

Sternhaufen in der Astrophysik

Als die Astronomen des 18. und 19. Jahrhunderts mit immer größeren Fernrohren den Sternenhimmel durchmusterten, stießen sie auf zahlreiche Nebelfleckchen, die sich bei näherem Hinsehen als Sternhaufen entpuppten. Schon bald unterschied man zwei Gruppen von Sternhaufen: Solche mit einigen Dutzend Mitgliedern, die sich in der Regel gut in einzelne Sterne auflösen ließen, nannte man *Offene Sternhaufen* (z.B. die Hyaden, die Plejaden oder η und χ Persei, siehe Abb. 1); solche, die viel kompakter erschienen und nicht vollständig in einzelne Sterne aufzulösen waren, bekamen den treffenden Namen *Kugelsternhaufen* (z.B. M 13, siehe Abb. 2). Die Mitglieder eines Sternhaufens haben sich annähernd gleichzeitig und aus derselben Gas- und Staubwolke gebildet. Sie sind also in etwa gleich alt und chemisch gleichartig zusammengesetzt, was sie besonders interessant macht. Offene Haufen und Kugelhaufen unterscheiden sich äußerlich erheblich voneinander, was ein erster Hinweis auf die ganz verschiedene Natur und Entwicklungsgeschichte dieser beiden Objektklassen ist. In diesem Beitrag soll ein knapper Überblick über die Bedeutung der Sternhaufen in der Astrophysik gegeben werden.

