

## ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ НАВКОЛО ЗІР — СУСІДІВ СОНЦЯ

М. В. Ваврух, Н. Л. Тишко

*Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра астрофізики,  
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна*

(Отримано 31 липня 2002 р.)

Структуру орбіт екзопланет зіставлено зі структурою планетних орбіт у Сонячній системі. Проаналізовано характеристики зір, навколо яких існують планети. Висока металічність більшості з них свідчить про ранні фази еволюції зір і належних до них планетних систем. Розглянуто питання про подібність структури 14 планетних систем, у яких є дві або більше планет. Запропоновано гіпотезу, що пояснює наявність значної кількості молодих зір в околицях Сонця зіткненням Галактики з Магеллановими Хмарами.

**Ключові слова:** екзопланети, металічність зір, еволюція планетних систем, Галактика, Магелланові Хмари.

PACS number(s): 96.35.-j

### I. ВСТУП

Пошук планетних систем навколо ближніх зір належить до старих проблем астрономії і становить астрофізичний аспект загальнішої проблеми — виникнення й поширення життя у Всесвіті. Протягом останніх десяти років у цій галузі досліджень одержано важливі результати, які відкрили нову епоху в астрономії.

Ще наприкінці сімдесятих років І. Шкловський писав, що “сучасна астрономія не має засобів для виявлення планет навколо інших зір” [1]. Однак більшість планет відкрито саме за допомогою класичного методу Лемана–Філеса побудови елементів спектроскопічної орбіти (див. [2]), що ґрунтується на ефекті Доплера. Тепер метод побудови кривих радіальних швидкостей зір настільки удосконалено, що він дозволяє вимірювати з похибками, меншими від 10 м/сек, а використання фільтрів — знизити їх навіть до 3 м/сек. Як відомо, першу позасонячну планету біля зорі 51 Peg відкрили співробітники Женевської обсерваторії М. Майор та Д. Квелоз у жовтні 1995 р. На початку 2002 року було відомо вже понад 75 планетних систем, причому за час від середини 1998 р. до середини 2002 р. відкрито 87 нових систем. На сьогодні ще немає цілком задовільної статистичної картини, але дослідження в цій перспективній галузі розширюються в щораз більшому темпі. У каталогах характеристик позасонячних планетних систем (див. [3,4]) подано передусім елементи орбіт планет — велика піввісь еліпса  $a$  (а.о.), період  $P$ , ексцентриситет  $e$ , оцінка маси планети  $m$  (переважно в одиницях маси Юпітера), а також деякі важливі характеристики зір (віддаль до зорі, її блиск, спектральний тип та металічність). При порівнянні відкритих планет із планетами Сонячної системи впадає у вічі, що багато з них, маючи масу, близьку до маси Юпітера  $m_j$ , відзначаються малими періодами орбітального руху й малими відстанями до материнської зорі. Щоб пояснити цей факт, деякі автори намагаються вдосконалити теорію планетоутворення, враховуючи такі потенційно важливі ефекти, як обертання зорі, взаємодію молоді зорі з планетою, вза-

ємні збурення планет великих мас в одній системі тощо. Значну кількість праць (напр., [5–8]) присвячено дослідженню характеристик зір, навколо яких знайдено планетні системи, методами спектроскопії та фотометрії.

Наша праця торкається передусім зв'язку між характеристиками зір і їхніх планетних систем. Обробка спостережуваних даних указує на наявність типових рис (а можливо, й універсальність) планетних систем, відмінності ж у їх будові можуть бути пояснені впливом еволюційних процесів.

### II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР З ПЛАНЕТНИМИ СИСТЕМАМИ

У таблиці 1 наведено фізичні характеристики зір та належних до них планет. При її складанні використано каталоги [3,4], з яких узяті характеристики планет ( $a$ ,  $P$ ,  $e$ ,  $m/m_j$ ), а також віддалі до зір (у парсеках)  $r$ , видимі зоряні величини  $v$ , спектральний тип (Sp). Ми доповнили ці дані розрахованими значеннями абсолютної зоряної величини  $M$ , відносної світності  $L/L_\odot$ , відносної маси зорі  $M/M_\odot$  ( $L_\odot$ ,  $M_\odot$  — світність і маса Сонця), а також значеннями металічності зір  $[Fe/H]$ , які взяті з [3–7]. Як видно з таблиці, переважна більшість планет знаходиться біля зір головної послідовності, значно менше — біля субгігантів, декілька — біля гігантів. У таблицю 1 не включено планети, знайдені біля пульсарів, а також ті, існування яких вимагає підтвердження. Відсутні також протопланетарні диски, знайдені біля зір головної послідовності класів A5 та B5 [4].

На рис. 1 наведено розподіл зір, біля яких знайдено планети, за спектральними класами. Як видно, більшість зір належить до ділянки від F7 до G7, невелика група — до класу K, декілька — до класу M. Наявність планетних систем біля зір пізніх спектральних класів пояснює причину їх повільного осьового обертання, а також добре відомий факт: спектральний клас F5 є межею, що розділяє зорі на два типи — із швидким осьовим обертанням та повільним.

ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ НАВКОЛО ЗІР — СУСІДІВ СОНЦЯ

№	Зоря	$r$	Sp	$M$	$\frac{L}{L_{\odot}}$	$\frac{M}{M_{\odot}}$	$v$	[Fe/H]	$a$	$\frac{m}{m_j}$	$P$	$e$
1	14 Her	18.15	K0V	5.38	0.65	0.89	6.670	0.50	2.50	3.30	1619.00	0.35
2	16 CygB	21.62	G2.5V	4.53	1.41	1.12	6.200	0.09	1.70	1.50	804.00	0.67
3	47 Uma	14.08	G0V	4.29	1.76	1.20	5.030	-0.08	3.73	0.76	2594.00	0.10
4	47 Uma	14.08	G0V	4.29	1.76	1.20	5.030	-0.08	2.10	2.41	1095.00	0.10
5	51 Peg	15.36	G2V	4.56	1.37	1.11	5.490	0.19	0.05	0.47	4.23	0.00
6	55 Cnc	13.40	G8V	5.31	0.68	0.90	5.950	0.29	0.11	0.84	14.65	0.02
7	55 Cnc	13.40	G8V	5.31	0.68	0.90	5.950	0.29	0.24	0.21	44.28	0.34
8	55 Cnc	13.40	G8V	5.31	0.68	0.90	5.950	0.29	5.9	4.05	5360	0.16
9	70 Vir	18.11	G4V	3.71	2.99	1.40	5.000	-0.03	0.43	6.60	116.60	0.40
10	BD-10 3166	-	G4V	-	-	1.10	10.000	0.50	0.046	0.48	3.49	0.00
11	Gl86	10.91	K1V	5.98	0.37	0.75	6.170	-0.24	0.11	4.00	15.78	0.05
12	Gl777A	16.9	G6IV+	4.70	1.20	0.9	5.71	0.14	3.65	1.15	2613	0.0
13	Gliese876	4.72	M4V	11.80	0.00	0.15	10.170	0.00	0.13	0.56	30.10	0.12
14	Gliese876	4.72	M4V	11.80	0.00	0.15	10.170	0.00	0.21	1.98	61.02	0.27
15	HD142	20.60	G1IV	4.13	2.03	1.25	5.700	0.04	0.98	1.36	338.00	0.37
16	HD1237	17.62	G6V	5.36	0.65	0.89	6.590	0.20	0.49	3.31	133.80	0.51
17	HD2039	89.8	G2/G3 IV/V	4.24	1.83	0.98	9.01	0.1	2.2	5.1	1190	0.69
18	HD4203	77.50	G5	4.23	1.85	1.21	8.680	0.22	1.09	1.64	406.00	0.53
19	HD4208	33.90	G5V	5.14	0.80	0.95	7.790	-0.24	1.69	0.81	829.00	0.04
20	HD6434	40.32	G3V	4.69	1.21	1.07	7.720	-0.52	0.15	0.48	22.09	0.30
21	HD8574	45.15	F8	4.53	1.41	1.12	7.800	-0.09	0.76	2.23	228.80	0.40
22	HD10697	30.00	G5IV	3.91	2.50	1.33	6.292	0.15	2.00	6.59	1083.00	0.12
23	HD12661	37.16	G6	4.59	1.33	1.10	7.440	0.32	0.85	2.47	263.56	0.347
24	HD12661	37.16	G6	4.59	1.33	1.10	7.440	0.32	2.61	1.86	1407.0	0.22
25	HD13507	26.2	G0	5.12	0.82	-	7.21	-0.05	2.39	3.46	1318	0.13
26	HD16141	35.90	G5IV	4.00	2.28	1.29	6.780	0.22	0.35	0.22	75.82	0.28
27	HD19994	22.38	F8V	3.32	4.28	1.56	5.070	0.23	1.30	2.00	454.00	0.20
28	HD20367	27	G0	4.25	1.81	-	6.41	0.1	1.25	1.07	500	0.23
29	HD23079	34.80	F8/G0V	4.39	1.60	1.16	7.100	-	1.48	2.54	627.30	0.06
30	HD23596	52	F8	3.66	3.13	-	7.24	0.32	2.72	7.19	1558	0.31
31	HD27442	18.10	K2IVa	3.15	5.00	1.64	4.440	0.20	1.18	1.43	423.00	0.02
32	HD28185	39.56	G5	4.81	1.08	1.04	7.800	0.24	1.00	5.60	385.00	0.06
33	HD30177	55	G8V	4.71	1.19	0.95	8.41	0.25	2.6	7.7	1620	0.22
34	HD33636	38.00	G0	4.16	1.98	1.24	7.060	-0.13	2.62	7.71	1553.00	0.39
35	HD37124	33.00	G4IV-V	5.09	0.84	0.96	7.680	-0.32	0.585	0.86	153	0.10
36	HD37124	33.00	G4IV-V	5.09	0.84	0.96	7.680	-0.32	2.95	1.01	1942	0.4
37	HD38529	42.43	G4	2.80	6.91	1.80	5.940	0.23	0.12	0.67	14.30	0.312
38	HD38529	42.43	G4	2.80	6.91	1.80	5.940	0.23	3.51	11.3	2189.53	0.34
39	HD39091	20.55	G1IV	4.11	2.08	1.26	5.670	0.09	3.34	10.37	2083.00	0.62
40	HD40979	33	F8V	4.15	1.99	1.08	6.746	0.194	0.818	3.16	260.0	0.42
41	HD46375	33.40	K1IV	5.32	0.68	0.90	7.940	0.25	0.04	0.25	3.02	0.00
42	HD49674	40.7	G5V	5.05	0.87	1.0	8.10	0.25	0.057	0.12	4.95	0.00
43	HD50554	31.03	F8	4.38	1.61	1.17	6.840	0.02	2.38	4.90	1279.00	0.42
44	HD52265	28.00	G0V	4.06	2.16	1.27	6.300	0.11	0.49	1.13	118.96	0.29
45	HD68988	58.00	G0	4.39	1.60	1.16	8.210	0.24	0.07	1.90	6.28	0.14
46	HD72659	51.4	G0V	3.93	2.45	0.95	7.48	-0.14	3.24	2.55	2185	0.18
47	HD73526	99	G6V	4.02	2.25	1.02	9.00	0.28	0.66	3.0	190.5	0.34
48	HD74156	64.56	G0	3.57	3.40	1.46	7.620	0.13	0.28	1.56	51.61	0.65
49	HD74156	64.56	G0	3.57	3.40	1.46	7.620	0.13	4.47	7.50	2300.00	0.40
50	HD75289	28.94	G0V	4.04	2.20	1.28	6.350	0.29	0.05	0.42	3.51	0.05
51	HD76700	59.7	G6V	4.25	1.82	1.0	8.13	0.1	0.049	1.197	3.97	0.00
52	HD80606	58.38	G5	5.23	0.74	0.92	9.060	0.43	0.44	3.41	111.80	0.93
53	HD82943	27.46	G0	4.35	1.66	1.18	6.540	0.32	0.73	0.88	221.60	0.54
54	HD82943	27.46	G0	4.35	1.66	1.18	6.540	0.32	1.16	1.63	444.60	0.41
55	HD83443	43.54	K0V	5.04	0.88	0.97	8.230	0.33	0.038	0.35	2.99	0.08
56	HD89744	40.00	F7V	2.73	7.38	1.84	5.741	0.18	0.88	7.20	256.00	0.70
57	HD92788	32.32	G5	4.76	1.13	1.05	7.310	0.24	0.94	3.80	340.00	0.36
58	HD106252	37.44	G0	4.54	1.39	1.12	7.410	-0.16	2.61	6.81	1500.00	0.54
59	HD108147	38.57	F8/G0V	4.06	2.17	1.27	6.990	0.19	0.104	0.41	10.90	0.50
60	HD108874	68.5	G5	4.58	1.34	1.0	8.76	0.14	1.07	1.65	401.0	0.20
61	HD114386	28.0	K3V	6.56	0.22	-	8.8	-0.03	1.62	0.99	872	0.28
62	HD114729	35	G3V	3.97	2.36	0.93	6.69	-0.22	2.08	0.9	1136	0.33
63	HD114762	40.57	F9V	4.26	1.80	1.21	7.300	-	0.30	11.00	84.03	0.33
64	HD114783	22.00	K0	5.86	0.41	0.78	7.570	0.33	1.20	0.90	501.00	0.10
65	HD121504	44.37	G2V	4.30	1.73	1.19	7.540	0.16	0.32	0.89	64.60	0.13
66	HD128311	16.6	K0	6.41	0.25	0.80	7.51	0.08	2.63	1.06	414	0.21
67	HD130322	30.00	K0V	5.65	0.50	0.82	8.040	-0.02	0.088	1.08	10.72	0.05
68	HD134987	25.00	G5V	4.46	1.50	1.14	6.450	0.23	0.78	1.58	260.00	0.25
69	HD136118	52.3	F9V	3.31	4.34	1.24	6.9	-0.065	2.335	11.9	1209.6	0.37
70	HD141937	33.46	G2/G3V	4.63	1.29	1.09	7.250	0.16	1.52	9.70	653.22	0.41

