Rotação Galáctica

Capítulo 2.3 do livro-texto.

Rotação galáctica

- As órbitas das estrelas e do gás em torno do centro da Galáxia são aproximadamente circulares.
- A rotação é diferencial: estrelas mais próximas ao centro completam suas órbitas em menos tempo do que estrelas mais distantes.

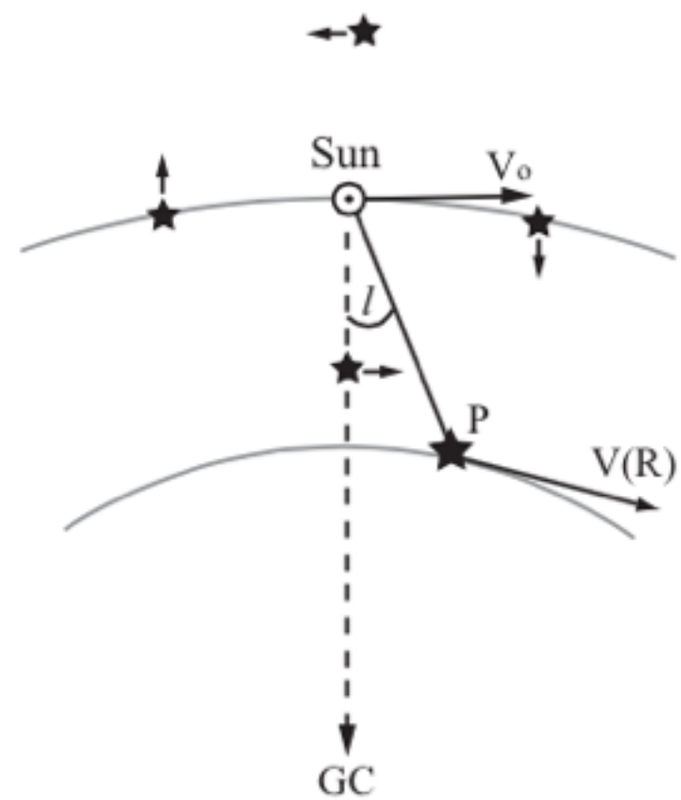


Fig. 2.18. Galactic rotation: stars closer to the Galactic center (GC) pull ahead of us in their orbits, while those further out are left behind. A star at the same Galactocentric radius moves sideways relative to us.

Local Standard of Rest (LSR)

- O padrão local de descanso (LSR em inglês) é definido como o movimento médio das estrelas próximas ao Sol
- Com relação a essa média, o Sol apresenta

$$v_x = 10\mathrm{km/s}, v_y = 5\mathrm{km/s}, v_z = 7 - 8\mathrm{km/s}$$

- Na maior parte das vezes assumimos que a órbita do LSR é circular
  - Recomendação da IAU (1985) é $R_0 = 8.5\,\mathrm{kpc}$ $V_0 = 220\,\mathrm{km\,s^{-1}}$
  - Valores mais recentes (2007) $R_0 \approx 8\,\mathrm{kpc}$ $V_0 \approx 200\,\mathrm{km\,s^{-1}}$

Medindo a curva de rotação

- Uma estrela em P se move em relação ao LSR com

$$V_r = V \cos\alpha - V_0 \sin l.$$

- Usando a Lei dos Senos

$$\frac{a}{\sin \hat{A}} = \frac{b}{\sin \hat{B}} = \frac{c}{\sin \hat{C}} = 2r$$

- Chegamos a

$$\sin l / R = \sin(90^\circ + \alpha)/R_0,$$

- e

$$V_r = R_0 \sin l \left(\frac{V}{R} - \frac{V_0}{R_0} \right).$$

Velocidade angular

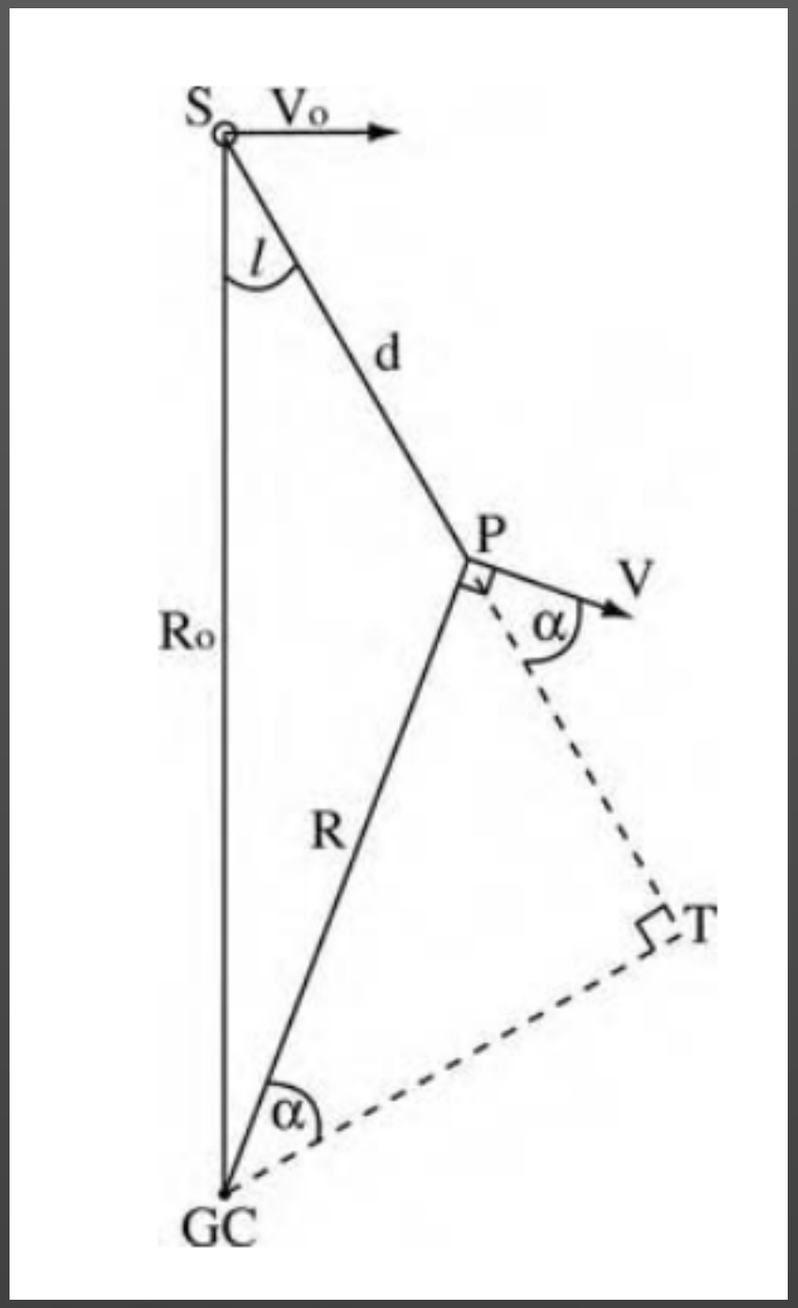
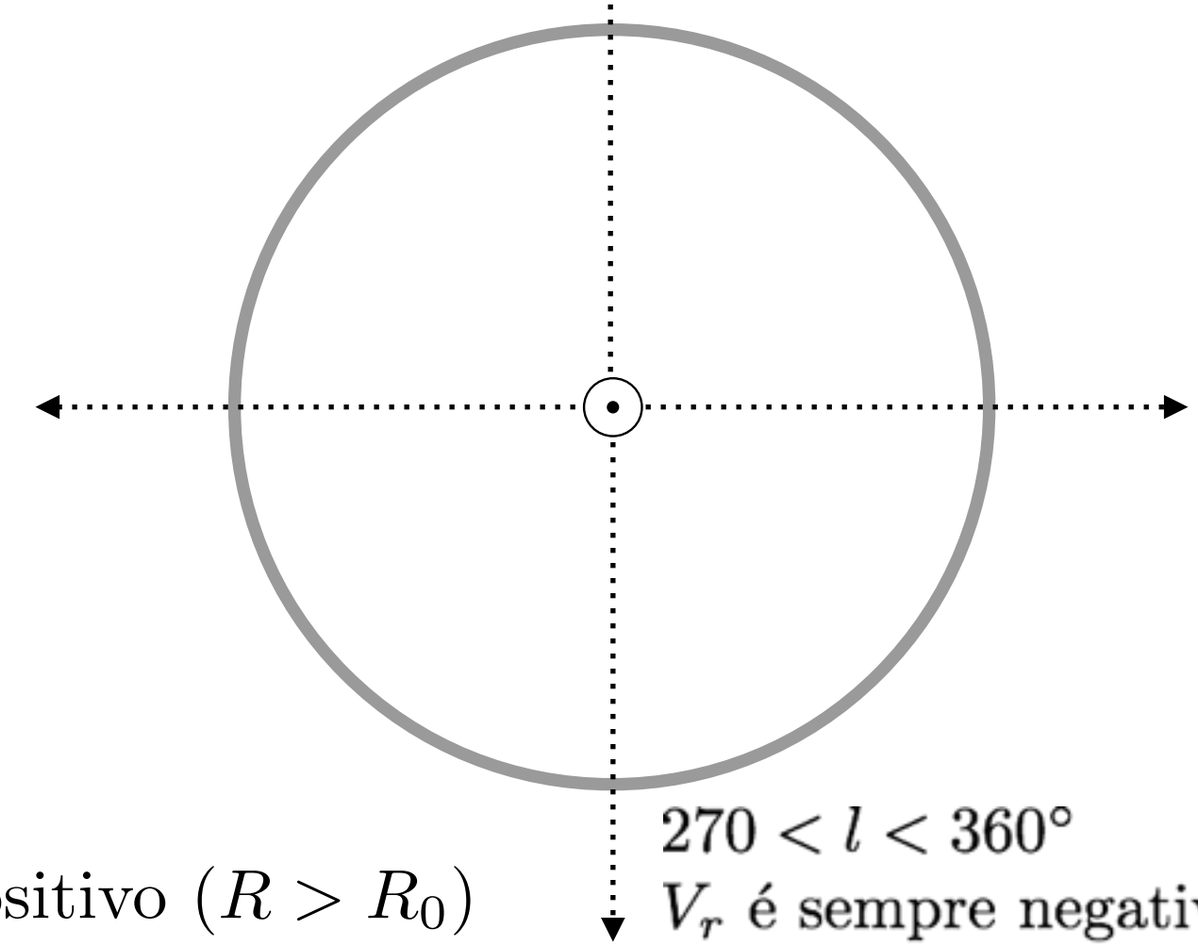


