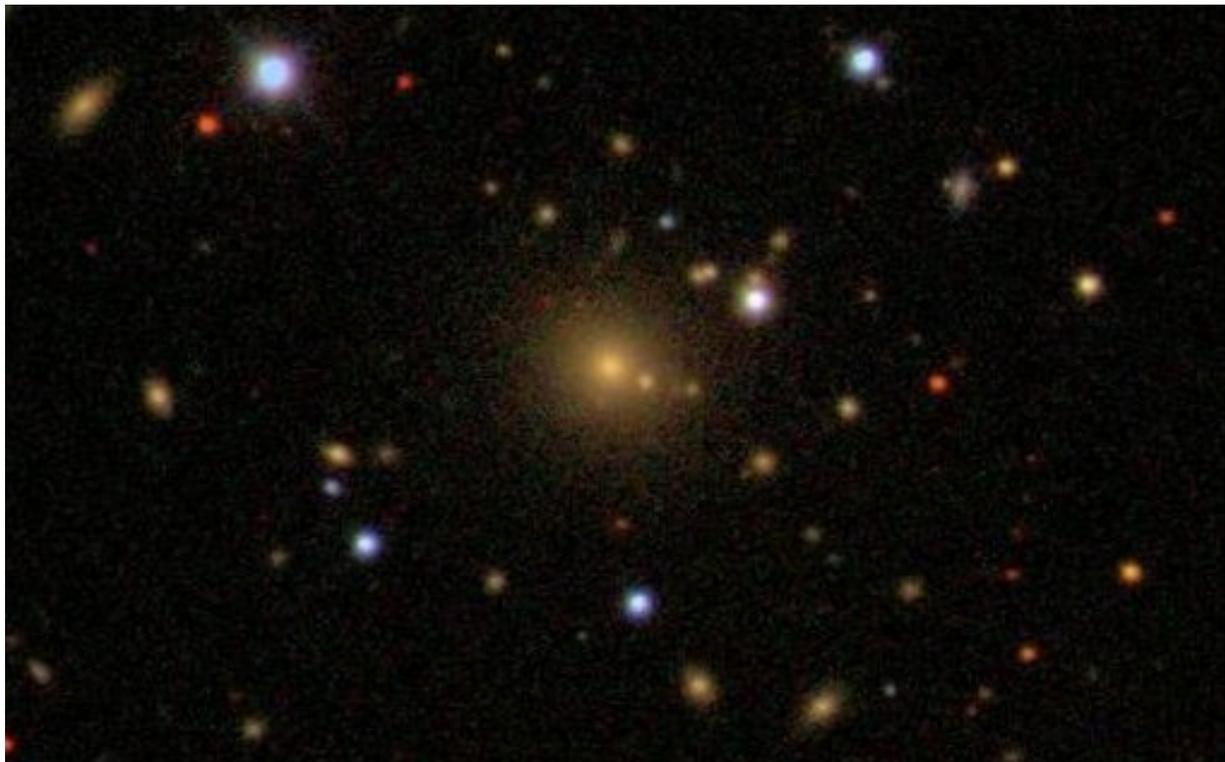


Online auf den Spuren von Hubble (und Wirtz)

Markus Pössel, Haus der Astronomie/Max-Planck-Institut für Astronomie

Online-Kataloge wie der des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) bieten heute direkten Zugriff auf die Daten von hunderttausenden von Galaxien. Dieser Artikel stellt vor, wie Schüler in selbständiger Arbeit mit solchen Daten die Hubble-Relation – den linearen Zusammenhang zwischen dem Abstand einer fernen Galaxie und der Rotverschiebung ihres Lichts – überprüfen und (mit einer weiteren Zusatzinformation) den Wert der Hubblekonstanten abschätzen können. Dazu werden die Grundlagen der [kosmischen Expansion](#) und der [Hubble-Relation](#) rekapituliert, und es wird vorgestellt, wie sich geeignete Daten aus dem SDSS [abrufen und auswerten lassen](#). Diese Materialien ergänzen den Artikel „Carl Wirtz und die Entdeckung der Hubble-Beziehung“ von Immo Appenzeller in *Sterne und Weltraum* 11/2009.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Mechanik, Optik	Ausbreitung von Strahlung , Dopplereffekt
Astronomie	Kosmos, Galaxien, Astropraxis	Hubble-Relation , Umgang mit Online-Katalogen
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma, Astro-Info	Trigonometrie , Statistik: Verteilungen , Stichproben , Informatik: Umgang mit Datenbanken .
Lehre allgemein	Lehrform	Praktikumsaufgabe



Bildmitte : die helle elliptische Galaxie mit der Identifikationsnummer 587737933581647932 (SDSS)

1 Einleitung

Dass unser Weltall expandiert, dass die darin enthaltenen Galaxien großräumig auseinanderstreben ist zweifellos die wichtigste Erkenntnis der Kosmologie. Sie führt zu den Urknall-Modellen: zum modernen Bild von der Entstehung des Universums aus einer extrem heißen und dichten Frühphase. Die genaue Bestimmung der kosmischen Parameter unseres Weltalls – der Bestimmung der Expansionsrate, des Alters der Weltalls und der allgemeinen Eigenschaften der darin enthaltenen Materie – sind Gegenstand einiger der spannendsten Forschungsprojekte der modernen Astrophysik. Ein Beispiel ist die Planck-Mission¹, die mit vorher nie erreichter Genauigkeit die Eigenschaften der kosmischen Hintergrundstrahlung untersuchen soll, eines „elektromagnetischen Echos“ des frühen, heißen Universums. Untersuchungen dieser Hintergrundstrahlung, aber auch der großräumigen Strukturen im Universum² und der Eigenschaften weit entfernter Objekte mit bekannter Helligkeit, der so genannten Supernovae vom Typ Ia³, haben zu grundlegenden offenen Fragen geführt: der Frage nach der Natur der Dunklen Materie⁴, die für rund 22% der Energiedichte im Weltall verantwortlich ist, und der rätselhaften Dunklen Energie⁵, die rund 74% dieser Dichte ausmacht und verantwortlich dafür ist, dass sich die Expansion des Universums derzeit beschleunigt.

Es ist eine grundlegende Eigenschaft der Wissenschaft, dass sich ihre Ergebnisse von jedem vernunftbegabten Wesen überprüfen lassen sollten – zumindest im Prinzip; in der Praxis sorgen die hohen Anforderungen sowohl an die instrumentelle Ausrüstung wie auch an die Vorkenntnisse des oder der Prüfenden dafür, dass diese Art kritischer Prüfung in der Spitzenforschung den Wissenschaftlern des betreffenden Fachgebiete vorbehalten bleibt. Umso wichtiger sind Beispiele, an denen sich grundlegende wissenschaftliche Ergebnisse zumindest in genäherter oder vereinfachter Form auch ohne Studium und Zugang zu Forschungsgeldern auf die Probe stellen lassen. Im Falle der kosmischen Expansion ist es nach wie vor mit den Methoden der Amateur- und Schulastronomie sehr schwierig, selbst Galaxienkataloge aufzunehmen, an denen sich die Charakteristika eines expandierenden Universums ablesen lassen. Als deutlich weniger aufwändige Alternative bietet sich die Auswertung von online verfügbaren astronomischen Katalogen an, in denen standardisierte Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen. Ziel dieses WiS!-Beitrags ist es, aufzuzeigen, wie sich der *Sloan Digital Sky Survey* zu diesem Zwecke einsetzen lässt. Für die Zukunft ist mit dem Fortschreiten von Projekten vom Typ *Virtual Observatory*,⁶ die gezielt Beobachtungsdaten sammeln und in einem einheitlichen Format bereitstellen, mit vielen weiteren Möglichkeiten zu rechnen, astronomische Originaldaten für schulische Projekte einsetzen zu können.

Im Unterschied zur Vorgehensweise, Schülern vor ausgewählte Daten von Galaxien zur Verfügung zu stellen, aus denen sich auf die kosmische Expansion schließen lässt⁷, bietet der direkte Zugriff auf Online-Kataloge größere Freiheiten, und damit Einblicke in wichtige Fragen des wissenschaftlichen Arbeitens: das Vorgehen bei der Datenauswahl, und insbesondere die Rolle von Modellvorstellungen bei der Datenauswahl und -auswertung.

Mit Schülern an online verfügbaren Katalogen wie dem des SDSS zu arbeiten, hat Vor- und Nachteile. Der größte Vor- wie Nachteil ist es, dass hier mit einem gewaltigen Datensatz gearbeitet wird, der weit umfangreicher ist, als eine allein für Unterrichtszwecke zusammen gestellte Datensammlung. Das erlaubt Flexibilität und eigenständige Entscheidungen bei der Datenauswahl, und bietet eine Vielzahl von Erkundungsmöglichkeiten. Allerdings ist gerade diese Vielfalt nicht unproblematisch, wenn es darum geht, eine Unterrichtseinheit zur kosmischen Expansion im engen zeitlichen Rahmen des Stundenplans unterzubringen. In diesem Beitrag beschreibe ich in den Abschnitten 0 und 3.3 eine der möglichen Vorgehensweisen. Zusammen mit den theoretischen Überlegungen der Abschnitte 2.1, 2.2

1 Tauber, Bersanelli und Lamarre 2008.

2 Phleps 2009, S. 34ff.

3 Leibundgut 2005; weitere Informationen in Abschnitt 2.4.

4 Schneider 2007, S. 45; Klein et al. 2005.

5 Doran 2007, Phleps 2009.

6 Etwa das deutsche Projekt GAVO, <http://www.g-vo.org>

7 z.B. SDSS Hubble Diagram Project: <http://cas.sdss.org/dr7/en/proj/advanced/hubble/>

und 2.4 bietet sie eine einfache Art und Weise, aus SDSS-Daten die Hubble-Relation herzuleiten. Die weiteren Abschnitte bieten zusätzliche Informationen, die für eine elementare Behandlung nicht unbedingt nötig sind, aber zum einen ein tieferes Verständnis fördern, zum anderen eine Reihe von Möglichkeiten für weitere Auswertungen und Untersuchungen aufzeigen.

2 Kosmische Expansion und Hubble-Relation

Dieses Kapitel enthält in knapper Form das zum Verständnis der Daten nötige Hintergrundwissen und führt die hier verwendete Terminologie ein.⁸

2.1 Der kosmische Skalenfaktor

Stellen wir uns ein Universum vor, das gleichmäßig mit Galaxien angefüllt ist – in jedem Teilvolumen V dieses Universums finden wir im Mittel die gleiche Anzahl N von Galaxien. Grundidee des expandierenden Kosmos ist, dass sich die mittleren Abstände zwischen je zwei beliebigen dieser Galaxien mit der Zeit einheitlich mit einem Skalenfaktor ändern.

Ein anschauliches zweidimensionales Analogon dieser Situation ist eine auf Papier gemalte Zeichnung, die mit Zoomfaktor ungleich eins fotokopiert wird. Im Vergleich von Original und gezoomter Kopie verändern sich alle Strecken, die man zwischen markanten Punkten auf der Zeichnung abmessen kann, beim fotokopieren um den gleichen Faktor.

Weitere gängige Modelle für dieser Expansion sind ein dreidimensionaler Rosinenkuchen, der beim Backen gleichmäßig aufgeht, die zweidimensionale Oberfläche eines Luftballons, der aufgeblasen oder ein zweidimensionales Gummituch, das auseinander gezogen wird.⁹ An einem eindimensionalen großen Gummiband – wie es etwa zur Physiotherapie eingesetzt wird und daher im Sanitätsfachhandel erhältlich ist – kann zumindest die eindimensionale Variante einer solchen Skalenfaktor-Expansion im Unterricht direkt demonstriert werden.¹⁰

Konkret bedeutet die Existenz des Skalenfaktors: Hat der Abstand zweier Galaxien A und B zu einer gegebenen Zeit t_1 den Wert g_{AB} , und zu einer späteren Zeit t_2 , den Wert f_{AB} , dann hängt das Verhältnis $f_{AB}:g_{AB}$ nur von den Zeiten t_1 und t_2 ab, nicht aber davon, welche zwei Galaxien A, B wir für unsere Betrachtung ausgewählt haben. Wir können daher willkürlich einen Zeitpunkt t_0 als Bezugspunkt wählen; den Abstand d_{AB} der beiden Galaxien nennen wir ihren *mitbewegten Abstand* und den Abstand der Galaxien zu irgendeinem anderen Zeitpunkt schreiben wir als

$$d_{AB}(t)=R(t) \cdot d_{AB},$$

mit dem durch diese Gleichung eingeführten kosmischen Skalenfaktor $R(t)$. Genau so können wir mit beliebigen anderen Galaxien vorgehen. Deren mitbewegter Abstand wird zwar im allgemeinen einen anderen Wert haben, doch der Skalenfaktor, der den mitbewegten Abstand und den Abstand zur Zeit t in Beziehung setzt, ist für alle Paare von Galaxien der gleiche.

