

I Dunkle Materie

II Gammastrahlen- und TeV-Astronomie

III Neutrinos

IV Gravitationswellen

Thema am 05.11.2007:

Galaxienhaufen

- **Virialmassen**
- **heißes Röntgengas**
- **Sunyaev-Zeldovich-Effekt**

Inhaltsverzeichnis:

- ◆ Bilder
- ◆ Hubble Sequenz
- ◆ Verteilung der Galaxien
- ◆ Von der Galaxie zum Galaxienhaufen
- ◆ Isotherme Verteilung
- ◆ Wie schwer ist ein Galaxienhaufen
- ◆ Virialtheroem
- ◆ Massenbestimmung
- ◆ Massen-Leuchtkraft-beziehung + dunkle Materie
- ◆ Vom visuellen in den Röntgenbereich
- ◆ Wichtige Eigenschaften der Röntgenstrahlung
- ◆ Entstehung der Bremsstrahlung
- ◆ Bremsstrahlungsemissivität
- ◆ Massenbestimmung durch Röntgenemission
- ◆ Cooling Flows
- ◆ Sunyaev Seldovich – Effekt
- ◆ Wo ist die Masse?

Spiralgalaxie M81

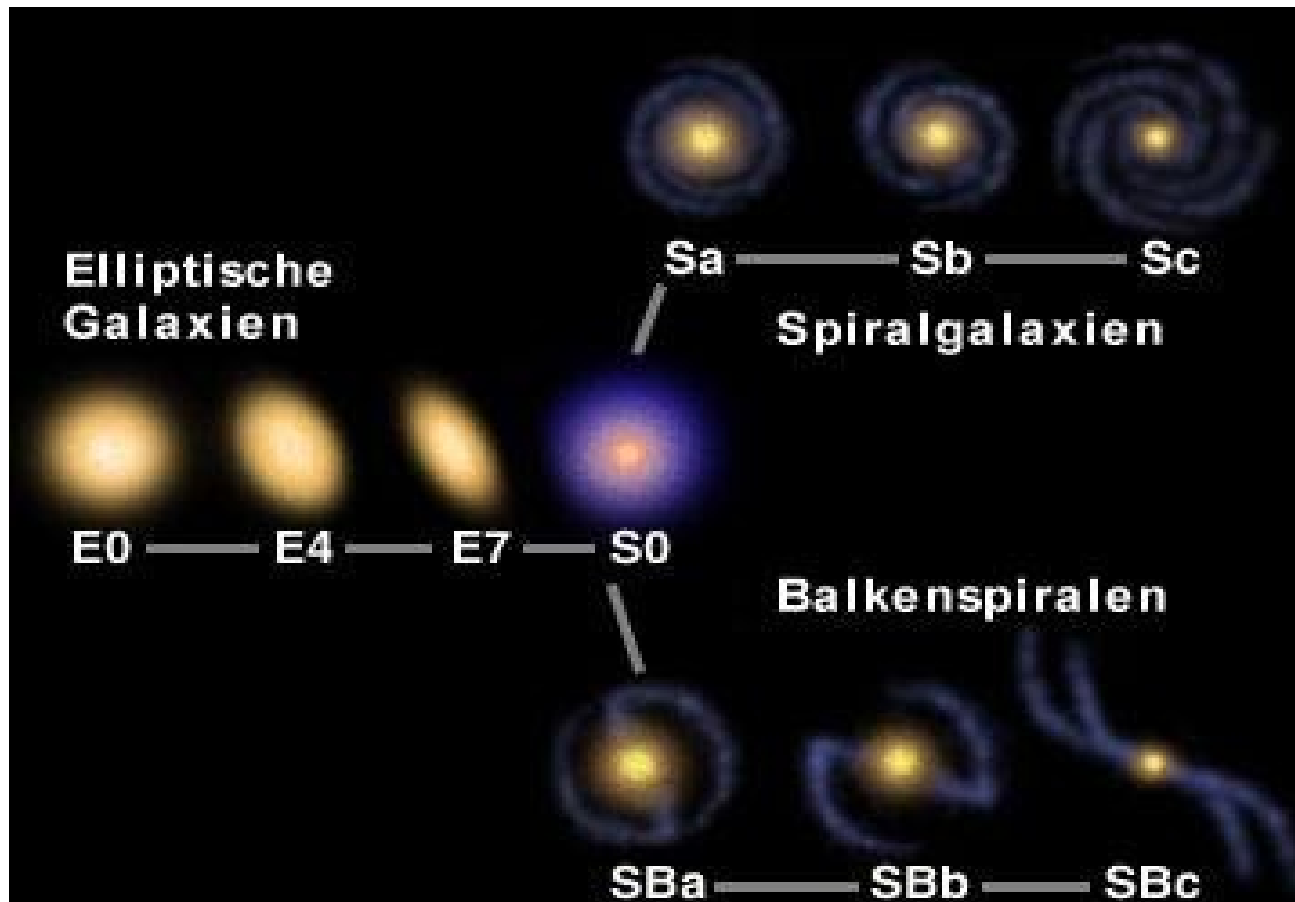


M31 - Andromedagalaxie

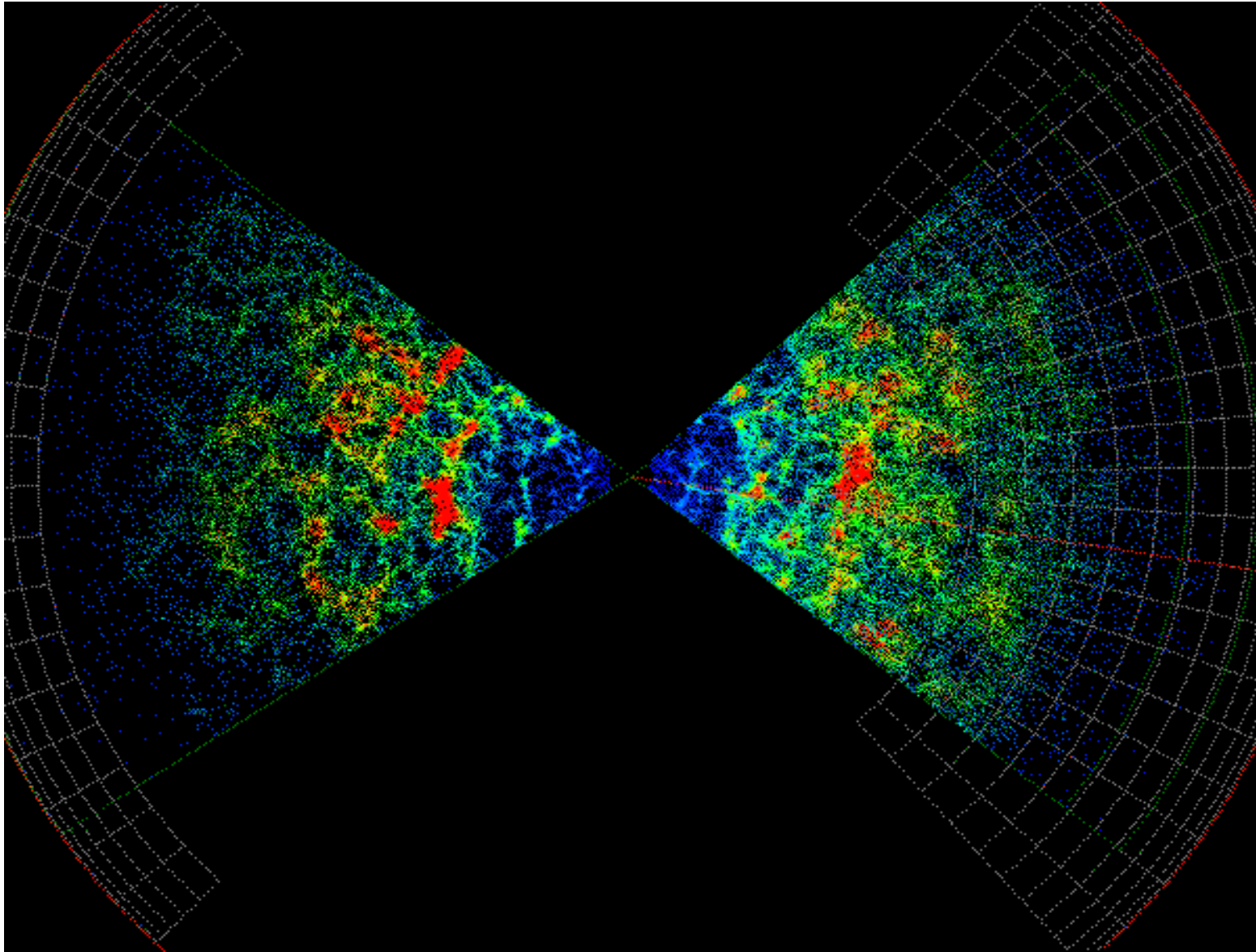
