

Jak odkrywano promieniowanie kosmiczne

Dość powszechne, acz całkowicie niesłuszne, jest mniemanie, że promieniowanie kosmiczne odkryte zostało przypadkiem, szczęśliwym zbiegiem okoliczności. Odkrywanie promieniowania kosmicznego, a dokładniej tego, co dziś nazywamy promieniowaniem kosmicznym, czyli strumienia cząstek przychodzących do Ziemi z przestrzeni kosmicznej, trwało dość długo i tak naprawdę nie jest zakończone do dziś dnia.

Czytając o początkach wielu dziedzin ludzkiej działalności często spotykamy na samym początku zdanie “Już starożytni Grecy...”. W przypadku fizyki promieniowania kosmicznego poszukiwanie tak głębokich korzeni wydawać się musi nieco sztuczne. Starożytni (i nie tylko) uznając generalnie zasadę opartej na ludzkiej logice sensowności stworzenia nie mogli wpaść na trop tak dalece nieuzasadnionego bytu. Nie ma przecież żadnej potrzeby zakładać, że zamieszkała przez nas ziemia bombardowana jest nieustannie przez niewiadomego pochodzenia drobiny materii, jeśli nie dają one żadnych dostrzegalnych efektów. Jeśli jednak ktoś uparłby się, mógłby odnaleźć co najmniej dwa zjawiska znane już starożytnym wiążące się w pewien, jakkolwiek bardzo odległy związek z badaniami promieniowania kosmicznego. Pierwsze z nich to oczywiście tajemnicze oddziaływanie bursztynu, drugie zaś to niezbadany mechanizm powstawania chmur na niebie¹.

Zwykle jako datę odkrycia promieniowania kosmicznego podaje się rok 1912. Datę tę niejako uprawomocniono wyrokiem Królewskiej Akademii w Sztokholmie w roku 1936 wręczając V. F. Hessowi (Rys.1) nagrodę Nobla. Chcąc jednak oddać sprawiedliwość prawdzie należy cofnąć się co najmniej o około 200 lat i wspomnieć wiele innych wielkich nazwisk fizyków mających swój udział w omawianej historii.

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

¹Jesienią 1998 roku ukazała się praca *Influence of cosmic rays on Earth's climate* (Phys. Rev. Lett. **81**, 5027) dowodząca związku pomiędzy natężeniem promieniowanie kosmicznego a długookresowymi charakterystykami stopnia pokrycia chmurami nieba (w skali globalnej) i związanymi z tym zmianami klimatycznymi.

balonem 7 sierpnia 1912 roku. Około roku 1785 C. A. Coulomb w trakcie przeprowadzania eksperymentów ze skonstruowaną przez siebie precyzyjną wagą skręceń, które to eksperymenty zapewniły mu stałe miejsce we wszystkich podręcznikach dotyczących elektryczności, zaobserwował ucieczkę ładunku elektrycznego z naładowanych ciał. Dziś efekt ten znany pod nazwą prądu ciemnego. Sformułował on nawet (wyprzedzając wynik znany dziś powszechnie jako prawo Ohma) zależność mówiącą iż gęstość prądu ciemnego jest proporcjonalna do wartości pola elektrostatycznego w danym punkcie. W pewnym sensie zjawisko to można uznać także za początek fizyki cząstek elementarnych, dalekiego prekursora słynnych doświadczeń Thomsona sprzed lat 100. W tamtych czasach nikt nie mógł przypuszczać, że obok kłopotów jakie przysparza eksperymentatorom może mieć ono jakiegokolwiek pozytywne następstwa. Nic więc dziwnego, że dalszy postęp w badaniach prądu ciemnego odnotowano dopiero w połowie XIX wieku. Wtedy to M. Matteucci odkrył dziwne zachowanie się prądu ciemnego przy dostatecznie wysokich polach elektrycznych. Okazało się, że przy dostatecznie dużych polach wartość prądu ciemnego nasycza się. Dalszy wzrost pola elektrostatycznego nie powoduje już znaczącego wzrostu szybkości upływu ładunku.

W końcu XIX wieku badaniom prądu ciemnego poświęcano coraz większą uwagę. W. Linss w 1887 badał odływ ładunku elektrostatycznego w powietrzu. W tym samym roku F. Exner zaproponował utworzenie ogólnoświatowej sieci obserwatoriów badających elektryczność atmosferyczną. Obserwacje J. Elstera i H. Geitela poczynione w latach 1882–1889 w jednej ze szkół średnich w Niemczech doprowadziły do “wiatru” zjonizowanych cząsteczek powietrza tworzących prąd ciemny, gdy naładowane elektrycznie ciało umieścili w zamkniętym pojemniku (Rys.4).

W 1884 badaniom prądu ciemnego poświęcił się wspomniany już J. J. Thomson. Od roku 1896 wartość gęstości prądu nasycenia można już było dzięki pracom J. J. Thomsona i E. Rutherford traktować jako miarę jonizacji ośrodka.

Równoległe do badań prądu ciemnego prowadzone były badania w pozornie bardzo odległym i nie mniej egzotycznym zakątku fizyki, który nazwać by można mechanizmem powstawania chmur.

