

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 58 (2000)
Heft: 298

Artikel: Supernovae Typ Ia im expandierenden Universum
Autor: Parodi, Bernhard
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898578>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Supernovae Typ Ia im expandierenden Universum¹

BERNHARD PARODI

Inhalt: Weisse Zwerge in engen Doppelsternsystemen können unter geeigneten Bedingungen mit einer Leuchtkraft von mehr als einer Milliarde Sonnen explodieren. Solch ein Ereignis wird als Supernova Typ Ia (kurz SN Ia) bezeichnet. Die weit-hin sichtbaren SNe Ia sind von grösster Bedeutung als Mittel zur intergalaktischen Distanzbestimmung. Im Artikel wird skizziert, warum sich SNe Ia eignen als sogenannte Standardkerzen und welchen Beitrag zum Weltbild sie zu leisten vermögen. Sie erlauben aufgrund der kosmologischen Zeitdehnung den Nachweis kosmischer Expansion. Sie haben in den letzten Jahren aber auch entscheidend dabei geholfen, sowohl die aktuelle Expansionsrate des Universums genau zu messen (d.h. die Hubble-Konstante zu bestimmen) als auch starke Indizien für deren künftiges Anwachsen (d.h. für die Existenz einer kosmologischen Konstante) zu liefern.

Einleitung

Schätzungen zufolge explodiert im sichtbaren Universum jede Sekunde ein Stern. In unserer Heimatgalaxie, der Milchstrasse, explodiert etwa alle 20-30 Jahre ein Stern. Mit blossem Auge ist am irdischen Himmel allerdings nur etwa alle 200 Jahre ein entsprechendes Aufblitzen zu sehen: In den letzten 2000 Jahren wurden weltweit neun dieser kurzzeitigen und daher von den chinesischen Chronisten als «Gaststerne» bezeichneten Ereignisse registriert. Die übrigen 9/10 dieser heute Supernova genannten Explosionen blieben unbemerkt, einerseits weil sie sich in sonnenfernen Gebieten der Milchstrasse ereigneten und daher zu schwach für das nackte Auge waren, andererseits verschlackten die zahlreichen dunklen Staubwolken, die die galaktische Ebene durchziehen, deren Licht. Heute sind mit geeigneten Instrumenten nurmehr deren Überreste erkennbar. Da die letzte direkte Sichtung einer Supernova in unserer Galaxis aus dem Jahre 1604 datiert, wäre statistisch gesehen eine weitere längst fällig.

Bis es soweit ist, lohnt es sich, Supernovae (kurz SNe) in anderen Galaxien zu entdecken und zu studieren. Insgesamt wurden bis heute etwas weniger als 2000 Supernovae beobachtet. Die Zahl der jährlich entdeckten SNe nahm im Laufe der letzten hundert Jahre rapi-de zu und liegt derzeit bei etwa 200. Da-

bei ist hervorzuheben, dass gerade auch die Amateurastronomie mit etwa 10 Prozent der Entdeckungen einen wesentlichen Beitrag leistet. Typischerweise erfolgt eine SN-Entdeckung durch den Vergleich einer aktuellen Galaxienaufnahme, die die Supernova als Lichtfleck enthält, mit einer früheren Aufnahme noch ohne Supernova. Heutige CCD-Aufnahmetechniken machen es auch dem Laien einfach, astronomische Bilder rasch auf SN-Kandidaten auswerten zu können. Eine Sequenz von Aufnahmen der letztjährigen SN 1999by in NGC 2841 ist in Fig. 1 abgebildet. Diese im Visuellen eine scheinbare Helligkeit von 13 Magnituden erreichende Supernova war schon mit mittelgrossen Kleinteleskopen beobachtbar.²

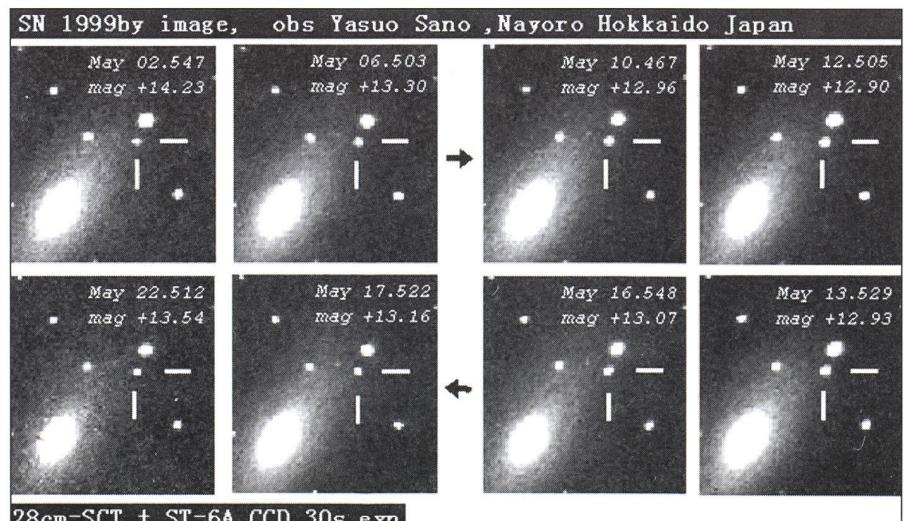
Spektrale Klassifikation der Supernovae

Die Unterscheidung der beobachteten SNe in Klassen und Unterklassen erfolgt mittels spektraler Kriterien. Haupt-

kriterium ist die Absenz von Wasserstofflinien (SN Typ I) beziehungsweise deren Präsenz (SN Typ II) im Spektrum. Da Typ-II-SNe durch kollabierende Kerne schwerer Sterne mit einer Lebensdauer von weniger als 100 Millionen Jahre erzeugt werden, sind SNe dieses Typs in Galaxien mit effizienter, aktiver Sternbildung zu finden, d.h. vor allem in Irregulären und Spiralgalaxien. SNe der Typen Ib und Ic sind nur in Spiralgalaxien zu beobachten und entstammen ebenfalls jungen, jedoch masseärmeren Vorläufersternen. Hingegen explodieren SNe vom Typ Ia in allen Galaxientypen, inklusive der elliptischen Galaxien, welche durch alte Sternpopulationen gekennzeichnet sind. Im Gegensatz zu allen anderen SNe strahlen SNe Ia kaum im UV und gar nicht im Radiobereich. SNe Ia, die in etwa einem Zehntel aller beobachteten SN-Ausbrüche vorliegen, haben offenbar alte Vorläufersterne. Von den beiden anderen Typ-I-Unterklassen unterscheiden sich SNe Ia durch eine deutliche Silizium-Absorptionslinie bei 6150 Å im frühen Spektrum (Fig. 2a).

