

Neue Methoden der kosmologischen Forschung

Autor(en): **Zwicky, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **26 (1953)**

Heft III-IV

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-112410>

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.

Neue Methoden der kosmologischen Forschung

von F. Zwicky.

(15. IV. 53.)

Summary. It is shown that a decision for or against the concept of the expanding universe is not possible on the basis of nebular counts. Also, all methods which involve the determination of absolute distances and absolute magnitudes of nebulae are most unreliable because of the recent discovery of intergalactic matter. The author has therefore developed new modes of approach to cosmological problems which belong to the realm of *dimensionless morphology*. These involve only the three basic operations of identification, counting and the use of coincidence conditions. These operations have been applied to the large scale distribution of stars, nebulae and clusters of nebulae. It is shown in particular that from a study of the distribution of the large clusters of galaxies the following three problems can be solved. First, the existence of intergalactic dust can be ascertained. Second, critical tests may be devised which will allow us to decide whether or not the universe is expanding. Third, the luminosity function of cluster nebulae can be derived and it is found that this function does not possess any maximum as has been claimed by many observers, but it is increasing monotonely with decreasing brightness of the nebulae.

1. Kosmologische Probleme.

Schon seit ihren Anfängen hat sich die Astrophysik Fragen gestellt, welche das Alter und den Ursprung verschiedenartiger Weltkörper betreffen. Es sind insbesondere die grössten Anstrengungen gemacht worden, durch direkte Beobachtung sowie durch die Theorie die Natur der Sterne, der Sternsysteme und der Haufen von Sternsystemen zu ergründen. Während der letzten zwei Jahrzehnte standen die meisten dieser Bemühungen im Zeichen der Theorie der Ausdehnung des Weltalls. Diese Theorie geht aus von der Annahme, dass die in den Spektren entfernter Sternsysteme beobachtete und mit der Entfernung zunehmende Rotverschiebung als Dopplereffekt zu deuten ist und deshalb einer wirklichen Fluchtgeschwindigkeit der betreffenden Lichtquellen entspricht.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass noch keines der erwähnten Probleme eine endgültige Lösung gefunden hat. Man weiss vor allem nicht, ob die universelle Rotverschiebung nicht etwa durch Effekte erklärt werden kann, die in einem stationären Weltall die Energie

von Lichtquanten langsam dezimieren, ohne dass man gezwungen ist, die Verhältnisse der gegenseitigen Entfernungen von Sternsystemen zu atomaren charakteristischen Längen (etwa Bohrs Länge) als Funktionen der Zeit anzusetzen. Ebensowenig ist es gelungen Beobachtungen zu machen, die uns über den Ursprung und die Entwicklung der Sterne entscheidende Auskunft liefern. Dieser Mangel an Fortschritten in der praktischen Kosmologie ist im wesentlichen zwei Umständen zuzuschreiben. Erstens gibt es unter den an kosmologischen Fragen interessierten Beobachtern nur wenige, denen die nötigen Riesenteleskope für ihre Forschungen zur Verfügung stehen. Und zweitens hat es sich in den letzten Jahren herausgestellt, dass die meisten dieser Beobachter Wege beschritten haben, die erst in jahrzehnte langer Arbeit oder vielleicht überhaupt nie zum Erfolge führen können.

Es wurde zum Beispiel während der letzten zwei Jahrzehnte versucht, bis zu etwa 500 Millionen Lichtjahren eine genaue Entfernungsskala aufzustellen¹⁾. Nach Festsetzung dieser Skala hoffte man dann durch ausgedehnte Zählungen der Verteilung extragalaktischer Nebel zu einer Entscheidung zu kommen, ob sich das Weltall wirklich ausdehnt oder nicht²⁾. Nun hat sich aber herausgestellt, dass mit Nebelzählungen eine solche Entscheidung nicht getroffen werden kann. Der Grund für diese Unmöglichkeit liegt darin, dass die Schwankungen in den transversalen Zählungen extragalaktischer Sternsysteme über die Himmelskugel derart wild und von einer solchen Grösse sind³⁾, dass die Unterschiede in den radialen Nebelzahlen (Tiefenzählungen), die man für ein sich ausdehnendes und ein stationäres Weltall erwarten sollte, gar nicht erfasst werden können. Die unerwartet grossen Schwankungen in den transversalen Zählungen sind dem Auftreten ausgedehnter Nebelhaufen sowie der Absorption des Lichtes durch interstellaren und intergalaktischen Staub zuzuschreiben³⁾. Die Entdeckung teilweise gleichförmig verteilten und teilweise in grossen Wolken auftretenden intergalaktischen Staubes wird insbesondere auf lange Zeiten hinaus genaue Entfernungsbestimmungen unmöglich machen.

Der Verfasser stellte sich deshalb die Frage, ob es nicht möglich sei, *Absolutmessungen ganz zu umgehen* und die wichtigsten kosmologischen Fragen durch Beobachtungen zu entscheiden, welche elementarster dimensionsloser Art sind und die sich in keiner Weise auf die Messung komplizierter physikalischer Grössen stützen. Es zeigte sich in der Tat, dass das durch die im folgenden Abschnitt besprochene Methode möglich ist.

