

<b>Zeitschrift:</b>	Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Astronomische Gesellschaft
<b>Band:</b>	49 (1991)
<b>Heft:</b>	247
<b>Artikel:</b>	Einige neuere Ergebnisse zur Entstehung des Sonnensystems
<b>Autor:</b>	Bochsler, Peter
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-898963">https://doi.org/10.5169/seals-898963</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 29.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Einige neuere Ergebnisse zur Entstehung des Sonnensystems

PETER BOCHSLER

## Zusammenfassung

Der folgende Artikel ist aus Notizen zu einem Vortrag zusammengestellt worden, den der Autor kürzlich bei der Astronomischen Gesellschaft Bern gehalten hat. Ausgehend von Beobachtungen der Infrarotastronomie sind in der letzten Zeit wesentliche neue Erkenntnisse über die Geburt von Sternen in dichten, interstellaren Wolken gemacht worden. Durch Isotopenanalysen in kleinen Kornfraktionen gewisser Meteoritenklassen haben wir heute eine klarere Vorstellung über die ursprüngliche Beschaffenheit des Sonnennebels, aus dem das Sonnensystem entstanden ist. Durch umfangreiche Untersuchungen mit Grossrechnern gelingt es heute, die Bildung und das Wachstum von Planeten durch Kollision und Koagulation von Einzelstücken in vielen Einzelheiten mitzuverfolgen.

## Einleitung

Seit Jahrhunderten beschäftigen sich die Menschen mit der Frage der Entstehung des Sonnensystems. Die ersten 'physikalischen' Modelle zur Entstehung des Sonnensystems wurden im achtzehnten und zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts durch Immanuel Kant (1724 - 1804)<sup>1</sup> und durch Pierre Simon de Laplace (1749 - 1829)<sup>2</sup> entwickelt. Die beiden Theorien wurden offenbar unabhängig voneinander formuliert; sie sind sich in vielem ähnlich, und sie werden im Kern auch heute noch als richtig angesehen.

Die Modelle von Kant und Laplace gehen davon aus, dass das Sonnensystem im Urzustand aus einem linsenförmigen, rotierenden Nebel bestanden hat, aus dem durch Kontraktion nach und nach die Planeten und das Zentralgestirn, die Sonne, entstanden sind.

Obwohl wir heute die Bildung des Sonnensystems mit ganz anderen Konzepten, neuen physikalischen Theorien und wesentlich besseren Instrumenten untersuchen, ist die Situation in einer Beziehung immer noch dieselbe wie zu den Zeiten von Kant und von Laplace: Bis heute kennen wir nur ein Sonnensystem. Alle Modelle über dessen Entstehung können nur an einem beobachtbaren Objekt überprüft werden, und es ist daher nicht erstaunlich, dass verschiedene Aspekte weiterhin nicht oder nur unbefriedigend geklärt sind. Es ist auch klar, dass gewisse, sich gegenseitig widersprechende Theorien, aufgrund der vorhandenen Beobachtungen nicht eindeutig falsifiziert oder verifiziert werden können. Der vorliegende Artikel versucht, aus Bruchstücken der Information und ohne Anspruch auf Vollständigkeit ein einigermaßen abgerundetes Bild der heutigen Vorstellungen zu vermitteln.

## Entstehung der Sonne

Beobachtungen der Sternentstehung in dichten Dunkelwolken erlauben Rückschlüsse über die Entstehung der Sonne vor 4.6 Milliarden Jahren. Mindestens im Falle der massiven Sterne scheint die Bewegung von galaktischen Spiralarmen durch Dunkelwolken die Sternbildung auszulösen. Massive Sterne strahlen bläuliches Licht aus und haben mit ihrer grossen Leuchtkraft eine kurze Lebenserwartung, sie können sich deshalb zeit ihres kurzen Lebens nicht sehr weit vom Ort ihrer Entstehung, den Dunkelwolken in den Spiralarmen, weg bewegen. Dies hat zur Folge, dass die Spiralarme von Galaxien in Farbfotographien in einem bläulichen Licht erscheinen.

