

А.В. Моисеев, САО РАН

Методы исследования галактик.

Лекция I.

Введение. Начальный этап внегалактической астрономии.
Закон Хаббла. Методы измерения расстояний до галактик.

Кратко обо мне: <https://www.sao.ru/hq/moisav/>

Наблюдал на телескопах: 6-м БТА и 1-м (САО РАН), 1.6-м (ИСЗФ РАН), 2.5-м (КГО ГАИШ МГУ), 4.2-м WHT, 6.5-м Magellan

Участник заявок на телескопы: Hubble, WSRT, GMRT, IRAM

Член рабочих групп космических проектов “Спектр-РГ” и “Спектр-УФ”

Лаборатория Спектроскопии и Фотометрии
Внегалактических Объектов

Алексей Моисеев [Switch to English](#)

[Основная](#) [CV](#) [Публикации](#) [Конференции](#) [Лекции](#) [Студенты](#) [Семья](#)

Здравствуйте! Это личная страничка Алексея Моисеева, д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника нашей [Лаборатории](#). Я - ответственный за метод наблюдений [SCORPIO-2](#) на 6-м телескопе САО РАН и прибор [MaNGaL](#) на 1-м телескопе САО РАН и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Также я руковожу [астрофизическим семинаром САО РАН](#), являюсь членом редколлегий журналов "[Астрофизический бюллетень](#)", "[Galaxies](#)" и [Frontiers in Astronomy and Space Sciences](#), являюсь зам. председателя диссертационного совета 24.1.212.01 САО РАН, вхожу в [Бюро Научного совета ОФН РАН по астрономии](#)

Мои научные интересы лежат в области внегалактической астрономии с особым вниманием на технику наблюдений:

- Морфология и кинематика галактик различных типов.
- Процессы обратной связи в галактиках: воздействие звездообразования на межзвездную среду, галактический ветер.
- Галактики с активными ядрами и их окружение.
- Методы 3D-спектроскопии: интегрально-полевые спектрографы, сканирующие интерферометры Фабри-Перо.

Постоянно используемые ссылки:

E-mail: moisav@sao.ru, moisav@gmail.com
Рабочий телефон: +7-87822-93-396

ads NED DR16 Web Plot Digitizer

Этот курс будет здесь

О чём этот курс?

Как из наблюдений получают основные характеристики галактик

- Расстояния. Морфологические типы. Форма, размеры
- Светимость, показатели цвета
- Содержание газа и пыли, их химсостав.
- Внутренняя кинематика, динамическая масса, темная материя
- Звездное население: возраст, содержание тяжелых элементов
- Звездообразование
- Активность ядер. Параметры центральной чёрной дыры
- Горячий газ в скоплениях галактик

Подразумевается знание:

общей и практической астрофизики, звездной астрономии, космологии

Некоторые видны глазом, но что это – было непонятно

Туманность Андромеды (M31)

Первое письменное упоминание:
964 г. Абдуррахман ибн Умар ас-Суфи

Магеллановы облака

964 г. ас-Суфи (но сам их не видел)
Описание дано Америго Веспуччи 1501/02 г



Некоторые на идеальном небе могут видеть
M33 (Треугольник) и M81 (Б. Медведица)



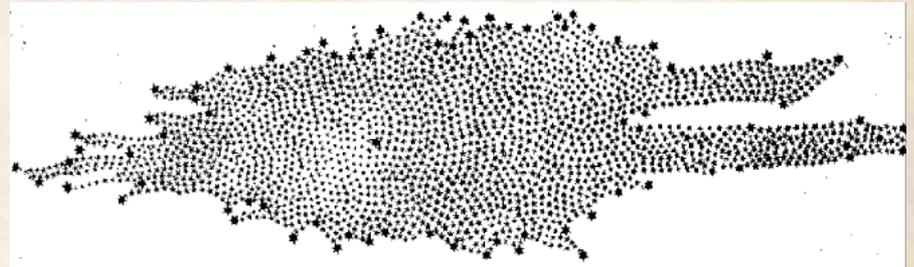
“Островные Вселенные”

1750 – Томас Райт предположил, что Млечный Путь = плоский слой звезд, а также предположил сходную природу для слабых туманностей

1755 - Иммануил Кант назвал их «островными вселенными»

1785 - Вильям Гершель оценил форму Млечного Пути

Галактики – от γάλακτος (молочный)



(Вильям Гершель 1785)

Галактики - гравитационно связанные системы из звёзд, околозвездного вещества, звёздных остатков, межзвёздного газа и пыли, возможной тёмной материи, находящиеся за пределами нашей Галактики.

(обобщение определений из Постнова-Засова, Засова-Сурдина, Вики...)

“Великий спор” о природе спиральных туманностей



Лорд Росс, 1850 г.
1.8м (72") телескоп



KPNO 2.1m

“Великий спор” о природе спиральных туманностей

Дебаты в Национальной академии наук США, 26 апреля 1920 г.:

Харлоу Шепли (Маунт-Вилсон)

- Размер Галактики ~100 кпк
- Солнце вдали от центра (20 кпк)
- Спиральные туманности – газовые облака Млечного Пути (А. ван Маанен ошибочно измерил “скорость вращения спиралей” - $0.02'/\text{yr}$ у М101 и тд)
- Новые звезды – вспышки при попадании звезд в “туманности”

Идея о цефеидах была верной, но ошибка в нуль-пункте

Гебер Кёртис (Ликская обсерватория)

- Размер Галактики ~10 кпк
- Солнце около центра
- Спиральные туманности – такие же галактики
- Новые звезды делятся на обычные и очень яркие (впоследствии - Сверхновые)



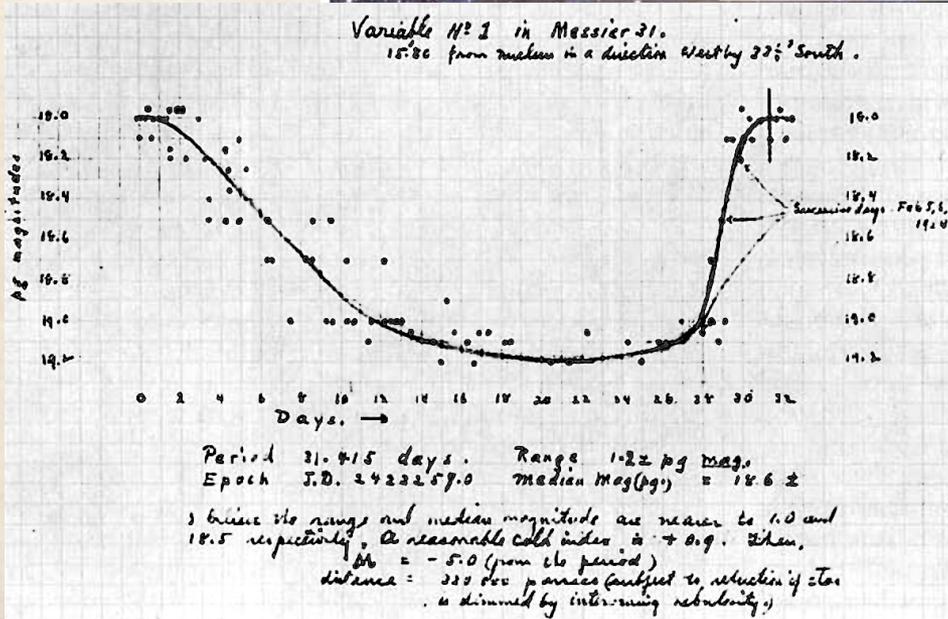
Письмо Эдвина Хаббла Шепли – 19 Февраля 1924

M31/NGC224

1.5-м (60") и
2.5-м (100")

телескопы

Маунт-Вилсон



portrait of its galactic home are shown in this image collection. | Photo Credit: NASA

Shapley:

“Here is the letter that
destroyed my universe”

A SPIRAL NEBULA AS A STELLAR SYSTEM, MESSIER 31¹

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

Material.—The present discussion of M 31 is based on the study of about 350 photographs taken with the 60- and 100-inch reflectors, distributed over an interval of about eighteen years. Two-thirds of the total number were obtained by the writer during the five years 1923-1928. Since the image of the nebula is much larger than the usable



40 цефеид, 85 Новых...

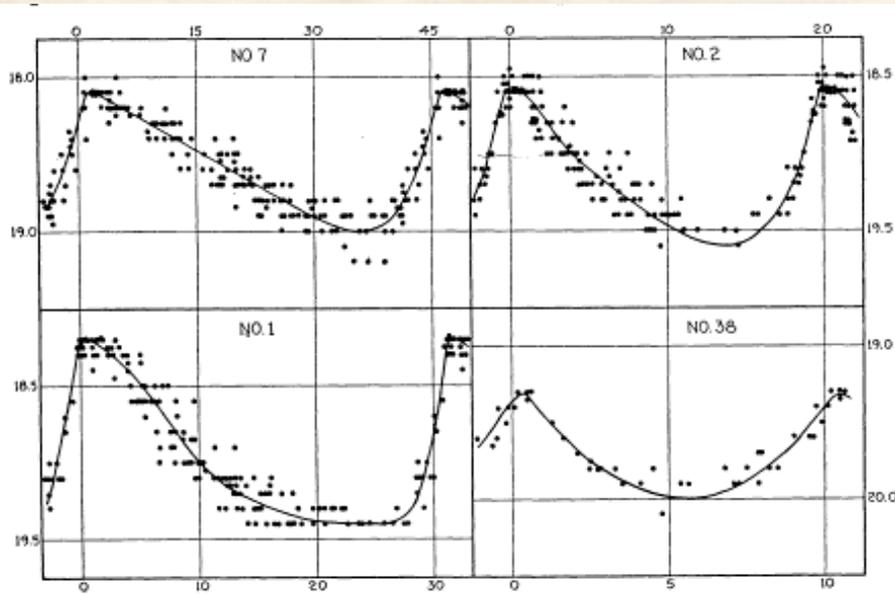
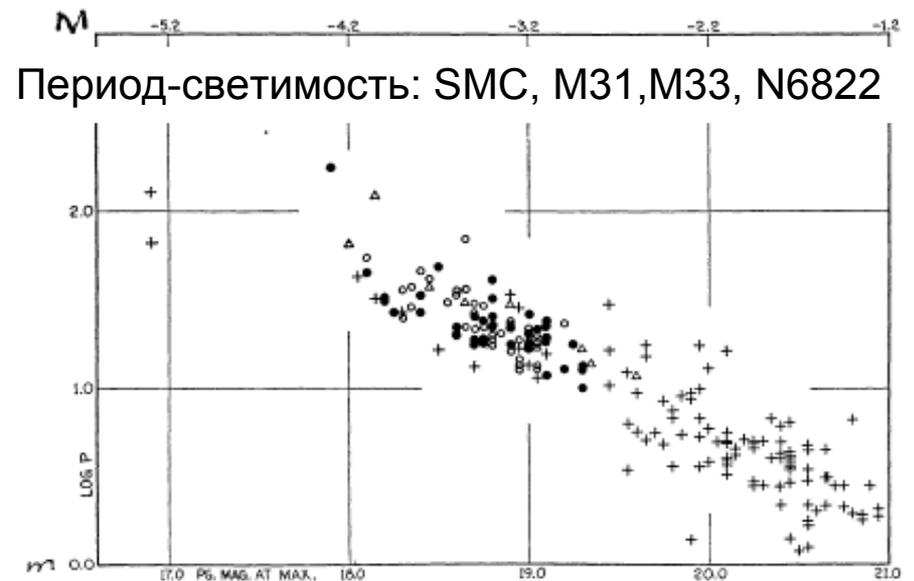


FIG. 1.—Light-curves of four Cepheids in M 31; ordinates, photographic magnitudes; abscissae, days.



