

Neue Fenster ins All

Physik-Nobelpreis für Neutrino- und Röntgenastronomie

Till Kirsten und Joachim Trümper

Den diesjährigen Nobelpreisträgern Raymond Davis jr. und Masatoshi Koshiba ist es erstmals gelungen, Neutrinos aus der Sonne und aus Supernovae nachzuweisen. Sie begründeten damit die experimentelle Neutrinoastrophysik, die seitdem aufregende fundamentale Beiträge zur Teilchenphysik liefert. Die zweite Hälfte des Nobelpreises erhält Ricardo Giacconi für seine Pionierarbeiten zur Röntgenastronomie, die sich zu einer tragenden Säule der Astrophysik und Kosmologie entwickelt hat.

Der Physik-Nobelpreis für Raymond Davis jr. für den ersten Nachweis von Neutrinos von der Sonne ist die späte Anerkennung für ein jetzt 88-jähriges Forscherleben, das in vieler Hinsicht von den Normen und Wertvorstellungen unseres modernen Physikbetriebs abweicht. Davis verkörpert Tugenden und Arbeitstechniken, die im heutigen Forschungsalltag der Mega-Kollaborationen nichts mehr gelten, vielfach sogar als kontraproduktiv angesehen werden. Dennoch hat er einen ganz neuen Forschungszweig, die Neutrinoastrophysik, ins Leben gerufen. Dennoch, oder deshalb?

Eine modernistische „Evaluation“ des in Rede stehenden Wissenschaftlers würde vernichtend ausfallen: Keine Flexibilität, lebenslang ist er bei einem Thema geblieben. Mangelnde Führungsqualitäten, kann nichts delegieren, will alles selbst machen, bis zum Lichtauschalten am Ende des 12–14 stündigen Labortages. Keine Teamfähigkeit, hat maximal drei oder vier engere Kollaborateure gehabt. Diesen wenigen brachte er zwar Nibelungentreue entgegen, das ging aber nicht soweit, dass er die Rohdaten nicht selbst betrachtet hätte, auch noch nach 30 Jahren Messbetrieb. Publikationsliste: Sehr kurz, er tat sich schwer mit Niederschriften, weil stets „erst noch etwas zu messen war“. Einwerbung von Drittmitteln? Da erinnere ich mich an einen wichtigen Termin, den er bei

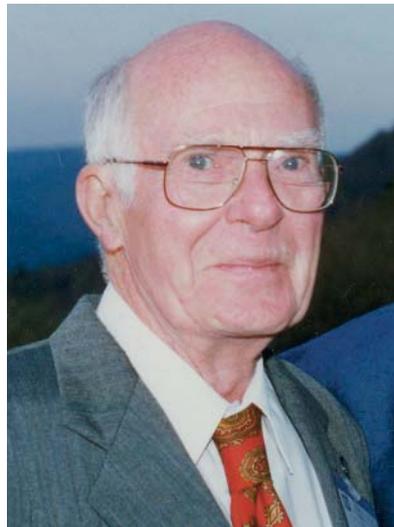
einem mächtigen DOE-Administrator in Washington hatte. Es ging um die Finanzierung des Gallium-Sonnenneutrino-Experiments, das ursprünglich als Gemeinschaftsprojekt des Brookhaven National Laboratory und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik geplant war. Während der 40-minütigen Audienz verwendete er 30 Minuten darauf, über die Schwierigkeiten zu berichten, die er am Vortag mit einer defekten Pumpe im Labor gehabt hat. Entsprechende Vorhaltungen wohlmeinend entsetzter Reisebegleiter hat er nie verstanden.

Vom Wesen her ist er ein sturer Philanthrop. Ob interessierter Laie oder kritischer Kollege, wann immer man mit einer Frage oder auch

Interpretationen waren ihm suspekt.

Davis ist eigentlich Chemiker, und er hat das auch oft hervorgehoben, obgleich er lebenslang physikalisch-astrophysikalische Forschung betrieb. Seinen Ph.D. in „Physical Chemistry“ erhielt er 1942 an der Yale University. 1948 ging er zum Chemistry Department des Brookhaven National Laboratory (BNL), wo er bis zu seiner Pensionierung 1985 verblieb. Akademische Laufbahnehren sind ihm in Brookhaven wegen seiner Querköpfigkeit weitgehend versagt geblieben. Von außerhalb ist allerdings zumindest in den letzten Jahren ein wahrer Preisregen über ihn niedergegangen, dessen Kulmination nun der Nobelpreis ist.

Im Chemistry Department wurde zu jener Zeit – als direkte Folge des Manhattan-Projektes – Kernchemie betrieben. Arbeiten zu Spalt- und Spallations-Ausbeutebestimmungen an schweren Kernen erforderten (etwa in der Tradition Otto Hahns) radiochemische Trennungs- und Nachweismethoden für kleinste Aktivitäten. Davis entwickelte hierfür spezielle Gas-Proportionalzählrohre, die er insbesondere zum Nachweis von radioaktiven Argon-Nukliden (^{37}Ar , ^{39}Ar , ^{41}Ar , ^{42}Ar) einsetzte, sowohl in bestrahlten Targets als auch in Meteoriten, in denen Radionuklide durch die Einwirkung der galaktischen kosmischen Strahlung entstanden sind. Da die nachzuweisenden Aktivitäten sehr gering waren, wurde er zu einem der Begründer der Low-Level-Technik, bei der das Prinzip gilt, dass das eigentliche Problem nicht das Signal, sondern der Störuntergrund ist. Neben der erforderlichen radiochemischen Reinheit der Apparaturen und der Abschirmung von externer Störstrahlung durch Rückzug in Labors unter der Erde hat er früh erkannt, dass die Untergrund-Vermeidung die beste Untergrund-Diskriminierung ist. Das daraus folgende Konzept der Miniaturisierung hat er als erster konsequent eingesetzt und damit der staunenden Welt gezeigt, dass Zählraten von z. B. einem Ereignis pro Monat



