

Astrophysik aktuell

Helmut Hetznecker

Expansions- geschichte des Universums

A Cosmic Microwave Background (CMB) radiation map is shown, split into two halves. The left half is a dark, noisy field of colors (blue, green, yellow, red) representing temperature fluctuations. The right half is a similar map but with a grid overlay, suggesting a coordinate system or a different representation of the same data. The background is dark with faint grid lines.

Vom heißen Urknall
zum kalten Kosmos

SACHBUCH

 Springer

Astrophysik aktuell

Reihe herausgegeben von

Andreas Burkert
Astronomisches Institut
Universität München
München, Deutschland

Helmut Hetznecker
Übersee, Deutschland

Andreas Müller
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesells
Heidelberg, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe: <https://link.springer.com/bookseries/8367>

Helmut Hetznecker

Expansions- geschichte des Universums

Vom heißen Urknall
zum kalten Kosmos

2. Auflage 2022

 Springer

Helmut Hetznecker
Übersee, Deutschland

ISSN 2731-3514

ISSN 2731-3522 (electronic)

Astrophysik aktuell

ISBN 978-3-662-63553-7

ISBN 978-3-662-63554-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63554-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2007, 2022
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Cover-Abbildung: Das „2dF Galaxy Redshift Survey“ des Australian Astronomical Observatory zeigt die räumliche Verteilung von 230.000 Galaxien in einem Ausschnitt unserer kosmischen Umgebung innerhalb von 4 Milliarden Lichtjahren. Quelle: The 2dF Galaxy Redshift Survey team, www.2dfgrs.net

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

In Liebe für Steffi

Sokrates: Man wird zwar die Gestirne, diese Zierden des Himmels, für das Schönste und Regelreichteste halten unter allem Sichtbaren, aber da sie nun mal im Sichtbaren gebildet sind, so wird man zugeben, dass sie weit hinter dem Wahrhaften zurückbleiben [...]. Dies ist denn nur mit dem Verstand zu fassen nicht durch das Gesicht. Oder meinst du etwa?

Glaukon: Nimmermehr.

Platon, Der Staat, VII, 529c–d

Prolog: Was ist die Welt?

Wir leben in einer Welt, die einen Anfang hatte. Vor etwa 14 Milliarden Jahren hat sich das Universum in einem immer noch völlig unverstandenen Akt in seine Existenz geworfen. Seit seinem Beginn dehnt es sich aus, es expandiert, oder um präzise zu sein: Der Raum breitet sich aus. Einhergehend mit der immer noch andauernden Expansion kühlt sich das Universum fortwährend ab. Die Theorie des Urknalls als modernes kosmologisches Standardmodell kann die Expansion des Universums, die Entstehung der leichten Elemente und die heute beobachtete Temperatur erklären. Was dieses Modell nicht erklärt, ist der Grund für den Beginn der kosmischen Entwicklung. Die Kosmologie beschreibt nur die Innenarchitektur des Weltalls, nicht das Davor und nicht das, was außerhalb des Universums sein könnte. Sie schweigt über die Ursache der Expansion des Raumes, aber beschreibt, wie das einmal in Bewegung geratene Universum immer weiter expandiert, oder – je nach Gesamtmasse – wieder in sich zusammenfällt. Die Kosmologie stellt sich einem alten philosophischen Problem: Woraus besteht die Welt und welche Kräfte sind darin am Werk? Von diesen Fragen handelt dieses Buch, es erzählt vom Entstehen und Werden des ganzen Universums.

