

Nichtstationäre Objekte im Weltall¹⁾

Prof. Dr. V. A. Ambarcumjan

Mitglied der AdW der UdSSR

Auswärtiges Mitglied der AdW der DDR

Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums Bjurakan

Die Entwicklung der modernen Astronomie weist eine charakteristische Besonderheit auf, die große Aufmerksamkeit verdient: Bis Ende des 19. Jh. beschäftigten sich die Astronomen hauptsächlich mit Objekten, die sich zeitlich so langsam ändern, daß sich dies bei den damaligen Beobachtungen nicht zeigte. Die moderne Astronomie hingegen entdeckte viele Typen kosmischer Körper, in denen verhältnismäßig schnelle Änderungen stattfinden, die manchmal einen katastrophenartigen Charakter tragen.

Ende des 19. Jh. erforschten die Astronomen vor allem die Planeten unseres Sonnensystems. Beobachtungen wiesen auf gewisse Veränderungen in ihren Atmosphären hin. Aber diese Variationen an einzelnen Stellen sind nicht irreversibel; denn es zeigte sich, daß sich der Zustand der Atmosphären im Ganzen nicht verändert. Wir sind heute davon überzeugt, daß entwicklungsbedingte Veränderungen der Planetenatmosphären viele Millionen Jahre erfordern. Weiterhin war die Welt der „unbewegten“ Sterne, der Fixsterne, Gegenstand der Forschung. Die Bezeichnung „unbewegt“ rührt ja daher, daß Ortsveränderungen am Himmel während der Beobachtungszeiträume nicht groß sind.

Die ersten Entdeckungen nichtstationärer Objekte im Weltraum

Am Ende des 19. Jh. wandten viele Astronomen ihre Aufmerksamkeit den physikalischen Veränderungen in den Zustandsgrößen der Sterne zu. Dabei begann man auch solche veränderlichen Sterne zu erforschen, deren Spektren zeitlich variieren.

Das Hauptaugenmerk richtete man jedoch auf die periodischen Veränderlichen — etwa die Cepheiden und die Veränderlichen vom Typ Mira Ceti. Bei diesen Objekten schließt anscheinend jede Periode mit der Rückkehr zum Ausgangspunkt ab. Der periodische Charakter dieser Veränderungen sagt aber nichts über die Richtung des gesamten Entwicklungsprozesses aus.

¹⁾ Vorabdruck aus V. A. Ambarcumjan (Herausgeber und Mitautor): Über Probleme der modernen Kosmogonie, Akademie-Verlag, Berlin 1976

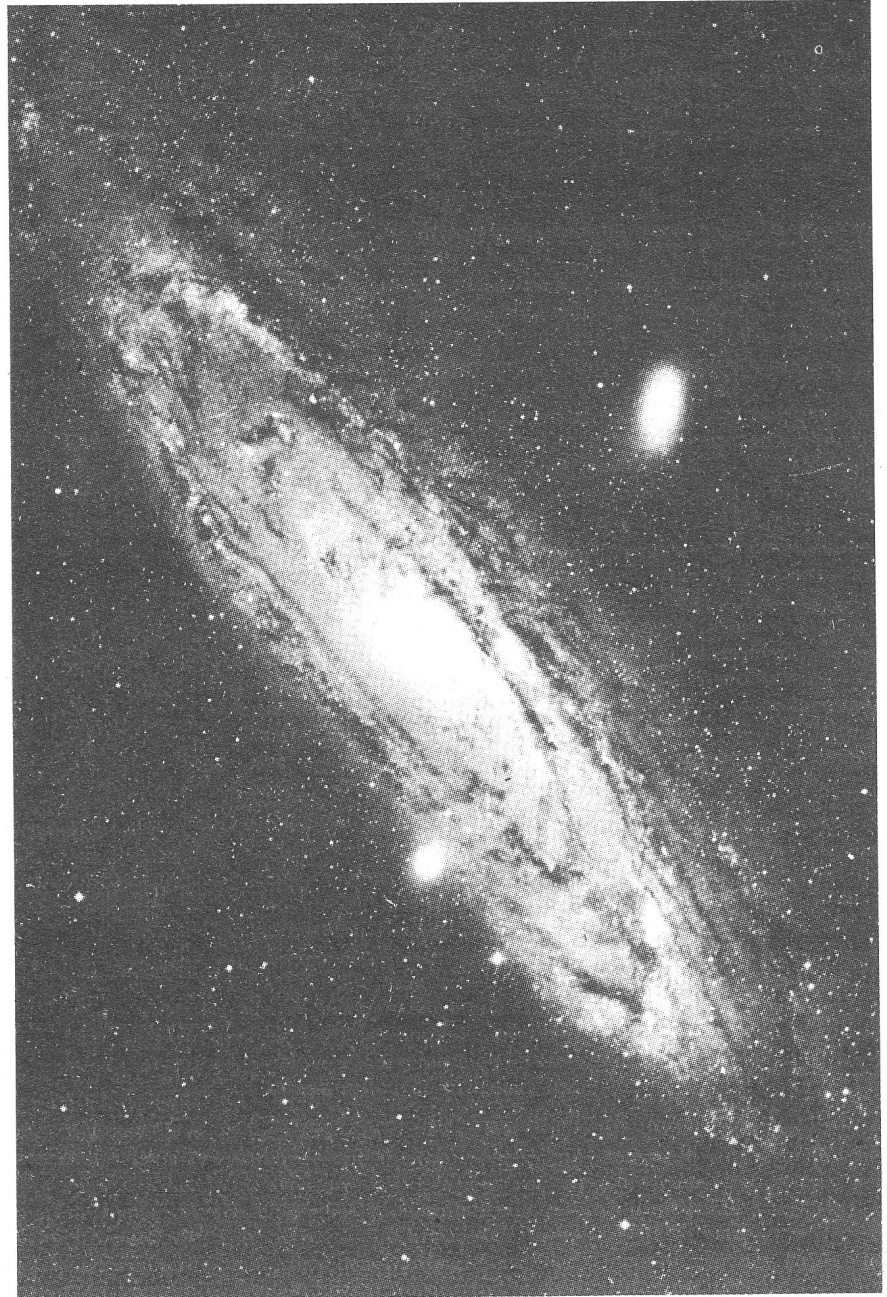


Abb. 1 Andromeda-Nebel; der Dorpater Astronom Hartwig entdeckte 1885 das Aufleuchten einer Supernova in der Nähe vom Kern des Andromeda-Nebels. Dieses Ereignis wies auf tiefgreifende kosmische Veränderungen größten Ausmaßes hin.

