

Fremde Welten auf dem Graphik- schirm – Die Bedeutung der Visualisierung für die Astrophysik

Strange Worlds on the Graphics Display

The Importance of Visualization for Astrophysics

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

Lehr- und Forschungsbereich Theoretische Astrophysik der
Universität Tübingen

Unsere Vorstellung von der uns umgebenden Welt ist im wesentlichen durch optische Eindrücke geprägt. Durch die Beschränkungen des menschlichen Auges können wir viele Bereiche nicht direkt visuell wahrnehmen, wie z.B. atomare und kosmische Objekte, mit Lichtgeschwindigkeit ablaufende Vorgänge und elektromagnetische Strahlung außerhalb des sichtbaren Bereichs. Die Menschen versuchen aus diesem Grund seit Jahrhunderten durch kunstvolle Instrumente wie Mikroskope, Fernrohre sowie schnelle und multispektrale Detektoren die Grenzen ihrer Wahrnehmung zu erweitern. Dies ist jedoch aufgrund physikalischer Gesetze nicht im beliebigen Maße möglich.

Obwohl auch die Computer selbst diesen grundsätzlichen physikalischen Beschränkungen unterliegen, sind sie doch ein Instrument, um mit Simulationsrechnungen im Rahmen der gültigen physikalischen Gesetze und durch Visualisierung der Ergebnisse diese fremden Welten sichtbar zu machen. Dies soll an einigen Beispielen, bei denen der Graphikschirm als Supermikroskop, als Riesenfernrohr und als Fenster zur Welt von Einstein dient, demonstriert werden.

Our picture of the world around us is determined essentially by optical impressions. Due to the limitations of the human eye, we cannot directly perceive many fields visually, e.g., atomic and cosmic objects, processes occurring with the velocity of light, and electromagnetic radiation outside the visual range. For this reason, humans have tried for centuries to expand the limits of their visual perception with the help of imaginative instruments such as microscopes, telescopes, and fast and multispectral detectors. Because of the laws of physics, this is not possible to an arbitrary extent.

Although the computer itself is restricted to these fundamental physical constraints, it is an instrument with which we, using simulation

calculations within the framework of the physical laws and through visualization of the results, can make these strange worlds visible. This will be demonstrated by several examples in which the graphics display serves as super microscope, giant telescope and window to the world of Einstein.

1. Einleitung und Motivation

Unsere Vorstellung von der uns umgebenden Welt ist im wesentlichen durch die optischen Eindrücke, die wir mit unseren Augen aufnehmen, geprägt. Durch die Beschränkungen des menschlichen Auges bleiben uns jedoch viele Bereiche verborgen. Daher erscheint uns alles, was wir nicht direkt visuell wahrnehmen können, intuitiv fremd. Dies betrifft sehr kleine Objekte (z.B. Atome), sehr weit entfernte Objekte (z.B. Pulsare), zeitlich sehr schnell ablaufende Vorgänge (z.B. Lichtausbreitung) und elektromagnetische Strahlung außerhalb des sichtbaren Bereichs (z.B. Röntgenstrahlung). Die Menschen versuchen aus diesem Grund seit Jahrhunderten durch kunstvolle Instrumente wie Mikroskope, Fernrohre sowie schnelle und multispektrale Detektoren die Grenzen ihrer Wahrnehmung zu erweitern. Dies ist jedoch aufgrund physikalischer Gesetze nicht in beliebigem Maße möglich. Beispielsweise verhindert die Heisenbergsche Unschärferelation den Bau von Supermikroskopen zur Beobachtung der Feinstruktur von Atomen. Die Winkelauflösung von Fernrohren ist durch die Gesetze der Beugung bestimmt, und man bräuchte Teleskopdurchmesser von Millionen Kilometern, um von Pulsaren mehr zu sehen als nur einen Lichtpunkt.

Obwohl auch die Computer selbst diesen grundsätzlichen physikalischen Beschränkungen unterliegen, sind sie doch ein Instrument, um mit Simulationsrechnungen im Rahmen der gültigen physikalischen Gesetze und durch Visualisierung der Ergebnisse diese fremden Welten sichtbar zu machen.

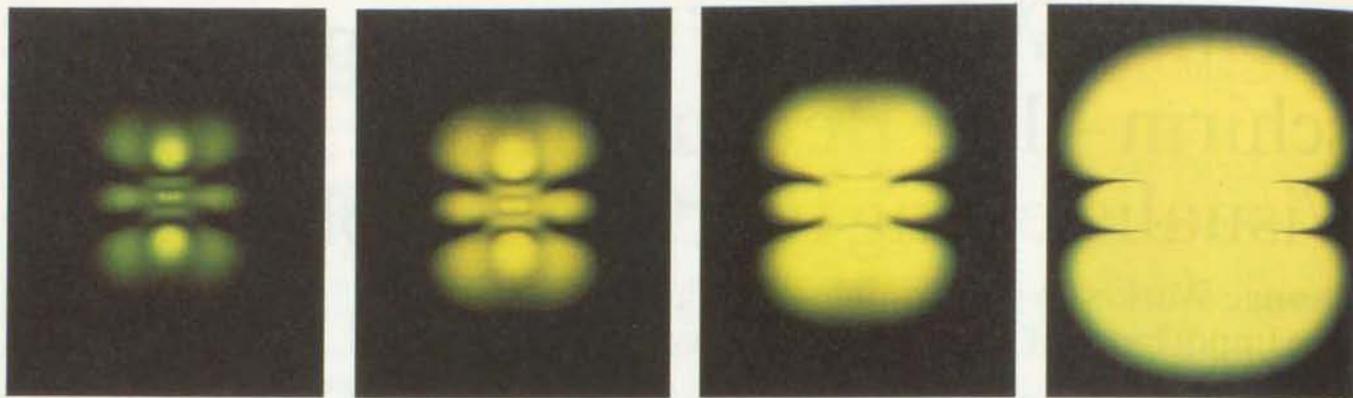


Bild 2.1: Visualisierung des Wasserstoffatoms mit Hilfe der Sehstrahlmethode. Durch eine Variation der Selbstabsorption kann man unterschiedlich tief in das Atom hineinschauen.