Woher nehmen Physiker eigentlich den Mut solche Fragen zu stellen? Wieso soll das Universum als Ganzes überhaupt in irgendeiner Weise verständlich sein? Schließlich ist der Weltraum *alles*, nicht irgendwas. „Da draußen“ ist es ja offenbar ganz anders als bei uns auf der Erde und trotzdem versuchen Menschen die Entwicklung und sogar die Entstehung des Universums zu

verstehen. Auf den ersten Blick scheint ein solches Unterfangen völlig aussichtslos, denn unser Erkenntnisapparat ist geschult an der unmittelbaren Anschauung. Anders gesagt: Die mit bloßen Augen und Ohren uns direkt zugänglichen Naturphänomene haben die Fähigkeiten unseres Gehirns hervorgebracht. Hätte das menschliche Gehirn keinen erheblichen Vorteil für das Überleben der Gattung Mensch gebracht, so hätte es sich nicht weiter entwickelt. Nur wenn eine Funktion in irgendeiner Weise von Nutzen für den Erhalt einer Spezies ist, wird sie von der Natur vorangebracht. Organe, die nicht nützlich sind in diesem Sinne, sterben ab. Unser Gehirn gehört also ganz offenbar zur erfolgreichen Ausstattung des Menschen, weil es Erfahrungen aus der direkten Umwelt zum Vorteil des Einzelnen verarbeitet.

Der Weltraum ist von einer nachgerade bestürzenden Leere. Das Licht sehr weit entfernter Sterne kann uns ja überhaupt nur deshalb erreichen, weil das Universum fast ganz leer ist. Unsere Umgebung, zum Beispiel die Luft in der Atmosphäre, ist von einer hohen Dichte geprägt. In einem Kubikzentimeter Luft schwirren 10^{20} Teilchen herum, die mittlere Dichte im Universum hingegen ist 26 Größenordnungen kleiner. Da draußen ist in der Tat fast nichts. Also noch mal, woher kommt der Mut der Physiker sich mit dem Universum als Untersuchungsgegenstand wissenschaftlich auseinanderzusetzen?

Er hängt mit einer ziemlich unglaublichen Hypothese zusammen. Die Kosmologen gehen davon aus, dass die auf der Erde gültigen Naturgesetze *überall* im Universum Bestand haben. Das mag auf den ersten Blick sehr anmaßend erscheinen, doch es hat seine Berechtigung. Denn die direkte Anschauung, die Sinneserfahrung, ist längst nicht mehr die Grundlage der modernen Physik, die sich vielmehr auf mathematische Abstraktion gründet. Die Kosmologie entspringt der Hypothese, dass wir die Natur als Ganzes durch ein Netz mathematisch formulierter Gesetze beschreiben können. Durch die Kombination von indirekten Hinweisen und mathematisch formulierten Theorien ist die Physik längst zu einer der intensivsten und weitest entwickelten intellektuellen Projekte der Menschheit geworden. Auf dem gesamten Globus forschen Menschen an den physikalischen Eigenschaften der Materie, des Lichts, des Raums und der Zeit. Durch die strikte

Durchführung ausgeklügelter Forschungsvorhaben ist es gelungen herauszufinden, woraus Materie besteht oder wie Licht und Materie interagieren. Und wir verstehen heute, wie grundlegende Voraussetzungen unseres Erkenntnisvermögens – Raum und Zeit! – sich verändern, wenn man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Alle diese Triumphe der modernen Physik basieren auf dem strengen Verfahren der Falsifikation. Falsifizieren – das bedeutet, eine falsche Aussage der Unwahrheit zu überführen. Zwar *suchen* die Physiker nach Wahrheit, doch sie können sich ihrer nie sicher sein. Deshalb haben sie sich auf den umgekehrten Weg gemacht. Theorien müssen falsifizierbar sein, sie müssen Vorhersagen machen, die im Experiment *überprüfbar* sind. Wenn das Experiment der Vorhersage entspricht, dann ist *vorläufig* auch die Theorie bestätigt. Die Geschichte der Physik zeigt jedoch, dass kaum eine Theorie ewig „lebt“. Früher oder später treten experimentelle Resultate auf, die die Grenzen der alten Lehre sichtbar und eine neue, umfassendere Theorie notwendig machen. Diese schafft neue Vorhersagen, die dann ihrerseits dem Experiment ausgesetzt werden.