Für solchermaßen mit einem Skalenfaktor expandierenden Universen gilt die so genannte *Hubble-Beziehung* oder *Hubble-Relation*, die Abstände und Abstandsänderungen für ferne Galaxien zueinander in Beziehung setzt.

⁸ Vgl. Duerbeck 2008, Lotze 2002a, Lotze 2002b.

⁹ z.B. ISB 2009, S. 105f., Bellmann und Bernhard 2008.

¹⁰ z.B. Price und Grover 2001.

2.2 Die Hubble-Relation: Ableitung mit Dopplereffekt

Betrachten wir einen Zeitpunkt t_0 und einen späteren Zeitpunkt $t_0+\Delta t$, wobei wir Δt so klein wählen wollen, dass $R(t)$ über diesen kleinen Zeitraum näherungsweise linear verläuft, wir also in guter Näherung $R(t_0+\Delta t) = R(t_0) + G(t_0) \cdot \Delta t$ setzen können.¹¹ Betrachten wir nun zwei Galaxien: unsere eigene, von der aus wir unsere Beobachtungen vornehmen, und eine weitere Galaxie, die von unserer eigenen den Abstände $d(t)$ hat. Dann lässt sich aus der Definition des Skalenfaktors $R(t)$ direkt ausrechnen, dass

$$d(t_0+\Delta t) - d(t_0) = [G(t_0)/R(t_0) \cdot d(t_0)] \cdot \Delta t$$

gilt. Auf der linken Seite steht die Änderung der Entfernung während des Zeitintervalls Δt . Der Ausdruck in eckigen Klammern auf der rechten Seite ist damit so etwas wie eine Geschwindigkeit; für ein expandierendes Universum, in dem der Skalenfaktor mit der Zeit immer größer wird und sich andere Galaxien immer weiter von uns entfernen, handelt es sich um so etwas wie eine *Fluchtgeschwindigkeit* der anderen Galaxie. Bemerkensweise hängt die Fluchtgeschwindigkeit, die wir hier $v(t_0)$ nennen wollen, vom Abstand der Galaxie ab:

$$v(t_0) = H(t_0) \cdot d(t_0),$$

wobei wir als Abkürzung die so genannte *Hubblekonstante* $H(t_0) = G(t_0)/R(t_0)$ eingeführt haben. In Worten lautet diese als *Hubble-Relation* bekannte Beziehung: Je weiter eine Galaxie von uns entfernt sind, umso größer ist ihre Fluchtgeschwindigkeit. Können wir die Entfernungen und Geschwindigkeiten ferner Galaxien messen, sagt das Modell des expandierenden Universums vorher, dass sie der Hubble-Relation genügen sollten. Historisch hat der Nachweis der Hubble-Relation überhaupt erst zu den modernen Modellen eines expandierenden Universums geführt.¹²

Abstandsbestimmungen in der Astronomie sind ein Problemfeld für sich.¹³ Geschwindigkeiten, mit denen sich Himmelskörper direkt von uns entfernen oder auf uns zulaufen – Radialgeschwindigkeiten – sind dagegen vergleichsweise einfach und präzise messbar. Durch den Dopplereffekt verschieben sich Wellenlänge bzw. Frequenz des Lichts eines astronomischen Objekts in direkter Abhängigkeit von seiner Radialgeschwindigkeit. Typischerweise lassen sich im Licht solcher Objekte charakteristische Spektrallinienmuster identifizieren – systematisch angeordnete Wellenlängen, bei denen das Objekt besonders viel oder besonders wenig Strahlung aussendet – deren tatsächliche Wellenlängen aus Labormessungen oder aus Berechnungen bekannt sind. Damit lässt sich die Wellenlängenverschiebung aus Beobachtungen direkt bestimmen. Der Dopplereffekt mit bewegter Quelle liefert einen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ_0 , bei der das betreffende Licht ausgesandt wurde, der Wellenlänge λ , bei der es gemessen wird, der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und der Geschwindigkeit v des aussendenden Objekts:

$$v/c = z := (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0,$$

womit wir gleichzeitig die Frequenzverschiebung z definiert haben. Ist z positiv – das ist in der Kosmologie der Regelfall – heißt z die *Rotverschiebung*, bei negativem z spricht man von *Blauverschiebung*.

11 $G(t_0)$ ist, wie aus dieser Definition ersichtlich, gerade die Ableitung von $R(t)$ nach der Zeit zum Zeitpunkt t_0 , und wird dementsprechend oft als $R'(t_0)$ geschrieben. Der hier gegebene Ausdruck ist der Anfang einer Taylorentwicklung.

12 Nussbaumer und Bieri 2009, Nussbaumer 2007.

13 Z.B. Wackermann 2006; ISB 2009 S. 52f., 73, 100f.

2.3 Die Hubble-Relation: Ableitung mit Skalenfaktor

Wir sind im vorangehenden Abschnitt implizit von der üblichen Vorstellung eines Raums ausgegangen, in dem sich die Galaxien bewegen: Wir haben von der Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien geredet und die übliche Formel für den Dopplereffekt bei bewegter Quelle verwendet. Diese Ableitung lässt unklar, welche genaue Rolle die klassischen Vorstellungen bei der Ableitung spielen, inwiefern sie eine Näherung darstellen und wie diese Näherung das Ergebnis beeinflussen.

Tatsächlich lässt sich die Hubble-Beziehung für Abstand und Rotverschiebung auch direkt aus der Skalenfaktor-Expansion ableiten; dabei wird klarer, welche Näherungen in die Hubble-Beziehung eingehen. Als Zusatzinformation wird lediglich benötigt, dass die Skalenbeziehung auch für Objekte gilt, die relativ zu den kosmisch auseinanderdriftenden Galaxien eine Trägheitsbewegung ausführen, etwa zwei Körper, die ohne die Einwirkung äußerer Kräfte und mit der gleichen Anfangsgeschwindigkeit durch den Raum fliegen, oder zwei Wellenberge ein und derselben Lichtwelle. Dies lässt sich aus den kosmologischen Modellen der Allgemeinen Relativitätstheorie folgern, die den theoretischen Rahmen für die hier angestellten Überlegungen bieten. Es lässt sich auch anhand der Modellvorstellungen nachvollziehen: Stellen wir uns das Universum als ein großes Gummituch vor, das immer weiter gestreckt wird, dann nimmt der Abstand zwischen zwei Ameisen, die mit gleicher Geschwindigkeit auf dem Gummituch entlanglaufen, in eben dieser Weise zu.

Damit folgt direkt: Sendet eine Galaxie zur Zeit t_A Licht aus, bei dem zwei aufeinander folgende Wellenberge den Abstand λ_0 haben, dann wird dieser Abstand bis zum Zeitpunkt t_E , zu dem das Licht bei uns, den Beobachtern, eintrifft, genau so mit dem kosmischen Skalenfaktor gestreckt wie die Abstände zwischen Galaxien.¹⁴ Für den Abstand λ , in dem die beiden Wellenberge bei uns eintreffen, gilt daher

$$\lambda = R(t_A)/R(t_E) \cdot \lambda_0$$

also

$$1+z = R(t_A)/R(t_E).$$

Nun nehmen wir an, dass $R(t)$ sich über die hier betrachteten Zeiträume (d.h. vom Zeitpunkt t_E bis zum Zeitpunkt t_A) näherungsweise linear ändert, also $R(t_A) = R(t_E) + G(t_E)(t_A - t_E)$. $G(t)$ ist dabei der gleiche Ausdruck wie im vorigen Abschnitt. Nun definieren wir die *Lichtlaufzeitentfernung* zwischen der beobachteten Galaxie und uns als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c , malgenommen mit der Laufzeit des Lichts, in diesem Falle also $D_{LZ} = c \cdot (t_E - t_A)$. Durch Umformen und bei Verwendung des oben eingeführten Ausdrucks $H(t)$ erhalten wir die Hubble-Relation

$$c \cdot z = H(t_E) \cdot D_{LZ}$$

zwischen Rotverschiebung und Lichtlaufzeitentfernung.

Formal mag unsere Näherung für $R(t)$ die gleiche sein wie im vorigen Abschnitt. Inhaltlich handelt es sich um etwas völlig anderes. Im vorigen Abschnitt haben wir den Abstand ein und derselben Galaxie zu leicht unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet. In dieser Entwicklung geht es um die Änderung des kosmischen Skalenfaktors, je nachdem, wie weit entfernt wir von der beobachteten Galaxie sind: $c \cdot (t_E - t_A)$, mit c der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, ist ein Maß für die Entfernung der beobachteten Galaxie, die so genannte *Lichtlaufzeitentfernung*, die wir mit D_{LZ} abkürzen wollen. Dies zeigt an, dass die hier verwendete Näherung nur solange vernünftig ist, solange die betrachteten Galaxien nicht zu weit von uns entfernt sind. Unsere Näherung gilt über Zeiträume hinweg, während denen die Ausdehnungsrate des Universums näherungsweise konstant ist. Abweichungen von der Hubble-Relation für hinreichend entfernte Galaxien zeigen an, wo diese Näherung ihre Gültigkeit verliert, und wie sich die kosmische Expansion bremst oder beschleunigt. Exakt durch solche Abweichungen wurde die beschleunigte Expansion des Universums nachgewiesen, die wir heute als Anzeichen für Dunkle Energie interpretieren.¹⁵

¹⁴ Vorsicht beim Vergleich mit englischsprachiger und einiger deutschsprachiger Literatur – dort können die Bezeichnungen gerade anders herum sein, mit einem Index E für Emission und A für Absorption.

¹⁵ Einmal mehr Leibundgut 2005.

2.4 Helligkeits-Rotverschiebungs-Beziehung

Abstand und Geschwindigkeit ferner Himmelsobjekte sind keine direkt messbaren Größen. Für die Überprüfung der Hubble-Beziehung ist es sinnvoll, sie so umzuschreiben, dass die Beziehung messbare Größen verknüpft, nämlich die Rotverschiebung und die Helligkeit von Objekten. Dazu ist zum einen v durch $c \cdot z$ zu ersetzen (dies folgt aus der Definition von z in Abschnitt 2.2; die Ableitung in Abschnitt 0 enthält von vornherein $c \cdot z$).

Weiterhin kann man sich folgendes überlegen: Angenommen, L sei die Gesamthelligkeit eines Objekts, gemessen als die *Strahlungsleistung* des Objekts, auch *Leuchtkraft* genannt: diejenige Energie, die das Objekt pro Sekunde in Form elektromagnetischer Strahlung in den Raum sendet. Bei Objekten, die in alle Raumrichtungen gleichermaßen abstrahlen – das ist für astronomische Objekte wie Sterne und Galaxien typischerweise der Fall, zumindest für den Bereich des sichtbaren Lichts, der uns später interessieren soll – hängt die tatsächlich beobachtete Helligkeit zum einen von der Gesamthelligkeit, zum anderen von der Entfernung zum Objekt ab. Wir können uns die Strahlung, die das Objekt in einem kleinen Zeitintervall δt ausschießt, als Kugelschale (mit der Dicke $c \cdot \delta t$) vorstellen, die sich um das Objekt herum ausdehnt. Wenn diese Strahlung unseren Detektor, erreicht, der sich im Abstand r von dem Objekt befinden möge, hat die Kugelschale bereits eine Fläche $4 \cdot \pi \cdot r^2$. Richten wir unseren Detektor genau auf das Objekt, und ist er so gebaut, dass er all jene Strahlungsanteile registriert, die auf seine Empfangsfläche mit dem Flächeninhalt ΔA treffen, dann verhält sich die nachgewiesene Strahlungsmenge zur Gesamtstrahlungsmenge wie ΔA zu $4 \cdot \pi \cdot r^2$. Während des Zeitintervalls δt kommt am Detektor die Energiemenge $\Delta A / (4 \cdot \pi) \cdot 1/r^2 \cdot L \cdot \delta t$ an, oder anders gesagt: die Empfangsleistung (empfangene Energie pro Zeiteinheit) am Detektor beträgt $\Delta A / (4 \cdot \pi) \cdot 1/r^2 \cdot L$. Um die Ergebnisse unterschiedlicher Detektoren vergleichen zu können, bietet es sich an, nur denjenigen Teil dieses Ausdrucks zu betrachten, der vom Detektor unabhängig ist. Dies ist der *Strahlungsstrom* $S = 1 / (4 \cdot \pi \cdot r^2) \cdot L$, auch Bestrahlungsstärke oder Strahlungsflussdichte genannt. Im Falle der Sonne entspricht er der Solarkonstante. Wir können nach dem Abstand r auflösen und die Hubble-Beziehung dann in der folgenden Form schreiben:

$$c \cdot z = H(t_A) \cdot \sqrt{L/S}.$$

Analoge Betrachtungen lassen sich anstellen, wenn man nicht die Gesamthelligkeit betrachtet, sondern sich von vornherein auf Abstrahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich beschränkt (für Feinheiten, die wir hier vernachlässigen, vgl. Abschnitt 4.2). Es ergibt sich die gleiche Formel, nur, dass L und S nun eine andere, auf einen bestimmten Wellenlängenbereich spezialisierte Bedeutung haben.

