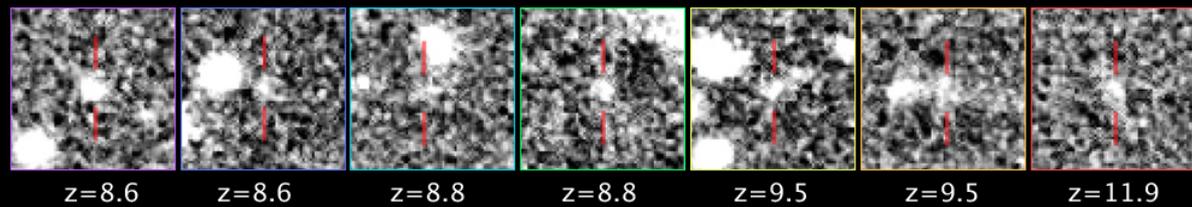


# Определение расстояний: первый шаг на пути к далёким галактикам



- **Расторгуев А.С.**, д.ф.-м.н., профессор каф. экспериментальной астрономии физического факультета; зав. отделом изучения Галактики и переменных звёзд ГАИШ МГУ им. М.В.Ломоносова



# Хаббловское сверхглубокое поле (HUDF 2012)

Экспозиция 100 ч.

Самые слабые  
галактики ( $\sim 30^m$ ) в  
1000 млрд. раз  
слабее Веги !

Им всего  
300-600 млн. лет



... А звезда здесь  
только одна !

# Разговор пойдет о шкале расстояний во Вселенной:

- Расскажем о способах **измерения расстояний в мегамире**
- Важно знать, как и с какой точностью определяются расстояния начиная от планет Солнечной системы и кончая далекими объектами – звёздами и другими галактиками
- Без этого невозможно понять наше место в Галактике и во Вселенной и изучать строение звёздного мира и мира галактик

- Большой диапазон расстояний требует иерархического (поделённого на ряд «ступеней» или этапов) подхода к решению задачи
- Пример: переход от измерения длины обычной линейкой к использованию велосчётчика или автомобильного одометра  измерение расстояния между городами
- Для этого нужно вначале **измерить ДЛИНУ ОКРУЖНОСТИ КОЛЕСА**, а затем считать его обороты

- Переход со ступени на ступень в попытках создания универсальной шкалы расстояний в астрономии называется **«калибровкой» линеек или шкал расстояний**; при этом новая «линейка», рассчитанная на измерение больших масштабов, градуируется по старой, используемой на меньших масштабах
- Вспомним историю...

С чего началось измерение больших расстояний ?

- С вычисления размера Земли по длине дуги окружности (Эратосфен Киренский, директор Александрийской библиотеки, ~240 г. до н.э.)

- Эратосфен отметил, что в полдень в Сиене (современный Асуан) Солнце было видно даже со дна глубокого колодца: значит, оно было почти в зените, а в Александрии (расположенной севернее) Солнце было на **7°12'** ниже зенита



Зенит



Зенит



$7^{\circ}12'$



L

Сиена  
(Асуан)

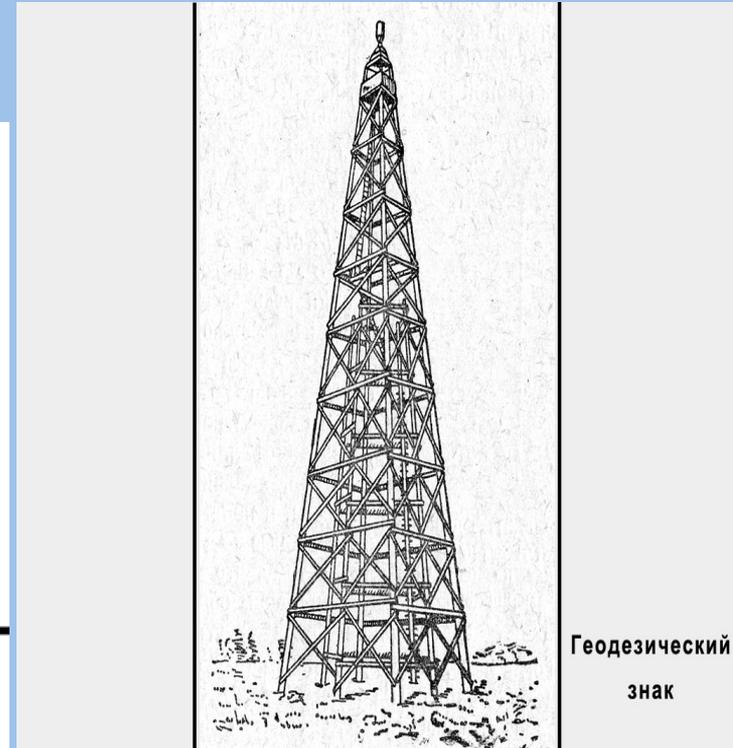
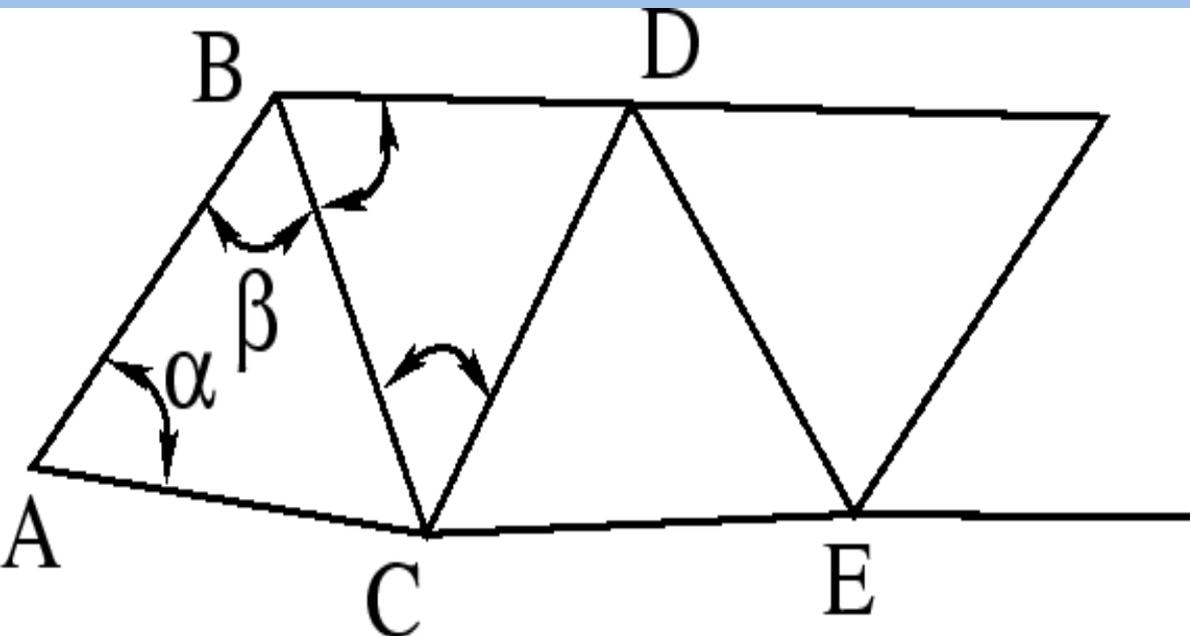
Александрия

$7^{\circ}12'$



- Предположив, что Земля - шар (что было вполне революционной идеей для того времени), Эратосфен, зная расстояние между городами (~5000 стадиев), оценил длину земного меридиана примерно в  $360/7.2 \times 5000 \approx 250000$  стадиев, т.е.:
- греческий стадий (~178 м)  $\longrightarrow$  44500 км
- египетский стадий (~172.5 м)  $\longrightarrow$  43125 км
- Современное значение - около **40030 km**
- Точность ~10% !!!

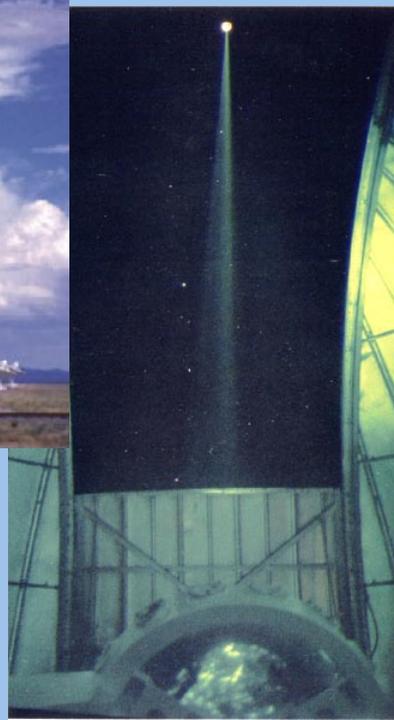
Метод триангуляции: база АВ + углы  $\alpha$ ,  $\beta$   $\rightarrow$  расстояния АС и ВС



- Материковая геодезическая сеть ABCDE...

