

Diskussionsforum

Ursprung des Sonnensystems

H. J. VÖLK
(Herausgeber)

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

Vorwort

Im Rahmen der Internationalen Astronomischen Tagung in Innsbruck fand am 16. September 1981 ein Diskussionsforum über den Ursprung des Sonnensystems statt. Diese Veranstaltung war als Experiment innerhalb einer regulären Tagung betrachtet worden und die Tagungsleitung hatte mich gebeten, eine solche Sitzung zu organisieren.

Die Teilnehmer auf dem Podium waren F. **Begemann** (Mainz), H.J. **Fahr** (Bonn), G. **Morfill** (Heidelberg), T.V. **Ruzmaikina** (Moskau), V.S. **Safronov** (Moskau), H.J. **Schober** (Graz) und W.M. **Tscharnuter** (Wien). Nach einer kurzen Einleitung gaben die Teilnehmer je ein Statement ab, das mit Rücksicht auf die beiden Wissenschaftler aus Moskau nicht in Deutsch, sondern in Englisch gehalten war. Diese Beiträge wurden später schriftlich formuliert. Obgleich sie in ihrem Tenor und ihrer Länge sehr verschieden sind, sind sie in Abschnitt II als Originalbeiträge ungekürzt wiedergegeben. Auf diese Kurzreferate folgte eine Diskussion im Plenum. Insgesamt standen zwei Stunden für die Veranstaltung zur Verfügung.

Im Anschluß an diese Veranstaltung wurde der Wunsch an mich herangetragen, einen Bericht über den Ablauf zu schreiben. Da kein Tonbandprotokoll existierte, habe ich mich nach erheblichen Bedenken entschlossen, im Abschnitt III eine ungefähre Wiedergabe der Diskussion auf Grund Herrn Morfills' und meiner Notizen zu versuchen. Dabei sind sicher nicht nur einige Beiträge unvollständig sondern vielleicht auch in Nuancen anders geraten als sie der Disputant heute empfindet. Ich hoffe deshalb auf die Nachsicht aller Beteiligten. Abschnitt IV enthält eine kurze Zusammenfassung.

Zum Schluß möchte ich sagen, daß mir die Veranstaltung als ganz anregend in Erinnerung ist. Sicher wäre eine halbe Stunde mehr Zeit sehr gut gewesen und alle Teilnehmer hätten davon profitiert, wenn zumindest eine stichwortartige Zusammenfassung der einleitenden Podiumsbeiträge vorab verteilt worden wäre. Insgesamt aber wird die Summe der Mei-

nungen der Teilnehmer bestimmen, ob diese Diskussionsform ein erfolgreiches Experiment war oder nicht.

September 1982

Heinrich J. Völk
Herausgeber

I. Einleitung

Die Frage der Entstehung des Sonnensystems hat Philosophen und Naturforscher immer wieder beschäftigt. Gleichwohl ist sie stets erneut in den Hintergrund getreten zu Gunsten neuerer, aufregender astronomischer Fragen. Dies ist kein Wunder, wenn man bedenkt, daß die Beobachtung vieler wesentlich gleichartiger astronomischer Objekte zu einer gegebenen Zeit im allgemeinen verschiedene Entwicklungsstadien dieser Objekte erkennen läßt. Dadurch wird im groben die theoretische Untersuchung der zeitlichen Entwicklung eines Objekts möglich. Bei Planetensystemen ist dieses Programm bis jetzt nicht durchführbar, weil außer dem Sonnensystem kein weiteres Planetensystem beobachtet werden konnte. Darüberhinaus sind viele astrophysikalische Fragen, wie etwa die nach der Frühgeschichte des Universums, dem Vergehen und der Explosion von Sternen, der Herkunft der kosmischen Strahlung, der Entstehung der chemischen Elemente, oder der Rolle der allgemeinen Relativitätstheorie bei der Energieerzeugung in aktiven Galaxien von solch starker intellektueller Faszination, daß sie lokale Phänomene leicht überschatten. Und wohl jeder Astrophysiker erliegt diesem Zauber mehr oder weniger. Auf der anderen Seite ist die Erde unsere astronomische Heimat. Auf ihr ist aller Wahrscheinlichkeit nach alles bekannte Leben entstanden und deshalb ist ihre Herkunft, zusammen mit dem Planetensystem und der Sonne, Gegenstand elementaren menschlichen Wissensdurstes nach dem Woher und Wohin jedes Einzelnen.

Ich glaube, daß das Problem der Entstehung des Sonnensystems heute eine erhebliche **wissenschaftliche** Aktualität hat, die sie aus dem Bereich der Spekulation langsam heraushebt. Das hat mehrere Gründe:

1) Die Entwicklung vor allem der Radio- und Infrarotastronomie hat zu vielen wichtigen Beobachtungen von Sternentstehungsgebieten geführt, die wegen der starken Staubabsorption der optischen Beobachtung nicht zugänglich sind. Diese Arbeiten stehen zum Teil erst am Anfang, und es ist in den nächsten Jahren noch sehr viel mehr an Auflösung und Empfindlichkeit zu erwarten. Ich denke dabei zunächst an größere Teleskope im Millimeterbereich und an gekühlte Infrarot-Teleskope im Weltraum, zum anderen aber auch an Speckletechniken. Kalte Staubwolken und -verdichtungen werden vornehmlich mit Hilfe von Sub-Millimeter-Teleskopen beobachtbar sein. Selbst wenn dabei keine kühlen, kleinen Begleiter von Sternen direkt gesehen werden können, wird die Beobachtung von ausgedehnten rotierenden Protosternen auch kleiner Masse (wie der Sonne) Schlüsse auf den zu erwartenden Entwicklungsweg erlauben. Hier gibt es allerdings einen Auswahleffekt, den man vorab nennen kann: da anscheinend die überwiegende Mehrzahl

der Sterne in Doppel- oder Mehrfachsystemen existiert, oder zumindest entsteht, und da die Beobachtung sich anfänglich auf der Sonne nahegelegene Gebiete konzentrieren muß, mag der sonnenähnliche Typus des Einzelsterns zunächst selten sein.

2) Die Theorie der Sternentstehung auf Grund des Kollaps interstellarer Wolken, oder Teilen davon, hat erhebliche Fortschritte gemacht. Dies führt dazu, daß auch für rotierende Systeme langsam vernünftige Bilder entstehen. Dies ist einerseits durch drei-dimensionale Rechnungen gelungen, die unter bestimmten Bedingungen konkrete Formen der Fragmentierung in frühen, optisch dünnen Stadien des protostellaren Kollaps suggerieren. Andererseits ist die weitere Entwicklung von rotierenden Fragmenten nur unter genauerer Berücksichtigung der Thermodynamik und des Strahlungs- und mechanischem Wärmetransports möglich, der Temperaturunterschiede innerhalb des Protosterns zu beschreiben erlaubt. Die Bildung großer fester Körper, etwa in der Art von Asteroiden oder terrestrischen Planeten, hängt natürlich entscheidend von der Temperaturstruktur des Systems ab.

3) Die Kosmochemie hat durch Altersbestimmungen mit Hilfe von Radionukliden und durch die Untersuchung des petrologischen, chemischen und isotopischen Aufbaus vor allem der Meteorite in den letzten zwei Dekaden eine Reihe von Rahmenbedingungen für die Planetenentstehung zusammengetragen. Sie verlangen eine ungefähre Gleichzeitigkeit der Entstehung der Meteorite bei Temperaturen, die offenbar weit oberhalb denen von interstellaren Wolken liegen, aber ohne volle isotopische Homogenität, das heißt Durchmischung. Obwohl sich der Anspruch Harold Urey's, ihm genüge eine Handvoll Materie vom Mond, um dessen Entstehung zu erklären, nicht erfüllt hat, können umgekehrt astrophysikalische Modelle nicht an den kosmochemischen Ergebnissen vorbeigehen.

