
Promieniowanie kosmiczne – w poszukiwaniu nieoczekiwanego

Tadeusz Wibig*

Katedra Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki

Abstrakt. Historia badań promieniowania kosmicznego od samego początku pełna jest niespodziewanych odkryć, które znacząco odmieniały zastane poglądy na świat. Sama koncepcja, że z kosmosu przychodzi do nas jakieś promieniowanie, wydawała się absurdalna, a co najmniej nieuzasadniona. Nikt nie spodziewał się tak olbrzymich energii cząstek, nikt „nie zamawiał” też mionów, nikt nie podejrzewał, że promieniowanie kosmiczne będzie docierało do powierzchni Ziemi w kaskadach liczących ponad miliardy pojedynczych cząstek na raz. Ale najdziwniejsze jest to, że jednak istnieli fizycy, którzy mieli tak niepoważne idee i to właśnie dzięki nim dziś wiemy to, co wiemy. A w fizyce promieniowania kosmicznego jest jeszcze sporo zagadek czekających na rozwiązanie i wiele zupełnie niespodziewanych odkryć.

Słowa kluczowe: promieniowanie kosmiczne, wielkie pęki atmosferyczne, historia fizyki, CREDO

Abstract. From the very beginning, the history of cosmic rays research has been full of unexpected discoveries that have significantly changed the prevailing view of the world. The very idea that some kind of radiation was coming to us from outer space seemed ridiculous, to say the least, unjustified. No one expected such enormous particle energies, no one also “ordered” muons, no one suspected that cosmic rays would come to the earth’s surface in cascades of more than billions of individual particles at the same time. But the strangest thing is that there must nevertheless have been physicists who had such frivolous ideas, and it is thanks to them that we know what we know. And in cosmic ray physics there are still many enigmas waiting to be solved and many discoveries to be made, discoveries that are absolutely unexpected.

Keywords: cosmic rays, extensive air showers, physics history, CREDO

Dość powszechne, jednak całkowicie niesłuszne, jest mniemanie, że promieniowanie kosmiczne odkryte zostało przypadkiem, szczęśliwym zbiegiem okoliczności. Odkrywanie promieniowania kosmicznego, a dokładniej tego, co dziś tak nazywamy, czyli strumieni cząstek docierających do Ziemi z przestrzeni kosmicznej, trwało dość długo i tak naprawdę w pewnych aspektach nie jest jeszcze zakończone.

Czytając o początkach wielu dziedzin ludzkiej działalności często spotykamy zdanie „Już starożytni Grecy...”. W przypadku fizyki promieniowania kosmicznego poszukiwanie korzeni tak głęboko wydaje się trochę sztuczne. Starożytni, uznając ludzką logikę i zasadę sensowności Natury, nie mogli wpaść na trop tak bardzo nieuzasadnionego bytu. Nic nie skłania nas do podejrzeń, że zamieszkała przez nas Ziemia bombardowana jest nieustannie przez niewiadomego pochodzenia drobiny materii, jeśli żadne efekty tego bombardowania nie są zauważalne. Jeśli ktoś uparłby się jednak, to mógłby odnaleźć co najmniej dwa zjawiska znane już starożytnym, wiążące się w pewien, choć bardzo odległy sposób z badaniami promieniowania kosmicznego. Pierwszym z nich jest tajemnicze oddziaływanie bursztynu, drugim niezbadany mechanizm powstawania chmur na niebie.

Zwykle za datę odkrycia promieniowania kosmicznego przyjmuje się rok 1912. Potwierdziła to Królewska Akademia w Sztokholmie wręczając w 1936 r. Viktorowi F. Hessowi nagrodę Nobla. Oddając sprawiedliwość prawdzie należy cofnąć się o co najmniej 200 lat i wspomnieć nazwiska kilku innych wielkich fizyków mających swój większy lub mniejszy udział w tej historii.

Badanie zjawisk elektrycznych, które doprowadziło między innymi do wyjaśnienia zagadki przyciągania przez potarty bursztyn niewielkich kawałków materii pod koniec XVIII wieku, dało także początek serii odkryć, które bezpośrednio doprowadziły Hessa do jego historycznego lotu balonem 07.08.1912.

Około 1785 r. Charles Augustin de Coulomb w trakcie przeprowadzania eksperymentów ze skonstruowaną przez siebie bardzo precyzyjną wagą skręceń, które to eksperymenty zapewniły mu stałe miejsce we wszystkich podręcznikach elektryczności, zaobserwował ucieczkę ładunku elektrycznego z naelektryzowanych ciał [1]. Dziś efekt ten znamy pod nazwą prądu ciemnego. Coulomb stwierdził proporcjonalność gęstości prądu ciemnego do wartości pola elektrostatycznego w danym punkcie. W pewnym sensie wyprzedził o prawie 50 lat Georga Ohma i jego prawo opisujące zależność napięcia i natężenia prądu. Odkrycie Coulomba można też potraktować jako początek fizyki cząstek elementarnych, gdyż wska-

*ORCID: 0000-0002-2078-0580

zało drogę późniejszym o ponad sto lat doświadczeniom Thomsona.

Na początku jednak nikt nie przypuszczał, że obok kłopotów, jakie to odkrycie przysparza eksperymentatorom, może mieć ono pewne pozytywne następstwa. Nic więc dziwnego, że dalszy postęp w badaniach prądu ciemnego odnotowano dopiero w połowie XIX w. Wtedy to Carlo Matteucci odkrył dziwne zachowanie prądu ciemnego przy wysokich wartościach pola elektrycznego. Okazało się, że wartość natężenia prądu osiąga nasycenie i nie rośnie już więcej wraz ze wzrostem napięcia.

W końcu XIX w. badaniom prądu ciemnego poświęcano coraz więcej uwagi: Linss [2] badał prądy płynące w powietrzu, Exner [3] zaproponował utworzenie ogólnoświatowej sieci pomiarowej elektryczności atmosferycznej. Istotne znaczenie miały jednak doświadczenia Elstera i Geitela, które doprowadziły do wykazania istnienia wiatru zjonizowanych cząsteczek powietrza odpowiedzialnego za istnienie prądu ciemnego, gdy elektrycznie naładowane ciało umieścili z zamkniętym pojemnikiem [4].



Ryc. 1. Elster i Geitel przy swoim elektroskopie (1900)

Wspomniany już J. J. Thomson poświęcił się badaniom prądu ciemnego w 1884 r. Po kilkunastu latach, dzięki pracom jego i Ernesta Rutherforda gęstość prądu nasycenia można było traktować jako miarę jonizacji ośrodka.

Zupełnie naturalnym było pytanie o czynnik tę jonizację wywołujący, ale o tym za chwilę. Cofnijmy się do prowadzonych równolegle badań w zupełnie innym i pozornie bardzo odległym zakątku fizyki – fizyki powstawania chmur. Początek badań zjawiska kondensacji w kontekście nas interesującym można datować na koniec XVIII w. Zauważono wtedy, że para wodna skrapla się na ściankach zamkniętej butelki chętniej, jeśli wprowadzi się przez korek do butelki igłę podłączoną do maszyny elektrostatycznej.

Koniec XIX w. i w tej dziedzinie okazał się okresem niebywałego rozkwitu. Z ważniejszych dat i nazwisk wymienić trzeba rok 1886 i Hermanna von Helmholtza, który wskazał wtedy właśnie na zjonizowane atomy gazu jako na jądra kondensacji w pozbawionym pyłu powietrzu.



Ryc. 2. Charles T.R. Wilson (1901)

Ideę tę wykorzystał Charles T. R. Wilson budując słynną komorę mgłową zwaną dziś powszechnie komorą Wilsona [5]. Stwierdził on w 1897, że jądra kondensacji w czystym powietrzu mogą być wytwarzane przez promieniowanie X, czy też przez promieniowanie zwane wtedy uranowym, co wyraźnie pokazywało na słuszność idei Helmholtza. W 1900 r. Wilson pokazał, że w czystym powietrzu jądra kondensacji pojawiają się także, gdy nie ma w pobliżu źródeł promieniowania X czy rud uranowych. Używając do badań tego zjawiska swojej komory opuścił nawet Laboratorium Cavendisha dla uniknięcia wpływu badanych tam substancji silnie radioaktywnych. Nie udało mu się pokonać trudności technicznych i bez konstruktywnych wniosków zajął się badaniem prądu ciemnego w zamkniętych naczyniach [6].

To właśnie Wilson był pierwszym, który przewidział istnienie promieniowania kosmicznego. Dla wyjaśnienia niewytłumaczalnej w inny sposób resztkowej jonizacji pojawiającej się znikąd zaproponował, by przyjąć, że są to pozaziemskiego pochodzenia promienie w rodzaju promieniowania X, czy też uranowego pochodzenia pozaziemskiego. Chcąc udowodnić swą tezę zbudował specjalny przenośny i odpowiednio czuły elektroskop, a w zasadzie wyrafinowaną komorę jonizacyjną i udał się z nią do kopalni, gdzie spodziewał się mniejszej szybkości powstawania jonów w powietrzu na skutek osłabienia przychodzącego z powierzchni czynnika jonizującego. Niestety nie mógł on wiedzieć, że jedynie kilkanaście procent zjawisk jonizacji na powierzchni Ziemi jest inicjowanych przez promieniowanie pochodzące z kosmosu; większość bowiem inicjowana jest, bardziej lub mniej bezpośrednio, promieniowaniem pierwiastków promieniotwórczych znajdujących się właśnie pod ziemią.

Rozwiązanie problemu wpływu radioaktywności ziemskiej na produkcję jonów w powietrzu stanowiło klucz otwierający wrota do fizyki promieniowania kosmicznego. Nie trzeba było czekać długo. Na przełomie wieków XIX i XX, a także na samym początku XX stulecia szybko poszerzała się wiedza człowieka o otaczającym go świecie, a samo rozwiązanie okazało się raczej trywialne. Wystarczyło wykorzystać ziemską atmosferę jako absorbent pochłaniający przemieszczające się do

góry promieniowanie skał. W tym celu można było wejść na odpowiednio wysoką górę lub, jeszcze lepiej, wznieść się w powietrze bez wspinania się na górę.

Drugi sposób okazał się bardziej efektywny. Seria lotów balonowych przeprowadzona niedaleko naszych dzisiejszych południowych i zachodnich granic przez Victora F. Hessa w latach 1911–1912 doprowadziła do solidnie udokumentowanego stwierdzenia, że im wyżej jesteśmy, tym czynnik jonizujący powietrze jest bardziej intensywny [7].

