Die Milchstraße: Morphologie und Kinematik

25. Januar, 2007

Laura Baudis, lbaudis@physik.rwth-aachen.de
Physikalisches Institut Ib, RWTH Aachen

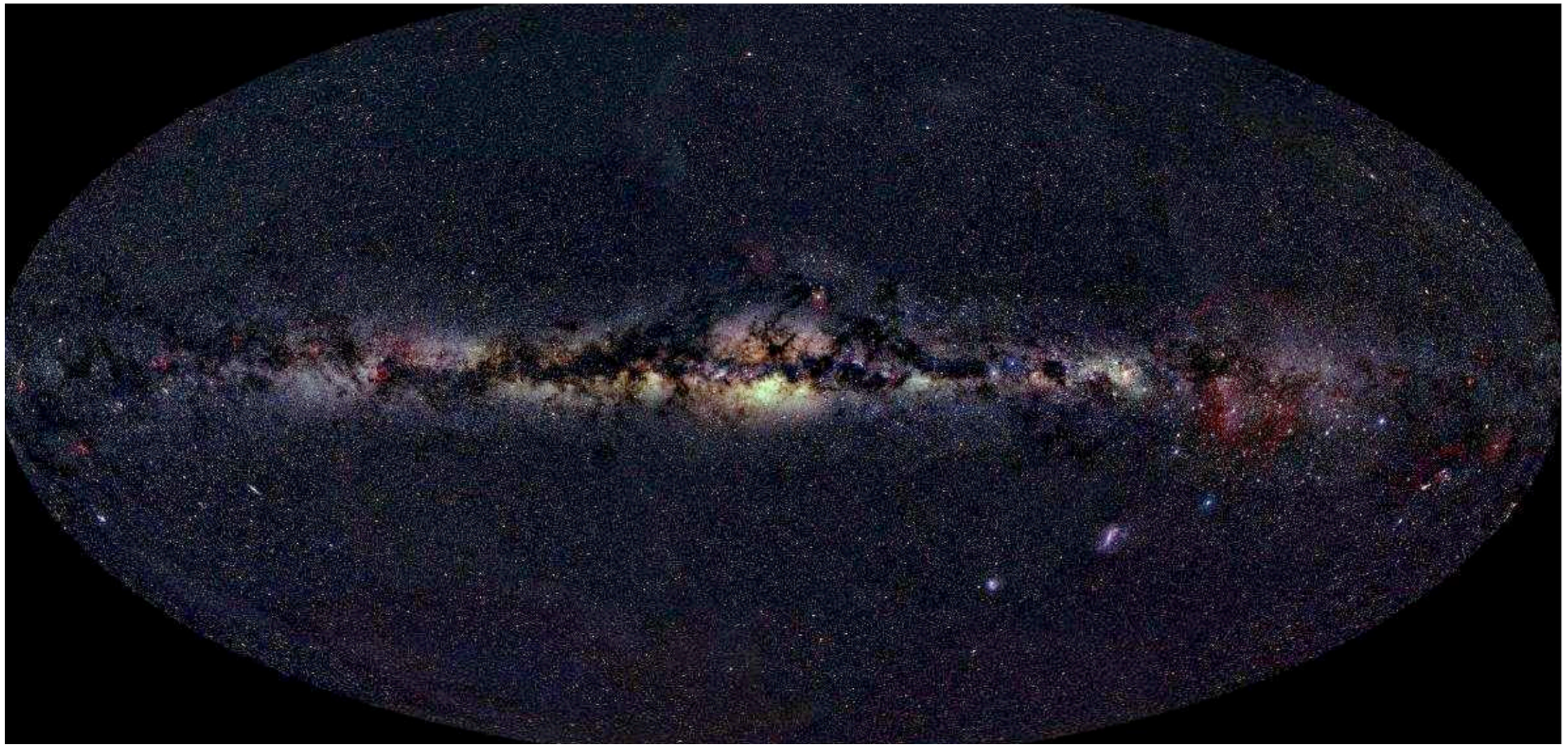
Inhalt

- Entfernungsbestimmungen in der Milchstraße
- Struktur der Galaxis, Komponenten
- Kinematik der Milchstraße
- Galaktische Rotationskurve

- Literatur:
- Carroll, Ostlie, Kapitel 24; Weigert, Wendker, Wisotzki, Kapitel 6; Unsöld, Baschek, Kapitel 11, P. Schneider, Kapitel 2

Die Milchstraße als Galaxie

- komplexer System aus Sterne, Staub, Gas und dunkle Materie



Die Milchstraße als Galaxie

- Wie entsteht aus einem Bild der Milchstraße aus unserer Perspektive ein realistisches Modell galaktischer Struktur?

- Beobachtung von Molekülwolken

  => “tracer” der Spiralstruktur

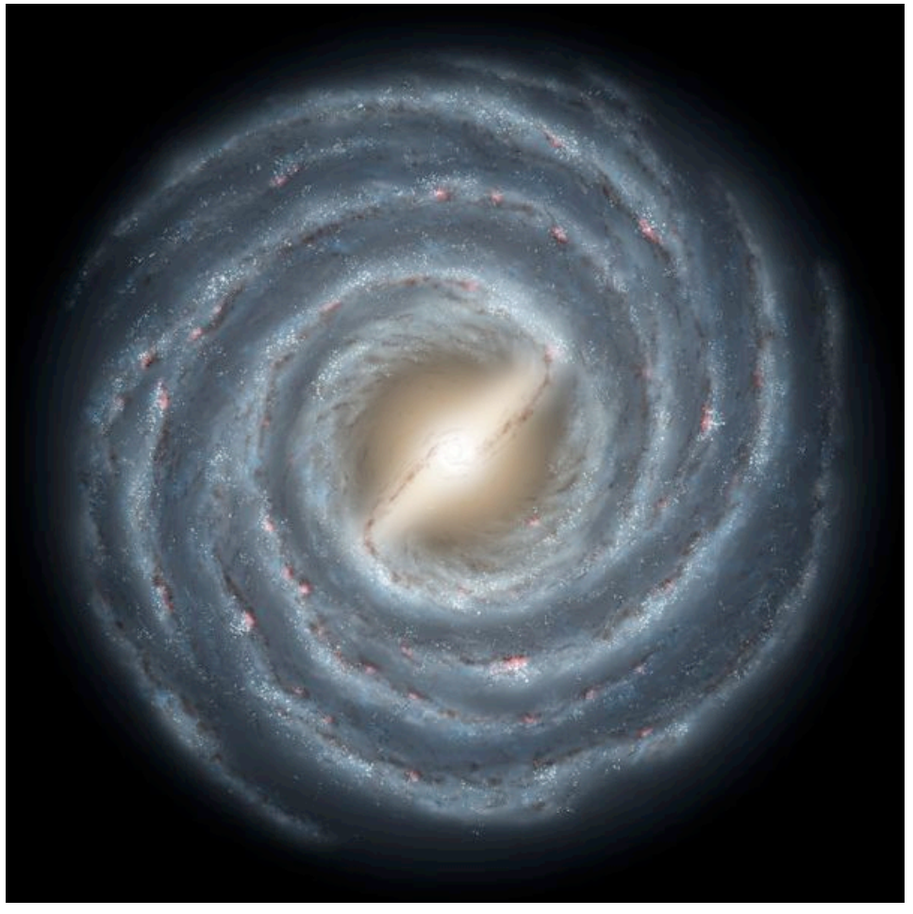
- **Untersuchung von:**

  → Sterndichten

  → Masseverteilung der Milchstraße

  → Rotation und Kinematik

  → Komponenten und großskalige Struktur des Galaxis



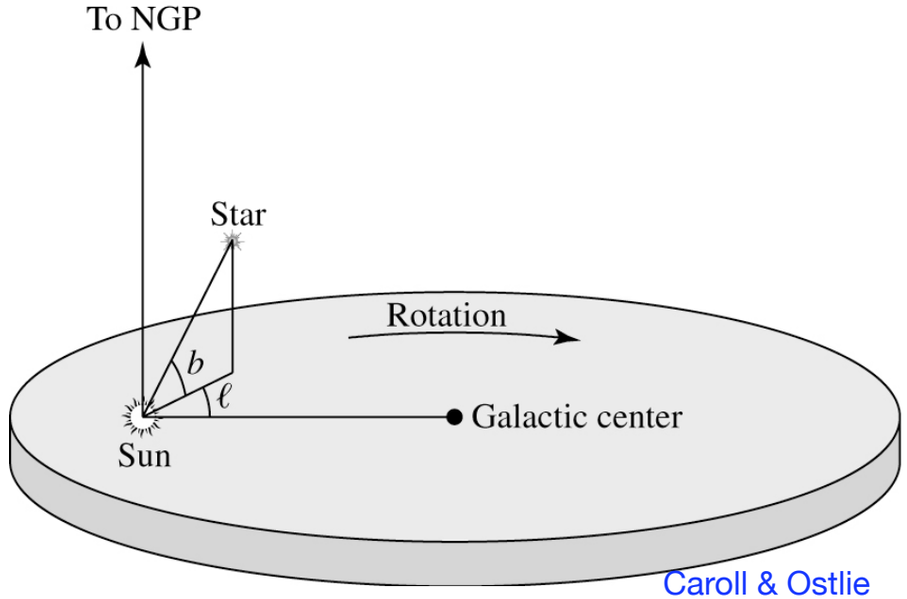
Sternzählung

- Beobachtung:

- die Milchstraße erscheint als ein fast kontinuierliches Band von Sternen, um ~ 62.6° gegen den Himmelsäquator geneigt => **flache Scheibe**
- Galaktisches Koordinatensystem:
- **b = galaktische Breite,** b = [-90°, + 90°]

  = Winkelabstand einer Quelle von der galaktischen Ebene
- **l = galaktische Länge**, l = [-180°, + 180°]

  = senkrechte Winkelkoordinate zu b
- **l =0°, b = 0° ⇒ Richtung zum galaktischen Zentrum**



Caroll & Ostlie

- Absorption durch Staub + Anwesenheit heller Sterne ⇒ Beobachtungen extragalaktischer Quellen in Richtung der Scheibe sehr schwierig ⇒ beste Beobachtungsbedingungen bei großen b; $|b| \lesssim 10°$: “zone of avoidance”

Entfernungsbestimmung in der Galaxis

- Zentrales Problem der Astronomie. Position von Quelle an der Sphäre => 2d-Bild. Für 3d-Information wird die Entfernung benötigt.
- Methoden:

  Trigonometrische Parallaxen: die nahen Sterne verändern ihre Positionen am Himmel relativ zu weit entfernten Quellen durch die Bewegung der Erde um die Sonne.

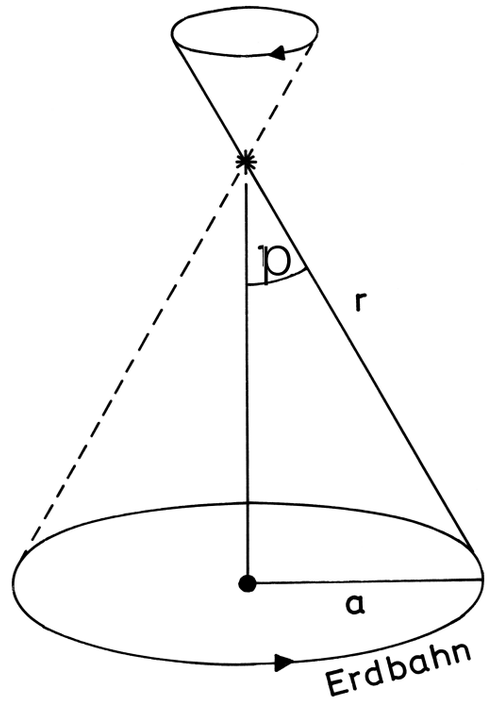
  Erinnerung

$$r = \frac{1\,AE}{\sin p} \simeq \frac{1}{p}\,AE$$

$$r = \frac{2.063 \times 10^5}{p''}\,AE$$

1 pc (parallax-second)$=2.063 \times 10^5\,AE = 3.086 \times 10^{18}\,cm$

$$r = \frac{1}{p''}\,pc$$



- bis ca ~ 300 pc (~ 30 pc vom Boden)

Entfernungsbestimmung in der Galaxis

- **Eigenbewegung**: Sterne bewegen sich relativ zur Sonne als Fkt. der Zeit
- Radiale Geschwindigkeits-Komponente v_r über Dopplerverschiebung von Spektrallinien messbar:

$$\mathrm{v}_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\boldsymbol{c} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}\boldsymbol{c}$$

- Tangentialkomponente v_t ist durch die Eigenbewegung meßbar (Parallaxe wird abgezogen). Die Eigenbewegung μ wird in Millibogensekunden/Jahr gemessen (mas/yr).

$$\mathrm{v}_t = \boldsymbol{D} \cdot \mu$$

$$\frac{\mathrm{v}_t}{\boldsymbol{km}/\boldsymbol{s}} = 4.47\left(\frac{\boldsymbol{D}}{1\boldsymbol{pc}}\right)\left(\frac{\mu}{1''/\boldsymbol{Jahr}}\right) = 4.47\left(\frac{\boldsymbol{p}}{1''}\right)^{-1}\left(\frac{\mu}{1''/\boldsymbol{Jahr}}\right)$$

- Hipparcos hat für ca. 10^5 Sterne Eigenbewegungen mit Genauigkeit von wenigen mas/yr gemessen

Sternstromparallaxe

- Offene Sternhaufen lösen sich mit der Zeit auf (kinetische Energie der Einzelsterne, externe Gravitationseinflüsse, differentielle Rotation der Milchstraße), aber sie bleiben lange gebundene Systeme und können viele 100 Millionen Jahre alt sein

  => Sterne haben im Wesentlichen eine gemeinsame Raumbewegung

  => Möglichkeit zur Entfernungsbestimmung

- Perspektivischer Effekt: alle Eigenbewegungen weisen auf den selben Punkt am Himmel, den Konvergenzpunkt K, der bestimmbar ist. Für einen gegebenen Haufenstern ist bekannt:
  Winkelabstand Φ zu K, Eigenbewegung μ, Radialgeschwindigkeit v_r:

