



Cerro Paranal

Nächtelang Exoplaneten jagen, Rote Riesen und Weiße Zwerge beobachten oder Schwarze Löcher erkunden - was so klingt wie die Abenteuer der Star-Trek-Crew, ist das alltägliche

VLT in Zahlen:

- Geografische Lage:
24° 37' 33" S,
70° 24' 11" W
2500 Meter über dem Meeresspiegel
1200 Kilometer nördlich von Santiago de Chile
- Im Schnitt leben 140-150 Menschen in der Observatoriums-Siedlung
- Das VLT verbraucht pro Tag soviel Elektrizität wie ein durchschnittlicher europäischer Haushalt in vier Monaten.
35 Lastwagen bringen täglich alles auf den Berg, was zum Leben gebraucht wird.
Darunter ein Tanklaster, der täglich 27 000 Liter Wasser in die Wüste bringt.
- Der Erhalt des Observatoriums kostet jährlich über dreißig Millionen Euro.

bzw. allnächtliche Programm des Very Large Telescope System (VLT) auf dem Cerro Paranal. Das VLT ist das Flaggschiff der europäischen bodengebundenen Astronomie und wird von der Europäischen Organisation für astronomische Forschung in der südlichen Hemisphäre (engl. European Southern Observatory, kurz ESO) betrieben. Die ESO ist die führende europäische Organisation für astronomische Forschung und wird von ihren 14 Mitgliedsländern getragen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Italien, die Niederlande, Österreich, Portugal, Spanien, Schweden, die Schweiz, die Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich. Neben dem VLT betreibt die ESO noch zwei weitere Observatorien in der Atacamawüste: La Silla und Chajnantor.

1991 ließ die ESO den 2660 Meter hohen Berg Cerro Paranal in der Wüste Atacama auf 2635 Meter herunter-

das auge^{3D}

sprengen, um für das Observatorium ein Plateau zu schaffen. Aber warum wurde gerade hier, mitten im Nirgendwo, das weltweit höchstentwickelte erdgebundene Instrument, mit dem man in den Kosmos schauen kann, gebaut?

Beste Voraussetzungen in der Atacamawüste

Was im Norden Chiles auf den ersten Blick wie ein karger, unwirtlicher und öder Fleck Erde wirkt, ist für die Eso-Astronomen ein geradezu perfekter und einzigartiger Standort. In der marsähnlichen Landschaft der wohl trockensten Wüste der Welt herrschen die besten Voraussetzungen, die für den erdgebundenen Blick ins All benötigt werden.

Die Anden verhindern die Entwicklung von Regenwolken, während der Humboldtstrom (der mit Wasser aus dem Bereich der Antarktis gespeist wird) an der zwölf Kilometer entfernten Küste die Seewinde abkühlt und damit die relative Luftfeuchtigkeit herabsenkt. Diese liegt auf dem Cerro Paranal im monatlichen Durchschnitt in der Regel deutlich unter 30 Prozent, was der Luftfeuchtigkeit in einer finnischen Sauna entspricht.

Es bilden sich in der Wüste zwar Wolkenfelder, zum Abregnen reicht es aber nicht. In einigen Wetterstationen dieser Wüste wurde seit Beginn ihrer Aufzeichnungen noch kein einziger Regentropfen verzeichnet. Die Atacamawüste ist kaum besiedelt; die nächste Siedlung liegt 120 Kilometer entfernt. Störfaktoren wie Straßenstaub und Lichter aller Art sind somit ausgeschlossen. Die trockene und ruhige Luftströmung, der niedrige Luft-

druck in der Höhe und die Abgeschiedenheit bedeuten für die Astronomen auf dem Cerro Paranal konkret: bis zu 350 sternenklare Nächte pro Jahr. Nichts stört den Blick, wenn das größte Teleskop der Welt nachts die Augen öffnet und zu den Sternen blickt.

Mit Einbruch der Dunkelheit erwachen die vier großen Einzelteleskope (Unit Telescopes, kurz UT) Antu, Kueyen, Melipal und Yepun (in der Sprache der Mapuche-Indianer Sonne,



das auge^{3D}

Mond, das Sternbild „Kreuz des Südens“ und Venus) zum Leben. Das bedeutet auch Arbeitsbeginn für die Betriebsastronomen, die Nacht für Nacht im sogenannten Service-Betrieb Beobachtungen (sogenannte Observing Blocks) abarbeiten, die Forscher aus ganz Europa beantragt haben oder Gastastronomen im Besucher-Modus betreuen. Die Zeit an den Teleskopen ist heiß begehrt – nur ein Bruchteil der Anträge kann genehmigt und abgearbeitet werden. Am VLT wird von Forschern zwei- bis fünfmal soviel Zeit an den Teleskopen beantragt als tatsächlich vergeben werden kann. Ein großer Vorteil sind somit die vier einzelnen Großteleskope, die viermal mehr Zeit bzw. viermal mehr Nächte zum Observieren des Sternenhimmels und auch viel mehr anschließbare Instrumente bereitstellen.

Für die Forscher hat hier die Nacht dennoch zu wenige Stunden. Den Gastastronomen, die im Besuchermodus (mit Hilfe des jeweiligen Astronomen vom Dienst) selbst vor Ort forschen, bleibt wenig Zeit. Sie haben meistens für Beobachtungen auf dem Paranal, die sie oft zwei Jahre oder länger vorbereitet haben, nur ein bis zwei Nächte Zeit. So auch die mexikanische Astronomin Eva Noyola vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, die sich zusammen mit ihren Mitarbeitern auf die Suche nach schwarzen Löchern begibt. Dafür observiert sie mit dem Astronomen vom Dienst zwei Nächte lang zwei verschiedene Objekte. (Auf Eva Noyola und ihr beeindruckendes Forschungsgebiet wird später noch einmal eingegangen werden.)

Der Service-Modus ermöglicht, dass die Forscher nicht selbst nach Chile reisen müssen und ihre Beobachtungen dann durchgeführt werden können, wenn die Bedingungen ideal sind.

Messungen im Infrarotbereich erzielen beispielsweise nur dann die besten Ergebnisse, wenn die Luftfeuchtigkeit sehr gering ist, da Wasserdampf besonders das Infrarotlicht absorbiert. Gerade dieses Licht ist aber für astronomische Untersuchungen besonders interessant, da man mit ihm den kosmischen Staub durchdringen kann.

Aufgabe:

- Erörtere, warum ein europäisches Observatorium in Chile liegt.