Hubble Sequenz

Benannt nach Edwin Hubble, der 1926 die verschiedenen Galaxientypen klassifizierte. Es wird auch auch als „Stimmgabel“-Modell betitelt

Achtung: Die Anordnung lässt keine Rückschlüsse über die Entwicklung der Galaxien zu

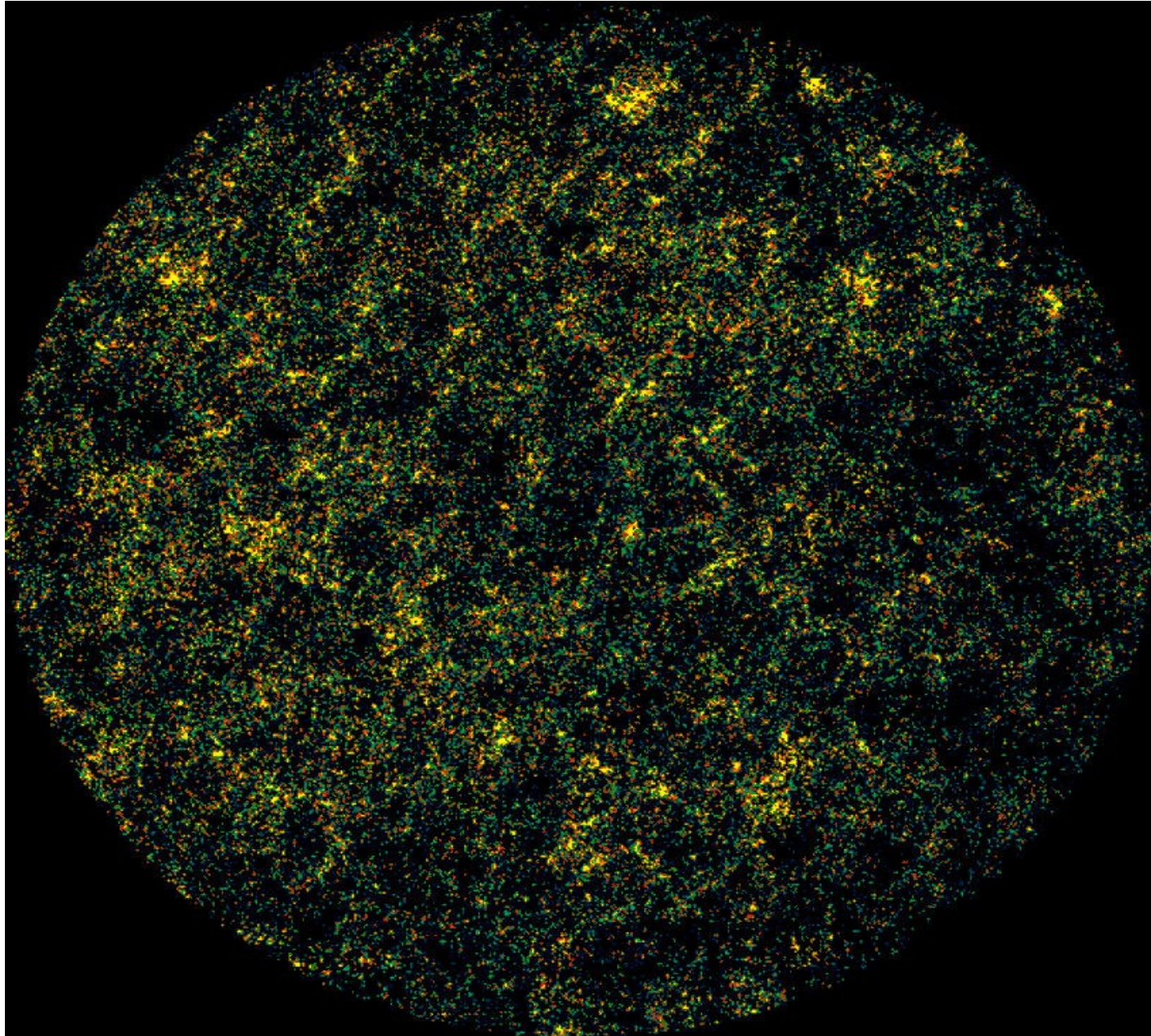


Verteilung der Galaxien I



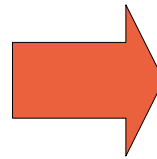
2° Sichtfeld - Galaxienrotverschiebung

Verteilung der Galaxien II



Von der Galaxie zum Galaxienhaufen

Die Idee: Einzelne Galaxien sind nicht homogen im Raum verteilt, sondern tendieren dazu, sich in Galaxienhaufen und Galaxiengruppen anzuordnen. Man spricht hierbei von „überdichten Gebieten im Universum“



Der Unterschied zwischen Galaxienhaufen und Galaxiengruppen liegt in der Anzahl der von ihnen beinhalteten Galaxien innerhalb einer Sphäre mit einem Durchmesser von $D \leq 1,5 \frac{Mpc}{h}$.

