



Nagroda Nobla dla pionierów astrofizyki neutrinowej i rentgenowskiej

Marek Kutschera

Instytut Fizyki UJ i Instytut Fizyki Jądrowej

Nagrodę Nobla za rok 2002 w dziedzinie fizyki otrzymali trzech uczeni: **Raymond Davis Jr.** (USA) i **Masatoshi Koshiba** (Japonia), którzy podzielili się połową nagrody za „pionierski wkład do astrofizyki, w szczególności za wykrycie neutrin kosmicznych”, oraz **Riccardo Giacconi** (USA), za „pionierski wkład do astrofizyki, który doprowadził do odkrycia kosmicznych źródeł rentgenowskich” (druga połowa nagrody); cytaty za Szwedzką Akademią Nauk.

Prof. R. Davis, urodzony w 1914 r., jest z wykształcenia chemikiem. Doktorat z chemii fizycznej uzyskał w 1942 r. na Uniwersytecie Yale i od 1948 r. pracował w Brookhaven National Laboratory (BNL) w Departamencie Chemii. W 1984 przeszedł na emeryturę w BNL, ale od 1985 kontynuował pracę naukową na Uniwersytecie Pensylwanii w Filadelfii, gdzie obecnie jest profesorem emerytowanym.

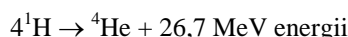
Prof. Masatoshi Koshiba (ur. 1926) otrzymał doktorat z fizyki w 1955 r. na Uniwersytecie w Rochester (USA). Jest profesorem emerytowanym w Centrum Fizyki Cząstek Elementarnych na Uniwersytecie w Tokio.

Prof. Riccardo Giacconi jest z pochodzenia Włochem, urodził się w 1931 r. w Genui. Doktorat zrobił w 1954 r. na Uniwersytecie w Mediolanie. Od 1959 pracował w USA w firmie American Science and Engineering, która prowadziła liczne projekty naukowe na zlecenie amerykańskiej agencji kosmicznej NASA. W latach 1981–1993 był dyrektorem centrum NASA zarządzającego kosmicznym teleskopem Hubble’a (Space Telescope Science Institute w Baltimore). Później był dyrektorem generalnym European Southern Observatory (ESO), europejskiego konsorcjum astronomicznego, które posiada kilka wielkich obserwatoriów w Chile (m.in. największy w tej chwili układ czterech współdziałających teleskopów VLT, od *Very Large Telescope*, w Obserwatorium Paranal). Obecnie R. Giacconi jest profesorem w Johns Hopkins University w Baltimore, a także prezesem organizacji Associated Universities, Inc., która administruje amerykańskim centrum radioastronomicznym NRAO – National Radio Astronomy Observatory.

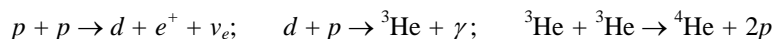
Tegoroczni laureaci są pionierami dwu dziedzin współczesnej astronomii: astrofizyki neutrinowej i astrofizyki rentgenowskiej. Dzięki ich entuzjazmowi, uporowi i wieloletniej pracy otwarte zostały dwa nowe „okna” do obserwacji kosmosu.

Astrofizyka neutrinowa

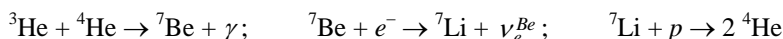
Powstanie tej gałęzi astrofizyki było odpowiedzią na wyzwanie, jakim stała się eksperymentalna weryfikacja hipotezy o termojądrowej naturze energii promieniowanej przez Słońce i inne gwiazdy. Idea, że energia ta pochodzi z przemian jądrowych, wiązana jest z nazwiskiem Sir Arthura Eddingtona, brytyjskiego astrofizyka, który używając wzoru Einsteina $E = mc^2$, pokazał, że przemiana czterech atomów wodoru w atom helu mogłaby dostarczyć energii promieniowanej przez Słońce. Bilans energetyczny reakcji syntezy helu byłby następujący:



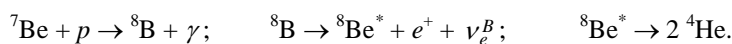
a więc ok. 0,7% masy spoczynkowej każdego atomu wodoru uległoby zamianie na energię. Minęło jednak prawie 20 lat, zanim Hans A. Bethe podał w 1939 r. teorię reakcji prowadzących do syntezy helu w Słońcu, które dziś nazywamy „łańcuchami pp ” (dalej jądro wodoru ^1H – proton – oznaczamy przez p , zaś deuteron, jądro deuteru ^2H , przez d):



