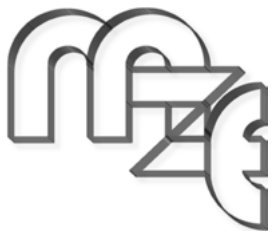


CREDO-Maze: promieniowanie kosmiczne w każdej szkole

Tadeusz Wibig



Artykuł ten jest pierwszym z serii poświęconej projektowi „Kosmos widziany z Łodzi”. Jest to realizacja pilotażowego etapu znacznie większej akcji udostępniania młodzieży nowoczesnej aparatury naukowej mającej w końcowym efekcie poka-

zać, a może i nauczyć młodych, ciekawych świata ludzi metod jakimi posługuje się współczesna nauka w poszukiwaniu praw rządzących Wszechświatem. Aparatura ta ma stać się zaczątkiem, a właściwie istotnym rozwinięciem projektu CREDO (Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory) i wszyscy, którzy przyłączą się do nas staną się uczestnikami niezwykłej podróży w nieznaną zakamarki Kosmosu.

Projekt, o jakim mówimy, nie jest projektem stricte naukowym. Chcemy podarować Wam, nauczycielom pracującym z uzdolnionymi młodymi ludźmi aparaturę, która może być wykorzystana nie tylko do uprawiania Nauki (przez duże „N”), ale może znaleźć zastosowanie w zwykłym nieciekawym i nudnym procesie uczenia fizyki w szkole. Daje ona możliwości naocznego poznania fizyki współczesnej, fizyki cząstek elementarnych, zetknięcia się bezpośrednio z teorią względności i przekonania się, że fizyczny diabeł nie jest tak straszny, jak go czasem sami sobie malujemy.

Projektowi „Kosmos widziany z Łodzi” patronuje „Fizyka w Szkole (z astronomią)”, przez co mamy nadzieję dotrzeć do dużego grona Czytelników. Aktualnie finansuje go Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego i Ministerstwo Edukacji i Nauki (SONP/

SN/516075/2021). Pilotaż obejmuje ustawienie w 10 liceach aparatury mierzącej wielkie pęki promieniowania kosmicznego. Ponieważ mamy nadzieję, że na tym się nie skończy, prosimy i zachęcamy zaciekawione, a może nawet i zainteresowane osoby, nauczycieli o kontakt z nami. Im więcej nas będzie, tym łatwiej będzie zrobić następny krok i podjąć kolejne wyzwania. Kontakt dla zainteresowanych tadeusz.wibig@uni.lodz.pl, a strona to <https://fundacja.uni.lodz.pl/index.php/kosmos-widziany-z-lodzi/>

Promieniowanie kosmiczne

Dwa lata temu w serii artykułów w „Fizyce w Szkole” opowiedzieliśmy w dużym oczywiście skrócie historię odkrywania promieniowania kosmicznego w jego wielkopętkowym aspekcie (co znaczy „wielkopętkowy”, wyjaśni się samo niebawem). Dla tych, którzy nie pamiętają, albo co gorsza nie czytali tych tekstów przypominamy, że promieniowanie kosmiczne to strumień cząstek dochodzący do Ziemi z przestrzeni pozaziemskiej. Zależnie od energii tych cząstek mogą one pochodzić ze Słońca, z rozmaitych obiektów z naszej Galaktyki, a nawet spoza niej. Cząstki te, tak czy inaczej, muszą przebyć długą drogę, a więc muszą być z natury swojej stabilne. W świecie wokół nas nie ma ich wiele. Mogą to być fotony. Na pewno fotony z kosmosu docierają do nas. To dzięki nim widzimy gwiazdy na niebie, ale poza tymi z zakresu widzialnego dociera do nas prawie całe widmo promieniowania elektromagnetyczne od fal radiowych do promieniowania X i gamma.

