



**Wydział  
Fizyki**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

# Promieniowanie kosmiczne

Opracowanie zaliczeniowe z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe  
rok akademicki 2022/23

autor:  
Jakub Włodarczyk

prowadzący:  
prof. dr hab. Jan Pluta

WARSZAWA 2022



# Spis treści

---

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Promieniotwórczość</b>	<b>7</b>
2.1	Pojęcia podstawowe . . . . .	7
2.2	Wielkości charakteryzujące promieniowanie jonizujące . . . . .	10
2.3	Średnia roczna dawka skuteczna - konsekwencje . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Odkrycie promieniowania kosmicznego</b>	<b>15</b>
3.1	Rys historyczny . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Czym jest promieniowanie kosmiczne?</b>	<b>19</b>
4.1	Promieniowanie kosmiczne . . . . .	19
4.2	Promieniowanie pierwotne . . . . .	20
4.2.1	Skład, intensywność i energia . . . . .	21
4.2.2	Zmiany natężenia promieniowania kosmicznego z wysokością w atmosferze i z głębokością poniżej poziomu morza . . . . .	25
4.3	Promieniowanie wtórne . . . . .	27
4.3.1	Kaskady elektronowo-fotonowe . . . . .	29
4.3.2	Kaskady hadronowe . . . . .	30
4.3.3	Szerokie pęki atmosferyczne . . . . .	32
4.4	Źródła promieniowania kosmicznego . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Metody obserwacji promieniowania kosmicznego</b>	<b>37</b>
5.1	Badanie własności promieniowania kosmicznego . . . . .	37
5.2	Obecne sposoby rejestrowania promieniowania kosmicznego . . . . .	41
5.2.1	Metody bezpośrednie . . . . .	41
5.2.2	Metody pośrednie . . . . .	41
5.2.3	Eksperymenty badające promieniowanie kosmiczne . . . . .	41

5.3	Oddziaływanie promieniowania kosmicznego z materią . . . . .	45
5.3.1	Cząstki naładowane elektrycznie . . . . .	45
5.3.2	Cząstki neutralne o masach równych lub bliskich zeru . . . . .	46
5.3.3	Cząstki neutralne o masach niezerowych . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Promieniowanie kosmiczne a człowiek</b>	<b>49</b>
6.1	Wpływ promieniowania kosmicznego na człowieka . . . . .	49
6.1.1	Wpływ na elektronikę . . . . .	49
6.1.2	Loty samolotowe i kosmiczne . . . . .	51
6.1.3	Postulowany wpływ na zmianę klimatu . . . . .	53
6.2	Zastosowania promieniowania kosmicznego . . . . .	53
6.2.1	Prześwietlanie piramid . . . . .	54
6.2.2	Rejestracja fal morskich, przyływów oraz odpływów . . . . .	54
6.2.3	Sprawdzanie bagaży na lotnisku . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Inne ciekawe zjawiska związane z promieniowaniem kosmicznym</b>	<b>57</b>
7.1	Okresowe zmiany natężenia promieniowania kosmicznego . . . . .	57
7.1.1	Wariacje dobowe . . . . .	58
7.1.2	Wariacje 27-dobowe . . . . .	59
7.1.3	Wariacje 11 letnie . . . . .	60
7.2	O mionach, elektronach i fotonach – cząstkach docierających do Ziemi z promieniowania kosmicznego . . . . .	61
7.2.1	Miony . . . . .	61
7.2.2	Elektrony . . . . .	63
7.2.3	Fotony . . . . .	63
7.2.4	Cząstka Oh My God . . . . .	64
7.3	Zjawiska geomagnetyczne, a promieniowanie kosmiczne . . . . .	65
7.4	Neutrino kosmiczne . . . . .	67
7.4.1	Czym są neutrino? . . . . .	67
7.4.2	Neutrino słoneczne . . . . .	68
7.4.3	Neutrino atmosferyczne . . . . .	70
7.4.4	Mikrofalowe promieniowanie tła (promieniowanie reliktove) . . . . .	70
<b>8</b>	<b>Zakończenie</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Określenia wielkości charakteryzujących promieniowanie kosmiczne pierwotne</b>	<b>77</b>
A.1	Natężenie i strumień . . . . .	77
A.2	Całkowe i różniczkowe widmo energetyczne . . . . .	79

# Rozdział 1

## Wstęp

---

Na jednej z francuskich uczelni technicznych „Ecole des Mines de Nantes” przy wejściu do budynku zauważyć można panią-manekin. Ubrana w strój firmowy, wita wszystkich wchodzących do budynku. Widok ten ukazany został na rysunku 1.1. Pani ta wydaje być się zaniepokojona a jej wzrok utkwiony jest na umieszczonej ponad nią lampę. W jej ręku znajduje się niewielka kartka, na której jest coś napisane. Na niniejszej fotografii ciężko dostrzec przesłanie tam zawarte. Informuje ona jednak wchodzących, że lampa błyska, kiedy równocześnie otrzymuje sygnał z dwóch detektorów promieniowania: jeden umieszczony nad, a drugi pod zaniepokojoną kobietą. Lampa błyska w nieregularnych odstępach czasu, średnio – co kilka sekund.

Nie trudno zrozumieć niepokój tej pani. Aby oba detektory równocześnie otrzymały sygnał, to coś musi przez nią przelecieć. Tym czymś jest **promieniowanie kosmiczne** i to właśnie o nim traktować będzie ta praca.



Rysunek 1.1: Pani-manekin witająca odwiedzających uczelnię Ecole des Mines de Nantes. Źródło:[1]

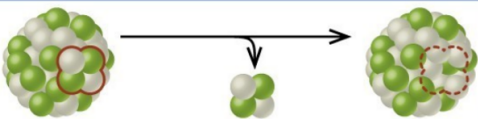
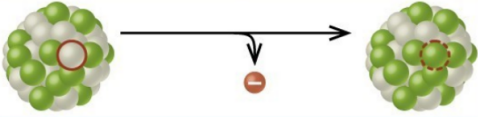
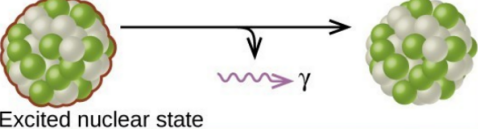
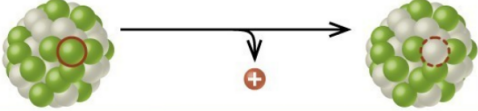


## Rozdział 2

# Promieniotwórczość

### 2.1 Pojęcia podstawowe

Każdy człowiek w każdej sekundzie swojego życia narażony jest na efekty promieniowania. **Promieniotwórczość** jest to zdolność jąder atomowych do rozpadu promieniotwórczego, podczas którego zachodzi emisja cząstek  $\alpha$ ,  $\beta$  lub  $\gamma$  (rys 2.1).

Type	Nuclear equation	Representation	Change in mass/atomic numbers
Alpha decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: decrease by 4 Z: decrease by 2
Beta decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y$		A: unchanged Z: increase by 1
Gamma decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$	 Excited nuclear state	A: unchanged Z: unchanged
Positron emission	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{+1}e + {}^{A}_{Z-1}Y$		A: unchanged Z: decrease by 1

Rysunek 2.1: Rodzaje rozpadów promieniotwórczych. Na rysunku ukazano równania reakcji zachodzących przy poszczególnych rozpadach, jak i liczby masowe **A** oraz atomowe **Z** rozpadających się jąder **X** i produktów rozpadu **Y**. Źródło:[2]

Promieniotwórczość tę podzielić można na dwie kategorie:

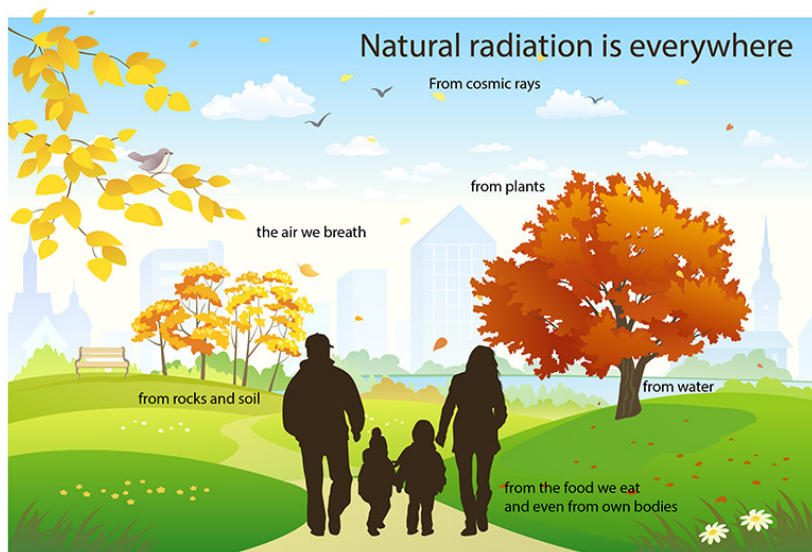
- promieniotwórczość sztuczna
- promieniotwórczość naturalna.

**Promieniotwórczość sztuczna** wynika z działalności człowieka. Są to sztuczne źródła promieniowania, takie jak izotopy promieniotwórcze, czy też urządzenia wytwarzające promieniowanie. Promieniotwórczość sztuczna pochodzi głównie z:

- wybuchów jądrowych przeprowadzanych w atmosferze (dotyczy do testów, które miały miejsce w latach 60. ubiegłego wieku)
- awarii elektrowni jądrowych (awaria w Czarnobylu w 1986 roku, uszkodzenie elektrowni w Fukushima spowodowane tsunami w roku 2011)
- diagnostyki medycznej
- badań naukowych
- przemysłu

**Promieniotwórczość naturalna** jest to promieniowanie jonizujące emitowane przez radionuklidy będące naturalnymi składnikami wszystkich elementów środowiska, ukazane zostało to na rysunku 2.2. W jej skład wchodzi:

- radon (pochodzący z gleby i skał, znajdujący się w powietrzu lub spożywanej wodzie)
- promieniowanie gamma
- promieniowanie kosmiczne
- promieniowanie z ciała człowieka
- toron



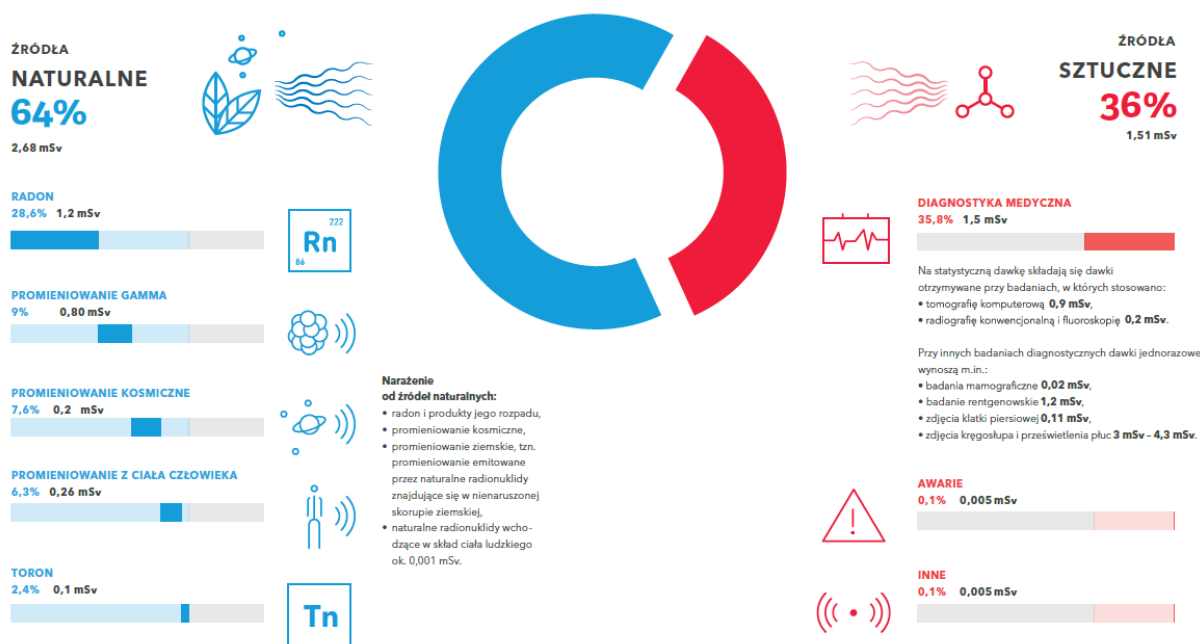
Rysunek 2.2: Naturalne źródła promieniowania obecne we wszystkich elementach środowiska. Źródło:[3]



Największy wkład w promieniowanie naturalne stanowi radon. Izotop tego pierwiastka uwalnia się w skutek rozpadu promieniotwórczego radu, który może znajdować się np. w materiałach konstrukcyjnych budynków. Promieniotwórcze izotopy radonu występujące w stanie gazowym mogą w łatwy sposób dostać się do organizmu człowieka wraz z wdychanym powietrzem. Następnie radon rozpada się w płucach człowieka, który go wchłonął. Jest on szczególnie niebezpieczny, ponieważ płuca nie posiadają żadnej warstwy ochronnej mogącej zaabsorbować promieniowanie  $\alpha$ . Na szczęście, walka z promieniotwórczymi izotopami radonu jest stosunkowo prosta - poprzez regularne wietrzenie pomieszczeń możliwym jest pozbycie się ich.

Innym źródłem promieniowania naturalnego jest promieniowanie kosmiczne, będące wysokoenergetyczną wiązką protonów bądź jąder atomowych. Promieniowanie to, jak sama nazwa wskazuje, pochodzi z kosmosu, a do człowieka docierają jedynie miony, elektrony i fotony.

Infografika na z rysunku 2.3 ukazuje udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej.



Rysunek 2.3: Wkład źródeł naturalnych i sztucznych w średniej rocznej dawce skutecznej. W przypadku odczytu wersji elektronicznej, w celu powiększenia należy nacisnąć kombinację klawiszy CTRL/+. Źródło:[4]

Jak widać na rysunku 2.3, naturalne źródła promieniowania stanowią niemal 2/3 wkładu do całkowitej dawki skutecznej pochłoniętej przez mieszkańca Polski w 2021 roku[4]. Promieniowanie naturalne charakteryzuje się faktem, iż nie da się go uniknąć (rys. 2.2). Radon obecny jest w materiałach budowlanych, glebie i wodzie. Promieniowanie kosmiczne jest również nieodłącznym elementem ludzkiego życia. Człowiek w każdej godzinie swojego życia bombardowany jest setkami cząstek pochodzących z

kosmosu.

Co ciekawe źródłem promieniowania może być również jedzenie, czy też inni ludzie. Tabela 2.1 przedstawia interesujące przykłady źródeł promieniotwórczych.

Źródło	Aktywność promieniotwórcza
banan	125 Bq/kg
mleko	50 Bq/kg
woda morska	12 Bq/kg
granit	7000 Bq/kg
popiół węglowy	2000 Bq/kg
5 letnie dziecko	600 Bq
osoba dorosła (70kg)	10000 Bq

Tabela 2.1: Aktywność promieniotwórcza wybranych substancji. Źródło:[5]

## 2.2 Wielkości charakteryzujące promieniowanie jonizujące

W tabeli 2.1 **aktywność promieniotwórcza** została wyrażona w bekerelach. Jest to jednostka dostarczająca informacji, ile rozpadów promieniotwórczych zachodzi w jednostce czasu. Przykładowo,  $1Bq$  odpowiada jednemu rozpadowi promieniotwórczemu na sekundę:

$$1Bq = 1\text{rozpad}/1s$$

Popularną, historyczną jednostką aktywności promieniotwórczej jest kiur. Jednostka ta została zastąpiona w układzie SI, bekerelem ( $Bq$ ). Zależność między tymi jednostkami, prezentują się następująco:

$$1Ci \approx 3.7 \cdot 10^{10} Bq.$$

1 Ci odpowiadać miał aktywności 1 grama czystego izotopu radu o liczbie masowej 226. Obecnie wiadomo, że radioaktywność 1 gramu radu 226 wynosi w rzeczywistości  $3.66 \cdot 10^{10} Bq$ .

Jednostka ta miała być aktem uhonorowania dziedzictwa małżeństwa Piotra oraz Marii Curie.

W opisie promieniowania jonizującego przydatne okazuje się być pojęcie **dawki pochłoniętej**  $D$ . Określa ona ilość energii  $E$  przekazanej przez promieniowanie jonizujące ciału o masie  $m$ . W przypadku opisu małego elementu tego ciała, wyrażenie to przybiera postać:

$$D = \frac{dE}{dm},$$

gdzie  $dE$  - energia przekazana przez promieniowanie jonizujące materii w elemencie objętości, którego masa dana jest przez  $dm$ .

Dawka pochłonięta wyrażona jest w grejach:  $1Gy = \frac{1J}{1kg}$ .

Inną jednostką stosowaną w opisie promieniowania jest siwert Sv. Za pomocą tej jednostki wyraża się wartość dawki równoważnej oraz skutecznej.

**Dawka równoważna**  $H_T$  określa zależność skutków biologicznych od typu i energii promieniowania. Wielkość ta dana jest wzorem:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

gdzie  $D_{T,R}$  - średnia dawka pochłonięta promieniowania jonizującego przez tkankę lub organ. Indeks  $T$  odnosi się do tkanki danego typu, natomiast indeks  $R$  porusza rodzaj promieniowania oraz jego energię. Wyraz  $w_R$  stanowi czynnik wagowy promieniowania. Przykładowe wartości tego współczynnika, zależne są od typu oraz energii cząstki i ukazane zostały w tabeli 2.2.

Typ cząstki	Energia	Współczynnik wagowy
Fotony		1
Elektrony, pozytony, miony		1
Neutrony	<10 keV	5
	10-100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 - 20 MeV	10
	>20 MeV	5
Protony	>2 MeV	5
Cząstki $\alpha$		20

Tabela 2.2: Tabela ukazująca współczynniki wagowe  $w_R$  promieniowania. Uwzględniony został w niej typ cząstki, jej energia oraz odpowiadający współczynnik wagowy. Źródło:[6]

Natomiast **dawka skuteczna**  $E_H$  jest to suma wszystkich równoważników dawki od narażenia zewnętrznego i wewnętrznego, po uwzględnieniu współczynników wagowych. Wielkość ta określa stopień narażenia całego ciała na promieniowanie nawet przy napromienowaniu tylko niektórych partii ciała. Uwzględnia ona zależność skutków biologicznych od rodzaju tkanki i wyrażona jest wzorem:

$$E_H = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R},$$

gdzie  $H_T$  - równoważnik dawki pochłoniętej,  $D_{T,R}$  - średnia dawka pochłonięta,  $w_R$  - współczynnik wagowy promieniowania R,  $w_T$  - współczynnik wagowy tkanki T.

Zastosowanie współczynnika  $w_T$  pozwala uwzględnić różne stopnie czułości poszczególnych narządów i tkanek z punktu widzenia możliwości wywołania przez promieniowanie skutków negatywnych.

Przykładowe wartości współczynnika  $w_T$  ukazane zostały w tabeli 2.3.

Tkanka lub narząd	$w_T$
Gruzoły płciowe	0.20
Czerwony szpik kostny	0.12
Jelito grube	0.12
Płuca	0.12
Żołądek	0.12
Pęcherz moczowy	0.05
Gruzoły sutkowe	0.05
Wątroba	0.05
Przełyk	0.05
Tarczycyca	0.05
Skóra	0.01
Powierzchnia kości	0.01
Pozostałe	0.05
Całe ciało	1.00

Tabela 2.3: Tabela ukazująca wartości współczynnika  $w_T$  dla różnych typów tkanek lub narządów. Źródło:[7]

## 2.3 Średnia roczna dawka skuteczna - konsekwencje

Wedle danych Państwowej Agencji Atomistyki[4], roczna całkowita dawka skuteczna promieniowania jonizującego otrzymana przez statystycznego mieszkańca Polski w 2021 roku wyniosła 4.19mSv.

Warto wspomnieć, że jest to wartość niewielka i całkowicie bezpieczna dla ludzkiego życia. Szacuje się, iż dawka promieniowania przekraczająca 100mSv w ciągu roku zwiększa ryzyko rozwoju nowotworu złośliwego. Natomiast w przypadku dawek mniejszych niż 10 mSv nie ma żadnych bezpośrednich dowodów potwierdzających zwiększone ryzyko zachorowania na nowotwory złośliwe.

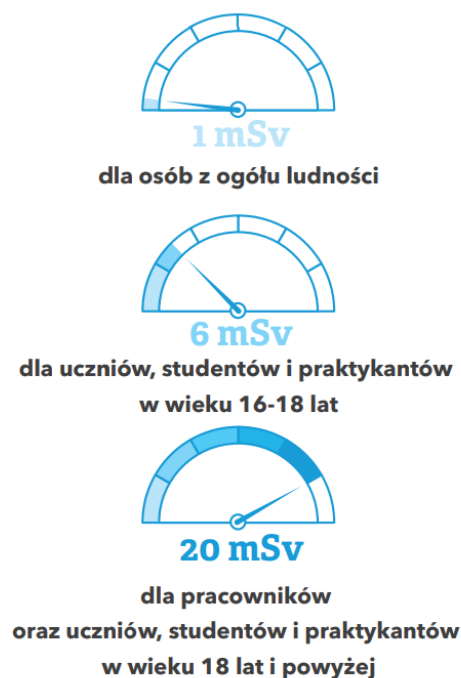
Promieniowanie jonizujące towarzyszyło człowiekowi od zawsze. Jest to czynnik, którego nie da się całkowicie wyeliminować, a jedynie powinny być podejmowane działania mające na celu jego ograniczenie. Wprowadzone i uregulowane prawnie zostały wartości dawki granicznej (limit dawki skutecznej), którą może zabsorbować człowiek w ciągu roku. Wartość ta dotyczy jedynie dawek otrzymanych ze **sztucznych źródeł promieniowania** z pominięciem dawek otrzymanych w ramach diagnostyki medycznej oraz zabiegów.

Wartości dawek granicznych zależą od wieku i wykonywanego zawodu, wynosząc[4]:

- 1 mSv - dla ogółu ludności
- 6 mSv - dla uczniów, studentów i praktykantów w wieku 16-18 lat
- 20 mSv - dla uczniów, studentów i praktykantów w wieku 18 lat i powyżej

Wartości te zostały również przedstawione na infografice widocznej na rysunku 2.4.

Jak widać na rysunku 2.3, wkład promieniowania kosmicznego w średniej dawce skutecznej pochłoniętej przez mieszkańca Polski jest niewielki i wynosi 7.6%. Odpowiada to około 0.2 mSv. Jest to wartość bardzo mała i mogłaby się wydawać pomijalna w wielu rozważaniach. Jednak niniejsza praca ukaże wagę promieniowania kosmicznego. Omówiony zostanie jego skład, wpływ na człowieka, oddziaływanie z materią i zastosowania. Dzięki czemu promieniowanie kosmiczne, które mogłoby się wydawać zjawiskiem zaniedbywanym i nie wartym jakichkolwiek rozważań, ukaże swoją wagę, wiele ciekawych konsekwencji, które ciągnie ono za sobą oraz dobrodziejstw, które człowiek wykorzystuje w codziennym życiu.



Rysunek 2.4: Dawki graniczne dla konkretnych grup społecznych. Źródło:[4]



## Rozdział 3

# Odkrycie promieniowania kosmicznego

---

### 3.1 Rys historyczny

Promieniowanie kosmiczne zostało odkryte przypadkowo. Stało się to podczas badania stanu naelektryzowania i przewodności elektrycznej atmosfery. W końcu XIXw. oraz na początku XXw. badano, jakich strat ładunku doznaje idealnie odizolowany elektroskop. W trakcie takich badań Jon Elster oraz Hans Geitel zauważyli, że w powietrzu istnieje nieznane źródło jonów.

Podobną konkluzję ze swoich badań wyciągnął również Charles Thomson Rees Wilson. Do swojego eksperymentu użył on komory jonizacyjnej i zauważył tworzenie się 20 par jonów w ciągu sekundy w objętości  $1\text{cm}^3$  powietrza. Ze względu na swój wynik uznał, iż musi istnieć coś jonizującego, co jest w stanie przenikać przez grube warstwy materiału.

W kolejnych latach przeprowadzono wiele doświadczeń. Przykładowo, praca Ernesta Rutherforda i H. L. Coocke'a polegała na nałożeniu dodatkowych metalowych ekranów na osłonę, pod którą znajdował się elektroskop. W efekcie tego straty elektryczności zostały zredukowane o około 30%. Stąd też uznano, iż musi istnieć zewnętrzne przenikliwe promieniowanie, które powoduje jonizację powietrza.

Natura tego promieniowania została uznana za zrozumiałą. Stwierdzono, że atmosfera i skorupa ziemska są bogate w pierwiastki promieniotwórcze, które emitują promieniowanie gamma posiadające dużą przenikliwość i zdolność jonizacji powietrza. Stosowanie osłon

---

przyczyniało się do zmniejszenia stopnia jonizacji w obszarze, gdzie umieszczony był elektroskop.

Stwierdzono, że obserwowany wpływ substancji promieniotwórczych widoczny jest jedynie w warstwach atmosfery w pobliżu powierzchni gleby, gdzie występuje wiele substancji promieniotwórczych. Oczekiwano wtedy, że wpływ jonizującego promieniowania powinien być mniejszy w wyższych warstwach atmosfery i maleć wraz ze wzrostem wysokości.

W 1909 roku Theodor Wulf (rys. 3.1) wynalazł czuły elektroskop. Było to urządzenie umożliwiające ocenę produkcji jonów wewnątrz szczelnie zamkniętego pojemnika. Za pomocą swojego urządzenia stwierdził osłabienie jonizacji na szczycie wieży Eiffla. Był to spadek radioaktywności wewnątrz ośrodka wraz ze wzrostem wysokości.



Rysunek 3.1: Theodor Wulf. Źródło:[18]

W roku 1911 Domenico Pacini (rys. 3.2) dokonał symultanicznej obserwacji jonizacji w trzech miejscach: nad jeziorem, nad morzem oraz trzy metry pod powierzchnią. Ze względu na spadek promieniowania pod wodą wysnuł on wnioski, iż część promieniowania jonizującego musi posiadać inne źródło niż promieniotwórczość biorąca się z głębi Ziemi.