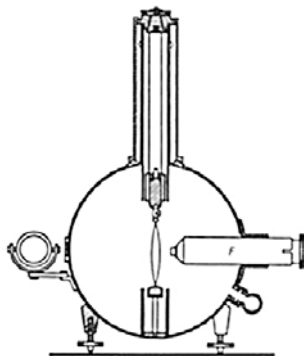


Ryc. 3. Victor Hess (1912)

Hess nazwał go promieniowaniem wysokościowym (niem. *Höhenstrahlung*). Jedynie na niewielkich wysokościach widać było jego zanik spowodowany oddaleniem się od źródeł radioaktywności w skorupie ziemskiej. Warto wspomnieć, że misja Hessa zakończyła się sukcesem dzięki postępowi technologicznemu w konstrukcji elektroskopów, jaki dokonał się w roku 1909 za sprawą ojca Wulfa, jezuitę z Akwizgranu [8].

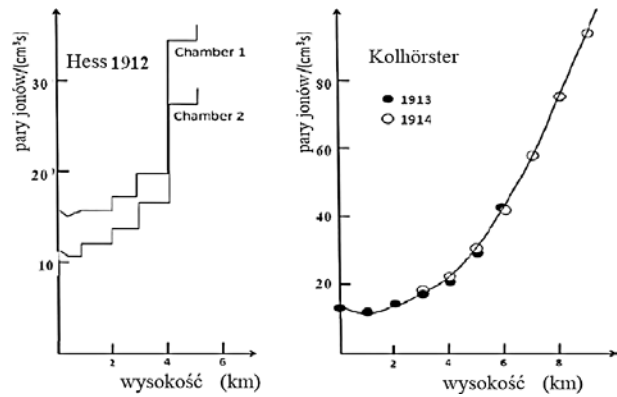


Ryc. 4. Theodor Wulf (1909)



Ryc. 5. Elektroskop Ojca Wulfa (1909)

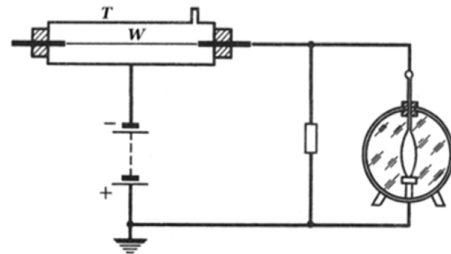
W następnych latach wyniki Hessa potwierdził Kolhörster [9] z większą jeszcze dokładnością i wznosząc się wyżej – prawie na 10 km.



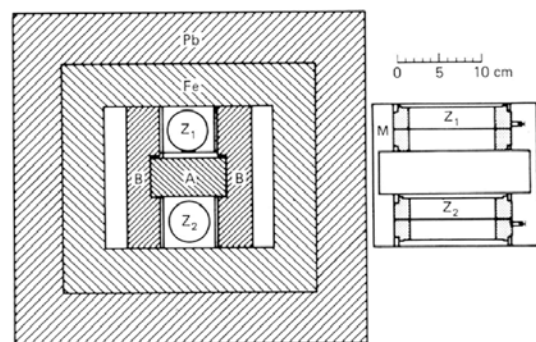
Ryc. 6. Szybkość jonizacji wyznaczona w lotach Hessa i Kolhörstera

Do końca lat 20. XX w. podstawowym narzędziem badania promieniowania kosmicznego były komory jonizacyjne i komory Wilsona. Te pierwsze pozwalały wyznaczyć tempo jonizacji. Te drugie pozwalały wyznaczyć dokładnie tor przelotu cząstek jonizujących. W latach 20. ciągle używał ich jeszcze w badaniach sam Wilson, ale i inni, np. radziecki odkrywca promieniowania kosmicznego Skobelcyn, który zobaczył na swoich kliszach ślady cząstek kosmicznych w 1927 roku [10].

Istotny przełom nastąpił w roku 1928, kiedy to Geiger i Müller skonstruowali licznik zwany dziś powszechnie licznikiem Geigera–Müllera [11].



Ryc. 7. Licznik Geigera i Müllera



Ryc. 8. Eksperyment Bothe i Kolhörstera (1929)

Zaraz też Bothe i Kolhörster użyli go po raz pierwszy w badaniach promieniowania kosmicznego [12]. Liczniki Geigera–Müllera (G–M) pozwalały dokładnie określić moment, w którym hipotetyczna cząstka promieniowania przeszła przez objętość czynną licznika jonizując zamknięty w nim gaz. Genialnym pomysłem było ustawienie w pionie dwóch liczników G–M jeden nad drugim

i obserwowanie przypadków, gdy w obu jednocześnie pojawił się impuls mówiący o przejściu cząstki – zrobili to Bothe i Kolhörster w 1929: dwa niewielkie liczniki (10 cm długości i 5 cm średnicy) osłonili pięciocentymetrowymi ściankami z żelaza i dodatkowo sześciocentymetrową obudową z ołowiu, a dla dodatkowego odciążenia się od radioaktywności otoczenia pomiary przeprowadzali w piwnicach budynku Reichsanstalt.

Badając charakterystyki cząstek promieniowania kosmicznego posunęli się do tego, że pomiędzy liczniki włożyli grubą na blisko 4 cm sztabę złota (nie dlatego, że byli bardzo bogaci, ale dlatego, że złoto można otrzymać w postaci czystej bez niechcianych radioaktywnych domieszek – złoto ma tylko jeden trwały izotop ^{197}Au). Przesuwali cały zestaw pomiarowy z piwnicy aż pod okno w dachu i dodając oraz ujmując osłony ołowiane wyznaczyli zdolność przenikania promieniowania wysokoenergetycznego przez materię. Okazało się, iż jest ona na tyle duża, że podważyła dość powszechne przekonanie o elektromagnetycznej naturze (promieniowanie γ) pochodzących z kosmosu cząstek.

Problem natury cząstek zaobserwowanych przez Skobelcyna przez następnych kilka lat zajmował tak od strony eksperymentalnej, jak i teoretycznej uwagę największych fizyków tamtych czasów, żeby wymienić tylko Millikana, Andersona, Augera, Blacketta, Rutherforda, Heisenberga, Diraca, a nawet małżeństwo Irenę i Fryderyka Joliot-Curie. Zainteresowanie to zaowocowało między innymi odkryciem przez Andersona w roku 1932 pozytonu, hipotetycznej antycząstki elektronu przewidzianej w 1930 roku przez Diraca.

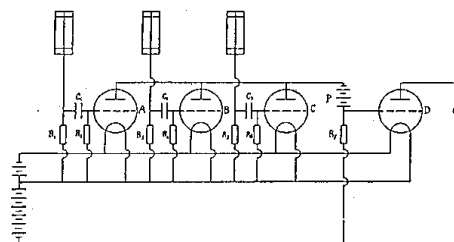
Kolejny krok w badaniach umożliwiło połączenie tych technik, elektroniczne wyzwalanie komór Wilsona. Aby do tego jednak doszło potrzebny był skok technologiczny dokonany w roku 1930 przez Bruno Rossiego [13].



Ryc. 9. Bruno Rossi (1932)

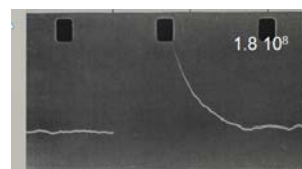
Był to układ elektroniczny obsługujący liczniki G–M, które sterowały siatkami lamp elektronowych połączonych w układ koincydencji, który generował impuls elektryczny w przypadku, gdy wszystkie liczniki G–M jednocześnie (w zadanym, krótkim przedziale czasowym) zostały trafione przez cząstki jonizujące. Równoległe do

Rossiego Bothe doszedł do podobnego rozwiązania stosując jedną lampę wyposażoną w dwie siatki.

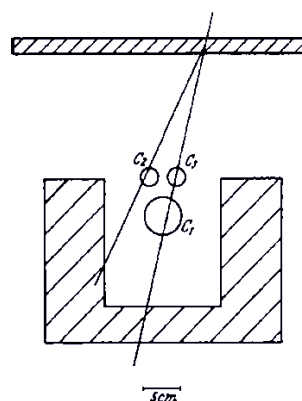


Ryc. 10. Układ koincydencyjny Rossiego

W bogatym materiale doświadczalnym zgromadzonym na początku lat trzydziestych, zawierającym zdjęcia wysokoenergetycznych elektronów (i pozytonów) z komór Wilsona wyzwalanych koincydencją liczników G–M, obserwowano od czasu do czasu dziwne fotografie, na których widoczne było przejście przez komorę kilku (do czterech na fotografiach Skobelcyna), a nawet kilkunastu (do 20 w eksperymencie Blacketta i Occhialiniego [14]) równoległych (lub prawie równoległych) śladów cząstek o bardzo wysokiej energii. To samo w istocie zjawisko obserwowano w eksperymentach z komorami jonizacyjnymi. Carmichael, (doktorant Chadwicka w Cavendish Laboratory) zarejestrował metodą fotograficzną wychylenie oscyloskopu odpowiadające pojawieniu się w jego dużej komorze jednocześnie ponad stu milionów jonów [15].

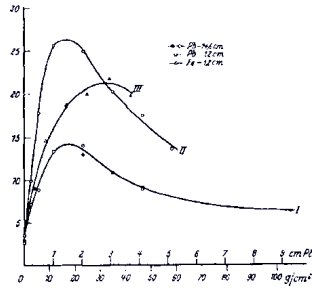


Ryc. 11. Rejestracja z komory jonizacyjnej Carmichaela (1935)



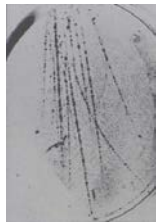
Ryc. 12. Eksperyment Rossiego (1933)

W swoich eksperymentach z rejestracją czysto elektroniczną (1932) Rossi umieścił trzy liczniki w osłoniętym ołowiu pudle ustawiając je jednak w nietypowej konfiguracji: dwa w jednej poziomej płaszczyźnie na górze i jeden pod nimi tak, że pojedyncza cząstka nie



Ryc. 13. Krzywe Rossiego

była w stanie uruchomić potrójnego układu koincydencji. Okazało się jednak, że koincydencje takie pojawiają się w przyrodzie. Co więcej, w roku 1933 stwierdził, że częstość tych koincydencji można zwiększyć, umieszczając pomiędzy górnymi licznikami i dolnym, grube (nawet do kilku centymetrów) warstwy ołowiu czy żelaza [16]. Warto tu jako ciekawostkę dodać, że rezultat ten był w swoim czasie tak zaskakujący, iż poważne czasopismo naukowe, jakim było wtedy niemieckie *Naturwissenschaften* odmówiło publikacji tych wyników Rossiego. Opublikowano je dopiero w *Physikalische Zeitschrift* po osobistym wstawiennictwie Heisenberga.

