АСТРОФИЗИКА

ТОМ 63 МАЙ, 2020 ВЫПУСК 2

ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В ТОНКИХ ДИСКАХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК, ВИДИМЫХ АНФАС

В.Е.КАРАЧЕНЦЕВА[1], И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ[2], О.Г.КАШИБАДЗЕ[2]

Поступила 17 августа 2019

Представлены оценки интегрального (SFR) и удельного (sSFR) темпа звездообразования для 181 галактики поздних типов Sc, Scd, Sd, видимой почти анфас. Значения SFR для них получены по FUV-потокам из обзора GALEX. Медианные величины sSFR равны: -10.66 dex для Sc, -10.44 dex для Scd и -10.40 dex для Sd типов в единицах (год)$^{-1}$. Среднее значение sSFR для этих галактик плавно уменьшается от маломассивных дисков к гигантским дискам. После учета фотометрических ошибок удельный темп звездообразования имеет малую космическую вариацию, 0.16 dex. Чтобы воспроизвести наблюдаемую звездную массу за космическое время $13.8 \cdot 10^9$ лет, галактики без балджей, видимые анфас, должны были иметь в прошлом темпы SFR в два-три раза выше, чем наблюдаемые сейчас.

Ключевые слова: *спиральные галактики: диски: звездообразование*

1. *Введение*. Обзор неба в FUV-полосе далекого ультрафиолета ($\lambda_{ef} = 1539$Å, FWHM = 269Å) на космическом телескопе GALEX [1,2] привел к обнаружению FUV-потоков у десятков тысяч галактик. Это позволило определить современный темп звездообразования в галактиках на характерной шкале времени ~10^8 лет, соответствующей среднему возрасту молодых голубых звезд. Удельный темп звездообразования, $\mathrm{sSFR} = \mathrm{SFR}/M^*$, отнесенный к единице звездной массы галактики, монотонно возрастает вдоль хаббловской последовательности от ранних типов S0, Sa (T=0, 1 по шкале Вокулера) до поздних типов Sm, Im, Ir (T=8, 9, 10) [3,4]. Основной причиной возрастания sSFR с ростом морфологического типа T является уменьшение доли старого звездного населения, сосредоточенного преимущественно в сфероидальной подсистеме (балдже). Остается пока неясным поведение sSFR в зависимости от морфологического типа или звездной массы у галактик без видимых признаков балджа. Мельник и др. [5] рассмотрели выборку ~500 ультраплоских (UF) спиральных галактик, ориентированных с ребра [6], у которых вклад балджа в общую светимость галактики пренебрежимо мал. Авторы пришли к заключению, что при переходе от Sc к Sd типам удельный темп звездообразования возрастает в два раза. Однако этот вывод нуждается в независимой проверке, поскольку в UF-галактиках, видимых с ребра, силен эффект внутреннего поглощения, который с трудом поддается количественному учету.

В работе [7] была сформирована выборка 220 спиральных галактик без балджей, видимых почти строго анфас. В нее вошли галактики морфологических типов Sc, Scd, Sd (T=5-7) с угловым диаметром $a>0'.8$, отношением осей $\log(a/b)<0.05$, и лучевой скоростью относительно центроида Местной группы $V_{LG}<10000$ км/с в зоне склонений DEC>-30°. Внутреннее поглощение в этих объектах невелико и практически не влияет на вид соотношения sSFR(T) или sSFR(M^*). Важной особенностью этих галактик является их локализация в областях низкой космической плотности [8], где нет заметных следов взаимодействия с близкими соседями.

Ниже мы оцениваем интегральный (SFR) и удельный (sSFR) темп звездообразования у галактик без балджей, видимых анфас, и рассматриваем зависимость этих параметров от звездной и водородной массы галактик.

2. *Исходные наблюдательные данные*. Среди 220 Sc, Scd, Sd-галактик нашей выборки, видимых анфас, вне зоны GALEX-обзора оказалось 39 галактик. Остальные галактики были уверенно детектированы в FUV-полосе. Данные о них представлены в табл.1. Следует отметить, что в ряде случаев FUV-изображения галактик распадаются на несколько фрагментов. Это потребовало индивидуального подхода к определению интегрального потока каждой галактики.

В столбцах табл.1 содержатся: (1) - имя галактики; (2) - морфологический тип по шкале Вокулера, определенный нами по многоцветным изображениям в обзоре PanSTARRS [9]; (3) - интегральная видимая величина галактики в B-полосе из базы данных HyperLEDA [10]; (4) - Галактическое поглощение согласно [11]; (5) - видимая величина галактики в FUV-полосе; (6) - видимая величина в линии нейтрального водорода 21 см по данным [10]; (7) - интегральная величина галактики в K-полосе, вычисленная по B-величине и морфологическому типу как

$$K_B = B_t - A_G + T/4 - 4.60\,, \qquad (1)$$

(соотношение получено путем аппроксимации данных, представленных на рис.19 в [12]); (8) - расстояние до галактики (в Мпк), определенное по лучевой скорости V_{LG} при параметре Хаббла $H_0=73$ км/с/Мпк; для близких галактик с $V_{LG}<2500$ км/с оценка расстояния сделана согласно модели [13], которая учитывает падение галактик к скоплению Virgo и расширение Местной космической пустоты; для самых близких галактик приведены индивидуальные фотометрические расстояния из базы данных САО РАН для галактик Местного объема http://www.sao.ru/lv/lvgdb/ [14]; (9) - логарифм интегральной светимости галактики в K-полосе при абсолютной величине Солнца $K_\odot = 3^{\rm m}.28$; (10) - логарифм водородной массы галактики

Таблица 1

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ Sc-Sd ГАЛАКТИК, ВИДИМЫХ АНФАС