2. Dimensionslose Morphologie.

Es handelt sich hier um eine durchschlagsfähige einfache Methode, die sich im wesentlichen nur mit der Beobachtung und der Analyse von Komplexen reiner Zahlen und der *morphologischen Struktur von Zahlenfeldern* befasst. Es werden nur folgende Operationen benutzt.

- a) Identifizierung von verschiedenen Objekten.
- b) Zählung dieser Objekte in verschiedenen Feldern.
- c) Bestimmung der relativen Grössen (Winkel) dieser Felder durch Benutzung von Koinzidenzen.

Im folgenden handelt es sich demgemäss speziell um folgende Schritte:

- a) Die Identifizierung von Sternen, von Sternsystemen (extragalaktischen Nebeln) und von Nebelhaufen.
- b) Die Zählung der genannten Objekte und c) die Bestimmung der Gleichheit direkt beobachtbarer Winkel. Es wird zum Beispiel genügen zu wissen, dass auf zwei photographischen Aufnahmen, die mit demselben Teleskop und unter denselben Umständen aufgenommen worden sind, gleichen Abständen auf den Platten gleiche Winkel entsprechen.

Wir werden Gelegenheit haben, kurz anzudeuten, dass mit Hilfe der Methoden der dimensionslosen Morphologie zum Beispiel die folgenden Probleme gelöst werden können und teilweise schon gelöst worden sind.

A. Durch laterale Zählungen von Sternen bis zu einer bestimmten Grenzhelligkeit, sowie durch radiale Zählungen von Sternen bis zu verschiedenen Grenzgrössen kann die Wolken- und Haufenbildung von Sternen im Milchstrassensystem untersucht werden. Gleichzeitig kann man über die räumliche Verteilung und die optische Dicke interstellarer Staubwolken Aufschluss gewinnen.

B. Durch laterale und radiale Zählungen von extragalaktischen Nebeln kann in analoger Weise über die Haufenbildung von Nebeln sowie die Raumverteilung intergalaktischer Staubwolken Aufschluss gewonnen werden. Die Existenz solcher Staubwolken ist tatsächlich erst kürzlich auf diese Weise entdeckt worden.

C. Laterale und radiale Zählungen von Haufen extragalaktischer Sternsysteme sind ganz besonders aufschlussreich. Wir werden zeigen, dass man durch Zählungen dieser Art in erster Linie einen unabhängigen Beweis für die Existenz intergalaktischer lichtabsorbierender Staubmassen erbringen kann. Weiter führt diese Methode auf dem einfachsten Weg zu dem langgesuchten Entscheid für oder

gegen die Theorie des sich ausdehnenden Weltalls. Als automatisches Nebenprodukt dieser Untersuchungen kann man noch die Häufigkeit von Nebelhaufen in Abhängigkeit der Zahl der zu ihnen gehörenden Nebel bestimmen. Weiter lässt sich leicht die Helligkeitsfunktion von Haufennebeln ableiten, deren Kenntnis für die theoretische Kosmologie von der grössten Wichtigkeit ist.

Wir betonen noch, dass uns hier die Verteilung von Sternen und von Staubwolken in der Milchstrasse nicht an sich interessiert. Wir müssen aber für unsere Zwecke sicher stellen, dass in den von uns bearbeiteten Feldern die Zahlen der Nebel und der Nebelhaufen nicht durch vorgelagerte interstellare Staubwolken wesentlich verfälscht werden. Falls deshalb die Sternzahlen in einem gegebenen Feld einer gleichförmig ungeordneten Verteilung entsprechen, werden wir annehmen, dass zwar die Existenz einer leicht absorbierenden homogenen interstellaren Staubwolke nicht ausgeschlossen ist, diese aber nicht fleckenweise grössere oder kleinere Lücken in das „Zahlenfeld“ der extragalaktischen Nebel schlägt.

3. Transversalzählungen von Sternen und von extragalaktischen Nebeln.

Alle im folgenden beschriebenen Zählungen beziehen sich auf Gebiete, die zwischen 50° und 90° nördlich galaktischer Breite liegen. Die Lichtabsorption durch interstellaren Staub ist klein und wesentlich gleichförmig. Es ergibt sich deshalb eine Verteilung von Sternen bis zur zwanzigsten photographischen Grösse m_p , die beinahe gleichförmig ungeordnet ist. Die ursprünglichen Zählungen mit den grossen Spiegelteleskopen ergaben ähnliche Resultate für die extragalaktischen Nebel²⁾, von denen bis $m_p = +20$ im ganzen etwa 50000 gezählt wurden. Die Analyse der ersten mit dem 48-Zoll-Schmidt-Teleskop gemachten Aufnahmen zeigte aber sofort, dass die Gleichförmigkeit der Nebelverteilung nur sehr bedingt existiert. Auf einigen Dutzend mit diesem Teleskop aufgenommenen Platten sind bis jetzt etwa zwei Millionen extragalaktischer Nebel identifiziert und gezählt worden. Daraus haben sich die folgenden zwei Resultate ergeben:

a) Eine unverhältnismässig grosse Zahl, wenn nicht die Mehrzahl der Nebel gehören grösseren und kleineren Nebelhaufen an, die bis zu vielen tausenden von Mitgliedern einschliessen und Durchmesser von Millionen von Lichtjahren besitzen. Das bedingt, dass über den Himmel in den etwa pro Quadratgrad ermittelten Nebelzahlen grosse Schwankungen auftreten.

