

# Neutrinski sindrom "podvojene osobnosti" i Nobelova nagrada za fiziku neutrina

---

Picek, Ivica

Source / Izvornik: **Matematičko fizički list, 2003, 211, 176 - 185**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:467228>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

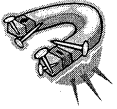
Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





## OSCILACIJE NEUTRINA

### Neutrinski sindrom “podvojene osobnosti” i Nobelova nagrada za fiziku neutrina

Ivica Picek\*, Zagreb

Polovicu Nobelove nagrade iz fizike za 2002. godinu podijelili su *Raymond Davis Jr.* s Pensilvanijskog sveučilišta u Philadelphiji i *Masatoshi Koshiha* s Tokijskog sveučilišta, “za pionirske doprinose astrofizici, posebice za detekciju kozmičkih neutrina”. Davisovo mjerenje manjka sunčevih neutrina i Koshibino ustanovljavanje manjka neutrina proizvedenih u atmosferi Zemlje ukazuju na *neutrinske oscilacije* kao novi fenomen u prirodi. Riječ je o prijelazu neutrina jedne vrste u neutrine druge vrste, pojavi s dalekosežnim posljedicama, koja se proučava u nizu laboratorija diljem svijeta.

### Uvođenje i potvrda postojanja “eluzivne čestice”

U vrijeme uvođenja neutrina kao hipotetičke nove čestice, jedine su poznate elementarne čestice bile proton i elektron. To je vrijeme izučavanja prirodne radioaktivnosti iza koje se skrivala nova (*slaba*) sila koja utjelovljuje san alkemičara – pretvorbu kemijskih elemenata. Očekivalo se da elektron koji biva otpušten pri prijelazu početne atomske jezgre (roditeljice) u konačnu jezgru (kćerku) odnosi dobro definiranu (diskretnu) energiju. Međutim, Chadwick (1914.) ustanovljava kontinuirani spektar beta zračenja, što bi po Bohru moglo značiti da smo po prvi put naišli na procese u kojima energija nije očuvana. Da bi izbjegao takvo što, Pauli (1930.), u očajničkom pokušaju spašavanja veze spina i statistike te očuvanja energije, povjerava sudionicima znanstvenog sastanka u Tübingenu svoju hrabru hipotezu nove čestice. U čuvenom pismu koje započinje s “Dear radioactive ladies and gentlemen”, iznosi prijedlog da u atomskoj jezgri postoji nova neutralna čestica spina  $1/2$ , “*neutron*”. Nakon što je Chadwick 1932. otkrio pravi neutron, Fermi (1934.) ugrađuje Paulijevu neuhvatljivu česticu u svoju teoriju slabe sile i naziva je *neutrinom* (malim neutronom).

Na osnovi novoutemeljene slabe sile bilo je moguće shvatiti porijeklo energije Sunca, ali i predvidjeti da je Sunce snažni izvor neutrina. Desetljeće nakon što je Gamow izveo formulu kvantno-mehaničkog tuneliranja, koja predviđa mogućnost prevladavanja kulonskog odbijanja protona, Hans Bethe je ustanovio tzv. *pp lanac* fuzije četiriju vodikovih atoma u atom helija (za to mu je dodijeljena Nobelova nagrada za 1976.

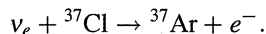
\* Autor je redoviti profesor teorijske fizike. Bavi se problemima fizike elementarnih čestica u pristupu teorije polja te dodirnim točkama fizike čestica i kozmologije, <http://www.phy.hr/~picek/>.

godinu), kao dominantni izvor sunčeve energije. Takvom fuzijom 1 kg vodika u nešto manje od kilograma helija oslobađa se  $6 \cdot 10^{14}$  J energije. Dva posto te goleme energije odnose neutriini, dok se ostatak izrači putem svjetlosti. No dok se od svjetlosti možemo štititi, neutrine je praktički nemoguće zaustaviti. Proračun koji su proveli Bethe i Peierls (1934.) pokazao je da su za neutrine potrebne sunčane naočale debljine 1000 svjetlosnih godina! Lov na tako eluzivne čestice činio se beznađnim.

