



Themen & Daten

- 11.04.: Aktuelles/Übersicht
- 25.04.: Mikrowellenhintergrund (WMAP)
- 09.05.: Reionisation
- 23.05.: Schwarze Löcher - NEUES
- 06.06.: Der Röntgen-Himmel
Teil I: Akkretionsscheiben
- 20.06.: Der Röntgen-Himmel
Teil II: AGN & Kosmologie
- **04.07.: Kugelsternhaufen**



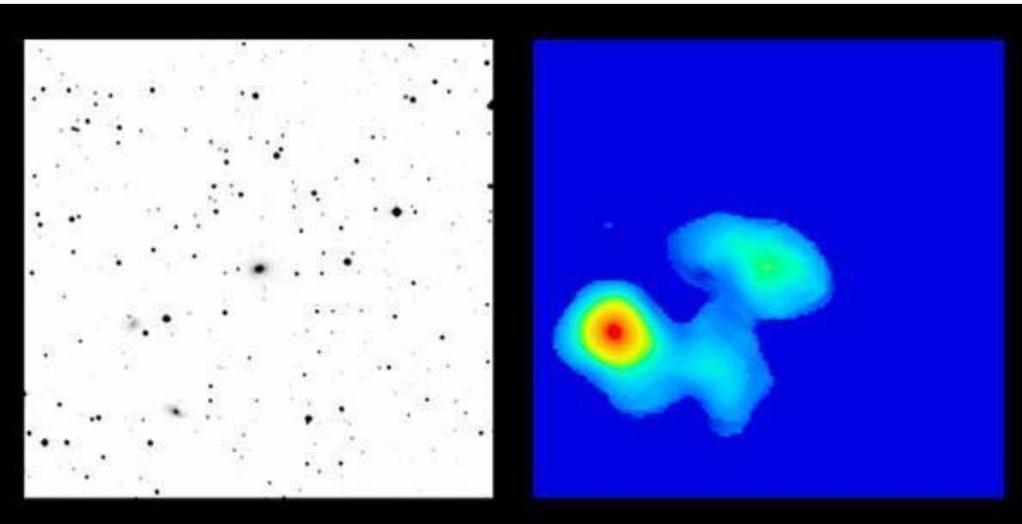
Heute

- Aktuell: Kanibalismus und Seyfert-Galaxien
- Aktuell: Homer und die Datierung der Odyssee

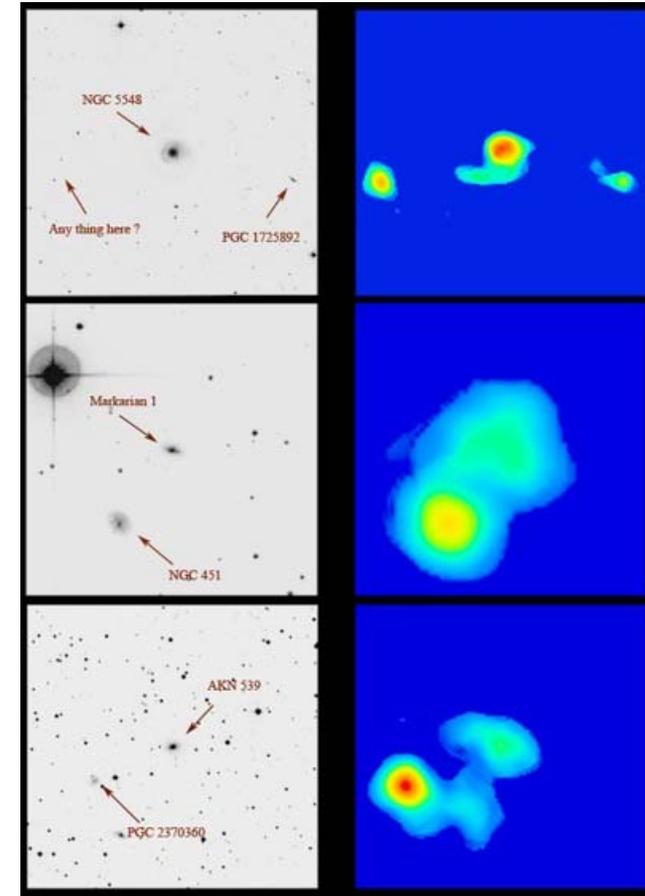
- Kugelsternhaufen
- Bimodalität der Farben
- Ursprung der Kugelsternhaufen
 - Verschiedene Szenarien für ihre Entstehung
 - Zusammenhang mit Entstehung der Galaxien
- Mittelschwere Schwarze Löcher & Kugelsternhaufen
- Rotierende und Nicht-Rotierende Kugelsternhaufen
- Zukunft der Kugelsternhaufen-Forschung

- Bilder

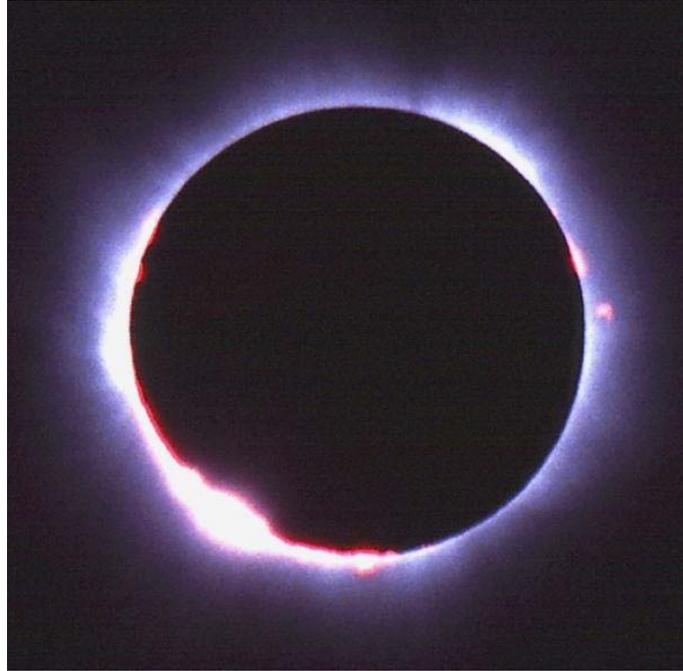
Seyferts: Kanibalismus



- Radioteleskope zeigen eine Möglichkeit der Fütterung von Seyfert Galaxien
- VLA-Beobachtungen von neutralem Wasserstoff zeigen, daß die meisten in Wechselwirkung mit Nachbargalaxien sind
- Im sichtbaren Licht nicht zu erkennen
- Klärt Unterschied zu radio-leisen Objekten

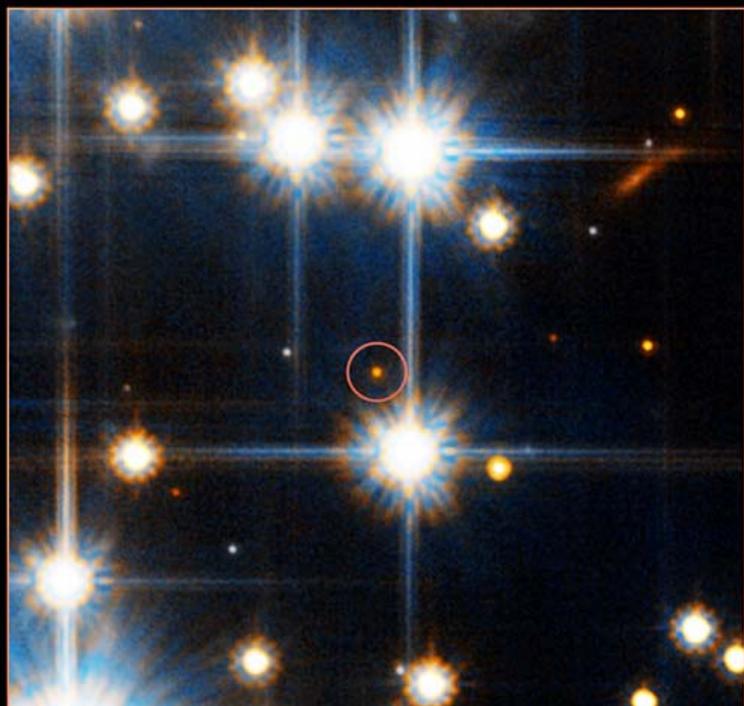


Homer, Odyssee



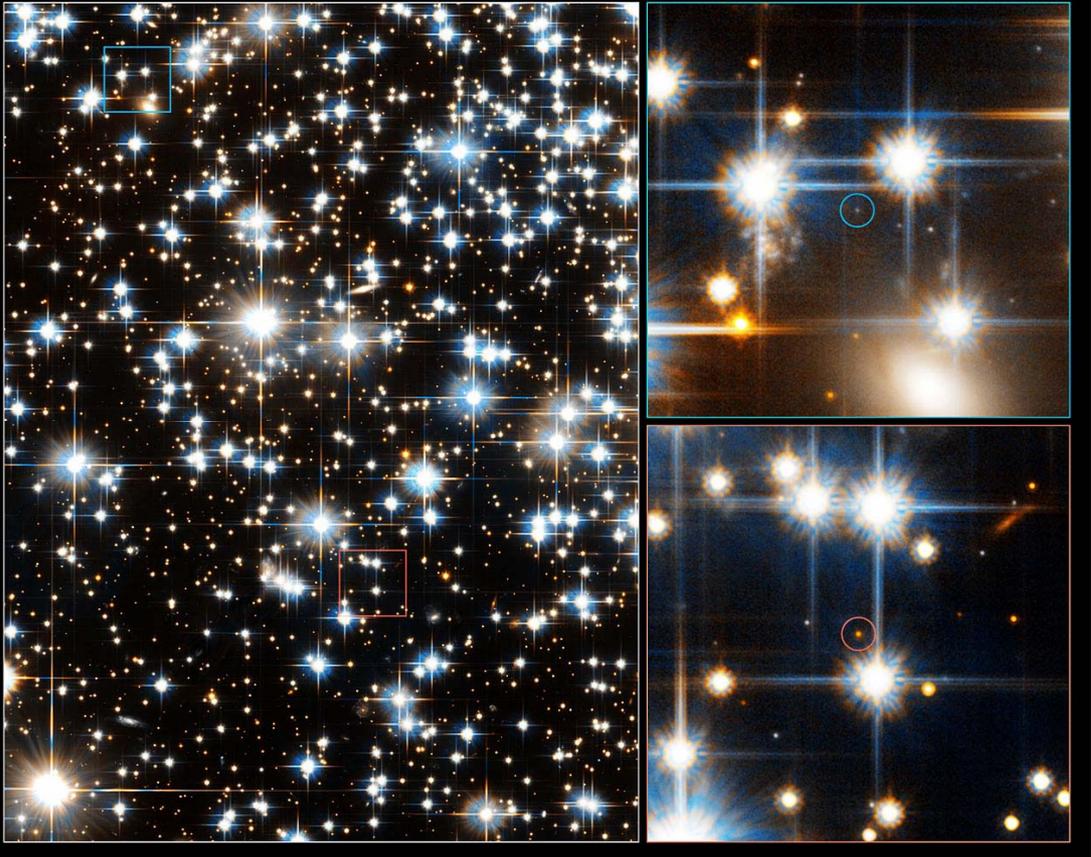
- Viele Fragen im Zusammenhang mit der Odyssee (hat Homer wirklich alles geschrieben ...)
 - Kam Odysseus zum Zeitpunkt einer Sonnenfinsternis zurück und wann war das??
 - Nach Hunderten von Jahren an Diskussionen beschlossen Wissenschaftler, daß das Problem nicht lösbar sei
 - Jetzt Passagen nochmals analysiert, die nicht genug beachtet worden waren
 - Suche nach spezifischen astronomischen Referenzen zur Datierung:
 - Tag der Rückkehr stimmt mit Neumond überein
 - Sechs Tage vorher ist Venus hoch am Himmel und sichtbar
 - 29 Tage vorher sind zwei Konstellationen (Plejaden und Boötes) gleichzeitig bei Sonnenuntergang sichtbar
 - 33 Tage vorher ist Merkur (Hermes, für die Römer Merkur) sichtbar und am westlichen Ende seiner Bahn
- ⇒ Innerhalb von 100 Jahren des Falls von Troja tauchen diese Konstellationen am 16. April 1178 v.Chr. Auf
- ⇒ Der gleiche Tag, an dem eine Sonnenfinsternis zu sehen war
- ⇒ Einige riskante Manöver

Kugelsternhaufen



Kugelsternhaufen im Wandel der Zeit ...

- Die rund 200 Kugelsternhaufen der Milchstraße enthalten einige der ältesten bekannten Sterne des Universums - junge Bewohner sind nicht auszumachen. *Gleiches Alter, gleiche chemische Zusammensetzung*
- Kugelsternhaufen sind vergleichbar historischen Stätten, vergleichbar den alten Stadtvierteln von Rom oder Istanbul, vor langer Zeit erbaut und seither kaum verändert: kompakte, in die Jahre gekommene Metropolen, die uns zwar viel über längst vergangene Zeiten berichten können, aber wenig darüber, was sich in Galaxien heute abspielt
-
- Hat sich verändert das Bild: neu entstandene Kugelsternhaufen wurden detektiert, können ganz offensichtlich auch heute noch entstehen, wenn Galaxien miteinander kollidieren



HST Beobachtungen von NGC 6397

- Schwächste (=älteste) Sterne in einem Kugelsternhaufen beobachtet, Hubble, 5 Tage beobachtet
- NGC 6397, einer der erdnächsten Kugelsternhaufen (8500 Lichtjahre)
- Ähnlich schwach wie Geburtstagskerze auf dem Mond, gesehen von der Erde aus
- Licht weißer Zwerge
- Maß des Alters des Universums
- Weiße Zwerge kühlen vorhersagbar ab, wie eine Uhr, tickt fast so lange wie das Universum alt ist, Universum kann nicht älter als die ältesten Sterne sein, 12 Milliarden Jahre alt

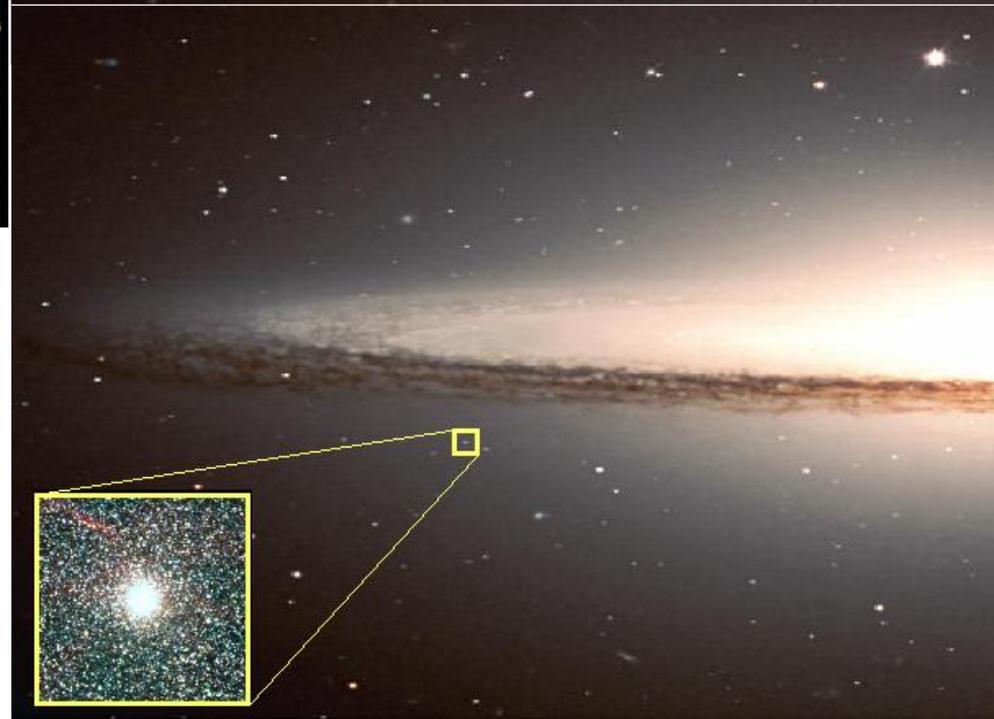
Eigenschaften von Kugelsternhaufen (GCs)

M 13

- SSPs – ein Alter und gleiche Metallizität
- $10^5 - 10^6 M_{\text{Sonne}}$
- Alle Galaxien $M_V < -15$ haben zumindest einen GC
- ~150 in MW
~400 in M31
> 10,000 in einigen Elliptischen Galaxien
- $S_N \equiv N_{\text{GC}} \times 10^{0.4(M_V + 15)}$,
2 – 3 × größer in Elliptischen



Über die Galaxien- Entstehung aus GCs lernen



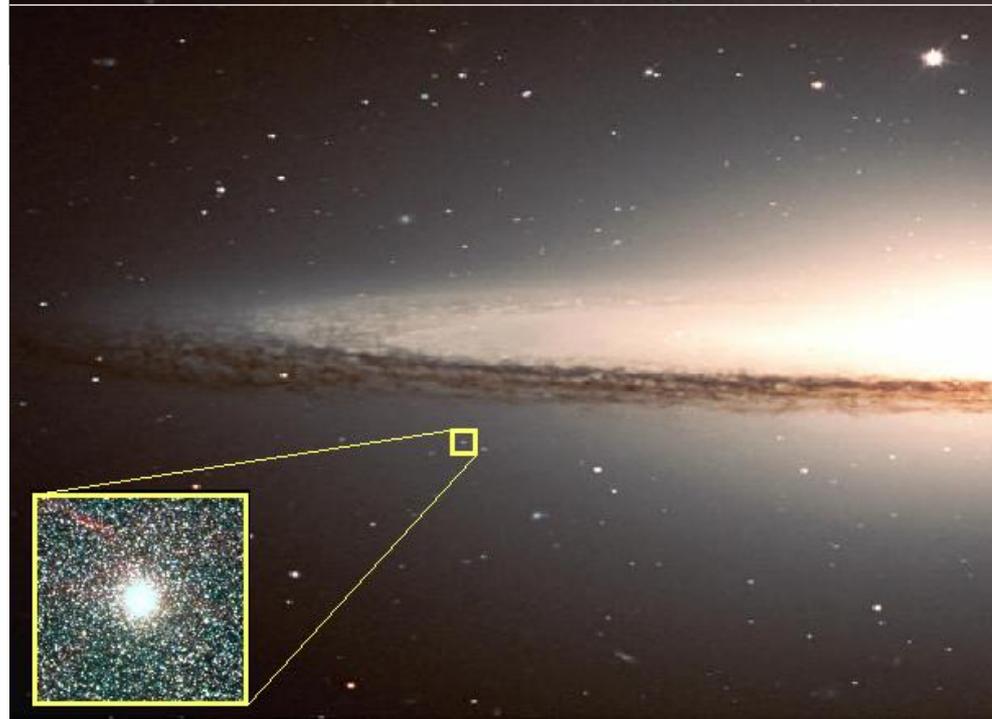
- Assoziiert mit Galaxien aller morphologischen Typen
- Theorien über die Galaxien-Entstehung und – Entwicklung genauer bestimmen

Wann und wie?

