

Темпы звездообразования и молекулярный газ в Хигсоновских компактных группах (arXiv: 1202.0458)

A. V. Kasparova

Sternberg astronomy institute, Russia

On the molecular gas content and SFR in Hickson Compact Groups: enhanced or deficient?*

V. Martínez-Badenes¹, U. Lisenfeld², D. Espada^{1,3}, L. Verdes-Montenegro¹, S. García-Burillo⁴, S. Leon⁵, J. Sulentic¹,
and M. S. Yun⁶

¹ Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA/CSIC), Apdo. 3004, 18080, Granada, Spain. e-mail: vicentm@iaa.es.

² Departamento de Física Teórica y del Cosmos, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Spain. e-mail: ute@ugr.es.

³ National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

⁴ Observatorio Astronómico Nacional (OAN) Observatorio de Madrid, C/ Alfonso XII 3, 28014, Madrid, Spain

⁵ Joint ALMA Observatory/ESO, Vitacura, Santiago, Chile.

⁶ Department of Astronomy, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA.

Preprint online version: February 3, 2012

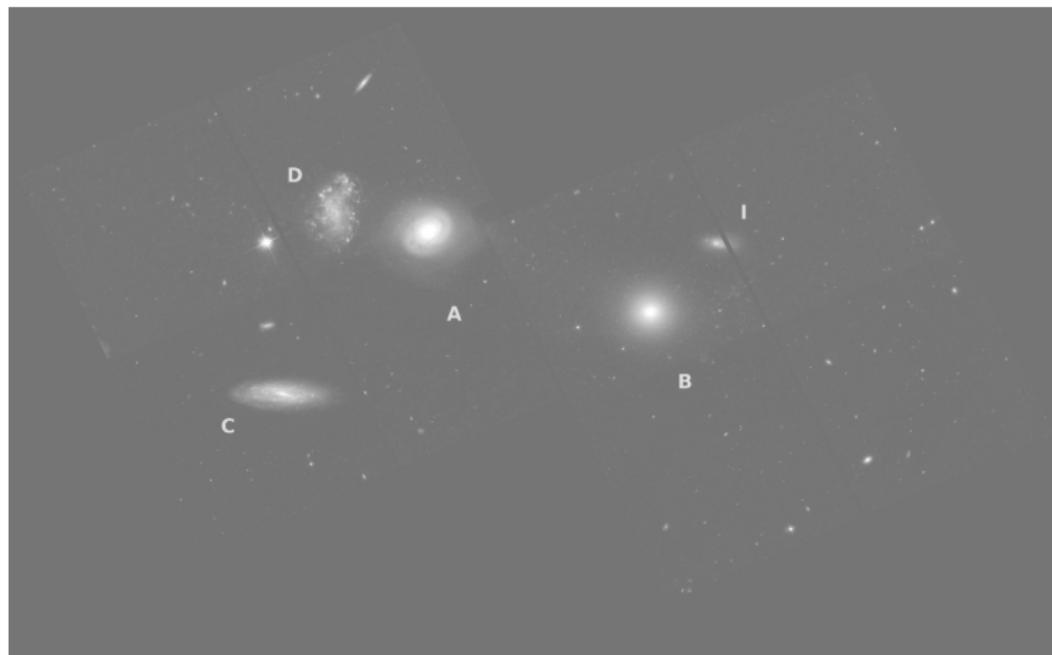
ABSTRACT

Aims. We study the effect of the extreme environment in Hickson Compact groups (HCGs) on the molecular gas mass, M_{H_2} , and the star formation rate (SFR) of galaxies as a function of atomic hydrogen (HI) content and evolutionary phase of the group.

Methods. We have selected a redshift limited ($D < 100$ Mpc) sample of 88 galaxies in 20 HCGs with available atomic hydrogen (HI) VLA maps, covering a wide range of HI deficiencies and evolutionary phases of the groups, and containing at least one spiral galaxy. We derived the far-infrared (FIR) luminosity (L_{FIR}) from IRAS data and used it as a tracer of the star formation rate (SFR). We calculated the HI mass (M_{HI}), L_{FIR} and M_{H_2} deficiencies.