Galaxiengruppen: weniger als 50 Galaxien*
Galaxienhaufen: mehr als 50 Galaxien*

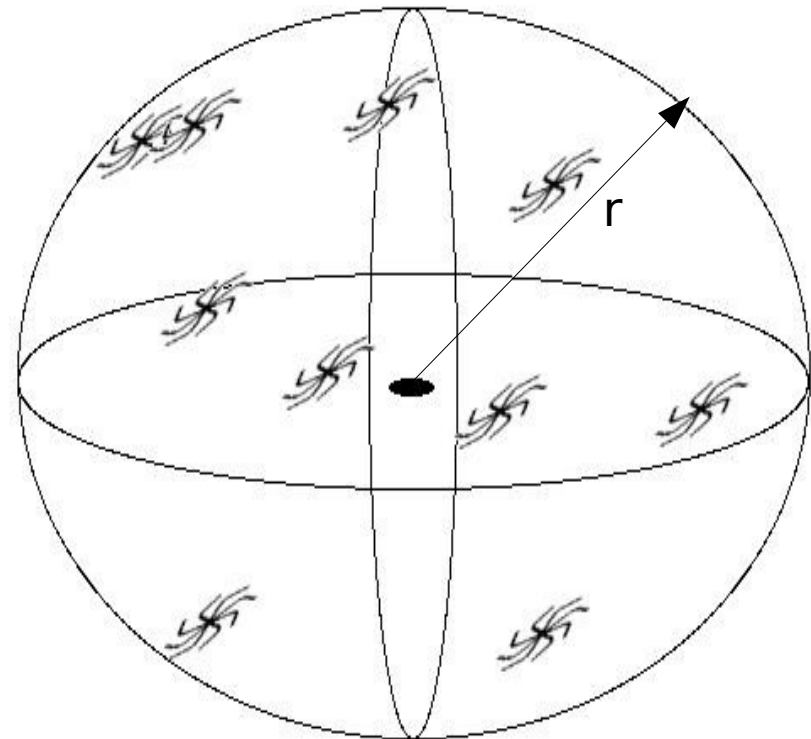
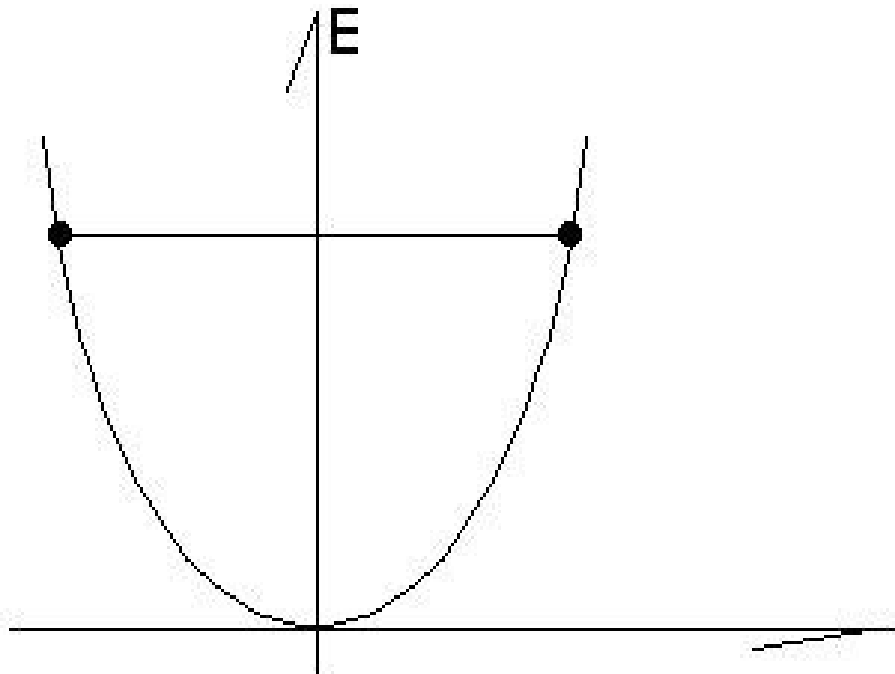
*) Abell Kriterium

Isotherme Verteilung I

Idee: Die Geschwindigkeitsverteilung der Galaxien im Haufen folgt lokal einer *Maxwellgeschwindigkeitsverteilung*.

Dies zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Radialgeschwindigkeiten, welche von verschiedenen Galaxienhaufen gemessen wurden.

Weiterhin gilt für das Massenprofil $M(r)$ des Galaxienhaufens, dass die Temperatur, bzw die Geschwindigkeitsdispersion unabhängig vom Radius sind.



Isotherme Verteilung II

Ausgehend von diesen Überlegungen über Galaxienhaufen, ergibt sich eine einparametrische Schar von Modellen.



Das Model der isothermen Sphären

Physikalische Grundlage: *Hydrostatische Gleichung*

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



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



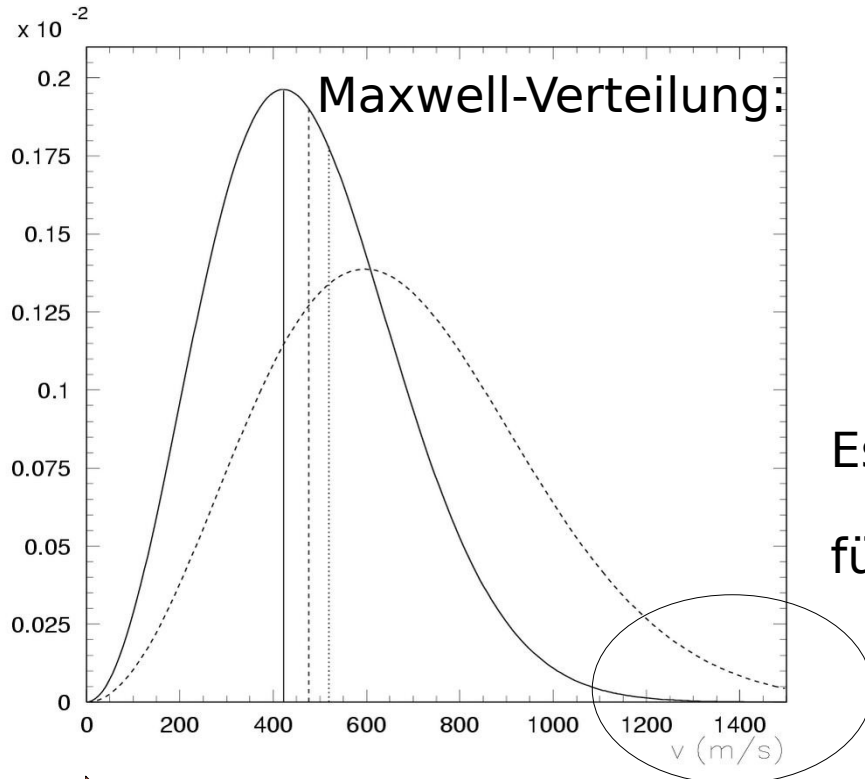
+ physikalisch sinnvolle Randbedingung: $\rho(\mathbf{0}) = \rho_0$

+ Dispersionsgeschwindigkeit: $\langle V^2 \rangle = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2$ & $\sigma_v^2 = \frac{\langle V^2 \rangle}{3}$

Isotherme Verteilung III

Anmerkungen:

➔ Geschwindigkeitsdispersion:



- Galaxien sind an ein Gravitationspotential gebunden.
- Da die Verteilung als stationär angenommen wird, dürfen die Galaxien nicht den Galaxienhaufen verlassen

Es existiert eine oberste Geschwindigkeit: V_{max}

für die gilt:

$$V_{max} < V_{flucht}$$

➔ Modell der isothermen Sphäre:

- Analytisches Model, kann nur als eine Näherung angesehen werden
- Galaxienverteilung hängt stark von den vorkommenden Galaxientypen innerhalb des Haufens ab

Wie schwer ist ein Galaxienhaufen?

