

Promieniowanie kosmiczne

(pochodzenie, skład, oddziaływanie w atmosferze, intensywność w funkcji miejsca i czasu oraz w relacji z innymi źródłami promieniowania, zagrożenie dla człowieka itd.)

Maryla Moczulska

Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Warszawska

Opracowanie zaliczeniowe z przedmiotu

"Metody i Technologie Jądrowe"

Uczelniana Oferta Dydaktyczna PW

Prowadzący: prof.dr hab. Jan Pluta

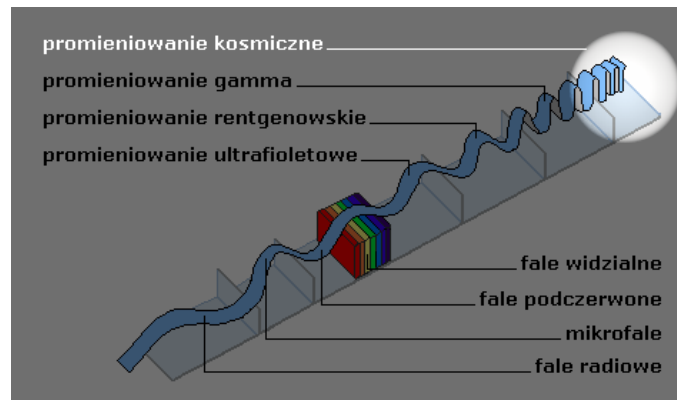
rok akademicki 2008/2009

Spis treści

1.	Co to jest promieniowanie kosmiczne	3
1.1.	Promieniowanie pierwotne i wtórne	4
2.	Skład promieniowania kosmicznego	4
2.1.	Energia promieniowania kosmicznego	6
3.	Historia badań promieniowania kosmicznego	6
4.	Źródła promieniowania kosmicznego	9
5.	Metody obserwacji promieniowania kosmicznego	12
6.	Oddziaływanie promieniowania kosmicznego w atmosferze	13
7.	Oddziaływanie promieniowania kosmicznego z magnetosferą i materią międzyplanetarną	16
8.	Wady i zalety promieniowania kosmicznego	17
9.	Działanie biologiczne promieniowania kosmicznego	18

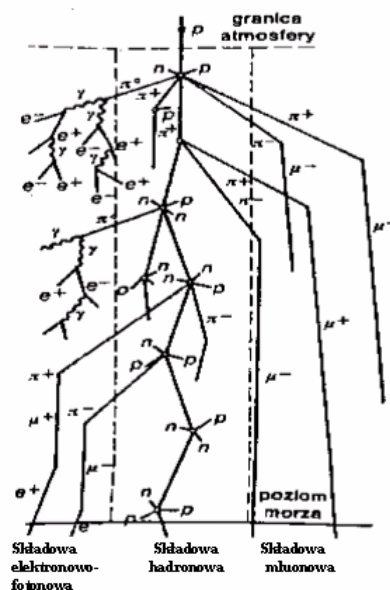
1. Co to jest promieniowanie kosmiczne

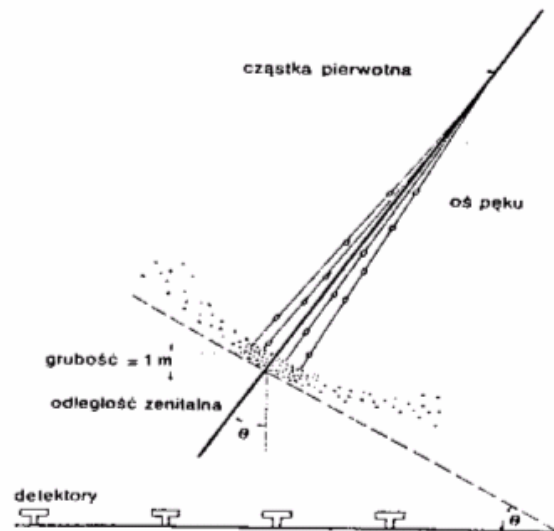
Promieniowanie kosmiczne – promieniowanie, które podobnie jak światło dociera do Ziemi z otaczającej ją otwartej przestrzeni międzygwiazdowej. Promieniowanie kosmiczne ma naturę korpuskularną. Są to cząsteczki naładowane, o bardzo dużych energiach, lecące po liniach prostych z dużymi prędkościami ku Ziemi z przestrzeni międzygwiazdowych. Natężenie promieniowania kosmicznego początkowo wzrasta z wysokością. Na wysokości 16km do 20km nad Ziemią maleje, a następnie od wysokości 50km ustala się. Charakteryzuje się najmniejszą ze wszystkich fal elektromagnetycznych długością fali (poniżej $1 \cdot 10^{-15}$ m) Rys 1



Rysunek 1 Źródło rysunku <http://faleelektromagnetyczne.republika.pl/promkosm.html>

Mimo iż promieniowanie kosmiczne jest silnie pochłaniane przez atmosferę Ziemi to dochodzi ono nie tylko do powierzchni Ziemi, ale przenika grube warstwy wody. Można je również wykryć na dużych głębokościach pod ziemią. Tylko niewielkie ilości promieniowania przedostają się przez atmosferę zmieniając swój pierwotny charakter. Cząstki pierwotnego promieniowania kosmicznego ulegają w atmosferze oddziaływaniom, tworząc w niej wielkie pęki atmosferyczne, które zmieniają pierwotny charakter promieniowania. Wielkie pęki atmosferyczne powstają wskutek zderzeń cząstek promieniowania kosmicznego o dużych energiach z jądrami atomów tworzących atmosferę ziemską. Cząstki wtórne produkowane w pęku dobiegają do powierzchni Ziemi, a nawet wnikają pod jej powierzchnię. Układy detektorów, takich jak liczniki scyntylacyjne lub Geigera-Müllera, rozmieszczone na powierzchni od kilkuset metrów do kilkunastu kilometrów kwadratowych (pod ziemią, na poziomie morza lub na szczytach gór) pozwalają określić zarówno rodzaj cząstek pierwotnych, jak i ich energię i kierunek przylotu.



Rysunek 2 Schemat wielkiego pęku atmosferycznego zapoczątkowanego przez szybki proton Źródło rysunku [3]**Rysunek 3** Układ detektorów rozłożonych na powierzchni ziemi pozwalający na określenie kierunku przylotu cząstki powodującej powstanie wielkiego pęku atmosferycznego.

Wynikiem oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą jest wzrost jej przewodnictwa elektrycznego. W przypadku braku czynników jonizujących, gaz tworzący atmosferę powinien mieć właściwości dielektryka. Fakt, że atmosfera ziemską jest ośrodkiem przewodzącym jest znany od 1900r. W roku 1912r. Y.F.Hess wykazał na podstawie obserwacji, że przewodnictwo atmosfery wzrasta z wysokością. Stwierdził że to jest następstwem jonizacji wywołanej przez przenikliwe promieniowanie pochodzenia pozaziemskiego.

1.1. Promieniowanie pierwotne i wtórne

Promienie kosmiczne dzielą się na dwa rodzaje: promienie pierwotne i promienie wtórne. Promienie pierwotne to strumień cząstek przybywający z kosmosu do górnych warstw atmosfery. Promienie wtórne to cząstki wyprodukowane wskutek oddziaływań cząstek pierwotnych w atmosferze Ziemi. Cząstki pierwotnego promieniowania kosmicznego, wpadając w atmosferę ziemską z dużą energią, wywołują w niej procesy wtórne, polegające na rozbijaniu napotykaných jąder oraz na wytwarzaniu nowych cząstek naładowanych i fotonów. Foton przy współdziałaniu z jądrem wytwarza parę elektron-pozyton. Te z kolei wytwarzają nowe fotony itd.

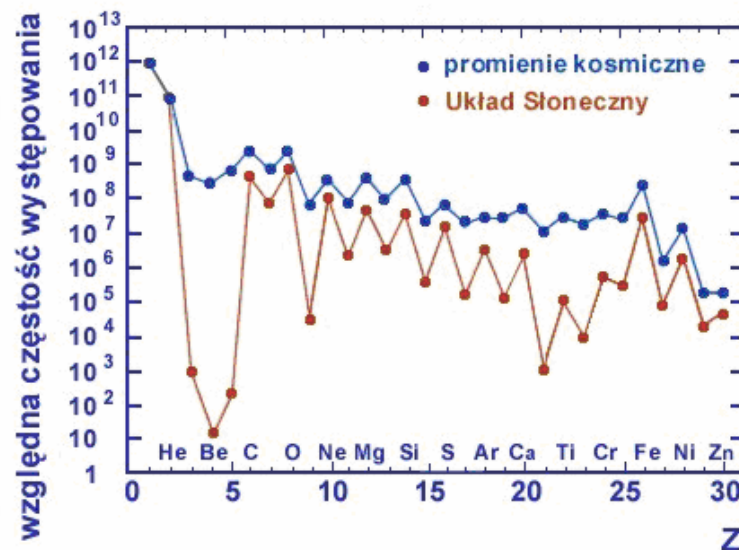
2. Skład promieniowania kosmicznego

W skład cząstek promieniowania kosmicznego wchodzi protony - jądra atomów wodoru (ok. 90%) i jądra helu (ok. 9%) oraz jądra cięższych pierwiastków - praktycznie wszystkich pierwiastków układu okresowego. Znikomą część strumienia promieni kosmicznych docierających do atmosfery stanowią elektrony, pozytony i antyprotony. Pozytony (anty elektrony) obserwowane w promieniowaniu kosmicznym są cząstkami wtórnymi, powstającymi w wyniku reakcji jądrowych promieniowania kosmicznego z materią międzygwiazdową.

Wodór i hel występują w promieniowaniu kosmicznym, w małej ilości natomiast pierwiastki o liczbie atomowej $18 < Z < 24$ występują w znaczenie większej ilości niż w materii Układu Słonecznego (m.in. lit beryl).

Duża ilość tych jąder jest wynikiem reakcji jądrowych zachodzących między szybkimi cząstkami promieniowania kosmicznego i materią międzygwiazdową; w wyniku tych reakcji jądra ciężkie ulegają rozbiciu na jądra lżejsze.