Ob auch die Geburt weniger massiver Sterne durch die Spiralarme einer Galaxie ausgelöst wird, ist nicht klar. Es gibt Anzeichen dafür, dass in verschiedenen Typen von interstellaren Wolken die Massenverteilung der neugeborenen Sterne verschieden ist. Fest steht, dass Sternbildung in Gruppen geschieht. Offenbar ist der Sternbildungsprozess in einer Dunkelwolke ansteckend. Am Beispiel des Orionnebels können wir mitverfolgen, wie junge, leuchtkräftige Sterne die 'Plazentawolke', aus welcher sie entstanden sind, zum Leuchten bringen. Beobachtungen im Infrarot zeigen, dass im Inneren der Dunkelwolke - im visuellen Wellenbereich noch unsichtbar - der Sternbildungsprozess ebenfalls eingesetzt hat; diese neugeborenen 'Protosterne' haben die umgebende Wolke noch nicht weggeblasen.

Ein möglicher Ansteckungsmechanismus ist von Elmegreen und Lada (1977)<sup>3</sup> eingehend untersucht und überzeugend dargestellt worden: Eine grobe, vereinfachende Skizze des Prozesses ist in Figur 3 dargestellt: Bereits entstandene Sterne schicken UV-Licht und Sternwinde in die benachbarte Wolke und führen dort zur Bildung von Ionisations- und Schockfronten. Staub und Gas wird mit diesen Fronten wie mit einem Schneepflug zusammengeschoben, und bei genügend grosser Dichte des Materials kann eine Gravitationsinstabilität den nachfolgenden Kollaps auslösen. In einem Abstand von ca. 10 Parsec von der ersten Generation von OB-Sternen wird eine zweite Generation von Sternen in der gleichen Dunkelwolke geboren, die nach einigen Millionen Jahren ihrerseits wieder Sternbildung auslösen kann.

Die Bedingungen für einen kugelsymmetrischen Gravitationskollaps sind relativ einfach herzuleiten. Bei einer Temperatur von 100 K ist eine Wolke von einer Sonnenmasse bei einer Dichte von ca.  $10^{-16}$  g/cm<sup>3</sup> gravitationell gebunden, und es kann ein Gravitationskollaps eintreten. Der Kollaps dauert etwa  $10^4$  Jahre. Es braucht anschliessend noch einige hunderttausend Jahre, bis im Kern der jungen Sonne die ersten Kernreaktionen einsetzen und aus der kollabierenden Wolke ein Protostern geworden ist.

<sup>1</sup> Immanuel Kant: *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonschen Grundsätzen abgehandelt*. Verlag Johann Friedrich Pedersen (1755)

<sup>2</sup> P.S. de Laplace: *Exposition du Système du Monde*. Courcier Paris (1796)

<sup>3</sup> B.G. Elmegreen, and C.J. Lada: *Sequential Formation of Subgroups in OB Associations*. *Astrophys. J.* 214, 725 - 741, 1977

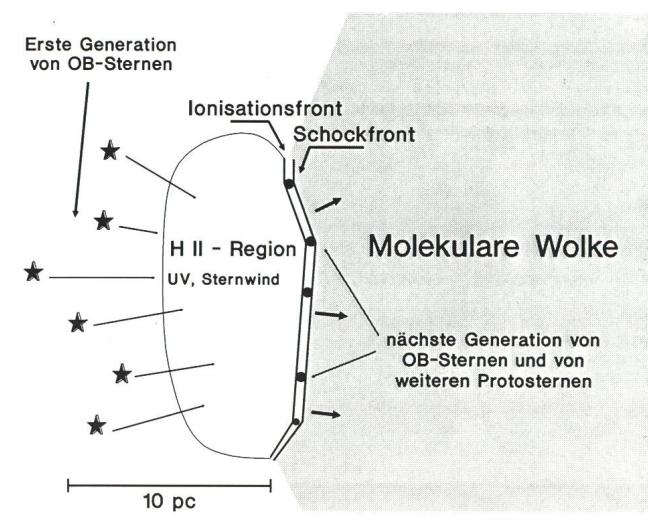


Figur 1: Orionnebel (Aufnahme von J. Alean)



