

Computersimulation in der Astrophysik

H. Ruder, T. Ertl, F. Geyer, H. Herold, U. Kraus,
H.-P. Nollert, A. Rebetzky, C. Zahn

Universität Tübingen
Theoretische Astrophysik
Auf der Morgenstelle 10
7400 Tübingen 1

1 Zusammenfassung und Einleitung

Unser Wissen über die Struktur des Kosmos und die darin enthaltenen Objekte stammt aus der sorgfältigen Analyse der einfallenden elektromagnetischen Strahlung, verbunden mit einer theoretischen Modellierung im Rahmen der von uns erforschten Naturgesetze. Die Beobachtungen erstrecken sich dabei heute vom Radiowellenbereich über den Infrarot-, den optischen, den Röntgenbereich bis hin zum Höchstenergie-Gamma-Bereich, also über mehr als 20 Dekaden des elektromagnetischen Spektrums. Eine realistische Modellierung der Systeme im Rahmen einer beobachtungsnahen Theorie erfordert vor allem bei Systemparameterstudien im allgemeinen den Einsatz der größten verfügbaren Rechenleistungen.

1.1 Simulationsmethoden

Die theoretische Modellierung selbst überdeckt ein breites Spektrum an astrophysikalischen Fragestellungen, wie z.B. die Dynamik des Planetensystems, die Entstehung protoplanetarischer Scheiben und Magnetosphären, Sternentwicklung, Supernovaexplosionen, Sternkollisionen, Akkretionsscheiben, Akkretionssäulen, Galaxienentwicklung, Jets usw. Sie führt auf die gekoppelten Differentialgleichungssysteme der Hydrodynamik, der Magnetohydrodynamik, des Strahlungstransports und der komplexen Vielteilchensysteme. Diese wiederum werden mit Codes für elliptische und hyperbolische Gleichungen, mit Teilchensimulations- und Monte-Carlo-Codes, sowie mit Verfahren zur hochgenauen Integration numerisch gelöst. Eine exemplarische, keineswegs vollständige Zusammenstellung verschiedener astrophysikalischer Objekte und der zu ihrer Simulation angewandten Methoden findet sich in Tab. 1.

1.2 Visualisierung

Ein Punkt, der zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist der Einsatz neuer graphischer Methoden, um die bei diesen Simulationsrechnungen anfallenden riesigen Datenmengen aufzubereiten. Die Entwicklung solcher Verfahren bildet inzwischen eine eigenständige Disziplin, genannt *ViSC = Visualization in Scientific Computing*. Zu den großen diagnostischen Vorteilen dieser Methoden kommt in der Astrophysik noch ein weiterer Aspekt hinzu. Bis auf wenige Ausnahmen sind die kosmischen Objekte so unvorstellbar weit entfernt, daß man sie nur als punktförmige Quellen beobachten kann. Wollte man sie als ausgedehntes Objekt erkennen, müßte man entweder hinfliegen, ein – mit Prä-Perry-Rhodan-Raumfahrt-Technologie – völlig aussichtsloses Unter-

Numerische Lösung der Bewegungsgleichungen von Vielteilchensystemen	Teilchensimulation (Particle-In-Cell)	Hydrodynamische und magnetohydrodynamische Simulationen	Monte-Carlo-Methoden
Dynamik des Planetensystems	Protoplanetare Scheiben	Akkretionsphänomene	Kosmische Strahlung
Dynamik von Sternhaufen	Akkretionsscheiben	Überschallströmungen, Jets	Gamma-Ray-Burster
Galaxienentwicklung	Magnetosphären	Scheiben	Photonenausbreitung
Galaxienkollisionen	Sternwinde	Interstellares Medium	

Tabelle 1:

Beispiele für Simulationsmethoden und ihre Anwendung auf astrophysikalische Objekte

fangen, oder man bräuchte optisch perfekte Teleskope mit Durchmessern von einer Million Kilometern und mehr. In der Tab. 2 sind für einige typische kosmische Entfernungen die Fernrohröffnungen zusammengestellt, die notwendig wären, um bei optimaler Abbildung ein 10 km großes Objekt räumlich aufzulösen. Die Zusammenstellung zeigt deutlich, daß es in absehbarer Zukunft keine Möglichkeiten geben wird, von den meisten astrophysikalischen Objekten außerhalb unseres Sonnensystems räumlich aufgelöste Bilder zu erhalten.

	Entfernung	Fernrohröffnung
20 000 km	Australien	1 mm
400 000 km	Erde - Mond	20 mm
80 Millionen km	Erde - Mars	4 m
4 Milliarden km	Erde - Neptun	200 m
4×10^{13} km = 4 Lj.	nächster Fixstern	2 000 km
400 Lichtjahre	kosmische Umgebung	200 000 km
12 000 Lichtjahre	Röntgenpulsar Her X-1	6 Millionen km

Tabelle 2:

Bedeutung von ViSC für die Astrophysik am Beispiel der räumlichen Auflösung: Notwendige Fernrohröffnungen für die beugungsbegrenzte Auflösung eines 10 km großen Objekts für einige typische Entfernungen

Durch Auswertung der durch multispektrale Beobachtungen gewonnenen Informationen zusammen mit den Computersimulationen lassen sich aber in vielen Fällen sehr detaillierte Vorstellungen von den räumlichen Strukturen und den physikalischen Vorgängen in den verschiedenen Systemen gewinnen. Hat man nun diese Vorstellungen entwickelt, dann kann man heutzutage dank der modernen Supercomputer und mit Hilfe von hochauflösenden Graphik-Workstations im Rahmen der bekannten physikalischen Gesetze dreidimensionale Bilder berechnen und sich - einen Raumflug simulierend - die Sternsysteme sowohl von allen Seiten,

als auch in ihrer zeitlichen Entwicklung anschauen. Diese, zugegebenermaßen sehr rechenintensive, Methode liefert jedoch nicht nur schöne und faszinierende Bilder und Filme, sondern auch ein sehr anschauliches und zugleich tiefes Verständnis der ablaufenden physikalischen Prozesse. Zur Visualisierung der zeitlichen Abläufe der Vorgänge eignen sich natürlich besonders gut animierte Filmsequenzen. Hierzu muß eine große Anzahl von Einzelbildern berechnet und bearbeitet werden. Mit solchen Verfahren kann der theoretische Astrophysiker den jeweils größten zur Verfügung stehenden Computer ganztägig beschäftigen – ein im Vergleich zu einem tatsächlichen Raumflug in die Tiefen unseres Universums immer noch winziger Zeit- und Kostenaufwand.

Anhand eines ausgewählten Beispiels soll nun demonstriert werden, zu welcher detaillierten Aussagen über die physikalischen Bedingungen bei kosmischen Objekten, die Tausende von Lichtjahren entfernt sind, die moderne Astrophysik auf diesem Wege gelangen kann.

2 Ein typisches Beispiel: Röntgenpulsare

Im Jahre 1971 wurden von dem mit hoher zeitlicher Auflösung beobachtenden Röntgensatelliten UHURU periodische Röntgenpulse registriert. Aus den Pulsperioden, die im Sekundenbereich liegen und ungeheuer konstant sind, folgt zwingend, daß es sich bei diesen kosmischen Röntgenquellen nur um rotierende Neutronensterne handeln kann. Seit ihrer Entdeckung sind diese *Röntgenpulsare* Gegenstand intensiver astrophysikalischer Forschungen, sowohl die Beobachtung als auch ihr theoretisches Verständnis betreffend. Auch unsere Gruppe beschäftigt sich seit Jahren mit einer immer detaillierteren Modellierung dieser interessanten Systeme, die ein Studium des Verhaltens von Materie unter den extremsten physikalischen Bedingungen erlauben.

