

Wie misst man eigentlich die Entfernung zu anderen Galaxien?

Autor(en): **Bütikofer, Markus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **61 (2003)**

Heft 314

PDF erstellt am: **24.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898376>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Wie misst man eigentlich die Entfernung zu anderen Galaxien?

MARKUS BÜTIKOFER

Eine einfache Frage...

Immer wieder stellen Besucher einer Sternwarte die Frage, woher man eigentlich weiss, wie weit die Sterne, die Galaxien oder andere Objekte von uns entfernt sind.

Im Grunde eine einfache Frage – erfordert sie jedoch eine mehr oder weniger umfangreiche Antwort. Denn die Thematik ist sehr komplex: Von Parallaxenmessungen über Cepheiden-Sterne zu Supernovae und vielen weiteren Teilgebieten der Astronomie...

Ein Laie mit beschränkten Vorkenntnissen könnte bei den Erklärungsversuchen des Demonstrators sehr schnell überfordert werden, was die Kunst, eine kurze und verständliche Antwort zu geben, wesentlich erschwert; zumal das Thema für den Amateurastronomen auch einen «harten Brocken» darstellt. Kein Wunder, denn die besten Astronomen, ausgestattet mit den modernsten Messgeräten, haben auch ihre liebe Mühe damit und streiten sich noch heute über die zu favorisierenden Theorien.

Klar ist, dass viele Details, die mit Entfernungsbestimmungen im Weltall zusammenhängen, noch unsicher oder sogar unbekannt sind. Aber auch klar ist, dass in den letzten 10 Jahren ein gewaltiger Sprung in der Zuverlässigkeit von Entfernungsangaben gemacht werden konnte. Die wichtigsten Hilfsmittel dabei waren 2 Satelliten im Erdorbit: Hipparcos und Hubble.

Hipparcos mass von 1989 – 1993 die Positionen von mehr als 2,5 Millionen Sternen extrem genau, bei 100 000 Sternen sogar mit einer Genauigkeit von einer Milli-Bogensekunde! Aus diesen Daten erhielten die Astronomen sehr präzise Entfernungswerte vieler Sterne – was die Basis lieferte für das in diesem Artikel beschriebene Projekt mit dem Hubble-Weltraum-Teleskop.

Das Hubble-Schlüsselprojekt

Mit dem Aussetzen des Hubble-Teleskops in der Erdumlaufbahn am 25. April 1990 hatten die Astronomen endlich das langersehnte Gerät zur Verfügung, mit welchem sie Sterne in anderen, fernerer Galaxien (als die aller-nächsten) entdecken konnten.

Die wichtigste Aufgabe der Hubble-Mission sollte sein, Cepheiden-Sterne in anderen Galaxien zu entdecken und deren Helligkeit sowie die dazugehörige Periodendauer zu messen.

Cepheiden-Sterne sind veränderliche Sterne, die ihre Helligkeit periodisch ändern, wobei die Periodendauer mit der absoluten Leuchtkraft der Sterne gekoppelt ist. Sie nehmen deshalb für die Astronomen die Funktion von Standard-Kerzen ein. Man misst die Periodendauer und weiss, wie hell ein solcher Stern in Wirklichkeit ist. Vergleicht man diese absolute Helligkeit mit seiner scheinbaren Helligkeit, kann daraus seine Entfernung einfach hergeleitet werden.

Alles ganz einfach? Im Prinzip schon, nur versperrt die Realität leider mit vielen Stolpersteinen den Weg. Wir werden sehen...

Das Hubble-Schlüsselprojekt hatte zum Ziel, die Hubble-Konstante auf $\pm 10\%$ genau zu bestimmen.

Die Hubble-Konstante ist eine Zahl, die aussagt, um wie viel schneller sich eine Galaxie von uns fortbewegt, je weiter sie von uns entfernt ist. Die Hubble-Konstante wird in Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec angegeben, wobei 1 Megaparsec 3,26 Millionen Lichtjahre ist.

