

«Измеряя Вселенную»



- Расторгуев А.С., д.ф.-м.н., профессор каф. экспериментальной астрономии МГУ им. М.В.Ломоносова, зав. отделом ГАИШ МГУ

Воображаемое путешествие
из мегамира в микромир и обратно
демонстрирует огромный интервал
пространственных масштабов
- от границы видимой Вселенной
до атомов и элементарных частиц:
от 10^{28} см (Хаббловский радиус,
или «горизонт событий»)
до 10^{-13} см (размер электрона)

Разговор пойдет о шкале расстояний во Вселенной:

- Мы ограничимся рассказом об **измерении расстояний в макром мире**
- Важно умение определять надежные расстояния до близких и очень далеких объектов – до звезд и других галактик
- Без него невозможно понимание нашего места в Галактике и во Вселенной и изучение их строения

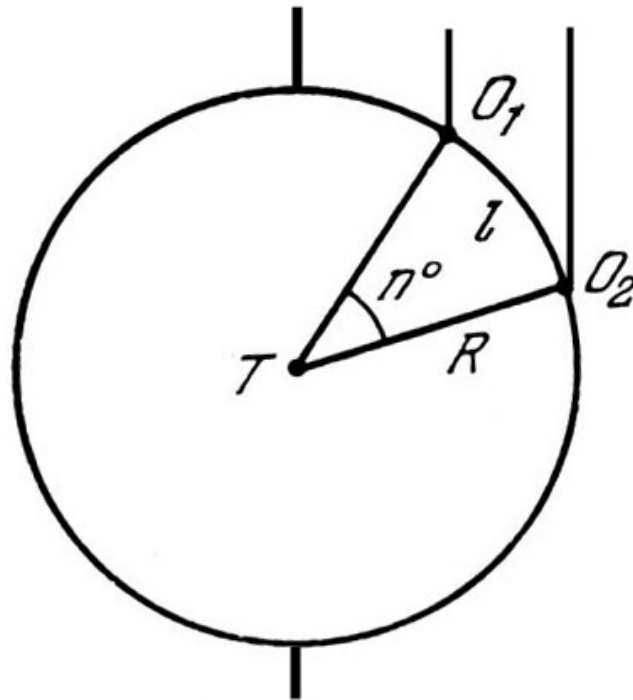
Похожая и привычная задача:

- Пример: переход от измерения длины обычной линейкой к использованию велосчетчика или автомобильного спидометра → измерение расстояния между городами
- Для этого нужно вначале **измерить ДЛИНУ ОКРУЖНОСТИ КОЛЕСА**

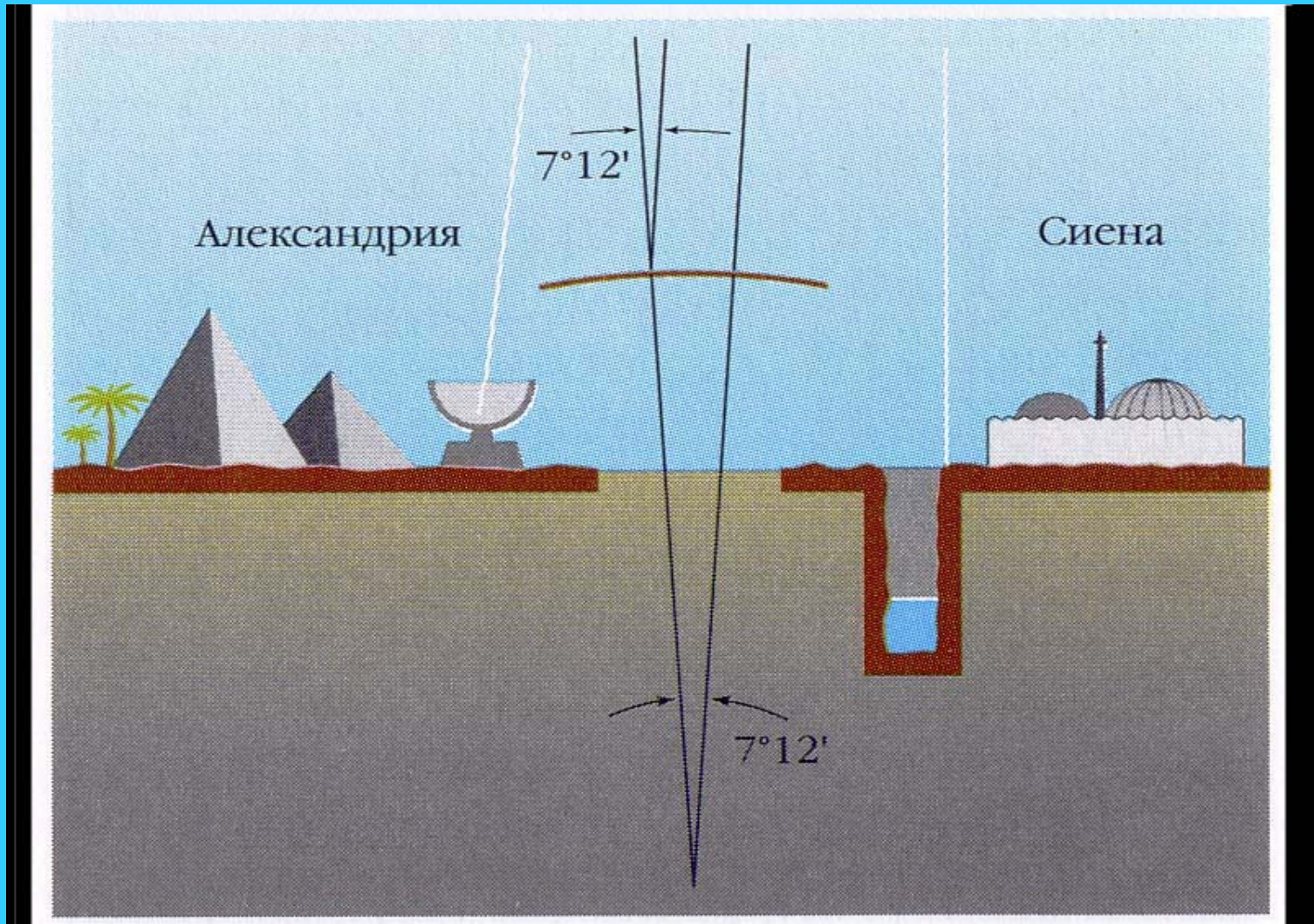
- Этот процесс в астрономии называется «калибровкой» линеек или шкалы расстояний, когда новая «линейка» градуируется по старой.
- Вспомним историю...

С чего начать?

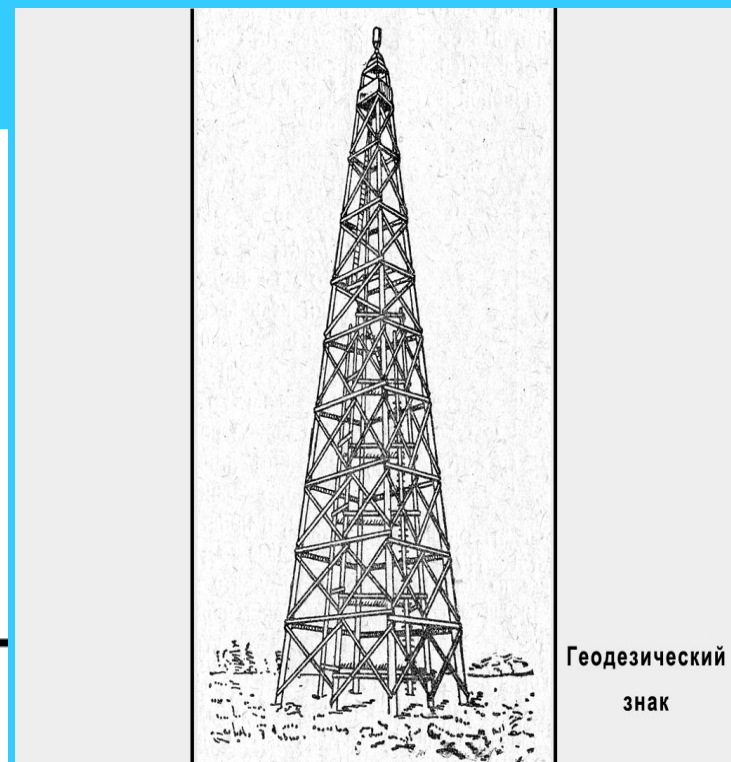
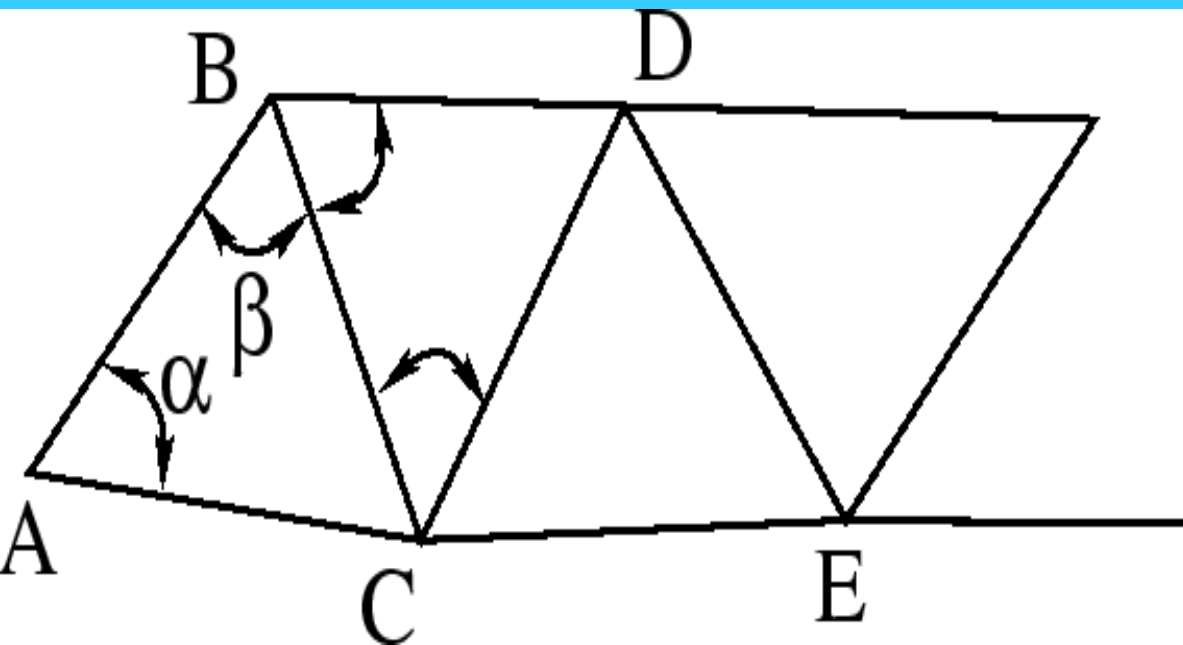
Измерение Земли: метод Эратосфена



Первое измерение длины меридиана Земли, выполненное Эратосфеном (III век В.С.)



