

## **Helle Sterne – Dunkles Universum**

Bruno Leibundgut  
European Southern Observatory

### ***Einleitung***

Das Universum ist ein dunkler Ort. Eine einfache und wichtige Beobachtung, die wir jeden Abend machen können. Sie beinhaltet eine fundamentale Information über unser Universum: es kann nicht unendlich groß und unendlich alt sein, sondern muss einmal einen Anfang gehabt haben. Heinrich Wilhelm Olbers hatte dies schon 1823 erkannt. In einem unendlich alten, statischen Universum wäre alles zu Temperaturen der Sternoberflächen erhitzt und würde so hell wie die Sonne leuchten. In einem unendlich ausgedehnten Universum würde jede Sichtlinie irgendwann auf die Oberfläche eines Sternes treffen und somit wäre es auch nachts in jeder Richtung so hell wie die Sonne.

In der Urknalltheorie hat das Universum auch wirklich einen (zeitlichen) Anfang. Mit einem endlichen Alter und der Raumausdehnung wird Olbers Paradoxon auf einfache Art gelöst: wir können nur einen begrenzten Teil des Universums beobachten und gleichzeitig ist die Strahlung entfernter Objekte zu längeren (roten) Wellenlängen verschoben. Das ehemals heiße Plasma des frühen Universums hatte etwa 300000 Jahre nach dem Urknall, als die Atomkerne und die Elektronen die ersten Atome formten, noch eine Temperatur von etwa 3000 Kelvin und ist bis heute auf 2.73 Kelvin abgekühlt. Das entspricht einer Verschiebung der Wellenlängen von etwa 1 Mikrometer zu den beobachteten Millimeterwellenlängen (etwa 1mm) oder einem Faktor 1000.

Das beobachtbare Universum ist begrenzt durch die Entfernung, die das Licht seit dem Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren zu uns zurückgelegt hat. Dieser Ereignishorizont weitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, erschließt aber wahrscheinlich trotzdem nur einen winzigen Teil des ganzen Universums, wenn die frühe Inflation wirklich stattfand. Die Anzeichen für eine solche inflationäre Phase haben sich in den letzten Jahren weiter verdichtet. Vor allem die Flachheit der Raum-Zeit Geometrie wurde mit Ballon- und Satelliten-Experimenten genau vermessen und lieferte ein deutliches Indiz, dass die Inflation einen kleinen, ursprünglich kompakten, Teil des Universums zu den heutigen Dimensionen ausgeweitet hat.

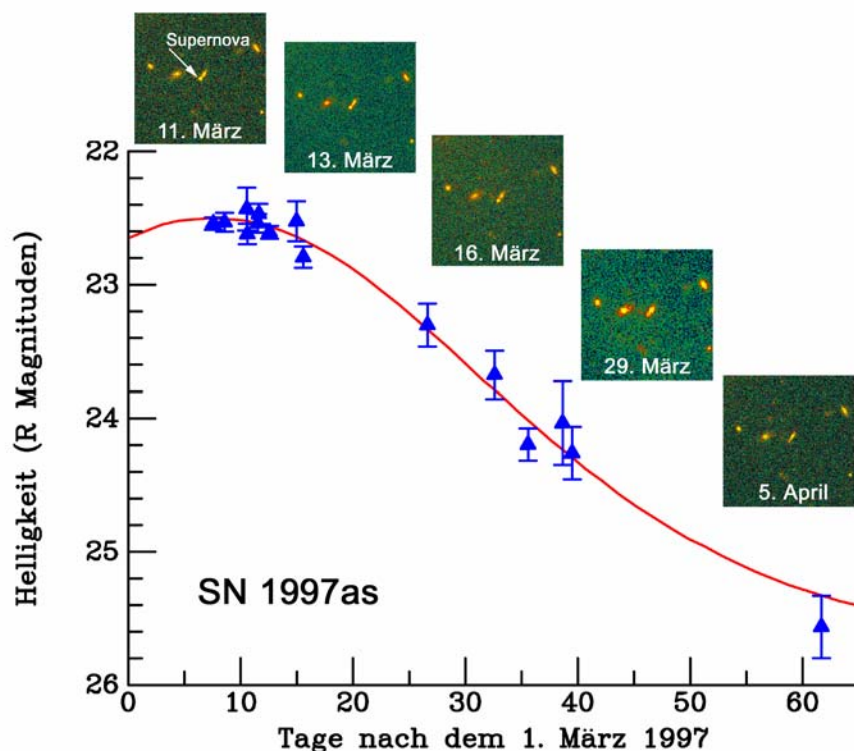
Die Expansionsgeschichte des Universums kann relativ einfach zusammengefasst werden. Da auf großen Entfernungen nur die Gravitation als wirkende Kraft von Bedeutung ist, wird das Universum mit der Einstein'schen Relativitätstheorie sehr gut beschrieben. Diese grundlegende Theorie verbindet die Geometrie des Raumes mit dem Energieinhalt und, zusammen mit ein paar sehr einfachen Annahmen, beschreibt sowohl die Vergangenheit als auch die Zukunft des Universums, wenn alle relevanten Größen bekannt sind. Bestimmend hierfür sind die Energiedichten der verschiedenen Teile des Universums. Bis vor ein paar Jahren wurden folgende Komponenten diskutiert: Materie, Strahlung, Neutrinos und die Raumkrümmung. *Materie* ist dabei alles, was wir in

unserem täglichen Leben kennen (Erde, Luft, Sterne, Gas, Staub, Galaxien). Atome und die meisten Elementarteilchen, üblicherweise als Baryonen bezeichnet, sind Materie. Allerdings scheint es (nicht-baryonische) Materie zu geben, die gravitativ wirkt, deren Ursprung und weitere Eigenschaften aber noch nicht bekannt sind. Diese so genannte Dunkle Materie soll für die großförmige Struktur des Universums verantwortlich sein und einen mehrfach größeren Beitrag zum Universum liefern als die reguläre Materie. Elektromagnetische *Strahlung* (Licht) beinhaltet Energie (zum Glück für das Leben auf der Erde). Der Energiebeitrag der Strahlung zur heutigen Expansion des Universums ist vernachlässigbar. Allerdings war dies nicht immer so. Im frühen Universum hat die Strahlung die Ausdehnungsgeschichte des Universums sehr stark mitbestimmt. Damals, kurz nach dem Urknall, waren die Temperatur und die Dichte so groß, dass ein Gleichgewicht zwischen Materieteilchen und Strahlung bestand. Die Überreste dieser heißen Phase werden als die oben erwähnte Mikrowellen-Hintergrundstrahlung beobachtet. *Neutrinos* sind Elementarteilchen, die nur durch die Schwache Wechselwirkung mit ihrer Umwelt in Kontakt sind. Bis vor wenigen Jahren wurde diskutiert, ob sie überhaupt Masse haben, oder wie Photonen masselos sind. Inzwischen ist erwiesen, dass Neutrinos eine Restmasse haben und damit können sie auch die Entwicklung des Universums mitbestimmen. Obwohl Neutrinos, nach den Photonen, die häufigsten Teilchen im Universum sind, ist ihre Masse so klein, dass ihr Beitrag zur globalen Energiedichte ebenfalls vernachlässigbar ist. Da Materie und Raum durch die Einstein'sche Relativitätstheorie gekoppelt sind, kann Energie auch in der *Raumkrümmung* vorhanden sein. Dieser Beitrag zum globalen Energiebudget muss berücksichtigt werden, obwohl bis vor wenigen Jahren sehr wenig darüber bekannt war. Das hat sich mit den neuen Messungen der Fluktuationen in der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung grundlegend geändert. Wir wissen nun, dass die Raumkrümmung auf großen Entfernungen verschwindend klein ist.