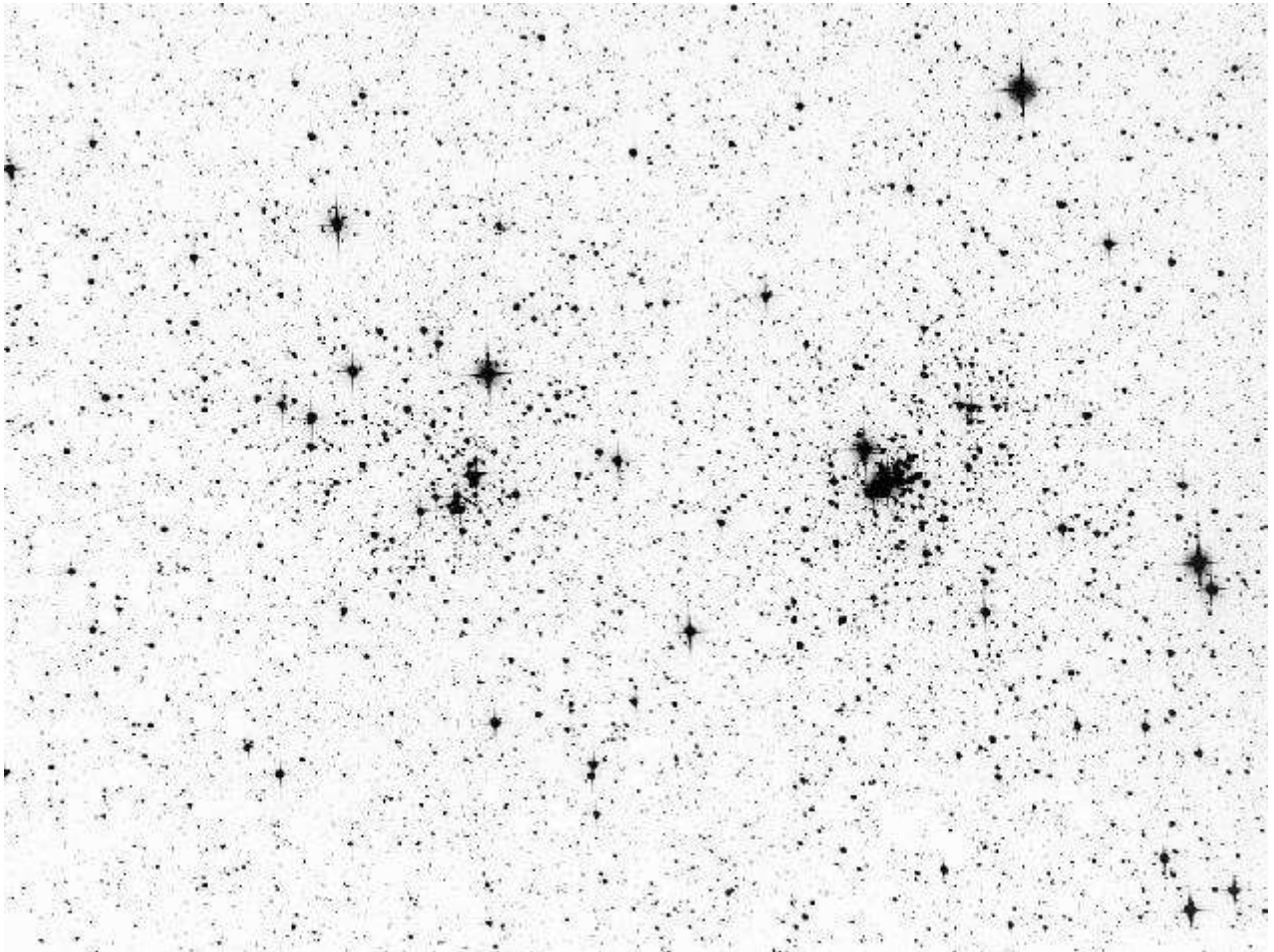


Abb. 1. Schon mit dem bloßen Auge erkennt man in einer klaren und mondlosen Nacht mitten in der Milchstraße zwischen den Sternbildern Cassiopeia und Perseus ein nebliges Fleckchen, das bereits im Altertum bekannt war. Ein lichtstarker Feldstecher oder besser noch ein Fernrohr mit einem Gesichtsfeld von 1 Grad zeigt an dieser Stelle die zwei unmittelbar benachbarten prachtvollen Offenen Sternhaufen η und χ Persei (NGC 869 und 884). Welch

ein Anblick: Hunderte von Sternen, darunter viele hellere und einige deutlich rote. Hierbei handelt es sich um extrem helle Überriesensterne. Jetzt im Herbst ist die optimale Beobachtungszeit für dieses Juwel in der Milchstraße.

Der Doppelhaufen im Perseus ist etwa 7000 Lichtjahre von der Erde entfernt und liegt damit nicht mehr wie die Sonne im "lokalen" Spiralarm unserer Milchstraße, sondern im benachbarten und weiter vom Milchstraßenzentrum entfernten "Perseus"-Arm. Das Alter von η und χ Persei beträgt etwa 10 Millionen Jahre. Es ist umstritten, ob die beiden Haufen räumlich wirklich so nahe beieinander liegen, daß sie wie Zwillinge haargenau die gleiche Entwicklungsgeschichte durchgemacht haben.

Unser Bild wurde auf unserer Vereinssternwarte auf dem Schauinsland mit der Astrokamera 45 Minuten lang auf Kodak TP 2415 aufgenommen. Norden ist oben, Osten ist links.