Метод триангуляции: база АВ +
углы α , β \rightarrow расстояния АС и ВС

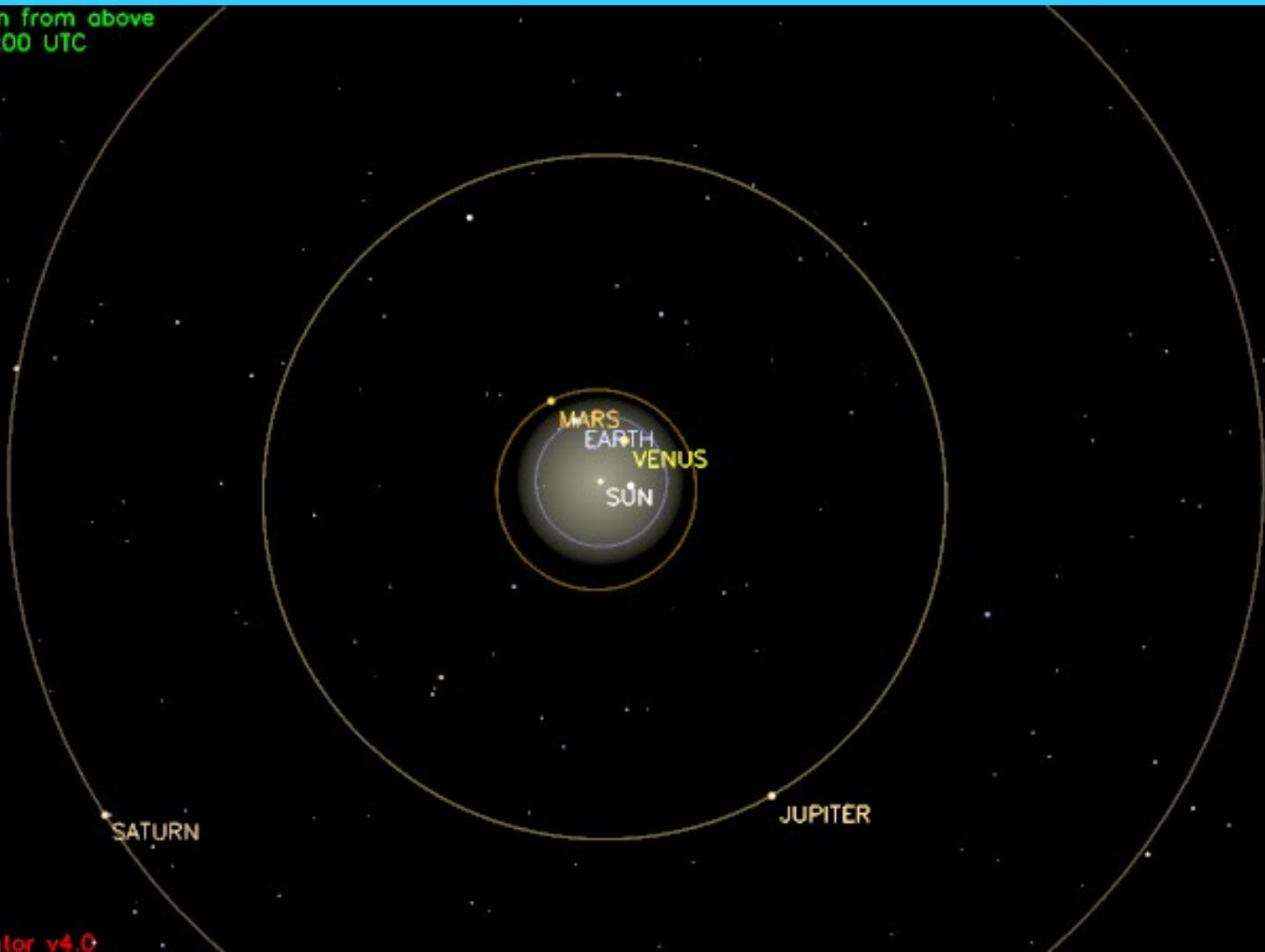


- Геодезическая сеть ABCDE...

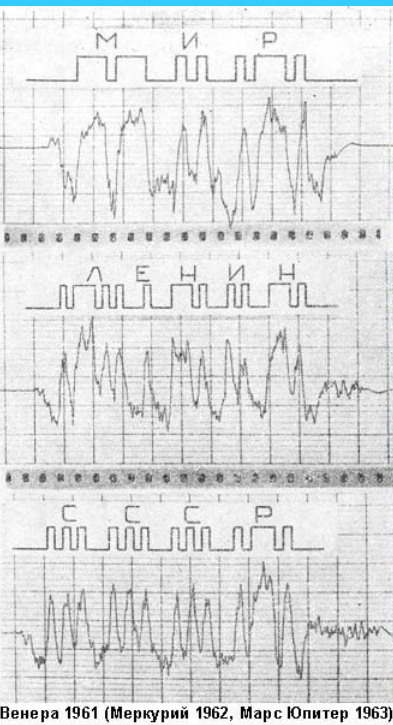
- Метод триангуляции (от слова «треугольник») основан на применении тригонометрии (от греческого «математика треугольников»)
- Современность: космическая геодезия, GPS-приемники, лазерная и радиолокация – позволяют точно измерять расстояния в пределах Солнечной системы – до планет и их спутников.

Так выглядит сейчас Солнечная система (вид «сверху»)

View of Solar System from above
2005 OCT 15 13:00:00 UTC
10.0° field of view



Расстояния измеряются по времени задержки отраженного сигнала, распространяющегося со скоростью света (300000 км/с)



Радиолокация планет

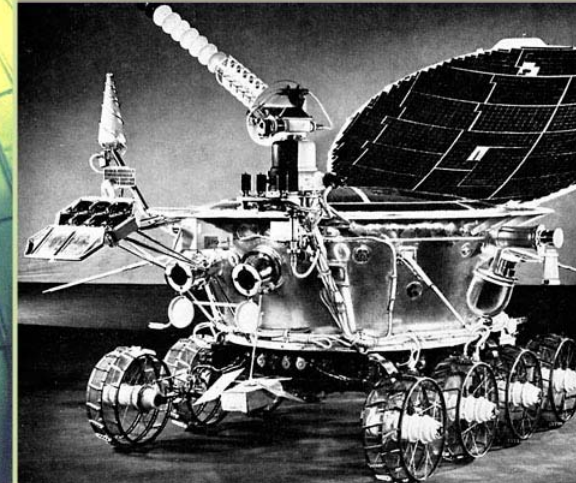


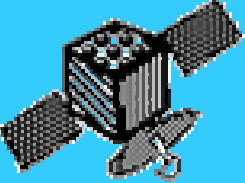
Венера 1961 (Меркурий 1962, Марс Юпитер 1963)



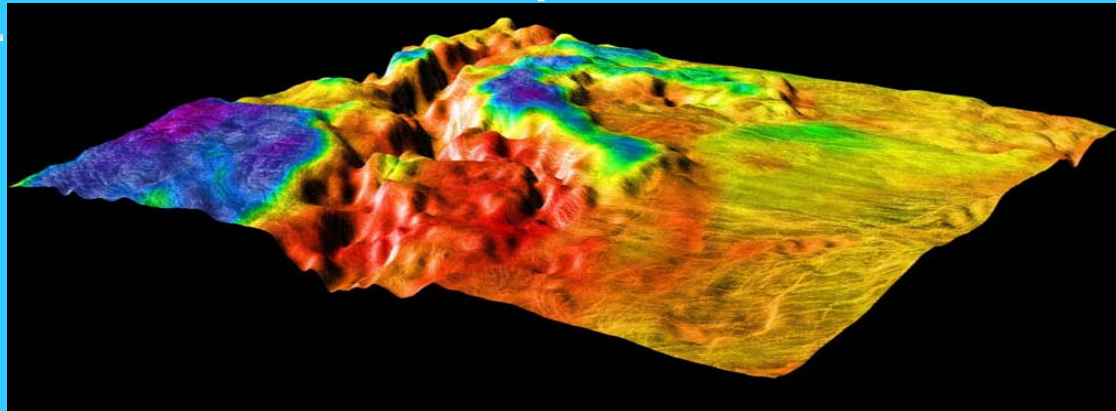
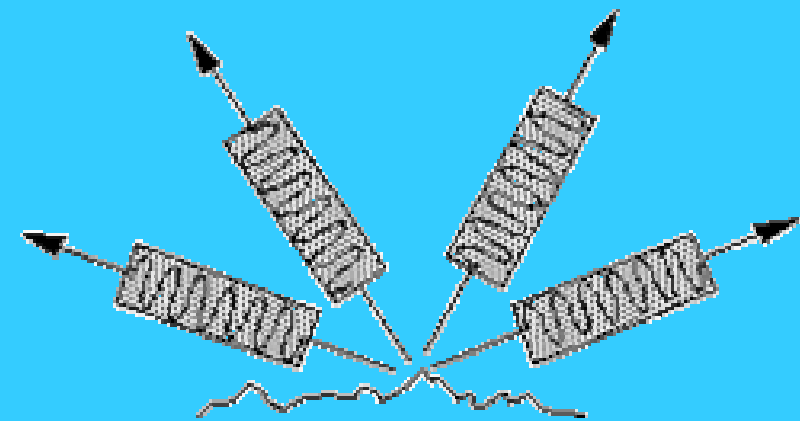
Лазерная локация Луны

(точность ~ 1 см)





- С помощью радиолокации удалось составить наиболее подробную карту поверхности планеты Венеры



Расстояния в Солнечной системе

Радиус Земли – 6371 км

- до Луны – 384000 км

- до Солнца – 150 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)

Наконец-то мы заглянули за край
«хрустальной небесной сферы»...