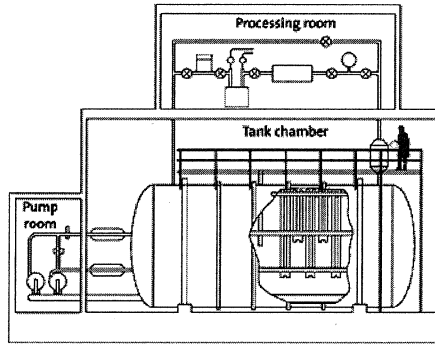
Nadu je probudilo puštanje u rad fisionih nuklearnih reaktora u čijoj blizini tok neutrina stostruko premašuje tok onih odaslanih sa Sunca. Primjerice, na 100 m udaljenosti od reaktora snage 3 GW protiče svake sekunde 600 milijardi antineutrina kroz  $\text{cm}^2$  površine. Reinesu i Cowanu je u mjerenjima između 1954. i 1956. uspjelo opaziti neutrine putem inverznog beta procesa (Nobelova nagrada Fredericku Reinesu za 1995. za otkriće *prvog* neutrina, opisano u MFL 3/183, 1995. – 96). No u 50-tim nije bilo jasno jesu li neutriini i antineutriini različite čestice i kako to ustanoviti. U Reinesovom pokusu riječ je o antineutrinima, čijim se uhvatom na jezgrama vodika stvaraju neutroni i pozitroni, u skladu s Fermijevom teorijom. Drugo pitanje, koje su otvorili akceleratori pokusi, odnosilo se na neutrine stvorene u paru s mionima. Da je riječ o neutrinima *druge generacije* (*mionskim* neutrinima, različitim od *elektronskih*) pokazali su pokusi nagrađeni Nobelovom nagradom za 1988. (podijelili su je Leon Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger). Od tada, u razmacima od po sedam godina, bilježimo Nobelove nagrade za neutrine, Reinesu 1995. i ovogodišnje Davisu i Koshibi. U pravilu, istraživanja koja su dovela do tako nagrađenih otkrića, utiru put novonadolazećim otkrićima. U ovom slučaju, nakon otkrića zasebnih neutrinjskih vrsta (*okusa*  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ), uslijedilo je otkriće “podvojene osobnosti” (*oscilacije okusa*) neutrina, kao jednog od neobičnijih fenomena u prirodi: neutriini koji su u nekoj reakciji stvoreni kao elektronski neutriini  $\nu_e$ , dolaze do detektora u svojoj točki oscilacije u kojoj nisu 100%  $\nu_e$ . Detektor koji je podešen na hvatanje  $\nu_e$  bilježit će njihov manjak.

### Davisov radiokemijski pokus

Reines-Cowanov pokus nije bio jedini koji se oslanjao na (anti)neutrine iz fisionih procesa u nuklearnim reaktorima. Luis Alvarez je 1949. planirao provesti pomoću reaktora uhvat neutrina klorom, kako je to 1946. predložio Bruno Pontecorvo. Na kraju, takav je pokus stvarno postavio Raymond Davis Jr. kod jednog od reaktora u području Savannah Rivera u SAD. Pokus je od samog početka davao negativne rezultate. Danas razumijemo zašto je izostajao očekivani signal konverzije klora u argon: Pokus se temeljio na pretpostavci da su neutriini i antineutriini identične čestice. Nakon spoznaje da to nije nužno ispunjeno, Davis se okreće mjerenju neutrina iz fuzionih procesa na Suncu, na kakve je osjetljiv Pontecorvov proces:

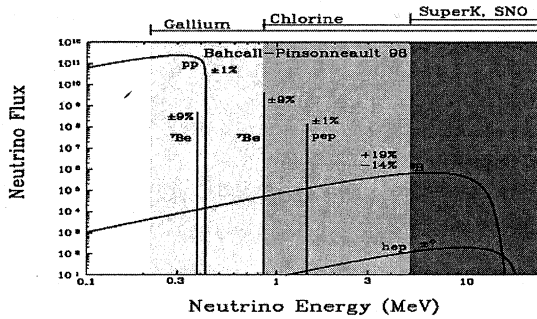


Tom se reakcijom proizvodi radioaktivni izotop argona koji prelazi natrag na klor, s poluzivotom od 35 dana. Trebalo je razviti tehnike separacije radioaktivnih atoma argona i njihova brojanja Geigerovim brojačem. Sam Pontecorvov uhvat ima ekstremno malu vjerojatnost pa se to nadoknađuje s velikim volumenom klora koji hvata neutrine. U Homestake pokusu (sl. 1), spremnik sa 600 tona tetraklorida smješten je u rudniku zlata na dubini 1560 m.



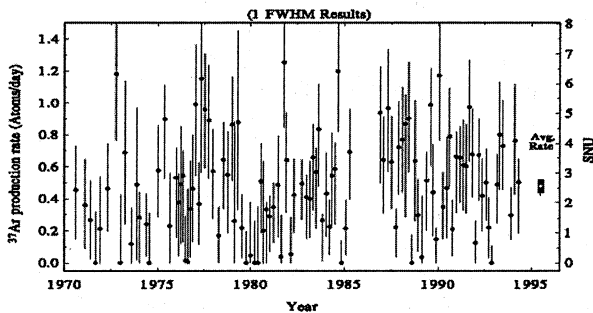
Sl. 1.

