

Ergebnisse des ersten Jahres Pulsar-Forschung

Autor(en): **Tammann, Gustav Andreas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **14 (1969)**

Heft 113

PDF erstellt am: **23.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-899813>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Vorsicht ans Werk gehen und in einem gut gelüfteten Raum arbeiten. Nach dem Ätzen wird das Plättchen mit viel Wasser abgespült und der Ätzgrund mit Benzin entfernt. Die besten Kreuzungspunkte werden in der schon beschriebenen Art und Weise mit einem Kupferrohr von 10 bis 12 mm lichter Weite herausgebohrt. Der Durchmesser der Plättchen muss nicht grösser sein, da die Eintrittspupille eines normalen 10mm-Okulares in der Grössenordnung von 6 bis 8 mm liegt. Die fertige Strichplatte wird dann in üblicher Weise gefasst. Die Reinigung der gefassten Strichplatte vor dem Einbau in das Okular ist allerdings nicht ganz einfach, wenn man eine Fläche anstrebt, auf der unter 25facher Vergrösserung wirklich kein einziges Staubkörnchen oder Fädchen zu sehen sein soll.

Anhang und Hinweise:

- 1) W. N. LINDSAY: *A Novel Dual-Field 8-inch Telescope*. Sky and Telescope XXIX, No. 2, February 1965, p. 112.
- 2) Geeignete und preiswerte Okulare für den Selbstbau von Fadenkreuzokularen erhält man in der Materialzentrale der SAG:

FREDY DEOLA, Engestrasse 24, 8212 Neuhausen am Rheinfl. Ferner bei: KOSMOS Lehrmittelverlag, Stuttgart, und SPINDLER und HOYER KG, Göttingen.

- 3) Allgemeine optische Betrachtungen: JOHANNES FLÜGGE: *Leitfäden der geometrischen Optik*; JOHANNES FLÜGGE: *Praxis der geometrischen Optik*; sowie K. MÜTZE, L. FOITZIK und W. KRUG: *Brockhaus ABC der Optik*.
- 4) WOLLASTON-Drähte und Quarzfäden sowie sämtliche Quarzprodukte und optische Komponenten aus hochreinem Quarz liefert die Firma HERAEUS in Hanau (Deutschland), Vertretung in der Schweiz: WISMER AG, Oerlikonerstrasse 88, 8057 Zürich.
- 5) Die Verarbeitung von WOLLASTON-Draht ist sehr gut im Buch: *Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen* von ANGERER-EBERT, Verlag Vieweg & Sohn, beschrieben. Dieses Buch sei dem Instrumentenbastler sehr empfohlen, da es eine wahre Fundgrube für unzählige Kniffe, Techniken und Angaben ist.
- 6) Die Herstellung optischer Planflächen ist sehr ausführlich in einer Reihe von Artikeln im Buch *Amateur Telescope Making*, Book I, II und III, von A. INGALLS beschrieben.

Adresse des Verfassers: HERWIN G. ZIEGLER, El.-Ing., Hertensteinstrasse 23, 5415 Nussbaumen bei Baden.

Ergebnisse des ersten Jahres Pulsar-Forschung

VON GUSTAV ANDREAS TAMMANN, Basel

*(Manuskript
Febr. 69)*

Aus verschiedenen Gründen scheint es gerechtfertigt, hier einen summarischen Bericht über die bisherigen Ergebnisse der Pulsar-Forschung zu geben. Erstens stehen die Pulsare seit ihrer Entdeckung im Zentrum des Interesses der Astronomen und haben in kurzer Zeit weit über hundert Fachpublikationen veranlasst, wobei eine Vielzahl von – zum Teil recht wilden – Spekulationen emporschoss. Zweitens ist seit dem 24. Februar 1968, an dem die Entdeckung des ersten Pulsars veröffentlicht wurde, gerade ein Jahr verstrichen. Zwar war einer kleinen Gruppe von Radioastronomen der Nachweis des ersten Pulsars schon einige Monate vorher gelungen, aber sie hielten ihre Entdeckung zunächst zurück, um in Ruhe zusätzliche Messdaten zu sammeln und gleichzeitig zu verhindern, dass die Sensationspresse sich der Objekte allzu liebevoll annähme. Wie erinnerlich, erreichten sie trotzdem dieses Ziel nur teilweise: gleich nach dem Bekanntwerden des ersten Pulsars wurde behauptet, die Radiopulse könnten nur von intelligenten Wesen, den «little green men», ausgesandt werden. Diese These war schon damals absurd und lässt sich heute beweiskräftig widerlegen, so dass es sich erübrigt, näher darauf einzugehen. – Eine weitere Rechtfertigung, hier einen Überblick über das bisher Erreichte zu geben, liegt in der Tatsache, dass es innert Jahresfrist gelungen ist, die ursprünglich völlig überraschenden Objekte soweit zu erforschen, dass sie heute ihrem Wesen nach wohl richtig verstanden und befriedigend in die Voraussagen der Theoretiker eingebettet werden können, und dass somit eine erste Etappe in der Pulsar-Forschung gewonnen ist.

Die Entdeckungsgeschichte

Die Entdeckung der Pulsare ist – wie so oft in den Naturwissenschaften – einem Zufall zu verdanken. Der englische Astronom ANTONY HEWISH, Director of Studies am Churchill College in Cambridge, wollte am Mullard Radio Astronomy Observatory der Universität Cambridge mit einem speziellen, hochempfindlichen Radioteleskop den Himmel bei einer Wellenlänge von 3.7 Metern systematisch durchmustern, – bei dieser relativ langen Wellenlänge war dies vorher noch nicht gemacht worden. Er erhoffte sich von diesem Programm neue Erkenntnisse über die lichtstärksten, entferntesten und sehr schwer zu erklärenden Objekte der Astronomie, die Quasistellaren Radioquellen (Quasare), und über die diffus verteilte Materie zwischen diesen und der Erde. Dabei fand er die wohl kleinsten, aber kaum weniger rätselhaften Objekte, die bisher von den Astronomen als selbststrahlende Körper nachgewiesen werden können. Wegen ihrer periodischen Radiopulse nannte er sie *Pulsare*. Er legte dem erstentdeckten Pulsar die wissenschaftliche Bezeichnung CP 1919 zu, was ein Signet für «Cambridge Pulsar mit der Rektaszension 19^h19^m» ist. Entsprechend werden jetzt auch die von anderen Observatorien entdeckten Pulsare benannt: der erste Buchstabe bezeichnet den Entdeckungsort, demselben folgt ein P und dann die Rektaszension in vier Ziffern; manche hängen zusätzlich noch das Vorzeichen und zwei Ziffern für die Deklination des Pulsars an.

