

Über die Evolution der Galaxien*)

Von V. AMBARZUMIAN, Erewan

Die Fragen, welche hier erörtert werden sollen, gehören sozusagen zum dritten Stockwerk des Gebäudes der Astronomie. Die heutige Astronomie ist nämlich in ganz übersichtlicher Weise in drei Stockwerke eingeteilt. Das erste ist das Studium des Sonnensystems, d. h. der Sonne und des Planetensystems. Das zweite Stockwerk ist die Stellarastronomie, welche die Eigenschaften der Sterne und ihre Beziehungen im Milchstraßensystem studiert, und das dritte ist die extragalaktische Astronomie, welche den ganzen beobachtbaren kosmischen Raum umfaßt. Wir haben bereits einige wunderbare Vorträge über die Verhältnisse im ersten Stockwerk gehört. Heute begeben wir uns direkt zur dritten Etage, ohne lange in der zweiten zu verweilen.

In den letzten zwei Jahrzehnten erlebte die extragalaktische Astronomie eine stürmische Entwicklung. Viele neue Tatsachen sind durch Beobachtung festgestellt worden; neues Beobachtungsmaterial sammelt sich rasch. Gleichzeitig aber erheben sich so viele neue Fragen, daß neue Beobachtungen und theoretische Arbeiten höchst notwendig sind. Die modernen optischen Teleskope wie z. B. das große Spiegelteleskop der Sternwarte in Tautenburg und die Radioteleskope erlauben uns, Informationen über Himmelskörper zu empfangen, welche mehrere Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind.

Das Volumen des Raumes, welcher heute von den Astronomen untersucht wird, ist daher ungeheuer groß. Diesen von uns beobachteten Teil des Weltalls kann man als *astronomisches Weltall* bezeichnen. Die neuen Untersuchungsmethoden werden zweifellos die Grenzen dieses astronomischen Weltalls weiter hinauschieben.

Wenn man die Erscheinungen in dem astronomischen Weltall untersucht, so kann man zweierlei Absichten verfolgen. Einerseits können wir einzelne Körper, d. h. lokale Prozesse studieren in der Hoffnung, tiefer in die Eigenschaften und Entwicklungsgesetze dieser Körper und ihrer Systeme, z. B. der Galaxien und der Galaxienhaufen, einzudringen. Dies ist das Ziel der *extragalaktischen Astronomie*. Aber wir können auch auf Grund der Beobachtung von Erscheinungen in dem astronomischen Weltall Schlußfolgerungen über die Struktur des *ganzen* Weltalls ziehen. Dies ist der Gegenstand der *Kosmologie*. In diesem Bericht wollen wir nicht die Probleme der Kosmologie behandeln. Wir wollen hier nur einige fundamentale Fragen der extragalaktischen Astronomie diskutieren.

Bekanntlich ist der größte Teil der Materie in unserem Milchstraßensystem (unserer Galaxie) in den Sternen konzentriert. Auch in anderen Galaxien bilden die Sterne die bevorzugte Form der Materie. Zum Beispiel enthält unser Milchstraßensystem mehr als 100 Milliarden Sterne, während das interstellare Gas nur 2 oder 3% der Gesamtmasse darstellt. Unsere Nachbargalaxie M 31 in der Andromeda

hat nicht weniger als 400 Milliarden Sterne. Aber neben den großen Riesengalaxien und Überriesengalaxien gibt es auch Galaxien von mäßigem Umfang, welche von einigen hundert Millionen oder einigen Milliarden Sternen gebildet werden, und die Zwerggalaxien, welche nur aus einigen Millionen Sternen bestehen. Es gibt im Weltraum eine viel größere Zahl von Zwerggalaxien als Riesengalaxien oder Überriesengalaxien. Aber es ist wichtig, daß die Mehrzahl der Sterne, welche sich im astronomischen Weltall befinden, in der verhältnismäßig kleinen Zahl der Überriesengalaxien konzentriert sind. Wir können auch sagen, daß die Mehrzahl der Sterne in Galaxien von höchster Leuchtkraft konzentriert sind. Wenn wir bedenken, daß der größte Teil der Materie in Sternen enthalten ist, dann wird es klar, daß der größte Teil der Masse des Weltalls in diesen Überriesengalaxien eingeschlossen ist.