In der umgeschriebenen Hubble-Relation sind z und S messbare Größen. Problematisch ist die Anwesenheit der Leuchtkraft L in der Formel, denn diese Größe lässt sich nur für wenige astronomische Objekte bestimmen, ohne bereits deren Abstand zu kennen. Derartige Objekte sind als *Standardkerzen* bekannt. Wichtigstes Beispiel für die moderne Forschung sind Supernovae vom Typ Ia. Dabei handelt es sich um Sternexplosionen, bei denen sich daraus, wie ihre Helligkeit ansteigt und wieder abfällt (der *Lichtkurve* der Supernova) auf die absolute Helligkeit schließen lässt. So lassen sich Distanzen bis hin zu einigen Milliarden Lichtjahren bestimmen; mit diesen Standardkerzen wurde 1998 nachgewiesen, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt¹⁶. Nach wie vor ein wichtiges Glied in der Kette ineinander greifender Methoden zur Entfernungsbestimmung, die von irdischen bis zu extragalaktischen Größenskalen führt, sind die so genannten *Cepheiden*: Instabile, pulsierende Sterne, deren Pulsationsperiode auf ihre absolute Helligkeit schließen lässt. Sie ermöglichen Entfernungsbestimmungen bis hin zu Distanzen von weniger als 100 Millionen Lichtjahren¹⁷.

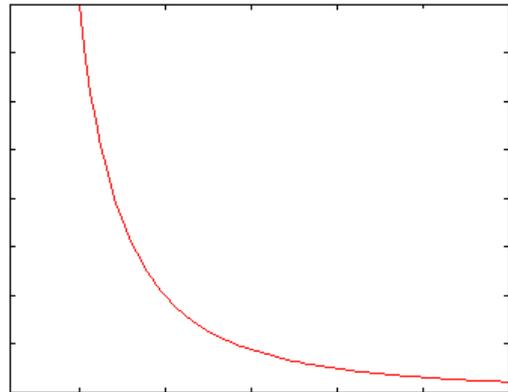
Stehen Daten zu Strahlungsflüssen und Rotverschiebungen vieler gleichartiger Objekte zur Verfügung, ist noch eine weitere Argumentation möglich. Eine Grundlage der modernen Kosmologie ist das *kosmologische Prinzip*, das besagt, dass das Universum im Mittel überall die gleichen Eigenschaften hat. Betrachten wir beispielsweise Spiralgalaxien – Galaxien die, wie unsere eigene Milchstraße, wie eine Scheibe mit charakteristischer Spiralstruktur geformt sind. Dann würden wir zwar erwarten, dass

¹⁶ Leibundgut 2005

¹⁷ z.B. Freedman et al. 2001.

die Eigenschaften *einzel*n herausgegriffener Spiralgalaxien aus unterschiedlichen Regionen des Kosmos sich im Allgemeinen durchaus unterscheiden. Schließlich gibt es größere und kleinere Spiralgalaxien, und es ist recht unwahrscheinlich, dass wir bei zweimaliger zufälliger Auswahl ausgerechnet Spiralgalaxien mit den gleichen Eigenschaften erwischen. Doch wenn wir die *Verteilungen* von Spiralgalaxien aus zwei großen, weit auseinander liegenden Regionen des Universums betrachten – wie viele große, wie viele mittelgroße, welches sind die Größten, wo liegt der Mittelwert – dann erwarten wir, ungefähr die gleichen Ergebnisse zu bekommen. Spiralgalaxie, so sollte man erwarten, bilden sich überall im Kosmos nach den gleichen Gesetzen. In einem Kosmos, der im Mittel überall gleichviel gleichartiger Materie enthält, sollte man erwarten, dass sich im Mittel gleiche Verteilungen gleichartiger Objekte ausbilden.

Haben wir es mit exakt gleich hellen Objekten zu tun (mit anderen Worten: hat die Leuchtkraft für alle diese Objekte den gleichen Wert), dann ergeben sich relative Helligkeitsunterschiede alleine durch den Abstand. Trägt man für diese Objekte den Strahlungsstrom gegen die Rotverschiebung auf, so ergibt sich qualitativ der Verlauf $S \sim 1/r^2$:

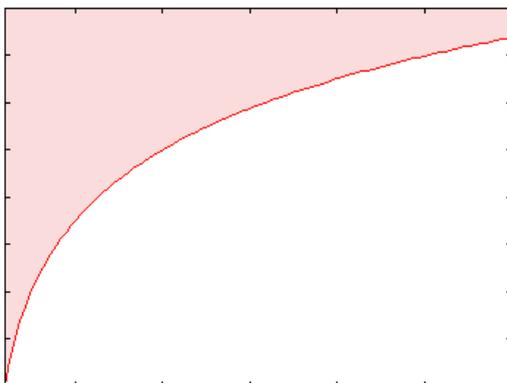


Eine weitere Komplikation gilt es zu berücksichtigen. Astronomen messen Helligkeit nicht als Strahlungsstrom, sondern – einem historisch gewachsenen System folgend, das der Wahrnehmung des menschlichen Auges nachgebildet ist – mit Hilfe so genannter *Größenklassen* oder *Magnituden*. Für zwei Objekte, deren Strahlungsströme S_1 und S_2 wir hier auf der Erde messen, ist der Unterschied ihrer Magnituden definiert als

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log(S_1/S_2).$$

Dabei ist „log“ der Logarithmus zur Basis 10; der Nullpunkt der Magnitudenskala wird willkürlich dadurch festgelegt, dass man die Magnitude des Sterns Wega (α Lyrae) zu Null setzt. Im Rahmen der hier angestellten Überlegungen ist dies nur eine Konvention, die uns einen weiteren Rechenschritt auferlegt, wenn wir von den Messdaten (angegeben als Magnituden) zur Hubble-Relation kommen wollen. Man sollte beim Betrachten der Messdaten allerdings im Hinterkopf behalten, dass die Magnitudenskala gegenläufig zu den üblicheren Helligkeitsmaßen ist: Hellere Objekte haben eine *kleinere* Magnitude als lichtschwächere Objekte.¹⁸

Mit Hilfe eines Grafikprogramms kann man direkt sehen, dass für Objekte mit gleicher Leuchtkraft, aber in unterschiedlicher Entfernung, für die die Hubble-Relation gilt, Magnitude und Rotverschiebung qualitativ wie $m = 5 \cdot \log(z) + \text{const.}$ zusammenhängen (rote Linie):



Der rosa ausgemalte Bereich zeigt an, wo in diesem Diagramm Objekte liegen, die lichtschwächer sind als die Objekte konstanter Leuchtkraft, die wir betrachtet haben.

Bevor wir zur eigentlichen Datenauswertung kommen, folgen hier noch einige Hintergrundinformationen zu den kosmologischen Modellen, auf denen unsere Überlegungen basieren.

18 Z.B. ISB 2009, S. 59f.

2.5 Grenzen und Kontext des hier verwendeten Modells

Zum Abschluss der theoretischen Vorarbeiten soll hier noch kurz auf die Grenzen und den Kontext des hier verwendeten Expansionsmodells eingegangen werden.

Theoretische Grundlage für die moderne Kosmologie ist Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, angewandt auf das Universum als Ganzes. Das hier vorgestellte Modell beruht auf der Näherung eines homogenen und isotropen Universums – eines Weltalls, das für jeden Beobachter, der auf einer der systematisch auseinanderdriftenden Galaxien sitzt, gleich aussieht, unabhängig von Beobachterstandort und Beobachtungsrichtung. Tatsächlich gibt es im Weltall auf einer ganzen Reihe von Größenskalen unregelmäßige Verklumpungen, umgeben von Regionen geringerer Dichte – Planeten und Sterne im Vergleich mit dem sie umgebenden interstellaren Raum; Galaxien im Vergleich mit dem sie umgebenden intergalaktischen Medium; Galaxienhaufen und Superhaufen, die sich zur großräumigen kosmischen Struktur aus Filamenten und Leerräumen zusammenfinden. Erst ab Größenskalen von rund 500 Millionen Lichtjahren hat das Weltall überall im Mittel die gleiche Dichte – erst würfelförmige Volumina mit dieser Kantenlänge enthalten im Mittel gleichviel Materie, egal, wo sie sich im Weltall befinden. Die Annahme, dass sich die großräumige Expansion eines im Mittel homogenen Universums mit den Gleichungen für ein tatsächlich homogenes Universum beschreiben lässt, hat sich bewährt. Dass diese Näherung sinnvoll ist, lässt sich allerdings nicht direkt aus den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ableiten, und es gibt Vermutungen – bislang allerdings noch nicht gestützt durch vollständige und in sich schlüssige Ableitungen –, dass der Umstand, dass wir eben kein auf allen Größenskalen homogenes Universum betrachten, für die beobachtete Beschleunigung der kosmischen Expansion, die üblicherweise der Dunklen Energie zugeschrieben wird, verantwortlich ist.¹⁹

In den Überlegungen der vorherigen Abschnitte war von Galaxien die Rede, die der kosmischen Expansion folgen. Bei tatsächlichen Galaxien kommt üblicherweise noch eine weitere Bewegungskomponente hinzu – die Bewegung der Galaxie in ihrem Galaxienhaufen, die Bewegung dieses Haufens relativ zu anderen kosmischen Massen. Auch unser eigenes Sonnensystem bewegt sich relativ zum Bezugsrahmen der kosmischen Expansion, und im Vergleich mit der kosmischen Hintergrundstrahlung lässt sich auch sehr präzise messen, mit welcher Geschwindigkeit: rund 400 km/s. Die Existenz dieser Eigengeschwindigkeiten ist ein weiterer Grund, warum die Hubble-Relation nicht exakt gültig ist. Dabei gilt allerdings auch: Je weiter entfernt die betrachteten Galaxien, umso weniger fallen ihre und unsere Eigengeschwindigkeit ins Gewicht.

Wir haben im Laufe der vorangehenden Abschnitte verschiedene Arten von Entfernung eingeführt: Die mitbewegte Entfernung in Abschnitt 2.1, die Lichtlaufzeitentfernung, für die wir in Abschnitt 0 die Hubble-Relation abgeleitet haben, und die Entfernung in Abschnitt 2.4, die implizit über den entfernungsabhängigen $1/r^2$ -Helligkeitsabfall definiert ist. Wir haben zwischen diesen Entfernungen bislang nicht differenziert, und werden im kommenden Kapitel nicht weiter auf mögliche Unterschiede zwischen diesen Entfernungsbegriffen eingehen. Eine genauere Untersuchung zeigt aber, dass für kosmisch gesehen große Distanzen tatsächlich Unterschiede zwischen den solchermaßen verschieden definierten Entfernungen bestehen. Ich gehe in Abschnitt 4.2 kurz darauf ein.

¹⁹ Buchert 2008.

3 Hubble im SDSS: Auswahl und Auswertung

3.1 Der Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

Der Sloan Digital Sky Survey ist eine aufwändige Durchmusterung, die rund ein Viertel der Himmelskugel erfasst. Die Durchmusterung wurde über 8 Jahre hinweg, von 2000 bis 2008, mit einem eigenen Teleskop mit 2,5 Metern Spiegeldurchmesser durchgeführt, das am Apache Point Observatory im US-Bundesstaat Neu-Mexiko steht. Die Durchmusterung ist eine Gemeinschaftsaktion von rund 25 Institutionen vornehmlich aus den USA. Im deutschsprachigen Raum sind daran das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, das Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und die Universität Basel beteiligt. Ihren Namen trägt die Durchmusterung in Anerkennung der großzügigen Förderung der ersten Projektphasen durch die Alfred P. Sloan-Stiftung.

