

# Vorlesung 9

Prof. Sascha Quanz  
Dr. Adrian Glauser  
Galaxien

# In-class activity

Was sind empirische Hinweise auf die Existenz von

- (a) Dunkler Materie in unserer Milchstrasse
- (b) einem super massereichen Schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstrasse?

# 9. Galaxien

Hubble Space Telescope  
Ultra-Deep Field (UDF)

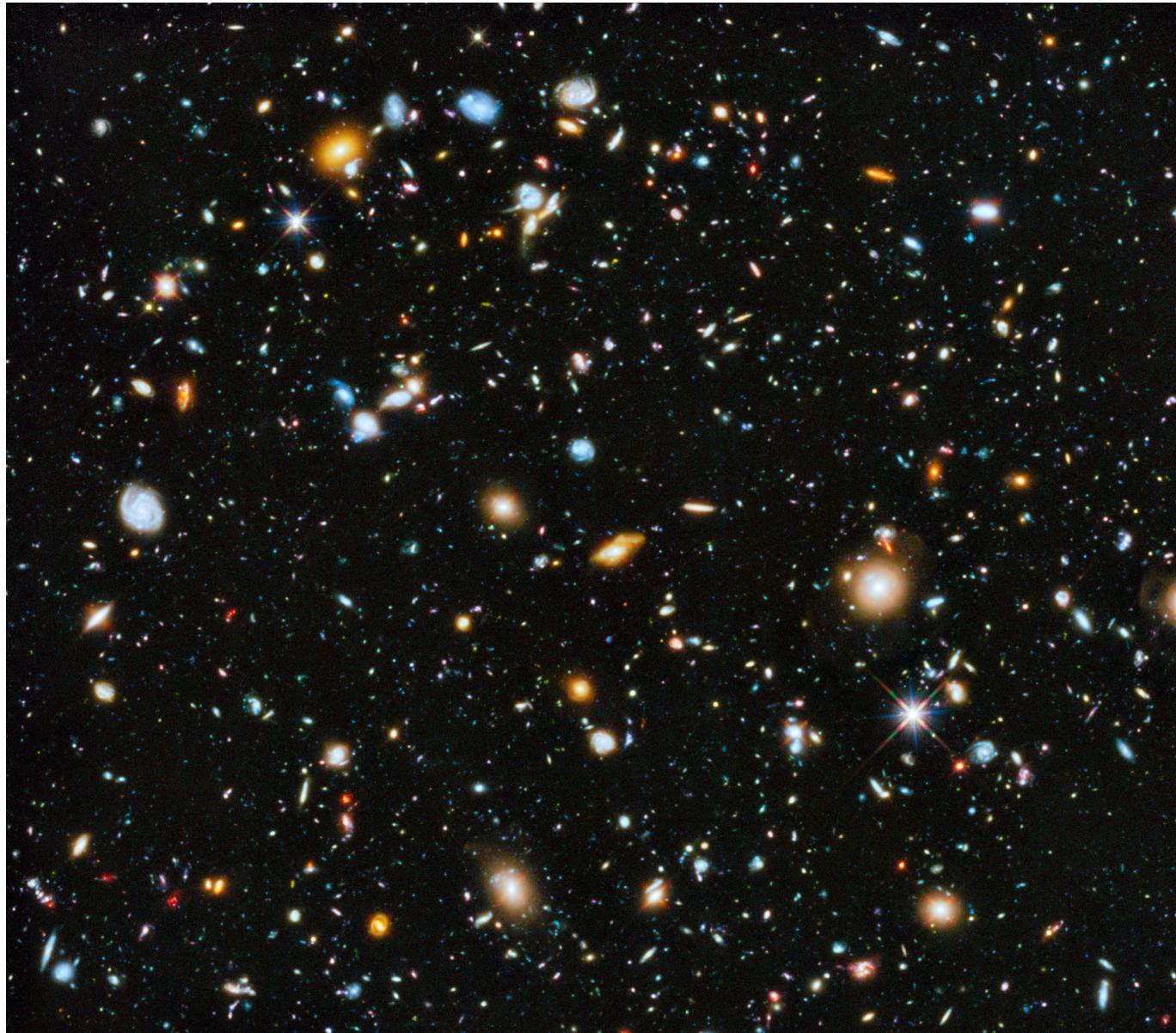
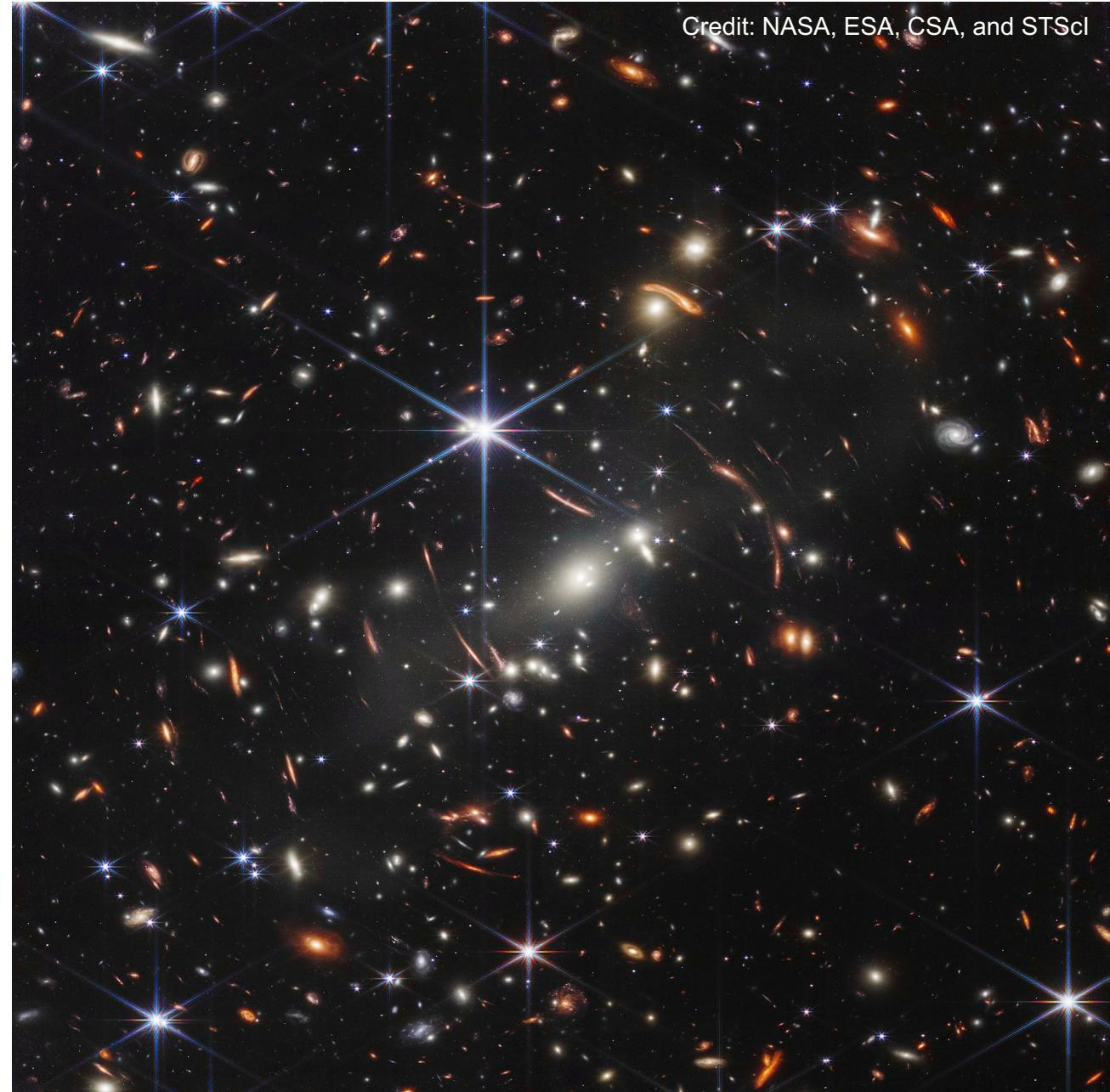


Image credit: NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI)

# 9. Galaxien

NASA's James Webb Space Telescope has produced the deepest and sharpest infrared image of the distant universe to date. Known as Webb's First Deep Field, this image of galaxy cluster SMACS 0723 is overflowing with detail. Thousands of galaxies – including the faintest objects ever observed in the infrared – have appeared in Webb's view for the first time. This slice of the vast universe is approximately the size of a grain of sand held at arm's length by someone on the ground. This deep field, taken by Webb's Near-Infrared Camera (NIRCam), is a composite made from images at different wavelengths, totaling 12.5 hours – achieving depths at infrared wavelengths beyond the Hubble Space Telescope's deepest fields, which took weeks. The image shows the galaxy cluster SMACS 0723 as it appeared 4.6 billion years ago. The combined mass of this galaxy cluster acts as a gravitational lens, magnifying much more distant galaxies behind it. Webb's NIRCam has brought those distant galaxies into sharp focus – they have tiny, faint structures that have never been seen before, including star clusters and diffuse features. Researchers will soon begin to learn more about the galaxies' masses, ages, histories, and compositions, as Webb seeks the earliest galaxies in the universe. This image is the telescope's first-full color image released. It was released July 11, 2022 6:21PM (EDT).