2.1 Das astrophysikalische Szenarium

Die Röntgenpulsare sind die stärksten Röntgenquellen unserer Milchstraße. Die Abstrahlung eines typischen Röntgenpulsars beträgt 10^{30} Watt, er emittiert damit allein im Röntgenbereich das zweitausendfache der gesamten Strahlungsleistung unserer Sonne. Der Röntgenpulsar selbst ist ein stark magnetisierter rasch rotierender Neutronenstern, der zusammen mit einem normalen Stern ein enges Doppelsternsystem bildet (Abb. 1a). Durch seinen kleinen Radius von nur etwa 10 km und seiner im Vergleich dazu großen Masse von ungefähr einer Sonnenmasse ist ein Neutronenstern ein äußerst kompaktes Objekt mit einer Dichte von 1 Milliarde 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 (Abb. 1b), von deren innerem Rand die Materie dann endgültig auf die Neutronensternoberfläche stürzt. Die ionisierte Materie, die aus der Scheibe in das Magnetfeld des Neutronensterns eintritt, wird von diesem Feld zu den Magnetpolen hin gebündelt (Abb. 1d). An der Sternoberfläche treten Magnetfeldstärken von 10^8 – 10^9 Tesla auf, diese Felder sind damit 10 Millionen mal stärker als die stärksten in irdischen Labors herstellbaren Felder. Ein Kubikzentimeter Feld enthält dabei soviel Energie, daß seine Erzeugung bei den heutigen Energiepreisen etwa zehn Milliarden Mark kosten würde. Bei den beiden Magnetpolen treffen dann auf eine Fläche von nur wenigen Quadratkilometern 100 Milliarden Tonnen Materie pro

Sekunde mit einer Geschwindigkeit von ca. 160 000 km/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.

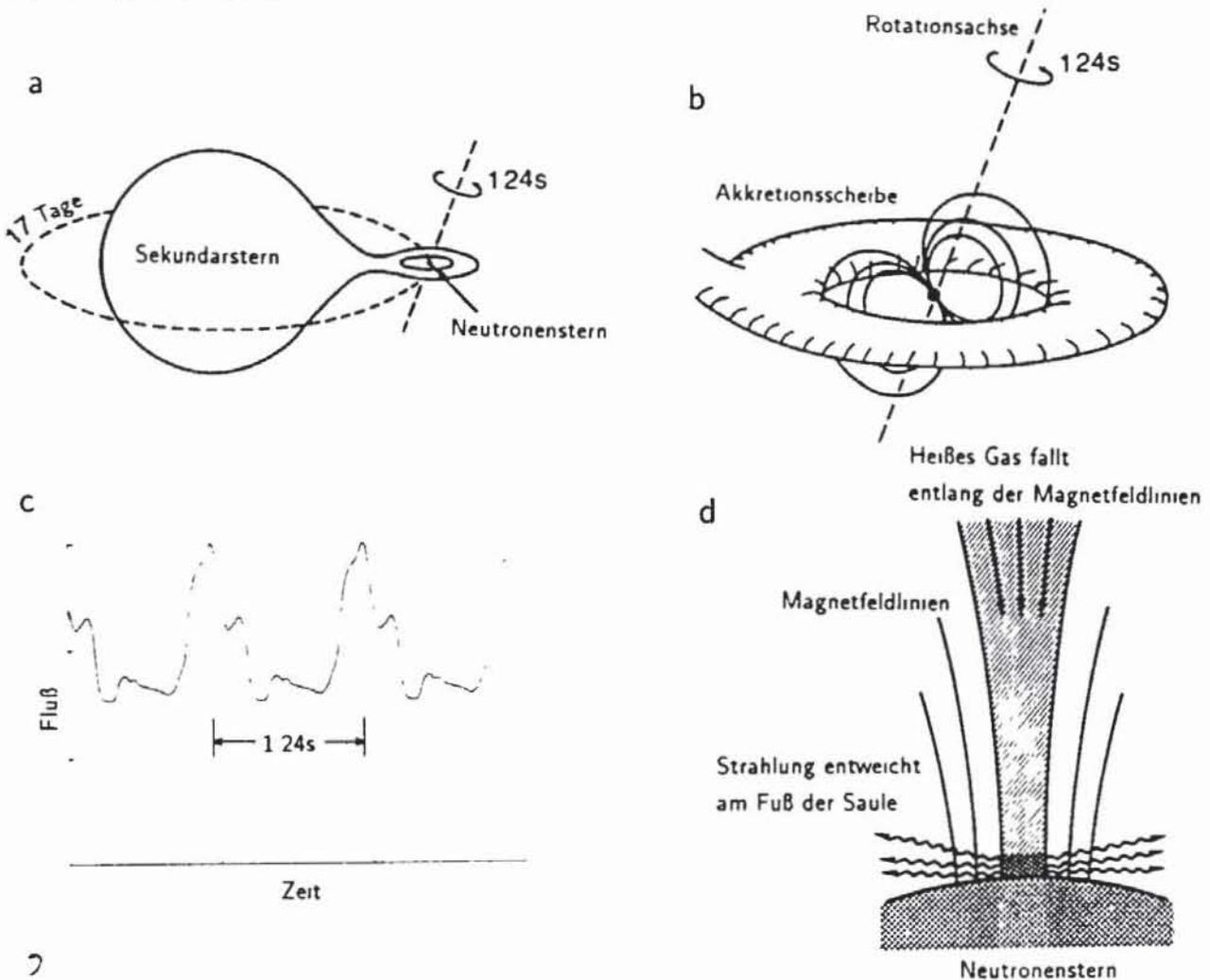


Abbildung 1:

Schematische Darstellung des engen Röntgen-Doppelsternsystems Her X-1 im Sternbild Herkules (a). Die Materie strömt vom Sekundärstern zum Neutronenstern und bildet dabei eine Scheibe (b). Durch die schnelle Rotation des Neutronensterns sieht man die an den magnetischen Polen (d) entstehende Röntgenstrahlung gepulst (c).

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 von 1/1000 mm \times 1/1000 mm aus der aufgeheizten Fläche strahlt eine Leistung ab, die genügen würde, den Primärenergiebedarf der Bundesrepublik zu decken. Die Abstrahlung des Röntgenlichts ist auf eine oder mehrere Vorzugsrichtungen konzentriert. Da die Achse durch die magnetischen Pole im allgemeinen nicht mit der Rotationsachse zusammenfällt, sehen wir somit - wie bei einem Leuchtturm - die Röntgenstrahlung mit der Rotationsperiode gepulst (Abb. 1c).

2.2 Die theoretische Modellierung

Es wäre natürlich ein völlig aussichtsloses Unterfangen, zu versuchen, das gesamte Doppelsystem mit allen Einzelheiten bis hin zur spektral aufgelösten Röntgenemission in einem Stück zu simulieren. Der einzig gangbare Weg ist die Zerlegung in Untersysteme mit wohldefinierten Schnittstellen und Wechselwirkungen. In unserem Beispiel sieht diese natürlich durch die physikalischen Gegebenheiten vorgegebene Zerlegung wie folgt aus:

- Modellierung des Sekundärsterns unter Berücksichtigung der Röntgenstrahlung und der Gezeitenwirkung des Neutronensterns,
- Berechnung der Materieüberströmrate am inneren Lagrange-Punkt,
- Simulation der sich um den Neutronenstern bildenden Akkretionsscheibe in Abhängigkeit von der Überströmrate,
- Stabilitätsanalysen für diese Scheiben, Berechnung ihrer Emission,
- Untersuchung der Wechselwirkungsprozesse am inneren Rand der Scheibe mit der Magnetosphäre des Neutronensterns,
- selbstkonsistente Modellierung der Akkretionssäule auf dem Neutronenstern bei vorgegebener Akkretionsrate und Magnetfeld,
- selbstkonsistente Modellierung der Abbremsregion (Hot Spot) am Fuße der Akkretionssäule auf der Neutronensternoberfläche,
- spektral und zeitlich aufgelöste Berechnung des Strahlungsflusses zum Beobachter unter Berücksichtigung der Lichtablenkung im starken Gravitationsfeld des Neutronensterns.

Zur Simulation dieser verschiedenen Teilsysteme sind jeweils ganz unterschiedliche Verfahren erforderlich. Jeder einzelne Punkt ist bereits ein sehr aufwendiges numerisches Problem. Wir wollen hier einige Ergebnisse unserer Simulationsrechnungen zur Entstehung von Akkretionsscheiben, zur Modellierung des Emissionsgebiets auf dem Neutronenstern und zum Einfluß relativistischer Effekte bei der Lichtausbreitung vorstellen.

