

BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Christopher Weth, Ute Kraus, Michael Ruder, Raphael Dannecker, Jan Freuer, Peer Schneider, Martin Konold, Hanns Ruder

Surfer helfen Forschern - ein Internetprojekt für Schüler zur Erforschung der Röntgenpulsare

1 Einleitung

Das Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg und die Theoretische Astrophysik der Universität Tübingen betreiben seit Februar 2000 ein Pilotprojekt, in dem PC-Besitzer, insbesondere auch Schulen, sich an der astrophysikalischen Forschung beteiligen können, indem sie die Rechenleistung ihrer Computer zur Verfügung stellen. Ausgangspunkt war das äußerst populäre amerikanische SETI@home-Projekt (siehe deren Webseite:

<http://setiathome.ssl.berkeley.edu>, oder Sullivan et al. 1997).

Inzwischen beteiligen sich über zwei Millionen Bürger und Firmen an der Auswertung der riesigen Datenmengen, die bei der Suche nach außerirdischem Leben von Radioteleskopen aus dem Weltall empfangen und aufgezeichnet werden. Jeder Interessent kann sich ein Programm kopieren, das dann, immer wenn der Rechner nicht ausgelastet ist, in engen Radiofrequenzbändern nach Signalen außerirdischer Zivilisationen sucht. Das hier durchgeführte Projekt ist zwar nicht so spektakulär wie die Suche nach Aliens, dafür hat es bereits einige wissenschaftliche Ergebnisse geliefert.

2 Röntgenpulsare

Röntgenpulsare sind intensive Röntgenquellen, die in regelmäßigen Pulsen Röntgenstrahlung bis zum hunderttausendfachen der Strahlungsleistung unserer Sonne aussenden. Seit ihrer Entdeckung Anfang der siebziger Jahre sind sie Gegenstand astrophysikalischer Forschungen (Beobachtungen: White et al. 1983, Nagase 1989, Bildsten et al. 1997; Modellrechnungen: Basko & Sunyaev 1975, Pravdo & Bussard 1981, Mészáros & Nagel 1985, Brainerd & Mészáros 1991). Der Röntgenpulsar selbst ist ein stark magnetisierter rasch rotierender Neutronenstern, der zusammen mit einem normalen Stern ein enges Doppelsternsystem bildet (Abb. 1 und 2). Durch seinen kleinen Radius von nur etwa 10 km und seine im Vergleich dazu große Masse von ungefähr eineinhalb Sonnenmassen ist ein Neutronenstern ein äußerst kompaktes Objekt mit einer Dichte von 500 Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter, also dem Mehrfachen der Dichte von Atomkernen. Aufgrund seiner starken Gravitationswirkung wird Masse aus dem normalen Begleitstern herausgezogen, die auf den Neutronenstern zuströmt und um ihn herum eine dünne Scheibe bildet, die sogenannte Akkretionsscheibe, von deren innerem Rand die Materie dann endgültig auf die Neutronensternoberfläche stürzt. Das ionisierte Gas, das aus der Scheibe in das Magnetfeld des Neutronensterns

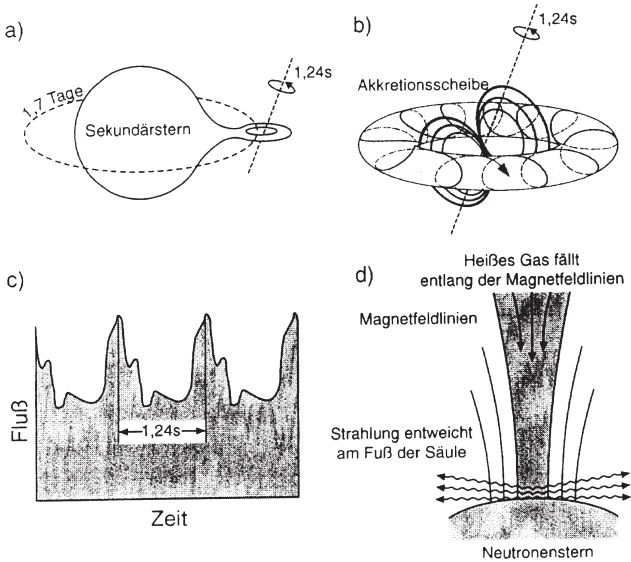


Abb. 1: Schematische Darstellung des Doppelsternsystems (a), der Akkretionsscheibe um einen Neutronenstern mit Dipolmagnetfeld (b) und der Emissionsregion an einem magnetischen Pol (d). Weil der Neutronenstern rotiert, sieht man die Röntgenstrahlung gepulst (c).