Nachdem HEWISH im Juli 1967 seine systematischen Beobachtungen begonnen hatte, fand eine seiner Mit-

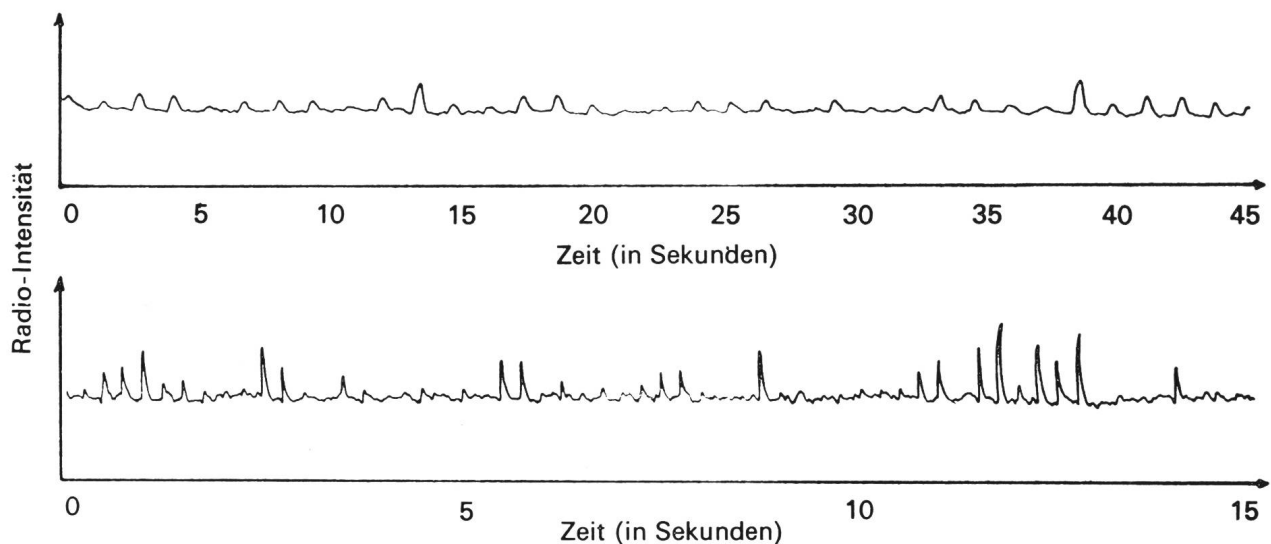


Abb. 1: Zwei frühe Radioregistrierungen von CP 1919 (oben) und CP 0950 (unten), die die zeitlich regelmässigen, aber ungleichen Pulse zeigen (nach HEWISH).

arbeiterinnen, JOCELYN BELL, im August auf den Registrierpapieren ein merkwürdiges Radiosignal, das trotz einiger verdächtiger Eigenschaften zuerst für eines der zahlreichen terrestrischen Störsignale gehalten wurde. Dann aber tauchten in der gleichen Himmelsgegend gleich sechs ähnliche Pulse auf. Dies erweckte in HEWISH Arbeitsgruppe so viel Spannung, dass die betreffende Region höchst intensiv überwacht wurde, aber erst sechs Wochen später, gegen Ende November, konnten von dort weitere derartige Signale aufgefangen werden, und zwar dieses Mal über längere Zeit. Es blieb kein Zweifel mehr: es musste sich um eine astronomische Radioquelle handeln, und das Unglaublichste war, dass diese Pulse sich sehr schnell mit grösster Regelmässigkeit alle 1.3 Sekunden wiederholten.

HEWISH publizierte zusammen mit seinen Mitarbeitern BELL, PILKINGTON, SCOTT und COLLINS seine Entdeckung in verantwortungsbewusster Weise erst Ende Februar 1968, zu einem Moment, wo ihm bereits einige andere Pulsare bekannt waren.

Beobachtungsdaten:

Heute sind zwei Dutzend Pulsare bekannt. Ihre Perioden liegen zwischen 0.033 und 3.74 Sekunden. Die Stärke und die Form der Pulse variiert nicht nur von einem Pulsar zum andern sehr stark, sondern auch beim gleichen Pulsar sind sie sehr verschiedenartig (Abb. 1). Auf Zeiten der scheinbaren Ruhe folgen Intervalle mit sehr starken Pulsen (Abb. 2). Mittelt man über eine grössere Anzahl von Pulsen eines bestimmten Pulsars, so ergibt sich jedoch eine mittlere Pulsstruktur, die für denselben Pulsar sehr charakteristisch ist (Abb. 3). Die Pulse selber dauern nur etwa eine Hundertstel Sekunde und sind im Durchschnitt um so kürzer, je kürzer die Periode ist (Abb. 4). Bei genügender Zeitauflösung zeigt sich, dass den Pulsen kleine, ebenfalls veränderliche Unterpulse von etwa einer Tausendstel Sekunde Dauer überlagert sind. Gewisse Gesetzmässigkeiten im zeitlichen Verlauf und Wechsel von Stärke und Form der Haupt- sowie Unterpulse scheinen angedeutet. Es herrscht noch keine Klarheit darüber, ob Stärke und Form in der Quelle selbst oder erst im interstellaren

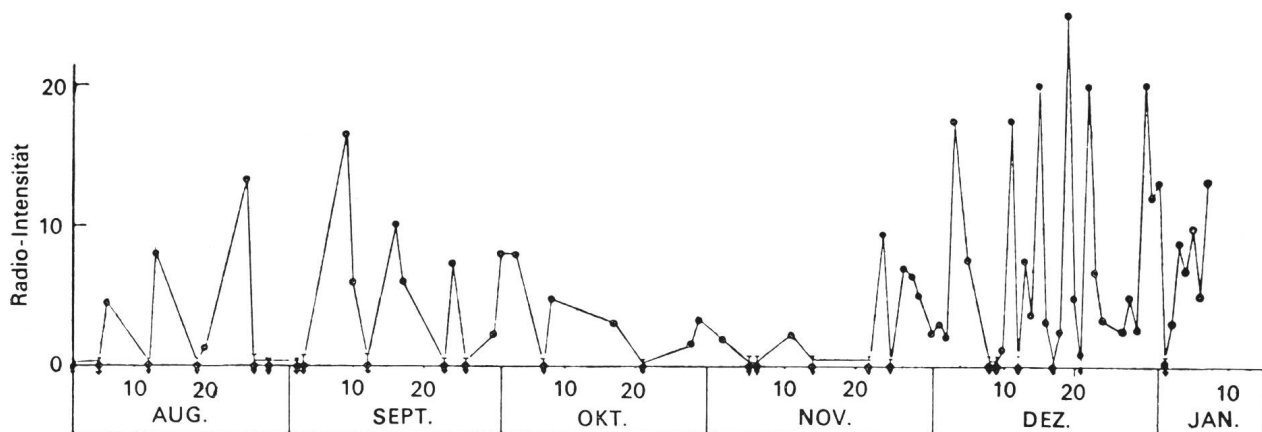


Abb. 2: Der jeweils stärkste Puls eines Tages von CP 1919 in Funktion des Datums (1967). Das Diagramm zeigt, dass ein Pulsar relativ ruhige (Oktober/November) und aktive (Dezember) Phasen haben kann (nach HEWISH und Mitarbeitern).