Rysunek 3.2: Domenico Pacini w trakcie pomiarów w 1910r. Źródło:[17]



W 1912 roku Wiktor Hess (rys. 3.3) poleciał balonem na wysokość 5.3km. Na jego pokładzie zabrał ze sobą trzy elektroskopy o zwiększonej dokładności. Stwierdził on, że wraz ze wzrostem wysokości początkowo występuje słaby spadek jonizacji po czym wartość ta szybko rośnie wraz ze wzrostem wysokości. Odkrył, że na wysokości 5300 m jonizacja zwiększyła się czterokrotnie w stosunku do jonizacji przy Ziemi. Hess wykluczył Słońce jako źródło promieniowania, jako że nie zaobserwował on różnicy intensywności jonizacji między dniem a nocą. Kontynuował swoje badania wznosząc się balonem. Orzekł, że wyniki jego obserwacji mogą być tłumaczone przez



Rysunek 3.3: W. Hess (w środku) lądujący po locie balonem 1912r. Źródło:[16]

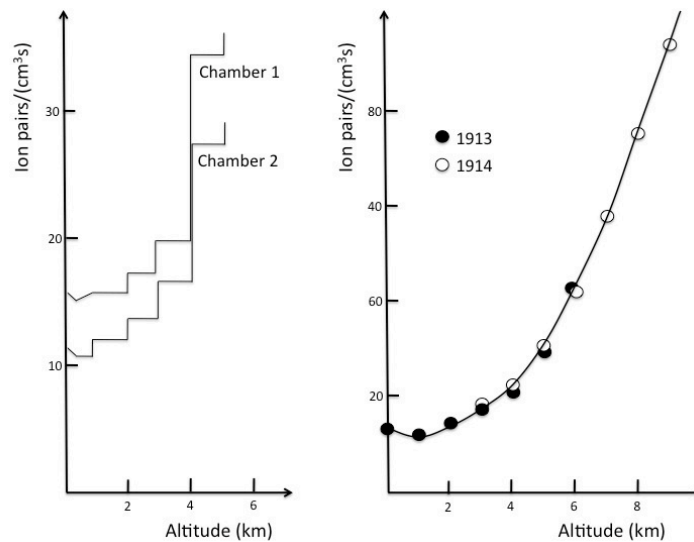
założenie, że promieniowanie o bardzo dużej sile penetracji wnika z góry do naszej atmosfery. Stwierdzono, że promieniowanie to pochodzi spoza Ziemi, z dużej wysokości. Stąd też początkowo nazwano je promieniowaniem wysokościowym.

W latach 1913-1914 Werner Kolhörster potwierdził wyniki Wiktora Hessa poprzez badanie promieniowania kosmicznego na wysokości dziewięciu kilometrów (tab. 3.1, rys. 3.4). Stwierdził on, że natężenie promieniowania kosmicznego rośnie wraz z wysokością.

<b>h [m]</b>	<b>n</b>
1000	-
2000	-
3000	+4.3
4000	+9.3
5000	+17.2
6000	+28.7
7000	+44.2
8000	+61.3
9000	+80.4

Tabela 3.1: Różnica liczby jonów n na wysokościach h w m n.p.m. wg. pomiarów wykonanych przez Wenera Kolhörstera. Źródło:[8]

Werner Kolhörster zauważył również, iż współczynnik pochłaniania promieniowania kosmicznego jest dużo mniejszy od współczynnika pochłaniania promieniowania gamma.



Rysunek 3.4: Porównanie uzyskanych wyników przez Hessa w 1912 (po lewej) i Kolhörstera (po prawej). W badaniach tych analizowane było zliczanie par jonów w zależności od wysokości nad poziomem morza. Źródło:[33]

Hipoteza mówiąca o tym, że jonizacja ta jest wynikiem promieniowania dochodzącego spoza atmosfery ziemskiej, wywołała sporo kontrowersji. Badania przeprowadzone w latach 1923–1926 przez Roberta Millikana całkowicie ją potwierdziły. Millikan wprowadził też nazwę "promieniowanie kosmiczne".

W 1936 roku Hess otrzymał nagrodę Nobla za swoje odkrycie.

## Rozdział 4

# Czym jest promieniowanie kosmiczne?

---

### 4.1 Promieniowanie kosmiczne

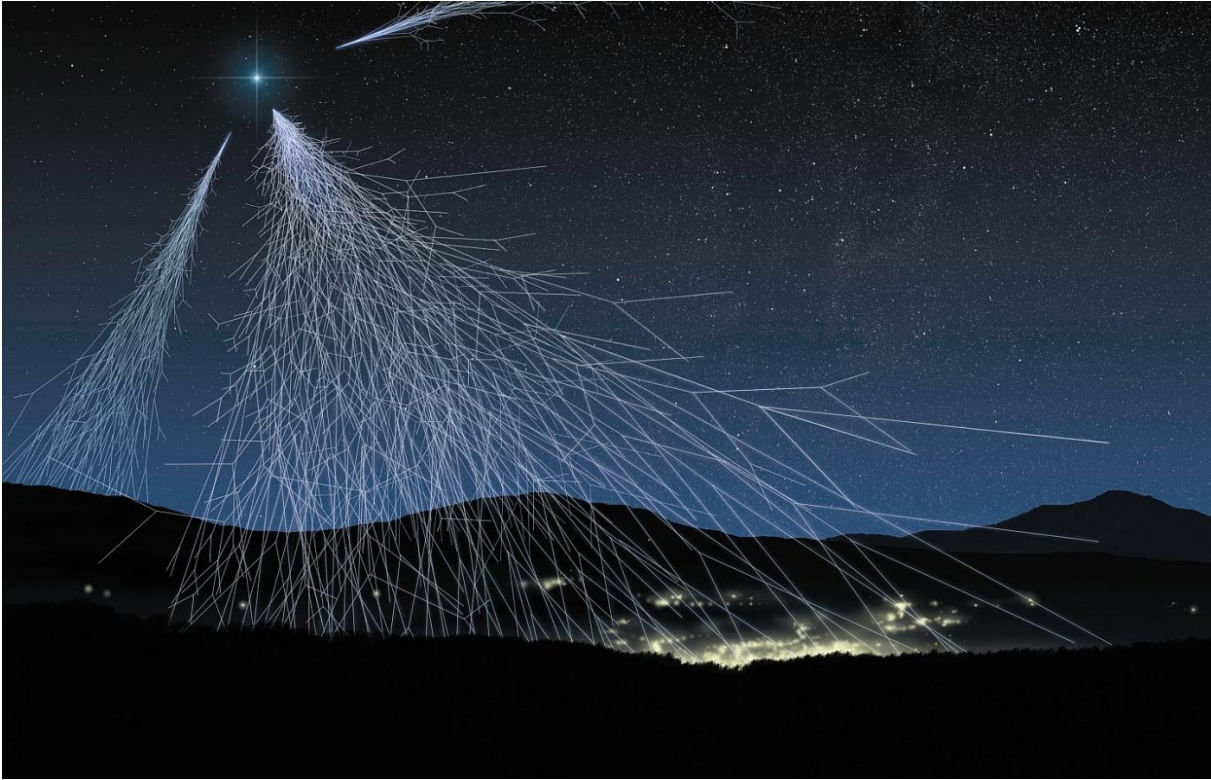
Promieniowanie kosmiczne jest to strumień cząstek składający się głównie z wysokoenergetycznych protonów oraz innych jąder atomowych. Cząstki te przemierzają przestrzeń kosmiczną z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła, docierając często do ziemskiej atmosfery. Ich pochodzenie wynika ze zjawisk zachodzących w przestrzeni kosmicznej.

W skład promieniowania kosmicznego wchodzi wszystkie poznane do tej pory cząstki. Podzielić można je na:

- promieniowanie pierwotne - należą do niego cząstki powstające w różnych procesach astrofizycznych, wpadające do atmosfery Ziemskiej z przestrzeni kosmicznej.
- promieniowanie wtórne - w skład którego wchodzi cząstki powstające w skutek oddziaływania promieniowania pierwotnego z jądrami atomów gazów atmosferycznych.

Rysunek 4.1 stanowi poglądową ilustrację, kiedy cząstka wchodząca w skład pierwotnego promieniowania kosmicznego wchodzi w interakcję z jądrem atomowym pierwiastka znajdującego się w górnych warstwach atmosfery. W wyniku tego cząstki tworzą kaskadę, która rozwija się w atmosferze i dociera do powierzchni Ziemi jako wiązka wtórnego promieniowania kosmicznego.

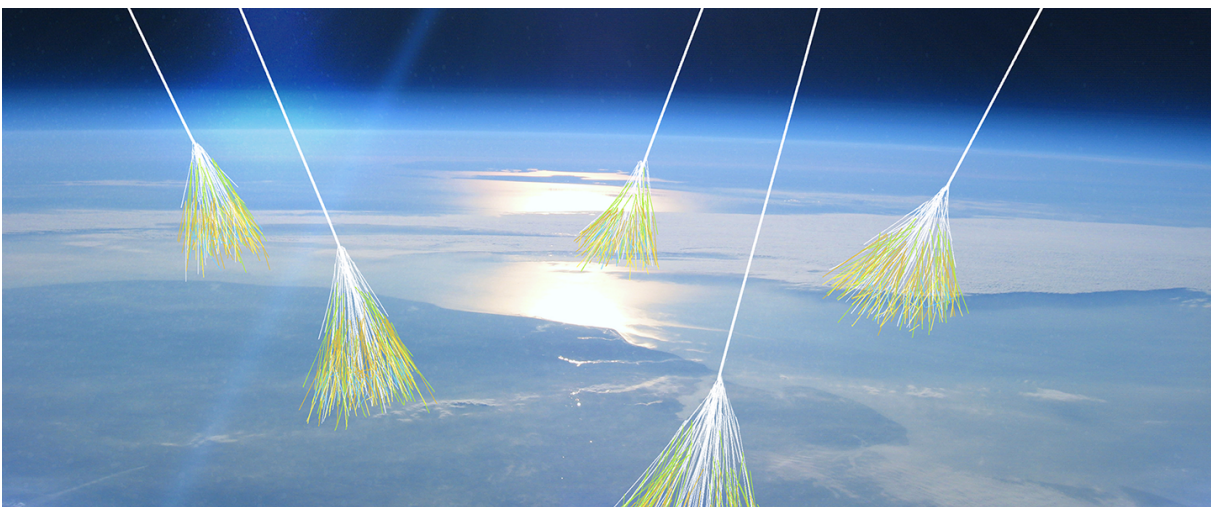
---



Rysunek 4.1: Promieniowanie kosmiczne - ilustracja poglądowa. Źródło:[15]

## 4.2 Promieniowanie pierwotne

Wiązka promieni pierwotnych może pochodzić spoza Układu Słonecznego, a czasem nawet spoza naszej Galaktyki. Kiedy wiązka pierwotnych promieni kosmicznych wchodzi w interakcję z ziemską atmosferą wytwarza się **wtórne promieniowanie kosmiczne**. Na rysunku 4.2 ukazano jakościowy charakter wiązki promieniowania kosmicznego. Ilustracja ta nie oddaje prawdziwej postaci tego zjawiska - jest wyłącznie poglądowa.



Rysunek 4.2: Koncepcyjna ilustracja promieniowania kosmicznego, nieukazująca prawdziwej natury tego zjawiska. Źródło:[19]

### 4.2.1 Skład, intensywność i energia

Większość cząstek wchodzących w **skład promieniowania pierwotnego** jest naładowana dodatnio. Przeprowadzono liczne pomiary za pomocą komór jonizacyjnych, liczników i emulsji jądrowych, które zostały wyniesione na duże wysokości za pomocą balonów. Wykazały one, iż ponad 90% cząstek promieniowania pierwotnego o energii  $E \leq 10^{18} \text{ eV}$  na jeden nukleon to protony[10]. Pozostałe to cząstki alfa oraz jądra cięższych pierwiastków. Wartości te zostały ukazane w tabeli 4.1.

Grupa jąder	Symbol	Ładunek Z	Średnia liczba nukleonów	Strumień cząstek na $m^2 \cdot s \cdot sr$	Zawartość w %
Protony	p	1	1	1300	92.9
Jądra helu	$\alpha$	2	4	88	6.3
Lekkie	L	3-5	10	1.9	0.13
Średnie	M	6-9	14	5.6	0.4
Ciężkie	H	$\geq 10$	31	2.5	0.18
Super ciężkie	VH	$\geq 20$	51	0.7	0.05

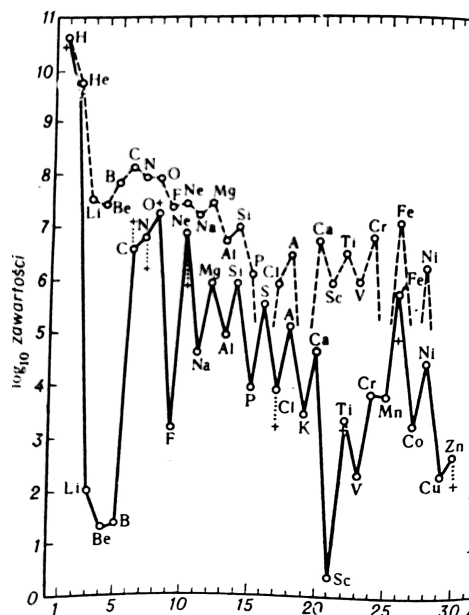
Tabela 4.1: Skład pierwotnych promieni kosmicznych. W tabeli ukazano różne grupy jąder, ich zakresy ładunków Z, średnie liczby nukleonów oraz wartości strumienia cząstek na  $m^2 \cdot s \cdot sr$ , co przekłada się na ich procentową zawartość we wiązce pierwotnego promieniowania kosmicznego. Źródło:[10]

Skład chemiczny cząstek wchodzących w skład pierwotnego promieniowania kosmicznego różni się nieco od zawartości poszczególnych pierwiastków znajdujących się w skorupie ziemskiej, meteorach oraz na Słońcu i innych gwiazdach znanych z analizy spektroskopowej.

Ukazane zostało to na rysunku 4.3.

Promieniowanie kosmiczne charakteryzuje się stosunkowo mniejszą zawartością wodoru i helu oraz znacznym nadmiarem cięższych pierwiastków w stosunku do składu Układu Słonecznego. Widoczne jest to szczególnie w przypadku jąder lekkich (grupa Li, Be, B). Ich zawartość w promieniowaniu kosmicznym jest większa o kilka rzędów od zawartości tych pierwiastków w Układzie Słonecznym (rys. 4.3).

Stąd też prawdziwa może wydawać się hipoteza, mówiąca o tym, że jądra ciężkie ulegają rozpadowi w trakcie zderzeń z jądrami materii międzygwiazdowej.



Rysunek 4.3: Porównanie względnej zawartości pierwiastków w promieniach kosmicznych (linia przerywana) i w Układzie Słonecznym (linia ciągła). Źródło:[10]

W składzie pierwotnego promieniowania kosmicznego nie więcej niż 1% stanowią elektrony.

Eksperymenty satelitarne wykazały obecność pozytonów oraz antyprotonów w wiązce pierwotnego promieniowania kosmicznego. Stanowią one mniej niż 1% cząstek wchodzących w jego skład. Prawdopodobnie nie są one antymaterią, która została "wyprodukowana" podczas Wielkiego Wybuchu.

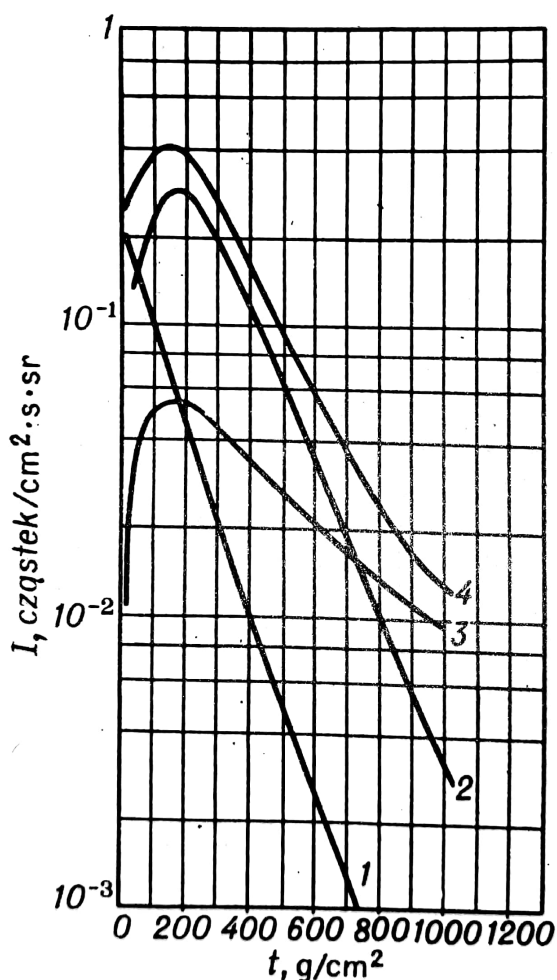
Antyprotony promieniowania kosmicznego mają również znacznie wyższą średnią energię niż protony. Przybywają na Ziemię z charakterystycznym maksimum energii wynoszącym 2 GeV, co wskazuje na ich produkcję w fundamentalnie innym procesie niż protony promieniowania kosmicznego, które mają średnio tylko jedną szóstą tej energii.

Nie ma dowodów na istnienie złożonych jąder atomowych antymaterii, takich jak jądra antyheliu (tj. cząstki anty-alfa) w wiązce promieniowania kosmicznego. Jednakże prowadzone są w tym kierunku badania.

Promieniowanie kosmiczne charakteryzuje się większą przenikliwością niż inne rodzaje promieniowania. Natężenie różnych składowych promieniowania kosmicznego w zależności od wysokości na szerokości geograficznej  $50^\circ$  zostało ukazane na rysunku 4.4.

Szczegółowa nomenklatura do wielkości charakteryzujących promieniowanie kosmiczne znajduje się w dodatku A.

**Natężenie** cząstek naładowanych wchodzących w skład promieniowania kosmicznego ulega modulacji. Wywołane jest to przez pole magnetyczne wiatru słonecznego w przestrzeni międzyplanetarnej. Natężenie promieniowania pierwotnego zmienia się w czasie zgodnie ze zmianami pola magnetycznego. Również pole magnetyczne Ziemi wpływa na intensywność promieniowania pierwotnego docierającego do granic atmosfery. Skutkiem tego jest zmniejszenie intensywności wraz ze wzrostem szerokości geomagnetycznej.



Rysunek 4.4: Natężenie różnych składowych promieniowania kosmicznego w zależności od wysokości na szerokości geograficznej  $50^\circ$ . 1 - protony i cząstki  $\alpha$ , 2 - składowa elektronowa, 3 - składowa mionowa, 4 - natężenie całkowite. Źródło:[10]

Modulacja słabnie wraz ze wzrostem energii cząstek. Dla cząstek o energii kinetycznej  $E_k \gtrsim 10^{12} \text{ eV}$  modulacja jest niezauważalna. Stąd też, ze wzrostem  $E_k$  zmniejsza się natężenie promieniowania.

Dla energii kinetycznej  $E_k \gtrsim 2.5 \cdot 10^9 \text{ eV/nukleon}$ , natężenie promieniowania wynosi około 0.14 cząstek na  $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ . Natomiast przy energii  $E_k \gtrsim 10^{15} \text{ eV/nukleon}$ , natężenie osiąga wartości około  $5 \cdot 10^{-10}$  cząstek na  $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ .

**Energie** cząstek wchodzących w skład pierwotnego promieniowania kosmicznego mierzone w różnych zakresach energetycznych, stosowano do tego różne metody pomiarowe. Przy niższych energiach, sięgających do około  $10^{12} \text{ eV}$ , pomiary były wykonywane bezpośrednio poza ziemską atmosferą. Przy wyższych energiach korzystano z metod pośrednich. Informację o energiach pozyskiwano za pomocą analizy szerokich pęków atmosferycznych. Ze względu na stosowane detektory (jedne z nich były czułe na cząstki o energiach znajdujących się w określonych przedziałach, inne zaś na energie powyżej określonej wartości) wprowadzono dwie definicje natężenia promieniowania kosmicznego:

- $I(> E)$  - natężenie cząstek o energiach większych od  $E$
- $I(E) dE$  - natężenie cząstek o energiach zawartych w przedziale  $(E, E+dE)$

Natężenia te związane są relacją:

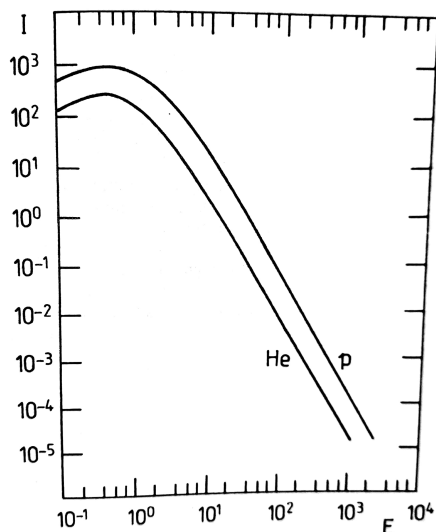
$$I(> E) = \int_E^{\infty} I(E') dE',$$

gdzie:

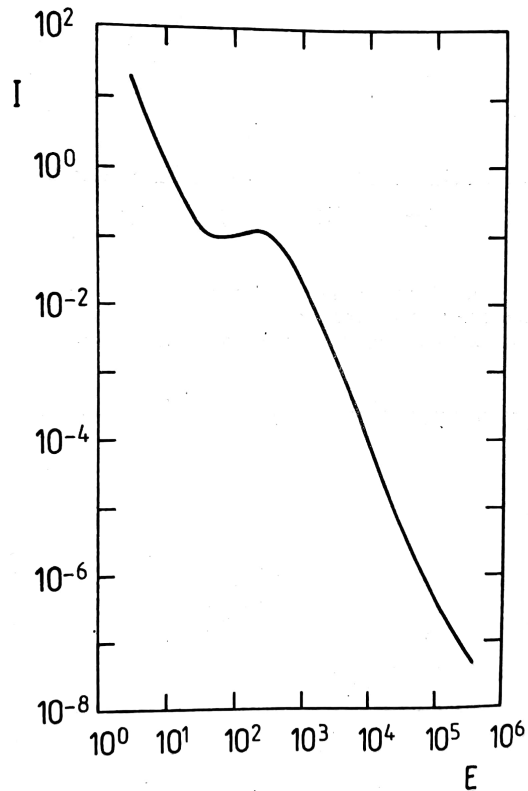
- $I(E)$  - widmo energetyczne różniczkowe promieniowania kosmicznego
- $I(>E)$  - widmo energetyczne całkowite.

Widma energetyczne promieniowania kosmicznego o pochodzeniu galaktycznym, w zakresie energii mniejszych od kilkudziesięciu GeV, zmieniają się wraz ze zmianą aktywności słonecznej. W okresie minimalnej aktywności słonecznej, natężenie promieniowania pierwotnego w pobliżu Ziemi jest istotnie mniejsze niż poza granicami Układu Słonecznego. W zakresie  $E_k \gtrsim 1 - 3 \text{ GeV/nukleon}$ , wpływ modulacji słonecznej na widma cząstek jest stosunkowo mały.

Ze względu na różne metody określania energii w różnych zakresach energetycznych, istnieje problem z ustaleniem jednego ogólnego widma energetycznego promieni kosmicznych w całym obszarze energii cząstek dochodzących do Ziemi.



(a) Różniczkowe widma energetyczne protonów i jąder helu w promieniowaniu kosmicznym przy powierzchni Ziemi. Natężenie  $I$  zostało wyrażone w ilości cząstek na  $m^2 \cdot s \cdot sr \cdot GeV/nukleon$ , energia  $E$  w  $GeV/nukleon$ . Źródło:[8]



(b) Różniczkowe widmo elektronów - zależność natężenia strumienia elektronów  $I$  (wyrażona w  $m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot MeV^{-1}$ ) od energii  $E$  w  $MeV$ . Źródło:[8]

Rysunek 4.5: Różniczkowe widma energetyczne protonów jąder helu i elektronów

Widmo energetyczne dla pierwiastków wodoru i helu ukazane zostało na rysunku 4.5a. Dane w obszarze energii do około  $3 \cdot 10^{14}$  eV/nukleon uzyskano z pomiarów bezpośrednich, natomiast zakres energii powyżej  $10^5$  GeV uzyskano z badań szerokich pęków atmosferycznych.

W przedziale energii od około 10 GeV do  $10^6$  GeV widmo protonów jest wykładnicze ze stałym wykładnikiem  $I_p(E) \propto E^{\gamma_p}$ , gdzie  $\gamma_p \approx 2.7$ . Przy energii około  $3 \cdot 10^6$  GeV widoczna jest zmiana współczynnika  $\gamma_p$  - widmo staje się bardziej strome.

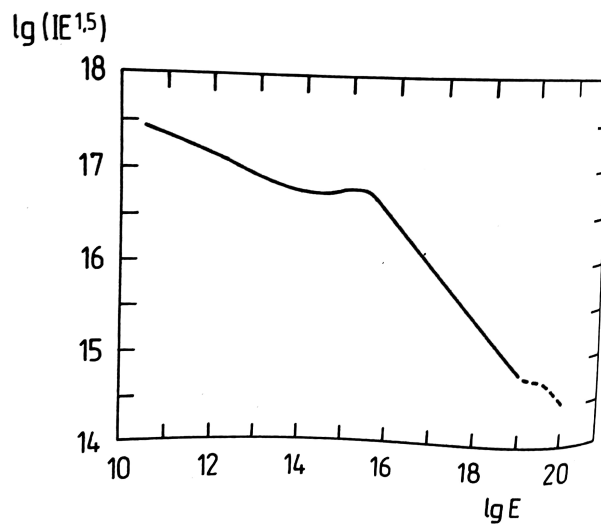
Elektrony (negatony i pozytony) w pierwotnym promieniowaniu kosmicznym stanowią około 1% ilości protonów. Widmo energetyczne elektronów jest silnie modulowane w zakresach niskich energii (do około 1 GeV). Obserwowane dane sięgają energii ponad  $10^{12}$  eV. W przybliżeniu widmo całkowite elektronów w zakresie energii  $E \in (5GeV, 100GeV)$ , można przedstawić w postaci:

$$I_e(> E) = 1.5 \cdot 10^{-2} E^{-2} \text{ cząstek}/(cm^2 \cdot s \cdot sr),$$

gdzie energia wyrażona jest w GeV.



W widmie widoczna jest wyraźna zmiana nachylenia w obszarze energii pomiędzy 100 MeV a 2 GeV. Widmo to zostało ukazane na rysunku 4.5b.



Rysunek 4.6: Integralne widmo pierwotnych promieni kosmicznych o energiach  $E \geq 10\text{GeV}$ . Strumień  $I$  wyrażony został w ilości cząstek na  $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ , energia  $E$  jest w eV. Źródło:[8]

Widmo energetyczne cząstek wielkich energii z promieniowania kosmicznego widoczne jest na rysunku 4.6. Przybliżone wyrażenie dla integralnego widma promieniowania kosmicznego może zostać opisane w następujący sposób:

$$I(> E) = E^{-1.7} \text{ cząstek}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}),$$

gdzie  $E \in (10\text{GeV}, 3 \cdot 10^6\text{GeV})$ , oraz:

$$I(> E) = 3 \cdot 10^{-10} (E \cdot 10^{-6})^{-2.1} \text{ cząstek}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}),$$

gdzie  $E \geq 3 \cdot 10^6\text{GeV}$ .