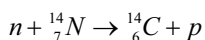
Historycznie rzecz biorąc jest to dziedzina astronomii. Innymi cząstkami, których możemy się spodziewać w strumieniu kosmicznym są elektrony. Są one oczywiście trwale i niewątpliwie podróżują przez Wszechświat trafiając czasem na Ziemię. Po drodze dość szybko tracą jednak energię w polach magnetycznych obecnych wszę-

dzie i w zderzeniach z materią, która jednak jest, choć w znikomej masie w pustce kosmicznej i jest ich w sumie niewiele. Niewiele w porównaniu z protonami. Tych jest najwięcej. Protony są jądrami atomów wodoru, a wszyscy wiemy, że na początku był tylko wodór i ciągle jest go we Wszechświecie najwięcej.

Poza jądrami wodoru w promieniowaniu kosmicznym znaleźć można praktycznie całą tablicę Mendelejewa, bo niby dlaczego nie. Mamy w ten sposób niejako bezpośredni dowód, że inne gwiazdy, inne systemy słoneczne, Galaktyka zbudowane są z takiej samej materii co my sami. Żeby przedstawić sytuację w sposób kompletny można jeszcze wspomnieć o neutrinach, które też są stabilne i które oczywiście także do Ziemi z kosmosu docierają. Jest ich sporo, a przynajmniej ta nam się wydaje, bo zauważenie neutrina jest niezwykle trudne. Przechodzi ono przez nasze detektory, przez Ziemię całą, a nawet przez Słońce jak przez masło.

Podsumowując możemy powiedzieć, że promieniowanie kosmiczne to głównie strumień jąder atomowych, w tym w większości protonów. O ich energiach mówiliśmy we wspomnianych artykułach w „Fizyce w Szkole”. Przypominamy, że najniższe są tak małe, że zderzając się z atomami atmosfery, gdy już dotrą do jej górnych warstw jedynie tracą swoją energię jonizując, wzbudzając cząsteczki atmosferycznych gazów. I tu wychodzi estetyczny efekt promieniowania kosmicznego: tak powstają polarne zorze. Ale mamy i efekty praktyczne: choćby w archeologii.

Promieniowanie kosmiczne o odrobinę większej energii niż to wzbudzające do świecenia atomy zderzając się z jądrami atmosfery czasem wybija z nich neutrony. Neutrony te mają też niewielkie energie, ale ponieważ są elektrycznie obojętne nie tracą łatwo energii i podróżują w atmosferze, zanim się nie rozpadną. Swobodne neutrony są nietrwałe i żyją mniej więcej 15 minut. W tym czasie może się zdarzyć, że taki neutron napotka na swej drodze jądro azotu, wbije się do środka i wywoła reakcję



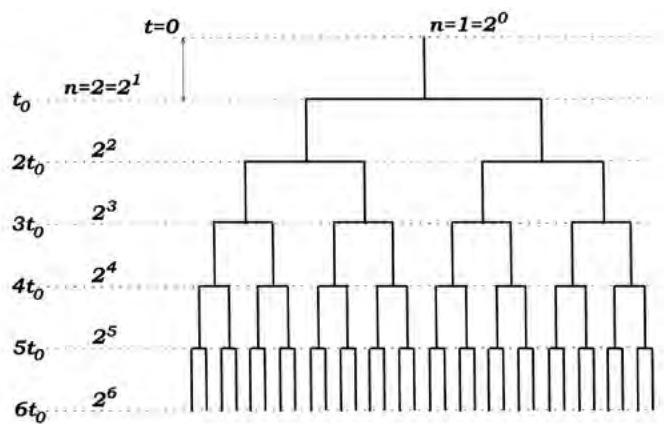
Nie będziemy teraz opowiadać, co dzieje się dalej z węglem ${}^1_6\text{C}$. Powiemy tylko, że w 1960 roku Willard Libby dostał nagrodę Nobla za wymyślenie w 1949 roku metody datowania radiowęglowego.