Während eine SN aufleuchtet und ihr Licht sich danach wieder abschwächt, wechselt auch das Spektrum: die dem Kontinuum überlagerten Spektrallinien sind Ausdruck derjenigen Elemente, die die Photosphäre der expandierenden Atmosphäre zur jeweiligen Zeit passieren. In Fig. 2a ist ersichtlich, wie sich die anfänglich prominente Si ($\lambda 6150$)-Absorptionslinie innerhalb einiger Wochen nach dem Maximum zurückbildet. Hingegen zeigen die Eisenlinien um 5000 Angstroem, die auf Grund der im nächsten Abschnitt erwähnten radioaktiven Zerfallsstufe entstehen, eine deutlicher werdende spektrale Signatur. Die SN-Ia-

Fig. 1: Eine Serie von Aufnahmen der SN 1999by in NGC 2841 in der Woche vor und nach dem Helligkeitsmaximum. Diese Typ Ia Supernova war bereits mit grösseren Amateurteleskopen visuell beobachtbar.



¹ Dieser Artikel ist die revidierte Fassung zweier vor der Astronomischen Gesellschaft Bern und dem Astronomischen Verein Basel gehaltener Vorträge.

² Unter HREF = «www.supernovae.net/isn.htm» des International Supernova Networks, beispielsweise, sind Informationen zum Thema der Supernovae zu finden. Insbesondere sind auch Links zu Bildern und Daten aktueller SNe angegeben.

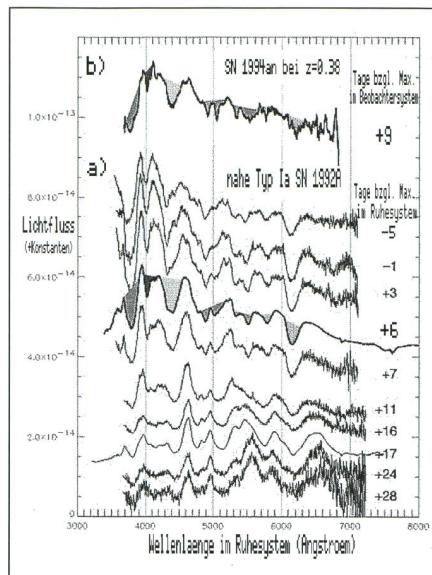


Fig. 2: a) Die spektrale Biographie eines nahen SN-Ia-Ausbruchs. SNe Ia sind erkennbar am Fehlen von Wasserstofflinien und dem Auftreten einer deutlichen Siliziumlinie bei 6150 Angstroem. b) Das Spektrum einer stark rotverschobenen SN Ia lässt sich durch Vergleich mit dem Spektrum einer nahen SN Ia datieren, wobei der Effekt der Zeitdilatation zu berücksichtigen ist.

Ausbrüche sind derart homogen, dass die Spektren unterschiedlicher SNe Ia nach derselben Anzahl Tage dieselben Eigenschaften zeigen. Dies trifft sowohl für nahe wie für entfernte SNe Ia zu. Daraus lässt sich beispielsweise für das in Fig. 2b gezeigte Spektrum der SN 1994an durch Vergleich mit dem typischen, darunter abgebildeten Spektrum abschätzen, dass es sechs Tage nach dem Maximum aufgenommen wurde. Weshalb dieses sechs Tage alte Spektrum in Tat und Wahrheit erst am neunten Tag beobachtet wurde und wie dies mit der Lichtkurvenverbreiterung entfernter SNe Ia zusammenhängt, soll nach dem nächsten Abschnitt erklärt werden.

SN-Ia-Lichtkurven und ihre Standardisierung

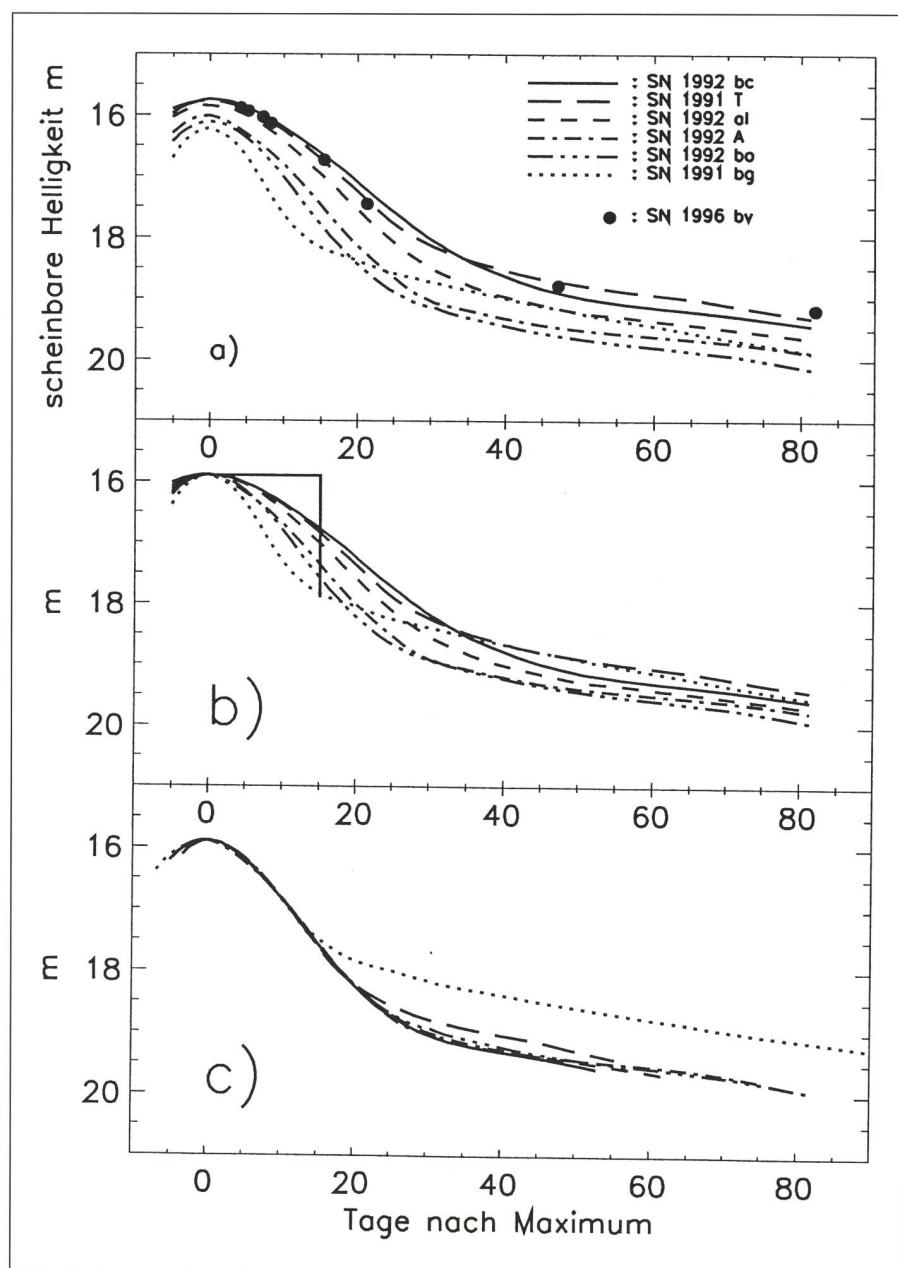
Den Lichtkurven aller SN-Typen ist ein rascher Anstieg bis zum Erreichen einer Maximalhelligkeit und ein langsameres Abklingen innerhalb einiger Wochen, gefolgt von einem mehrmonatigen Ausklingen, gemeinsam. Genaueres Hinsehen offenbart allerdings Unterschiede im Betrag der An- und Abstiegsraten sowie in der Lichtkurve. Die größten Maximalhelligkeiten erreichen die SNe Ia. Physikalisch aussagekräftig sind die gebrochen-linearen Kurvenverläufe nach dem Maximum: da die scheinbare Helligkeit eine logarithmische Größe der Intensität ist, bedeutet eine lineare

Helligkeitsabnahme einen exponentiellen Intensitätsabfall. In der Tat ist das Licht einer Supernova durch den radioaktiven Zerfall charakteristischer, bei der Explosion in unverhältnismässigen Mengen gebildeten Elementen bestimmt. Für die Lichtkurve der SNe Ia ist die Zerfallsfolge Nickel⁵⁶ → Kobalt⁵⁶ → Eisen⁵⁶ verantwortlich.