Галактика	T	B_t	A_G	m_{FUV}	m_{21}	K_B	D	$\log L_K$	$\log M_{HI}$	logSFR	logSFR/L_K
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NGC7816	5	13.91	0.27	16.31	14.58	10.29	74	10.93	10.24	0.204	-10.73
UGC00044	7	16.70	0.15	18.70	17.80	13.70	89	9.73	9.11	-0.685	-10.41
UGC00048	6	15.60	0.58	16.91	14.89	11.92	63	10.14	9.97	0.061	-10.08
NGC7834	6	15.35	0.63	17.22	15.96	11.63	74	10.40	9.68	0.112	-10.29
NGC0039	5	14.34	0.35	16.69	16.02	10.64	70	10.74	9.61	0.061	-10.68
UGC00160	6	16.50	0.21	17.56	15.97	13.19	68	9.70	9.61	-0.416	-10.12
PGC1075005	6	15.57	0.15	17.18	...	12.32	46	9.71	...	-0.654	-10.36
PGC002257	5	15.41	0.11	17.34	...	11.95	59	10.07	...	-0.528	-10.60
IC1562	5	13.60	0.05	15.24	15.02	10.20	52	10.66	9.76	0.156	-10.51
NGC0198	5	13.10	0.11	16.12	16.16	9.64	74	11.19	9.60	0.155	-11.04
IC0043	5	13.95	0.29	16.70	15.40	10.31	70	10.88	9.86	0.014	-10.86
NGC0236	5	14.43	0.11	16.08	16.02	10.97	80	10.73	9.73	0.235	-10.49
NGC0255	5	12.41	0.15	14.26	13.51	8.91	21	10.39	9.57	-0.166	-10.56
IC0056	6	15.15	0.12	16.65	16.25	11.93	85	10.40	9.69	0.072	-10.33
UGC00626	5	14.97	0.21	16.96	...	11.41	80	10.55	...	-0.035	-10.59
ESO412-013	5	15.00	0.09	16.68	...	11.56	78	10.47	...	-0.037	-10.51
ESO542-004	7	15.00	0.06	16.97	...	12.10	78	10.26	...	-0.182	-10.44
IC1666	6	14.35	0.27	17.03	16.23	10.98	70	10.61	9.53	-0.134	-10.74
PGC005023	6	15.78	0.14	18.76	18.44	12.54	27	9.16	7.82	-1.754	-10.91
UGC00929	6	14.82	0.15	16.43	16.23	11.57	104	10.72	9.87	0.358	-10.36
NGC0575	5	13.72	0.27	16.11	15.51	10.10	46	10.59	9.45	-0.134	-10.73
NGC0628	5	9.80	0.28	12.20	11.56	6.17	10	10.84	9.71	0.118	-10.73
UGC01148	5	15.45	0.71	18.02	16.48	11.39	68	10.42	9.41	-0.216	-10.64
ESO543-021	5	14.95	0.08	16.63	...	11.52	79	10.50	...	-0.014	-10.51
UGC01347	5	13.50	0.32	15.97	15.65	9.83	79	11.17	9.86	0.431	-10.74
PGC007210	5	14.97	0.13	16.12	14.88	11.49	112	10.81	10.48	0.527	-10.28
UGC01478	5	14.56	0.47	17.21	16.18	10.74	69	10.69	9.53	-0.066	-10.76
UGC01546	5	14.76	0.33	16.75	15.63	11.08	33	9.92	9.11	-0.628	-10.54
PGC007942	6	15.00	0.12	16.83	16.50	11.78	73	10.32	9.46	-0.137	-10.46
PGC008142	5	14.91	0.10	17.30	...	11.46	110	10.81	...	0.021	-10.79
UGC02043	5	14.96	0.52	17.88	...	11.09	73	10.60	...	-0.243	-10.85
UGC02094	5	13.74	0.28	16.26	15.37	10.12	73	10.99	9.91	0.214	-10.78
ESO479-022	5	15.39	0.13	17.05	...	11.91	99	10.54	...	0.053	-10.49
UGC02174	5	15.09	0.57	17.11	14.86	11.17	72	10.56	10.10	0.091	-10.47
ESO546-011	5	14.52	0.15	16.27	15.23	11.02	62	10.49	9.82	-0.031	-10.52
NGC1067	5	14.55	0.82	17.57	16.12	10.38	64	10.77	9.49	-0.005	-10.78
UGC02323	5	15.66	1.08	18.72	16.62	11.23	111	10.91	9.77	0.217	-10.69
PGC012008	5	15.00	0.21	17.33	...	11.44	129	10.96	...	0.232	-10.72
UGC02623	7	15.59	1.02	19.07	15.36	11.72	63	10.22	9.78	-0.467	-10.69
UGC02692	5	14.07	0.34	16.06	15.86	10.38	87	11.04	9.87	0.496	-10.54
UGC02712	6	15.50	1.26	20.26	17.58	11.14	97	10.83	9.27	-0.380	-11.21
UGC02721	7	16.40	0.58	18.45	16.67	12.97	89	10.02	9.56	-0.253	-10.28
NGC1325A	7	13.40	0.09	16.03	15.87	10.46	15	9.48	8.33	-1.214	-10.69
ESO548-035	5	13.49	0.27	15.77	14.82	9.87	57	10.88	9.91	0.195	-10.68

