

Galaxien

Wolfram Schmidt

8. Mai 2016

Überblick

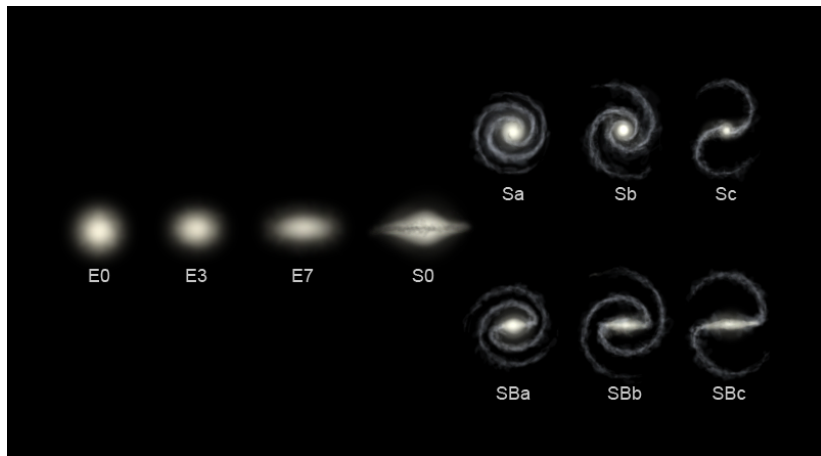
1 Eigenschaften von Galaxien

- Galaxientypen
- Elliptische Galaxien
- Spiralgalaxien

2 Spiralgalaxien

- Das interstellare Medium
- Sternentstehung

Die Hubble-Sequenz



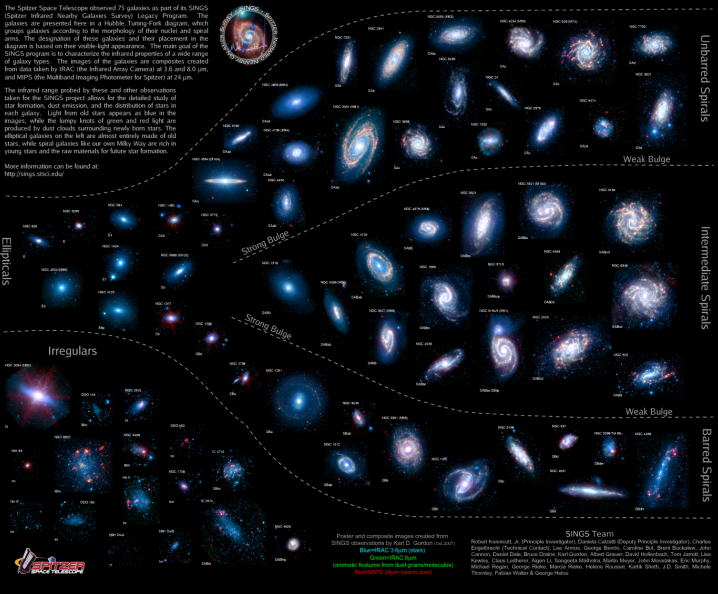
commons.wikimedia.org

The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of the SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The disposition of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu>





HST-Aufnahme von NGC 1132 (hubblesite.org)



HST-Aufnahme von NGC 5866 (hubblesite.org)

Sombrero Galaxy • M104



Hubble
Heritage

Spiral Galaxy NGC 3370



Hubble
Heritage

NASA, The Hubble Heritage Team and A. Riess (STScI) • Hubble Space Telescope ACS • STScI-PRC03-24

Barred Spiral Galaxy NGC 1300



Hubble
Heritage

Die Klassifikation nach Hubble

● Elliptische Galaxien

- bestehen überwiegend aus **alten Sternen** (rötliche Farbe) und enthalten **kaum interstellares Gas** (keine Sternentstehung)
- werden nicht durch Rotation stabilisiert sondern durch **unabhängige, chaotische Eigenbewegungen der Sterne**
- gehen wahrscheinlich aus Verschmelzungs- und Wechselwirkungsprozessen mit anderen Galaxien hervor

● Spiralgalaxien

- bestehen aus einer **gasreichen, dünnen Scheibe** und einem sphäroidischen Kern
- der Kern ähnelt einer elliptischen Galaxie und zeigt keine Sternentstehung (hauptsächlich massearme, rötliche Sterne)
- die vom Kern ausgehenden **Spiralarme zeigen starke Sternentstehungsaktivität** (viele massereiche, bläulicher Sterne)