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

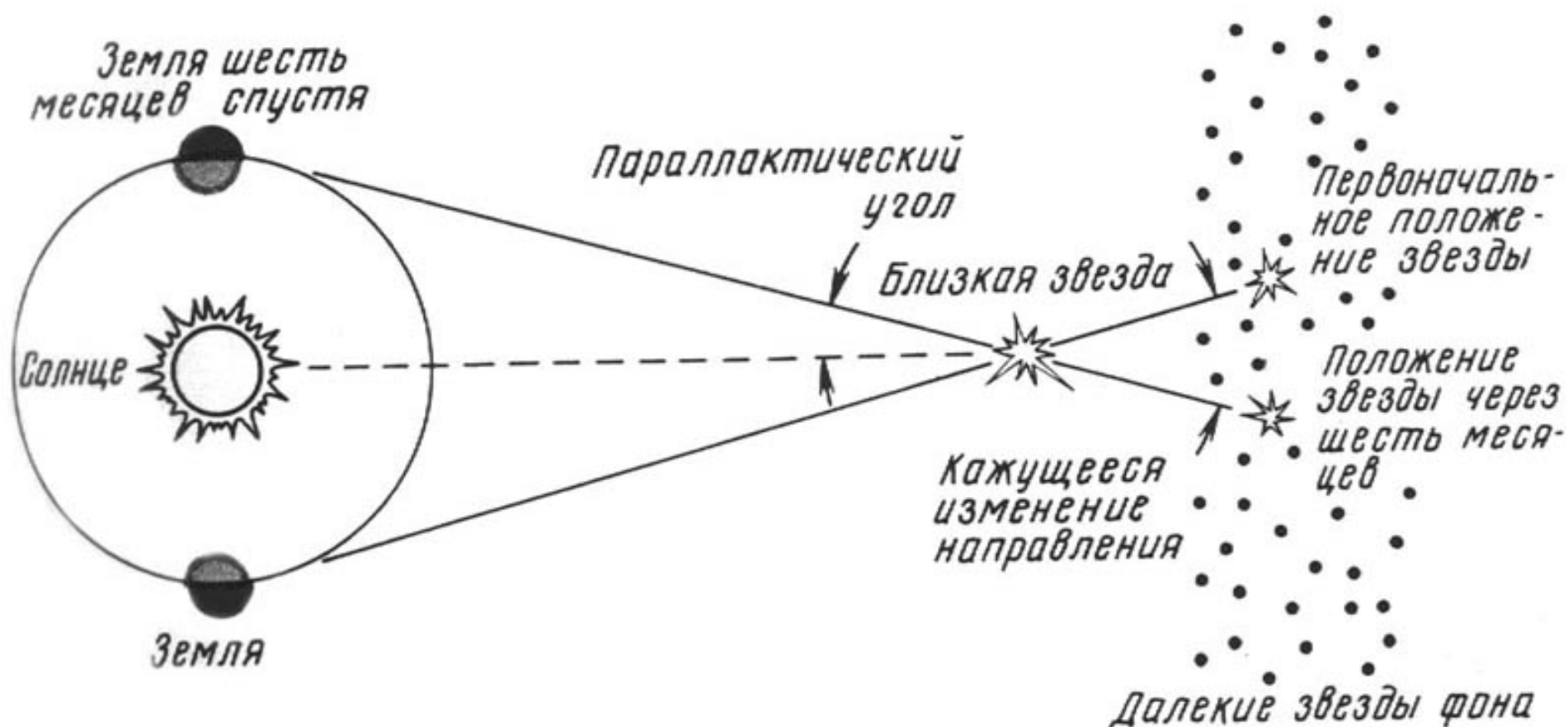


- **Звезды очень далеки от нас**

- Расстояния до близких звезд измеряются старым добрым методом *триангуляции*, только в качестве БАЗЫ используется радиус орбиты Земли, равный
1 а.е. = 150000000 км.
- Измеряется годичный параллакс звезд

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

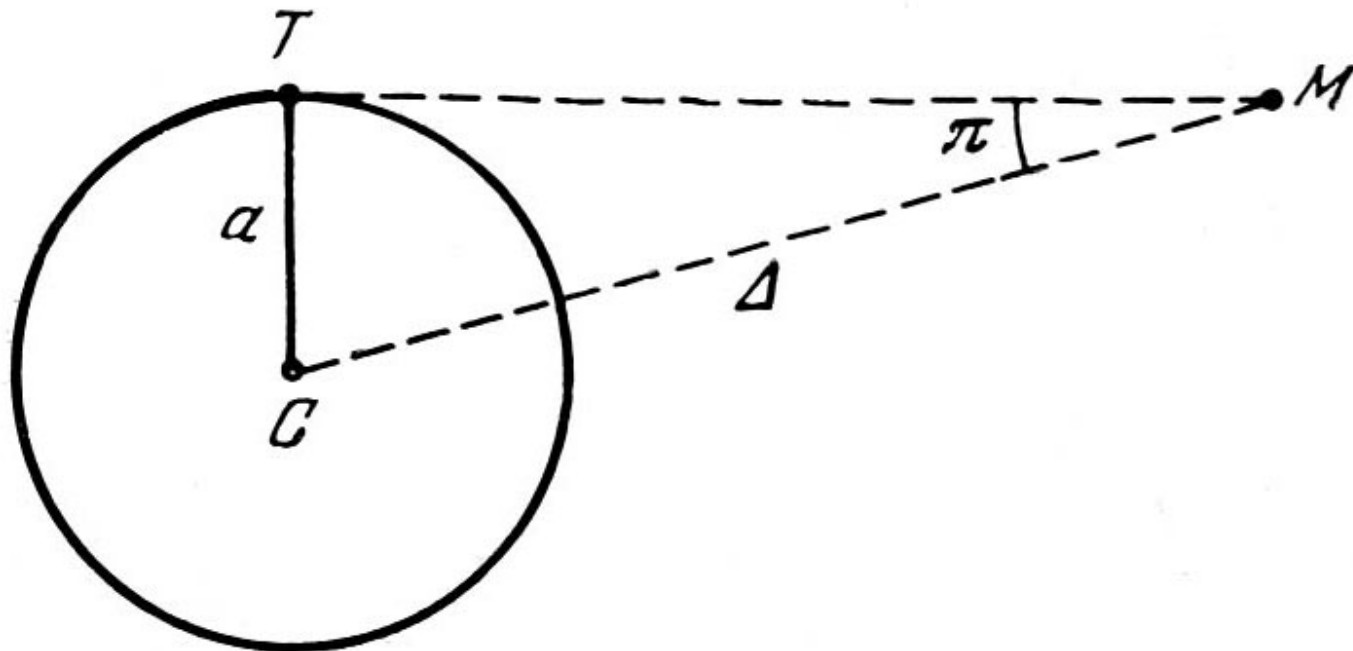
Эффект параллактического смещения звезд



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

Параллаксы бывают разные

Параллакс
суточный, горизонтальный, годичный



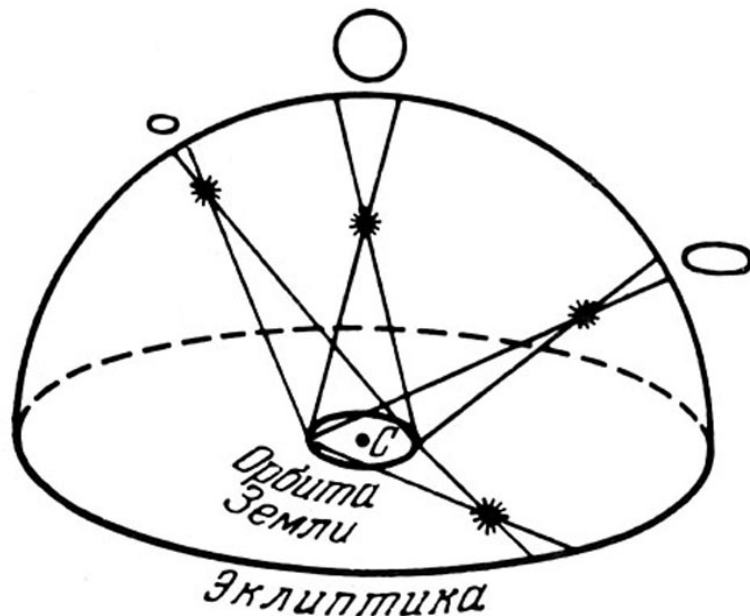
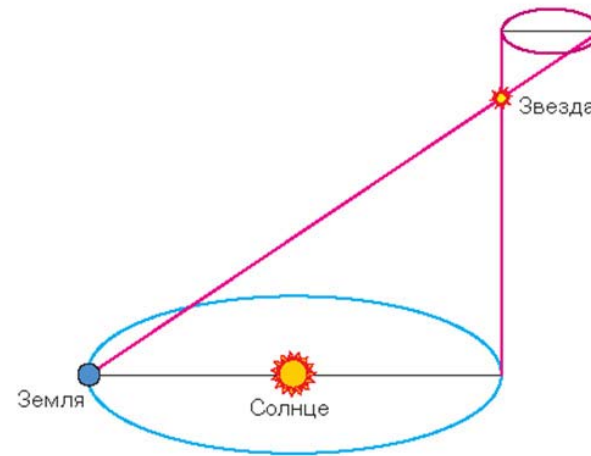
$\Delta \rightarrow D$

$\pi \rightarrow p$

Годичный параллакс звезд еще называют тригонометрическим параллаксом.

