ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
XXXI 1960 1

АСТРОФИЗИКА

Р. А. Саакян

О деформации галактик при столкновениях

(Представлено академиком В. А. Амбарцумяном 21. X 1959)

Плотные скопления галактик типа скоплений Coma и Corona Borealis заключают в себе много галактик типа SO, которые не содержат темной материи, а также не имеют спиральных ветвей. Предполагается, что эти галактики по преимуществу состоят из звездного населения второго типа. Свойства таких галактик по Спитцеру и Бааде ([1]) объясняются тем, что галактики в плотных скоплениях часто сталкиваются, проходят друг через друга. Вследствие столкновения двух галактик, когда одна из них проходит через другую, они лишаются пылевой материи, которая при столкновении выбрасывается из галактик. После столкновения у них уже не могут образоваться спиральные ветви, так как по мнению Спитцера и Бааде звезды спиральных ветвей образуются из диффузной материи. Однако возникает вопрос, если галактики типа SO пережили столкновение, то почему в строении этих галактик не наблюдается последствий столкновения? Указанные авторы пытаются объяснить это тем, что при прохождении галактик друг через друга в распределении и кинематике звезд почти не происходит изменений. Системы звезд почти не деформируются.

При далеком прохождении двух галактик приращение скорости звезды относительно центра своей галактики можно выразить через:

$$\Delta v_r = \frac{2GM}{v}\left|\frac{\vec{r}_0}{r_0^2} - \frac{\vec{r}_1}{r_1^2}\right|, \tag{1}$$

где M — масса проходящей галактики, G — гравитационная постоянная, v — относительная скорость галактик, r_0 — наименьшее расстояние звезды m от центра проходящей галактики и r_1 — взаимное расстояние центров двух галактик в момент наибольшего сближения.

Однако надо отметить, что при выводе формулы (1) перемещением звезды m по отношению к центру своей галактики за время взаимодействия пренебрегают, а импульс, полученный звездой m от проходящей галактики за время сближения, считают направленным по r_0. Это можно признать хорошим приближением при далеком прохождении двух галактик, при близком же прохождении и особенно при столкновении (прохождении насквозь) галактики с гигантской галактикой эти допущения не верны, так как в этих случаях расстояние звезды m от центра своей галактики за время сближения так сильно изменяется, что этим изменением нельзя пренебрегать, а импульс, полученный звездой от проходящей галактики за время прохождения, не направлен по r_0.

Спитцер и Бааде, принимая формулу (1), преобразуют первый член правой части следующим образом:

$$\Delta v = \frac{2GM}{vr_0} = \frac{2v_c^2(r_0)}{v}, \tag{2}$$

где $v_c(r_0)$ — скорость кругового движения звезды в галактике на расстоянии r_0 от центра, принимая, что масса галактики сосредоточена в центре галактики.

Основываясь на данных наблюдений, они считают, что для всех расстояний от центра галактики в галактиках-карликах можно принимать $v_c = 100\ \frac{км}{сек}$, а в галактиках-гигантах $v_c = 300\ \frac{км}{сек}$. Для средних галактик они брали $v_c = 200\ \frac{км}{сек}$. Пользуясь формулой (2) и принимая $v = 2400\ \frac{км}{сек}$, они получили

$$\Delta v = \frac{2\,v_c^2}{v} = 33{,}3\ \frac{км}{сек}.$$

Затем принимая, что центры галактик при наибольшем сближении находятся на расстоянии $r_1 = 2a_1$, а звезда m на расстоянии a_1 от центра своей галактики, для приращения скорости относительно центра они получают:

а) когда звезда находится между центрами галактик:

$$\Delta v_r = \frac{2GM}{a_1} - \frac{2GM}{2a_1} = 17\ \frac{км}{сек}; \tag{3}$$

б) когда звезда не находится между центрами галактик, но находится на продолжении линии, соединяющей центры:

$$\Delta\, v_r = \frac{2GM}{2\,a_1} - \frac{2GM}{3\,a_1} = 6\ \frac{км}{сек}. \tag{4}$$