Figur 2: Spiralarme der Galaxie NGC 6744 im bläulichen Licht

Figur 3: Bildung von OB-Assoziationen nach Elmegreen und Lada



### Umverteilung von Drehimpuls im Sonnennebel

Der Ablauf der Ereignisse dürfte in der Realität allerdings wesentlich komplizierter gewesen sein als oben dargestellt. Offensichtlich war im Sonnennebel Drehimpuls vorhanden, der verhindert hat, dass Staub- und Gasteilchen ohne weiteres in die Richtung der Rotationsachse abstürzen konnten. Das hat dazu geführt, dass zunächst nicht ein kugelsymmetrisches Objekt entstanden ist, sondern eine Akkretionsscheibe. Damit sich aus einer rotierenden Gaswolke ein Sonnensystem entwickelt, muss Drehimpuls aus dem rasch rotierenden Zentrum in die Scheibe abgeführt werden. Für diesen Prozess werden verschiedene Mechanismen diskutiert: Turbulenz im Nebel könnte im viskosen Gas-Staubgemisch den Drehimpuls in der Akkretionsscheibe von innen nach aussen umverteilen. Es ist aber auch vorstellbar, dass sich in der Akkretionsscheibe – ähnlich wie in einer Galaxie – Spiralarme bilden, die über die Gravitationswechselwirkung die äusseren Teile des Nebels beschleunigen, die inneren Teile abbremsen, und damit ebenfalls Drehimpuls aus dem Innern nach aussen transportieren. Detaillierte Computermodelle zeigen, dass das Zusammenspiel von Gravitation und Rotation im kontrahierenden Sonnennebel einen empfindlichen Einfluss auf die Entwicklung des Systems hat. In den meisten Fällen entsteht aus einem rotierenden Nebel ein Ring und nachher ein Doppel- oder Mehrfachsternsystem; nur aus einem langsam rotierenden Nebel kann ein Gebilde wie das Sonnensystem entstehen. Eine eingehendere, leicht verständliche Schilderung dieser Vorgänge findet sich in einem Artikel von A.P. Boss<sup>4</sup>.

Über die weitere Entwicklung der jungen Sonne kann man sich heute ein recht gutes Bild machen. Die Beobachtung von ähnlichen Objekten von vergleichbarer Grösse (T-Tauristerne) zeigt, dass die Bildung von Akkretionsscheiben aus Gas und Staub eine recht alltägliche Erscheinung ist. Junge T-Tauristerne rotieren rascher als erwachsene Sterne vergleichbarer Masse. Es ist anzunehmen, dass auch die junge Sonne wesentlich rascher rotiert hat, entsprechend stärker war die solare Aktivität und entsprechend intensiver war der frühe T-Tauri-Sonnenwind, der im Laufe der Bildung des Planetensystems schliesslich die letzten Überreste von Gas und Staub aus dem Sonnennebel weggeblasen hat.

### Interstellare Körner in Meteoriten - Zeugen der Geburt des Sonnensystems

Bis vor zwanzig Jahren gab es ein fast unbestrittenes Paradigma für die Entstehung des Sonnensystems: Aus der scheinbar einheitlichen Isotopenzusammensetzung der chemischen Elemente in Mond-, Meteoriten- und terrestrischen Proben und aus der Tatsache, dass bei all diesen Proben eine einheitliche obere Grenze der Entstehungszeit von 4.6 Milliarden Jahren abgeleitet werden konnte, war man der Meinung, der Sonnennebel müsse mindestens zu einem Zeitpunkt - eben vor 4.6 Milliarden Jahren - vollständig gasförmig und vollkommen durchmischt gewesen sein. Diese Vorstellung wurde anfangs der siebziger Jahre durch einige bahnbrechende Entdeckungen, an denen auch Mitglieder des Berner Physikalischen Institutes beteiligt waren, umgestossen. Aus der Isotopenanalyse von Neon in einigen ursprünglichen Meteoriten war geschlossen worden, dass es

