

Ćwiczenie 103

Promieniowanie kosmiczne

Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z działaniem układu koincydencyjnego liczników G-M. Badanie zależności natężenia promieniowania od kąta nachylenia teleskopu oraz od położenia liczników względem siebie.

Wprowadzenie

Promieniowaniem kosmicznym nazywamy strumień cząstek dochodzących do Ziemi spoza Układu Słonecznego. Promieniowanie to zawiera przede wszystkim cząstki naładowane, których dziewięćdziesiąt procent stanowią protony. Energie ich wahają się od 10^9 eV aż do 10^{20} eV i wyżej. Na przykład w 1991 roku zarejestrowano cząstkę kosmiczną o energii 3×10^{20} eV (50 J). Cząstki o takich energiach zdarzają się jednak bardzo rzadko, jedna cząstka pada na około 100 km^2 raz na rok.

Pochodzenie promieni kosmicznych nie zostało jeszcze w pełni określone. Przypuszcza się, że mogą być one generowane w wybuchach gwiazd supernowych, a cząstki o skrajnych energiach powstają prawdopodobnie w otoczeniu galaktycznej czarnej dziury.

Padając na powierzchnię atmosfery, protony zderzają się z jądrami atomów powietrza, wywołując reakcje jądrowe, w których powstają cząstki wtórne, przede wszystkim mezony π^+ , π^- , π^0 . Mezony π^0 mają krótki czas życia ($0,884 \cdot 10^{-16}$ s) i rozpadają się na dwa kwanty γ – fotony



Energia tych fotonów znacznie przewyższa energię równoważną masie spoczynkowej elektronu i pozytonu (1,02 MeV). Zachodzą więc warunki sprzyjające tworzeniu par w polu elektrycznym jąder. Foton γ znika, a powstaje elektron i pozyton

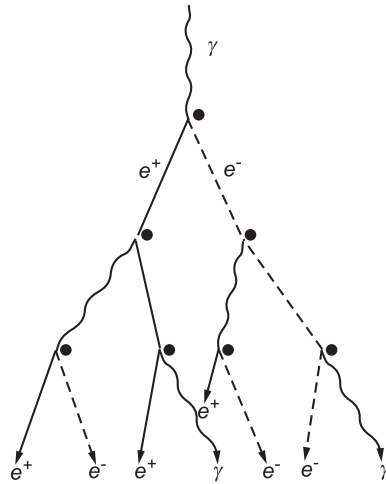


Nadwyżka energii fotonu γ zamienia się na energię kinetyczną pary. W procesach hamowania elektronu i pozytonu ponownie powstają fotony γ o nieco mniejszej energii



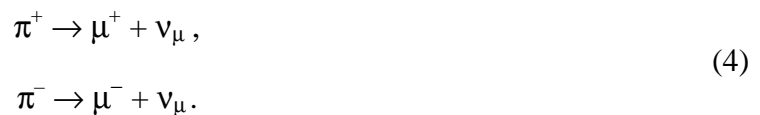
(X oznacza jądro składników powietrza, umożliwiające zajście reakcji (3) przez przejście nadmiaru pędu).

Reakcje te zachodzą kolejno jedne po drugich, tworząc kaskady elektronowo-fotonowe (rys. 1).



Rys. 1. Kaskady elektronowo-fotonowe

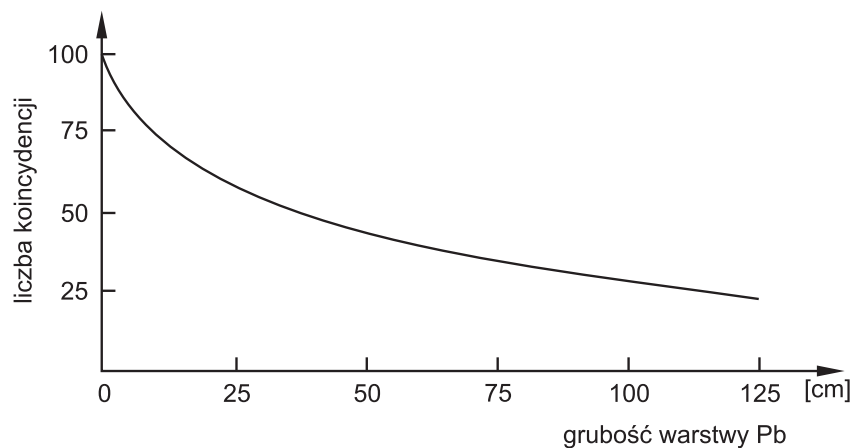
Mezony π^+ i π^- powodują dalsze reakcje jądrowe lub przez rozpad dają początek mionom



