

Kosmische Evolution für Nicht-Physiker: Wie unser Weltall wurde, was es heute ist

6. Galaxien – Teil 1

Knud Jahnke, MPIA

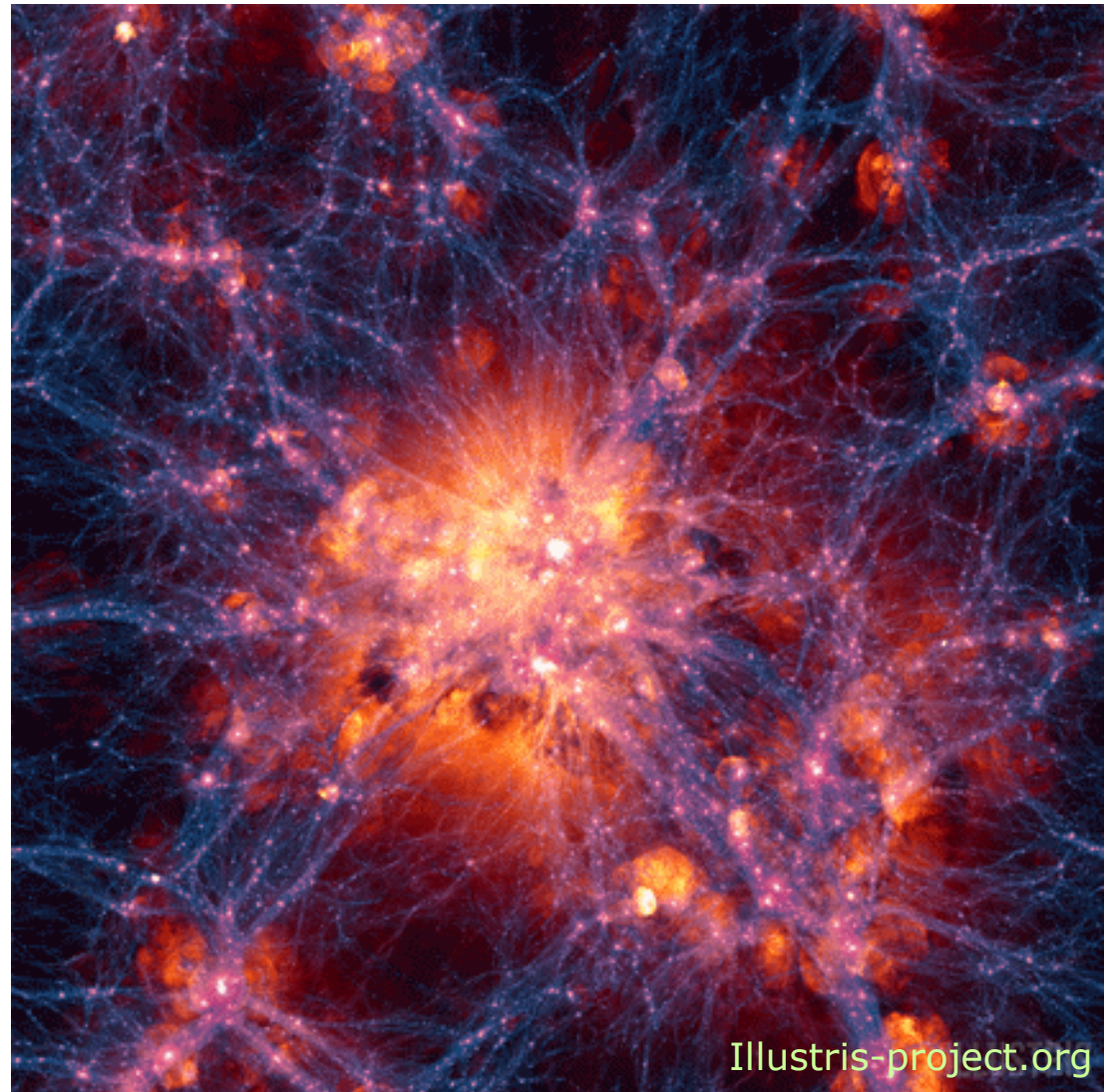
Großskalige Strukturen

Dunkle Materie Halos + Filamente

Gas "kondensiert"
in Zentren von Halos

→ Sterne entstehen

→ Galaxien



Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})



ESO/Beletsky

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})

Größte Galaxien: $\sim 10^{14}$ Sterne



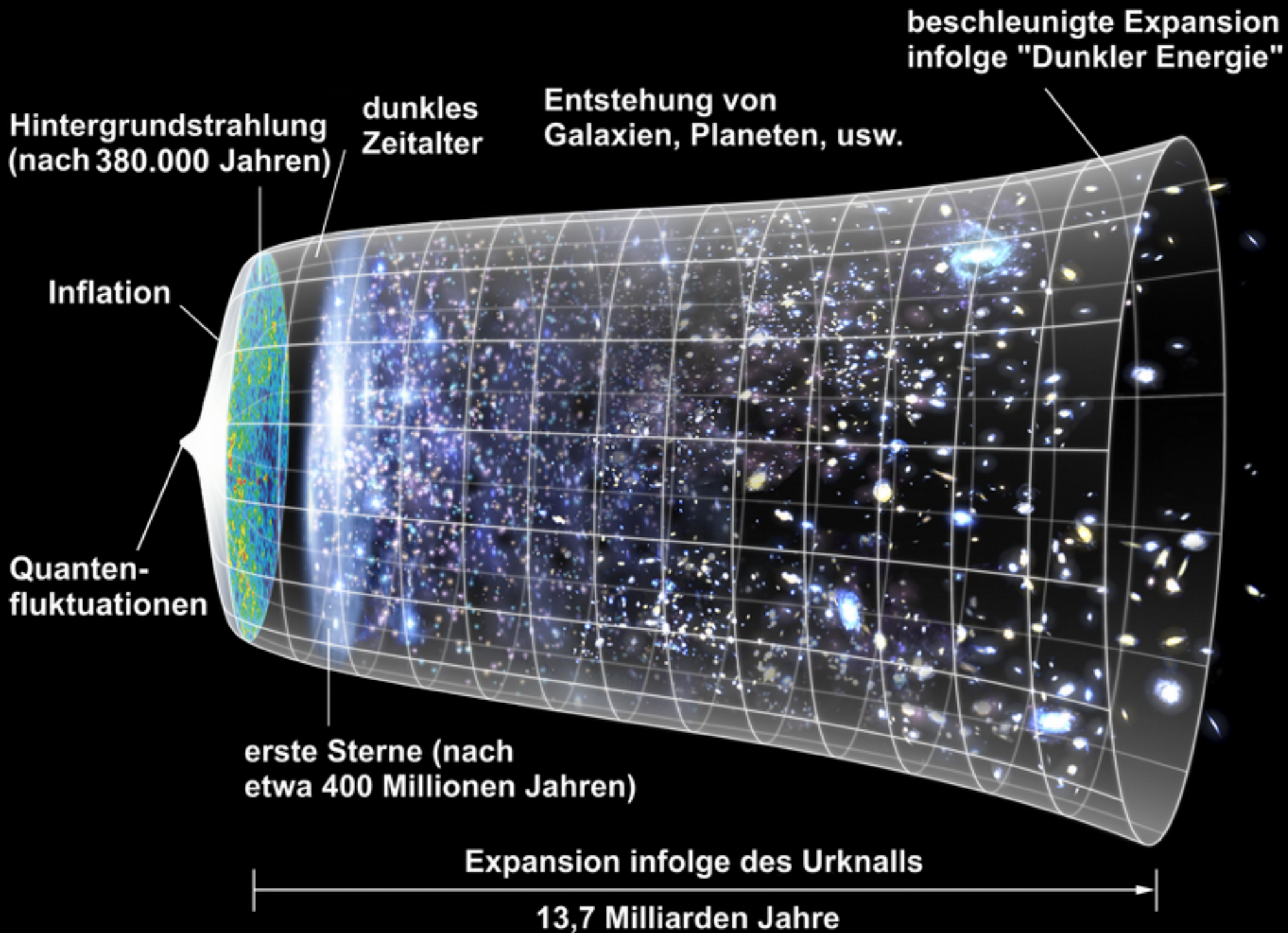
Galaxie ESO 146-5 (NASA/ESA HST)

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

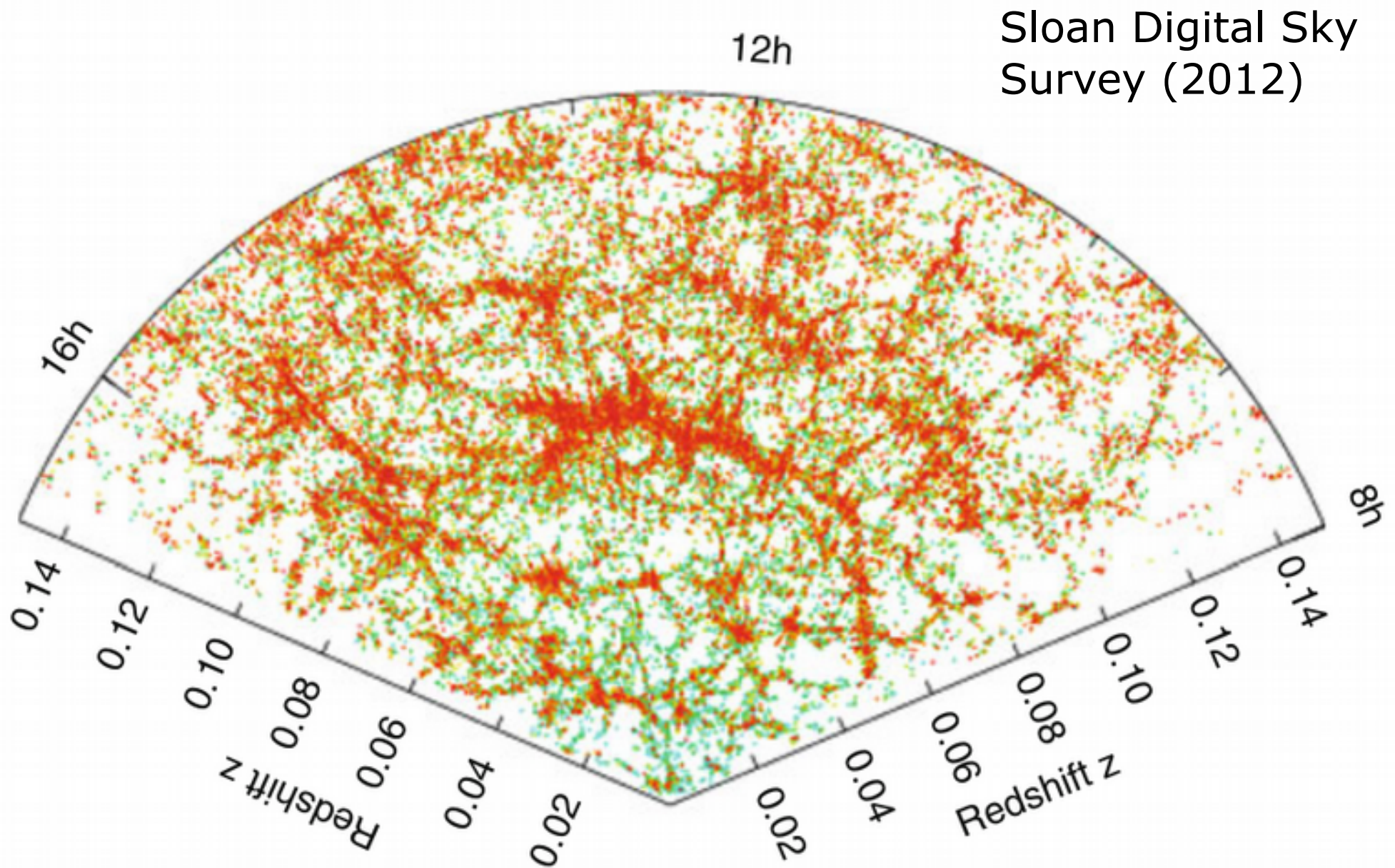
Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})

Größte Galaxien: $\sim 10^{14}$ Sterne

Balken
Wachstum Winde
Strukturen Löcher
Drehimpuls Verteilung
irreguläre Melliptische
atomares Halo Ausflüsse
Bulge Gas Farben kaltes
Galaxien Rückkopplungen Molekülwolken
Balkenspiralen Entwicklung
Größenverhältnisse
Core Sternentstehung
Spiralarme Spiralgalaxien
Schwarzes Loch
Zusammenstöße
Gastransport Emission
Regulierung Röntgen
Supernovae Cusp
Entstehung



Strukturen von Strukturen



Allison Coil et al., 2013



Visuell

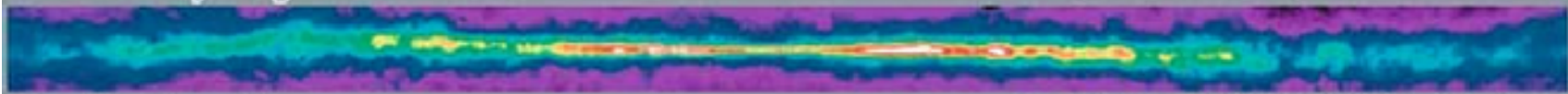
Andromeda (Messier 31)

