

УДК: 524.333

КЛАССИЧЕСКИЕ ЦЕФЕИДЫ И РАССТОЯНИЯ HST
ПРОГРАММНЫХ ГАЛАКТИК

Г.В.АБРАМЯН

Поступила 21 мая 2003

Принята к печати 19 мая 2004

С помощью полученных нами ранее PL-соотношений и с применением отличающейся от принятой Фридманом и др. методики, были пересмотрены расстояния HST программных галактик. Полученные расстояния этих галактик в среднем имеют более высокие внутренние точности, чем достигнутые ранее другими авторами. Кроме того, при выводе расстояний не были использованы коррекции за металличность и за неполноту выборки КЦ. Несмотря на это, принятые нами модули расстояний с дисперсией ± 0.395 совпадают с данными Фридмана и др., что свидетельствует о незначительности или даже полном отсутствии указанных двух эффектов для выборки КЦ HST программных галактик.

1. *Введение.* С целью определения постоянной Хаббла в Основном Проекте Космического Телескопа Хаббла (Hubble Space Telescope Key Project - HSTKP) [1], в качестве первичных индикаторов расстояний были приняты классические цефеиды (КЦ). Постулируя значение $18^m.50$ в качестве модуля расстояния Большого Магелланова Облака (БМО) и основываясь на полученных Удельским и др. [2] соотношениях период-светимость (PL) для полос V и I КЦ БМО, Фридман и др. [1] определили расстояния 31 галактики (расположенные в объеме с радиусом ~ 25 Мпк). Полученные таким способом расстояния авторами [1] были использованы для калибровки вторичных методов определения расстояний галактик, тем самым расширяя как количество объектов с известными расстояниями, так и объем рассматриваемого пространства (примерно до расстояний ~ 400 Мпк). Таким образом, ныне действующая шкала внегалактических расстояний целиком опирается на КЦ и поэтому дальнейшее уточнение расстояний сравнительно близлежащих галактик с помощью КЦ пока что остается весьма актуальной проблемой.

С другой стороны, в наших работах [3-5] получен ряд новых результатов, относящихся к абсолютной калибровке (с помощью HIPPARCOS параллакс) и точности PL-соотношений, пульсирующих в фундаментальной моде (FU) КЦ.

В данной работе, с целью улучшения точности определения расстояний сравнительно близлежащих галактик, нами предпринята попытка пересмотра этих расстояний на основе полученных в работе [5] абсолютных калибровок

КЦ и с помощью методики, отличающейся от принятой в [1].

2. *Вопрос выбора PL-соотношений.* На Космическом Телескопе Хаббла (HST) наблюдательный материал для КЦ программных галактик был получен в полосах V и I [1]. По этой причине основное внимание будем уделять PL-соотношениям именно для этих полос. Сводка наиболее обсуждаемых в настоящее время в научной литературе V и I PL-соотношений, наряду с полученными нами в работе [5] аналогичными данными, приведена в табл.1, столбцы которой обозначают: 1 - порядковый номер; 2, 3, 4 - полоса, нуль-пункт и наклон PL-соотношений, соответственно; 5, 6 - значения модуля расстояния БМО, вычисленные нами на основе FU КЦ с $\log P > 0.4$ выборки OGLE [2]; 7 - примечания; 8 - источники PL-соотношений.

Приведенные в табл.1 значения модуля расстояния БМО нами были получены двумя способами: а) с использованием свободных от межзвездного поглощения OGLE V_0 и I_0 величин и при $R_V/(R_V - R_I) = 2.55$ (согласно [2]), б) согласно работе [3] при $R_V/(R_V - R_I) = 2.443$, $R_V = 3.19$ и:

$$E(\langle B \rangle - \langle V \rangle) = -0.374 - 0.166 \log P + 0.766(\langle V \rangle - \langle I \rangle). \quad (1)$$

Отметим, что наши решения 1-3 (табл.1) получены для наклонов PL-соотношений на основе FU КЦ БМО с $\log P > 0.4$ выборки OGLE [2], а 4-6 - 25 FU КЦ Галактики выборки Джерена и др. [6]. Решения 13 и 14 Джерена и др. [6] также были получены для наклонов PL-соотношений FU КЦ Галактики. Остальные все решения табл.1 относятся к FU КЦ БМО. Кроме решений под номерами 7-9 и 11-14, для всех остальных нуль-пункты определены на основе HIPPARCOS параллаксов. Нуль-пункты решений 7-9 определены Удельским и др. [2] с помощью последовательности красных звезд (red clump) БМО, а нуль-пункты решений 11-14 определены Джереном и др. [6] на основе расстояний 28 FU КЦ Галактики (измеренные авторами работы [6] с помощью метода Эванса-Барнеса). Из табл.1 видно, что применение решений 7-9 и 11-14 к FU КЦ БМО приводит к короткой шкале внегалактических расстояний. Кроме этих, остальные все решения, как уже было отмечено, основаны на HIPPARCOS нуль-пунктах и определенные на их основе значения модуля расстояния БМО расположены в пределах: для случая а) $18^m.45 < DM_{\text{БМО}} < 18^m.59$ (ширина интервала - $0^m.14$) и для б) $18^m.51 < DM_{\text{БМО}} < 18^m.62$ (ширина интервала - $0^m.11$). Таким образом, ширина интервала сужается на $0^m.03$, когда в качестве исходных данных принимаются параметры выше рассмотренного случая б), что позволяет нам выбрать его основным.

Дальнейшее рассмотрение табл.1 показывает, что нуль-пункт PL-соотношения $M_I = -3.05 \log P - 1.84$ Ланоикса и др. [13] значительно отличается как от наших, так и от данных Гроновагена и Оудмажера