Results. The mean deficiencies of L_{FIR} and M_{H_2} of spiral galaxies in HCGs are close to 0, indicating that their average SFR and molecular gas content are similar to those of isolated galaxies. However, there are indications of an excess in M_{H_2} (~ 50%) in spiral galaxies in HCGs which can be interpreted, assuming that there is no systematic difference in the CO-to- H_2 conversion factor, as either an enhanced molecular gas content or as a higher concentration of the molecular component towards the center in comparison to galaxies in lower density environments. In contrast, the mean M_{HI} of spiral galaxies in HCGs is only 12% of the expected value. The specific star formation rate ($\text{sSFR} = \text{SFR}/\text{stellar mass}$) tends to be lower for galaxies with a higher M_{H_2} or M_{HI} deficiency. This trend is not seen for the star formation efficiency ($\text{SFE} = \text{SFR}/M_{\text{H}_2}$), which is very similar to isolated galaxies. We found tentative indications for an enhancement of M_{H_2} in spiral galaxies in HCGs in an early evolutionary phase and a decrease in later phases. We suggest that this might be due to an enhancement of the conversion from atomic to molecular gas due to on-going tidal interactions in an early evolutionary phase, followed by HI stripping and a decrease of the molecular gas content because of lack of replenishment.

Conclusions. The properties of M_{H_2} and L_{FIR} in galaxies in HCGs are surprisingly similar to those of isolated galaxies, in spite of the



Хигсоновские компактные группы (HCGs) — плотные относительно изолированные группы 4-8 галактик (Hickson 1982)

Ранее было известно

- Взаимодействие в группах приводит к дефициту HI. В спиральных галактиках наблюдается только 24% от ожидаемой массы атомарного водорода для галактик данной светимости и морфологического типа
- Только у половины из самых дефицитных групп наблюдается рентгеновское излучение, что говорит о том, что механизм взаимодействия галактика-IGM не является основной причиной выметания HI
- Известно, что в сильно взаимодействующих системах (слияния, приливные хвосты, возмущения внутренней структуры) доля молекулярного газа повышена (Casasola 2004). Однако раньше считалось, что в скоплениях, в среднем, нет дефицита H_2 , не смотря на очевидную нехватку HI (Kenney, Young 1986, Boselli et al 2002). Хотя Fumagalli 2009 нашел, что 40% галактик скоплений с дефицитом HI имеют также нехватку H_2 .
- M_{H_2} и L_{fir} для HCGs ниже, чем у галактик поля с теми же значениями дефицита HI. Это объясняли, что HI необходим для образования H_2 , а H_2 — для ЗО.

Выборка

86 галактик из 20-ти HCGs, в широком диапазоне дефицитов HI и находящиеся на разных эволюционных стадиях. Критерии для групп:

- Содержит по крайней мере четыре члена, соответствуют критериям Хигсона. Также были исключены “неправильные” группы, с которыми были перепутаны узловатые иррегулярные галактики.)
- Содержит по крайней мере одну спиральную галактику (так как весь интерес в газе).
- Расстояния ≤ 100 Mpc

Галактики сравнения — изолированные AMIGA
(Verdes-Montenegro et al. 2005)

Выборка

II. THE CATALOG

a) *Selection Criteria*

A compact group is defined here by the following criteria:

$$N \geq 4 \quad (\text{population}), \quad (1)$$

$$\theta_N \geq 3\theta_G \quad (\text{isolation}), \quad (2)$$

$$\bar{\mu}_G < 26.0 \quad (\text{compactness}), \quad (3)$$

where N is the total number of galaxies within 3 mag of the brightest, $\bar{\mu}_G$ is the total magnitude of these galaxies per arcsec² averaged over the smallest circle (angular diameter θ_G) that contains their geometric centers, and θ_N is the angular diameter of the largest concentric circle that contains no other (external) galaxies within this magnitude range or brighter.

Выборка

86 галактик из 20-ти HCGs, в широком диапазоне дефицитов HI и находящиеся на разных эволюционных стадиях. Критерии для групп:

- Содержит по крайней мере четыре члена, соответствуют критериям Хигсона. Также были исключены “неправильные” группы, с которыми были перепутаны узловатые иррегулярные галактики.)
- Содержит по крайней мере одну спиральную галактику (так как весь интерес в газе).
- Расстояния ≤ 100 Mpc

Галактики сравнения — изолированные AMIGA
(Verdes-Montenegro et al. 2005)

ЭВОЛЮЦИЯ

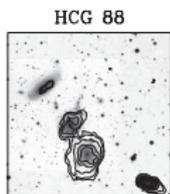
Эволюционные фазы:

- Фаза 1: HI целиком находится в галактиках.
- Фаза 2: от 30% до 60% HI удалено из диска приливными взаимодействиями
- Фаза 3a: Весь газ находится вне галактик в виде приливных хвостов.
Фаза 3b: в нескольких случаях — облако HI с общей скоростью, в которое вложены галактики

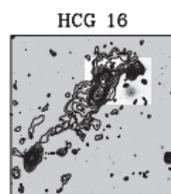
Эволюционная стадия — это показатель эволюции холодной ISM, но не всегда показатель возраста группы. Например HCG 79 (фаза 1) состоит из 3 галактик раннего типа и одной спиральной, чье звездное гало показывает то, что группа старая (Durbala 2008)