Fig 2.19. Galactic rotation: a star or gas cloud at P with longitude l and Galactocentric radius R, at distance d from the Sun, orbits with speed V(R). The line of sight to P is closest to the Galactic center at the tangent point T

$$V_r = R_0 \sin l \left(\frac{V}{R} - \frac{V_0}{R_0} \right).$$

$90 < l < 180°$
V_r é sempre negativo ($R > R_0$)

$0 < l < 90°$
V_r é positivo, a menos das estrelas do outro lado da Galáxia com $R > R_0$



Centro galáctico

$180 < l < 270°$
V_r é sempre positivo ($R > R_0$)

$270 < l < 360°$
V_r é sempre negativo exceto estrelas do outro lado da Galáxia com $R > R_0$

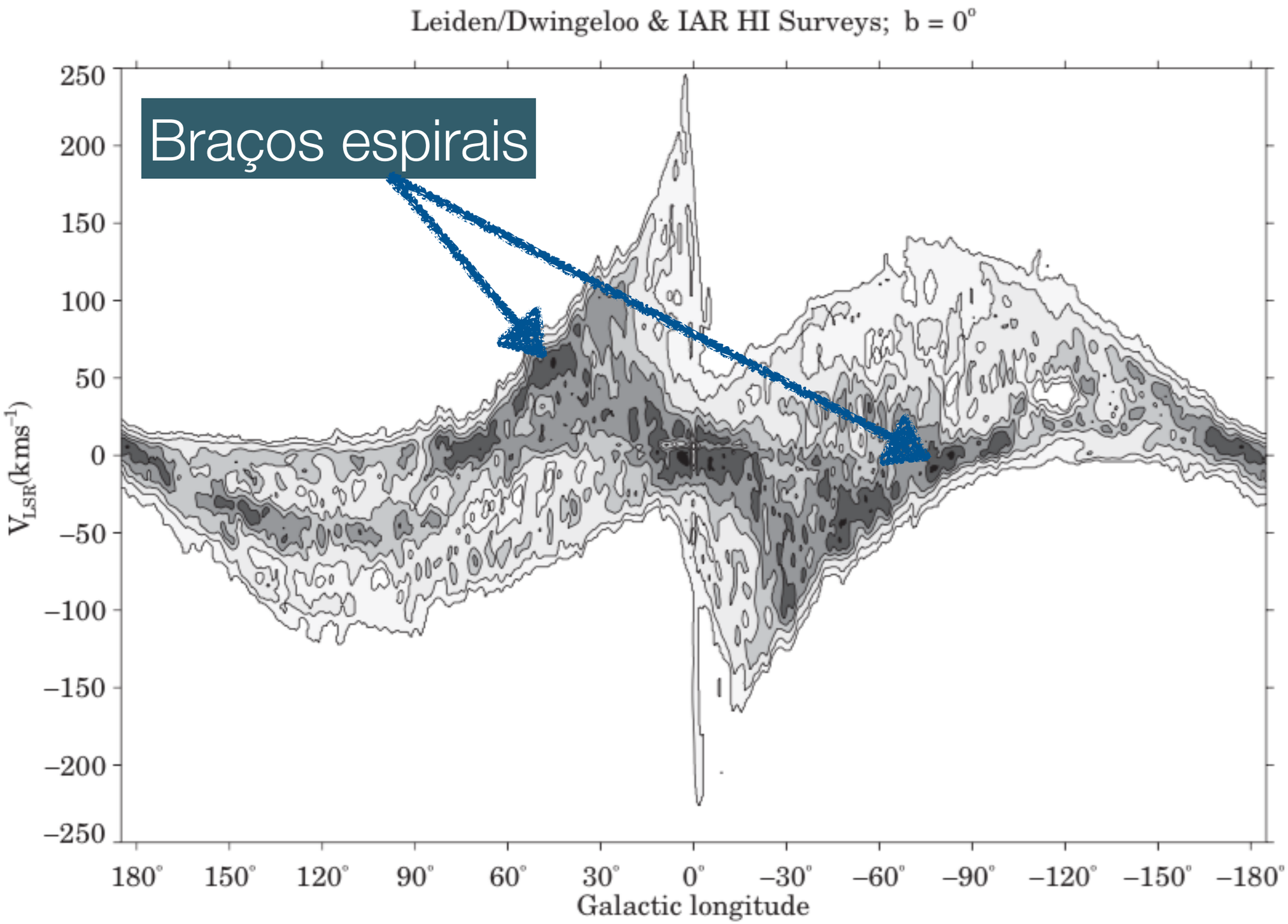


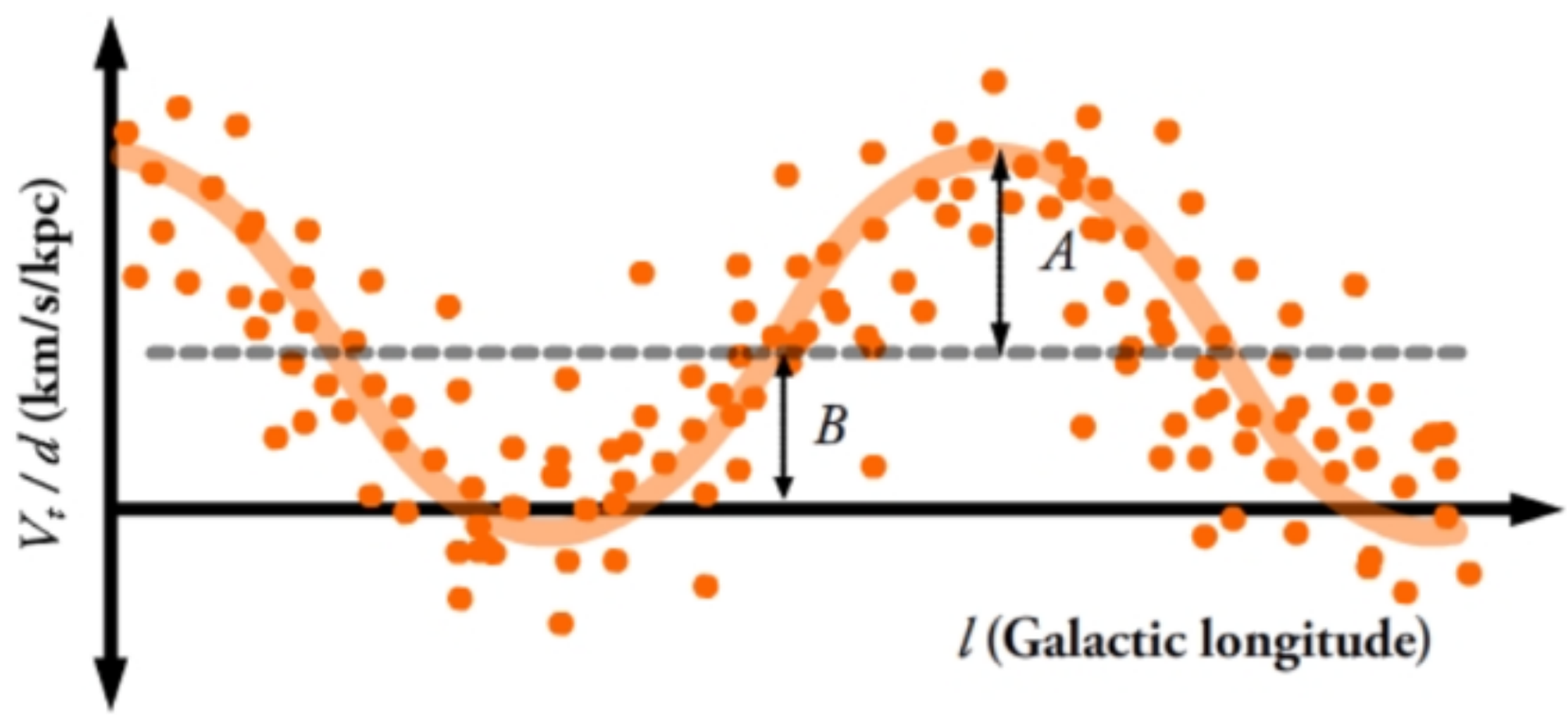
Fig. 2.20. In the plane of the disk, the intensity of 21 cm emission from neutral hydrogen gas moving toward or away from us with velocity V_{LSR}, measured relative to the local standard of rest – D. Hartmann and W. Burton.