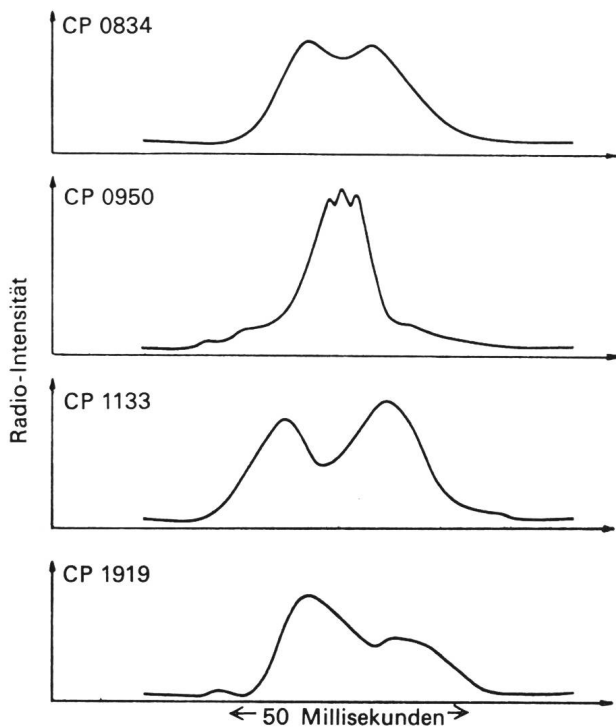


Abb. 3: Die über mehrere Hundert Pulse gemittelte Pulsform verschiedener Pulsare. Obwohl zwei aufeinanderfolgende Pulse vom gleichen Pulsar sehr verschiedene Formen haben können, ist die *mittlere* Pulsform eines Pulsars recht konstant und charakteristisch (nach HEWISH).

Medium moduliert werden; jedenfalls ist der Einfluss der interplanetaren Materie und der Erdatmosphäre – die sogenannte Szintillation – zu vernachlässigen, denn bei der gleichzeitigen Beobachtung eines Pulsars von zwei, einige Tausend Kilometer voneinander entfernten Radioobservatorien ergaben sich absolut gleichartige Pulse. Ausserdem weisen die Pulsare einen je nach Objekt mehr oder weniger deutlichen Dispersionseffekt auf, das heisst, derselbe Puls kommt um so früher auf der Erde an, je kürzer die Wellenlänge ist, bei der beobachtet wird.

Die Perioden der Pulsare erwiesen sich zunächst als unglaublich konstant. Nach einigen Monaten der Beobachtung stand fest, dass diese Perioden sich um weniger als eine Hundertmillionstel Sekunde verändert hatten. Man meinte schon, in den Pulsaren extraterrestrische Uhren höchster Genauigkeit zu besitzen, was für eine experimentelle Überprüfung der Allgemeinen Relativitätstheorie sehr wertvoll gewesen wäre. Mit der Zeit stellte sich jedoch heraus, dass die Perioden von mindestens fünf Pulsaren nicht streng konstant sind, und zwar wächst die Periodendauer bei allen diesen Objekten um minime Beträge an. Der Zuwachs ist am stärksten bei dem Pulsar NP 0532, der bei weitem die kürzeste bekannte Periode hat.

Da die Strahlungsintensität der Pulsare nur wenig über der Nachweisbarkeitsschwelle auch der grössten Radioteleskope liegt, war es zunächst nicht möglich, ihre Position an der Sphäre genau zu bestimmen. Bei

einigen Pulsaren ist es dank raffinierter Spezialmethoden trotzdem gelungen, Präzisionspositionen zu erhalten. Dadurch bot sich nun die Möglichkeit, in diesen Fällen auch nach dem optischen Gegenstück der Pulsare zu suchen. Dieses Suchen verlief – trotz anfänglicher Erfolgsmeldungen, die später jedoch nicht bestätigt wurden – ergebnislos. Bei keinem der in Frage kommenden Pulsare konnte ein optisches Objekt heller als 21.5 magn. gefunden werden. Dies schien die Pulsare ausschliesslich in die Domäne der Radioastronomie zu verweisen, besonders da auch die Versuche, Gamma- oder Röntgenstrahlen von den Pulsaren zu messen, fehlschlügen. Als neueste Überraschung ist Ende Januar 1969 der optische Nachweis eines Pulsars COCKE, DISNEY und TAYLOR vom Steward Observatory in Tucson, nun doch geglückt, und ihre Entdeckung wurde bereits von zwei amerikanischen und einer englischen Forschergruppe bestätigt. Sie fanden, dass ein Stern, der ganz in der Nähe der Radioposition des Pulsars NP 0532 liegt, periodische *Lichtschwankungen* zeigt (Abb. 5 und 6). Die Zusammengehörigkeit der beiden Objekte kann nicht in Zweifel gezogen werden, da die genaue Periode im optischen wie im Radiobereich 0.0330955 Sekunden beträgt, was die kürzeste in der Astronomie überhaupt bekannte Periode darstellt. Die Bedeutung dieser Identifizierung kann überhaupt nicht hoch genug bewertet werden, denn der Stern 18. Grössenklasse, der periodisch für Hundertstelsekunden 3 Grössenklassen heller wird, liegt inmitten des sogenannten Crab-Nebels, jenes Überrestes des von den Chinesen beobachteten Supernovaausbruches aus dem Jahre 1054, und ist von den

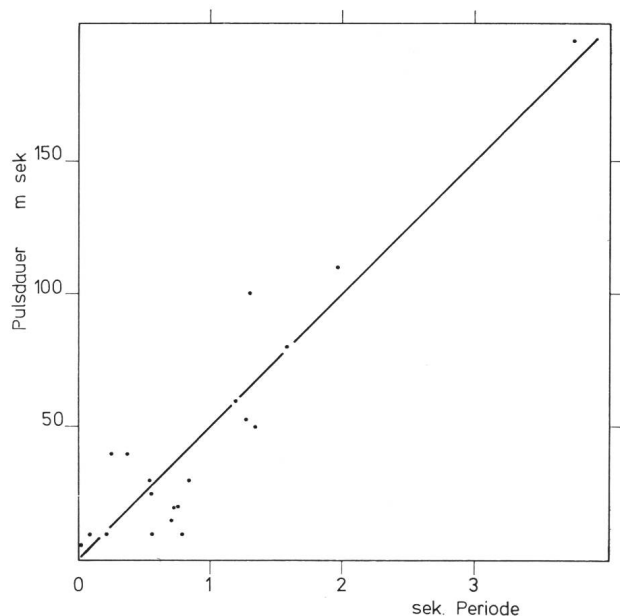


Abb. 4: Beziehung zwischen Periode und Pulsdauer. Die bisherigen Messdaten ordnen sich ungefähr längs der eingezeichneten 45°-Geraden an. Je länger die Periode, desto länger ist die Pulsdauer; dies suggeriert, dass die Pulsare rotieren und mit wachsender Umlaufgeschwindigkeit – ähnlich einem Leuchtturm – Strahlungsbündel immer kürzerer Dauer auf die Erde werfen.

