

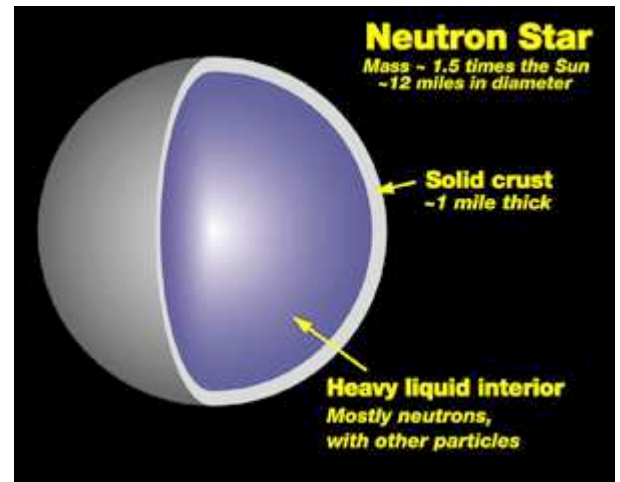
Die Einstein@Home Arecibo Radio Pulsar Suche

Was ist ein Radiopulsar?

Radiopulsare können entstehen, wenn massereiche Sterne ihr Leben aushauchen. Hat ein massereicher Stern seinen gesamten für die Energieerzeugung vorhandenen Kernbrennstoff aufgebraucht, stößt er in einer Supernova-Explosion einen großen Anteil seiner Materie in den Raum; der innere Kern aber, der kaum mehr als ca. 1,5 Sonnenmassen enthält, fällt, getrieben von seiner eigenen Schwerkraft, in sich zusammen. Die Materie im Kern wird dabei so sehr verdichtet, dass die Elektronen in die Protonen gedrückt werden und zu Neutronen rekombinieren. Nun ist ein so genannter Neutronenstern entstanden. (Ist ein Neutronenstern schwerer als zwei bis drei Sonnenmassen, kollabiert er weiter und wird zu einem Schwarzen Loch.)

Radiopulsare sind Neutronensterne mit einem extrem starken Magnetfeld. Außerdem rotieren sie, wobei Rotations- und Magnetfeldachse gegeneinander geneigt sind. Freie Elektronen, die sich in der Umgebung (des Neutronensterns) befinden, werden entlang der Magnetfeldlinien auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und emittieren unter anderem polarisiertes, zu einem engen Kegel gebündeltes Licht im Radiowellenbereich (ähnlich wie Synchrotronstrahlung in einem Teilchenbeschleuniger). Streift dieser Lichtkegel die Sichtlinie in Richtung Erde, sehen wir regelmäßig die Radioemission aufflackern, wie bei einem Leuchtturm. Einige Radiopulsare lassen sich auch im optisch sichtbaren Licht sowie in Röntgen- und Gammastrahlung beobachten.

Bisher konnten Neutronensterne in erster Linie als eben solche Radiopulsare beobachtet werden. Derzeit sind ungefähr 1800 Radiopulsare und zusätzlich ein halbes Dutzend Röntgenpulsare bekannt. Nur ein kleiner Anteil dieser bekannten Pulsare ist in einem Doppelsystem gebunden, wobei die zweite Komponente z. B. auch ein Weißer Zwerg sein kann. Der Vorteil von Doppelsystemen ist, daß dann mithilfe der Keplerschen Gesetze die Masse der einzelnen Komponenten bestimmt werden kann. Allerdings ist die bekannte Stichprobe nicht groß genug, um eine zuverlässige obere Grenze für die Masse von Neutronensternen bestimmen. Diese Obergrenze stellt gleichzeitig den Übergang zu Schwarzen Löchern dar. Das Wissen um diese Größe würde wiederum Aufschluß über die Physik von solch hoch verdichteter Materie geben.



