

Лекции 3-4

Астрофизика (введение в астрофизику)

1. Определение звездной величины
2. Звездные величины и показатели цвета
3. Определение расстояний в астрономии

Доцент кафедры астрономии

Казанского госуниверситета Г.В. Жуков

Использованы материалы курса

«Галактическая астрономия» А.В. Расторгуева (ГАИШ МГУ)

Определение звездной величины

В астрофизике практически единственным источником информации об исследуемых объектах и физических процессах является электромагнитное излучение, регистрируемое как наземными приборами так и аппаратами, находящимися в космосе.

Исторически мощность этого излучения измеряется внесистемными звездными величинами.

Определение звездной величины

Энергия, падающая

на площадку -

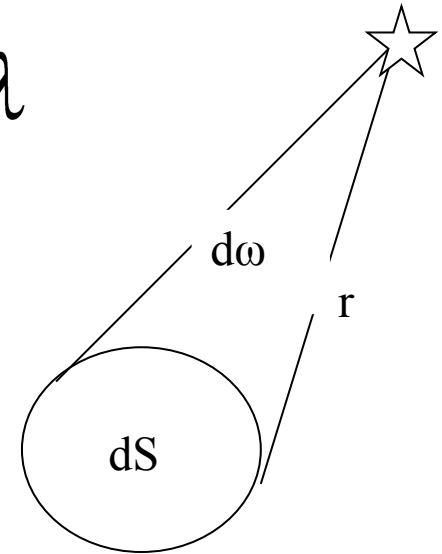
(так определяется

интерсивность излучения $I(\lambda)$)

$$W(\lambda) = I(\lambda) d\omega dt d\lambda$$

Поток -
$$F(\lambda) = \frac{W(\lambda)}{dt} = I(\lambda) d\omega d\lambda$$

Освещенность -
$$E(\lambda) = \frac{F(\lambda)}{dS} = \frac{I(\lambda)}{r^2} d\lambda$$



**Звездная величина, введенная Гиппархом во II веке до н.э.,
связана с освещенностью:**

$$m = -2.5 \log E + \text{const}$$

(«абсолютное» определение)

Определение звездной величины

Звездные величины двух звезд (или величины одной и той же звезды на разных расстояниях) связаны соотношением Погсона (1857):

$$\frac{E_1}{E_2} = 2.512^{-(m_1 - m_2)} \quad (\text{«относительное» определение звездной величины})$$

В действительности звездная величина зависит от спектрального диапазона, в котором производятся наблюдения. Поэтому без этого указания понятие звездной величины некорректно.

Определение звездной величины

Монохроматическая звездная величина ($\Delta\lambda \rightarrow 0$):

$$m_{\lambda} = -2.5 \log E_{\lambda} + \text{const}(\lambda)$$

На практике монохроматическая звездная величина может быть реализована в спектроскопии или радио-астрономии. Чаще всего, спектральная чувствительность приемника и пропускание оптики и атмосферы естественным образом формируют спектральную полосу, в которой проводятся наблюдения.

Определение звездной величины

Гетерохромная звездная величина, ($\Delta\lambda \sim 1-100\text{нм}$):

$$m_{\Delta\lambda} = -2.5 \log \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda} + \text{const}(\Delta\lambda)$$

$$\varphi(\lambda) = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \varphi_5 \dots,$$

φ_i - спектральное пропускание межзвездной среды, атмосферы, оптики телескопа, оптики регистрирующей аппаратуры, спектральная чувствительность светоприемника и т.п.

Определение звездной величины

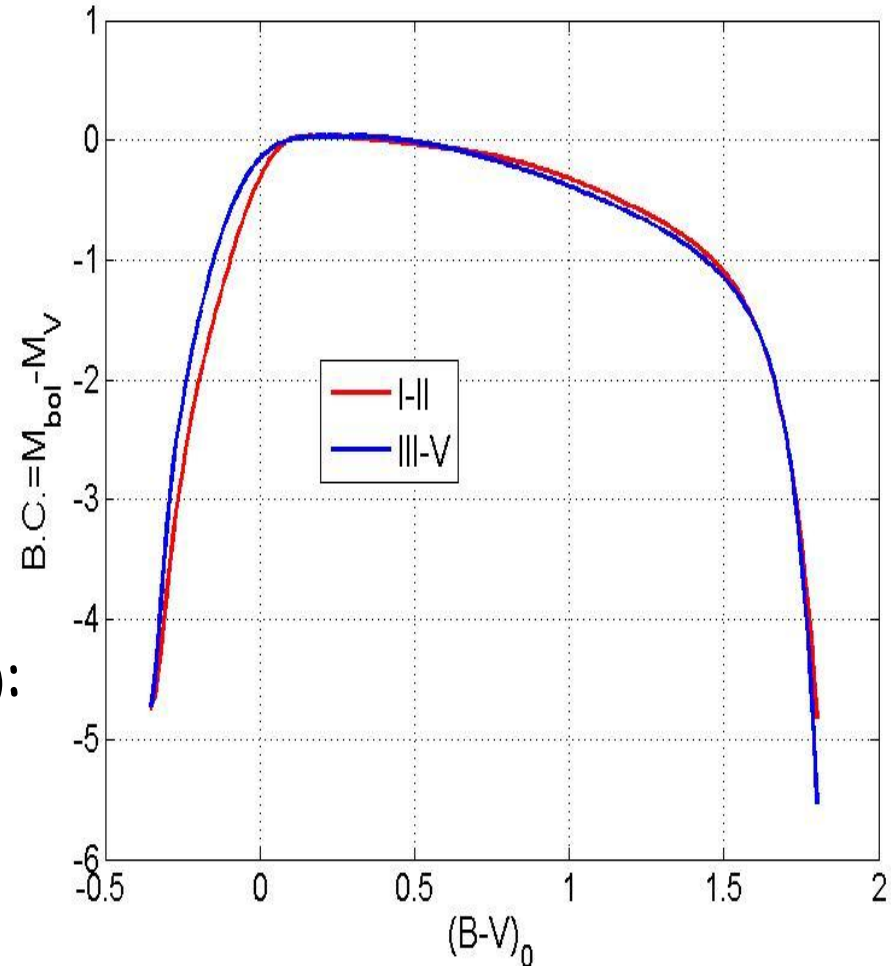
При решении ряда астрофизических задач (источники энергии звезд, внутреннее строение и эволюция звезд) необходимо знать полную энергию, излучаемую звездой во всем спектре. Такой характеристикой служит болометрическая звездная величина:

$$m_{bol} = -2.5 \log \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda} + const(bol)$$

Определение звездной величины

Даже при использовании заатмосферных наблюдений звезд очень трудно получить болометрическую звездную величину, поэтому ее рассчитывают теоретически (например, в модели АЧТ болометрическую поправку (В.С.) к визуальной величине):

$$B.C. = M_{bol} - M_v$$



B.C. vs $(B-V)_0$ (P.J.Flower, ApJ V.469, P.355, 1996)

Определение звездной величины

Для определения некоторых физических параметров звезд, например, температуры служит показатель цвета CI - разность звездных величин в двух участках спектра:

$$CI = m_{12} - m_{34} = -2.5 \log \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_1(\lambda) \varphi_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E_2(\lambda) \varphi_2(\lambda) d\lambda}$$

(Фактически CI дает представление о распределении энергии в спектре звезды. В современной многоцветной фотометрии существует несколько показателей цвета: U-B, B-V, V-R и т.д.)

