Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln

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

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **6 (1933)**

Heft II

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-110267

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

Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln

von **F. Zwicky.**

(16. II. 33.)

Inhaltsangabe. **Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung vøn Wichtigkeit zu werden verspricht.**

§ 1. Einleitung.

Es ist schon seit langer Zeit bekannt, dass es im Weltraum gewisse Objekte gibt, welche, wenn mit kleinen Teleskopen beobachtet, als stark verschwommene, selbstleuchtende Flecke erscheinen. Diese Objekte besitzen verschiedenartige Strukturen. Oft sind sie kugelförmig, oft elliptisch, und viele unter ihnen haben ein spiralartiges Aussehen, weshalb man sie gelegentlich als Spiralnebel bezeichnet. Dank des enormen Auflösungsvermögens der modernen Riesenteleskope gelang es, festzustellen, dass diese Nebel ausserhalb der Grenzen unseres eigenen Milchstrassensystems liegen. Aufnahmen, die mit dem Hundert-Zoll-Teleskop auf dem Mt. Wilson gemacht worden sind, offenbaren, dass diese Nebel Sternsysteme sind, ähnlich unserem eigenen Milchstrassensystem. Die extragalaktischen Nebel sind im grossen und ganzen gleichförmig über den Himmel und, wie gezeigt werden konnte, auch gleichförmig über den Weltraum verteilt. Sie treten als einzelne Individuen auf oder gruppieren sich zu Haufen. Die folgenden Zeilen beabsichtigen einen kurzen Abriss der wichtigeren Merkmale und eine Beschreibung der Methoden, welche es möglich gemacht haben, diese Merkmale zu fixieren.

§ 2. Entfernungen und allgemeine Merkmale extragalaktischer Nebel.

Wie schon erwähnt, gelingt es, mit Hilfe der modernen Teleskope eine ganze Anzahl von Nebeln ganz oder teilweise in einzelne Sterne aufzulösen. Im grossen Nebel in Andromeda z. B. sind eine grosse Zahl von individuellen Sternen beobachtet worden.

Kürzlich sind in diesem Nebel auch kugelförmige Sternhaufen entdeckt worden, ähnlich denjenigen, die im Bereiche unseres eigenen Milchstrassensystems liegen. Der glückliche Umstand der Beobachtbarkeit einzelner Sterne in Nebeln eröffnet zwei Wege zur Bestimmung von deren Entfernungen.

A) *Bestimmung der Entfernung mit Hilfe der Perioden-Helligkeitsbeziehung für Cepheiden.*

Cepheiden sind Sterne, deren Helligkeit periodisch mit der Zeit variiert. Die Perioden liegen gewöhnlich im Bereich von einem bis zu sechzig Tagen. Die absolute Helligkeit ist eine eindeutige Funktion der Periode, welche Funktion für Sterne unseres eigenen Systems bestimmt worden ist. Bei bekannter Periode ist es deshalb möglich, aus dieser Beziehung die absolute Helligkeit der Cepheiden abzuleiten. Bestimmt man dazu noch die scheinbare Helligkeit und vergleicht man diese mit der berechneten absoluten Helligkeit, so erhält man unmittelbar die Entfernung der Sterne. Eine ganze Reihe von Cepheiden sind im Andromedanebel beobachtet worden. Dessen Distanz und Durchmesser sind mit ihrer Hilfe auf ungefähr 900,000 resp. 42,000 Lichtjahre festgesetzt worden. Zum Vergleich sei daran erinnert, dass unser eigenes System einen Durchmesser besitzt, dessen obere Grenze auf ca. 100,000 Lichtjahre geschätzt wird. Auf gleiche Weise sind die Entfernungen von acht andern Nebeln gefunden worden. In Nebeln, deren Entfernung grösser ist als einige Millionen Lichtjahre, können keine individuellen Cepheiden mehr aufgelöst werden. Zur Bestimmung ihrer Entfernung müssen daher andere Methoden ersonnen werden.

B) *Statistik der Sterne grösster Helligkeit eines Nebels.*

Diese Methode stützt sich auf die Annahme, dass in den extragalaktischen Sternsystemen die relative Häufigkeit der absoluten Helligkeiten der Sterne dieselbe ist wie in unserem eigenen System. Die Erfahrungen mit den bisher untersuchten Nachbarsystemen sind in der Tat in Übereinstimmung mit dieser Annahme. Die absolute Helligkeit der hellsten Sterne in unserem eigenen und den ihm benachbarten Systemen ergibt sich im Mittel als — 6,1 mit einer Streuung von weniger als einer halben Grössenklasse. Auf ähnliche Bestimmungen der Entfernungen mit Hilfe von Novas sei hier nur hingewiesen.

C) *Bestimmung der Entfernung von Nebeln mit Hilfe ihrer totalen scheinbaren Helligkeit.*

Mit Hilfe der ersten zwei Methoden sind bis jetzt die Entfernungen von etwa sechzig extragalaktischen Nebeln gefunden worden. Aus der gemessenen scheinbaren Helligkeit und der bekannten Entfernung dieser Nebel können wir sofort auf ihre absolute Helligkeit schliessen. Wir erhalten auf diese Weise die folgende Verteilungskurve (Fig. 1).

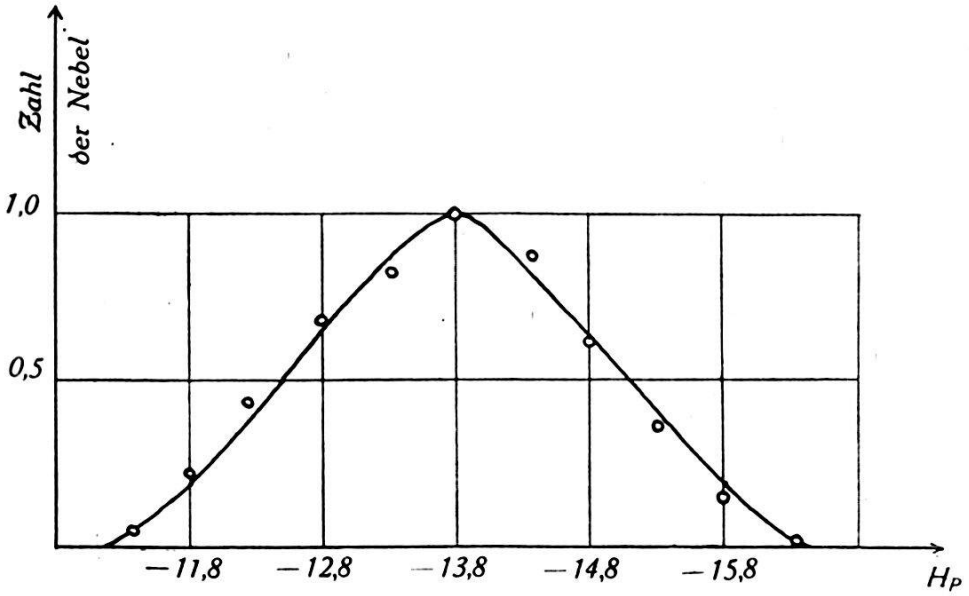

Fig. 1.
H_P = Photographische Helligkeit.

