Доклады Академии Наук СССР
1940. Том XXIX, № 4

АСТРОНОМИЯ

Академик В. Г. ФЕСЕНКОВ

О КОЛИЧЕСТВЕ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Общее число звезд в нашей галактике было оценено Зирсом ([1]) в 30 миллиардов путем экстраполяции статистических подсчетов, сделанных для разных площадок небесного свода. В настоящее время эта оценка потеряла всякое значение, так как Зирс не учитывал весьма значительного галактического поглощения, совершенно скрывающего центральные части галактики.

Лучшее представление о массе галактики можно составить на основании разбора систематических звездных движений в окрестностях Солнца. Явление галактического вращения в предположении стационарных условий и кругового характера движения приводит к значению общей массы в 10^{11} масс Солнца. В настоящем сообщении я делаю оценку общего числа звезд, входящих в состав нашей системы, на основании галактической концентрации, т. е. отношения числа звезд в плоскости Млечного Пути к числу звезд в направлении на галактический полюс.

Предположим, что в нашей системе звезды распределяются согласно поверхностям одинаковой плотности, симметричным относительно оси вращения z,

$$\varphi(r,z)=k^2,$$

где k—параметр, изменяющийся от одной поверхности к другой. В элементарном объеме $R^2dRd\omega$, наблюдаемом из S под телесным углом $d\omega$, заключается число звезд $N(k)\,dv=N(k)\,R^2dR\,d\omega$.
Общее число звезд в данном направлении будет

$$n\,d\omega=d\omega\int\limits_0^\infty N(k)\,R^2\,dR.$$

Если поверхности одинаковой плотности суть эллипсоиды вращения

$$\frac{r^2}{a_0^2}+\frac{z^2}{b_0^2}=k^2,$$

то общее число звезд в галактике будет

$$\underline{\overline{N}}=4\pi\int\limits_0^k N(k)\,a_0^2b_0k^2\,dk.$$

Примем, что распределение звезд в функции k представляется рядом

$$\left.\begin{aligned} N(k) &= A_0 + \frac{A_1}{a_0 k_0} + \frac{A_2}{a_0^2 k_0^2} + \ \ldots, \qquad \text{если } k \leqslant k_0, \\ \text{и} \qquad N(k) &= A_0 + \frac{A_1}{a_0 k} + \frac{A_2}{a_0^2 k^2} + \ \ldots, \qquad \text{если } k \geqslant k_0, \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

где A_0, A_1, A_2, ... некоторые постоянные величины.

Мы предполагаем, таким образом, наличие небольшого центрального ядра с постоянной плотностью, избегая тем самым особенных точек в центре. В таком случае

$$\underline{\overline{N}} = \frac{4\pi}{3} r^3 \eta A_0 + 2\pi A_1 r^2 \eta \left(1 - \frac{1}{3} \frac{k_0^2}{k^2}\right) + 4\pi A_2 r \eta \left(1 - \frac{2}{3} \frac{k_0}{k}\right), \text{ где } \eta = \frac{b}{a}.$$

Поскольку k_0 должно быть мало по сравнению с k, относящимся к внешним границам нашей системы, предыдущее выражение может быть написано просто в виде

$$\underline{\overline{N}} = \frac{4\pi}{3} r^3 \eta A_0 + 2\pi A_1 r^2 \eta + 4\pi A_2 r \eta,$$

по крайней мере если ограничиваться лишь тремя членами в разложении ([1]).

Перейдем теперь к выражению для числа звезд в произвольном направлении, заданном сферическими координатами λ, β, которые отсчитываются по отношению к экваториальной плоскости галактики.

Вместо расстояния R введем новую переменную ϑ по формуле

$$R = \frac{l \sin(\vartheta + \alpha)}{\sin \vartheta}$$

(l — расстояние солнца S от центра галактики C, α — угол между направлениями на C и на рассматриваемый элементарный объем dv, ϑ — угол между направлениями на S и C). Очевидно, $\cos\alpha = \cos\beta \cos\lambda$.

