Der Kosmos der Galaxien

Autor(en): **Wild, Paul**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **6 (1961)**

Heft 74

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-900311

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

ORION
Mitteilungen der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Bulletin de la Société Astronomique de Suisse

OKTOBER – DEZEMBER 1961 **No 74**
4. Heft von Band VI – 4e fascicule du Tome VI

DER KOSMOS DER GALAXIEN [1]

Von Paul Wild, Bern

Es ist Ihnen allen geläufig, dass unsere Sonne als ein unscheinbarer Stern in ein gewaltiges, linsenförmiges Gebilde eingefügt ist, das etwa hundert Milliarden Sonnen enthalten mag und das wir von innen heraus als Milchstrassenband über den Himmel hin projiziert sehen. Sie wissen auch, dass diese unsere Galaxis wieder nur eines von unzähligen Sternsystemen gleichen Ranges ist, die uns den Anblick mehr oder weniger regelmässiger, schwacher Nebelflecke bieten. Einige wenige davon kennen Sie aus eigener Anschauung: den grossen Andromedanebel, dem unsere Milchstrasse in vielen Stücken gleicht; die üppige offene Spirale M 33 im Dreieck; den herrlichen Wirbelnebel M 51 in den Jagdhunden. Und am Südhimmel würden Sie die glanzvolle Sternfülle der beiden nächsten Galaxien bewundern: der Magellanschen Wolken. Die unermüdlichen Himmelsdurchmusterer des ausgehenden 18. und des 19. Jahrhunderts trugen in Katalogen Tausende von mühsam visuell erspähten Nebelflecken zusammen; aber erst die Photographie enthüllte die wachsenden Legionen immer schwächerer, kleinerer, fernerer Gebilde und zugleich die Struktur und Zusammensetzung der näheren. Edwin Hubble von der Mt. Wilson-Sternwarte war als erster

[1]) Vortrag, gehalten am 7. Mai 1961 anlässlich der Generalversammlung der SAG in Luzern.

anfangs der 1930er Jahre in der Lage, das «Reich der Nebel» zu beschreiben. Sein faszinierendes Buch wird immer ein Glanzstück der astronomischen Literatur bleiben. Das Reich der Nebel ist das beobachtbare Weltall schlechthin, und Hubble hat wohl aus dieser Tatsache seine beinahe feierliche Autorität geschöpft. Ob nun freilich das, was wir sehen können, ein beträchtlicher und typischer Teil des ganzen Universums überhaupt sei oder nur ein bedeutungsloser Winkel mit zufälligen Eigenschaften, die weit von denen des wirklichen Alls abweichen, das weiss vorläufig niemand zu sagen.

Unter dem Kosmos soll hier nicht etwas Räumliches verstanden werden, geschweige denn ein Gebiet, das je erobert und besetzt werden könnte, sondern, nach der ursprünglichen, abstrakteren Wortbedeutung die der Schöpfung innewohnende Ordnung. Wir wollen uns vor allem mit der räumlichen Anordnung der Sternsysteme im Weltall beschäftigen.

Der Idealfall, dass die Entfernung jedes beobachteten Nebels bekannt wäre, lässt sich wohl nur in der nächsten Nachbarschaft unserer Galaxis einigermassen verwirklichen, nämlich ungefähr so weit, als mit den grossen Reflektoren noch viele helle Einzelsterne verschiedener Typen zu erkennen sind. In diesen Bereich fallen einige Dutzend bis hundert Galaxien, die nicht sehr gleichmässig im Raume verteilt sind. Unsere Milchstrasse ist mit den Magellanschen Wolken, dem Andromedanebel, der Spirale im Dreieck und etlichen kleineren Geschwistern zur sogenannten Lokalen Gruppe assoziiert, und in ähnlicher Weise sind in einigem Abstand je eine Anzahl Sternsysteme z. B. um M 81 und um M 101 im Grossen Bären und um M 102 im Drachen geschart (Abbildung 1). Es ist fundamental für die ganze extragalaktische Forschung, dass es gelinge, in dieser unserer näheren Umgebung eine zuverlässige Entfernungsskala aufzustellen; denn an ihr müssen alle Kriterien für die grössten, kosmologisch interessantesten Distanzen geeicht werden, und von ihr hängt auch die Kenntnis der physikalischen Daten der Galaxien ab: ihrer Dimensionen, Rotationszeiten, Massen und Leuchtkräfte. Die Messung extragalaktischer Entfernungen bereitet immer noch grosse Schwierigkeiten, die unmöglich alle hier aufgezählt und gründlich besprochen werden können, sondern höchstens knapp angedeutet. Es müssen im Prinzip die scheinbaren Helligkeiten von Sternen in den benachbarten Galaxien verglichen werden mit ihren irgendwie gefundenen absoluten Helligkeiten. Man sah z. B. in den Cepheiden-Veränderlichen ideale Entfernungsindikatoren, weil sich für sie eine Beziehung zwischen Periodendauer und absoluter Helligkeit aufstellen liess. Leider musste man aber nach und nach einsehen, dass