Seit der Entdeckung der Radialgeschwindigkeiten der Galaxien und somit der Entdeckung der Ausdehnung des Universums, weiss man, dass sich die Galaxien von uns wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie entfernt sind. Nur stritten sich die Astronomen seit diesen Entdeckungen um den Betrag der Hubble-Konstante.

Denn ob die Hubble-Konstante nun 100 km/sec/Mpc oder 50 km/sec/Mpc beträgt hat weitreichende Folgen: Sie bestimmt im wesentlichen das Alter und die Grösse des Universums!

Diesen seit 70 Jahren währenden Streit um den Betrag der Hubble-Konstante wollte und konnte man mit dem Hubble-Teleskop endlich auf $\pm 10\%$ einschränken; hierfür wurde jedoch ein Projekt mit besonderer Priorität benötigt – das Hubble-Schlüsselprojekt.

Ein Team von 28 Astronomen untersuchte mit dem Hubble-Teleskop von 1991 – 1999 insgesamt 18 auserwählte Spiralgalaxien, wobei besonderer Wert auf die Position dieser Galaxien gelegt wurde. Sie sollten nämlich möglichst über den ganzen Himmel verstreut sein, um später ein allgemeingültiges Resultat zu erhalten.

Wie diese Untersuchungen nun genau ablaufen, soll am Beispiel der zweiten beobachteten Galaxie, der grossen und jedem Amateurastronomen vertrauten Galaxie im Grossen Bären, M101, erzählt werden.

Cepheidenjagd in M101

Für die Cepheiden-Suche in M101 hatten sich die Astronomen einen Zeitrahmen von 260 Tagen vorgestellt. Der Plan war, während 14 verschiedenen Beobachtungsintervallen im Frühling, Sommer und Herbst 1993 genügend Fotos mit dem Hubble-Teleskop zu machen, um daraus neue Cepheiden herauslesen zu können.

Beobachtungsstart war am 2. März 1993. Fotografiert wurden 4 je 1,25 mal 1,25 Bogenminuten «grosse» Regionen im äussersten, westlichen Spiralarm der Galaxie. Die 4 Felder entsprechen den Gesichtsfeld der 4 Hubble-CCD-Sensoren.

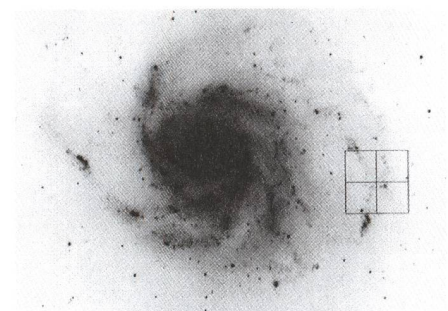


Bild 1: Spiralgalaxie M101 mit Beobachtungsfeldern des HST (rechts).

Trotz des lichtstarken Hauptspiegels von 2,4 Metern Durchmesser mussten recht lange Belichtungszeiten gewählt werden, denn einzelne Sterne in einer anderen Galaxie registrieren zu können, ist selbst für das Hubble-Teleskop nicht einfach.

In der Frühlings-Beobachtungsspanne wurde eine totale Belichtungszeit (alle Einzelfotos zusammen) von 1 Stunde 3 Minuten und 20 Sekunden erreicht (3800 Sekunden), im Sommer waren es 1 Stunde 20 Minuten (4200 Sekunden) und im Herbst nochmals soviel.

Aufgrund der Kosmischen Strahlung, der das Hubble-Teleskop in seiner Umlaufbahn um die Erde ausgesetzt ist, enthält jedes Foto «Kratzer», welche einzelne Himmelsobjekte überdecken können. Deshalb wird generell jedes «Einzelfoto» in 2 gleich lange, unmittelbar nacheinander belichtete Aufnahmen, geteilt. So können in der nachfolgenden Computerauswertung die Effekte der kosmischen Strahlung wegretuschiert werden, da die «Einschläge»

nach dem Zufallsprinzip auftreten und sie deshalb (meistens) nicht 2 mal am genau gleichen Ort «Kratzer» hinterlassen. Falls doch, benötigt man zusätzliche Fotos.