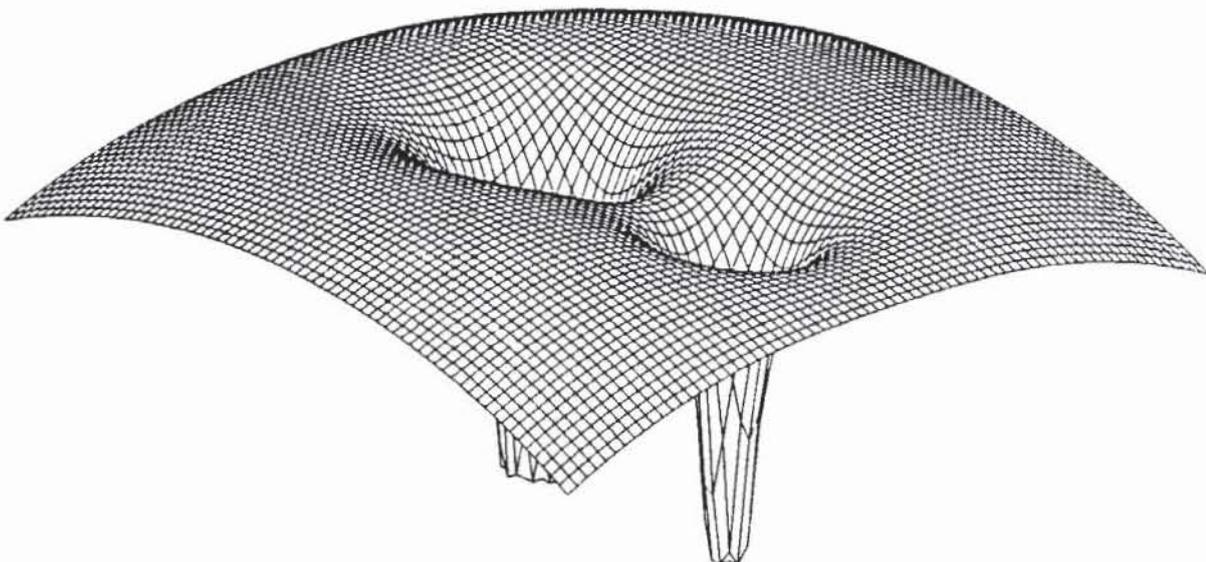


Abbildung 2:
Das Roche-Potential für ein Massenverhältnis 1:2.

2.3 Akkretionsscheiben

Zur Modellierung von Akkretionsscheiben sind Teilchensimulationsmethoden besonders gut geeignet. Ein "Teilchen" repräsentiert dabei ein kleines, aber makroskopisches Volumenelement gefüllt mit Akkretionsscheibenmaterial. Die Bewegung dieser Pseudoteilchen wird durch die Newtonsche Bewegungsgleichung bestimmt. Sie enthält die Gravitationswirkung der beiden Sterne, die Zentrifugal- und die Corioliskraft. Die zwei Komponenten des Systems werden als Massenpunkte angenommen, die auf Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt umlaufen. Im mitrotierenden System erhält man dann das in Abb. 2 für ein Massenverhältnis von 1:2 dargestellte Roche-Potential.

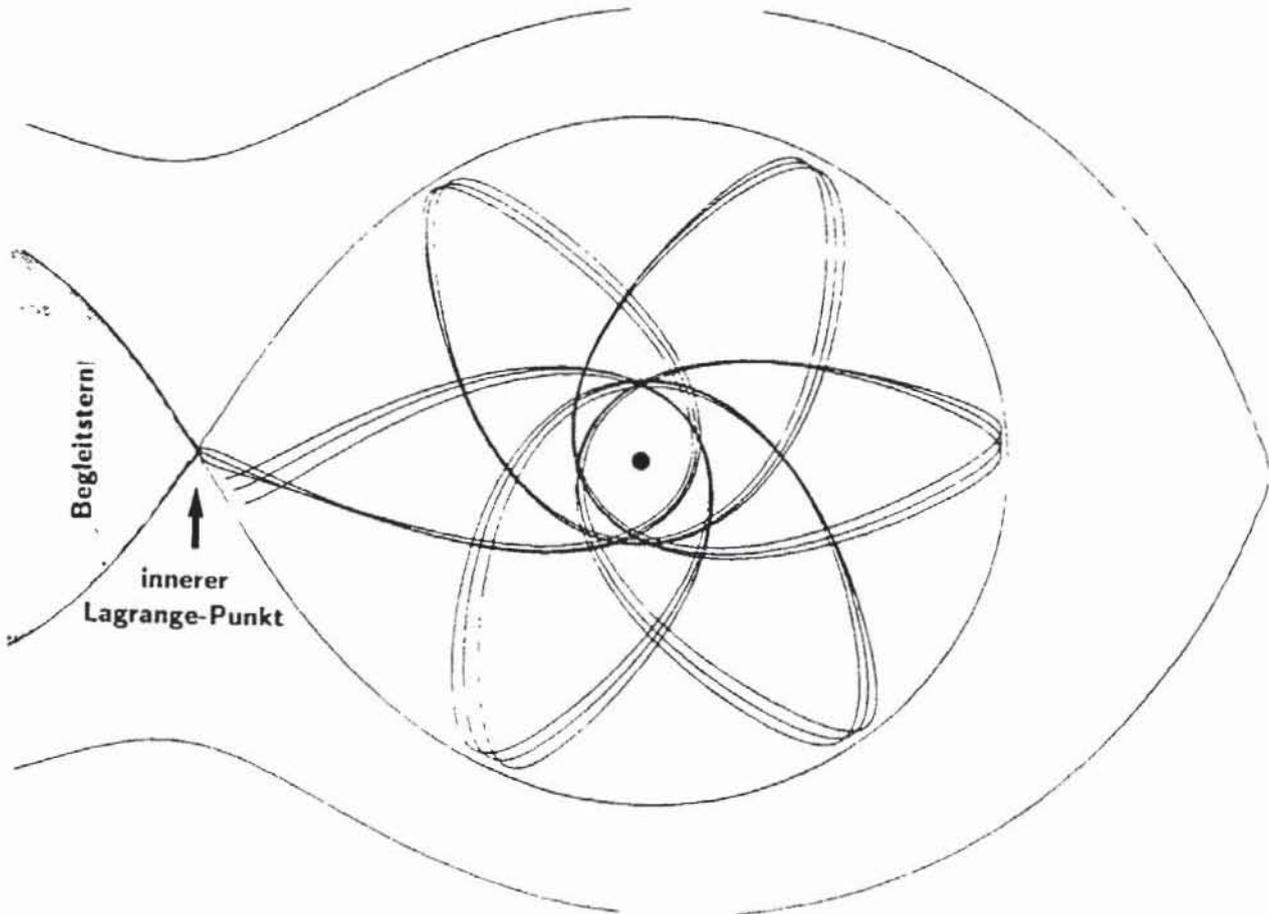


Abbildung 3:

Einteilchenbahnen im Roche-Potential mit etwas unterschiedlichen Anfangsbedingungen am inneren Lagrange-Punkt.

In einem ersten Schritt wird mit einem schnellen Verfahren die Bewegungsgleichung numerisch integriert. Die Abb. 3 zeigt drei Bahnen von Einzelteilchen in diesem Roche-Potential, die unter leicht verschiedenen Anfangsbedingungen am inneren Lagrange-Punkt gestartet sind. Für eine realistische Simulation müssen zusätzlich der Druckgradient und die Viskosität berücksichtigt werden. Diese makroskopischen Größen müssen auf eine effektive Wechselwirkung zwischen den Gaszellen umgerechnet werden. Die viskose Wechselwirkung verursacht lokal eine Geschwindigkeitsangleichung der einzelnen Teilchen, wodurch ihre Bahnen näherungsweise

kreisförmig verlaufen und führt auf einen nach innen gerichteten Massentransport. In Abb. 4 ist eine Momentaufnahme einer Scheibe mit 20 455 Teilchen dargestellt. Die eingezeichneten Konturen sind Linien gleicher Dichte.