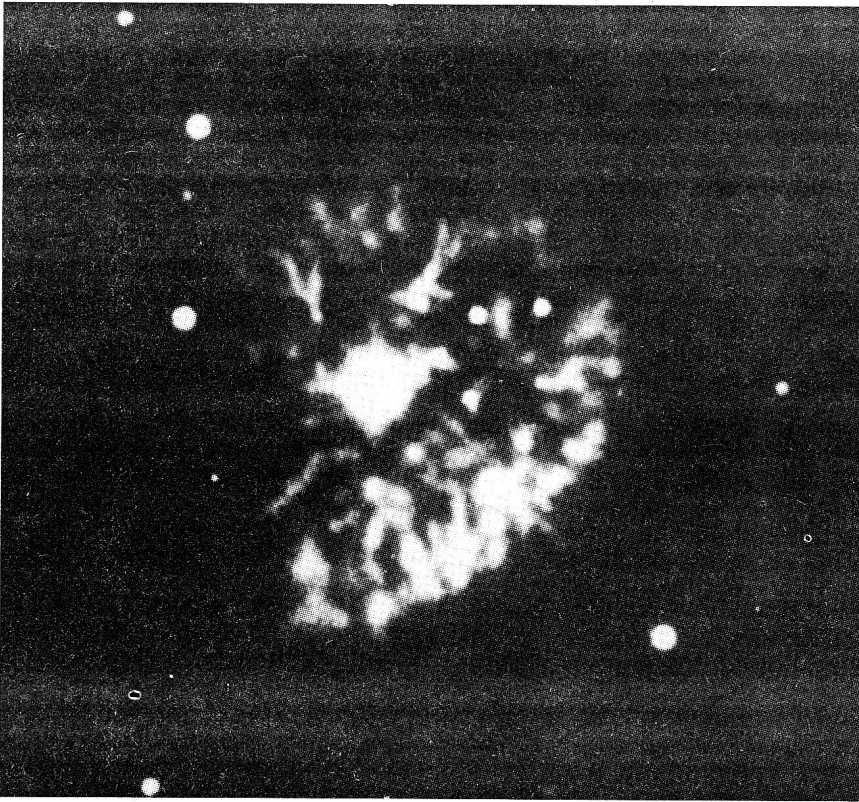


Abb. 2 Nova Persei 1901; alle Beobachtungen dieses Ausbruchs am Beginn unseres Jahrhunderts trugen wesentlich zum Verständnis der Novaerscheinung bei. Man erkannte, daß beim Novaausbruch ein kleiner expandierender Gasnebel entsteht.

Abb. 3 So etwa sieht unser Milchstraßensystem „von außen“ aus. Das Schema zeigt die ungefähre Ausdehnung und den Standort unserer Sonne. Das Objekt Cassiopeia A erwies sich als intensive Radioquelle. Es ist jünger als 1000 Jahre und entstand aus einem Supernovaausbruch.



Sogar bei den damals bekannten unregelmäßigen Veränderlichen rechnete man damit, daß der Stern im Lauf der Zeit sehr nahe zu einem einmal beobachteten (beliebigen) Ausgangszustand zurückkehrt. Die Bedeutung dieser Veränderungen für die gesamte Entwicklung des Sterns war bis in die jüngste Vergangenheit unklar.

Die einzigen damals bekannten Objekte, die nichtstationär im gegenwärtigen Sinn des Wortes sind (das sind Objekte, bei denen der Zustand so grundlegend verändert wird, daß die Möglichkeit einer Rückkehr zum vorhergehenden Zustand ausgeschlossen ist), waren kurzperiodische Kometen im Sonnensystem und Novae in der Galaxis, schließlich auch das Aufleuchten einer Supernova in der Nähe vom Kern des Andromedanebels. Dieses Ereignis, 1885 von dem Dorpater Astronomen Hartwig entdeckt, wies auf noch tieferegreifende Veränderungen größten Ausmaßes hin (Abb. 1).

Diese Entdeckung hatte fundamentale Bedeutung. Natürlich dachte in dieser Zeit noch niemand daran, daß Supernovae besondere Kategorien möglicher explosiver Erscheinungen in Sternsystemen sind. (Seither wurde in der Lokalen Gruppe, d. h. in unserer kosmischen Nachbarschaft, keine andere Supernova entdeckt, so daß die Beobachtungen Hartwigs weiterhin außerordentlich bedeutsam sind.)

Das Bild von einer sich nur langsam ändernden Welt, in welcher die Zustände aller Objekte fast stationär sind, harmonisierte vollständig mit den mechanischen Vorstellungen über das Weltall. Dieses „ruhige“ Bild wurde aus der Himmelsmechanik entwickelt.

Damals entstand die Astrophysik. Sie befaßte sich zunächst hauptsächlich mit der thermodynamischen Gleichgewichtsstrahlung der Sterne.

Nichtstationäre Objekte in der Galaxis

Im 20. Jh. häuften sich immer rascher Beobachtungsdaten über die Sterne und ihren Aufbau. Bereits das erste Viertel unseres Jahrhunderts übertraf in dieser Beziehung die Erfolge der Astronomie des 19. Jh. In den darauffolgenden Jahrzehnten wuchs der Informationsfluß weiter an. Dies ging konform mit der Entwicklung der theoretischen Astrophysik und diente als Anstoß für systematische und tiefgehende Studien der Erscheinungen von nichtstationären Zuständen und Prozessen — insbesondere auch von solchen, die auf den ersten Blick gegenwärtig noch stationär erscheinen.

Den Anfang des 20. Jh. markierte die Entdeckung eines Novaausbruchs. Alle Beobachtungen von diesem Ausbruch trugen wesentlich zu einem richtigen Verständnis der Novaerscheinung bei. Man erkannte, daß beim Novaausbruch

ein kleiner expandierender Gasnebel entsteht, dessen Materie vom Stern abgestoßen worden ist (Abb. 2).

Die Entwicklung der theoretischen Astrophysik gestattete es, nicht nur den Charakter solcher Sternausbrüche qualitativ einzuschätzen, sondern auch viele andere Erscheinungen, die man zunächst für stationär hielt, die aber — wie sich zeigte — doch zu tiefgreifenden, nichtumkehrbaren Veränderungen im Zustand der Materie führen.