Promieniowanie kosmiczne niskich energii docierając do granic ziemskiej atmosfery zderza się z jądrami atomowymi cząsteczek powietrza i jeśli energia jest dostatecznie duża może wyprodukować „z niczego” zupełnie nowe cząstki elementarne. Jest to praktyczna realizacja równania Einsteina $E = mc^2$. Cząstki te znane są ludzkości od niedawna. Wokół nas ich nie ma, bo żyją bardzo krótko. Rozpadają się na coraz to mniejsze, aż najczęściej kończą jako niemal niezauważalne neutrino, fotony i elektrony, albo miony, zwane też ciężkimi elektronami z tym, że mionów powstaje znacznie mniej, są dużo cięższe i wytworzyć je „z niczego” jest trudniej. Oddziałują one niby tak samo jak elektrony, z tym, że jako cięższe, oddziałują niechętnie i tracą energię bardzo wolno i bez przeszkód przechodzą przez całą atmosferę i przenikają w ogóle przez materię dość łatwo.

Kaskady elektromagnetyczne

Zajmijmy się elektronami i fotonami, bo to jest znacznie ciekawsze. Mają one małe szanse dotarcia z samej góry atmosfery do powierzchni ziemi. Po drodze oddziałują one i oddziałują tworząc kolejne generacje fotonów i elektronów o zmniejszającej się coraz bardziej energii.

Wyobraźmy sobie, że na szczycie atmosfery ($t = 0$) pojawia się jeden elektron (albo foton, to prawie wszystko jedno, mówmy „cząstka”) o energii E . Spodziewamy się, że po jakiejś drodze, powiedzmy t_0 , na skutek oddziaływań elektromagnetycznych z jądrami atmosfery wytworzy on „z niczego” jedną jeszcze cząstkę. Ponieważ energia musi się zachowywać, przyjmijmy dla uproszczenia, że obie będą miały energię $E/2$. Każda z nich po następnej drodze t_0 wytworzy po jeszcze jednej cząstce. I tak dalej i dalej. Sytuację tę ilustruje rysunek.



Jeśli zanalizować sytuację dokładniej możemy stwierdzić, że po zrobieniu n kroków, czyli po przejściu drogi $t = nt_0$, liczba cząstek wynosi już

$$N(t) = 2^n = 2^{t/t_0}$$

i każda z tych cząstek będzie miała energię

$$E(t) = E_0 \times (1/2)^n = E_0 \times 2^{-t/t_0}$$

Oczywiście taka kaskada nie będzie rozwijała się w nieskończoność, bo w końcu energia każdej z cząstek będzie zbyt mała, aby „z niczego” wytworzyć nowy elektron. Tak naprawdę kaskada kończy się wcześniej, bo powolne elektrony przebijając się przez materię bardzo szybko tracą energię jonizując atomy ośrodka. Zarówno rachunki, jak i eksperymenty pokazały, że proces gwałtownych strat dla elektronów w powietrzu zaczyna się gdzieś w okolicy 100 MeV. Energię tę nazywa się energią krytyczną. „MeV” – „mega elektronowolt” to jednostka energii używana w fizyce jądrowej. 1 eV to energia jaką cząstka naładowana ładunkiem jednego elektronu uzyskałaby przyspieszając na różnicy potencjałów 1 V. To niedużo, mniej więcej tyle, ile niosą fotony światła widzialnego, czyli te, które pobudzają impulsy nerwowe w siatkówce naszego oka. Energia krytyczna 100 MeV to sto milionów razy więcej.

Odległość od szczytu atmosfery do punktu, w którym cząstki osiągną energię krytyczną jest równa

$$t_{max} = t_0 \times \ln_2(E_0 / E_{kr})$$

i liczba cząstek w tym momencie to

$$N_{max} = E_0 / E_{kr}$$

Oczywiście przedstawiona wyżej teoria jest bardzo grubym przybliżeniem rzeczywistości, ale w sumie coś w tym jest. Jeśli znamy drogę, średnią drogą na oddziaływanie i energię krytyczną możemy powiedzieć, ile energii musi mieć cząstka promieniowania kosmicznego, by jej konsekwencje w postaci kaskady cząstek dotarły do powierzchni ziemi.