***Lösung:** Von der Erde aus kann man nur von der Südhalbkugel aus in die Mitte der Milchstraße sehen. Die genannten Voraussetzungen in der Atacamawüste machen den Standort Chile perfekt.*

Experiment:

- Verschiebe das untere Ende eines Rohres mit Frischhaltefolie und bringe über dem Rohr eine Infrarotlampe an. Unter das Rohr wird ein Strahlungsmessgerät gelegt, um die von der Lampe kommende Infrarot-Strahlung messen zu können. Wie verändert sich der Ausschlag des Messgeräts, wenn in das Rohr feuchte Luft oder etwas Wasser eingefüllt wird?

das auge^{3D}

Lösung: Der Ausschlag des Strahlungsmessgeräts geht deutlich zurück, da der Wasserdampf in der Luft bzw. das Wasser einen Teil des Infrarotlichts absorbiert.

Aufgabe:

- Überlege welche Strahlungsarten von Wasser stark absorbiert werden und welche nicht!

Lösung: Vor allem infrarotes Licht und Mikrowellen werden stark absorbiert. Kaum verschluckt werden dagegen UV-Strahlung und sichtbares Licht.

Instrumente und Besonderheiten am VLT

Interferometer

Eine der Besonderheiten am VLT ist das VLTI (Very Large Telescope Interferometer), mit dem alle vier Hauptteleskope für Infrarotbeobachtungen zu einem Interferometer zusammengeschlossen werden können.

Die Hauptspiegel jedes der vier Hauptteleskope ist 8,2 Meter groß. „Damit ist jedes einzelne für sich genommen schon eines der größten Teleskope der Welt“, so Jochen Liske, Astronom und Mitglied der ESO-Arbeitsgruppe für die Planung des Nachfolgeteleskops des VLTs. „Einer der wichtigsten Punkte ist aber: Man kann alle vier Teleskope [wie zu einem einzigen



großen Spiegel] zusammenschließen, sie sozusagen als einzelnes Teleskop verwenden. Dieses Teleskop kann Informationen liefern, als ob sie von einem einzelnen Teleskop kämen, das einen Durchmesser hat, der so groß ist, wie der größte Abstand zwischen den Einzelteleskopen“, so Liske weiter.

Die vier (jeweils 450 Tonnen schweren) Hauptteleskope bilden zusammen mit den vier kleineren Hilfsteskokopen, die Auxiliary-Telescopes (AT), das Interferometer (VLTI). Die Hilfsteskoskope werden für Interferenzmessungen mit bis zu 200 Meter Abstand benutzt und können, im Gegensatz zu den feststehenden Großteleskopen, auf dreißig verschiedene Stationen bewegt werden.

das auge^{3D}

Man kann sich ein Interferometer als ein Riesen-Teleskop mit 200 Meter Durchmesser vorstellen. Dieses Teleskop hat zwei wichtige Eigenschaften: eine enorme Lichtsammelkapazität und ein enorm hohes Auflösungsvermögen. (Das Auflösungsvermögen eines Teleskops nimmt linear mit seinem Durchmesser zu.) Jetzt stellt man sich ein Loch in dem Riesenspiegel vor. Und dann noch eins. So viele bis der Riesenspiegel durchlöchert ist und schließlich – bis auf ein paar isolierte Teile – nichts mehr von dem ursprünglichen Spiegel übrig ist. Da das ursprüngliche Riesenteleskop so das meiste seiner Lichtsammelfläche verloren hat, ist ihm natürlich seine enorme Lichtsammelkapazität abhanden gekommen. Sein Auflösungsvermögen ist aber nicht zerstört worden, sondern ist nach wie vor vorhanden!

Die Einzelteleskope eines Interferometers verhalten sich also wie einzelne Teile eines Riesenteleskops, dem man die ganzen anderen Teile geklaut hat. Allerdings nur, wenn man das Licht der Einzelteleskope miteinander synchronisiert, so wie das bei einem Riesenteleskop auch der Fall wäre.

Werden alle vier, zum Interferometer zusammengeschlossene, Teleskope auf ein zu beobachtendes Objekt im Universum gerichtet, observieren alle vier Licht von der gleichen Wellenlänge – hauptsächlich infrarotes Licht. Da das Licht zu den unterschiedlichen Teleskopen unterschiedlich lang unterwegs ist, müssen die unterschiedlichen Wegstrecken des Lichts ausgeglichen werden – das Licht muss also synchronisiert werden.

Das Kunststück, alle Teleskope miteinander zu verbinden, geschieht im Delay Tunnel des VLT-Interferometers. Dorthin wird das Licht der Teleskope über ein komplexes unterirdisches Spiegelsystem geleitet und so zusammengesetzt, dass sich die Weglängen der einzelnen Lichtanteile auf 100 Metern um nicht mehr als auf das Tausendstel eines Millimeters unterscheiden. Das heißt: Auf den Wagen werden Spiegel so verschoben, dass sie die Standortsunterschiede der Einzelteleskope ausgleichen. Denn nur wenn diese Synchronisation perfekt funktioniert, verhalten sich die Einzelteleskope wie ein einzelnes großes Teleskop.

Interferometer erhöhen die Winkelauflösung eines Teleskops. Um die Größe von Winkeln im Gradmaß anzugeben, benutzt man die Maßeinheit Bogenminute.

Wie bei den Zeiteinheiten nutzt man zur Angabe von Winkeln im Gradmaß das Sexagesimalsystem. Das heißt: Der Winkelgrad hat 60 Bogenminuten und die Bogenminute 60 Bogensekunden. 3600 Bogensekunden ergeben also genau ein Grad.

Also: $1^\circ = 60'$

Das menschliche Auge hat eine Auflösung von rund 25 Bogensekunden und kann damit theoretisch Objekte, die ein Meter auseinander stehen, noch in fast 8 km Entfernung auseinanderhalten. Eine Bogensekunde ergibt in etwa einen Winkel, den ein Eincentstück aus einer Entfernung von 3 km bilden würde.

Die Interferenz der Lichtwellen (also die Überlagerung der Wellen, bei der die Wellen verstärkt werden, wenn Wellenberge und -täler genau aufeinanderfallen), verstärkt das Auf-