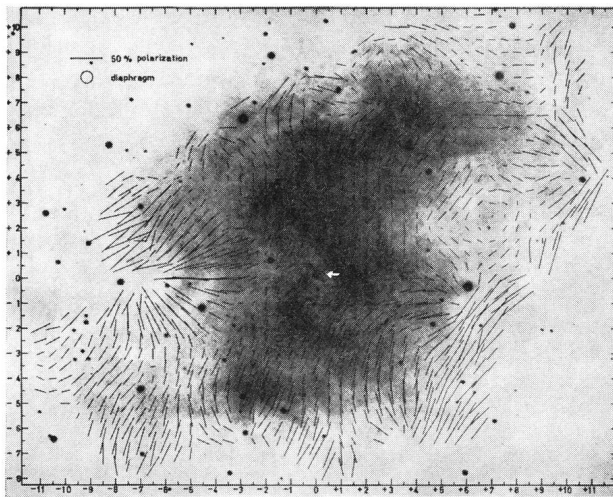


Abb. 5: Aufnahme des Crab-Nebels. Der optisch pulsierende Zentralstern ist mit einem Pfeil markiert. Die schwarzen Linien geben Lage, Richtung und Stärke der Polarisation des Lichtes vom Crab-Nebel an. Die starke Polarisation spricht dafür, dass ein erheblicher Teil des Lichtes Synchrotronstrahlung ist (nach WOLTJER).

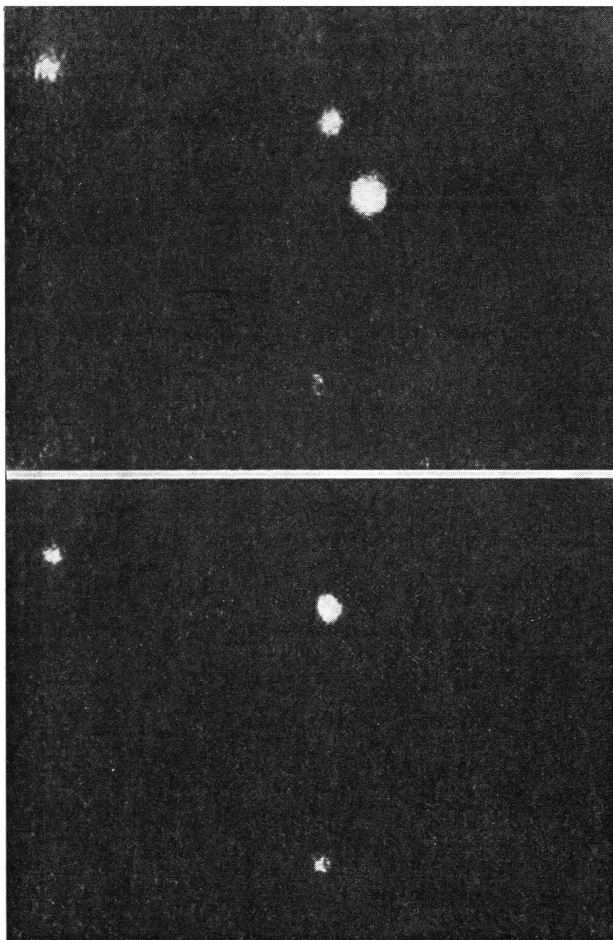


Abb. 6: Zwei sehr kurz belichtete Aufnahmen der beiden Zentralsterne im Crab-Nebel. Die Bilder wurden mit einer Fernsehkamera am 3-Meter-Spiegel der Lick-Sternwarte gewonnen. Oben: der pulsierende Stern ist sehr hell (ca. 15 magn.); unten: derselbe Stern ist fast unsichtbar (ca. 18 magn.) (nach MILLER und WAMPLER).

Astronomen bereits früher als das wahrscheinlichste Zentrum der Explosion betrachtet worden. In diesem Zusammenhang ist von grossem Interesse, dass die Radioposition des Pulsars PSR 0833-45, der mit 0.089 Sekunden die zweitkürzeste Periode hat, ebenfalls in das Gebiet einer Exsupernova fällt, und zwar in den älteren, optischen und Radioastronomen längst bekannten Nebel Vela X. Über die Schlussfolgerungen aus diesen Koinzidenzen wird bei den Pulsarmodellen noch einiges zu sagen sein.

Ende Januar gelang ausserdem PORTER, JENNINGS und O'MONGAIN in Qrendi auf Malta der Nachweis der optischen Pulsation des Pulsars NP 0527. Auch hier stimmt die optische mit der Radioperiode überein, die mit 3.745 Sekunden die längste bekannte Periode eines Pulsars ist. Dieser Pulsar liegt nur 1.5 Grad vom Crab-Nebel entfernt und zeigt praktisch die gleiche Dispersion wie NP 0532. Es wird in der nächsten Zeit ein Hauptanliegen der Pulsarforschung sein, zu entscheiden, ob die Nähe von NP 0527 beim Crab-Nebel zufällig ist, oder ob ein physischer Zusammenhang zwischen diesen Objekten besteht. Sollte das letztere der Fall sein, so wäre man gezwungen, die im Folgenden beschriebenen Modellvorstellungen noch in einzelnen Punkten erheblich zu revidieren.

Die Entfernungen

Zunächst ist es für die Entfernungen der Pulsare von Bedeutung, dass sie ihre Positionen an der Sphäre nicht nachweislich verändern, während sich die Erde in ihrer Bahn um die Sonne bewegt. Dieses Ausbleiben einer trigonometrischen Parallaxe zeigt, dass die Pulsare jenseits der nächsten Fixsterne liegen müssen.

Sodann wurde schon erwähnt, dass die Radiostrahlung von Pulsaren den Effekt der Dispersion zeigt, der nur durch die freien Elektronen in der Milchstrasse hervorgerufen sein kann. Setzt man die interstellare Dichte von freien Elektronen als bekannt voraus, so kann aus der Grösse der Dispersion die Entfernung berechnet werden. Gewisse theoretische Überlegungen haben die Astronomen dazu geführt, für diese Dichte 0.1 freie Elektronen pro Kubikzentimeter anzunehmen. Mit diesem Wert ergeben sich die typischen Distanzen von Pulsaren zu 30 bis 1500 Parsec (1 Parsec = 3.26 Lichtjahre). Die Pulsare würden also innerhalb unserer Milchstrasse zur weiteren Umgebung unserer Sonne gehören. Vor einiger Zeit haben aber HABIG und POTTASCH gezeigt, dass die Argumente, die zum oben genannten Wert für die Elektronendichte führen, unsicher fundiert sind, und dass dieselbe sehr wohl um einen Faktor 10 bis 100 kleiner sein könnte. Dies würde die Pulsardistanzen um den gleichen Faktor vergrössern.

