

## 50 Jahre Entdeckung: Pulsare

In Bezug auf den Beitrag „Einstein@home erspäht 13 unbekannte Pulsare“ in SuW 5/2017, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“, Zielgruppe: Oberstufe, WIS-ID: 1377447

Olaf Kretzer (Volks- und Schulsternwarte Suhl)

Eine exotische Spezies von Himmelskörpern wird - 50! 1967 wurden die ersten Pulsare als erste Vertreter einer Klasse von Endstadien der Sterne, den Neutronensternen, entdeckt. Seitdem folgten viele weitere Entdeckungen, und aktuell kennen wir ca. 3000 Pulsare. Der Text soll einen kurzen historischen Abriss geben über das Wesen dieser außergewöhnlichen Objekte, ihre Entdeckungsgeschichte und ihrer Bedeutung für unser Verständnis von kosmischen Objekten. Kleine Aufgaben geben zum Schluss Gelegenheit, physikalische und mathematische Kenntnisse anzuwenden.

| Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag (Oberstufe) |   |   |
|---|---|---|
| <b>Astronomie</b>                               | Geschichte der Astronomie, Sterne, Raumfahrt, Planeten      | Endstadium der Sternentwicklung, Neutronenstern, Pulsar, extrasolare Planeten, Raumfahrt zum „Rand“ des Sonnensystems, Zukunft der Raumfahrt, GPS - Navigationssysteme                                      |
| <b>Physik</b>                                   | Mechanik, Elektromagnetismus, Relativitätstheorie, Optik    | Masse, Dichte, Drehimpuls, Drehimpulserhaltung, Magnetfeld, Bewegung geladener Teilchen im Magnetfeld, Synchrotronstrahlung, Energieerhaltung, Gravitationswellen, Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen |
| <b>Fächer-<br/>verknüpfung</b>                  | Astro-Geschichte, Astro-Philosophie                         | Wissenschaftsgeschichte, Nobelpreis<br>Außerirdisches Leben, Kontaktaufnahme  |
| <b>Lehre<br/>allgemein</b>                      | Kompetenzen<br>Querschnittskompetenzen<br>Unterrichtsmittel | Fachwissen<br>Vergleich und Transfer von Erkenntnissen aus verschiedenen Bereichen der Astronomie und Raumfahrt, Aufgaben   |



Abbildung 1: Überlagerung einer optischen Aufnahme des Krebsnebels (rot) mit einer Aufnahme im Röntgenbereich gewonnenen (blau). © NASA/HAST/CXC/ASU, J. Hester et. al., [https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/152733main\\_image\\_feature\\_618\\_vs\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/152733main_image_feature_618_vs_full.jpg)

## 50 Jahre Entdeckung: Pulsare

Im Sommer 1967 entdeckten Antony Hewish und Jocelyn Bell bei Messungen mit dem Mullard Radio Observatorium bei Cambridge (siehe Abb. 2) Radiosignale extremer Gleichmäßigkeit (siehe Abb. 3). Auf Grund dieser Tatsache wurde anfangs über eine künstliche Quelle dieser Signale spekuliert - die Idee vom ‚little green man‘. Durch gründliche Kontrolle des Radioteleskops und seiner Umgebung - so wurde überprüft ob vorbeifahrende Fahrzeuge Ursache für die gemessenen Signale sein könnten - konnten nach und nach alle potenziellen Fehlerquellen ausgeschaltet werden. Das untersuchte Objekt, welches die Bezeichnung CP 1919 trug, wurde zum ersten Exemplar einer neuen Gattung von Himmelskörpern, den Pulsaren, und erhielt die Bezeichnung PSR B1919+21.



Abbildung 2: Mullard Radio Observatorium bei Cambridge. © Department of physics, university Cambridge

In den folgenden Jahren wurde klar, dass die Natur dieser Objekte schon mehr als 30 Jahre vorher bekannt war. Bereits 1931 berechnete der russische Physiker Lew Landau die Möglichkeit der Existenz extrem kompakter Objekte, den so genannten Neutronensternen. Kurz darauf, 1933, untersuchten Walter Baade und Fritz Zwicky diese Objekte. Sie stellten bei der genauen Analyse ihrer Sternentwicklungsmodelle fest, dass in Folge von Supernovaexplosionen Neutronensterne als ein mögliches Endstadium der Sternentwicklung entstehen könnten. Im Jahre 1939 berechneten Robert Oppenheimer und George Michael Volkoff das erste theoretische Modell eines Neutronensterns auf Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins mit der Annahme einer reinen Neutronenflüssigkeit.