das auge^{3D}

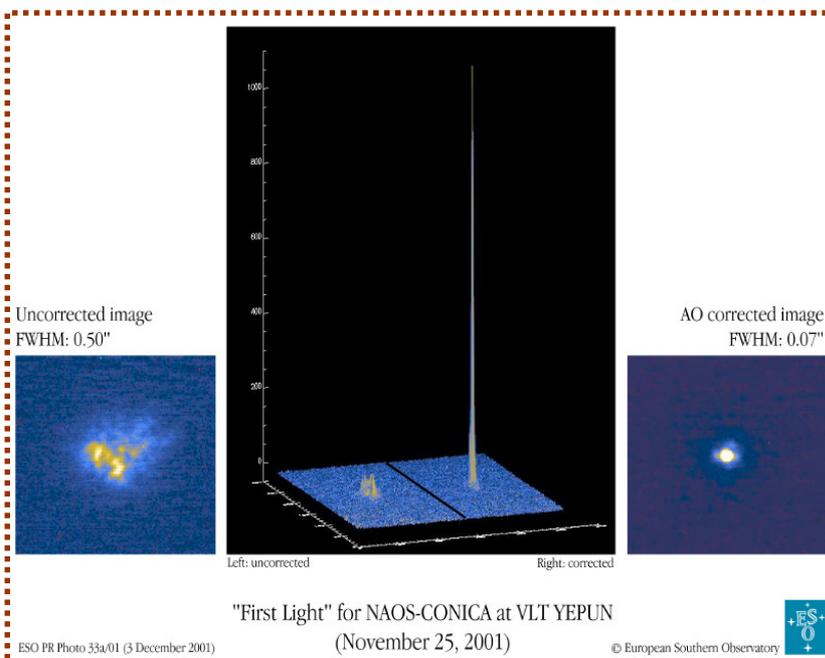
lösungsvermögen der erdgebundenen Teleskope um ein Vielfaches. Die hohe Präzision lässt Aufnahmen mit einer Winkelauflösung von tausendstel Bogensekunden zu. Das bedeutet: Mit dem VLTI könnte man von der Erde aus die Scheinwerfer eines Autos unterscheiden, das sich auf dem Mond befindet.

Adaptive und aktive Optik

Das Licht der Sterne muss bis zur Erde eine gewaltige Strecke zurücklegen. Das Licht bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 299 792,5 Kilometern pro Sekunde durch den Kosmos – das bedeutet, das Licht von unserer Sonne braucht 8 1/3 Minuten bis zu uns. Das Licht von dem der Sonne am nächsten gelegenen Stern, Proxima Centauri, muss dagegen eine Strecke von 41,63 Billionen Kilometern (in Zahlen 41 630 000000 000) zurücklegen und ist somit 4,4 Lichtjahre unterwegs. Auf seinem Weg - vorbei an anderen Sternen und Planeten - verläuft der Weg des Lichts nahezu ungehindert. Erst wenn es die Erdatmosphäre erreicht, wird es von Luftströmungen und Blasen unterschiedlicher Temperatur abgelenkt: Der Stern funkelt.

Adaptive Optik

Mit den heutigen technischen Möglichkeiten der Astronomie kann Sternenlicht in den großen



Teleskopen gebündelt werden, das milliardenfach schwächer ist als jenes, das wir mit bloßem Auge sehen, wenn wir in den Nachthimmel schauen. Dennoch beeinträchtigt „das Funkeln“, also die Erdatmosphäre, die Leistungsfähigkeit der Teleskope und sorgt für Unschärfe und Verzerrung. (Man kann sich das so vorstellen: Das Licht muss erst

Korrigiertes Funkeln: Links das Bild eines Sterns ohne adaptive Optik, rechts bei eingeschalteter adaptiver Optik. In der Mitte ist die Konzentration des Lichts dargestellt.
Quelle: ESO

durch eine dreckige und verschmierte Fensterscheibe, bevor es in unser Zimmer scheint.)

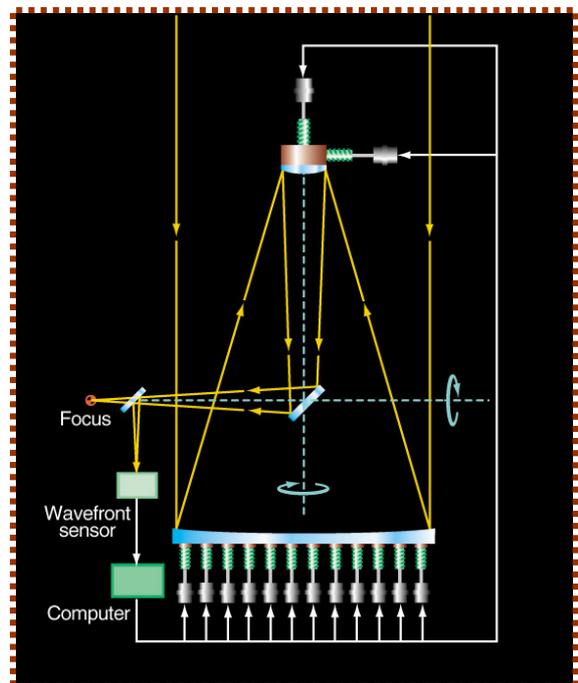
das auge^{3D}

Damit die Bilder so scharf werden, wie die, die Teleskope aus dem Weltraum aufnehmen, (wie beispielsweise das Hubble Weltraumteleskop) wurde das adaptive Optiksyste entwickelt. Die Aufgabe des adaptiven Systems ist es, permanent Bildverschlechterung aufgrund atmosphärischer Störungen (Seeing) zu kompensieren. Dabei wird das tanzende Bild eines hellen Sterns (eines sogenannten Leitsterns) im Blickfeld analysiert, um mit einem Wellenfrontsensor aus der Abweichung des Bilds vom theoretischen Beugungsbild die Verformung der Wellenfront abzuleiten. Mit den erhaltenen Daten wird bis zu hundert Mal pro Sekunde ein zusätzlicher kleiner und sehr biegsamer Spiegel verformt. Dieser computergesteuerte Spiegel befindet sich im Strahlengang auf einer Halterung, die aus 185 einzeln ansteuerbaren Stempeln besteht. Diese Stempel sorgen, indem sie den Spiegel schnell und mikrometergenau eindrücken, dafür, dass die verbogene Wellenfront nach der Reflexion wieder eben ist und somit die atmosphärischen Störungen ausgeglichen sind. Der Spiegel biegt sozusagen die verformte Wellenfront wieder zurecht.

Mit der adaptiven Optik lassen sich daher noch schwächere – also weiter entfernte – Lichtquellen als bisher möglich untersuchen, da sich mit Hilfe des Infrarot-Wellenfrontsensors sich auch Leitsterne verwenden lassen, die im Infraroten hell sind und im sichtbaren Licht nicht.

Aktive Optik

Adaptive und aktive Optik werden zum Teil synonym verwendet. In der Astronomie bezeichnen sie aber zwei unterschiedliche Vorgänge. Wird eines der vier Spiegelteleskope des VLT beim Beobachten in verschiedene Richtungen geschwenkt, verbiegt sich der acht Meter große und nur 18 Zentimeter dicke Primärspiegel unter seinem Gewicht von 20 Tonnen und durch Temperaturschwankungen deutlich. Diese Spiegelkrümmung kann zu Abbildungsfehlern führen. Die mechanische Verformung wird korrigiert, indem 150 Aktuatoren (hydraulisch gelagerte Stempel) wie bei der



Das System der aktiven Optik gewährleistet die völlige Kontrolle der Optik des VLT und optimiert die Leistung in allen einnehmbaren Stellungen des Teleskops. Der Wellenfrontsensor erfasst und analysiert das beobachtete Objekt; entsprechende Signale werden erzeugt, die die Aktuatoren steuern.