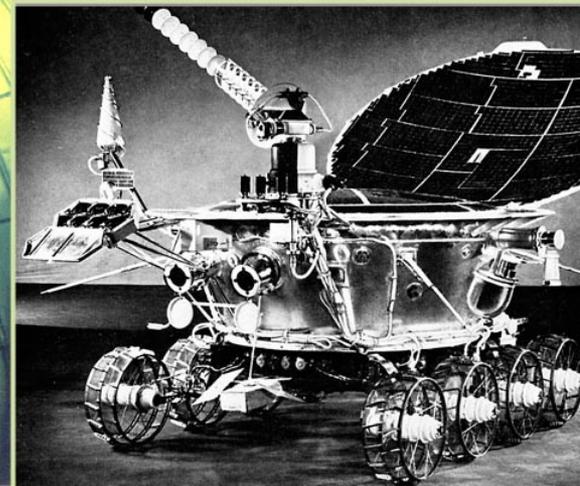
- Метод триангуляции (от слова «треугольник») основан на применении тригонометрии (от греческого «математика треугольников»)
- Современность: космическая геодезия, сети GPS-ГЛОНАСС, лазерная и радиолокация - позволяют точно измерять расстояния в пределах Солнечной системы - до Луны, планет и их спутников, астероидов

Расстояния до Луны, планет, их спутников и малых тел Солнечной системы измеряются по времени задержки отраженного лазерного луча/радиолуча, распространяющегося со скоростью света ( $300000 \text{ км/с}$ )



Лазерная локация  
Луны

(точность  $\sim 1 \text{ см}$ )



# Расстояния в Солнечной системе

Радиус Земли - 6371 км

- до Луны - 384000 км

- до Солнца - 149,6 млн. км = 1 а.е.  $\approx$  8  
СВЕТОВЫХ МИНУТ

• 1 а.е. - новая единица измерения  
расстояния - **«астрономическая**  
**единица»**

• Радиус Солнечной системы:  $\sim$  40 а.е.  $\approx$   
5 световых часов (Плутон + Харон)

## Первые попытки измерить расстояния до звезд предприняли:

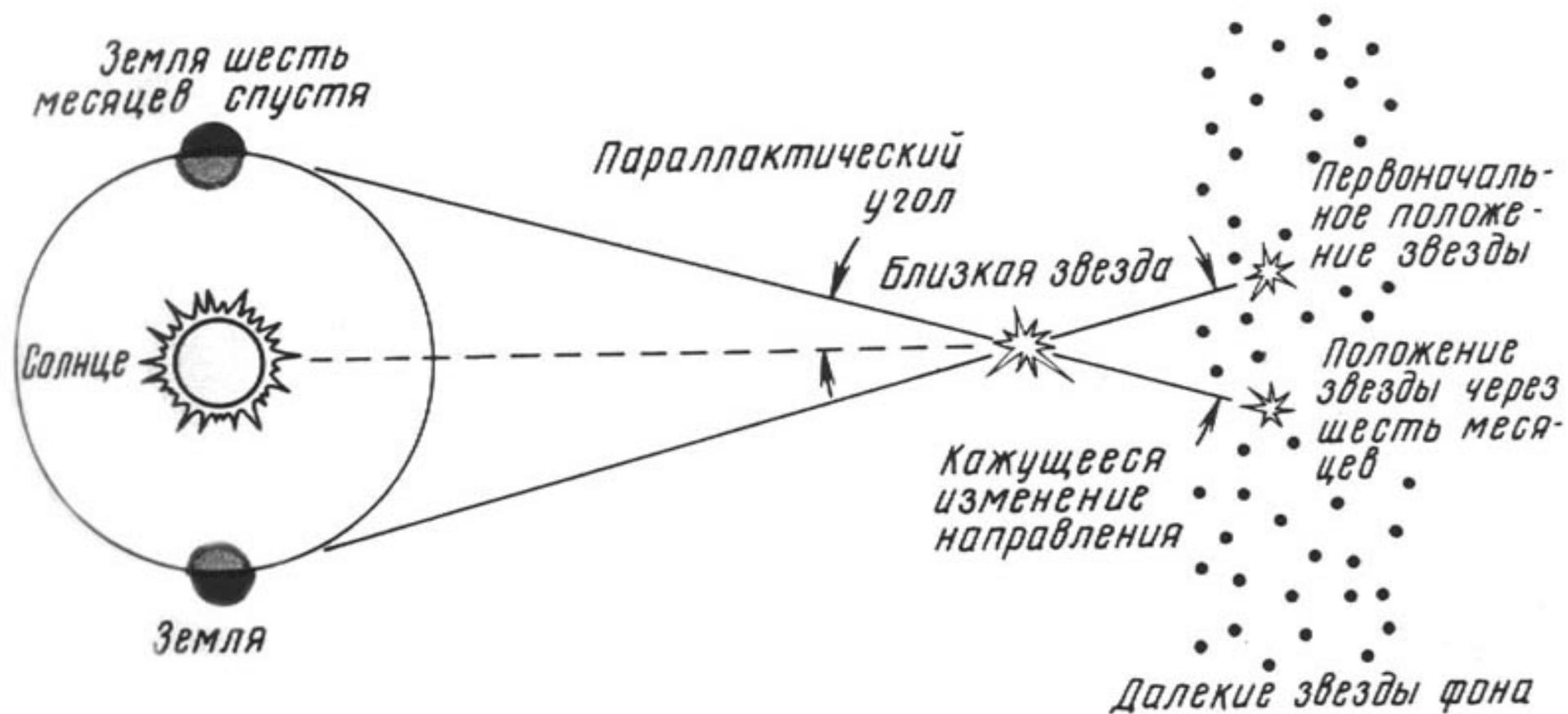
- Христиан Гюйгенс (1694) - Сириус в 28000 раз дальше Солнца (если он похож на Солнце; на самом деле он в 540000 раз дальше...)
- Д.Брэдли и В.Гершель (середина XVIII в.) показали, что расстояния до звезд больше 200000 а.е.
- В.Я.Струве (1835-1840) первым измерил точное расстояние до Веги

- 
- Звезды очень далеки от нас

- Расстояния до близких звезд измеряются старым добрым *методом триангуляции*, только в качестве БАЗЫ используется радиус орбиты Земли, равный **1 а.е. = 149 597 870 700 км**
- Измеряется годичный параллакс (или просто параллакс) звезд

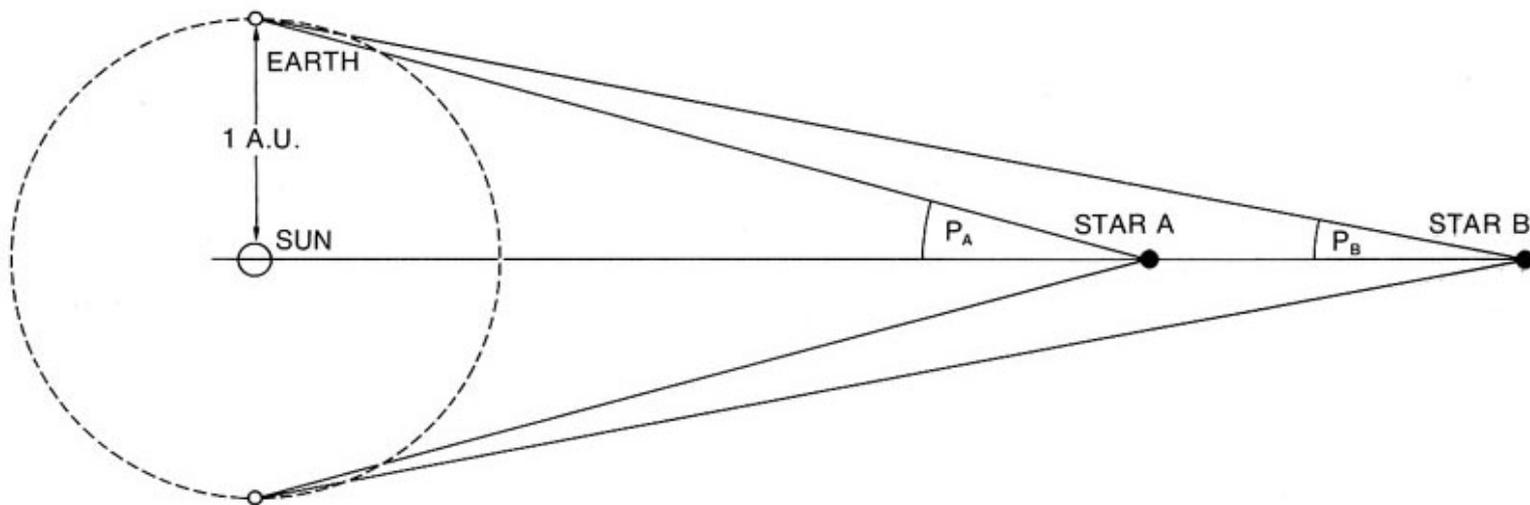
- Пример параллактического смещения: одинокая береза смещается на фоне далекого леса, если Вы смотрите на нее из окна движущегося автомобиля

# Эффект параллактического смещения звезд



**Внимание:** на практике измеряют не абсолютный, а относительный параллакс, определяя положение изучаемой звезды относительно звезд фона.