Unterschiede

Über die Galaxien- Entstehung aus GCs lernen

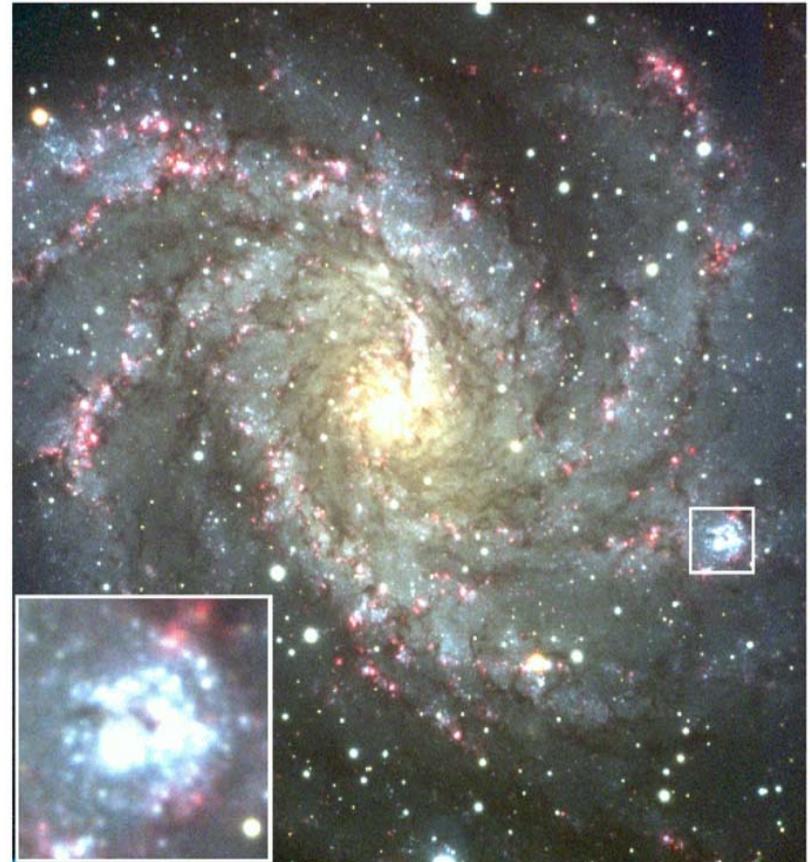
- Alte galaktische Komponenten
- Befinden sich in einer sphäroiden Randregion einer Galaxie (dem galaktischen Halo)
- Älteste Objekte einer Galaxie und reichen an das Alter des Universums
- Fast kein Gas mehr, was akkretiert werden könnte: sollten Schwarze Löcher dort existieren, müßten sie hungern





Sternentstehungs-Geschichte der Galaxien kann anhand der GCs studiert werden

- Massive Sternhaufen entstehen während aller großen Sternentstehungsphasen (Schweizer 2001)
- Die Anzahl der jungen Haufen skaliert mit dem Gas was in der Wechselwirkung involviert ist
(Kissler-Patig et al 1998)
- Die Effizienz der Haufenbildung hängt von der SFR in Spiralen ab (Larsen & Richtler 2000)

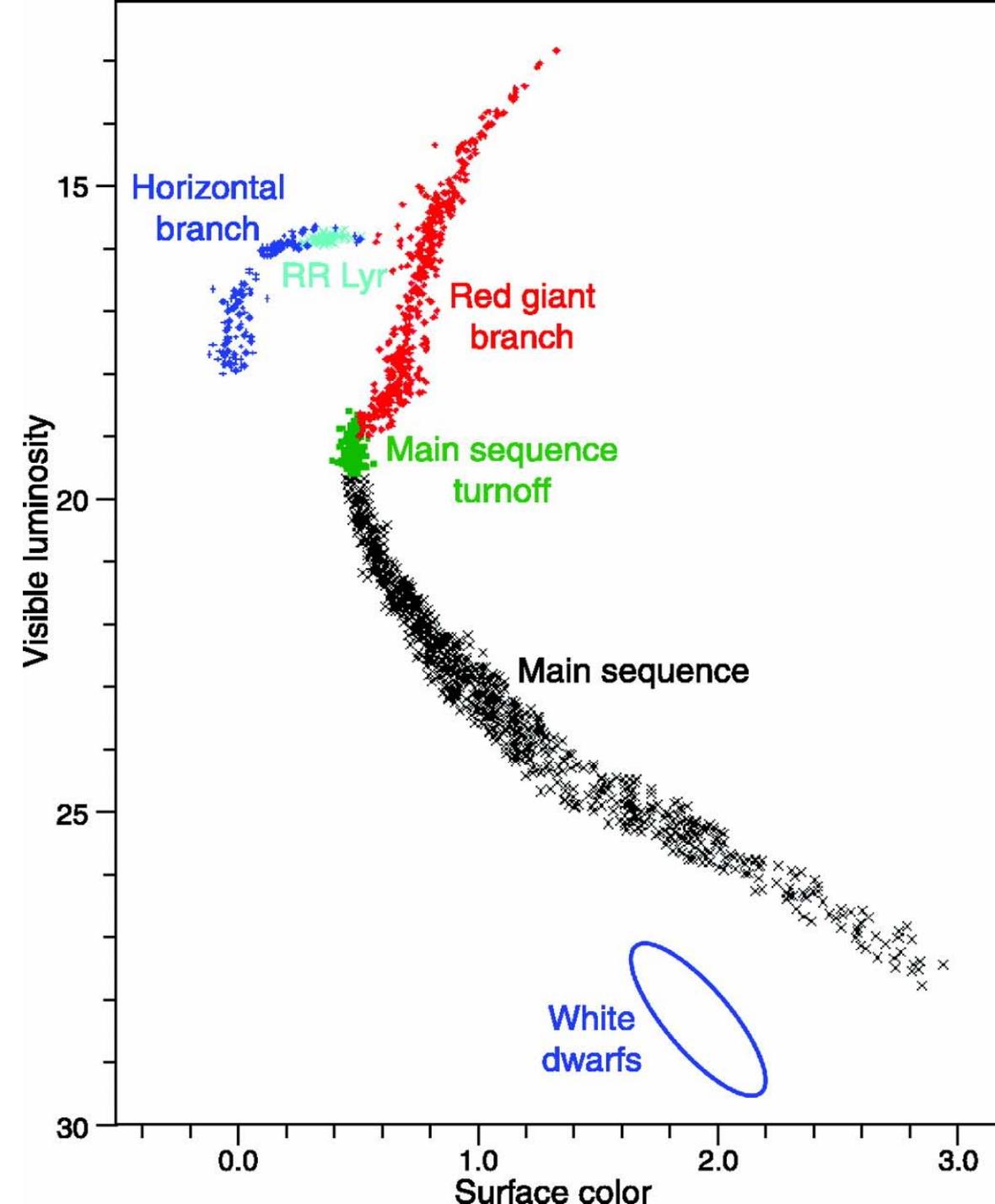


NGC 6946 Larsen et al 2001



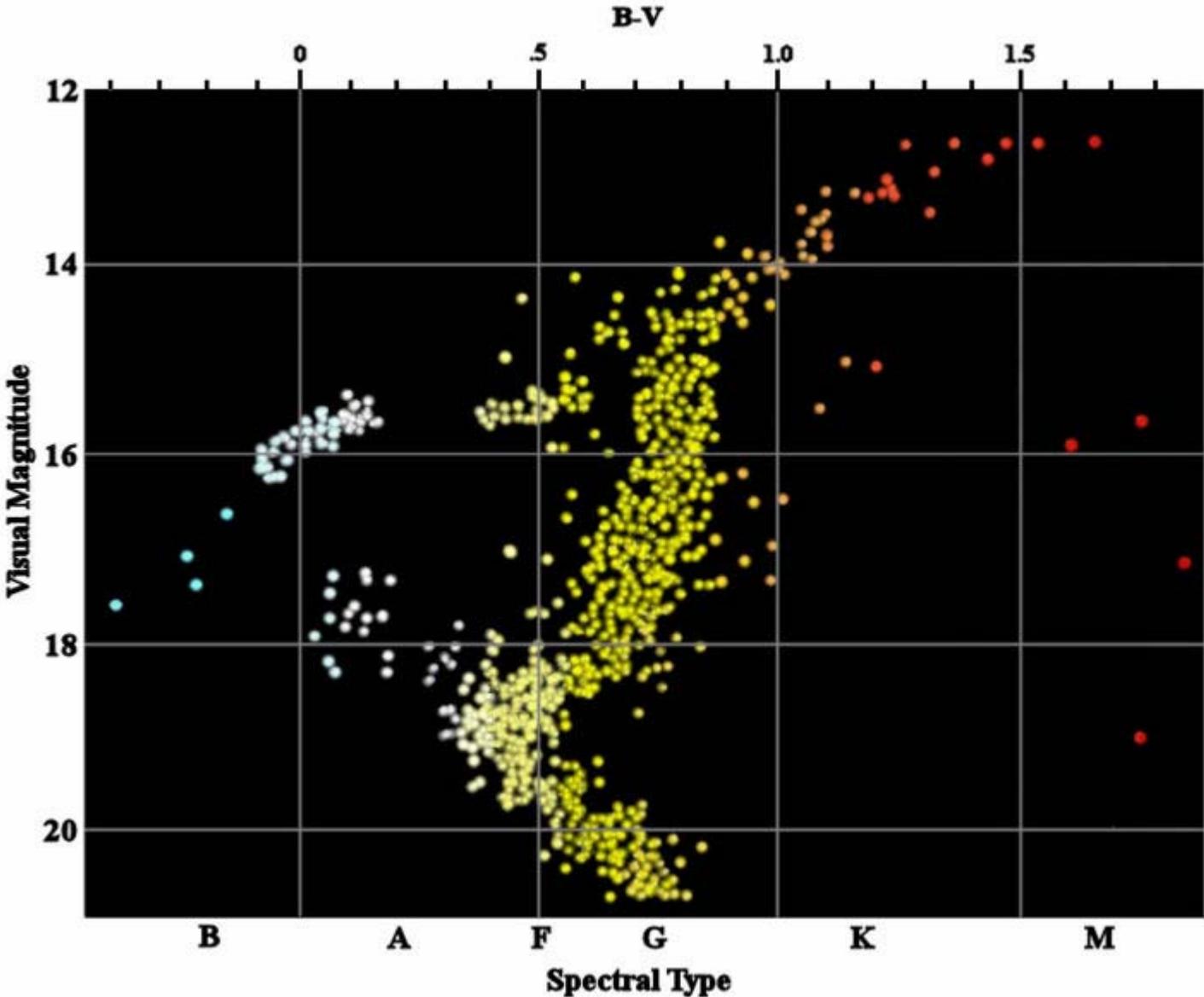
Kugelsternhaufen

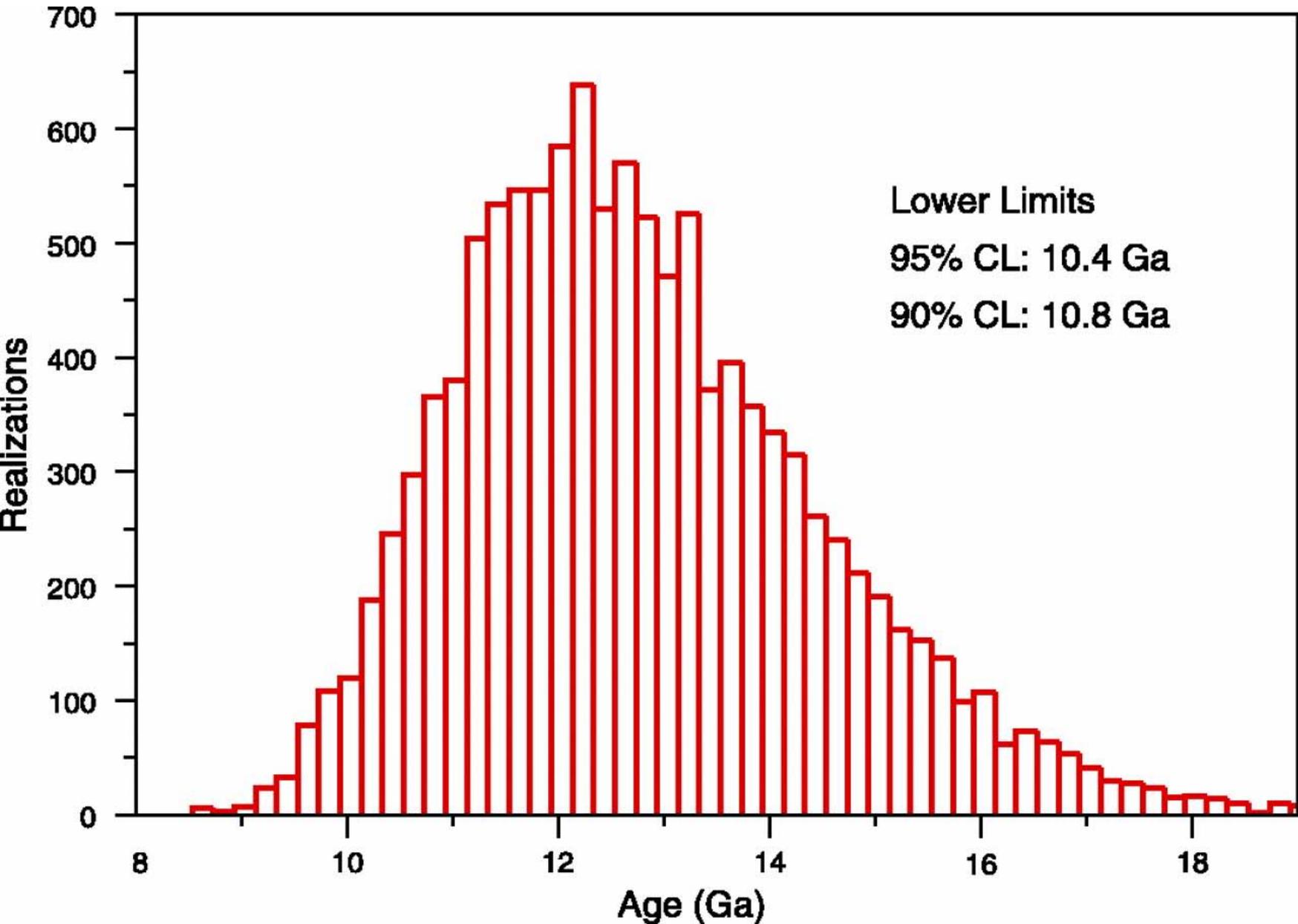
Altersbestimmung



- Farben-Helligkeitsdiagramm für typischen Kugelsternhaufen: Wasserstoffbrennen passiert auf der Hauptreihe, danach Oberfläche kühlt ab und expandiert (Roter Riesen-Ast), schließlich Helium-Fusion im Kern (Horizontalast), nicht stabile Unterklasse (RR-Lyrae), wenn Helium aufgebraucht: Weißer Zwerg
 - Die besten Altersbestimmungen von Kugelsternhaufen (mit der geringsten Ungenauigkeit) sind die, die auf der Leuchtkraft am „**main sequence turnoff point**“ basieren
- Monte Carlo Simulationen
Dann Vergleich mit Beobachtungen

Farben-Helligkeitsdiagramm der Kugelsternhaufen





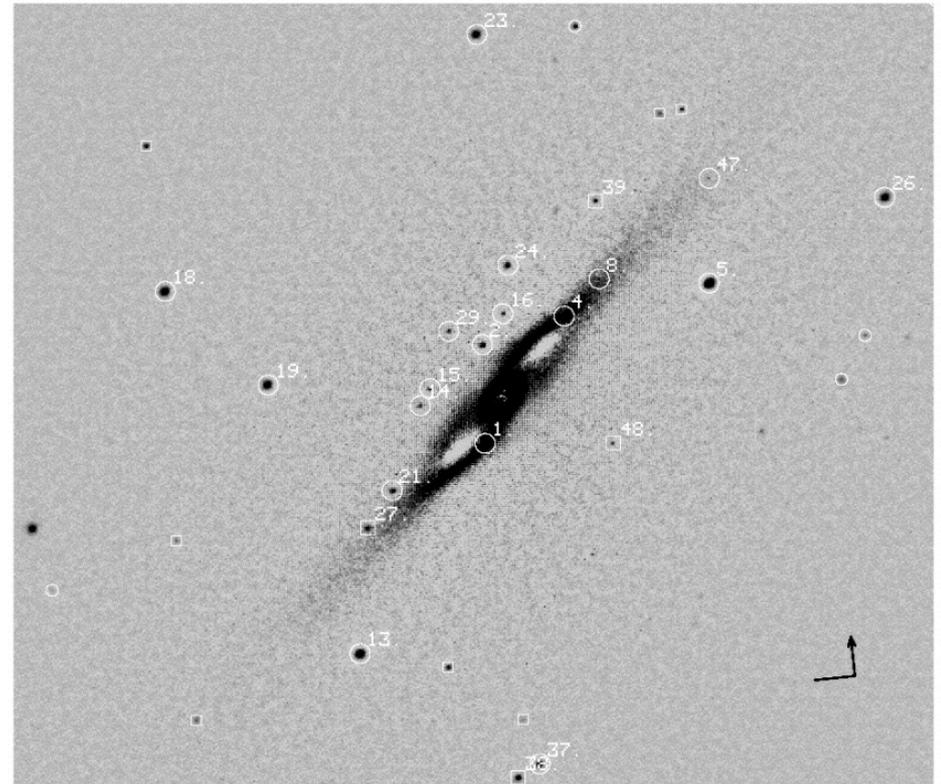
Histogramm stellt die Resultate einer Monte Carlo Simulation basierend auf 10 000 fits für unterschiedliche Eingangparameter um das Alter des CG zu bestimmen



NGC 3610

- Mittleres Alter
(4 Gyr) **Merger Rest**
- Keck Spektren von 6
Kandidaten **junger**
Kugelsternhaufen (+ 2 mit
blauerer Farben)
- $3 < R_g < 13$ kpc
 $R_{\text{eff}3610} = 2.3$ kpc

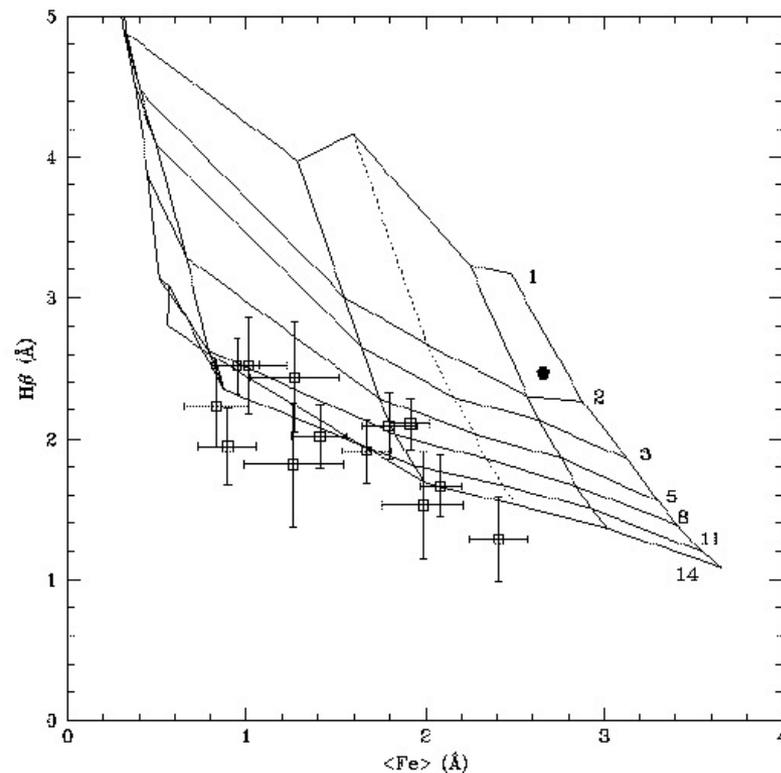
Strader, Brodie,
Schweizer et al (2003)





NGC 7457

- S0 bei 12.2 Mpc
- Merger Rest?
- Entgegengesetzt rotierender Kern
- Zentrales Alter 2–2.5 Gyr (Sil'chenko et al 2002)
- Beide Subpopulationen sind alt !