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NGC1376	5	12.85	0.20	15.02	14.62	9.30	57	11.10	9.99	0.438	-10.66
PGC013714	6	15.10	0.35	17.41	...	11.65	59	10.19	...	-0.371	-10.56
IC0342	5	9.40	2.41	12.80	8.03	3.64	3	10.81	10.07	0.470	-10.34
UGC02859	5	16.00	1.93	19.88	15.29	10.72	77	10.79	9.99	0.084	-10.71
UGC03051	6	16.00	0.97	18.37	16.13	11.94	95	10.49	9.83	0.131	-10.36
NGC1599	5	14.10	0.17	15.38	15.33	10.58	54	10.54	9.66	0.225	-10.32
IC0391	5	12.98	0.56	15.04	14.69	9.07	24	10.44	9.21	-0.046	-10.49
ESO552-047	5	15.26	0.44	17.59	...	11.47	90	10.63	...	-0.007	-10.64
PGC017323	7	13.49	0.34	14.92	14.59	10.30	30	10.14	9.45	0.024	-10.12
PGC018031	5	14.84	1.09	18.30	16.69	10.40	96	11.11	9.62	0.262	-10.85
IC0441	5	14.40	1.18	17.16	15.16	9.87	30	10.32	9.22	-0.224	-10.54
UGC03574	6	13.20	0.25	14.66	13.74	9.85	24	10.13	9.59	-0.134	-10.26
UGC03701	6	14.80	0.26	16.59	15.29	11.44	42	9.98	9.46	-0.409	-10.39
UGC03806	6	15.26	0.44	18.10	16.61	11.72	74	10.36	9.43	-0.385	-10.74
UGC03825	5	15.06	0.37	16.97	16.21	11.34	114	10.89	9.96	0.394	-10.50
UGC03886	5	16.00	0.27	16.57	15.67	12.38	69	10.04	9.74	0.041	-10.00
UGC03924	7	15.66	0.13	17.54	16.80	12.68	69	9.92	9.29	-0.457	-10.37
UGC04074	5	13.75	0.18	16.54	...	10.22	99	11.21	...	0.295	-10.92
NGC2500	7	12.22	0.17	13.80	13.95	9.20	12	9.79	8.91	-0.450	-10.24
NGC2514	5	14.01	0.15	16.17	15.65	10.51	65	10.73	9.70	0.051	-10.68
PGC086610	7	16.40	0.20	18.14	17.45	13.35	65	9.60	8.98	-0.696	-10.29
PGC023378	6	14.49	0.21	17.19	15.59	11.18	60	10.39	9.65	-0.380	-10.77
UGC04380	5	15.05	0.26	17.39	16.43	11.44	104	10.77	9.79	0.058	-10.71
UGC04445	5	15.06	0.29	17.11	15.60	11.42	88	10.63	9.98	0.044	-10.59
IC0509	5	13.83	0.16	15.87	15.49	10.33	74	10.92	9.87	0.290	-10.63
NGC2607	5	14.95	0.18	16.09	15.02	11.42	47	10.09	9.67	-0.173	-10.26
UGC04536	5	15.42	0.41	18.06	...	11.66	103	10.67	...	-0.101	-10.77
NGC2661	6	13.86	0.13	15.30	15.15	10.63	54	10.52	9.73	0.226	-10.30
UGC04853	6	15.24	0.17	16.34	15.22	11.97	34	9.59	9.30	-0.559	-10.15
PGC026687	6	14.72	0.13	16.40	...	11.49	46	10.04	...	-0.353	-10.39
UGC05015	6	15.30	0.09	16.69	15.85	12.11	28	9.36	8.88	-0.935	-10.29
UGC05153	5	15.65	0.13	16.82	...	12.17	110	10.53	...	0.236	-10.29
UGC05169	7	15.44	0.05	17.41	...	12.54	106	10.34	...	-0.099	-10.44
NGC2967	5	12.28	0.44	15.26	13.46	8.49	31	10.89	9.93	-0.002	-10.90
UGC05274	6	14.92	0.18	17.01	15.97	11.64	79	10.45	9.74	-0.087	-10.54
ESO566-019	6	13.99	0.21	16.03	15.27	10.68	47	10.38	9.57	-0.125	-10.51
ESO499-011	7	15.01	0.27	17.50	15.80	11.89	38	9.71	9.17	-0.856	-10.57
PGC028556	5	14.84	0.19	17.47	16.07	11.30	98	10.77	9.89	-0.077	-10.85
ESO567-010	6	14.44	0.29	17.09	16.43	11.05	38	10.05	8.92	-0.672	-10.72
PGC029301	5	15.24	0.21	20.14	...	11.68	125	10.83	...	-0.919	-11.75
UGC05474	6	14.89	0.10	16.16	15.37	11.69	80	10.44	9.99	0.197	-10.24
UGC05483	5	15.13	0.17	17.29	16.42	11.62	82	10.49	9.59	-0.181	-10.67
PGC029882	5	14.54	0.23	17.19	...	10.96	126	11.13	...	0.283	-10.84
PGC029929	7	14.30	0.34	16.82	15.08	11.11	44	10.15	9.59	-0.400	-10.55
NGC3184	6	10.41	0.07	12.53	12.89	7.24	11	10.50	9.26	-0.092	-10.59
PGC030452	5	14.78	0.06	16.64	...	11.37	87	10.64	...	0.051	-10.59
PGC030830	5	14.91	0.08	17.01	...	11.48	99	10.71	...	0.030	-10.68

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NGC3344	5	10.50	0.14	12.60	12.20	7.01	10	10.51	9.45	-0.149	-10.66
PGC031979	7	14.05	0.16	14.97	14.61	11.04	31	9.88	9.47	-0.103	-9.98
PGC032091	6	14.45	0.17	16.00	14.92	11.18	37	9.97	9.50	-0.353	-10.33
NGC3433	5	13.30	0.15	15.14	14.26	9.80	35	10.48	9.71	-0.069	-10.55
PGC032817	6	15.28	0.17	17.06	...	12.01	110	10.59	...	0.167	-10.42
NGC3506	5	13.16	0.13	15.73	15.34	9.68	86	11.31	10.06	0.458	-10.85
UGC06130	5	15.02	0.16	17.20	16.11	11.51	112	10.80	9.99	0.119	-10.68
UGC06194	6	14.62	0.07	15.92	15.43	11.45	35	9.82	9.25	-0.444	-10.26
PGC034006	5	14.13	0.27	16.46	15.30	10.51	103	11.13	10.24	0.429	-10.70
UGC06335	6	14.91	0.02	16.64	15.26	11.79	41	9.82	9.45	-0.634	-10.45
UGC06429	5	13.78	0.05	15.74	15.14	10.38	53	10.61	9.72	-0.033	-10.64
IC0696	6	14.50	0.22	16.83	15.58	11.19	84	10.69	9.95	0.062	-10.62
UGC06528	5	14.12	0.05	16.19	16.31	10.72	46	10.35	9.13	-0.336	-10.68
PGC036269	5	15.59	0.12	17.94	17.10	12.12	88	10.35	9.38	-0.415	-10.77
PGC036353	5	14.14	0.32	16.51	...	10.47	39	10.31	...	-0.394	-10.70
NGC3938	5	10.87	0.09	13.05	13.08	7.43	18	10.85	9.61	0.140	-10.71
ESO573-002	5	15.50	0.31	17.16	15.86	11.84	76	10.34	9.75	-0.081	-10.42
NGC4136	5	11.70	0.08	13.70	13.70	8.27	17	10.46	9.31	-0.178	-10.64
NGC4195	6	15.29	0.08	16.54	15.82	12.11	61	10.04	9.57	-0.205	-10.24
NGC4303	5	10.16	0.11	12.24	12.82	6.70	15	10.98	9.56	0.322	-10.66
NGC4303A	6	13.53	0.16	14.82	14.61	10.28	15	9.55	8.84	-0.677	-10.23
IC3267	5	14.12	0.09	16.96	16.79	10.68	38	10.20	8.77	-0.774	-10.97
IC3271	5	14.57	0.14	16.81	16.17	11.08	97	10.85	9.84	0.137	-10.72
NGC4411B	6	12.98	0.12	14.95	14.67	9.76	28	10.30	9.36	-0.210	-10.51
NGC4535	5	10.56	0.13	13.46	12.91	7.08	16	10.89	9.57	-0.099	-10.98
NGC4571	6	11.92	0.22	15.18	14.94	8.60	15	10.22	8.71	-0.771	-10.99
NGC4653	5	12.77	0.14	14.86	14.30	9.28	40	10.80	9.81	0.150	-10.65
PGC042868	7	13.03	0.13	14.91	13.88	10.05	17	9.75	9.24	-0.623	-10.37
ESO574-029	5	13.67	0.26	16.58	...	10.06	83	11.13	...	0.188	-10.94
NGC4688	7	12.60	0.10	14.80	13.60	9.65	7	9.14	8.58	-1.371	-10.51
NGC4900	5	11.89	0.10	13.82	14.49	8.44	16	10.34	8.94	-0.264	-10.61
UGC08153	6	14.49	0.13	16.07	15.24	11.26	38	9.97	9.39	-0.387	-10.35
PGC045690	5	15.86	0.07	17.53	...	12.44	67	9.99	...	-0.524	-10.51
NGC5068	6	10.50	0.44	12.80	12.36	6.96	5	9.92	8.78	-0.605	-10.53
UGC08436	7	15.03	0.11	16.60	16.09	12.07	41	9.71	9.12	-0.548	-10.26
NGC5154	5	14.73	0.07	16.35	15.61	11.31	77	10.56	9.86	0.064	-10.49
PGC048087	7	14.45	0.32	16.70	15.17	11.28	34	9.86	9.33	-0.591	-10.45
ESO445-076	7	14.73	0.29	16.65	15.51	11.59	34	9.74	9.19	-0.591	-10.33
UGC08877	7	15.18	0.02	17.37	16.82	12.31	37	9.52	8.74	-1.014	-10.54
NGC5405	5	14.52	0.14	16.42	15.58	11.03	94	10.85	10.05	0.269	-10.58
PGC049982	5	16.00	0.09	17.62	...	12.56	126	10.49	...	0.004	-10.48
NGC5457	5	8.30	0.05	10.00	10.41	4.90	7	11.04	9.86	0.510	-10.53
UGC09008	6	15.29	0.09	17.19	16.34	12.10	73	10.20	9.52	-0.298	-10.50
NGC5468	5	12.94	0.12	13.90	13.94	9.47	37	10.66	9.89	0.449	-10.21
NGC5476	6	13.34	0.14	15.71	14.86	10.10	34	10.34	9.45	-0.330	-10.67
NGC5494	5	13.30	0.36	15.13	14.40	9.59	30	10.43	9.53	-0.039	-10.47
UGC09144	6	15.95	0.06	17.56	...	12.79	108	10.26	...	-0.134	-10.39