Einstein hatte seiner Theorie zusätzlich zu den oben beschriebenen Parametern noch einen weiteren hinzugefügt. Die *Kosmologische Konstante* beschreibt eine Eigenschaft des Raumes, die ursprünglich helfen sollte, das Universum zu stabilisieren. Einsteins Theorie erlaubt keine stabilen Lösungen für das Universum, d. h. es muss sich entweder ausdehnen oder zusammen ziehen. Die Kosmologische Konstante entspricht einer Energiedichte, wie sie von der Quantenmechanik bekannt ist. Dort enthält das Vakuum auch eine (äußerst kleine) Energie. Diese Vakuumsenergie hat für das Universum eine erstaunliche Konsequenz: sie wirkt wie eine abstoßende Kraft und kann zu einer Beschleunigung der Expansion führen.

## ***Das Universum wird von Explosionen vermessen***

Ein entscheidender Beitrag zum Verständnis des Universums wird durch Distanzmessungen geliefert. Seit 75 Jahren wissen wir, dass das Universum sich ausdehnt, allerdings benötigen wir noch einen Maßstab, der uns erlaubt, die Ausdehnung zu vermessen. Kosmologische Maßstäbe sind leider nicht sehr leicht zu finden. Deshalb sind Supernovae mit ihrer enormen Leuchtkraft schon seit ihrer Entdeckung von Walter Baade, Fritz Zwicky und Rudolph Minkowski in den Vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts zur Messung kosmologischer Entfernungen vorgeschlagen worden. Die

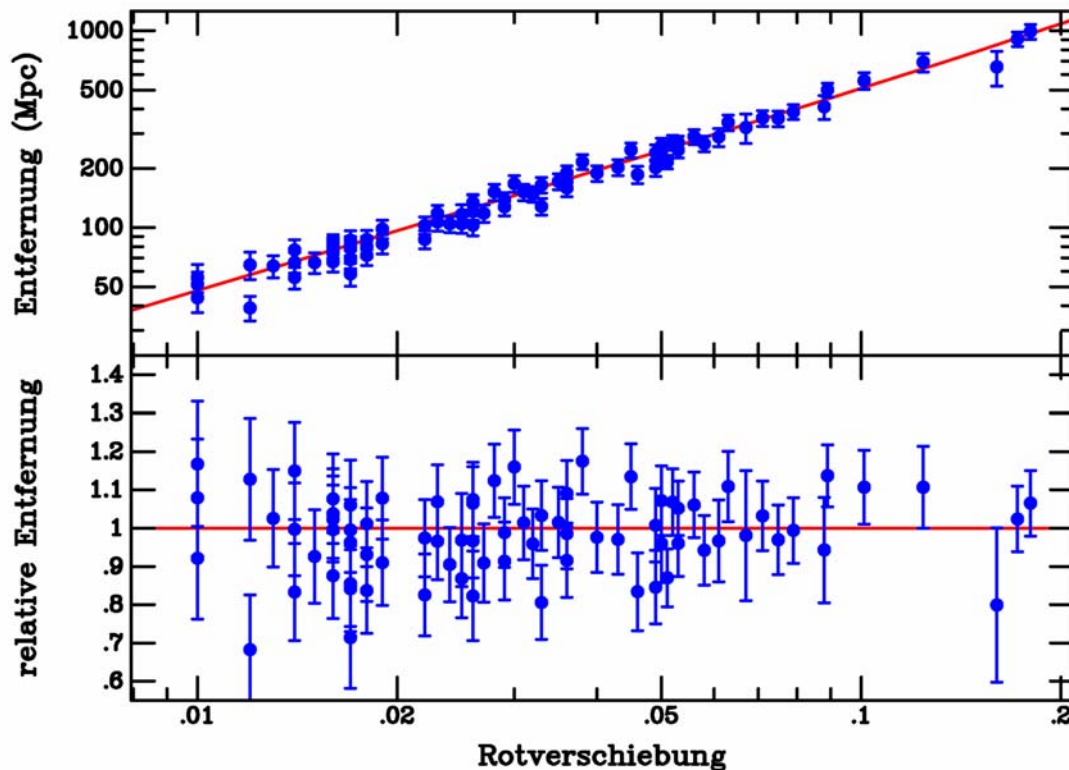


**Bild 1:** Die Lichtkurve einer Typ Ia Supernova. Die Bilder zeigen den Helligkeitsabfall der Supernova und ihre Muttergalaxie. Die Daten sind mit einer Standard-Lichtkurve für nahe Typ Ia Supernovae, korrigiert für die Zeitdilatation, abgeglichen.

Helligkeit einer Supernova verändert sich über einen Zeitraum von mehreren Monaten. Es wird dabei zwischen verschiedenen Typen unterschieden (siehe Box 1). Die als Typ Ia Supernovae bezeichneten Objekte stellen eine Klasse mit sehr homogenen Eigenschaften dar (siehe den Artikel von Hillebrandt und Röpke). Obwohl Unterschiede in ihren Lichtkurven und der spektralen Entwicklung beobachtet werden, scheinen sie mehr oder weniger immer dieselbe maximale Leuchtkraft zu erreichen. Diese Eigenschaft als „Standardkerzen“ ist dafür verantwortlich, dass sie für Entfernungsmessungen vorgeschlagen wurden. Mark Phillips (damals am Cerro Tololo Inter-American Observatory und heute am Las Campanas Observatory der Carnegie Institution) hat vor etwa zehn Jahren eine Beziehung zwischen absoluter Leuchtkraft bei maximaler Helligkeit und der Lichtkurvenform entdeckt. Diese Beziehung hat erlaubt, die Leuchtkräfte weiter zu normieren und dazu geführt, dass wir inzwischen relative Entfernungen zwischen Typ Ia Supernovae mit etwa zehn Prozent Genauigkeit bestimmen können. Weiter Verfahren sind vorgeschlagen worden, aber sie beruhen im Wesentlichen auf derselben Methodik (siehe Box 2). Die Lichtkurvenform ist natürlich distanz-unabhängig (außer für die Zeitdilatation, die weiter unten noch beschrieben wird) und deshalb für die Korrektur der Leuchtkräfte ideal.

Die exquisite Eigenschaft als gute Entfernungsindikatoren der Typ Ia Supernovae ist im Hubble Diagram der nahen Objekte sehr gut zu sehen. In diesem Diagramm sind die Entfernung und die Fluchtgeschwindigkeit (beziehungsweise die Rotverschiebung)

gegeneinander aufgetragen. Das berühmte Hubble Gesetz besagt, dass die Expansion und die Entfernung proportional zueinander sind und die Proportionalitätskonstante ist nach dem Entdecker Edwin Hubble benannt. Die Typ Ia Supernovae bestätigen das Hubble Gesetz mit ausgezeichneter Genauigkeit. Dies ist der beste Beweis, dass die Supernovae die Distanzen im nahen Universum akkurat vermessen.



**Bild 2:** Hubble Diagramm für nahe Typ Ia Supernova. Das Hubble Gesetz ist mit den 75 gezeigten Objekten deutlich bestätigt. Die Qualität der Supernovae als gute relative Distanzindikatoren ist durch die kleine Streuung um die Expansionslinie (in rot) gut sichtbar. Das untere Diagramm ist ein so genanntes ‚modifiziertes Hubble Diagramm‘, in dem die relativen Abweichungen von der Expansionslinie aufgetragen sind.