Credit: NASA, ESA, CSA, and STScI

# 9. Galaxien

Galaxien wurden schon im Katalog von Messier (1784) mit ca. 100 “nebelartigen” Objekten am Nordhimmel aufgelistet, z.B. M31 ist die Andromedagalaxie. Damals war aber nicht bekannt, um was für Objekte es sich handelt.

Dreyer’s New Galactic Catalogue (1890) umfasst ca. 8000 ausgedehnte “NGC” Objekte, z.B. NGC 224=M31, bestehend aus einer Sammlung von Galaxien, Nebeln und Sternhaufen.

Nebel als selbstständige Galaxien wurde um etwa 1925 erkannt. Ganz wesentlich bei dieser Erkenntnis waren die Beobachtungen von Cepheiden in M31 durch Edwin Hubble.

Inzwischen wurden > 100 Millionen Galaxien katalogisiert. Dank sehr tiefen Beobachtungen ist bekannt, dass es im beobachtbaren Universum >  $10^{11}$  helle Galaxien gibt.

Andromeda Galaxie M31 [Sb] mit M32 [E2] (oben) und NGC 205 [dE]

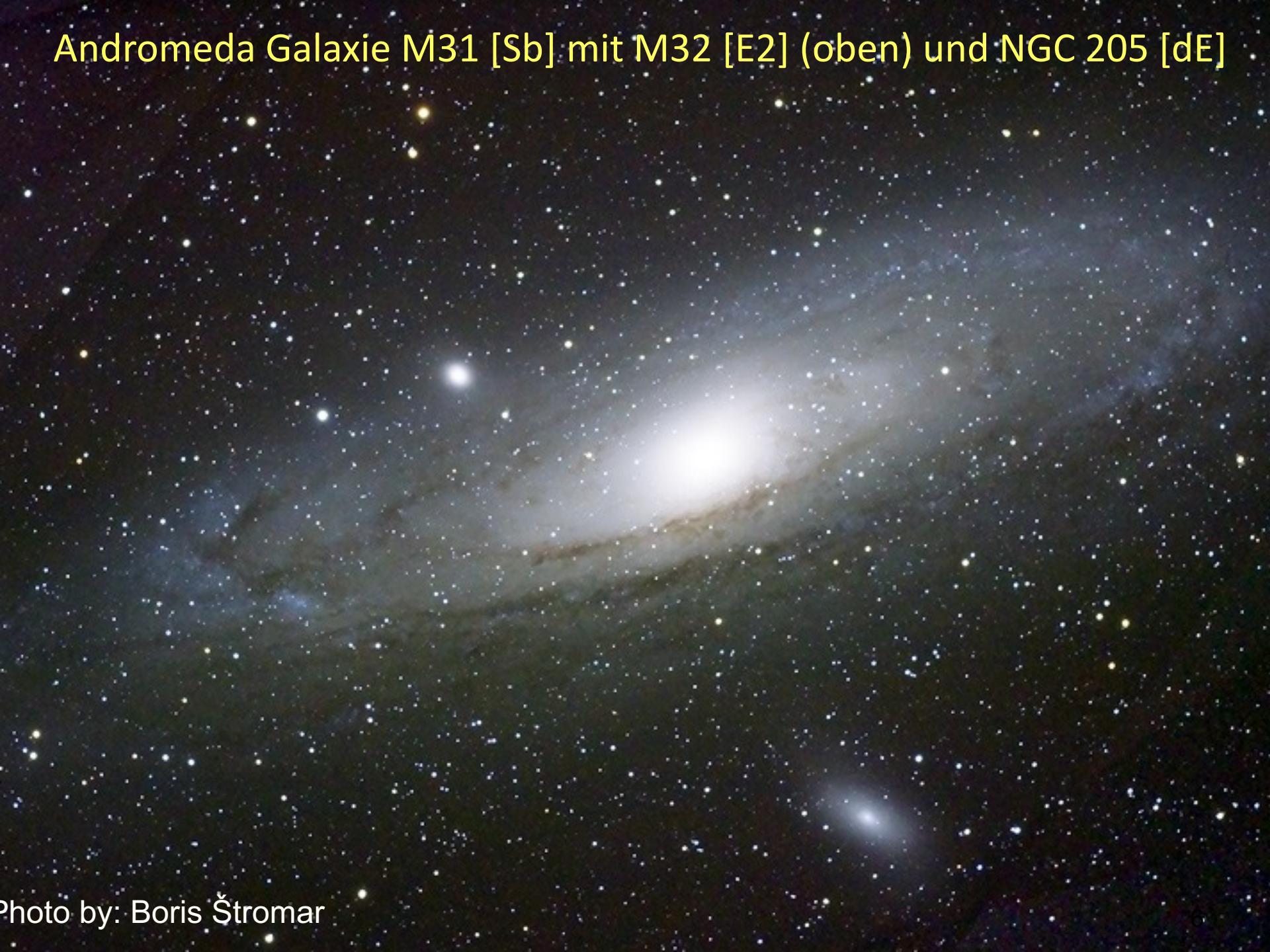
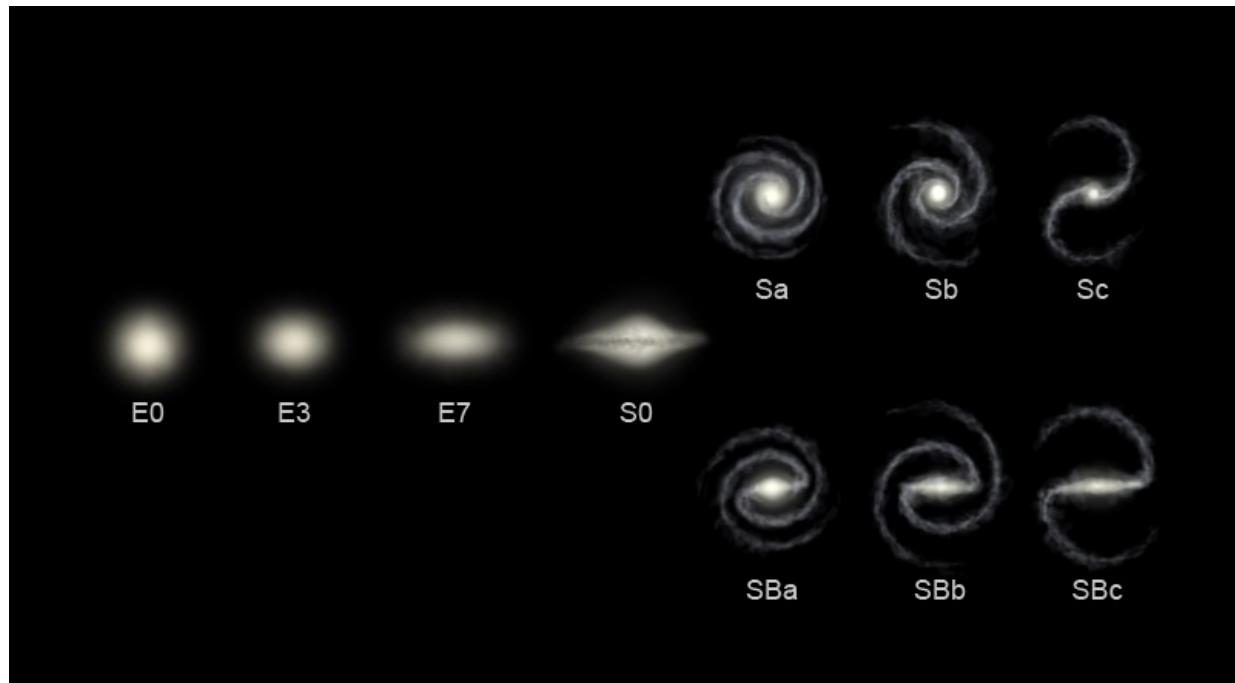


Photo by: Boris Štromar

# 9.1 Die Hubble-Sequenz

Hubble ordnete Galaxien nach den vier folgenden morphologischen Kategorien:

1. „**S**“ Galaxien, gewöhnliche Spiralgalaxien (manchmal SA)“ : zentrale Ausbuchtung oder Kern (central bulge) und eine Scheibe mit Spiralstruktur
2. „**SB**“ Galaxien, Balkengalaxien („barred spirals“): zentrale Ausbuchtung, ein Balken und eine Scheibe mit Spiralstruktur (meistens)
3. „**E**“ Galaxien, Elliptische Galaxien: kugel- oder ellipsoidenförmig, sehr homogenen Helligkeits-Verteilung, ohne Scheibe
4. „**Irr**“ Galaxien, irreguläre Galaxien (oder „Im“): irreguläre geometrische Gestalt (später angefügt)



Hubble (1936),  
The Realm of the Nebulae

Entlang der Hubble Sequenz und zwischen den Armen der Stimmgabel besteht ein stetiger Übergang. Von E0 bis E7 nimmt die Abflachung der E-Galaxien zu. Von Sa/SBa, über Sb/SBb bis Sc/SBc nimmt die relative Grösse des Zentralgebietes ab und die Spiralarme breiten sich aus (offenere Windung). **Die Hubblesequenz ist keine Entwicklungssequenz.** Aber das Erscheinungsbild einer Galaxie kann sich mit der Zeit stark ändern. Anpassungen an die Hubble Sequenz wurden regelmässig vorgenommen (z.B. hinzufügen von prefix „d“ für „Dwarf“, oder Typ „Sph“ für sphärisch, oder Typ „D“ für „Diffus“, oder prefix „c“ für „central dominated“.)