Constantes de Oort

- As constantes de Oort (Jan Oort, 1900 - 1992) A e B medem respectivamente o desvio a partir da rotação rígida (*local shear*) e o gradiente de momento angular (*local vorticity*) no disco próximo ao Sol $d \ll R$
- A partir das constantes pode-se determinar as propriedades orbitais do Sol
- Dedução: http://en.wikipedia.org/wiki/Oort_constants#Derivation

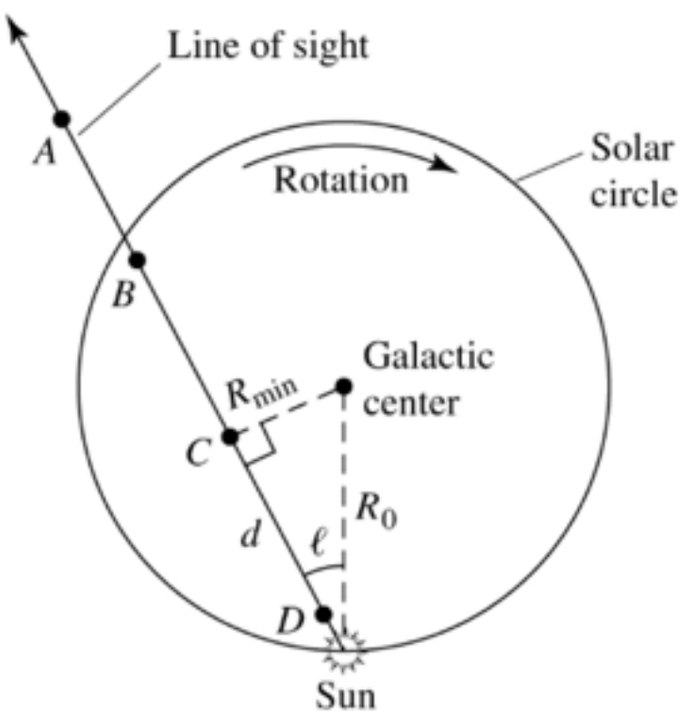
$$V_{\text{obs, r}} = A\, d\, \sin(2l)$$
$$V_{\text{obs, t}} = A\, d\, \cos(2l) + B\, d$$

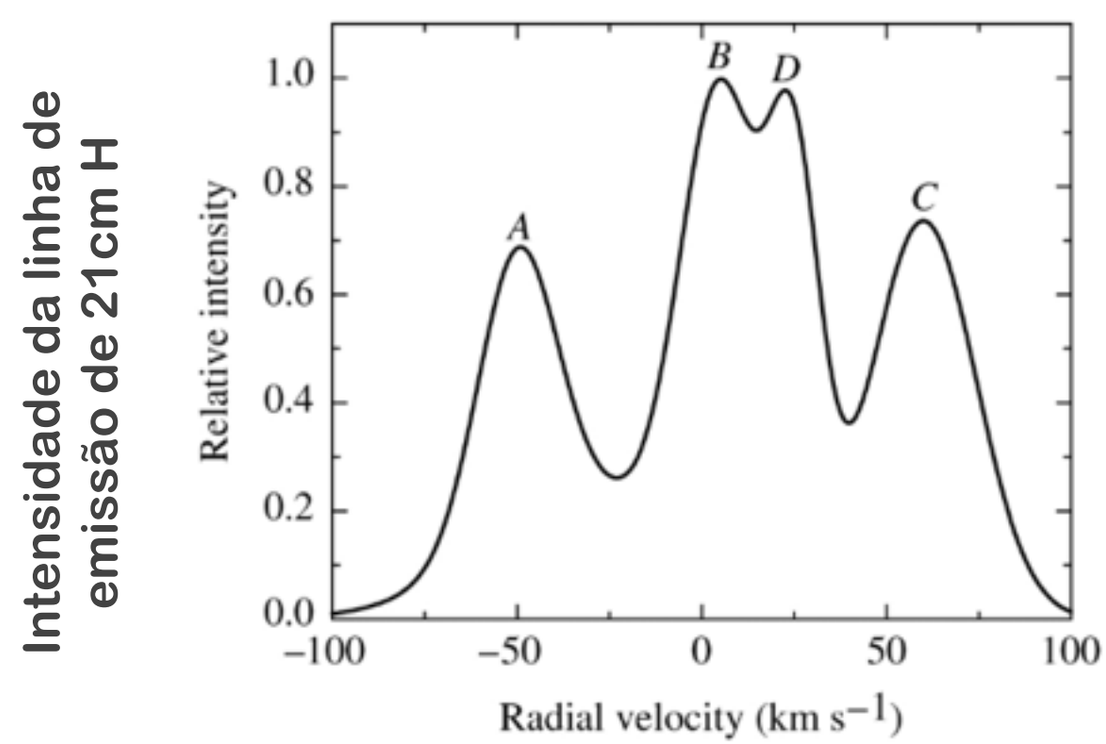
$$A = \frac{V_{\text{obs, r}}}{d \sin(2l)}$$
$$B = \frac{V_{\text{obs, t}}}{d} - A \cos(2l)$$



Método da tangente

- Se soubéssemos a distância até as estrelas para as quais medimos a velocidade radial, poderíamos calcular a curva de rotação da Galáxia $V(R)$
- Para a Galáxia interna $(R < R_0)$ usamos o método da tangente





$$R = R_0 \sin l \qquad \text{and} \qquad V(R) = V_r + V_0 \sin l. \qquad (2.17)$$

http://euhou.obspm.fr/public/Milky_Way_Rotation_A4.pdf

Galáxia externa

- Precisa-se de associações de estrelas jovens para os quais seja possível fazer paralaxe espectroscópica ou fotométrica
- A velocidade radial é medida a partir das nuvens de gás nos quais essas associações estão embebidas

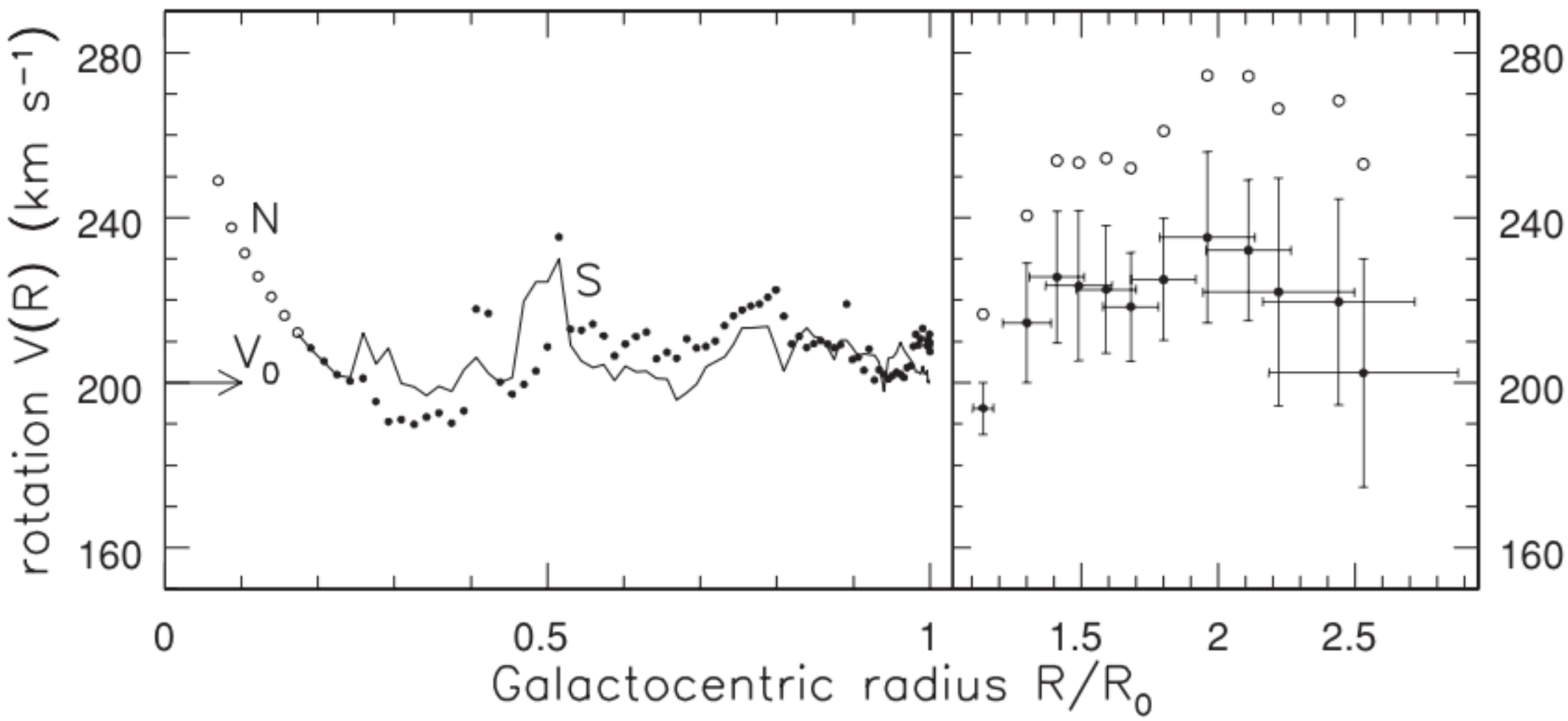


Fig. 2.21. Left, the Milky Way's rotation from the tangent-point method, taking $V_0 = 200\,\mathrm{km\,s^{-1}}$; dots show velocities of northern HI gas with $l > 270°$; the curve gives results from southern gas at $l < 90°$. The tangent-point method fails at $R \lesssim 0.2R_0$ (open circles) because this gas follows oval orbits in the Galactic bar. Right, the rotation speed of the outer Galaxy, calculated for $V_0 = 200\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ (filled circles) and for $V_0 = 220\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ (open circles); crosses show estimated errors – W. B. Burton and M. Honma.