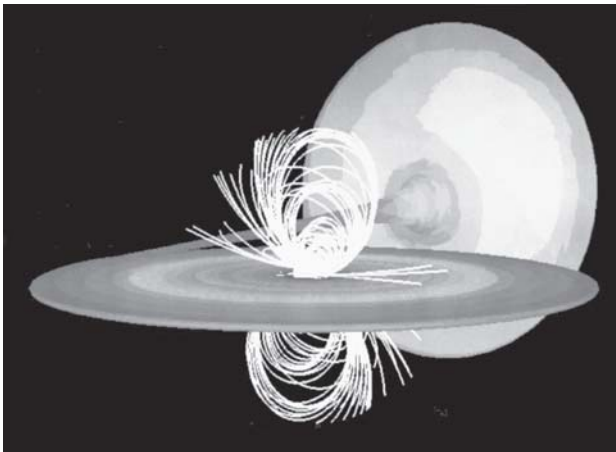


Abb. 2: Ein Röntgenpulsar ist ein stark magnetisierter rasch rotierender Neutronenstern, der zusammen mit einem normalen Stern ein enges Doppelsternsystem bildet. Vom Begleitstern strömt Materie zum Neutronenstern, bildet eine dünne Scheibe und stürzt letztlich auf die Pole des winzigen, im Bild nicht sichtbaren Neutronensterns im Zentrum der Scheibe.

eintritt, wird von diesem Feld zu den Magnetpolen hin gebündelt. Dort treffen dann bei Magnetfeldstärken, die eine Billion mal größer sind als das Magnetfeld an der Erdoberfläche, auf eine Fläche von nur wenigen Quadratkilometern 100 Milliarden Tonnen Materie pro Sekunde mit einer Geschwindigkeit von 160000km/s, also mit mehr als halber Lichtgeschwindigkeit, auf. Dabei wird die Oberfläche durch die bei der Abbremsung freigesetzte kinetische Energie auf Temperaturen von ca. 100 Millionen Grad aufgeheizt, was zur Emission der Röntgenstrahlung führt. Diese "kosmische Röntgenröhre" ist so intensiv, dass man damit einen Menschen noch in einer Entfernung von einer Billion Kilometern in Sekundenbruchteilen durchleuchten könnte. Ein winziger Ausschnitt aus der aufgeheizten Fläche von 1/1000 mm x 1/1000 mm strahlt eine Leistung ab, die genügen würde, den Primärenergiebedarf der Bundesrepublik zu decken. Da die Achse durch die magnetischen Pole im Allgemeinen nicht mit der Rotationsachse zusammenfällt (dies ist auch auf der Erde so, der magnetische Nordpol liegt z. B. momentan fast 12° südlich vom geographischen), sehen wir somit - wie bei einem Leuchtturm - die Röntgenstrahlung mit der Rotationsperiode gepulst.

Diese Systeme sind allerdings so weit weg (einige 10000 Lichtjahre) und so klein (kleiner als der Radius der Bahn von Merkur um die Sonne), dass man ihre Komponenten sicherlich niemals mit einem Teleskop auflösen können wird - denn das müsste dann eine Öffnung von mehreren Millionen Kilometern haben. Daher ist der einzige Weg, mehr über sie zu lernen, der Versuch, die gemessenen Pulse mit einem theoretischen Modell zu reproduzieren. Im Rahmen eines solchen theoretischen Modells muss berechnet werden, wie die Röntgenstrahlung den einfallenden Plasmastrom durchquert und schließlich zum Beobachter gelangt. Die genaue Berechnung der Photonenausbreitung in diesem heißen, relativistisch schnell strömenden, stark magnetisierten Plasma ist ein außerordentlich schwieriges Problem.