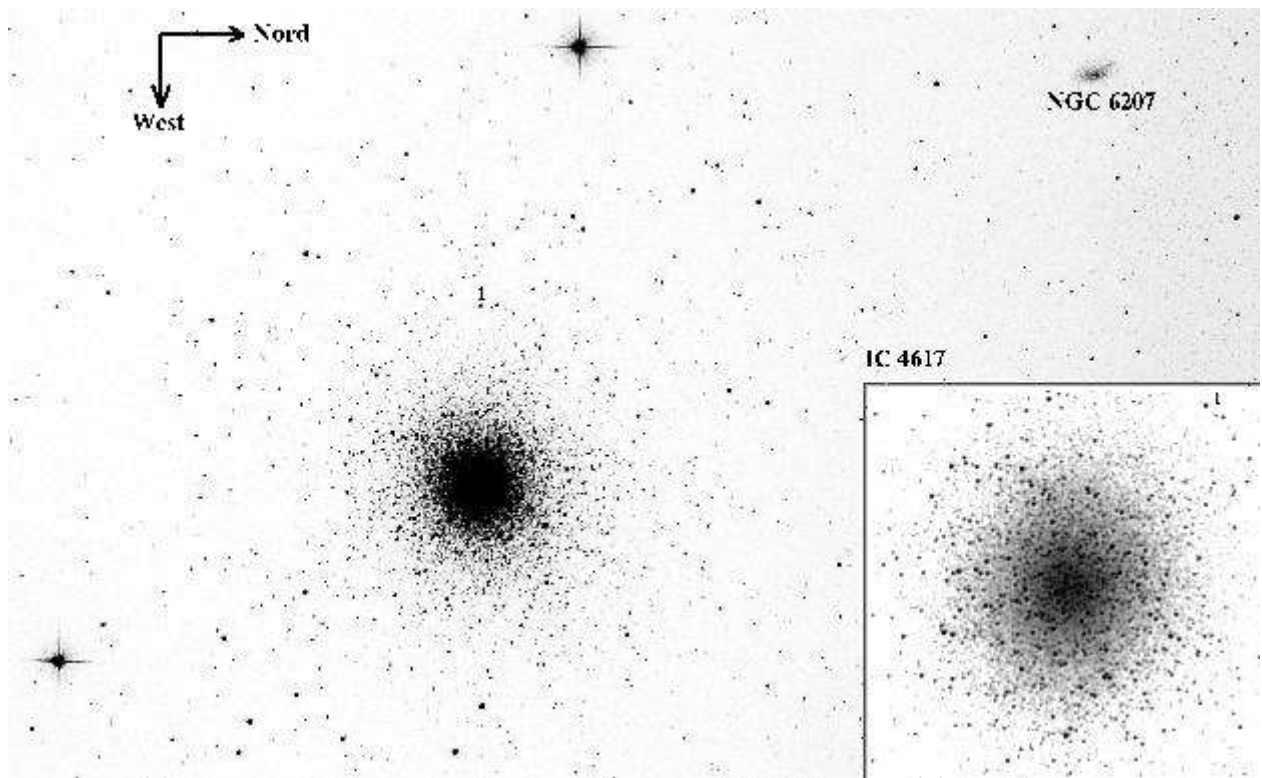


Abb. 2. M 13 ist einer der hellsten Kugelsternhaufen am Himmel. In einer klaren und mondlosen Nacht ist er gerade noch mit bloßem Auge als nebliges Fleckchen im Sternbild Herkules auszumachen. Im Fernrohr entfaltet er seine ganze Pracht, wobei die hellsten der insgesamt etwa 500000 Sterne als solche aufgelöst werden.

Von unserer Vereinssternwarte auf dem Schauinsland aus haben wir M 13 verschiedentlich aufgenommen. Die mit der Astrokamera gewonnene Übersichtsaufnahme zeigt M 13 und zwei nahegelegene hellere Sterne, die bereits im Feldstecher zu erkennen sind. Die beiden Galaxien NGC 6207 und IC 4617 liegen weit im Hintergrund. Auf der mit der ST-7-Kamera gemachten CCD-Aufnahme und mit entsprechender Bildverarbeitung gelingt es, einzelne Sterne sowohl im Zentrum als auch in den Außenbereichen des Haufens sichtbar zu machen (siehe eingesetztes kleines Bild). Zur Orientierung ist auf den beiden etwas gegeneinander verdrehten Aufnahmen derselbe Stern mit "1" markiert.