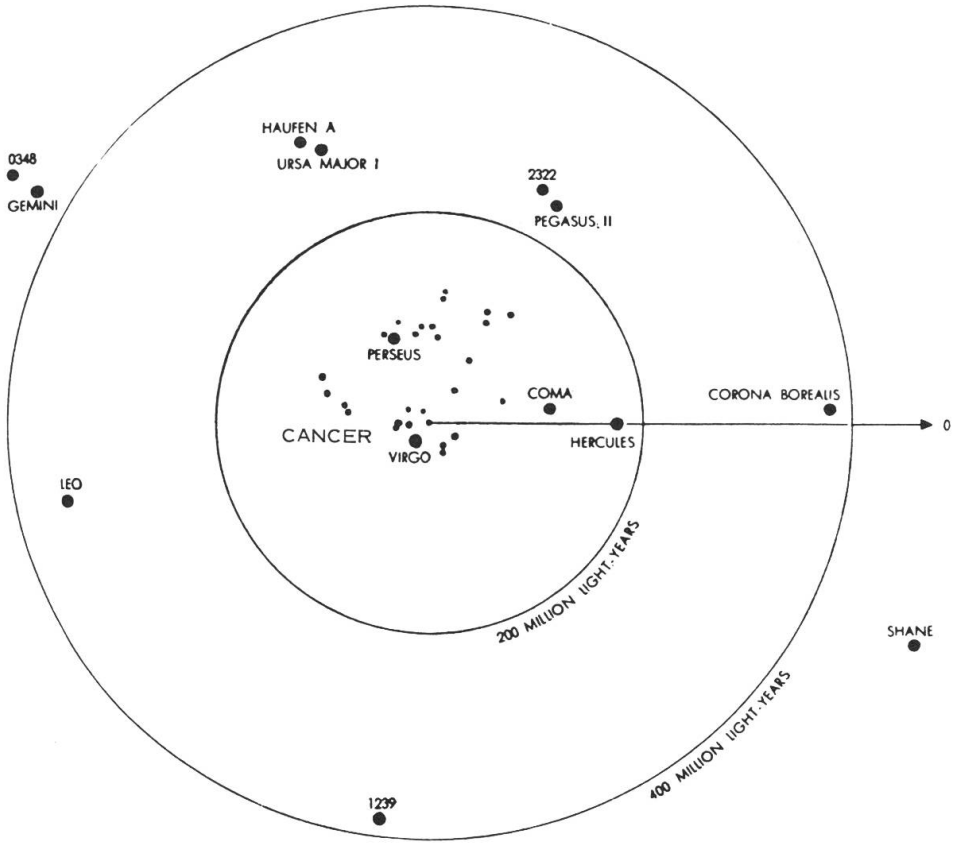

Abbildung 1 - Die nächsten Nebelhaufen. Im Zentrum die Lokale Gruppe (Scientific American, September 1956).

die grosse Streuung in diesem einst berühmten Cepheiden-Gesetz seine Anwendung (wenigstens vorläufig) fragwürdig macht. Beim neuesten Angriff haben deshalb Hubbles Nachfolger die Cepheiden überhaupt fahren lassen und an ihre Stelle die Novae gesetzt. Es scheint, dass die absoluten Helligkeiten der gewöhnlichen Novae mit ihren Verweilzeiten nahe dem Maximum korreliert sind; aber es dürfte doch einigermassen fraglich sein, ob diese empirische Beziehung, die theoretisch weniger gut fundiert ist als das Cepheiden-Gesetz, wirklich besser brauchbar sei. Neben den Novae, die nicht immer nach Wunsch aufleuchten, sind bis in etwa 30 Andromedanebel-Distanzen noch die hellsten Riesen- und Ueberriesensterne in Spiralarmen mit dem Hale-Teleskop zu sehen und auch als Entfernungsindikatoren zu brauchen. Doch ist grosse Vorsicht geboten, dass man nicht, wie es früher geschah (z. B. in M 100), leuchtende Gasnebel oder junge, enge Sternhaufen irrtümlicherweise für die hellsten Einzelsterne hält.

Es scheint gegenwärtig, dass die Verdoppelung der extragalaktischen Distanzen, die im Jahre 1952 von Baade vorgenommen wurde, innerhalb der Lokalen Gruppe ungefähr in Ordnung ist, dass aber jenseits ihrer Grenzen viel kräftiger multipliziert werden muss, mit einem noch nicht genau bekannten Faktor zwischen 4 und 10. Wahrscheinlich werden für die Bestimmung der mittleren und wirklich grossen Entfernungen auch die Supernovae zu Hilfe genommen werden, die ja im Maximum die Leuchtkraft einer ganzen Galaxie erreichen und sogar übertreffen können. Die gegenwärtig während mehrerer Jahre durchgeführte photographische Supernova-Suche, an der auch die Sternwarte Zimmerwald teilnimmt, hat u. a. zum Ziel, über die Brauchbarkeit dieser kosmischen Fanale für die Entfernungsmessung zu entscheiden. Bis jetzt erschliesst man die grossen Distanzen, in denen keine permanenten Einzelsterne mehr erkennbar sind, aus den Gesamthelligkeiten ganzer Galaxien. Das kann aber nicht individuell exakt geschehen, sondern nur statistisch, je für ein Kollektiv von Nebeln; denn die absoluten Helligkeiten der Sternsysteme sind bei weitem nicht alle gleich, nicht einmal eng um einen Mittelwert geschart, wie man einst glaubte oder hoffte. Zu den mehreren schon früher bekannten kleinen Mitgliedern der Lokalen Gruppe, wie z. B. den elliptischen Begleitern des Andromedanebels oder dem unregelmässigen IC 1613, sind in den letzten Jahrzehnten und Jahren noch zahlreiche neu entdeckte ausgesprochene Zwerggalaxien hinzugekommen und sogar intergalaktische Kugelsternhaufen. In den benachbarten Gruppen sieht es ähnlich aus, und Zwickys Vermutung erscheint sehr plausibel, dass der Raum zwischen den grossen Galaxien von Scharen kleinerer und kleinster Sternsysteme bevölkert sei.

Beschränken wir uns nun nicht mehr auf unsere nächste Umgebung, sondern untersuchen wir die scheinbare Verteilung der 1250 hellsten Galaxien, bis etwa zur 13. Grösse, so fällt uns besonders die gewaltige Konzentration in der Nähe des nördlichen Milchstrassenpols, im Gebiet der Sternbilder Jungfrau, Coma Berenices und Grosser Bär, auf. Das sind der eigentliche Virgo-Haufen, seine südliche Verlängerung in den Centaurus und der Ursa Major-Nebelschwarm, der auch irgendwie damit zusammenzuhangen scheint. Der ganze unregelmässige Komplex enthält mehrere tausend Sternsysteme aller verschiedenen Typen und Massen. Einige der hellsten sind Ihnen gut bekannt: z. B. M 104 mit der wunderschönen Absorptionskante, und der elliptische Nebel M 87, umgeben von mehreren hundert Kugelsternhaufen. Eine ebenso langgestreckte, aber nicht ganz so auffällige Ansammlung von Galaxien zieht

sich von der Andromeda über Dreieck, Fische, Walfisch, Sculptor und den Südpol der Milchstrasse hin. Einige Astronomen glauben, dass das Virgo- und das Sculptorband nicht bloss zufällig sich ungefähr zu einem Grosskreis am Himmel ergänzen, sondern dass sie zusammen eine Art Milchstrasse von Milchstrassen bilden, die Projektion einer stark abgeplatteten Lokalen Supergalaxis, der auch die Lokale Gruppe angehöre (fast am Rande freilich), und deren Zentrum in der Nähe des Virgohaufens zu suchen wäre. Ob diese Vorstellung zutrifft, ist nicht leicht zu entscheiden, einmal weil die lichtverschluckenden Dunkelwolken unserer eigenen Milchstrasse bis in beträchtliche Breiten die extragalaktischen Nebel für uns auslöschen, und zum andern, weil uns von unserem Standort innerhalb der Lokalen Supergalaxis der Ueberblick über sie fehlt, zum mindesten solange die Entfernungsskala noch nicht zuverlässig in Ordnung ist.

