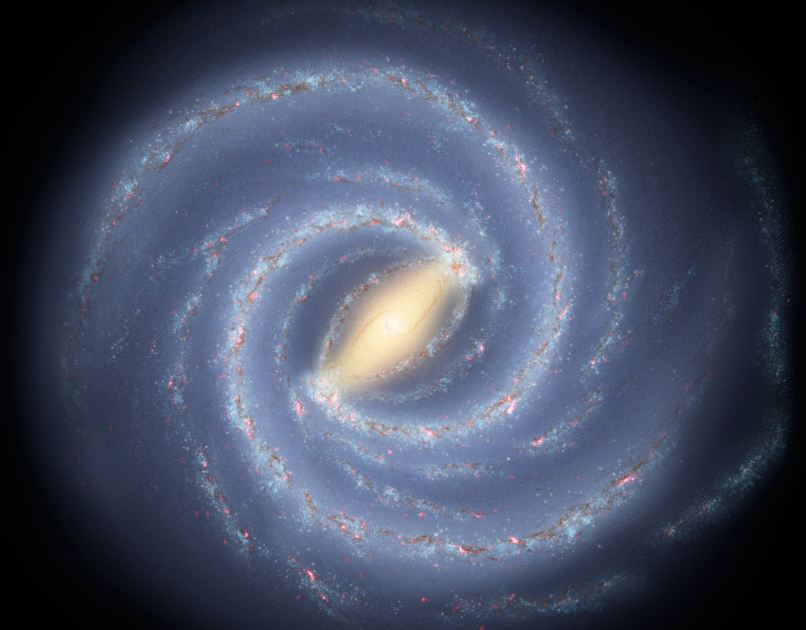


Die Milchstraße

- I. Geschichte der "Erkennung" der Milchstraße
- II. Aufbau unserer Milchstraße
- III. Die Rotationskurve
- IV. Die Spiralstruktur
- V. Galaktisches Zentrum
- VI. Entstehung der Milchstraße



Die Milchstraße - unsere Galaxis



M i l k y W a y G a l a x y

Bezeichnung:

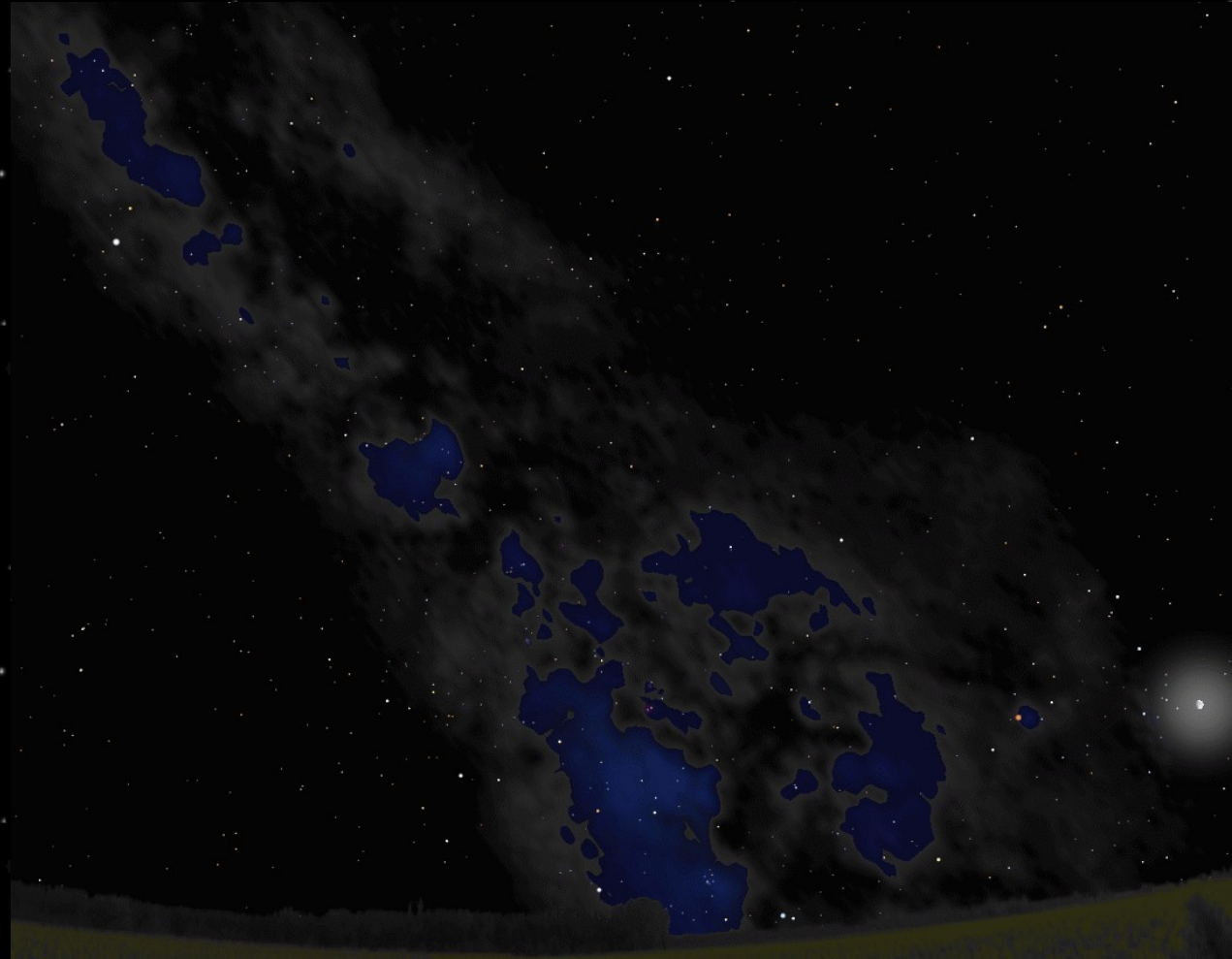
Allgemein: Galaxie / Sternensystem (engl. galaxy)

Unsere Galaxie: Galaxis / Milchstraße (engl. Galaxy)

Die Milchstraße: Unsere Galaxis im Optischen

Erscheinung:

- milchiges Band
- keine Auflösung in Einzelsterne mit dem bloßen Auge



Geschichte der "Entdeckung" der Milchstraße

Galileo (1610): Das Band der Milchstraße aufgelöst in Sterne

Immanuel Kant (1755): Gravitationskräfte auch verantwortlich für
Bildung der Milchstraße

∃ Weitere Galaxien - "island universes"

Charles Messier (~1790): 109 helle Nebel, z.B. M31= Andromeda Nebel

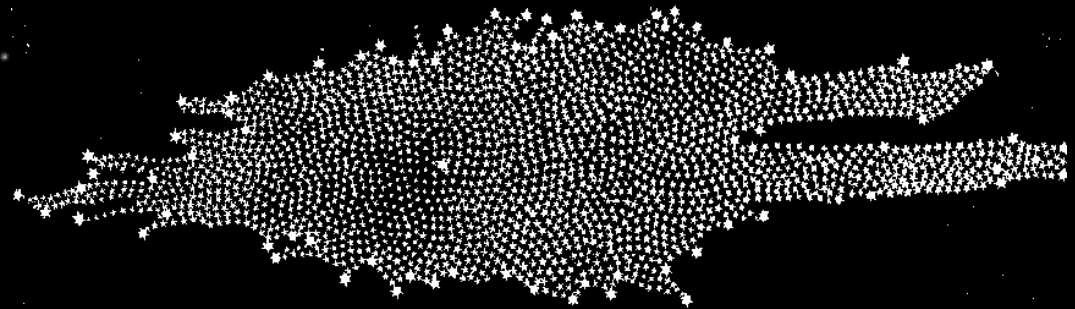
William & Caroline Herschel (1785): 5000 Nebel:

Gasnebel / Unaufgelöste Sternhaufen

William Parsons (1845): 72''-Teleskop: Spiralstruktur externer Nebel

**Morphologie der Milchstraße
aus Sternzählungen
(Herschel 1785)**

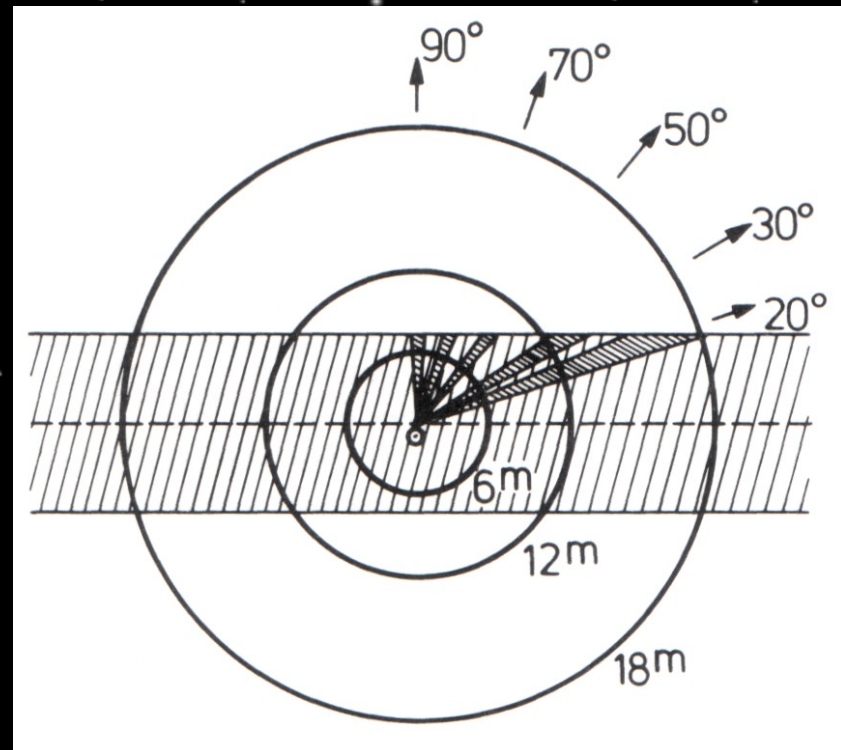
**Sonne im Zentrum der
Sternverteilung.**



Bestimmung der Struktur der Milchstraße

Sternzählungen: Bei gleichförmiger Verteilung der Sterne und fehlender Extinktion, ist die beobachtete Anzahldicke der Sterne ein Maß für die Ausdehnung

Es war schnell klar, dass die Milchstraße eine Scheibenstruktur aufweist.

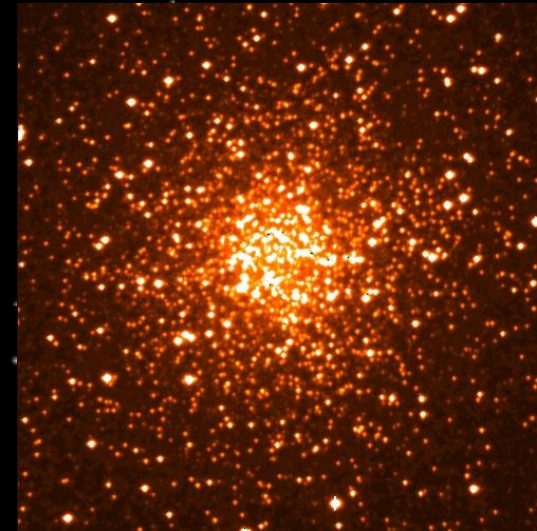
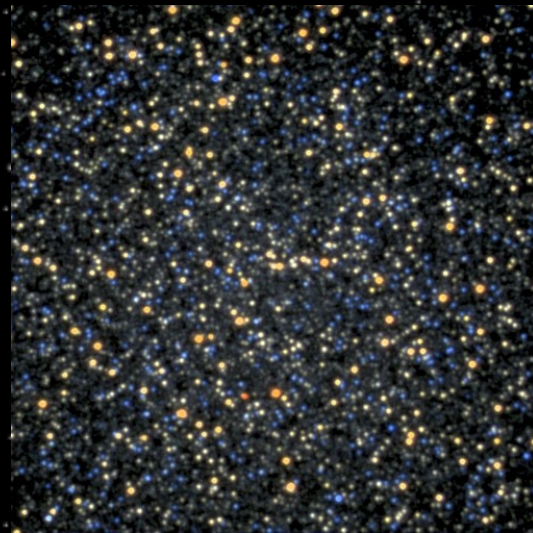


Bestimmung der Struktur der Milchstraße

Sternhaufen: Statistik dominiert durch Sternhaufen.

2 Typen:

- Kugelsternhaufen
- Offene Sternhaufen



47 Tucanée

Kugelsternhaufen (globular clusters)

150 bekannt in der Milchstraße

10.000 - 1.000.000 Sterne gravitativ gebunden, $d = 3\text{-}70\text{pc}$

Geschichte:

10 Sterne/ pc^3

1665: M22

1677: Omega Centauri

M5, M13, M71, M4, M15, M2

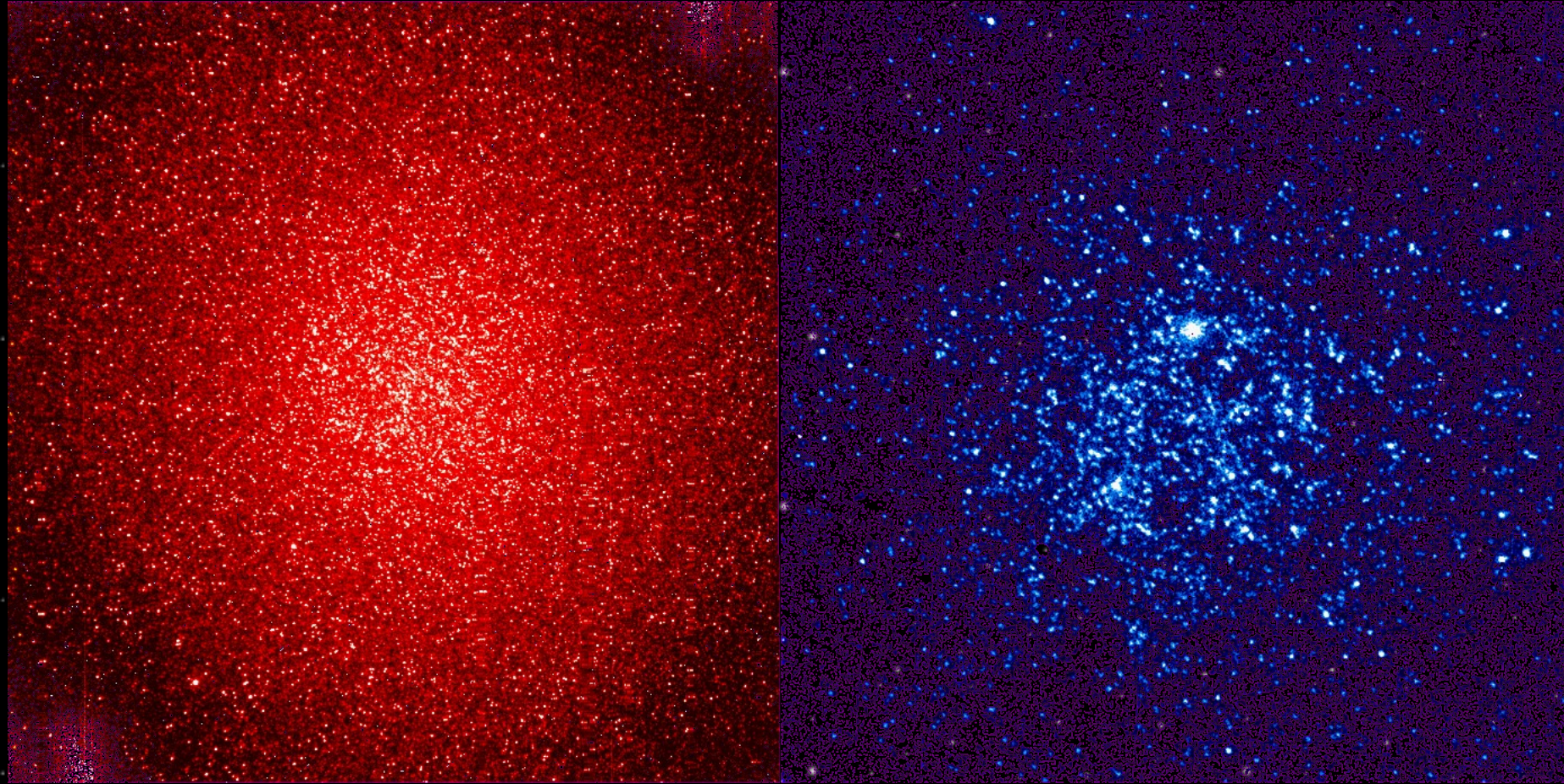
Bis 1782: 33 Kugelsternhaufen.

1782: Herschel beginnt
systematische Suche: 37 weitere
Kugelsternhaufen.