ЭВОЛЮЦИЯ

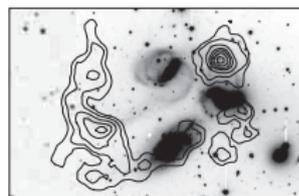
Phase 1:
Low level of interaction



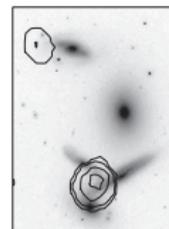
Phase 2
Multiplied tidal features



Phase 3a: No HI in the galaxies

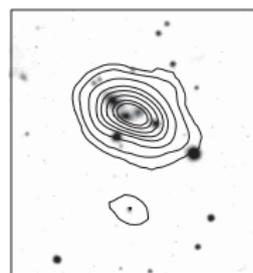


HCG 92



HCG 40

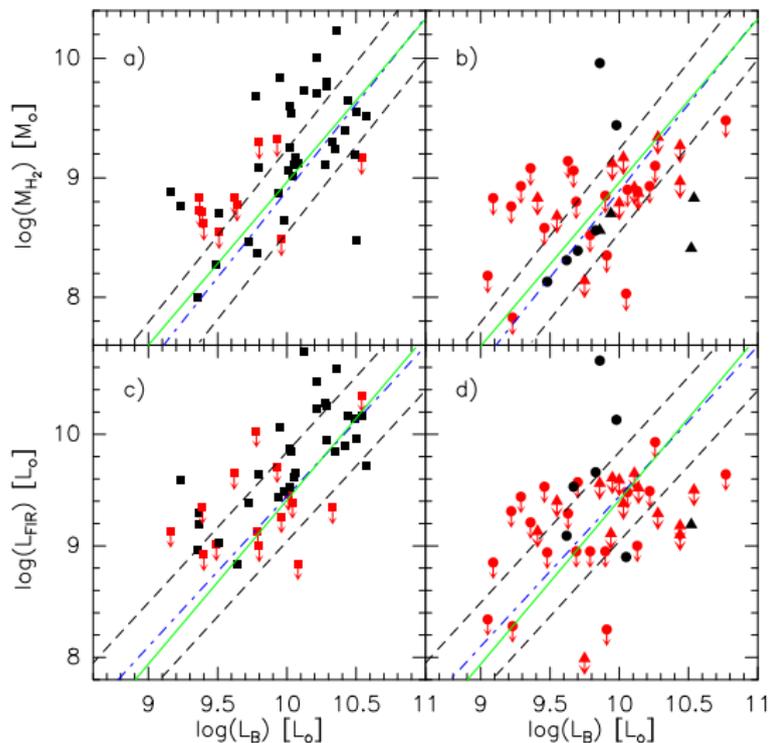
Phase 3b: HI in an envelope



HCG 49

Данные

- CO(1-0) и CO(2-1) — часть IRAM, часть NRAO
- Конверсионный фактор $\chi_{co} = N_{H_2}/I_{co} = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} (\text{K} \cdot \text{km/s})^{-1}$
- Исправления за апертуру, чтобы получить полную массу H_2 :
 $I_{co} = I_o \exp(r/r_c)$. Это предполагает, что распределение молекулярного газа в диске галактик HCGs такое же, как и в галактиках поля!
- 60 и 100 μm FIR — ADDSCAN/SCANPI



Для спиралей есть зависимость $M_{H_2}(L_B)$ и $L_{fir}(L_B)$, причем разница для HCGs (зеленая линия) с изолированными галактиками (синяя штрих-пунктирная линия) не значительная.

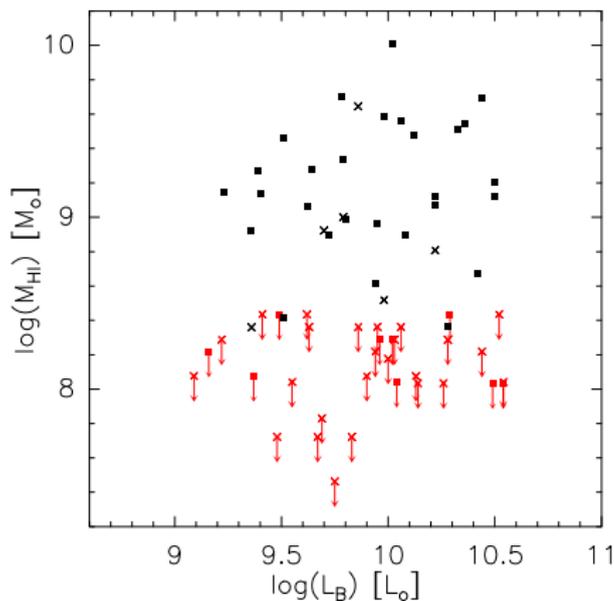


Fig. 5. M_{HI} vs L_B for late-type ($T \geq 1$, squares) and early-type (crosses) galaxies. Black symbols denote detections and red symbols upper limits.