Die Durchmusterung ergab zum einen eine fotografische Karte des betreffenden Himmelsgebiets; wie in der Astronomie üblich, wurden dazu nacheinander mehrere elektronische Schwarz/Weiß-Aufnahmen durch verschiedene Filter aufgenommen – in diesem Falle fünf verschiedene Filter –, die jeweils nur einen bestimmten Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums durchlassen, und das im oder nahe dem Bereich des sichtbaren Lichts. Aus solchen Einzelaufnahmen lassen sich Farbbilder rekonstruieren; insgesamt enthalten diese Aufnahmen allerdings mehr Information als ein herkömmliches Farbfoto.

Zusätzlich zur Kartierung – und den im gleichen Zug vorgenommenen Helligkeitsmessungen – wurden im Rahmen der Durchmusterung die Spektren von mehr als einer Million Galaxien und von hunderttausenden von Sternen aufgenommen.

Die wichtigsten der bei der Durchmusterung gewonnenen Daten stehen der Allgemeinheit online zur Verfügung.²⁰

3.2 Zugriff auf den SDSS, Teil I: Überblicksbild der Galaxien

Es gibt eine Reihe von Zugriffsmöglichkeiten auf die Daten des SDSS. Für die Zwecke dieses Artikels wählen wir die direkte Abfrage in der Datenbanksprache SQL. Der Abfragevorgang selbst ist damit vergleichsweise einfach: Der im Folgenden abgebildete Textblock wird mittels Kopieren-und-Einfügen in das Eingabefeld, das unter

<http://cas.sdss.org/dr7/en/tools/search/sql.asp>

zur Verfügung steht kopiert. Wählt man auf der gleichen Seite die Ausgabeform „HTML“, erscheint das Ergebnis im Webbrowser; wählt man „CSV“ (steht für „Comma Separated Values“, durch Komma getrennte Werte), so wird eine einfache Textdatei mit Daten generiert, die direkt in Programme wie Microsoft Excel eingelesen werden kann. Es bietet sich an, nach Aufsuchen der Seite gleich den Knopf „Clear Query“ (rechts über dem Eingabefeld) zu drücken, um die dort vorgegebene Suchanfrage, die wir nicht verwenden wollen, zu löschen. Der Text unserer eigenen Suchanfrage mag auf den ersten Blick kompliziert scheinen, lässt sich aber leicht gezielt verändern; wie, das wird unten noch konkret beschrieben.

Zunächst zur Suchanfrage selbst. In vereinfachter Form – Achtung, die folgende Abfrage soll nur dem besseren Verständnis dienen und sollte nicht in das Eingabefeld der SDSS-Webseite kopiert werden! – lautet sie:

```
SELECT
objID,z,petroMag_r
WHERE (primTarget & (fPrimTarget('TARGET_GALAXY')) > 0) AND (zWarning = 0)
```

²⁰ Allgemeine Informationen (freilich auf Englisch) bietet das Webportal <http://www.sdss.org/>, auf die Möglichkeiten, Daten abzurufen, gehen wir in den folgenden Abschnitten genauer ein.

Einfach gesagt: Der SDSS enthält eine lange Liste von Einträgen, für jedes Objekt einen. Jeder Eintrag enthält Daten, etwa über die Position des Objekts, seine Helligkeit und seine Rotverschiebung. Die oben abgedruckte Anweisung gibt an, welche Einträge aus dieser Datenmenge ausgewählt werden sollen. Im Einzelnen:

1. `SELECT objID,z,petroMag_r` heißt: Erzeuge eine Tabelle, die für jedes Objekt die Identifizierungsnummer des Objekts (`objID`), die Rotverschiebung des Objekts (`z`) und die Magnitude, genauer: die hier verwendete „Petrosian Magnitude durch r-Filter“. Weitere Informationen zu dieser Magnitude finden sich in Anhang 0; hier ist unmittelbar nur wichtig, dass sich diese Magnitude wie in Abschnitt 2.4 beschrieben in einen Strahlungsfluss umrechnen lässt.
2. `WHERE`, wörtlich, „wobei“, zeigt an, dass nur bestimmte Objekte angezeigt werden sollen: Zeige nur Objekte, bei denen („`WHERE`“) gilt: die automatische Vorverarbeitung hat das Objekt als Galaxie identifiziert (das sagt der komplizierte Ausdruck direkt hinter dem „`WHERE`“) und („`AND`“) es sind bei der Bestimmung der Rotverschiebung aus den Spektrallinien keinerlei Probleme aufgetreten („`zWarning = 0`“).

Die tatsächliche Anfrage – diese, nicht die obige vereinfachte Form sollte auf die angegebene Internetseite kopiert werden – sieht etwas komplizierter aus:

```
SELECT
p.objID,s.z,p.petroMag_r
FROM BESTDR7..SpecObj AS s
JOIN BESTDR7..Galaxy AS p ON s.bestObjID = p.objID
WHERE (p.primTarget & (dbo.fPrimTarget('TARGET_GALAXY')) > 0) AND (zWarning = 0)
```

Die Reihenfolge der Anweisungen ist anders als in der vereinfachten Version. Außerdem kommen die Werte nicht aus einer, sondern aus zwei Listen (einer Liste für Positions- und Helligkeitsmessungen, einer für Spektralmessungen), und die Anfrage enthält die Angabe, aus welcher Datenbank gelesen werden soll („`FROM...`“), und dass jedem Objekt gemäß seiner Identifizierungsnummer seine Spektraldaten zugeordnet werden sollen („`JOIN...`“). Angaben, die sich auf die Positions- und Helligkeitsdatenbank beziehen, ist ein „`p.`“ vorangestellt, Angaben aus der Spektraldatenbank ein „`s.`“.

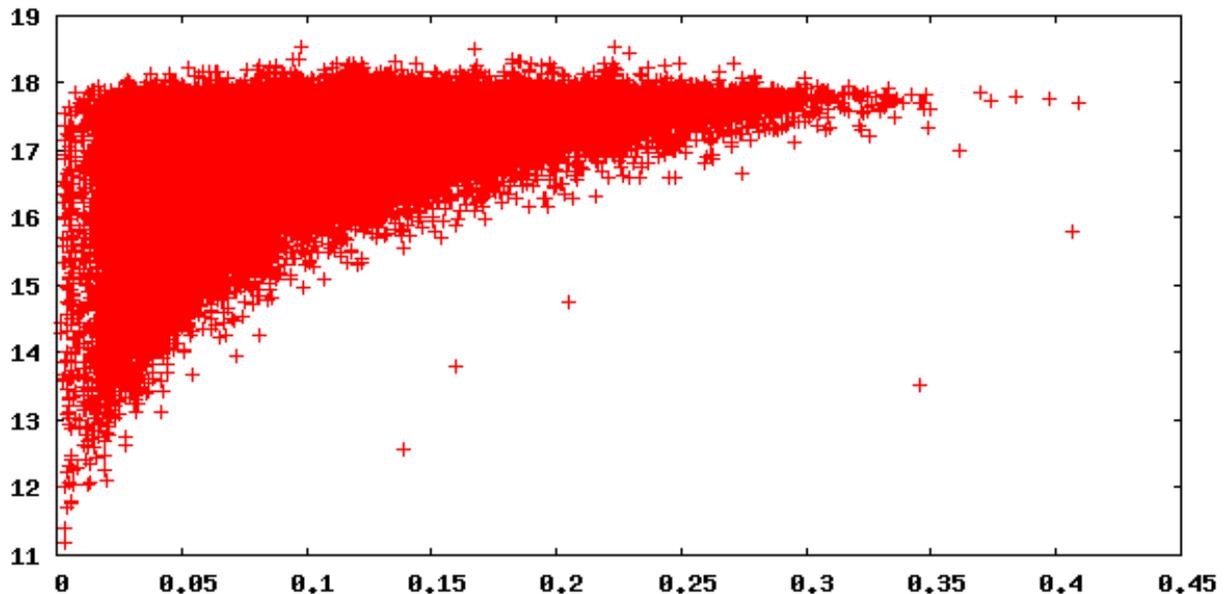
Startet man diese Suchanfrage, dann lassen sich die Resultate in einer Textdatei herunterladen (Wahlmöglichkeit „`CSV`“ anklicken), die zunächst einmal „`results.csv`“ heißt, und die man tunlichst geeignet umbenennen sollte. Hier sind die ersten (von 67810) Zeilen der Datei (Ladedauer 3-4 Minuten):

```
objID,z,petroMag_r
587722952230174996,0.030284,17.675173      587722952230175035,0.077923,17.47781
587722952230175138,0.160228,17.109627
```

Die erste Zeile enthält Informationen darüber, was folgt: für jedes Objekt die Identifikationsnummer, die Rotverschiebung, und die Magnitude. Man sollte dieser Zeile von Hand ein „`#`“ vorstellen; üblicherweise wird eine Zeile, die mit „`#`“ beginnt, von Auswertungsprogrammen ignoriert. Jede der nächsten hier gezeigten drei Zeilen beschreibt ein Objekt. Durch Kommata getrennt sind jeweils angegeben: die 19-stellige Identifikationsnummer, die Rotverschiebung (z.B. für das zweite der Objekte `z=0,0779`) und die Magnitude (z.B. für das dritte Objekt `17.109627`). Ganz unten enthält die Datei noch den Hinweis, dass wir mehr Objekte ausgewählt haben, als dieses Verfahren liefern kann. Wir schneiden diesen Hinweis ab.

Das Ergebnis findet sich als Beispieldatei `alle_galaxien.csv` auf meinen begleitenden Webseiten zu diesem Artikel, auf <http://www.mpia.de/home/poessel/wishubble/index.html>.

Trägt man die Magnituden dieser Objekte gegenüber ihrer Rotverschiebung auf, so ergibt sich das folgende Bild:



Dass die von Datenpunkten bedeckte Fläche – so dicht bedeckt, dass sich die einzelnen roten Kreuze gar nicht mehr auseinander halten lassen – dabei bei Magnitudenwerten von knapp 18 abrupt abbricht, ist ein Auswahleffekt: Galaxien jenseits der entsprechenden Grenzhelligkeit sind zu leuchtschwach als dass sich die Petrosian-Magnitude gemäß dem in Anhang 0 beschriebenen Verfahren zuverlässig berechnen ließe.

Die klare Begrenzung der Datenfläche nach unten – und ihre Form! – sind genau das Ergebnis, das zu erwarten wäre, wenn eine Reihe von Annahmen zutreffen: a) die Rotverschiebung ist in der Tat ein Maß für die Entfernung (Hubble-Relation) und b) die hellsten der hier betrachteten Galaxien haben überall im Weltall die gleichen Eigenschaften – insbesondere die gleiche Leuchtkraft. Für diese hellsten Galaxien ist der Kurvenverlauf tatsächlich der der Abbildung auf Seite 7.

Dies motiviert den nächsten Auswertungsschritt, in dem wir versuchen, uns auf die hellsten Objekte zu beschränken, um so die Hubble-Gerade zu rekonstruieren.

Die Anzahl der Zeilen in unserer Datei und die Rotverschiebungswerte zeigen am direktesten, welche Fortschritte die Astronomie seit Carl Wirtz gemacht hat. Wo Wirtz und die professionellen Astronomen seiner Zeit Zugriff auf knapp 30 Rotverschiebungswerte für Galaxien mit z -Werten deutlich kleiner als 0,01 hatten, liefert der SDSS jedem, der einen Internetanschluss besitzt, genaue Werte für zigtausende Galaxien bis jenseits von $z=0,3$ frei Haus.

3.3 Zugriff auf den SDSS, Teil II: Die hellsten Galaxien

Um zu prüfen, ob die Hubble-Relation gilt – und, unter Einbeziehung einer Zusatzinformation, einen Zahlenwert für die Hubble-Konstante abzuleiten –, wollen wir ab jetzt nur noch die hellsten Galaxien betrachten: die Galaxien mit der größten Leuchtkraft.