Die mittlere absolute visuelle Helligkeit der Nebel ergibt sich zu − 14,9 mit einer Streuung von ungefähr fünf Grössenklassen und einer Halbwertsbreite der Verteilungskurve von ca. zwei Grössenklassen. Diese Streuung ist leider zu gross, um eine genaue Bestimmung der Entfernung eines *individuellen* Nebels aus seiner scheinbaren Helligkeit und der Verteilungskurve der absoluten Helligkeiten zu ermöglichen. Wie es trotzdem gelingt, die Entfernungen vereinzelter Nebel mit grosser Genauigkeit zu bestimmen, wird später diskutiert. Die folgende Tatsache erlaubt uns indessen, die Entfernung einer grossen Anzahl von ausserordentlich schwachen Nebeln zu finden. Wie schon erwähnt, gruppieren sich Nebel oft in dichten Haufen, welche hundert bis tausend Individuen enthalten. Es ist natürlich ausserordentlich wahrscheinlich, dass eine solche scheinbare Häufung von Nebeln auch eine wirkliche Häufung im Weltraum bedeutet, und dass deshalb alle diese Nebel ungefähr in derselben Entfernung liegen. Es ist relativ leicht, die Verteilungskurve der scheinbaren Helligkeiten der Nebel eines Haufens zu bestimmen. Diese Verteilungskurve

ist praktisch dieselbe wie die Verteilungskurve der absoluten Helligkeiten der sechzig Nebel, deren Distanzen unter A) und B) gefunden worden sind. Das ist ein Beweis dafür, dass die scheinbare Häufung der Nebel auch einem wirklichen dichten Schwarm im Weltraum entspricht. Ein Vergleich der mittleren scheinbaren Helligkeit der Nebel im Haufen mit dem mittleren Absolutwert — 14,9 liefert sofort die Entfernung des Haufens. Die Entfernungen der folgenden Nebelhaufen sind auf diese Weise bestimmt worden.

Tabelle I.

Nebelhaufen	Entfernung in Millionen Lichtjahren
Coma-Virgo	6
Pegasus	23,6
Pisces	22,8
Krebs (Cancer) . . .	29,3
Perseus	36
Coma	45
Ursa Major I	72
Leo	104
Gemini	135

Die Zahl der Nebel pro Einheitsvolumen in einem dieser dichten Schwärme ist zum mindesten hundertmal grösser als die entsprechende mittlere Anzahl der im Weltraum verteilten individuellen Nebel.

Es ist von Interesse, hier einige kurze Bemerkungen betreffend andere Merkmale von Nebeln einzuschalten, welche einer Untersuchung mit Hilfe des Hundert-Zoll-Teleskops zugänglich sind.

In erster Linie ist mit Bezug auf die Struktur des Weltalls von Wichtigkeit die Frage, ob die Verteilung der Nebel über den Weltraum eine gleichförmige ist oder nicht. Im Falle der Gleichförmigkeit erwarten wir für die Anzahl der Nebel in einer Kugelschale vom Radius r und der konstanten Dicke dr eine Anzahl von Nebeln proportional r^2, vorausgesetzt, dass wir es mit einem euklidischen Raum zu tun haben. Diese Erwartung entspricht tatsächlich sehr genau der Wirklichkeit, d. h. für denjenigen Teil des Weltalls, der im Bereich des Hundert-Zoll-Teleskops liegt. Das bedeutet natürlich nicht, dass der Weltraum sich nicht gelegentlich als ein nicht-euklidischer Raum herausstellen wird, falls es einmal gelingt, noch weiter in denselben vorzudringen.

Wir dürfen nicht unterlassen zu erwähnen, dass die vorstehenden Schlussfolgerungen nur gültig sind, falls von einer Absorption und Streuung des Lichtes im Weltraum abgesehen werden kann. Der Befund einer gleichförmigen Verteilung der Nebel bis in die grössten erreichbaren Entfernungen mit einer Methode, die das praktische Fehlen von Absorption und Streuung voraussetzt, ist allerdings in sich schon beinahe ein Beweis für die Richtigkeit dieser Annahme. In der Tat würde eine tatsächlich vorhandene gleichförmige Verteilung von Nebeln durch Absorption dahin gefälscht, dass die Zahl der Nebel in Kugelschalen konstanter Dicke schwächer als r^2 mit der Entfernung zunähme und schliesslich sogar abnehmen würde. In Anbetracht der Tatsache, dass Gase und Staubmassen im interstellaren Raum unseres Systems mit Sicherheit nachgewiesen werden können, wäre es allerdings von grosser Bedeutung, einen unabhängigen Beweis für die Durchsichtigkeit des intergalaktischen Raumes zu liefern und zu zeigen, dass nicht etwa eine Krümmung des Weltraumes, kombiniert mit Absorption und Streuung, eine gleichförmige Verteilung der Nebel vortäuscht. Eine statistische Untersuchung der scheinbaren Durchmesser von Nebeln wäre z. B. dazu geeignet.

Theoretisch müsste das Vorhandensein von intergalaktischer Materie etwa dem Dampfdruck der vorhandenen Sternsysteme entsprechen. Unter der Annahme, dass das Weltall einen stationären Zustand erreicht hat, lässt sich dieser Dampfdruck abschätzen[1]). Er ergibt sich als ausserordentlich klein und würde praktisch das Auffinden intragalaktischer Materie ausschliessen.

