

100 Jahre „Kosmische Expansion“:

Wer hat entdeckt, dass das Universum expandiert?

Wolfgang Albrecht, Reinhard Mawick

Diese Expansion wird mit dem Hubble – Gesetz $v=H \cdot d$ bzw. $H=v/d$ beschrieben. Die Größe H ist die sogenannte „Hubble-Konstante“. Mit diesem Gesetz wird eine fundamentale Eigenschaft unseres Universums beschrieben, das Ausmaß seiner gegenwärtigen Expansion. Schauen wir in das All, haben wir den Eindruck, dass sich die fernen Galaxien von uns wegbewegen. Je ferner sie sind umso schneller bewegen sie sich von uns weg. Heute gehen wir für H von einer Größenordnung von ca. $70 \text{ km/sek Mpc}^{-1}$ aus, mit der sich, wie wir inzwischen wissen, der Kosmos ausdehnt.

Das Hubble Gesetz hat seinen Namen vom US-amerikanischen Astronomen Edwin Hubble, dem zugeschrieben wird, zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Entdeckung gemacht zu haben, die von vielen Astrophysikern als die größte wissenschaftliche Entdeckung aller Zeiten angesehen wird: **Der Kosmos ist nicht statisch, wie bis dahin alle angenommen haben, sondern dynamisch.**

Nun hat die Internationale Astronomische Union (IAU) diese Namensgebung korrigiert. Hubble war es nicht allein. Zum einen hatte er eine große Anzahl von Mitarbeitern zum andern ist die Erkenntnis des dynamischen Universums zu Anfang des 20. Jahrhunderts auf Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein weiteren Astrophysikern gelungen.

Dem hat die IAU nun Rechnung getragen mit seiner Empfehlung, in Zukunft vom Hubble-Lemaître Gesetz zu sprechen, wenn es um die Expansion des Universums geht:

„Die XXX. Hauptversammlung der Internationalen Astronomischen Union beschließt zu empfehlen, dass von nun an die Expansion des Universums als „Hubble-Lemaître-Gesetz“ bezeichnet werden möge.“

Bereits auf der Versammlung im August 2018 in Wien waren 74% der 385 Anwesenden für diese Resolution gewesen, und bei einer folgenden elektronischen Abstimmung unter allen 11072 Mitgliedern bei einer Wahlbeteiligung von 37% sogar 78%. Bindend ist diese Empfehlung nicht, mehr eine Ermahnung, dass keineswegs jedes Naturgesetz von demjenigen entdeckt wurde, nach dem es benannt ist.

Wir möchten im Folgenden kurz beleuchten, welche Ereignisse sich in der Astrophysik / Astronomie in dieser Zeit abgespielt haben.

Zu Anfang des 20. Jahrhunderts war die wissenschaftliche Welt noch davon überzeugt, dass wir in einem statischen Universum ohne Anfang und Ende leben und das Universum aus der Milchstraße besteht.¹

1905 beschrieb Albert Einstein, dass Raum und Zeit nicht konstant sind und das Licht sich immer mit der gleichen Geschwindigkeit von ca. 300.000 km / sek bewegt.

1912 gelang es erstmalig **Vesto Slipher** die Radialgeschwindigkeit eines Spiralnebels zu messen.

1914 hatte Slipher die Radialgeschwindigkeit von 15 Galaxien gemessen und auch deren Rotation festgestellt.

1914/1915 veröffentlichte **Albert Einstein** die Allgemeine Relativitätstheorie.

1917 fanden Albert Einstein und **Willem de Sitter** zwei verschiedene Lösungen der Relativitätstheorie, die beide statisch sind – es gab auch noch keinen offensichtlichen Beobachtungsgrund, ein dynamisches Universum anzunehmen. Allerdings musste Einstein hierfür einen Term in die Gleichungen der ART einfügen, damit das Universum statisch erscheint: den Λ -Term.

1917 hatte Slipher hat bereits die Geschwindigkeiten von 25 Galaxien gemessen und vermutet, dass sich alle voneinander entfernen. Ein erstes Indiz für ein dynamisches All.

1922 veröffentlichte **Alexander Friedmann** eine dynamische Lösung der Relativitäts-Glei-

chungen, „Über die Krümmung des Raumes“, die zunächst aber kaum Beachtung fand.