Die Geschichte der Relativitätstheorie von Albert Einstein liefert ein wunderbares Beispiel für einen solchen Umfangsvorgang: Sie beschreibt die Physik schnell bewegter Systeme, sogar bis zur Lichtgeschwindigkeit. Sie umfasst die Mechanik Isaak Newtons, dessen Gleichungen nur für Geschwindigkeiten gültig sind, die viel kleiner sind als die des Lichts. Beide Theorien sind weithin anerkannt. Aber die eine, die Newtonsche Physik, ist eingebettet in Einsteins Theorie – die nichts mehr mit unserer durch den Alltag geschulten Anschauung zu tun hat. Im Gegenteil: Die Relativitätstheorie ist geradezu das Paradebeispiel für die Abstraktionsfähigkeit des menschlichen Gehirns. Einstein hat weit über die Welt der normalen Sinneserfahrungen hinausgedacht. Er ging davon aus, dass die mathematisch formulierten Naturgesetze in allen Bezugssystemen stets die gleiche Form haben sollten: Er verlangte deren *Invarianz*. Für Bezugssysteme, die sich mit sehr hohen Geschwindigkeiten bewegen, war diese Invarianz aus den Newtonschen Gesetzen heraus aber nicht zu erreichen. Außerdem gab es eine ganze Reihe von Experimenten mit Lichtstrahlen, die

sich mit Newtons Physik einfach nicht erklären ließen. Einstein erhob ein abstraktes Prinzip, die Invarianz der Naturgesetze, zur Grundlage der neuen Theorie. Und er hatte ganz offenbar recht, denn alle Vorhersagen der Relativitätstheorie haben sich glänzend im Experiment bestätigt. Es ist bemerkenswert, dass viele Experimente der Relativitätstheorie gar keine Laborversuche sind, sondern auf astronomischen Beobachtungen fußen. Die Physik des 20. Jahrhunderts fand eine ihrer wichtigsten Theorien am Himmel bestätigt. Dies war ein großer Schritt für die Anwendung irdischer Physik auf das ganze Universum.

Die Relativitätstheorie beschreibt die Bewegung von Teilchen in Raum und Zeit in Abhängigkeit von deren Bewegungszustand. Dazu gehört auch die Schwerkraft, die sich schlicht als eine *Beschleunigung* erweist. Den Aufbau der Materie sowie deren Wechselwirkung mit Licht beschreibt die *Quantenmechanik*. Auch sie hat sich glänzend bestätigt – sowohl im Labor als auch bei der Analyse des Lichts der Sterne und Galaxien.

Die Entdeckung von Molekülen im Gas zwischen den Sternen zeigt, wie eng Labor- und Astrophysik verzahnt sind: Man weiß aus der Untersuchung des Wasserstoffs und anderer Elemente im Labor, dass Atome ihre Strahlung niemals kontinuierlich abgeben, sondern nur in gewissen Energiepaketen. Das Strahlungsspektrum des Wasserstoffs, bestehend aus Energiepaketen, wird im Labor in Form von Linien bei bestimmten Frequenzen sichtbar. Mit ihnen stellen Astronomen die Spektrometer ein, die sie an ihre Teleskope anschließen. So finden sie die Wasserstoffatome in den Gaswolken unserer Milchstraße und anderer Galaxien.

Mit Hilfe solcher Messungen hat man auch entdeckt, dass das Universum expandiert: Man beobachtete eine Verschiebung der Spektrallinien von Wasserstoff hin zu größeren Wellenlängen (die so genannte Rotverschiebung), die sich in ganz einfacher Weise erklärt, wenn man annimmt, dass die Galaxien sich von unserer Milchstraße entfernen. Zusammen mit zahlreichen Beobachtungen immer weiter entfernter Galaxien liefert dieses Modell das grundsätzliche Ergebnis, dass sich das gesamte Universum ausdehnt. Die *Expansion des Universums* bildet den Grundstein der modernen Kosmologie. Sie wurde entdeckt, weil wir voraussetzen, dass die auf der Erde entdeckten Strahlungsgesetze der