Определение звездной величины

Шкала звездных величин включает как самый яркий объект на небе - Солнце ($m = -27^m$), так и самые слабые звезды, доступные крупным телескопам, имеющие $m \approx 30^m$.

Современная точность фотометрии достигает 0.1% по освещенности или 0.001^m . Для перехода от наблюдаемых звездных величин к энергии, излучаемой звездами, необходимо знать расстояния до них.

Определение звездной величины

Если расстояния до двух звезд известны, то освещенности от них, отнесенные к стандартному расстоянию 10 пк, дадут абсолютные звездные величины M , которые уже можно сравнивать. Они связаны с видимыми звездными величинами m и расстоянием r соотношением:

$$M = m + 5 - 5 \log r$$

Абсолютная величина характеризует энергию, излучаемую всей поверхностью звезды - светимость L :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (\text{для случая АЧТ})$$

Расстояния до звезд

Классификация методов определения расстояний:

- **Абсолютные, или прямые** (опирающиеся только на простейшие геометрические построения)
- **Промежуточные** (использующие некоторые дополнительные данные, не связанные напрямую с расстояниями)
- **Относительные, или косвенные** (в основном фотометрические), опирающиеся на физическую природу объектов

Расстояния до звезд

Абсолютные или прямые методы:

- Тригонометрический параллакс
- Расстояния "движущихся скоплений" или метод радианта); метод применим к ближайшим скоплениям: Гиады, Ясли, группа UMa,...
- Гравитационное линзирование (временная задержка между изображениями)

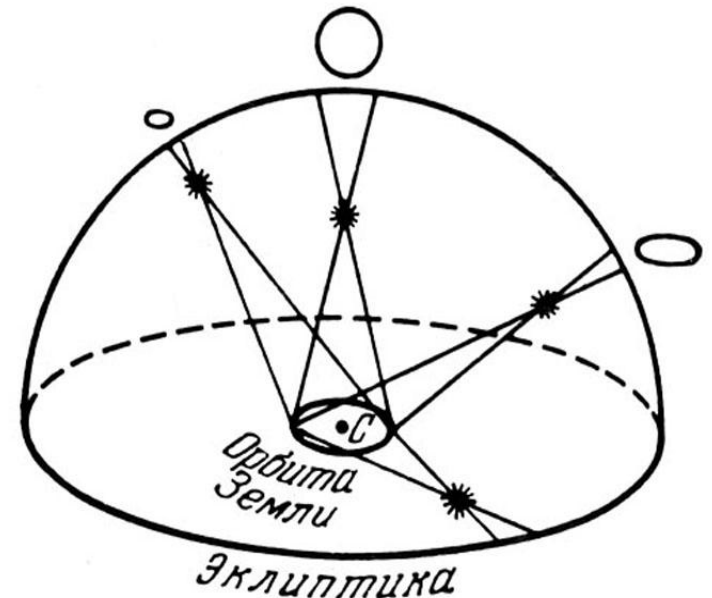
Расстояния до звезд

- Тригонометрический параллакс - **абсолютный (первичный) метод** измерения расстояний: он не опирается ни на какие предположения о физических характеристиках звезд
- Используется для калибровки **фотометрических (вторичных)** методов измерения расстояний
- Основа всей шкалы расстояний во Вселенной!

Расстояния до звезд

Тригонометрические параллаксы

Из-за орбитального движения Земли вокруг Солнца близкие звезды описывают на небе **параллактические эллипсы**, большая ось которых параллельна эклиптике.



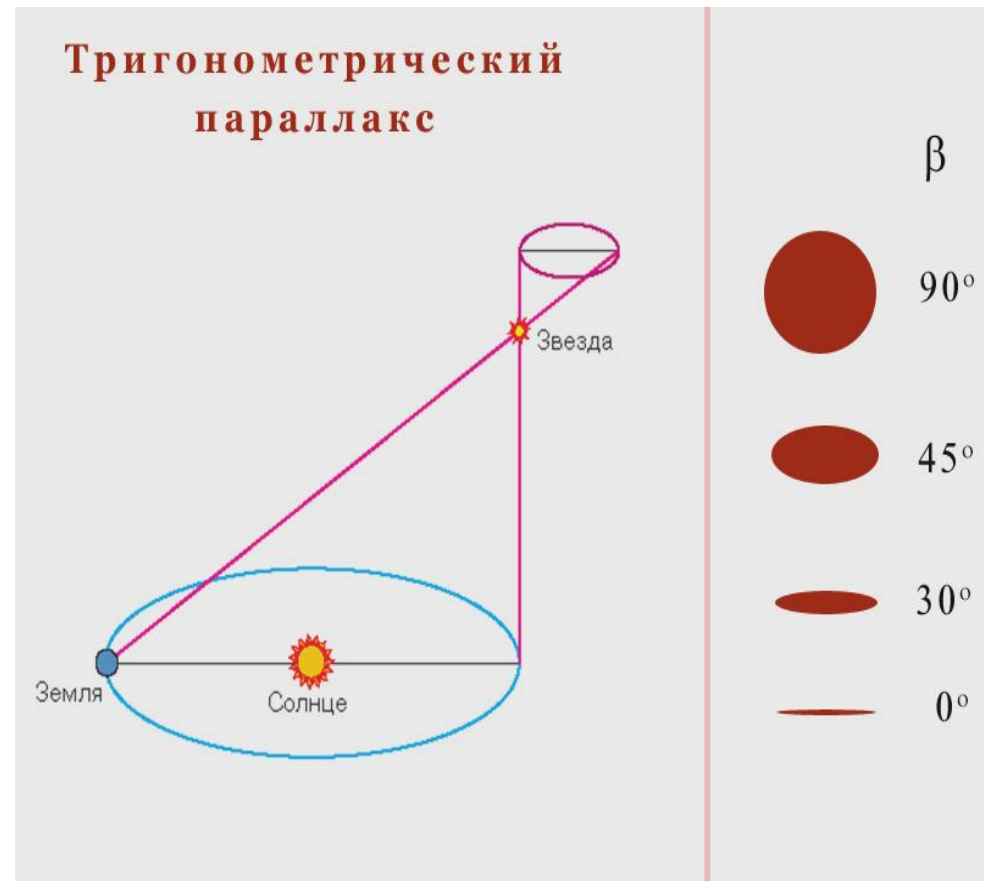
Расстояния до звезд

Размеры эллипсов уменьшаются при увеличении расстояния до звезды, а форма зависит от эклиптической широты β .