– to łańcuch $pp\text{I}$. Jądro helu ^4He może powstać nie tylko w powyższej reakcji, ale i na drodze katalitycznej, za pomocą istniejących już jąder ^4He



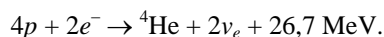
– to łańcuch $pp\text{II}$. Jądro ^7Be może też wejść w reakcję z protonem, co daje alternatywny sposób zakończenia syntezy helu, zwany łańcuchem $pp\text{III}$:



W łańcuchu reakcji termojądrowego spalania wodoru w Słońcu decydujące znaczenie ma pierwsze ogniwo, synteza deuteronu: $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$. Proces ten pokazuje kluczową rolę słabych oddziaływań w astrofizyce, zachodzi bowiem dzięki słabym oddziaływaniami. Przebieg tej reakcji wyobrażamy sobie tak, że proton podlega wirtualnej fluktuacji $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ (na co pozwala w mechanice kwantowej zasada nieoznaczoności Heinsenberga). Jeśli w tym czasie „odpowiednio blisko” znajdzie się drugi proton, to może on dzięki oddziaływaniom silnym związać neutron i utworzyć jądro deuteru. Uwolniona energia wiązania deuteronu powoduje, że pozyton e^+ i neutrino ν_e stają się cząstkami rzeczywistymi, pozyton szybko anihiluje z elektronem, ale neutrino ν_e swobodnie wydostaje się ze Słońca i może dotrzeć do Ziemi. Reakcja ta jest bardzo rzadka, gdyż aby zasza, oba protony muszą zbliżyć się do siebie na odległość działania sił jądrowych, rzędu kilku fm ($1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$). Przeszkadza temu bariera kulombowska, która dla dwu protonów w odległości 1 fm wynosi 1,4 MeV, zaś energia kinetyczna protonów w Słońcu jest rzędu 1 keV, co odpowiada temperaturze wnętrza Słońca ok. $15 \times 10^6 \text{ K}$. Bariera kulombowska przewyższa więc energię kinetyczną protonów kilkaset

razy. Tu znów z pomocą przychodzi mechanika kwantowa, która pozwala cząstkom tunelować przez tę barierę, dzięki czemu reakcja może zajść.

Bilans reakcji termojądrowego spalania wodoru ma postać:



Znając moc promieniowania Słońca $L_\odot \approx 4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ łatwo szacować, ile neutrin Słońce promieniuje w każdej sekundzie: $N_{\nu_e} \approx 5 \times 10^{38}/\text{s}$. Na Ziemi strumień neutrin wynosi $\Phi \approx 6 \times 10^{10} /\text{cm}^2\text{s}$. Aby móc przewidzieć wyniki eksperymentu, potrzebne są dokładne obliczenia widma energetycznego neutrin wytwarzanych w Słońcu. Dostarczają ich teoretyczne modele budowy Słońca, które są potwierdzone przez obserwacje heliosejsmologiczne wnętrza Słońca.

Początkowo fizycy byli sceptyczni co do możliwości wykrycia neutrin słonecznych z powodu niezmiernie małych przekrojów czynnych na oddziaływania słabe. Rejestracja tych cząstek byłaby niezwykle ważna, gdyż stanowiłaby bezpośrednie potwierdzenie hipotezy reakcji termojądrowych w Słońcu. Dałaby także możliwość „zajrzenia” do samego jądra Słońca, gdzie energia słoneczna jest wytwarzana. Raymond Davis był pierwszym uczonym, który uważał, że jest to możliwe. Eksperymenty radiochemiczne z neutronami wytwarzanymi w reaktorze jądrowym Davis rozpoczął już na początku lat pięćdziesiątych w Brookhaven, wykorzystując reakcję $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$, która zachodzić może dla neutrin o energii powyżej 0,81 MeV (to wartość tzw. progu energetycznego). Aparatura pomiarowa składała się ze zbiornika zawierającego 3900 litrów czterochloru węgla CCl_4 , który był tarczą naświetlaną przez neutrina z reaktora. Argon wytworzony w zbiorniku był wymywany za pomocą helu, który był przepuszczany przez ciecz w zbiorniku. Atomy argonu były usuwane z helu przez pułpkę węglową, zanurzoną w ciekłym azocie (-196°C), która zatrzymuje argon, a przepuszcza hel. Izotop argonu ${}^{37}\text{Ar}$ rozpada się poprzez wychwyt elektronu z czasem półrozpadu 35 dni. Do wykrywania elektronów Augera z rozpadu argonu używana była komora proporcjonalna.