Bis Ende Herbst 1993 hatte man 108 Aufnahmen gemacht; 100 Fotos durch einen Grünfilter (555 Nanometer) und 8 Fotos durch einen Infrarot-Filter (814 Nanometer) belichtet.

Leider gingen partiell Daten mehrerer Fotos verloren, weil sich das Hubble-Teleskop während den Beobachtungen unvorhergesehen in einen Sicherheitsmodus schaltete oder plötzlich andere technische Probleme eintraten.

Deshalb wurde beschlossen, die verlorenen Daten nachzuholen und die Datenmenge sogar noch zu erhöhen. Im Februar, März und April 1994 belichtete das Hubble-Teleskop wieder dieselben Regionen in M101. Weil den Astronomen dabei aber die Temperatur der CCD-Sensoren von -76°C zu hoch war, wurde eine weitere Beobachtungsperiode im März und April 1995 addiert. In dieser Zeit operierten die CCD-Chips des Hubble-Teleskops bei -88°C , was den Astronomen im Hinblick auf das elektronische Rauschen weit besser gefiel.

Die zwei angehängten Beobachtungsintervalle generierten insgesamt 56 zusätzliche, qualitativ weit bessere Fotos, weil sie mit der im Dezember 1993 installierten neuen Kamera geschossen werden konnten. Bei der «Service-Mission Nummer 1», mit CLAUDE NICOLLIER als Roboterarm-Führer, installierten die Astronauten auch die Korrektur-Optik für den falsch geschliffenen Hubble-Hauptspiegel, was dem Teleskop von da an eine weit schärfere Sicht gab.

28 der neuen Fotos wurden mit Grünfilter gemacht, 20 mit Infrarot-Filter und 8 mit einem Blaufilter (439 Nanometer). Die gesamte Belichtungszeit dieser Fotos belief sich auf 3 Stunden 5 Minuten (11 100 Sekunden).

Datenaufbereitung

Das Astronomenteam begann mit der Auswertung der 108 Bilder, die noch mit der alten Kamera gemacht wurden, schon bevor die zusätzlichen 56 Fotos mit der neuen Kamera belichtet waren.

Zuerst verglich man alle infolge der Kosmischen Strahlung angefertigten Fotopaare mit einem speziell für diesen Zweck erfundenen Computerprogramm. Damit waren fast alle «Kratzer» auf den Bildern wegretuschiert. Das Programm übertrug ausserdem alle gefundenen Objekte eines Fotos mit deren Positionen (Koordinaten auf einzelner Foto) in einen Haupt-Sternenkatalog

mit eigenem, für alle Fotos umgerechneten Koordinatensystem.

Nachdem so alle Objekte der 108 Fotos im Haupt-Sternenkatalog erfasst waren, schickte man diese ungeheure Datenmenge durch ein zweites Computerprogramm, welches weitere unbrauchbare Objekte aussortieren konnte. Dies waren beispielsweise unaufgelöste Sternhaufen, Hintergrundgalaxien oder Strichspuren um hellere Sterne. Simultan zum Aussortieren bestimmte das Programm auch alle Helligkeiten der erhaltenen Objekte. Weil jeder CCD-Chip seinen eigenen Charakter hat, und die Licht-Empfindlichkeit der 4 Sensoren mit jeweils 800×800 Pixel auch über die einzelnen Pixelflächen variieren konnte, musste das Programm bei der Helligkeitsbestimmung auch noch diese potentielle Fehlerquelle berücksichtigen. Das Verhalten der CCD-Chips hatte man vorher am Kugelsternhaufen NGC 1850 ausgetestet.

Aufgrund der riesigen Datenmenge dauerte die Datenreduktion und Auswertung mit dem zweiten Programm auf einem *Sun Sparc 2* Computer ganze 4 Wochen! Der daraus resultierende Sternenkatalog liess sich aber sehen: Das Programm fand mehr als 23 000 einzelne Sterne!