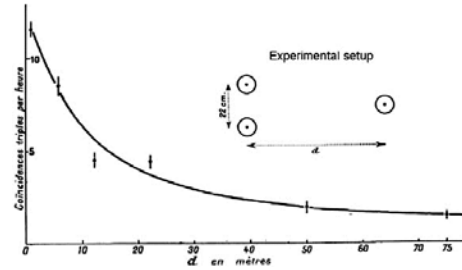


Ryc. 14. Mały pęk zarejestrowany przez Blacketta i Occhialiniego (1933)

Pytanie o naturę tego zjawiska budziło wiele kontrowersji. Auger i Skobieltyn zaproponowali wyjaśnienie, że są to elektrony wybite w procesie Comptona przez wysokoenergetyczny foton (kwant promieniowania γ). Heisenberg uważał że są to δ -elektrony wybijane przez wysokoenergetyczny elektron, zatem różnice dotyczyły natury cząstki pierwotnej. Gdyby odwołać się wtedy do procedur demokratycznych, prawdopodobnie foton wygrałby z elektronem, choć obie kandydatury nie były idealne. Z dzisiejszego punktu widzenia widać, jak niebezpiecznym może być w fizyce czy nauce akceptowanie poglądów większości.

Teoretyczne rozwiązanie zagadki wielokrotnych śladów, które można nazwać *małymi pękami* rejestrowanymi przez Rossiego i widzianymi na fotografiach z komory mgłowej przez Skobieltyn, Balcketta i Occhialiniego na początku lat trzydziestych pojawiło się w roku 1937 w pracy Bhabhy i Heitlera [17] i znane jest jako teoria kaskadowa. Znalazła ona pełne i dość zaskakujące potwierdzenie już w roku 1938, kiedy to Piere Auger i Roland Maze odkryli *wielkie pęki atmosferyczne* (*Extensive*

Air Showers) [18]. Idea ich eksperymentu była dokładnie taka sama, jak w doświadczeniu Rossiego z licznikami G–M ustawionymi w wierzchołkach trójkąta. Modyfikacja polegała w zasadzie jedynie na skali.



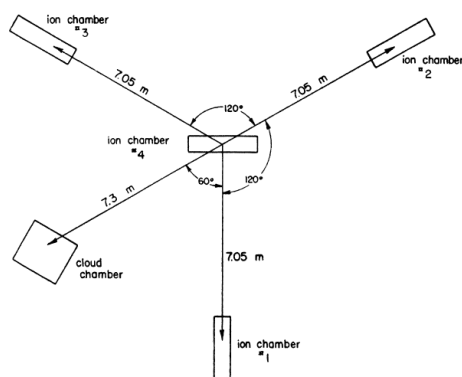
Ryc. 15. Schemat i wyniki eksperymentu Augera i Maze'a

Dwa liczniki G–M ustawione jeden nad drugim, pracujące w koincydencji jako swoisty teleskop, dały sygnał o przejściu w tym miejscu z grubsza pionowo co najmniej jednej naładowanej cząstki o wysokiej energii. Trzeci licznik G–M odsuwano od pionowej pary liczników rejestrując jednoczesne przejście przezeń innej cząstki. Osiągnięcie Augera i Maze możliwe było jedynie dzięki wielkim umiejętnościom technicznym tego drugiego, który tak zmodyfikował układ Rossiego, żeby przypadkowe zliczenia pojawiały się na tyle rzadko, by mierzyć wiarygodnie sygnały fizycznej koincydencji pojawiające się zaledwie raz na kilka godzin.

Gdy przesuwany licznik znajdował się blisko pary liczników teleskopu, pojawienie się potrójnej koincydencji nie było niczym nadzwyczajnym. Zauważył to już Rossi i widzieli też Skobieltyn, Balckett i Occhialini w komorach Wilsona, a Carmichael w komorze jonizacyjnej, jednak żaden z nich nie spodziewał się, by kaskady cząstek miały rozmiary mierzone w metrach. Auger i Maze postanowili sprawdzić, jak wielkie bywają kaskady cząstek w powietrzu. Mając precyzyjny układ pomiarowy po rozsunięciu liczników na kilka metrów ciągle jeszcze rejestrował przypadki fizycznej korelacji rejestracji w tak oddalonych punktach. Przy odległości kilkunastu metrów Maze widząc wciąż zliczenia potrójnej koincydencji zaczął poszukiwać technicznej usterki swojego układu pomiarowego i mimo wielu wysiłków nic takiego nie znalazł. Auger, który był już wtedy uznany naukowcem, stwierdził, że Maze błędnie nie popełnił i szybko na palcach oszacował, że gdyby zsumować energię wszystkich cząstek, jakie musiały w tym momencie dotrzeć na powierzchnię Ziemi w przewidzianej przez Bhabhe i Heitlera kosmicznej kaskadzie, to musiałaby ona być co najmniej milion razy większa od energii wyzwolanej podczas rozpadów radioaktywnych jąder promieniotwórczych. Czegoś takiego nikt się nie spodziewał!

Jeszcze w tym samym roku wynik Augera i Maze'a został potwierdzony między innymi przez Kolhörstera, sam Auger zaś stwierdził istnienie wielkich pęków atmosferycznych o rozmiarach co najmniej setek metrów. Energie cząstek je inicjujących u szczytu atmosfery musiały być miliardy razy większe niż typowe energie rozpadów promieniotwórczych. Natychmiast pojawiły się pytania, skąd biorą się takie cząstki, gdzie i jak powstają, czym właściwie są.

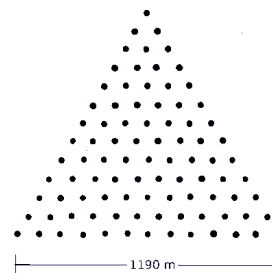
Po przerwie spowodowanej II wojną światową przystąpiono do systematycznych badań. Jeśli zmierzmy, ile cząstek dotarło do trzech różnych punktów Ziemi, to przy rozsądnym założeniu, że wtórne cząstki rozkładają się symetrycznie względem osi będącej przedłużeniem kierunku pierwotnie przylatującej cząstki i stosując nie specjalnie wyrafinowane metody matematyczne, da się określić punkt, w którym oś pędu osiągnęła powierzchnię Ziemi, w miarę dokładnie scałkować gęstość cząstek w całym pęku i wyznaczyć jego wielkość, a zatem energię pierwotnej cząstki.



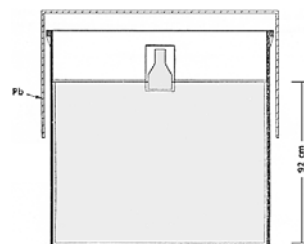
Ryc. 16. Aparatura pękowa w Echo Lake

Metodę tę zastosowano w eksperymencie zbudowanym przez Williama z grupy Rossiego, który był wówczas (1948) zatrudniony w MIT na Mt. Evans, Echo Lake w Kolorado. Trzy komory jonizacyjne umieszczono w wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku 6 metrów, jeszcze jedną w środku, a dodatkowo wielką komorę mgłową do obserwacji i pomiarów kierunków śladów cząstek pękowych [19].

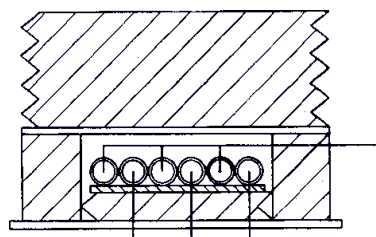
Na początku lat 50. XX w., zbudowano w Wielkiej Brytanii w Harwell wielką aparaturę wielkopękową obejmującą prawie 80 stacji pomiarowych złożonych z sześciu liczników G–M każda, rozmieszczonych w obrębie trójkąta równobocznego o boku długości prawie 1200 metrów [20]. Wzbożono ją później (1958) w wodne liczniki Czernkova mające uzupełniać binarną informację liczników G–M (trafiony/nietrafiony) informacją analogową o ilości światła wygenerowanego w dużym zbiorniku czystej wody przez poruszające się w wodzie szybciej od światła naładowane cząstki wielkiego pędu [21].



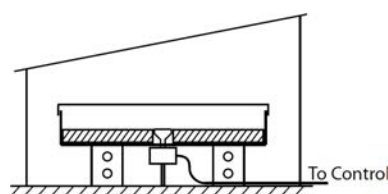
Ryc. 17. Schemat aparatury w Harwell



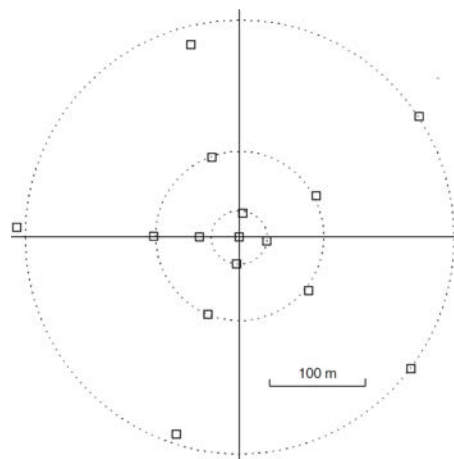
Ryc. 18. Detektor czerenkowski w Harwell



Ryc. 19. Jedna ze stacji detekcyjnych w Harwell

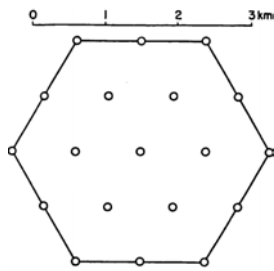


Ryc. 20. Detektor scyntylacyjny w stacji Agassiz



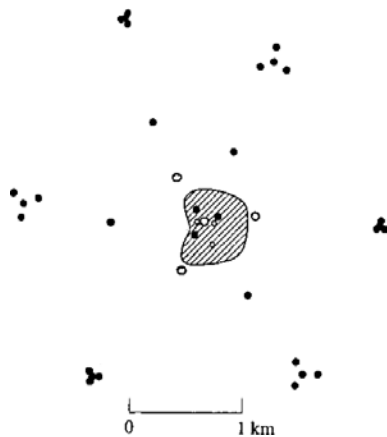
Ryc. 21. Eksperyment w stacji Agassiz

Odpowiedzią Amerykanów była aparatura wielkopękowa Agassiz, składająca się z 12 detektorów scyntylacyjnych, o powierzchni około metra kwadratowego każdy, rozmieszczonych na obszarze mniej więcej kilometra kwadratowego. Pozwoliło to po raz pierwszy użyć szybkiego timingu do pomiarów kierunkowych [22]. Aparatura ta w roku 1957 zarejestrowała rekordowy pęk o energii 3×10^{18} eV. Ciekłe, łatwopalne scyntylatory zamieniono na bezpieczne stałe [23] i takie w końcu ustawiono w górach Boliwii w El Alto (4200 m n.p. m.) i później w Chacaltay (5200 m), by zbadać, jak wielkie pęki rozwijają się na dużych wysokościach w atmosferze [24], a sam eksperyment ze stacji Agassiz przeniesiono do Volcano Ranch (1770 m) niedaleko Albuquerque w Nowym Meksyku. Detektory Volcano Ranch umieszczono symetrycznie na powierzchni sześciokąta o rozmiarze około 3 km. Eksperyment ten pracował ćwierć wieku począwszy od roku 1960.