Tę metodę radiochemiczną Davis postanowił wykorzystać do wykrycia neutrin słonecznych. Pomimo dużego strumienia neutrin ze Słońca ogromnym utrudnieniem w ich wykrywaniu jest ich mała energia: neutrina pp , które dominują, mają energie niniejsze niż 0,4 MeV, a jedynie ułamek rzędu 10^{-4} neutrin ma energie powyżej 5 MeV. Są to tzw. neutrina borowe, pochodzące z rozpadu jądra ${}^8\text{B}$, oznaczone jako ν_e^B w łańcuchu $ppIII$. Teoria słabych oddziaływań mówi, że przekroje czynne neutrin rosną wraz z energią. Do wykrycia niskoenergetycznych neutrin potrzebne są więc większe ilości atomów chloru (tarczy). Mając już odpowiednie doświadczenie z metodą radiochemiczną, Davis zaproponował eksperyment detekcji neutrin słonecznych, wykorzystujący 615 ton czterochloroetylenu C_2Cl_4 .

Zbiornik z ciecżą umieszczony został w kopalni złota Homestake (Dakota Pd.) na głębokości 1500 m. Budowa aparatury ukończona została w 1967 r.

Pierwsze wyniki, otrzymane po 150 dniach zbierania danych (argon był ekstrahowany przy użyciu helu ze zbiornika z C_2Cl_4 co dwa miesiące), dały górne ograniczenie na strumień neutrin słonecznych 3 SNU, co było wielokrotnie mniej, niż przewidywały ówczesne obliczenia. Jednostka, tradycyjnie używana do opisu ilości reakcji wywołanych przez neutrina słoneczne, SNU (od ang. *solar neutrino unit*), odpowiada zachodzeniu jednej reakcji na sekundę na 10^{36} atomów (chloru, w przypadku eksperymentu Davisa), $1 \text{ SNU} = 10^{-36}/s$. O skali wyzwania, przed jakim stanął Davis, najlepiej świadczy ilość 17 atomów argonu, jakie co dwa miesiące należało wydobyć spośród 2×10^{30} atomów chloru w zbiorniku! Metoda radiochemiczna okazała się jednak niezwykle skuteczna. Jej kluczowym elementem była wydajność ekstrakcji argonu. Proces ten został przez Davisa bardzo szczegółowo zbadany, co umożliwiło kontrolę nad źródłami ewentualnych błędów.

Eksperyment Davisa działał nieprzerwanie w latach 1970–1994. W tym czasie w zbiorniku powstało 2200 atomów argonu, z których 1997 zostało wydobytych, a 875 zostało zliczonych w liczniku proporcjonalnym. Szacuje się, że w tej liczbie 776 atomów pochodziło od neutrin słonecznych, natomiast 109 wyprodukowanych było przez procesy tła. Produkcja argonu w zbiorniku wyniosła $0,48 \pm 0,03$ (stat.) $\pm \pm 0,03$ (syst.) atomów dziennie, co daje $2,56 \pm 0,16$ (stat.) $\pm 0,16$ (syst.) SNU. Tę wartość należy porównać z teoretycznym przewidywaniem dla eksperymentu chlorowego $8,6 \pm 1,2$ SNU. Oznacza to, że eksperyment Davisa wykrył ok. 30% obliczonego teoretycznie strumienia neutrin słonecznych.