**Typische Leuchtkraft** der einzelnen Typen: (in absoluten Magnituden;  $-22 = 10^{11} L_{\text{sun}}$ )

cD	-21.2 ,	dE	-14/-16 ,	S-	Galaxien:	-17 bis -21	,	Irr	-17
E	-19.2 ,	dSph	-10/-15 ,					dIrr	-10/-17

Elliptische Galaxien überspannen einen riesigen Helligkeitsbereich von >10 mag von den sehr hellen zentralen Haufengalaxien cD bis zu den Zwerg-Ellipsen dE und Zwergsphäroiden dSph. Bei den Spiralgalaxien ist der Bereich weniger breit. Irreguläre Galaxien gehören nicht zu den typischen, hellen Galaxien.

**Die Häufigkeit der verschiedenen Typen** in klassischen Galaxien-Katalogen (z.B. NGC) ist ungefähr wie folgt:

- ~ 70 % Spiralgalaxien, ~ 5 % irreguläre Galaxien,
- ~ 20 % Elliptische Galaxien, ~ 2 % spezielle (gestörte) Galaxien.

Dies entspricht nicht der wahren Typenhäufigkeit, weil helle Galaxien überproportional katalogisiert werden. Wichtig: Es handelt sich hierbei um das „lokale Universum“ ( $z \sim 0$ )!

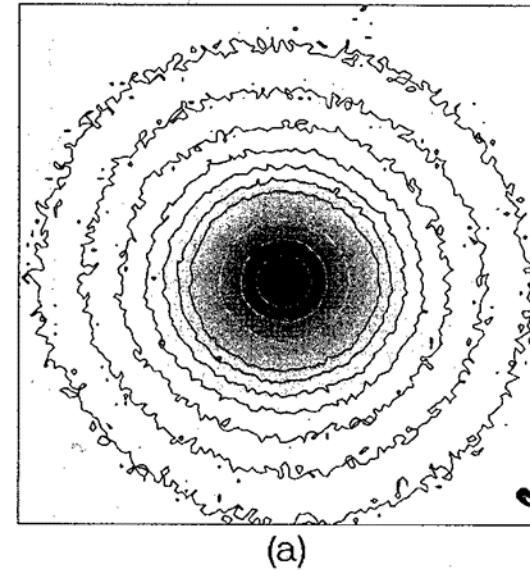
## 9.2 Elliptische Galaxien

**Geometrie:** Elliptische Galaxien haben ein sehr gleichmässiges Erscheinungsbild fast ohne Strukturen, ohne Staubbänder oder leuchtende HII-Gaswolken. Die elliptische Geometrie wird für die Klassifikation verwendet

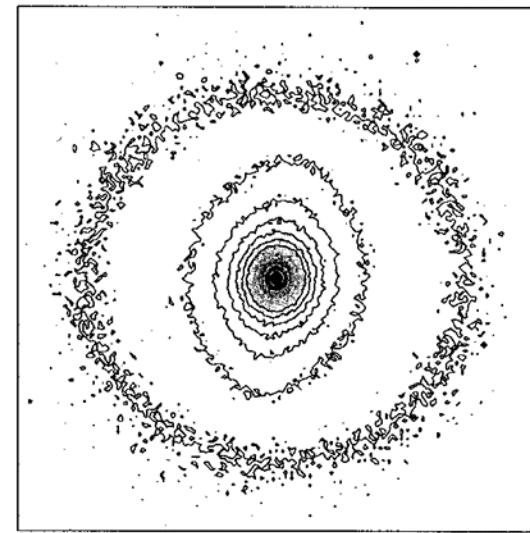
$$Eq \text{ mit } q = 0 - 7 \text{ und } q = 10 \cdot (a-b)/a,$$

wobei  $a$  die grosse und  $b$  die kleine scheinbaren Halbachsen sind. Die beobachtete Elliptizität ist nur die Projektion des Sphäroids am Himmel. Die wahre Elliptizität ist  $\geq$  als die scheinbare Elliptizität. Die wahren Elliptizitäten von 0-7 sind etwa gleich häufig.

**Aufbau:** Eine elliptische Galaxie ist eine Ansammlung von alten Sternen, die ungeordnet um das Zentrum kreisen. Da es kein kühles Gas gibt, entstehen auch keine neuen Sterne. Die Galaxie besteht deshalb hauptsächlich aus langlebigen, massearmen, Sternen. Das Spektrum einer elliptischen Galaxie entspricht etwa einem K-Stern.



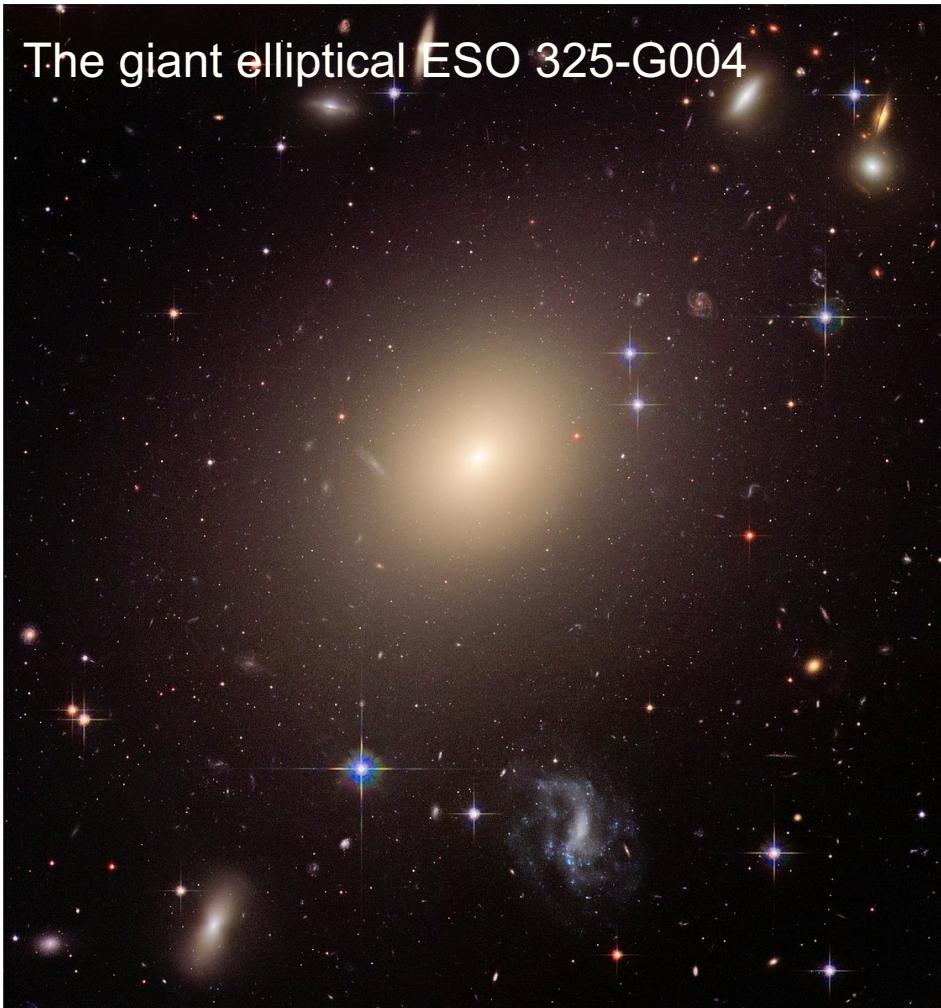
(a)