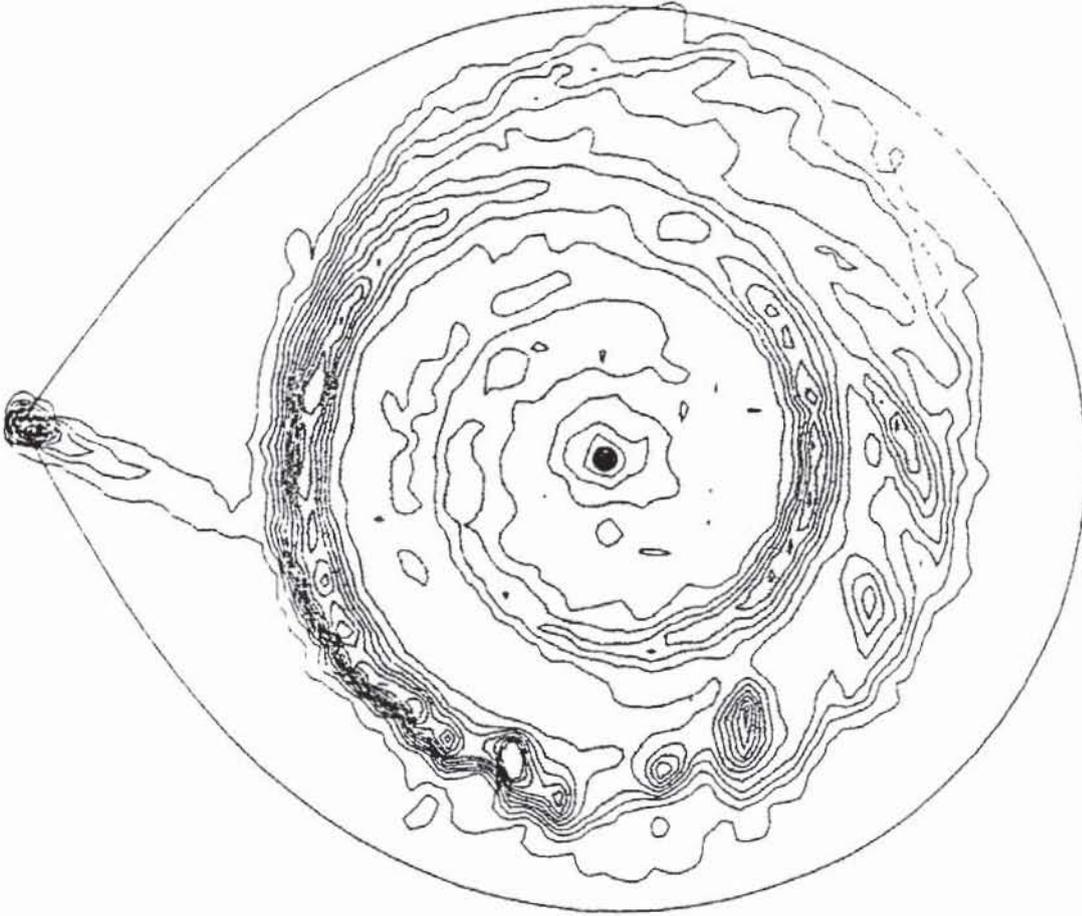


Abbildung 4:

Momentaufnahme einer computersimulierten Akkretionsscheibe mit 20 455 Teilchen. Die eingezeichneten Konturen sind Linien gleicher Dichte. Dieser Zustand hat sich nach 37 Bahnperioden eingestellt.

Mit den Beobachtungen direkt vergleichbar sind nur Lichtkurven und Spektren. Um aus den simulierten Scheiben realistische Lichtkurven zu erhalten, muß man den Strahlungstransport in der Scheibe berücksichtigen, d.h. man muß berechnen, wie die durch die viskose Wechselwirkung lokal in der Scheibe erzeugte Energie abgestrahlt wird. Außerdem hängt die Lichtkurve natürlich sehr empfindlich davon ab, unter welchem Winkel das System beobachtet wird. Beispielsweise ergeben sich große Unterschiede, je nachdem ob der Neutronenstern und die Akkretionsscheibe während einer Bahnperiode vom Begleitstern verdeckt werden oder nicht. Die Abb. 5 zeigt eine typische Lichtkurve für die Bedeckung einer Akkretionsscheibe. Zur Veranschaulichung ist auch noch die jeweilige Stellung des Systems relativ zum Beobachter gezeichnet.

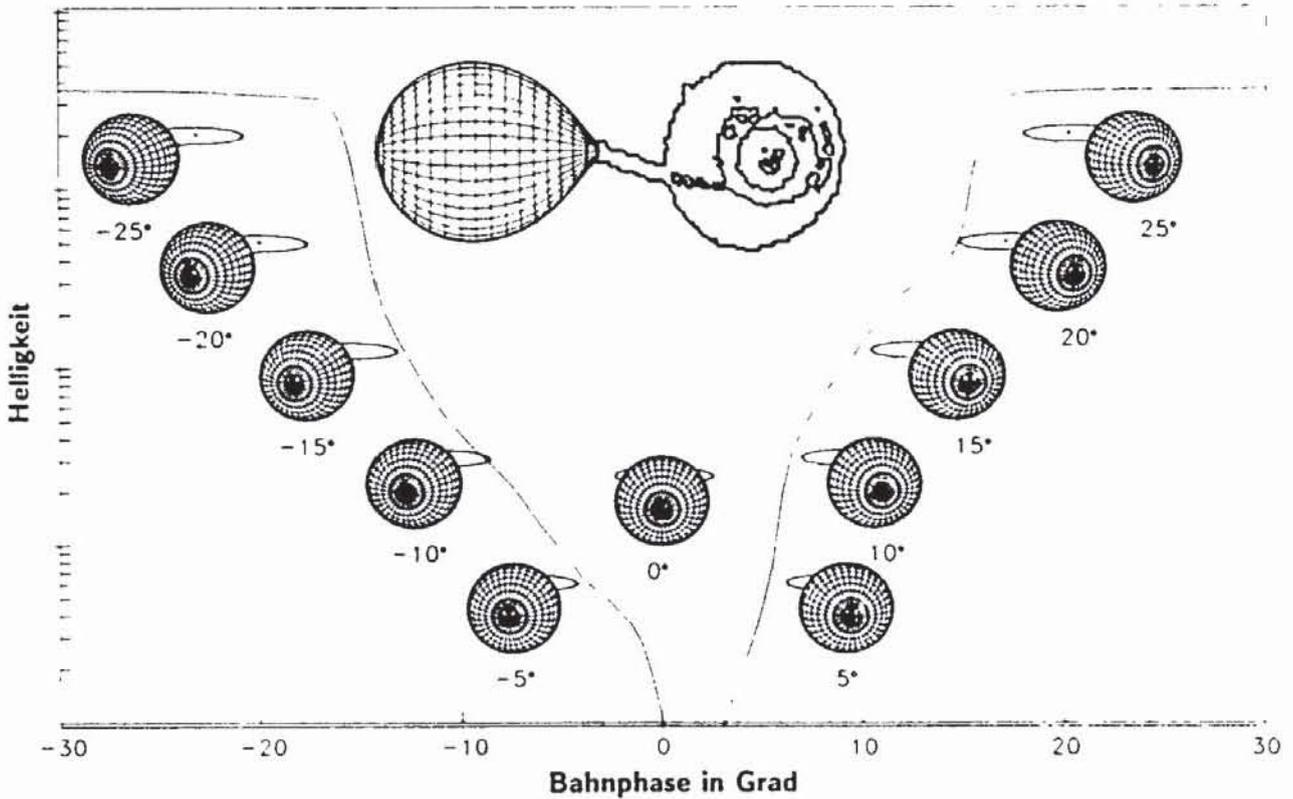


Abbildung 5:

Beispiel einer Lichtkurve für die Bedeckung einer Akkretionsscheibe. Die jeweilige Stellung des Systems relativ zum Beobachter ist in Schritten von 5 Grad eingezeichnet. Die Draufsicht zeigt die räumliche Struktur der Scheibe.

Als besonders wichtig für unsere Untersuchungen von Akkretionsscheiben hat sich eine gute Diagnostik erwiesen. Eine Rechnung, beginnend mit der Bildung der Scheibe bis hin zu einem stationären Zustand mit etwa 20 000 Teilchen, wie er in Abb. 4 dargestellt ist, benötigt viele Cray 2 CPU-Stunden und erzeugt einige 100 MByte an Daten. Um die Vorgänge bei der Scheibenbildung, die Entstehung von Spiralstrukturen, die Ausbildung von Instabilitäten usw. verfolgen zu können, müssen diese Daten als Filmsequenzen aufbereitet werden. Abb. 6 zeigt eine Zeitserie für die Entwicklung einer Scheibe. Wir beginnen die Rechnungen ohne Scheibe und lassen kontinuierlich Materie vom normalen Stern auf den kompakten Stern überströmen. Nach vielen Umlaufperioden (typisch mehrere Stunden) hat die Scheibe ihren endgültigen Zustand erreicht. Dann strömt vom inneren Rand genau soviel Materie auf den kompakten Stern wie der Scheibe vom Begleitstern zugeführt wird. Ist durch Strahlungstransportrechnungen die lokale Abstrahlung der Scheibe in ihrer spektral- und winkelabhängigen Charakteristik bestimmt, dann lassen sich realistische Bilder erzeugen. Abb. 7 zeigt das Ergebnis einer derartigen Visualisierung.