Matéria Escura na Galáxia

- Para um sistema esférico, a velocidade V em uma órbita circular de raio R está relacionada à massa contida no interior deste raio $\mathcal{M}(<R)$ por

$$\mathcal{M}(<R) = RV^2/G. \qquad (2.18)$$

- Para R em parsecs, M em massas solares e tempo em mega-anos,

$$G = 4.5 \times 10^{-3}$$

- Como V(R) não cai com a distância, a massa deve crescer quase linearmente com o raio, mesmo além do raio solar onde há menor densidade estelar
- Isso também é observado em outras galáxias espirais
- Assume-se que as galáxias contém um halo de matéria escura (não emite luz)

Meteorologia da Galáxia: o gás interestelar

Capítulo 2.4

Meio Interestelar (MIE)

- corresponde a menos de 10% da massa bariônica da Galáxia
- dá a Galáxia várias de suas características morfológicas: braços espirais, regiões de formação estelar…
- gás é aquecido e ionizado por radiação estelar, é posto em movimento por fortes ventos estelares ou ondas de choque de SN, ou pela passagem através dos braços espirais
- assim como a atmosfera da Terra, o MIE é um sistema complexo, onde tem-se que levar em considerações fatores como campo magnético, pressão do gás…
- com raras exceções, as distâncias são apenas distâncias cinemáticas, i.e., dependem de uma V(R) já conhecida

Extinção interestelar

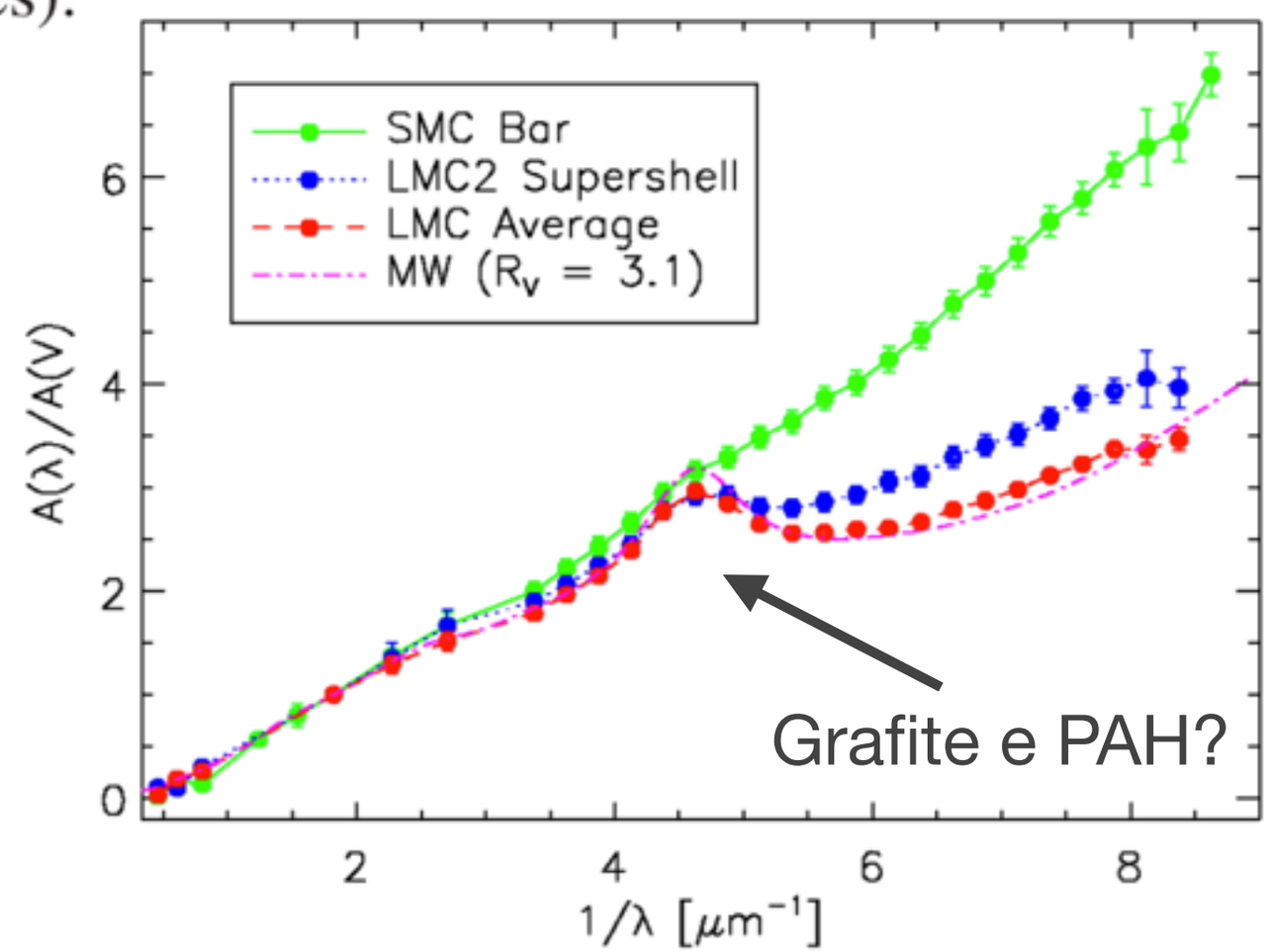
$$F_\lambda(x + \Delta x) = F_\lambda(x)[1 - \kappa_\lambda \, \Delta x],$$

opacidade $\kappa_\lambda \propto 1/\lambda \qquad 3000 \text{ Å} < \lambda < 1 \ \mu\text{m}$

$$N_{\rm H} \approx 1.8 \times 10^{21} \, {\rm cm}^{-2} \times A_V({\rm magnitudes}).$$

$$A_V = R \cdot E(B - V) \qquad R \simeq 3.1$$

$$E(\lambda - V) = (\lambda - V) - (\lambda - V)_0$$



Curvas de extinção média para a Galáxia e Nuves de Magalhães

Medidas de extinção

- Comparar fluxo de estrelas de tipo espectral bem determinado com estrelas semelhantes não afetadas por extinção (ou por espectros teóricos)
- Em gás, usa-se razões de linhas que não são afetadas por temperatura e densidade: exemplo, a razão teórica entre os fluxos das linhas de emissão de Halpha e Hbeta é 2.85. Valores diferentes desta razão são devido a extinção.

Meio interestelar

- Constituintes: gás (neutro, ionizado e molecular), poeira, raios cósmicos
- É um meio multi-fase, dependendo do constituinte em questão, da temperatura e densidade. Fases (onde mecanismos de aquecimento e resfriamento estão em equilíbrio; Field, Goldsmith & Habing1969; McKee & Ostriker 1977):
  - frio: $T < 300K$, HI e H_2
  - morno: $T \sim 10^4K$, gás neutro rarefeito e ionizado
  - quente: $T \sim 10^6K$ gás ionizado, aquecido por SN
- As pressões térmicas das três fases estão aproximadamente em equilíbrio

Meio interestelar

- Bastante rarefeito:
  - regiões densas => 10^6 moléculas por cm^3
  - regiões quentes => 10^{-4} íons por cm^3
  - ar => 10^{19} moléculas por cm^3
  - vácuo de laboratório => 10^{10} moléculas por cm^3
  - contraste denso - rarefeito maior do que diferença entre água e ar
- Massa:
  - 99% gás (70% H, 28% He, 2% metais)
  - 1% poeira
- Voyager 1 “chegou" ao meio interestelar em Agosto de 2012 (heliopausa = limite teórico onde a pressão do vento solar e do meio interestelar se igualam)

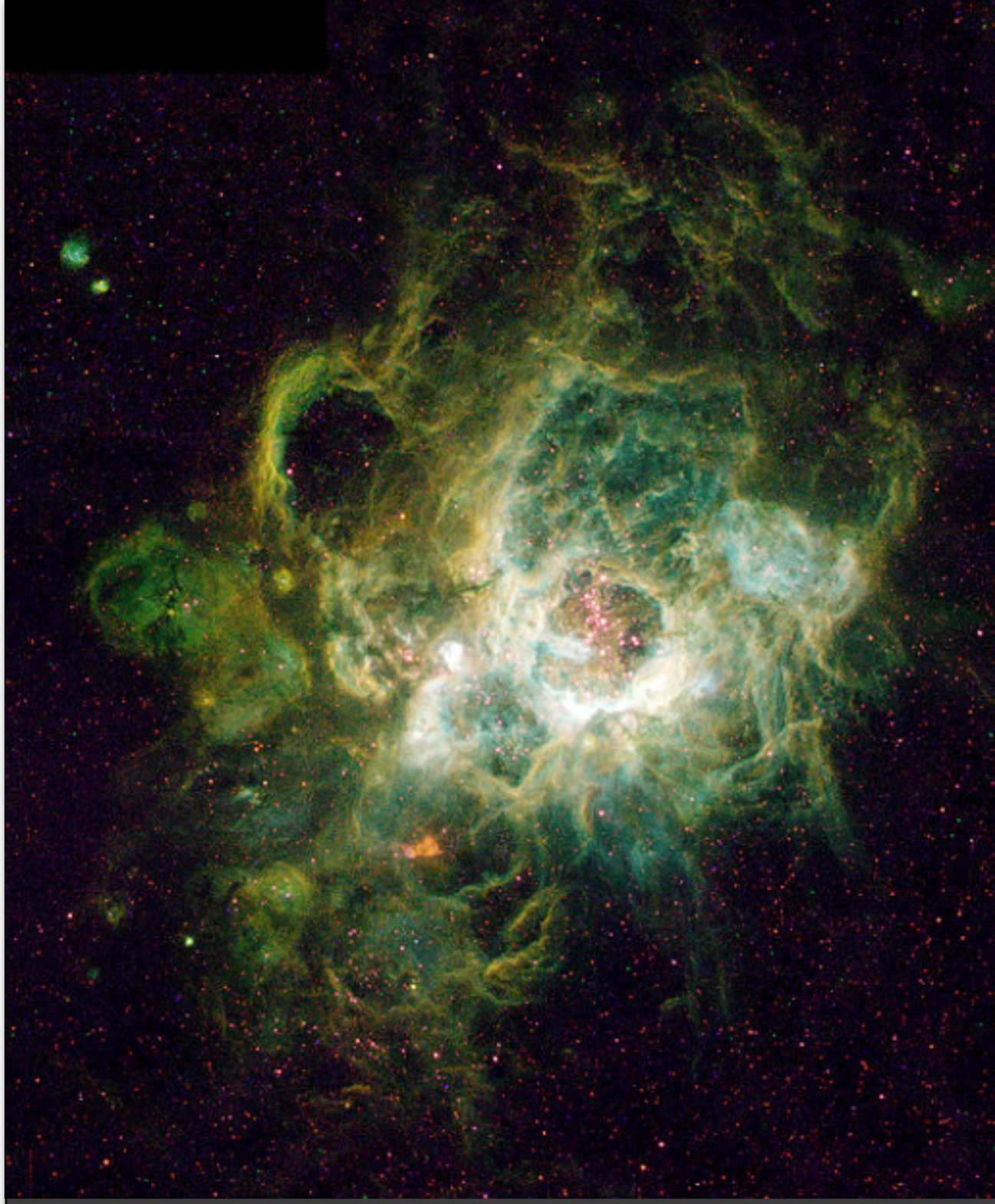
Estruturas

- o MIE é turbulento e cheio de estruturas
- estrelas nascem em nuvens moleculares densas e frias, tipicamente de alguns parsecs de distância