Aus einer Beobachtungsreihe von SN-Helligkeiten lässt sich eine Lichtkurve interpolieren (Fig. 3a). Heutige CCD-Aufnahmetechniken unter Einsatz von Standardfiltern erlauben genaue Helligkeitsmessungen und entsprechend ein-

deutige Lichtkurvenbestimmungen. Erfolgen die ersten Beobachtungen einer Supernova erst nachdem diese ihr Helligkeitsmaximum überschritten hat, so lässt sich dieses gleichwohl mit grosser Genauigkeit bestimmen. Dazu genügt die Anpassung der Lichtkurve einer vollständig beobachteten SN Ia an die Datenpunkte der weniger gut beobachteten SN, möglichst in mehreren Filterbändern gleichzeitig. Die gesuchte Maximalhelligkeit ist dann einfach ablesbar. Einer Komplikation ist allerdings Rechnung zu tragen: Die Lichtkurven der SNe Ia sind einander zwar ähnlich,

Fig. 3: a) SNe Ia zeigen nur leichte Unterschiede im Verlauf ihrer Lichtkurven. Gut beobachtete SNe Ia dienen als Vorlage (Standardlichtkurven oder Templates), um die Maximalhelligkeit der SNe mit nur wenigen Beobachtungsdaten bestimmen zu können. b) Hellere SNe haben breitere Lichtkurven und klingen langsamer ab. Dies lässt sich zur Definition einer Standardhelligkeit benutzen. c) Eine einheitliche Standardlichtkurve kann durch Streckung der Lichtkurven konstruiert werden.



zeigen bei genauerem Hinsehen aber dennoch eine Bandbreite an Variationen. Einzelne SNe Ia sind im Maximum heller als andere. Die Abweichungen von der mittleren Helligkeit können bis zu 0.8 mag betragen. Ursache dieser individuellen Maximalhelligkeiten sind leicht unterschiedliche Nickel⁵⁶-Massen: Je mehr davon vorhanden ist, desto intensiver und heller ist die Explosion. Zudem sind in den ersten Wochen die Lichtkurven der helleren SNe breiter als diejenigen der schwächeren. Einige Lichtkurven genau beobachteter SNe Ia (sogenannte Templates) sind in Fig. 3a gegeneinander aufgetragen; die beste Anpassung an die Datenpunkte der SN 1996bv ergibt das Template der SN 1991 T. Tatsächlich korrelieren die Lichtkurvenbreite oder, alternativ, die sogenannte Abklingrate Δm_{15} (d.h. die Veränderung der Helligkeit innerhalb der ersten 15 Tage nach dem Maximum) mit der absoluten Helligkeit im Maximum. Die hellsten SNe Ia mit den breiten Kurven erleiden in den ersten beiden Wochen nach dem Maximum einen Helligkeitsrückgang von ungefähr einer Magnitude, während es bei den schwächsten SNe Ia mehr als das Doppelte ist. Dieser empirische Zusammenhang lässt sich zur Definition einer Standardmaximalhelligkeit beziehungsweise einer Standardlichtkurve ausnutzen (Fig. 3b und c). Anstelle der aus der Beobachtung ermittelten Maximalhelligkeit wird dann eine daraus berechnete, effektive Helligkeit adoptiert. Die Bandbreite an Lichtkurven lässt sich demnach sauber auf eine Referenzlichtkurve reduzieren. Es ist dabei allerdings noch ein weiterer Effekt zu berücksichtigen, der die Lichtkurven weit entfernter SNe im Vergleich zu den nahegelegenen systematisch breiter erscheinen lässt und der, wie Ende des vorherigen Abschnitts angedeutet, auch die spektrale Entwicklung verlangsamt: die kosmische Zeitdilatation.

Hubble-Effekt und Zeitdilatation

SNe explodieren in nahen und fernen Galaxien. Mass für die Entfernung einer Galaxie ist deren spektrale Rotverschiebung, d.h. die Verschiebung der aus Labormessungen erwarteten Wellenlängen der Spektrallinien hin zu beobachteten grösseren Wellenlängen z^3 . Für nahe Galaxien und unabhängig von ihrer Position am Himmel gilt, dass – ab-

gesehen von weiter unten noch zu diskutierenden Störfaktoren – ihre Entfernung d proportional zu deren gemessener Rotverschiebung z ist:

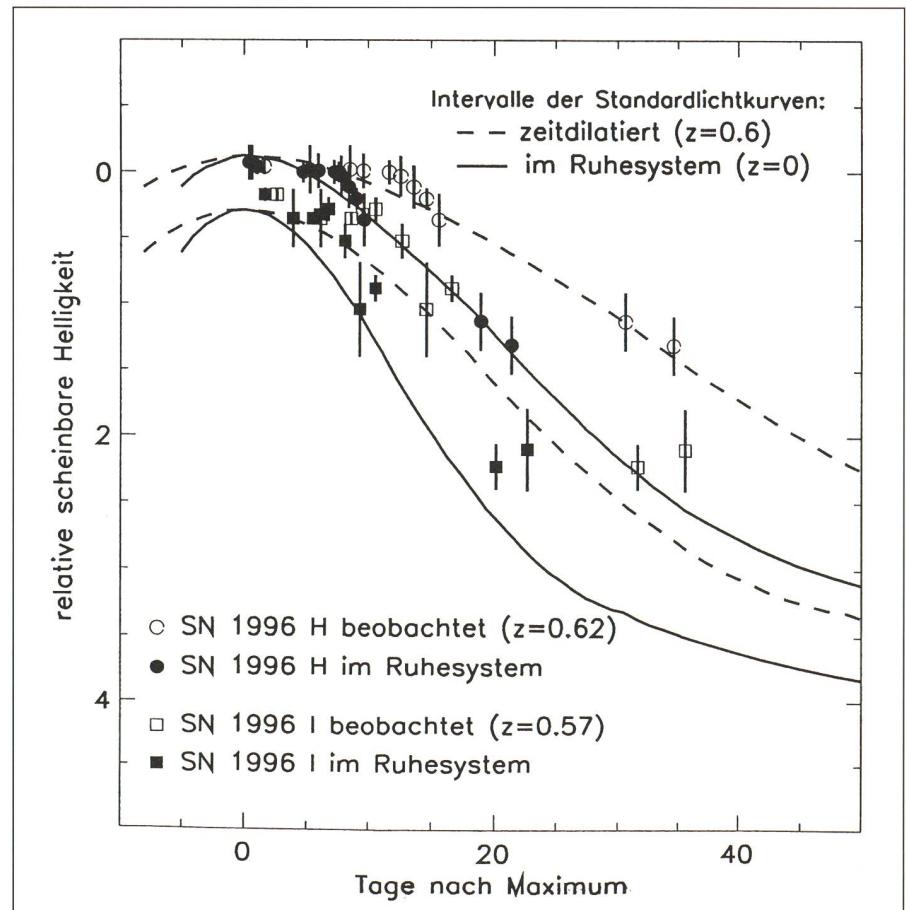
$$z = (H_0/c) \cdot d.$$

Dieses von Edwin Hubble 1929 publizierte und nach ihm benannte Gesetz enthält zwei Konstanten, einerseits die sogenannte Hubble-Konstante H_0 , deren genauer Wert aus den SN Ia Beobachtungsdaten zu bestimmen sein wird, und andererseits die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum. Letztere wurde von Hubble in die reine Rotverschiebungs-Entfernungsbeziehung eingeführt, um formal eine Rotverschiebungs-Geschwindigkeitsbeziehung analog zum bekannten Doppler-Effekt zu erhalten. Den Galaxien wird dadurch eine sogenannte Fluchtgeschwindigkeit $v = c \cdot z$ zugeordnet. Anschaulich gesprochen bedeutet damit das Hubblesche Gesetz, dass sich alle Galaxien von der unserigen entfernen, und zwar umso schneller, je weiter entfernt sie sind. Dabei können formal durchaus «Fluchtgeschwindigkeiten» auftreten, die grösser als c sind. Die relativistische Verallgemeinerung der gewöhnlichen

Dopplerformel, $z = \sqrt{(c+v)/(c-v)} - 1$, greift hier nicht, denn die Spezielle Relativitätstheorie ist nur auf Bewegungen im Raum (und zudem im euklidischen Raum) anwendbar. Hingegen implizieren die obige Interpretation des Hubbleschen Gesetzes sowie das Kosmologische Prinzip (nach dem die Gültigkeit des Hubbleschen Gesetzes in jeder Galaxie, nicht nur in der unserigen, angenommen wird), dass sich der Raum zwischen den Galaxien ausdehnt, die Relativbewegungen der Galaxien demnach mit dem Raum (unter Umständen gekrümmten Raum) erfolgen! Für die mathematische Beschreibung der Expansion des Universums ist die Allgemeine Relativitätstheorie zuständig. Sie beschreibt die Ausdehnung des Raums oder, anders gesagt, die Streckung des Koordinatennetzes mittels eines zeitabhängigen Skalenfaktors $S(t)$, einer Art Massstabsfunktion: War der Skalenfaktor zum Zeitpunkt t der Lichtemission $S(t)$, so ist er zum heutigen Zeitpunkt t_0 auf $S(t_0)$ angewachsen. die Theorie liefert für die expansionsbedingte Streckung der Photonenwellenlängen einen Faktor

$$1 + z = S(t_0) / S(t).$$

Fig. 4: Die expansionsbedingte Zeitdilatation sorgt dafür, dass die beobachteten Lichtkurven rotverschobener SNe Ia um einen Faktor $(1+z)$ gegenüber den Lichtkurven naher SNe Ia gestreckt sind.



³ Die Rotverschiebung z ist definiert als die Differenz von beobachteter Wellenlänge λ_0 einer Spektrallinie und ihrer im Labor emittierten Wellenlänge λ , dividiert durch diese Laborwellenlänge: $z = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda$ oder $1 + z = \lambda_0 / \lambda$.

Die kosmische Rotverschiebung ist demnach ein Mass für die Zunahme des Skalenfaktors des Universums seit der Lichemission bei der Quelle. In Abgrenzung zum Doppler-Effekt lässt sich diese Gesetzmässigkeit als Hubble-Effekt bezeichnen [1]. Ein Objekt mit $z=2$ hat also sein Licht ausgesandt, als alle Entfernung im Universum 3 mal kleiner waren als heute. Für genügend kleine Zeitintervalle (t_0-t), während denen sich der Skalenfaktor nur wenig ändert, geht die obige Formel in

$$z = [S'(t_0)/S(t_0)] \cdot (t_0-t) = H_0 \cdot d/c$$
 über⁴, wobei die Hubble-Konstante $H_0 = S'(t_0)/S(t_0)$ als die momentane zeitliche Änderung des Skalenfaktors, normiert mit dessen Wert, identifiziert wird. Dies ist genau das Hubblesche Gesetz. Für grössere Zeitintervalle lässt sich z nur im unphysikalischen Spezialfall eines materielosen Universums in die relativistische Doppler-Formel entwickeln, ansonsten ist diese nicht sinnvollerweise zur Beschreibung der «Fluchtgeschwindigkeiten» verwendbar. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Hubblesche Gesetz linearer Expansion nur in der lokalen Näherung gültig ist, d.h. für nahe Galaxien mit Rotverschiebungen kleiner als $z \approx 0.1$, und dass die Hubble-Konstante die aktuelle Expansionsrate des Universums beschreibt.

Die radikale Interpretation der Rotverschiebung als Folge kosmischer Expansion hat mehrere Tests erfolgreich überstanden, darunter

- den Energieunabhängigkeits-Test: Die gemessene Rotverschiebung ist über das ganze Spektrum eines Objekts ermittelt immer dieselbe, d.h. sie ist unabhängig von der Photonenergie und nicht das Resultat offensichtlicher Absorptionseffekte.
- Den Existenznachweis einer kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung: Die uns hier und jetzt aus allen Himmelsrichtungen hochgradig gleichmässig erreichende Reliktstrahlung aus der Frühphase des Universums wurde Ende der 40er Jahre vorausgesagt und Mitte der 60er Jahre tatsächlich detektiert. Dieses Nachglühen des Urknalls zeigt, in Übereinstimmung mit einer

prognostizierten Abkühlung um den Faktor $(1+z) \approx 1000$ seit dem Übergang vom undurchsichtigen Plasmauniversum ins transparente Materieuniversum, das Spektrum einer Schwarzkörperstrahlung der Temperatur 2.7° Kelvin und hat daher ein Intensitätsmaximum bei etwa 1 mm.