Нет корреляции M_{HI} с L_B , что отражает то, что атомарная компонента очень подвержена влиянию окружения.

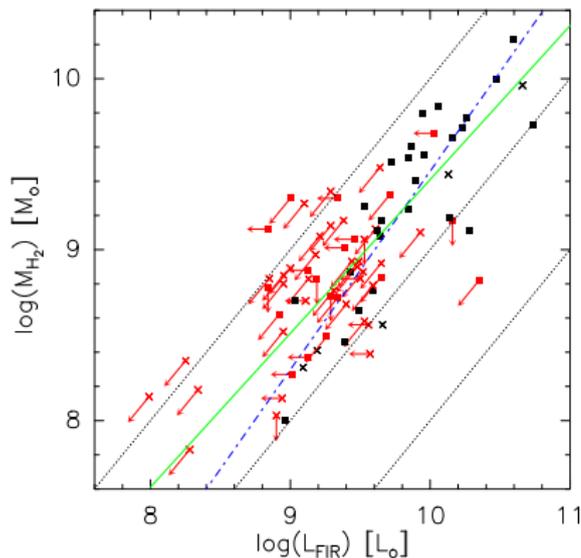


Fig. 6. M_{H_2} vs L_{FIR} for late-type ($T \geq 1$, squares) and early-type (E+S0, crosses) galaxies. The green line corresponds to the bisector fit found for HCGs galaxies, while the blue dashed-dotted line corresponds to the bisector fit found for the AMIGA isolated galaxies from Lisenfeld et al. (2011). The fits are detailed in Table 4. The dotted black lines correspond to the $L_{\text{FIR}}/M_{\text{H}_2}$ ratios 1 (left), 10 (middle) and 100 (right) L_{\odot}/M_{\odot} . Black symbols denote detections and red symbols upper limits.

Практически все галактики лежат в диапазоне $L_{\text{fir}}/M_{\text{H}_2} = 1 - 10 L_{\odot}/M_{\odot}$, что типично для нормальных галактик.

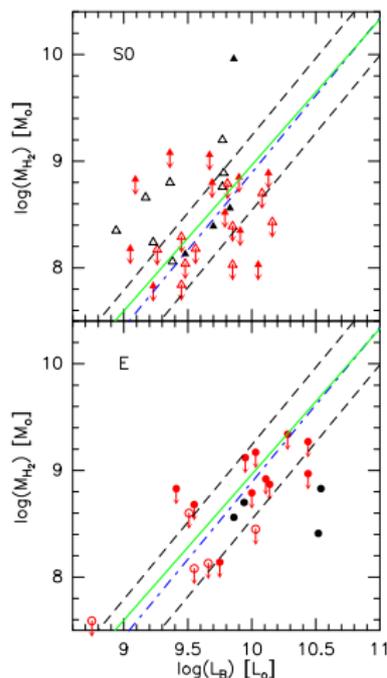


Fig. 7. M_{H_2} vs L_B for early-type galaxies in HCGs (full symbols) and from the AMIGA sample of isolated galaxies (open symbols) with distances between 20 and 70 Mpc. The lines are the same as in Fig. 5a and b. Black symbols denote detections and red symbols upper limits. *Top:* S0 galaxies (triangles), *Bottom:* elliptical galaxies (circles).

Для ранних типов в HCGs:

- Для изолированных галактик тех же типов и расстояний характерны более высокие M_{H_2} для тех же L_B (?). Если S0 галактики в плотном окружении происходят от ободранных спиралей, это может значить, что молекулярный газ также удаляется при этом процессе.
- Интересно, что диапазон светимостей L_B для S0 галактик HCGs такой же, как и у изолированных, а для E — на полпорядка величины более яркие.
- FIR светимость для E в группах практически такая же, как и в изолированных.

