodku,  $v = c/n$ ), sugeruje możliwość wykorzystania tego zjawiska do detekcji szybkich cząstek. Zbudowany na tej zasadzie licznik będzie przy tym zupełnie nieczuły na ogromne nawet tło cząstek o prędkościach mniejszych niż  $v = c/n$ . Kawalek jakiegokolwiek przezroczystej substancji lub naczynie z cieczą lub gazem „ogładane” przez fotopowielacz będzie stanowić najprostszy typ licznika Czerenkowa — tzw. licznik progowy.

Próg licznika będzie oczywiście określony przez współczynnik załamania światła zastosowanej substancji „radiatora”. Zauważmy, że za pomocą kilku liczników progowych o różnych własnościach możemy liczyć osobno cząstki różnego rodzaju w wiązce „mieszanej”. Jest to typowa sytuacja spotykana w fizyce wysokich energii. Spośród produkowanych w zderzeniach w tarczy akceleratora cząstek można, stosując odchylenie w polu magnetycznym, wydzielić „wiązkę” o określonym pędzie  $p$ . Wiązka taka zawierać będzie cząstki różnych rodzajów — np. mezony  $\pi^+$ , mezony  $K^+$  i protony. Ze względu na różne masy tych cząstek ich prędkości będą jednak się różnić: mezony  $\pi$  będą najszybsze, protony najwolniejsze. Zastosowanie trzech progowych liczników Czerenkowa o tak dobranych własnościach, że jeden będzie czuły tylko na mezony  $\pi$ , drugi na mezony  $\pi$  i  $K$ , a trzeci na wszystkie trzy rodzaje cząstek, pozwala na określenie składu wiązki, a w połączeniu z innymi detektorami (np. licznikami scyntylacyjnymi czy też komorami iskrowymi) — np. na badanie oddziaływań cząstek jednego określonego typu w takiej „mieszanej” wiązce bez konieczności budowy kosztownych układów separacji według mas.

Korzystając z własności kierunkowych promieniowania Czerenkowa (porównaj rys. 1) można zbudować licznik czuły na cząstki, których prędkości zawarte są w pewnym określonym przedziale,  $\beta_{\min} < \beta < \beta_{\max}$ . W tym celu należy rejestrować jedynie promieniowanie emitowane w przedziale kątów  $\vartheta_1 < \vartheta < \vartheta_2$ , gdzie  $\vartheta_1, \vartheta_2$  określone są warunkami

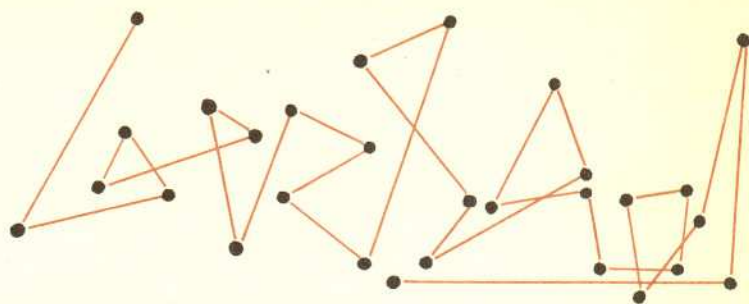
$$\cos \vartheta_1 = \frac{1}{\beta_{\min} \cdot n}, \quad \cos \vartheta_2 = \frac{1}{\beta_{\max} \cdot n}.$$

Rysunek 2 pokazuje najprostszy typ takiego licznika, zwanego różnicowym. Centralna przesłona i cylindryczne zwierciadło powodują, że do fotopowielacza dochodzi jedynie promieniowanie Czerenkowa emitowane w pewnym przedziale kątów. Liczniki z ogniskowaniem światła za pomocą zwierciadeł wklęsłych i układów soczewek pozwalają na osiągnięcie bardzo wysokiej zdolności rozdzielczej, dochodzącej w najlepszych konstrukcjach do  $\Delta\beta/\beta \cong 10^{-5}$ . Istnieje jeszcze trzeci typ licznika Czerenkowa — tzw. licznik całkowitego pochłaniania. Takie liczniki używane są do pomiaru całkowitej energii kwantów gamma lub elektronów przez rejestrację promieniowania Czerenkowa pochodzącego od wtórnych elektronów. Jeżeli wszystkie elektrony wtórne zostaną w liczniku zatrzymane, to wielkość obserwowanego impulsu będzie proporcjonalna do całkowitej energii pierwotnego kwantu czy też elektronu.