Quelle: ESO

adaptiven Optik permanent die Form nachjustieren, indem sie sich an einem Leitstern orientieren.

Die Erschaffung eines Sterns



Ein Laserstrahl zielt von Yepun aus in das Zentrum der Milchstraße.

Quelle: ESO

Will man aber beispielsweise Objekte im Zentrum der Milchstraße beobachten, gibt es weitere Schwierigkeiten: Im sichtbaren Licht gibt es hier (wie in den meisten Gebieten des Weltraums) kaum Sterne, die hell genug sind, um als Leitsterne (Natural Guide Star; NGS) in der Nähe des zu beobachtenden Objekts zu dienen. Hier tritt der Physiker und Laserspezialist des VLT Jose Luis Alvarez auf den Plan. „Wenn mich die Leute

fragen, was ich auf dem Paranal mache, dann sage ich immer: 'Ich erschaffe künstliche Sterne.'“, erzählt Alvarez. Was wie Science-Fiction klingt, ist die normale Arbeit des Laserspezialisten. „Ich verbringe ziemlich viel Zeit in diesem kleinen Reinraum, um mit diesem Laseraggregat den künstlichen Leitstern für die adaptive Optik zu erzeugen...“, beschreibt Alvarez seine Tätigkeit am VLT weiter.

Das Projektionsteleskop des Speziallasers PARSEC sitzt wie eine „Stirnlampe“ auf dem Teleskop Yepun. Der Laser an sich befindet sich in dem Reinraum-Labor unter dem Teleskop – das Reich von Jose Luis Alvarez. Eine Lichtfaser überträgt das Laserlicht zum Projektionsteleskop, das auf der Rückseite des Sekundärspiegels sitzt und den Laserstrahl in den Himmel schickt. Der Laser erzeugt im Beobachtungsgebiet eine punktförmige Lichtquelle in 90 Kilo-

Übrigens:

Natrium-Atome entstehen aus verglühten Meteoriten aus dem Weltall.

meter Höhe – oberhalb der atmosphärischen Turbulenzen –, indem der Laser Natrium-Atome zum Leuchten anregt. Die angeregten Atome beginnen, in der gleichen Farbe wie der Laser sehr stark zu leuchten. Die Laserstrahlen erzeugen damit einen Referenzpunkt, der immer

gleich bleibt. Das Licht der künstlichen Leitsterne verhält sich in der Atmosphäre genauso wie das Licht der zu beobachtenden Objekte. Mit der Hilfe des Leitsterns können alle

Störungen, die von der Atmosphäre über dem Teleskop verursacht werden, berechnet und beseitigt werden – auch wenn sie ständig variieren.

Aufgabe

- Erkläre die Aussage: Jede Beobachtung im Weltall ist auch eine Zeitreise zurück in die Vergangenheit.

Aufgabe:

- Warum kann man das Zentrum unserer Galaxis nicht sehen?

Lösung: Die Milchstraße enthält viel kosmischen Staub, der das Licht weit entfernter Sterne absorbiert. Mit Hilfe der Radioastronomie ist das Zentrum der Milchstraße zu erkennen.

Zu den Sternen und wieder zurück - Die Entfernungsmessung

Von den künstlichen zurück zu den realen Sternen. Wenn wir wissen wollen, wie weit die Sterne von uns entfernt liegen, stoßen wir auf das Problem, dass wir ihren Durchmesser (wie z. B. bei der Sonne) nicht messen können – sie sind einfach zu weit weg. Um die Entfernung von der Erde zu den Sternen oder ganzen Galaxien zu errechnen, kann man aus der Strahlung der Sterne Berechnungen zur Entfernung anstellen. Dazu zieht man unter anderem die scheinbare und die absolute Helligkeit heran.

Scheinbare Helligkeit

Wenn wir mit dem bloßen Auge in den Himmel schauen, sehen wir unterschiedlich hell leuchtende Sterne, die sich zum Teil auch in der Färbung unterscheiden. Abgesehen von unseren Planeten sind alle Sterne ferne Sonnen. Manche von ihnen, die für uns nur sehr schwach leuchten, sind an sich aber viel hellere Sonnen als unsere, liegen aber sehr weit von uns entfernt, sodass sie uns nur als schwache Punkte erscheinen. Die Intensität des Lichtes, das uns auf der Erde erreicht, sagt nichts über die Größe oder tatsächliche Leuchtkraft des Sterns aus.

Magnituden (mag)

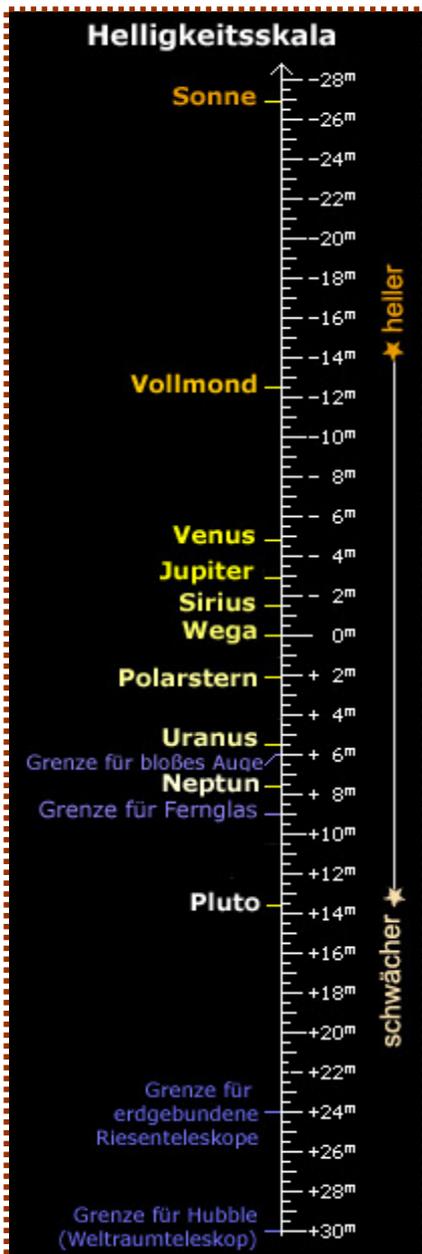
lat. *magnitudo* = Größenklasse

Schon der griechische Astronom Hipparch unterteilte 120 v. Chr. die Helligkeit der Sterne in sechs verschiedene Größenklassen, die Magnituden. Nach dieser Einteilung sind die hellsten Sterne Magnitude 1 (also Sterne erster Größe; 1^m), die schwächsten Magnitude 6.

das auge^{3D}

Die scheinbare Helligkeit eines Sterns – *mag* oder *m* – gibt an, wie hell uns ein Himmelskörper erscheint. Da man mit der heutigen Technik bedeutend mehr Objekte im Universum beobachten kann, erweiterten Astronomen 1800 die antike Helligkeitsskala nach beiden Seiten und führten eine dezimale Unterteilung ein.