Początek badań zjawiska kondensacji w kontekście nas interesującym można datować na koniec wieku XVIII. Zauważono wtedy właśnie, że para wodna kondensuje się na ściankach zamkniętej butelki szybciej, jeśli igłę wprowadzoną do butelki przez korek połączyć z maszyną elektrostatyczną.

Koniec wieku XIX i w tej dziedzinie okazał się okresem niebywałego rozwoju. Z ważniejszych dat (i nazwisk) wymienić można choćby rok 1886 i von Helmholtza, który wtedy to właśnie wskazał na zjonizowane atomy gazu jako ośrodki kondensacji pary w pozbawionym pyłu powietrzu. Ideę tę wykorzystał C. T. R. Wilson budując słynną komorę znaną dziś powszechnie jako komora Wilsona (Rys.5). Stwierdził on w roku 1897, że zarodki kondensacji w czystym powietrzu mogą być produkowane przez promieniowanie X, czy promieniowanie zwane wtedy uranowym wskazując wyraźnie, że są one zjonizowanymi cząsteczkami powietrza. W roku 1900 wykazał on że nawet, przy braku w pobliżu rud uranowych, czy źródeł promieni X zarodki kondensacji pojawiają się w wolnym od kurzu powietrzu. Do badania tego zjawiska próbował użyć wynalezionej przez siebie komory, jednakże nawet mimo opuszczenia Laboratorium Cavendisha dla uniknięcia wpływu obecnych tam i badanych substancji silnie radioaktywnych, nie udało mu się pokonać trudności technicznych i w dalszych badaniach skierował swe zainteresowanie ku metodom badającym prąd ciemny w zamkniętych naczyniach.

Wilson był pierwszym, który zapostulował istnienie promieniowania kosmicznego. Dla wyjaśnienia niewyjaśnialnej innymi metodami resztkowej jonizacji pojawiającej się znikąd zaproponował, by przyjąć, że są to promienie w rodzaju X, czy uranowych pochodzenia pozaziemskiego. Dla udowodnienia prawdziwości swojej tezy zbudował specjalny przenośny i odpowiednio czuły elektroskop, a w zasadzie wyrafinowaną komorę jonizacyjną (Rys.6), i udał się z nią do kopalni, gdyż spodziewał się zaobserwować tam zmniejszenie szybkości powstawania jonów w powietrzu na skutek osłabienia przychodzącego z góry czynnika jonizującego. Niestety dla niego nie mógł on wiedzieć, że jedynie kilkanaście procent jonizacji na powierzchni Ziemi ma pochodzenie kosmiczne, większość zaś pochodzi bardziej lub mniej bezpośrednio ze znajdujących się właśnie pod Ziemią pierwiastków promieniotwórczych.

Rozwiązanie problemu wpływu radioaktywności ziemskiej na produkcję jonów w powietrzu stanowiło klucz otwierający drzwi fizyce promieniowania kosmicznego. Nie trzeba było czekać zbyt długo. Na przełomie wieków (i w początkach wieku XX jeszcze) szybkość poszerzania się horyzontów wiedzy człowieka o otaczającej go rzeczywistości była ogromna, a samo rozwiązanie okazało się bardzo proste. Wystarczyło wykorzystać atmosferę ziemską jako absorbent pochłaniający idące z dołu do góry promieniowanie skał. W tym celu można było wejść na odpowiednio wysoką górę, lub jeszcze lepiej, wznieść się w powietrze bez używania góry. Drugi sposób

okazał się bardziej efektywny. Seria lotów balonowych (Rys.2) przeprowadzonych niedaleko od naszych dzisiejszych południowych i zachodnich granic przez Viktora F. Hessa latach 1911–1912 wyposażonego w skonstruowany w 1909 roku przez jezuitę – ojca Wulfa z Aachen niezwykle czuły elektroskop (Rys.3) w doprowadziła do bardzo solidnie udokumentowanego stwierdzenia, że czynnik jonizujący powietrze im wyżej, tym jest bardziej intensywny (poza niewielkimi wysokościami, gdzie widać wyraźnie zanikanie jego ziemskiej składowej).

Aż do końca lat dwudziestych naszego wieku podstawowym narzędziem badania promieniowania kosmicznego były komory jonizacyjne. W roku 1929 W. Bothe i W. Kolhörster po raz pierwszy użyli skonstruowanego w Kilonii rok wcześniej licznika znanego jako licznik Geigera–Muellera (Rys.7). Komory jonizacyjne pozwalały precyzyjnie umiejscawiać w przestrzeni ślady przechodzących cząstek. Liczniki typu Geigera–Muellera pozwoliły bardzo dokładnie określić moment przejścia cząstki a zastosowanie dwóch (lub więcej) odpowiednio ustawionych liczników GM i obserwacje impulsów pojawiających się w nich jednocześnie (koincydencji) otworzyło całkiem nowe horyzonty przed eksperymentalnym badaniem promieniowania kosmicznego. Warto w tym miejscu, tytułem ciekawostki historycznej, uzmysłowić sobie trudności jakie stały przed eksperymentatorami w tamtych czasach. Elektroniczne przyrządy liczące, których pełne są dziś wszystkie laboratoria i pracownie fizyczne były wszak jeszcze kwestią (niedalekiej, ale jednak) przyszłości. Rejestracje odbywały się z użyciem szybko przesuwałającej się taśmy (Rys.8). Zdziwiająco, ale technika ta pozwalała mierzyć różnice czasowe rzędu $100\mu\text{s}$!