4) Schließlich hat die neuere Erforschung der Planetenoberflächen und deren absolute Datierung nachgewiesen, daß zur Zeit der Entstehung dieser Planeten (oder Monde) das Sonnensystem von einer ungeheuren Menge kleiner Körper von Kilometergröße erfüllt war und daß diese Zahl im Vergleich zum heutigen Alter des Systems rasch abnahm durch Einschlag und Kraterbildung. Das legt nahe, daß auch die großen Körper des Planetensystems zunächst überhaupt erst durch inelastische Zusammenstöße solcher kleiner Körper aufgebaut worden sind.

Diesen verschiedenen Quellen von Erkenntnissen, die ich hier nur unvollständig angedeutet habe, entspricht die Vielfalt der 5- bis 10-minütigen Beiträge vom Podium, die im nächsten Abschnitt wiedergegeben sind: Werner Tscharnuter und Tamara Ruzmaikina äußern sich zu Fragen des anfänglichen Gravitationskollaps und der frühen Entwicklung des so entstehenden rotierenden Protosterns; Friedrich Begemann präzisiert Aussagen über das Altern des Sonnensystems und über kosmochemische Befunde im Planetensystem; Gregor Morfill stellt seine Ideen über die kosmochemischen Konsequenzen einer turbulenten Entwicklung einer protosolaren Akkretionsscheibe dar; Hans-Jörg Fahr macht einige Vorschläge zum Fragmentationsprozeß als Lösung des Drehimpulsproblems beim Kollaps rotierender Protosterne; Hans Josef Schober konzentriert sich auf die Asteroiden als überlebende Zeugen der frühesten Epochen in der Geschichte des Sonnensystems; schließlich präsentiert Viktor Sergiewitsch Safronov in knapper Form ein vollständiges Modell der Entstehung des Sonnensystems, mit Betonung seiner Theorie der späten Phasen der Akkumulation „kleiner“ fester Körper („Planetesimale“) zu Planeten heutiger Größe.

Manche dieser Ideen haben eine sehr alte Geschichte. Zum Teil gehen sie zurück auf die ersten Anwendungen der Turbulenztheorie in der Astrophysik. Zum Abschluß meiner einleitenden Bemerkungen, die sehr viel knapper waren als dieser Einleitungsabschnitt,

habe ich dann gesagt: „Ich freue mich ganz besonders, daß Herr von Weizsäcker und Herr Lüst heute hier sind. Carl Friedrich von Weizsäcker hat in den vierziger Jahren als erster auf die Rolle aufmerksam gemacht, die Turbulenz im Gas in kosmischen Objekten und im besonderen bei der Planetenentstehung aus einem rotierenden Gasnebel spielen sollte. Er hat diese Vorstellungen dann mit seinen Schülern, insbesondere mit Reimar Lüst auf die Frage des Drehimpuls- und Massentransports in rotierenden Gasscheiben angewandt. Die K.-Schwarzschild-Vorlesung von Herrn Paczynsky hat die Aktualität dieser Ideen deutlich gemacht, und ich denke, daß dies auch bei der heutigen Diskussion des Planetensystems sehr sichtbar werden wird.“

II. Statements der Podiumsteilnehmer

W.M. TSCHARNUTER
Universitäts-Sternwarte, Universität Wien

One of the basic problems in modelling the formation of the (pre)solar nebula by gravitational collapse of a rotating interstellar cloud is the appropriate choice of the initial conditions. Particularly the initial amount of angular momentum is of crucial importance. Of course, there is a lower limit set by our present solar system. According to estimates given by Ruzmaikina (this conference) the total angular momentum is most likely to be in the range from 3×10^{51} to $2 \times 10^{52} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$ and according to the initial density and temperature of $10^{-19} \text{ g cm}^{-3}$ and 10K, respectively, as well as to an initial total mass slightly higher than $1 M_{\odot}$, the specific angular momentum would be in the range $10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. However, the giant planets exhibit specific angular momenta exceeding $10^{20} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, which indeed is an indication for a higher initial amount of angular momentum in the primitive solar nebula. Similarly the minimum initial mass of the nebula may be estimated to range in between $1.01 M_{\odot}$ and $1.1 M_{\odot}$, but taking into account that presumably not all matter initially available can be accreted, masses of the primordial fragment up to $2-3 M_{\odot}$ are not quite unrealistic.

Model calculations based on local conservation of angular momentum during the collapse of a rotating cloud show that there is always the danger of forming a multiple system instead of a single central condensation. If, however, the amount of angular momentum were chosen to be too low in order to avoid the occurrence of instabilities and fragmentation – in this case the ratio of rotational energy and gravitational energy β had to be as low as 10^{-5} –, it would not be quite obvious how to build up a protoplanetary disk whose size is comparable to the extension of the present solar system.

Thus, in order to end up with a configuration like our solar system some process which relaxes the condition of local angular momentum conservation must have been operating during the formation of the presolar nebula which was able to separate mass and angular momentum in an effective way. In principle, magnetic fields can support such a transport process, but it is doubtful whether they could play a really decisive role, since the degree

of ionization in collapsing clouds is expected to be extremely low leading to very short time scales of ambipolar diffusion of the magnetic field. More attractive seem to be frictional processes operating in a turbulent nebula, although the driving source and the specific features of such a turbulence are not known.

As a first step we may introduce a kinematic viscosity $\nu = \alpha \cdot c_s \cdot l$, where c_s is the sound velocity, l a characteristic length, e.g. the „half-thickness“ of the nebula and α a dimensionless number < 1 (1/10 say). Based on these simple assumptions we have calculated an evolutionary sequence from the early collapse phases up to the formation of an accreting disk with Keplerian rotation containing an central stellar object accumulating at a rate that is controlled by the frictional process. Unfortunately, the accuracy of the calculation is only moderate or even poor due to the very limited spatial resolution of the numerical (axially symmetric) 2-dimensional models. Only qualitative conclusions may be drawn, but there is good hope to expect that the numerical accuracy can be drastically increased in the near future.

To summarize we may state that, depending on the initial conditions, we are offered two different ways in which the solar system could have formed:

- i) A cloud fragment of very low initial angular momentum ($\beta \lesssim 10^{-5}$) would collapse to a rapidly rotating „hot“ ($T \gtrsim 2000$ K) proto-„sun“; a preplanetary disk forms afterward, consisting of matter that has gained the excess angular momentum, by some transport process (magnetic fields, turbulence, . . .),
- ii) the collapse of a turbulent cloud containing already enough angular momentum ($\beta \cong 10^{-4} - 10^{-3}$ initially) leads to an extended cool nebula with just a tiny hot core in its center. The accumulation of the central object is entirely governed by frictional processes and is not a direct result of the overall collapse. Contrary to case i), at any stage of the evolution, there is a sufficient amount of matter available bearing such a high angular momentum that a preplanetary disk can form.

Case i) implies the fact that the primordial dust particles will melt, before a recondensation takes place – it favors a „hot“ solar nebula; case ii) allows the formation of larger solids in a „cold“ gaseous environment. Which case actually applies to the origin of our own solar system is not so much an astrophysical problem but rather a challenge for cosmochemistry.

