

# Dunkle Energie

von Siegfried Beisswenger

## Geschichte der Dunklen Energie

Im Jahre 2011 ging der Nobelpreis in Physik an S. Perlmutter, B.P. Schmidt und A. Riess für eine Entdeckung, die sie in den Jahren 1997/98 gemacht hatten: die beschleunigte Expansion des Universums. Bis dahin gingen die Standardmodelle der Kosmologie von einem Universum aus, das entweder für alle Zeiten expandiert oder nach endlicher Zeit seine Expansion beendet und sich wieder beschleunigt zusammenzieht. In beiden Fällen sollte aber die Expansionsrate, charakterisiert durch die Hubble Konstante, in früheren Zeiten größer gewesen sein als heute.

Wenn sich aber die Expansionsgeschwindigkeit mit der Zeit vergrößert anstatt abzunehmen, kann nur der Schluss gezogen werden, dass dafür eine unbekannte Kraft verantwortlich sein muss, von der damals wie heute niemand weiß, woher sie rührt. Michael S. Turner von der Universität Chicago gab ihr 1998 den Namen „Dunkle Energie“. Doch die Dunkle Energie hat eine viel längere Geschichte.

Schon im Jahr 1917 erkannte Einstein, dass die Anwendung seiner Feldgleichungen auf ein isotropes und homogenes Universum nicht zu einem stationären Universum führt. Da für ihn nur ein unveränderliches Universum vorstellbar war, führte er in seine Feldgleichungen eine Konstante ein, die der Gravitation entgegenwirken sollte. Er nannte sie „Kosmologische Konstante“ und versah sie mit dem griechischen Buchstaben  $\lambda$  (Lambda). Es sei nebenbei bemerkt, dass die Kosmologische Konstante tatsächlich kein zeitlich stabiles sondern nur ein labiles Gleichgewicht bewirken konnte. Aber dies wurde erst später erkannt.

Anfangs der 1920er Jahre fand der russische Physiker und Mathematiker Alexander A. Friedmann Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen, nach denen das Universum nicht statisch sondern dynamisch war. Zunächst interessierte sich die Fachwelt wenig für dynamische Weltmodelle. Diese Situation änderte sich als 1927 der belgische Physiker George Lemaître zu den gleichen rechnerischen Ergebnissen wie Friedmann kam. Aber er rechnete nicht nur, sondern griff auch auf Messungen zurück. Indem er die Rotverschiebung entfernter Galaxien, die Vesto Slipher schon 1917 erkannte, mit Galaxie-Entfernungen kombinierte, die inzwischen Edwin Hubble publiziert hatte, stellte er als Erster fest, dass zwischen beiden Größen eine lineare Beziehung bestand: Galaxien bewegten sich nicht nur von uns weg, sondern entferntere Galaxien taten dies sogar mit einer größeren Geschwindigkeit als nähere. Es bestand ein proportionaler Zusammenhang und die zugehörige Konstante wurde später - nachdem sie durch Edwin Hubble 1929 wesentlich genauer bestimmt wurde - „Hubble-Konstante“ benannt.

Einstein, der zunächst die Lösung von Friedmann als falsch abgelehnt hatte (ihm unterlief ein mathematischer Fehler), soll, nachdem er von der Hubble-Expansion gehört hatte, seinen Lambda –Term als größte Eselei seines Lebens bezeichnet haben. Ob diese Überlieferung richtig ist, ist ungewiss. Auf jeden Fall verschwand der Lambda-Term für viele Jahre aus den theoretischen Weltmodellen bis er nach der Entdeckung der beschleunigten Expansion am Ende der 1990er Jahre wieder reaktiviert wurde.

## Friedmann Expansion

Im Standardmodell der modernen Kosmologie spielt die sogenannte Friedmannsche Expansionsgleichung eine entscheidende Rolle. Diese Gleichung beschreibt das zeitliche Expansionsverhalten des Universums mittels zweier Energiedichten, nämlich die der Materie und die der Strahlung und einem Krümmungsterm. Geht man mit Hilfe der Friedmanngleichung in der Zeit rückwärts, kommt man unweigerlich zum Urknallszenario. Mit der Entdeckung der beschleunigten Expansion wird nun die Friedmanngleichung um die alte Einsteinsche Konstante, die fortan als Energiedichte des Vakuums interpretiert wird und den saloppen Namen „Dunkle Energie“ erhält, erweitert. Im Falle eines räumlich flachen Universums verschwindet die Krümmung und die drei Dichten (Materie, Strahlung und Vakuumenergie) addieren sich zu der sogenannten kritischen Dichte. Die Normierung auf diese kritische Dichte führt zu den sogenannten Dichteparametern, die sich im Falle eines räumlich flachen Universums zu „eins“ addieren. Für die Gesamtdichte „Omega-total“ gilt dann:  $\Omega_{\text{total}} = 1 = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\lambda$ , wobei  $\Omega_m$ ,  $\Omega_r$ ,  $\Omega_\lambda$  die Dichteparameter von Materie, Strahlung und Dunkler Energie sind.

Der Dichteparameter der Strahlung spielte im jungen Universum eine entscheidende Rolle, kann aber heute vernachlässigt werden, so dass die Expansion des Universums in unsere Epoche im wesentlichen durch die Materiedichte und die Dichte der Vakuumenergie (Dunkle Energie) bestimmt ist. Als Werte der Dichteparameter gelten heute ungefähr:  $\Omega_m \approx 0,3$  (dieser Wert umfasst die sichtbare, sogenannte baryonische Materie und die unsichtbare, sogenannte Dunkle Materie) und  $\Omega_\lambda \approx 0,7$  für die Dichte der Vakuumenergie. Im Lichte der Allgemeinen Relativitätstheorie und wegen des sogenannten Kosmologischen Prinzips versteht man die Expansion als Expansion des Raumes. D.h. nicht die Galaxien entfernen sich voneinander, sondern der dazwischenliegende Raum selbst dehnt sich aus.

Erwähnt werden sollte noch, warum man von einem flachen Universum ausgeht und woher man die Werte der Dichteparameter kennt. Die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung, die 1964 von R. Wilson und A. Penzias entdeckt wurde, spielt hier eine herausragende Rolle. Diese Strahlung wurde von dem Satelliten Cobe (1989 bis 1993), der Raumsonde WMAP (2001 bis 2010) und in jüngster Zeit vom Satelliten Planck (2009 bis 2013) erkundet. Die Analyse kleinster Fluktuationen dieser Strahlung im Zusammenspiel mit der physikalisch-mathematischen Modellierung der Verhältnisse als diese Strahlung 380 Tausend Jahre nach dem Urknall vom jungen Universum freigegeben wurde, führen zu den oben genannten Ergebnissen. Damit erhält die Dunkle Energie im Wesentlichen ihre Rechtfertigung erstens wegen der Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums und zweitens wegen der Flachheit des Universums, wie sie sich aus der Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung ergibt. Bei beidem handelt es sich um relativ junge Forschungsergebnisse.