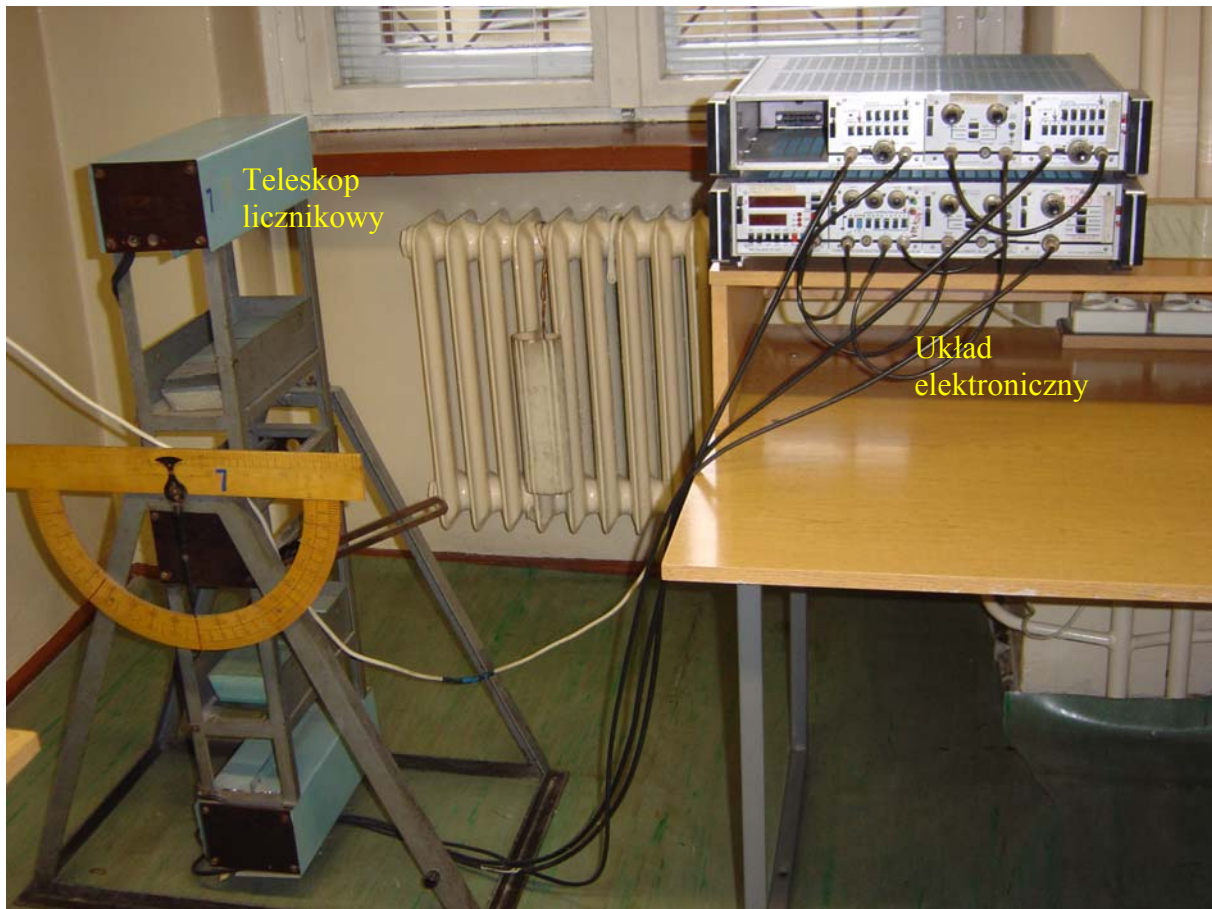


Doświadczenie nr 7

Określenie średniego czasu życia mionu.



1. Student winien wykazać się znajomością następujących zagadnień:

01. Promieniowanie kosmiczne – wpływ ziemskiego pola magnetycznego na natężenie tego promieniowania.
02. Promieniowanie pierwotne – jakie cząstki wchodzi w skład tego promieniowania.
03. Promieniowanie wtórne – gdzie i jak powstaje:
 - a) przenikliwa składowa tego promieniowania,
 - b) „mięka” składowa.
04. Piony – rodzaje pionów i ich własności.
05. Miony – rodzaje i własności mionów.
06. Wyznaczanie czasu życia mionów.