Milchstraße in verschiedenen Wellenlängen

Radio Continuum 408 MHz Bonn, Jodrell Banks, & Parkes



Atomic Hydrogen 21 cm Leiden-Dwingeloo, Maryland-Parkes



Radio Continuum 2.4-2.7 GHz Bonn & Parkes



Molecular Hydrogen 115 GHz Columbia-GISS



Infrared 12, 60, 100 μm IRAS



Near Infrared 1.25, 2.2, 3.5 μm COBE/DIRBE



Optical Laustsen et al. Photomosaic



X-Ray 0.25, 0.75, 1.5 keV ROSAT/PSPC



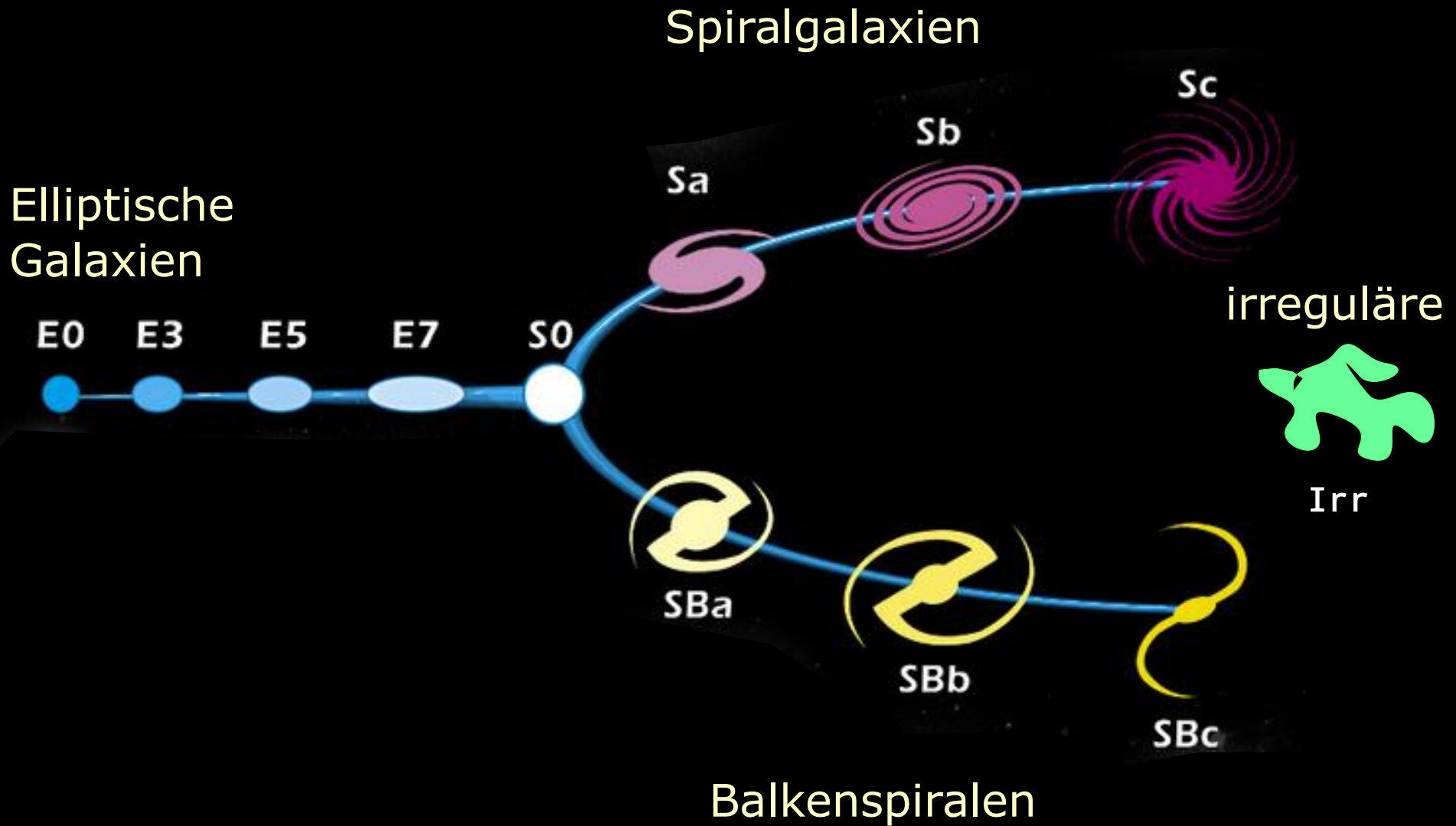
Gamma Ray >100 MeV CGRO/EGRET



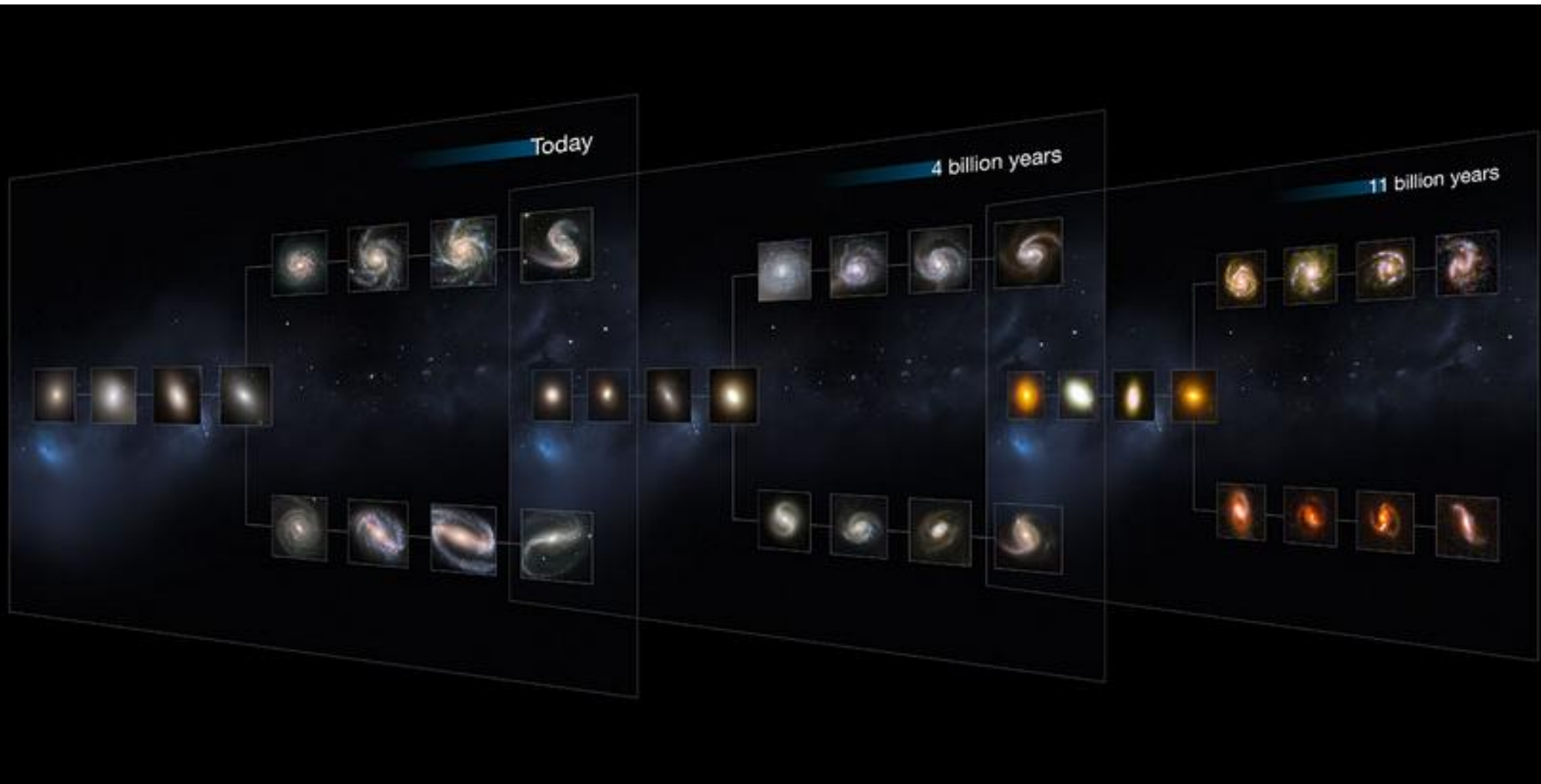
Klassifikation von Galaxien

Ellipsen – Lentikulare – Spiralen – Irreguläre

“Hubble-Schema”



Klassifikation von Galaxien



HST/CANDELS

Klassifikation von Galaxien

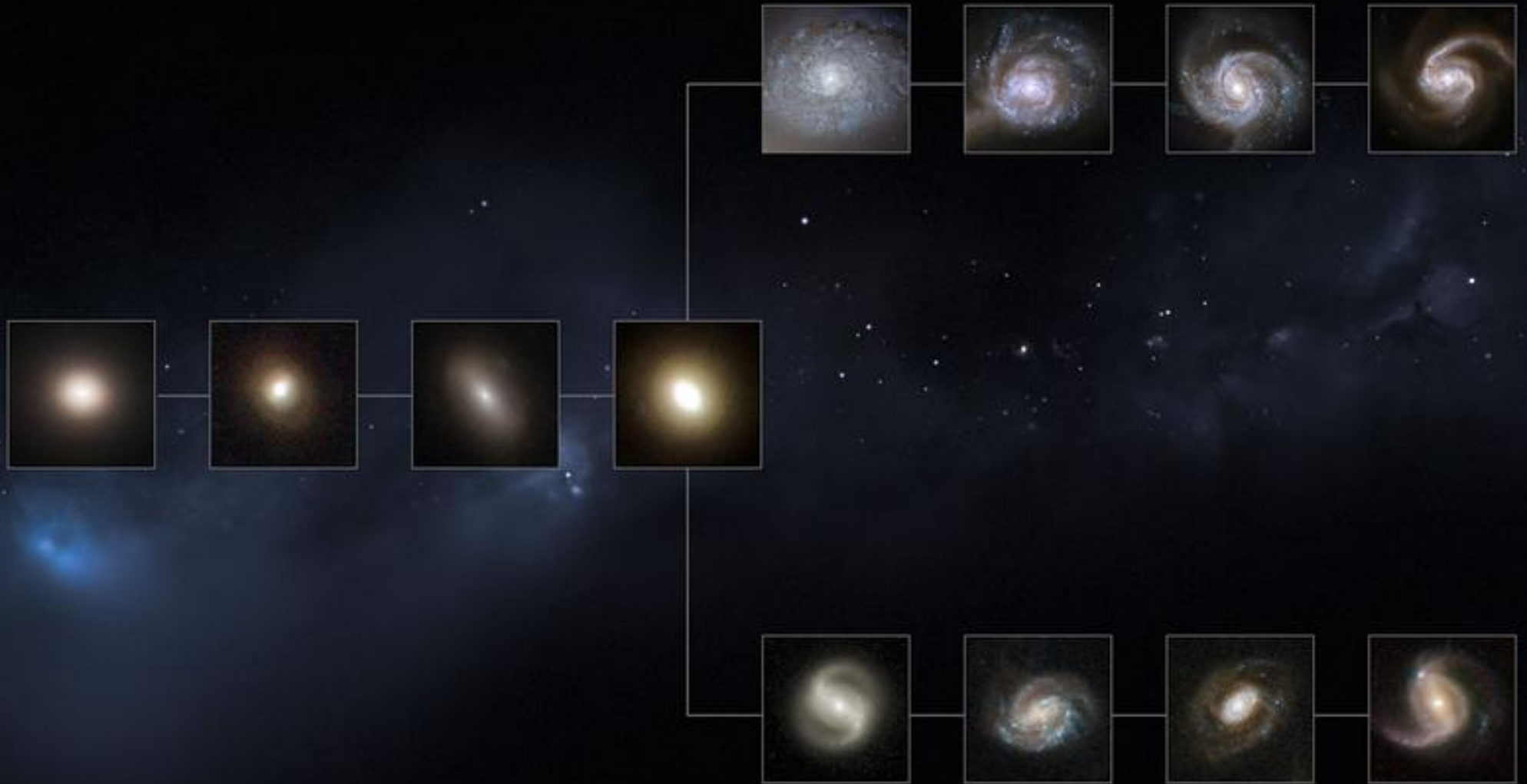
Heute



HST/CANDELS

Klassifikation von Galaxien

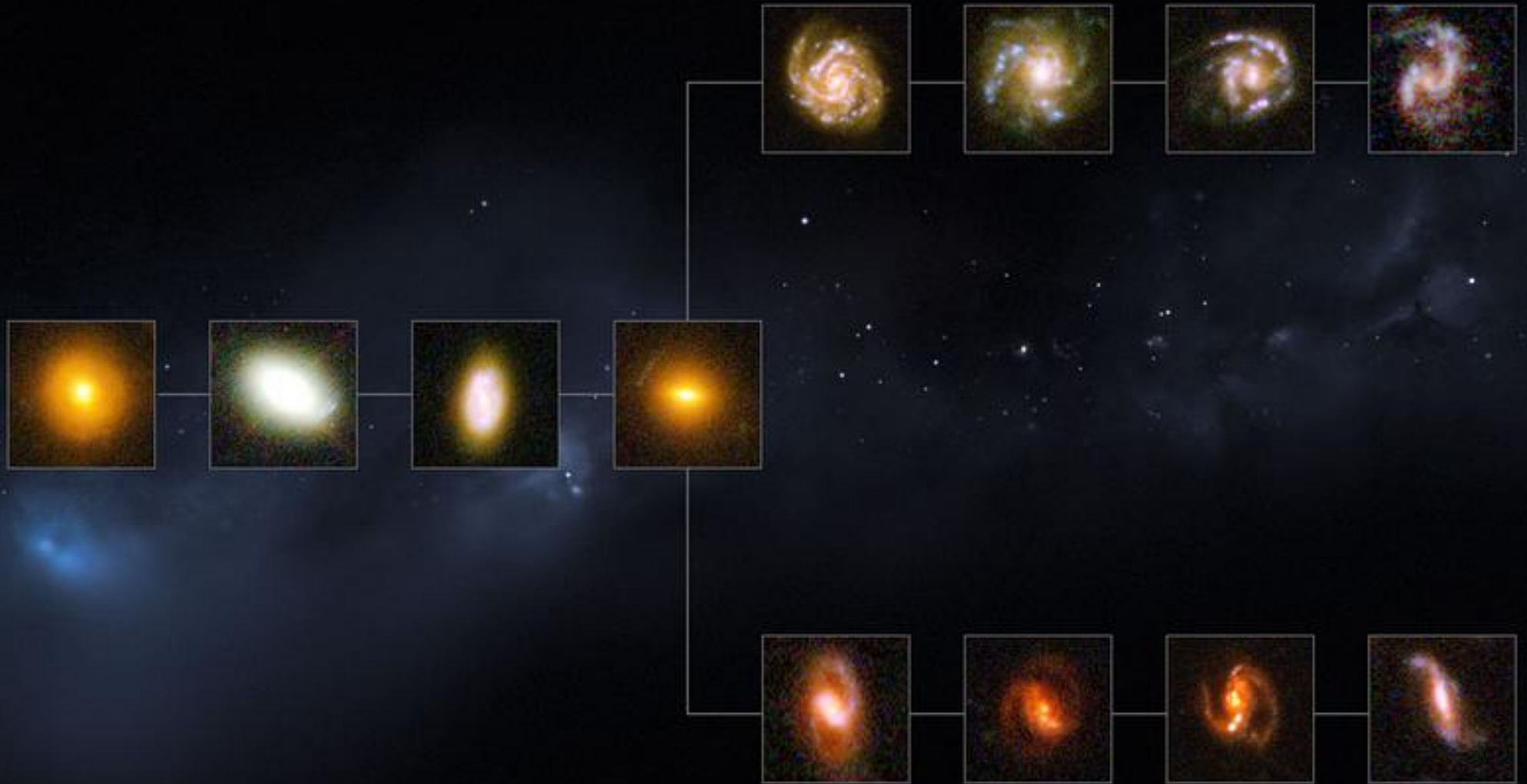
vor 4 Milliarden Jahren



HST/CANDELS

Klassifikation von Galaxien

vor 11 Milliarden Jahren



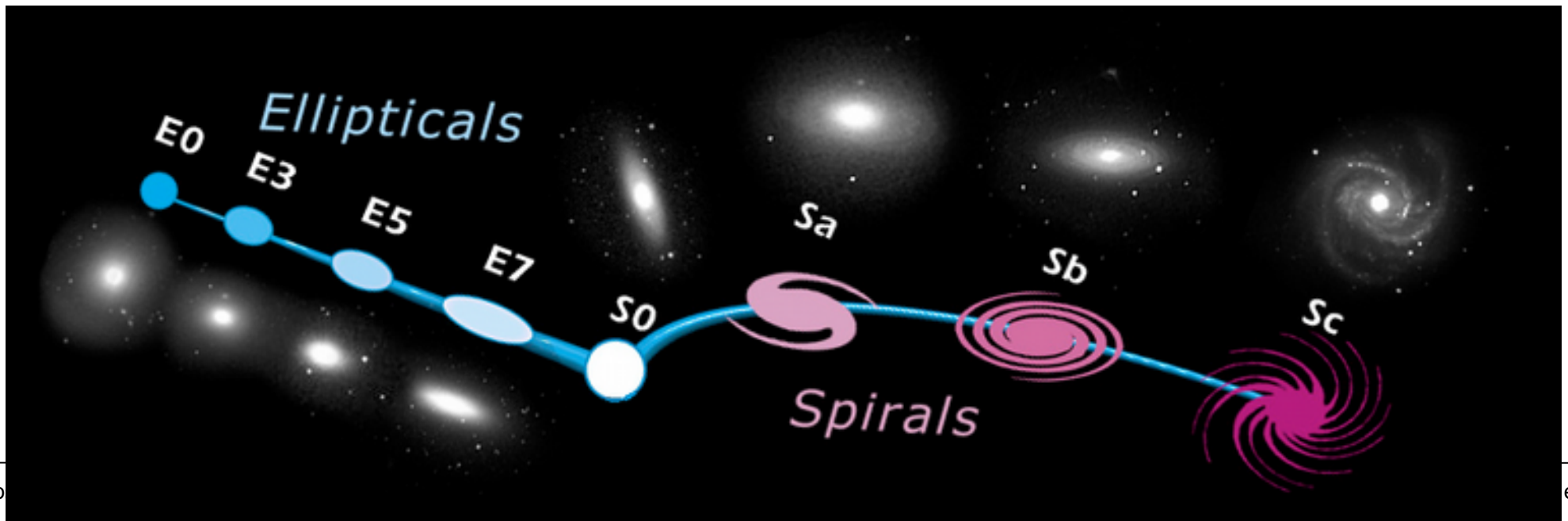
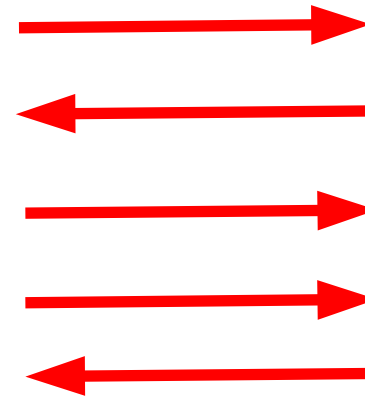
HST/CANDELS