Таблица 1

СВОДКА V И I PL-СОТНОШЕНИЙ FU КЦ

№	По- лоса	α σ_α	δ σ_δ	DM_{LMC} σ_{DM} сл. а)	DM_{LMC} σ_{DM} сл. б)	Исходные данные, на основе которых получены PL-соотношения	Ис- точ- ник
1	V	-1.416 0.121	-2.754 0.015	18.520 0.273	18.549 0.084	α - на основе HIPPARCOS параллаксов, δ - на основе выб.	[5]
2	I	-1.915 0.121	-2.971 0.015	18.535 0.176	18.560 0.084	OGLE [2], $E(B-V)$ и R_λ - [3]	
3	W_{VI}	-2.636 0.114	-3.284 0.015	18.490 0.084	18.577 0.084		
4	V	-1.224 0.115	-2.996 0.092	18.487 0.280	18.516 0.098		
5	I	-1.724 0.115	-3.216 0.099	18.505 0.184	18.530 0.099	Джесна и др. [6], $E(B-V)$ и R_λ - [3]	
6	W_{VI}	-2.441 0.114	-3.533 0.117	18.459 0.097	18.546 0.099		
7	V	-1.180 -	-2.760 0.031	18.288 0.273	18.317 0.084	α - на основе БМО- red clump, δ - на основе выборки OGLE [2],	
8	I	-1.66 -	-2.962 0.021	18.274 0.176	18.299 0.084	$E(B-V)$ и R_λ - OGLE [2] (ошибки нуль-пунктов в [2] не приведены)	
9	W_{VI}	-2.41 -	-3.277 0.014	18.260 0.084	18.347 0.084		
10	W_{VI}	-2.644 0.100	-3.255 0.010	18.479 0.084	18.566 0.084	α, δ - на основе строк 7 и 8 данной таблицы для случая $DM_{BMO} = 18^m.50$, R_λ - Карделли и др. [7]	[1]
11	V	-1.294 0.087	-2.769 0.073	18.407 0.273	18.437 0.084	α, δ - на основе выборки Джесна и др. [6], R_λ - [8], $E(B-V)$ - [9]	
12	I	-1.726 0.064	-3.041 0.054	18.392 0.177	18.414 0.085		
13	V	-1.021 0.164	-3.037 0.138	18.311 0.280	18.340 0.103	α, δ - на основе выборки Джесна и др. [6], R_λ , $E(B-V)$ - из раз- личных источников собраны в [6]	
14	I	-1.435 0.159	-3.329 0.132	18.290 0.192	18.315 0.113		
15	V	-1.430 0.100	-2.810 0.060	18.570 0.273	18.600 0.085	α - на основе HIPPARCOS паралл. δ - из работы Лени и Стоби [10], R_λ - [8], $E(B-V) - (B-V)_0$ из [10]	[11]
16	V	-1.440 0.050	-2.770 0.080	18.554 0.273	18.584 0.084	α - на основе HIPPARCOS паралл., δ - из работы Мадора и Фридман [12], R_λ - [8], $E(B-V) - (B-V)_0$ из [10]	
17	I	-1.810 0.090	-3.050 0.070	18.512 0.177	18.537 0.086		
18	V	-1.411 0.100	-2.810 0.060	18.551 0.273	18.581 0.085	α - на основе HIPPARCOS паралл. δ_V - [10], δ_I - [6,14], δ_{IV} - [14] R_λ - [8], $E(B-V) - (B-V)_0$ из [10]	
19	I	-1.918 0.111	-3.050 0.070	18.590 0.177	18.615 0.086		
20	W_{VI}	-2.557 0.104	-3.411 0.040	18.495 0.087	18.582 0.088		

[15] и весьма вероятно, что авторами [13] получен значительно смещенный нуль-пункт для этого решения. В пользу данного вывода говорит и следующий факт. На основе V и I PL-соотношений Ланоикса и др. [13] для модуля расстояния БМО получаются значения $18^m.58$ и $18^m.54$, соответственно (при $R_V/R_I = 1.69$ и $E(B-V)$, согласно формуле (1)). Теперь, если на основе этих же PL-соотношений и для $R_V/R_I = 1.69$ построить $W_{\text{пл}}$ PL-соотношение и с его помощью вычислить модуль расстояния БМО, то получается $18^m.47$, то есть имеется внутренняя несогласованность порядка $0^m.1$ нуль-пунктов PL-соотношений Ланоикса и др. [13], что дает нам основание исключить эти соотношения из дальнейшего рассмотрения.

Наклоны PL-соотношений, используемых Фистом и Катчпол [11], а также Гроновагеном и Оудмажером [15] (2.81 ± 0.06 и 3.05 ± 0.07 для V и I , соответственно), существенно отличаются от аналогичных величин, полученных Удельским и др. [2] (2.760 ± 0.031 и 2.962 ± 0.021) и подтвержденных нами в [4] (2.754 ± 0.015 и 2.971 ± 0.015) на основе выборки FU КЦ БМО OGLE. Так как OGLE выборка КЦ БМО в настоящее время является наиболее многочисленной и однородной, то нам кажется обоснованным отдавать предпочтение OGLE наклонам для V и I . В пользу данного вывода говорит также и тот факт, что согласно [2,16] для FU КЦ галактик БМО, ММО и IC 1613 получаются одинаковые наклоны PL-соотношений, несмотря на существенное различие металличности входящих в их состав КЦ ($Fe/H = -0.3; -0.7$ и -1.0 dex, соответственно).

Резюмируя вышеприведенные рассуждения и основываясь на приведенных нами в [5] доводах в пользу значения модуля расстояния БМО: $DM_{LMC} = 18^m.569 \pm 0^m.117$, приходим к заключению, что наиболее обоснованными, среди приведенных в табл.1 решений, по всей вероятности, можно считать полученные нами в работе [5] следующие PL-соотношения

$$M_V = -1.416 (\pm 0.121) - 2.754 (\pm 0.015) \log P \quad \sigma = \pm 0.08, \quad (2)$$

$$M_I = -1.915 (\pm 0.121) - 2.971 (\pm 0.015) \log P \quad \sigma = \pm 0.08. \quad (3)$$

Основное преимущество наших PL-соотношений (2) и (3) заключается в том, что нуль-пункты определены с помощью HIPPARCOS параллакс, а наклоны - с помощью OGLE выборки FU КЦ БМО. На основе последних двух выражений и согласно [3], принимая $R_V/(R_V - R_I) = 2.443 (\pm 0.026)$, для определения модулей расстояний FU КЦ получаем следующую формулу:

$$DM = \langle V \rangle - 2.443 (\pm 0.026) (\langle V \rangle - \langle I \rangle) + 2.636 (\pm 0.114) + 3.284 (\pm 0.015) \log P \quad (4)$$

$$\sigma = \pm 0.08.$$

Для сравнения с формулой (4), ниже приведено аналогичное соотношение, которое было использовано в [1] для вычисления модулей расстояний HSTKP галактик:

$$DM = \langle V \rangle - 2.45(\langle V \rangle - \langle I \rangle) + 5.899 (\pm 0.01) + 3.255 (\pm 0.01)(\log P - 1) \quad (5)$$

$$\sigma = \pm 0.08.$$

Здесь уместно напомнить, что выражение (5) в [1] получено при $DM_{LMC} = 18^m.50$. Но, во-первых, согласно нашим расчетам, с применением того же выражения (5) к 673 FU КЦ БМО с $\log P > 0.4$ выборки OGLE получается: $DM_{LMC} = 18^m.560 (\pm 0.088)$, то есть предположение авторов HSTKP о расстоянии БМО не соответствует их выражению (5). И, во-вторых, так как значение 18.50 постулируется, то есть является безошибочной величиной, то величина ± 0.01 в выражении (5) на самом деле не является истинным значением среднеквадратичной ошибки нуля-пункта этого соотношения и характеризует только внутреннюю ошибку определения расстояния БМО. Последние две неувязки PL-соотношения (5) устранены в случае нашего выражения (4), что и является основным отличием этих двух формул.