Pomoc merytoryczna potrzebna do opracowania wyników:

Zależność natężenia przenikliwej składowej promieniowania kosmicznego od kierunku i oszacowanie średniego czasu życia mionu μ .

W ćwiczeniu dokonuje się oszacowania średniego czasu życia mionów (cząstek nietrwałych) stanowiących przeważającą (tzw. przenikliwą) część promieniowania kosmicznego docierającego do powierzchni Ziemi na podstawie stosunkowo prostego pomiaru i przyjęcia szeregu dodatkowych założeń nie związanych bezpośrednio z samym eksperymentem.

Jak wykazały badania, miony promieniowania kosmicznego są wynikiem szybkiego rozpadu mezonów II generowanych przez pierwotne cząstki kosmiczne w górnych warstwach atmosfery. Można przyjąć, że miony te powstają głównie w stosunkowo cienkiej warstwie atmosfery, znajdującej się na wysokości około $l = 15$ km, co odpowiada ciśnieniu określonemu warstwą powietrza o grubości masowej równej $123 \text{ [g/cm}^2\text{]}$. Oznacza to, że miony, które docierają do powierzchni Ziemi lecąc w kierunku pionowym musiały przebyć odległość l_0 (15 km), której grubość masowa wynosiła:

$$1. \quad H = (1033 - 123) \text{ [g/cm}^2\text{]} = 910 \text{ [g/cm}^2\text{]}.$$

Dla mionu lecącego w kierunku powierzchni Ziemi pod kątem azymutalnym α będziemy mieli odpowiednio:

$$2. \quad I_\alpha = \frac{I_0}{\cos \alpha}$$

$$3. \quad H_\alpha = \frac{H_0}{\cos \alpha}$$

Przebycie dłuższej drogi geometrycznej ($l_\alpha \geq l_0$), nawet , gdyby zaniedbać zmniejszanie się prędkości w wyniku strat energii, wymaga dłuższego czasu, a zatem zwiększa szansę na spontaniczny rozpad mionów w locie. Z kolei potrzeba przebycia przez miony większej grubości masowej ($H_\alpha \geq H_0$) zwiększa możliwość ich zatrzymania w wyniku strat jonizacyjnych. Oba te czynniki sprawiają, że mierzone na poziomie morza natężenie przenikliwej składowej promieniowania kosmicznego maleje ze wzrostem kąta azymutalnego (maksimum przypada na zerową wartość tego kąta - kierunek pionowy).

Jeżeli średni czas życia lecących w stronę powierzchni Ziemi mionów (w układzie związanym z Ziemią) oznaczyć przez $\bar{\tau}$ i wziąć pod uwagę, że z reguły miony te mają prędkość bliską prędkości światła, to można przyjąć, że średnia droga mionów ze względu na ich rozpad jest z dobrym przybliżeniem równa:

$$l_{\text{rozp}} = c \bar{\tau}$$

Miony lecące pod kątem azymutalnym α mają do przebycia drogę dłuższą niż lecące pionowo, o

$$4. \quad \Delta l_\alpha = l_\alpha - l_0 = l_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right),$$

a to oznacza, że ich szansa na dotarcie do powierzchni Ziemi jest ze względu na rozpad

$$5. \quad K = \frac{1}{P(\Delta l_\alpha)}$$

razy mniejsza niż lecących pionowo ($\Delta l_{\alpha=0} = 0$), gdzie

$$6. \quad P(\Delta l_\alpha) = \exp\left(-\frac{\Delta l_\alpha}{l_{rozp}}\right)$$

lub

$$7. \quad P(\Delta l_\alpha) = \exp\left(-\frac{\Delta l_\alpha}{c\bar{\tau}}\right)$$

Uwzględnienie osłabienia natężenia przenikliwej składowej promieniowania kosmicznego (mionów) wskutek strat jonizacyjnych, a w szczególności określenie zależności tego osłabienia od kąta azymutalnego jest bardziej skomplikowane. Dodatkowe osłabienie w stosunku do pionu dla danego kierunku α można określić empirycznie, przez wyznaczenie dla kierunku pionowego, osłabienia, jakie dałoby umieszczenie absorbenta (np. odpowiedniej warstwy grafitu) nad teleskopem licznikowym, mierzącym natężenie składowej przenikliwej promieniowania kosmicznego. Absorbent powinien być ekwiwalentny - ze względu na pochłanianie - warstwie powietrza o grubości masowej równej:

$$8. \quad \Delta H_\alpha = H_\alpha - H_0 = H_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right).$$

