

Лабораторная работа

Определение фотометрического расстояния до галактик методом TRGB и диаграмма Хаббла

Л.Н. Макарова

*Специальная Астрофизическая Обсерватория
Российской Академии Наук*

Аннотация

Основная задача данного практикума — определение фотометрического расстояния до нескольких близких карликовых галактик, расположенных в ближайших группах галактик, но за пределами нашей Местной группы. Для определения расстояния используется один из самых точных и универсальных индикаторов — вершина ветви красных гигантов (TRGB). Дается представление о поведении диаграммы Хаббла в Местном объеме Вселенной (до 10 Мпк).

Задачи:

1. Изучение метода TRGB определения расстояния до галактики по данным указаниям
2. Построение диаграммы показатель цвета — звездная величина по предложенным таблицам звездной фотометрии
3. Выделение ветви красных гигантов
4. Определение видимой величины TRGB
5. Определение расстояния до нескольких предложенных галактик
6. Построение диаграммы Хаббла по предложенной таблице данных
7. Нанесение полученных данных на диаграмму Хаббла

Необходимые ресурсы:

Компьютер с ОС UNIX, предоставляется сетевой доступ к системе обработки изображений и анализа данных MIDAS.

Предоставляются таблицы фотометрии и фотометрических ошибок для нескольких карликовых галактик Местного Объем.

Репрезентативная выборка расстояний и лучевых скоростей галактик Местного Объем содержится в таблице [local_volume](#).

Замечание:

Вместо MIDAS можно использовать любую программу, которая способна манипулировать таблицами в несколько тысяч (десятков тысяч) строк и обладает возможностями для ряда математических действий, в частности, применения цифровой фильтрации.

Контрольные вопросы:

1. Какие звезды находятся на вершине ветви красных гигантов
2. Какова абсолютная величина TRGB в фильтре I
3. Что такое функция рассеяния точки

4. Каков основной принцип PSF-фотометрии
5. Как определяется модуль расстояния
6. Привести формулу, связывающую расстояние и модуль расстояния
7. Каковы составляющие ошибки модуля расстояния, определяемого по TRGB
8. Какова, по современным представлениям, величина постоянной Хаббла

Продолжительность работы: 3 — 5 дней

1. Введение

Одним из наиболее точных современных индикаторов расстояний до близких галактик является вершина ветви красных гигантов (tip of the red giant branch, TRGB). Метод имеет достаточно ясное физическое обоснование. Когда в ядре звезды небольшой массы (до 3 масс Солнца) выгорает весь водород и происходит возгорание гелия, так называемая "гелиевая вспышка", то звезда находится вблизи вершины ветви красных гигантов. Абсолютная величина такой звезды-красного гиганта в цвете I весьма слабо зависит от возраста и металличности (для малометаллического звездного населения), являясь, таким образом, хорошим индикатором расстояния до галактики. Этот принцип иллюстрируется на рис. 1, приведенном в работе Lee M.G., Freedman W.L., Madore B.F. (1993).

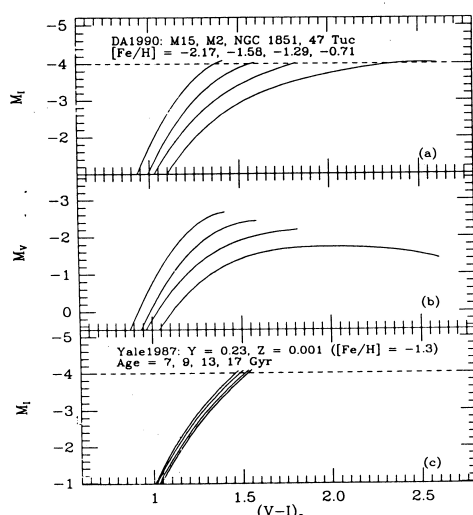


Рис.1. (а) Эмпирическая зависимость $M_I, (V-I)_0$ для ветви красных гигантов шаровых скоплений M 15, M 2, NGC 1851 и 47 Tuc, металличности которых равны: -2.17, -1.58, -1.29 и -0.71 dex, соответственно.