Пересмотр расстояний HST программных галактик будем проводить на основе наших PL-соотношений (2,3), наклоны которых определены с помощью 673 FU КЦ БМО OGLE выборки [2,4], а нуля-пункты - на основе HIPPARCOS параллакс 260 КЦ Галактики [5].

3. *Методика определения расстояний HST программных галактик.* Расстояния HSTKP галактик Фридманом и др. [1] были определены с помощью непосредственного применения к выборкам КЦ этих галактик выражения (5). Полученные таким способом расстояния затем корректировались за металличность КЦ и за смещение, связанное с неполнотой соответствующих выборок. Детальное рассмотрение данной схемы приводит к выводу, что: а) непосредственное применение выражения (5), с точки зрения точности определения расстояний, не является наилучшим способом решения данного вопроса; б) по крайней мере для полос V и I не существует заметной зависимости наклонов и нуля-пунктов PL-соотношений от металличности КЦ и с) при корректном подходе к определению расстояний галактик не возникает смещение модулей расстояний из-за неполноты соответствующих выборок КЦ. Нам удалось выяснить, что видоизменив принятую в [1] методику определения расстояний, для большинства программных галактик HST можно получить более высокие внутренние точности, чем были достигнуты в работе [1]. Изложим смысл нашего подхода к данному вопросу на примере одной, наугад выбранной из программных галактик HST - NGC 3627.

Отметим, что дальнейшие расчеты выполнены на основе наблюдательных данных, собранных во внегалактической части электронного каталога Патуреля и др. [17], где кроме полученных в рамках HSTKP данных о КЦ, включены также и результаты аналогичных наблюдений на HST других авторов.

Достоверно установлено, что дисперсия обычных, неоткалиброванных V и I PL-соотношений без учета межзвездного поглощения, по сравнению с PL-соотношением на основе W_{VI} функции, значительно выше, так как W_{VI} величины свободны от межзвездного поглощения согласно следующему известному выражению:

$$W_{VI} = \langle V \rangle - (R_V / (R_V - R_I)) (\langle V \rangle - \langle I \rangle) = \langle V \rangle_0 - (R_V / (R_V - R_I)) (\langle V \rangle - \langle I \rangle)_0. \quad (6)$$

Рассмотрим PL-соотношения для выборки 104 КЦ галактики NGC 3627. Эти соотношения приведены в табл.2 (межзвездное поглощение не учтено), где для сравнения приведены также соответствующие данные для OGLE выборки FU КЦ БМО с $\log P > 0.4$. Столбцы табл.2 обозначают: 1 - полоса; 2 - нуль-пункт PL-соотношения (без абсолютной калибровки); 3 - среднеквадратичная ошибка нуль-пункта; 4 - наклон PL-соотношения; 5 - среднеквадратичная ошибка наклона; 6 - дисперсия PL-соотношения; 7 - коэффициент корреляции; 8 - количество КЦ в соответствующей выборке. Приведенные в табл.2 W_{VI} PL-соотношения получены двумя способами: 1) обычным способом, когда W_{VI} выражается левой частью формулы (6) и 2) когда в (6) показатель цвета $(V - I)$ заменяется выражением $(\langle V \rangle - \langle I \rangle) = A + B \log P$ (зависимость период-наблюдаемый цвет) и W_{VI} функция выражается формулой:

$$W_{VI} = \langle V \rangle - R_V / (R_V - R_I) (A + B \log P). \quad (7)$$

Как следует из табл.2, в случае БМО действительно дисперсия W_{VI} PL-соотношения (случай 1) значительно меньше от соответствующих величин для V и I . Для галактики NGC 3627 наблюдается обратное этому явление, то есть дисперсия W_{VI} PL-соотношения (случай 1) получается примерно в 1.5 раза больше, чем для V и I (без учета межзвездного поглощения). Применение W_{VI} функции, согласно выражению (7) для NGC 3627 уменьшает дисперсию W_{VI} PL-соотношений (случай 2 в табл.2) до уровня соответствующих величин для V и I , а для БМО, наоборот, увеличивает дисперсию W_{VI} PL-соотношения (случай 2 в табл.2).

Как следует из табл.3, где приведены дисперсии V , I (без учета межзвездного поглощения) и W_{VI} PL-соотношений выборок КЦ для 32 из 35 HST программных галактик, приведенных в работе [17], аналогичная с NGC 3627 ситуация наблюдается у большинства из них. Отметим, что в этой таблице для галактики IC 1613, кроме HST данных, приведены также данные, полученные с помощью 85 FU КЦ выборки OGLE на основе работы Удельского и др. [16]. Наблюдения КЦ HSTKP галактики NGC 2403 выполнены только в полосе V , а для галактик NGC 6822, SEX A и SEX B количество наблюденных КЦ составляет всего 1, 3 и 3, соответственно и по этой причине упомянутые 4 галактики в дальнейшем не будем рассматривать.