Um uns die Bedeutung dieser Tatsache klarzumachen, müssen wir beachten, daß die Galaxien im kosmischen Raum in Haufen und Gruppen auftreten. Als Beispiele für Galaxienhaufen können die reichen Haufen der Galaxien in Virgo und Coma Berenices dienen. Als Beispiel der armen Gruppen kann unsere *lokale Gruppe* der Galaxien dienen. Mitglieder dieser lokalen Gruppe sind z. B. unser Milchstraßensystem und der Andromedanebel. In der Nachbarschaft dieser lokalen Gruppe gibt es eine andere arme Gruppe der Galaxien um M 81, die bekannte Spiralgalaxie. Jede solche arme Gruppe enthält nicht mehr als zehn oder zwanzig Galaxien. Jede von diesen Gruppen enthält üblicherweise ein oder zwei Riesen (oder Überriesen), d. h. Galaxien, deren Masse viel größer ist als die gesamte Masse aller anderen schwächeren Galaxien der Gruppe. Ähnlich gibt es in jedem reichen Galaxienhaufen eine kleine Zahl von Überriesen mit einer Gesamtmasse, welche größer ist als die Gesamtmasse von hundert sonstigen schwachen Mitgliedern. In dieser Weise spielen die Galaxien höchster Leuchtkraft die Hauptrolle in den Haufen und Gruppen. Das bedeutet, daß, wenn wir über die Probleme der Entstehung und Entwicklung der Haufen sprechen, wir in erster Linie die Probleme der Evolution der Überriesen verstehen müssen; denn die Existenz der schwachen Mitglieder des Haufens kann man als eine sekundäre Erscheinung betrachten. Die entscheidende Frage betrifft die Entstehung und Evolution der Überriesen. In dieser Hinsicht ist die Situation hier ähnlich wie in unserem Sonnensystem. Im Sonnensystem ist der Hauptteil der Masse in einem Zentralkörper, der Sonne, vereinigt, und wenn wir die Probleme der Entstehung des Sonnensystems lösen wollen, so müssen wir zuerst die Entstehung und Evolution der Sonne betrachten.

Jetzt wollen wir uns fragen, welche Eigenschaften diese Überriesengalaxien haben. Die Beobachtungen zeigen, daß sie stets eine reguläre Form haben. Im Gegensatz dazu hat ein ziemlich großer Teil der

*) Vortrag, gehalten auf der 103. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte am 6. Oktober 1964 in Weimar.

Zwerggalaxien irreguläre Formen. Die Mehrheit der Überriesen ist von sphärischen bzw. elliptischen Formen oder linsenförmig, auch Spiralformen sind nicht selten. Als ein Beispiel der spiralförmigen Überriesen kann der Andromedanebel M 31 gelten. Eine wichtige Eigenschaft der Überriesengalaxien ist die *Anwesenheit eines Kernes* in jeder solchen Galaxie. Jeder solche Kern ist eine zentrale Verdichtung, welche relativ kleine Dimensionen, aber eine große Konzentration der Sterne hat. Die Konzentration der Sterne in einigen Kernen ist vieltausendmal größer als die mittlere Sternkonzentration in den übrigen Teilen derselben Galaxie. Eine andere Situation haben wir im Falle der Galaxien von schwacher Leuchtkraft; viele solche Galaxien haben keinen Kern.