1923 erste Veröffentlichung von Friedmanns „Die Welt als Raum und Zeit“ in St. Petersburg.

1923 konnte **Edwin Hubble** nachweisen, dass der Andromedanebel (M31) weit außerhalb unserer Milchstraße liegt.²

1923 veröffentlichte **Herrmann Weyl** in der 5. Auflage seines Werkes „Raum - Zeit - Materie“ den Anhang „Rotverschiebung und Kosmologie“. Er beschrieb die Spiralnebel als Objekte, die nicht unter dem gravitativen Einfluss der Milchstraße stehen. Er sah den Raum in ständiger Vergrößerung begriffen, als eine auseinanderstrebende Schar von Galaxien, deren Bewegung auf zeitartigen Geodäten erfolgt. Für jeden Beobachter der sich mit einem solchen Objekt bewegt, erscheint dann das Licht von Objekten in kosmischer Entfernung rotverschoben. Weyl gab eine erste systematische Berechnungsmethode für die kosmologische Rotverschiebung an..

1923 Einstein per Postkarte an Weyl: „De Sitter laufen zwei genügend voneinander entfernte Punkte beschleunigt auseinander. Wenn schon keine quasistatische Welt, dann fort mit dem kosmologischen Glied!“³

1924 fand **Carl Wirtz** anhand von 42 Galaxien, dass „ohne Zweifel“ mit wachsender Distanz die positiven Radialgeschwindigkeiten der Galaxien erheblich zunehmen – einen entsprechenden Trend hatte er bereits 1922 gesehen. Er veröffentlichte einen „linearen Zusammenhang [...] zwischen den Logarithmen der Winkeldurchmesser und den Rotverschiebungen, die [er] als Fluchtgeschwindigkeiten interpretierte“. Daraus schloss er auf einen linearen Zusammenhang zwischen den Logarithmen der Entfernungen und den Fluchtgeschwindigkeiten. Die Streuung seiner Daten war sehr groß, allerdings waren die Daten, die Hubble fünf Jahre später veröffentlichte ebenso weit gestreut.

1924 veröffentlichte **Alexander Friedmann** seine Arbeit „Über die Möglichkeit einer Welt mit negativer Krümmung“

1925 kam **Knut Lundmark** zum selben Schluss wie Carl Wirtz

1925: Alexander Friedmann starb 37jährig an Typhus in St. Petersburg. Er konnte nun nicht mehr in die Fortschritte der Kosmologie eingreifen. Seine 1922 und 1924 veröffentlichten Arbeiten blieben lange Zeit wirkungslos.

1925 auf der Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft stellte Hubble die Ergebnisse seiner Beobachtungen zu M31 und anderen Spiralnebeln dar. Damit fand die „Große Debatte“ (1920) ihr Ende, indem er eindeutig nachwies, dass die Spiralnebel eigene Galaxien darstellen.

1927 veröffentlichte **George Lemaitre** – wohl ohne Kenntnis der Friedmannschen Arbeiten – seine Promotions-Arbeit „Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques“⁴, in der er auf Grundlage der ART, der räumlichen Verteilung der Galaxien, sowie der von **Milton Humason** in ihren Spektren nachgewiesenen Rotverschiebung, die Expansion des Weltalls unter Berücksichtigung der von Einstein eingeführten kosmologischen Konstante postulierte und einen Zusammenhang von Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien erkannte.

1927 traf Lemaitre anlässlich der Solvay Konferenz in Bruxelles mit Einstein zusammen und trug ihm die Ergebnisse seiner Doktorarbeit vor. Einstein machte daraufhin Lemaitre auf die in Deutsch 1922 und 1924 publizierten Arbeiten von Friedmann aufmerksam.

1928 könnten sich Lemaitre und Hubble auf einer IAU-Hauptversammlung in den Niederlanden getroffen haben, von der Hubble Zeitzeugen zufolge aufgeregt zurückgekehrt sei. Ob er die Galaxienfrage mit Lemaitre diskutiert hatte, lässt sich nicht klären – später zitierte er dessen 1927er Arbeit jedenfalls nicht.

1929 wandte sich Lemaitre per Brief an **Arthur Eddington** und wies auf seine Arbeit von 1927 hin.