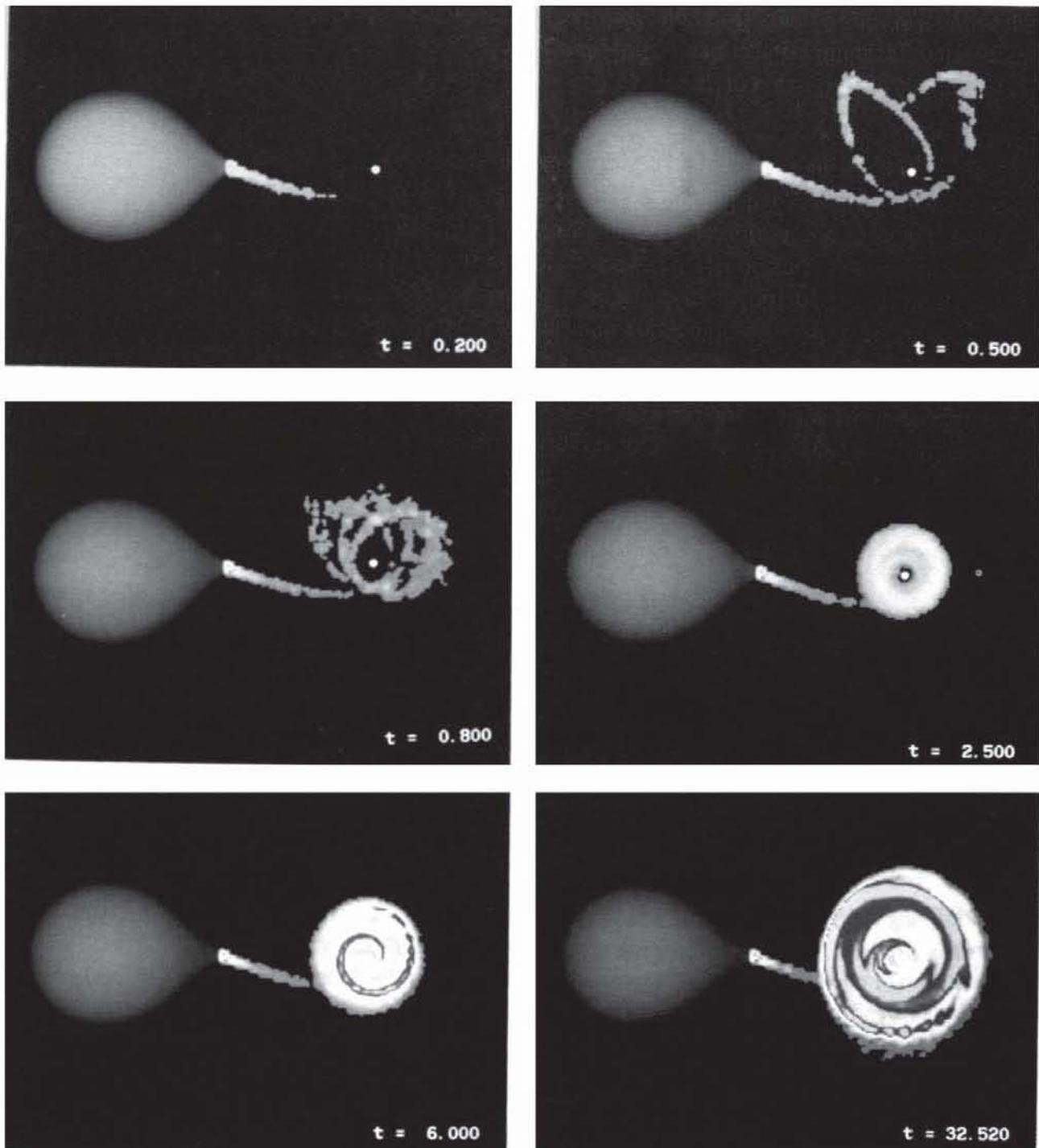


Abbildung 6:

Zeitserie der Entwicklung einer Akkretionsscheibe. Die Materie strömt vom normalen Stern durch die Gravitationswirkung auf den kompakten Stern und bildet dabei eine dünne Scheibe. Die Helligkeit nimmt mit wachsender Flächendichte zu. Die Zeit wird als Vielfaches der Umlaufzeit der beiden Sterne angegeben.

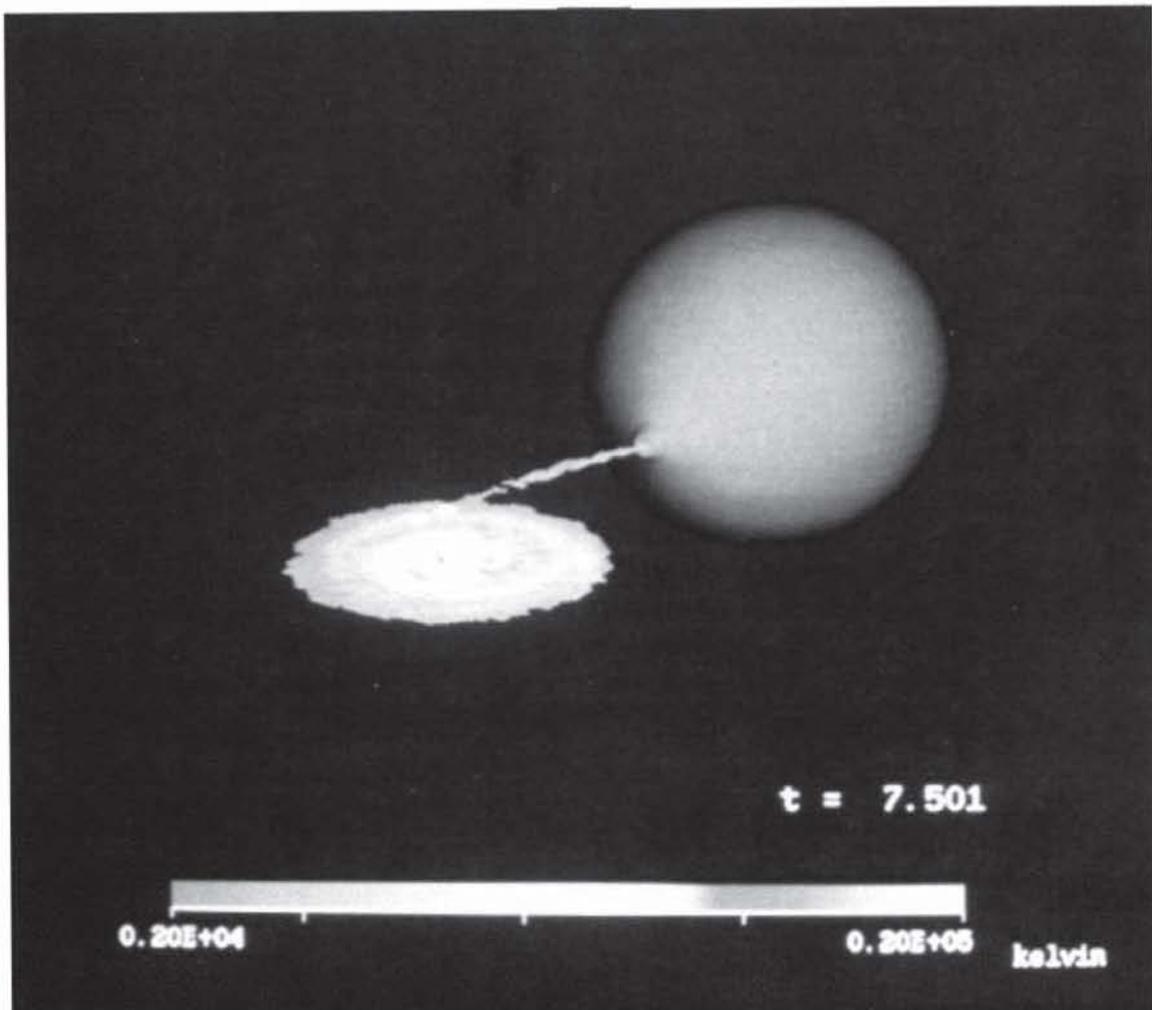


Abbildung 7:

3D-Darstellung eines realistischen Doppelsternsystems mit einer Akkretionsscheibe. Gebiete mit höherer Temperatur strahlen mehr ab und erscheinen daher heller. Es sind deutlich zwei heiße Bereiche zu erkennen: einmal der Ort, wo die Materie vom Begleitstern auf die Scheibe trifft, und zum anderen der innere Rand der Scheibe, wo die Materie durch innere Reibung stark aufgeheizt wird.