№	Зоря	$r$	Sp	$M$	$\frac{L}{L_{\odot}}$	$\frac{M}{M_{\odot}}$	$v$	[Fe/H]	$a$	$\frac{m}{m_j}$	$P$	$e$
71	HD147513	12.9	G3/G5V	4.82	1.07	0.92	5.376	-0.03	1.26	1.0	540.4	0.52
72	HD150706	27.2	G0	4.86	1.04	—	7.029	-0.13	0.82	1.0	264.9	0.38
73	HD160691	15.20	G3IV-V	4.24	1.84	1.21	5.150	0.28	1.5	1.7	638	0.31
74	HD160691	15.20	G3IV-V	4.24	1.84	1.21	5.150	0.28	2.3	1	—	0.8
75	HD162020	31.26	K2V	6.71	0.19	0.7	9.18	0.01	0.072	13.75	8.43	0.28
76	HD168443	37.88	G5	4.03	2.23	1.29	6.920	0.03	0.29	7.70	58.12	0.53
77	HD168443	37.88	G5	4.03	2.23	1.29	6.920	0.03	2.85	16.9	1739.50	0.23
78	HD168746	43.12	G5IV	4.78	1.12	1.05	7.950	-0.07	0.065	0.23	6.403	0.08
79	HD169830	36.32	F8V	3.10	5.25	1.66	5.900	0.14	0.82	2.96	230.40	0.34
80	HD177830	59.00	K0	3.32	4.28	1.56	7.175	0.00	1.00	1.28	391.00	0.43
81	HD178911	46.73	G5	4.62	1.29	1.09	7.970	0.28	0.32	6.29	71.49	0.12
82	HD179949	27.00	F8V	4.09	2.10	1.26	6.250	0.02	0.045	0.84	3.09	0.05
83	HD187123	49.92	G5	4.30	1.74	1.19	7.790	0.16	0.042	0.52	3.10	0.03
84	HD190228	66.11	G5IV	3.20	4.79	1.61	7.300	-0.24	2.31	4.99	1127.00	0.43
85	HD192263	19.90	K2V	6.61	0.21	0.63	8.100	-0.20	0.15	0.76	23.87	0.03
86	HD195019	37.36	G3 IV-V	4.05	2.19	1.28	6.910	0.00	0.14	3.43	18.30	0.05
87	HD196050	46.9	G3V	4.24	1.83	1.1	7.6	0.0	2.5	3.0	1289	0.28
88	HD209458	47.00	G0V	4.29	1.75	1.20	7.650	0.04	0.045	0.69	3.52	0.00
89	HD210277	21.29	G0	4.99	0.92	0.99	6.630	0.16	1.10	1.28	437.00	0.45
90	HD213240	40.75	G4IV	3.76	2.86	1.38	6.810	0.23	2.03	4.50	951.00	0.45
91	HD216437	26.5	G4 IV-V	3.95	2.40	1.07	6.064	0.0	2.7	2.1	1294	0.34
92	HD217107	37.00	G8IV	3.32	4.29	1.56	6.160	0.30	0.07	1.28	7.11	0.14
93	HD222582	45.00	G5	4.43	1.54	1.15	7.700	-0.01	1.35	5.40	576.00	0.71
94	HD223084	38.6	G0	4.31	1.73	1.05	7.24	-0.2	0.41	1.18	101.06	0.48
95	HIP75458	31.50	K2III	0.81	—	3.11	3.300	0.03	1.34	8.64	550.70	0.71
96	HR810	15.50	G0V pec.	4.45	1.52	1.15	5.400	0.25	0.93	2.26	320.10	0.16
97	$\epsilon$ Eridani	3.00	K2V	6.34	0.26	0.68	3.730	-0.10	3.30	0.86	2502.00	0.61
98	$\rho$ CrB	17.43	G0V	4.19	1.92	1.23	5.400	-0.19	0.23	1.10	39.65	0.03
99	$\tau$ Boo	15.60	F7V	3.53	3.52	1.47	4.500	0.28	0.046	3.87	3.31	0.02
100	$v$ And	13.47	F7V	3.98	2.33	1.30	4.630	0.09	0.06	0.71	4.62	0.03
101	$v$ And	13.47	F7V	3.98	2.33	1.30	4.630	0.09	0.83	2.11	241.20	0.18
102	$v$ And	13.47	F7V	3.98	2.33	1.30	4.630	0.09	2.50	4.61	1267.00	0.41