Als Beispiel betrachten wir die sog. Wolf-Rayet-Sterne. Aus spektralanalytischen Beobachtungen ergab sich, daß ständig Materie aus der Atmosphäre dieser Sterne ausströmt. Aus der Intensität der Linien im Spektrum konnte man die Materiemenge berechnen, die ein Wolf-Rayet-Stern während eines Jahres verliert: $10^{-5} \cdot \dots \cdot 10^{-6}$ Sonnenmassen. Das heißt aber: Schon in einigen zehntausend Jahren — also in einem, kosmisch gesehen, kurzen Zeitintervall — verändert sich die Masse des Wolf-Rayet-Sterns merklich. Dabei muß sich auch der physikalische Zustand des Sterns grundlegend ändern. Andererseits zeigten die Beobachtungen, daß die Spektren dieser Sterne über einige Jahrzehnte hinweg relativ konstant blieben. Trotz der relativen Beständigkeit dieser Spektren ist also der Schluß zwingend, daß sich während einer (im kosmischen Maßstab) kurzen Zeit der Zustand eines derartigen Sterns einschneidend ändern muß. Mit anderen Worten: Hinter empirisch festgestellter Unveränderlichkeit der beobachteten Eigenschaften des Objekts verbergen sich tiefgreifende und überdies recht schnelle Änderungen seines Zustands. Und das ist doch recht bemerkenswert.

Eines bleibt noch zu sagen: Im ersten Drittel des 20. Jh. wurden alle Fragen der Entstehung und Entwicklung der Himmelskörper hauptsächlich spekulativ behandelt. Dabei nutzte man den größten Teil der damals vorhandenen Beobachtungsdaten kaum, ja man ignorierte diese sogar. Entsprechend den Traditionen, die auf die kosmogonischen Hypothesen des 18. und 19. Jh. zurückgehen, glaubte man, daß alle Himmelskörper aus ausgedehnten Materiebeln hervorgegangen wären. In unserer Galaxis beobachten wir gegenwärtig keine sehr großen Massen diffuser Materie. Der überwiegende Teil der Materie ist also in Sternen konzentriert. Das heißt aber, der Prozeß der Sternbildung in der Galaxis wurde bereits in einer zurückliegenden Epoche abgeschlossen, und die Galaxis macht gegenwärtig keine schnelle bzw. sehr auffällige und erkennbare Entwicklung durch.

Es ist jedoch klar, daß wir bei Schlußfolgerungen über ein untersuchtes Objekt und seine Evolution nicht von einer a priori gegebenen Hypothese

ausgehen dürfen. Das Urteil muß aus der Analyse aller Eigenschaften des gegebenen Objekts abgeleitet werden, die wiederum aus verallgemeinerten Beobachtungsdaten bestimmt wurden. Diese Einstellung stützt sich auf das dialektisch-materialistische Prinzip, wonach jeder Stufe der materiellen Welt eigene strukturelle und entwicklungsbedingte Gesetzmäßigkeiten zukommen.

Systematische Forschungen, die auf dieser Einsicht basierten, begannen Anfang der 30er Jahre an der Leningrader Universität. Sie führten zu neuen Vorstellungen über den Zeitablauf und die Entwicklungswege vieler Sternentypen und Sternsysteme. Mit den Methoden der theoretischen Astrophysik wiesen Astronomen in der Folgezeit nach, daß planetarische Nebel keine stationären Objekte sein können. Fast gleichzeitig wurde ihre Expansion entdeckt. Wie beim Novaphänomen verwandelt sich auch hier die von einem Stern abgestoßene Gasmasse in einen Nebel.

Die Analyse der Beobachtungsdaten

hinsichtlich der relativen Stationarität oder Nichtstationarität von Sternen und Sterngruppen in der Galaxis zeigte eines sehr deutlich: Unsere Galaxis ist ein System, in welchem — im Gegensatz zu früher allgemein angenommenen Vorstellungen — stürmische und manchmal überaus schnelle Veränderungen vor sich gehen (Abb. 3).

Als man Prinzipien aus der Sterndynamik auf die entdeckten Sternhaufen anwandte, gelangte man zu dem Schluß, daß selbst Haufen, die sich in einem „stationären“ Zustand befinden, wegen der Eigenbewegung der Sterne schließlich „verdampfen“ müssen. Einzelne Sterne verlassen nämlich — ähnlich wie Moleküle die Oberfläche von Flüssigkeiten — im Laufe der Zeit den Sternhaufen. In der Folge müssen durch diesen Prozeß viele Sternhaufen in einigen hundert Millionen Jahren verschwinden, ja einige von ihnen sogar schon in einigen zehn Millionen Jahren.

Auf ähnliche Weise wurden alle visuellen Doppelsterne der Galaxis analysiert.

Abb. 4 Plejaden („Siebengestirn“); dieser junge Sternhaufen im Sternbild Taurus („Stier“) ist mit bloßem Auge sichtbar. Aus statistischen Überlegungen folgt z. B., daß die meisten Sterne in den Plejaden sog. Flaresterne („Flackersterne“) sind.



