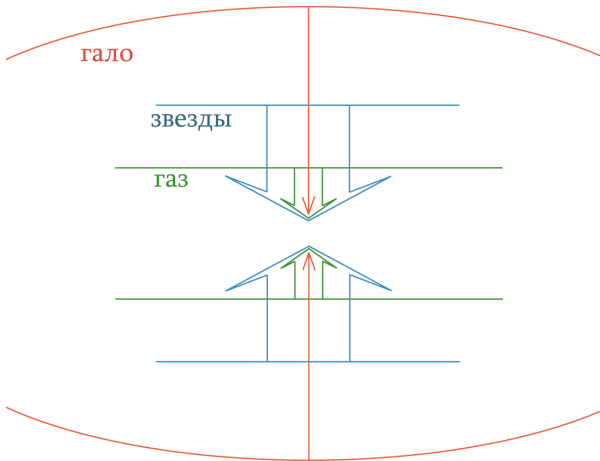


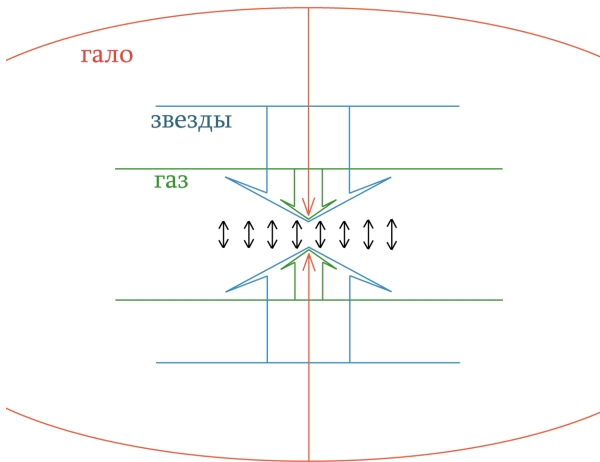
Давление равновесной межзвездной среды в галактических дисках

А. В. Каспарова

ГАИШ МГУ, Москва







Для бесконечного диска с изотермическими звездным и газовыми компонентами предполагая, что газовая шкала высот много меньше вертикальной шкалы звездного диска галактики:

$$P = (2G)^{0.5} \Sigma_{gas} v_{gas} \left(\rho_{star}^{0.5} + \left(\frac{\pi}{4} \rho_{gas} \right)^{0.5} \right),$$

где G — гравитационная постоянная,

Σ_{gas} — полная поверхностная плотность газа,

v_{gas} — дисперсия скоростей газа по z -координате,

ρ_{star} и ρ_{gas} — объемные плотности соответственно звездной и газовой компонентов в плоскости симметрии диска.

Пренебрегая самогравитацией газа, получим:

$$P = 0.84 (G \Sigma_{star})^{0.5} \Sigma_{gas} \frac{v_{gas}}{h_{star}^{0.5}},$$

где h_{star} — вертикальная шкала звездного диска и $h_{star} = (v_{star}^2 / 4\pi G \rho_{star})^{0.5}$.

Для бесконечного диска с изотермическими звездным и газовыми компонентами предполагая, что газовая шкала высот много меньше вертикальной шкалы звездного диска галактики:

$$P = (2G)^{0.5} \Sigma_{gas} v_{gas} \left(\rho_{star}^{0.5} + \left(\frac{\pi}{4} \rho_{gas} \right)^{0.5} \right),$$

где G — гравитационная постоянная,

Σ_{gas} — полная поверхностная плотность газа,

v_{gas} — дисперсия скоростей газа по z -координате,

ρ_{star} и ρ_{gas} — объемные плотности соответственно звездной и газовой компонентов в плоскости симметрии диска.

Пренебрегая самогравитацией газа, получим:

$$P = 0.84 (G \Sigma_{star})^{0.5} \Sigma_{gas} \frac{v_{gas}}{h_{star}^{0.5}},$$

где h_{star} — вертикальная шкала звездного диска и $h_{star} = (v_{star}^2 / 4\pi G \rho_{star})^{0.5}$.

$$v_{gas}(R) = const \text{ и } h_{star}(R) = const \Rightarrow P(R) \sim \Sigma_{star}^{0.5}(R) \Sigma_{gas}(R)$$

Система уравнений

Narayan, Jog (2002)

- Атомарный и молекулярный водород образуют тонкие неоднородные диски, вложенные в звездный.
- Для профиля гало темной материи берется псевдоизотермическая сфера: $\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_{DM}(0)}{1+(r/R_c)^2}$,
 $V_{as} = \sqrt{4\pi G \rho_{DM}(0) R_c^2}$.