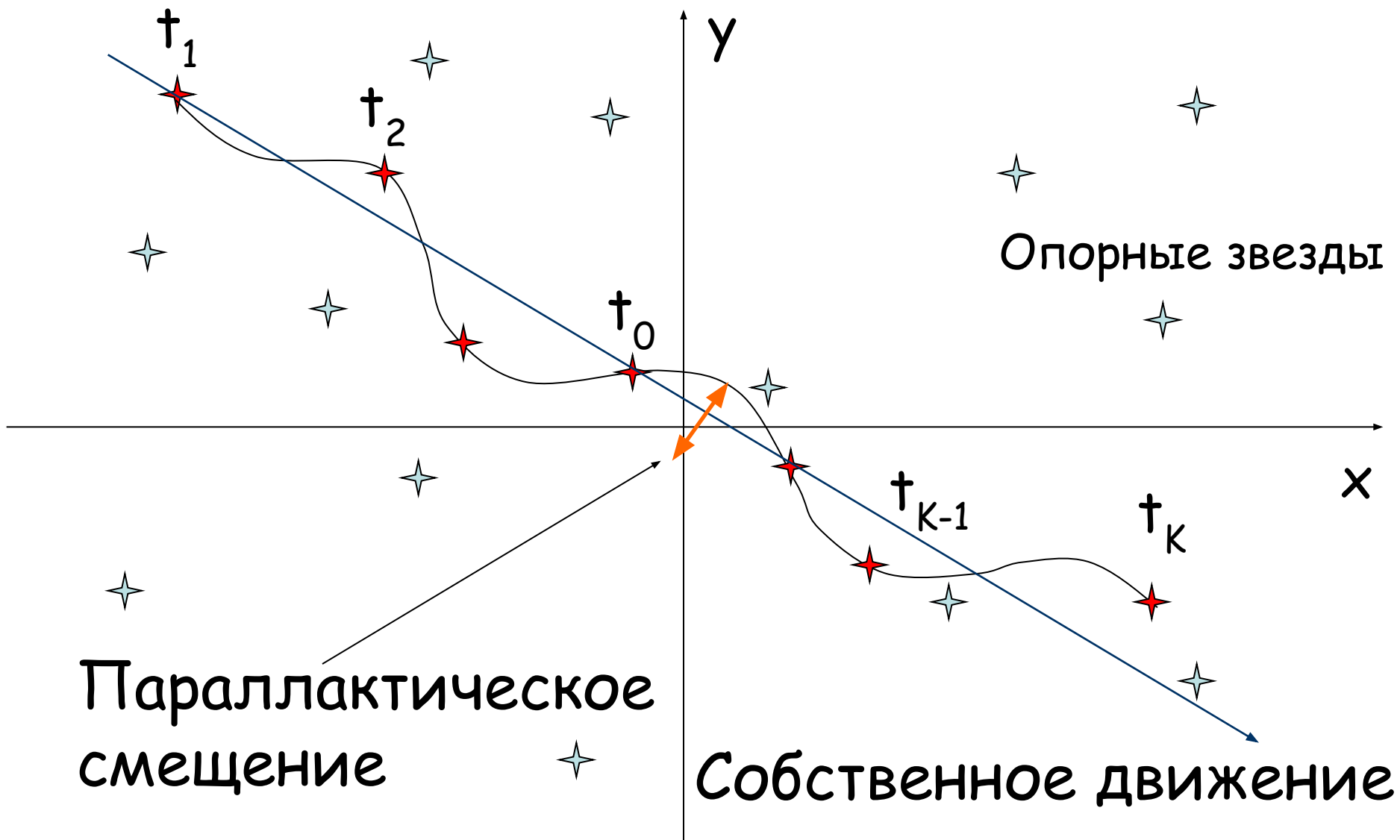
Параллакс π – большая полуось параллактического эллипса:

$$r \text{ (пк)} = 1 / \pi''$$

1 пк (парсек) = 206265 а.е.
= $3.086 \cdot 10^{16}$ м = 3.26 св. г.



Относительный метод измерения тригонометрических параллаксов



Расстояния до звезд

Для вычисления параллакса (и одновременно собственного движения) вначале определяется изменение координат звезды со временем по ряду фотопластинок или ПЗС-изображений.

Характерный интервал наблюдений - десятки лет.

Простейшая модель изменения сферических координат звезды (α , δ) со временем:

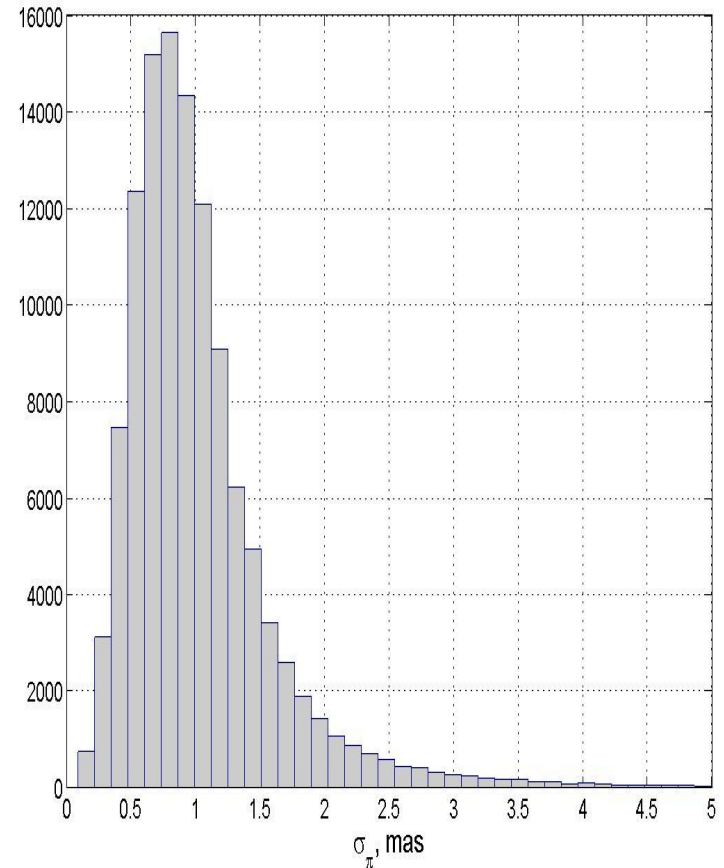
$$\Delta\alpha = \Delta p_\alpha \pi + \Delta t \mu_\alpha$$

$$\Delta\delta = \Delta p_\delta \pi + \Delta t \mu_\delta$$

Здесь π – параллакс, $\mu\alpha$ и $\mu\delta$ – компоненты собственного движения, Δt – интервал наблюдений, а параметры p_α , p_δ зависят от взаимного положения Земли, Солнца и звезды. (Примечание: абсолютизация π)

Расстояния до звезд

Точность наземных измерений углов - не лучше $\pm 0.01''$. Поэтому надежные расстояния не превышают 25-50 пк. Вынос измерительной аппаратуры на орбиту Земли существенно улучшает наши возможности. В 1989 году была запущена орбитальная обсерватория для определения параллаксов и собственных движений. Измерено около 120 000 звезд с точностью $\pm 0.001''$.