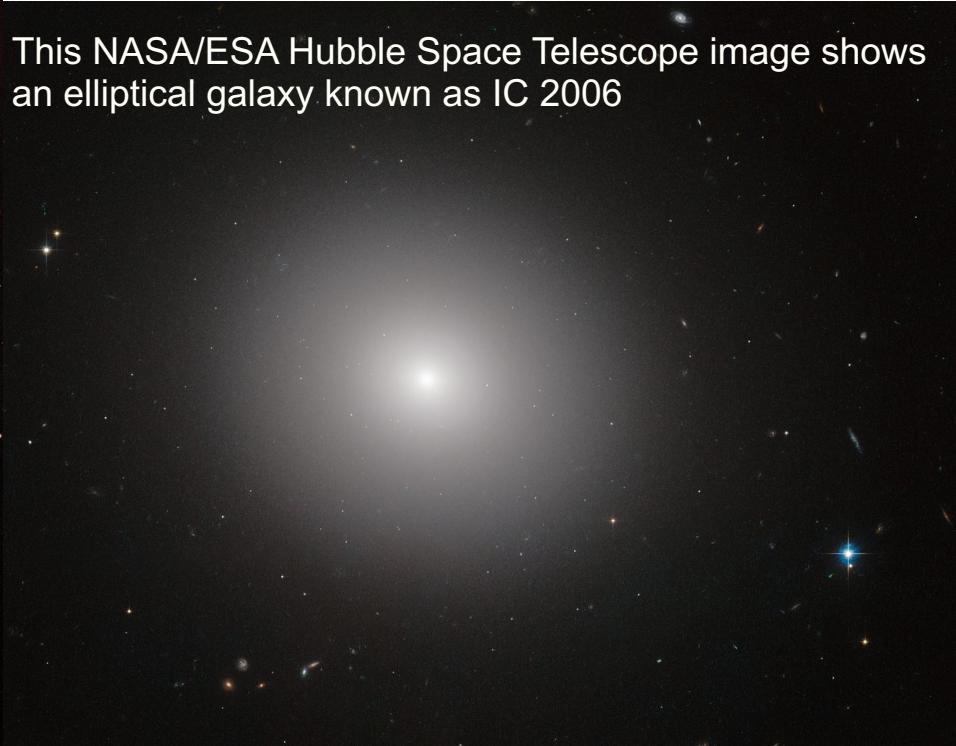
R-Band Isophoten für elliptische Galaxien

## 9.2 Elliptische Galaxien

The giant elliptical ESO 325-G004



This NASA/ESA Hubble Space Telescope image shows an elliptical galaxy known as IC 2006



Credit: NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); J. Blakeslee (Washington State University); ESA/Hubble & NASA Image acknowledgement: Judy Schmidt and J. Blakeslee (Dominion Astrophysical Observatory). Science acknowledgement: M. Carollo (ETH, Switzerland)

## 9.3 Spiralgalaxien

Normale Spiralen (S-Typ) haben ein Zentralgebiet, aus dem die Spiralarme tangential herauswachsen. Bei Balkenspiralen (SB-Typ) wachsen die Spiralarme tangential aus den Enden eines Balkens heraus.

Das Zentralgebiet hat die Eigenschaften einer kleinen elliptischen Galaxie mit wenig Gas und Staub, einer ungeordneten Bewegung der Sterne und einem Spektrum, dass meist durch kühle, alte Sterne dominiert wird. Spezielle Spiralgalaxien zeigen etwas Gas und Staub im Zentralbereich und es gibt auch eine grosse Gruppe sogenannter aktiver Spiralgalaxien (Seyfert Galaxien) mit sehr starker nuklearer Aktivität.

Die Scheiben aller Spiralgalaxien enthalten viel Gas und Staub, mit vielen hell leuchtenden Sternentstehungsgebieten, die typischerweise entlang der Spiralarmen aufgereiht sind.

Praktisch alle Sterne und das Gas bewegen sich in einer geordneten Rotation um das Galaxienzentrum. Die Spiralarme sind Dichtewellen (ca. 10% höhere Dichte) in der Scheibe, die eine stark erhöhte Sternentstehung verursachen, und deshalb heller leuchten. Das Spektrum der Scheibe entspricht im optischen einem heißen Stern (A-Stern) mit mehr oder weniger starken Emissionslinien der HII-Regionen.

# Beispiele für Spiralgalaxien

NGC 300, Typ Sc



NGC 1365, Typ SBb,  
mit aktivem Kern “Seyfert Galaxie”



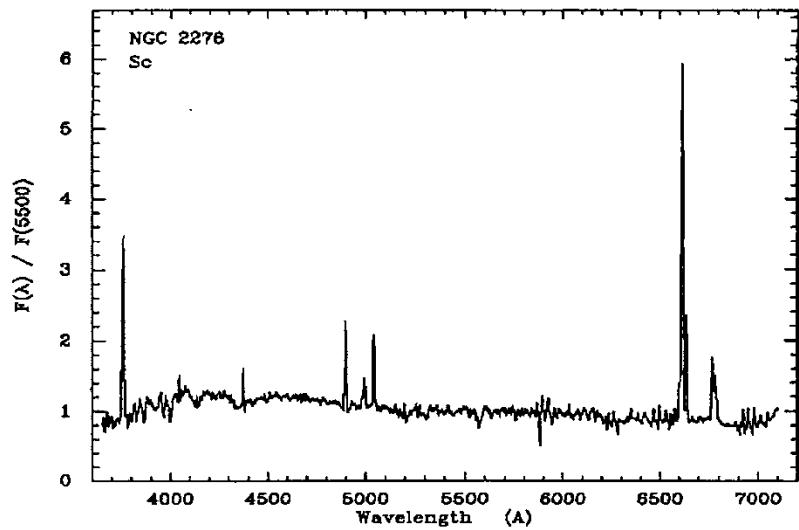
## 9.4 Irreguläre Galaxien

Irreguläre Galaxien haben vor allem im blauen Spektralbereich eine sehr ungleichmässige Struktur. Im Roten ist die Lichtverteilung regelmässiger, oft scheibenförmig und mit einer vorherrschenden Rotationsrichtung. Irreguläre Galaxien enthalten viel Gas und Staub und zeigen aktive Sternentstehung.

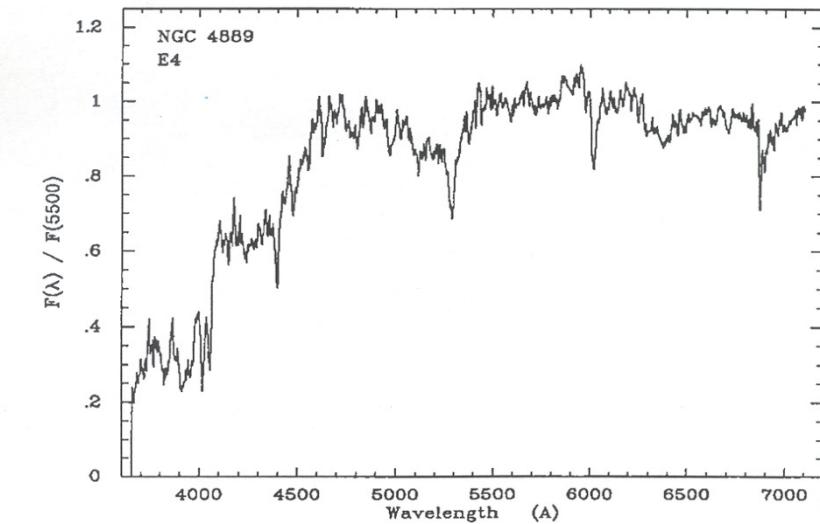
Zwei sehr bekannte irregulären Galaxien sind die Magellan'schen Wolken LMC und SMC (Large / Small Magellanic Cloud) mit einer Distanz von 44 kpc und 51 kpc. Der Durchmesser der LMC ist etwa 6 Grad.