- Die Beobachtung kosmischer Zeitdilatation: Im expandierenden Universum werden nicht nur die Lichtwellen um $(1+z)$ gestreckt, sondern ebenso alle Zeitintervalle. Das Ticken einer Uhr bei der Rotverschiebung z wird hier beobachtet, als tickte die Uhr $(1+z)$ -mal langsamer. Man nennt diesen an sich einfachen Effekt die «Zeitdilatation». Als verlässliche kosmische Uhren können die standardisierten Lichtkurven der SNe Ia (oder deren spektrale Entwicklung, vgl. Fig. 2) dienen. Schon 1939 hat O. WILSON darauf hingewiesen, dass sich im expandierenden Raum die Explosionen entfernter SNe zeitlich gestreckt ereignen müssten, die beobachteten Lichtkurven gegenüber denjenigen naher SNe um einen Faktor $(1+z)$ gedehnt sein müssten. Da sowohl die zur Detektion entfernter und daher schwacher SNe notwendige Messgenauigkeit als vor allem auch die Standardlichtkurven der SNe Ia erst seit relativ kurzer Zeit zur Verfügung stehen, konnte dieser Test erst vor wenigen Jahren durchgeführt werden. In Fig. 4 ist sein Ausgang zu Gunsten der Expansionsrotverschiebung illustriert. Offene Symbole repräsentieren die beobachteten Helligkeiten zweier beliebiger, weit entfernter SN Ia als Funktion der Zeit. Den Rotverschiebungen um $z=0.6$ korrespondiert eine Lichtreisezeit von ungefähr 5 Milliarden Jahren. Die durchgezogenen Linien geben die bereits in Fig. 3a besprochene Bandbreite der Lichtkurven naher SNe Ia wieder. Da die gemessenen Datenpunkte ausserhalb des kanonischen Bereichs normaler SNe Ia liegen, scheinen sie im ersten Moment atypische Ereignisse zu sein. Werden jedoch unter der Annahme, dass die expansionsbedingte Zeitdilatation eine Rolle spielt, die Beobachtungszeitpunkte der SNe Ia in deren Ruhesystem transformiert, d.h. um den Faktor $(1+z)$ verkürzt, so liegen die resultierenden geschlossenen Symbole innerhalb der erwarteten Schranken. Bis heute haben sich unter der Annahme zeitdilatierter Beobachtungen ausnahmslos alle entfernten SNe Ia, die immerhin schon bis zu ei-

ner Rotverschiebung von knapp $z=1$ gemessen wurden, bezüglich ihrer Lichtkurven als typische Vertreter ihrer Klasse erwiesen.

SNe Ia als kosmische Standardkerzen

Die Korrektur der Beobachtungszeitpunkte um den Effekt kosmischer Zeitdilatation wird heute routinemässig angebracht. Die Konstruktion einer wie schon in den Figuren 3.b und c gezeigten vereinheitlichten Standardhelligkeit bzw. Standardlichtkurve ist somit entfernungsunabhängig durchführbar. Damit erfüllen SNe Ia die grundsätzliche Bedingung an eine sogenannte Einheits- oder Standardkerze: ihre absoluten Maximalhelligkeiten streuen nur geringfügig um einen Mittelwert. SNe Ia eignen sich somit vorzüglich als Entfernungsindikatoren: Aus der Differenz zwischen beobachteter, scheinbarer Maximalhelligkeit (m) und absoluter Helligkeit (M) im Maximum (das ist definitionsgemäss die scheinbare Helligkeit, die das Objekt aus einer Entfernung von 10 pc betrachtet hätte), kann im Prinzip die Distanz (d) zur SN beziehungsweise ihrer Muttergalaxie errechnet werden: Das sogenannte Entfernungsmodul verknüpft diese Grössen in der einfachen Beziehung

$$(m-A)-M = 5 \cdot \log(d) + 25$$

$$\Leftrightarrow d = 10^{(m-A-M-25)/5},$$

wo A zusätzlich eine eventuelle Absorptionskorrektur repräsentiert und d in Megaparsec (=3.3 Millionen Lichtjahre) angegeben ist. Eine Unsicherheit in der scheinbaren Maximalhelligkeit von blos 0.1 Magnituden wirkt sich bereits als 5%-Unsicherheit in der Distanzbestimmung aus. Je kleiner also die Streuung der gemessenen Helligkeiten ist, desto akurater ist die Entfernungsangabe. Einen in der Regel blos geringen und einigermassen kontrollierbaren Einfluss hat die Lichtabschwächung, welche durch Absorption in der Muttergalaxie und/oder in unserer Galaxis verursacht ist: Erstere lässt sich aus dem Farbindex der SN abschätzen, letzterer kann mittels bestehender Absorptionskarten⁵ korrigiert werden. Neben der Homogenität ihrer Helligkeit warten SN Ia mit einem weiteren Vorteil als Entfernungsindikatoren auf: mit ihrer Absoluthelligkeit. Da diese im Visuellen bei etwa -19.4 Magnituden liegt (standardisiert, wie oben beschrieben), sind SNe Ia über 100 000-mal heller als ihre Hauptkonkurrenten, die hellsten Cepheiden. Somit lassen sie sich bis in gut 300-mal grössere (Leuchtkraft-) Entfernung erkennen. Sind Cepheiden in

⁴ Für mathematisch Interessierte: der Skalenfaktor $S(t)$ wird einfach durch seine Taylorreihenentwicklung erster Ordnung um t_0 ersetzt und z als sehr klein angenommen.

⁵ Abrufbar etwa in der NASA/IPAC Extragalactic Database (NED): <http://www.ipac.caltech.edu>

nerhalb der Lokalen Gruppe und mit dem Hubble Space Telescope (HST) immerhin bis gut zu Distanzen etwa des Virgo-Haufens ($z=0.003$ oder 70 Millionen Lichtjahre) als Einheitskerzen geeignet, so erreichen SNe Ia als Entfernungssindikatoren wahrlich kosmische Raumzeittiefen ($z \approx 1$ oder ca. 7 Milliarden Lichtjahre). Mit dem projektierten Nachfolgeteleskop für das HST, dem Next Generation Space Telescope (NGST), werden schon bald Objekte bis zu Rotverschiebungen von $z \approx 5$, was der Epoche der Galaxienbildung vor etwa 12 Milliarden Jahren entspricht, im Bereich des Beobachtbaren liegen!

Kalibrierung der absoluten SN Ia Helligkeiten

Die Bestimmung der SN Ia Absoluthelligkeit M erfolgte in mehreren Schritten: (i) Aus diversen Methoden der Entfernungsbestimmung wurde eine Distanz von knapp 170 000 Lichtjahren bis zu der irregulären Scheibengalaxie Große Magellansche Wolke (LMC), sichtbar auf der Südhemisphäre, erschlossen. Dabei spielte auch eine rein geometrische und daher verlässliche Ermittlung der Distanz mit Hilfe des Ausbruchs der Typ-II-SN 1987A eine wichtige Rolle. (ii) Neben der Distanz ist auch die Helligkeits-Periodenbeziehung der Cepheiden in der LMC bekannt. Der lineare Zusammenhang zwischen Helligkeit und Periode der Cepheiden wird bis auf kleinere (und vernachlässigbare?) Metallizitätseffekte in allen nahen Spiralgalaxien als derselbe angenommen. (iii) Dank den hochauflösenden Bildqualitäten des HST konnte die Helligkeits-Periodenbeziehung auch in einigen vergleichsweise nahen Galaxien (wie beispielsweise M66), die zudem Hort gut beobachteter SN-Ia-Ausbrüche waren, erstellt werden. (iv) Cepheiden gleicher Periode einerseits in der LMC und andererseits in Muttergalaxien von SNe Ia weisen zwar dieselben Absoluthelligkeiten auf, werden aber auf Grund der unterschiedlichen Distanzen mit einem entsprechenden Unterschied in den scheinbaren Helligkeiten gemessen. Die Differenz zwischen dem Entfernungsmodul der LMC und demjenigen einer SN-Ia-Muttergalaxie lässt sich formal nach der einzigen unbekannten Größe auflösen: der Distanz zur SN-Ia-Muttergalaxie. (v) Ist diese endlich bestimmt, so ist wiederum mit dem Entfernungsmodul der SN-Ia auch ihre absolute Helligkeit schnell berechnet. Aus bislang acht derart mittels Cepheiden kalibrierter (und standardisierter) SN-Ia-Absoluthelligkeiten ergab sich der oben genannte Mittelwert von gut -19.4 Magnituden im Visuellen. Dies entspricht mehr als einer Milliarde Mal der Leuchtkraft der Sonne!