im Sonnensystem zu einem frühen Zeitpunkt mehr als einen Typ Neon gegeben haben musste. Von den Apollo-Folienexperimenten des Berner Institutes war bereits damals die genaue Isotopenzusammensetzung von solarem Neon bekannt. Nun wurde festgestellt, dass es unmöglich war, die Isotopenzusammensetzung in gewissen ursprünglichen Meteoriten als Entwicklung aus solarem Neon zu interpretieren. Peter Eberhardt<sup>5</sup> und Mitarbeitern gelang es, aus diesen Meteoriten Körner herauszutrennen, die praktisch reines <sup>22</sup>Ne enthielten. Bis heute kennt man keinen physikalischen Prozess, der in der Lage wäre, in Mineralkörnern von Meteoriten reines <sup>22</sup>Ne herzustellen. Es gibt bis heute praktisch nur eine plausible Erklärung für diesen experimentellen Befund:

- 1) Die Körner sind in einer Sternatmosphäre bei einer Temperatur entstanden, bei der die Kondensation von Körnern möglich war, bei der aber noch kein Neon eingebaut werden konnte.
- 2) Die Sternatmosphäre muss mit frisch synthetisiertem, radioaktivem <sup>22</sup>Na dotiert gewesen sein, das in die Körner eingebaut worden ist. Zwischen Produktion und Einbau in die Körner können nur wenige Jahre verstrichen sein, sonst wäre das kurzlebige ( $T_{1/2} = 2.6$  Jahre) <sup>22</sup>Na bereits vor dem Einbau zerfallen.
- 3) In den verschiedenen Körnern ist das <sup>22</sup>Na in <sup>22</sup>Ne zerfallen.
- 4) Es ist nicht klar, wie lange nach ihrer Entstehung diese Körner in den Sonnennebel hineingetragen worden sind. Möglicherweise ist der in Figur 3 dargestellte Ansteckungsprozess beim Einbau beteiligt; dann wären zwischen Entstehung und Einbau 'nur' einige Millionen Jahre verstrichen. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Körner noch viel länger im interstellaren Medium aufgehalten haben, bis sie schliesslich im Sonnennebel eingefangen wurden. Interessant ist, dass sie alle denkbaren Schockfronten innerhalb und ausserhalb des Nebels überlebt haben und schliesslich auch den Einbau in einen Meteoriten ohne Verlust des sehr volatilen Edelgases Neon überstanden haben.
- 5) Die Existenz von praktisch reinem <sup>22</sup>Ne in Meteoritenkörnern beweist unumstösslich, dass der junge Sonnennebel nicht überall auf hohe Temperaturen erhitzt und nie vollständig durchmischt worden ist.
- 6) Für das Verständnis der Vorgänge im Sonnennebel ist der klare Beweis für das Vorhandensein von Körnern ausserordentlich wichtig: Körner können auch bei relativ tiefen Temperaturen Strahlung absorbieren und emittieren. Sie spielen eine wichtige Rolle für den Thermalhaushalt des Sonnennebels und den eventuellen Aufbau von Konvektionszellen. Gleichzeitig muss aber auch zur Kenntnis genommen werden, dass die Durchmischung nicht vollständig war, d.h. die Konvektion war, falls überhaupt vorhanden, räumlich begrenzt.

Es gibt noch viele weitere Hinweise dafür, dass der Sonnennebel nie vollständig gasförmig und gut durchmischt gewesen ist. Es ist aber im Rahmen dieses Artikels nicht möglich, auf weitere Einzelheiten einzugehen.

<sup>4</sup>Alan P. Boss; *Kollaps interstellarer Wolken und Sternentstehung*. Spektrum der Wissenschaft März 1985 (62-67)

<sup>5</sup>P. Eberhardt; *A neon-E rich phase in the Orgueil carbonaceous chondrite*. Earth Planet. Sci. Letters 24, 182-187, 1974.