## 9.5 Spektroskopie von Galaxien



Spektrum einer Spiralgalaxie



Spektrum einer elliptischen Galaxie

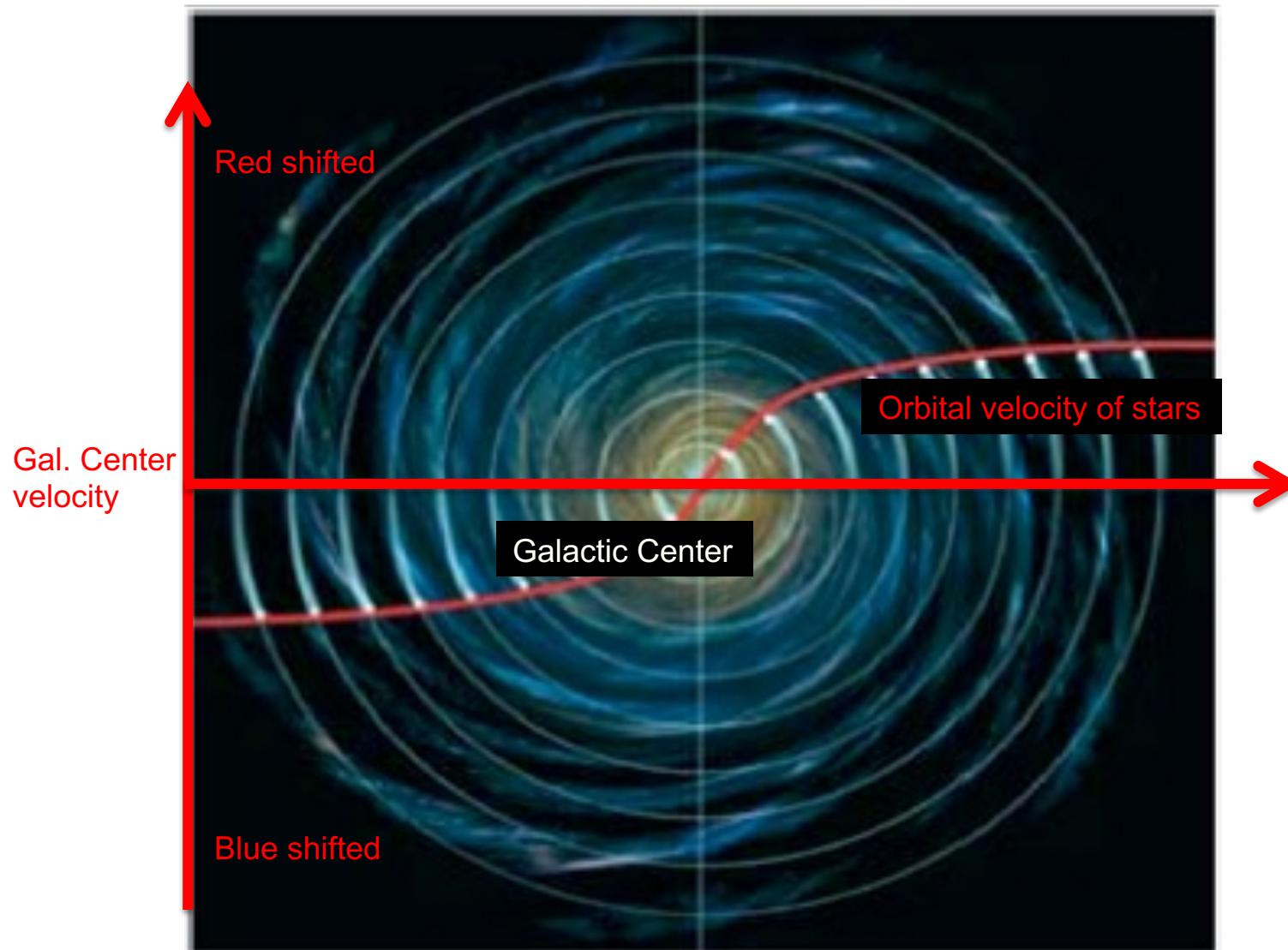
S-Galaxien zeigen ein von heissen Sternen (A-Sternen) dominiertes blaues Spektrum mit mehr oder weniger starken Nebellinien. Das Spektrum von E-Galaxien ähnelt einem K-Stern. Der Kontinuums-Verlauf und die Stärke der Emissionslinien sind gute Indikatoren für die Sternentstehungsrate einer S-Galaxie. Typische Werte sind etwa eine Sonnenmasse pro Jahr [ $M_S/J$ ].

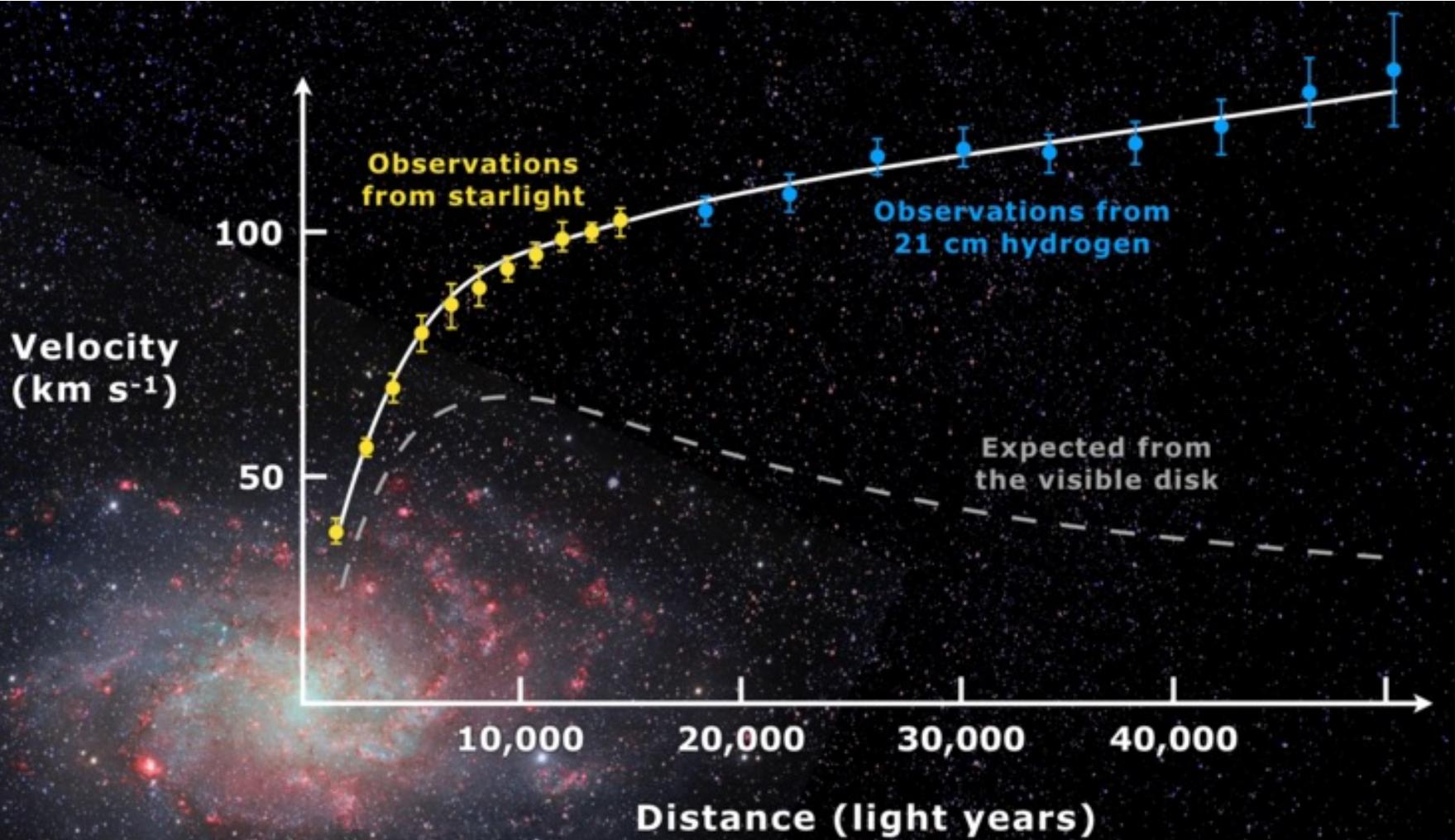
Aus den Spektren von Galaxien lässt sich durch den Dopplereffekt die allgemeine Bewegung messen. Bei Scheibengalaxien ergibt dies die Rotationskurve und bei Elliptischen Galaxien die Geschwindigkeitsverteilung der Sterne.

# In-class activity

Wie kommt es, dass S-Galaxien ein von heissen Sternen (A-Sternen) dominiertes blaues Spektrum mit mehr oder weniger starken Nebellinien zeigen und das Spektrum von E-Galaxien einem K-Stern ähnelt? Warum gerade diese Spektraltypen?

## 9.6 Rotationskurven für eine Scheibengalaxie





Die gemessenen  
**HI Rotationskurven** müssen  
 die Inkination  $i$  der Galaxie  
 berücksichtigen. Die wahre  
 Rotationsgeschwindigkeit ist

$$V_{\text{rot}}(R) = v_r(R) \sin i.$$

Alle Messungen von  $v_{\text{rot}}(R)$   
 in Spiralgalaxien zeigen, dass  
 die radiale Geschwindigkeit  
 bis zu sehr grossen Radien  
 konstant bleibt. Dies kann  
 praktisch nur durch einen  
 ausgedehnten Halo **dunkler  
 Materie** erklärt werden.