#### 4.2.2 Zmiany natężenia promieniowania kosmicznego z wysokością w atmosferze i z głębokością poniżej poziomu morza

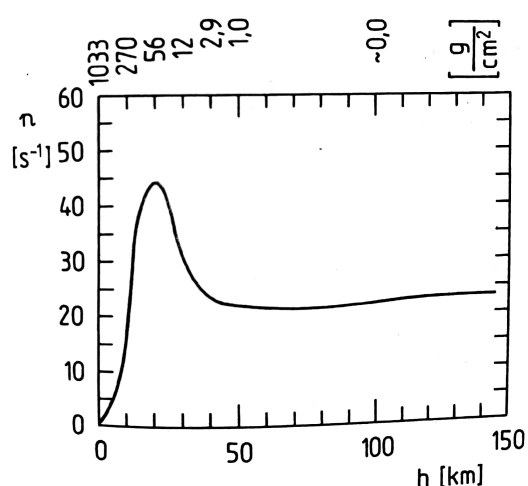
Promieniowanie kosmiczne można również analizować pod kątem jego natężenia w zależności od wysokości nad poziomem morza. Pierwsze takie dane były zbierane na przełomie lat 20. i 30. XX w., a informacje te były przedstawiane w dwóch wariantach:

- określano zależność od głębokości w atmosferze lub wysokości nad poziomem morza całkowitego natężenia promieniowania kosmicznego dochodzącego do przyrządu pomiarowego ze wszystkich kierunków

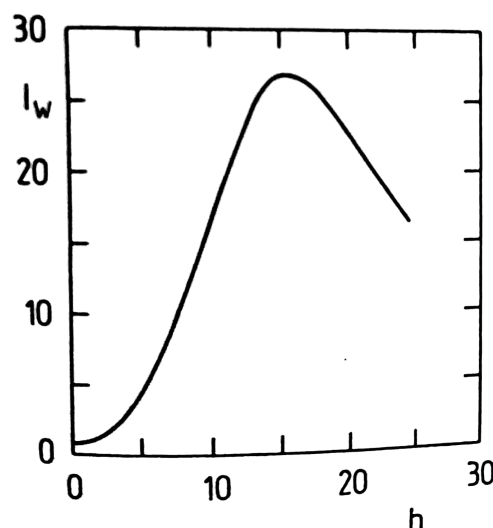
- określano zależność od wysokości nad poziomem morza liczby cząstek promieniowania kosmicznego docierającego do przyrządu pomiarowego z kierunków zawartych w jednostkowym kącie bryłowym na jednostkę powierzchni w jednostce czasu

W pierwszym przypadku korzystano z pojedynczych komór jonizacyjnych lub pojedynczych liczników Geigera-Müllera. W drugim używano teleskopu z dwóch lub kilku liczników usytuowanych równolegle względem siebie (jeden nad drugim) pracujących w koincydencji. Te układy pomiarowe były wynoszone wysoko nad poziom morza za pomocą sond balonowych lub rakiet. Więcej informacji dotyczących detekcji promieniowania kosmicznego znajduje się w rozdziale 5.

Jednymi z pierwszych pomiarów dotyczących zależności globalnego promieniowania kosmicznego od wysokości były dane zebrane za pomocą pojedynczego licznika Geigera-Müllera, który został wyniesiony na rakiemie V2 na wysokość 150 km nad szerokością geograficzną północną wynoszącą 41°. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 4.7a.



(a) Zależność szybkości zliczeń - liczby impulsów  $n$  na sekundę w zależności od wysokości od poziomem morza  $h$  wyrażonej w km - pojedynczego licznika Geigera-Müllera. Źródło:[8]



(b) Zależność wertykalnego natężenia promieniowania kosmicznego  $I_w$  cząstek  $\cdot cm^{-2} \cdot min^{-1} \cdot sr^{-1}$  od wysokości  $h$  w km n.p.m. Źródło:[8]

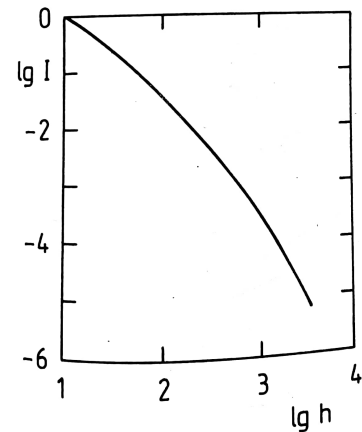
Rysunek 4.7: Otrzymane wyniki natężenia promieniowania kosmicznego ze wzrostem wysokości

Zależność wysokościowa globalnego natężenia wykazuje następujące właściwości:

- poza granicami atmosfery ziemskiej natężenie promieniowania kosmicznego jest stałe i wynosi około  $0.14$  cząstek  $\cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot s^{-1}$
- początkowo natężenie wzrasta wraz z głębokością w atmosferze do wartości maksymalnej osiągananej na wysokości 20 - 22 km n.p.m., po czym następuje spadek do wartości około 50 razy mniejszej od wartości maksymalnej. Największa wartość tzw. "maksimum Pfozera" wynosi około  $0.28$  cząstek  $\cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot s^{-1}$ .

Dokładniejsze dane uzyskano 10 lat później. Widoczne są one na rysunku 4.7b. Wynika z nich, iż maksimum natężenia promieniowania kosmicznego w kierunku pionowym występuje na wysokości około 15 km. Przy ciśnieniu  $110 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , wynosi ono  $0.45 \text{ cząstek} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Natężenie w maksimum jest około 3 razy większe niż poza granicami atmosfery oraz około 30 razy większe niż na poziomie morza.

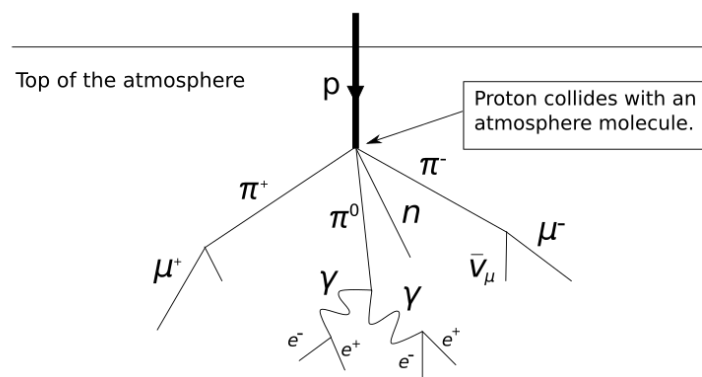
Pomiary natężenia promieniowania kosmicznego poniżej powierzchni gruntów oraz pod wodą zaczęto wykonywać w 1925 roku. Pierwotnie w tym celu wykorzystywano komory jonizacyjne pogrążone w wodzie jeziora pokrytego lodem na głębokości około 80 m. Następnie w badaniach wykorzystywano komory i liczniki, które umieszczano również w kopalniach. Zwiększano również głębokości, na jakich umieszczano liczniki. Na głębokości 3000 m pod poziomem morza natężenie promieniowania wynosiło około  $3 \cdot 10^{-6}$  natężenia na poziomie morza. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 4.8.



Rysunek 4.8: Intensywność  $I$  promieni kosmicznych na głębokości  $h$  pod powierzchnią ziemi wyrażonej w metrach równoważnika wody. Źródło:[8]

### 4.3 Promieniowanie wtórne

Wtórne promienie kosmiczne biorą się z interakcji promieni pierwotnych z atomami atmosfery. Wiązka pierwotnego promieniowania kosmicznego trafia do atmosfery i po zderzeniu z jej cząsteczkami tworzy tzw. **"pęk atmosferyczny"**. Zostało to schematycznie przedstawione na rysunku 4.9.

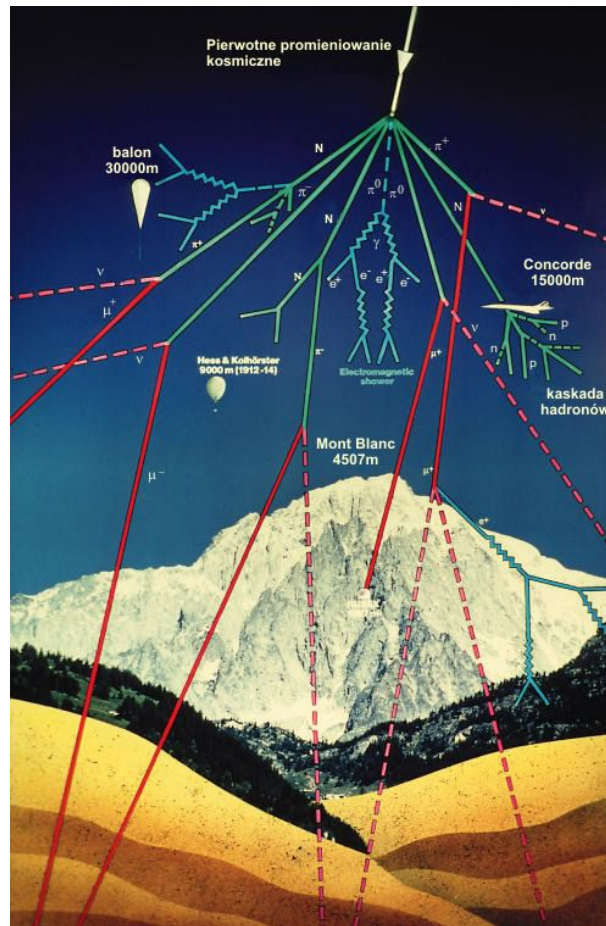


Rysunek 4.9: Schematyczna ilustracja ukazująca stworzenie pęku atmosferycznego. Źródło:[34]

Podczas takiego zderzenia powstają nowe cząstki (rys. 4.10). Są to protony i neutrony, które mają często tak duże energie, że są w stanie zderzać się z kolejnymi cząsteczkami wchodzącymi w skład atmosfery. Oprócz nich tworzą się również krótkożyciowe cząstki elementarne takie jak: miony, mezony  $\pi$  oraz hiperony. Co ciekawe, cząstki te zostały odkryte po raz pierwszy w wiązce promieniowania kosmicznego.

W przypadku gdy cząstka promieniowania pierwotnego posiadała dostatecznie dużą energię, możliwym było, aby powstały pary proton-antyproton lub neutron-antyneutron.

Oprócz pierwotnych cząstek promieniowania kosmicznego oraz protonów i neutronów wtórnych, z cząsteczkami atmosfery oddziaływać mogą również mezony  $\pi$ .



Rysunek 4.10: Schematyczny rysunek ukazujący tworzenie się wtórnych promieni kosmicznych. Na ilustracji w celu oddania wysokości nad poziomem morza zaznaczono przykładowo eksperymenty balonowe Hessa i Kolhörstera, jak również przykładowe wysokości lotów samolotami Concorde. Źródło:[35]

Mezony  $\pi$  szybko rozpadają się na fotony. Te z kolei mogą tworzyć parę elektron-pozyton. Elektrony wzbudzone emitują z kolei fotony. W ten sposób powstaje tzw. elektronowo-fotonowa miękka składowa promieniowania kosmicznego, stanowiąca około 30% promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi. Natężenie tej składowej na górnej granicy atmosfery jest właściwie zerowe jej istota rośnie wraz z zagłębianiem się promieni kosmicznych w atmosferę ziemską.

Co więcej, z rozpadu mezonów  $\pi$  wytworzyć mogą się również miony. Nie oddziałują one z jądrami, tracąc energię jedynie przez jonizację i znikają wskutek rozpadu. Ich czas życia jest bardzo krótki, jednakże przez efekty relatywistyczne (dylatacja czasu) są one rejestrowane przy powierzchni Ziemi, stanowiąc główną składową wtórnego promieniowania kosmicznego. Wartość tę można szacować na około 70%. Warty wspomnienia jest fakt, iż składowa mionowa jest tzw. składową twardą. Jest to bardzo przenikliwa składowa promieniowania kosmicznego. Wedle niektórych doświadczeń, miony pochodzenia kosmicznego mogą penetrować przestrzeń do głębokości dochodzących nawet do 300m pod powierzchnię Ziemi.

Część mionów rozpada się również w atmosferze. W takim przypadku wzbogacają one wtórne promieniowanie kosmiczne o elektrony.

Reasumując, wiązka promieniowania pierwotnego wpadając do atmosfery Ziemskiej wchodzi w interakcję z cząsteczkami atmosfery, tworząc w ten sposób wiązkę promieniowania wtórnego. Ta natomiast, na skutek oddziaływań z atmosferą, bądź rozpadów krótkożyciowych cząstek, ulega przemianom tak, że do powierzchni Ziemi docierają głównie:

- miony
- elektrony
- fotony

W fizyce cząstek elementarnych wyróżnia się kaskady:

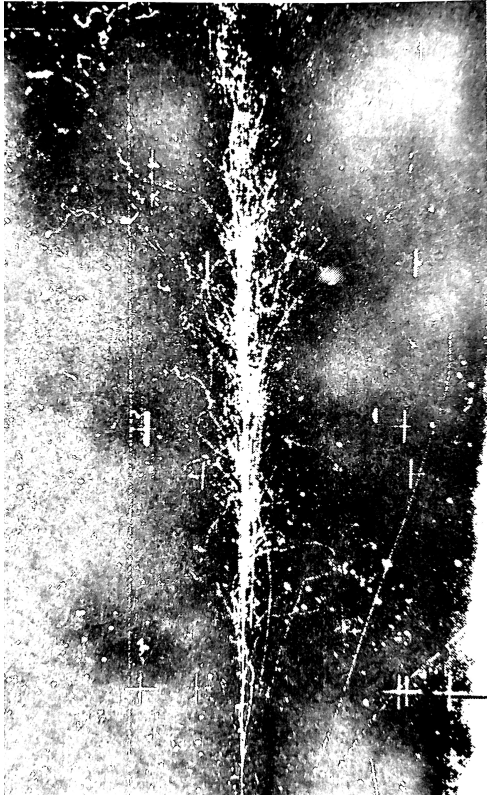
- elektronowo-fotonowe
- hadronowe

Są to kaskady, w skład których wchodzi cząstki wtórnego promieniowania kosmicznego. Produkowane są one w wyniku interakcji wysokoenergetycznych cząstek z gęstą materią (w przypadku promieniowania kosmicznego są to cząsteczki atmosfery).

Powstające cząstki wchodzi ze sobą w reakcję produkując wiele nowych produktów o mniejszej energii. Następnie zaczynają ze sobą oddziaływać w ten sam sposób, czego efektem jest produkcja wielu niskoenergetycznych cząstek. Na końcu tego procesu są one zatrzymywane i absorbowane przez materię.

#### **4.3.1 Kaskady elektronowo-fotonowe**

Kaskady te mogą być generowane przez elektrony lub kwanty gamma o dostatecznie dużych energiach. Kiedy elektron przenika przez dostatecznie grubą warstwę ośrodka, wypromieniowuje kwant gamma. Jego energia może być porównywalna z energią promieniującego elektronu. W przypadku, gdy energia kwantu gamma będzie większa od podwójnej masy elektronu, przekonwertuje on w parę elektronową (elektron i pozyton), z której dalej będą mogły promieniować kwanty gamma.



Rysunek 4.11: Fotografia kaskady elektronowo-fotonowej zainicjowanej w ciekłym ksenonie. Widoczny jest rozwój poprzeczny i podłużny. Źródło:[8]

Proces taki ma miejsce do momentu, gdy emitowane kwanty gamma i wytwarzane pary nie osiągną energii mniejszych od energii progowej dla tych procesów.

Wytwarza się wtedy kaskada elektromagnetyczna. Wytworzone elektrony i kwanty gamma ulegają procesom konwersji, hamowania, ale również rozpraszane są w ośrodku, podczas czego zmianie ulega kierunek ich trajektorii.

Stąd też, biorąc za oś kaskady kierunek trajektorii inicjującej kaskadę cząstki (pierwotnego elektronu lub kwantu gamma), można powiedzieć, że kaskada rozwija się nie tylko w kierunku osiowym lecz i poprzecznym do osi kaskady.

Na rysunku 4.11 przedstawiona została przykładowa kaskada elektronowo-fotonowa rozwijająca się w ciekłym ksenonie. Podobne kaskady elektronowe-fotonowe inicjowane są w atmosferze Ziemskiej przez kwanty gamma lub elektrony z pierwotnego lub wtórnego promieniowania kosmicznego.

### 4.3.2 Kaskady hadronowe

Kiedy wysokoenergetyczny hadron (o energii dużo większej od progowej energii wytwarzania pionów) padnie na warstwę materiału, w trakcie przedostawania się przez tę materię zderzy się z jądrem atomowym. W wyniku tego utworzone zostaną wtórne hadrony, wśród których dominować będą mezony  $\pi$ .

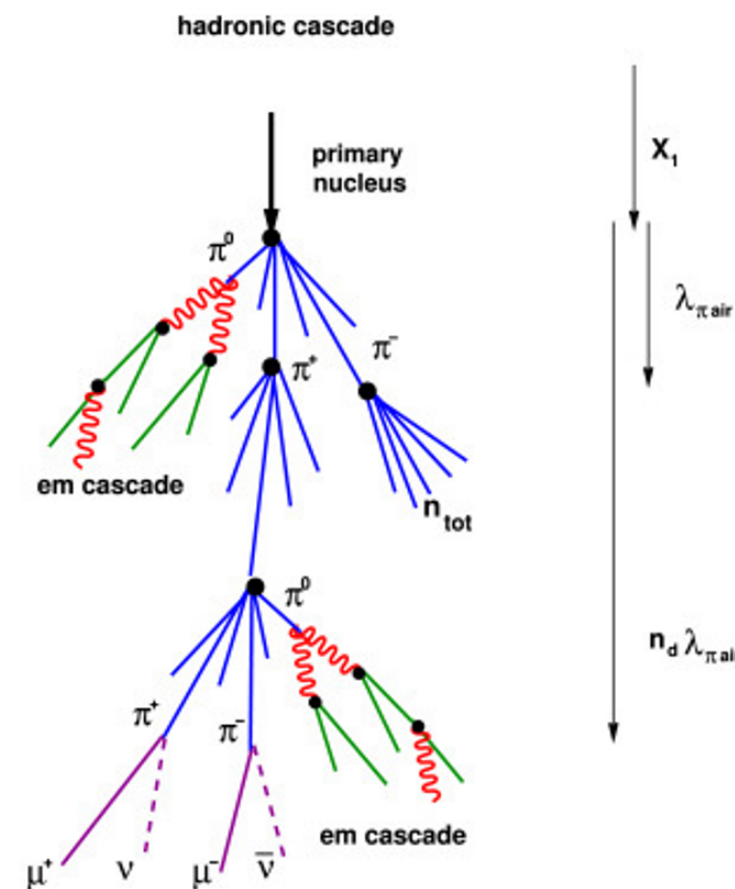
W przypadku, gdy energie kinetyczne produktów takiej reakcji jądrowej będą dużo większe od progowej energii wytwarzania pionów, wtedy produkty te zderzając się z jądrami atomów napotkanych w ośrodku powodują wytwarzanie nowych hadronów (pamiętając o zasadach zachowania energii, pędu i ładunku).[11]

Przy dostatecznie dużych energiach kinetycznych cząstek, które powstają w kolejnych zderzeniach, możliwym jest, aby proces się powtórzył. W takim przypadku powstaje kaskada hadronowa podobna do kaskady elektromagnetycznej. Warto jednak wspomnieć, iż rozwój kaskady hadronowej przebiega w wyniku zachodzenia zupełnie innych procesów, niż ma

to miejsce w przypadku kaskady elektromagnetycznej. W przypadku kaskady hadronowej dominującą rolę odgrywają oddziaływania silne.

Kaskada jest tworem trójwymiarowym. Wynika to z faktu, iż kierunek lotu hadronu inicjalizującego kaskadę określa jej oś. Skalę rozwoju podłużnego kaskady określa jądrowa długość absorpcji, natomiast wytwarzane cząstki wylatują z obszaru zderzenia pod różnymi kątami względem osi kaskady.

Wartym wspomnienia jest, iż kaskad czysto hadronowych praktycznie nie obserwuje się w przyrodzie. Zazwyczaj obok z kaskady hadronowej mamy do czynienia z kaskadą elektromagnetyczną wraz z towarzyszącą jej składową leptonową (neutrinową i mionową). Spowodowane jest to faktem, iż wśród produktów w reakcjach wytwarzania cząstek pojawiają się również cząstki niestabilne. Mogą się one rozpadać na neutrino, kwanty gamma, elektrony bądź miony. Następnie ponad 99% neutralnych pionów rozpada się na dwa kwanty gamma po czasie życia wynoszącym około  $10^{-16}$ s. Jeśli energia kwantów gamma jest wystarczająco duża, mogą przedłużyć kierunek lotu macierzystego pionu, w efekcie czego mogą wywołać kaskady elektronowo-fotonowe, towarzyszące kaskadom hadronowym. Zjawisko to ukazane zostało na rysunku 4.12.



Rysunek 4.12: Kaskada hadronowa (hadronic cascade) wraz ze stowarzyszoną kaskadą elektromagnetyczną (em cascade). Źródło:[44]

Kaskady hadronowe powstają w atmosferze ziemskiej. Są one zainicjowane przez pierwotne promieniowanie kosmiczne. Dla dostatecznie dużych energii, tj.  $E_0 \geq 10^{17} \text{ eV}$ , tworzą się kaskady o rozmiarze podłużnym sięgającym do najniższych warstw atmosfery. Skorelowane cząstki natomiast pojawiają się w odległości kilku kilometrów od osi kaskady. Są to tzw. "szerokie kaskady atmosferyczne" lub **"szerokie pęki atmosferyczne"**. W pobliżu osi takiej kaskady, na poziomie morza, pojawia się kilka tysięcy skorelowanych cząstek na  $1 \text{ m}^2$ . Obszar wokół osi pędu, mający średnicę kilku metrów, jest to tzw. rdzeń kaskady.

### 4.3.3 Szerokie pęki atmosferyczne

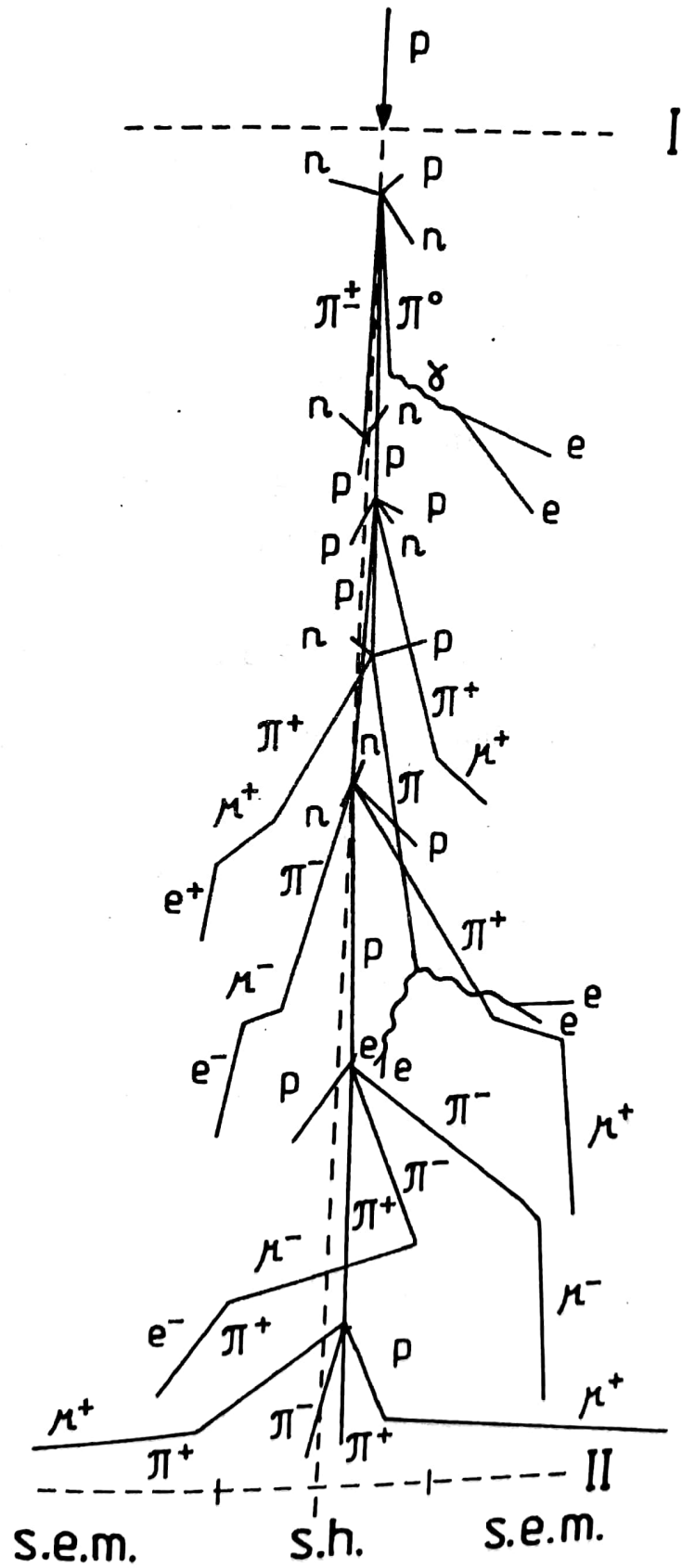
Wiązka promieniowania jądrowego, składająca się głównie z protonów i jąder pierwiastków lekkich, pada wpada do atmosfery ziemskiej. Tam zderza się z atomami i molekułami (głównie azotu i tlenu). W wyniku zderzenia, cząstki promieniowania pierwotnego tracą energię na jonizację i wzbudzenie atomów. W efekcie tego wytwarzane są nowe cząstki (głównie mezony).

W sytuacji, gdy energie cząstek pierwotnych są większe od  $1 \text{ GeV/nukleon}$ , nie przekraczając jednocześnie wartości kilku  $\text{GeV/nukleon}$ , w zderzeniach jądrowych powstają hadrony wtórne. Są to głównie piony. Co więcej, z jąder tarczy emitowane są nukleony o energii nieprzekraczającej kilku  $\text{MeV}$ . Są one jednakże zbyt mało energetyczne, aby były w stanie wytworzyć kolejne hadrony.

W przypadku, gdy energie cząstek pierwotnych są dostatecznie duże, w wyniku ich interakcji z jądrami atomów znajdujących się w atmosferze są one w stanie wytworzyć hadrony wtórne. Te zaś, dzięki swojej wysokiej energii, mogą wywołać kolejną reakcję z jądrami atomów atmosfery, w której wytworzą się kolejne pokolenia wysokoenergetycznych hadronów. W dostatecznie grubych warstwach atmosfery zachodzi proces kaskadowego wytwarzania się cząstek, mogący sięgać aż do poziomu morza.

W przykładowym procesie, który może być zapoczątkowany przez pojedynczy proton w wysokich warstwach atmosfery, na poziomie morza możliwym jest wygenerowanie dziesiątek milionów hadronów. W kolejnych reakcjach wytwarzane są szybkie mezony  $\pi$ , więc w lawinie pojawiają się produkty rozpadu mezonów. Są to: kwanty gamma (pochodzące od cząstek neutralnych), miony i elektrony (pochodzące od cząstek naładowanych dodatnio).





Rysunek 4.13: Schemat rozwoju szerokiego pęku atmosferycznego zainicjowanego przez proton pierwotny  $p$ , na granicy atmosfery I. Źródło:[8]

Rozpadom podlegają również inne produkty wchodzące w skład lawin. Kwanty gamma oraz elektrony mogą inicjować kaskady elektronowo-fotonowe. Wszystkie cząstki wytworzone w takiej lawinie ulegają odchyleniu od kierunku cząstki pierwotnej inicjującej lawinę (od osi lawiny). Odchylenia te zachodzą na skutek różnych, niezerowych kątów emisji produktów reakcji i rozpadów hadronów. Wokół śladu lawiny pojawiają się duże ilości wtórnych hadronów i leptonów, rozłożone w wielkich obszarach.