b) Es ergibt sich weiter das folgende erstaunliche Resultat. Wenn man mit wachsender Belichtungszeit immer mehr lichtschwache Nebel erfasst, wachsen mit der Zahl der Nebel auch die relativen

Abweichungen von der gleichförmig ungeordneten Verteilung. Dies lässt sich nur durch die Annahme der Existenz intergalaktischen Staubes erklären, der teilweise in Wolken riesiger Ausdehnung konzentriert ist. Verdichtungen solchen Staubes scheinen insbesondere innerhalb der grössten Nebelhaufen selbst aufzutreten. Zählt man zum Beispiel die Nebel im Gebiet des grossen Nebelhaufens in Coma, einmal bis $m_p = +16$, dann bis $m_p = 18$ und $m_p = 20$, so ergeben sich pro Quadratgrad entlang einem Durchmesser des Haufens Zahlen, die den Profilen der Figur 1 entsprechen.

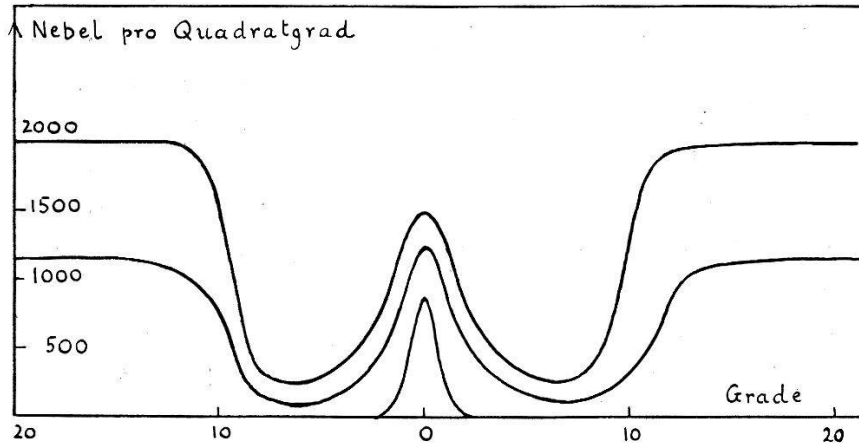


Fig. 1.

Profile von Nebeldichten durch den Comahaufen bis zu verschiedenen photographischen Grössen m_p .

Die Kurven in der Figur sind natürlich ausgeglättet. Die tatsächlichen Werte der differentiellen Nebelzahlen würden beträchtliche lokale Schwankungen zeigen, die nicht eingezeichnet sind. Man zählt zum Beispiel mit dem 18-Zoll-Schmidt-Teleskop in einem Kreis von fünf Bogenminuten im Zentrum des Haufens bis $m_p + 16,5$ etwa 2000 Nebel pro Quadratgrad und bis zu $m_p = +20$ etwa 5000 Nebel pro Quadratgrad. Die in der Figur benutzten Zahlen sind über ganze Quadratgrade summiert und überdies ausgeglättet.

Für $m_p = +16$ ragt die Bevölkerung des Comahaufens als hoher Berg über die Umgebung hinaus; für $m_p = 18$ ist schon das allgemeine mittlere Bevölkerungsniveau zur Höhe der Nebelzahl im zentralen Quadratgrad angewachsen, und für $m_p = 20$ stellt zwar die zentrale Bevölkerungsdichte noch eine Erhebung dar, die aber in einer tiefen Mulde unten sitzt, welche von Hochplateaus viel dichter Bevölkerung umgeben ist. Bei der Untersuchung des grossen Haufens in Virgo und sogar bei den mittleren und kleinen Nebelhaufen im Krebs und Pegasus wiederholt sich dasselbe Bild, das am einfachsten durch die Annahme zu erklären ist, dass sich in den inneren Regionen der Nebelhaufen ausgedehnte intergalaktische

Staubmassen ansammeln, bei deren Traversierung Lichtstrahlen durch Absorption und Streuung ungefähr die Hälfte ihrer Intensität einbüßen. Das Postulat der Existenz intergalaktischen Staubes führt natürlich sofort zur Voraussage anderer beobachtbarer Erscheinungen, die wir weiter unten besprechen.

4. Radialzählungen von extragalaktischen Nebeln.

Die Zahl der Nebel n_t , die in einem gegebenen Raumwinkel Ω gezählt wird, wächst stark an mit abnehmender scheinbarer Helligkeit der Nebel. Falls keine Haufenbildung und auch kein intergalaktischer Staub existieren, würde n_t im Mittel nach der Beziehung $\log_{10} n_t = 0,6 \cdot m$ -Konstante ansteigen und die Verteilung innerhalb des Raumwinkels wäre gleichförmig ungeordnet, falls die wirkliche Raumverteilung ebenfalls gleichförmig ungeordnet ist. Die Beobachtungen erfüllen aber diese Erwartung nicht, was direkt auf Haufenbildung und intergalaktischen Staub schliessen lässt. Die mathematisch statistische Analyse der Morphologie der Nebelverteilung in Abhängigkeit von n_t lässt sich am besten mit Hilfe der sogenannten Dispersions-Unterteilungskurven durchführen. Zu diesem Zwecke unterteilt man den Raumwinkel Ω in z gleiche Winkel $\omega_i = \Omega/z$, so dass die innerhalb ω_i beobachtete Zahl der Nebel $n_i = n_t/z + \delta_i$ ist. Die beobachtete Dispersion wird definiert als