Nach der Entdeckung der Pulsare schlug Thomas Gold bereits 1968 rotierende Neutronensterne als Quelle der beobachteten Radiostrahlung vor. Nach anfänglich sehr kontrovers geführter Diskussion setzte sich diese Interpretation schließlich durch.

Im Jahre 1974 erhielt Antony Hewish für die Erstentdeckung eines Pulsars den Nobelpreis für Physik. Bei der Preisverleihung wurde Jocelyn Bell übergangen, ein Fakt welcher nach wie vor stark in der Kritik steht.

Die theoretischen Modelle sowie die in den letzten 50 Jahren erfolgten Beobachtungen ermöglichen inzwischen ein relativ gutes Verständnis der Entstehung und des Aufbaus eines Neutronensterns sowie von dessen Entwicklung. Der Zentralbereich des Neutronensterns ist auf Grund seiner enorm hohen Dichte auch heute noch im Zentrum der wissenschaftlichen Forschung. Auf Grund der starken Gravitationskräfte auf und in der Nähe dieses ultrakompakten Objektes kann und muss eine exakte rechnerische Analyse nur auf Basis der Einstein'schen Allgemeinen Relativitätstheorie erfolgen.

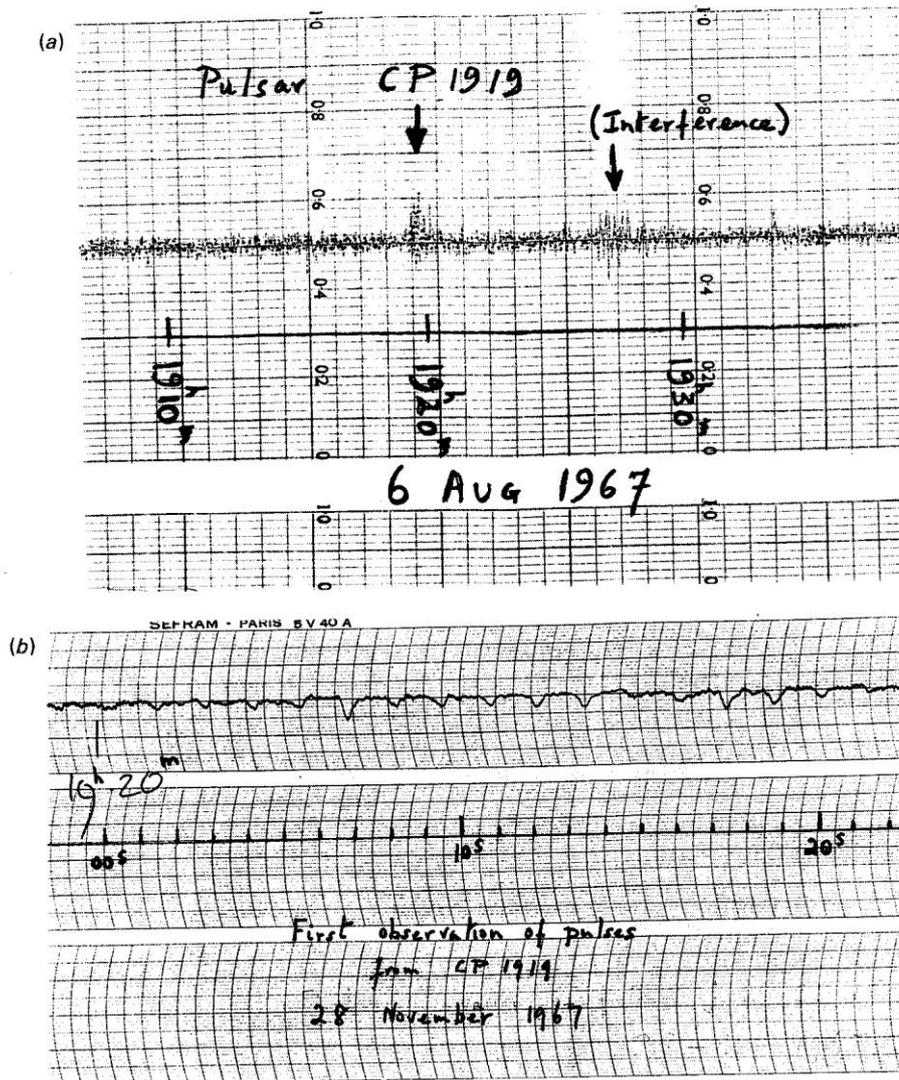


Abbildung 3: Daten der ersten Pulsarbeobachtung

(a) Die erste Messungen des späteren Pulsars PSR 1919+21 mit Interferenzen, welche gleichzeitig gemessen wurden

(b) Beobachtungsdaten vom 28.11.1967

© [http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/pulsars/pulsars4\\_1.htm](http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/pulsars/pulsars4_1.htm)

## Einschub Neutronensterne

Neutronensterne stellen ein mögliches Endstadium der Sternentwicklung für Sterne mit Massen im Bereich von etwa 8 bis 25 Sonnenmassen dar. Sie entstehen nach Supernovaexplosionen des Typs II (Ib oder Ic). Ihre Radien liegen im Bereich zwischen 10 km und 12 km, und sie besitzen dabei Massen von 1,2 Sonnenmassen bis 2 Sonnenmassen. Damit ergeben sich Dichten für diese Objekte, welche im Bereich der Dichten der Kernmaterie ( $10^{17} \text{ kg/m}^3$ ) liegen. Die meisten der bekannten Neutronensterne können wir als Pulsare beobachten.