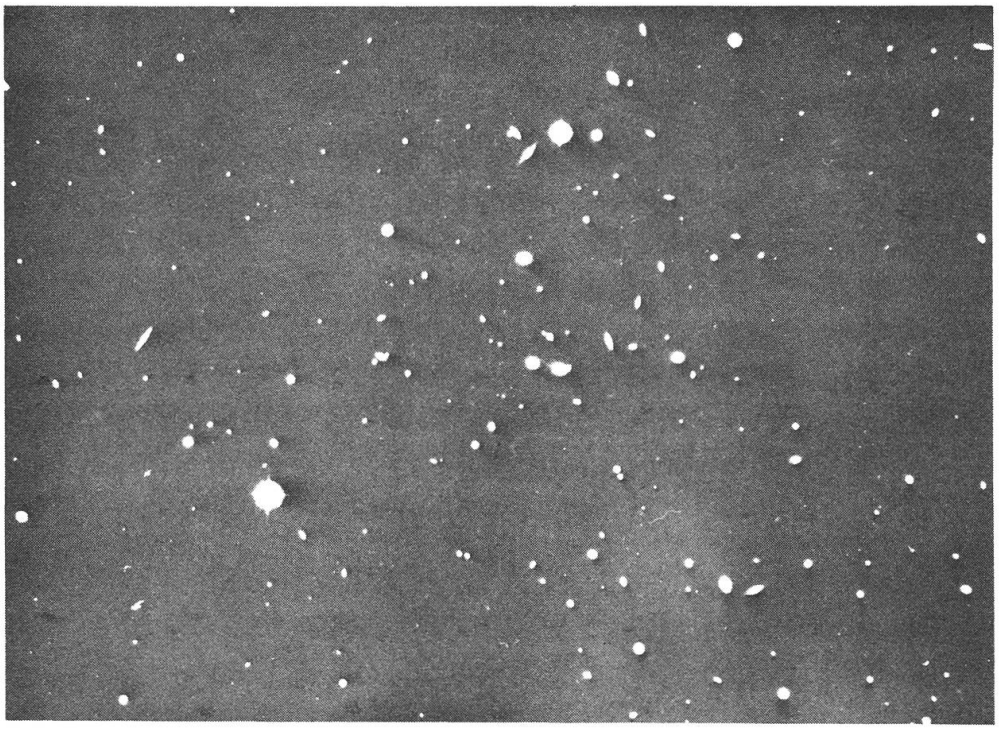

Abbildung 2 - Der Corona Borealis-Haufen (Zentralgebiet), photographiert mit dem Hale-Teleskop. Nur was ganz kreisrund erscheint, sind Vordergrundsterne, alles andere (die Mehrzahl der Objekte) Galaxien. (Zwicky, Proceedings of the 3rd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability; p. 122.)

Seit vielen Jahrzehnten sind etliche fernere Nebelhaufen von verschiedener Ausdehnung und Struktur bekannt und spielen z. T. eine grosse Rolle in der empirischen Kosmologie. Besonders gut untersucht sind bis jetzt die regelmässigen, sphärischen Haufen mit starker zentraler Verdichtung (Abbildung 1). Relativ nahe Haufen dieses Typs liegen z. B. in der Hydra, im Pegasus, im Krebs und im Perseus; die Prunkstücke sind indessen der Coma- und der Corona Borealis-Haufen (Abbildung 2). Erst die Schmidt-Kameras haben den ganzen Reichtum und die wahre Ausdehnung grosser Nebelhaufen offenbart; die grossen Reflektoren mit ihrem engen Gesichtsfeld eignen sich wenig dazu. Die elementarste Untersuchung eines Nebelhaufens auf einer Schmidt-Aufnahme geht etwa so vor sich, dass man auf einer überdeckten Glasplatte, welcher ein enges Maschennetz fein aufkopiert ist, die Galaxien mit Tinte markiert, unter einer Binokularlupe, und diese Punkte nachher in jedem Teilfeldchen auszählt. Schliesslich kann man Isoplethen zeichnen, das sind Kurven gleicher Nebelzahlen. Aus ihrem Verlauf lässt sich die scheinbare Ausdehnung des Haufens ermitteln, und an der niedrigsten ringsum laufenden Isoplethe kann die ungefähre Zahl der sogenannten Feldnebel abgelesen werden, d. h. der Vorder- und Hintergrund-Objekte, die von allen Zählungen im Haufen zu subtrahieren sind. Auf diese Weise hat Zwicky z. B. auf Platten der Grossen Palomar-Schmidt den scheinbaren Durchmesser des Coma-Haufens zu vollen 12° und die Zahl der erkennbaren Mitglieder zu fast 11 000 bestimmt. An allen untersuchten sphärischen Haufen wurden zwei bedeutsame Feststellungen gemacht: erstens, dass die helleren, massiveren Nebel weit stärker gegen die Mitte konzentriert sind und die äusseren Gebiete fast ganz den schwächeren überlassen, dass also eine merkliche Trennung nach Massen eingetreten ist; und zweitens, dass die Verteilung der helleren, zentraler gelegenen Nebel fast genau so aussieht wie die auf einen Hintergrund projizierte Verteilung der Moleküle in einer isothermen Gaskugel, die der eigenen Gravitation überlassen ist. Ob man allein auf Grund dieser beiden Erscheinungen – der Trennung der Massen und des Aufbaus nach einer isothermen Gaskugel – die regelmässigen Haufen für stabile Gebilde halten darf, ist fraglich; es steht überhaupt keine statistische Mechanik zur Behandlung endlich grosser gravitierender Systeme zur Verfügung. Plausibel scheint es indessen, dass ein Nebelhaufen, falls er bei seiner Entstehung ungeordnet und zufällig abgegrenzt war, sehr viel Zeit gebraucht haben muss, um in den heute beobachteten geordneten Zustand zu gelangen. Dazu müssen nämlich zahlreiche nahe Begegnungen unter seinen Mitgliedern stattgefunden haben. Aus den Durchmessern

grosser Haufen (etwa 40 Millionen Lichtjahre) und den individuellen Nebelgeschwindigkeiten (1000 - 3000 km/sec) ist darum zu schliessen, dass die regelmässigen Nebelhaufen entweder Billionen Jahre alt sein müssen statt der heute angenommenen Milliarden, oder aber dass sie unter ganz speziellen Bedingungen schon in ihrer heutigen Struktur entstanden sind (wenn auch vielleicht auf engerem Raume).