- Dann folgt:

$$v_r = v \cdot \cos\phi$$

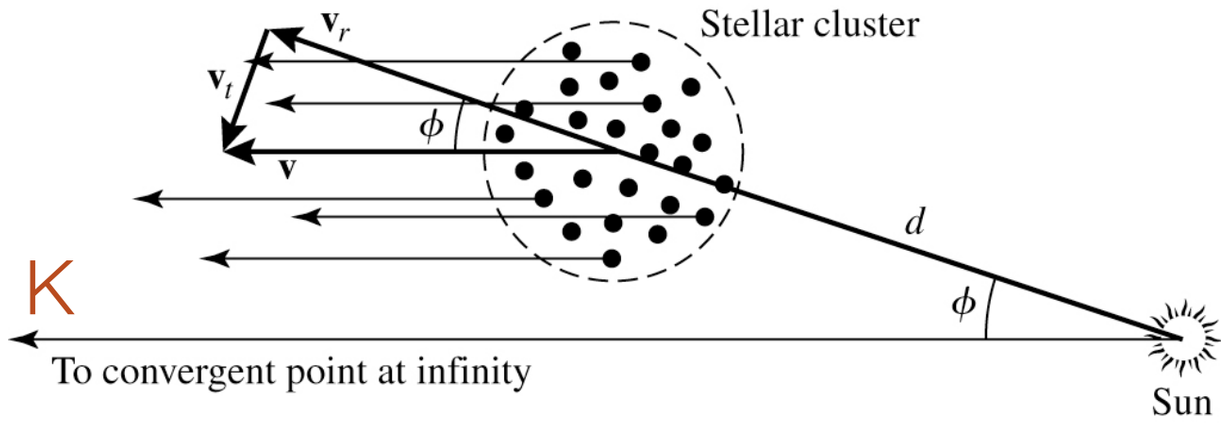
$$v_t = v \cdot \sin\phi$$

$$v_t = \mu \cdot r$$

$$\Rightarrow r = \frac{v_t}{\mu} = \frac{v_r}{\mu} \tan\phi$$

- Mittelung über viele Sterne

  => guter Wert für die Entfernung



Entfernungsbestimmung in der Galaxis

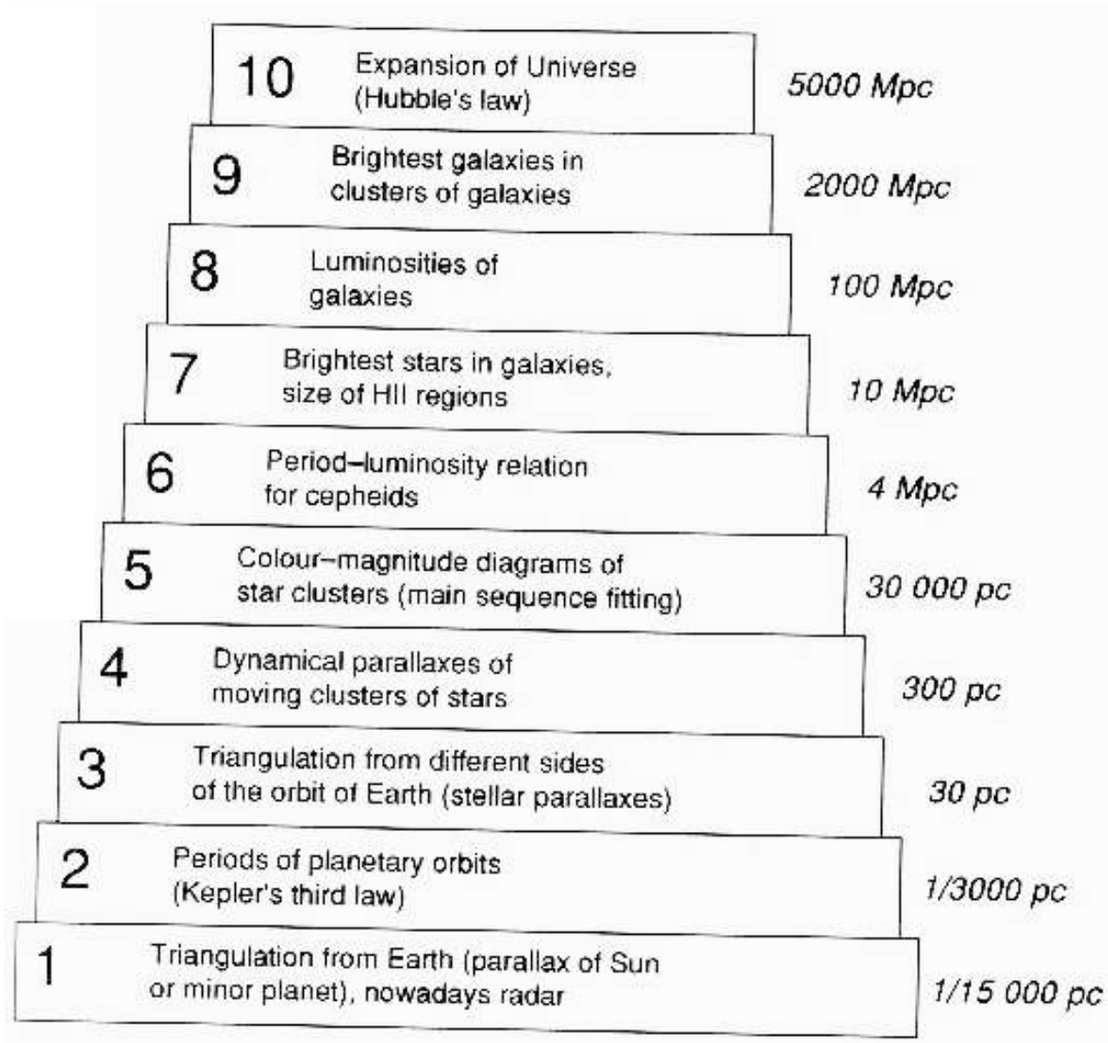
- **Photometrische Parallaxe**: durch Anpassung des Entfernungsmoduls eines Sternhaufens (“main sequence fitting”), da die absoluten Helligkeiten der Sterne auf der HR bekannt sind
- **Spektroskopische Parallaxe:** aus Spektrum des Sterns kann der Spektraltyp und die Leuchtkraftklasse bestimmt werden => absolute Helligkeit M
- **Perioden-Leuchtkraft-Beziehung** von Cepheiden,

  W Virginis-Sterne, RR Lyrae Sterne etc:

  => Leuchtkraft aus Pulsationsperiode

  => Verbindung zu extragalaktischen Methoden zur Entfernungsbestimmung

Problem: Unsicherheiten können sich fortsetzen, Methoden, Entfernungen direkt zu messen sind sehr wichtig



Entfernungsleiter, Karttunen

Struktur der Galaxis

- **Die Milchstraße besteht aus:**

  galaktische Scheibe

  sphäroidaler, zentraler Bulge

  sichtbarer (stellarer) Halo

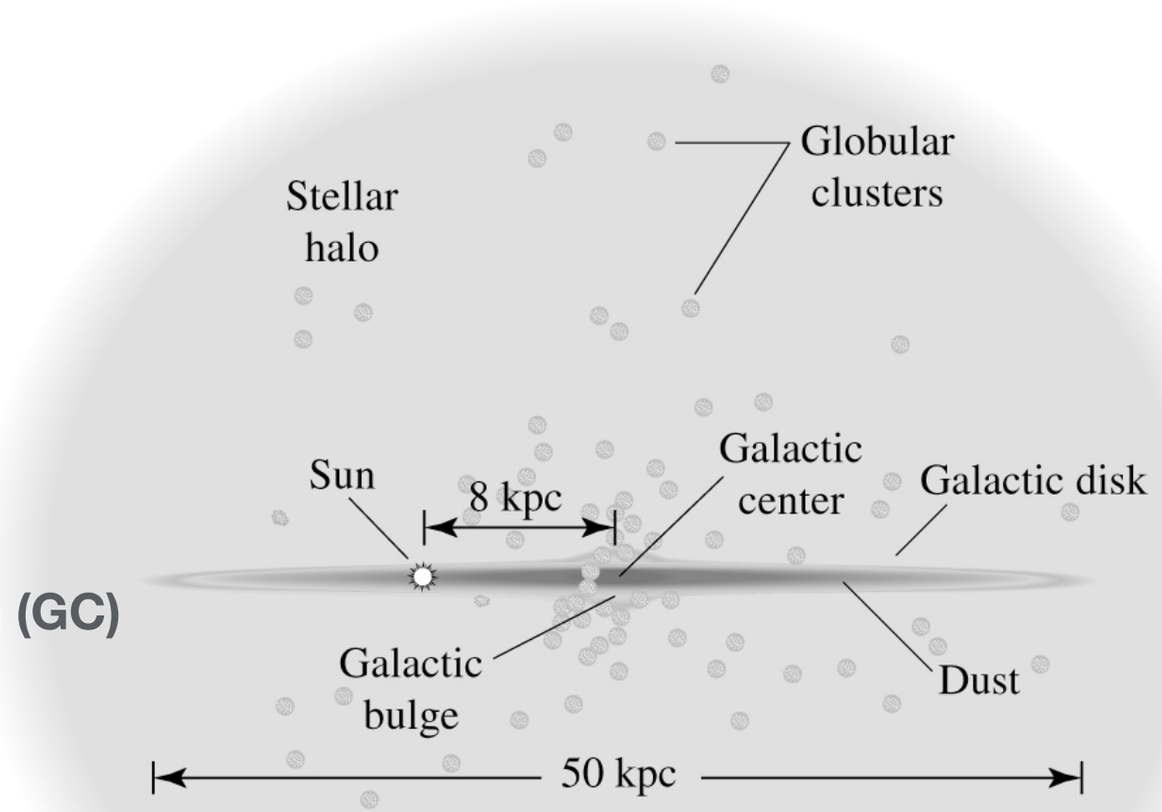
  dunkler Halo

- **Die Entfernung Sonne-galaktisches Zentrum (GC)**

  R_0 = 8.5 kpc (offizieller Wert, IAU 1985)

  neuerer Wert **R_0 = 8.0±0.5 kpc**

- **Der Durchmesser der Scheibe D ≈ 50 kpc**



Caroll & Ostlie

Die Galaktische Scheibe

- Die Scheibe besteht aus verschiedenen Komponenten:
- **junge dünne Scheibe** (young thin disk): Gebiet der momentanen Sternentstehung, enthält das meiste Gas und Staub der Galaxis

  Skalenhöhe (Distanz, über die die Dichte um e^{-1} abfällt): $\mathbf{z_{y,thin} \approx 50\ pc}$

- **alte dünne Scheibe** (old thin disk): dicker, mit einer Skalenhöhe von $\mathbf{z_{thin} \approx 325\ pc}$
- **dicke Scheibe** (thick disk): Skalenhöhe von $\mathbf{z_{thik} \approx 1.4\ kpc}$
- Die Dichte ρ der dicken Scheibe beträgt nur etwa 2% der Dichte in der Scheibenebene. Die Dichteverteilung der Sterne wird aus Sternzählungen erhalten:

$$n(z,R) = n_0 (e^{-z/z_{thin}} + 0.02 \cdot e^{-z/z_{thik}}) \cdot e^{-R/h_R}$$

- mit z = vertikale Höhe über die Mittelebene der Galaxis
- R = radiale Distanz vom GC
- $h_R \approx 3.5$ kpc, die Skalenlänge der Scheibe
- $n_0 \approx 0.02$ Sterne/pc^3 im Bereich $4.5 \leq M_V \leq 9.5$

Die Galaktische Scheibe

- Die Sonne ist Mitglied der jungen dünnen Scheibe bei **z = 30 pc** oberhalb der Scheibenebene (kinematisch). Das Alter passt eher zur dünnen Scheibe
- Die **Leuchtkraftdichte** (Leuchtkraft pro Volumeneinheit) der dünnen Scheibe wird durch folgende Funktion modeliert:

$$L(R,z) = L_0 e^{-R/h_R} \operatorname{sech}^2(z / z_0)$$

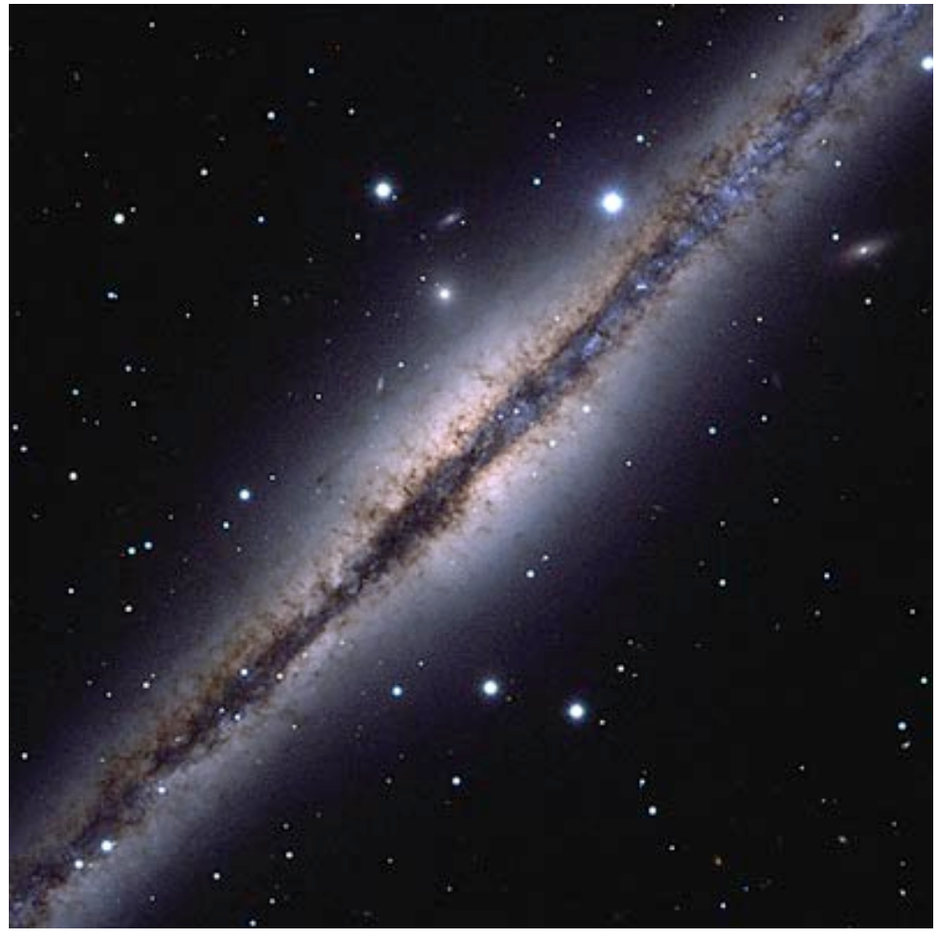
- wobei:

$$\operatorname{sech}(z / z_0) = \frac{2}{e^{z/z_0} + e^{-z/z_0}}$$

- für die dünne Scheibe ist

$$z_0 = 2 z_{thin}$$

$$L_0 \simeq 0.05 L_\odot pc^{-3}$$



NGC 891 (APOD)

dünne, junge Scheibe “von außen”

Die Galaktische Scheibe: chemische Zusammensetzung und Alter

- Unterschied der chemischen Komposition in dünner und dicker Scheibe:

  Sterne der Population I (Pop I): metallreich, Z ~ 0.02, hauptsächlich in dünner Scheibe

  Sterne der Population II (Pop II): metallarm, Z ~ 0.001, hauptsächlich in dicker Scheibe

  (Z = Metallizität, Massenanteil der Elemente schwerer al Li)