Podczas badania w roku 1927 promieniowania ciał radioaktywnych w komorze Wilsona D. V. Skobelcyn zauważył dziwne ślady cząstek najwyraźniej wysokoenergetycznych i nie pochodzących z badanych substancji (Rys.9). Niezależnie, w odstępie kilku miesięcy, przypuszczenie, że mogą być one pochodzenia wysokościowego (“Höhenstrahlung” Hessa), znalazło potwierdzenie w eksperymencie Bothego i Kolhörstera, który zapewnił im trwałe miejsce w historii badań promieniowania kosmicznego (Rys.7). Umieścili oni dwa małe (10cm długości i 5cm średnicy) liczniki GM jeden nad drugim wewnątrz pudła o ściankach z pięciu centymetrów żelaza i dodatkowo sześciu ołowiu (dla odcięcia się od radioaktywności otoczenia pomiary przeprowadzane były w piwnicy Reichsanstalt) i dodatkowo przedzielili je blisko czterocentymetrową sztabą złota (12.3 kg). Przenosząc pomiary z

piwnicy pod okno w dachu i dodając lub ujmując ołowiany absorbent mogli wyznaczyć zdolność przenikania promieniowania kosmicznego przez materię. Okazała się być ona na tyle duża, że podważyła dość powszechne przekonanie o elektromagnetycznej naturze (promieniowanie γ) przychodzących z przestrzeni 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, Diracka a nawet małżeństwo Irenę i Fryderyka Joliot–Curie. Zainteresowanie to zaowocowało między innymi odkryciem pozytonu, hipotetycznej antycząstki elektronu zapostulowanej w 1930 roku przez P. A. M. Diraca, przez Andersona w roku 1932 (Rys.11).

Istotny postęp w technikach detekcji promieniowania kosmicznego wprowadziło wynalezienie przez B. Rossiego w roku 1930 elektronicznego układu elektronicznego opartego na triodach (Rys.12) (równoległe Bothe doszedł do elektronicznej rejestracji koincydencji w oparciu i jedną lampę wyposażoną w dwie siatki). W bogatym materiale doświadczalnym zgromadzonym na początku lat trzydziestych zawierającym zdjęcia z komór Wilsona wyzwalanych koincydencją liczników GM śladów wysokoenergetycznych elektronów (i pozytonów) obserwowano od czasu do czasu dziwne fotografie, na których widoczne było przejście przez komorę kilku (do 4 na fotografiach Skobelcyna) a nawet kilkunastu (do 20 w eksperymencie P. Blacketta i G. Occhialiniego z roku 1933) równoległych (lub prawie) śladów cząstek bardzo wysokich energii. Obok zdjęć z komór, to samo w istocie zjawisko obserwowano w eksperymentach z komorami jonizacyjnymi [Carmichael jako doktorant Chadwicka w Cavendish Laboratory zarejestrował metodą fotograficzną wychylenie elektroskopu odpowiadające pojawieniu się w komorze 2×10^8 jonów (Rys.10)] jak i czysto koincydencyjnych. I tak na przykład w roku 1932 Rossi umieścił trzy liczniki w osłoniętym ołowiem pudle ustawiając je jednak w dość nietypowej geometrii, a mianowicie jeden w górze, a dwa w jednej poziomej płaszczyźnie pod nim, tak że pojedyncza cząstka nie była w stanie uruchomić potrójnego układu koincydencyjnego (Rys.13). Okazało się, że koincydencje takie jednak występują. Co więcej, w 1933 roku stwierdził on, że częstość tych koincydencji można zwiększyć wkładając pomiędzy górny a dolne liczniki grube (nawet do kilku centymetrów) warstwy ołowiu, czy żelaza (Rys.14). Warto jako ciekawostkę w tym miejscu dodać,

że rezultat ten był w swoim czasie tak zaskakujący, że poważne czasopismo naukowe jakim było wtedy niemieckie *Naturwissenschaften* odmówiło publikacji wyników Rossiego. Publikacja ukazała się dopiero w *Physikalische Zeitschrift* po osobistym wstawiennictwie Heisenberga.

Pytanie o naturę tego zjawiska budziło wiele kontrowersji. Auger i Skobelcyn proponowali, 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. Różnice, jak widać dotyczyły natury cząstki pierwotnej. Gdyby odwołać się wtedy do procedur demokratycznych, prawdopodobnie foton wygrałby z elektronem, aczkolwiek obie kandydatury nie były idealne. Z dzisiejszego punktu widzenia widać naocznie, jak niebezpiecznym może być w fizyce (nauce) akceptowanie poglądów większości.

Teoretyczne rozwiązanie zagadki wielokrotnych śladów (przyjąć chyba można dla nich polską nazwę “małych pęków”) pojawiło się dopiero w roku 1937 w pracy H. J. Bhabhy i W. Heitlera i znane jest jako teoria kaskadowa. Pełne potwierdzenie znalazła ona w roku 1938, kiedy to P. Auger i R. Maze odkryli wielkie pęki atmosferyczne.