Hier stehen wir vor einem Auswahlproblem: Einige der Galaxien in unserer Ergebnisliste sind vergleichsweise hell, weil ihre Leuchtkraft groß ist. Andere erscheinen uns nur deswegen hell, weil der Abstand zu ihnen besonders klein ist. Wie können wir diese beiden Effekte auseinander halten? Das einfachste Vorgehen besteht darin, das Rotverschiebungsintervall in kleine Abschnitte zu teilen. Wir wählen willkürlich eine Intervallbreite von $\Delta z = 0,005$. Gilt die Hubble-Relation, dann sollten Galaxien mit sehr ähnlichen z -Werten ungefähr gleich weit von uns entfernt sein. Vergleichen wir die gemessenen Helligkeiten der Galaxien mit Rotverschiebungen zwischen z_0 und $z_0 + \Delta z$, dann sollten die unterschiedlichen gemessenen Helligkeiten ungefähr die unterschiedlichen Leuchtkräfte wiedergeben. Suchen wir innerhalb eines jeden der z -Intervalle jeweils die hellsten Objekte heraus, dann sollten wir insgesamt eine Liste mit den Objekten mit der größten Leuchtkraft erhalten.

An den Wert von Δz müssen wir zwei gegenläufige Ansprüche stellen. Je kleiner Δz , umso geringer die Entfernungsunterschiede zwischen den Galaxien, und umso besser unsere Auswahl. Wählen wir Δz dagegen sehr klein, so betrachten wir unter Umständen nur noch sehr wenige Galaxien. Dass unter diesen Galaxien eine mit der maximal möglichen Leuchtkraft ist, wird umso unwahrscheinlicher, je kleiner wir Δz wählen.

Auf dieses und weitere Auswahlprobleme, sowie mögliche Lösungen, wird in dem optionalen Abschnitt 4.1 noch weiter eingegangen werden. Hier treffen wir nur grobe Vorsichtsmaßnahmen: Wir nehmen die Gesamtverteilung auf S. 11 in Augenschein und sehen, dass die Zahl der Galaxien für Werte $z < 0,02$ und $z > 0,295$ stark abnimmt. Wir beschränken uns von nun an auf z -Werte, die zwischen diesen Extremen liegen.

An dieser Stelle sei eine grundsätzliche Nebenbemerkung erlaubt. In einigen unzulässig vereinfachten Beschreibungen des Wissenschaftsbetriebs wird so getan, als seien Beobachtungen und Experimente weitgehend unabhängig von der Theorie. An diesem Beispiel wird sehr schön deutlich, was in der Wissenschaftspraxis gang und gäbe ist: Die theoretischen Grundlagen liefern eine wichtige Leitlinie, wenn es darum geht, überhaupt erst einmal zu entscheiden, welche Daten aufgenommen (in unserem Falle: ausgewählt) werden sollen, und wie sie auszuwerten sind.

Wer mit entsprechender Auswertungssoftware vertraut ist, mag es vorziehen, die Gesamtliste der Galaxien herunter zu laden, diese dann nachträglich in die gewählten Rotverschiebungsintervalle einzuordnen, jedes Intervall nach seiner Helligkeit zu ordnen, und dann die hellsten Objekte im *Object Explorer* in Augenschein zu nehmen, um die hier angesprochenen Fehlmessungen und andersartigen Objekte auszuschließen. Ich habe einen anderen Weg gewählt, und lade jedes z -Intervall wie folgt direkt aus der SDSS-Datenbank in eine Datei. Für das z -Intervall $0,05 < z \leq 0,055$ lautet die Abfrage wie folgt:

```
SELECT TOP 10
p.objID,s.z,p.petroMag_r
FROM BESTDR7..SpecObj AS s
JOIN BESTDR7..Galaxy AS p ON s.bestObjID = p.objID
WHERE (p.primTarget & (dbo.fPrimTarget('TARGET_GALAXY')) > 0) AND (s.z>0.05) AND
(s.z<=0.055) AND (zWarning = 0)
ORDER BY p.petroMag_r ASC
```

Neu sind dabei im Vergleich zu der Abfrage auf S. 10:

1. Die Zeile `ORDER BY petroMag_r ASC` befiehlt: Ordne die Einträge in der Reihenfolge ihrer Helligkeit – kleinste Magnitudenwerte zuerst. „petroMag_r“ steht für ASC steht für „ascending“, aufsteigend, d.h. kleinste Magnitude (im paradoxen System der Astronomen heißt das ja: größte Helligkeit) zuerst. DESC wäre absteigende Ordnung.

2. SELECT TOP 10 heißt: Wähle aus der so geordneten Tabelle die ersten zehn Werte, das heißt: die hellsten zehn Objekte aus. TOP 100 wären die ersten hundert Werte, und so weiter.
3. Im Abschnitt „WHERE“, der Bedingungen an die Auswahl der Objekteinträge steht, sind die Ausdrücke „AND (s.z>0.05) AND (s.z<=0.055)“ hinzugekommen. Sie besagen: Betrachte nur Objekte, deren z-Wert größer als 0,05 ist, und deren z-Wert kleiner oder gleich 0,055 ist, mit anderen Worten: die in das gewünschte z-Intervall fallen. Um andere z-Intervalle zu erhalten muss man in der Suchanfrage lediglich diese Zahlenwerte für Ober- und Untergrenze anpassen.

Wiederum sollte man die herunter geladenen Dateien, die zunächst alle „result.csv“ heißen, nach dem Herunterladen gleich umbenennen.

Bevor wir die Daten in diesen Dateien weiterverarbeiten: Der Blick auf die Gesamtverteilung auf S. 11 offenbart eine weitere Besonderheit. Die untere Begrenzung der Verteilung – die „Kurve der hellsten Objekte“ ist zwar vergleichsweise gut definiert. Doch ganz vereinzelt finden sich weit unterhalb der Kurve einzelne Datenpunkte. Es ist in der Wissenschaft unter geeigneten Umständen durchaus üblich, solche „Ausreißer“ beiseite zu lassen. Vorsichtiger ist es, die Objekte direkt in Augenschein zu nehmen – das tun auch die Professionellen. Wir benutzen dazu den „Object Explorer“ des SDSS:

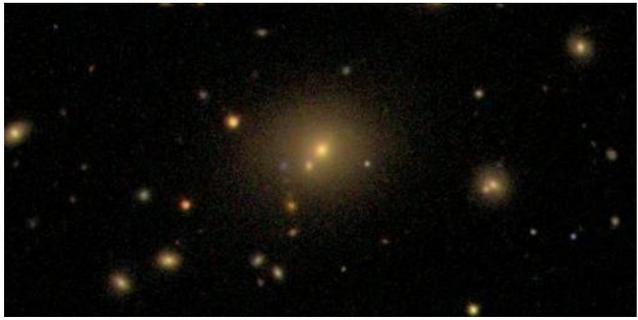
<http://cas.sdss.org/dr7/en/tools/explore/obj.asp>

Dessen (für uns) wichtigste Funktionen in der Menüleiste am linken Seitenrand sind:

Engl. Bezeichnung	Funktion
Search by [...] ObjId	Ermöglicht Aufruf des Objekts über die Identifikationsnummer (in unseren Daten: objID)
Finding chart	Zeigt den Anblick des Objekts; Zoom möglich. Kann auch durch Klicken auf das Objektbild aufgerufen werden.

Durch Klicken auf das unten links sichtbare Spektrum kann eine größere Ansicht des Spektrums aufgerufen werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen einige typische Ansichten hellster Objekte, die man in einem gegebenen z -Intervall antreffen kann. Mit zunehmendem z -Wert (nach der Hubble-Relation: zunehmender Entfernung) sehen natürlich auch diese Objekte zunehmend lichtschwächer und undeutlicher aus. Das Zielobjekt ist jeweils exakt in Bildmitte:

	<p>Ell: Große elliptische Galaxie, umgeben von vielen kleinen elliptischen Galaxien. Das weitaus häufigste Aussehen. Elliptische Galaxien sehen diffus aus, mit hellerer Zentralregion, aber ohne weitere Strukturen.</p> <p>Objekt-ID: 587738574069366889</p>
	<p>Spi: Spiralgalaxie. Solche Galaxien zeigen eine typische Spiralarmstruktur.</p> <p>Objekt-ID: 588009365861498889</p>
	<p>SPG: Stern an Plattengrenze</p> <p>Objekt-ID: 587727178473078842</p>
	<p>Gal-Stern: Galaxie sehr nahe an hellem Stern.</p> <p>Objekt-ID: 587725041702469675</p>



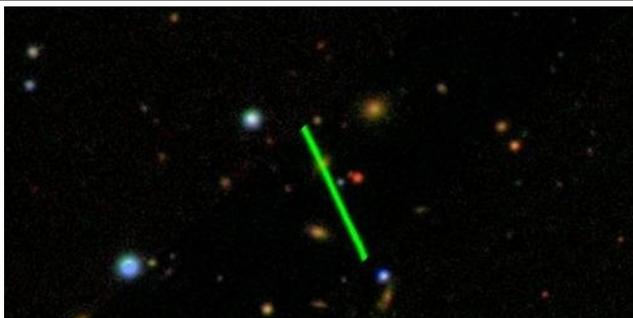
Ell-PG: Elliptische Galaxie an einer Plattengrenze, mit sichtbarem Helligkeits- bzw. Farbsprung

Objekt-ID: 587736782002192615



Durch: Entferntere Galaxie, die durch eine Vordergrundgalaxie hindurchscheint

Objekt-ID: 587726014001578079



Sat: Satellitenspur (?)

Objekt-ID: 587736753543905433



Quasar: Quasar (besonders heller, aktiver Galaxienkern – in diesem Beispiel befindet sich gleichzeitig ein Stern rechts unten, Gal-Stern)

Objekt-ID: 588017627224670213



Schmelz: Durch Verschmelzung verzerrte Galaxie(n)

Objekt-ID: 587742062663041028

Das Aufnahmefeld des SDSS ist aus streifenförmigen Teilaufnahmen zusammengesetzt. Im Falle SPG wird das ausgewählte Objekt z.T. vom Licht eines Sterns überstrahlt, der sich auf der angrenzenden Aufnahme befindet, wobei klar sichtbar ist, dass das Sternenlicht auf den Aufnahmen unterschiedlich deutlich aufscheint. Die Annahme liegt nahe, dass das Sternenlicht die automatische Helligkeitsbestimmung des ausgewählten Objekts das, dem Augenschein nach, nicht besonders hell ist, verfälscht hat. Ähnlich unsicher erscheinen uns die Fälle „Gal-Stern“, „Ell-PG“ (bei mir nur ein einziges Mal aufgetreten), außerdem „Durch“ – wobei bei „Gal-Stern“ der Fall eines nahen Sterns insbesondere bedenklich ist, wenn der Stern helle Beugungszacken hat, die direkt in das Galaxienscheibchen laufen; automatische Bildauswertungssoftware, die die Helligkeit des Sternscheibchens abzieht, könnte mit dieser zusätzlichen Struktur Probleme bekommen. Wir lassen all diese Daten außer Betracht. Bei „Sat“ (bei mir ebenfalls nur ein Fall) dürfte es sich um die Spur eines Satelliten handeln, der durch die Aufnahme geflogen ist.

Für den Fall von Quasaren ist aufgrund der bläulichen Farbe augenscheinlich klar, dass es sich um eine andere Objektart handelt. Der Unterschied wird noch deutlicher, wenn man – auch ohne die Einzelheiten und Hintergründe zu kennen – das Spektrum solcher Objekte betrachtet und seine Form mit der von elliptischen Galaxien vergleicht. Tatsächlich handelt es sich bei solchen Objekten um Quasare – aktive Galaxienkerne, die energiereiche Strahlung aussenden. Auch ohne dieses Zusatzwissen sind die Unterschiede offensichtlich. Kenner sehen darüber hinaus z.B. an den klar definierten Maxima im Spektrum („Emissionslinien“), wovon es sich handelt.

Verschmelzungsprodukte („Schmelz“) nenne ich unregelmäßige, asymmetrische Galaxien, die längliche oder klumpige Strukturen aufweisen. Dies ist die schwierigste Kategorie – in einigen Grenzfällen ist die Einschätzung, ob es sich um ein Verschmelzungsprodukt handelt – oder vielleicht doch nur um zwei Galaxien, die von uns aus gesehen hintereinander stehen? – schwierig, und damit notwendigerweise subjektiv. Ob es sich tatsächlich – so die unter Astronomen akzeptierte Deutung – um Resultate der Verschmelzung zweier Galaxien handelt, ist dabei für unsere Argumentation nebensächlich. Das oben gezeigte Beispielbild ist nicht repräsentativ – jedes Objekt, das ich in meinem Durchlauf als „Schmelz“ klassifiziert habe, sieht anders aus.