Nebulosa da cabeça do cavalo (Bernard 33)

Estruturas

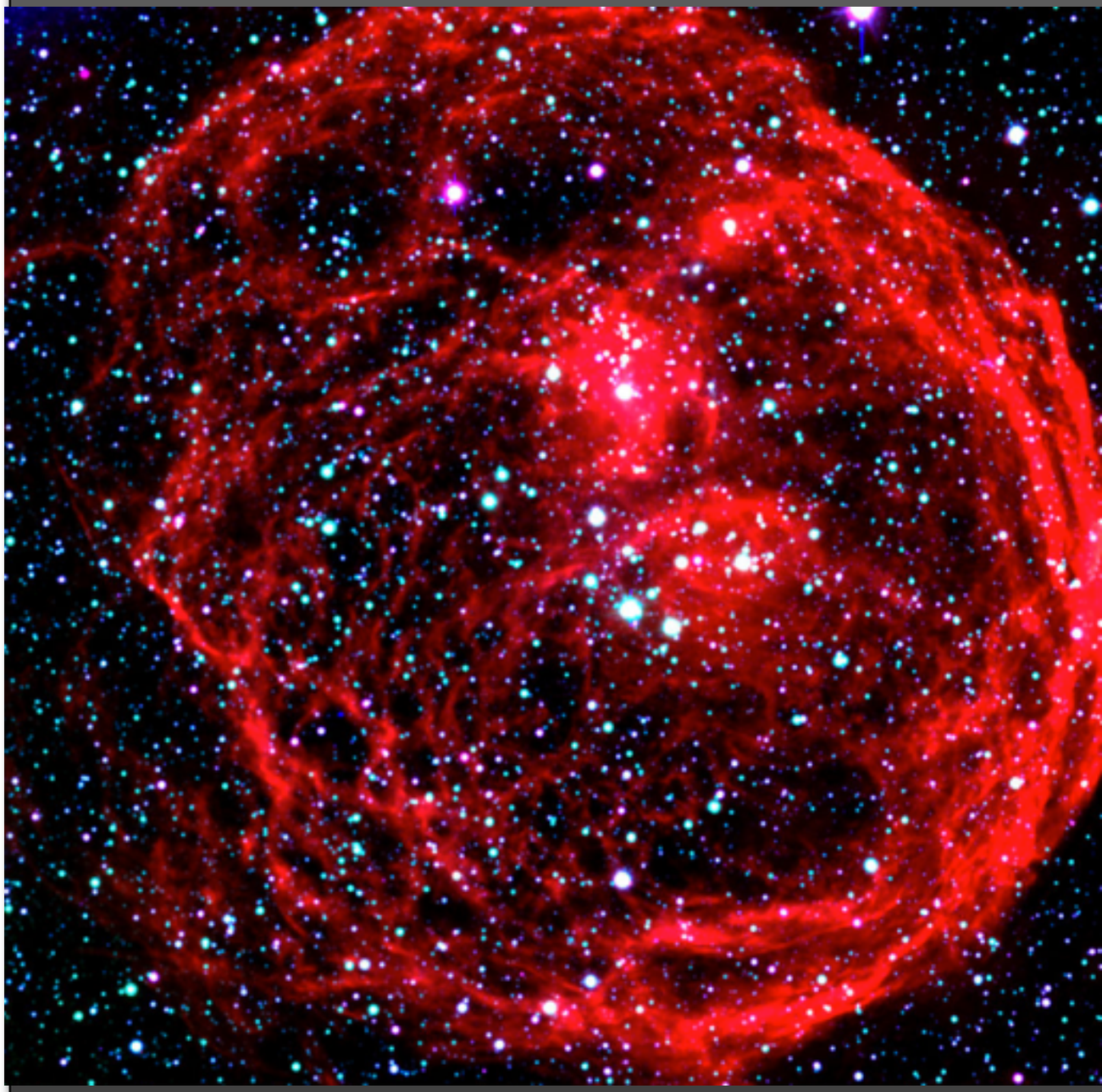
- ventos estelares de estrelas jovens e ondas de choque de supernovas injetam grande quantidade de energia nos arredores (turbulência hipersônica)
- quando as primeiras estrelas começam a brilhar, quebram o H2 em H e ioniza o H => região HII
- o gás é aquecido a ~10000K, a pressão sobe ~1000x, expande empurrando o gás frio a velocidades supersônicas (champagne flow)



Região HII NGC604, na Galáxia do Triângulo

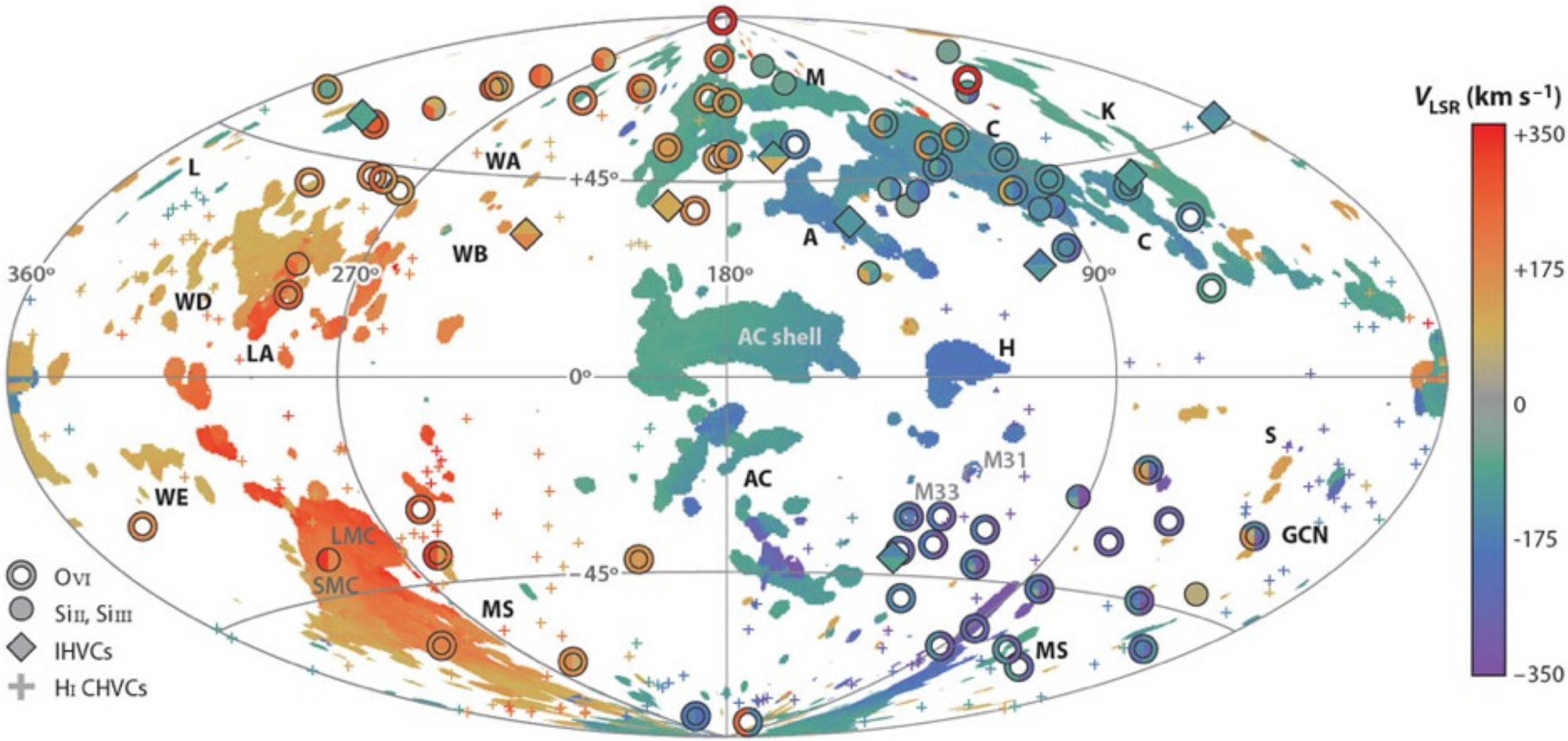
Estruturas

- as estruturas resultantes podem ser vistas bolhas de gás quente, observadas por satélites de raios-X e regiões turbulentas vistas em mapas de rádio telescópios.



Superbolha Henize70, na Grande Nuvem de Magalhães

http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept12/Putman/Figures/figure1.jpg



Putman, M.E. et al. 2012.
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 50:491–529.