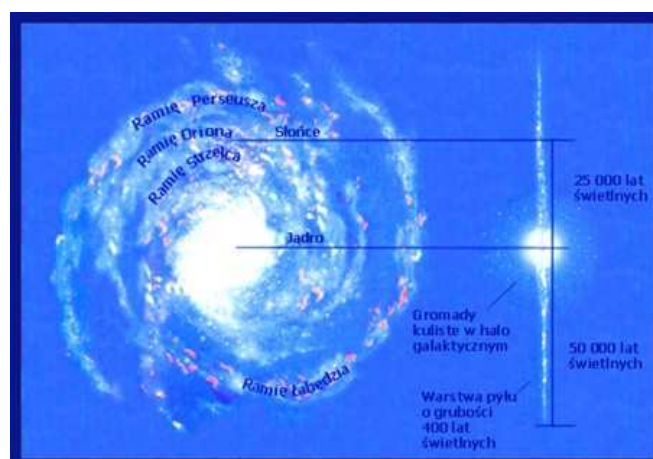
Z badań spektroskopowych wynika, że skład materii Galaktyki w okolicach Układu Słonecznego nie różni się znacząco od innych obszarów Galaktyki i można go uważać za reprezentatywny dla całego dysku Galaktyki Rys 4



Rysunek 4 Porównanie rozpowszechnienia pierwiastków w materii Układu Słonecznego i w promieniowaniu kosmicznym

Pierwiastki Li, Be, B oraz Sc, Ti, V, Mn są bardzo rzadkie w materii Układu Słonecznego, co oznacza, że rzadko występują jako produkty końcowe nukleosyntezy w gwiazdach. Częstości ich występowania w źródłach promieni kosmicznych są niewielkie, zbliżone do obserwowanych w materii Układu Słonecznego. Ponieważ częstości występowania tych pierwiastków w promieniowaniu kosmicznym są o kilka rzędów wielkości większe niż w znanej nam materii w Galaktyce. Jądra pierwiastków występujące w promieniowaniu kosmicznym są jądrami wtórnymi, pochodzącymi z fragmentacji cięższych, znacznie częściej występujących jąder - odpowiednio węgla, tlenu i żelaza.

Badanie zawartości jąder wtórnych stanowi metodę badania warunków propagacji promieni kosmicznych w Galaktyce. Pomiar częstości występowania jąder wtórnych i pierwotnych oraz znajomość procesu fragmentacji dostarczają informacji o ilości materii, przez którą przeszły cząstki, pomiędzy źródłem promieni kosmicznych a Ziemią. Najdokładniejsze dane istnieją dla stosunków natężeń jąder B/C, oraz sub-Fe / Fe. Dane wskazują, że cząstki promieni kosmicznych o energiach ok. 1 GeV/nukleon przechodzą przez 5-10 g/cm² materii pomiędzy źródłami a Układem Słonecznym, przy czym zależność badanych stosunków od energii wskazuje, że przebyta droga zależy od energii cząstek, mianowicie spada ze wzrostem energii powyżej 1 GeV/nukleon.



Rysunek 5 *Kształt naszej Galaktyki- Drogi Mlecznej przedstawiony z góry i z boku. Widać jasne jądro Galaktyki i rozwijające się z jądra spiralne ramiona, a w rzucie bocznym centralnie położony dysk galaktyczny. Spiralne ramiona znajdują się w cienkim dysku zawierają warstwę pyłu.*

W centralnej części Galaktyki znajduje się kuliste halo zawierające gromady kuliste gwiazd. Na rysunku zaznaczone jest również położenie Układu Słonecznego w Galaktyce. Całkowita droga $5\text{g}/\text{cm}^2$, którą przechodzą promienie kosmiczne, jest stosunkowo duża. Grubość dysku Galaktyki w okolicach Układu Słonecznego, wynosząca około 200-300 pc (1 parsek(pc) = 3.26 lat świetlnych = $3.086 \cdot 10^1$ m), odpowiada ilości materii zaledwie około $1\text{ mg}/\text{cm}^2$. Oznacza to, że całkowita droga jaką przebywają promienie kosmiczne, jest tysiące razy większa, niż grubość dysku galaktycznego. Tory lotu cząstek muszą być więc silnie zakrzywione tak, że cząstki zostają uwięzione w pewnych obszarach Galaktyki, przechodząc przez nie wielokrotnie. Rozprzestrzenianie się promieni kosmicznych w Galaktyce ma więc raczej charakter dyfuzji, a nie ruchu cząstek w określonym kierunku pomiędzy źródłem a miejscem obserwacji.

Całkowity strumień promieni kosmicznych padających na atmosferę Ziemi jest rzędu 1000 cząstek/(m^2s). Okolice Układu Słonecznego są obszarem dość typowym dla całego dysku Galaktyki, można założyć, że gęstość cząstek promieniowania kosmicznego jest w przybliżeniu stała w całym dysku Galaktyki. Wynosi ona $10^{-10}/\text{cm}^3$, co odpowiada gęstości energii promieni kosmicznych ok. $1\text{ eV}/\text{cm}^3$. Jest to wielkość tego samego rzędu, co energia światła gwiazd (ok. $0,6\text{ eV}/\text{cm}^3$), lub energia pól magnetycznych (ok. $0,2\text{ eV}/\text{cm}^3$). [1]

2.1. Energia promieniowania kosmicznego

Cząstki promieniowania kosmicznego mają bardzo wysokie energie, poruszają się z prędkościami bliskimi prędkości światła. Cząstki najwyższej energii wchodzące w skład promieniowania kosmicznego mają energie ponad 100 milionów razy wyższe, niż energie osiągnięte w największych akceleratorach cząstek na Ziemi.

3. Historia badań promieniowania kosmicznego

Promieniowanie kosmiczne zostało odkryte przypadkowo, podczas badania stanu naelektryzowania i przewodności elektrycznej atmosfery. Badano straty ładunku elektrycznego, jakich doznaje doskonale odizolowany elektroskop umieszczony wewnątrz osłony metalowej.

W roku 1900 J. Elster i H. Geitel zauważyli istnienie nieznanego źródła jonów w powietrzu. C.T.R. Wilson podczas badań wykonanych za pomocą komory jonizacyjnej stwierdził tworzenie się około 20 par jonów w ciągu 1s w 1cm^3 . Wilson dopatrywał się występowania działania jonizującego czegoś, co jest zdolne przenikać przez grube warstwy materiału.

E. Rutherford i H.L. Cooke stwierdzili istnienie zewnętrznego przenikliwego promieniowania powodującego jonizację powietrza, nakładając dodatkowe ekrany metalowe na osłonę pod którą znajduje się elektroskop (straty elektryczności na listkach elektroskopu wynosiły około 30%). Początkowo uważano że wpływ substancji promieniotwórczych przejawia się wyraźnie jedynie w warstwach atmosfery w pobliżu powierzchni gleby, gdzie najbardziej obficie występują emanacje promieniotwórcze i produkty ich rozpadu. Sądzone więc, że wpływ jonizującego promieniowania od substancji promieniotwórczych powinien być mniejszy w wyższych warstwach atmosfery i słabnąć ze wzrostem wysokości.

W roku 1910 B.W. Wolf skonstruował czuły elektroskop , za pomocą którego zmierzył osłabienie jonizacji na szczycie wieży Eiffla, (nastąpiło osłabienie radioaktywności wraz ze wzrostem wysokości).

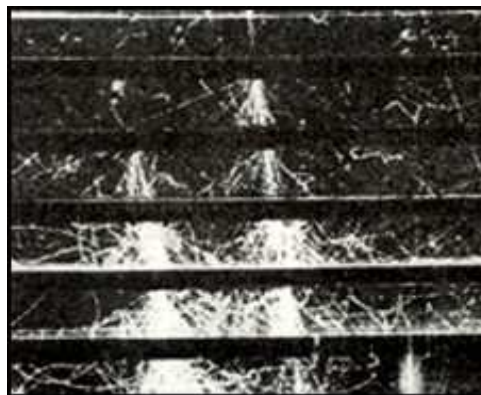
W latach 1911 i 1912 Victor Hess podczas podróży balonem mierzył natężenie przenikliwego promieniowania ze wzrostem wysokości w atmosferze. Stwierdził, że ze wzrostem wysokości początkowo występuje słaby spadek jonizacji, a następnie pojawia się szybki jej wzrost ze

wzrostem wysokości. Stwierdził że przyczyną wzrostu jonizacji jest przenikliwe promieniowanie pochodzące spoza Ziemi, z „wysokości” nazwano je promieniowaniem wysokościowym – „Höhenstrahlung”. Nowoodkryty rodzaj promieniowania nazwany został później promieniowaniem kosmicznym, co zawierało myśl, że jego źródło znajduje się poza Ziemią.



Rysunek 6 Powrót z pierwszej przygodowej podróży fizyków, której celem było badanie promieniowania kosmicznego (źródło fotografii <http://auger.ifj.edu.pl>)

W roku **1927** Dymitr Skobelcyn wykorzystując komorę mgłową sfotografował po raz pierwszy cienkie jak duchy ślady pozostawione przez promienie kosmiczne



Rysunek 7 Ślady cząstek promieniowania kosmicznego widoczne w komorze Wilsona (źródło fotografii <http://auger.ifj.edu.pl>)

W roku **1932** obserwując ślady cząstek promieniowania kosmicznego zarejestrowane przez komorę mgłową Carl Anderson odkrył antymaterię w postaci antyelektronu, nazwanego później pozytonem. Pozyton jest cząstką podobną do elektronu, lecz z odwrotnym (dodatnim) ładunkiem. Rozgorzała debata nad naturą promieniowania kosmicznego. Zgodnie z teorią Roberta Millikana uznano je za promieniowanie gamma docierające do Ziemi z Kosmosu. Z czasem przybywało jednak dowodów, że promieniowanie kosmiczne to wysokoenergetyczne cząstki naładowane.