Idea tego eksperymentu była dokładnie taka jak w doświadczeniu Rossiego z licznikami GM ustawionymi w wierzchołkach trójkąta. Modyfikacja polegała na użyciu całej atmosfery jako absorbenta i wyeliminowaniu z koincydencji górnego licznika, gdyż obserwacja jednoczesnego przejścia cząstek przez liczniki w płaszczyźnie poziomej automatycznie zakłada, że coś przyjsć z góry musiało. Pytaniem, na jakie próbowano znaleźć odpowiedź, było określenie, jak duże są poprzeczne rozmiary “pęków” obserwowanych przez Rossiego i na zdjęciach z komór. Odpowiedź miało dać wyznaczenie jak szybko zanika częstość koincydencji wraz ze zwiększaniem odległości pomiędzy licznikami. Wynik doświadczenia okazał się zaskakujący. Nawet przy rozsunięciu liczników na odległość 30 metrów obserwowano więcej rejestracji niż wynikałoby to z przypadkowych fluktuacji tła. Po wyeliminowaniu tego, co niemożliwe (wszelkich możliwych efektów aparaturowych), to co zostaje, musi być prawdziwe, jak zwykł był mawiać Sherlock Holmes. Tym co zostało w doświadczeniu Maza i Augera były właśnie wielkie pęki promieniowania kosmicznego. W myśl teorii kaskadowej tak wielkie ilości cząstek rozrzucone na odległościach setek metrów mogły być wyprodukowane przez cząstkę pochodzenia kosmicznego o energii przekraczającą o wiele rzędów te, z jakimi fizycy spotkali się w swoich laboratoriach dotychczas.

I w tym miejscu możnaby w zasadzie zakończyć opowiadanie historii odkrywania promieniowania kosmicznego. Mniej więcej pół wieku temu dowiedzieliśmy się, że do Ziemi dochodzą z przestrzeni kosmicznej okruchy materii takiej samej, z jaką mamy do czynienia na co dzień, rozpędzone jednak do gigantycznych energii. Przez ponad pięćdziesiąt lat wybitne umysły starały się zgłębić tajemnicę ich pochodzenia. Wciąż jednak pozostaje ono dla nas zagadką. Pozornie, im więcej o nim wiemy, tym wiemy o nim mniej.

Zbadano widmo energetyczne promieniowania kosmicznego i wiemy, że rozciąga się ono od najniższych energii pozwalających cząstkom poruszać się w ogóle w przestrzeni Układu Słonecznego, aż do energii takich, jakie mają piłki tenisowe uderzane podczas poważnych zawodów (Rys.15) (przy czym ta górna granica może w ogóle nie istnieć). Rysunek 16 przedstawia kształt tego widma. Nie wiemy, dlaczego przez tak wiele rzędów wielkości (w energii) zachowuje się ono tak niezwykle regularnie.

Zbadano na tyle dokładnie, na ile pozwala wspomniane wyżej widmo (statystyka!), co wchodzi w skład strumienia cząstek kosmicznych. Okazało się, że jest tam wszystko, co tylko być tam by mogło. Wśród składników materii żyjących dostatecznie długo, aby pokonać kosmiczne dystanse są oczywiście wspomniane już elektrony i protony (tych drugich jest znacznie więcej). Od roku 1948 wiemy, że w promieniowaniu kosmicznym są też ciężkie jądra atomowe (Rys.17). W sumie jest to dość zrozumiałe, jednak w szczegółach okazuje się, że pewnych pierwiastków, czy wręcz niektórych ich izotopów, jest zbyt dużo, lub zbyt mało i wyjaśnić tego nie potrafimy.

Ze znanych cząstek w promieniowaniu kosmicznym widzimy jeszcze fotony. Osiągają one energie około 10^{13} eV (a może i większe). Ich badania doprowadziły nawet do powstania osobnej dziedziny astronomii zwanej *astronomią γ* , pełnej właściwych sobie, nierozwiązanych problemów, jak choćby ekscytujące ostatnio nawet codzienne gazety rozbłyski γ .

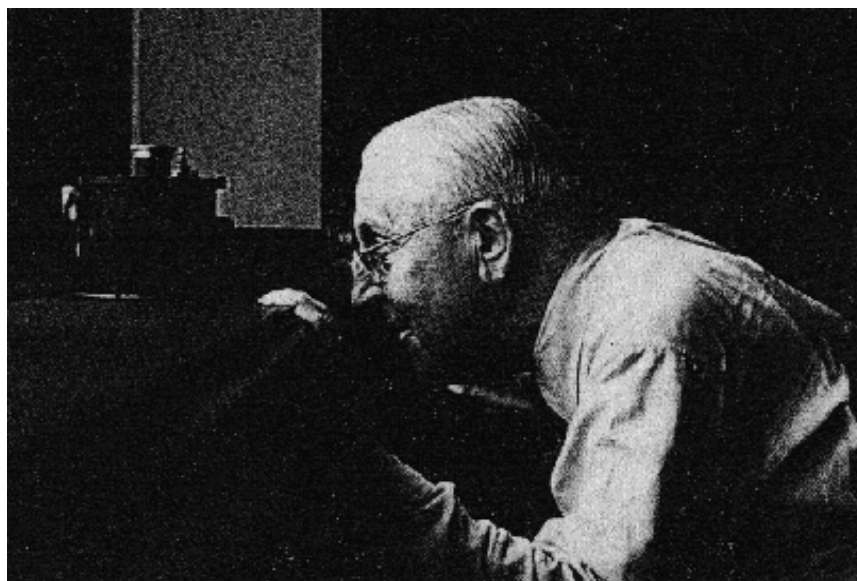
Na naszych oczach rodzi się być może *astronomia neutrinowa* dysponująca do tej pory jedynie niezbyt jasnymi do końca rejestracjami neutronów z wybuchu supernowej 1987A (Rys.18) i najwyższej wagi nierozwiązany problemem deficytu neutronów słonecznych. Póki co, jest to wciąż jeszcze fizyka, czy raczej astrofizyka, promieniowania kosmicznego.

