

Struktur des Universums: Galaxienhaufen und Gruppen

14. Juni 2007

Laura Baudis, lbaudis@physik.rwth-aachen.de
Physikalisches Institut Ib, RWTH Aachen

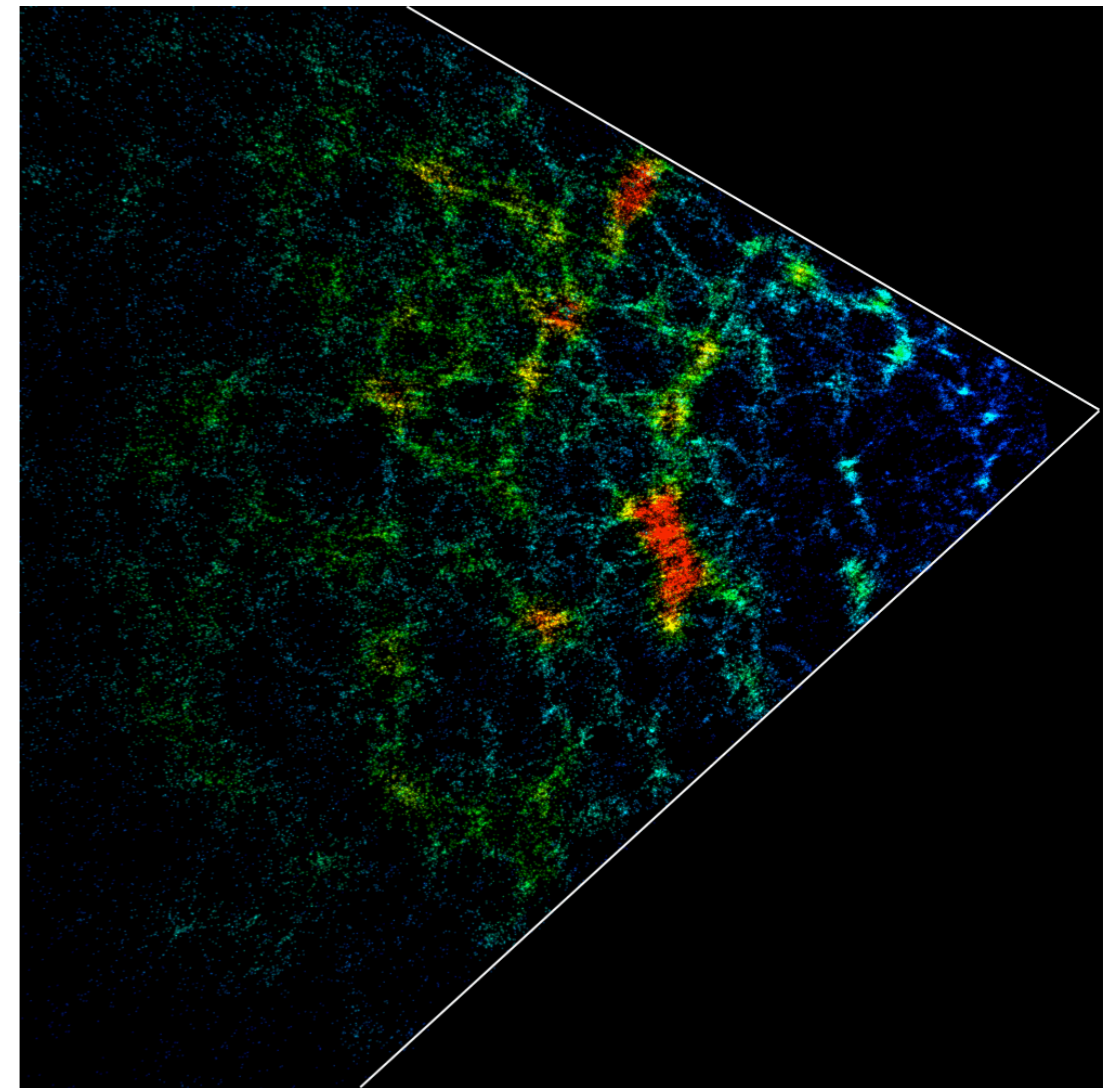
Inhalt

- Einleitung
- Lokale Gruppe und Umgebung
- Klassifikation von Haufen
- Räumliche Verteilung der Haufengalaxien; isotherme Verteilung
- Dynamische Masse von Haufen
- Galaxiengruppen
- Röntgenemission von Galaxienhaufen
 - Morphologie der Röntgenstrahlung
 - Modelle der Röntgenemission
 - Der Sunyaev-Zeldovich Effekt
- Literatur:
- Schneider, Kapitel 6; Carroll, Ostlie, Kapitel 27.3; Weigert, Wendker, Wisotzki, Kapitel 12; Unsöld, Baschek, Kapitel 12.4

Einleitung

- Galaxien sind nicht gleichförmig verteilt, man findet sie oft in Gruppen (galaxy groups) oder Galaxienhaufen (clusters of galaxies)
- **Milchstraße: Mitglied einer Gruppe, der Lokalen Gruppe**
- Der Übergang zwischen Gruppen und Haufen ist fließend, sie werden nach der Anzahl der dazugehörenden Galaxien unterschieden
- **Gruppen:**
 $N \leq 50$ Mitglieder, Durchmesser $D \leq 1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$
charakteristische Masse $M \sim 3 \times 10^{13} M_{\odot}$
- **Haufen:**
 $N \geq 50$ Mitglieder, $D \geq 1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$
charakteristische Masse $M \geq 3 \times 10^{13} M_{\odot}$

Galaxienverteilung: 2dFGR Survey

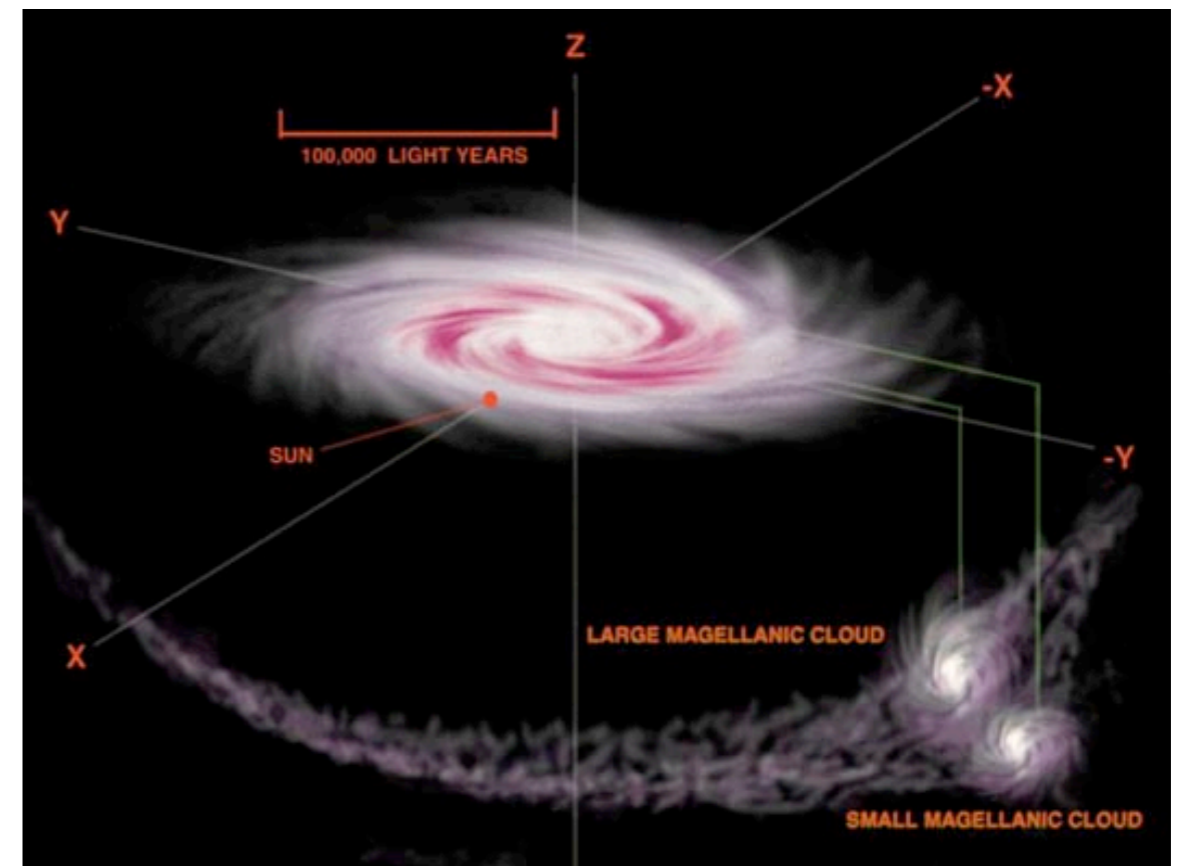


<http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>

- Galaxienhaufen sind die massereichsten gebundene Strukturen im Universum!

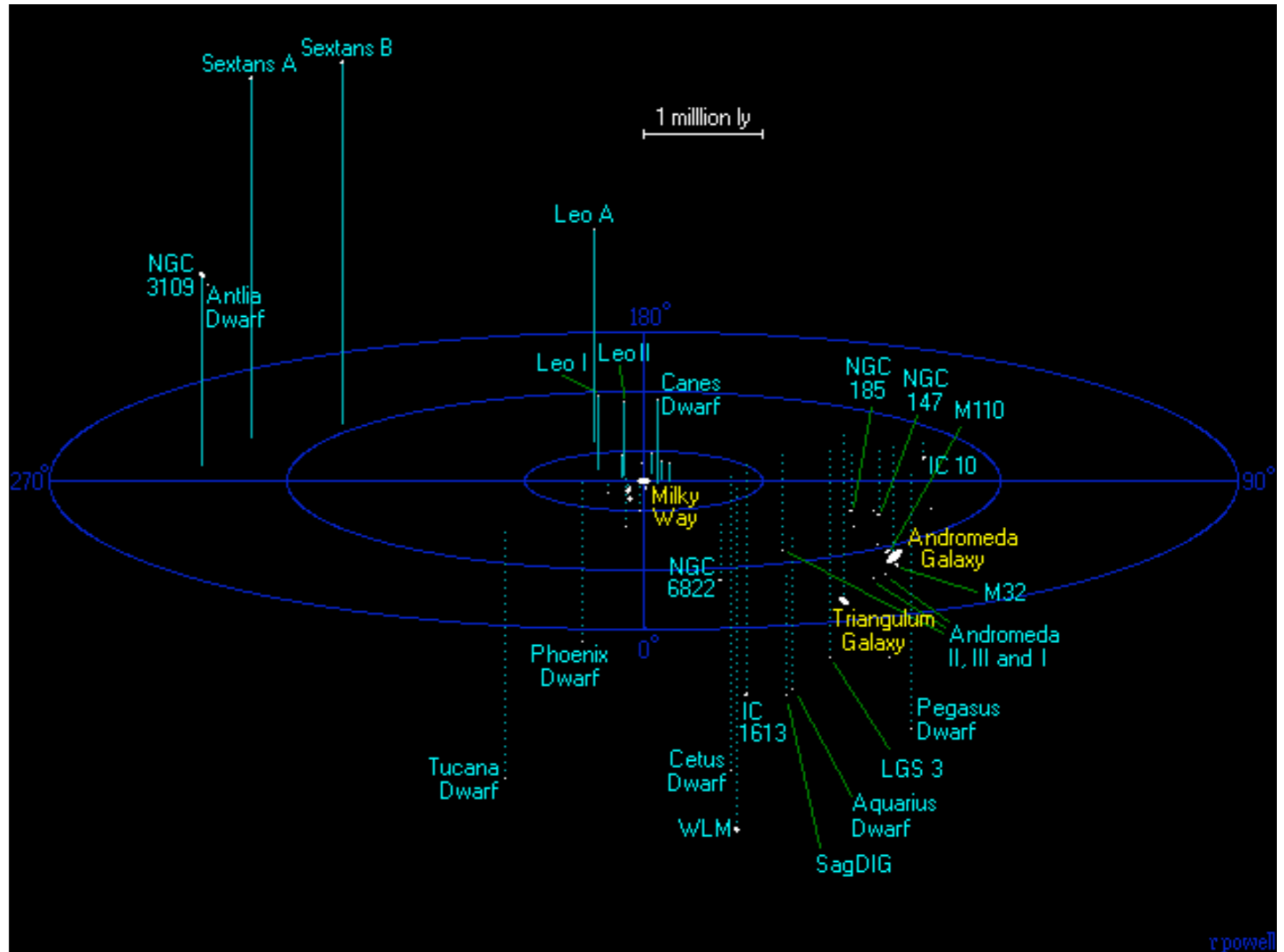
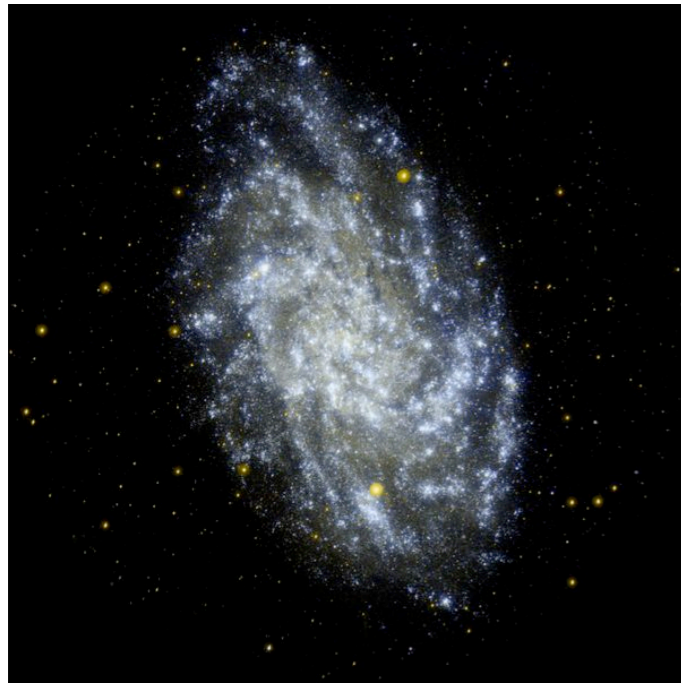
Die Lokale Gruppe

- Innerhalb ~ **35 Mpc** der Galaxis sind etwa **35 Galaxien** bekannt; diese Galaxienkonzentration wird als **Lokale Gruppe** (local group) bezeichnet
- **Die leuchtkräftigsten Mitglieder:** die Milchstraße (MW), Andromeda (M31), und M33, alle 3 sind Spiralgalaxien; Entfernung zu Andromeda: $D = 770 \text{ kpc}$
- **Die nächst leuchtkräftigsten Mitglieder:** die Große und Kleine Magellanschen Wolken (LMC, SMC), beides irreguläre Galaxien (wie ~ 11 weitere Mitglieder); alle anderen: Zwerggalaxien, sehr klein und leuchtschwach. Viele der Zwerggalaxien gruppieren sich um MW und M31 (Satellitengalaxien)
- **Milchstraße: LMC, SMC + 9 Zwerggalaxien**
(mehrere davon im Magellanschen Strom, ein langes Band aus neutralem Wasserstoff das vor $\sim 2 \times 10^8 \text{ yr}$ durch Gezeiten-WW aus den Magellanschen Wolken herausgerissen wurde)