Jeżeli więc współczynnik charakteryzujący to osłabienie oznaczyć przez $P(\Delta H_\alpha)$, to obserwowane przy powierzchni Ziemi natężenie mionów I_α dla kierunku α może być opisane wzorem

$$9. \quad I_\alpha = I_0 P(\Delta H_\alpha) P(\Delta l_\alpha), \quad \text{gdzie} \quad I_0 = I_\alpha \quad \text{dla} \quad \alpha = 0.$$

Ze wzoru (8) otrzymujemy

$$10. \quad \frac{I_\alpha}{I_0} = P(\Delta H_\alpha) P(\Delta l_\alpha)$$

i dalej

$$11. \quad P(\Delta l_\alpha) = \frac{I_\alpha}{I_0} \frac{1}{P(\Delta H_\alpha)}$$

a więc pomiary stosunku $\frac{I_\alpha}{I_0}$ i $P(\Delta H_\alpha)$ pozwoliłyby znaleźć $P(\Delta l_\alpha)$, a w konsekwencji [por. wzór (6)] oszacować $\bar{\tau}$.

Pomiarów I_0 i I_α , a ściślej proporcjonalnych do I_0 i I_α szybkości zliczeń n_0 i n_α , można dokonać rejestrując dla teleskopu, pracujących w koincydencji liczników G-M, (patrz Rysunek nr 1)

szybkości zliczeń dla dwu ustawień: pionowego ($\alpha = 0$) i po odchyleniu go od pionu o kąt α .

Jak już zaznaczono, $P(\Delta H_\alpha)$ można również wyznaczyć za pomocą tego samego teleskopu umieszczając nad nim (w położeniu pionowym) odpowiedni absorbent. Ze względu na czasochłonność pomiarów, w tym ćwiczeniu przedmiotem bezpośredniego pomiaru będą proporcjonalne do I_0 i I_α szybkości zliczeń koincydencji n_0 i n_α (dalej będziemy traktować n_0 i n_α oraz I_0 i I_α , odpowiednio, jako ekwiwalentne wielkości). O ile chodzi o $P(\Delta H_\alpha)$, to zostaną w ćwiczeniu wykorzystane gotowe wyniki odnośnych eksperymentów, które pokazały, że z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że:

$$12. \quad P(\Delta H_\alpha) = (\cos \alpha)^{1,6}.$$

Wstawiając wzory (7) i (12) do wzoru (9), otrzymamy:

$$13. \quad I_\alpha = I_0 (\cos \alpha)^{1,6} e^{-\left[\frac{\Delta l_\alpha}{c\bar{\tau}}\right]},$$

skąd

$$14. \quad \frac{\Delta l_\alpha}{c\bar{\tau}} = \ln \frac{I'_\alpha}{I_\alpha},$$

gdzie wprowadzono oznaczenie

$$15. \quad I'_\alpha = I_0 (\cos \alpha)^{1,6}.$$

Rozwiązując równanie (14) względem τ otrzymujemy:

$$16. \quad \bar{\tau} = \frac{\Delta l_\alpha}{c} \frac{1}{\ln \frac{I'_\alpha}{I_\alpha}}.$$

Zatem pomiar I_0 oraz I_α pozwala oszacować średni czas życia mionów kosmicznych w locie.

Komentarz:

Jeśli niestabilna cząstka charakteryzuje się średnim czasem życia τ_0 w układzie z nią związanym równym, to w układzie względem którego porusza się ona z prędkością v , jej średni czas życia wynosi

$$17. \quad \tau = \tau_0 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

gdzie

$$18. \quad \beta = \frac{v}{c}.$$

Uwzględniając, że energia całkowita E cząstki jest określona wzorem

$$19. \quad E = \frac{M c^2}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

gdzie M jest masą spoczynkową cząstki, możemy wzór (17) zapisać w postaci

$$20. \quad \tau = \tau_0 \frac{E}{Mc^2}.$$

Występująca we wzorze (15) $\bar{\tau}$ jest średnią czasów τ uwarunkowaną rozkładem energetycznym mionów.