T.V. RUZMAIKINA

O. Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth,
Academy of Sciences, USSR, Moscow

It is generally accepted now that the origin of preplanetary disk was a result of the formation of the Sun. The most attractive mechanism for the disk formation is a redistribution of angular momentum inside a collapsing protostar (presolar nebula). In fact, a fragment of a rotating interstellar molecular cloud can not contract into a star without loss of its angular momentum. A fragment of solar mass corotating with the Galaxy at onset of collapse ($n = 10^5 \text{ cm}^{-3}$ for $T = 10$ K) has a mean angular momentum per unit mass $j \cong 10^{19} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, which is 30 to 50 times the maximum specific angular momentum acceptable for a uniformly rotating Sun.

The reconstruction of the solar nebula by augmenting the planets with H and He to restore a solar composition results in a mass of the nebula of 0,01 to 0,1 M_{\odot} and a total angular momentum of $3 \cdot 10^{51}$ to $2 \cdot 10^{52}$ $\text{g cm}^2 \text{s}^{-1}$ (Hoyle, 1960; Weidenschilling, 1977). Dividing this angular momentum by the presolar nebula mass $M_{\text{PN}} \cong 1 M_{\odot}$ yields the value of its specific angular momentum

$$10^{18} \lesssim j_{\text{PN}} \lesssim 10^{19} \text{ cm}^2 \text{s}^{-1}. \quad (1)$$

This value is comparable with that for the molecular cloud fragment considered above. Hence the disk (solar nebula) is able to take an excess of angular momentum out of a forming solar embryo.

A problem is to reconstruct this process. To start with it is desirable to know something about the initial parameters of the presolar nebula, in particular its initial angular momentum. It seems natural to choose a specific angular momentum of the presolar nebula in the range determined by eq. (1) (Hoyle, 1960). Such an approach is advocated by a theory of planetary formation (Safronov, 1972), and a structure theory of a hydrostatic solar nebula (Vitjazev, Pechernikova, 1981).

In recent attempts to calculate the evolution of a presolar nebula, a larger initial specific angular momentum of about 10^{20} $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ and corresponding masses 2 to 3 M_{\odot} were used in order to avoid the necessity to concentrate the angular momentum in a small fraction of a solar mass and to explain the formation of an extended disk with a radius of about 10^{15} cm. It is worth mentioning in this connection that the orbital angular momentum per unit mass of the giant planets is also about 10^{20} $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. The problems arise, however, to avoid a fragmentation of the disk into a binary star, as pointed out by Norman, Wilson (1978), or a multiple system of huge planets, and to collect one solar mass in the center and to expel about a half of the total mass from the system. It must be emphasized that a specific angular momentum of 10^{20} $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ exceeds greatly ($\sim 10^2$ times) that of a typical close binary starsystem. Perhaps these problems can be solved by taking into consideration an angular momentum redistribution with nearly sonic turbulence (Tscharnuter, 1981).

The aim of this communication is to show that the character of the evolution of a presolar nebula with $j_{\text{PN}} \cong (1 \text{ to } 5) \cdot 10^{18}$ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ is favourable to the formation of the Sun with an extended solar nebula. For the specific angular momentum considered, a ratio of rotational to gravitational energy is $\beta \cong 10^{-5}$ at the presolar nebula collapse onset. It remains smaller than $\beta \cong 0,14$ up to the end of the dissociation of molecular hydrogen when a starlike core is formed in the center of the presolar nebula (Ruzmaikina, 1981a). The initial mass M and central density ρ_c of the core are likely to be close to the ones for nonrotating stars: $M \cong 10^{-2} M_{\odot}$, $\rho_c \sim 10^{-2}$ g cm^{-3} . The initial equatorial radius is about 10^{12} cm. The angular momentum can be effectively redistributed in the core over a core evolution time scale τ_{ev} either by turbulent friction (Wiita et al., 1979) or by a magnetic field (Ruzmaikina, 1981 b).

Consider what will happen to the core when the time scale of angular momentum redistribution is less than τ_{ev} . It follows from the theorem by Lynden-Bell and Pringle (1974) that an uniformly rotating state of minimum energy will be established in the pressure dominated part of the core. However in a subsurface equatorial part of the core the pressure dominance breaks down and the centrifugal forces become greater than the pressure gradient. In the equilibrium condition a differential rotation will be maintained here. This stage is associated with the onset of a rotationally driven outflow of matter from the equator.

It is a remarkable fact that in the uniformly rotating centrally condensed core (at least more centrally condensed than a polytrope of index $n \geq 1,5$) the outflow begins for a ratio of centrifugal to gravitational energy β that is less than that for bifurcation: $\beta_{\text{cr}} \cong 0,14$ (Ostriker, Bodenheimer, 1973) to an ellipsoidal deformation resulting in the fragmentation of the core. Let us mention that in an uniformly rotating star of polytropic index $n = 3$ the centrifugal forces begin to lead to matter outflow from the equator for $\beta = 0,007$, 20 times less than β_{cr} (Zeldovich, Novikov, 1969). The calculations of a viscous evolution of rotating white dwarfs reveal a similar phenomenon for $\beta \cong 0,09$ (Durisen, 1979). One can estimate that a forming core of a protostar of solar mass begins to outflow and form a disk at the accretional stage when its mean specific angular momentum $j \geq 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Ruzmaikina, 1981a).

Let us consider how the forming disk will evolve. The equations for the evolution of a Keplerian disk under the action of viscosity were derived by von Weizsäcker (1948). The viscous disk evolution in the absence of accretion was examined in detail by Lynden-Bell and Pringle (1974). It follows from their results that the disk rotating in a centrifugal force versus gravity balance will keep the differential rotation when the time scale of processes redistributing its angular momentum is longer compared to the orbital time scales. The basic form of the disk evolution is an expansion of its outmost parts. Radial scales increase in time τ as

$$R \sim 3 (\nu\tau)^{1/2} \quad (2)$$

where ν is the kinematic viscosity.

One can see from eq. (2) that the disk radius can grow up to a radius of the present solar system $\cong 10^{15} \text{ cm}$ over a time $\tau \cong 10^6 \text{ yr}$ (a time scale of accretion of the envelope onto the forming solar mass star (Larson, 1969)) when the viscosity ν is of the order of $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. If the turbulent viscosity characterizes the dominant dissipation process and if the scale of the largest eddie is of the order of the disk thickness, the turbulent velocities needed are

$$v_T \cong 10^{-2} v_s, \quad (3)$$

where v_s is the sound speed.

We consider the case, when the forming core (an embryo of the Sun) and the disk are surrounded with an accreting envelope. The specific angular momentum j_{en} of matter inflowing onto the disk edge is less than the intrinsic specific angular momentum because of a previous concentration of the angular momentum in the disk. As a result of the discontinuity (and inversion) of the angular momentum and the angular velocity at the disk edge, an intense turbulent friction arises here. The angular momentum of matter inflowing onto the disk edge increases in a time scale shorter than a dynamical time scale of the sliding of matter to the center. So the matter will join the disk edge preventing its expansion.

One can show that the radial velocity in the disk U_R is

$$U_r = -\frac{3}{R^{1/2} \sigma} \frac{\partial}{\partial R} (\nu \sigma R^{1/2}) - \left[1 - \frac{j_{\text{en}}}{(GMR)^{1/2}} \right] \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} R - \frac{3}{2} \frac{R}{\tau_{\text{ev}}} \quad (4)$$

where G is the constant of gravity, M is the core mass, $\tau_{\text{ev}} = \frac{M}{\dot{M}}$ is the time scale of its increase, σ is a surface density in the disk, $\dot{\sigma}$ is the mass inflowing per unit time onto unit area of the disk, ν is the kinematic viscosity, and j_{en} is the specific angular momentum of

inflowing matter. (In the case of spherically symmetric accretion j_{en} depends on the core mass as $M^{1/3}$.)