2.4 Akkretionssäulen und relativistische Lichtablenkung

Der größte Teil der Röntgenstrahlung entsteht in der Abbremsregion an der Neutronensternoberfläche, wo die Materie mit hoher Geschwindigkeit auftrifft. Die Abbremsung erfolgt innerhalb weniger Zentimeter. Die Strahlung muß dann durch den einfallenden Plasmastrom hindurch entweichen, bevor sie zum Beobachter gelangt. Die genaue Berechnung der Photonenausbreitung in diesem heißen, relativistisch schnell strömenden, stark magnetisierten Plasma ist ein außerordentlich schwieriges Problem. Die Plasmaströmung bewirkt eine Mitführung der Röntgenquanten, was zur Folge hat, daß diese die Säule bevorzugt in Richtung auf den Stern verlassen und so ringförmig um die Akkretionssäule auf die Neutronensternoberfläche auftreffen. Dort werden sie durch mehrfache Streuprozesse reflektiert, wodurch sich am Fuße der Säule ein im Röntgenlicht leuchtender Ring bildet (Abb. 8).

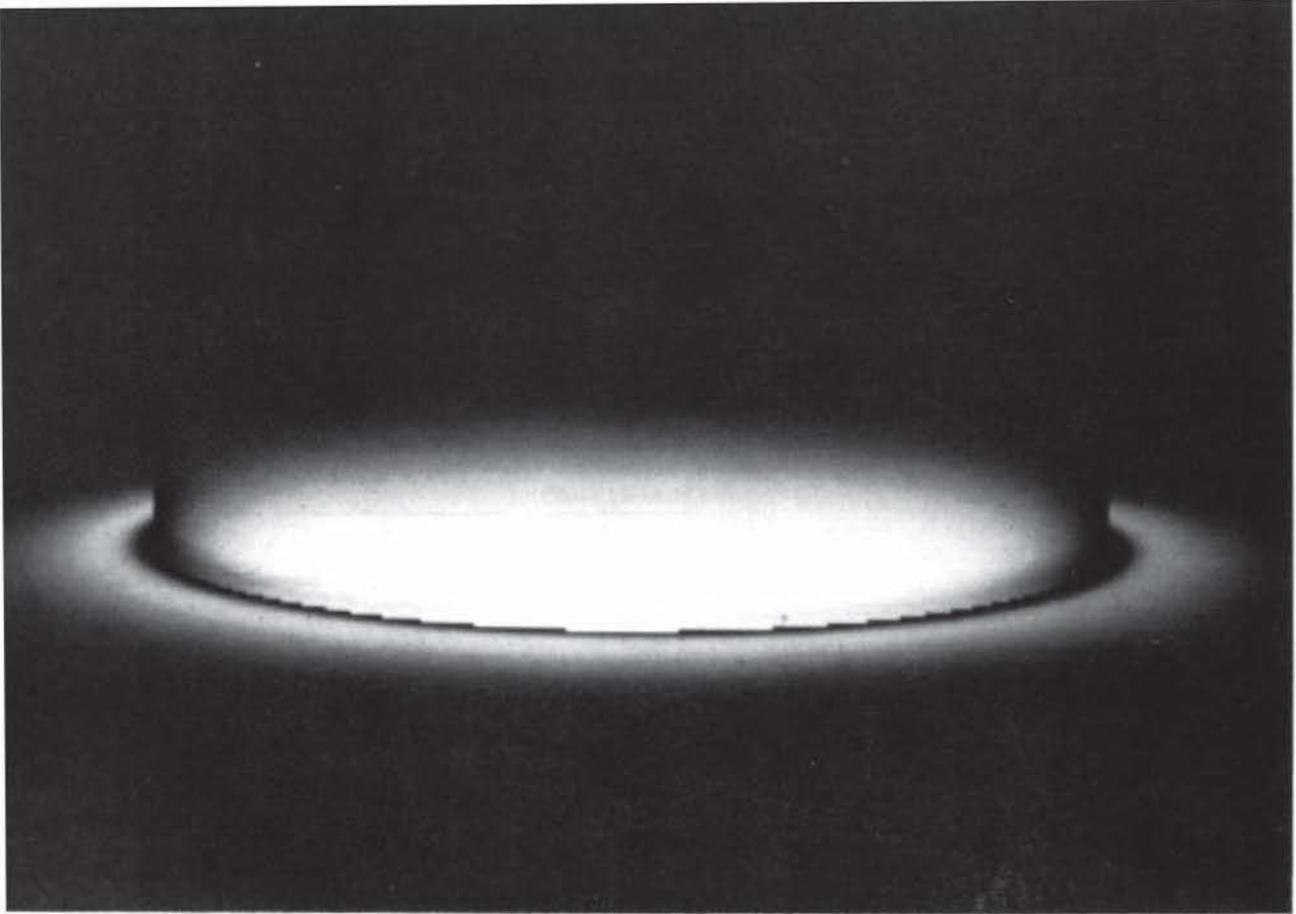


Abbildung 8:

Computergraphik des unteren Endes einer Akkretionssäule auf dem magnetischen Pol 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 einen durch die Röntgenstrahlung aufgeheizten Ring.

Ein Phänomen, dessen Bedeutung für die korrekte Modellierung von Röntgenpulsaren erst seit kurzem voll erkannt wurde, ist die Lichtablenkung in den starken Gravitationsfeldern, wie sie in der Umgebung von Neutronensternen vorliegen. Die an der Oberfläche des Neutronensterns entstehenden Röntgenquanten werden, genauso wie jede andere elektromagnetische Strahlung auch, durch die gewaltige Gravitation – etwa 500 Milliarden mal größer als auf der Erdoberfläche – "angezogen"; ihre Bahn weicht von der geradlinigen Bahn ab. Während dieser Effekt bei der Sonne nur sehr gering ist (1.75 Bogensekunden am Sonnenrand), beträgt er in der Nähe eines Neutronensterns mehr als 45 Grad. Die Abb. 9 zeigt einige Photonenbahnen in der Schwarzschild-Metrik. Als eine Folge dieser Ablenkung kann auch Licht von Teilen der Rückseite des Sterns den Beobachter erreichen, man kann also teilweise um den Stern herumschauen, und es wird somit ein größerer Teil der Sternoberfläche sichtbar. Noch drastischer sind die Effekte für Strahlung, die etwas (einige 100 Meter) oberhalb der Sternoberfläche entsteht. Diese Strahlung kann selbst dann zum Beobachter gelangen (s. Abb. 9), wenn das Emissionsgebiet genau hinter dem Stern liegt. Diese Effekte wirken sich natürlich sehr stark auf die Beobachtung aus.

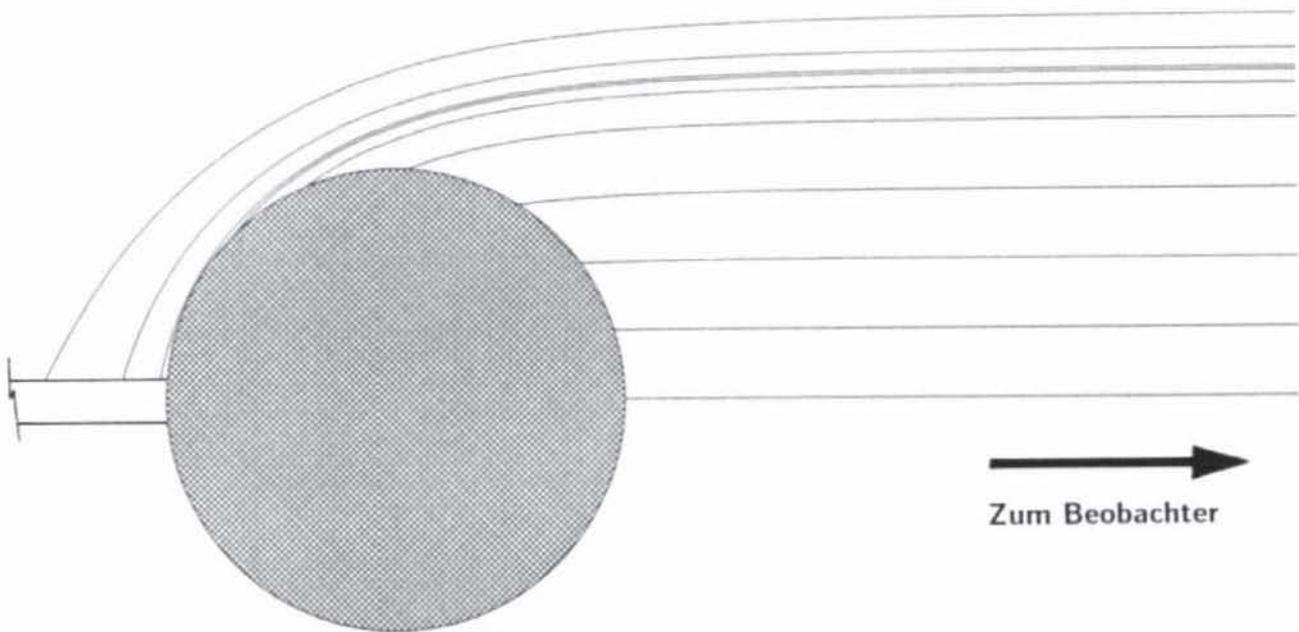


Abbildung 9:

Lichtablenkung bei einem Neutronenstern. Gezeichnet sind einige Bahnen von Photonen, die zu einem weit entfernten Beobachter gelangen.