Eine weitere interessante Frage ist mit den Spektraltypen der Nebel verknüpft. Die meisten extragalaktischen Nebel besitzen Absorptionsspektren ähnlich demjenigen der Sonne mit stark hervorstechenden H- und K-Linien von Kalzium und einem intensiven G-Band von Ti (4308 Å), Fe (4308 Å) und Ca (4308 Å). Nebel gehören daher zum Spektraltypus G. Der Spektraltypus ist unabhängig von der Entfernung, soweit die Beobachtungen bis jetzt reichen. Eine von der Entfernung abhängige Verschiebung des Gesamtspektrums wird später diskutiert werden. Die Breite der Absorptionslinien beträgt gewöhnlich mehrere Ångströmeinheiten und ist ebenfalls von der Entfernung unabhängig.

Ein kleiner Prozentsatz der beobachteten Nebel weist auch Emissionslinien (Nebulium) auf, die gewöhnlich von der Kernpartie des Nebels herrühren. Über die physikalischen Bedingungen in solchen Systemen ist leider noch sehr wenig bekannt.

---

[1]) F. Zwicky, Proc. of the Nat. Academy of Sci., Vol. 14, S. 592, 1928.

Drittens ist von Wichtigkeit die Untersuchung des Auftretens der verschiedenen schon erwähnten Formen von Nebeln. Die statistische Verteilung ist ungefähr 74% Spiralen, 23% kugelförmige Nebel und etwa 3% zeigen ein irreguläres Aussehen.

Viertens möchte ich die Bestimmung der Helligkeitsverteilung innerhalb eines einzelnen Nebels erwähnen. Diese Untersuchung ist kürzlich von E. HUBBLE am Mt. Wilson unternommen worden. HUBBLE erhält das folgende vorläufige Resultat. Die Helligkeit lässt sich als eine universelle Funktion $L(r, \alpha)$ darstellen, wo r die Entfernung vom Zentrum des Nebels bedeutet und α ein geeigneter Parameter ist. Durch Variation von α können die Helligkeitsverteilungen in allen Nebeln mit grosser Genauigkeit (ca. 1%) auf dieselbe Funktion reduziert werden, und zwar bis zu Werten von r, für welche die Helligkeit bis auf $^1/_{1000}$ derjenigen des Zentrums abgefallen ist. Es ist auch von Wichtigkeit mit Bezug auf das praktische Fehlen von Absorption und Streuung im intergalaktischen Raum, dass die Verteilungsfunktion der $\alpha's$ in den verschiedenen Nebelhaufen von der Entfernung unabhängig ist. Beiläufig sei erwähnt, dass L mit derjenigen Funktion zusammenfällt, die der Helligkeitsverteilung in einer isothermen Emden'schen Gaskugel entspricht.

Fünftens ist von enormer Bedeutung, dass die Nebel in grosser Entfernung nach rot verschobene Spektren aufweisen, wobei die Verschiebung mit der Entfernung zunimmt. Die Besprechung dieser sog. Rotverschiebung stellt das Hauptthema dieser Arbeit dar.

§ 3. Die Rotverschiebung extragalaktischer Nebel.

Beziehung zwischen Entfernung und Rotverschiebung.

V. M. SLIPHER am Observatorium in Flagstaff in Arizona war der erste, der beobachtete, dass gewisse Nebel Verschiebungen ihrer Spektren aufweisen, welche einem Dopplereffekt von bis zu 1800 km/sek. entsprechen. Dagegen ist von SLIPHER noch keine Beziehung zwischen Rotverschiebung und Entfernung aufgestellt worden. Ein solcher Zusammenhang wurde zuerst von G. STRÖMBERG[1]) vermutet anlässlich seiner Untersuchung über die Geschwindigkeit der Sonne relativ zu weiter und weiter entfernten Objekten. Er fand, dass die mittlere Geschwindigkeit der Sonne, bezogen auf das System der uns benachbarten Nebel sehr gross ist, d. h. von der Grössenordnung von 500 km/sek, und dass die Gruppe der benutzten Nebel eine Expansion besitzt, welche von der Entfernung des einzelnen Nebels abzuhängen scheint.

[1]) G. STRÖMBERG, Astrophys. Journal **61**, 353—388 (1925).

Da zur Zeit von Strömbergs Untersuchungen noch keine zuverlässige Bestimmung der Entfernungen der Nebel bekannt war, versuchte K. LUNDMARK, die beobachteten grossen Geschwindigkeiten mit der „Kompaktheit" der photographischen Bilder der Nebel in Zusammenhang zu bringen. Dies erwies sich später als ein Versuch in der richtigen Richtung. Der Versuch blieb allerdings ohne positiven Erfolg, da es sich herausstellte, dass die scheinbaren Durchmesser von Nebeln derselben Entfernung grosse Variationen aufweisen.

E. HUBBLE am Mt. Wilson arbeitete in derselben Richtung. Auch er versuchte zuerst, die Rotverschiebung an die scheinbare Konzentration des Nebels zu knüpfen. Dabei ging er von dem Gedanken aus, dass die Rotverschiebung dem bekannten Einstein'schen Effekt entspräche. Es zeigte sich indessen, dass es auf diese Weise nicht möglich war, rationelle Zusammenhänge aufzudecken.

E. HUBBLE versuchte daraufhin, die Rotverschiebung mit der Entfernung der verschiedenen Nebel in Zusammenhang zu bringen. Dieser Versuch ist, wie wohl bekannt, seither von grossem Erfolg gekrönt gewesen. Die Nebel, die anfänglich für eine solche Untersuchung zur Verfügung standen, besassen Entfernungen von einer bis zu sechs Millionen Lichtjahren. Die Diskussion aller Daten ergab eine lineare Beziehung zwischen der Rotverschiebung und der Entfernung, mit dem Resultat, dass die Verschiebung einer scheinbaren Fluchtgeschwindigkeit von 500 km/sek pro eine Million Parseks entsprach (1 Parsek gleich ca. 3,26 Lichtjahre). Die Streuung war dabei allerdings relativ gross, indem z. B. der uns benachbarte Andromedanebel eine *Violettverschiebung* von ca. 200 km/sek besitzt, d. h. sich entweder scheinbar oder wirklich auf uns zu bewegt. Trotzdem ergab sich später, dass die hier zum erstenmal berechnete Verschiebung der Spektren eine ausserordentlich gute war. Der beste Beweis für die erstaunliche Sorgfalt der Hubble'schen Arbeitsweise ist wohl, dass er auf Grund der obigen Beziehung bis jetzt noch in jedem Falle die Rotverschiebungen bis auf einige Prozent genau voraussagen konnte, und zwar für Entfernungen, die bis auf das Dreissigfache der zuerst benutzten angewachsen sind.