Beim Kollaps der Vorgängersterne steigt die Flussdichte des Magnetfelds auf Grund des Gesetzmäßigkeiten der Elektrodynamik (deutlich kleinerer Querschnitt bei gleich starkem Magnetfeld) extrem an. Unter bestimmten Umständen (Magnetfeld des Vorgängersterne war bereits sehr stark, Rotationsdauer des Neutronensterns  $< 10 \text{ ms}$ ) können Neutronensterne entstehen, deren Magnetfeld deutlich stärker ist als das von „normalen“ Neutronensternen. Man nennt diese Objekte dann Magnetare.

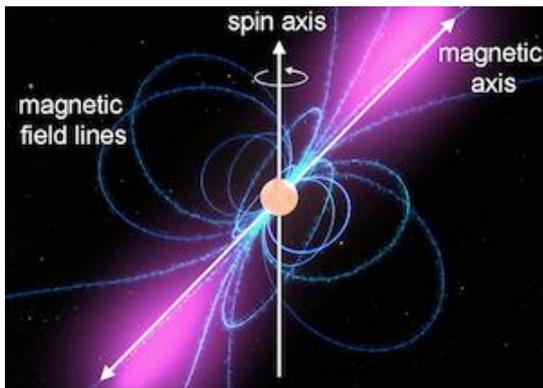


Abbildung 4: Bei Pulsaren fallen die magnetische Achse und die Rotationsachse nicht zusammen.

© NASA/Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab, [https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron\\_stars1.html](https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron_stars1.html)

Beim Kollaps des Vorgängersterns wird ein großer Teil des Drehimpulses beibehalten (Drehimpulserhaltung). Dies führt auf Grund der deutlichen Verkleinerung des Objektradius (Pirouetteneffekt) zu einer starken Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit.

Die am Äquator auftretende maximale Geschwindigkeit kann dabei in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit sein!

Die Rotation des Neutronensterns findet innerhalb eines heißen, ionisierten Gasnebels statt, welcher in Folge der Supernovaexplosion entstand. Das starke Magnetfeld ( $B = 10^8$  Tesla) beeinflusst dabei die Ausbreitung der geladenen Teilchen des Gasnebels.