Atomphysik überall im Universum gültig sind. Mit der Expansion des Universums hat sich aber auch die direkte Anwendung der Relativitätstheorie auf die Kosmologie ergeben. Denn die Gleichungen der Relativitätstheorie beschreiben die Expansion des Universums als einen Überschuss an Bewegungsenergie gegenüber der Schwerkraft der im Universum verteilten Materie. Wiederum konnte eine auf der Erde entwickelte physikalische Theorie die Vorgänge am Himmel erfolgreich erklären.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts schafften Max Planck und Albert Einstein die Grundlagen der modernen Physik, einer Physik, die die Geschichte des Universums als Ganzes erzählt. Quantenmechanik und Relativitätstheorie sind die fundamentalen Bausteine der modernen Kosmologie. Die Kombination dieser beiden durch zahllose Experimente bestätigten Theorien macht es möglich, das große Bild von der Entwicklung des Universums zu beschreiben. Das vorliegende Buch handelt davon. Es dokumentiert die beeindruckenden Ergebnisse der Forscherarbeit eines ganzen Jahrhunderts.

Harald Lesch

Inhaltsverzeichnis

1 Die Hierarchie der kosmischen Strukturen	1
1.1 Galaxien und Galaxienhaufen	5
1.2 Superhaufen und Filamente	11
1.3 Dichtekontrast und Homogenität	14
1.4 Zusammenfassung	16
2 Das Universum expandiert	19
2.1 Strichcodes im Licht der Nebel	19
2.2 Edwin Hubble und die Cepheiden im Andromedanebel	22
2.3 Das Ende der geozentrischen Ära	23
2.4 Je weiter, desto schneller	25
2.5 Das Universum expandiert	26
2.6 Das Hubble-Lemaître-Gesetz	28
2.7 Ein beliebtes Missverständnis	30
2.8 Rückfall in die geozentrische Welt?	30
2.9 Zusammenfassung	34
3 Geburt und Kindheit des Universums	35
3.1 Ein epochaler Zufallsfund	35
3.2 Die Geburt von Raum und Zeit	38
3.3 Planck und die Grenze der Erkenntnis	42
3.4 Die fundamentalen Kräfte	47
3.5 Die Entwicklung des frühen Universums	50
3.6 Die Entstehung der leichten Elemente	62
3.7 Zusammenfassung	65

4	Das Friedmann-Lemaître-Universum	69
4.1	Ein Standard für den Kosmos	70
4.2	Ω und H_0	74
4.3	Die Geometrie des Kosmos	78
4.4	Einsteins größte Eselei reloaded	81
4.5	Die Welt, in der wir leben	86
4.6	Gravitationslinsen und H_0	92
4.7	Inflation im jungen Kosmos	96
4.8	Zusammenfassung	106
5	Das Echo des Urknalls	109
5.1	Ein Steckbrief der Hintergrundstrahlung	110
5.2	Entkopplung und die kosmische Hintergrundstrahlung	114
5.3	Die Bedeutung der Hintergrundstrahlung für die Kosmologie	122
5.4	Kontroverse um den Hubble-Parameter	126
5.5	Zusammenfassung	128
6	Das Dunkle Universum	131
6.1	Dunkle Materie	133
6.2	Dunkle Energie	141
6.3	Zusammenfassung	147
	Glossar	151
	Stichwortverzeichnis	161



Die Hierarchie der kosmischen Strukturen

1

Wir starten mit einer Reise von der Erde durch die Galaxie zu Galaxienhaufen, Superhaufen und Filamenten.

Ich erinnere mich noch sehr gut an eine Konferenz zum Thema „Frühe Strukturen im Universum“, an der ich vor vielen Jahren auf der Insel Elba teilgenommen habe. Ganz besonders erinnere ich mich an eine Bemerkung, die einer der Referenten damals recht beiläufig während seines Vortrages anbrachte: „Das Einzige“, so sagte er, „was wir sicher über das Universum wissen, ist, dass es wirklich sehr groß ist.“