Wir führen eine Monte-Carlo-Simulation der Ausbreitung der Röntgenphotonen durch. Dieses Projekt wird seit 1999 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Es geht um die vollständige Berechnung des Strahlungstransports in einem Modell, das sich durch die Berücksichtigung der korrekten magnetischen Wirkungsquerschnitte, aller relativistischen Effekte und einer realistischen Geometrie auszeichnet. Diese Simulationen sollen das Bindeglied zwischen unseren bisherigen theoretischen Arbeiten über Strahlungstransport (Herold 1979, Rebetzky 1988) und unseren bisherigen beobachtungsnahen Arbeiten zur Analyse von Pulsprofilen werden (Blum & Kraus 2000; Kraus et al. 1996). Die Monte-Carlo-Simulation verläuft im Prinzip folgendermaßen: Ein Röntgenphoton wird am "heißen Fleck" auf dem Neutronenstern erzeugt, indem Ort, Richtung und Frequenz mittels Zufallszahlen bestimmt werden. Das Photon wird solange von Streuung zu Streuung verfolgt, bis es den Plasmastrom verlässt und aus dem Pulsarsystem entweicht. Die Anzahl der entweichenden Photonen wird als Funktion von

Richtung, Energie, Anzahl der Streuungen und Polarisation tabelliert. Daraus lässt sich dann die Form des Röntgenpulses berechnen. Allerdings setzt dies voraus, dass für jedes Modell einige hundert Millionen Photonen verfolgt werden. Um Röntgenpulse wirklich zu verstehen, müssen viele verschiedene Modelle berechnet werden.

3 Das Internetprojekt

Hier setzt nun die Idee dieses Projekts an: Ein handelsüblicher PC kann in einer Stunde die Ausbreitung von etwa hunderttausend Photonen berechnen. Beim Surfen im Internet wird so wenig Rechenleistung benötigt, dass das Monte-Carlo-Programm nebenher laufen kann. Wenn einige tausend Computernutzer dieses Programm beim Surfen mitlaufen lassen würden, könnte jede Stunde ein weiteres Pulsarmodell berechnet werden.

Zur Übertragung der gerechneten Daten wird das Internet (genauer gesagt: Das HTTP-Protokoll) genutzt. So kann die bisher ungenutzte Prozessorleistung der permanent oder zeitweilig mit dem Internet verbundenen Computer zum Lösen der wissenschaftlichen Aufgabe verwendet werden.

Alle beteiligten Computer werden - unabhängig von Hersteller und Betriebssystem - zu einem Hunderte von Prozessoren umfassenden virtuellen Parallelrechner gekoppelt. Die Teilnehmer des XPulsar-Projektes müssen lediglich die Homepage <http://www.xpulsar.de> anwählen, um dort ein graphisch animiertes Java-Applet zu starten. Die plattformunabhängige Programmiersprache Java wurde gewählt, damit nicht für jedes Betriebssystem eine eigene Version des Programmes geschrieben werden musste; außerdem muss ein Java-Applet nicht installiert werden, sondern wird direkt von einer Webseite geladen und gestartet. Solange dieses Applet mit seinem integrierten Nachrichten-Ticker auf der Arbeitsoberfläche sichtbar ist, läuft im Hintergrund die Röntgenpulsarsimulation. Die Web-Surfer können sich währenddessen weiter durch das Angebot des WWW bewegen. Im Gegensatz zum SETI-Projekt kann man beim XPulsar-Projekt wahlweise anonym oder angemeldet mitmachen. Eine Programminstallation auf dem eigenen Rechner ist möglich, aber nicht notwendig.

Auf den Webseiten des Projektes wird ausführlich über die Physik der Röntgenpulse informiert. Auf eine kurze Einführung folgt unter den folgenden Überschriften eine allgemeinverständliche Darstellung der wichtigsten Aspekte:

- Das Standardmodell der Röntgenpulse: Hier wird erklärt, wie man sich ein Röntgenpulsarsystem vorstellt. Die einzelnen Komponenten (Akkretionsscheibe, -säule und Hot Spots) werden mit Worten und einfachen Bildern beschrieben.
- Die gemessenen Signale: Dieser Abschnitt befasst sich damit, wie die pulsierenden Signale entstehen, welchen Einfluss das magnetische und das gravitative Feld des Neutronensterns darauf haben, und gibt einige Anhaltspunkte, wie die gemessenen Pulsformen zustande kommen könnten.

- Zyklotronlinie: Hier wird kurz die Entstehung und Bedeutung der in vielen Spektren beobachteten Absorptionslinie beschrieben.