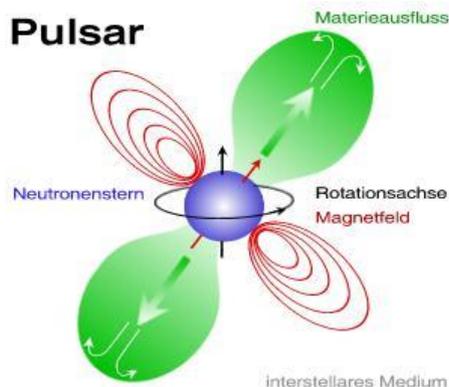


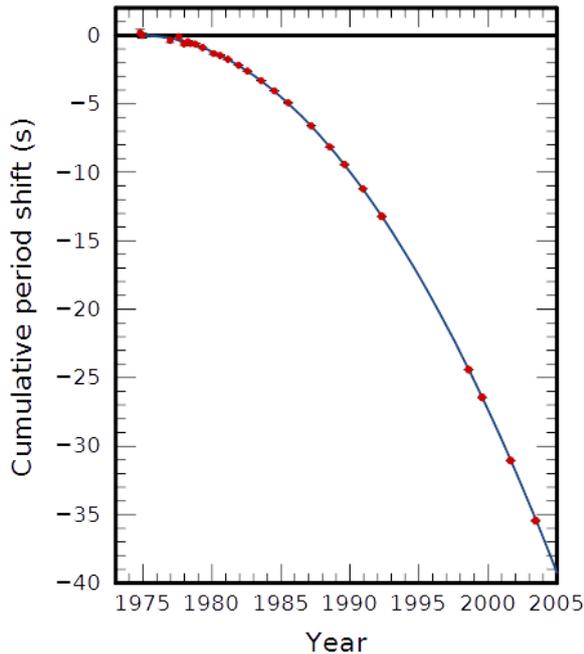
Abbildung 5: Schema Abstrahlung von Radiostrahlung durch einen Pulsar.

© Spektrum, <http://www.spektrum.de/lexikon/astonomie/pulsar/363>

Die sich entlang der Magnetfeldlinien bewegenden geladenen Teilchen senden elektromagnetische Wellen in Form von Synchrotronstrahlung ab. Als Synchrotronstrahlung bezeichnet man elektromagnetische Strahlung, die tangential zur Bewegungsrichtung geladener Teilchen abgestrahlt wird, wenn sich diese mit relativistischer Geschwindigkeit krummlinig (also beschleunigt) bewegen. Der Ort der

Ausstrahlung der elektromagnetischen Welle rotiert mit der Rotationsfrequenz des Pulsars um die Rotationsachse. Beobachter, welche sich in der Ausstrahlungsrichtung des Pulsars befinden, werden regelmäßig - abhängig von der Rotationsperiode - von dieser Strahlung „getroffen“ und detektieren extrem genau periodisch wiederkehrende Impulse dieser kosmischen Leuchttürme. Über viele Jahre hinweg waren sie genauer als die maximal erreichbare Ganggenauigkeit der besten irdischen Atomuhren. Allerdings zeigte sich bei den meisten untersuchten Pulsaren eine Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit (siehe Abb. 6) bedingt durch den Energieerhaltungssatz. Die Energie zur Aussendung der Strahlung wird zum größten Teil aus der Rotationsenergie genommen. Darüber hinaus ergibt sich aus den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie, dass eine weitere Energieabgabe in Form von Gravitationswellen stattfinden muss.

Exemplarisch konnte dies an einem besonderem Pulsar, dem Doppelpulsar PSR B 1513 + 16 (PSR: Pulsating source of radio emission), gezeigt werden. Eigentlich liegt hier nur ein Pulsar mit einem weiteren Neutronenstern in einem Doppelsystem vor. Die Astronomen Russell Alan Hulse und Joseph Taylor entdeckten dieses Objekt im Jahr 1974 und untersuchten die Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und konnten so die Vorhersagen der Relativitätstheorie bestätigen. Sie erhielten dafür 1993 den Nobelpreis für den ersten indirekten Nachweis der Existenz der Gravitationswellen. Der direkte Nachweis der Existenz von Gravitationswellen konnte erst 2016 erbracht werden.