Таблиця 1.

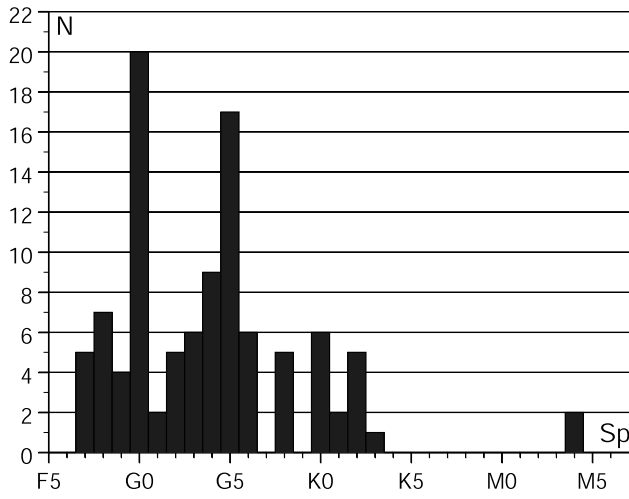


Рис. 1. Розподіл зір, біля яких знайдено планети, за спектральними класами.

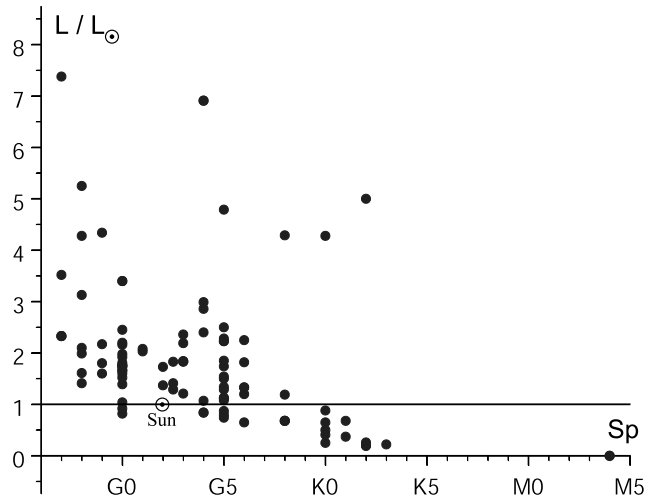


Рис. 2. Діаграма “спектр-світність”.