Let us now estimate from eq. (4) a radius of the disk R_D at the end of the accretion stage, assuming that the velocity of the disc expansion is limited by the infall of matter (the second term in eq. (4)). The disk expansion is described by the first term on the right side of eq. (4). It equals in the order of magnitude:

$$U_{R1} = \frac{3\nu}{\delta R_D}$$

where $\delta \cdot R_D$ is a radial scale over which the surface density changes at the disk edge. The main hindering term is

$$U_{R2} = -\frac{\dot{\sigma}}{\sigma} R_D$$

Assume now that the matter infalling onto the disk edge mixes with the one in the disk at $\delta \cdot R_D \cong (H_D R_D)^{1/2}$, where H_D is the disk thickness. Then $\dot{\sigma}$ may be approximated by

$$\bar{\sigma} \cong \frac{M}{\tau_{\text{ev}} R_D^2} \exp\left[-\left(\frac{R_D^2 - R^2}{H_D R_D}\right)^2\right] \quad (5)$$

Assume further that the surface density increases to the average value:

$$\bar{\sigma} = \frac{M_D}{\pi R_D^2} \quad (6)$$

when $R_D^2 - R^2 \cong H_D R_D$.

Now we may use the equality $\sigma = \bar{\sigma}$ in eq. (4) and obtain $\delta \cong (H_D/R_D)^{1/2}$. Taking into account that the total angular momentum of the disk, which is formed at the end of accretion stage, is much larger than the one for the Sun and comparable with $I_{\text{PN}} = j_{\text{PN}} \cdot M_{\text{PN}}$, we obtain an useful relation:

$$\bar{\sigma} R_D^{5/2} \cong \frac{j_{\text{PN}} M^{7/6}}{G^{1/2} M_{\text{PN}}^{2/3}} \quad (7)$$

We may obtain a limitation on the disk radius R_D from the condition $U_{R1} = |U_{R2}|$ by using relations (5 - 7):

$$R_D \cong \left(\frac{\nu}{\delta}\right)^{2/5} \frac{j_{\text{PN}} M^{1/15} \tau_{\text{ev}}^{2/5}}{G^{1/5} M_{\text{PN}}^{4/5}} \quad (8)$$

Then

$$\bar{\sigma} \cong \frac{M}{\nu \tau_{\text{ev}}} \quad (9)$$

(10)

Consider a disk like that introduced by Shakura and Sunyaev (1973) in which the turbulent viscosity in the disk is written as

$$\nu = 0,2 \alpha (G M R_D)^{1/2} \left(\frac{H_D}{R_D}\right)^2 \quad (11)$$

where α is a dimensionless factor $\lesssim 1$. In the outer parts of the disk the turbulence could likely be supported by infall of matter onto the disk. Assume that a part q of the kinetic energy of accretion onto the disk edge feeds the turbulence in the region of accretion

$\delta \cdot R_D$, i.e., the turbulent velocity v_T is

$$v_T \cong \left(q \frac{\delta}{\sigma} GM \frac{H_D}{R_D} \right)^{1/3} .$$

Then one may obtain

$$\alpha \sim q^{1/2} \frac{H_D}{R_D} . \quad (12)$$

Let us now estimate R_D , $\bar{\sigma}$ and M_D for the following numerical values

$$M \cong M_{PN} \cong 1 M_{\odot}, j_{PN} = (1 \text{ to } 5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}, \tau_{ev} = 3 \cdot 10^{13} \text{ s}, \frac{H_D}{R_D} \cong 0,2, q \cong 0,1. \quad (13)$$

We have from eqs. (8-12):

$$\nu \cong 0,1 \cdot q^{5/8} (GM)^{1/2} \cdot (\tau_{ev} j_{PN})^{1/4} \left(\frac{H_D}{R_D} \right)^{29/8} \cdot \left(\frac{M}{M_{PN}} \right)^{1/3} \cong (1 \text{ to } 2) \cdot 10^{17} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}, \quad (14)$$

$$R_D \cong 0,5 q^{1/4} (\tau_{ev} j_{PN})^{1/2} \left(\frac{H_D}{R_D} \right)^{5/4} \cdot \left(\frac{M}{M_{PN}} \right)^{1/3} \cong (2 \text{ to } 5) \cdot 10^{14} \text{ cm}, \quad (15)$$

and correspondingly:

$$\bar{\sigma} \cong (1 \text{ to } 0,3) \cdot 10^3 \text{ g cm}^{-2}, M_D/M_{\odot} \cong (0,5 \text{ to } 1) \cdot 10^{-1}. \quad (16)$$

The most critical parameter is H_D/R_D because in our approximation $\nu \cong (H_D/R_D)^{3,6}$. Safronov (1972), and Vitjazev and Pechernikova (1981) estimate $H_D/R_D \cong 0,05$ to $0,1$ for a hydrostatic solar nebula. In the stage of accretion H_D/R_D must be greater than this value due to both the input of energy with the infalling matter, and the higher luminosity of the Sun (Larson, 1969; Winkler, 1978).

One can see from estimates (14-16) that the preplanetary solar nebula may in principle be formed during the stage of accretion. The expansion of the disk accompanied by decrease of its mass would continue after the end of the accretion if some turbulence or other viscosity were present in the disk. Zel'dovich (1981) gives arguments that turbulence in a Keplerian disk could be supported by differential rotation.

The estimates given are, of course, very preliminary. To test the picture proposed it would be important to undertake a numerical simulation of the collapse of a presolar nebula with a total angular momentum $\cong 10^{51}$ to $10^{52} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$ and with a mass slightly greater than $1 M_{\odot}$, taking into account angular momentum transfer.

It is a pleasure to thank M.L. Norman, V.S. Safronov, K.-H. Winkler and, especially, W.M. Tscharnuter for useful discussions.

References

- CAMERON, A.G.W., in: *Protostars and Planets*, ed.T. Gehrels, Tucson, Un. Arizona Press, p. 453
 CAMERON, A.G.W., PINE, M.R.: 1973, *Icarus* **18**, 377
 DURISEN, R.H.: 1975, *Astrophys. J.* **195**, 483
 HOYLE, F.: 1960, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* **1**, 28
 LARSON, R.B.: 1969, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **145**, 297
 LYNDEN-BELL, D., PRINGLE, J.E.: 1974, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **168**, 603

- NORMAN, M.L., WILSON, J.R.: 1978, *Astrophys. J.* **224**, 497
 RUZMAIKINA, T.V.: 1981a, *Adv. Space Res.*, Vol. 1, COSPAR, p. 49
 RUZMAIKINA, T.V.: 1981b, *Pizma Astron. Zh.* **7**, 188
 SAFRONOV, V.S.: 1972, in: *On the Origin of the Solar System*, ed. H. Reeves, C.N.R.S., Paris, p. 89
 SHAKURA, N.K., SUNYAEV, R.A.: 1973, *Astron. Astrophys.* **24**, 337
 TSCHARNUTER, W.M.: 1978, *Moon and Planets* **19**, 229
 TSCHARNUTER, W.M.: 1981, in: *IAU Symposium 93, Fundamental problems in the theory of stellar evolution*, ed. D. Sugimoto, D.Q. Lamb, D.M. Schramm, Dodrecht, Reidel, p. 105
 VITJASEV, A.V., PECHERNIKOVA, G.V.: 1981, *Pizma Astron. Zh.*, in press
 von WEIZSÄCKER, C.F.: 1948, *Z. Naturforsch.* **3a**, 524
 WEIDENSCHILLING, C.J.: 1977, *Icarus* **35**, 99
 WIITA, P.J., SCHRAMM, D.N., SYMBALISTY, E.M.D.: 1979, in: *Proc. X Lunar. Plan. Sci. Conf.*, Oxford, Pergamon Press
 WINKLER, K.-H.A.: 1978, *Moon and Planets* **19**, 237
 ZEL'DOVICH, Ya.B.: 1981, *Proc. Roy. Soc. London* **A374**, 299
 ZEL'DOVICH, Ya.B., NOVIKOV, I.D.: 1967, *Relyativistic Astrophysics*, Moscow, Nauka

F. BEGEMANN

Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

Ich bin in einer etwas anderen Lage als meine beiden Vor-Redner. Sie mußten sich aus einsichtigen Gründen in ihren Aussagen darauf beschränken, wie die Bedingungen bei der Entstehung des Sonnensystems gewesen sein könnten – ich kann Ihnen mit einigen Tatsachen dienen. Das sollte Sie nicht verführen, zu glauben, in der Kosmochemie könne und würde man nicht auch spekulieren – ganz im Gegenteil!