От чего зависит параллакс?  
- От расстояния до звезды



Для малых углов  $p \sim 1/D$

# Парсек - новая единица измерения межзвездных расстояний

**Парсек**  
(ПАРаллакс + СЕКунда)

Расстояние, с которого  
большая полуось земной  
орбиты видна под углом  
в **1''**

**1'' = 1/1296000 часть окружности**

Соответствует годовому  
параллаксу в 1''

$$D = \frac{1}{p''} \text{ ПК}$$

1 A.U. →



Обозначение

**1 pc**

**1 ПК**

(1 пс)

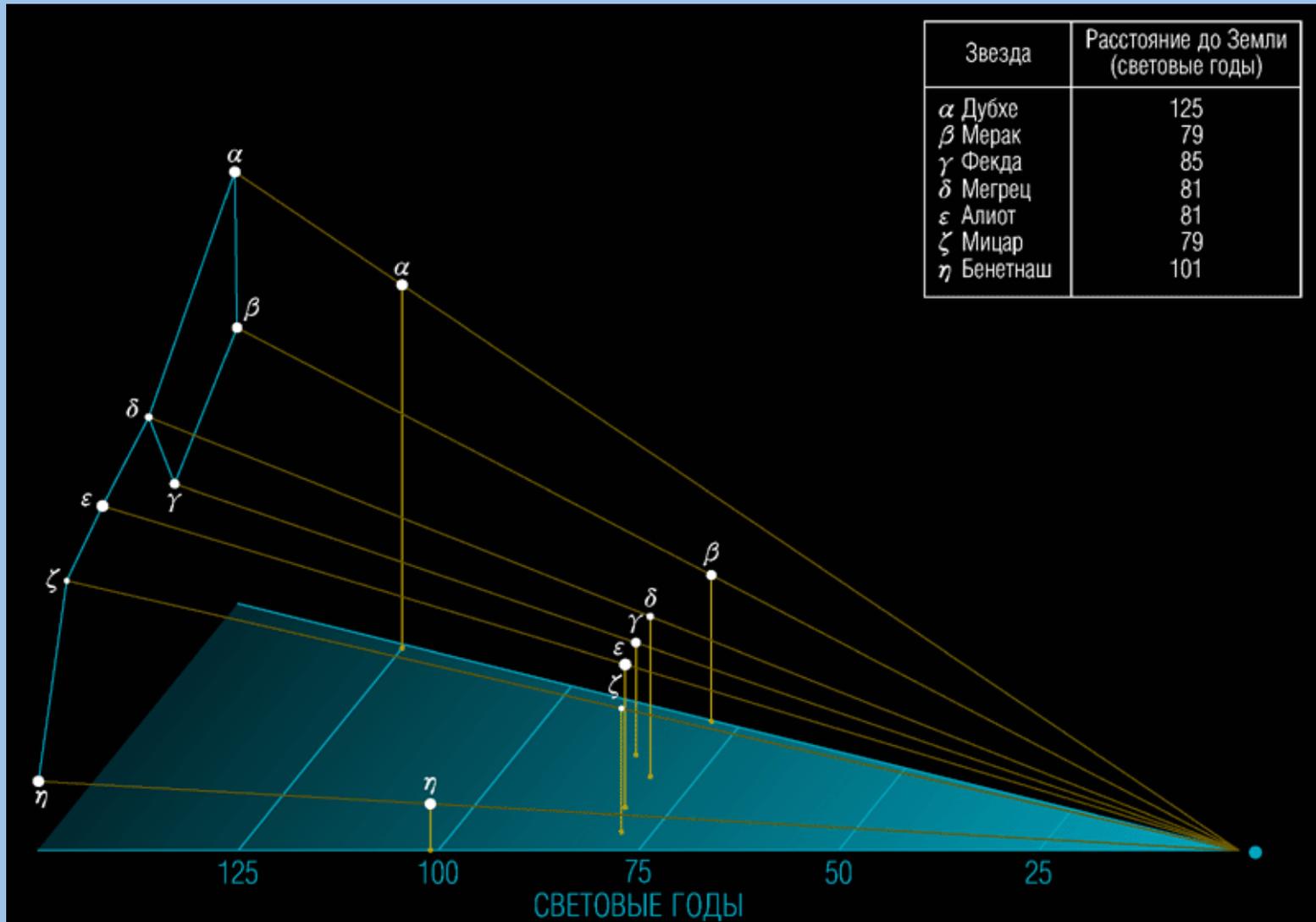
Соотношение

$$\begin{aligned} 1 \text{ ПК} &= 3,26 \text{ св.года} \\ &= 206265 \text{ а.е.} \\ &= 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м} \end{aligned}$$

- 1" (1 угловая секунда):
- Под таким углом человеческий волос толщиной 0.1 мм виден с расстояния около 20 м !
- В астрометрии используются также миллисекунды (1 мсд = 0.001") и микросекунды (1 мксд = 0.000001")
- Фантастически малые углы !
- Их измерение находится на переднем крае техники наблюдений и бросает вызов современным технологиям эксперимента

- Расстояния измеряются также в килопарсеках ( $1000 \text{ пк} = 1 \text{ кпк}$ ,  $\rho'' = 1 \text{ мсд}$ ) и мегапарсеках ( $10000000 \text{ пк} = 1 \text{ Мпк}$ ,  $\rho'' = 1 \text{ мксд}$  - пока не достигнутая точность)
- Близость звёзд на небе (например, объединённых в созвездия) не всегда означает их близость в пространстве.
- Знание расстояний позволяет отделить одни звёзды от других в пространстве.
- Параллаксы практически всех звёзд намного меньше 1 угловой секунды

# Звёзды созвездия Большой Медведицы (UMa = Ursa Major)



# Параллакс - угол малый...

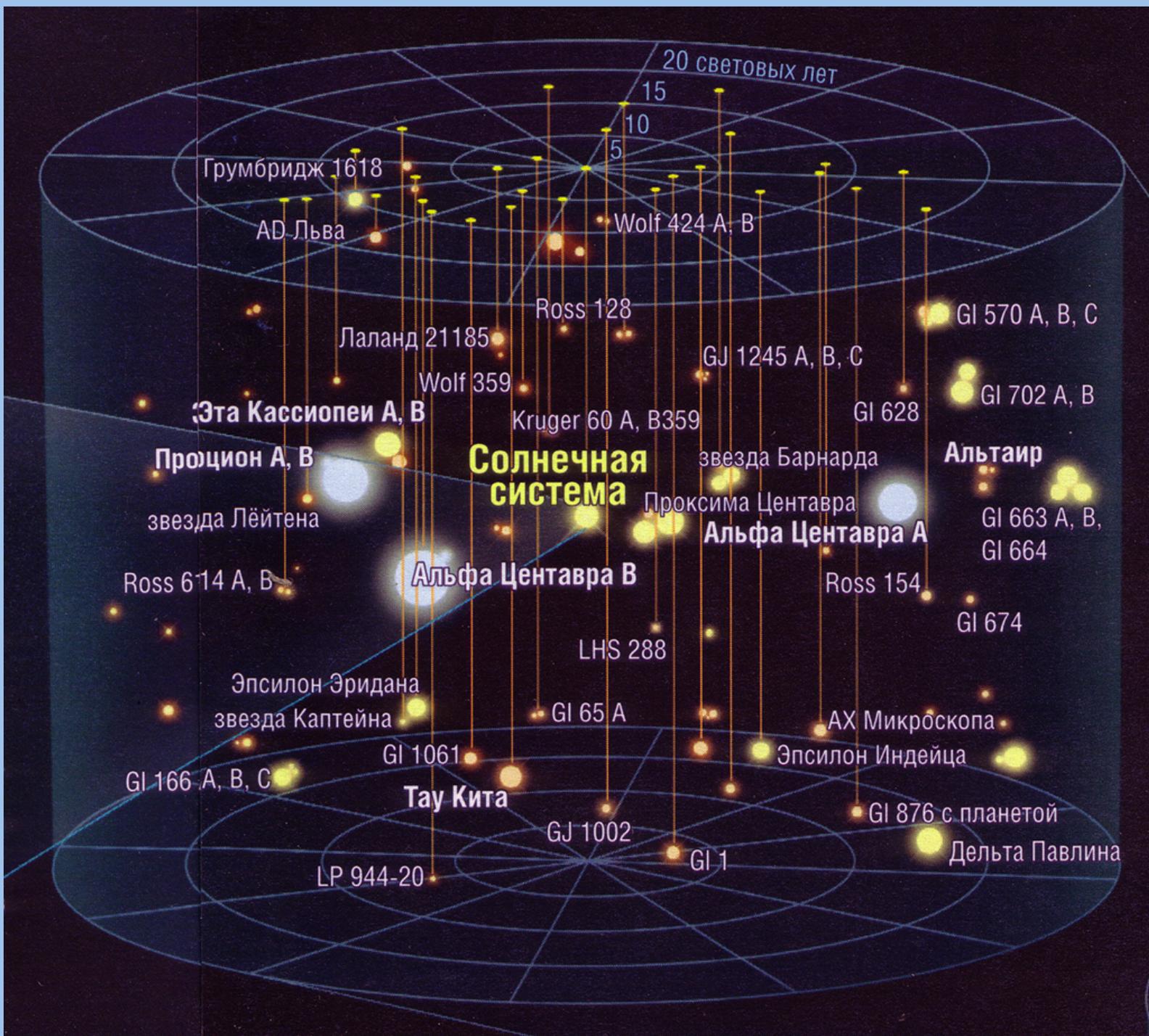
- Измерять его трудно...
- По состоянию на 1992 г. наземными телескопами измерено около 13000 параллаксов звёзд с точностью  $\pm 0.01$  угл.сек.