Und daran gibt es in der Tat keinen Zweifel. Wenn heute vom „Weltall“ oder dem „Universum“ die Rede ist, denken die meisten Menschen zuallererst an die ungeheuren Dimensionen, die sich jeder menschlichen Anschauung entziehen. Die Astronomen helfen unserer begrenzten Vorstellungskraft gerne mit Vergleichen etwa der folgenden Art: Stellen Sie sich die Sonne vor, auf die Größe Ihres Daumennagels geschrumpft (ihr tatsächlicher Durchmesser beträgt circa 1,4 Millionen Kilometer). Die Erde, nur noch einen zehntel Millimeter klein, umrundet die Sonne dann in einer Distanz von etwa einem Meter, und die Umlaufbahn des Zwergplaneten Pluto, des äußersten populären Objekts unseres Sonnensystems, hat einen Radius von 50 Metern. Wollten wir in einem derart verkleinerten Kosmos mit dem Auto zum von uns aus gesehen nächsten Stern gelangen, dem allernächsten von 100 Milliarden in unserer Milchstraße, sollten wir vor der Abfahrt vorsichts-

halber noch tanken. Denn bis zu unserem nächsten Nachbarn am Sternenhimmel, *Proxima Centauri*, sind es bereits 300 km. Natürlich haben wir uns, gemessen an den gewaltigen Dimensionen des uns bekannten Universums, nach dieser Reise zum nächsten Stern noch keine Haaresbreite von der Stelle bewegt. Wie brachte es der britische Kultautor Douglas Adams auf den Punkt? – *Das Universum ist groß, verdammt groß!*

Wenn wir nach den Entfernungen der Objekte im Universum fragen, tun wir uns im Prinzip recht leicht, wenn es um unsere Nachbarsterne wie *Proxima Centauri*, *Wega* oder *Sirius* geht. Denn diese Sterne sind nah genug, um im Laufe eines Jahres eine winzige, aber gut messbare Ellipsenbahn in den Himmelhintergrund zu zeichnen, während wir mit der Erde um die Sonne laufen. Diesen *Parallaxeneffekt* können Sie ganz leicht selber beobachten, indem Sie mit ausgestrecktem Arm Ihren Daumen abwechselnd mit dem linken und dem rechten Auge vor dem Hintergrund einer Landschaft anpeilen. Mit etwas angewandter Geometrie erhält man damit für *Proxima Centauri*, unseren Nachbarstern, eine Entfernung vom etwa 270.000-Fachen unseres Abstandes von der Sonne. Da die Astronomen wie alle anderen Wissenschaftler lieber mit greifbareren Zahlen arbeiten, hat man eine recht bequeme und anschauliche Längeneinheit eingeführt, nämlich die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt (Tab. 1.1). Bei einer konstanten Lichtgeschwindigkeit von ziemlich genau 300.000 Kilometer pro Sekunde sind das etwa 9,45 Billionen Kilometer. Diese Distanz bezeichnen wir als ein *Lichtjahr* (1 Lj). Wir können leicht ausrechnen, dass *Proxima Centauri* etwa 4,3 Lichtjahre von uns entfernt ist. Die meistgebrauchte Längeneinheit in der professionellen Astronomie ist allerdings nicht das Lichtjahr, sondern die sogenannte Parallaxensekunde,

Tab. 1.1 „Praktische“ Längeneinheiten für Astronomen und Kosmologen

1 Lichtjahr	1 Lj	-	-	$9,45 \cdot 10^{12}$ km
1 Parsec	1 pc	-	3,26 Lj	$30,8 \cdot 10^{12}$ km
1 Kiloparsec	1 kpc	1000 pc	3262 Lj	$30,8 \cdot 10^{15}$ km
1 Megaparsec	1 Mpc	1 Million pc	$3,26 \times 10^6$ Lj	$30,8 \cdot 10^{18}$ km
1 Gigaparsec	1 Gpc	1 Milliarde pc	$3,26 \times 10^9$ Lj	$30,8 \cdot 10^{21}$ km

oder kurz *ein Parsec* (1 pc). Das ist die Entfernung, von der aus betrachtet der Radius der Erdumlaufbahn unter einem Winkel von einer Bogensekunde erscheint, also dem 3600stel Teil eines Grads. Wie man leicht nachrechnen kann, sind das etwa 30,8 Billionen Kilometer oder 3,26 Lichtjahre.