$$\frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} = \frac{V_{as}^2 R_c}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 + z^2}}{R_c} \right) \left[1 - \frac{3z^2}{R^2 + z^2} \right] +$$

$$+ \frac{z^2 R_c^2 V_{as}^2}{(R^2 + z^2)^2 (R_c^2 + R^2 + z^2)} + \frac{V_{as}^2}{(R^2 + z^2)} \left[\frac{2z^2}{R^2 + z^2} - 1 \right]$$

Система уравнений

$$-\frac{\langle (v_z)_i^2 \rangle}{\rho_i} \frac{d\rho_i}{dz} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \phi_i}{\partial z} + \frac{\partial \phi_d}{\partial z}$$

Уравнение гидростатического равновесия

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z^2} = 4\pi G \sum_{i=1}^3 \rho_i.$$

Уравнение Пуассона для тонкого осесимметричного диска

Система уравнений

$$-\frac{\langle (v_z)_i^2 \rangle}{\rho_i} \frac{d\rho_i}{dz} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \phi_i}{\partial z} + \frac{\partial \phi_d}{\partial z}$$

Уравнение гидростатического равновесия

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z^2} = 4\pi G \sum_{i=1}^3 \rho_i.$$

Уравнение Пуассона для тонкого осесимметричного диска

Распределение объемной плотности на заданном расстоянии от центра:

$$\frac{d^2 \rho_i}{dz^2} = \frac{\rho_i}{\langle (v_z)_i^2 \rangle} \left[-4\pi G \sum_{i=1}^3 \rho_i - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{d\rho_i}{dz} \right),$$

$$\rho_i = (\rho_0)_i \quad \text{и} \quad \frac{d\rho_i}{dz} = 0$$

Выборка галактик и используемые параметры

Имя	Расст.	R_{25}	Звездный диск		Темное гало	
			h_r	$\Sigma_{star}(0)$	V_{as}	R_c
	Мпк	кпк	кпк	$M_{\odot}/\text{пк}^2$	км/с	кпк
MW	—	20	3.20	640.9	220.0	5.0
M33	0.7	7	1.18	439.5	136.6	7.0
M51	8.4	27.4	4.38	—	120.0	3.25
M81	3.63	11.55	2.8	1709.5	88.0	4.6
M100	17.0	18.3	4.00	—	272.0	4.7
M101	7.48	23.80	4.6	628.8	236.0	5.2
M106	6.95	10	6.3	933.7	157.0	8.0
SMC	0.06	3.47	1.4	168.0	—	—

Выборка галактик и используемые параметры

$$\log(M/L)_\lambda = a_\lambda + b_\lambda(\text{Color})$$

$$I(R) = I_0 \exp(-R/R_0)$$

$$(v_r)_{star} = Q \frac{3.36G\Sigma(R)}{\alpha(R)}$$

$$\alpha(R) = 2\Omega \sqrt{1 + \frac{R}{2\Omega} \frac{d\Omega}{dR}}$$

$$(v_z)_{star} = \frac{1}{2}(v_r)_{star}$$

Дисперсии скоростей звезд для MW брались из наблюдений (J.R.Lewis, K.C.Freeman, 1989). Для SMC $(v_z)_{star} = 27.5$ km/s, $(v_z)_{HI} = 22$ km/s (J. Harris, D. Zaritsky, 2006).

Атомарная и молекулярная дисперсия скоростей по z равны 9 и 6 km/s соответственно.

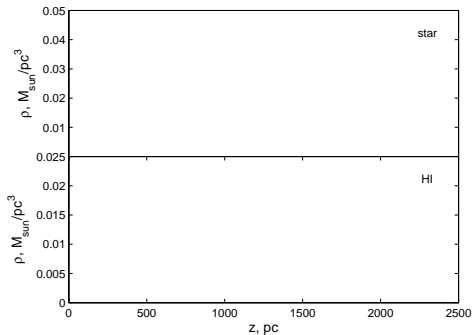
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



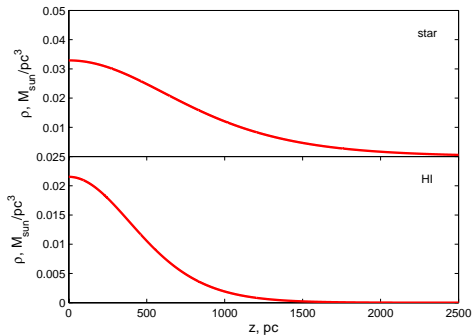
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



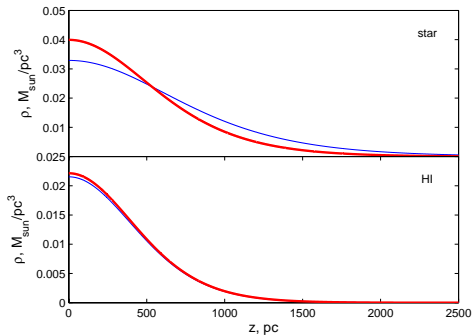
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