- 1989-1992 г.: работа космического аппарата HIPPARCOS (акроним для Гиппарха) - **HI**gh **P**recision **PAR**allax **CO**llecting **S**atellite, измерены параллаксы  $\sim 118000$  звёзд с точностью  $\pm 0.001''$

- Современные данные о тригонометрических расстояниях звёзд дают нам представление о том, как «устроены» ближайшие окрестности Солнца в нашей Галактике

- смотрим трёхмерную карту:



# Есть ли предел роста точности измерений ?

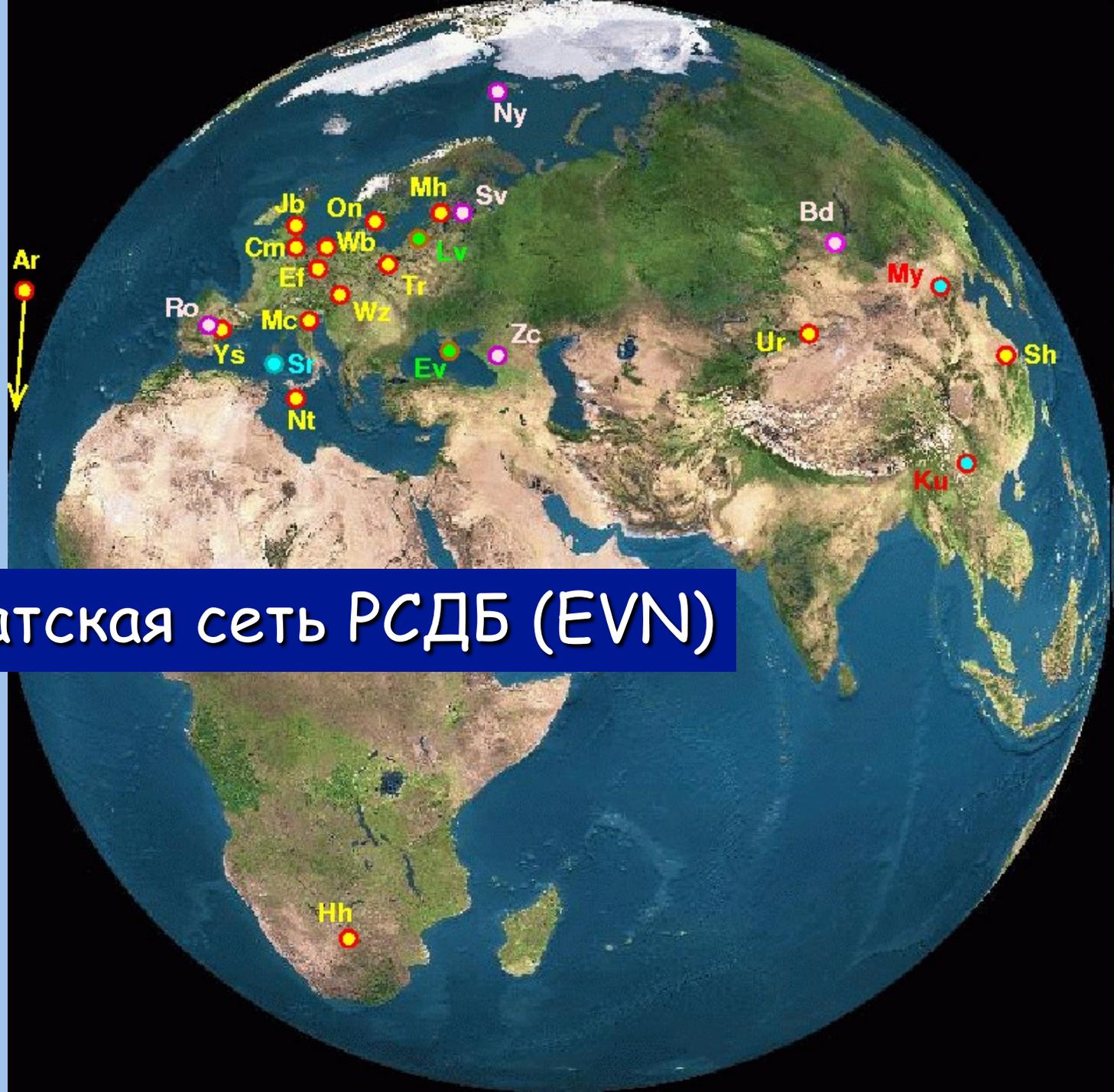
- Точность определения положений и параллаксов звёзд  $\sim 3-4$  мксд, по современным представлениям, близка к предельной. Именно такую величину имеют естественные флуктуации *м е т р и к и* *п р о с т р а н с т в а - в р е м е н и* вследствие гравитационного влияния звезд на лучи света, приводящие к видимому «дрожанию» (эффекты Общей Теории Относительности)

---

Действительно ли предел? - Пока не знаем

- Измерять расстояния до космических объектов можно не только в оптическом диапазоне, но и с помощью **сетей радиотелескопов** (методами РСДБ - радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами)
- Эта возможность связана с достижением сверхвысокого **углового разрешения** системы РСДБ
- Угловое разрешение (самый малый различимый угол) равен
$$\theta \approx 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$
- где  $\lambda$  - рабочая длина волны, а  $D$  - диаметр зеркала (или длина базы интерферометра)

# Примеры сетей РСДБ



## Евроазиатская сеть РСДБ (EVN)

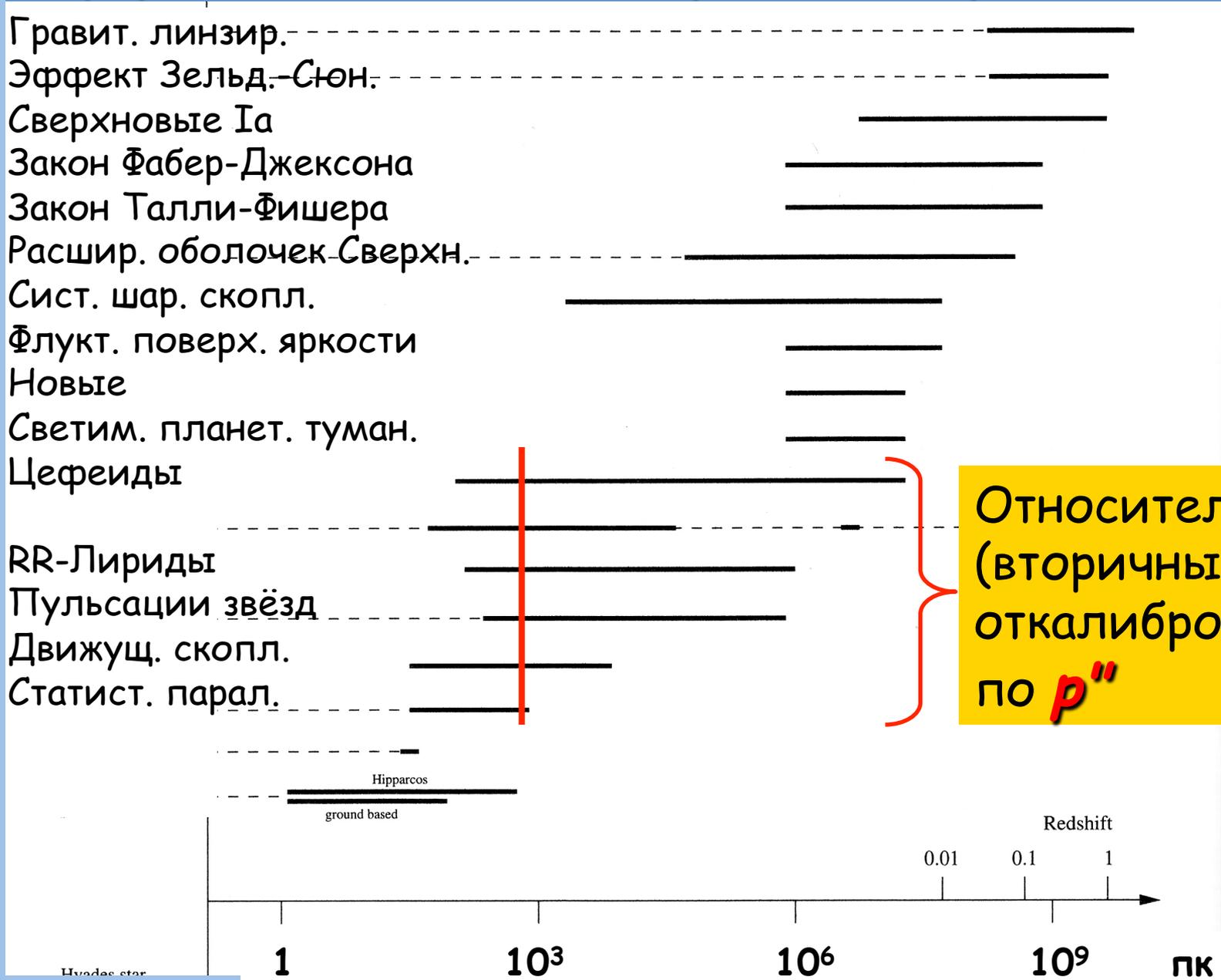
Европа -  
Азия:  
~25 антенн

## Но даже этого недостаточно для изучения далёких галактик. Что же делать ?

- На расстояниях более 100-1000 пк относительная точность современных тригонометрических параллаксов становится невысокой (~10-100%)
  - Нужно искать новые методы стыковки «линеек», которыми мы уже научились пользоваться.
  - **Снова встает проблема перехода от простой линейки к спидометру ...**
- 

- Метод тригонометрических параллаксов называют абсолютным, т.к. он не опирается ни на какие другие предположения о свойствах звёзд, а только на элементарные геометрические представления и не требует дополнительной информации