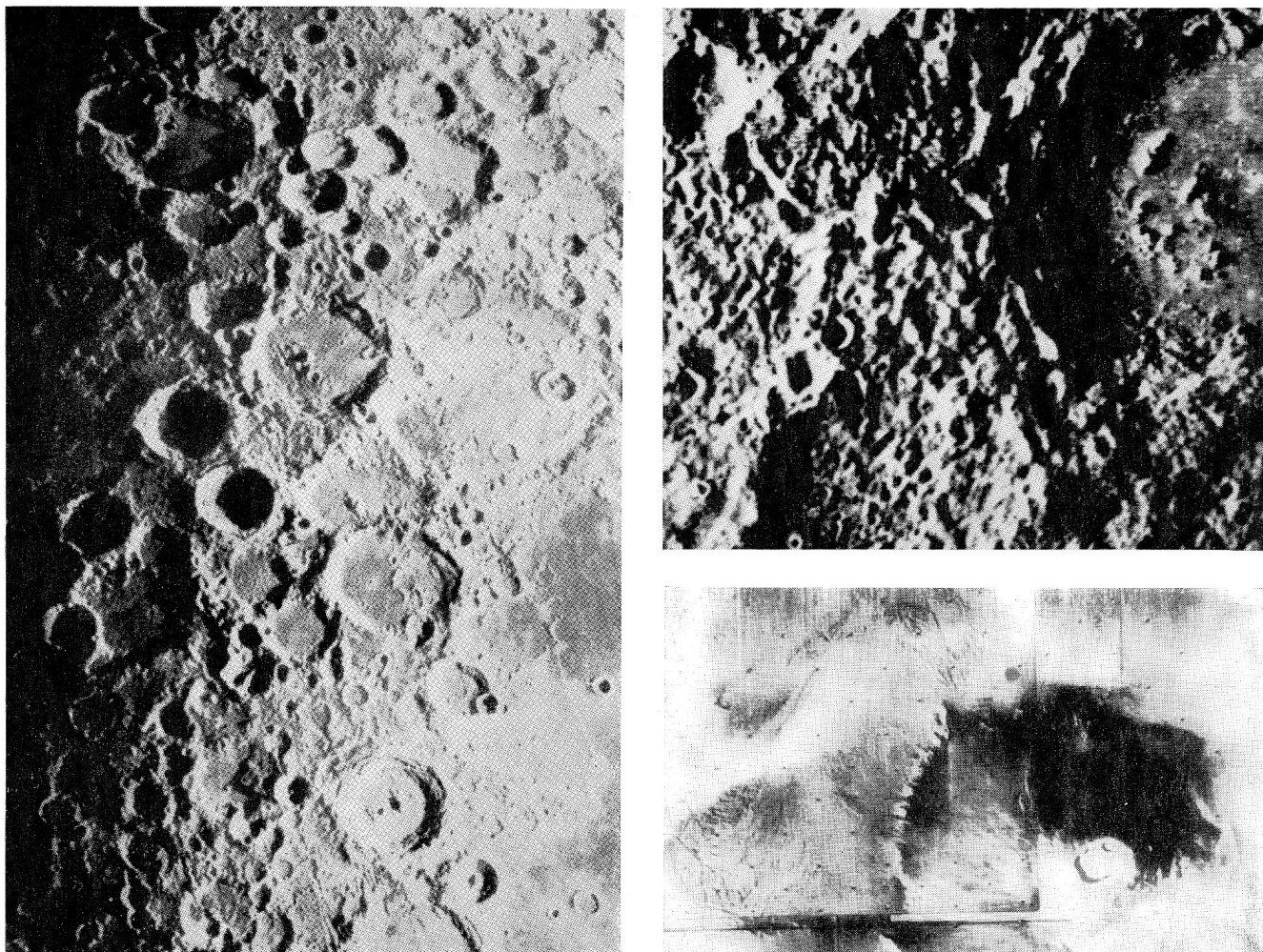


Abb. 5 Oberflächenformen vom Mond (links), Merkur (rechts oben) und Mars. Die ersten beiden Abb. zeigen deutlich, daß die Oberflächen dieser Himmelskörper von Kratern geradezu übersät sind. Gründliche Analysen der jüngsten Merkurtaufnahmen zeigen z. B. mehrere Gebirgsauffaltungen und lavagefüllte Becken, die auf Vulkanismus hindeuten. Der Nix Olympia auf dem Mars ist ein riesiger Vulkankegel, der steil aus einer Marsebene herausragt. Sein Gipfel trägt ein typisches vulkanisches Einsturzbecken, eine sog. Caldera, von 65 km Durchmesser.

Es zeigte sich, daß die Zerfallsrate von Sternpaaren bei Begegnungen mit Sternen des allgemeinen Sternfeldes größer ist als die Entstehungsrate von neuen Sternpaaren bei zufälliger Annäherung von Sternen. Der Anteil der Einzelsterne im gesamten Sternfeld der Galaxis wächst deshalb beständig aus dem Zerfall von Sternhaufen und visuellen Doppelsternen. Auf diese Weise charakterisieren Zerfall und Zerstreuung in voller Übereinstimmung mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik die allgemeine Richtung der Prozesse in unserer Galaxis und — wie sich schließlich zeigte — auch in anderen Galaxien.

In diesen Arbeiten wurde auch der Begriff der „kurzen Zeitskala“ des Alters der Galaxis und ihrer Sterne formuliert. Anfang der 30er Jahre glaubte man, daß

das Entwicklungsalter der Sterne der Galaxis $10^{12} \dots 10^{13}$ Jahre beträgt („lange Zeitskala“). Aber die Entdeckung des unvermeidlichen Zerfalls von Sterngruppen und Sternhaufen in verhältnismäßig kurzer Zeit bestätigte, daß die Galaxis in ihrem gegenwärtigen Zustand nicht älter als etwa $10^{10} \dots 10^{11}$ Jahre sein kann.

In den 30er bis 40er Jahren wurden neue Fakten über die Richtung der Prozesse in Sternsystemen und über das Alter der Sterne in der Galaxis bekannt. Zum Beispiel zeigte sich, daß Supernovae eine eigene Klasse von Sternen darstellen, deren Ausbrüche in ihrer Mächtigkeit bedeutend über die gewöhnlicher Novae hinausgehen. Die Energie, die bei einer Supernovaexplosion freigesetzt wird, beträgt rd. 10^{50} erg, was etwa der

Wärmeenergie entspricht, die in einem gasförmigen Stern enthalten ist. Es ist offensichtlich, daß die Explosion einer Supernova einen Übergangsprozeß eines Sterns aus einem Zustand in einen qualitativ anderen darstellt. Zugleich weist die Seltenheit der Supernovae darauf hin, daß nicht alle Sterne wie eine Supernova ausbrechen können, sondern nur einige Typen.

Wie wir heute wissen, entstehen als Folge von Supernovaexplosionen gigantische Nebel, die oftmals sowohl optisch als auch im Radiowellenbereich zu beobachten sind. Derartige Fakten zeigen, daß das Entstehen von Nebeln aus Sternen eine weit verbreitete Erscheinung ist. Umgekehrt kennen wir bis jetzt keinen Fall, wo aus diffuser Materie ein dichtes Objekt entstanden wäre,

obwohl dieser Übergang — übernommen aus alten kosmogonischen Hypothesen — die Grundlage vieler heute bestehender Kosmogonien ist.

Auf Grund von Arbeiten Bjurakaner Astronomen wurde Ende der 40er Jahre ein neuer Typ von Sternsystemen, die Sternassoziationen, entdeckt. Diese relativ jungen Gruppen zerstreuen sich unmittelbar nach ihrem Entstehen. Sie sind meist nichtstationär im vollen Sinn des Wortes, weil sich die Sterne der Gruppe schnell voneinander entfernen. Auch unsere Galaxis zeigt sich nichtstationär, da ja junge Sterne auch noch gegenwärtig in Sternassoziationen entstehen.

Die Entdeckung der Sternassoziationen warf auch ein neues Licht auf bekannte Daten über Mehrfachsysteme, z. B. das Trapez im Orion. Äußerlich scheint nichts auf eine Instabilität des Trapez-Systems hinzuweisen. Inzwischen zeigte sich aber, daß dieses System in kosmisch sehr kurzer Zeit, nämlich in etwa 10^6 Jahren oder weniger, zerfallen muß.

Diese Entdeckung ist ein gewichtiges Argument zugunsten der Vorstellung, daß eine Zerstreung aus anfangs kleinem Volumen einen wichtigen Teil des Entwicklungsprozesses im Kosmos darstellt. Demgegenüber geben vorhergehende Beobachtungen nicht den geringsten Hinweis auf die Möglichkeit eines Übergangs von einem diffusen Zustand in einen dichteren.