Период-светимость: SMC, M31, M33, N6822

FIG. 3.—Period-luminosity relation among the extra-galactic Cepheids. The crosses refer to 106 Cepheids observed by Shapley in the Small Magellanic Cloud; the black discs, to 40 Cepheids in M 31; the open circles, to 35 in M 33; the triangles, to 9 in N.G.C. 6822. The apparent magnitudes at maxima have been reduced to the distance of M 31 by adding 4.65 to those in the Small Magellanic Cloud, 0.1 to those in M 33, and 0.55 to those in N.G.C. 6822. The absolute photographic magnitudes at the top of the diagram are based upon Shapley's zero point ($m - M = 17.55$ for the Small Magellanic Cloud).

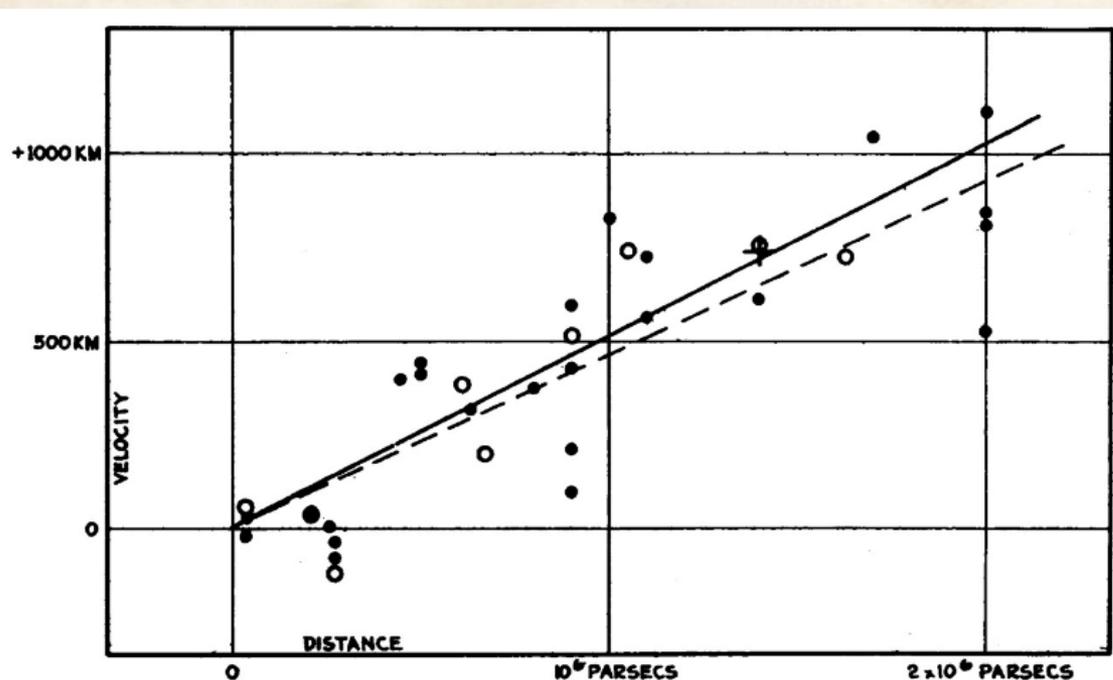
Лучевые скорости (не Хаббл!)

Весто Слайфер

1912 – $V(M31) = -300$ км/с (7 часов экспозиций)

1917 – доклад о 25 “спиральных туманностях”, $\langle V \rangle = +500$ км/с
но считал, что можно объяснить движением Солнца....

Милтон Хьюмасон: измерения более далеких туманностей на 100" телескопе
1929 : $V(NGC 7679) = +3779$ (45+36 ч. экспозиций)



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae. Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted

Hubble:

1929, Proceedings of the National Academy of Science, 14,168

$$v = H_0 r - \text{“закон Хаббла”}$$

$$H_0 = 500-540 \text{ км/с/Мпк}$$

Ошибка на порядок за счёт
вторичных индикаторов
расстояния + перкалибровка
цефеид и учёт поглощения

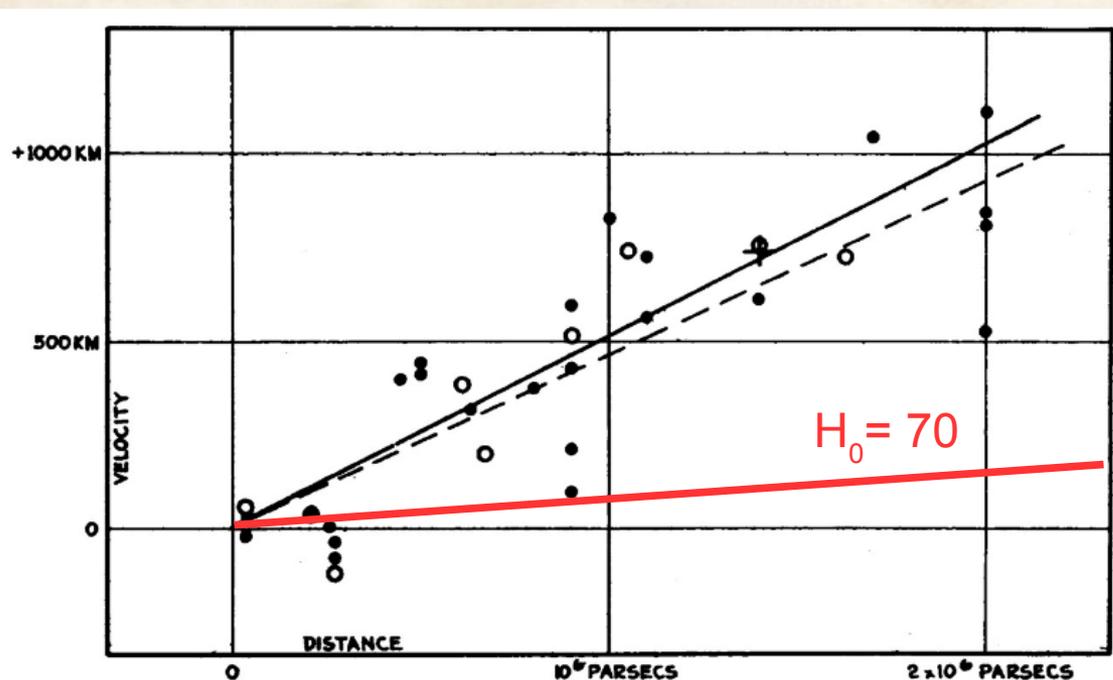
Лучевые скорости (не Хаббл!)

Весто Слайфер

1912 – $V(M31) = -300$ км/с (7 часов экспозиций)

1917 – доклад о 25 “спиральных туманностях”, $\langle V \rangle = +500$ км/с
но считал, что можно объяснить движением Солнца....

Милтон Хьюмасон: измерения более далеких туманностей на 100" телескопе
1929 : $V(NGC 7679) = +3779$ (45+36 ч. экспозиций)



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae. Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted

Hubble:

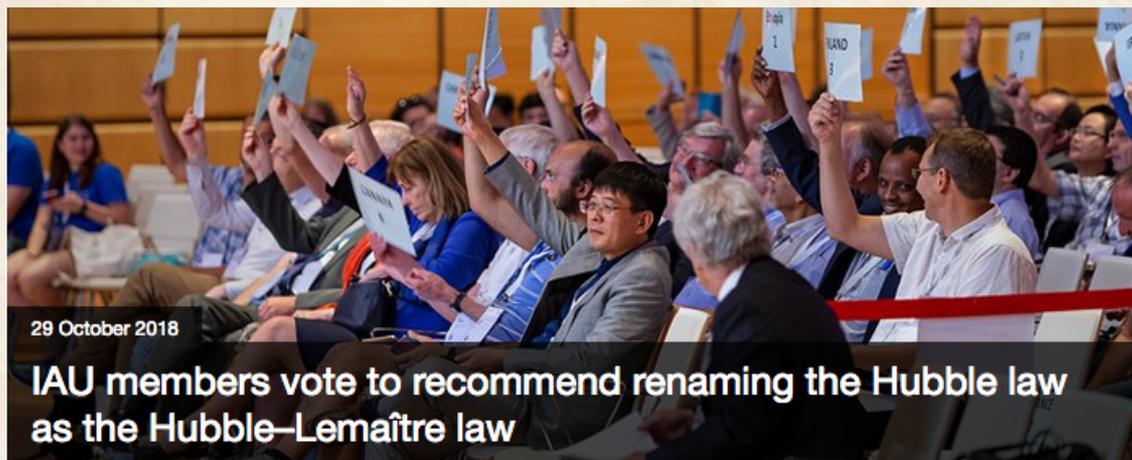
1929, Proceedings of the National Academy of Science, 14,168

$v = H_0 d$ - “закон Хаббла”

$H_0 = 500-540$ км/с/Мпк

Ошибка на порядок за счёт вторичных индикаторов расстояния + перкалибровка цефеид и учёт поглощения

2018: закон Хаббла-Леметра



За - 78%, против – 20%, голосовало - 37% членов МАС

Отрицательное мнение лектора по этому поводу – ссылка [Закон Хаббла – Хаббл!](#)

Принцип В.И. Арнольда :

“Если какое-либо понятие имеет персональное имя, то это - не имя первооткрывателя” (он же – закон С. Стингера)

From Wikipedia, the free encyclopedia

Hubble's law, also known as the **Hubble–Lemaître law**,^[1] is the observation in **physical cosmology** that **galaxies** are moving away from Earth at speeds proportional to their distance. In other words, the farther they are, the faster they are moving away from Earth. The velocity of the galaxies has been determined by

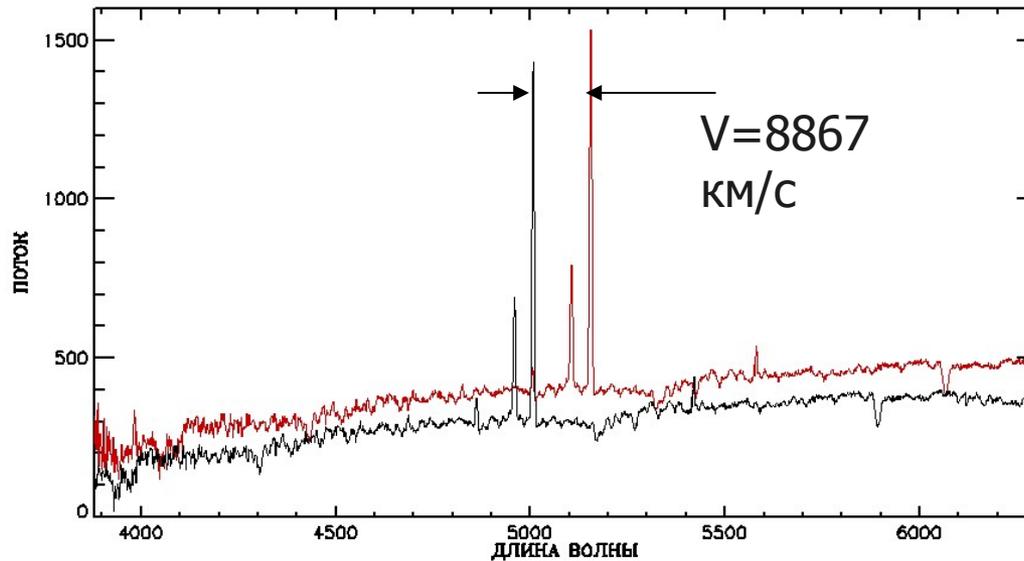


Статья 1927 г.