Unter einer harten Kruste aus Eisen befindet sich die flüssige Kernmaterie, bestehend aus Neutronen und Elementarteilchen. (1 Meile entspricht ungefähr 1.6 Kilometern)

Credit: NASA

Warum suchen die Astronomen nach Radiopulsaren in Doppelsternsystemen?

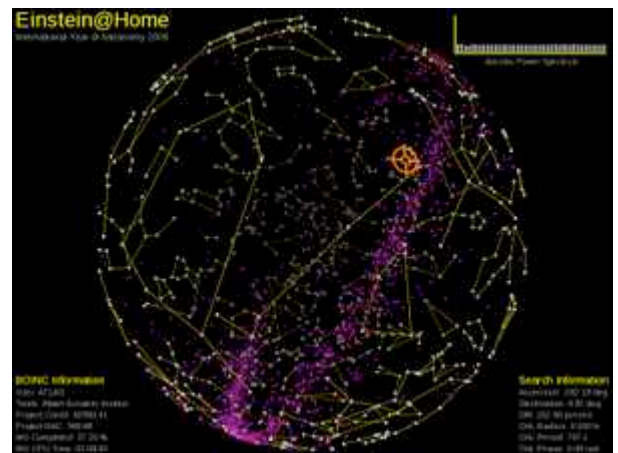
Die meisten Pulsare sind schwache Radioquellen. Daher bedarf es sehr großer, leistungsstarker Teleskope, wie z.B. des Arecibo-Teleskops in Puerto Rico, um sie zu detektieren. Astronomen haben den gesamten Himmel mit verschiedenen Teleskopen abgesucht und dabei Pulsare in der Milchstraße und in benachbarten Kugelsternhaufen gefunden. Pulsare in anderen Galaxien entziehen sich noch unserer Beobachtung, da sie zu schwach strahlen. Die meisten Pulsare konnten allerdings nur durch Signalintegration gefunden werden: Dabei wird eine große Anzahl von Aufnahmen, die den Radiopuls enthalten, gezielt überlagert, um den Radiopuls deutlich von dem Rauschhintergrund abzuheben.

Diese Methode funktioniert aber für die meisten, in kurzperiodischen Doppelsystemen gebundenen Pulsare nicht. Da wir diese Doppelsysteme häufig direkt von der Seite oder in einem Winkel zu uns gekippt betrachten, wird das Signal durch die Zeitverzögerung zwischen den uns näheren und den weiter entfernten Beobachtungspunkten verschmiert. Dadurch hebt sich das Signal dann weniger stark vom Hintergrund ab. Da sich die meisten Sterne in Doppelsystemen befinden, ist dieser Umstand für die Beobachtung hinderlich. Folglich wird eine große Anzahl an Pulsaren bei diesen herkömmlichen Durchmusterungen übersehen.



Die meisten bekannten Pulsare lassen sich nur mit den größten Radioteleskopen beobachten, wie z. B. der 305-Meter-Antenne bei Arecibo, Puerto Rico (siehe Foto), dem Parkes Observatory (New South Wales, Australia), dem Jodrell Bank Observatory (Manchester, England), und dem Green Bank Telescope (Virginia, USA).

Courtesy of the NAIC - Arecibo Observatory, a facility of the NSF



Der Einstein@Home Bildschirmschoner für die Radiopulsarsuche zeigt die Positionen der bekannten Pulsare als violette Punkte an.