A teraz zastanówmy się przez chwile, jak można by takie kaskady zaobserwować.

Oczywiście trzeba by dysponować odpowiednimi detektorami cząstek. We wspomnianym tekście o odkrywaniu promieniowania kosmicznego poświęciliśmy temu zagadnieniu sporo miejsca i odsyłamy do niego zainteresowanych szczegółami. Teraz zajmiemy się jednym ze sposobów zobaczenia szybko przelatującej koło nas cząstki elementarnej jest zastosowanie w tym celu zjawiska scyntylacji, a konkretniej scyntylacji w przezroczystych substancjach organicznych.

Przelatująca przez materię cząstka naładowana, właśnie dlatego, że niesie ze sobą ładunek elektryczny mijając elektrony związane z atomami, z których składają się cząsteczki materii oddziałuje z nimi, wybija ze swoich ustalonych pozycji przenosząc na wyższe poziomy energetyczne i po przejściu pozostawia za sobą rozmieszczone wzdłuż jej drogi cząsteczki wzbudzone, które bardzo chętnie i prawie natychmiast powracają do swoich stanów podstawowych emitując przy tym nadmiar energii, jakie uzyskały w zderzeniach.

Istnieją takie (przezroczyste) ciała, w których powroty te odbywają się poprzez emisję kwantów światła i to w obszarze widzialnym, albo nieco bardziej w stronę ultrafioletu. Jest to zwykłe światło, które moglibyśmy zobaczyć własnymi oczami (gdyby działały w ultrafiolecie – a nie działają!), a na pewno takie, które moglibyśmy zarejestrować urządzeniami elektronicznymi w rodzaju kamer aparatów fotograficznych w naszych smartfonach. Moglibyśmy, ale właściwie nie możemy. Światła tego jest niesłychanie mało. Ilość jego można by mierzyć w pojedynczych fotonach, a tego żadne oko nie zarejestruje. Ale od czegoś pomysłowość ludzka i nasza innowacyjność. Potrzeba jest matką wynalazku i skoro potrzebowaliśmy rejestrować pojedyncze fotony, wymyślono specjalne przyrządy pozwalające to robić.

Detektory

Przez wiele lat najczulszymi detektorami światła były fotopowielacze, specjalne lampy elektronowe z kilkunastoma elektrodami wewnątrz wzmacniające sygnały miliony razy. Miały one jednak swoje wady, podobnie jak „zwykłe” lampy elektronowe, których pełne były dawne radia i telewizory. Dziś już tego nie ma, zastąpiły je układy półprzewodnikowe. I tak też się stało z detektorami światła. Zamiast fotopowielaczy możemy dziś stosować stosunkowo proste i tanie fotopowielacze krzemowe, które będziemy dla wygody dalej nazywać SiPMami.

SiPM zmienia nikły strumień światła wpadający w małe, o rozmiarach mierzonych w milimetrach, okienko w impuls

elektryczny. Aby efektywnie doprowadzić fotony powstałe we wzbudzeniach cząstek scyntylatora do mierzącego powiedzmy 1 mm² okienka SiPMa trzeba zastosować jeszcze jedną technologiczną innowację ostatnich lat: światłowody. Oczywiście światłowody są dziś powszechne i ich rola w technologiach telekomunikacyjnych jest olbrzymi, ale takie telefoniczne światłowody nie bardzo nadają się do celów transmisji światła w detektorach cząstek.

Potrzebne nam światłowody nie tylko mają transmitować światło z jednego końca do drugiego, ale mają je także zbierać z otoczenia. Muszą więc być znacznie grubsze. Najlepiej oczywiście, jakby miały przekrój odpowiadający okienku SiPMa i takie właśnie światłowody się produkuje w kilku miejscach na świecie. Dodatkowo ich konstruktorzy pomyśleli, że aby działały skuteczniej, dobrze by było, aby absorbowały światło ultrafioletowe, o którym wspominaliśmy i zmieniały je w najlepiej widoczny dla SiPMa kolor zielonkawy. Wszystko to zastosowaliśmy w detektorach naszego projektu CREDO-Maze.