Fachbegriffe sind als Links auf ein Glossar gestaltet, so dass per Mausklick eine Erklärung zur Verfügung steht. Die Webseiten enthalten außerdem laufend den aktuellen Stand der Simulation mit den bereits bearbeiteten Modellparametern und den erzielten Ergebnissen. Teilnehmer, die sich als Einzelpersonen, Gruppen oder Schulen anmelden, werden in einer laufend aktualisierten Statistik geführt. Hier kann man jederzeit online einsehen, wer momentan mit wie vielen Rechnern aktiv ist, wie viele Photonen pro Sekunde dabei geschafft werden und wie viele Photonen eine Person, Gruppe oder Schule insgesamt bereits beigesteuert hat. Um Neueinsteigern ein schnelles Vorankommen in der Liste zu ermöglichen, gibt es neben dem Gesamtstand auch monatliche Statistiken.

4 Der Schulwettbewerb

Vor allem Schulen sollten für das Projekt gewonnen werden, und zwar durch einen Wettbewerb, der vom 1. März bis zum 30. Juni 2000 lief. Alle Realschulen und Gymnasien in Baden-Württemberg konnten teilnehmen und wurden durch Plakate auf den Wettbewerb aufmerksam gemacht (Abb. 3). Für diejenige Schule, die in den vier Wettbewerbsmonaten die meisten Photonen berechnete, wurde als Preis ein Fernrohr „Next Star“ und ein Laptop von IBM ausgesetzt. Für die Zweitplat-

Surfer helfen Forschern

Institut für Astronomie und Astrophysik, Abteilung Theoretische Astrophysik und Computational Physics der Universität Tübingen
Ministerium für Kultur, Jugend und Sport sowie Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

XPulsar@home

Röntgenpulsare, leuchtende Objekte am Himmel doch was steckt dahinter?

Wie rechnet am meisten?

Diese Frage zu klären ist die Aufgabe dieses Projektes. Mit Hilfe von privaten Computern (Desktoprechner) wird versucht das Geheimnis dieser kosmischen Vererber der Doppelsterne zu lösen. Was passiert wenn Hunderte Millionen Tonnen rotlen Gases mit hoher Lichtgeschwindigkeit auf einen Neutronenstern losst?

Alle können mithelfen, diese Rätsel zu lösen. Das Einzige was man dazu braucht ist ein Computer mit einem Internetzugang. Informieren Sie sich darüber auf unserer Homepage unter: <http://www.xpulsar.de>

Alle Gymnasien und Realschulen aus Baden-Württemberg sind eingeladen sich an dem Projekt zu beteiligen. Für die besten Schulen gibt es attraktive Preise zu gewinnen:

1. Preis: Fernrohr „Next Star“ + IBM Laptop
2. Preis: ein wertvolles Softwarepaket
- 3.-10. Preis: Bücher und Softwarepakete

Wettbewerbszeitraum
1.3. - 30.6.2000

Neitere Informationen dazu finden Sie auf unserer Homepage.

Kontakt: Institut für Astronomie und Astrophysik,
Abteilung Theoretische Astrophysik und Computational Physics
Auf der Morgenstelle 10
72078 Tübingen
email: xpulsar@xpulsar.de

<http://www.xpulsar.de>

Logos: IBM, XTC, XTC, XTC, XTC, XTC

Abb. 3: Plakat zur Ausschreibung des Schulwettbewerbs

zierte gab es einen PC. Zusätzlich wurden unter den ersten zehn Astronomiebücher und -softwarepakete verteilt. Dabei brauchten sich die Schulen nicht auf ihre eigenen Rechner zu beschränken, auch mit privaten PCs durfte für eine Schule mitgerechnet werden. Auf diese Weise konnten diejenigen, die selbst nur wenige oder langsame Rechner haben, diesen Nachteil z. B. durch gute Kontakte zu ehemaligen Schülern ausgleichen.

„Mit diesem Wettbewerb wollen wir einerseits das Forschungsprojekt der Theoretischen Astrophysik Tübingen unterstützen und andererseits wieder mehr Schülerinnen und Schüler für das Fach Physik begeistern“, so Wissenschaftsminister Klaus von Trotha und Kultusministerin Dr. Annette Schavan.

Das Resultat: Innerhalb von fünf Monaten kamen über 75 Jahre Rechenzeit zusammen. Der Großteil davon ist den rund 80 Realschulen und Gymnasien zu verdanken, die sich am Wettbewerb beteiligten, während etwa 20% der Rechenleistung von Einzelteilnehmern aufgebracht wurde. Dies ermöglichte Simulationen von etwa 200 Pulsarmodellen.