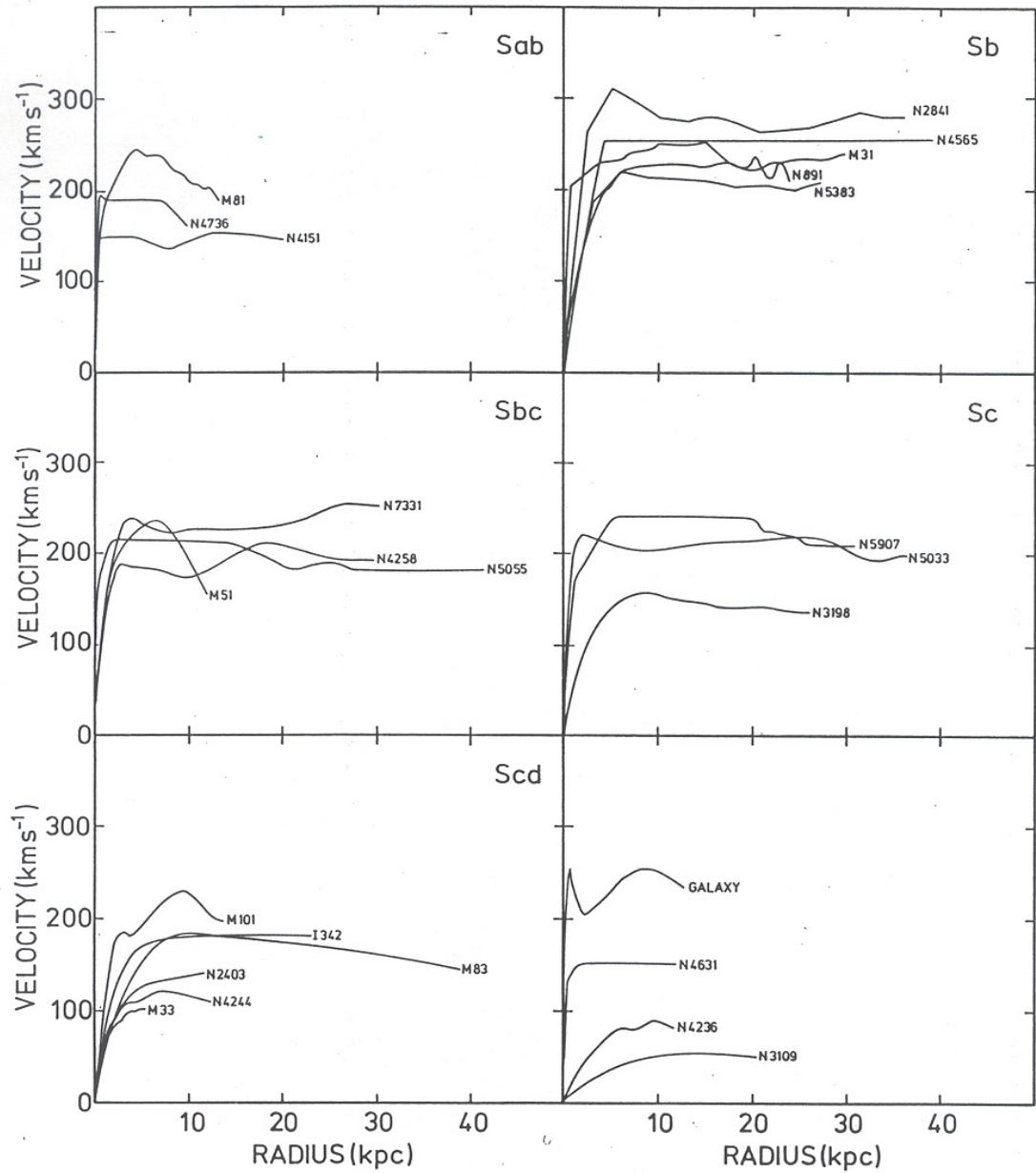


FIG. 3. Rotation curves of 25 galaxies of various Hubble types.

## 9.7 Galaxienmassen

Für die Anwendung des Virialtheorems  $2E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 0$  auf viele Massenpunkte hat die kinetische und potentielle Energie die Form

$$E_{\text{kin}} = \sum_i \frac{1}{2} M_i v_i^2 \quad \text{und} \quad E_{\text{pot}} = \sum_{i < j} \frac{G M_i M_j}{r_{ij}}$$

Radius  $R$  gibt eine gute Abschätzung von  $M_R$ , der Masse innerhalb von  $R$ , gemäss

$$V^2(R) \approx \frac{GM_R}{R}$$

Damit liefert die Messung der Rotationsgeschwindigkeit in Spiralgalaxien, oder die Messung der Geschwindigkeitsdispersion in Elliptischen Galaxien, Zentralgebieten von Spiralgebieten, Sternhaufen oder Galaxienhaufen eine gute Abschätzung der Masse.

**Tully-Fisher Relation:** In Scheibengalaxien kann die maximale Rotationsgeschwindigkeit  $v_{\text{max}}$  aus räumlich unaufgelösten HI-(21cm) Beobachtungen bestimmt werden, falls die Inkarnation aus einem optischen Bild bekannt ist (Annahme: die Scheibengalaxie ist rund).

Die empirische Tully-Fisher Relation beschreibt die Leuchtkraft von Scheibengalaxien als Funktion der maximalen Rotationsgeschwindigkeit.

$$L \approx c(\nu_{\max})^4$$

Diese Beziehung widerspiegelt das Virialtheorem  $(v^2)^2 \approx (GM/R)^2$  und den Zusammenhang, dass die Leuchtkraft einer Scheibe und deren Masse proportional zur Scheibenfläche sind:  $L, M \sim R^2$ .

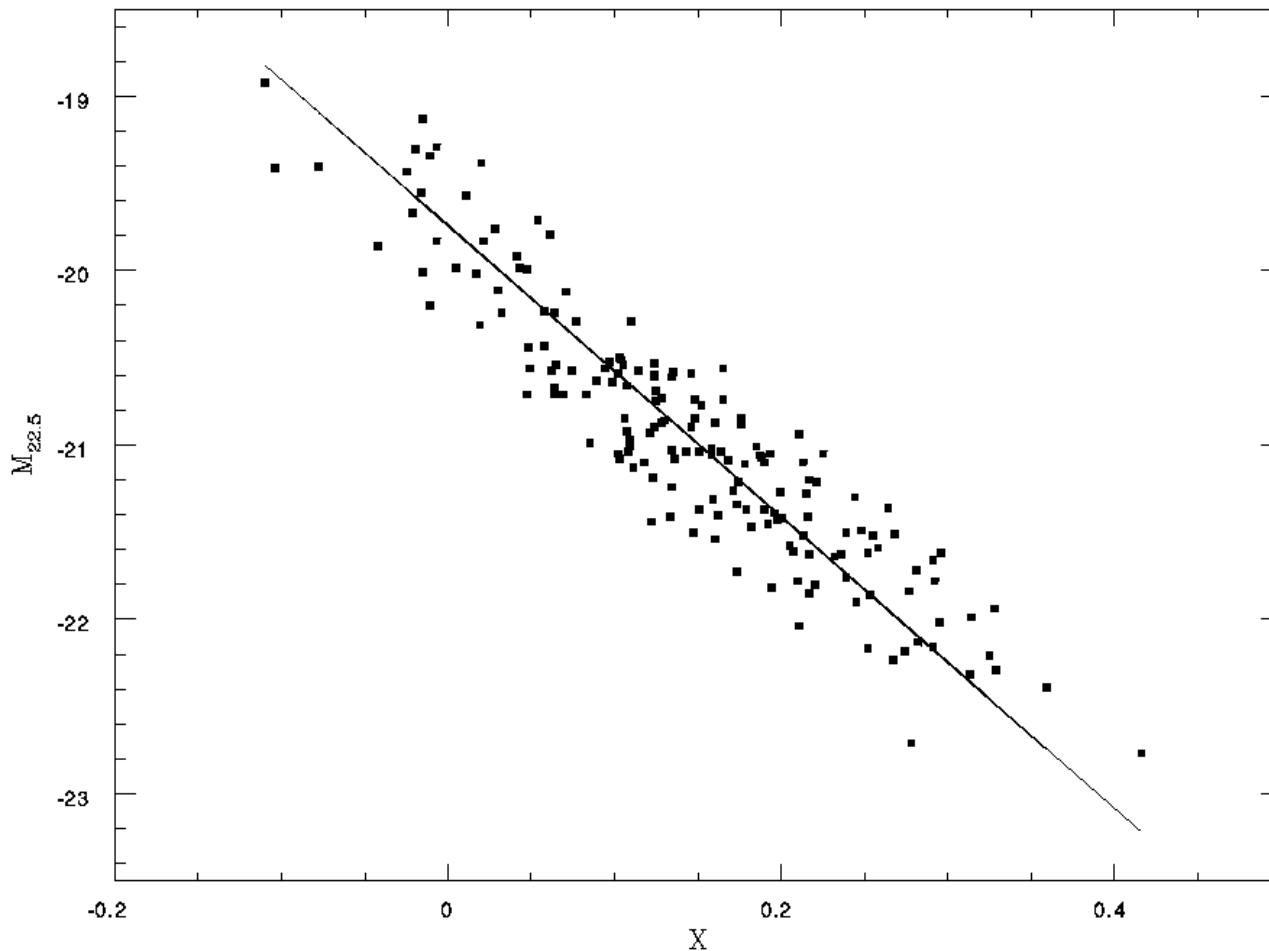
**Massen von elliptischen Galaxien:** Für elliptische Galaxien gilt eine ähnliche Beziehung für die gemessene Geschwindigkeitsdispersion  $\sigma(v)$  (Faber-Jackson Relation). Die Messung basiert auf der Verbreiterung von Absorptionslinien in den Spektren von elliptischen Galaxien.

$$L \approx \sigma(v)^4$$

**Masse-Leuchtkraft Beziehung:** Leuchtkraft- und Masseabschätzung liefert das Masse-Leuchtkraft Verhältnis  $M/L$  (in  $[M_S/L_S]$ ) für Galaxien. Diese Grösse charakterisiert verschiedene Galaxientypen.