	HCGs		AMIGA ⁽¹⁾	
	Mean	n_{UL}/n	Mean	n_{UL}/n
$\log(L_B) (L_\odot)$	9.95±0.06	0/46	9.75±0.04	0/150
$\log(M_{H_2}) (M_\odot)$	9.02±0.09	11/46	8.38±0.09	64/150
$\log(L_{FIR}) (L_\odot)$	9.53±0.09	15/45	9.16±0.05	58/150
Def(M_{H_2}) (from L_B)	-0.14±0.09	11/46	0.06±0.04	64/150
Def(M_{H_2}) (from L_K)	-0.15±0.06	10/45	-0.01±0.05	58/149
Def(L_{FIR})	-0.11±0.08	15/45	-0.09±0.04	58/150
Def(HI)	0.93±0.13	9/37	-	-
$\log(M_{H_2}/L_B)$, all L_B (M_\odot/L_\odot)	-0.96±0.08	11/46	-1.25±0.04	64/150
$\log(M_{H_2}/L_B)$, low L_B ⁽²⁾ (M_\odot/L_\odot)	-1.04±0.10	10/22	-1.36±0.05	56/103
$\log(M_{H_2}/L_B)$, high L_B ⁽³⁾ (M_\odot/L_\odot)	-0.88±0.09	1/24	-1.06±0.05	8/47
$\log(M_{H_2}/L_K)$ ($M_\odot/L_{K,\odot}$)	-1.58±0.05	10/45	-1.76±0.05	50/135
$\log(L_{FIR}/L_B)$	-0.45±0.07	15/45	-0.52±0.03	58/149

Средние величины $def(M_{H_2})$ и $def(L_{fir})$ для спиралей HCGs похожи. Избыток M_{H_2} или L_{fir} не связан с яркими объектами как таковыми. Но половина из таких галактик при ближайшем рассмотрении демонстрирует некие искажения структуры (приливные хвосты в оптике и/или HI, кинематические возмущения и т.д.)

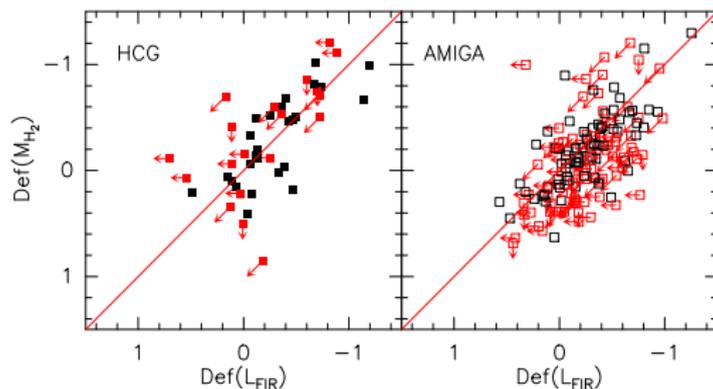


Fig. 8. M_{H_2} deficiency vs L_{FIR} deficiency for late-type ($T \geq 1$) galaxies in HCGs (left) and from the AMIGA sample (right). Red symbols represent upper limits in either M_{H_2} or L_{FIR} , and black symbols detections. The $y=x$ line is plotted as reference and does not represent a fit to the data.

Для изолированных галактик $def(M_{H_2})$ распространяется до немного меньших величин для данных $def(L_{fir})$.

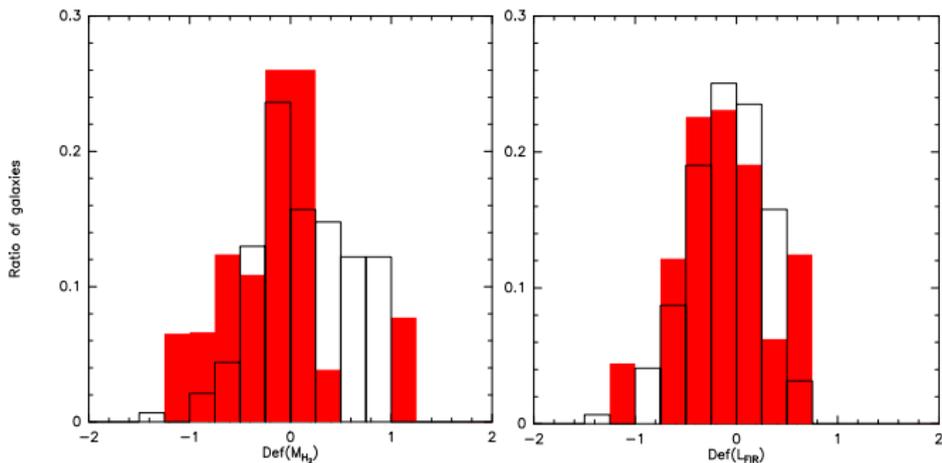


Fig. 9. $Def(M_{H_2})$ (top) and $Def(L_{FIR})$ (bottom) distribution of spiral galaxies in AMIGA (black line) and in HCGs (red filled bars), calculated with ASURV in order to take the upper limits into account.