2. Der Graphikschirm als Supermikroskop

Der große Physiker und Positivist Ernst Mach hat sich Ende des 19. Jahrhunderts lange gewehrt, die Existenz von Atomen anzuerkennen. Es wird berichtet (z.B. in dem Buch „Weltreich der Physik“ von Armin Hermann), daß von ihm jede Diskussion über Atome mit der Frage beendet wurde „Ham'S ans g'sehn?“.

Inzwischen zweifelt (hoffentlich) niemand mehr an der Existenz von Atomen, und auch zu der Frage wie sie „aussehen“ gibt es ideenreiche Anstrengungen sowohl auf der experimentellen als auch auf der theoretischen Seite. Wobei „aussehen“ hier nicht bedeutet, daß man sie etwa in einem Lichtmikroskop einfach ansehen könnte; Atome sind einige tausendmal kleiner als die Lichtwellenlänge und demzufolge mit optischen Methoden prinzipiell räumlich nicht auflösbar. „Aussehen“ heißt hier,

daß die einzelnen Atome unter bestimmten experimentellen Bedingungen, wie etwa in einem Elektronenmikroskop oder in dem von Werner Binning und Herbert Rohrer erfundenen Tunnelenmikroskop (Nobelpreis für Physik 1987) in Erscheinung treten, bei dem letztgenannten „Mikroskop“ als dreidimensionale Hügellandschaft oder als mehr oder weniger geordnete erbsenähnliche Gebilde auf dem Monitorschirm.

Für den theoretischen Physiker stellt sich die Situation hier etwas einfacher dar; durch numerische Lösung der Schrödinger-Gleichung mit Hilfe moderner Supercomputer lassen sich die Eigenschaften zumindest der leichteren Atome mit nahezu beliebiger Genauigkeit berechnen. Das Ergebnis solcher Rechnungen sind die Energien, Wellenfunktionen und weitere spezifische Eigenschaften des Atoms. Nun ist die Wellenfunktion ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, das atomare Elektron an einem bestimmten Ort anzutreffen. Das heißt, man kann sich das Betragsquadrat der Wellenfunktion als eine den Atomkern umgebende dreidimensionale Wolke vorstellen, deren Dichte proportional zur Wahrscheinlichkeit ist, das Elektron an der jeweiligen Stelle anzutreffen. Stellt man sich vor, daß diese nebelartige Struktur leuchtet, dann kann man berechnen, wie diese Elektronenwolke für einen sich an einem beliebigen Ort befindlichen Beobachter aussieht, indem man die Intensitäten längs der verschiedenen Sehstrahlen aufintegriert. Berücksichtigt man zusätzlich noch eine Selbstabsorption des Nebels, so kann man durch Variation des Absorptionsparameters unterschiedlich tief in das Objekt hineinschauen. Die so gewonnenen Bilder lassen sich dann helligkeits- oder farbcodiert auf einem hochauflösenden Graphikschirm darstellen und zeigen, wie ein Atom aussieht (Bild 2.1). Zusätzlich kann man die Atome drehen und so einen echten dreidimensionalen Eindruck von der Struktur des Atoms vermitteln. (Es ist geplant, Videobänder und Filme für Demonstrationszwecke allgemein zugänglich zu machen.)

Richtet man das Supermikroskop nicht nur auf statische Objekte, sondern auch auf dynamische Vorgänge, so erschließen sich dem Betrachter physi-

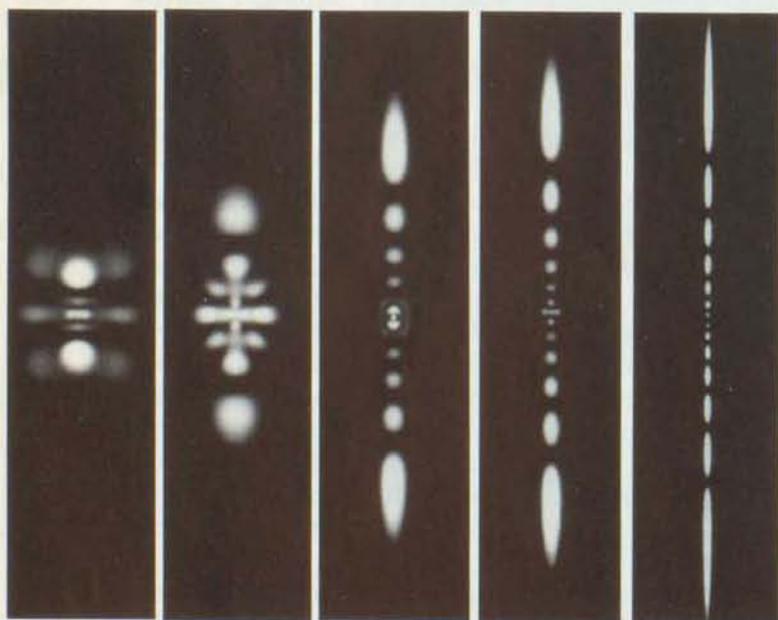


Bild 2.2: Die Wirkung eines Magnetfelds (von links nach rechts anwachsend) auf die Struktur eines Wasserstoffatoms, visualisiert mit Hilfe der Sehstrahlmethode. Durch die zunehmenden magnetischen Kräfte werden die Atome zu nadelförmigen Gebilden zusammengeschürt.