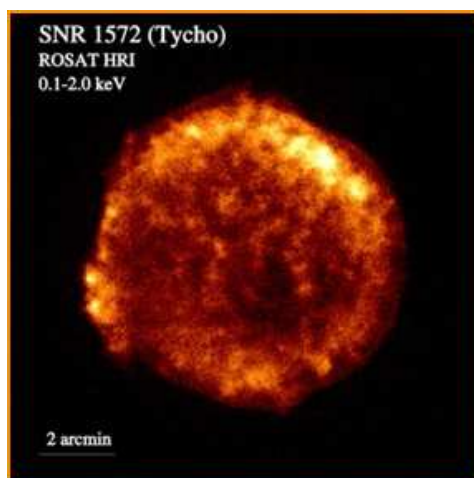
W roku **1937** Seth Neddermeyer i Carl Anderson odkryli nową, elementarną, bardzo lekką cząstkę i nazwali ją mezonem μ (mionem). Pozyton i mion były pierwszymi w serii cząstek lżejszych od atomu odkrytymi dzięki badaniom promieni kosmicznych. Dało to początek nowej dziedzinie fizyki - fizyce cząstek elementarnych. Fizycy cząstek wykorzystywali promienie kosmiczne do swych badań aż do lat 1950-tych kiedy to powstały pierwsze akceleratory cząstek.

W roku **1938** Pierre Auger, który umieścił detektory cząstek wysoko w Alpach zauważył, że dwa detektory odległe od siebie o wiele metrów często sygnalizują nadejście promieni

kosmicznych dokładnie w tym samym czasie. Odkrył w ten sposób "wielkie pęki kosmiczne" - pęki wtórnych, subatomowych cząstek powstałych w zderzeniach pierwotnych, wysokoenergetycznych cząstek promieni kosmicznych z molekułami powietrza. Auger wyliczył, że cząstki które wywołały zarejestrowane pęki, miały energie rzędu 10^{15} eV - czyli 10 milionów razy wyższych niż znane uprzednio.

W roku **1946** grupy badaczy kierowane przez Bruno Rossiego w USA i Grigorija Zacepina w ZSRR rozpoczęły eksperymenty, których celem było badanie struktury wielkich pęków odkrytych przez Augera. Skonstruowali oni pierwsze sieci detektorów do badania wielkich pęków atmosferycznych.

W roku **1949** Enrico Fermi zaproponował teorię przyspieszania promieni kosmicznych. Zgodnie z nią promienie kosmiczne przyspieszane są przez odbicia od obłoków magnetycznych poruszających się w przestrzeni międzygalaktycznej. Wiemy dziś, że eksplodujące gwiazdy (supernowe) działają jako takie akceleratory kosmiczne, choć nie mogą one przyspieszać promieni kosmicznych do najwyższych obserwowanych energii.



Rysunek 8 Pozostałość po wybuchu supernowej SNR 1572 (Tycho). Zdjęcie wykonane przy pomocy satelity Rosat (źródło fotografii <http://auger.ifj.edu.pl>)

W roku **1962** John Linsley i jego współpracownicy zarejestrowali po raz pierwszy w detektorze Volcano Ranch w Nowym Meksyku cząstki promieniowania kosmicznego o energii około 10^{20} eV.

W latach **1960**-tych Arno Penzias i Robert Wilson odkryli, że niskoenergetyczne mikrofały wypełniają Wszechświat. Wkrótce potem Kenneth Greisen, Vadim Kuzmin i Grigorij Zacepin zauważyli, że wysokoenergetyczne promienie kosmiczne muszą oddziaływać z tym promieniowaniem mikrofalowym, co prowadzi do redukcji ich energii. W wyniku takiego procesu cząstki, przebywając ogromne międzygalaktyczne odległości, nie mogą mieć energii większej niż $5 \cdot 10^{19}$ eV.

W roku **1991** grupa fizyków pracujących w eksperymencie "Oko Muchy" zarejestrowała promieniowanie kosmiczne o energii $3 \cdot 10^{20}$ eV. (najwyższa energia jaką zarejestrowano) Pojedyncze przypadki o energiach około 10^{20} eV rejestrowano w różnych eksperymentach w czasie ostatnich 30 lat.



Rysunek 9 Aparatura eksperymentu "Oko Muchy" w stanie Utah w USA, powyżej - wewnątrz pojedynczego detektora
(źródło fotografii <http://auger.ifi.edu.pl>)

W roku **1994** grupy badaczy w eksperymentach AGASA w Japonii i Jakuck w Rosji doniosły o zaobserwowaniu przypadków o energii $2 \cdot 10^{20}$ eV. Razem z przypadkiem Oka Muchy - były to cząstki najwyższej energii które dotarły do Ziemi z Kosmosu.

W roku **1995** Międzynarodowa grupa badaczy rozpoczęła przygotowania do budowy nowego obserwatorium promieni kosmicznych o nazwie "Projekt Pierre Auger" - dla uhonorowania pamięci odkrywcy wielkich pęków atmosferycznych. W nowym obserwatorium zbudowany zostanie ogromny detektor, który pozwoli zarejestrować i zmierzyć dużą liczbę promieni kosmicznych najwyższych energii. Wierzymy, że badanie kierunków przychodzenia promieni kosmicznych najwyższych energii pozwoli lepiej zrozumieć naturę i ewolucję Wszechświata.

4. Źródła promieniowania kosmicznego

Nie potrafimy dziś odpowiedzieć na pytanie, gdzie we Wszechświecie znajdują się obiekty zdolne wysyłać i przyspieszać cząstki do tak gigantycznych energii i jaki proces fizyczny jest za to odpowiedzialny. Istnieje kilka różnych teorii co do pochodzenia pierwotnego promieniowania kosmicznego. Każda teoria mająca na celu wyjaśnienie pochodzenia promieniowania kosmicznego musi uwzględniać trzy podstawowe fakty:

1) Gęstość energii promieniowania kosmicznego jest rzędu 10^{19} J*cm⁻³, czyli jest tego samego rzędu co inne postacie energii występujące w przestrzeni międzygwiazdowej, takie jak energia związana z promieniowaniem reliktowym, energia pola magnetycznego, czy energia kinetyczna obłoków materii międzygwiazdowej.

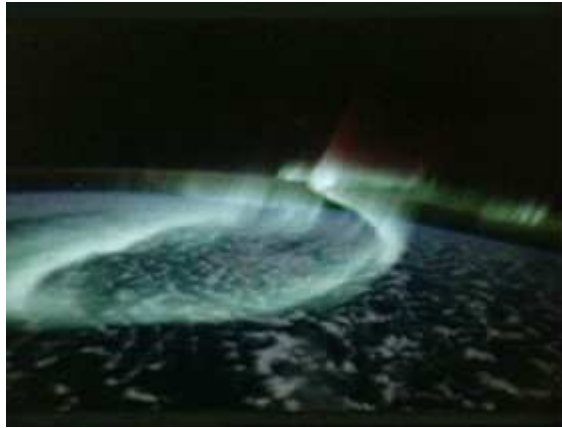
2) Widmo energetyczne promieniowania kosmicznego można przybliżyć wyrażeniem E^{-e} , gdzie E oznacza energię, a wykładnik e jest równy około 2,5.

3) Średni czas życia cząstek promieniowania kosmicznego jest rzędu 10^8 lat, po upływie tego czasu cząstki tracą znaczną część swej energii wskutek oddziaływań z rozproszoną materią, polem magnetycznym i rozrzedzonym promieniowaniem, występującymi w przestrzeniach międzygwiazdowych, a być może również - międzygalaktycznych.

Pewne jest to, że promieniowanie kosmiczne dochodzi do górnych granic atmosfery z przestrzeni międzyplanetarnej i, że składa się z cząstek naładowanych dodatnio. Cząstki te lecą w różnych kierunkach po liniach prostych z bardzo dużymi prędkościami, zbliżonymi do prędkości światła; ich energie sięgają do 10^{19} eV. W pobliżu Ziemi cząstki działają na nie pole magnetyczne ziemskie, które odchyła je ku biegunom. Wskutek tego natężenie promieni kosmicznych jest w pobliżu równika nieco mniejsze niż w większych szerokościach geograficznych i właśnie mniejsze natężenie tych promieni jest odpowiedzialne za powstawanie zorzy polarnej.



Rysunek 10 Naładowane elektrycznie cząstki ze Słońca wywołują zjawisko zorzy polarnej w górnych warstwach ziemskiej atmosfery. Najpiękniejsze zorze podziwiać można w okresie największej aktywności słonecznej (źródło fotografii <http://auger.ifi.edu.pl>)



Rysunek 11 Zorza polarna sfotografowana przez astronautów NASA. Widać pasmo świecącego powietrza znajdujące się 80-12 km nad powierzchnią Ziemi. Zjawisko zorzy jest wywołane wzbudzeniem atomów tlenu w górnych warstwach atmosfery, przez promieniowanie z Pasów Radiacyjnych van Allena. Najczęściej występuje powyżej 65° szer. geo gr., na wiosnę i w jesieni. (źródło fotografii <http://auger.ifi.edu.pl>)



Rysunek 12 Inne zdjęcie zorzy polarnej wykonane również przez astronautów NASA. Pokazuje postrzeżone pasmo czerwonej poświaty nazwanej "Czerwona Korona" widocznej także 80-120km nad powierzchnią Ziemi (źródło fotografii <http://auger.ifi.edu.pl>)

Część promieniowania kosmicznego o niższych energiach pochodzi z rozbłysków słonecznych (obserwuje się wyraźną korelację między rozbłyskami i nagłymi wzrostami ilości cząstek promieniowania kosmicznego o energiach od 100MeV do kilku GeV), ale są to zjawiska sporadyczne. Większość promieniowania kosmicznego pochodzi z wybuchów gwiazd nowych i supernowych. Gwiazdy te wyrzucają naładowane cząstki, które blakając się w przestrzeniach międzygwiazdowych mogą na przykład być rozpędzane przez znajdujące się tam pola magnetyczne i elektryczne. Źródłem promieniowania kosmicznego mogą być również gwałtowne procesy mające miejsce w centrum naszej Galaktyki, jak również w centrum Grupy Lokalnej Galaktyk.

Aktywność gwiazd

Sądono że aktywność gwiazd typu Słońce może być źródłem promieniowania kosmicznego. Jednak energie emitowanych przez takie gwiazdy cząstek są niewielkie - takie, jakie napotyka się w pierwotnym promieniowaniu. Również dokładna analiza wydajności energetycznej gwiazd skłania do odrzucenia Słońca i gwiazd mu podobnych jako istotnych źródeł promieniowania.