Spiralgalaxien sind scheibenförmig, und durch ihre Spiralarme leicht zu erkennen.

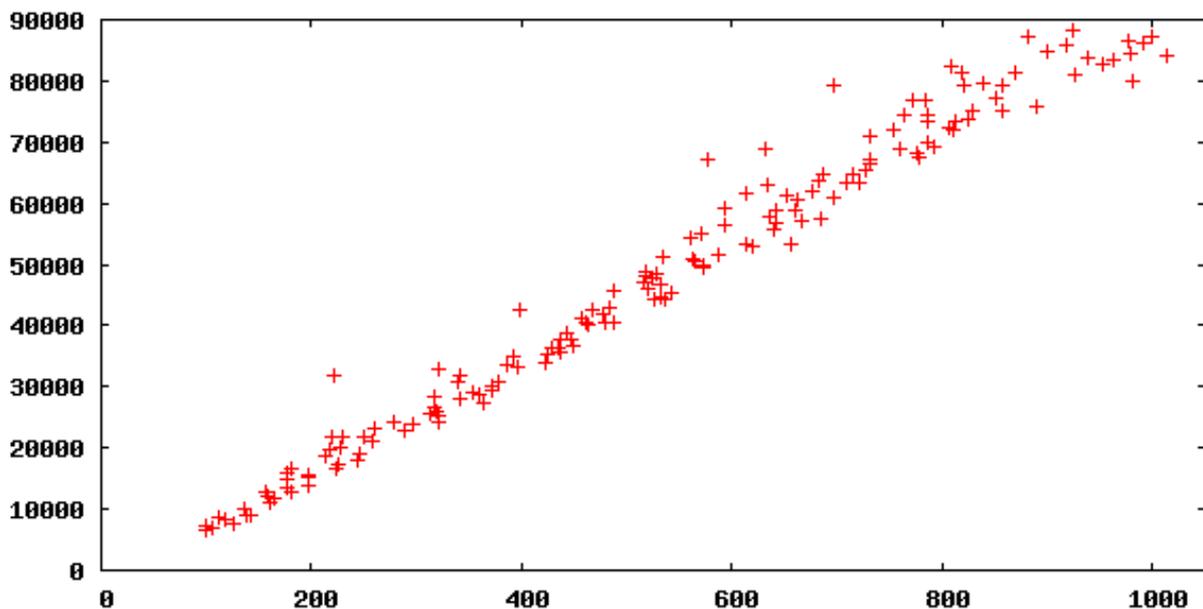
Objekte vom Ell sind elliptische Galaxien – eher strukturlose Gebilde, deren Helligkeit von innen nach außen abnimmt.

Typischerweise treffen wir bei unserer Auswahl auf die hellste elliptische Galaxie in einem Haufen solcher Galaxien – bei Rotverschiebungen größer als $z > 0,165$ treffen wir nur noch solche Objekte an, und auch bei kleineren Rotverschiebungen haben wir es nur vereinzelt mit Spiralgalaxien oder Verschmelzungsobjekten zu tun. Das legt nahe, dass wir es mit einem Stichprobeneffekt zu tun haben: Die hellsten Objekte sind tatsächlich die hellsten elliptischen Galaxien, und wenn wir andersartige Objekte in unserer Liste antreffen, dann, weil unsere Stichprobe in dem betreffenden z -Intervall nicht repräsentativ ist. (Auf diesen und weitere Auswahleffekte, sowie auf Möglichkeiten, es besser zu machen, wird in Abschnitt 4.1 eingegangen.) Dass wir es insgesamt – von wenigen Ausnahmen abgesehen, die meisten davon klar als Fehlmessungen zu erkennen – mit Objekten gleichen Aussehens zu tun haben, zeigt jedenfalls, dass unsere Annahme, dass wir es nach unserer Helligkeitsauswahl mit gleichartigen Objekten – eben den hellsten Galaxien – zu tun haben, berechtigt ist.

Zum praktischen Vorgehen: Die Begutachtung – bei der Arbeit mit getrennten SQL-Abfragen für jedes Intervall auch die Erstellung der einzelnen Dateien – eignet sich gut zur Gruppenarbeit. Auf Gruppen von je zwei Schülern verteilt, sind die Dateien schnell ausgewertet und die Kandidaten schnell ausgewählt. Schüler, die an dieser Arbeit besonderen Spaß finden, sollte man auf das Projekt *GalaxyZoo* hinweisen (<http://www.galaxyzoo.org>), in dessen Rahmen man einer Forschergruppe online Galaxien aus den SDSS-Daten klassifizieren helfen kann.

Ich selbst erzeuge mit Hilfe eines Perl-Skripts, das ebenfalls auf <http://www.mpia.de/home/poessel/wishubble/index.html> zur Verfügung steht, automatisch Seiten, auf denen die Objektnummern anklickbar sind, und spare mir so das Kopieren und Einfügen der Identifikationsnummern.

Für die hellsten Galaxien kann man $1/\sqrt{S}$ gegen z auftragen – für Objekte gleicher Leuchtkraft L , für die eine Hubble-Relation gilt, sollten dann gemäß den Überlegungen in Abschnitt 2.4 alle Datenpunkte auf einer Geraden liegen. Da wir noch keinen Referenzwert haben, mit dem wir Magnituden in Strahlungsströme umrechnen können, tragen wir auf der x-Achse $10^{-0.2 \cdot m}$ auf, auf der y-Achse die Rotverschiebung z . Gilt die Hubble-Beziehung, dann sollte sich eine Gerade ergeben. Ohne Referenzwert können wir die Steigung dieser Geraden allerdings nicht in die Hubble-Konstante umrechnen, und die Einheit der x-Werte ist unbestimmt; y-Werte sind in Kilometer pro Sekunde. Es ergibt sich die folgende Grafik:



Für astronomische Verhältnisse ist dies eine spektakulär geradentreue Verteilung. Man vergleiche sie mit der in Appenzellers Artikel abgebildeten Verteilung, aus der Hubble auf die nach ihm benannte Relation schloss, oder den Daten von Wirtz. Für die von uns ausgewählten hellsten Galaxien ist der Zusammenhang zwischen Entfernung und Rotverschiebung offenbar tatsächlich in guter Näherung linear.

3.4 Bestimmung der Hubblekonstante

Die Bestimmung des Wertes der Hubble-Konstanten ist eine der grundlegenden Messungen der Kosmologie. So schön die obige Verteilung aussehen mag – daraus mit einiger Genauigkeit die Hubblekonstante zu bestimmen, ist nicht einfach, denn dabei spielen eine Reihe von Effekten und Überlegungen eine Rolle, die wir hier nicht berücksichtigen (siehe Abschnitt 4.1 und 4.2). Im folgenden werden wir den direkten Weg gehen, und die Steigung einer Ausgleichsgerade durch das oben gezeigte Diagramm bestimmen. Auch dazu ist allerdings noch eine weitere Information vonnöten, nämlich die Leuchtkraft L , die alle die von uns ausgesuchten Objekte gemeinsam haben. Diese Information ist nicht leicht zu bekommen – eine Abstandsbestimmung wäre ein Projekt für sich, und würde den Rahmen der hier abgesteckten Projektarbeit sprengen. Für die Zwecke dieses Projekts werde ich den Abstand und die Magnitude eines recht bekannten Objekts, der elliptischen Galaxie mit der Messier-Katalognummer 87 („M 87“) direkt angeben: Der Abstand von M 87 von der Erde beträgt $(16,7 \pm 0,2)$ Mpc²¹, wobei wir mit Mpc oder „Mega-Parsec“ gleich eine in der Kosmologie übliche Entfernungseinheit wählen: Ein Mega-Parsec sind eine Million Parsec, und ein (streng genommen: eine!) Parsec entspricht 3,26 Lichtjahren beziehungsweise knapp 31 Billionen Kilometern. In der SDSS-Datenbank trägt M 87 die Identifikationsnummer 588017703470628939; der *Object Explorer* zeigt, dass M 87 in der Tat vom gleichen Typ wie die hellsten fernen Galaxien ist, die wir betrachten: die hellste elliptische Galaxie in einem Haufen weiterer elliptischer (und anderer) Galaxien, nämlich des so genannten Virgo-Haufens im Sternbild Jungfrau. Die im SDSS angegebene Magnitude ist allerdings unzuverlässig, da M 87 deutlich größer ist als die anderen Galaxien der Durchmusterung, und der Auswertungsalgorithmus in solchen Fällen nicht zum richtigen Ergebnis führt. Mit einer etwas aufwändigen Rechnung, die Daten zweier verschiedener Vermessungen des Helligkeitsprofils verwendet (vgl. Anhang A.) , komme ich für die von uns verwendete Variante der Petrosian-Magnitude auf $m = (8,35 \pm 0,05)$.

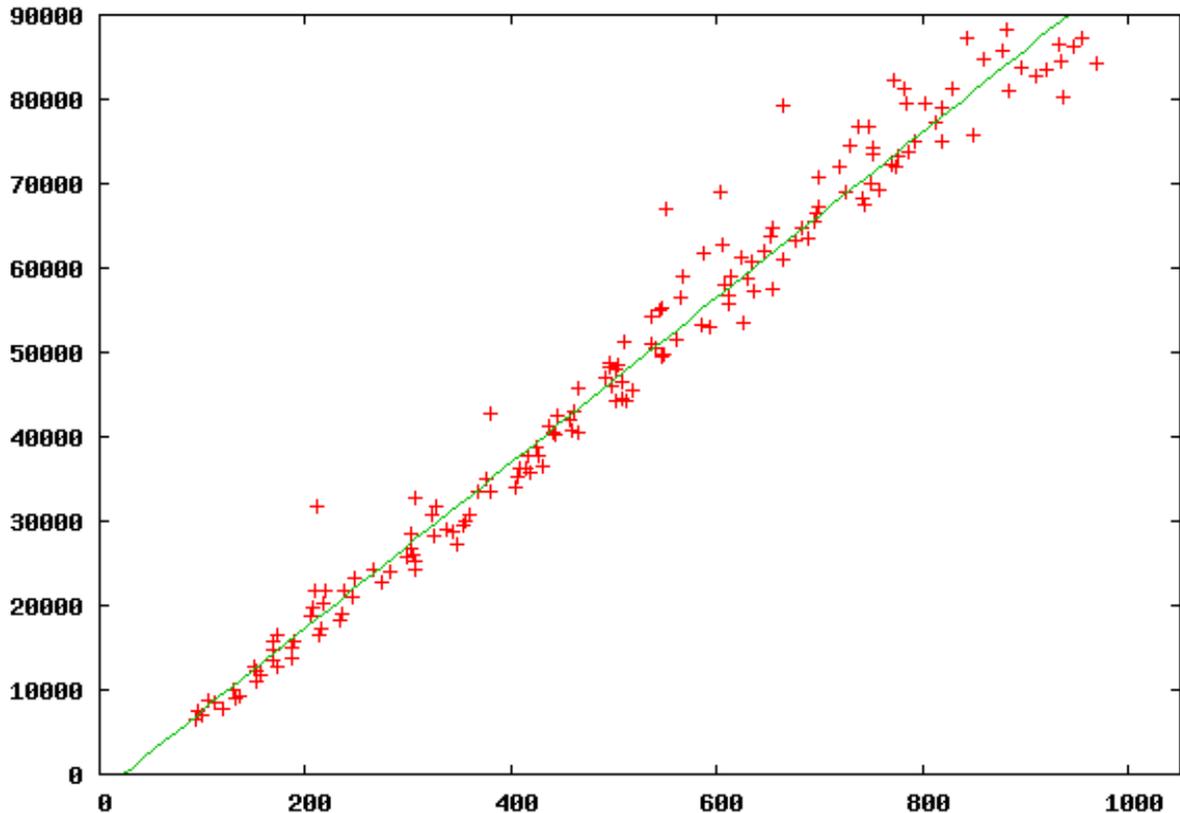
Aus dieser Zusatzinformation können wir mit Hilfe der Formeln des Abschnitts 2.4 die Magnitudenwerte für unsere fernen Galaxien in Abstandswerte umwandeln. Da wir annehmen, dass all diese Objekte und M 87 die gleiche Leuchtkraft L haben, besteht zwischen dem Abstand von der Erde, d , eines dieser Objekte, dem Abstand von M 87 von der Erde d_0 und den Magnituden m und m_0 die Beziehung

$$d = d_0 \cdot 10^{0,2 \cdot (m - m_0)}.$$

So lässt sich der Abstand jeder der anderen hellsten Galaxien berechnen. Trägt man die Werte für $c \cdot z$ gegenüber den Abständen auf, so ergibt sich das folgende Diagramm, wobei x-Werte in Megaparsec, y-Werte in Kilometer pro Sekunde angegeben sind:

²¹

Mei et al. 2007.