Имеем
$$n = \int_{\vartheta_0}^{\pi - \alpha} N(k) \frac{l^3 \sin^2(\vartheta + \alpha)}{\sin^4 \vartheta} \sin \alpha d\vartheta.$$

Принимая во внимание, что

$$z = R \sin\beta \quad \text{и} \quad r^2 = l^2 + R^2 \cos^2\beta - 2lR \cos\beta \cos\lambda,$$

находим следующую связь между k и ϑ:

$$\alpha_0^2 k^2 = l^2 \left(1 + \frac{\sin^2(\alpha + \vartheta)\cos^2\beta}{\sin^2\vartheta} - 2\frac{\sin(\alpha + \vartheta)}{\sin\vartheta} \cos\beta\cos\lambda + \right.$$
$$\left. + \frac{\sin^2(\alpha + \vartheta)}{\eta^2} \frac{\sin^2\beta}{\sin^2\vartheta}\right).$$

Найдем число звезд в направлении на полюс галактики ($\beta = 90°$, $\alpha = 90°$) и в направлении луча зрения, расположенного в галактической плоскости перпендикулярно к радиусу ($\lambda = 90°$; $\beta = 0°$; $\alpha = 90°$). В первом случае

$$n_1 = l^3 A_0 \int_{\vartheta_0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2\vartheta \, d\vartheta}{\sin^4\vartheta} + l^2 A_1 \int_{\vartheta_0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2\vartheta \, d\vartheta}{\sin^4\vartheta \sqrt{1 + \frac{1}{\eta^2}\operatorname{ctg}^2\vartheta}} + A_2 l \int_{\vartheta_0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2\vartheta \, d\vartheta}{\sin^4\vartheta \left(1 + \frac{1}{\eta^2}\operatorname{ctg}^2\vartheta\right)}. \tag{2}$$

Во втором случае имеем то же самое выражение, в котором, однако, $\eta=1$. Нижний предел интеграции определяется из условия

$$\operatorname{ctg}\vartheta_0=\eta\frac{\sqrt{r^2-l^2}}{l}=\eta\operatorname{ctg}\psi_0.$$

Можно положить, что Солнце находится от центра галактики на расстоянии $^2/_3$ ее радиуса. Следовательно, $l=0{,}667\,r$.

Интеграция (2) приводит к следующему результату:

$$n_1=l^3A_0\eta^3\frac{\operatorname{ctg}^3\psi_0}{3}+A_1l^2\eta^3\left(\frac{1}{4\log e}\cdot\log\frac{1-\cos\psi_0}{1+\cos\psi_0}+\frac{1}{2}\,\frac{\cos\psi_0}{\sin^2\psi_0}\right)+$$
$$+A_2l\eta^3\left(\operatorname{ctg}\psi_0-\frac{\pi}{2}+\psi_0\right).$$

Отсюда видно, что $n_1=n_2\eta^3$, т. е.

$$\frac{n_2}{n_1}=C=\frac{a^3}{b^3}.$$

Итак, галактическая концентрация, определяемая как отношение числа звезд в направлениях $\beta=0°$, $\lambda=90°$ и $\beta=90°$, оказывается равной отношению кубов экваториальной и полярной полуосей эллипсоидов одинаковой плотности, независимо от закона распределения числа звезд в зависимости от k. Иначе говоря, галактическая концентрация зависит только от формы галактической системы, но не от распределения в ней плотностей на разных расстояниях от центра.

Для оценки общего числа звезд в галактике достаточно, зная C и вид функции $N(k)$, определить число звезд лишь по одному определенному направлению. Вообще говоря, это представляет довольно трудную задачу. Только в направлении на полюс галактики возрастание числа слабых звезд с каждой следующей величиной настолько замедляется, что возможно более или менее уверенно проэкстраполировать их общее число до самой границы нашей системы. На основании упомянутых данных Зирса можно заключить, что на 1 квадратный градус неба в направлении на полюс приходится 10^4 звезд. Итак,

$$n_1=\left(\frac{180}{\pi}\right)^2\cdot10^4.$$

С другой стороны, общее число звезд во всей системе можно представить в виде

$$\underline{N}=\frac{n_1}{\eta^2}\cdot\frac{\frac{4\pi}{3}r^3A_0+2\pi A_1r^2+4\pi A_2r}{\frac{\operatorname{ctg}^3\psi_0}{3}l^3A_0+\left(\frac{1}{4\log e}\log\frac{1-\cos\psi_0}{1+\cos\psi_0}+\frac{1}{2}\frac{\cos\psi_0}{\sin^2\psi_0}\right)A_1l^2+A_2l\left(\operatorname{ctg}\psi_0-\frac{\pi}{2}+\psi_0\right)}.$$

