

Л. В. Смирнова

**Применение адиабатических инвариантов для исследования рассеянных скоплений**

*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П539).*

Исследуются галактические элементы 497 орбит рассеянных звездных скоплений. Рассматривается вычисление и применение адиабатических инвариантов для исследования рассеянных скоплений. Находится взаимосвязь между физическими и динамическими параметрами скоплений.

**Ключевые слова:** рассеянные скопления, пояс Гульда, динамика Галактики, адиабатический инвариант.

L. V. Smirnova

**Use of Adiabatic Invariants to Research Sparse Congestions**

Galactic elements of 497 orbits of sparse star congestions are investigated. Calculation is considered and use of adiabatic invariants to research sparse congestions. There is interrelation between physic and dynamic parameters of congestions.

**Keywords:** sparse congestions, belt of Guld, dynamics of the Galaxy, an adiabatic invariant.

**Введение**

Рассеянные звездные скопления являются более молодыми объектами Галактики. Они характеризуются меньшей плотностью по сравнению с шаровыми скоплениями и большими размерами. Данные скопления расположены в диске Галактики, следовательно, их распределение в Галактике является важным вопросом изучения. Рассеянные скопления участвуют во вращении Галактики позволяя построить кривую вращения. Распределение скоплений в Галактике и кривая вращения дают нам представление о потенциале Галактики. Часть скоплений входит в состав более массивного образования Галактики – Пояса Гульда. Перечисленные характеристики рассеянных звездных скоплений показывают необходимость более серьезного изучения их динамических свойств.

В настоящее время существует каталог DAML [5], содержащий данные 1787 рассеянных скоплений, в том числе лучевые скорости для 447 скоплений и собственные движения для 890 объектов каталога. Для некоторых скоплений приведены физические характеристики: возраст указан для 89,5 % скоплений каталога, металличность ( $[Fe/H]$ ) – 20 % и показатель цвета (B-V) – 94,7 %. Этот каталог уже использовался для расчета орбит скоплений в нескольких моделях потенциала Галактики, например, [6].

Основным результатом этой работы явилось вычисление элементов орбит скоплений и определение зависимости между физическими и динамическими параметрами.

Для определения орбит рассеянных скоплений были использованы каталоги Харченко [7] и DAML. Все данные для расчета орбит имелись для 497 рассеянных звездных скоплений, 33 из них, согласно Бобылеву, принадлежат Поясу Гульда [1]. Известны галактические координаты (d, l, b) и скорости ( $V_d, V_\phi, V_z$ ) скоплений в галактической системе координат.

**Адиабатические инварианты**

Под адиабатическим инвариантом будем понимать такую величину, которая сохраняется при медленном изменении параметров системы. Соответственно, такая величина может характеризовать не только периодические, но и условно-периодические движения системы.

Применение адиабатических инвариантов в небесной механике впервые было предложено Пуанкаре. В работах [3, 4, 8] адиабатические инварианты применяются для решения различного рода задач небесной механики. В настоящей работе предлагаем рассмотреть их использование для изучения свойств рассеянных звездных скоплений.

Рассмотрим орбиты, мало отличающиеся от плоских, с небольшими вертикальными колебаниями (вдоль оси  $z$ ). В таком случае энергия плоского движения  $C_1$  не будет сохраняться. Но в силу малости вертикальных колебаний данные изменения будут незначительны. Поэтому движение по орбите можно усреднить. При этом медленно меняющаяся величина  $C_1$  будет вести себя как некоторая функция от вертикальных колебаний  $z$ . Потенциал Галактики представим в виде центрально-симметричной трехкомпонентной модели [9].

Таким образом, можно оценить значение адиабатического инварианта по  $r$  в цилиндрических координатах:

$$I_r = \frac{1}{\pi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \dot{r} dr = \frac{1}{\pi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \sqrt{2 \sum_{i=1}^3 \frac{GM_i}{(r^2 + [a_i + \sqrt{b_i^2 + z^2}]^2)^{\frac{1}{2}}} + 2C_1 - \frac{C_2^2}{r^2}} dr \quad (1)$$

Вычисления показали, что величина  $C_1$  энергии плоского движения и адиабатического инварианта ( $I_r$ ) по координате  $r$  сохраняется до  $10^{-5}$  порядка точности.