Die Schwierigkeit, die Spektren sehr entfernter Nebel zu photographieren, liegt in der Notwendigkeit ausserordentlich langer Expositionszeiten. In der Tat war es notwendig, Platten bis zu fünfzig Stunden und mehr zu exponieren, und es schien kaum möglich, mit dieser Untersuchung noch viel weiter in den Weltraum vorzudringen. In neuester Zeit sind dadurch grosse Fort-

schritte erzielt worden, dass man einen Spektrographen benutzte, dessen Kammeralinse das Öffnungsverhältnis F/0,6 besitzt. Damit wurde allerdings sehr an Dispersion geopfert, und die erhaltenen Spektren sind nur etwa zwei Millimter lang. Die Expositionszeiten konnten indessen auf einige Stunden heruntergedrückt werden. Trotzdem scheint es nicht möglich zu sein, weiter als etwa 200 Millionen Lichtjahre in den Weltraum vorzudringen. Der Grund dafür liegt teilweise in dem Standort des Hundert-Zoll-Teleskops in der Nähe der Grosstadt Los Angeles, denn die Beleuchtung des Nachthimmels und die damit verbundene starke Lichtstreuung ins Teleskop setzt den astronomischen Beobachtungen auf dem Mt. Wilson leider eine Grenze, die noch unterhalb der tatsächlichen Leistungsfähigkeit des Teleskops liegt. Für das 200-Zoll-Teleskop, das sich gegenwärtig für das California Institute of Technology in Konstruktion befindet, wird deshalb ein günstigerer Standort ausgewählt werden müssen.

Die Rotverschiebungen der verschiedenen Nebelhaufen, ausgedrückt als scheinbare Doppler'sche Fluchtgeschwindigkeiten, sind in der folgenden Tabelle II zusammengestellt.

Tabelle II[1]).

Nebelhaufen	Zahl d. Nebel im Haufen	Scheinbarer Durchmesser	Entfernung in 10^6 Lichtjahren	Mittlere Geschwindigkeit
				km/sek
Virgo . . .	(500)	12°	6	890
Pegasus . .	100	1°	23,6	3810
Pisces . . .	20	0,5	22,8	4630
Cancer . .	150	1,5	29,3	4820
Perseus . .	500	2,0	36	5230
Coma . . .	800	1,7	45	7500
Ursa Major I	300	0,7	72	11800
Leo	400	0,6	104	19600
Gemini . .	(300)	—	135	23500

Diese Resultate sind in Fig. 2 graphisch dargestellt.

Aus dieser Zusammenstellung folgt, dass die extragalaktischen Nebel Geschwindigkeiten besitzen, welche der Entfernung proportional sind. Die spezifische Geschwindigkeit, pro Million Parseks, ist

$$v_s = 558 \text{ km/sek.} \tag{1}$$

Die Rotverschiebung jedes individuellen Nebels ist im Mittel aus den Verschiebungen von mindestens drei Spektrallinien abge-

[1]) Siehe E. Hubble und M. L. Humason, Astrophys. Journal LXXIV, 1931. In dieser Arbeit sind auch die wesentlichsten Literaturangaben zu finden.

leitet. Es sind dies gewöhnlich die H- und K-Linien, das G-Band ($\lambda = 4303$ Å) und gelegentlich eine der Linien H_δ (4101 Å), H_γ (4340 Å), Fe (4384 Å) und H_β (4861 Å). Die Unsicherheit in der Rotverschiebung des Nebelhaufens in Leo ergibt sich auf diese Weise z. B. als

$$v = 19621 \pm 300 \text{ km/sek}.$$

Die verschiedenen Absorptionslinien erleiden dieselbe relative Ver-

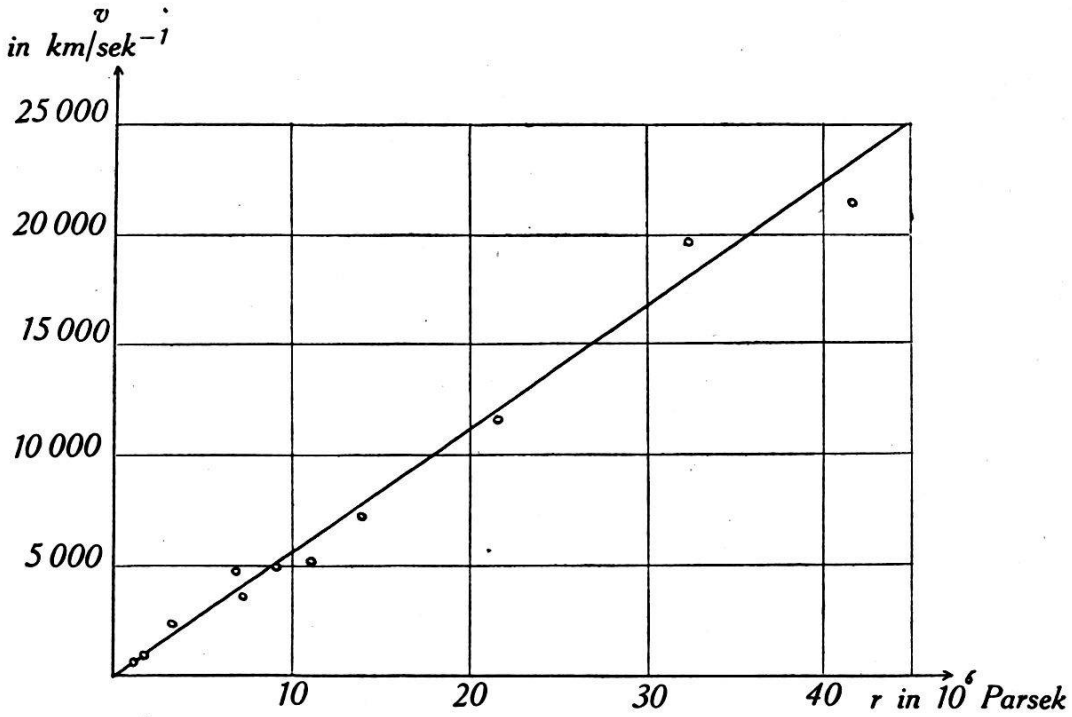

Fig. 2.

schiebung, genau wie beim Dopplereffekt. Es ist also für einen bestimmten Nebel

$$\Delta\lambda/\lambda = \text{konstant} = K = v/c = \varkappa r \qquad (2)$$

unabhängig von der Wellenlänge λ, und die Verschiebung kann, wie wir es getan haben, bequemerweise im Geschwindigkeitsmasse ausgedrückt werden. Derselbe Wert von K gilt daher auch für die Verschiebung des Maximums des kontinuierlichen Emissionsspektrums.