Die Lokale Gruppe

M33



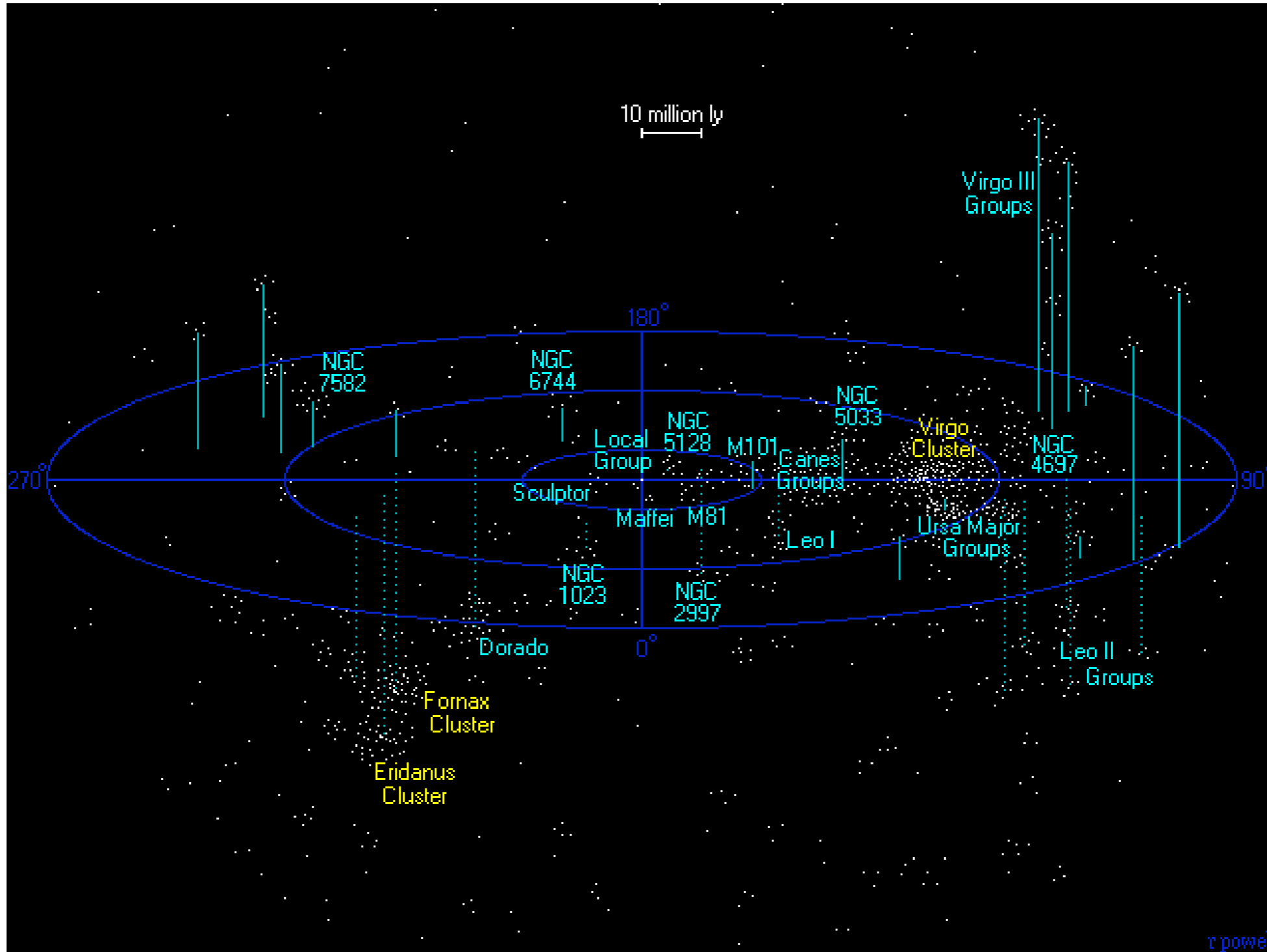
Sextans A

<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

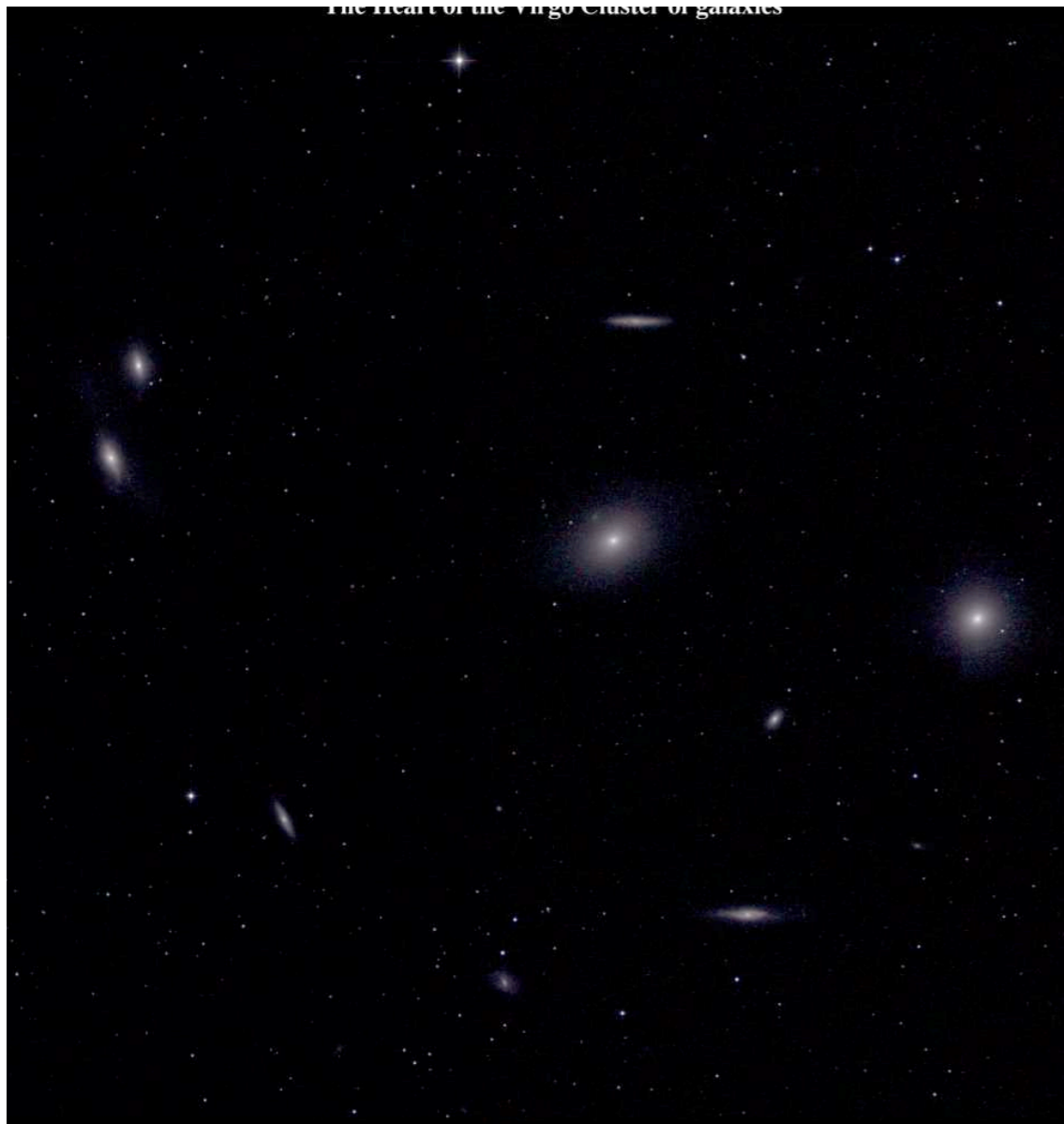
Umgebung der Lokalen Gruppe

- **Lokale Gruppe: Konzentration von Galaxien, ca. 35 Mitglieder**
- Die nächsten Galaxien werden in der Sculptor Gruppe gefunden: ~ 6 Mitglieder, $D \sim 1.8$ Mpc
- Danach kommt die M81 Gruppe mit ~ 8 Galaxien bei $D \sim 3.1$ Mpc
- **Weitere nahe Assoziationen von Galaxien innerhalb 10 Mpc von der MW:**
 - Centaurus Gruppe: 17 Mitglieder, $D \sim 3.5$ Mpc
 - M101 Gruppe: 5 Mitglieder, $D \sim 7.7$ Mpc
 - M66 und M96 Gruppen: zusammen 10 Mitglieder, $D \sim 9.4$ Mpc
 - NGC 1023 Gruppe: 6 Mitglieder, $D \sim 9.6$ Mpc
- Die meisten Galaxien: innerhalb von Gruppen; es gibt mehr Zwerggalaxien als leuchtkräftige Galaxien, die Zwerggalaxien befinden sich bevorzugt an größeren Galaxien
- **Die nächsten massiven Galaxienhaufen:**
 - der Coma Haufen, bei $D \sim 90$ Mpc
 - der Virgo Haufen bei $D \sim 16$ Mpc

Umgebung der Lokalen Gruppe



Virgo Haufen und Coma Haufen



Virgo Haufen, $D \sim 16$ Mpc, irregulärer Haufen; etwa 250 große Galaxien, 2000 kleinere in einer Region mit $R \approx 3$ Mpc



Coma Haufen, $D \sim 90$ Mpc, regulärer Haufen mit $R \approx 6$ Mpc; insgesamt etwa 10000 Galaxien, die meisten Zwergellipsen und zu schwach, um gesehen zu werden. Der Haufen enthält etwa 1000 helle Galaxien ($\approx 15\%$ davon sind Spiralen und irreguläre Galaxien). Im Zentrum befinden sich 2 große cD Galaxien.

Galaxien in Haufen und Gruppen

- **Der Abell Katalog:** Abell (1958) konstruierte Katalog von Galaxienhaufen durch Identifikation von Gebieten am Himmel mit Überdichte von Galaxien; diese Identifikation führte er visuell mittels der Photoplatten des Palomar Sky Surveys durch, einem photographischen Atlas des nördlichen Himmels
- Überdichte der Galaxien wird innerhalb eines bestimmten Raumwinkels definiert; **Abell's Kriterien:**
 - ➔ ein Haufen enthält im Mittel ≥ 50 Galaxien im Magnitudenintervall $m_3 \leq m \leq m_3 + 2$, wobei m_3 = scheinbare Helligkeit der dritthellsten Galaxie des Haufens
 - ➔ diese Galaxien müssen sich innerhalb eines Kreises mit Winkelradius θ_A befinden:

$$\theta_A = \frac{1.7'}{z}$$

wobei z = abgeschätzte Rotverschiebung, θ_A = Abell Radius des Haufens (entspr. $R_A = 1.5 h^{-1}$ Mpc);
Abschätzung der Rotverschiebung: Leuchtkraft der 10-hellsten Galaxie des Haufens wurde als gleich in allen Haufen angenommen; "Kalibration" der Entfernung mittels Haufen mit bekannter Rotverschiebung

- ➔ z soll im Bereich $0.02 \leq z \leq 0.2$ liegen (untere Schranke: Haufen ist auf einer Photoplatte ($\sim 6^\circ \times 6^\circ$) zu finden, obere Schranke durch Empfindlichkeitsgrenze der Photoplatten)
- **Abell Katalog:** 1682 Haufen, die diese Kriterien erfüllen; 1030 Haufen mit 30 - 49 Galaxien
- **ACO Katalog** (1989): Erweiterung des Abell Katalogs auf den südlichen Himmel, 4076 Haufen
- **Zwicky Katalog:** 1961-1968, enthält mehr Haufen, wird als weniger verlässlich eingeschätzt

Probleme der optischen Haufensuche

- Galaxienhaufen: ein 3D Objekt, Galaxienzählung basiert auf Projektion der Galaxienpositionen am Himmel
- Projektionseffekte: zufällige, durch Projektion zustande kommende Überdichten an der Sphäre werden als Haufen klassifiziert
- Nicht alle klassifizierte Mitglieder des Haufens sind tatsächlich Galaxien im Haufen, auch eine Folge von Projektionseffekten
- Abschätzung der Rotverschiebung recht grob; Spektroskopie vieler Abell Haufen wurde heute durchgeführt, Abschätzung hat einen Fehler von $\sim 30\%$
- Katalog basiert auf visuelle Untersuchung von Photoplatten und ist daher zT subjektiv; heute kann man die Abell-Kriterien mittels digitaler Aufnahmen in automatisierter Suche objektivieren (es stellt sich aber heraus, dass die Ergebnisse nicht allzu unterschiedlich sind)
- Trotz dieser potentieller Probleme wird Abell und ACO Katalog immer noch sehr häufig benutzt
- **Nomenklatur:** Abell 851 ist 851ster Eintrag, auch als A851 bezeichnet

Abell-Klassen: “Richness”

- Abell und ACO Katalog: unterteilt Haufen in “richness” und Entfernungs-Klassen:

richness class R	N	Anzahl in Abell's Katalog
(0)	(30-49)	(≥ 103)
1	50-79	1224
2	80-129	383
3	130-199	68
4	200-299	6
5	≥ 300	1

N = Anzahl der Haufengalaxien mit
Magnituden zwischen m_3 und m_3+2

Abell-Klassen: Entfernung

Entfernungs-Klasse	m_{10}	geschätzte $\langle z \rangle$	Anzahl in Abell's Katalog mit $R \geq 1$
1	13.3-14.0	0.0283	9
2	14.1-14.8	0.0400	2
3	14.9-15.6	0.0577	33
4	15.7-16.4	0.0787	60
5	16.5-17.2	0.131	657
6	17.3-18.0	0.198	921

m_{10} Magnitude der zehnthellsten Galaxie im Haufen, R = richness class

Die beiden Klassifizierungen geben grobe Abschätzung der Entfernung und Galaxienzahl der Haufen an

Leuchtkraft Verteilung der Haufengalaxien

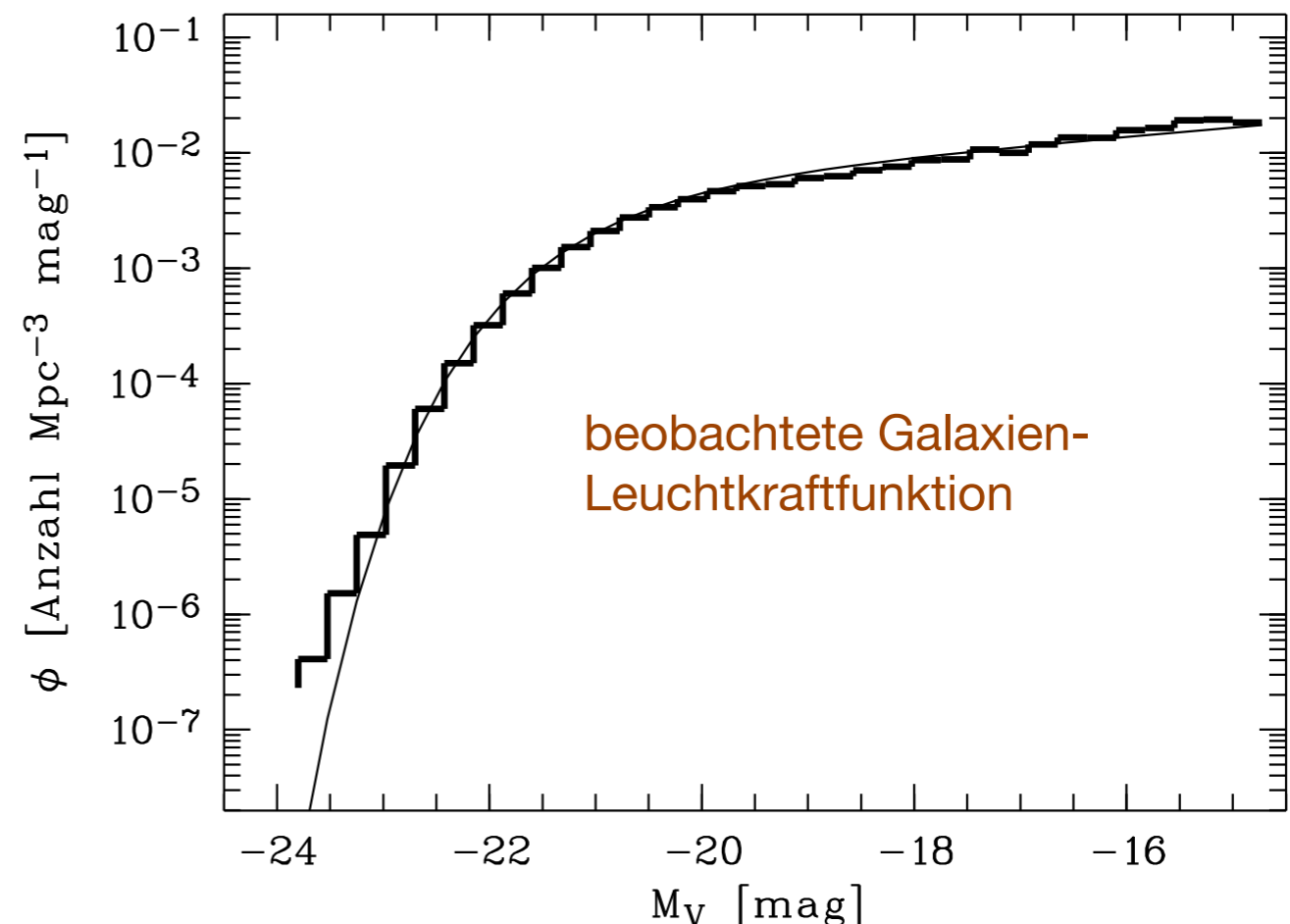
- Die Verteilung der Leuchtkraft von Galaxien eines Haufens wird durch die Leuchtkraftfunktion beschrieben: $\Phi(M)dM$ definiert die **Anzahldichte der Galaxien mit absoluter Helligkeit im Intervall $[M, M+dM]$** . Die Gesamtdichte von Galaxien ist dann:

$$v = \int_{-\infty}^{+\infty} dM \Phi(M)$$

- entsprechend definiert man $\Phi(L)dL$ als **Anzahldichte von Galaxien mit Leuchtkraft zwischen $[L, L+dL]$**

- Bedeutung der Leuchtkraftfunktion:**

- ➔ das Integral gibt die **Anzahldichte aller Galaxien an**
- ➔ die Form der Leuchtkraftfunktion gibt das **Anzahlverhältnis leuchtschwacher zu leuchtstarken Galaxien an**



Leuchtkraft Verteilung der Haufengalaxien

- Die Galaxienverteilung wird durch die Schechter-Leuchtkraftfunktion parametrisiert:

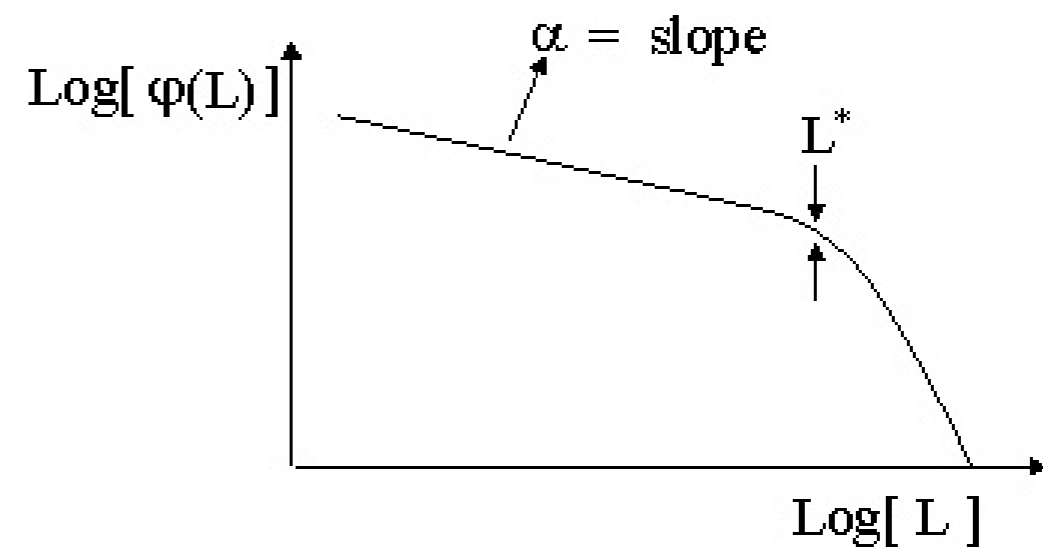
$$\Phi(L) = \left(\frac{\Phi^*}{L^*} \right) \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha e^{-\frac{L}{L^*}}$$