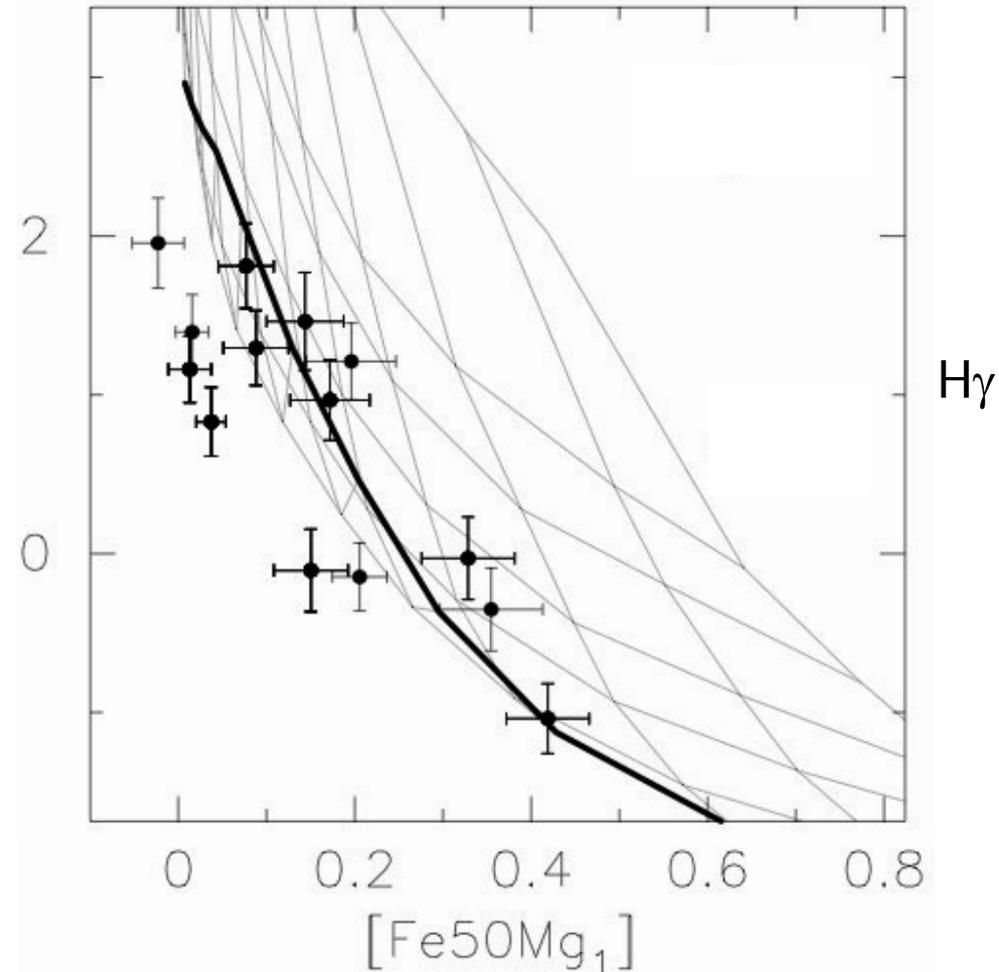


Chomiuk, Strader & Brodie 2004



NGC 1052

- Merger Rest elliptisch in kleiner Gruppe bei 18 Mpc
- HI Gezeitenarme, HI fällt auf den AGN
- Spektroskopisches Alter ~ 2 Gyr
- $[\text{Fe}/\text{H}] \sim +0.6$
- Alle GCs sind ~ 13 Gyr alt





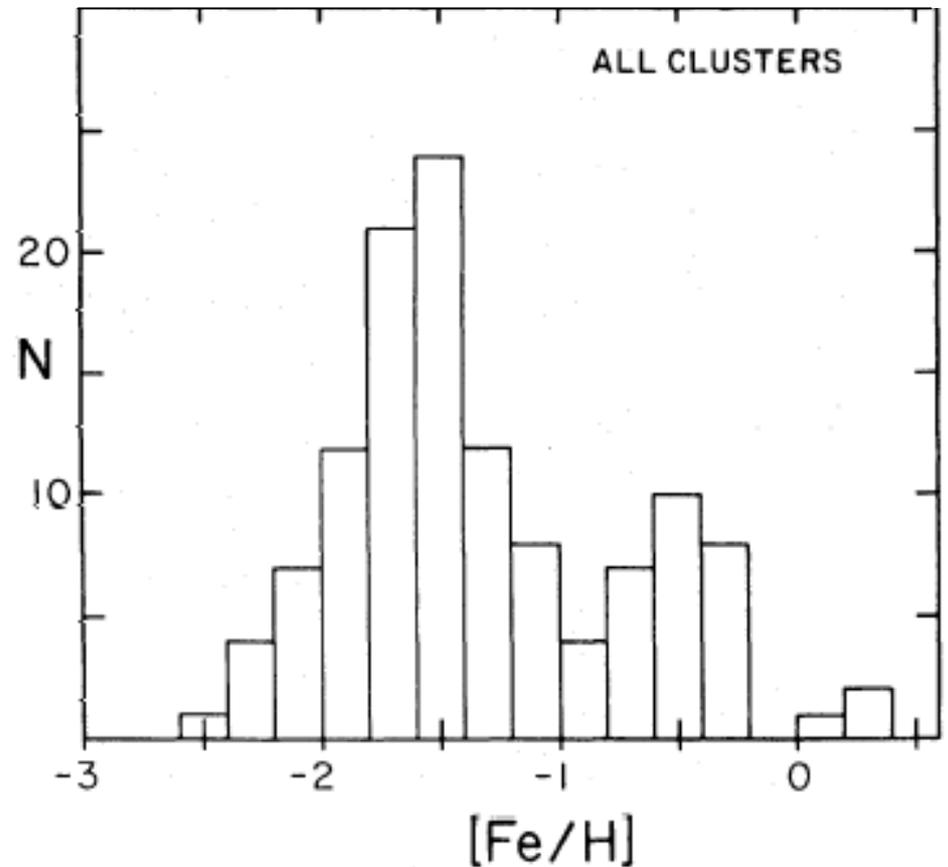
Milchstraße

Peaks bei

$[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.5$ and -0.6

(Zinn 1985)

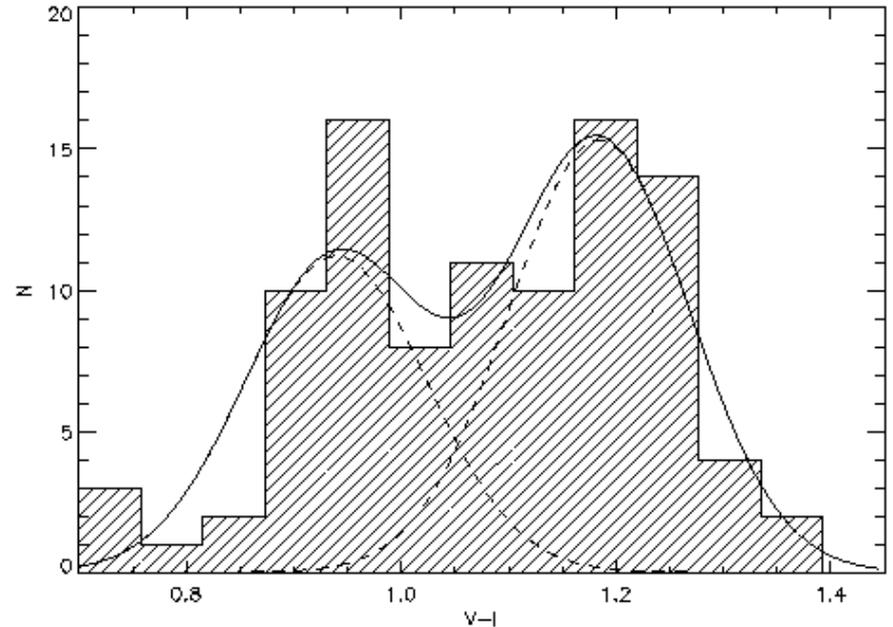
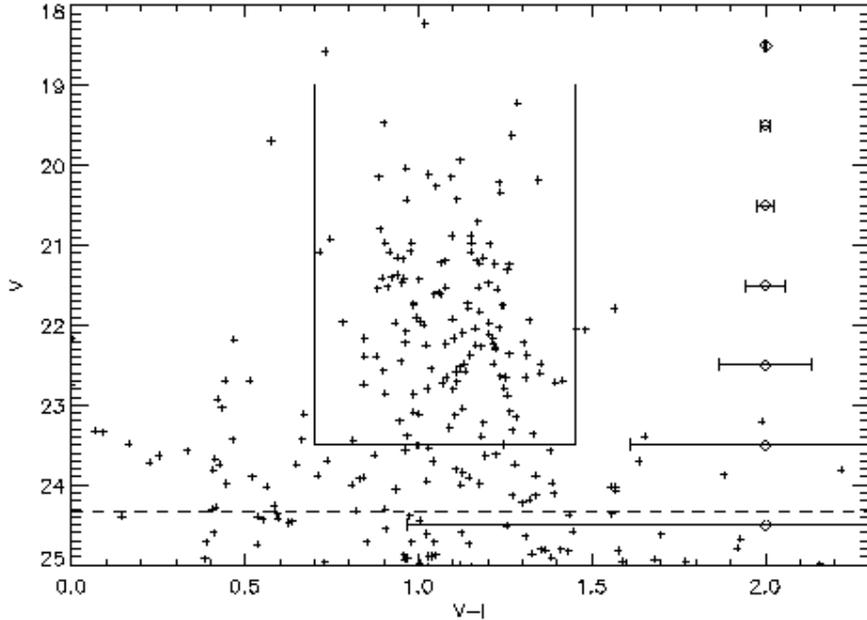
MW GCs sind alle alt



Sombrero

Peaks bei $(V-I)_0=0.96$ und 1.21

Larsen, Forbes & Brodie (MNRAS 2001)



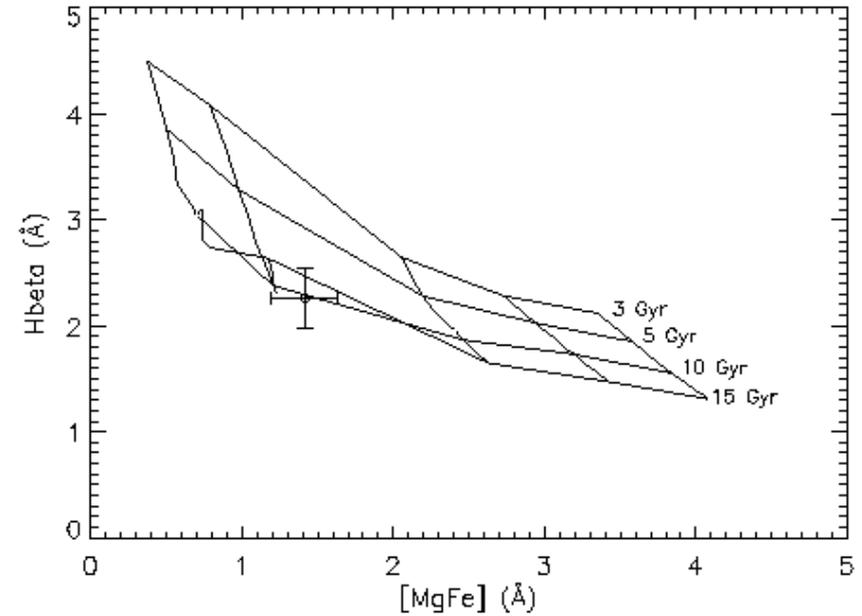
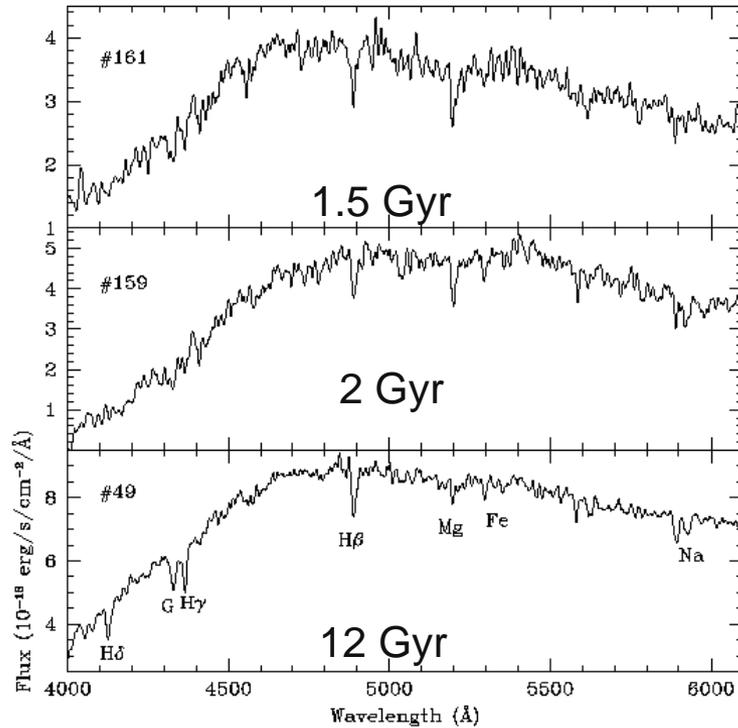
Spektroskopie mit Keck zeigt, größter Teil der Kugelsternhaufen (sowohl rot als auch blau) sind alt (~ 13 Gyr) Larsen, Brodie, Forbes (2002)



Das Alter von Kugelsternhaufen

- Wachsende Evidenz, daß sowohl rote als auch blaue Kugelsternhaufen sehr alt sind (>10 Gyr)
- Geringer Anteil roter Haufen könnte jung sein
- **Elliptische/Lenticulars:**
 - NGC 1399 (Kissler-Patig, Brodie, Schroder et al. 1998; Forbes et al 2001)
 - M87 (Cohen, Blakeslee & Ryzhov 1998)
 - NGC 4472 (Puzia et al 1998; Beasley et al. 2000)
 - NGC 1023 (Larsen & Brodie 2002)
 - NGC 524 (Beasley et al 2003)
 - NGC 3610 (Strader, Brodie et al 2003, 2004)
 - NGC 4365 (Larsen, Brodie et al 2003)
 - NGC 1052 (Pierce et al 2004)
 - NGC 7457 (Chomiuk, Strader & Brodie 2004)
 - + PhD theses of T. Puzia and M. Hempel
- **Spiralen:** M 31 (Barmby et al. 2000; Beasley, Brodie et al 2004)
 - M 81 (Schroder, Brodie, Huchra et al. 2001)
 - M 104 (Larsen, Brodie, Beasley et al 2002)

Wie genau kann das Alter von Kugelsternhaufen bestimmt werden?