● Balkenspiralgalaxien

- die Spiralarme gehen nicht vom Zentrum, sondern von einem mehr oder weniger ausgeprägten Balken aus

Klassifizierung von elliptischen Galaxien

- **cD-Galaxien:** sind **extrem massereich** ($M \sim 10^{13} - 10^{14} M_{\odot}$);
enthalten besonders viel dunkle Materie (M/L bis zu $750 M_{\odot}/L_{\odot}$)
und befinden sich meist **im Zentrum eines Galaxienhaufens**;
 $-22 \leq M_B \leq -25$; besitzen einen hellen, ellipsenförmigen Kern
und einen diffusen Halo aus Sternen
- **Normale elliptische Galaxien:** $M \sim 10^8 - 10^{13} M_{\odot}$;
 $M/L \sim (10 - 100) M_{\odot}/L_{\odot}$; $-15 \leq M_B \leq -23$; Durchmesser
zwischen 1 und 200 kpc; dazu gehören Riesenellipsen (gE) und
kompakte Ellipsen (cE)
- **Zwergellipsen (dE):** **viel niedrigere Oberflächenhelligkeit** als
eine cE mit der gleichen absoluten Helligkeit; $M \sim 10^7 - 10^9 M_{\odot}$;
 $-13 \leq M_B \leq -19$
- **Blaue kompakte Zwerggalaxien (BCD):** enthalten eine große
Anzahl von **jungen, massereichen Sternen** und erscheinen daher
ungewöhnlich blau ($0.0 \leq B - V \leq 0.3$); $M \sim 10^9 M_{\odot}$

Faber-Jackson-Beziehung

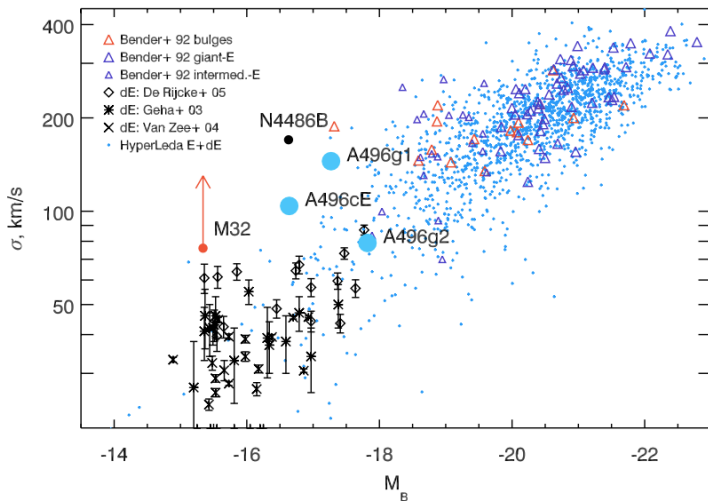
Für die Leuchtkraft L und die zentrale Geschwindigkeitsdispersion σ in normalen elliptischen Galaxien und Zwerggalaxien sowie im sphäroidischen Kern von Spiralgalaxien gilt:

$$L \propto \sigma^4 \quad (1)$$

- Wurde von *Robert Earl Jackson* und *Sandra M. Faber* 1976 entdeckt
- Folgt aus $\sigma^2 = GM/(5R)$ unter der Annahme, dass
 - $L \propto M$ (konstantes Masse-Leuchtkraft-Verhältnis) $\Rightarrow R \propto L/\sigma^2$
 - $L \propto R^2$ (konstante Oberflächenleuchtkraft)
- Die beobachtete Faber-Jackson-Beziehung lautet:

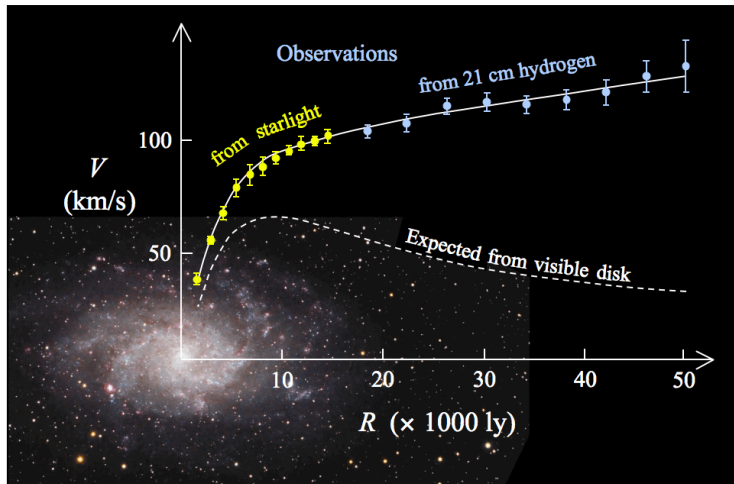
$$\log_{10} \sigma \text{ [km/s]} = -0.1 M_B + \text{konst.} \quad (2)$$