Koniec komentarza.

W naszych oszacowaniach przyjmujemy, że można we wzorze (16) położyć [por. wzór (20)]

$$21. \quad \bar{\tau} = \tau_0 \frac{\bar{E}}{Mc^2},$$

gdzie $\bar{E}$ oznacza średnią energię tych mionów, które lecąc z górnej warstwy atmosfery gdzie powstały, mogły mimo absorpcji dotrzeć do powierzchni Ziemi, czyli tych, których energia była większa od pewnego $E_{\min}$ (zależnego m.in. od α) określonego stratami jonizacyjnymi. Zgodnie z danymi literaturowymi średnia strata jonizacyjna energii mionu w powietrzu jest określona zależnością:

$$22. \quad \frac{dE}{dH} = 2 \frac{MeV \text{ cm}^2}{g},$$

a więc

$$23. \quad E_{\min}(\alpha) = 2 \frac{H_0}{\cos \alpha} \quad [MeV],$$

gdzie H_0 jest wyrażone w $[g/cm^2]$. Znajomość $E_{\min}(\alpha)$ pozwala obliczyć $\bar{E}_\alpha$ za pomocą wzoru:

$$24. \quad \bar{E}_\alpha = \frac{\int_{E_{\min}(\alpha)}^{\infty} E \frac{dN}{dE} dE}{\int_{E_{\min}(\alpha)}^{\infty} \frac{dN}{dE} dE},$$

gdzie E jest energią mionu, a dN/dE rozkładem energetycznym mionów, tak, że

$$25. \quad [dN/dE] dE$$

oznacza ułamek mionów posiadających energię z przedziału $E, E + dE$. Odnośne pomiary pokazują, że

$$26. \quad dN/dE = A / E^{2,6}, \text{ gdzie } A \text{ jest stałą.}$$

Rozwiązując równanie (24) z uwzględnieniem (26) otrzymamy:

$$27. \quad \bar{E}_\alpha = \frac{8}{3} E_{\min}(\alpha).$$

Zastępując we wzorze (16) $\bar{\tau}$ przez (21) otrzymujemy

$$28. \quad \tau_0 = \frac{\Delta I_\alpha M c^2}{c \bar{E}_\alpha \ln \frac{I'_\alpha}{I_\alpha}},$$

gdzie: Mc^2 – energia spoczynkowa mionu,
 c – prędkość światła.

ΔI_α jest określona wzorem (4), $\bar{E}_\alpha$ wzorem (27), a I'_α wzorem (15), gdzie I_0 jest natężeniem promieniowania mionowego dla α_0 . I_α jest analogicznym natężeniem dla $\alpha \neq 0$ (można zastąpić I_0 i I_α przez n_0 i n_α odpowiednio).

UWAGA:

W wykonywanym ćwiczeniu miony oprócz warstwy powietrza musiały przejść przez stropy betonowe (pomiar prowadzi się w budynku) i absorbent ołowiany w teleskopie. Z dobrym przybliżeniem wynikającą stąd dodatkową absorpcję można uwzględnić kładąc we wzorze () $H_0 = 1300 \text{ [g/cm}^2\text{]}$, a nie $910 \text{ [g/cm}^2\text{]}$ jak to wynika ze wzoru ().