(b) Зависимость $M_V, (V-I)_0$ для тех же скоплений.

(c) Теоретические изохроны для красных гигантов возраста 7, 9, 13 и 17 Gyr и металличности $[Fe/H] = -1.3$ dex.

Lee и др. (1993) оценили абсолютную величину $M_{I,TRGB} = -4.0 \pm 0.1$ зв. величины. В этой работе также впервые приведена численная оценка расстояния до близких галактик методом TRGB по функции светимости звезд - красных гигантов с использованием цифрового фильтра с ядром Собеля. Точность определения модуля расстояния методом TRGB на этом этапе составляла 0.1 - 0.2 зв. величины. Существенные улучшения метода были сделаны в последние годы. Sakai S., Madore B. F., Freedman W. L. (1996) предложили сглаженную функцию светимости. Mendez B. et al. (2002) использовали метод максимального правдоподобия для измерения I_{TRGB} , уменьшив ошибку метода до 0.05 зв. величины. Дальнейшее развитие метод максимального правдоподобия получил в работе Makarov D. et al. (2006). Ошибка была уменьшена

до 0.03 зв. величины. Недавняя калибровка метода в работе Rizzi et al. (2007) дала более точные нуль-пункты и показала слабую зависимость TRGB от металличности звезд (для малометаллического звездного населения).

Метод TRGB замечательно универсален, поскольку использует звездное население II типа (красные гиганты), содержащееся практически во всех галактиках.

Целью данной работы является определение величины TRGB и фотометрического расстояния для нескольких карликовых галактик за пределами Местной группы.

2. Фотометрия разрешенных звезд в галактиках и диаграмма показатель цвета — звездная величина (CMD)

2.1. Апертурная и PSF-фотометрия звезд в галактике

С помощью метода апертурной фотометрии, как видно и из его названия, производится суммирование отсчетов пикселей изображения в круговой апертуре (см., например, Da Costa 1992). Одной из основных проблем этого метода, как и звездной фотометрии в целом, является выбор фона. Сигнал фона неба складывается из нескольких составляющих. Прежде всего это излучение атмосферы Земли, зодиакальный свет, а также свет неразрешенных звезд и галактик фона. В идеальном случае изолированной звезды достаточно измерить сигнал в кольце, центр которого совпадает с центром звезды, а внутренний радиус достаточно велик (несколько величин FWHM — полной ширины звездного профиля на половине максимума интенсивности), чтобы исключить влияние на результат измерения крыльев звезды. Чаще всего, однако, измерениям мешают близкие соседние звезды. Это особенно верно для наших наблюдательных данных, где звезды находятся в теле галактики, и сигналы от многочисленных близких звезд и диффузный свет самой галактики сильно затрудняют оценку фона. Пример изображения близкой, разрешенной на звезды галактики приведен на рис. 2.



Рис. 2 Изображение карликовой галактики Sextans A, расположенной в окрестностях Местной группы галактик, полученное на 2-м телескопе KPNO.

Интересующие нас звезды, зачастую очень слабые, создают в теле галактики густые звездные поля. Для таких случаев PSF - фотометрия дает лучшую точность. Фундаментальный принцип PSF - фотометрии заключается в том, что с линейным светоприемником, таким как CCD, и отсутствием заметных искажений, вносимых оптическими элементами камеры, функция рассеяния точки (Point-Spread-Function, (PSF)) одинакова для всех звезд изображения, независимо от их яркости и координат на кадре. PSF определяется как двумерное распределение интенсивности, возникающее в светоприемнике под воздействием точечного источника излучения (звезды). Тогда изображения ярких и слабых звезд отличаются только масштабом PSF, т. е. звездные изображения содержат одинаковую долю полной интенсивности в апертуре данного радиуса. Оценку звездных величин делают, приближая заранее определенную PSF к изображениям звезд. При такой фотометрии все звезды, расположенные на изображении, обрабатываются одновременно, чтобы учесть влияние непосредственных соседей. Существуют общеизвестные пакеты программ для фотометрии в густых полях, например, DAOPHOT II (Stetson 1987), DoPHOT (Mateo, Schechter 1989), DOLPHOT (Dolphin 2000). Приведенный список далеко не полон.