## Die Hubble Konstante

Die Bedeutung der Hubble Konstante ist, dass sie die absoluten Größen des Universums festlegt. Durch die Friedmann–Gleichungen sind die dominierenden Parameter für die Entwicklung des Universums mit der momentanen Expansionsrate verknüpft. Es ist deshalb extrem wichtig, die Hubble Konstante so gut wie möglich zu bestimmen. Supernovae haben dabei eine prominente Rolle gespielt. Die Schwierigkeit ist, dass die Hubble Konstante eine absolute Größe ist, d.h. sie muss in absoluten physikalischen Einheiten gemessen werden und kann nicht durch relative Messungen bestimmt werden. Da Typ Ia Supernovae gute *relative* Distanzen bestimmen, muss für die Messung der Hubble Konstante eine zusätzliche Größe bestimmt werden. Dies ist die absolute Leuchtkraft zum Zeitpunkt der maximalen Helligkeit der Supernova. Traditionell wurde dafür die Entfernung der uns nächsten Supernovae durch andere Entfernungskindikatoren bestimmt. Das ganze basiert auf der so genannten ‚Distanzleiter‘, die ursprünglich auf der

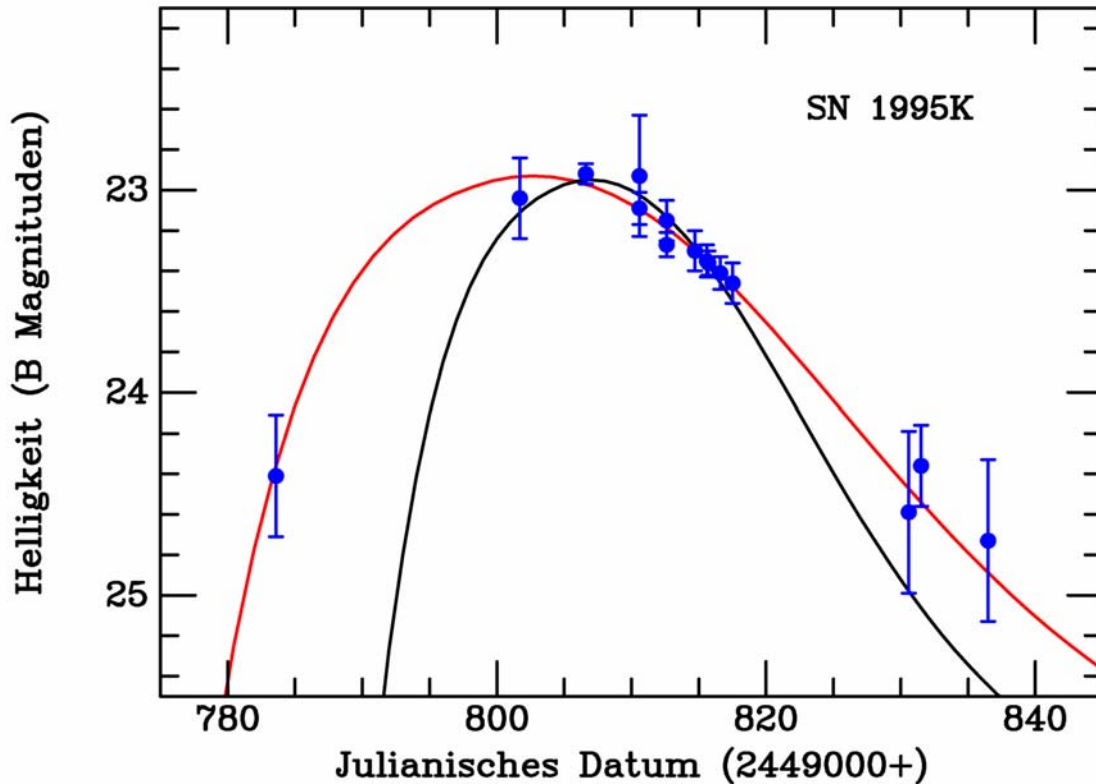
mittleren Distanz zwischen Erde und Sonne, der Astronomischen Einheit, beruht. In einem lang angelegten Programm haben Gustav Andreas Tammann aus Basel und Alan Sandage von den Carnegie Observatories in Pasadena diese Distanzleiter bis zu den nahen Supernovae erstellt. Mit dem *Hubble Space Telescope* haben sie Cepheiden Sterne in Galaxien mit historischen Supernovae gemessen und die Leuchtkraft der Supernovae geeicht. Parallelprogramme haben diese Methode nachvollzogen, sind allerdings zu leicht anderen Werten für die Hubble Konstante gekommen. Es stellt sich jetzt heraus, dass die Hauptursache für die Diskrepanzen nicht die Supernovae selber sind, sondern die Annahmen in den Leiterstufen. Entscheidend hierfür ist die Distanz zur Grossen Magellanschen Wolke am Südhimmel.

Ein völlig neuer Weg ist der Versuch die Leuchtkraft der Supernovae von Explosionsmodellen zu bestimmen (siehe dazu den Beitrag von Wolfgang Hillebrandt und Fritz Röpke). Das optische Licht der Supernovae kommt vom radioaktiven Zerfall von Nickel und Kobalt Isotopen. Die Energie wird dabei als Gamma-Strahlung freigesetzt. Zuerst werden die Gamma-Strahlen von der Supernova Hülle vollständig absorbiert und in Strahlung niedrigerer Energie umgewandelt. Zu späten Zeiten hat die Ausdehnung der Supernova die Hülle so verdünnt, dass die Gamma-Strahlen frei entweichen können. Es muss also einen Übergang der vollständigen Umwandlung der Gamma-Strahlen Energie zu deren völligen Entweichen geben. David Arnett von der University of Arizona hat in Rechnungen schon vor über zwanzig Jahren gezeigt, dass dieser Übergang am Maximum der Lichtemission passiert. Es ist damit möglich, die Leuchtkraft einer Typ Ia Supernova von Modellen, die die Menge von radioaktivem Material in den Explosionen berechnen, zu bestimmen. Zusammen mit Max Stritzinger am Max-Planck Institut für Astrophysik habe ich versucht, die Hubble Konstante mit dieser Methode zu berechnen. Leider sind die Modelle noch nicht ausgereift genug, um feste Vorhersagen der Menge von radioaktivem Material zu machen. Dazu kommt, dass wir inzwischen wissen, dass Typ Ia Supernovae nicht alle die gleiche Menge radioaktiven Materials erzeugen und somit für jede individuelle Supernova das passende Model gefunden werden müsste. Es war trotzdem möglich eine absolute untere Limite von  $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  für den Wert der Hubble Konstante zu bestimmen.

## Die universelle Expansion der Universums

Weit entfernte Objekte erscheinen weniger hell als nahe. Diese Binsenwahrheit gilt auch im Universum. Allerdings wird diese Aussage durch die Geometrie des Raumes relativiert. Die Bahn eines Lichtstrahles hängt davon ab, wie sehr der Raum gekrümmt ist. Dies ist vergleichbar mit interkontinentalen Reisen, bei denen der scheinbar gekrümmte Weg die kürzeste Verbindung ist. Ein Blick auf die Weltkarten eines Flugmagazines mit den Reiserouten kann dies leicht bestätigen. Die Expansion des Raumes hat aber auch zur Folge, dass Uhren von verschiedenen Betrachtern unterschiedlich wahrgenommen werden. So scheinen Uhren in einem Schwerfeld langsamer zu laufen als außerhalb. Die Ausdehnung des Raumes ist weiterhin der Grund, dass die Wellenlänge des Lichtes gestreckt wird. Sie wird als Rotverschiebung des Lichts von weit entfernten Objekten, wie Galaxien, Quasaren und Supernovae, beobachtet. Mit dieser Streckung des Raumes geht eine Zeitdilatation einher, die mit einer Standarduhr bei weiter Entfernung gemessen werden kann. Dazu wird ein zeitabhängiges Phänomen

benötigt, das über einen großen Teil des Universums beobachtet werden kann. Typ Ia Supernovae mit ihrem regelmäßigen Lichtkurven Verhalten sind geradezu ideal für ein solches Experiment. Die ersten weit entfernten Supernovae sind denn auch für diesen Test benützt worden. So konnten wir zeigen, dass die Streckung der Wellenlängen des Lichtes exakt mit der Streckung der Lichtkurven von Typ Ia Supernovae übereinstimmt, eine klare Voraussage aller kosmologischen Modelle, die auf der Allgemeinen Relativitätstheorie basieren. Die Helligkeitsentwicklung der entfernten Supernovae erscheint verlangsamt. Dies entspricht genau der Voraussage, dass Uhren im entfernten



**Bild 3:** Darstellung der Zeitdilatation in einer entfernten Supernova (Rotverschiebung von 0.479). Die rote Kurve, korrigiert entsprechend der Relativitätstheorie, ist ein guter Fit an die beobachtete Lichtkurve von SN 1995K. Die entsprechende Standard Lichtkurve von nahen Typ Ia Supernova ohne Korrektur (schwarze Linie) folgt den Daten nicht.

Universum für uns langsamer ticken. Alle Supernovabeobachtungen werden inzwischen routinemäßig für diese Zeitdilatation korrigiert.