$$\sigma_{\text{beob.}} = [1/z \sum \delta_i^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Für eine gleichförmige ungeordnete Verteilung der Nebel wäre die erwartete Dispersion gegeben durch

$$\sigma_{\text{ber.}} = [n_t (1 - 1/z)/z]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Das Verhältnis

$$k(z, n_t) = \sigma_{\text{beob.}}/\sigma_{\text{ber.}} \quad (3)$$

wird in Abhängigkeit von z und n_t beobachtungsmässig bestimmt. Wir haben bereits im vorigen Abschnitt besprochen, dass die Transversalzählungen in einem grossen Raumwinkel Ω erhebliche Abweichungen von der gleichförmigen Verteilung ergeben. Das zeigt sich denn auch in der Analyse von $k(z)$ bei konstantem n_t darin, dass $k(z)$ für alle Werte von z , die nicht sehr gross sind, im allgemeinen stark von Eins abweicht. Solange n_t klein ist, kann dieses Resultat durch Haufenbildung unter den Nebeln gedeutet werden. Sobald aber n_t so gross wird, dass im Winkel Ω viele Haufen liegen, fällt diese Erklärungsweise dahin. Man muss dann zur Annahme intergalaktischen Staubes schreiten, für dessen Existenz das Verhalten

von $k(z, n_t)$ als Funktion von n_t bei konstantem $z = z_0$ einen weiteren Beweis liefert.

In der Figur 2 deuten wir schematisch an, welches Verhalten für $k(n_t, z_0)$ ohne und mit wolkenhaft verteiltem intergalaktischem Staub zu erwarten ist.

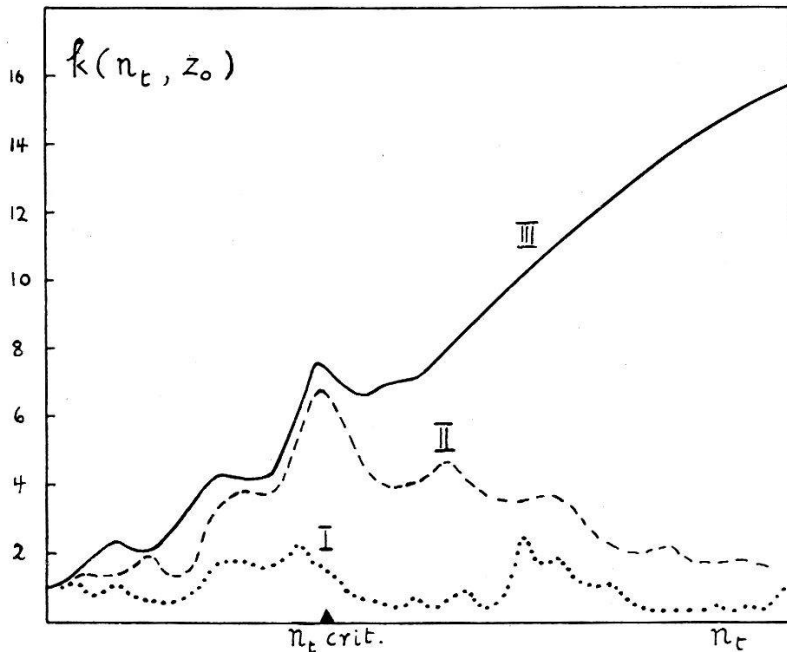


Fig. 2.

Verhalten der Dispersions-Unterteilungsfunktion $k(n_t, z)$ bei konstanter Unterteilung z_0 mit und ohne Haufenbildung der Nebel sowie mit und ohne intergalaktischen Staub.

Für eine gleichförmig ungeordnete Verteilung der Nebel wäre die Kurve I zu erwarten. Infolge der Bildung von Nebelhaufen geht I etwa in II über. n_t (kritisch) ist von der Grössenordnung der Zahl der Nebel in einem Volumen von der Grösse eines Nebelhaufens. Falls dieser Haufen im Raumwinkel Ω unsymmetrisch gelagert ist, sind besonders grosse Werte von $k(z)$ zu erwarten. Geht man noch zu viel grösseren Werten von n_t , dann schliesst der Raumwinkel Ω viele Haufen ein, die Verteilung nähert sich wieder der gleichförmig ungeordneten und $k(z_0)$ sollte gegen Eins konvergieren. Die Beobachtungen ergeben im krassen Gegensatz zu dieser Erwartung Werte für $k(n_t)$, die schematisch durch die Kurve III wiedergegeben sind. Dieses Verhalten ist wiederum nur durch die Annahme intergalaktischen Staubes erklärbar. Es eröffnet sich damit sofort ein neues Arbeitsprogramm, das zur Aufgabe hat, die differentielle Lichtschwächung und die Rotfärbung entfernter Nebel und Nebelhaufen direkt mit der Verteilung der intergalaktischen Staubwolken in Zusammenhang zu bringen, wie das analogerweise bereits

mit dem Problem der scheinbaren Helligkeiten und Farbenexzesse der Sterne in der Milchstrasse als verursacht durch interstellare Staubwolken geschehen ist.