Credit: AEI Hannover

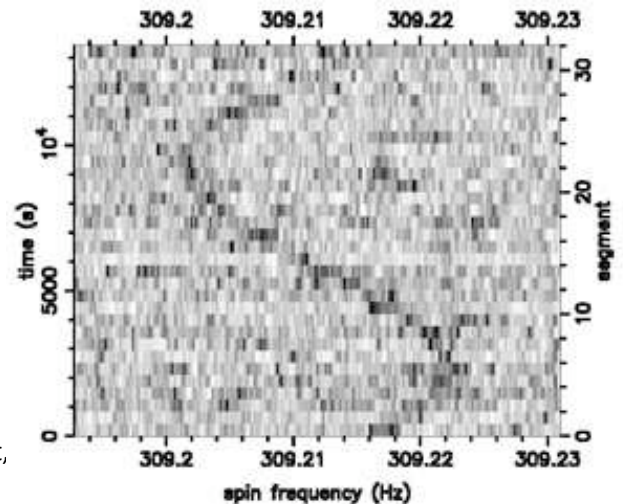
Wie funktioniert unsere neue Suchmethode im Rahmen des Projekts Einstein@Home?

Unsere neue Suchmethode basiert auf einer sogenannten Blindsuche: Vorab sind weder Abstand zur Erde, Rotationsfrequenz des Pulsars noch Bahnparameter des Radiopulsarsystems bekannt. All diese Parameter verbergen sich möglicherweise in dem betrachteten Datensatz. Wir müssen daher bei dieser Suche den Parameterbereich sehr weit fassen, um eine möglichst große Detektionswahrscheinlichkeit zu erhalten.

Der interstellare Raum ist mit Gas und Staub angefüllt. Einige dieser Wolken sind bis zu 8000 K heiß und enthalten daher ionisiertes Gas und freie Elektronen. Radiowellen, die solche Wolken durchqueren, werden dabei frequenzabhängig verzögert, was bedeutet, dass höherfrequente Radiowellen uns eher erreichen als niederfrequente, die eine Quelle zum selben Zeitpunkt verlassen (Zeitverzögerung, Dispersion). Je höher die Elektronendichte in dem Gas entlang der Sichtlinie ist, desto größer ist auch die Zeitverzögerung. Da Radioteleskope über eine große Bandbreite an Radiofrequenzen beobachten, muss diese Laufzeitverzögerung korrigiert werden. Da das genaue Maß der Laufzeitverzögerung von der zunächst unbekannt Entfernung des Pulsars sowie der Anzahl der Elektronen entlang dieser Strecke abhängt, errechnen wir vorab 628 fiktive Testwerte zur Korrektur der verzögerten Lichtlaufzeit. Basierend auf jeder dieser Testreihen suchen wir dann unabhängig voneinander in den vorhandenen Beobachtungsdaten nach Pulsaren. Dieser Prozess wird Entzögerung (Dedispersion) genannt und von den Einstein@home Servern durchgeführt.

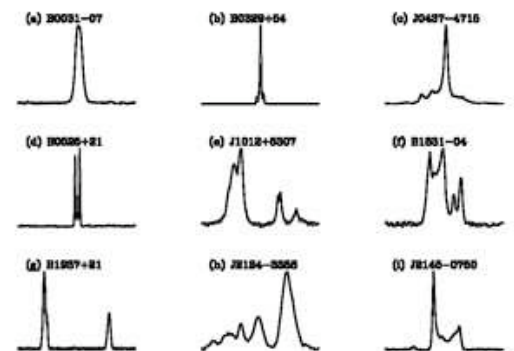
Da wir die Bahnparameter des Doppelsystems ebenfalls nicht kennen, müssen wir (auch hierbei) tausende an möglichen Testfällen überprüfen, wobei jeder einem anderen Muster von Dopplerbeschleunigung und -verzögerung entspricht. Für jeden dieser Testfälle werden die vorhandenen Daten entsprechend für den vollständigen Dopplereffekt korrigiert. Dies stellt den ersten Schritt dar, der auf den Computern, die an diesem Projekt teilnehmen, durchgeführt wird. Im nächsten Schritt wird überprüft, ob in dem Datensatz ein Radiopulsar passend zu einem bestimmten berechneten (oder ähnlichen) Orbit vorhanden ist. Dies wird anhand einer Frequenzanalyse (Fouriertransformation) durchgeführt, wodurch die Rotationsfrequenz ohne den Ausschmiereffekt wiederhergestellt wird.