# Место тригонометрических параллаксов в общей иерархии всех методов определения расстояний



Относительные (вторичные) методы, откалиброванные по  $p''$

## Следующий шаг: относительные (вторичные) методы определения расстояний

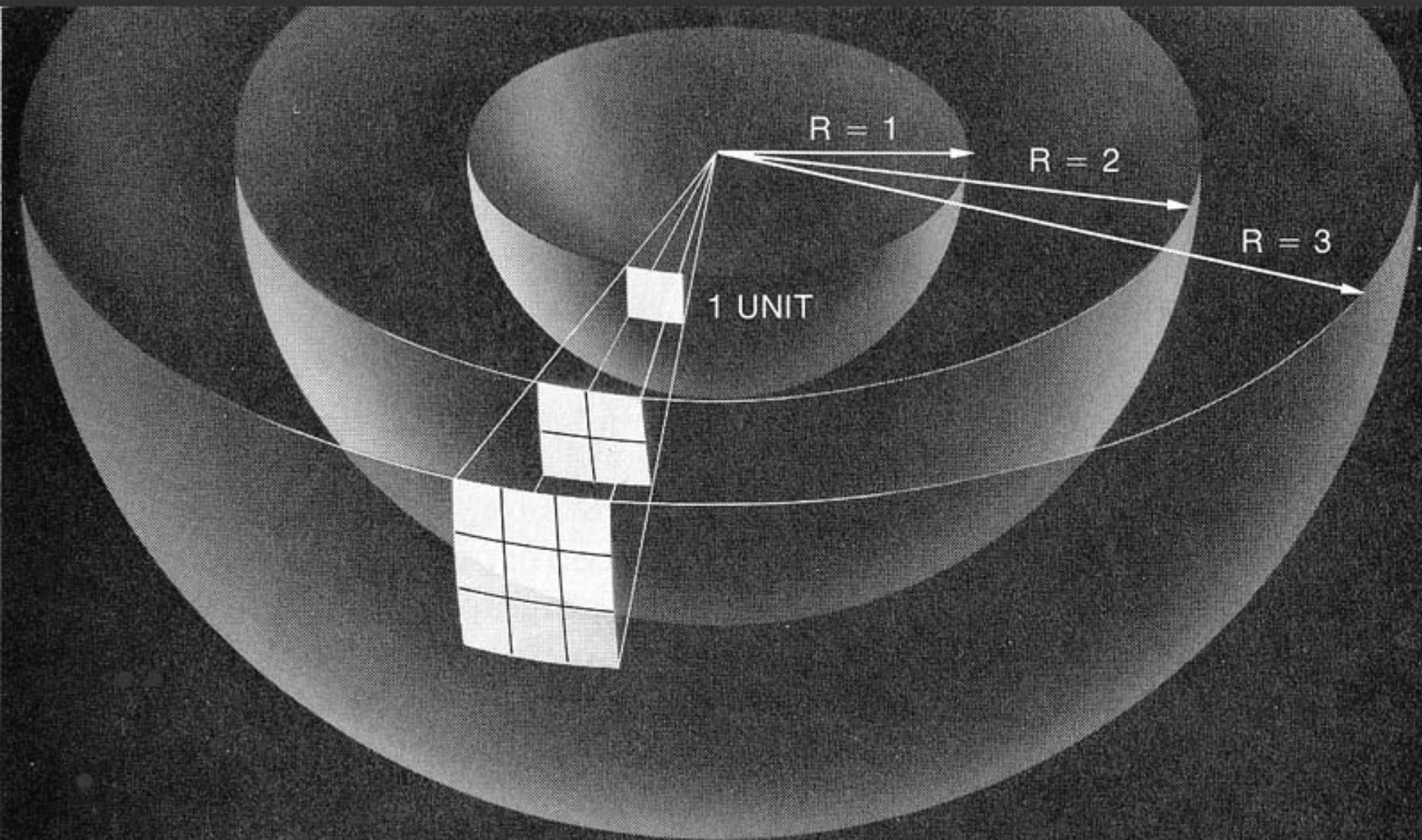
- Главные из них - фотометрические, т.е. связанные с измерением блеска звёзд. Их еще называют методами «стандартной свечи»

• -----

### Физическая основа метода:

- Известно, что свет от лампочки, как и от любого источника света, ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния до неё,  $1 / R^2$ .

# Фотометрические методы



# Метод «стандартной свечи»

- **Проверьте сами:** лампочка на 25 вт на расстоянии 1 м дает такую же освещенность, как и лампочка на 100 вт, отнесенная на 2 м.
- **Звёзды - те же «лампочки»**, только гораздо более далекие и яркие
- Уже почти 100 лет астрономы, определяя расстояния до звёзд, опираются на то, что звёзды одного и того же типа выделяют одинаковое количество **Э Н Е Р Г И И** (т.е. обладают одинаковой **С В Е Т И М О С Т Ь Ю**)

- **Как и** Звезда  $0^m$  - Вега
- Шкала  
оценки  
2000 Самые слабые звёзды, видимые  
невооружённым глазом:  $+6^m$
- По со  
разни  
звезд Слабейшие звёзды, доступные  
крупнейшим телескопам:  $+30^m$
- звёзды Различия в блеске в 4 млрд. раз !
- Тогда  
относ  
2.512 Звёздная величина может выражаться  
и отрицательным числом
- Чем ярче звезда, тем **МЕНЬШЕ** число,  
выражающее её блеск (система типа  
рейтинговой): **звезда  $0^m$  в 100 раз ярче звезды  $5^m$**

- Шкалу абсолютных звёздных величин вводят для того, чтобы охарактеризовать **полную энергетика излучения звёзд** (например, выраженную в эрг/с или в Вт)
- Для этого - конечно, мысленно - помещают все звёзды на одно и то же расстояние для сравнения их **абсолютную** величину
- Именно эта формула используется для определения расстояний до далёких звёзд по их видимым и абсолютным звёздным величинам
- $m - M = 5 \cdot \lg D \text{ (в пк)} - 5$

## Звёзды различаются:

- Массой и размерами
- Температурой (цветом)
- Светимостью (абсолютной зв. величиной)
- Возрастом и стадиями эволюции
- Химическим составом вещества
- Происхождением
- Орбитами в галактиках

от ~10 млн. К до 2-3 млрд. К и плотностях плазмы выше  $100-1000 \text{ г/см}^3$

- Плотность может превышать  $\sim 1 \text{ т/см}^3$

М

- На этапе первичного нуклеосинтеза во Вселенной возникли только лёгкие ядра H, He, Li
- Химический состав звёзд (по доле массы):
- ~ 70% водорода (H)
- ~ 28% гелия (He)
- Остальное - более тяжёлые ядра (Li, Be, C, N, O, Mg, S, Ca, ...)
- Тяжёлые элементы «попали» в звезду в основном в результате обогащения межзвёздной среды взрывами Сверхновых, «выбрасывающих» продукты их термоядерного синтеза

Откуда мы знаем абсолютные величины звезд?  
Из их видимых величин и точных расстояний.

Это возможно только для близких звезд.

- Светимости звёзд определяются, в конечном счёте, по тригонометрическим параллаксам - это и есть «калибровка светимостей»
- 

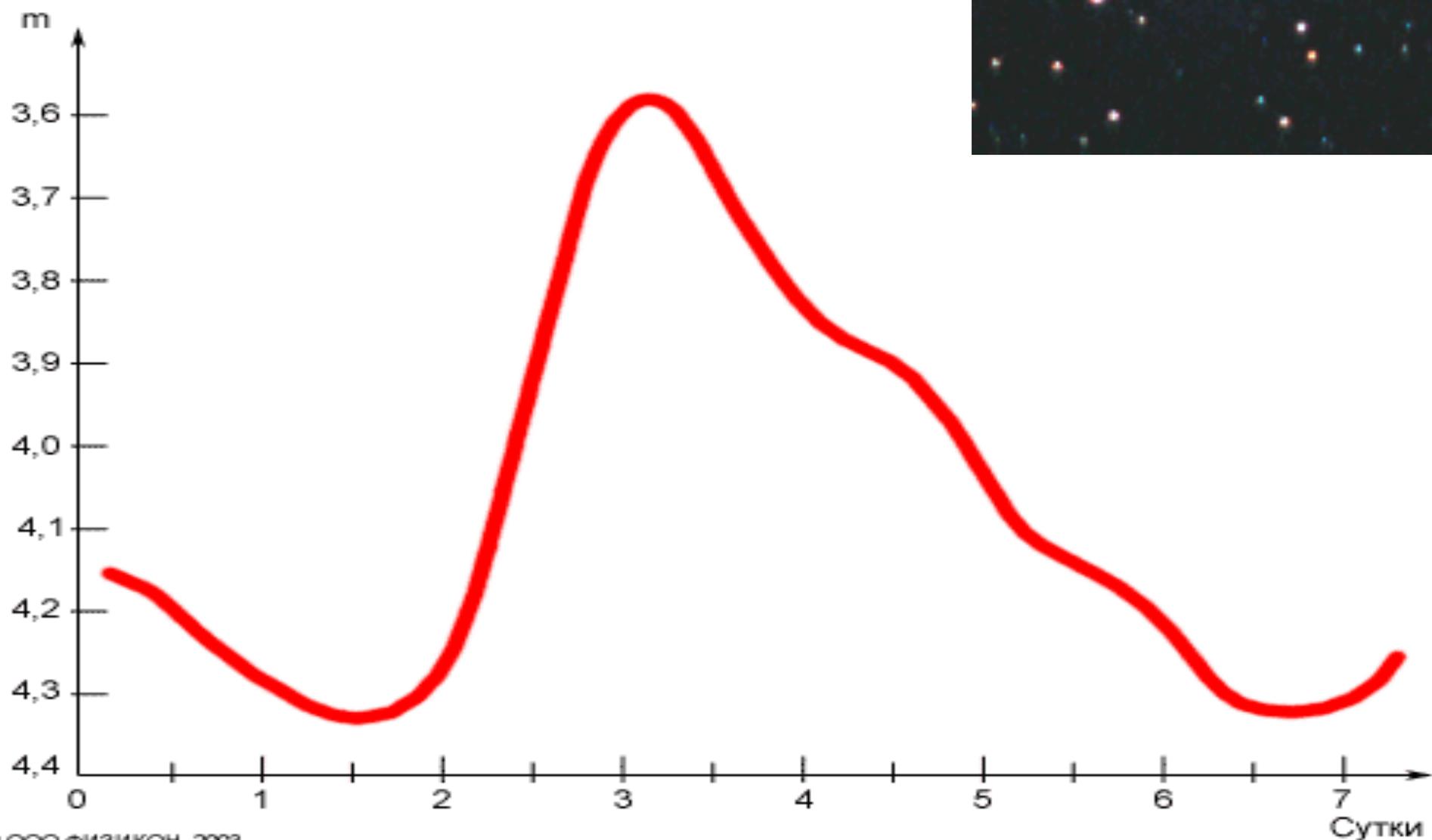
- Итак, зная **тип и цвет** звезды, мы вычисляем ее светимость, т.е. абсолютную звёздную величину - это следствие универсальности физических законов, управляющих эволюцией звёзд