Je kleiner der *m*-Wert ist, umso besser kann man also das Objekt sehen. Sterne mit kleinerer Größenklassen-Zahl sind also heller und Sterne mit größerer Größenklassen-Zahl sind schwächer leuchtend. In einer hell erleuchteten Stadt erkennt man ohne Teleskop größtenteils



nur Sterne um *4mag* am Himmel, an wenig besiedelten Orten wie im Gebirge bis etwa *6mag*. Das Hubble-Weltraumteleskop ist in der Lage, Sterne der 31. Größenklasse, also *31mag*, zu sehen, was der Helligkeit einer Kerze entspricht, die auf dem Mond steht.

Laut Weber-Fechner'schem Gesetz ist die Empfindungsstärke des menschlichen Auges nicht linear, sondern logarithmisch verteilt. Das bedeutet, dass die doppelte Helligkeit auf der Skala vom Auge nicht doppelt so hell wahrgenommen wird. Die Helligkeitsdifferenz von einer Größenklasse zur nächsten beträgt immer das 2,512-fache der Helligkeit.

Es ergibt sich also:

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{\frac{m_2 - m_1}{2.5}} = \left(10^{\frac{1}{25}}\right)^{m_2 - m_1} = 2.51^{m_2 - m_1}$$

bzw.

$$m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

wobei *E* die Energie pro Zeit und Fläche, also Leistung pro Fläche, angibt.

So ist beispielsweise die Sonne mit einer scheinbaren Helligkeit von *-26.8mag* 13,7 Milliarden Mal heller als Sirius, der hellste Stern am Nachthimmel. Die scheinbare Helligkeit

das auge^{3D}

ist also abhängig von der Entfernung des beobachteten Himmelskörpers zum Beobachter (beziehungsweise von der Erde). Die absolute Helligkeit hingegen ist eine von der Entfernung unabhängige Größe.

Aufgabe:

- Ein Stern hat die scheinbare Helligkeit 6mag , ein zweiter die scheinbare Helligkeit 1mag . Berechne das Verhältnis ihrer ankommenden Strahlungsleistung pro m^2 auf der Erde.

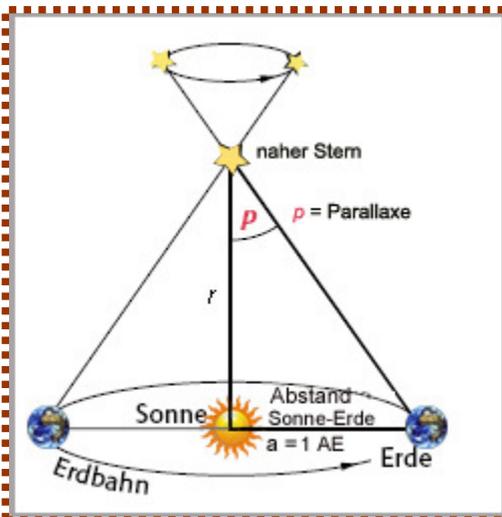
Antwort: Die Differenz der relativen Helligkeiten ist 5.

$$\text{Mit } \frac{E_1}{E_2} = 10^{\frac{m_2 - m_1}{2,5}} = \frac{E_1}{E_2} = 10^2$$

Die ankommende Strahlungsleistung pro m^2 des um 5mag helleren Sterns ist 100-mal so groß.

Absolute Helligkeit

Die absolute Helligkeit eines Sterns hängt von seiner wahren Helligkeit, seiner Leuchtkraft,



Bestimmung der Entfernung eines Sterns mit der Sternparallaxe: Zweimal im Jahr wird die genaue Position des Sterns vermessen. Man befindet sich genau dann in einer Entfernung von 1 parsec, wenn man die (mittlere) Entfernung Erde-Sonne unter einem Winkel von $1/3600$ stel Grad, also 1 Bogensekunde, sieht.

ab. Zur Ermittlung der absoluten Helligkeit M (die ebenfalls in Magnituden angegeben wird) eines Sterns versetzt man ihn aus seiner tatsächlichen Entfernung in eine gedachte Entfernung von 10 Parsec (Parallaxensekunde, pc), das heißt, man rechnet aus, wie hell die Sterne erscheinen würden, wenn sie alle in der einheitlichen Entfernung $10pc$ von der Erde entfernt wären.

Die Sternparallaxe ist eine Methode zur Messung interstellarer Entfernungen. Dabei beobachten Astronomen den Stern von zwei einander gegenüberliegenden Punkten der Erdbahn – z. B. einmal im Sommer und einmal im Winter. Dabei wird von den jeweiligen Blickrichtungen zum Stern ein Winkel eingeschlossen, der umso kleiner ist, je weiter der Stern von der Erde entfernt ist. Die

das auge^{3D}

Parallaxe p ist also der halbe Winkel zwischen den Blickrichtungen von zwei gegenüberliegenden Punkten der Erdbahn (2AE) zum Stern.

AE (Astronomische Einheit) bedeutet mittlerer Abstand Erde-Sonne und beträgt 149 597 870 Kilometer (oder $1,496 \cdot 10^{11}$).

Da die Parallaxe sehr klein ist, wird sie meist in Bogensekunden angegeben.

Die Einheit Parsec beschreibt die Entfernung, in der die Parallaxe p eine Bogensekunde beträgt.

Es gilt (siehe Schaubild):

$$p = \frac{a}{r} \quad \text{bzw.} \quad r = \frac{a}{p}$$

Der Abstand Erde-Sonne a beträgt 1 AE

$$1 \text{ AE} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Mit $p = 1'' = \left(\frac{1^\circ}{3600}\right)$ ergibt sich:

$$r = \frac{149,6 \cdot 10^6}{\frac{1^\circ}{3600}} = 3,09 \cdot 10^{13}$$

also: **1pc = $3,1 \cdot 10^{13}$ Kilometer**

Wenn man für p den Zahlenwert der in Bogensekunden angegebenen Parallaxe einsetzt, so

gilt $r = \frac{1}{p}$ und man erhält die Entfernung r in Parsec.

Die Entfernung in Lichtjahren erhält man durch $\frac{3,26}{p}$. Mit der Sternparallaxe ist die Ent-

fernung der Sterne bis ca. 100 Lichtjahre messbar.

Die absolute Helligkeit ist also die Helligkeit, die der Stern in einer Einheitsentfernung von 10pc (entspricht 32,6 Lichtjahren) hat.