Raymond Davis jr.

nur mit allgemeiner Neugier zu ihm kam, stets hatte er Zeit für lange (unangemeldete) Gespräche. Die Person vor ihm war stets wichtiger als die härteste „deadline“. Er ging zunächst vorurteilslos und ohne vorgefasste Meinungen an wissenschaftliche Fragen heran und war aufgeschlossen für neue Informationen. Hatte er aber eine Meinung gebildet, so war er mit „weichen“ Argumenten auch dann nicht davon abzubringen, wenn dies den leider auch in der Physik so häufigen Modeströmungen zuwider lief. Im Zweifelsfall galt immer das Primat der Daten, suggestiv unterlegte In-

Prof. Dr. Till Kirsten,
Max-Planck-Institut
für Kernphysik,
Postfach 103980,
69029 Heidelberg,
E-Mail: till.kirsten
@mpi-hd.mpg.de;
Der Autor ist Initiator
und Leiter des
GALLEX-Sonnen-
neutrinoexperiments
(seit 1978).

Prof. Dr. Joachim
Trümper,
Max-Planck-Institut
für extraterrestrische
Physik (MPE),
Giessenbachstraße,
D-85740 Garching,
E-Mail: jtruemper
@mpe.mpg.de;
Der Autor war von
1975 bis 2001 Direktor
am MPE

messbar gemacht werden können – Voraussetzung für das, was noch kommen sollte.

Davis war fasziniert von den Konzepten der Neutrinophysik und der Idee von Bruno Pontecorvo (1946) und L. Alvarez (1949), den experimentellen Nachweis der von Pauli postulierten Neutrinos mittels eines großen „radiochemischen“ chlorhaltigen Detektors nahe an einem starken Kernreaktor zu versuchen. Die zugrundeliegende Reaktion ist $\bar{\nu} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$. Dies unterstellte, dass die reaktorproduzierten Anti-Neutrinos mit Neutrinos identisch sind, was erst 1956 mit der Entdeckung der Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung durch Lee und Yang widerlegt wurde. Schon 1955 hatte Davis seinen ersten Chlordetektor gebaut. Aus einem Tank mit 3800 Litern Perchloräthylen (C_2Cl_4) wurde nach Zugabe von inaktivem Argon und Antineutrino-Bestrahlung am Savannah River Reaktor alles vorhandene Argon durch Helium ausgespült, gereinigt, und in Proportionalzählrohren gemessen. Das Ergebnis war negativ, es wurde kein ${}^{37}\text{Ar}$ -Signal über dem Untergrund gefunden. Dies war die erste starke Evidenz für die Verschiedenheit von Neutrino und Antineutrino und die Erhaltung der Leptonenzahl [1]. Ein Jahr später bestätigten dann Reines und Cowan [2] ihre früheren Hinweise [3] auf die Reaktion $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ in einem Flüssigszintillator, der erste (Anti-)Neutrino-Nachweis überhaupt.

Wenn der Chlordetektor für den Nachweis von Antineutrinos nicht geeignet war, warum es dann nicht mit Neutrinos versuchen? Seit Weizsäcker, Bethe und Fowler war klar, dass die Sonne eine intensive Neutrinoquelle sein muss. Allerdings hat die Cl-Ar-Reaktion eine Energieschwelle von 814 keV, so dass der Nachweis der primären „pp-Neutrinos“ aus der Fusion von Protonen ($p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$; $E_\nu \leq 420$ keV) ausschied (dies wurde erst später mit Gallium möglich). Was blieb, waren die ${}^8\text{B}$ -Neutrinos aus dem Betazerfall der in der seltenen Nebenreaktion $p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ erzeugten ${}^8\text{B}$ -Kerne, denn deren Energie reicht bis 14 MeV.¹⁾ Allerdings sind ${}^8\text{B}$ -Neutrinos ca. 10^4 -mal seltener als die pp-Neutrinos, deren Fluss durch die Energieerzeugung in der Sonne weitgehend festgelegt ist. Die Sache schien aussichtslos, im größten noch praktika-

bel in der Homestake-Mine in Süddakota unterzubringenden Tank mit 600 Tonnen Perchloräthylen würde weniger als ein ${}^{37}\text{Ar}$ -Atom pro Monat erzeugt werden.

1963 änderte sich die Situation von „völlig hoffnungslos“ in „fast aussichtslos“, da J. Bahcall realisierte, dass der Reaktionsquerschnitt für die Chlor-Reaktion etwa 20-fach höher ist als zuvor gedacht. Nun sollte es also wenigstens einige Atome pro Monat geben – Davis nahm die Herausforderung an. Die nächsten 30 Jahre lief der fast epische Versuch eines Einzelkämpfers gegen eine skeptische Welt, dessen Ergebnis unter dem Begriff „Sonenneutrino-Problem“ bekannt wurde. Nur wenige treue Mitarbeiter begleiteten Ray auf seinem Weg, vor allem Bruce Cleveland und Keith Rowley. Große Hilfe von Brookhaven erhielt er nicht, weder von der Administration noch von den meisten Kollegen. Die vergleichsweise minimalen Mittel zum Weiterbetrieb des Experimentes wurden immer wieder in Frage gestellt. Hier halfen dann seine schon angesprochene „Sturheit“ und das hervorragende persönliche Verhältnis, das er zum Management und Personal der Homestake-Mine aufgebaut hatte. Dann reiste er auch schon mal ohne genehmigte Mittel zur Mine. Nach seiner „ersten“ Pensionierung 1985 hat die Pennsylvania University auf Betreiben von Ken Lande das Homestake-Experiment zum Glück vor der Einstellung bewahrt.