**Abbildung 6: Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit.**

© J.M. Weisberg, J.H. Taylor: *Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis*, arXiv:astro-ph/04071v1, By Inductiveload - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9538634>

Praktische Bedeutung erhielten die Pulsare auch in der Raumfahrt. Als 1973 die Raumsonden Pioneer 10 und 11 gestartet wurden, um das äußere Sonnensystem zu erkunden und perspektivisch den freien Weltraum zu erreichen, wurden Plaketten mit geschickt, welche den potenziellen „Findern“ eine Vorstellung von der irdischen Zivilisation vermitteln sollten. So fliegt beispielsweise Pioneer 10 in Richtung des Sterns Aldebaran, dem Hauptstern des Sternbilds Stiers (in 67 Lichtjahren Entfernung). Die

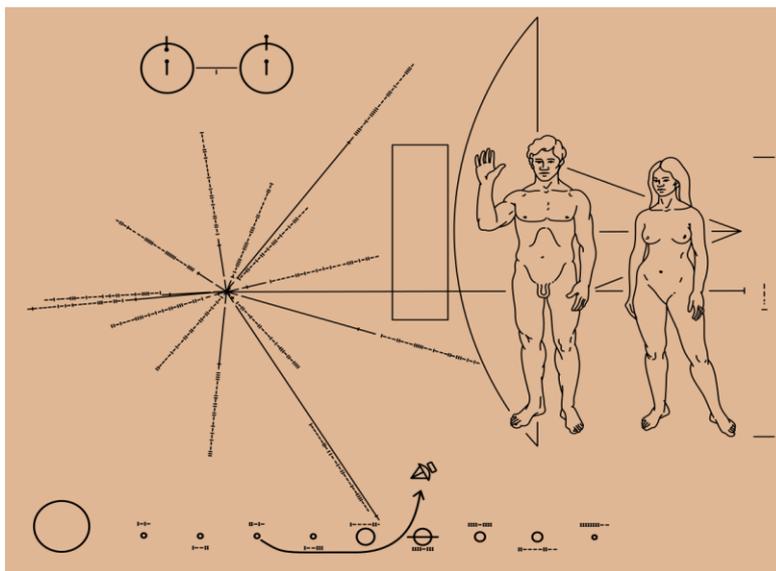
Flugdauer beträgt allerdings 2 Millionen Jahre! Neben verschiedenen Motiven und Informationen wurde mittels der Plakette der Ort der Erde mit Hilfe der Positionen von 14 Pulsaren, deren Periodendauern mit angegeben wurden, dargestellt.

Im Jahre 1992 wurden bei dem 1990 von Aleksander Wolszczan entdeckten Pulsar PSR 1257+12 durch genaue Analyse der empfangenen Strahlung drei Planeten entdeckt. Im Jahre 1994 wurde um den Pulsar PSR B1620-26 ein weiterer Planet gefunden. Man zählt diese Entdeckungen üblicherweise nicht zu den Exoplaneten, da sie keinen Stern, sondern eine „Sternleiche“ umlaufen! So wurden die ersten „offiziellen“ Exoplaneten erst 1995 entdeckt.

Eine weitere potenzielle Anwendung der Pulsare könnte ein perspektivisches intergalaktisches GPS werden. Während das irdische GPS zur Bestimmung der genauen Position auf der Erdoberfläche hochgenaue Zeitsignale von mindestens drei Navigationssystemsatelliten erfordert (im vollständigen Betrieb: GPS (USA), GLONASS

(Russland), im Teilbetrieb: Galileo (Europa), Beidou (China)), können perspektivische Navigationssysteme die hochgenauen Zeittakte der Pulsare nutzen.

Es zeigte sich in den letzten 50 Jahren allerdings, dass diese Objekte nicht nur Radiostrahlung aussenden sondern auch Strahlung in anderen Wellenlängenbereichen. Die zur Charakterisierung häufig verwendeten Bezeichnungen (Röntgenpulsare, Gammapulsare, ..) sind allerdings irreführend.