Wśród wytworzonych cząstek wtórnych dominuje tryplet mezonów:  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  oraz  $\pi^0$ . Piony naładowane charakteryzują się krótkim czasem życia i rozpadają się odpowiednio na:  $\mu^+ + \nu$  oraz  $\mu^- + \bar{\nu}$ . W przypadku, gdy energia cząstki jest dostatecznie duża, czas życia  $\tau$  zostaje znacząco wydłużony (ze względu na zjawiska relatywistyczne) co pozwala im przed rozpadem oddziaływać z napotkanymi jądrami. Te cząstki, którym nie udało się zderzyć z jądrami, rozpadają się, powodując pojawienie się składowej mionowej w lawinie. Składowa ta jest bardzo przenikliwa, ze względu na fakt, iż miony tracą mało energii na jonizację ośrodka. W przypadku pokonania całej grubości atmosfery, wartość ta wyniosłaby jedynie 2 GeV.

Proces opisany powyżej stanowi tzw. **"szeroki pęk atmosferyczny"**. Schemat rozwoju takiej lawiny został ukazany na rysunku 4.13.

W szerokim pęku atmosferycznym są trzy zasadnicze składowe:

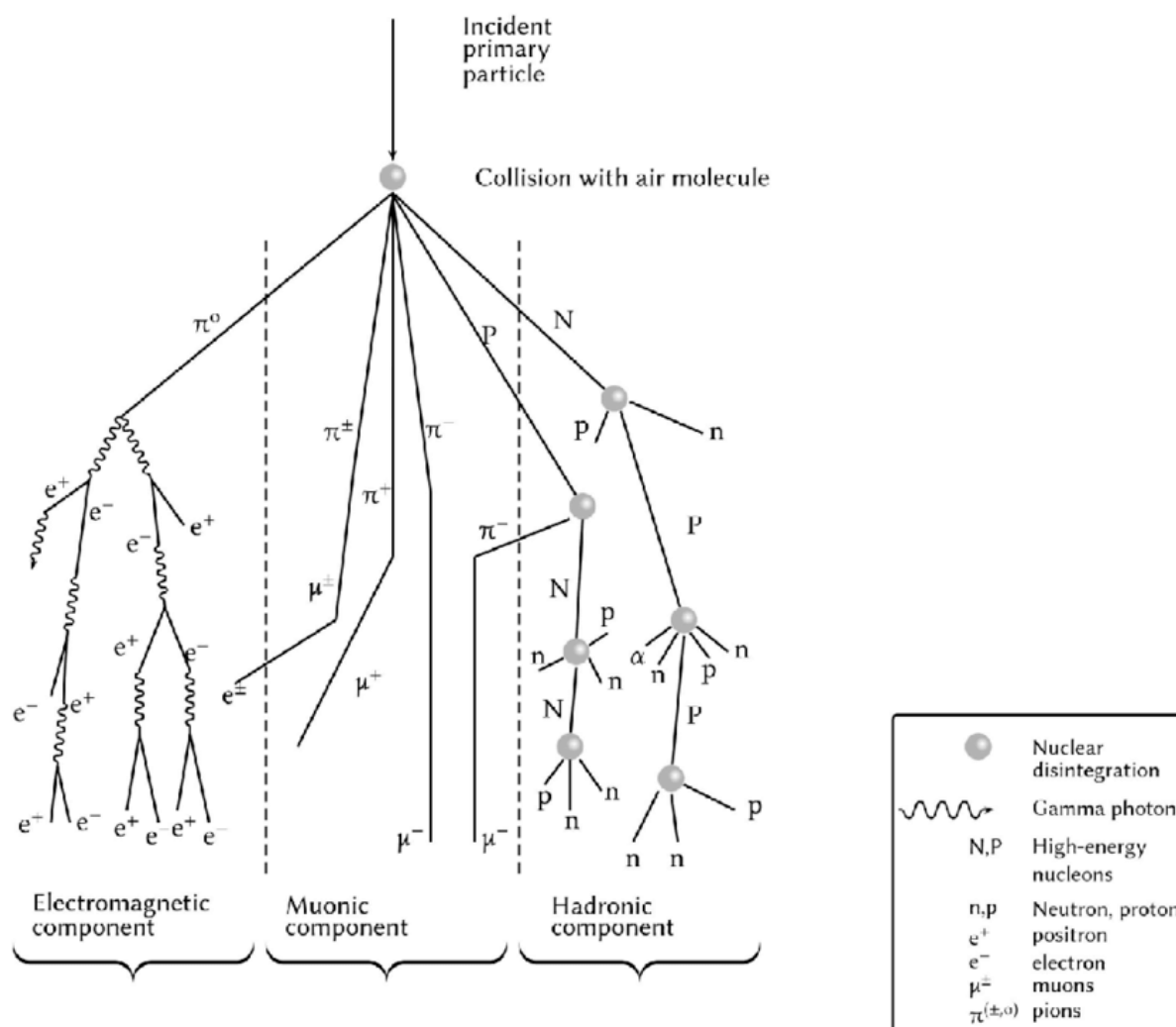
- hadronowa - skupiona głównie wokół osi pęku określanej przez kierunek trajektorii cząstki pierwotnej inicjującej pęk i tworząca jego rdzeń
- elektronowo-fotonowa - stowarzyszona z kaskadą hadronową
- mionowa - powstała głównie na skutek rozpadów pionów.

Każda z tych składowych rozwija się w różny sposób wraz ze wzrostem głębokości w atmosferze. Zostało to ukazane na rysunku 4.14.

## 4.4 Źródła promieniowania kosmicznego

Pomimo, iż promieniowanie kosmiczne zostało odkryte ponad sto lat temu, jego pochodzenie wciąż pozostaje tajemnicą. Wiązać może się to z ograniczoną wiedzą, jaką człowiek posiada na temat kosmosu. Istnieją jednak liczne hipotezy dotyczące pochodzenia promieniowania kosmicznego.

Wiedza dotycząca pochodzenia promieniowania kosmicznego opiera się na danych pochodzących z promieniowania pierwotnego, wtórnego oraz danych radioastrologicznych.



Rysunek 4.14: Szeroki pęk atmosferyczny z ukazanymi składowymi: hadronową, elektronowo-fotonową i mio-nową. Źródło:[27]

Uważa się, że cząstki wchodzące w skład promieniowania kosmicznego są głównie pochodzenia galaktycznego. Cząstki o bardzo dużej energii, tj.  $10^{17}$  eV/nukleon, prawdopodobnie powstają poza naszą Galaktyką. Natomiast część stosunkowo miękkich promieni kosmicznych jest pochodzenia słonecznego.[10]

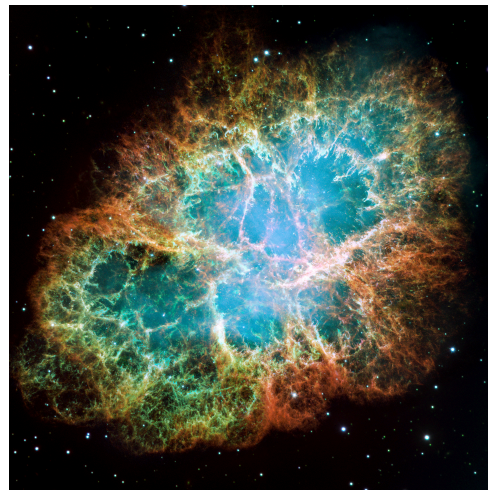
Zaobserwowano wyraźną korelację między rozbłyskami słonecznymi a nagłymi wzrostami liczby cząstek promieniowania kosmicznego, charakteryzującymi się energiami od 100MeV do kilku GeV. Stąd też wysnuto hipotezę o tym, że część promieniowania kosmicznego o niższych energiach może pochodzić od rozbłysków słonecznych.

Co więcej, uważa się, iż większość promieniowania kosmicznego pochodzi od wybuchów gwiazd supernowych. Podczas takiego wybuchu emitowane są cząstki, które następnie w przestrzeni kosmicznej mogą być przyspieszane (przez pole elektryczne), a ich torę mogą być zakrzywiane (przez pole magnetyczne obecne w kosmosie).

Radioastrologiczne dane o rozkładzie źródeł promieniowania nietermicznego w Galaktyce dostarczają informacji o tym, że najsilniejszymi źródłami są mgławice (otoczki gwiazd supernowych).

Są to głównie:

- Mgławica Kraba (rys. 4.15)
- Mgławica Kasjopeja A
- otoczka supernowej IC 443
- Mgławica Włóknista w gwiazdozbiore Łabędź
- centralny obszar radiacyjny Galaktyki



Rysunek 4.15: Mgławica Kraba. Źródło:[29]

Elektrony, które podlegają hamowaniu magnetycznemu, powstają głównie na skutek rozpadów mezonów  $\pi$ , tworzących się podczas zderzeń wiązki promieniowania kosmicznego z jądrami atomów materii międzygwiazdowej lub bezpośrednio w trakcie rozszerzania się otoczek gwiazd supernowych.

Analiza teoretyczna mówi, że przyśpieszenie promieni kosmicznych może zachodzić w sposób systematyczny lub statyczny poprzez spotkanie z ruchomymi niejednorodnościami pola magnetycznego. Pierwsza porcja cząstek wywołana jest najprawdopodobniej przez fale uderzeniowe, które powstają podczas zderzeń mas gazów w procesie mającym miejsce podczas wybuchów gwiazd supernowych. Stąd też, energia cząstek promieniowania kosmicznego pochodzi z energii jąder tych wybuchów.

Innym źródłem promieniowania kosmicznego mogą być również gwałtowne procesy mające miejsce w centrum naszej Galaktyki. Co ciekawe, obserwacje promieniowania kosmicznego dokonane przez satelitę PAMELA wskazują na niewielką różnicę prędkości między protonami a cząstkami alfa. Jest to wynik zaskakujący, za którym może się kryć inny, jeszcze nie poznany mechanizm powstawania promieniowania kosmicznego.

## Rozdział 5

# Metody obserwacji promieniowania kosmicznego

---

### 5.1 Badanie własności promieniowania kosmicznego

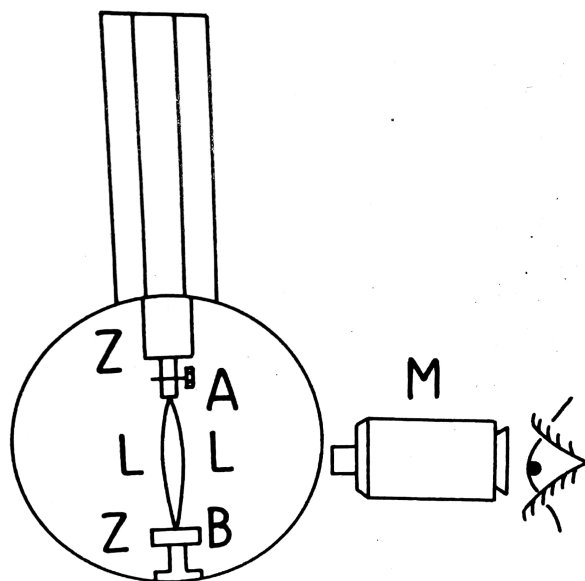
W czasie, kiedy odkryto promieniowanie kosmiczne panował pogląd, iż promieniowanie to jest promieniowaniem gamma. Nie było na to jednak bezpośrednich dowodów doświadczalnych.

W celu zbadania istoty promieniowania kosmicznego należało nieustannie ulepszać detektory, aparaturę detekcyjno-pomiarową oraz metody identyfikacji cząstek i szybkich jąder atomowych, poruszających się niekiedy z prędkością bliską prędkości światła.

Pierwsze badania nieznanego czynnika jonizującego przy powierzchni ziemi dokonano za pomocą **elektroskopu**. Podobne wyniki uzyskano za pomocą **komór jonizacyjnych**. Elektroskopy i komory jonizacyjne otaczano często metalowymi osłonami o różnej grubości. Wiktor Hess badał zmiany jonizacji w atmosferze wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza, wznosząc się ponad Ziemię za pomocą balona. Podczas tych badań korzystał z tzw. elektroskopu Wulfa, którego schemat został ukazany na rysunku 5.1. Jego wyniki zostały potwierdzone przez Wernera Kolhörstera, który posługiwał się podobnym, nieco ulepszonym przyrządem.

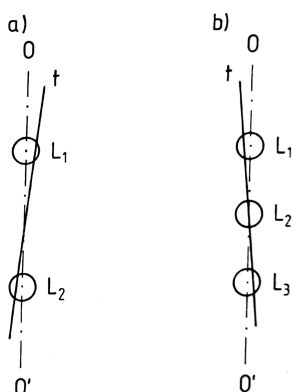
W roku 1922 R. A. Milikan i I. S. Bowen przeprowadzili swoje badania, wykorzystując w nich znacznie bardziej skomplikowane aparaty. Dla ich doświadczenia skonstruowano cztery niezwykle lekkie elektroskopy, charakteryzujące się nadzwyczajną precyzją.

---



Rysunek 5.1: Schemat elektroskopu Wulfa. Cienkie nitki kwarcowe pokryte warstewką metalu są połączone w punktach A i B. Umieszczone są one na specjalnym zawieszaniu ZZ. Nitki umiejscowione są wewnątrz dużego naczynia cylindrycznego. Odpychanie się nitek LL jest mierzone za pomocą mikroskopu M. Źródło:[8]

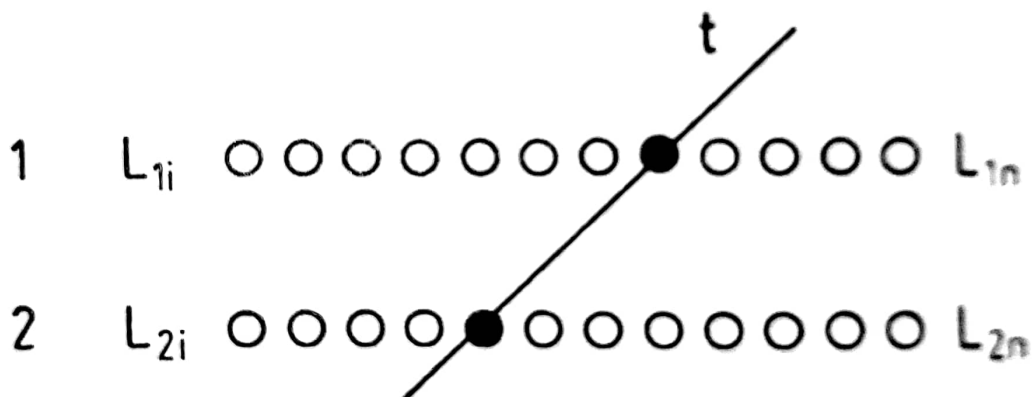
W. Bothe i W. Kolhörster w swoich badaniach promieni kosmicznych używali **liczników Geigera-Müllera** ustawionych jeden nad drugim. Ustawione były one w taki sposób, aby cząstka lecąca z góry (z "kosmosu") mogła przenikać przez nie wszystkie. Taki układ liczników stanowi teleskop. Daje on wskazania o przejściu cząstki przez wszystkie liczniki pracujące w koincydencji. Schematy najprostszyc teleskopów, złożonych z dwóch i trzech liczników, ukazane zostały na rysunku 5.2.



Rysunek 5.2: Schematy teleskopów zestawionych z liczników Geigera-Müllera pracujących w koincydencji. a) teleskop złożony z dwóch liczników, b) teleskop złożony z trzech liczników. t - trajektorie cząstki, 0'-0 - oś teleskopu. Źródło:[8]

Po stwierdzeniu, za pomocą min. układów teleskopowych liczników Geigera-Müllera, że promienie kosmiczne zawierają szybkie cząstki naładowane, pojawiła się potrzeba

wyjaśnienia natury tych cząstek i ich oddziaływania na atomy ośrodka. Wykorzystywano do tego inny układ liczników. Ustawiane były one w poziome warstwy pracujące w układzie koincydencyjnym. Były to tzw. **"układy hodoskopowe"** i pozwalały określać tory cząstek przechodzących przez te liczniki. Dzięki umieszczeniu między warstwami liczników w hodoskopach różnych warstw materiałów możliwym było określenie charakterystyk energetycznych cząstek. Układ ten został ukazany na rysunku 5.3.



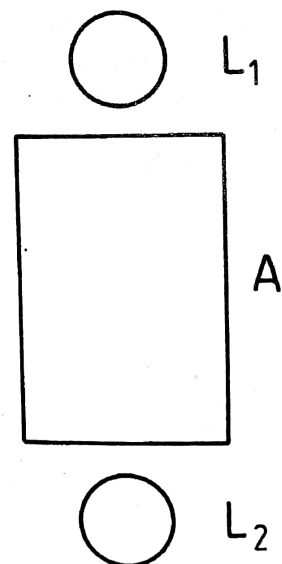
Rysunek 5.3: Hodoskop zestawiony z dwóch warstw (1 i 2) liczników pracujących w koincydencji. Przy przechodzeniu cząstki wzdłuż trajektorii  $t$  przez liczniki, widać ich zaczernienie. Źródło:[8]

Do badania natężenia promieniowania kosmicznego ze wzrostem wysokości nad poziomem morza używano przeważnie:

- liczników Geigera-Müllera
- komór jonizacyjnych
- liczników scyntylicyjnych
- liczników Czernkowa

Umieszczane były one na różnych wysokościach w górach, na balonach, raketach, sztucznych satelitach Ziemi, czy sondach kosmicznych. Często aparatura ta umieszczana była pod powierzchnią wody lub głęboko w kopalniach.

Oddziaływanie cząstek promieniowania kosmicznego z materiałem badano za pomocą urządzeń analogicznych do teleskopów złożonych z wielu detektorów pracujących w koincydencji. Między detektorami umieszczano absorbenty z różnych materiałów. Dzięki takim urządzeniom możliwym jest uzyskanie informacji o pochłanianiu promieniowania kosmicznego w różnych absorbentach w zależności od ich grubości. Zazwyczaj określano liczbę koincydencji zależnie od grubości absorbentu z określonego materiału. Opisane urządzenie zostało ukazane na rysunku 5.4.



Rysunek 5.4: Schemat urządzenia do badania pochłaniania promieniowania kosmicznego w materiałach.  $L_1$  oraz  $L_2$  - detektory np. liczniki GM, A - absorbent. Źródło:[8]

Podczas badań cząstek promieniowania kosmicznego istotny problem stanowi określenie ich energii. Stosuje się do tego różne metody odpowiednie do zakresu energii. Najczęściej stosowaną metodą jest metoda "kalorymetryczna". Podczas niej pomiar wykonuje się za pomocą **kalorymetru jonizacyjnego**.

Korzysta się wtedy z relacji między energią kinetyczną cząstki a całkowitą jonizacją wywołaną przez tę cząstkę i wszystkie cząstki wytworzone przez nią w reakcjach w odpowiednio grubych warstwach absorbentów.

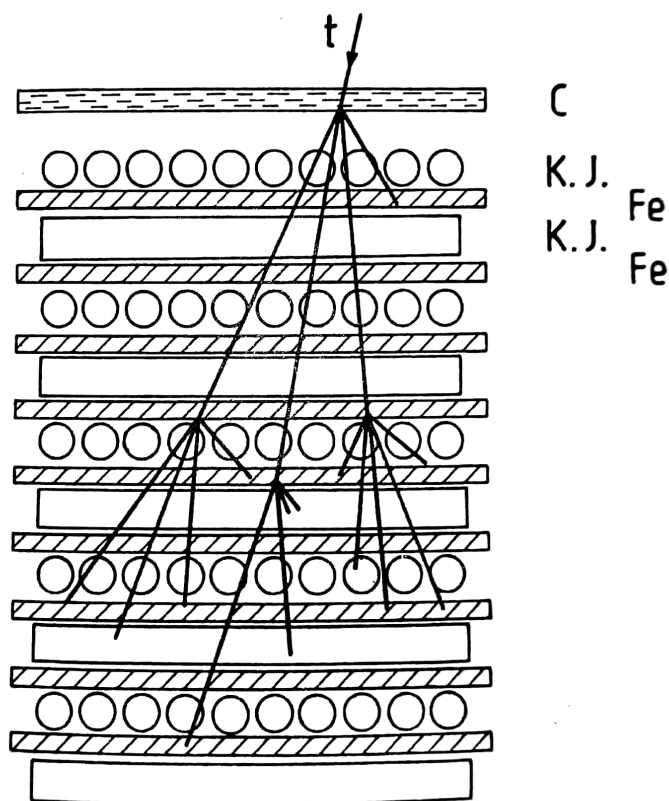
Efekt jonizacyjny określony jest przez całkowitą liczbę  $N_c$  par jonów wytworzonych w bloku materiału na skutek wniknięcia do niego cząstki o energii  $E_0$ . Spełniona jest wtedy relacja  $E_0 = kN_c$ , gdzie  $k$  jest średnią energią rozchodowaną na wytworzenie jednej pary jonów w bloku absorbenta.

Wartość  $N_c$  można określić znając rozkład jonizacji  $N(x)$ :

$$N_c = \int_0^{x_c} N(x) dx,$$

gdzie  $x_c$  jest grubością absorbenta w kalorymetrze.

Schemat kalorymetru jonizującego pokazano na rysunku 5.5. W celach badawczych kalorymetry te były wynoszone w przestrzeń kosmiczną na sztucznych satelitach i stacjach orbitalnych.



Rysunek 5.5: Schemat kalorymetru jonizacyjnego. C - płyta grafitowa - konwertor, w którym następuje reakcja cząstki z promieniowania kosmicznego padającej po trajektorii t. K.J. - komory jonizacyjne. Fe - absorbenty z żelaza. Komory jonizacyjne K.J. w warstwach sąsiednich ułożone są względem siebie prostopadłe osiami Źródło:[8]



## 5.2 Obecne sposoby rejestrowania promieniowania kosmicznego

Obecne metody detekcji promieniowania kosmicznego dzielą się na dwa rodzaje. Są to **bezpośrednie** oraz **pośrednie** metody detekcji promieniowania kosmicznego.

Metody bezpośrednie bazują na detekcji pierwotnego promieniowania kosmicznego w przestrzeni kosmicznej (za pomocą satelitów), bądź w wysokich warstwach atmosfery (eksperymenty balonowe).

Metody pośrednie natomiast bazują na pomiarze wtórnego promieniowania kosmicznego wchodzącego w skład szerokich pęków atmosferycznych. Pomiarów te wykonywane są w licznych obserwatoriach znajdujących się na powierzchni Ziemi, jednak w przyszłości planowane jest wykonywanie takich pomiarów również w przestrzeni kosmicznej, czy też za pomocą eksperymentów balonowych.

### 5.2.1 Metody bezpośrednie

W ramach metod bezpośrednich umieszcza się detektory promieniowania kosmicznego na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, satelitach oraz balonach wznoszących się na duże wysokości. Główną wadą tego rozwiązania jest konieczność wyborów detektorów o niewielkiej masie i rozmiarach.

### 5.2.2 Metody pośrednie

Metody pośrednie bazują na pomiarach promieniowania kosmicznego wykonywanych przez eksperymenty plasujące się na Ziemi. Podzielić je można na dwie kategorie: eksperymenty badające wtórne promienie kosmiczne tworzące szerokie pęki atmosferyczne oraz eksperymenty mierzące promieniowanie elektromagnetyczne wytworzone przez pęki w atmosferze.

Większość z tych eksperymentów wykorzystuje tzw. "teleskopy Czernkowa", które są zdolne do badania wysokoenergetycznych fotonów będących z zakresu energii od 50 GeV do 50 TeV.

### 5.2.3 Eksperymenty badające promieniowanie kosmiczne

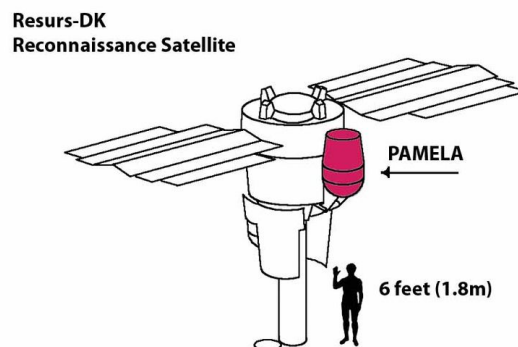
Eksperymenty zajmujące się badaniem promieniowania kosmicznego można podzielić na eksperymenty oparte na balonach, bądź satelitach (rys. 5.6) oraz eksperymenty naziemne (rys. 5.7).

Przykładowe programy badawcze oparte na satelitach:

- PAMELA (rys. 5.6b) - satelita, która w swoich badaniach skupiona jest na odnalezieniu w wiązce promieniowania kosmicznego antymaterii
- Voyager 1, 2 (rys. 5.6a) - dwie sondy kosmiczne wysłane przez NASA poza obszar naszego systemu gwiazdowego. W swoich założeniach miały na celu również badanie promieniowania kosmicznego
- ACE (Advanced Composition Explorer) - program satelitarny NASA badający min. wiatr słoneczny



(a) Sonda Voyager. Sondy Voyager 1 i Voyager 2 są identyczne w budowie. Źródło:[20]



(b) Satelita Pamela z zaznaczonym na różowo detektorem. Źródło:[21]

Rysunek 5.6: Programy badawcze oparte na satelitach

Przykładowe programy badawcze bazujące na balonach:

- Advanced Thin Ionization Calorimeter - program przeprowadzany na Antarktydzie
- Cosmic Rays Energetics and Mass (CREAM) - eksperyment balonowy badający skład promieni kosmicznych o energiach powyżej  $10^{15}$ eV

Przykłady eksperymentów naziemnych:

- CLOUD - eksperyment badający promieniowanie kosmiczne, mieszczący się przy CERN
- KASCADE (rys. 5.7b) - eksperyment badawczy poruszający tematykę pierwotnego promieniowania kosmicznego
- Pierre Auger Observatory (rys. 5.7a) - obserwatorium, które dąży do detekcji wysokoenergetycznych cząstek wchodzących w skład promieniowania kosmicznego



(a) Obserwatorium Pierre Auger. Źródło:[22]



(b) Eksperyment KASCADE. Źródło:[23]

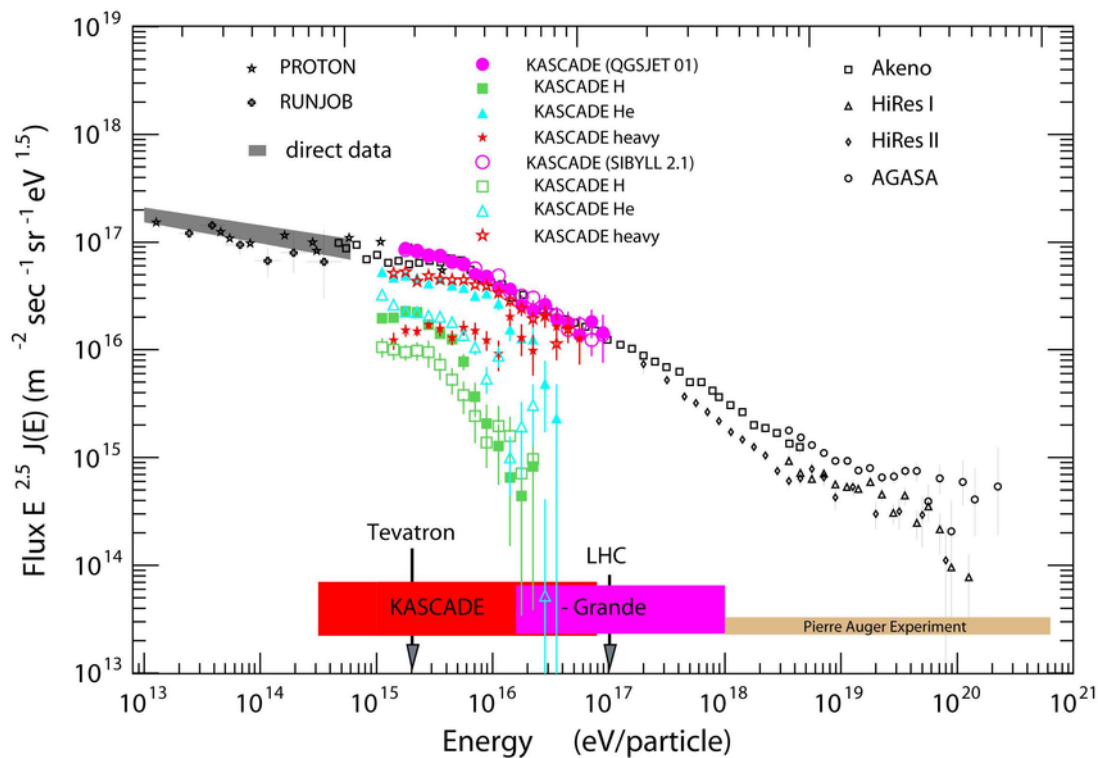
Rysunek 5.7: Eksperymenty naziemne zajmujące się promieniowaniem kosmicznym

Wartym wspomnienia jest również fakt, iż eksperyment NA61/SHINE działający przy CERN, do którego w ramach realizowanej pracy inżynierskiej należy autor niniejszego opracowania, przyczynia się do badania promieniowania kosmicznego.