Bis in die letzten Jahre hat man allgemein angenommen, daß die Galaxienkerne Sternsysteme sind, welche nur aus Sternen und vielleicht etwas Gas bestehen. Die Sterndynamik zeigt, daß die Existenz eines dichten und ziemlich stabilen Sternsystems in der Mitte einer Galaxie durchaus möglich ist. In vielen Fällen sind die Durchmesser der Kerne ungewöhnlich klein im Verhältnis zu den Durchmessern der zugehörigen Galaxien. Zum Beispiel hat WALTER BAADE gezeigt, daß der Kern von M 31 einen Durchmesser der Größenordnung von 15 Lichtjahren hat, während der ganze Durchmesser von M 31 zehntausendmal größer ist und etwa 150000 Lichtjahre beträgt. Wir wissen, daß 1952 WALTER BAADE und RUDOLF MINKOWSKI gezeigt haben, daß einige mit Radioteleskopen beobachtete diskrete Radioquellen mit optisch beobachtbaren Galaxien zusammenfallen. So wurde z. B. die Radioquelle im Cygnus, die nach der Intensität der beobachteten Radiostrahlung als zweitstärkste bekannt ist, mit einer optisch beobachtbaren Galaxie im Cygnus identifiziert. Diese Radiogalaxie bezeichnen wir jetzt als Cygnus A. Es ist interessant, daß in den *optischen Frequenzen* diese Galaxie so schwach ist, daß man am Himmel mehr als hunderttausend Galaxien finden kann, welche *optisch heller sind als Cygnus A*. Aus diesem Beispiel kann man schließen, daß das Verhältnis der Intensitäten von optischer und Radiostrahlung bei verschiedenen Galaxien ganz verschieden ist. Die Radiogalaxie Cygnus A befindet sich in einer Entfernung von 600 Millionen Lichtjahren von uns. Viele andere Radiogalaxien, z. B. Virgo A, Centaurus A, sind viel näher bei uns, aber sie geben schwächere Radiostrahlung. Das bedeutet, daß ihre „Radioleuchtkraft“ viel niedriger ist als die von Cygnus A. Die Beobachtungen zeigen, daß die Radiostrahlung jeder Radiogalaxie herkommt von einer oder zwei großen Wolken mit Teilchen sehr hoher Energien (relativistische Elektronen und Protonen), welche sich in der optischen Galaxie oder in ihrer Nachbarschaft befinden.

Unmittelbar nach der Entdeckung der Radiogalaxien wurde eine Theorie entwickelt, welche ihre Erscheinungen erklären sollte. Nach dieser Theorie ist jede Radiogalaxie das Resultat eines zufälligen Zusammenstoßes zweier gewöhnlicher Galaxien. Die Radiostrahlung entsteht durch verschiedene komplizierte physikalische Prozesse, welche während des Zusammenstoßes zur Entstehung einer großen Anzahl relativistischer Teilchen führen. Doch ist diese Theorie bald nach ihrer Entstehung mancherlei unüberwindlichen Schwierigkeiten begegnet. Es wurde ge-