Gegen Ende des Schulwettbewerbs haben wir in einer online-Umfrage nach Interessen, Motiven und Meinungen der Teilnehmer am XPulsar-Projekt gefragt. Der Fragebogen wurde von insgesamt 80 Personen ausgefüllt. Die meisten SchülerInnen gaben ein mittleres bis starkes Interesse für Physik und Astronomie an, während das Interesse für den Bereich Computer und Internet fast ausnahmslos als sehr stark bezeichnet wurde. Von den Lehrern wurde die Frage, ob das Interesse der SchülerInnen an Astronomie gesteigert worden sei, in der Mehrzahl bejaht. Drei der vier befragten Lehrer haben das XPulsar-Projekt auch in den Unterricht eingebracht. Die folgenden beiden Kommentare aus der Umfrage geben einen Eindruck von der Aufnahme des XPulsar-Projekts in den Schulen:

„Hier wurde eine supergute Idee verwirklicht: lehrreich im Inhalt, sportlich-spielerisch im Wettbewerb. Seien Sie nicht allzu enttäuscht, wenn die physikalischen Seiten viel seltener aufgerufen wurden als die Highscores. In den letzten Wochen war der Wettbewerb enorm spannend, der momentane Stand immer wieder im Vordergrund.“ (ein *Lehrer*)

„Ich finde es super, dass wir Schüler an solchen Projekten teilnehmen dürfen und somit die Wissenschaft und Forschung unterstützen dürfen.“ (ein *Schüler*)

5 Ergebnisse

Abb. 4a zeigt das Ergebnis einer Simulationsrechnung. Eine Emissionsregion an einem magnetischen Pol, wie sie in Abb. 1 schematisch dargestellt ist, sieht man hier so, wie sie gemäß der Simulation im Röntgenlicht erscheint. Man erkennt den hell leuchtenden heißen Fleck, an dem die herabstürzende Materie auf die Neutronensternoberfläche auftrifft. Hier entsteht die Röntgenstrahlung, die sich dann durch den Materiestrom hindurch ausbreitet und dabei gestreut wird. Wo gestreute Strahlung seitlich aus dem Materiestrom austritt, erscheint dieser schwach leuchtend. Auf den Verbleib der gestreuten Photonen hat die schnelle Fallbewe-

gung der Materie einen entscheidenden Einfluss: Die Photonen werden bevorzugt nach unten gestreut (Advektion). Je nachdem, wie steil die gestreuten Photonen nach unten laufen, können sie in den heißen Fleck zurückkehren oder neben dem heißen Fleck auf die Oberfläche des Neutronensterns auftreffen oder aber seitlich entweichen. Die Oberfläche des Neutronensterns wird in der Nähe des heißen Flecks durch auftreffende Photonen aufgeheizt und wird dadurch, wie in Abb. 4a zu erkennen ist, zu einem weiteren schwach leuchtenden Röntgenemissionsgebiet.

Dieses detaillierte Bild der Emissionsregion kann man nun allerdings nicht direkt mit der Beobachtung vergleichen, weil Röntgenpulsare typischerweise mehrere

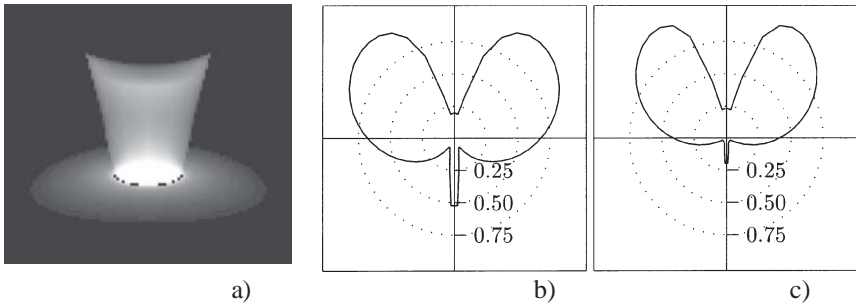


Abb. 4: a) Computersimulation eines Röntgenemissionsgebietes auf der Oberfläche eines Neutronensterns. Man erkennt die durch das riesige Magnetfeld zu einer Säule gebündelte, herabstürzende, nur schwach strahlende Materie, den heißen Fleck auf der Oberfläche sowie die durch die Röntgenstrahlung aufgeheizte Sternoberfläche in der Nähe des heißen Flecks. b) Die zugehörige Strahlungscharakteristik. Sie gibt die Richtungsabhängigkeit des Gesamt-Röntgenflusses an. Der Radius des Neutronensternes beträgt 8,4 km, die Masse 1,4 Sonnenmassen. Die Magnetfeldachse zeigt nach oben. c) wie b), aber mit 12,6 km Radius

zehntausend Lichtjahre von uns entfernt sind und selbst in den besten Teleskopen punktförmig erscheinen. Die komplizierten Verhältnisse in der Emissionsregion bewirken jedoch, dass die scheinbare Punktquelle aus verschiedenen Richtungen verschieden hell aussieht. Diese Richtungsabhängigkeit des Röntgenflusses ist es, die letztlich mit Beobachtungen verglichen werden kann.