Budući da reakcija klora u argon ima prag od 0.81 MeV, ona ne može biti ostvarena niskoenergijskim primarnim neutrinima *pp* lanca, u kojima je Sunce najizdašnije. Napredak postignut u izučavanju procesa na Suncu pokazao je da se radiokemijska metoda može osloniti na neutrine emitirane boronom-8, koji dosežu 14 MeV (sl. 2).



Sl. 2.

Ipak, signal neutrinog uhvata je izostajao sve do nalaženja metode razlikovanja raspada argona od pozadinskih događaja. Od uvođenja te metode 1970, mjesečno se na  $2 \cdot 10^{30}$  klorovih atoma u spremniku registrirala proizvodnja od dvadesetak atoma argona (sl. 3). U četvrt stoljeća koliko je trajao pokus, ukupno je ekstrahirano oko 2000 atoma argona.

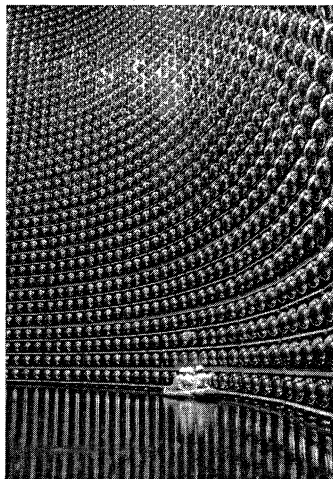


Sl. 3.

Izraženo solarnim neutrinским јединицама (1 SNU одговара једном ухвату у секунди на 1036 атома мете), мјерено је  $2.56 \pm 0.16(\text{stat.}) \pm 0.16(\text{syst})$  SNU. У успоређби с теоријским оћекивањем од 8.6 SNU које се темелји на познавању процесa у Сунцу, установљена је тек трећина соларног флукса неутрина од борона-8. Та загонетка мањка соларних неутрина била је потајем покретања нових покуса. Исти мањак неутрина опажен је у каснијим сличним покусима конверзије галија у германиј, гдје праг од 0.23 MeV допушта осјетљивост на неутрине нижих енергија (види сл. 2). Коначна потврда Дависовог резултата за високоенергијске неутрине борона-8 стгла је с потпуно различитог експеримента у Јапану.

### Koshibin Kamiokandeov eksperiment

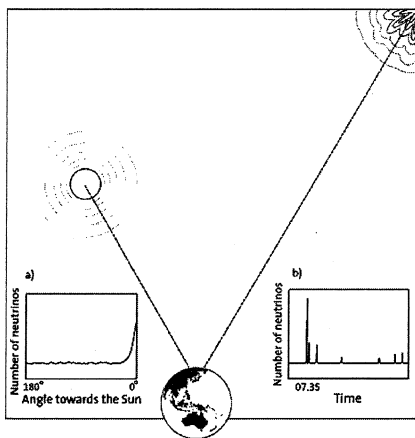
Уз експеримент Kamiokande везана су два медијски експонирана догађаја: опажање супранове SN87A од 23. велјаће 1987. и хаварије детектора од 12. студеног 2001. којом је на неко вријеме несретно заустављен тај сјајни покус. Изворно, Kamiokande је замишљен као детектор Љеренковљева свјетла путем којегa би се могао опазити распад протона. Наиме, набийене честице које се појављују као производи распada протона (примјерице позитрон из процесa  $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ ) носе голему енергију и doseжу у води брзину која премашује вриједност брзине свјетлости у води. Да би детектирао карактеристичну (Љеренковљеву) свјетлост коју израче такве честице, Masatoshi Koshiba је у рудник на дубину 1 km смјестио спремник с 2140 тона воде окружен фотомултипликаторима за детектирање појединачних фотона. Да би снизио праг осјетљивости на процесe нижих енергија од one из распada протона, Koshiba је морао конструирати осјетљивије фотомултипликаторе с цијевима великог промјера. С 1100 цијеви промјера 50 cm у првој фази је doseгнут праг од 30 MeV, што је довољно за догађаје изазване налетом козмићких неутрина, али недovoljno за опажање сунчевих неутрина. Уз значајна побољшања крајем 1986. је doseгнут Kamiokande II с прагом 8 MeV (сл. 4).



Sl. 4.