Estruturas

Nuvens de alta velocidade

Meio Interestelar

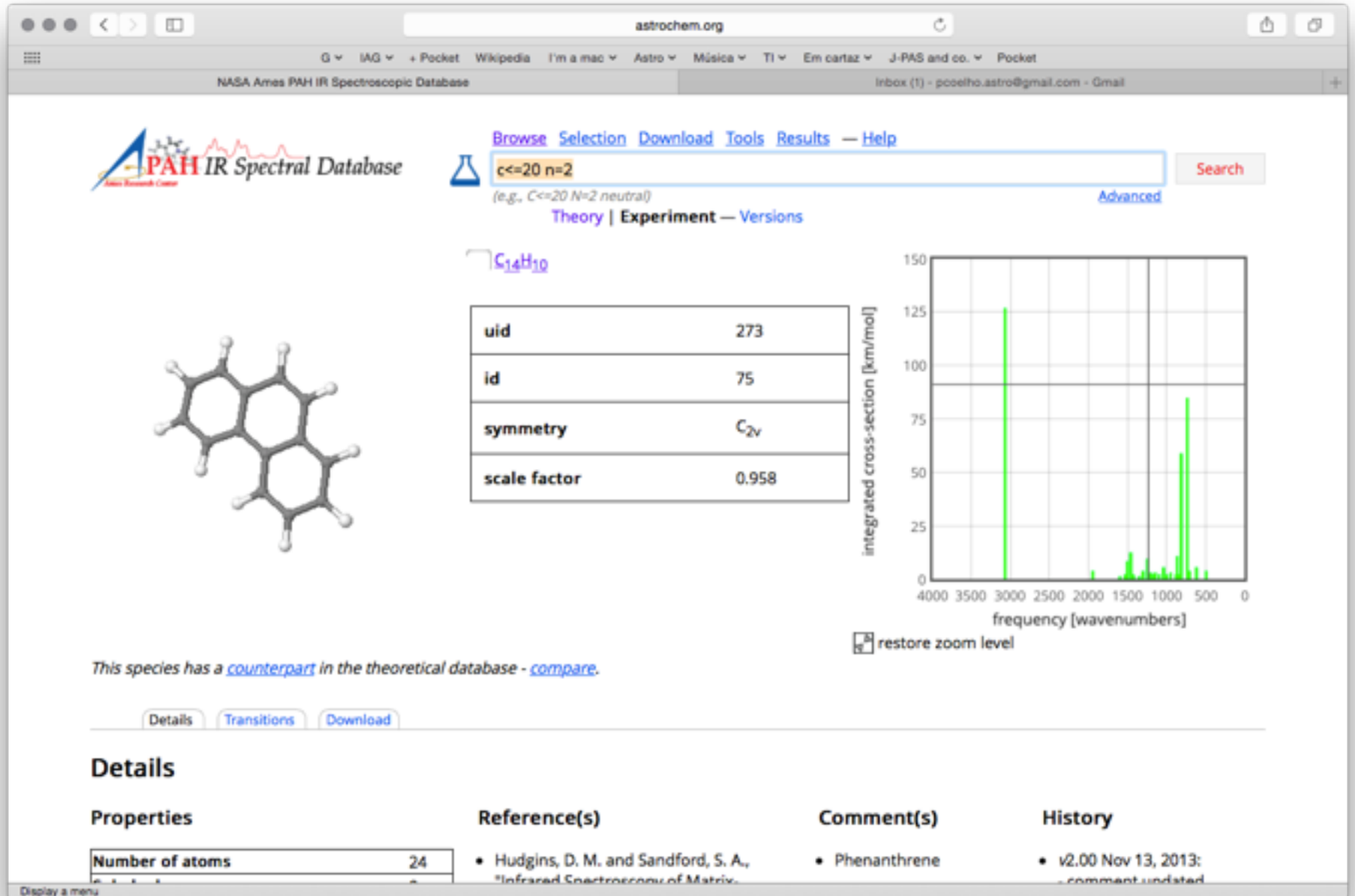
Table 2.4 A 'zeroth-order' summary of the Milky Way's interstellar medium (after J. Lequeux)

Component	*Description*	*Density* (cm^{-3})	*Temperature* (K)	*Pressure* (p/k_B)	*Vertical extent*	*Mass* ($\mathcal{M}_\odot$)	*Filling factor*
Dust grains						10^7–10^8	Tiny
large $\lesssim 1\ \mu m$	Silicates, soot		~20		150 pc		
small ~ 100 Å	Graphitic C		30–100				
PAH < 100 atoms	Big molecules				80 pc		
Cold clumpy gas	Molecular: H_2	> 200	< 100	Big	80 pc	$(2) \times 10^9$	<0.1%
	Atomic: HI	25	50–100	2 500	100 pc	3×10^9	2%–3%
Warm diffuse gas	Atomic: HI	0.3	8 000	2 500	250 pc	2×10^9	35%
	Ionized: HII	0.15	8 000	2 500	1 kpc	10^9	20%
HII regions	Ionized: HII	1–10^4	~10 000	Big	80 pc	5×10^7	Tiny
Hot diffuse gas	Ionized: HII	~0.002	$\sim 10^6$	2 500	~5 kpc	(10^8)	45%
Gas motions	$\frac{3}{2}\langle\rho_{HI}\rangle\sigma_r^2$	$\langle n_H\rangle \sim 0.5$	$10\ km\ s^{-1}$	8 000			
Cosmic rays	Relativistic	$1\ eV\ cm^{-3}$		8 000	~3 kpc	Tiny	
Magnetic field	$B \sim 5\ \mu G$	$1\ eV\ cm^{-3}$		8 000	~3 kpc		
Starlight	$\langle\nu h_P\rangle \sim 1\ eV$	$1\ eV\ cm^{-3}$			~500 pc		
UV starlight	11–13.6 eV	$0.01\ eV\ cm^{-3}$					

Note: ( ) denotes a very uncertain value. Pressures and filling factors refer to the disk midplane near the Sun; notice that the pressures from cosmic rays, in magnetic fields, and the turbulent motions of gas clouds are roughly equal.

PAH

- Polycyclic aromatic hydrocarbon
- Compostos orgânicos com cerca de 100 átomos de Carbono ou menos



- http://www.astrochem.org/pahdb/

Disco inclinado, queda de densidade do H2, órbitas não circulares, barra?