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
UGC09216	5	14.51	0.08	16.78	15.88	11.08	77	10.65	9.75	-0.097	-10.75
NGC5660	5	12.38	0.10	14.22	14.34	8.93	36	10.85	9.71	0.284	-10.57
UGC09317	6	15.00	0.06	16.22	15.58	11.84	61	10.15	9.67	-0.088	-10.23
ESO580-014	6	14.55	0.39	16.64	16.18	11.06	82	10.71	9.69	0.254	-10.46
UGC09837	5	13.81	0.09	15.47	15.10	10.37	39	10.35	9.47	-0.154	-10.50
UGC09945	5	14.19	0.25	16.42	15.32	10.59	94	11.02	10.15	0.354	-10.67
NGC5989	6	13.56	0.10	16.02	16.24	10.36	42	10.41	9.08	-0.305	-10.72
UGC10020	7	14.44	0.22	15.86	15.25	11.38	31	9.74	9.21	-0.416	-10.16
PGC056010	6	15.42	0.13	17.48	17.46	12.19	63	10.03	8.94	-0.514	-10.55
PGC056318	5	15.33	0.08	17.35	...	11.90	82	10.38	...	-0.269	-10.65
PGC056639	6	15.77	0.10	20.37	...	11.67	115	10.76	...	-0.480	-11.24
NGC6143	5	13.92	0.10	16.18	15.38	10.47	76	10.88	9.94	0.147	-10.74
PGC058201	5	15.69	0.23	17.38	15.76	12.11	117	10.60	10.16	0.139	-10.46
UGC10427	5	15.19	0.06	16.88	16.47	11.78	124	10.78	9.93	0.260	-10.53
IC1221	6	14.59	0.05	15.58	15.75	11.44	78	10.52	9.81	0.371	-10.15
UGC10590	6	14.06	0.13	16.42	...	10.83	45	10.28	...	-0.385	-10.67
IC1236	5	14.23	0.35	17.02	16.22	10.53	85	10.96	9.70	0.097	-10.86
UGC10956	5	15.64	1.19	19.81	...	11.10	94	10.82	...	-0.280	-11.10
NGC6493	6	15.44	0.17	16.63	...	12.17	85	10.30	...	0.115	-10.19
UGC11214	6	15.00	1.01	18.62	15.61	10.89	39	10.14	9.27	-0.710	-10.85
NGC6711	5	13.71	0.37	16.72	16.44	9.99	68	10.98	9.42	0.045	-10.94
NGC6821	7	13.62	1.39	17.71	14.52	9.38	18	10.07	9.03	-0.726	-10.79
NGC6946	5	9.60	1.48	13.20	10.00	4.77	8	11.21	10.14	0.446	-10.76
PGC902799	5	16.30	0.20	17.16	15.44	12.75	49	9.59	9.53	-0.547	-10.14
NGC7137	5	13.05	0.60	15.89	15.32	9.10	23	10.39	8.93	-0.392	-10.79
UGC11816	5	14.83	0.61	17.20	15.28	10.87	68	10.63	9.88	0.032	-10.59
ESO532-008	5	15.29	0.14	17.26	...	11.80	87	10.47	...	-0.136	-10.61
PGC068549	5	14.23	0.43	17.01	...	10.45	71	10.83	...	0.011	-10.82
ESO602-027	5	14.48	0.19	16.62	16.06	10.95	80	10.74	9.71	0.081	-10.66
NGC7309	5	13.04	0.25	15.78	15.43	9.44	57	11.05	9.67	0.174	-10.87
ESO603-011	5	15.01	0.21	17.18	...	11.45	114	10.85	...	0.185	-10.66
UGC12192	7	16.50	0.53	18.24	16.44	13.13	93	10.00	9.69	-0.175	-10.17
IC5261	6	13.88	0.19	15.84	15.47	10.59	46	10.40	9.47	-0.086	-10.48
NGC7495	5	13.76	0.42	16.44	14.64	9.99	70	11.01	10.17	0.220	-10.79
NGC7535	6	14.28	0.29	16.63	15.34	10.89	67	10.61	9.85	0.005	-10.60
UGC12522	7	15.41	0.46	18.07	15.62	12.10	42	9.72	9.33	-0.850	-10.57
UGC12585	7	14.63	0.31	16.64	15.52	11.47	53	10.17	9.57	-0.188	-10.36
UGC12635	6	15.31	0.21	17.71	16.62	12.00	74	10.25	9.42	-0.401	-10.65
PGC071751	5	14.74	0.28	17.47	16.33	11.11	115	10.99	9.92	0.128	-10.86
ESO605-016	5	13.23	0.14	15.99	15.70	9.74	110	11.50	10.13	0.575	-10.92
PGC072738	5	14.82	0.23	17.25	16.71	11.24	83	10.65	9.48	-0.106	-10.76
UGC12838	5	14.86	0.19	16.73	16.18	11.32	101	10.79	9.87	0.241	-10.55
NGC7798	5	12.95	0.28	15.56	16.03	9.32	36	10.70	9.03	-0.113	-10.81

$$\log M_{HI} = 12.33 - 0.4\, m_{21} + 2\log D \qquad (2)$$

в единицах массы Солнца; (11) - логарифм интегрального темпа звездо-

образования в $M_\odot$/год, который, согласно [3], выражается как

$$\log(\mathrm{SFR}) = 2.78 - 0.4(m_{\mathrm{FUV}} - 1.93\,A_G) + 2\log D\,; \qquad (3)$$

(12) - логарифм удельного темпа звездообразования в единицах (год)$^{-1}$ в предположении $M^*/L_K = 1\times M_\odot/L_\odot$ [15].