Распределение ошибок параллаксов HIPPARCOS (van Leeuwen, 2007)

Расстояния до звезд

Относительные, или косвенные методы:

Большинство методов, в основном фотометрические, опираются на:

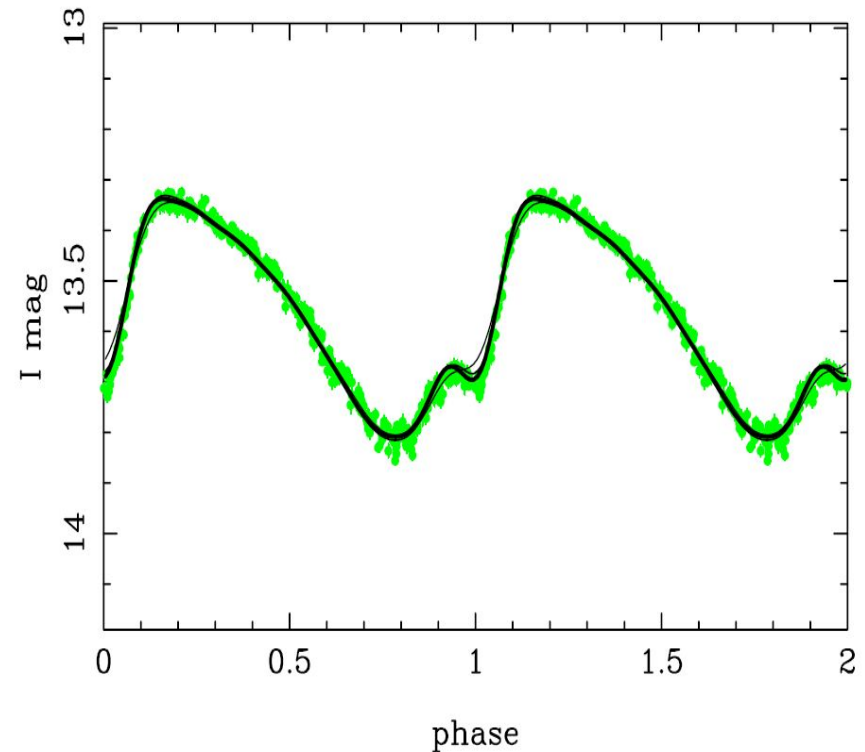
- известные светимости звезд, прокалиброванные на основе каких либо абсолютных методов;
- статистические соотношения между звездными характеристиками (например, зависимость "период - светимость" цефеид, зависимость "скорость падения блеска - блеск в максимуме" Сверхновых типа Ia).

Основная идея фотометрических методов заключается в выборе критерия, позволяющего сделать предположение о величине светимости звезды (M) и использовании соотношения $M = m + 5 - 5 \log r$.

Расстояния до звезд

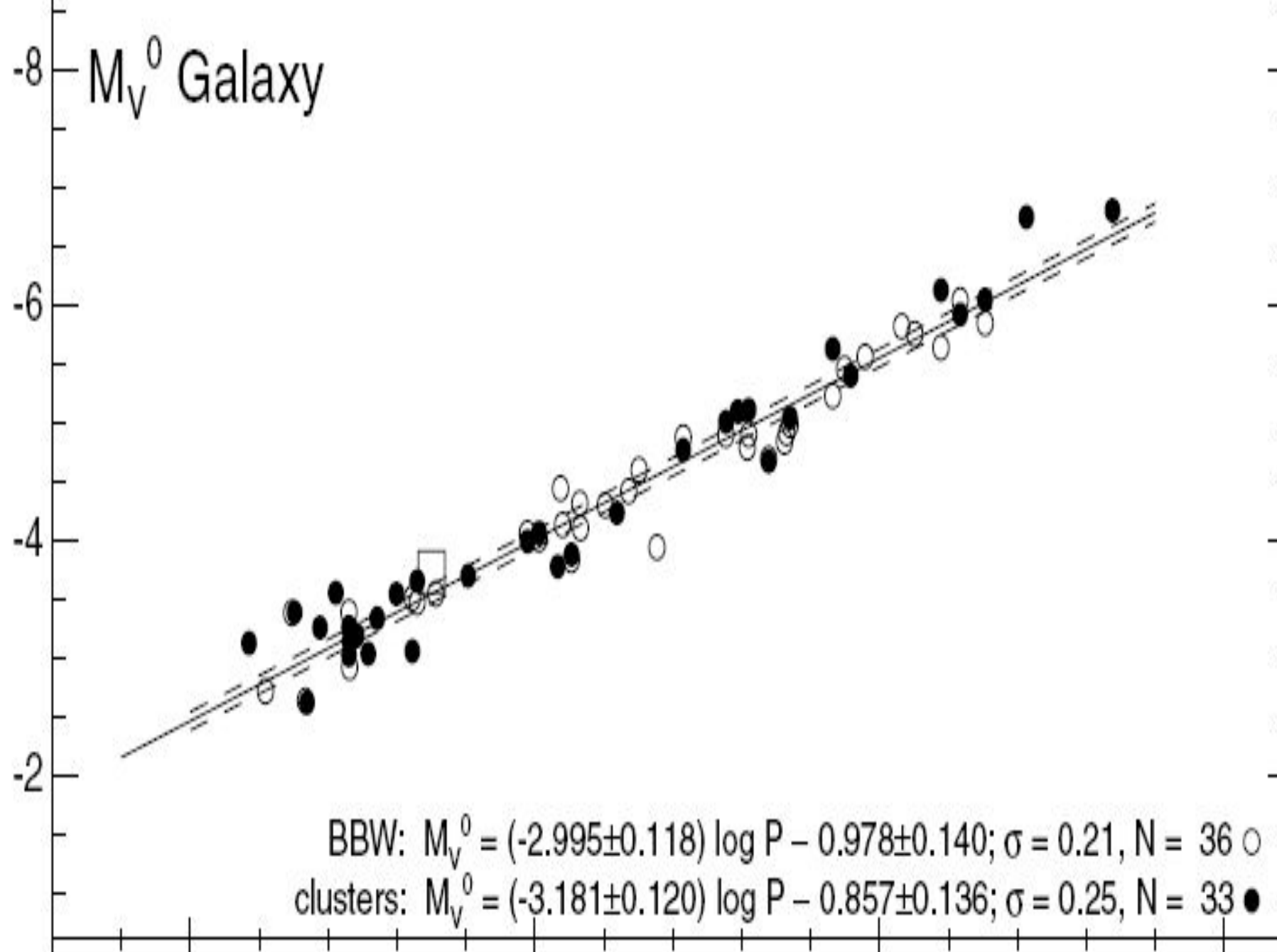
Пульсирующие звезды типа δ Цефея относятся к звездам весьма высокой светимости, что позволяет изучать их вплоть до 50 Мпк.

Для них обнаружена четкая зависимость, позволяющая по величине периода определять светимость и, следовательно, расстояние.