2. Cel doświadczenia.

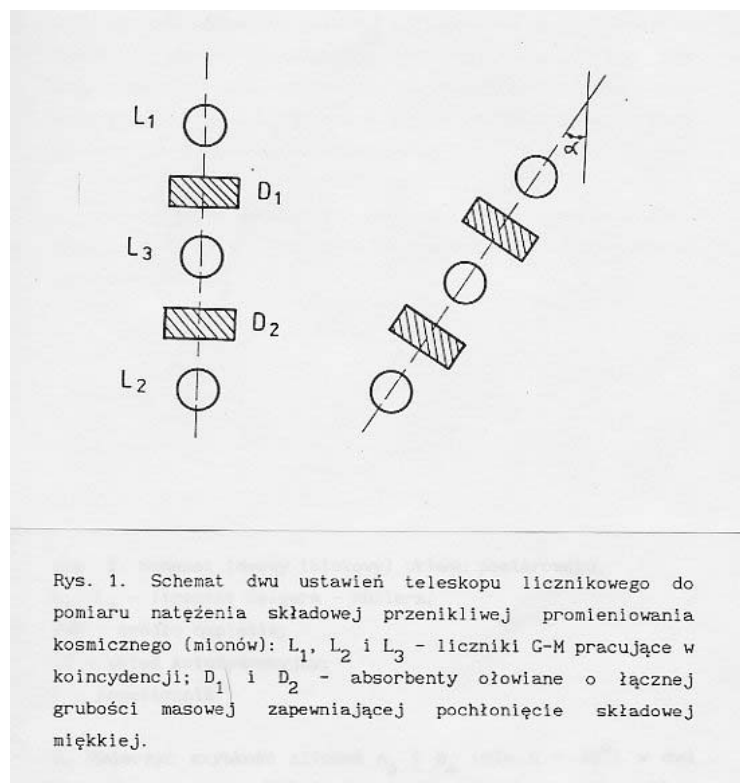
Celem doświadczenia jest pomiar I_0 oraz I_α .

3. Technika pomiarów.

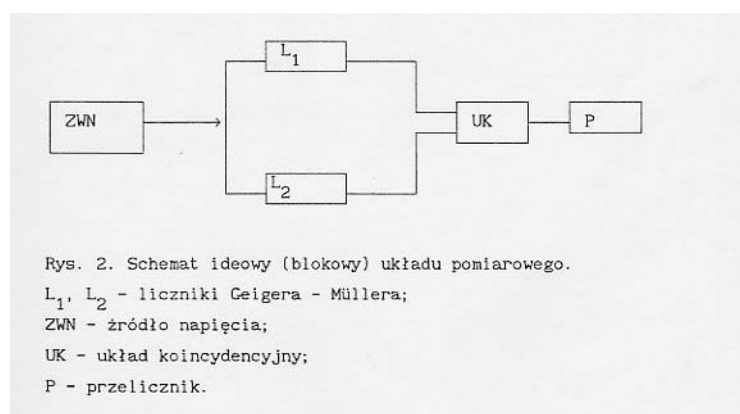
- a) Zapoznać się z układem pomiarowym, a w szczególności sprawdzić obecność absorbentów ołowianych między górnymi i dolnymi licznikami teleksopu, oraz przećwiczyć sposób justowania (ustawiania w odnośnej pozycji) teleskopu (przed podłączeniem zasilania liczników).

Uwaga:

Użyty w ćwiczeniu teleskop posiada dwie grupy liczników (górną i dolną) połączonych tak, że działają one jak pojedyncze liczniki o większych rozmiarach poprzecznych (odpowiedniki L_1 i L_2 , nie ma L_3), mamy tu licznik dwuteleskopowy.



b) Włączyć układ zasilający w obecności prowadzącego. Schemat ideowy układu pomiarowego przedstawia poniższy rysunek:



b) Zmierzyć szybkość zliczeń n_0 oraz n_α (dla $\alpha = 45^\circ$) w dwu seriach pomiarowych. W każdej serii pomiar n_0 prowadzić w ciągu 1 godziny, a n_α w ciągu 1,5 godziny.
 Komentarz:
 Student przeprowadza jedną serię pomiarową (ze względu na czas trwania ćwiczenia), a jako wynik drugiej serii przyjmuje wyniki uzyskane wcześniej przez innego studenta – otrzymuje je od Opiekuna Technicznego pracowni.

4. Opracowanie wyników.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych n_0 i n_α należy obliczyć dla każdej serii pomiarowej oddzielnie i dla średnich z obu serii następujące wielkości:

a) Posługując się wzorem (16) obliczyć średni czas życia mionów w układzie związanym z Ziemią.

- b) W oparciu o wzór (28) obliczyć czas życia mionów w układzie, w którym są one w spoczynku.
- c) Korzystając ze wzoru (17) oszacować średnią prędkość mionów, które lecąc z kierunku określonego kątem α przeszły przez liczniki teleskopu.
- d) Doświadczenie pokazuje, że zależność natężenia składowej przenikliwej od kierunku ich lotu przy powierzchni Ziemi spełnia zależność

$$I_{\alpha} = I_0 \cos^n(\alpha).$$

Obliczyć wartość wykładnika n wynikającą z przeprowadzonych pomiarów(n_0, n_{α}).