Durch diese Verteilung lässt sich entweder mit der Hand und Augenmaß eine Gerade ziehen, oder man kann ein Auswertungsprogramm bemühen, das über lineare Regression die Steigung der Ausgleichsgeraden ermittelt. Ich erhalte unter Verwendung des Programms gnuplot, mit dessen Hilfe ich auch die Grafiken erstellt habe, für die Ausgleichsgerade

$$c \cdot z = H_0 \cdot d + b$$

die Werte $H_0 = (98 \pm 1) \text{ km/s/Mpc}$ und $b = (2255 \pm 669) \text{ km/s}$ (grüne Linie). Wohlgermerkt beziehen sich die angegebenen Ungenauigkeiten nur auf die Güte der Anpassung, nicht auf die systematischen Fehler, die unsere Ableitung zweifellos mit sich bringt; ein Anzeichen dafür ist die Abweichung von b vom erwarteten Wert Null. Die angegebene Unsicherheit in der Distanz von M 87 entspricht einer Unsicherheit von $\pm 1,2 \text{ km/s/Mpc}$ der Hubblekonstante, die (wahrscheinlich zu gering abgeschätzte) Unsicherheit der Petrosian-Magnitude von 0,05 entspricht $\pm 2,3 \text{ km/s/Mpc}$. Die Unsicherheiten durch Auswahleffekte dürften noch größer sein.

Die derzeit genaueste Messung der Hubblekonstante (passender weise mit dem Weltraumteleskop Hubble)²² ergibt $H_0 = (74,2 \pm 3,6) \text{ km/s/Mpc}$. Unser Wert hat davon eine relative Abweichung von 32%; das ist angesichts unserer Vereinfachungen eine durchaus akzeptable Übereinstimmung.

²² Riess et al. 2009.

4 Variationen und Korrekturen

Wie im Text verschiedentlich angedeutet, ist die im vorigen Kapitel vorgezeichnete Auswertung nur eine von vielen möglichen Verfahren. In diesem Kapitel möchte ich einen Überblick darüber geben, was man anders machen kann – ein Vergleich der verschiedenen Möglichkeiten dürfte zwar den Zeitrahmen einer Unterrichtseinheit sprengen, kommt aber beispielsweise für Projektarbeit infrage. Außerdem möchte ich eine Übersicht geben, welche Umstände unsere Auswertung vernachlässigt hat. Von einem astronomischen Fachartikel würde erwartet, dass er alle diese weiteren Einflüsse in Betracht zieht; dieses Kapitel gibt damit auch einen Einblick in die Komplexität tatsächlicher Forschung.

4.1 Verschiedene Auswahlverfahren

Wir haben unsere z -Intervallgröße vergleichsweise willkürlich festgelegt. Haben wir mit der gewählten Größe den Auswahlereffekt – nähere Galaxien erscheinen heller, obwohl sie eine geringere Leuchtkraft haben – ausgeschaltet? Das lässt sich recht direkt überprüfen. Wir halbieren jedes der z -Intervalle; spielt die Entfernung tatsächlich keine Rolle, so sollten im Mittel jeweils 50% der von uns ausgewählten Galaxien in der unteren Hälfte des Intervalls liegen, 50% in der anderen Hälfte. Tatsächlich liegen, über alle Intervalle aufsummiert, deutlich mehr als die Hälfte aller Galaxien in der jeweils unteren Hälfte ihres z -Intervalls; ein klares Zeichen, dass die Entfernung nach wie vor eine Rolle spielt.

Es sind mehrere Möglichkeiten denkbar, hier gegenzusteuern:

1. Wir verkleinern die Intervalle noch weiter. Ab einer gewissen Größe werden, wie oben kurz erwähnt, andersartige Auswahlereffekte auftreten: Dann sind in unseren Intervallen nur noch so wenige Galaxien enthalten, dass es unwahrscheinlich wird, dass tatsächlich eine vom hellsten Typus dabei ist.
2. Wir teilen die Rotverschiebungswerte zweimal auf: einmal in Intervalle von der Größe Δz , das zweite Mal in Intervalle der gleichen Größe Δz , deren Lage allerdings gegenüber der ersten Intervallserie um $\Delta z/2$ verschoben ist. So fallen Galaxien, die in der einen Intervallserie in der oberen Intervallhälfte liegen, in der anderen Serie in die untere Hälfte. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Auswahl. So könnten wir jeder Galaxie im Schnittintervall die Summe ihrer Rangnummern in jedem der beiden Intervallschemata zuordnen, und die Galaxien mit der kleinsten Summe auswählen.

Eine weitere Überlegung betrifft die Art der Objekte, die wir betrachten: elliptische Galaxien, Spiralgalaxien und Verschmelzungsprodukte. Es fällt auf dass die letzten beiden Objektarten nur bei vergleichsweise geringen Rotverschiebungen auftreten: Spiralgalaxien in meinem Datensatz nur bei $z < 0,09$, die entfernteste Verschmelzung bei $z \approx 0,16$. Was bedeutet das? An dieser Stelle ist es notwendig, sich zu überlegen, was gleich große z -Intervalle eigentlich bedeuten. Wenn die Hubble-Relation gilt, dann ist z proportional zum Abstand. $(z+\Delta z)^3 - z^3$ ist damit proportional zum Volumen, in dem alle Galaxien zwischen Rotverschiebung z und Rotverschiebung $z+\Delta z$ liegen (nämlich zu dem Volumen einer Kugelschale mit äußerem Radius proportional zu $z+\Delta z$, innerem Radius proportional – gleicher Proportionalitätsfaktor – zu z). Damit gilt: Das Volumen beispielsweise, das dem z -Intervall von $z=0,16$ bis $z=0,165$ entspricht, ist genau so groß wie das Volumen des rund drei Mal größeren z -Intervalls von $z=0,085$ bis $z=0,1$. Das legt nahe, dass wir es mit einem **Stichprobeneffekt** zu tun haben: Die Intervalle, die wir bei kleinen z -Werten betrachten, entsprechen zu kleinen Volumina, als dass wir dort mit hinreichender Wahrscheinlichkeit erwarten können, hinreichend viele Vertreter der hellst möglichen Galaxien zu finden. Unsere Stichproben in diesem z -Bereich sind nicht repräsentativ. Erst bei den größeren Volumina der höheren z -Werte gehen uns in jedem z -Intervall jeweils genügend hellste Galaxien ins Netz; daher finden wir dort auch keine der – absolut gesehen weniger leuchtkräftigen – Spiralgalaxien oder Verschmelzungsobjekte mehr.

Eine weitere Modifikation bestünde demnach darin, insbesondere bei großen z die z -Intervalle so zu verändern, dass wir unsere hellsten Galaxien immer aus einem gleich großen Volumen auswählen. (Dass wir bei großen z -Werten nur noch aus vergleichsweise wenig Einträgen auswählen, ist nicht so schlimm, wie es sich zunächst anhört – da die hellsten Objekte am besten sichtbar sind, haben die Beobachtungen hier bereits eine Vorauswahl getroffen, die unseren Bemühungen, die hellsten Objekte zu bestimmen, nicht entgegensteht.) Auch bei solchermaßen angepassten z -Intervallen müssen wir zusätzlich aufpassen, dass wir nicht innerhalb jedes Intervalls bevorzugt die nahen Galaxien auswählen.

Eine Möglichkeit, beide Probleme zu umgehen, besteht darin, zu iterieren. Der bei unserem ersten Durchgang gewonnene Näherungswert für die Hubble-Konstante erlaubt es uns, Rotverschiebungen in Distanzen umzurechnen; aus den Distanzen wiederum können wir die Leuchtkräfte der verschiedenen Galaxien direkt berechnen, und aus dem gesamten Datensatz die Galaxien mit der größten Leuchtkraft herausuchen. Für diese Galaxien berechnen wir nun ein zweites Mal die Hubble-Konstante. Wir können das Verfahren wiederholen, bis die so gewonnene Hubble-Konstante sich nicht mehr nennenswert verändert.

4.2 Was wir vernachlässigt haben

Wie nun schon mehrmals angesprochen, haben wir bei unserer vereinfachten Auswertung eine Reihe von Effekten vernachlässigt.

Wir haben die Hubble-Relation für die Lichtlaufzeit-Entfernung bestimmt, bei unserer Auswertung allerdings die Helligkeits-Entfernung eingesetzt. Die Unterschiede entsprechen einer Hubble-Relation, die zusätzliche Terme quadratisch in z erhält. Solche Terme sind bei z -Werten bis $z = 0,3$ vergleichsweise klein, können aber zu Abweichungen führen.²³

Unsere Helligkeitsmessung fand durch ein bestimmtes Filter statt. Betrachtet man Objekte einer bestimmten Gattung bei unterschiedlichen Rotverschiebungen, so macht sich bemerkbar, dass ein und dasselbe Filter bei diesen Objekten unterschiedliche Regionen des Spektrums betrachtet. Dies wird in der Astronomie durch die so genannte K-Korrektur berücksichtigt; bei unseren z -Werten ist anzunehmen, dass derlei Korrekturen bereits eine Rolle spielen.²⁴

Unsere Analyse beruht auf der Annahme, dass die hellsten (elliptischen) Galaxien überall im Weltall gleich hell sind. Doch tatsächlich ist jeder Blick ins ferne Weltall ein Blick in die Vergangenheit. Nach unserer Rechnung (Hubble-Relation!) sind die fernsten der Galaxien, die wir betrachtet haben, rund 1000 Mpc oder 3 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt. Grob überschlagen hat das Licht dieser Galaxien demnach 3 Milliarden Jahre gebraucht, um uns zu erreichen; dementsprechend zeigen uns unsere Aufnahmen diese Galaxien so, wie sie vor 3 Milliarden Jahren aussahen. In den gängigen Modellen der Galaxienentstehung gibt es dabei zwei gegenläufige Effekte. Zum einen wachsen Galaxien mit der Zeit immer weiter an, indem sie sich kleinere Galaxien einverleiben. Wäre dies die einzige Änderung, wäre anzunehmen, dass Galaxien in früheren Zeiten – und damit die Galaxien, die wir bei großen Rotverschiebungen beobachten – weniger hell sind als Galaxien bei geringeren Rotverschiebungen, die wir in einem Zustand sehen, in dem sie bereits deutlich älter sind. Tatsächlich kommt ein weiterer Effekt hinzu. Elliptische Galaxien, wie wir sie hier betrachten, bilden kaum neue Sterne; andererseits erreichen im Laufe der Zeit immer mehr der vorhandenen Sterne das Ende ihres Brennstoffvorrats, und sie verlöschen. Ginge es allein hiernach, müssten die entfernteren Galaxien, die wir in einem jüngeren Stadium sehen, *heller* sein als die nahen. Tatsächlich gleichen sich diese beiden Entwicklungseffekte zum Teil aus. Wie sie angemessen zu berücksichtigen sind, ist Teil der aktuellen Forschungsdiskussion, und übersteigt bei weitem das, was wir mit einfachen Mitteln nachvollziehen können.

²³ Z.B. Rindler 2001, Abschnitte 17.1, 17.2 und 17.5.

²⁴ Hogg et al. 2002.

Der Raum zwischen den Galaxien ist vergleichsweise, aber nicht vollständig leer. Er enthält – insbesondere in, zum Teil aber auch außerhalb von Galaxienhaufen – das *intergalaktische Medium*, mit Dichten von 10 bis 1000 Wasserstoffatomen pro Kubikmeter. Im Prinzip absorbiert es einen Teil der Strahlung ferner Galaxien; deren Helligkeit sollte daher mit dem Abstand etwas stärker abnehmen als nur mit $1/r^2$. Tatsächlich spielt dieser Effekt bei Betrachtungen wie den unsrigen nur eine untergeordnete Rolle. Wir müssen aber festhalten, dass wir ihn nicht systematisch berücksichtigt haben.²⁵

Wir hatten oben bereits kurz erwähnt, dass sich das Sonnensystem relativ zum Bezugssystem der kosmischen Expansion bewegt. Dies bewirkt eine systematische Verschiebung der Rotverschiebungen; bei Galaxien, die in unserer Bewegungsrichtung liegen, ist die von der Erde aus gemessene Rotverschiebung etwas weniger als die Rotverschiebung, die für den Hubble-Effekt eine Rolle spielt, bei Galaxien in der entgegen gesetzten Richtung etwas mehr. Eine genaue Analyse muss auch diesen Effekt berücksichtigen.