Time је уређај био спреман за лов на сунчеве неутрине који dolaze из распada борона-8, но за разлику од Дависовог, овај се покус одвијао у реалном врену и

mogao je odrediti smjer dolazećih neutrina. Takva su opažanja stvarno provedena (sl. 5 pokazuje Sunce viđeno u “neutrinskom svjetlu”) i potvrdila manjak solarnih neutrina, sukladno Davisovim rezultatima.



Sl. 5.

## Oscilacije neutrina i novi neutrinski pokusi

Već spomenute oscilacije neutrina najjednostavnije su objašnjenje mjenog manjka sunčevih neutrina. Velika potpora takvom objašnjenju došla je s ovogodišnjim objavljivanjem rezultata sa Sudbury Neutrino Observatory (SNO) u Kanadi. Taj pokus ima u odnosu na prethodne “dodatnu dimenziju”, mogućnost da uz procese prenošene tzv. nabijenim strujama ustanovljava i procese koje prenose tzv. neutralne slabe struje. Kao rezultat, SNO je ustanovio da je nestajanje jedne vrste neutrina praćeno pojavljivanjem neutrina druge vrste. Time je ustanovljena oscilacija neutrina kao nova pojava koja usput ukazuje da neutrimo posjeduju masu, a time vodi na dalekosežne posljedice u fizici čestica i kozmologiji.

Ipak, ovako ustanovljena oscilacija neutrina ograničena je na neutrine koji su došli sa Sunca. No, ukoliko su oscilacije neutrina univerzalna pojava, moramo to mjeriti i za neutrine iz drugih izvora. To je postalo moguće nakon što je Koshiba sa suradnicima unaprijedio eksperiment do razine Super-Kamiokande, s 50 000 tona vode i 11 146 fotomultiplikatora. Uz iscrpniju informaciju o sunčevim neutrimo, taj je pokus 1998. po prvi put dao naznake za oscilacije atmosferskih neutrina (nestajanje mionskih neutrina koji do detektora dolaze odozdo, kroz Zemlju). Bio je to velik poticaj za pokretanje tzv. “Long-baseline” pokusa, s dugim podzemnim snopovima mionskih neutrina, koji od akceleratora koji ih proizvodi do detektora putuju kroz zemljinu unutrašnjost. Prvi takav pokus, KEK-Kamiokande projekt sa snopom od 730 km, zaustavljen je već spomenutom havarijom. Čeka se na njegovu rekonstrukciju, a istodobno su u pripremi europski i američki pokusi sa snopovima iste duljine, OPERA (CERN-Gran Sasso) te MINOS (Fermilab-Soudan). Ti bi pokusi prvenstveno dali više informacija o oscilacijama mionskih neutrina, koje su indicirane na Super-Kamiokande za atmosferske neutrine.

U međuvremenu (prije same dodjele ovogodišnje nagrade) došla je i potvrda neutrinskih oscilacija mjenih za elektronske antineutrine iz nuklearnih reaktora. Riječ

je o rezultatima s KamLAND (Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) japanskog podzemnog laboratorija, koji je neka vrsta teleskopa koji umjesto neutrina sa zvijezda hvata neutrine s "konstelacije" od 69 reaktora u Japanu i Koreji. Kroz 145 dana mjerenja zabilježeno je 54 događaja koje su proizveli reaktorski neutriini, u usporedbi s 86 očekivanih na temelju proračuna, koji se za reaktore mogu učiniti preciznije nego za unutrašnjost Sunca.

U ovogodišnjoj Nobelovoj nagradi istaknuto je da su nagrađeni pokusi odigrali ulogu prvih neutrinjskih teleskopa, opažanjem neutrina sa Sunca i sa supranove SN87A. Sljedbenici tih pionirskih poduhvata su "pravi" neutrinjski teleskopi kod kojih se fotomultiplikatori smještaju u dubine antarktičkog leda (AMANDA) ili u morske dubine (ANTARES, kod Toulona). Jedino u "neutrinjskom svjetlu", koje ne mijenja smjer na putu do nas, možemo utvrditi lokaciju izvora primarnog kozmičkog zračenja (primjerice aktivnih galaktičkih jezgri, AGN). Već smo u posjedu prvih nebeskih karti izvora kozmičkih neutrina. Istodobno, sami neutriini, u svjetlu izmjerenih oscilacija koje sugeriraju njihovu masu, dobivaju bitno novu kozmičku dimenziju.