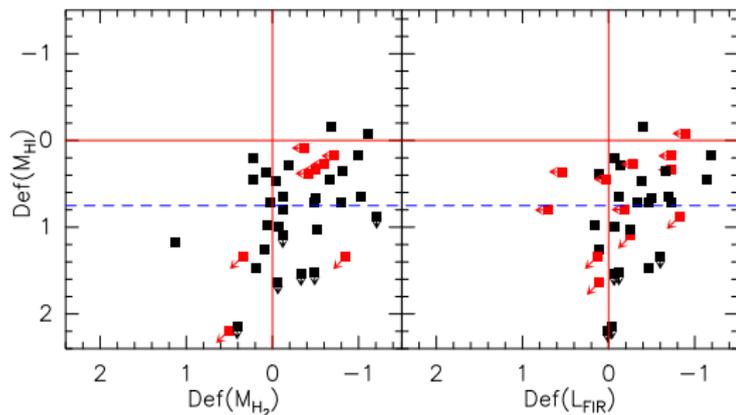
Это соответствует тому, что в HCGs на 40-60% больше M_{H_2} , чем для изолированных.

Возможные причины высокой доли H_2 :

- И в самом деле большая доля молекулярного газа.
- Большая концентрация молекулярного газа к центру в HCGs по сравнению с изолированными (из-за применения экстраполированного потока)
- Систематическая разница для конверсионного фактора χ_{co} . Он зависит от многих свойств галактик (металличность, газовая температура, газовая плотность, дисперсия скоростей), но, похоже, тут эти параметры такие же как и для изолированных.

Первые два пункта наиболее вероятны. Похоже, в HCGs более активное звездообразование в центральном компактном ядре. Этому способствует взаимодействие с окружением, что приводит к потере углового момента молекулярным газом, который и падает в центр. Эти диссипативные эффекты минимальны для изолированных галактик.

Дефицит газа



Галактики с
сильным
дефицитом HI
имеют более-менее
нормальные H_2 и
 L_{fir}

Fig. 10. M_{HI} vs M_{H_2} deficiencies (left) and M_{HI} vs L_{FIR} deficiencies (right) for spiral galaxies ($T \geq 1$). The red lines show $Def(M_{HI}) = 0$, $Def(M_{H_2}) = 0$ and $Def(L_{FIR}) = 0$, and the dashed lines give $Def(M_{H_2}) = 0.75$, separating low and highly HI-deficient galaxies in our analysis. Red symbols denote upper limits in M_{H_2} or L_{FIR} .