Таблица 2

V , I и W_{VII} PL-СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ КЦ ГАЛАКТИК
NGC 3627 И БМО

Полоса	α	σ_α	δ	σ_δ	σ	ρ	N
NGC 3627							
V	27.400	0.377	-1.539	0.266	0.513	0.498	104
I	26.519	0.364	-1.698	0.257	0.506	0.548	104
W_{VII} (1)	25.247	0.507	-1.929	0.358	0.708	0.470	104
W_{VII} (2)	25.247	0.377	-1.927	0.265	0.524	0.583	104
БМО							
V	17.597	0.039	-2.788	0.057	0.304	0.883	673
I	16.915	0.025	-2.986	0.036	0.191	0.955	678
W_{VII} (1)	15.941	0.010	-3.284	0.015	0.079	0.993	673
W_{VII} (2)	15.941	0.039	-3.284	0.057	0.304	0.911	673

Теперь попробуем разобраться в причинах возникновения описанного выше явления. Если W_{VII} функция выражается согласно (6) и для определения расстояния галактики применяется формула типа (4), то это означает, что производится учет межзвездного поглощения для каждой КЦ данной выборки в отдельности. В случае применения W_{VII} функции согласно (7) происходит учет среднего для данной выборки межзвездного поглощения, а не по каждой КЦ в отдельности. Теперь, если величина ошибок определения усредненных по интенсивности звездных величин КЦ намного меньше дисперсии значений межзвездного поглощения для данной выборки КЦ, как это имеет место для FU КЦ БМО выборки OGLE, то учет межзвездного поглощения по отдельным КЦ значительно снижает дисперсию W_{VII} PL-соотношений, следовательно и внутренние ошибки определения расстояния галактики. В обратном случае, то есть когда фотометрические ошибки сравнимы с дисперсией межзвездного поглощения для данной выборки или по величине мало уступают ей, то учет межзвездного поглощения по отдельным КЦ становится причиной увеличения дисперсии W_{VII} PL-соотношения, следовательно и больших отклонений расстояний отдельных КЦ от их истинного значения. Эти отклонения, в большинстве случаев являющиеся следствием фотометрических ошибок и будучи не связанными с межзвездным поглощением, становятся причиной понижения точности определения расстояния соответствующей галактики, как это имеет место, например, в случае NGC 3627.

Данный анализ показывает, что непосредственное применение формулы типа (5) не всегда оправдано и получение с ее помощью сравнительно высокоточных расстояний галактик не является строго гарантированным для любой выборки КЦ вне зависимости от фотометрических ошибок.

Как следует из табл.3, для многих HST программных галактик наблюдается аналогичная с NGC 3627 ситуация и по этой причине, непосредственное применение формулы (5), как это сделано в работе [1], приводит к искусственному завышению внутренних ошибок определения расстояний этих объектов. Отметим, что Патурель и др. [18] также рассмотрели вопрос расстояний галактик на основе КЦ по той же методике, что и в [1], но на основе более обширного наблюдательного материала, чем в [1]. Несмотря на это, полученные ими среднеквадратичные ошибки определения расстояний, в основном, мало отличаются от аналогичных величин Фридмана и др. [1].

Таблица 3

ДИСПЕРСИИ V , I и $W_{\text{пл}}$ PL-СОТНОШЕНИЙ
КЦ НСТКР ГАЛАКТИК

Галактика	N	σ_W	σ_V	σ_I	Галактика	N	σ_W	σ_V	σ_I
NGC 224	38	0.385	0.389	0.265	NGC 4258	15	0.245	0.242	0.184
NGC 300	16	0.277	0.200	0.200	NGC 4321	42	0.480	0.352	0.325
NGC 598	8	0.320	0.247	0.172	NGC 4414	9	0.367	0.286	0.241
NGC 925	60	0.484	0.310	0.298	NGC 4496A	142	0.323	0.306	0.259
NGC 1326A	17	0.368	0.271	0.271	NGC 4535	27	0.286	0.259	0.241
NGC 1365	40	0.346	0.319	0.284	NGC 4536	75	0.456	0.275	0.271
NGC 1425	29	0.209	0.248	0.177	NGC 4548	24	0.240	0.310	0.197
NGC 2090	31	0.238	0.260	0.206	NGC 4603	22	0.548	0.251	0.239
NGC 2541	28	0.417	0.171	0.217	NGC 4639	25	0.338	0.429	0.336
NGC 3031	22	0.364	0.350	0.290	NGC 4725	20	0.238	0.268	0.223
NGC 3109	14	0.876	0.329	0.499	NGC 5253	13	0.570	0.220	0.255
NGC 3198	77	0.782	0.468	0.485	NGC 5457	31	0.396	0.300	0.236
NGC 3319	33	0.511	0.343	0.339	NGC 7331	13	0.320	0.309	0.220
NGC 3351	30	0.441	0.334	0.309	IC 4182	52	0.395	0.248	0.227
NGC 3368	18	0.220	0.259	0.205	IC1613	5	0.235	0.092	0.144
NGC 3621	49	0.377	0.504	0.364	IC1613-OGLE	85	0.517	0.405	0.431
NGC 3627	104	0.708	0.513	0.506	БМО-OGLE[3]	673	0.079	0.304	0.191

Чтобы окончательно убедиться в правильности вышеприведенных рассуждений, детально рассмотрим первоначальный этап определения расстояния галактики NGC 3627 по методике Фридмана и др. [1] и по той, что ниже предлагается нами взамен. Здесь и далее пока что рассматриваются только внутренние среднеквадратичные ошибки средних расстояний галактик, то есть без учета ошибок нуль-пунктов соответствующих PL-соотношений. Согласно [1], применив формулу (5) к 104 КЦ NGC 3627, для модуля расстояния этой галактики получаем: $DM_W = 29^m.746 \pm 0.074$. Точно такое значение среднеквадратичной ошибки ($DM_W = 29^m.787 \pm 0.074$) получается и с применением нашей формулы (4), а различие численных значений модуля расстояния обусловлено различием формул (4) и (5). По величине

внутренних среднеквадратичных ошибок средних модулей расстояний галактик обе эти формулы идентичны.