Исходя из этих результатов они считают, что большая часть звезд должна получать приращения скорости порядка $8\ \frac{км}{сек}$. Спитцер и Бааде признают, что вычисления, сделанные ими, грубы, однако они считают, что полученные значения скорее преувеличены. Во-первых, масса проходящей галактики считалась сосредоточенной в ее центре, вовторых, вычисленные приращения скорости получены только для случаев, когда направление относительной скорости галактик перпендикулярно к плоскости орбиты. В случаях, когда v не перпендикулярно плоскости орбиты, Δv_r будет меньше. Учитывая эти обстоятельства, они считают, что Δv_r будет порядка примерно $3 \frac{км}{сек}$.

Таким образом, они пришли к выводу, что приращения скорости звезды относительно центра галактики на противоположных сторонах галактики суть малые величины по сравнению с самими скоростями звезд в галактике*. Отсюда следует, что столкновение галактик мало влияет на распределение звезд в галактиках.

Однако заметим, что при определении Δv_r они принимали, что расстояние звезд до центра своей галактики $r_{(0)} = r_0$, но если взять $r_{(0)} > r_0$, то очевидно: $\Delta v_r > 17 \frac{км}{сек}$ и в случае столкновения любой галактики с галактикой средних размеров, $17 \frac{км}{сек}$ не будет верхним пределом Δv_r. Затем из вычислений, сделанных Спитцером и Бааде, невозможно понять, для каких расстояний r_0, r_1 и при какой массе проходящей галактики вычислены Δv_r и Δv. Так, например, можно показать, что при $M = 0{,}7 \cdot 10^{11}$ солнечных масс ([1] вычисления, выполненные Спитцером и Бааде, сделаны не для такого расстояния, при котором галактики сталкиваются, а, наоборот, соответствуют расстоянию между центрами, при котором они все еще находятся на значительном расстоянии друг от друга. В самом деле, принимая $M = 0{,}7 \cdot 10^{11}$ солнечных масс, $v = 2400 \frac{км}{сек}$, $\Delta v = 33 \frac{км}{сек}$, из (2) находим: $r_0 \cong 8000$ парсек. Таким образом, считая, что радиус средней эллиптической галактики не больше 5000 пс, получаем, что звезда первой галактики, при сближении со второй галактикой, находилась вне границ последней (8120>5000).

Из определения Δv следует, что указанные авторы пользуются законами Кеплера, однако наблюдения показывают, что в центральных частях галактик, особенно эллиптических, движение звезд вокруг центра галактик совершается по закону вращения твердого тела и только во внешних частях движение совершается по законам Кеплера ([2]).

Теоретически эти законы можно вывести следующим образом.

---

* Заметим, что даже приращение скорости звезды $\Delta v_r = 17 \frac{км}{сек}$ не настолько малая величина, чтобы она мало влияла на распределение звезд в галактиках. Подробное обсуждение показывает, что такие величины приращения скорости сильно влияют на распределение звезд в галактиках. На этом мы здесь не будем останавливаться. Это является предметом другой работы.

По ([3]) в случае, когда галактика имеет ось и плоскость симметрии и кроме равномерного распределения массы в галактике имеется и центральное сгущение массы, движение во внутренних частях галактики в плоскости симметрии определяется уравнением:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{h^2}{r^3} - \frac{3GMk_1}{2a^3 e^2}\left[\frac{1}{e} \arcsin e - \sqrt{1-e^2}\right] - \frac{kGM}{r^2}, \tag{5}$$

где h — постоянная площадей, M — масса галактики, a — большая полуось, e — эксцентриситет галактики, $k+k_1=1$.