Nachdem die nächsten 56 Fotos zur Verfügung standen, verarbeitete man ihre Daten auf die gleiche Weise. Dabei benutzten die Astronomen 4 alte Bilder, um die Daten der neuen Fotos mit dem schon erstellten Sternenkatalog abzustimmen. Zum Eichen der Helligkeitsbestimmungen der Einzelsterne verfügte man über Testdaten an den Kugelsternhaufen ω Centauri, Palomar 4 und NGC 2419, weil ja schliesslich die CCD-Chips der neuen Kamera einen anderen Charakter aufwiesen als bei der alten Kamera.

Die Helligkeitskalibrierung war eine sehr wichtige, aber aufwendige Sache: Zusätzlich zur Komplizierung infolge der sphärischen Aberration, ausgelöst durch den fehlerhaft geschliffenen Hauptspiegel des Teleskops, mussten Temperaturunterschiede, Fokuspunkt-Verschiebungen, verschiedene Belichtungszeiten, die elektrischen Ladungen der CCD-Sensoren und, wie schon erwähnt, deren Charakter sowie auch die Eigenheiten der unterschiedlichen Kameras berücksichtigt werden. Denn von der korrekten und möglichst genauen Helligkeitsbestimmung der Einzelsterne hing schliesslich das Endresultat ab, die präzise Entfernungsbestimmung zu M101.

Unter Berücksichtigung all dieser Störgrössen befand das Astronomenteam, dass der maximal mögliche Helligkeitsfehler im grünen Licht $\pm 0,06$ und im roten Licht $\pm 0,04$ Magnituden betrage.

Endlich hatte man die Voraussetzung für eine erfolgreiche Cepheidsuche erreicht; alle Fotos waren 100% vergleichbar kalibriert, die Sterne waren erfasst und die Störeffekte berücksichtigt. Jetzt konnte die Suche beginnen.

Neue Cepheiden

Zwei Methoden wurden für die Cepheidsuche verwendet:

1. Die Suche nach Helligkeitsunterschieden innerhalb einer Beobachtungsspanne zur Entdeckung kurzperiodischer Veränderlicher.
2. Die Suche nach Helligkeitsunterschieden über mehrere Beobachtungsspannen hinweg zur Entdeckung langperiodischer Veränderlicher.

Die beiden Methoden bedeuten also, dass die Daten von Fotos mit verschiedenen Zeitabständen miteinander verglichen werden.

Zwei verschiedene Computerprogramme wurden für diese Aufgabe eingesetzt. Die zwei Programme sollten die Sicherheit erhöhen, dass wirklich veränderliche Sterne entdeckt werden und nicht irgendwelche Zufallsergebnisse. In den Daten waren beispielsweise immer noch Effekte der kosmischen Strahlung vorhanden, denn das Retuschieren hatte ja nur beim Vergleich zweier Bilder stattgefunden. Prallte aber an gleicher Stelle zufälligerweise mehrmals ein kosmisches Partikel auf den CCD-Chip, konnte das erste Programm das nicht erkennen. Im weiteren gab es auch defekte Pixel, die auch das Bild eines Sternes imitieren konnten.

Hatte nun das eine Programm eine Helligkeitsvariation entdeckt, musste dies auch das andere Programm erkennen, ansonsten schied dieser «Variable» aus.

Eine weitere Sicherheit ergab sich, indem man die Grün-Daten mit den Infrarot-Daten verglich: Eine Helligkeitsveränderung im grünen Licht musste auch eine Helligkeitsveränderung im Infraroten zur Folge haben, sonst schied auch dieser Kandidat aus.

Für die Endauswahl kamen auch nur Veränderliche in Frage, die auf mindestens 16 Fotos erschienen. Die nach solch strengen Kriterien von beiden Programmen gefundenen Sterne wurden anschliessend von den Astronomen persönlich in Augenschein genommen, wobei sich zwei Gruppen gegenseitig überprüften. Auch sie mussten in ihrem Urteil übereinstimmen.