Распределение спиральных галактик нашей выборки по интегральному темпу звездообразования и *K*-светимости представлено на рис.1. Галактики типов Sc, Scd и Sd изображены, соответственно, квадратами, треугольниками и кружками. Галактики на диаграмме показывают морфологическую сегрегацию: максимальные значения $\mathrm{SFR}\sim 3M_\odot$/год соответствуют массивным Sc галактикам типа M101, минимальные значения $\mathrm{SFR}\le 0.1M_\odot$/год характерны для карликовых спиралей Scd, Sd.

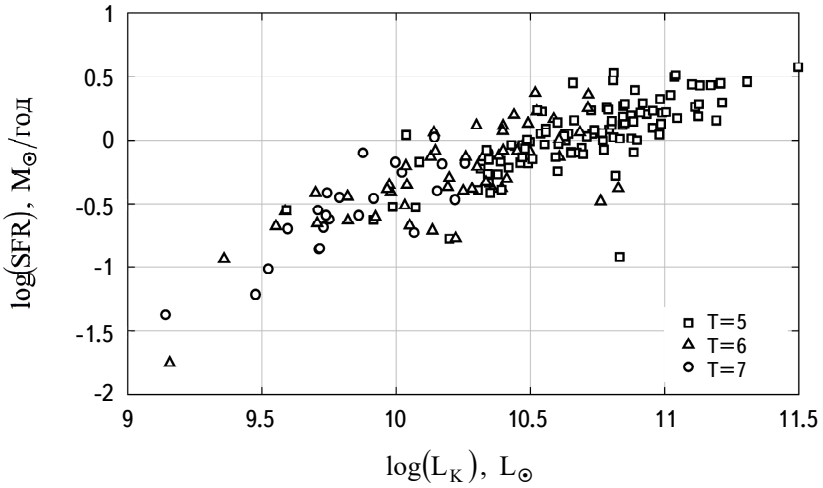

Рис.1. Темп звездообразования и *K*-светимость у галактик поздних типов ($T = 5$, 6, 7), видимых анфас.

Рис.2 воспроизводит распределение галактик по интегральному темпу звездообразования и водородной массе. Величина SFR в дисках спиралей поздних типов показывает более тесную корреляцию с M_{HI}, чем с M^*, имея наклон 0.86 ± 0.04. Этот наклон оказывается значительно меньше наклона 1.4 ± 0.1, который описывает соотношение log(SFR) vs $\log M_{HI}$ для отдельных очагов звездообразования (закон Шмидта-Кенникаta [16]).

Соотношения между водородной массой и звездной массой (*K*-светимостью) для 146 галактик рассматриваемой выборки показаны на рис.3. Обозначения морфологических типов те же, что на предыдущих рисунках. Три диагональных прямых соответствуют значениям M_{HI}/L_K, равным 1, 0.1 и 0.01. Медиана этого отношения составляет 0.15, тогда как для отдельных типов галактик медианное отношение равно: 0.10 (Sc), 0.17 (Scd) и 0.28 (Sd).

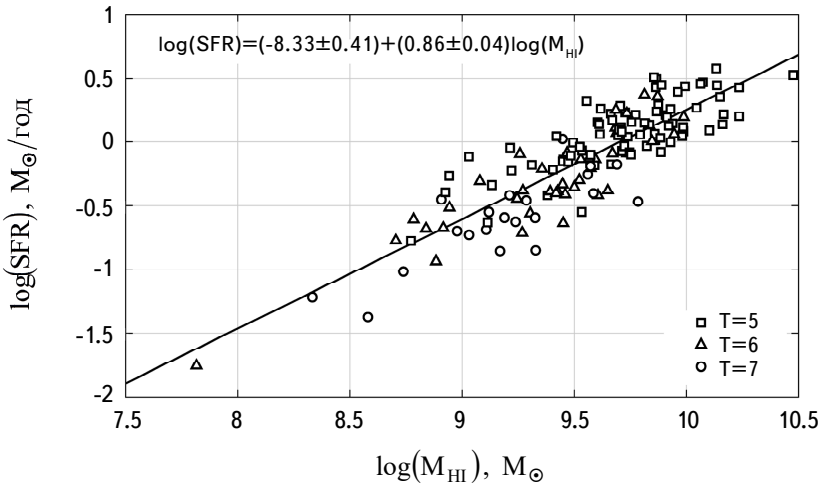

Рис.2. Темп звездообразования и водородная масса у галактик поздних типов, ориентированных анфас.

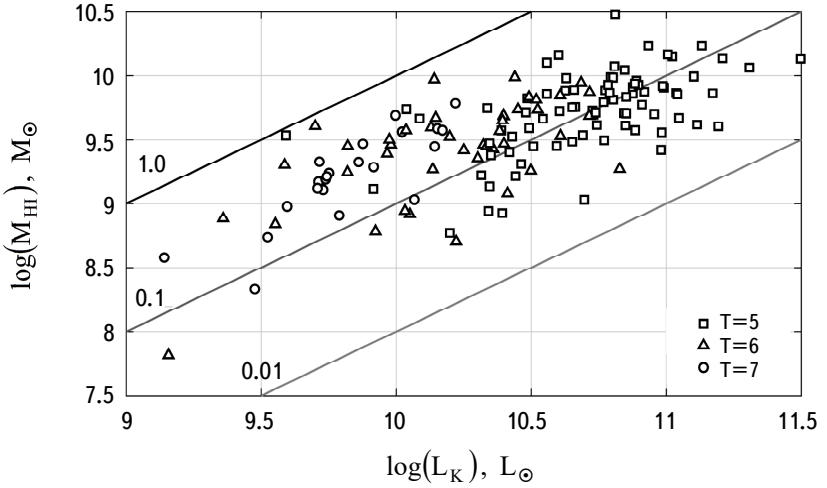

Рис.3. Соотношение между водородной массой и *K*-светимостью у галактик поздних типов Sc, Scd, Sd, видимых анфас.

Данные рис.3 отражают известный факт, что относительное содержание нейтрального водорода в дисках спиральных галактик падает с увеличением массы (светимости) галактики. Это в свою очередь означает, что процесс преобразования газа в звезды происходил в массивных галактиках более интенсивно, чем в объектах низкой светимости.