Wie die heißen Riesen erwiesen sich die veränderlichen Zwergsterne des Typs T-Tauri als junge Objekte. Besonders viele wurden in der Orion-Assoziation entdeckt. Aber die jüngsten von allen gegenwärtig erforschten stellaren Objekten sind die sog. Herbig-Haro-Objekte. Nach den Beobachtungen enthält ein derartiges Objekt einen Stern, der im Verlauf einer relativ kurzen Zeitspanne aufleuchtet und danach lange, d. h. über viele Jahre, im Zustand maximaler Helligkeit verbleiben kann.

Ein ähnliches Anwachsen der Leuchtkraft (um einen Faktor 100 und mehr) kann — wie unlängst gezeigt wurde — auch in einem bestimmten Stadium der Entwicklung der T-Tauri-Sterne vor sich gehen. Sterne, die sich in dieser Weise verändern, nennen wir Fuoren. Die Helligkeit dieser Fuoren im Maximum ihrer Leuchtkraft übersteigt um ein Vielfaches die maximale Helligkeit der Sterne, die im Zentrum der Herbig-Haro-Objekte aufleuchten.

Diese Tatsachen zeigen, daß das Verhalten der Sterne um so „unerwarteter“ und ungewöhnlicher ist, je näher die von uns betrachteten Etappen am Anfang des Entstehens junger Sterne liegen. Diese „Unvorhersehbarkeit“ beruht auf Mängeln aller gegenwärtig existierenden Theorien der Sternentwicklung. Nach dem T-Tauri-Stadium beginnt ein neuer, längerer Lebensabschnitt der

jungen Sterne, in dem der für die T-Tauri-Sterne charakteristische unregelmäßige Lichtwechsel praktisch aufhört und der Stern seine Helligkeit nicht mehr ändert. Allerdings kann man bei einem derartigen Stern von Zeit zu Zeit Ausbrüche beobachten, bei denen seine Helligkeit auf das Mehrfache — manchmal auf weit über das Zehnfache des Normalwerts — ansteigen kann. Die Dauer eines solchen Ausbruchs beträgt gewöhnlich einige Minuten bis einige zehn Minuten. Man kann dieses Entwicklungsstadium junger Zwergsterne deshalb als Eruptionsstadium bezeichnen. Es dauert etwa 10^8 Jahre, bei roten Zwergen des Spektraltyps M sogar $5 \cdot 10^8$ Jahre.

Nicht nur in Sternassoziationen, sondern auch in vielen jungen Sternhaufen stellen die sog. Flaresterne einen wesentlichen Teil der Sternpopulation. Aus statistischen Überlegungen folgt z. B., daß die Mehrzahl der Sterne in den Plejaden Flaresterne sind (Abb. 4). Es besteht jetzt kein Zweifel mehr, daß jeder Stern mit einer Masse unterhalb der Sonnenmasse das Flarestadium durchläuft. Man kann sagen, daß in der Frühphase der Entwicklung bei Sternen kleiner Masse eruptive Prozesse ein ebenso fundamentales Attribut sind wie ihre elektromagnetische Strahlung. Leider können jedoch die gegenwärtigen Theorien des inneren Aufbaus und der Entwicklung der Sterne weder diese eruptiven Erscheinungen vorhersagen, noch sind sie imstande, die Beobachtungen zu erklären.

Bemerkt sei noch, daß zwischen der Eruptionstätigkeit in den Sternen niedriger Leuchtkraft und der Vulkanstätigkeit der Planeten eine tiefe Analogie besteht. Wie man inzwischen weiß, haben Planeten wie Mars und Merkur lange Epochen mächtiger Vulkanaktivität durch-

laufen. Ihre Oberflächen ähneln deshalb auch der Mondoberfläche. Im übrigen gibt es viele Gründe anzunehmen, daß auf den genannten Planeten die Vulkanstätigkeit heftiger war als auf dem Mond (Abb. 5).

In den letzten Jahren wurden wir auch Zeugen anderer Phänomene in den Sternen:

Eruptionstätigkeit und andere nichtstationäre Prozesse werden plötzlich als Folge einer schnellen Vergrößerung der optischen Leuchtkraft des Sterns unsichtbar. Das ist bei den Fuoren (Sterne vom Typ FU Orionis) der Fall. Hier haben wir es mit der Bildung einer undurchsichtigen Hülle um den Stern zu tun, die in den tieferen Schichten weiterhin ablaufenden stürmischen Prozesse verbirgt.

So fügt sich durch die genaue Analyse der Beobachtungsergebnisse allmählich ein neues Bild von der Entstehung und Entwicklung der Sterne.

Nichtstationäre Prozesse in anderen Galaxien — kosmogonische Aktivitäten der Kerne von Galaxien

In den 30er Jahren gab es noch wenige Beobachtungsdaten über Galaxien. Die damals übliche Klassifikation der Galaxien nach Hubble beschrieb nur die Eigenschaften einiger regelmäßiger Galaxientypen, die für einen stationären Zustand charakteristisch sind. Die Einführung des Schmidt-Systems beim Bau wichtiger Teleskope gestattete jedoch, unser Wissen über Sternsysteme bedeutend zu erweitern. Dabei wurde die Vorstellung Hubbles über eine gleichmäßige Verteilung der Galaxien im Raum widerlegt. Es zeigte sich, daß die meisten Galaxien in Gruppen oder Haufen zusammengefaßt sind, während man an der Existenz eines allgemeinen Gala-

Abb. 6 Galaxie M 82; Anfang der 60er Jahre entdeckte man einen gewaltigen Radioausbruch im Kern dieser Galaxie, der vor etwa 1,5 Mill. Jahren stattgefunden haben muß.

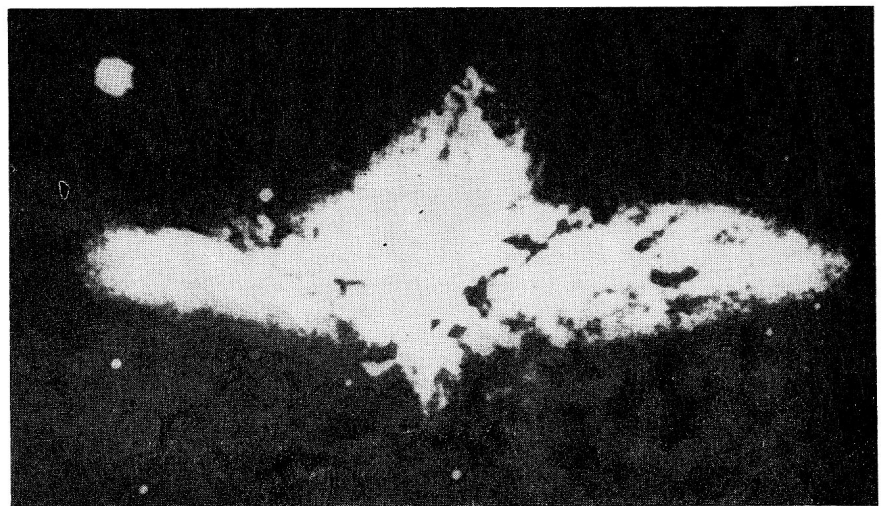




Abb. 7 Nordamerika-Nebel

xienfeldes, das den Raum zwischen den Haufen und Gruppen erfüllt, mehr und mehr zweifelte.