Nach all diesen Tests und der visuellen Inspektion blieben von den vielen Tausend Sternen gerade 29 übrig! 29 Cepheiden! Die entscheidenden 29.

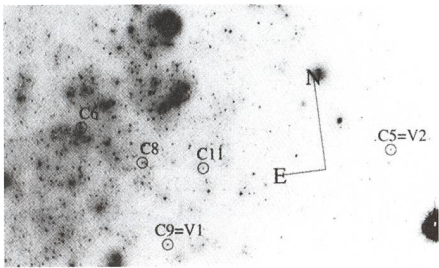


Bild 2: Ausschnitt aus Hubble-Foto mit eingekreisten Cepheiden.

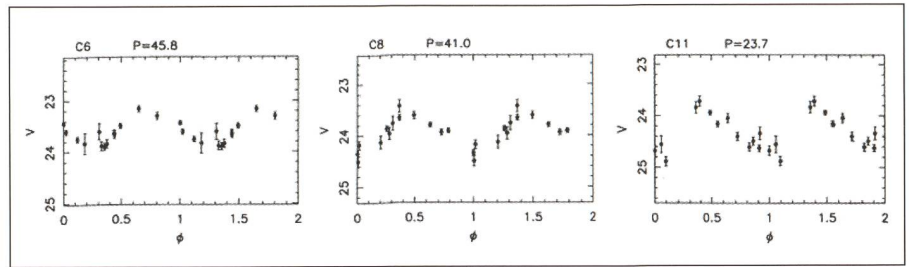


Bild 3: Helligkeitskurven von 3 Cepheiden aus Bild 2. Periodendauer P ist oben in Tagen angegeben.

Zwei der 29 neuen Cepheiden stellten sich als Wiederentdeckung heraus. Die Cepheiden Nummer 5 und Nummer 9 (siehe Bild 2) waren seit 1986 bekannt. Ihre Periodendauer konnte jedoch durch Hubble verfeinert werden.

Die 29 gefundenen Cepheiden haben folgende Eigenschaften:

- Periodendauer: Zwischen 13 und 58 Tagen
- Mittlere Helligkeit: Zwischen 23,29 und 25,08 Magnituden (scheinbare Helligkeit!)

Das Astronomenteam schätzte, dass im beobachteten Gebiet nur ca. 50% aller Cepheiden gefunden wurde. Gründe dafür sah man darin, dass einige Cepheiden sich in Sternhaufen oder nahe anderen Sternen versteckt hielten, so dass sie nicht erkannt werden konnten, oder dass aufgrund nicht optimaler Zeitabstände bei der Beobachtung mit dem Hubble-Teleskop einige Cepheiden gerade keine erkennbaren Helligkeitsunterschiede aufwiesen.

Distanz zu M101

Nun könnte man annehmen, dass die Distanz zu M101 aus den Helligkeiten der gefundenen Cepheiden einfach zu bestimmen wäre, wenn man sie nur mit einigen «Eich-Cepheiden» vergleicht.

Leider ist diese Annahme falsch. Die Realität ist einfach etwas komplizierter. Sogar wesentlich komplizierter. Bevor die Wissenschaftler zu einer fundierten Entfernungsangabe von M101 in der Lage waren, bedurfte es zuerst unständlicher Bestimmungen oder Abschätzungen von Fehlertoleranzen.

Die erste Fehlerquelle ist die auch bei Amateurastronomen bekannte interstellare Extinktion. Das Licht einer anderen Galaxie oder deren Objekten wird beim Durchgang durch interstellare Räume in unserer Galaxie abgeschwächt. Gründe hierfür können Molekülwolken, Gasnebel oder anderes Material sein, welches in der Milchstrasse zu finden ist und unsere Sicht nach außen trübt.