Теперь вычислим модуль расстояния NGC 3627 с помощью методики, которую мы предлагаем. Для этого напомним, что:

$$E\langle(V) - \langle I \rangle\rangle = \langle(V) - \langle I \rangle\rangle - \langle(V) - \langle I \rangle\rangle_0. \quad (8)$$

Из наблюдательных данных можно получить следующую экспериментальную зависимость:

$$\langle(V) - \langle I \rangle\rangle = A + B \log P, \quad (9)$$

где A и B постоянные величины, а на основе соотношений (2) и (3) можно написать:

$$\langle(V) - \langle I \rangle\rangle_0 = 0.499 + 0.217 \log P. \quad (10)$$

Учитывая, что $A_V = 2.443 E\langle(V) - \langle I \rangle\rangle$ и $A_I = 1.443 E\langle(V) - \langle I \rangle\rangle$, согласно [3], и решение выражения (9) для 104 КЦ галактики NGC 3627 имеет следующий вид:

$$\langle(V) - \langle I \rangle\rangle = 0.881(\pm 0.198) + 0.159(\pm 0.140) \log P, \quad \sigma = \pm 0.276, \quad (11)$$

на основе выражений (8-11) получаем:

$$A_V = 0.933 - 0.142 \log P, \quad \text{и} \quad A_I = 0.551 - 0.083 \log P. \quad (12)$$

С применением выражений (12) и формул (2,3) для модуля расстояния NGC 3627 получаем: $DM_V = 29^m.787 \pm 0.058$ и $DM_I = 29^m.787 \pm 0.057$, а после усреднения значений V и I модулей расстояний для каждой КЦ в отдельности - $DM_{VI} = 29^m.787 \pm 0.055$. Сравнение среднеквадратичной ошибки последней величины с ошибкой, полученной выше методом непосредственного применения выражения (4) показывает, что предлагаемая методика обеспечивает повышение внутренней точности определения модуля расстояния галактики NGC 3627 примерно на 30%.

В терминологии W функции эквивалентами нашей схемы являются выражения:

$$DM_{W(VV)} = \langle V \rangle - 2.443(A + B \log P) + 3.284 \log P + 2.636, \quad (13)$$

$$DM_{W(II)} = \langle I \rangle - 1.443(A + B \log P) + 3.284 \log P + 2.636, \quad (14)$$

где постоянные A и B определяются с помощью избыточной системы уравнений типа (9), а выражения $DM_V \equiv DM_{VI}$ и $DM_I \equiv DM_{IV}$ являются тождествами (имея в виду выражение (10)). Изложенная методика расчетов предлагается нами взамен прямого применения формулы (4).

Следующая проблема, на которую мы обратили внимание, это вопрос "однородности выборок" КЦ для отдельных HST программных галактик. Под термином "однородные выборки" мы имеем в виду выборки, состоящие из физически однотипных объектов. Снова вернемся к выборке КЦ галактики NGC 3627. На рис.1 (левые три графика) приведены

неоткалиброванные зависимости период-светимость для КЦ этой галактики (W_{VI} PL-соотношение построено для значения $R_V/(R_V - R_I) = 2.443$, а V и I PL-соотношения - без учета межзвездного поглощения). Как видно из рис.1, имеются несколько КЦ, отклонения которых, по всей вероятности, трудно отнести к классу статистически возможных, если соответствующая выборка является однородной. Причинами таких больших отклонений могут быть как ошибочное отнесение объектов к классу КЦ, так и наложение близлежащих, но не разрешенных, изображений окрестных звезд на изображение КЦ. Возможны и другие причины этих больших отклонений, как например, сравнительно высокие фотометрические ошибки для слабых КЦ. Нам кажется, для получения достаточно однородных выборок, необходимо провести некую предварительную фильтрацию выборок. В этом случае возникает вопрос выбора оптимального фильтра, применение которого, сильно не уменьшая численность выборки, позволило бы отсекалть грубые отклонения на PL-соотношениях. Проведенные нами численные эксперименты показали, что таким фильтром может служить отсеечение объектов на PL-соотношениях V , $\log P$ и I , $\log P$ (построенные без учета межзвездного поглощения с привлечением всех известных КЦ данной выборки) согласно критерию $|\Delta m_\lambda| \geq 1.5\sigma$, где $|\Delta m_\lambda|$ абсолютное значение отклонения видимого блеска КЦ от соответствующего PL-соотношения, σ дисперсия этого соотношения. На первый взгляд кажется, что постепенное ужесточение фильтра может привести к более высоким точностям, но на самом деле это не так. Постепенное ужесточение условия фильтрации на самом деле означает постепенное уменьшение количества объектов в выборке

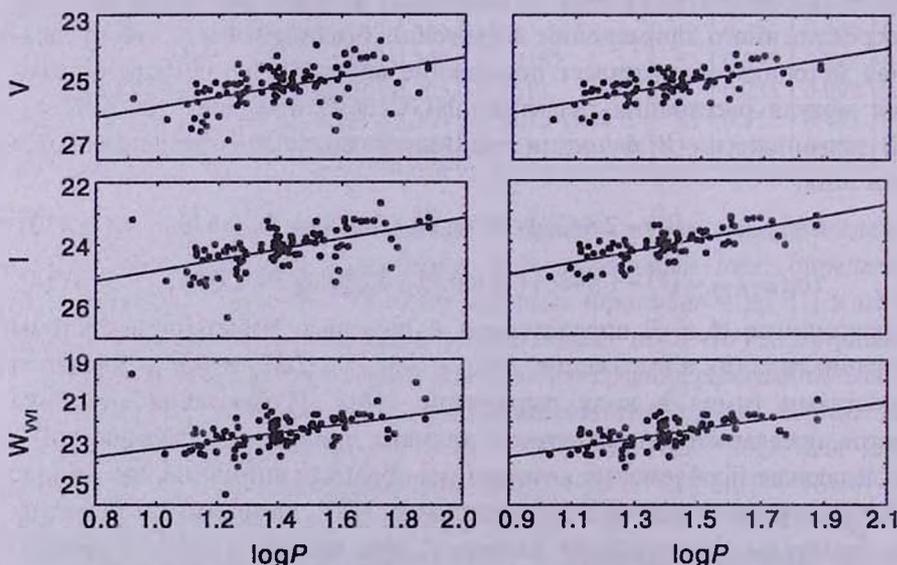


Рис.1. V , I и W_{VI} PL-соотношения выборки КЦ галактики NGC 3627, левые три графика построены без отсеечения выборки; правые три - после 1.5σ отсеечения выборки.

и в этом случае быстро начинает падать точность полученных расстояний.

Результат воздействия описанного фильтра на выборку КЦ галактики NGC 3627 виден на рис.1 (правые три графика). После применения описанного фильтра к выборке КЦ галактики NGC 3627 отсекаются всего 16 объектов и с применением вышеизложенного нашего метода для модуля расстояния этой галактики получается: $DM_{VI} = 29^m.812 \pm 0.041$. Интересно, что после фильтрации прямое применение формулы (4) приводит к значению: $DM_W = 29^m.814 \pm 0.057$, которое по точности явно превышает аналогичную величину, полученную выше без фильтрации и значительно приближается к результату, полученному с применением нашей методики.