Raymond Davis jest pionierem, którego mistrzowska sztuka znajdowania kilku atomów wśród 10^{30} dała początek nowej dziedzinie fizyki, jaką jest astrofizyka neutrinowa. Odkrył on neutrina słoneczne, ale mierzony przez niego strumień zawsze był mniejszy od przewidywanego teoretycznie. Ten wynik dał początek „problemowi neutrin słonecznych”. Neutrino słoneczne wydają się znikać po drodze ze Słońca do detektora w kopalni Homestake. Sugeruje to istnienie nowej własności neutrin – niezerowej masy spoczynkowej. Neutrino obdarzone masą mogą „oscylować” pomiędzy różnymi rodzajami, elektronowym (ν_e), muonowym (ν_μ) i taowym (ν_τ), co tłumaczyć może deficyt neutrin elektronowych w eksperymencie Davisa, który nie jest czuły na inne rodzaje neutrin. Istnienie masy neutrin wykracza poza tzw. Model Standardowy cząstek elementarnych, zatem eksperyment Davisa otwiera także nowy rozdział fizyki neutrin jako lekkich (ale nie bezmasowych) leptonów.

Pionierska działalność Davisa pociągnęła za sobą cały szereg następnych eksperymentów neutrin słonecznych, spośród których wymienić należy GALLEX, SAGE Kamiokande, Super-Kamiokande i SNO. Dwa pierwsze eksperymenty miały charakter radiochemiczny, podobnie jak eksperyment Davisa, ale ich substancją czynną był izotop galu ^{71}Ga , który w reakcji wychwytu neutrina przechodzi w ger-

man ^{71}Ge . Próg tej reakcji jest znacznie niższy, ok. 0,233 MeV, zatem eksperymenty galowe są czułe na neutrino pp (o energii poniżej 0,4 MeV). GALLEX po raz pierwszy zarejestrował te neutrino. Ich strumień okazał się także niższy prawie o połowę od przewidywań teoretycznych. Nie ma tu miejsca, aby o tych eksperymentach pisać szczegółowo (zainteresowanych czytelników odsyłam do artykułu w *Postęпах Fizyki* [1]), ale warto przynajmniej przedstawić wynik eksperymentu prowadzonego w Sudbury Neutrino Observatory (SNO) w Kanadzie, gdzie działa nowy detektor ciężkowodny, czuły na wszystkie rodzaje neutrin. Deuter, obecny w ciężkiej wodzie, może służyć do wykrycia neutrin elektronowych w reakcji $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$, zachodzącej przez prąd naładowany, oraz do pomiaru całkowitego strumienia neutrin (wszystkich trzech rodzajów) w reakcji rozbitcia deuteronu na proton i neutron $\nu_i + d \rightarrow p + n + \nu_i$, $i = e, \mu, \tau$, zachodzącej przez prądy neutralne. Wyniki eksperymentu, ogłoszone w kwietniu 2002, pokazują zgodność (w granicach błędów) całkowitego strumienia neutrin docierającego do detektora SNO z przewidywaniami modeli słonecznych. Jednak tylko 1/3 neutrin to neutrino elektronowe. Pomiar SNO w pełni potwierdza wyniki eksperymentu Davisa, a jednocześnie wyjaśniają wartość strumienia neutrin słonecznych, zarejestrowanego w tym eksperymencie. Mamy po raz pierwszy tak silny dowód oscylacji neutrin, co jest w praktyce równoważne dowodowi istnienia niezerowej (choć zapewne bardzo małej) masy spoczynkowej neutrin. Dalsze badania pozwolą odpowiedzieć na pytanie, które rodzaje neutrin są masywne i jaki jest mechanizm oscylacji, a także czy istnieją inne rodzaje tych ciągle ogromnie tajemniczych cząstek (np. neutrino sterylne).

Drugi z tegorocznych laureatów, Japończyk **Masatoshi Koshi**, na początku lat osiemdziesiątych XX wieku zainicjował eksperyment Kamiokande, którego oryginalnym celem było poszukiwanie rozpadu protonu (Kamioka Nucleon Decay Experiment). Zaprojektowany przez Koshibę detektor składał się z ogromnego zbiornika, zawierającego 2140 ton bardzo czystej radiochemicznie wody, umieszczonego w kopalni Kamioka, na głębokości 1000 m. Zbiornik wody otoczony był ponad tysiącem fotopowielaczy, których zadaniem była rejestracja promieniowania Czerenkowa ewentualnych produktów rozpadu protonu. Oryginalny cel eksperymentu nie został osiągnięty, ale M. Koshi postanowił przystosować eksperyment do detekcji neutrin ze Słońca. Koshi jest pionierem w zastosowaniu do wykrywania neutrin kosmicznych wodnych detektorów Czerenkowa, których ogromną zaletą jest możliwość ustalenia kierunku nadejścia neutrina. Detektory te działają w czasie rzeczywistym, co pozwala na rejestrację każdego przypadku.