- Каждая звезда в принципе может служить «стандартной свечой»
- Но в астрономии есть несколько важнейших типов «стандартных свечей», отличительная черта которых - **уникальность (их невозможно перепутать с другими объектами):**
  - - Цефеиды
  - - RR-Лириды
  - - Сверхновые звезды
  - - Сами спиральные и эллиптические галактики

Цефеиды, названные так по имени первой открытой 400 лет назад звезды этого типа,  $\delta$  Цефея

- Это **молодые** пульсирующие переменные звезды, меняющие блеск с периодами от 1 до 100 суток; желтые сверхгиганты, они в 100 - 10000 раз ярче Солнца и видны издалека (вплоть до ~40-50 Мпк)
- Их **светимость растет с увеличением периода пульсаций**
- Они населяют рассеянные скопления, спиральные и дисковые галактики

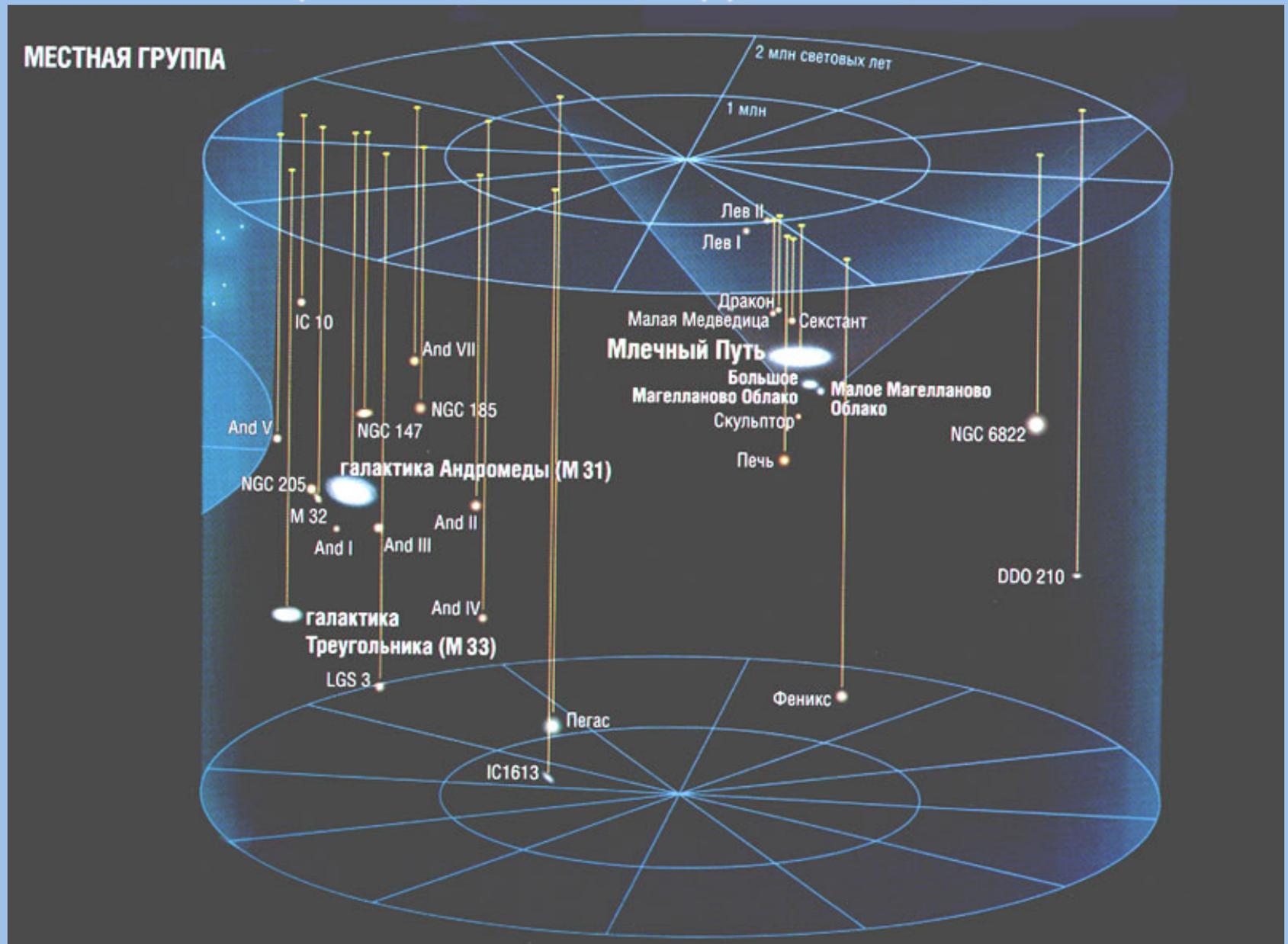
# Кривая блеска цефеиды



RR-Лириды, названные так по имени первой открытой звезды, RR Лиры

- В отличие от цефеид, это **старые звезды**, населяющие эллиптические галактики, галактические гало и шаровые звездные скопления
- По характеру изменения блеска похожи на цефеиды, но периоды меньше 1 дня
- Их светимости почти одинаковы - они все в 80 - 100 раз ярче Солнца

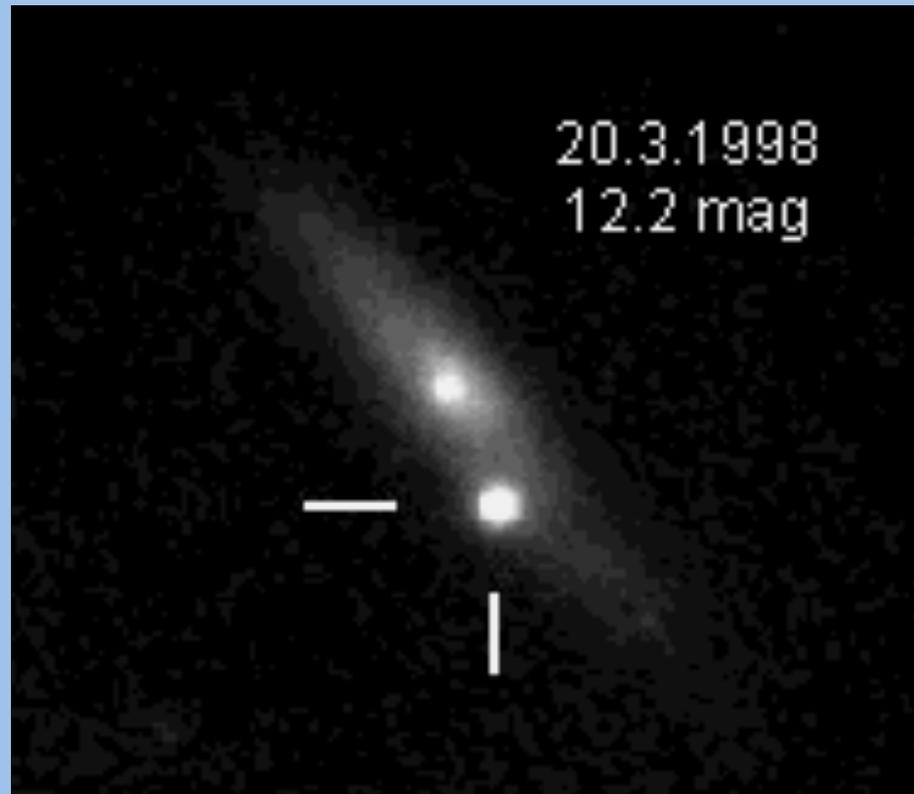
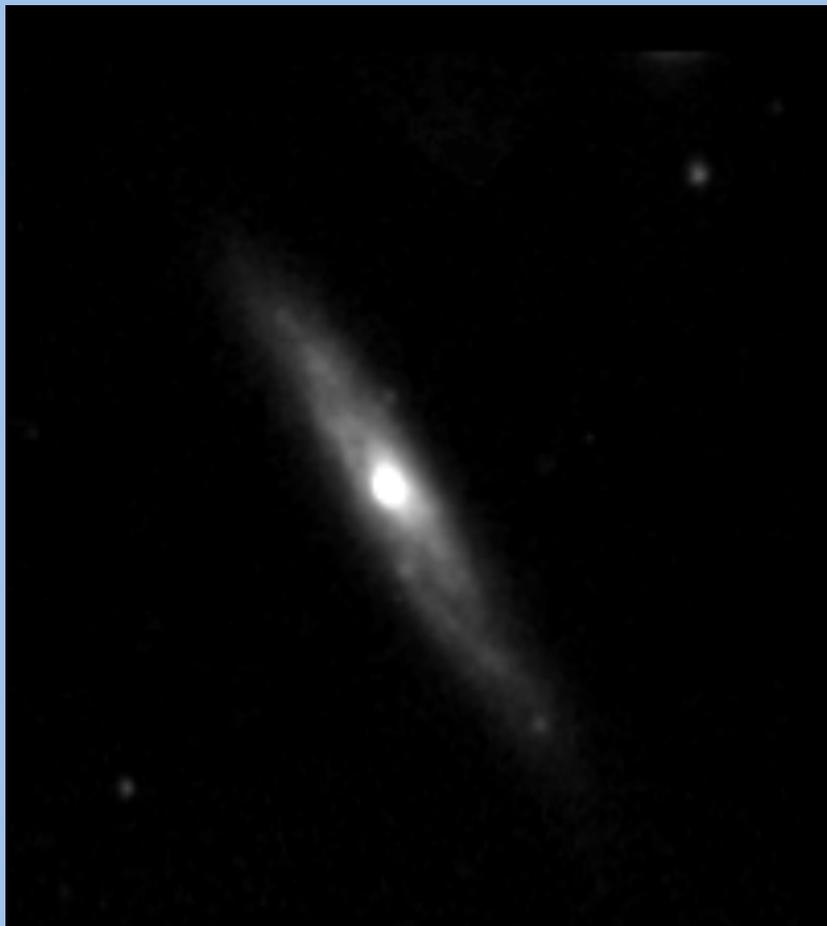
# Благодаря этим звёздам у нас есть представление о строении Местной Группы галактик