Kennt man die absolute Helligkeit M und die scheinbare Helligkeit m eines Sterns, lässt sich daraus seine Entfernung r errechnen. Der Zusammenhang der drei Größen ergibt folgende Formel des Entfernungsmoduls:

$$m - M = 5 \cdot \lg r - 5$$

wobei m und M in mag und r in pc einzusetzen sind.

das auge^{3D}

Aufgabe:

- Bestimme die absolute Leuchtkraft der Sonne (scheinbare Helligkeit $-26,73mag$). Wie würde sie am Nachthimmel erscheinen, wenn sie in einer Entfernung von $10pc$ stehen würde?

Lösung:

$$r = 1 \text{ AE} = 1,496 \cdot 10^{11} \quad r \text{ in pc einsetzen} \quad pc = 0,00000485 \text{ bzw. } 4,848 \cdot 10^{-6}$$
$$m = -26,73mag$$

$$m - M = 5 \cdot \lg r - 5$$

$$M = -26,73 + 5 - 5 \cdot \log 4,848 \cdot 10^{-6}$$

$$M = 4,841mag$$

Die absolute Helligkeit M der Sonne beträgt $4,841mag$ bzw. $4,841^M$. Damit würde sie aus $10 pc$ Entfernung als sehr schwacher Stern am Himmel erscheinen.

Aufgabe:

- Unser hellster Stern Sirius A hat eine scheinbare Helligkeit von $-1,44mag$, die Parallaxe beträgt $0,375''$. Berechne die absolute Helligkeit M des Sterns.

Lösung:

$$r = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,375} = 2,667pc$$

$$M = -1,44 + 5 - 5 \cdot \log 2,667$$

$$M = 1,43mag$$

Die absolute Helligkeit von Sirius beträgt $1,43mag$ bzw. $1,43^M$.

Aufgabe:

- Welche Bedeutung hat die Berechnung der absoluten Helligkeit naher Sterne für die Entfernungsbestimmung von weit entfernten Sternen?

Lösung: Ist die absolute Helligkeit von nahen Sternen bekannt, kann man durch den Vergleich der Spektren eine Bestimmung der absoluten Helligkeit von weit entfernten Sternen vornehmen. Kennt man die absolute Helligkeit, ist über das Entfernungsmodul eine Entfernungsbestimmung möglich.

Lebenslauf eines Sterns:

Von Weißen Zwergen, Roten Riesen, und Schwarzen Löchern

Über 16 Jahre lang haben Astronomen am VLT mit infrarotem Licht den Staub der Zentralregion unserer Milchstraße durchforstet. Dabei wurden 28 Sterne ausfindig gemacht, die auf elliptischen Bahnen um ein massives zentrales und dabei unsichtbares Objekt kreisen. Forschern des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik gelang mit dieser – teilweise am VLT durchgeführten – Langzeitstudie, eine aufsehenerregende Entdeckung: Im Zentrum unserer Milchstraße befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch, das 4 Millionen Mal so

massereich ist wie unsere Sonne. Dieser Meilenstein in der Forschung belegt, dass Schwarze Löcher nicht nur theoretische Konstrukte sind, sondern real existieren.

Aber was ist überhaupt ein Schwarzes Loch und wie entsteht es? Seine Entstehung hängt unmittelbar mit der Geburt und dem Tod von Sternen zusammen.

Aus dem Leben eines Sterns

Große kosmische Wolken aus konzentrierter interstellarer Materie – wie Gas, Staub und Moleküle – und einem Durchmesser von mindestens mehreren hundert Lichtjahren bilden an den Rändern der Spiralarme der Galaxis die sogenannten Sternentstehungsgebiete – die Kinderstuben der Sterne.

Die interstellare Molekülwolke zieht sich in Nebeln (wie z. B. im Orionnebel), in denen die mittlere Dichte wesentlich höher liegt als

im restlichen All, aufgrund der Gravitation zusammen und zerfällt in kleinere Teilbereiche. Die so entstandenen Wolkenteile verdichten sich immer mehr und kollabieren schließlich.



Bernard 68 ist mit nur 410 Lichtjahren Entfernung einer der nächstgelegenen Globule. Da Globule nicht von außen angestrahlt werden, machen sie sich nur dadurch bemerkbar, dass sie das Licht dahinterliegender Sterne und Nebel verschlucken. *Quelle: ESO*



Die kosmische Wolke des Adler-Nebels: Astronomen am VLT haben die bekannten Säulen, die „pillars of creation“, untersucht und ganze Nester von jungen Sternen in diesem Sternentstehungsgebiet entdeckt. *Quelle: ESO*

Auslöser dafür können z. B. die Schockwelle einer nahen Supernova oder der Strahlungsdruck bereits entstandener Jungsterne sein. Aber nicht jede interstellare Wolke wird automatisch zu einem neuen Stern. Zerstreuende Einflüsse wie Turbulenz, Wärmebewegungen, Magnetfelder oder Fliehkräfte können verhindern, dass die Wolke sich verfestigt. Aus der Verdichtung bilden sich durch das langsame Zusammenziehen und Erhitzen einzelne Globulen. Diese kleinen kompakten Ansammlungen kosmischen Gases und Staubs werden durch erhöhten Gravitationsdruck weiter zusammengedrückt, woraufhin die Dichte und die Temperatur weiter ansteigen. Daraufhin kollabiert die Ansammlung immer schneller; um den entstehenden

Protostern bildet sich (als Folge des Drehimpulses der Globule) eine Scheibe, die den