W eksperymencie Kamiokande neutrino wykrywane były przez elastyczne rozpraszanie na elektronach:

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-.$$

Elektrony, które wskutek tego rozproszenia uzyskały odpowiednio dużą energię, emitują promieniowanie Czerenkowa, wykrywane przez fotopowielacze. Minimalna energia elektronu, pozwalająca na jednoznaczny identyfikację, wynosiła 8 MeV. Eksperyment Kamiokande mógł więc wykryć tylko neutrino pochodzące z rozpadu jąder ${}^8\text{B}$. Dzięki wrażliwości na kierunek przychodzenia neutrin eksperyment Kamiokande dał ostateczny dowód, że Słońce emituje neutrino. Pomiar strumienia neutrin słonecznych wykazał deficyt w porównaniu z przewidywaniami modeli Słońca: zmierzony strumień stanowił około połowy wartości obliczonej, $\Phi_{\text{obs}}/\Phi_{\text{obl}} = 0,46 \pm 0,13$ (stat.) $\pm 0,08$ (syst.). Wielkość deficytu zmierzona przez Kamiokande jest inna niż w eksperymencie Davisa – co można interpretować jako argument za zależnością energetyczną mechanizmu oscylacji neutrin, jak np. w modelu Mikheeva i Smirnowa.

Eksperyment Kamiokande odegrał przełomową rolę w innej dziedzinie astrofizyki: po raz pierwszy wykrył neutrino pochodzące z wybuchu supernowej. Supernowa SN1987A pojawiła się w Wielkim Obłoku Magellana 23 lutego 1987 r. W tym dniu o godz. 7:35:35 UT detektor Kamiokande zarejestrował błysk neutrinowy, trwający ok. 20 s i składający się z 12 neutrin, które dotarły do detektora ok. 3 godz. przed pojawieniem się na niebie optycznej supernowej. Obserwacja neutrin potwierdziła teorię wybuchu supernowej typu II, która jest wynikiem grawitacyjnego zapadnięcia się rdzenia wypalanej termojądrowej gwiazdy. Rdzeń taki, zbudowany głównie z jąder żelaza ${}^{56}\text{Fe}$, po przekroczeniu granicznej masy Chandrasekhara traci stabilność i zapada się w ułamku sekundy do gwiazdy neutronowej. Uwolniona energia grawitacyjna wypromieniowana jest głównie w postaci neutrin, które unoszą w krótkim czasie energię 10^{53} ergów. Neutrino powstają głównie podczas neutronizacji materii oraz stygnięcia gorącej protogwiazdy neutronowej. Neutronizacja następuje przez reakcję odwrotną do rozpadu β neutronu, $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$. Reakcja ta zachodzi, gdy potencjał chemiczny elektronów spełnia warunek $\mu_e > (m_n - m_p)c^2$, co ma miejsce w czasie kolapsu, gdy potencjał chemiczny elektronów szybko rośnie wskutek wzrostu gęstości materii, $\mu_e \sim \rho^{5/3}$. Utworzony po zahamowaniu kolapsu obiekt, zwany protogwiazdą neutronową, stygnie przez emisję par neutrino-antyneutrino. Modele teoretyczne przewidują, że średnia energia neutrin wynosi ok. 10–20 MeV. Energie neutrin, zarejestrowane przez detektor Kamiokande, są zgodne z tymi przewidywaniami.

Koshiba był inicjatorem budowy eksperymentu Super-Kamiokande, w którym masa wody została powiększona do 50000 ton, a liczba fotopowielaczy do 10 000. Eksperyment ten ruszył w 1996 r. i szybko przyniósł pierwsze wyniki wskazujące na oscylacje neutrin [2], a także dostarczył szczegółowych informacji o neutrinach słonecznych [2]. W listopadzie 2001 r. nastąpił wypadek wywołany implozją jednego z fotopowielaczy, który spowodował duże straty, i obecnie eksperyment Super-

-Kamiokande jest nieczynny. Informacje o tym eksperymencie można znaleźć na stronie internetowej [2].