zeigt, daß alle bekannten Radiogalaxien Überriesen sind. Gewöhnlich sind sie die hellsten Mitglieder der Galaxienhaufen, in welchen sie sich befinden. Wir wissen aber, daß die Zahl der Zwerggalaxien viel größer ist als die Zahl der Riesen und Überriesen. Daher muß die Zahl der Zusammenstöße zwischen den Zwergen viel größer sein, auch wenn man ihre kleinen Querschnitte in Rechnung stellt. Es war ganz unmöglich, das Fehlen der Zwerge unter den Radiogalaxien auf Grund der Zusammenstoßtheorie zu erklären. Später wurden viele andere Tatsachen gefunden, welche der Stoßhypothese widersprechen, so daß diese Hypothese jetzt völlig aufgegeben ist.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Entstehung der radiostrahlenden Wolken in den Radiogalaxien auf *innere Ursachen* zurückzuführen. Die Theorie zeigt, daß Wolken von energiereichen Teilchen ihre Energie durch die Ausstrahlung in kosmischen Magnetfeldern in einem relativ kurzen Zeitintervall verlieren müssen; damit würde ihre Radiohelligkeit schwächer werden. Die Lebenszeit dieser Wolken kann höchstens von der Größenordnung einiger Millionen Jahre sein, ein Zeitintervall, welches sehr klein ist im Vergleich zu der Lebensdauer der Galaxien selbst. Dies bedeutet, daß der Zustand der Radiogalaxien eine kurze Entwicklungsstufe im Leben der entsprechenden Galaxien ist. Da aber die Radiogalaxien zu der Klasse der Galaxien von höchster optischer Leuchtkraft gehören, so erscheint es notwendig, zu postulieren, daß ein großer Teil solcher Galaxien (wenn nicht alle) durch diese Phase der Radiogalaxien hindurchgeht. Es ist auch nicht ausgeschlossen, daß wir es mit einer wiederkehrenden Erscheinung im Leben eines Teils der Überriesengalaxien zu tun haben.

Wo ist nun die Quelle der Wolken energiereicher Teilchen in den Radiogalaxien? Es ist leicht zu zeigen, daß diese Wolken nicht das Resultat der Aktivität der einzelnen Sterne sein können. Dafür hat ein einzelner Stern nicht genügend Energie. Diese und viele andere Tatsachen führten uns zur Vorstellung, daß die Wolken energiereicher Teilchen von den Galaxienkernen ausgeworfen worden sind infolge von Explosionen, welche in den Kernen stattfinden. Man muß annehmen, daß *im Kerne jeder Radiogalaxie eine Explosion stattgefunden hat*, welche mit der Befreiung einer ungeheuren Menge Energie von der Größenordnung 10^{58} bis 10^{60} erg verknüpft ist. In den letzten Jahren wurden in Radiogalaxien und in anderen Galaxien auch andere Erscheinungen gefunden, welche sich mit dieser Vorstellung über Explosionen in den Kernen von Galaxien in voller Übereinstimmung befinden. Diese Vorstellung ist daher jetzt allgemein anerkannt.

Ist die Umwandlung einer gewöhnlichen Galaxie in eine Radiogalaxie die einzig mögliche Konsequenz der Explosionen, welche in den Kernen der Galaxien stattfinden? Die Antwort muß negativ sein. Es sind Explosionen in den Kernen von Galaxien möglich, welche zu ganz anderen Veränderungen führen. Schon in unserem Vortrag auf der Solvay-Konferenz von 1958 haben wir die Entstehung der ganz ungewöhnlichen irregulären Galaxie M 82 diskutiert. Diese Galaxie ist ein Mitglied der oben erwähnten M 81-Gruppe. Wir haben auf Grund von dynamischen Betrachtungen gezeigt, daß das irreguläre Objekt M 82 ein sehr junges Sternensystem sein muß. In den letzten

2 Jahren haben SANDAGE und LYNDS diese Galaxie näher untersucht. In ihren äußeren Teilen haben sie ein großes System von Filamenten gefunden, welche aus Gasen bestehen. Die Emissionslinien des Wasserstoffs im Spektrum dieser Filamente sind relativ zu ihrer normalen Lage stark verschoben. Und wenn man die Größe der Verschiebungen eingehend analysiert, so kommt man zu dem eindeutigen Schluß, daß alle Filamente vor rund $1\frac{1}{2}$ Millionen Jahren aus dem Zentralgebiet der Galaxie ausgestoßen worden sind. Man muß daher annehmen, daß vor $1\frac{1}{2}$ Millionen Jahren eine *Explosion im Kern der Galaxie M 82 stattgefunden* hat. Bekanntlich enthalten viele Galaxien beträchtliche Massen von interstellarem Gas, z. B. bilden in unserem Milchstraßensystem die interstellaren Gaswolken 2 bis 3% der Gesamtmasse. In der Überriesengalaxie M 31 bildet die Gaskomponente rund 1% der Masse. Natürlich hat die Entdeckung, daß die Gasmassen in M 82 vom Zentralkern ausgestoßen wurden, die Astronomen gezwungen, die Frage nach der Entstehung der Gaskomponente (gasförmige Subsysteme) aller Galaxien in neuem Licht zu betrachten.