Bei Distanzen von Virgo 6 Stunden mit Keck \Rightarrow H β Fehler: $\pm 0.15 - 0.3 \text{ \AA}$
 $\Rightarrow 2 - 4 \text{ Gyr}$ bei 12 Gyr
 Modell-abhängige absolute Alter

■ Modelle sind hochgradig degeneriert bei niedrigen Metallizitäten und hohem Alter

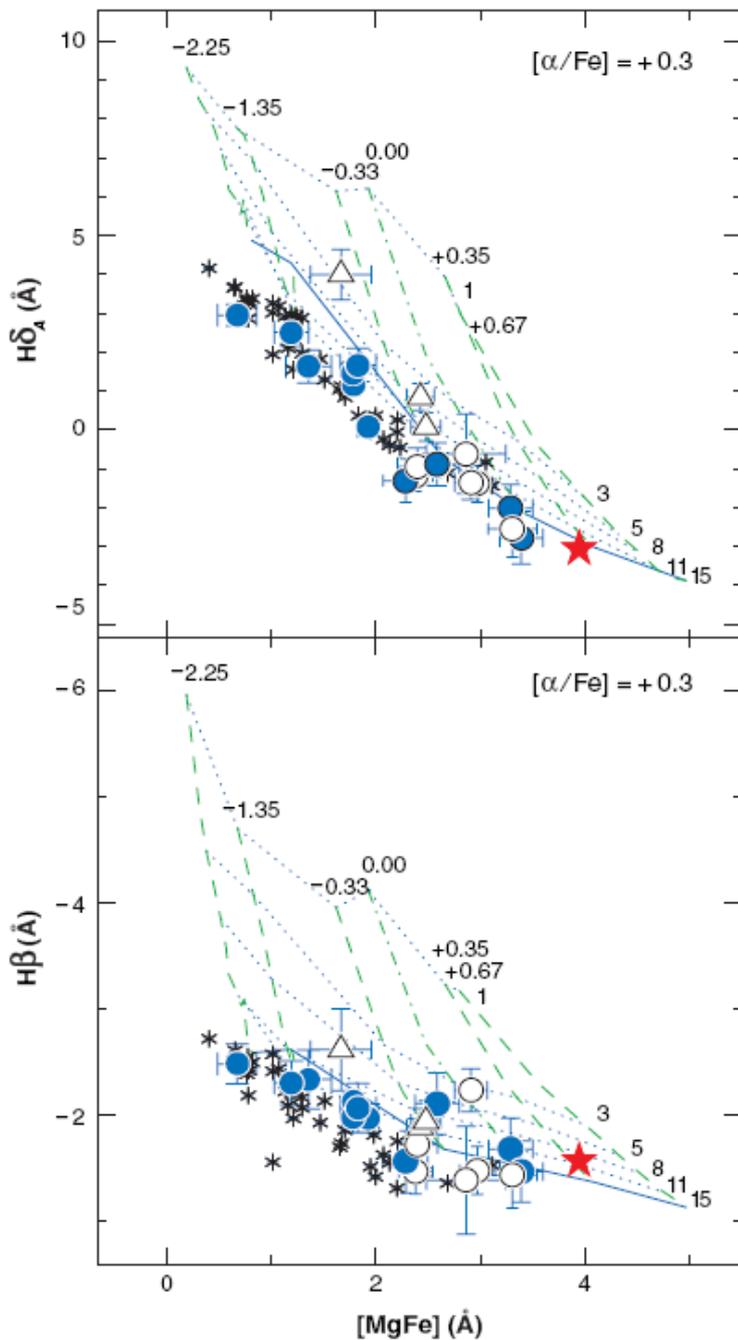


Figure 7

$H\delta_A$ and $H\beta$ versus $[MgFe]$ age-metallicity index-index plots for globular clusters (GCs) in NGC 1407 (circles and triangles; A. J. Cenarro, J. P. Brodie, J. Strader & M. A. Beasley, in preparation) and Galactic GCs (stars, from Schiavon et al. 2004). The blue filled circles are “normal” GCs, the open circles have anomalously high $[Mg/Fe]$ and $[C/Fe]$, and the open triangles are GCs with enhanced Balmer lines (probably due to blue horizontal branches, but younger ages are also a possibility). The large red star is a central $r_e/8$ aperture for NGC 1407 itself. The overplotted grids are Thomas, Maraston, & Korn (2004) models with $[\alpha/Fe] = +0.3$ and the ages and metallicities indicated. The model grid lines cross at old ages and low metallicities, making exact age estimates impossible.

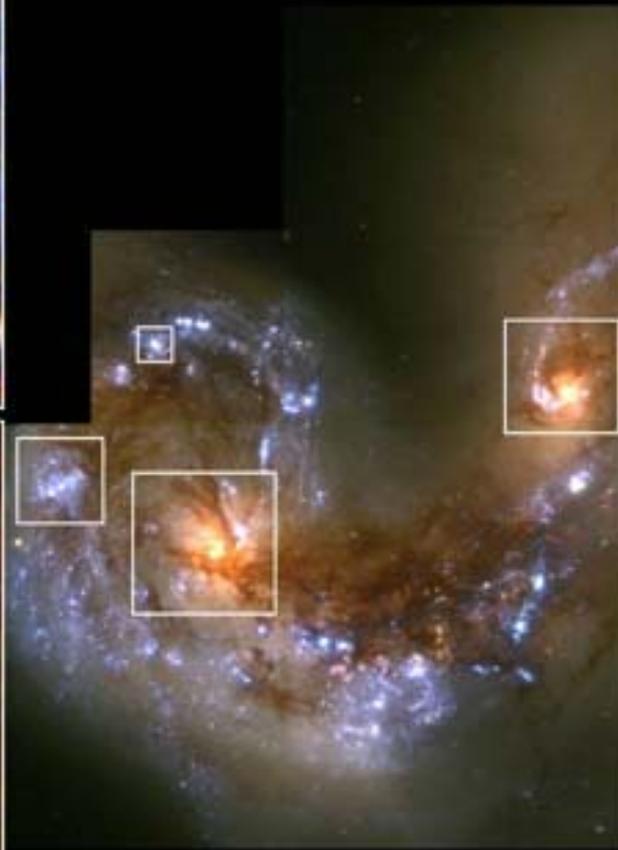
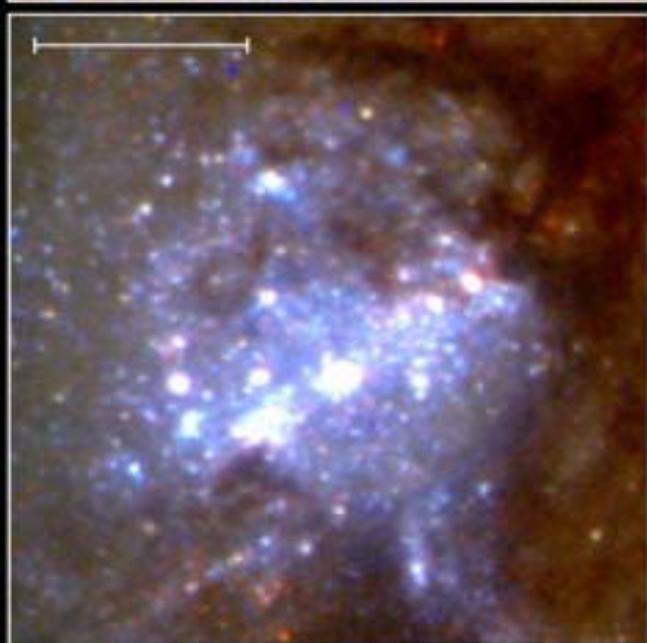
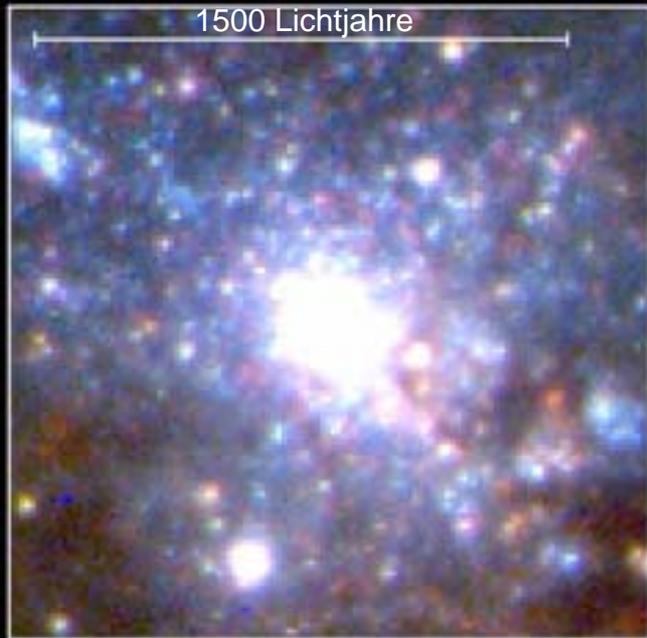


Kugelsternhaufen

Bimodalität der Farben

Sup-Populationen

1500 Lichtjahre





- Links: Kollision der beiden Spiralgalaxien triggert die Entstehung neuer Sterne in Kugelsternhaufen
- Links: Hellste Kugelsternhaufen enthalten ca. 1 Mio Sterne
- Rechts: die Kerne der Galaxien zeigen Gas und Staub in den zentralen Regionen, Kerne in den staubigen Regionen erscheinen rötlich

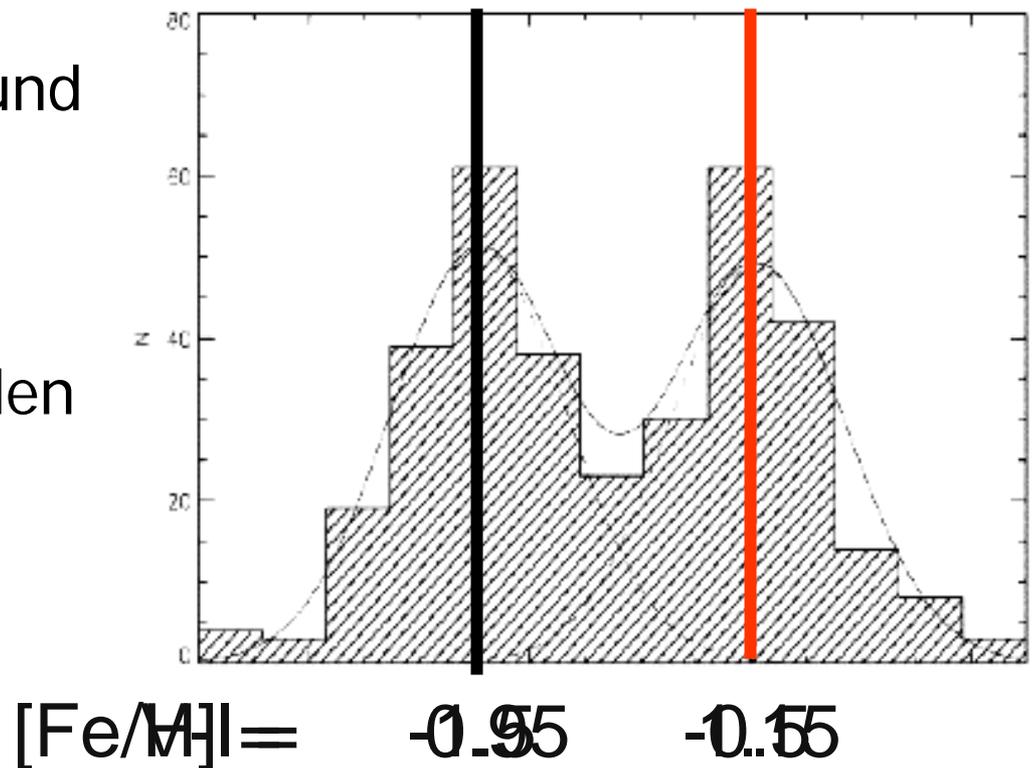


Wichtig! Bimodale Farbverteilung

Bimodal Farb-Verteilung \Rightarrow
Sub-populationen der Kugelsternhaufen

Farbunterschiede aufgrund
von
Altersunterschieden
und /oder
Metallizitäts Unterschieden

\Rightarrow Mehrere Epochen
und/oder Mechanismen
der Entstehung



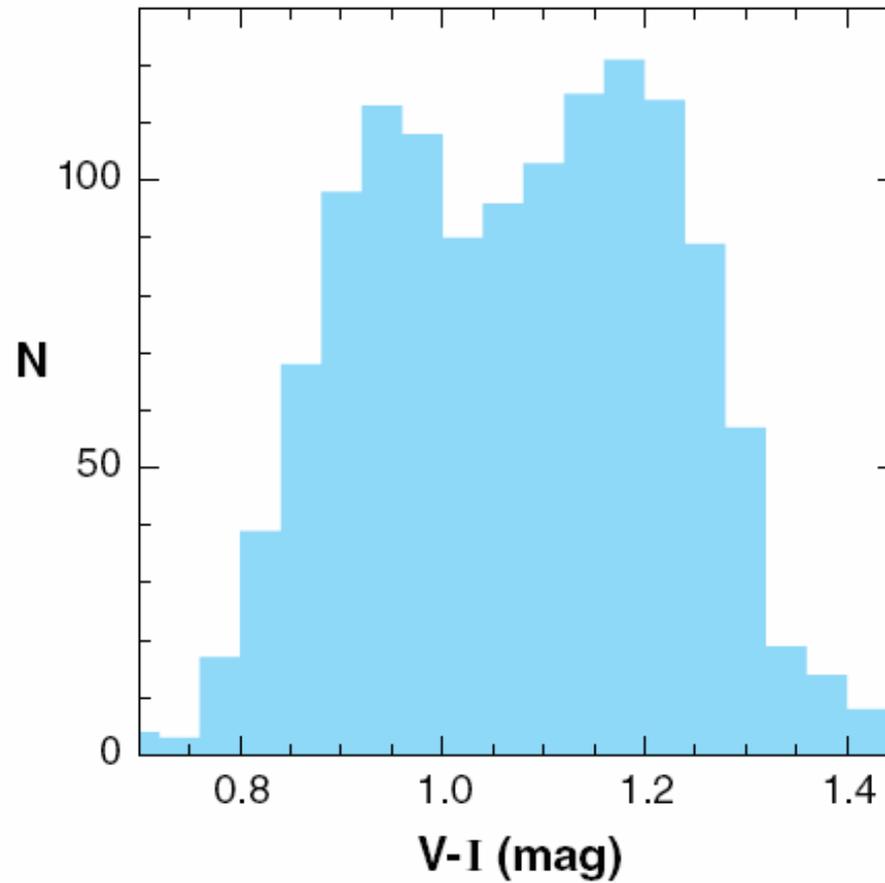


Figure 1

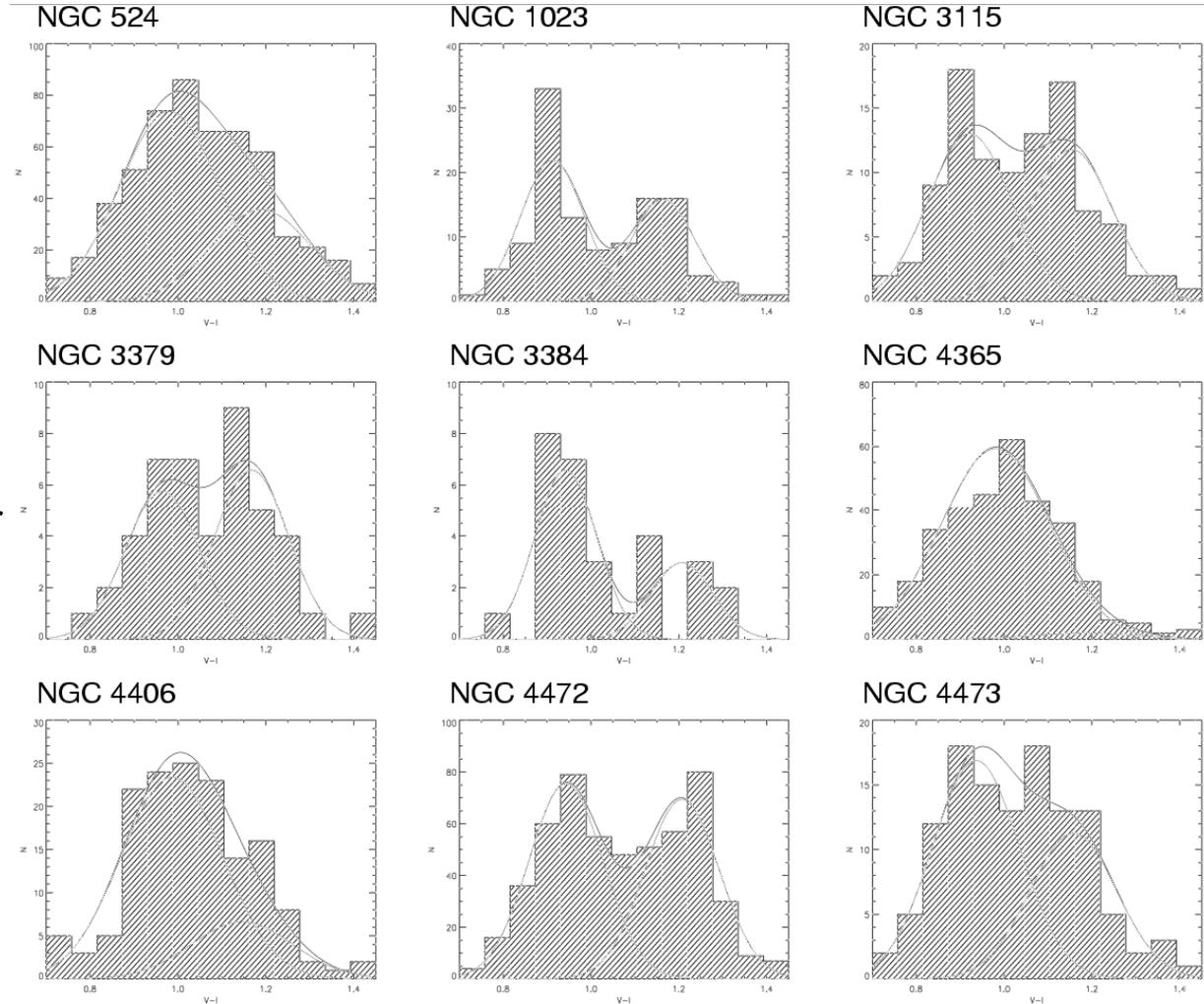
$V - I$ color histogram of globular clusters in the Virgo giant elliptical M87, showing clear bimodality (Larsen et al. 2001; figure from data courtesy of S. Larsen).