Як видно з діаграми “спектр-світність” (рис. 2), багато зір (навколо яких є планети) мають світність, значно вищу за світність Сонця. Одне з пояснень цього факту може ґрунтуватись на припущенні, що це молоді зорі, які ще не зайняли належних їм місць на головній послідовності відповідно до своїх мас.

Із розподілу планет за масами (рис. 3) видно, що маси великої кількості невидимих супутників зір знаходяться в ділянці (0.5–1.0) маси Юпітера, але є й досить масивні — близько  $10 m_j$ .

Рис. 4 подає розподіл кількості планет за великими півосями їхніх орбіт. Для порівняння з будо-

вою орбіт Сонячної системи на рисунку показано значення півосей орбіт Меркурія, Венери, Землі і т.д. тонкими лініями (1, 2, 3, ...). Лінія з позначкою (5) відповідає середній орбіті астероїдного поясу.

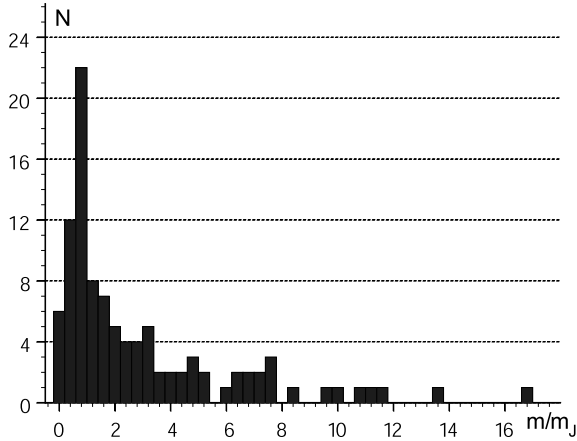


Рис. 3. Розподіл планет за масами.

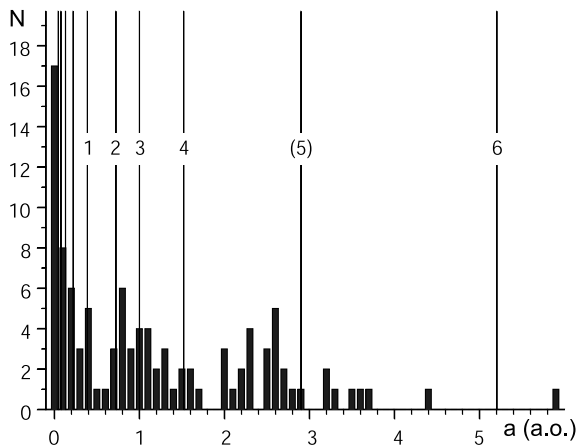


Рис. 4. Розподіл планет за великими півосями їхніх орбіт.

Як відомо, середнє значення відношення півосей двох сусідніх орбіт ( $\alpha_n = a_n/a_{n+1}$ ) для Сонячної системи дорівнює 0.604... [9]. Якщо припустити, що ця величина мало залежить від кількості планет, то всередині орбіти Меркурія могли б існувати планети з орбітами, позначеними тонкими лініями без номерів. Орбіті з  $n = -3$  відповідала б велика піввісь  $a_{-3} \approx 0.048 \dots$  а.о., будучи близькою до півосей багатьох позасонячних планетних орбіт. На рис. 5 подано розподіл лише для планет з низькими орбітами (тонкі пунктирні лінії відповідають фіктивним орбітам Сонячної системи з  $n = -3, -2$ ). Як видно, існує певна кореляція між положеннями орбіт навколо різних зір, однак говорити про подібність будови планетних систем це ще не дає підстав. Близькі значення великих півосей орбіт не можуть бути критерієм подібності в будові планетних систем навколо різних зір. Таким критерієм може бути  $\langle \alpha_n \rangle$  [9].

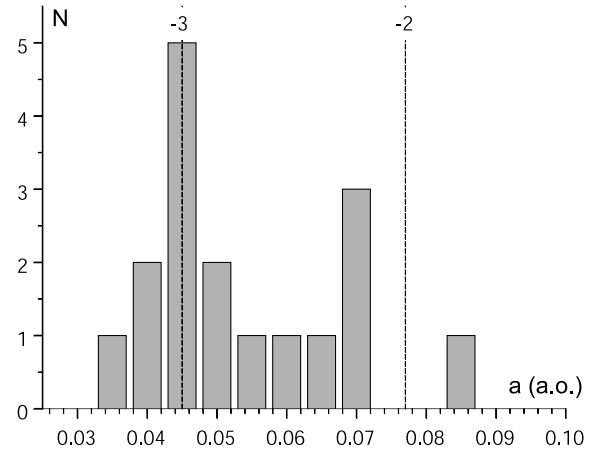


Рис. 5. Розподіл планет з низькими орбітами.