### Das beschleunigte Universum

In der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts hatten sich zwei unabhängige Forschergruppen zum Ziel gesetzt, die mittlere Materiedichte des Universums mit Supernovae zu messen. Dazu wollten sie die Eigenschaft der Supernovae als Entfernungsindikatoren ausnutzen. In einem materiedominierten Universum sollte die universelle Expansion durch die anziehende Gravitation zwischen den Galaxien verlangsamt werden. Diese Abbremsung der Expansion ist direkt mit der mittleren Materiedichte verknüpft. Da damals schon bekannt war, dass Galaxien und

Galaxienhaufen oft von Dunkler Materie, deren physikalische Eigenschaften und Herkunft noch völlig unerklärt sind, dominiert werden, war es extrem wichtig die globale Materiedichte zu bestimmen. Dies war besonders interessant, da die Inflationstheorie für das frühe Universum verlangt, dass das Universum genügend Energie hat, so dass es ewig expandiert und die Raum-Zeit Geometrie flach ist. Die zweite Bedingung besagt nichts anderes, als dass die Winkelsumme von Dreiecken im Universum 180 Grad ist. Für positive gekrümmte Räume wäre die Winkelsumme größer (zum Beispiel auf einem Globus) und in negativen Räumen kleiner als 180 Grad. Die damals bekannten Messungen waren weder für die Geometrie noch für die Materiedichte genügend genau, um die zukünftige Entwicklung des Universums vorherzusagen.

Sollte es möglich sein, Entfernungen über einen beträchtlichen Teil des beobachtbaren Universums zu messen, so wäre die mittlere Expansion zwischen früheren Zeitpunkten und heute bestimmbar. Es ist zu beachten, dass für dieses Experiment nur relative Distanzen bestimmt werden müssen und keine Abhängigkeit von der Hubble Konstante besteht. Typ Ia Supernovae mit ihren extremen Leuchtkräften und ihrer Eigenschaft als gute relative Distanzindikatoren sind prädestiniert für ein solches Experiment. Saul Perlmutter vom Lawrence Berkeley National Laboratory war einer der ersten, der den Versuch zu einer solchen Messung in den späten 80er Jahre propagierte. Dies war recht visionär und die meisten erfahrenen Supernovafachleute waren skeptisch, ob die benötigte Messgenauigkeit erreicht werden könnte. Allerdings waren auch sie bald überzeugt und eine zweite Gruppe, das *High- $z$  Supernova Search Team*, formierte sich um Brian Schmidt (heute an der Australian National University in Canberra, Australien). Perlmutters Gruppe firmiert unter dem Namen *Supernova Cosmology Project*.

Beobachtungen von entfernten Supernovae sind relativ schwierig. Allerdings haben sie den Vorteil, dass wir nicht auf geeignete Objekte warten müssen, sondern sie direkt suchen können. Supernovae sind extrem selten und in unserer Milchstrasse sind nur fünf Supernovae über das letzte Jahrtausend gesichert beobachtet worden. Deshalb sind die Beobachtungen von nahen Supernovae nicht vorhersehbar (Beispiele sind im Artikel von Hillebrandt und Röpke gegeben). Der Überraschungseffekt einer nahen Supernova ist immer noch groß und das Beispiel von SN 1987A, einer Typ II Supernova, hat dies sehr deutlich belegt. Für entfernte Supernovae kann ein sehr großes Volumen abgesucht werden und es ist deshalb möglich geeignete Supernovae innerhalb eines limitierten Zeitrahmens zu finden, vorausgesetzt, dass ein genügend großes Blickfeld nach Objekten schwacher Helligkeit abgesucht wird. Die Problematik hierbei ist, die Supernovae innerhalb kürzester Zeit zu finden. Sie sind die buchstäblichen Nadeln im universalen Heuhaufen der Galaxien. Mit CCD Kameras der letzten Generationen sind solche Suchen möglich geworden. Die ersten wirklich entfernten Supernovae wurden von einer dänischen Forschergruppe im Jahre 1988 während einer Suche mit dem Dänischen 1.5m-Teleskop auf La Silla gefunden. In mehreren Jahren konnten sie leider nur zwei entfernte Objekte finden. Sowohl das Blickfeld als auch das Teleskop waren für eine effiziente Suche zu klein gewesen. Außerdem waren die Folgebeobachtungen nicht ausreichend organisiert, um die Supernovae zu klassifizieren und eine Aussage zur Kosmologie zu machen. Das *Supernova Cosmology Project* publizierte seine ersten sieben Objekte 1995. In dieser Arbeit favorisierten sie noch ein Universum mit hoher Materiedichte.

Allerdings hat sich in der Zwischenzeit herausgestellt, dass einige dieser frühen Objekte nicht sicher als Typ Ia Supernovae identifiziert werden konnten. Das *High-z Supernova Search Team* beobachtete sein erstes Objekt, SN 1995K, im selben Jahr.

In den folgenden Jahren haben beide Gruppen ihre Supernovasuchen und auch die Folgebeobachtungen verfeinert. In freudlichem Wettkampf wurden weitere Supernovae beobachtet. Diese Beobachtungen sind wissenschaftliche Großunternehmungen bei denen mehrere Sternwarten und Teleskope miteinander koordiniert werden. Eine typische Supernovasuche und die nachfolgenden Klassifizierungen und Lichtkurvenmessungen laufen folgendermaßen ab.

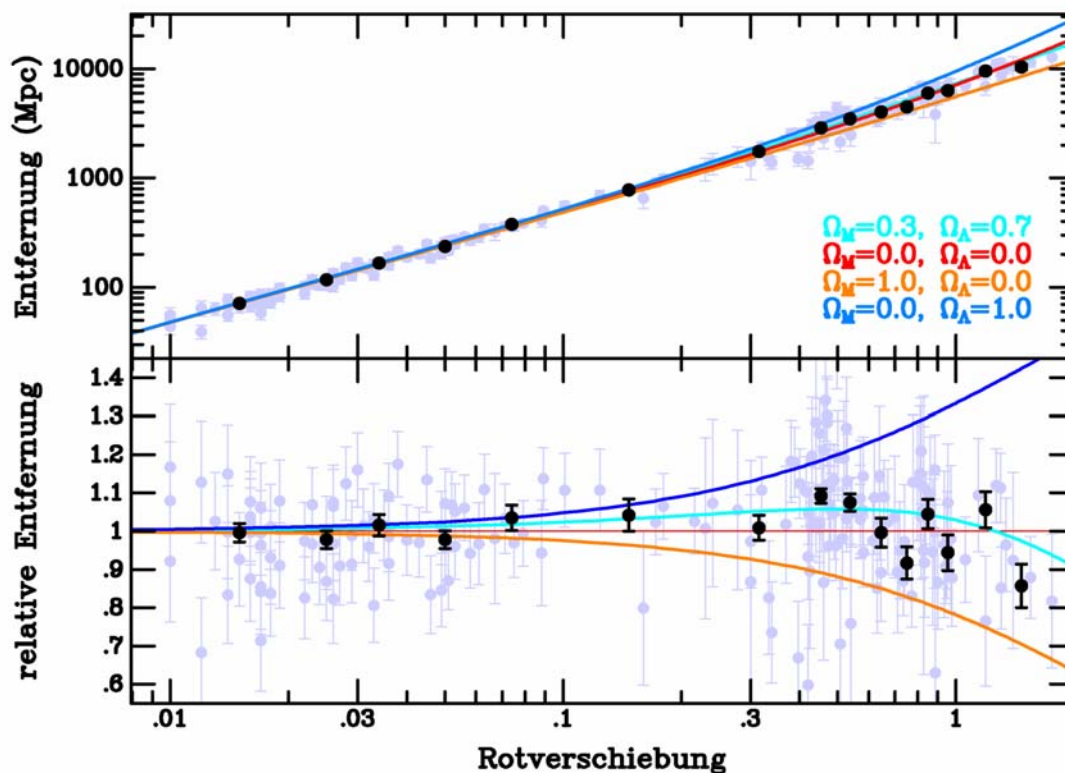
Beobachtungszeit an allen verfügbaren Großteleskopen wird in Anträgen mindestens ein halbes Jahr vor den eigentlichen Beobachtungen beantragt. Dabei müssen zuerst die Suchkampagnen bewilligt werden. Typischerweise werden die Suchen an 4m Teleskopen gemacht. Das *Victor-Blanco* Teleskop auf *Cerro Tololo* in Chile mit seiner Weitwinkelkamera ist dabei das am häufigsten benützte Teleskop. Seit letztem Jahr wird auch das *Canada-France-Hawaii* Teleskop mit seiner *MegaCam* für Supernovasuchen benützt (die verschiedenen Projekte sind in Box 3 zusammengefasst). Mit diesen Teleskopen werden dann in der Woche nach Neumond möglichst viele Sternfelder beobachtet. Diese Daten werden als Referenzaufnahmen bezeichnet. In der Woche vor dem nächsten Neumond werden dieselben Sternfelder wieder beobachtet und mit den Referenzaufnahmen verglichen. Nach der Subtraktion der Aufnahmen vom selben Himmelsgebiet bleiben dann nur neue Lichtquellen übrig. Danach werden die größten zur Verfügung stehenden Teleskope (*VLT*, *Keck*, *Gemini*, *Subaru*, *Magellan*) benachrichtigt, wo Projektmitarbeiter bereits warten, um spektrographische Aufnahmen der Supernovakandidaten zu machen. Nur mit einem Spektrum lassen sich Objekte klassifizieren. Dabei gilt es die Typ Ia Supernova von anderen Supernovatypen und aktiven galaktischen Kernen zu trennen. Manchmal haben wir auch veränderliche Objekte entdeckt, die sich nicht klassifizieren lassen. Alle positiv identifizierten Typ Ia Supernovae werden dann weiter beobachtet, um die Lichtkurve möglichst genau zu bestimmen.