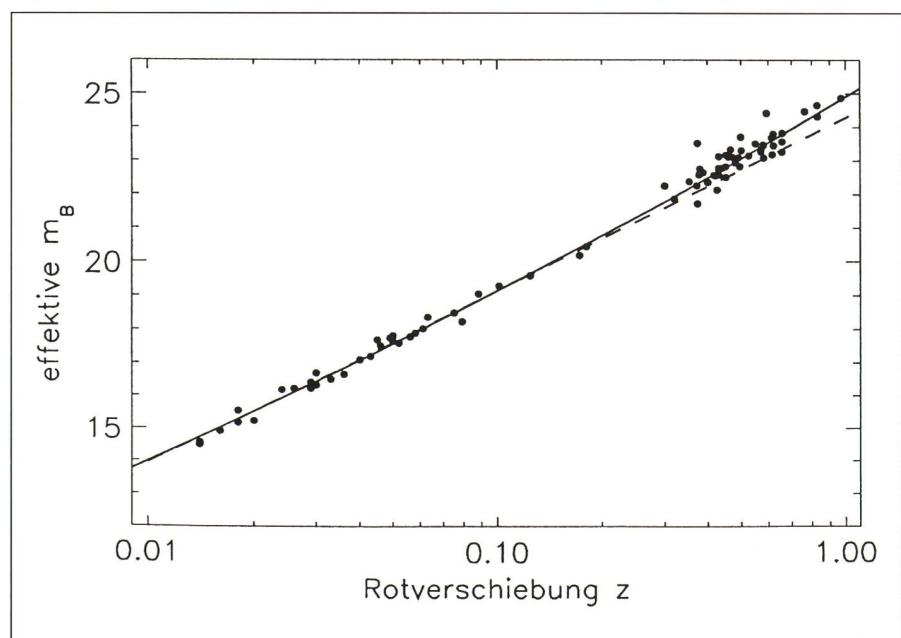
Die aktuelle Expansionsrate des Universums

Eingebettet in ihre Muttergalaxien treiben die SNe mit im Hubble-Fluss auseinanderstrebender Galaxien. Als weit her aus der Vergangenheit scheinende Leuchtfeuer markieren sie frühere kosmodynamische Verhältnisse. Die Zunahme der Ausdehnung des Raums seit der Explosion ist durch die messbare Rotverschiebung der heute bei uns ankommenen Photonen quantifiziert. Aus der ebenfalls messbaren scheinbaren Helligkeit kann auf Grund der bekannten wahren Helligkeit mittels des Entfernungsmoduls ihre Distanz ermittelt werden. Das Hubblesche Gesetz besagt, dass Rotverschiebung und Distanz proportional zueinander sind. SNe Ia erlauben daher, die Proportionalitätskonstante genau zu bestimmen. Ist diese ein für alle Mal festgelegt, so verrät einem die Rotverschiebung irgend eines kosmischen Objekts dessen Distanz! Die Kenntnis exakter Entfernungen und damit der linearen Dimensionen kosmischer Phänomene ist zu deren physikalischen Verständnis fundamental wichtig. Im Prinzip genügte zur Bestimmung der Proportionalitätskonstanten bereits eine präzis vermessene SN Ia. Nun liegen jedoch Galaxien in Gruppen und Haufen und unterliegen dementsprechend gravitativen Kräften: Daher ist die gemessene Rotverschiebung der Galaxien in Tat und Wahrheit eine Überlagerung einerseits des Hubble-Flusses und ande-

rerseits lokal störender, sogenannter Pe- kularbewegungen. Beispielsweise bewegt sich die Lokale Gruppe, deren dominante Mitglieder die Milchstrasse und die Andromeda-Galaxie M31 sind, mit einer Geschwindigkeit von 220 km/s auf das Zentrum des unseren Lokalen Superhaufen dominierenden Virgo-Haufens zu! Um die Hubble-Konstante mittels naher Galaxien genau bestimmen zu können, müssen die gemessenen Rotverschiebungen um den Anteil, der aus den Störbewegungen resultiert, korrigiert werden: Ein delikates Unterfangen. Restunsicherheiten in den Messungen einzelner SN-Rotverschiebungen und SN-Helligkeiten lassen sich im Einzelfall zwar nicht eliminieren, doch sind statistisch robuste Aussagen für eine genügend grosse Anzahl Einzelobjekte möglich. Im Hubble-Diagramm, der graphischen Entsprechung des Hubble-Gesetzes, werden daher Rotverschiebung und Entfernung möglichst vieler SNe Ia gegeneinander aufgetragen (Fig. 5). Üblicherweise wird nicht die berechnete Entfernung, sondern äquivalent dazu die tatsächlich gemessene scheinbare Helligkeit gegen den Logarithmus der linearen Fluchtgeschwindigkeit aufgetragen. Die nahen SNe Ia ($z < 0.1$) nageln dank ihrer kleinen Streuung – welche den Einsatz der SNe Ia als Standardkerzen eindrücklich rechtfertigt – den Wert der Hubble-Konstanten mit bisher unerreichter Genauigkeit fest:

$$H_0 = 60 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$$

Fig. 5: Das Hubble-Diagramm für 87 nahe und entfernte SNe Ia. Mittels den nahen SNe wird die Hubble-Konstante bestimmt, d.h. die aktuelle Expansionsrate des Universums. Die entfernten SNe erscheinen bei einer gegebenen Rotverschiebung gegenüber einer linearen Expansion (gestrichelte Linie) als zu schwach, was als Zeichen einer beschleunigten Expansion angesehen wird. Die durchgezogene Linie ist für ein Universum mit $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$.



Dies bedeutet, dass eine Raumstrecke von einem Mpc (=3.3 Millionen Lichtjahre) jede Sekunde um 60 km wächst (sofern nicht, wie in unserer Umgebung, gravitative Kräfte entgegenwirken). Der Raum zwischen den Galaxienhaufen wird kontinuierlich gestreckt und ebenso die Wellenlängen der darin propagierenden Photonen. Der obige Wert von H_0 zusammen mit den im nächsten Kapitel beschriebenen Ergebnissen ergibt, dass der Urknall vor 15 Milliarden Jahren stattgefunden hat. Dieses Alter stimmt sehr gut mit heutigen Altersbestimmungen von Kugelsternhaufen überein, für die sich 12-13 Milliarden Jahre ergeben.