Aus den vorherigen Überlegungen kann über die Dichteverteilung auf das Massenprofil des Galaxienhaufens geschlossen werden. Dies geschieht über die beobachtete Pekulärgeschwindigkeit.

Hierbei spielt das Virialtheorem eine zentrale Rolle. Dies kann angewendet werden, da Galaxienhaufen als gravitativ gebundene Systeme im statistischen Gleichgewicht aufgefasst werden können, welche auf langen Zeitskalen stabil bleiben.

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

mit:

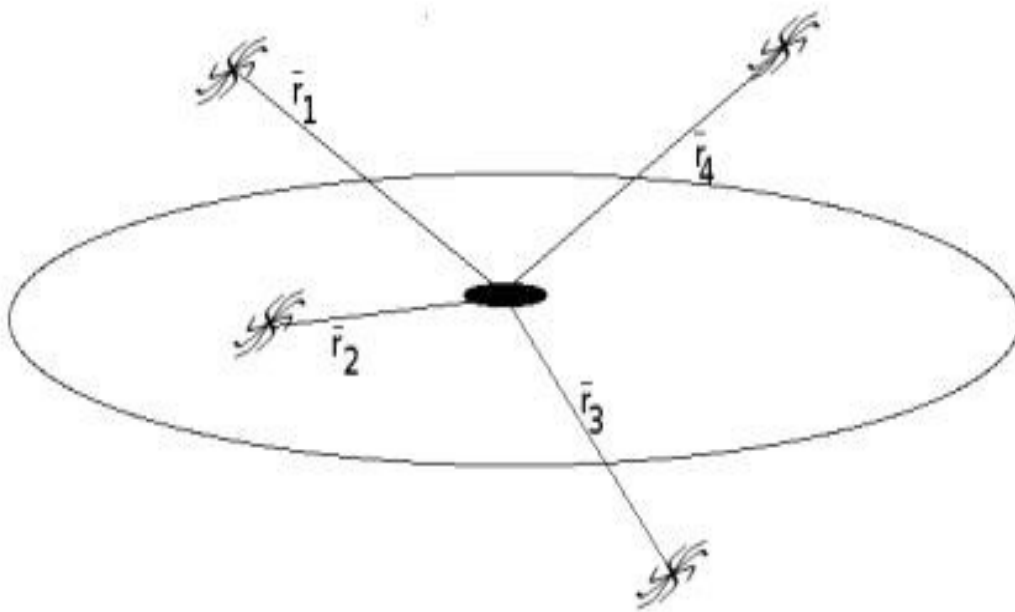
$$E_{kin} = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \quad E_{pot} = -\frac{1}{2} G \sum_{i \neq j} \frac{m_i m_j}{r_{ij}}$$

Virialtheorem I

kurze Herleitung:

Das Virialtheorem macht Aussagen über zeitliche Mittelwerte von potentieller und kinetischer Energie für ein Vielteilchensystem dessen Wechselwirkung untereinander durch ein allgemeines Potential beschrieben werden kann.

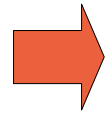
Kurz gesagt: Es ist perfekt für einen Galaxienhaufen!



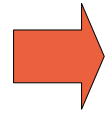
Jede Galaxie besitzt eine Eigengeschwindigkeit, und somit einen Impuls $\vec{p} = m\vec{v}$

$$\Rightarrow \vec{P} = \sum_{i=1}^N m_i \vec{v}_i \quad (1)$$

Virialtheorem II



Daraus definiert sich das „Virial“ des Systems: $A = \sum_{i=1}^N m_i \dot{\vec{r}}_i \circ \vec{r}_i$ (2)

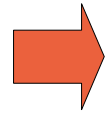


Die zeitliche Ableitung lautet:

$$\dot{A} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i \circ \vec{r}_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d}{dt} \vec{p}_i \right) \circ \vec{r}_i + \sum_{i=1}^N \vec{p}_i \circ \left(\frac{d}{dt} \vec{r}_i \right) \quad (3)$$

$$\dot{A} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i \circ \vec{r}_i + \sum_{i=1}^N m_i \dot{r}_i^2 \quad (4)$$

$$\dot{A} = - \sum_{i=1}^N \vec{\nabla}_i U \circ \vec{r}_i + 2 E_{kin} \quad (5)$$



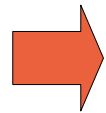
Jede Einzelgröße ändert sich zeitlich, doch das Zeitmittel ändert sich in einem stabilen System nicht. Für $\tau \rightarrow \infty$ gilt:

$$\langle \dot{A} \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{A} dt = - \left\langle \sum_{i=1}^N \vec{\nabla}_i U \circ \vec{r}_i \right\rangle + 2 \langle E_{kin} \rangle = 0 \quad (6)$$

Virialtheorem III

Für die vorliegende Wechselwirkungskraft, der *Gravitation* gilt für das Potential U :

$$U(r) = G \frac{Mm}{r} \quad (7)$$



$$\vec{\nabla} U = -G \frac{Mm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (8)$$



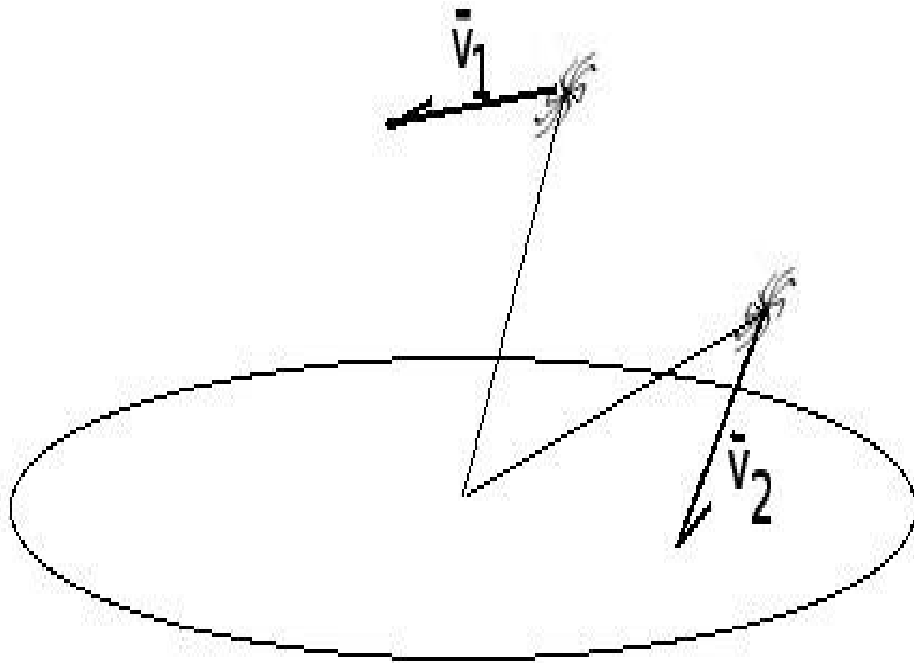
$$\vec{r} \vec{\nabla} U = -G \frac{Mm}{r} = -U = -E_{pot} \quad (9)$$

Dies setzt man in Gleichung 6 ein und erhält:

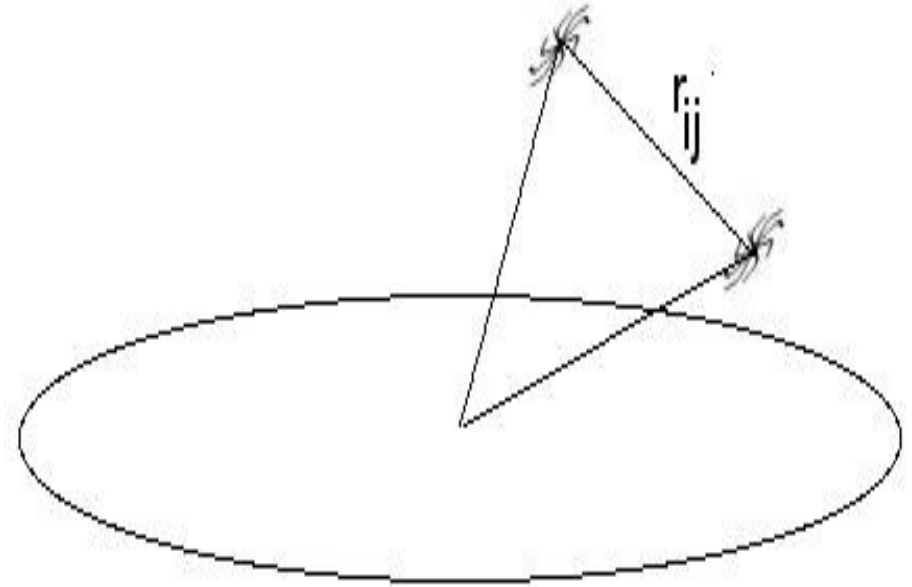
$$\langle E_{pot} \rangle + 2 \langle E_{kin} \rangle = 0$$

Massenbestimmung I

Durch das Virialtheorem, der kinetischen sowie der potentiellen Energie kann nun die Masse bestimmt werden:



$$E_{kin} = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$$



$$E_{pot} = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}}$$

*) Da jede Galaxie bei der Aufsummierung doppelt vorkommt

Massenbestimmung II

Daraus erhält man für die kinetische und potentielle Energie:

$$\rightarrow E_{pot} = -G \frac{M^2}{R}$$

Daraus folgt die Massenabschätzung durch das Virialtheorem:

$$\rightarrow E_{kin} = \frac{M}{2} \langle v^2 \rangle$$

$$2E_{kin} + E_{pot} = 0 \quad \rightarrow \quad M = \frac{r_G \langle v^2 \rangle}{G}$$

Es werden Massen im Größenordnungsbereich $m \sim 10^{15}$ Sonnenmassen bestimmt. Dieser Wert ist für reiche Galaxienhaufen mit 1 Mpc Durchmesser und einer Dispersionsgeschwindigkeit von $\sigma_v \sim 1000 \text{ km/s}$ ermittelt worden.

Masse-Leuchtkraft-Beziehung & dunkle Materie I

Mit der somit gewonnenen Abschätzung für die Masse des Galaxienhaufens, kann eine charakteristische Masse definiert werden:

$$m_{char} = \frac{\text{abgeschätzte Masse}}{\text{Anzahl der leuchtkräftigsten Galaxien}} = \frac{M}{N}$$

- Alternativ kann M mittels der optischen Gesamtleuchtkraft der Galaxien im Haufen abgeschätzt werden.

- Daraus erhält man charakteristisch eine Masse-zu-Leuchtkraft-Beziehung von:

$$\left(\frac{M}{L_{tot}}\right) \approx 300 h \left(\frac{M_{sun}}{L_{sun}}\right)$$

- Dieser Wert übersteigt das M/L-Verhältnis um mindestens den Faktor 10!!!

Masse-Leuchtkraft-Beziehung & dunkle Materie II

Dies lässt auf eine größere Masse innerhalb des Galaxienhaufens schließen, als durch bisherige Massenabschätzungen nachgewiesen werden konnte.



★ Coma Haufen

◆ Dies wurde bereits 1933 von Fritz Zwicky anhand des Coma Haufens nachgewiesen.

◆ Es wird darüber spekuliert, ob es Masse gibt, die nicht auf konventionelle Art „gesehen“ werden kann (nicht baryonische Materie)