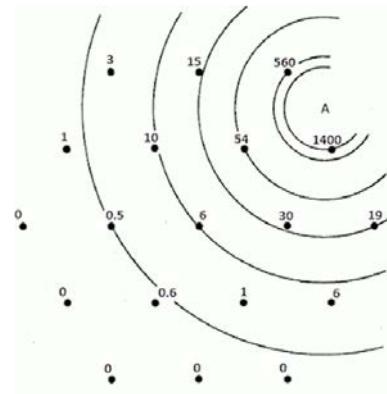
Ryc. 22. Aparatura Volcano Ranch

Anglicy zareagowali budując równie wielką aparaturę w Haverah Park, gdzie eksploatowano technikę detektorów czerenkowskich, podobnie jak w Harwell. Aparatura ta pracowała od początku lat 60. XX w. przez prawie 30 lat. [25]



Ryc. 23. Haverah Park

Najbardziej spektakularnego odkrycia dokonano jednak w USA. W lutym 1962 zarejestrowano pęk zawierający jakieś 50 miliardów cząstek, którego energię oszacowano początkowo na 10^{20} eV [26]. Tę historyczną rejestrację pokazano na ryc. 23. Wydaje się, że nie było w tym

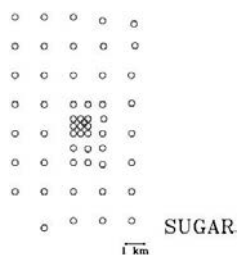


Ryc. 24. Rejestracja w Volcano Ranch wielkiego pęku o numerze 2-4834

nic nadzwyczajnego. Rejestrowano już wcześniej pęki zawierające miliardy cząstek, nigdy jednak tak wielkiego pęku jak 2-4834. Liczby przy detektorach pokazują zmierzającą gęstość cząstek pękowych w danym miejscu. Odkrycie to jednak nabrało znaczenia po roku 1964, kiedy to dwóch radioastronomów Penzias i Wilson zauważyło, że ciągle rejestrują na fali 7,35 cm emisję pochodzącą z niewiadomego źródła; wydawało się jakby to promieniowanie wysyłało ciało doskonale czarne o temperaturze $3,5 \pm 1$ K [27] – jakby cały Wszechświat wypełniony był tym promieniowaniem. I okazało się, że rzeczywiście tak jest. Penzias i Wilson dostali za swoje odkrycie w roku 1978 nagrodę Nobla, ale nie to jest najważniejsze. Jeśli wszędzie pełno jest tych bardzo zimnych, ale jednak mających jakąś energię fotonów, to, jak zauważyli Rosjanie Zatsepina i Kuzmin [28] i niezależnie od nich Amerykanin Greisen [29], protony promieniowania kosmicznego o bardzo wielkich energiach powinny zderzać się z tymi fotonami i jak pokazały proste rachunki, powinny bardzo szybko tracić swą bardzo wielką energię. Na tyle szybko, że właściwie cząstek o energiach 10^{20} eV w ogóle nie powinno się rejestrować. Efekt ten nazwano od nazwisk odkrywców obcięciem GZK.

Odkrycie z Volcano Ranch pozostawało w sprzeczności z tym, co wiemy o oddziaływaniach cząstek elementarnych. Nikt nie mógł podważyć wyniku pomiaru. O ile błąd o kilkanaście, nawet kilkadziesiąt procent w wyznaczaniu energii pęku byłby do pomyślenia, to jednak tu sprzeczność wydawała się nie do pokonania. Czyżby w fizyce działo się coś dziwnego. Każdy taki sygnał powoduje, że rzesze fizyków „rzucają się” na dany temat i powstają różne, dziwne czasem teorie (np. „może jednak teoria względności nie działa do końca tak, jak powiedział Einstein”, albo coś równie dziwnego – czemu nie!), ale z drugiej strony wzmożono wysiłki eksperymentalne, by sprawdzić, jak to jest w istocie, bo w szczególności w fizyce jedna jaskółka (2-4834) wiosny od razu nie czyni. Wynik z Volcano Ranch należało potwierdzić, albo też

wykazać, że jest to jednak jednorazowa pomyłka, fluktuacja, nieszczęśliwy zbieg okoliczności.



Ryc. 25. Eksperyment SUGAR

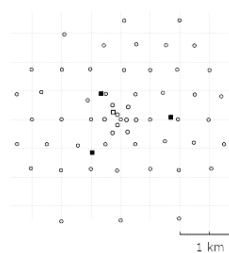
W końcu lat 60. XX w. do wyścigu amerykańsko-angielskiego w budowie największych aparatur pękowych i poszukiwaniu cząstek o najwyższej energii dołączyli Australijczycy, którzy skonstruowali eksperyment SUGAR, (Sydney University Giant Air-shower Recorder). 47 stacji pomiarowych, każda składająca się z dwóch wielkich, mających po 6 metrów kwadratowych zbiorników ciekłego scyntylatora, pokrywały obszar $\sim 100 \text{ km}^2$. O ile liczniki w Volcano Ranch i w Haverah Park ustawione były na powierzchni Ziemi, aby nic nie przeszkadzało w dotarciu do nich wielkopękowym elektronom, to w Australii tamtejsze wielkie zbiorniki zakopano w ziemi na kilka metrów, na tyle głęboko, aby typowe elektrony (i fotony) produkowane w atmosferze i tworzące zdecydowaną większość każdego pędu dotrzeć do nich nie mogły.

Co zatem obserwowały detektory w SUGAR? Obserwowały zupełnie inne cząstki elementarne. Te same, które w eksperymencie Bothego i Kolhörstera przebiły się przez sztabkę złota i powodowały koincydencje w doświadczeniach Rossiego z wielocentymetrowymi warstwami ołowiu. Nazywamy je dziś mionami (i oznaczamy grecką literą μ). Stanowią one mniej więcej 10% wszystkich cząstek w pęku (zależy to od typu cząstki, jaka pęk zainicjowała i od wysokości w atmosferze, na jakiej dokonujemy rejestracji).

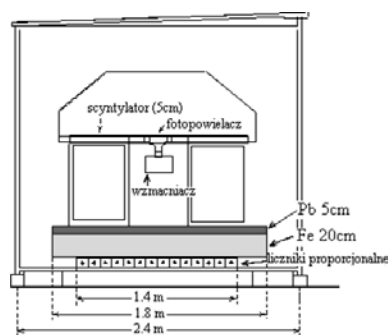
Inną ciekawostką aparatury australijskiej było to, że stacje nie były ze sobą w żaden sposób połączone. Każda z nich działała samodzielnie i ciekawe przypadki, gdy w obu scyntylatorach pojawiał się wystarczająco jasny błysk, rejestrowano na zwykłej magnetofonowej taśmie. Co jakiś czas wymieniano się taśmami i porównywano zapisy w dzisiejszej terminologii offline. Aby ustalić, czy jakieś stacje zarejestrowały ten sam wielki pęk, niezbędna była ich czasowa synchronizacja. Przy braku systemu GPS i systemu serwerów czasu NTP problem rozwiązano budując własny maszt radiowy i wysyłając z niego do wszystkich stacji własne sygnały czasu. Aparatura SUGAR pracowała nieco ponad 10 lat [30].

Od lat 70. XX w. w wyścigu ku najwyższym energiom biorą też udział Rosjanie. W Jakucku nad brzegiem Leny

zbudowali oni aparaturę, która była rozbudowywana i mierzyła wielkie pęki na wiele różnych sposobów [31]. Głównie były to pomiary elektronów licznikami scyntylacyjnymi, ale także mionów licznikami osłoniętymi przed składową elektronową oraz pomiary czerenkowskie światła powstającego w atmosferze robione w bezksiężycowe noce z użyciem skierowanych w niebo otwartych rur z czułymi detektorami światła umieszczonymi na końcu, ale też kamerami rejestrującymi światło fluorescencyjne powstające przy wzbudzeniu cząsteczek atmosfery (azotu N_2) przez przelatujący pęk.



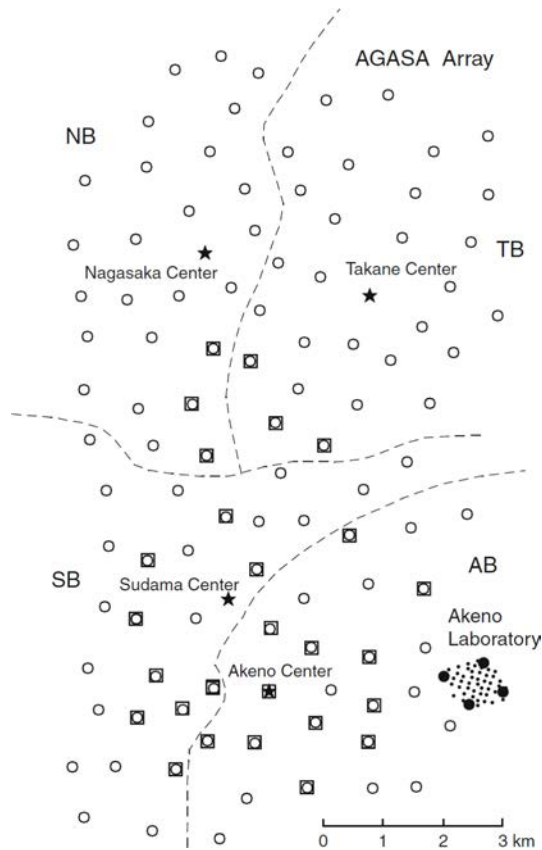
Ryc. 26. Aparatura wielkopękowa w Jakucku



Ryc. 27. Detektor naziemny aparatury Akeno /AGASA

Wszystkich przebili jednak Japończycy. W małej miejscowości Akeno w 1979 roku wybudowano aparaturę pękową na powierzchni 1 km^2 (A1). Składała się ona ze 156 detektorów scyntylacyjnych o powierzchni 1 m^2 . Dodatkowo zainstalowano tam detektor mionowy o powierzchni 25 m^2 , zbudowany z długich i wąskich liczników proporcjonalnych ($5 \text{ m} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) przykrytych dwumetrową warstwą betonu. W kolejnym kroku w 1984 powstała aparatura o powierzchni 20 km^2 (A20). Składały się na nią 23 detektory elektronów rozstawione w odstępach 1 km. W 1990 roku uruchomiono instalację Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) obejmującą powierzchnię 100 km^2 , składającą się w sumie ze 111 detektorów naziemnych o powierzchniach $2,2 \text{ m}^2$ każdy, rozstawionych co mniej więcej 1 km (A100) i 27 osłoniętych betonem detektorów mionowych [32]. Wyniki uzyskane przez aparaturę AGASA skonfundowały większość fizyków zajmujących się promieniowaniem kosmicznym. Wskazywały one na istnienie sporej liczby przypadków o energiach przewyższających energię dozwoloną przez

obcięcie GZK. Najwyższą energię zarejestrowano w maju 2001 roku i wynosiła ona $\sim 2,5 \times 10^{20}$ eV [33]. Wszystko wskazywało na to, że coś z naszym rozumieniem fizyki Wszechświata jest nie tak.