wobei M_B die absolute Helligkeit im B-Band ist



I. Chilingarian et al., Discovery of a new M 32-like “Compact Elliptical” galaxy in the halo of the Abell 496n cD galaxy, *Astron. & Astrophys.* 466, L21 (2007)

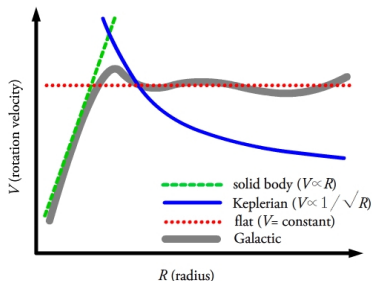
Rotationskurven von Spiralgalaxien



Rotationskurve der Galaxie M33 (commons.wikimedia.org)

- Um 1970 bestimmte *Vera Rubin* die Geschwindigkeitsprofile von Sternen in Spiralgalaxien mittels spektrographischer Messungen
- Sie stellte fest, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne in der Scheibe **nahezu konstant** ist, was eine **lineare Zunahme der Masse mit dem Radius** impliziert:

$$V^2 = \frac{GM_r}{r} \Rightarrow \frac{dM_r}{dr} = \frac{V^2}{G} \Rightarrow \rho(r) \propto r^{-2}$$



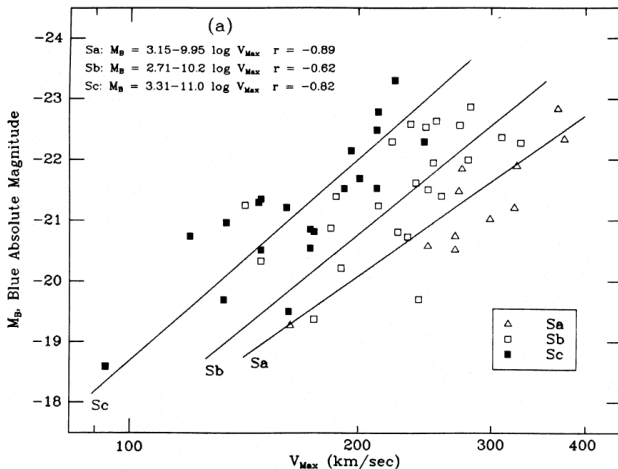
commons.wikimedia.org

Navarro-Frenk-White-Profil

Das radiale Dichteprofil von **Halos aus kalter dunkler Materie** in N-Körper-Simulationen ist näherungsweise gegeben durch

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2} \quad (3)$$

Tully-Fisher-Beziehung



V. Rubin et al., Rotation velocities of 16 SA galaxies and a comparison of Sa, Sb, and SC rotation properties, *Astrophys. J.* 289, 81 (1985)

Vera Rubin (geb. 1928), US-amerikanische Astronomin

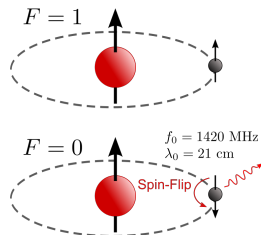
- Beobachtete Abweichungen der Galaxienbewegungen vom Hubble-Gesetz und argumentierte bereits 1954 in ihrer Doktorarbeit, dass **Galaxien nicht gleichförmig verteilt sind**, sondern in Haufen auftreten
- Zeigte in den 1970er Jahren durch ihre Messungen der **Rotationskurven von Galaxien**, dass diese nicht durch die Anziehungskraft der leuchtenden Materie erklärt werden können
- Ihre Forschungsergebnisse stießen anfangs auf erhebliche Skepsis
- Setzte sich besonders für Frauen in der Wissenschaft ein