Eine beschleunigte Expansion?

Um herauszufinden, welches der vielen, mit einem Urknall als Anfangssingularität startenden Weltmodelle der Wirklichkeit am nächsten kommt, muss die Änderung der Expansion bestimmt werden. Aus heutiger Sicht entspricht dies einer messbaren Abweichung vom linearen Hubble-Gesetz bei genügend grossen Rotverschiebungen. Bereits die bisherigen Erkenntnisse zur Verteilung und Menge sowohl der sichtbaren wie auch der etwa zehnmal häufigeren dunklen Materie wiesen auf ein Universum, dessen Materiegehalt zu gering ist, um die Expansion je wieder vollständig abbremsen oder gar in eine Kontraktion umkehren zu können. Doch die Ergebnisse des Supernova Cosmology Projects und des High-z Supernovae Search Teams waren dennoch überraschend bis schockierend. Sie fielen vom Baum der Erkenntnis als Frucht einer cleveren Suchstrategie: Jeweils vor Neumond wurden mittels eines 4m-Teleskops besonders galaxienreiche Himmelsgebiete weitwinklig fotografiert und mit den Aufnahmen der vergangenen Serie verglichen. Derart liessen sich jeden Monat um die 100 000 Galaxien auf Supernovaausbrüche untersuchen. Bei einer angenommenen Ausbruchsfrequenz von 1/5 SNe pro Galaxie und Jahrhundert konnten daher monatlich etwa ein Dutzend SN-Entdeckungen prognostiziert werden. Dadurch war auch die Zeit für die notwendigen Folgebeobachtungen unter anderem mit dem 10m-Keck-Teleskop schon im voraus beantragbar. Da das Aufleuchten einer SN etwa drei Wochen in Anspruch nimmt, wurden viele SNe vor Erreichen ihrer Maximalhelligkeit gefunden, was die Aufnahme einer um das Maximum vollständigen Lichtkurve erlaubte. Die meisten der bis 1999 gefundenen, hochrotverschobenen SNe Ia ($0.3 < z < 1$) sind ebenfalls in Fig. 5 eingetragen. Die erwartete Nichtlinearität

der Expansion ist offensichtlich. Doch die Überraschung war, dass bei gegebener Rotverschiebung die SNe Ia *schwächer* erscheinen, als bei einer gleichmässig linear erfolgten Expansion erwartet würde. Das bedeutet, dass die Distanzen bzw. gemäss Hubbleschem Gesetz die «Fluchtgeschwindigkeiten» überproportional zugenommen haben: Die Expansion des Universums erfolgt beschleunigt!

Grosse Behauptungen verdienen eine besonders kritische Prüfung. Einige der systematischen Unsicherheiten seien hier angeführt:

- **Absorption:** Die galaktische Absorption, die nahe wie ferne SNe betrifft, wurde berücksichtigt, und da etwa 100 verschiedene Himmelsfelder zur Beobachtung herangezogen wurden, würden sich eventuelle Unterschätzungen der Absorption in einzelnen Richtungen nicht als systematischer Trend niederschlagen. Der intergalaktischen Absorption ist durch den im fernen Infrarot (FIR) beobachteten Hintergrund eine Limite bezüglich lichtschluckendem Staub (herkömmlicher Art) gesetzt; diese kann die Lichtschwächung nicht zur Gänze erklären. Die interne Absorption in den Muttergalaxien der SNe Ia ist insofern vernachlässigbar, als kein systematischer Unterschied im Farbexzess der nahen und entfernten SNe Ia beobachtet wird.
- **Homogenisierungskorrektur:** Der Verdacht, dass das Standardisierungsverfahren einen unentdeckten Haken hat, kann dadurch entkräftet werden, dass die kosmologischen Resultate ohne Korrektur dieselben bleiben (wenn auch mit einer geringeren statistischen Gewissheit).
- **Evolution:** Dies ist die grosse Unbekannte. War beispielsweise die chemische Zusammensetzung der Weissen Zwerge im jüngeren Universum

anders, metallärmer, als heute, so verlieren die SN-Explosionen entsprechend schwächer. Allerdings sind sich die beobachteten Lichtkurven und Spektralentwicklungen der SNe Ia bis $z \approx 1$ doch sehr ähnlich, zumindest nach dem Helligkeitsmaximum. Ein möglicher Hinweis auf eine Evolution ist gegeben durch den anscheinend rascheren Anstieg der Lichtkurven hochrotverschobener SNe Ia in den ersten beiden der drei Wochen bis zum Maximum.

Ein fast schon berauschend guter Grund, die deduzierten Resultate als tatsächlich zu akzeptieren, kommt von Seiten der instrumentellen Präzisionskosmologie: jüngste Messungen der Anisotropie in der Kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung (MWH) bestätigen die Voraussagen derjenigen theoretischen Kosmologen, die im frühesten Universum eine Phase sogenannt inflationären Wachstums (d.h. extrem Anwachsen der Grösse des Universums innert kürzester Zeit) annehmen (Fig. 6, nach [2]). Die Theorie kosmischer Inflation verlangt, dass das Universum heute praktisch flach, d.h. quasi euklidisch ist. Sie postuliert zudem die Existenz einer den Raum überall durchsetzenden Energie, der sogenannten Vakuumsenergie (oder allgemeiner einer sogenannten «Quintessenz»). Die Vakuumsenergie ist, wie die Teilchenphysiker längst nachgewiesen haben, eine mikrokosmische Realität. Ein flaches Universum impliziert, dass die Summe der Dichte dieser Vakuumsenergie (formal, und in eine dimensionslose Grösse gebracht, mit Ω_Λ abgekürzt) und der Dichte des Energieäquivalents aller Materie im Universum (kurz und einheitenlos Ω_M) eins betragen muss: $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$. In Fig. 6 ist diese nun auch empirisch als ziemlich wahrscheinlich erkannte Relation als die mit «flach» bezeichnete Linie eingezeichnet. Diese Vakuumsenergie, im astronomischen Zusammenhang auch als Kosmologische Konstante bekannt, wird verantwortlich gemacht für eine allfällige *Beschleunigung* der kosmischen Expansion. Genau dies legen die hochrotverschobenen SNe Ia tatsäch-

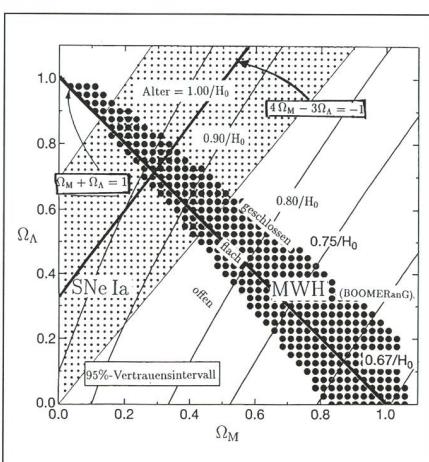


Fig. 6: Kosmische Komplementarität: Messungen der Anisotropie in der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung deuten auf ein Universum mit sogenannt flacher Raumzeitstruktur hin. Dieser empirische Befund unterstützt das durch die SNe Ia gefundene Resultat einer beschleunigten Expansion. Erklärung der Achsen im Text.