2.2. Диаграмма показатель цвета — звездная величина

По результатам фотометрии звезд галактики в разных фильтрах (чаще всего широкополосных B, V, R, I Джонсона-Козинса) можно построить диаграмму показатель цвета — звездная величина (CMD) (отражающую диаграмму Герцпшунга — Рессела), где разные звездные популяции сравнительно легко различимы. Пример CMD для Sextans A приведен на рис. 3. Обратите внимание на положение звезд различного возраста на диаграмме, типичной для близких карликовых irregулярных галактик. Положение вершины ветви красных гигантов показано красной горизонтальной линией.

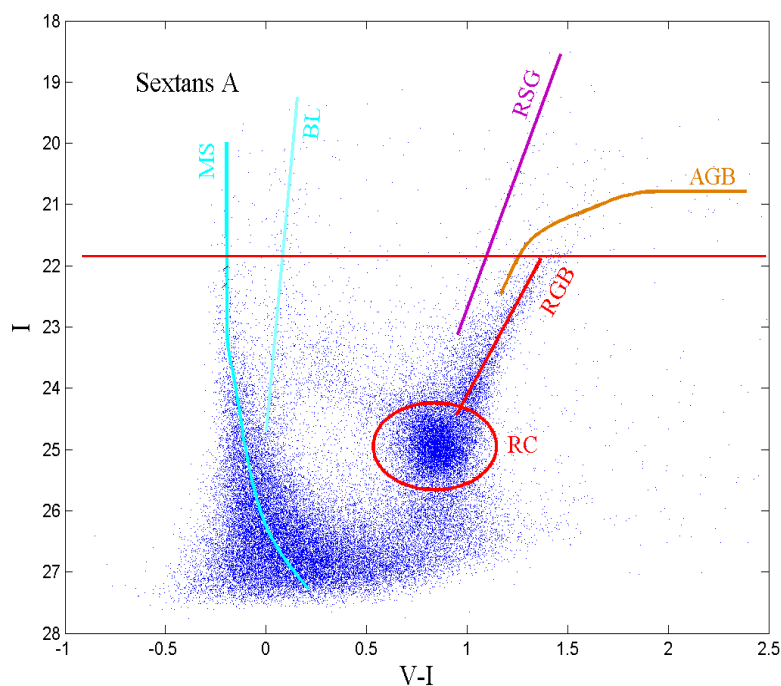


Рис.3. Диаграмма показатель цвета — звездная величина для Sextans A. Расстояние

до этой галактики $D = 1.4$ Мпк. Линиями обозначены положения различных звездных популяций, где **MS** — звезды главной последовательности, возраст 10-300 Myr; **BL** — звезды голубой петли, возраст 10-300 Myr; **RSG** — красные сверхгиганты и гиганты, возраст 10 Myr — 1 Gyr; **AGB** — асимптотическая ветвь гигантов, возраст > 1 Gyr; **RGB** — ветвь красных гигантов, возраст > 1 Gyr; **RC** — звезды красного сгущения.

Чем дальше от нас расположена галактика, тем труднее разрешить ее на отдельные звезды. Уже в пределах ближайших к нам групп галактик, на расстоянии около 3-4 Мпк, даже с использованием возможностей космического телескопа Хаббла, видна лишь верхняя часть ветви красных гигантов. Чтобы измерить звездные величины более слабых звезд, расположенных в области красного сгущения, нужны очень длинные экспозиции (несколько десятков тысяч секунд). На рис. 4 приведен пример CMD карликовой иррегулярной галактики, расположенной в одной из ближайших к нам групп М 81.