Es darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass wir in Fig. 1 die mittlere Dopplergeschwindigkeit der Nebelschwärme aufgetragen haben. Diese Geschwindigkeit ist das Mittel aus den Werten mehrerer individueller Nebel (von 2 bis 9) in den einzelnen Haufen. Es ist von grosser Bedeutung für die Theorie der hier besprochenen Effekte, dass die Geschwindigkeiten der einzelnen Mitglieder eines Haufens sehr vom Mittel abweichen können. Im Comasystem z. B., welches bis jetzt am besten untersucht worden ist, sind die folgenden Einzelwerte gemessen worden.

Scheinbare Geschwindigkeiten im Comahaufen.

$v =$ 8500 km/sek	6900 km/sek
7900	6700
7600	6600
7000	5100 (?)

Es ist möglich, dass der letzte Wert von 5100 km/sek einem sog. Feldnebel (field nebula) entspricht, welcher nicht dem Comasystem angehört, sondern nur in dasselbe sich projiziert. Die Wahrscheinlichkeit für diese Annahme ist allerdings nicht sehr gross ($^1/_{16}$). Auch wenn wir diesen Nebel weglassen, bleiben die Variationen im Comasystem immer noch sehr gross. Es ist in diesem Zusammenhang von Interesse, daran zu erinnern, dass die mittlere Dichte im Comahaufen die grösste bis jetzt beobachtete ist.

Nachdem jetzt die Beziehung zwischen der Entfernung und der Rotverschiebung bekannt ist, können wir rückwärts aus derselben die Entfernungen von Einzelnebeln ableiten, falls deren Rotverschiebungen spektroskopisch gemessen sind. Weiterhin können wir die Zuverlässigkeit der früher besprochenen Methoden zur Bestimmung der Entfernung nochmals unabhängigerweise nachprüfen. Wir brauchen dazu in der Tat nur die Verteilungskurve der Helligkeiten aller Einzelnebel derselben Rotverschiebung zu bestimmen. Diese neue Verteilungskurve muss mit derjenigen der Fig. 1 übereinstimmen, falls unsere ursprüngliche Entfernungsbestimmung richtig ist. Dies ist in der Tat sehr angenähert der Fall.

Wie schon erwähnt, bedeutet die Rotverschiebung eine Verschiebung des gesamten Emissionsspektrums des Nebels. Zusätzlich zur Verminderung der scheinbaren photographischen Helligkeit in geometrischer Abhängigkeit von der Entfernung gibt es also noch eine Verminderung infolge der Rotverschiebung. Das Problem der räumlichen Verteilung der Nebel in grossen Entfernungen ist also nicht nur mit der Krümmung und Absorption des Weltraumes, sondern auch noch mit der Rotverschiebung eng verknüpft, was die ganze Sachlage sehr kompliziert.

Zum Schlusse müssen wir noch einige Resultate van Maanen's erwähnen, die mit der Hubble'schen Bestimmung der Entfernung im Widerspruch zu sein scheinen. Van Maanen hat über den Zeitraum von etwa zwanzig Jahren die scheinbaren Bewegungen (im Winkelmass) von Nebeln an der Himmelssphäre gemessen. Da die entsprechenden Winkelgeschwindigkeiten der nächsten Nebel nur etwa 0,01 Bogensekunden pro Jahr betragen, können zu dieser Untersuchung nur Nebel mit gut definierten, sternartigen „Ker-

nen" benutzt werden, da sonst die Festlegung der Koordinaten des Nebels sehr durch die Verwaschenheit seines photographischen Bildes erschwert ist. Kombiniert man die van Maanen'schen Winkelgeschwindigkeiten mit den Hubble'schen Entfernungen, so erhält man ausserordentlich hohe Geschwindigkeiten. Für N. G. 4051, der nach HUBBLE in der Entfernung von 4 Millionen Lichtjahren liegt und die scheinbare Radialgeschwindigkeit 650 km/sek besitzt, misst VAN MAANEN eine Winkelgeschwindigkeit von 0,015″ pro Jahr, woraus eine wirkliche Geschwindigkeit von 94,000 km/sek folgt. Darin liegt ein grosses Problem. Eine triviale Lösung scheint von vornherein nicht ausgeschlossen, indem vielleicht die von VAN MAANEN beobachtete Bewegung nicht dem Nebel, sondern dem als Bezugssystem benutzten Sternhintergrund zugeschrieben werden könnte. Es muss allerdings betont werden, dass VAN MAANEN für 13 Nebel ähnliche Diskrepanzen festgestellt hat. Dabei ergab sich noch das Resultat, dass sich alle diese Nebel vom Pol der Milchstrasse wegzubewegen scheinen, was schwer durch die Annahme einer Bewegung des Bezugssystemes zu erklären ist.

Von gleicher Wichtigkeit ist VAN MAANEN's Bestimmung der Eigenrotation extragalaktischer Spiralnebel. In Messier 33, nach HUBBLE in der Entfernung von 900,000 Lichtjahren, beobachtet VAN MAANEN, überlagert über die oben erwähnte Transversalbewegung, eine dem gesamten Nebel zukommende Rotation, deren Komponenten für Einzelobjekte im Nebel von der Grössenordnung von 0,012″ bis zu 0,024″ pro Jahr sind. Bei der genannten Entfernung ergeben sich Drehgeschwindigkeiten von der Grössenordnung von 33,000 km/sek, während z. B. F. G. PEASE für N. G. C. 4594 aus dem Dopplereffekt an beiden Enden seines Durchmessers die Eigenrotation von nur 800 km/sek gemessen hat[1]).