**Abbildung 7: Plakette der NASA Raumsonden Pioneer 10 und 11.** © <https://solarsystem.nasa.gov/galleries/pioneer-plaque>

## Röntgenpulsare

Es existieren Radiopulsare, die neben der Radiostrahlung auch Röntgenstrahlung aussenden. Ein Beispiel ist der Vela-Pulsar. Ursache für die gepulste Röntgenstrahlung ist hier wie bei der Radiostrahlung die Synchrotronstrahlung. Das Profil der Röntgenpulse zeigt einen anderen Verlauf als im Radiobereich. Ein Röntgenpulsar wäre also exakt gesehen ein Pulsar, der u. a. auch Röntgenstrahlung aussendet.

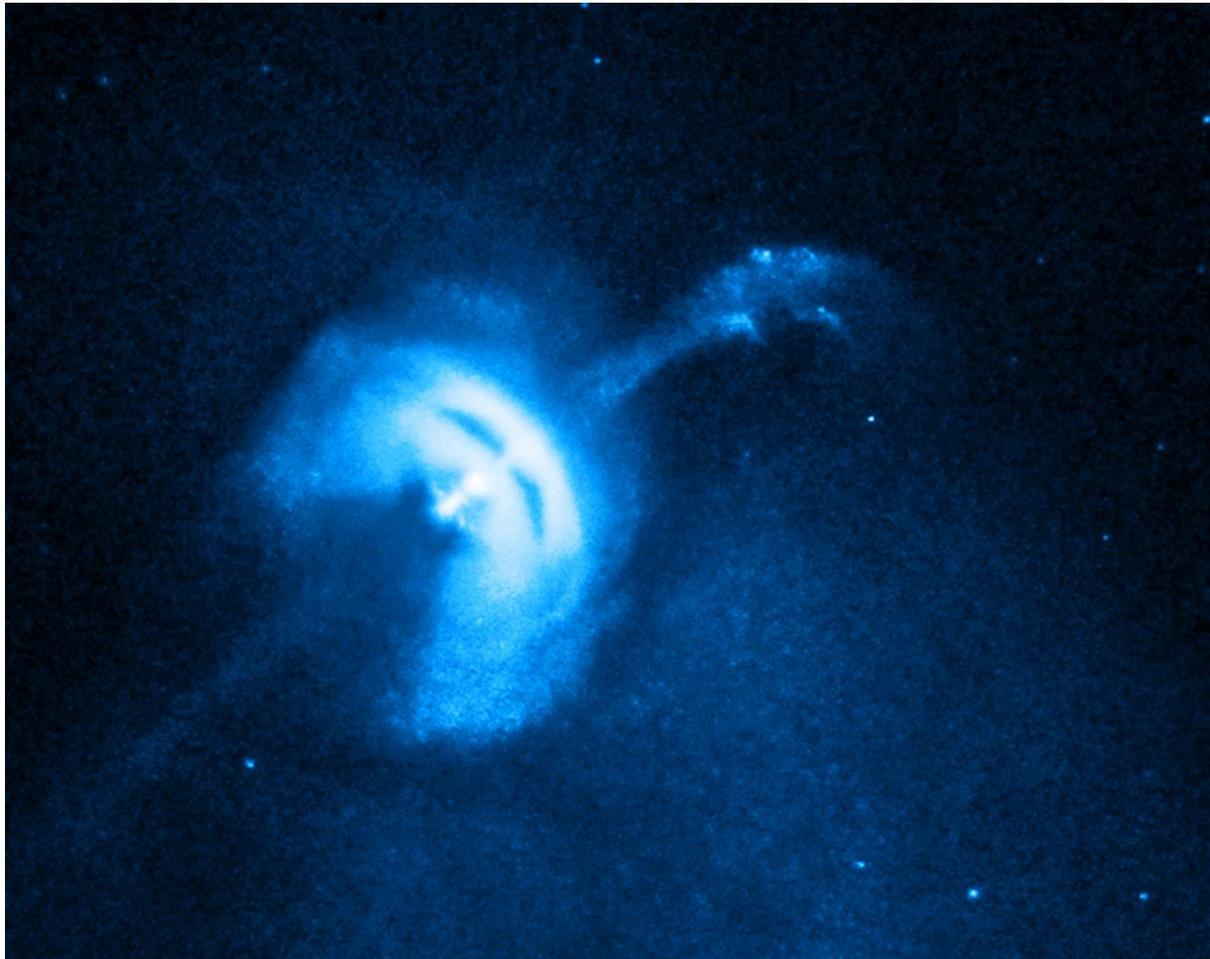


Abbildung 8: Der Vela Pulsar im Röntgenlicht.

