

IV.5. Promieniowanie Czerenkowa.

Fizyk rosyjski Paweł A. Czerenkow podjął badania (1934 r.) nad znanym słabym świeceniem niebiesko-białym wydzielanym przez silne preparaty promieniotwórcze (promieniowanie γ). Obserwowane świecenie jest niezależne od rodzaju środowiska, w którym jest wydzielane.

Widmo tego świecenia jest ciągłe oraz wykazuje bardzo charakterystyczny stan polaryzacji oraz osobiwe własności kierunkowe¹.

Obserwowane jest światło spójne w kierunku ruchu elektronów w stożku o kącie rozwarcia ϑ w danym ośrodku materialnym. Kąt ϑ jest zawsze mniejszy od $\pi/2$.

W odległości l od źródła S elektronów na ekranie obserwowany jest obraz w postaci jasnej plamy w kształcie koła o promieniu a .

Okazuje się, że promieniowanie Czerenkowa ma charakter fal uderzeniowych Macha.

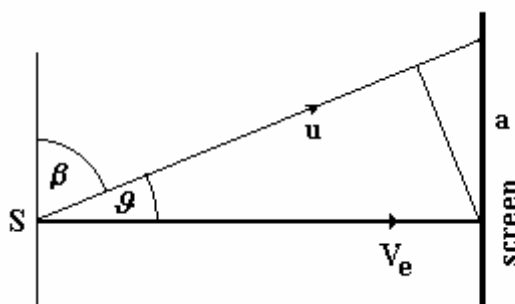


Fig. IV.5.1. Ze źródła S strumień elektronów o prędkości V_e generuje światło w stożku o kącie rozwarcia ϑ .

Z rys. IV.5.1., znajdujemy:

$$\cos \vartheta = \frac{u}{V_e} \quad (\text{IV.5.1.})$$

gdzie: u – prędkość światła w danym ośrodku materialnym.

V_e – prędkość elektronów.

Ponieważ bezwzględny współczynnik załamania: $n = \frac{c}{u}$, to z powyższego mamy:

$$\cos \vartheta = \frac{c}{n \cdot V_e} \quad (\text{IV.5.2.})$$

gdzie: c – prędkość światła *in vacuo*;

Zależność (IV.5.2.) przedstawiana jest w literaturze przedmiotu² jako opisująca eksperyment Czerenkowa.

Bezpośrednio z doświadczenia możemy wyznaczyć wartość kąta ϑ (Fig. IV.5.1).

Natomiast z tablic fizycznych brana jest wartość bezwzględnego współczynnika załamania n dla danego ośrodku materialnego.

Na przykład, dla powietrza: $n \cdot \cos \vartheta \approx 1,0000925$; dla benzenu: $n \cdot \cos \vartheta \approx 1,1770$.

Z kolei, z zależności (IV.5.1.) oraz (IV.5.2.) wynika, że: $u \leq V_e < c$.

¹ J.V. Jelly, *Cerenkov Radiation and Its Applications* (Pergamon: London, 1958).

² L.D. Landau, E.M. Lifshitz, and L.P. Pitaevskii, *Electrodynamics of Continuous Media* (Pergamon: New York, 1984).

Na podstawie powyższego przedstawia się³, że prędkość V_e elektronów jest mniejsza od prędkości c światła *in vacuo*.

Krótką analiza powyższych wyników.

W eksperymentach Czerenkowa nie jest bezpośrednio obserwowany kierunek γ ruchu czoła fali uderzeniowej *in vacuo*, lecz kierunek ϑ ruchu czoła fali uderzeniowej w danym ośrodku materialnym, np. w powietrzu lub cieczy (Fig. IV.5.1).

Ponieważ światło nie jest ruchem falowym jakiegokolwiek ośrodka materialnego, to opis efektu Czerenkowa powinien też uwzględniać generację światła w kierunku γ *in vacuo*.

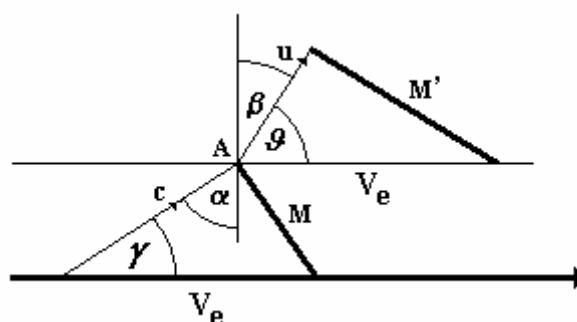


Fig. IV.5.2. Rysunek pomocniczy dla znalezienia zależności (IV.5.5.).