- **Alter-Metallizitäts-Beziehung** ([Fe/H] als Indikator des Alters einer stellaren Population):

  die Metallizität sollte mit dem Alter der Sterne korellieren (zB wird durch SN-Explosionen das ISM mit Fe angereichert, daher sollten die jüngsten Sterne die höchste relative Fe-Häufigkeit aufweisen). Die Metallizität wird auch definiert als das Fe/H-Verhältnis in der Atmosphäre eines Sterns relative zur Sonne:

$$\left[\frac{Fe}{H}\right] \equiv \log_{10}\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right) - \log_{10}\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_{\odot}$$

- [Fe/H] = -4.5 für extrem alte Sterne (3×10^{-5} der solaren Häufigkeit)
- [F/H] = 1 für sehr junge Sterne
- jedoch ist diese Beziehung nicht sehr eng, da es lokale Effekte der Anreicherung gibt (zB lokale Supernovae)

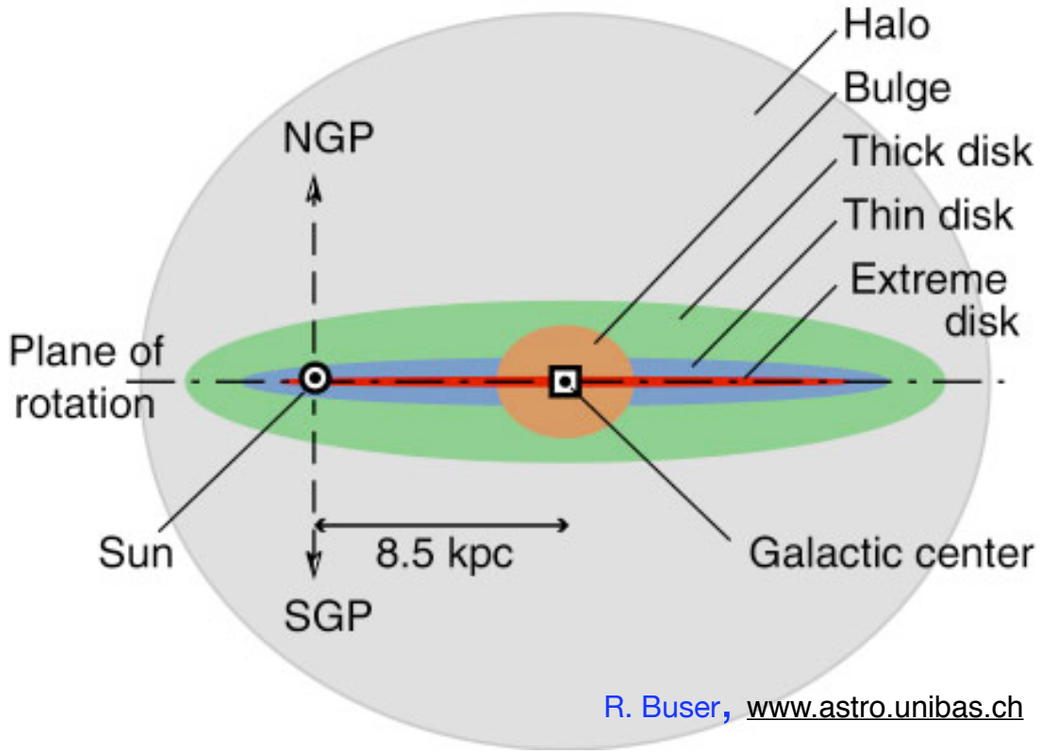
Die Galaktische Scheibe: chemische Zusammensetzung und Alter

- Charakteristische Werte für die Metallizität:

in dünner Scheibe -0.5 ≲ [Fe/H] ≲ 0.3

in dicker Scheibe -0.6 ≲ [Fe/H] ≲ -0.4

(im stellaren Halo: -4.5 ≲ [Fe/H] ≲ -0.5)



R. Buser, www.astro.unibas.ch

⇒ Sterne in dünner Scheibe signifikant jünger als Sterne in dicker Scheibe

- entweder - Sternentstehung begann in dicker Scheibe früher, oder hörte dort früher auf (Sternentstehung in der dicken Scheibe wahrscheinlich > 12 Gyr, in der dünnen Scheibe wahrscheinlich <12 Gyr und bis heute andauernd)
- oder - Sterne sind von der dünnen in die dicke Scheibe “gewandert”, zB durch Störungen des Gravitationspotentials durch Begleitergalaxien ⇒ Verteilung in z-Richtung wird breiter

Die Galaktische Scheibe: Masse

- Masse der dünnen Scheibe:

  → in Sternen ~ **$6\times10^{10}\ M_\odot$**, plus ~ **$0.5\times10^{10}\ M_\odot$** in Staub und Gas

- Leuchtkraft der Sterne in dünner Scheibe im B-Band: **$L_B = 1.8\times10^{10}\ L_\odot$**

  => Masse-zu-Leuchtkraft Verhältnis

$$\frac{M}{L_B} \approx 3\frac{M_\odot}{L_\odot}$$ dünne Scheibe

- Wenn der größte Teil der Masse und der Leuchtkraft von HR-Sternen kommt, gilt die M-L-Beziehung:

$$L\left[L_\odot\right] = \left(M\left[M_\odot\right]\right)^\alpha, \qquad \alpha = 2.5 - 4$$

  ⇒ Ersetzen der Leuchtkkraft und Auflösen nach Masse ergibt:

$$\langle M \rangle = 3^{1/(1-\alpha)} M_\odot \approx 0.8 M_\odot$$ => typischer Scheibenstern hat eine Masse knapp unterhalb der Sonnenmasse

- Dicke Scheibe: in den 80er identifiziert, im Detail unsicher;

- Leuchtkraft der Sterne in dicker Scheibe: **$L_B = 2\times10^8\ L_\odot$** (~1% der dünnen Scheibe), Masse **$M \approx (2\text{-}4)\times10^9\ M_\odot$** (~3% der dünnen Scheibe) => größeres M/L_B-Verhältnis

Die Galaktische Scheibe: Staub und Gas

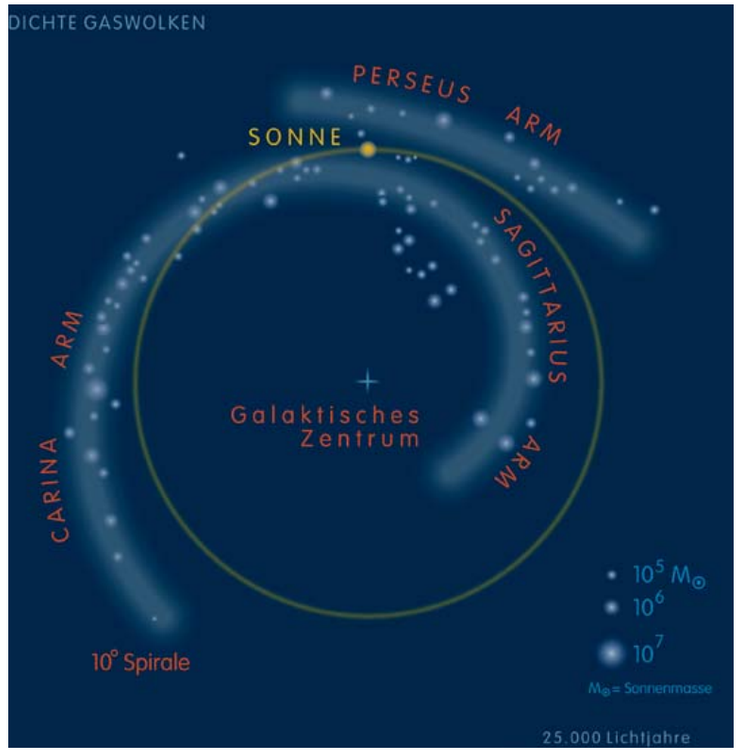
- **Spiralstruktur:** in externen Galxien oft die auffallendste Struktur, vor allem in blauen Licht, aber auch im NIR ⇒ aktive Sternentstehung (sehr junge Objekte wie O, B - Sterne) und H-II Regionen

- Spiralarme:

  weniger prägnant im roten Licht → alte Sterne hatten Zeit,

  sich aus den Spiralarmen wegzubewegen

  Gas und Staub hauptsächlich in Spiralarmen konzentriert:



H_2 und Staub bei 3 kpc ≲ R ≲ 8 kpc, innerhalb |z| ≲ 90 pc; $\mathbf{M_{H2} \approx 10^9 M_\odot}$

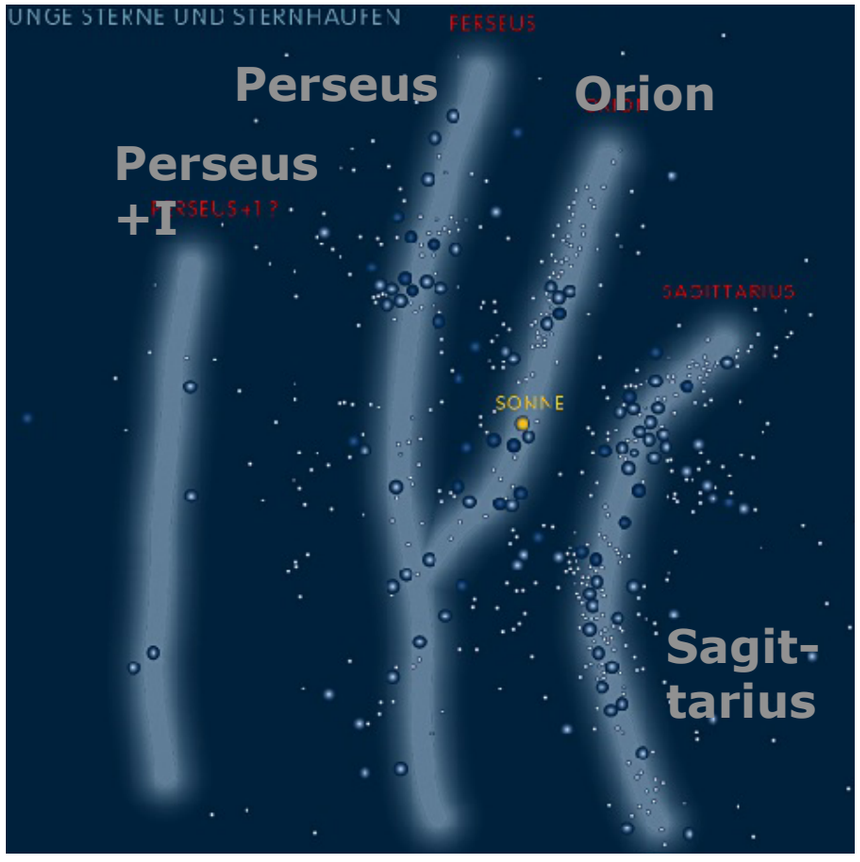
HI bis weit draußen: R ≲ 25 kpc, Skalenhöhe innerhalb R ≲ R_0: ~ 160 pc;

$\mathbf{M_{HI} \approx 4 \times 10^9 M_\odot}$

in Sonnenumgebung $\rho_{Gas} \approx 0.04\ M_\odot/pc^3$

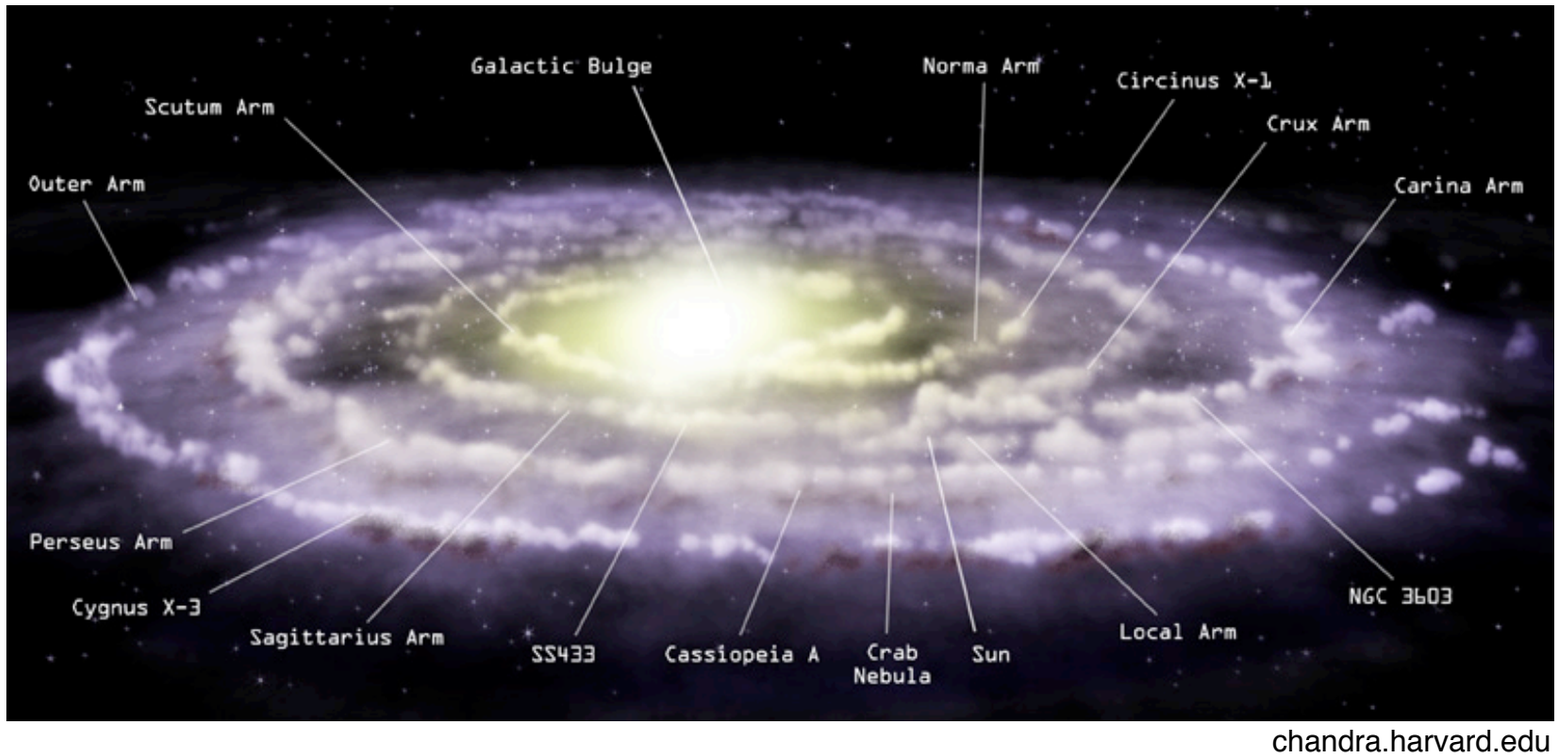
für große R ≳ 12 kpc → enorm vergrößerte Skalenhöhe ~ 1 kpc, weiterhin ist dort die Gasscheibe verbogen (warped) → Ursprung des warps noch unklar