Zur Verdeutlichung der Lichtablenkung und der dadurch bewirkten Effekte haben wir berechnet, wie ein Neutronenstern für einen entfernten Beobachter aussehen würde (Abb. 10). Das dazu erforderliche Ray-Tracing in der Schwarzschild-Metrik ist relativ aufwendig, da die Bahn jedes einzelnen Photons durch numerische Integration bestimmt werden muß. Ein Bild mit einer Auflösung von 4800×4800 Punkten benötigt auf einer Cray 2 etwa 10 Minuten CPU-Zeit. Die hohe Auflösung ist zumindest lokal notwendig, da die Emission auf sehr kleinen Längen stark variieren kann.

Anhand der Abb. 10 erkennt man deutlich, daß durch die relativistische Lichtablenkung die beiden sich gegenüberliegenden Emissionsgebiete gleichzeitig sichtbar sein können und insgesamt während einer Rotation viel länger zu sehen sind. Das obere Emissionsgebiet beispielsweise verschwindet überhaupt nicht hinter dem Horizont, sondern ist in jeder Rotationsphase zu sehen. Ohne Lichtablenkung dagegen ist immer nur eines der beiden Emissionsgebiete sichtbar. Wie schon erwähnt, sind die Modifikationen noch größer, wenn der abstrahlende Bereich etwas oberhalb der Neutronensternoberfläche liegt, dann wirkt das Gravitationsfeld sogar wie eine Sammellinse (s. Abb. 9). Wie stark sich dadurch die Lichtkurven, die ja letztendlich als beobachtbare Größe das Ziel der Simulationsrechnungen sind, ändern, ist für zwei Beispiele in Abb. 11 demonstriert.

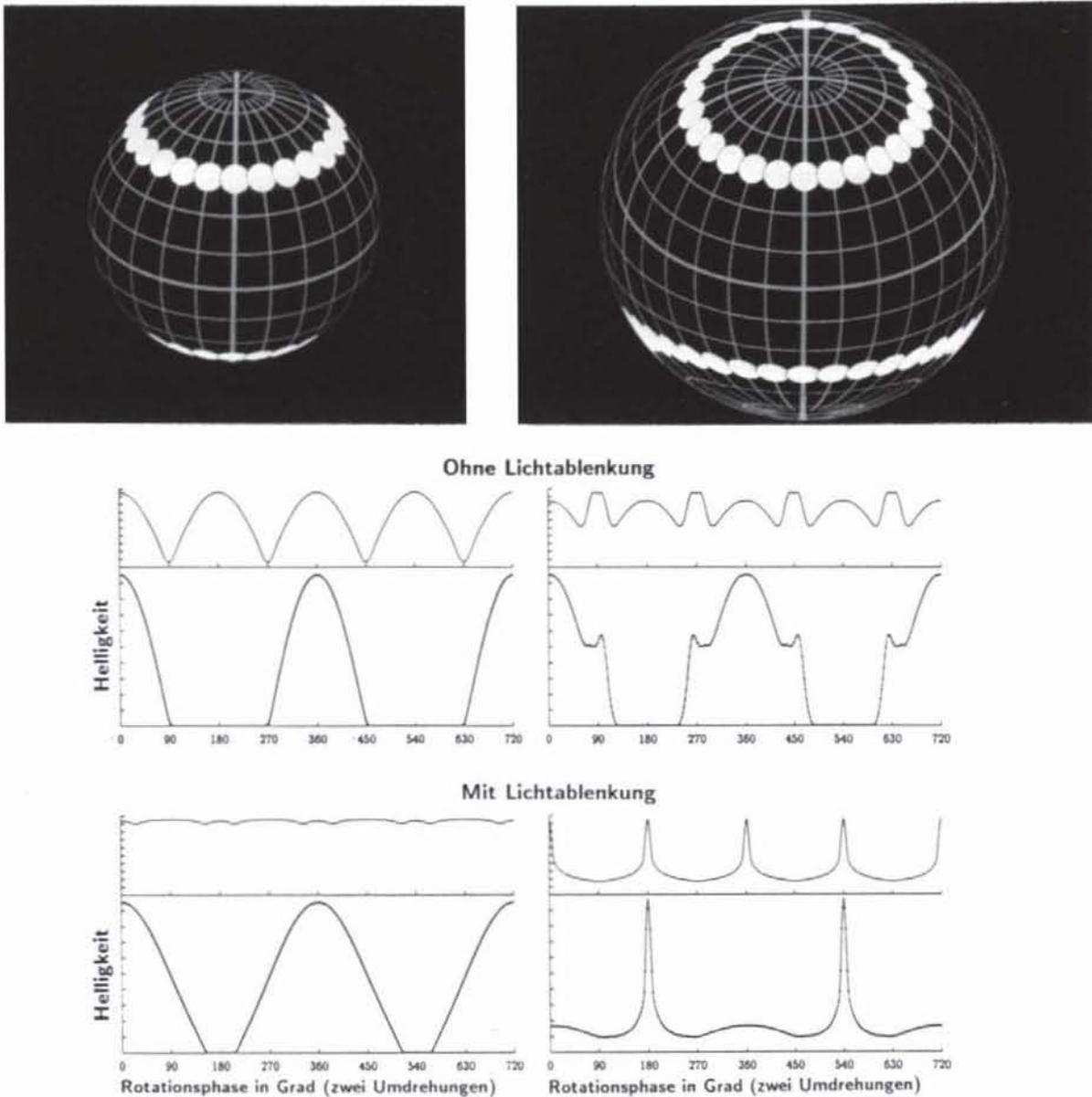


Abbildung 10:

Verdeutlichung der Lichtablenkung an einem Neutronenstern. Dazu wurde der Neutronenstern mit einem Netz von Längen- und Breitenkreisen überzogen und mit zwei einander gegenüberliegenden kreisförmigen Emissionsgebieten versehen. Diese werden in verschiedenen Stellungen während der Rotation gezeigt. Das linke Bild entstand ohne Berücksichtigung der Lichtablenkung, im rechten Bild führt die Lichtablenkung im starken Gravitationsfeld dazu, daß der Stern größer erscheint und ein Teil der Rückseite sichtbar ist.

Abbildung 11:

Beispiele für den Einfluß der relativistischen Lichtablenkung auf die Lichtkurven eines rotierenden Neutronensterns mit einem Emissionsgebiet (untere Kurven) bzw. zwei gegenüberliegenden Emissionsgebieten (obere Kurven). Die Lichtkurven in den oberen Bildern sind ohne, die in den unteren mit relativistischer Lichtablenkung gerechnet. Die linke Abbildung gehört zu einem heißen Fleck auf der Sternoberfläche, die rechte zu einer Akkretionssäule, die auch oberhalb der Sternoberfläche emittiert. Die relativistische Lichtablenkung erzeugt ein scharfes Maximum in der Lichtkurve der Akkretionssäule, da das Gravitationsfeld bei einer bestimmten Position der Säule als Sammellinse wirkt.