kalisch neue Welten. So wurden z.B. mit Hilfe von Filmsequenzen, in denen man die Wirkung eines anwachsenden Magnetfeldes auf die Form des Atoms direkt verfolgen kann, neue Einsichten in der Physik kompakter Objekte gewonnen (Bild 2.2). Besonders eindrucksvoll in ihren komplexen Strukturen sind dabei die hochangeregten Rydberg-Zustände mit Magnetfeld, zu deren Berechnung auf einem Supercomputer, der Cray 2 des Rechenzentrums der Universität Stuttgart, die tausend niedrigsten Eigenwerte und deren Eigenvektoren von Matrizen mit über hundert-siebzig Millionen von Null verschiedenen Matrixelementen berechnet wurden. In diesen Zuständen mit Hauptquantenzahlen um 50 bis 100 wird aus dem Wasserstoffatom ein zartes und bizarres Gebilde voll künstlerischer Ästhetik mit Bindungsenergien von wenigen Millielektronenvolt und räumlichen Ausdehnungen in Magnetfeldrichtung bis zu einem tausendstel Millimeter, also vergleichbar den angestrebten charakteristischen Größen der Strukturen eines Chips in VLSI-Technik. Diese Gebilde sind interessante Studienobjekte für den Übergang von der klassischen Physik zur Quantenmechanik und von fundamentaler Bedeutung für Fragen im Zusammenhang mit dem Quantenchaos. Das klassische System zeigt in diesen Magnetfeld- und Energiebereichen einen Übergang von regulärem zu chaotischem Verhalten. Klassische periodische Bahnen werden zunehmend instabil, nichtperiodische Bahnen stochastisch. Semiklassische Vorhersagen lassen jedoch

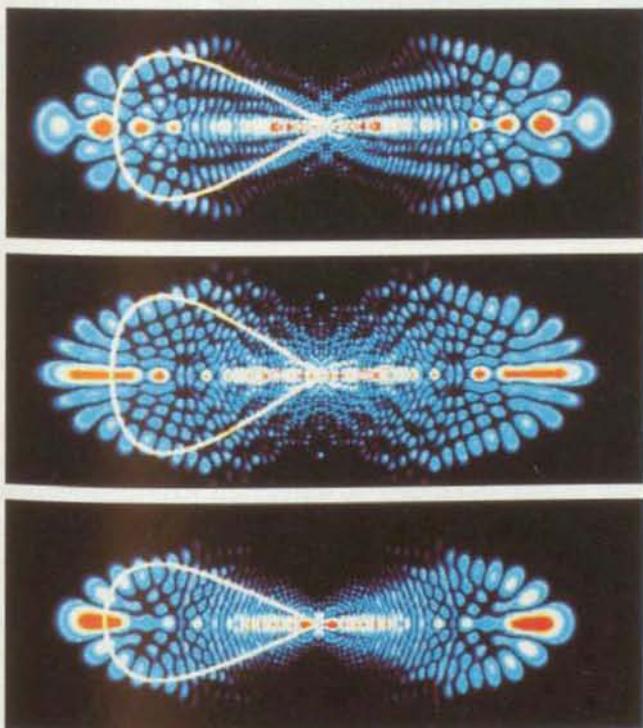


Bild 2.3: Beispiele für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons in hoch angeregten Rydberg-Atomen bei einem Magnetfeld von 6 Tesla. Diese Atome haben bereits Dimensionen von der Größenordnung eines tausendstel Millimeters. Durch die Visualisierung wird die enge Korrelation zwischen den eingezeichneten periodischen klassischen Bahnen und einer erhöhten quantenmechanischen Aufenthaltswahrscheinlichkeit deutlich.

eine Lokalisierung der Elektronenbahnen, d.h. eine Überhöhung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons längs klassischer Bahnen erwarten. Die Bedeutung einer guten Visualisierung kommt insbesondere hier zum Tragen. Ein einfaches numerisches Maß, mit dem sich solche Überhöhungen der Aufenthaltswahrscheinlichkeit längs klassischer Bahnen berechnen ließe, gibt es nicht. Die Natur hat uns Menschen jedoch mit einem der effizientesten Detektoren zum Aufspüren räumlicher Strukturen ausgerüstet: dem Auge. Die Computervisualisierung liefert diesem Detektor das Objekt, ein farbcodiertes Bild, in dem Lokalisierungen längs klassischer Bahnen als Narben in der Struktur erkennbar sind (Bild 2.3).

3. Der Graphikschirm als Riesenfernrohr

Unser Wissen über die Struktur des Kosmos und die darin enthaltenen Objekte stammt aus der sorgfältigen Analyse der auf der Erde einfallenden elektromagnetischen Strahlung, verbunden mit einer theoretischen Modellierung im Rahmen der von uns erforschten Naturgesetze. Die astronomischen 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.

Die sprunghafte Zunahme unserer Kenntnisse in den letzten zwei Jahrzehnten verdanken wir vor allem den vielen Forschungssatelliten, die die Beobachtung kosmischer Objekte ohne die störenden Einflüsse unserer Atmosphäre erlauben. Speziell im weichen Röntgenbereich ist dadurch eine Beobachtung überhaupt erst möglich, und es ist gerade dieser Spektralbereich, der uns wesentlich neue Erkenntnisse über hochinteressante Objekte geliefert hat, da intensive Röntgenstrahlung nur unter sehr extremen physikalischen Bedingungen entsteht. Parallel zu dieser Erweiterung unserer Beobachtungsmöglichkeiten hat aber auch die rasante Entwicklung der Computerkapazität einen ganz erheblichen Anteil an dem wissenschaftlichen Fortschritt, denn die in diesen Röntgenemissionsgebieten vorherrschenden Temperaturen, Magnet-, und Gravitationsfelder sind so extrem, daß sie in irdischen Labors niemals erzeugt werden können. Folglich bleibt nur die Möglichkeit, die Eigenschaften der Materie und die unter diesen Bedingungen ablaufenden physikalischen Prozesse theoretisch zu berechnen, um so – im Vergleich mit den Beobachtungen – zu zuverlässigen Aussagen über die Struktur dieser kosmischen Objekte zu gelangen. Die möglichst realistische Computersimulation der Systeme im Rahmen einer beobachtungsnahen Theorie erfordert vor allem bei Parameterstudien im allgemeinen den Einsatz der größten verfügbaren Rechenleistungen.