В случае круговой орбиты имеем:

$$v = \frac{h}{r}, \quad \frac{d^2r}{dt^2} = 0. \tag{6}$$

Подставив значение h из (5) в (6) находим:

$$v^2 = \frac{3Gk_1M}{2\, a^3e^2}\left[\frac{1}{e} \arcsin e - \sqrt{1-e^2}\right] r^2 + \frac{kGM}{r}. \tag{7}$$

Если звезда находится в центральных частях галактики, можно приближенно принять, что $k=0_1$, $k_1=1$, тогда из (7):

$$v^2 = \frac{3GM}{2a^3l^2}\left[\frac{1}{e} \arcsin e - \sqrt{1-e^2}\right] r^2, \tag{8}$$

а когда звезда находится во внешних частях галактики и эксцентриситет мал, можно приближенно принять: $k=1$, $k_1=0$, тогда из (7) находим:

$$v^2 = \frac{GM}{r}. \tag{9}$$

Таким образом получается, что для определения массы галактики через скорость звезды можно пользоваться формулой (8), когда звезда находится в центральных частях галактики; формулой (9), когда звезда находится во внешних частях галактики, а в промежуточных случаях надо пользоваться формулами подобными (7). Поэтому при определении Δv надо исходить из значения массы галактики, а не из значения скорости звезды в центральных частях галактики, так как для определения массы галактики через скорость этих звезд требуются дополнительные данные.

Определим приращение скорости звезды, когда одна галактика проходит через другую. Рассмотрим следующие случаи. Расстояние звезды от центра галактики равно 5000 пс. Звезда при сближении двух галактик находилась или между их центрами или на линии, соединяющей центры галактик. r_0 и r_1 даны в табл. 1, $M=10^{11}$ солнечных масс, $v=2400\ \frac{км}{сек}$.

Предположив, что масса проходящей галактики сосредоточена в ее центре, мы составили табл. 1. Однако в действительности масса галактики распределена во всем ее объеме. Показано, что во всех галактиках при отдалении от центра галактики плотность массы уменьшается. Поэтому для определения приращения скорости звезды, когда галактики столкнутся, надо учесть это обстоятельство.

Таблица 1

r_0	r_1	Δv_r
500 *пс*	5500 *пс*	700 *км/сек*
6000	5500	57
1000	6000	300
7000	6000	9
2000	7000	129
9000	7000	11,3

Об импульсе, полученном звездой, когда две шарообразные галактики сталкиваются. Как известно, импульс, полученный звездой, выражается через:

$$\Delta p = \int_{-\infty}^{\infty} f(r)\, dt, \tag{10}$$

где $f(r)$ — действуюшая на звезду сила, а dt — дифференциал времени.

Если звезда галактики 1 находится внутри галактики 2, то ускорение, получаемое этой звездой от стороны галактики 2, будет:

$$f(r) = \frac{GM(r)}{r^2}\,\frac{\vec{r}}{r}, \tag{11}$$

где $M(r)$ — масса, заключенная внутри сферы с радиусом r вокруг центра второй галактики.

Из (10) и (11), для приращения скорости звезды, находим:

$$\Delta v = G\int_{-\infty}^{\infty} \frac{M(r)\,\vec{r}}{r^3}\, dt. \tag{12}$$

Считая, что при сближении галактик расстояние звезды от центра своей галактики не изменяется, а галактика 2 относительно галактики 1 двигается прямолинейно, находим:

$$\Delta v = 2\,Gr_0 \int_{0}^{\infty} \frac{M(r)}{r^3}\, dt, \tag{13}$$

где r_0 — самое короткое расстояние между центрами звезды и галактики 2.

Предполагая, что относительное движение галактик прямолинейное и равномерное, мы можем написать:

$$dt = \frac{dy}{v}, \tag{14}$$

где v — относительная скорость галактик, y — линия, по которой галактика 2 двигается относительно галактики 1.

Очевидно в этом случае имеем:

$$r^2 = y^2 + r_0^2, \tag{15}$$

откуда

$$y dy = r dr. \tag{16}$$

Подставив значение y из (15) в (16), оттуда значение dy в (14), а оттуда значение dr в (13), находим:

$$\Delta v = \frac{2Gr_0}{v} \int_{r_0}^{\infty} \frac{M(r)dr}{r^2 \sqrt{r^2 - r_0^2}} \cdot \tag{17}$$

Интервал (r_0, ∞) разделим на две части: (r_0, a) и (a, ∞), где a — радиус галактики 2.