2.5 Computational Science Fiction

Seit Albert Einstein vor 85 Jahren seine spezielle und vor 74 Jahren seine allgemeine Relativitätstheorie aufgestellt hat, gibt es ungezählte Geschichten und Filme, die versuchen, die diesen physikalischen Theorien zugrundeliegenden Raumzeitvorstellungen zu veranschaulichen. Da wir nicht täglich mit 99% der Lichtgeschwindigkeit zu unserem Arbeitsplatz in der Nähe eines Schwarzen Loches fliegen, widerspricht die Raum-Zeit-Struktur der Relativitätstheorie vollkommen der unserer tagtäglichen Erfahrung. Wir leben in unserer Vorstellung in einem dreidimensionalen euklidischen Raum, Geschwindigkeiten addieren sich einfach, es gibt keine Grenzgeschwindigkeit, die Lichtgeschwindigkeit ist praktisch unendlich, Lichtlaufzeiteffekte spielen demzufolge keine Rolle, und das Licht breitet sich geradlinig aus. Daß dies bei Geschwindigkeiten, die nahe an der Lichtgeschwindigkeit liegen, nicht so ist, wird in der Relativitätstheorie beschrieben und ist experimentell mit hoher Genauigkeit bestätigt. Die dadurch auftretenden Erscheinungen – aus unserer Erfahrungswelt heraus als Paradoxa beurteilt – sind physikalische Realität.

Dank der Rechenleistung moderner Supercomputer eröffnet sich hier ein reizvolles, weniger der Forschung sondern mehr dem Verständnis dienendes Gebiet der Visualisierung der vierdimensionalen Raum-Zeit-Struktur der Relativitätstheorie. Die Grundidee ist einfach: man gibt sich physikalisch realistische Objekte vor, modelliert lokal ihr Emissionsverhalten, wie beispielsweise leuchtende Oberflächen, emittierende und absorbierende Volumina, und berechnet dann für einen ruhenden oder auf einer bestimmten Bahn fliegenden Beobachter mit Hilfe der Sehstrahlverfolgung in der gekrümmten Raumzeit Einzelbilder, aus denen sich dann Filmsequenzen aufbauen lassen.

Bewegt sich auch der Beobachter mit einer der Lichtgeschwindigkeit vergleichbaren Geschwindigkeit, sind überdies noch Lichtlaufzeiteffekte zu berücksichtigen, d.h. man muß rückwärts den Ort berechnen, an dem die Photonen emittiert wurden, die gleichzeitig ins Auge des Beobachters gelangen. Zusätzlich kann man diese Sequenzen für zwei Augenpositionen berechnen und so versuchen, sogar dreidimensionale Vorstellungen zu gewinnen. Bei Geschwindigkeiten zu nahe an der Lichtgeschwindigkeit und bei zu starken Gravitationsfeldern ist die Raum-Zeit-Struktur vermutlich derartig verzerrt, daß unser Gehirn keinen dreidimensionalen Eindruck mehr erzeugen kann; dies wird zur Zeit untersucht. Eins ist jedoch schon sicher: Die Beschleunigung auf Warp-Geschwindigkeiten beim Raumschiff Enterprise oder im Krieg der Sterne sind zwar sehr phantasievoll gemacht, sie sind aber – ebenso wie der Flug durch das Schwarze Loch in dem gleichnamigen Film – physikalisch falsch, so sähe es nicht aus!

Um einen kleinen Eindruck zu vermitteln, wie komplex die Raum-Zeit-Struktur bereits in der Umgebung eines Neutronenstern ist, haben wir in Abb. 12 einen karierten Neutronenstern mit zwei gegenüberliegenden selbstleuchtenden Säulen einmal mit und einmal ohne Lichtablenkung in drei Positionen dargestellt.

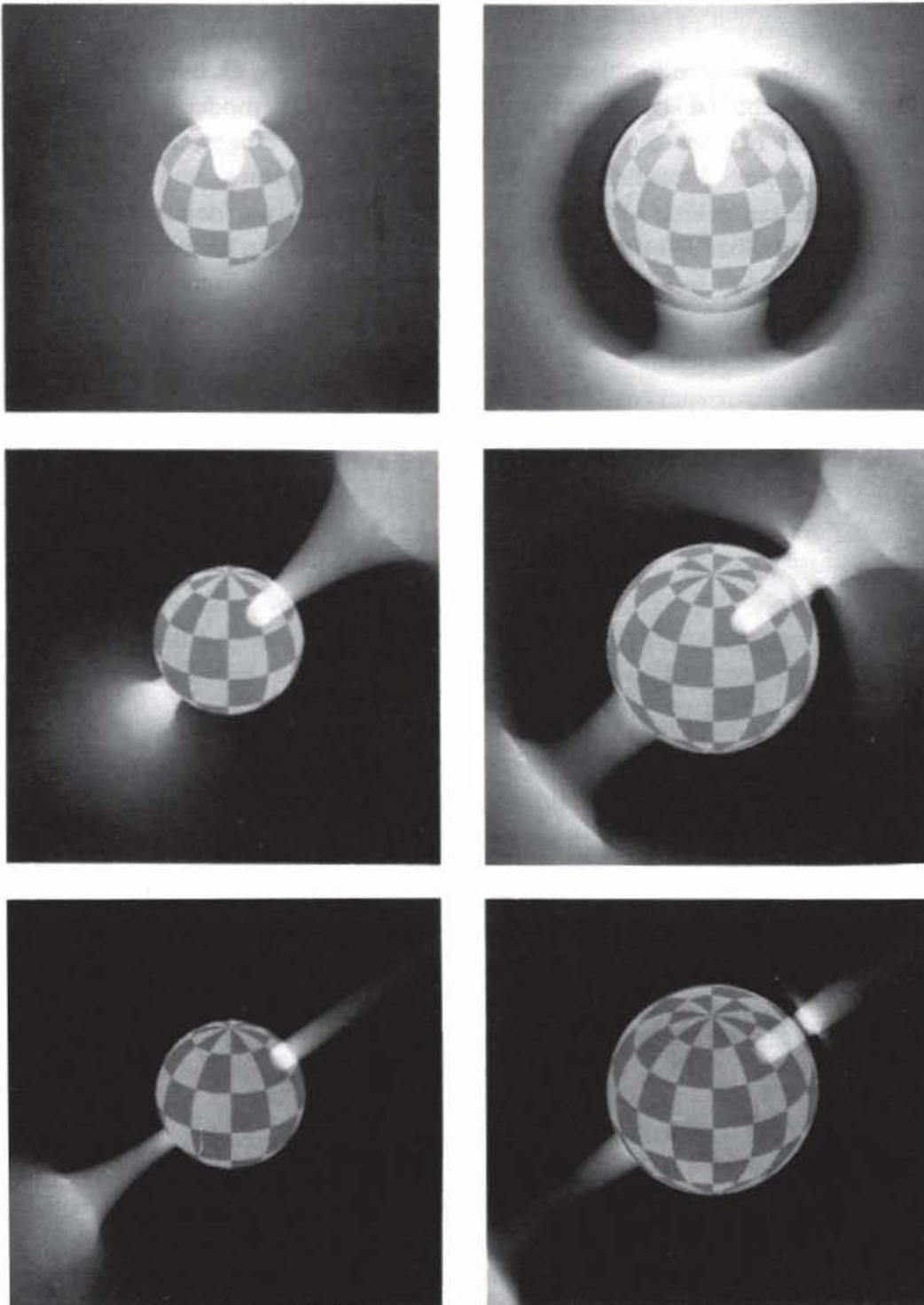


Abbildung 12:

Raum-Zeit-Struktur in der Umgebung eines Neutronensterns. Die Bilder zeigen einen zur besseren Veranschaulichung mit einem Karomuster überzogenen Neutronenstern mit zwei gegenüberliegenden selbstleuchtenden Säulen in drei verschiedenen Orientierungen einmal mit (rechts) und einmal ohne (links) Lichtablenkung berechnet.

3 Ausblick

Exemplarisch für viele weitere Problemstellungen in der Astrophysik haben wir am Beispiel des Röntgenpulsars versucht zu demonstrieren, wie erfolgreich moderne Supercomputer und graphische Methoden bei der Simulation einiger Teilaspekte eingesetzt werden können. Das endgültige Ziel unserer Modellrechnungen für Röntgenpulsare sind spektral aufgelöste Lichtkurven und zeitaufgelöste Spektren in Abhängigkeit von den wesentlichen Systemparametern, die unmittelbar mit den Messungen verglichen werden können. Auf dem Weg dahin benötigen wir jedoch noch tieferes physikalisches Verständnis, bessere numerische Verfahren, schnellere Algorithmen und noch viel mehr Rechenleistung.