## Riccardo Giacconi: pionir rendgenske astronomije

*Krešimir Pavlovski\*, Zagreb*

Slučajno, eksperimentirajući s katodnim cijevima, njemački je fizičar Wilhelm Röntgen, godine 1895. otkrio X-zrake. Njegovo je otkriće odmah našlo praktičnu primjenu u medicini. Sljedećih nekoliko desetljeća X-zrake ili 'rendgensko' zračenje pokazalo se nezamjenjivim alatom u istraživanju mikro-svijeta atoma i tako omogućilo razvoj kvantne teorije tvari. Prošlo je više od pola stoljeća dok astronomi nisu otkrili nebeske izvore rendgenskog zračenja i tako upotpunili razumijevanje strukture i razvoja makro-svijeta zvijezda, galaksija i svemira kao cjeline.

Riccardo Giacconi, američki astronom talijanskog porijekla, pionir je i jedan od začetnika rendgenske astronomije i jedan je od dobitnika Nobelove nagrade za fiziku u 2002. godini. U obrazloženju Nobelovog odbora stoji da je Giacconi nagrađen "za pionirski doprinos astrofizici koji je doveo do otkrića svemirskih izvora X-zraka". Kada su Röntgena, prvog Nobelovog laureta iz fizike (nagrađen je 1901. godine) upitali što misli o svojem otkriću, on je lakonski odgovorio "ja ne mislim, ja istražujem!". S istim motom ušao je krajem pedesetih godina prošlog stoljeća Riccardo Giacconi u potpuno nepoznato znanstveno područje. Da se rukovodio tadašnjim predviđanjima vjerojatno se nikada ne bi niti počeo baviti svemirskim istraživanjima. Jer, prema tadašnjem poznavanju svemira u rendgenskom području elektromagnetskog spektra naprosto je trebao biti 'crn', zvijezde i galaksije su u tom dijelu spektra trebale zračiti tek (zanemarivo) mali broj fotona.

Riccardo Giacconi rođen je u Genovi, 6. listopada 1930. godine. Studij fizike završava na Sveučilištu u Milanu s doktoratom iz fizike elementarnih čestica. Do prelaska u privatnu kompaniju American Science and Engineering (AS&E) 1959. godine, kraće radi na sveučilištima u Milanu, Indiani i Princetonu. Stacionirana u sveučilišnom i

\* Autor je redoviti profesor na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: kresimir@phy.hr, <http://www.phy/~kresimir>

istraživačkom centru u Cambridgeu, u američkoj saveznoj državi Massachusetts, AS&E je tada bila kompanija sa samo tridesetak zaposlenih.

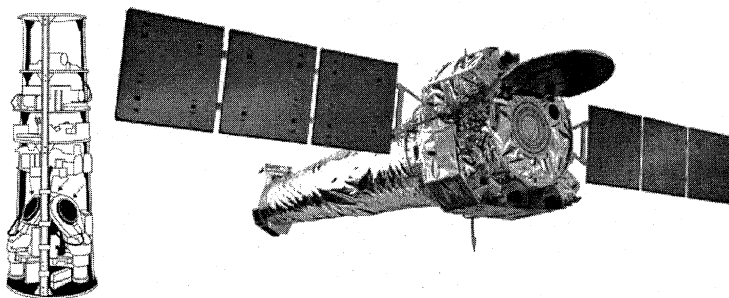
Godine 1949. tim istraživača s Naval research Laboratory predvođen Herbertom Friedmanom otkrio je slabu emisiju X-zraka iz Sunčeve korone. Na zarobljenim njemačkim raketama V2 iz II. svjetskog rata oni su postavili male Geigerove brojače. Otkrivena emisija X-zraka bila je čak milijun puta manja od ukupne energije koju Sunce zrači u ostalim valnim duljinama! Zbog toga se smatralo da će detekcija svemirskih izvora rendgenskog zračenja biti bezuspješna. Giacconi, koji je vodio malu grupu entuzijasta, na sreću, nije se previše obazirao što drugi misle, baš kao i njegov prethodnik Röntgen. Traživši potporu kod NASA-e Giacconi je bio odbijen. Međutim, američka kompanija Air Force, imala je više sluha za astrofizičare: mala kompanija AS&E dobiva financijsku potporu za potragu X-zračenja Mjeseca. Početak je bio težak. Prve dvije rakete AS&E rasprsnule su se prilikom lansiranja. Treći pokušaj, u lipnju 1962. godine bio je pun pogodak. Tijekom vrlo kratkog perioda opažanja, svega pet minuta je bilo na raspolaganju, Geigerovi brojači stotinu puta osjetljiviji od bilo kojih upotrijebljenih ranije, detektirali su jak izvor X-zraka u smjeru zvijezda Scorpius a pored toga i jednoličnu pozadinu rendgenskog zračenja. Ubrzo, otkriće Giacconija i suradnika potvrdila je Friedmanova grupa. Otvoreno je novo spektralno područje za istraživanje svemira. Zanimljivo je da je tek 1990. godine pomoću satelita ROSAT otkriveno zračenje Mjeseca u području X-zraka! Zemljina atmosfera apsorbira većinu fotona elektromagnetskog zračenja propuštajući tok fotona do površine tek u dva prozora, vidljivi i radiovalni. Fotoni rendgenskog dijela spektra imaju valne duljine od  $0.05 \text{ \AA}$  do  $100 \text{ \AA}$ , dakle energije od 200 keV odnosno 0.1 keV. Tvrdo rendgensko zračenje prodire u atmosferi do visine od 25 km, dok je meko zaustavljeno već na 200 km. Zbog toga se istraživanja rendgenskog zračenja svemirskog porijekla mogu obavljati isključivo izvan ili tek u visokim slojevima Zemljine atmosfere. Eksperimenti s raketama omogućuju tek mjerenja u kratkom vremenu (prvi letovi Aerobee rakete koja su koristili Giacconi i suradnici trajali su svega desetak minuta dok je iskoristivo vrijeme bilo čak upola manje!). Zbog toga Giacconi nakon inicijalnog, neočekivanog uspjeha dobiva podršku pri NASA-i koja prihvaća njegov prijedlog da se u orbitu oko Zemlje postavi satelit opremljen uređajima za detekciju rendgenskog zračenja. Dijelom to je bio svemirski eksperiment potpomognut talijanskom vladom. Satelit UHURU, što na svahili jeziku znači 'sloboda', uspješno je lanisan iz Kenije, godine 1970. Uspjeh satelita bio je iznad svih očekivanja. Zabilježeno je da je to najcitiraniji eksperiment svih vremena, ne samo u astronomiji i fizici već u svim prirodnim znanostima.