M3

OMEGA CENTAURI



VIS

UV



150 Lj



Omega Centauri:

10 Millionen Sterne

Hellster galaktischer Kugelsternhaufen

Sternkollisionen

Sternendichte in
Kugelsternhaufen so
groß, dass Kollisionen
vorkommen

-> blue stragglers

("Aufgefrischte" alte
massereiche Sterne)

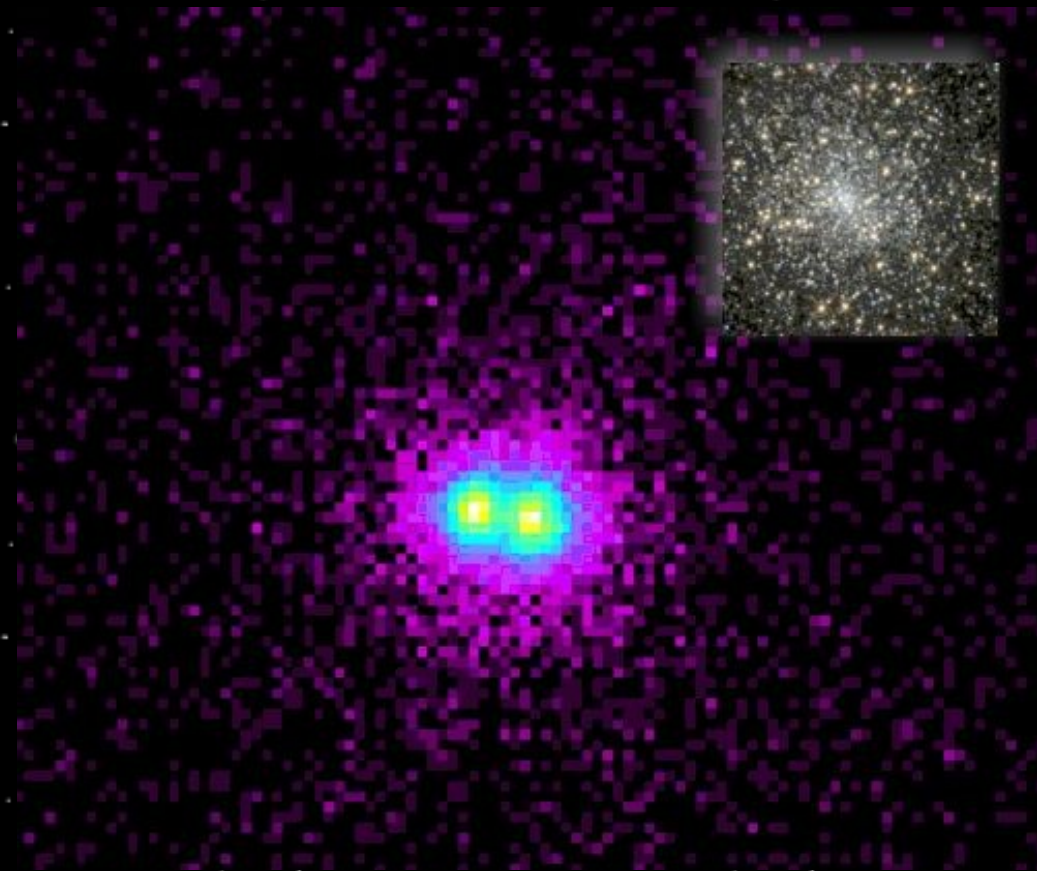
Globular Cluster NGC 6093



NGC 6093

Hubble
Heritage

M 15: 2 Neutronen-Stern Binärsysteme



CHANDRA Satellit: Röntgensterne im Kern des
Kugelsternhaufen M15

Offene Sternhaufen

Gemeinsame Entstehung aber nicht gravitativ gebunden



~ 1200

Hyaden

Pleiaden



NGC 2266

A deep-field astronomical image of the star cluster NGC 2266. The image shows a dense field of stars of various colors (yellow, blue, red) against a black background. The stars are concentrated in a central region, with a few brighter stars standing out. The overall appearance is that of a rich, open star cluster.

3kpc Entfernung in Gemini

Die Shapley - Curtis Debatte

The Great Debate 1920

„National Academy of Sciences“, Washington D.C.

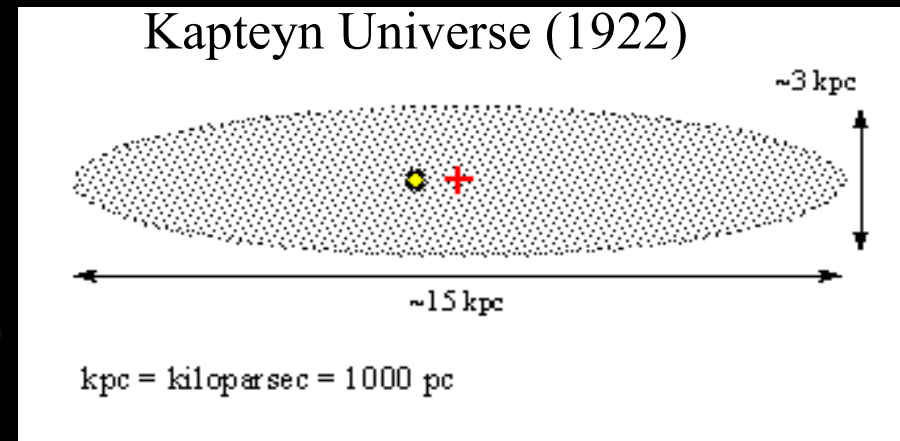
- Wie groß ist die Milchstraße?
- Wie groß ist das Universum?
- Gibt es ein Universum jenseits der Milchstraße?
 - Liegen die Spiralnebel in der Milchstraße?
 - Bestehen die Spiralnebel aus Gas oder aus Sternen?

Heber Curtis (Lick Observatory)

Verfechter der "radikalen Inseltheorie"

Ausgangspunkt: Das "Kapteyn Universum":

- Die Milchstraße hat einen **Durchmesser von ~15 kpc**.
(Kapteyn benutzte die Eigenbewegung und die Dopplerbewegung, um Entfernungen abzuschätzen.)
- Die **Sonne ist fast im Zentrum der Milchstraße** – ein heliozentrisches Bild.
(Da nicht die extreme Verrötung beobachtet wird, die Rayleighstreuung an Gasatomen verursacht folgte Kapteyn, dass **Extinktion keine Rolle spielt** !
Interstellarer Staub war unbekannt.)



Heber Curtis (Lick Observatory)

Spiralgalaxien sind extragalaktisch:

- Die Nova von 1885 in Andromeda ergibt eine Entfernung von ~ 100 kpc, damit ist der Nebel extragalaktisch. (Aber: Verwechslung der Supernova in M31 mit galaktischen Novae)
- Spiralgalaxien von der Seite gesehen weisen dunkle Bänder auf, die auch die Milchstraße zeigt.



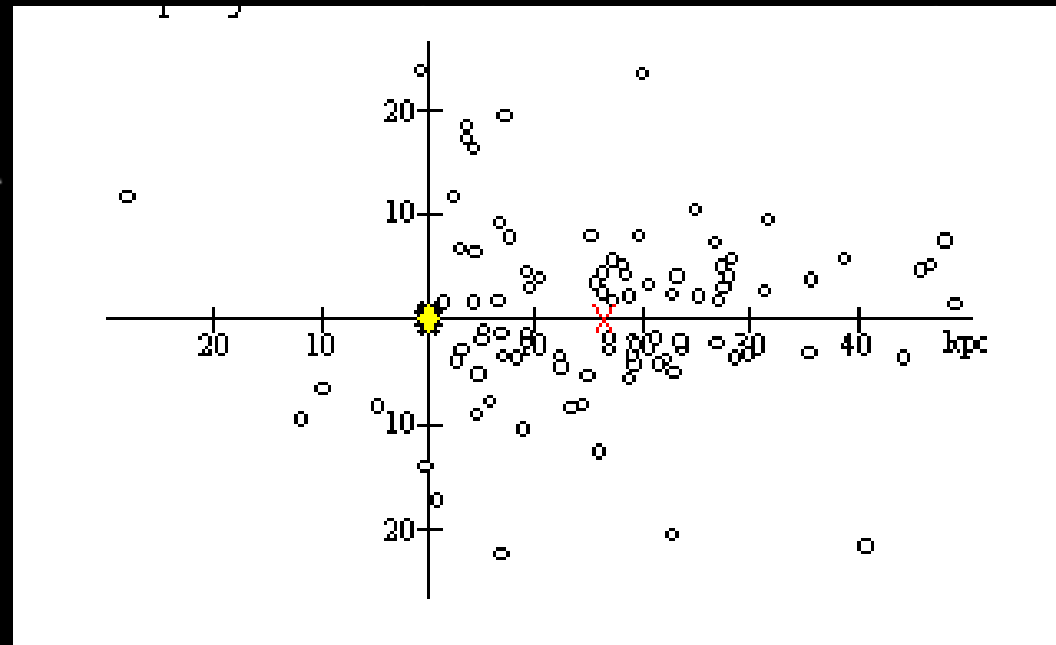
- Die Spektren von Spiralnebeln sehen dem Summenspektrum der Sterne in der Milchstrasse ähnlich.
- Spiralnebel haben viel größere Radialgeschwindigkeiten als Sterne in der Milchstrasse. Also sind Spiralnebel extra-galaktisch.
- Spiralnebel haben stark unterschiedliche Winkeldurchmesser (>2 Grad bis Sub-Bogensekunden) und daher Entfernungen.

Harlow Shapley (Harvard)

Verfechter der **konventionellen Nebel-Hypothese**

Die Milchstraße füllt das Universum!

- Die Milchstraße hat einen Durchmesser von 100 kpc (Cepheiden-Messungen).
- Verteilung von Kugelsternhaufen aus ihrem Winkeldurchmesser und durch die RR Lyrae Sterne deutet auf sehr starke interstellare Absorption hin!
- Die **Sonne sitzt am Rand der Verteilung** von Kugelsternhaufen in 15 kpc Entfernung, nicht im Zentrum der Galaxis!

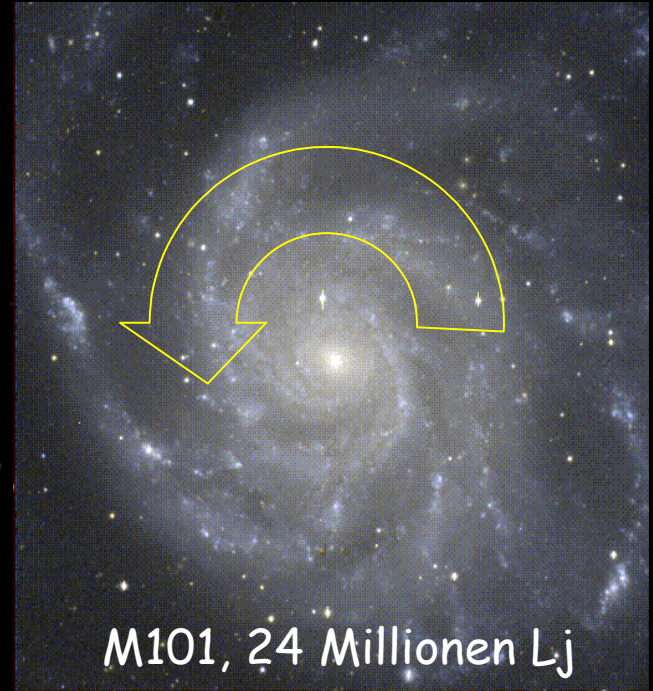


Harlow Shapley (Harvard)

- Die „Nova“ (korrekt Supernova) im Andromeda Nebel M31 von 1885 liefert eine Entfernung von 10 kpc (korrekt ist 1Mpc), also ist der Nebel *in* unserer Milchstraße.
- Die Rotationsperiode von M101 (van Maanen) wäre größer als c , falls M101 extragalaktisch ($R > 5\text{kpc}$) wäre. (van Maanen's Analyse basierte auf fehlerhaften Messdaten!!)



M31, 2.25 Millionen Lj,
784kpc



M101, 24 Millionen Lj

Edwin Hubble

Hubble beendet 1923 die Debatte:

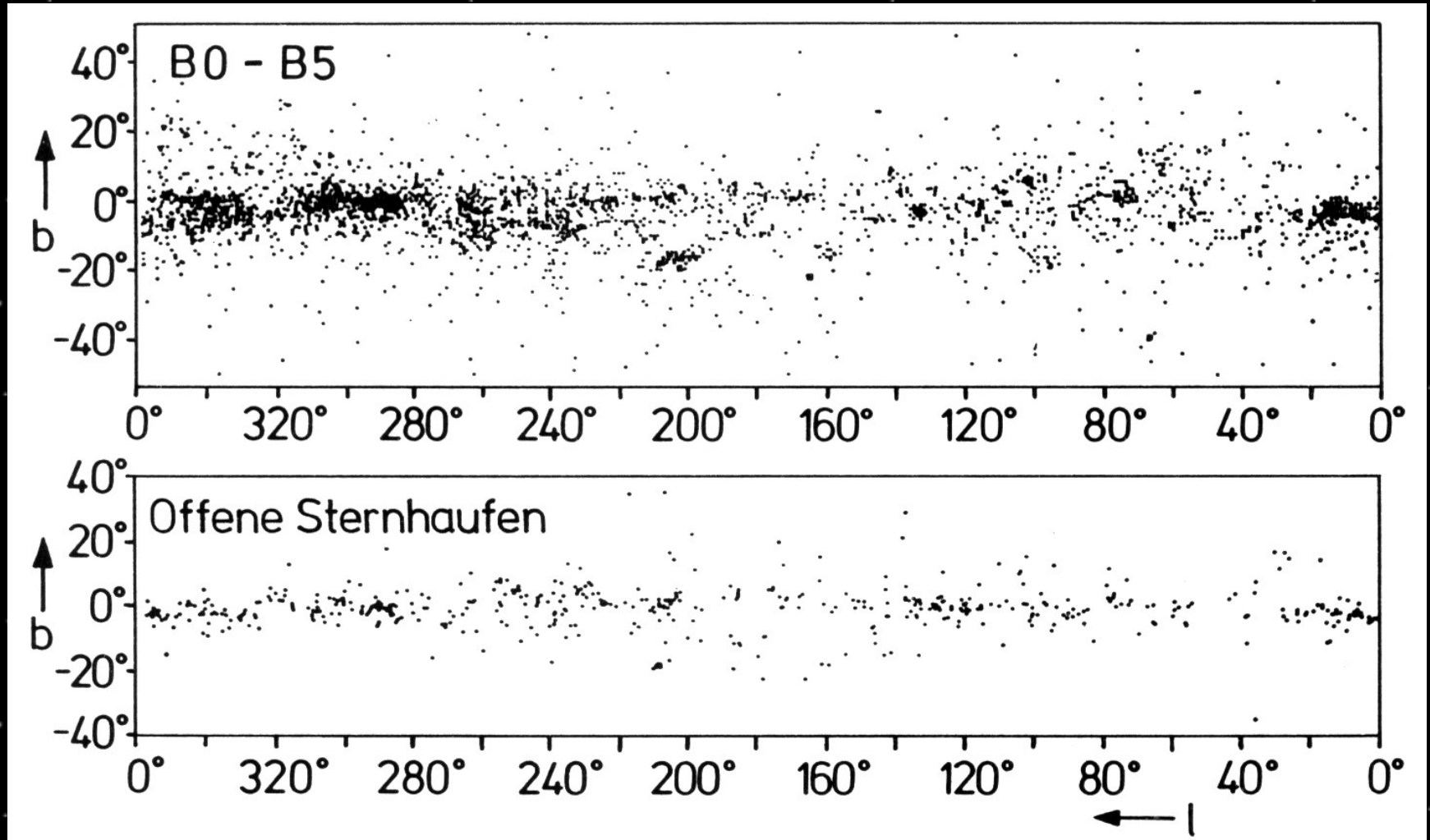
- Mit dem Mt. Wilson 100'' Teleskop fand er Cepheiden in Andromeda. Aus der Perioden-Leuchtkraft Beziehung ergaben sich 300 kpc. Also ist M31 eine externe Spiralgalaxie !
- Bis 1925 fand Hubble 10 Cepheiden und ermittelte eine mittlere Entfernung von ~ 1 Mpc.

Das Universum wurde plötzlich viel größer !



Bestimmung der Struktur der Milchstraße

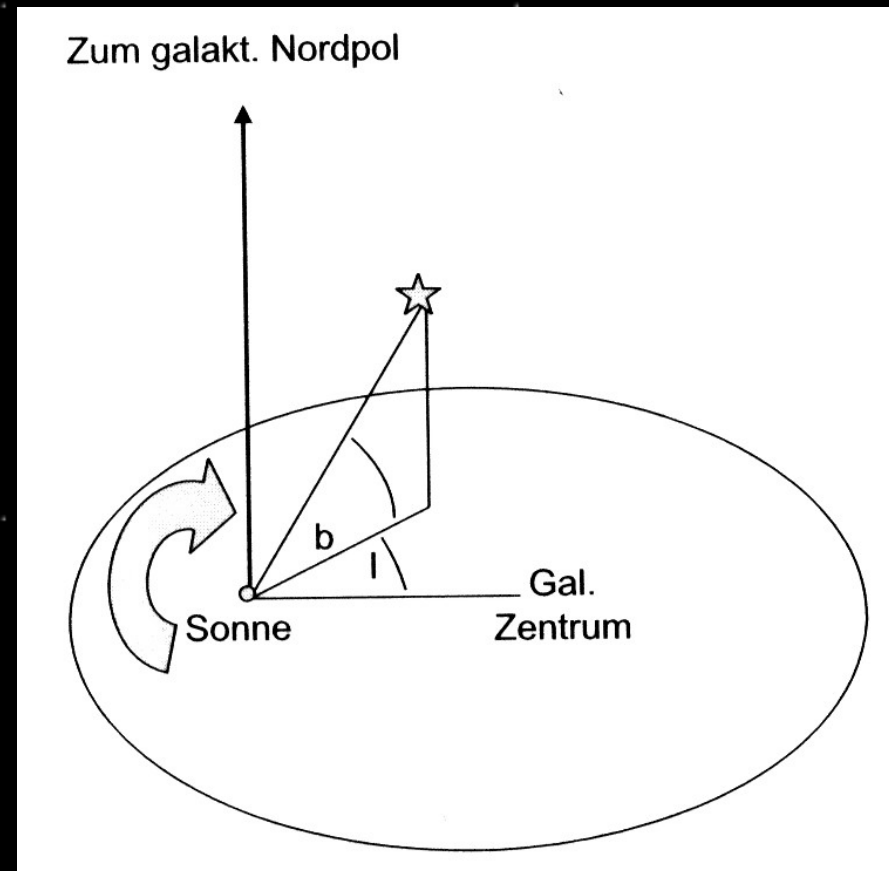
Unterschiedliche Verteilungen der Sterne