Das Ziel der Simulationen ist es daher, die Richtungsverteilung der Photonen zu ermitteln, die den Neutronenstern und den Materiestrom verlassen. Abb. 4b zeigt eine solche Richtungsverteilung der Photonen für ein typisches Pulsarmodell. Hier muss man sich einen Neutronenstern mit einer Emissionsregion wie in Abb. 4a als punktförmige Quelle in der Bildmitte denken. Der Stern ist so orientiert, dass der Materiestrom sich senkrecht nach unten bewegt. Ähnlich wie bei der Richt-

charakteristik einer Antenne ist in diesem Diagramm radial in jede Richtung abgetragen, wie groß der Fluss ist, der in diese Richtung entweicht. Man erkennt, dass nur wenig Strahlung genau nach oben entkommt, da der Materiestrom dies verhindert. Besonders viel Röntgenfluss entweicht vom heißen Fleck und aus dem Materiestrom schräg nach oben und zur Seite. Auch genau nach unten ist der Röntgenfluss ziemlich hoch. Das ist zunächst erstaunlich, denn wenn man von unten auf den Neutronenstern blickt, dann ist ja der Stern vor der Emissionsregion. Die Emissionsregion müsste vollständig verborgen und unsichtbar sein. Dass man dennoch Röntgenstrahlung empfängt, liegt an der relativistischen Lichtablenkung im Gravitationsfeld des Neutronensterns, die Photonen so weit um den Stern herumlenken kann, dass der leuchtende Materiestrom von unten sichtbar ist (siehe Abb.5).

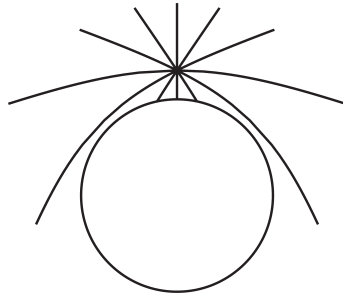


Abb. 5: Relativistische Lichtablenkung im Gravitationsfeld des Neutronensterns.

Einige Bahnen von Photonen, die oberhalb der Neutronensternoberfläche starten und sich (ohne Streuungen) durch das starke Gravitationsfeld des Neutronensterns bewegen, illustrieren, dass Photonen je nach ihrer Richtung eine erhebliche Ablenkung von der geradlinigen Ausbreitung erfahren können. Insbesondere solche Photonen, die fast streifend am Neutronenstern vorbeilaufen, werden weit nach hinten umgelenkt.

Die Stärke der gravitativen Lichtablenkung hängt empfindlich von Masse und Radius des Neutronensterns ab: Je kleiner der Neutronenstern (bei gleicher Masse) ist, umso stärker werden die Lichtstrahlen um ihn herum gebogen und umso größer ist der Teil der Oberfläche, den man sieht (Abb. 6; Nollert et al. 1989, Kraus 1998). Dies geht so weit, dass ab einem bestimmten Wert aus jeder Richtung beide Hot Spots sichtbar sind. Andererseits werden bei stärkerer Lichtablenkung gestreute Photonen, die streifend am Stern vorbeikommen, stärker nach unten "fokussiert", was ein stark moduliertes Signal verursachen kann (Pechenik et al., 1983, Riffert & Mészáros 1988). Ein Beispiel dafür ist in Abb. 4 zu sehen, in der die Strahlungscharakteristiken von zwei Modellen, in denen der Neutronenstern verschiedene Radien hat, verglichen werden. Natürlich ist es möglich, die Strahlungscharakteristiken noch detaillierter zu untersuchen - so kann man z. B. die

Richtungen der ungestreuten Photonen mit denen der gestreuten vergleichen, oder die von Photonen mit verschiedenen Energien einander gegenüberstellen. Die Strahlungscharakteristik lässt sich zwar nicht direkt beobachten, denn wir haben nicht die Möglichkeit, um einen Röntgenpulsar herumzufliegen und aus jeder Richtung den Röntgenfluss zu messen. Aber ein indirekter Vergleich ist möglich, denn da der Neutronenstern rotiert, zeigt sich eine Emissionsregion dem Betrachter im Laufe der Zeit unter verschiedenen Richtungen. Als Folge davon variiert der beobachtete Röntgenfluss und diesen variablen Fluss, das Pulsprofil, kann man für jede beliebige Orientierung der Rotationsachse und für jede beliebige Lage der Emissionsgebiete an den beiden Polen vorhersagen, wenn man erst einmal die Strahlungscharakteristik kennt.