Из-за орбитального движения Земли вокруг Солнца близкие звезды описывают на небе параллактические эллипсы

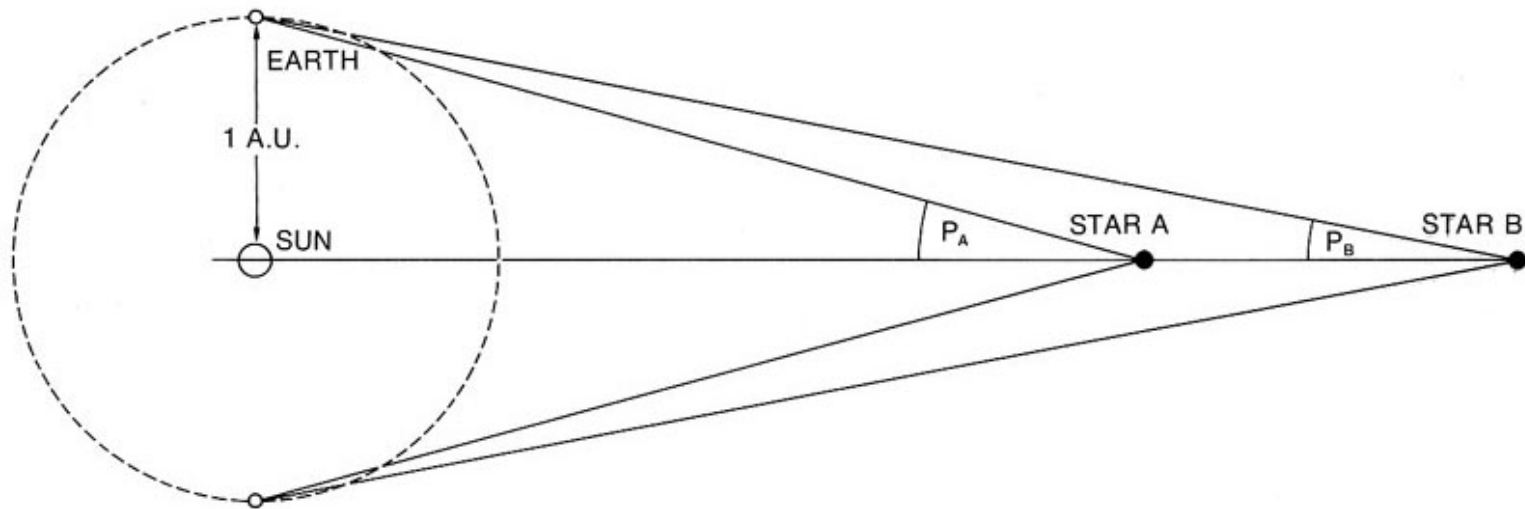
Тригонометрический параллакс



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

От чего зависит параллакс?

Зависимость параллактического угла
от расстояния



Парсек - единица измерения межзвездных расстояний

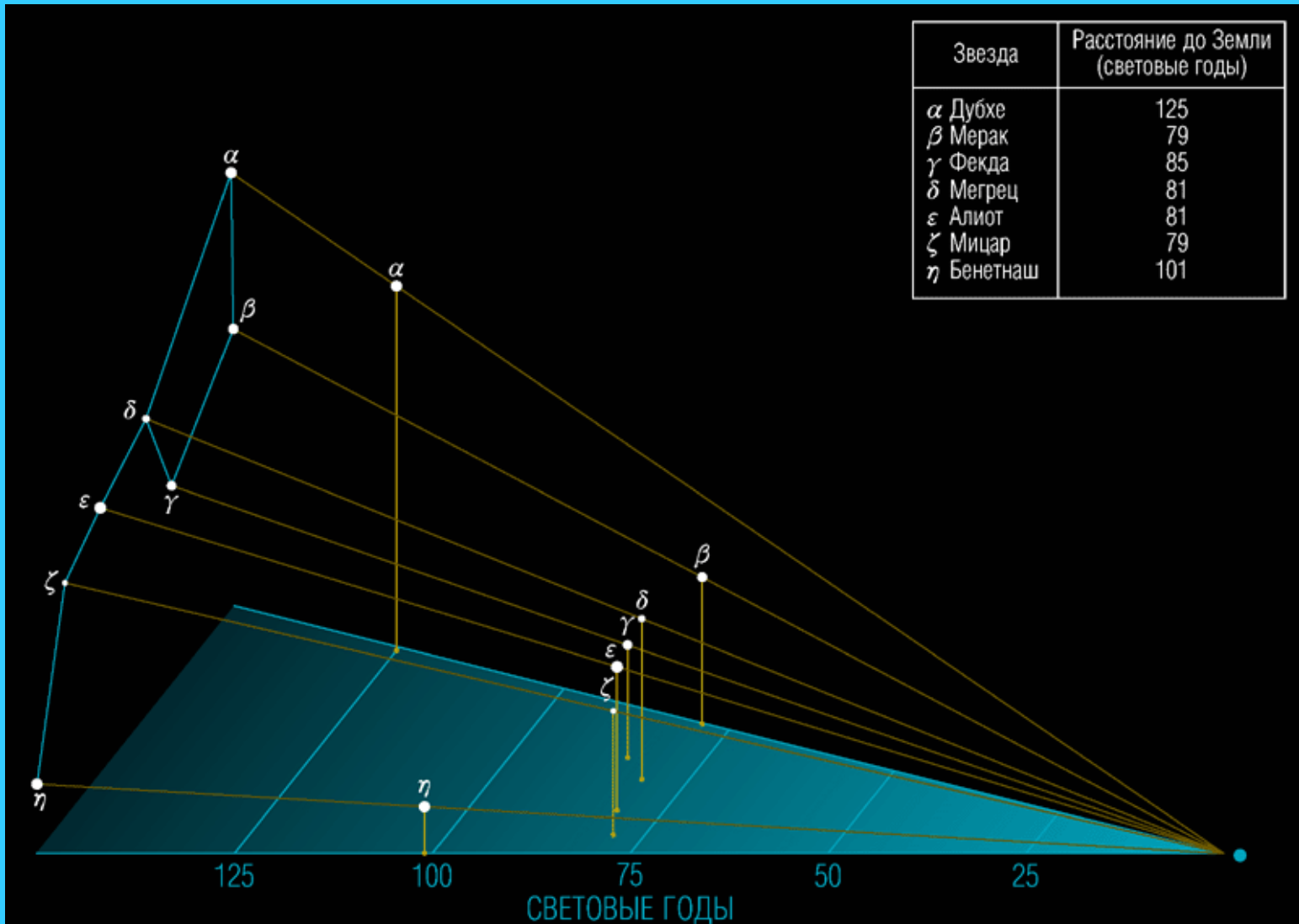


Близость звезд на небе (например, объединенных в созвездия) не всегда означает их близость в пространстве.

Знание расстояний позволяет отделить одни звезды от других в пространстве.

Параллаксы большинства звезд намного меньше 1 угловой секунды.

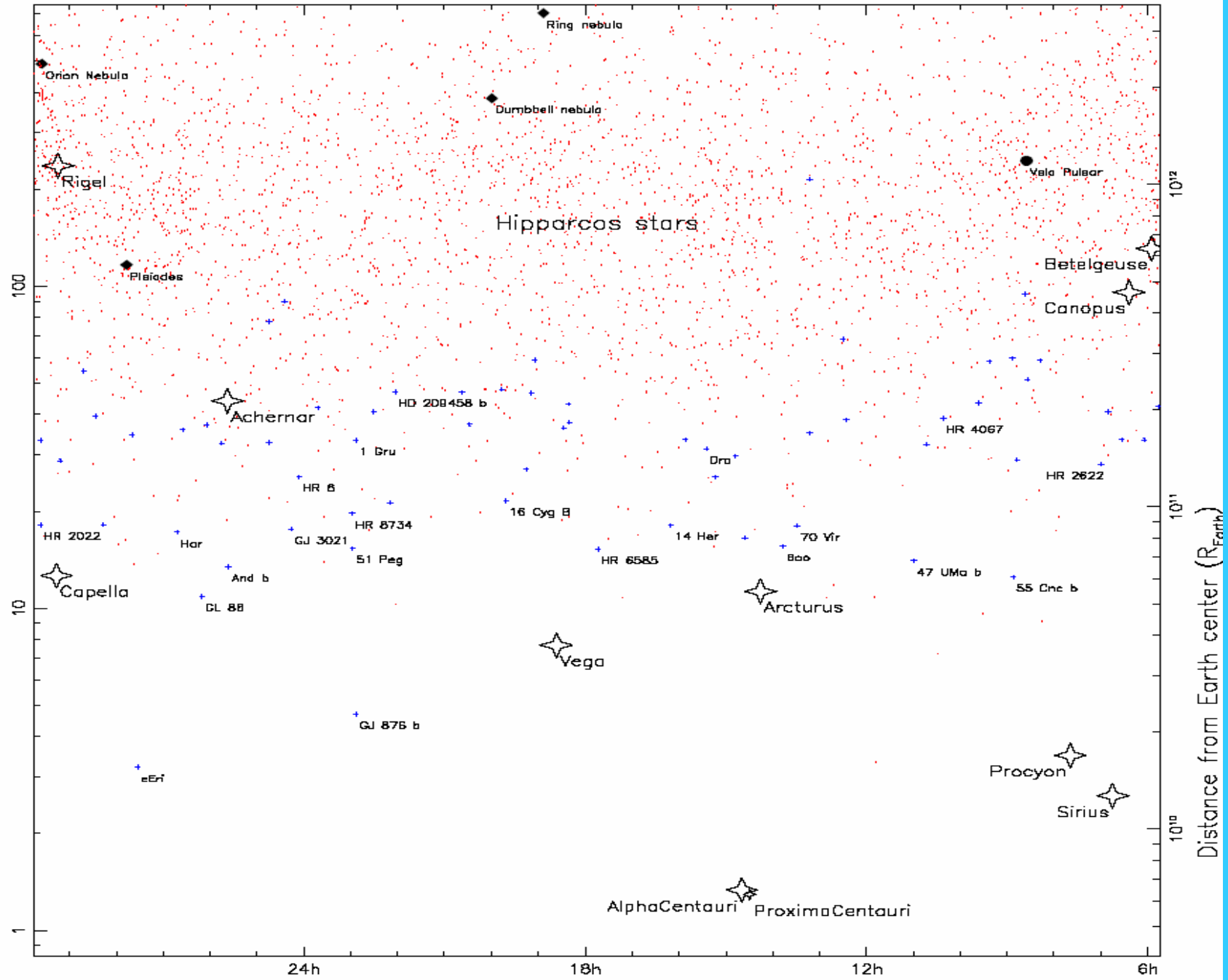
Звезды созвездия Большой Медведицы (UMa = Ursa Major)



Параллакс – угол малый...