© NASA/CXC/Univ of Toronto/M.Durant et al; Optical: DSS/Davide De Martin, [https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/vela\\_lq.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/vela_lq.jpg)

## Gamma pulsare

Einige Pulsare, wie der Vela Pulsar, emittieren einen Teil ihrer Strahlungsenergie im hochenergetischen Bereich der Gammastrahlung. Die genauen Mechanismen der Energiefreisetzung der Gamma Pulsare sind allerdings noch nicht vollständig verstanden.

## Optische Pulsare

Einige Pulsare emittieren nicht nur in den genannten Wellenlängenbereichen Energie, sondern auch im optischen Bereich. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Pulsar im Krebsnebel (siehe Abb. 9). Am Ort dieses Pulsars leuchtete im Jahre 1054 eine Supernova auf, die in verschiedenen Chroniken beschrieben wurde. Sie wurde als heller Stern am Tageshimmel charakterisiert und war so hell, dass man wochenlang nachts lesen konnte.

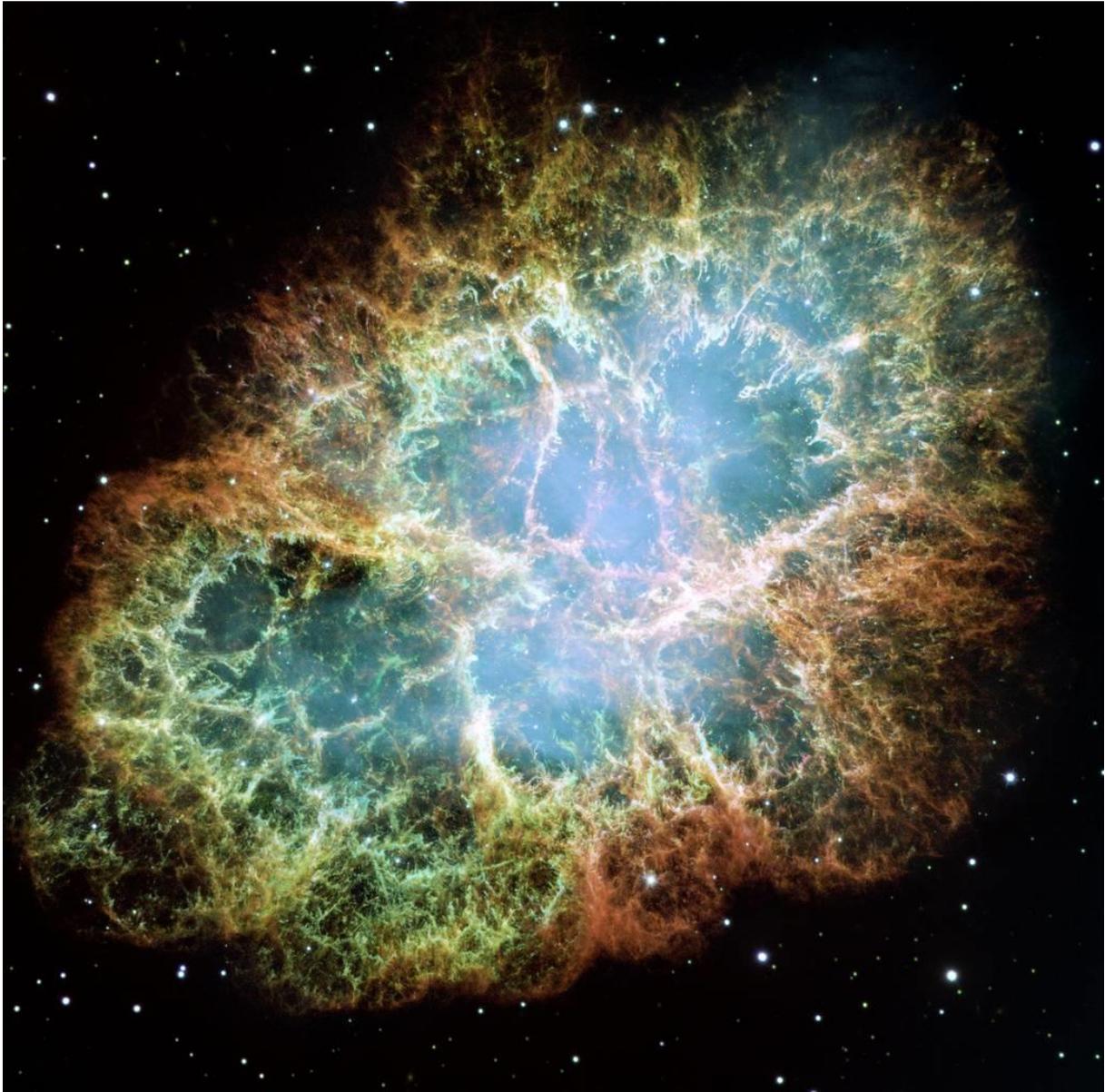


Abbildung 9: Krebsnebel im Optischen, aufgenommen durch das Hubble-Weltraumteleskop.  
© NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU), [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_1604.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1604.html)

## Ausblick

Auch 50 Jahre nach Entdeckung der ersten Pulsare bewahren diese Objekte noch einige Geheimnisse, welche bisher nicht verstanden sind. Die unterschiedlichen Formen dieser ultrakompakten Objekte erschweren zum einen deren Erforschung, sind aber auch ein Ausdruck der Vielfalt der Natur.

## Aufgaben

1. Berechne die Größe eines Neutronensterns mit der Masse der Sonne und der Dichte der Kernmaterie! ( $\rho = 10^{17} \text{ kg/m}^3$ ,  $M = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ )

$$\rightarrow M = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \cdot \text{m}^3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{17} \text{ kg}}} \approx 17 \text{ km.}$$