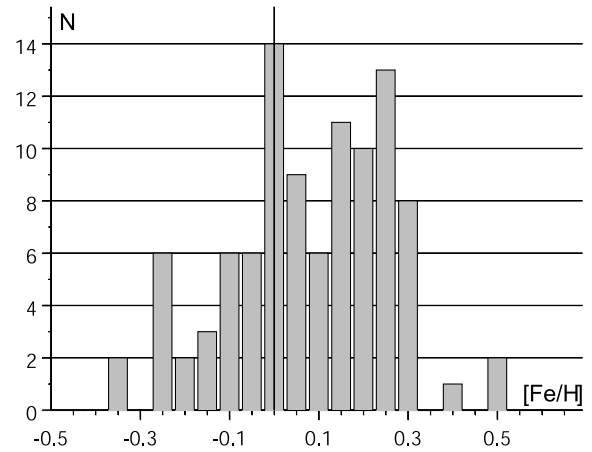


Рис. 6. Розподіл зір, навколо яких існують планети, за металічністю.

На рис.6 подано розподіл зір, навколо яких існують планети, за металічністю (як звичайно, металічність Сонця прийнято за нуль). Як бачимо, більшість зір у цій шкалі має додатну металічність (високу), невелика частина зір належить до ділянки проміжної металічності ( $-0.1-0.0$  dex), а в ділянці  $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$  dex практично немає зір. Середнє значення металічності для цих зір дорівнює 0.16... dex. На рис.7 подано розподіл за металічністю всіх зір в околицях Сонця в радіусі до 30 парсек за каталогом [10]. Середнє значення металічності цих зір становить  $-0.15$  dex, що на 0.3 dex відрізняється від середнього значення металічності зір із планетними системами.

Із діаграми “металічність зорі — велика піввісь планетної орбіти” (рис.8) видно, що зорі високої металічності мають планети як з низькими, так і високими орбітами, а зорі низької металічності не мають планет з низькими орбітами. Як відомо, статистика підтверджує, що молоді зорі мають вищу металічність, ніж старі зорі. Таким чином, зорі з планетними системами, що мають низькі орбіти, слід уважати зорями молодого віку, які разом з планетними системами є на ранніх етапах еволюції.

Нааявність в околицях Сонця значної кількості молодих зір не є випадковістю, вона пов'язана з другим етапом інтенсивного зореутворення [11], який закінчився приблизно 0.5 млрд. років тому.

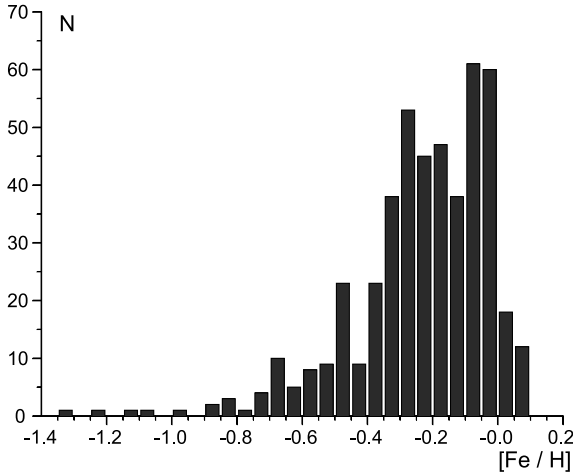


Рис. 7. Розподіл за металічністю всіх зір в околицях Сонця.

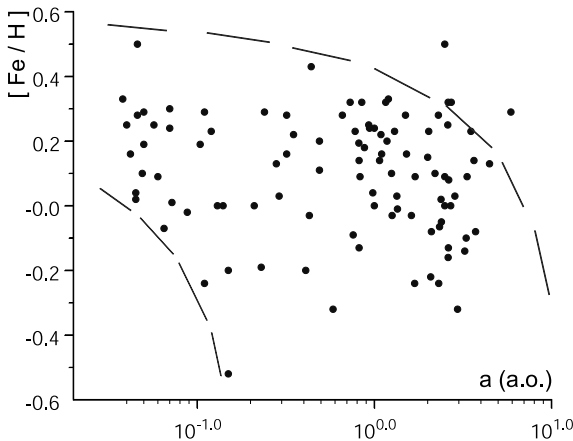


Рис. 8. Діаграма “металічність зорі — велика піввісь планетної орбіти”.

### III. ПОДІБНІСТЬ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ

У цьому розділі розглянемо питання про подібність структури орбіт у 14 планетних системах — Сонячній та інших системах навколо зір, де виявлено принаймні дві або три планети. Імовірно, що там існують системи з багатьох планет, але планети малої маси поки що не виявлені. Характеристики планет та материнських зір подано в таблиці 2. Перші сім із цих систем належать до молодих, усі решта — до старих. Зокрема, не викликає сумніву вік двох останніх систем, що існують навколо пульсарів PSR 1257+12 та PSR 1828-11. Їхні планети мають маси, близькі до маси Землі (індекс J означає, що маса планети виміряна в одиницях маси Юпітера, індекс E — в одиницях маси Землі).