5. Einfachste Modelle eines stationären und eines sich ausdehnenden Weltalls.

Es handelt sich vor allem zuerst darum, festzustellen, ob sich das Weltall wirklich ausdehnt oder nicht. Bis auf Entfernungen von einigen hundert Millionen Lichtjahren sind Erscheinungen, welche man einer nichtverschwindenden Raumkrümmung oder einer von Null verschiedenen kosmologischen Konstanten zuschreiben müsste, in erster Annäherung vernachlässigbar. Wir suchen deshalb nach Beobachtungen, die uns zwischen einem euklidischen, stationären und gleichförmig bevölkerten Weltall W_S und einem gleichfalls nicht gekrümmten, aber sich ausdehnenden Weltall W_A (EINSTEIN-DE SITTER⁴)) unterscheiden lassen. Wir beabsichtigen diese Unterscheidung auf Grund von Überlegungen zu treffen, die der dimensionslosen Morphologie eigen sind.

Man stelle sich vor, dass Kugeln oder allgemein konvexe Körper vom mittleren Durchmesser $\bar{d}$ gleichförmig ungeordnet über den Raum verteilt sind. Moleküle in einer Flüssigkeit oder Körner in einem Sandhaufen sind Beispiele solcher Körper. Uns interessieren in der vorliegenden Untersuchung die Nebelhaufen als Testkörper. Von einem bestimmten Punkt P aus gesehen gibt es über den Raumwinkel 4π verteilt $N_\gamma d\gamma$ solcher Körper, die unter einem Gesichtswinkel erscheinen, der zwischen γ und $\gamma + d\gamma$ liegt. Für das stationäre Weltall W_S ergibt sich leicht

$$N_\gamma^{(s)} = 4\pi \zeta \bar{d}^3 / \gamma^4, \quad (4)$$

wobei angenähert $\sin \gamma \cong \gamma$ gesetzt worden ist. ζ ist die Zahl der Testkörper pro Volumeneinheit. Das Produkt $\zeta \bar{d}^3$ ist deshalb eine reine Zahl, die gleich Eins wird, falls die in Frage stehenden Körper Raumfüller sind.

Andererseits kann gezeigt werden, dass für ein flaches und sich gleichförmig ausdehnendes Weltall W_A

$$N_\gamma^{(A)} = 4\pi \zeta \bar{d}^3 / \gamma^4 [1 - \bar{v}(\gamma)/c]^3 \quad (5)$$

wird, wobei $\bar{v}(\gamma)$ die mittlere Fluchtgeschwindigkeit derjenigen Körper ist, die vom Beobachter unter dem Winkel γ gesehen werden.

Es liegt die Versuchung nahe, zur Prüfung der Beziehungen 4 und 5 etwa die extragalaktischen Sternsysteme selbst und im speziellen

Kugelnebel zu benutzen. Es stellt sich aber heraus, dass Durchmesser von Nebeln aller Helligkeiten gar nicht leicht zu messen sind und dass bis jetzt prinzipiell keine Methode zur Verfügung steht, um nur Nebel von ungefähr konstantem absolutem Durchmesser in die Statistik einzubeziehen. Dies ist anderseits durchaus möglich, falls man als Prüfkörper die grossen extragalaktischen Nebelhaufen wählt.

6. Statistik der grossen extragalaktischen Nebelhaufen.

Als Körper, deren Verteilung im Weltall im Sinne des vorigen Abschnitts analysiert werden kann, sind die grossen Nebelhaufen ganz besonders geeignet. Wie schon erwähnt, sind im Gegensatz dazu die Nebel selbst als Testkörper unbrauchbar, ausser wenn man sie etwa mit Sicherheit als Mitglieder grosser Haufen identifizieren kann. Auf alle Fälle müssen aber zur Bestimmung der Winkeldurchmesser von Sternsystemen schwache Kontraste in Flächenhelligkeiten gemessen werden, was experimentell ausserordentlich schwierig ist. Anderseits können die Durchmesser der Haufen einfach durch Zählung ihrer Mitglieder bestimmt werden. Weiter ist es möglich, die Auswahl der Nebelhaufen sehr homogen zu gestalten. Wir skizzieren wie man vorgeht, um die Formeln (4) und (5) zu prüfen.

Für die in Frage stehenden Untersuchungen sind Rotaufnahmen (Eastman 103 A—E-Emulsion hinter einem tiefen Rotfilter) unübertroffen. Eine einzelne Aufnahme mit dem 48-Zoll-Schmidt-Teleskop auf Palomar überdeckt etwa vierzig Quadratgrade und enthält in den nebelreichsten Feldern des Himmels bis zu hundert grosse extragalaktische Nebelhaufen. Unter einem grossen Haufen ist dabei ein solcher verstanden, der im Helligkeitsbereich von $m_{\max}$ bis $m_{\max} + 3$ mehr als fünfzig Mitglieder enthält. Dabei ist $m_{\max}$ die photographische Grösse des hellsten Nebels. Grosse Nebelhaufen sind auf den erwähnten Platten bis zu Entfernungen von über 500 Millionen Lichtjahren (bisherige Skala) klar an den folgenden Kriterien erkennbar. Erstens ist im Zentrum dieser Haufen die Zahl der Nebel so gross, dass sich dieselben im wesentlichen berühren. Auf alle Fälle ist diese Zahl pro Einheitsfläche mindestens fünf- bis zehnmal so gross als die entsprechende Zahl gleich heller Nebel im umliegenden Feld. Falls nur eine einzige Anhäufung vorhanden ist, nennen wir den Haufen kompakt, sonst lose. Unter den kompakten Haufen gibt es viele, die Kugelsymmetrie⁵⁾ und einen regelmässigen Abfall der Bevölkerungsdichte nach aussen zeigen (Emden-Verteilung). Als Durchmesser eines Haufens be-