W ten sposób pojedynczy proton wytwarza mieszaną kaskadę zwaną wielkim pękiem atmosferycznym o olbrzymiej liczbie cząstek.

W promieniowaniu zarejestrowanym na poziomie morza można wyróżnić składową miękką (elektronowo-fotonową), docierającą tylko do powierzchni Ziemi i składową twardą (mionową), która przenika nawet grube warstwy skorupy ziemskiej.

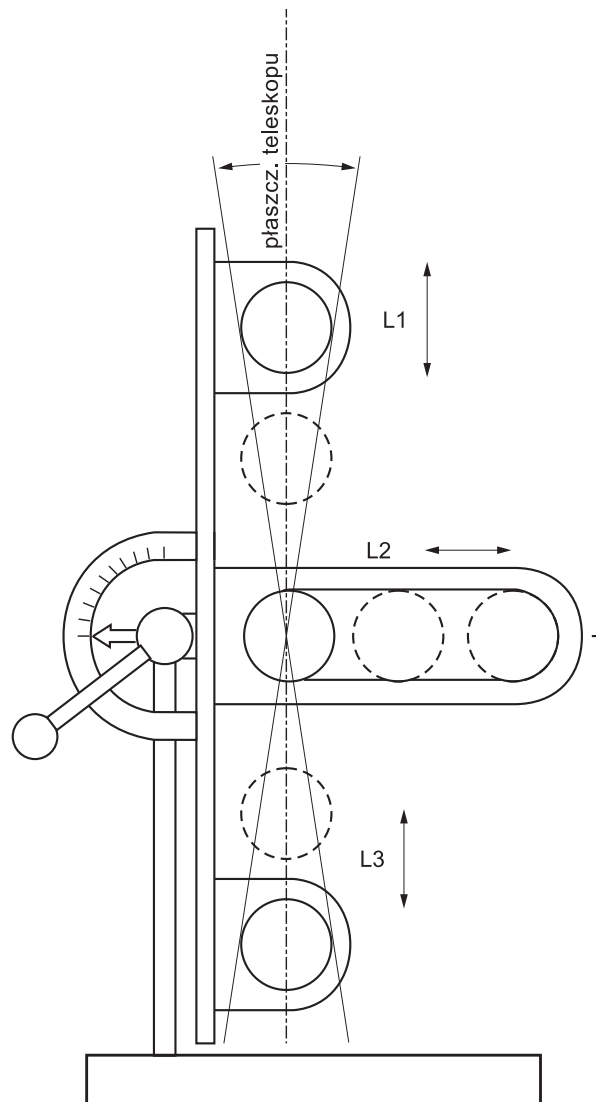
Rysunek 2 przedstawia krzywą absorpcji promieniowania kosmicznego w ołowiu. Początkowy, szybszy spadek natężenia przechodzącego promieniowania odpowiada absorpcji składowej miękkiej. Praktycznie całkowita absorpcja składowej miękkiej zachodzi w absorbencie ołowianym grubości 10 cm, zaś składowej twardej – grubości 1 m.



Rys. 2. Krzywa absorpcji promieniowania kosmicznego

Promieniowanie kosmiczne bada się metodą koincydencji, rozpowszechnioną szczególnie w latach 1930 – 1960, a stosowaną jeszcze do dziś.