Die Bestimmung von Entfernungen im Universum

Das Jahr 1838 markiert einen Meilenstein in der wissenschaftlichen Erforschung des Universums. Denn in jenem Jahr maß der deutsche Astronom Wilhelm Friedrich Bessel (1784–1846) zum ersten Mal die Entfernung eines Sterns mittels einer *Parallaxe*.

Dazu bestimmte er die Position des Sterns 61 Cygni im Sternbild Schwan zweimal im Abstand von sechs Monaten. Weil die Erde nach jeweils sechs Monaten unterschiedliche Positionen auf ihrer Umlaufbahn einnimmt, erscheint uns auch der Fixstern zu den Zeitpunkten der beiden Messungen um einen kleinen Winkel versetzt. Dieser Winkel ist umso kleiner, je weiter der Stern von uns entfernt ist (Abb. 1.1). Anwenden lässt sich diese geometrische Methode nur für Sterne bis zu einer Distanz von einigen hundert Lichtjahren. Der europäische Satellit *Hipparcos* vermaß auf diese Weise in den frühen 90er-Jahren die Positionen und Entfernungen von mehr als einer Million Sternen in der Umgebung der Sonne. Seit dem Jahr 2013 verfährt die ESA-Raumsonde *Gaia* nach der Parallaxenmethode und wird bis Mitte der 2020er-Jahre weit mehr als eine Milliarde Sterne unserer Milchstraße vermessen haben – dazu die Bewegungen, Helligkeiten, Farben und Spektren zahlreicher Objekte. Ein astrometrisches Projekt von bisher unerreichter Dimension!

Weiter entfernte Himmelskörper und Objekte außerhalb unserer Milchstraße verlangen nach anderen Methoden, zum Beispiel die Methode der *Standardkerzen*. So bezeichnen die Astronomen Objekte, deren tatsächliche Leuchtkraft (die *absolute Helligkeit*) bekannt ist. Aus der Strahlung, die

wir hier auf der Erde messen (der *scheinbaren Helligkeit*), können wir dann geradewegs auf die Entfernung des Objekts schließen, wenn wir das Verhältnis von scheinbarer und absoluter Leuchtkraft auswerten.

Zu den Standardkerzen gehören zum Beispiel die sogenannten *Cepheiden*. Das sind Sterne, die ihre Helligkeit mit strenger Regelmäßigkeit im Laufe einiger Tage oder Wochen verändern. Die maximale *absolute* Helligkeit eines Cepheiden-Sterns hängt eng mit der Periodendauer seiner Helligkeitsschwankung zusammen, die wir leicht beobachten können – genau wie die maximale *scheinbare* Helligkeit. Da Cepheiden sehr leuchtkräftig sind, können wir sie noch in Distanzen von immerhin 20 Mpc sehen. So können wir die Entfernungen einiger naher Galaxien bestimmen, indem wir die Cepheiden darin beobachten. (Und ja, 20 Mpc oder 60 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxien sind „nah“.)

1977 entdeckten die beiden Astronomen Brent Tully und Richard Fisher, dass die absolute Helligkeit einer Spiralgalaxie mit ihrer Rotationsgeschwindigkeit zusammenhängt. Diese sogenannte *Tully-Fisher-Relation* macht jede große Spiralgalaxie bis zu einer Entfernung von 200 Mpc zu einer Standardkerze. Analog dazu gibt es für Elliptische Galaxien die sogenannte *Faber-Jackson-Relation*. Sie beschreibt eine Beziehung zwischen der Leuchtkraft und dem Maß der (ungeordneten) Bewegung der Sterne in der Galaxie. Die Dynamik von Galaxien kann aus dem Spektrum des Lichtes bestimmt werden, das wir von ihnen empfangen.

Supernovae vom Typ Ia sind Standardkerzen von größter Bedeutung. In Doppelstern-Systemen kann es unter bestimmten Voraussetzungen passieren, dass ein Stern fortwährend Materie von seinem Partner absaugt. Sobald der „kleine Dieb“ eine bestimmte Grenzmasse erreicht, kollabiert er schlagartig und explodiert sogleich durch die reflektierte Schockwelle – ein Prozess, der die enorme Energie von Milliarden Sonnen ausstrahlt! Da dieses Ereignis im-