Die Halbwertszeit von ${}^{37}\text{Ar}$ beträgt 35 Tage, eine sinnvolle Exponierungszeit bis zur Quasi-Sättigung ist demnach ca. 3 Monate. Viermal im Jahr also reisten Ray Davis oder Bruce Cleveland in die Homestake-Mine, um 1400 Meter untertage das Argon zu extrahieren, in den Zähler einzufüllen, und die anschließende halbjährige Zählperiode einzuleiten. Pro Messlauf wurden jeweils nur wenige ${}^{37}\text{Ar}$ -Atome durch ihren Zerfall nachgewiesen, das Ergebnis eines einzelnen Runs war also statistisch völlig insignifikant. Um ausreichend Statistik zu gewinnen lief diese Routine über 30 Jahre (Abb. 1). Das Endergebnis unter der Annahme einer zeitlich unveränderlichen Produktionsrate hat dennoch einen erstaunlich geringen Messfehler von nur 9% (1σ , inklusive systematische Fehler).

Es wurde zum Ritual, Davis für seinen heroischen Versuch zur Bewältigung des Unmöglichen zu

bewundern, aber dann im kleinen Kreis durchblicken zu lassen, dass er eben doch ein Don Quixote ist. Sollte ein anständiger Physiker wirklich glauben, dass er aus 600 Tonnen einer stinkenden Chemikalie von 5 Ar-Atomen 4,9 herausholt und sowohl Nebenreaktionen als auch Rückhalteeffekte auf diesem Level unter Kontrolle hat? Viele Einwände, vernünftige und unvernünftige, wurden gemacht, warum das Billard mit wenigen Atomen fehlerhaft sein müsste. Aufgeregte

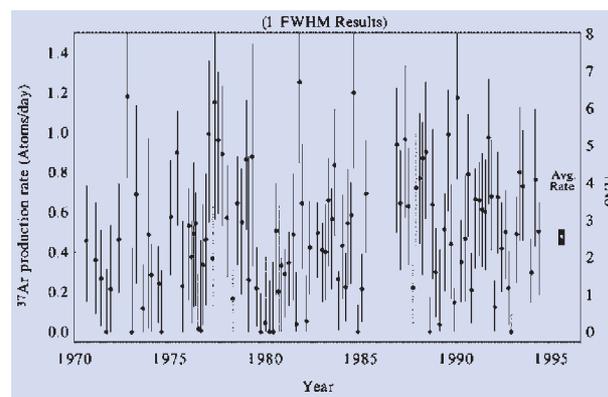


Abb. 1: Ergebnisse des Homestake-Chlorexperiments von 1970 bis 1995 [4]. Gezeigt sind die Individualergebnisse für 108 Ar-Extraktionen nach Abzug kleiner nicht-solarer Anteile. Der kleine vertikale Balken ganz rechts ist das kumulative Ergebnis unter Einschluss auch systematischer Fehler: $2,56 \pm 0,22$ SNU. Die obere Bildbegrenzung bei 8 SNU entspricht etwa dem nach dem Standard-Sonnenmodell erwarteten Wert. (1 SNU = Solar Neutrino Unit = 1 Neutrinoefang pro 10^{36} Targetatome und Sekunde.)

Diskussionen fanden statt, Davis beteiligte sich nicht daran. Statt dessen führte er zu fast jedem vernünftigen Einwand Begleitexperimente zum Ausschluss bzw. der Reduktion systematischer Fehler durch, allerdings mit der bedauernden Ausnahme, dass eine vorgesehene Eichung mit einer (teuren) künstlichen ${}^{65}\text{Zn}$ -Neutrinoquelle wegen mangelnder Unterstützung nicht realisiert werden konnte.

Was blieb, war ein signifikant von null verschiedenes Signal, also der erste Nachweis von Sonnenneutrinos, andererseits aber eine um einen Faktor drei niedrigere Rate als man dies aus dem Sonnenmodell vorhersagte. Akzeptierte man aufgrund der vielen Begleitversuche, dass keine experimentellen Artefakte vorhanden waren, blieben als mögliche Ursache entweder Abweichungen vom Standard-Sonnenmodell („astrophysikalische Lösung“) oder Neutrino-Oszillationen auf dem Weg von der Sonne zum Detektor („teilchenphysikalische

1) ${}^7\text{Be}$ entsteht über $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$,
 ${}^3\text{He}$ aus $d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$

Lösung“). Davis favorisierte die erste Variante, er sagte mir einmal wörtlich: „Nobody knows for sure what is going on inside the Sun“. Auch hielt er lange daran fest, dass (anfängliche) statistische Fluktuationen der Messraten in Antikorrelation mit dem Sonnenzyklus astrophysikalisch bedingt sind; später hat sich das dann herausgemittelt. Der „Standard“ im „Standard-Sonnen-Modell“ war ihm suspekt-dogmatisch, obgleich auch für ihn alles von der Fluss-Vorhersage abhing.