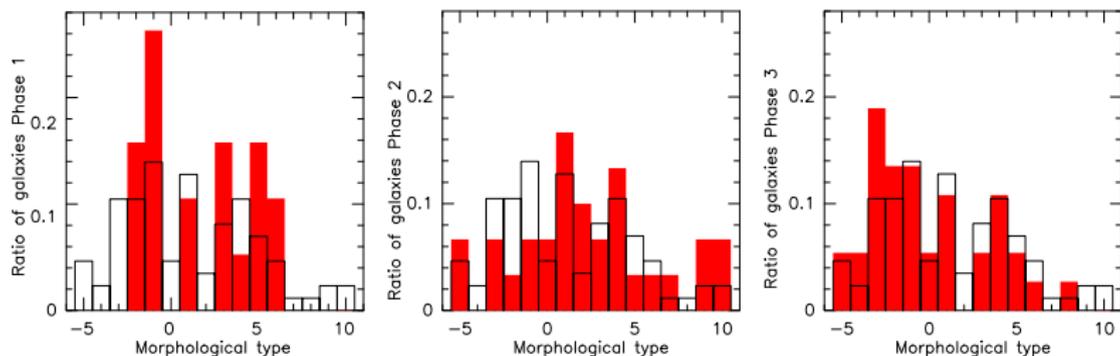
Дефицит газа

		Def(M_{H_2})	$\log(M_{H_2}/L_B)$ (M_\odot/L_\odot)	n_{UL}/n	$\log(M_{H_2}/L_K)$ ($M_\odot/L_{K,\odot}$)	n_{UL}/n
Total		-0.14±0.09	-0.96±0.08	11/46	-1.58±0.05	10/45
HI content of galaxies	Def(HI)<0.75	-0.34±0.10	-0.82±0.10	5/21	-1.40±0.07	4/20
	Def(HI)>0.75	-0.07±0.16	-1.15±0.13	3/16	-1.77±0.08	3/16
HI content of the group	Normal	-0.38±0.20	-0.76±0.15	1/6	-1.52±0.11	0/5
	Slightly deficient	-0.08±0.11	-0.99±0.10	8/32	-1.59±0.07	8/32
	Very deficient	-0.21±0.08	-0.95±0.10	2/8	-1.60±0.12	2/8
Evolutionary Phase	Phase 1	-0.35±0.14	-0.76±0.11	2/11	-1.46±0.09	1/10
	Phase 2	-0.16±0.13	-0.92±0.12	5/21	-1.55±0.07	5/21
	Phase 3	-0.04±0.09	-1.07±0.08	4/14	-1.71±0.11	4/14
		Def(L_{FIR})	$\log(L_{FIR}/L_B)$	n_{UL}/n	$\log(L_{FIR}/L_K)$ ($L_\odot/L_{K,\odot}$)	n_{UL}/n
Total		-0.11±0.08	-0.45±0.07	15/45	-1.14±0.09	14/44
HI content of galaxies	Def(HI)<0.75	-0.32±0.11	-0.28±0.11	6/20	-0.84±0.10	5/19
	Def(HI)>0.75	0.03±0.11	-0.60±0.11	6/16	-1.38±0.13	6/16
HI content of the group	Normal	-0.19±0.19	-0.36±0.11	3/6	-1.07±0.17	2/5
	Slightly deficient	-0.08±0.09	-0.45±0.09	10/31	-1.15±0.11	10/31
	Very deficient	-0.23±0.08	-0.37±0.07	2/8	-1.03±0.14	2/8
Evolutionary Phase	Phase 1	-0.17±0.15	-0.36±0.13	4/11	-1.03±0.13	3/10
	Phase 2	-0.12±0.13	-0.43±0.13	7/20	-1.11±0.14	7/20
	Phase 3	-0.12±0.05	-0.45±0.04	4/14	-1.11±0.09	4/14

Дефицит газа

		Def(M_{H_2})	$\log(M_{H_2}/L_B)$ (M_\odot/L_\odot)	n_{UL}/n	$\log(M_{H_2}/L_K)$ ($M_\odot/L_{K,\odot}$)	n_{UL}/n
Total		-0.14±0.09	-0.96±0.08	11/46	-1.58±0.05	10/45
HI content of galaxies	Def(HI)<0.75	-0.34±0.10	-0.82±0.10	5/21	-1.40±0.07	4/20
	Def(HI)>0.75	-0.07±0.16	-1.15±0.13	3/16	-1.77±0.08	3/16
HI content of the group	Normal	-0.38±0.20	-0.76±0.15	1/6	-1.52±0.11	0/5
	Slightly deficient	-0.08±0.11	-0.99±0.10	8/32	-1.59±0.07	8/32
	Very deficient	-0.21±0.08	-0.95±0.10	2/8	-1.60±0.12	2/8
Evolutionary Phase	Phase 1	-0.35±0.14	-0.76±0.11	2/11	-1.46±0.09	1/10
	Phase 2	-0.16±0.13	-0.92±0.12	5/21	-1.55±0.07	5/21
	Phase 3	-0.04±0.09	-1.07±0.08	4/14	-1.71±0.11	4/14
		Def(L_{FIR})	$\log(L_{FIR}/L_B)$	n_{UL}/n	$\log(L_{FIR}/L_K)$ ($L_\odot/L_{K,\odot}$)	n_{UL}/n
Total		-0.11±0.08	-0.45±0.07	15/45	-1.14±0.09	14/44
HI content of galaxies	Def(HI)<0.75	-0.32±0.11	-0.28±0.11	6/20	-0.84±0.10	5/19
	Def(HI)>0.75	0.03±0.11	-0.60±0.11	6/16	-1.38±0.13	6/16
HI content of the group	Normal	-0.19±0.19	-0.36±0.11	3/6	-1.07±0.17	2/5
	Slightly deficient	-0.08±0.09	-0.45±0.09	10/31	-1.15±0.11	10/31
	Very deficient	-0.23±0.08	-0.37±0.07	2/8	-1.03±0.14	2/8
Evolutionary Phase	Phase 1	-0.17±0.15	-0.36±0.13	4/11	-1.03±0.13	3/10
	Phase 2	-0.12±0.13	-0.43±0.13	7/20	-1.11±0.14	7/20
	Phase 3	-0.12±0.05	-0.45±0.04	4/14	-1.11±0.09	4/14