Kolaboracja NA61/SHINE wykonuje pomiary referencyjne dla eksperymentów KASCADE oraz Pierre Auger Observatory. W ramach tych pomiarów, eksperyment NA61/SHINE mierzy produkcję hadronów powstających ze zderzenia pion-węgiel. Jest to przybliżenie tego, co dzieje się, gdy piony wchodzą w interakcję z jądrami powietrza. Wyniki eksperymentu NA61/SHINE pozwolą lepiej zrozumieć kaskady powstające w szerokich pękach atmosferycznych, a tym samym pomogą wydedukować właściwości wysokoenergetycznych cząstek promieniowania kosmicznego na podstawie danych dotyczących szerokich pęków atmosferycznych.

**KASCADE** był to eksperyment, który w swojej tematyce poruszał kwestie promieniowania kosmicznego. Badał on skład pierwotnej wiązki promieniowania kosmicznego oraz oddziaływania silne poprzez symultaniczne pomiary elektronów, mionów oraz hadronów wchodzących w skład szerokich pęków atmosferycznych. Ten europejski eksperyment mieścił się w Niemczech przy Karlsruher Institut für Technologie[14] i zakończył swoje działanie w roku 2013. Pomimo to część detektorów, z których korzystało KASCADE, jest nadal w użyciu przez inne eksperymenty badające promieniowanie kosmiczne.

Wynikiem działania eksperymentu KASCADE było odnalezienie „kolana” na wykresie spektrum energii w okolicy 80 PeV oraz rozszerzenie pomiarów tego spektrum do 200 PeV (rys. 5.8).



Rysunek 5.8: Spektrum energii wiązki promieniowania kosmicznego wraz z pomiarami wykonanymi przez eksperyment KASCADE. Na wykresie widoczne jest charakterystyczne „kolano” przy energiach około 80 PeV. Źródło:[45]

**Pierre Augner Observatory** jest międzynarodowym obserwatorium, zlokalizowanym w Argentynie, w którym za pomocą szeregu detektorów badana jest wiązka promieniowania kosmicznego. Głównym jego celem działania jest detekcja ultrarelatywistycznych cząstek poruszających się z prędkościami bliskimi prędkościom światła, o energiach powyżej  $10^{18}$  eV. Sieć detektorów Czerenkowa została rozlokowana na obszarze sięgającym do  $3000 \text{ km}^2$ , w celu detekcji wielu szerokich pęków atmosferycznych.

Konstrukcja urządzeń wchodzących w skład Pierre Augner Observatory zaczęła się w roku 2000, zbieranie danych natomiast rozpoczęto w 2005 roku.

W 2017 roku, dane pochodzące z 12 lat obserwacji ukazały znaczącą anizotropię kierunku przybycia promieni kosmicznych o energiach powyżej  $8 \cdot 10^{18}$  eV. Wynik ten sugeruje, że źródła pochodzenia tych ekstremalnie wysokoenergetycznych promieni kosmicznych należy doszukiwać się w obszarach pozagalaktycznych. Jednakże nie wiadomo narazie, które galaktyki są odpowiedzialne za występowanie tych ultrarelatywistycznych cząstek. Pytanie to pozostaje przedmiotem badań w ramach aktualizacji Pierre Augner Observatory.

## 5.3 Oddziaływanie promieniowania kosmicznego z materią

Jądra atomowe oraz cząstki bardzo często oddziałują nie od razu po zetknięciu z granicą ośrodka (np. z atmosferą) lecz po przebyciu w niej pewnej drogi.

### 5.3.1 Cząstki naładowane elektrycznie

Cząstki naładowane elektrycznie przechodząc przez ośrodek powodują wzbudzenie i jonizację atomów ośrodka. Podczas procesu jonizacji cząstka traci część swojej energii oraz zmniejsza swoją prędkość. Średnie straty energii na jonizację opisuje wzór Bethego-Blocha:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4}{mv^2} \frac{Z}{A} \left[ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right],$$

gdzie:

- $E$  - energia cząstki
- $x$  - droga cząstki w ośrodku [ $g/cm^2$ ]
- $m$  - masa elektronu
- $z$  - ładunek cząstki w jednostkach ładunku elementarnego  $e$
- $v$  - prędkość cząstki
- $\beta$  - stosunek  $v/c$
- $N_0$  - liczba Avogadro
- $Z, A$  - liczba atomowa i masowa atomów ośrodka
- $I$  - efektywny potencjał jonizacyjny uśrednionych po wszystkich elektronach  $I \approx 10 Z eV$

Wzór ten dostarcza informacji, że wartość średniej straty energii kinetycznej na jonizację ośrodka tzw.  $\langle dE/dx \rangle$  nie zależy od masy cząstki  $M$  i zmienia się z prędkością jak  $1/v^2$ . Zależność  $\langle dE/dx \rangle$  od rodzaju ośrodka jest bardzo słaba, bo  $Z/A \approx 0.5$  dla niemalże wszystkich jąder (wyłączając z tego wodór oraz najcięższe pierwiastki).

Straty jonizacyjne dla elektronu, będącego najlżejszą cząstką naładowaną, istotnie fluktuują. Wynika to z faktu, iż ulega on dużym rozproszeniom w polach kulombowskich jąder atomowych, czemu towarzyszy emisja kwantów gamma.

Na straty energii na jonizację nakładają się również straty radiacyjne na promieniowanie elektromagnetyczne. Wszystkie cząstki naładowane elektrycznie podlegają radiacyjnemu hamowaniu wraz z towarzyszącą mu emisją promieniowania elektromagnetycznego. Jest to tzw. "Bremsstrahlung". Zjawisko to może występować dla wszystkich cząstek naładowanych, ale prawdopodobieństwo jego wystąpienia jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu masy hamowanej cząstki. Stąd też, przykładowo, dla mionów proces ten jest

około 40 000 razy rzadszy niż dla elektronów.[8] W wyniku zjawiska hamowania pojawiają się kwanty o energiach małych i porównywalnych z energią hamowanego elektronu. Wypromieniowanie jednego kwantu o dużej energii jest tak samo prawdopodobne, jak prawdopodobieństwo wypromieniowania takiej samej energii w postaci wielu kwantów. Średnią stratę energii na promieniowanie hamowania wyraża wzór:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Bs} = \frac{4e^4}{137c^4} \frac{N}{A} Z(Z+1) \frac{1}{m_0^2} E \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right),$$

gdzie:

- $e$  - ładunek elektronu
- $N$  - liczba Avogadro
- $A, Z$  - liczba masowa i atomowa w ośrodku
- $m_0, E$  - masa i energia cząstki hamowanej

Cząstkom naładowanym elektrycznie o dostatecznie dużych prędkościach towarzyszy promieniowanie Czerenkowa. Gdy cząstka zbliża się do atomu, wtedy pod wpływem jej pola elektrycznego chmura elektronowa atomu ulega przesunięciu względem jądra.

### 5.3.2 Cząstki neutralne o masach równych lub bliskich zeru

Przykładem cząstek neutralnych o zerowej masie są kwanty gamma. Do niedawna sądzono, iż również neutrino są cząstkami o zerowej masie jednak w świetle uzyskanych badań wykazano, iż neutrino mają masę niezerową.

Wysokoenergetyczne fotony oddziałują z materią w trzech procesach:

- zjawisku fotoelektrycznym
- rozpraszaniu Comptonowskim
- reakcji par cząstka-antycząstka

Przy oddziaływaniu fotonów z materią mogą zostać one całkowicie pochłonięte lub rozproszone na duże kąty. Osłabienie wiązki fotonów przebiega zgodnie z prawem eksponencjalnym:

$$I = I_0 \exp(-\mu x),$$

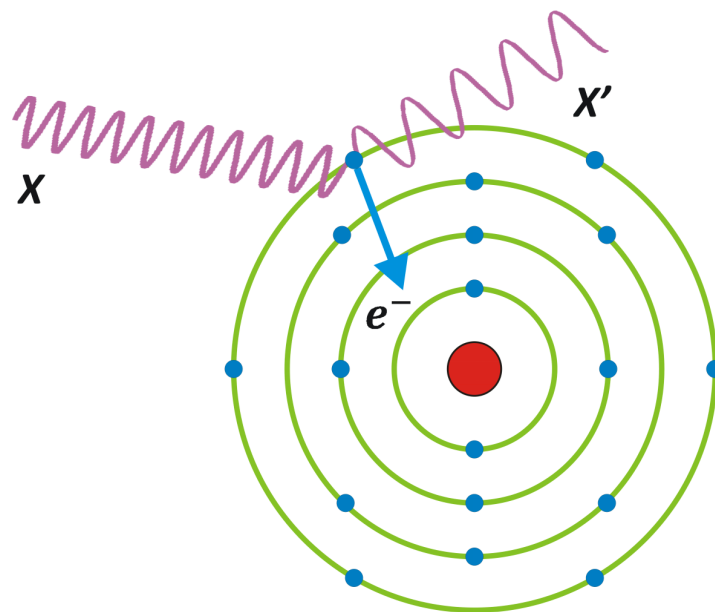
gdzie:

- $\mu$  - współczynnik pochłaniania ( $\mu = \mu_{fe} + \mu_{Cs} + \mu_{pp}$ ) składający się z trzech współczynników odpowiadających trzem wspomnianym zjawiskom.
- $I_0$  - natężenie wiązki padającej na granicę ośrodka

W przypadku **zjawiska fotoelektrycznego**, foton pochłaniany jest przez atom. W takim przypadku energia  $E = h\nu - W$ , gdzie  $W$  jest energią wiązania elektronu w atomie. Proces ten dominuje w przypadku oddziaływań fotonów z jądrami ciężkimi, gra on istotną rolę w przypadku małych energii tj.  $E \in (0.01, 1) \text{ MeV}$ .

W przypadku energii większych od  $1 \text{ MeV}$  zaczyna dominować **zjawisko Comptona** (rys. 5.9). Gdy kwant gamma zderza się z elektronem, rozprasza się on (kwant) przekazując część swojej energii elektronowi odrzutu. Wynikiem czego, długość fali fotonu przesuwana jest w stronę mniejszych wartości. Prawdopodobieństwo zajścia takiego procesu szybko maleje wraz ze wzrostem energii rozpraszanego kwantu gamma.

W przypadku gdy energia fotonu osiąga wartość większą od podwójnej masy spoczynkowej elektronu może zajść zjawisko **kreacji par** elektron-pozyton. Wysokoenergetyczny foton przechodząc w pobliżu jądra atomowego, oddziałuje z polem elektrycznym jądra. W wyniku tego traci swoją całkowitą energię. Jej kosztem powstaje para cząstek - elektron i pozyton.

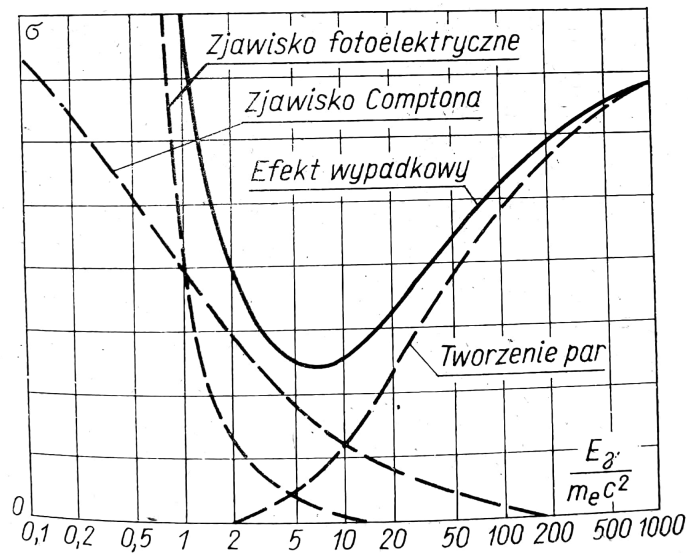


Rysunek 5.9: Efekt Comptona.  $X$  - padający kwant gamma,  $e^-$  - elektron odrzutu,  $X'$  - rozproszony kwant gamma, charakteryzujący się mniejszą długością fali, niż kwant padający. Źródło:[42]

Całkowity przekrój czynny na wszystkie trzy procesy przedstawia się następująco:

$$\sigma = \sigma_{fe} + \sigma_{Cs} + \sigma_{pp}.$$

Na rysunku 5.10 ukazano przebieg przekrojów czynnych na absorpcję kwantów  $\gamma$  w ołowiu w funkcji energii dla każdego z trzech mechanizmów oddziaływania, jak również całkowity przekrój czynny  $\sigma$ .



Rys. 166

Rysunek 5.10: Przekrój czynny na absorpcję kwantów  $\gamma$  w ołowiu w funkcji energii. Na wykresie ukazano zjawiska: fotoelektryczne, krecacji par oraz Comptona. Ukazany został również efekt wypadkowy. Źródło:[12]

### 5.3.3 Cząstki neutralne o masach niezerowych

Przykładowe cząstki neutralne o niezerowych masach to: neutrony oraz neutralne piony, mezony i kaony.

W przypadku, gdy neutrony przenikają przez ośrodek, mogą być rozpraszane na jądrach i wychwytywane przez protony. Co więcej mogą powodować przemiany jądrowe, bądź w wyniku reakcji mogą wytwarzać się nowe cząstki. Ilościowy udział poszczególnych procesów zależy od energii neutronów.

Zazwyczaj stosuje się poniższy podział wartości energii dla neutronów:

- neutrony powolne - poniżej  $10^3 \text{ eV}$
- neutrony o średnich energiach - ( $10^3, 5 \cdot 10^5$ )  $\text{eV}$
- neutrony szybkie - ( $5 \cdot 10^5, 10^7$ )  $\text{eV}$
- neutrony superszybkie - powyżej  $5 \cdot 10^7 \text{ eV}$ .

Efektom oddziaływania neutronów superszybkich z jądrami atomów jest wytwarzanie cząstek neutralnych bądź elektrycznie naładowanych. Każda z wytworzonych cząstek neutralnych może, podobnie jak neutron, powodować wytwarzanie cząstek w zderzeniach jądrowych, jeśli posiada wystarczająco dużą energię kinetyczną. Co więcej, większość cząstek neutralnych rozpada się spontanicznie przez to, że posiadają skończony czas życia.

Przykładowo, neutralne piony rozpadają się zazwyczaj na dwa kwanty gamma. Przy dostatecznie dużej energii rozpadającego się pionu, poszczególne produkty rozpadu mogą posiadać energie przewyższające masę spoczynkową rozpadającego się pionu.



## Rozdział 6

# Promieniowanie kosmiczne a człowiek

---

### 6.1 Wpływ promieniowania kosmicznego na człowieka

Promieniowanie kosmiczne jest czynnikiem, który nieustannie towarzyszy każdemu człowiekowi na Ziemi. Mimo to, większość ludzi nawet nie zdaje sobie sprawy z jego obecności.

Wpływ promieniowania kosmicznego stanowi jedynie ułamek całkowitego promieniowania pochodzącego ze źródeł naturalnych, na jakie narażony jest człowiek. Całkowita dawka pochodząca ze źródeł naturalnych, jaką pochłaniają ludzie w ciągu całego roku, określona jest na poziomie około  $3 \text{ mSv}$ . Udział promieniowania kosmicznego w tym wyniku wynosi około  $0.39 \text{ mSv}$ , co daje jedynie 13% całego wkładu[37].

Jednakże promieniowanie pochodzące od promieni kosmicznych zwiększa się wraz z wysokością. Dawka pochodząca od promieniowania kosmicznego na poziomie morza stanowi około  $0.3 \text{ mSv}$ , zwiększając się do wartości  $1.0 \text{ mSv}$  dla miast położonych na większych wysokościach nad poziomem morza.

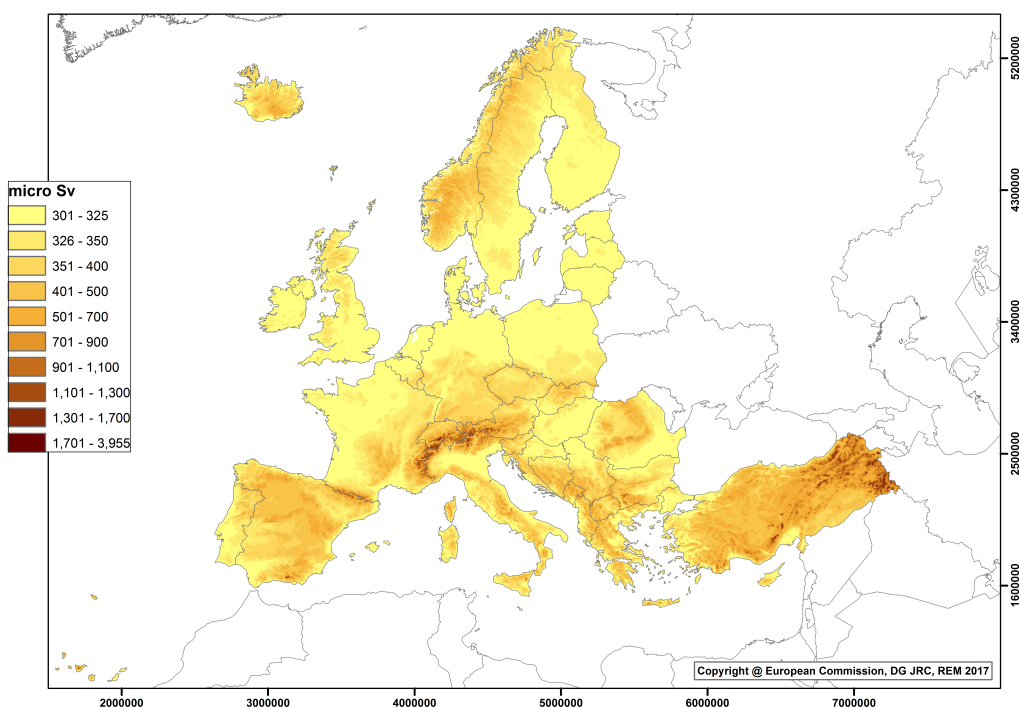
Średnia dawka skuteczna, jaką w ciągu roku otrzymuje mieszkaniec Europy (na poziomie morza) jest ukazana na rysunku 6.1.

#### 6.1.1 Wpływ na elektronikę

Promienie kosmiczne mają wystarczające energie, aby zmieniać stany elementów wchodzących w skład układów elektronicznych. Powodować to może występowanie przejściowych błędów, takich jak uszkodzenie danych, bądź nieprawidłowa wydajność procesorów. Błędy

---

European Annual Cosmic-Ray Dose Map



Rysunek 6.1: Mapa ukazująca roczną dawkę skuteczną, jaką mieszkańcy Europy otrzymuje (na poziomie morza) ze wszystkich komponentów promieniowania kosmicznego. Źródło:[24]

te określane są terminem "błędy miękkie". Problem ten obowiązywał dla elektroniki znajdującej się na dużych wysokościach, przykładowo na satelitach, jednakże wraz z ciągłym zmniejszaniem rozmiarów tranzystorów problem ten zaczyna również dotyczyć elektroniki znajdującej się na Ziemi.

Badania przeprowadzone przez IBM w latach 90. XX w. wykazały, że komputery doświadczają średnio jednego błędu wywołanego promieniowaniem kosmicznym na 256 megabajtów pamięci RAM miesięcznie. W celu złagodzenia tego błędu, firma Intel proponowała detektor promieniowania kosmicznego, który mógłby być zintegrowany z mikroprocesorami przyszłej generacji. Umożliwiłby on procesorowi powtórzenie ostatniego polecenia po zdarzeniu związanym z promieniowaniem kosmicznym. Pamięć ECC służy do ochrony danych przed uszkodzeniem spowodowanym przez wiązkę promieniowania kosmicznego.

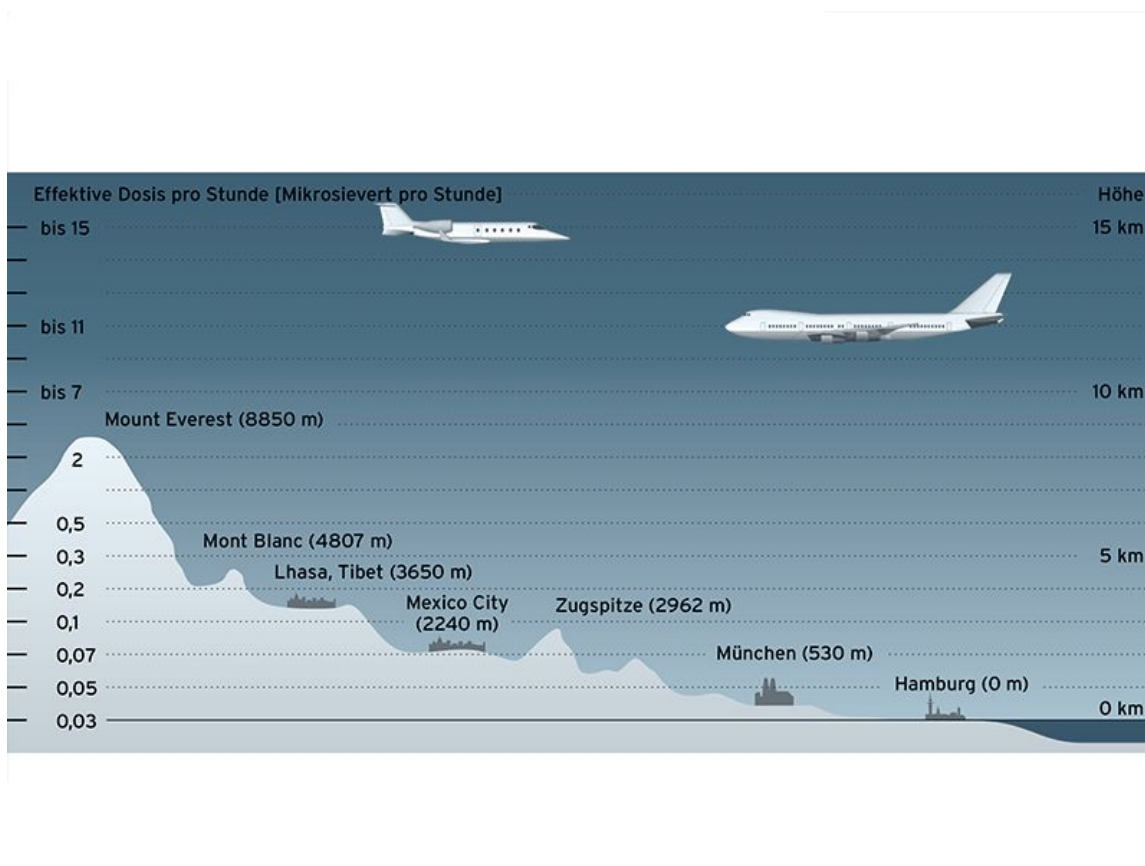
W roku 2008 uszkodzenie danych w systemie sterowania lotem spowodowało, że samolot Airbus A330 spadł z wysokości setek stóp, powodując obrażenia u wielu pasażerów i członków załogi. Promieniowanie kosmiczne zostało rozważone w kategorii jednej z możliwych przyczyn uszkodzenia danych, jednakże wykluczono je przez to, że przyczyna ta była zbyt mało prawdopodobna.

W sierpniu 2020 naukowcy poinformowali, że promieniowanie jonizujące pochodzące od

środowiskowych źródeł promieniotwórczych oraz wiązki promieniowania kosmicznego może mieć negatywny wpływ na realizację odpornych na uszkodzenia nadprzewodzących komputerów kwantowych.

### 6.1.2 Loty samolotowe i kosmiczne

Samoloty pasażerskie latają na wysokościach około 10 km. Natomiast loty o prędkościach naddźwiękowych sięgają wysokości nawet 17 000 - 23 000 metrów. Jest to obszar, który można uznać za będący praktycznie poza atmosferą ziemską (rys. 6.2).