Die Galaktische Scheibe:Spiralstruktur



↑ lokale Spiralstruktur:
O-Sterne und junge Sternhaufen

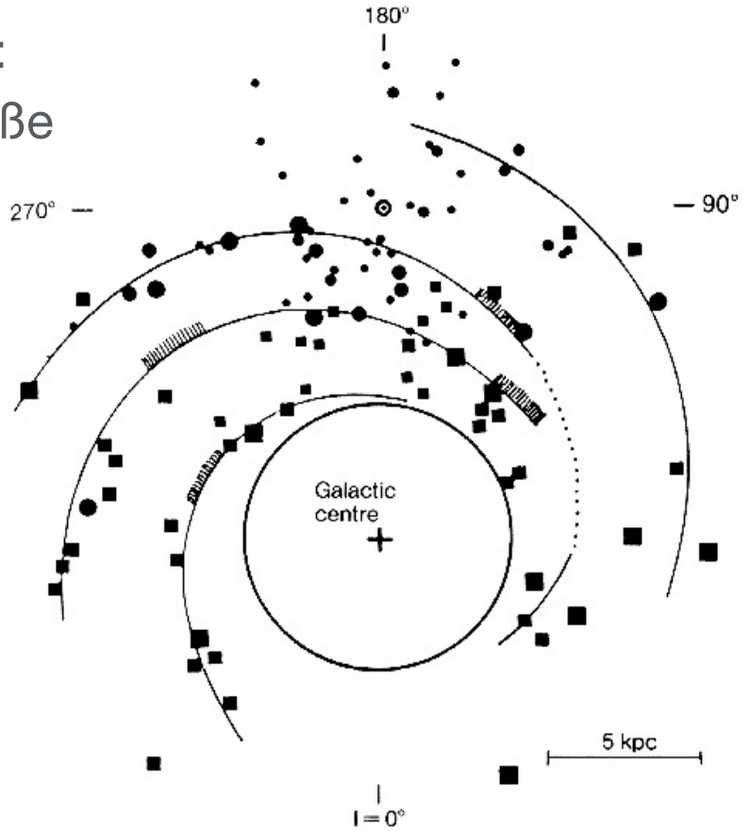
↓ schematische Dartellung der Spiralarme + einige Röntgen-Quellen



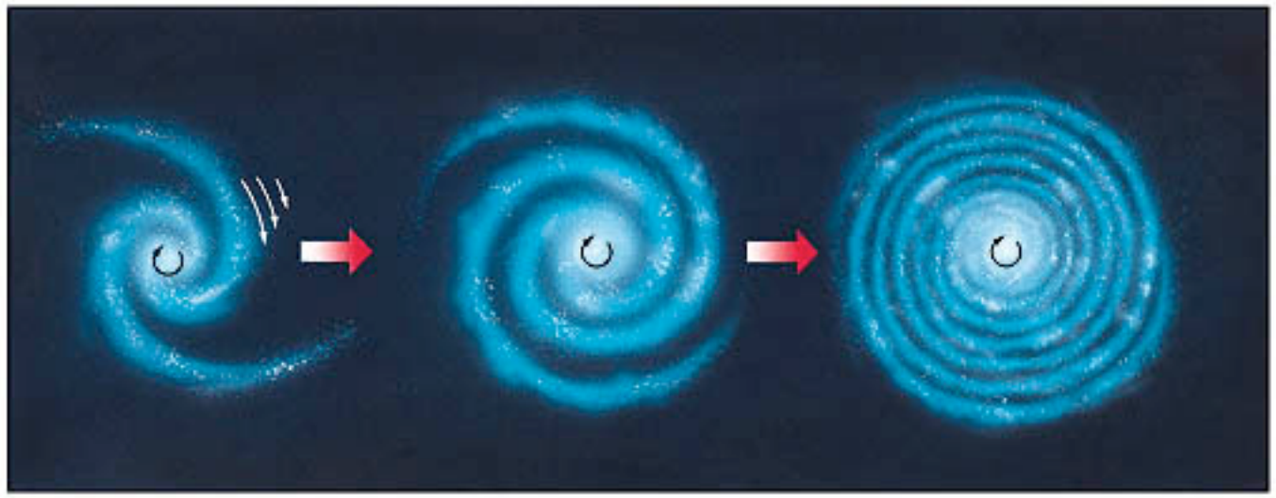
chandra.harvard.edu

Natur der Spiralarme

- **Was sind Spiralarme?** Sie können nicht an Sternen gebunden sein: “Galaktisches Jahr” für Sonne ist ~ 230 Millionen Jahre → Milchstraße hat ~ 50 Rotationen hinter sich und Spiralstruktur hätte sich durch differentielle Rotation schon längst aufgewickelt ↓



diff. Rotation



physics.uoregon.edu/~jimbrau/

Dichtewellen (Lin und Shu, 60er Jahre): Spiralarme sind starr rotierende Dichtewellen. Sterne und Gas passieren diese Wellen, Gas wird beim Eintritt stark komprimiert ⇒ Kollaps + Sternentstehung

~ 10^7 Jahre für Durchgang durch Spiralarm → ausreichend Zeit für die Entwicklung von Molekülwolken, HII-Regionen und jungen Sternen, die auf die Arme konzentriert sind

Der Galaktische Bulge

- der Bulge ist wegen Extinktion hauptsächlich im IR beobachtbar (IRAS, COBE)
- **Bulge:** zentrale Verdickung der Galaxis, mit Skalenhöhe ≈ 400 pc und M ≈ 10^{10} $M_\odot$
- Aus Form und Kinematik: Bulge ist nicht sphärisch, sondern ein Balken mit R ≈ 1 kpc
- (Milchstraße typisch, 2/3 aller Galaxien zumindest einen kleinen, zentralen Balken)
- **Helligkeitsverteilung I(R) im Bulge ist empirisch:**

$$\log\left(\frac{I(R)}{I_e}\right) = -3.33\left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/4} - 1\right]$$

R_e = 0.7 kpc: effektiver Radius
I_e = Oberflächenhelligkeit bei R_e
[I] = $L_\odot/pc^2$

$R^{1/4}$-Gesetz: de Vaucouleurs Profil:
fällt wesentlich langsamer an für große R, verglcihen mit Exponentialgesetz

- mit R_e definiert als (Hälfte der L innerhalb R_e):

$$\int_0^{R_e} dR \cdot R \cdot I(R) = \frac{1}{2}\int_0^{\infty} dR \cdot R \cdot I(R)$$

Der Galaktische Bulge

- **Altersverteilung im Bulge**: Metallizität variiert stark **$-1 \lesssim [Fe/H] \lesssim 1$** mit Mittelwert = 0.3, d.h. die mittlere Metalizität ist 2 × die solare ⇒ relative junge Sternpopulation
- Jedoch findet man auch sehr metallarme RR Lyrae Sterne, also alte Sterne

  ⇒ Trennung der Zugehörigkeit Bulge-Scheibe nicht einfach, die junge Komponente könnte auch Teil der Scheibe sein; bisher unklar
- **Masse des Bulge:**

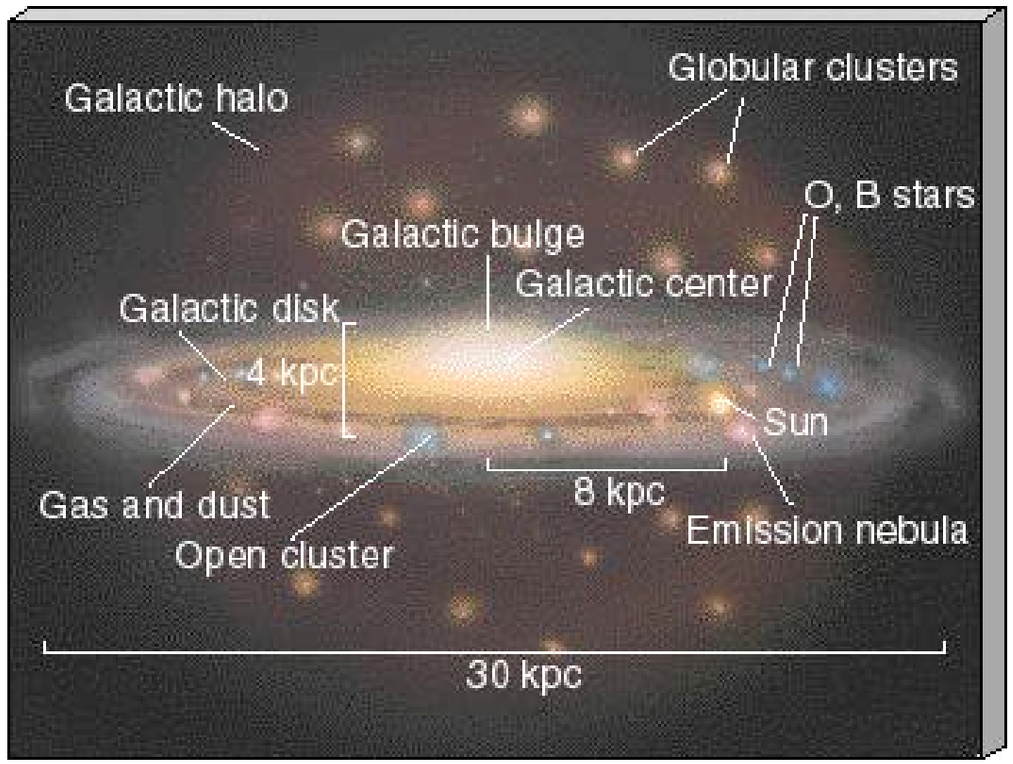
  in Sternen ~ 10^{10} $M_\odot$, plus ~ 10^8 $M_\odot$ molekulares Gas

  Leuchtkraft der Sterne im Bulge im B-Band: **$L_B = 3\times10^9$ $L_\odot$**

$$\frac{M}{L_B} \approx 3\frac{M_\odot}{L_\odot}$$ Bulge

⇒ Masse-Leuchtkraft Verhältnis sehr ähnlich

wie in der dünnen Scheibe



Der stellare Halo

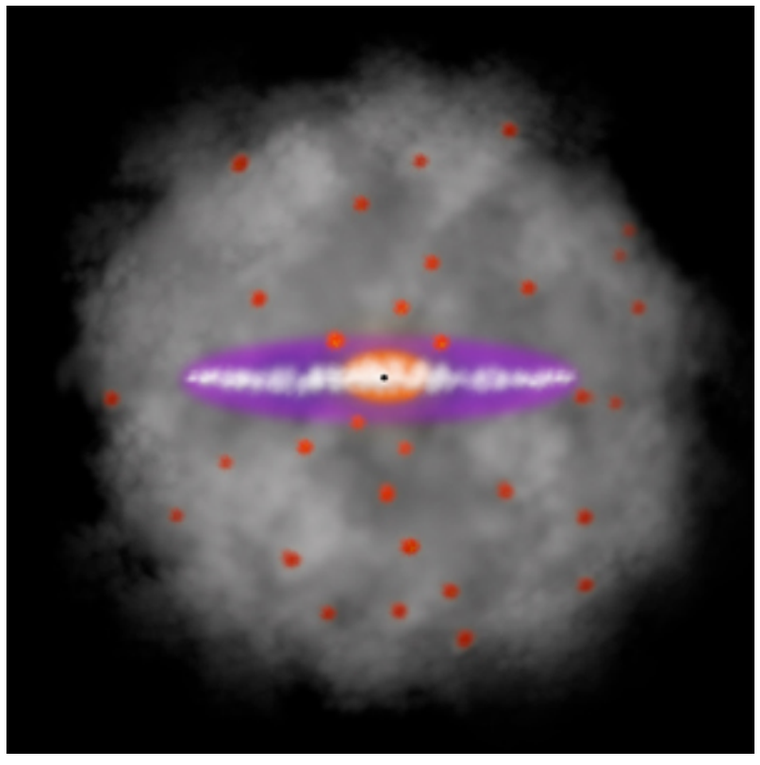
- der **sichtbare Halo** der Milchstraße besteht aus Kugelsternhaufen und Feldsternen mit großer Geschwindigkeit zur galaktischen Ebene (high-velocity stars)
- alte Kugelsternhaufen: [Fe/He] < -0.8: sphärisch verteilt um GC
- jüngere Kugelsternhaufen: [Fe/He]: > -0.8: flachere Verteilung, eventuell Teil der dicken Scheibe, etwa gleiche Skalenhöhe
- die meisten Kugelsternhaufen: **r ≲ 35 kpc**, einige r > 60 kpc (eingefangen von LMC, SMC ?)
- wobei $r = \sqrt{R^2 + z^2}$ Abstand vom GC
- Feldsterne: bis r ≈ 50 kpc => $r_{halo} \approx$ **50 kpc**
- **Dichteverteilung** von metallarmen Kugelsternhaufen und Feldsternen

$$n(r) = n_{0,halo} \cdot r^{-3.5}$$

$n_{0,halo}$ ~ 0.2% der Dichte in Mittelebene der dünner Scheibe

- bei sichtbaren Wellenlängen ist der **effektive Radius** des $r^{1/4}$ Halo-Gesetzes (Radius, bei dem 1/2 des Halo-Lichts emittiert wird)