Mittlerweile sind als Ergebnis neuer Experimente Neutrino-Oszillationen von ν_e in ν_μ bzw. ν_τ die generell akzeptierte Erklärung für die verschiedenen beobachteten Neutrino-Defizite [5], inklusive das ^8B -Neutrino-Defizit (der Chlordetektor spricht nur auf ν_e an). Dies hat die weitreichende Konsequenz, dass Neutrinos Masse haben. Das ist nicht mehr und nicht weniger als die viel beschworene Evidenz für „neue“, das heißt über das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung hinausgehende Physik. Dies ist aber nicht die Entdeckung von Davis, dazu war der theoretisch vorhersagbare ^8B -Neutrinofluss zu ungenau. Die neueren Erkenntnisse sind aber die Folge der Türen, die Davis öffnete, indem er experimentell vorführte, dass das scheinbar Unmögliche machbar ist. Die anschließenden Neutrinoexperimente Gallex, Superkamiokande und SNO haben daraus ihren Mut bezogen. Sie haben mit den vergleichsweise unglaublich geringen Mitteln der von gestandenen Hochenergiephysikern belächelten Maulwürfe im Tunnel den Durchbruch geschafft, auf den supranationale Mega-Beschleunigerprojekte weiter warten lassen. Der Mann, der nie in seinem Leben einen vernünftigen Finanzierungsantrag geschrieben hat, hat die höchste „Science per Dollar-Effizienz“ ausgelöst, die weit und breit zu finden ist. Vielleicht hat das nicht nur mit Physik zu tun.

Ein wissenschaftlicher Kosmopolit

Der 1926 geborene Japaner Masatoshi Koshiba ist einer der Begründer der Teilchenastrophysik. Die Beobachtung des Neutrinopulses aus dem Kollaps der Supernova SN1987a mit dem Wasser-Cerenkov-Detektor in der japanischen Kamioka-Mine ist der sichtbare Höhepunkt einer langen erfolg-

reichen Forscherlaufbahn, die von wissenschaftlicher Kuriosität und kosmopolitischem Arbeitsstil geprägt war. Sein wissenschaftliches Interesse galt in den 50er- und 60er-Jahren (an den Universitäten Tokyo und Chicago) zunächst der kosmischen Strahlung, insbesondere den Teilchen höchster Energie und den von ihnen ausgelösten Wechselwirkungen in der obersten



Masatoshi Koshiba

Atmosphäre. Dies führte (in den siebziger Jahren) direkt zur Myonen- und Neutrinophysik, mit wichtigen Beiträgen insbesondere zu in der Atmosphäre erzeugten Neutrinos und Untergrund-Myonenschauern. Hier liegen bereits die Anfänge zu seinen späteren wichtigen Arbeiten zur Untergrund- und Neutrino-Astrophysik. Daneben führte ihn die Beschäftigung mit kosmischer Strahlung zur fundamentalen Teilchenphysik, zunächst im Rahmen von JADE (japanisch-deutsch-britische Kollaboration bei PETRA/ DESY Hamburg), dann unter eigener Leitung mit dem von ihm konzipierten KAMIOKANDE-Detektor zum Nachweis des Protonenzerfalls. Nachdem der Protonenzerfall ausblieb, vollzog Koshiba als einziger den mutigen Versuch, einen für 1000 MeV-Energien konzipierten Detektor durch Untergrundreduzierung für die Messung im 10 MeV-Bereich nutzbar zu machen, dokumentiert in der etwa 1985 vollzogenen Namensumdeutung von KAMIOKANDE = „Kamioka Nucleon Decay Experiment“ in „Kamioka Neutrino Detector“.

„Just in time“, nur drei Monate nachdem der nun mit speziellen Reinigungsanlagen ergänzte Detektor wieder in Betrieb genommen war, folgte die historische Beobachtung des Neutrinopulses der Super-

nova SN1987a, welche die erste experimentelle Bestätigung für die umfangreiche existierende Theorie der Vorgänge beim Sternkollaps (Neutronisierung, Neutrinokühlung) lieferte (Abb. 2, [6]). Nicht zu ferne Supernovae sind selten, in unserer Galaxis rechnet man im Mittel mit einer pro Jahrhundert. Koshiba hat hier etwas mit Kepler gemein. Der erlebte drei Supernovae in seinem Leben!

Der Wasser-Cerenkov-Detektor registriert Neutrinos durch Streuung an Elektronen (dominant bei niederen Energien) oder durch Absorption an Protonen ($\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$) bei höheren Energien. Die Elektronen bzw. Positronen erzeugen Cerenkov-Licht, das mit vielen Photomultipliern an der Peripherie des Targettanks nachgewiesen wird. Man erhält Energie- und Richtungsinformation in Echtzeit, die untere Energieschwelle wird nur durch die Untergrundraten bestimmt, über die Jahre ist sie von ursprünglich ca. 10 MeV bis auf ca. 4 MeV abgesenkt worden. Damit war der Nachweis von ^8B -Neutrinos von der Sonne möglich, und in der Tat, in Sonnenrichtung erschien ein deutliches Signal. Das erste Neutrinoteleskop war geboren. Tatsächlich kann man (als Kuriosität) eine Abbildung der Sonne in Neutrinos erzeugen. Beim Blick darauf fallen Astronomen in Depression, während Teilchenphysiker an Pauli denken und in Bewunderung erstarren. Damit wurde der Davissche Befund bestätigt: Signal vorhanden, aber abweichend von der theoretischen Vorhersage [7]. Es gab eine Differenz in der Höhe des Defizits (Drittel vs. Hälfte), das änderte aber nichts am Prinzip und ist heute aus den Ergebnissen neuer Experimente (SNO) voll verstanden. Ähnlich wie Davis hat Koshiba Pionierarbeit geleistet; die dadurch getriggerten Folgeexperimente überließ er zunehmend der nächsten Generation. Er hat aber noch die Weichen für den Superkamiokande-Detektor gestellt, mit dem sein Schüler Y. Totsuka die Sonneneutrinoeobachtungen mit viel besserer Statistik fortführte und im höherenergetischen Bereich mit der Beobachtung eines anomalen Verhältnisses von in der Atmosphäre erzeugten Elektron- und Myon-Neutrinos zusätzliche Evidenz für Neutrinooszillationen fand. Dabei erwies sich Koshiba als guter Sachwalter der Wissenschaft, der seinen Erfolg