M_V^0 Galaxy

M_V^0

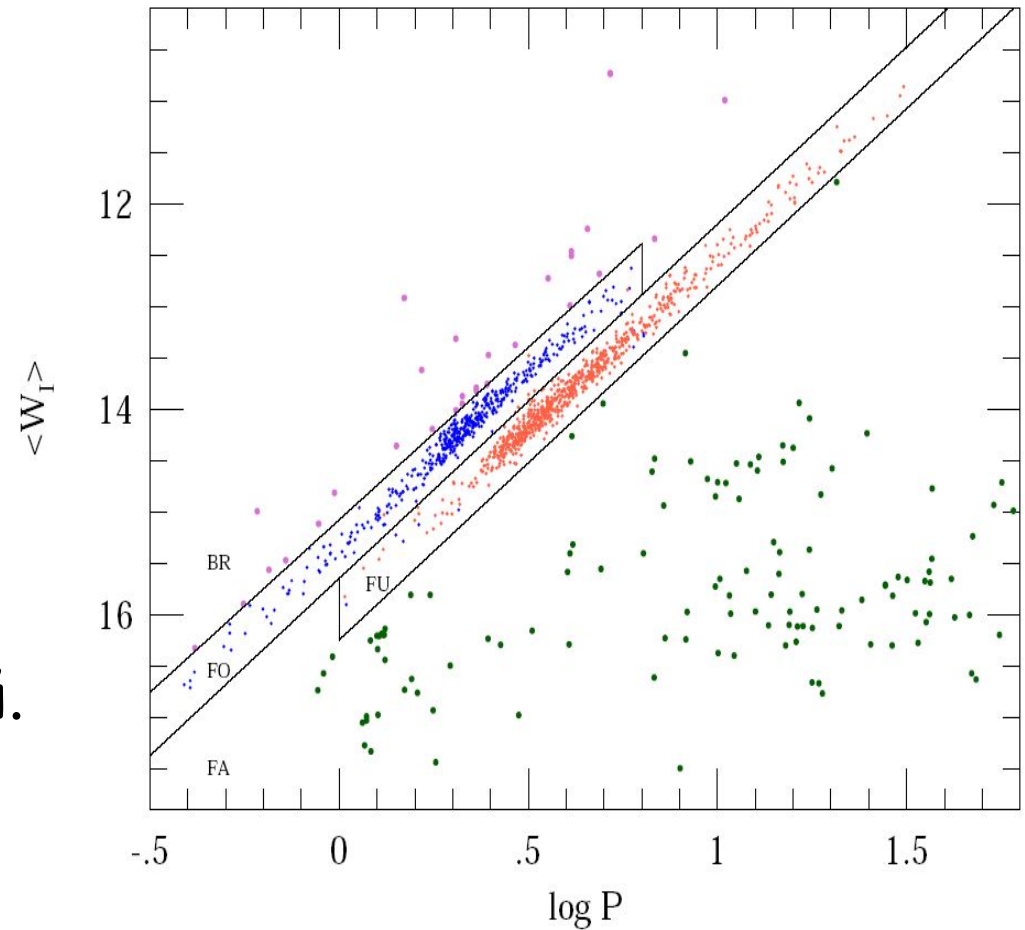


BBW: $M_V^0 = (-2.995 \pm 0.118) \log P - 0.978 \pm 0.140$; $\sigma = 0.21$, $N = 36$ ○
clusters: $M_V^0 = (-3.181 \pm 0.120) \log P - 0.857 \pm 0.136$; $\sigma = 0.25$, $N = 33$ ●

Расстояния до звезд

При поиске эффектов микролинзирования в БМО было обнаружено и изучено много цефеид. Оказалось возможным разделить зависимость $P-L$ на две, что заметно повысило точность определения расстояний.

Красные: основной тон пульсаций
Синие: первый обертоны
 $P_1 / P_0 \approx 0.71$

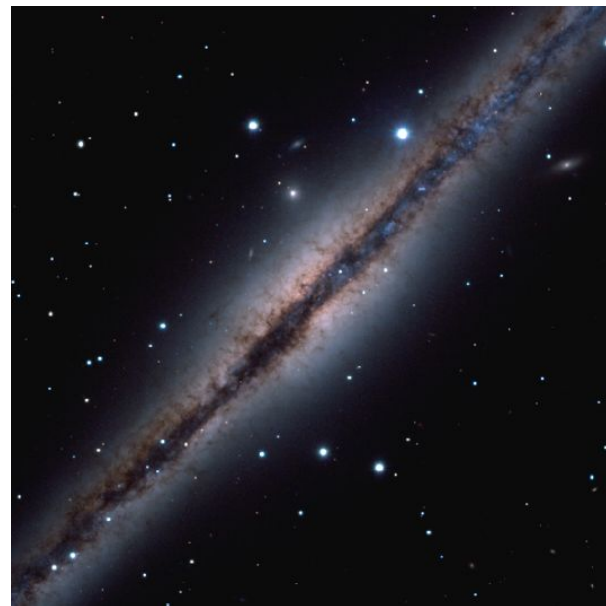


Расстояния до звезд

Диск нашей Галактики толщиной ~ 200 пк заполнен хорошо перемешанной смесью межзвездного газа (в основном, атомарного и молекулярного водорода - HI и H₂) и межзвездной пыли.

Межзвездная среда (МЗС) имеет характерную плотность $\sim 1 \text{ см}^{-3}$ и полную массу $\sim 10^{10} M_{\odot}$ ($\sim 10\%$ массы видимого диска).

Примером могут служить спиральные галактики, видимые с ребра.