Скорость удаления и красное смещение



NGC 5972



Красное смещение

$$z = \lambda / \lambda_0 - 1$$

$$cz = H_0 d$$

Различие космологического и доплеровского красных смещений

Космологическое (определение)

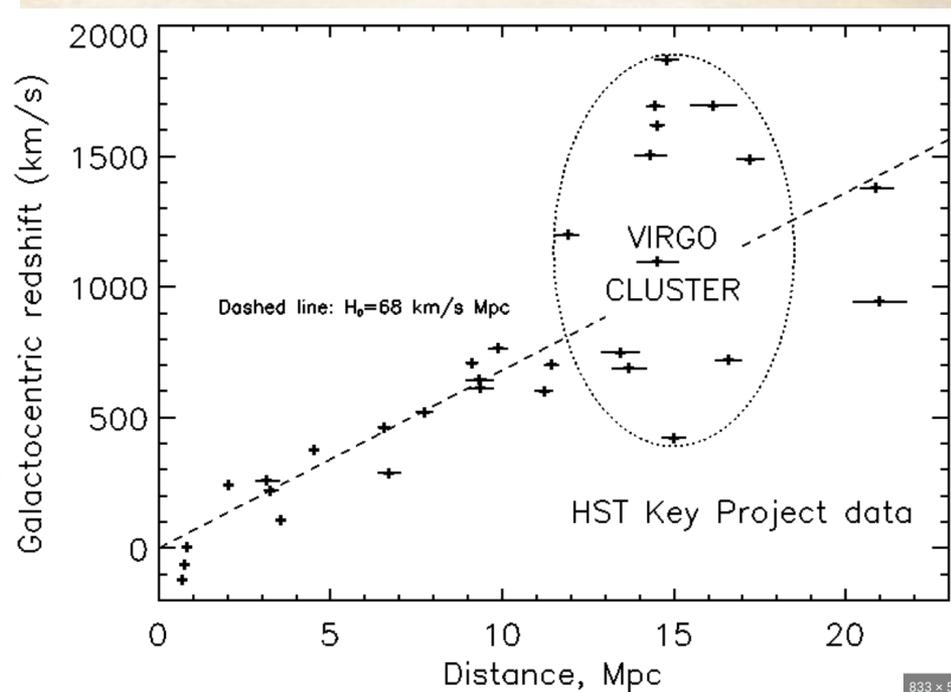
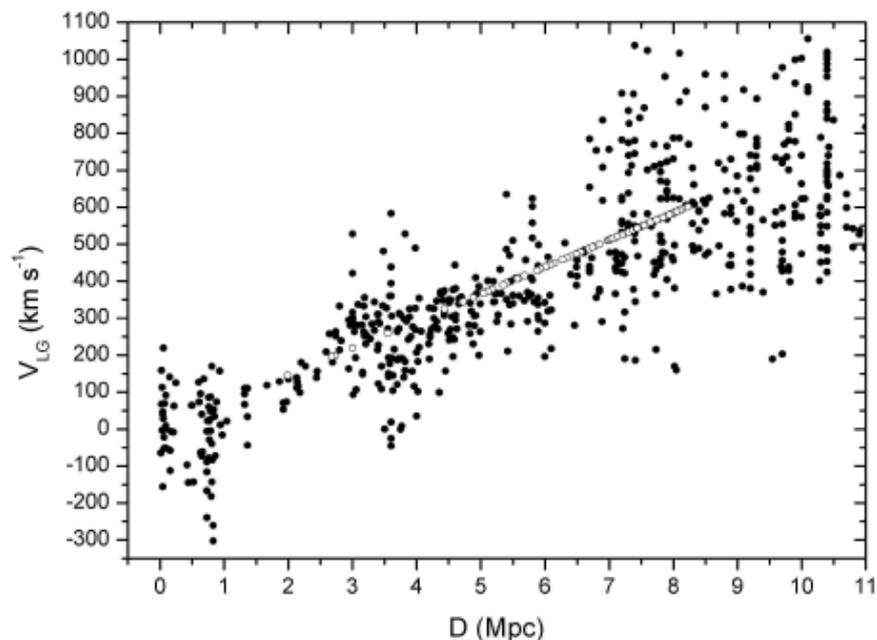
$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t)} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Доплер (годится для $z < 0.1$)

$$z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \approx \frac{v}{c}$$

Зачем нужны прямые измерение расстояний помимо z

Локальные движения смещают оценку z в Ближней Вселенной (<10-20 кпк)



: Хаббловский поток вокруг центроида Местной Группы. Не

Karachentsev et al 2004, 2008

“Стандартная свеча” vs “стандартная линейка”

В расширяющейся Вселенной различаются фотометрическое расстояние (d_L) и расстояние по угловому размеру (d_A):

$$d_A = D/\theta$$

$$d_L = \sqrt{L/4\pi F}$$

$$d_L = (1+z)^2 d_A$$

$$\mu = m - M = 5 \log(d_L) + 25, \text{ где } (d_L) - \text{ в [Мпк]}$$

Полный набор формул, связывающих z и D зависит от космологической модели

$$D_{\text{now}} = \frac{c}{H_0} \int_{1/(1+z)}^1 \frac{da}{a\sqrt{X}} = \frac{cZ}{H_0},$$

$$D_A = D_{\text{now}} \frac{J([1 - \Omega_{\text{tot}}]Z^2)}{1+z},$$

$$d_L = (1+z)^2 d_A.$$

$$X(a) = \frac{\Omega_m}{a} + \frac{\Omega_r}{a^2} + \Omega_v a^2 + (1 - \Omega_{\text{tot}})$$

$$Z = \int_{1/(1+z)}^1 \frac{da}{a\sqrt{X}}$$

Wright (2006): A Cosmology Calculator for the World Wide Web:

<https://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

Построение шкалы расстояний

- Цефиды, $M = -2 \dots -7$
- Вершина ветви красных гигантов, $M = -4$
- Функция светимости планетарных туманностей
- Функция светимости шаровых скоплений
- Флуктуации поверхностной яркости
- Новые звезды
- Сверхновые типа Ia: $M = -19$

“Стандартная свеча”

- Соотношение Талли-Фишера (дисковые галактики)
- Соотношение Фибера-Джексона (эллиптические)

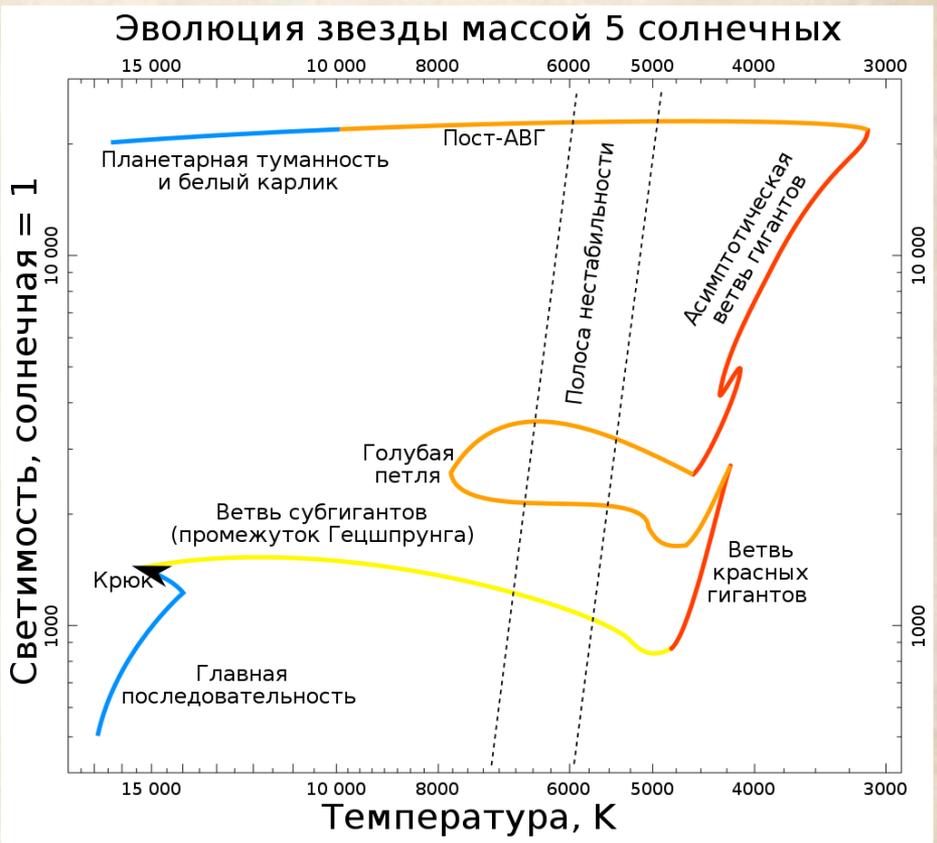
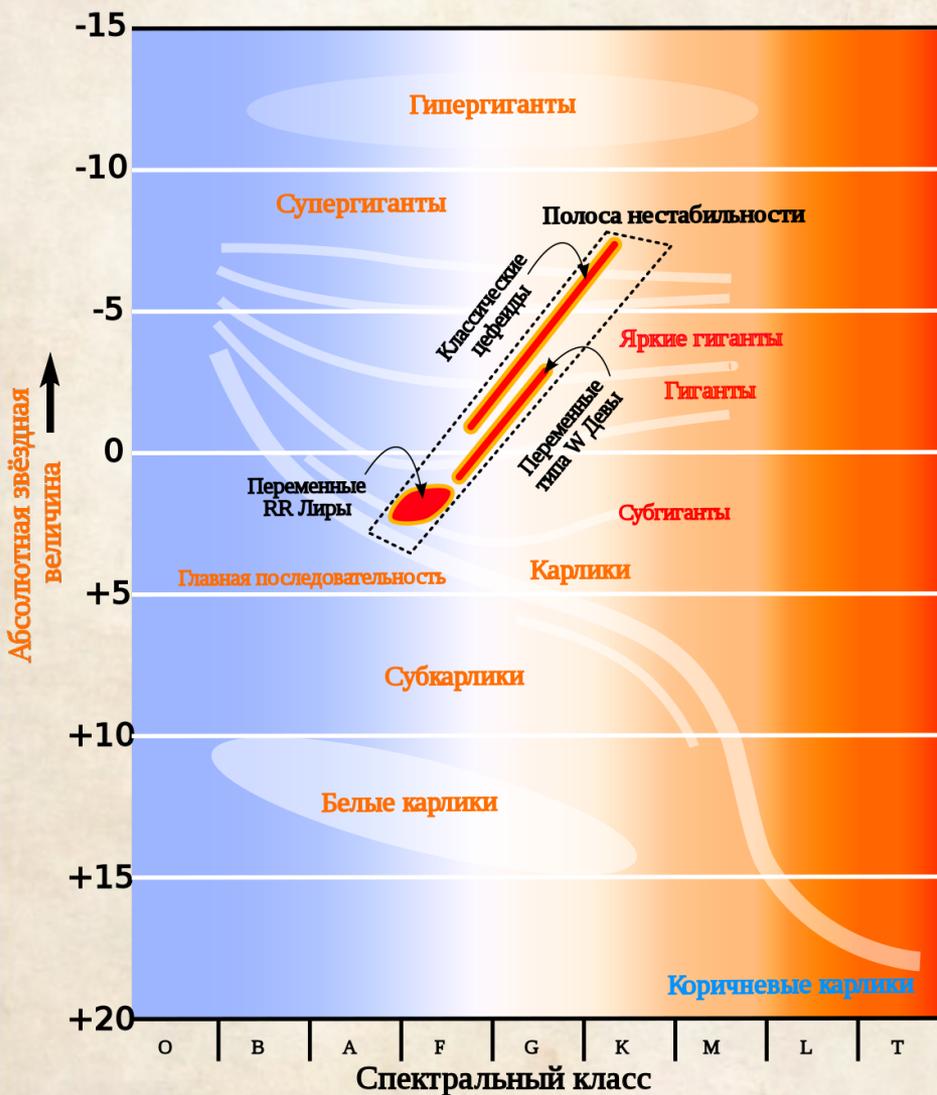
“Масштабные соотношения”