Sygnały elektryczne generowane przez SiPMy są bardzo małe. Aby używać je praktycznie trzeba je wzmocnić i odpowiednio uformować. Potem można już mierzyć ich wielkość, notować czas pojawienia się. Można przyglądać się im próbując dostrzec coś więcej.

My chcemy rejestrować cząstki naładowane generowane przez promieniowanie kosmiczne w atmosferze. Wiemy, że cząstki te mają duże energie i poruszają się prawie z prędkością światła (w próżni). Nazywamy je relatywistycznymi. To, czy prędkość to to 0.999×c, czy 0.999999×c to z punktu widzenia cząsteczek scyntylatora wszystko jedno. Wszystkie cząstki relatywistyczne wzbudzają je tak samo. Co więcej, wielkość tego wzbudzenia nie zależy nawet od tego, jaka to cząstka (o ile tylko jest dostatecznie relatywistyczna). Wynika z tego, że ilość światła emitowana przez scyntylator przy przechodzeniu przez jedną relatywistyczną cząstkę jest zawsze z grubsza taka sama. W związku z tym mierząc wielkość sygnału z SiPMa moglibyśmy stwierdzić, ile pękowych cząstek trafiło w nasz detektor.

Pomiary

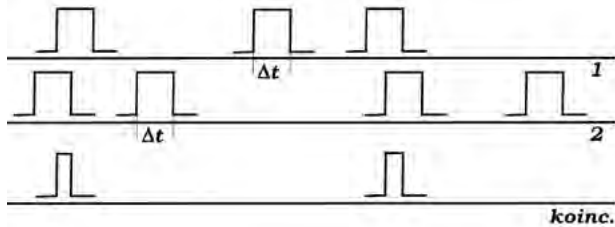
Zmierzenie wielkości malutkiego i bardzo krótkiego sygnału nie jest łatwe, ale ludzie to robią. Robią to naukowcy budujący wielkie aparatury wielkopękowe na świecie. My postanowiliśmy tego jednak nie robić. Mierzenie wielkości sygnału ma sens wtedy, gdy spodziewamy się często obserwować przypadki, gdzie cząstek w detektorze będzie wiele. Nasze detektory są niewielkie. Postanowiliśmy używać scyntylatorów prostokątnych o wymiarach 10 na 20 cm, czyli o powierzchni 0.02 m². Aby w taki detektor trafiło 10 cząstek, to ich gęstość na powierzchni ziemi powinna być około 500 na metr kwadratowy. Albo więc byłby to bardzo duży pęk, albo mniejszy, ale taki, którego oś byłaby bardzo blisko detektora.

Obie te możliwości zdarzać się będą stosunkowo rzadko. Jeśli w naszą aparaturę trafi wielki pęk atmosferyczny, to najczęściej nasz detektor będzie trafiony jedną cząstką (albo i wcale). Oczywiście strumień cząstek niestowarzyszonych z wielkimi pękami, czyli takich, które ostały się

z pęków niewielkich, które w atmosferze dawno zanikły zawsze będzie trafiał w detektor cząstkami pojedynczymi. Nie ma sensu strzelać z armaty do wróbli. Nie ma sensu komplikować układów elektronicznych ponad miarę. To zawsze kosztuje, a my mamy inne priorytety.

Wiadomo, że elementy światłoczułe „szumią”. Pojawiają się w nich elektroniczne szумы, niewielkie sygnały generowane raz na jakiś czas przez drgania termiczne materii, z jakiej się składają. Można się ich pozbyć schładzając intensywnie nasze SiPMy. To jedna droga, kosztowna i kłopotliwa. My zasadniczo nie będziemy na nie zwracać uwagi dzięki temu, że jesteśmy bardzo sprytni i wyposażyliśmy nasze detektory w dwa światłowody i w dwa SiPMy i do dalszej analizy wybierać będziemy tylko takie przypadki, gdy oba SiPMy jednocześnie zarejestrowały błysk.