—▶ missing mass problem

Vom visuellen- in den Röntgenbereich

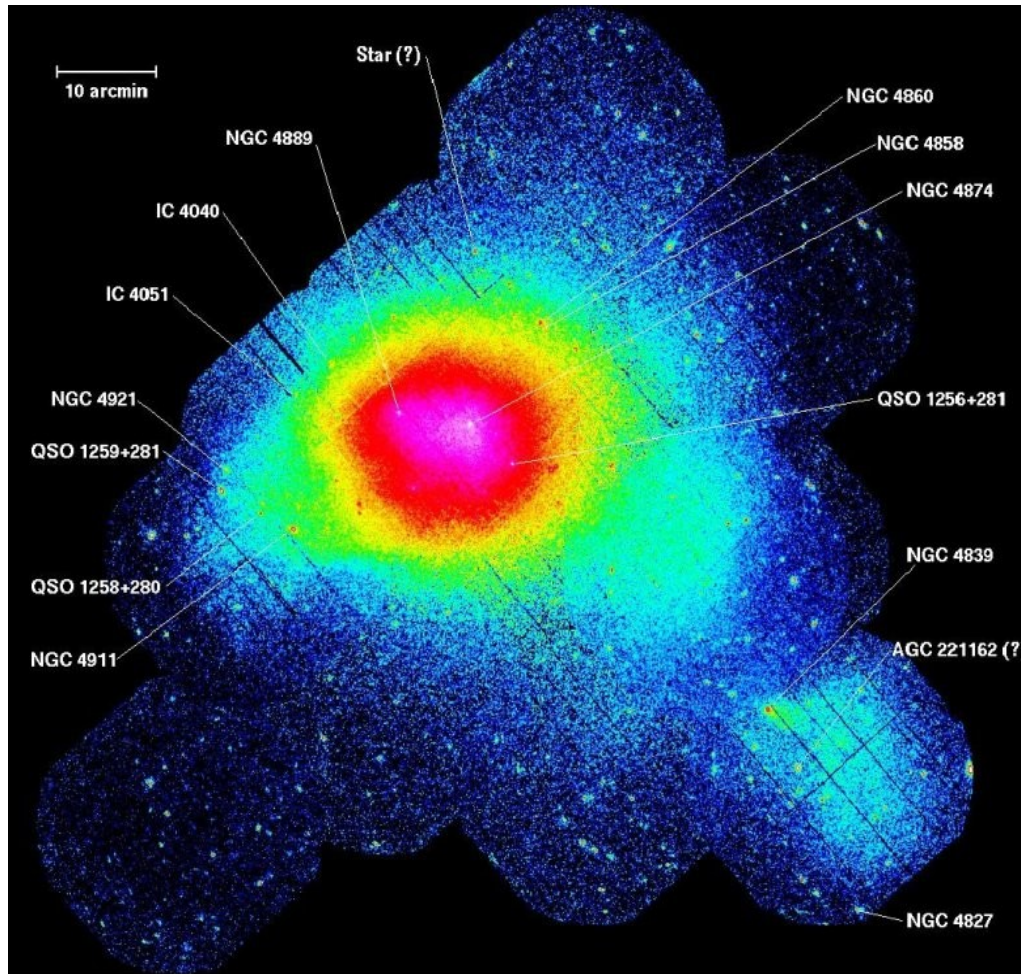


Image courtesy of U. Briel, MPE Garching, Germany

Coma Cluster of galaxies

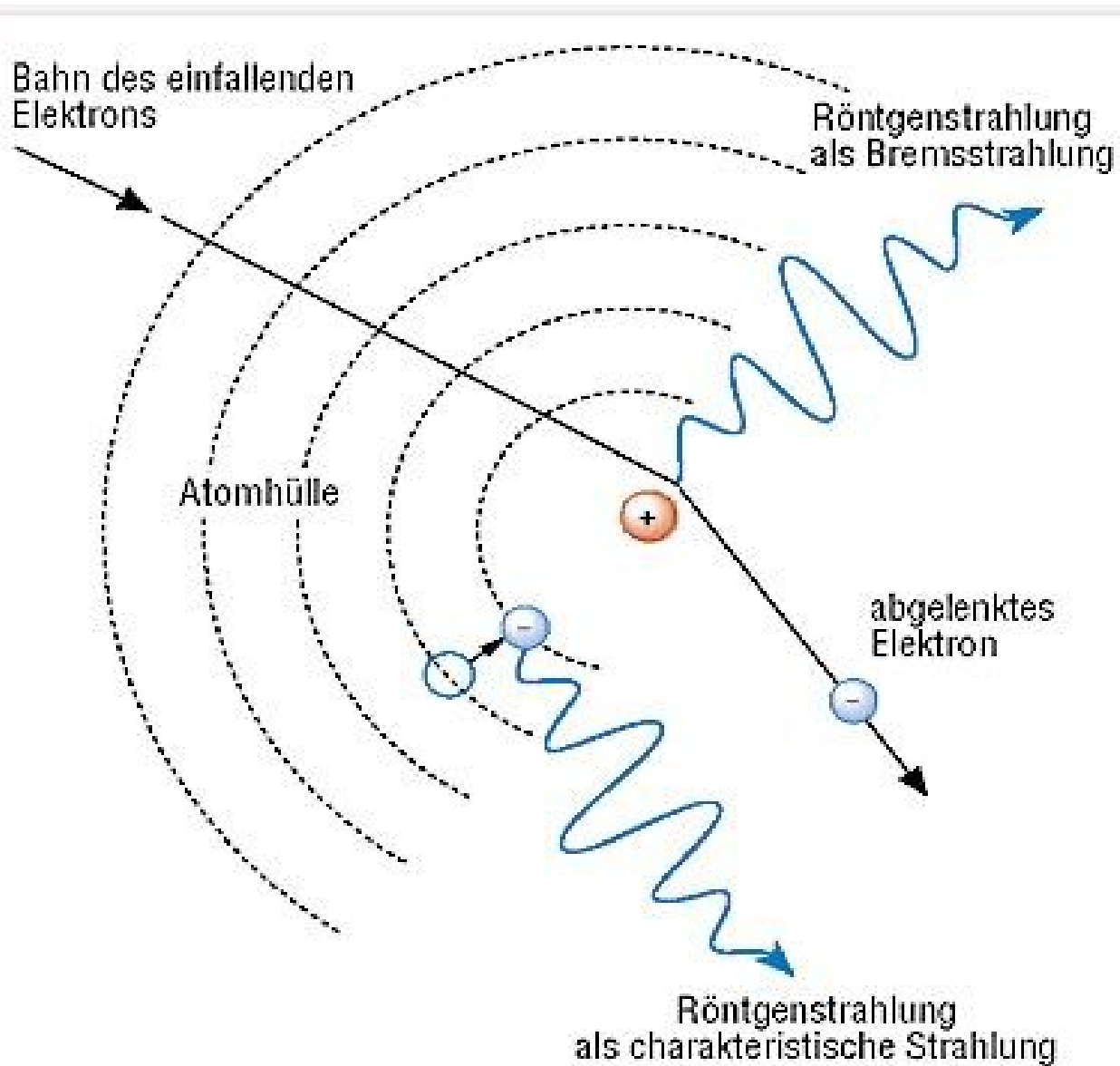
European Space Agency

- Röntgenstrahlen in massereichen Galaxien entdeckt (1970)
- 1978 wurde auch in masseärmeren Haufen Röntgenstrahlung entdeckt
- Das Bild zeigt den Coma Haufen im Röntgenspektrum
- Das Röntgenspektrum ermöglicht Aussagen über die Masse eines Galaxienhaufens

Wichtige Eigenschaften der Röntgenstrahlung

- Galaxienhaufen sind neben AGNs die hellsten extragalaktischen Röntgenquellen
- Röntgenstrahlung stammt nicht aus einzelnen Galaxien, sondern dehnt sich räumlich aus ($> 1\text{Mpc}$)
- Röntgenstrahlung verändert sich nicht über die beobachtete Zeitskala (ca. 30yr)
- Linien-Emissionen (Lyman- α des 25fach ionisierten Eisens), welche in massereichen Galaxienhaufen beobachtet wurden sind ein Hinweis für die Herkunft der Röntgenstrahlung.

Entstehung der Röntgenstrahlung



- lichtschnelle Elektronen werden an einem Atomkern im ionisierten Gas abgelenkt
- Als Resultat der Richtungsänderung wird Bremsstrahlung in Form von Röntgenstrahlung frei
- Das Spektrum der Strahlung lässt auf optisch dünne thermische Bremsstrahlung eines heißen Gases schließen
- Die Masse des heißen Gases ist interessant

Bremsstrahlungs-Emissivität

Die Emissivität wird beschrieben durch:

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

e Elektronenladung

n_e Dichte der Elektronen

n_i Dichte der Ionen

Z Ladung der Ionen

m_e Elektronenmasse

g_{ff} Gaunt-Faktor

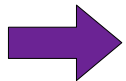
$$g_{ff} \approx \frac{3}{\sqrt{\pi}} \ln\left(\frac{9 k_B T}{4 h_p \nu}\right)$$

Massenbestimmung durch Röntgenemission

Massenbestimmung des Gases:

Ausgehend von der Hydrostatischen Annahme: $\nabla P = -\rho_g \nabla U$

wird folgende Gleichung formuliert:

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


Radialer Verlauf von ρ_g und T zur Massenbestimmung

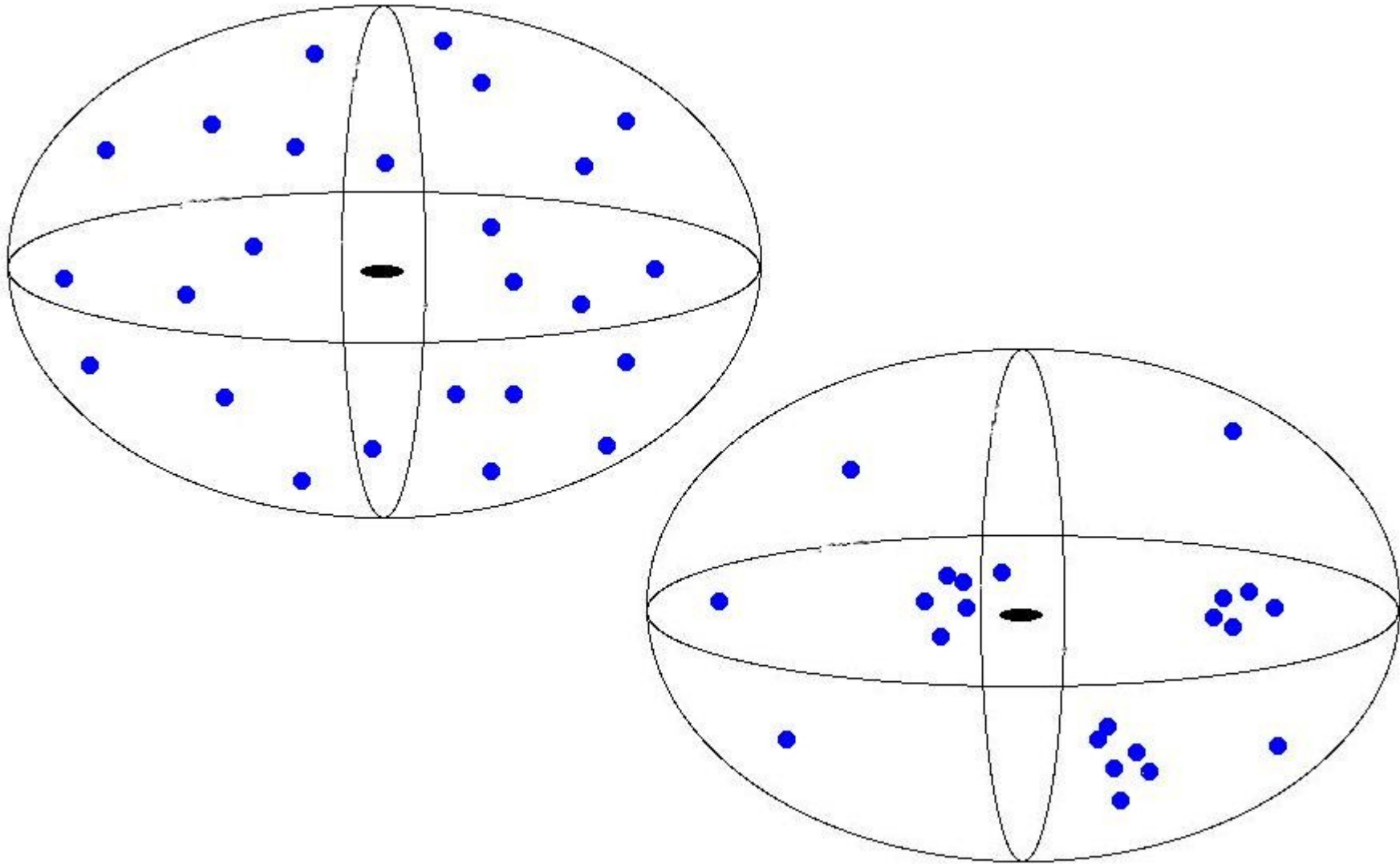
Cooling Flows I

Bisherige Annahme: Hydrostatisches Gleichgewicht

Cooling Flow Annahme:

- ➔ Durch Emission, also Bremstrahlung, kühlt das heiße Gas ab!
- ➔ Geschieht dies über eine lange Zeit, verliert die hydrostatische Annahme an Gültigkeit
- ➔ Die Folge des Abkühlungsprozesses ist eine Verdichtung der freien Teilchen, ähnlich dem Prozess des Auskondensierens

Cooling Flows II



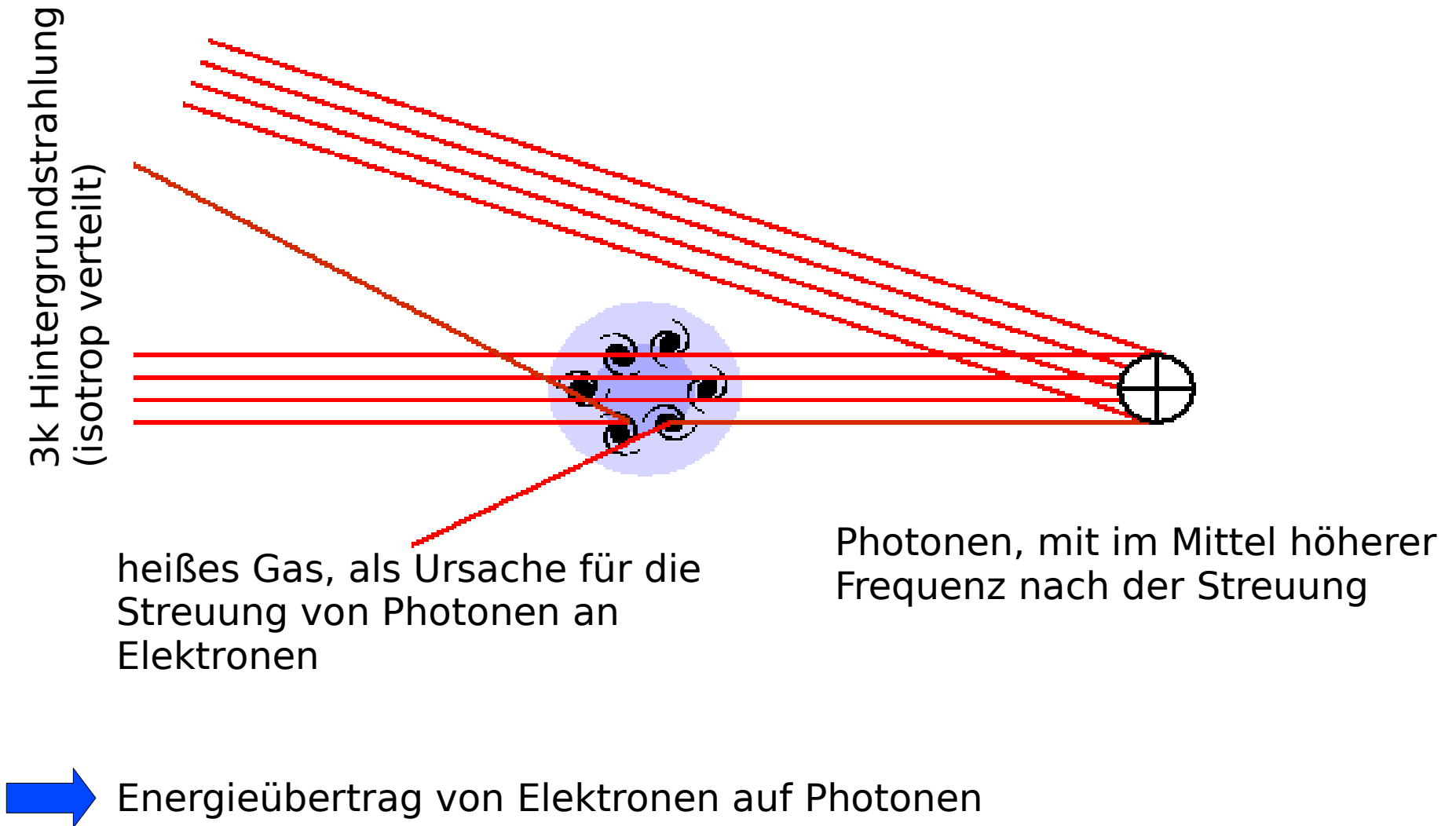
für $\tau \rightarrow \infty$ folgt eine Verdichtung der Teilchen