### Entstehung der Planeten

Bei seiner Beschreibung der Ereignisse im frühen Sonnensystem ging Laplace von der Idee aus, die Planeten seien durch 'Subkondensationen' im Sonnennebel entstanden. Er stellte sich vor, der gleiche Prozess, der für die Bildung der Sonne verantwortlich ist, Auslösung eines Gravitationskollapses im dichten Gas, sei auch im kleinen Massstab die Ursache für die Bildung der Planeten. Heute ist man allgemein der Meinung, mindestens die kleineren Planeten seien durch einen anderen Vorgang gebildet worden. Dies folgt vor allem aus der Tatsache, dass die terrestrischen Planeten (Merkur, Venus, Erde und Mars) eine chemische Zusammensetzung aufweisen, die vom frühen Sonnennebel völlig verschieden ist. Es wird vermutet, dass diese Planeten sich allmählich durch binäre Akkretion, d.h. durch das Zusammenprallen und Zusammenkleben von einzelnen kleineren Stücken, gebildet haben. Man stellt sich vor, dass die Bildung der Planeten in zwei Stufen abgelaufen ist. Zunächst haben sich Staubkörner innerhalb von wenigen hundert Jahren unter der Einwirkung der Gravitation auf die Mittelebene der Akkretionsscheibe abgesetzt. Beim Fall auf die Akkretionsscheibe dürften die Teilchen auf eine Grösse von einige mm bis cm angewachsen sein. Auf der Mittelebene angelangt, bewegen sich diese Teilchen in der nächsten Phase auf Keplerellipsen mehr oder weniger in derselben Ebene um die in der Entstehung begriffene, junge Sonne. Das weitere Geschehen hängt offenbar entscheidend von der Art der Stöße ab, die die einzelnen Teilchen untereinander ausführen. Inelastische Stöße führen zur Koagulation von zwei Stücken zu einem Stück. Koagulation wird wahrscheinlicher, wenn die relativen Teilchengeschwindigkeiten vor dem Stoss klein sind. Nach einem inelastischen Stoss wird die Energie des koagulierten Stückes kleiner sein als die Energie des Stosspartner, d.h. die grossen Halbachsen der Teilchenbahnen nehmen im allgemeinen ab. Andererseits muss auch bei inelastischen Stössen der Drehimpuls erhalten bleiben; das führt dazu, dass im allgemeinen die Exzentrizitäten der Bahnen abnehmen. Teilchen auf kreisähnlichen Bahnen haben kleine Relativgeschwindigkeiten, damit wird im Fall einer Kollision die Wahrscheinlichkeit der Koagulation erhöht. Turbulenz im Gas-Teilchengemisch sorgt in dieser Phase dafür, dass überhaupt noch Kollisionen stattfinden. Nach einiger Zeit ( $10^4$  -  $10^5$  Jahre) sind die grössten Stücke zu Planetenembryos von einigen km angewachsen. Für Körper von dieser Grösse wird die Gravitation zwischen den Körpern wichtig, die Wechselwirkung mit allfällig noch vorhandenem Gas spielt praktisch keine Rolle mehr. Obwohl die Schwerkraft das Anwachsen der grössten Stücke beschleunigt, besteht nun die Gefahr, dass sich die verbleibenden Planetenkeimlinge wegen der vielen inelastischen Kollisionen nur noch auf Kreisbahnen bewegen, so dass nur noch ganz selten enge Begegnungen vorkommen. Damit wäre an Stelle eines Sonnensystems eine 'kosmogonische Geröllhalde' entstanden. Elastische Stöße ('flybys') zwischen grossen Stücken können nun aber die Bahnexzentrizitäten und Bahnneigungen zwischen den verschiedenen Objekten wieder erhöhen und damit die Wahrscheinlichkeit von weiteren Stössen vergrössern, bevor die Akkretion gänzlich zum Stillstand kommt.