Das Farben- Helligkeitsdiagramm

Am besten kommt man dem Schicksal der Sternhaufen mit Hilfe des sogenannten Hertzsprung-Russell-Diagramms (HRD) oder des eng verwandten Farben-Helligkeitsdiagramms (FHD) auf die Spur. In diesem für die Astrophysik fundamentalen Diagramm trägt man die Leuchtkraft der Sterne (bei Sternhaufen ihre scheinbare Helligkeit) als Funktion ihrer "Oberflächentemperatur" bzw. Farbe auf. Farbe und Temperatur hängen eng miteinander zusammen: Kühle Sterne sind rötlich, heiße weiß oder gar blau.

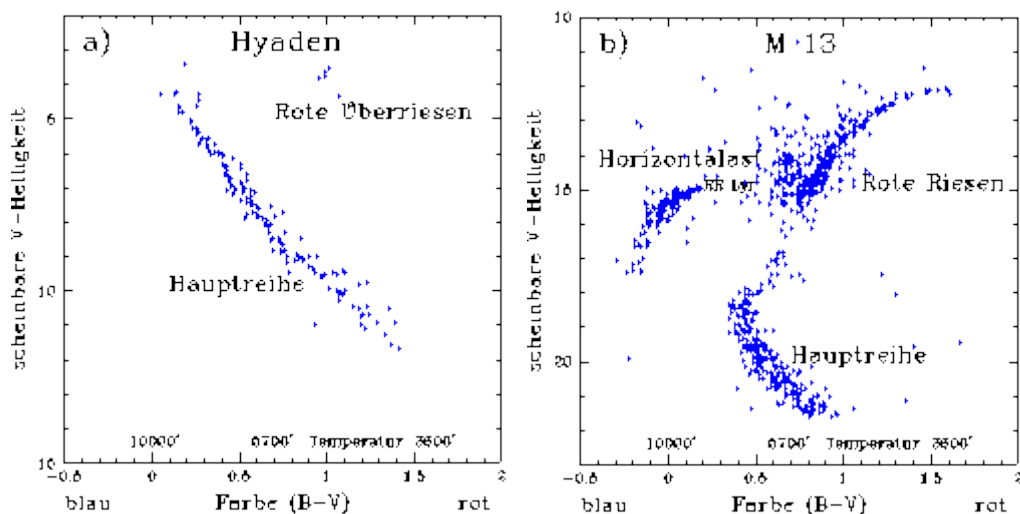


Abb. 3. a) Farben-Helligkeitsdiagramm (FHD) der Hyaden, eines jungen Offenen Sternhaufens, der im allgemeinen als Referenz dient. Fast alle Sterne befinden sich noch auf der Hauptreihe. b) FHD des Kugelsternhaufens M 13. Sterne von etwa 0.9 Sonnenmassen und schwerer haben die Hauptreihe bereits in Richtung Rote Riesen verlassen. Nach ihrem Intermezzo als Rote Riesen bewegen sich die masseärmeren Sterne auf den Horizontalast.

Abbildung 3a zeigt das FHD der Hyaden, eines nahen Offenen Sternhaufens, der im allgemeinen als Referenz dient. Fast alle Sterne liegen auf einer gut definierten Linie, der sogenannten *Hauptreihe*, die von links oben nach rechts unten verläuft. Links oben stehen die Sterne, die heiß, blau, massereich und leuchtkräftig sind; kühlere, rote, massearme und leuchtschwache Sterne stehen rechts unten auf der Hauptreihe. Auch unsere Sonne ist ein typischer Hauptreihenstern. Das FHD des Kugelsternhaufens M 13 (Abb. 3b) sieht ganz anders aus als das der Hyaden. Die Hauptreihe findet sich nur im Bereich der masseärmeren, kühleren und eher rötlichen Sterne. Dafür sind andere Teile des FHD reichlich bevölkert: Es gibt viele rötliche und leuchtkräftige Sterne, sogenannte *Rote Riesen*, sowie recht leuchtkräftige Sterne, die sich zwischen den Roten Riesen und dem blauen Teil des FHD auf dem sogenannten *Horizontalast* anordnen.