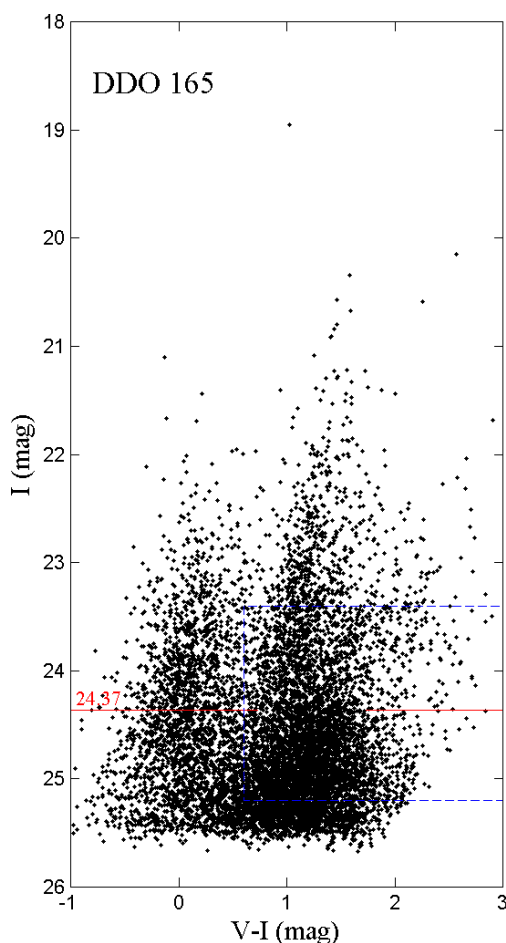


Рис. 4. Диаграмма показатель цвета — звездная величина для карликовой иррегулярной галактики DDO 165 (расстояние $D = 4.8$ Мпк), изображения которой получены на HST/ACS с экспозициями 600 сек в фильтрах V и I. Синей пунктирной линией показана область AGB/RGB, выделенная для построения функции светимости RGB и определения TRGB, красная горизонтальная линия — положение TRGB.

3. Определение расстояния до галактики

Рассмотрим в деталях получение величины фотометрического расстояния до близкой галактики на примере DDO 165, с использованием MIDAS.

3.1. Построение CMD по данной таблице фотометрии и выделение области RGB

Предложенные текстовые таблицы содержат уже измеренные звездные величины звезд галактики в фильтрах V и I с соответствующими фотометрическими ошибками. Текстовый файл для галактики DDO 165 имел бы соответствующее имя — ddo165 и содержал бы четыре колонки : V (mag), error V (mag), I (mag), error I (mag). Чтобы производить манипуляции с этой таблицей в среде MIDAS, создадим из файла фотометрии таблицу MIDAS с помощью команды **create/table**. Команда **compute/table** позволит посчитать показатель цвета V-I для звезд галактики, а команды **create/graphics** и **plot/table** позволят визуализировать получившуюся диаграмму показатель цвета — звездная величина.

Следующим шагом является выделение области AGB/RGB на CMD. Эта процедура необходима для того, чтобы при построении функции светимости звезд — красных гигантов минимизировать ее засорение звездами более молодых популяций MS/BL/RSG. Соответствующая, уже выделенная, область для DDO 165, отмечена на рис.4 синей пунктирной линией. Команда **select/table** позволяет выделить AGB/RGB по величине I и показателю цвета V-I, а последующая команда **copy/tab** позволит сохранить выделенную область в виде отдельной таблицы, и затем строить функцию светимости звезд AGB/RGB.

3.2. Построение функции светимости красных гигантов и определение величины TRGB

Величина TRGB определяется как скачек, нарушение непрерывности функции светимости звезд - красных гигантов и численно часто определяется с помощью цифрового фильтра с ядром Собеля. Чтобы определить функцию светимости RGB в цвете I, можно воспользоваться командой **compute/histogram**. Последующее применение команды **filter/digital** с ядром Собеля : -1,0,1 даст величину I_{TRGB} как положение наиболее выраженного пика. На рис. 5 приведена функция светимости AGB/RGB для DDO 165 и положение I_{TRGB} , полученное с помощью цифрового фильтра.