4.3 Andere Filter, andere Magnituden und die lineare Ausdehnung von Galaxien

Die hier verwendete Petrosian-Magnitude ist in Anhang 0 näher beschrieben. Wir haben das r-Filter verwendet, das vergleichsweise langwellig ist – ein Vorteil dieser Wahl wird weiter unten in diesem Abschnitt im Zusammenhang mit der K-Korrektur beschrieben. Andere Wahlen sind möglich; die fünf SDSS-Filter sind, vom blauen bis zum roten Bereich des Spektrums hin aufgezählt, u, g, r, i und z. Ersetzt man in der SQL-Abfrage `petroMag_r` durch `petroMag_g`, so erhält man die Petrosian-Magnitude, aufgenommen durch das g-Filter, und analog für die anderen Filter.

Weitere mögliche Magnitudendefinitionen sind wie folgt: `expMag_r` nähert den Helligkeitsverlauf (Filter r) durch eine Exponentialfunktion $I_0 \cdot \exp(-r/r_0)$ des Winkelabstands r vom Zentrum der Galaxie an und berechnet daraus eine Gesamthelligkeit, die nach de Vaucouleurs benannte Magnitude `deVMag_r` nähert den Verlauf durch $I_e \cdot \exp[-7,67 \cdot ((r/r_e)^{0,25} - 1)]$. Der exponentielle Verlauf entspricht näherungsweise den Verhältnissen bei Spiralgalaxienscheiben, der de Vaucouleurs-Verlauf den Verhältnissen bei elliptischen Galaxien. Bei der Berechnung von `modelMag_r` werden beide Helligkeitsprofile ausprobiert und dann das am besten passende ausgewählt. Ersetzt man den Zusatz `_r` durch die Bezeichnung eines der anderen vier Filter, erhält man die entsprechende Magnitude.

Auch die lineare Ausdehnung von Galaxien lässt sich als Maß für ihre Entfernung verwenden – analog dazu, wie wir die hellsten Objekte betrachtet und aus ihrer relativen Lichtschwäche auf ihre Entfernung geschlossen haben, kann man die ausgedehntesten Objekte auswählen, annehmen, dass sie aus der Nähe betrachtet alle die gleiche Ausdehnung haben, und daraus, dass sie am Himmel unterschiedlich klein erscheinen, ihre Entfernung ermitteln. Hierzu kann man aus dem SDSS Größen wie `petroR50_r` abrufen, den Winkelradius, der 50 Prozent des mit der Petrosian-Magnitude assoziierten Strahlungsflusses eines Objekts enthält, oder `petroR90_r`, den Winkelradius, der 90 Prozent enthält, oder `petroR_r`, den in Anhang 0 definierten Petrosian-Radius. Der oben definierte charakteristische Radius r_0 der Exponentialverteilung ist über `expRad_r` abrufbar, und der charakteristische Radius r_e der de Vaucouleurs-Verteilung über `deVRad_r`. Wiederum erhält man, ersetzt man den Zusatz `_r` durch die Bezeichnung eines der anderen vier Filter, die entsprechenden Größen für diese Filter.

²⁵ Vgl. More et al. 2009.

Danksagung

Ich danke Arjen van der Wel, Mark Sargent und Bradford Holden für hilfreiche Diskussionen und Arjen für die kritische Durchsicht einer früheren Version dieses Textes.

Anhang

A Die Petrosian-Magnitude

Es ist keine triviale Aufgabe, einem ausgedehnten Objekt – wie einer Galaxie – eine Magnitude zuzuordnen, die keine weitere, versteckte Abstandsabhängigkeit ins Spiel bringt. Eine Möglichkeit bietet die hier vorgestellte Petrosian-Magnitude.²⁶

Angenommen, wir betrachten ein ausgedehntes Himmelsobjekt, dessen Mittelpunkt sich hinreichend eindeutig bestimmen lässt. Im Folgenden sei r der Abstand von diesem Mittelpunkt, gemessen als Winkel (typischerweise in der Größenordnung von Bogensekunden). Dann ist das Petrosian-Verhältnis $P(r)$ zum Abstand r definiert als das Verhältnis des Strahlungsflusses der Region innerhalb eines Kreisrings mit innerem Radius $0,8 \cdot r$ und äußerem Radius $1,25 \cdot r$ zum mittleren Strahlungsfluss der Region innerhalb der Kreisfläche mit Radius r . Der *Petrosian-Radius* r_p ist dann definiert als derjenige Radius, bei dem $P(r_p) = 0,2$ gilt. Der *Petrosian-Strahlungsfluss* ist der Strahlungsfluss der kreisförmigen Region mit Radius $2 \cdot r_p$; die *Petrosian-Magnitude* ist die zugehörige Magnitude.

Die konkreten Zahlenwerte für die Kreisringradien, das den Petrosian-Radius definierende Verhältnis und den Radius der Region, über die zur Messung des Petrosian-Strahlungsflusses summiert wird, sind Konvention. Die Zahlenwerte sind so gewählt, dass sie ein robustes Maß für die Magnitude liefern, das z.B. gegenüber Helligkeitsschwankungen innerhalb der Galaxie vergleichsweise unabhängig ist. Wichtig ist an dieser Definition, dass sie nicht von der Gesamthelligkeit der Galaxie abhängt – nur von ihrem intrinsichen Helligkeitsprofil.

Um den Referenzwert für M 87 zu finden, habe ich die Angaben in Artikeln, die über Messungen der Helligkeitsprofile von Galaxien inklusive M 87 berichten, mit einer Helligkeitsmessung kombiniert, die mit dem für unsere Auswertung maßgeblichen Filter r vorgenommen wurde. Die erste Arbeit ist die von Ferrarese et al. (2006), in der in Tabelle 3 die Parameter eines so genannten Sersic-Helligkeitsprofils $I_e \cdot \exp[-b_n \cdot ((r/r_e)^{1/n} - 1)]$ mit $b_n = 1,992 \cdot n - 0,3271$ angegeben werden. Die Parameter werden allerdings nur für die Filter g und z angegeben. Ich übernehme daher nur die Formparameter und wähle dafür den Mittelwert der (nicht sonderlich voneinander abweichenden) Parameter für g und z -Messungen an M 87, nämlich $n = 6,06$ und $r_e = 164$ Bogensekunden. Um I_e zu erhalten, verwende ich eine durch Suche in der NASA/IPAC Extraterrestrial Database ergibt einen Messwert für eine Helligkeitsbestimmung, die mit dem gleichen Filter r wie die SDSS-Messungen vorgenommen wurde (siehe Link auf <http://www.mpia.de/home/poessel/wishubble/index.html>), bei einer Öffnung von 30,1 Bogensekunden. Aufintegrieren des Intensitätsprofils bis zu dieser Öffnung ergibt durch Vergleich einen Wert für I_e . Damit ist das vollständige Intensitätsprofil bekannt; folgt man dem oben angegebenen Rezept für die Petrosian-Magnitude erhält man $m = 8,4$. Zum Vergleich habe ich das gleiche Verfahren mit dem in Cappellari et al. (2006) in Tabelle angegebenen charakteristischen Radius $r_e = 105$ Bogensekunden für ein de Vaucouleurs-Intensitätsprofil (s.o.), nämlich $I_e \cdot \exp[-7,67 \cdot ((r/r_e)^{0,25} - 1)]$ durchgeführt und erhalte $m = 8,3$. Ich bilde den Mittelwert der Flüsse und werte die Abweichungen der beiden Teilergebnisse von diesem Mittelwert als Maß für die Unsicherheit: $m = 8,35 \pm 0,05$.

26 Die Darstellung folgt Strauss et al. 2002, wo die beim SDSS verwendete Definition vorgestellt wird.

5 Literatur

- Bellmann, A. und H. Bernhard (2008): „Kosmologie im Unterricht der Sekundarstufe I“ in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* **45(5)**, S. 4–7.
- Buchert, T. (2008): „Dark Energy from structure – a status report“ in *General Relativity and Gravitation* **40**, S. 467 – 527.
- M. Cappellari et al. (2006): “The SAURON project - IV. The mass-to-light ratio, the virial mass estimator and the Fundamental Plane of elliptical and lenticular galaxies” in *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **366**, S. 1126–1150.
- Doran, M. (2007): „Geheimnisvolle Dunkle Energie“ in: *Sterne und Weltraum* 11/2007, S. 42–51.
- Duerbeck, H. W. (2008): „Die Rotverschiebung – der Schlüssel zur modernen Kosmologie“ in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* **45(5)**, S. 34–38.
- Ferrarese, L., et al. (2006): „The ACS Virgo Cluster Survey. VI. Isophotal Analysis and the Structure of Early-Type Galaxies“ in *Astrophysical Journal Supplement Series*, **164**, S. 334–434.
- Freedman, W.L. et al. (2001): „Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant“ in *Astrophysical Journal* **553**, S. 47–72.
- Fukugita, M., et al. (1996): „The Sloan Digital Sky Survey Photometric System“ in *Astronomical Journal* **111**, S.1748–1756.
- Hogg, D. W., et al. (2002): „The K correction.“ <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0210394>
- ISB (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, Hg., 2009): *Grundlagen der Astrophysik. Handreichungen für den Unterricht der gymnasialen Oberstufe*.Brigg Pädagogik: Augsburg. ISBN: 978-3-87101-486-4.
- Kessler, R., et al. (2009): „First-year Sloan Digital Sky Survey-II (SDSS-II) Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters.“ <http://arxiv.org/abs/0908.4274>
- Klein, U. et al. (2005): „Galaxien und Dunkle Materie: neue Sichtweisen“ in *Sterne und Weltraum* 9/2005, S. 28–36.
- Leibundgut, B. (2005): „Helle Sterne im dunklen Universum – Kosmologie mit Supernovae vom Typ Ia“ in *Sterne und Weltraum* 5/2005, S. 30–37.
- Lotze, K.-H. (2002a): „Kosmologie“ in: Kircher, E.; Schneider W.B. (Hrsg.): *Physikdidaktik in der Praxis*, 71–102. Springer-Verlag: Berlin u.a.
- Lotze, K.-H. (2002b): „Die Kinematik kosmologischer Modelle“ in *Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule* **51(3)**, S. 2–11.
- Mei, Simona et al. (2007): „The ACS Virgo Cluster Survey. XIII.“ in *Astrophysical Journal* **655**, S. 144–162.
- More, S., J. Bovy und D. Hogg (2009): “Cosmic Transparency: A Test with the Baryon Acoustic Feature and Type Ia Supernovae“ in *Astrophysical Journal* **696**, S. 1727–1732.
- Nussbaumer, H. und L. Bieri (2009): *Discovering the Expanding Universe*. Cambridge University Press: Cambridge. ISBN: 978-0-521-51484-2.
- Nussbaumer, H. (2007): „Achtzig Jahre expandierendes Universum“ in *Sterne und Weltraum* 6/2007, S. 36–44.
- Phleps, S. (2009): „Schallwellen in der Ursuppe“ in *Sterne und Weltraum* 10/2009, S. 30–39.
- Price, R.H. und E. Grover (2001): „Cosmological expansion in the classroom“ in *American Journal of Physics* **60(2)**, S. 125–128.
- Riess, A., et al. (2009): „A Redetermination of the Hubble Constant with the Hubble Space Telescope from a Differential Distance Ladder.“ <http://arxiv.org/abs/0905.0695>

Rindler, W. (2001): *Relativity - Special, General and Cosmological*. Oxford University Press: Oxford. ISBN: 0-19-850836-0.

Schneider, Peter (2007): „Die Grundfragen der Kosmologie“ in *Sterne und Weltraum* 7/2007, S. 44–52.

Strauss, M. A., et al. (2002): „Spectroscopic Target Selection in the Sloan Digital Sky Survey: The Main Galaxy Sample“ in *Astronomical Journal* **124**, S. 1810–1824.

Tauber, J., M. Bersanelli und J.-M. Lamarre (2008): „Die Planck-Mission“ in *Sterne und Weltraum* 2/2008, S. 38-55.

Wackermann, W. (2006): „Die astronomische Entfernungsleiter“ in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* **43(6)**, S. 14–18.