zeichnen wir weiter durch willkürliche Festsetzung den Durchmesser desjenigen Kreises, an dessen Peripherie die Zahl der Haufen nebel pro Quadratgrad nur noch etwa anderthalb bis zweimal so gross ist wie die entsprechende Zahl der gleich hellen Feldnebel. Welcher Faktor gewählt wird, ist unwichtig, solange man bei der ganzen Analyse immer am gleichen Kriterium festhält.

In Figur 3 zeigen wir ein typisches Feld in Corona Borealis, das im ganzen bis zur Grenze des 48-Zoll-Schmidt-Teleskops etwa 90 000 Nebel enthält, d. h. fast 2500 pro Quadratgrad. Die photographische Helligkeit der schwächsten Nebel dürfte ungefähr $m_p = 20,5$ sein.

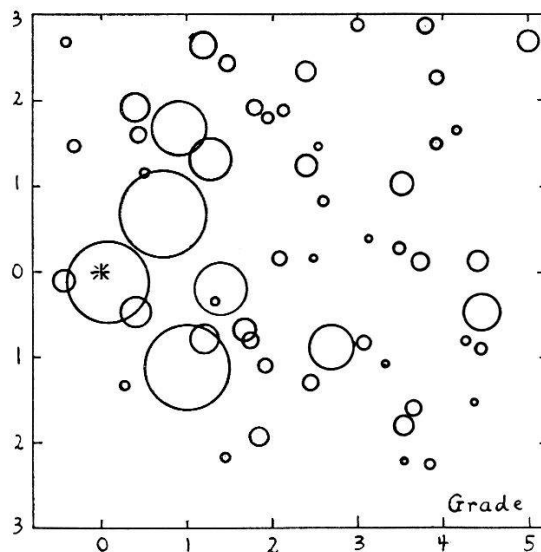


Fig. 3.

Lage und Durchmesser von 55 grossen Nebelhaufen in einem reichen Nebelfeld in Corona Borealis. Der bei den Koordinaten (0, 0) liegende Stern ist β Cor. Bor. mit Rektaszension 15 h 25 m 46 s und Deklination $+29^\circ 20' 46''$.

55 auf den Originalplatten leicht erkennbare grosse Nebelhaufen sind in der Figur 3 als Kreise eingezeichnet, deren Durchmesser aus der Verteilung der fünfzig hellsten Nebel jedes Haufens ermittelt sind. Auf der in Frage stehenden Platte sind noch etwa vierzig zusätzliche und ganz entfernte Nebelhaufen als verschwommene Massen kleiner Flecken erkennbar, die an der Grenze der photographischen Auflösbarkeit liegen und die ganz besonders rot sind. Für solche Haufen ist aber die Bestimmbarkeit eines zuverlässigen Durchmessers zweifelhaft und sie sind deshalb in der folgenden Bewertung nicht benutzt.

Um die Schwankungen kleiner Zahlen möglichst zu eliminieren, wurde in Figur 4 eine vorläufige Probe der Formeln (4) und (5) unter Heranziehung von drei Feldern angestellt, die insgesamt 120 Quadratgrad überdecken und 158 Nebelhaufen enthalten. Die

Mittelpunkte dieser Felder liegen bei den Rektaszensionen 15 h 14 m, 15 h 40 m, 11 h 5 m und den respektiven Deklinationen $+29^{\circ}40'$, $+23^{\circ}42'$ und $+41^{\circ}29'$.

Die in der Figur benutzten Werte von N_{γ}^* beziehen sich je auf einen Raumwinkel von 40 Quadratgrad (Plattenfläche), so dass in (4) $N_{\gamma} \cong 1000 N_{\gamma}^*$. Die Lage des Punktes *A* ist natürlich nur durch die Beobachtungen in einem sehr grossen Feld von tausenden von Quadratgraden ableitbar. Die benutzten Werte für *A* beruhen auf

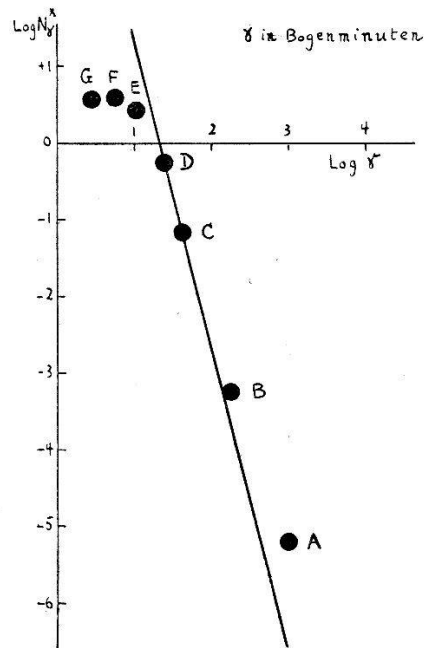


Fig. 4.