Do pomiarów stosujemy teleskop licznikowy. Jest to układ trzech liczników Geigera-Müllera umieszczonych w jednej płaszczyźnie (rys. 3) i podłączonych do tranzystorowego



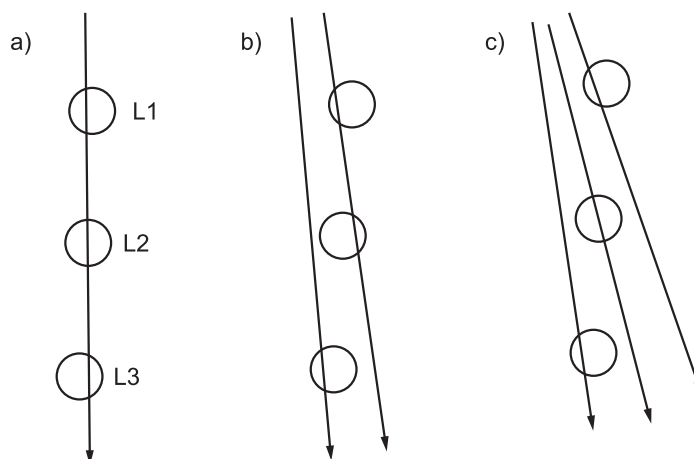
Rys. 3. Teleskop licznikowy

układu koincydencyjnego UK, mającego trzy wejścia i jedno wyjście. Zasada jego działania jest następująca: wytwarza on na wyjściu impuls napięcia wtedy i tylko wtedy, gdy na wszystkich trzech wejściach podane są jednocześnie impulsy napięcia. Warunkiem zadziałania układu koincydencyjnego jest więc jednoczesne zadziałanie trzech liczników teleskopu. Zachodzi to wtedy, gdy przez wszystkie trzy liczniki przechodzi jedna cząstka (rys. 4a) lub więcej cząstek przechodzi jednocześnie przez poszczególne liczniki (rys. 4b, c). Ta druga ewentualność jest znacznie mniej prawdopodobna, ale możliwa dzięki istnieniu wielkich pęków atmosferycznych. Tak wytworzony impuls w układzie koincydencyjnym nazywamy koincydencją rzeczywistą. Cząstki padające na liczniki niezależnie od siebie mogą spowodować koincydencje przypadkowe, jeżeli odstępów czasowych między cząstkami są

mniejsze od czasu rozdzielczego UK. Średnią częstość koincydencji przypadkowych można obliczyć wg wzoru

$$n_{\text{przyp}} = 3 n_1 n_2 n_3 \tau^2, \quad (5)$$

gdzie: n_1, n_2, n_3 – częstości zliczeń poszczególnych liczników,
 τ – czas rozdzielczy UK ($\tau = 0,2 \mu\text{s}$).

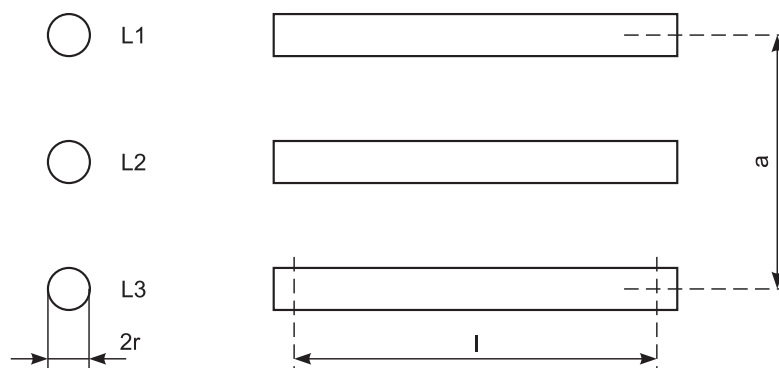


Rys. 4. Warunki zadziałania układu koincydencyjnego: jednoczesne przejście przez trzy liczniki: a) jednej cząstki, b) dwóch, c) trzech cząstek

Dzięki stosowaniu teleskopu licznikowego uzyskujemy dwie korzyści:

a) wyeliminowanie tła promieniowania pochodzącego ze skorupy ziemskiej, materiałów budowlanych i konstrukcyjnych, skażeń powietrza etc., które dają pomijalną liczbę koincydencji przypadkowych,

b) możliwość rejestracji cząstek przychodzących z określonego kierunku, w obrębie określonego kąta bryłowego. Kąt bryłowy teleskopu Ω zależy od rozmiarów liczników i ich wzajemnej odległości (rys. 5).