### Коэффициенты корреляции и средние величины

Для 497 рассеянных скоплений с известными начальными значениями координат и скоростей была произведена оценка следующих параметров движения: минимального  $r_{min}$  и максимального  $r_{max}$  расстояния до центра Галактики, максимального возвышения над плоскостью Галактики  $z_{max}$ , периода движения и адиабатический инвариант по координате  $r - T_r, I_r$ .

Исходя из полученных данных, можно сделать предварительные выводы о связи между физическими параметрами скоплений и элементами их орбит. Распределение рассеянных скоплений для их статистической обработки производилось по возрасту, значению адиабатического инварианта и принадлежности к Поясу Гульда.

По возрасту

Распределение скоплений по возрасту оказалось равномерным за исключением наиболее старых скоплений, у которых среднее значение эксцентриситета, максимального возвышения над плоскостью Галактики и адиабатического инварианта выше. Результаты представлены в таблице 1. Значение коэффициентов корреляции для энергии, углового момента и периода по возрасту показывает разнородность данных групп. Она увеличивается для средних возрастов  $lg(8)$  и  $lg(7)$ , при этом данные зависимости противоположно направлены. Увеличение корреляции для возрастов  $lg(8)$  и  $lg(7)$  можно объяснить увеличением количества скоплений в данных интервалах возрастов и, следовательно, полнотой выборки.

Таблица 1

Средние значения и коэффициенты корреляции для распределения скоплений по времени

Средний показатель времени на интервале	n	$z_{max}$	e	$I_r$	$I_\phi$	$T_r$	E
Среднее значение							
6,750896	67	0,18499	0,091557	0,021772	1,735771	178,3347	-0,12597
7,436939	196	0,14	0,081598	0,018299	1,751535	179,1158	-0,1257
8,387737	156	0,262794	0,091763	0,022344	1,782583	183,4531	-0,12482
9,244057	35	1,878633	0,201101	0,114982	1,686255	198,274	-0,12028
Коэффициенты корреляции							
6,750896	67	-0,10273	-0,10095	-0,08267	0,08786	0,086656	0,046002
7,436939	196	-0,12	-0,12152	-0,06759	-0,16593	-0,17968	-0,15173
8,387737	156	0,134509	0,098576	0,145936	0,224733	0,221302	0,227016
9,244057	35	-0,0225	0,297177	0,245633	0,031093	-0,01874	0,030142

### Принадлежность к поясу Гульда

В случае деления скоплений по принадлежности к Поясу Гульда средние значения одних динамических параметров (эксцентриситет, максимальное возвышение над плоскостью и адиабатический инвариант) Пояса Гульда выделяются на фоне остальных скоплений, что видно из таблицы 2.

Таблица 2  
Средние значения для распределения рассеянных звездных скоплений по принадлежности к поясу Гульда

	$z_{\max}$	$e$	$I_r$	$I_\phi$	$T_r$	$E$	возраст	[Fe/H]	V-B
все	0,31	0,10	0,03	1,76	182,03	-0,13	7,79	-0,07	0,32
без ПГ	0,33	0,10	0,03	1,76	182,20	-0,12	7,81	-0,07	0,34
ПГ	0,10	0,04	0,0003	1,77	179,66	-0,13	7,48	-0,09	0,07

При этом распределение средних значений других динамических параметров является равномерным. Можно также отметить, что группа всех скоплений и рассеянных звездных скоплений, исключая скопления Пояса Гульда, не имеют существенных отличий (рис. 1). Этот факт показывает, что скопления пояса «растворяются» в остальных скоплениях и их динамическое выделение довольно проблематично.

