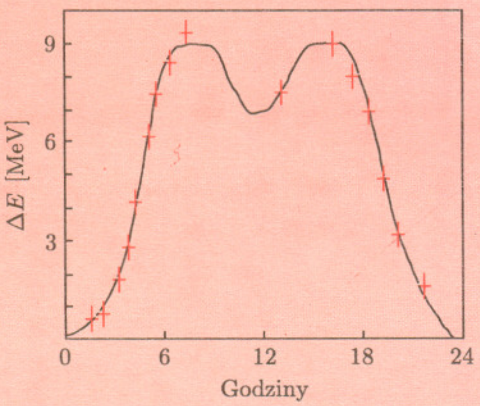
Dokładny pomiar energii elektronów w LEPie jest możliwy dzięki wykorzystaniu wszystkich informacji o całym CERNowskim kompleksie przyspieszającym oraz dzięki wykonaniu skomplikowanych pomiarów pomocniczych. Opis stosowanych metod wykracza poza zakres tego popularnego artykułu. Ważne jest to, że po kilku latach pracy akceleratora osiągnięto precyzję pomiaru energii od 3 do 5 MeV, czyli względną dokładność $\Delta E/E$ około $3{,}5 \times 10^{-5}$. Po dokonaniu tych pomiarów zauważono nieoczekiwany efekt – dobową zależność energii wiązki od czasu przedstawioną na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność ΔE od godziny, w której wykonano pomiar energii e^+e^- w LEPie. Na potrzeby tego rysunku przyjęto, że $E_0 = E(0) = E(24\text{ h})$. Krzywa ciągła jest przewidywaniem teorii pływów.

Okazuje się, że zależność ta jest spowodowana przez ruch Księżyca wokół Ziemi, a dokładniej – przez odkształcenie skorupy ziemskiej spowodowane przyciąganiem grawitacyjnym Księżyca. Zrozumienie tego efektu wymaga dokładniejszego rozważenia mechanizmu przyspieszania elektronów w LEPie.

Do przyspieszania elektronów w LEPie wykorzystujemy fale radiowe o częstości $f = 352\,254\,170$ Hz, które w specjalnych wnękach rezonansowych przekazują swoją energię przechodzącym przez wnękę paczkom cząstek. Wybór częstości przyspieszającej nie jest przypadkowy, jest ona liniowo związana z częstością obiegu pierścienia LEPu przez elektrony, a więc z jego rozmiarami, na przykład promieniem R, który dla LEPu wynosi 4,24 km. Tak więc zmiana częstości fal radiowych Δf będzie prowadziła do pewnej zmiany energii wiązek ΔE. Dla LEPu obowiązuje

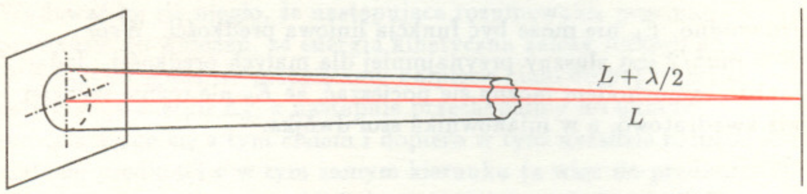
Promień świetlny

Kazimierz PIETRASZKIEWICZ

W optyce pojęcie promienia świetlnego ma dwa znaczenia: jest to nieskończenie cienka linia – pojęcie matematyczne, a także jest to fizyczny **promień**, który ma skończoną grubość.

Promień jako pojęcie fizyczne będziemy odróżniali od promienia jako pojęcia matematycznego wytłuszczając ten pierwszy.