Über die Jahre haben beide Gruppen über hundert entfernte Supernovae beobachtet. Publiziert ist bisher allerdings nur ein Bruchteil dieser Daten. Der Grund dafür sind die aufwendigen Reduktionen und Analysen, die benötigt werden, um gesicherte Resultate zu erreichen. Supernovae explodieren natürlich in Galaxien. Das hat zur Folge, dass die Helligkeitsmessung der Supernovae oft durch das nicht-uniforme Hintergrundlicht der Muttergalaxie erschwert wird (ein Beispiel ist in Bild 1 zu sehen). Im Normalfall ist es nötig die Galaxie ein Jahr *nach* der Supernovaexplosion nochmals detailliert zu beobachten und diese tiefe Aufnahme von allen Supernovadaten zu subtrahieren, um die punktförmige Supernova akkurat messen zu können.

Wenn die Helligkeit der Supernovae für jede Epoche bestimmt ist, müssen sie als Lichtkurve aufgetragen werden. Hier stellt sich die Rotverschiebung als ein Problem in den Weg. Wir können die entfernten nicht direkt mit den nahen Supernovae vergleichen, da sie nicht bei denselben Wellenlängen beobachtet wurden. Es muss also eine Korrektur



eingeführt werden, so dass auch Gleiches mit Gleichem verglichen wird. Diese Korrekturen sind an und für sich nicht schwierig zu bestimmen, wenn die Supernovae nicht zeitveränderlich wären und wenn die Korrektur nicht auch noch von der beobachteten Farbe der Supernovae abhängen würde. Die letztere wird von der Rötung, beziehungsweise Absorption, innerhalb der Muttergalaxie beeinflusst. Die Korrekturen werden von gut beobachteten nahen Typ Ia Supernovae abgeleitet. Bei der Anwendung auf die entfernten Supernovae müssen dann die Phase, Rötung und Farbe berücksichtigt werden. Erst dann können die Maximalhelligkeiten der Supernovae in einem bestimmten Wellenlängenbereich, typischerweise im blauen, da dort die meisten Supernovadaten existieren, miteinander verglichen und die Entfernungen bestimmt werden. Das Hubble Diagramm in Bild 4, das eine Erweiterung des Hubble Diagrams von Bild 2 darstellt, sind aller bisher veröffentlichten Typ Ia Supernovae gezeigt.



**Bild 4:** Das Hubble Diagramm aller publizierter Typ Ia Supernovae. Die Originaldaten sind im Hintergrund und ihre Mittelwerte in bestimmten Rotverschiebungsintervallen dargestellt. Die Kurven entsprechen möglichen kosmologischen Modellen. Das leere Universum ( $\Omega_M=0$ ;  $\Omega_\Lambda=0$  – rote Kurve) ist als Referenz angegeben. Ein materiedominiertes Universum ( $\Omega_M=1$ ;  $\Omega_\Lambda=0$ ) hätte eine Verlangsamung der Expansion zur Folge. Die Daten bevorzugen eindeutig ein Modell mit wenig Materie. Das momentan favorisierte Konkordanzmodell mit einem Beitrag von Dunkler Materie ( $\Omega_\Lambda>0$ ) ist in hellblau gezeigt.

Zur Verdeutlichung der Resultate werden die von den Supernovae gemessenen Entfernungen mit denjenigen in einem leeren Universum verglichen. Der Grund dafür ist, dass im normalen Hubble Diagramm die Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen des Universums sehr schlecht erkennbar sind. Bei sehr großen Distanzen hängt die Expansion vom mittleren Energieinhalt des Universums ab und Hubble's Gesetz wird entsprechend modifiziert. Bei einer hohen Materiedichte wird die Ausdehnung des

Universums stärker abgebremst. In einem hypothetischen, leeren Universum wirkt keine Anziehung und die Ausdehnung verläuft ungebremst. Natürlich leben wir nicht in einem leeren Universum, aber als Grenzfall ist dieses Model zur Illustration sehr geeignet. Zur Erinnerung, es war das Ziel der Supernova Experimente den mittleren Materiegehalt des Universums durch die Abbremsung der Expansion zu messen. In diesem Fall müssten die beobachteten Entfernungen kleiner sein als im ungebremsten leeren Universum. Zur Überraschung aller waren die Entfernungen der Supernovae aber bis zu 10% *größer* als im Falle eines leeren Universums. Dieses Ergebnis konnte im Rahmen der damals akzeptierten Ideen nicht interpretiert werden. Um einen Mitarbeiter des *High-z Supernova Search Teams* zu zitieren: „In unseren Herzen wissen wir, dass dies nicht stimmen kann!“ Dies war die Situation zu Beginn 1998. Was war falsch gelaufen?

Die Fehlersuche konnte beginnen. Waren die Messungen falsch gemacht worden? Es konnten keine offensichtlichen Fehler in der Photometrie gefunden werden. Waren die Korrekturen für die Rotverschiebung unzuverlässig? Die Beobachtungen waren schon so gemacht worden, dass die Korrekturen minimal sein sollten, und dies war wirklich der Fall. Obwohl noch Diskussionen zur Präzision der Korrekturen geführt wurden, waren alle überzeugt, dass diese nicht Schuld am Ergebnis sein konnten. Wurde die Korrektur für die Absorption in der Muttergalaxie nicht richtig angewandt? Es ist zwar möglich und sicherlich nicht ausgeschlossen, dass Staub in einer anderen Galaxie Rötungseigenschaften hat, die wesentlich vom Staub in der Milchstrasse abweichen, aber die Supernovae konnten sehr gut mit der bekannten Formel korrigiert werden. Außerdem zeigten die meisten Supernovae überhaupt keine Anzeichen von Rötung. Oder waren die entfernten Supernovae nicht so leuchtstark, wie ihre nahen Vertreter? Mit anderen Worten verlieren sie die Eigenschaft als gute Entfernungsmesser bei großer Rotverschiebung? Dies ist etwas schwieriger zu beantworten. Entscheidend hierfür ist, ob die entfernten Explosionen aus irgendwelchen Gründen nicht so hell werden wie die Vergleichsobjekte im nahen Universum. Immerhin explodierten diese Sterne zu einer Zeit, als das Universum nur halb so alt war wie jetzt und die Sonne und das Sonnensystem noch nicht existierten. Die einzige Möglichkeit ist die verschiedenen Supernova Eigenschaften, vor allem die Lichtkurvenform und die spektrale Evolution, so gut wie möglich zu überprüfen. Die verfügbaren Daten deuten alle darauf hin, dass die entfernten Supernovae zumindest den nahen sehr ähnlich sind. Da der Helligkeitsunterschied aber sehr klein ist (nur etwa 25% bei einer Rotverschiebung von 0.5 verglichen zu einem leeren Universum) muss diese Möglichkeit genau geprüft werden. Es wäre eine große Hilfe, wenn wir die Physik der Explosion und des Strahlungstransportes besser verstehen würden. Damit könnten auch Aussagen zu einer etwelchen Helligkeitsentwicklung gemacht werden. Leider sind wir noch nicht ganz soweit.