Rysunek 6.2: Ekspozycja na promieniowanie kosmiczne podczas rejsu samolotem na różnych wysokościach. Na grafice ukazano zależność dawki efektywnej na godzinę (niem. effektive Dosis pro Stunde (Mikrosievert pro Stunde)) w funkcji wysokości nad poziomem morza wyrażonej w kilometrach (niem. Höhe). Przedstawiono miejscowości położone na różnych wysokościach nad poziomem morza. Lokalizacja każdej z nich wpływa na przyjmowaną dawkę promieniowania kosmicznego. Źródło:[25]

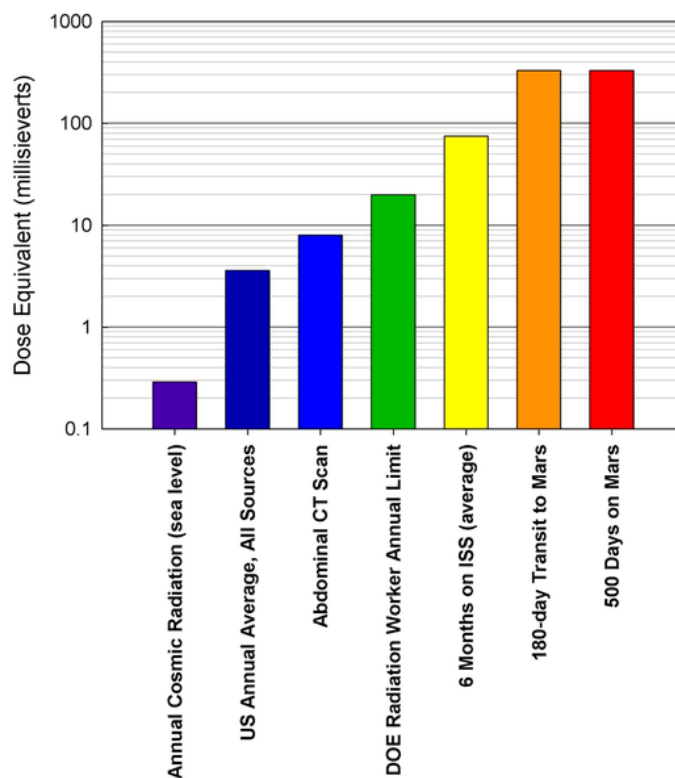
Przy lotach na wysokościach około 20 km podczas pracy załogi wynoszącej 20 h w ciągu miesiąca, dawka promieniowania otrzymywana przez pracowników wynosi około 480 mrem/rok[8] co daje wartość 4.8 mSv/rok. Nie jest to wartość zagrażająca ludzkiemu życiu, jako że dopuszczalna roczna wartość promieniowania wedle polskich norm została określona na 5 mSv. W czasie takich lotów załoga narażona jest na słabe napromieniowanie jądrami ciężkimi. Mimo, że strumień jąder ciężkich na tych wysokościach wynosi około 1% od strumienia pierwotnego, wiadomym jest, iż pojedyncze uderzenia jąder atomowych o

małych energiach mogą powodować istotne lokalne uszkodzenia komórek w ciele. Szczególnie znaczące uszkodzenia zachodzą w ludzkim organizmie, gdy jądro wyhamowywane jest w nim samym. Ocenia się, iż wyhamowywanie jąder o liczbie  $Z \geq 6$  zdarza się z częstością około  $6 \cdot 10^{-3}$  w ciągu godziny w  $1 \text{ cm}^3$  ciała.

Również pasażerowie samolotów nie muszą obawiać się promieniowania kosmicznego, o ile ograniczają ilość lotów w ciągu roku. Zakładając, że pasażer samolotu w czasie godzinnego lotu na wysokości 11 km n.p.m otrzymuje dawkę promieniowania równą  $6.781 \mu\text{Sv}$ [36], a dopuszczalny wzrost dawki w ciągu roku to  $1 \text{ mSv}$ , pozwala mu to na 166 godzinnych lotów w ciągu roku.

W przypadku długotrwałych lotów na statkach kosmicznych w otwartej przestrzeni (poza atmosferą ziemską) załoga narażona jest na promieniowanie, którego skutkiem może być zwiększone prawdopodobieństwo zachorowania na nowotwory. Z danych klinicznych, określono, że prawdopodobieństwo nabycia białaczki w czasie misji kosmicznych podwaja się.

Wpływ ciężkich jonów na organizm ludzki badany był podczas misji Apollo na księżyc. Astronaucci określali, iż widzieli rozbłyśki świetlne mimo zamkniętych oczu. Eksperymenty określiły, że rozbłyśki te były powodowane przez zderzenia ciężkich jonów z siatkówką oka. Co więcej, ustalono, iż gdy na cebulki włosów padają ciężkie jony, włosy stają się koloru szarego. Prawdopodobnie, gdy niskoenergetyczny ciężki jon uderzy w jądro komórki, zniszczeniu ulega cała komórka na skutek wydzielenia się w niej dużej ilości energii.



Rysunek 6.3: Porównanie dawek promieniowania, w tym kolejno: roczna dawka promieniowania kosmicznego na poziomie morza, średnia roczna dawka dla mieszkańca USA pochodząca ze wszystkich źródeł promieniowania, dawka pochodząca od tomografii komputerowej mięśni brzucha, roczna dawka dopuszczalna dla osób pracujących z promieniowaniem, średnia dawka, na którą narażeni są ludzie przebywający 6 miesięcy na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), dawka uzyskana w wyniku podróży z Ziemi na Marsa trwającej 180 dni oraz dawka uzyskana w wyniku przebywania na Marsie przez 500 dni. Źródło:[37]

Promienie kosmiczne pochodzenia galaktycznego stanowią jedną z najważniejszych barier stojących na drodze planów podróży międzyplanetarnych (rys. 6.3). Promieniowanie kosmiczne stanowi również zagrożenie dla elektroniki znajdującej się pokładzie statków kosmicznych.

W 2010 roku awaria sondy kosmicznej Voyager 2 została przypisana odwróceniu pojedynczego bitu, co zostało spowodowane prawdopodobnie przez wiązkę promieniowania kosmicznego. Stąd też rozważa się fizyczne lub magnetyczne ekranowanie statków kosmicznych w celu zminimalizowania uszkodzeń elektroniki oraz narażeń ludzi na promienie kosmiczne.

### **6.1.3 Postulowany wpływ na zmianę klimatu**

Wpływ promieniowania kosmicznego na zmiany klimatu został zasugerowany przez E. Neyę w 1959r. oraz R. Dickinsona w 1975r.

Postulowano, że wiązka promieniowania kosmicznego mogła być odpowiedzialna za poważne zmiany klimatu i masowe wymieranie w przeszłości.

Wedle A. Mellotta i M. Miedwiediewa, cykle w biologicznych populacjach morskich, trwające 62 milionów lat, wykazują korelacje z ruchem Ziemi względem płaszczyzny Galaktyki i wzrostem ekspozycji na działanie promieniowania kosmicznego.

Co więcej, uważa się, iż bombardowanie promieniami gamma pochodzącymi z lokalnych supernowych mogło przyczyniać się do mutacji oraz być powiązane z decydującymi zmianami klimatu Ziemi i masowym wymieraniem w epoce Orodowiku.

## **6.2 Zastosowania promieniowania kosmicznego**

Promieniowanie kosmiczne, niosące tak niewielki wkład w całkowitą dawkę, jaką pochłania człowiek w ciągu roku, mogłoby się wydawać zjawiskiem pomijalnym, niewartym uwagi. Wiadomo, że energie kinetyczne cząstek napotykanego w promieniach kosmicznych są największe ze wszystkich, jakie obserwuje się we Wszechświecie, jednakże użycie tych cząstek w bezpośrednich badaniach procesów jądrowych przy wielkich energiach jest praktycznie niemożliwe. Wynika to z faktu, iż strumienie takich cząstek są znikomo małe w porównaniu ze strumieniami, jakie należałoby stosować do takich badań.

Jednakże naukowcom udało się odnaleźć sposoby, dzięki którym wiązka promieniowania kosmicznego może być przydatna dla ludzkości. Wykorzystuje się ją min. do prześwietleń piramid, rejestracji fal morskich oraz przyptyków i odpływów a nawet do prześwietleń bagaży na lotniskach.

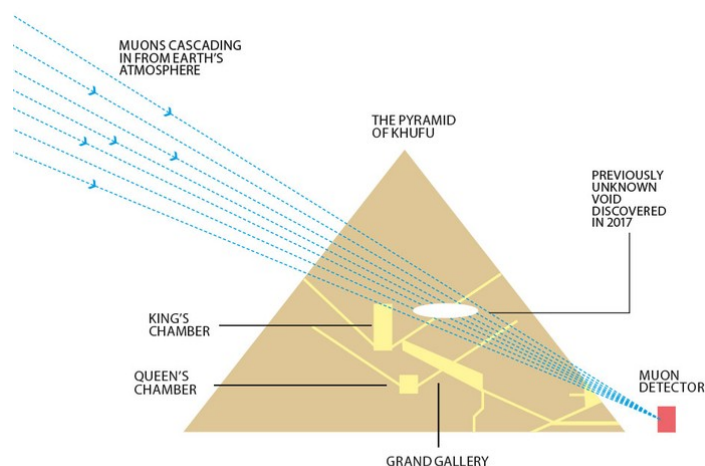
## 6.2.1 Prześwietlanie piramid

Zespół fizyków, w skład którego wchodził L.W. Alvarez (i inni), opublikował pracę [43], w której ukazano, w jaki sposób strumień mionów kosmicznych może być użyty do poszukiwania ukrytych komór w piramidach egipskich.

Metodologia użyta w takich badaniach bazuje na fakcie, iż część widma energetycznego składającego się z niskoenergetycznych mionów jest obcinana, gdy wiązka ta przenika przez skończoną warstwę absorbentu.

Gdy użyje się detektora mionów o wysokiej zdolności rozdzielczej kątowej w podziemnym laboratorium w górach, da się określić wariacje kątowe strumienia tychże cząstek. W efekcie tego możliwe staje się określenie konturu warstwy gór nad detektorem. Jest on widoczny w świetle wiązki mionowej. W podobny sposób można wykrywać inne obiekty znajdujące się pod grubymi warstwami jakiegoś ośrodka.

W podobny sposób za pomocą wiązek mionów prześwietla się piramidy (rys. 6.4). W Gizie znajdują się trzy piramidy. W jednej z nich, w piramidzie Cheopsa istnieje system przejść, korytarzy, galerii oraz komór. W piramidzie Chephrena znana jest jedynie jedna komora, stąd też za pomocą detektora mionowego poszukiwano anomalii w rozkładzie kątowym mionów, które przeszły przez piramidę. Przeanalizowane zostało  $2 \cdot 10^6$  śladów mionowych, jednakże ukrytych komór nie odnaleziono.



Rysunek 6.4: Schematyczna ilustracja ukazująca proces prześwietlania piramid. Źródło:[43]

## 6.2.2 Rejestracja fal morskich, przyptyków oraz odpływów

Pracę w tym zakresie wykonywali O.C Allkofer i M. Simon. Oparta była ona na dawno zaobserwowanym fakcie. Mianowicie dostrzeżono, iż strumień promieniowania kosmicznego na poziomie morza jest niemalże stały. W przypadku, gdy detektor dostarczający informacji o grubości warstwy materiału osłabiającego strumień promieniowania umieszczony zostanie w wodzie, dostarczać będzie informacji o grubości warstwy wody. Informację tę będzie można wywnioskować na podstawie głębokości detektora w wodzie oraz strumienia

promieni kosmicznych.

Powyższa metoda pozwala na uzyskanie charakterystyki fal morskich. Dostarcza informacji na temat okresów, amplitudy i kształtów fal.

Sposób ten ma znaczącą przewagę nad metodą standardową, która odbywa się za pomocą rejestrujących urządzeń mechanicznych. Mianowicie, metoda wykorzystująca właściwości promieniowania kosmicznego, umożliwia badanie fal morskich, nawet w przypadku gdy na morzu dryfują bryły lodu.

### **6.2.3 Sprawdzanie bagaży na lotnisku**

Obecnie prześwietlanie bagaży na lotnisku bazuje na skanerach używających promieniowania X. Metoda ta ma swoje plusy z racji, iż ukazuje gęstość substancji. Ma ona jednak również wiele minusów. Przed przejściem przez bramkę wymagane jest zdjęcie metalowych części ubioru. Co więcej, metoda ta potrafi wykryć jedynie gęstość, a nie skład materiałów, na które działa. Nie odróżni ona również wybuchowych cieczy od zwykłej wody, jeśli będą miały one podobną gęstość. Alternatywą do tego rozwiązania może być tzw. "tomografia mionowa", która umożliwiłaby przykładowo odróżnienie wybuchowej cieczy od wody.

Tomografia mionowa wykorzystuje promieniowanie kosmiczne do pomiarów grubości materiału, przez który przenikają miony. Podczas gdy nadmierne wykorzystywanie promieniowania X może być szkodliwe dla ludzkiego organizmu, tomografia mionowa wykorzystuje wiązki promieniowania kosmicznego, które towarzyszą człowiekowi cały czas.

Miony nie tracą tak dużo swojej energii podczas propagacji, jak inne źródła promieniowania. Umożliwia im to penetrację materiałów na większych głębokościach, co pozwala określać skład chemiczny materii.

Do tej pory tomografia mionowa wykorzystywana była jedynie do prześwietlania wielkich obiektów, takich jak piramidy i wulkany. Używano jej również do poszukiwań minerałów pod powierzchnią gleby. Jednakże, dzięki temu pomysłowi skanowanie bagaży na lotnisku z wykorzystaniem promieniowania kosmicznego może wkrótce wyprzeć dotychczasowe metody bazujące na promieniach X.





## Rozdział 7

# Inne ciekawe zjawiska związane z promieniowaniem kosmicznym

---

### 7.1 Okresowe zmiany natężenia promieniowania kosmicznego

Natężenie promieniowania kosmicznego podlega z czasem słabym periodycznym i nieperiodycznym zmianom. Mimo, że na pierwszy rzut oka można uznać, iż natężenie promieniowania kosmicznego na poziomie morza traktować można jako stałe, pomiary promieniowania kosmicznego na przestrzeni dziesiątek lat ukazać mogą fluktuacje periodyczne i nieperiodyczne.

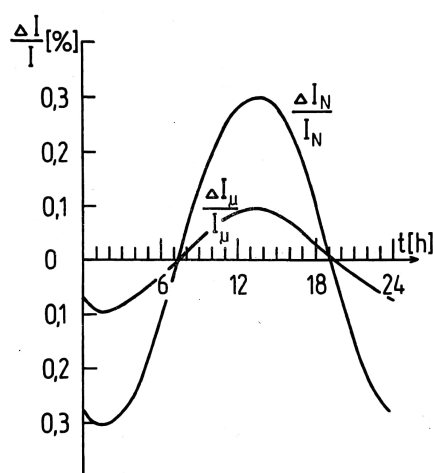
Obserwowane zmiany periodyczne charakteryzują się okresami: godzinowymi, dziennymi i rocznymi. Wszystkie te okresy powiązane są z procesami mającymi miejsce na Słońcu. Istotny wkład niosą również zjawiska meteorologiczne tj. zmiany temperatury i ciśnienia atmosferycznego, jak również zmiany powiązane z porami roku. Natomiast analiza składu chemicznego meteorytów pozwala wysnuć wnioski dotyczące wariacji długookresowych pierwotnego promieniowania kosmicznego, zachodzących w ciągu tysięcy i milionów lat.

---

### 7.1.1 Wariacje dobowe

Są to słoneczno-dobowe wariacje natężenia promieniowania kosmicznego, związane są z dobowym obrotem Ziemi. Stwierdzono, że natężenie promieniowania kosmicznego mierzone na Ziemi wykazuje okresowe fluktuacje o okresie jednego dnia słonecznego. Zmiany są kształtu sinusoidalnego, a ich okres wynosi jeden dzień słoneczny. Maksimum natężenia promieniowania kosmicznego występuje po południu czasu lokalnego. Na rysunku 7.1 ukazane zostały względne zmiany natężenia  $\Delta I/I$  dla składowych nukleonowej i mionowej w ciągu jednego okresu.

Uważa się, że wariacje są wynikiem oddziaływania wiatru słonecznego z polem magnetycznym Słońca.



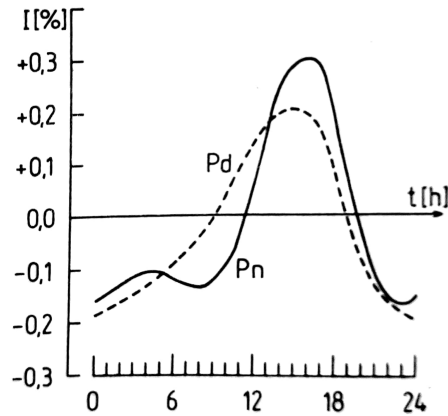
Rysunek 7.1: Kształt względnych zmian  $\Delta I/I$  wyrażonego w %, natężenia składowej mionowej nukleonowej  $I_N$  oraz mionowej  $I_\mu$  promieniowania kosmicznego na poziomie morza,  $t$  jest to czas wyrażony w godzinach wg czasu lokalnego. Źródło:[8]

H. Alfven, K.G. Malmfors oraz W. Kolshörster badali wariacje słoneczno-dobowe za pomocą układów teleskopowych. Zauważyli, że wariacje zależą od kierunku. Przykładowo, pierwsza harmonika wariacji słoneczno-dobowej dla kierunku północnego miała amplitudę wynoszącą około 0.16% oraz maksimum o godzinie 13.30. Natomiast dla kierunku południowego amplituda miała tę samą wartość, ale położenie maksimum przesunęło się do godziny 19.00.

W ramach omówienia wyników stwierdzono, że różnica wariacji dla tych dwóch kierunków nie może być wywołana żadnym zjawiskiem atmosferycznym, jako że cząstki biegnące z północy jak i z południa przenikają takie same warstwy powietrza, które znajdują się w podobnych warunkach. Co więcej, mało prawdopodobne jest, aby efekt ten pochodził od pola magnetycznego Ziemi.

Podobne badania zostały przeprowadzone przez H. Elliota oraz D.W.N Dolbeara za pomocą liczników pracujących w układzie teleskopowym. Wyniki ich pracy zostały ukazane na

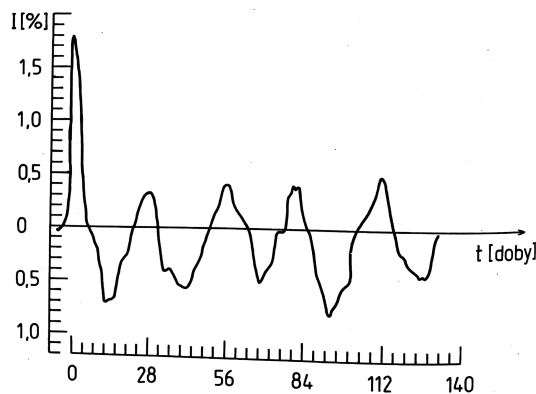
rysunku 7.2. Porównywane są średnie dobowe wariacje dla kierunków północnego i południowego, uzyskane na podstawie pomiarów trwających 360 dni. Widoczne jest, że między wariacjami w kierunku północnym i południowym istnieje znaczna różnica, która zgadza się z wielkością uzyskaną przez W. Kolshörstera.



Rysunek 7.2: Wariacje dobowe dla kierunków północnego  $P_n$  i południowego  $P_d$ .  $I$  - natężenie promieniowania wyrażone w %,  $t$  - czas lokalny w godzinach. Źródło:[8]

### 7.1.2 Wariacje 27-dobowe

Burze magnetyczne o średnim natężeniu powtarzają się co około 27 dni. Jeśli któregoś dnia zaobserwować można wyraźnie odróżniającą się wartość natężenia strumienia promieniowania kosmicznego to podobną anomalię można zaobserwować 27 dni później. Z faktu, iż okres 27 dniowy jest taki sam jak okres obrotu Słońca wokół osi, wnioskować można, że cykliczność zmian strumienia posiada genezę w efektach słonecznych. Co więcej, wiadomo, że natężenie promieniowania kosmicznego określone na poziomie morza powiązane jest z aktywnością geomagnetyczną.



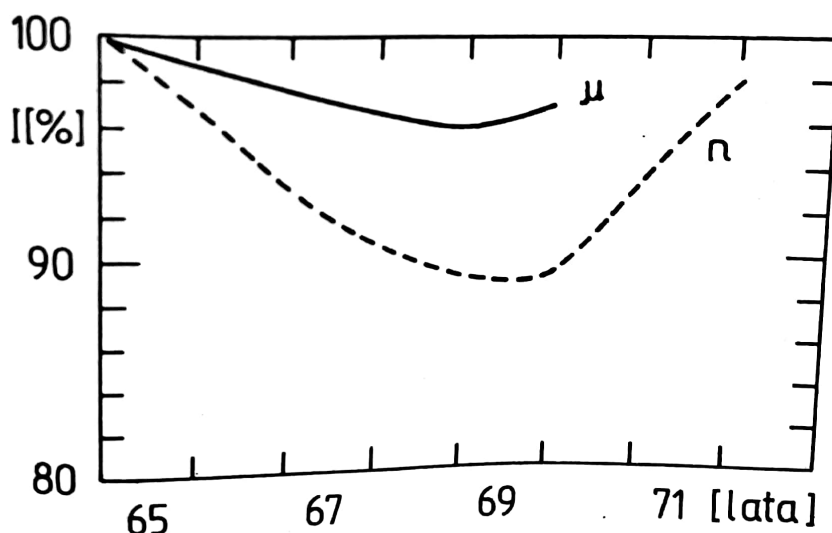
Rysunek 7.3: 27-dobowa powtarzalność amplitudy natężenia promieni kosmicznych.  $I$  - natężenie względne w procentach,  $t$  - czas w dobach. Źródło:[8]

W latach 1937-38 uzyskano dane, za pomocą których sporządzono zależność zmian procentowych natężeń z czasem wyrażonym w dobach słonecznych. Zależność ta ukazana jest na rysunku 7.3.

### 7.1.3 Wariacje 11 letnie

Dzięki wieloletnim obserwacjom promieniowania kosmicznego zauważono fluktuacje średniego natężenia z okresem około 11 lat. Warto wspomnieć, że jest to analogiczne do 11-letniego okresu aktywności słonecznej.

Na rysunku 7.4 ukazano średnie zmiany natężenia neutronów wynoszące około 14% oraz mionów na poziomie 4.5%. Uzyskane dane tyczą się okresu 11-letniego.



Rysunek 7.4: Wariacje 11-letnie średnich względnych wartości strumieni neutronów  $n$  oraz mionów  $\mu$ . Źródło:[8]

Liczba plam na Słońcu ulega zmianie. W ciągu okresu wynoszącego 11 lat ich ilość waha się od wartości minimalnej do maksymalnej.

Czas pomiędzy minimum a maksimum aktywności słonecznej wynosi średnio 4.6 roku, natomiast od maksimum do minimum jest to około 6.7 roku. Wartości te po zsumowaniu dają około 11 lat.

Badania promieniowania kosmicznego dostarczają informacji, że istnieje składowa promieniowania kosmicznego skorelowana z aktywnością słoneczną.

Natężenie tej składowej jest znacznie większe w okresie minimum aktywności słonecznej oraz niemal niezauważalne podczas maksimum aktywności słonecznej. Rozważana składowa charakteryzuje się małymi energiami cząstek.

Podczas cyklu aktywności słonecznej zmianie ulega wiatr słoneczny. Co ciekawe, jego charakterystyki również wykazują cykl 11-letni (natężenie cząstek wiatru słonecznego wrasta w czasie wzmożonej aktywności Słońca oraz maleje, gdy Słońce jest spokojne).

Podczas gdy obserwowane jest maksimum plam na Słońcu, strumień galaktycznego promieniowania kosmicznego jest silnie zmniejszony. Spowodowane jest to faktem, iż więcej cząstek odchyła się pod wpływem pola magnetycznego, przez co nie dosięgają one Ziemi.

## **7.2 O mionach, elektronach i fotonach – cząstkach docierających do Ziemi z promieniowania kosmicznego**

Wiązka pierwotnego promieniowania kosmicznego dostając się do atmosfery ziemskiej ulega wielu zderzeniom z cząsteczkami powietrza. W ten sposób powstaje wiązka wtórna promieniowania kosmicznego.

Wiązka promieniowania kosmicznego może zderzyć się z atomami tlenu i azotu na każdej głębokości w atmosferze. Stąd też prawdopodobieństwo takiego zderzenia jest bardzo duże. Naturalnym rezultatem takiego stanu rzeczy jest fakt, że wiązka pierwotnego promieniowania kosmicznego niemalże nie dociera do powierzchni Ziemi.

Na powierzchni Ziemi rejestrowana jest natomiast wiązka wtórnego promieniowania kosmicznego. Jest ona bogata w miony, elektrony i fotony, które to mogą stanowić ciekawy temat do rozważań. Poczynając od udowodnienia prawdziwości teorii relatywistycznej, kończąc na kaskadach elektronowo-fotonowych.

### **7.2.1 Miony**

Miony zostały odkryte w roku 1937 przez C.D. Andersona jako składnik wtórnego promieniowania kosmicznego. Początkowo zostały one zakwalifikowane do mezonów ze względu na ich masę będącą pomiędzy masą elektronu i protonu. Jednakże w miarę rozwoju zrozumienia budowy materii, nazwa mezon została zarezerwowana dla hadronów o spinie całkowitym. Stąd też miony należą do leptonów, jako że posiadają one połowiczny spin z racji swojej przynależności do fermionów.

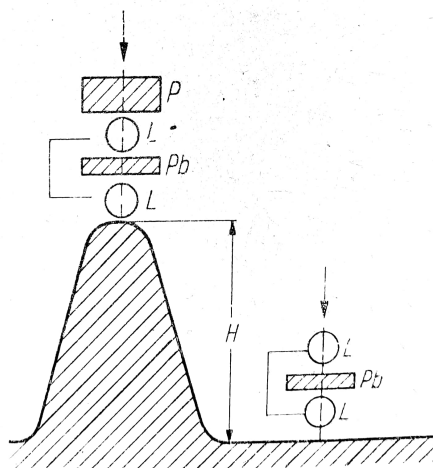
Wyróżnia się dwa rodzaje mionów:  $\mu^-$  oraz  $\mu^+$ . Posiadają one bardzo mały czas połowicznego rozpadu plasujący się na poziomie  $1.5 \mu\text{s}$ . Cząstki te rozpadają się na: elektron, antyneutrino elektronowe oraz neutrino mionowe (w przypadku  $\mu^-$ ), bądź na: pozyton, neutrino elektronowe oraz antyneutrino mionowe (w przypadku  $\mu^+$ ).

Miony, będąc cząstkami nietrwałymi, posiadają średni czas życia wynoszący około  $2.2 \cdot 10^{-6}\text{s}$ .

Potwierdzone zostało to za pomocą doświadczenia, w którym porównywano natężenie promieniowania kosmicznego na poziomie morza oraz na wierzchołku wysokiej góry. Schemat tego doświadczenia został ukazany na rysunku 7.5.

Na wierzchołku góry na drodze cząstek umieszczona została płyta  $P$ , której zdolność absorpcyjna równa była zdolności absorpcyjnej warstwy powietrza o grubości równej wysokości  $H$  góry, liczonej od poziomu morza. Oczekiwano zatem, iż liczba rejestrowanych mionów na górze i na poziomie morza będzie jednakowa. Doświadczenie to ukazało jednak, że natężenie mionów na poziomie morza było znacznie mniejsze niż na wierzchołku góry. Jedynym możliwym wytłumaczeniem zaobserwowanego zjawiska była hipoteza o samorzutnym rozpadzie mionów, co prowadzi do zmniejszenia ich liczby w czasie potrzebnym do przebycia drogi od wierzchołka góry do poziomu morza.

Miony są najsilniej penetrującymi cząstkami naładowanymi. Wynika to z faktu, iż nie oddziałują one silnie z jądrami ośrodka. Co więcej, dzięki swojej większej masie (w porównaniu do elektronów, z którymi wykazują znaczne powiązanie) nie tracą tak dużo energii na promieniowanie hamowania. Jedynym znaczącym źródłem utraty energii przez miony przechodzące przez ośrodek materialny jest jonizacja atomów ośrodka. W wyniku tego miony wchodzące w skład wtórnej wiązki promieniowania kosmicznego obserwowane są również na głębokości kilkuset metrów pod powierzchnią Ziemi.