Astrofizyka rentgenowska

Riccardo Giacconi został nagrodzony za pionierski wkład w rozwój astrofizyki rentgenowskiej, która pozwala nam obecnie widzieć obraz Wszechświata w świetle rentgenowskim. Dzięki teleskopom rentgenowskim i detektorom CCD możemy w sensie dosłownym oglądać niebo w tym niewidzialnym dla oka zakresie energii fotonów [3]. Ta gałąź astrofizyki powstała dopiero pół wieku po odkryciu przez Röntgena promieniowania nazwanego jego imieniem – za to odkrycie Wilhelm Röntgen otrzymał pierwszą Nagrodę Nobla z fizyki w 1901 r. Głównym powodem późnego początku astronomii rentgenowskiej było zupełne pochłanianie promieniowania rentgenowskiego przez atmosferę ziemską.

Możliwość badań astronomicznych w tym obszarze widma promieniowania elektromagnetycznego pojawiła się dla naukowców po II wojnie światowej, gdy niemieckie rakiety V2 zostały przewiezione do USA. Za początek ery astrofizyki rentgenowskiej należy uznać rok 1949, kiedy to Herbert Friedman z laboratorium badawczego marynarki USA (NRL – Naval Research Laboratory) odkrył promieniowanie rentgenowskie Słońca, wysyłając licznik Geigera na pokładzie rakiety ponad gęste warstwy atmosfery. Promieniowanie to pochodzi z korony słonecznej, która ma temperaturę kilku milionów kelwinów, oraz z obszarów plam słonecznych i erupcji na powierzchni Słońca. Wydawało się wówczas, że szanse na badanie innych gwiazd są niewielkie, gdyż czułość detektorów musiałaby być 100 razy większa, aby wykryć promieniowanie rentgenowskie najbliższej gwiazdy (gdymy było takie jak Słońca).

Poważnym problemem były także początkowe trudności w uzyskaniu informacji o kierunku promieniowania rentgenowskiego. Dopiero w latach dwudziestych XX wieku pokazano, że promieniowanie rentgenowskie ulega załamaniu oraz że przy bardzo małym kącie padania następuje całkowite wewnętrzne odbicie. Odkrycie to pozwoliło na skonstruowanie rentgenowskiej optyki obrazującej, po raz pierwszy zastosowanej w mikroskopie rentgenowskim w latach pięćdziesiątych.

W 1959 r. Riccardo Giacconi został zatrudniony w firmie American Science and Engineering, współpracującej z NASA, w której prezesem był Bruno Rossi, fizyk promieni kosmicznych ze słynnej uczelni Massachusetts Institute of Technology (MIT) w Bostonie. Zainspirowani mikroskopem rentgenowskim Giacconi wraz z Rossim opracowali wówczas zasady budowy teleskopu rentgenowskiego. Ich projekt systemu optycznego zawierał układ współosiowych parabolicznych zwierciadeł, które skupiałyby wiązkę równoległych promieni rentgenowskich dzięki całkowitemu odbiciu promieni padających prawie równolegle do powierzchni zwierciadła (używany tu ang. termin *grazing reflection* dosłownie oznacza „mus-

kające odbicie”). Idea ta została w kilka lat później wypróbowana w praktyce przez Giacconiego i jego zespół. Jednak pierwsze eksperymenty raketowe, mające na celu wykrycie fluorescencji rentgenowskiej Księżyca wywołanej przez promienie rentgenowskie ze Słońca, zespół Giacconiego wykonał w 1962 r. przy użyciu trzech liczników Geigera wystrzelonych na pokładzie rakiety Aerobee. Promieniowania Księżyca nie udało się wykryć, ale odkryto niespodziewanie bardzo silne źródło położone znacznie dalej, dające zliczenia 100 fotonów/s. Obiekt ten nazwano później Scorpius X-1. Wkrótce Giacconi i współpracownicy odkryli kilka innych źródeł, m.in. trzy źródła w gwiazdozbiornie Łabędzia (Cygnus), Cyg X-1, X-2, X-3, a jednym z nich była mgławica w Krabie, będąca pozostałością po supernowej z 1054 r.