- wobei L^* = charakteristische Leuchtkraft, oberhalb derer die Verteilung exponentiell abfällt
- α = Steigung der Leuchtkraftfunktion für kleine L ; da für $L \ll L^* \rightarrow \Phi(L) \propto (L/L^*)^\alpha$
- Φ^* = Normierung der Verteilung

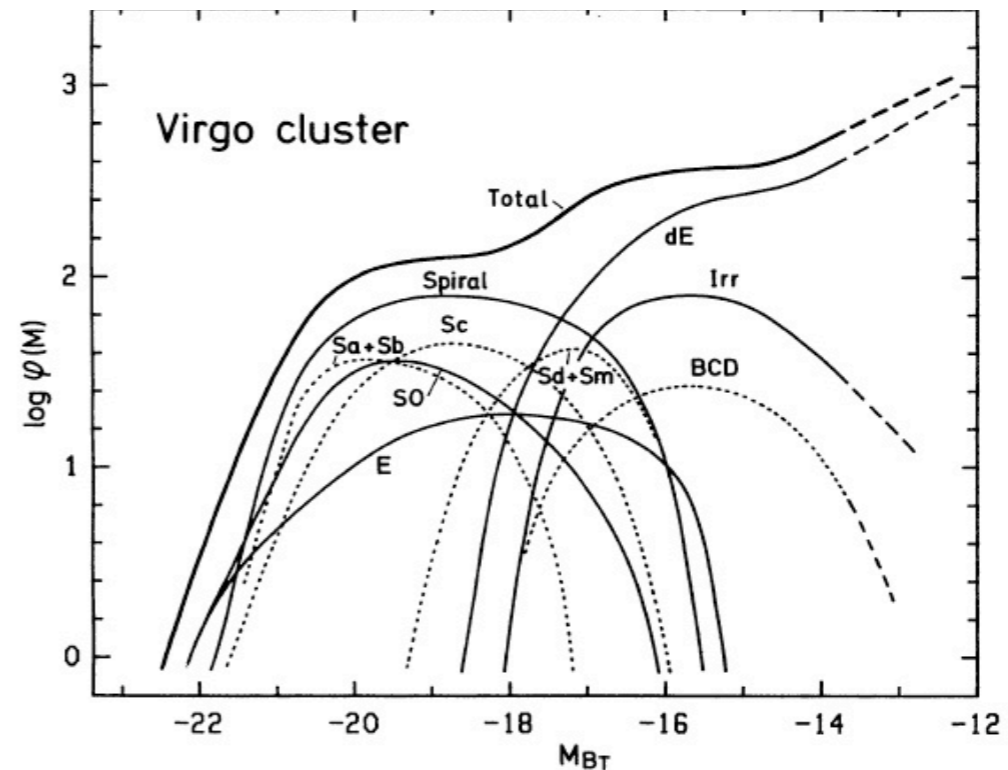
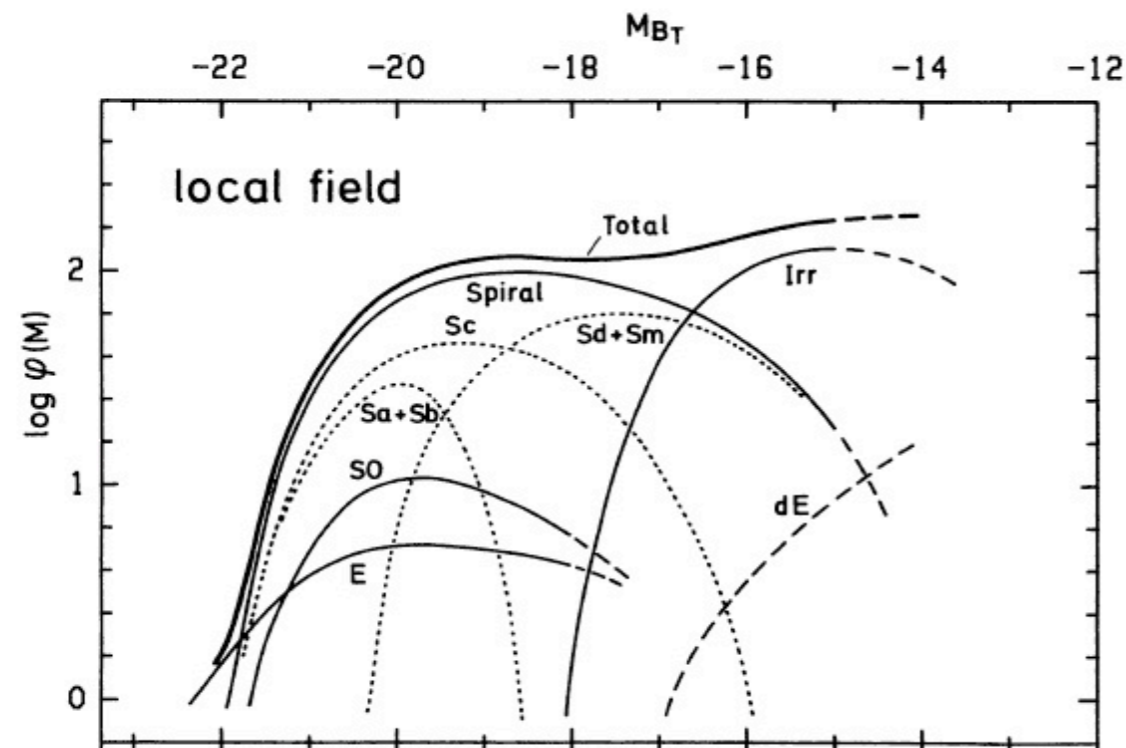
- Das Integral

$$\int (L \times \Phi) dL$$

- gibt die 'Leuchtkraftdichte' aller Galaxien an
(Volumen-Emissivität)



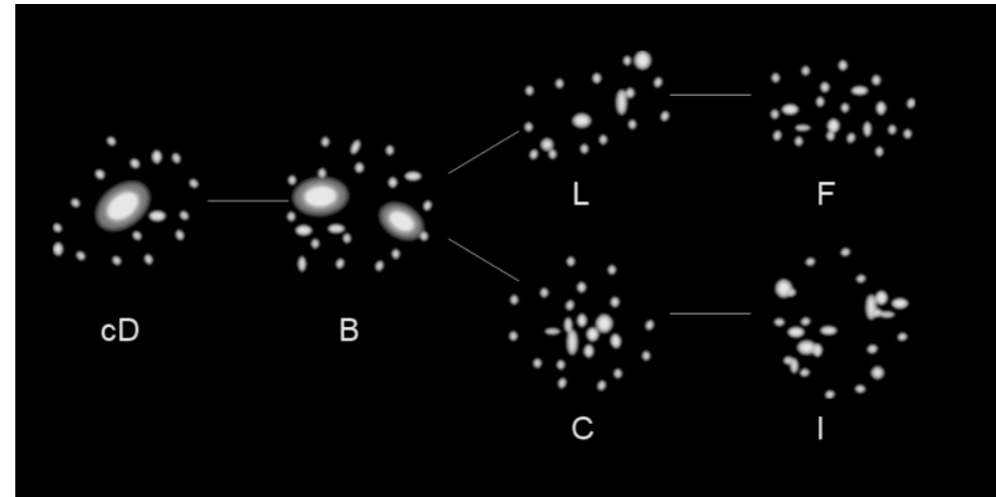
Leuchtkraft Verteilung der Haufengalaxien



- guter Fit an Daten bei vielen Haufen, wenn die hellste Galaxie vernachlässigt wird
- Viele Haufen enthalten cD Galaxie im Zentrum: diese unterscheiden sich von großen Ellipsen in mehrerer Hinsicht:
 - sie haben sehr ausgedehnte stellare Hülle $R \sim 100$ kpc, die weit oberhalb eines de Vaucouleur Profils liegt
 - man findet sie nur im Zentrum von Haufen oder Gruppen, dh nur in Gebieten stark erhöhter Galaxiendichte
 - viele cD Galaxien haben Mehrfachkerne, die bei anderen Haufenmitglieder recht selten sind

Morphologische Klassifikation von Haufen

- Haufen werden aufgrund ihrer Galaxienverteilung klassifiziert, mehrere sind bekannt



- Grobe Einteilung: reguläre Haufen, irreguläre Haufen, und Haufen, die dazwischen liegen (weder regulär, noch völlig irregulär, Übergänge sind fließend)

Reguläre Haufen sind kompakt, irreguläre Haufen sind "offen"

Reguläre Haufen werden durch Frühtyp Galaxien (Ellipsen und S0) dominiert; irreguläre Haufen enthalten mehr Spiralen

Reguläre Haufen werden sehr häufig von einer cD Galaxie im Zentrum dominiert, zentrale Galaxiendichte ist sehr hoch; irreguläre Haufen sind wesentlich weniger dicht im Zentrum

Reguläre Haufen haben viele Haufenmitglieder (große 'richness'); irreguläre Haufen besitzen weniger Mitglieder

Irreguläre Haufen besitzen starke Substruktur, reguläre Haufen nicht

Reguläre Haufen befinden sich in einem relaxierten Zustand; irreguläre Haufen sind noch in der Entwicklung

Räumliche Verteilung der Galaxien

- Meisten Haufen: zentrierte Dichteverteilung der Haufengalaxien; falls Haufen nicht zu elliptisch, kann Dichteverteilung als sphärisch symmetrisch angenommen werden
- Beobachtet: nur projizierte Dichteverteilung $N(R)$; diese hängt mit der 3-dim. Verteilung $n(r)$ zusammen über:

$$N(R) = 2 \int_R^{\infty} \frac{dr r n(r)}{\sqrt{r^2 - R^2}}$$

- Beobachtet wird natürlich keine Funktion $N(R)$, sondern Punkte (Galaxienorte), die in bestimmter Weise verteilt sind; man kann $N(R)$ durch Glättung der Punkteverteilung erhalten, falls Anzahldichte der Galaxien groß genug ist; alternativ - man betrachtet parametrisierte Verteilung von $N(R)$ und passt die Parameter an die Beobachtungen der Galaxienpositionen an
- **Parametrisierte Verteilung muss mindestens fünf Parameter enthalten:**
 - ➔ zwei, die die Position des Zentrums des Haufens am Himmel angeben
 - ➔ einen Parameter, der die Amplitude der Dichte beschreibt, dafür kann man zB die zentrale Dichte $N_0=N(0)$ angeben
 - ➔ ein 'Kernradius' r_c , den man üblicherweise so definiert, dass bei $R = r_c$ die Dichte auf Hälfte des zentralen Wertes abgefallen ist, $N(r_c)=N_0/2$
 - ➔ ein Parameter, der angibt, 'wo der Haufen aufhört', der Abell-Radius R_A ist eine erste Näherung dafür

Isotherme Verteilungen

- Modelle beruhen auf Annahme, dass Geschwindigkeitsverteilung der Masseteilchen eines Haufens lokal eine MB-Verteilung besitzen, also ‘thermalisiert’ sind (motiviert durch spektroskopische Untersuchungen der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Radialgeschwindigkeiten)
- Weitere Annahme: das Massenprofil des Haufens folgt dem der Galaxien und die ‘Temperatur’ (oder die v-Dispersion) ist unabhängig vom Radius (isotherme Verteilung) => eine 1-parametrische Schar von Modellen, den sogenannten isothermen Sphären.
- **Im Gleichgewicht ist Druckgradient = Gravitationsbeschleunigung**

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2}$$

wobei $\rho(r) = \langle m \rangle n(r)$ Dichte der Verteilung, zB Dichte der Galaxien

und $M(r) = 4\pi \int_0^r \rho(r') r'^2$ Masse innerhalb des Radius r

- Durch Differentiation erhält man:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{\rho} \frac{dP}{dr} \right) + 4\pi G r^2 \rho = 0$$

Isotherme Verteilungen

- Der Zusammenhang zwischen Druck und Dichte ist $P = nk_B T$, andererseits ist:

$$\frac{3}{2}k_B T = \frac{\langle m \rangle}{2} \langle v^2 \rangle \quad \begin{array}{l} \langle m \rangle = \text{mittlere Masse der Teilchen} \\ \langle v^2 \rangle = \text{mittlere quadr. Geschwindigkeit} \end{array}$$

- Falls T (bzw $\langle v^2 \rangle$) unabhängig von r, so ist:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{k_B T}{\langle m \rangle} \frac{d\rho}{dr} = \frac{\langle v^2 \rangle}{3} \frac{d\rho}{dr} = \sigma_v^2 \frac{d\rho}{dr}$$

- wobei

$$\sigma_v^2 = \frac{\langle v^2 \rangle}{3} \quad \begin{array}{l} \text{Eindimensionale Geschwindigkeitsdispersion} \\ = \text{radiale } v\text{-Dispersion, die messbar ist} \end{array}$$

- Daraus ergibt sich:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_v^2 r^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} \right) + 4\pi G r^2 \rho = 0$$

Differentialgleichung für die Dichte $\rho(r)$

Isotherme Verteilungen

- Die resultierende Differentialgleichung für $\rho(r)$ kann iA nicht analytisch gelöst werden; die Randbedingungen sind

$$\rho(0) = \rho_0 \quad \text{Zentrale Dichte } \rho(0)$$

$$\left(\frac{d\rho}{dr} \right) \Big|_{r=0} = 0 \quad \text{Dichteverlauf im Zentrum ist flach}$$

- Es existiert eine spezielle analytische Lösung; durch Einsetzen sieht man dass

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{\sigma_v^2}{2\pi G r^2}$$

die Differentialgleichung löst; die Lösung \rightarrow **singuläre isotherme Sphäre**; diese hat divergierende Dichte bei $r \rightarrow 0$ und unendliche Masse $M(\mathbf{r}) \propto r$

- Numerische Lösungen mit flachem Kern ergeben, dass die zentrale Dichte und Kernradius folgendermassen zusammenhängen:

$$\rho_0 = \frac{9\sigma_v^2}{4\pi G r_c^2}$$

- diese Lösungen fallen auch wie $\rho \propto r^{-2}$ nach außen hin ab, haben also auch eine divergierende Masse

Isotherme Verteilungen

- **Ursprung der Massendivergenz: die isothermen Verteilungen beruhen auf den Annahme, dass die Geschwindigkeitsverteilung isotherm, also MB-Verteilung folgt**
 - eine MB-Verteilung hat “Flügel”, sie enthält also Teilchen mit beliebiger hoher v
 - da die Verteilung als stationär angenommen wird, dürfen solche Teilchen nicht ‘entkommen’, die Geschwindigkeit muss also kleiner als die Fluchtgeschwindigkeit sein
 - für MB-Verteilung lässt sich dies nur durch die unendliche Gesamtmasse erreichen
- Um das Problem der divergenten Gesamtmasse zu beseitigen, führt man **selbst-gravitierende dynamische Modelle mit abgeschnittener v -Verteilung ein: King Modelle**; diese können nicht analytisch dargestellt werden; es existiert jedoch analytische Fit-Formel für den zentralen Bereich des Massenprofils:

$$\rho(\mathbf{r}) = \rho_0 \left[1 + \left(\frac{\mathbf{r}}{r_c} \right)^2 \right]^{-3/2}$$

- Mit der Gleichung für die projizierte Dichteverteilung $N(R)$ erhält man die projizierte Flächenmassendichte:

$$\Sigma(\mathbf{R}) = \Sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\mathbf{R}}{r_c} \right)^2 \right]^{-1} \quad \text{mit} \quad \Sigma_0 = 2\rho_0 r_c$$

Auch analytischer Fit des King Profils hat divergente Gesamtmasse; die Divergenz ist aber nur logarithmisch

Isotherme Verteilungen

- **Bemerkungen:**
- diese analytischen Modelle für die Dichteverteilung der Galaxien sind natürlich nur Näherungen, Galaxienverteilung in Haufen sind oft stark strukturiert
- dynamische Modelle sind nur dann auf Galaxienverteilungen anzuwenden, wenn Galaxiendichte der Materiedichte folgt
- die Verteilung der Galaxien in Haufen ist oft vom Galaxientyp anhängig; Anteil der Frühtyp Galaxien (Es und S0s) ist häufig im Zentrum des Haufens am höchsten
- ein typischer Wert für den Kernradius ist $r_c \sim 0.25h^{-1}$ Mpc

Dynamische Masse von Haufen

- Dynamische Zeitskala von Haufen: Zeit, die die Galaxie benötigt, um den Haufen einmal zu durchqueren:

$$t_{cross} \sim \frac{R_A}{\sigma_v} \sim 1.5h^{-1} \times 10^9 \text{ yr}$$

- wobei angenommen wurde, dass $\sigma_v \sim 1000 \text{ km / s}$
- **t_{cross} - kleiner als das Alter des Universums** => wenn Haufen nicht gravitativ gebunden wären, würden sie sich auf Zeitskalen von t_{cross} auflösen.
- Daher Annahme: Haufen sind gravitativ gebundene Systeme; da $t_{cross} \ll t_0$, nimmt man viriales Gleichgewicht an:

$$2E_{kin} + E_{pot} = 0$$

- dabei ist:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \quad \text{und} \quad E_{pot} = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}}$$

m_i = Masse der i-ten Galaxie im Haufen

v_i = Betrag ihrer Geschwindigkeit

r_{ij} = räumlicher Abstand zwischen i-ter und j-ter Galaxien

Dynamische Masse von Haufen

- Man definiert die **Gesamtmasse des Haufens**,

$$M \equiv \sum_i m_i$$

- die Massen-gewichtete **Geschwindigkeitsdispersion**

$$\langle v^2 \rangle \equiv \frac{1}{M} \sum_i m_i v_i^2$$

- und den **gravitativen Radius**

$$r_G \equiv 2M^2 \left(\sum_{i \neq j} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} \right)^{-1}$$