In diesem Zusammenhang muß man besonders bemerken, daß eine Gruppe holländischer Astronomen mit Professor J. OORT an der Spitze in den inneren Teilen unseres Milchstraßensystems systematische Expansionsbewegungen des neutralen interstellaren Wasserstoffs beobachtet hat. Die Geschwindigkeiten dieser Bewegungen sind von der Größenordnung von einigen zehn Kilometern/sec. Das macht es unwahrscheinlich, daß sie eine Folge der Explosion darstellen. Es liegt nahe anzunehmen, daß hier eine kontinuierliche Ausströmung der Materie aus dem Kern stattfindet. Eine ähnliche ruhige Ausströmungserscheinung wurde in M 31 von G. MÜNCH beobachtet. Infolgedessen kann man schließen, daß die aus Galaxiekernen kommenden Gasmassen eine beträchtliche Rolle in der Entstehung der Gaskomponente der Galaxie spielen. Es ist sehr wahrscheinlich, daß dies die Hauptquelle der Gasmassen in Galaxien ist. Dabei kommen die Explosionen und die kontinuierliche, ruhige Ausströmung gleichermaßen in Betracht.

Nunmehr wollen wir über eine wichtige Eigenschaft der Struktur der Galaxien und speziell unseres Milchstraßensystems sprechen. Diese Eigenschaft war durch die Arbeiten von BOTTLINGER, LINDBLAD, KUKARKIN und BAADE bekanntgeworden. Sie besteht darin, daß wir jede Galaxie als eine Superposition von mehreren einander durchdringenden Subsystemen betrachten können. Dabei kann die physikalische Natur der Sternpopulationen der verschiedenen Subsysteme sehr verschieden sein. Zum Beispiel besteht unser Milchstraßensystem unter anderem aus folgenden Subsystemen: den Spiralarmen, der Scheibe und einem sphärischen Halo. Die Entwicklung jedes dieser Subsysteme geht in Übereinstimmung mit den Gesetzen der Sterndynamik gewissermaßen unabhängig von den anderen vor sich. Die physikalischen Eigenschaften der Einzelsterne in den verschiedenen Subsystemen sind auch verschieden. Es ist z. B. bekannt, daß die Population der Spiralarme viel jünger ist als die Population des sphärischen Halos. Die moderne Stellarastronomie gibt viele Gründe für die Vorstellung, daß nicht nur die Entwicklung jedes dieser Untersysteme, sondern auch seine Entstehung gewissermaßen unabhängig von den anderen erfolgt ist. Jetzt fragen wir:

Wie könnten diese Subsysteme entstehen? Betrachten wir z. B. diese Frage für die Spiralarme. Bekanntlich bestehen die Spiralarme aus zwei Komponenten: 1. junge Sterne in Sternassoziationen und Sternhaufen und 2. Gaswolken. Aber wir sind schon zu dem Schluß gekommen, daß die Gaswolken wahrscheinlich aus der ausgestoßenen Kernmaterie entstanden sind. Dann liegt der Gedanke nahe, daß die Sternpopulation der Spiralarme ebenfalls aus Kernmaterie entstanden ist. Die Mehrzahl der Astrophysiker ist der Meinung, daß die jungen Sterne der Sternassoziationen aus den Gaswolken der Spiralarme entstehen. Es scheint mir, daß diese Ansicht auf sehr schwachen Füßen steht. Aber zweifellos besteht ein genetischer Zusammenhang zwischen der Sternbevölkerung der Spiralarme und den Gaswolken. Daher kann man unabhängig von der Art dieses Zusammenhangs schließen, daß die Sternbevölkerung aus der Materie, welche vom Kern ausgestoßen wurde, entstanden ist. Wenn wir zur Population des sphärischen Halos übergehen, so dürfen wir nicht vergessen, daß diese Sterne sich in sehr langgestreckten Bahnen bewegen. Im Perigalaktikum passieren sie also sehr nahe am Kern. Diese Eigenschaft haben z. B. die Bahnen der Kugelhaufen, welche sich als einheitliche Systeme in unserer Milchstraße bewegen. Aber gerade eine solche Eigenschaft müssen die Bahnen der Körper haben, welche vom Kern der Galaxie ausgestoßen wurden. Wir sehen, daß wir auch hier einige Gründe haben, die für die Entstehung dieser Population aus der Kernmaterie sprechen. Endlich bilden die großen Wolken energiereicher Teilchen (das relativistische Plasma) in Radiogalaxien eine Art von Subsystemen, welche — wie wir schon gesehen haben — durch die Kernexplosionen entstehen.

Unsere obigen Beobachtungen führen zu folgendem Bild der Entstehung der verschiedenen Teile jeder Galaxie, welche eine Superposition von verschiedenen Subsystemen darstellt: Der Kern stößt von Zeit zu Zeit große Mengen von Materie aus, welche, abhängig von den Verhältnissen und von den Anfangsgeschwindigkeiten, verschiedene Subsysteme bildet. Diese Subsysteme bestehen entweder aus Sternen oder aus Gaswolken. Auf solche Weise erzeugt der Kern in seiner Umgebung eine Galaxie. Von diesem Standpunkt aus ist der Kern ein grundlegender Faktor in der Entwicklung der Galaxie. Wenn dieser Standpunkt richtig ist, so muß man annehmen, daß in den frühesten Phasen der Entwicklung einer Galaxie diese nur ein isolierter Kern ohne Sternbevölkerung in der Umgebung war. So kommen wir zu der Vorstellung einer Möglichkeit isolierter Kerne. Die Frage ist, inwieweit diese Vorstellung den Beobachtungstatsachen entspricht. In den folgenden Abschnitten wollen wir uns kurz mit der Natur der Kerne, mit den Formen der Kernaktivität und mit der Existenz isolierter Kerne befassen.

Über die Natur der Galaxienkerne. Bis zu den letzten Jahren war man überzeugt, daß jeder Galaxienkern fast ausschließlich aus Sternen bestehe. Die Spektren und Farben der Kerne zeigen, daß die Sterne, welche sich im Kern befinden, ähnliche physikalische Eigenschaften haben wie die Sterne in der unmittelbaren Umgebung des Kerns. Man kann auch sagen, daß bei den meisten Galaxien die Leuchtkraft der Kerne durch ihre Sterne bedingt ist. Aber man kann fragen, ob die Sterne die einzige Komponente der