Tak więc, rys. IV.5.1. powinien być uzupełniony według rys. IV.5.2., z którego znajdujemy:

$$\cos \vartheta = \sin \beta = \frac{u}{V_e} \quad (IV.5.3.)$$

czyli zależność (IV.5.1.), oraz

$$\cos \gamma = \sin \alpha = \frac{c}{V_e} \quad (IV.5.4.)$$

Dzieląc stronami powyższe zależności, znajdujemy:

$$\frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{u} = n$$

gdzie: u – prędkość światła w danym ośrodku materialnym.

W powyższym zawarte jest znane prawo załamania Snella-Descartesa.

Z powyższego, mamy także:

$$\cos \gamma = n \cdot \cos \vartheta = \frac{c}{V_e} \quad (IV.5.5)$$

A to oznacza, że zależność (IV.5.2.) jest tylko częściowym zapisem zależności (IV.5.5.).

Jednak wstawiając do równania (IV.5.5.) dane doświadczalne jak wyżej (Eq. IV.5.2.) znajdujemy, że $\cos \gamma = n \cdot \cos \vartheta > 1$, co nie jest prawdziwe.

A to wprost oznacza, że Eqs (IV.5.2.) oraz (IV.5.5.) są niezgodne z doświadczeniem.

Zauważmy też, że w równaniach (IV.5.1.) oraz (IV.5.4.) zawarty jest warunek: $V_e \geq c \geq u$ (Fig. IV.5.2.). Tym samym, zawarty jest warunek, że prędkość V_e elektronów jest równa lub

³ Edwin F. Taylor, John Archibald Wheeler, *SPACETIME PHYSICS*, W.H. Freeman and Company, San Francisco and London 1966.

większa od prędkości c światła *in vacuo*, oraz większa od prędkości u światła w danym ośrodku materialnym.

Równanie dla promieniowania Czerenkowa.

Przy rozpatrywaniu promieniowania Czerenkowa należy uwzględnić, że stożek Czerenkowa jest przestrzenią punktów interferencyjnych (Fig. IV.5.3).

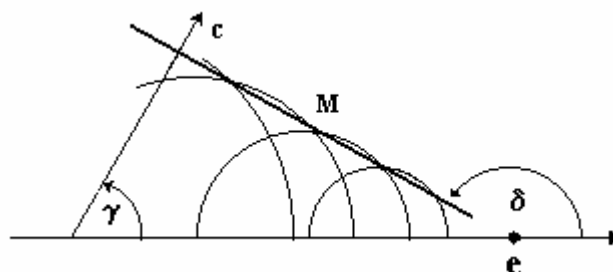


Fig. IV.5.3. Fala uderzeniowa dla prędkości nadkrytycznych V_e elektronu *in vacuo*:
M – linia Macha punktów interferencyjnych, która tworzy sobą czoło fali uderzeniowej.

Wskazane punkty interferencyjne tworzą sobą czoło fali uderzeniowej **M**. Linia **M**, zwana linią Macha, uzupełniana jest od strony poruszającego się elektronu przez kolejne punkty interferencyjne. Wewnątrz stożka tworzy się wiele linii **M** Macha.

Przyjmujemy, zgodnie z doświadczeniem, że linie te przesuwają się w kierunku γ z prędkością c światła *in vacuo*, lub z prędkością u w danym ośrodku materialnym.

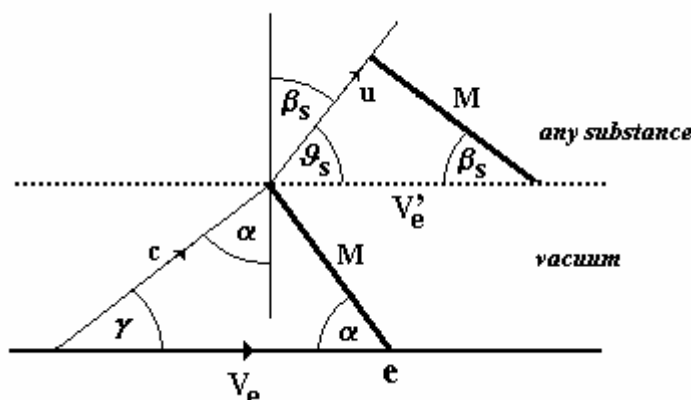


Fig. IV.5.4. Promieniowanie Czerenkowa.
 Długość **M** czoła fali uderzeniowej jest niezmiennicza.

Na rys. IV.5.4. zaznaczony obszar jako *vacuum* jest tunelem wytworzonym przez strumień elektronów poruszających się w danym ośrodku materialnym. W tunelu tym nie ma cząstek danego ośrodka materialnego. Dlatego, w tego rodzaju eksperymentach nie jest bezpośrednio obserwowany ruch fali uderzeniowej **M** *in vacuo*, lecz tylko w danym ośrodku materialnym. Z powyższego wprost wynika, że fala uderzeniowa **M** w całości odtwarzana jest w ośrodku materialnym o współczynniku załamania n (Fig. IV.5.4).