Višestruko je povećan broj poznatih izvora rendgenskog zračenja, kojih je do 1970. godine bilo poznato svega 40. Ne treba zaboraviti da su 1967. godine radio-astronomi otkrili pulsare, kompaktne neutronske zvijezde, što je bio daljnji veliki poticaj za razvoj astronomije X-zraka. Praćenjem pojedinih izvora pomoću UHURU satelita otkriveno je da emisija X-zraka može biti, katkad, vrlo nagla i silovita, a da ima izvora s periodičnim promjenama emisije. Mnogi su izvori prepoznati na snimcima zvjezdanog polja što je dalje omogućilo detaljna astrofizička istraživanja. Ubrzo je otkriveno da su u pravilu jaki izvori X-zraka dvojni sustavi zvijezda u kojima materija struji s (normalne) zvijezde na pratioca koji je kolapsirajuća zvijezda, bijeli patuljak, neutronska zvijezda ili crna rupa. Naročito su jaki izvori oni kod kojih je kolapsar neutronska zvijezda ili crna rupa jer je i potencijalna jama (gravitacijsko polje) mnogo dublja i materija se ubrzava do vrlo velikih brzina. UHURU je ipak imao jedan veliki nedostatak – a to je nemogućnost 'snimanja'. Uređaji su omogućavali samo brojanje rendgenskih fotona ali ne i njihova fokusiranja u sliku. Još ranije, Giacconi je s fizičarom Brunom Rossijem, predložio konstrukciju rendgenskog teleskopa. Rentgenske su zrake izuzetno prodorne, tako da se pod uobičajenim kutovima ne reflektiraju od metalnog zrcala,



već prodiru u njega. Zbog toga ih je potrebno reflektirati pod vrlo malim kutom, tek toliko da 'okrznu' metalnu površinu zrcala. Međutim, izrada zrcala za rendgenski teleskop, vrlo je zahtjevna. Zahvaljujući divovskom uspjehu UHURU satelita, NASA prihvaća sljedeći Giacconijev projekt, izgradnju prvog rendgenskog teleskopa koji bi bio postavljen u orbitu oko Zemlje. S velikom financijskom potporom NASA-e osnovan je pri harvardskom sveučilištu poseban odjel u koji prelazi Giacconi sa svojim suradnicima – sada ih je već preko dvije stotine, od čega polovicu čine astronomi. To je zabilježeno kao najveći znanstveni transfer u povijesti američke znanosti. S poznatim menadžerskim sposobnostima, Giacconi i taj projekt dovodi do uspjeha. Rentgenski teleskop na satelitu omogućuje dobivanje prvih slika neba velike rezolucije i precizne položaje tisuće rendgenskih objekata; bijelih patuljaka, neutronskih zvijezda, crnih rupa, međuzvjezdanih udarnih valova nastalih eksplozijama supernova, jezgama galaksija i vrućim plinom koji ispunjava prostor među galaksijama.