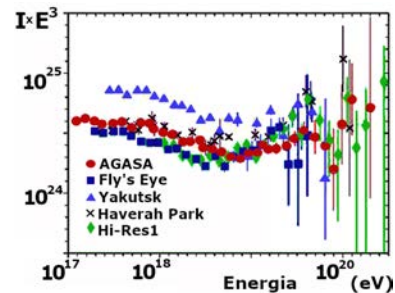


Ryc. 28. Japońska aparatura w Akeno

Po raz kolejny sprawą zajęli się Amerykanie. Od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku na pustyni w stanie Utah funkcjonował eksperyment Fly's Eye [34] (później, po rozbudowie w latach 90. nazywany High Resolution Fly's Eye albo po prostu HiRes [35]). Nazwa oko muchy odpowiada technice pomiaru pęków. Nie polegała ona na rejestracji cząstek przez detektory umieszczone na powierzchni Ziemi, a na patrzeniu w górę i poszukiwaniu błysków światła fluorescencyjnego powstającego przy przechodzeniu przez atmosferę jednocześnie bardzo wielu cząstek naładowanych. W górę patrzyły pojedyncze bardzo czułe czujniki światła umieszczone w ogniskach teleskopów schowanych w okrągłych obudowach ustawionych na dwóch wzniesieniach ponad pustynią w Dugway. W sumie takich teleskopów było 22 (w oku lewym - Five Mile Hill) i 42 (w oku prawym - Camel's Back Ridge). Oczywiście eksperyment działać mógł tylko w bezksiężycowe i bezchmurne noce, ale za to był stosunkowo tani w realizacji. W maju 1997 rozbudowano go zastępując zwykłe oczy much oczami o wysokiej rozdzielczości i w taki sposób mierzono w Utah pęki do roku 2006.



Ryc. 29. Teleskopy eksperymentu Fly's Eye



Ryc. 30. Widmo energetyczne promieniowania kosmicznego najwyższych energii (dla przejrzystości strumień pomnożono przez E^3)

Wyniki eksperymentów w Utah niezbyt się zgadzały z uzyskanymi przez Japończyków, co widać na ryc. 30. Jakieś obcięcie widma przed energią 10^{20} eV jest widoczne, choć te kilka przypadków, w tym pęk z 1991 roku o największej dotąd zarejestrowanej energii $3,2 \times 10^{20}$ eV może niepokoić.

Nie to jest jednak najgorsze. Wielkie eksperymenty w końcu XX w. publikowały wyniki wzajemnie sprzeczne ze sobą i czasem różnica sięgała nawet 100% (ryc. 30). Może wydawać się to dziwne, w końcu chodzi o polichenie, ile cząstek o danej energii upadło na określoną powierzchnię w jednostce czasu, a jednak... Podstawową trudnością jest tu określenie energii cząstki. Przy tak wielkich energiach, w oddziaływaniach z jądrami atomów atmosfery produkowane są olbrzymie ilości cząstek wtórnych, które wciąż mają w większości olbrzymie energie i niosą je w głąb atmosfery oddziałując i produkując nieustannie nowe cząstki. Mierzymy rozmiary tej lawiny albo ustawiając na powierzchni Ziemi detektory rejestrujące cząstki naładowane (głównie elektrony i pozytony) z wielkiego pędu atmosferycznego próbując go w kilku, kilkunastu punktach oddalonych od siebie o setki metrów, albo obserwując na powierzchni Ziemi w jednym punkcie (czasem w dwóch) światło, jakie powstaje w wyniku pobudzenia cząsteczek atmosferycznych (azotu) przez naładowane cząstki pękowe na całej drodze rozwoju kaskady. W obu tych przypadkach potrzebna jest bardzo skomplikowana, tak teoretycznie, jak i numerycznie, machina obliczeniowa opracowująca zbierane dane. Aby powiedzieć, co dotarło na granicę atmosfery i zainicjowało konkretną lawinę cząstek musimy odtworzyć ją, wymodelować, wysymulować opierając się na fizycznych modelach zjawisk zachodzących przy najwyższych energiach. Biorąc pod uwagę to, że cząstek w takich pękach są

miliardy i że nie istnieje teoria opisująca ich oddziaływania, zdumienie budzić może nie fakt istnienia niezgodności w interpretacji pomiarów, a to że w ogóle interpretacja taka jest możliwa. Naukowcy skupieni wokół wielkich eksperymentów robią co mogą, a nie mogą wszystkiego. Rekord energii padł w Stanach. Eksperyment Fly's Eye zobaczył błysk wywołany przejściem przez atmosferę kaskady cząstek zainicjowanej przez pojedynczą cząstkę o energii $3,2 \times 10^{20}$ eV.

Energię tę można przeliczyć na jednostki znane nam z lekcji fizyki. To jest ponad 50 dzuży (J)! Taką energię ma solidnie kopnięta piłka, albo cegła spadająca z balkonu pierwszego piętra – całkiem sporo. W jaki sposób pojedynczy proton osiągnął energię spadającej cegły, to jedno z ważniejszych pytań, na które nikt nie zna tak naprawdę odpowiedzi. Gdybyśmy dowiedzieli się, jak to się robi, kto wie, jak moglibyśmy to wykorzystać. Czasem aż strach pomyśleć!

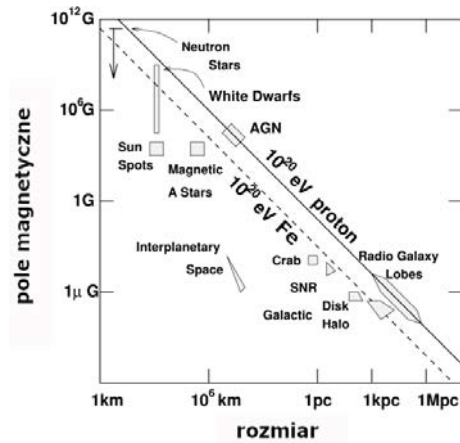
Wiemy, że cząstkom elementarnym można nadać wielkie energie umieszczając je w odpowiednio silnych polach elektrostatycznych, albo też przyspieszając je kilkakrotnie (zmuszając je do krążenia w kółko) w polach odpowiednio słabszych. Tak w sumie działają nasze akceleratory i póki co nikt nic lepszego nie wymyślił. Kłopot w tym, że nie wydaje się, aby we Wszechświecie były istotne obszary, w których mamy niezerowe (choćby i nieduże) pole elektrostatyczne wytwarzane przez naładowane kosmiczne elektrody. Pomijając nawet sam brak takich elektrod, przestrzeń pełna jest materii zjonizowanej, która, gdyby trafiła w taki obszar, zaraz skutecznie zneutralizowałaby ładunki wytwarzające pole. Na szczęście w plazmie kosmicznej istnieją prądy elektryczne. Plazma wiruje, oscyluje. Obłoki jej przemieszczają się, napotyka ją inne, zderzają się z nimi, a wszystkiemu towarzyszą niewielkie, ale rozległe pola magnetyczne generowane przez ruch plazmy, a jednocześnie ruch ten stabilizujące. Od czasów mniej więcej Maxwella wiadomo, że przemieszczające się pola magnetyczne generują w układzie laboratoryjnym pola elektryczne. I tu może być pies pogrzebany!

Niezależnie od tego, jaki byłby mechanizm przyspieszania, rozmiar kawałka przestrzeni, gdzie następuje przyspieszanie, nie może być mniejszy niż promień okręgu, po którym poruszałyby się naładowana cząstka przyspieszana w istniejącym tam polu magnetycznym. Promień Larmora rośnie z energią cząstki, więc warunek ten daje oczywistą granicę na energię, jaką może uzyskać przyspieszana cząstka

$$E_{\max} = ZqBR,$$

gdzie Z jest liczbą atomową przyspieszanego jądra, (nie musi to być wcale proton ($Z = 1$), gdyż jesteśmy

pewni, że w promieniowaniu kosmicznym występują pierwiastki całego układu okresowego, w szczególności żelazo o $Z = 26$), q to wartość ładunku elementarnego, B jest wartością pola magnetycznego, a R charakterystycznym rozmiarem obszaru przyspieszania.



Ryc. 31. Wykres Hillasa ukazujący możliwości produkcji cząstek o najwyższych energiach w różnych obiektach astrofizycznych

Zależność ta zastosowana do wysokoenergetycznego końca widma promieniowania kosmicznego pokazana jest na wykresie znanym jako wykres Hillasa [36]. I znowu pojawia się problem: prawie nigdzie we Wszechświecie nie ma warunków do przyspieszania, jedynie może się to zdarzyć w: aktywnych jądrach galaktyk (AGN) i aktywnych jądrach galaktyk z rozległymi obszarami emisji radiowej (Radio Galaxy Lobes), Galaktycznych halo albo białych karłach, czy gwiazdach neutronowych. Oczywiście na wykresie tym nie zaznaczono wszystkich obiektów na niebie. Niektórych po prostu nie znamy, a chcielibyśmy poznać.

I trzeci problem, jaki wiąże się z cząstkami o najwyższych energiach. W oddziaływaniach z mikrofalowym promieniowaniem tła powinny one tracić energię dość szybko, jeśli tylko przekraczają energię, przy której może powstać rezonans Δ^+ (nietrawny hadron) w procesie

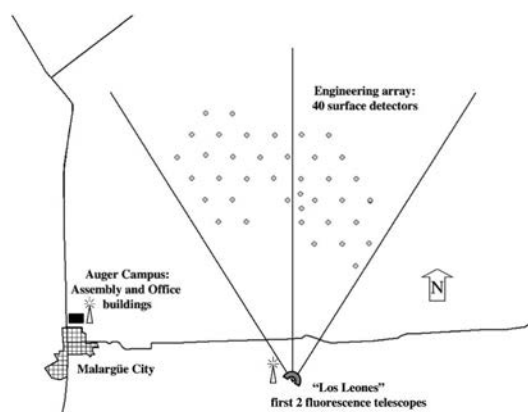


Rezonans rozpada się z powrotem na proton i mezon π z tym, że proton ma już teraz mniejszą energię niż przedtem i proces ten powtarza się, aż energia protonu zmniejszy się do około 5×10^{19} eV. Czas między zderzeniami określa przekrój czynny. Dokładne rachunki (uwzględniające jeszcze inne niuanse) pokazują, że jeśli gdzieś w przestrzeni są źródła protonów o energii powiedzmy 10^{21} eV, czy nawet wyższej, to nie mogły one dotrzeć do nas z energiami większymi niż 10^{20} eV z odległości większej niż kilkadziesiąt megaparseków. W skali kosmicznej to bardzo blisko. Na tyle blisko, że w międzygalaktycznych polach magnetycznych, które są

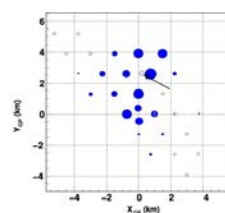
wprawdzie bardzo słabe, ale są wszędzie i próbują odchyłać cząstki naładowane w różne strony, kierunek z jakiego mogłyby one dotrzeć na Ziemię celowałby mniej więcej w miejsce, w którym powstały. Kierunki z jakich nadlatywały cząstki inicjujące wielkie pęki o najwyższych energiach określane są metodą triangulacji właściwie dość precyzyjnie. Gdyby sporządzić mapę tych kierunków, powinniśmy „zobaczyć” źródła tych cząstek. Oczywiście eksperymenciarze zrobili to. Zrobili i nic nie zobaczyli. Wynik był dokładnie negatywny. Mimo wielkich wysiłków i poszukiwań, nie udało się znaleźć żadnej statystycznie istotnej anizotropii (czyli odchylenia od jednorodności rozkładu na sferze niebieskiej). Nie zauważono też żadnej korelacji z obiektami astrofizycznymi, o których wiemy, że są niedaleko nas. Ten negatywny wynik był bardzo frustrujący.