В интервале (a, ∞) для приращения скорости звезды имеем:

$$\Delta v_1 = \frac{2GMr_0}{v} \int_{a}^{\infty} \frac{dr}{r^2 \sqrt{r^2 - r_0^2}} = \frac{2GM}{vr_0} \left| 1 - \sqrt{1 - \frac{r_0^2}{a^2}} \right| \cdot \tag{18}$$

В интервале (r_0, a) для приращения скорости, находим:

$$\Delta v_2 = \frac{2Gr_0}{v} \int_{r_0}^{a} \frac{M(r)\, dr}{r^2 \sqrt{r^2 - r_0^2}} = \frac{2G}{vr_0} \int_{r_0}^{a} M(r) d\sqrt{1 - \frac{r_0^2}{r^2}},$$

откуда после интегрирования получим:

$$\Delta v^2 = \frac{2G}{vr_0} \left[M \sqrt{1 - \frac{r_0^2}{a^2}} - \int_{r_0}^{a} \sqrt{1 - \frac{r_0^2}{r^2}}\, dM(r) \right] \cdot \tag{19}$$

Из (18) и (19) находим:

$$\Delta v = \frac{2G}{vr_0} \left| M - \int_{r_0}^{a} \sqrt{1 - \frac{r_0^2}{r^2}}\, dM(r) \right|. \tag{20}$$

Для значения $dM(r)$ имеем:

$$dM(r) = 4\pi\rho\, r^2 dr, \tag{21}$$

где ρ плотность в объеме $4\pi r^2 dr$.

Подставив значение $dM(r)$ из (21) в (20), находим:

$$\Delta v = \frac{2G}{vr_0} \left[M - 4\pi \int_{r_0}^{a} \rho r^2 \sqrt{1 - \frac{r_0^2}{r^2}}\, dr \right]. \tag{22}$$

Примем согласно ([5]), что плотность в шарообразной системе имеет вид:

$$\rho = \frac{k \pi^{3/2} e^{\frac{3h^2GM}{a}}}{h^3 (1 + \omega^2 r^2)} e^{-\frac{4}{3} Gh^2 \pi \bar{\rho} r^2}, \tag{23}$$

где k, h и ω — постоянные величины, $\bar{\rho}$ — среднее значение плотности

Для максвеловского распределения скоростей имеем: $\omega=0$,

$$h^2 = \frac{1}{2\sigma^2}, \tag{24}$$

где σ дисперсия скоростей. Учитывая также, что

$$\bar{\rho} = \frac{3M}{4\pi a^3}, \tag{25}$$

получаем

$$\rho = \rho_0 e^{-br^2}, \tag{26}$$

где

$$b = \frac{GM}{2a^3\sigma^2}. \tag{27}$$

Подставив значение ρ из (26) в (22), находим:

$$\Delta v = \frac{2G}{vr_0}\left| M - 4\pi\rho_0 \int_{r_0}^{a} \sqrt{1-\frac{r_0^2}{r^2}}\, e^{-br^2} r^2 dr \right|, \tag{28}$$

ρ_0 определяется из

$$\rho_0 = \frac{M}{4\pi \int_0^a e^{-br^2} r^2 dr}. \tag{29}$$

Подставив значение ρ_0 из (29) в (28), находим:

$$\Delta v = \frac{2GM}{vr_0}\left[1 - \frac{\int_{r_0}^{a} \sqrt{1-\frac{r_0^2}{r^2}}\, e^{-br^2} r^2 dr}{\int_0^a e^{-br^2} r^2 dr} \right], \tag{30}$$

где $r_0 < a$, а при $r_0 > a$ имеем:

$$\Delta v = \frac{2GM}{vr_0}. \tag{31}$$

Если для данных M и a известно σ, тогда b определяется из (27), а Δv из (30).

После численного интегрирования по (30), при значениях: $M=10^{11}$ солнечных масс, $v=2000\ \frac{км}{сек}$, $a=4000$ пс, $\sigma=100\ \frac{км}{сек}$, получим, при $r_0=500$ пс $\Delta v=200\ \frac{км}{сек}$, а при $r_0=1000$ пс $\Delta v=220\ \frac{км}{сек}$.