Wybuchy supernowych

Energia niesiona przez promienie kosmiczne może być wstrzykiwana do Galaktyki przy wybuchach supernowych. W fazie początkowej wybuchu supernowej wytwarza się fala uderzeniowa rozprzestrzeniająca się od rdzenia gwiazdy i przyspieszająca cząstki w zewnętrznych obszarach do energii $10^8=10^{21}$ eV. Wytwarzają się neutrony, które z kolei powodują powstawanie jąder cięższych w szybkich procesach wychwytu. Eksplozji towarzyszy promieniowanie w zakresie fal radiowych, światła i promieniowania rentgenowskiego rozchodzące się z rejonu pozostałości po wybuchu gwiazdy; może ono być odniesione do procesów przyspieszania synchrotronowego cząstek. Mogą tam być przyspieszane elektrony do energii ok. 10^{13} eV, a nawet protony i inne jądra atomowe. Z obserwacji wynika, że średnio jedna supernowa zdarza się w Galaktyce co 30-50 lat i przy wybuchu wyzwala się energia rzędu 10^{43} - 10^{44} J. Eksplozje te mogą powodować pozostawianie strumienia promieni kosmicznych w Galaktyce w stanie stacjonarnym z zawartością energii ok. 10^{49} J. Przypływ energii z takich źródeł może być dostatecznie duży, aby wytworzyć równowagę między cząstkami dopływającymi ze źródeł i cząstkami opuszczającymi Galaktykę lub doznającymi strat energii w procesach oddziaływań z ośrodkiem międzygwiazdowym.

Gwiazdy nowe

Gwiazdy nowe mogą wytwarzać promieniowanie kosmiczne w podobnym procesie, jak supernowe, ale energia wyzwolana w tych obiektach wynosi tylko ok. 10^4 energii wyzwolanej przy eksplozji supernowej. Nowe jednak pojawiają się znacznie częściej niż supernowe - ok. 100 w ciągu roku -- mogą więc wносить zauważalny wkład do promieni kosmicznych.

Pulsary

Podczas ewolucji gwiazdy neutronowej elektryczna przewodność materii gwiazdowej pozostaje dostatecznie wielka, aby podtrzymać jej pierwotne pole magnetyczne. To podtrzymywanie strumienia magnetycznego prowadzi do powstawania intensywnych pól powierzchniowych osiągających 10^9 T. Tak silne pola magnetyczne H indukują odpowiednio silne pola elektryczne w których mogą być przyspieszane cząstki promieniowania kosmicznego. Ponadto obracający się pulsar wytwarza intensywne promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie niskich częstotliwości, unoszące ogromną porcję energii. Cząstki promieni kosmicznych mogą "podłączać" się do takich fal i uzyskiwać w ten sposób energie bliskie maksymalnym występującym w promieniach kosmicznych - rzędu 10^{21} eV.

Magnetyczne gwiazdy A

Istnieją w Galaktyce obiekty zwane magnetycznymi gwiazdami A o powierzchniowych polach magnetycznych rzędu ponad 0,1T. Ruch obrotowy takich gwiazd powoduje przyspieszanie - w ich polach magnetycznych - cząstek promieni kosmicznych, podobnie jak w pulsarach. Maksymalna energia uzyskiwana przy takim przyspieszaniu wynosi ok. 10^{10} eV. Gwiazdy magnetyczne A mogą więc częściowo przyczyniać się do wytwarzania promieni kosmicznych w zakresie energii niskich - mniejszych niż 10^{10} eV.

Białe karły

Istnieje wiele gwiazd typu białych karłów, szeroko rozsypanych po Galaktyce. Jeżeli obiekty te stanowią wczesne stadia pulsarów i ich pola magnetyczne są dostatecznie silne, to mogą one wносить wkład do promieniowania kosmicznego w zakresie niższych energii - podobnie jak gwiazdy magnetyczne A. Ponieważ takich źródeł jest dostatecznie dużo, ich udział w niskoenergetycznej składowej promieniowania kosmicznego może być zauważalny.

Jądro Galaktyki

Jądro Galaktyki jest traktowane jako źródło biorące aktywny udział w tworzeniu promieniowania kosmicznego, w procesach podobnych do tych, jakie zachodzą przy wybuchach supernowych. Jako argumentację na rzecz takiego poglądu przytacza się dane z obserwacji wzmożonego promieniowania - w niektórych zakresach częstotliwości - z obszarów centralnych Galaktyki, w porównaniu z innymi jej obszarami. Ponadto, istnieją dowody na to, że na wielką skalę zachodzi wyrzucanie materii z jądra Galaktyki. Sądzi się, że jeśli eksplozje w jądrze powtarzają się z okresem rzędu 10^7 lat, to jest możliwe wytwarzanie tam promieni kosmicznych z mocą ok. 10^{33} J/s.

Źródła pozagalaktyczne

Mogą istnieć również inne niż galaktyczne źródła promieniowania kosmicznego. Jest wielce prawdopodobne, że promienie kosmiczne są wstrzykiwane do przestrzeni międzygalaktycznej z różnych źródeł: normalnych galaktyk, radiogalaktyk, kwazarów. Źródła takie produkują energię w postaci promieniowania synchrotronowego osiągającą ok. 10^{36} J/s - ok. 10^5 razy więcej niż w Galaktyce. Promieniowanie kosmiczne może więc być zjawiskiem uniwersalnym - gęstość energii zawartej w promieniach kosmicznych jest w przybliżeniu stała na całej przestrzeni Wszechświata. Aby gęstość energii promieniowania kosmicznego była ok. 1 eV/cm^3 zarówno wewnątrz, jak i zewnątrz Galaktyki, moc źródeł musi wynosić ok. $5 \cdot 10^{23} \text{ J/(cm}^3 \cdot \text{s)}$, jeśli straty nie są brane pod uwagę; znaczy to, że każde ze źródeł powinno wносить średnio 10^{42} J/s do wytwarzania cząstek relatywistycznych - ok. 100 razy mniej niż energia wnoszona przy emisji promieniowania elektromagnetycznego. W ramach modelu uniwersalnego napotyka się trudności przy próbach wyjaśnienia tak wielkich wkładów energetycznych.

Jedną z teorii dotyczącą pochodzenia promieniowania kosmicznego stwierdza, że cząstki promieniowania o energiach wyższych niż 10^{17} eV są pochodzenia pozagalaktycznego. Protony o energiach $6 \cdot 10^{17}$ eV, przelatując w magnetycznym polu galaktycznym $5 \cdot 10^{-10}$ T, podążają po orbitach kołowych o promieniu larmorowskim rzędu $6 \cdot 10^{20}$ cm, prostopadłych do wektora pola. Taki promień larmorowski jest porównywalny z rozmiarami Drogi Mlecznej, więc protony powyżej 10^{17} eV nie mogą się gromadzić w polu Galaktyki. Ponadto, protony o tak wielkich energiach wytworzone w Galaktyce powinny wykazywać widoczną anizotropię wskazującą na źródła odpowiedniego przyspieszania; anizotropii nie obserwuje się, jeśli wysnuwać wniosek na podstawie ubogiej dotychczas statystyki danych obserwacyjnych.

5. Metody obserwacji promieniowania kosmicznego

Celem obserwacji promieniowania kosmicznego jest dokonanie jednoznacznej identyfikacji cząstek, określenie ich widma energetycznego (tzn. względnej liczby cząstek danego rodzaju, o energii zawartej w jednostkowym przedziale wokół danej energii E oraz kierunku przylotu). Jednoznaczna identyfikacja cząstki wymaga określenia jej ładunku oraz masy. Wszystkie cząstki promieniowania kosmicznego są jądrami atomowymi pozbawionymi całkowicie powłok elektronowych; określenie ładunku jest więc równoznaczne z określeniem liczby atomowej jądra (czyli liczby znajdujących się w nim ładunków dodatnich). Określenie znaku ładunku pozwala na odróżnienie materii od antimaterii. Do identyfikacji cząstek można wykorzystać pewne właściwości ich oddziaływania z materią. Cząstka promieniowania kosmicznego przechodząca przez gęsty ośrodek traci część swej energii na jonizację lub wzbudzenie tworzących go atomów. Straty te nazywamy stratami jonizacyjnymi. W ogólnym wypadku zależą one od ładunku oraz prędkości cząstki; tak więc oprócz określenia strat jonizacyjnych (czyli ubytku energii na jednostkowej drodze) do identyfikacji cząstki potrzebne są również niezależne informacje o jej prędkości. W przypadku cząstek relatywistycznych (poruszających się z prędkością bliską prędkości światła) straty jonizacyjne zależą praktycznie tylko od ładunku.

Innej możliwości identyfikacji cząstek dostarcza analiza tzw. promieniowania Czerenkowa. Promieniowanie to pojawia się zawsze, gdy prędkość cząstki obdarzonej ładunkiem elektrycznym, poruszającej się w przezroczystym ośrodku o współczynniku załamania n , przekracza wartość c/n , czyli jest większa od prędkości światła w tym ośrodku (pozostając jednak mniejsza od prędkości światła w próżni). Natężenie oraz barwa promieniowania Czerenkowa emitowanego na jednostkowej drodze zależy od ładunku cząstki i od jej prędkości. Gdy cząstki poruszają się z prędkością dużo większą od prędkości granicznej c/n , właściwości promieniowania Czerenkowa zależą od ładunku cząstki.

W zakresie energii mniejszych od około 3×10^8 eV straty jonizacyjne mogą doprowadzić do całkowitego zatrzymania cząstki zanim oddziaływania jądrowe zamienią ją w cząstkę lub cząstki innego rodzaju.

Do określenia energii cząstek o większych energiach wykorzystuje się następujące urządzenia:

- Liczniki Czerenkowa - zależnie od współczynnika załamania użytej substancji rejestrują tylko cząstki o energiach większych od określonej energii progowej.
- Spektrometry magnetyczne- urządzenia, w których wykorzystuje się fakt, że cząstka o pędzie p i ładunku Z , poruszająca się w poprzecznym polu magnetycznym o natężeniu B , zakreśla koło o promieniu $r = p/ZB$. Urządzenia tego rodzaju są zazwyczaj używane w połączeniu z układami komór iskrowych lub z blokami emulsji, pozwalającymi dokładnie określić tory cząstek. Spektrometry jonizacyjne- urządzenia w których pierwotna cząstka traci swą energię w grubej warstwie absorbującej wskutek oddziaływań jądrowych, prowadzących do powstania kaskad mezonowych. Ostatecznie, niemal cała energia kinetyczna cząstki zamienia się w energię kaskady elektronów i może być zmierzona.