Klassifikation von Galaxien

Ellipsen – Lentikulare – Spiralen – Irreguläre

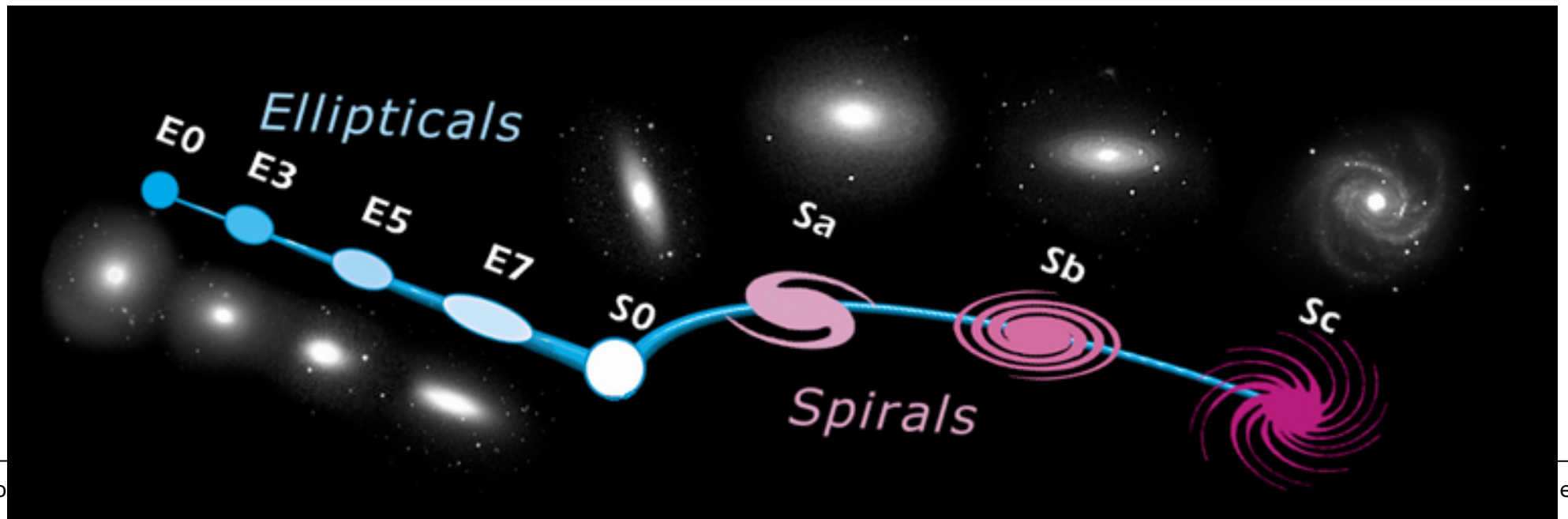
- Sequenz in:

- Drehimpuls
- mittlerem Sternalter
- Bulge/Scheiben-Verhältnis
- (spezifischen) Sternentstehungsraten
- Entwicklung



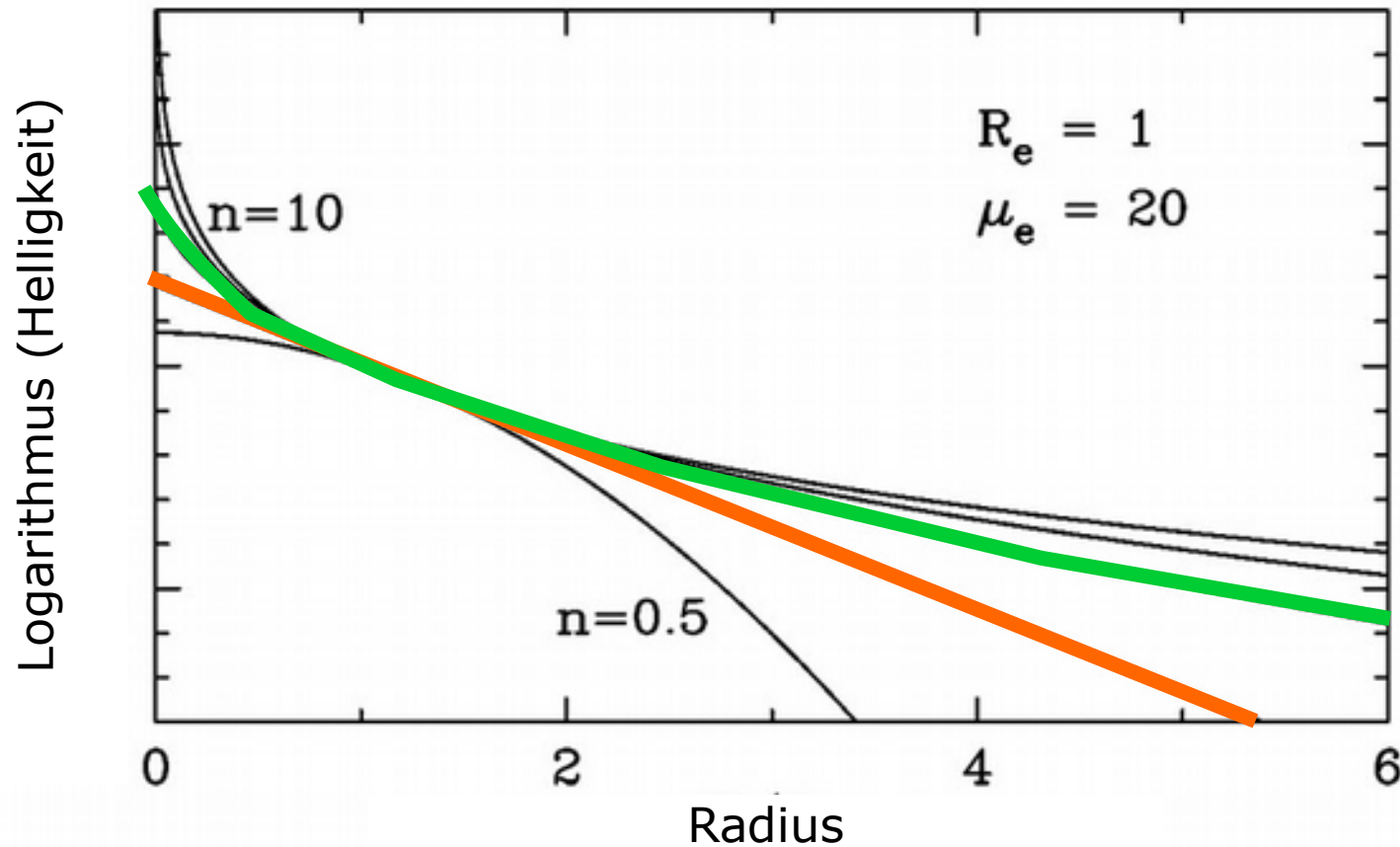
Klassifikation von Galaxien

- Elliptische Galaxien:
 - E0-E7: Achsenverhältnis
 - (fast) keine Sternentstehung
 - De Vaucouleurs-Helligkeitsprofil: $I \sim \exp(-k r^{1/4})$



Radiale Helligkeitsprofile

Generalisiert: Sersic Profil $I \sim e^{-kr^{1/n}}$

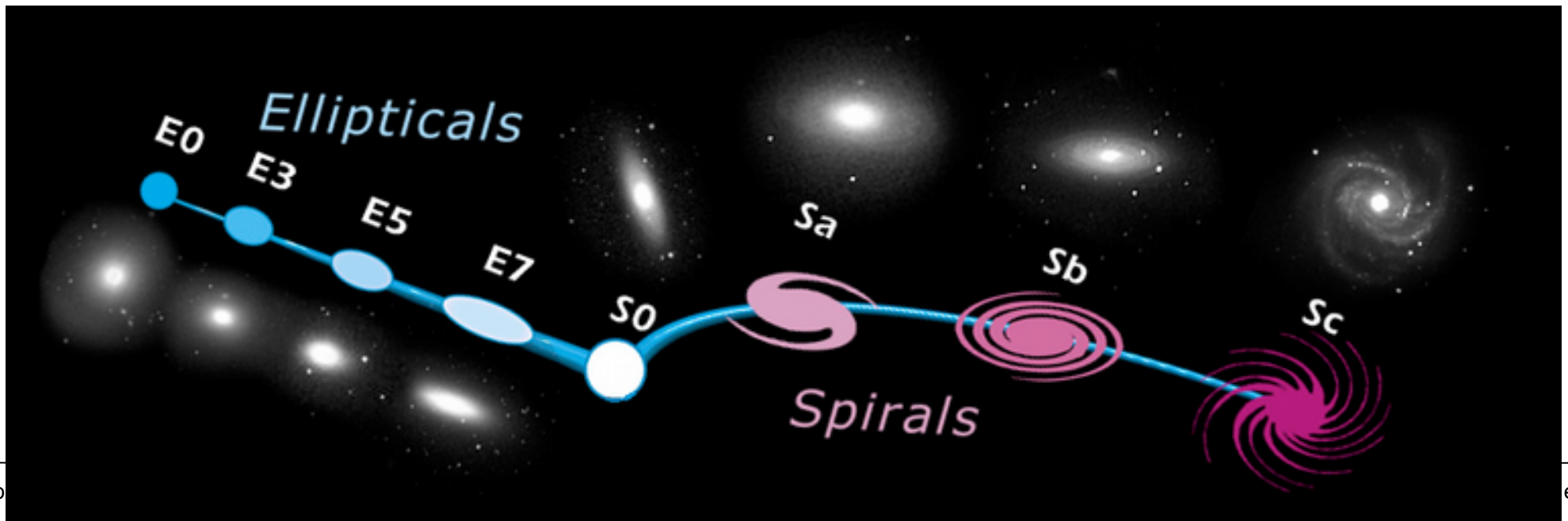


$n=1$: exponentielle Scheibe \rightarrow Spiralgalaxien

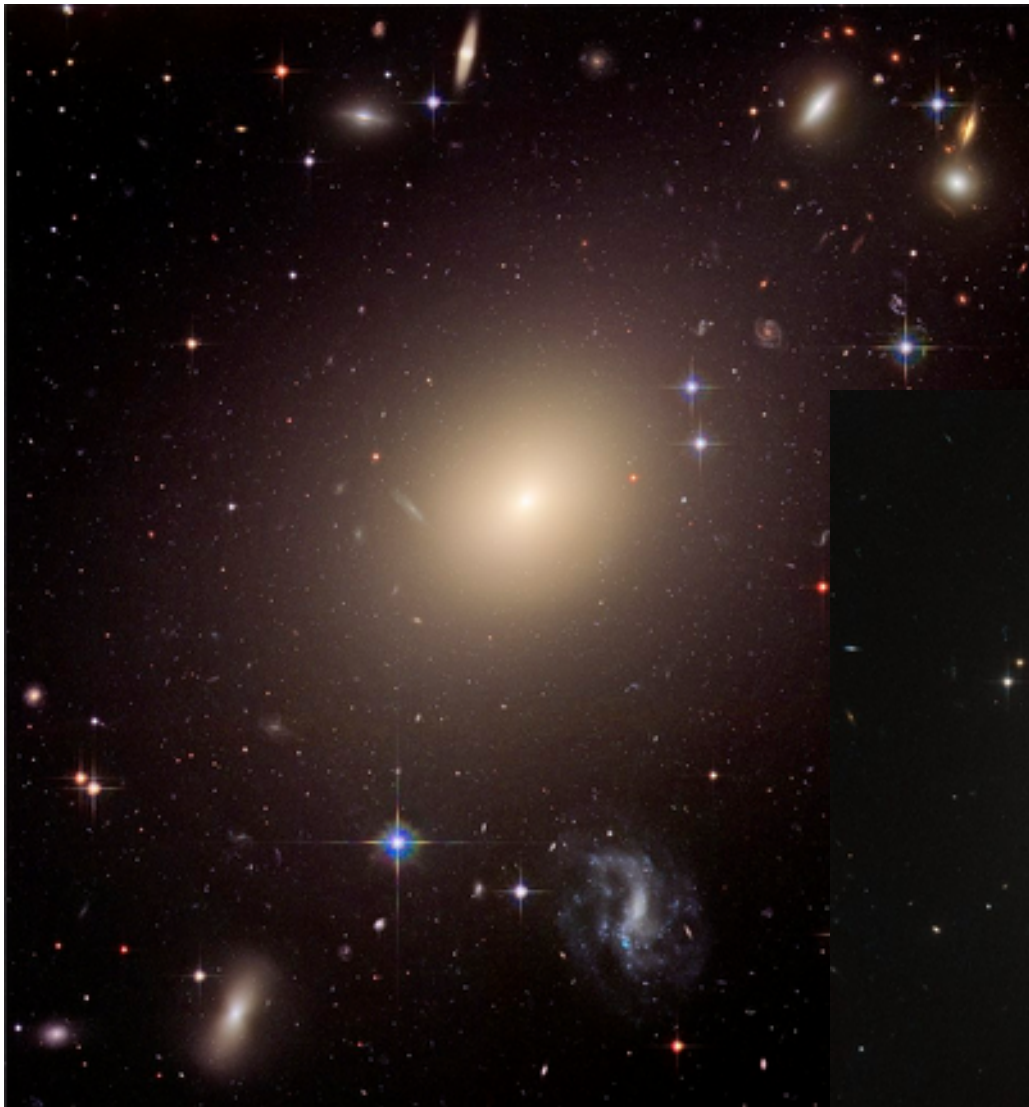
$n=4$: de Vaucouleurs-Gesetz \rightarrow elliptische Galaxien

Klassifikation von Galaxien

- Elliptische Galaxien:
 - E0-E7: Achsenverhältnis
 - (fast) keine Sternentstehung
 - De Vaucouleurs-Helligkeitsprofil: $I \sim \exp(-k r^{1/4})$
- Lentikulare (S0):
 - Rotation, keine Arme, wenig Sternentstehung

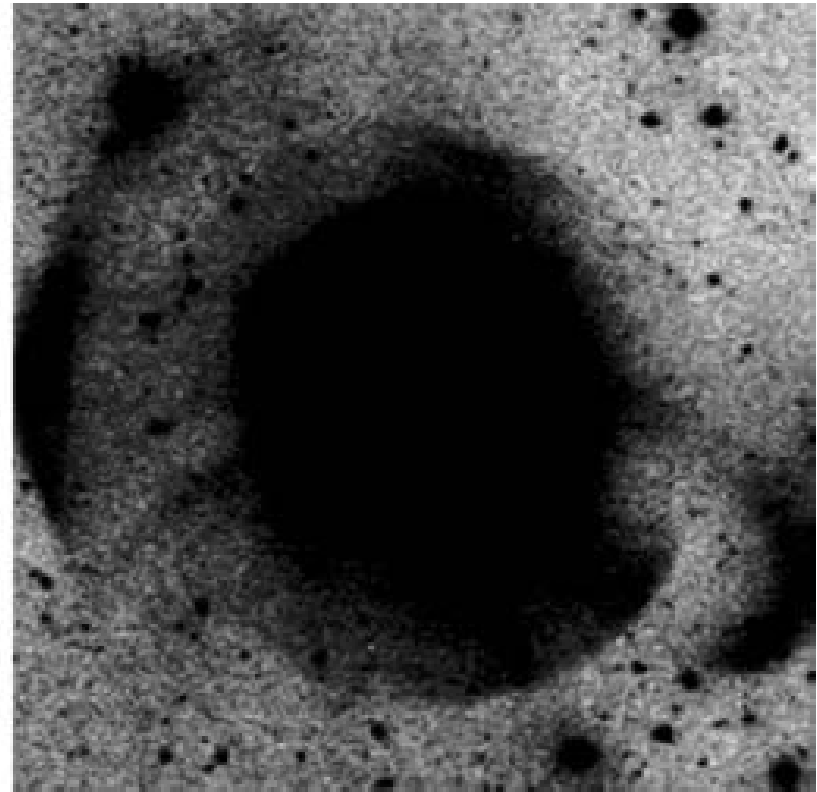
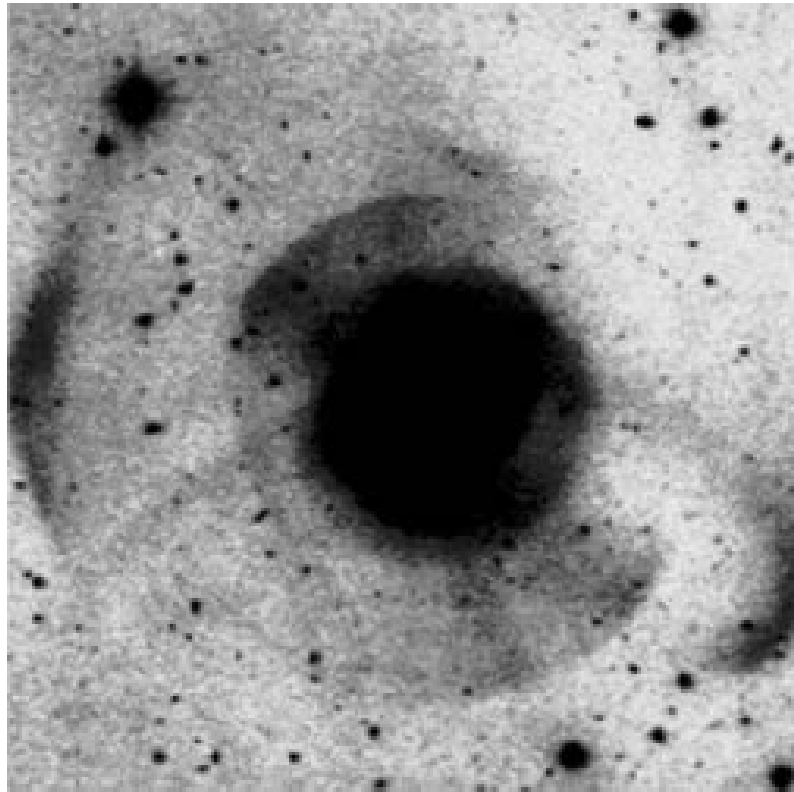