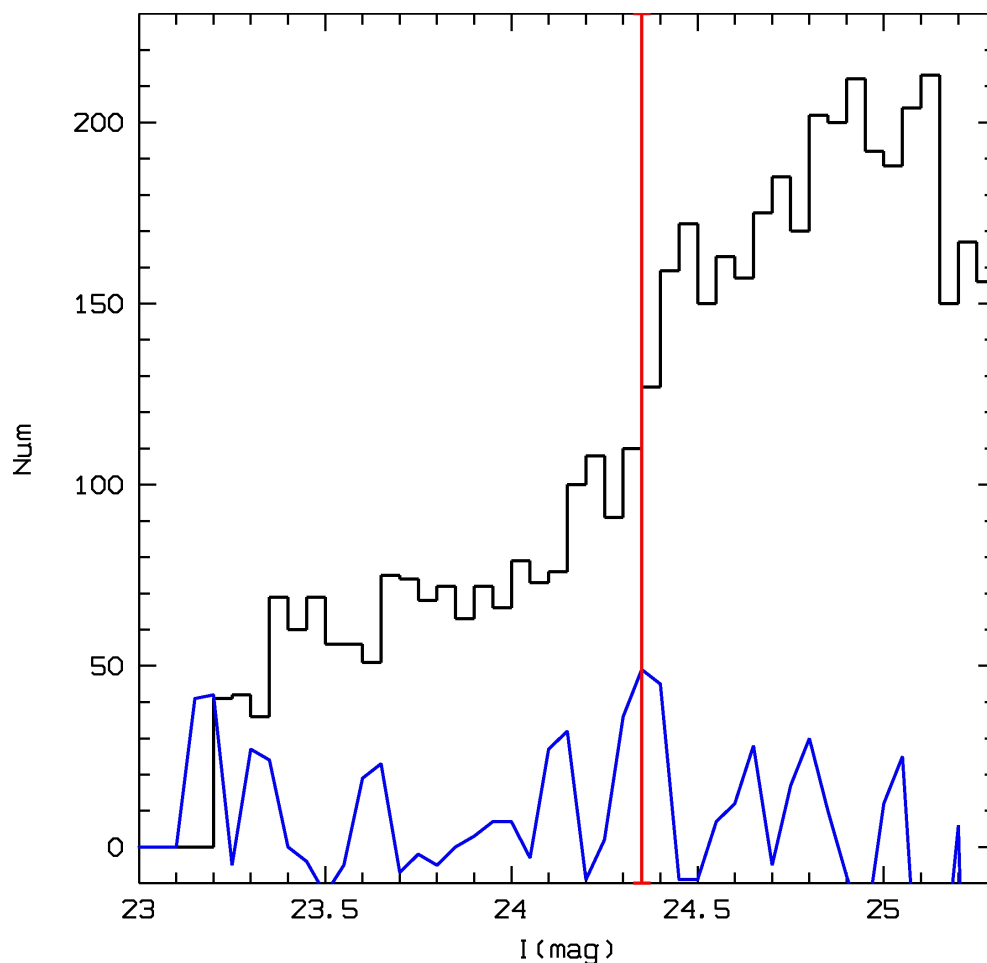


Рис.5. Функция светимости DDO 165 и результат цифровой фильтрации (фильтр Собеля, синяя линия). Положение $I_{\text{TRGB}} = 24.35 \pm 0.10$ показано красной чертой.

Замечание 1: Приведенный способ оценки I_{TRGB} является самым простым. Положение TRGB и ошибка этой величины несвободны от влияния размера бина функции светимости. Ошибку I_{TRGB} можно оценить как полуширину пика отклика фильтра Собеля в районе TRGB. Более изощренные методы оценки TRGB, позволяющие существенно снизить ошибку I_{TRGB} , упомянуты во введении.

Замечание 2. При оценке положения TRGB следует обязательно учитывать возможное наличие существенной популяции звезд асимптотической ветви гигантов среднего возраста (AGB, см. рисунки 3 и 4), верхняя граница которой также может давать значительный пик (примерно на 1 зв. величину ярче TRGB), что приводит к неверной оценке расстояния.