Tabela 1 Metody obserwacji promieniowania kosmicznego w różnych zakresach energii.

Zakres energii	Metoda obserwacji
$2 \times 10^7 - 3 \times 10^8$ eV	Detektory umieszczone na pokładach sztucznych satelitów o orbitach ekscentrycznych, wybiegających poza magnetosferę
$2 \times 10^8 - 5 \times 10^{10}$ eV	bloki emulsji i liczniki Czerenkowa wynoszone przez balony stratosferyczne
$10^{10} - 10^{14}$ eV	spektrometry jonizacyjne i bloki emulsji rejestrujące reakcje jądrowe, umieszczone na pokładach satelitów i balonów stratosferycznych
$10^{12} - 10^{16}$ eV	podziemne pomiary strumienia mionów
$10^{16} - 10^{20}$ eV	obserwacje wielkich pęków atmosferycznych

6. Oddziaływanie promieniowania kosmicznego w atmosferze

Docierające z przestrzeni kosmicznej do Ziemi promieniowanie oddziałuje z ziemskim polem magnetycznym i atmosferą. W wyniku oddziaływań zdarzają się procesy - odpowiednio do rodzaju występujących oddziaływań.

Jedną z ważniejszych charakterystyk promieniowania kosmicznego jest jego natężenie. Natężenie to ulega istotnym zmianom z wysokością nad poziomem morza i z głębokością poniżej tego poziomu.

W latach dwudziestych i trzydziestych XX wieku sporządzono charakterystyką promieniowania kosmicznego jest zależność jego natężenia od głębokości w atmosferze - od ciśnienia atmosferycznego. Występują one w dwóch wariantach:

1. Zależność od głębokości w atmosferze lub od wysokości nad poziomem morza, całkowitego natężenia promieniowania kosmicznego dochodzącego do przyrządu pomiarowego ze wszystkich kierunków.

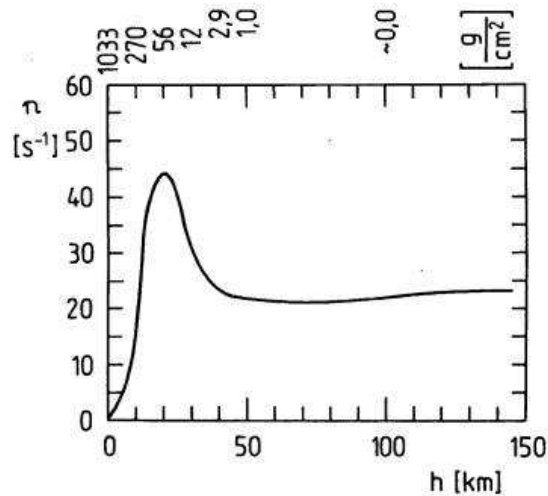
pojedyncze komory jonizacyjne lub pojedyncze liczniki Geigera-Müllera

2. 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.

Do pomiarów natężenia używano teleskopu z dwóch lub kilku liczników usytuowanych równolegle względem siebie jeden nad drugim i pracujących w koincydencji.

W obu przypadkach układy pomiarowe wynoszono wysoko nad poziom morza za pomocą sond balonowych lub na raketach. Uzyskiwano w ten sposób informację o całkowitym lub globalnym natężeniu i o składowej pionowej natężenia promieniowania na różnych głębokościach w atmosferze.

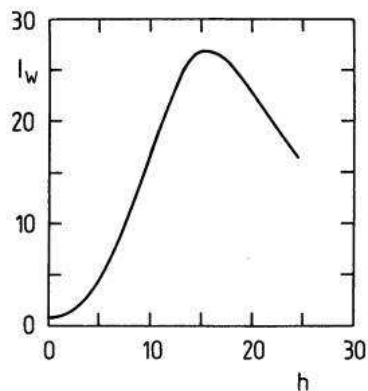
Jednymi z pierwszych danych dotyczących zależności globalnego promieniowania kosmicznego od wysokości nad poziomem morza, osiągającej prawie 150km, są wyniki dostarczone przez pojedynczy licznik wyniesiony na rakiecie V2 nad szerokością geograficzną północną wynoszącą 41° w dn. 27 maja 1948 r.



Rysunek 13 Zależność szybkości zliczeń - liczby impulsów n na sekundę pojedynczego licznika Geigera-Mullera od wysokości h km n.p.m.; raketę V2 niosącą licznik wypuszczono na szerokości północnej 41°. Według danych z pracy A.V. Gangnesa, J.F. Jenkinsa Jr., J. Van Allena

Zależność wysokościowa globalnego natężenia wykazuje następujące właściwości:

- poza granicami atmosfery średnie natężenie promieniowania kosmicznego jest stałe, wynoszące ok. $0,14 \text{ cząstek} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, dla cząstek o energii większej od $2,5 \cdot 10^9 \text{ eV/nukleon}$
- początkowo natężenie wzrasta z głębokością w atmosferze, do wartości maksymalnej przy wysokości 20-22 km n.p.m., tj. przy ok. $100 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
- przy ok. 20km n.p.m. występuje spadek natężenia aż do wartości ok. 50 razy mniejszej na poziomie morza od wartości maksymalnej; największa wartość nosi nazwę maksimum Pfozera, ponieważ on pierwszy wykrył to maksimum, wynosi ona około $0,28 \text{ cząstek} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Dokładniejsze dane uzyskano następnie po ok. 10 latach (Rys. 13)



Rysunek 14 Zależność wertykalnego natężenia promieniowania kosmicznego I_w cząstek $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ od wysokości h km n.p.m.; wg danych z rozprawy doktorskiej L.T. Baradzeja.

Maksimum natężenia promieniowania kosmicznego w kierunku pionowym występuje na wysokości ok. 15km przy ciśnieniu ok. $110 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, wynosi ono $0,45 \text{ cząstek} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Natężenie w maksimum jest ok. 3 razy większe niż poza granicami atmosfery i ok. 30 razy większe niż na poziomie morza.

Krzywe zmian natężenia promieniowania globalnego i jego składowej pionowej z głębokością w atmosferze różnią się istotnie. Maksimum natężenia globalnego znajduje się wyżej nad poziomem morza niż maksimum natężenia w kierunku pionowym. Różnice te są zrozumiałe jakościowo - cząstki przybywające do danego miejsca z różnych kierunków przenikają grubsze warstwy atmosfery jak cząstki przychodzące tam pionowo; w pierwszym przypadku cząstki rozmnażają się silniej niż w drugim i maksimum natężenia ustala się wyżej niż w przypadku drugim.

Stosunek między zmianami wysokościowymi natężenia promieniowania kosmicznego globalnego i pionowego analizował ilościowo H. Gross, (założeniu, że promieniowanie kosmiczne pada izotropowo na granicę atmosfery, a trajektorie cząstek nie są zakłócane przez ziemskie pole magnetyczne).

$$V(x) = g(x) - x \frac{dg(x)}{dx}$$

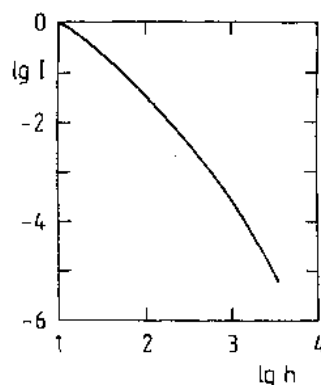
gdzie

$V(x)$ - natężenia promieniowania w kierunku pionowym

X - grubości warstwy atmosfery, licząc od jej granicy,

$g(x)$ - natężenia globalnego odniesioną do jednostki kąta bryłowego

Pomiary natężenia promieniowania kosmicznego pod powierzchnią gruntów i powierzchnią wody w zbiornikach wodnych zaczęto wykonywać w 1925r.; R.A. Millikan wraz ze współpracownikami wykonał serię obserwacji i pomiarów za pomocą komór jonizacyjnych pogrążonych w wodzie pokrytego lodem jeziora. Zaobserwowano wówczas, że jeszcze na głębokości ok. 80 m w wodzie jest prąd w komorze jonizacyjnej, wykazuje on zmniejszanie się z głębokością zanurzenia. Następnie, w badaniach wykonanych przez E. Regenera, W. Kohlhörstera, A. Ehmerta, J. Claya, V.C. Wilsona, Y. Miyazaki za pomocą komór i liczników pracujących na różnych głębokościach w wodzie i w kopalniach rozszerzono zakres głębokości; na głębokości ok. 3000m natężenie promieniowania wynosi ok. $3 \cdot 10^{-6}$ natężenia na poziomie morza.

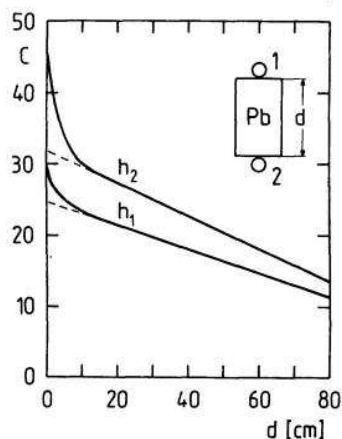


Rysunek 15 Intensywność I promieni kosmicznych na głębokości h pod powierzchnią ziemi wyrażonej w metrach równoważnika wody;

Dużą przenikliwość cząstek promieniowania kosmicznego przez grube warstwy materiałów pokazał B. Rossi. Posługiwał się on prostym hodoskopem zawierającym trzy równoległe leżące w płaszczyźnie pionowej liczniki Geigera-Müllera; odległość między skrajnymi licznikami wynosiła 100cm. Liczniki 1-2-3 były umieszczone w bloku ołowianym i połączone w układzie

koincydencyjnym. Aparatura rejestrowała znaczną liczbę koincydencji. Jeśli zaś usunięto licznik 2 poza granice kąta bryłowego wyznaczonego licznikami 1-3, to liczba koincydencji zmniejszyła się wielokrotnie. Zasadnicza część koincydencji była spowodowana pojedynczymi cząstkami naładowanymi przenikającymi warstwę 100cm ołowiu. Wiadomo, że cząstka relatywistyczna traci ok. 1 MeV energii przy przenikaniu $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ołowiu, to cząstki przenikające przez teleskop powinny mieć energię ponad 10^8eV .