- Daraus erhält man:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle \quad \text{und} \quad E_{pot} = -G \frac{M^2}{r_G}$$

- und mit dem **Virialtheorem**:

$$M = \frac{r_G \langle v^2 \rangle}{G}$$

Dynamische Masse von Haufen

- **Übergang zu projizierten Größen:** falls Galaxienposition und Richtung der Geschwindigkeitsvektoren der Galaxien unkorreliert sind (zB bei isotroper v-Verteilung), gilt:

$$\langle v^2 \rangle = 3\sigma_v^2; \quad r_G = \frac{\pi}{2} R_G \quad \text{mit} \quad r_G \equiv 2M^2 \left(\sum_{i \neq j} \frac{m_i m_j}{R_{ij}} \right)^{-1}$$

- wobei: R_{ij} = projizierter Abstand der Galaxien i und j
- **Da σ_v und R_G direkt beobachtbar sind => Gesamtmasse des Haufens:**

$$M = \frac{3\pi R_G \sigma_v^2}{2G} = 1.1 \times 10^{15} M_\odot \left(\frac{\sigma_v}{1000 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{R_G}{\text{Mpc}} \right)$$

- **Typische Werte (für reiche Haufen) sind $\sigma_v \sim 1000 \text{ km/s}$ und $R_G \sim 1 \text{ Mpc} \Rightarrow M \sim 10^{15} M_\odot$**
- Die obige Massenabschätzung hängt nicht mehr von den Massen m_i der Einzelgalaxien ab!
- Jedoch: aus M und Anzahl der Galaxien N kann die charakteristische Masse $m = M/N$ der Galaxien berechnet werden, es folgt **$m \sim 10^{13} M_\odot$**
- M kann auch mit der optischen Gesamtleuchtkraft der Haufengalaxien verglichen werden, **$L_{\text{tot}} \sim 10^{12}-10^{13} L_\odot$** , daraus kann das **Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis** berechnet werden

Dynamische Masse von Haufen

- Charakteristische Werte für das **Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis**

$$\left(\frac{M}{L_{tot}} \right) \sim 300 h^{-1} \left(\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \right)$$

- Dieser Wert übersteigt das M/L-Verhältnis von Frühtyp Galaxien um mindestens einen Faktor 10!
- **Zwicky 1933:** aus solchen Untersuchungen des Coma-Haufen folgerte er, dass Galaxienhaufen mehr Masse enthalten müssen, als in Galaxien sichtbar ist - das 'missing mass' Problem
- **Frage:** wenn Hauptanteil der Masse sich nicht in Galaxien befindet, ist dann obige Anwendung des Virialtheorems noch gerechtfertigt?
- **Antwort:** ja, falls die räumliche Verteilung der Galaxien der Verteilung der Gesamtmasse folgt
=> Galaxienhaufen bestehen zum größten Teil aus dunkler Materie; der sichtbare Teil (dh die Sterne) von Galaxien machen weniger als ~ 5% der Haufenmasse aus
- Wie wir noch sehen werden, ist die Massenabschätzung aus der Dynamik von Galaxien nicht die einzige Methode; andere Methoden bestätigen dieses zentrale Ergebnis

Dynamische Masse von Haufen

- Weitere Bemerkungen:

Zwei-Körperstöße von Galaxien sind dynamisch unwichtig; die entsprechende Relaxationszeitskala t_{relax} ist viel größer als das Alter des Universums:

$$t_{\text{relax}} = t_{\text{cross}} \frac{N}{\ln N}$$

Die Geschwindigkeitsdispersion verschiedener Galaxientypen ist etwa gleich; es gibt keine klare Trends von σ_v mit der Leuchtkraft von Galaxien: Galaxien im Haufen sind nicht ‘thermalisiert’, das würde bedeuten, dass sie alle die gleiche kinetische Energie hätten, mit $\sigma_v \sim m^{-1/2}$; dies lässt auch darauf schliessen, dass Stöße der Galaxien untereinander dynamisch irrelevant sind; vielmehr wird die Geschwindigkeitsverteilung durch kollektive Prozesse bei der Bildung des Haufens bestimmt: violent relaxation -> durch großskalige Dichteinhomogenitäten bei der Bildung von Haufen werden Galaxien kollektiv beeinflusst, sie erhalten im statistischen Mittel die gleiche Geschwindigkeitsverteilung; dieser Prozess findet auf Zeitskalen von t_{cross} statt

Dynamische Reibung: Gravitationsfeld einer Galaxie beeinflusst die Bewegung der anderen Galaxien; durch Gravitationsanziehung erzeugt eine Galaxie eine (leichte) Überdichte von Materie auf der rückwärtigen Seite ihrer Bahn; diese Überdichte bremst die Bewegung der Galaxie und wirkt wie eine Reibung, dynamische Reibung:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} \propto -\frac{m\rho\vec{v}}{|\vec{v}|^3}$$

Dynamische Masse von Haufen

- Weitere Bemerkungen:

die dynamische Reibung ist wichtiger für massive Galaxien, diese können signifikante Abbremsungen erfahren, dadurch sinken sie tiefer im Potentialtopf; die massivsten Haufengalaxien sollten sich daher um das Haufenzentrum konzentrieren

falls dynamische Reibung über genügend lange Zeitskala wirken kann, können die massiven Haufengalaxien im Zentrum zu einer Galaxie verschmelzen; dies ist als mögliche Erklärung der Entstehung von cD-Galaxien herangezogen werden

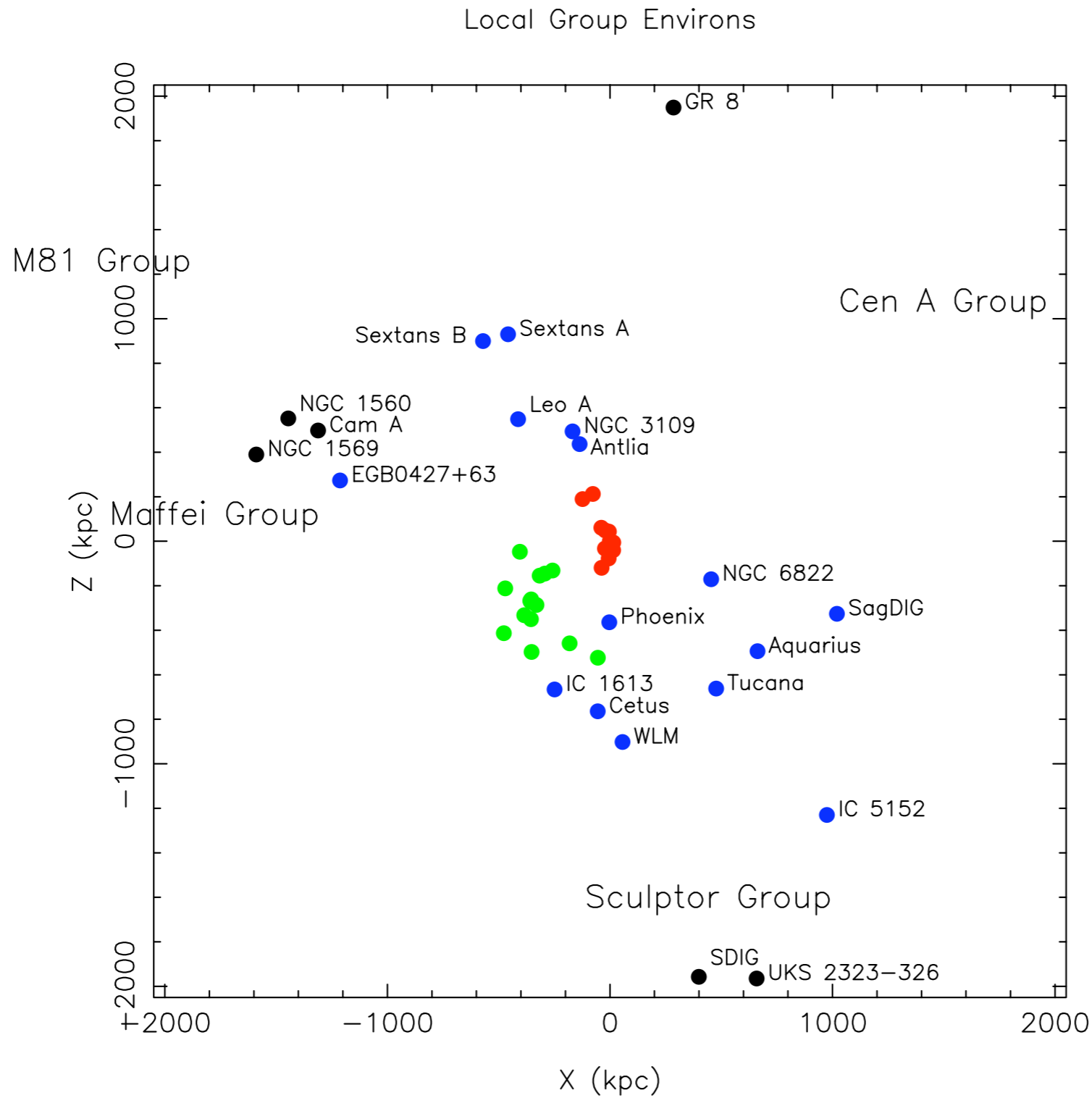
dynamische Massenbestimmung kann beeinflusst werden durch anisotrope Geschwindigkeitsverteilung der Haufengalaxien und nicht-sphärische Massenverteilung des Haufens (Projektionseffekte)

deshalb sind alternative Massenbestimmungen notwendig

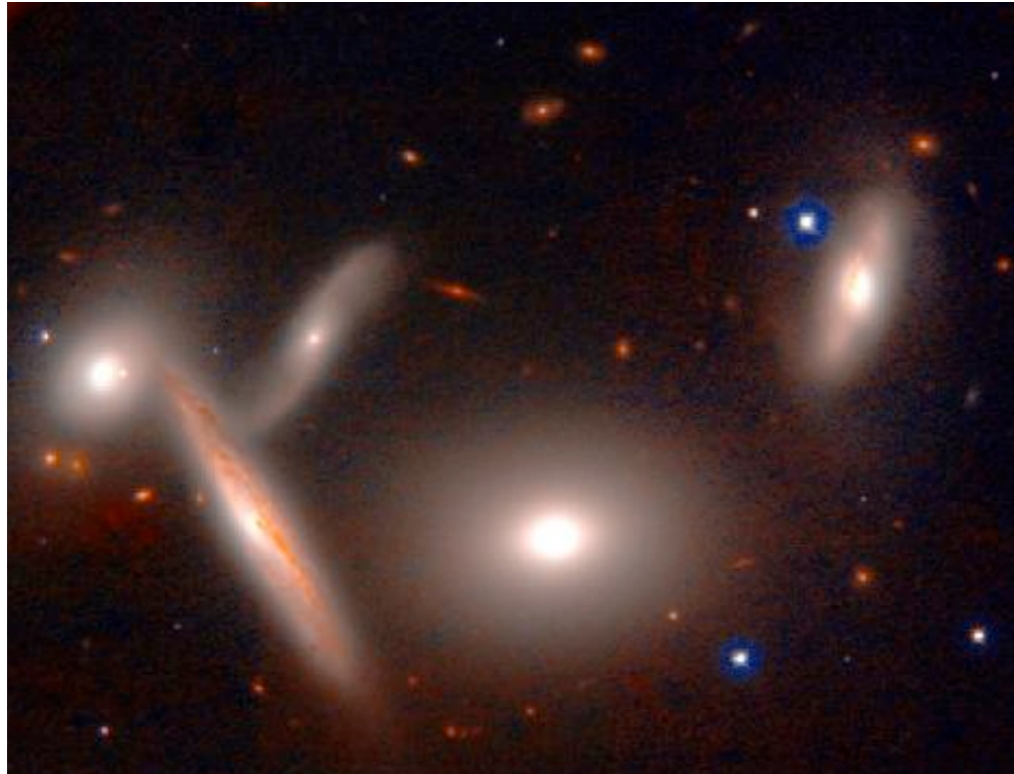
Galaxiengruppen

- Ansammlungen von Galaxien, die Abell's Kriterien nicht erfüllen, sind meistens Gruppen; diese sind Fortsetzungen von Haufen mit weniger Mitgliedern - daher geringere Masse, kleinere Geschwindigkeitsdispersion, kleinere Ausdehnung
- Trennung zwischen Gruppen und Haufen daher willkürlich
- Gruppen sind schwieriger zu finden als Haufen; das Überdichtekriterium wird bei ihnen mehr von Projektionseffekten von Vordergrund- und Hintergrundgalaxien beeinflusst
- Eine besondere Klasse von Gruppen: kompakte Gruppen, eine Ansammlung von (meist wenigen) Galaxien mit sehr kleinem projizierten Abstand; bekannteste Beispiele: Stephan's Quintett und Seyfert's Sextett
- In 1982: Katalog von 100 kompakten Gruppen (HCG, Hickston Compact Groups), bestehend aus vier und mehr hellen Mitgliedern; Median der Rotverschiebung $z = 0.03$
- In neuerer Zeit wurden Gruppen in spektroskopischen Surveys selektiert, damit war ein 3-d Überdichtekriterium anwendbar, daher Projektionseffekte wesentlich reduziert, und erlaubt Detektion von Gruppen in Gebieten höherer mittlerer Galaxiendichte

Galaxiengruppen



Galaxiengruppen



HCG 40 (d~100 Mpc)
Aufnahme mit Subaru Teleskop
(3 Spiralen, 1 Ellipse, 1 S0)



HCG 87 (d~100 Mpc)
Aufnahme mit Gemini

Galaxiengruppen

- Die Geschwindigkeitsdispersion von Gruppen ist wesentlich kleiner als die von Haufen, typische Werte sind $\sigma_v \sim 300$ km/s
- Kompakte Gruppen haben Lebensdauer sehr viel kleiner als das Alter des Universums; dynamische Zeitskala: $t_{\text{dyn}} \sim R/\sigma_v \sim 0.02 H_0^{-1}$; durch dynamische Reibung verlieren Galaxien in diesen Gruppen Bahnenergie; sie nähern sich daher dem dynamischen Zentrum, wo Wechselwirkungen und Verschmelzungen mit anderen Galaxien stattfinden; in der Tat zeigen etwa 40% der Galaxien von HCG Anzeichen von Wechselwirkungen
- Da die Lebensdauer von kompakter Gruppen kleiner als das Weltalter ist, müssen diese sich vor nicht allzu langer Zeit gebildet haben; und falls wir nicht in einer speziellen Ära der kosmischen Geschichte leben, müssen sich solche Gruppen auch heute noch bilden
- Aus dynamischen Untersuchungen: man findet, dass genau wie bei Haufen, die Gesamtmasse von Gruppen wesentlich höher ist als die Summe der Masse von Galaxien; typisches M/L-Verhältnis ist:

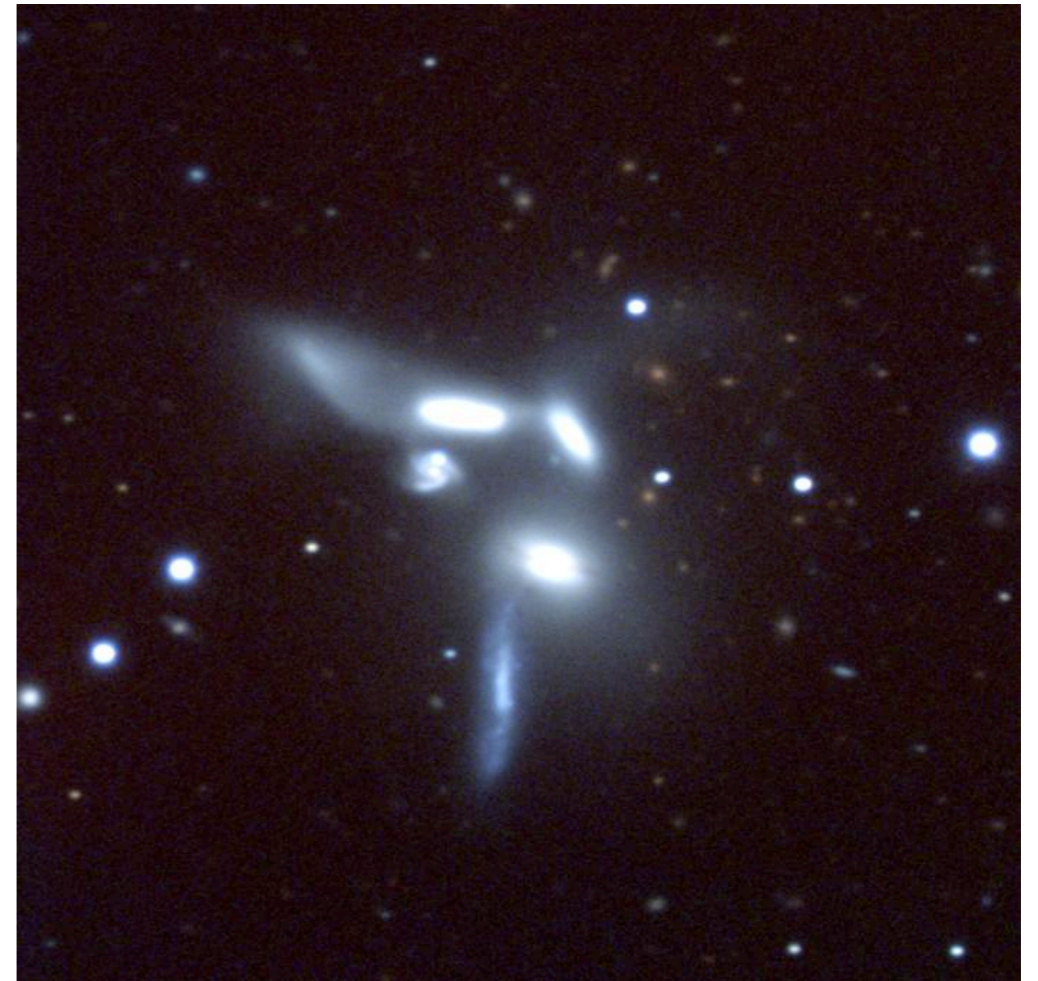
$$\left(\frac{M}{L_{\text{tot}}} \right) \sim 50 h^{-1} \left(\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \right)$$