clever in neue Forschungsgelder zu transformieren verstand.

Toshi Koshiba erhielt viele Auszeichnungen, hier sollen stellvertretend das deutsche Bundesverdienst-

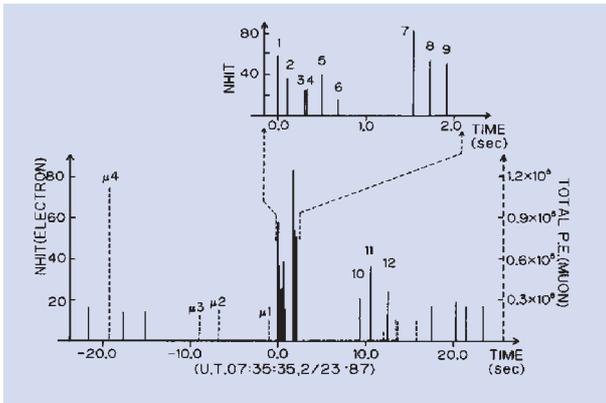


Abb. 2: Antineutrinos der Supernova 1987a aus der 160000 Lichtjahre entfernten Großen Magellanschen Wolke, registriert vom Kamiokande-Detektor [6]. Die ersten 9 von 12 individuellen Neutrinoereignissen erreichten den Detektor innerhalb von 2 Sekunden. Die Energie der über die Absorption an den Detektorprotonen nachgewiesenen Antineutrinos reichte von 7 bis 35 MeV.

kreuz (1985) und der Orden des japanischen Kaisers für kulturelle Verdienste (1997) erwähnt werden. Er war besonders stolz darauf, dass ihm dieser Orden in der offiziellen Verleihungsprozedur vom Tenno persönlich überreicht wurde. Für einen Japaner ist das schon etwas ganz besonderes, selbst wenn er sonst zum burschikos-unjapanischen tendiert. Als Humboldt-Preisträger war er 1997/98 an Max-Planck-Instituten in Heidelberg und Garching sowie am DESY in Hamburg. Er genießt hier bei vielen Freunden und Kollegen große Sympathie und Wertschätzung, nicht zuletzt auch wegen seines freundlichen und dennoch sehr selbstbewussten Auftretens.

TILL KIRSTEN

Literatur

[1] R. Davis, Phys. Rev. **97**, 766 (1955)
 [2] C. Cowan et al., Science **124**, 103 (1956)
 [3] F. Reines und C. Cowan, Phys. Rev. **92**, 830 (1953)
 [4] B. Cleveland et al., Astrophys. J. **496**, 505 (1998)
 [5] T. Kirsten, Rev. Mod. Phys. **71**, 1213 (1999); Phys. Blätter, September 2001, S. 23
 [6] K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 1490 (1987)
 [7] K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 1297 (1990); siehe auch Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 1683 (1996)

Vom Mond zu den Quasaren

Riccardo Giacconi erhält den Physik-Nobelpreis für seine „pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources“. In der Tat ist Giacconi der Vater der extrasolaren Röntgenastronomie und hat ihre Entwicklung wie kein anderer beeinflusst. Vierzig Jahre sind seit der Entdeckung der ersten kosmischen Röntgenquelle – Scorpius X-1 – durch ihn und sein Team vergangen. In dieser Zeit hat sich die Röntgenastronomie zu einer der tragenden Säulen der modernen Astrophysik und Kosmologie entwickelt. Im Lichte der Röntgenstrahlung offenbart sich uns das „heiße Universum“ mit Temperaturen von Millionen bis Milliarden Grad. Neben dieser thermischen Emission entsteht Röntgenstrahlung auch als Synchrotronstrahlung oder durch den inversen Compton-Effekt, also durch die Wechselwirkung relativistischer Elektronen mit Magnet- bzw. Photonenfeldern. Aus Röntgenbeobachtungen haben die Astrophysiker sehr viel über die extremen physikalischen Bedingungen in den Quellen gelernt. Ungeheuer beeindruckend sind die Fortschritte bei der Instrumentierung. Heute beobachten wir Objekte, die zehn



Riccardo Giacconi

Milliarden Mal schwächer sind als Scorpius X-1. Gleichzeitig stieg die Winkelauflösung von 100 Grad auf 0,5 Bogensekunden! In nur vierzig Jahren durchlief die Röntgenastronomie eine Entwicklung, für welche die optische Astronomie 400 Jahre benötigt hat!