Da die Signale von Radiopulsaren nicht sinusförmig sondern gepulst sind, erhält man bei der Frequenzanalyse neben der Grundfrequenz (also der eigentlichen Rotationsfrequenz) auch höhere Harmonische (ganzzahlige vielfache der Grundfrequenz, Oberschwingungen). Bei der Pulsarsuche bedient man nun eines gut bekannten Tricks: Man addiert alle diese Frequenzkomponenten und erhöht dadurch signifikant die Empfindlichkeit bei der Suche. Diese Aufsummierung ist der letzte Schritt, welcher auf den Computern der Teilnehmer an Einstein@Home ausgeführt wird. Schließlich wird eine Liste mit den auffälligsten Kandidaten für Pulsare erstellt und an die Einstein@Home-Server übermittelt, welche dann von den Projektwissenschaftlern ausgewertet wird.



Aufgrund der Orbitbewegung in einem Doppelsystem ändert sich die beobachtete Rotationsfrequenz (d. h. die Zeit zwischen den empfangenen Lichtpulsen) eines Pulsars periodisch.

Credit: Adam Chandler



Die Lichtkurven von Pulsaren zeigen oft viele unterschiedliche Signaturen. Meist lässt sich aber ein einziges, besonders prominentes Maximum ausmachen.

Credit: D. R. Lorimer, Binary and Millisecond Pulsars, Living Rev. Relativity 11, (2008), 8

Was ist das Neue an unserer Suchmethode?

Bisherige Suchmethoden für Radiopulsare in Doppelsystemen waren die sog. Beschleunigungssuche und die sog. Seitenbandsuche. Bei der ersten Methode, der Beschleunigungssuche, wird die variable Zeitverzögerung korrigiert, indem der Orbit (Umlaufbahn) des Doppelsystems genähert wird; diese Methode lässt sich allerdings nur anwenden, falls die Beobachtungszeitspanne sehr viel kürzer ist als die gesamte Bahnperiode. Die zweite Methode, die Seitenbandsuche, bewährt sich immer dann, wenn die Beobachtungszeitspanne deutlich länger als die Bahnperiode des Doppelsystems ist. So existiert zwischen diesen beiden Methoden eine Lücke, innerhalb derer beide Methoden einen großen Verlust an Empfindlichkeit erleiden. Für unsere Suche verwenden wir Datensätze mit einer Beobachtungszeit von 5 Minuten. Dadurch verliert man bei der Beschleunigungssuche bei Orbitperioden, die kürzer als 50 Minuten sind, deutlich an Empfindlichkeit. Die Seitenbandmethode dagegen wird unempfindlich für Orbitperioden, die länger als 3 Minuten dauern.

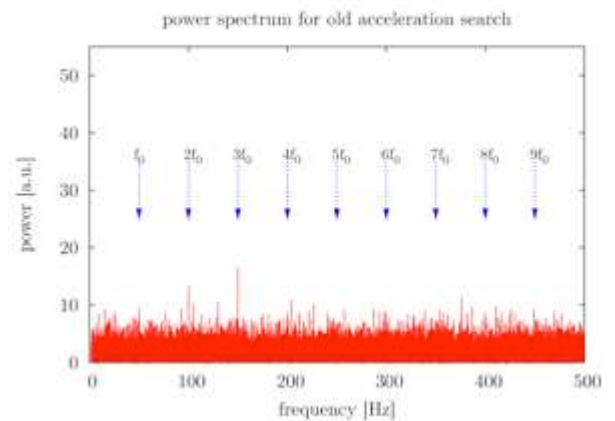
Die neue Suchmethode soll die so entstandene Lücke schließen. Es können nun Periodendauern (von Doppelsystemen) bis zu 11 Minuten korrigiert werden, was bedeutet, dass die Bahnbewegung bis zur Hälfte des Gesamtorbits verfolgt werden kann (dabei kann auch der stark variierende Dopplereffekt gemessen werden). Die Abbildungen rechts veranschaulichen den Fortschritt, der mit dieser Methode erreicht werden kann.