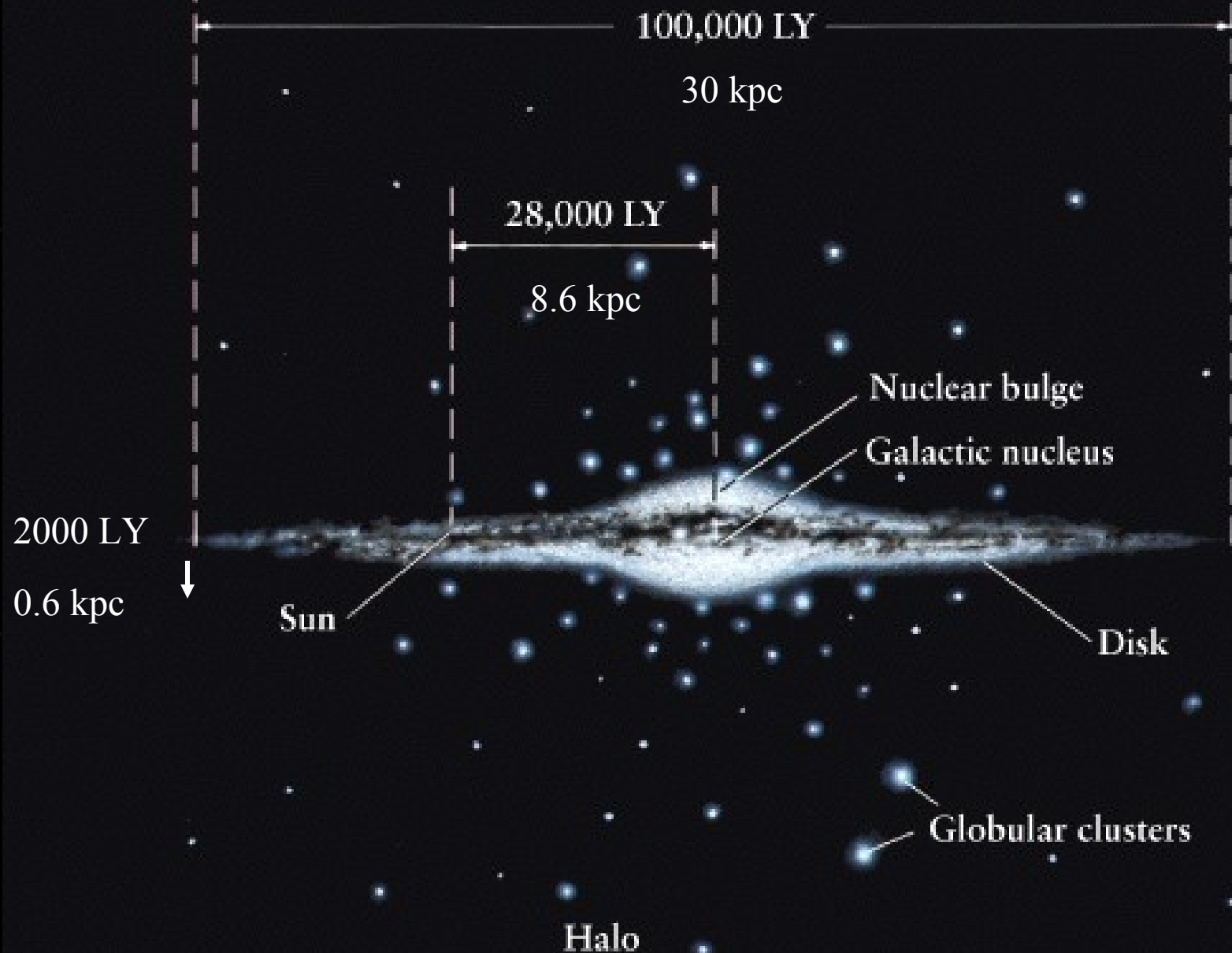
Galaktische Koordinaten

Angepasstes sphärisches Koordinatensystem:

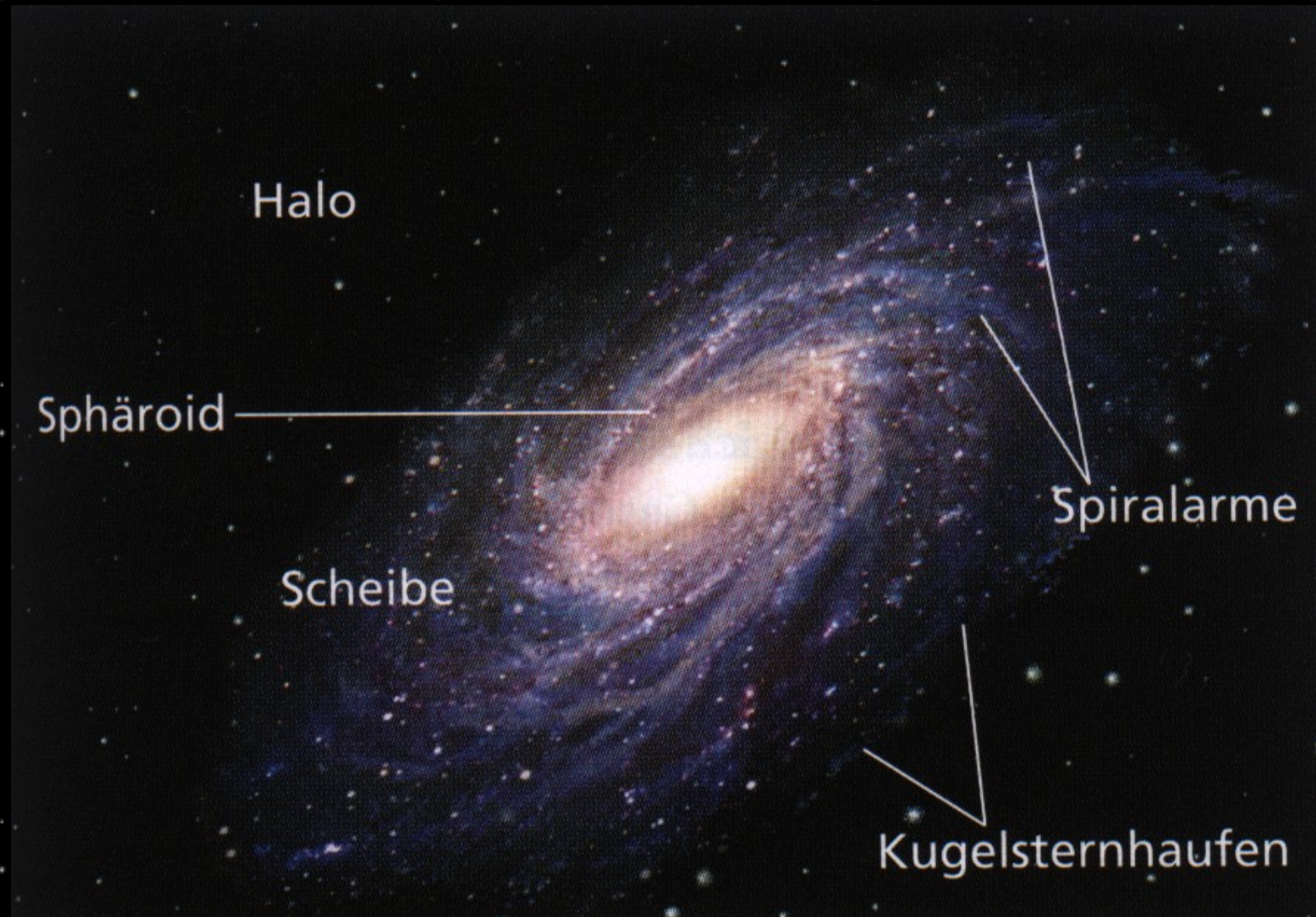
- $b=0^\circ$ definiert die Galaktische Ebene,
- $l=0^\circ$ gibt die Richtung zum Zentrum der Milchstraße



Modell unserer Milchstrasse



Modell unserer Milchstrasse

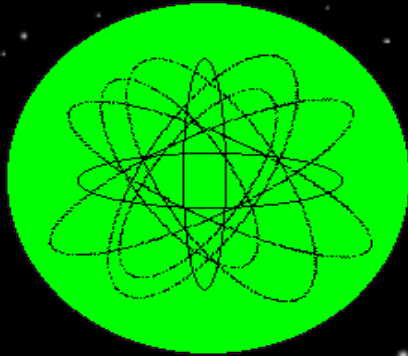


Die einzelnen Komponenten



rotierende
Scheibe: Gas &
junge Sterne
(Pop I).

isotropic halo component



isotropes Halo:
alte Sterne
(Pop. II)

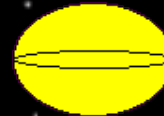


● aktiver Kern

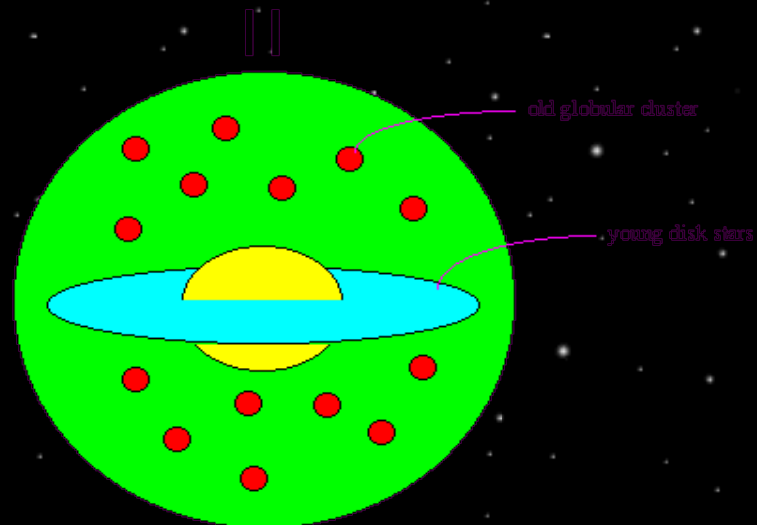
● alte Kugel-
sternhaufen

rotierender Bauch

rotating bulge component



Zusammen:
Milchstraße



Die einzelnen Komponenten

Sternpopulationen:

	Extreme Pop. I	alte Pop. I	Scheiben Pop. II	Interm. Pop. II	Halo Pop. II
Typ. Objekte	Interst. Materie O, B, T Taur junge offene Haufen klass. Ceph. H-II-Regionen	Sonne A, Me Riesen ältere offene Haufen	Planet. Nebel gal. Novae RR Lyr $P < 0,4$ d	Langperiod. Veränderl.	Kugelhaufen RR Lyr $P > 0,4$ d Pop. II Ceph
Alter [10^9 a]	$< 0,1$	0,1...10	3...10	~ 10	≥ 10
Konz. z. gal. Zentrum galakt. Orbit	keine kreisf.	gering fast kreisf.	stark hohes e	stark exzentr.	stark hohes e

Population I:

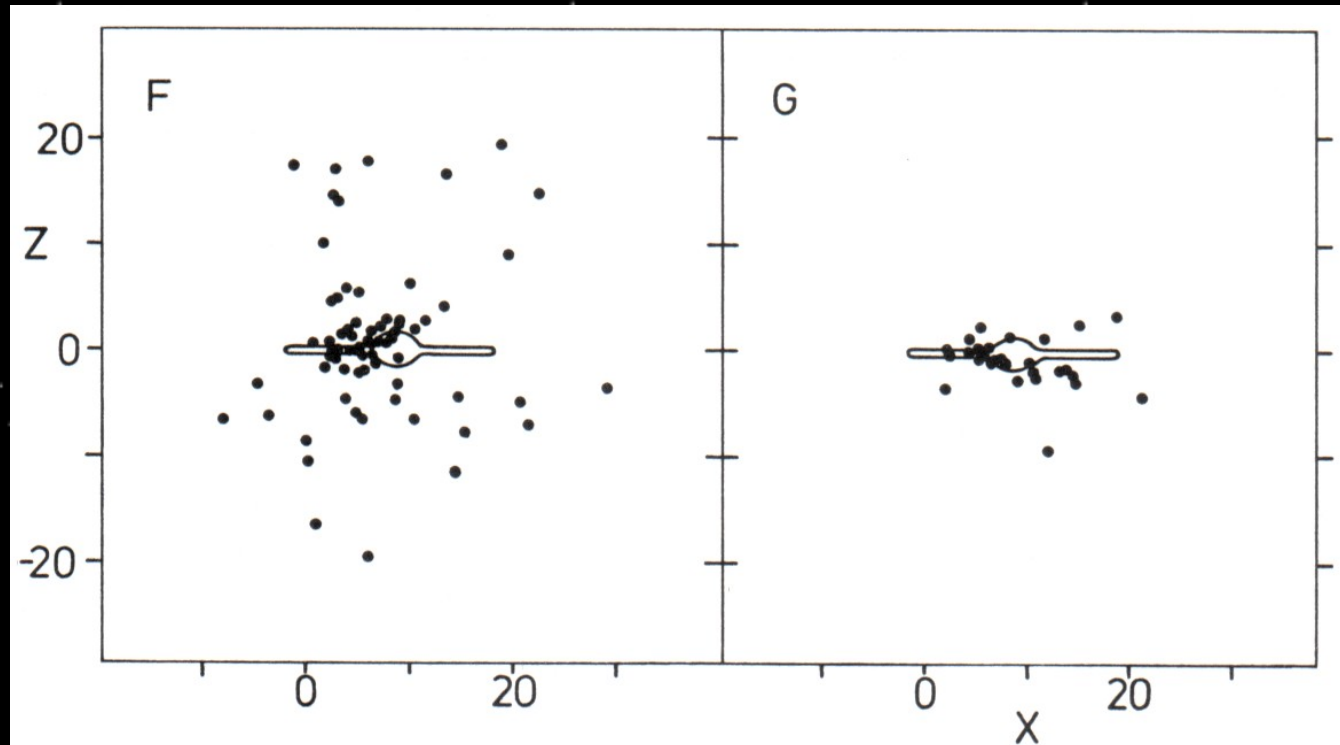
- in der Scheibe
- bilden offene Sternhaufen
- hohe Metallizität: 1-3%
($>3\%$ im Kern)

Population II:

- im Halo und Bauch
- fast ausschließlich in kompakten Kugelsternhaufen
- Metallizität: $< 1.5\%$

Verteilung der Kugelsternhaufen

Unterschiedliche Verteilung von Kugelsternhaufen verschiedenen Alters im Halo



Verteilung der Kugelhaufen mit Spektraltyp F (metallarm) und G (metallreich).
Ursprung: Sonne, Einheiten: kpc

Metallreiche Haufen sind zur Scheibe hin konzentriert.

Die einzelnen Komponenten

Halosterne bewegen sich weit ober- und unterhalb der Scheibe auf weitgehend zufällig orientierten Umlaufbahnen.

Sterne des Sphäroids besitzen ebenfalls zufällig orientierte Umlaufbahnen.

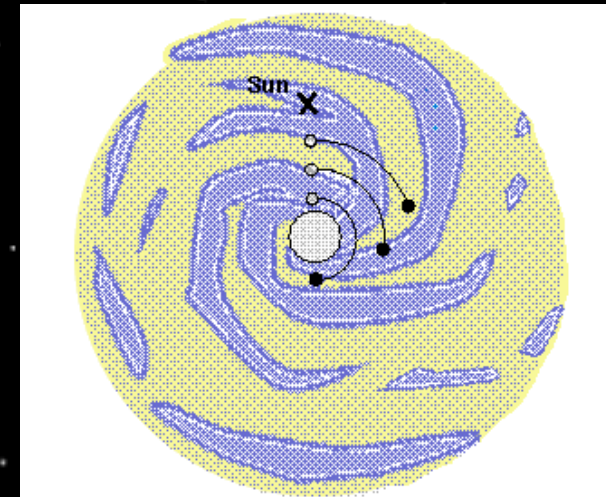


Scheibensterne bewegen sich auf kreisförmigen Umlaufbahnen, die alle in die gleiche Richtung weisen, denen allerdings eine Auf- und Abbewegung überlagert ist.

Dynamik und Kinematik

- Sterne bewegen sich regellos wie Mücken in einem Schwarm, mit der sog. **Pekuliargeschwindigkeit**
- dem ist eine regelmäßige Bewegung überlagert, wobei die Sterne das galaktische Zentrum umkreisen
- die Scheibe der Milchstraße rotiert nicht starr, sondern **differentiell**
- Sterne näher am galaktischen Zentrum umkreisen es schneller als Sterne weiter außen

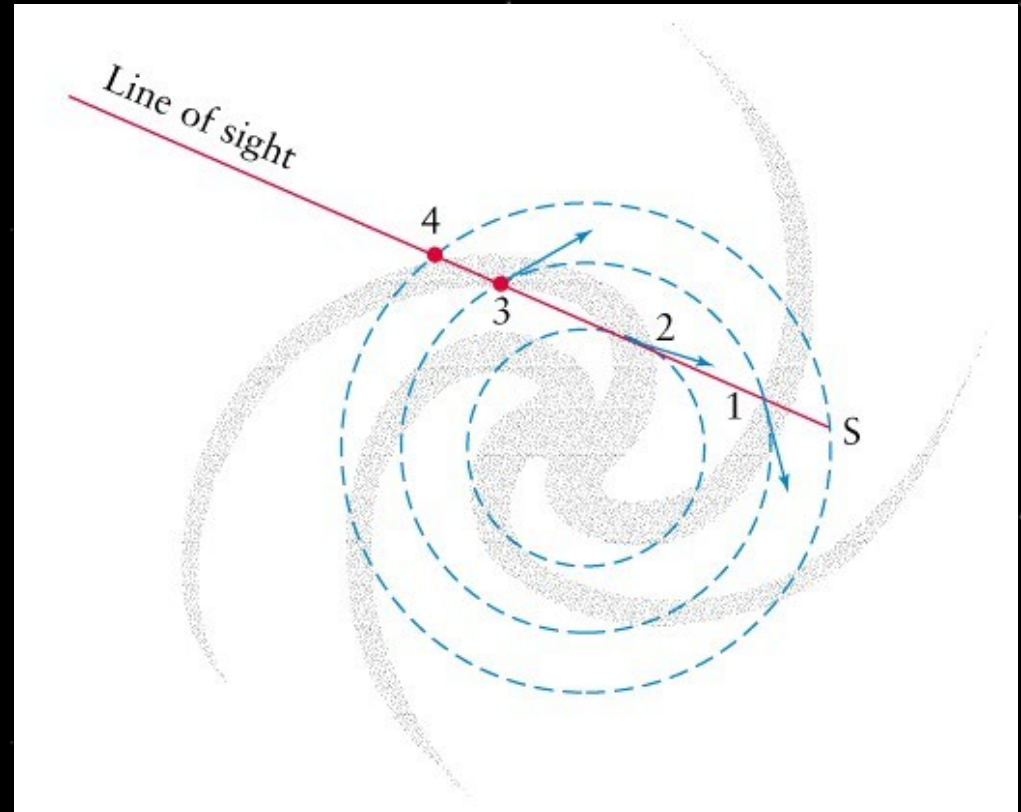
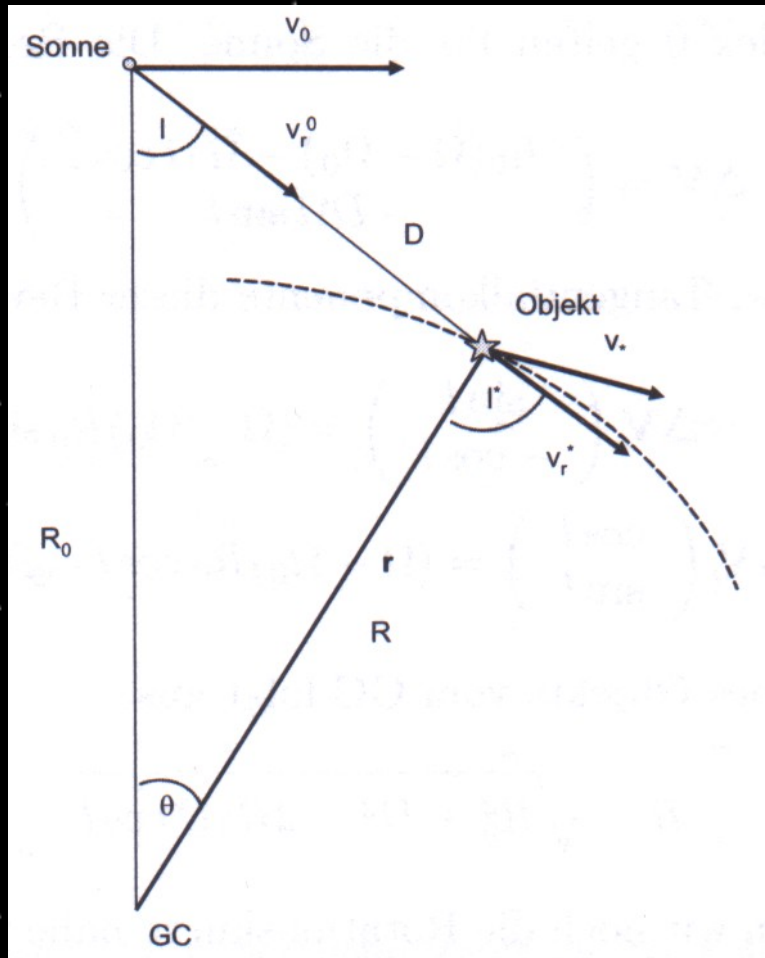
Die Orbitalgeschwindigkeit der Sonne beträgt 250 km/s. Ein „galaktisches Jahr“ dauert damit 200-250 Millionen Jahre.