Die interstellare Extinktion erschwert die zuverlässige Helligkeitsbe-

stimmung extragalaktischer Objekte sehr, weil sie nämlich für jeden Blickwinkel anders und nicht genau bekannt ist!

Hinweise auf das Ausmass der Trübung konnten aus Vergleichen der Grünfotos mit den Infrarotfotos gewonnen werden, denn die Lichtabschwächung wirkt sich bei verschiedenen Wellenlängen jeweils anders aus.

Ein weiteres Problem stellten die «Eich-Cepheiden» zum Vergleich dar. Das Astronomenteam wählte dafür 47 bekannte Cepheiden in der Grossen Magellanschen Wolke aus. Nun stellte sich heraus, dass die Verhältnisse von Leuchtkraft zu Periode der Magellanschen Cepheiden zu denen in M101 nicht genau übereinstimmten. Das konnte daran liegen, dass man in M101 zufälligerweise eine Mehrheit von Cepheiden mit einem etwas anderen Typ fand und die «normalen» Typen in der Minderheit waren. Was gut sein konnte, denn die statistische Aussagekraft von 29 Sternen in M101 ist ja nicht besonders hoch. Genauere Aufschlüsse über Leuchtkraft-Periode-Beziehungen würden erst viele weitere, noch zu entdeckende, Cepheiden in anderen Galaxien bringen.

All diese Analysen brachten schliesslich eine Gesamt toleranz für die Helligkeitsangaben der Cepheiden in M101. Die errechnete Unsicherheit sollte, jeder denkbare Störfaktor berücksichtigt, $\pm 0,17$ Magnituden betragen. Die Trübung ging mit nur 0,03 Magnituden in die Gesamt toleranz ein. Das heisst, dass wir einen fast perfekt ungetrübten Blick durch unsere Milchstrasse auf M101 haben! Bei der Grossen Magellanschen Wolke fand man zum Vergleich eine Trübung von 0,10 Magnituden.

Resultat: M101 ist 24,1 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Die Unsicherheit dieser Entfernungsangabe beträgt $\pm 1,9$ Millionen Lichtjahre.

Dies ist mit Abstand die genaueste jemals erhaltene Entfernungsangabe für M101. Ernstzunehmende frühere Forschungsergebnisse deckten einen Bereich von 15,6 bis 25,7 Millionen Licht-

jahre ab. Einzig eine Entfernungsbestimmung mittels einer Supernova, die sich zufälligerweise 1970 in M101 ereignete (SN 1970G), lieferte das gleiche Resultat, nur mit einer wesentlich grösseren Unsicherheit.

Resultate des Hubble-Schlüsselprojekts und die Hubble-Konstante

Nun, da die Distanz zu M101 zuverlässig bekannt ist, sehen wir doch einmal, welche «Hubble-Konstante» dabei heraus kommt. Zuerst rechnen wir die 24,1 Millionen Lichtjahre in Megaparsec um (dividieren mit 3,26 Millionen). M101 ist somit 7,39 Megaparsec von uns entfernt.

Jetzt benötigen wir die seit langem bekannte Radialgeschwindigkeit von M101: Sie beträgt 241 Kilometer pro Sekunde. Jede Sekunde fliegt M101 also 241 Kilometer weiter weg von uns. Teilen wir diese Geschwindigkeit mit der Distanz in Megaparsec, erhalten wir eine «Hubble-Konstante» von 32,6 km/s/Mpc. Das heisst, für jedes Megaparsec zusätzliche Entfernung nimmt die Geschwindigkeit einer Galaxie um 32,6 Kilometer pro Sekunde zu.

Mit dieser «Hubble-Konstante» müsste das Universum rund 30 Milliarden Jahre alt sein. Aus verschiedenen Erkenntnissen weiss man aber, dass das Alter des Universums maximal 15 Milliarden Jahre betragen kann. Somit ist die oben berechnete «Hubble-Konstante» ganz klar falsch. Aber warum?