Wie weit sind Sternhaufen entfernt?

Die Farben-Helligkeitsdiagramme vieler Offener Sternhaufen sehen dem FHD der Hyaden recht ähnlich. Die Hauptreihen dieser Sternhaufen sind gegenüber der Hauptreihe der Hyaden

nach unten, also zu schwächeren scheinbaren Helligkeiten hin verschoben. Diese Verschiebung ist eine Folge der unterschiedlichen Entfernungen: Hauptreihensterne einer bestimmten Masse und damit auch einer bestimmten Temperatur und Farbe haben, wenn sie chemisch gleich zusammengesetzt sind, auch die gleiche absolute Helligkeit. Aus der Helligkeitsdifferenz der Hauptreihen im FHD kann man auf die Entfernungsdifferenz, z.B. relativ zu den Hyaden, schließen. Die Entfernung der Hyaden ist durch Parallaxenmessungen mit dem Astrometriesatelliten Hipparcos sehr zuverlässig zu 148 Lichtjahren bestimmt worden. Hipparcos konnte erstmals auch zu anderen Offenen Sternhaufen Parallaxenentfernungen messen. Diese stimmen erstaunlicherweise nicht in allen Fällen gut mit den Entfernungen überein, die aus der Helligkeitsdifferenz der Hauptreihen abgeleitet wurden. Über die Gründe dieser Diskrepanz wird derzeit noch gerätselt.

Nachdem in den 50er- und 60er-Jahren Entfernungen zu vielen Offenen Sternhaufen gemessen worden waren, konnte man beweisen, daß unsere Milchstraße eine Galaxie mit ausgeprägter Spiralstruktur ist, weil die Offenen Haufen sehr deutlich die Spiralarme in der Sonnenumgebung nachzeichnen.

Prinzipiell liesse sich die Entfernungsbestimmungsmethode des Hauptreihenfits (Helligkeitsdifferenz zwischen den Hauptreihen zweier Haufen) auch auf Kugelsternhaufen anwenden. In der Praxis hat man aber oft das Problem, daß die Hauptreihensterne von Kugelsternhaufen schon sehr schwach und damit schlecht beobachtbar sind. Glücklicherweise sorgt die Natur für Abhilfe: Kugelsternhaufen enthalten Sterne, die pulsieren und dabei ihre Helligkeit in weniger als einem Tag in charakteristischer Weise verändern. Diese nach dem Prototyp RR Lyrae benannten Sterne stehen im FHD in der Lücke des Horizontalastes (siehe Abb. 3b) und sind relativ leicht beobachtbar. Die wichtigste Eigenschaft ist, daß sie eine bekannte absolute Helligkeit haben, die etwas von der chemischen Zusammensetzung abhängt. Sie sind also so etwas wie Standardkerzen oder 100-Watt-Birnen. Da man ihre absolute Helligkeit ("100 W") kennt, kann man aus der beobachteten Helligkeit auf die Entfernung schließen. Ein Beispiel: RR Lyrae-Sterne mit der chemischen Zusammensetzung wie die Sterne in M 13 haben eine absolute Helligkeit von $M_V = 0.45$ mag. Aus Abb. 3b entnimmt man eine scheinbare Helligkeit der RR Lyrae-Sterne in M 13 von $m_V = 14.9$ mag. Das läßt sich mit der Definition des astronomischen Helligkeitssystems in die Entfernung d umrechnen:

$$\log d [\text{in pc}] = [(m_V - M_V) + 5] / 5 .$$

M 13 ist also 7800 parsec oder 25000 Lichtjahre von uns entfernt. Im Gegensatz zu den Offenen Haufen liegen die Kugelsternhaufen nicht in der Hauptebene der Milchstraße, sondern umgeben diese in einem annähernd kugelförmigen Halo. Kugelsternhaufen können auch benutzt werden, um die Entfernung zu anderen Galaxien zu bestimmen. Dazu vergleicht man die mittlere scheinbare Helligkeit des Kugelhaufensystems der fernen Galaxie mit der mittleren absoluten Helligkeit der Kugelhaufen der Milchstraße.