3.3. Определение модуля расстояния и самого расстояния

Разность видимой и абсолютной величин принято называть модулем расстояния:

$$\mu_0 = m_{0,I} - M_I^{\text{TRGB}}$$

Здесь $m_{0,I}$ — видимая величина TRGB в цвете I, исправленная за поглощение:

$$m_{0,I} = I_{\text{TRGB}} - A_I,$$

где A_I — величина Галактического поглощения, и

$$M_I^{\text{TRGB}} = -4.04 \pm 0.12,$$

согласно одной из калибровок (Bellazini et al. 2001), которую мы будем использовать для простоты, и точности которой достаточно для наших целей.

Искомое расстояние d определяется затем по простой формуле:
$$\mu_0 = 25 + 5 \lg d \text{ (Mpc)}$$

3.4. Ошибки измерения

Полная ошибка модуля расстояния складывается из ошибок оценки TRGB и ошибок калибровки:

$$\sigma_{\text{res}}^2 = \sigma_{\text{I, TRGB}}^2 + \sigma_{\text{calib}}^2$$

где ошибки TRGB $\sigma_{\text{I, TRGB}}$ складываются из собственно ошибки оценки TRGB σ_{int} , ошибок фотометрии звезд σ_{phot} , ошибки нуль-пункта перевода инструментальных величин звезд в стандартные σ_{zero} и ошибки поправки за апертуру σ_{aper} . Необходимо также учесть ошибку оценки величины поглощения σ_{A_I} :

$$\sigma_{\text{I, TRGB}}^2 = \sigma_{\text{int}}^2 + \sigma_{\text{phot}}^2 + \sigma_{\text{aper}}^2 + \sigma_{\text{zero}}^2 + \sigma_{A_I}^2$$

Поскольку звездная фотометрия не является задачей данной работы, мы положим, исходя из наших данных:

$$\sigma_{\text{aper}} = 0.05 \text{ mag}$$

$$\sigma_{\text{zero}} = 0.05 \text{ mag}$$

Ошибка Галактического поглощения также известна:

$$\sigma_{A_I} - 16\% \text{ от величины поглощения (Schlegel et al. 1998)}$$

Ошибка калибровки:

$$\sigma_{\text{calib}} = 0.12 \text{ mag (Bellazzini et al. 2001)}$$

Затем, ошибка расстояния:

$$\sigma_{\text{dist}}^2 = d \sigma_{\text{res}}^2 / 2.17$$

Замечание: Величину галактического поглощения A_I можно взять, например, из базы данных NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/>).

4. Закон Хаббла. Построение диаграммы Хаббла. Постоянная Хаббла.

Эта, завершающая, часть работы носит, скорее, иллюстративный характер и призвана дать общее представление о том, как выглядит диаграмма Хаббла для ближней Вселенной.

В классическом виде закон Хаббла, как известно, имеет вид:

$$V_r = H_0 d,$$

где V_r - скорость галактики вдоль луча зрения и d - расстояние до галактики.

Коэффициент пропорциональности H_0 носит название постоянной Хаббла.

В настоящее время величина постоянной Хаббла оценивается в $H_0 = 70 - 75$ км/с/Мпк.

Надо заметить, что, помимо участия в космологическом расширении, галактики еще

обладают собственными, пекулярными, скоростями, которые доминируют именно для сравнительно близких объектов, находящихся от нас на расстоянии нескольких мегапарсек, то есть именно в той области, где расстояния галактик оцениваются наиболее точно фотометрическими методами (Цефеиды, TRGB), независимо от красного смещения. Закон Хаббла на этих расстояниях работает плохо. Пример диаграммы Хаббла для Местного объема Вселенной (галактики на расстоянии примерно до 10 Мпк) приведен на рис. 6.

Предоставляется таблица, содержащая расстояния и лучевые скорости галактик Местного объема Вселенной, по которой следует построить диаграмму Хаббла, а затем нанести на эту диаграмму точки собственных измерений.