Bei all diesen Prozessen scheint die Umlaufperiode um die Sonne den Takt zu bestimmen: Die Zeit für die Bildung der innersten Planeten (Merkur, Venus, Erde) wird auf ca.  $10^7$  Jahre geschätzt, Mars braucht nach diesem Modell gegen  $10^8$  Jahre, und für die äusseren Planeten kann binäre Akkretion

wohl nur im Anfangsstadium eine Rolle gespielt haben. Es wird vermutet, dass nach der Bildung eines festen Kernes aus Mg, O, Fe und Si im verbleibenden Gas-Staubgemisch an verschiedenen Stellen Instabilitäten ausgelöst wurden, die zu 'Subkondensationen' und zur Bildung der grossen, gasreichen Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun geführt haben. Die Entstehung von Jupiter hat möglicherweise die Fertigstellung eines Planeten im Asteroidengürtel verhindert. Eine plausible Erklärung für die Entstehung der Oortschen Kometenwolke wird ebenfalls mit der Bildung von Jupiter und Saturn verbunden: Objekte aus Eis und Staub von einigen km Grösse, die sich im Bereich von Jupiter und Saturn gebildet hatten, wurden bei engen Begegnungen ('elastischen Stößen') mit diesen Riesenplaneten auf stark exzentrische Bahnen aus dem inneren Sonnensystem herausgeschleudert. Störungen im Perihel dieser Objekte führen dazu, dass heute gelegentlich 'neue' Kometen wieder ins innere Sonnensystem zurückgeholt werden. Die nachfolgende Tabelle vermittelt eine grobe Übersicht der Zeitskalen für die verschiedenen, oben diskutierten Prozesse. Eine detailliertere Diskussion der Vorgänge in der solaren Akkretionsscheibe mit mehreren nützlichen Literaturangaben hat kürzlich Solange Cuénod im Orion publiziert<sup>6</sup>.

<sup>6</sup>S. Cuénod: *Rôle des conditions primitives d'accrétion dans le disque solaire*. Orion 242, 39-42, 1991.

Tabelle 1: Ablauf der Ereignisse bei der Bildung des Sonnensystems

Zeitskala [ Jahre ]	Prozess
$10^1$	Einbau von radioaktivem $^{22}\text{Na}$ in interstellare Körner
$< 10^8$	Aufenthalt von Staub im interstellaren Medium vor der Bildung des Sonnennebels
$10^4$	Gravitationskollaps Bildung einer Akkretionsscheibe
$10^3$	Absetzen von Staub auf Mittelebene der Akkretionsscheibe (bei 1 AE)
$10^7$	Binäre Akkretion, inelastische Stöße (bei 1 AE)
$10^6$	Binäre Akkretion, elastische Stöße (bei 1 AE)
$10^7$	Abschluss der Bildung von Merkur, Venus, Erde
$10^8$	Abschluss der Bildung von Mars

**Ausblick**

Die Geschichte der Erforschung des Sonnensystems liefert ein interessantes Beispiel für die Einbettung der Wissenschaft im momentanen Zeitgeist. Kant und Laplace interessierten sich vor allem für die mechanischen Aspekte der Bildung und Entwicklung des Sonnensystems. Sie lebten zur Zeit der hohen Uhrmacherkunst. Das 19. Jahrhundert war die Zeit der Dampfmaschine. Die Wissenschaft begann sich um die Frage der Energieumsetzung in der Sonne zu kümmern. Aufgrund der Annahme, dass Sonnenenergie letztlich aus der Umsetzung von Gravitationsenergie stammt, errechnete Lord Kelvin ein Sonnenalter von 30 Millionen Jahren. Zu Beginn dieses Jahrhunderts wurde das Phänomen der Radioaktivität erforscht und die moderne Kernphysik begründet. Beide Forschungszweige fanden eine fruchtbare Anwendung in der Erforschung der Geschichte des Sonnensystems. Das Alter des Sonnensystems konnte zuverlässig bestimmt werden, und der Prozess der Energieumsetzung in der Sonne durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium wurde richtig verstanden. Mit der Entwicklung von grossen Rechenanlagen wurde es möglich, die Akkretion von Planeten in vielen Einzelheiten zu untersuchen.