Obok zwykłej i stabilnej w warunkach laboratoryjnych materii obecnej w promieniowaniu kosmicznym w całej swej rozciągłości mamy tam też to, co na Ziemi spotyka się niezwykle rzadko, a mianowicie antymaterię. Zmierzone strumienie kosmicznych antyprotonów i pozytonów upewniają nas

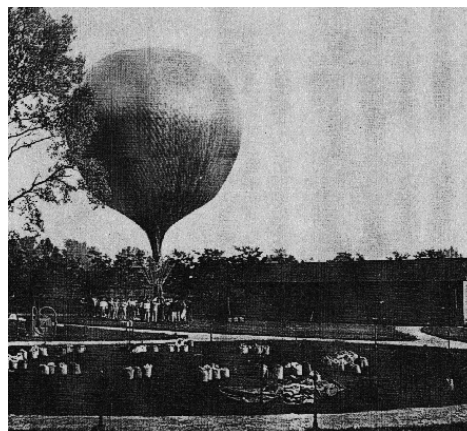
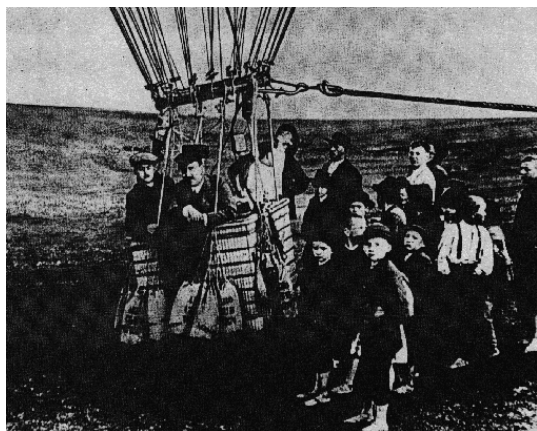
(i uspokajają jednocześnie), że nasz kawałek Wszechświata zbudowany jest ze zwykłej materii i nie grozi nam raczej spotkanie z dużym fragmentem anty-świata. Bliższe przyjrzenie się temu, co w tej materii widzimy, prowadzi jednak do kolejnych pytań bez odpowiedzi. Tak pozytonów, jak i antyprotonów wydaje się być odrobinę za dużo (Rys.19). Nie na tyle, aby niepokoić opinię publiczną, na tyle jednak, by ludzie chcący zrozumieć mieli nad czym rozmyślać.

Mnogość problemów pozostających wciąż do rozwiązania nie świadczy, mimo wszystko, o braku postępu. Badanie promieniowania kosmicznego od samego początku wzbogacało naszą wiedzę o Wszechświecie nie tylko w skali makro, ale i o zachowaniu podstawowych elementów, z jakich składa się on w najmniejszej znanej nam dziś skali. Jedną z najbardziej awangardowych dziedzin fizyki współczesnej, fizyka wysokich energii, zaczęła się właśnie od promieniowania kosmicznego. Być może, pozyton pozostałby jedynie hipotetyczną cząstką istniejącą w teoretycznych pracach Diraca, gdyby nie dziwny ślad w komorze Wilsona wyniesionej na balonie (Rys.11) w górne warstwy atmosfery. Pierwsze cząstki elementarne poza tymi budującymi znaną nam, stabilną materię : μ (1937) i π (1947) wykryto właśnie w promieniowaniu kosmicznym. Energie osiągnane w istniejących, a także te, jakie będzie można osiągnąć w planowanych dopiero akceleratorach cząstek elementarnych, o wiele rzędów wielkości ustępują energiom cząstek promieniowania kosmicznego i najprawdopodobniej nie zbliżą się nigdy do prawego krańca (górną granicy energii) rysunku 16. Jeśli więc coś ciekawego miałoby się dziać w fizyce przy zderzeniach cząstek o energiach 10^{20} eV, to zobaczyć to będziemy mogli jedynie w promieniowaniu kosmicznym.