Z uwagi na wszystkie te niepokojące problemy i wagę zagadnień, dotyczących naszej wiedzy o mikroświecie, o oddziaływaniach cząstek wysokoenergetycznych, o ekstremalnych obiektach astrofizycznych i w końcu o Wszechświecie w skali daleko pozagalaktycznej, wiek XXI rozpoczęły gigantyczne przedsięwzięcia eksperymentalne. Jeszcze w roku 1991 powstała idea zbudowania dwóch wielkich eksperymentów na skalę dotąd niespotykaną, globalną. Jeden miał stanąć na półkuli południowej, drugi na północnej, by obejmowały w sumie całe niebo. Ponieważ statystyka zarejestrowanych przypadków, czyli liczba zarejestrowanych cząstek w okolicach obcięcia GZK rośnie bardzo powoli (z grubsza jeden przypadek /kilometr kwadratowy /stulecie), aby doczekać się definitywnych rozstrzygnięć postawiono na rozmiar, bo tu rozmiar na pewno ma znaczenie. O ile w dotychczasowych eksperymentach prowadzono pomiary na powierzchni rzędu 100 km², to tym razem plany były kilkudziesięciokrotnie bardziej ambitne, mierzone w tysiącach kilometrów kwadratowych. Znalezienie odpowiedniego miejsca jedynie na półkuli północnej było stosunkowo łatwe – poligon armii amerykańskiej w Dugway (strefa 51!) doskonale się do tego nadawał, na półkuli południowej zaś wybrano Argentynę, pampę w okolicy miejscowości Mendoza. Oba eksperymenty miały być identyczne. Z czasem pojawiły się drobne różnice, ale co do zasady wielkie pęki atmosferyczne miały być tu i tam rejestrowane w ciemne noce przez zestawy bardzo czułych detektorów światła fluorescencyjnego, a przez całą dobę rejestrowała je sieć detektorów powierzchniowych. Europejczycy skoncentrowali się na południowym eksperymencie i w roku 2000 rozpoczęli budowę Pierre Auger Observatory (PAO) [37]. Rok później oddali do użytku tak zwaną Engineering Array – działający prototyp, na który składały się 32 powierzchniowe detektory czerenkowskie i jeden teleskop fluorescencyjny. Układ ten pracował przez pół roku głównie w celach testowych

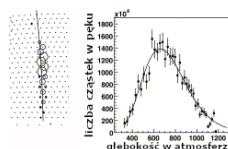
i kalibracyjnych. W roku 2003 PAO osiągnęło rozmiar przewyższający sieć AGASA i stało się największym na świecie eksperymentem „kosmicznym”. Rok później opublikowano pierwsze fizyczne wyniki z pierwszych 100 detektorów powierzchniowych [38]. Największy pęk zarejestrowany w pierwszym roku pracy aparatury miał energię 4×10^{19} eV, był prawie poziomy (kąt zenitalny to było ponad 80°) i wyglądał tak, jak na ryc. 33.



Ryc. 32. PAO Engineering Array (2004)



Ryc. 33. Pęk o energii 4×10^{19} eV zarejestrowany przez detektory powierzchniowe Engineering Array PAO

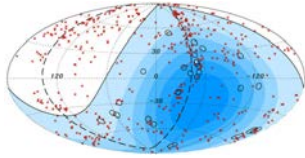


Ryc. 34. Widok innego pęku w detektorze fluorescencyjnym i wyznaczony rozwój podłużny tego pęku

Detektory fluorescencyjne także rejestrowały pęki i przykład takiej rejestracji mamy na ryc. 34. Na podstawie wielkości impulsów światła przychodzących z różnych kierunków można odtworzyć tak zwaną krzywą rozwoju podłużnego pęku i na jej podstawie szacować przede wszystkim energię całej kaskady, czyli energię pierwotnej cząstki promieniowania kosmicznego.

W 2007 roku statystyka zarejestrowanych pęków wysokoenergetycznych była już na tyle duża (w sumie 27 pęków o energiach powyżej $5,7 \times 10^{19}$ eV), że można było pokusić się o poszukiwanie kierunków z jakich docierają. Sprawdzano, czy istnieją korelacje z różnymi obiektami na niebie (zmieniając przy tym i energię progową – stąd ta dziwna liczba 5,7) i wreszcie znaleziono! [39]. Katalog kwazarów i aktywnych jąder galaktyk autorstwa Véron-Cetty i Véron z roku 2006 zawierał pozycje

85 221 kwazarów, 1 122 obiekty typu BL Lac i 21 737 aktywnych jąder galaktyk. 694 z nich znajdowało się bliżej niż 100 Mpc. Nie wnikając w szczegóły opublikowano mapę kierunków pęków zarejestrowanych przez PAO i AGN oraz wyznaczono na 99% poziom ufności dla realności korelacji kółek i kropek z ryc. 35.



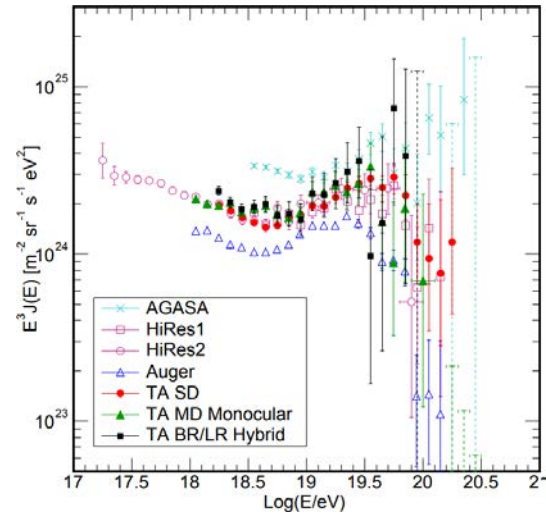
Ryc. 35. Kierunki na niebie (w projekcji Aitoffa i współrzędnych galaktycznych) 27 pęków zarejestrowanych przez PAO (kółka) i AGN (kropki) z katalogu V-C

Wydawało się, że zagadka wysokoenergetycznego końca widma w promieniowaniu kosmicznym bliska jest rozwiązaniu zwłaszcza, że w 2008 roku PAO pokazało wyniki pomiarów widma energetycznego promieniowania kosmicznego o najwyższych energiach. Widać (ryc. 36, 37) było na nim wyraźnie obcięcie GZK powyżej energii 4×10^{19} eV [40].

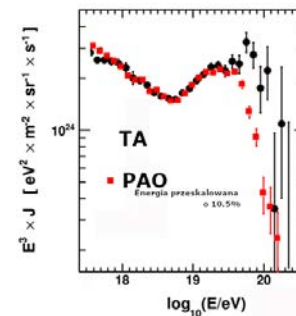
W tym samym czasie na półkuli północnej powstawał eksperyment Telescope Array (TA). Budowa zaczęła się trochę później niż PAO, bo w 2003, lecz pierwsze wyniki zaczęły pojawiać się w 2008 roku. Nieco ponad 500 scyntylacyjnych detektorów powierzchniowych TA rozłożono na trzy razy mniejszym obszarze niż w PAO. Od roku 2012 TA publikuje swoje wyniki dotyczące widma energetycznego z wyraźnym obcięciem GZK przy energii $4,8 \times 10^{19}$ eV [41] i anizotropii, której zupełnie nie można dostrzec także powyżej energii $5,7 \times 10^{19}$ eV [42]. Przetestowano też szczególnie dokładnie proponowane przez PAO korelacje z aktywnymi jądrami galaktyk z katalogu V-C i nic! nie znaleziono. Oba wielkie eksperymenty prezentują wzajemnie sprzeczne konkluzje.

Z widmami energetycznymi jest w sumie podobnie. Jedni i drudzy wskazują na obcięcie sugerowane przez mechanizm GZK i to w podobnym miejscu, jednak, gdy narysować oba widma na jednym obrazku widok jest zdumiewający:

Punkty PAO leżą niżej od wyników TA i to zdecydowanie (czynniki 2!). Oczywiście należy pamiętać, że na osi pionowej mamy strumień cząstek pomnożony (dla wygody) przez E^3 i systematyczny błąd pomiaru energii przesuwają punkty nie tylko poziomo, ale i w pionie. Nowe wielkie eksperymenty, nowi (po części) ludzie, nowe narzędzia obliczeniowe nie pomogły. Rozbieżności, jakie obserwowaliśmy w XX wieku nie zniknęły z początkiem XXI. Można by postąpić, tak jak postępują niektórzy, podsumowując aktualną sytuację stwierdzeniem „nic się nie stało”. Przeskalujemy energię TA o 5,2% w dół, albo PAO o 5,2% w górę, jak w pracy [43], albo tylko PAO



Ryc. 36. Widma energetyczne zmierzone przez PAO i TA (i starsze wersje Hi-Res oraz dla porównania AGASA)



Ryc. 37. Widmo energii mierzone przez TA i przez PAO (widmo PAO jest przeskalowane w energii o 10,5%)

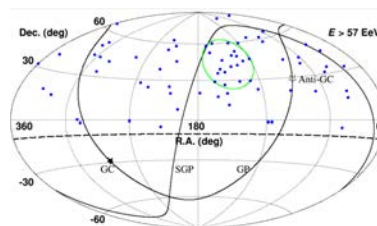
o 10,5% i już będzie lepiej. Wyniki takiego rozumowania przedstawia ryc. 37.