Jaka jest jego grubość? Jeżeli spróbujemy wydzielić **promień** przepuszczając falę przez otwór w ekranie, to rozmiary tego otworu nie mogą być większe od rozmiarów pierwszej strefy Fresnela (patrz *Delta* 3/1993). Co to oznacza w praktyce? Otóż, znaczy to tyle, że droga L przebyta przez promień środkowy (od środka otworka do płaszczyzny obserwacji) nie powinna różnić się od drogi przebytej przez promień skrajny o więcej niż $\lambda/2$. Łatwo wykazać, że średnica **promienia** wyniesie $D \leq 2\sqrt{\lambda L}$, gdzie λ jest długością fali świetlnej. Z drugiej strony średnica **promienia** świetlnego nie może być znacznie mniejsza od podanej tu wartości, gdyż wystąpi wtedy silne ugięcie. Tak określony **promień** stanowi rurkę w przestrzeni, zwężającą się w kierunku płaszczyzny obserwacji.

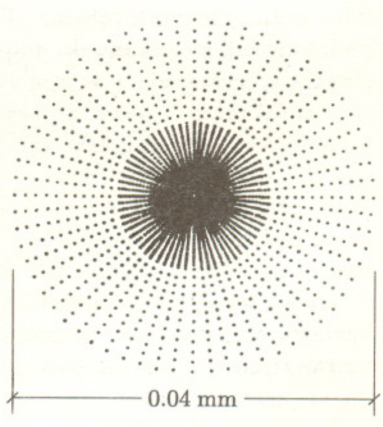


Otwór w ekranie przepuszczający jeden **promień**

Płaszczyzna obserwacji

Promień świetlny to podstawowe pojęcie optyki geometrycznej, działu fizyki, który ciągle się rozwija. Optyka geometryczna, mimo że jest teorią przybliżoną, służy także do opisu zjawiska dyfrakcji. Ten dział optyki nazywa się *geometryczną teorią dyfrakcji*. A więc opis zjawisk dyfrakcji nie jest wcale zarezerwowany tylko dla optyki falowej. Optyka geometryczna jest bezkonkurencyjna przy analizie propagacji w ośrodkach niejednorodnych, zwłaszcza wtedy, gdy parametry ośrodka znamy tylko w przybliżeniu. Dobrym przykładem jest tu zjawisko refrakcji astronomicznej, czyli odchylenie **promienia** świetlnego podczas przejścia przez atmosferę ziemską.

Inny przykład to zastosowanie optyki geometrycznej do oceny jakości pojedynczej soczewki. Na soczewkę kierujemy pęk **promieni**, które następnie po opuszczeniu soczewki przecinają płaszczyznę detekcji (płaszczyznę obserwacji) tworząc tzw. diagram śladów. Rozmieszczenie punktów stanowiących diagram śladów jest miarą jakości analizowanej soczewki; im punkty są bardziej skupione, tym lepsza jest soczewka.



Wróćmy jednak do **promienia**. Pewnego razu na ćwiczeniach rachunkowych z teorii dyfrakcji prowadzący zapytał studentów: jaka powinna być średnica otworka w *camera obscura*? (patrz *Delta* 12/1993). Studenci wydawali się zaskoczeni pytaniem i wreszcie jeden z nich powiedział: średnica otworka powinna być taka, aby przeszedł przezeń tylko jeden **promień** (a może miał na myśli promień?). Odpowiedź ta wywołała wesołość na sali. Jednak w świetle tego, co wiemy o **promieniu** jako realnym obiekcie fizycznym, odpowiedź ta jest jak najbardziej poprawna. Rzeczywiście, średnica otworka w *camera obscura* powinna być równa średnicy **promienia**, czyli nie powinna przekraczać rozmiarów pierwszej strefy Fresnela.

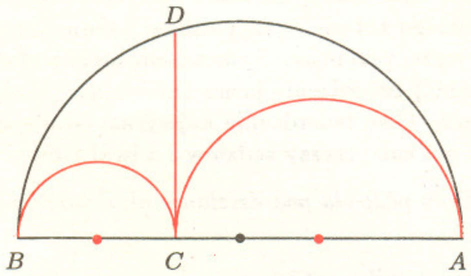
Kącik spokojnych miłośników rachunków

Jeszcze raz o nożu

Pisząc poprzednio o tzw. szewskim nożu wyraziłem opinię, że nie sposób wypowiadać się o jego polu, gdyż brakuje – obecnego w przypadku księżyców Hipokratesa – trójkąta do porównania.