- Der Anteil von Spiralgalaxien in Gruppen ist, wie in Haufen, geringer als Anteil an Feldgalaxien; dabei nimmt Anteil an Spiralen mit steigendem σ_v der Gruppe ab
- Auch Galaxiengruppen sind, wie Haufen, Röntgenstrahler; sie enthalten ein heißes intergalaktisches Gas, allerdings mit kleineren Temperaturen und kleinerer Metallizität als bei Haufen

Galaxiengruppen



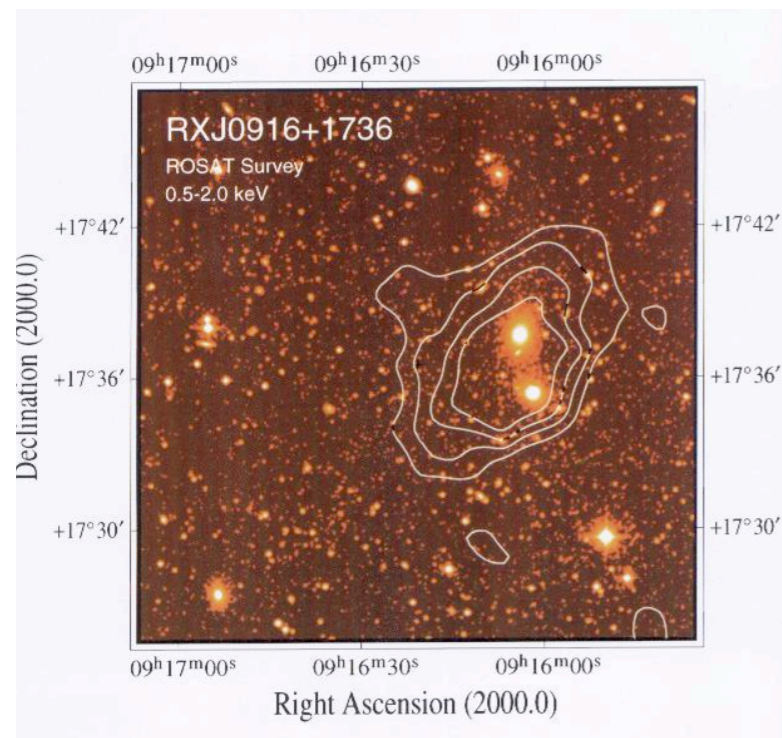
Stephan's Quintett



Seyfert's Sextett

Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen

- Entdeckung des UHURU Röntgensatelliten: massive Galaxienhaufen emittieren Röntgenstrahlung
- Einstein-Satellit: entdeckte Röntgenstrahlung auch von weniger massiven Haufen und Gruppen
- **Allgemeine Eigenschaften der Röntgenstrahlung:**
 - ➔ neben den AGNs sind Galaxienhaufen die hellsten extragalaktischen Röntgenquellen, mit charakteristischen Leuchtkräften von $L_X \sim 10^{43} - 10^{45} \text{ erg/s}$
 - ➔ die Röntgenstrahlung von Haufen ist ausgedehnt, kommt also nicht von einzelnen Galaxien; die Skala der Emission kann **1 Mpc** und mehr betragen
 - ➔ die Röntgenstrahlung von Haufen ist zeitlich nicht variabel



Galaxiengruppe RXJ0916+1736

Überlagerung eines optischen Bildes mit einer Röntgenkarte

Deutlich zu erkennen: die Gruppe, besonders die Gegend um die 2 großen Ellipsen ist ein Röntgenstrahler

Kontinuum-Strahlung

- Das Spektrum der Strahlung lässt auf thermische Bremsstrahlung (frei-frei Strahlung) eines heißen Gases schließen
- Bremsstrahlung-Emissivität wird beschrieben durch

$$\epsilon_{\nu}^{ff} = \frac{32\pi Z^2 e^6 n_e n_i}{3m_e c^3} \sqrt{\frac{2\pi}{3k_B T m_e}} e^{-h\nu/k_B T} g_{ff}(T, \nu)$$

- mit e : Elementarladung; n_e , n_i : Dichte der Elektronen und Ionen; Z = Ladung der Ionen, m_e = Elektronenmasse; g_{ff} : Gaunt-Faktor, ein QM-Korrekturfaktor, von der Größenordnung 1, oder genauer:

$$g_{ff} \approx \frac{3}{\sqrt{\pi}} \ln\left(\frac{9k_B T}{4h\nu}\right)$$

=> Spektrum ist flach für $h\nu \ll k_B T$, und exponentiell abfallend für $h\nu \gtrsim k_B T$

Kontinuum-Strahlung

- Die charakteristische Temperatur der Röntgenemission von massiven Haufen ist

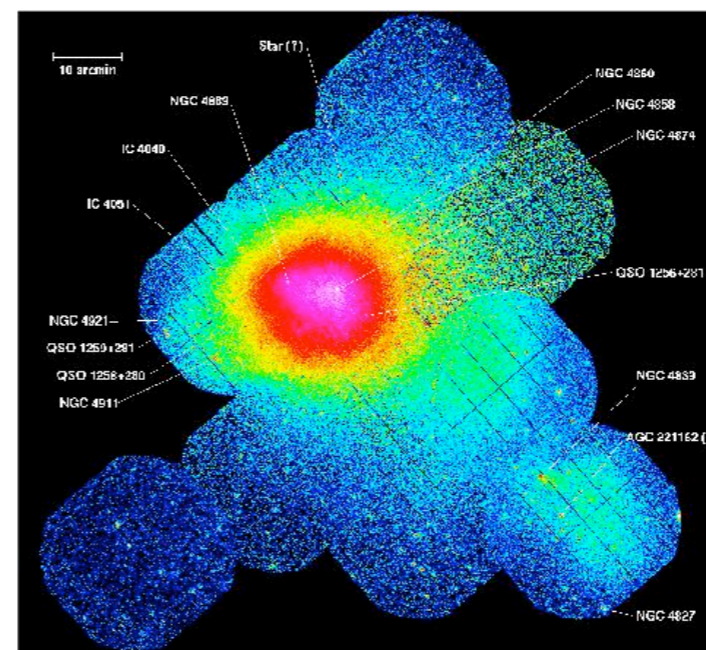
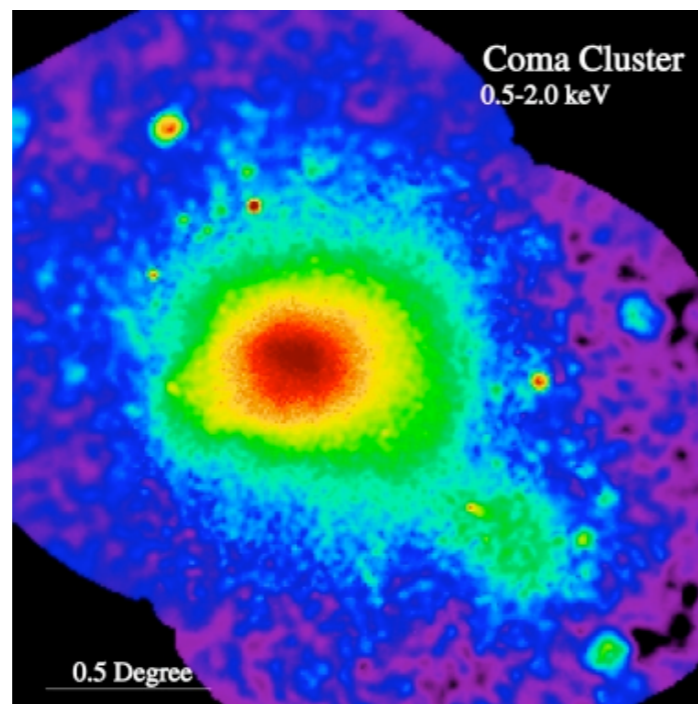
$$T \sim 5 \times 10^7 \text{ K} \text{ oder } k_B T \sim 5 \text{ keV}$$

- Für ein thermisches Plasma mit solarer Häufigkeit ergibt sich:

$$\varepsilon^{ff} = \int_0^\infty dv \varepsilon_v^{ff} \approx 3.0 \times 10^{-27} \sqrt{\frac{T}{1 \text{ K}}} \left(\frac{n_e}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^2 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

- Die Energie und Winkelauflösung von Chandra und XMM-Newton (beide 1999 gestartet) ließen keine detaillierten Untersuchungen der räumlichen Abhängigkeit der Gastemperatur zu; daher wird oft angenommen, dass T räumlich konstant ist

Coma Haufen:
ROSAT Aufnahme



Coma Haufen:
XMM Aufnahme

Linienstrahlung

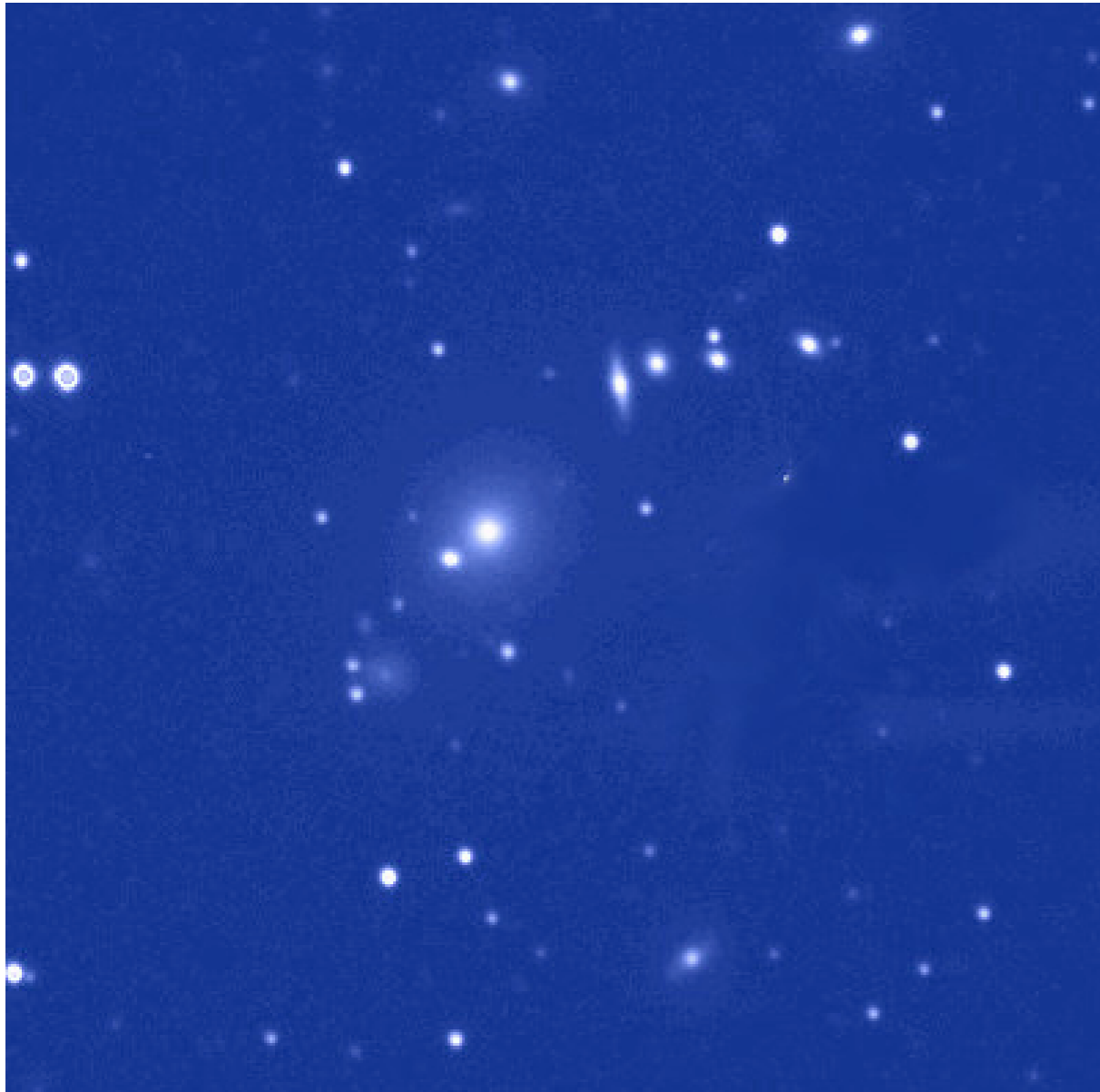
- Ursprung der Röntgenstrahlung aus heißem, diffus verteiltem Gas (intra-cluster gas) wird durch die Entdeckung von Linien-Emission bestätigt
 - ➔ die stärkste Linien in massiven Haufen ist bei ~ 7 keV (Lyman α Linie des 25-fach ionisierten Eisens, dh dem Fe-Kern mit einem Elektron); etwas weniger ionisiertes Fe hat starken Übergang bei $E \sim 6.4$ keV
 - ➔ später wurden auch andere Linien im Röntgenspektrum von Haufen entdeckt; je heißer das Gas, umso weniger Linienemission gibt es, da das Gas umso vollständiger ionisiert ist
- Die Röntgenstrahlung von Haufen mit relativ kleinen Temperaturen $k_B T \lesssim 2$ keV, kann von Linienstrahlung hochionisierter Atome (C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca) dominiert sein
- Die Emissivität eines thermischen Plasmas mit solarer Häufigkeit kann grob approximiert werden durch:

$$\varepsilon = 6.2 \times 10^{-19} \left(\frac{T}{1K} \right)^{-0.6} \left(\frac{n_e}{1cm^{-3}} \right)^2 \text{ erg cm}^{-3} s^{-1}$$

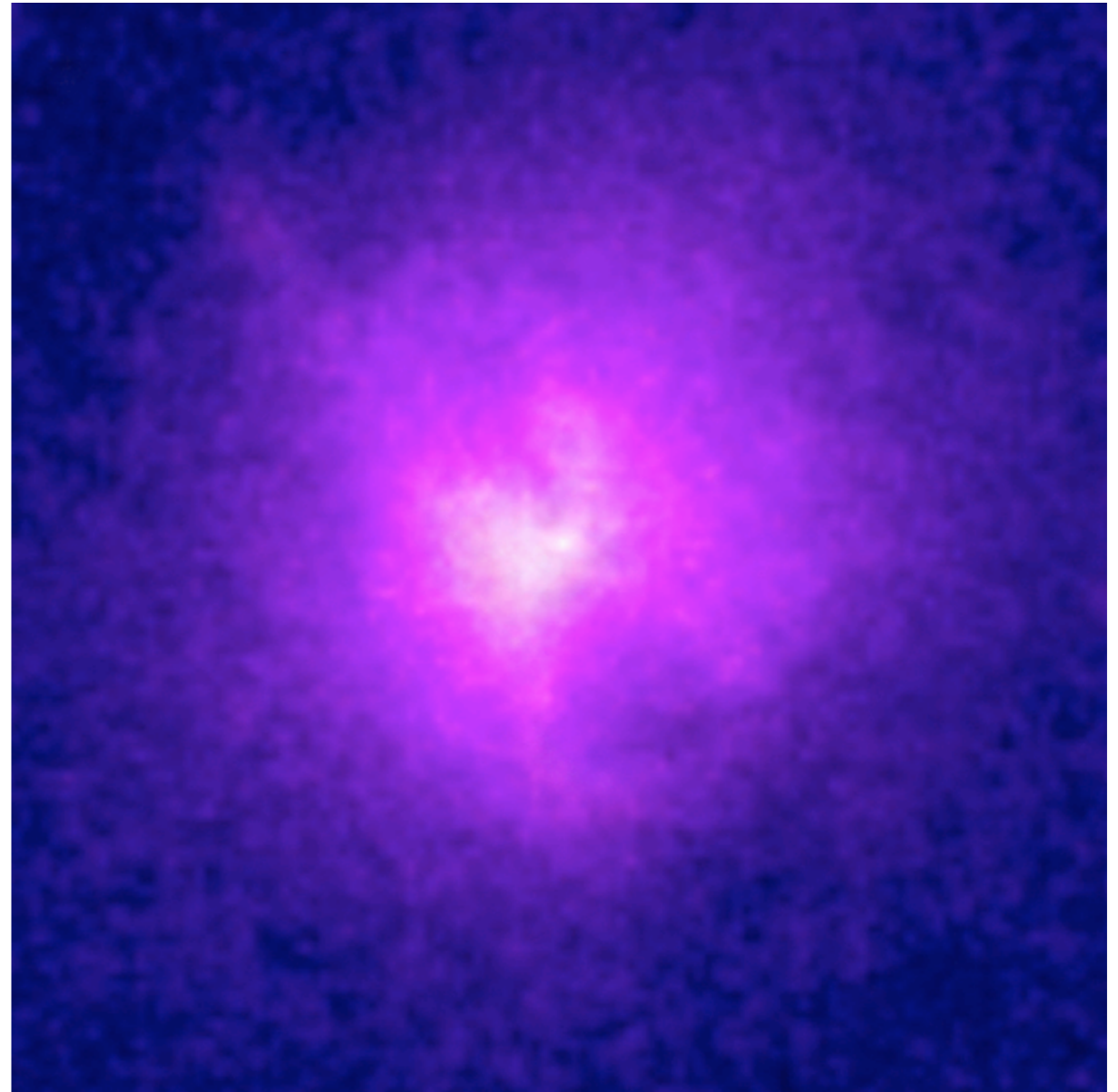
im Bereich $10^5 K \lesssim T \lesssim 4 \times 10^7 K$ (wobei hier sowohl frei-frei Emission als auch Linienstrahlung berücksichtigt wird)