Color-Magnitude Diagrams

- Average blue peak color $(V-I)_0 = 0.95 \pm 0.02$
- Average red peak color $(V-I)_0 = 1.18 \pm 0.04$

$[Fe/H] = -1.4, -0.6$

(Kissler-Patig, Brodie, Schroder et al. 1998 AJ)



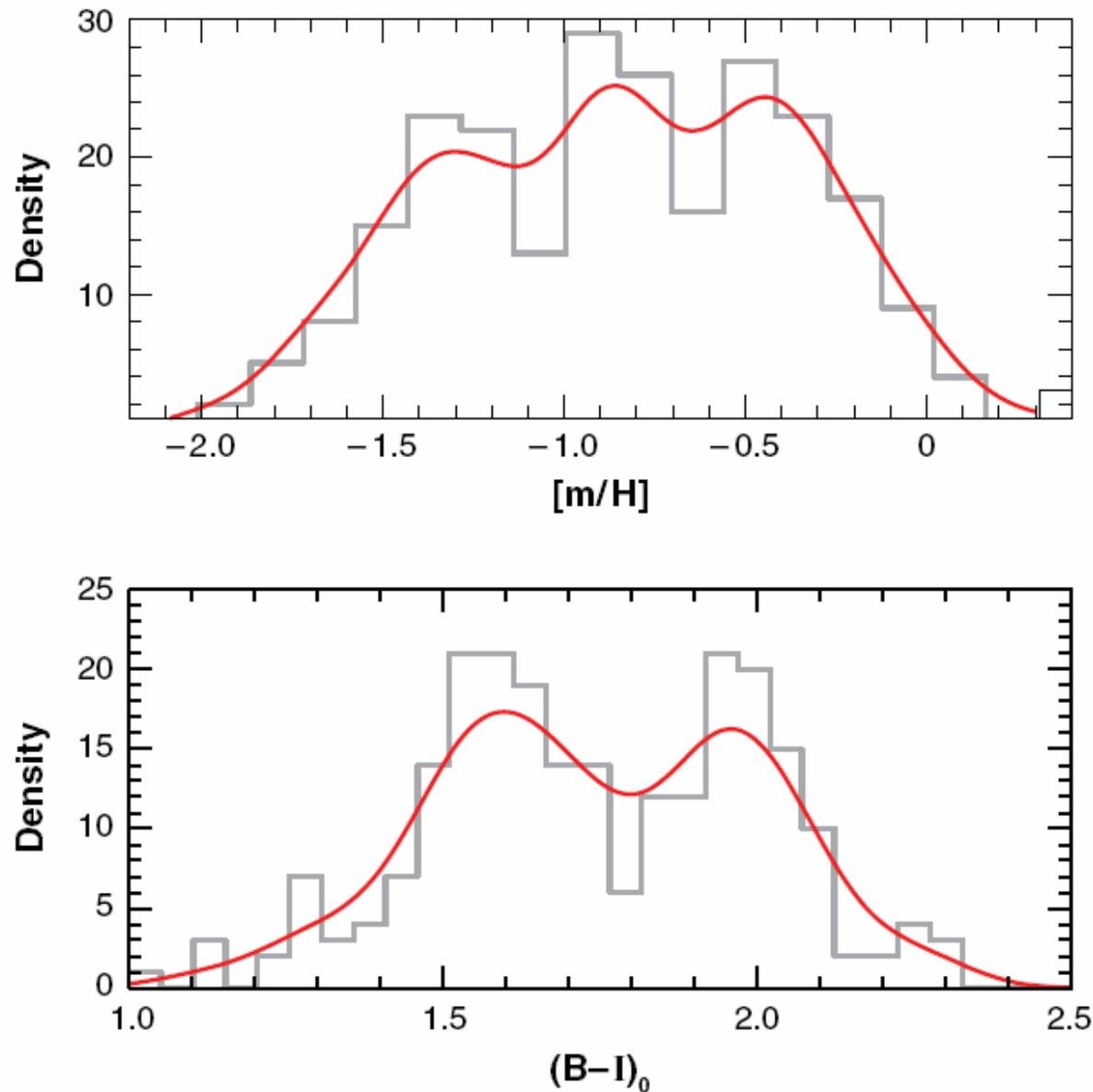


Figure 9

Smoothed kernel density histograms in $V - I$ and $[m/H]$ for globular clusters (GCs) in NGC 5128. The metallicity histogram shows evidence for three distinct subpopulations of GCs, and a comparison of the two histograms indicates the clear nonlinearity of the color–metallicity relation (M.A. Beasley, E.W. Peng, T. Bridges, W.E. Harris, G.L.H. Harris, D.A. Forbes & G. Mackie, in preparation).

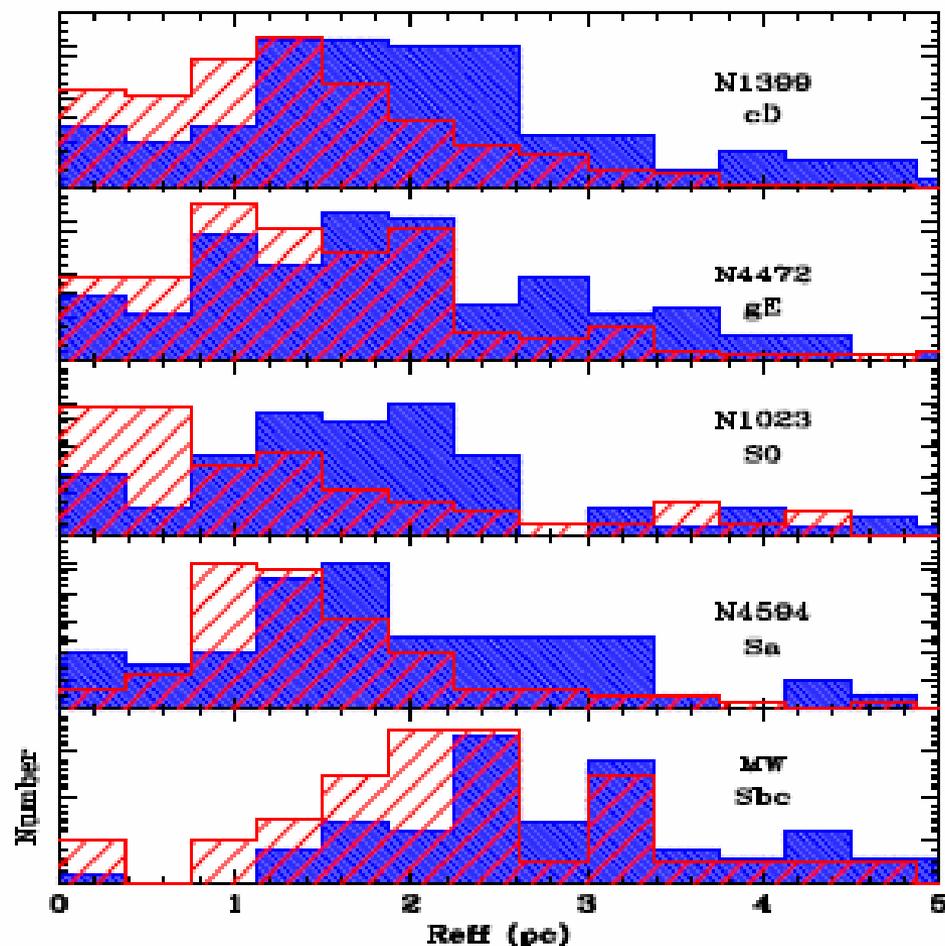


Figure 4. Size of blue and red globular clusters. Blue clusters (shaded) are on average 20% larger than red clusters (hashed) over a wide range of host galaxy Hubble type and luminosity.



Kugelsternhaufen

Modelle zur Erklärung der
Sup-Populationen

GC/Galaxien Bildungs-Modelle

1. Bildung der elliptischen Galaxien/GCs in Merger

(Schweizer 1987,
Ashman & Zepf 1992)

2. In situ/Multi-Phasen Kollaps

(Forbes, Brodie & Grillmair 1997)

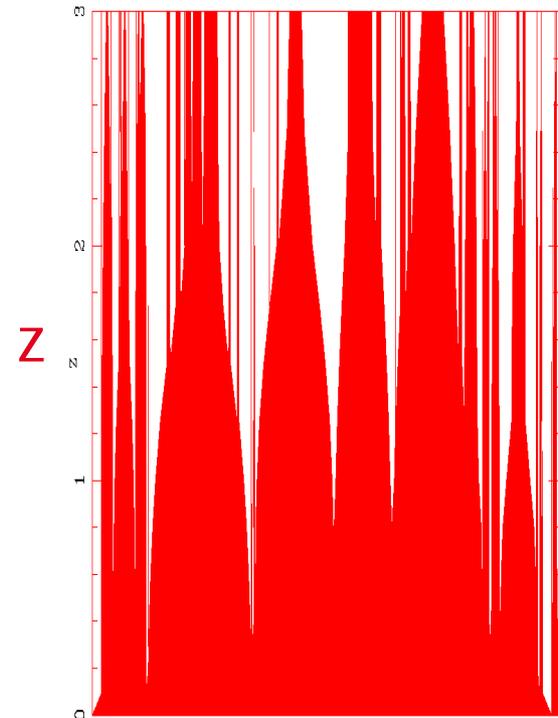
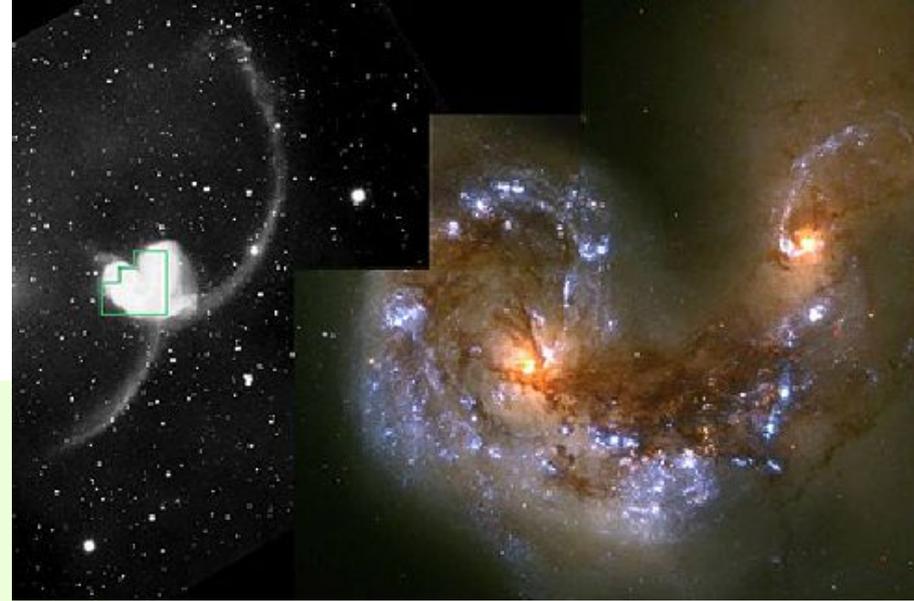
3. Accretion/stripping

(Cote' et al. 1998)

4. Hierarchisches Verschmelzen

(Beasley et al. 2002)

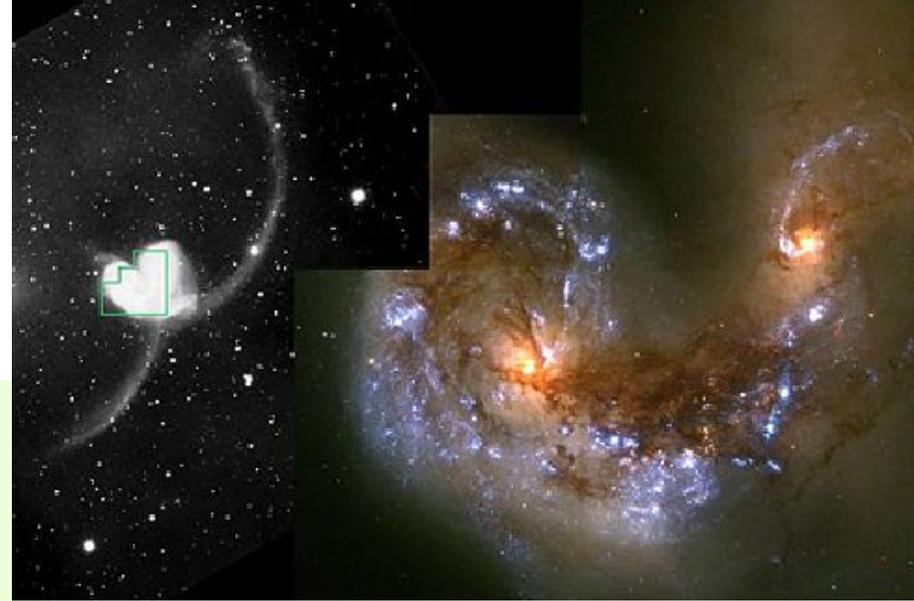
2 & 4 erfordern (temporäres) truncation
(Abschalten) der Bildung der GC bei
hohen Rotverschiebungen



GC/Galaxien Bildungs-Modelle

1. Bildung der elliptischen Galaxien/GCs in Merger

(Schweizer 1987,
Ashman & Zepf 1992)



Zunächst Probleme mit diesem Modell:

Elliptische Galaxien weisen wesentlich mehr Kugelsternhaufen auf, als Spiralsystem gleicher Masse

Die Verschmelzung zweier Spiralgalaxien sollte jedoch zu einer simplen Addition der Anzahl der Kugelsternhaufen führen

Überschuss an Kugelsternhaufen läßt sich nur dann erklären, wenn die Verschmelzung Selbst neue Kugelsternhaufen hervorbringt

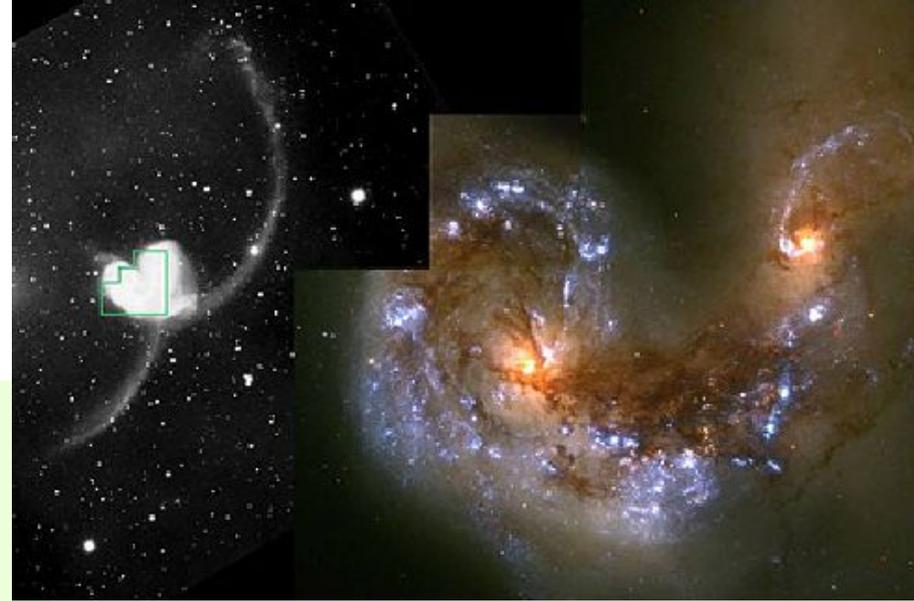
Junge, dichte Sternhaufen dann in starburst-Galaxien mit HST gefunden -> galaktische Kollisionen erzeugen nicht nur neue Sterne sondern auch neue Kugelsternhaufen

Dann sollten alle elliptischen Galaxien (aus Kollisionen von Spiralgalaxien Hervorgegangen) beide Arten von Kugelsternhaufen enthalten, die alten aus den Frühphasen und die jungen, aus Kollisionen

GC/Galaxien Bildungs-Modelle

1. Bildung der elliptischen Galaxien/GCs in Merger

(Schweizer 1987,
Ashman & Zepf 1992)



Weitere Probleme mit diesem Modell:

Dann sollten sich auch Populationen mittleren Alters finden lassen – aber: junge Kugelsternhaufen sind hell, weil die in ihnen enthaltenen massereichen Sterne hell sind, Massereichen Sterne entwickeln sich schnell und vergehen rasch, danach verläuft die Entwicklung wesentlich langsamer

Trotzdem sind Kugelsternhaufen mittleren Alters in mehreren elliptischen Galaxien Gefunden worden: große Population mittelalter Kugelsternhaufen in einer ansonsten Ziemlich normalen elliptischen Galaxie

Mehrere Altersstufen:

I) Wenige Mio Jahre alte Systeme in Galaxien, die gerade erst verschmelzen

II) Einige Milliarden Jahre alte Systeme

III) 12 Milliarden Jahre alte Systeme

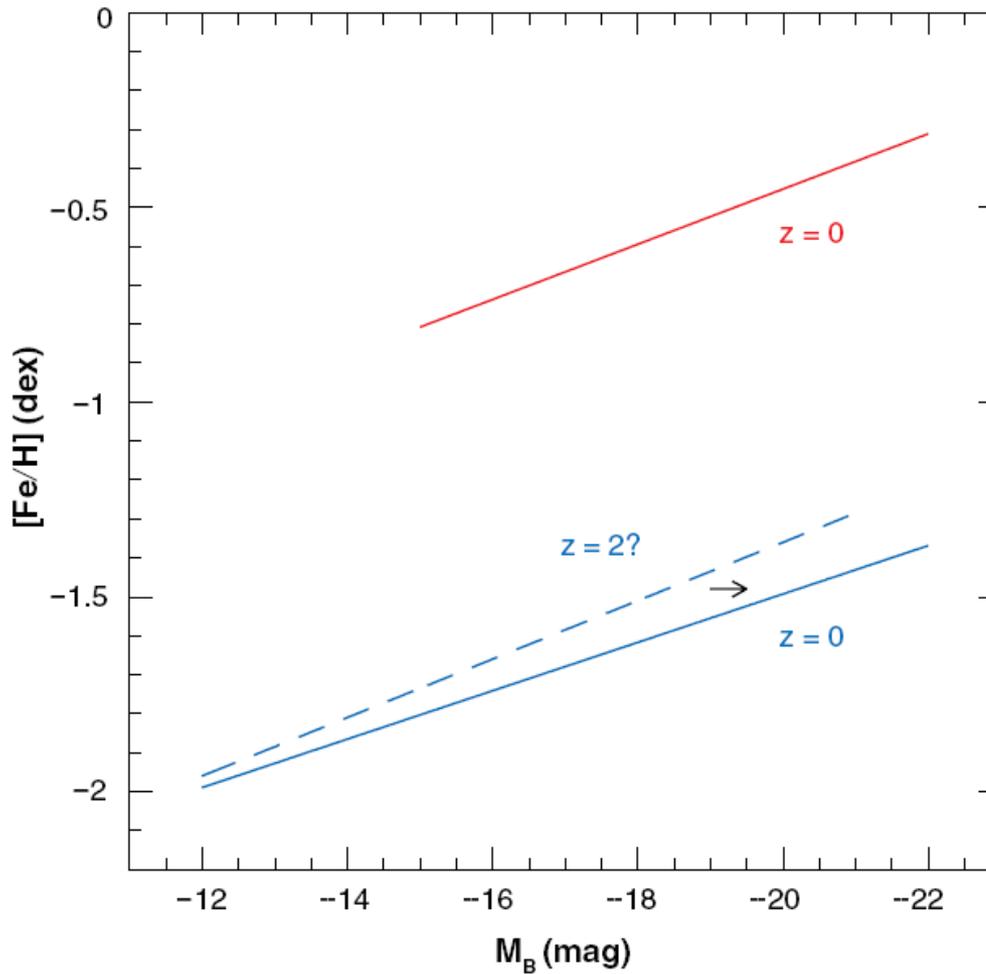


Figure 12

A schematic plot of the evolution of the metal-poor globular cluster metallicity-galaxy luminosity relation due to biased galaxy merging. The solid lines show the $z = 0$ relations for both subpopulations; the dashed blue line shows a conceptual metal-poor relation at higher redshift.

GC/Galaxien Bildungs-Modelle

1. Bildung der elliptischen Galaxien/GCs

in Merger (Schweizer 1987,
Ashman & Zepf 1992)

2. In situ/Multi-Phasen Kollaps

(Forbes, Brodie & Grillmair 1997)

Metallarme GC wurden in Gas-Fragmentation in den frühen Phasen der Galaxien-Entstehung gebildet, dann abgeschnitten bei hohen Rotverschiebungen und hat nach einer „Schlafperiode“ wieder eingesetzt

In der zweiten Phase wurden die metallreichen GC der der Hauptteil der Feldsterne gebildet

Rolle des Feedback??