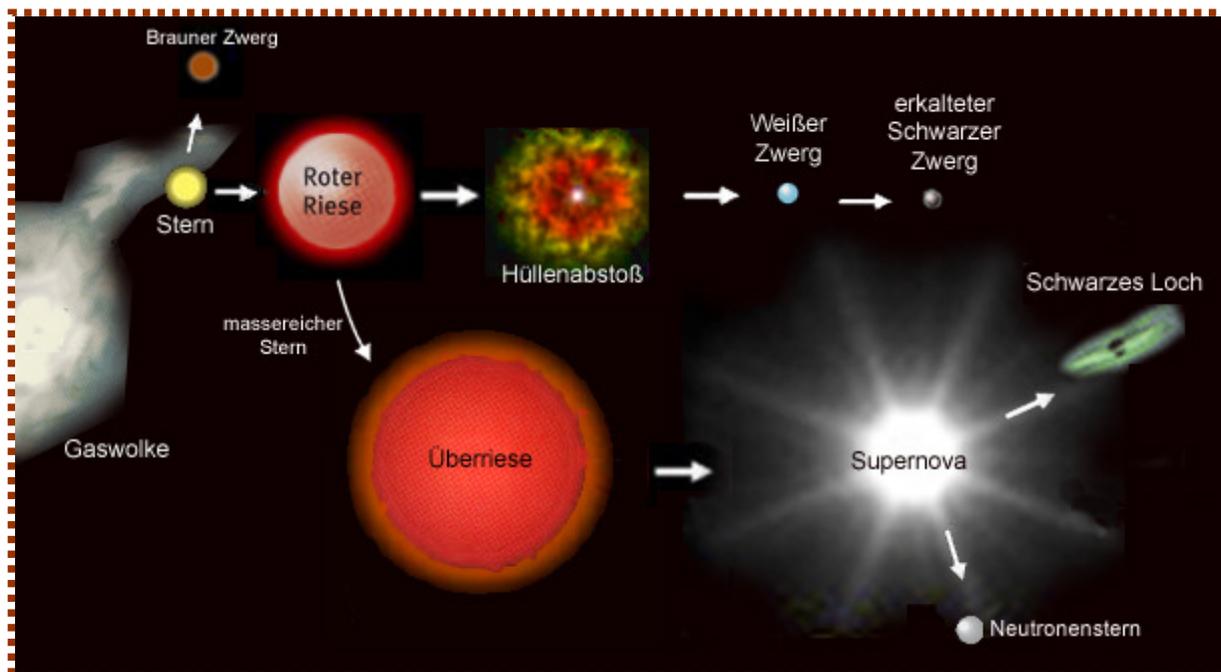


Schaubild Sternentstehung

Protostern umkreist. Aus dieser Scheibe können neben weiteren Sternen auch Planeten entstehen – vermutlich ist unser Sonnensystem aus solch einer Scheibe hervorgegangen. Diese Phase der Sternentwicklung ist allerdings noch nicht ausreichend erforscht. Der Protostern sammelt (akkretiert) weiter Masse aus der ihn umkreisenden Scheibe und wird so immer massereicher. Wird nach einigen Millionen Jahren eine hohe Zentraltemperatur von mehr als 10 Millionen Kelvin erreicht, beginnt der Protostern mit der Energiefreisetzung durch Kernfusion: Ein junger Stern erstrahlt im Universum.

Schafft ein junger Stern es nicht mindestens 8 Prozent der Sonnenmasse zu akkretieren, wird er im Inneren nicht heiß genug. Solche verhinderten Sterne nennt man Braune Zwerge.

Rote Riesen, Überriesen, Weiße Zwerge und Supernovae

Sobald die Kernfusion von Wasserstoff der beherrschende Energieproduktionsprozess wird,

Übrigens:

Ein Körper ist um so heller, je heißer er glüht. Das heißt, wenn ein roter Stern mit einer schwach glühenden Oberfläche dennoch sehr hell ist, muss er eine gewaltige Oberfläche haben. An der blauen Färbung der Wega kann man ablesen, dass ihre Oberfläche sehr heiß ist (um 9400 Grad). Proxima Centauri, ein kühler und massearmer Stern mit einer Oberflächentemperatur von ungefähr 3000 Grad Celsius, leuchtet dagegen rötlich.

gleichens sich der innere Gas- und Strahlungsdruck sowie die Eigengravitation aus: Jetzt bleiben Größe und Temperatur des Sterns für etwa 2 Millionen bis 20 Milliarden Jahre stabil.

Man spricht jetzt von einem Stern in der Hauptreihenphase (nach der Hauptreihe im

Hertzprung-Russell-Diagramm); vereinfacht ausgedrückt: Der Stern ist erwachsen. Er verändert sich während dieser Phase kaum.

Sind die Brennstoffvorräte des Sterns erschöpft, setzt die Kernfusion im Inneren aus und der Kern sackt in sich zusammen. Gleich darauf verbrennt das Helium zu Kohlenstoff und noch schwereren Elementen (Heliumbrennen), während der letzte Rest Wasserstoff in den äußeren Schalen des Sterns verbrennt. Dadurch werden die äußeren Gasschichten des Sterns aufgeheizt und blähen sich auf mehrere 100 Sonnenradien auf. Die Außenschichten kühlen ab und bilden die sichtbare rot leuchtende Außenhülle: Der Stern ist zum Roten Riesen geworden.

Je massereicher ein Stern ist, desto höher ist seine Zentraltemperatur und desto schneller findet die Verwandlung von Wasserstoff in Helium statt. Massereiche Sterne sind sozusagen die Rockstars unter den Sternen: sie sind groß, leben schnell und verschwenderisch und sterben verhältnismäßig jung.

Die weitere Entwicklung verläuft für massearme und massereiche Sterne unterschiedlich, wobei man Sterne bis zu 2,3 Sonnenmassen als massearm bezeichnet.

Beträgt die Masse eines Roten Riesen weniger als 1,4 Sonnenmassen, verliert er

Übrigens:

Da unsere Sonne zu den kleineren Sternen gehört, kann sie etwa 11 Mrd. Jahre lang Kernfusion betreiben. Da sie aber schon 4,6 Mrd. Jahre alt ist, wird in 4,5 bis 5 Mrd. Jahren der gesamte Wasserstoffvorrat des Sonnenkerns zu Helium verbrannt sein. Sie wird so anwachsen, dass sie Merkur und Venus verschlingt und unsere Erde auf über 1000 Grad erhitzt. Dann wird unsere Sonne sterben.

seine Außenhülle, ohne dass eine Supernova stattfindet. Zurück bleibt ein etwa erdgroßer Weißer Zwerg, dessen Materie so unglaublich dicht ist, dass schon ein Teelöffel davon mehrere hundert Millionen Tonnen wiegen würde. Weiße Zwerge sind das letzte Stadium in der Entwicklung von massearmen Sternen. Sie haben keine Möglichkeit mehr zur Kernfusion und kühlen so langsam aus.

Ist der Stern sehr massereich, bläht er sich immer weiter auf und erhöht seine Leuchtkraft um etwa das 1.000- bis 10.000-fache, bis er zum Roten Überriesen wird. Kollabiert der Rote Überriese, wird ein letztes Mal sehr viel Energie freigesetzt.

Der Stern schleudert seine äußeren Schichten weg, wobei die absolute Helligkeit blitzschnell um das Milliardenfache ansteigt ($-12mag$ bis $-13,5mag$).



Ein Roter Riese endet in einer Supernova. Dabei wird der Größenunterschied sehr deutlich. Rechts von dem Roten Riesen akkretiert ein Weißer Zwerg Material vom Riesenstern. Der Rote Riese hat einen 100 Mal größeren Radius als unsere Sonne, der Weiße Zwerg ist dagegen hundert Mal kleiner als unsere Sonne.

Quelle: ESO

Das Leben eines massereichen Sterns endet in einer gewaltigen Explosion, einer Supernova. Eine Supernova strahlt innerhalb weniger Wochen oder Monaten so viel Energie aus wie unsere Sonne in 10 bis 100 Millionen Jahren.