Falls man also die van Maanen'schen Resultate nicht Beobachtungsfehlern zuschreibt, sondern als für die Nebel selbst charakteristisch annimmt und die Hubble'schen Entfernungsbestimmungen nicht fallen lassen will, steht man vor einem ernsthaften Problem.

§ 4. Spekulationen betreffend die Rotverschiebung.

Eine vollständige Theorie der Rotverschiebung muss zu Resultaten führen, welche den folgenden Forderungen genügen.

1. Die Rotverschiebung ist einem Dopplereffekt analog, d. h. $\Delta\lambda/\lambda$ für einen bestimmten Nebel ist eine Konstante.

[1]) An Messier 33 selbst sind die Beobachtungen noch nicht abgeschlossen. Die Rotationsgeschwindigkeiten betragen aber nur etwa 50 km/sek.

2. Die scheinbare Dopplergeschwindigkeit ist proportional der Entfernung r und beträgt 558 km pro Sekunde und Million Parseks.

3. Es besteht keine merkbare Absorption und Streuung von Licht im Weltraum, welche mit der Rotverschiebung in Verbindung gebracht werden könnte.

4. Die Bestimmtheit der optischen Bilder der Nebel ist so gut, wie man es vom Auflösungsvermögen der Instrumente erwarten kann. Die Entfernung der Objekte spielt offenbar die aus geometrischen Überlegungen zu erwartende Rolle.

5. Die Spektraltypen der Nebel sind im wesentlichen von der Entfernung unabhängig.

6. Die grosse Streuung der Einzelwerte der Geschwindigkeiten der Nebel dichter Haufen muss im Zusammenhang mit der Rotverschiebung erklärt werden.

7. Die Geschwindigkeit des Lichtes auf dem langen Wege vom Nebel bis zu uns ist praktisch dieselbe, wie die aus terrestriellen Messungen bekannte Lichtgeschwindigkeit. Dies wurde durch Aberrationsmessungen an Nebeln von Strömberg und auch von Biesbroek festgestellt.

8. Eine Theorie der Rotverschiebung, welche nicht gleichzeitig eine Aufklärung der van Maanen'schen Resultate liefert, ist zum mindesten unbefriedigend.

Die angeführten Tatsachen stellen das Beobachtungsmaterial bis zu einer Entfernung von ungefähr 150 Millionen Lichtjahren dar. Zu ihrer Erklärung liegen bis jetzt zwei allgemeine Vorschläge vor. Der erste umfasst alle Theorien kosmologischen Charakters, die sich auf die Relativitätstheorie stützen. Der zweite geht aus von einer Wechselwirkung des Lichtes mit der Materie des Weltraumes.

A) *Kosmologische Theorien.*

Es sind in den letzten Jahren eine grosse Reihe von Versuchen gemacht worden, die Rotverschiebung auf Grund der Relativitätstheorie zu erklären. Einige wesentliche Gedanken sind dabei die folgenden.

Die allgemeine Relativitätstheorie hat zu zwei Auffassungen betreffend die Struktur des Weltraumes geführt. Die eine ist repräsentiert durch die Einstein'sche quasisphärische Welt, während de Sitter für den Fall verschwindend kleiner Massendichte die Möglichkeit eines hyperbolischen Raumes abgeleitet hat.

Während die Geometrie des Einstein'schen Raumes nicht direkt zu einer Rotverschiebung führt, ist mit der de Sitter'schen Welt eine solche notwendigerweise verknüpft. R. C. Tolman hat indessen gezeigt, dass dabei $\Delta\lambda/\lambda$ nicht nur von der Entfernung, sondern auch noch von der Eigengeschwindigkeit des Nebels abhängt. Es folgt, dass man neben der Rotverschiebung auch Violettverschiebungen erwarten müsste, die zwar im Mittel kleiner, im ganzen aber doch von derselben Grössenordnung sind wie die Rotverschiebungen, was den Beobachtungen widerspricht. Die Rotverschiebung konnte deshalb nicht direkt mit der Krümmung des Raumes in Verbindung gebracht werden.

Ein weiterer wichtiger Vorschlag stammt von Friedmann, Tolman, Lemaitre und Eddington, aus deren Arbeiten hervorgeht, dass ein statischer Raum nach der Relativitätstheorie dynamisch unstabil ist und deshalb anfangen wird, sich zu kontrahieren oder zu expandieren. Dieses Resultat wurde von ihm dahin interpretiert, dass die Rotverschiebung einer tatsächlichen Expansion des Weltalls entspräche. Dieser Vorschlag ist seither von vielen Forschern eingehend diskutiert worden. Die einfachste Formulierung wurde kürzlich von Einstein und de Sitter[1]) gegeben. Diese beiden Forscher geben vorläufig eine Gesamtkrümmung des Raumes vollkommen auf. Die Krümmung des Raumes war im wesentlichen eine Folge der Einführung einer sog. kosmologischen Konstanten Λ in die Einstein'schen Feldgleichungen, was dem Postulat einer Abstossungskraft entspricht, welche für sehr grosse Entfernungen die Newton'sche Anziehung kompensiert. Dieses Postulat war geschichtlich notwendig, um die Existenz einer nicht verschwindenden mittleren Massendichte zu verstehen, die sonst im Grenzfalle eines unendlichen statischen Raumes zu unendlichen Gravitationspotentialen führen würde. Diese letztere Schwierigkeit fällt aber automatisch fort, falls alle Massen im Weltall sich voneinander weg oder aufeinander zu bewegen. Die Expansion der Materie kann dann unter Weglassung von Λ und der mittleren Krümmung direkt mit der mittleren Dichte in Zusammenhang gebracht werden. Einer Expansion von 500 km/sek pro Million Parseks entspricht nach Einstein und de Sitter eine mittlere Dichte $\varrho \cong 10^{-28}$ gr/cm^3. Aus den Beobachtungen an selbstleuchtender Materie schätzt Hubble $\varrho \sim 10^{-31}$ gr/cm^3. Es ist natürlich möglich, dass leuchtende plus dunkle (kalte) Materie zusammengenommen eine bedeutend höhere Dichte ergeben, und der Wert $\varrho \sim 10^{-28}$ gr/cm^3 erscheint daher nicht

[1]) A. Einstein und W. de Sitter, Proc. of the Nat. Acad. Sci., Vol. 18, S. 213, 1932.

unvernünftig. Aus der Theorie ergibt sich weiter nach EINSTEIN die folgende genauere Beziehung für die Rotverschiebung

$$\Delta\lambda/\lambda = \varkappa r[1 + 7\,\Delta\lambda/4\,\lambda]. \tag{3}$$

Das bedeutet, dass für grosse Entfernungen die Rotverschiebung stärker als linear mit der Entfernung zunehmen sollte. Auf Grund des bisherigen Beobachtungsmaterials ist es leider noch nicht möglich, diese wichtige Schlussfolgerung nachzuprüfen. Neuerdings für grösste Entfernungen beobachtete Werte $\Delta\lambda/\lambda \sim 1/7$ sind allerdings gross genug, um beträchtliche Abweichungen (25%) von der linearen Beziehung erwarten zu lassen.