Licznik całkowitego pochłaniania może więc służyć jako spektrometr energii. Jednym z pierwszych eksperymentów, w którym zastosowano liczniki Czerenkowa, był sławny eksperyment przy akceleratorze „Bevatron” w Berkeley, w którym wykazano istnienie antyprotonów (1955 r.). Warto może przypomnieć, że w badanej wiązce na 1 antyproton przypadało aż 50 000 mezonów  $\pi^-$ ! W chwili obecnej licznik Czerenkowa stał się jednym z ważnych narzędzi fizyki wysokich energii. Ze względu na prędkości cząstek bliskie prędkości światła ( $\beta \cong 1$ ) stosuje się przeważnie liczniki gazowe. Zmieniając ciśnienie gazu w liczniku można w dogodny sposób zmieniać jego własności. Niektóre liczniki tego typu są bardzo duże — np. w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN w Genewie zainstalowano ostatnio gazowy licznik Czerenkowa o objętości 50 m<sup>3</sup>, czyli o rozmiarach średniego pomieszczenia mieszkalnego.

Na zakończenie ciekawostka. Niektórzy teoretycy dopuszczają możliwość istnienia cząstek, tzw. tachionów, poruszających się szybciej niż światło w próżni. Cząstki takie emitowałyby promieniowanie Czerenkowa także w próżni! To właśnie zjawisko postanowiono wykorzystać w eksperymencie mającym na celu wykrycie tachionów, wynik eksperymentu był jednak negatywny.

Ciało, na które nie działa siła, porusza się ruchem jednostajnym, prostoliniowym. Tak brzmi pierwsza zasada dynamiki klasycznej, zwana zasadą bezwładności. Czy nieklasyczne, kwantowe cząstki elementarne również są bezwładne i nie zmieniają swego ruchu przy braku sił zewnętrznych? Zbiór wyników bardzo dokładnych pomiarów położenia elektronu wykonanych w jednakowych odstępach czasu może wyglądać tak.



Pomiary dla cząstki klasycznej układałyby się na linii prostej i leżałyby w równych odstępach. A tu nie dostajemy ani ruchu jednostajnego, ani prostoliniowego. Mało tego — pomiary powtórzone dla drugiego takiego samego elektronu układałyby się na zupełnie innej linii łamanej. Tak chce mechanika kwantowa, a właściwie fundamentalna w niej zasada nieoznaczoności. Dokładny pomiar położenia elektronu wprowadza dużą nieokreśloność jego pędu, czyli prędkości. Prawdopodobieństwo tego, że pęd elektronu będzie miał wartość zmieniającą się w szerokim zakresie, staje się stosunkowo duże. Tak więc pojęcie toru elektronu nie ma w mechanice kwantowej sensu. Nie ma też sensu np. model atomu Bohra, w którym elektrony poruszają się po torach kołowych. A co to jest tor klasyczny? Dostajemy go, gdy mierzymy położenie niezbyt dokładnie — średnio bowiem elektron porusza się bezwładnie po prostej. Warto na zakończenie zauważyć, że opisanego wyżej doświadczenia nikt nie przeprowadził, a wyniki jego przewidzieliśmy jedynie na podstawie teorii świetnie opisującej inne fakty doświadczalne.



$$c^2 = a^2 + b^2$$

Słynne twierdzenie Pitagorasa obowiązujące w geometrii euklidesowej. Wszyscy znają jego dowód. Podamy jeszcze jeden dowód prostszy od powszechnie cytowanego. Skorzystamy przy tym z analizy wymiarów. W geometrii płaskiej trójkąt prostokątny  $ABC$  jest całkowicie wyznaczony przez jeden z boków (np.  $c$ ) i kąt  $\alpha$ . Pole takiego trójkąta musi więc być dane wzorem

$$S_{ABC} = c^2 f(\alpha),$$

gdzie  $f(\alpha)$  jest pewną bezwymiarową funkcją bezwymiarowego parametru  $\alpha$ . Podobnie  $S_{ADC} = b^2 f(\alpha)$ ,  $S_{BDC} = a^2 f(\alpha)$  z tą samą funkcją  $f$ . Ale  $S_{ABC} = S_{ADC} + S_{BDC}$  i dzieląc stronami przez  $f(\alpha)$  dostajemy nasze twierdzenie (porównaj Delta 2/1976).