О распределении числа звезд в функции расстояния от центра галактики нам почти ничего неизвестно. Более надежное представление об этом распределении можно получить по аналогии с другими образованиями, равноценными нашей галактике,—внегалактическими туманностями. Мною было уже показано, что подобная туманность, ближайшая к нам, именно, находящаяся в созвездии Андромеды, характеризуется непрерывным и быстрым падением яркости от центра к периферии, что в пределах расстояния до $40'$ может быть представлено эмпирически в виде

$$f(r)=a+\frac{b}{r}+\frac{c}{r^2},$$

причем $a=-0{,}04$; $b=0{,}11$; $c\approx0$, если за единицу расстояния принять $40'$.

Падение яркости в туманности Андромеды происходит таким образом несколько быстрее, чем r^{-1}, но медленнее, чем r^{-2}.

Принимая во внимание, что внегалактические туманности развернутого типа, к которому принадлежит туманность Андромеды, а также наша галактика, имеют в высшей степени плоскую структуру, можно, казалось бы, принять тот же закон и для распределения звездных плотностей. Оказывается, однако, что колор-индекс спиральных ветвей этой туманности уменьшается с расстоянием, другими словами, ветви постепенно синеют. Их цветовая температура близка к 6000° в центральных частях и доходит почти до 10 000° на расстоянии в 40′. Нужно поэтому считать, что периферическая часть подобной туманности состоит преимущественно из звезд с меньшим колор-индексом, т. е. абсолютно более ярких и отличающихся большей энергетической отдачей на единицу массы. Изменение звездной плотности происходит поэтому быстрее, чем изменение яркости и, возможно, приближается в r^{-2}.

Положим сначала $A_0 = A_1 = 0$. Имеем

$$\underline{\overline{N}} = \frac{n_1}{\eta^2} \frac{4\pi r^2}{l\left(\operatorname{ctg}\psi_0 - \frac{\pi}{2} + \psi_0\right)}$$

или

$$\underline{\overline{N}} = 2{,}21\,\eta^{-2} \cdot 10^9. \tag{3}$$

Если, с другой стороны, звездная плотность изменялась бы как r^{-1}, т. е. если бы $A_0 = A_2 = 0$, то

$$\underline{\overline{N}} = \frac{n_1}{\eta^2} \cdot \frac{2\pi r^2}{l^2\left(\frac{1}{4\log e} \cdot \log\frac{1-\cos\psi_0}{1+\cos\psi_0} + \frac{1}{2}\frac{\cos\psi_0}{\sin^2\psi_0}\right)},$$

откуда $\underline{\overline{N}} = 1{,}3\,\eta^{-2} \cdot 10^9$.

Мы видим, таким образом, что число звезд в галактике лишь незначительно зависит от характера распределения звездной плотности. В гораздо большей степени $\underline{\overline{N}}$ зависит от формы звездной системы, непосредственно связанной с галактической концентрацией.

Как известно, видимая галактическая концентрация быстро увеличивается со звездной величиной. Для звезд 21-й величины $C = 44{,}2$ и продолжает возрастать в геометрической прогрессии. Для оценки правильного значения C нужно учесть, что вследствие наличия поглощающей материи, проникающая способность телескопа гораздо меньше в плоскости галактики (2700 парсеков для звезд 21-й вел.), чем по направлению на полюс (7600 парсеков). Если при подсчетах звезд ограничиваться одинаковыми расстояниями по обоим направлениям, то C возрастает до 2200. В действительности, однако, для правильной оценки C необходимо вести подсчеты звезд в пределах тех же поверхностей одинаковой плотности, имеющих весьма сплющенную форму. Следовательно, истинная концентрация выразится огромным числом. Приблизительная оценка дает от 10^5 до 10^6. Полагая поэтому $\eta = 10^{-2} - 2\cdot 10^{-2}$, находим из (3), что общее число звезд в нашей системе будет $\underline{\overline{N}} = 10^{13}$, с точностью во всяком случае до одного порядка.

Поступило
23 VII 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Seares a. Joyner, Astrophysical Journ., **67** (1928).