- $M/L \approx 3$  für Scheibengalaxien mit vielen leuchtkräftigen jungen Sternen,
  - $M/L \approx 100$  für elliptische Galaxien mit vielen leuchtschwachen Sternen.
- $M/L$  wird für grobe Masseabschätzung ohne aufwendige Geschwindigkeitsmessung verwendet.

# Beispiel: Tully-Fisher Relation



Example relation between rotational velocity and I-band luminosity for a large sample of spiral galaxies from Dell'Antonio et al. (1996). The slope of the is close to the expected slope derived from the Virial Theorem. The X-axis is the log of the line width where zero corresponds to  $\log = 2.5$  ( $\sim 300$  km/s).

## 9.8 Die lokale Gruppe

Die lokale Galaxiengruppe wird dominiert von den 3 Scheibengalaxien M31, Milchstrasse und M33. Milchstrasse und M31 besitzen zudem je mindestens 10 Satellitengalaxien. Die Tabelle listet nur die hellsten Satellitengalaxien. Es gibt in der lokalen Gruppe viele leuchtschwache Zwerggalaxien vom Typ dIrr, dE und dSph die in grösserer Entfernung nicht mehr beobachtet werden können.

In Zwerggalaxien sind interessant, weil die Eigenschaften der interstellaren Materie, der Sterne und der Elementhäufigkeiten für verschiedene Umgebungen untersucht werden können.

Galaxie	Typ	Mag.
Milchstrasse	SBb	-20.8
Grosse Magellan'sche Wolke	Irr	-17.9
Kleine Magellan'sche Wolke	Irr	-16.3
Canis Major Zwerggalaxie	dIrr	-14.5
Sagittarius Zwerggalaxie	dSph	-12.7
Andromeda Galaxie M31	Sb	-21.6
NGC 205 (M110)	dE6	-16.1
M32	E2	-16.0
IC 10	dIrr	-15.6
NGC 147	dE5	-14.9
Triangulum Galaxie M33	Sc	-18.9

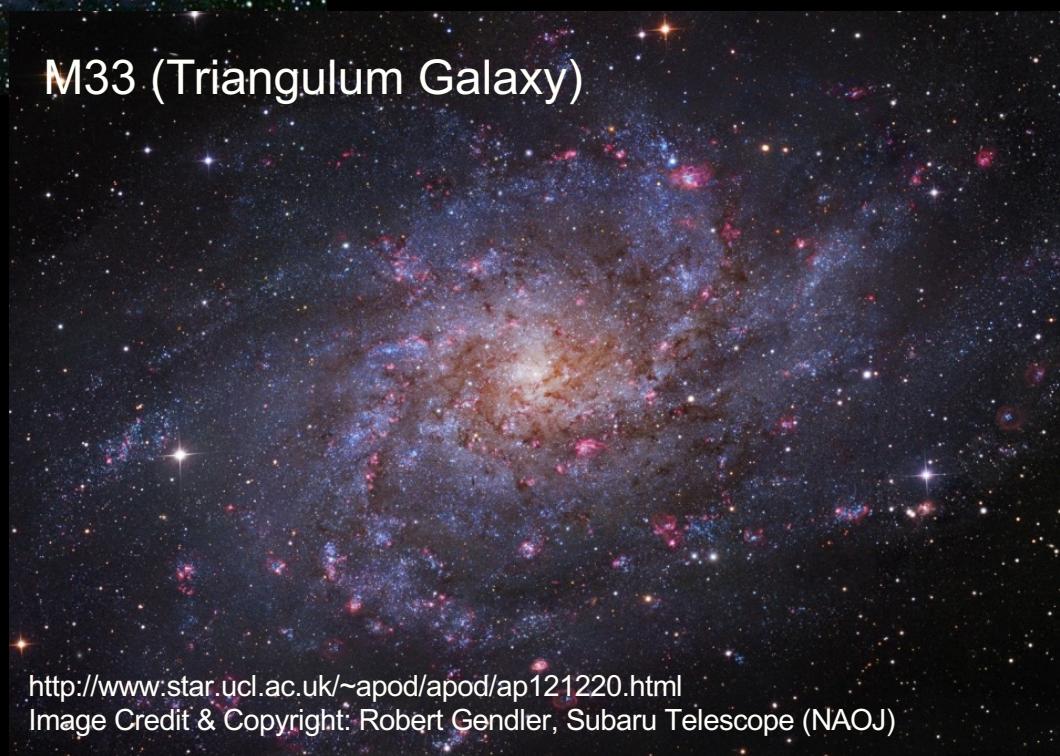
Die 3 leuchtkräftigen Galaxien der lokalen Gruppe und ihre hellsten Satellitengalaxien.

# M31 (Andromeda)



<http://cs.astronomy.com/asy/m/galaxies/426011.aspx>

# M33 (Triangulum Galaxy)



<http://www.star.ucl.ac.uk/~apod/apod/ap121220.html>

Image Credit & Copyright: Robert Gendler, Subaru Telescope (NAOJ)

# 9.9 Wechselwirkungen zwischen Galaxien

## Kollision einer Zwerggalaxie mit einer Scheibengalaxie:

Die Entwicklung und das Erscheinungsbild vieler Galaxien wird durch Wechselwirkungen oder sogar Kollisionen stark beeinflusst. Bei der Andromeda Galaxie M31 ist offensichtlich, dass die beiden elliptischen Galaxien M32 und NGC 205 sich schon durch die Scheibe von M31 bewegt haben, oder diese in Zukunft durchdringen werden. Die Sagittarius Zwerggalaxie befindet sich gerade in einer Kollision mit unserer Milchstrasse (auf der anderen Seite des galaktischen Zentrums) und auch die Struktur der Magellan'schen Wolken wird stark durch das Gravitationsfeld der Milchstrasse beeinflusst.

Solche Kollisionen zwischen grossen Scheibengalaxien und Zwerggalaxien finden praktisch immer statt. Wegen dem ungleichen Massenverhältnis (z.B. 100:1) ist der resultierende Effekt für die grosse Galaxie nicht katastrophal. Dichtewellen werden generiert, die zu einer Verstärkung der Spiralstruktur (z.B. in M51) oder zur Bildung eines Rings statt Spiralen führen kann (z.B. M31). Die kleine Galaxie wird aber oft aufgerissen, weil die Sterne aus dem nicht so tiefen Gravitationspotential rausgerissen werden. Ein sehr illustratives Beispiel sind die Sternströme einer zerstörten Zwerggalaxie, die bei NGC 5907 beobachtet werden.