Interaktive Simulation von Pulsaren in Doppelsystemen

Studieren Sie den Doppler-Effekt anhand der 3D-Visualisierungssoftware PulsatingScience, die Ihnen zum Herunterladen (frei) zur Verfügung steht. Damit können Sie Doppelpulsarsysteme erzeugen, beobachten und die Systemparameter abändern. Die Abbildung rechts unten zeigt einen Ausschnitt aus dieser interaktiven Simulation.

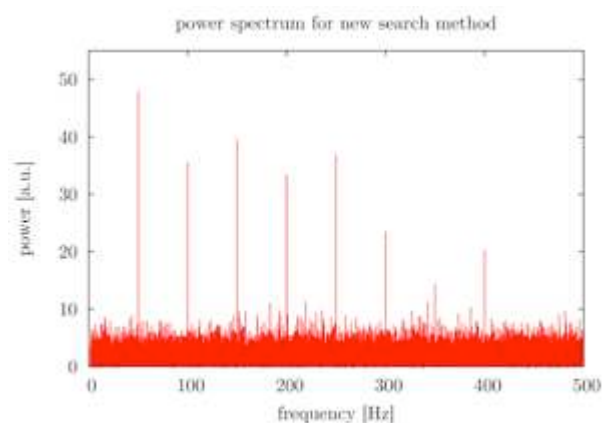
Laden Sie sich bei den untenstehenden Links eine für Ihr System passende Version herunter:

- [Microsoft Windows \(XP/Vista, 32 bit\)](#)
- [Apple Mac OS X \(Intel, 32 bit\)](#)
- [GNU/Linux \(from 2.6.8, Intel x86\)](#)



Beschleunigungssuche anhand eines simulierten Datensatzes über fünf Min. bei einem Pulsar mit einem 11-minütigen Orbit. Die Pfeile kennzeichnen die höheren Harmonischen des Pulsarsignals. Die Detektion weist eine niedrige Signifikanz auf.

Credit: AEI Hannover



Unsere neue Suchmethode, angewandt auf denselben Datensatz wie oben: Acht höhere Harmonische heben sich deutlich vom Hintergrundrauschen ab. Diese Detektion ist hoch signifikant.

Credit: AEI Hannover

Was für Daten werden bei der Suche verwendet?

Wir verwenden Daten einer derzeit laufenden Himmelsdurchmusterung, die mit dem bei 305 Meter Durchmesser weltweit größten Radioteleskop, dem Arecibo-Observatorium in Puerto Rico, durchgeführt wird. Dieses Teleskop ist mit einem Detektor ausgestattet, der sieben aneinandergrenzende Himmelsbereiche gleichzeitig aufnehmen kann: dies ist der Arecibo-L-Band Feed-Array, genannt ALFA. Die Suche nach Pulsaren ist eine der Hauptaufgaben von ALFA und wird von einer internationalen, stetig wachsenden Gruppe von Astronomen, dem ALFA-Pulsarkonsortium, durchgeführt.

Diese Durchmusterung enthält 5 Minuten lange Beobachtungssequenzen für jeden mit ALFA abgedeckten Himmelsabschnitt. Unsere Pulsarsuche zielt darauf ab, in diesen Datensätzen Doppelsysteme mit Orbitalperioden länger als 11 Minuten zu finden.

Weitere Links:

Das Arecibo-Teleskop wird von der Forschungseinrichtung [National Astronomy and Ionosphere Center \(NAIC\)](#) betrieben.

In der Fotogalerie des Arecibo-Teleskops gibt es Bilder von der Konstruktionsphase bis zum aktuellen Stand zu sehen. [Arecibo telescope photo gallery](#)

Auf folgender Seite finden Sie eine detaillierte Beschreibung des Arecibo-Teleskops: [hier](#).