Пример галактики NGC 3627 показывает, что в отдельных случаях, с применением 1.5σ фильтра и средних значений межзвездного поглощения, согласно формул типа (12), можно получить почти двукратный выигрыш во внутренней точности определения расстояний галактик на основе КЦ по сравнению с методом непосредственного применения формул типа (4).

4. *Результаты определения расстояний HST программных галактик на основе КЦ.* Расстояния HST программных галактик нами были определены с применением наших PL-соотношений (2,3) и вышеизложенной методики на основе КЦ внегалактической части электронного каталога Патурела и др. [17]. Результаты этих расчетов приведены в табл.4, последовательные столбцы которой обозначают: 1 - название галактики; 2 - количество N КЦ галактики согласно [17]; 3 - количество $N(\text{Фил})$ оставшихся КЦ в выборке после применения 1.5σ фильтра; 4 - модули расстояний DM_W галактик и их внутренние (без учета ошибок определения нуль-пунктов PL-соотношений) среднеквадратичные ошибки σ_{DM} , определенные в результате непосредственного применения формулы (4) и без фильтрации выборок; 5 - те же самые величины (DM_W (Фил) и σ_{DM}), полученные с применением 1.5σ фильтрации выборок; 6 - величины DM_{VI} и σ_{DM} , определенные согласно вышеизложенной нашей методике (формула 13) и с применением 1.5σ фильтрации выборок; 7, 8 - полученные в работах [1] и [18] величины DM_W и σ_{DM} ; 9 - окончательно принятый нами модуль расстояния галактики DM_{ABR} и его среднеквадратичная ошибка (с учетом ошибок определения нуль-пунктов PL-соотношений); 10 - принятые Фридман и др. [1] окончательные значения модулей расстояний HSTKP галактик DM_{FRD} (с учетом коррекции за металличность) (окончательные среднеквадратичные ошибки для каждой галактики в отдельности в [1] не приведены); 11 - принятые Патурелем и др. [18] окончательные значения модулей расстояний HST программных галактик DM_{PAT} (с учетом неполноты выборок) и их среднеквадратичные ошибки (с учетом внешних ошибок). В этой таблице для модуля расстояния галактики IC 1613 приведено также значение, полученное

нами на основе 85 FU КЦ выборки OGLE из работы [16].

Для модуля расстояния БМО в табл.4 приведены значения, полученные нами на основе двух выборок КЦ. Первая из них составлена нами [3] и включает все 673 FU КЦ OGLE выборки с $\log P > 0.4$. Вторая выборка составлена Патурелем и др. [17] и включает 718 КЦ. Хотя обе они были составлены на основе OGLE выборки КЦ БМО, но тем не менее имеется небольшое различие этих двух выборок.

Таблица 4

МОДУЛИ РАССТОЯНИЙ HST ПРОГРАММНЫХ ГАЛАКТИК

Галактика	N	N Фильт.	DM_W σ_{DM}	DM_W Фильт. σ_{DM}	DM_{VI} Фильт. σ_{DM}	DM_W [1] σ_{DM}	DM_W [18] σ_{DM}	DM_{ABR} σ_{DM}	DM_{FRD} [1]	DM_{PAT} [18] σ_{DM}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
NGC 224	38	33	24.505 0.064	24.546 0.052	24.535 0.045	24.38 0.05	24.44 0.07	24.535 0.129	24.48	24.47 0.23
NGC 300	16	13	26.535 0.091	26.594 0.078	26.593 0.057	26.53 0.07	26.36 0.29	26.593 0.134	26.50	26.45 0.32
NGC 598	8	8	24.494 0.147	24.494 0.147	24.493 0.109	24.56 0.10	24.70 0.13	24.493 0.163	24.62	24.77 0.39
NGC 925	60	48	29.792 0.063	29.852 0.051	29.852 0.030	29.80 0.04	29.77 0.07	29.852 0.124	29.81	29.80 0.16
NGC 1326A	17	15	31.116 0.095	31.147 0.099	31.148 0.065	31.00 0.09	31.11 0.10	31.148 0.137	31.04	31.18 0.17
NGC 1365	40	31	31.286 0.056	31.254 0.047	31.255 0.032	31.20 0.05	31.26 0.06	31.255 0.125	31.27	31.31 0.15
NGC 1425	29	25	31.654 0.045	31.633 0.045	31.631 0.037	31.54 0.05	31.66 0.05	31.635 0.127	31.70	31.68 0.17
NGC 2090	31	26	30.353 0.044	30.330 0.045	30.329 0.036	30.27 0.04	30.32 0.05	30.329 0.126	30.35	30.36 0.15
NGC 2541	28	24	30.346 0.081	30.367 0.058	30.366 0.028	30.26 0.07	30.33 0.06	30.366 0.124	30.25	30.39 0.16
NGC 3031	22	18	27.709 0.080	27.645 0.077	27.644 0.047	27.67 0.07	27.66 0.08	27.644 0.130	27.80	27.70 0.16
NGC 3109	14	11	25.178 0.491	25.257 0.232	25.255 0.078	-	25.38 0.22	25.255 0.144	-	25.20 0.31
NGC 3198	77	67	30.660 0.090	30.716 0.071	30.716 0.027	30.64 0.08	30.86 0.10	30.716 0.124	30.70	31.11 0.23
NGC 3319	33	28	30.697 0.091	30.773 0.078	30.771 0.045	30.64 0.09	30.70 0.08	30.771 0.129	30.62	30.83 0.18
NGC 3351	30	26	29.738 0.128	29.821 0.078	30.014 0.049	29.90 0.10	29.81 0.09	30.014 0.130	30.00	29.85 0.16
NGC 3368	18	16	30.092 0.063	30.132 0.063	30.132 0.065	29.95 0.08	30.05 0.06	30.132 0.137	30.11	30.08 0.17