- Мазеры в активных галактических ядрах
- Эффект Сюняева-Зельдовича (скопления)

“Стандартная линейка”

- Задержка сигнала в гравитационных линзах
- Гравитационные волны от слияния компактных объектов
- Космологические методы оценки H_0 (БАО, Сахаровский осцилляции)

“Звездные индикаторы”



Стандартные свечи: Цефеиды

Хорошо изученный индикатор, но требуется:

- высокое угловое разрешение
- десятки эпох наблюдений ($T=10-50$ дней)
- ограничение по расстоянию
- учёт внутреннего поглощения
- учёт металличности

Hubble Space Telescope (HST) Key Project (Freedman et al 1994 - 2001)

31 галактика, 3 – 25 Мпк, 7 – 69 цефеид на галактика

WFPC2 камера, фильтры V (F555W) и I (F814W)

Нуль пункт – по цефеидам БМО (>700 звезд)

Два фильтра позволяли учесть эффект поглощения + коррекция за металличность областей HII

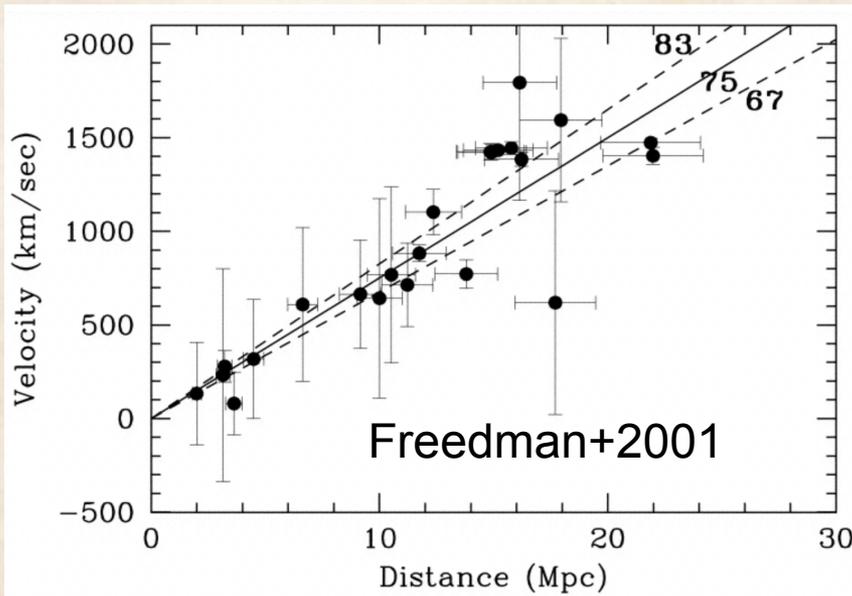
$$M_V = -2.760[\pm 0.03](\log P - 1) - 4.218[\pm 0.02]$$

$$M_I = -2.962[\pm 0.02](\log P - 1) - 4.904[\pm 0.01]$$

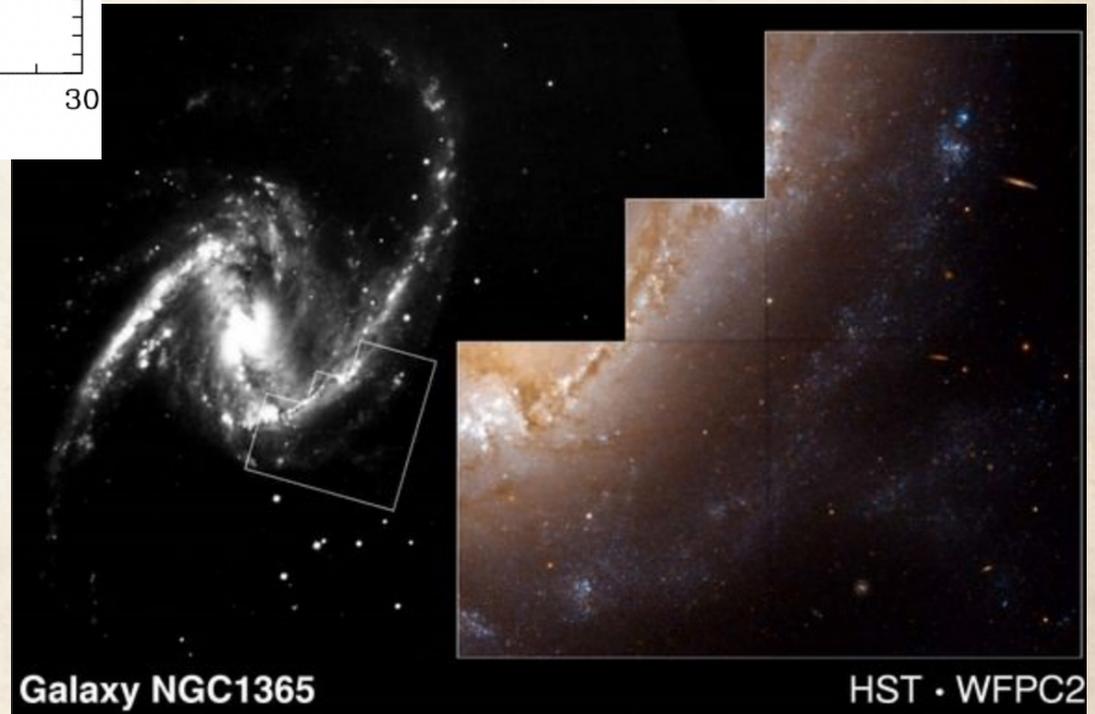
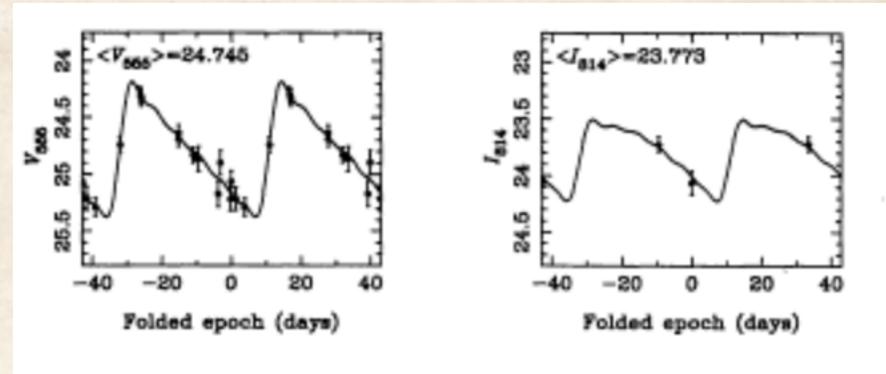
$$\mu_0 = \mu_V - R(\mu_V - \mu_I) + \delta\mu_Z$$



Стандартные свечи: Цефеиды



Пример цефеиды в M96



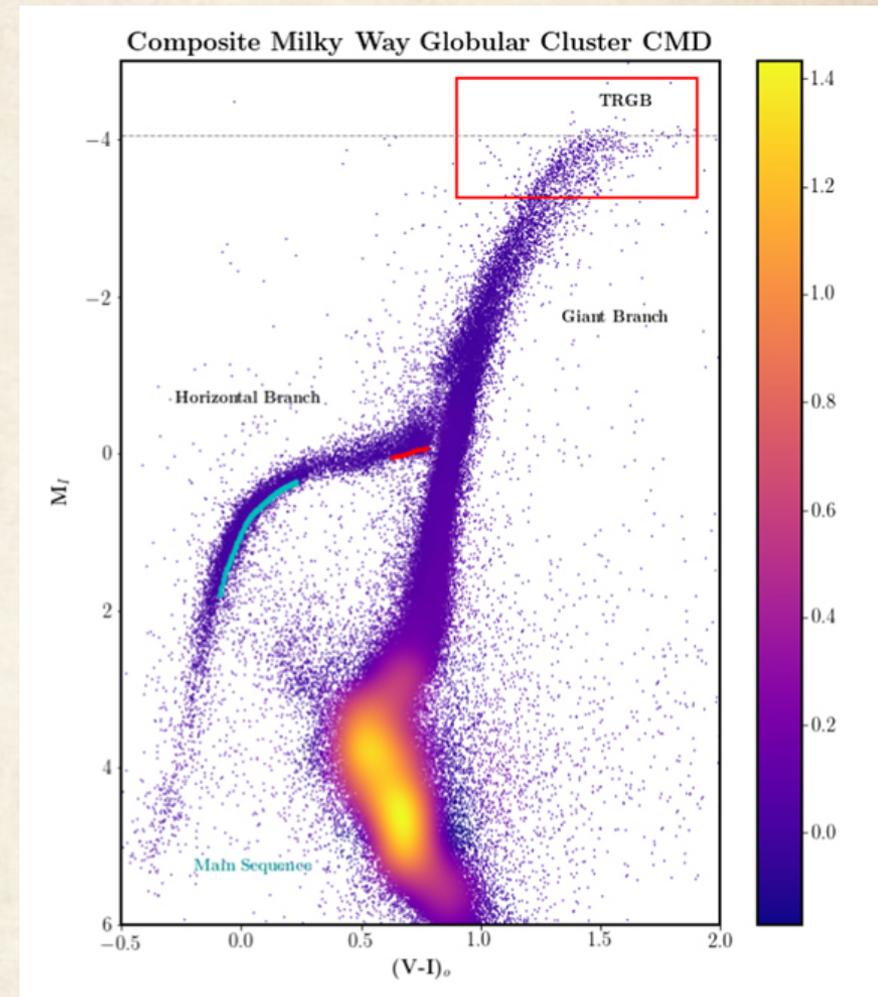
TRGB (Вершина ветви красных гигантов)

(Tip of the red-giant branch)

- Достаточно яркий индикатор $M(I)=-4$ ($D < 10$ Мпс, HST)
- Старые, малометаллические звезды – годится в галактиках разных типов
- Красные гиганты не связаны с областями ЗО (мало поглощение)
- Простота реализации – одна эпоха изображений в двух фильтрах
- Есть зависимость от возраста и металличности