Sunyaev-Zeldovich-Effekt I

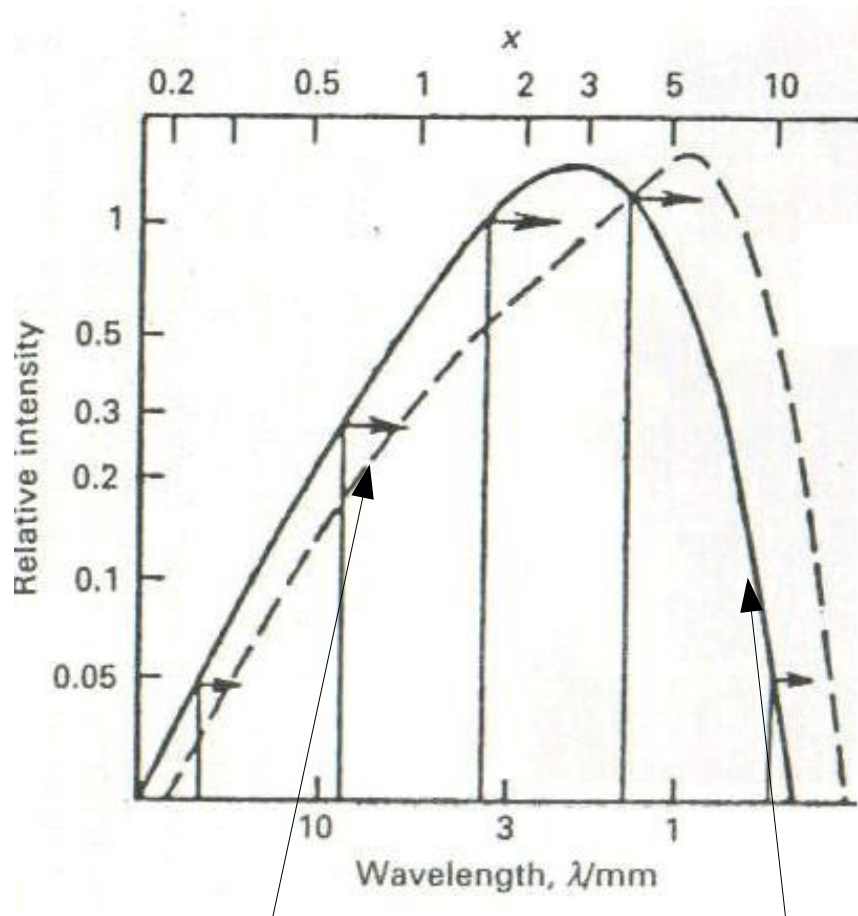
Grundlage:

- Elektronen eines heißen Gases können Photonen der 3k – Hintergrundstrahlung streuen
- Durch die Streuung ändert sich im Mittel die Energie der Photonen
- Die Anzahl der Photonen im zeitlichen Mittel bleibt erhalten
- Dieser Effekt tritt in Galaxienhaufen auf und ist wichtig für deren Untersuchung
- Der SZ-Effekt wurde 1970 vorhergesagt
- Der SZ-Effekt wurde inzwischen in vielen Haufen vermessen

Sunyaev-Zeldovich-Effekt II



Sunyaev-Zeldovich-Effekt III



Normale Planck-Verteilung
Durch Streuung verschobene Planck-Strahlung

Trägt man die Wellenlänge gegen die Intensität der Planck-Verteilung auf, erkennt man eine Abweichung:

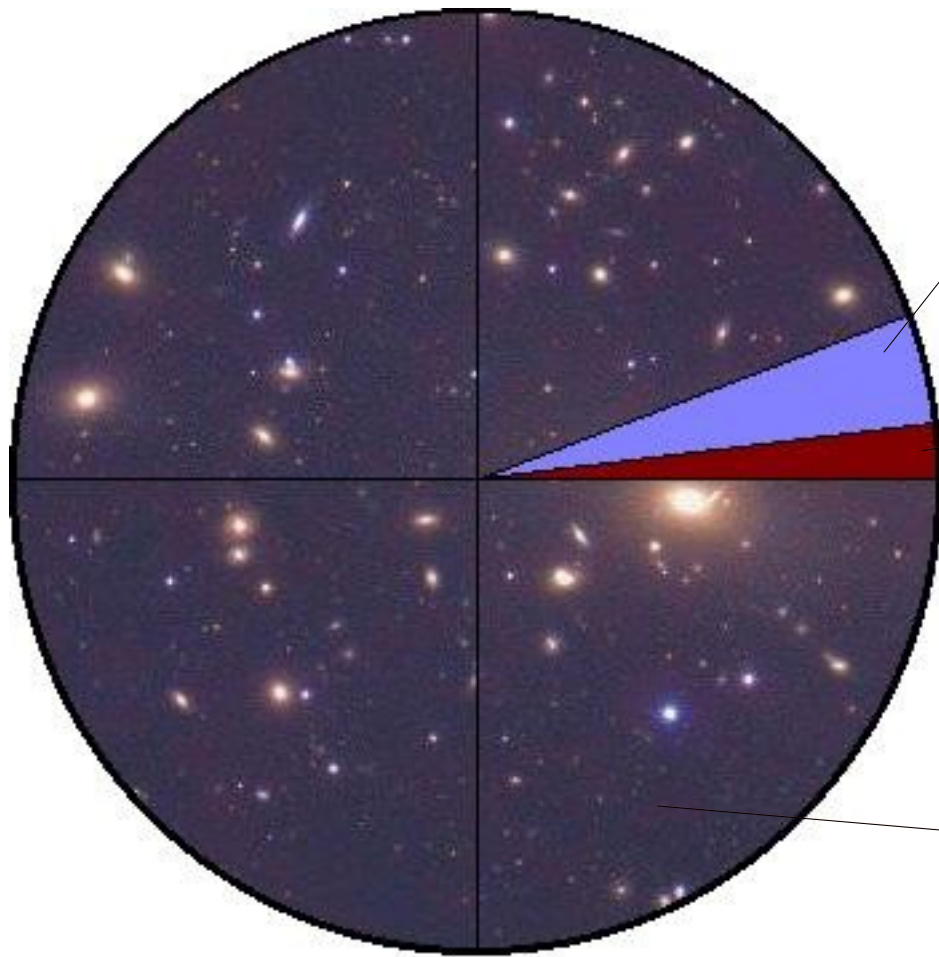
Die Verschiebung ist abhängig von der Temperatur und Dichte des Gases:

➡ Eine weitere Art Massenbestimmung durchzuführen

Wo ist die Masse?

- ▲ Massenbestimmung durch verschiedenste Verfahren möglich
 - ↳ Virialsatz
 - ↳ Emissionsspektrum des Röntgengases
 - ↳ SZ-Effekt
 - ...
- ▲ Verschiedene Meßmethoden führen immer wieder zu demselben Problem.
 - ↳ „missing mass problem“
- ▲ Die Suche nach der *dunklen Materie* geht weiter...

Wo ist die Masse?



ca. 15%
im intergalaktischen
Gas

ca. 3% der Masse
befinden sich in den
Sternen/Planeten

ca. 80% der Masse
in Form von
Dunkler Materie