In den 50er Jahren stellte man fest, daß sich unter den Galaxien in Gruppen und Haufen ein hoher Anteil nichtstationärer Systeme befindet. In sehr vielen Galaxiengruppen und -haufen fand man eine sehr große Geschwindigkeitsdispersion. Das weist auf eine Labilität der entsprechenden Systeme hin.

Zur Erklärung dieser Erscheinung wurde folgende Vorstellung entwickelt: Die Galaxien eines jeden Haufens erhalten im Moment ihres Entstehens eine so große Geschwindigkeit, daß die gegenseitigen Anziehungskräfte nicht ausreichen, um den Haufen als gebundenes System zusammenzuhalten. Außerdem zeigte sich, daß unter den Vielfachgalaxien der Anteil der nichtstabilen Systeme vom Trapez-Typ wesentlich höher ist als unter den Vielfachsternen.

Mit anderen Worten: Zusammen mit einigen Erscheinungen direkter Nichtstationarität beobachten wir überall Zerfallsprozesse von Haufen und Gruppen von Galaxien.

Worin bestehen nun die Unterschiede zwischen Sterngruppen sowie Gruppen und Haufen von Galaxien?

Sternassoziationen zerfallen in einer Zeit von etwa 10^7 Jahren; die Sterne leben aber noch einige Milliarden Jahre länger. Das bedeutet: Auch bei einer hohen Sternentstehungsrate bilden die Sterne, die aus Gruppen ausgeschieden sind und jetzt dem allgemeinen Sternfeld angehören, den überwiegenden Anteil. Bei Galaxien ist die Situation anders. Die Zerfallszeit der Haufen und der Vielfachsysteme beträgt hier Hunderte von Millionen, ja sogar Milliarden Jahre und wird damit etwa mit dem Alter der Galaxien vergleichbar. Daher haben die meisten der Galaxien die an

und für sich instabilen Haufen und Gruppen noch nicht verlassen.

Neue Möglichkeiten zum Erforschen nichtstationärer Erscheinungen in Galaxien eröffnete die Radioastronomie. Die meisten kosmischen Objekte, die mit Hilfe radioastronomischer Methoden entdeckt wurden, sind ihrem Wesen nach nichtstationär und können nur über kurze Zeiträume Radiostrahlung aussenden. Betrachten wir beispielsweise die beiden intensiven Radioquellen Cassiopeia A (Abb. 3) und den Krebsnebel.

Beide Objekte sind jünger als 1000 Jahre. Sie entstanden aus einem Supernovaausbruch. In den Radiogalaxien beträgt das Radioemissionsstadium Millionen Jahre. Dieser Zeitraum ist klein im Vergleich zum Alter der jeweiligen Galaxie. Mit anderen Worten: Radiogalaxien müssen kurze, aber sich möglicherweise wiederholende Phasen der Galaxienentwicklung sein.

Die Analyse der Radiostrahlung führte zu dem Schluß, daß in Kernen von Galaxien gigantische Ausbrüche vor sich gehen. Dabei ist die Existenz von Radiogalaxien eng mit dem Entstehen großer, Radiostrahlung emittierender Massen diffuser Materie in bis dahin normalen Galaxien verbunden.

Woher kommen diese Massen? Für die inneren Teile der Galaxie existiert — wie eine Analyse zeigte — kein entsprechender Mechanismus. Andererseits sind die Eigenschaften der inneren Teile von Galaxien, speziell ihrer Kerne, unbekannt. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die genannten Massen den Kern verlassen und sich später in radiostrahlende Wolken umwandeln. Diese Wolken müssen sich ausreichend schnell aus dem Kerngebiet entfernen; das heißt, der ganze Prozeß trägt Ausbruchscharakter. Man bezeichnet eine Galaxie in der Phase der intensiven Radiostrahlung gemeinhin als „radioaktiv“.

Heute bestehen kaum noch Zweifel, daß die Radioausbrüche einer Galaxie das Resultat eines gigantischen Ausbruchs in ihrem Kern sind. Die Vorstellung über Ausbrüche in Galaxien traf anfangs auf gewaltigen Widerstand von seiten der Astronomen, die weiterhin daran festhielten, daß die kosmische Entwicklung vor allem durch die Kondensation diffuser Materie bestimmt wird. Als Gegenvorschlag zu den Ausbruchstheorien stellten sie eine völlig unbegründete Hypothese zur Diskussion, die sogar noch eine weite Verbreitung fand. Danach sollten Galaxienzusammenstöße die Ursache der Radioausbrüche sein.

Es waren fast zehn Jahre erforderlich, ehe diese unbegründete und unproduktive Hypothese ihren wissenschaftlichen Kredit verlor. Aber selbst für die Anhänger der Ausbruchstheorie kam die direkte Bestätigung Anfang der 60er Jahre unerwartet. Damals entdeckte

man nämlich einen Ausbruch im Kern der Galaxie M 82, welcher vor 1,5 Mill. Jahren stattgefunden haben muß (Abb. 6). Zugleich wies man auch Bewegungen in den kernnahen Gebieten der Seyfert-Galaxien nach. Das erhärtete den schon früher eingeführten Begriff der kosmogonischen Aktivität der Kerne von Galaxien.

Ein Vergleich dieser Fakten mit zahlreichen anderen Daten, die auf äußerlich scheinbar „ruhige“ Galaxien hinwiesen, erlaubte es uns, bereits in der Mitte der 50er Jahre eine Theorie über die fundamentale Rolle der Kerne bei der Bildung aller Galaxien und ihrer weiteren Entwicklung zu formulieren. Diese Theorie wurde bestätigt durch die Entdeckung der quasistellaren Radioquellen und anderer kompakter Objekte, in welchen der Kern der dominierende Faktor ist.