Es ist nach und nach wahrscheinlich geworden, dass die meisten Galaxien zu Haufen gehören. Die Isoplethen der Nebelzählungen, bis zu allen möglichen Grenzhelligkeiten, verlaufen fast nirgends ruhig; in keiner Richtung sieht man eine bloss zufällig verteilte Menge von einzelnen Nebeln. Das Bild eines beliebigen, einigermassen reichen Nebelfeldes, abseits der verfälschenden Dunkelwolken unserer Milchstrasse, entsteht durch Uebereinanderprojizieren vieler näherer und fernerer Haufen von verschiedener Grösse und Struktur, samt einem unbekannten Anteil von «nicht organisierten» Galaxien, «Einzelmitgliedern» des Kosmos. Sind deutliche Vordergrundhaufen da, so fallen dem Betrachter einer Zählplatte die Abweichungen von einer zufälligen Verteilung sofort auf. Oefter aber werden sie erst durch eine statistische Analyse zutage gefördert. Man zählt z. B. die Galaxien mit mehreren verschiedenen Netzeinteilungen des ganzen Feldes aus, von engen Maschen zu roher Vierteilung, und vergleicht dann für jedes Netz die Streuung der registrierten Anzahlen mit der theoretisch zu erwartenden Streuung einer rein zufälligen Verteilung ohne Gravitationseinfluss. Falls Haufen von einem bestimmten scheinbaren Durchmesser offen oder versteckt dominieren, so muss gerade bei jener Maschenweite die beobachtete Verteilung am meisten von der zufälligen abweichen. Ist aber die Verteilung im grossen viel unregelmässiger als im kleinen, so muss man entweder annehmen, dass Haufen sich in einem Teil des Feldes häufen, oder dass Absorption den andern Teil schwächt. Hier scheiden sich die Geister, wie an fast allen Kreuzwegen der Wissenschaft.

Ob es Haufen von Haufen gebe, ist eine hochinteressante Streitfrage. Wenn einst das nötige Beobachtungsmaterial gesammelt sein wird, besonders Zwickys Katalog von 35 000 Nebeln und 10 000 Haufen fertiggestellt, an dem auch die Berner Sternwarte mitarbeitet und dessen erster Band diesen Sommer erscheinen wird, dann dürfte es nicht mehr sehr schwierig sein, die soeben kurz besprochenen statistischen Analysen auch auf Haufen anstelle von Einzelnebeln anzuwenden. Die vorläufig vorhandenen Daten genügen kaum, und rein theoretische Argumente, wie sie Zwicky z. B. gegen die Existenz von Ueberhaufen

vorbringt, setzen immer schon Annahmen über die Struktur des ganzen Universums voraus.

Das Problem der intergalaktischen Absorption ist etwas traktabler. Die beste Evidenz ist vielleicht, dass durch Vordergrundhaufen und ihre Umgebung hindurch nicht nur weniger Nebel, sondern sogar weniger ferne Haufen gezählt werden als anderswo. Auch dieser Befund bedarf noch sehr der Verstärkung, aber dass intergalaktische Materie überhaupt existiert, ist meines Erachtens zum vornherein wahrscheinlich. Es ist nicht einzusehen, warum Gas und Staub nur als inter*stellare* Materie in Sternsystemen vorkommen sollten und nicht auch zwischen den Galaxien. Hätten sie hier auch ursprünglich gefehlt, so hätten doch, zumindest in den dichteren Nebelhaufen, Kollisionen und nahe Begegnungen von Galaxien schon längst für Besiedlung des Vakuums gesorgt. Wenn sogar die Gezeitenwirkungen leuchtende Brücken von Sternen herauszuziehen vermögen (Abbildung 3), wie dies offenbar an manchen Sternsystemen geschehen sein muss, um wieviel leichter lassen sich da nicht Gas und Staub in den intergalaktischen Raum hinaus fegen! Wie dicht nun aber die Materie zwischen den normalen Sternsystemen alles in allem lagere, aufsummiert von Zwerggalaxien und Sternhaufen bis hinunter zum Gas, darüber gehen die Meinungen der Astronomen noch weit auseinander.

Es scheint mir angebracht, von hier aus einen Seitenblick zu tun auf die Bestimmung der Massen von Nebeln und Nebelhaufen. Fast alle einigermassen zuverlässig bekannten Massen einzelner Galaxien sind Rotationsmassen von Spiralnebeln. Die Kreisbahn-Geschwindigkeit irgend eines Objektes an der Peripherie eines rotierenden Sternsystems ist durch das dritte Keplersche Gesetz gegeben und hängt ab vom Radius und von der Gesamtmasse des Systems. Umgekehrt kann also die Masse erschlossen werden aus dem Radius (dessen Kenntnis diejenige der Entfernung voraussetzt) und der peripheren Rotationsgeschwindigkeit (welche man spektroskopisch messen kann an näheren Spiralnebeln, die von der Kante gesehen werden). Auf diese Weise hat man in unserer Umgebung wiederholt gefunden, dass Spiralnebel von mittlerer Leuchtkraft ein paar mal zehn Milliarden Sonnenmassen enthalten, Riesensysteme wie der Andromedanebel oder unsere eigene Galaxis sogar bis etwa zweihundert Milliarden Sonnen. Geschwindigkeitsmessungen an Doppelnebeln, die einander umkreisen, bestätigen dieses Resultat sehr gut.