Ponadto, *per analogiam* do względnej prędkości u światła w danym ośrodku materialnym, należy uwzględnić względną prędkość elektronu. Jeżeli *in vacuo* prędkość elektronu wynosi V_e , to względem poruszających się cząstek danego ośrodka materialnego względna prędkość elektronu wynosi V_e' .

Można tu rozpatrywać dwa przypadki odstępstwa od znanego prawa Snella-Descartesa

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta$$

których bardziej szczegółowe i dosyć obszerne opisy pomijamy tutaj.

1. Wartość kąta załamania β_S jest inna niż kąta β według prawa Snella-Descartesa.

Oznacza to, że wartość prędkości u światła w danym ośrodku materialnym nie zależy od rodzaju fali świetlnej. Spełniony jest więc warunek:

$$n = \frac{c}{u} = \text{const}$$

Zmianie ulega kąt refrakcji β . Jest to światło spolaryzowane. Z rys. IV.5.4. mamy:

$$\text{tg} \alpha = \frac{c}{M} = \text{ctg} \gamma \quad \text{and} \quad \text{tg} \beta_S = \frac{u}{M} = \text{ctg} \vartheta_S$$

A z powyższego:

$$\left. \begin{aligned} \text{tg} \alpha &= n \cdot \text{tg} \beta_S \\ \text{tg} \vartheta_S &= n \cdot \text{tg} \gamma \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.5.6.})$$

Powyższe zależności, podane tutaj po raz pierwszy w literaturze przedmiotu, opisują prawo załamania dla promieniowania Czerenkowa.

Znając wartości kąta ϑ oraz współczynnika załamania n , z zależności (IV.5.6.) możemy znaleźć kąt γ Czerenkowa.

I tak na przykład, na podstawie danych doświadczalnych, z zależności (IV.5.4.) oraz (IV.5.6.), znajdujemy:

$$\text{dla powietrza: } \vartheta = 1^\circ 16' ; n = 1,0002926; \cos \gamma = \frac{c}{V_e} \approx 0,9997559 < 1 ;$$

$$\text{dla benzenu: } \vartheta = 38^\circ 30' , n = 1,504; \cos \gamma = \frac{c}{V_e} \approx 0,883982 < 1 .$$

Tak więc, w eksperymencie Czerenkowa prędkość V_e elektronów jest większa od prędkości c światła *in vacuo*, czyli: $V_e > c$. Ponadto, z rys. IV.5.4. znajdujemy:

$$\cos \vartheta = \frac{u}{V_e'} = \frac{c}{n \cdot V_e'}$$

co warto porównać z zależnością (IV.5.2.).

Z powyższego możemy znaleźć względną prędkość V_e' elektronów w danym ośrodku materialnym.

Ponieważ z doświadczenia: $n \cdot \cos \vartheta > 1$, to spełniony jest warunek: $u < V_e' < c$.

Także z doświadczenia wiadomo (Étienne Louis Malus, 1808), że światło ma charakter fali poprzecznej. Tym samym, wyniki (IV.5.6.) są w całkowitej zgodności z eksperymentami dla fal uderzeniowych oraz światła spolaryzowanego.

2. Można też rozważać przypadek, gdy zmianie ulega współczynnik załamania n , ale bez zmiany kąta refrakcji β . Oznacza to, że prędkość fali świetlnej w danym ośrodku materialnym zależy od długości tej fali. Z rys. IV.5.4. mamy:

$$\left. \begin{aligned} \text{tg} \alpha &= n_s \cdot \text{tg} \beta \\ \text{tg} \vartheta &= n_s \cdot \text{tg} \gamma \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.5.7.})$$

gdzie: $n_s = \frac{c}{u_s}$ – współczynnik załamania;

u_s – względna prędkość fali uderzeniowej M w danym ośrodku materialnym.

Ponadto, uwzględniając zależność (IV.5.7.), z rys. IV.5.4. znajdujemy

$$\cos \gamma = \frac{c}{V_e} \quad \text{and} \quad \cos \vartheta = \frac{u_s}{V_e}$$

Także i w tym przypadku spełnione są warunki: $V_e > c$ oraz $u_s < V_e < c$, czyli prędkość V_e elektronów jest większa od prędkości c światła *in vacuo*.

Jednak z doświadczenia wiadomo, że prędkość fali w danym ośrodku nie zależy od długości fali. Z tego względu zależności (IV.5.7.) nie opisują rzeczywistego ruchu falowego.