www.brainpickings.org

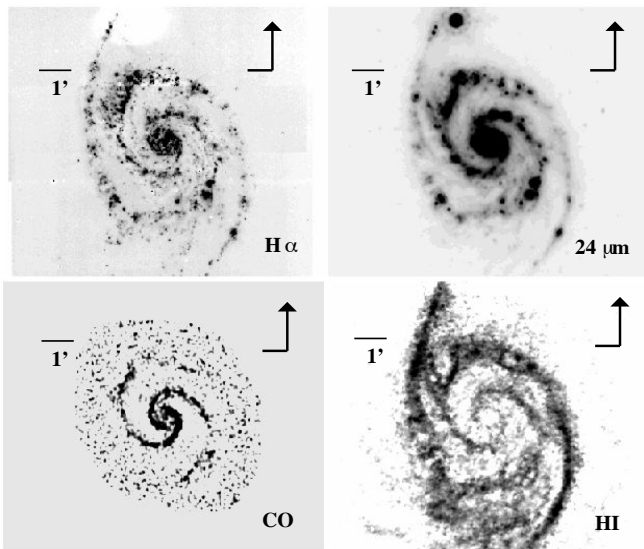
Die Gasphasen des interstellaren Mediums

- Neben interstellarem Staub enthalten die Scheiben von Spiralgalaxien Gas, das auf **verschiedene Phasen** verteilt ist
- Neutrales Gas lässt sich vor allem über die **21-cm-Linie** beobachten (Hyperfeinstruktur-übergang von **H I**)
- Die kälteste und dichteste Phase besteht überwiegend aus **H₂** (indirekte Beobachtung über die 2.6-mm-Linie des CO-Moleküls)



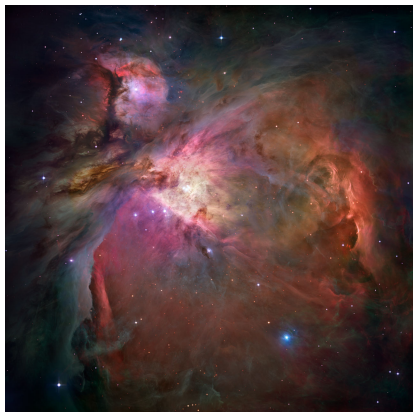
commons.wikimedia.org

Komponente	T [K]	n [cm^{-3}]	Beobachtung
Molekülwolken	10 – 20	$10^2 - 10^6$	2.6-mm-Linie, IR
Kaltes neutrales Gas	50 – 100	20 – 50	21-cm Linie
Warmes neutrales Gas	6000 – 10000	0.2 – 0.5	21-cm Linie
Warmes ionisiertes Gas	um 8000	0.2 – 0.5	H α
Heißes ionisiertes Gas	$\sim 10^6 - 10^7$	$\sim 10^{-4} - 10^{-2}$	UV und Röntgen



Verschiedene Gaskomponenten in M15, aus R. C. Kennicutt et al., Star Formation in NGC 5194

(M51a). II. The Spatially Resolved Star Formation Law, [Astrophys. J. 671, 333 \(2007\)](#)



HST-Aufnahme des Orionnebels
(hubblesite.org)



Kombinierte Spitzer/HST-Aufnahme
(hubblesite.org)

Die Sternentstehungsrate

- Das **kalte, dichte Gas** in Molekülwolken kann kollabieren und Sterne bilden ($M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$)
- Die Zeitskala des Gravitationskollaps ist $t_G \propto (G\rho)^{-1/2}$ (**Freifallzeitskala**)
- Aus dieser Zeitskala ergibt sich die **Sternentstehungsrate**

$$\dot{\rho}_* \sim \frac{\rho}{t_G} \propto \rho^{3/2}$$

- Oft wird statt der Volumendichte ρ die über die Dicke der Scheibe gemittelte **Säulendichte** Σ in Einheiten von $M_\odot \text{pc}^{-2}$ verwendet
- Wird außerdem eine effektive Zeitskala $t_* = t_G/\epsilon$ mit dem Effizienzparameter ϵ definiert, so lässt sich die Sternentstehungsrate schreiben als