Perspektywy odkrycia źródeł rentgenowskich poza Układem Słonecznym oceniane były pesymistycznie, na podstawie oceny termicznej emisji rentgenowskiej znanych rodzajów gwiazd, która jest znacznie mniejsza od emisji optycznej. Odkrycia dokonane przez Giacconiego pokazały, że obiekty takie, jak Sco X-1 (zidentyfikowany z gwiazdą 13. wielkości), emitujące tysiące razy więcej energii w zakresie rentgenowskim niż w świetle widzialnym, stanowią całkiem nowy i nieznan dotąd rodzaj źródeł. Mgławica Krab okazała się być 10 mld razy silniejszym źródłem rentgenowskim niż Słońce. W ciągu następnych kilku lat zespół Giacconiego i grupa Friedmana z NRL odkryły łącznie ok. 50 źródeł za pomocą eksperymentów raketowych i balonowych (w tym grupa z NRL odkryła pierwsze źródło pozagalaktyczne w galaktyce M67 oraz pulsujące promieniowanie rentgenowskie z pulsara w Krabie o tej samej częstotliwości co pulsy optyczne i radiowe, 30 Hz).

Dla uzyskania dłuższych czasów obserwacji, niż było to możliwe w eksperymentach raketowych, trwających po kilka minut, Giacconi zainicjował w 1963 r. budowę pierwszego satelity rentgenowskiego, UHURU, który został wystrzelony w 1970 z Kenii (*uhuru* w języku swahili to wolność). Satelita ten był wyposażony w dwa zestawy czułych liczników proporcjonalnych. Wykonał on pierwszy rentgenowski przegląd nieba z czułością 1/1000 natężenia promieniowania z mgławicy Kraba. Liczba źródeł szybko przekroczyła 300, a zaskoczeniem była nieoczekiwanie duża liczba gwiazd podwójnych ze zwartymi towarzyszami, takich jak Centaurus X-1. Obiekt ten jest gwiazdą neutronową na orbicie wokół gorącego nadolbrzyma. Gwiazda neutronowa ściąga materię z olbrzyma, która zanim na nią spadnie tworzy dysk akrecyjny. Promieniowanie rentgenowskie generowane jest przez gorącą materię wirującą w dysku oraz hamującą na powierzchni gwiazdy neutronowej. Źródło Sco X-1 okazało się być podobnym układem podwójnym. Słynne źródło Cyg X-1 było pierwszym kandydatem na układ podwójny zawierający czarną dziurę o masie kilku mas Słońca. Niestety, fakt, że towarzyszem hipotetycznej czarnej dziury jest w tym przypadku masywny nadolbrzym, powoduje duży błąd w wyznaczeniu jej masy.

Wkrótce nastąpiła prawdziwa eksplozja obserwacji rentgenowskich. Różne konsorcja naukowe wybudowały i umieściły na orbicie dziewięć nowych satelitów. Dostarczyły one wielu interesujących obserwacji. Ważnym wynikiem było odkrycie rozbłysków rentgenowskich, wskazujących na zachodzenie wybuchów termojądrowych na powierzchni gwiazd neutronowych, a także zaobserwowanie szybkich zmian strumienia rentgenowskiego z radiogalaktyki Centaurus A, świadczącego o tym, że emisja rentgenowska pochodzi z zadziwiająco małych obszarów w centrum galaktyki.

Pierwszy teleskop rentgenowski o rozdzielczości 2 sekund łuku został umieszczony na orbicie na pokładzie satelity HEAO-2, nazwanego po starcie „Einstein X-ray Observatory”. Teleskop został zaprojektowany i wykonany pod kierunkiem Giacconiego – projekt ten był zatwierdzony przez NASA w 1965 r., ale udało się go zrealizować dopiero w 1978 r., kiedy to satelita „Einstein” został wystrzelony. Na jego pokładzie oprócz teleskopu z wydajnymi kamerami znajdowały się czułe spektrometry o dużej rozdzielczości widmowej. Misja Obserwatorium „Einstein” okazała się wielkim sukcesem. Czułość instrumentów była 1000 razy wyższa niż na pokładzie satelity UHURU. Zespół Giacconiego mógł obserwować źródła milion razy słabsze niż Sco X-1. Obserwatorium „Einstein” dostarczyło mnóstwo wyników dla zespołu Giacconiego, a także wykonywało obserwacje na zamówienie innych astronomów, którym w drodze konkursu przyznano czas obserwacyjny. Po raz pierwszy zbadano słabe źródła promieniowania rentgenowskiego, takie jak atmosfery zwykłych gwiazd. Duża zdolność rozdzielcza pozwoliła na wykonanie map obiektów rozciągniętych, takich jak pozostałości po supernowych. Widma rentgenowskie tych obiektów pokazały, że są one wzbogacone o cięższe pierwiastki, wytworzone przez eksplodujące gwiazdy. Wśród odkryć wymienić należy strumienie rentgenowskie z aktywnych jąder sąsiednich galaktyk radiowych i promieniowanie rentgenowskie kwazarów.