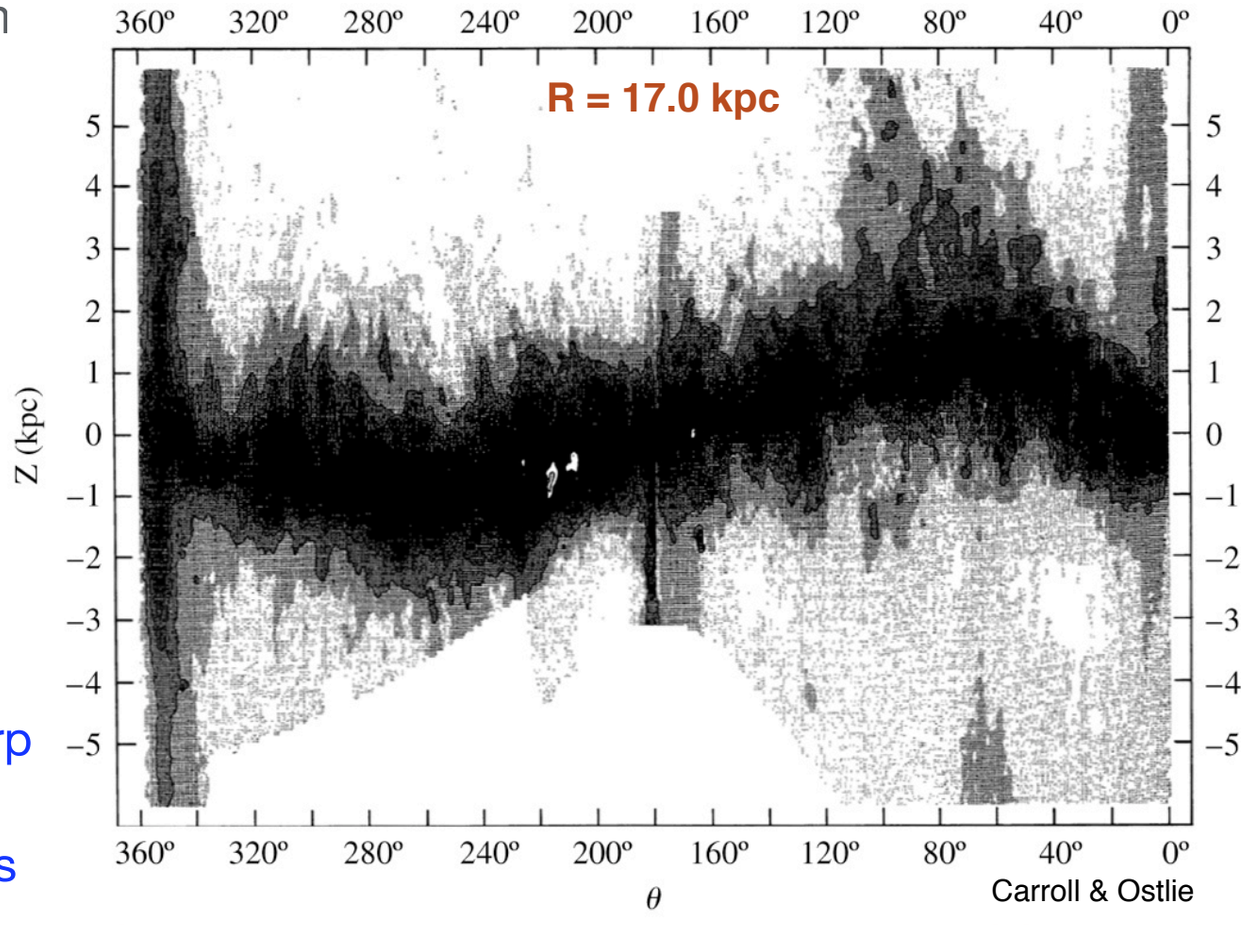
$$r_e = 2.7\ kpc$$



chandra.harvard.edu/

Gaswolken in der Milchstraße

- Gas + Staubwolken: unterschiedliche T, M, und ρ (siehe Vorlesung 11, ISM)
- Verteilung in der Galaxis durch Messungen der Extinktion und Re-Emission des Staubes, der 21-cm HI-Linie, der CO-Linien als ‘tracer’ von H_2-Gas
- **Neutraler Wasserstoff (HI) und kühler Staub:** hauptsächlich in der galaktischen Ebene, mit vertikalen Skalenhöhen von ≈ 90 pc; außerhalb 12 kpc → Skalenhöhen von > 800 pc + warp
- **HI-Wolken** auch bei hohen Latituden, die meisten mit großen negativen Radialgeschwindigkeiten (zur galaktischen Ebene hin) von ≈ 400 km s^{-1} (gemessen mit 21-cm Linie)
  Quellen - noch unklar, SN-Ausbrüche ?
- **Heißes Gas**, bis zu 50 kp vom GC - “koronales Gas”, jedoch genaue Entfernung unklar



Galaktische Mittelebene bei z = 0, Richtung zum GC ist bei 0º

HI-Verteilung bei R =17 kpc und warp
⇒ Info über Verteilung der Masse
in den äußeren Regionen der Galaxis

Sternpopulationen in der Milchstraße

- Historisch: Einteilung in Pop I und Pop II (W. Baade, 1940). Heute eine feinere Klassifikation
- **Extreme Pop I**: Überriesen, Cepheiden, offene Sternhaufen: sehr junge Sterne, typisches Alter < 10^8 yr, Metallizität 2x derjenigen in der Sonne, Konzentration in Spiralarmen
- **Ältere Pop I:** A-Sterne, normale Riesen, .. : typisches Alter 10^8 yr - 10^9 yr; Konzentration in der galaktischen Ebene
- **Scheibenpopulation** (auch die Sonne): Hauptteil der Sterne, Konzentration zum Zentrum. Typisches Alter 2 - 6 $\times 10^9$ yr
- **Jüngere Pop II**: Konzentration zum Zentrum hin, nur geringe Abflachung zur Ebene. Typisches Alter 6 - 9 $\times 10^9$ yr. Etwa 10-20 fache geringere Metallizität als Pop I Sterne.
- **Extreme Pop II**: Halo-Sterne, Kugelhaufen. Kugelsymmetrische Verteilung, Konzentration zum GC. Typisches Alter > 10^{10} yr (so alt wie die Milchstraße selbst). Etwa 1000-fache geringere Metallizität als Pop I Sterne.

Population	**$\langle z \rangle$ [pc]**	**$\langle v_z \rangle$ [km s^{-1}]**	**M [10^9 $M_\odot$]**
Extr. Pop I	120	8	3
Ältere Pop I	160	10	10
Scheibenpop.	400	16	40
Jüngere Pop II	700	25	40
Extr. Pop II	2000	75	20

Zusammenfassung: Masse/Leuchtkraft der sichtbaren Komponenten

- Gesamtleuchtkraft im B-Band:

$$L_{B,tot} = (2.3 \pm 0.6) \times 10^{10} L_{\odot}$$

- jedoch 1/3 der Leuchtkraft im IR-Bereich, daher die gesamte bolometrische Leuchtkraft der Galaxis:

$$L_{bol} = 3.6 \times 10^{10} L_{\odot}$$

- **Summe der Massen:** dünne + dicke Scheibe, interstellares Gas + Staub, galaktischer Bulge, sichtbarer Halo:

$$M_{tot,lum} \approx 9 \times 10^{10} M_{\odot}$$

- wie wir gleich sehen werden, kann diese Gesamtmasse die Bewegung der Sterne und des Gases bei $R >> R_0$ nicht erklären: eine Komponente der Galaxis fehlt noch!
- diese “dunkle” Komponente könnte nicht nur die Bewegung der Sterne/Gas beeinflussen, sondern auch die warps, die am Rande der sichtbaren Scheibe beobachtet werden, generieren!

Zusammenfassung: Komponenten der Milchstraße

	neutrales Gas	dünne Scheibe	dicke Scheibe	Bulge	stellarer Halo	DM Halo
$M\,(10^{10}\mathrm{M}_\odot)$	0.5	6	0.2 bis 0.4	1	0.1	55
$L_\mathrm{B}\,(10^{10}\mathrm{L}_\odot)$	–	1.8	0.02	0.3	0.1	0
$M/L_\mathrm{B}\,(\mathrm{M}_\odot/\mathrm{L}_\odot)$	–	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)	0.16	0.325	1.4	0.4	3	2.8
σ_w (km s^{-1})	5	20	60	120	90	–
[Fe/H]	$> +0.1$	–0.5 bis +0.3	–1.6 bis –0.4	–1 bis +1	–4.5 bis –0.5	–
Alter (Gyr)	0 bis 17	< 12	14 bis 17	10 bis 17	14 bis 17	?

Tabelle 1: Parameter und charakteristische Werte für die Komponenten der Milchstraße. Eine Skalenhöhe bezeichnet die Höhe über der Scheibe, bei der die Dichte auf 1/e abgesunken ist. σ_w ist die Geschwindigkeitsdispersion in Richtung senkrecht zur Scheibe.

P. Schneider

Kinematik der Milchstraße: Standort und Sonnenbewegung

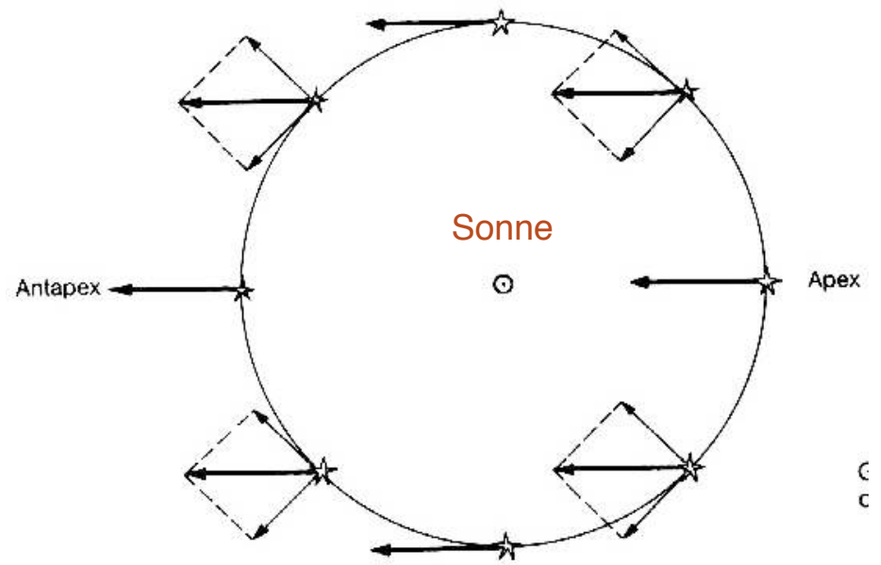
- Standort für alle Beobachtungen ist die Sonne, daher sollte ihre Bewegung möglichst gut bekannt sein. Die Sonnenbewegung ergibt sich aus der Analyse der **Radial- und Eigenbewegungen** benachbarter Sterne:
- **Apex:** der Punkt, auf den sich die Sonne scheinbar zu bewegt
- Die Sterne in der Nähe des Apex scheinen sich im Mittel

  auf die Sonne zu bewegen (negative v_r)
- Bewegung der Sterne (und der Sonne) in der Scheibe der

  Milchstraße ist zusammengesetzt aus:

  → systematische Rotation in der Ebene der Scheibe (Koordinate θ)

  → zufällig verteilte Pekuliarbewegungen in alle Richtungen (R, θ, z)



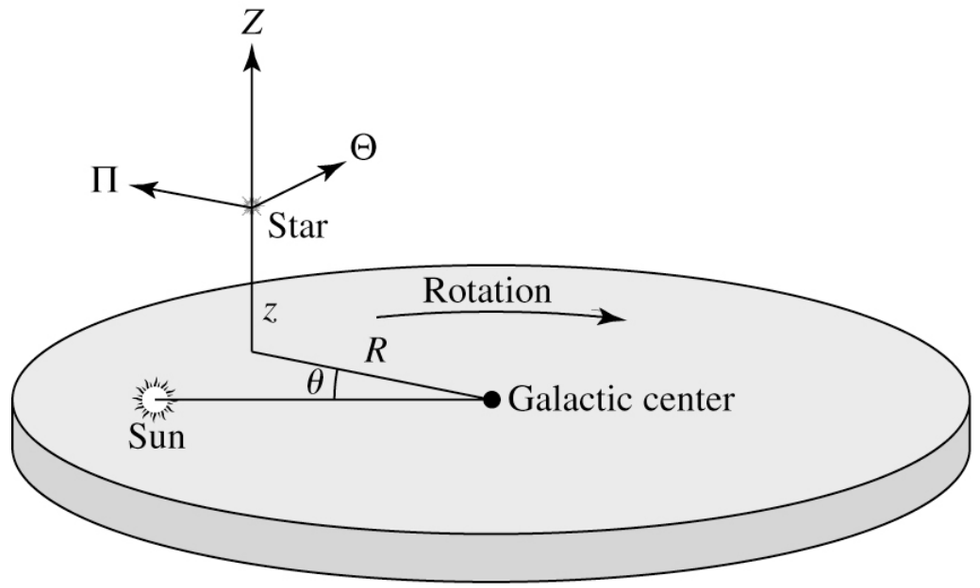
Kartunnen

- **Benötigt:** KS, in dem die Bewegung der Sonne sinnvoll zu messen ist, und als Referenz für die Untersuchung der Bewegungen in der Milchstrase auf großen Skalen dienen kann. Dh “lokaler Standard”, der nur an der großskaligen Rotation teilnimmt und auf die Pekuliarbewegungen korrigiert ist.

Local Standard of Rest

- Der gesuchte Standard: **Local Standard of Rest (LSR)**
- **Koordinatensystem: (R, θ, z)**
- **Geschwindigkeitskomponenten**

$$\Pi \equiv \frac{dR}{dt}, \quad \Theta \equiv R\frac{d\theta}{dt}, \quad Z \equiv \frac{dz}{dt}$$



Carroll & Ostlie

Zylindrisches Koordinatensystem (R, θ,z)

- LSR: Punkt, der instantan in der Sonne zentriert ist, und sich in einer perfekten Kreisbahn um das GC bewegt. Daher muss gelten:

$$\Pi_{LSR} \equiv 0, \quad \Theta_{LSR} \equiv \Theta_0, \quad Z_{LSR} \equiv 0$$

mit $\Theta_0 \equiv \Theta(R_0)$

Kreisbahngeschwindigkeit am Ort der Sonne

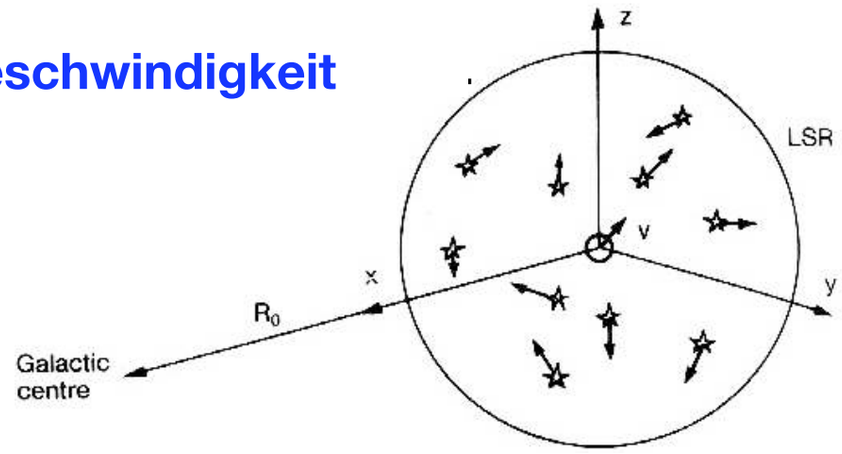
- Obwohl sich das LSR ständig ändert, ist die Zeitskala der Änderung (Orbitperiode $\approx 230 \times 10^6$ yr) so groß, dass dieser Effekt vernachlässigt werden kann!