Die Entdeckung einer großen Zahl Markarian-Galaxien (Galaxien mit einer anomal intensiven ultravioletten Strahlung) wurde sehr bedeutsam für den weiteren Ausbau dieser Theorie von der Rolle der Kerne bei der Entwicklung von Galaxien. Die Markarian-Galaxien ähneln den Seyfert-Galaxien; auch dort gibt es Materieausbrüche aus dem Kerngebiet. Bis vor kurzem konnte man auf solche bereits stattgefundenen Ausbrüche großer Materiemassen aus dem Galaxienkern nur aus dem gegenwärtigen Erscheinungsbild der Galaxie spekulativ schließen. Aber kürzlich gelang es, in der Markarian-Galaxie 6 einen Ausbruch zu beobachten. Dieser fand gewissermaßen direkt vor unseren Augen statt. Alte Spektrogramme dieser Galaxie zeigten nichts Auffälliges, aber 1970 enthielt das Spektrum um eine Größenordnung stärkere Spektrallinien. Man ermittelte eine Geschwindigkeit der emittierenden Wolken von 3000 km/s relativ zu dem als ruhend angenommenen Kern. Damit war die Ausbruchstheorie überzeugend bestätigt.

Beim Erforschen von Galaxien, insbesondere aber beim Untersuchen mächtiger nichtstationärer Prozesse, kristallisierten sich zwei stark unterschiedliche Standpunkte heraus:

Der eine Standpunkt ist durch das Bestreben gekennzeichnet, ein Modell zu konstruieren, welches von schon bekannten Gesetzen der Physik und Mechanik ausgeht. Dabei glauben die Vertreter dieser Richtung aus einem bestimmten Grund, daß die Erscheinungen in der Welt der Galaxien nicht qualitativ anders sein können als in Systemen kleineren Maßstabs; sie übersehen völlig, daß die Natur bei weitem reicher ist, als wir es uns augenscheinlich vorstellen können.

Die Anhänger der entgegengesetzten Einstellung akzeptieren die Notwendigkeit, neue Vorstellungen über das Wesen der astrophysikalischen Erscheinungen

auf der Grundlage realer Fakten zu entwickeln. Dabei verschließen sie keinesfalls die Augen vor den Schwierigkeiten, die bei dem Versuch entstehen, eine bestimmte Erscheinung auf der Grundlage alter Vorstellungen zu erklären. Diese Schwierigkeiten sind für sie der Ansatzpunkt ihrer Arbeit. Im Bewußtsein dieser Schwierigkeiten rechnen sie damit, daß sie mit qualitativ neuen Erscheinungen und Problemen konfrontiert werden, wobei vertraute Vorstellungen evtl. aufgegeben werden müssen.

Vor 20 Jahren dachten alle Astronomen, daß die Kerne von Galaxien aus gewöhnlichen Sternen bestehen. Wenn man die optische Strahlung der Kerngebiete nicht ganz exakt untersucht, kann man tatsächlich leicht zu solchen Schlüssen kommen. Auf Grund detaillierter Beobachtungen sowohl im optischen als auch im radioastronomischen Bereich wurden jedoch allmählich neue Daten bekannt. Diese führten zu der Hypothese, daß auch Körper nichtstellarer Natur in den Kernen vorhanden sind, die manchmal zu Ausbrüchen führen. Diese Hypothese wurde sofort eindrucksvoll bestätigt, so daß sie nun völ-

lig gesichert erscheint. Damit wurde also gleichzeitig überzeugend demonstriert, wie fruchtbar der zweite Standpunkt ist.

Natürlich war es für die Anhänger der ersten Richtung schwer zu verstehen, weshalb sich ausgerechnet die zweite Variante als erfolgreich erwies, die sich auf ein konsequentes Verallgemeinern der Beobachtungsdaten gründet. Sie akzeptierten jetzt die Existenz von Ausbrüchen in Galaxienkernen, erklärten aber, daß diese Ausbrüche nicht die Folge eines Freisetzens von im Kern vorhandener Energie sind. Sie leugneten die Möglichkeit neuer, bis heute unbekannter Eigenschaften der Materie und versuchten, die Ausbrüche als Folge eines Gravitationskollaps' diffuser Materie zu erklären. Um die Ausbrüche und die Zerstreung von Materie zu erklären, wurden also wieder die traditionellen Vorstellungen eingeführt.

Im Lauf der Zeit erwies sich die Kollapshypothese als völlig fruchtlos — ganz zu schweigen von vielen logischen Schwierigkeiten und Widersprüchen, die bei dem Versuch auftauchten, ein Modell dieser Erscheinungen zu konstruie-

Abb. 8 Typische Gestalt eines Spiralnebels



ren. Statt dessen wiesen uns die Beobachtungen direkt auf die Eigenschaft der Kernmaterie hin, große Energiemengen bis zum nächsten Ausbruch speichern zu können. Dies gilt vor allem für Kernmaterie im dichten oder supernovaartigen Zustand.

Eine andere Frage ist, ob man die Eigenschaften des Kerns erklären kann, wenn man von den bekannten Gesetzen der theoretischen Physik ausgeht. Obwohl wir nicht wissen, wie man das machen kann, so wollen wir doch die Möglichkeit nicht völlig ausschließen, ein Kernmodell der Galaxien auf der Grundlage bekannter Gesetze der theoretischen Physik zu entwickeln, das mit den beobachteten Eigenschaften im Einklang ist. Wenn es sich erweisen sollte, daß dies nicht geht, ist die Schlußfolgerung unvermeidlich, daß die Gesetze der theoretischen Physik in ihrer bekannten Form nicht anwendbar sind. Wir halten diese Möglichkeit nicht nur für sehr wahrscheinlich, sie überrascht uns auch nicht, weil die gegenwärtig angewendeten Formen der physikalischen Grundgesetze auf jenen Materieeigenschaften begründet sind, die in einem zwar breiten, aber doch begrenzten Bereich der physikalischen Bedingungen vorliegen. Unter den Bedingungen, wie sie z. B. in Kernen von Galaxien oder in quasistellaren Objekten vorherrschen, könnten unsere Gesetze versagen. Deshalb müssen sie dann präzisiert und verallgemeinert werden, damit ihre Aussagekraft steigt und sich ihr Gültigkeitsbereich erweitert.