Differential rotation: greater angular speeds closer to the galactic center.

Entfernungsbestimmung aus Dopplermessungen

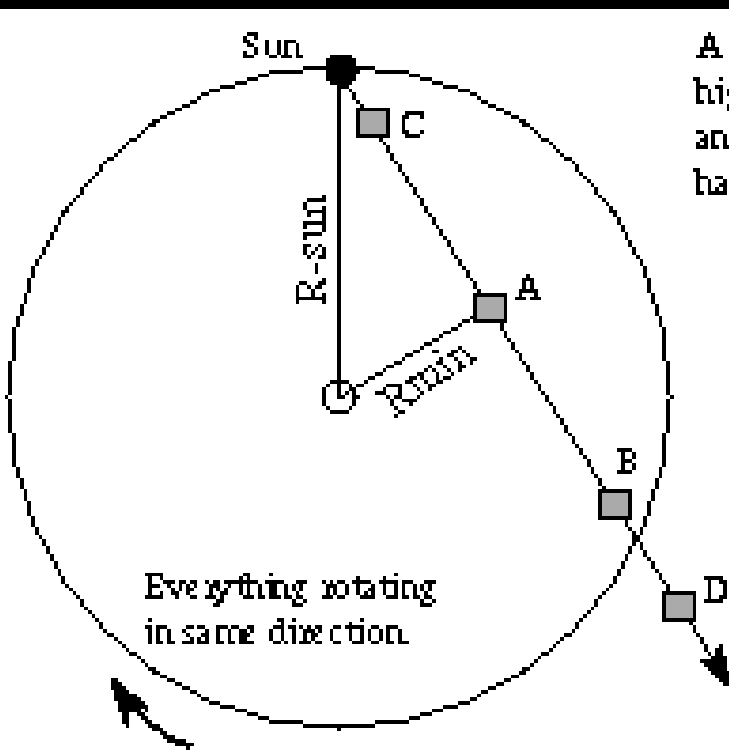
Radio-Linienbeobachtungen erlaubten erstmals Sichtlinien-Geschwindigkeitsmessungen



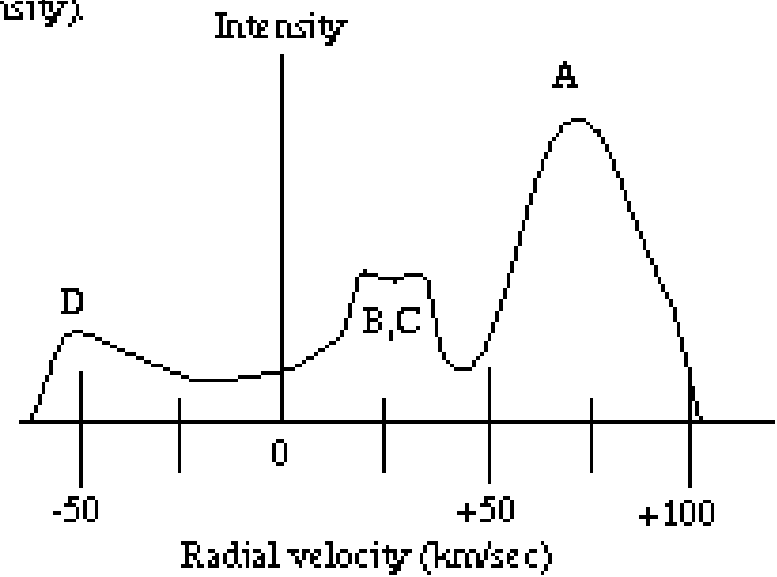
Die Maximalgeschwindigkeit wird tangential gemessen.

Masse der Galaxis

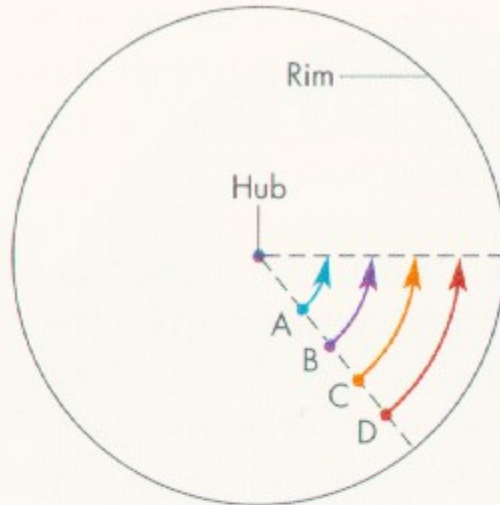
Aus der Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle in der Galaxis kann man ihre Position und Masse des Gases ableiten (galaktische Rotationskurven)



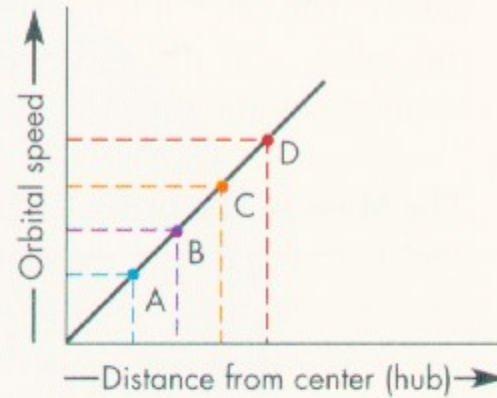
A has greatest angular speed and moving fastest away from sun. A has higher density of H. B & C moving at about same angular speed > sun's angular speed. D is outside solar distance—slower angular speed and has less material (density).



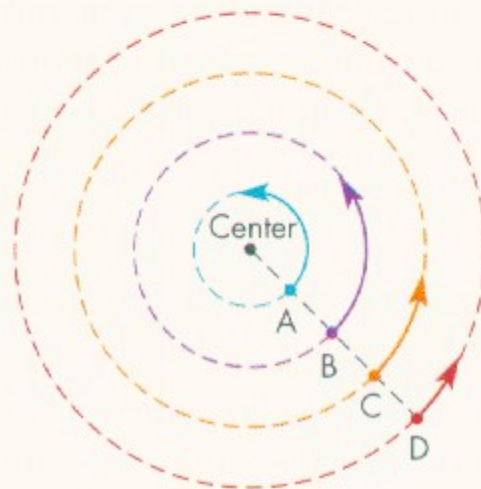
Starre Rotation und Keplersche Rotation



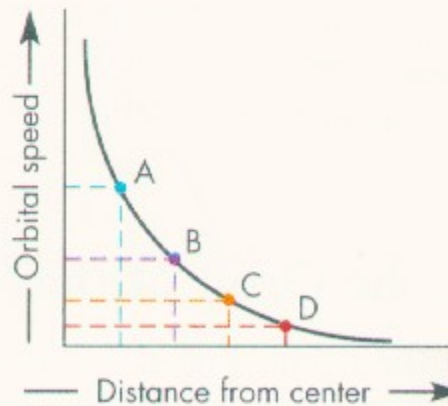
Wheel-like rotation



Rotation curve for wheel-like rotation

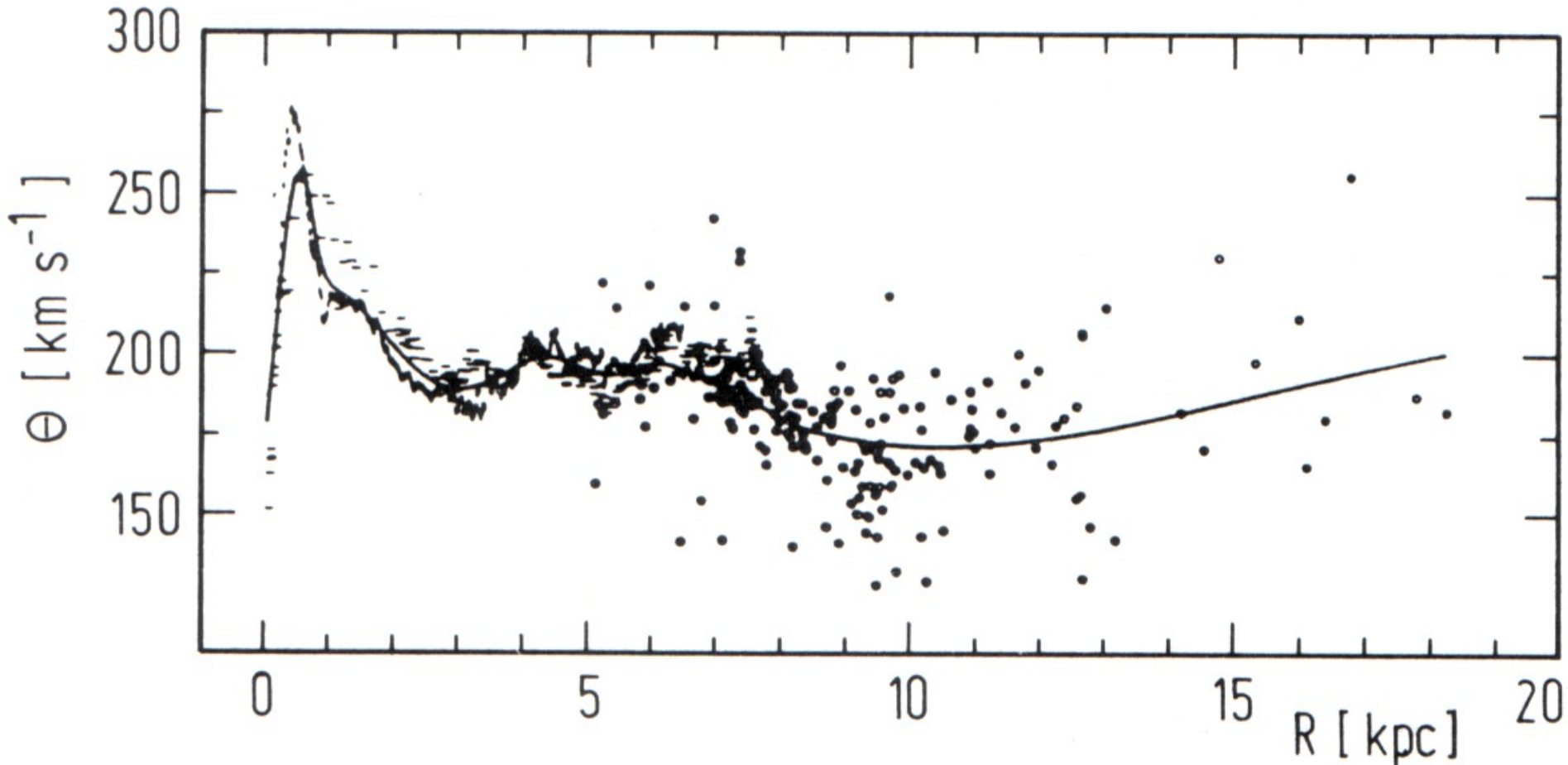


Planet-like rotation



Rotation curve for planet-like rotation

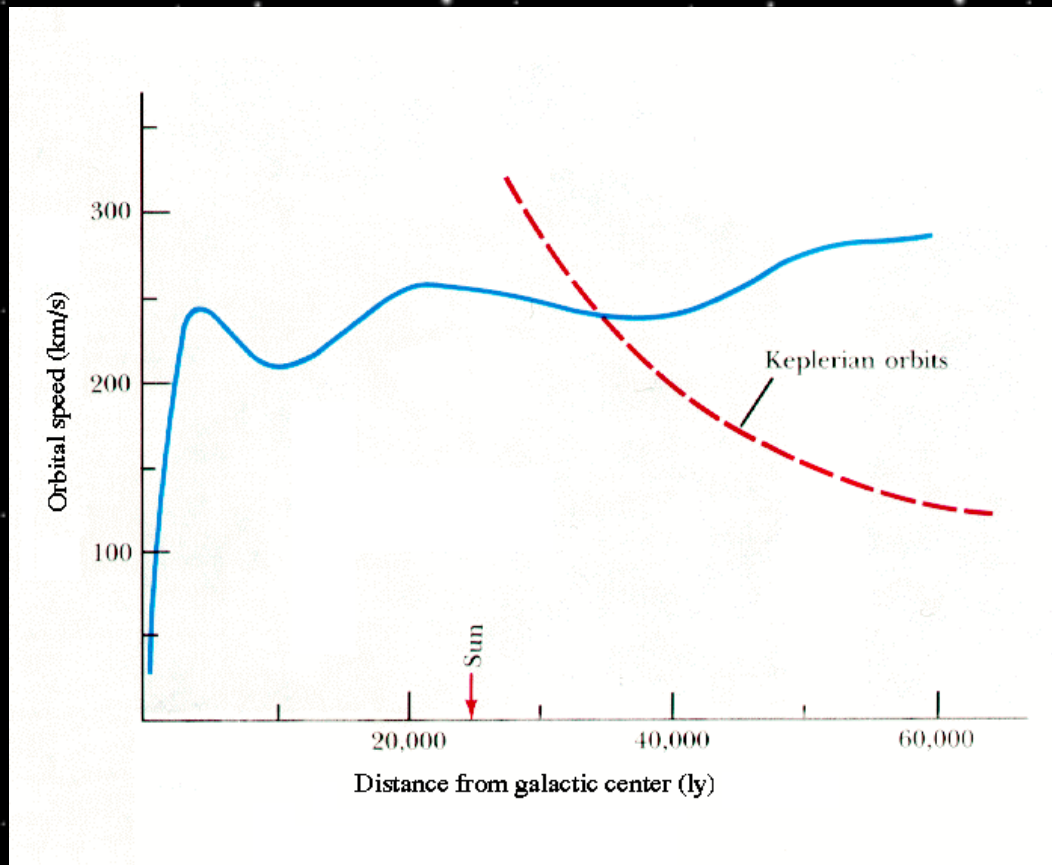
Beobachtete Rotationskurve



Aus der gemessenen Rotationskurve lässt sich die Masse bei verschiedenen radien bestimmen.

Masseverteilung

Ein Großteil der Masse der Galaxis wird nicht beobachtet: Diese Masse kann nicht aus Sternen, Gas oder Staub bestehen und ihre Verteilung muss sich weit über den sichtbaren Rand der Galaxis erstrecken (60 – 80 kpc !).



Dunkle Materie:

Kandidaten:

MACHOS (Massive Compact Halo Objects)

- braune Zwerge
- weiße Zwerge
- schwarze Löcher,
- Neutronensterne

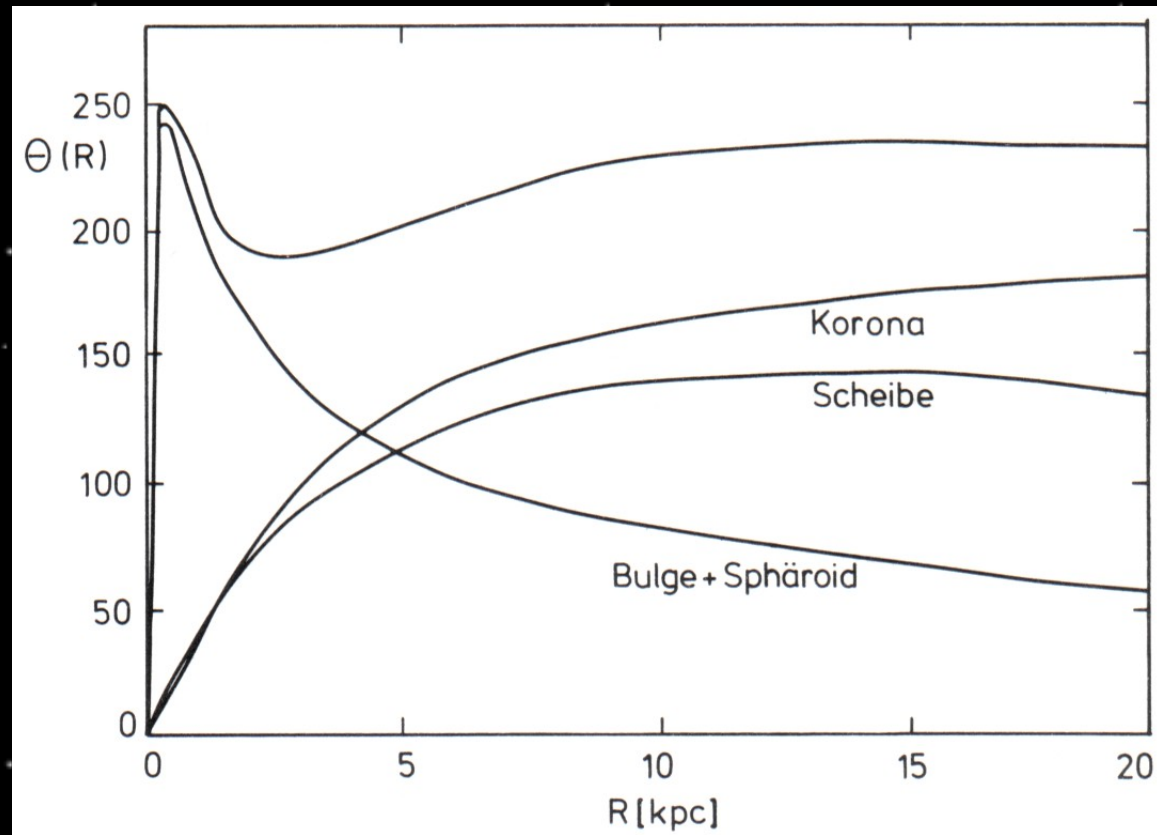
WIMPS (Weakly interacting massive particles)

kalter molekularer Wasserstoff

Masseverteilung

Zerlegung der Rotationskurve nach Massenbeiträgen der verschiedenen Komponenten:

- Scheibe: $80 \text{ M}_{\odot}/\text{pc}^2$
 $R = 25 \text{ kpc}$
- Bulge+Halo:
 $0.0002 \text{ M}_{\odot}/\text{pc}^3$
- Dunkle Korona:
 $0.009 \text{ M}_{\odot}/\text{pc}^3$
 $R > 150 \text{ kpc}$



Parameter der Komponenten

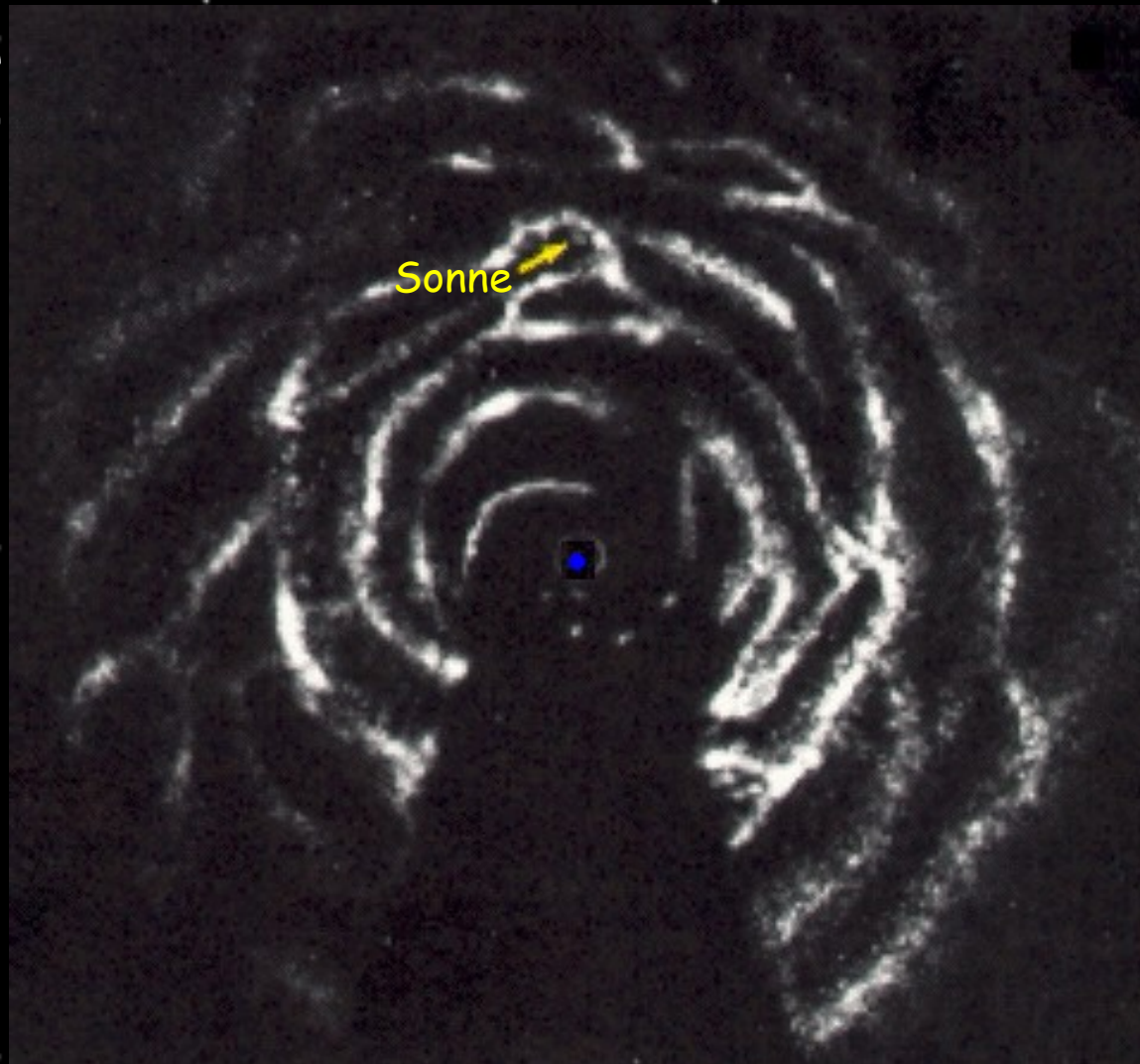
Kombination der beobachteten Verteilung und der Information aus der Rotationskurve

	neutr. Gas	dünne Scheibe	dicke Scheibe	Bulge	stell. Halo	DM Halo
M	0,5	6	0,2-0,4	1	0,15	0
L_B	-	1,8	0,02	0,3	0,1	
$M//L_B$	-	3		3	~ 1	
Durchm.	50	50	50	2	100	> 200
Form	$e^{-h_z/z}$	$e^{-h_z/z}$	$e^{-h_z/z}$	Balken	$r^{-3,5}$	$\frac{1}{(a^2+r^2)}$
Skalenh.	0,13	0,33	1,5	0,4	3	2,8
σ_z	7	20	40	120	100	-
[Fe/H]	$> 0,1$	-0,5-0,3	-1,6..-0,4	-1...1	-4,5...-0,5	-

M: $10^{10} M_{\odot}$, L: $10^{10} L_{\odot}$, D: kpc, h_z : kpc, σ_z : km/s, [Fe/H]: $\lg(X_{\text{Fe}}/X_{\text{H}})_{\odot}$

Die Spiralstruktur

HI-Spiralen
(21cm Linie)

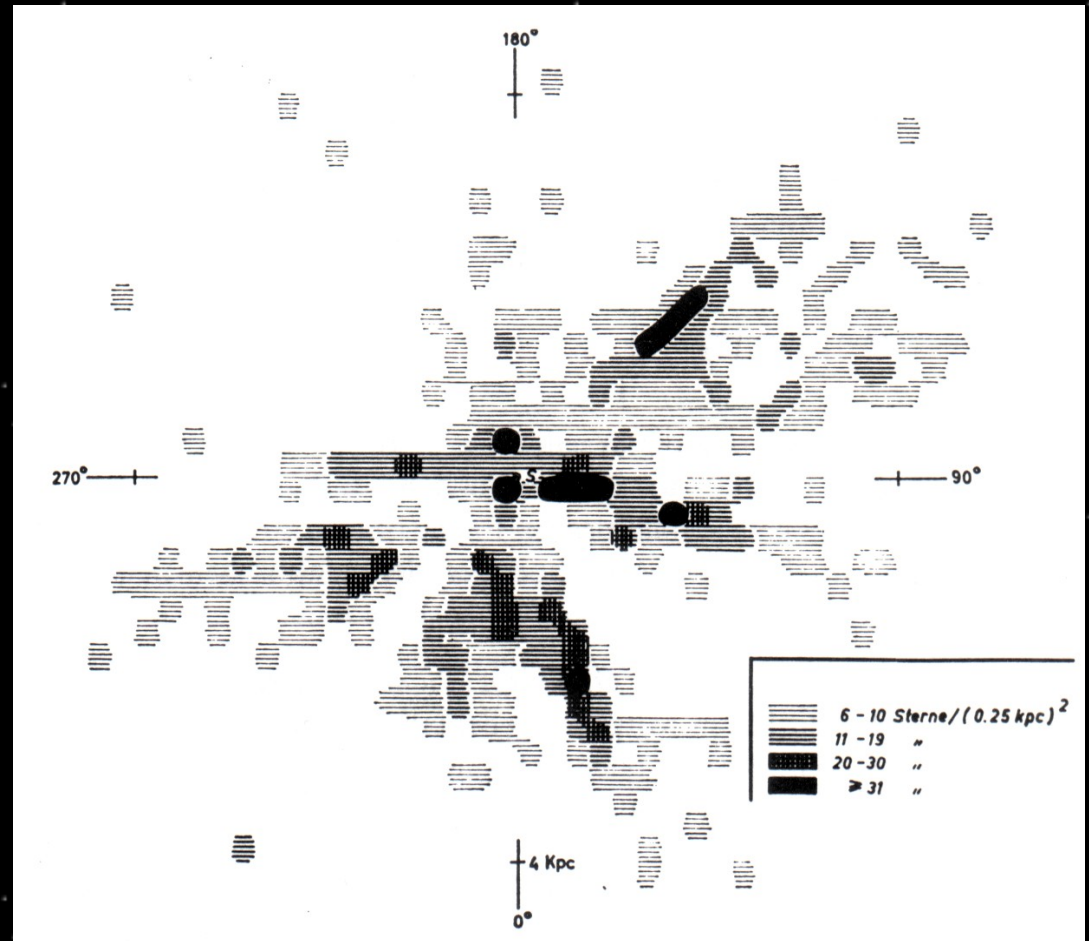


Vermessung des neutralen Wasserstoffs in der Milchstraße

Die Spiralstruktur

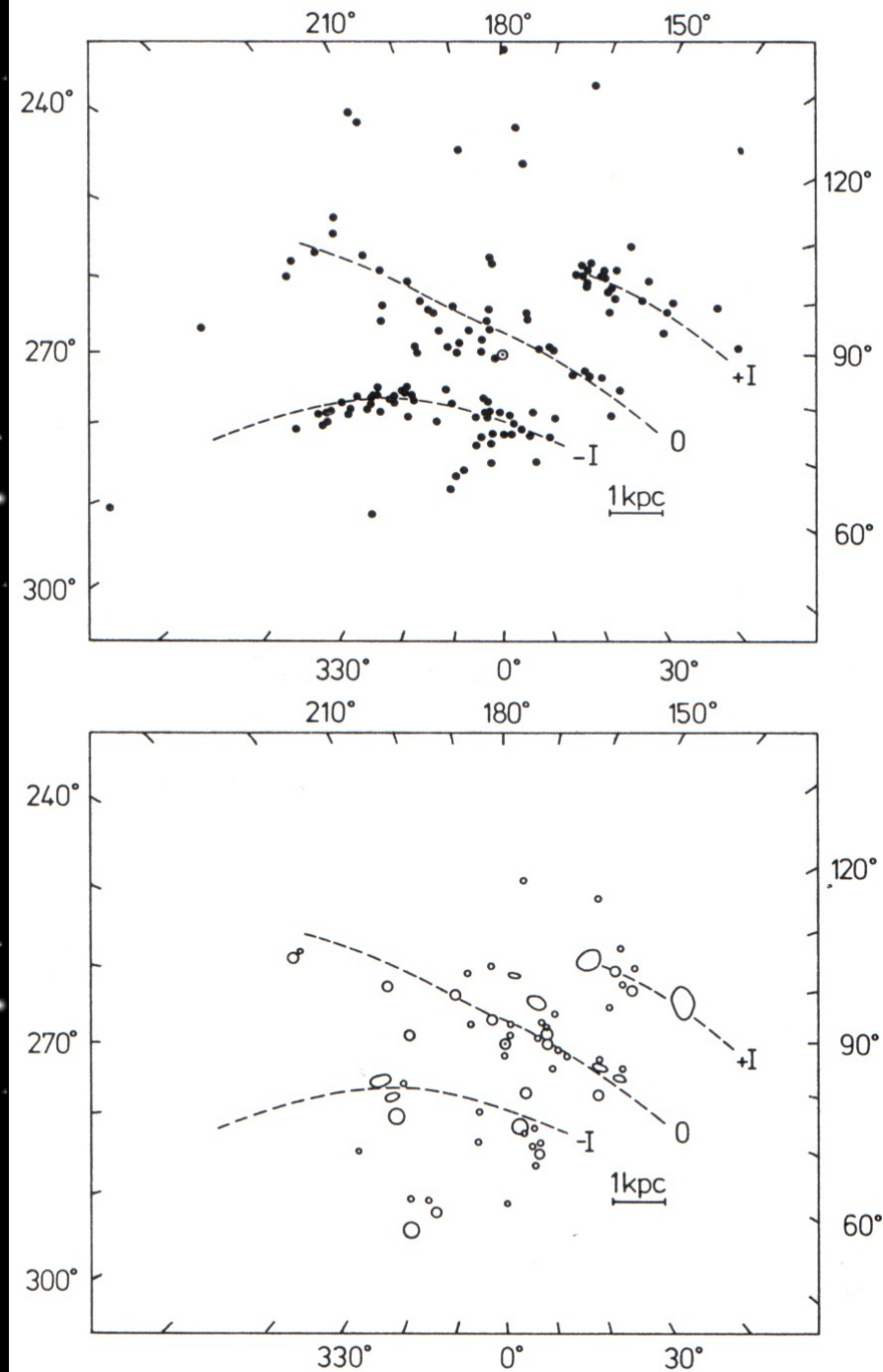
- Feldsterne zeigen keine klaren Inhomogenitäten der Verteilung
- Junge heiße Sterne sind aber in Spiralen konzentriert.

Beobachtete Verteilung der OB-Sterne (Klare & Neckel 1967)



Die Spiralstruktur

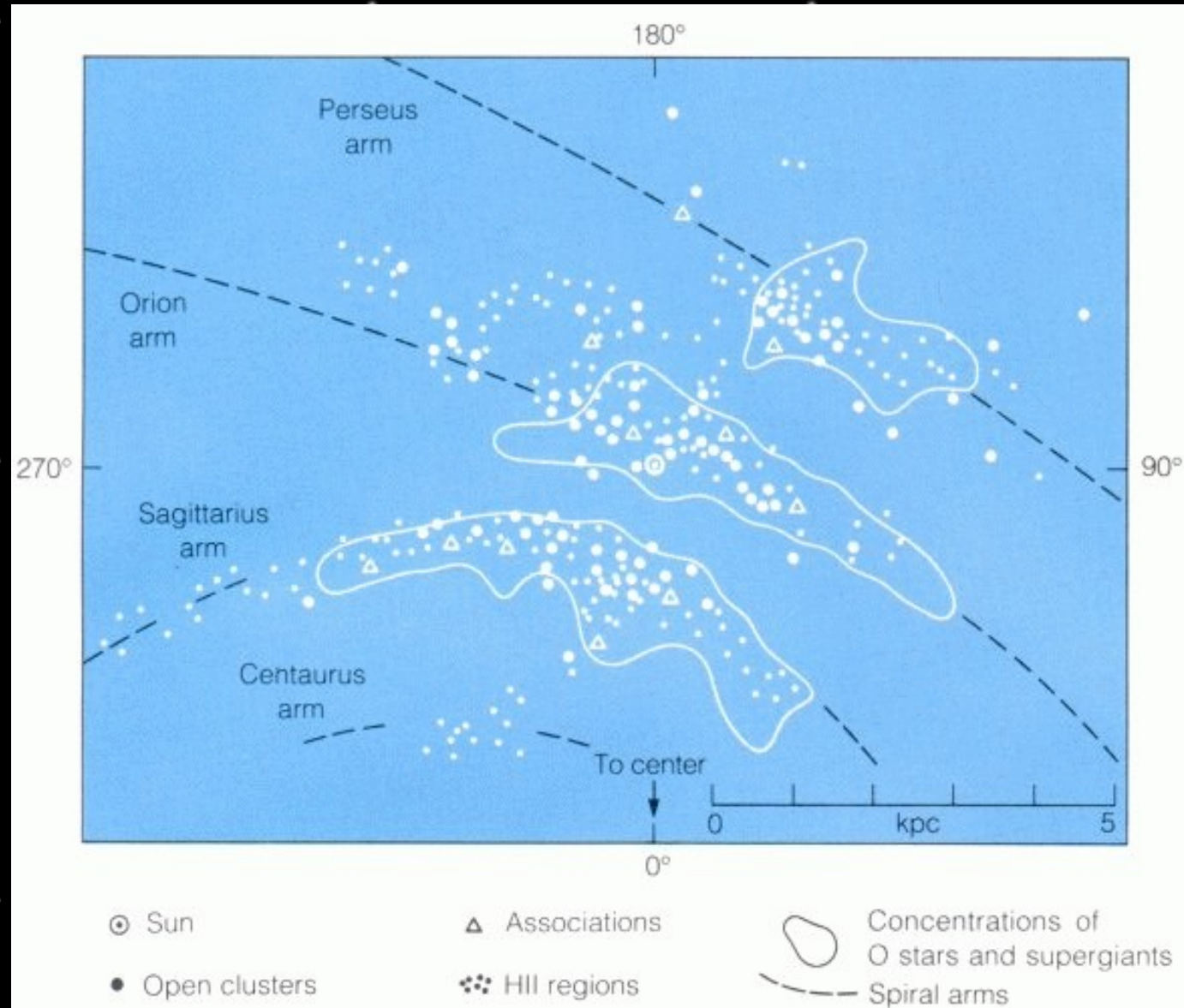
- Verteilung junger offener Sternhaufen (oben) und von OB-Assoziationen (unten)
- Konzentration im
 - Perseus-Arm
 - Lokalen Arm
 - Sagittarius-Arm
- Sternentstehung findet bevorzugt in Spiralarmen statt.
- Das Bild der Spiralstruktur wird von HII-Regionen um heiße jungen Sternen erzeugt.



Beobachtungen der Struktur

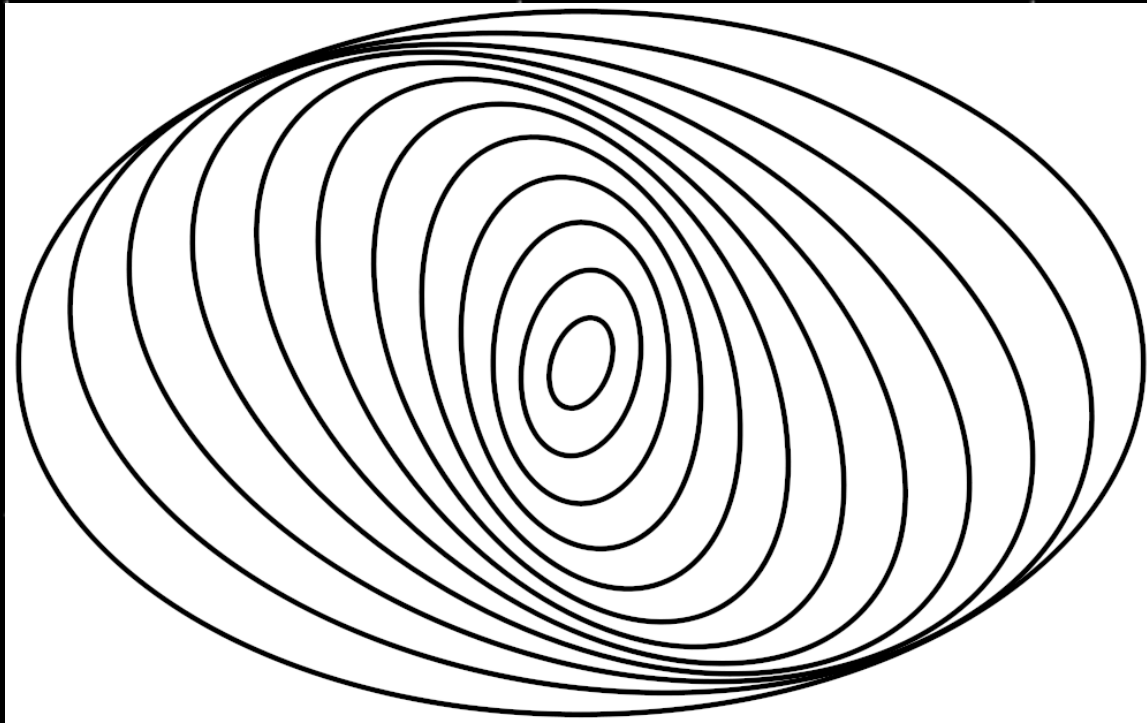
➤ Optisch:

Berücksichtigt man die Absorption durch Staub (Extinktion), so findet man die O- und B- Sterne in den Spiralarmen angeordnet.