Среди 181 галактики нашей выборки имеются 13 случаев, когда темп звездообразования был определен по $H\alpha$-потоку, $F(H\alpha)$. Согласно [16], интегральный темп звездообразования выражается соотношением

$$\log[\mathrm{SFR}(\mathrm{H}\alpha)] = \log F(\mathrm{H}\alpha) - 0.244\, A_G + 2\log D + 8.98\,, \qquad (4)$$

где поток в линии Hα измерен в единицах (эрг/см^2 с), а расстояние D - в Мпк. Данные об этих галактиках, взятые из базы данных NASA Extragalactic Database = NED (http://ned.ipac.caltech.edu), представлены в табл.2. Оценки потока $F(\mathrm{H}\alpha)$ для них сделаны разными авторами на разных телескопах. Тем не менее, согласие значений SFR по Hα -потоку и FUV-потоку оказывается

Таблица 2

ТЕМПЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ПО ДАННЫМ FUV И Hα ПОТОКОВ

Галактика	D, Мрс	A_G	log[SFR(FUV)]	logF(Hα)	log[SFR(Hα)]
NGC628	10.2	0.28	0.12	-10.84	0.22
NGC2500	12.4	0.17	-0.45	-11.60	-0.39
NGC3184	11.1	0.07	-0.09	-11.12	-0.04
NGC3344	9.8	0.14	-0.15	-11.09	-0.10
NGC4136	17.0	0.08	-0.18	-11.82	-0.36
NGC4303	15.0	0.11	0.32	-11.03	0.32
NGC4688	7.0	0.10	-1.37	-11.90	-1.21
NGC4900	16.0	0.10	-0.26	-11.68	-0.27
NGC5068	5.1	0.44	-0.60	-10.83	-0.34
NGC5457	7.0	0.05	0.51	-10.22	0.45
NGC6946	7.7	1.48	0.45	-10.47	0.63
NGC7137	23.0	0.60	-0.39	-11.95	-0.11
NGC7798	36.0	0.28	-0.11	-12.13	0.03

вполне удовлетворительным. Средняя разность $\log[\mathrm{SFR}(\mathrm{H}\alpha)] - \log[\mathrm{SFR}(\mathrm{FUV})]$ составляет 0.08 ± 0.04 при дисперсии разности 0.12. Результат этого сравнения показывает, что нуль-пункты используемых эмпирических соотношений (3) и (4) согласуются друг с другом в пределах типичной погрешности измерения потоков ~0.1 dex.

3. *Удельный темп звездообразования в тонких дисках галактик.* Как было отмечено выше, тонкие спиральные галактики поздних типов без балджей являются довольно обособленными объектами, эволюция которых мало подвержена внешнему влиянию: вспышкам звездообразования из-за приливного возмущения массивного соседа или же поглощения спутника при слиянии. По этой причине такие галактики весьма удобны для изучения автономной эволюции спиральных дисков. Наиболее важной характеристикой глобальной эволюции галактики является удельный темп звездообразования, отнесенный к единице звездной массы, $\mathrm{sSFR} = \mathrm{SFR}/M^*$. Для оценки M^* мы использовали соотношение $M^*/L_K \simeq 1 \times M_\odot/L_\odot$ [15], где светимость L_K определялась по видимой B-величине и среднему показателю цвета $\langle B-K \rangle$, зависящему от морфологического типа T.

Рис.4 представляет распределение спиральных дисков галактик без балджей, ориентированных анфас, по удельному темпу звездообразования и звездной массе. Пунктирная горизонтальная линия соответствует параметру Хаббла $H_0 = (13.8 \times 10^9$ лет$)^{-1}$, когда галактика успевает воспроизвести наблюдаемую массу с наблюдаемым темпом SFR за космологическое время 13.8 млрд. лет. Как показывает линия квадратичной регрессии (сплошная линия), средний удельный темп звездообразования в тонких дисках уменьшается с ростом светимости галактики. Из этих данных следует, что в прошлом средний темп звездоообразования у маломассивных галактик был в два раза выше наблюдаемого сейчас, а для самых массивных галактик прежний темп был в 3-4 раза интенсивнее.

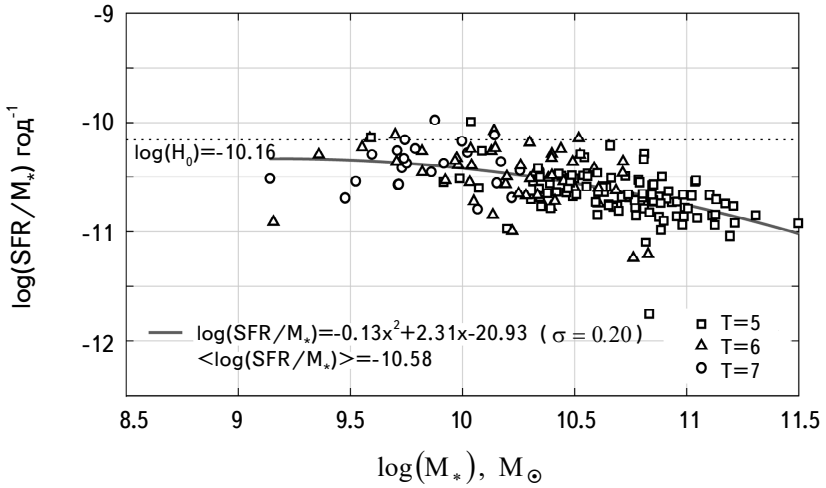

Рис.4. Распределение галактик поздних типов, наблюдаемых анфас, по удельному темпу звездообразования и звездной массе.

Разброс галактик относительно линии регрессии равен 0.20 в логарифмической шкале. Средняя погрешность *K*-светимости из-за ошибок измерения *B*-величины ($0^m.25$) и морфологического типа ($0^m.18$) составляет $0^m.31$. Сделав квадратичное вычитание ошибок, мы получаем для истинной (космической) вариации SFR величину 0.16 dex. Это означает, что преобразование газа в звезды в тонких дисках спиральных галактик выглядит довольно единообразным процессом.

Следует отметить, что база данных HyperLEDA [10] содержит оценки интегральной величины K_t для большинства объектов нашей выборки. Оценки K_t были получены в основном из обзора 2MASS [12]. Однако из-за короткого времени экспозиций (~8 с) 2MASS обзор систематически недоучитывает вклад периферийных областей в интегральную светимость галактик, особенно для объектов голубого цвета. Рис.5 воспроизводит соотношение между K_B и K_t

величинами для 159 галактик рассматриваемой выборки. Линия регрессии для них выражается как $K_t = 0.58 + 0.99K_B$. Средняя разность звездных величин составляет $\langle K_t - K_B \rangle = 0^{\mathrm{m}}.49$, возрастая в сторону самых слабых галактик. Среднее квадратичное отклонение от линии регрессии равно $0^{\mathrm{m}}.59$, также увеличиваясь от ярких к слабым галактикам. Поскольку по нашей оценке средняя квадратичная погрешность K_B-величины составляет $0^{\mathrm{m}}.31$, то на долю независимо измеряемой K_t-величины приходится основная погрешность, $\sigma(K_t) = 0^{\mathrm{m}}.50$.