Chcąc sytuację rozważyć dokładnie, ilościowo przyjmijmy, że mamy dwa źródła zupełnie niezależnych sygnałów. Pierwszy daje ich R_1 na sekundę, a drugi R_2 . Jednocześnie w rozumieniu układu elektronicznego to stwierdzenie, że dwa sygnały pojawiły się w czasie krótszym niż Δt . Rysując to na linii czasu mamy



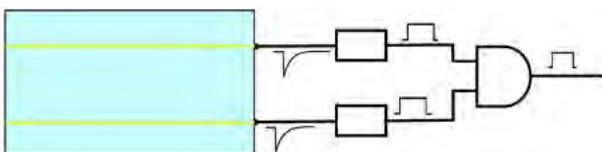
Uwzględniając, że sygnał z pierwszego SiPMa może raz pojawić się o Δt wcześniej w raz później o Δt w stosunku do sygnału z drugiego SiPMa każde pojawienie się każdego sygnału z pierwszego źródła (a jest ich średnio R_1) otwiera bramkę czasową o długości ($2\Delta t$). W sumie bramka otwarta jest zatem średnio na czas $R_1 \times (2\Delta t)$. Każdy z losowo pojawiających się sygnałów z drugiego źródła (a jest ich średnio R_2) może w nią trafić lub nie. Liczba trafień jest zatem równa

$$R_{koinc.} = R_1 \times R_2 \times (2\Delta t)$$

Ilość sygnałów wychodzących z każdego SiPMa to powiedzmy jakieś 30000 na sekundę (mówimy o częstości szumów 30 kHz), a po układzie koincydencyjnym każdy detektor opuszcza mniej niż ~200 sygnałów na sekundę (200 Hz).

Zachodzi pytanie, czy te 200 sygnałów to zawsze są sygnały generowane przez jakieś istotne fizyczne przyzyny, czyli głównie przez przejście przez scyntylator cząstki naładowanej (kosmicznej, lub nie). Aby to obliczyć musimy wiedzieć, poza częstością sygnałów wchodzących do bramki AND, jaka jest długość uformowanych sygnałów w każdym kanale. W naszym przypadku to 200 ns (2×10^{-7} s).

Detektor i jego logika przedstawiona jest na rysunku.



Aparatura wielkopękowa

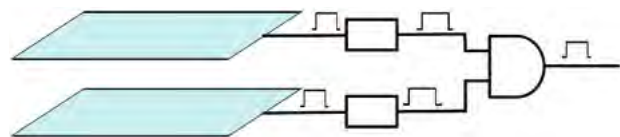
Aparatura wielkopękowa, jaką chcemy zbudować w Waszej szkole składać się będzie z czterech takich detektorów rozstawionych w niewielkich (~10 m) odległościach od siebie i prostego układu rejestrującego ciekawe przypadki. Oczywiście przejście pojedynczej cząstki przez licznik jest też ciekawym przypadkiem. Jest tych przypadków jednak kilkadziesiąt na sekundę. Odpowiadają one pojedynczym cząstkom wtórnym promieniowania kosmicznego, o jakich wspominaliśmy. Będziemy je zliczać, zapisywać i w planach mamy system monitorowania pogody kosmicznej, ale o tym przy innej okazji. Ciekawszymi przypadkami będą jednoczesne trafienia jakiś cząstek w dwa (trzy/cztery) detektory. Będzie to znaczyło, że najpewniej właśnie nasza aparatura trafiona została przez wielki pęk. Takie trafienia nie będą zbyt częste. Informacja o tym będzie oczywiście zapisywana, transmitowana do głównej bazy danych projektu CREDO, gdzie będą ją mogli uwzględnić w swoich pracach fizycy, ale będzie ona też dostępna całemu światu, jeśli tylko świat będzie chciał ją wykorzystać. O szczegółach powiemy przy innej okazji.

