Die kosmische Rotverschiebung und das Hubble-Gesetz

Nachdem die amerikanische Wissenschaftlerin Henrietta Swan-Leavitt das *Cepheiden*-Verfahren zur Bestimmung größerer kosmischer Entfernungen (siehe Beitrag *Entfernungen*) entwickelt hatte, machte Ende der 1920-er Jahre der Astronom Edwin Hubble eine merkwürdige Entdeckung. Er stellte nämlich fest, dass das Licht von Sternen umso roter erscheint, je weiter die Objekte von uns entfernt sind.

Die Aufzeichnung einer ganzen Reihe von Sternspektren (siehe Beitrag *Spektren*) zeigte gegenüber im Labor aufgenommenen kontinuierlichen Spektren mit den entsprechenden Absorptions- und Emissionslinien eine Verschiebung zu größeren Wellenlängen hin. Und zwar verschoben sich alle Linien der Sternspektren (sowohl Emissions- als auch Absorptionslinien) als jeweilige Kennung der darin enthaltenen Elemente gegenüber den entsprechenden Laborspektren um den gleichen Betrag, wie Abbildung 1 zeigt. Bezogen auf das Spektrum des sichtbaren Lichts spricht man in diesem Fall von einer **spektralen Rotverschiebung**.

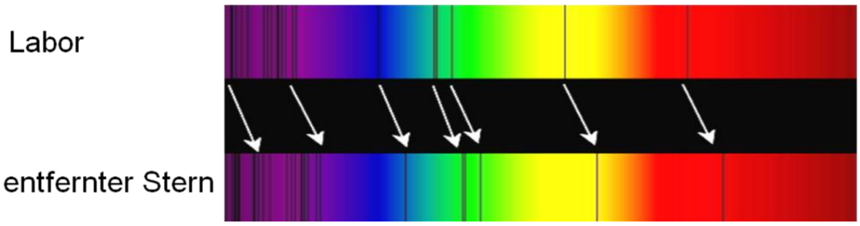


Abb.1
Kosmische Rotverschiebung

Quelle:
www.mpifr-bonn.mpg.de/Dir_Anna2/Redshift.png

Dabei zeigte sich, dass die Rotverschiebung umso größer war, je weiter die Sterne von der Erde entfernt waren. Eine vergleichbare Erscheinung im akustischen Bereich, den so genannten *Dopplereffekt* beobachten wir im täglichen Leben, wenn sich ein hupendes Auto von uns fortbewegt. Der Ton wird mit zunehmender Geschwindigkeit und Entfernung immer tiefer, das heißt, die Länge der Schallwellen wird immer größer. Dementsprechend interpretierte Hubble seine Beobachtung an Sternspektren dahingehend, dass alle Himmelsobjekte sich mit wachsendem Abstand von uns immer schneller entfernen, ganz so, als ob sie vor der Erde flüchten würden. Als Astronom leitete Hubble daraus in Analogie zur Akustik eine lineare Beziehung zwischen der Entfernung der stellaren Objekte und deren Rotverschiebung bzw. Fluchtgeschwindigkeit ab (Abbildung 2). Dies ist das nach ihm benannte Hubble-Gesetz: $\mathbf{v_H = H_o \cdot D}$
dabei bedeuten:
(v_H = Fluchtgeschwindigkeit, H_o = Hubble-Konstante, D = Entfernung).

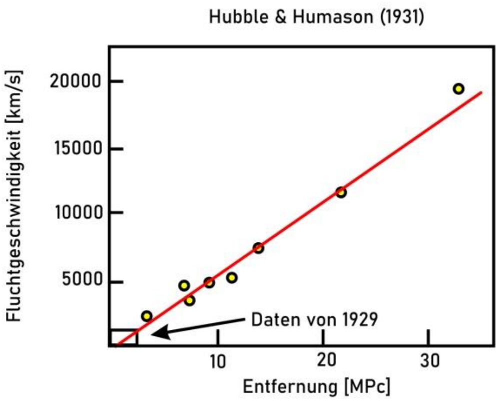


Abb. 2 :

Erste Messungen der Hubble-Konstanten

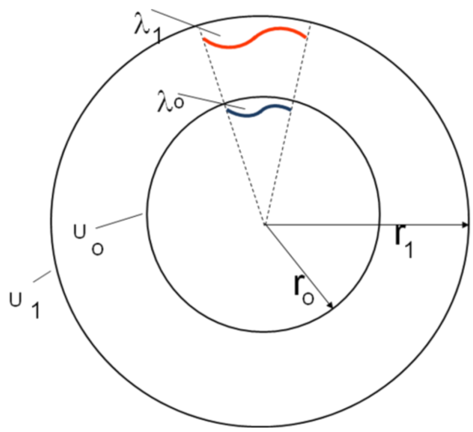
Grafik nachgezeichnet nach Hubble & Humason (1931)

Mit der physikalischen Interpretation seines Gesetzes war Hubble allerdings zurückhaltend. Es ist jedoch klar, dass die von ihm erkannte “Galaxienflucht“ mit dem heutigen Bild der Expansion des Universums fest verbunden ist. Damit war die Vorstellung vom expandierenden Universum zwar nicht geboren worden, – dies hatte schon zwei Jahre zuvor 1927 der belgische Priester George Lemaitre allein auf Basis der Einsteinschen Gleichungen angenommen –, wurde aber durch Hubbles Arbeit bestätigt. Als Konsequenz daraus entstand auch die Vorstellung von einem Anfang des Universums, dem Urknall. Wenn sich nämlich das Universum bis heute stetig ausgedehnt hat, muss es in der Rückschau vor langer Zeit einmal winzig klein gewesen sein, bzw. bei “Null“ angefangen haben zu existieren. Wir wissen inzwischen, dass dies vor etwa 13,8 Milliarden Jahren der Fall gewesen sein muss.

Die heute als ***kosmische Rotverschiebung*** $\boldsymbol{z = (\lambda_1 - \lambda_o)/\lambda_o = \Delta\lambda/\lambda_o}$ bezeichnete Vergrößerung der Wellenlängen λ in Spektren von Sternen, Galaxien und sonstigen strahlenden kosmischen Objekten wird heute nicht mehr mit dem *Dopplereffekt* erklärt, der sich auf die Bewegung von Objekten **im Raum** bezieht, sondern mit der Dehnung der elektromagnetischen Wellen durch die Expansion des **Raumes selbst** (siehe Abbildung 3). Die Theorie hat inzwischen gezeigt, dass die oben angegebene Form des Hubble-Gesetzes nur für geringe Rotverschiebungen in guter Näherung gilt. Für größere z, das heißt, größere Distanzen, wird das Hubble-Gesetz komplexer und somit vom jeweiligen Modell des Universums abhängig.

Abb. 3:

Veranschaulichung der Expansion eines Raumelements mit dem Radius $r_o \rightarrow r_1$ und der damit verbundenen Dehnung einer Welle der Länge $\lambda_o \rightarrow \lambda_1$



P. S.