Tabelle 3.1: Bedeutung der Visualisierung für die Astrophysik am Beispiel der räumlichen Auflösung: Notwendige Fernrohröffnungen für die beugungsbegrenzte Auflösung eines 10 km großen Objekts für einige typische Entfernungen

| | 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 |

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-Perly-Rhodan-Raumfahrt-Technologie – völlig aussichtsloses Unterfangen, oder man bräuchte optisch perfekte Teleskope mit Durchmessern von einer Million Kilometern und mehr. In der Tabelle 3.1 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.

Durch Auswertung der durch multispektrale Beobachtungen gewonnenen Informationen zusam-

men 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 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 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.

Im folgenden soll an einem Beispiel etwas genauer beschrieben werden, wie bei Magnetfeldern, die millionenfach größer sind als die stärksten Magnetfelder, die man in irdischen Labors herstellen kann, bei Temperaturen von einigen 100 Millionen Grad und bei Gravitationsfeldern mit der 10^{12} -fachen Stärke des Erdfeldes – also bei Bedingungen, die unsere experimentellen Möglichkeiten um viele Größenordnungen überschreiten – durch Computersimulationen detaillierte Aussagen über komplexe physikalische Vorgänge erzielt und aussagekräftige Bilder erzeugt werden können.

3.1 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, da sie die stärksten Röntgenquellen unserer Milchstraße sind. Die Abstrahlung eines typischen Röntgenpulsars beträgt 10^{30} Watt, er emittiert damit allein im Röntgenbereich das zehntausendfache 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 (Bild 3.1a). Durch seinen kleinen Radius von nur etwa 10 km und seine im Vergleich dazu große Masse von ungefähr einer

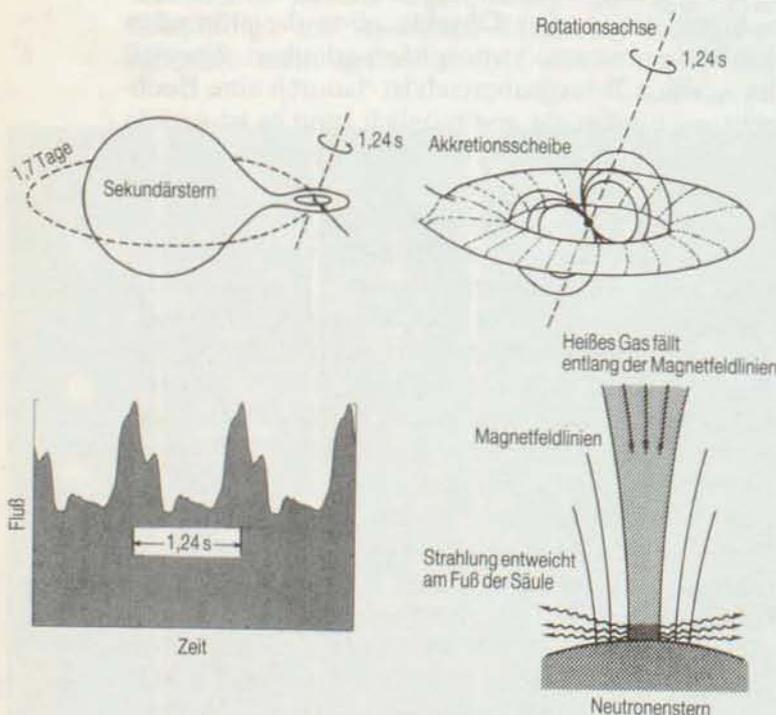


Bild 3.1: Schematische Darstellung des engen Röntgen-Doppelsternsystems Her X-1 im Sternbild Herkules (a). Die Materie strömt vom Sekundärstern zum Neutronenstern und bildet dabei eine Scheibe (b). Durch die schnelle Rotation des Neutronensterns sieht man die an den magnetischen Polen (d) entstehende Röntgenstrahlung gepulst (c).

Sonnenmasse 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 (Bild 3.1b), 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 (Bild 3.1d). Dort treffen dann bei Magnetfeldstärken von 10^8 – 10^9 Tesla 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. 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. 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 (Bild 3.1c).

Es wäre natürlich ein völlig aussichtsloses Unterfangen, zu versuchen, das gesamte Doppelsternsystem 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. Zur Simulation dieser verschiedenen Teilsysteme sind jeweils ganz unterschiedliche numerische Verfahren erforderlich, die aufgrund der Problemgröße die Kapazität eines Supercomputers erfordern. Die dabei anfallenden riesigen Datenmengen lassen sich adäquat eigentlich nur durch Visualisierung beurteilen. Daher wollen wir jetzt einige Ergebnisse unserer Simulationsrechnungen zur Entstehung von Akkretionsscheiben und zur Modellierung des Emissionsgebiets auf dem Neutronenstern in Form von Bildern präsentieren.

3.2 Akkretionsscheiben

Zur Modellierung von Akkretionsscheiben sind Teilchensimulationsmethoden besonders gut geeignet. Ein „Teilchen“ repräsentiert dabei ein kleines, aber makroskopisches Volumenelement, gefüllt mit Akkretionsscheibenmaterial. Die Bahn dieser Pseudoteilchen ist durch die Newtonsche Bewe-

gungsgleichung bestimmt und wird durch numerische Integration gewonnen. Die Bewegung erfolgt unter dem Einfluß der Gravitationswirkung der beiden Sterne, die als Massenpunkte angenommen werden und auf Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt laufen, sowie unter dem Einfluß der Zentrifugal- und der Corioliskraft. Für eine realistische Simulation müssen zusätzlich der Druckgradient und die Viskosität berücksichtigt werden. Diese Größen werden auf eine effektive Wechselwirkung zwischen den Gaszellen umgerechnet. Die viskose Wechselwirkung verursacht lokal eine Geschwindigkeitsangleichung der einzelnen Teilchen, wodurch ihre Bahnen näherungsweise kreisförmig verlaufen, und führt auf einen nach innen gerichteten Massentransport. Diese interne Reibung bewirkt eine Erhitzung des Scheibenmaterials und damit unterschiedliche Temperaturen in der Akkretionsscheibe (Bild 3.2).