Verteilung der grossen Nebelhaufen in drei reichen Nebelfeldern als Funktion ihrer Winkeldurchmesser. Die ausgezogene Gerade ist die nach der Theorie eines stationären Weltalls zu erwartende Beziehung zwischen $\log_{10} N_{\gamma}^*$ und $\log \gamma$.

der Tatsache, dass auf einer Kalotte von 10000 Quadratgrad um den nördlichen galaktischen Pol drei Nebelhaufen bekannt sind, deren Durchmesser im Lichte ihrer fünfzig hellsten Nebel gesehen grösser als zehn Grad sind.

Wir bemerken noch, dass unsere drei Felder im Durchschnitt 1,3 grosse Nebelhaufen pro Quadratgrad enthalten, also eine Zahl, die ungefähr fünfzigmal so gross ist, als ursprünglich angenommen wurde²⁾. Weiter ersieht man, dass die Punkte *B*, *C* und *D* gut auf der theoretischen Kurve liegen. Ebenso stellt der Punkt *A* eine Abweichung dar, wie sie wegen der ihn bestimmenden kleinen Zahl von nur drei Nebelhaufen ganz normal ist.

Für kleine Winkeldurchmesser γ der Haufen weichen die Beobachtungen scharf von der theoretischen Geraden ab. Die beobachteten Werte von N_{γ}^* liegen nicht nur nie über den Geraden,

wie das nach der Theorie des sich ausdehnenden Weltalls zu erwarten wäre, sondern die beobachtete Kurve knickt plötzlich scharf nach viel zu kleinen Werten von N_γ^* ab. Dieses charakteristische Verhalten führt zu zwei Schlussfolgerungen, von denen die erste bereits auf Grund der heute verfügbaren Beobachtungen sicher steht, während die zweite noch vorläufigen Charakters ist. Durch die im Gange befindlichen Untersuchungen der Durchmesser von etwa zweitausend Nebelhaufen wird aber auch die zweite Schlussfolgerung geklärt werden können.

Die erste Schlussfolgerung aus unseren Beobachtungen an Nebelhaufen ist, dass die Lichtabsorption durch intergalaktischen Staub uns die Identifizierung sehr entfernter Haufen verunmöglicht. Während Staub, der mehr oder weniger regelmässig über den ganzen intergalaktischen Raum verteilt ist, schon von den kleinsten Entfernungen an Einzelnebel verdunkelt, bleiben ganze Haufen auf grosse Distanzen identifizierbar, bis in unregelmässiger Weise so viele ihrer Einzelmitglieder verdunkelt werden, dass die Haufen ihre wesentliche Identität verlieren. Dies geschieht relativ plötzlich, und zwar nach Aussage unserer Kurve bei Winkeln γ , die kleiner sind als etwa zwanzig Bogenminuten. Solchen Winkeldurchmessern grosser Haufen entsprechen scheinbare Rezessionsgeschwindigkeiten von etwa 60000 km/s oder Entfernungen von 400 Millionen Lichtjahren (bisherige Distanzskala).

Die zweite erstaunliche, aber noch ganz vorläufige Schlussfolgerung ist die, dass der nach Gleichung (5) für ein sich ausdehnendes Weltall zu erwartende Faktor $[1 - \bar{v}(\gamma)/c]^{-3}$ bis jetzt nirgends in Erscheinung tritt. Wie schon erwähnt, ist $\bar{v}(\gamma) = 60000$ km/s für Nebelhaufen deren Durchmesser $\gamma = 20$ Bogenminuten. Der Punkt D in Figur 4 sollte deshalb bereits um den Betrag $\log_{10} 2$ über der ausgezogenen Geraden liegen. Das ist aber in keinem der bis jetzt ausgemessenen Felder der Fall. Dieser Befund stimmt damit überein, dass der Verfasser mit dem 200-Zoll-Teleskop bei Grenzbelichtung nur einen kleinen Bruchteil der pro Quadratgrad zu erwartenden (im Durchschnitt etwa fünf) grossen Nebelhaufen gefunden hat. Man ist natürlich versucht, diesen Ausfall ganz der Lichtabsorption durch intergalaktischen Staub in die Schuhe zu schieben. Eine genaue Analyse der Verhältnisse zeigt aber, dass ein solcher Ausweg aus verschiedenen Gründen nicht gangbar ist. Der einfachste Grund ist der, dass auf keinen Fall die Identität der Nebelhaufen und ihrer wesentlichen Durchmesser verloren gehen können, bevor man nicht ganz erhebliche Ausfälle in der Gesamtzahl der Nebel selbst beobachtet. Die hundert hellsten

Nebel eines Haufens bleiben im Durchschnitt so lange die scheinbar hellsten Nebel bis Lichtabsorption die Mehrzahl der vielen schwächeren Nebel dieses Haufens verdunkelt hat. Falls man also bei dem Punkt *D* der Figur 4 nicht schon ganz grosse Defizite in den Nebelzahlen beobachtet, was auf unseren Platten nicht der Fall ist, kann man die Tatsache der viel zu kleinen Zahlen von Nebelhaufen nicht durch Lichtabsorption erklären und damit die Theorie des expandierenden Weltalls retten. Ebenso ist bis jetzt kein Anzeichen dafür zu finden, dass Nebelhaufen sich in der kurzen Zeitspanne von einigen hundert Millionen Jahren bilden und daher in unserer extragalaktischen Nachbarschaft häufiger sind als in sehr grossen Entfernungen. Der Hauptgrund für diese Feststellung liegt darin, dass die entfernten Nebelhaufen in jeder Beziehung die gleiche innere Struktur und die gleichen kinematischen Eigenschaften (Geschwindigkeitsdispersion) aufzuweisen scheinen wie die nahen Nebelhaufen.