Dass die aus der Dispersion errechnete Entfernung mindestens bei einem Pulsar tatsächlich wesentlich zu klein zu sein scheint, haben DE JAGER und seine Mitarbeiter gezeigt. Sie fanden in dem Pulsar CP 0328 die 21-cm-Linie in Absorption. Diese Linie wird durch den interstellaren, neutralen Wasserstoff hervorgeru-

fen, und sie prägt sich allen bekannten, extragalaktischen Radioquellen auf. Der neutrale Wasserstoff ist hauptsächlich in den Spiralarmen unserer Galaxie konzentriert, und da die verschiedenen Spiralarme sich gegenüber der Sonne mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen, verursachen sie infolge des Dopplereffektes eine geringe Verschiebung der Wellenlänge der Wasserstoff-Absorptionslinie. Aus der beobachteten Wellenlänge einer Absorption in der Nähe der 21-cm-Linie kann man daher sehr zuverlässig schliessen, in welchem Spiralarm der absorbierende Wasserstoff liegt. Die genannten Autoren fanden die durch den sogenannten Perseusarm verursachte Absorption noch deutlich ausgeprägt. Das bedeutet, dass der Pulsar sich jenseits dieses Armes befinden muss, dessen Entfernung von 4.2 Kiloparsec (kpc) wir dank der grundlegenden Arbeiten über die Milchstrassenstruktur von W. BECKER in Basel gut kennen. Diese Entfernung wäre also eine Minimaldistanz für CP 0328; sie übertrifft die Dispersionsentfernung für diesen Pulsar von 267.5 Parsec um einen Faktor 17! Die Gültigkeit dieser aus den Absorptionslinien abgeleiteten Entfernung ist zurzeit allerdings etwas in Frage gestellt, da französische Radioastronomen in Nançay die Absorptionslinie des Perseusarms *nicht* finden konnten, während an einem amerikanischen Observatorium DE JAGERS Ergebnisse anscheinend bestätigt wurden.

In einem anderen Fall kann jedoch kaum mehr bezweifelt werden, dass die Dispersionsmethode einen Wert liefert, der viermal zu klein ist. Wie schon gesagt wurde, gehören der Crab-Nebel und der Pulsar NP 0532 mit grösster Wahrscheinlichkeit zusammen. Die Dispersionsentfernung von NP 0532 ist 564 Parsec, während die Entfernung des Crab-Nebels aus der Expansionsrate des leuchtenden Gases – auf mindestens 50 Prozent genau bestimmt – 2 kpc beträgt.

Einen weniger klaren Fall stellen der Supernova-Überrest Vela X und der in diesem liegende PSR 0833-45 dar, da die Entfernung des ersteren aus optischen und Radiobeobachtungen bisher nur unbefriedigend geschätzt werden konnte. Der wahrscheinlichste Wert ist 500 Parsec. Sofern dieser Wert richtig ist, stimmt er in höchst auffälliger Weise mit der Dispersionsentfernung von 500 Parsec für diesen Pulsar überein. Man wäre hier also geneigt anzunehmen, dass der bisher gewählte Wert von 0.1 für die Dichte der freien Elektronen zutrifft.

Im Ganzen ist das Vertrauen in die aus der Dispersion abgeleiteten Entfernungen stark gesunken, und es zeichnen sich Indizien dafür ab, dass die notwendigen Korrekturfaktoren von Fall zu Fall verschieden sind. Dies würde bedeuten, dass die Dichte freier Elektronen in unserer Milchstrasse erheblichen regionalen Schwankungen unterworfen ist.

Wenn die grosse Distanz von CP 0328 jenseits des Perseusarms richtig ist, so läge dieser Pulsar bereits in äusseren Zonen unseres Milchstrassensystems, wo die Dichte des neutralen Wasserstoffs schon so klein ist, daß er kaum mehr wesentliche Absorptionsphäno-

mene hervorrufen kann. Es stellt sich dann die Frage, ob dieser Pulsar und vielleicht auch andere überhaupt noch zu unserer Galaxie gehören. Diese Zugehörigkeit wird allerdings durch einen anderen Befund höchst wahrscheinlich gemacht: die Verteilung der bisher bekannten Pulsare zeigt eine deutliche Konzentration zur Milchstrassenebene hin (Abb. 7). Dies wäre bei extragalaktischen Objekten ausgeschlossen.

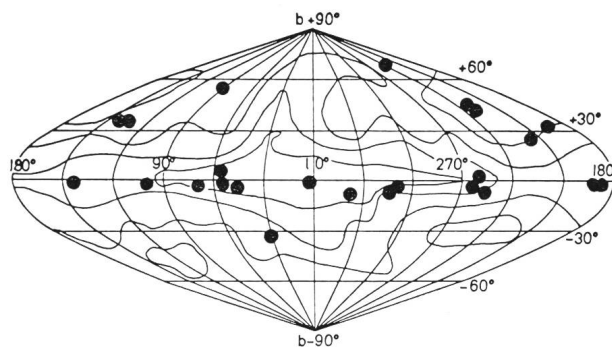


Abb. 7: Die Verteilung der Pulsare an der Sphäre. Es sind die galaktischen Koordinaten aufgetragen, so dass die Hauptebene unserer Milchstrasse mit der Äquatorialebene zusammenfällt. Die 24 Pulsare zeigen eine gewisse Konzentration zum Äquator hin.

Anzahl und Grösse

Zwei interessante Grössen, der Energieauswurf und die Raumdichte der Pulsare, hängen in starkem Masse von den Entfernungen und damit auch von deren Unsicherheiten ab. Dazu kommt, dass wir nicht wissen, ob und wie stark die Strahlung der Pulsare richtungsorientiert ist. Es ist sehr wohl denkbar, dass wir – ähnlich wie bei einem Schiffsleuchtturm, der von einem Flugzeug aus kaum gesehen werden kann –, nur diejenigen Pulsare zu beobachten vermögen, bei denen sich die Erde zufälligerweise in der bevorzugten Strahlungsrichtung befindet. Dann gäbe es viele Pulsare, die uns völlig verborgen bleiben. Andererseits würden dann die beobachteten Pulsare sehr rationell strahlen und kleine Energieverluste in für die Erde irrelevante Richtungen erleiden. Man kann daher für Raumdichte und Energieauswurf zurzeit bestenfalls Schätzungen geben. Vielleicht ist die Zahl von hunderttausend Pulsaren in unserer Milchstrasse ein vernünftiger Wert. Für den Energieauswurf verwenden die meisten Autoren den Wert von 2×10^{31} erg pro Sekunde; diese Strahlungsleistung entspricht einem Hundertstel des Wertes für die Sonne.

Die Kürze und Deutlichkeit der einzelnen Pulse bei den Pulsaren erlaubt einen Schluss auf die Grösse der letzteren. Die veränderliche Strahlung muss nämlich aus Gebieten stammen, die innerhalb der Pulsdauer von der sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzenden Strahlung durchlaufen werden können. Dies beschränkt die Grösse der strahlenden Gebiete – und damit wohl auch der Pulsare selbst – auf etwas weniger als die Grösse der Erde. Die immerhin erhebliche Strahlungsintensität muss also aus einem verhältnismässig sehr kleinen Volumen kommen.