Inną nazwą tej figury jest arbalest – tak nazywano najstraszniejszą broń średniowiecza: kuszę ze stalowym łukiem.

Trójkąta istotnie brakuje, natomiast o polu mówić można, gdyż ładnie się wyraża przez długość wspólnej stycznej dwóch mniejszych półokręgów od punktu styczności do punktu przecięcia z największym półokręgiem.



Oznaczając, tak jak poprzednio (*Delta* 5/1994), odcinek ten przez CD (patrz rysunek), a promienie mniejszych okręgów przez r_1 i r_2, promień zaś dużego okręgu przez r mamy $r = r_1 + r_2$ oraz

$$CD^2 = 2r_1 \cdot 2r_2\,,$$

gdyż trójkąt ADB jest prostokątny, pole natomiast całego noża jest równe

$$\frac{1}{2}\pi r^2 - \frac{1}{2}\pi r_1^2 - \frac{1}{2}\pi r_2^2 = \frac{1}{2}\pi(r^2 - (r_1+r_2)^2 + 2r_1r_2) = $$
$$= \frac{1}{4}\pi(CD)^2 = \pi\left(\frac{CD}{2}\right)^2.$$

Można to interpretować jako pole koła o średnicy CD.

Warto zwrócić uwagę, że promienie okręgów wpisanych w każdą z części noża można też wyrazić za pomocą CD:

$$s = \frac{CD^2}{4r}\,.$$

M.K.

następujący związek między względnymi zmianami energii i względnymi zmianami częstości:

$$(1) \qquad \frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\alpha_c}\frac{\Delta f}{f}\,,$$

gdzie stała $\alpha_c = 3{,}84 \times 10^{-4}$ jest związana ze strukturą wnęk rezonansowych LEPu i znamy ją z niezależnych pomiarów z dokładnością około 5%.

Zastanówmy się teraz, co by się stało z energią elektronów, gdyby pierścień akceleratora uległ niewielkiemu odkształceniu, powiedzmy, promień zwiększyłby się o ΔR. Częstość obiegu elektronów ulegałaby zmniejszeniu na skutek niewielkiego wzrostu obwodu pierścienia i przestałaby pasować do starannie dobranej częstości fal radiowych f. Dopasowanie częstości fal do nowych rozmiarów LEPu wymagałoby obniżenia jej o Δf.

Możemy więc zapisać, że w pierwszym przybliżeniu

$$(2) \qquad \frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta R}{R}\,.$$

Jeżeli częstość radiowa nie ulegnie zmianie, to energia wiązki elektronów musi ulec zmniejszeniu zgodnie ze wzorem (1), co, po podstawieniu zależności (2), prowadzi nas do wzoru

$$(3) \qquad \frac{\Delta E}{E} = -\frac{1}{\alpha_c}\frac{\Delta R}{R}\,.$$

Obliczenie odkształcenia LEPu pod wpływem sił grawitacyjnych Księżyca wymaga dość złożonych rachunków numerycznych uwzględniających budowę geologiczną i własności sprężyste skał, w których jest wydrążony podziemny tunel akceleratora. Z obliczeń tych wynika, że maksymalna zmiana promienia R wynosi około 150 μm. Względna zmiana promienia LEPu $\Delta R/R$ wynosi więc $(1{,}5\times10^{-4}\ \mathrm{m})/(4{,}24\times10^{3}\ \mathrm{m}) = 3{,}5\times10^{-8}$. Po podstawieniu do wzoru (3) otrzymujemy względną zmianę energii wiązki równą około $0{,}7\times10^{-4}$, czyli zmianę energii układu e^+e^- o około 6,8 MeV. Taką samą zmianę energii e^+e^- można by uzyskać zmieniając częstość fali przyspieszającej o 10 Hz, na przykład z 352 254 170 Hz na 352 254 180 Hz.

Dane z rysunku 2 można teraz wykreślić nie w zależności od czasu, lecz w zależności od stosunku siły pływu w danym momencie doby do maksymalnej siły pływu. Taki wykres przedstawia rysunek 3.