Zanim aparatura w Waszej szkole zacznie wysyłać w świat wyniki swoich rejestracji, trzeba ją oczywiście w Waszej szkole postawić i to jest mały problem, ale potem trzeba ją przetestować i upewnić się, czy wszystko działa jak należy. W tym celu przewidzieliśmy całą serię testów, które przeprowadzić będziecie musieli przeprowadzić sami. Oczywiście będziemy służyć Wam wszelką pomocą, radą, ale nie wątpimy, że po krótkim instruktażu dacie sobie doskonale radę.

Pierwszym testem jest sprawdzenie, czy nasze detektory rzeczywiście reagują na przychodzące z góry cząstki wtórnego promieniowania kosmicznego w szczególności miony, ale nie tylko.

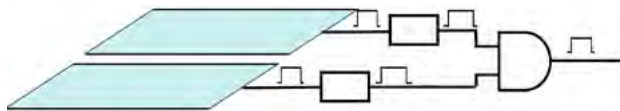
W tym celu dwa spośród czterech detektorów należy ustawić w układ, który nazywać będziemy teleskopem: jeden nad drugim, w pierwszym teście z możliwie małym odstępem. Pokazane jest to na rysunku.

Każdy detektor ma wewnątrz, jak mówiliśmy, układ generujący sygnał przy jednoczesnym pojawieniu się impulsu z obu SiPMów. Układ taki nazywa się koincydencyjnym. Sygnały z obu detektorów teleskopu podane są ponownie tym razem do innego, zewnętrznego do układu koincydencyjnego i ostatecznie rejestrujemy sygnał w przypadku, gdy przez scyntylatory górnego i dolnego detektora przeszła cząstka naładowana.



Oczywiście w układzie tym pojawiać się mogą sygnały przypadkowe. Omawiany wyżej szum. Do oszacowania, jakich częstości sygnałów szumowych możemy się spodziewać musimy poznać częstość sygnałów wychodzących niezależnie z górnego i dolnego detektora i musimy wiedzieć, jak długa jest bramka zewnętrznego układu koincydencji. Częstości musimy zmierzyć, a o bramce mu-

simy zasięgnąć informacji od konstruktorów elektroniki naszej aparatury. Aktualnie wynosi on 100 ns, czyli 10^{-7} s. To bardzo mało. Jeśli detektory wysyłają sygnały w ilości mniej więcej 100 na sekundę (100 Hz), to policzona ze wzoru: $R_{koinc.} = R_1 \times R_2 \times (2\Delta t)$ częstość szumów wynosi 0.002, czyli jedno przypadkowe zdarzenie raz na jakieś 10 minut. Warto to zapamiętać, gdy będziemy interpretować wyniki właściwego testu.



Aby definitywnie przekonać niedowiarków, że rzeczywiście mierzymy cząstki promieniowania kosmicznego wystarczy postawić te dwa detektory obok siebie:

W takiej konfiguracji nie możemy się spodziewać, że jedna cząstka kosmiczna wywoła wzbudzenie w obu detektorach. Zachodzi bardzo poważne pytanie: a co będzie, gdy cząstki promieniowania kosmicznego przychodzą do powierzchni ziemi parami (co najmniej)? Aby kwestię tę rozstrzygnąć trzeba odwołać się do doświadczenia.

Doświadczenie

Jeśli pomiar taki przeprowadzony w budynku, gdzie ponad detektorami znajdują się grube betonowe stropy, detektory nasze zareagują jedynie na przychodzące z góry miony wysokich energii, bo te są, jak już wspomnieliśmy, bardzo przenikliwe.

Jeśli detektory wyniesiemy spod dachu i ustawimy na świeżym powietrzu, ewentualnie pod cienkim drewnianym dachem, będziemy mierzyć jednocześnie i miony, i elektrony. Możemy się zatem spodziewać różnic w obu tych przypadkach. Doświadczenie, którego wyniki przedstawiamy poniżej w wykonane zostało przez grupę uczniów z XXXI LO w Łodzi Annę Ways, Natalię Marciniak, Lenę Woźną i Emilię Krzelowską pod opieką nauczyciela fizyki profesora Krzysztofa Michałowskiego.