Die Theorie führt auch zu bestimmten Schlussfolgerungen betreffend die Verteilung der Helligkeiten, Zahl der Nebel, Durchmesser usw., in Abhängigkeit von der Entfernung, die aber ebenfalls noch nicht nachgeprüft sind.

Keine der kosmologischen Theorien hat sich bis jetzt mit dem Problem der grossen Streuung der Geschwindigkeiten in dichten Nebelhaufen, wie dem Comasystem, beschäftigt.

B) *Direkte Beeinflussung der Frequenz des Lichts durch im Weltraum vorhandene Materie.*

Ein Versuch, verschiedene physikalische Effekte wie Comptoneffekt an ruhenden oder bewegten Elektronen im Weltraum, Ramaneffekt usw., zur Erklärung der Rotverschiebung heranzuziehen, wurde von mir bereits vor einigen Jahren unternommen[1]). Es zeigte sich, dass keiner unter diesen eine wesentliche Rolle spielen kann. Bei Heranziehung von Effekten, welche in einer unmittelbaren räumlichen Wechselwirkung zwischen Licht und Materie ihren Ursprung haben, erweist es sich nämlich als unmöglich, die Durchsichtigkeit des intergalaktischen Raumes zu erklären.

Dagegen schlug ich damals einen weiteren möglichen Effekt vor, der zwar auf der Erde kaum wird beobachtet werden können, für dessen Existenz aber gewisse theoretische Gründe vorgebracht werden können. Einem Photon oder Lichtquant von der Frequenz ν entspricht nach der Relativitätstheorie eine träge sowohl als eine schwere Masse $h\nu/c^2$. Es besteht also eine Wechselwirkung (Anziehung) zwischen Licht und Materie. Wird das Photon in zwei verschiedenen Punkten P_1 und P_2, deren Gravitationspotentiale *dieselben* sind, emittiert und absorbiert, so verliert es auf dem Wege von P_1 nach P_2 einen gewissen Impuls und gibt denselben an die Materie ab. Das Photon wird röter. Dieser

[1]) F. ZWICKY, Proc. of the Nat. Acad. Sci., Vol. 15, S. 773, 1929.

Effekt, den man als Gravitationsreibung bezeichnen könnte, ist wesentlich durch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von Gravitationswirkungen verursacht. Seine Grösse hängt von der mittleren Dichte der Materie, sowie von deren Verteilung ab. Die Rotverschiebung $\Delta\lambda/\lambda$ ist in diesem Falle nicht nur von der Entfernung, sondern auch noch von der Verteilung der Materie abhängig. Untersuchungen zur Prüfung dieser Schlussfolgerung sind im Gange.

Abschliessend ist wohl zu sagen, dass keine der bis jetzt vorgeschlagenen Theorien befriedigen kann. Alle sind auf äusserst hypothetischer Basis entwickelt, und es ist keiner unter ihnen gelungen, praktisch irgendwelche neuen physikalischen Zusammenhänge aufzudecken.

§ 5. Bemerkungen zur Streuung der Geschwindigkeiten im Coma-Nebelhaufen.

Wie aus der Zusammenstellung in § 3 hervorgeht, existieren im Comahaufen scheinbare Geschwindigkeitsunterschiede von mindestens 1500 bis 2000 km/sek. Im Zusammenhang mit dieser enormen Streuung der Geschwindigkeiten kann man folgende Überlegungen anstellen.

1. Setzt man voraus, dass das Comasystem mechanisch einen stationären Zustand erreicht hat, so folgt aus dem Virialsatz

$$\bar{\varepsilon}_k = -\tfrac{1}{2}\,\bar{\varepsilon}_p\,, \tag{4}$$

wobei $\bar{\varepsilon}_k$ und $\bar{\varepsilon}_p$ mittlere kinetische und potentielle Energien, z. B. der Masseneinheit im System bedeuten. Zum Zwecke der Abschätzung nehmen wir an, dass die Materie im Haufen gleichförmig über den Raum verteilt ist. Der Haufen besitzt einen Radius R von ca. einer Million Lichtjahren (gleich 10^{24} cm) und enthält 800 individuelle Nebel von je einer Masse entsprechend 10^9 Sonnenmassen. Die Gesamtmasse M des Systems ist deshalb

$$M \sim 800 \times 10^9 \times 2 \times 10^{33} = 1.6 \times 10^{45}\,\text{gr.} \tag{5}$$

Daraus folgt für die totale potentielle Energie Ω:

$$\Omega = -\frac{3}{5}\,\Gamma\,\frac{M^2}{R} \tag{6}$$

Γ = Gravitationskonstante

oder

$$\bar{\varepsilon}_p = \Omega/M \sim -64 \times 10^{12}\,\text{cm}^2\,\text{sek}^{-2} \tag{7}$$

und weiter

$$\bar{\varepsilon}_k = \overline{v^2}/2 = -\varepsilon_p/2 = 32 \times 10^{12}\,\text{cm}^2\,\text{sek}^{-2}$$

$$(\overline{v^2})^{1/2} = 80\,\text{km/sek}\,. \tag{8}$$

Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete[1]). Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

2. Man kann auch annehmen, dass das Comasystem sich nicht im stationären Gleichgewicht befindet, sondern dass die ganze verfügbare potentielle Energie als kinetische Energie erscheint. Es wäre dann

$$\varepsilon_k = -\varepsilon_p . \tag{9}$$

Man kann also durch diese Annahme gegenüber 1. nur einen Faktor 2 einsparen, und die Notwendigkeit einer enorm grossen Dichte dunkler Materie bleibt bestehen.