Hat ein Stern nach einer Supernova eine größere Masse als 1,4 Sonnenmassen, jedoch eine geringere als 3,2 Sonnenmassen, wird er zu einem Neutronenstern, der die Masse der Sonne und mit etwa 20 bis 24 Kilometern der Größe von Berlin entspricht.

Eines der rätselhaftesten Objekte unseres Universums entsteht, wenn ein Stern nach einem Supernovaausbruch noch eine Masse von über 3,2 Sonnen besitzt: das Schwarze Loch.

Schwarze Löcher

Schwarze Löcher kann man nicht direkt sehen, da sich in ihnen Materie so unvorstellbar stark verdichtet hat, dass ihrer Schwerkraft selbst Lichtstrahlen nicht mehr entkommen können.

Deshalb ist ein Schwarzes Loch vollkommen dunkel. Die Ansammlung von Materie ist so stark, dass im Inneren der Löcher die herkömmlichen Vorstellungen von Raum und Zeit zusammenbrechen; die Zeit bleibt in ihnen stehen.

Schwarze Löcher verschlucken alles, was in ihre Nähe kommt und machen selbst vor Planeten und Sternen nicht halt. Staub und Gas, die von ihm angezogen werden, umkreisen in einer riesigen flachen Scheibe das Schwarze Loch (ähnlich wie Wasser beim Ablauf einer Badewanne) und bilden dabei eine große flache Scheibe (Akkretionsscheibe). Je näher Gas und Staub dem Loch kommen umso schneller bewegen sie sich - bis sie schließlich verschluckt werden.

In den 1970ern gelang es erstmals Forschern, dieses dunkle Phänomen ausfindig zu machen. Mit Röntgenbeobachtungssatelliten wurde im Hals des Sternbilds Schwan eine starke

das auge^{3D}

Röntgenstrahlung entdeckt. In der Nähe der unsichtbaren Strahlenquelle fanden die Forscher einen Stern mit 30-facher Masse unserer Sonne. Nähere Untersuchungen ergaben, dass der Himmelskörper einen unsichtbaren Partner in knapp sechs Tagen umkreiste. Das Gegenstück musste als auch sehr massereich sein. Als mögliche Erklärung blieb nur ein Schwarzes Loch. Mit Radioteleskopen vorgenommene Messungen im Zentrum der Milchstraße ergaben, dass die Massendichte im Zentrum unserer Galaxis viel größer ist, als es für irgendein anderes Objekt möglich wäre.

Nach diesem Prinzip sucht Eva Noyola in elliptischen Galaxien und Kugelsternhaufen nach Schwarzen Löchern. Sie versucht herauszufinden, ob in diesen Objekten Schwarze Löcher stecken, indem sie die Bewegungen der einzelnen Sterne misst. Momentan arbeitet ein ganzes Team mit ihr an der Vermessung der Sternenansammlung Omega Centauri. Durch die Observation von zwei Sternhaufen am VLT erhält sie einen großen Datensatz, den es zu analysieren gilt. Nach der langen Auswertung der Daten wird Eva Noyola dann wissen, ob sie ein weiteres Schwarzes Loch entdeckt hat, oder nicht.

Aufgabe:

- Wie wird unsere Sonne einmal enden? Beschreibe ihre Entwicklung.

Lösung: Die Sonne benötigte 30 Millionen Jahre, um sich von einer Wolke in einen Protostern zu entwickeln (das sind gerade mal 0,1 Prozent ihrer gesamten Lebensdauer) und dann nochmal 10 Millionen Jahre, um zu einem echten Stern zu werden. Momentan befindet sie sich in der stabilen Phase, die noch etwa 4 Milliarden anhält bis sie etwa eine Milliarde Jahre lang stirbt. Allmählich wird ihre Leuchtkraft zunehmen, bis in ihrem Zentrum der Wasserstoff von den Kernfusionsprozessen komplett aufgebraucht sein wird. Anschließend wächst sie auf das Hundertfache an (wobei sie z. B. Merkur verschlucken wird). Als Roter Riese wird sie die Erde stark erhitzen, wobei alles Wasser auf unserem Planeten dabei verdampfen wird. Nachdem sie ihre äußeren Schichten abgestoßen hat, wird unsere Sonne als matt glühender Weißer Zwerg enden. Die übriggebliebenen Planeten und Monde unseres Sonnensystems werden weiterhin um den Weißen Zwerg kreisen und dabei allmählich abkühlen.

Auf der Suche nach der neuen Erde

Eine große Menge an Berechnungen ist auch bei der Suche nach Exoplaneten von Nöten. Die bereits bekannten Planeten, die andere Sterne (und nicht unsere Sonne) umkreisen, wurden fast alle auf indirektem Wege, über die Beobachtung des Lichts ihrer Muttersterne, gefunden. Die Planeten sind nicht sehr hell und befinden sich – von uns aus gesehen – sehr nah an ihrem Mutterstern. Die Suche nach ihnen ist in etwa so, wie wenn man versuchen würde, eine

das auge^{3D}

Leuchtdiode neben einem Autoscheinwerfer aus einer Distanz von ein paar hundert Kilometern zu erkennen.

1995 wurde mit 51 Pegasi b (bzw. Bellerophon) der erste Exoplanet gefunden, weitere folgten schnell. Mittlerweile sind 403 extrasolarer Planeten bekannt (Stand Oktober 2009). Die meisten der gefundenen Exoplaneten sind in etwa so schwer wie Jupiter – also von gigantischem Ausmaß. Der leichteste Planet ausserhalb unseres Sonnensystems wurde Anfang des Jahres gefunden: Der Planet „Gliese 581 e“ im 20,5 Lichtjahre entfernten System Gliese 581 hat etwa die doppelte Masse der Erde (und ist damit achtzig Mal kleiner als 51 Pegasi b). Funde wie diese machen Hoffnung, in nicht allzu ferner Zukunft erdähnliche Planeten zu finden – auch wenn die bisher gefundenen alles andere als lebensfreundliche Welten sind.

Das VLT vermag es, weit in bisher unbekannte Gegenden des Alls zu spähen. Für die Suche nach erdähnlichen Planeten ist es hingegen noch nicht gerüstet – dafür sieht das Auge noch nicht scharf genug. Die Astronomen sind sich aber sicher, dass es theoretisch jede Menge dieser kleinen, unserer Erde ähnelnden Planeten in den Weiten des Weltalls geben muss. Um sie aufzuspüren, wird die nächste Generation der Superteleskope gebaut, das Extremely Large Telescope (ELT). Dass wir eine neue Erde entdecken, ist also nur eine Frage der Zeit. Und was ist schon Zeit – unsere Zeit – im Vergleich zum Alter der Sterne?