Pekuliargeschwindigkeiten

- Die Geschwindigkeit eines Sterns relativ zum LSR: **Pekuliargeschwindigkeit**

$$\boldsymbol{V} = (\boldsymbol{V}_{R,}\boldsymbol{V}_{\theta,}\boldsymbol{V}_{z}) \equiv (\mathrm{u,v,w})$$

$$\mathrm{u} = \Pi - \Pi_{LSR} = \Pi$$
$$\mathrm{v} = \Theta - \Theta_{LSR} = \Theta - \Theta_{0}$$
$$\mathrm{w} = \boldsymbol{Z} - \boldsymbol{Z}_{LSR} = \boldsymbol{Z}$$



- Die Pekuliargeschwindigkeit der Sonne rel. zu LSR = **Sonnenbewegung $V_\odot$**
- Ist $V_\odot$ bekannt, so kann man die Geschwindigkeitsmessungen relativ zur Sonne umrechnen in Geschwindigkeiten relativ zum LSR: sei ΔV die Radialgeschwindigkeit eines Sterns relativ zum LSR (direkt meßbar). Dann ist dessen Pekuliargeschwindigkeit:

$$\vec{\boldsymbol{V}} = \vec{\boldsymbol{V}}_{\odot} + \Delta\vec{\boldsymbol{V}}$$

- Wir betrachten ein **Ensemble von Sternen in der Sonnenumgebung**. Annahme: Galaxis ist stationär und axialsymmetrisch => gleich viele Sterne bewegen sich von innen nach außen wie umgekehrt, und gleichviele von oben nach unten wie von unten nach oben:

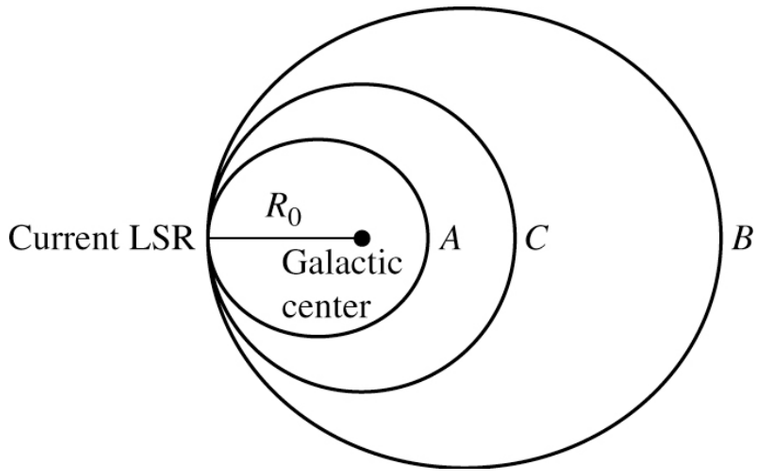
$$\langle \boldsymbol{u} \rangle = \frac{1}{\boldsymbol{N}} \sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{N}} \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{i}} = 0, \quad \langle \boldsymbol{w} \rangle = \frac{1}{\boldsymbol{N}} \sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{N}} \boldsymbol{w}_{\boldsymbol{i}} = 0$$

Pekuliargeschwindigkeiten

- Dies gilt nicht für die v-Komponente, da diese von der Verteilung der Orbits abhängt (nicht nur kreisförmige Orbits!)
- zB sei u = 0 und w = 0 für alle Sterne im sample
  => die Sterne müssen sich entweder am entferntsten Punkt vom GC (apogalacticon), oder am nahesten Punkt (perigalacticon) befinden, when sie mit dem LSR übereinstimmen (hier für Punkt A und B). Damit also 2 Sterne ihren Bahnen folgen können, muss gelten:

$$\Theta_A(\boldsymbol{R}_0) < \Theta_0$$

$$\Theta_B(\boldsymbol{R}_0) > \Theta_0$$



Dies bedeutet, dass $v_A < 0$ und $v_B > 0$. Da es aber mehr Sterne innerhalb als außerhalb der solaren Entfernung zum GC gibt, resultiert:

$$\langle \mathrm{v} \rangle < 0$$

Die Geschwindigkeit eines Sterns relativ zur Sonne ist die Differenz zwischen der Pekuliargeschwindigkeit des Stern und der Sonnenbewegung rel. zum LSR:

$$\Delta \boldsymbol{u} \equiv \boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_\odot, \quad \Delta \mathrm{v} \equiv \mathrm{v} - \mathrm{v}_\odot, \quad \Delta \boldsymbol{w} \equiv \boldsymbol{w} - \boldsymbol{w}_\odot$$

$$\vec{\boldsymbol{V}}_\odot = \left(-\langle \Delta \boldsymbol{u} \rangle, -\boldsymbol{C}\langle \boldsymbol{u}^2 \rangle - \langle \Delta \mathrm{v} \rangle, -\langle \Delta \boldsymbol{w} \rangle\right)$$

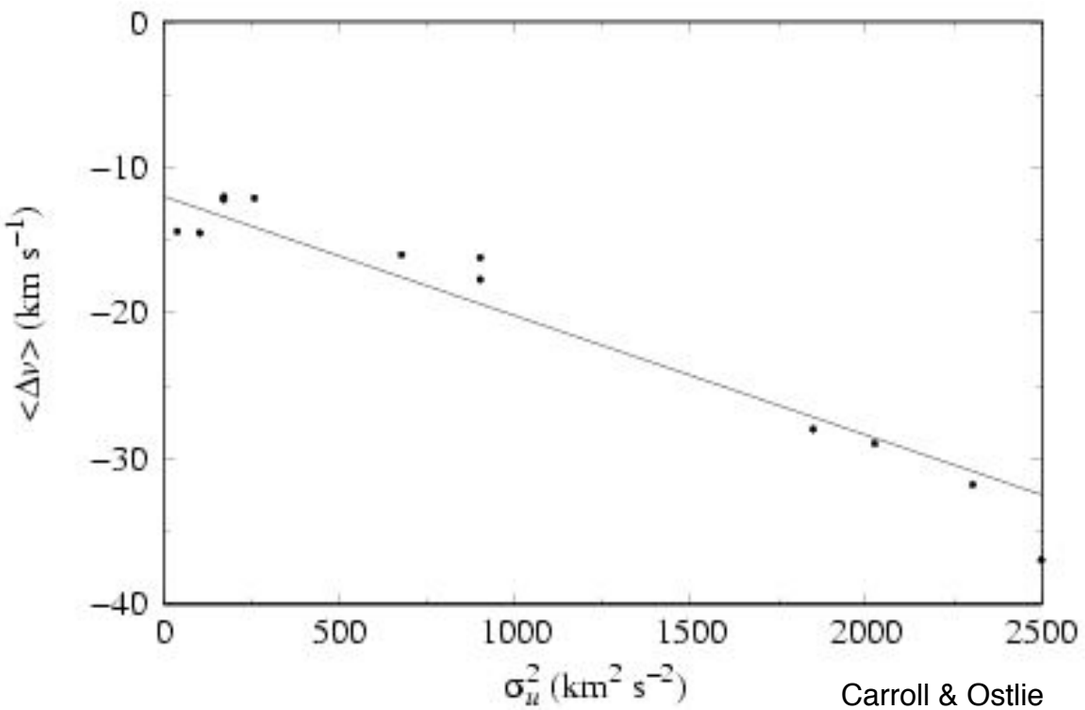
Pekuliargeschwindigkeiten

- Wird nun **$\langle\Delta v\rangle = \langle v\rangle - v_\odot$ gegen $\langle u^2\rangle$** für Sterne der Sonneumgebung aufgetragen (wobei verschiedene Sternpopulationen benutzt werden) => **C und $v_\odot$ direkt aus dem linearen Fit ablesbar**; die anderen Komponenten durch Mittelung. Es folgt:

$$\vec{V}_\odot = (-9, 12, 7)\,km \cdot s^{-1}$$

=> Sonne bewegt sich nach innen, nach oben und schneller, als es einer Kreisbahn an ihrem Ort entspricht, in Richtung **l = 53°, b = 25°** (apex)

=> damit ist $\vec{V}_\odot$ bestimmt, aber nicht **Θ_0, die Rotationsgeschwindigkeit des LSR**!



Carroll & Ostlie

linearer Zusammenhang zwischen $\langle\Delta v\rangle$ und
jeder Punkt: ein “sample” aus Objekten
(zB Überriesen, WZ, Cepheiden, planetariche Nebel, etc)

$v_\odot$ aus y-Achsenabschnitt

C aus Steigung

Rotationsgeschwindigkeit des LSR

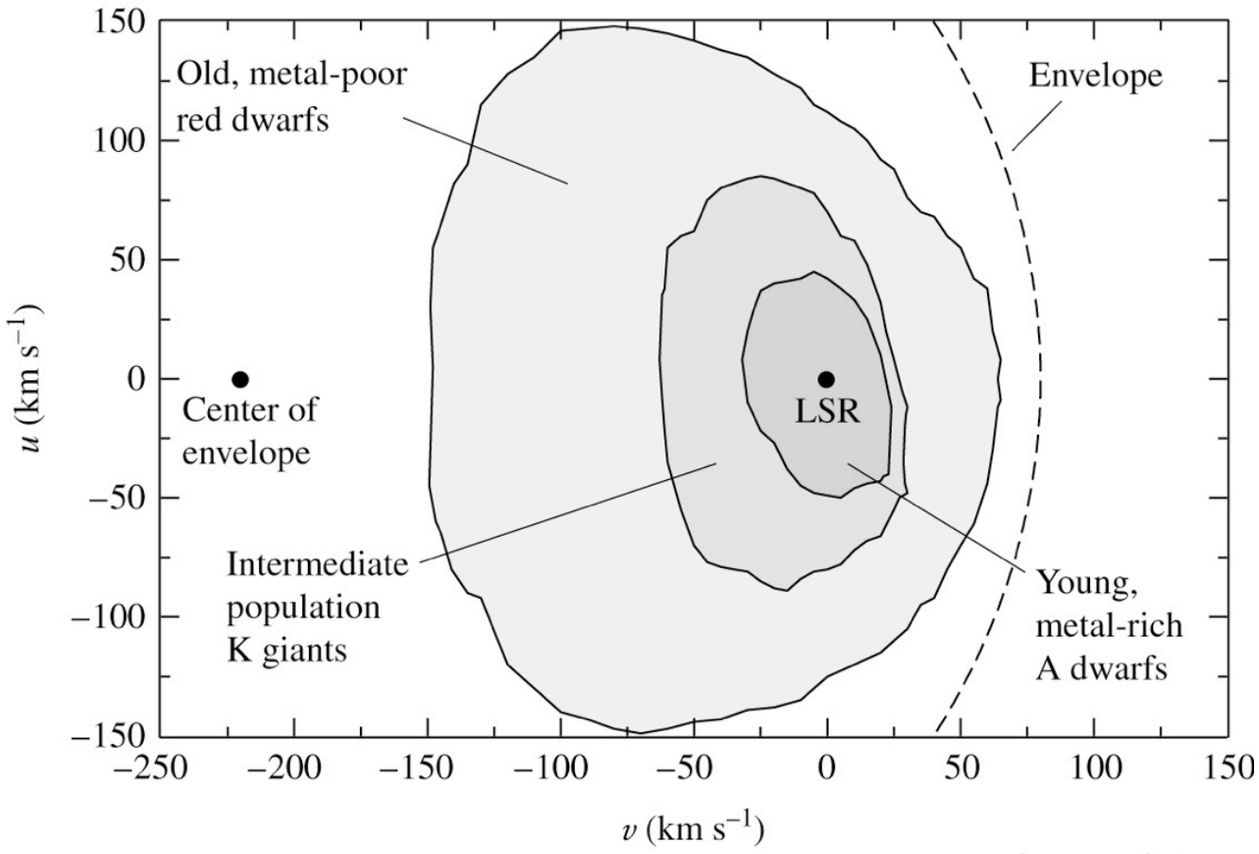
- Da wir jetzt die Sonnenbewegung kennen, können die Geschwindigkeiten der Sterne relativ zur Sonne in Pekuliargeschwindigkeiten relativ zum LSR transformiert werden. Man kann dann eine Komponente der Pekuliarbewegung gegen die andere auftragen für eine spezifische Gruppe (sample) von Sternen in der Sonnenumgebung

  => Informationen über deren Kinematik

  => “velocity ellipsoids”

- ZB: Diagramm von u vs. v => junge Sterne zeigen eine kleine Geschwindigkeitsdispersio alte Sterne -> eine viel größere Variation in u und v

  → (ähnliches Verhalten, wenn w gegen v aufgetragen wird)



Carroll & Ostlie

Rotationsgeschwindigkeit des LSR

- **Geschwindigkeitsdispersion der Sterne:** klein für junge Sterne, größer für ältere Sterne, und noch größer für alte, metallarme Sterne => deutliche Geschwindigkeits-Metallizitäts-Beziehung !

  => Die ältesten Sterne haben die größten Pekuliargeschwindigkeiten

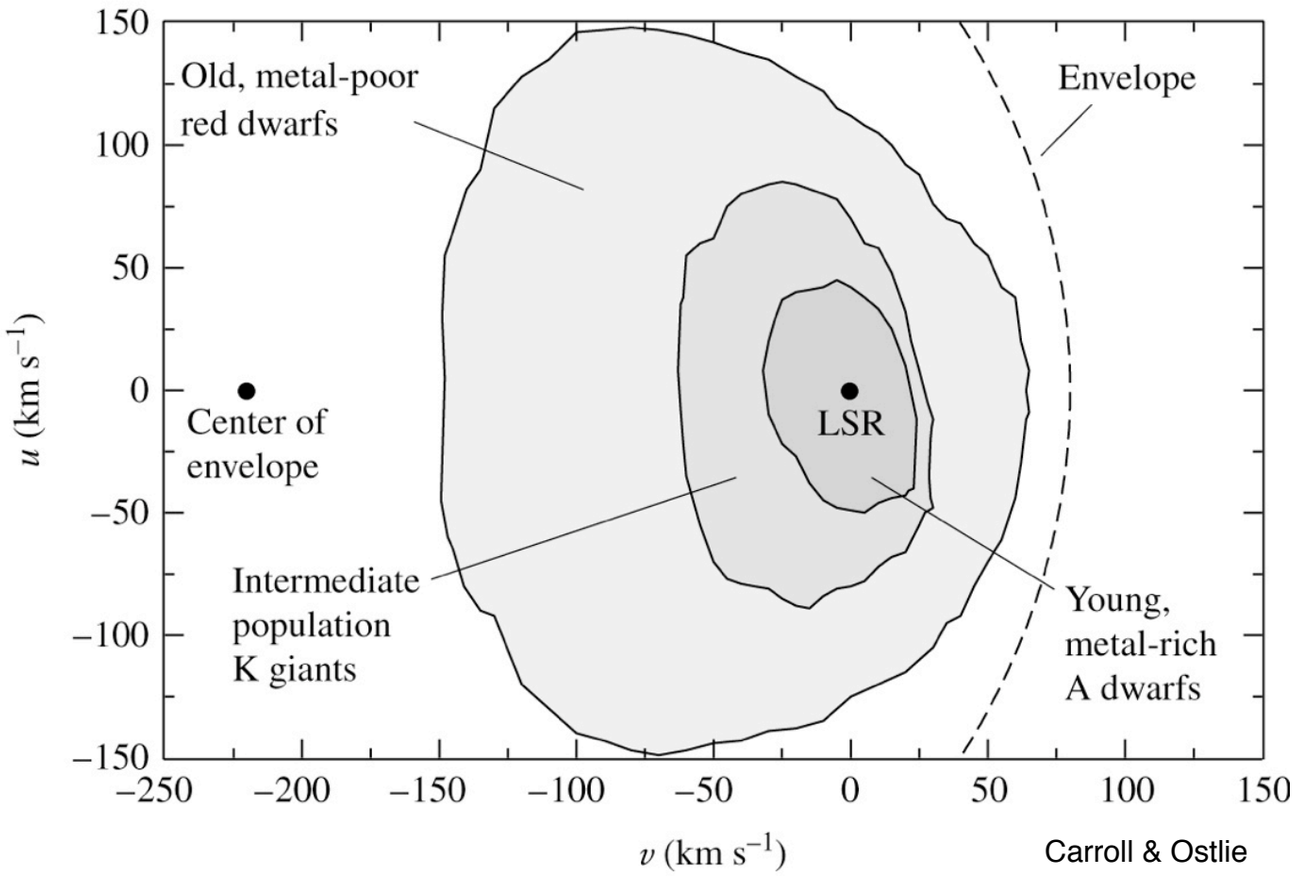
- **Asymmetrischer Drift:** für high-velocity Sterne gibt es kaum welche mit v > 65 km/s, aber solche mit v < -250 km/s; aufgetragen im (u-v)-Diagramm => **Verteilung, die eine kresförmige Hülle ergibt, deren Mittelpunkt bei u = 0 und v = -220 km/s liegt.**