lich nahe. Die SNe Ia liefern als wahrscheinlichsten Zusammenhang zwischen Ω_M und Ω_Λ ihrerseits die Bedingung $4\Omega_M - 3\Omega_\Lambda = -1$ (Fig. 6). Der Umstand, dass sich die beiden genannten formalen Bedingungen, die Phänomene des Makro- wie des Mikrokosmos repräsentieren, im Ω_M - Ω_Λ -Diagramm ziemlich genau rechtwinklig schneiden und dadurch ein Schnittgebiet als hochwahrscheinlich auszeichnen, wird manchmal als Kosmische Komplementarität bezeichnet. Die wahrscheinlichste Lösung liegt bei $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) \approx (0.3, 0.7)$. Die Übereinstimmung des derart bestimmten Werts von Ω_M mit dem unabhängig beobachte-

ten Wert von $\Omega_M \approx 0.2-0.3$ liefert noch das Tüpfelchen auf dem i. Wir scheinen also in einem sich beschleunigt expandierenden Universum zu leben, dessen Energiegehalt zu etwa 70% bestimmt ist durch Quantenvakuumsenergie und/oder Quintessenz und zu etwa 30% durch vor allem Dunkle Materie.

Dies alles ist etwas mysteriös. Deshalb der langen Rede kurzer Sinn: Wie letztlich nicht nur die Arbeit mit den SNe Ia zeigt, ist die heutige Kosmologie eine empirische Wissenschaft. Ontologisch betrachtet, leben wir in einer wundervollen Zeit; wir dürfen auf weitere

Revolutionen in der Evolution kosmischer Weltwahrnehmung gespannt sein.

BERNHARD PARODI
Astron. Institut der Univ. Basel
Venusstr. 7, CH-4102 Binningen
E-mail: parodi@astro.unibas.ch

Bibliographie

- [1] K.-H. LOTZE, *Hubble-Effekt versus Doppler Effekt*, Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Köln 1999; J.A. PEACOCK, *Cosmological Physics*, Cambridge 1999
- [2] P. DE BERNARDIS ET AL., *Nature* 404, 955 (2000)

L'Univers, dis-moi ce que c'est?

Episode 20: Les galaxies, cinquième partie

FABIO BARBLAN

8.2 Les galaxies barrées

Préambule: Un rapide coup d'œil à la bibliographie montre que nous sommes, avec le sujet de cet épisode, au cœur de la recherche actuelle. Il est difficile, lorsque le recul manque, d'exprimer clairement et de façon simple, des concepts complexes qui sont en voie de clarification au niveau de la recherche. L'auteur sollicite l'indulgence du lecteur pour les passages qui seraient particulièrement «obscurs».

Un bon tiers des galaxies à disque possède une barre, c'est-à-dire une structure centrale allongée, souvent triaxiale et pratiquement en rotation solide (figures 1 et 2 a-f). Cela signifie que l'ensemble de la matière constituant la barre se comporte, du point de vue de la rotation, comme un corps rigide. La structure triaxiale est fortement accentuée dans le plan de la galaxie, le rapport

des axes est en moyenne de 2.5 à 5. Par contre, dans la direction perpendiculaire au plan, le système reste très aplati, les deux petits axes ayant approximativement les mêmes dimensions. Dans un autre tiers de galaxies à disque, il existe une barre d'extension plus réduite. Mais la mise en évidence dans l'infrarouge de barres dans des galaxies ne montrant, dans le visible, aucune trace d'une telle structure, fait surgir la question: existe-t-il vraiment des galaxies à disque n'ayant pas de barre? La pertinence de cette interrogation est confirmée par la découverte de galaxies à disque dont le bulbe est triaxial.

La compréhension des galaxies barrées n'est pas simple. Il s'agit de systèmes complexes dont tous les mystères ne sont pas encore élucidés. La dynamique stellaire y joue un grand rôle et les simulations numériques sont un outil indispensable à une plus large maîtrise du phénomène¹.

Il est pratiquement certain, maintenant, que la grande majorité des galaxies barrées est le siège d'ondes de

densité. Comme expliqué dans l'épisode précédent, l'onde de densité possède une vitesse angulaire constante de l'ordre de trente kilomètres par seconde en moyenne. La vitesse angulaire des étoiles est variable; elle croît, linéairement, du centre vers l'extérieur jusqu'à une valeur maximale et reste ensuite pratiquement constante sur de grandes distances (voir épisode N° 18, ORION 292, «La courbe de rotation d'une galaxie»). On peut donc facilement imaginer qu'à une certaine distance R_c du centre de la galaxie, la vitesse angulaire de la perturbation et celle des étoiles de cette région soient identiques. Ces étoiles ont donc la particularité d'accompagner l'onde de densité dans son mouvement de rotation. Le rayon R_c est dit rayon de corotation. Concernant le mouvement des étoiles, il existe d'autres zones particulières dans la galaxie. Nous avons vu, dans l'épisode 19, que le mouvement réel des étoiles est un mouvement épicyclique. Les zones où les trajectoires épicycliques se referment sur elles-mêmes, c'est-à-dire celles qui contiennent un nombre entier d'épicycles, sont dites «zones de résonance de Lindblad». Il en existe une, voire deux, à l'intérieur du rayon de corotation et une à l'extérieur de ce rayon. La zone de corotation et les zones de résonance de Lindblad, si elles existent, jouent un rôle important dans la dynamique du système.

Le calcul des orbites stellaires dans le cadre d'un potentiel bisymétrique, effectué pour la première fois par Contopoulos et Papayannopoulos en 1980, met en évidence l'existence de classes de trajectoire:

¹ A l'Observatoire de Genève a été réalisé, pour les besoins des simulations numériques, le quatrième plus puissant ordinateur au monde, GRAVITOR, constitué d'un couplage de 64 micro-ordinateurs qui exécutent simultanément en parallèle des calculs de dynamique galactique au rythme de 80 milliard d'opérations à la seconde.

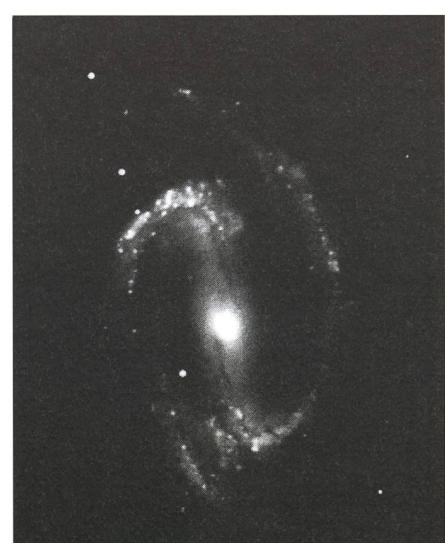


Figure 1: La galaxie barrée NGC 1300 de type SBb(s) (source [4])