Do poszukiwania składowych promieniowania kosmicznego o różnych przenikliwościach użyto prostego układu koincydencyjnego złożonego z dwóch liczników tworzących hodoskop, przedzielonych warstwą ołowiu o zmiennej grubości d . Przy zwiększaniu d od 0 do ok. 15cm liczba koincydencji zmniejszała się stosunkowo szybko, a przy dalszym zwiększaniu grubości warstw ołowiu liczba koincydencji spadała istotnie wolniej. Współczynnik pochłaniania promieniowania znacznie zmalał i dalsze zwiększanie grubości warstwy ołowiu prowadziło tylko do nieznacznego zmniejszania się liczby koincydencji.



Rysunek 16 Kształt krzywych pochłaniania cząstek promieni kosmicznych w ołowiu na dwóch wysokościach w atmosferze – h_1 wynoszącej ok. 520 mmHg i h_2 ok. 750 mm Hg - zależność liczby koincydencji C dwóch liczników Geigera-Müllera od grubości d pochłaniacza ołowianego. W prawym górnym rogu schemat urządzenia pomiarowego z dwóch liczników 1 i 2 i filtra Pb o zmiennej grubości.

Na podstawie tego eksperymentu naturalne rozdzielono promieniowania kosmicznego na dwie składowe - **miękką**, pochłanianą w warstwie ołowiu o grubości ok. 15cm - i **twardą**, przenikającą przez warstwy ołowiu grubsze ok. 15cm. Stwierdzono, że stosunek natężeń obu składowych zależy od wysokości miejsca obserwacji nad poziomem morza. Na poziomie morza miękka składowa stanowi ok. 1/3 a twarda 2/3 całkowitego natężenia promieniowania.

Na poziomie morza i na niewielkich wysokościach nad nim składowa miękka zawiera głównie elektrony -- negatony i pozytony oraz fotony, składowa twarda zawiera głównie cząstki o masach większych, praktycznie nie tracących energii na promieniowanie hamowania - protony, mezony, miony; na poziomie morza istotnie przeważają miony.

7. Oddziaływanie promieniowania kosmicznego z magnetosferą i materią międzyplanetarną

Pole magnetyczne Ziemi też wpływa na intensywność promieniowania docierającego do granic atmosfery - powoduje zmniejszanie się jej ze wzrostem szerokości geomagnetycznej.

Charakterystyczna dla pierwotnego promieniowania kosmicznego jest jego izotropia - dociera ono do Ziemi jednakowo intensywnie ze wszystkich kierunków w danym punkcie poza atmosferą; jednorodność rozkładu kierunków ruchu cząstek w przestrzeni jest bardzo duża.

Dane o anizotropii galaktycznego promieniowania kosmicznego można uzyskać z pomiarów poza granicami atmosfery, tylko dla cząstek o energiach kinetycznych nie mniejszych od 500-1000 GeV, bo ruch cząstek o mniejszych energiach jest silnie skażony polem magnetycznym Układu Słonecznego. W całym tym zakresie najwyższych obserwowanych energii nie znaleziono wyraźnej

anizotropii; w zakresie energii do ok. 10^{14} eV mierzona anizotropia jest mniejsza od ok. 0,5%, wzrastając do około 3% przy energii ok. $3 \cdot 10^{17}$ eV.

Pole magnetyczne, a dokładniej jego składowa poprzeczna, wywiera istotny wpływ na ruch cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym. Tory cząstek promieniowania kosmicznego są więc określone zarówno przez rozkład pola magnetycznego w Galaktyce (natężenie pola rzędu 10^{10} T), jak i przez znacznie silniejsze pole magnetyczne otaczające Ziemię w postaci tzw. magnetosfery lub geokorony. Od 1937r. znany jest tzw. efekt Forbusha, polegający na tym, że ogólny strumień promieniowania kosmicznego ulega znacznemu zmniejszeniu w okresach burz geometrycznych. Efekt Forbusha tłumaczy się działaniem tzw. butelki magnetycznej, w którym pole magnetyczne jest wzmocnione, odbija dobiegające z zewnątrz cząstki promieniowania kosmicznego. Efekt Forbusha jest jednym z przejawów znaczącego ogólniejszego zjawiska modulacji promieniowania kosmicznego w 11-letnim cyklu aktywności słonecznej. Modulacja ta polega na okresowych zmianach natężenia promieniowania kosmicznego, przy czym wielkość tych zmian zależy od energii promieniowania kosmicznego. Zjawisko modulacji słonecznej jest wynikiem oddziaływania cząstek promieniowania kosmicznego z materią i polem magnetycznym, unoszoną ze Słońca w postaci tzw. wiatru słonecznego. Cząstki promieniowania kosmicznego, dyfundujące poprzez nieregularności pola magnetycznego w wietrze słonecznym, są wynoszone wraz z tymi nieregularnościami z układu planetarnego. Istniejące teorie tego zjawiska pozwalają przewidzieć w sposób ilościowy osłabienie strumienia promieniowania kosmicznego (zależnie od energii) oraz zmianę widma energetycznego cząstek w wyniku oddziaływania z wiatrem słonecznym.

8. Wady i zalety promieniowania kosmicznego

Promieniowanie kosmiczne pozostaje nadal jednym z najbardziej niezbadanych rodzajów promieniowania z całego spectrum falowego. Jest ono ciągłym przedmiotem badań uczonych na całym świecie. Coraz lepsze metody detekcji promieni kosmicznych, a co za tym idzie - pełniejsza znajomość widma energetycznego, jak również zależność składu chemicznego promieni kosmicznych od ich energii ma zasadnicze znaczenie dla zrozumienia procesów akceleracji i propagacji promieni kosmicznych we Wszechświecie. Promienie kosmiczne dostarczają dodatkowych informacji o procesach ewolucji gwiazd, a także o własnościach przestrzeni międzygwiazdowej. W przeszłości promieniowanie kosmiczne było jedynym źródłem cząstek o wysokich energiach, umożliwiając badanie cząstek i ich oddziaływań.

Badanie promieni kosmicznych jest bardzo cennym źródłem informacji o Wszechświecie, dostarcza informacji o procesach ewolucji gwiazd i nukleosyntezy, a także o własnościach przestrzeni międzygwiazdowej i Galaktyki jako całości.

Badanie promieniowania kosmicznego jest ściśle powiązane z fizyką cząstek. W przeszłości promieniowanie kosmiczne było jedynym źródłem cząstek o wysokich energiach, umożliwiając badanie cząstek i ich oddziaływań. Większość początkowych odkryć w fizyce cząstek została dokonana przy użyciu promieni kosmicznych. Obecnie badania w zakresie fizyki cząstek są prowadzone głównie przy użyciu akceleratorów cząstek, aczkolwiek promieniowanie kosmiczne wciąż dostarcza cząstek o energiach wyższych niż osiągnięte w akceleratorach.

Promieniowanie kosmiczne jest również wykorzystywane do wyznaczania wieku wykopalisk. Znajomość natężenia promieniowania kosmicznego i jego wpływu na syntezę radioaktywnego izotopu węgla ^{14}C pozwoliły na rozwinięcie metody wyznaczania wieku wykopalisk opartej na pomiarze radioaktywności próbek.

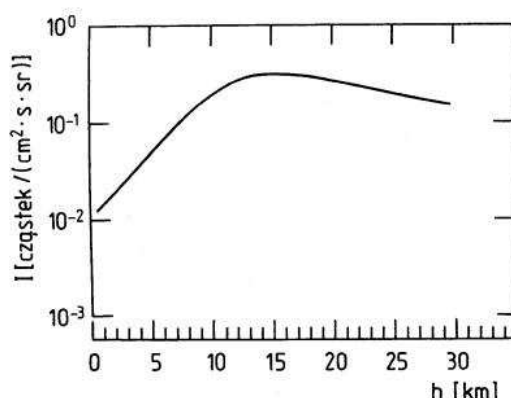
Spśród mniej znanych efektów można tu wymienić związek natężenia promieniowania kosmicznego z zawartością ozonu w atmosferze; z trwałością sztucznych satelitów, a także wpływ zaburzeń geomagnetycznych na zdrowie ludzi, w szczególności na występowanie zawałów serca.

Wahania natężenia cząstek emitowanych przez Słońce powodują zaburzenia ziemskiego pola magnetycznego, czyli tzw. burze magnetyczne. W połączeniu ze zmianami jonizacji górnych warstw atmosfery, burze magnetyczne silnie wpływają na warunki rozchodzenia się fal radiowych. Mogą one powodować utratę łączności radiowej na dużych obszarach na Ziemi, również łączności z satelitami. Utrzymanie dobrej łączności radiowej ma zasadnicze znaczenie w komunikacji lotniczej. Znane są również przypadki popełniania błędów w nawigacji morskiej spowodowane właśnie burzami magnetycznymi.

Zmiany pola magnetycznego na powierzchni Ziemi mogą indukować duże napięcia w sieciach energetycznych, powodując ich awarie na dużych obszarach, takie jak np. awaria głównego transformatora energetycznego w New Jersey w 1989r. Zaburzenia geomagnetyczne mogą też zakłócić działanie systemów zdalnej sygnalizacji i kontroli, np. w sieci kolejowej.

9. Działanie biologiczne promieniowania kosmicznego

Promieniowanie kosmiczne działając na organizmy żywe, powoduje zmiany w ich komórkach (analogicznie, jak produkty rozpadów źródeł radioaktywnych). Na poziomie morza aż do wysokości gór dawki promieniowania kosmicznego są małe w porównaniu z dawkami lub dozami radioaktywności ośrodka, ale rosną szybko wraz z wysokością. Zmiany strumienia cząstek promieniowania i strumieni różnych składowych z wysokością w atmosferze pokazano na rysunku poniżej.