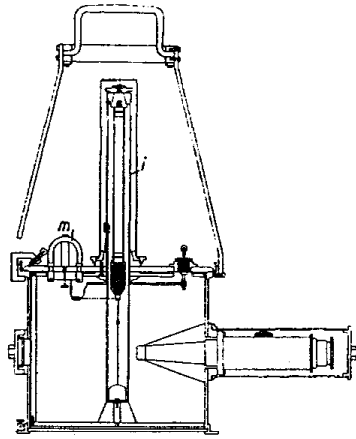
Gromadzenie faktów i wyciąganie z nich logicznie uzasadnionych wniosków jest przede wszystkim domeną prywatnych detektywów (i to przede wszystkim w powieściach i filmach), nie jest jednak wykluczone, że z czasem będziemy mogli powiedzieć, cytując Sherloka Holmesa: "Ależ to oczywiste, mój drogi Watsonie." mając na myśli promieniowanie kosmiczne.



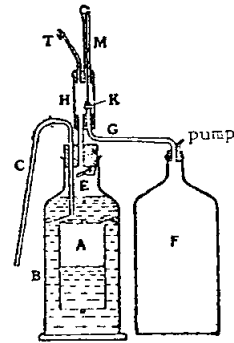
Rys. 1: Wiktor Hess patrzy w swój elektroskop w roku 1952.



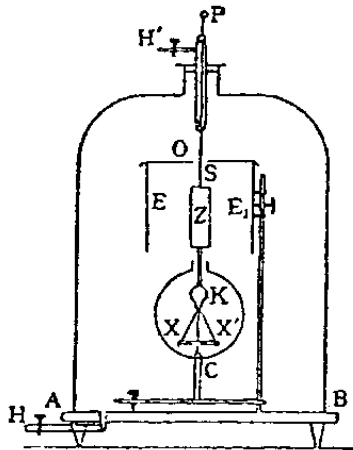
Rys. 2: Hess odkrywa promieniowanie kosmiczne.



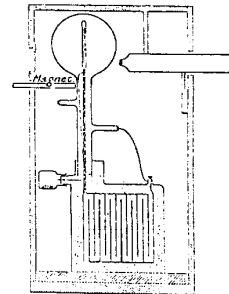
Rys. 3: Elektroskop Wulfa.



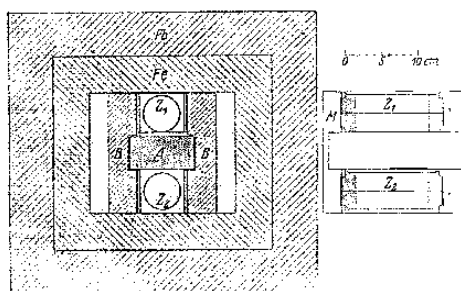
Rys. 5: Układ doświadczalny, na którym Wilson wykrył w 1896 roku związek pomiędzy kondensacją przesyconej pary i obecnością czynnika jonizującego. Pierwsza komora Wilsona.



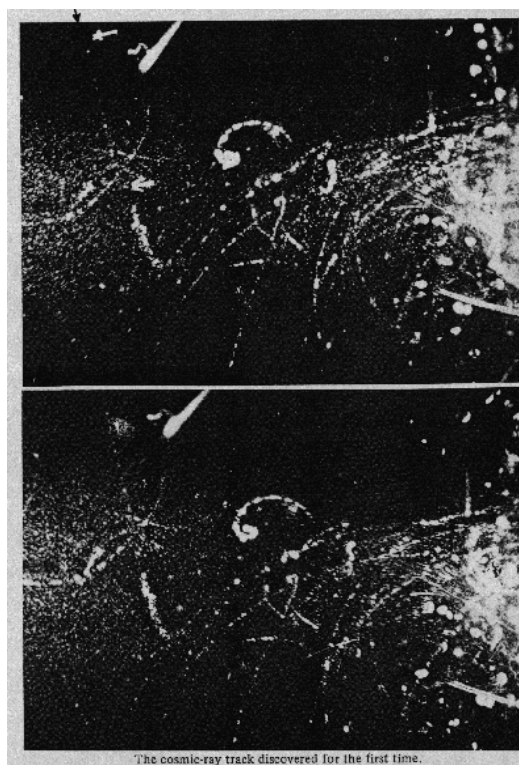
Rys. 4: Przyrząd, przy użyciu którego Geitel w roku 1890 stwierdził, że jony odpowiedzialne za istnienie prądu ciemnego produkowane są w sposób ciągły w powietrzu.



Rys. 6: Komora jonizacyjna użyta przez Wilsona w jego eksperymencie z poszukiwaniem promieniowania kosmicznego pod ziemią.



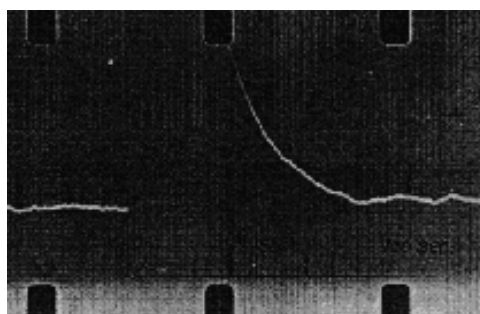
Rys. 7: Układ liczników G-M w doświadczeniu Bothego i Kolhörstera.