- Annahme: der galaktische Halo, zu dem diese Sterne gehören rotiert nicht (oder nur langsam)

  => Asymmetrie der v-Verteilung ist allein auf die Rotation des LSR zurückzuführen, der Mittelpunkt der Einhüllenden bei $-\Theta_0$:

$$\Theta_0 = \Theta(\boldsymbol{R}_0) = 220 \boldsymbol{km} \cdot \boldsymbol{s}^{-1}$$

  Dies ist auch der IAU standard



Carroll & Ostlie

Rotationsgeschwindigkeit des LSR

- Daraus ergibt sich:

  ⇒ Umlaufzeit der Sonne (genauer, des LSR) um die Galaxis:

$$\boldsymbol{P} = \frac{2\pi \boldsymbol{R}_0}{\Theta_0} = 230 \times 10^6 \, \boldsymbol{yr}$$

  ⇒ Masse der Galaxis innerhalb der Umlaufbahn der Sonne:

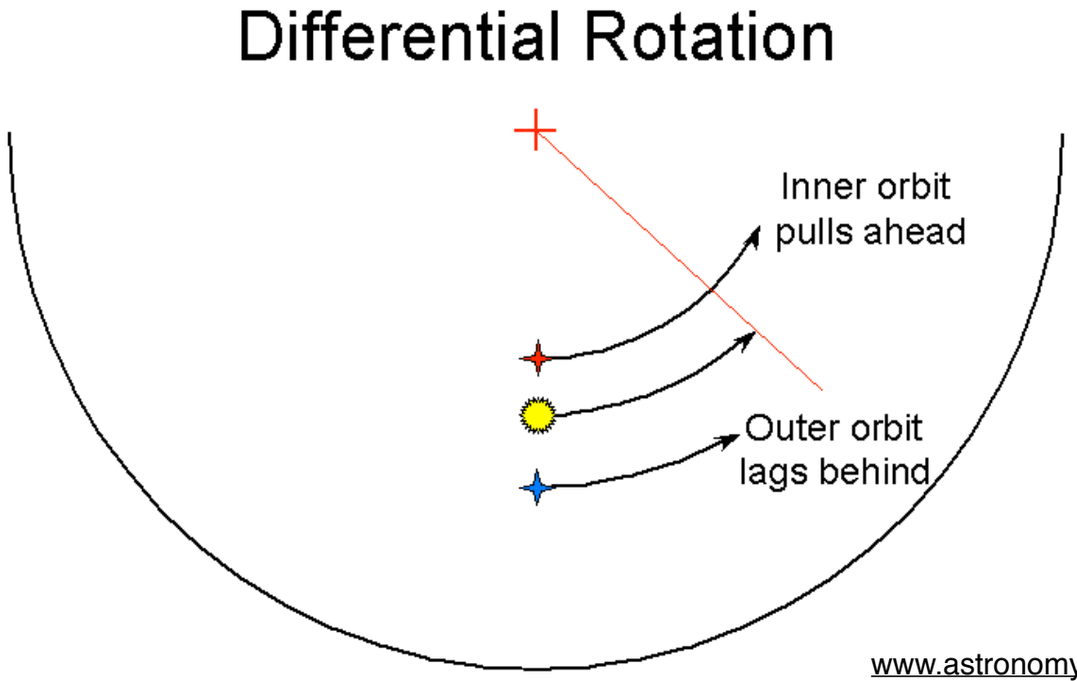
$$\frac{\mathrm{v}^2}{\boldsymbol{r}} = \frac{\boldsymbol{G}\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{r}<\boldsymbol{R}}}{\boldsymbol{R}^2}$$

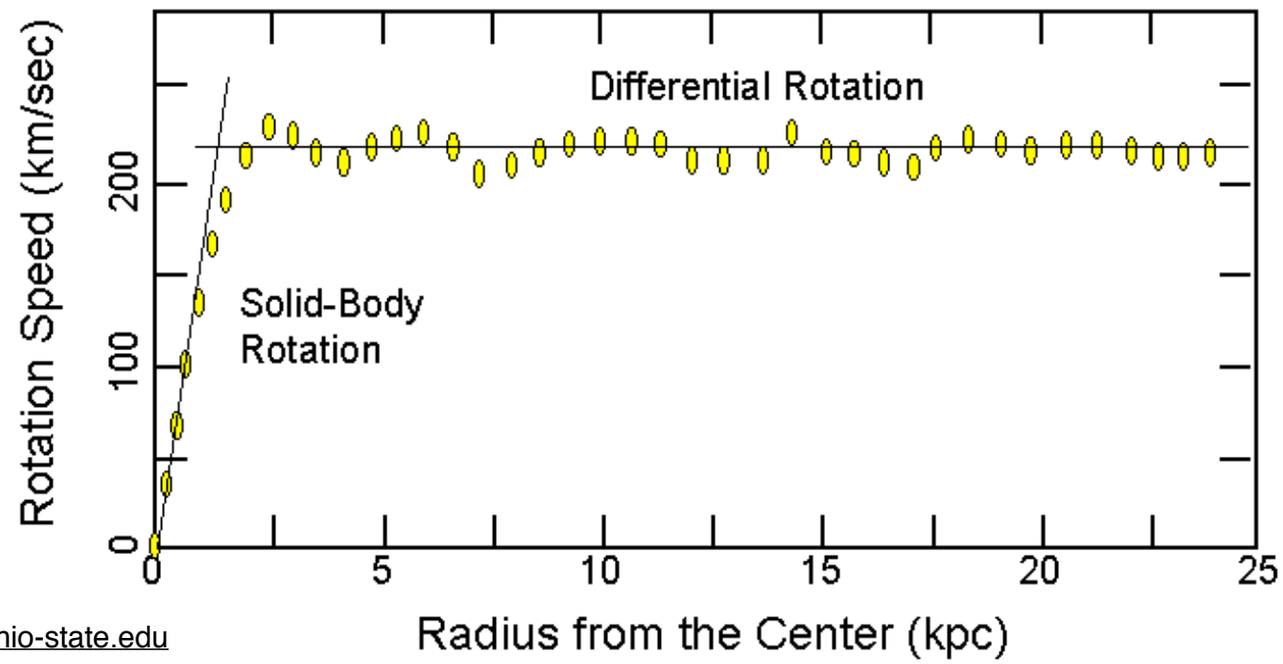
$$\boldsymbol{M}(<\boldsymbol{R}_0) = \frac{\Theta_0^2 \boldsymbol{R}_0}{\boldsymbol{G}} = 8.8 \times 10^{10} \, \boldsymbol{M}_\odot$$

Differentielle Rotation der Milchstraße

- **Die galaktische Scheibe rotiert differentiell**

  => die Winkelgeschwindigkeit ist nicht konstant, sie nimmt nach außen hin ab (mit Ausnahme des zentralen Bereichs)





www.astronomy.ohio-state.edu

→ die lokale Rotation der Milchstraße wurde erstmal von Jan Oort, 1927, untersucht

Geometrische Beschreibung

- Annahme: Sonne (LSR) und Stern S sind auf Kreisbahnen um das GC
- Relativgeschwindigkeit Sonne - Stern ist:

$$v_r = \Theta \cos\alpha - \Theta_0 \sin l$$
$$v_t = \Theta \sin\alpha - \Theta_0 \cos l$$

- Mit der Winkelgeschwindigkeit

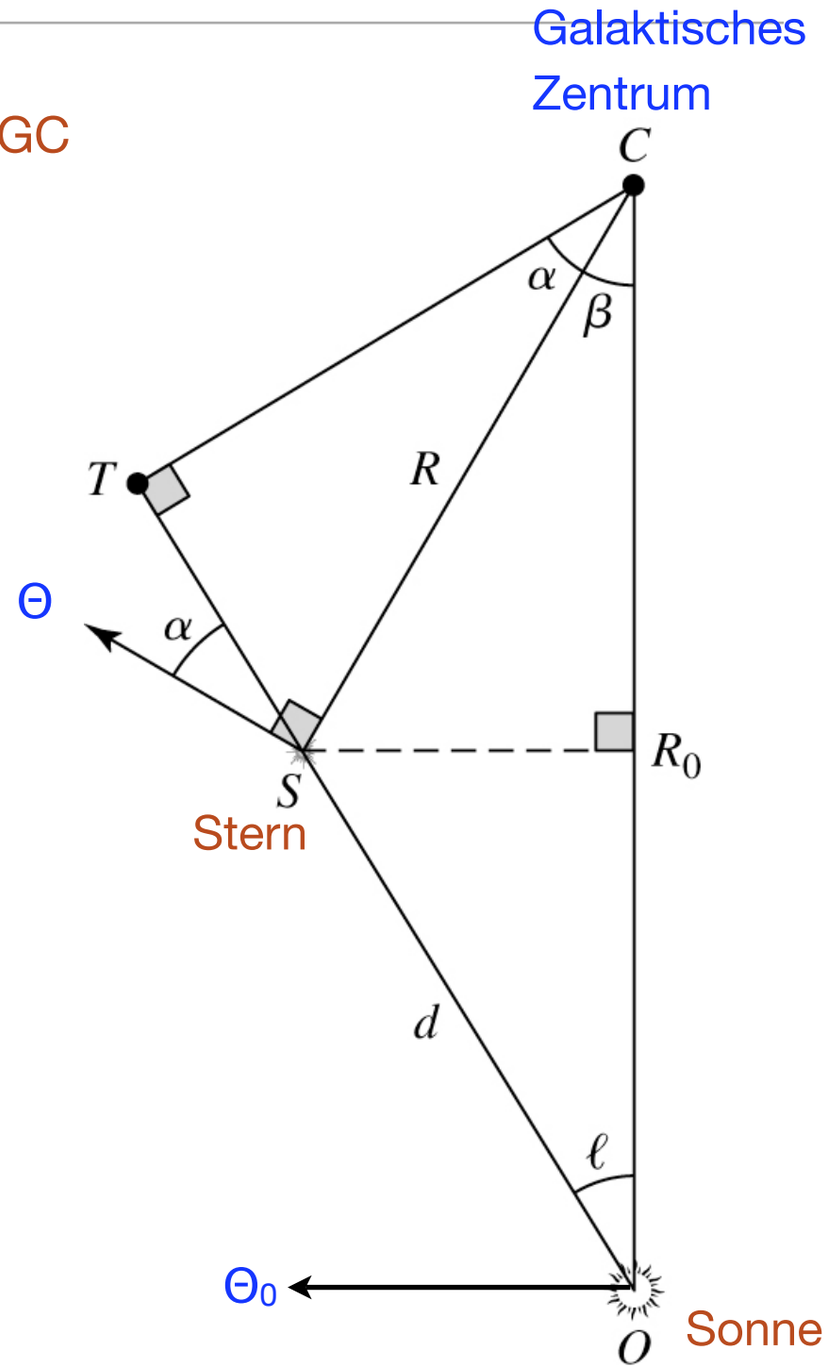
$$\omega(R) = \frac{\Theta(R)}{R}$$

- ist:

$$v_r = \omega R \cos\alpha - \omega_0 R_0 \sin l$$
$$v_t = \omega R \sin\alpha - \omega_0 R_0 \cos l$$

- Wir betrachten die rechtwinkligen Dreiecke OCT und SCT:

$$R\cos\alpha = R_0 \sin l$$
$$R\sin\alpha = R_0 \cos l - d$$



Carroll & Ostlie

Rotationskurve nahe R_0, Oortsche Konstanten

- Einsetzen in v_r, v_t liefert:

$$v_r = (\omega - \omega_0) R_0 \sin l$$

$$v_t = (\omega - \omega_0) R_0 \cos l - \omega d$$

- Mit der Gleichung für die Radialgeschwindigkeit läßt sich durch Messung von v_r die Winkelgeschwindigkeit bestimmen, nicht aber der Abstand, zu dem sie gehört.

- Kann man jedoch **v_r und die Eigenbewegung $\mu = vt/d$** messen, so kann aus den obigen Gleichungen ω und d bestimmt werden. Wegen der Extinktion kann die Methode nicht bei großen d angewandt werden (Messungen sind in der Scheibe!)