Elliptische Galaxien



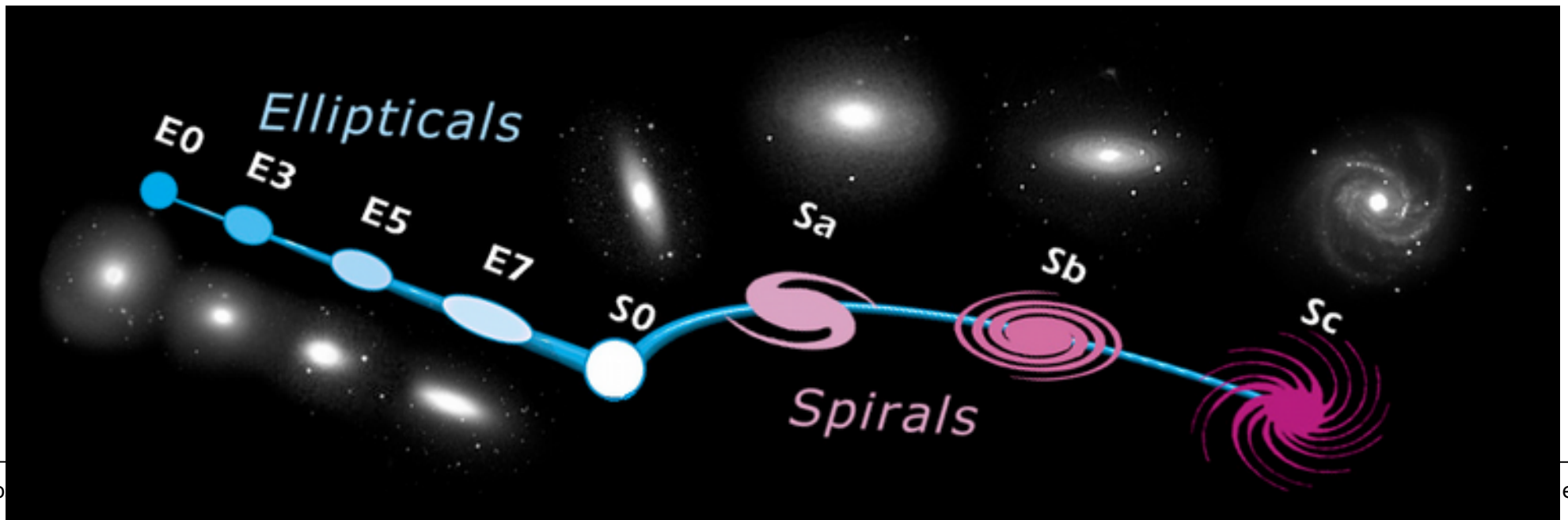
NASA/ESA HST

Struktur: tiefe Aufnahmen von E-Galaxie



Klassifikation von Galaxien

- Spiralen:
 - Sa-Sc, Sd, Sm: Bulge-Stärke, Windungsstärke der Arme
 - Sternentstehung
 - Helligkeitsprofil: exponentielle Scheibe $I \sim \exp(-kr)$



Spiralgalaxien

M64: Sab



M51: Sbc



M101: Sc



M83: SBa



NGC1356: SBb

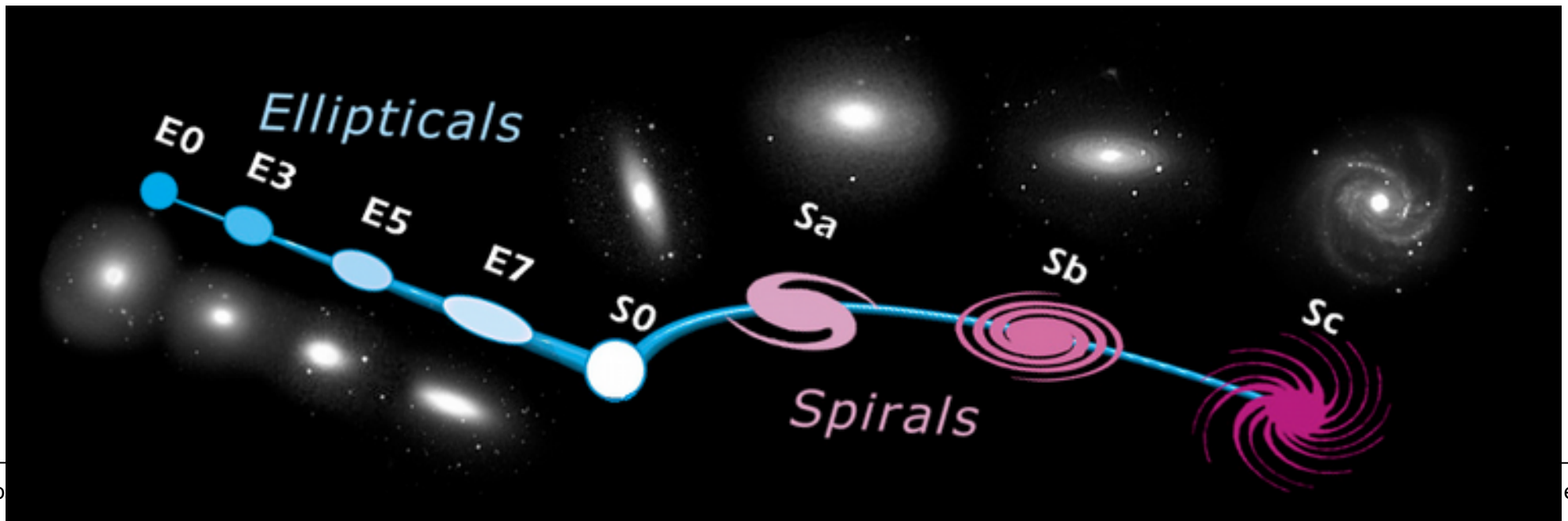


M58: SBc



Klassifikation von Galaxien

- Spiralen:
 - Sa-Sc, Sd, Sm: Bulge-Stärke, Windungsstärke der Arme
 - Sternentstehung
 - Helligkeitsprofil: exponentielle Scheibe $I \sim \exp(-kr)$
- Irreguläre (Irr, Im):
 - Sehr wenig oder keine kohärente Struktur
 - Kein Bulge, starke Sternentstehung



Irreguläre Galaxien



Martin Winder/
Dietmar Hager

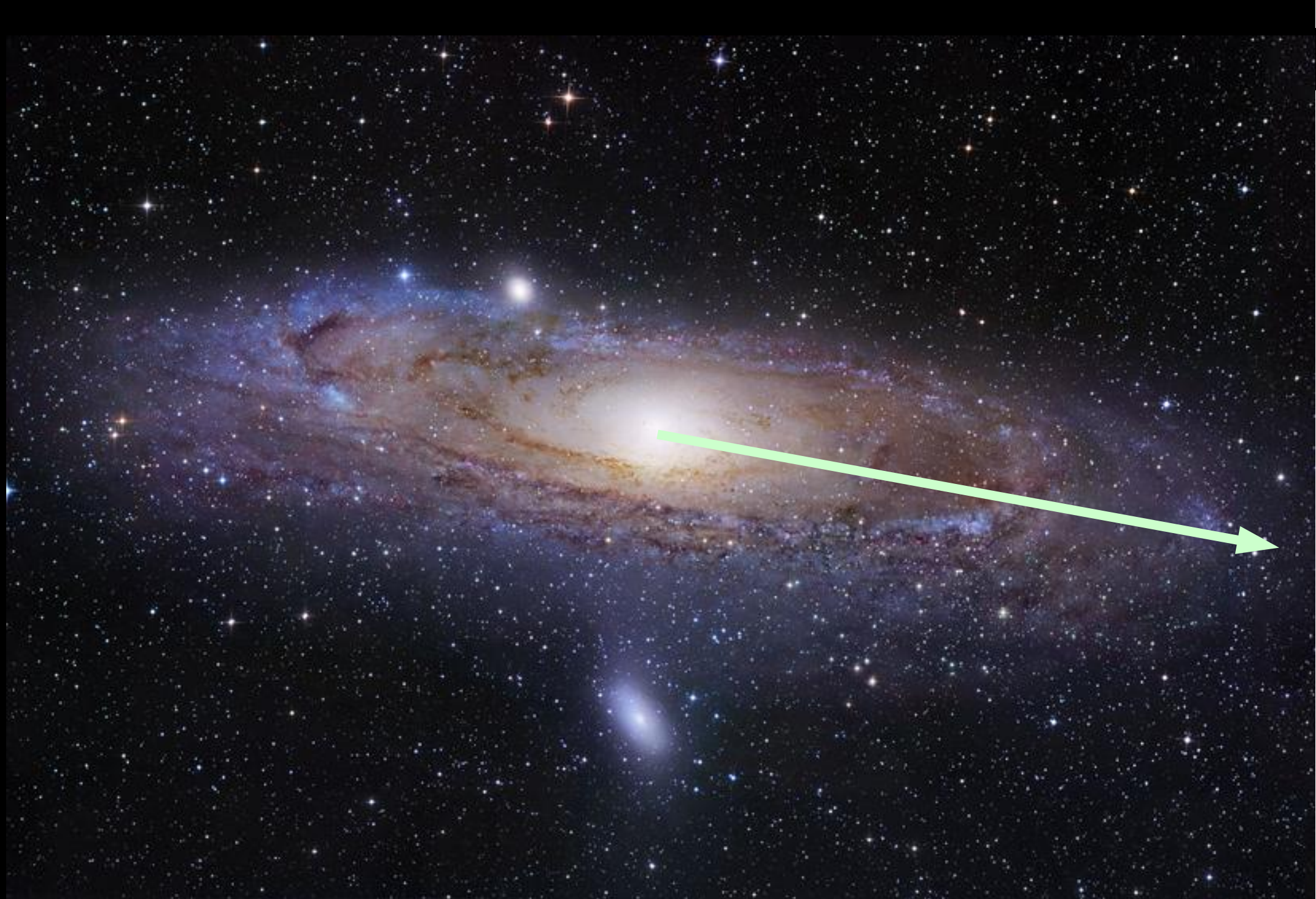
Galaxienzusammenstöße



Struktur von Galaxien

- Sterne, Gas, ... und mehr

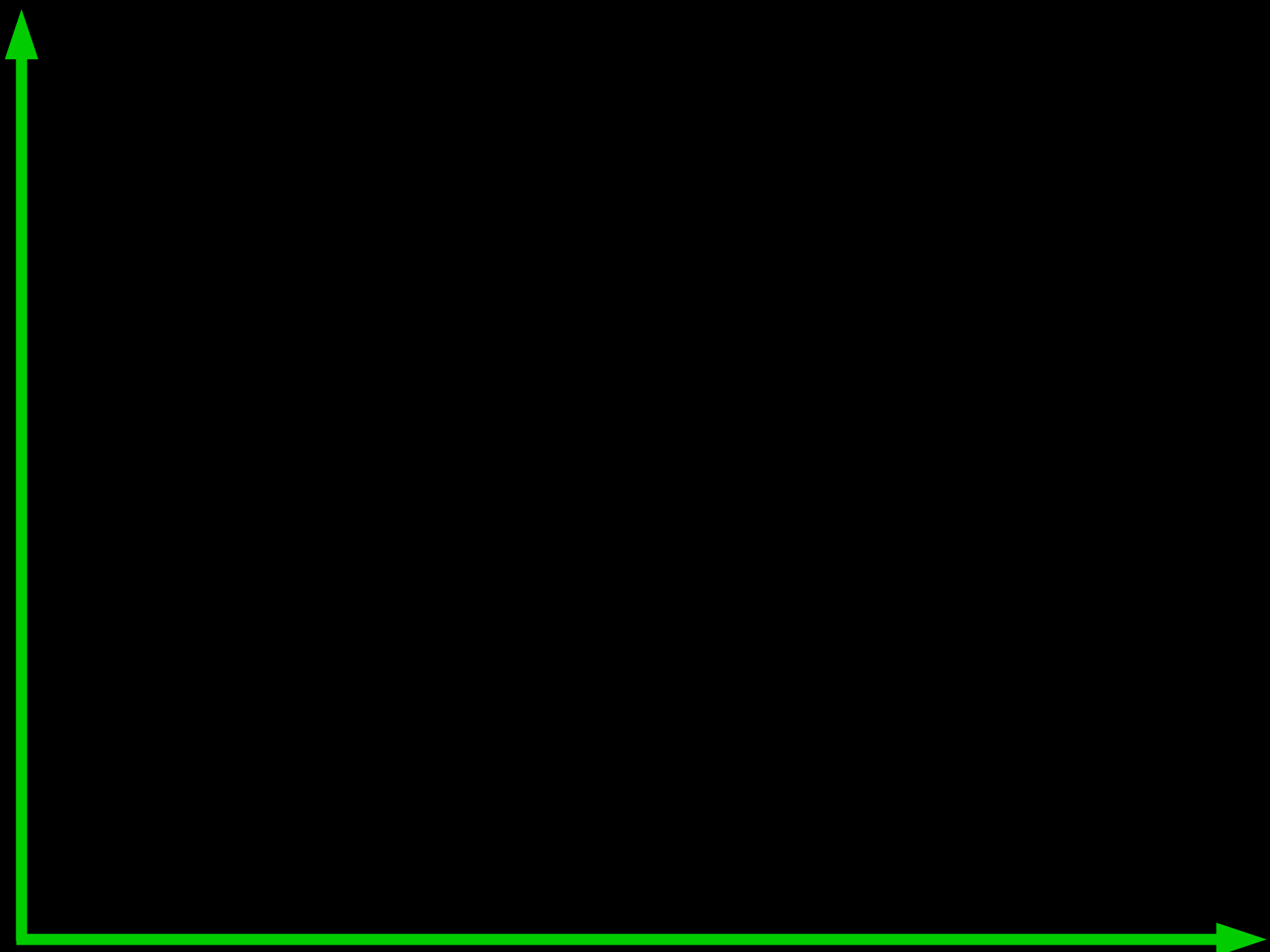
→ Einschub: Rotationskurven



NASA/Hubble

Rotationsgeschwindigkeit
[Kilometer/Sekunde]

Abstand vom Zentrum
[Kiloparsec]



Einschub: Rotationskurven

Gravitation + zentrifugales Gleichgewicht (sph. Symm.):

$$F_G = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \qquad F_Z = m \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 r$$

Masse innerhalb Radius R:

$$\frac{Gm(<R)}{R^2} = \frac{v^2(R)}{R} = \omega^2(R) \cdot R$$

v Rotationsgeschwindigkeit
ω Winkelgeschwindigkeit

Einschub: Rotationskurven

$$\frac{Gm(<R)}{R^2} = \frac{v^2(R)}{R} = \omega^2(R) \cdot R$$

Beispiele:

Kugel konstanter Dichte

$$M(<R) = \int_0^R dr \rho(r) r^2$$

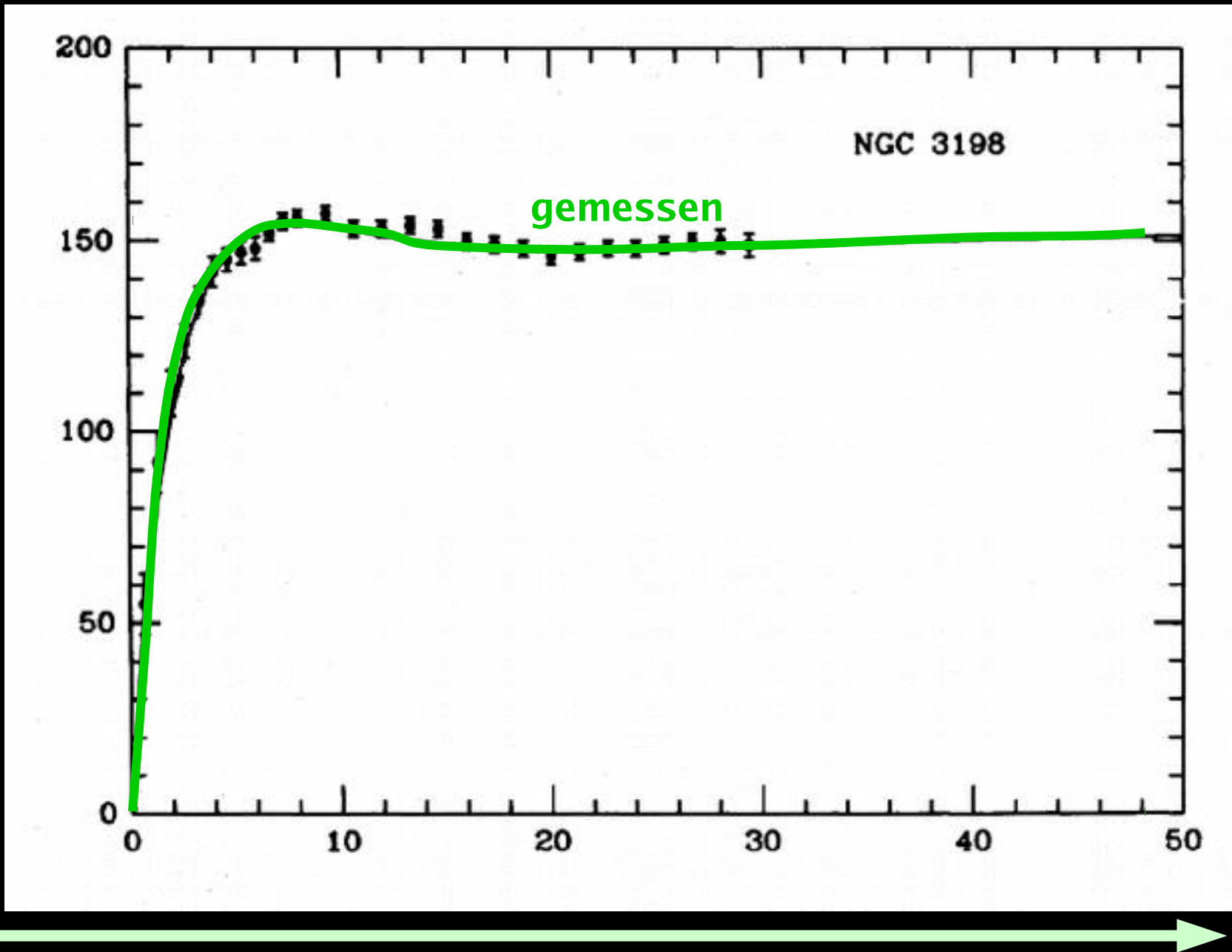
$$\rho = \text{const.} \Rightarrow M \propto R^3 \Rightarrow v \propto R, \quad \omega = \text{const.} \quad (\text{isotherm})$$

Punktmasse

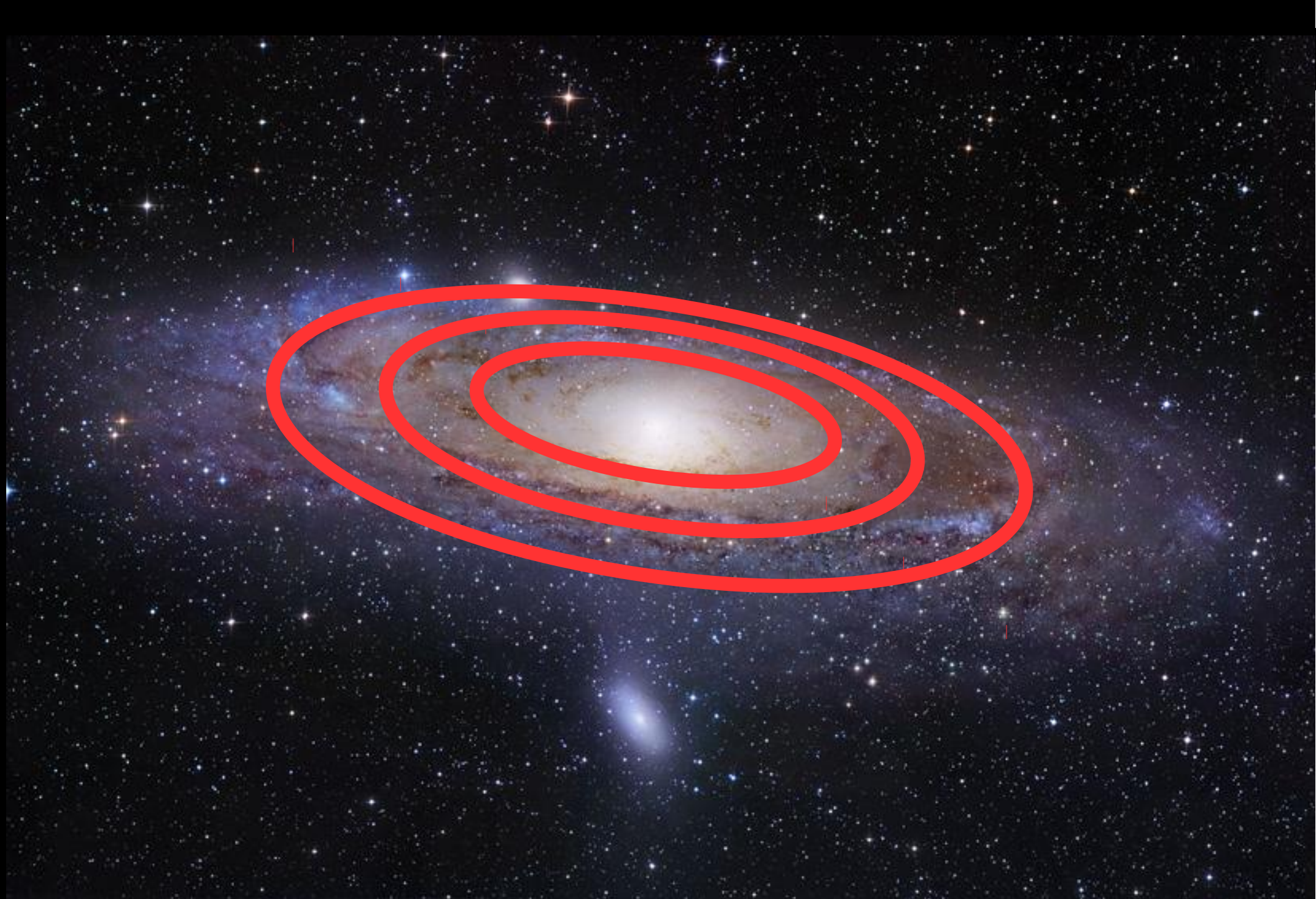
$$M = \text{const.} \Rightarrow v \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

(keplersch)

Rotationsgeschwindigkeit
[Kilometer/Sekunde]

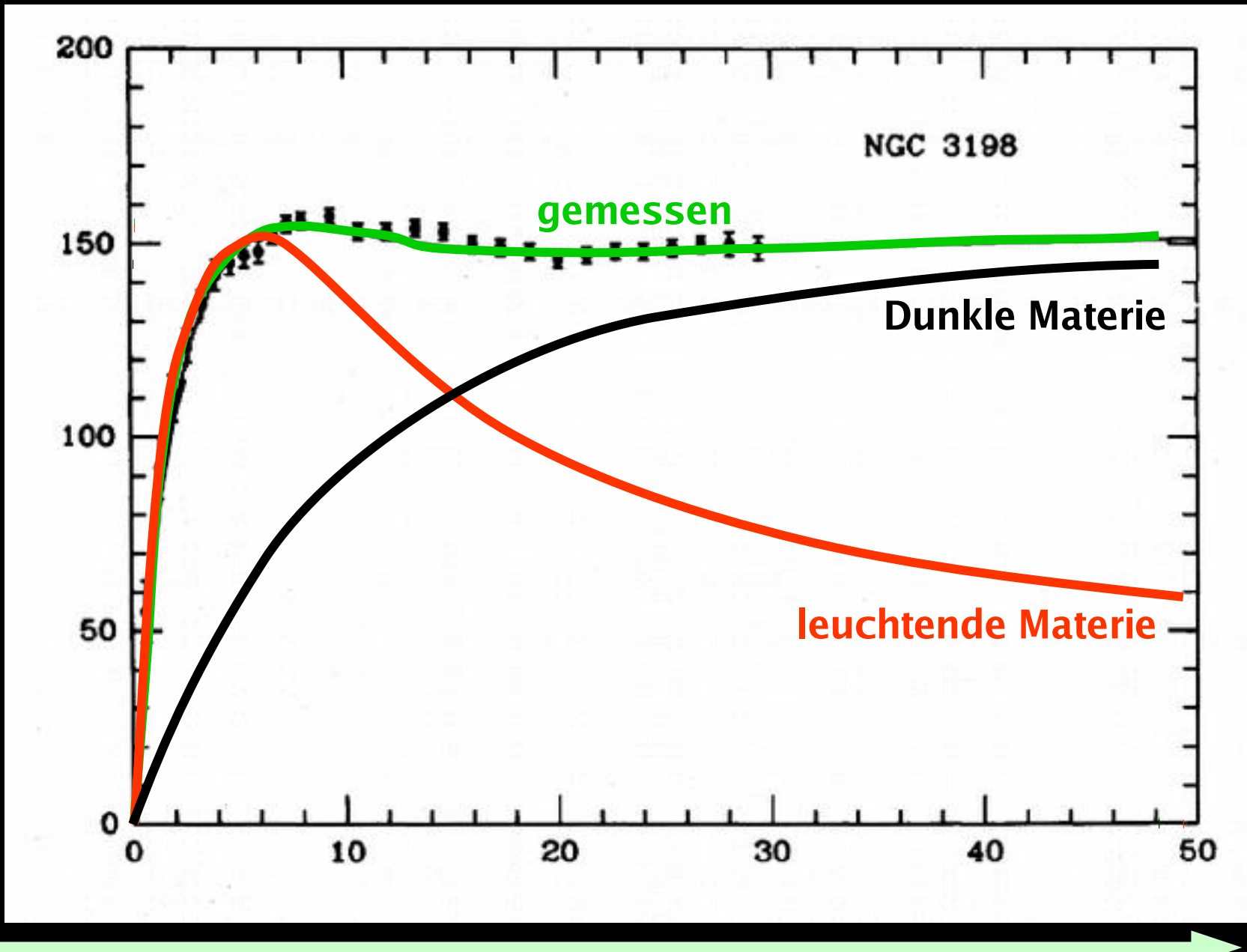


Abstand vom Zentrum
[Kiloparsec]



NASA/Hubble

Rotationsgeschwindigkeit
[Kilometer/Sekunde]



Abstand vom Zentrum
[Kiloparsec]