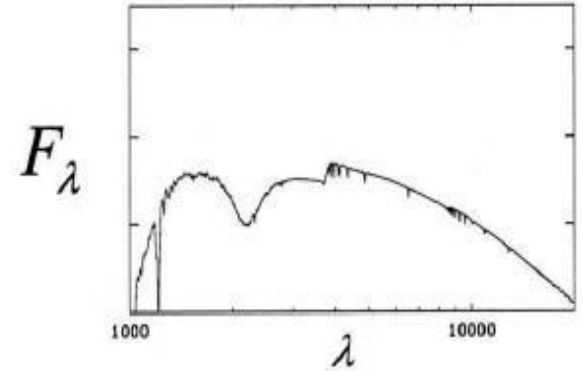
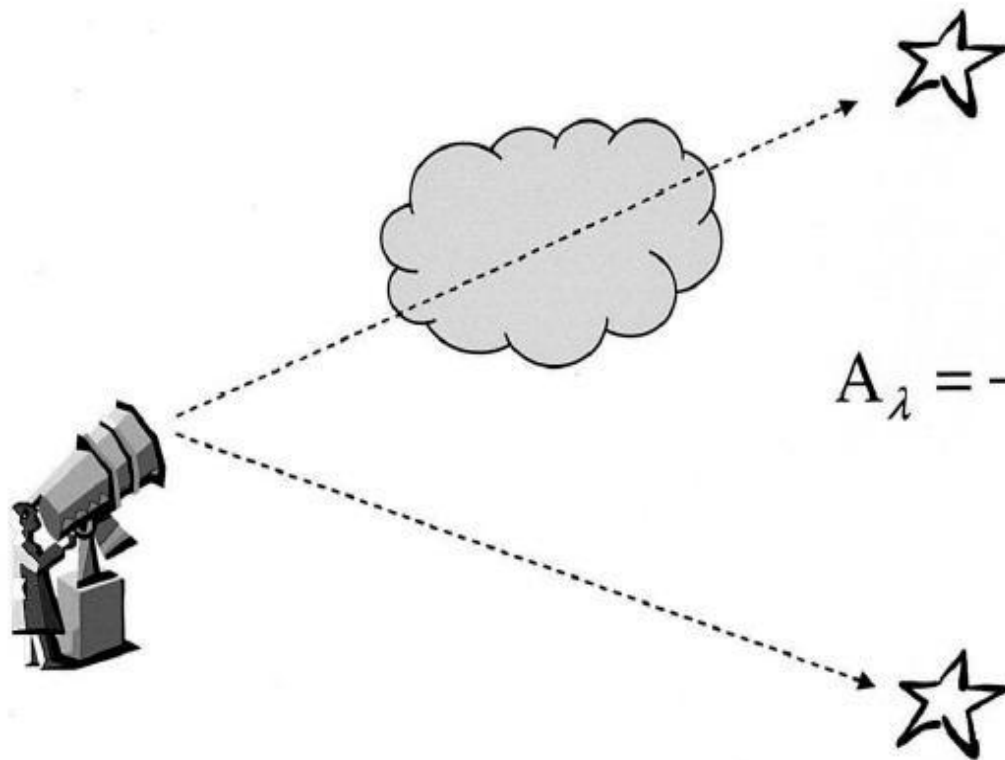
Расстояния до звезд

Наличие пыли в МЗС приводит к поглощению и покраснению света. Абсолютная звездная величина при учете поглощения A_λ увеличивается:

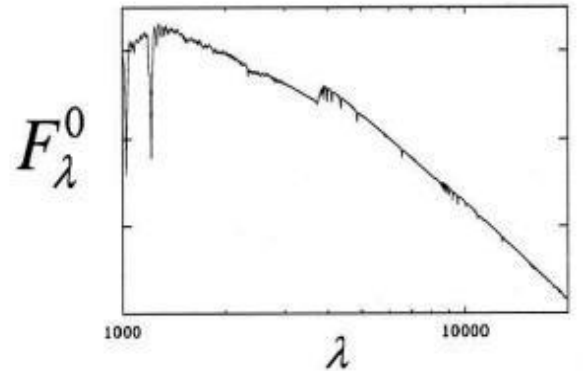
$$M_\lambda = m_\lambda + 5 - 5 \log r - A_\lambda$$

Таким образом, фотометрически определяемые расстояния значительно недооцениваются и возникает проблема учета межзвездного поглощения света.

Расстояния до звезд



$$A_\lambda = -2.5 \log(F_\lambda / F_\lambda^0) = 1.086 \tau_\lambda$$

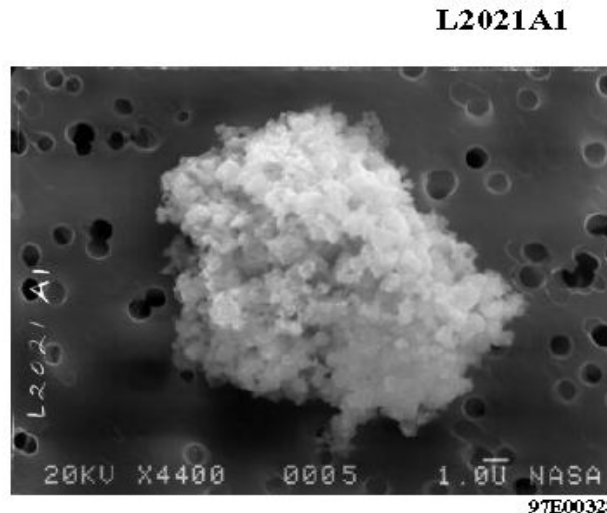
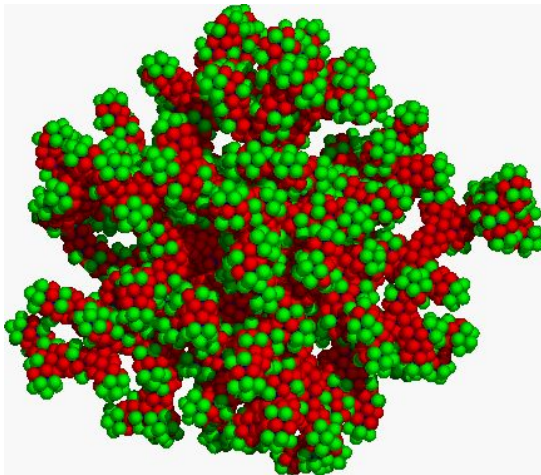


Размеры пылевых частиц $\sim 100 \text{ nm} - 1 \text{ }\mu\text{m}$

Химический состав: смесь C (графита), O, Si, Mg, Fe, ..., Na, Al, Ca, Ni, K, Ti, Cr, Mn, Co, ...

Пылинки имеют сложную пространственную структуру.