- Измерять его трудно...
- По состоянию на 1992 г. наземными телескопами измерено около 13000 параллаксов звезд с точностью ± 0.01 угл.сек.
- 1992 г.: закончена работа космического аппарата HIPPARCOS (Гиппарх), измерены параллаксы ~ 118000 звезд с точностью ± 0.001 угл.сек.
- Их распределение по небу и по расстояниям приведено на следующем рисунке (до 1 кпк = 1000 пк)

Distance from Earth (parsecs)

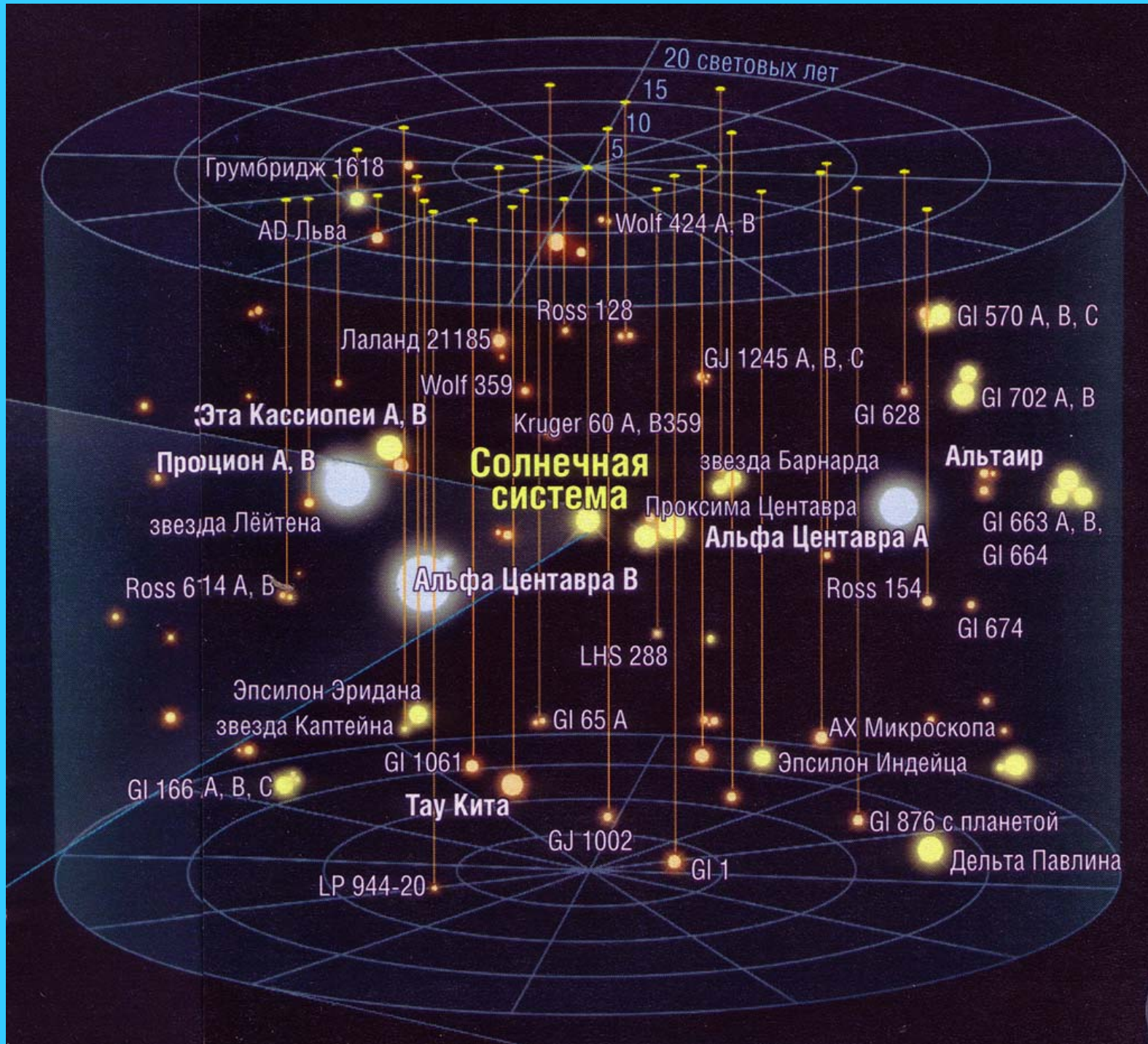


Hipparcos stars

Distance from Earth center (R_{Earth})

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

– смотрим трехмерную карту:



Надежды на будущее

- Космический проект Европейского Космического агентства (запланирован на 2011-2017 г.) **GAIA**

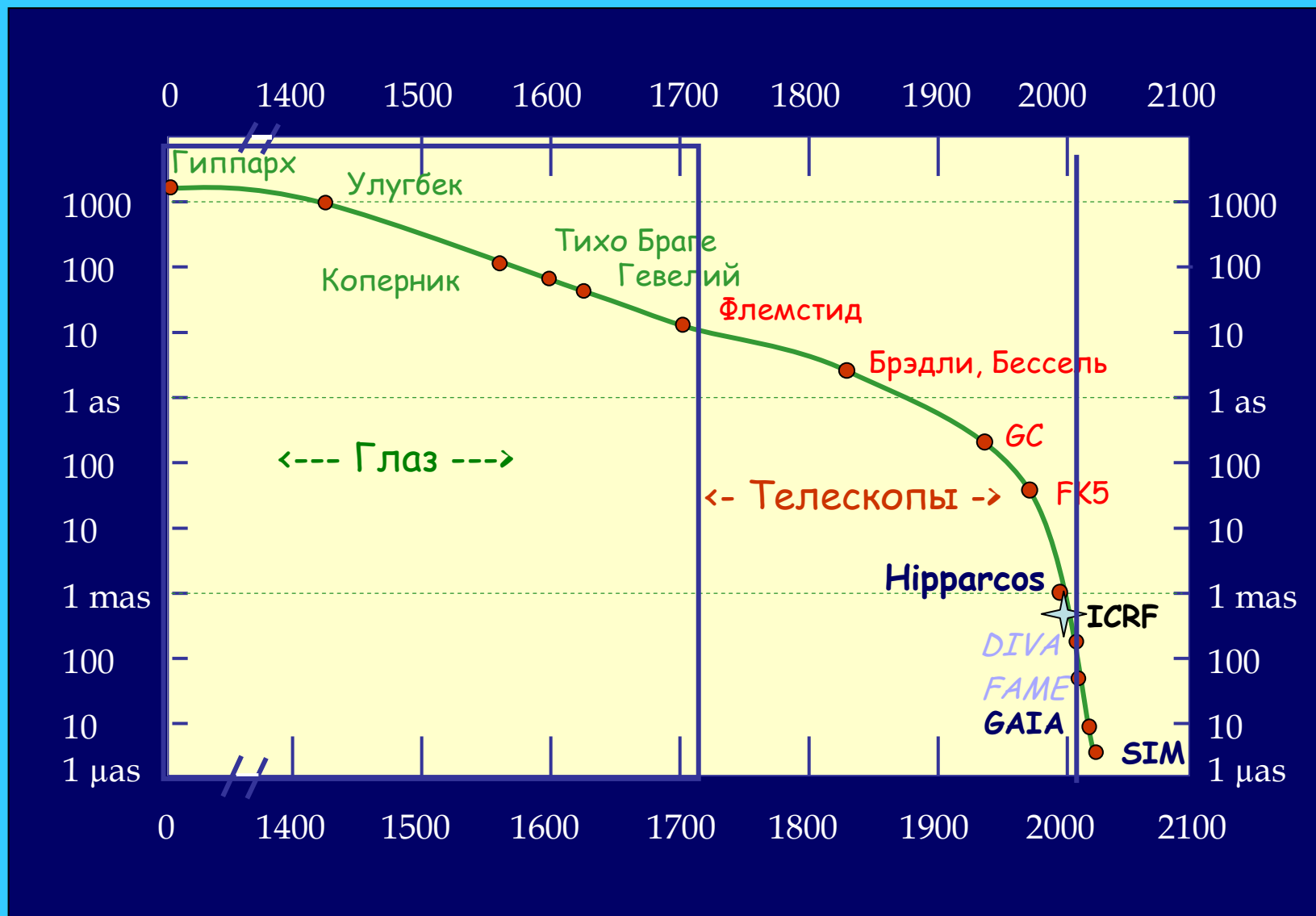
Предполагается измерить параллаксы ~1 млрд. звезд ярче 20^m (!) с точностью до 10^{-5} угл. сек.