Galaxienkerne bilden. Wieweit ist die Existenz von anderen, nichtstellaren Objekten in den Kernen der Galaxien ausgeschlossen? In diesem Zusammenhang muß man sich an eine Arbeit von SEYFERT erinnern, welche schon 1942 erschienen ist. SEYFERT bemerkte, daß einige Galaxien relativ helle Kerne haben. Während bei manchen Galaxien die Helligkeit der Kerne kleiner als 1% der Gesamthelligkeit der Galaxie ist und in einigen Fällen sogar kleiner als 0,1%, erreichen in den Seyfert-Galaxien die relativen Kernhelligkeiten Werte, welche viel größer als 10% sind. In den Spektren dieser Galaxien hat SEYFERT sehr breite und in einigen Fällen aufgespaltene Emissionslinien beobachtet. Natürlich können diese Linien nicht von Sternen herrühren. Offenbar enthalten diese Kerne nicht nur eine Sternbevölkerung, sondern auch ausgedehnte Gaswolken, welche sich mit großen Geschwindigkeiten bewegen. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Wolken müssen von der Größenordnung einiger tausend Kilometer/sec sein. Aber das bedeutet, daß sie nicht im Kern bleiben können und ihn verlassen müssen. Die Zeit, welche notwendig ist, damit eine Gaswolke den Kern verläßt, beträgt bei solchen Geschwindigkeiten etwa 10^4 bis 10^5 Jahre. Diese Zeitspannen sind sehr kurz. Die einzige Möglichkeit besteht darin, daß diese Gaswolken in der Gegenwart unmittelbar im Kern entstehen und ihn dann verlassen. Da die Massen der einzelnen Wolken von der Größenordnung 10^2 bis 10^3 Sonnenmassen sind, können sie nicht von einzelnen Sternen im Kern ausgestoßen sein. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als anzunehmen, daß es in den Kernen einen anderen Faktor gibt, welcher die Entstehung solcher Wolken verursacht. In dieser Weise werden wir zu der Idee geführt, daß in den Kernen sehr massive (übermassive) nichtstellare Körper existieren, welche während ihrer Aktivität die Gaswolken mit großen Geschwindigkeiten ausstoßen können.

Dynamische Betrachtungen zeigen, daß man in jedem Kern nur *einen* solchen übermassiven Körper ständig haben kann. Diesen nichtstellaren Körpern muß man eine sehr große Masse von der Größenordnung 10^7 Sonnenmassen oder mehr zuschreiben. Die Bevölkerung der Galaxiekerne besteht also allgemein aus drei Komponenten: der Sternbevölkerung, den Gaswolken und einem nichtstellaren übermassiven Körper.

Wenn wir zu den Explosionen zurückkehren, welche in den Kernen stattfinden und welche mit der Befreiung von ungeheuren Mengen von Energie und Masse verknüpft sind, so können wir jetzt diese Prozesse als eine Äußerung der Aktivität der in den Kernen befindlichen nichtstellaren Körper betrachten. Da die Aktivität der Galaxienkerne von diesen nichtstellaren Körpern verursacht wird, so können wir drei mögliche Zustände der Kerne unterscheiden: 1. der normale, ruhige Zustand, in dem es nur einen ruhigen kontinuierlichen Ausfluß der Materie aus dem nichtstellaren Körper gibt, 2. der angeregte Zustand, in welchem sich z.B. die Seyfert-Galaxien befinden, und zuletzt 3. der Explosionszustand. Durch eine solche Explosion sind z.B. die Galaxien vom M 82-Typus mit neugeborenen Filamentsystemen durchzogen.

Die kompakten Galaxien. Wir haben schon gezeigt, daß die oben entwickelten Vorstellungen zu dem Schluß führen, daß das früheste Stadium im Leben

einer Riesengalaxie ein isolierter Kern ohne umgebende Subsysteme von Sternen sein muß. In dieser Hinsicht ist die Entdeckung ZWICKYs von einigen hundert Objekten, welche er „Kompakte Galaxien“ genannt hat, von großer Wichtigkeit. Auf den astronomischen Aufnahmen geben diese Galaxien fast sternähnliche Bilder. Viele solche kompakte Galaxien bestehen im wesentlichen nur aus einem Kern. Einige von ihnen haben Spektren mit Emissionslinien. Das bedeutet die Existenz interstellarer Gasmassen in diesen Galaxien. Andere haben nur Absorptionslinien. Daraus können wir schließen, daß, während sich ein Teil der kompakten Galaxien in einem angeregten Zustand befindet, die anderen ruhig sind. Natürlich muß man noch zeigen, daß in der Tat die Entwicklung der kompakten Galaxien auf Bildung einer normalen Galaxie hinführt. Aber die Existenz solcher Galaxien ist schon ein neuer Beweis für die Unabhängigkeit der Kerne von den übrigen Teilen der Galaxien.