Zu einem stark abweichenden Ergebnis gelangt man aber, wenn man zuerst die totale Masse eines Nebelhaufens bestimmt. Man benützt

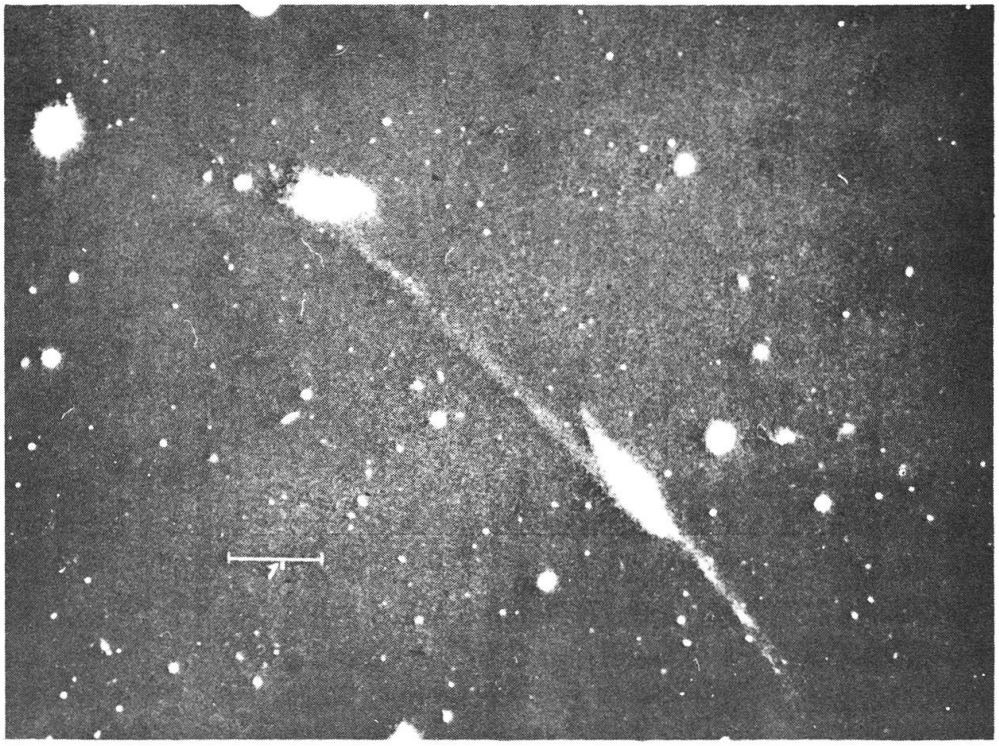

Abbildung 3 - Lichtbrücke von mehreren hunderttausend Lichtjahren Länge, zwischen zwei sich begegnenden Galaxien, im Sternbild Wassermann.
(Zwicky, Morphological Astronomy, p. 230.)

zuerst die totale Masse eines Nebelhaufens bestimmt. Man benützt dazu den sogenannten Virialsatz, der aussagt, dass in einem stabilen Haufen die gesamte Bewegungsenergie (in Bezug auf den Schwerpunkt) halb so gross ist wie die gesamte negative potentielle oder Gravitationsenergie (das ist die Arbeit, die man aufwenden müsste, um den Haufen gegen seine eigene Schwerkraft völlig zu zerstreuen). Aus der Dispersion der beobachteten Radialgeschwindigkeiten mehrerer Haufenmitglieder ist die Bewegungsenergie abzulesen; von ihr schliesst man, eben mit Hilfe des Virialsatzes, auf die Gravitationsenergie, und von dieser weiter auf die gesamte Masse (wobei freilich die ungefähre Struktur des Haufens und sein Radius, also auch wieder seine Entfernung, bekannt sein müssen). Schliesslich dividiert man durch die Anzahl der einigermassen hellen Galaxien des Haufens. In allen reichen Nebelhaufen, ob sphärisch oder unregelmässig, ist so (mit Hilfe von provisorischen Distanzen) eine mittlere Masse von etwa einer Billion Sonnen pro Sternsystem gefunden worden. Das ist rund zehnmal mehr als die zuverlässigeren individuellen Massenbestimmungen ergeben haben. Da Rotations- und Virialmassen beide einfach

linear von der Entfernung abhangen, besteht diese Diskrepanz unabhängig von der Entfernungsskala. Sie lässt sich beheben, wenn man annimmt, dass nur ein Zehntel der Masse eines Haufens in den normalen Sternsystemen steckt, neun Zehntel dagegen in Form von intergalaktischer Materie zerstreut sind. Das wäre ganz im Sinne der Zwickyschen Auffassung, die einige Evidenz zu ihren Gunsten hat. Aber es gibt auch noch einen andern Ausweg, nämlich dass die Nebelhaufen, oder doch wenigstens manche von ihnen, gar nicht stationäre, sondern unbegrenzt sich ausdehnende Gebilde sind, die ihre Identität nach und nach verlieren, und dass der Virialsatz, jene Relation zwischen Bewegungs- und Gravitationsenergie, daher nicht gilt und die Gesamtmasse eines Haufens also falsch ermittelt wurde. Auch diese Ansicht lässt sich teilweise begründen. Es steht z. B. fest, dass in etlichen kleineren und grösseren Gruppen von Galaxien, so in der M 81-Gruppe und in Stephans Quintett, einzelne Mitglieder so schnell laufen, dass sie sich für immer von den andern entfernen. Wahrscheinlich haben manche Gruppen überhaupt positive Gesamtenergie und lösen sich allmählich auf. Ja, man vermutet sogar, dass dieses Schicksal selbst grösseren Haufen beschieden sei, z. B. dem lockeren, unregelmässigen Hercules-Haufen. Es scheint sich im Reich der Nebel in erstaunlicher Weise zu wiederholen, was in den Spiralarmen der Milchstrasse geschieht: So wie Assoziationen und ganze Haufen von jungen Sternen aus Gasnebeln geboren werden und auseinanderfahren, so entstehen offenbar expandierende Gruppen von jungen Galaxien. Aber woraus? Kondensiert sich die intergalaktische Materie, oder verjüngen und teilen sich Riesenmilchstrassen? Wäre es möglich, dass junge Sternsysteme von alten als Zwerge geboren werden und dann wachsen? Oder entsteht fortwährend neue Materie aus Energie oder gar aus dem Nichts?

Da sind wir schon auf dem Glatteis der Kosmologie. Ich bitte Sie gleichermassen um Nachsicht, wenn ich Ihnen zu ängstlich zu tasten oder zu leichtsinnig zu eilen scheine.