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, 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. Bild 3.3 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.

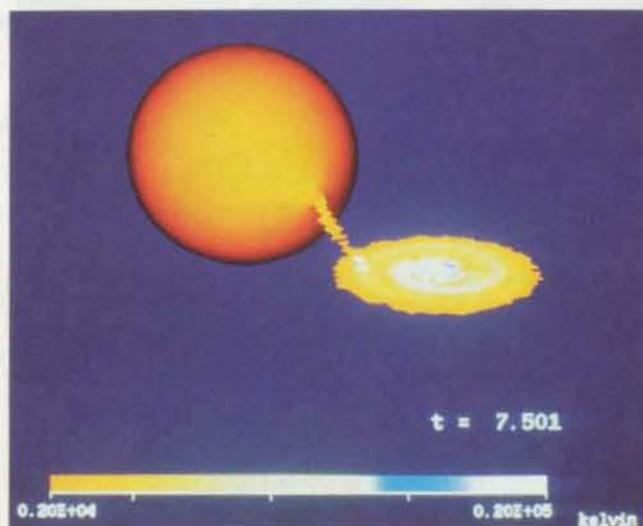


Bild 3.2: Das Ergebnis einer aufwendigen Computersimulation zur Entstehung einer Akkretionsscheibe um ein kompaktes Objekt in einem Doppelsternsystem. Die Farbcodierung der Scheibe entspricht der lokalen Temperatur des Scheibenmaterials.

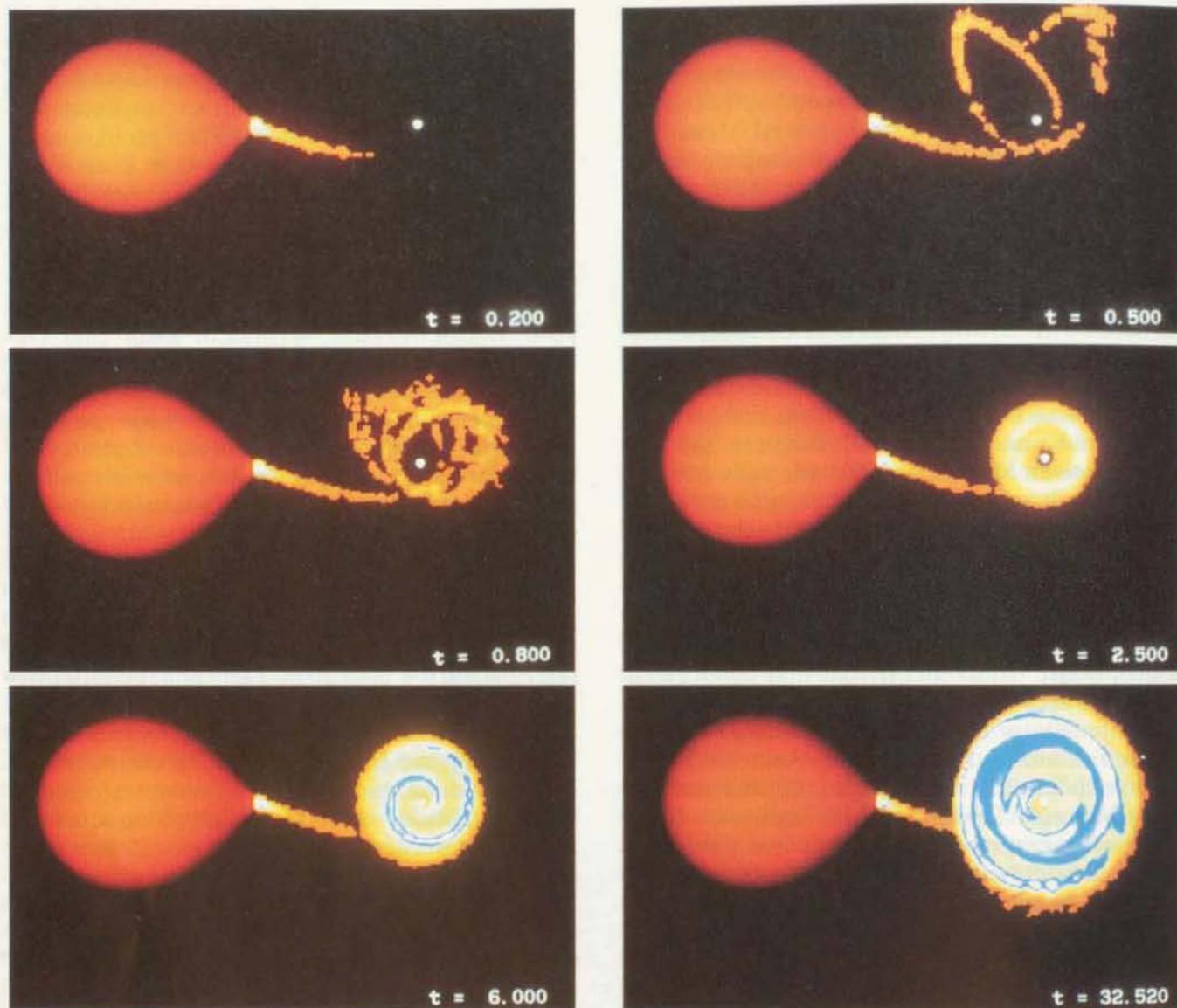


Bild 3.3: Zeitserie der Entwicklung einer Akkretionsscheibe, wobei die Zeit als Vielfaches der Umlaufzeit der beiden Sterne angegeben wird. Die Materie strömt vom normalen (roten) Stern durch die Gravitationswirkung auf den kompakten (weißen) Stern und bildet dabei eine dünne Scheibe. Die Farbcodierung in der Scheibe repräsentiert die Materiedichte. Solche Bildsequenzen werden immer häufiger eingesetzt, um die zugrundeliegende CPU-intensive Computersimulation zu überwachen und die riesigen anfallenden Datenmengen zu interpretieren.