- **Lokale Betrachtung: $(R-R_0)/R_0 << 1$**

- Entwicklung von $\omega(R)$ um $\omega_0(R_0)$:

$$\omega(R) = \omega_0(R_0) + \left.\frac{d\omega}{dR}\right|_{R_0} (R - R_0) + \ldots$$

$$\omega - \omega_0 \approx \left.\frac{d\omega}{dR}\right|_{R_0} (R - R_0)$$

Differenz in 1. Ordnung

- die Ableitung ist an der Stelle $R=R_0$ zu nehmen, daher:

$$v_r = (R - R_0) \left.\frac{d\omega}{dR}\right|_{R_0} R_0 \sin l$$

Rotationskurve nahe R_0, Oortsche Konstanten

- Mit $\omega(R) = \frac{\Theta(R)}{R}$ folgt:

$$R_0 \frac{d\omega}{dR}_{|R_0} = \frac{R_0}{R}\left(\frac{d\Theta}{dR}_{|R_0} - \frac{\Theta}{R}\right) \approx \frac{d\Theta}{dR}_{|R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0}$$

- wiederum in erster Ordnung in $R\text{-}R_0$; daher:

$$v_r = \left(\frac{d\Theta}{dR}_{|R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0}\right)(R - R_0)\sin l$$

- analog dazu erhält man:

$$v_t = \left(\frac{d\Theta}{dR}_{|R_0} - \frac{\Theta_0}{R_0}\right)(R - R_0)\cos l - \omega_0 d$$

Rotationskurve nahe R_0, Oortsche Konstanten

- Für $$\left|\boldsymbol{R}-\boldsymbol{R}_0\right| \ll \boldsymbol{R}_0 \Rightarrow \boldsymbol{R}-\boldsymbol{R}_0 \approx \boldsymbol{d}\cos\boldsymbol{l}$$

- durch Einsetzten in die Gleichungen für v_r und v_t erhält man:

$$v_r \approx \boldsymbol{A}\boldsymbol{d}\sin 2\boldsymbol{l}$$

$$v_t \approx \boldsymbol{A}\boldsymbol{d}\cos 2\boldsymbol{l} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{d}$$

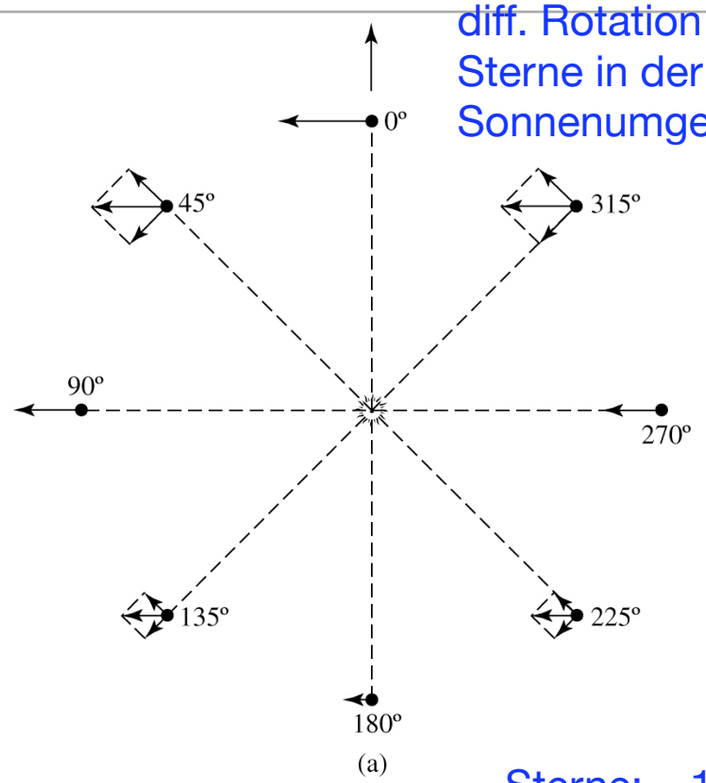
- mit den Oortschen Konstanten:

$$\boldsymbol{A} \equiv -\frac{1}{2}\left(\frac{d\Theta}{d\boldsymbol{R}}_{|\boldsymbol{R}_0} - \frac{\Theta_0}{\boldsymbol{R}_0}\right)$$

$$\boldsymbol{B} \equiv -\frac{1}{2}\left(\frac{d\Theta}{d\boldsymbol{R}}_{|\boldsymbol{R}_0} + \frac{\Theta_0}{\boldsymbol{R}_0}\right)$$

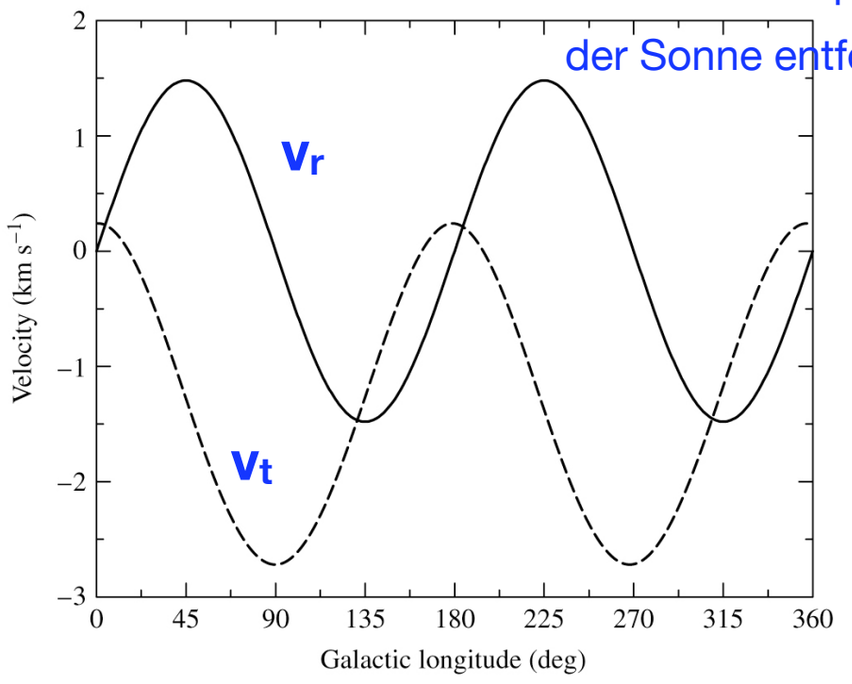
=> **Radial- und Tangentialgeschwindigkeitsfeld relativ zur Sonne weisen eine Sinus-Kurve mit Periode π auf, v_r und v sind um $\pi/4$ phasenverschoben**

diff. Rotation der Sterne in der Sonnenumgebung



(a)

Sterne: ~ 100 pc von der Sonne entfernt



(b)

Rotationskurve nahe R_0, Oortsche Konstanten

- Aus einem ‘sample’ von Sternen mit ähnlicher Entfernung d erhält man A aus den Amplituden der v_r und v_t Kurven, während B durch den vertikalen ‘offset’ von v_t gegeben ist
- Wir können jetzt einige wichtige Beziehungen zwischen den Oortschen Konstanten A, B und den lokalen Parameter der galaktischen Rotation, R_0, ω_0, Θ_0 und $(d\Theta/dR)_{R0}$ bestimmen

$$\omega_0 = \frac{\Theta_0}{R_0} = A - B$$

$$\frac{d\Theta}{dR}_{|R_0} = -(A + B)$$

Winkelgeschwindigkeit der Sonnenbahn und deren Ableitung

- basierend auf Ergebnisse der **Hipparcos Astrometrie-Mission:**

$$A = 14.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$

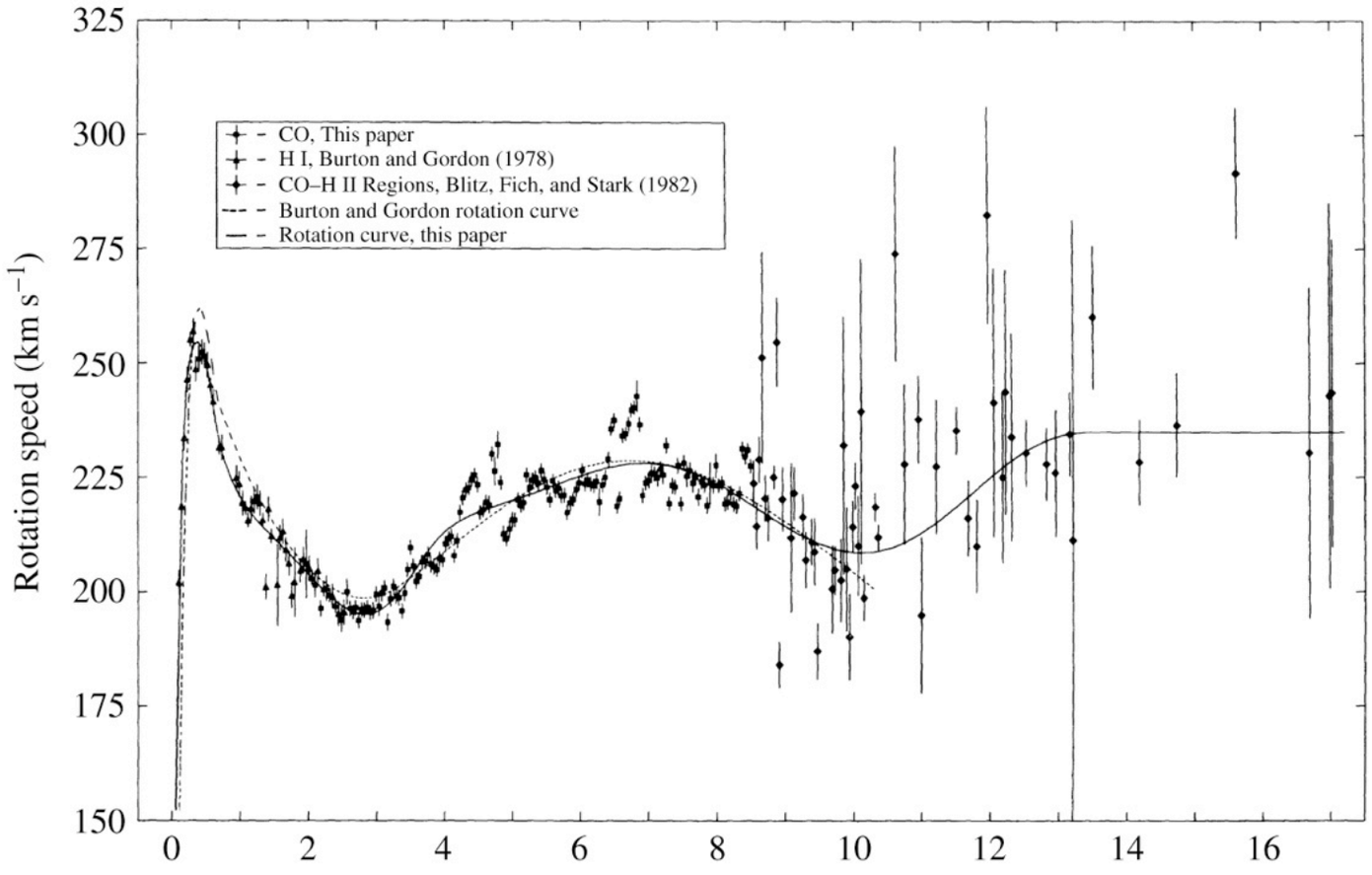
$$B = -12.4 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$

Rotationskurve für R > R_0

- Die Messung von Θ(R) bei R > R_0 erfordert v_r Messungen von Objekten, deren Entfernung man direkt bestimmen kann, zB Cepheiden oder RR-Lyrae Sterne
- Aus l und d kann R berechnet werden, und dann ω(R), bzw. Θ(R) bestimmt werden:

$$v_r = (\omega - \omega_0) R_0 \sin l \qquad \omega(R) = \frac{\Theta(R)}{R}$$

=> jedes Objekt mit bekanntem d und v_r liefert einen Meßpunkt für die galaktische Rotationskurve



Ergebnis: die Rotationskurve für R > R_0 fällt nicht nach außen hin ab, wie erwartet

Θ(R) ist praktisch konstant für R > R_0 => M(R) ~ R

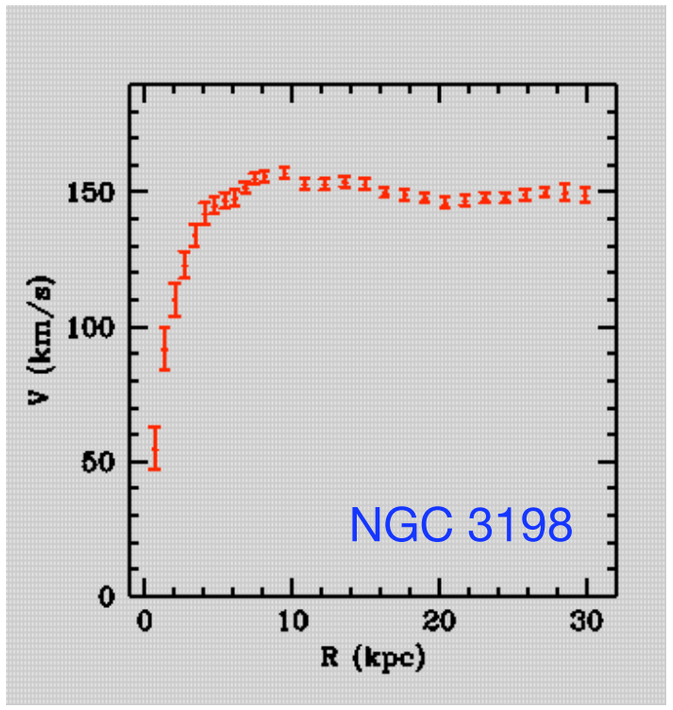
Galaktische Rotationskurve

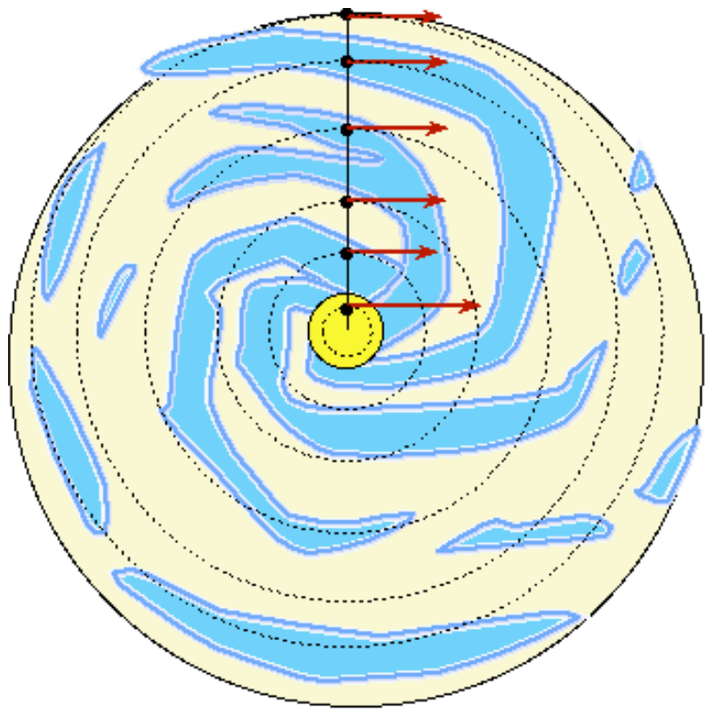
- Flache Rotationskurven wurden bei vielen Spiralgalaxien gemessen, alle weisen eine ähnliche Struktur der Rotationskurve auf
- - innerer Bereich: starker Ansteig der Rotationskurve bis zu ~ kpc vom Zentrum -> “rigid-body rotation”:

$$\Theta \propto \boldsymbol{R}, \quad \omega = \frac{\Theta}{\boldsymbol{R}} = \boldsymbol{konst.}$$

- alle Sterne habe die gleiche Geschwindigkeit um das galaktische Zentrum, genauso wie ein starrer Körper
- - äußerer Bereich: ab ~ kpc, soweit man messen kann:

  => flache Rotationskurven!





The mass inside an orbit can be found using the size of the orbit and the orbital speed. The arrows show the speeds for certain points on the **rotation curve** for this galaxy.