Sie kennen alle das Gesetz von Hubble und Humason: dass nämlich die Spektren der fernen Galaxien samt und sonders aus ihrer Normallage nach längeren Wellen hin verschoben erscheinen (im Vergleich zu den Spektren ruhender irdischer Lichtquellen), und dass diese Rotverschiebung linear mit der Entfernung der Nebel anwächst. Innerhalb eines gegebenen Spektrums ist die Verschiebung jeder Stelle, jeder Linie strikte proportional zur Ruhe-Wellenlänge. Weil diese Eigenschaft charakteristisch ist für den sogenannten Dopplereffekt bei Bewegung

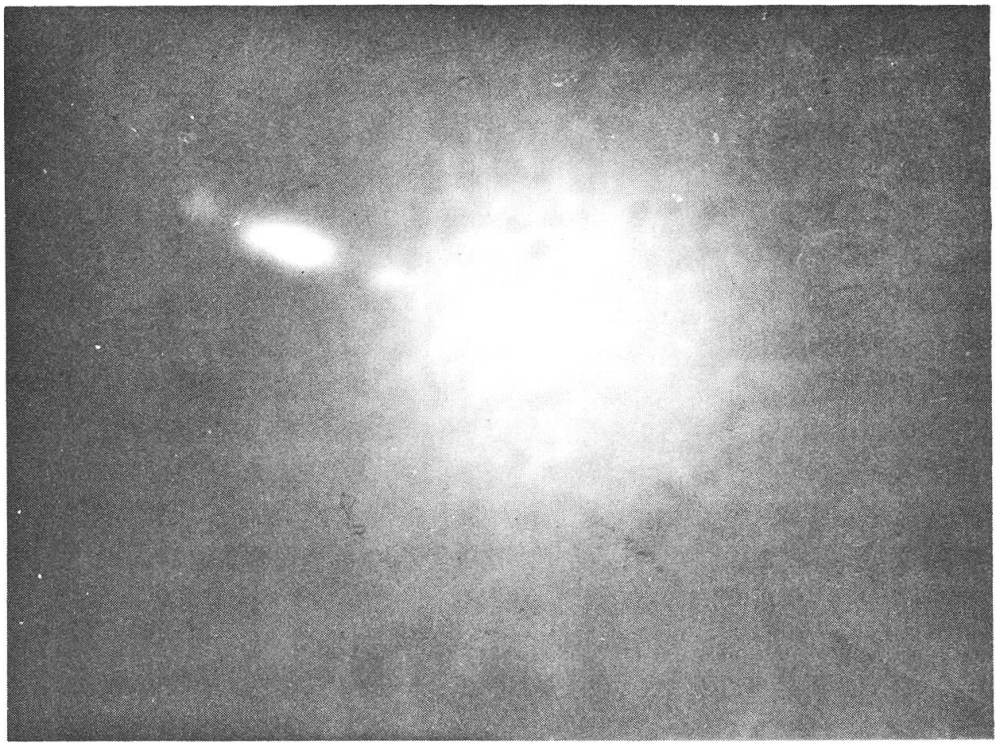

Abbildung 4 - Der «Pfeil» in M 87 im Virgo-Haufen. Mit einer Geschwindigkeit von mehr als 300 km/sec wird Materie aus dem Kern dieser elliptischen Galaxie ausgeschleudert. Das Licht dieses «Pfeils» ist merklich polarisiert, und M 87 ist eine kräftige Radioquelle.

einer Lichtquelle in Blickrichtung, so ist es natürlich, dass man in erster Linie an ein Weglaufen der Nebel von uns denkt und damit an eine allgemeine gegenseitige Flucht, also an eine Ausdehnung des Weltalls. Ab und zu werden Zweifel an dieser Deutung laut, aber es ist nicht a priori einzusehen, warum sie falsch sein müsste, warum nicht ferne Galaxien 40 000, 60 000, 100 000 und mehr Kilometer in der Sekunde von uns rücken dürften. Kein einziger anderer Erklärungsversuch der Rotverschiebung hat bis heute Erfolg gehabt. Man fühlt sich aber trotzdem verpflichtet, einen Entscheid zu fällen, und sucht ihn vor allem aus der Ueberlegung zu holen, dass wir ja die sehr grossen Raumtiefen in dem Zustand sehen, der vor Milliarden von Jahren herrschte. Z. B. muss im Falle wirklicher Expansion des Weltalls in den weitesten Fernen eine grössere räumliche Dichte der Galaxien zu beobachten sein als in unserer Nähe, wo wir die heutige, dünnere Verteilung sehen. Hubble stellte die erste Probe an mit Hilfe von sukzessiven Nebelzählungen bis zu immer schwächeren Grenzhelligkeiten. Von einer Grössenklasse zur nächsten sollte die Zahl der Nebel sich

vervierfachen ohne Expansion, dagegen stärker anwachsen mit Expansion. Das Unternehmen misslang aus verschiedenen Gründen, die vielleicht etwas speziell, aber instruktiv sind: 1) ist es praktisch unmöglich, bei Nebelzählungen eine ganz bestimmte Grenzhelligkeit einzuhalten, ausser wenn man zuerst eine mühsame und schwierige, genaue Photometrie von Tausenden von Nebeln durchführt; 2) sind die schwächsten noch registrierten Nebel auf einer photographischen Platte immer nur unsicher von den schwächsten Vordergrundsternen zu unterscheiden; 3) vermindert die Rotverschiebung die Helligkeit der Nebel, und zwar um einen Betrag, der abhängig ist von der Deutung des Phänomens (die man ja eben erst sucht); und 4) schwächt intergalaktische Absorption von unbekannter Stärke das Licht der Nebel noch weiter.

In sehr grossen Entfernungen kommen nicht mehr Einzelnebel, sondern nur noch ganze Haufen als zuverlässig identifizierbare Untersuchungsobjekte in Frage. An die Stelle der heiklen Nebelhelligkeiten treten dann als Entfernungsindikatoren die leichter zu messenden scheinbaren Durchmesser der Haufen. Aus leider noch etwas spärlichem Beobachtungsmaterial fand Zwicky, dass kein Ueberschuss sehr ferner Haufen bestehe, dass das Weltall sich also nicht ausdehne. Intergalaktische Absorption kann aber auch diesen Befund sehr stark beeinflusst haben.