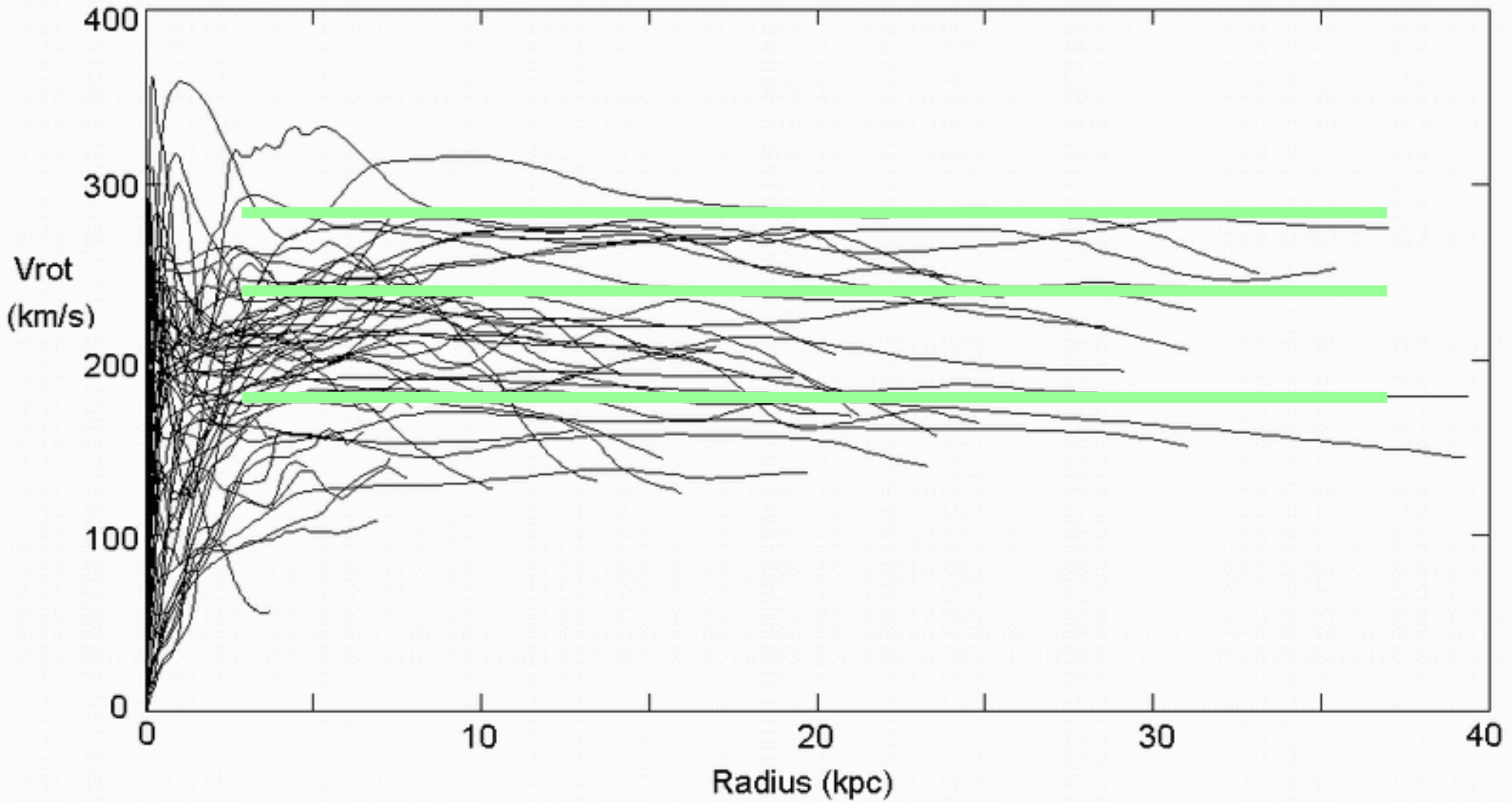
Vermutungen: Jan Hendrik Oort ~1932

Fritz Zwicky ~1933

Nachweis: Vera Rubin 1960+



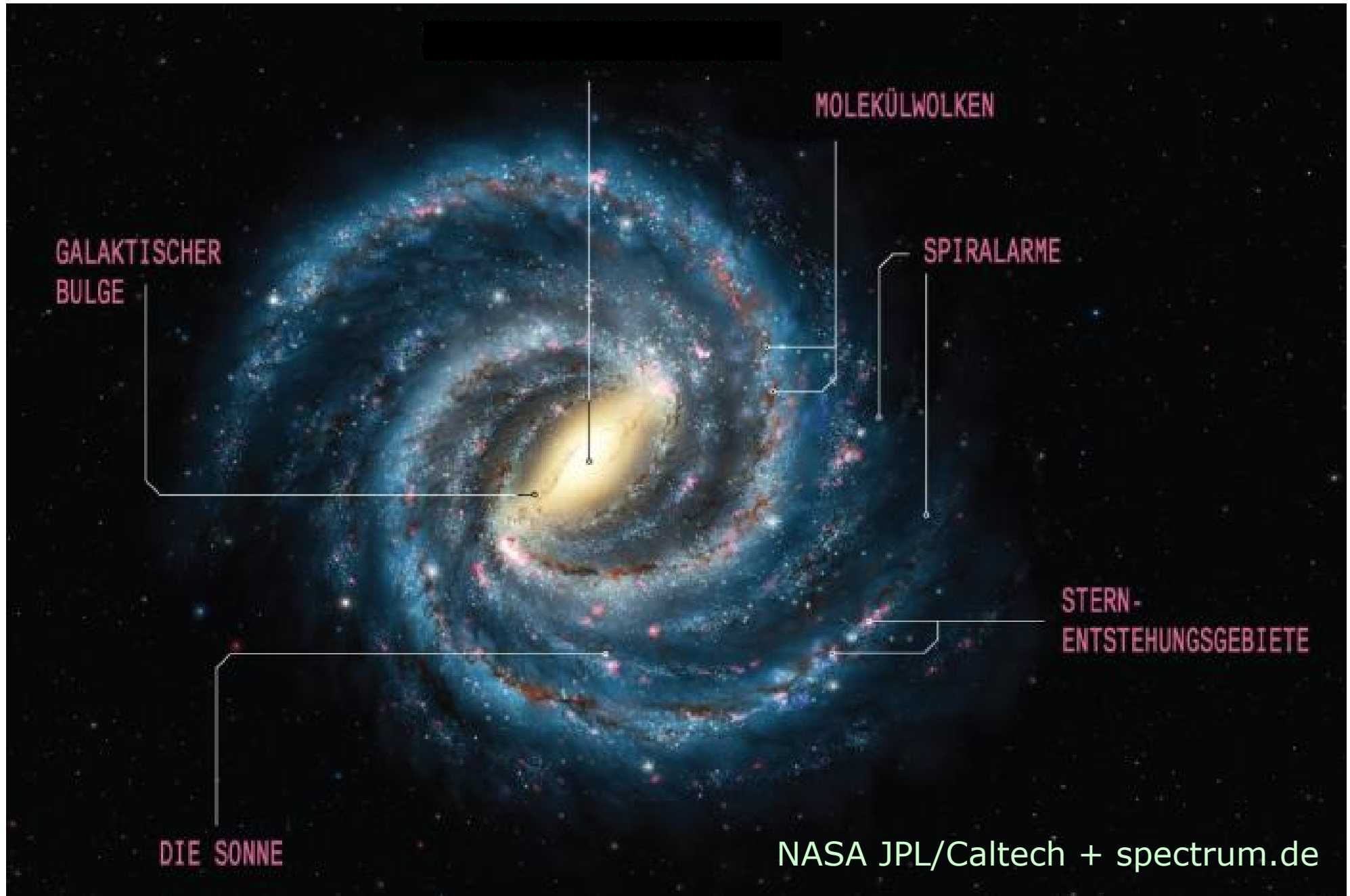
Rotationskurven: viele Galaxien





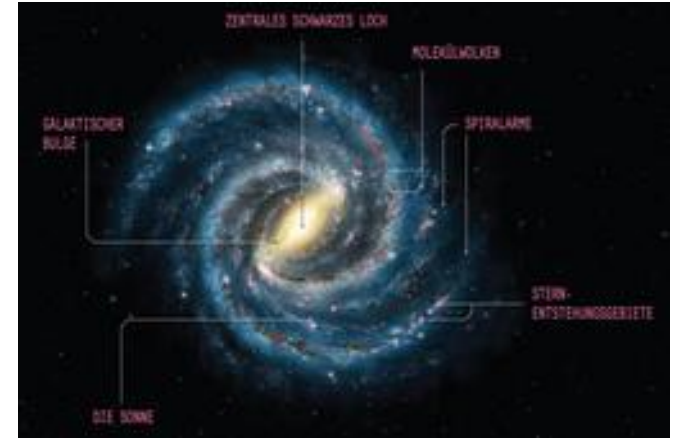
ESO/Beletsky

Milchstraße, Komponenten



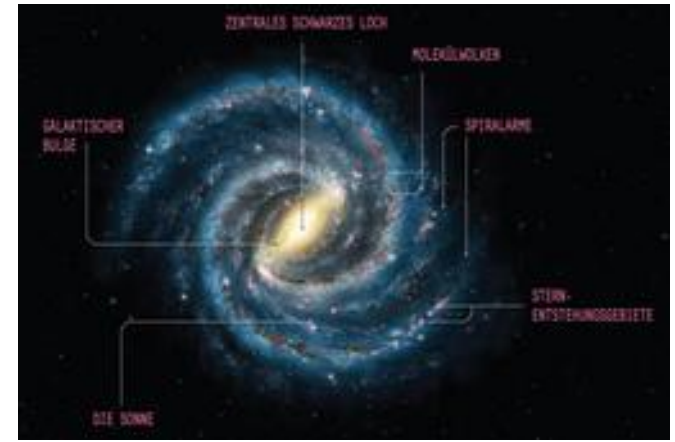
Stellare Scheibe:

- Sternentstehung
- "exponentielle Scheibe" + Spiralarme
- Drehimpuls, kleine Geschwindigkeitsdispersion → flach
- "dünne Scheibe": höhere Metallizität, hohe Masse
- "dicke Scheibe": niedrigere Metallizität, wenig Masse → evtl. kein Unterschied aber "Migration" nach außen

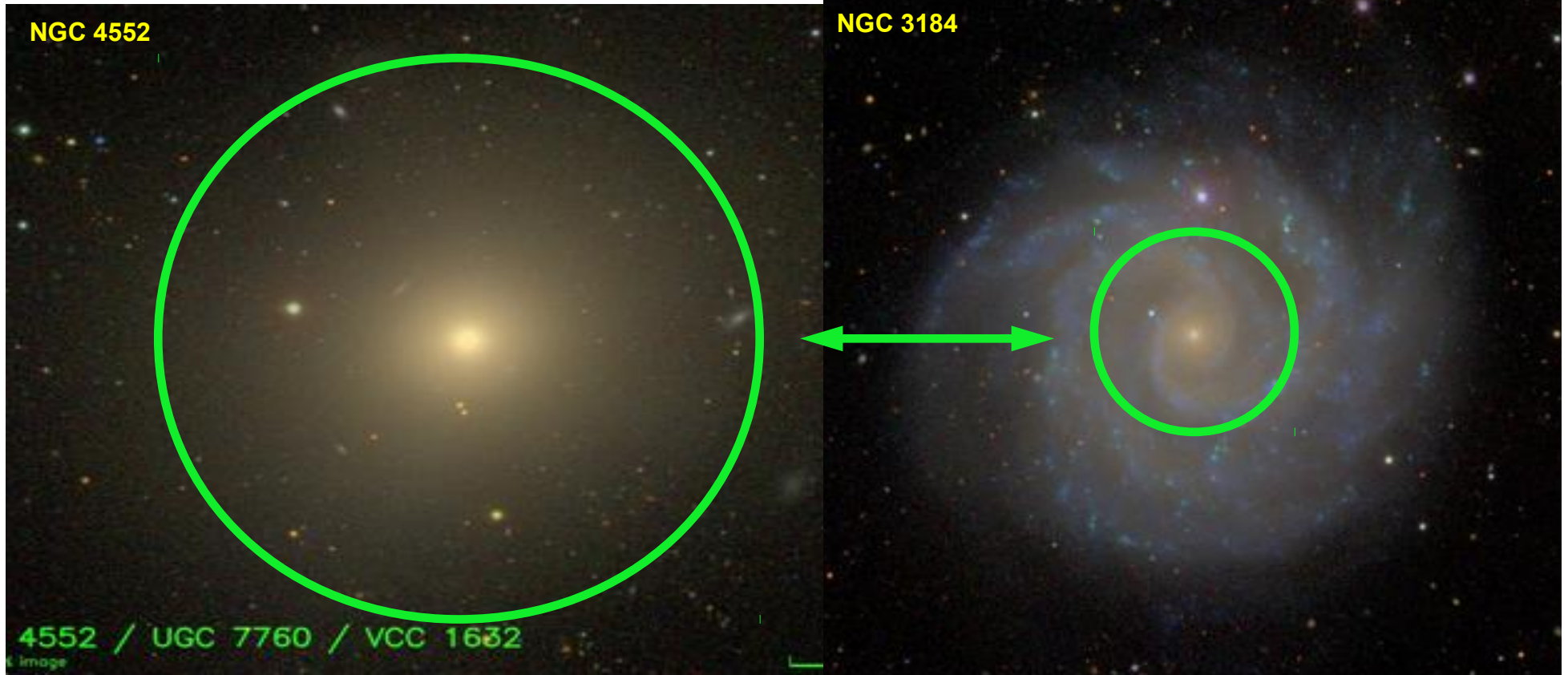


Stellarer *Bulge* ("Zentralverdickung"):

- ältere Sterne
- keine Sternentstehung
- wenig Drehimpuls, hohe Geschwindigkeitsdispersion → dicker
 - Sternentstehung = Scheibe
 - Bulge = umverteilte Scheibensterne



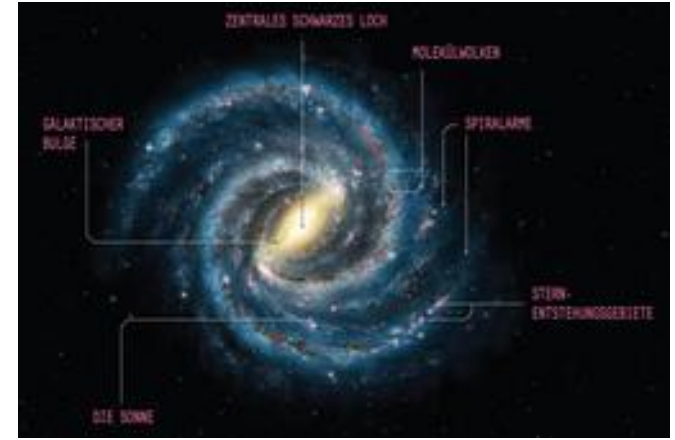
Bulge → Spheroid



Elliptische Galaxie

Stellarer Bulge
(Zentralverdickung)

Stellarer *Bulge* ("Zentralverdickung"):



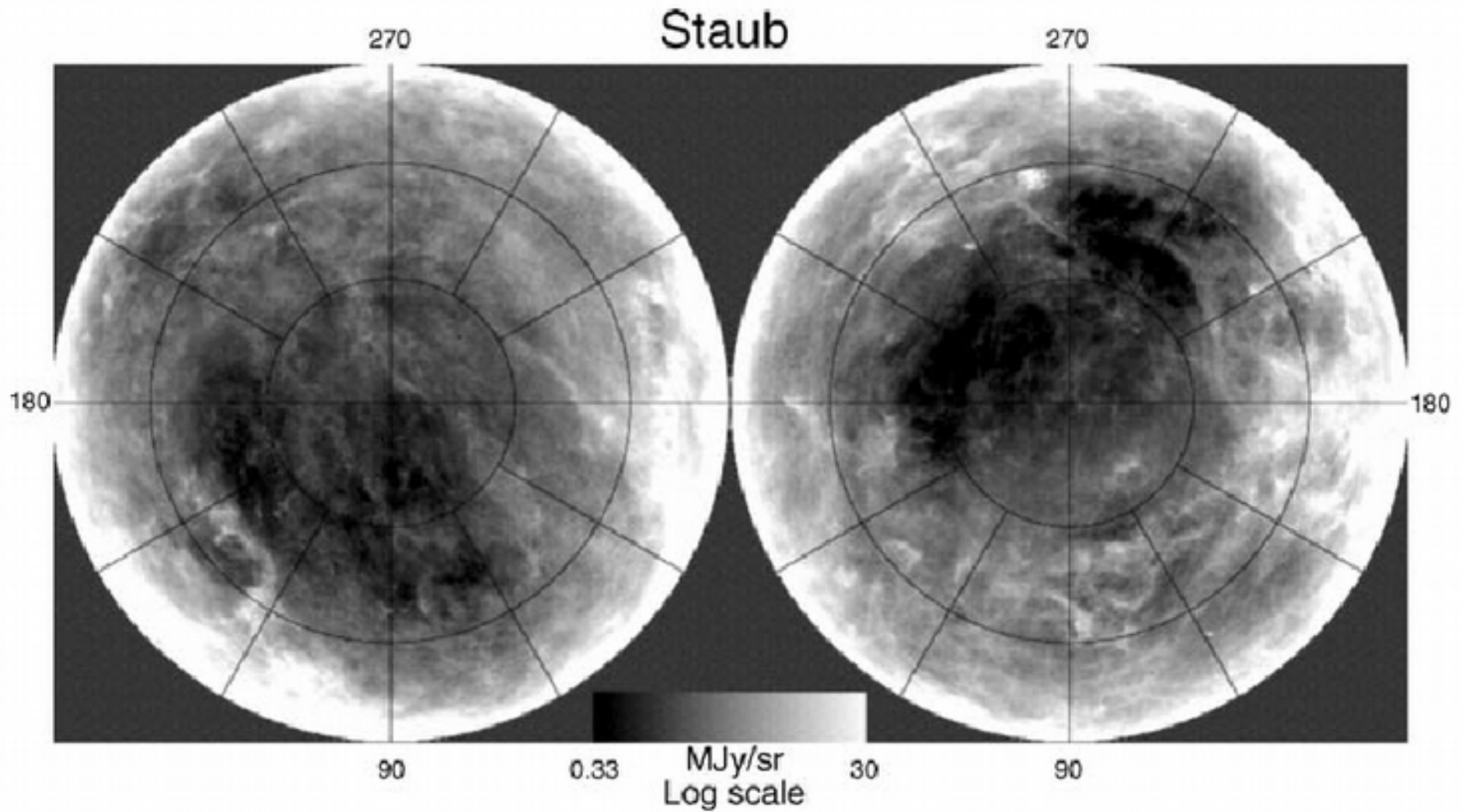
- ältere Sterne
- keine Sternentstehung
- wenig Drehimpuls, hohe Geschwindigkeitsdispersion → dicker
→ Sternentstehung = Scheibe
→ Bulge = umverteilte Scheibensterne

(neutrale) Gasscheibe:

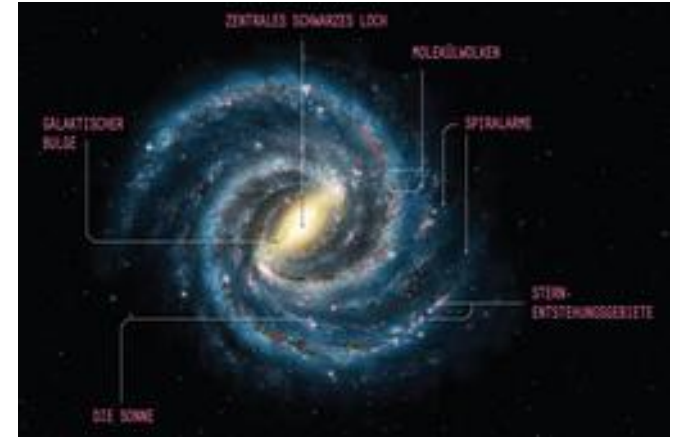
- Gas = Dissipation + Kühlung
→ Drehimpuls = Scheibe
- Quelle für neue Sterne



Milchstraße, Komponenten

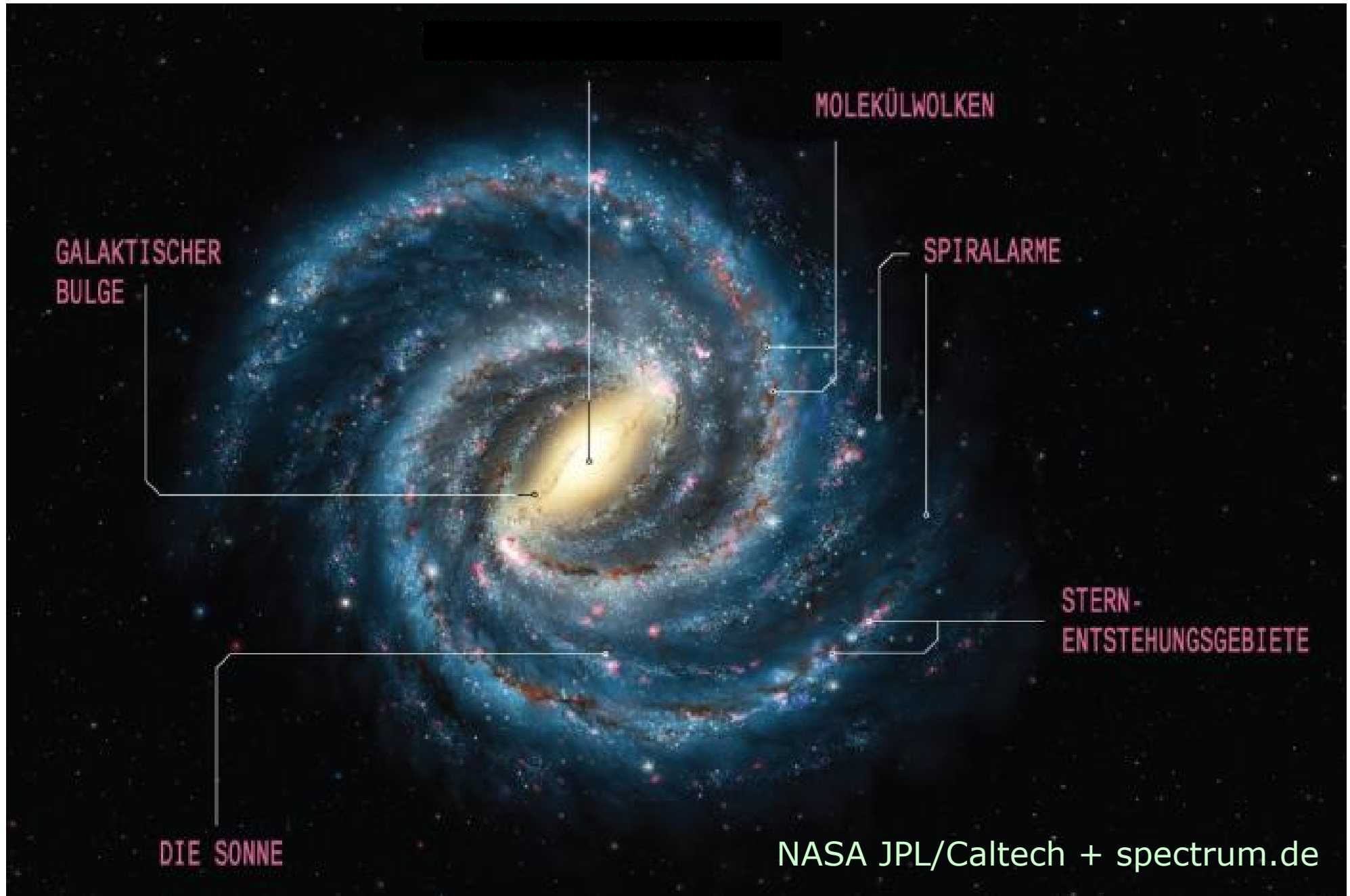


(neutrale) Gasscheibe:



- Gas = Dissipation + Kühlung
→ Drehimpuls = Scheibe
- Quelle für neue Sterne
+ Staub

Milchstraße, Komponenten



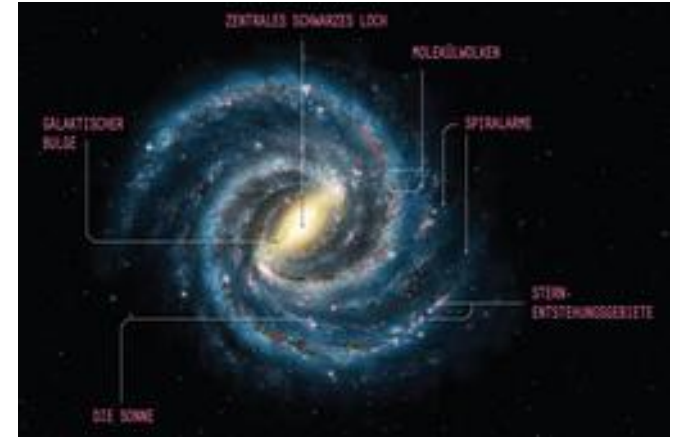
Dunkle-Materie-Halo:

- unbekannte Teilchen
- viel Masse
- nur gravitative Wechselwirkung



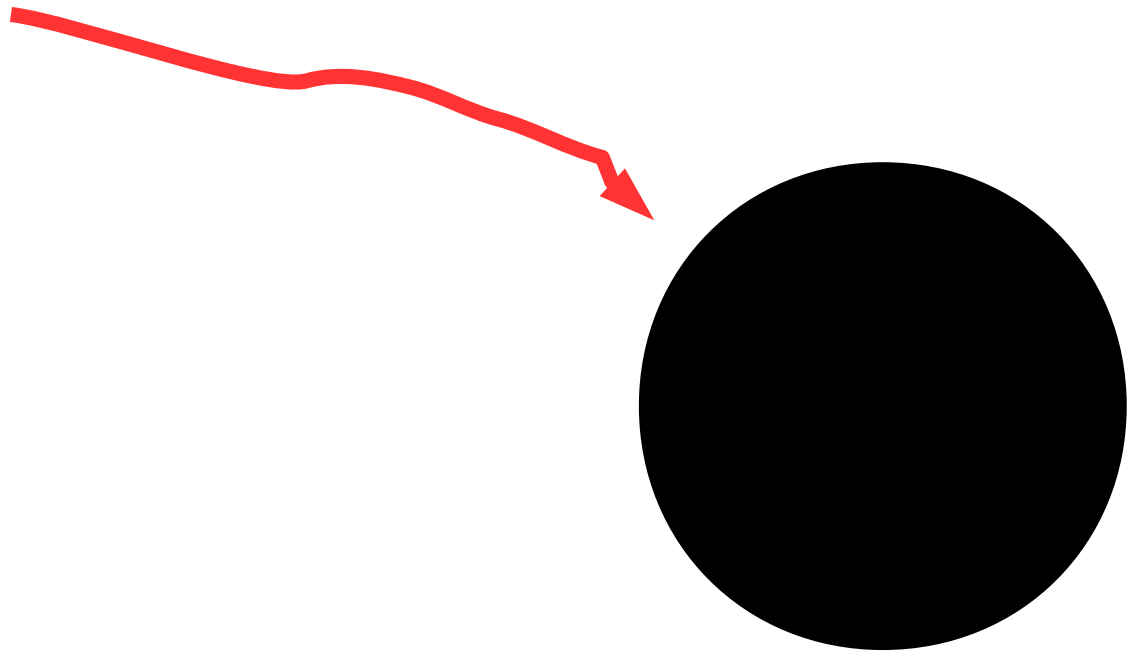
Stellarer Halo:

- alte, metallarme ("Pop II") Sterne
→ "Frühzeitlaboratorium"
- wenig Masse



Zentrales Schwarzes Loch:

$3.7 \times 10^6 M_{\text{Sonne}}$

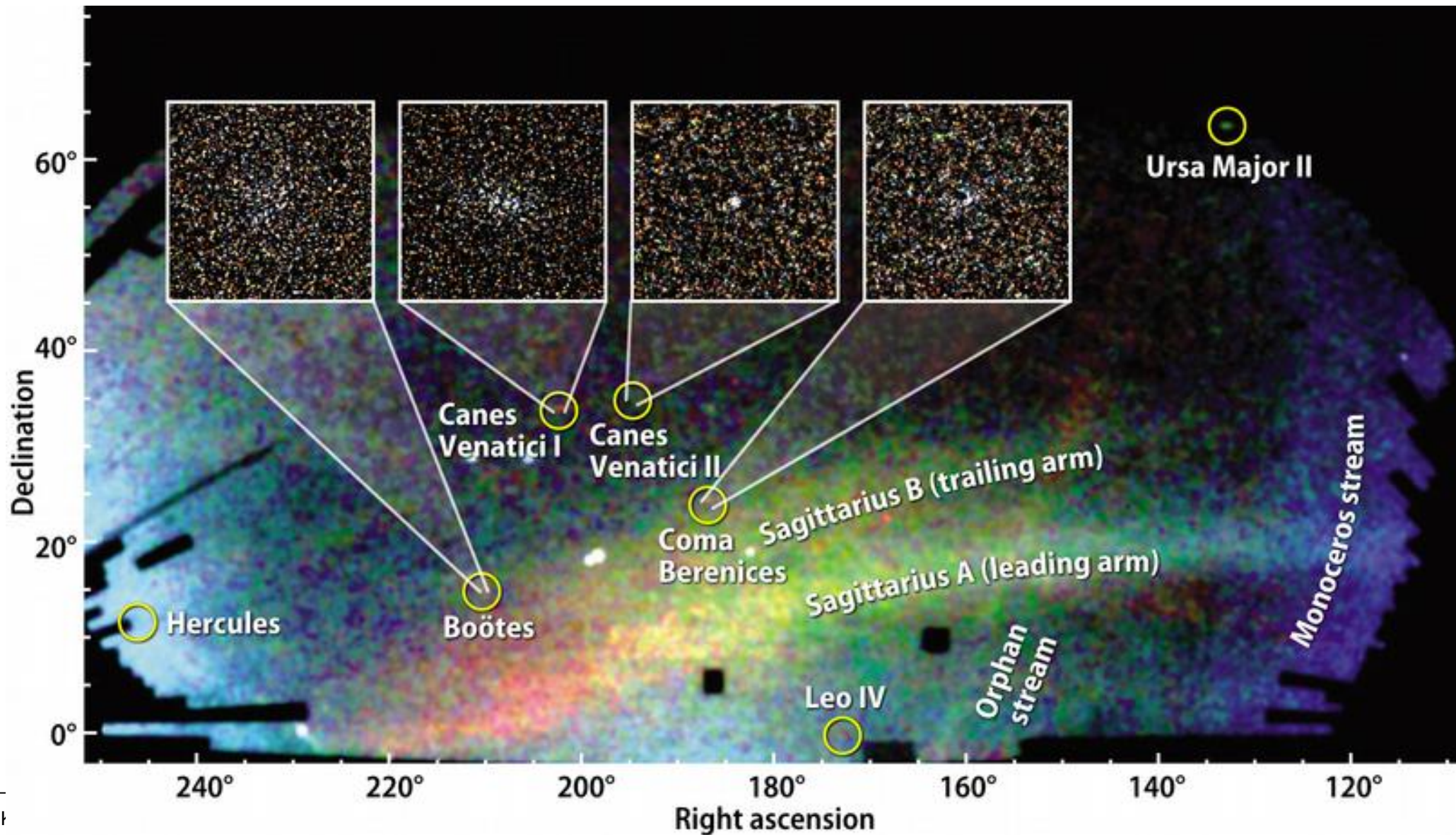


Milchstraße, Komponenten

	neutrales Gas	dünne Scheibe	dicke Scheibe	Bulge	stellarer Halo	DM Halo
M ($10^{10} M_{\odot}$)	0.5	6	0.2 bis 0.4	1	0.15	~ 100
L_B ($10^{10} L_{\odot}$)	-	1.8	0.02	0.3	0.1	0
M/L_B (M_{\odot}/L_{\odot})	-	3	-	3	~ 1	-
Durchm. (kpc)	50	50	50	2	100	> 200
Form	$e^{-h_z/z}$	$e^{-h_z/z}$	$e^{-h_z/z}$	Balken?	$r^{-3.5}$	$(a^2 + r^2)^{-1}$
Skalenhöhe (kpc)	0.13	0.325	1.5	0.4	3	2.8
σ_z (km s^{-1})	7	20	40	120	100	-
[Fe/H]	> 0.1	-0.5 bis +0.3	-1.6 bis -0.4	-1 bis +1	-4.5 bis -0.5	-

Milchstraße und Zwerggalaxien

MW Zwerggalaxien

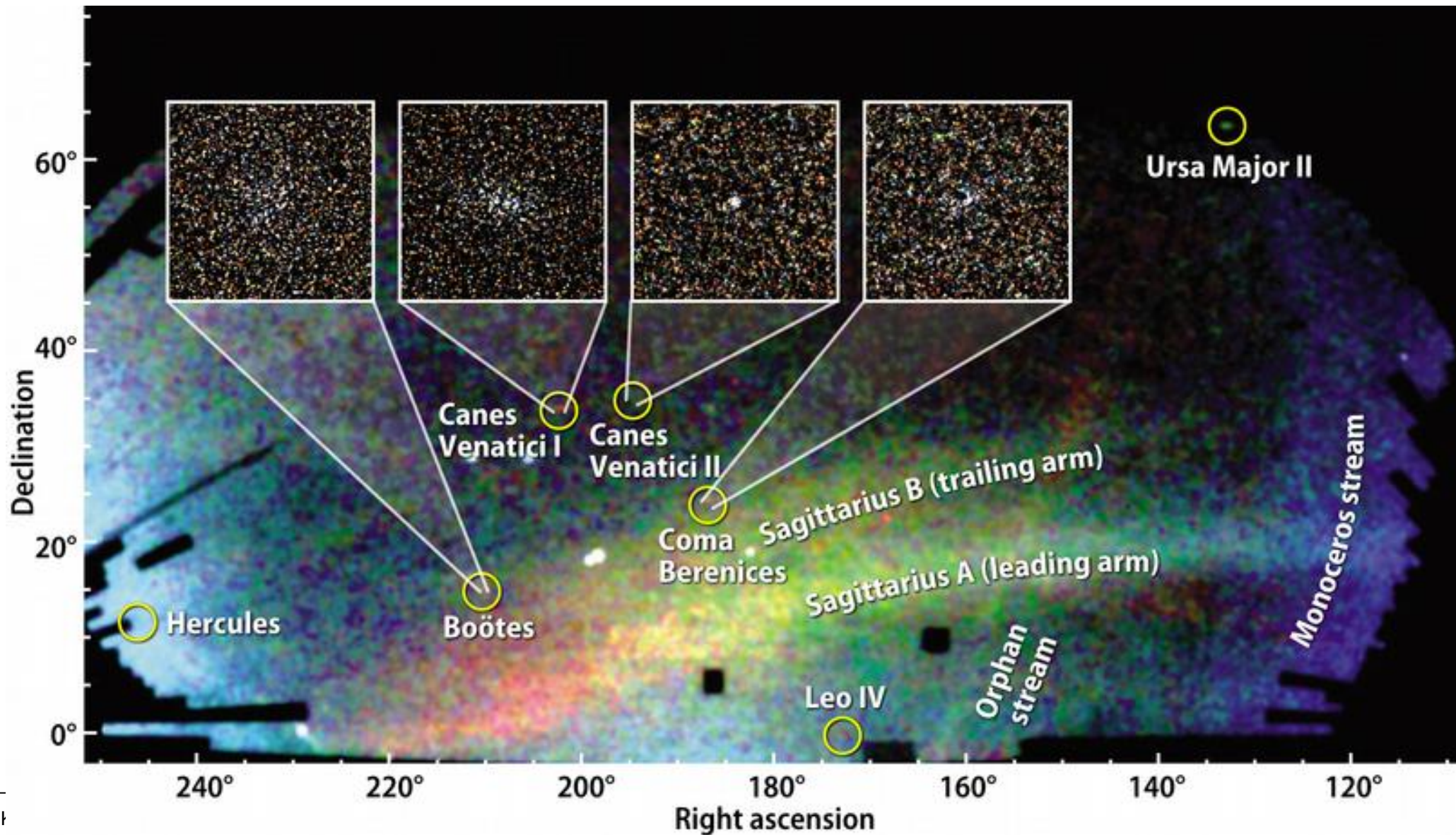


Galaxienzusammenstöße



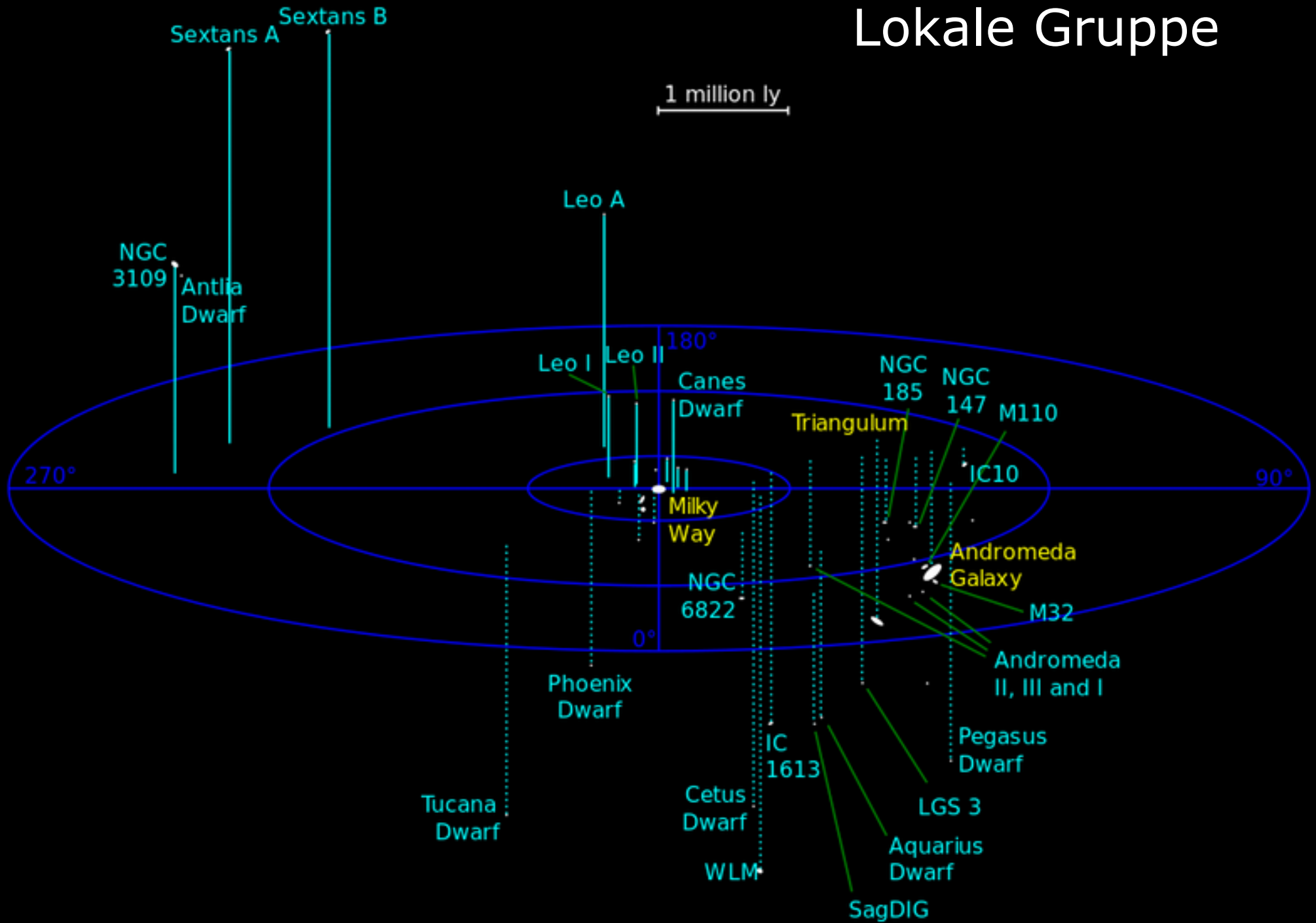
Milchstraße und Zwerggalaxien

MW Zwerggalaxien



- 3x massereiche Spiralgalaxien: Andromeda (M31), Milchstraße, Triangulum (M32)
- 1x elliptische: M32
- 12x irreguläre
- 5x Zwerg-Ellipsen
- ~24x Zwerg-Spheroidale
- ~5x andere
- zahlreiche Zwerggalaxien seit 2000 entdeckt