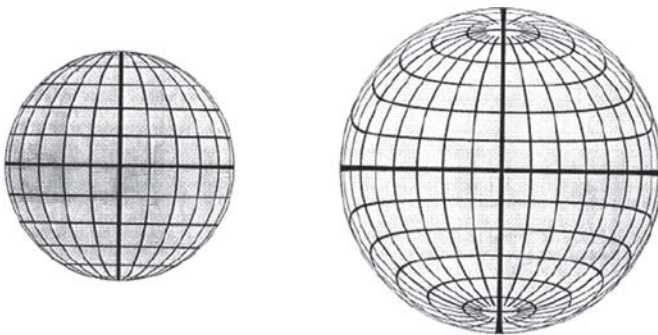


Abb. 6: Sichtbare Oberfläche eines Neutronensternes ohne (links) und mit (rechts) Lichtablenkung. Aus Nollert et al., 1989.

Wenn man aus einer simulierten Strahlungscharakteristik simulierte Pulsprofile erzeugen möchte, hat man im einfachsten Fall (zwei symmetrische und genau gegenüber liegende Emissionsgebiete) zwei freie Parameter: den Winkel zwischen der Sichtlinie und der Rotationsachse des Neutronensternes, und den Winkel, den die letztere mit der Magnetfeldachse einschließt (siehe Abb. 7).

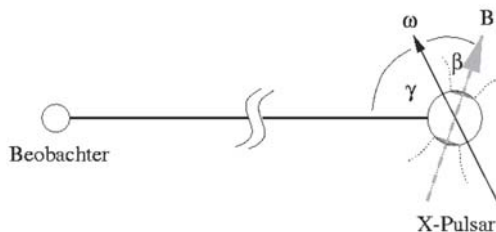


Abb. 7: Skizze der Winkel, die für die Form der Pulsprofile maßgeblich sind. Die Magnetfeldachse ist mit B bezeichnet, die Rotationsachse mit ω .

In Abb. 8 sind zwei aus den Strahlungscharakteristiken von Abb. 4 berechnete Pulsprofile abgebildet. Der Radius des Neutronensterns ist oben kleiner als unten (8,4 km und 12,6 km); alle anderen Parameter (Neutronensternmasse, Akkretionsrate, Magnetfeld, Öffnungswinkel der Akkretionssäule, etc.) wurden konstant gehalten. Deutlich sieht man, dass die Pulsprofile sehr empfindlich auf Änderungen des Radius reagieren: Beim größeren Radius sind die Spitzen der gestreuten Photonen weniger ausgeprägt und das Signal hat auch weitere Maxima. Die vollständige Auswertung der Daten wird sich sicherlich über mehrere Monate hinziehen. Anhand der großen Anzahl der berechneten Modelle kann dabei untersucht werden, wie sich die verschiedenen Modellparameter auf die Form der Pulsprofile auswirken, so dass letztlich im Vergleich mit beobachteten Pulsprofilen Aussagen über diese Parameter möglich sind.