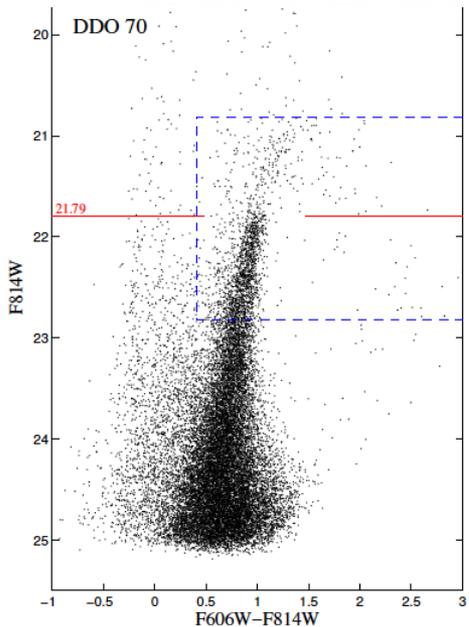
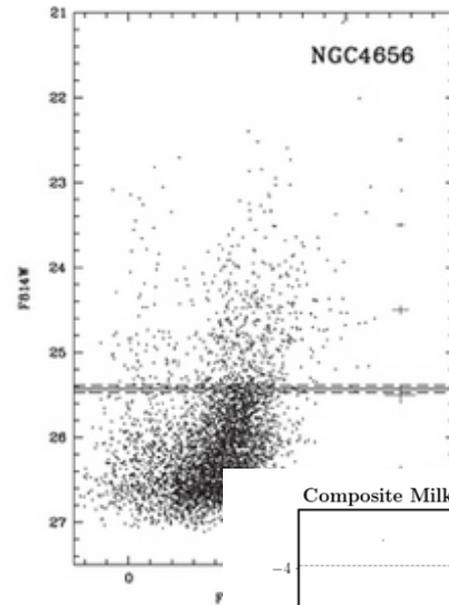
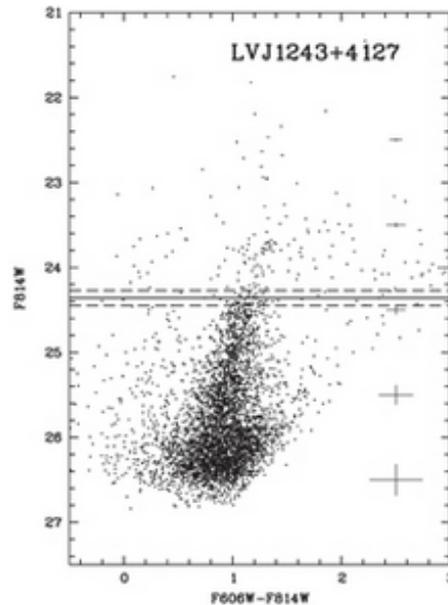
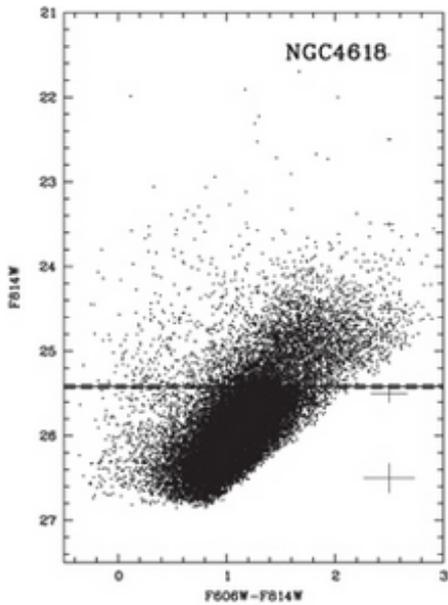
$$M_I^{\text{TRGB}} = 0.258 [M/H]^2 + 0.676 [M/H] - 3.629$$

(Belazzini + 2004)

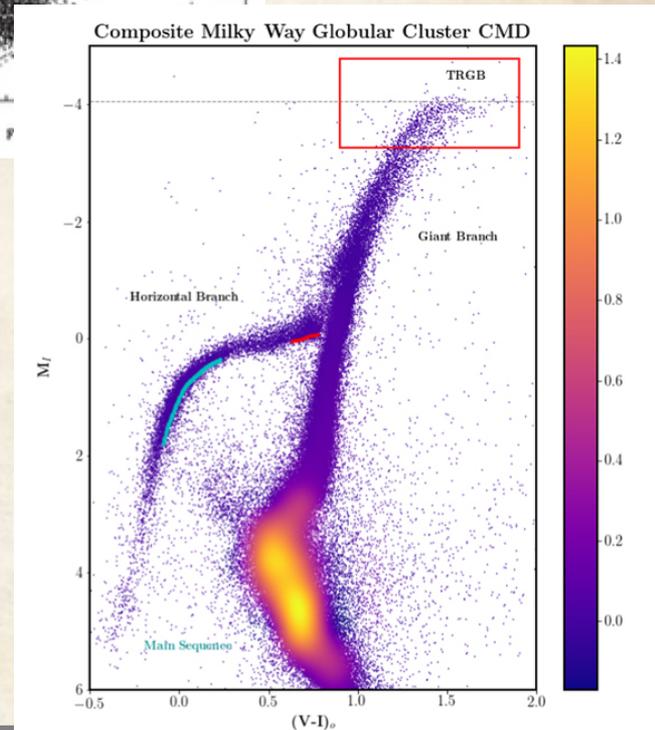
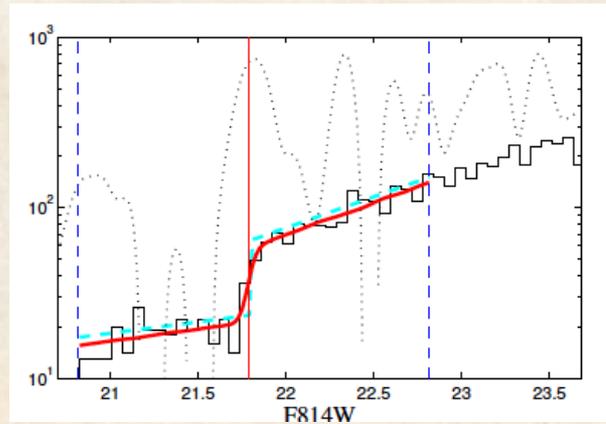


(Freedman 2021)

TRGB в реальных галактиках



Karachentsev + 2018

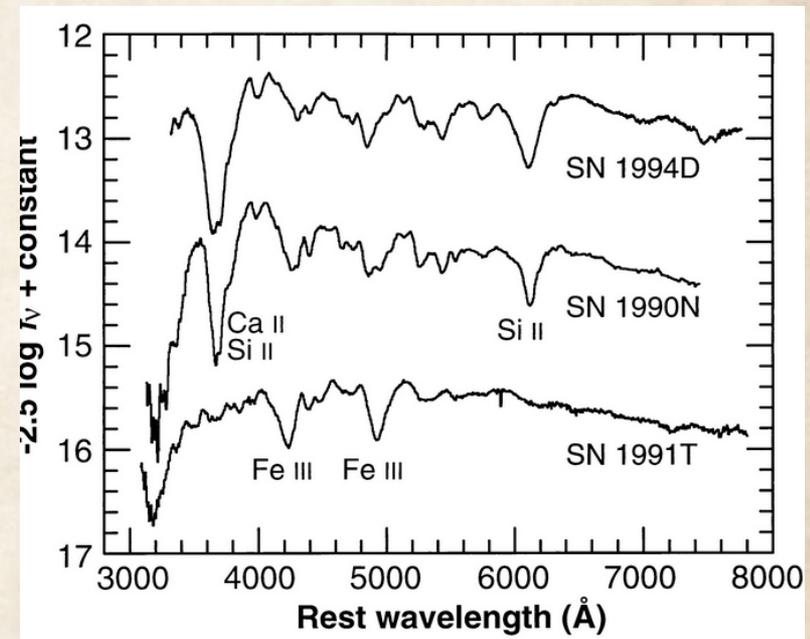
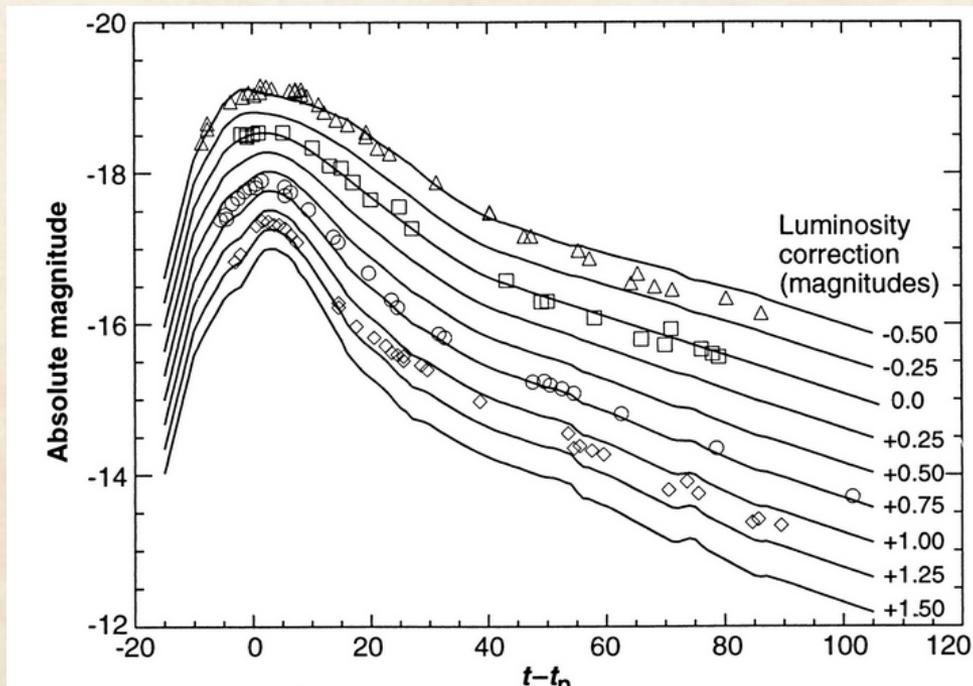


Стандартные свечи: Сверхновые Ia

Нет линий водорода, термоядерный взрыв белого карлика вблизи предела Чандрассекара

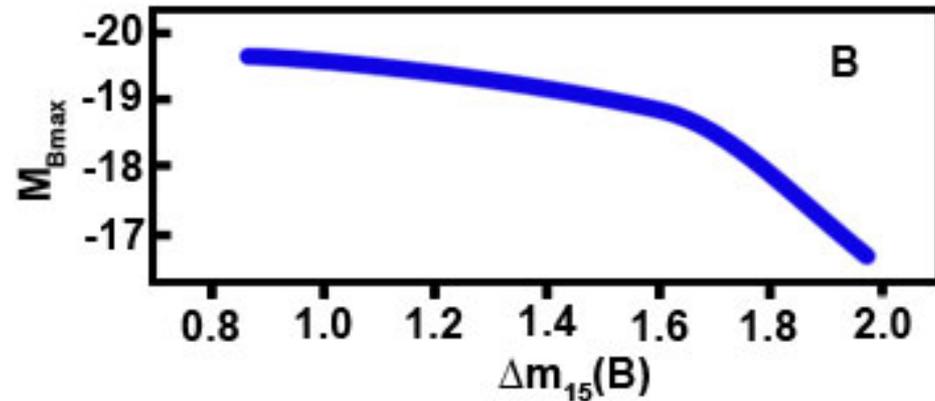
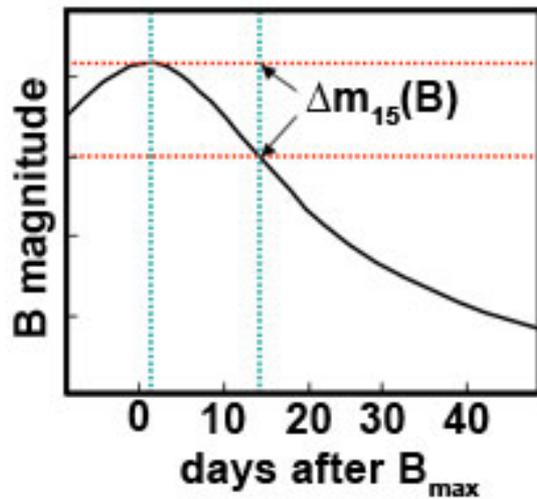
Светимость в максимуме – зависит от массы радиоактивного ^{56}Ni