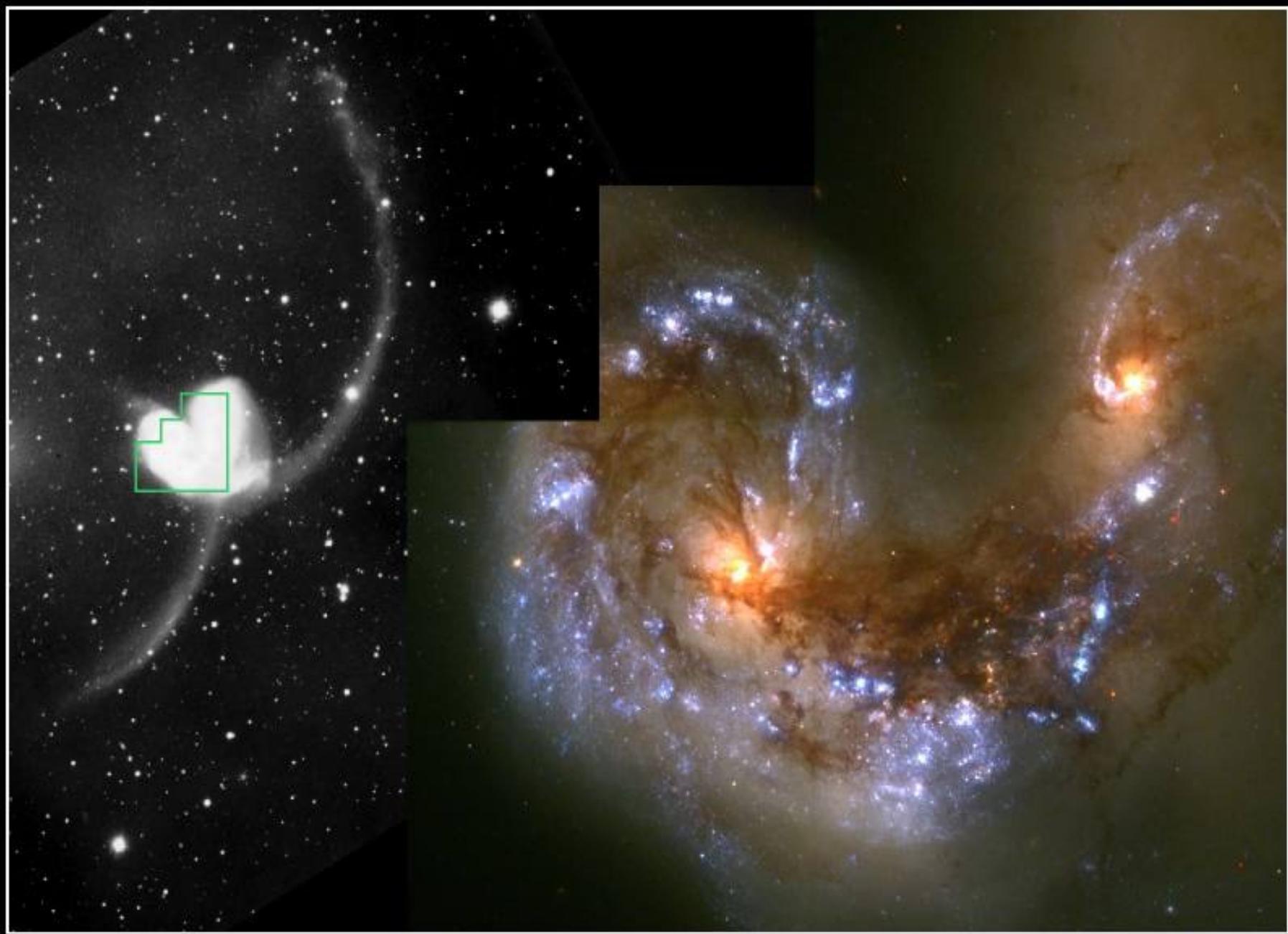
Sternströme um NGC 5907 (von R. Jay Gabany et al.)

# Kollisionen zwischen Scheibengalaxien

Bei der Kollision von zwei Scheibengalaxien sieht man folgende Phänomene:

- Die Sterne bewegen sich durch die Galaxien. Es kommt kaum zu Sternkollisionen, weil die Abstände zwischen Sternen verglichen mit den Sternradien riesig sind.
- Die Sternbahnen werden aber durch das Gravitationspotential des Kollisionspartners verändert und die Scheiben werden stark deformiert.
- Die Gaswolken der beiden Galaxien kollidieren im Gegensatz zu den Sternen heftig und es gibt dann zwei grundsätzliche Möglichkeiten:
  - Es kommt zu einer Gaskonzentration, die zu einer starken oder sogar extremen Sternentstehungsphase in der Kollisionszone führt, oder
  - das Gas wird durch den Schock der Kollision und ungenügender Kühlung durch Abstrahlung auf  $T > 10^6 \text{ K}$  aufgeheizt. Das Gas expandiert in den intergalaktischen Raum und es entsteht eine elliptische Galaxie ohne Gas.

Kollidierende Galaxien mit starken Sternentstehungsphasen sind oft mehr als 100x heller als die Milchstrasse und gehören zu den hellsten Galaxien. Solche Phasen sind häufig, wenn Galaxien im frühen Universum beobachtet werden weil bei diesen Distanzen nur noch die hellsten Objekte sichtbar sind. Ein gutes Beispiel für eine Kollision mit extremer Sternentstehung sind NGC4038/4039 ( Antennengalaxie).



**Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039**

HST • WFPC2

PRC97-34a • ST Scl OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST Scl) and NASA

# Kollisionen zwischen Scheibengalaxien



Visualization: F. Summers (STScI)

Simulation: C. Mihos (CWRU) & L. Hernquist (Harvard)

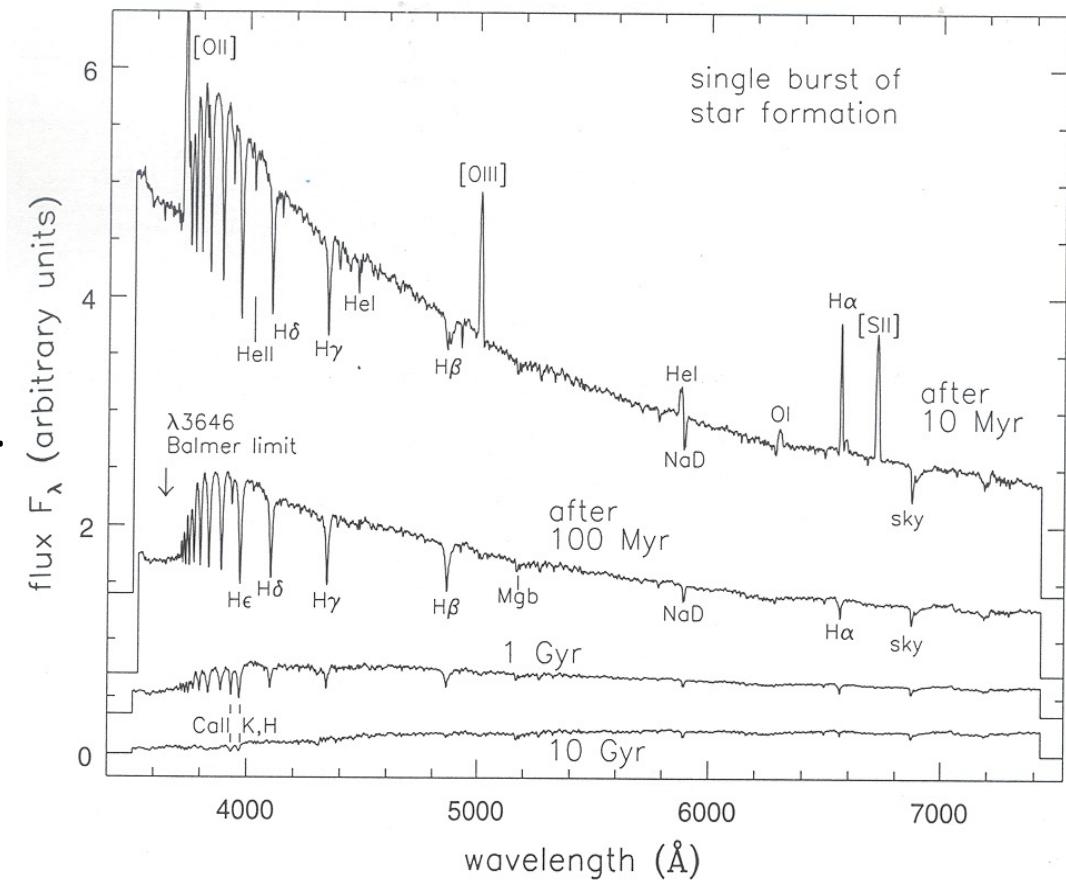
# Das Spektrum einer Sternentstehungsphase

Diese Graphik zeigt die spektralen Signaturen einer Sternentstehungsphase.

10 Mio. Jahre nach dem Ausbruch wird die Helligkeit durch O und B Sterne dominiert, wobei die Hauptemission im UV ist ( $\approx 1000\text{\AA}$ ). Gut sichtbar sind Emissionslinien der HII-Nebel.

Nach 100 Mio. J dominieren die A-Sterne, nach 1 Mia die F-G Sterne, danach die K-Sterne und das Spektrum entspricht E-Galaxien.

Bei Scheibengalaxien ist die Sternentstehung kontinuierlich, und das Spektrum ist eine Mischung aus diesen Phasen.



**Figure 6.19** Spectra for a ‘galaxy’ that makes its stars in a  $10^6$  yr burst, all plotted to the same vertical scale. Emission lines of ionized gas are strong 10 Myr after the burst ends; after 100 Myr, the galaxy has faded and reddened, and deep hydrogen lines of A stars are prominent. Beyond 1 Gyr, the light dims and becomes slightly redder, but changes are much slower – B. Poggianti.