- Emissivität hängt quadratisch von der Dichte des Plasmas ab, da Bremsstrahlung und Stoss-Ionisation Zwei-Teilchen Prozesse sind

Galaxienhaufen Hydra A

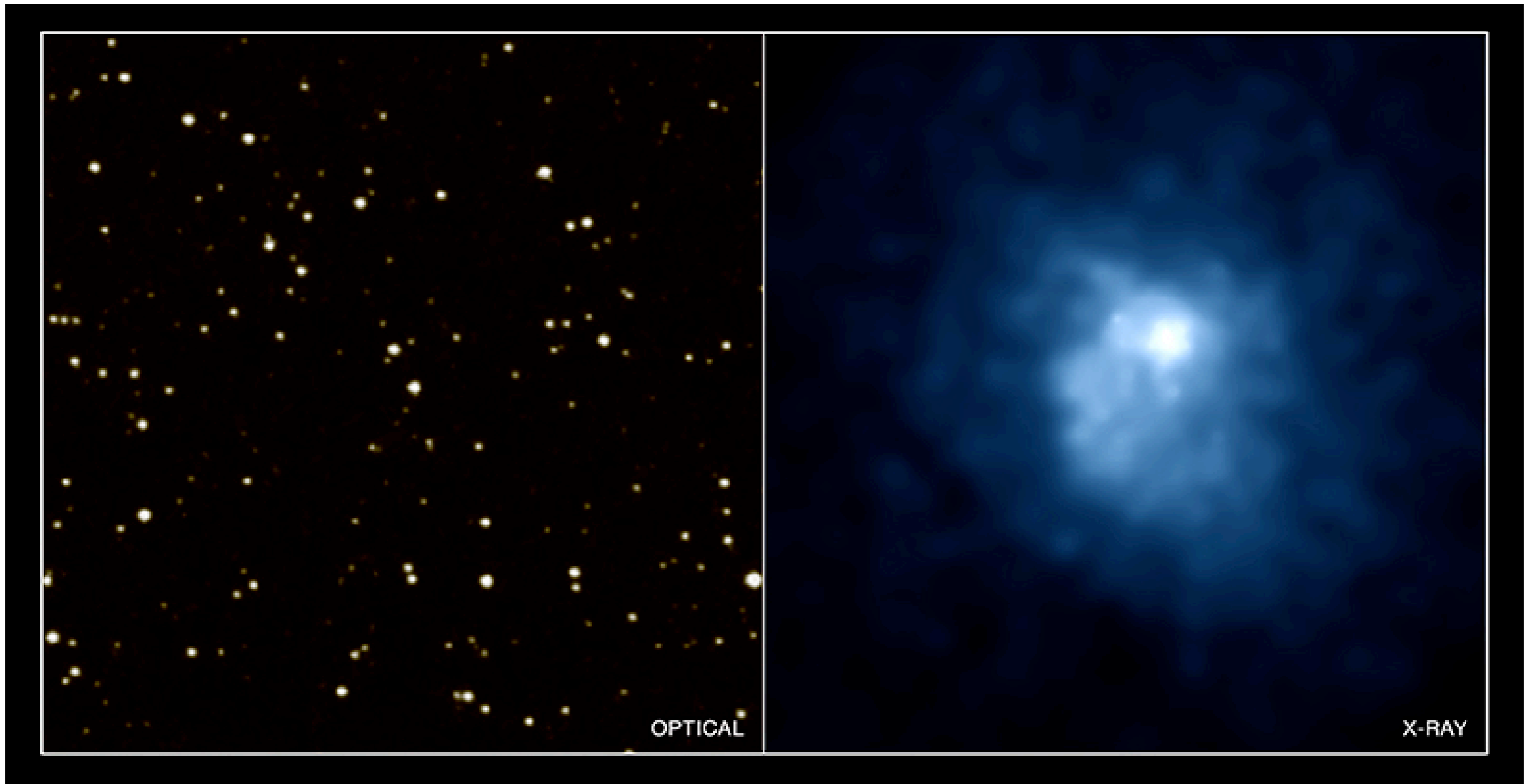


Optische Aufnahme



Röntgen Aufnahme (Chandra)

Galaxienhaufen 3C438



X-ray: NASA/CXC/CfA/R.P.Kraft; Optical: Pal.Obs. DSS

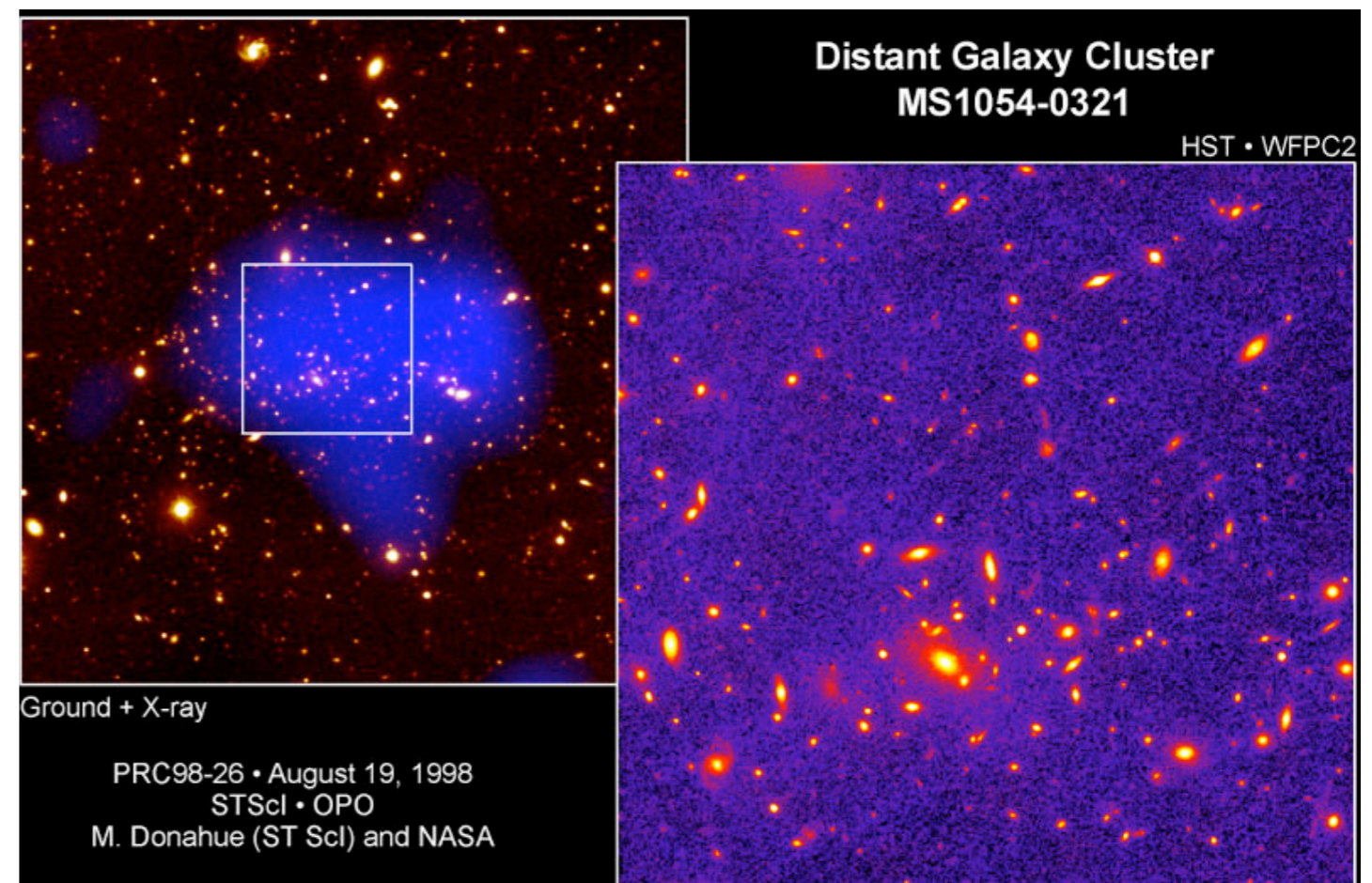
Morphologie der Röntgenstrahlung

- Grobe Einteilung der Morphologie der Röntgenstrahlung in reguläre und irreguläre Haufen
- **Reguläre Haufen:** glatte Helligkeitsverteilung, zentriert auf optischem Zentrum des Haufens, nach außen hin abfallende Helligkeit; sie haben charakteristischerweise großes L_X und T
- **Irreguläre Haufen:** können mehrere Helligkeitsmaxima besitzen, oft zentriert auf Haufengalaxien oder Untergruppe von Haufengalaxien; falls Anteil von Spiralen groß $\Rightarrow L_X$ und T kleiner

- **Weitere Unterteilung:**

Haufen, die zentrale dominante Haufengalaxie besitzen und solche, die keine besitzen; die ersteren haben häufig starken zentralen Peak der Röntgenemission

- Die Röntgenemission weicht häufig von axialer Symmetrie ab; die Annahme, dass Haufen sphärisch symmetrisch sind ist also nicht gut begründet



Modelle der Röntgenemission

- **Hydrostatische Annahme**

- Die **Schallgeschwindigkeit** im Haufengas: $c_s \approx \sqrt{\frac{P}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{nk_B T}{\rho_g}}$

mit $P =$ Gasdruck

$$P = \frac{\rho_g k_B T}{\mu m_p}$$

$\rho_g =$ Dichte des Gases; $n =$ Anzahldichte der Gasteilchen

- und die **mittlere molekulare Masse μ** (Verhältnis der mittleren Masse eines Gasteilchens und der Protonen-Masse):

$$\mu \equiv \frac{\langle m \rangle}{m_p}$$

- Für ein vollständig ionisiertes Gas wäre $\mu = 1/2$ (ein p und ein e^- pro $\sim p$ -Masse); da Haufengas auch He und schwerere Elemente enthält, ist $\mu \sim 0.63$

- Die Schalllaufzeit durch den Haufen:

$$t_{sc} = \frac{2R_A}{c_s} \sim 7 \times 10^8 \text{ y}$$

- für einen Haufen mit $T \sim 10^8 \text{ K}$

Modelle der Röntgenemission

- Die Schalllaufzeit ist also wesentlich kleiner als die Lebensdauer des Haufens (~ Alter des Universums)
=> **das Gas im Haufen kann sich im hydrostatischen Gleichgewicht befinden, so dass:**

$$\nabla P = -\rho_g \nabla \phi$$

wobei ϕ = Gravitationspotential

- **Im sphärisch symmetrischen Fall gilt:**

$$\frac{1}{\rho_g} \frac{dP}{dr} = -\frac{d\phi}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2}$$

mit $M(r)$ = Masse innerhalb Radius r ; dabei ist M die Gesamtmasse, also nicht nur die Gasmasse, da die gesamte Masse das Gravitationspotential ϕ bestimmt

- Wir setzen den Druck $P = \frac{\rho_g k_B T}{\mu m_p}$ in die obige Gleichung ein und erhalten:

$$M(r) = -\frac{k_B T r^2}{G \mu m_p} \left(\frac{d \ln \rho_g}{dr} + \frac{d \ln T}{dr} \right)$$

=> kann man den radialen Verlauf von ρ_g und T messen, so kann man die Masse $M(r)$ bestimmen, und somit die Gesamtdichte als Funktion des Radius r vermessen

Modelle der Röntgenemission

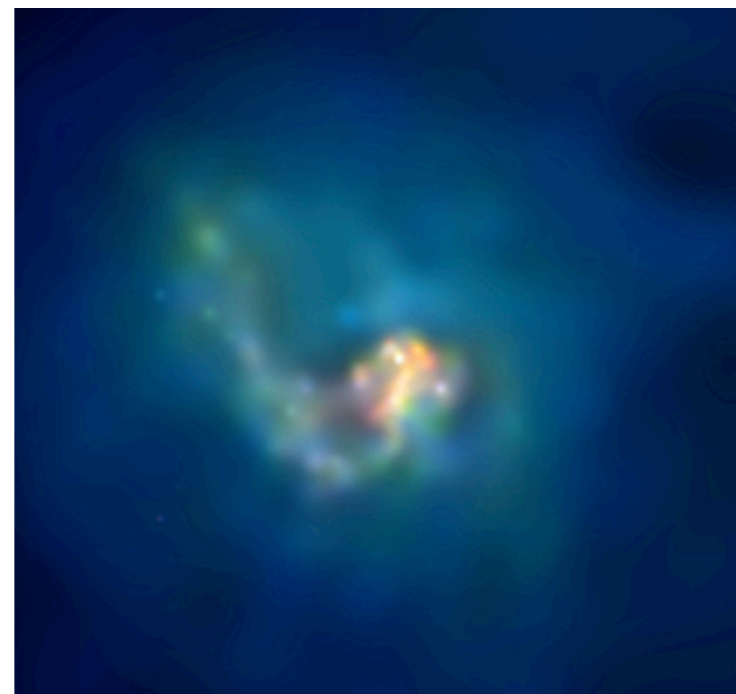
- **Probleme:**

$\rho_g(r)$ und $T(r)$ müssen aus Röntgenhelligkeit und spektraler Temperatur bestimmt werden, unter Benutzung der Bremsstrahlungsemissivität; diese ist aber nur projiziert beobachtbar:

$$I_\nu(\mathbf{R}) = 2 \int_R^\infty dr \frac{\epsilon_\nu(\mathbf{r})r}{\sqrt{r^2 - R^2}}$$

Winkel- und Energieauflösung der Röntgenteleskope vor XMM-Newton und Chandra war nicht ausreichend, um $\rho_g(r)$ und $T(r)$ zu vermessen, außer für die nächsten Haufen

- **Isotherme Gasverteilung:** nimmt man an, dass die Gastemperatur konstant ist, $T = T_g$, so vereinfacht sich die Gleichung für $M(r)$. Aus dem radialen Verlauf von $I(R)$ kann man dann $\epsilon(r)$ bestimmen, durch Inversion der Gleichung für $I_\nu(R)$
- Zusätzlich: für $h\nu \ll k_B T$ ist die Bremsstrahlungsemissivität nur schwach von T anhängig



Centaurus Haufen:

Chandra 3'x3' Aufnahme

→ Morphologie der Röntgenemission ist komplex

Farben: Photonenenergien:

von niedrigen zu hohen in rot, gelb, grün und blau

Relativ kühle Innenbereich kann das Ergebnis eines 'cooling flows' sein

Das β -Modell

- Weit verbreitet - das Anpassen der Röntgendaten an das sogenannte **β -Modell**: dies basiert auf der Annahme, dass das Dichteprofil der gesamten Materie (dunkle und leuchtende) durch eine isotherme Verteilung gegeben ist. Aus

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2} \quad \text{und} \quad \frac{dP}{dr} = \frac{k_B T}{\langle m \rangle} \frac{d\rho}{dr} = \frac{\langle v^2 \rangle}{3} \frac{d\rho}{dr} = \sigma_v^2 \frac{d\rho}{dr}$$

- erhält man:

$$\frac{d \ln \rho}{dr} = -\frac{1}{\sigma_v^2} \frac{GM}{r^2}$$

- Andererseits folgt aus der Gleichung für $M(r)$ im isothermen Fall:

$$\frac{d \ln \rho_g}{dr} = -\frac{\mu m_p}{k_B T} \frac{GM}{r^2}$$

- Aus dem Vergleich der beiden letzten Gleichungen folgt dann:

$$\rho_g(\mathbf{r}) \propto [\rho(\mathbf{r})]^\beta \quad \text{mit} \quad \beta \equiv \frac{\mu m_p \sigma_v^2}{k_B T_g}$$