Da Röntgenstrahlung in der Erdatmosphäre absorbiert wird, verdankt die Röntgenastronomie ihre

Existenz der Raketentechnik. Doch Giacconi war nicht ihr erster Pionier: Herbert Friedman vom Naval Research Laboratory in Washington DC (NRL) nutzte mit seinem Team ab 1946 als erster erbeutete deutsche V2-Raketen, um die Sonne im UV- und Röntgenbereich zu beobachten. Auf diese Weise gelang es 1949, die Röntgenemission der Sonnenkorona mit Geiger-Müller-Zählrohren nachzuweisen. Dieselbe Gruppe war es auch, die 1960 das erste Röntgenbild der Sonne mit einer Lochkamera aufnahm. Es zeigte deutlich die Randaufhellung der Sonnenkorona, die von dem Tübinger Astrophysiker Gerhard Elwert, einem der letzten Sommerfeldschüler, vorausgesagt worden war.

Ein Jahr zuvor trat der 28-jährige gebürtige Italiener Giacconi, der mit 23 Jahren in Mailand promoviert hatte, in die Firma American Science and Engineering (AS&E) ein. Der berühmte MIT-Physiker Bruno Rossi hatte diese gegründet, um mit staatlichen Geldern Forschung und Entwicklung durchzuführen. Von Rossi kam die Anregung zur Röntgenastronomie, und zweifellos war er die intellektuell treibende Kraft in dieser sehr frühen Phase. Zwar schien es aufgrund der großen Entfernungen utopisch, Röntgenstrahlung von anderen Sternen zu entdecken, aber die Erfahrung eines langen Forscherlebens lehrte Rossi, dass der Kosmos mit seiner unerschöpflichen Vielfalt immer für Überraschungen gut ist. So begann er mit Giacconi und anderen ein durch die US Air Force finanziertes Raketenprogramm, um mit Geiger-Müller-Zählrohren nach Röntgenstrahlung vom Mond und anderen Quellen zu suchen.

Erklärtes Ziel war zunächst der Mond. Der zweite Start einer Aerobee-Rakete am 12. Juni 1962 war erfolgreich, wenn auch mit einem unerwarteten Ergebnis: Vom Mond war in den heruntergefunkteten Daten keine Spur, aber stattdessen wurde eine sehr helle Quelle im Sternbild Skorpion (Scorpius X-1) und eine diffuse Hintergrundstrahlung ausgemacht²⁾ (Abb. 3). Diese aufregende Entdeckung markiert die Geburtsstunde der kosmischen Röntgenastronomie. Sie löste eine geradezu hektische Aktivität verschiedener Gruppen aus, um mit Raketenexperimenten bei (2–10 keV) oder mit Ballonexperimenten (>20 keV) weitere Quellen zu fin-

2) Später wurde klar, dass die Röntgenstrahlung vom Mond, hervorgerufen durch Reflexion solarer Röntgenstrahlung oder durch das Bombardement durch den Sonnenwind, um Zehnerpotenzen zu schwach für dieses Experiment war. Das erste Röntgenbild des Mondes wurde 1990 mit ROSAT kurz nach seinem Start gemacht.

den. Bald wurde Scorpius X-1 nach einer genauen Positionsbestimmung mit einem blauen Stern identifiziert, und ein spektakuläres Experiment des NRL, bei dem die Bedeckung durch den Mond ausgenutzt wurde, bewies, dass der Crabnebel mit einer der ganz hellen Quellen identisch war [2]. Das NRL-Team

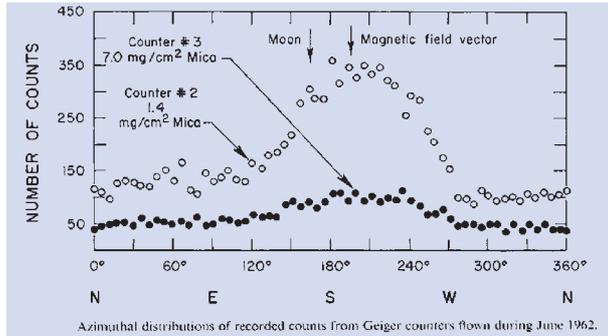


Abb. 3: Azimutale Verteilung der Röntgenquanten, die mit den Geiger-Müller-Zählrohren des Raketenexperiments vom 12. Juni 1962 registriert wurden. Die Zählrohre hatten Eintrittsfenster aus Glimmer verschiedener Dicke. Das breite Maximum der Intensitätsverteilung liegt nicht in Richtung des Mondes, sondern in Richtung des Sternbilds Skorpion. Der flache Teil der Kurve kommt durch die Röntgen-Hintergrundstrahlung zustande. Es dauerte Wochen, bis sich Giacconi und seine Kollegen davon überzeugt hatten, dass die Strahlung nicht aus der Erdmagnetosphäre stammt. (aus [1])

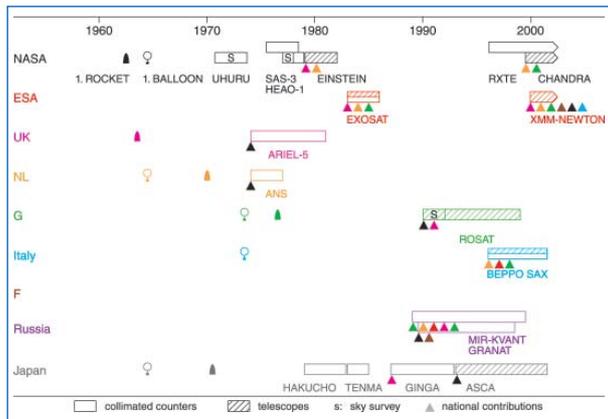


Abb. 4: Die weltweite Entwicklung der kosmischen (extrasolaren) Röntgenastronomie von den ersten Raketen- und Ballonexperimenten 1962 bis heute.

entdeckte auch den Crabpulsar, dessen Periode bereits aus Radio- beobachtungen bekannt war, und die erste extragalaktische Quelle, die aktive Galaxie M 87 im Virgohaufen.