Entstehung der Spiralarme

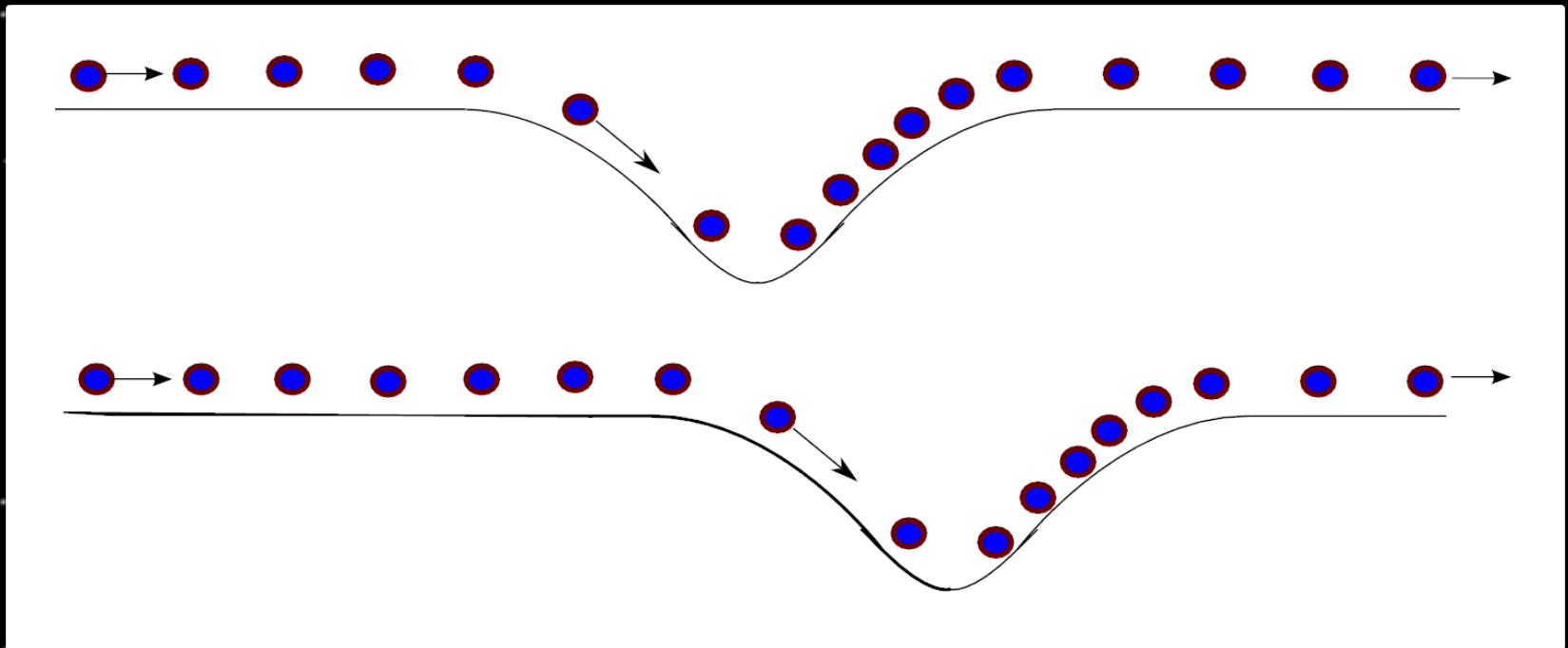
Eine minimale bipolare Störung führt zu leicht elliptischen Orbits. Durch unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten ergibt sich automatisch eine Doppelspiralstruktur.



Die Störung kann durch einen zentralen Balken oder durch die gravitative Wechselwirkung mit einer anderen Galaxie verursacht sein.

Dichtewellen

Sterne und interstellare Wolken wandern durch die Spiralen. Bei Annäherung an die Verdichtung werden sie beschleunigt, dann abgebremst. Dadurch verschieben sie die Dichtewelle.

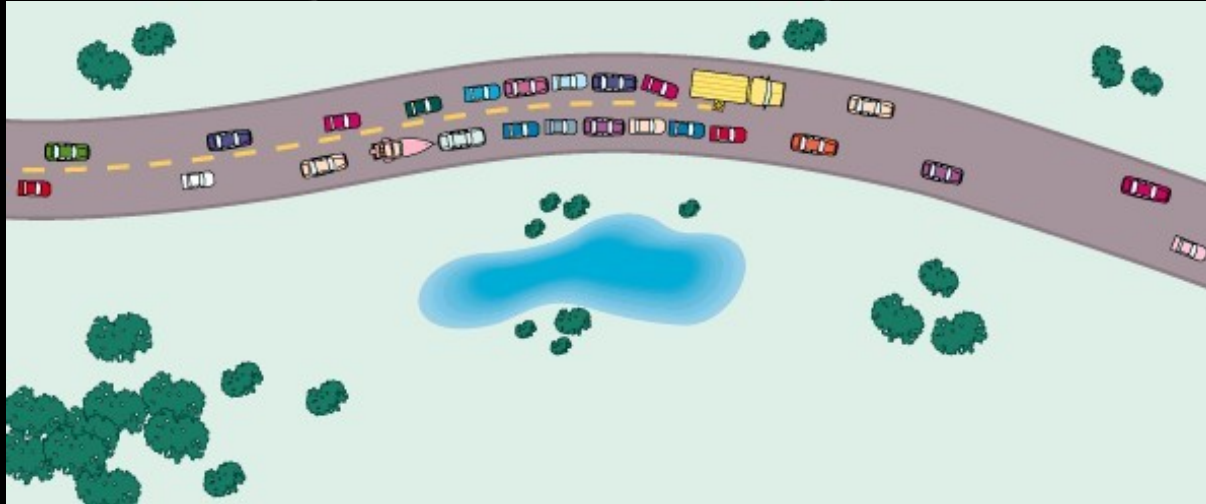


Die Dichtewelle läuft der Bewegung hinterher.

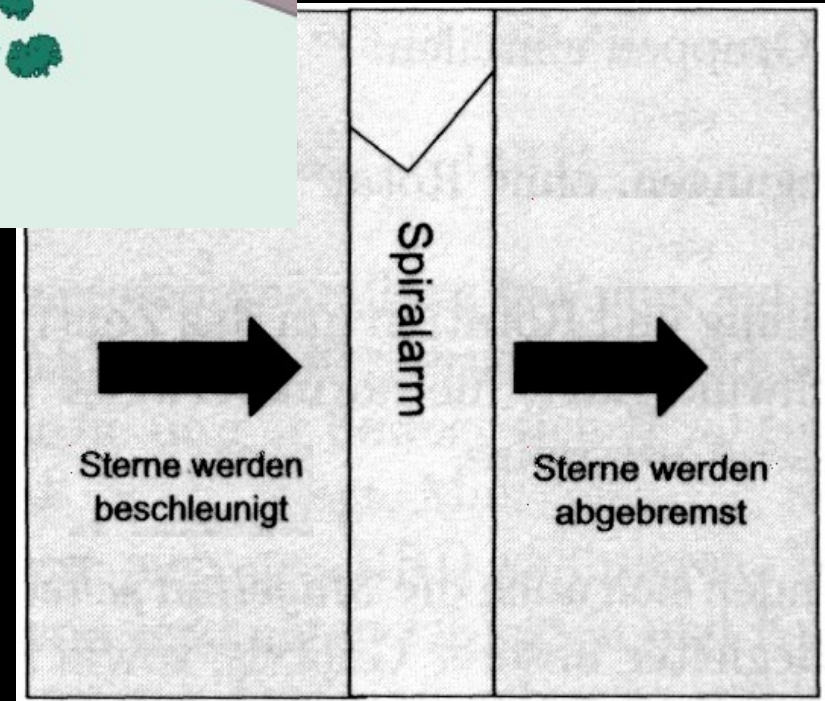
-> Nachhängende Spiralen

Dichtewellen

Dichtewellen funktionieren wie Staus auf der Autobahn. Gas und Sterne beschleunigen zur Welle und werden dann gebremst.

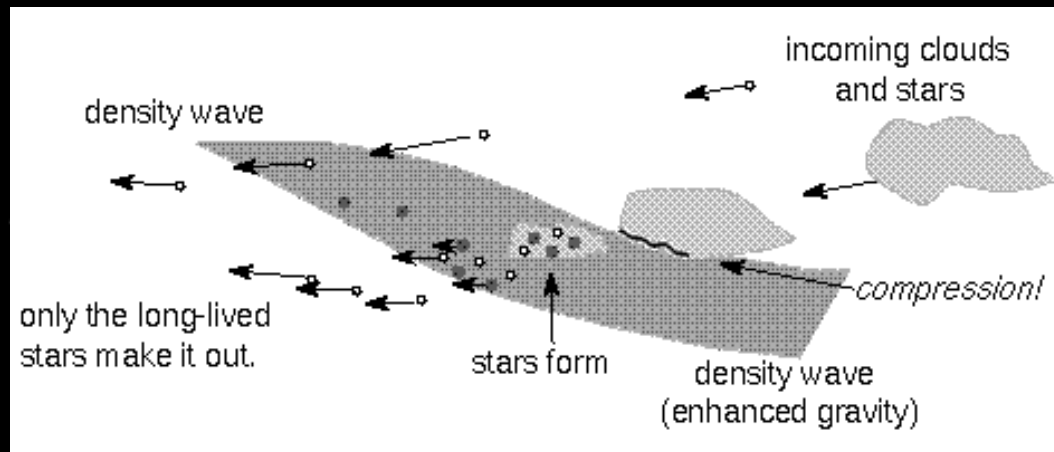


Eine spiralförmige Dichtewelle (mit 10 bis 20 km/s) verdichtet bzw. verdünnt das Gas in der galaktischen Scheibe und bedingt so die Entstehung der Spiralarme.



Sternentstehung in den Spiralarmen

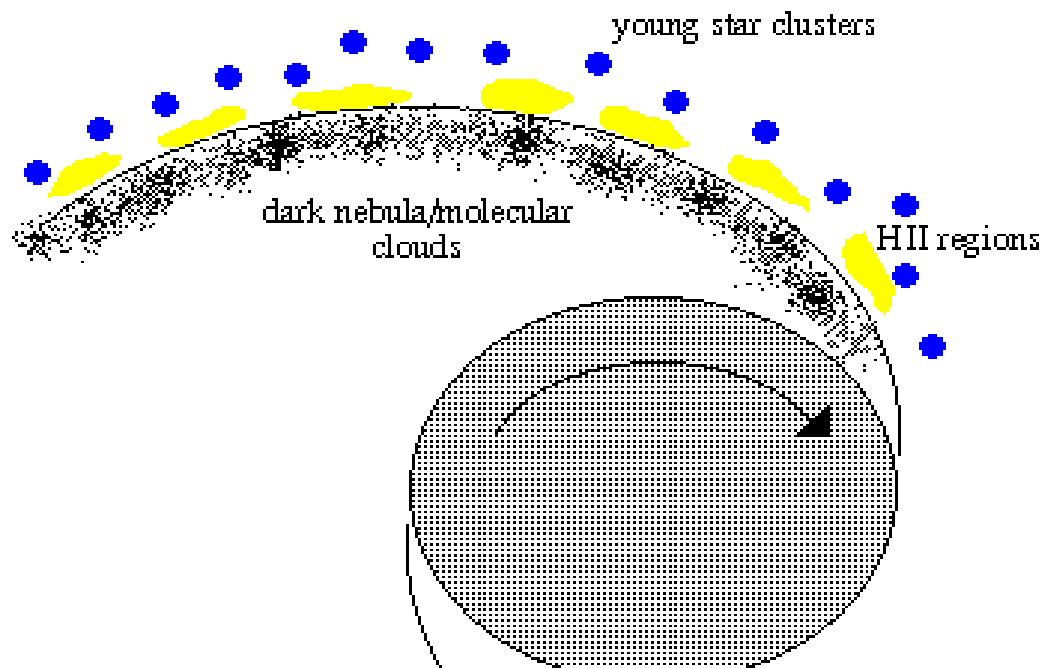
- Im "Stau" der Spirale werden die Wolken komprimiert und bilden Sterne.
- Die heißesten Sterne leben nur in der Spirale.
- Die Spiralen leuchten hell obwohl der Dichtekontrast nur ca. 5% beträgt.



- Nur Sterne mittlerer Massen leben lange genug um die Spirale zu verlassen.

Sternentstehung in den Spiralarmen

Gas und Staub werden durch die Dichtewelle eingesammelt und komprimiert. Zuerst werden die HII Regionen, dann einzelne Sternhaufen sichtbar. Blaue Sterne werden an der Kante der Spiralarme beobachtet.



Die Sterne lösen sich langsam aus den Armen ab.

Sternentstehung in den Spiralarmen



Dunkle Flecken entlang der Innenseite des Spiralarms zeigen, wo sich die Gaswolken zusammenballen ... und durch die Kompression dieser Wolken wird die Sternentstehung in diesem Arm initiiert.



Die blauen Flecken sind junge Sterne, die im Spiralarm entstanden sind.

Rote Flecke sind Emissionsnebel um die heißesten und jüngsten Sterne.

Fluss von Gas und Sternen durch den Spiralarm

Galaktische Fontänen

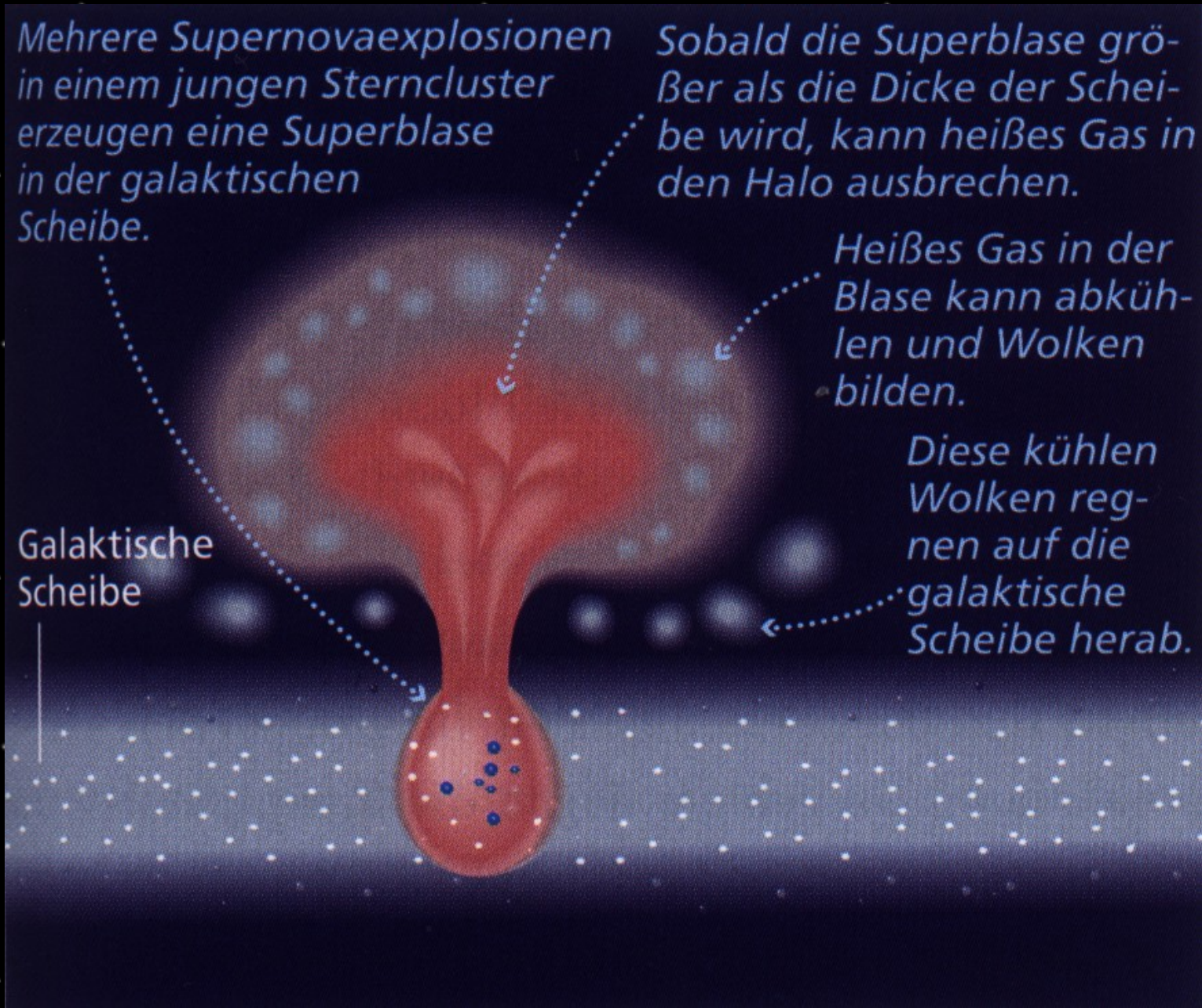
Mehrere Supernovaexplosionen in einem jungen Sterncluster erzeugen eine Superblase in der galaktischen Scheibe.

Sobald die Superblase größer als die Dicke der Scheibe wird, kann heißes Gas in den Halo ausbrechen.

Heißes Gas in der Blase kann abkühlen und Wolken bilden.

Diese kühlen Wolken regnen auf die galaktische Scheibe herab.