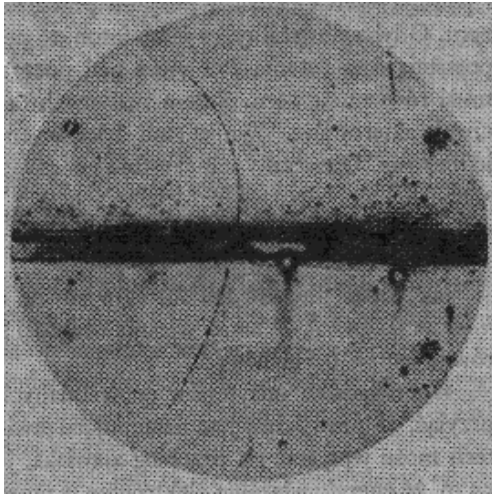
Rys. 9: Fotografie cząstek promieniowania kosmicznego wykonane przez Skobelcyna.



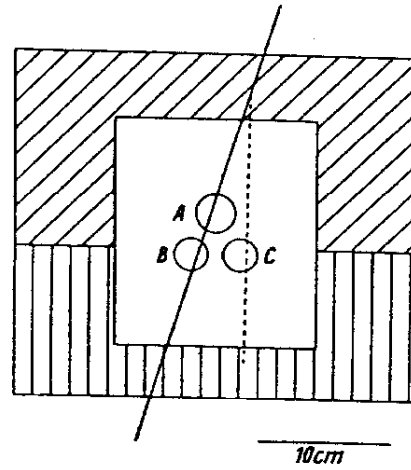
Rys. 8: Rejestracja koincydencji w doświadczeniu Bothego i Geigera z roku 1925. Odstęp czasu odpowiadający pionowym liniom jest równy 10^{-3} sekundy.



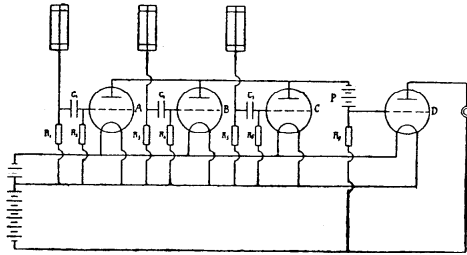
Rys. 10: Rejestracja WPA dokonana przez Carmichaela w roku 1933.



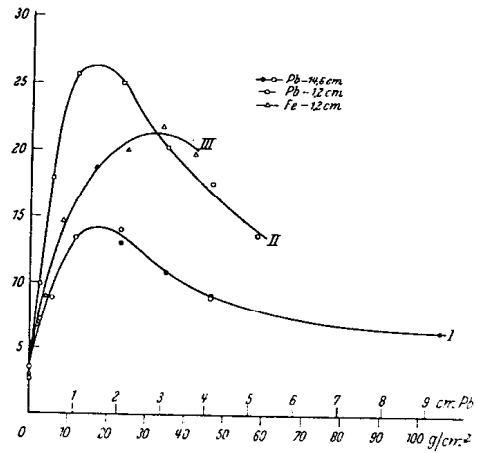
Rys. 11: Słynna fotografia śladu pozytonu wykonana przez Andersona w roku 1932.



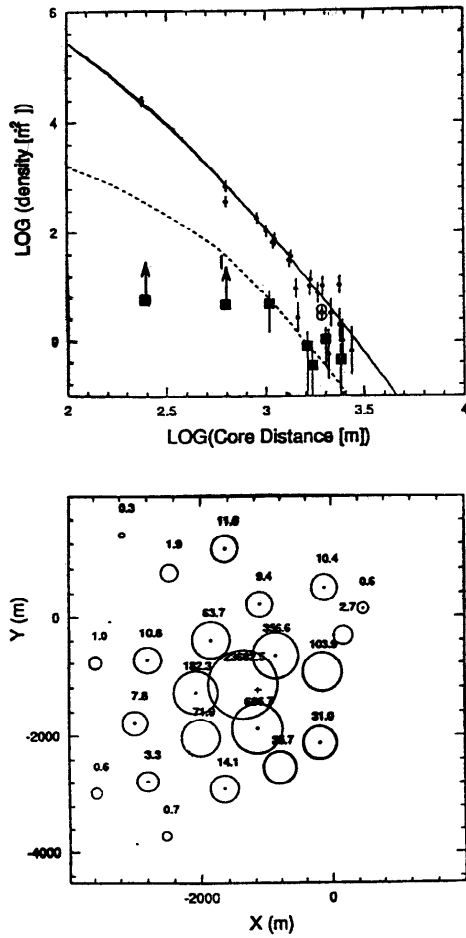
Rys. 13: Układ trzech liczników Rossiego w koincydencji.