Универсальный характер кривых блеска (с учётом коррекции за эффект Псковского-Филлипса):

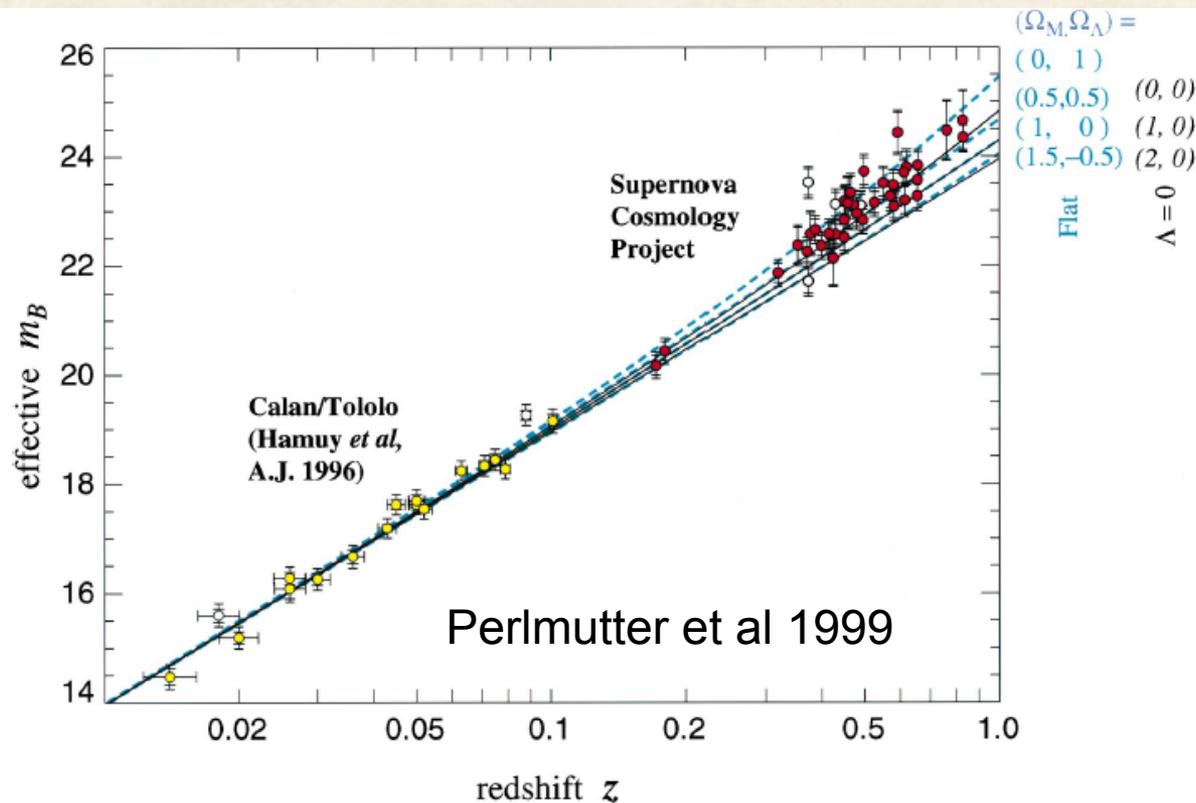
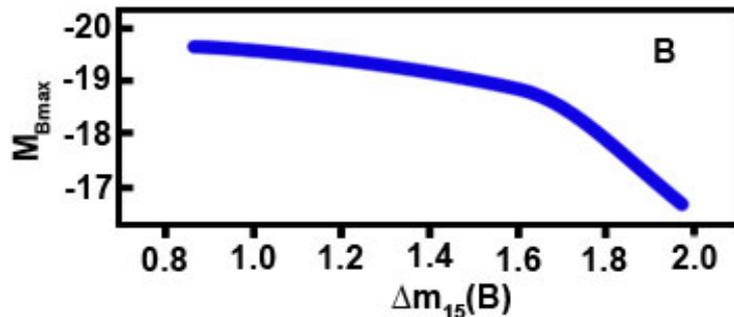
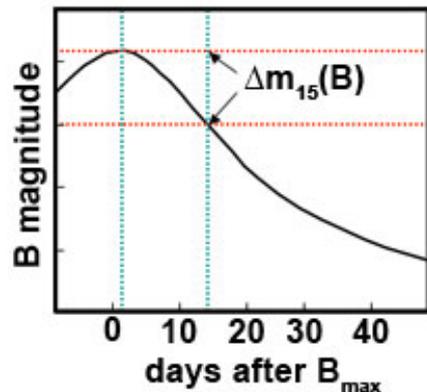


Homoto + 1997

Стандартные свечи: Сверхновые Ia



Стандартные свечи: Сверхновые Ia



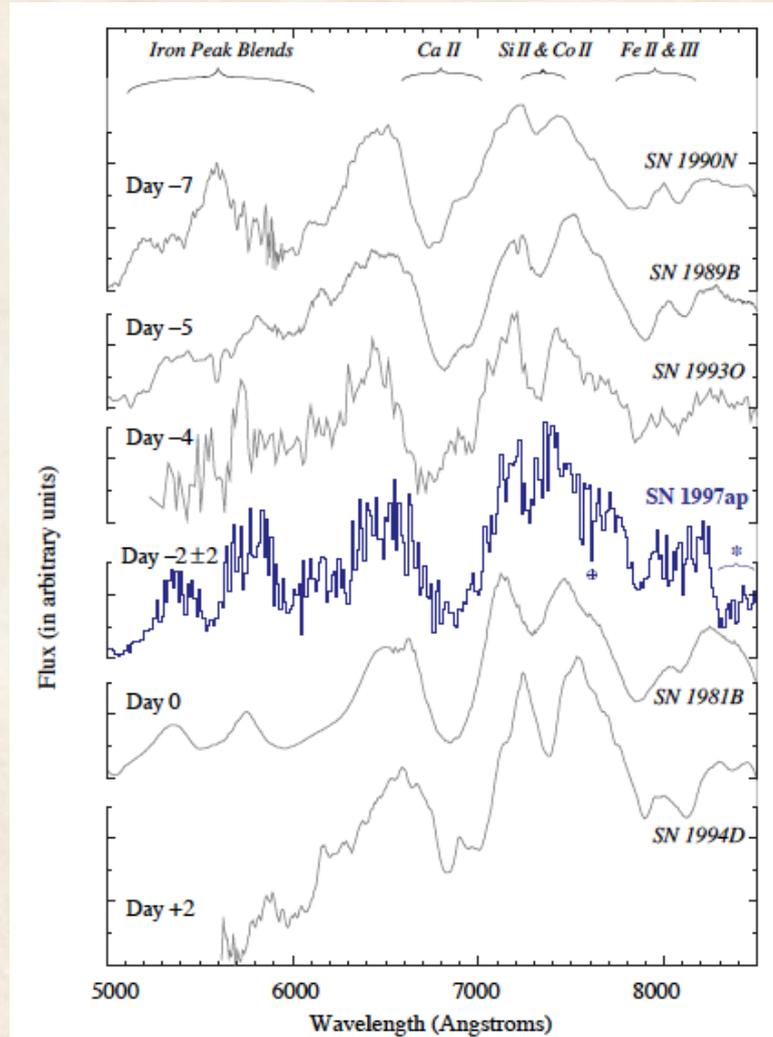
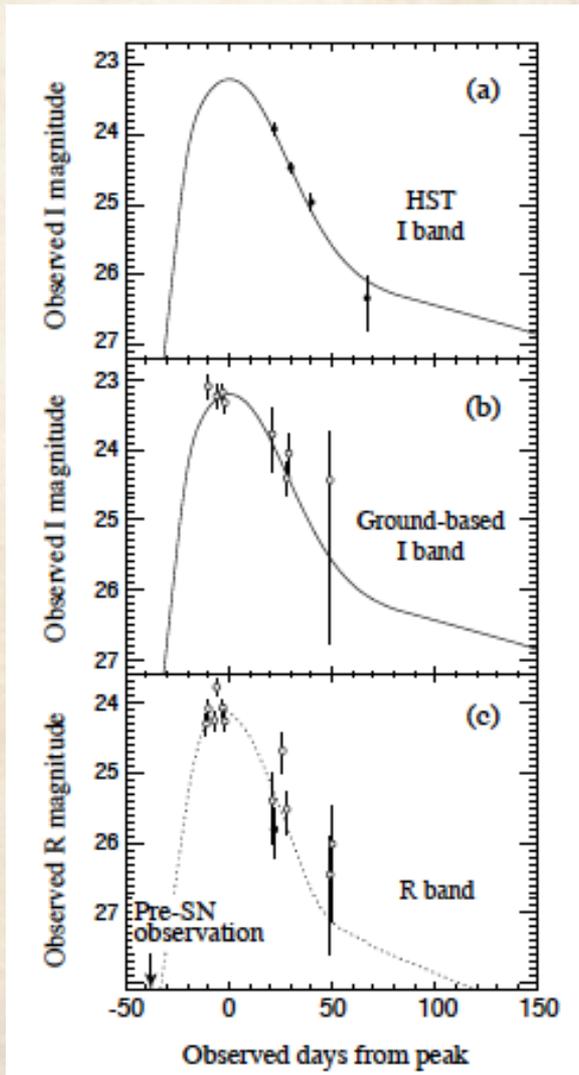
Нобелевской премия по физике 2011 г.
«за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых»

Сол Перлмуттр,
Брайан Шмидт,
Адам Рисс

“Космологические Сверхновые Ia”