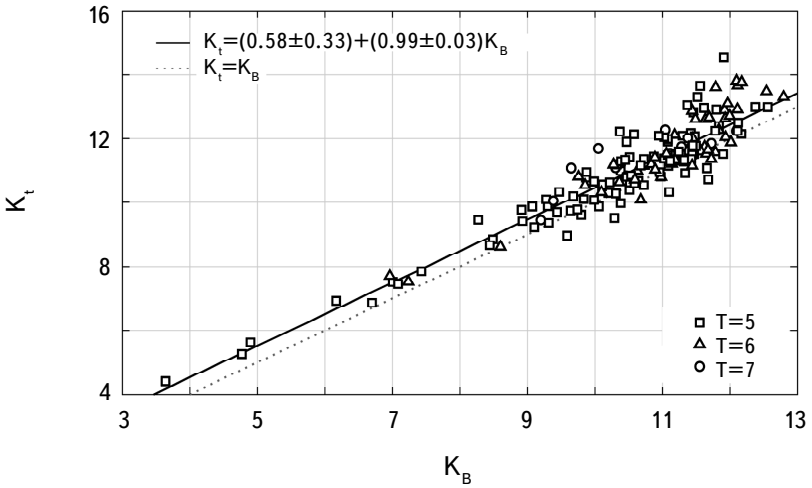

Рис.5. Соотношение между интегральной *K*-величиной из HyperLEDA и видимой *K*-величиной, определенной по показателю цвета (*B* - *K*) и морфологическому типу, для Sc, Scd, Sd галактик, видимых анфас.

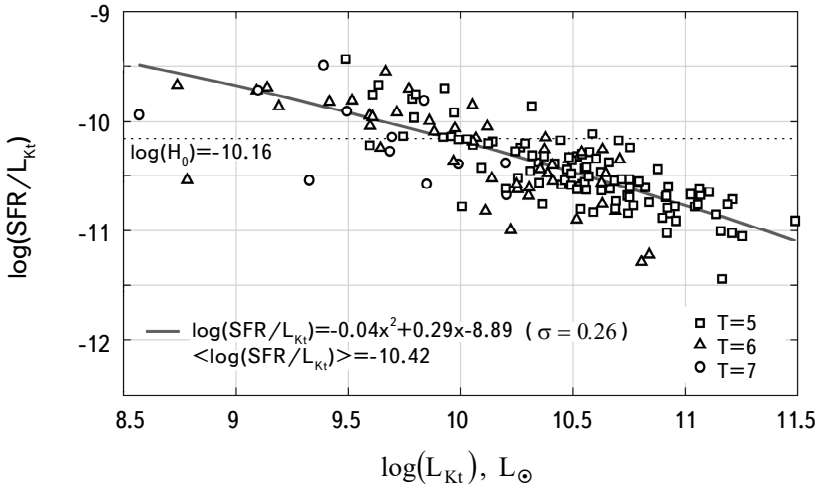

Рис.6. Распределение галактик поздних типов, видимых анфас, по удельному темпу звездообразования и *K*-светимости по данным HyperLEDA.

В фотометрической системе K_t соотношение между удельным темпом звездообразования и K_t-светимостью приобретает вид, показанный на рис.6. Как следует из этих данных, переход от K_B к K_t значительно увеличивает число маломассивных галактик, располагающихся выше предела sSFR$=H_0$. Дисперсия галактик относительно линии регрессии также возрастает, $\sigma(\mathrm{sSFR})=0.26$ dex. Это значение согласуется со сделанной оценкой $\sigma(K_t)=0^{\mathrm{m}}.50$ или $\sigma(L_K)=0.20$ dex, если истинная вариация удельного темпа звездообразования равна 0.16 dex. Данный пример показывает, что формальное использование шкалы K_t-величин может приводить к систематическому искажению картины звездообразования в дисках спиральных галактик, особенно в области их низких светимостей.

4. *Удельный барионный темп звездообразования*. Как хорошо известно, чем меньше светимость галактики позднего типа, тем бóльшая доля ее массы пребывает в газообразном состоянии. Такая закономерность видна и для тонких спиральных дисков (см. рис.3). Это свидетельствует о том, что процесс преобразования газа в звезды у маломассивных галактик менее эффективен, чем в галактиках высокой светимости. В течение вековой эволюции звездная масса галактики возрастает, но суммарная барионная масса звезд и газа остается постоянной, если галактика изолирована и не подпитывается межгалактическим газом. В этом случае можно ввести понятие удельного барионного темпа звездообразования sbSFR$=$SFR$/M_{bar}$, где

$$M_{bar}=M^*+M_{gas}=\Upsilon_K^* L_K+\eta M_{HI}\,. \qquad (5)$$

До сих пор мы полагали, что $\Upsilon_K^*=1$ [15]. Однако Макгаук и Шомберт [17] привели веские аргументы в пользу меньшего значения, $\Upsilon^*=0.6$. Согласно [18], другой параметр, η, равен 1.85, учитывая вклад гелия и молекулярного водорода в полную массу газа. В действительности, величина параметра η остается пока не вполне определенной, поскольку доля молекулярного газа не постоянна, а падает в сторону маломассивных галактик. С другой стороны, есть указания на то, что диски галактик могут быть окружены значительными массами теплого ионизованного газа.

Принимая соотношение $M_{bar}=0.6L_K+1.85M_{HI}$, мы вычислили удельный барионный темп звездообразования для галактик нашей выборки. Результаты представлены на рис.7. Как следует из этих данных, дисперсия галактик относительно линии регрессии уменьшается до величины космической вариации, $\sigma(\mathrm{sbSFR})=0.15$ dex. С точностью до ошибок фотометрии все галактики типов Sc, Scd, Sd лежат под горизонтальной линией sbSFR$=H_0$, показывая, что современные темпы звездообразования этих галактик недостаточны для преобразования исходной массы газа в звезды за космологическое время H_0^{-1}.