$$\dot{\Sigma}_* = \frac{\Sigma}{t_*} = \epsilon \frac{\Sigma}{t_G}$$

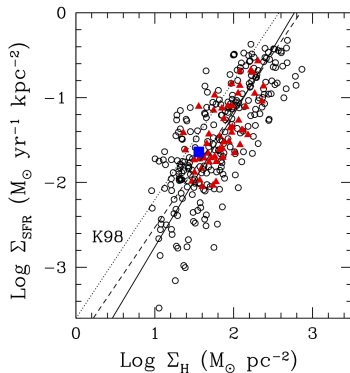
Kennicutt-Schmidt-Gesetz

- Empirisch wurde für normale Spiralgalaxien bei niedrigen Rotverschiebungen

$$\dot{\Sigma}_* \propto \Sigma^\alpha$$

mit $\alpha \approx 1.4$ festgestellt

- Aus der Proportionalitätskonstante folgt $t_* \sim 10^9$ a, was viel länger als $t_G \sim 10^7$ a ist, d.h. ϵ beträgt nur etwa 1 %
- Ein wesentliches Problem ist also: Warum ist die Sternentstehung so ineffizient?



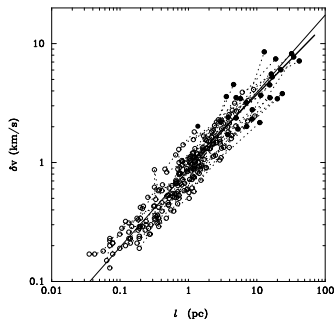
Lokale Sternentstehungsraten in M51, aus R. C. Kennicutt et al., *Astrophys. J.* 671, 333 (2007)

Turbulenz in Molekülwolken

- Aus Beobachtungen von CO-Linien in Molekülwolken folgt eine Geschwindigkeitsdispersion
 $\sigma \sim 1 - 10 \text{ km s}^{-1}$
- Die thermische Geschwindigkeit der Moleküle ist vergleichbar mit der **isothermen Schallgeschwindigkeit**

$$c_s = \sqrt{\frac{kT}{\mu m_H}} \approx 0.3 \text{ km s}^{-1} \sim 0.1 \sigma$$

- Die beobachteten Werte von σ in Molekülwolken weisen auf **turbulente Bewegungen des Gases mit Überschallgeschwindigkeit** hin

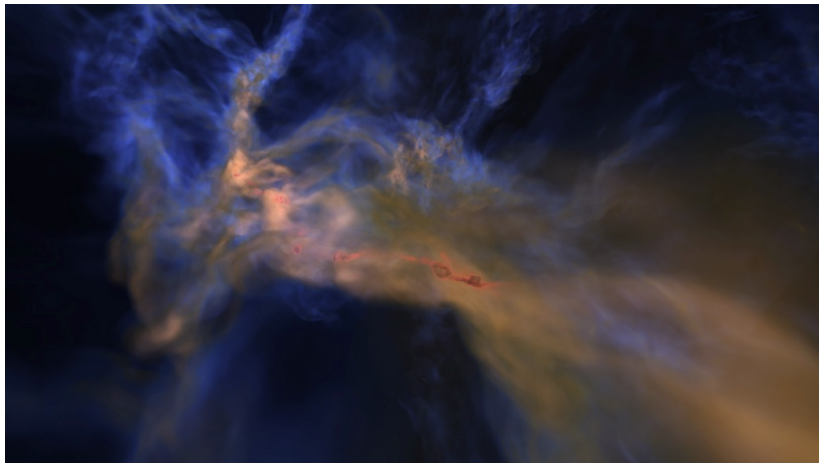


Geschwindigkeitsdispersion in Molekülwolken, aus M. H. Heyer & C M. Brunt, The Universality of Turbulence in Galactic Molecular Clouds, *Astrophys. J.* 615, L45 (2004)

- Diese Interpretation wird darüber hinaus durch den beobachteten Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsdispersion und der Größe L von Molekülwolken bzw. Teilbereichen einer Wolke gestützt (ursprünglich 1981 von *R. B. Larson* festgestellt):

$$\sigma \propto L^{0.5 \pm 0.1}$$

- Einer gängigen Theorie zufolge **entstehen durch Stoßwellen starke Verdichtungen**, während die mit turbulenten Wirbeln verbundenen Scherströmungen der Verdichtung entgegenwirken
- Wird die Jeans-Masse im verdichteten Gas überschritten, kann dieses kollabieren und einen **prästellaren Kern** bilden
- Numerische Simulationen zeigen, dass unter bestimmten Annahmen die niedrige Effizienz der Sternentstehung durch diesen Prozess erklärt werden kann



Visualisierung einer Simulationen der Entstehung von prästellaren Kernen in einer turbulenten Gaswolke durch *Alexei Kritsuk* und *Mike Norman* (svs.gsfc.nasa.gov)