- Космический проект NASA (США) **SIM**
- Мы, наконец, узнаем, как устроена наша Галактика

Наиболее интересные ожидания от GAIA:

- Открытие более 400000 квазаров
- Открытие до 20000 экзопланет (1 M_J , $P < 10$ лет); сейчас известно > 150
- Открытие ~ 20000 «коричневых карликов», «звезд» малой массы, так и не ставших настоящими звездами.
- 3-мерная карта Галактики до ~ 10 кпк
- Определение светимостей многих звезд

GAIA и SIM: «золотой век» астрономии



Еще более отдаленные перспективы

- Точность определения параллаксов $\sim 10^{-6}$ угл.сек. (1 микросекунда), по современным представлениям, является предельной. Именно такую величину имеют естественные флуктуации *метрики пространства-времени* вследствие гравитационного влияния звезд на лучи света, приводящие к видимому «дрожанию».

Неужели это предел? Пока мы этого не знаем.

Но это слишком далекие перспективы.

Подумаем о настоящем. Как быть?

- На расстояниях более 100-1000 пк точность современных тригонометрических параллаксов становится уже недостаточной.
 - Нужно искать новые методы «стыковки» линеек, которыми мы уже научились пользоваться. Снова встает проблема перехода от линейки к спидометру...
-

- Метод тригонометрических параллаксов называют абсолютным, т.к. он не опирается ни на какие другие предположения о свойствах звезд, а только на геометрию.

Следующий шаг: относительные методы определения расстояний

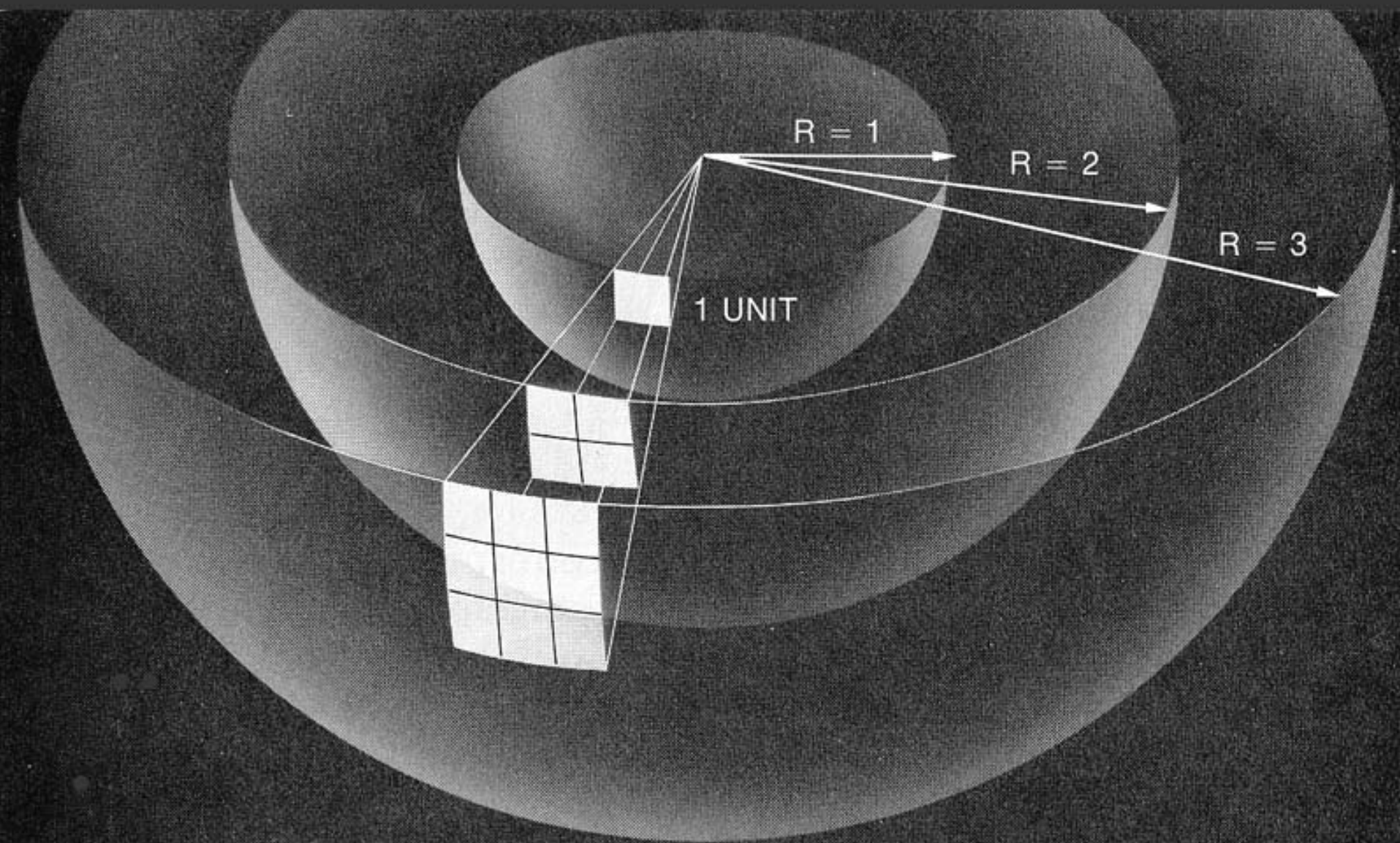
- Главные из них – фотометрические, т.е. связанные с измерением блеска звезд. Их еще называют методами «стандартной свечи».

• -----

Физическая основа метода:

- Известно, что свет от лампочки, как и от любого источника света, ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния, R^{-2} .

Фотометрические методы



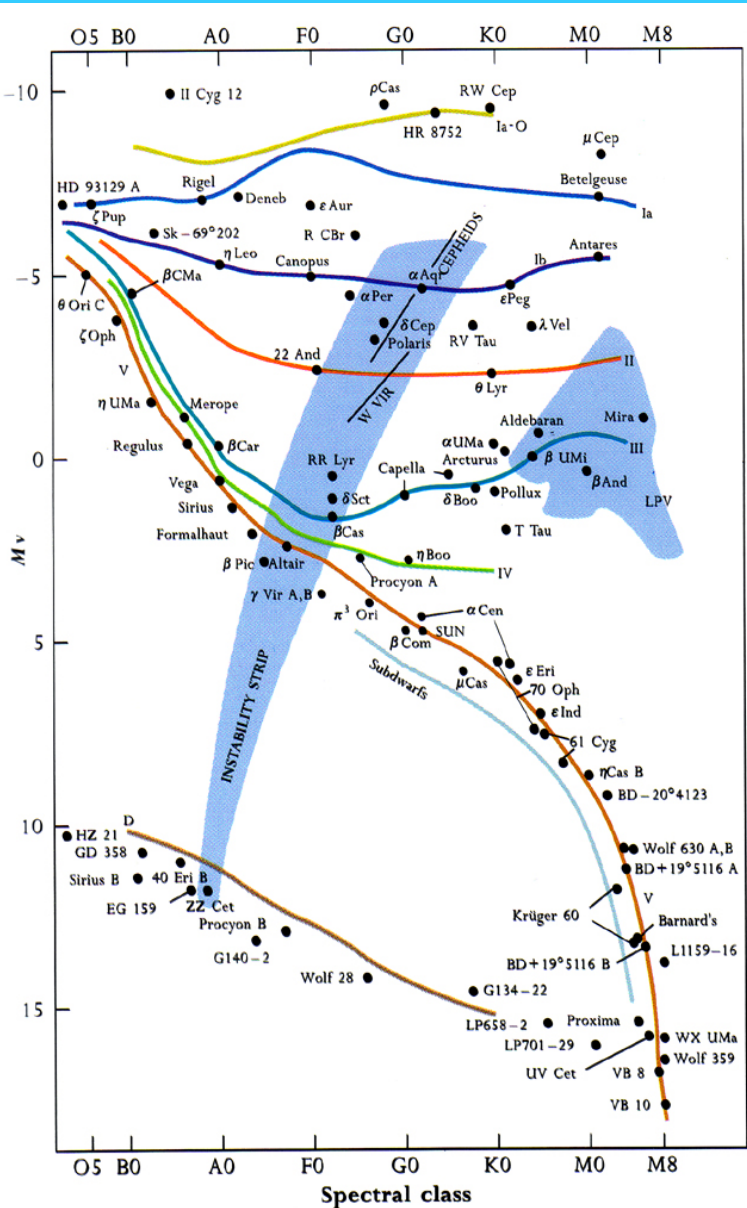
Метод «стандартной свечи»

- **Проверьте сами:** лампочка на 25 вт на расстоянии 1 м дает такую же освещенность, как и лампочка на 100 вт, отнесенная на 2 м.
- Звезды – те же лампочки, только гораздо более далекие и яркие.
- Уже почти 100 лет астрономы знают, что звезды одного и того же типа имеют один и тот же абсолютный блеск, выражаемый в абсолютных звездных величинах.

Блеск звезд измеряется в звездных величинах, введенных 2000 лет назад Гиппархом

- По определению: разница в яркости в 100 раз соответствует разности блеска звезд на 5 звездных величин.
- Если m - видимая звездная величина, M - абсолютная звездная величина (т.е. видимая звездная величина на расстоянии 10 пк), то они связаны с расстоянием R и величиной поглощения света A формулой
$$m - M = 5 \lg R(\text{в пк}) - 5 + A$$

Диаграмма «спектр – абсолютная звездная величина» (диаграмма Герцшпрунга-Рассела)



- Спектральный класс характеризует температуру звезды
- На диаграмму нанесены данные о близких звездах с известными параллаксами

Откуда мы знаем абсолютные величины звезд?

Из их видимых величин и точных расстояний.

Это возможно только для близких звезд.

- Светимости звезд определяются – в конечном счете - по тригонометрическим параллаксам близких звезд – это и есть «калибровка светимостей».