Rysunek 17 Zmiana z wysokością h w km w atmosferze strumienia promieniowania kosmicznego I – sumy ilości nukleonów, elektronów i mionów (źródło fotografii [1])

Górne warstwy atmosfery absorbują prawie zupełnie promieniowanie kosmiczne towarzyszące rozbłyskom słonecznym. Cięższe jądra atomowe prawie nie docierają na wysokość 10km ponieważ ulegają fragmentacji. Jednakże na większych wysokościach, ok. 15km znajduje się zawsze chociaż niewielka porcja ciężkich jąder atomowych. Natomiast w otwartej przestrzeni, praktycznie poza atmosferą ziemską - nie ma prawie żadnego ekranowania przed promieniowaniem kosmicznym towarzyszącym rozbłyskom słonecznym. Dawki promieniowania wzrastają szczególnie w obszarach pasów radiacyjnych wokół Ziemi.

Cząstki z promieniowania kosmicznego przenikając poprzez organizmy żywe, powodując różne zmiany w ich komórkach. Cząstki naładowane elektrycznie głównie wzbudzają i jonizują atomy, z których komórki są zbudowane, a niekiedy powodują zmiany w jądrach atomowych - wskutek wywołanych reakcji jądrowych. reakcje te są najczęściej inicjowane przez naładowane lub obojętne elektrycznie hadrony. W procesie jonizacji z atomów są wrywane elektrony, zaś w reakcjach jądrowych jądra atomów ulegają destrukcji (przenikaniu hadronów przez jądra towarzyszy emisja z jąder nukleonów i fragmentów jądrowych, i zazwyczaj produkcja cząstek). W danej warstwie materii jest odkładana określona energia bombardujących ją cząstek - zazwyczaj występują energetyczne straty jonizacyjne cząstek naładowanych - na skutek oddziaływań

elektromagnetycznych (podobne do tych strat energetyczne straty hadronów, występujące na skutek silnych oddziaływań hadronów z materią wewnątrzjądrową).

Określonym stratom energetycznym odpowiada określona dawka lub doza promieniowania działającego na dowolny materiał. Zmiany biologiczne w napromieniowanych organizmach są proporcjonalne do dawek i mocy promieniowania.

Uszkodzenia radiacyjne zależą nie tylko od dawki promieniowania, lecz i od tego, jaki organ jest wystawiony na działanie promieniowania. najbardziej czuła jest komórka w stadium wczesnego okresu dzielenia. Destrukcja jąder atomów - z jakich są zbudowane komórki - w procesach jądrowych prowadzi do zmian w strukturze i budowie chemicznej porażonej komórki - może to wywołać nieprawidłowości rozwoju.

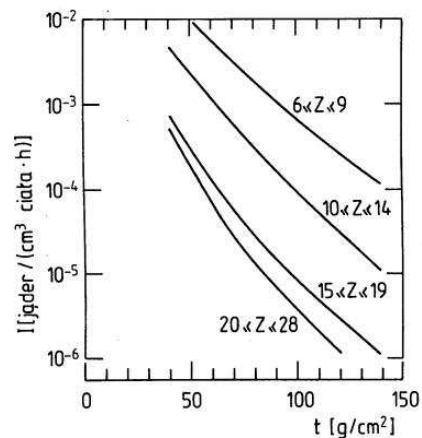
Wyróżniamy trzy klasy efektów działania biologicznego promieniowania:

1. Efekty somatyczne polegające na uszkodzaniu radiacyjnym komórek podtrzymujących procesy życiowe; mogą one przejawiać się wprost w ciele napromieniowanego osobnika po kilku minutach lub tygodniach, a nawet później -- po latach.
2. Efekty genetyczne występujące przy uszkodzeniach komórek odpowiedzialnych za przekazywanie cech dziedzicznych; przejawiają się one statystycznie w całej populacji.
3. Efekty spowodowane uszkodzeniami radiacyjnymi płodu - uszkodzenia embrionu we wczesnym stadium rozwoju; wskutek takich uszkodzeń

Aby określić zagrożenie radiacyjne spowodowane promieniowaniem kosmicznym, trzeba znać strumień cząstek na różnych wysokościach. Przy obliczeniach można ograniczyć się do podstawowych składowych promieniowania właściwych dla danej wysokości nad poziomem morza. W ścianach aparatów latających mogą rozwijać się kaskady elektronowo-fotonowe i hadronowe; rozmnożenie spowodowane procesami kaskadowymi można pominąć jeśli grubość ścianek z danego materiału przewyższa charakterystyczne długości dla tego materiału - średnią długość drogi swobodnej do oddziaływania nukleonów w materiale i średnią długość radiacyjną. W przypadku samolotów warunki te są spełnione i rozmnażanie w ścianach może być pominięte. Ważne dane wyjściowe do obliczeń stanowią typowe zależności wysokości przebywania aparatów latających od czasu; można przyjąć, że czas osiągnięcia wysokości ok. 10km i lądowania samolotu o prędkości poddźwiękowej wynosi ok. 1h, a samolotu o prędkości naddźwiękowej - około 0,5h; pozostały lot odbywa się odpowiednio na wysokościach 10 i 23km.

Przy określaniu strumieni cząstek ograniczono się do nukleonów, elektronów i mionów. Nie uwzględniono zawartości w nich cięższych jąder atomowych. Zawartość tę zaniedbano; można tak postąpić w granicach błędów oszacowań. Jednak, bombardowanie ciała pojedynczymi jądrami, a zwłaszcza zatrzymywanie się ciężkich jąder w ciele może powodować duże wydzielanie energii w niewielkich obszarach i prowadzić do poważnych uszkodzeń lokalnych o mikroskopijnych średnicach.

Rys 18 przedstawia liczbę zatrzymujących się różnych jąder wewnątrz sfery o promieniu 12cm - symulującej ciało ludzkie na wysokości 20km w atmosferze. Dla jąder z liczbą ładunkową $Z=6$ otrzymano $5,6 \cdot 10^{-3}$ zatrzymujących się jąder na centymetr sześcienny ciała w ciągu godziny. Biorąc objętość embrionu - wynoszącą ok. 1 cm^3 - i czas przebywania ciężarnego członka załogi około 40h w miesiącu w warunkach napromieniania na wysokości ok. 20km, prawdopodobieństwo zdarzenia się popadania jądra o $Z > 6$ w embrion wynosi ok. 20%; na wysokości około 15km prawdopodobieństwo to zmniejsza się ok. dziesięciokrotnie.

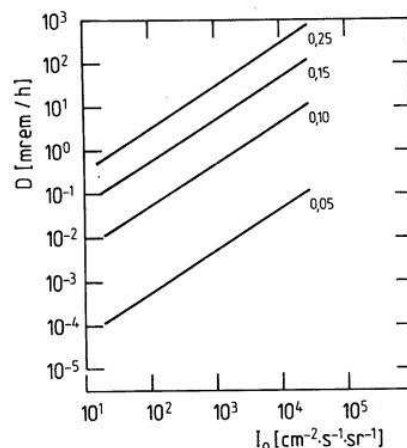


Rysunek 18 Całkowity strumień I jąder zatrzymujących się w cm^3 ciała w ciągu godziny, zależnie od głębokości t w atmosferze ziemskiej; Z - liczba ładunkowa jądra atomowego [1]

Rozbłyski słoneczne zwiększają dawki promieniowania kosmicznego, zwłaszcza w Układzie Słonecznym i w górnych warstwach atmosfer planet. Rozbłyski zdarzają się z częstością ok. 12 na rok, niektóre z nich powodują zmiany dawki protonów w pobliżu biegunów Ziemi nie wywołując żadnych zmian w pobliżu równika - z powodu dużego obciążenia magnetycznego; neutrony wtórne wytworzone w atmosferze - przez protony pojawiające się przy rozbłyskach - wnoszą od ok. 20 do ok. 50% dawki, zależnie od rodzaju rozbłysku. Około dwóch razy w roku pojawiają się rozbłyski dające wyjątkowo duże natężenia słonecznego promieniowania kosmicznego - wówczas wkład do dawki wynosi ok. 100 turem/h. Inne rozbłyski powodują dawki wynoszące ok. 1 mrem/h.

Dawki głębokościowe i rozkłady głębokościowe dawek w ciele są określone przez zależność dawki od głębokości w ciele, dla średniego rozbłysku słonecznego w określonym miejscu; na wysokości ok. 20 km dawka taka zmniejsza się ok. pięciokrotnie z głębokością w ciele od 0 do 30 cm, przy 0cm wynosi ona ok. 0,5mrad/h.

Rozkład możliwych dawek biologicznych, w mrem/h, w obszarach podbiegunowych dla różnych rozbłysków słonecznych pokazano na poniższym rysunku. Rozkład obejmuje ok. 80% wszystkich mierzonych przypadków.



Rysunek 19 Możliwe dawki biologiczne D w mrem/h przy rozbłyskach słonecznych o różnych parametrach I_0 i G . Według O.C. Allkofera i M. Simona. Cyfry obok linii określają parametr rozbłysku G w GV. Wartości parametrów rozbłysku obejmują ok. 80% obserwowanych rozbłysków słonecznych.

Promieniowanie kosmiczne a lot samolotem

Zagrożenie biologiczne może nastąpić podczas lotu samolotem w zakresie prędkości poddźwiękowych, odbywającego się na wysokości 8-12km n.p.m. oraz z prędkościami naddźwiękowymi (17-23km n.p.m.), a także w przypadku lotów kosmicznych w otwartą przestrzeń Układu Słonecznego. Następuje wówczas napromieniowanie załogi i pasażerów.