Widać zgodność w obszarze od 10^{19} eV do 3×10^{19} eV. Poza tym obszarem wyniki nadal zgodne nie są. Stanowi to spory problem, jeśli ktoś chciałby ustalić, skład masywowy promieniowania kosmicznego w tym zakresie energii. Obcięcie GZK, o którym wspominaliśmy, dotyczy z istoty swojej jedynie protonów, a ściśle pojedynczych nukleonów. Jeśli lecącą cząstką promieniowania kosmicznego jest jądro atomowe, np. żelaza ($A = 56$), ma w całości energię E , to każdy z jego nukleonów ma energię E/A , czyli 56 razy mniejszą. Obcięcie GZK w przypadku jąder żelaza zaczynałoby pracować dopiero powyżej energii 10^{21} eV. Wydawać by się mogło, że widziane w widmie obcięcie jasno wskazuje, że cząstkami promieniowania kosmicznego o najwyższych energiach są protony. Jest to jednak nieprawda. Jądra atomowe oddziałują z promieniowaniem elektromagnetycznym (fotonami, kwantami γ) na wiele sposobów i jednym z nich jest fotodezintegracja poprzez rezonansowe wzbudzenie zwane Gigantycznym Rezonansem Dipolowym. Podobnie, jak ma to miejsce w procesie GZK, dla jąder o bardzo wysokiej energii szansa na pochłonięcie jakiegoś fotonu, którymi wypełniony jest cały Wszechświat, staje się czasem wyjątkowo duża. Dokładne obliczenia pokazują, że fotony

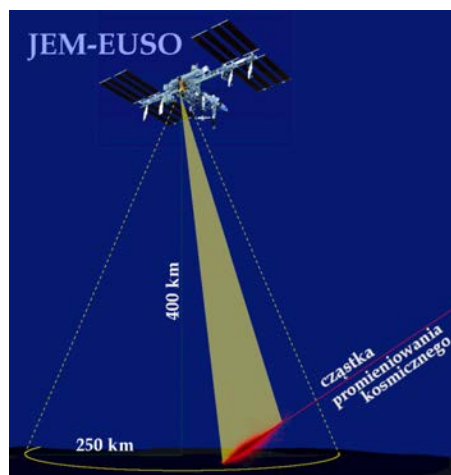
wzbudające jądra nie muszą być wcale fotonami mikrofalowego promieniowania tła (jak w GZK), których jest ponad 400 w każdym centymetrze sześciennym. Dla jąder promieniowania kosmicznego o niższych energiach, wypełniające Wszechświat równie dokładnie promieniowanie podczerwone ma energii na tyle dużo, że w takim jądrze powstanie na chwilę Gigantyczny Rezonans Dipolowy, a następnie rozpadnie się ono na mniejsze kawałki, każdy o całkowitej energii proporcjonalnej do jego masy atomowej. Proces fotodezintegracji jąder promieniowania kosmicznego zachodzi (złośliwie) tylko odrobinę dalej na skali energii niż GZK dla protonów. Szczegółowe rachunki i odpowiedź na pytanie, co do nas przylatuje, zależy niezwykle silnie od tego, jaki kształt ma widmo energetyczne i w którym miejscu zaczyna się obcięcie. Zmiana energii o 10% znacząco zmienia wyciągane wnioski. Na szczęście są też inne sposoby i próby wyznaczania mas docierających do nas cząstek o najwyższych energiach.

W kwestii anizotropii w ostatnich latach sytuacja zmieniła się i to w zasadzie o 180° . Pierwsze pomiary PAO wskazywały na korelację z aktywnymi jądrami galaktyk, czemu eksperyment TA zaprzeczał zdecydowanie. Napływ nowych rejestrowanych przypadków i rozrzut kierunków ich dotarcia na powierzchnię Ziemi nie potwierdzały pierwszych doniesień – po latach z silnej, zdecydowanie nieprzypadkowej korelacji pozostała tylko lekka sugestia, której już dziś nikt nie traktuje poważnie. Za to początkowo izotropowe rozłożenie kierunków przychodzenia cząstek na półkuli północnej po pięciu latach zbierania danych przestało być już tak izotropowe [44]. W sumie TA dysponowało 72 przypadkami pęków o energiach powyżej $5,7 \times 10^{19}$ eV i rozkładały się one z wyraźnym wskazaniem na znaczący nadmiar z okolic obiektu o współrzędnych: RA: $144,3^\circ$, dec: $40,3^\circ$. Nadmiar ten rozkładał się, jak widać na ryc. 38 w miarę równo wewnątrz stożka o kącie rozwarcia około 25° . W obszarze tym jest na pewno sporo ciekawych obiektów astrofizycznych, jednak nic co nadawałoby się szczególnie na źródło promieniowania kosmicznego o najwyższych energiach, nic co emitowałoby szczególnie intensywnie promieniowanie elektromagnetyczne w jakimkolwiek zakresie fal, od radiowych po promieniowanie γ , a spodziewalibyśmy się, że jeśli gdzieś tam zachodzą procesy prowadzące do nadawania jądratomowym gigantycznych energii, to powinny temu towarzyszyć i inne ekstremalne zjawiska – a tu nic!

Wszystko wskazuje na to, że rozbieżności pomiędzy PAO i TA nie da się przezwyciężyć. Co należy zrobić w takiej sytuacji? Powołać do życia nowy, przy okazji jeszcze większy, nowocześniejszy, lepszy eksperyment, który zmierzy wreszcie to, co chcielibyśmy zmierzyć i odpowie na zasadnicze pytania jasno i definitywnie. W tym

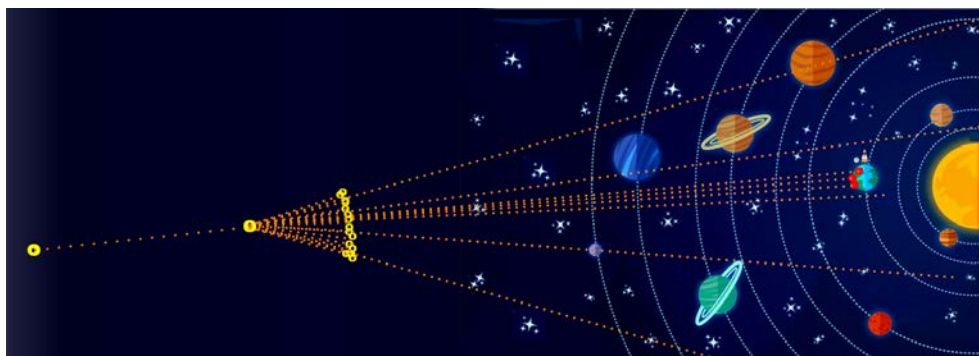


Ryc. 38. Mapa kierunków przychodzenia wielkich pęków o najwyższych energiach rejestrowanych przez TA. Zielone koło wyznacza stożek o promieniu 25° – hot spot



Ryc. 39. Eksperyment JEM-EUSO

miejscu fizyka zderza się z ekonomią. PAO w założeniach miało kosztować 50 milionów (euro). Przez dwadzieścia lat wszystkie koszty wyniosły setki milionów. Tyle, że trudno to nawet policzyć. Kogo stać na wybudowanie czegoś, co powinno kosztować grube miliardy? Pytanie jest raczej retoryczne. Wiele instytucji, krajów a nawet zwykłych prywatnych milionerów byłoby na to stać, tylko czy ktoś to zrobi? To nie jest pewne. Postawienie tysięcy dużych detektorów na sporej powierzchni i ustawienie teleskopów wypatrujących subtelnych błysków na niebie jest logistycznie dość skomplikowane, a zapewnienia, że po kilku(nastu) latach będziemy mądrzejsi, też nie są specjalnie przekonujące, szczególnie biorąc pod uwagę poprzednie, opisane wyżej przedsięwzięcia. Trzeba by wymyślić coś nowego, coś zdecydowanie innego. I wymyślono. Obecnie nazywa się to EUSO (Extreme Universe Space Observatory) [45] – kosmiczny teleskop patrzący jednak nie w niebo, a wprost przeciwnie, w dół. I cóż on może zobaczyć? Te same błyski, jakie widziało Obserwatorium Pierre'a Auger'a i eksperyment Telescope Array, ale umieszczony na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, z wysokości około 400 km nad Ziemią będzie obserwował nie tysiące kilometrów kwadratowych, a obszary wielkości Polski ($312\,676\text{ km}^2$), patrząc ukośnie nawet kilkakrotnie większe. Oczywiście będzie widział mniej fluorescencyjnych fotonów generowanych przez pęki o najwyższych energiach i obserwacja ich będzie daleko bardziej złożona, to jednak, jak pokazują prowadzone



Ryc. 40. Idea Zespołów Promieniowania Kosmicznego

obecnie testy, możemy się spodziewać interesujących wyników w niedługim czasie.

Jest jeszcze jedna możliwość. W roku 1985 Linsley, ten sam, który wykrył gigantyczny wielki pęk w roku 1962, zaproponował budowanie aparatury złożonej z autonomicznych, miniaturowych aparatów wykrywających małe pęczki bardzo lokalnie [46]. Wiele takich mini aparatów połączonych w sieć miało być nową jakością i przynieść odpowiedzi na ważne pytania. Wtedy jednak, prawie 40 lat temu, idea ta była bardzo skomplikowana. Dziś rozmaite sieci bez trudu oplatają świat, satelity oglądają nas z wysoka, przekazują dane, synchronizują ruch lotniczy, dyskutują z samochodami o ich położeniu, czasem z dokładnością centymetrową. Telefony tworzą sieci złożone z setek milionów, może miliardów węzłów. Ze swojego smartfonu możesz połączyć się z każdym, kto także „jest smart”. A każdy telefon ma wbudowany aparat fotograficzny. Aparaty są detektorami fotonów wpadających przez obiektyw na półprzewodnikową matrycę pojedynczych pikseli. Gdyby telefonom zasłonić obiektywy tak, by światło nie mogło wzbudzać elektronów w matrycy, byłyby one i tak wzbudzone przez naładowane cząstki, które dochodzą do nas z różnych stron. Część z nich to wtórne promieniowanie kosmiczne niekiedy przychodzące w wielkich pęczkach promieniowania kosmicznego, a czasem w bardzo wielkich pęczkach. Można wyobrazić sobie, że naraz wiele telefonów zarejestruje naładowane cząstki. Gdyby zebrać od nich tę informację, uzupełnić ją o wyniki istniejących ciągle na świecie dużych aparatów pękowych, można by nie tylko zbierać dane o wielkich pęczkach atmosferycznych i zwiększać statystykę najciekawszych, najbardziej energetycznych przypadków, ale można by też pokusić się o znalezienie czegoś nowego, czego nikt jeszcze nie widział i czego właściwie nikt się nie spodziewa. Takimi zjawiskami mogą być na przykład Zespoły Promieniowania Kosmicznego, którą to ideę ilustruje ryc. 40: z odległych, nieznanych przestrzeni kosmosu przylatuje w pobliże Układu Słonecznego nieznaną, niewidzianą jeszcze bardzo masywną cząstką. Mogła ona powstać na

samym początku Wszechświata, o którym ciągle wiemy bardzo mało. Mogłaby powstać i być na tyle stabilną, by przetrwać 14 miliardów lat i całkiem przypadkowo zabłądzić do nas. Mogłaby wejść w interakcję z polami magnetycznymi Słońca, albo zwyczajnie rozpaść się na mniejsze, znane nam z laboratoriów cząstki elementarne, które miałyby wciąż niesłychanie duże energie. One by zapewne też rozpadały się, czasem oddziaływały i taka lawina przechodząc przez Układ Słoneczny mogłaby trafić na Ziemię i spowodować zainicjowanie w jej atmosferze dużej liczby gigantycznych pęków promieniowania kosmicznego. Wszystkie one byłyby skorelowane czasowo i wykryć je mogłaby tylko globalna sieć detektorów. Zaobserwowanie Zespołów Promieniowania Kosmicznego byłoby tak samo niespodziewane, jak wykrycie samego promieniowania kosmicznego przez Hessa, czy wielkich pęków przez Augera i Maze’a i rzuciłoby nowe, nieznanne światło na otaczający nas Wszechświat. Nie wiemy oczywiście, czy Zespoły Promieniowania Kosmicznego w ogóle istnieją. Nie wiemy też, czy da się je łatwo wyłapać wśród olbrzymiej ilości sygnałów dochodzących do nas z kosmosu. Sprząc w jedną sieć miliony (miliardy?) małych detektorów w smartfonach jest zadaniem niezwykle ambitnym, próby jednak trwają. Jednym z takich eksperymentów jest projekt CREDO (Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory) [47] z interesującym mottem **The quest for the unexpected** (W poszukiwaniu niespodziewanego).