Seit kurzem liegt es im Zeitgeist, die 'Umwelt' und ihre Veränderungen zu untersuchen. In jeder Zeitung ist etwas zum Thema 'Treibhauseffekt' zu lesen. Entsprechend beschäftigen sich auch moderne Planetologen mit der Erforschung der Entwicklung von planetaren Atmosphären und den Zusammenhängen mit der Entstehung und der Erhaltung des Lebens.

Zu allen diesen Fragen gibt es eine reichhaltige Literatur. Wir verweisen nur auf den kürzlich erschienenen Band<sup>7</sup> aus einer ganzen Reihe von Büchern mit ähnlicher Thematik, in dem die Entwicklungsgeschichte der Meteoriten von ca. 70 kompetenten Autoren behandelt wird.

PETER BOCHSLER  
Physikalisches Institut  
der Universität Bern

<sup>7</sup>J.F. Kerridge and M. Shapley Matthews: *Meteorites and the Early Solar System*. The University of Arizona Press 1988.

## Eclaircissement d'un trou noir.

NOËL CRAMER

Un très curieux système stellaire avait été retenu en 1977 par les astronomes américains C.B. Stephenson et N. Sanduleak dans leur compilation d'étoiles présentant des raies d'émission dans leur spectre. L'objet portant le numéro 433 dans cette liste, SS433, une étoile de magnitude 14 dans la constellation de l'aigle, se situait à l'emplacement où les radioastronomes avaient détecté une source radio ponctuelle proche d'une source étendue nommée W50, et où le satellite UHURU avait également découvert une source de rayons X en 1976.

Des observations spectroscopiques faites il y a une dizaine d'années, dans le domaine optique, révélèrent d'intenses raies d'émission de l'hydrogène qui présentaient un effet Doppler variable avec une période de 163 jours, et correspondaient à des vitesses pouvant atteindre au moins

17% de celle de la lumière. Une étude photométrique montra la présence d'éclipses avec une période de 13 jours et la spectroscopie mit en évidence une variation de vitesse radiale de même période pour certaines raies plus faibles. Ces observations, rendues difficiles par l'absorption de plus de 99% de la lumière par des nuages interstellaires sur la ligne de visée, ont été interprétées comme suit (voir schéma):

Une étoile double, située à environ 18'000 années lumière de nous, comprend une composante principale massive accompagnée d'un compagnon compact entouré d'un disque d'accrétion. L'étoile principale remplit son «volume de Roche» et perd rapidement sa matière, à raison d'un millionième de masse solaire par année, en alimentant le disque d'accrétion du compagnon plus petit. Une partie de l'hydrogène qui chute sur l'étoile compacte est éjectée en deux jets étroits et opposés, proches de l'axe de rotation du disque d'accrétion, avec des vitesses d'au moins 80'000 km/s (un peu à la manière de ce qu'on observe dans le cas de certains noyaux de galaxies actives et quasars). La période de 163 jours correspond au mouvement de précession du disque d'accrétion; celle de 13 jours au mouvement orbital du système.

L'observation d'éclipses, et des vitesses radiales qui donnent les vitesses orbitales, permettent avec l'aide des lois de Newton et de Kepler de «peser» les deux membres du système. Les meilleures estimations de la vitesse orbitale du compagnon compact faites jusqu'à présent étaient de 195 km/s. Ceci donnait pour la composante principale une masse de 16 fois celle de notre Soleil et, pour son compagnon, 4 masses solaires. Dans ces conditions, il devait s'agir d'un trou noir, car une étoile à neutrons s'effondre en un tel objet lorsque sa masse dépasse 3 masses solaires. SS433 a donc longtemps été considéré comme un sérieux candidat de trou noir.