Das Sonnensystem ist etwa 4,6 Milliarden Jahre alt. Um Mißverständnisse zu vermeiden, möchte ich diese Aussage spezifizieren, und ich möchte sie einschränken. Die Spezifizierung ist eine Definition dessen, was wir in diesem Fall unter „Alter“ verstehen: Es meint diejenige Zeit, vor der ein Sub-System vom prae-solaren Nebel abgetrennt wurde und während der es stets ein **abgeschlossenes** System war. Die Definition beinhaltet **nicht**, daß das System seit seiner Abtrennung stets kalt geblieben wäre. Steine von der Erde oder vom Mond können natürlich noch vor sehr kurzer Zeit erwärmt und isotopisch equilibriert worden sein, so daß ihre sekundären Alter sehr kurz sind. Diese sekundären Alter sind aber **nicht**, was gemeint ist mit der Aussage, das Sonnensystem sei 4,6 Milliarden Jahre alt.

Die **Einschränkung** ist, daß die Aussage beruht auf der Analyse der wenigen festen Materie des Sonnensystems, die wir bisher zur Untersuchung im Labor zur Verfügung haben. Sie beruht auf der Analyse von irdischer, lunarer und meteoritischer Materie, und für diese können wir sagen, daß ihr Alter etwa 4,6 Milliarden Jahre ist und daß die Alter dieser verschiedenen planetaren Körper innerhalb von ~40 Millionen Jahren übereinstimmen. Wir kennen jedoch nicht das Alter der Sonne, noch wissen wir, ob die Sonne etwa älter oder jünger ist als die Erde.

Bei der Deutung dieses Alters ist zu fragen, ob es sich um ein echtes, einheitliches, oder ein scheinbares, mittleres, Alter handelt. Bei einer vorgegebenen Population von Körnern

läßt sich stets eine Verteilung von Altern um einen Mittelwert konstruieren, so daß der Meßwert diesen Mittelwert ergibt. Die genaue Form der Altersverteilung hängt jedoch ab von der Halbwertszeit des für die Altersbestimmung verwendeten Radionuklids. Da das Alter des Sonnensystems unter Verwendung von Radioisotopen verschiedener Halbwertszeit bestimmt wurde, und da die so bestimmten Alter miteinander übereinstimmen, ist zu schließen, daß eine evtl. Altersverteilung entweder sehr schmal sein muß oder aber, daß nur ein geringer Anteil der gesamten Materie eine solche Verteilung um einen Mittelwert zeigen kann.

Das hat Folgerungen für die Temperatur vor, während oder nach dem Kollaps des prae-solaren Nebels: Entweder war die Temperatur hoch genug, so daß alle radiometrischen Uhren auf „Null“ gesetzt werden konnten, oder aber es gab nur wenig alten Staub im prae-solaren Nebel.

Die Vorstellung, alter prae-solarer Staub könne den Kollaps des Sonnensystems in unverfälschter Form überlebt haben, hätte noch vor wenigen Jahren als ketzerisch gegolten. Es war ein Dogma der Kosmochemie, das Sonnensystem sei durch die Kondensation eines isotopisch ideal homogenisierten prae-solaren Nebels entstanden – und wenn in diese Aussage die durch radioaktiven Zerfall entstandenen radiogenen Kerne miteinbezogen werden, bleibt nur wenig Raum für „alten“ Staub. Heute glauben wir aber, es besser zu wissen: Bei etwa einem Dutzend Elemente sind Variationen der isotopischen Zusammensetzung gefunden worden, die nicht durch Vorgänge erklärt werden können, die unseres Wissens noch heute im Sonnensystem ablaufen. Die Variationen scheinen vielmehr primordiale Heterogenitäten widerzuspiegeln, und einige davon lassen sich zwanglos durch die Annahme erklären, daß prae-solarer Staub Träger dieser Anomalien ist. Für die thermische Geschichte bedeutet das, daß die Temperatur einiger meteoritischer Minerale nicht wesentlich höher als $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ gewesen sein darf. Andererseits aber gibt es eindeutige Evidenz, daß manche Komponenten in Meteoriten durch direkte Kondensation aus einem heißen Gas entstanden sind – und dabei bedeutet „heiß“ Temperaturen von etwa 2000°C . Und es ist für Modelle der Frühgeschichte des Sonnensystems vielleicht wichtig zu wissen, daß die Evidenz für „tiefe“ Temperaturen und für „hohe“ Temperaturen heute in denselben Meteoriten in Abständen von nur wenigen Millimetern gefunden wird.

G. E. MORFILL

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

First of all, I should like to state that I believe that the protoplanetary cloud was turbulent during the early phases of its evolution, and that evidence of this turbulence still exists even now. I have come to this conviction through the work that my colleagues and I have done in Heidelberg during the last few years – in close cooperation with W. Tscharnuter.

Originally, turbulent viscosity was introduced into the hydrodynamical collapse calculations in order to overcome the angular momentum problem and to allow the formation of a single star out of a rotating and collapsing cloud, exactly in the sense how it was originally envisaged by C.F. v. Weizsäcker and later by R. Lüst. The result of the hydrodynamical calculations was that a relatively modest turbulent disk was formed in the

centre of the large collapsing cloud. This disk is hot at the centre (> 2000 K) but mostly cold ($\cong 10$ K at the outer rim). This disk is the site of planet formation.

Having introduced turbulence in this arbitrary fashion (to overcome a serious dynamical problem) it became important, of course, to investigate other „side effects“. There are turbulent pressure, dissipation and heat transport, of course, but potentially far more interesting are the effects of turbulent transport on the dust, since some information may become „stored“ in solid bodies.

I should like to focus on two problems:

1) According to the collapse calculations, the disk is cold in the planetary region, (on average $\cong 300$ K, except for a very small region in the centre) and apparently this is not very dependent on initial conditions. This is at variance with cosmochemical evidence from meteorites, which demands temperatures in excess of 1000 K or more, as Professor Begemann just mentioned. So we have a „thermal“ problem. I will come back to that later.

2) There is more fundamental problem with dust particles in a rotating gas disk, a „dynamical problem“. Both gas and dust „see“ the same gravitational field at the same location. The gas motion, however, is also influenced by the radial pressure gradient, and therefore the gas has a slower rotation than the dust. As a result, the dust particles lose angular momentum by friction with the gas and spiral in towards the centre. For cm-size particles this process is rapid so that, for the disk sizes calculated, the particle lifetime in the disk is only about 1000 years and the total mass of dust is a few M_E (earth masses). This is uncomfortably low, in particular the lifetime of $\cong 1000$ years would require very rapid and efficient planet formation.

Turbulence is very helpful here. When the dust gets into the inner hot regions it evaporates. The vapour diffuses (eddy diffusion), the process tries to even out the concentration gradients from the source, and some of the vapour thus diffuses back into cooler regions of the nebula. Here it condenses onto the dust particles and thus matter is recycled. This incidentally, enhances particle growth. That is not all, however. The information that the material has evaporated is also transported into the cooler regions and can be stored (on dust grains and later in planetesimals). This appears to provide an elegant solution to the discrepancy between meteoritical evidence and hydrodynamical calculations, our „thermal“ problem.