Таблица 4 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
NGC 3621	49	42	29.232 0.055	29.201 0.047	29.201 0.044	29.06 0.06	29.13 0.06	29.201 0.129	29.11	29.14 0.15
NGC 3627	104	88	29.787 0.074	29.814 0.057	29.812 0.041	29.71 0.08	29.77 0.07	29.812 0.128	30.01	29.79 0.15
NGC 4258	15	10	29.544 0.067	29.583 0.059	29.582 0.037	29.44 0.07	29.45 0.07	29.582 0.127	29.51	29.48 0.16
NGC 4321	42	32	30.836 0.080	30.923 0.070	30.921 0.048	30.75 0.07	30.98 0.08	30.921 0.130	30.91	31.22 0.24
NGC 4414	9	7	31.234 0.132	31.165 0.137	31.166 0.080	31.18 0.09	31.27 0.05	31.166 0.149	31.24	31.35 0.26
NGC 4496A	142	111	30.862 0.027	30.868 0.026	30.867 0.019	30.80 0.03	30.81 0.03	30.867 0.122	30.86	30.89 0.18
NGC 4535	27	22	30.942 0.056	30.966 0.040	30.966 0.036	30.84 0.05	30.87 0.07	30.966 0.126	30.99	30.98 0.20
NGC 4536	75	69	30.787 0.053	30.795 0.054	30.794 0.025	30.78 0.04	30.79 0.07	30.794 0.126	30.87	30.93 0.19
NGC 4548	24	17	30.978 0.050	31.039 0.057	31.038 0.045	30.88 0.05	30.91 0.05	31.038 0.129	31.05	30.94 0.17
NGC 4639	25	21	31.656 0.078	31.709 0.056	31.709 0.056	31.59 0.07	31.64 0.07	31.709 0.133	31.71	31.71 0.21
NGC 4725	20	16	30.432 0.059	30.411 0.068	30.410 0.050	30.33 0.06	30.44 0.06	30.410 0.131	30.46	30.46 0.18
NGC 5253	13	10	27.488 0.165	27.568 0.126	27.557 0.042	27.54 0.10	27.39 0.18	27.557 0.128	27.49	27.48 0.34
NGC 5457	31	21	29.284 0.073	29.286 0.052	29.284 0.045	29.18 0.10	29.23 0.07	29.284 0.129	29.13	29.26 0.15
NGC 7331	13	11	30.846 0.092	30.765 0.086	30.764 0.070	30.81 0.09	30.80 0.11	30.764 0.140	30.84	30.86 0.22
IC4182	52	42	28.414 0.055	28.351 0.052	28.349 0.023	28.26 0.05	28.36 0.06	28.349 0.123	28.26	28.37 0.15
IC1613	5	4	24.333 0.120	24.246 0.107	24.245 0.083	24.24 0.14	24.19 0.11	24.245 0.147	24.06	24.20 0.20
IC1613 OGLE	85	77	24.411 0.085	24.416 0.022	24.414 0.024	-	-	24.416 0.123	-	-
LMC(OG LE-[3])	673		18.577 0.003	18.573 0.003	18.575 0.005	-	-	18.573 -	18.50 -	-
LMC(OG LE-PAT)	718	644	18.545 0.003	18.542 0.003	18.540 0.005	18.50 -	18.37 0.00	18.540	-	18.37 0.14

5. *Обсуждение полученных результатов.* Как следует из табл.4, применение вышеизложенного нашего метода позволяет примерно в 1.5-2 раза повысить внутреннюю точность определения модулей расстояний HST программных галактик (табл.4, столб. 6-8). Действительно, средняя

величина внутренних среднеквадратичных ошибок модулей расстояний в нашем случае составляет 0.045 ± 0.019 , а для [1] и [18] эта величина достигает значений - 0.071 ± 0.029 и 0.083 ± 0.049 , соответственно (для общих в трех случаях 30 галактик).

Напомним, что приведенные в табл.4 окончательно принятые авторами работ [1] и [18] значения модулей расстояний галактик DM_{FRD} и DM_{PAT} авторами этих работ получены в результате коррекции за металличность КЦ и за неполноту выборок. Причем, согласно [1], величина средней коррекции за металличность ($\sim 0^m.07$) превышает величину коррекции за неполноту выборок ($\sim 0^m.01$). Обратная этой ситуация была выявлена авторами работы [18]. В [18] величина коррекции за металличность получилась ничтожной по сравнению с коррекцией за неполноту выборки. Одно только это противоречие уже говорит о том, что эти коррекции имеют неоднозначное объяснение. Кроме этого, возникает также правомерный вопрос, а именно, необходима ли какая-либо коррекция вообще. Полученные нами результаты показывают, что оба эти эффекта на самом деле ничтожны, и на базе существующего в настоящее время наблюдательного материала их выявление в работах [1] и [18] нельзя считать обоснованным.

Чтобы доказать данное утверждение, рассмотрим принятые нами значения линейных расстояний этих галактик D_{ABR} в сравнении с аналогичными величинами из работ [1] - D_{FRD} и [18] - D_{PAT} . С этой целью были вычислены разности $D_{ABR} - D_{FRD}$, $D_{ABR} - D_{PAT}$, $D_{FRD} - D_{PAT}$ и построены их распределения, которые показывают, что принятые нами расстояния HST галактик очень хорошо согласуются с расстояниями из работы [1] и имеют значительные расхождения с принятыми в [18] расстояниями. Фактически нами получены те же самые результаты, что и в [1], но без привлечения коррекции за металличность КЦ (как это сделано в [1]), Из данного факта вытекает, что эти коррекции на самом деле не вызваны различием металличности КЦ этих галактик, а просто являются следствием принятой в [1] методики расчета расстояний. В пользу данного вывода говорят также и следующие соображения. Рассмотрим зависимость разностей $D_{FRD} - d_{FRD}$ от принятых в [1] расстояний D_{FRD} (табл.4, столбец 12 в [1]). Здесь d_{FRD} неоткорректированные за металличность расстояния галактик в [1] (табл.4, столбец 10 в [1]). Разность $D_{FRD} - d_{FRD}$ фактически является принятой в [1] величиной коррекции за металличность. Эта зависимость $D_{FRD} - d_{FRD} = 0.022 \exp(0.2 D_{FRD})$, из которой следует, что величина коррекции за металличность показывает сильную зависимость от расстояния галактик и непрерывно возрастает с увеличением расстояния. Это означает, что и металличность КЦ этих галактик меняется аналогичным образом. Трудно представить реальность существования такого эффекта в

мире галактик. Насколько нам известно, в пользу реальности такого эффекта пока что не существуют каких-либо наблюдательных фактов. Здесь уместно напомнить также о выводе Удельского и др. [16], согласно которому для PL-соотношений FU КЦ галактик БМО, ММО и IC 1613 получаются одинаковые нуль-пункты и наклоны, не зависимо от значительного различия металличности КЦ этих галактик.