Die großen Pioniere dieser frühen Epoche waren neben Giacconi zweifellos Friedman und Rossi, die in den neunziger Jahren starben. Giacconi bestimmte vor allem mit zwei Satellitenprojekten entscheidend den weiteren Verlauf der Röntgenastronomie: Uhuru, 1964 vorgeschlagen und 1970 gestartet, führte die erste dedizierte Röntgendurchmusterung des Himmels durch, die am Ende 339 Objekte im Energiebereich 2–6 keV erbrachte [3]. Zu den wichtigsten Entdeckungen gehörten die Röntgendoppel-

sterne Centaurus X-3 und Hercules X-1, rotierende magnetische Neutronensterne, die einen „normalen“ Stern umkreisen. Ihre enorme Strahlungsleistung stammt aus der Umwandlung von Gravitations- in thermische Energie beim Einfall von Materie des Begleiters auf den Neutronenstern. Ein weiterer Höhepunkt war die Identifizierung von Cygnus X-1 als Doppelsystem und ersten Kandidaten für ein Schwarzes Loch. Auch die Entdeckung der Röntgenemission von Galaxienhaufen, die auf die Anwesenheit von sehr heißem Plasma großer Masse schließen ließ, geht auf das Konto von Uhuru.

In dieser Pionierphase wurden die Beobachtungen meist mit großflächigen Proportional- oder Szintillationszählern durchgeführt, denen durch vorgeschaltete mechanische Kollimatoren eine gewisse Richtungsauflösung verliehen wurde. Giacconi und Rossi aber wünschten sich abbildende Teleskope, wobei Linsen wegen ihrer starken Absorption nicht infrage kamen. Sie schlugen deshalb bereits 1959 Teleskope vor, die auf der Reflexion bei streifendem Einfall beruhen, wobei sie zunächst an Paraboloidspiegel dachten [4]. Dabei stießen sie auf eine Arbeit von Hans Wolter (Kiel) aus dem Jahre 1952, der gezeigt hatte, dass ein dem Paraboloid-nachgeschalteter Hyperboloidspiegel die absolut katastrophalen Bildfehler des ersteren korrigieren und ein in erster Ordnung richtiges Bild liefern würde [5]. Giacconi griff diese Erfindung auf, und bald wurden die ersten Röntgenteleskope für Sonnenbeobachtungen auf Raketen und vom Sklyab aus eingesetzt.

Noch vor dem Start von Uhuru führte Giacconi 1970 ein US-Konsortium an, das der NASA einen Röntgenteleskop-Satelliten vorschlug. Dieses 1978 gestartete Einstein-Observatorium machte vom Röntgenhimmel zum ersten Mal echte Bilder, was vor allem dem Studium von ausgedehnten Quellen wie Supernovaüberresten und Galaxienhaufen zugute kam und gleichzeitig eine dramatische Verbesserung der Empfindlichkeit mit sich brachte – um einen Faktor hundert im Vergleich mit Uhuru [6]. Bis zum Ende der Einstein-Mission war die Zahl der bekannten Röntgenquelle auf etwa 5000 gestiegen. Nicht zuletzt wurde es nun möglich, die Röntgenemission normaler

Sterne quer durch das Hertzsprung-Russell-Diagramm zu studieren.

Es ist diese höchst eindrucksvolle Triade – Raketenexperiment, Uhuru, Einsteinobservatorium –, die den Ruhm von Giacconi begründet hat. Auch das bereits 1976 vorgeschlagene höchstauflösende Röntgenteleskop Chandra trägt seine Handschrift. Allerdings wurde es erst 1999 gestartet, lange nachdem Giacconi 1981 seine Gruppe verlassen hatte, um nacheinander Direktor des Hubble Space Telescope Science Institutes in Baltimore, dann Generaldirektor des European Southern Observatory, (ESO, Garching, 1993–99) und schließlich Präsident der Associated Universities, Inc. (Washington DC) zu werden. Wie stark Giacconi mit seinen frühen Aktivitäten auch die Entwicklung in anderen Teilen der Welt stimuliert hat, zeigt Abb. 3.

Auch in Deutschland galt das Interesse zunächst der Sonne. Angeregt durch Gerhard Elwert und Gottfried Möllenstedt begann eine kleine Gruppe am Astronomischen Institut Tübingen (AIT) in den sechziger Jahren, Fresnel-Zonenplatten als Objektive für Aufnahmen der Sonnenkorona zu verwenden. Das erste erfolgreiche Raketenexperiment fand 1971 statt, kurz bevor ich Direktor des AIT wurde. Mein Hauptinteresse galt jedoch der kosmischen Röntgenastronomie, und so begannen wir 1971 mit einem Ballonprogramm, um Präzisionsmessungen im harten Röntgenbereich (20–200 keV) zu machen, in dem es noch keine nennenswerte Konkurrenz von Satelliten gab. Ein Höhepunkt war die Entdeckung der Zyklotronlinie bei 38 keV im Spektrum der von Uhuru entdeckten Quelle Hercules X-1, aus der sich zum ersten Mal direkt die polare Magnetfeldstärke eines Neutronensterns ergab (5×10^8 Tesla). Mit dem Nachfolgeexperiment HEXE auf der MIR-Station gelang es wenige Monate nach der Explosion der Supernova 1987A (scharf markiert durch die von Koshiba beobachteten Neutrinos), die harte Röntgenstrahlung nachzuweisen, die durch „Comptonisierung“ aus den Gammaquanten des in der Explosion synthetisierten radioaktiven Materials (vor allem Co56) in der expandierenden Hülle entsteht.