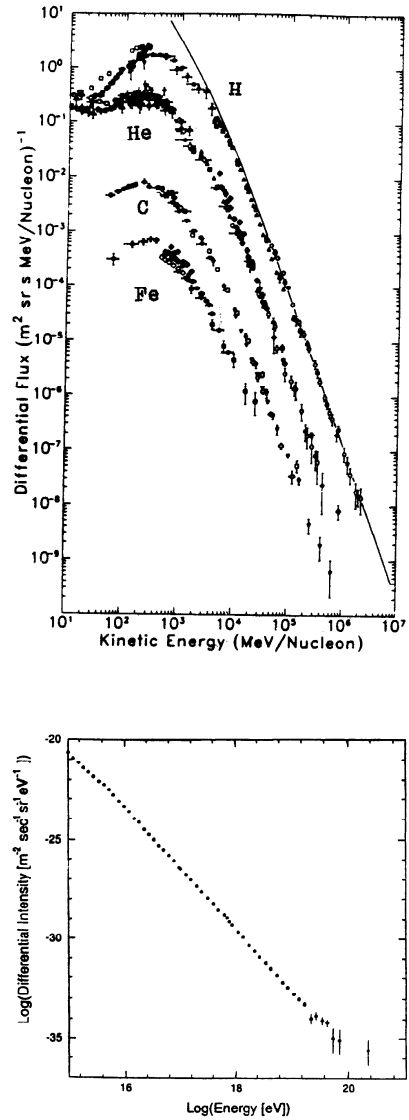
Rys. 12: Układ koincydencyjny wymyślony przez Rossiego.



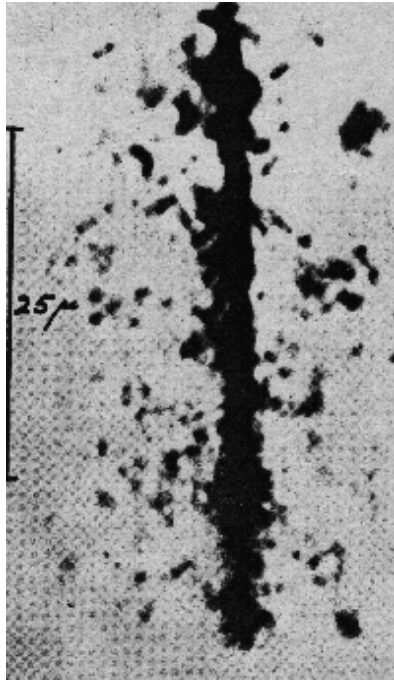
Rys. 14: Krzywa Rossiego: częstość koincydencji w funkcji grubości warstwy ołowiu przedzielającej liczniki.



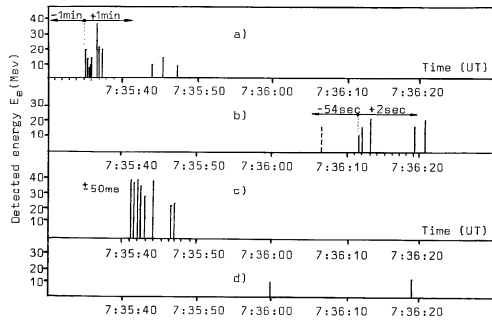
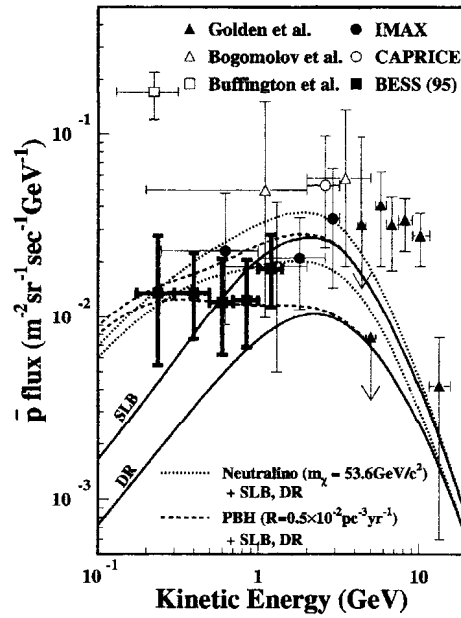
Rys. 15: Rejestracja wielkiego pęku zapoczątkowanego przez cząstkę promieniowania kosmicznego o najwyższej energii, jaką do tej pory zaobserwowano (górny rysunek pokazuje gęstości cząstek, a na dolnym promienie okręgów proporcjonalne są do logarytmu liczby cząstek w detektorach).



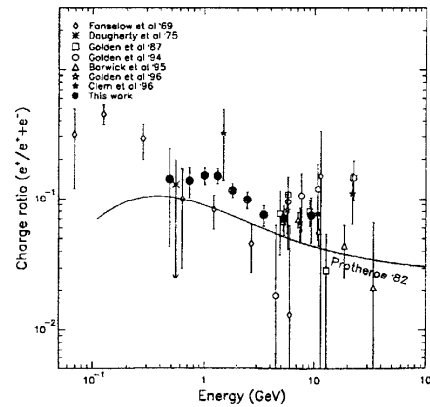
Rys. 16: Widmo energetyczne promieniowania kosmicznego. Część niskoenergetyczna z rozbiem na poszczególne pierwiastki i wysokoenergetyczna mierzona w eksperymencie AKENO.



Rys. 17: Jeden z pierwszych zaobserwowanych śladów ciężkiego jądra atomowego w promieniowaniu kosmicznym.



Rys. 18: Rejestracje neutronów z wybuchu supernowej 1987A z czterech różnych aparatur (Kamiokande, Baksan, IMB i Frejus).



Rys. 19: Pomiary antyprotonów i pozytonów promieniowania kosmicznego i ich porównanie z przewidywaniami rozmaitych teorii.