3. Die mittlere Dichte im Comahaufen sei gänzlich durch das Auftreten leuchtender Materie bestimmt (obige Masse M). Die grossen Geschwindigkeiten können dann nicht auf Grund von Überlegungen vom Typus 1. oder 2. erklärt werden. Falls die beobachteten Geschwindigkeiten trotzdem wirkliche sind, müsste also das Comasystem mit der Zeit auseinanderfliegen. Das Resultat dieser Expansion wären am Ende 800 Einzelnebel (field nebulae), welche, wie aus 2. hervorgeht, Eigengeschwindigkeiten von der ursprünglichen Grössenordnung (1000 bis 2000 km/sek) aufweisen würden. Aus Analogie müsste man also erwarten, dass Einzelnebel mit derartig grossen Eigengeschwindigkeiten auch im gegenwärtigen Entwicklungsstadium des Weltalls beobachtet werden können. Diese Schlussfolgerung stimmt aber kaum mit den Erfahrungstatsachen überein, indem die Streuung Eigengeschwindigkeiten von einzeln auftretenden Nebeln 200 km/sek nicht übersteigt.

4. Man kann auch versuchen, die Geschwindigkeiten als scheinbare aufzufassen, indem man sie als durch die Einstein'sche Rotverschiebung verursacht interpretiert. Unter Voraussetzung der obigen Masse M hätte man für die relative Änderung der Wellenlänge λ

$$\Delta\lambda/\lambda \sim -\varepsilon_p/c^2 \sim 3{,}5 \times 10^{-8}, \tag{10}$$

was einer Geschwindigkeit von nur 10 m/sek entspricht. Um also auf diese Weise zu einer Erklärung für die grossen Streugeschwindigkeiten zu kommen, müsste man noch eine sehr viel grössere Dichte dunkler Materie zulassen als unter 1. oder 2.

---

[1]) Dies wäre grössenordnungsmässig in Übereinstimmung mit der in § 4 besprochenen Auffassung von EINSTEIN und DE SITTER.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass die grosse Streuung der Geschwindigkeiten im Comasystem (und in anderen dichten Nebelhaufen) ein noch nicht geklärtes Problem in sich birgt.

§ 6. Durchdringende Strahlung und Rotverschiebung.

Vergleicht man die Intensität des sichtbaren Lichtes von unserer Milchstrasse (L_m) mit der Intensität des Lichtes (L_w), das vom Rest des Weltalls zu uns kommt, so erhält man

$$L_m/L_w \gg 1 . \tag{11}$$

Unter der Annahme, dass die durchdringende Strahlung nicht lokalen Charakters ist, ergibt sich für dieselbe das zu (11) analoge Verhältnis der Intensitäten S als

$$S_m/S_w < 0{,}01 . \tag{12}$$

Es folgt dies aus dem praktischen Fehlen sternzeitlicher Variationen für die durchdringende Strahlung. Wie ich anderorts[1]) auseinandergesetzt habe, ist die Ungleichung (12) deshalb schwer zu verstehen, weil kosmische Strahlen, die in sehr grosser Entfernung entstehen, infolge der Rotverschiebung mit sehr verminderter Energie auf der Erde eintreffen. Falls z. B. die Rotverschiebung durchwegs der Entfernung proportional wäre, würden Lichtquanten, die aus Entfernungen grösser als 2000 Millionen Lichtjahre herkommen, bei uns mit der Energie Null eintreffen. (Aus dieser Überlegung folgt beiläufig, dass auch bei Vorhandensein unendlich vieler Sterne im Weltall, die Lichtintensität doch überall einen endlichen, wohldefinierten Wert besitzt.) Unter vernünftigen Annahmen über den Typus der Reaktion, welche kosmische Strahlen produziert, ist es sehr schwer, die Ungleichung (11) zu verstehen, und zwar liegt, wie angedeutet, die Hauptschwierigkeit in der Existenz der Rotverschiebung[1]).

Schliesslich möchte ich noch darauf hinweisen, dass die Koexistenz der beiden Ungleichungen (11) und (12) gewissen neueren Auffassungen über den Ursprung der durchdringenden Strahlung sehr grosse Schwierigkeiten bereiten wird. Es ist z. B. von G. Lemaitre der Vorschlag gemacht worden, dass man die kosmischen Strahlen als Überbleibsel gewisser superradioaktiver Prozesse betrachten könne, die vor langer Zeit vor sich gegangen sind. Nun muss aber gleichzeitig ein entsprechend riesiger Betrag von

[1]) F. Zwicky, Phys. Review, Januar 1933.

sichtbarem und ultraviolettem Licht emittiert worden sein. Da interstellare Gase (ebenso wie unsere Atmosphäre) die durchdringende Strahlung stärker absorbieren als sichtbares Licht, ist die Koexistenz der Ungleichungen (11) und (12) unverständlich.

Es ist weiter wichtig, in diesem Zusammenhang auf die folgende interessante Tatsache hinzuweisen. Ein unregelmässig begrenzter Gürtel, welcher der Milchstrasse entlang läuft und sich von etwa -10^0 bis zu $+10^0$ galaktischer Breite erstreckt, versperrt vollkommen unsere Aussicht in den extragalaktischen Raum, d. h. es können in diesem Gürtel keine extragalaktischen Nebel beobachtet werden. Es ist bekannt, dass ein Teil der Absorption sehr ausgedehnten, dichten Staubmassen zuzuschreiben ist. Falls die durchdringenden Strahlen extragalaktischen Ursprungs sind, müsste man eigentlich erwarten, dass auch sie entlang der Milchstrasse absorbiert würden, d. h. man müsste auf der Erde eine sternzeitliche Variation der Intensität der kosmischen Strahlen beobachten. Da eine solche Variation nicht gefunden worden ist, ist man versucht zu schliessen, dass die durchdringende Strahlung nicht extragalaktischen Ursprungs sein kann. Es muss allerdings noch genauer untersucht werden, mit welcher Dichte und in welcher Ausdehnung interstellare Materie in der Milchstrasse auftritt.

Die vorliegende Arbeit ist aus zahlreichen Diskussionen mit den in diesem Gebiet arbeitenden Forschern am Mt. Wilson Observatorium entstanden. Ich bin insbesondere Herrn Dr. W. Baade für viele wertvolle Ratschläge zu grossem Dank verpflichtet.

California Institute of Technology, Pasadena.