Unsere Entwicklung von Wolter-Teleskopen, die wir 1972/73 gemeinsam mit Carl Zeiss begannen, stieß von Anfang an auf Interesse

bei Giacconi. Alle drei Wolter-Teleskope, die von Zeiss gebaut und vom MPE mit abbildenden Proportionalzählern bestückt wurden, lieferten interessante Ergebnisse, z. B. 1979 das erste Röntgen-„Farbbild“ einer kosmischen Quelle (Puppis A). Vor allem aber waren sie wichtige Vorübungen für den 1975 von uns vorgeschlagenen Röntgensatelliten. Nachdem das BMFT Ende der siebziger Jahre für alle Großprojekte eine „substantielle“ internationale Beteiligung zur Bedingung gemacht hatte, gewannen wir die NASA für eine Beteiligung mit einem kostenlosen Space Shuttle-Start und einem der drei Fokalinstrumente des Röntgenteleskops. Die Fürsprache von Giacconi hat viel dazu beigetragen, die NASA für ROSAT zu interessieren. Der Startschuss für den Bau von ROSAT fiel 1983, der Start war für 1987 geplant. Aber nach der Challengerkatastrophe 1986 drohte das Aus oder zumindest eine Verschiebung um viele Jahre. Schließlich gelang es uns, wiederum mit Unterstützung Giacconis, die NASA davon zu überzeugen, einen Raketenstart zu bewilligen.

Zweifellos gehört ROSAT zu den Quantensprüngen in der Entwicklung der Röntgenastronomie [7]. Seine Himmelsdurchmusterung, die erste mit einem Wolter-Teleskop, erbrachte 120 000 Quellen und viele interessante Entdeckungen. Bei den „pointierten“ Beobachtungen war ROSAT um einen Faktor zehn empfindlicher als das Einstein-Observatorium. Kein Wunder, dass

Giacconi sich äußerst intensiv an ROSAT-Beobachtungen beteiligte. Unsere Zusammenarbeit begann bereits 1985, und sie zielte auf die Enträtselung des Röntgenhintergrundes ab, des „Holy grail of X-ray astronomy“, den Giacconi über 20 Jahre zuvor entdeckt hatte. Mit dem Einstein-Observatorium war es bereits gelungen, etwa 20 % dieser Strahlung in einzelne Quellen aufzulösen, unter denen etliche Quasare waren. Wir wussten, dass wir mit ROSAT erheblich weiter kommen würden. Mit von der Partie war Maarten Schmidt, der Entdecker der Quasarroterverschiebungen, sowie der junge Postdoc Günther Hasinger, der aufgrund seines Könnens mit der Zeit der „Principal Investigator“ unseres „deep survey teams“ wurde. Am Ende hatte ROSAT insgesamt 14 Tage auf eine Stelle des Himmels im Großen Wagen gestarrt und dabei den Löwenanteil (etwa 80 %) des Röntgenhintergrundes aufgelöst [8]. Die meisten der Quellen sind Quasare und andere aktive Galaxien mit Rotverschiebungen bis zu 4,5, was einer Entfernung von etwa 12 Milliarden Lichtjahren entspricht.

Zwischen 1985 und 1999 trafen wir uns praktisch jährlich am MPE, um die Beobachtungen zu planen und die Ergebnisse zu diskutieren. Abends ging es dann im Augustinerbräu weiter, wo Giacconi am liebsten Schweinshaxn und Apfelstrudel aß. Besonders eng war natürlich der Kontakt während der sechs Jahre, die Giacconi bei der ESO war. Von seiner Wohnung hoch über

dem Viktualienmarkt hatte man einen wunderbaren Blick auf die Münchner Silhouette, und neben dem überlangen Esstisch hing ein riesiges Gemälde des Hobbymalers Giacconi, die Kopie eines italienischen Meisters.

Der Vorstoß in die Tiefen des Universums wird jetzt mit Chandra und XMM-Newton fortgesetzt. Die Frage, wie und wann die ersten Schwarzen Löcher entstanden sind, und viele weitere Fragen über das „heiße Universum“ harren noch einer Antwort. Derzeit ist die kosmische Röntgenastronomie immer noch so spannend und ihre Entwicklung so rasant wie in den letzten vierzig Jahren. Und Pläne für noch viel größere Teleskope der Zukunft, wie XEUS, werden bereits geschmiedet. Die Röntgengruppe des MPE, jetzt unter der Leitung von Günther Hasinger, freut sich mit Riccardo Giacconi über seinen Nobelpreis 2002.

JOACHIM TRÜMPER

Literatur

- [1] R. Giacconi et al., Phys. Rev. Lett. **9**, 439 (1962)
- [2] C.S. Bowyer et al., Science **146**, 1912 (1964)
- [3] R. Giacconi et al., Astrophys. J. (Letters) **165**, L27 (1971)
- [4] R. Giacconi und B.B. Rossi, J. Geophys. Res. **65**, 773 (1960)
- [5] H. Wolter, Ann. Physik **10**, 94 (1952)
- [6] R. Giacconi et al., Astrophys. J. **230**, 540 (1979)
- [7] J. Trümper, Phys. Blätter, Januar 1991, S. 29; Juli/August 1995, S. 649; September 1999, S. 45
- [8] G. Hasinger et al., Astron. & Astrophys. **329**, 482 (1998)