Im April 2004 wurde ALFA (hier links an Stahlseilen hängend) in die Kuppel des Areciboteleskops gebracht. Die Empfänger befinden sich im Gregorianischen Fokus der Antennenschüssel.
Credit: Tony Acevedo/Arecibo



Das Arecibo L-band Feed Array (ALFA) in der Gregorianischen Kuppel.
Credit: B. Knispel, AEI Hannover

Wie unterstützt dieses Projekt die Suche nach Gravitationswellen?

Bewegt sich eine Masse beschleunigt durch den Raum, verändert sich dadurch die Krümmung der Raumzeit. Diese Veränderungen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit in Form von Gravitationswellen durch den Raum. Je stärker verdichtet und massereicher ein Objekt ist, und je stärker die Masse beschleunigt wird, desto stärker sind die von ihm ausgestrahlten Gravitationswellen. So stellen enge Doppelsysteme mit kompakten Komponenten wie Neutronensternen oder Schwarzen Löchern eine starke, kontinuierliche Quelle für Gravitationswellen dar.

Die Ergebnisse der Pulsarsuche basierend auf den Arecibo-Daten erweitern unser Verständnis dafür, wie viele Neutronensterne enthaltende Doppelsysteme in unserem Beobachtungsbereich überhaupt zu erwarten sind. Zudem erhalten wir so eine Anzahl an Doppelsystemen mit bekannter Himmelsposition und bekannten Bahnparametern. Pulsare können durch verschiedene Mechanismen Gravitationswellen erzeugen, die in dem für bodengebundene Detektoren empfindlichen Frequenzbereich liegen. Die Ergebnisse dieser Radiopulsarsuche erlauben es uns, gezielt nach Gravitationswellen von Doppelpulsaren auf der Basis der Gravitationswellendetektoren LIGO, VIRGO und GEO600 zu suchen.

Außerdem können diese neu entdeckten Pulsare als Eichquellen für den zukünftigen, weltraumbasierten Gravitationswellendetektor LISA dienen. LISA soll Ende 2020 gestartet werden. Damit würden Gravitationswellen beobachtbar, die bei Bahnperioden im mHz-Bereich emittiert werden.

Gravitationswellendetektoren:

[LIGO Homepage](#)

[VIRGO Homepage](#)

[GEO 600 Homepage](#)

[LISA Homepage](#)



Gravitationswellendetektoren wie LIGO in Hanford, Washington, sind kilometerlange, mit Laserlicht betriebene Michelsoninterferometer. Sie könnten kleinste Phasenverschiebungen zwischen den geteilten Laserstrahlen detektieren, so wie es der Fall wäre, wenn eine Gravitationswelle die lokale Raumzeit verzerrte.
Credit: LIGO Laboratory

Was können wir über Radiopulsare lernen?

Seit ihrer Entdeckung im Jahre 1967 durch Jocelyn Bell und Anthony Hewish in Cambridge, UK, stellen Radiopulsare eines der aufregendsten Gebiete der astronomischen Forschung dar. Obwohl ein gewisses Grundverständnis über den Aufbau von Neutronensternen/Pulsaren vorhanden ist, gilt es noch eine Menge physikalischer Prozesse im Einzelnen zu klären:

- Wie viele Teilchen werden durch das extrem starke Magnetfeld beschleunigt?
- Um welche Art von Teilchen handelt es sich hierbei?
- Entlang welcher Bahnen bewegen sich diese Teilchen?
- In welcher Entfernung von der Oberfläche des Neutronensterns wird die Radiostrahlung erzeugt, die wir mit den Radioteleskopen beobachten können?