SN 1997ap $z=0.83$

Perlmutter + 1997

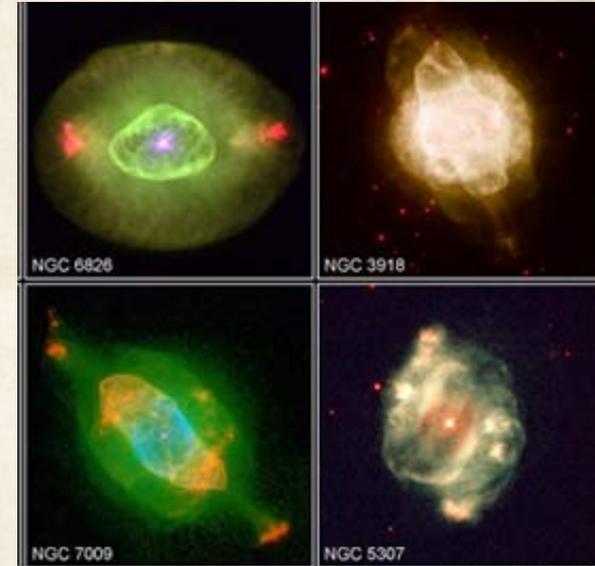
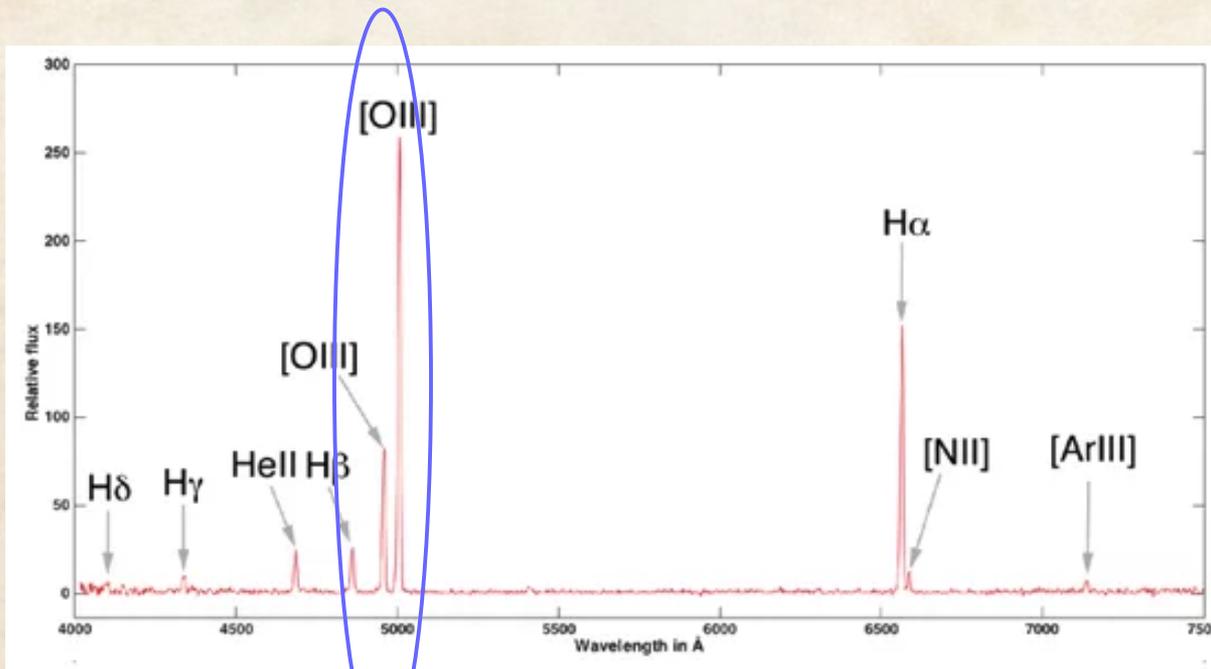


Keck 10m

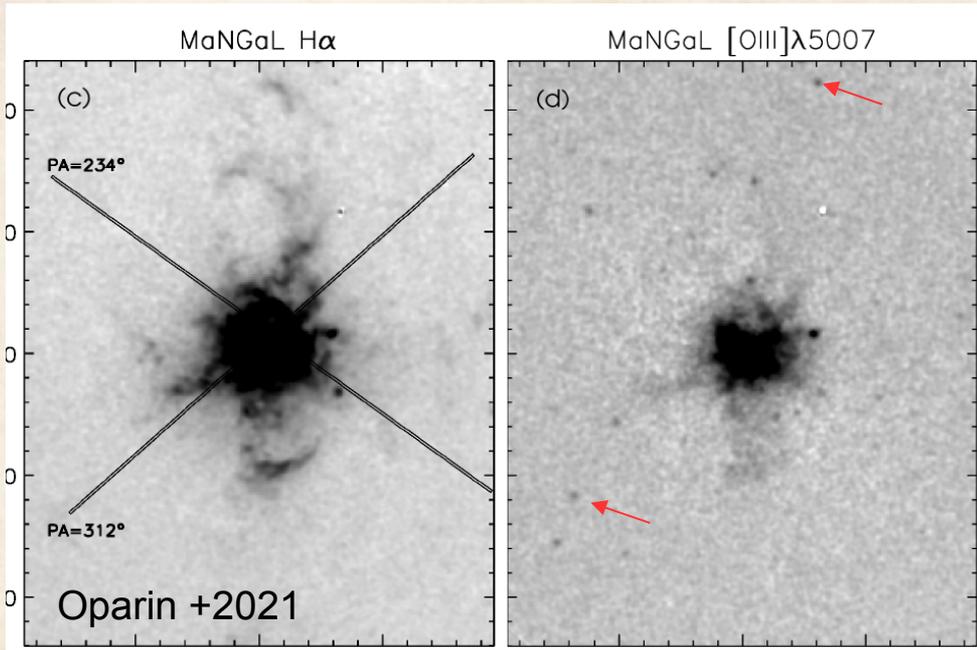
Стандартные свечи: планетарные туманности

Planetary nebula luminosity function (PNLF)

Основа метода – слабая зависимость ФМ от металличности: Светимость туманности в линии [OIII]5007 при уменьшении [O/H] - падает, но при этом повышается УФ-светимость ядра



Стандартные свечи: планетарные туманности



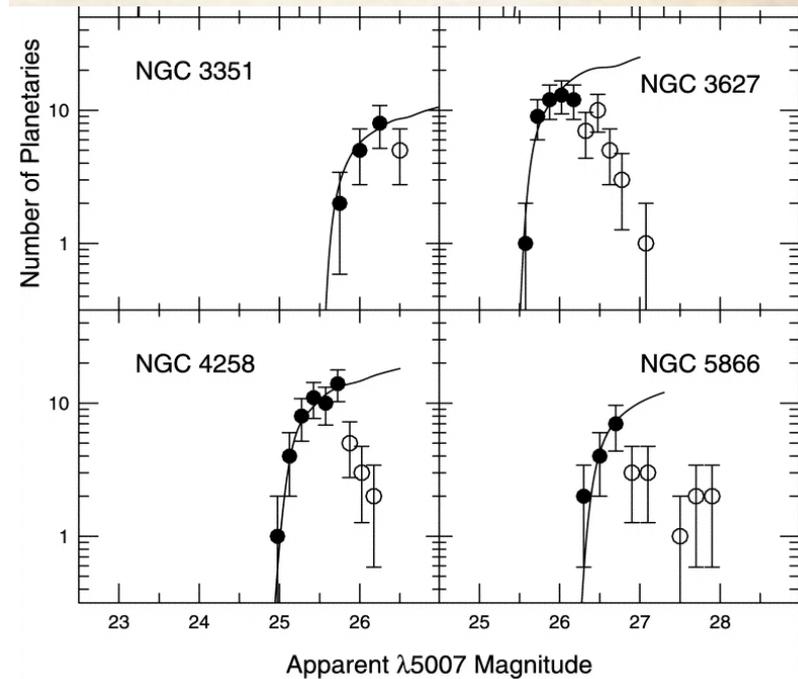
$$m_{5007} = -2.5 \log F_{5007} - 13.74$$