Теперь рассмотрим вопрос о коррекции расстояний HST галактик за неполноту выборки КЦ. Выше мы отметили, что согласно Фридман и др. [1] величина этой коррекции незначительная. Как будет показано далее, на самом деле это так и есть. Патурел и др. в работе [18] данному вопросу уделили большое внимание. В явном виде, не приводя окончательные значения этих коррекций, они утверждают, что величина коррекции за неполноту выборки может достигать до значений $0^m.4$. С целью детального рассмотрения данного вопроса нами были вычислены разности $DM_{PAT}(15) - DM_{PAT}(HIP)$ (фактическая величина коррекции за неполноту выборки согласно [18]). Здесь $DM_{PAT}(15)$ начальные значения модулей расстояний HST галактик, полученные в результате прямого применения формулы:

$$DM = \langle V \rangle - 2.45(\langle V \rangle - \langle I \rangle) + 2.347 + 3.456 \log P, \quad (15)$$

выведенной нами для $R_V/R_I = 1.69$ и на основе принятых в работе [18] PL-соотношений (формула (15) в явном виде в [18] не приведена), а $DM_{PAT}(HIP)$ - полученные в [18], после коррекции за неполноту выборки, модули расстояний (табл.4, столб.4 в [18]). Из зависимости разностей $DM_{PAT}(15) - DM_{PAT}(HIP)$ от $DM_{PAT}(HIP)$ следует, что только в 6 случаях, из рассмотренных 32 галактик, величина коррекции за неполноту выборки получается больше $0^m.07$ и достигает значения $0^m.34$. Интересно отметить, что именно для этих 6 галактик в [18] получены наибольшие внутренние среднеквадратичные ошибки окончательно принятых расстояний. Кроме того, принятые в [18] модули расстояний 3 из этих 6 галактик (NGC 4321, 3198 и 598) имеют наибольшие расхождения либо от наших, либо от данных Фридмана и др. [1]. Для других двух галактик - NGC 300 и IC 1613 в [18] модули расстояний получены с помощью всего 2 и 5 КЦ, соответственно. Таким образом, в этих 5 случаях полученные в [18] коррекции нельзя считать значимыми. Остается одна галактика - NGC 3109, для которой полученное в [18] значение коррекции за неполноту выборки с натяжкой можно считать значимым. Нам кажется необоснованным на примере этой единственной галактики делать вывод о значительности величины коррекции за неполноту выборки КЦ. Что касается полученных в [18] значений коррекции за неполноту выборки меньше $0^m.07$, то они находятся в пределах внутренних ошибок определения модулей расстояний соответствующих галактик и даже

наблюдается невысокая линейная корреляция на уровне $\rho = 0.4$ между этими двумя величинами.

6. *Заключение.* С помощью PL-соотношений (2)-(4) и с применением отличающейся от принятой Фридманом и др. [1] методики, были пересмотрены расстояния HST программных галактик. Полученные нами расстояния этих галактик (табл.4) в среднем имеют более высокие внутренние точности, чем было достигнуто ранее другими авторами. Кроме того, при выводе этих расстояний нами не были использованы коррекции за металличность и за неполноту выборки КЦ. Несмотря на это, полученные нами модули расстояний с дисперсией $\pm 0^m.395$ согласуются с данными из [1] без значительного смещения нуля -пунктов шкалы расстояний ($0^m.006$). Данный факт свидетельствует о незначительности или даже полном отсутствии указанных двух эффектов для выборок КЦ HST программных галактик.

Автор выражает благодарность К.С.Гигояну за оказанную помощь при выполнении данной работы.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
Армения, e-mail: habrahamyan@web.am

THE CLASSICAL CEPHEIDS AND THE DISTANCES OF HST PROGRAM GALAXIES

H.V.ABRAHAMYAN

By using PL relations obtained by us earlier and a method, different from Freedman et al. method, the distances of HST program galaxies have been revised. In the mean they have more inner accuracies than the ones derived by other authors. Besides, during the calculating of these distances we did not use the correction for metallicity or incompleteness bias in the Cepheid samples. Irrespective of it, distance modules taken by us with the dispersion $\pm 0^m.395$ coincide with that of Friedman et al., which is in favour of insignificance or even full absence of mentioned two effects for Cepheid samples of HST program galaxies.

Key words: *galaxies: distances - stars: Cepheids: PL-relations*

ЛИТЕРАТУРА

1. *W.R.Freedman, B.F.Madore, B.K.Gibson et al.*, *Astrophys. J.*, **553**, 47, 2000.
2. *A.Udalski, M.Szumanski, M.Kubiak et al.*, *Acta Astron.*, **49**, 201, 1999.
3. *Г.В.Абрамян*, *Астрофизика*, **46**, 381, 2003.
4. *Г.В.Абрамян*, *Астрофизика*, **46**, 557, 2003.
5. *Г.В.Абрамян*, *Астрофизика*, **47**, 25, 2003.
6. *W.P.Gieren, P.Fouque, M.Gomez*, *Astrophys. J.*, **496**, 17, 1998.
7. *J.A.Cardelli, G.C.Clayton, J.S.Mathis*, *Astrophys. J.*, **345**, 245, 1989.
8. *C.D.Laney, R.S.Stobie*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **263**, 921, 1993.
9. *J.D.Fernie, B.Beattie, N.R.Evans, S.Seager*, *IBVS*, №4148, 1998.
10. *C.D.Laney, R.S.Stobie*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **266**, 441, 1994.
11. *M.W.Feast, R.M.Catchpole*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **286**, L1, 1997.
12. *B.F.Madore, W.Fridman*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **103**, 933, 1991.
13. *P.Lanoix, G.Paturel, R.Garnier*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **308**, 969, 1999.
14. *N.R.Tanvir*, *Harmonizing Distance scales in a post-Hipparcos Era*, eds. D.Egret, A.Heck, *ASP Conf. Ser.*, **167**, 84, 1999.
15. *M.A.T.Groenewegen, R.D.Oudmaijer*, *Astron. Astrophys.*, **356**, 849, 2000.
16. *A.Udalski, L.Wurzykowski, G.Pietrzynski et al.*, *Acta Astronomica*, **51**, 221, 2001.
17. *G.Paturel, G.Theureau, P.Fouque et al.*, *Astron. Astrophys.*, **383**, 398, 2002.
18. *G.Paturel, P.Teerikorpi, G.Theureau, P.Fouque et al.*, *Astron. Astrophys.*, **389**, 19, 2002.