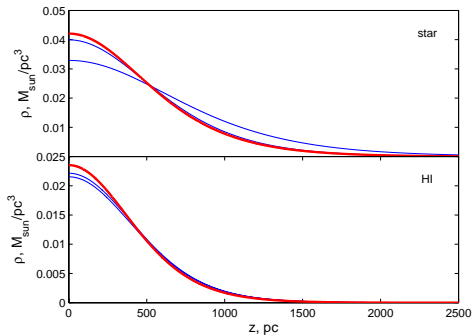
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



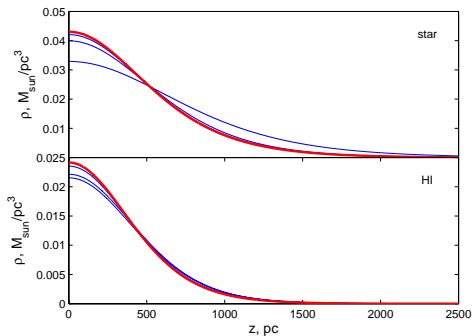
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



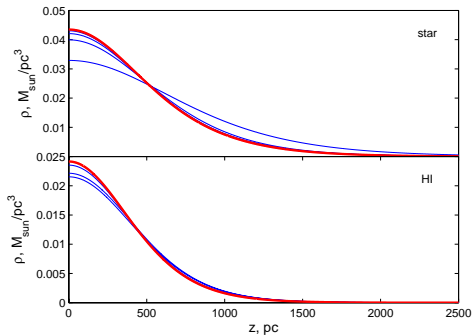
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



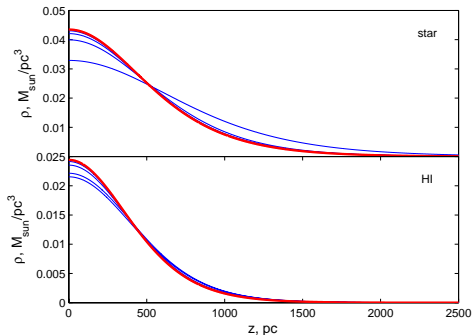
Численное моделирование

$$\begin{cases} \rho'_{1i} = \rho_{2i} \\ \rho'_{2i} = \frac{\rho_{1i}}{(v_z)_i^2} \left(-4\pi G(\rho_{1i} + \Gamma) - \frac{\partial^2 \phi_d}{\partial z^2} \right) + \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \end{cases}$$

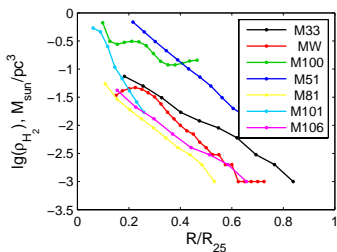
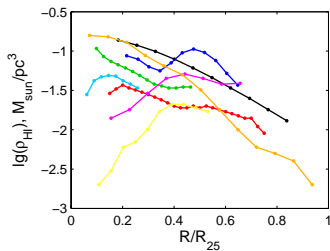
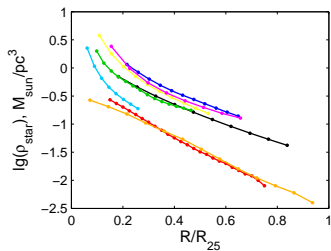
с граничными условиями:

$$\begin{cases} \rho_{1i}|_{z=0} = \rho_i(0) \\ \rho_{2i}|_{z=0} = 0 \end{cases},$$

где при первом расчете (назовем это нулевой итерацией) $\Gamma = 0$ для звездного компонента, $\Gamma = \rho_{star}$ (только что подсчитанная звездная плотность) для атомарного газа, а для молекулярного $\Gamma = \rho_{star} + \rho_{HI}$. При каждой итерации в слагаемом Γ последовательно обновляются значения объемных плотностей



Распределения объемных плотностей



Расчет давления

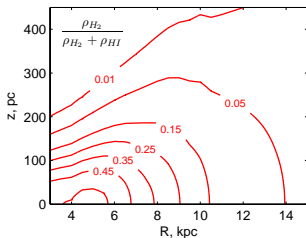
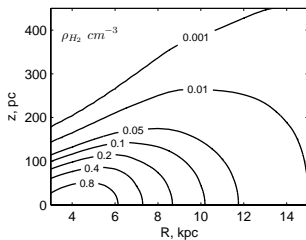
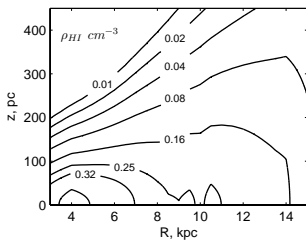
С точностью до ошибок итерационных вычислений (несколько процентов) равновесное давление межзвездной среды, полученное при решении, равно динамическому давлению в плоскости диска:

$$P = P_{dyn} = \rho_{HI} v_{HI}^2 + \rho_{H_2} v_{H_2}^2,$$

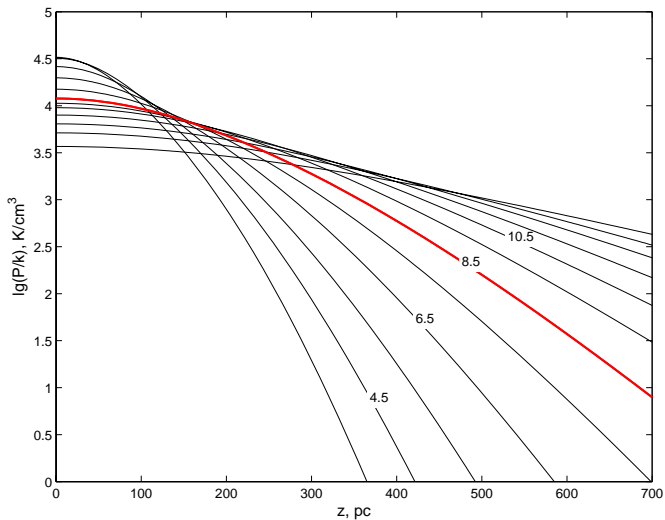
где в газовых плотностях учтен вклад элементов тяжелее водорода (коэффициент 1.38).

Расхождение наших результатов с давлением, полученным по упрощенным формулам, увеличивается с ростом расстояния от центра и составляет от 30% во внутренних областях галактик до 40% на больших R , что объясняется возрастающей ролью газа и темного гало во внешних областях диска.

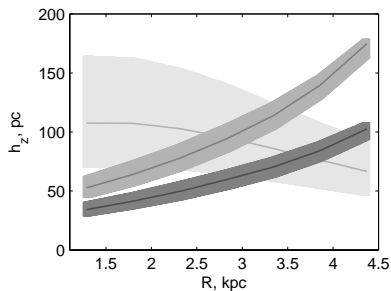
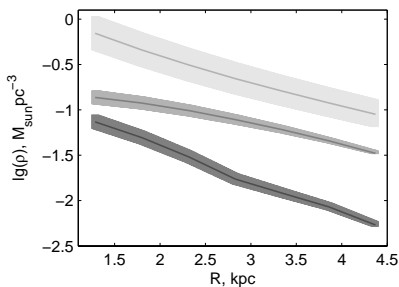
Наша Галактика



Наша Галактика



Чувствительность результатов вычислений к оценкам дисперсии скоростей звезд



Модель с постоянной толщиной звездного диска

Формула для равновесного гравитирующего изотермического диска:

$$\rho_{star}(z) = \rho_{star}(0) \operatorname{sech}^2 \left(\frac{z}{(h_z)_{star}} \right), \quad (1)$$

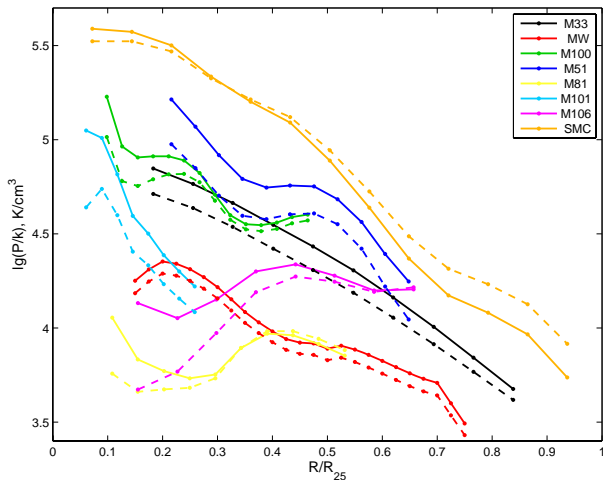
где вертикальная шкала диска считалась пропорциональной его радиальной шкале:

$$(h_z)_{star} = \frac{(v_z^2)_{star}}{\pi G \Sigma_{star}} = 0.2 h_R \quad (2)$$

для всех галактик, кроме SMC, и $0.3 h_R$ для SMC.

Полутолщина, плотность и давление газовых компонент в гравитационном поле звездного диска определялись при тех же значениях дисперсии скоростей газа, какие были приняты в первой, основной модели.

Модель с постоянной толщиной звездного диска



Сплошной линией обозначены распределения, полученные для нашей основной модели, а пунктиром — при предположении постоянства толщины звездного диска.

Зависимости доли молекулярного газа по отношению к атомарному от гидростатического давления