Die Radioastronomen von Cambridge verkündeten neulich, dass die Zahl der punktförmigen Radioquellen, die von vielen für extrem weit entfernte, optisch zum grössten Teil nicht mehr wahrnehmbare Galaxien in Kollision gehalten werden, proportional zur 3,6ten Potenz der Entfernung anwachse, d. h. stärker als das Volumen. Die höhere Dichte in der Ferne wäre ein Argument zugunsten der Expansion; aber man darf sich wohl daran erinnern, dass überhaupt die Deutung dieser Radio-Quellen und damit ihre extragalaktische Stellung bis jetzt höchstens plausibel gemacht, nicht aber bewiesen ist.

Schliesslich wäre noch das originelle Vorgehen der Statistiker Neyman und Miss Scott zu erwähnen, die umgekehrt von verschiedenen kosmologischen Hypothesen aus mit allem denkbaren Raffinement (inklusive Roulettespiel) künstliche Nebelfelder erzeugen und sie dann in einer maschinellen statistischen Analyse mit wirklichen Nebelzählungen von der Lick-Sternwarte vergleichen. Das ist ein so komplexes Unternehmen, dass nach vielen Jahren noch immer erst einige mathematische und arbeitspsychologische, aber noch keine greifbaren astronomischen Resultate vorliegen.

Ich hoffe, dass Sie nicht allzusehr enttäuscht sind, wenn ich nach diesen langatmigen und vielleicht schwerverständlichen Ausführungen Ihnen erst sage, dass allein aus dem gemeinsamen Prinzip all dieser Bemühungen (aus dem Unterschied der Nebeldichten nah und fern) wahrscheinlich überhaupt kein zwingendes Argument gegen die Expansion abgeleitet werden könnte und daher auch keine Entscheidung herbeigeführt. Es bleibt nämlich im Falle eines negativen Befundes, wie ihn z. B. Zwicky erhielt, immer noch die Möglichkeit, dass das Universum, wie die englischen Mathematiker Bondi, Gold und Hoyle glauben, stationär gebaut ist. Ausgangspunkt ihrer Theorie ist das sogenannte «perfekte kosmologische Prinzip»: dass das Weltall nicht nur von allen Punkten aus, sondern auch zu allen Zeiten in grossen Zügen den gleichen Anblick bieten müsse. Das stationäre Universum ist unendlich gross und unendlich alt; es dehnt sich allezeit gleichmässig aus, und die dadurch bedingte Verdünnung der Materie wird wettgemacht durch fortwährende Neuschöpfung von Materie aus Nichts oder aus Expansions-Energie. Wie das genau vor sich gehen soll, ist sehr umstritten.

Gestatten Sie mir nun, fürs letzte Stück ohne Skrupeln die Expansion des Weltalls als einleuchtend vorauszusetzen. Dann sind im Hubble-Humason-Gesetz, das Sie in der Form $v = H \cdot r$ kennen, die Geschwindigkeiten (v) nicht bloss als symbolisch, sondern als reell anzusehen. Der Betrag der sogenannten Hubble-Konstanten (H), des Anwachsens der gemessenen Fluchtgeschwindigkeiten mit der Entfernung (r), wird gegenwärtig halboffiziell mit etwa 75 km/sec per 1 Million Parsec angegeben. Man kann daraus leicht finden, dass die Ausdehnung vor 13½ Milliarden Jahren begonnen hat, falls jeder Nebel von Anfang an dabei war und sich unverändert mit seiner heute beobachteten Geschwindigkeit bewegt hat. Das wäre aber ein nicht sehr wahrscheinlicher Spezialfall. Es ist eher zu erwarten, dass die Anwesenheit der Materie die Expansion bremse. Die Kraft der Bremsung und schliesslich die ganze Entwicklung des Weltalls könnte man unter Umständen berechnen, wenn man die mittlere Massendichte im Universum kennte. Weil über diese aber noch heiss gestritten werden kann, so muss man sich vorläufig mit dem Versuch begnügen, die Vergangenheit der Expansion direkt in den grössten Raumtiefen abzulesen. In Abbildung 5 ist für je die hellsten Nebel in fernen Haufen der Logarithmus der Rotverschiebung gegen die als Entfernungsmass dienende bolometrische Helligkeit aufgetragen, und zugleich ist die zu erwartende Beziehung für einige spezielle kosmologische Modelle eingezeichnet. Dass die

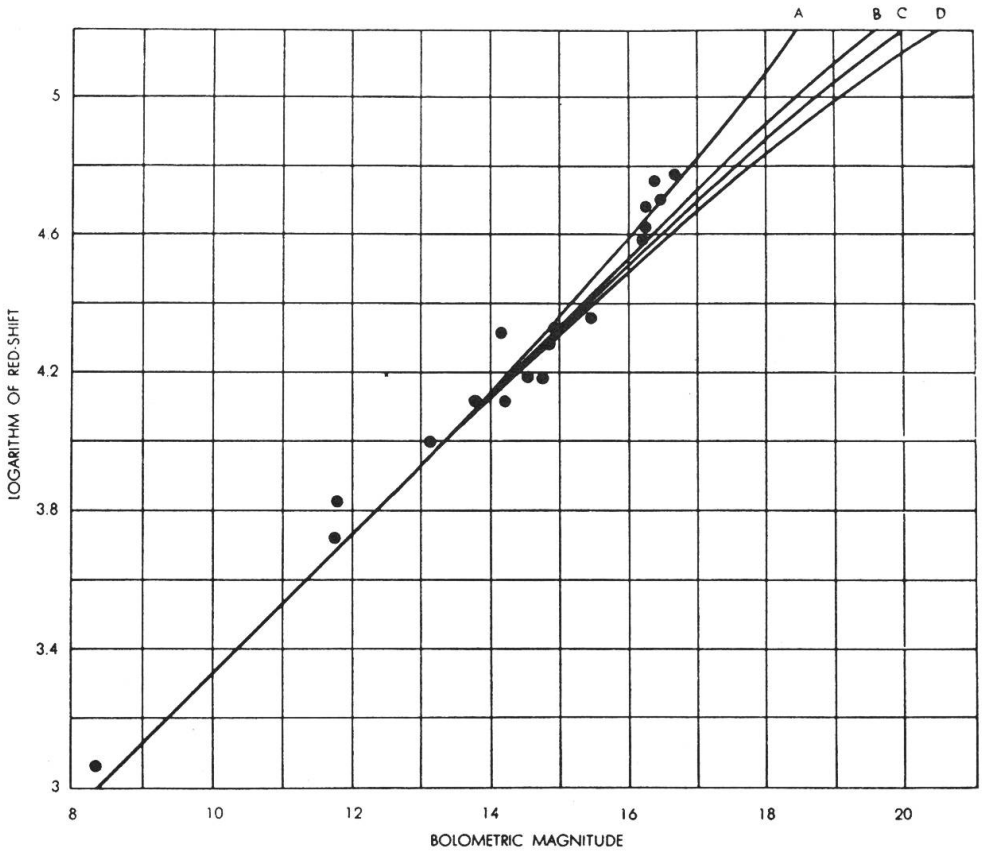

Abbildung 5 - Hubble-Humason-Gesetz. Der Logarithmus der Rotverschiebung des Lichtes (log C · $\Delta\lambda / \lambda$) ferner Galaxien ist aufgetragen gegen ihre scheinbare bolometrische Helligkeit (als Entfernungsmass dienend).