$$I(\lambda 5007)/I(H\alpha + N_{II}) > 1.6$$

$$N(M) \propto e^{0.307M} (1 - e^{3(M^* - M)})$$

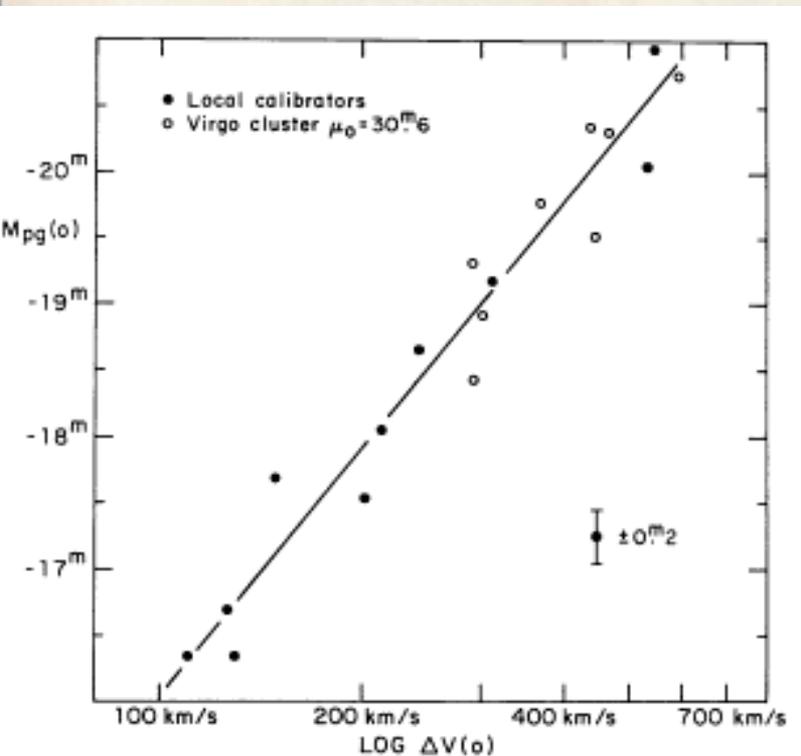
$$M^* = -4.51$$

Ciardullo + 2002

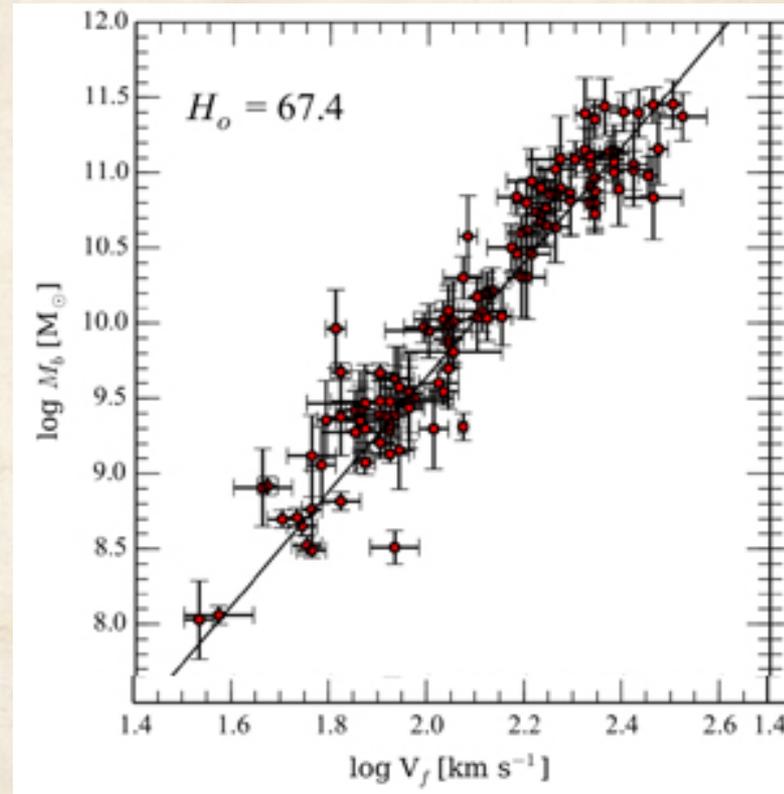


Соотношение Талли-Фишера

Tully & Fisher 1977:
Связь ширины профиля HI и
светимости галактики



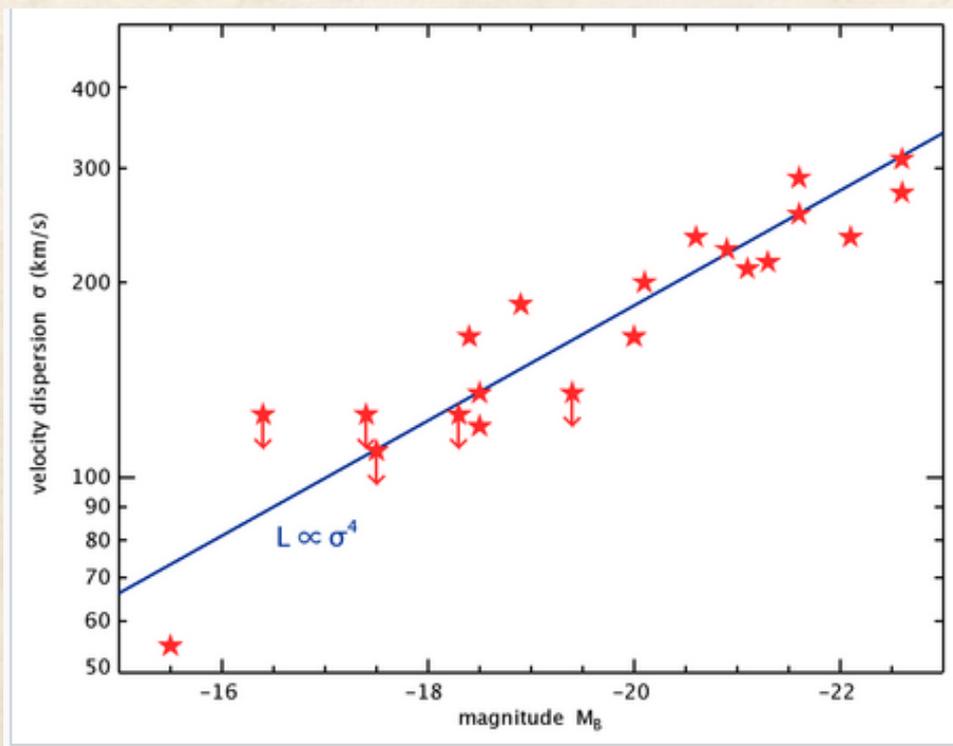
Сейчас применяют как $W(\text{HI})$, так и
амплитуду вращения галактики.
Барийонная масса: газ+звезды



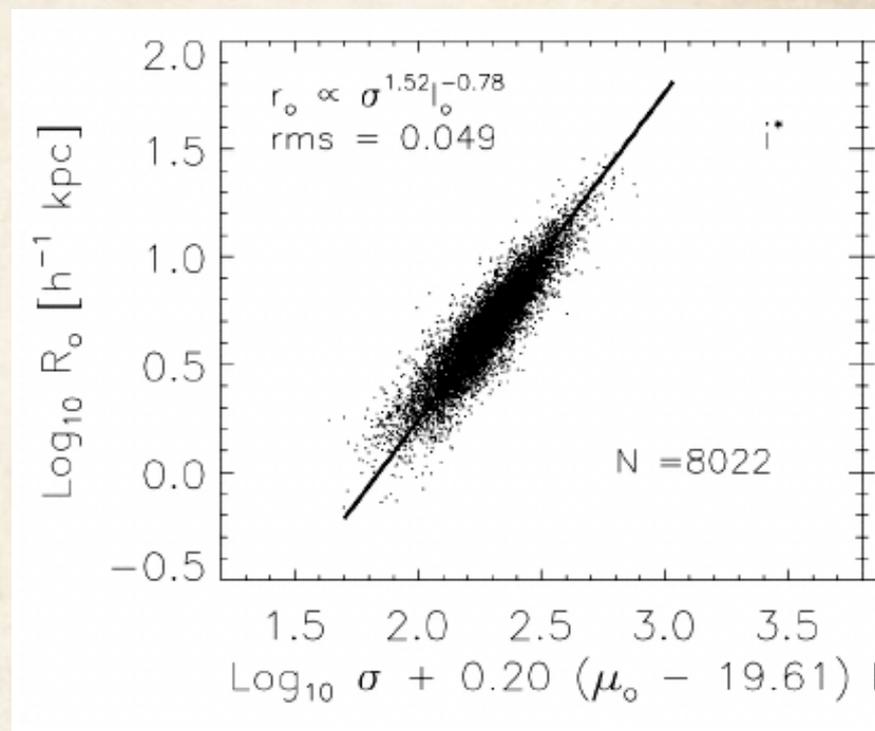
Schombert + 2020

Эллиптические галактики

Соотношение Фабера-Джексона
(Faber & Jackson 1976):
Светимость – центральная дисперсия
скоростей

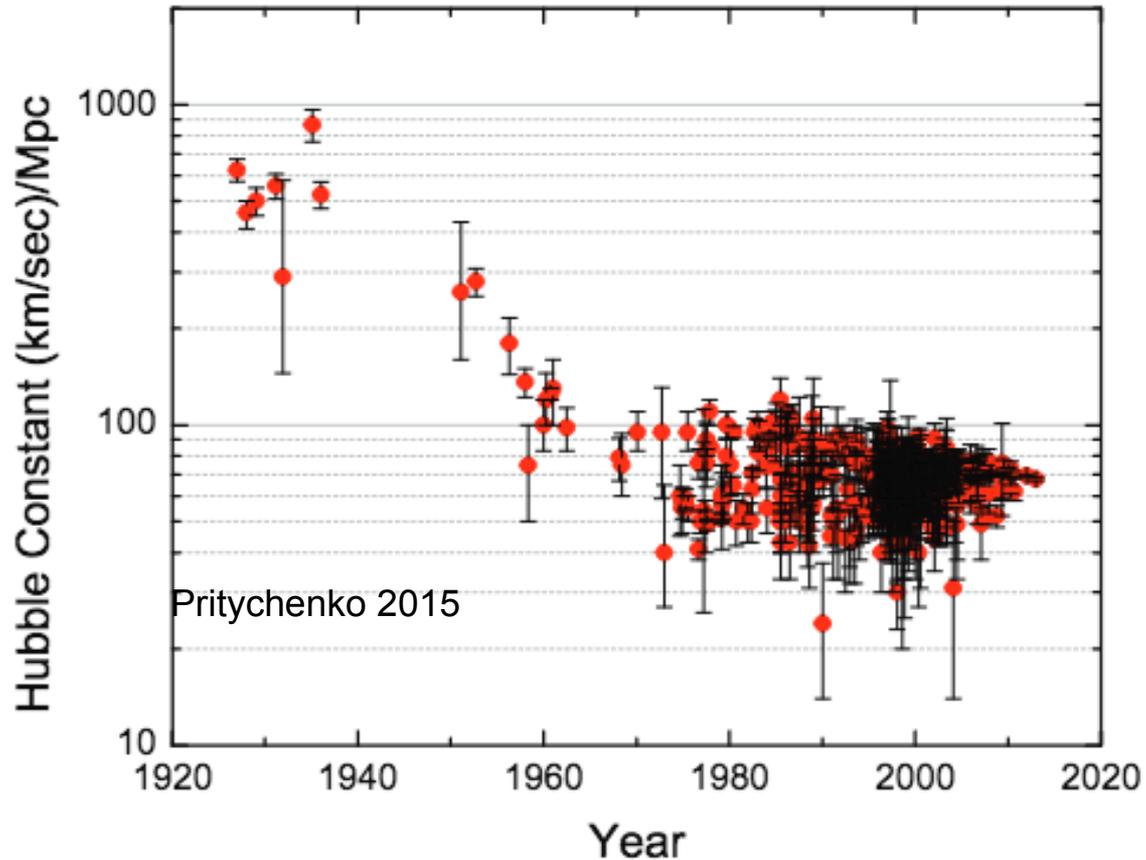


Фундаментальная плоскость:
 R_e – эффективный радиус.
 $\langle \mu \rangle$ – средняя поверхностная яркость в R_e
 σ дисперсия скоростей



Bernardi et al. 2003 : 9000 галактик SDSS

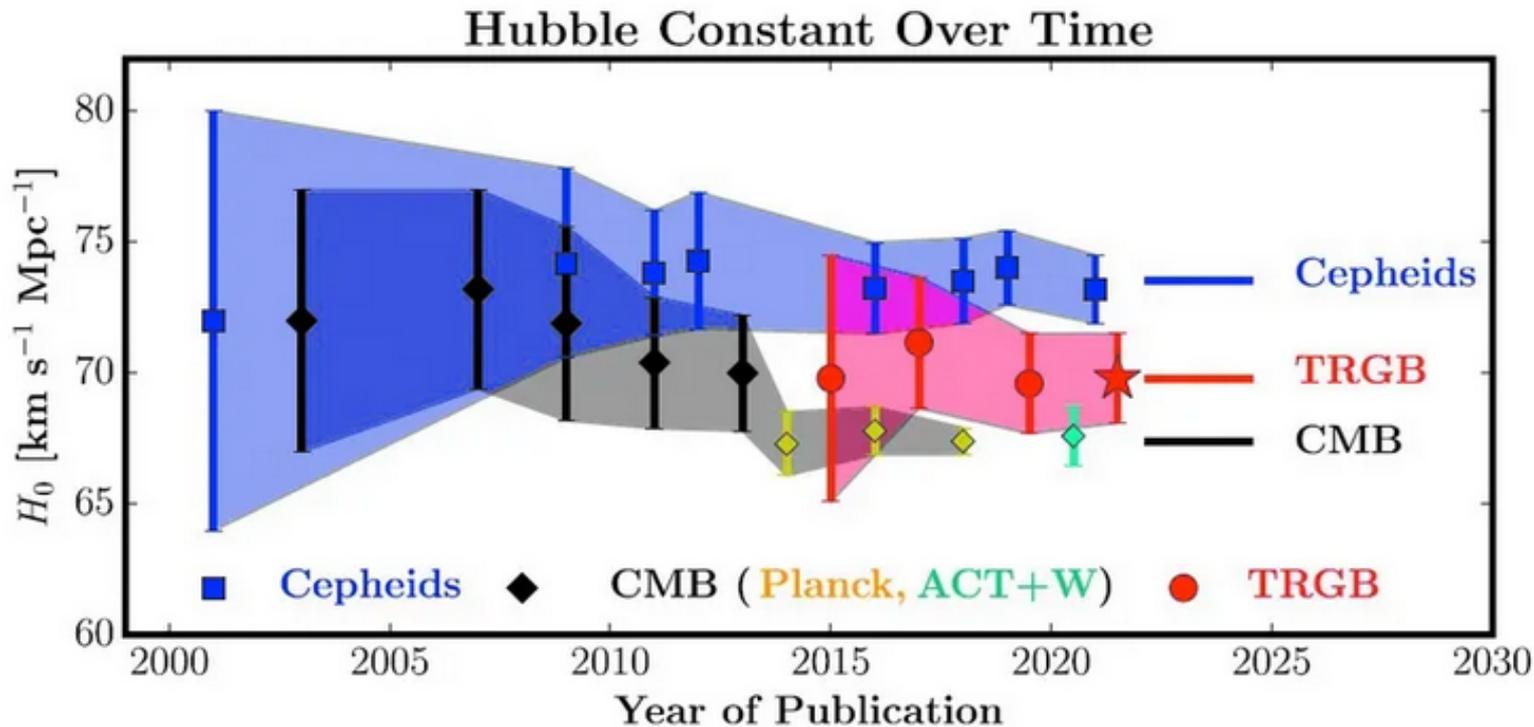
Эволюция измерений постоянной Хаббла



1980-2000:

Сосуществование “длинной” и “короткой” шкал: $H_0=50$ и 100 км/с/Мпк

“Напряжение Хаббла” (Hubble tension)



WMAP+Planck: 67.4 ± 0.5 км/с/Мпк

Freedman 2021

Сверхновые, цефеиды: $73.2 (\pm 1.3)$ км/сек/Мпс

Riesse et al 2023: более 1000 цефеид с JWST подтверждают “Хаббловское напряжение” на уровне 8.2 сигма