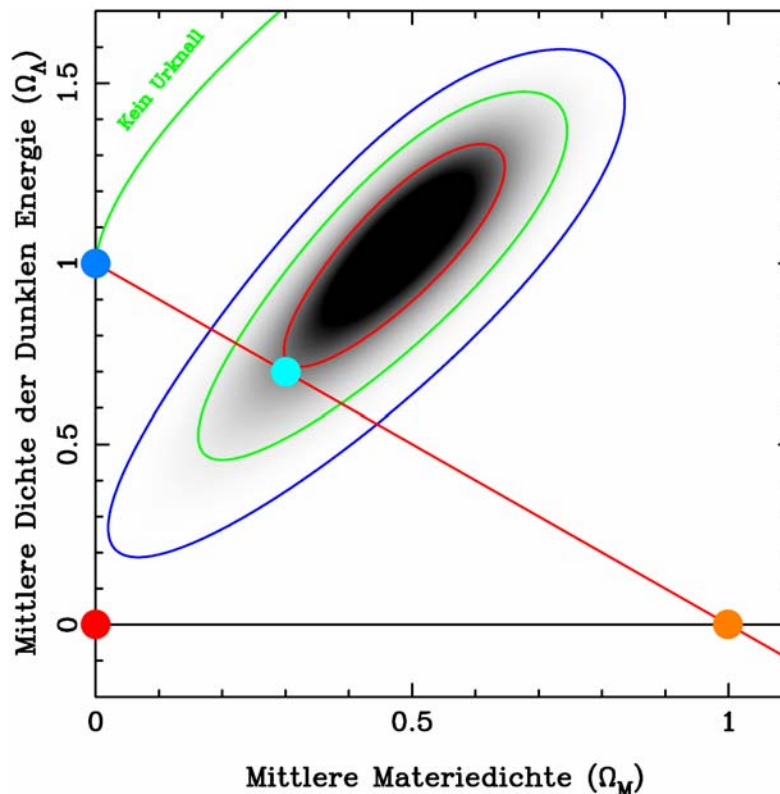
Die kosmologische Interpretation des Supernova Resultates ist, dass die universelle Expansion in den letzten 6 Milliarden Jahren sich beschleunigt hat und deshalb die Supernovae weiter entfernt als in einem leeren Universum erscheinen. Die Gravitation wirkt allerdings nur anziehend und nicht abstoßend. Allerdings hatte Albert Einstein schon eine mögliche Lösung für unsere Messungen vorgeschlagen, als er versuchte seine Allgemeine Relativitätstheorie auf das Universum anzuwenden. Damals waren Galaxien

noch nicht als Milchstrassen erkannt und ihre Fluchtgeschwindigkeiten noch nicht gemessen. Die einzigen Geschwindigkeiten, die Astronomen zu jener Zeit gemessen hatten, waren die Radialgeschwindigkeit von Sternen und, da die Milchstrasse weder kontrahiert noch expandiert, waren diese Geschwindigkeiten sehr klein. Einstein hatte erkannt, dass ein statisches Universum in seiner Theorie nicht möglich war und versuchte sie zu „stabilisieren“. Dazu hat er die Kosmologische Konstante eingeführt. Willem de Sitter konnte sehr schnell beweisen, dass auch dieser extra Term in den Einstein'schen Gleichungen nicht-statische Lösungen erlaubt, und Einstein hat später seine Einführung als großen Fehler bereut. Die Kosmologische Konstante ist jedoch die einfachste Erklärung für die beobachtete globale Beschleunigung. Dies war die Erklärung die Adam Riess (damals an der University of California in Berkeley und jetzt am Space Telescope Science Institute) für das *High-z Supernova Search Team* 1998 publizierte. In dieser Publikation waren nur zehn entfernte Typ Ia Supernovae analysiert, aber die Evidenz für die beschleunigte Expansion war schon deutlich. Das *Supernova Cosmology Project* hat dann 1999 mit einer größeren Anzahl entfernter Supernovae nachgezogen und das erstaunliche Resultat bestätigt.

Beinahe gleichzeitig sind damals auch die ersten exakten Messungen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung bekannt geworden. Und diese deuteten auf eine flache Geometrie des Universums hin. Zusammen mit den Supernovae war die Schlussfolgerung, dass eine zusätzliche Energiekomponente im Universum vorhanden sein muss, unausweichlich.

Inzwischen haben beide Supernovagruppen viele nahe und entfernte Typ Ia Supernovae vermessen und sind immer wieder zum selben Ergebnis gekommen. In den letzten zwei Jahren wurde nun noch eine entscheidende Vorhersage bestätigt. Die Dichte im frühen Universum war höher als jetzt und folglich war auch die Anziehungskraft der Gravitation damals stärker. Die Expansion im frühen Universum war verlangsamt! Erst in der zweiten Hälfte der universalen Geschichte hat sich die Dunkle Energie durchgesetzt und die Beschleunigung begonnen. Für die Distanzen bedeutet dies, dass wir zwar eine Beschleunigung bis zu einer gewissen Rotverschiebung sehen, dann aber eine Verlangsamung beobachtet werden sollte. Dies wurde in verschiedenen Supernova Datensets wirklich gesehen (cf. Bild 4). Die Beobachtungen von Typ Ia Supernovae mit dem *Hubble Space Telescope* bei Rotverschiebungen größer als 1 waren hierfür entscheidend. Die Existenz der Dunklen Energie ist inzwischen für beinahe alle Kosmologen erwiesen.

Diese Erkenntnis ist in Bild 5 nochmals dargestellt. Dies ist ein inzwischen klassisches Diagramm der Kosmologie geworden. Es zeigt die Beiträge der Materiedichte und der Energiedichte der Dunklen Energie (in der Form einer Kosmologischen Konstante) für kosmologischen Modelle die auf Friedmann-Theorien aufbauen. Diese sind direkt von der Einsteinschen Relativitätstheorie abgeleitet. Die in Bild 4 eingezeichneten Modelle sind hier nochmals angegeben. In der Vergangenheit wurden nur Modelle mit  $\Omega_\Lambda=0$  diskutiert (Box 4 gibt eine Erklärung der hier verwendeten  $\Omega$ ). Dies entspricht den Modellen entlang der horizontalen Linie. Das Einstein-de Sitter Modell hat zusätzlich eine flache Raumgeometrie und ist beim Schnittpunkt der diagonalen roten Linie und der horizontalen schwarzen Linie rechts unten im Diagramm zu finden (ocker Punkt). Kosmologische Modelle mit einer flachen Raumgeometrie liegen entlang der diagonalen roten Linie. In der oberen linken Ecke entspricht Modellen, die keinen Urknall hatten. In diesem Parameterbereich liefern die Friedmann-Modelle keine konvergenten Lösungen. Die Supernovadaten bevorzugen ein Gebiet, das sowohl weit von einem Materie-dominierten Universum ( $\Omega_\Lambda=0$ ) als auch dem Einstein-de Sitter Modell entfernt liegen.