M101 ist eine relativ nahe Galaxie und wird noch von lokalen Gravitationsfeldern beeinflusst. Die richtige Hubble-Konstante kann nur über viele verschiedene, möglichst weit entfernte Galaxien gemittelt werden, welche idealerweise noch nicht einmal gravitativ von ihrer Umgebung beeinflusst werden.

Leider finden sich fast alle Galaxien in Haufen oder Gruppen, somit ist letztere Bedingung nicht gegeben. Auch die gewünschten Messungen an Galaxien in grossen Entfernungen lassen sich nicht realisieren, denn ihre Cepheiden-Sterne sind einfach zu schwach.

Umso erstaunlicher ist es deshalb, dass das Astronomenteam, welches am Hubble-Schlüsselprojekt arbeitete, es doch geschafft hat, mit der Beobachtung von 18 auserwählten Spiralgalaxien die Hubble-Konstante auf $\pm 10\%$ genau zu bestimmen.

In Tabelle 1 sind die 18 Galaxien aufgelistet. Ihre Entfernungen wurden nach derselben Methode wie bei M101 bestimmt. Vergleichen Sie einmal ein paar Radialgeschwindigkeiten mit den Entfernungen! Sie werden feststellen, dass die Radialgeschwindigkeiten heftig variieren. Beispiel 1: NGC 4414 und NGC 1326A. Bei beiden Galaxien ergab sich fast die gleiche Distanz, jedoch wird die Radialgeschwindigkeit von NGC 4414 aufgrund ihrer Nähe zum grossen Virgo-Galaxienhaufen sehr stark verringert, hingegen bei NGC 1326A wegen ihrer Nähe zum Fornax-Haufen vergrössert. Beispiel 2: M81 fliegt aufgrund lokaler Beeinflussung sogar mit 34 km/s auf uns zu!

Für die Astronomen war zwar schon klar, dass M81 nicht zur Bestimmung der Hubble-Konstante geeignet sein würde. Man benutzte sie aber als Testobjekt für das Hubble-Teleskop zum Start des Hubble-Schlüsselprojekts, um die Suchmethode und alle technischen Aspekte vorher einmal durchzutesten. Anschliessend machte man sich daran, Kandidaten mit potentiell immer grösseren Distanzen zu untersuchen.

Aus den 18 Galaxiedistanzen, die im Rahmen des Hubble-Schlüsselprojekts gemessen wurden, und zusätzlich 13 weiteren Galaxien mit publizierten Cepheiden-Daten, war das Astronomen-

team in der Lage, eine neue Hubble-Konstante (H_0) zu bestimmen. Sie beträgt:

$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$$

Diese Hubble-Konstante basiert rein auf Entfernungsbestimmungen mittels Cepheiden anderer Galaxien. Geeicht wurden die Daten an den Cepheiden-Messungen der *Grossen Magellanschen Wolke*, wobei deren Daten wiederum mit Cepheiden-Sternen unserer Milchstrassen-Umgebung geeicht wurden. Und nun schliesst sich der Kreis, denn die sehr genauen Parallaxenmessungen an den uns nächsten Cepheiden wurden vom ganz am Anfang dieses Artikels erwähnten Satelliten *Hipparcos* durchgeführt.

Mit dieser Hubble-Konstante kann man jetzt die Distanz zu allen entfernten Galaxien und anderen Objekten im Universum ermitteln. Man muss nur deren Radialgeschwindigkeit messen, was meistens nicht schwierig ist, teilt diese Geschwindigkeit durch die Hubble-Konstante und multipliziert den Quotienten mit 3,26 Millionen Lichtjahren.

Beispiel: Bei einer Galaxie wird eine Radialgeschwindigkeit von 9000 km/s gemessen. Wie weit ist sie von uns entfernt?

Lösung: $9000 \text{ km/s} : 72 \text{ km/s/Mpc} * 3,26 \text{ Mio Lichtjahre} \approx 400 \text{ Millionen Lichtjahre}$.

Zum Schluss...