Припускаючи, що великі півосі орбіт планет, наведених у таблиці 2 систем, підлягають закономірності Тіціуса-Боде [12] ( $a_n = a_{n-1}\alpha^{-1}$ ), знаходимо, що середнє значення  $\alpha$  для кожної системи близьке до 0.6..., як і для планетних орбіт Сонячної системи. Стара планетна система пульсара PSR 1257+12 дуже нагадує внутрішню частину Сонячної системи (Меркурій, Венера, Земля), стиснута у два рази. Є очевидна подібність структури орбіт планет навколо зір Gliese 876, 47 UMa, HD 82943, PSR 1829-11 до структури Сонячної системи. Якщо за критерій подібності вибрати середнє значення параметра  $\alpha_n$ , то всі відомі планетні системи в околицях Сонця мають однакову структуру. На прикладі аналізу структури орбіт вторинних тіл у Сонячній системі (планети навколо Сонця, супутники навколо планет-гігантів) один із авторів цієї роботи раніше зробив висновок про те, що  $\langle \alpha_n \rangle$  слабо залежить від маси центрального тіла, а через те планетні системи, що утворились навколо зір з близькими фізичними характеристиками, повинні мати подібність [9]. Відкриття планетних систем навколо інших зір підтверджує цей висновок.

### IV. ЗАКІНЧЕННЯ

Щоб інтерпретація особливостей будови відкритих екзопланетних систем була переконливою, потрібно більше спостережуваних даних. Однак і тепер можна зробити деякі висновки. Статистично встановлено, що молоді зорі мають вищу металічність. Автори, що займаються проблемою зв'язку між цими характеристиками зір (див. [11]), вважають, однак, що пропорційності між ними немає, а скоріше спостерігаються два періоди інтенсивного зореутворення. В околицях Сонця, як і у Великій Магеллановій Хмарі, останній період інтенсивного зореутворення закінчився приблизно 0.5 млрд. років тому [13]. Існує гіпотеза про те, що Магелланові Хмари пройшли біля Галактики якраз у цю епоху (див. [14]). Як свідчать радіоастрономічні дані, за розподілом нейтрального водню обидві Магелланові Хмари виглядають як єдина спіральна галактика (а не неправильна) [15]. Цей факт свідчить на користь зближення Галактики з невеликою спіральною галактикою, яка була зруйнована і в якій почався етап інтенсивного зореутворення. Подібний процес повинен був проходити і в околицях Сонця, яке знаходиться в тій частині Галактики, що зазнала якщо не найсильнішого, то досить помітного впливу. Гіпотеза зближення галактик пояснює наявність досить значної кількості молодих зір в околицях Сонця. У праці [8] показано, що у сфері радіуса 100 пс навколо Сонця є близько 200 зір з високою металічністю (в інших частинах Галактики ситуація може бути іншою). Згідно з цією гіпотезою, у Великій Магеллановій Хмарі повинні існувати зорі і їх планетні системи на ранніх стадіях еволюції, подібні на екзопланетні системи Галактики. Телескопи наступного покоління з космічним базуванням дозволять перевірити цей висновок.

№	Зоря	Sp	[Fe/H]	$\frac{M}{M_{\odot}}$	$m$	$a_n$	$\alpha_n = \frac{a_n}{a_{n+1}}$	$\langle \alpha_n \rangle$
103	HD 82943	G0	0.32	1.18	0.88 <sub>J</sub> 1.63 <sub>J</sub>	$a_2 = 0.73$ $a_3 = 1.16$	0.63	0.63
104	HD12661	G6	0.32	1.1	2.47 <sub>J</sub> : 1.86 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.85$ : $a_3 = 2.61$	0.571	0.571
105	55 Cnc	G8V	0.29	0.9	0.84 <sub>J</sub> 0.21 <sub>J</sub> : 4.05 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.11$ $a_2 = 0.24$ : $a_9 = 5.9$	0.458 0.608	0.591
106	HD160691	G3IV-V	0.28	1.21	1.7 <sub>J</sub> 1 <sub>J</sub>	$a_1 = 1.5$ $a_2 = 2.3$	0.652	0.652
107	HD38529	G4	0.23	1.8	0.67 <sub>J</sub> : 11.3 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.12$ : $a_9 = 3.51$	0.617	0.617
108	HD 74156	G0	0.13	1.46	1.56 <sub>J</sub> : 7.5 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.276$ : $a_5 = 4.47$	0.573	0.573
109	<i>v</i> And.	F8V	0.09	1.30	0.71 <sub>J</sub> : 2.11 <sub>J</sub> : 4.61 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.059$ : $a_6 = 0.83$ : $a_8 = 2.50$	0.59	0.59
110	HD168443	G5	0.03	1.29	7.7 <sub>J</sub> : 16.9 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.29$ : $a_5 = 2.85$	0.565	0.565
111	Sun	G2V	0.00	1.00	.....	$a_1 = 0.387$ $a_2 = 0.723$ $a_3 = 1.00$ $a_4 = 1.54$ $a_5 = 2.90$ $a_6 = 5.2$ .....	0.535 0.723 0.656 0.525 0.557	0.604
112	Gliese 876	M4V	0.00	0.15	0.56 <sub>J</sub> 1.98 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.13$ $a_2 = 0.21$	0.62	0.62
113	47 UMa	G0V	-0.08	1.20	2.54 <sub>J</sub> 0.76 <sub>J</sub>	$a_4 = 2.09$ $a_5 = 3.73$	0.56	0.56
114	HD37124	G4IV-V	-0.32	0.96	0.86 <sub>J</sub> : 1.01 <sub>J</sub>	$a_1 = 0.585$ : $a_4 = 2.95$	0.583	0.583
115	PSR 1257+12	-	-	2.0	0.015 <sub>E</sub> 3.4 <sub>E</sub> 2.8 <sub>E</sub>	$a_1 = 0.19$ $a_2 = 0.36$ $a_3 = 0.47$	0.528 0.766	0.646
116	PSR 1828-11	-	-	2.0	3 <sub>E</sub> 12 <sub>E</sub> 8 <sub>E</sub>	$a_3 = 0.93$ $a_4 = 1.32$ $a_5 = 2.1$	0.705 0.629	0.667

Таблиця 2.