Rys. 5. Wymiary określające kąt bryłowy teleskopu

Szczegółowe wyliczenia prowadzą do wzoru

$$\Omega = \frac{r}{2a} \left[\frac{\frac{l}{a}}{1 + \left(\frac{l}{a}\right)^2} + 3 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{l}{a}\right) \right], \quad (6)$$

gdzie: l – długość części czynnej licznika ($l = 800$ mm),
 r – promień wewnętrzny licznika ($r = 26,5$ mm),
 a – odległość między skrajnymi licznikami teleskopu.

Natężenie promieniowania określają dwie wielkości:

a) natężenie kierunkowe $I(\theta)$ zdefiniowane jako liczba cząstek padających na jednostkę powierzchni prostopadłej do danego kierunku w jednostkowym kącie bryłowym na jednostkę czasu (wymiar: $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$),

b) natężenie całkowite J , zdefiniowane jako liczba cząstek padających na jednostkową powierzchnię w obrębie półpełnego kąta bryłowego (2π) na jednostkę czasu (wymiar: $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Natężenie kierunkowe promieni kosmicznych zależy od kąta zenitalnego θ (względem pionu) – zmniejsza się ze wzrostem tego kąta. Tłumaczy się to wpływem ziemskiego pola magnetycznego na tory cząstek i efektami absorpcji w atmosferze. Zależność tę na poziomie morza opisuje wzór

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta, \quad (7)$$

gdzie I_0 – natężenie kierunkowe pionowe.

Natężenie całkowite J obliczamy przez scałkowanie wzoru (7) względem kąta bryłowego

$$J = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_0 \cos^2 \theta \, 2\pi \sin \theta \, d\theta,$$

czyli

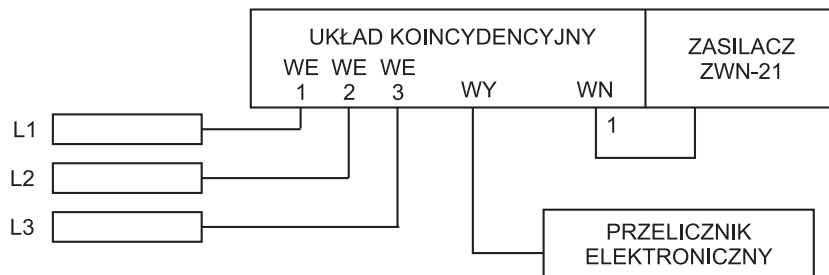
$$J = \frac{2\pi}{3} I_0. \quad (8)$$

Literatura

1. Szczeniowski S.: *Fizyka doświadczalna. T. IV.* Warszawa, PWN 1974
2. Dobrotin N.A.: *Promieniowanie kosmiczne.* Warszawa, PWN 1958 (rozdz. I i II)
3. Halliday D.: *Wstęp do fizyki jądrowej.* Warszawa, PWN 1957 (rozdz. XVI)
4. Rossi B.: *Promieniowanie kosmiczne.* Warszawa, PWN 1968
5. Mięśowicz M.: *Promieniowanie kosmiczne.* Warszawa, PWN 1947
6. Kubiak M.: *Promieniowanie kosmiczne: Encyklopedia fizyki współczesnej, str. 975.* Warszawa, PWN 1983

Aparatura

W skład zestawu pomiarowego (rys. 6) wchodzi: teleskop licznikowy, zasilacz wysokiego napięcia ZWN-21, układ koincydencyjny UK-21 i przelicznik elektroniczny P-21. Teleskop licznikowy można obracać wokół poziomej osi. W tym celu trzeba zluźnić rękojęści po obu stronach osi, obrócić teleskop i ponownie zacisnąć rękojęści. Uwaga: nie zaciskać zbyt mocno! Skrajne liczniki można zbliżać lub oddalać od środkowego po zluźwaniu nakrętek motylkowych na odwrocie.