Daten für 24 Pulsare (Stand vom 24. Februar 1969)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Name	Rektaszension (1950,0)	Deklination (1950,0)	l_{II}	b_{II}	Periode (Sekunden)	Puls- dauer (m sec)	\dot{N}_{cdl} ($cm^{-3}pc$)	Entdeckungsort	Bemerkungen
CP 0328	$3^h 28^m 52^s$ ± 15	$+55^\circ$ ± 1	145°	— 1°	0.714518563	15	26.75	Cambridge	Distanz aus HI-Absorption: > 4.2 kpc; schwacher Vor- und Nachpuls.
NP 0527	5 25 45 ± 36	$+21^\circ 58'$ ± 9	183.8	— 6.9	3.74549	~ 200	50.2	National Radio Astr. Observatory Green Bank	1.5° vom Crab-Nebel; mittlere Pulsform: Doppelmaximum; Periode auch optisch nachgewiesen.
NP 0532	5 31 31.46	$+21^\circ 58' 54.8''$	184.6	— 5.4	0.03309114	6	56.4	National Radio Astr. Observatory Green Bank	Im Crab-Nebel; Periode um 38 Nanosec. pro Tag zunehmend; Nebenpuls 14 ms nach Hauptpuls; optisch identifiziert.
MP 0736	7 36 51 ± 1	-40° ± 2	254	— 9	0.375	40	100	Molonglo, Australien	
CP 0808	8 08 58 ± 6	$+74^\circ 38' 10''$ ± 25	140	+34	1.292241325	100	5.77	Cambridge	Mittlere Pulsform: Doppelmaximum?
AP 0823+26	8 23 52 ± 20	$+26^\circ 48'$ ± 5	197.0	+31.7	0.53062	—	19.4	Arecibo	Ziemlich schwach und sporadisch.
PSR 0833-45	8 33 39 ± 1	$-45^\circ 00' 05''$ ± 15	264	— 3	0.0892	10	50	Molonglo	Position koinzidiert mit Exsupernova Vela X, deren Distanz ~ 500 pc.
CP 0834	8 34 25.5	$+6^\circ 19' 13''$	220	+26	1.273763190	55	12.80	Cambridge	Periode zunehmend: $\Delta P/P = 5 \cdot 10^{-15}$; mittlere Pulsform: Doppelmaximum; kon- stante Radioquelle nur $11'$ entfernt.
MP 0835	8 35 34 ± 1	-40° ± 2	260	0	0.765	20	120	Molonglo	
PSR 0904+77	9 04 ± 10	$+77^\circ 40'$ ± 50	135	+34	1.57905	< 80	—	Harvard	Schwach und sehr sporadisch.
PP 0943	9 43	$+8^\circ 00'$	228	+42	1.09	—	17	Puschino, Russland	Sehr stark veränderlich.
CP 0950	9 50 30.65	$+8^\circ 09' 47.0''$	230	+44	0.2530650385	40	2.94	Cambridge	Periode zunehmend: $\Delta P/P = 0.3 \cdot 10^{-15}$; schwacher Nebenpuls 0.1 s vor Hauptpuls.
CP 1133	11 33 27.1	$+16^\circ 07' 35.0''$	240	+70	1.187911025	60	4.87	Cambridge	Periode zunehmend: $\Delta P/P = 4 \cdot 10^{-15}$; mittlere Pulsform: Doppelmaximum (zwei- tes Maximum stärker).
MP 1426	14 26 35 ± 1	-66° ± 2	313	— 5	0.788	10	60	Molonglo	
MP 1451	14 51 33 ± 1	-68° ± 2	314	— 8	0.248	—	—	Molonglo	
HP 1506	15 07 40 ± 30	$+55^\circ 30'$ ± 1	90	+53	0.739677626	20	19.60	Harvard	

MP 1727	17 27 50 ±1	-50 ±2	341	- 9	0.835	30	140	Molonglo
PSR 1749-28	17 49 48.8 ±0.3	-28 05 57 ±8	1.6	- 1.0	0.5621	10	50.88	Molonglo
CP 1919	19 19 37.05	+21 47 06.0	56	+ 4	1.337301109	50	12.55	Cambridge
PSR 1929+10	19 29 52 ±1	+10 52 49 ±15	48	- 4	0.227	10	8	Molonglo
JP 1933+16	19 30 10 ±20	+16 06 ±7	52.3	- 2.0	0.358764	-	143	Jodrell Bank
AP 2015+28	20 15 45 ±20	+28 31 ±5	68	- 4	0.557954	25	14.2	Arecibo
PSR 2045-16	20 45 47.6 ±0.4	-16 27 50 ±12	30.5	-33.1	1.9616633	110	11.4	Molonglo
PSR 2218+47	22 18 ±1	+47 30 ±30	98	- 8	0.538461	30	43.8	Green Bank

Periode zunehmend: $\Delta P/P = 1 \cdot 10^{-15}$;
 Nebenperiode $P_2 = 0.0155089$ s; mittlere
 Pulsform: Doppelmaximum (zweites Maxi-
 mum schwächer).
 Nebenperiode $P_2 = 0.0106879$ s.
 Mittlere Pulsform: Doppelmaximum und
 schwacher Vorpuls.
 Nebenpuls genau halbwegs zwischen
 Hauptpulsen.

Erläuterungen zur Tabelle links:

Die Kolonnen bedeuten: 1 = die mit PSR (= Pulsar) beginnenden Bezeichnungen sind vorläufig; bei ihrer Wahl waren genaue Positionen nicht erhältlich. 2 und 3 = Rektaszension und Deklinationen für 1950.0 nach den bisher besten Messungen mit ihrem wahrscheinlichen Fehler; die Daten basieren auf Radiomessungen ausser für NP 0532, wo die optische Position des Pulsars gegeben ist. 4 und 5 = Galaktische Länge und Breite nach der Definition von 1959. 6 = die bisher besten Perioden (Vorsicht: manche Perioden sind «scheinbare», wie sie von der Erde aus gemessen werden; andere sind auf die Sonne reduziert; die genauesten sind auf den Schwerpunkt des Sonnensystems bezogen). 7 = die durchschnittliche Gesamtdauer eines Pulses. 8 = die Grösse $\int N_e dl$ (N_e = Anzahl freier Elektronen pro cm^3 ; l = Länge des Weges in Parsec zwischen Pulsar und Beobachter) wird aus der Dispersion bestimmt; setzt man einheitlich $N_e = 0.1$ Elektronen/ cm^3 , so erhält man die Pulsarentfernung in Parsec durch Division der Werte in 8 durch 0.1; wegen der Problematik dieser Entfernungen siehe Text.

Modellvorstellungen

Von den zahlreichen Modellvorschlägen für die Pulsare sind alle von dieser fundamentalen Eigenschaft, der grossen Strahlungsdichte, ausgegangen. Da in der Astronomie nur zwei Arten von Objekten bekannt sind, die Weissen Zwerge und die Neutronensterne, die diese Bedingung erfüllen können, haben diese beiden Sterntypen von Anfang an im Zentrum der Diskussion gestanden.

Man hat bisher tatsächlich etwa zwei Dutzend *Weisse Zwerge* gefunden, obwohl sie schwer zu erkennen und daher auch schwer zu entdecken sind. Es sind sehr alte Sterne, die ihren Vorrat an Kernenergie aufgebraucht haben, und die unter ihrer eigenen Gravitationskraft zu kleinen, unerhört dichten und heissen Gebilden zusammengebrochen sind.