Das Alter der Sternhaufen

Der Schlüssel zum Verständnis der unterschiedlichen FHD liegt in der zeitlichen Entwicklung der Sterne, die man gut in Modellrechnungen simulieren kann. Ein mit den Gesetzen der Physik gefütterter Computer berechnet die innere Struktur, die Leuchtkraft und die Oberflächentemperatur eines Sterns bestimmter Masse und chemischer Zusammensetzung als Funktion der Zeit. Trägt man Helligkeit und Temperatur (Farbe) eines Modellsterns für jeden Zeitpunkt in ein FHD ein, so kann man seinen Entwicklungsweg im FHD verfolgen.

Es zeigt sich, daß alle Sterne zunächst auf der Hauptreihe liegen. Schon nach wenigen Millionen Jahren bewegen sich die besonders schweren Sterne von etwa 20 Sonnenmassen nach rechts in den Bereich der Roten Überriesen. Ihr Wasserstoffvorrat im Zentrum für die Kernfusion zu Helium ist aufgebraucht. Die Entwicklung zu einem Roten Überriesen geschieht so schnell, daß der Bereich zwischen Hauptreihe und Riesen im FHD leer bleibt. Als nächstes beziehen diese Sterngiganten ihre Energie aus der Fusion von Helium zu Kohlenstoff, nach einigen weiteren Brennphasen haben sie einen Eisenkern, aus dem sich durch Kernfusion keine Energie mehr gewinnen läßt. Sie enden schließlich in einer furiosen Supernovaexplosion und sterben aus. Masseärmere Sterne gehen mit ihrem Energievorrat wesentlich sparsamer um und entwickeln sich langsamer. Unsere Sonne hat ihren zentralen Wasserstoffvorrat erst etwa 9 Milliarden Jahre nach ihrer Entstehung verbraucht und bewegt sich dann allmählich von der Hauptreihe weg in Richtung Riesenast. Die Hauptreihe wird im Lauf der Zeit von oben links her entvölkert. Der Punkt, bis zu dem sich die Sterne noch auf der Hauptreihe befinden, ist ein Maß für das Alter der Sternpopulation. Nach ihrem Aufenthalt im Gebiet der Roten Riesen laufen masseärmere Sterne im FHD weiter auf den Horizontalast. Sie stoßen dabei einen Teil ihrer äußeren Hülle ab, der eine Zeitlang als Planetarischer Nebel sichtbar ist, und werden wieder heißer und blauer. In ihrem Inneren fusionieren sie Helium zu Kohlenstoff und allenfalls noch Kohlenstoff zu Sauerstoff.

Vor diesem Hintergrund ist jetzt klar, daß die Hyaden ein junger Sternhaufen sein müssen, weil die Hauptreihe noch gut besetzt ist. Erst ganz wenige Sterne haben sich zu Roten Überriesen entwickelt. In der Literatur wird das Alter der Hyaden mit 625 \pm 50 Millionen Jahren angegeben. Zum Vergleich: die Sonne ist 4600 Millionen = 4.6 Milliarden Jahre alt. Fast alle Offenen Haufen sind jung, man findet nur wenige alte (z.B. M 67). Daraus gewinnen wir folgendes Bild: Die meisten Offenen Sternhaufen haben sich vor relativ kurzer Zeit aus einem Gas- und Staubnebel wie dem Großen Orionnebel gebildet und lösen sich meistens nach einigen Hundert Millionen Jahren auf.