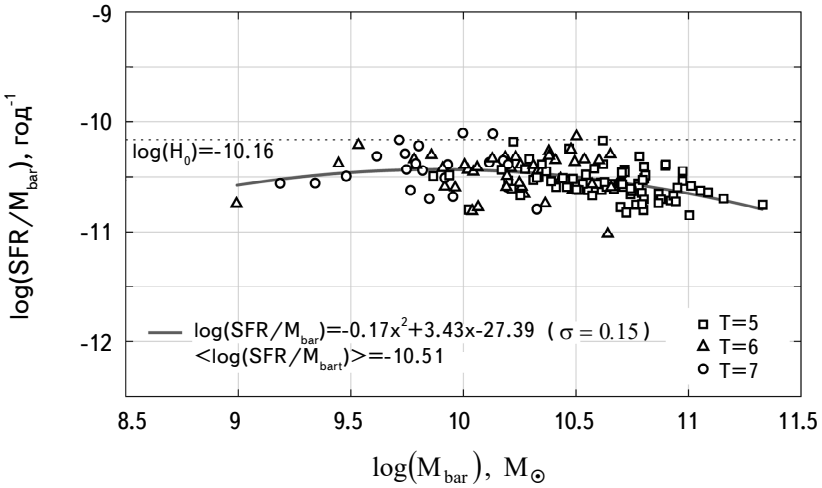

Рис.7. Распределение галактик Sc, Scd, Sd-типов, видимых анфас, по удельному барионному темпу звездообразования и барионной массе.

5. *Заключительные замечания*. Мы рассмотрели выборку 220 спиральных галактик без балджей, ориентированных анфас. Из них для 181 галактики определены интегральные и удельные темпы звездообразования по FUV-потокам из обзора GALEX. Среди этих галактик 106 относятся к типу Sc, 51 - к типу Scd и 24 - к типу Sd. Полученные медианные значения удельного темпа звездообразования для них составляют, соответственно, -10.66 dex, -10.44 dex и -10.40 dex в единицах (год)$^{-1}$. За космологическое время 13.8 млрд. лет при современном темпе звездообразования типичная спиральная галактика позднего типа успевает воспроизвести только (1/3-1/2) своей наблюдаемой звездной массы. Следовательно, в прошлом их средний темп звездообразования должен был быть в 2-3 раза выше наблюдаемого сейчас. Необходимо отметить, что при факторе $\Upsilon_K^* = 0.6$ в соотношении (5), вместо использованного нами значения 1.0, различие между прошлым и современным SFR становится в 1.7 раза меньше.

Современный удельный темп звездообразования тем ниже, чем больше звездная масса спиральной галактики. Однако у более массивных Sc-галактик наблюдаемое отношение массы газа к звездной массе (0.10) заметно меньше, чем в Scd (0.17) и Sd (0.28) галактиках. Следовательно, эффективность процесса преобразования газа в звезды была тем выше, чем больше масса спирального диска.

Исключая вклад фотометрических ошибок, мы получили для дисперсии sSFR при фиксированной массе значение 0.16 dex. Малый разброс галактик относительно линии регрессии sSFR(M^*) указывает на единообразие процесса

звездообразования в дисках тонких спиральных галактик, расположенных в областях низкой космической плотности.

Темп звездообразования и относительное содержание водорода в дисках Sc, Scd, Sd галактик, ориентированных с ребра [5,19], хорошо согласуются с параметрами, полученными в настоящей работе для спиральных галактик без балджей, видимых анфас. Из этого согласия, в частности, следует, что тонкие диски Sc-Sd галактик практически прозрачны в линии 21 см при любых углах наклона диска к лучу зрения.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РНФ 19-12-00145. В работе использованы базы данных HyperLEDA и NED, а также данные спутника GALEX и обзора неба PanSTARRS.

[1] Главная астрономическая обсерватория Национальной Академии наук, Украина,
[2] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, Россия, e-mail: ikar@sao.ru

STAR FORMATION IN THIN DISCS OF SPIRAL GALAXIES SEEN FACE-ON

V.E.KARACHENTSEVA[1], I.D.KARACHENTSEV[2], O.G.KASHIBADZE[2]

We present estimates of integrated (SFR) and specific (sSFR) star formation rate for 181 late-type Sc, Scd, Sd galaxies seen almost face-on. Their SFRs are derived via FUV-flux from GALEX survey. The median values of sSFR are: -10.66 dex for Sc, -10.44 dex for Scd and -10.40 dex for Sd types in units of $(yr)^{-1}$. The average sSFR of the galaxies decreases smoothly from low-mass to giant discs. Being corrected for photometric errors, the sSFR for them has a low cosmic variance of 0.16 dex. To reproduce the observed stellar mass over the cosmic time of 13.8 Gyr, the bulge-less face-on galaxies need to have in the past 2-3 times higher SFR than their present rates.

Keywords: *spiral galaxies: discs: star formation*

ЛИТЕРАТУРА

1. *D.C.Martin*, *J.Fanson*, *D.Schiminovich et al.*, Astrophys. J., **619**, L1, 2005.
2. *A.Gil de Paz*, *S.Boissier*, *B.F.Madore et al.*, Astrophys. J. Suppl., **173**, 185, 2007.
3. *J.C.Lee*, *A.Gil de Paz*, *C.Tremonti et al*, Astrophys. J., **706**, 599, 2009.
4. *I.D.Karachentsev*, *E.I.Kaisina*, Astron. J., **146**, 46, 2013.
5. *O.V.Melnyk*, *V.E.Karachentseva*, *I.D.Karachentsev*, AstBu, **72**, 1, 2017.
6. *V.E.Karachentseva*, *Y.N.Kudrya*, *I.D.Karachentsev et al.*, AstBu, **71**, 1, 2016.
7. *I.D.Karachentsev*, *V.E.Karachentseva*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc, **485**, 1477, 2019.
8. *I.D.Karachentsev*, *V.E.Karachentseva*, *Y.N.Kudrya*, AstBu, **71**, 129, 2016.
9. *K.C.Chambers*, *E.A.Magnier*, *N.Metcalfe et al.*, arXiv:1612.05560, 2016.
10. *D.Makarov*, *P.Prugniel*, *N.Terekhova et al.*, Astron. Astrophys., id. A13, 570A, 2014.
11. *D.J.Schlegel*, *D.P.Finkbeiner*, *M.Davis*, Astrophys. J., **500**, 525, 1998.
12. *T.H.Jarrett*, *T.Chester*, *R.Cutri et al.*, Astron. J., **125**, 525, 2003.
13. *E.J.Shaya*, *R.B.Tully*, *Y.Hoffman et al.*, Astron. J., **850**, 207, 2017.
14. *E.I.Kaisina*, *D.I.Makarov*, *I.D.Karachentsev et al.*, AstBu, **67**, 115, 2012.
15. *E.F.Bell*, *D.H.McIntosh*, *N.Katz et al.*, Astrophys. J. Suppl., **149**, 289, 2003.
16. *R.C.Kennicutt*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **36**, 189, 1998.
17. *S.S.McGaugh*, *J.M.Schombert*, Astron. J., **148**, 77, 2014.
18. *M.Fukugita*, *P.J.E.Peebles*, Astrophys. J., **616**, 643, 2004.
19. *S.S.Kaisin*, *I.D.Karachentsev*, *H.Hernandez-Toledo et al.*, AstBu, **73**, 1 2020.