Galaktische
Scheibe



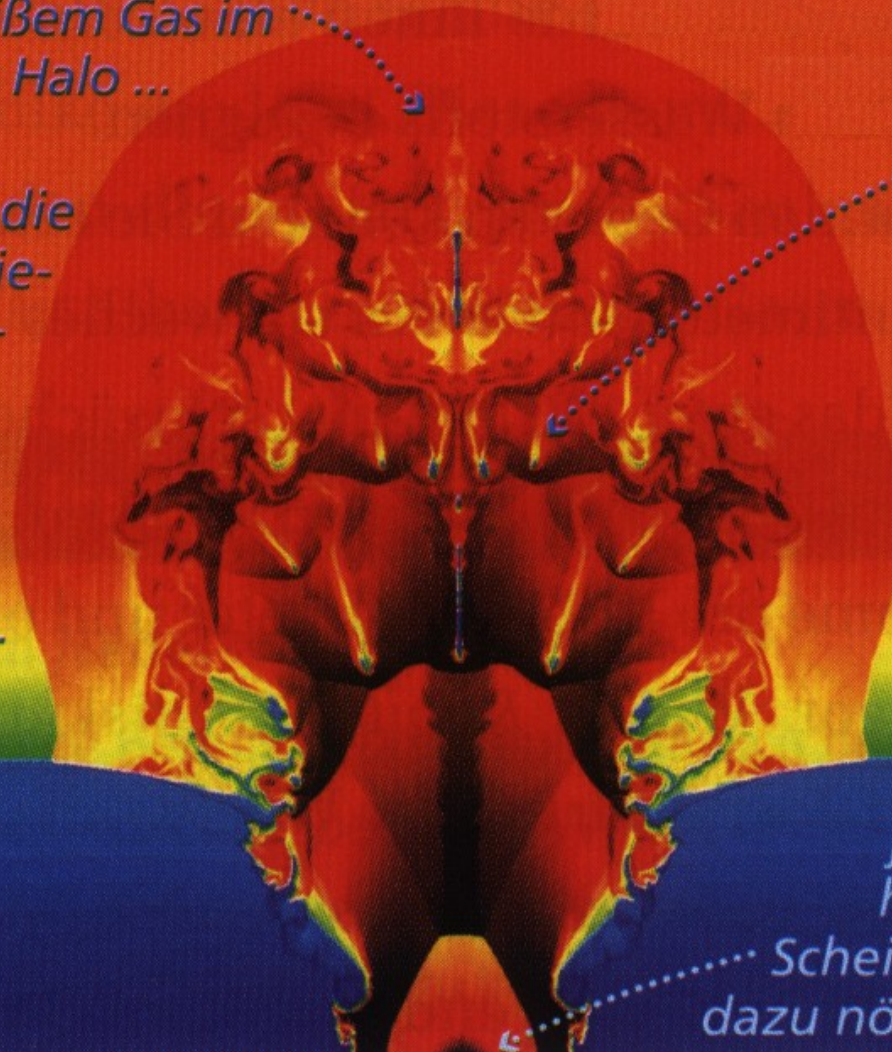
Galaktische Fontänen

Orangefarbene und rote Gebiete entsprechen heißem Gas im galaktischen Halo ...

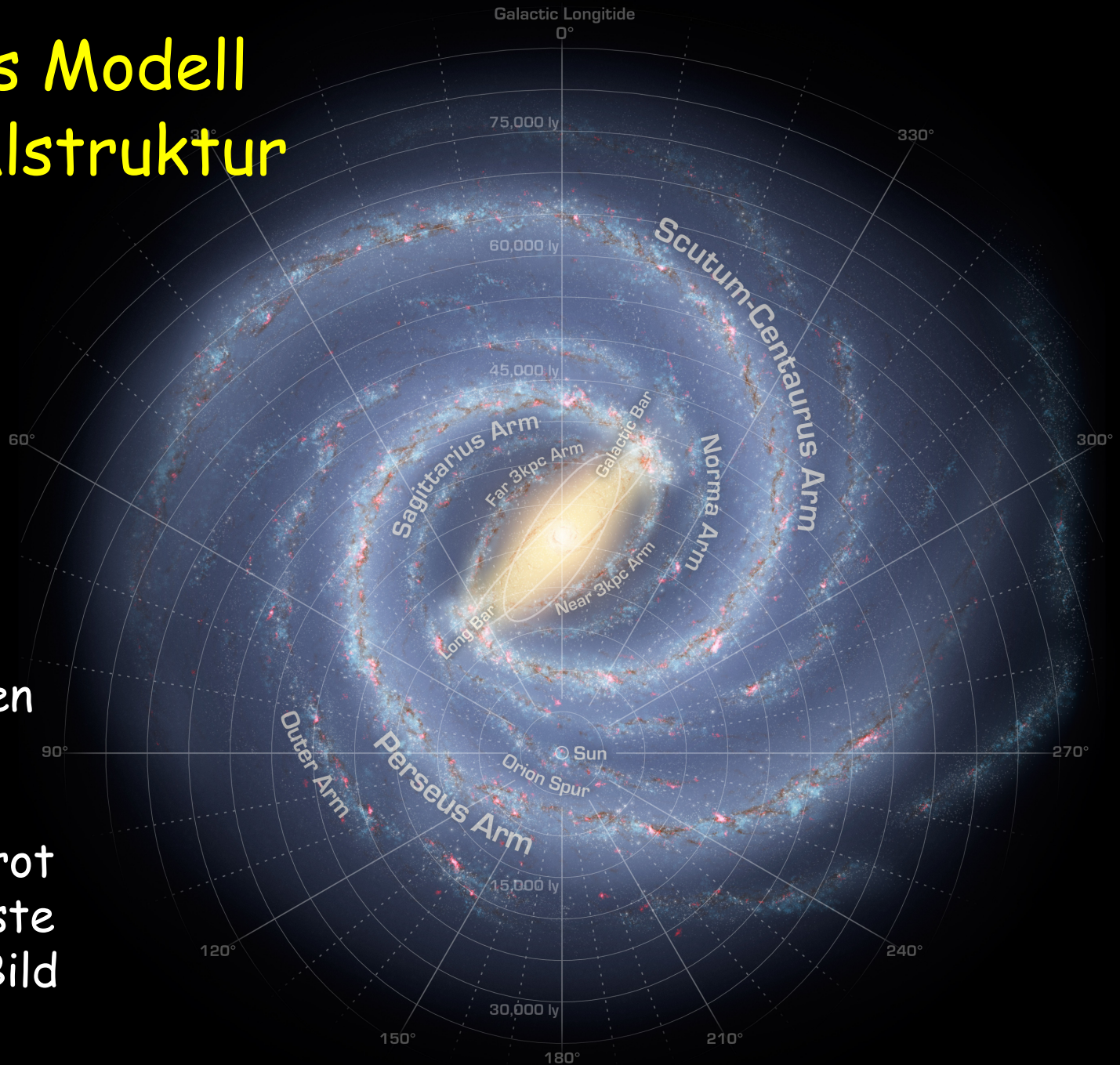
... während die blauen Gebiete dem kühleren Gas der galaktischen Scheibe entsprechen.

In dieser Simulation wird heißes Gas der Superblase in den Halo gefegt ...

... und ein junger Sternhaufen in der Scheibe liefert die dazu nötige Energie.

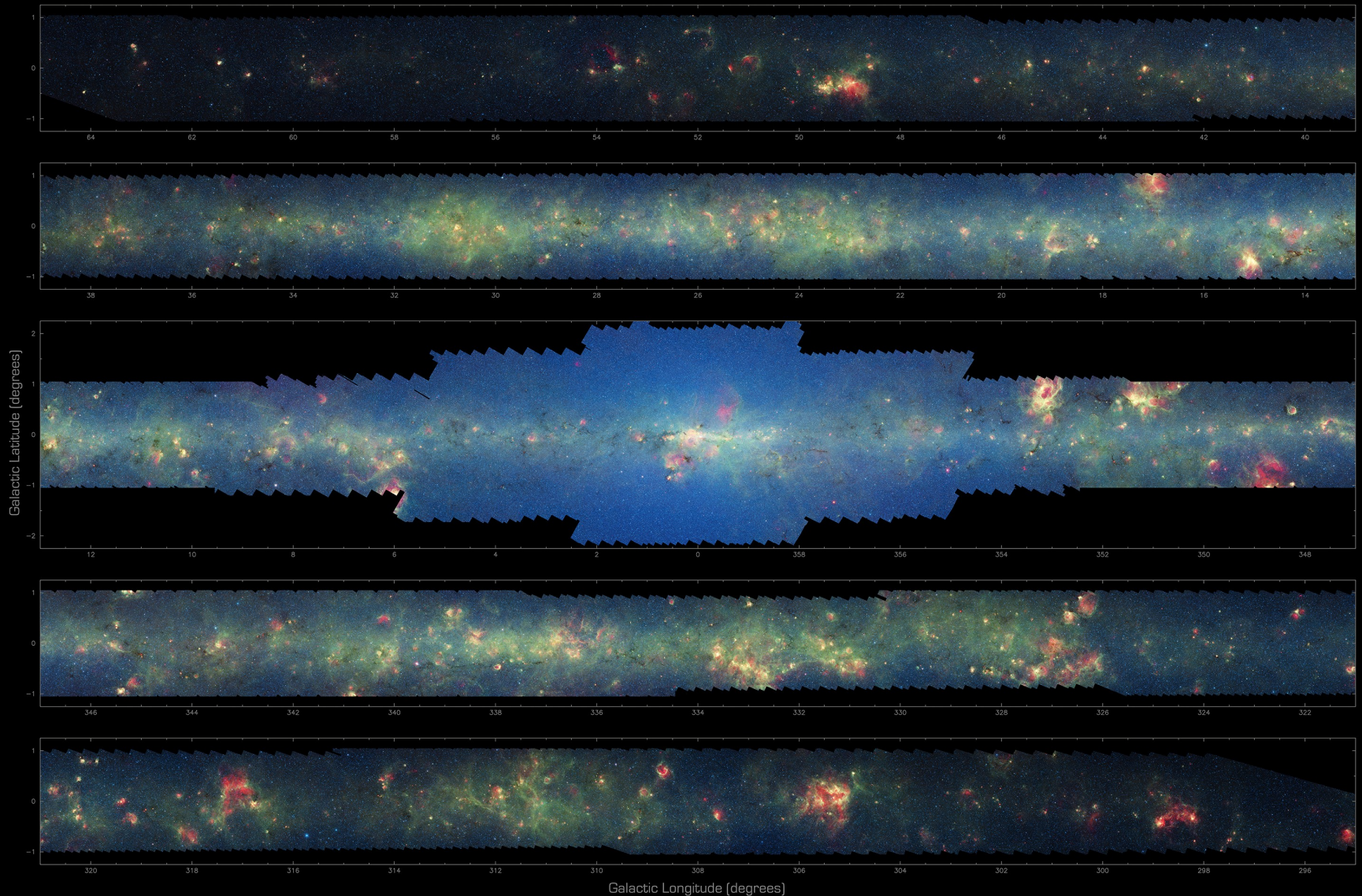


Aktuelles Modell der Spiralstruktur



Beobachtungen
des Spitzer-
Satelliten im
fernen Infrarot
haben das erste
vollständige Bild
geliefert

Aktuelles Modell der Spiralstruktur

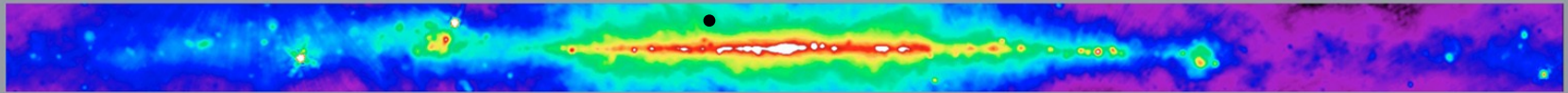


The Infrared Milky Way: GLIMPSE/MIPSGAL

Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

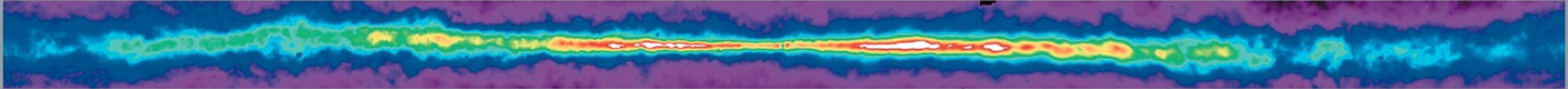
Radio Continuum

408 MHz Bonn, Jodrell Banks, & Parkes



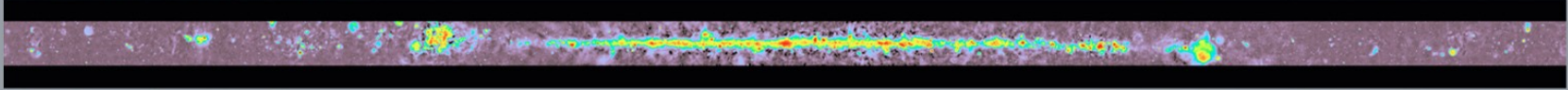
Atomic Hydrogen

21 cm Leiden-Dwingeloo, Maryland-Parkes



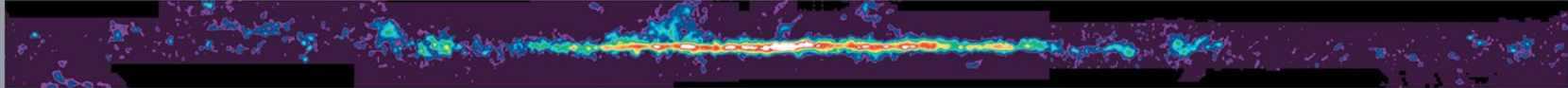
Radio Continuum

2.4-2.7 GHz Bonn & Parkes



Molecular Hydrogen

115 GHz Columbia-GISS



Infrared

12, 60, 100 μ m IRAS



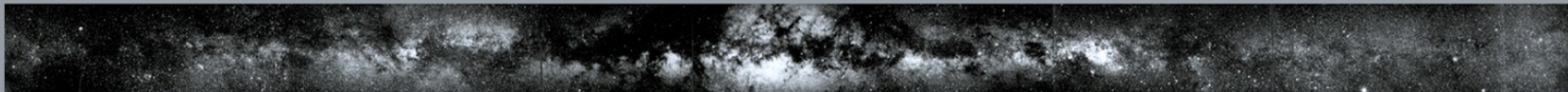
Near Infrared

1.25, 2.2, 3.5 μ m COBE/DIRBE



Optical

Laustsen et al. Photomosaic



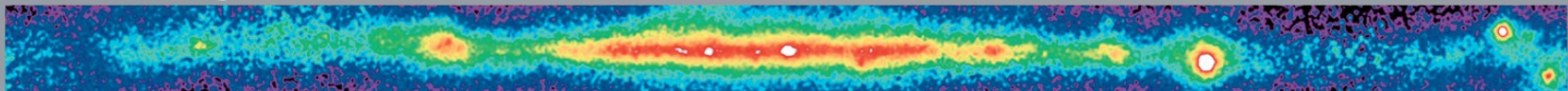
X-Ray

0.25, 0.75, 1.5 keV ROSAT/PSPC



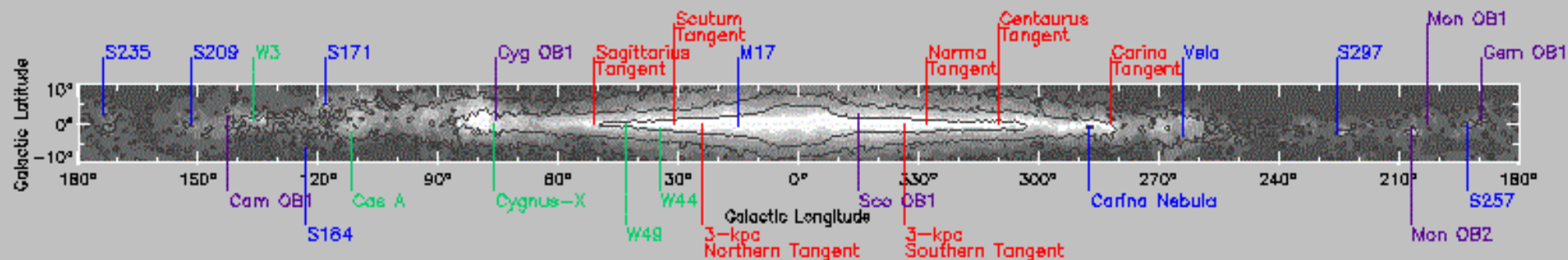
Gamma Ray

>100 MeV CGRO/EGRET



Aktuelles Modell der Spiralstruktur

Kombination der Beobachtungen bei verschiedenen Wellenlängen mit der bekannten Rotationskurve erlaubt genaue Identifikation der einzelnen Strukturen.