3.3 Akkretionssäulen

Die Materie, die die Scheibe am inneren Rand verläßt, ist aufgrund der hohen Temperaturen ionisiert und muß daher den Magnetfeldlinien bis zu den Polen auf der Neutronensternoberfläche folgen. Der größte Teil der Röntgenstrahlung entsteht dort in der Abbremsregion, 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 Photonen ausbreitung 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 Neuro-

nensternoberfläche auftreffen. Dort werden sie durch mehrfache Streuprozesse reflektiert, wodurch sich am Fuße der Säule ein im Röntgenlicht leuchtender Ring bildet (Bild 3.4).



Bild 3.4: 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.

4. Der Graphikschirm als Fenster zur Welt von Einstein

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 alltäglichen 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 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.

4.1 Gekrümmte Lichtstrahlen

Ein Effekt, dessen Bedeutung für die korrekte Modellierung von physikalischen Phänomenen in der Umgebung stark gravitierender kompakter Objekte erst seit kurzem voll erkannt wurde, ist die Lichtablenkung in diesen starken Gravitationsfeldern.



Bild 4.1: Lichtablenkung im starken Gravitationsfeld eines Neutronensterns. Eingezeichnet ist der Verlauf einiger Lichtstrahlen für einen weit entfernten Beobachter. Obwohl die angedeutete Säule genau hinter dem Stern liegt, ist ihre Oberfläche für den Beobachter sichtbar.

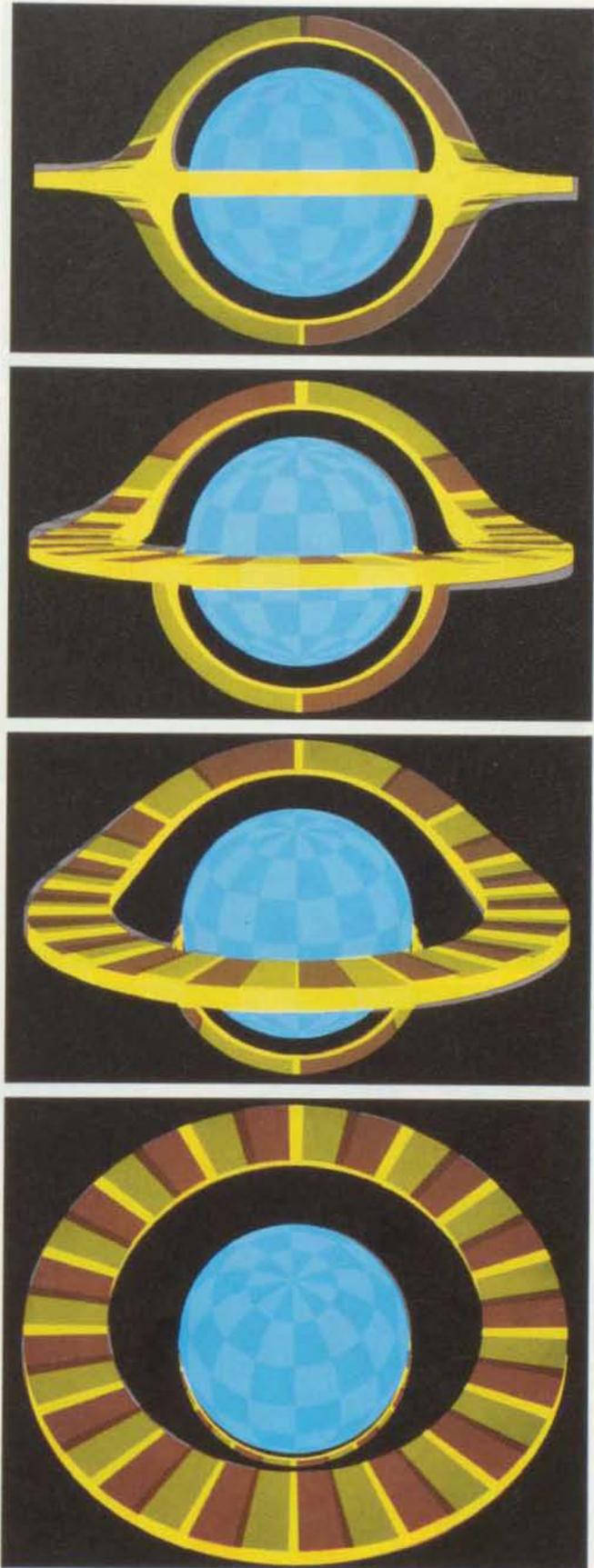


Bild 4.2: Raumstruktur in der Umgebung eines Neutronensterns. Die Bilder zeigen einen zur besseren Veranschaulichung mit einem Karomuster überzogenen Neutronenstern und einen ihn umgebenden ebenfalls karierten Ring unter verschiedenen Blickwinkeln. Durch die gravitative Lichtablenkung ist gleichzeitig die Ober- und Unterseite des Rings zu sehen. Man beachte auch die gleichzeitige Sichtbarkeit der beiden Pole auf dem Neutronenstern.