Weitere Geheimnisse halten sich unterhalb der Pulsaroberfläche verborgen:

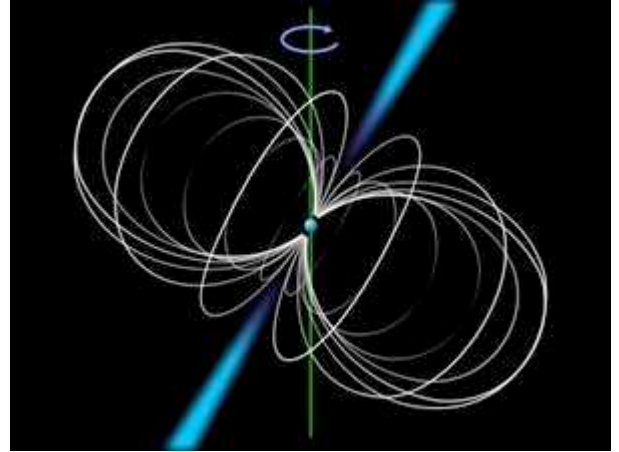
- Wie setzt sich ein Neutronenstern/Pulsar im Inneren zusammen?
- Gibt es dort - vielleicht - einen Kern, der gar nicht mehr aus ganzen Neutronen besteht, sondern nur noch aus deren einzelnen Bestandteilen, den Quarks?

Von unserem neuen Projekt erhoffen wir uns, diese Fragen beantworten zu können. Darüber hinaus erwecken diese faszinierenden Objekte nicht nur das Interesse von Astrophysikern, sondern auch jenes von Kern- und Teilchenphysikern.

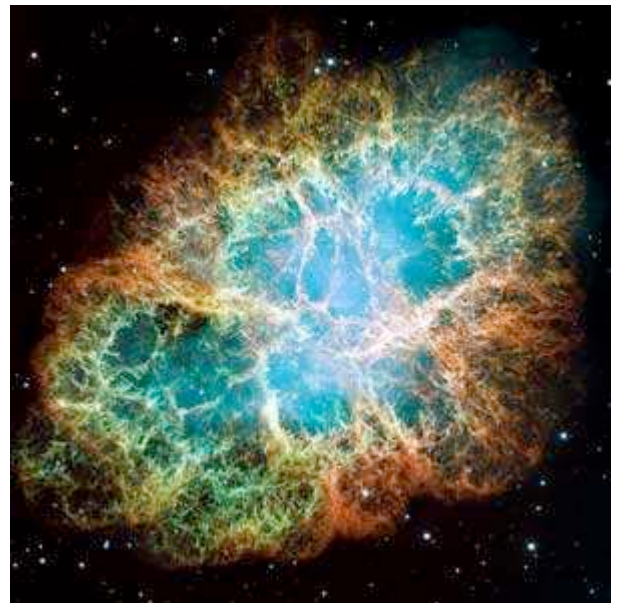
Astronomen wiederum sind daran interessiert, neue Erkenntnisse über die Population von Pulsaren und damit von Neutronensternen als Überreste von Supernova-Explosionen zu gewinnen.

- Stimmt unser bisheriges Verständnis davon?
- Gibt es etwa einen Überschuß an Pulsaren in Doppelsystemen oder treten sie eher als Einzelgänger auf, die aufgrund ihres explosiven Sterntods aus dem Doppelsystem herausgeschleudert worden sind?

Mithilfe solcher Informationen könnten Supernovamodelle überprüft oder überholt werden. Daraus lässt sich wiederum schließen, mit welcher Intensität eine Emission von Gravitationswellen bei einem Supernova-Ereignis zu erwarten ist und welches Profil die Signale vermutlich aufweisen werden.



Die Neutronensterne selbst besitzen eine sehr heiße Oberfläche und strahlen deshalb im Röntgenlicht. In ihren starken Magnetfeldern werden Teilchen beschleunigt, die dann nahezu im gesamten Frequenzbereich von Radio- bis Gammastrahlung emittieren (hellblau).