Novi izazov Giacconi prihvaća izborom za generalnog direktora European Southern Observatory sa sjedištem u Garchingu kraj Münchena i opservatorijama u čileanskim Andama, planinama La Silla i Paranal. Giacconijevim dolaskom započela je realizacija sigurno najvećeg projekta u astrofizici – postavljanje četiri 8-m teleskopa na Paranalu kraj Aftonagaste te njihovo povezivanje u interferometar, poznate pod nazivom VLT i VLTI. Kada je Giacconi 1998. godine otišao na novu rukovodeću funkciju predsjednika Associate Universities u SAD-u, europski astrofizičari započeli opažanja na najmoćnijim 'strojevima' u svijetu. Jedan je od bliskih Giacconijevih kolega, jednom za njega, izjavio: "Da nije vrhunski astrofizičar, jednako je uspješno mogao biti predsjednik uprave General Motorsa!". Izuzetna je njegova sposobnost da u viziji znanstvenika, istraživača, uspješno realizira najsloženije tehnološke projekte. U trenutku kada mu je saopćeno da je ovogodišnji laureat, Giacconi je posebno naglasio da je prvi znanstvenik koji je to priznanje dobio radeći pod okriljem NASA-e. Dobitnik je mnogih prestižnih nagrada i priznanja, a vjerojatno mu je jedna od najdražih, počasni doktorat rimskog sveučilišta "La Sapienza".



*Slika 1. Od rakete Aerobee do rendgenskog svemirskog opservatorija Chandra. Na raketi Aerobee bila su ugrađena tri Geigerova brojača. Pionirski pokušaji Giacconija i suradnika doveli su do neočekivanog otkrića svemirskih izvora rendgenskog zračenja. Satelit Chandra vrhunac je tehnologije s tri rendgenska teleskopa kojima su razlučeni izvori rendgenskog zračenja u dalekim galaksijama.*

Svako tijelo u okolni prostor zrači energiju koja odgovara njegovoj temperaturi. Idealni je slučaj zračenje crnog tijela, koje je u stanju upiti (i emitirati) zračenje svih valnih duljina bez ostatka. Raspodjela energije u spektru za zračenje crnog tijela dana je Plankovom funkcijom. Ukupna je energija  $E$  koju zrači tijelo temperature  $T$  u sve smjerove, dana Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$E = \sigma T^4, \quad (1)$$

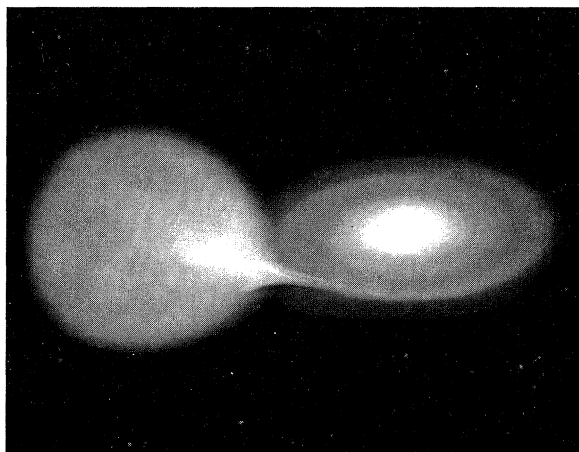
gdje je  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  Stefan-Boltzmannova konstanta. Valna duljina maksimuma Planckove krivulje energetske raspodjele zračenja crnog tijela temperature  $T$  dana je Wienovim zakonom:

$$\lambda_{\max} = \frac{2.897}{1000 T} [\text{m}]. \quad (2)$$

Često puta dobro je znati i sljedeću formulu koja daje energiju fotona u elektronvoltima (eV) za danu valnu duljinu izraženu u nanometrima ( $1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA}$ ):

$$E = \frac{1240}{\lambda}. \quad (3)$$

Izračunat ćemo prema jednakostima (1) – (3) tipične vrijednosti za rendgensko zračenje. Rentgenske ili X-rake imaju valne duljine reda veličine angstroma. Uzet ćemo  $\lambda = 1 \text{ \AA}$ . Prema jedn. (3) kvant energije rendgenskog fotona imat će energiju  $E = 12.4 \text{ keV}$  odnosno, znajući da je  $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , energija našeg fotona u SI sustavu iznosi  $E = 2 \cdot 10^{-15} \text{ J}$ . Da bi tijelo imalo maksimum zračenja u rendgenskom području spektra, prema jedn. (2) izračunat ćemo temperaturu koju bi trebalo postići: za  $\lambda_{\max} = 1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  proizlazi  $T \approx 29 \cdot 10^6 \text{ K}$ , dakle gotovo trideset milijuna kelvina! Tako ekstremno visoke temperature mogu se postići u plinu koji ispunjava prostor među galaksijama i koji je vrlo rijedak ili pak akrecijom (prirastom) materije u blizini neutronskih zvijezda ili crnih rupa, dakle u vrlo jakom gravitacijskom polju.