Das β -Modell

- Also in der **King-Näherung**

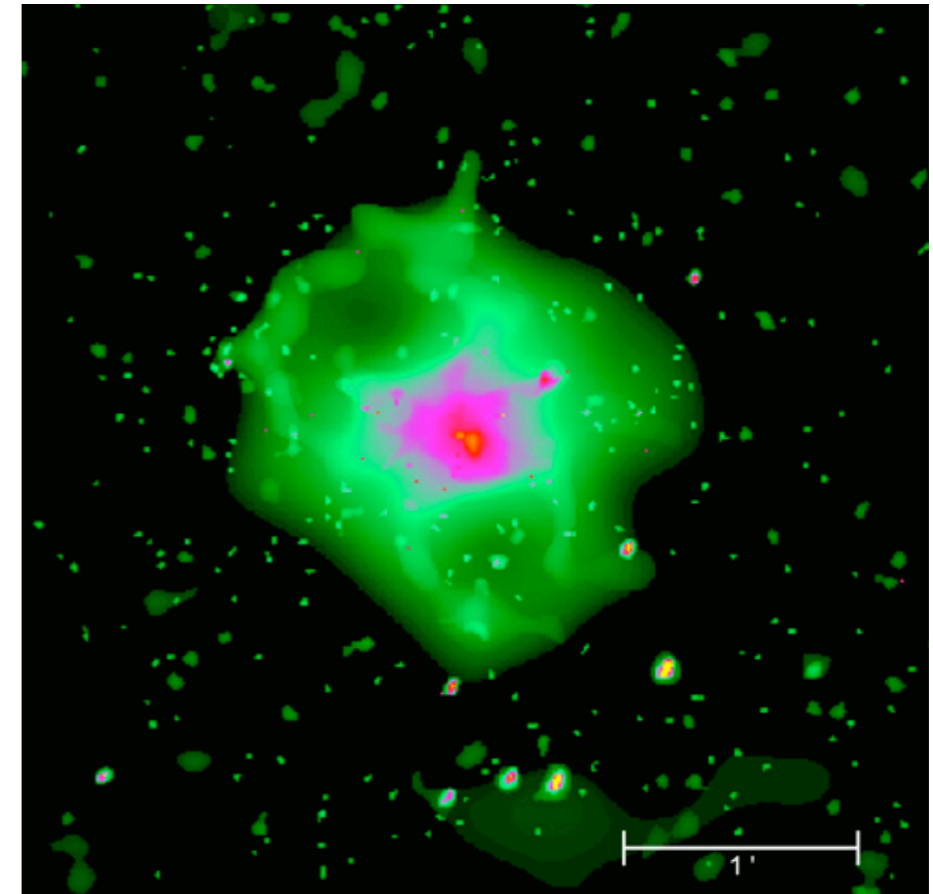
$$\rho_g(\mathbf{r}) = \rho_{g0} \left[1 + \left(\frac{\mathbf{r}}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta/2}$$

wobei ρ_{g0} = zentrale Gasdichte

- Das Helligkeitsprofil der Röntgenemission ist dann:

$$I(R) \propto \left[1 + \left(\frac{R}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta+1/2}$$

Die Röntgenemission vieler Haufen kann gut mit diesem Profil gefittet werden; die sich ergebende Werte für r_c sind $r_c = 0.1-0.3 h^{-1} \text{ Mpc}$ und $\beta = \beta_{\text{fit}} \approx 0.65$. Andererseits kann β mittels der Definition aus der Temperatur T_g und σ_v gemessen werden; typische Werte liegen bei $\beta_{\text{spec}} \approx 1$ (die Diskrepanz ist bisher noch nicht gut verstanden, siehe aber Bemerkungen)



Galaxiengruppe HCG 62

Chandra 4' x 4' Aufnahme

→ Röntgenemission sehr komplex + 2 symmetrisch angeordnete Gebiete, die fast frei von ICM erscheinen (Löcher durch Jets der zentralen Galaxie?)

Das β -Modell

- **Bemerkungen:**

- ➔ die Temperaturmessungen von Haufen sind zur Zeit noch nicht sehr genau; nur die Emissions-gemittelte Temperatur wird gemessen; die Unabhängigkeit von ϵ_v^{eff} von T für $h\nu \ll k_B T$ macht die Messung von T schwierig
- ➔ die gemessenen Werte für β_{fit} hängen vom Winkelbereich ab, über den das Profil gefittet wird; je weiter der Bereich, umso größer wird β_{fit} , also umso kleiner die Diskrepanz zwischen β_{spec} und β_{fit}
- ➔ neuere Untersuchungen von Haufen (Chandra, XMM-Newton) haben gezeigt, dass das Gas nicht wirklich isotherm ist; der Temperaturverlauf ist typischerweise zum Zentrum hin und nach außen abnehmend, dazwischen befindet sich ein Maximum
- ➔ die Geschwindigkeitsverteilung der Galaxien, mit denen σ_v gemessen wird, kann anisotrop sein

- **Aus der Messung der Röntgenemission folgt die Massenabschätzung eines Haufens:** man findet in Übereinstimmung mit der dynamischen Methode, dass Haufen sehr viel mehr Masse enthalten, als in Galaxien sichtbar ist

- Die Gasmasse des ICM (intra-cluster Mediums) ist zu klein, um die fehlende Masse zu erklären; die Gasmasse ist etwa $\sim 15\%$ der Gesamtmasse eines Haufens

=> die Masse von Galaxienhaufen ist zu etwa $\sim 3\%$ in sichtbarer Form in Galaxien enthalten, ca. 15% im intergalaktischen Gas; der Rest, also $\sim 80\%$ ist dunkle Materie, die somit die Masse von Haufen dominiert

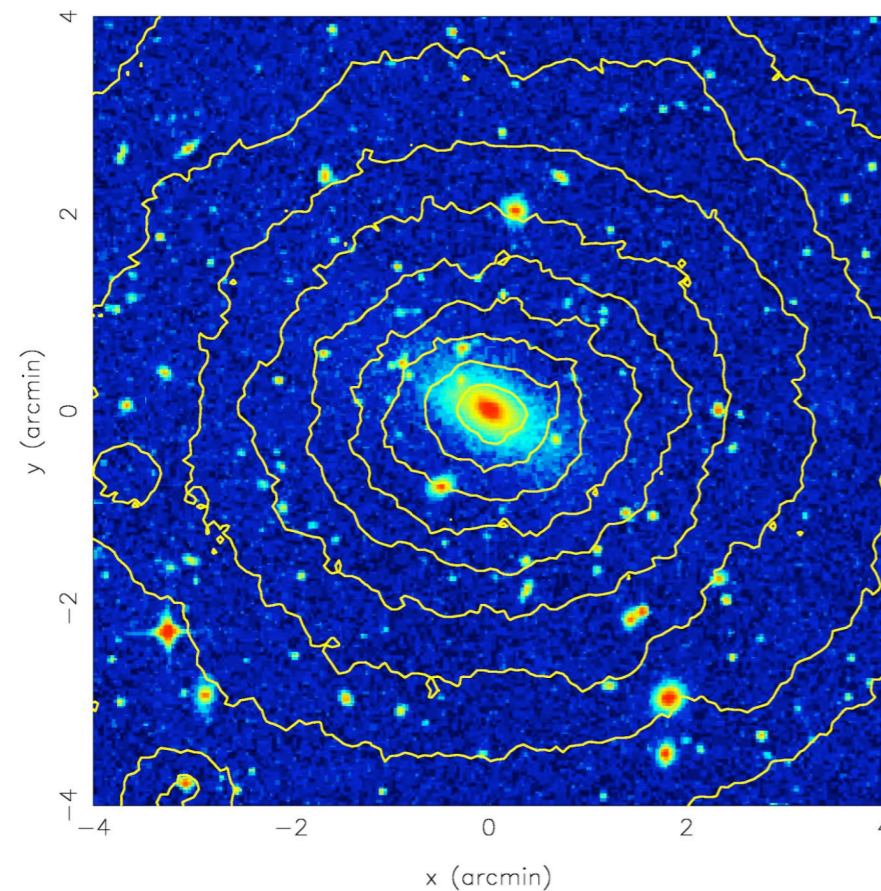
Das β -Modell



XMM-NEWTON SCIENCE RESULTS

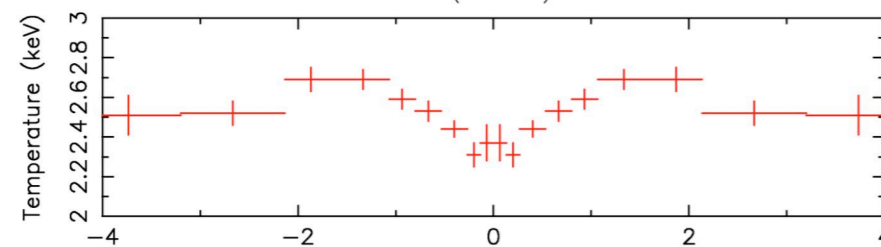
Sérsic 159-03

Contours: XMM-Newton MOS – Image: DSS



Röntgenemission des Galaxienhaufens Sérsic 159-03, beobachtet mit XMM-Newton und superponiert auf eine optische Aufnahme.

Unteres Bild: radiale Verteilung der Temperatur des ICMs. Obwohl die Röntgenkontouren des Haufens praktisch kreisförmig sind und so erscheinen, als wäre dieser Haufen in einem relaxierten Zustand, ist T eine Funktion des Radius!



P. Schneider 6 December 2000

Cooling Flows

- Das Röntgen-emittierende Gas verliert Energie; falls es nicht nachgeheizt wird, kühlt es ab
- die Zeitskala der Kühlung ist allerdings sehr lang

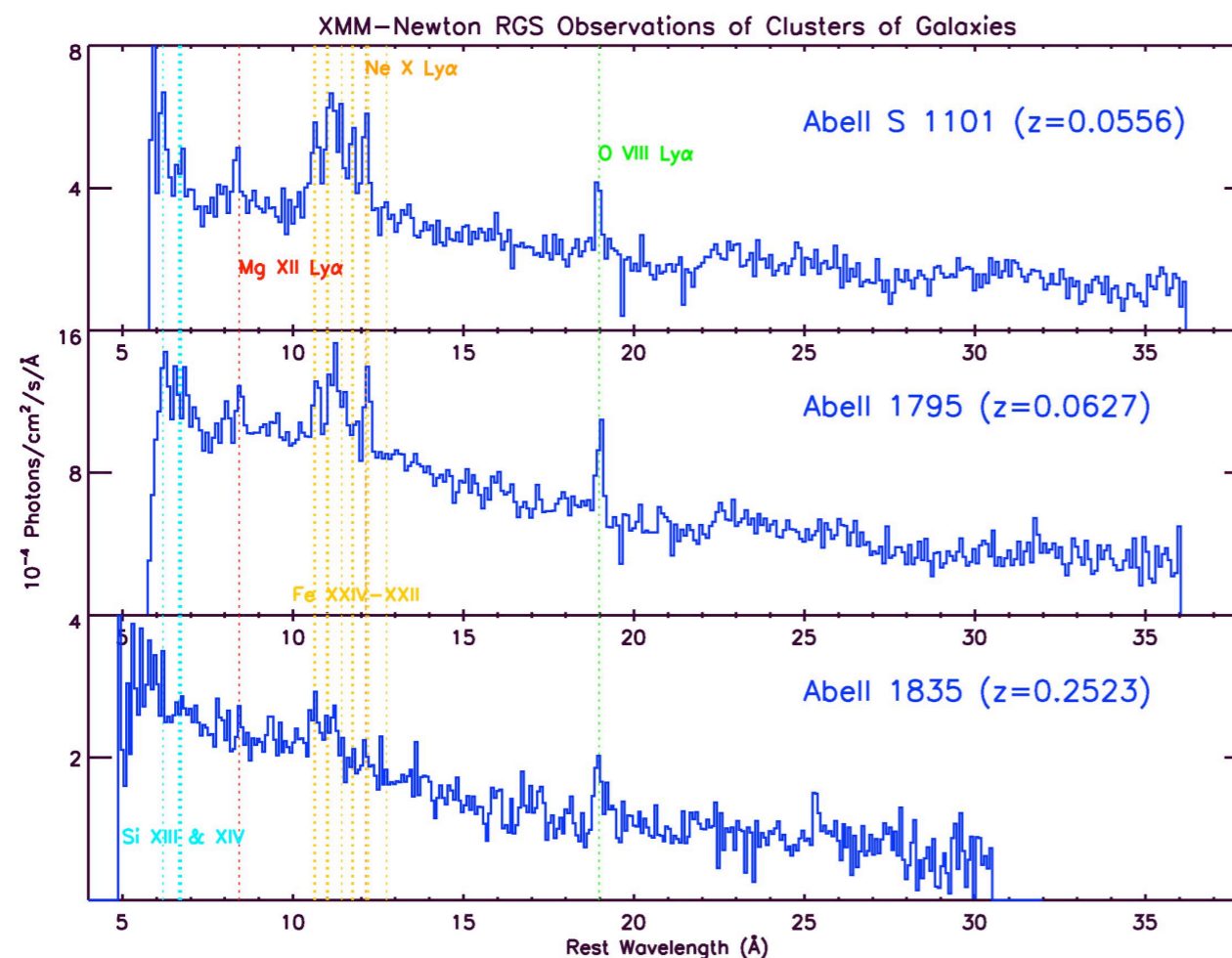
$$t_{cool} \equiv \frac{u}{\epsilon^{eff}} \approx 8.5 \times 10^{10} \text{ y} \left(\frac{n_e}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T_g}{10^8 \text{ K}} \right)^{1/2}$$

$$\text{wobei } u = \frac{3}{2} n k_B T_g \quad \text{mit } n = \frac{\rho_g}{\mu m_p}$$

- die Kühlzeit ist also länger als die Hubble-Zeit, fast überall im Haufen; deshalb ist hydrostatisches Gleichgewicht möglich; jedoch kann im Zentrum von Haufen die Dichte so groß sein, dass $t_{cool} \lesssim t_0$
- ➔ dort kann das Gas effizient kühlen
- wenn Gas kühlt, verringert sich sein Druck; hydrostatisches Gleichgewicht kann im Zentrum nicht mehr aufrecht erhalten werden
 - um P-Gleichgewicht wieder herzustellen, muss Gas nach innen strömen und sich dabei komprimieren; es kommt also zu einem nach innen gerichteten Fluss
 - die dadurch erfolgte Erhöhung der Dichte beschleunigt die Kühlung

Cooling Flows

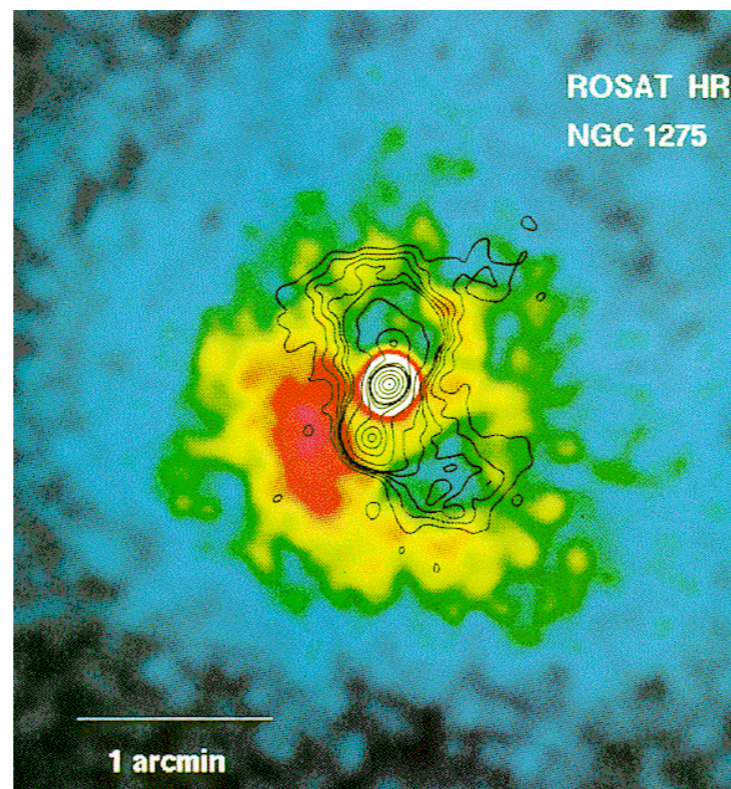
- diese 'cooling flows' sind im Zentrum massiver Haufen beobachtet worden; die dadurch erzeugte Verdichtung des Gases führt zu starken Erhöhung der Röntgenemission, da $\epsilon_{\text{eff}} \propto n_e^2$
- => scharfes Maximum in $I(R)$ ist deutliches Zeichen eines cooling flows; die Menge des kühlenden Gases kann beträchtlich sein, typischerweise mehrere $100 M_{\odot}/y$



Röntgenspektren dreier Haufen (mit XMM-Newton):
die Spektren zeigen kein Gas mit $T \leq 2$ keV, dessen Anwesenheit man für cooling flows erwarten würde - warum kühlt das Gas nicht weiter?