Kurve A: Extrapolation der Beobachtungen.

Kurve B: Unendlich grosses Universum mit euklidischem Raum (links von B: geschlossenes, endliches Universum; rechts von B: offenes, unendlich grosses Universum).

Kurve C: Mit konstanter Geschwindigkeit expandierendes Universum (links von C: Expansion gebremst).

Kurve D: Stationäres Universum mit ständiger Neuschöpfung von Materie (Bondi-Gold-Hoyle).

(Sandage, Scientific American, September 1956.)

Messkurve A links von C liegt, bedeutet, dass die Expansion offenbar gebremst wird; dass sie überdies links von B liegt, heisst, dass die Massendichte so hoch, die Bremsung so kräftig sei, dass der Weltraum endlich und positiv gekrümmt sein müsse, ein Raum, der (analog zur Oberfläche einer Kugel) ohne Rand in sich zurückkehrt. Aus der genaueren Lage der Kurve A ergibt sich, dass die Expansion vor 7½ Milliarden Jahren begonnen hat.

Glauben Sie aber nicht, dass uns so eindeutiges Wissen gegönnt sei. Es ist zwar vom neuesten, aber auch schon wieder fragwürdig. Die Theoretiker des inneren Aufbaus und der Entwicklung der Sterne schreiben seit kurzem den ältesten Gebilden in unserer Milchstrasse, den Kugelsternhaufen, Vergangenheiten von bis zu 25 Milliarden Jahren zu, und von M 87 im Virgo-Haufen (Abbildung 4) verlautet gar, er könnte 140 Milliarden Jahre alt sein. Es ist leicht möglich, dass die Theorie der Sternentwicklung hierin weit irrt; aber auch mit der Kosmologie ist es nicht zum besten bestellt. Es könnte z.B. sehr wohl ein bescheidener Unterschied in der Leuchtkraft der hellsten Nebel in den nahen und in den fernsten Haufen bestehen, etwa eine in der Zwischenzeit eingetretene Schwächung dieser Leuchtkraft infolge der Entwicklung der Sterne, oder auch nur ein Auswahleffekt in dem Sinne, dass in den grössten Raumtiefen nur noch Haufen mit überdurchschnittlich leuchtenden hellsten Nebeln überhaupt photographiert werden können. Dann hätten wir ungleiche Objekte miteinander verglichen, und die nötigen Korrekturen könnten leicht so gross werden, dass wir statt auf ein geschlossenes auf ein unendliches, offenes Universum schliessen müssten, das entweder sich endlos verdünnt oder durch ständige Erschaffung neuer Materie stationär erhalten wird. Von einer klaren Entscheidung für ein bestimmtes Modell des Universums sind wir offensichtlich heute noch weit entfernt.

LE COSMOS DES GALAXIES

(Résumé de la conférence de Paul WILD, Berne, à l'occasion de l'Assemblée générale de la SAS le 7 mai 1961 à Lucerne.)

Notre soleil n'est qu'une étoile parmi les quelques cents milliards d'autres qui forment notre Galaxie. On sait qu'il existe des milliards d'autres galaxies. Seules les distances d'un petit nombre de celles-ci sont connues avec quelque certitude, notamment celles des membres du Groupe local (figure 1). La méthode des Céphéides s'étant avérée trop peu sûre, d'autres procédés ont été choisis pour déterminer les distances extragalactiques (éclat des novae et supernovae, magnitude globale des galaxies, etc.). Le doublement des distances extragalactiques (Baade, 1952) n'est justifié que pour le Groupe local, au-delà le facteur à appliquer serait de 4 à 10.

Entre les galaxies ont été trouvés des systèmes stellaires nains, par exemple des amas globulaires; l'espace intergalactique contient aussi de la matière diffuse.

Presque toutes les galaxies appartiennent à des amas de galaxies (figure 2). Ces amas (dans la Vierge, le Centaure, la Grande Ourse, etc.) semblent former un amas d'amas de galaxies (supergalaxie). Dans les amas de galaxies, les membres ayant une grande masse se trouvent au centre, les plus légers au bord. Cette ségrégation pourrait indiquer, ou bien que les amas réguliers sont extrêmement vieux (quelques mille milliards au lieu de quelques milliards d'années) ou bien qu'ils se sont formés en ayant dès le début leur structure actuelle. Le catalogue de 35 000 galaxies et 10 000 amas de galaxies publié prochainement par Zwicky apportera peut-être quelque lumière sur ces questions.

Selon l'hypothèse et la méthode appliquées, on obtient pour la masse d'une galaxie dix à cent milliards de fois celle du soleil (résultat déduit de la rotation des galaxies) ou mille milliards de soleils (en partant de la rotation des amas entiers). Cette différence pourrait être due à la présence de matière intergalactique (environ neuf dixièmes de la masse totale) ou au fait possible que les amas ne soient pas des ensembles stables. La création de groupes en expansion de nouvelles galaxies n'est pas impossible (figure 4).

Malgré toutes les nouvelles observations, les problèmes cosmologiques sont loin d'être résolus : par exemple la « réalité » de l'expansion de l'Univers. En partant de certaines suppositions plausibles on pourrait conclure que cette expansion aurait débuté il y a 7,5 milliards d'années, mais alors comment concilier cette conclusion avec celle des spécialistes de la constitution interne et de l'évolution des étoiles qui indiquent 25 milliards d'années pour l'âge des amas globulaires de notre Galaxie, ou avec une autre qui donne 140 milliards d'années à M 87 dans l'amas de la Vierge (figure 4) ?