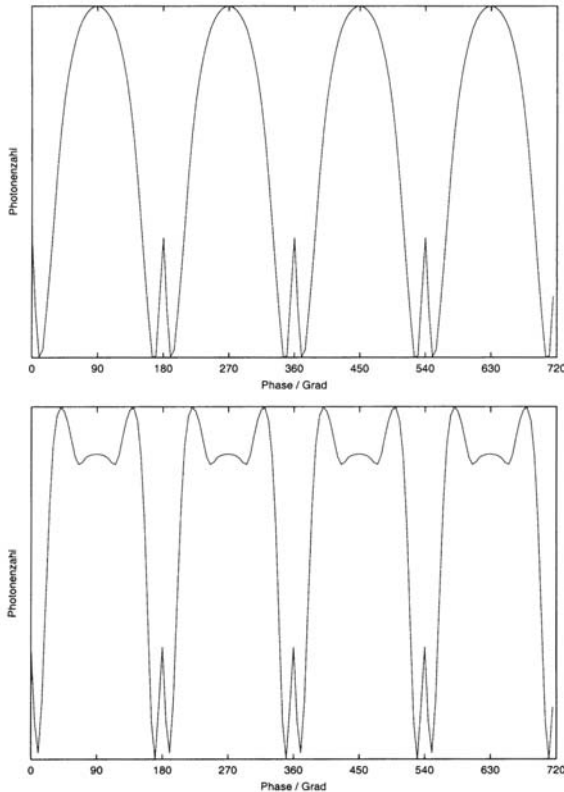


Abb. 8: Aus den Daten aus Abb. 4 erzeugte Pulsprofile (oben: 8,4 km Radius; unten: 12,6 km). Der Winkel zwischen Sichtlinie und Rotationsachse sowie der zwischen Rotations- und Magnetfeldachse ist jeweils 90° .

6 Ausblick

Auch nach dem Ende des Schulwettbewerbs geht das XPulsar-Projekt weiter. Nach wie vor beteiligen sich neben den Schulen auch zahlreiche Einzelpersonen und Gruppen, die die Möglichkeit nutzen, durch ihren Eintrag in der Highscoreliste auf ihre Homepage hinzuweisen.

Durch die durch den Wettbewerb entstandenen Kontakte zwischen Schulen und der Theoretischen Astrophysik Tübingen wird es zu weiteren gemeinsamen Projekten kommen - so möchte sich eine Schule am seit einiger Zeit laufenden Aufbau eines vollständig über das Internet steuerbaren Teleskops beteiligen, und weitere haben bereits Interesse an dessen Benutzung angemeldet.

Wir danken Herrn Peter Castellaz vom Wissenschaftsministerium für den Anstoß zu diesem Projekt und den Mitarbeitern des Wissenschafts- und Kultusministeriums sowie deren Pressestelle für die Unterstützung des Projekts und des Wettbewerbs.

Weiterhin danken wir Daniel Kobras für seine Rettungsaktionen an mehr als einem Wochenende.

Die Entwicklung der Monte-Carlo-Simulation wird seit 1998 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

7 Literaturverzeichnis

- BASKO, M. M.; SUNYAEV, R. A.: *Astron. Astrophys.* **42** (1975) 311
 BILDSTEN, L.; CHAKRABARTY, D.; CHIU, J.; FINGER, M. H.; KOH, D. T., NELSON, R. W.; PRINCE, T. A.; RUBIN, B. C.; SCOTT, D. M.; STOLLBERG, M.; VAUGHAN, B. A.; WILSON, C. A.; WILSON, R. B.: *Ap. J. Supp.* **113** (1997) 367
 BLUM S.; KRAUS U.: *Ap. J.* **529** (2000) 968
 BRAINDERD, J. J.; MÉSZÁROS, P.: *Ap. J.* **369** (1991) 179
 HEROLD, H.: *Phys. Rev. D* **19** (1979) 10
 KRAUS, U.: IN: RIFFERT H., RUDER H., NOLLERT H.-P., HEHL F. W.:
 Rel. Astrophysics, Vieweg Verlag (1998)
 KRAUS U., BLUM S., SCHULTE J., RUDER H., MÉSZÁROS P.: *Ap. J.* **467** (1996) 794
 MÉSZÁROS, P.; NAGEL, W.: *Ap. J.* **298** (1985) 147
 NAGASE, F.: *Publ. Astron. Soc. Japan* **41** (1989) 1
 NOLLERT, H.-P.; RUDER, H.; HEROLD, H.; KRAUS, U.:
Astron. Astrophys. **208** (1989) 153
 PECHENICK, K. R.; FTACLAS, C.; COHEN, J. M.: *Ap. J.* **274** (1983) 846
 REBETZKY, A.; HEROLD, H.; MAILE, T.; RUDER, H.; WOLF, K.:
Astron. Astrophys. **205** (1988) 215
 Riffert H., Mészáros P. 1988: *Ap. J.* **325**, 207
 SULLIVAN, W. T. III; WERTHIMER, D.; BOWYER, S.; COBB, J.; GEDYE, D.; ANDERSON D.:
 In: Proc. of the Fifth Intl. Conf. on Bioastronomy 1997
 White, N. E.; Swank, J. H.; Holt S. S.: *Ap. J.* **270** (1983) 711