При $r(0) = 4000$ пс (расстояние звезды от центра своей галактики) для ускорения звезды относительно центра своей галактики при этих данных находим: при $r_0 = 500$ пс $\Delta v_r = 89 \frac{км}{сек}$, а при $r_0 = 1000$ пс $\Delta v_r = 120 \frac{км}{сек}$. Эти данные помещены в табл. 2.

Таблица 2

r_0	r_1	Δv	Δv_r
500 пс	4500 пс	200 $\frac{км}{сек}$	89 $\frac{км}{сек}$
5000	4500		11
1000	5000	220	120
6000	5000		16,5

Когда направление v не перпендикулярно плоскости орбиты рассматриваемых звезд, то по Спитцеру и Бааде, как указывалось выше, Δv_r будет меньше, чем в приведенных выше примерах. Однако надо отметить, что это замечание не всегда правильно. Так, например, как видно из (1), в том случае, когда r_0 и r_1 имеют одно и то же направление, Δv_r не зависит от направления v.

Очевидно, что при встрече двух галактик, среднее Δv_r всех звезд галактики будет меньше, чем среднее Δv_r звезд, находящихся в плоскости, проходящей через центр галактики, к которой направление v перпендикулярно. Однако необходимо подчеркнуть, что для перераспределения звезд в галактике играет роль не среднее приращение скоростей звезд, а индивидуальные приращения, особенно большие приращения скоростей звезд. Поэтому усреднение не имеет здесь большого смысла.

С другой стороны, для определения Δv_r также нет смысла взять массу средней галактики, имея в виду, что различия в массах галактик весьма велики. Особенно большое перераспределение звезд в галактике может происходить, когда она встретится с большой галактикой.

Исходя из вышеизложенного, можно сказать, что данные, находящиеся в табл. 2, не являются верхними границами приращения скоростей при сближении двух галактик.

Данные табл. 2 показывают, что, при столкновении с гигантской галактикой, распределение звезд в звездной системе сильно изменяется, так как при этом скорости звезд в галактиках получают значительные приращения. Очевидно, что при столкновении галактик, особенно, когда компактная гигантская галактика проходит через среднюю или маленькую, некоторая часть звезд из последних систем может покинуть свою систему, а возможно стать членом проходящей галактики.

Все это позволяет сделать вывод, что столкновение галактик с гигантскими галактиками поля должно приводить к существенным изменениям в системах, участвующих в столкновении. Поскольку богатые скопления галактик всегда содержат некоторое число подобных гигантских и сверхгигантских объектов, то эффект столкновений заслуживает дальнейшего изучения.

Выражаю глубокую благодарность академику В. А. Амбарцумяну за замечания при выполнении этой работы.

Бюраканская астрофизическая обсерватория
Академии наук Армянской ССР

Ռ. Հ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Գալակտիկաների դեֆորմացիան բախման հետևանքով

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ գալակտիկաների կույտերում գալակտիկաների բախում հնարավոր է: Գալակտիկաների բախման հետևանքով նրանցում կարող են հանդես գալ նոր երևույթներ: Սպիտցերը և Բաադեն քննարկելով գալակտիկաների բախման հարցը, եկել են այն եզրակացության, որ գալակտիկաների բախման հետևանքով վերջիններիս մեջ աստղերի վերաբաշխում չի կատարվում: Այս աշխատանքում ցույց է տրված, որ նրանց եզրակացությունը ճիշտ չէ: Պարզվում է, որ գալակտիկաների բախման հետևանքով նրանցում կարող են առաջանալ աստղերի զգալի տեղաբաշխում: Հատկապես այդ երևույթները խիստ արտահայտիչ կլինեն, երբ հսկա գալակտիկան բախվի փոքր կամ միջակ գալակտիկայի հետ:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *Л. Спитцер* и *В. Бааде*, Apj, 113, 2, 413, 1950. [2] *Н. У. Мэйел* и *Л. Аллер*, Apj, v. 95, 2, 5, 1942. [3] *С. Чандрасекар*, Принципы звездной динамики, М., 1948. [4] *Т. Пейдж*, Apj, 116, 63, 1952. [5] *К. Ф. Огородников*, Динамика звездных систем, М., 1958.