Rys. 6. Schemat blokowy połączeń

Wyłącznik sieciowy po prawej stronie włącza sieć do całego układu. Przyciski START i STOP służą do rozpoczęcia i zakończenia liczenia, a przycisk RESET zeruje wskazanie. Czas pomiaru można ustawiać przyciskami u dołu w sekundach lub minutach.

Uwaga. Nie wolno pod jakimkolwiek pozorem odłączać kabla od licznika G-M. Grozi to uszkodzeniem układu elektronicznego!

Wykonanie ćwiczenia

A. Rozkład kątowy zenitalny

1. Uruchomienie układu elektronicznego:

- włączyć zasilacz wysokiego napięcia przy wyzerowanym helipocie, po kilku minutach nastawić helipot na napięcie pracy podane na obudowie zasilacza,
- włączyć przelicznik, sprawdzić, czy przy pionowym ustawieniu teleskopu liczba zliczeń wynosi $20 \div 60$ w 1 minucie, a przy poziomym $0 \div 3$. W razie dużych odchyłeń od wskazanych wartości wezwać obsługę techniczną pracowni.

2. Pomiar:

- zmierzyć liczbę koincydencji N w funkcji kąta zenitalnego dla $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$. Czas każdego pomiaru $4 \div 6$ minut.
- dla kontroli powtórzyć pomiar dla $\theta = 0^\circ$, wyniki wpisać do poniższej tabelki.

Kąt θ	Liczba koincydencji N	Czas as t	i (θ)	Δ N	Δ i	c $\cos^2 \theta$

Opracowanie wyników

1. Liczba koincydencji dla $\theta = 90^\circ$ pochodzi od przypadków trafienia liczników przez cząstki z pęku atmosferycznego. Liczbę tę należy odjąć od wszystkich pomiarów. Dzieląc następnie każdy pomiar przez pomiar dla $\theta = 0^\circ$, otrzymujemy znormalizowaną funkcję rozkładu zenitalnego

$$i(\theta) = \frac{N(\theta) - N(90^\circ)}{N(0^\circ) - N(90^\circ)}.$$

2. Na papierze milimetrowym narysować wykres funkcji $i(\theta)$.
3. Obliczyć błędy statystyczne ΔN , Δi , nanieść je na wykres.
4. Z badać zgodność punktów doświadczalnych z przebiegiem krzywej $\cos^2\theta$ i wyciągnąć wnioski.

B. Wyznaczanie natężenia promieniowania

1. Uruchomienie aparatury jak w punkcie 1 wersji A.
2. Pomiar:
 - a) ustawić pionowo teleskop,
 - b) zmierzyć liczbę koincydencji N dla czterech rozstawów liczników skrajnych $a = 450, 350, 250, 200$ mm przy zachowaniu symetrycznego ich położenia względem licznika środkowego. Czas każdego pomiaru $6 \div 10$ minut. Wyniki wpisać do poniższej tabelki.

O dległ. liczn. a	Li czba koinc. N	Cz as pom. t	Częst ość $n = \frac{N}{t}$	K ąt brył. Ω	Po w. liczn. S	N atęż. I_0	ΔN	ΔI_0

Opracowanie wyników

1. Dla każdego pomiaru obliczyć kolejno: częstość zliczeń $n = N/t$, kąt bryłowy Ω (wzór 6), natężenie kierunkowe pionowe $I_0 = \frac{N}{t \Omega S}$.
2. Wykonać wykres zależności $I_0(\Omega)$, obliczyć niepewności $u(N)$ oraz $u(I_0)$ i nanieść je na wykres.
3. Wyjaśnić, dlaczego I_0 zależy od Ω , czyli od wzajemnej pozycji liczników.
4. Znaleźć prostą regresji, punkt przecięcia jej z prostą $\Omega = 0$ i wartość I_0 odpowiadającą temu punktowi, tj. $I_0(\Omega = 0)$. Jaki jest sens fizyczny ekstrapolacji?
5. Obliczyć natężenie całkowite J (wzór 8) i niepewności $u(J)$.