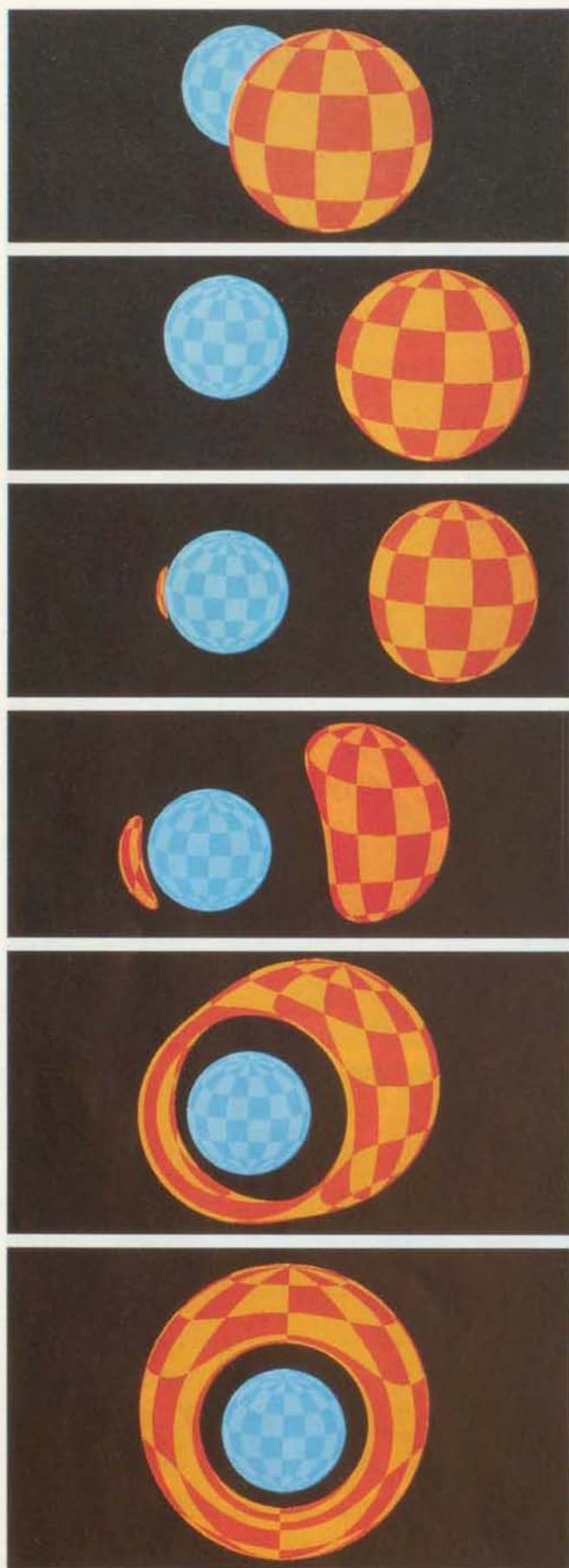


Bild 4.3: Sechs verschiedene Bahnphasen von dem Umlauf eines als masselos angenommenen (roten) Sterns um einen (blauen) Neutronenstern. Durch die gravitative Lichtablenkung sieht man den Stern teilweise links und rechts vom Neutronenstern und, wenn er sich hinter dem Neutronenstern befindet, sogar als ein ringförmiges Gebilde.

dern. Licht wird, genauso wie jede andere elektromagnetische Strahlung auch, durch die gewaltige Gravitation – etwa 500 Milliarden mal größer als auf der Erdoberfläche – „angezogen“; seine Ausbreitung 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 90 Grad. Das Bild 4.1 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. Bild 4.1), wenn das Emissionsgebiet genau hinter dem Stern liegt.

Zur Verdeutlichung der Lichtablenkung und der dadurch bewirkten Effekte haben wir berechnet, wie für einen entfernten Beobachter ein Neutronenstern mit einem Ring, der hier natürlich eine Akkretionsscheibe repräsentieren soll (Bild 4.2), und wie ein Neutronenstern mit einem umlaufenden Begleitstern (Bild 4.3) aussehen würde. Das dazu erforderliche Ray-Tracing in der Schwarzschild-Metrik ist relativ aufwendig, da die Bahn jedes einzelnen Photons durch numerische Integration bestimmt werden muß.

Der wesentliche Unterschied zu der uns vertrauten Raum-Zeit-Struktur besteht darin, daß man durch die Lichtablenkung am Neutronenstern um ihn herumschauen kann. Dies hat zur Folge, daß man bei dem Ring in Bild 4.2 gleichzeitig die Ober- und die Unterseite des hinter dem Neutronenstern liegenden Ringteils sieht. Hierin liegt der Grund für die verwirrende scheinbare Aufspaltung des Rings. Wenn man nun der symbolischen Akkretionsscheibe wie in Bild 3.2 eine Temperatur zuordnet, die zu einer lokalen Abstrahlung von Energie führt, wird klar, daß die astronomische Beobachtung der Scheibe in Bild 4.2 zu ganz anderen Lichtkurven führt, als im nichtrelativistischen Fall. Genau das gleiche gilt auch für den umlaufenden Stern (Bild 4.3), von dem man Teile sowohl links als auch rechts vom Neutronenstern erkennt und der, wenn er sich hinter dem Neutronenstern befindet, sogar als ringförmiges Gebilde erscheint.

4.2 Endliche Lichtgeschwindigkeit

Bewegt sich ein Objekt oder sein Beobachter mit einer der Lichtgeschwindigkeit vergleichbaren Geschwindigkeit, so sind die durch die Lorentz-Transformation beschriebenen Effekte der speziellen Relativitätstheorie wie die Längenkontraktion und die Aberration zu berücksichtigen. Für die Visualisierung von schnell bewegten Körpern müssen wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit zusätzlich noch die Lichtlaufzeiteffekte berechnet werden, d.h.