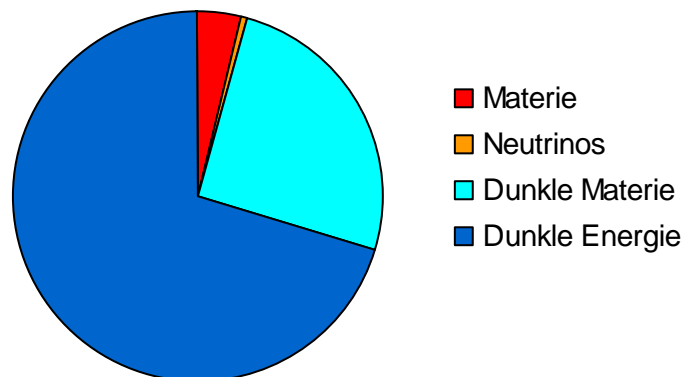
**Bild 5:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der kosmologischen Parameter. Für jede mögliche Kombination wird ein Abgleich mit den Daten (185 Supernova von Bild 4) berechnet. Die Grauskala zeigt die Wahrscheinlichkeit für diese Zahlenkombination an. Die Wahrscheinlichkeitsbereiche sind mit den roten (66%), grünen (95%) und blauen (99%) Linien angedeutet. Es ist deutlich sichtbar, dass die besten Lösungen einen signifikanten Beitrag der Dunklen Energie verlangen. Ein flaches Universum (mit der Summe  $\Omega_M + \Omega_\Lambda=1$ ) ist als rote diagonale Linie eingezeichnet. Die Messungen der Hintergrundstrahlung bevorzugen ein kosmologisches Modell mit Parametern entlang dieser Linie. Die Punkte bezeichnen die Modelle, die in Bild 4 eingezeichnet sind. Dies sind das leere Universum (rot), das Einstein-de Sitter Universum, das von Materie dominiert ist (ocker), Ein Universum ausschließlich aus Dunkler Energie bestehen (blau) und das Konkordanzmodell (hellblau).

Die Konturlinien entsprechen den 66%, 95% und 99% Wahrscheinlichkeiten für die Modelle, welche die Supernova beschreiben. Ein beträchtlicher Beitrag der Kosmologischen Konstante ist in diesem Diagramm sichtbar. Dies war das erste Anzeichen, dass die Vorstellungen zum kosmologischen Modell falsch waren. Kombiniert mit den Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die ein flaches Modell bevorzugen, ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Inzwischen hat sich das Modell mit  $\Omega_M=0.3$  und  $\Omega_\Lambda=0.7$  als so genanntes „Konkordanz-Modell“ etabliert (hellblauer Punkt in Bild 5). Weitere unabhängige Messungen von Gravitationslinseneffekten und Massenbestimmungen in Galaxienhaufen unterstützen solche Werte. Der Name Konkordanzmodell ist ein Indiz für die Unzufriedenheit vieler Astrophysiker, dass wir die Natur dieses Universums noch nicht verstehen.

Alternativen zur Kosmologischen Konstante als Erklärung für die Dunkle Energie beruhen auf dem Zerfall von Teilchenfelder, die Energie in die Raum-Zeit frei lassen, ähnlich den Theorien für die Inflation im sehr frühen Universum. Es ist durchaus möglich, dass ein solches physikalisches Feld, oft mit ‚Quintessence‘ umschrieben, die Expansion antreibt. Allerdings bestehen hier Probleme mit der Feinjustierung, damit die Beschleunigung erst ‚spät‘, d.h. mehrere Milliarden Jahre nach dem Urknall, in der Entwicklung einsetzt. Weitere Erklärungsversuche beruhen auf der Möglichkeit, dass die Gravitation in höheren als vier Dimensionen wirkt und ein ‚Leck‘ in diesen höheren Dimensionen existiert. Dadurch könnte sozusagen Energie aus anderen Dimensionen in unser vier-dimensionales Universum gepumpt werden.

Diese neue Komponente des Universums, was immer die physikalische Erklärung ist, dominiert zurzeit die kosmische Expansion. Sie macht etwa 70% der kritischen Dichte aus. Aus der Nukleosynthese des Urknalls wissen wir, dass nur etwa 3 bis 4% der Energiedichte des Universums aus Materie besteht, wie wir sie aus unserem Alltag kennen. Die Dunkle Materie macht etwa 25% des Universums aus.

### Energiekomponenten im Universum



**Bild 6:** Die Verteilung der bekannten Energiekomponenten, die momentan für die Entwicklung des Universums wichtig sind. Die Natur der Dunklen Materie und Dunklen Energie sind momentan noch unbekannt.

## Die Zukunft des Universums

Die kosmologischen Modelle sind sehr eindeutig in ihren Vorhersagen für die Zukunft. Nur müssen alle Modellparameter bekannt sein. Bis vor wenigen Jahren hatten wenige Astrophysiker mit der Kosmologischen Konstante gerechnet. Die Aufgabe der Supernova Experimente war es die Zukunft aufgrund der Abbremsung zu ermitteln. Wenn die Abbremsung stark genug gewesen wäre, das heißt genügen Materie im Universum vorhanden gewesen wäre, so hätten wir einen *Big Crunch*, das in sich Zusammenstürzen des Universums, am Ende erwartet. Mit der Dunklen Energie sind die Vorhersagen jetzt etwas schwieriger geworden. Aufgrund der Vermessung des Mikrowellen-Hintergrundes scheint fest zu stehen, dass die globale Geometrie der Raum-Zeit flach ist und damit wahrscheinlich immer so bleiben wird. Die Materiedichte, die in Galaxienhaufen gemessen wird, ist zu klein, um die Flachheit des Raumes erklären zu können. Die Beschleunigung, wie sie von den Supernovae gemessen wurde, kann nur mit einer abstoßenden Komponente in Einstein's Gleichungen erklärt werden. Die Kosmologische Konstante ist dafür die einfachste Möglichkeit. Sie wirkt zu allen Zeiten und an allen Stellen gleich. Sie hätte zur Folge, dass die Galaxien für uns allmählich alle rotverschoben im Himmelshintergrund verschwinden würden. Es bliebe eine unendliches Universum mit sehr wenig beobachtbaren Galaxien übrig. Mit der Zeit wäre die Energie in den Sternen aufgebraucht und alle Materie in Schwarzen Löchern konzentriert. Das Universum wäre erloschen. Allerdings kann die Beschleunigung auch auf einer zeitabhängigen Phänomen beruhen. In einem solchen Fall hat sich die Stärke der Dunklen Energie mit der Zeit verändert und Voraussagen für die Zukunft des Universums wären sehr schwierig. Man kann sich vorstellen, dass die Wirkung dieser Kraft einmal wieder nachlässt, ähnlich wie dies am Ende der inflationären Phase im frühen Universum geschah, und dann die Ausdehnung sich wieder verlangsamt. Es kann aber auch sein, dass die Dunkle Energie so stark ist und die Raumausdehnung in einer Weise beschleunigt wird, dass die uns bekannten Kräfte nicht ausreichen, um das Universum zu erhalten. In einem solchen Fall würde die Raumausdehnung am Ende alles zerreißen, das heißt die Galaxien, das Sonnensystem, ja die Atome würden auseinander gerissen und das Universum würde im *Big Rip* zerfallen.

Es ist inzwischen zur Aufgabe geworden, die Stärke der Dunklen Energie zu messen. Supernovae sind dabei immer noch die besten Kandidaten, obwohl auch andere Methoden vorgeschlagen wurden. Nur mit hochpräzisen Messungen der Entfernungen und der Expansionsgeschichte des Universums werden wir erfahren können, was die Zukunft des Universums sein wird. Diese Aufgabe haben sich die Supernovaforscher gestellt. Zurzeit sind mindestens zwei weltweite Projekte im Gange, um diese Eigenschaften besser zu erforschen. Das eine ist das *ESSENCE* Projekt, das aus dem *High-z Supernova Search Team* hervorgegangen ist, und das andere der *Supernova Legacy Survey* (weitere Projekte sind in Box 3 beschrieben).

Was auch immer die Zukunft bringen wird, es steht fest, dass das Universum von einer bisher unbekannten und weitgehend unbeschriebenen Energiekomponente dominiert wird. Diese Komponente entspricht im Wesentlichen der Vakuumsenergie, etwas salopp gesagt also dem Nichts. Für uns bedeutet die heutige Vorstellung auch, dass wir nicht nur nicht im Zentrum des Weltalls stehen sondern auch unsere Form von Materie nicht dem

vorherrschenden Material im Universum entspricht. Da wir aus Baryonen bestehen das Universum aber in erster Linie aus Dunkler Energie und Dunkler Materie, müssen wir auch dieses ‚Zentrum‘ aufgeben. In einer gewissen Weise entspricht dies einer weiteren Kopernikanischen Revolution.