Koleżanki dysponowały czterema detektorami, z których każdy miał nieco inny bieg własny. Określono go z grubsza mierząc oscyloskopem liczbę zliczeń na sekundę R_i . Ze odpowiedniego wzoru wyliczono spodziewaną liczbę koincydencji przypadkowych $R_{koinc.}$. Detektory ustawiona w linii najpierw ten z numerem „1”, potem w odległości 70 cm detektor „2” i potem jeden na drugim ustawiono detektory „3” i „4”.

Tabela przedstawia w pierwszych pięciu wierszach porównanie spodziewanej liczby przypadkowych koincydencji dla detektorów leżących obok siebie z wynikami pomiarów przeprowadzonych pod dachem i na wolnym powietrzu. Pomiar wykonywano przez jedną godzinę i liczbę przypadkowych koincydencji przeliczono na spodziewaną liczbę przypadków na godzinę.

I już można z naszego doświadczenia wyciągnąć pierwsze fizyczne wnioski. Na początku wypada stwierdzić, że to wszystko, co mówiliśmy wyżej wydaje się znajdować swoje potwierdzenie w wynikach wykonanych pomiarów.

Po pierwsze pomiar na dworze pokazuje, że raczej nie mamy do czynienia z pojawianiem się rejestracji czą-



stek jednocześnie w obu detektorach. A przynajmniej nie dzieje się to na tyle często, aby można to było zauważyć w przeciągu godziny.

Po drugie takie samo ustawienie detektorów, ale pod kilkoma piętrami betonowych stropów powoduje, że liczba przypadków jednoczesnej obserwacji cząstek w detektorach położonych obok siebie znacznie wzrasta. Jedynym wytłumaczeniem tego faktu może być to, że coś się dzieje z cząstkami promieniowania kosmicznego we wspomnianych betonowych stropach. Jest to na tyle ciekawe, że wymaga dodatkowych badań.

Dociekliwi przypatrując się różnicom liczby rejestracji „pod dachem” i przykładając to do geometrii układu pomiarowego mogą zauważyć jeszcze jeden fakt: detektory z pary detektorów 1-2, tak jak i 2-3 i 2-4 były oddalone od siebie o 70 cm i wykazują nieco więcej zliczeń niż pary 1-3 i 1-4 o odstępnie między detektorami 140 cm. Efekt ten także wymaga dodatkowych badań i pomiarów.

W ostatnim rzędzie tabeli pokazano liczbę zliczeń detektorów ułożonych jeden nad drugim, a więc, zgodnie z naszą koncepcją liczbę cząstek promieniowania kosmicznego trafiających w detektory. W tym przypadku liczba rejestracji na wolnym powietrzu jest znacznie, niemal dwa razy większa od liczby zliczeń pod dachem. Mogłoby to oznaczać, że betonowe stropy pochłaniają sporą część dochodzącego do powierzchni ziemi wtórnego promieniowania kosmicznego. Zbadanie stopnia i wielkości tego pochłaniania wymaga oczywiście dodatkowych pomiarów i badań.

detektory	R_1	R_2	$R_{koinc.}$	pomiar na dworze	pomiar pod dachem
1-2	130	180	16.8	18	95
1-3	130	130	12.1	12	34
1-4	130	90	8.4	8	31
2-3	180	130	16.8	14	60
2-4	180	90	11.6	5	54
średnio:			13.4	11.4	54.8
3-4	130	90	8.4	6404	3774

Jak widać już taki prosty eksperyment przynosi zupełnie nieoczywiste wyniki. Mieliśmy doskonały przykład na to, że poznanie odpowiedzi na jedno pytanie rodzi pytania nowe i tak być powinno. Na tym polega cała zabawa, zabawa w fizykę.

Tadeusz Wibig,

Katedra Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Łódzkiego