The turbulent transport in a disk which has a temperature gradient leads to a large scale fractionation according to volatility. Evidence for this exists (e.g. iron silicate fractionation of terrestrial planets, the higher volatile „ice“ content of the Jovian moons compared with the Earth's moon, as well as the meteorite classification).

Thus turbulence, introduced for dynamical reasons, seems to give an explanation (at least qualitatively) for many other phenomena. Nevertheless, I feel that it would be unwise at the present stage, where the calculations are still crude and barely quantitative, to overestimate the model. Most of the observations can be understood in terms of other processes also (albeit a whole zoo of them), and some of these processes may be important. In other words, the model is intellectually satisfying. That does not necessarily make it right, only very convincing.

H. J. FAHR

Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung, Universität Bonn

In nearly all of its aspects the cosmogony of the solar system is closely connected with the problem of angular momentum transport from the inner to the outer regions of the collapsing presolar nebula. Therefore this problem should be subject to an as intense as possible investigation prior to pushing forward any conclusions which are derived under the assumption that the angular momentum problem is already solved. The theoretical descriptions of mechanisms relevant for angular momentum transport are not unique and unequivocal. They depend very much on the actual angular momentum transport effectiveness of turbulent viscosity or magnetic stresses of fields that might be kept frozen into the collapsing gas.

Introducing a phenomenologically modelled form of turbulent viscosity in a suitable parameterization, Tscharnuter, in his most recent theoretical calculations, can pursue the temporal development of the collapse of a rotating cloud until a hot and dense central collapse region with temperatures above 2000 K is generated. In earlier work, not taking into account turbulent forms of angular momentum transport, he and others found that the collapse moved towards the formation of a toroidal condensation with cool and relatively dilute gas in central regions, indicating no chance for the production of something like a protosolar core. This points out the drastically different results one obtains if using different forms of angular momentum transport. I therefore recommend some reservation in taking the results of current collapse calculations as the completely accurate representation of the physical truth. They depend too sensitively on what type of computer code is used.

In contrast to the most modern views, I personally hesitate to believe in a homogeneous cosmogony of all solar planets since in my opinion severely constraining facts seem to imply a vote against it. Besides the Sun, only the giant planets Jupiter and Saturn can be understood as objects of a primordial elemental composition according to cosmic abundances in view of their masses, surface temperatures and average densities. Only in these cases do the He/H-ratio, the D/H-ratio, and the [C,N,O]/H-ratio seem to be in accordance with their cosmic values. All the other objects are markedly different in that they show drastic overabundances of D and [C,N,O].

If both turbulent and magnetic effects fail to provide the necessary transport of angular momentum, one could, as an alternative view, consider the Sun, Jupiter, and Saturn as subfragmentations of a primary gas torus at about 5 AU distance from the primary collapse center. What do we really know about the initial turbulence spectrum in the primary collapsing cloud? How does it develop in time and what are the decay periods of the turbulent elements? Does turbulence, if it exists at all in the primary collapse, survive?

Of course it is hard to explain why these subfragments of a primary torus are so disparate in their masses. But it could be even harder to show in any competing theoretical model why there is such a surprising homogeneity in the planetary systems of the Sun, Jupiter, and Saturn, with the observed astonishing sequences from the more iron-rich, mineral objects to the more icy objects. Maybe it would be easier to explain the disparate masses as a phenomenon of secondary mass exchanges between the primary fragment masses within the torus, like mass exchanges in double star systems which are known to have largely disparate masses.

H. J. SCHOBER
Institut für Astronomie, Universität Graz

Until only a decade ago our knowledge about asteroids was more or less restricted to a single aspect: orbits. The study of dynamic properties of asteroids is still worthwhile to do, with respect to secular resonances, family production and collisions in the asteroid belt. But our major knowledge as related to the origin of the solar system should come out from our knowledge about physical properties of asteroids, as did show the evolution of research starting in 1971 only.

Asteroids are considered to be rocky and small bodies with modestly eccentric and inclined orbits, mainly between Mars and Jupiter; but objects do also exist outside of this belt, as discoverage of Chiron at $a=13.7$ AU or four Atens with $a < 1$ AU, and earth-crossing asteroids as Apollos and Amors do prove. The population of asteroids must be much larger than known only from observations. Together with the comets asteroids are known as the only residual planetesimals from the earliest epoch of the solar system history. Compared with the major planets their chemical, thermal and geological evolution should have been moderate, and compared with comets on the other hand, their orbital evolution generally can be considered as modest, too. So, together with the meteorites they should be one of the best clues for us to the early development and evolution of the solar system, as they remained roughly unchanged. Contrary to the meteorites they are large, ranging from 1000 km diameter down to kilometer-sized objects, or smaller.

During the evolution also cratering and collisions have occurred; we do know that several types of asteroids exist, at least as classified from surface composition; the two major groups are represented by dark C-asteroids and the bright S-types with possibly higher density. A cratering in the past on the surface can be measured during the rotation of an asteroid, if observed from the earth; there is some evidence that we could see different layers, starting from the surface down to deeper levels, even down to the core in the case when a catastrophic collision has resulted in a break-up of the whole body; some evidence was found for family production due to that process, too. Usually asteroids should be very uniform, but for larger objects a differentiation may have occurred due to partial heating up and cooling down with a resulting condensation of the heavier material in the core.

We do think now that we have to assume a hierarchy of planetesimals due to evolution of the solar system, starting with nebula matter and grains (up to 1000Å diameter), micro-meteorites and meteorites (μm to m), primordial asteroids and collision products (up to 1000 km) and giant planets (up to 10^5 km). Taking into account the densities of asteroids, $2 - 3 \text{ g cm}^{-3}$, these projects do fit into the gap between Mars and Jupiter. This fact also gives rise to the assumption that all the known asteroids still can be found near the regions where they were formed originally – so they can be used as tracers for the origin and for the early stage of the evolution of the solar system.

V. S. SAFRONOV

O. Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Academy of Sciences, USSR, Moscow

This short report is an attempt to present the main features of the model of the Solar system origin which takes into account the results of the dynamical study of collapse of the solar nebula, the evolution of the protoplanetary cloud and the accumulation of planets, and which does not contradict the available data. This model is considered by the author as a preferable one among the others. Many specialists also accept it as a probable model.

1. In this model a common origin of the sun and the planets is assumed from a unique solar nebula, in contrast with the origin of planets by fission from an already-formed sun or their origin from matter captured by the sun. Plausible versions of these old hypotheses have approached now the common origin: the first transformed into the fission of a protoplanetary disk from an extensive central nucleus (protosun); the second considers the capture contemporary with the formation of the sun.

2. We prefer the model of the solar nebula with a moderate mass ($\lesssim 1.1 M_{\odot}$) and a rather slow initial angular momentum $K \cong 10^{52} \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ in contrast to a massive solar nebula ($\cong 2 M_{\odot}$) with a high initial angular momentum ($K \cong 10^{54} \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-1}$) (Safronov and Ruzmaikina, 1978). The collapse of rapidly rotating nebulae results mainly in double and multiple star formation. This question is discussed in detail in T.V. Ruzmaikina's paper (1982). The uncertainty of initial parameters of the solar nebula exists due to an insufficient knowledge of the fragmentation process of interstellar clouds, and of the consequences of tidal interactions of fragments.