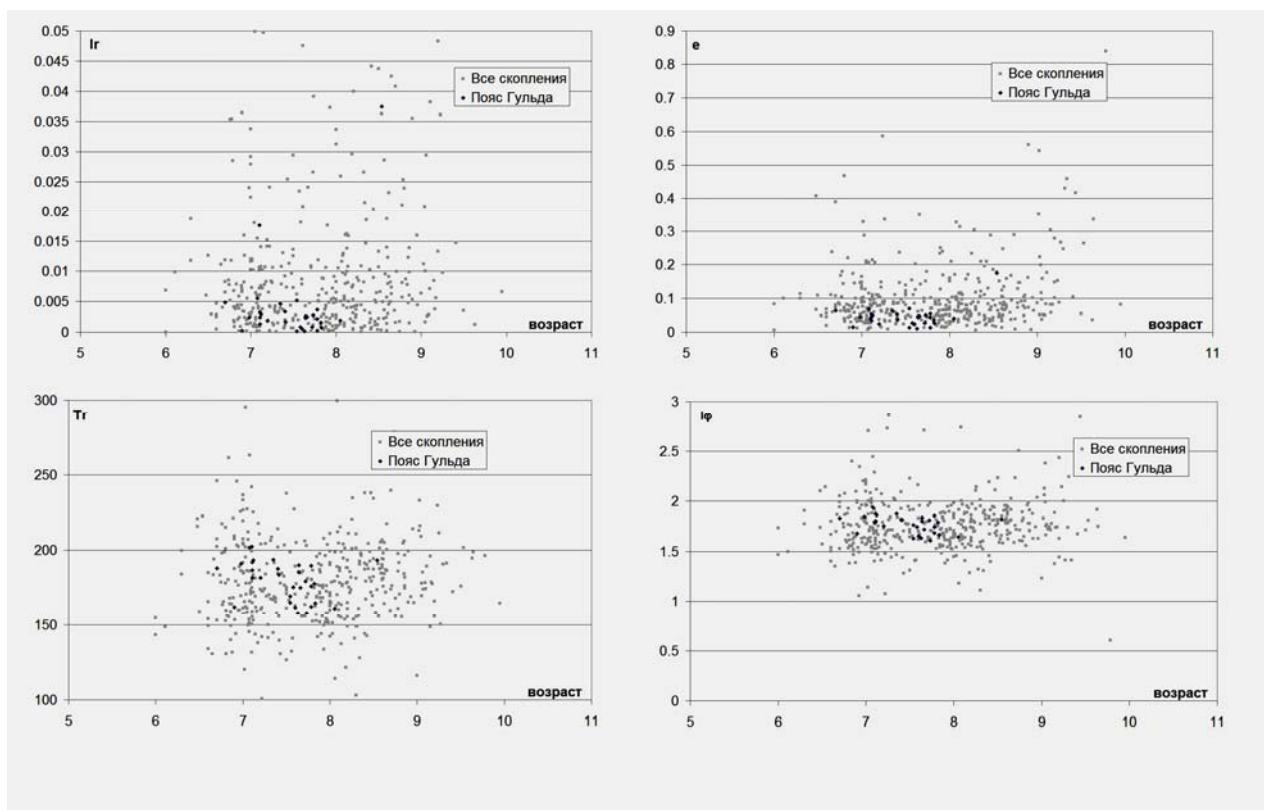


Рис. 1. Распределение по возрасту в зависимости от динамических параметров орбит для Пояса Гульда и остальных скоплений

Значение коэффициентов корреляции отличается по всем рассматриваемым элементам по сравнению с остальными рассеянными скоплениями:

- Возрастание корреляции по возрасту от некоторых динамических характеристик (табл. 3), наибольшее увеличение коэффициента наблюдается для углового момента  $-0,36$  (Пояс Гульда),  $0,03$  (остальные скопления) и по периоду  $-0,35$  (Пояс Гульда),  $0,14$  (остальные скопления). По остальным параметрам также наблюдается увеличение показателя, но менее заметное.
- Наблюдается увеличение коэффициента корреляции по показателю цветности (V-B) для эксцентриситета и адиабатического инварианта.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между динамическими и физическими параметрами для распределения рассеянных звездных скоплений по принадлежности к Поясу Гульда