Besonders bemerkenswert sind die 1963 entdeckten quasistellaren Radioquellen, welche auf den Aufnahmen von Sternen nicht unterscheidbar sind. Nur die große Rotverschiebung der Spektrallinien zeigt, daß diese Quellen sich in ungeheuren Entfernungen von uns befinden. Die optische Leuchtkraft dieser quasistellaren Objekte ist einige zehnmal größer als die Leuchtkraft der hellsten Überriesengalaxien. Die beobachteten Helligkeitsveränderungen zeigen, daß die Durchmesser dieser Quellen kleiner sind als ein Lichtjahr. Die außerordentlich große Leuchtkraft zeigt, daß diese Objekte sich in einem Explosionszustand befinden. Vielleicht kann man annehmen, daß hier gerade die oben postulierten nichtstellaren Körper sich im Explosionszustand befinden. Die Anwesenheit der Emissionslinien spricht dafür, daß während der Explosion Gasmassen von der Größenordnung 10^7 Sonnenmassen ausgestoßen wurden. Es scheint, daß in unserem Bild der Evolution der Galaxien diese quasistellaren Objekte ihren Platz im Anfangsstadium finden müssen. Aber es wird besser sein, weitere Beobachtungsergebnisse abzuwarten.

Das oben beschriebene Bild der Evolution widerspricht den Vorstellungen, welche unter den Astronomen bis in die letzte Zeit verbreitet waren. Nach den älteren Vorstellungen stellt sich die Evolution der Galaxien als Kondensationsprozeß einer protogalaktischen Wolke dar. Aber die neuen Beobachtungen zeigen, daß die entgegengesetzte Richtung der Evolution viel wahrscheinlicher ist: Die Beobachtungen zeigen unmittelbar, daß in Galaxien die Explosions- und Ausstoßungsprozesse sehr häufig sind. Nirgends sehen wir Kondensationsprozesse, nirgends sehen wir die erwarteten ursprünglichen gasförmigen verdünnten Protogalaxien. Die mathematische Beschreibung der oben behandelten explosiven Prozesse und Expansionsphänomene kann nur auf der Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie aufgebaut werden. Wir erinnern uns hier an die Ideen von PASCUAL JORDAN aus den Jahren 1947—1955. JORDAN hat selbst die Sternentstehungsprozesse diskutiert; aber es ist möglich, daß seine Ideen besser anwendbar sind auf die Entstehung der Galaxien.

In den letzten Monaten hat der junge sowjetische Physiker IGOR NOVIKOV in einer Arbeit gezeigt, daß in einem expandierenden Friedman-Universum die Verzögerung der Explosion in einigen Punkten mög-

lich ist. Diese verzögerten Explosionen können nach NOVIKOV zur Entstehung der Galaxien führen. Diese Ideen sind sehr interessant und verdienen weitere Entwicklung.

Alles, was hier dargestellt wurde, entspringt aus den Beobachtungen und ist ein Resultat der Gegenüberstellung und Vergleichung der zahllosen Beobachtungstatsachen. Aber für die Erklärung der neugefundenen Phänomene sind weitere neue Beobachtungen mit Hilfe der mächtigen Teleskope notwendig.

In wunderbarer Weise erweist sich die Natur immer als viel komplizierter und viel ungewöhnlicher,

als wir es uns vorstellen konnten. Im Falle der Galaxien zwingt uns die Natur, sie zu erkennen, wie sie selbst ist. Wir sehen uns gezwungen, unsere vorgefaßten, alten Ideen zu verlassen und neue Vorstellungen zu entwickeln. Vielleicht ist dieses Beispiel eine gute Illustration zu der Ansicht, daß die äußere Welt eine von unserer Vernunft unabhängige Existenz hat.

*Byurakan Astrophysical Observatory, Armenia,
USSR*

Eingegangen am 11. April 1965