Rysunek 7.5: Schematyczne ukazanie warunków w jakich przeprowadzone zostało doświadczenie potwierdzające samorzutny rozpad mionów. Źródło:[11]

Dzięki obserwacji strumienia mionów wyprodukowanego w górnej warstwie atmosfery ukazano prawdziwość zjawiska dylatacji czasu, które zostało przewidziane w szczególnej teorii względności. Gdyby zjawisko dylatacji czasu nie istniało, mion poruszający się z prędkością bliską prędkości światła rozpadłby się po przebyciu drogi około 660m. Jednakże na Ziemi obserwuje się miony, które powstały na wysokości kilkudziesięciu kilometrów. Obserwowane wyniki wytłumaczone są przez relatywistyczne zjawisko dylatacji czasu. Podczas gdy obserwator znajdujący się na Ziemi określiłby, iż czas, jaki minął wskazuje na to, iż cząstka powinna się dawno rozpaść, dla mionu, poruszającego się z prędkością bliską

prędkości światła, upłynął znacznie mniejszy czas, pozwalający mu na przebycie znacznie większych odległości.

### **7.2.2 Elektryony**

Innymi cząstkami docierającymi do powierzchni Ziemi z wtórnej wiązki promieniowania kosmicznego są elektryony. Są to cząstki trwałe, będące leptonami. Posiadają one spin połówkowy, przez co zalicza się je do fermionów.

Odkrycie pierwszej cząstki elementarnej przypisuje się J. Thompsonowi i datuje się to wydarzenie na rok 1895. Dokonane zostało to za pomocą dokładnej analizy własności promieni katodowych, które okazały się być wiązką cząstek o ujemnym ładunku elektrycznym oraz masie 1837 razy mniejszej od masy najlżejszego atomu (tj. atomu wodoru).

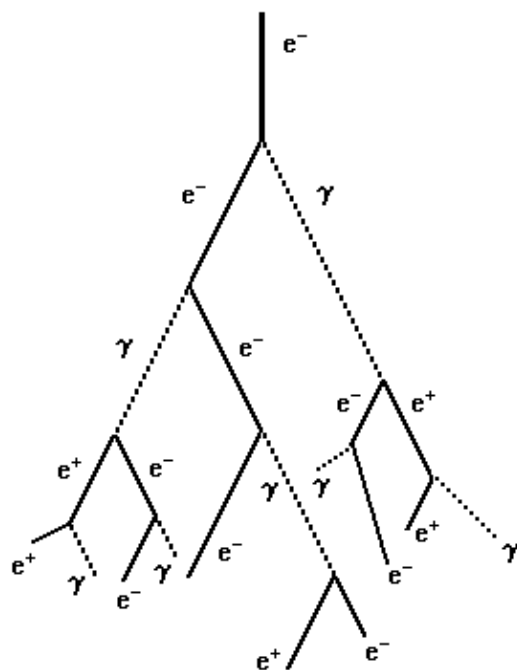
Okazało się, że w różnych wariantach doświadczenia z promieniami katodowymi (elektrody z różnych materiałów, różne gazy) cząstki te miały taką samą masę i ładunek. Analiza innych zjawisk, np. elektrolizy, doprowadziła do podobnego wniosku: w skład atomów wchodzi cząstki elementarne mogące się od nich odrywać. Fakt, iż atomy jako całość są elektrycznie obojętne, a część atomu pozostająca po oderwaniu elektronów ma ładunek dodatni świadczy o tym, że oderwana część musi mieć ładunek ujemny.

Elektryony odgrywają również znaczącą rolę w wiązce promieniowania kosmicznego. Wchodzi one w skład wtórnego promieniowania kosmicznego oraz poprzez interakcję z atomami atmosfery mogą inicjować kaskady elektronowo-fotonowe. Zostały one opisane szczegółowo w sekcji 4.3.1.

### **7.2.3 Fotony**

Ostatnią składową wtórnego promieniowania kosmicznego, które dociera do Ziemi, są fotony. Cząstka ta należy do grupy bozonów cechowania i przenosi oddziaływania elektromagnetyczne. Fotony charakteryzują się spinem całkowitym, co jest wspólne dla wszystkich bozonów. Nie posiadają one ładunku elektrycznego oraz masy spoczynkowej. Oznacza to, że foton może istnieć jedynie w ruchu. Jeśli foton będzie oddziaływać z otoczeniem, np. przez efekt fotoelektryczny - zniknie.

Fotony wchodzi w skład wtórnej wiązki promieniowania kosmicznego. Mogą one inicjować kaskady elektronowo-fotonowe (rys. 7.6). Emitowane są one przez elektryony w tych kaskadach. Również szerokie pęki atmosferyczne są bogate w kwanty gamma.



Rysunek 7.6: Kaskada elektronowo-fotonowa wywołana przez elektron. Źródło:[28]

Oddziaływanie kwantów gamma z materią (poprzez zjawiska fotoelektryczne, Comptona oraz kreacji par) opisane zostało w sekcji 5.3.2.

#### 7.2.4 Cząstka Oh My God

W ramach ciekawostki wspomnieć można o tzw. "cząstce O Mój Boże" (ang. Oh My God particle). Była to cząstka będąca najprawdopodobniej protonem pochodzącym z promieniowania kosmicznego. Została on zarejestrowana w 1991 roku przez detektor "Fly's Eye" ośrodka Dugway Proving Ground znajdującym się w Utah.

Fenomen tej cząstki polega na wartości jej energii - była to cząstka pochodzenia kosmicznego o największej energii, jaką kiedykolwiek zaobserwowano z tego źródła. Wartość tej energii została oszacowana na poziomie  $3.2 \cdot 10^{20}$  eV i znacznie przewyższała energie cząstek, jakie potrafi osiągnąć człowiek. Co więcej, wyróżnia się ona pośród innych cząstek promieniowania kosmicznego, których energie wynoszą średnio od  $10^7$  eV do  $10^{10}$  eV.

Ogromna energia cząstki "O Mój Boże" skłoniła naukowców do rozmyślań dotyczących epoki, w której została wytworzona oraz miejsca jej powstania. Najnowsze badania z wykorzystaniem teleskopu "Array Project" sugerują, iż cząstka ta pochodzić może z okolicy konstelacji "Wielkiej Niedźwiedzicy".



### 7.3 Zjawiska geomagnetyczne, a promieniowanie kosmiczne

Wysokoenergetyczna wiązka pierwotnych promieni kosmicznych jest niebezpieczna dla człowieka. Wynika to z faktu, iż naładowane cząstki przechodzące przez ludzki organizm jonizują atomy ośrodka.

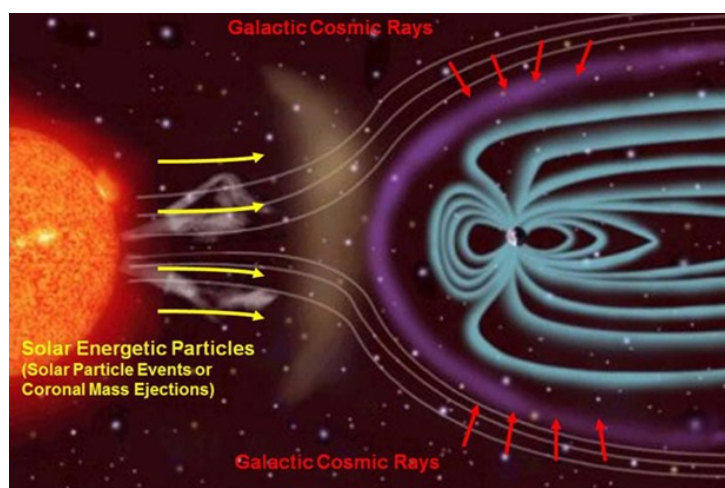
Jednakże ludzie mieszkający na Ziemi są (często nieświadomie) chronieni przed negatywnym wpływem promieniowania kosmicznego. Pierwszą formę ochrony stanowi ziemska atmosfera. Z jej udziałem pierwotna wiązka promieniowania kosmicznego przekształca się we wtórną wiązkę promieniowania kosmicznego, co zostało opisane w sekcji 4.3.

Innym źródłem ochrony przed pierwotnym promieniowaniem kosmicznym jest pole magnetyczne Ziemi.

Naładowane cząstki wchodzące w skład promieniowania kosmicznego są odchylane przez pole magnetyczne Ziemi, czego efektem jest fakt, że wiele odchylonych cząstek nie trafia w obszar ziemskiej atmosfery.

Co więcej, niektóre z nich mogą zostać uwięzione w tzw. "pasach Van Allena" (rys. 7.7). Odkryte zostały one w 1958r. przez satelitę Explorer 1.

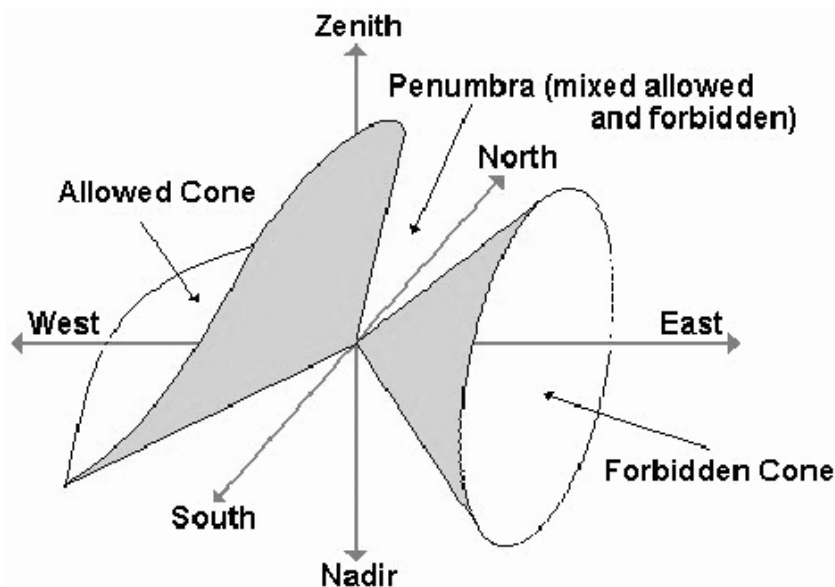
Cząstki odchylone w kierunku biegunów północnego i południowego mogą wchodzić w interakcję z ziemską atmosferą. Zderzenia atomów promieniowania kosmicznego z cząsteczkami atmosfery prowadzą do wzbudzenia ośrodka. W wyniku relaksacji atomy emitują światło, które można zaobserwować w postaci Zorzy Polarnej.



Rysunek 7.7: Pasy Van Allena. Źródło:[30]

Z badań wpływu pola magnetycznego Ziemi na ruch naładowanych cząstek wynika, że istnieją dozwolone i zabronione kierunki padania cząstek pierwotnego promieniowania kosmicznego. Obszary te mają kształt współosiowych stożków o kącie rozwarcia będącym stosunkiem pędu i ładunku cząstek.

Obszar dozwolonych kierunków zwany jest **stożkiem głównym** a niedozwolonych - **stożkiem Störmera**. Ukazane zostały one na rysunku 7.8.



Rysunek 7.8: Geometryczna wizualizacja stożków dozwolonego (głównego) i niedozwolonego (Störmera). Źródło:[31]

Pole magnetyczne Ziemi powoduje zależność natężenia  $I$  promieniowania kosmicznego od szerokości geograficznej. Zjawisko to zwane jest **efektem szerokościowym**. Ilościowo można wyrazić je poprzez stosunek  $[I(90^\circ) - I(0^\circ)] / I(90^\circ)$ .

Odchylający wpływ pola magnetycznego Ziemi najwyraźniej przejawia się w obszarze równikowym. Efekt szerokościowy wynosi ledwie 10% na poziomie morza osiągając wartość 36% na wysokości 10 km. Spowodowane jest to faktem, iż cząstki promieniowania kosmicznego na poziomie morza pochodzą od wysokoenergetycznych cząstek pierwotnego promieniowania kosmicznego. Cząstki te są słabo odchylane przez pole magnetyczne Ziemi ze względu na dużą wartość swojego pędu.

Zjawisko to wiąże się z okresowymi (11 letnimi) wariacjami promieniowania kosmicznego. Jego charakter zależy od aktywności słonecznej. Zjawisko to zostało opisane bardziej szczegółowo w sekcji 7.1.3.

Przez niecentralne położenie dipola magnetycznego, natężenie pola magnetycznego nie jest stałe na tej samej szerokości geograficznej. Stąd też natężenie promieniowania kosmicznego zależy również od długości geograficznej punktu obserwacji. Jest to tzw. **"efekt długościowy"**.

## 7.4 Neutrina kosmiczne

### 7.4.1 Czym są neutrina?

Neutrina są to cząstki elementarne należące do grupy leptonów. Ze względu na swój połówkowy spin, neutrina przynależą do fermionów. Mają one zerowy ładunek elektryczny i niezerową masę. Fakt ten został odkryty stosunkowo niedawno, jako że przedtem traktowano neutrina jako cząstki pozbawione masy spoczynkowej.

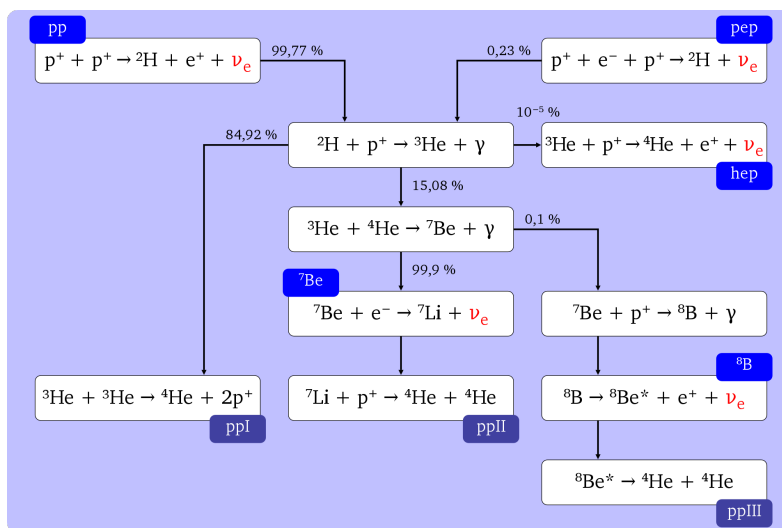
Wyróżnia się trzy rodzaje neutrin:

- neutrino elektronowe  $\nu_e$
- neutrino mionowe  $\nu_\mu$
- neutrino taonowe  $\nu_\tau$

oraz ich odpowiedniki w antymaterii (antyneutrina).

Neutrina oddziałują z materią jedynie poprzez oddziaływania grawitacyjne oraz oddziaływania słabe. Stąd też neutrina (np. pochodzące z wiązki promieniowania kosmicznego) mogą penetrować przestrzeń na duże głębokości bez większej straty energii.

Neutrina powstają na skutek oddziaływania pierwotnej wiązki promieniowania kosmicznego z atmosferą (wchodzą w skład wtórnej wiązki promieniowania kosmicznego). Emitowane są one również przez Słońce np. w ramach cyklu protonowego. Schematyczny rozwój cyklu protonowego został ukazany na rysunku 7.9. Co więcej, neutrina wytwarza się w akceleratorach w ramach zderzeń ciężkich jonów mających miejsce w eksperymentach, znajdujących się przy CERN.

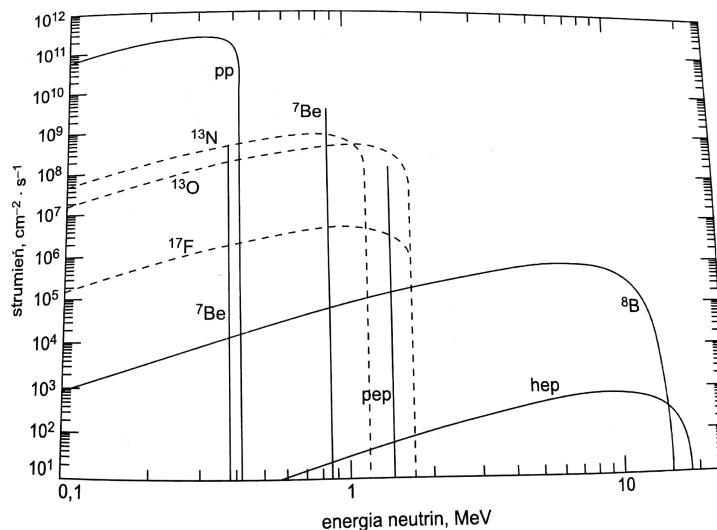


Rysunek 7.9: Cykl protonowy. Na czerwono oznaczono neutrina powstające w tym cyklu Źródło:[32]

## 7.4.2 Neutrina słoneczne

Neutrina słoneczne są wytwarzane oraz emitowane przez Słońce. Powstają one w procesach termojądrowej syntezy jąder lekkich pierwiastków oraz rozpadach  $\beta^+$ , które zachodzą w centrum Słońca.

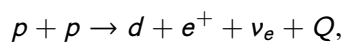
Na rysunku 7.10 ukazana została przewidywana wartość strumienia neutrin przy powierzchni Ziemi w przypadku neutrin produkowanych w Słońcu.



Rysunek 7.10: Strumienie neutrin słonecznych, o danych energiach, na powierzchni Ziemi, zależnie od reakcji w jakiej są produkowane wewnątrz Słońca Źródło:[13]

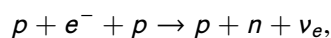
Neutrina słoneczne są produkowane w łańcuchach reakcji termojądrowych zachodzących we wnętrzu Słońca.

Najważniejszą z nich jest reakcja  $pp$ :

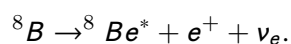


gdzie wydzielona energia  $Q = 0.42$  MeV.

Neutrina produkowane są również w reakcji  $pep$ :



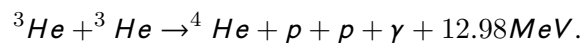
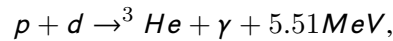
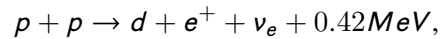
jak również w ramach rozpadu  ${}^8B$  oraz  ${}^7Be$ :



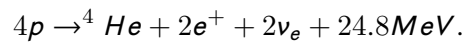
Reakcje te zostały schematycznie ukazane na rysunku 7.9.

Rysunek 7.10 pokazuje, że całkowity strumień neutrin zdominowany jest przez reakcję  $pp$ .

Źródłem energii słonecznej jest ciąg reakcji:



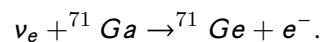
Sumaryczny efekt powyższych reakcji można zapisać jako:



Po anihilacji pozytonów oczekiwać można uwolnienia całkowitej energii o wartości 26.9 MeV. W reakcjach tych neutrina unoszą średnio 0.5 MeV a reszta przekształca się w światło słoneczne.

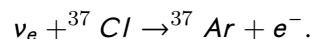
Neutrino słoneczne rejestrowane były przez cztery duże eksperymenty.

Detektory SAGE oraz GALLEX bazowały na reakcji:



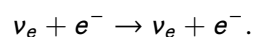
Dlatego też były one czułe na neutrina pochodzące z reakcji  $pp$  (stanowiące około 60% strumienia neutrin) oraz wszystkie neutrina o wyższych energiach (40%).

Eksperyment Homestake posługiwał się tarczą z  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  oraz rejestrował reakcję:



Wartym wspomnienia jest fakt, iż w tym przypadku rejestrowanie neutrin z procesu  $pp$  było niemożliwe.

Neutrino słoneczne obserwuje się również za pomocą detektorów Kamiokande oraz Superkamiokande. W tych przypadkach stosowano wodne liczniki Czerenkowa, które rejestrowały w czasie rzeczywistym elektrony odrzucane w wyniku procesu rozpraszania elastycznego:



Eksperyment ten bazuje na neutronach pochodzących z rozpadu  ${}^8\text{B}$ .

### 7.4.3 Neutrina atmosferyczne

Piony oraz miony zostały odkryte pod koniec lat czterdziestych XX wieku dzięki pierwszym eksperymentom badającym promieniowanie kosmiczne. Stało się to na podstawie badania rozpadów:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Piony powstają w wyniku oddziaływania protonów (stanowiących wiązkę pierwotnego promieniowania kosmicznego) o energiach powyżej kilku GeV, nadlatujących z przestrzeni kosmicznej, z cięższymi jądrami w atmosferze ziemskiej. Piony produkowane są wysoko w atmosferze. Z racji krótkiego czasu życia (26 ns) praktycznie wszystkie naładowane piony (przynajmniej te o energii  $E_\pi \ll 100 \text{ GeV}$ ) rozpadną się w locie zanim wezmą udział w reakcji jądrowej.

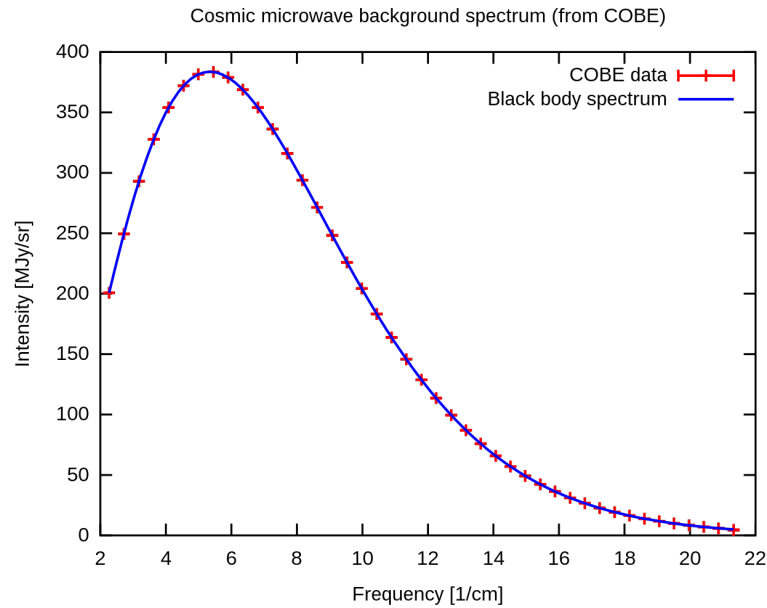
Czas życia mionu jest około 100 razy dłuższy (2.2  $\mu\text{s}$ ). Jednakże przy energii  $E_\mu < 2 \text{ GeV}$  praktycznie wszystkie miony także rozpadną się w locie. Natomiast dla energii powyżej 4 lub 5 GeV, większość mionów będzie miała wystarczającą energię i czas życia (wydłużony z powodu dylatacji czasu), aby dotrzeć do poziomu morza. Miony o bardzo wysokich energiach przenikają pod Ziemię. Eksperymenty badające neutrino słoneczne i atmosferyczne bardzo często umieszczane są pod powierzchnią Ziemi w celu zredukowania tła.

Można przewidywać, że na poziomie morza powinny być dwa neutrino  $\nu_\mu$  na każde neutrino  $\nu_e$ . Taki stosunek otrzymuje się w zakresie niskich energii  $E_\nu < 1 \text{ GeV}$ . Przy wyższych energiach stosunek liczby neutrin mionowych do elektronowych jest większy, ponieważ mniejszy jest ułamek mionów rozpadających się w locie w atmosferze.

### 7.4.4 Mikrofalowe promieniowanie tła (promieniowanie reliktowe)

Pod terminem tym kryje się promieniowanie elektromagnetyczne wypełniające całą przestrzeń. Co ciekawe, dane dotyczące spektralnego rozkładu tego promieniowania zebrane przez satelitę COBE dokładnie pokrywają się z rozkładem przewidywanym dla promieniowania ciała doskonale czarnego (tzw. rozkładem Plancka) o temperaturze  $T = 2.73 \pm 0.01 \text{ K}$ . Wyniki te zostały ukazane na rysunku 7.11.

Pod koniec lat 40. XX wieku George Gamow wraz z Ralphem Alpherem i Robertem Hermanem spekulowali, że istnieje promieniowanie wypełniające jednorodnie cały Wszechświat.



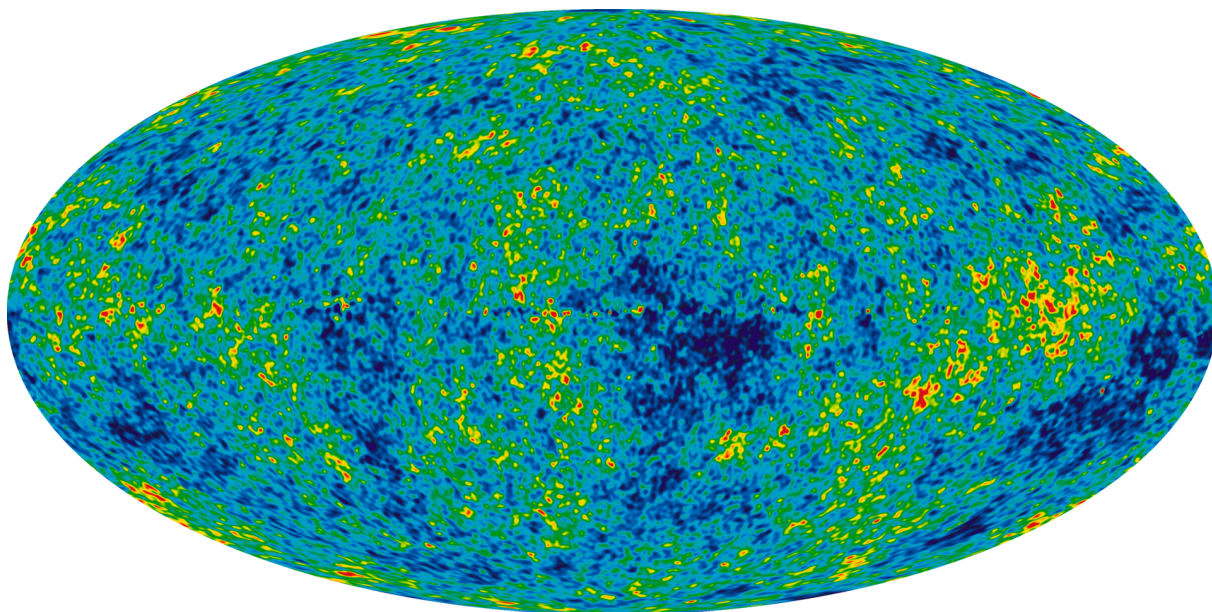
Rysunek 7.11: Wykres mikrofalowego promieniowania tła zmierzony za pomocą detektora FIRAS, umieszczonego na satelicie COBE. Krzywa na niniejszym wykresie ukazuje rozkład Plancka promieniowania ciała doskonale czarnego dla  $T = 2.73\text{K}$ . Słupki pomiarowe zaznaczone na wykresie zostały powiększone w celu poprawienia ich widoczności, jako że faktyczne niepewności pomiarowe nie mogłyby być zaobserwowane na wykresie. Źródło:[38]

Uważali oni, że po Wielkim Wybuchu powinna pozostać fotonowa "ognista kula", która w wyniku ekspansji została schłodzona do kilku kelwinów. Ich praca nie zyskała jednak rozgłosu i została zapomniana. Istnienie promieniowania relikтового zostało przewidziane również przez niezależnie pracujących naukowców: radzieckiego kosmologa Jakowa Zeldowicza oraz Amerykanina Roberta Dicke.