Пояс Гульда	возраст	[Fe/H]	V-B	РЗС	возраст	[Fe/H]	V-B
$z_{\max}$	-0,09	0,45	0,11	$z_{\max}$	0,18	-0,37	-0,03
e	0,32	0,19	0,52	e	0,18	-0,52	0,09
$I_r$	0,33	0,23	0,60	$I_r$	0,14	-0,43	0,02
$I_\phi$	-0,36	-0,47	-0,10	$I_\phi$	0,04	0,05	-0,04
$T_r$	-0,35	-0,37	-0,04	$T_r$	0,14	-0,25	-0,06
E	-0,30	-0,35	-0,03	E	0,18	-0,32	-0,09

Деление скоплений на пять групп по адиабатическому инварианту показало уменьшение среднего значения эксцентриситета с уменьшением рассматриваемой величины (табл. 4). Это объясняется зависимостью эксцентриситета и адиабатического инварианта (табл. 5). Так, в работах [2, 8] предлагается способ оценки эксцентриситета при помощи адиабатического инварианта.

Таблица 4

Средние значения для распределения рассеянных звездных скоплений по адиабатическому инварианту

значение	n	e	$I_r$	$I_\phi$	E	возраст	V-B
$10^{-1}$	22	0,4115	0,3774	2,0714	-0,1051	8,3286	0,3576
$10^{-2}$	146	0,1452	0,0295	1,7755	-0,1246	7,8539	0,3702

Таблица 5

Коэффициенты корреляции для распределения рассеянных звездных скоплений по адиабатическому инварианту

	n	e	$I_\phi$	E	возраст	V-B
$10^{-1}$	22	0,87	-0,08	0,6144	0,14	-0,08
$10^{-2}$	146	0,96	0,02	0,1178	0,22	0,09
$10^{-3}$	267	0,97	0,05	0,0625	0,08	0,11
$10^{-4}$	56	0,46	0,19	0,1800	0,003	0,13
$10^{-5}$	6	0,97	0,10	0,0998	0,44	-0,78

$$1 - e^2 = \left[1 + \frac{I_r}{I_\phi}\right]^{-2} \quad (2)$$

Результат сравнения значения эксцентриситетов, определенных двумя методами показал среднее совпадение результатов 87 %.

Из таблицы 5 можно выделить зависимость энергии движения с малыми значениями адиабатического инварианта (0,61). Других статистически значимых корреляций между адиабатическим инвариантом и другими элементами не обнаружено.

### Заключение

Таким образом, адиабатические инварианты могут служить для оценки эксцентриситета. Данная величина показала некоторую зависимость от возраста скоплений (табл. 1). При разбиении скоплений на принадлежность к Поясу Гульда увеличивается корреляция данной величины с возрастом и с показателем цветности. Хотя непосредственное разбиение на группы не дает таких хороших результатов.

### Библиографический список

1. Бобылев, В. В. Кинематика пояса Гульда на основе рассеянных скоплений звезд [Текст] / В. В. Бобылев // Письма в астрономический журнал. – 2006. – Т. 32, №12. – С. 906.
2. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теоретическая физика. Механика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1973. – 207 с.
3. Маркеев, А. П. Теоретическая механика [Текст] / А. П. Маркеев. – М. : ЧеРо 1999, 572с.
4. Спицер, Л. Динамика шаровых скоплений [Текст] / Л. Спицер. – М. : Мир, 1990. – 184 с.
5. DAML (version 2.10 - feb/17/2009) [On-line Data Catalog] // Dias W. S., Alessi B. S., Moitinho A. and Lépine J. R. D - Astron&Astrophys. – 2002. – v.389.
6. Wu, Zhen-Yu; Zhou, Xu; Ma, Jun; Du, Cui-Hua The orbits of open clusters in the Galaxy [Текст] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2009 – v. 399. – p. 2146.
7. Kharchenko N.V. Catalogue of Open Cluster Data (COCD) (Kharchenko+, 2005) [VizieR On-line Data Catalog] // Astron&Astrophys – 2005. – v.438.
8. Eggen O.J. Lynden-Bell D. and Sandage A.R. Evidence from the motion of old stars that the Galaxy collapsed [Текст]// Astron. J. – 1962. - v.136. – с.748.
9. Jasevicius V. The Galaxy gravitation potential in a stackel approximation [Текст] / Baltic Astronomy, 1994. – V.3. – P. 232.