Die *Neutronensterne* hingegen blieben bis jetzt rein hypothetische Objekte. Theoretisch kann man zeigen, dass die Weissen Zwerge noch nicht das Endstadium für die Sternmaterie darstellen, sondern unter extremen Drucken können sich Protonen und Elektronen – in Umkehrung des normalerweise beobachteten Prozesses – zu Neutronen vereinen. In Form von Neutronen kann die Masse eines ganzen Sternes in eine Sphäre von weniger als hundert (!) Kilometern Durchmesser gepackt werden. Man glaubt aber, dass es vom Stadium eines Weissen Zwerges keinen Übergang in dasjenige eines Neutronensternes gibt, und daher sagten die Theoretiker voraus, ein Neutronenstern würde sich nur – unter Überspringung des Weissen-Zwerg-Stadiums – bei der Supernova-Explosion eines Sternes bilden.

Anfänglich konzentrierte man sich – vielleicht aus einer gewissen Scheu vor den hypothetischen Neutronensternen – bei den Erklärungsversuchen für die Pulsare auf die Weissen Zwerge. Als Uhrwerkmechanismus für die Erzeugung der so streng periodischen Pulse bot sich entweder Rotation oder Pulsation des Sternes an. Beide Phänomene sind bei gewöhnlichen Sternen sehr wohl bekannt, vollziehen sich aber hier sehr viel langsamer. Auch der Umlaufs- und Schwingungszeit eines Weissen Zwerges sind nach unten

Grenzen gesetzt; es scheint, dass beide nur unter sehr unplausiblen Annahmen kürzer als eine Sekunde werden können. Als immer kürzere Pulsarperioden entdeckt wurden, verloren die Weissen Zwerge an Attraktion, und bei der bisher kürzesten Periode (0.033 Sekunden bei NP 0532) sind die Weissen Zwerge wohl vollends ausgeschlossen.

In dem Masse, in dem die Weissen Zwerge an Tauglichkeit für ein Pulsarmodell verloren, gewannen die Neutronensterne an Erklärungskraft. Wenn ein Stern zu einem Neutronenstern zusammenbricht, muss er, um dem fundamentalen Erhaltungssatz des Drehimpulses zu genügen – ähnlich einem Pirouetten fahrenden Schlittschuhläufer –, unglaublich rasch zu rotieren beginnen. Bei der drastischen Reduktion seines Durchmessers werden dabei zwangsweise gewaltige Energiemengen in Rotationsenergie verwandelt. Es lässt sich berechnen, dass ein frisch eingestürzter Neutronenstern sich etwa eintausendmal in der Sekunde um seine Achse dreht, und dass dann seine Rotationsenergie den phantastischen Betrag von 10^{52} erg erreicht (dies würde den Strahlungsbedarf von hundert Sonnen während einer Milliarde Jahre decken). Es liegt nun nahe anzunehmen, dass ein Pulsar ein solcher Neutronenstern ist, der langsam seine Rotationsenergie in Strahlung umsetzt. Trifft dies zu, so wären drei typische Eigenschaften der Pulsare zu erwarten:

1. sie sind mit Supernovaüberresten assoziiert,
2. ihre (Rotations-)Periode wächst langsam nach Massgabe ihrer Energieverluste an, und
3. kurze Perioden müssen mit kurzen Pulsdauern Hand in Hand gehen, da bei schneller Rotation die aktive Zone nur kurzfristig auf die Erde gebündelt sein kann.

Alle drei Charakteristika haben wir bei den Beobachtungen wenigstens bei einigen Pulsaren kennen gelernt. Somit kann wohl kaum mehr ein Zweifel bestehen, dass es sich bei den Pulsaren um rotierende Neutronensterne handelt. Es bleibt nur noch die Frage nach dem Mechanismus, wie ein solcher Stern Rotationsenergie in Strahlung verwandelt. TH. GOLD hat schon kurz nach der Entdeckung der Pulsare ein Modell entwickelt, das jetzt im Mittelpunkt des Interesses steht.

Nach GOLD hat der Neutronenstern ein sehr starkes Magnetfeld, das das umgebende, von einzelnen Zonen des Sternes selbst laufend nachgelieferte, ionisierte Gas (Plasma) zwingt, die sehr schnelle Rotation starr mitzumachen. Je grösser der Zentrumsabstand dieses Plasmas ist, desto grösser muss die Bahngeschwindigkeit sein. In der Distanz, wo diese Geschwindigkeit diejenige des Lichtes erreicht, werden notwendigerweise Instabilitäten auftreten: ein Grossteil des Plasmas bricht mit relativistischen Geschwindigkeiten aus dem rotierenden System aus, der Rest der Energie wird durch Wechselwirkung mit dem umgebenden, ruhenden Plasma in Strahlung verwandelt, unter anderem zum Beispiel nach dem sogenannten Synchrotronmechanismus. Solche relativ komplizierten Strahlungs-

mechanismen müssen nicht nur für die Radiopulse, sondern auch für die optische Strahlung der Pulsare verantwortlich gemacht werden. Es lässt sich leicht zeigen, dass die Wärmestrahlung, die bei gewöhnlichen Sternen dominiert, bei Neutronensternen nur eine verschwindend kleine Rolle spielt, jedenfalls für den optischen Beobachter, obwohl nach Modellrechnungen an ihren Oberflächen Temperaturen von 1 bis 10 Millionen Grad herrschen. Einerseits nämlich verschiebt gerade diese hohe Temperatur nach dem Planckschen Strahlungsgesetz den Wellenlängenbereich, in dem die meiste Wärmeenergie abgegeben wird, weit aus dem optischen Bereich bis fast zu den Röntgenstrahlen, und andererseits ist die strahlende Oberfläche von Neutronensternen eben äusserst klein. Hieraus folgt, dass wir die Wärmestrahlung im optischen Bereich von einem Neutronenstern nur feststellen können, wenn dieser sich praktisch innerhalb des Sonnensystems befände. Sehr viel günstiger liegt nach dem Gesagten die Situation für die weichen Röntgenstrahlen: hier besteht noch immer berechtigte Hoffnung, die Wärmestrahlung der Neutronensterne wegen der Undurchsichtigkeit der Atmosphäre für kurzweilige Strahlen wenigstens von Raketen aus zu beobachten.

Die Periodenverlängerung beim Crab-Pulsar beträgt zurzeit etwa 0.36 Promille im Jahr. Eine derartige Abbremsung für einen rotierenden Neutronenstern bedeutet, dass ihm etwa 2×10^{38} erg pro Sekunde entzogen werden. Es ist höchst auffallend, dass dieser Energiebetrag von der gleichen Grössenordnung ist wie die gesamten Energieverluste, die der Crab-Nebel durch seine beobachtete optische, Radio- und Röntgenstrahlung erleidet. Es war bisher ein ungelöstes Rätsel, woher die kurzlebigen relativistischen Elektronen ständig nachgeliefert werden, die besonders für die sehr energiereiche Röntgenstrahlung notwendig sind. Diese Frage wäre nun durch den postulierten Neutronenstern zwanglos geklärt.