Mikrofalowe promieniowanie tła zostało odkryte przypadkowo. Amerykańscy astrofizycy Arno Allan Penzias i Robert Woodrow Wilson zbudowali antenę, której celem miało być odbieranie krótkich fal radiowych. Jednakże naukowcy słyszeli szum, którego nie potrafili zidentyfikować oraz wykluczyć poprzez usuwanie coraz to kolejnych hipotetycznych źródeł szumu. W roku 1965 szum ten został poprawnie zidentyfikowany jako promieniowanie reliktowe, a obserwatorzy otrzymali za swoje odkrycie Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1978.

Reliktowe promieniowanie mikrofalowe ma zbyt duże natężenie, aby mogło mieć pochodzenie gwiazdne. Określono, iż promieniowanie reliktowe jest pozostałością po Wielkim Wybuchu, które uległo zmianie na skutek ekspansji i ochłodzenia się Wszechświata. Powstało ono w okresie rekombinacji, podczas którego naładowane elektrony i protony po raz pierwszy związały się, tworząc elektrycznie obojętne atomy wodoru. Temu procesowi towarzyszyła emisja promieniowania, którego skutki widoczne są do dziś w postaci promieniowania relikowego.

Wartość energii mikrofalowego promieniowania tła może być oszacowana na obecnym etapie rozwoju Wszechświata tj. dla czasu około 10 mld lat  $\approx 10^{18}$  s. Wynosi ona około 1 meV co odpowiada temperaturze około kilku kelwinów. Fakt zaobserwowania promieniowania relikтового był kluczowym argumentem przemawiającym za hipotezą Wielkiego Wybuchu.



Rysunek 7.12: Wahania temperatury sprzed 13.77 miliarda lat (pokazane jako różnice kolorów). Odpowiadają one zarodkom, z których wytworzyły się galaktyki. Obraz ukazuje zakres temperatur  $\pm 200\mu\text{K}$ . Dane, na podstawie których został utworzony niniejszy obraz całego nieba wczesnego Wszechświata zostały zebrane przez 9 lat działania misji Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). Źródło:[39]

Mikrofalowe promieniowanie tła było badane przez wiele misji kosmicznych. W roku 1989 wystrzelony został przez NASA Cosmic Background Explorer tzw. COBE. Dwóch głównych naukowców zajmujących się COBE otrzymało w 2006 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za dowody potwierdzające teorię Wielkiego Wybuchu oraz za wykazanie, że niewielkie zmiany promieniowania relikтового ujawniają informacje o stanie wszechświata.

Różnice te, zwane anizotropiami, stały się bardziej widoczne dzięki sondzie kosmicznej nowej generacji NASA - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, tzw. WMAP. Ta misja, rozpoczęta w 2001 roku, znalazła mocne dowody na inflację tj. bardzo wczesną epokę, kiedy to Wszechświat dramatycznie się rozszerzył.

Najbardziej zaawansowanym jak dotąd satelitą służącym do badań tego typu jest Planck. Został on wystrzelony w 2009 roku i obrazuje niebo z ponad 2.5-krotnie większą rozdzielczością niż WMAP. Planck stworzył najostrzejszą mapę całego nieba, jaką kiedykolwiek



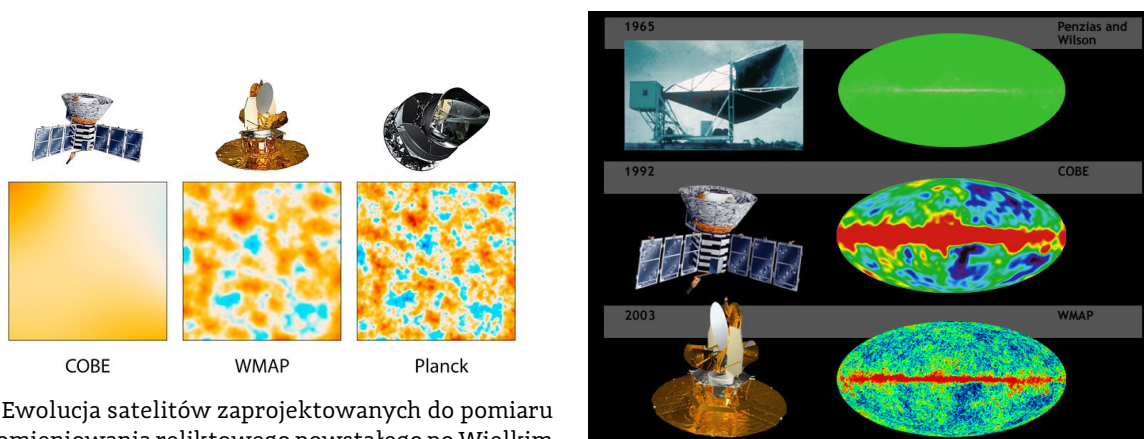
wykonano z mikrofalowego promieniowania tła wszechświata. Planck jest to misja Europejskiej Agencji Kosmicznej, przy znaczącym udziale NASA.

Wspomniane misje kosmiczne, wraz z uzyskanymi wynikami zostały ukazane na rysunku 7.13a.

Jak już wspomniano, mikrofalowe promieniowanie tła zostało odkryte w roku 1965 przez Penziasa i Wilsona za pomocą mikrofalowej anteny tubowej. Symulacja nieba oglądanego przez ich odbiornik mikrofalowy została ukazana w prawym górnym rogu rysunku 7.13b.

Mapa wczesnego Wszechświata sporządzona przez COBE w roku 1992 widoczna jest na centralno-prawej części rysunku 7.13b. W wyniku tej misji Mather i Smoot otrzymali Nagrodę Nobla w 2006 roku.

Natomiast statek kosmiczny WMAP, wystrzelony w 2001 roku i aktywny do 2010 roku, zmapował wzorce w znacznie wyższej rozdzielczości, aby odkryć nowe informacje o historii i losach Wszechświata (rys. 7.12). Przykładowo, dzięki WMAP w 2003 roku dowiedziano się, że w skład promieniowania relikтового, oprócz promieniowania mikrofalowego, wchodzi również promieniowanie neutrinowe. Naukowcy Bennet, Page i Spergel, pracujący przy tej misji, zdobyli nagrodę Shaw w 2010 roku za swoją pracę nad WMAP. Widok wczesnego wszechświata uzyskany przez WMAP widoczny jest w prawym dolnym rogu rysunku 7.13b.



(a) Ewolucja satelitów zaprojektowanych do pomiaru promieniowania relikтового powstałego po Wielkim Wybuchu. To promieniowanie ujawnia tajemnice pochodzenia Wszechświata, jego losu, składników i nie tylko. Źródło:[40]

(b) Diagram historii mikrofalowego promieniowania tła, ukazujący poprawę rozdzielczości na przestrzeni lat. Promieniowanie reliktowe, przenikające całą przestrzeń, jest promieniowaniem, którego pochodzenie wiąże się z Wielkim Wybuchem i jest jednym z nielicznych źródeł informacji o warunkach panujących we wczesnym Wszechświecie. Źródło:[41]

Rysunek 7.13: Ewolucja badania mikrofalowego promieniowania tła



## Rozdział 8

# Zakończenie

---

Promieniowanie kosmiczne towarzyszy ludziom od zarania dziejów. Każdy człowiek na Ziemi i w kosmosie, w każdej sekundzie swojego życia jest bombardowany przez tę wysokoenergetyczną wiązkę cząstek. Mimo to, większość mieszkańców Błękitnego Globu nie zdaje sobie sprawy z obecności takiego zjawiska w ich życiu. Nic więc dziwnego, że promieniowanie kosmiczne zostało zauważone po raz pierwszy niespełna 110 lat temu.

Wiązka promieniowania kosmicznego wnosi do całkowitej dawki promieniowania pochodzącego ze źródeł naturalnych zaledwie ułamek tej wielkości. Przykładowo, wedle raportu Prezesa Polskiej Agencji Atomistyki za rok 2021[4], statystyczny mieszkaniec Polski w ciągu roku otrzymał dawkę skuteczną promieniowania jonizującego wynoszącą 4.19mSv. Dawka pochodząca od promieniowania kosmicznego stanowiła zaledwie 0.2mSv, dając jedynie 4.77% rocznej dawki promieniowania.

Stąd też widać, iż promieniowania kosmicznego nie trzeba się bać. Nie należy go jednak lekceważyć, gdyż przy częstych lotach samolotem na dużych wysokościach nad poziomem morza wpływ tego zjawiska zaczyna być zauważalny. Dlatego też należy zachować rozsądek przy ilości rejsów samolotowych. Idąc „wyżej”, poza Ziemską atmosferę, promieniowanie kosmiczne staje się jeszcze bardziej niebezpieczne, gdyż w przestrzeni kosmicznej ludzie narażeni są na wiązkę pierwotną, przed którą człowiek na Ziemi chroniony jest przez atmosferę. Promieniowanie kosmiczne jest jedną z głównych przeszkód występujących przy długich lotach kosmicznych, czy też w przypadku planowanej w odległej przyszłości kolonizacji Marsa.

Jednakże ze zjawiskiem promieniowania kosmicznego wiążą się nie tylko niedogodności. Człowiek nauczył się wykorzystywać je do własnych potrzeb, dzięki czemu zdolny jest do prześwietlania piramid i odnajdywania ukrytych komnat. Promienie kosmiczne uprościły

---

również rejestracje fal morskich, a co za tym idzie, badanie przyływów i odpływów. Warty wspomnienia jest również niezmiernie popularna w ostatnich latach tomografia miotowa, która ma szansę wyprzeć z lotnisk skanery używające promieniowania X do prześwietlania bagaży.

Promieniowanie kosmiczne jest idealnym przykładem zjawiska, które wydawać mogłoby się procesem nieważnym i niewnoszącym niczego twórczego do świata nauki. Wszak dawka pochodząca od wiązki wtórnej stanowi zaledwie ułamek całkowitego promieniowania, na jakie narażony jest człowiek, a intensywność wiązki jest zbyt mała, aby mogła być użyta do jakichkolwiek badań jądrowych. Jednakże promieniowanie kosmiczne charakteryzuje się szeregiem zastosowań. Ponadto, podobnie jak światło, niesie ono informację astronomiczną oraz astrofizyczną o otaczającej Ziemię przestrzeni kosmicznej. Stąd też wiedza o tym zjawisku nie powinna być traktowana jedynie jako ciekawostka. Właściwości promieniowania kosmicznego muszą być nieustannie badane w celu poznania jego natury oraz nowych zastosowań.

## Dodatek A

# Określenia wielkości charakteryzujących promieniowanie kosmiczne pierwotne

---

### A.1 Natężenie i strumień

**Natężenie, bądź też natężenie kierunkowe  $I$**  promieni kosmicznych określa się poprzez liczbę cząstek  $dN$  padających na element płaszczyzny  $dS$  w czasie  $dt$  z jednostkowego elementu kąta bryłowego  $d\Omega$  (rys. A.1) i dane jest wzorem:

$$I = \frac{dN}{dS dt d\Omega}.$$

Wielkość  $I$  wyrażona jest w ilości cząstek na  $cm^2 \cdot sr^1 \cdot s$ .

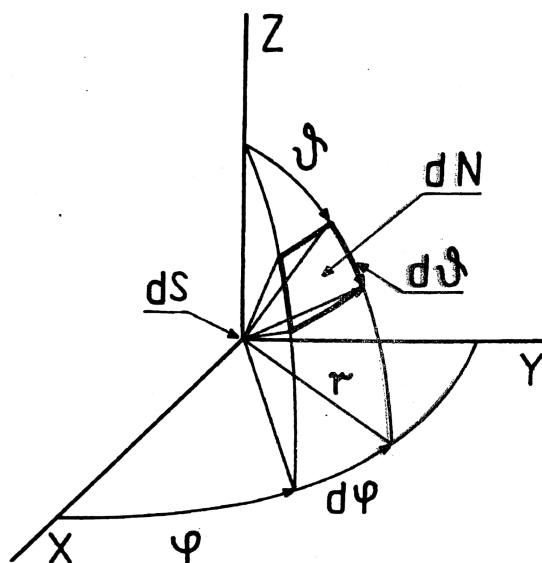
Wartość  $I$  jest zależna od kątów: zenitalnego  $\vartheta$  i azymutalnego  $\varphi$ , czasu  $t$  oraz energii cząstek  $E$ . Daje to  $I = I(\vartheta, \varphi, t, E)$ .

Natężenie przecałkowane po  $E$  oznacza się jako  $I_i(\vartheta, \varphi, t)$ .

W przypadku gdy  $\vartheta = 0$ , natężenie strumienia nazywa się pionowym i oznacza się je odpowiednio  $I_v, I_{iv}$ .

---

<sup>1</sup>steradian - jednostka kąta bryłowego.



Rysunek A.1: Schemat służący do określenia natężenia promieniowania kosmicznego.  $dS$  - element powierzchni w początku układu,  $dN$  - ilość cząstek padających na element powierzchni,  $d\varphi$  - kąt azymutalny,  $d\vartheta$  - kąt zenitalny.  $d\varphi$  i  $d\vartheta$  definiują element kąta bryłowego  $d\Omega$ . Źródło:[8]

Strumień promieniowania kosmicznego zdefiniowany jest następująco:

$$F_i = \int_0^{\pi/2} I_i \cos \vartheta d\Omega,$$

gdzie:  $\vartheta$  jest to kąt między pionem do elementu powierzchni a kierunkiem prędkości cząstek, a  $d\Omega$  elementem kąta bryłowego.

W przypadku izotropowego rozłożenia promieni, strumień przecałkowany po  $E$  wynosi:

$$F_i = \int_0^{\pi/2} I_i \cos \vartheta \sin \vartheta d\Omega = \pi I_i.$$

Wartość  $F_i$  wyrażona została w ilości cząstek na  $cm^2 \cdot s$ .

Natężenie całkowite lub globalne (zsumowane po wszystkich kierunkach) otrzymuje się poprzez scałkowanie natężenia kierunkowego  $I$  po  $d\Omega$ :

$$I_1 = \int_{2\pi} I d\Omega = \int_{\vartheta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = 2\pi \int_0^{\pi/2} I(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta.$$

W przypadku analizy zbioru cząstek o pewnym rozkładzie energii, wygodnie posługiwać się różniczkowym natężeniem  $I_k(E)$ .

$I_k(E) dE$  oznacza natężenie cząstek k-tej składowej w przedziale energii od  $E$  do  $E + dE$ .

Natężenie cząstek o energiach większych od  $E$  (natężenie całkowite) zdefiniowane jest jako:

$$I_k(> E) = \int_E^{\infty} I_k(E) dE.$$

## A.2 Całkowe i różniczkowe widmo energetyczne

**Różniczkowe widmo energetyczne  $D$**  określa ilość cząstek  $dN$  padających na element płaszczyzny  $dS$ , w czasie  $dt$  z kąta bryłowego  $d\Omega$  w przedziale energii  $dE$ :

$$D = \frac{dN}{dS d\Omega dt dE}.$$

Wielkość ta wyrażona jest w ilości cząstek na  $cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot GeV$ .

**Całkowe widmo energetyczne  $C$**  określone jest przez ilość  $dN$  cząstek o energiach większych od  $E$ , padających na jednostkowy element płaszczyzny  $dS$  z elementu kąta bryłowego  $d\Omega$  w czasie  $dt$ :

$$C(> E) = \frac{dN}{dS d\Omega dt}$$

Jednostką tej wartości jest ilość cząstek na  $cm^2 \cdot s \cdot sr$ .

Widmo energetyczne różniczkowe  $D$  i całkowite  $C$  powiązane są relacjami:

$$C(> E) = \int_E^{\infty} D dE$$

$$-\frac{dC}{dE} = D$$





# Bibliografia

---

- [1] *Pani-manekin witająca odwiedzających uczelnię Ecole des Mines de Nantes*. Zdjęcie dzięki uprzejmości prof. Jana Pluty.
  - [2] *Radioactive Decay*. <https://courses.lumenlearning.com/chemistryformajors/chapter/radioactive-decay-2/>.
  - [3] *Types and sources of radiation*. <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm>.
  - [4] *Raport Roczny Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki*. <https://www.gov.pl/web/paa/raport-roczny-prezesa-paa>.
  - [5] H. Zbrozczyk. *Wstęp do Fizyki Jądrowej*. Prezentacja do wykładu, 2022.
  - [6] *Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe*. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20010030018/U/D20010018Lj.pdf>.
  - [7] J. Pluta. *Dozymetria i ochrona radiologiczna*. Prezentacja do wykładu Metody i Techniki Jądrowe, 2022.
  - [8] Zbigniew Strugalski. *Promieniowanie kosmiczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1993. Książka znajdująca się w zbiorach biblioteki Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.
  - [9] Malley, Marjorie C. *Radioactivity: A History of a Mysterious Science*. Oxford University Press. pp. 78–79, 2011.
  - [10] J. Bańkowski i in. *Encyklopedia fizyki*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1973. Książka znajdująca się w zbiorach biblioteki Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.
-

- [11] K. N. Muchin. *Doświadczalna fizyka jądrowa tom II*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1978. Książka znajdująca się w zbiorach biblioteki Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.
- [12] K. N. Muchin. *Doświadczalna fizyka jądrowa tom I*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1978. Książka znajdująca się w zbiorach biblioteki Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.
- [13] D. H. Perkins. *Wstęp do fizyki wysokich energii*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005. Zbiory własne.
- [14] *Karlsruher Institut für Technologie*. <https://www.kit.edu/>.
- [15] *Promieniowanie kosmiczne zdjęcie poglądowe*. <https://www.polityka.pl/tygodnikpolityka/nauka/1526639,1,promieniowanie-kosmiczne---dar-niebios.read>.
- [16] *Hess lądujący po locie balonem 1912r.* <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hessballon.jpg>.
- [17] *Pacini w trakcie pomiarów*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pacini\\_measurement.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pacini_measurement.jpg).
- [18] *Theodor Wulf*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wulf1910.jpg>.
- [19] *Dr Clewer – Surrey Space Centre*. <https://cosmicray.com.au/what-is-a-cosmic-ray>.
- [20] *Sonda Voyager*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voyager.jpg>.
- [21] *Satelita PAMELA*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PAMELAonResurs-DK.jpg>.
- [22] *Obserwatorium Pierre Auger*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CDAS\\_building.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CDAS_building.JPG).
- [23] *Eksperyment KASCADE*. <https://www.iap.kit.edu/kascade/english/>.
- [24] *Annual cosmic-ray dose*. <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Cosmic/Annual-cosmicray-dose>.
- [25] *Monitoring of flight personnel*. <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/occupation/methodology/air-crew-monitoring.html>.
- [26] *How scientists are using cosmic radiation to peek inside the pyramids*. <https://www.sciencefocus.com/future-technology/how-scientists-are-using-cosmic-radiation-to-peek-inside-the-pyramids/>.
-

- [27] *Air Shower scheme.* [https://www.researchgate.net/figure/Basic-scheme-of-an-air-shower-From-left-to-right-the-electromagnetic-component-soft\\_fig1\\_331023686](https://www.researchgate.net/figure/Basic-scheme-of-an-air-shower-From-left-to-right-the-electromagnetic-component-soft_fig1_331023686).
- [28] *Demonstrating cosmic ray induced electromagnetic cascades, Peter Dunne.* <http://hst-archive.web.cern.ch/archiv/hst2000/teaching/expt/muons/cascades.htm>.
- [29] *Mgławica Kraba.* [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crab\\_Nebula.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crab_Nebula.jpg).
- [30] *Cosmic Rays The Origin of Cosmic Rays and Geomagnetic Effects.* <https://slideplayer.com/slide/8987685/>.
- [31] *The Modelling of Background Noise in Astronomical Gamma Ray Telescopes.* [https://www.researchgate.net/publication/225206656\\_The\\_Modelling\\_of\\_Background\\_Noise\\_in\\_Astronomical\\_Gamma\\_Ray\\_Telescopes](https://www.researchgate.net/publication/225206656_The_Modelling_of_Background_Noise_in_Astronomical_Gamma_Ray_Telescopes).
- [32] *Proton proton cycle.* <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23213257>.
- [33] *Porównanie uzyskanych wyników przez Hessa w 1912 i Kolhörstera.* <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HessKol.jpg>.
- [34] *Ilustracja ukazująca tworzenie się pęku atomosferycznego.* [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_Collision.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Collision.svg).
- [35] *Schematyczny rysunek ukazujący tworzenie się wtórnych promieni kosmicznych.* <https://physicsmasterclasses.org/exercises/keyhole/pl/detectors/main-4.html>.
- [36] *Lot do Genewy.* Prezentacja do wykładu Metody i Techniki Jądrowe opracowana przez prof. J. Plutę.
- [37] *Promieniowanie kosmiczne.* [https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray).
- [38] *Rozkład spektralny promieniowania relikтового wraz dopasowanym rozkładem Plancka.* <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cmbr.svg>.
- [39] *NASA / WMAP Science Team.* [http://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/ilc\\_9yr\\_moll4096.png](http://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/ilc_9yr_moll4096.png).
- [40] *The Universe Comes into Sharper Focus.* <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA16874>.
- [41] *A Brief History of Background Radiation.* [https://map.gsfc.nasa.gov/m\\_ig/030644/030644.html](https://map.gsfc.nasa.gov/m_ig/030644/030644.html).
- [42] *Efekt Comptona.* [https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php?title=Plik:Efekt\\_comptona.png](https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php?title=Plik:Efekt_comptona.png).

- [43] L.W. Alvarez i in. *Search for Hidden Chambers in the Pyramids*. *Science*, 1970.
- [44] S. Mollerach i E. Roulet. *Progress in high-energy cosmic ray physics*. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 98:85–118, 2018.
- [45] Aurelian Florin Badea i in. *Investigating the 2nd knee: The KASCADE-grande experiment*. *Journal of Physics: Conference Series*, 47:238, 10 2006.

# Spis rysunków

---

1.1	Pani-manekin witająca odwiedzających uczelnię Ecole des Mines de Nantes . . . . .	5
2.1	Rodzaje rozpadów promieniotwórczych . . . . .	7
2.2	Naturalne źródła promieniowania . . . . .	8
2.3	Wkład źródeł naturalnych i sztucznych w średniej rocznej dawce skutecznej . . . . .	9
2.4	Dawki graniczne dla konkretnych grup społecznych . . . . .	13
3.1	Theodor Wulf . . . . .	16
3.2	Domenico Pacicni w trakcie pomiarów . . . . .	16
3.3	W. Hess lądujący po locie balonem 1912r . . . . .	17
3.4	Porównanie uzyskanych wyników przez Hessa i Kolhörstera . . . . .	18
4.1	Promieniowanie kosmiczne - ilustracja pogładowa . . . . .	20
4.2	Koncepcyjna ilustracja promieniowania kosmicznego . . . . .	20
4.3	Porównanie względnej zawartości pierwiastków w promieniach kosmicznych i w Układzie Słonecznym . . . . .	21
4.4	Natężenie różnych składowych promieniowania kosmicznego . . . . .	22
4.5	Różniczkowe widma energetyczne protonów jąder helu i elektronów . . . . .	24
4.6	Integralne widmo pierwotnych promieni kosmicznych o energiach $E \geq 10\text{GeV}$ . . . . .	25
4.7	Otrzymane wyniki natężenia promieniowania kosmicznego ze wzrostem wysokości . . . . .	26
4.8	Intensywność promieni kosmicznych pod powierzchnią ziemi . . . . .	27
4.9	Schematyczna ilustracja ukazująca stworzenie pęku atmosferycznego . . . . .	27
4.10	Schematyczny rysunek ukazujący tworzenie się wtórnych promieni kosmicznych . . . . .	28
4.11	Fotografia kaskady elektronowo-fotonowej zainicjowanej w ciekłym ksenonie . . . . .	30
4.12	Kaskada hadronowa wraz ze stowarzyszoną kaskadą elektromagnetyczną . . . . .	31
4.13	Schemat rozwoju szerokiego pęku atmosferycznego . . . . .	33

---

4.14 Szeroki pęk atmosferyczny z ukazanymi składowymi: hadronową, elektronowo-fotonową i mionową . . . . .	35
4.15 Mgławica Kraba . . . . .	36
5.1 Schemat elektroskopu Wulfa . . . . .	38
5.2 Schematy teleskopów zestawionych z liczników Geigera-Müllera pracujących w koincydencji . . . . .	38
5.3 Schemat hodoskopu . . . . .	39
5.4 Schemat urządzenia do badania pochłaniania promieniowania kosmicznego w materiałach . . . . .	39
5.5 Schemat kalorymetru jonizacyjnego . . . . .	40
5.6 Programy badawcze oparte na satelitach . . . . .	42
5.7 Eksperymenty naziemne zajmujące się promieniowaniem kosmicznym . . . . .	43
5.8 Spektrum energii wiązki promieniowania kosmicznego . . . . .	44
5.9 Efekt Comptona . . . . .	47
5.10 Przekrój czynny na absorpcję kwantów $\gamma$ w ołowiu w funkcji energii . . . . .	48
6.1 Mapa ukazująca roczną dawkę skuteczną, jaką mieszkaniec Europy otrzymuje (na poziomie morza) ze wszystkich komponentów promieniowania kosmicznego	50
6.2 Ekspozycja na promieniowanie kosmiczne, na różnych wysokościach . . . . .	51
6.3 Porównanie dawek promieniowania . . . . .	52
6.4 Schematyczna ilustracja ukazująca proces prześwietlania piramid . . . . .	54
7.1 Kształt względnych zmian $\Delta I/I$ . . . . .	58
7.2 Wariacje dobowe dla kierunków północnego i południowego . . . . .	59
7.3 27-dobowa powtarzalność amplitudy natężenia promieni kosmicznych . . . . .	59
7.4 Wariacje 11-letnie średnich względnych wartości strumieni neutronów $n$ oraz mionów $\mu$ . . . . .	60
7.5 Schematyczne ukazanie warunków w jakich przeprowadzone zostało doświadczenie dowodzące samorzutny rozpad mionów . . . . .	62
7.6 Kaskada elektronowo-fotonowa wywołana przez elektron . . . . .	64
7.7 Pasy Van Allena . . . . .	65
7.8 Geometryczna wizualizacja stożków dozwolonego i niedozwolonego . . . . .	66
7.9 Cykl protonowy . . . . .	67
7.10 Strumienie neutrino słonecznych, o danych energiach, na powierzchni Ziemi . . . . .	68
7.11 Rozkład spektralny promieniowania relikтового wraz dopasowanym rozkładem Plancka . . . . .	71
7.12 Wahania temperatury sprzed 13.77 miliarda lat . . . . .	72
7.13 Ewolucja badania mikrofalowego promieniowania tła . . . . .	73
A.1 Schemat służący do określenia natężenia promieniowania kosmicznego . . . . .	78

# Spis tabel

---

2.1	Aktywność promieniotwórcza wybranych substancji . . . . .	10
2.2	Tabela ukazująca współczynniki wagowe $w_R$ promieniowania . . . . .	11
2.3	Tabela ukazująca wartości współczynnika $w_T$ dla różnych typów tkanek lub narządów . . . . .	12
3.1	Różnica liczby jonów $n$ na wysokościach $h$ w m n.p.m. wg. pomiarów wykonanych przez Wernera Kolhörstera . . . . .	17
4.1	Skład pierwotnych promieni kosmicznych . . . . .	21