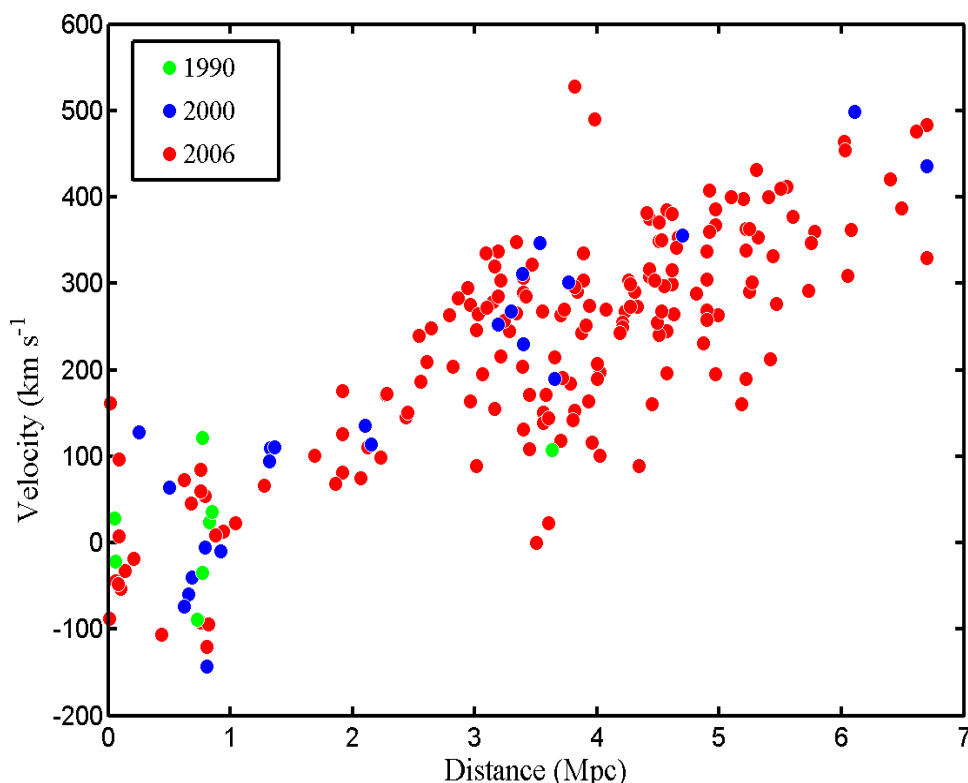


Рис.6. Зависимость лучевой скорости галактики, исправленной за движение Местной Группы (V_{LG}) от расстояния.

Замечание. Величину лучевой скорости галактики, исправленную за движение Местной Группы (V_{LG}) можно взять из базы данных NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/>) или базы данных CAO для Местного объема <http://www.sao.ru/lv/lvgdb/>. Следует обратить внимание на то, что имена галактик [kk](#) каталогизированы в NED как [\[kk98\]](#).

5. Результаты

В качестве результатов следует представить:

1. Диаграммы цвет-звездная величина с отмеченной областью RGB
2. Функции светимости
3. Величина TRGB
4. Модуль расстояния и расстояние с оценкой ошибок
5. Диаграмма Хаббла

Список литературы:

Bellazzini M., Ferraro F.R., Pancino E., 2001, **ApJ**, 556, 635

Da Costa G.S., 1992, **ASPC**, 23, 90

Dolphin A., 2000, **AJ**, 531, 804

Lee M.G., Freedman W.L., Madore B.F., 1993, **ApJ**, 417, 553

Makarov D., Makarova L., Rizzi L., Tully R.B., Dolphin A.E., Sakai S., Shaya E.J., 2006, **AJ**, 132, 2729

Mateo M., Schechter P.L., 1989, **ESOC**, 31, 69

Mendez B., Davis M., Moustakas J., Newman J., Madore B.F., Freedman W.L. , 2002, **AJ**, 124, 213

Rizzi L., Tully R.B., Makarov D., Makarova L., Dolphin A.E., Sakai S., Shaya E.J., 2007, **ApJ**, 661, 815

Sakai S., Madore B. F., Freedman W. L., 1996, **ApJ**, 461, 713

Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M., 1998, **ApJ**, 500, 525

Stetson P., 1987, **PASP**, 99, 191