Oczywiście wspaniale by było złapać króliczka, ale sama pogoń za nim jest fascynująca, a co ważniejsze bardzo kształcąca dla ludzi goniących za cząstkami elementarnymi ze smartfonami w dłoniach.

Literatura

- [1] Coulomb, C.A., Mem. De l'Acad. Paris, 616, (1795).
- [2] Linns W., Meteor. Zeits., 4, 345 (1887) [wg Chalmers, J. A., *Atmospheric Electricity*, Pergamon Press, (1957)].

- [3] Exner, F., *Über transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektrizität*, Wien, Akad. Ber. **95**, 1084 (1887).
- [4] Elster, J. i Geitel, H., *Über die Existenz elektrischer Ionen in der Atmosphäre*, *Terrest. Magnetism*, **4**, 213, 1899.
- [5] Wilson, C.T.R., *On a method of making visible the paths of ionising particles through a gas*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences **85**, 285 (1911).
- [6] Longair, M., C.T.R. Wilson and the cloud chamber, *Astroparticle Physics* **53**, 55 (2014).
- [7] Hess V. F., *About the absorption of gamma rays in the atmosphere*, *Physikalische Zeitschrift* **12**, 998 (1911); Hess V. F., *About Observations of the Penetration Radiation During 7 Balloon Flights*, *Physikalische Zeitschrift* **13**, 1084 (1912).
- [8] Wulf, Th., *About the radiation of high penetration capacity contained in the atmosphere*, *Physikalische Zeitschrift*, **8**, 251 (1909).
- [9] Kolhörster, W., *Messungen der durchdringenden Strahlung im Freiballon in größeren Höhen* *Physikalische Zeitschrift*, **14**, 1153 (1913); Kolhörster, W., *Messungen der durchdringenden Strahlungen bis in Höhen von 9300 m* *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **16**, 719 (1914).
- [10] Skobeltsyn, D., *Über eine neue Art sehr schnellerstrahlen*, *Zeitschrift für Physik* **54**, 686 (1929).
- [11] Geiger, H. i Müller, W., *Das Elektronenzählrohr*, *Physikalische Zeitschrift* **29**, 839 (1928).
- [12] Bothe, W. i Kolhörster, W., *Das Wesen der Höhenstrahlung*, *Zeitschrift für Physik* **56**, 751 (1929).
- [13] Rossi, B., *Method of registering multiple simultaneous impulses of several Geiger counters*, *Nature* **125**, 636 (1930).
- [14] Blackett, P. M. S. i Occhialini, G. P. S., *Photography of penetrating corpuscular radiation*, *Nature* **130**, 363 (1932).
- [15] Carmichael, H., *The Nature of Large Cosmic-Ray Bursts*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, **154**, 223 (1936).
- [16] Rossi, B., *Über die Eigenschaften der durchdringenden Korpuskularstrahlung in Meeresniveau*, *Z. Phys.* **82**, 151 (1933).
- [17] Bhabha, H. J. i Heitler, W., *The Passage of Fast Electrons and the Theory of Cosmic Showers*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences **159**, 432 (1937).
- [18] Auger, P., Maze, R. i Grivet-Mayer, T., *Grandes gerbes cosmiques atmosphériques contenant des corpuscules ultra-pénétrantes*, *Compt. Rend. Acad. Sci.*, **B206**, 1721 (1938); *Les grandes gerbes cosmiques de l'atmosphère Auger*, P. i Maze, R., *Compt. Rend. Acad. Sci.*, **B207**, 288 (1938).
- [19] Rossi, B. i Staub, H., *Ionization Chambers and Counters*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York. (1949).
- [20] Cranshaw, T. E. i W Galbraith, W., *Time variations of Extensive Air Showers and the Origin of Cosmic Rays*, *Phil. Mag.* **45** 1109 (1954)
- [21] Porter, N. A., Cranshaw, T. E., De Beer, J. F., Parham, A. G. i Sherwood, A. C., *Observations on extensive air showers VII. The lateral distribution of energy in the electron-photon component*, *Phil. Mag.*, **3**, 826 (1958).
- [22] Bassi, P., Clark, G. i Rossi, B., *Distribution of Arrival Times of Air Shower Particles*, *Phys. Rev.* **92**, 441 (1953).
- [23] Clark, G. W., Scherb, F. i Smith, W. B., *Preparation of Large Plastic Scintillators* *Review of Scientific Instruments*, **28**, 433 (1959).
- [24] Hersil, J., Escobar, I., Scott, D., Clark, G. i Olbert, S., *Observations of Extensive Air Showers near the Maximum of Their Longitudinal Development.*, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 22. (1961).
- [25] Lawrence, M. A., Reid, R. J. O. i Watson, A. A., *The cosmic ray energy spectrum above 4×10^{17} eV*, *J. Phys. G* **17** 733 (1991); Ave, M., Hinton, J. A., Knapp, J., Lloyd-Evans, J., Marchesini, M. i Watson, A. A., *Cosmic ray mass composition above 3×10^{17} eV measured with the Haverah Park Array*, Proceedings of 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany: 385 (2001).
- [26] Linsley, J., *Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 10^{20} eV*, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 146 (1963).
- [27] Penzias, A.A. i Wilson R. W., *A Measurement Of Excess Antenna Temperature At 4080 Mc/s*, *Astrophysical J. Lett.* **142**: 419 (1965).
- [28] Zatsepin, G. T. i Kuz'min, V. A., *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays*, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Lett.* **4**, 78 (1966).
- [29] Greisen, K. *End to the Cosmic-Ray Spectrum?*, *Phys. Rev. Lett.* **16** (17) 748 (1966)
- [30] Winn, M. M., Ulrichs, J., Peak, L. S., McCusker C. B. A. i Horton, L., *The cosmic-ray energy spectrum above 10^{17} eV*, *J. Phys.*, **G 12**, 653 (1986); Winn, M. M., Ulrichs, J., Peak, L. S., McCusker C. B. A. i Horton, L., *The arrival directions of cosmic rays above 10^{17} eV*, *J. Phys. G* **12**, 675 (1986).
- [31] Ivanov, A, for the Yakutsk array group, *The Yakutsk array experiment: Main results and future directions* EPJ Web of Conferences **53**, 04003 (2013); Knuarenko, S., Petrov, I., Petrov, Z. i Slepsov, I., *Ultra-high energy cosmic rays: 40 years retrospective of continuous observations at the Yakutsk array: Part 1. Co-*

- smic ray spectrum in the energy range 10^{15} – 10^{18} eV and its interpretation*, EPJ Web of Conferences 99, 04001 (2015).
- [32] Chiba, N. i in., *Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) covering 100 km² area*, Nucl. Instr. Methods A 311, 338 (1992).
- [33] Hayashida, N. i in., *Observation of a Very Energetic Cosmic Ray Well Beyond the Predicted 2.7K Cutoff in the Primary Energy Spectrum*, Phys. Rev. Lett. 73, 3491 (1994).
- [34] Baltrusaitis. R. M., Cady, R., Cassiday, G. L., Coperv, R., Elbert, J. W., Gerhardy, P. R., Ko, S., Loh, E. C., Salamon, M., Steck, D. i Sokolsky, P., *The Utah Fly's Eye detector*, Nucl. Instr. Methods A 240, 410 (1985)
- [35] Abu-Zayyad, T. i in., *The prototype high-resolution Fly's Eye cosmic ray detector*, Nucl. Instr. Methods A 450, 253 (2000).
- [36] Hillas A. M., *The origin of ultra-high-energy cosmic rays*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 22, 425 (1984).
- [37] Pierre Auger Collaboration, *Auger Collaboration Presentations*, Proceedings of the 27th ICRC, Hamburg, pp. 699–787 (2001).
- [38] Abrahama J. i in. (Pierre Auger Collaboration), *Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory*, Nucl. Instr. Methods A 523, 50 (2004).
- [39] Pierre Auger Collaboration, *Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects*, Science 318, 938 (2007).
- [40] Pierre Auger Collaboration, *Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV*, Phys. Rev. Lett. 101, 061101 (2008).
- [41] Abu-Zayyada. T. i in. (TA Collaboration), *The energy spectrum of Telescope Array's Middle Drum detector and the direct comparison to the High Resolution Fly's Eye experiment* Astroparticle Physics 39-40, 109 (2012).
- [42] Abu-Zayyada. T. i in. (TA Collaboration), *Search For Anisotropy Of Ultrahigh Energy Cosmic Rays Wit The Telescope Array Experiment*, The Astrophysical J. 757, 26 (2012).
- [43] Ivanov, D., for the Pierre Auger Collaboration and the Telescope Array Collaboration *Report of the Telescope Array – Pierre Auger Observatory Working Group on Energy Spectru m*, 35th International Cosmic Ray Conference, Bexco, Busan, Korea (2017).
- [44] Abbasi, R. U. i in. (TA Collaboration), *Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment*, Astrophysical J. Lett., 790, L21 (2014).
- [45] Kajino, F., for the JEM-EUSO collaboration) *The JEM-EUSO mission to explore the extreme Universe*, Nucl. Instr. Methods A 623, 422 (2010).
- [46] Linsley, J., *Mini And Super Mini Arrays For The Study Of Highest Energy Cosmic Rays*, Proceedings of 19th International Cosmic Ray Conference, La Jola, USA, OG9.4-9, 434 (1985).
- [47] Homola, P. i in. (CREDO Collaboration) *Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory*, Symmetry 12, 1835 (2020).