Kosmische Reionisation als Mechanismus um die Kugelsternhaufen-Bildung zu unterbrechen?

GC/Galaxien Bildungs-Modelle

1. Bildung der elliptischen Galaxien/GCs

in Merger (Schweizer 1987,
Ashman & Zepf 1992)

2. In situ/Multi-Phasen Kollaps

(Forbes, Brodie & Grillmair 1997)

3. Accretion/stripping

(Cote' et al. 1998)

Metallreiche GCs wurden in
Massiver Galaxie gebildet, während
Die metallarmen GCs durch Akkretion
aus den benachbarten Galaxien
geringer Masse gewonnen wurden



Modell Vorhersagen

Schlüssel Eigenschaften:

Alter, Metallizitäten, Häufigkeits-Verhältnisse, Kinematik,
Leuchtkraft-Funktionen der **roten** und **blauen** Sub-populationen

- ◆ **Merger model** → **alte Population** (~Alter des Universums weniger ~1 Gyr) + **junge Population** stimmen mit Alter des Mergers überein
- ◆ **Multi-Phasen Kollaps** → **2 alte Populationen** eine etwas (~2–4 Gyr) jünger als die andere
- ◆ **Akkretion** → **blaue** und **rote** Haufen haben das **gleiche Alter**
- ◆ **Hierarchisches Verschmelzen** → Alters-Substruktur in **roter** Sub-pop + **roten GCs** in Feld/Gruppen Elliptischen geringer Leuchtkraft ~ 2 Gyr jünger als in hellen Haufen-Elliptischen

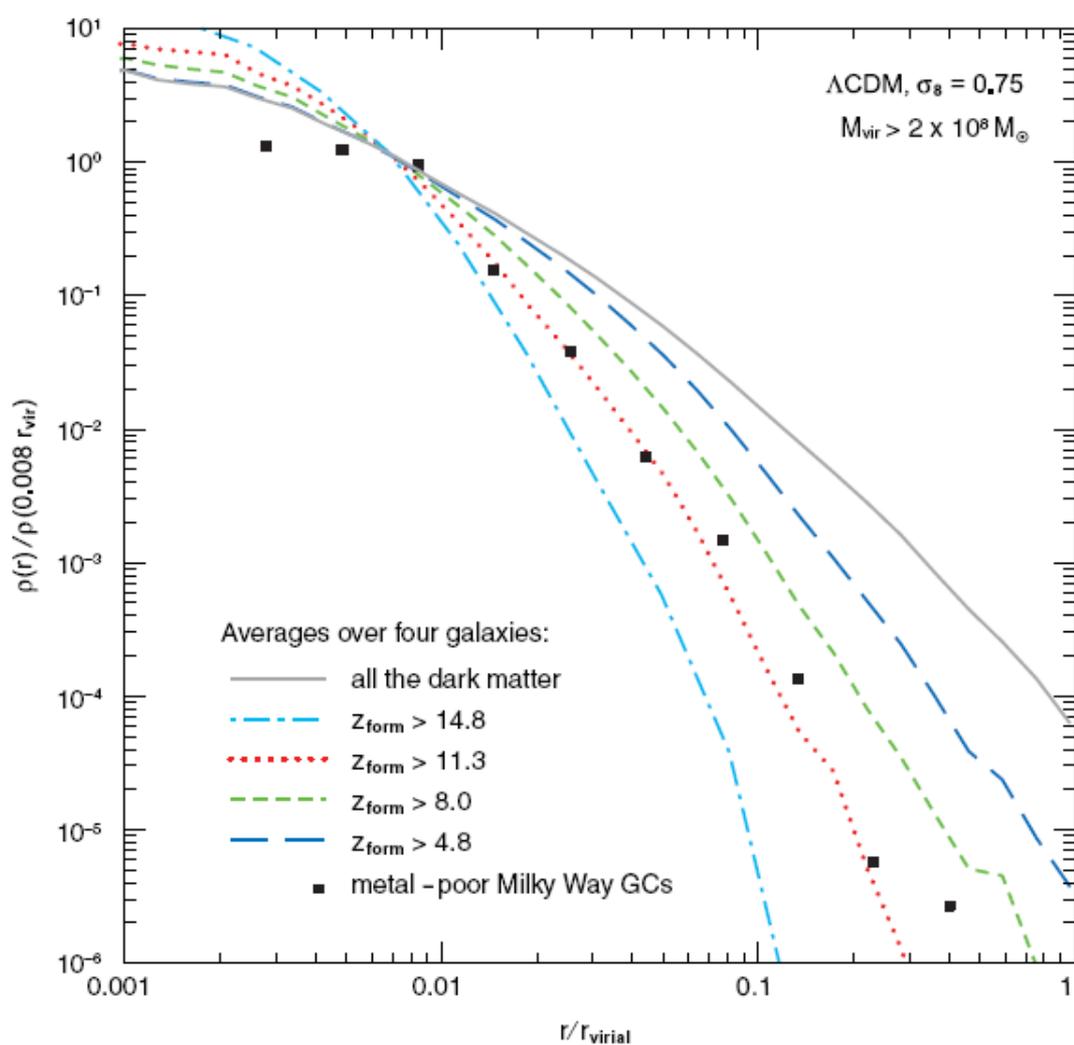


Figure 14

The radial distribution of metal-poor globular clusters in the Galaxy compared to results from numerical simulations of the formation of a Galaxy-like dark-matter halo in a Λ CDM cosmology (Moore et al. 2006). The lines represent the radial distribution of $2 \times 10^8 M_{\odot}$ mass halos that collapsed before: $z = 14.8$ (*light blue dot-dashed*), $z = 11.3$ (*red dotted*), $z = 8.0$ (*short green dashed*), $z = 4.8$ (*long dark blue dashed*), and the cumulative distribution (*solid*). The higher the redshift of collapse, the rarer the peak. Under the assumption that reionization truncates star formation in such halos, the comparison suggests reionization at $z \sim 10$. This redshift and mass combination corresponds to $\sim 2.5\sigma$ peaks.

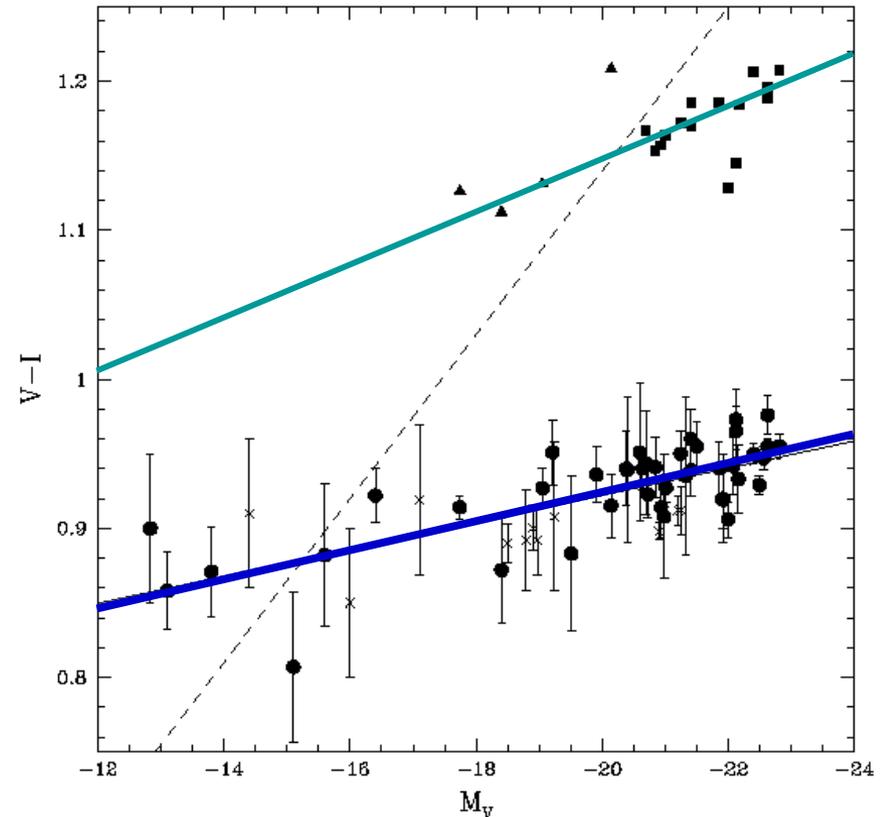


Kugelsternhaufen

Relationen

Kugelsternhaufen und Galaxien-Entstehung

- Farben von sowohl roten als auch blauen GCs korrelieren mit der Galaxienmasse (M_V und σ) und Farbe
- Blaue Relation ist schwierig im Akkretions/major merger Szenario zu erklären: sie hätten schon sehr früh gewußt haben müssen, wie schwer die Galaxie ist/wird und sich darauf eingestellt haben



Strader, Brodie & Forbes 2004

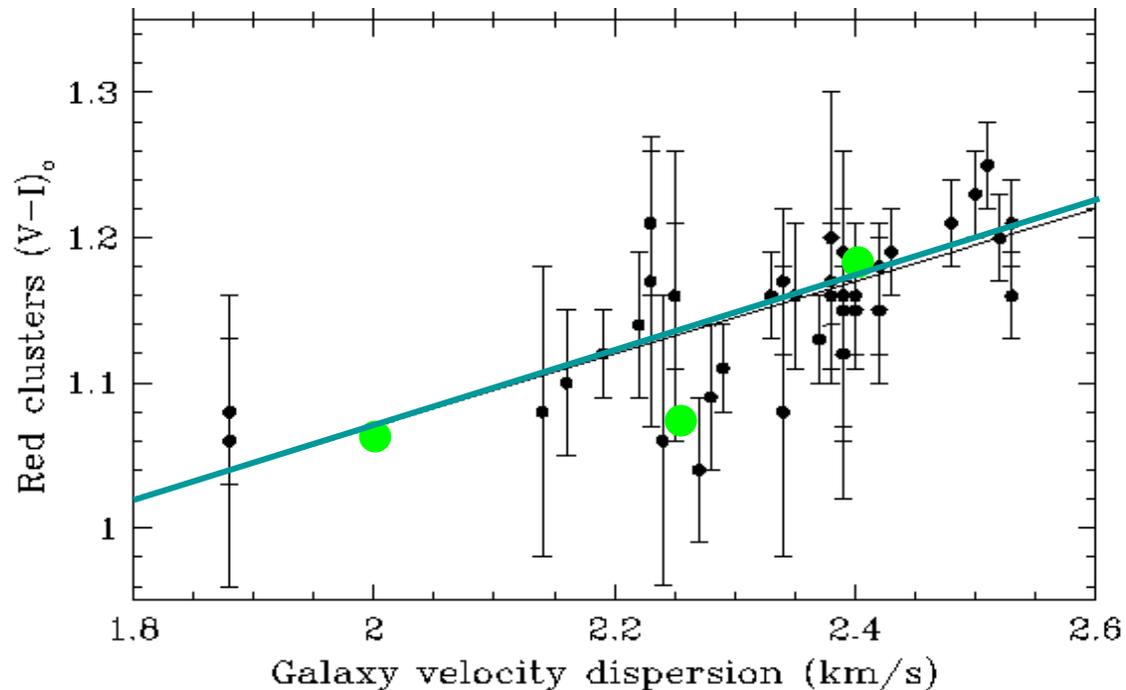
Larsen, Brodie et al 2001

Korrelationen mit Host-Galaxie Eigenschaften

Rote Kugelsternhaufen Relation hat die gleiche Steigung wie die Galaxienfarben Relation \Rightarrow
Rote Kugelsternhaufen und Galaxiensterne haben sich im selben Sternentstehungs-Ereignis gebildet

Metallreiche Kugelsternhaufen in Spiralen und Elliptischen haben denselben Ursprung — sie bildeten sich zusammen mit den Bulge-Sternen

Spiralen passen am besten



Brodie & Huchra 1991; Forbes, Brodie & Grillmair 1997;
Forbes, Larsen & Brodie 2001; Larsen, Brodie, Huchra et al 2001

Bulge S_N

	M104	M31	MW
Hubble type	Sa	Sb	Sbc
Metallreiche GCs	667	100	53
Bulge-zu-Total	0.80	0.25	0.19
Scheiben S_N	4.2	0.21	0.19
Bulge S_N	1.1	0.63	0.84

Die metallreichen GCs in M104 sind assoziiert mit der Bulge- und *nicht* der Scheiben-Komponente

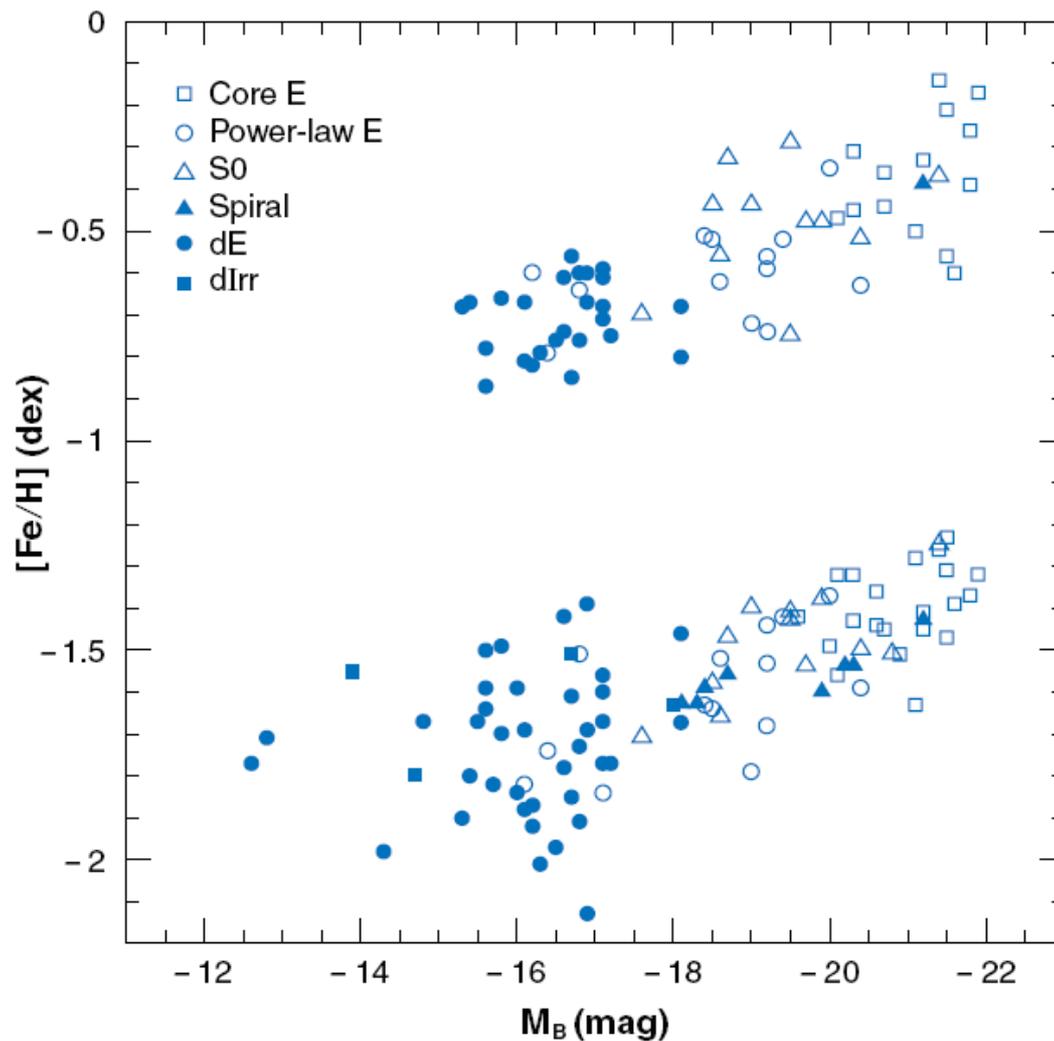


Figure 2

Peak globular cluster (GC) metallicity versus galaxy luminosity (M_B) for metal-poor and metal-rich GCs in a range of galaxies. The points are from Strader et al. (2004b) and J. Strader, J.P. Brodie, L. Spitler & M.A. Beasley (submitted) and have been converted from $V - I$ and $g - z$ to $[Fe/H]$ using the relations of Barmby et al. (2000) and Peng et al. (2006a), respectively. Galaxy types are indicated in the figure key; classifications are in Table 1. Linear relations exist for both subpopulations down to the limit of available data.

Kurze Zusammenfassung

Farb-Verteilung der Kugelsternhaufen in “nahen” Galaxien

- Bimodalität
 - ⇒ Mehrere Epochen/Mechanismus der Entstehung universal
- Beide Sub-Populationen sind alt
 - Inkonsistent mit “major (späte) merger” Bild
 - Galaxien Entstehung bei hohen z – der Rest ist eingefroren
- Ähnlichkeiten zwischen den Peak-Farben in Spiralen und Elliptischen
 - Universaler Kugelsternhaufen Entstehungs-Prozess

Kurze Zusammenfassung

Korrelationen mit Eigenschaften der host-Galaxie

- Steigung der **roten** Kugelsternhaufen Farb- gegen Galaxienmasse-Relation die gleiche wie Galaxienfarbe gegen Galaxienmassen Relation
Gemeinsame Geschichte der Metallanreicherung für metallreiche Kugelsternhaufen (in Spiralen und Elliptischen) und der host-Galaxie
- Anzahl der **metallreichen** Kugelsternhaufen skaliert mit der bulge-Leuchtkraft + **metallreiche** Kugelsternhaufen sind **alt**
- Korrelation zwischen den Farben der Kugelsternhaufen und der Leuchtkraft der host Galaxie (Masse) und Farben für sowohl **rote** als auch **blaue**
Schwierig im merger/Akkretions Szenario zu erklären
Beide Populationen “wußten” über die Größe der finalen Galaxie zu der sie gehören
– Fragmente in denen sich die Kugelsternhaufen gebildet haben in frühen Phasen waren bereits in dunklen Halos der finalen Galaxie eingebettet

..... also

Entstehungs-Szenario:

der Hauptteil

beider Kugelsternhaufen Sub-Populationen

hat sich früh

innerhalb des Potentialtopfes der Protogalaxy in

multiplen Episoden von Sternentstehungsphasen

gebildet

?????????