Cooling Flows

- **Was passiert mit dem einströmenden Gas?** In Haufen mit cD Galaxie kann das kühlende Gas innerhalb der Hubble Zeit einen beträchtlichen Anteil der cD Masse ausmachen - sind cD Galaxien durch Akkretion in cooling flows entstanden? Die Frage nach dem Schicksal des kühlenden Gases ist bisher ungeklärt
- Cooling flows sind inzwischen direkt nachgewiesen, durch Röntgenspektroskopie; T_g nimmt in cooling flow Haufen tatsächlich deutlich nach innen ab
- Viele Haufen haben eine aktive Galaxie im Zentrum, deren Aktivität (zB durch Radio-Jets) beeinflusst das ICM - zB kann Jet Energie auf das ICM übertragen werden, dadurch wird ICM geheizt - vielleicht der Grund, warum cooling flows nicht bis zu sehr kleinen Temperaturen herunterkühlen
- der Einfluss von Jets auf die Röntgenemission kann direkt nachgewiesen werden



Perseus Haufen

ROSAT Bild des zentralen Gebietes, mit der zentralen Galaxie NGC 1275

Radioemission: Konturen
Röntgenemission: Farben

Zu erkennen: der Einfluss der Radio-Jets auf die Röntgenemission (am Ort der 'lobes' ist diese stark unterdrückt)

Der Sunyaev-Zeldovich Effekt

- Die Elektronen des heißen Gases streuen Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung; ein Photon, das sich durch einen Haufen auf uns zu bewegt, wird nach der Streuung in eine andere Richtung erhalten, und uns nicht erreichen

Da CMB aber isotrop ist, wird für jedes Photon der CMB, das aus dem Lichtstrahl herausgestreut wird, ein anderes hineingestreut - dadurch ist die Gesamtzahl der Photonen erhalten

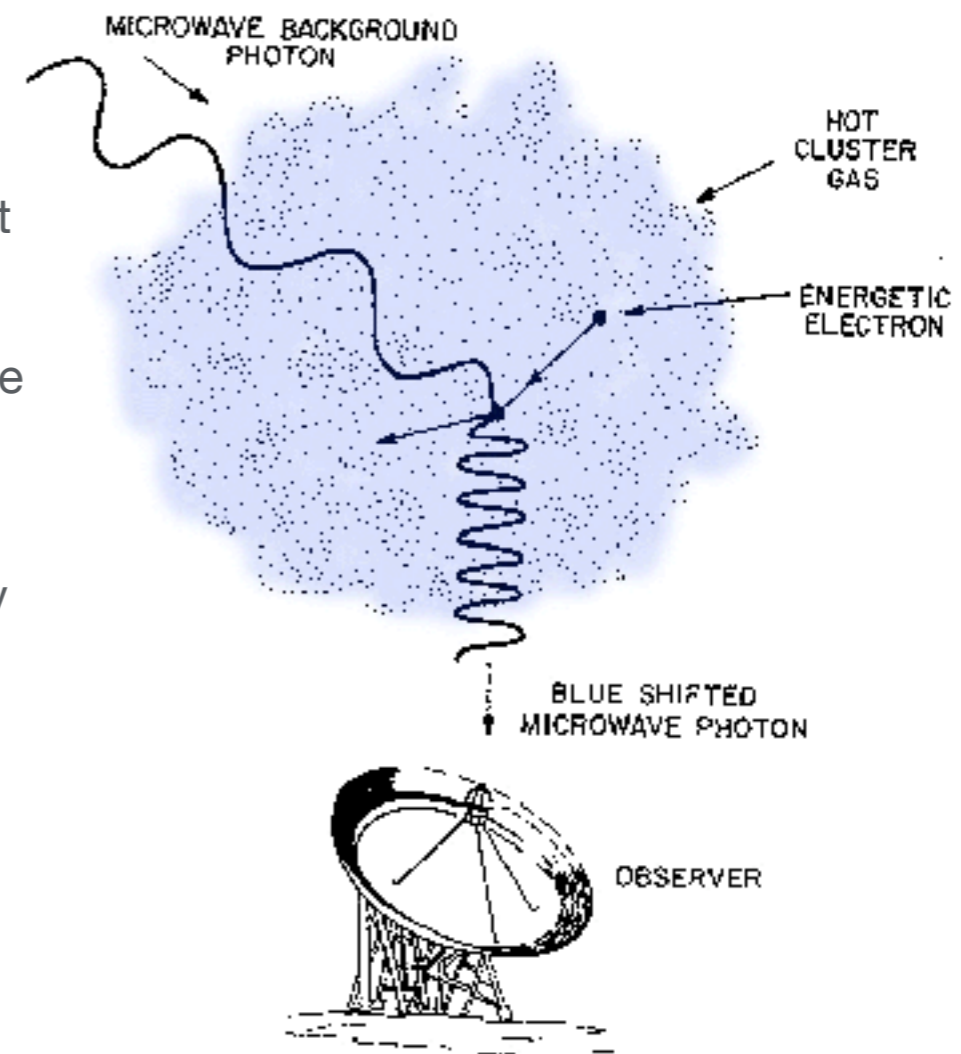
Allerdings: durch Streuung mit heißen Elektronen ändert sich die Energie der Photonen ein wenig; nach der Streuung haben sie (im Mittel) eine höhere Frequenz

=> diese Streuung führt dazu, dass niederenergetische Photonen relativ zum Planck-Spektrum reduziert werden, höherenergetische jedoch hinzukommen

=> das Spektrum der CMB, gemessen in Richtung eines Galaxienhaufens, weicht von Planck-Spektrum ab

=> der Grad der Abweichung hängt von der Temperatur des Haufens und seiner Dichte ab

- dieser Effekt heißt Sunyaev-Zeldovich Effekt, er wurde in 1970 vorgeschlagen und inzwischen bei vielen Haufen nachgewiesen



Der Sunyaev-Zeldovich Effekt

- Im Rayleigh-Jeans Bereich des CMB-Spektrums werden Photonen weggestreut. Es gilt:

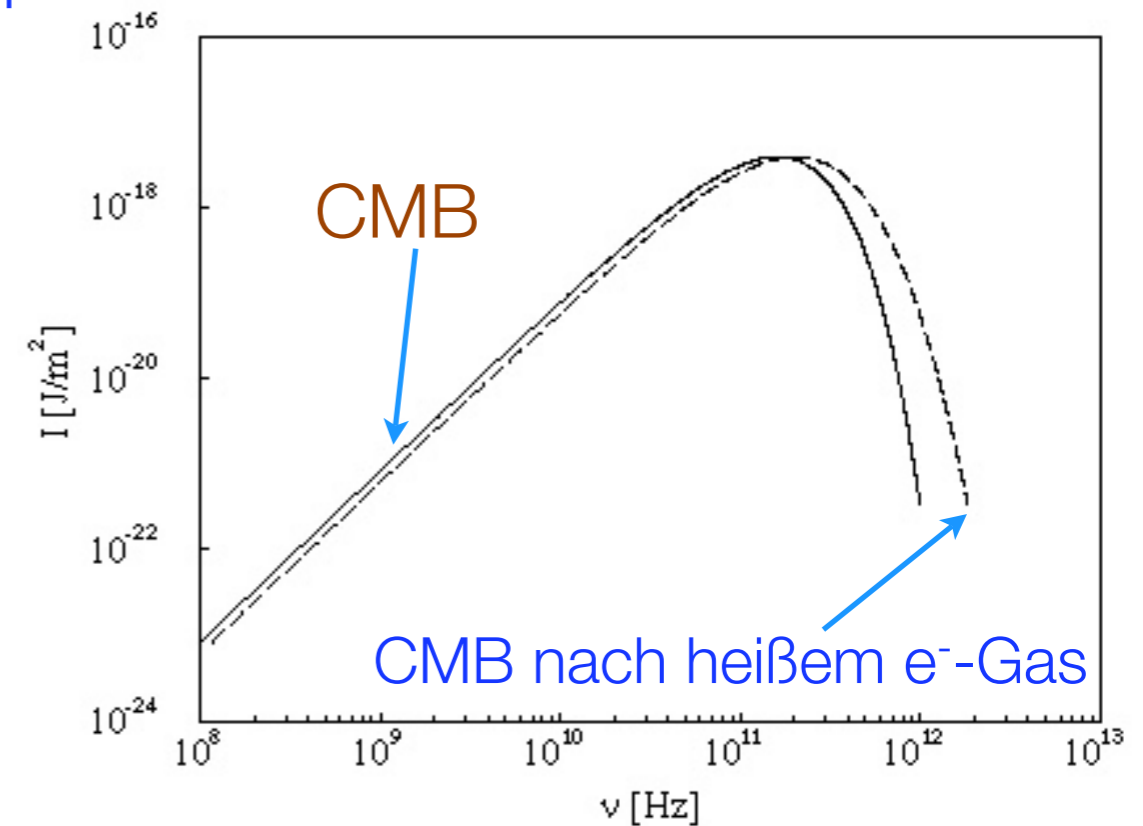
$$\frac{\Delta I_{\nu}^{RJ}}{I_{\nu}^{RJ}} = -2y$$

- wobei y zum Integral entlang der Sichtlinie durch den Haufen proportional ist:

$$y = \int dl \frac{k_B T_g}{m_e c^2} \sigma_T n_e$$

- und σ_T ist der Thompson-Wirkungsquerschnitt für Elektronenstreuung:

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2$$



Der Sunyaev-Zeldovich Effekt: Entfernungsbestimmung

- Der SZ-Effekt erlaubt, in Verbindung mit der Röntgenemission, **die Entfernung eines Haufens zu bestimmen**. Die Änderung der CMB-Intensität ist proportional zur Elektronendichte n_e , zur Ausdehnung L des Haufens entlang der Sichtlinie, und zur Gastemperatur T_g :

$$\frac{|\Delta I_v^{RJ}|}{I_v^{RJ}} \propto n_e L T_g$$

- Andererseits ist die Flächenhelligkeit der Röntgenstrahlung:

$$I_x \propto L n_e^2$$

- Aus diesen beiden Relationen kann n_e eliminiert werden; da man T_g aus dem Röntgenspektrum messen kann bleibt:

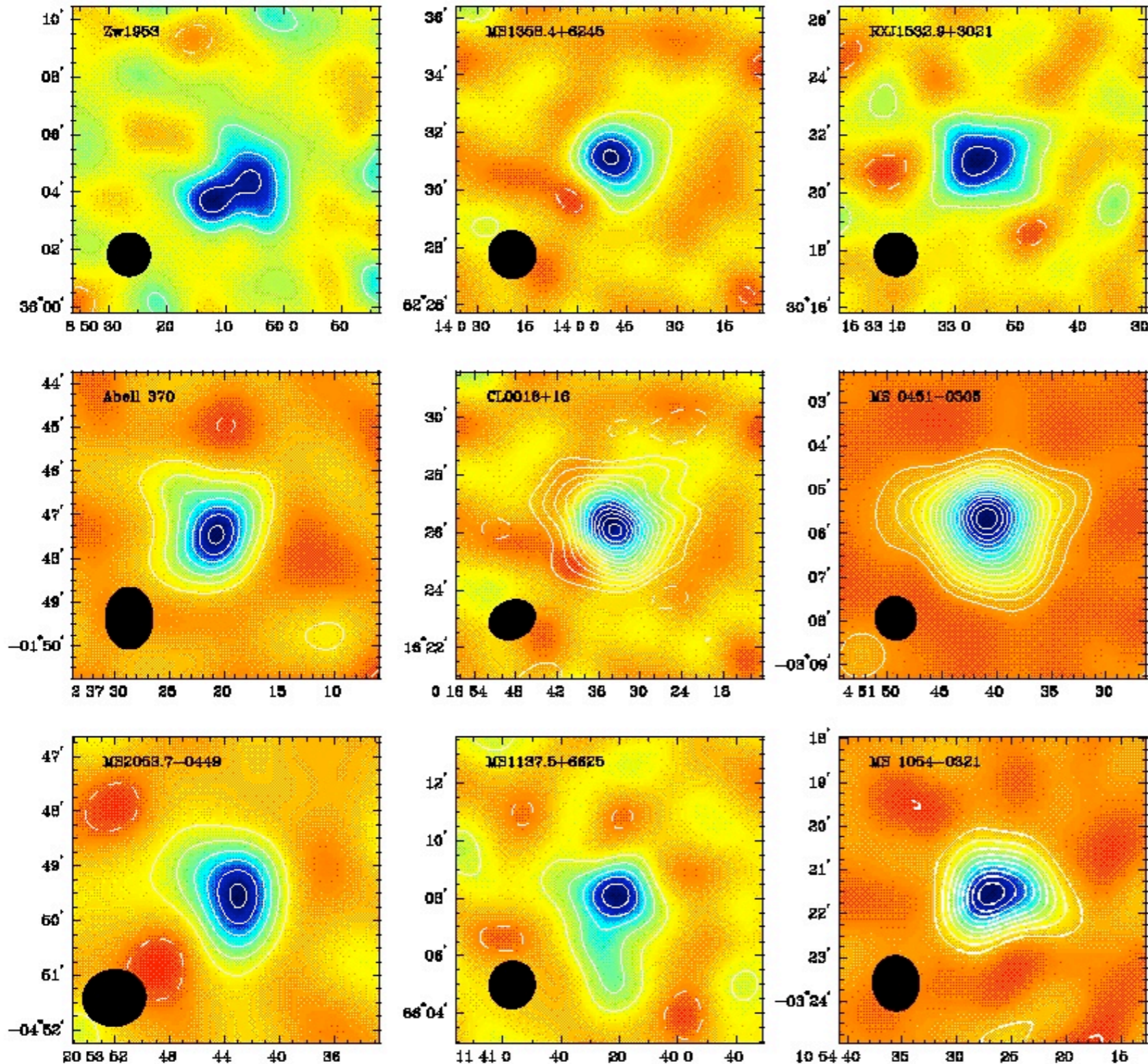
$$\frac{|\Delta I_v^{RJ}|}{I_v^{RJ}} \propto \sqrt{L I_x}$$

- Nimmt man an, dass der Haufen sphärisch ist, so ist die Ausdehnung L entlang der Sichtlinie gleich der transversalen Ausdehnung $R = \theta D_A$, mit θ = Winkelausdehnung, D_A = Winkelentfernung zum Haufen. Es folgt:

$$D_A = \frac{R}{\theta} = \frac{L}{\theta} \propto \left(\frac{\Delta I_v^{RJ}}{I_v^{RJ}} \right)^2 \frac{1}{I_x}$$

Dies ist also eine Entfernungsbestimmung, die unabhängig von der Rotverschiebung z des Haufens ist

Der Sunyaev-Zeldovich Effekt



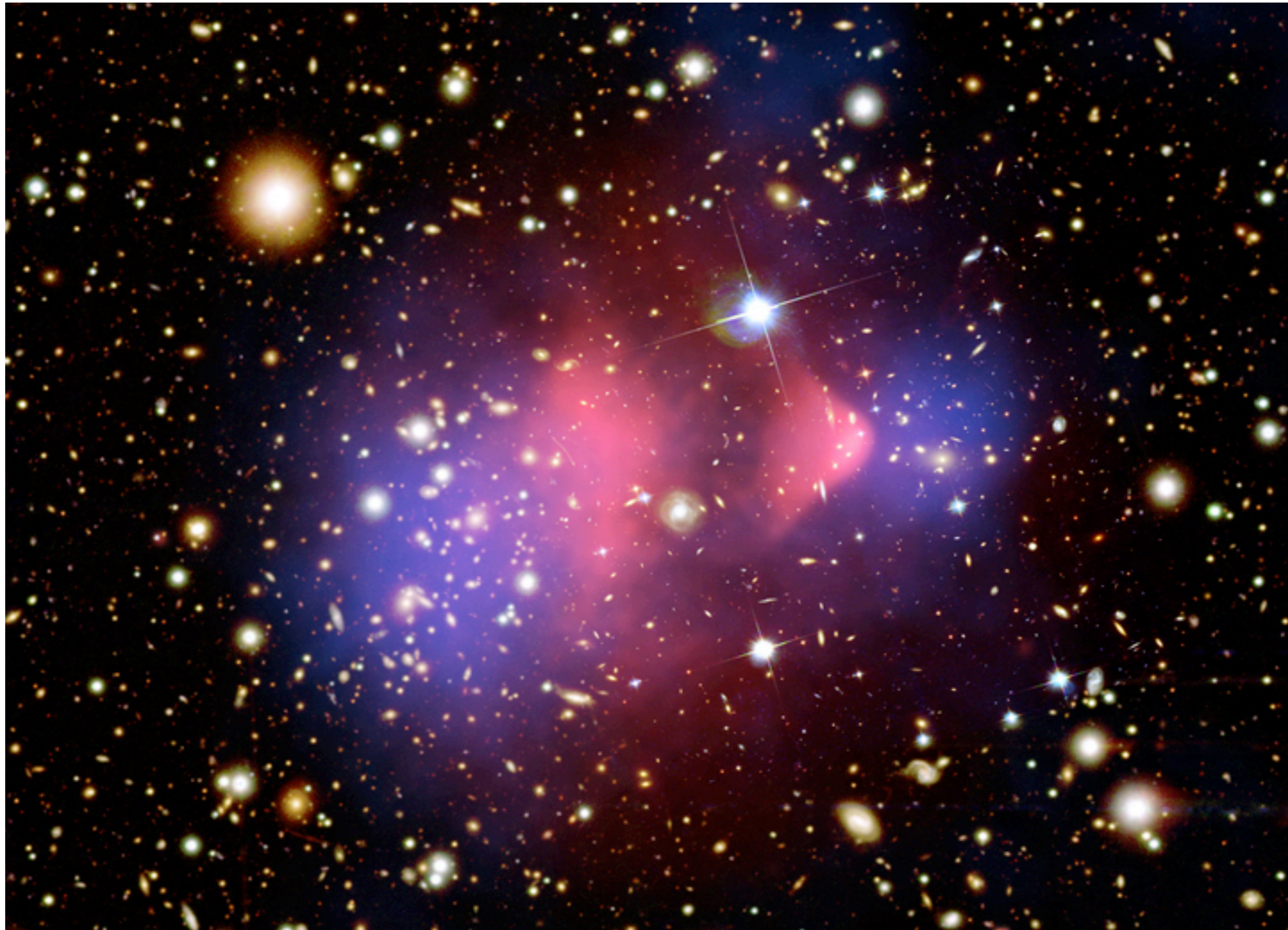
SZ-Karten von 9 Galaxienhaufen mit $0.17 < z < 0.32$

Dargestellt: die Temperaturdifferenz der gemessenen CMB relativ zur mittleren CMB Temperatur.

Schwarze Ellipsen: Größe des instrumentellen Beams

Die räumliche Abhängigkeit des SZ-Effekts ist klar zu erkennen. Da der SZ-Effekt proportional zur Elektronendichte ist, kann man den Massenanteil der Baryonen im Haufen messen, wenn man andererseits die Masse des Haufens aus dynamischen Methoden oder aus der Röntgentemperatur kennt

Der Bullet Cluster: direkter Hinweis auf Dunkle Materie



chandra.harvard.edu

Der Cl0024+17 Cluster: Dunkle Materie Ring



<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2007/17/image/a/>