Das Galaktische Zentrum



Naval Research Laboratory

Wide-Field Radio Image of the Galactic Center

$\lambda = 90 \text{ cm}$

(Kassim, LaRosa, Lazio, & Hyman 1999)

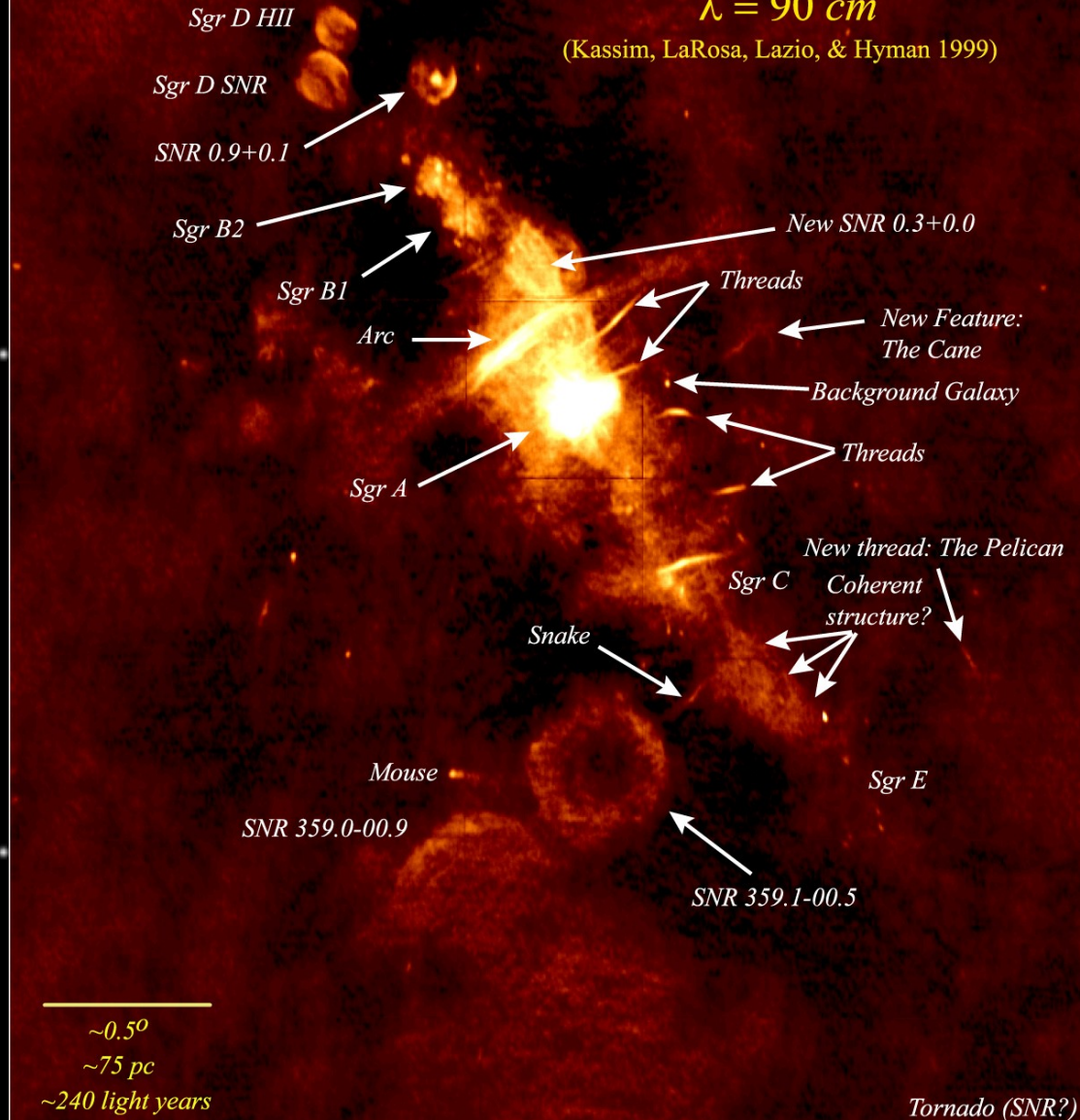
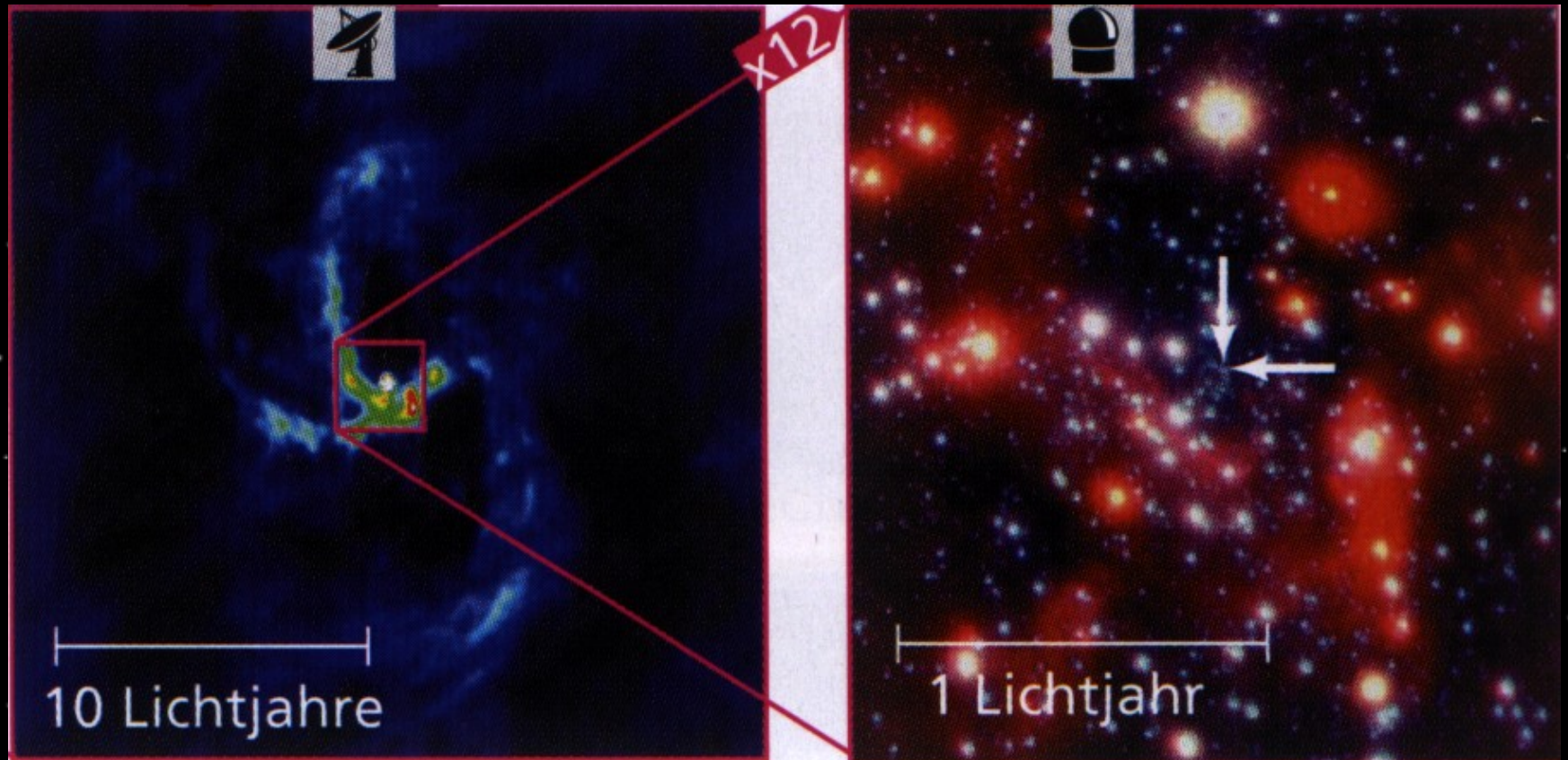


Image processing at the Naval Research Laboratory using DoD High Performance Computing Resources
 Produced by N.E. Kassim, D.S. Briggs, T.J.W. Lazio, T.N. LaRosa, J. Imamura, & S.D. Hyman
 Original data from the NRAO Very Large Array courtesy of A. Pedlar, K. Anantharamiah, M. Goss, & R. Ekers

Das Galaktische Zentrum



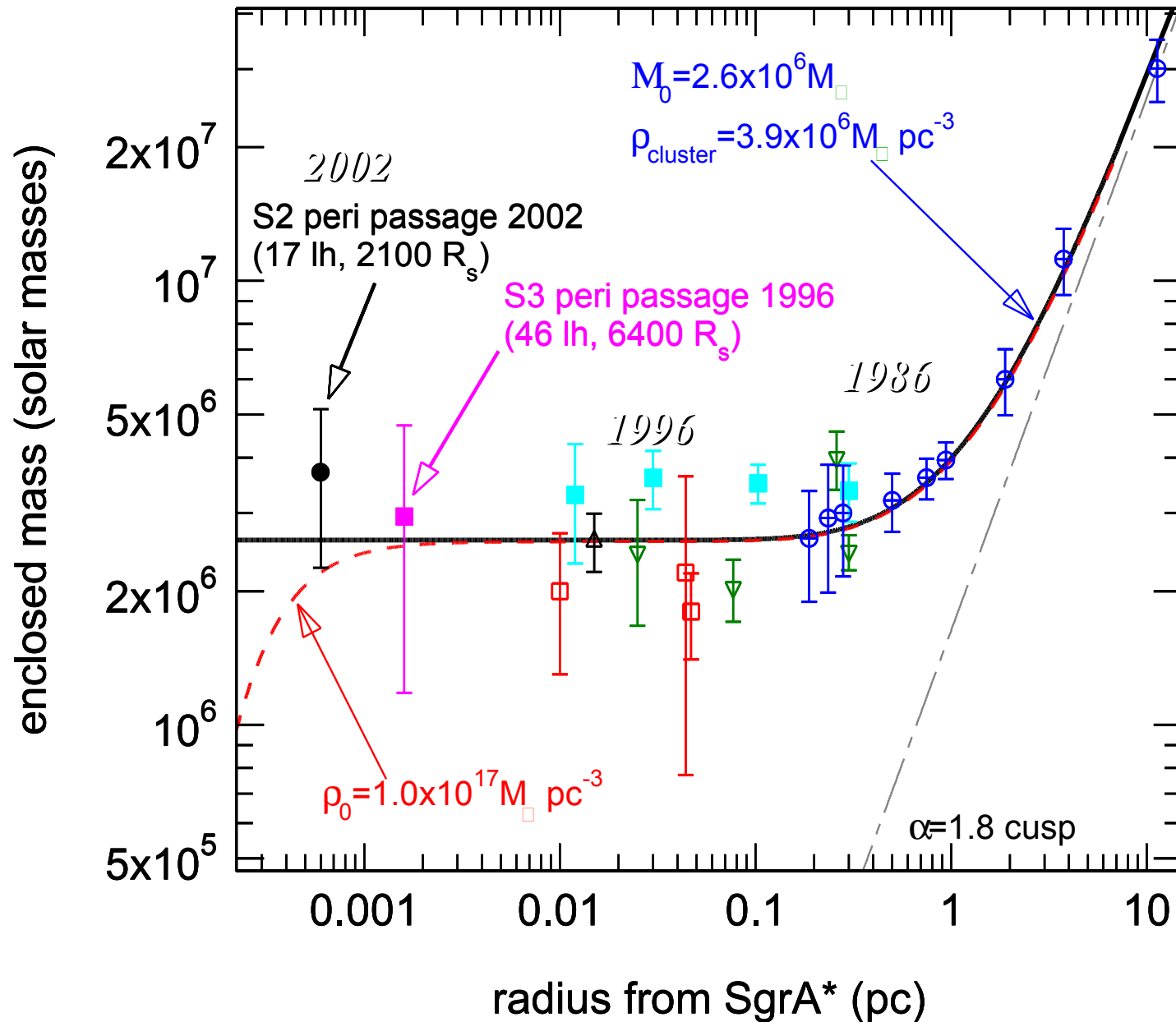
Das schwarze Loch



Auch vermutet in den Zentren
einer Reihe anderer Galaxien

Mit bis zu 1000 km/s bewegen sich die Zentralsterne um ein Objekt mit 2.5 Millionen Sonnenmassen: **Sgr A*** im Zentrum bewegt sich mit „nur“ 20 km/s !

Das zentrale schwarze Loch



Schödel et al., NATURE 419, 694, 2002 (Oct 17th)

Entstehung der Milchstraße

Lynden-Bell Theorie:

Ort, Alter und chem. Zusammensetzung der Sterne sagt uns:

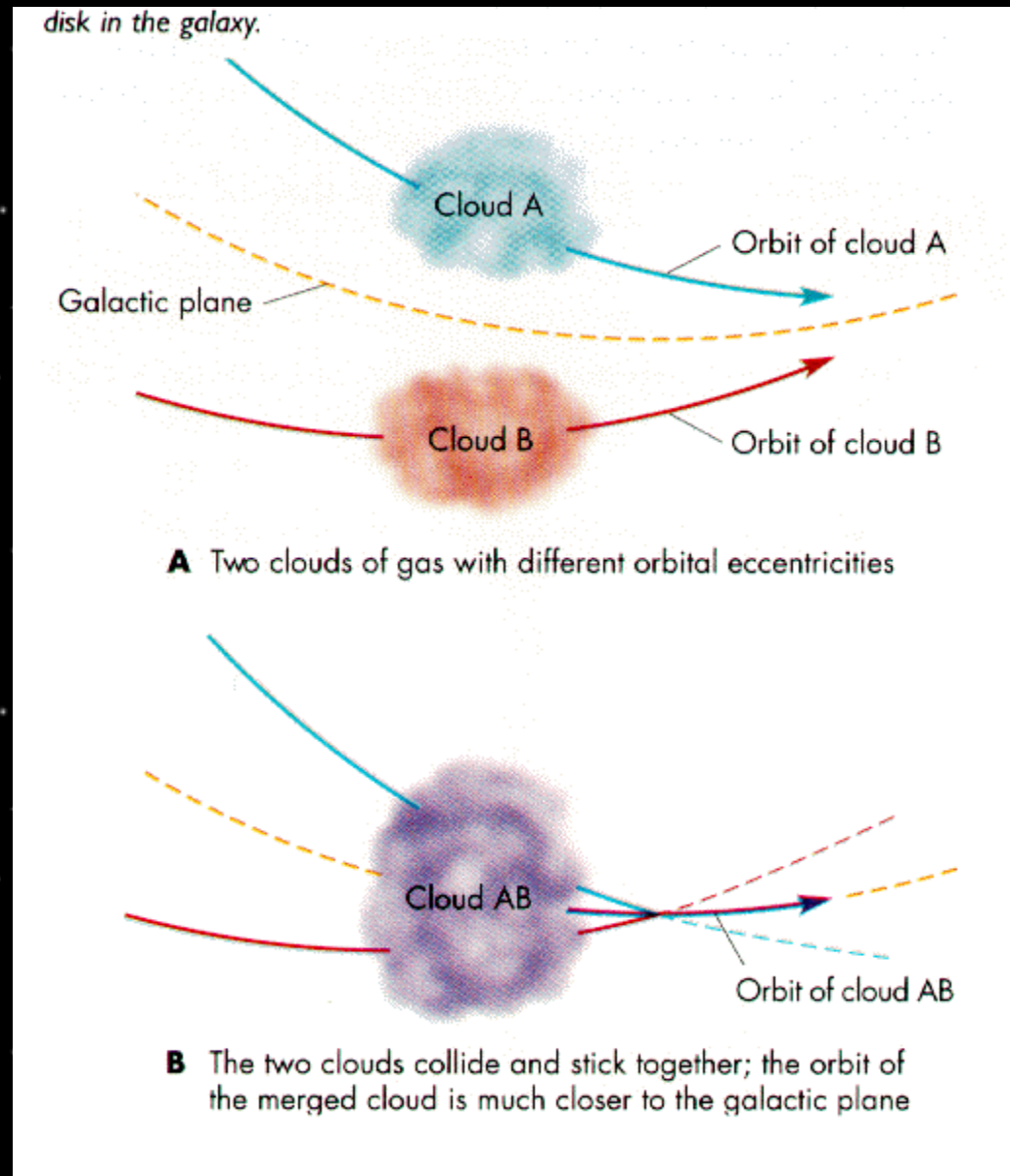
Galaxien bilden sich vermutlich ähnlich wie Sonnensysteme
⇔ kondensierende Wolke

Drehimpulserhaltung führt zur Zunahme der
Rotationsgeschwindigkeit in der Kontraktionsphase
⇔ Abflachen der protogalaktischen Wolke in der
Äquatorialebene

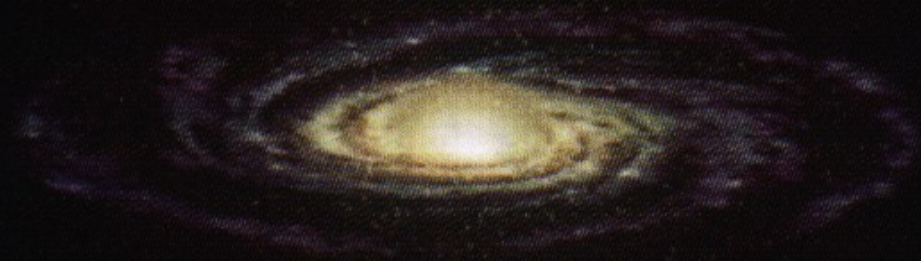
Sterne, die sich vor dem Abplatten gebildet haben,
verbleiben als 1. Generation im Halo

Abplattung in der galaktischen Ebene

Wolken
kollidieren
inelastisch



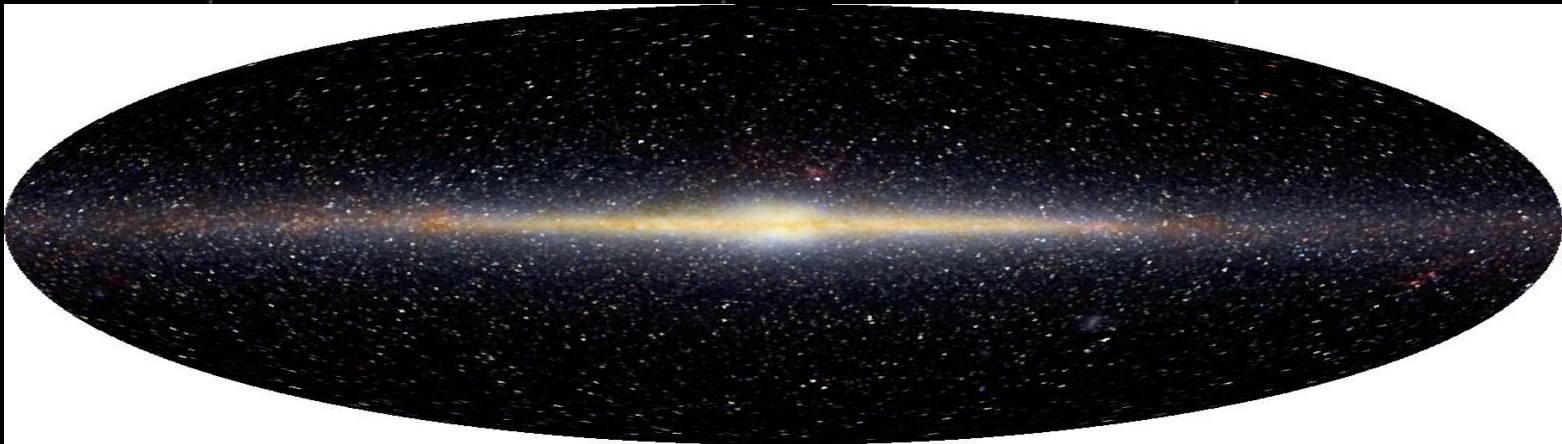
Entstehung der Milchstraße



Milliarden Jahre später sorgt der Stern-Gas-Stern-Zyklus für anhaltende Sternentstehung in der Scheibe. Das Fehlen von Gas im Halo verhindert die Sternentstehung außerhalb der Scheibe.

Zusammenfassung

- Milchstraße ist zweitgrößte Galaxie der Lokalen Gruppe
- mißt im Durchmesser ca. 30 kpc
- über 100 Milliarden (10^{11}) Sonnen sind enthalten
- Masse von 750 Milliarden bis 1 Billion Sonnenmassen ($0.75 - 1 \times 10^{12}$)
- Scheibe mit Spiralstruktur und ellipsoidem „Bauch“



Milky Way with COBE

Zusammenfassung

- Die Milchstraße ist eine Spiralgalaxie vom Typ SAB(rs)bc II
- Unser Sonnensystem befindet sich ca. 6pc über der galaktischen Ebene und 8kpc vom galaktischen Zentrum entfernt
- umkreist das galaktische Zentrum mit 250 km/s und braucht etwa 200 Mio. Jahre für einen Umlauf