Samoloty pasażerskie o prędkościach poddźwiękowych latają na wysokościach ok. 10km, loty na aparatach naddźwiękowych odbywają się na wysokościach 17000-23000m -- praktycznie poza atmosferą ziemską lub tuż przy jej rozmytej granicy;

Przy lotach na wysokościach ok. 20km, przy pracy załogi trwającej w ciągu miesiąca ok. 20h, dawka promieniowania otrzymywana przez członków załogi wynosi ok. 480mrem/rok; dopuszczalna wg polskich norm roczna dawka wynosi w warunkach normalnych 500mrem. W czasie takich lotów załoga jest narażona i na słabe napromienianie jądrami ciężkimi. Chociaż strumień takich jąder na tych wysokościach wynosi tylko ok. 1% od strumienia pierwotnego, to wiadomo, że pojedyncze uderzenia jąder atomowych małych energii mogą powodować istotne lokalne uszkodzenia komórek w ciele. Szczególnie istotne mikrouszkodzenia zdarzają się, gdy jądro jest wyhamowywane w ciele. Oceny wykazują, że wyhamowywanie jąder o liczbie ładunkowej $Z=6$ powinno zdarzać się z częstością ok. $6 \cdot 10^{-3}$ w ciągu godziny w 1cm^3 ciała. Jeśli wśród członków załogi pracującej przez 40h w miesiącu znajduje się kobieta ciężarna, w stadium początkowym ciąży - to uderzenie jądra atomowego w embrion o objętości ok. 1cm^3 może się zdarzyć z prawdopodobieństwem ok. 20% w ciągu miesiąca. Na wysokości 10km prawdopodobieństwo to zmniejsza się ok. dziesięciokrotnie. Przy dużej liczbie przewozów pasażerów w aparatach latających na wysokościach ok. 20km niebezpieczeństwo takiego porażenia w skali ogólnej wzrasta z ilością lotów, dla pojedynczego pasażera jest ono mało prawdopodobne.

Promieniowanie kosmiczne a loty kosmiczne

W przestrzeni poza atmosferą ziemską rozbłyski słoneczne wnoszą jeszcze większe porcje cząstek do promieniowania kosmicznego; istotny wkład wnosi składowa galaktyczna zawierająca protony i jądra cięższe. Przy ocenie dawek promieniowania w obszarze poza atmosferą trzeba brać pod uwagę różne składowe: elektrony, protony i jądra ciężkie o różnych energiach. Dawki promieniowania w przestrzeni poza atmosferą oceniano dla potrzeb związanych z lotami kosmicznymi. Promieniowanie galaktyczne daje dawki 0,07-0,30 rema/dzień; w dziesięciodniowej misji Apollo dawka wynosiła ok. 3 remów. W obszarze pasów radiacyjnych wokół Ziemi dawka od elektronów na powierzchni obiektu wynosi 10^2 - 10^3 radów/h, natomiast dawka od protonów pod warstwą aluminium o grubości 1cm wynosi 1-10 radów/h, przy przelocie przez strefę pasów radiacyjnych, dla obiektu za osłoną 1cm aluminium, dawka ta wynosi ok. 0,5 radów. Przy rozbłyskach słonecznych dawka promieniowania na powierzchni obiektu wynosi 12-350 radów na jeden przypadek rozbłysku; na głębokości w ciele wynoszącej 2cm dawka jest 1-15 radów, przy zdarzających się najsilniejszych rozbłyskach dawka uzyskiwana przez ciało ludzkie wynosi ok. 1000 radów. Dawka ciężkich jonów $Z=10$ o przekazie liniowym energii $LPE=500\text{MeV/cm}$ wynosi $0,9 \cdot 10^3$ - $1,7 \cdot 10^3$ cząstek/ m^2 /dzień; w dziesięciodniowej misji księżycowej Apollo notowano 1,5 uderzenia jonów na 1cm^2 .

Przy długotrwałych lotach na statkach kosmicznych w otwartej przestrzeni - poza atmosferą ziemską - załoga jest narażona na dwa zasadnicze skutki napromienienia w pierwotnych promieniach kosmicznych: skrócenie życia i wzrost prawdopodobieństwa zachorowania na raka. Z danych obserwacyjnych w klinikach - gdzie pacjenci byli poddawani radioterapii - można przewidzieć, że prawdopodobieństwo nabycia białaczki w czasie misji kosmicznej podwaja się.

Wpływ ciężkich jonów na organizm ludzki badano w czasie misji Apollo na Księżyc, gdzie astronauta doświadczali wrażenia rozbłysków świetlnych przy zamkniętych oczach. Eksperymenty laboratoryjne wykazały, że takie rozbłyski były wywoływane przez uderzenia ciężkich jonów na siatkówkę. Z badań wynika, że cebulki włosów stają się koloru szarego przy padaniu na nie ciężkich jonów. Prawdopodobnie, gdy ciężki jon niskiej energii uderzy w jądro komórki, cała komórka niszczy się na skutek wydzielania w niej dużej ilości energii. Ponieważ obszar objęty jonizacją w ośrodku wokół drogi jonu rozszerza się ze wzrostem ładunku elektrycznego jonu, każda komórka uderzona przez jon jest niszczone.

Spis rysunków

Rysunek 1 Źródło rysunku http://faleelektromagnetyczne.republika.pl/promkosm.html	3
Rysunek 2 Schemat wielkiego pęku atmosferycznego zapoczątkowanego przez szybki proton Źródło rysunku [3]	4
Rysunek 3 Układ detektorów rozłożonych na powierzchni ziemi pozwalający na określenie kierunku przylotu cząstki powodującej powstanie wielkiego pęku atmosferycznego.	4
Rysunek 4 Porównanie rozpowszechnienia pierwiastków w materii Układu Słonecznego i w promieniowaniu kosmicznym	5
Rysunek 5 Kształt naszej Galaktyki- Drogi Mlecznej przedstawiony z góry i z boku. Widać jasne jądro Galaktyki i rozwijające się z jądra spiralne ramiona, a w rzucie bocznym centralnie położony dysk galaktyczny. Spiralne ramiona znajdujące się w cienkim dysku zawierają warstwę pyłu. ...	6
Rysunek 6 Powrót z pierwszej przygodowej podróży fizyków, której celem było badanie promieniowania kosmicznego (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	7
Rysunek 7 Ślady cząstek promieniowania kosmicznego widoczne w komorze Wilsona (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	7
Rysunek 8 Pozostałość po wybuchu supernowej SNR 1572 (Tycho). Zdjęcie wykonane przy pomocy satelity Rosat (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	8
Rysunek 9 Aparatura eksperymentu "Oko Muchy" w stanie Utah w USA, powyżej - wewnątrz pojedynczego detektora (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	9
Rysunek 10 Naładowane elektrycznie cząstki ze Słońca wywołują zjawisko zorzy polarnej w górnych warstwach ziemskiej atmosfery. Najpiękniejsze zorze podziwiać można w okresie największej aktywności słonecznej (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	10
Rysunek 11 Zorza polarna sfotografowana przez astronautów NASA. Widać pasmo świecącego powietrza znajdujące się 80-12 km nad powierzchnią Ziemi. Zjawisko zorzy jest wywołane wzbudzeniem atomów tlenu w górnych warstwach atmosfery, przez promieniowanie z Pasów Radiacyjnych van Allena. Najczęściej występuje powyżej 65° szer. geo gr., na wiosnę i w jesieni. (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	10
Rysunek 12 Inne zdjęcie zorzy polarnej wykonane również przez astronautów NASA. Pokazuje postrzępione pasmo czerwonej poświaty nazwanej "Czerwona Korona" widocznej także 80-120km nad powierzchnią Ziemi (źródło fotografii http://auger.ifj.edu.pl)	10
Rysunek 13 Zależność szybkości zliczeń - liczby impulsów n na sekundę pojedynczego licznika Geigera-Mullera od wysokości h km n.p.m.; raketę V2 niosącą licznik wypuszczono na szerokości północnej 41°. Według danych z pracy A.V. Gangnesa, J.F. Jenkinsa Jr., J. Van Allena.....	14
Rysunek 14 Zależność wertykalnego natężenia promieniowania kosmicznego I_w cząstek $\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ od wysokości h km n.p.m.; wg danych z rozprawy doktorskiej L.T. Baradzeja.	15
Rysunek 15 Intensywność I promieni kosmicznych na głębokości h pod powierzchnią ziemi wyrażonej w metrach równoważnika wody;	15
Rysunek 16 Kształt krzywych pochłaniania cząstek promieni kosmicznych w ołowiu na dwóch wysokościach w atmosferze – h_1 wynoszącej ok. 520 mmHg i h_2 ok. 750 mm Hg - zależność liczby koincydencji C dwóch liczników Geigera-Müllera od grubości d pochłaniacza ołowianego. W prawym górnym rogu schemat urządzenia pomiarowego z dwóch liczników 1 i 2 i filtra Pb o zmiennej grubości.	16
Rysunek 17 Zmiana z wysokością h w km v atmosferze strumienia promieniowania kosmicznego I –	18
Rysunek 18 Całkowity strumień I jąder zatrzymujących się w cm^3 ciała w ciągu godziny, zależnie od głębokości t w atmosferze ziemskiej; Z - liczba ładunkowa jądra atomowego [1].....	20
Rysunek 19 Możliwe dawki biologiczne D w mrem/h przy rozbłyskach słonecznych o różnych parametrach l_0 i G . Według O.C. Allkofera i M. Simona. Cyfry obok linii określają parametr rozbłysku G w GV. Wartości parametrów rozbłysku obejmują ok. 80% obserwowanych rozbłysków słonecznych. 20	

Literatura

- [1] Z. Strugarski, PROMIENIOWANIE KOSMICZNE, Oficyna Wydawnicz Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993,
- [2] Piotr Decowski ENCYKLOPEDIA FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ, red nauk., Warszawa PWN; 1983
- [3] O.C Allofer, INTRODUCTION TO COSMIC RADIATION, Munchen 1975
- [4] Artykuł z "Wiedzy i Życia" nr 12/1998 Jan P. Nassalski WŁADCY WSZECHŚWIATA
- [5] Artykuł z "Wiedzy i Życia" nr 8/1998 Jerzy Kowalski-Glikman CZĄSTKI Z NIEBIOS
- [6] Artykuł z "Wiedzy i Życia" nr 10/1998 Ewa L. Łokas CIEMNA MATERIA WE WSZECHŚWIECIE
- [7] Artykuł z "Wiedzy i Życia" nr 07/2000 Michał Różyczka DZIWNA PRÓŻNIA NASZEGO WSZECHŚWIATA
- [8] Artykuł z "Wiedzy i Życia" nr 10/1996 Lawrence M. Krauss FIZYKA PODRÓŻY MIĘDZYGWIEZDNYCH
- [9] Strona internetowa <http://auger.ifj.edu.pl>)