Der Krebsnebel — die Überreste einer Sternexplosion, die im Jahre 1054 von der Erde aus als Supernova beobachtet wurde — wird durch den Pulsar in seinem Zentrum zum Leuchten gebracht.

Credit: NASA, ESA and Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University). Acknowledgement: Davide De Martin

Was passiert, wenn Ihr Computer etwas Interessantes findet?

Wenn die Analyse eines bestimmten Datenausschnitts vielversprechend aussieht und eindeutige oder auch nur andeutungsweise Anzeichen der oben gezeigten Form aufweist, wird das Zielobjekt in eine Kandidatenliste eingetragen. Von Zeit zu Zeit wird diese Liste an das PALFA (Pulsar-ALFA) Konsortium gesendet und durchgesehen. Wenn die betreffenden Zielobjekte vom Konsortium als vielversprechend eingestuft werden, dann wird eine Folgebeobachtung für das betreffende Objekt durchgeführt.

Sind die neuen Daten vorhanden, werden sie anhand der oben beschriebenen Methode analysiert. Da sich die Nachfolgebeobachtung über ein deutlich längeres Zeitintervall erstreckt als das der großflächigen Durchmusterung, kann anhand der neu gewonnenen Daten nun mit sehr viel besserer Zuverlässigkeit bestimmt werden, ob ein neuer Pulsar gefunden wurde oder nicht.

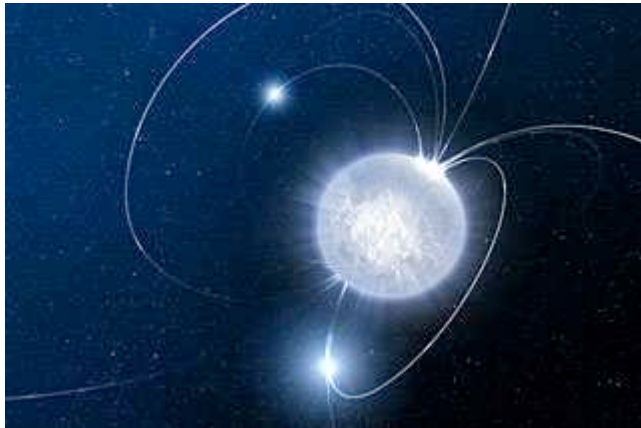
Die an der Suche beteiligten PC-Benutzer, auf deren Computern die ursprüngliche Datenanalyse durchgeführt wurde, bei welcher der Pulsarkandidat mit der höchsten Signifikanz gefunden wurde, werden in der Danksagung der wissenschaftlichen Veröffentlichung über die Entdeckung erwähnt.



Jeder Pulsarkandidat wird mit der 305-Meter-Schüssel bei Arecibo, Puerto Rico, über einen längeren Zeitraum nachbeobachtet um ihre wahre Natur bestimmen zu können.

Courtesy of the NAIC - Arecibo Observatory, a facility of the NSF

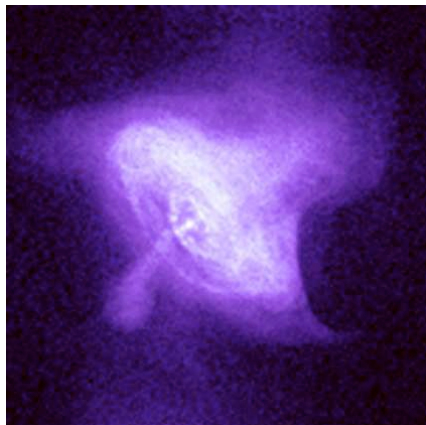
Bilder



Künstlerische Darstellung eines Neutronensterns

<http://www.eso.org/public/images/eso0831a/>

Credit:ESO



Krebsnebel Pulsar

<http://chandra.harvard.edu/photo/1999/0052/>

Credit NASA/CXC/SAO

Nutzung: http://chandra.harvard.edu/photo/image_use.html