Noch ein anderes altes Problem der Astronomen scheint von GOLD seiner Lösung zugeführt werden zu können. Bisher gab es nur unbefriedigende Theorien über die Herkunft der riesigen Energiemengen, die in der unsere Milchstrasse erfüllenden sogenannten kosmischen Strahlung – bestehend aus sehr schnellen Elementarteilchen – gespeichert ist. Es lässt sich nun leicht zeigen, dass der Crab-Pulsar – wenn er vor 915 Jahren als frisch zusammengestürzter Neutronenstern begann – bei der beobachteten Abbremsungsrate und den gemessenen Strahlungsverlusten heute noch viel schneller pulsieren müsste, als es tatsächlich der Fall ist. Demnach muss er früher noch sehr viel mehr Energie abgegeben haben als heute. GOLD findet, dass diese zusätzlichen Energieverluste gerade ausreichen, um die kosmische Strahlung während hundert Jahren in unserem ganzen Milchstrassensystem zu erzeugen. Wenn man eine Supernova in hundert Jahren pro Galaxie annimmt, was ein sehr vernünftiger Wert ist, so lässt sich auf diesem Wege die Herkunft der kosmischen Strahlung zwanglos erklären.

Es bleibt die Frage, ob wohl alle Pulsare mit Supernovae assoziiert sind, nachdem dies bisher nur bei zwei von ihnen gezeigt werden konnte. Diese Frage darf wohl bejaht werden. Die genannten beiden Pulsare haben die kürzesten bekannten Perioden und sind daher wohl die jüngsten. Es ist sehr glaubhaft, dass bei den älteren Pulsaren das bei der Explosion ausgeschleuderte Gas bereits genügend in den Raum diffundieren konnte, dass es sich optisch oder radiotechnisch nicht mehr nachweisen lässt.

Wenn somit eine Gesamtkonzeption von starker Überzeugungskraft zur Deutung des Phänomens der Pulsare vorliegt, darf doch nicht verschwiegen werden, dass zahlreiche Einzelprobleme noch ihrer Erklärung harren. Über die tatsächlich auftretenden Strahlungsmechanismen, den die Periode erzeugenden Uhrwerksmechanismus und die Modulation der unterschiedlichen Pulse müssen unsere Vorstellungen noch als rudimentär bezeichnet werden. Wie bereits angedeutet, stellt auch eines der Probleme die Lage des Pulsars NP 0527 dar. Ist seine Nähe beim Crab-Nebel nur zufällig bedingt? Dies wäre nach rein statistischen Überlegungen über die zufällige Verteilung der bisher bekannten Pulsare an der Sphäre höchst unwahrscheinlich. Auf der anderen Seite haben die Astronomen reichlich die Erfahrung gemacht, dass statistische Betrachtungen über die scheinbare Verteilung von Objekten am Himmel oft zu gefährlichen Fehlschlüssen führen können. Sollten ausgerechnet der Pulsar mit der kürzesten Periode, NP 0532, mit demjenigen der längsten Periode, NP 0527, – die aber auffallenderweise gerade die beiden einzigen Pulsare sind, die sich bisher optisch nachweisen liessen – physisch zusammengehören, so müssten die beiden Objekte im Jahre 1054 wohl zusammengestanden haben. Ihre heutige Distanz würde dann aber verlangen, dass sich NP 0527 mit einer Relativgeschwindigkeit von der Grössenordnung von 50000 km/s vom Crab-Nebel entfernt. Die Erklärung einer derartigen Geschwindigkeit würde die allergrössten Schwierigkeiten bereiten.

Obwohl die Pulsare nach dem Gesagten die Astronomen auch noch in Zukunft in Atem halten werden, darf doch schon von einem grossartigen Erfolg gesprochen werden, der durch die glückliche Zusammenarbeit von Astronomen der verschiedenen Fachrichtungen ermöglicht wurde: die Radioastronomen entdeckten unter raffinierter Ausnutzung aller technischen Möglichkeiten die neuen Objekte mit ihren zunächst völlig überraschenden Eigenschaften, den optischen Astronomen gelang in wenigstens einem Fall der Nachweis, dass die Radio- und optischen Pulse von einem Stern im Zentrum einer Exsupernova stammen, und die Theoretiker sehen offenbar ihre Voraussagen, dass das Schicksal einer Supernova in einen Neutronenstern ausmündet, in schönster Weise bestätigt. Dies ist nach nur einjährigen Bemühungen wahrhaftig eine reiche Ernte!

Eingegangen am 20. März 1969

Nachwort (20. Juli 1969)

Seit Abschluss des Manuskriptes haben sich keine umwälzende Ergebnisse über die Pulsare ergeben, vielmehr scheinen die Grundsätze des hier geschilderten Bildes allmählich untermauert zu werden. Es sind jetzt 32 Pulsare bekannt. Ihre Dispersionsentfernungen sind vielleicht doch nicht ganz so schlecht wie befürchtet, da DE JAGERS Befund, dass CP 0328 jenseits des Perseusarmes liege, endgültig widerlegt wurde. Die grossen Anstrengungen, den sicher jungen Pulsar PSR 0833–45 im Supernovaüberrest Vela X auch optisch nachzuweisen, haben keinen eindeutigen Erfolg gezeigt. Gemäss unseren Modellvorstellungen verlängert auch dieser Pulsar seine Periode, – jedoch hat er sie vorübergehend um einen sehr kleinen Betrag verkürzt! Man vermutet, durch eine plötzliche Kontraktion sei die Rotationsgeschwindigkeit vergrössert worden; es lässt sich zeigen, dass der beobachtete Effekt durch eine ganz minime Schrumpfung zustande käme. – Der wichtigste Nachtrag betrifft die Röntgenstrahlung vom Crab-Nebel. Ursprünglich sagten die Theoretiker messbare Röntgenstrahlung bei Neutronensternen voraus, und daraufhin wurde tatsächlich bei den ersten Messungen der kosmischen Röntgenstrahlung von Raketen aus der Crab-Nebel als Röntgenquelle entdeckt. Die Enttäuschung war gross, als sich anlässlich einer Mondokkultation der Quelle zeigte, dass die Röntgenstrahlen aus einem ausgedehnten Gebiet stammen. Nun hat eine Gruppe von Wissenschaftlern der Columbia-Universität bei einem Aerobee-Raketen-Flug am 7. März 1969 messen können, dass *ein Teil* (etwa sieben Prozent) der harten Crab-Röntgenstrahlung doch vom Pulsar NP 0532 kommt: sie fanden im Röntgenbereich überlagerte Pulse, die genau mit der Pulsarperiode übereinstimmen! Das Resultat wurde bereits mehrfach bestätigt.

Adresse des Verfassers: Dr. GUSTAV ANDREAS TAMMANN, Astronomisch-Meteorologische Anstalt der Universität Basel, Venusstrasse 7, 4102 Binningen.

Florida-Reise

Dank einem günstigen Chartervertrag mit der SWISSAIR konnte der Preis der Reise um Fr. 600.– auf Fr. 2625.– gesenkt werden (Mahlzeiten nicht inbegriffen). Anmeldeschluss: 31. August 1969.

Dr. E. HERRMANN, Präsident der SAG,
Sonnenbergstrasse 6, 8212 Neuhausen am Rheinfluss

Voyage en Floride

Grâce à un contrat avantageux avec la SWISSAIR, le prix a pu être réduit de Fr. 600.– et se monte maintenant à Fr. 2625.– (repas non compris). Délai pour les inscriptions: 31 août 1969.

E. HERRMANN, Président de la SAS,
Sonnenbergstrasse 6, 8212 Neuhausen / Chute du Rhin