1929 veröffentlichte **Howard P. Robertson** in seiner Arbeit *“On the Foundations of Relativistic Cosmology”* das allgemeine Linienelement für die expandierenden Friedmann-Modelle mit sphärischer, euklidischer und hyperbolischer Metrik. In der Diskussion beschränkte er sich allerdings wieder auf den statischen Kosmos.

1929 veröffentlichte **Edwin Hubble** de facto dasselbe Resultat wie Lemaitre zwei Jahre zuvor in seiner Arbeit: *„A Relation between Distance and Radial Velocity among extragalactic Nebulae“*. Die verwandten Daten waren weitgehend dieselben, insbesondere stammten die Geschwindigkeiten von Slipher von 1917. Er zeichnete den linearen Zusammenhang erstmals als Diagramm. Anders als Lemaitre zog Hubble nicht den Schluss, dass dies ein Indiz für eine Expansion des Alls sei; vielmehr vermutete er ein noch nicht entdecktes Naturgesetz hinter der Rotverschiebung der Galaxien.

1930 machte **Eddington** in einem *„Letter to Nature“* auf die Arbeit von Lemaitre aufmerksam und sorgte für die Publizierung einer Übersetzung ins Englische in den *„Monthly Notices of the Royal Astronomical Society“* im Jahre 1931.

1931 erschienen Lemaitres Arbeiten *“Expansion of the universe, A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extragalactic nebulae”* und *“The Expanding Universe”*.

1931 publizierte **Otto Heckmann** in Göttingen seine Arbeit *„Über die Metrik des sich ausdehnenden Universums“*

1931 wiederholten Hubble und **Milton Humason** die Analyse mit 40 weiteren Galaxien und konnten das lineare Gesetz endgültig etablieren: *„The Velocity-Distance Relation Among extragalactic Nebulae“*. Aber Hubble war – wie er in einem Brief an de Sitter schreibt – immer noch ratlos, was das bedeutete.

1932 publizierte Heckmann in Göttingen seine Arbeit *„Die Ausdehnung der Welt und ihre Abhängigkeit von der Zeit“*. In dieser Arbeit hatte er zu ersten Mal eine graphische Darstellung aller von Friedmann 1922 und 1924 abgeleiteten expandie-

renden kosmologischen Modelle veröffentlicht, eine vollständige Klassifikation der Friedmannschen Modelle in Abhängigkeit von der Zeit und den Modellparametern.

1932 publizierten Einstein und de Sitter in der National Academy of Science ein kosmologisches Modell, das die einfachste denkbare Lösung der Feldgleichungen enthielt: Der Raum wurde als euklidisch „flach“ ($k=0$) angenommen und die kosmologische Konstanten Λ wurde a priori auf Null gesetzt. Der Druck zwischen den Sternen und Galaxien, den Lemaitre in seiner 1927er Arbeit postuliert hatte, wurde weiterhin voll vernachlässigt.

1933 erschien ein *“Relativistic Cosmology”* betitelter Übersichtsartikel von Robertson in den *Reviews of Modern Physics*

Zusammenfassend ist also festzustellen, dass George Lemaitre 1927 „also zwei Jahre vor Hubble“ die Beziehung $R'/R = \text{const.}$ hergeleitet und für die Konstante den Wert mit 575 km/s/Mpc angegeben hat. Dieser Wert ist wie Hubbles Wert für H „ziemlich ungenau“, da beide weitgehend auf dieselben von Slipher stammenden (ungenauen) Werte zurückgegriffen hatten. Darüber hinaus hat Lemaitre die Bedeutung der Konstanten für die Expansion des Universums erkannt. Für Hubble ging es nur um den (optischen) Dopplereffekt für sich entfernende Galaxien.

Der Durchbruch für die Kosmologie des expandierenden Raumes kam in der wissenschaftlichen Diskussion der Jahre 1931 bis 1933 und beruhte maßgeblich auf den Arbeiten von V. Slipher, C. Wirtz, A. Friedmann, G. Lemaitre und O. Heckmann, insbesondere durch die Unterstützung von Arthur Eddington. Dies führte dann letztlich auch zu einem Umdenken von Albert Einstein und der Aufgabe der Vorstellung vom statischen Universum.

Auf die Arbeiten insbesondere von Friedmann, Lemaitre sowie Einstein werden wir in zwei Andromeda-Ausgaben des Jahres 2019 ausführlicher eingehen.