3. The planets have formed not from massive gaseous condensations with masses of the order of Jupiter's mass (protoplanets), but as a result of accumulation of solid material. After the end of collapse of the solar nebula, the separation of a protoplanetary cloud from a compact protosun, and the decay of turbulence in the cloud, the dust particles have settled toward its central plane forming there a dust layer. When the dust particles have grown in size up to several centimeters or more, the layer has reached the critical density, became gravitationally unstable and fragmented into numerous dust condensations. The coalescence of these condensations at collisions has led to their contraction and transformation into solid bodies of 10 km size in the zone of the terrestrial planets (Safronov, 1969). There is an uncertainty in estimates of the formation rate of the dust layer, because it is not clear how long the turbulence existed in the cloud and how effective was the sticking of the dust particles in these conditions.

4. The dynamical evolution of the swarm of protoplanetary bodies (gravitational perturbations at close encounters and increase of their relative velocities, collisions, coalescence and fragmentation of bodies) resulted in the formation of a considerable number of planetary „embryos“ – the largest bodies which grew faster than the rest of bodies in their „feeding zones“ (with the efficiency of sticking equal 1; Safronov, 1969, 1980). The velocities of the rest of bodies grew up proportionally to the radii of the embryos. The earth has acquired 98% of its mass during about 10^8 yr.

5. At the initial stage the accumulation proceeded in the presence of gas which decreased relative velocities of bodies and therefore favoured their faster accumulation. The dissipation of the gas from the Earth's zone lasted $\cong 10^7$ yr, and the final stage of the earth's growth was gas-free. The main process of the removal of gas was presumably not the solar

wind at the T Tauri stage of the sun which was too short to allow the gas accretion by Jupiter and Saturn, but the thermal dissipation from the hot exosphere of the cloud heated by the UV radiation of the sun (Pechernikova, Vitjazev, 1981). The Earth growing in the presence of the gas would acquire an enormous initial atmosphere ($\approx 10^{26}$ g) and a very high temperature (more than 4000 K, Hayashi et al., 1979) which is not in agreement with the data of the Earth sciences. The initial temperatures of the planets which have grown in the absence of gas were determined not by their accumulation time but by the masses and the dimensions of the impacting bodies. The exterior half of the Earth's globe in the course of accumulation was heated up to the beginning of melting temperature of rocks (corresponding to a viscosity of $\approx 10^{17}$ poise, Safronov, 1981).

6. Jupiter and Saturn have formed in a two-stage process. At first the solid bodies accumulated like the terrestrial planet-embryos. When the largest bodies reached a critical mass (about two Earth's masses), the second stage began – the accretion of gas by these bodies (planets' nuclei). The maximum surface temperature of Jupiter reached 5000 K in the accretion process. The heating by Jupiter of the inner part of its circumference resulted in a silicate composition of the nearest satellites.

7. The origin of smaller bodies of the solar system is considered as a by-product of the planetary formation process. The accumulation of planets was accompanied by the formation of circumplanetary satellite swarms due to the gravitational capture of particles and bodies colliding inelastically in the vicinity of planets. The accumulation of satellites within the swarms was similar to that of the planets (Ruskol, 1975). The giant planets as they grew up have thrown away from the Solar system a considerable amount of bodies due to gravitational perturbations. A part of bodies ejected to a far periphery of the Solar system underwent perturbations from nearby stars and remained on heliocentric orbits forming the Oort's cometary cloud (Safronov, 1972).

In the asteroidal belt the process of accumulation of a planet was interrupted by the larger Jupiter's zone bodies (JZB) intervening the belt. Colliding with the asteroids, these bodies have swept out a greater part of them and removed them from the belt; the velocities of the rest of asteroids increased due to gravitational perturbations at the encounters with the JZB. As a result, the collisions between asteroids themselves became disruptive, not cohesive (Safronov, 1979). The meteorites falling onto the Earth are chiefly products of asteroids fragmentation. The carbonaceous chondrites represent the primary substance of the Solar system. The accumulation theory allows to explain the gradual transfer of meteorite structure type from C1 to C2, C3, and to ordinary chondrites, as an evolutionary track, connected mainly with the impact transformation of colliding bodies (Vitjazev and Pechernikova, 1982).

The planetary cosmogony develops toward a more deep and detailed study of the accumulation theory of planets and also toward a broadening of the involved problems, i.e. the study of the earliest and the latest stages of the process. The planetary cosmogony, tends to join the neighbouring disciplines – the stellar cosmogony, the cosmochemistry, the Earth's sciences. That is, especially in boundary fields there may be expected the most important and interesting results.

References

- HAYASHI C., NAKAZAWA K., MIZUNO H.: 1979. Earth's melting due to the blanket-ing effect of the primordial dense atmosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.* **43**, 22.
 PECHERNIKOVA G.V., VITJAZEVA A.V.: 1981. Thermal dissipation of gas from the protoplanetary cloud. *Adv. Space Res.* **1**, 55.

- RUSKOL E.L.: 1975. „Origin of the Moon“, Moscow, Nauka; NASA TT F-16623.
- RUZMAIKINA T.V.: 1982, this volume, p. 49.
- SAFRONOV V.S.: 1969. „Evolution of the protoplanetary cloud and the formation of the Earth and planets“, Moscow, Nauka; NASA TT-F-667, 1972.
- SAFRONOV V.S.: 1972. Ejection of bodies from the solar system in the course of the accumulation of the giant planets and the formation of cometary cloud. In: „The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets“, Eds. G.A. Chebotarev et al., Reidel, Dordrecht, p. 329.
- SAFRONOV V.S.: 1979. On the origin of asteroids. In: „Asteroids“, Ed. T. Gehrels, Univ. Ariz. Press, Tucson, p. 975.
- SAFRONOV V.S.: 1980, Accumulation of the protoplanetary bodies. In: „Early solar system processes and the present solar system“, LXXIII Corso Soc. Ital. Di Fisica, Bologna, p. 58.
- SAFRONOV V.S.: 1981. Initial state of the Earth and its early evolution. In: „Evolution of the Earth“, Eds. R.J. O'Connell and W.S. Fyfe, Geodyn. Series vol. 5; Washington, D.C., p. 249.
- SAFRONOV V.S., RUSKOL E.L.: 1982. On the origin and the initial temperature of Jupiter and Saturn. *Icarus*, in press.
- SAFRONOV V.S., RUZMAIKINA T.V.: 1978. On angular momentum transfer and accumulation of solid bodies in the solar nebula. In: „Protostars and Planets“, Ed. T. Gehrels, Univ. Arizona Press, Tucson, p. 545.
- VITJAZEV A.V., PECHERNIKOVA G.V.: 1982. Models of protoplanetary disks around F-G stars. *Pisma Astron. Zh.* (in press).

III. Diskussion

Herr von Weizsäcker erinnerte sich zunächst an die Situation, die er als Student vorfand; da habe er gelernt, daß die einzige Möglichkeit der Bildung des Planetensystems der Einfang durch die Sonne sei. Beim Nachdenken über die Unterschiede zwischen der Sonne und den festen Planeten falle primär die Verschiedenheit der chemischen Zusammensetzung auf, die einen kalten Prozeß des Aufbaus suggeriere. Andererseits stehe bei der Vorstellung der Bildung des Sonnensystems aus einem Gasnebel die Notwendigkeit des Drehimpulstransports im Vordergrund. Damals habe er sich auf turbulenten Transport konzentriert, weil er von Plasmaphysik nichts wußte. Ihm dränge sich nach den Ergebnissen der letzten Jahre nun vor allem die Frage auf: woher kommt die Diversifikation im Sonnensystem mit Körpern aus Eis unter den Satelliten der großen Gasplaneten und festen Planeten aus schwer flüchtigen Elementen? Gibt es dafür eine einfache Erklärung? Herr Morfill sah turbulenten Transport als eine Möglichkeit dafür an, zumindest wenn er, wie Herr Völk hinzufügte, auf dem Hintergrund eines großräumigen Temperaturgradienten stattfindet. Herr Schober ging davon aus, daß das Material der Satelliten von Jupiter und Saturn aus eingefangenen Asteroiden bestehe, unter Erhaltung der Unterschiedlichkeit.