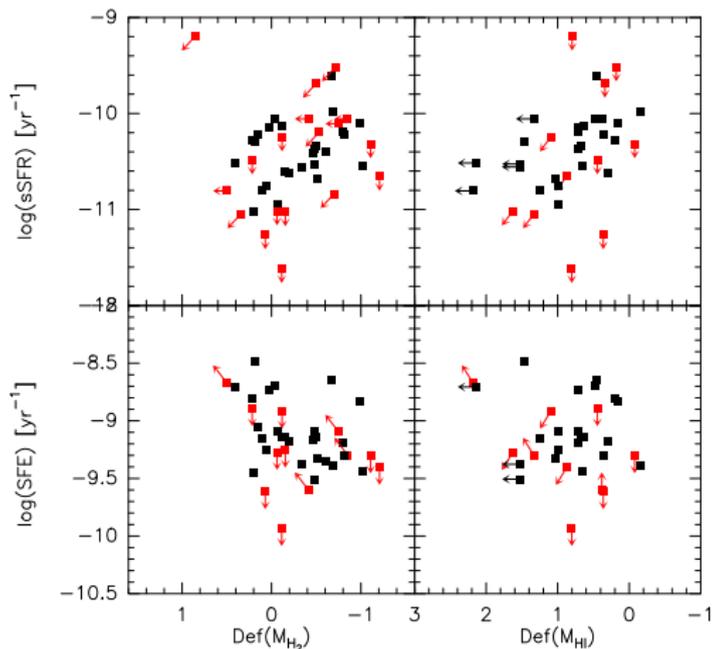
Эволюция типов



“Очень отчетливо меняется морфологический тип с эволюционной фазой. Количество S0 и E возрастает на фазе 3. Поэтому S0 в HCGs могут быть ободранными спиралями” (с)

Звездообразование

- $SFR = 2.2 \cdot 10^{-10} L_{fir}$
- SFE (SFR/M_{H_2}) для галактик HCGs немного выше, чем для изолированных, хотя четкой разницы нет.
- sSFR — темпы звездообразования на массу звезд (по K)
- Почти не наблюдается зависимости ни от дефицита HI, ни H_2 .



Звездообразование

Table 9. Mean $\log(\text{sSFR})$ and $\log(\text{SFE})$ as a function of $\text{Def}(M_{\text{HI}})$ and $\text{Def}(M_{\text{H}_2})$ for spiral galaxies ($T \geq 1$). Mean values are calculated as explained in Table 6.

	$\log(\text{sSFR})(\text{yr}^{-1})$	
	Mean	n_{UL}/n
$\text{Def}(M_{\text{HI}}) < 0.75$	-10.31 ± 0.10	(5/19)
$\text{Def}(M_{\text{HI}}) > 0.75$	-10.85 ± 0.13	(6/16)
$\text{Def}(M_{\text{H}_2}) < -0.25$	-10.33 ± 0.07	(6/22)
$\text{Def}(M_{\text{H}_2}) > -0.25$	-10.81 ± 0.12	(8/22)
	$\log(\text{SFE})(\text{yr}^{-1})$	
	Mean	n_{UL}/n
$\text{Def}(M_{\text{HI}}) < 0.75$	-9.08 ± 0.07	(5/19)
$\text{Def}(M_{\text{HI}}) > 0.75$	-9.16 ± 0.12	(6/16)
$\text{Def}(M_{\text{H}_2}) < -0.25$	-9.05 ± 0.07	(6/22)
$\text{Def}(M_{\text{H}_2}) > -0.25$	-9.04 ± 0.13	(8/22)

For each subsample, n is the number of galaxies and n_{UL} is the number of upper limits.

Хотя дефицит атомарного водорода не влияет на абсолютные SFR и SFE, но отражается на SFR на единицу звездной массы.

В процессе эволюции:

- Галактики в HCGs начинают с нулевыми дефицитами
- Затем в течении ранней эволюционной фазы приливные взаимодействия увеличивают с одной стороны переход $HI \rightarrow H_2$ и с другой стороны — обдирают HI. Это ведет к $def(M_{HI}) > 0$ и $def(M_{H_2}) < 0$.
- В финале множественные взаимодействия внутри группы обдирают большую часть HI в результате чего $def(M_{HI}) \gg 0$, и как следствие растет $def(M_{H_2})$.
- Все вместе это ведет к возрастанию доли S0 в HCGs на поздних стадиях их эволюции.

- Соотношения между M_{H_2} , L_{fir} и L_b в галактиках HCGs не сильно отличаются от таковых для изолированных.
- Есть небольшой избыток M_{H_2} , который можно объяснить тремя способами: действительно избыток молекул, большая концентрация H_2 во внутренней области диска, другой χ_{co}
- Диапазон светимостей S0 для HCGs такой же, как и для изолированных, однако, E на полвеличины более яркие.
- Соотношения $L_{fir}/M_{H_2} = 1 - 10 L_o/M_o$ такое же, как и для изолированных
- Сильный дефицит HI (только 12% от ожидаемого количества)
- SFE в HCGs лишь незначительно ниже, чем в изолированных и не зависит ни от $def(M_{HI})$, ни от $def(M_{H_2})$
- sSFR возрастает с убыванием $def(M_{HI})$, ни от $def(M_{H_2})$, хотя влияния HI на обычную SFR нет
- Убывание $def(M_{H_2})$ в процессе эволюции группы
- нет изменения глобального дефицита HI, что предполагает, что молекулярный газ и ЗО изменяются от одиночных взаимодействий, а не непосредственно из-за локального окружения (?)