...bleibt nur noch zu erwähnen, dass es auch noch andere Methoden gibt, Distanzen im Universum zu bestimmen. Die nachfolgend aufgeführten Metho-

den würden aber den Rahmen des vorliegenden, selbst schon umfangreichen Artikels sprengen, wollte man sie im Detail erklären.

Aus vielen anderen Methoden für die Entfernungsbestimmung eignen sich zum Beispiel Supernovae des Typs Ia und II: Es handelt sich um Sternexplosionen, die je nach Typ eine mehr oder weniger einheitliche maximale Helligkeit erreichen. Weiter gibt es die sogenannte Tully-Fisher-Beziehung, die aussagt, dass eine Galaxie umso heller ist (absolute Leuchtkraft), je schneller sie rotiert.

Auch bei diesen Methoden lässt sich eine Hubble-Konstante generieren. Die 3 erwähnten Werte wurden mit der auf Cepheiden basierenden Hubble-Konstante geeicht.

1. Supernovae Typ Ia:
 $H_0 = 71 \pm 10 \text{ km/s/Mpc}$
2. Supernovae Typ II:
 $H_0 = 72 \pm 16 \text{ km/s/Mpc}$
3. Tully-Fisher-Beziehung:
 $H_0 = 71 \pm 10 \text{ km/s/Mpc}$

Sie haben nun gesehen, wie die «einfache Frage» – der Titel dieses Artikels – eine ganz schön umfangreiche Thematik in Bewegung setzt, will man sie detailliert und fundiert beantworten. Vielleicht erinnert sich der eine oder andere Leser beim Blick in den nächtlichen Sternenhimmel oder durch ein Teleskop – z.B. beim Betrachten einer fernen Galaxie! – ein bisschen an das Gelesene... und staunt darüber, nicht aus Unverständnis, sondern darüber, wie das heutige Wissen über diese Dinge zustande kam.

MARKUS BÜTIKOFER

Schulhausgasse 9a, CH-3110 Münsingen

Tabelle 1: Die Resultate des Hubble-Schlüsselprojekts (schattierte Spalten) bei allen 18 untersuchten Galaxien. In der letzten Spalte ist jeweils das Publikationsdatum der betreffenden Fachschrift (Paper) angegeben.

Nr	Name der Galaxie	Sternbild	Helligkeit (mag)	Radialgeschwind. (km/s)	Gefundene Cepheiden	Distanz (Mio LJ)	Publikationsdatum
1	M81	Grosser Bär	7.89	-34	30	11.8	6.1994
2	M101	Grosser Bär	8.31	241	29	24.1	5.1996
3	M100	Haar der Berenike	10.05	1'571	52	52.5	6.1996
4	NGC 925	Dreieck	10.69	553	80	30.3	10.1996
5	M95	Löwe	10.53	778	49	32.8	3.1997
6	NGC 3621	Wasserschlange	10.18	727	69	20.5	12.1997
7	NGC 2090	Taube	11.99	931	34	40.1	6.1998
8	NGC 7331	Pegasus	10.35	816	13	49.2	7.1998
9	NGC 4414	Haar der Berenike	10.96	716	11	62.3	8.1998
10	NGC 2541	Luchs	12.26	559	34	40.4	11.1998
11	NGC 4725	Haar der Berenike	10.11	1'206	20	41.1	2.1999
12	NGC 1365	Chemischer Ofen	10.32	1'636	52	59.7	4.1999
13	NGC 3198	Grosser Bär	10.87	663	78	47.3	4.1999
14	M91	Haar der Berenike	10.96	486	24	51.8	5.1999
15	NGC 4535	Jungfrau	10.59	1'961	50	52.2	8.1999
16	NGC 3319	Grosser Bär	11.48	739	33	46.7	10.1999
17	NGC 1326A	Chemischer Ofen	13.77	1'836	17	61.0	11.1999
18	NGC 1425	Chemischer Ofen	11.87	1512	29	72.4	1.2000