Herr Kippenhahn lenkte die Diskussion auf Probleme der numerischen Codes für Kollapsberechnungen von interstellaren Wolken. Das Auftreten oder Nichtauftreten von Ringen schien eine Frage des Codes zu sein. Dazu bemerkte Herr Norman, daß das Auftreten von Ringen von den Anfangsbedingungen abhängt. Weiterhin, man rechne, was man rechnen

könne. Isotherme Codes seien eher für Fragen der Struktur von interstellaren Wolken geeignet. Der Tscharnuter-Code sei gut, wenn man wirklich Sterne und Planeten rechnen wolle. Herr **Winkler** fügte hinzu, daß die Ringbildung von der anfänglichen Drehimpulsverteilung bestimmt werde und dies sei ja ganz in Ordnung. Herr **Völk** meinte, daß empirisch das Sonnensystem wohl nicht das Resultat einer hierarchischen Fragmentierung von Ringen sein könne, da sich bei diesem Prozeß grundsätzlich ungefähr gleiche Fragmentmassen ergäben.

Die Theoretiker sollten stärker auf die Beobachtungen sehen, nicht nur auf ihre numerischen Probleme, betonte Herr **Elsässer**. Infrarotbeobachtungen von bipolaren und kometaren Nebeln zeigten häufig einen absorbierenden Streifen (auf Grund von Staub), also eine Scheibenstruktur, zusammen mit einem zentralen Objekt, das aber vielleicht ein ganz enger Doppelstern sein könne. Die „Lobes“ könnten durch Winde in Z-Richtung mit entstehen. Deshalb verdienten auch Winde Aufmerksamkeit. Das Auftreten von Staub-Koagulation werde durch Extinktionsmessungen in Sternentstehungsgebieten nahegelegt. Herr **Kippenhahn** bemerkte dazu, daß die Theorie schon wichtig sei. Aber wenn man der Elsässer'schen Logik folgen wolle, dann könne man sich auch fragen, warum man die Entstehung des Sonnensystems mit Computern verfolgt, wo doch die Beobachtung ohne Zweifel zeigt, daß es entstanden ist. Herr **Tscharnuter** betonte, daß die für unser Planetensystem relevante Theorie des Kollaps rotierender Protosterne geringer Masse den Strahlungsdruck als dynamisches Element nicht benötige. Herr **Völk** fügte hinzu, daß nicht klar sei, wieweit die derzeitigen Beobachtungen früher Sterne in Staubscheiben für die Entstehung eines Planetensystems wie dem der Sonne schon direkte Hinweise lieferten; gleichwohl seien Beobachtungen, wie sie von Herrn Elsässer erwähnt worden seien, von größter Bedeutung.

Bezüglich der Annahme andauernder turbulenter Bewegungen im protosolaren System äußerte Herr **Safronov** ein deutliches Unbehagen und stellte die Frage, was eigentlich die Turbulenz antreibe. Seines Wissens gebe es keinen überzeugend nachgewiesenen Mechanismus. Herr **Völk** räumte ein, daß die Turbulenz in den von ihm favorisierten Modellen in der Tat ein ad hoc-Element sei, deren Plausibilität allerdings in (fast) umgekehrtem Verhältnis zur Qualität ihres mathematischen Nachweises stehe. Herr **Safronov** wandte sich daraufhin der Entstehung der großen Gasplaneten zu. Nach seiner Auffassung hat auch in diesem Fall zunächst die Akkumulation von Planetesimalen die entscheidende Rolle gespielt. Dies führte zu einem festen Planetenkern, der dann das Gas aus seiner Umgebung akkretieren konnte. Obgleich dies in einem instabilen Vorgang geschehe, so sei aber keine Gravitationsinstabilität in Teilen einer zirkumsolaren Gas/Staub-Scheibe erforderlich, oder, in seinen Augen, auch nur wahrscheinlich gewesen. Für die letztere Instabilität sei eine viel höhere Gasdichte erforderlich. Was die andauernde Existenz von turbulenten Gasbewegungen in einer präplanetaren Scheibe angehe, so sei es eher möglich, daß anfängliche Turbulenz schließlich abklinge und ein ziemlich laminares Stadium der Staubsedimentation folge.

Herr **Sedlmayr** stellte drei allgemeine Fragen zur Entstehung von Planetensystemen: (i) Ist Staub wichtig für die Dynamik? (ii) Wie genau sollte man erwarten, mit **einer** Theorie das Planetensystem der **Sonne** zu reproduzieren? (iii) Sind Sonne und Planeten gleichzeitig entstanden? Diese Fragen wurden nicht mehr vollständig diskutiert. Bei den üblichen Kollapsmodellen spielt der Staub für den Strahlungstransport und damit auch für Dynamik eine zentrale Rolle, wie Herr **Tscharnuter** anmerkte. Herr **Völk** meinte, daß es keinen Anlaß gebe, von **einer** Theorie eine Erklärung aller Details unseres eigenen Systems zu erwarten und daß dies auch garnicht das Hauptziel sein könne. Herr **Schmidt-Kaler**

wies darauf hin, daß das Instrument auf dem zukünftigen Astrometrie-Satelliten HIPPARCHOS der ESA möglicherweise Planeten anderer Sterne wird beobachten können. Er erinnerte an seinen Vorschlag, diesen Satelliten über seine normale Operationszeit hinaus nach einer Pause von einigen Jahren wieder einzuschalten.

Schließlich fragte Herr Kundt nach Evidenz für das von T. Gold postulierte omnipräsente Methan im Erdkörper; Herr Begemann meinte, diese Frage sei naturgemäß schwierig zu beantworten.

IV. Schlußbemerkung

Zweifellos wird mancher Teilnehmer ein etwas konfuse Bild nach dieser Veranstaltung mit nach Hause genommen haben. Das sollte sich aber meiner Meinung nach mehr auf den notwendigerweise verkürzten Darstellungen und vielleicht auch auf den Ablauf der Sitzung beziehen, als auf das eigentliche Thema. Wenn man nämlich einmal überlegt, wieviel eigentlich über die Planetenentstehung (nicht die Sonnenentstehung) bekannt ist, so ist das nicht wenig. Die Existenz vieler km-großer fester Körper (Planetesimale) zur Zeit der Bildung kann als sicher gelten. V.S. Safronov's Theorie der Akkumulation solcher Körper zu Planeten durch Stöße in Gegenwart des Gravitationsfeldes der Sonne ist analytisch überzeugend und durch numerische Simulationen in den wesentlichen Punkten bestätigt. So scheinen die späten Phasen der Planetenbildung fast geklärt zu sein, wenn man das empirische Faktum der Bildung der Planetesimale zugrunde legte. Natürlich gibt es auch dafür eine Theorie, die aber aufs Engste mit dem Frühstadium der Entstehung der Sonne und der vermuteten Bildung einer protoplanetaren Scheibe zusammenhängt. Die Bildung großer Staubaggregate in diesem System, wie sie die meteoritischen Chondrulen zu fordern scheinen, sowie die kosmochemische und hydrodynamische Entwicklung in diesem Frühstadium beinhalten die ungelösten Fragen. Sie sind von dem Problem der Sternentstehung kaum zu trennen, im Gegenteil, sie sind wahrscheinlich ein integraler Teil davon.