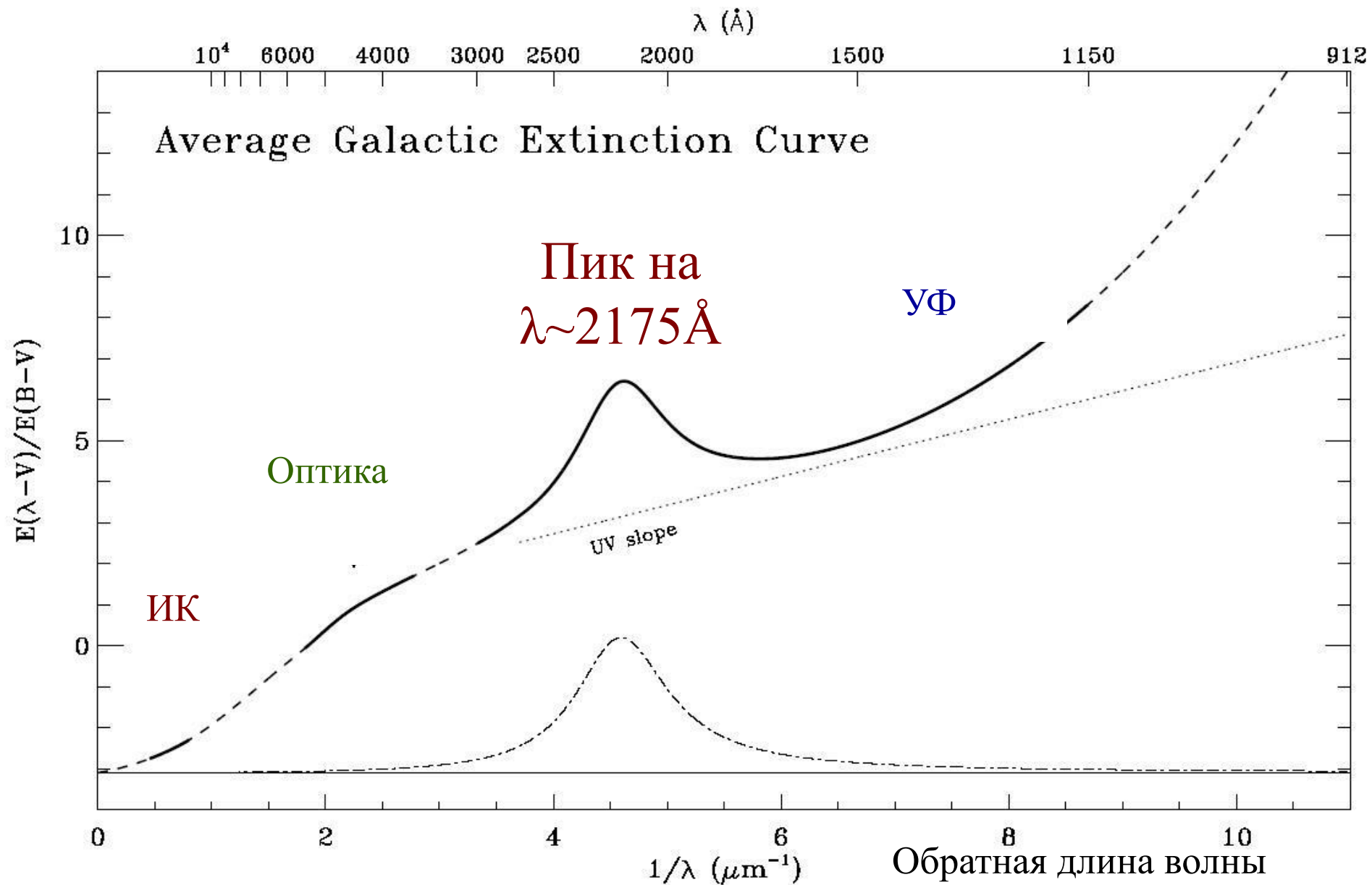
Пыль рассеивает, поглощает и поляризует проходящий свет (селективно).



Модель межзвездной пылинки (слева) и образец пылинки (проект Stardust)

Расстояния до звезд

Расстояния до звезд



Расстояния до звезд

Альbedo
пылинок:
данные
наблюдения
туманностей

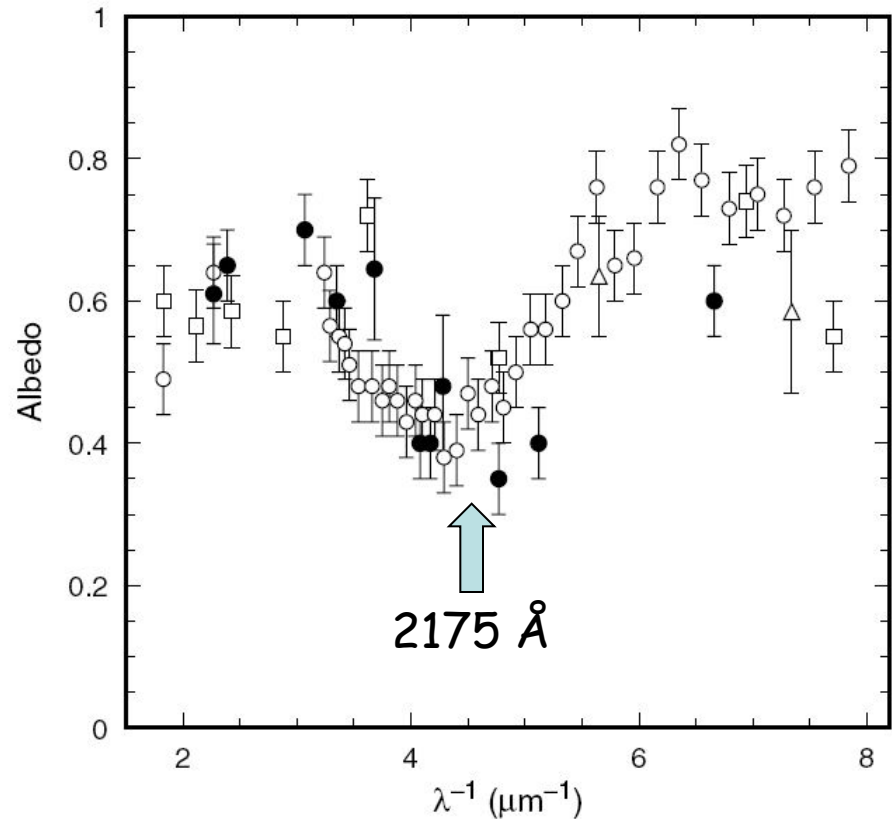


Figure 3.5. The spectral dependence of the grain albedo from observations of diffuse galactic light and reflection nebulae: full circles, diffuse galactic light (Lillie and Witt 1976, Morgan *et al* 1976, Toller 1981); open circles, IC 435 (Calzetti *et al* 1995); open squares, NGC 7023 (Witt *et al* 1982, 1992, 1993); and open triangles, Upper Scorpius (Gordon *et al* 1994).

полученные.

а) по фотометрическим данным;