Zanim jeszcze Obserwatorium „Einstein” znalazło się na orbicie, w 1976 r. Giacconi i H. Tananbaum zgłosili do NASA projekt nowego teleskopu rentgenowskiego AXAF (Advanced X-ray Astronomical Facility). Teleskop ten miał być dalszym ulepszeniem modelu z „Einsteina”, o rozdzielczości pół sekundy łuku, podobnej do optycznych teleskopów. Czułość miała być znacznie większa, posiadać miał on układ kamer z detektorami CCD i czułe spektrometry. Teleskop został – po wieloletnich opóźnieniach – wyniesiony na orbitę w lipcu 1999 r. i ochrzczony imieniem Chandra (ku czci S. Chandrasekhara). Chandra dostarczył już wiele bardzo cennych wyników [3]. Także europejski orbitalny teleskop rentgenowski XMM-Newton dostarcza nowe dane od dwu lat. Oba urządzenia to obserwatoria rentgenowskie nowej generacji o niespotykanych wcześniej możliwościach.

Astrofizyka rentgenowska zmieniła zasadniczo nasze poglądy na temat Wszechświata. Satelity rentgenowskie odkryły nowe klasy obiektów, w których zachodzą gwałtowne zjawiska o bardzo dużych energiach, z istnienia których wcześniej nie

zdawaliśmy sobie sprawy. Ich własności wskazują na obecność zwartych obiektów, gwiazd neutronowych i/lub czarnych dziur, posiadających ekstremalnie silne pola grawitacyjne i magnetyczne. Odkryto istnienie plazmy o temperaturze rzędu setek milionów kelwinów. Dziś obserwacje rentgenowskie są podstawową metodą badań fizyki gwiazd neutronowych, czarnych dziur i gorącego gazu międzygalaktycznego. Znalaziono tysiące źródeł promieniowania rentgenowskiego, w tym bardzo egzotyczne układy podwójne, takie jak „burstery” rentgenowskie, czy nowe rentgenowskie, będące kandydatkami na czarne dziury. Obserwacje rentgenowskie dają coraz jaśniejszy obraz dynamiki aktywnych jąder galaktyk jako obiektów zdominowanych przez supermasywne czarne dziury. W zakresie rentgenowskim udało się zaobserwować także gromady galaktyk – 300 z nich odkrył satelita „Einstein”. Obecnie obserwacje te stanowią najlepszą ewidencję obecności ciemnej materii.

W obszernym uzasadnieniu werdyktu Szwedzka Akademia Nauk wymienia trzech uczonych, którzy wnieśli największy wkład do powstania i rozwoju astrofizyki rentgenowskiej. Są to Herbert Friedman i Riccardo Giacconi, a także Bruno Rossi, którzy byli twórcami metod i instrumentów do obserwacji promieniowania rentgenowskiego z kosmosu zastosowanych przez nich samych i rzesze ich następców do lepszego poznania Wszechświata, co zaowocowało bardzo wieloma odkryciami. Friedman i Rossi już nie żyją. Giacconi, inicjator budowy pierwszego satelity rentgenowskiego i pierwszego teleskopu rentgenowskiego, otrzymuje nagrodę także w imieniu pozostałych „ojców założycieli” tej dziedziny astrofizyki.

Przygotowując ten artykuł, autor wykorzystał materiały udostępnione przez Szwedzką Królewską Akademię Nauk [4].

Referencje:

- [1] M. Wójcik, M. Misiaszek i G. Zuzel, *Postępy Fizyki*, 2002, w druku
- [2] <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/icepp-e.html>
- <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk>
- [3] <http://chandra.harvard.edu>
- [4] <http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/index.html>

Redakcja poleca:

K. Fiałkowski, „Nagroda Nobla 2002”, *Foton* 79, 2002