## Сверхновые звезды как «стандартные свечи»

- **Сверхновые** - наиболее грандиозные взрывные явления во Вселенной, с мощностью излучения в максимуме блеска более  $10^{41}$  эрг/с - **в сотни миллионов и миллиарды раз ярче Солнца.**
- Сопровождается сбросом оболочки со скоростями в тысячи км/с.
- Последняя Сверхновая в нашей Галактике вспыхнула в 1604 г. (SN Кеплера), она достигла яркости  $-3^m$
- Ежегодно открывают сотни Сверхновых в далёких галактиках

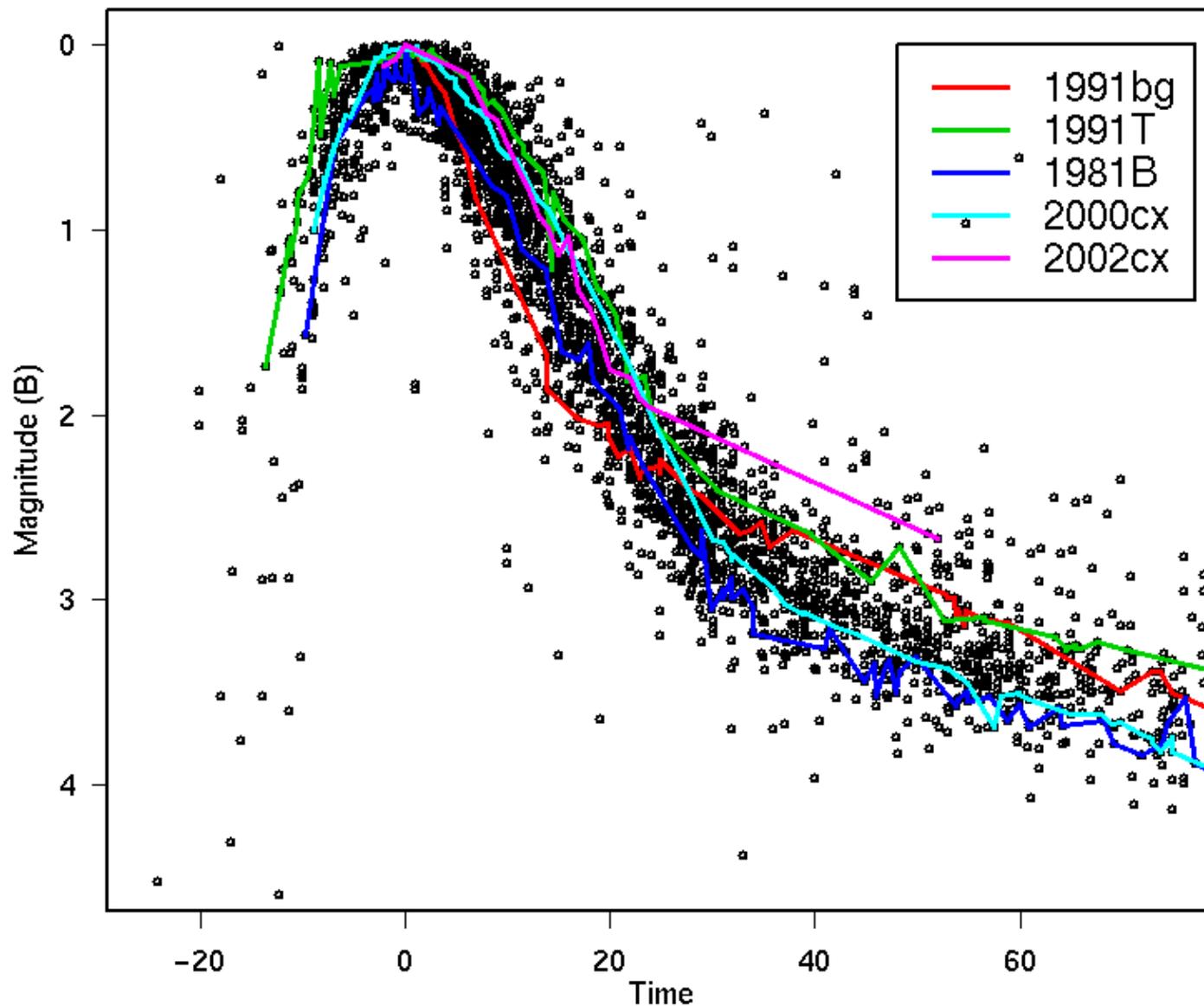
Иногда блеск SN в максимуме сравним с блеском всей галактики:



# SN 2005 г. в галактике М51 «Водоворот»

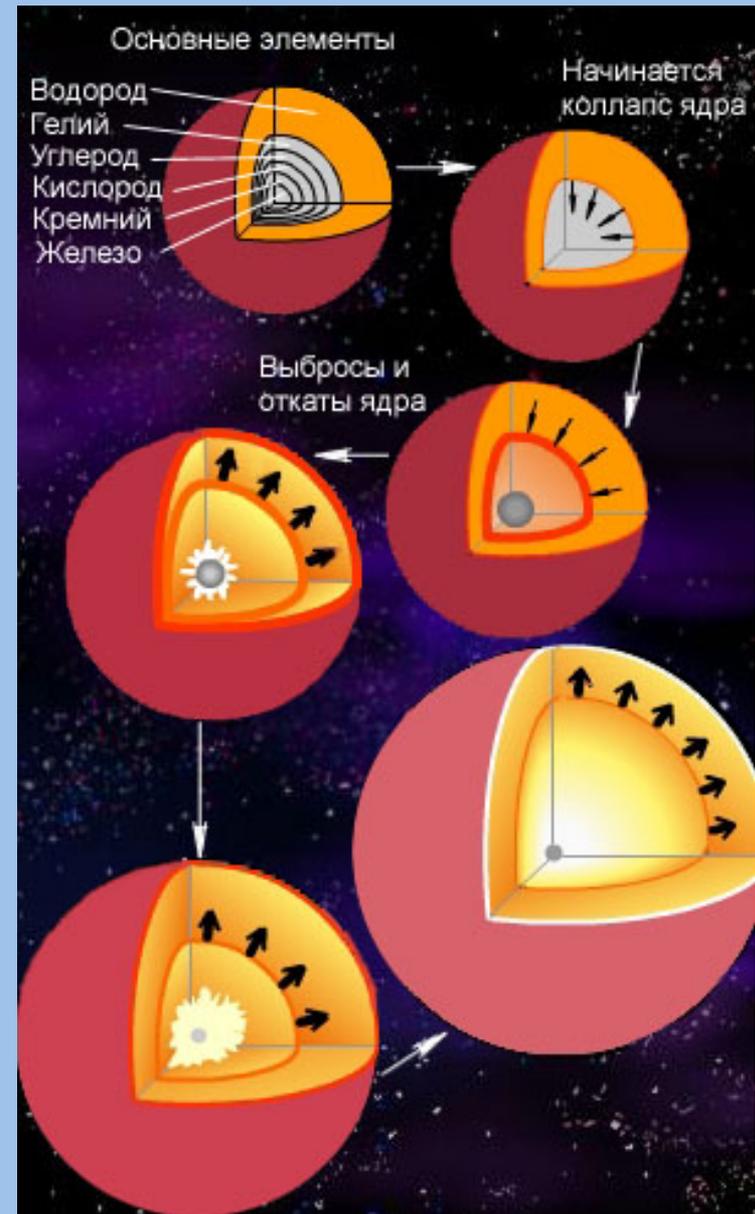


# Так меняется блеск Сверхновой со временем (разные Сверхновые)



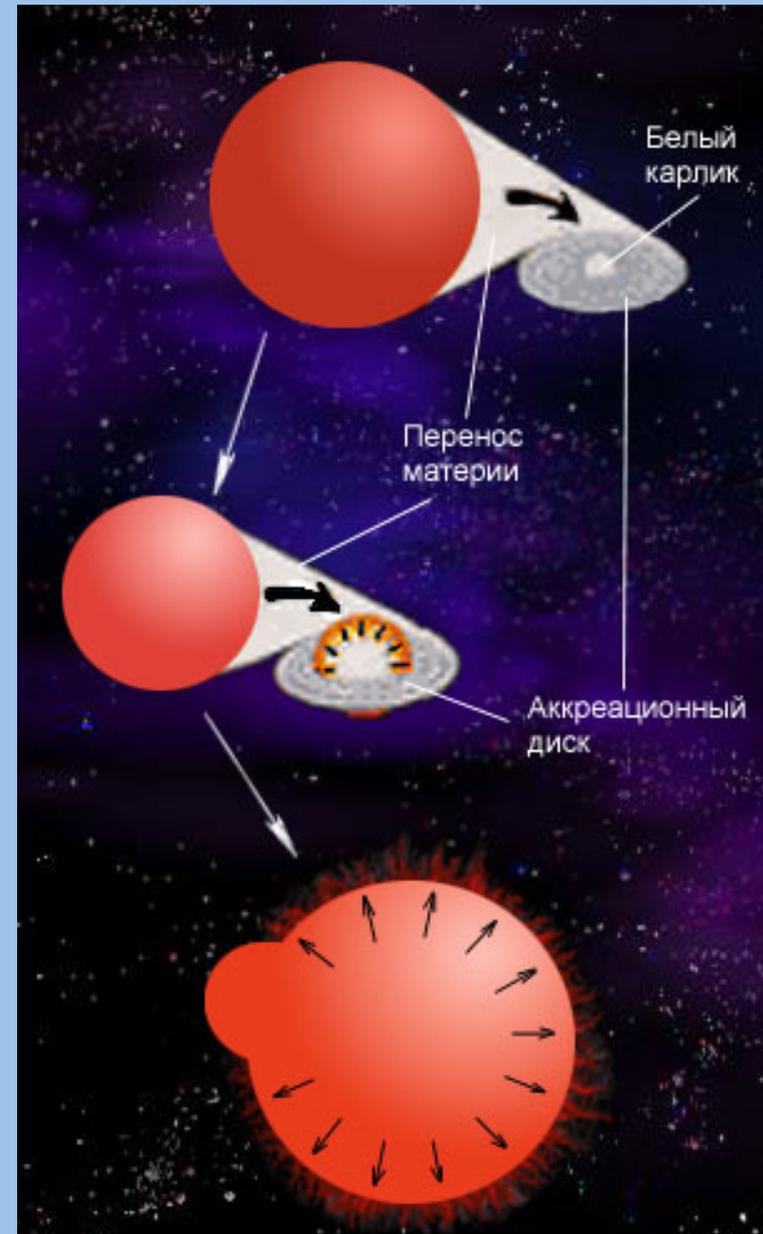
# Природа Сверхновых II типа

- Тип II - коллапс ядра и взрыв массивной звезды, приводящий к образованию нейтронной звезды или черной дыры
- $M_V(\text{max})$  до  $-22^m$
- Пример: SN1987 в БМО



# Природа Сверхновых I типа

- **Тип Ia** - термоядерный взрыв белого карлика (СО) в результате слияния двух белых карликов или аккреции вещества от спутника, приводящей к росту массы до критического значения,  $\sim 1.4$  Солнечной
- $M_V(\text{max}) \approx -19.5^m$ 
  - **«стандартная свеча» !!!**



- На больших (космологических) расстояниях Сверхновые благодаря их яркости и «узнаваемости» становятся почти единственным средством определения расстояний и изучения строения и эволюции Вселенной
- По «стандартным свечам», в т.ч. Сверхновым, определяется **постоянная Хаббла**, описывающая расширение Вселенной и характеризующая ее возраст:  
$$V \approx H \times R$$
- По современным данным,  $H \approx 72 \pm 4$  км/с/Мпк

# Этапы построения шкалы расстояний

- Тригонометрические параллаксы близких звезд и звездных скоплений



- Светимости цефеид и RR-Лирид



- Фотометрические расстояния галактик, содержащих цефеиды, RR-Лириды.  
Определение светимостей Сверхновых звезд.

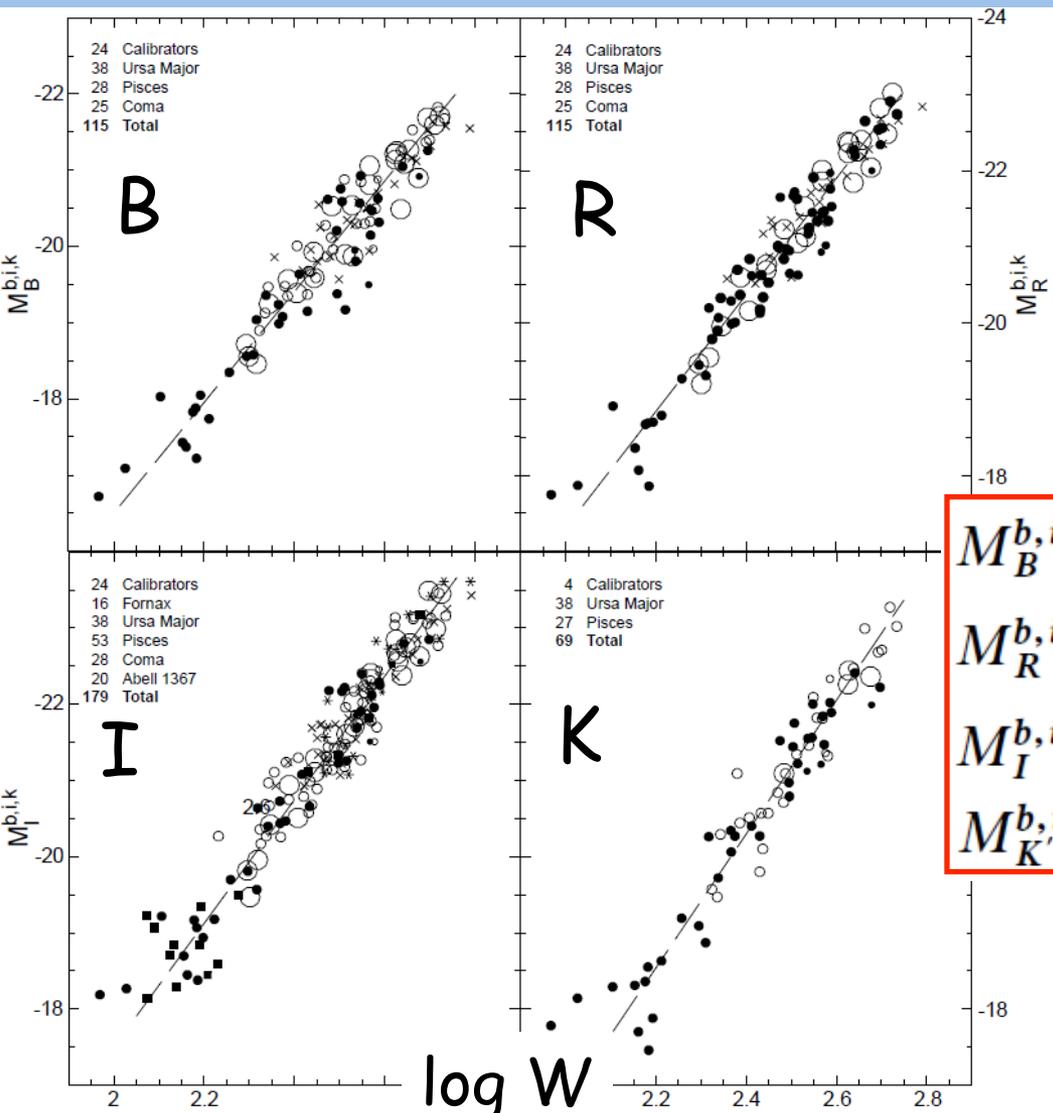


- Фотометрические расстояния далеких галактик, измеренные по Сверхновым



- Определение постоянной Хаббла

# Галактики как «стандартные свечи»: закон Талли-Фишера



$$M_B^{b,i,k} = -20.11 - 7.27(\log W_R^i - 2.5)$$

$$M_R^{b,i,k} = -21.12 - 7.65(\log W_R^i - 2.5)$$

$$M_I^{b,i,k} = -21.57 - 8.11(\log W_R^i - 2.5)$$

$$M_{K'}^{b,i,k} = -23.17 - 8.78(\log W_R^i - 2.5)$$

- На космологических масштабах единицей длины служит 1 Мегалпарсек = 1000000 пк = 1 Мпк.
- Другая характеристика расстояния – красное смещение линий в спектре  $z = \Delta\lambda/\lambda$ , связанное с удалением галактик от нас
- $z = 1$  соответствует скорости удаления галактики 180000 км/с (!) и расстоянию  $\sim 2500$  Мпк или около **8 млрд. световых лет**
- Это примерно половина возраста Вселенной
- **Заглядывая в глубины Вселенной, мы по сути дела заглядываем в её прошлое**

- **Итак:**
- проблема шкалы расстояний - измерения расстояний в астрономии - пронизывает всю современную астрономию, начиная от строения Галактики до пока еще не решенных проблем космологии, имеющих непосредственное отношение к рождению Вселенной и ее современному расширению