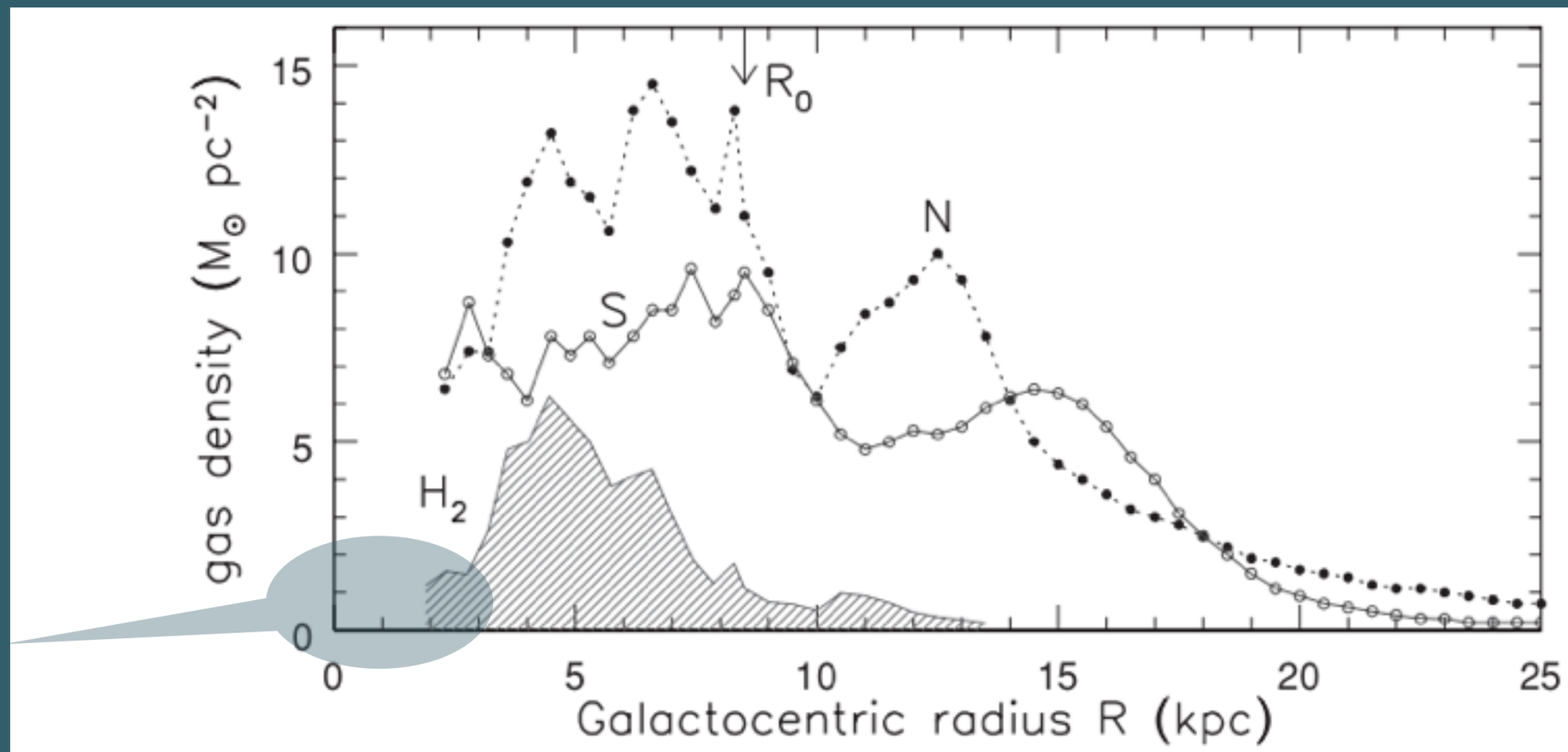
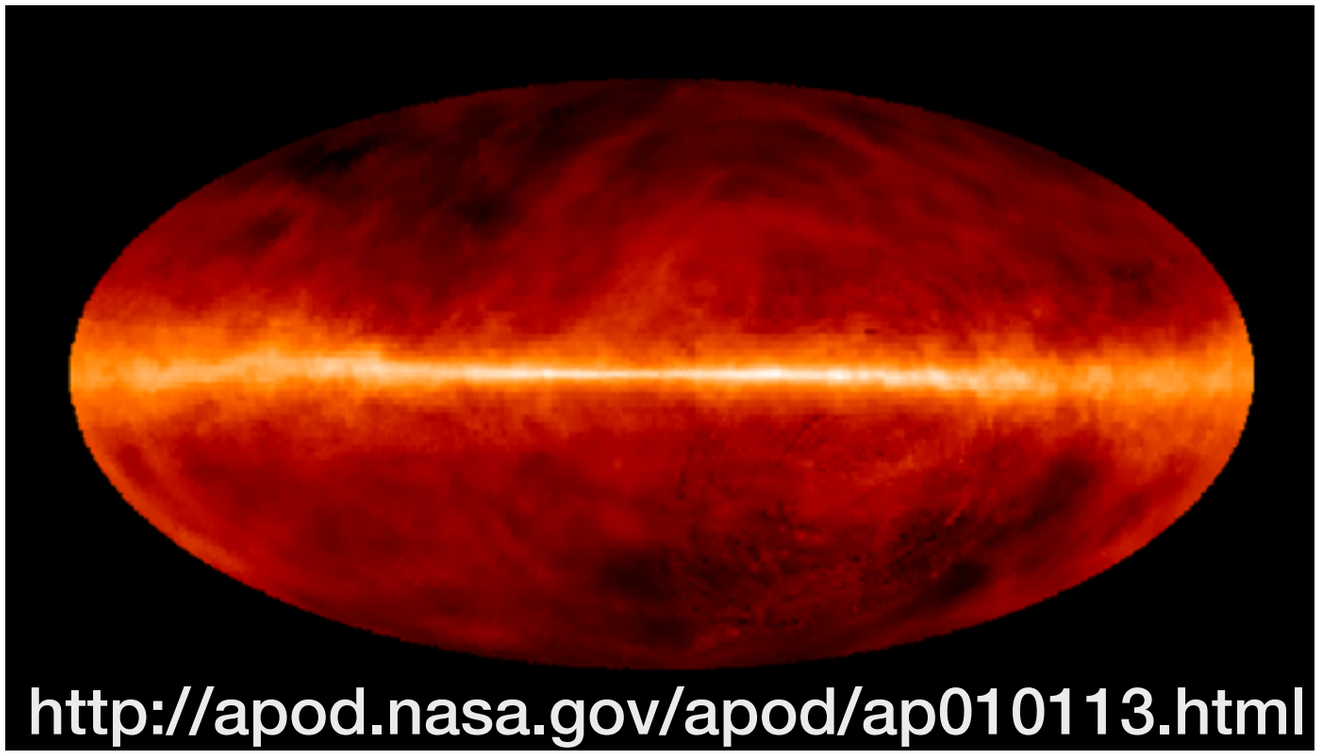
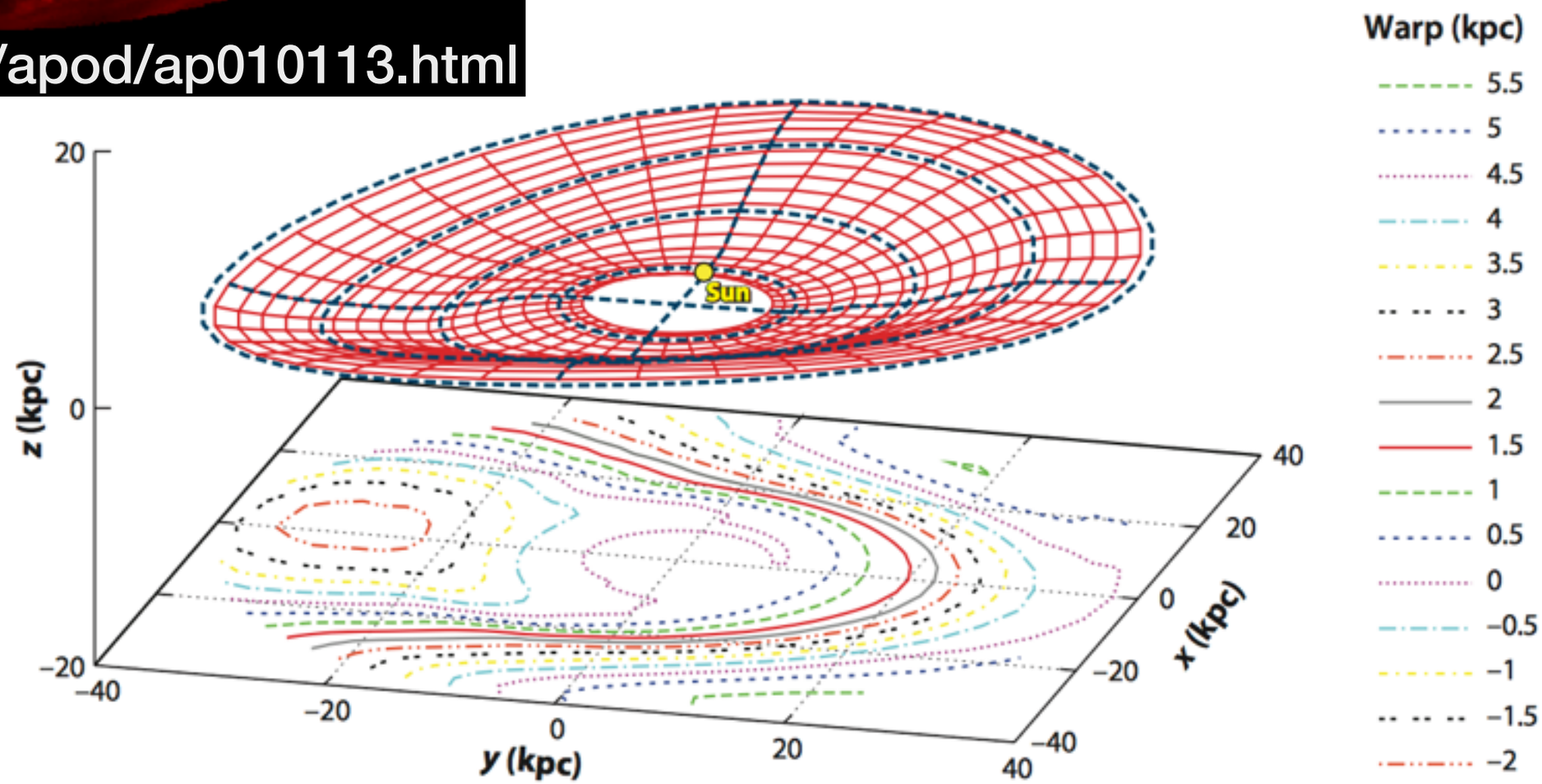


Fig. 2.22. The surface density of neutral hydrogen, as estimated separately for the northern ($0 < l < 180°$; filled dots) and southern ($180° < l < 360°$; open circles) halves of the Galaxy. Within the solar circle, the density is sensitive to corrections for optical thickness; outside, it depends on what is assumed for $V(R)$. The shaded region shows the surface density of molecular hydrogen, as estimated from the intensity of CO emission – W. Burton and T. Dame.

Quase todo H2, mas menos do que metade do HI está dentro da órbita solar. Gás molecular está acumulado em um anel de 4kpc. Perto do Sol, CO se acumula dentro de 80pc do plano do disco, HI é cerca de 2 vezes mais espesso. Gás e poeira estão concentrados próximos aos braços espirais. Acima de 1-2kpc, quase todo gás é quente ou morno.





Kalberla & Kerp, ARA&A 2009, 47, 27

Figure 3

The warped Galactic plane; average midplane positions as derived from the Leiden-Argentine-Bonn 21-cm line survey by fitting three basic modes. Isophotes are from $z_0 = -2$ to 5.5 kpc in steps of 0.5 kpc. The $z = 0$ plane is inclined by 60° and viewed from $\phi = 15°$. The location of the Sun is indicated by the yellow dot. The blue dashed lines mark quadrants in azimuth and distances $R = 10$, 20, 30, and 40 kpc, respectively.

Radiação do meio interestelar

- Linhas de emissão ou espectro de contínuo (corpo negro)
- Em densidades baixas, observam-se as chamadas “linhas proibidas”, que deveriam se chamar *linhas menos prováveis*, são transições mais lentos:
  - um elétron de H leva cerca de 10^{-8}s para pular do nível 3 para 2, mas para as transições proibidas leva cerca de 1s
  - altamente sensíveis a densidade e temperatura do gás
  - são identificadas por colchetes, ex, [OIII] em 500.7nm.
- 21cm: transição hiperfina do H, resultante do acoplamento entre o spin nuclear e o do elétron; leva 11Myr pra ocorrer (!!!)
- Moléculas: transições eletrônicas, rotacionais e vibracionais
- CO é a molécula mais abundante depois do H_2, e tem duas transições rotacionais importantes em 1.3 e 2.6 mm que precisam de apenas T ~ 10-20K; a razão Xco entre H2 e CO é relativamente constante na Galáxia