Es ist noch zu bemerken, dass, falls der Bestimmung von N_γ systematische Fehler anhaften, diese eher von der Art sind, dass N_γ für kleine Werte von γ noch kleinere Werte annehmen würde, als wir sie mit unserer Methode abgeleitet haben. Ein Grund dafür liegt darin, dass in grossen Entfernungen eine kleine Gruppe von Nebeln etwa fälschlicherweise als Haufen identifiziert wird. Der zweite Grund ist der, dass wegen der sicher nicht genau gleichen Dimensionen der ausgewählten Nebelhaufen das von uns errechnete N_γ für kleine γ ebenfalls zu gross ausfällt. Unsere vorläufige Schlussfolgerung ist deshalb, dass die beobachtete Häufigkeit der Nebelhaufen in Abhängigkeit vom Winkeldurchmesser eher auf ein stationäres und im grossen gleichförmig bevölkertes Weltall hinweist und dass die universelle Rotverschiebung nicht als Dopplereffekt zu deuten ist. Die hier mitgeteilten Untersuchungen werden fortgesetzt mit der Absicht, etwa 2000 Nebelhaufen zu bearbeiten und die Analyse mit einem Tatsachenmaterial durchzuführen, dessen Reichhaltigkeit garantiert, dass keine unwahrscheinlich grossen Schwankungen das Endresultat fälschen.

Die dritte Schlussfolgerung, die wir aus unseren Beobachtungen ziehen können, ist, dass sich für die 158 bearbeiteten Nebelhaufen folgende angenäherte Beziehung zwischen der Gesamtzahl n_t , der auf den 48-Zoll-Schmidt-Teleskop-Platten identifizierbaren Mitgliedernebeln und den Haufendurchmessern γ ergibt

$$n_t = k [\gamma - \gamma_0]. \quad (6)$$

Aus dieser Beziehung ist sofort zu schliessen, dass die Zahl n_t auch folgendermassen ausgedrückt werden kann:

$$n_t(\Delta m) = A [10^{\Delta m/5} - 1], \quad (7)$$

wo $\Delta m = m_{\text{Grenze}} - m_{\text{max}}$. Dabei ist m_{Grenze} die für Teleskop, Emulsion und Belichtungszeit charakteristische photographische Grenzgrösse, bei der man gerade noch einen Nebel von einem Stern unterscheiden kann. Andererseits ist m_{max} die photographische Grösse des hellsten Haufennebels. Wie schon längst vorausgesagt⁶⁾, hat also die sogenannte Helligkeitsfunktion der Haufennebel im beobachteten Bereich gar kein Maximum, sondern wächst exponentiell mit Δm an. Dieses Resultat ist unter anderem deshalb von Wichtigkeit, weil mit ihm ein zweiter Eckstein der ursprünglich geplanten Methode dahinfällt, durch radiale Zählungen von extragalaktischen Nebeln zu einem Entscheid zwischen den Theorien eines expandierenden und eines stationären Weltalls zu kommen. Den ersten Grund, der in den grossen Schwankungen der transversalen Nebelzahlen liegt, haben wir schon früher erwähnt.

Schlusswort.

Die im obigen skizzierten Beobachtungen und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen zeigen, dass die Methode der dimensionslosen Morphologie sich im Gebiet der Grossverteilung der Materie im Weltall als ausserordentlich durchschlagsfähig erweist. Es besteht die beste Aussicht, dass mit Hilfe dieser Methode einige der ältesten kosmologischen Probleme einer Entscheidung zugeführt werden können, sobald eine genügende Anzahl der bereits mit dem grossen Schmidt-Teleskop auf Palomar aufgenommenen Durchmusterungsplatten für die allgemeine Ausmessung und Durchzählung zur Verfügung steht, was etwa binnen zweier Jahre der Fall sein sollte. Gleichzeitig wird es angebracht sein, mit dem 200-Zoll-Teleskop zum Zwecke der Aufdeckung systematischer Korrekturen zusätzliche Beobachtungen durchzuführen.

California Institute of Technology, Pasadena.

Literaturverzeichnis.

- 1) E. P. HUBBLE, Proc. Amer. Philosophical Society **95**, 461 (1951); P. TEN BRUGGENCATE, Experientia **6**, 81 (1950).
- 2) E. P. HUBBLE, The Realm of the Nebulae, Yale University Press (1936).
- 3) F. ZWICKY, Publ. of the Astronomical Society of the Pacific **64**, 247 (1952).
- 4) A. EINSTEIN and W. DE SITTER, Proc. of the Nat. Acad. of Sciences **18**, 213 (1932).
- 5) F. ZWICKY, Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific **54**, 185 (1942).
- 6) F. ZWICKY, Physical Review **61**, 489 (1942).