Згідно з сучасними уявленнями, утворення більшої чи меншої кількості планет з масою близькою до маси Юпітера визначається початковою масою газОВО-пилової хмари, з якої виникає система “зоря + планети”. Масивні планети на низьких орбітах — це цілком закономірно, бо при типовому ході процесу гравітаційного стиску біля центру хмари більша густина матерії. Однак у процесі еволюції внутрішні ділянки планетних систем можуть сильно змінюватись під впливом різних механізмів (випромінювання гравітаційних хвиль, припливної взаємодії із зорею і т. д.). Як впливає із загальної теорії відносності [16], похідна періоду орбітального руху в системі “зоря-планета” (маса зорі  $\sim$  маси Сонця) за часом  $\frac{dP}{dt}$  за рахунок випромінювання гравітаційних хвиль має порядок  $10^{-12}$ . Через це планета з масою Юпітера за

час  $\sim 4$  млрд. років, унаслідок втрати енергії на гравітаційне випромінювання, перейде з орбіти, для якої  $a = 0.05$  а.о., на поверхню зорі і буде поглинута нею. Можливо, саме через це в Сонячній системі та в інших “старих” системах відсутні планети з низькими орбітами й масами  $\sim m_j$ . Планетні системи з низькими орбітами — це молоді системи, які знаходяться на ранніх етапах еволюції, а Сонячна система у своєму теперішньому вигляді є скоріше винятком, ніж типовою планетною системою.

Подібність структури планетних орбіт біля різних зір в околицях Сонця свідчить про універсальний характер процесів планетоутворення біля зір тих самих спектральних класів. У зв'язку з цим дальший пошук планетних систем слід проводити передусім біля зір класів F, G з високою металічністю.

- [1] И. С. Шкловский, *Вселенная. Жизнь. Разум* (Наука, Москва, 1987).
- [2] А. В. Гончарский, А. М. Черепашук, А. Г. Ягола, *Некорректные задачи астрофизики* (Наука, Москва, 1985).
- [3] J. Schneider, *Extrasolar Planets Encyclopedia* (<http://cfa-www.harvard.edu/planets>).
- [4] G. W. Marcy, *Extrasolar Planets Catalog* (<http://exoplanets.org>).
- [5] R. P. Butler, S. S. Vogt, G. W. Marcy, D. A. Fischer, G. W. Henry, K. App, *Astroph. J.* **545**, 504 (2000).
- [6] R. P. Butler, G. W. Marcy, D. A. Fischer, S. S. Vogt, C. G. Tinney, H. R. A. Jones, A. J. Penny, K. Apps, (<http://exoplanets.org/stats2000.ps>).
- [7] A. Gimenez, *A&A* **356**, 213 (2000).
- [8] G. Laughlin, *Astroph. J.* **545**, 1064 (2000).
- [9] М. В. Ваврух, *Журн. физ. докл.* **1**, 612 (1997).
- [10] В. А. Захожай, Э. Ф. Шапаренко, *Кинем. физ. небес. тел.* **12**, 20 (1996).
- [11] Л. В. Коротина, А. В. Драгунова, Н. С. Комаров, *Астрофизика* (Ереван), **31**, вып. 3, 539 (1989).
- [12] М. М. Ньето, *Закон Титциуса–Бодя* (Мир, Москва, 1976).
- [13] Л. С. Пилюгин, *Кинем. физ. небес. тел.* **12**, 82 (1996).
- [14] Б. А. Воронцов-Вельяминов, *Внегалактическая астрономия* (Наука, Москва, 1978).
- [15] R. McGee, J. Milton, *Austr. J. Phys.* **19**, 343 (1966); *Suppl.* №2 (1966).
- [16] R. V. Wagoner, *Astroph. J.* **196**, L63 (1975).

## PLANETARY SYSTEMS AROUND THE STARS IN VICINITY OF THE SUN

M. V. Vavrukh, N. L. Tyshko

*The Ivan Franko National University of Lviv, Chair of Astrophysics  
8 Kyrylo and Methodii Str., Lviv, UA-79005, Ukraine*

The orbits structure of the exoplanets was compared with the orbits structure of planets in the Solar System. The characteristics of the planet-bearing stars were analysed. The high metallicity of most of them indicates the early phases of the evolution for those stars and their planetary systems. Structural similarity of eight planetary systems which have two or more planets, was examined. A hypothesis explaining the presence of a lot of young stars near the Sun by collision between the Galaxy and the Magellanic Clouds is suggested.