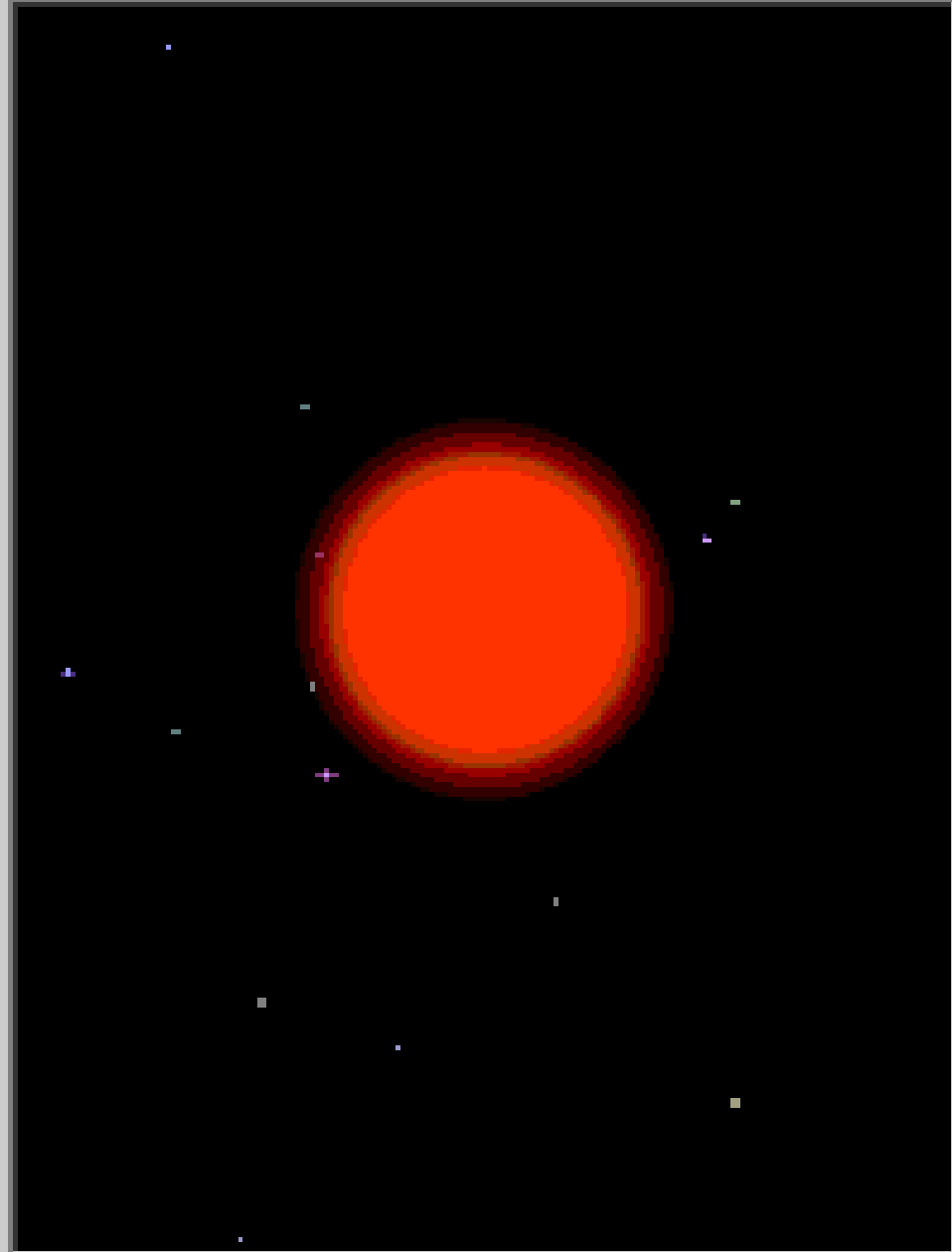
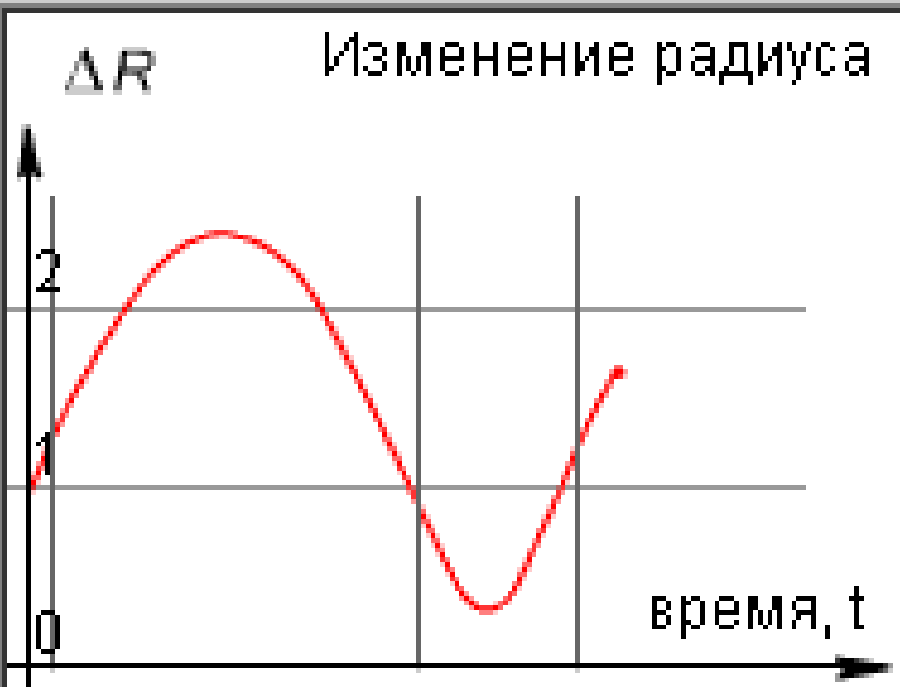
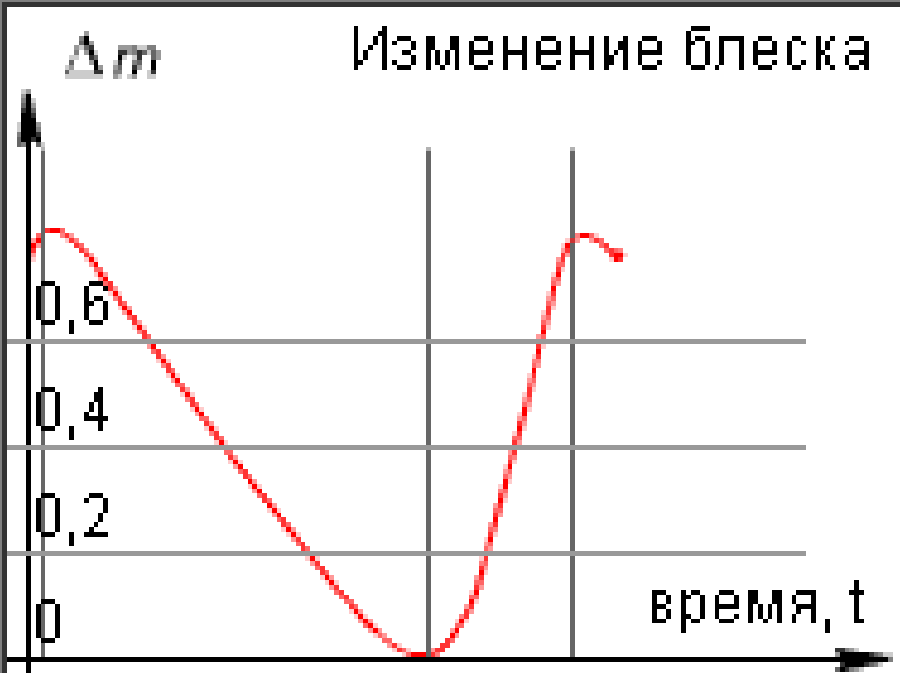
-
- Итак, зная тип или спектральный класс звезды, мы оцениваем ее светимость, т.е. абсолютную звездную величину – это следствие универсальности физических законов, управляющих эволюцией звезд.

- В астрономии есть несколько важнейших типов «стандартных свечей», отличительная черта которых – **уникальность** (их невозможно ни с чем перепутать):

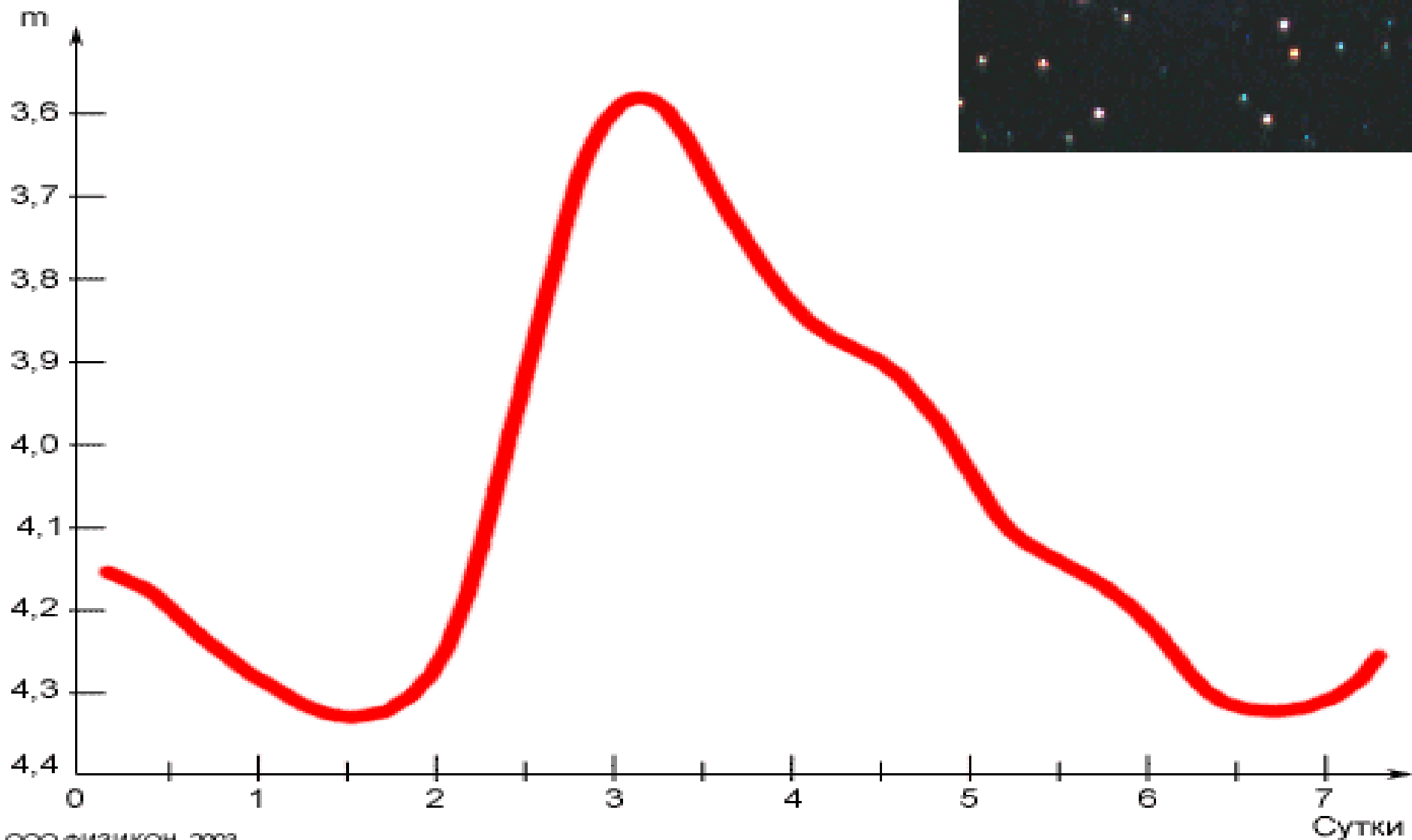
- - цефеиды
- - RR-Лириды
- - звездные скопления
- - Сверхновые звезды