Lokale Gruppe



Sterne in Galaxien

- Stellare Massen:
 - MW: $8 \times 10^{10} M_{\text{sonne}}$ (Scheibe 6×10^{10} , Bulge 1×10^{10})
 - MW Halo $5.5 \times 10^{11} M_{\text{sonne}}$
 - Andromeda: etwas massereicher
 - Giant Elliptical (M87): $10^{12} M_{\text{sonne}}$
 - Zwerggalaxie: $10^7 - 10^8 M_{\text{sonne}}$
 - MW Zwerggalaxien: $< 10^7 M_{\text{sonne}}$
- → alles „Galaxien“, über 6 Größenordnungen in Masse

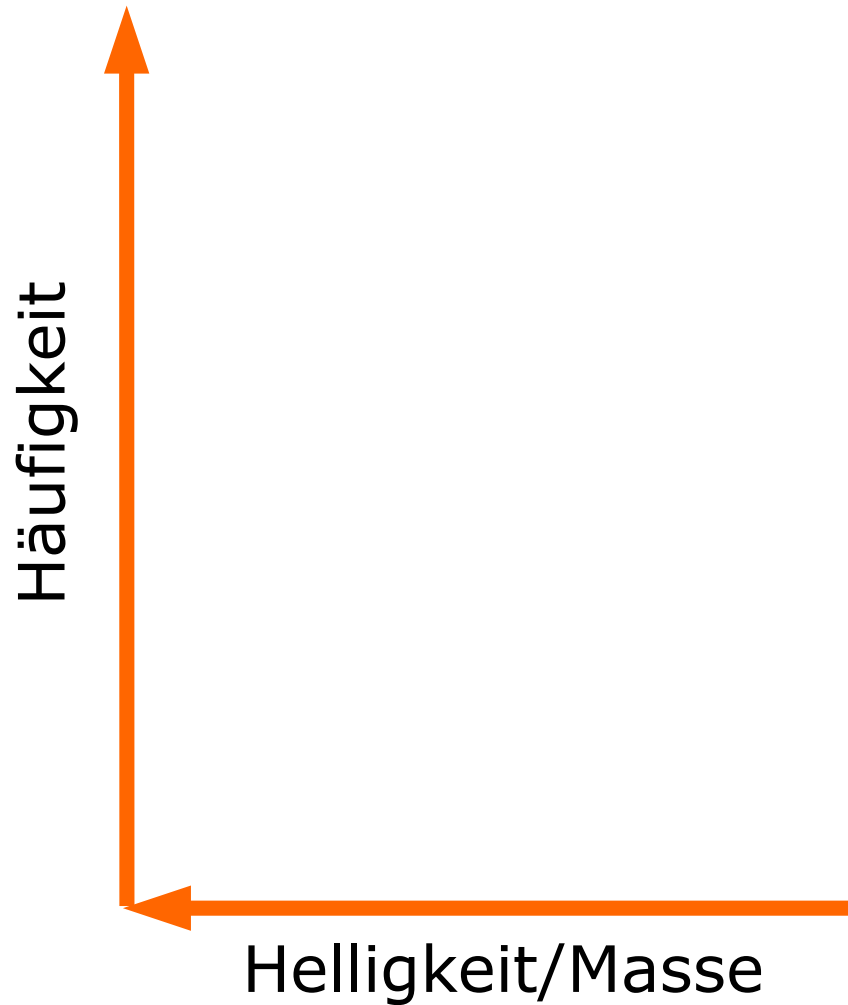
- 3x massereiche Spiralgalaxien: Andromeda (M31), Milchstraße, Triangulum (M32)
- 1x elliptische: M32
- 12x irreguläre
- 5x Zwerg-Ellipsen
- ~24x Zwerg-Spheroidale
- ~5x andere
- zahlreiche Zwerggalaxien seit 2000 entdeckt

Gruppen, Haufen

- “Umgebung” von Galaxien: Maß für Anzahl-Dichte
- Gruppe = wenige ($\sim 1-10$) Galaxien
- Haufen: Abell-Maß
 - “Anzahl Galaxien mit Helligkeit m_3 bis $m_3+2\text{mag}$ ” mit m_3 = Helligkeit der dritthellsten

Richness class R	N	Anzahl in Abells Katalog
(0)	(30–49)	(≥ 1000)
1	50–79	1224
2	80–129	383
3	130–199	68
4	200–299	6
5	≥ 300	1

Galaxien in Feld und Haufen



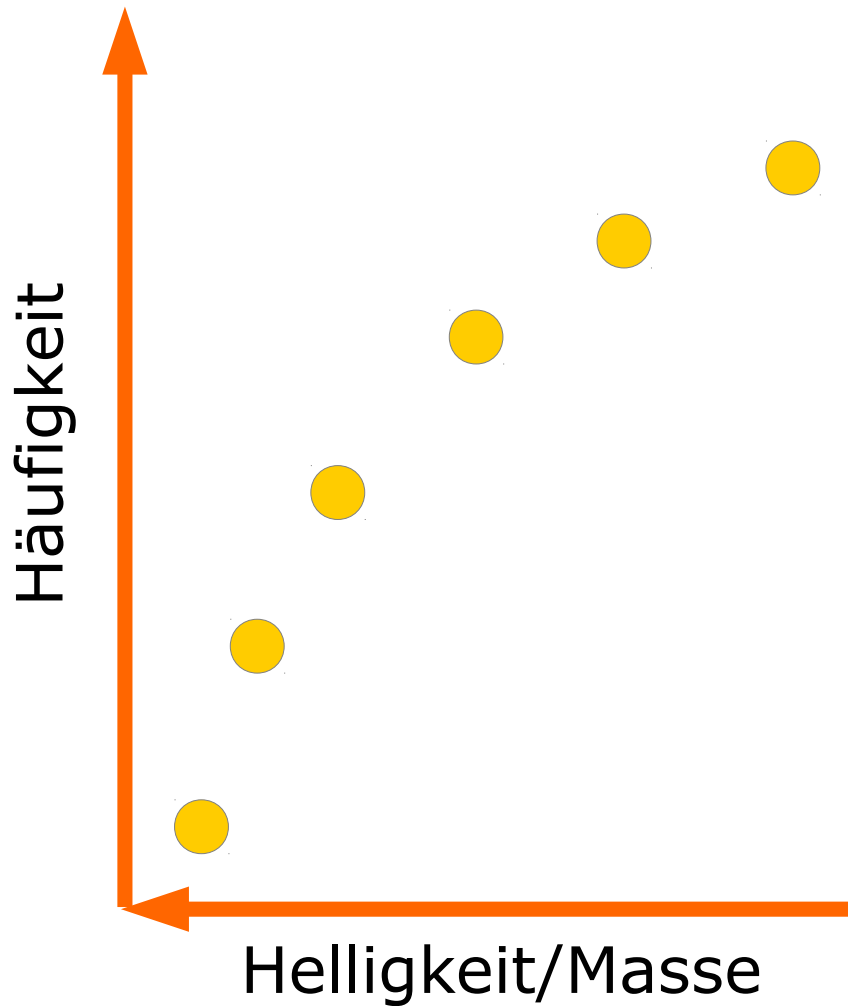
“Leuchtkraftfunktion”

“Massenfunktion”

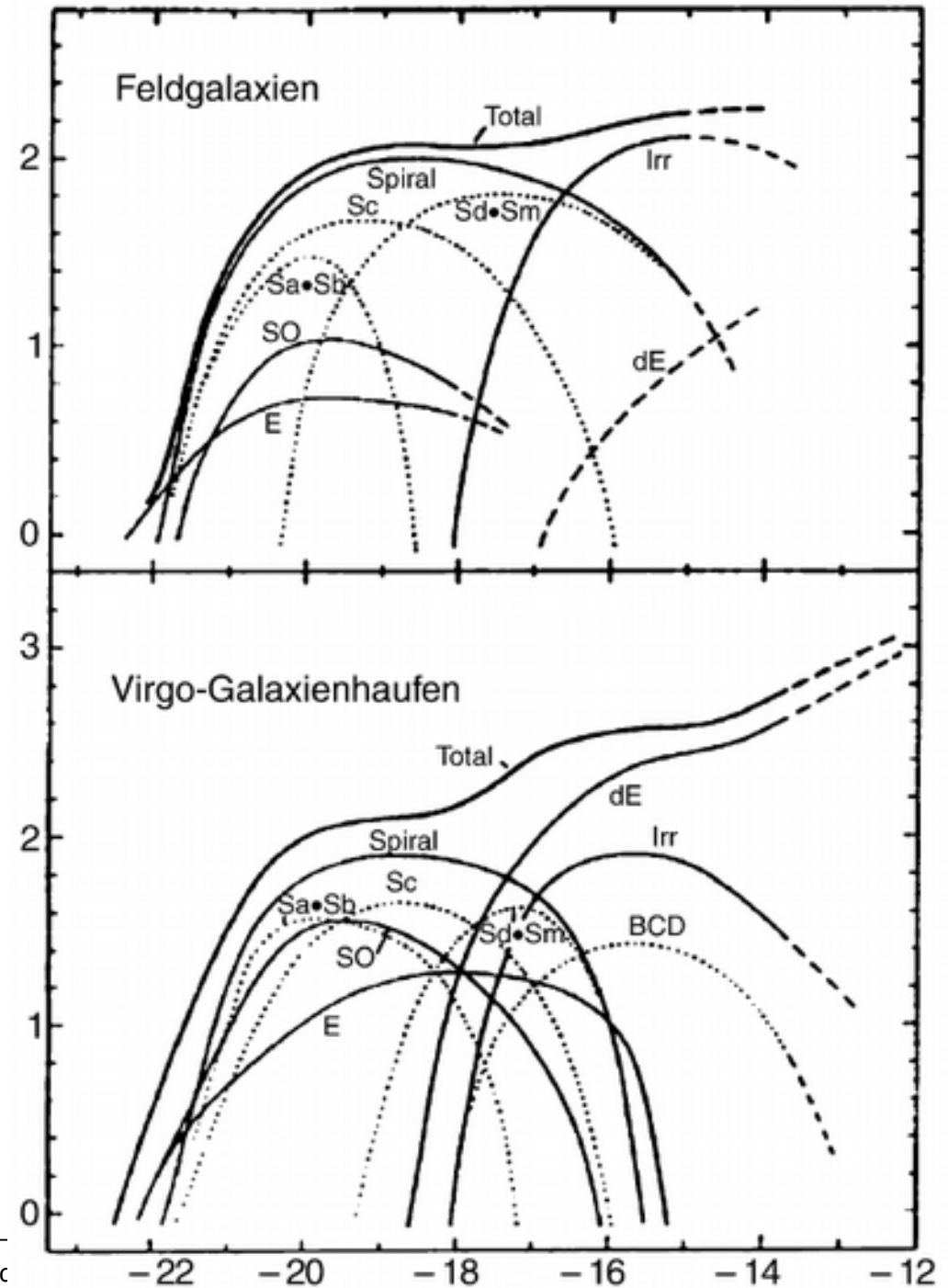
Galaxienzusammenstöße

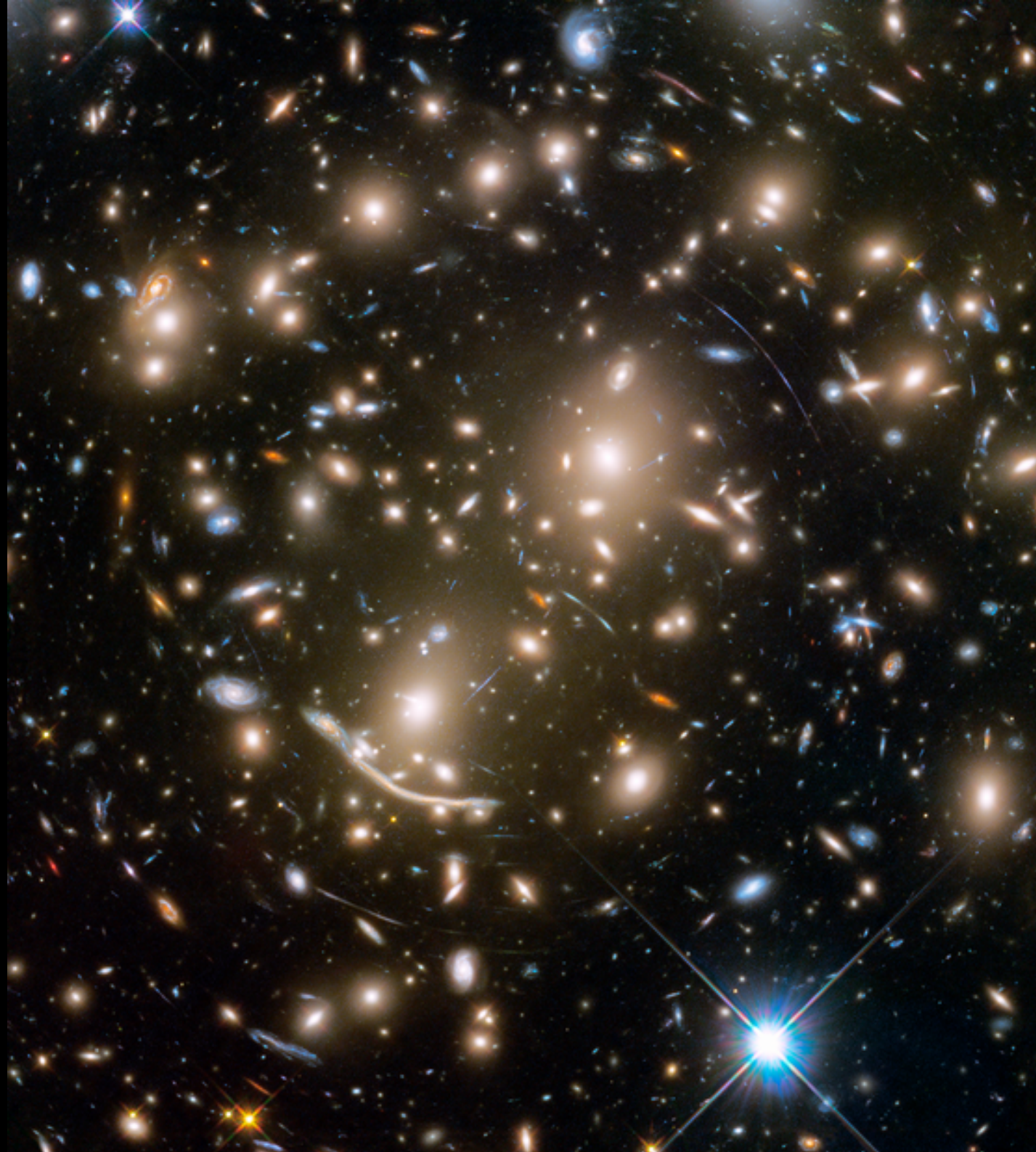


Galaxien in Feld und Haufen



“Leuchtkraftfunktion”
“Massenfunktion”





NASA/ESA HST
Frontier Field Abell 370



NASA/ESA HST
Frontier Field
Abell S1063

Zusammenfassung

- Galaxien sind gravitativ zusammengehaltene Systeme von 10^5 - 10^{12} Sternen, in DM Halos
- Es gibt verschiedene Typen von G., je nach Drehimpuls und Entstehungsgeschichte
- Die Milchstraße ist eine Spiralgalaxie und hat verschiedene Komponenten aus Sternen, Gas und Dunkler Materie
- Die Milchstraße ist Teil der lokalen Gruppe von Galaxien, inklusive der Andromedagalaxie
- Es gibt Feldgalaxien, aber auch Galaxien-Gruppen und -Haufen