2. Änderungen in den empfangenen Signalen eines astronomischen Objektes lassen Rückschlüsse darauf ziehen, wie groß die Quelle des Signales ist, da die Änderungen sich maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können.

- a.) Die Pulsdauer eines Signals beträgt ca. 3 % der Periode. Was lässt sich daraus über die Größenordnung des Objektes aussagen?

Annahme :  $T = 3 \text{ ms}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

$$\rightarrow s = 0,1 \text{ ms} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^4 \text{ m} \approx 30 \text{ km.}$$

- b.) Die Pulse zeigen Strukturen bis in den Bereich  $< 10^{-6} \text{ s}$ . Welche Größenordnung besitzen die Ausdehnungsgebiete der Strahlung?

$$\rightarrow s = 1 \mu\text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^4 \text{ m} \approx 300 \text{ m.}$$

$\rightarrow$  Dies deutet auf Ausdehnungsgebiete einer Größe von ca. 300 m hin.

- c.) Das Alter eines Pulsars kann abgeschätzt werden mit der Gleichung:  $A = \frac{1}{2} \cdot (T/T')$   
( $T$  .... Rotationsperiode,  $T'$  .... Änderungsrate:  $10^{-19}$  bis  $10^{-13}$ ).

Für den Krebspulsar gelten:  $T = 33 \text{ ms}$ ,  $T' = 4,2 \cdot 10^{-13}$ .

Wie alt ist ungefähr der Krebspulsar nach dieser Abschätzung?

$$\rightarrow A = \frac{1}{2} \cdot 33 \cdot 10^{-3} \text{ s} / (4,2 \cdot 10^{-13}) = 3,93 \cdot 10^{10} \text{ s} = 1250 \text{ Jahre.}$$

## Einige Quellen

### Pulsarkatalog / Pulsarastronomie

- <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>
- <http://www.pulsarastronomy.net/pulsar/>

### ART und Pulsare

- <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/news/2008/doppelter-pulsar-bestaetigt-einsteins-relativitaetstheorie/>
- <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.201590077/abstract>

### Entdeckungsgeschichte

- [http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/pulsars/pulsars\\_index.htm](http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/pulsars/pulsars_index.htm)