Es wird einige Jahre dauern, bis wir mehr über die Dunkle Materie und die Zukunft des Universums verstehen werden. Die Experimente sind auf eine Dauer von mehreren Jahren angelegt, damit genügend Supernovae vermessen werden können. Der Arbeitsaufwand und auch die Gruppen sind nicht kleiner geworden. Schon in der Vergangenheit sind das *High-z Supernova Search Team* und das *Supernova Cosmology Project* weltweite Unternehmen gewesen. Die neuen Experimente sind inzwischen noch größer geworden und verlangen eine sorgfältige weltweite Koordination.

Supernovae sind die hochenergetischen Explosionen einzelner Sterne. Sie gehören zu den hellsten Objekten im Universum überhaupt. Ironischerweise haben sie uns den dunklen Inhalt des Universums gezeigt. Es scheint, als wenn wir gerade eine der interessantesten Phasen des Universums miterleben können.

**Box 1:** Aufgrund der spektralen Erscheinung werden verschiedene Untertypen von Supernovae unterschieden. Type Ia Supernovae zeigen weder Wasserstoff- noch Heliumlinien und ermangeln somit der häufigsten Elemente im Universum. Ihr Explosionsmechanismus, die thermonukleare Verbrennung, ist fundamental verschieden von allen anderen Supernovae. Typ II Supernovae sind das Resultat eines Kernkollapses im Inneren eines massiven Sternes. Diese Supernovae zeigen ausgeprägte Wasserstoff- und Heliumlinien. Typ Ib Supernovae sind ähnlich, obwohl sie keine Wasserstofflinien zeigen, aber Helium vorhanden ist. Wie die Typ Ic, die weder Wasserstoff noch Helium, dafür aber Sauerstoff und Kalzium in den Spektren aufzeigen, sind auch sie die Explosionen massiver Sterne. Es gibt Hinweise, dass sie auch mit den Gamma-Strahlen Ausbrüchen assoziiert sind.

**Box 2:** Die maximale Leuchtkraft von Typ Ia Supernovae ist korreliert mit der Lichtkurvenform. Supernovae mit einer langsamen zeitlichen Entwicklung sind typischerweise leuchtstärker als solche mit einem schnelleren Lichtabfall. Diese Beziehung ist ein entscheidender Bestandteil der Distanzbestimmung mit Typ Ia Supernovae. Seit diese Beziehung gefunden wurde, sind verschiedene Methoden zur Korrektur entwickelt worden. Der ursprüngliche Vorschlag von Mark Phillips war den Lichtabfall im Zeitintervall zwischen dem Maximum und 15 Tage danach in blauem Licht zu messen. Diese Methode wird oft als  $\Delta m_{15}$  Methode bezeichnet. Sie ist inzwischen auf weitere Wellenlängen ausgeweitet worden. Die Multi-wavelength Light Curve Shape Methode (MLCS) benützt alle vorhandenen optischen Wellenlängen in einer koordinierten Form um die Maximalleuchtkraft zu normalisieren und gleichzeitig die Rötung zu bestimmen. Eine weitere Version der Korrekturmethode postuliert, dass die Maximalleuchtkraft mit einer zeitlichen Streckung der Lichtkurve korreliert. Diese Stretch-Methode basiert auf einer Standardlichtkurve, die als Basis für alle Typ Ia Supernovae fungiert. Eine Eigenart dieser Methode ist, dass sie nicht die Leuchtkraft normiert, sondern die beobachteten Helligkeiten in „effektive“ Helligkeiten umwandelt. Für das Distanzmodul ist dies irrelevant, aber physikalisch macht es natürlich keinen Sinn. Es bleibt zu betonen, dass wir im Moment die Physik, die für diese Veränderung der Lichtkurve verantwortlich ist, leider noch nicht verstehen.



**Box 3:** Es können Supernova Projekte mit verschiedenen Zielen unterschieden werden. Im nahen Universum sucht seit etwas über zehn Jahren die *Lick Observatory Supernova Search* mit einem automatischen Teleskop nach Supernovae. Gleichzeitig hat die *Calán/Tololo Supernova Search* zwischen 1990 und 1995 die größte Stichprobe von gut beobachteten Type Ia Supernovae beobachtet. Außerdem hat die Gruppe am *Center for Astrophysics* in Cambridge, USA, viele nahe Supernovae beobachtet. In Europa hat ein Großprojekt mit ESO Teleskopen organisiert von Astronomen in Padua, Italien, mehrere detaillierte Datensets beigetragen. Seit drei Jahren haben sich die Europäischen Astronomen zur *European Supernova Collaboration* zusammengeschlossen und beobachten alle sehr nahen Typ Ia Supernovae in einer Genauigkeit, die bisher nicht möglich war. Die Supernova Gruppe am *Cerro Tololo Inter-American Observatory* hat sich mit der *Carnegie Institution* und deren südlicher Station *Las Campanas Observatory* zur *Supernova Optical and Infrared Search* vereint. Inzwischen hat sich dieses Projekt zum *Carnegie Supernova Project* weiter entwickelt. Diese Gruppe konzentriert sich auf einen Rotverschiebungsbereich bis zu 0.3. Konkurrenz in diesem Bereich ist die *Supernova Factory*, ein US-Französisches Projekt, das in den nächsten Jahren etwa 300 Supernovae beobachten will. Bei höheren Rotverschiebungen haben das *High-z Supernova Search Team* und das *Supernova Cosmology Project*, beides weltweite Zusammenarbeiten mit Mitarbeitern in Europa, Nord- und Südamerika, Australien und Japan, damit begonnen die Eigenschaften der Dunklen Materie zu untersuchen. Das *ESSENCE* Projekt versucht die Dunkle Energie mit etwa 200 gut vermessenen Typ Ia Supernovae bei Rotverschiebungen zwischen 0.2 und 0.8 mit einer Suche am *Victor Blanco* Teleskop auf *Cerro Tololo* zu charakterisieren. Das Konkurrenzunternehmen heißt *Supernova Legacy Survey* und benützt das *Canada-France-Hawaii* Teleskop. Das *Hubble Space Telescope* wurde für die *Higher-z Supernova Search* benutzt. Weitere Supernova Projekte sind geplant. So soll das *Sloan Digital Sky Survey* Teleskop für eine Supernova Suche genutzt werden. Pläne für einen Satelliten spezialisiert für Supernovabeobachtungen sind schon weit fortgeschritten. Die *SuperNova Acceleration Probe* (SNAP) könnte Supernovae über einen großen Rotverschiebungsbereich schon in etwas über zehn Jahren beobachten.

**Box 4:** Die  $\Omega$  der Kosmologie. Es hat sich eingebürgert, dass in der Kosmologie relative Vergleiche gebraucht werden. Anstelle von absoluten Werten werden hierzu Vergleichswerte zu speziellen Modellen benützt. Anstelle der direkten Materie- und Energiedichten werden die Verhältnisse zu den Werten, die einem flachen Universum entsprechen, berechnet. Die Energiedichte eines flachen Universums wird auch als ‚kritische Dichte‘ bezeichnet. Die  $\Omega$  sind so definiert, dass sie die Dichte des Modells relativ zur kritischen Dichte des flachen Universums darstellen.  $\Omega=1$  entspricht somit in allen Fällen dem flachen Universum.  $\Omega>1$  beschreibt Modelle, in denen die Raumkrümmung positiv ist, und  $\Omega<-1$  entspricht Modellen mit einer negativen Raumkrümmung. Um die Beiträge einzelner Komponenten zur gesamten Energiedichte zu beschreiben, werden die  $\Omega$  oft aufgeteilt und mit Subskripts versehen.  $\Omega_M$  steht für die Materiedichte,  $\Omega_\Lambda$  bezeichnet den Beitrag der Dunklen Energie oder Kosmologischen Konstante.