The image is a composite of two astronomical photographs. The left side shows a wide field of view filled with numerous stars of varying colors, from bright yellow and white to blue and red. A small blue square in the upper left and a red square in the lower right highlight specific regions. The right side is a zoomed-in view of a central region, showing several bright stars with prominent diffraction spikes. A blue circle in the upper right and a red circle in the lower right highlight specific stars. A purple semi-transparent box is overlaid in the center, containing text.

Kugelsternhaufen

(Stellare oder Mittlere)

Schwarze Löcher im Zentrum?

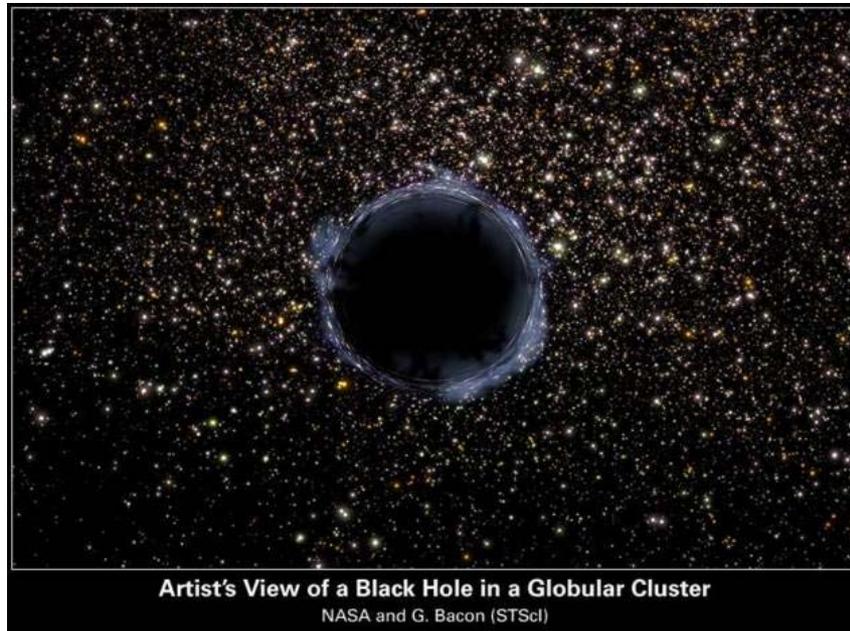
Schwarze Löcher in Kugelsternhaufen?

- Wenn ja, welche Masse? Die „normalen“ **stellaren** oder die gesuchten und **intermediären** (10^2 - 10^6 Sonnenmassen)?
- Probleme mit Kugelsternhaufen und Schwarzen Löchern: größere Wahrscheinlichkeit für enge Begegnungen und Kollisionen zwischen Sternen; führt dies zur Entstehung großer Schwarzer Löcher, oder unterbindet dies die Existenz Schwarzer Löcher in Kugelsternhaufen, unklar
- Theorien: für die Zentren die Entstehung von Schwarzen Löchern mit dem Tausendfachen der Sonnenmasse durch Kollisionen vorausgesagt
- Numerische Simulationen: praktisch alle entstehenden Schwarzen Löcher werden durch enge Vorübergänge schnell aus dem haufen heraus katapultiert
- Zusammenhang mit Bildung der Kugelsternhaufen?

Schwarze Löcher in Kugelsternhaufen?

- In unserer Galaxie: nur 13 helle Röntgenquellen im Milchstraßen-Kugelsternhaufen-System
- Alle könnten Neutronenstern-Akkretions-Systeme beinhalten: 10mal mehr Neutronensterne als Schwarze Löcher würde man erwarten
- z. Bsp. M15: hat mehrere helle Neutronensterne
- Nur Variabilität mit großer Amplitude kann sicherstellen, daß wir Emission von einer Quelle und nicht einer Anzahl von Quellen sehen
- Wichtig die spektroskopische Bestätigung, daß es sich wirklich um einen Kugelsternhaufen handelt
- Intermediäre Schwarze Löcher mit Massen von 10^5 , 10^6 Sonnenmassen existieren laut Barth et al. 2005, Greene & Ho 2006

Alternativen für Schwarze Löcher



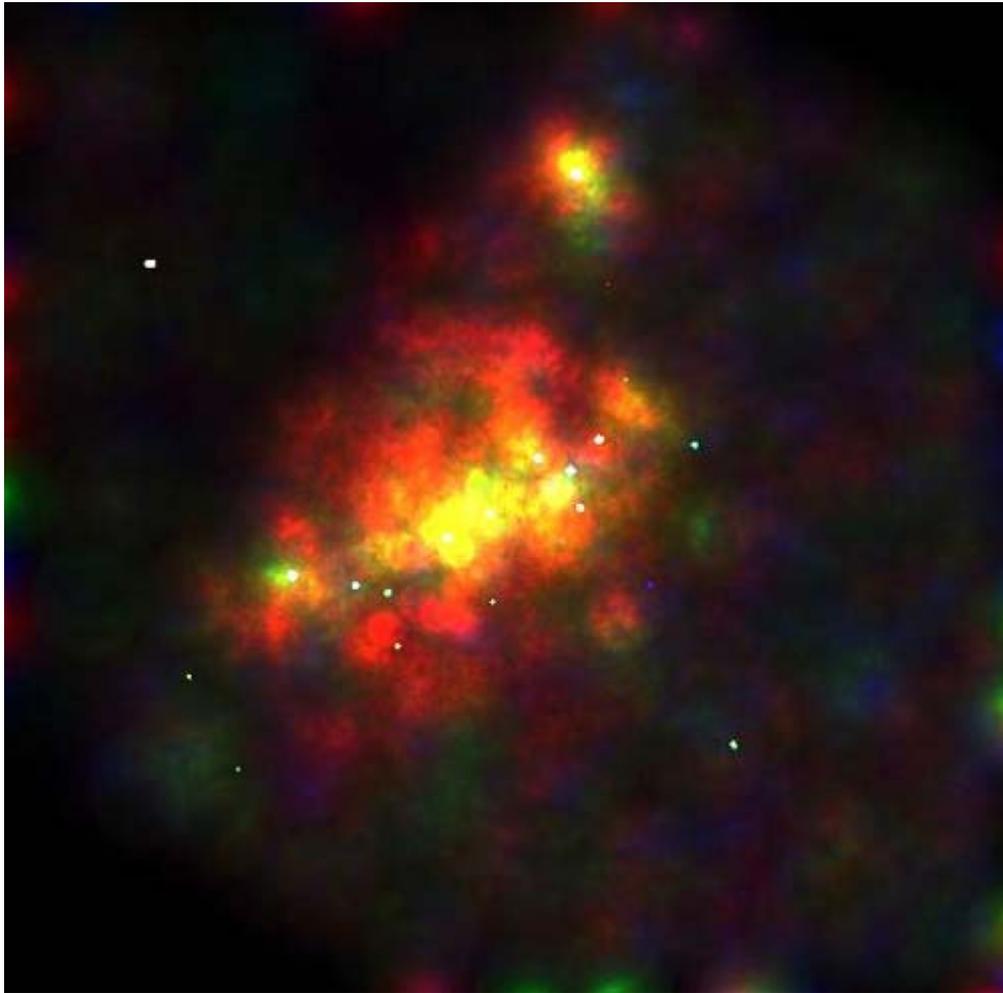
- Große Ansammlung massereicher oder kompakter Sterne:
 - Bosonensterne
 - Fermionenball

klassische Schwarze Löcher		Gravastern	Stringstern	Holostern
Vakuumentyp: relativistisches Vakuum		Vakuumentyp: Dunkle Energie	Vakuumentyp: Strings, Branen	Vakuumentyp: Strings
Schwarzschild 1916	Kerr 1963	Mazur & Mottola 2001	Mathur 2004	Petri 2004
Allgemeine Relativitätstheorie		Quantengravitation	Stringtheorien	Relativitätstheorie, Stringtheorien

Bosonenstern, Fermionenball

- Teilchen mit ganzzahligem Spin: Bosonen (Photonen, Higgs-Teilchen, ..., Graviton, Gluonen)
- Teilchen mit halbzahligem Spin: Fermionen (Quarks, Leptonen)
- Fermionen unterliegen dem Pauli-Prinzip (müssen sich zumindest in einer Quantenzahl unterscheiden), gilt nicht für Bosonen; können daher ein Bose-Einstein-Kondensat bilden
- Bosonen- oder Fermionensterne würden Ausweg aus dem Dilemma der Singularitäten bilden, wären lediglich aus Bosonen wie den Higgs-Teilchen aufgebaut, oder im Fall der Fermionensterne aus Neutrinos oder Gravitinos
- Aber: Können aber nicht die gesamte Massenskala vom stellaren Schwarzen Loch bis hin zum supermassereichen Loch abdecken
- Aber: Auch unklar, wie beim Kollaps eines Sterns aus ganz „normaler“ Materie *nur* Higgs-Teilchen oder *nur* Neutrinos entstehen

Ultraluminous X-ray Sources



A [Chandra](#) image of NGC 4485 and NGC 4490:
two potential ULXs

- Entdeckt in den 80igern durch das Einstein Space Observatory, später mit ROSAT, deutlich mehr Quellen durch XMM und Chandra
- Eine Röntgenquelle, die nicht der Kern der Galaxie ist und leuchtkräftiger als 10^{39} erg/s (10^{32} Watt) (bei isotroper Strahlung)
- Normalerweise eine ULX pro Galaxie; gefunden in allen Galaxientypen, häufiger in Sternentstehungsregionen und in wechselwirkenden Galaxien; einige sind Hintergrund-Quasare
- Leuchtkraft übersteigt Eddington Leuchtkraft der Neutronensterne und stellaren Schwarzen Löcher
- Unklar, was diese ULX antreibt: gebeamte Emission von Objekten stellarer Masse, akkretierende mittelschwere Schwarze Löcher, Super-Eddington Emission

Die meist-diskutierten Fälle

Folgende Kugelsternhaufen gelten als aussichtsreich:

NGC 6093 (M80)

NGC 6266 (M62)

NGC 7078 (**M15**)

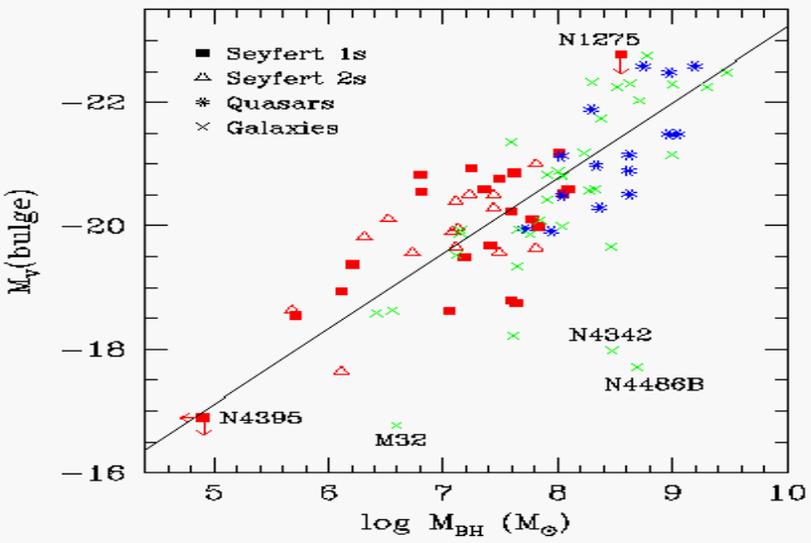
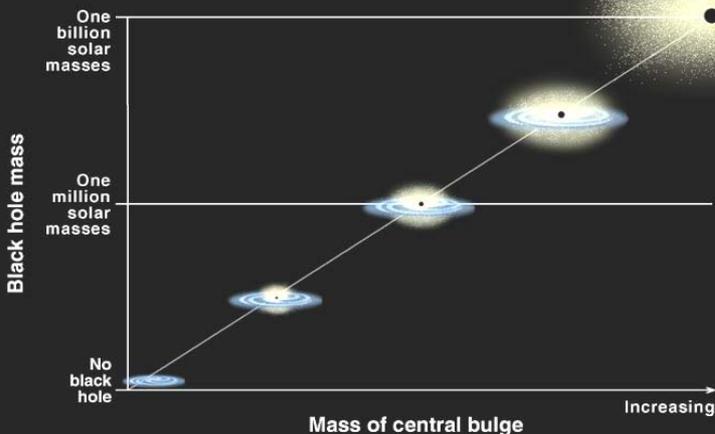
NGC 4472 (**M49**) im Virgo-Haufen

G1 (M31)



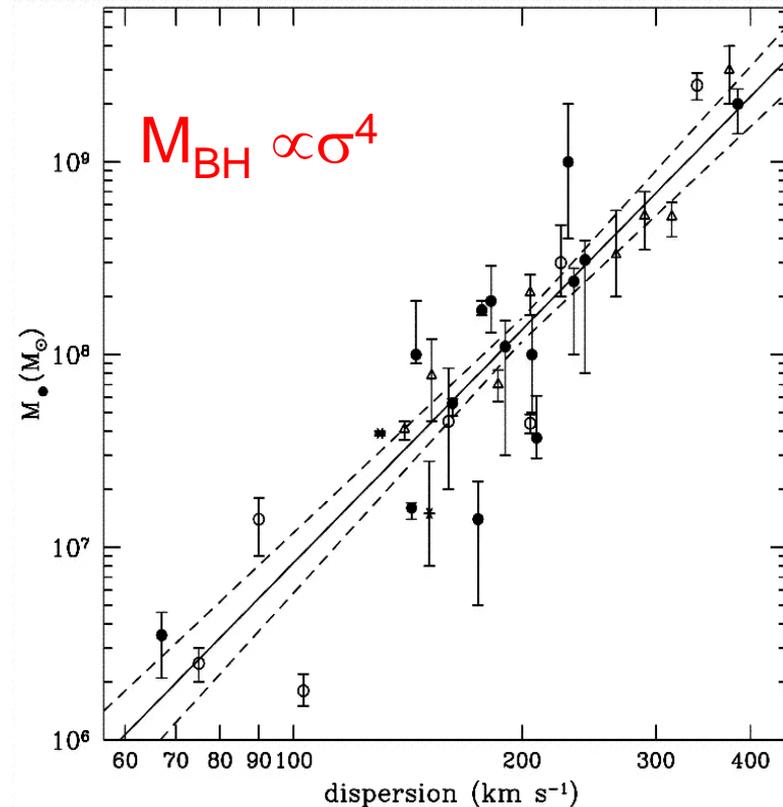
Cosmology: Black Hole - Bulge / Black Hole - velocity dispersion

Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



$$M_{\text{BH}} \propto M_{\text{bulge}}^{1.74}$$

Magorrian et al. 1998



M - σ relation

Gebhardt et al. 2000;
Merritt & Ferrarese 2000;
Tremaine et al. 2002

NGC 6093 (M80)

NGC 6266 (M62)

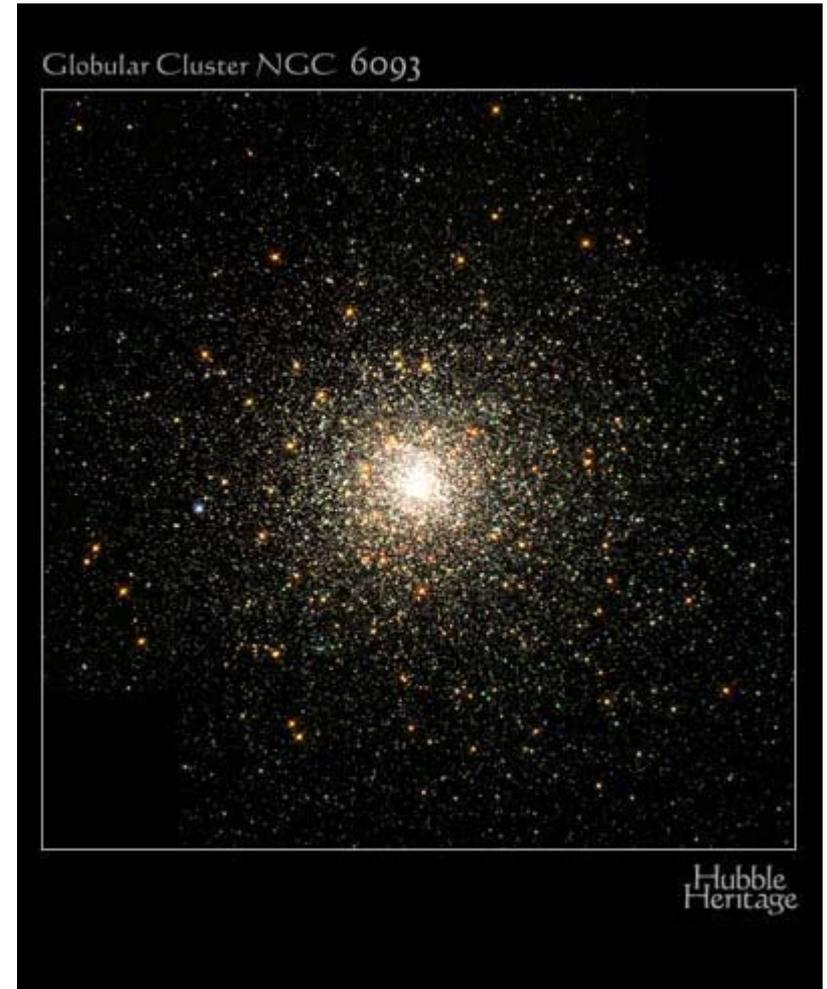
- Aus Relation zwischen Masse der Schwarzen Löcher und Geschwindigkeitsdispersion kann man die Kugelsternhaufen mit passenden Geschwindigkeitsdispersion aussuchen;

Für Kugelsternhaufen: 10-20 km/s

VLA-Beobachtungen zeigen keine Radioquelle

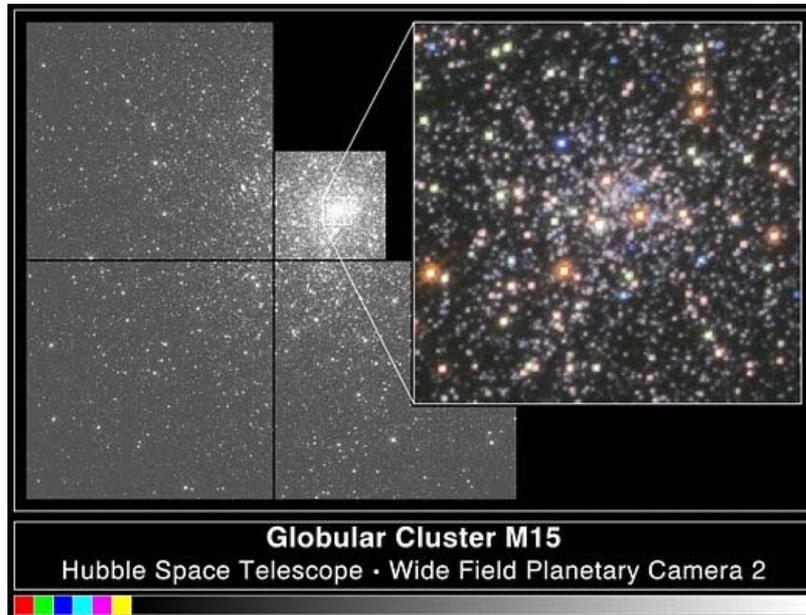
Verschiedene Gründe möglich:

- muß nicht heißen, daß kein Schwarzes Loch da ist
- Akkretion kann episodisch sein, Pech bei der Beobachtung
- Gasdichte kann viel geringer sein verglichen mit Galaxien
- Strahlungseffizienz geringer als erwartet
- Akkretionsmodell vielleicht falsch



NGC 7078 (M15, Milchstraße)

- Mindestens 500 000 Sterne, Sternbild Pegasus
- Aus Bewegung der Sterne im Kugelhaufen Anzeichen für Schwarzes Loch von 4000 Sonnenmassen
- Dann: Röntgenstrahlung aus Akkretionsscheibe, relativ sicher, daß es sich um ein Schwarzes Loch handelt, aber: stellares Schwarzes Loch mit „normaler“ Masse
- Keine Radioquelle mit dem VLA gefunden (paper 2008)



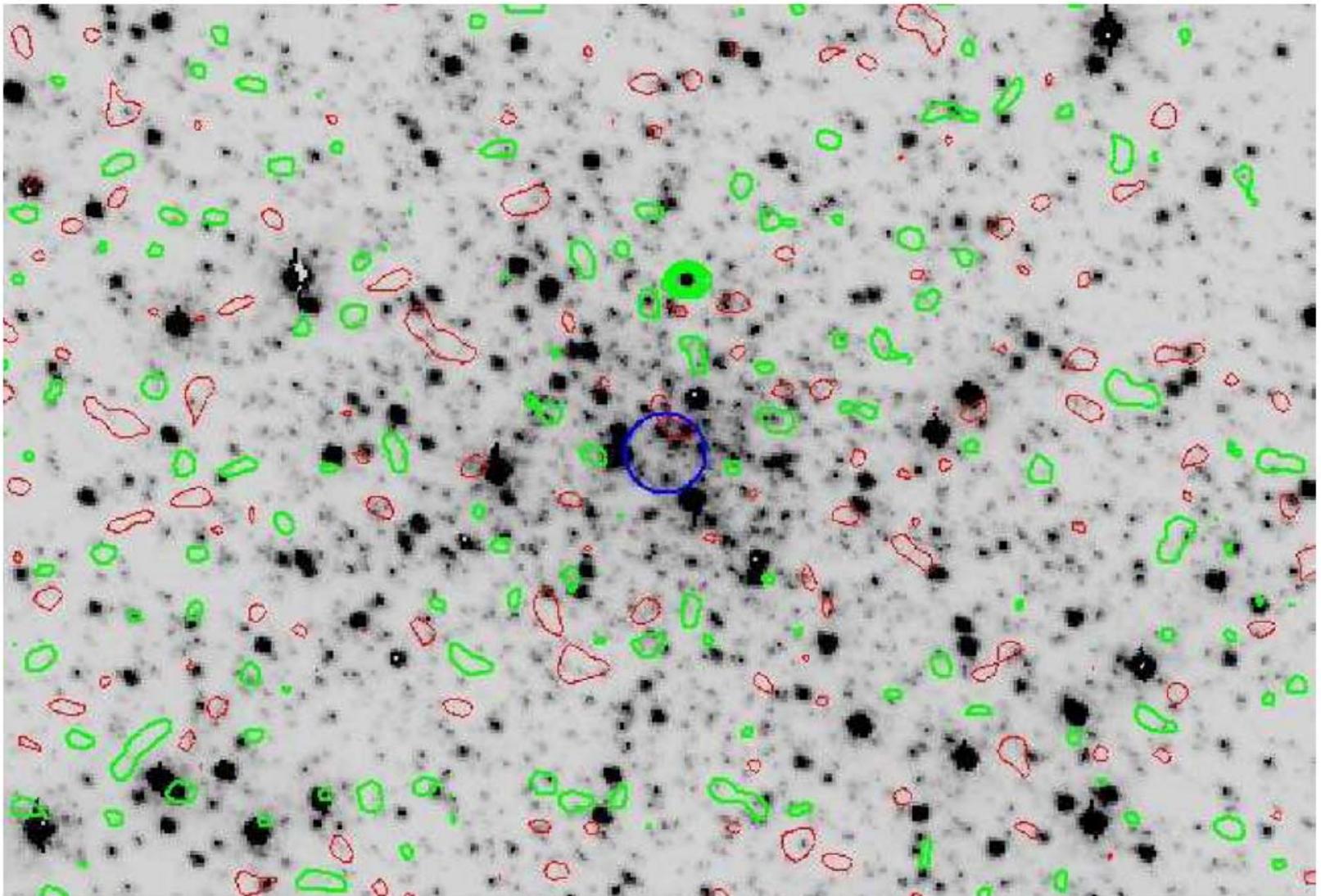


Figure 1. HST optical image of M15 overlaid with the VLA contours of the central 10". Positive 1- σ , 2- σ , and 3- σ noise contours (8.5, 17, and 25.5 μ Jy) are shown in green and negative contours are shown in red. The blue circle marks the center determined from Noyola & Gebhardt (2006), with a diameter of 0.5". North is up and east to the left. The radio source, AC211, is easily seen just north of the center. The other known X-ray source, M15 X-2, is not detected.

(A color version of this figure is available in the online journal)

NGC 4472 (M49, Virgo-Haufen)

- Röntgenquelle im Kugelsternhaufen entdeckt: XMM und Chandra-Beobachtungen zeigen helle Röntgenstrahlung des Kugelsternhaufens, ULX (Ultraluminous X-ray Source)
- Spektrum und Variabilität eindeutiger Beleg für Schwarzes Loch
- Zu hell für einen Neutronenstern
- Keine zufällige Überlagerung einer Röntgenquelle in der Galaxie mit dem Kugelsternhaufen (Wahrscheinlichkeit 0.5%), oder mit entfernter aktiven Galaxie (<0.6%)
- Schnelle Variabilität um Faktor 7 in 3 Stunden: schließt Überlagerung von Strahlung mehrerer Neutronensterne aus
- Bleibt nur: Schwarzes Loch, Spektrum stimmt mit Strahlung einer Akkretionsscheibe mit einem Innenradius von 4400 km überein, stimmt dieser Innenradius mit dem innersten stabilen Orbit um das Schwarze Loch überein, besitzt das Schwarze Loch eine Masse von ca. 400 Sonnenmassen (mittleres!!!)
- Kann aber auch stellares Schwarzes Loch mit nur wenigen Sonnenmassen sein
- BESTER KANDIDAT !!

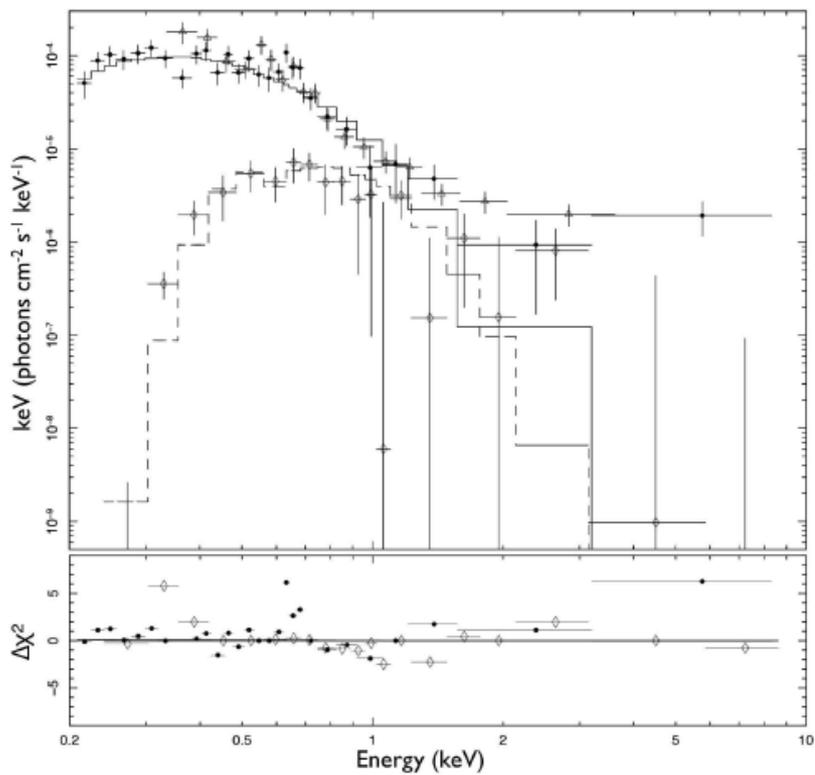


Figure 1. XMM-Newton EPIC pn spectra and $\Delta\chi^2$ residuals for an absorbed MCD model fit for bright (solid circle, solid line) and faint (open diamond circle, dashed line) epochs. The Chandra spectrum (open triangle) is also overlapped to demonstrate its likeness to the bright epoch XMM-Newton data.

XMM- Spektrum für helle (ausgefüllter Kreis) Phase
 Für schwache (offene Rauten, Kreise)
 Chandra(offene Dreiecke)

Shih et al. 2008

Maccarone et al. 2007

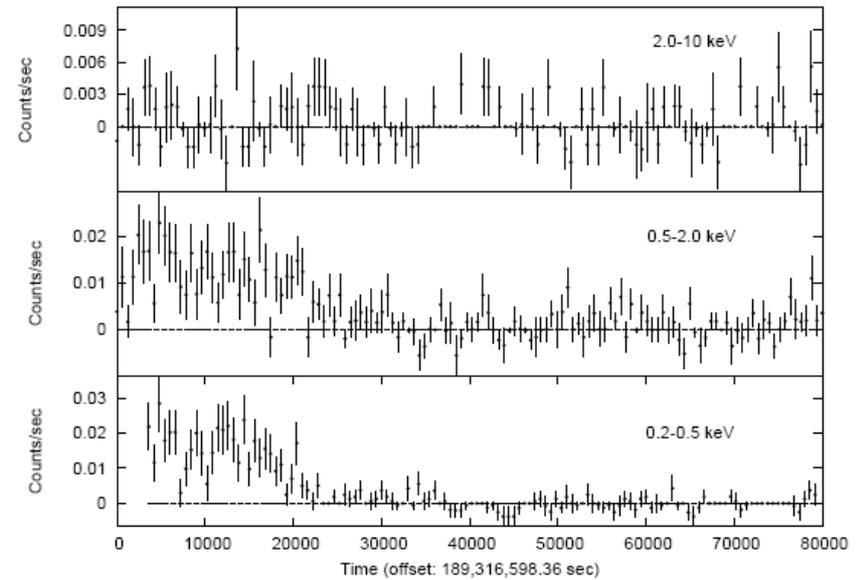


Figure 2. The XMM-Newton lightcurves in three colours: 0.2-0.5, 0.5-2.0, and 2.0-10.0 keV. The integration time is 600 second and dash lines in each panels emphasise the zero counts/s level.

Shih et al. 2008

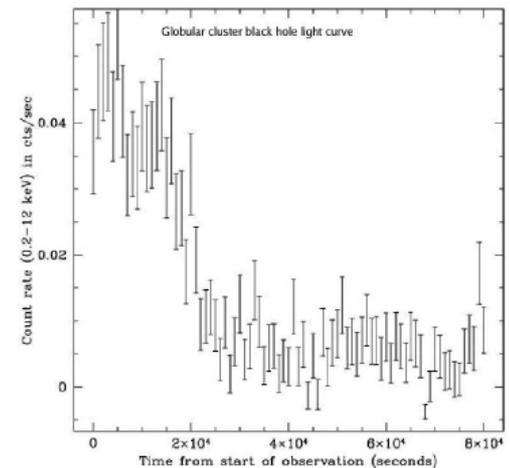


Figure 1. The XMM-Newton light curve of XMMU J1229397+07533.

NGC 4472 (M49, Virgo-Haufen)

- Entweder:

- Intermediäres Schwarzes Loch mit einigen 100 Sonnenmassen, einige Prozent der Eddington-Rate; Akkretionsscheibe dehnt sich in den inneren stabilen zirkularen Orbit aus

oder

- Oder stellares Schwarzes Loch mit Super-Eddington Akkretion

⇒ Wahrscheinlich stellares Schwarzes Loch, was wesentlich schneller akkretiert als seine Eddington-Rate

G1 (M31, Andromedanebel)

- Andromeda besitzt vermutlich 500 Kugelsternhaufen
- Aus Bewegung von Sternen in Kugelhaufen Anzeichen für Schwarzes Loch mit 17 000 Sonnenmassen
- Chandra Beobachtungen
- Radio-Beobachtungen mit 28 μJy Quelle im Zentrum (oder Pulsar-Wind oder Planetarischer Nebel)



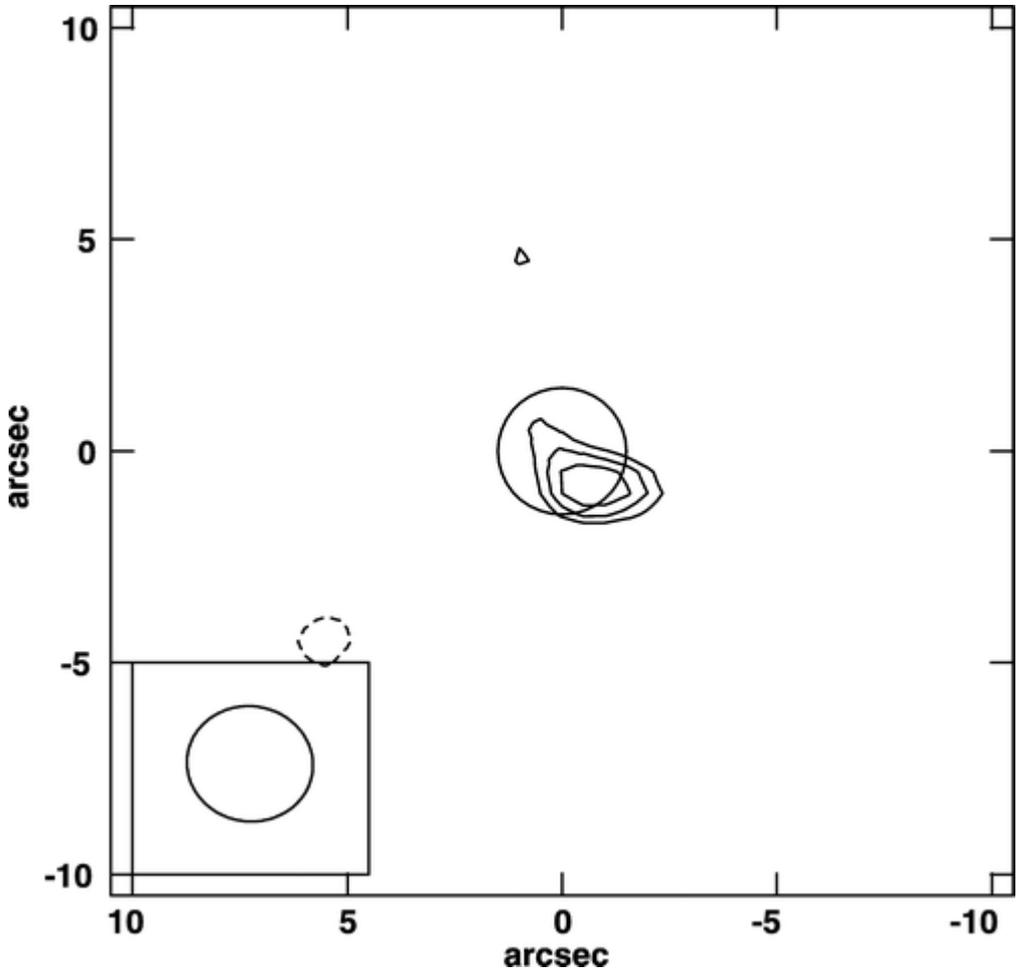


Fig. 1.— VLA C configuration 8.4 GHz image of the vicinity of G1 in M31, with contours at intervals of 0.5 times the rms noise. The lowest contour is at 3 times the noise of $6.2 \mu\text{Jy}$ beam, and negative contours are shown dashed; the synthesized beam is shown in the box in the lower left corner. The (0, 0) point is at a J2000.0 position of , . The 1.5 radius circle about this central point represents the 1σ error in the X-ray position of G1 (Kong 2007).



Kugelsternhaufen

Rotieren oder Nicht Rotieren?

Rotieren oder nicht Rotieren?

- Einige rotieren, andere nicht!!
- Fortschritte mit Astrometrie, Bewegungen einzelner Sterne in einem Kugelsternhaufen können bestimmt werden
- Alte Idee: können nicht rotieren, sonst würden sie abflachen!! Wenn sich aus der Ursprungs-Wolke schnell Sterne bilden, bleibt keine Zeit für Wechselwirkungen (10^{10} Jahre) und ein sphärischer rotierender Haufen wird lange sphärisch bleiben, länger als das Alter unseres Universums
- Keine „flachen“ Haufen bisher gefunden, wären auch nicht so lange stabil



Kugelsternhaufen

Zukunft

Zukünftige Kugelsternhaufen-Forschung

- Zur Zeit mehr Daten als Theorien ... Interpretationen fehlen
- Numerische und semi-analytische Simulationen fehlen umd die Entstehungsorte der Kugelsternhaufen zu finden und ihre Evolution zu verfolgen
- Das Alter kann nicht genau genug bestimmt werden, Probleme mit dem „horizontalen Ast“
- Hochaufgelöste Spektren sollen helfen
- Entdeckung der Dunklen Materie in Kugelsternhaufen würde helfen bzgl. der kosmologischen Bildung von GCs
- Zusammenhang mit ultra-kompakten Zwerggalaxien?
- Mit der Größenverteilung stimmt etwas nicht...
- Metallizitätsverteilung in individuellen Sub-Populationen kann nicht länger ignoriert werden, Fits höherer Ordnung sind nötig
- etc.

Wintersemester 2008/9: Frontiers in Extragalactic Astrophysics

Vorlesungszeit:
6.10.08 – 31.01.09

Beginn am:
10.10.08, 14 Uhr, hier!!

Themen: String-Theorie, Multiversen, URKNALL!!, GLAST, Wurmlöcher,
Zeitmaschinen,
Kugelsternhaufen Teil II, etc.

Einen schönen Sommer!!