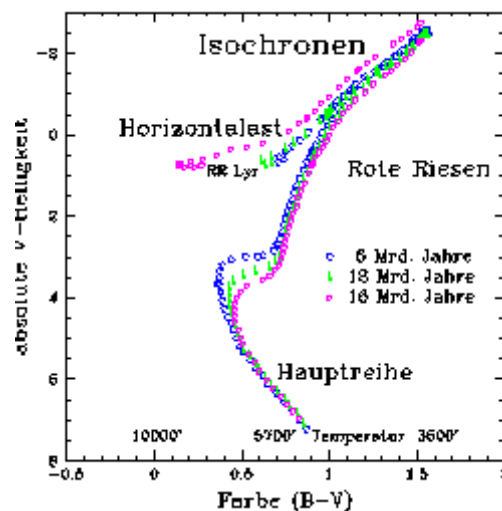


Abb. 4. Mit Sternmodellen berechnete Linien gleichen Alters (Isochronen) im FHD für eine Sternpopulation von 0.1 bis einigen Sonnenmassen. Die angenommene chemische Zusammensetzung entspricht in etwa der von M 13. Vergleich der Isochronen mit dem FHD von M 13 ergibt ein für Kugelhaufen typisches Alter von 12 bis 14 Milliarden Jahren für M 13.

M 13 muß dagegen wesentlich älter sein als die Hyaden. Mit den Computermodellen kann man berechnen, wie eine Sternpopulation von 0.1 bis einigen Sonnenmassen mit vorgegebener anfänglicher chemischer Zusammensetzung nach bestimmter Zeit im FHD aussieht. Abbildung 4 zeigt solche Isochronen (Linien gleichen Alters) für Alter zwischen 8 und 16 Milliarden Jahren. Legt man die Isochronen über das FHD von M 13, so findet man ein Alter von 12 bis 14 Milliarden Jahren, also erheblich älter als unsere Sonne. Die meisten anderen Kugelsternhaufen sind ähnlich alt. Sie sind während des Kollapses der Proto-Milchstraße entstanden, noch bevor sich in der Hauptebene der heutigen Milchstraße die ersten Sterne gebildet haben. Diese Vorstellung steht im Einklang mit der räumlichen Verteilung der Kugelhaufen relativ zur Milchstraße (siehe oben) und mit ihrer chemischen Zusammensetzung. Kugelsternhaufen enthalten in der Regel einen deutlich geringeren Anteil an chemischen Elementen schwerer als Wasserstoff und Helium als etwa die Sonne, weil die Materie, aus der sie sich gebildet haben, noch nicht oder nur wenig durch die Fusions- und Supernovaschlacken der ersten Sterngenerationen chemisch "verunreinigt" war.

Kugelsternhaufen und das Alter des Universums

Das Alter der Kugelhaufen ist mit dem Alter des Universums seit dem Urknall zu vergleichen. Hierfür werden je nach Weltmodell Werte zwischen 8 und 20 Milliarden Jahren gehandelt. Logischerweise muß das Universum mindestens so alt sein wie die ältesten Objekte, die es enthält. Wenn die Altersbestimmung der Kugelsternhaufen richtig ist, scheiden einfache Weltmodelle aus, die ein kleineres Weltalter als etwa 15 Milliarden Jahre vorhersagen. Das hat Folgen für die Expansionsgeschwindigkeit des Universums, die aus der Rotverschiebung der Galaxien gemessen und in Form des Hubbleparameters H_0 angegeben wird. Wenn das Universum jung ist, muß es schnell expandieren, um seine heutige Ausdehnung zu erreichen; wenn es dagegen älter ist, genügt eine kleinere Expansionsgeschwindigkeit. H_0 muß kleiner als etwa 55 km/s/Mpc sein, damit kein Widerspruch zum Alter der Kugelhaufen entsteht. Der Wert von H_0 ist derzeit noch umstritten und soll durch verschiedene Messungen geklärt werden. Man darf gespannt sein, wie zwei auf so unterschiedlichen Betrachtungen beruhende Zeitskalen wie das Expansionsalter des Universums und das Entwicklungsalter der Kugelhaufen miteinander vereinbar sind.

Martin Federspiel martin@astro.unibas.ch