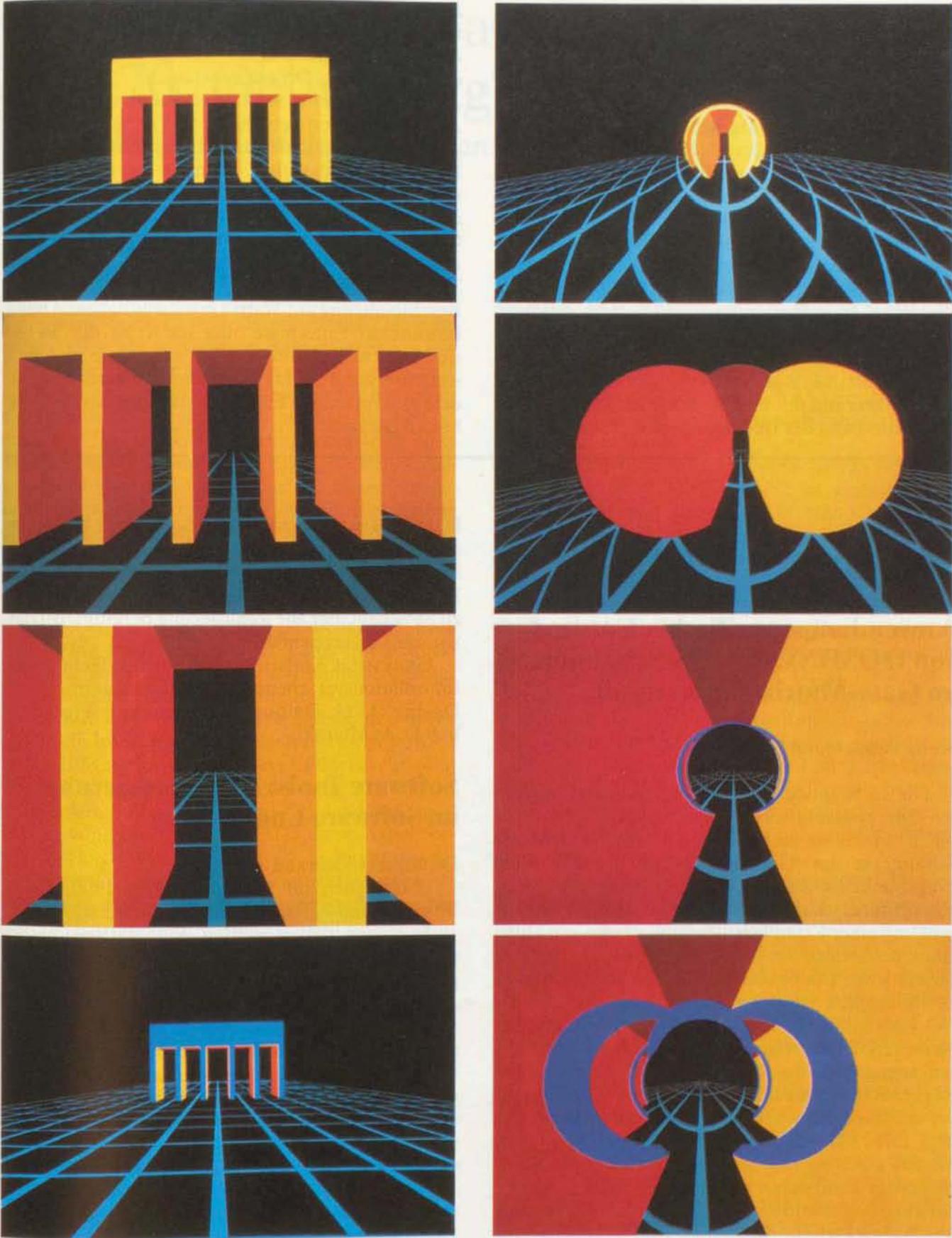


Bild 4.4: Visualisierung der Effekte der Raum-Zeit-Struktur der speziellen Relativitätstheorie am Beispiel eines Fluges durch das stilisierte und leicht vergrößerte (Höhe 10 Lichtsekunden) Brandenburger Tor, wobei sich der Beobachter auf den vier Bildern der linken Sequenz mit 10%, auf denen der rechten Sequenz mit 99% der Lichtgeschwindigkeit bewegt. Während sich links nur geringe Effekte bemerkbar machen, ist das Objekt rechts dramatisch verzerrt. Obwohl der Beobachter in Flugrichtung blickt, kann er sowohl die Innenseiten als auch die Rückseite sehen. Zur besseren Unterscheidung sind die Oberflächen verschieden eingefärbt, die Vorderseite erscheint gelb, die Rückseite blau und die Innenseiten rot, braun und orange. Zwischen dem dritten und dem vierten Bild der ersten Sequenz hat sich der Beobachter um 180° gedreht und schaut entgegen der Flugrichtung zurück.

man muß berechnen, wo sich das leuchtende Objekt befand, als die Photonen emittiert wurden, die dann gleichzeitig ins Auge des Beobachters gelangen.

Am Beispiel eines relativistischen Fluges mit 10% und 99% der Lichtgeschwindigkeit durch das stilisierte und vergrößerte (Höhe 10 Lichtsekunden) Brandenburger Tor soll demonstriert werden, welchen starken Einfluß die Raum-Zeitstruktur der speziellen Relativitätstheorie auf das Erscheinungsbild von Objekten hat (Bild 4.4). Naiv würde man erwarten, daß das Tor durch die Lorentz-Kontraktion bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit in Bewegungsrichtung stark verkürzt ist. In Wirklichkeit wird diese Verkürzung durch die Auswirkung der endlichen Lichtlaufzeit nahezu kompensiert. Man sieht stattdessen eine dramatische Verzerrung des gesamten Objekts infolge der Aberration und der Bedingung, daß die das Bild er-

zeugenden Photonen gleichzeitig auf der Photoplatte ankommen müssen und daher – wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit – zu ganz unterschiedlichen Zeiten vom Objekt aus starten.

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!