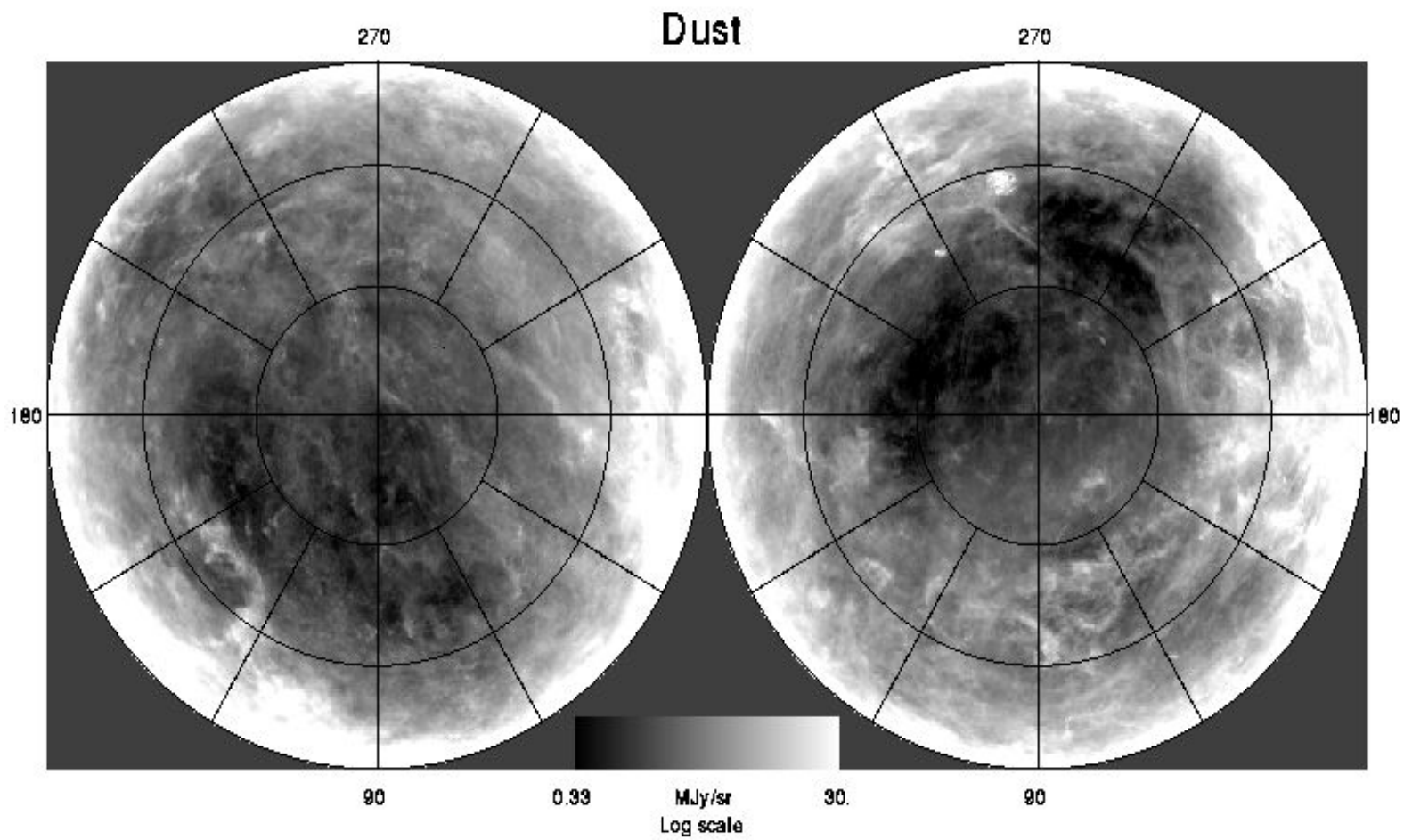
б) по атомарному водороду и подсчетам далеких галактик;

Существование карт поглощения света на небе, полученные:
в) по данным излучения пыли.

а) по фотометрическим данным;

б) по атомарному водороду и подсчетам далеких галактик;

в) по данным излучения пыли.



Расстояния до звезд

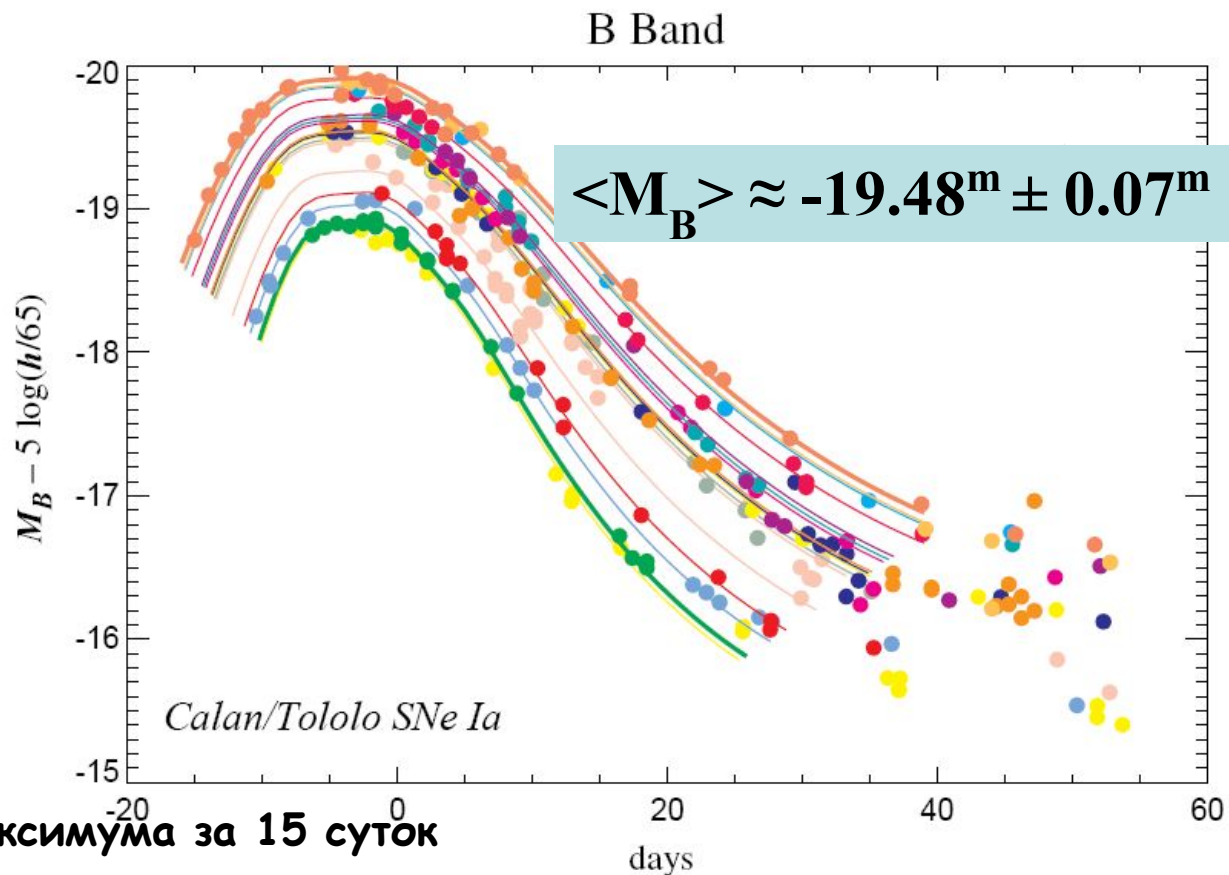
Термоядерный взрыв белого карлика (C/O) в результате аккреции вещества со спутника
 В максимуме блеска одни из ярчайших объектов:
 могут наблюдаться на расстояниях > 3 Гпк (!)

Используются для исследования строения Вселенной

блеск в максимуме

$$M_B \approx -21.73 + 2.70 \Delta V_{15}$$

Используются для
 исследования
 строения
 Вселенной



ΔV_{15} - падение блеска от максимума за 15 суток

по соответствовало некоторым космологическим моделям с расширением (де Ситтер, А. Фридман).

Значение постоянной Хаббла H зависит от калибровки расстояний до галактик (цефеиды, сверхновые...) и в настоящее время оценивается в 70 км/сМпк .

Для неразрешимых на звезды далеких галактик и квазаров закон Хаббла является методом определения

расстояний до них.

$$V_r = H \cdot r,$$

что соответствовало некоторым космологическим моделям с расширением (де Ситтер, А. Фридман).

Значение постоянной Хаббла H зависит от калибровки расстояний до галактик (цефеиды, сверхновые...) и в настоящее время оценивается в 70 км/сМпк .

Для неразрешимых на звезды далеких галактик и квазаров закон Хаббла является методом определения расстояний до них.