Erörtern wir diese Frage ausführlicher: Die Gesetze der Physik sind ihrem Wesen nach Verallgemeinerungen einer bestimmten Gesamtheit von beobachteten Daten, ausgedrückt in einer möglichst einfachen und kurzen Form. Man darf jedoch nicht denken, das System unserer Gesetze der theoretischen Physik, das in bestimmten Entwicklungsstadien der Wissenschaft formuliert wurde, wäre absolut genau und abgeschlossen und könnte nicht mehr weiter verallgemeinert werden. Diese Gesetze widerspiegeln die objektive Realität nicht vollständig, sondern nur annähernd; damit können sie nicht nur, sondern müssen sogar präzisiert und verallgemeinert werden. (Das Präzisieren und Verallgemeinern der Naturgesetze ist gewöhnlich ein einheitlicher Prozeß; so ist zum Beispiel der Übergang von der klassischen Mechanik zur speziellen Relativitätstheorie sowohl eine Präzisierung der klassischen Mechanik als auch ihre Verallgemeinerung für den Fall großer Geschwindigkeiten.)

Diese Ansicht basiert auf einer genauen Analyse der Entwicklung unserer gegenwärtigen Naturwissenschaft, die eine immer größere Mannigfaltigkeit qualitativ neuer Erscheinungen entdeckt. Die

Wissenschaftler befanden sich wiederholt in der Zwangslage, die physikalischen Gesetze und Theorien zu verallgemeinern, um Meßdaten, die bestimmte Erscheinungen charakterisieren, erklären zu können.

Auf ähnliche Weise begannen auch die Astronomen, nichtstationäre Prozesse in Kernen von Galaxien und quasistellaren Objekten zu erforschen. Niemals in der Vergangenheit befaßte sich die Physik und Astronomie in derartigem Umfang mit Konzentrationen so großer Massen in verhältnismäßig kleinem Volumen. Es handelt sich um Massen in der Größenordnung von mindestens 10^{10} Sonnenmassen, konzentriert in einem Volumen, das viel kleiner ist als das Volumen irgendeines Sternhaufens. Es geht um solche Umwandlungen von Materie, bei denen sich deren Dichte millionenfach ändern und die Stärke des Gravitationsfeldes unbekannte Größenordnungen erreichen kann.

Wir haben keine Garantie und können auch gar keine haben, daß die uns bekannten Gesetze der Physik auch unter diesen Bedingungen streng gelten. Es wäre daher nicht verwunderlich, wenn die gegenwärtigen großen Schwierigkeiten bei der theoretischen Deutung einer Reihe nichtstationärer Prozesse im Lauf der Zeit in direkte Widersprüche zu den uns bekannten Gesetzen der theoretischen Physik hinüberwachsen würden.

Nichtstationarität — eine gesetzmäßige Phase der kosmogonischen Prozesse

Die Dauer der kosmogonischen Prozesse ist meist wesentlich größer als die Zeitspanne der astronomischen Beobachtungen, so daß keine unmittelbaren Veränderungen als Ergebnis dieser Prozesse bemerkt werden können. Trotzdem gibt es im Leben kosmischer Körper und ihrer Systeme auch Etappen, in denen bei bestimmten Entwicklungsprozessen neue Kräfte entstehen, die den Zustand der Körper und Systeme schnell und gründlich ändern können. Genau in einem derartigen Fall sagen wir, daß sich das Objekt in einem nichtstationären Zustand befindet. Und weil solche Ereignisse so schnell ablaufen, können wir diese Veränderungen unmittelbar beobachten (Ausbrüche von Novae, Supernovae u. a.) und evtl. Schlüsse aus sehr vielen indirekten Daten ziehen (Zerfall von Sternhaufen und Sternassoziationen, Ausbrüche von Kernen in Galaxien).

In der Geschichte der Wissenschaften gibt es ein interessantes Kuriosum: Die Astronomen, welche die Rolle nichtstationärer Objekte in der kosmischen Evolution nicht verstanden, verschlossen gewöhnlich auch gern die Augen vor Schwierigkeiten, die mit deren Deutung verbunden waren. Sie betrachteten diese Objekte als „Mißgeburten“ im Rahmen

einer allgemein gesetzmäßigen Entwicklung.

Es ist z. B. bekannt, daß Ende des vergangenen Jahrhunderts eine Hypothese verbreitet war, nach der Novae ausschließlich das Ergebnis der seltenen Erscheinung eines Zusammenstoßes zweier Sterne sind. Es wurde völlig außer acht gelassen, daß sie — wie wir heute wissen — auch das Ergebnis gesetzmäßiger Sternentwicklung sind. Der gleiche Fall wiederholte sich bei den Radiogalaxien, nur in vielleicht noch jämmerlicherer Form. Wieder hielt man die Radiogalaxien eine Zeitlang für das Ergebnis des Zusammenstoßes von zwei Galaxien, obwohl von Anfang an klar war, daß die Wahrscheinlichkeitsstatistik solchen Vorstellungen widerspricht.

Richtig ist der entgegengesetzte Standpunkt: Nichtstationäre Prozesse stellen eine gesetzmäßige Phase der kosmischen Entwicklung dar. Jedoch ist zu jedem Zeitpunkt der Anteil der kosmischen Objekte, die eine Wende ihrer Entwicklung durchmachen, gewöhnlich klein. Er ist in jedem Fall bei weitem kleiner als der Anteil der Objekte, die sich in stationärem Zustand befinden (z. B. ist die Zahl der Sterne in Assoziationen klein im Verhältnis zur Zahl der Sterne im allgemeinen Sternfeld der Galaxis). Die Erforschung der Röntgenquellen und der Pulsare in der Galaxis ließ keinen Zweifel daran, daß diese Objekte erstens überdichte Körper und zweitens nichtstationär sind. Interessant ist, daß in der Regel Nichtstationarität gerade dann auftritt bzw. nicht auszuschließen ist, wenn in einem kleinen Volumen eine verhältnismäßig große Masse existiert.

Nichtstationäre Zustände stellen gewöhnlich eine jähe Wende in der Entwicklung eines Objekts dar. Sie sind mit der Geburt neuer Körper (z. B. Sternassoziationen) oder mit dem Übergang des Objekts aus einer Klasse in eine andere verbunden (Ausbrüche von Supernovae, die zur Umwandlung des Sterns in einen Nebel führen).

Folglich eröffnet ein detailliertes Erforschen nichtstationärer Prozesse oder Übergangserscheinungen den Weg zu einem tieferen Verständnis der Entwicklung kosmischer Objekte. Bis zur Mitte der dreißiger Jahre, als man die ersten wichtigen Hinweise auf nichtstationäre Objekte erhielt, spielte die Entwicklungsidee in der Astrophysik keine überragende Rolle, obwohl die Mehrheit der Astrophysiker sehr gut verstand, daß sich ihre Objekte verändern. Heute ist es für alle Astrophysiker selbstverständlich, daß sich Sterne, Sternhaufen und Galaxien entwickeln. Dieser Zustand ist unzweifelhaft ganz wesentlich mit darauf zurückzuführen, daß man die nichtstationären kosmischen Objekte so intensiv und gründlich untersuchte.