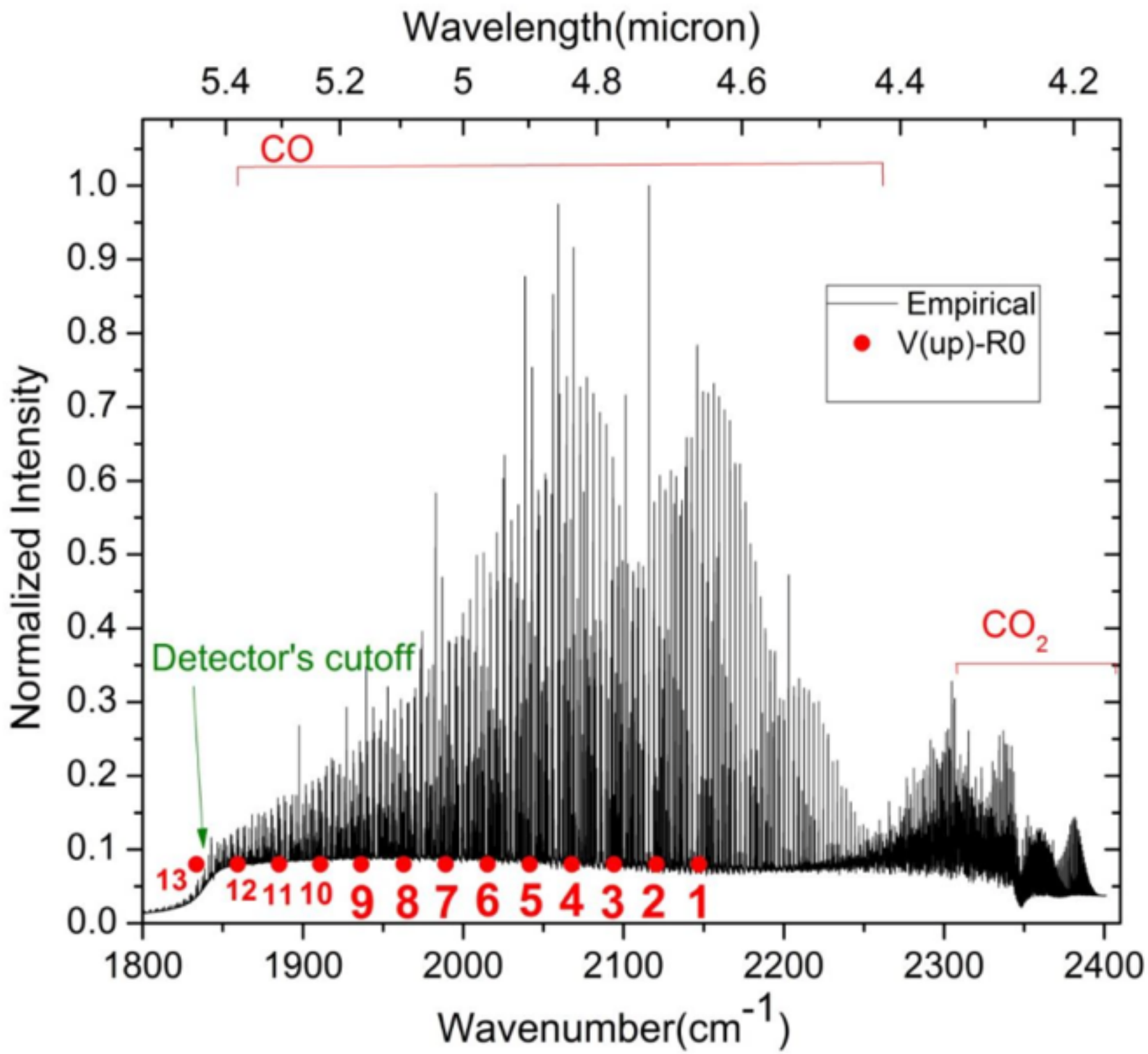


Figure 7. Microwave discharge spectrum of CO and CO_2. with the positions of R0 for vibrational states of CO up to V = 13 (with $\Delta V = -1$) are indicated by solid circular symbols.

http://www.physics.ucf.edu/~rep/theses/Farnood_MS_2011.pdf

Radiação do MIE

- transições vibracionais moleculares emitem linhas com alguns microns, transições rotacionais emitem em milímetros
- a molécula H2, a mais abundante, é muito difícil de ser observada; emite significativamente apenas em T acima de ~1000K (precisa haver uma fonte de UV “atrás" da nuvem molecular)
- a molécula mais abundante depois do H2 é a CO, com transições rotacionais importantes em 1.3 e 2.6mm que requerem apenas T ~ 10-20K pra serem excitados.
- boa parte do gás molecular pode estar “escondido”, pois boa parte deste é opticamente espesso
- gás ionizado em regiões HII são detectados em rádio (emissão free-free, T ~ 10^4K; bremsstrahlung térmico, espalhamento de elétrons livres)
- gás quente emissor de raio-X (T ~ 10^7K) preenche os espaços entre nuvens mais frias e densas, e deve estar escapando da Galáxia

Mecanismos de aquecimento

- Raios cósmicos (núcleos atômicos de alta energia) transferem energia por ionização e excitação, e interações com elétrons livres.
- Aquecimento fotoelétrico de grãos: UV de estrelas quentes removem elétrons de grãos, aquecendo o grão e dando energia cinético ao novo elétron livre
- Fotoionização: mecanismo dominante em regiões HII
- Aquecimento por raio-X: raio X remove elétrons de átomos e moléculas, podendo provocar fotoionizações secundárias. Importante no meio morno.
- Aquecimento químico: formação de H molecular na superfície de grãos, produz 4.48eV por molécula formada.

Mecanismos de aquecimento

- Aquecimento grão-gás: transferência de energia térmica entre átomos/moléculas e grãos, por colisão
- Mecanismos macroscópicos
  - explosões SN
  - ventos estelares
  - expansão de regiões HII
  - perturbações magneto-hidrodinâmicas (rotação Galáctica, remanescentes de supernovas)

- Resfriamento ocorre por emissão de fótons (de-excitação)

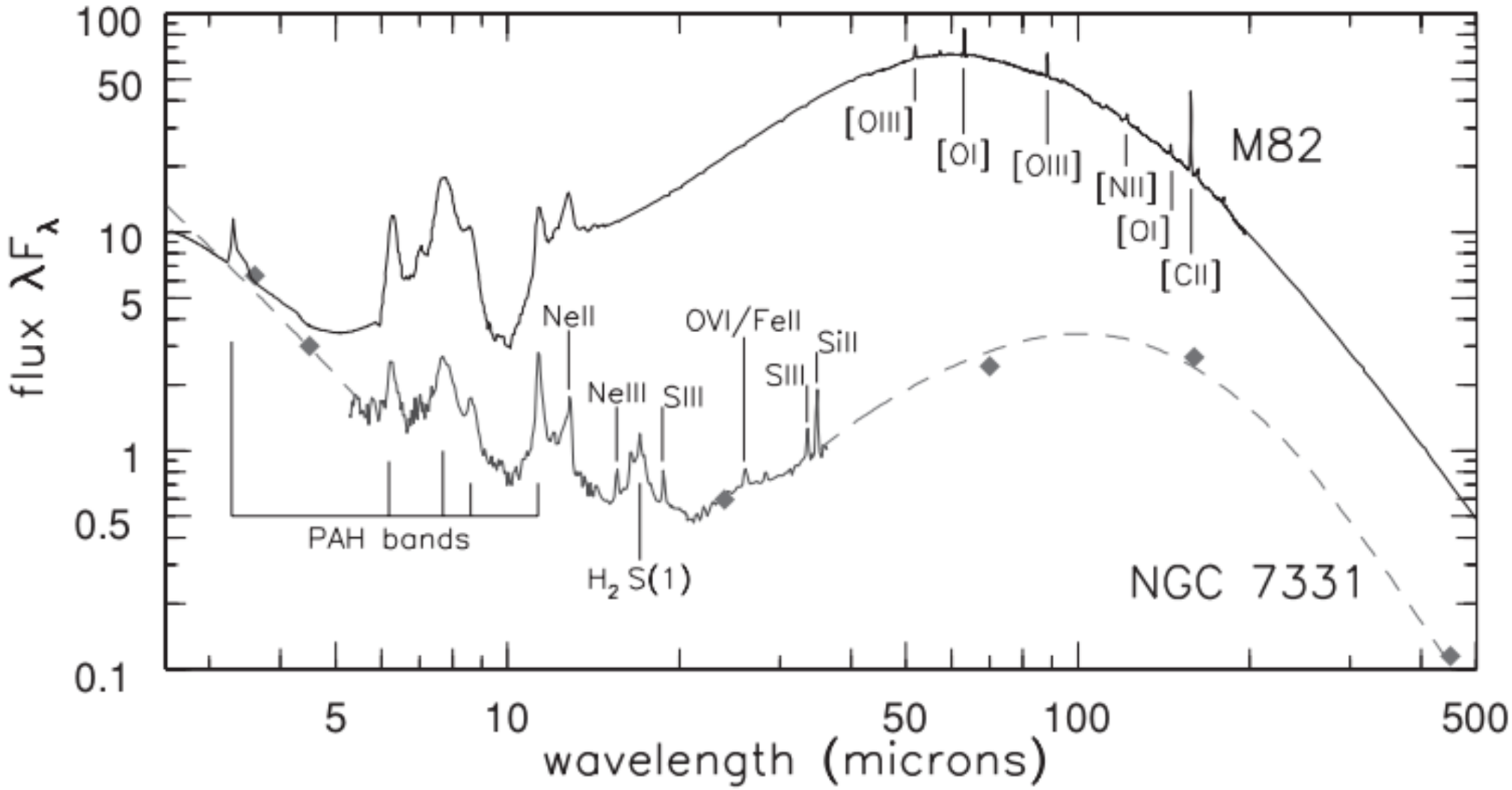


Fig. 2.24. Infrared spectra of Sb spiral galaxy NGC 7331 and starburst galaxy M82. Equal heights in λF_λ correspond to equal energy radiated per decade in frequency. For wavelengths of atomic lines, see Table 1.7; PAHs emit shortward of 30 μm; emission from large dust grains peaks near 100 μm – J. D. Smith, D. Dale, and A. Li: Spitzer Space Telescope; G. Lagache: ISO.