Slika 2. Kataklizmičke dvojne zvijezde u kojima je jedna od komponenta bijeli patuljak, neutronska zvijezda ili crna rupa vrlo su jaki izvori rendgenskog zračenja (vidi okvir 2).

U pojedinim etapama razvoja zvijezda u dvojnim sustavima može doći do prijenosa tvari s jedne komponente na drugu. Zvijezda–primalac ne može odmah primiti svu tvar već se ona privremeno pohranjuje u akrecijskom disku. Upravo su akrecijski diskovi izvori snažne emisije rendgenskog zračenja. Spiralno kružeći prema zvijezdi mase  $M$  čestica tvari mase  $m$  gubi potencijalnu gravitacijsku energiju. Ako se je polumjer orbite čestice,  $r$ , promijenio za  $\Delta r$  tada je oslobođena energija u iznosu:

$$\Delta PE = -GMm \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r - \Delta r} \right). \quad (4)$$

Zanima nas iznos oslobođene gravitacijske energije u vremenu, pa iznosi masa tvari koja struji s jedne komponente na drugu u dvojnem sustavu. Prsten diska širine  $\Delta r$  i polumjera  $r$  ima površinu  $4\pi r \Delta r$  (moramo uzeti u obzir da disk ima dvije strane). Oslobođenu gravitacijsku potencijalnu energiju disk zrači kao elektromagnetsko zračenje. Jedinični element ukupno, prema Stefan-Boltzmannovom zakonu, zrači energiju  $E = \sigma T^4$ , gdje je  $T$  temperatura tvari. Izjednačimo izraze za energiju te uz manja pojednostavnjenja dobivamo:

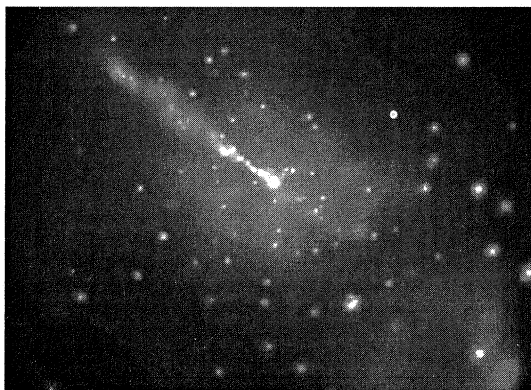
$$GM(\Delta m/\Delta t) = 4\pi r^2(r - \Delta r)\sigma T^4, \quad (5)$$

što dalje, uz  $r - \Delta r \approx r$  daje ovisnost temperature akrecijskog diska o udaljenosti od zvijezde:

$$T^4 = \frac{GM(\Delta m/\Delta t)}{4\pi\sigma r^3}, \quad (6)$$

odnosno, jednostavnije:  $T \approx r^{-3/4}$ .

Izračunajmo temperaturu akrecijskog diska u neposrednoj blizini površine neutronske zvijezde mase  $M = 1.4M_{\odot}$  i polumjera  $R = 15$  km. Za  $\Delta m/\Delta t$  uzet ćemo tipičnu vrijednost poznatu za kataklizmičke zvijezde  $\Delta m/\Delta t = 10^{14} \text{ kgs}^{-1}$ . Izračunavanjem, proizlazi da je temperatura unutrašnjeg akrecijskog diska oko neutronske zvijezde  $T = 9.4 \cdot 10^6$  K. Prema Wienovom zakonu slijedi da je valna duljina maksimuma zračenja  $\lambda = 3 \text{ \AA}$ . Dvojni sustav s takvim svojstvima zračit će najviše tvrdo rendgensko zračenje!



Slika 3. Rendgenski snimak galaksije Centaurus A koja se nalazi na udaljenosti 20 Mpc. Razlučeni su mnogobrojni rendgenski izvori (točkice) a ističe se snažni izvor u samom središtu galaksije, tzv. aktivna galaktička jezgra koja sadrži masivnu crnu rupu, te mlaz vrućeg plina koji je usmjeren u crnu rupu koja se nalazi u središtu galaksije. Cijela se ova eliptična galaksija kupa u difuznom rendgenskom zračenju koje dolazi od razrijeđenog ali zato izuzetno vrućeg plina koji ju ispunjava.