1. Цефеиды, названные так по имени первой открытой звезды этого типа, δ Цефея

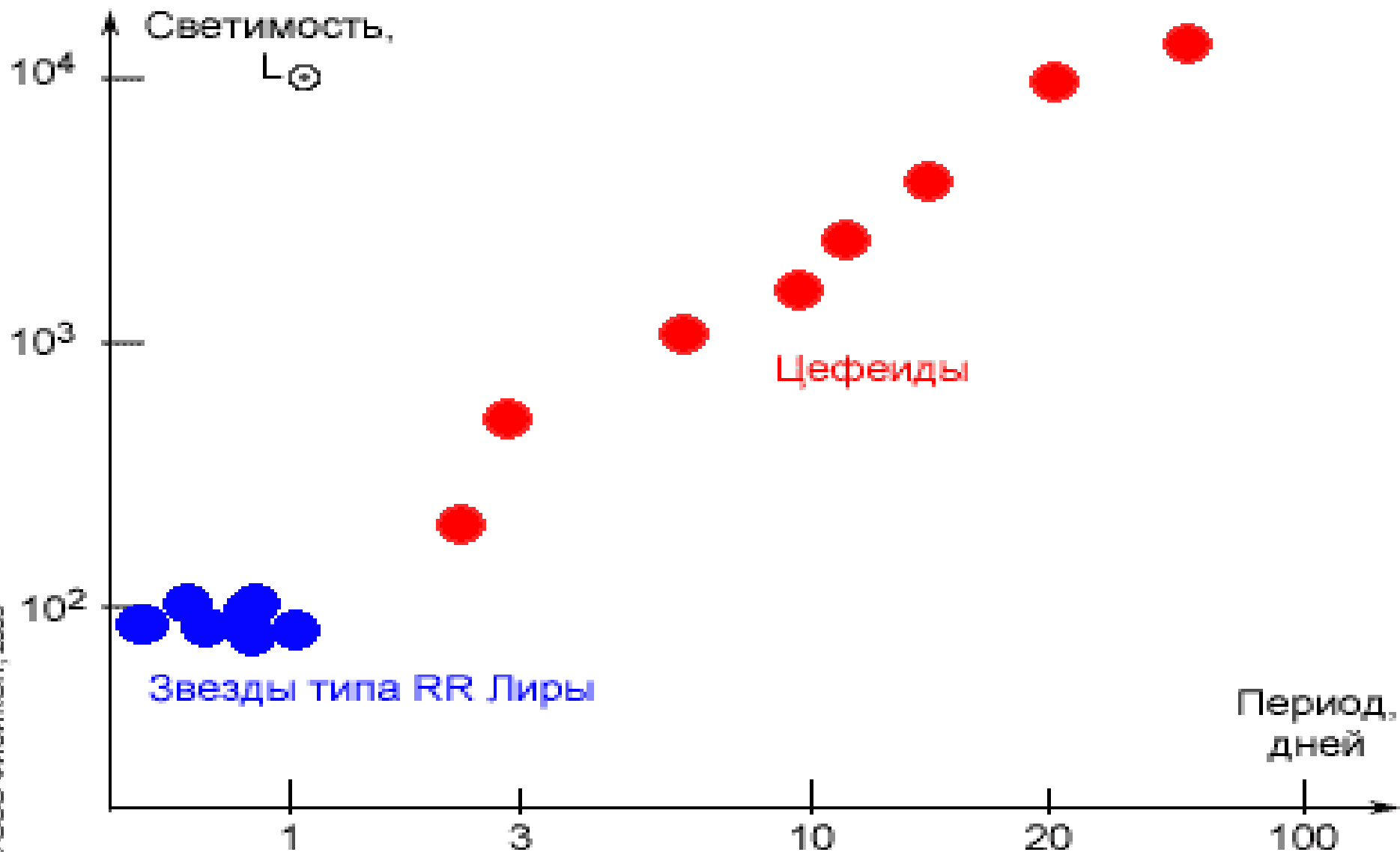
- Это **молодые** пульсирующие переменные звезды, меняющие блеск с периодами от 1 до 100 суток; желтые сверхгиганты, они в 100 – 10000 раз ярче Солнца и видны издалека
- **Их светимость растет с увеличением периода пульсаций**
- Они населяют рассеянные скопления, спиральные и неправильные галактики



Кривая блеска цефеиды



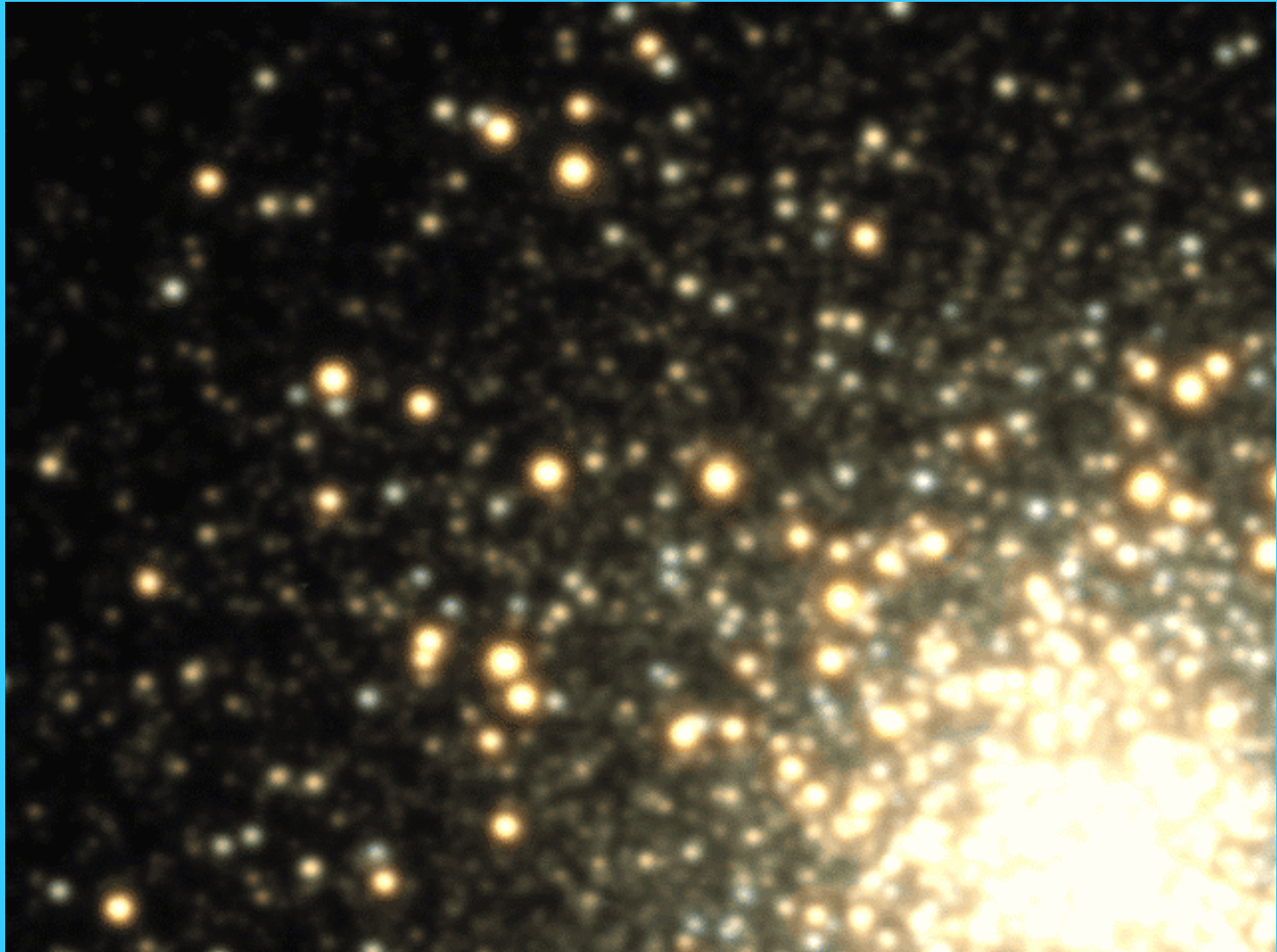
Зависимость «период-светимость» для цефеид и RR-Лирид



2. 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

Смотрите, как они мерцают в шаровом скоплении M3 = NGC5272:



3. Рассеянные звездные скопления

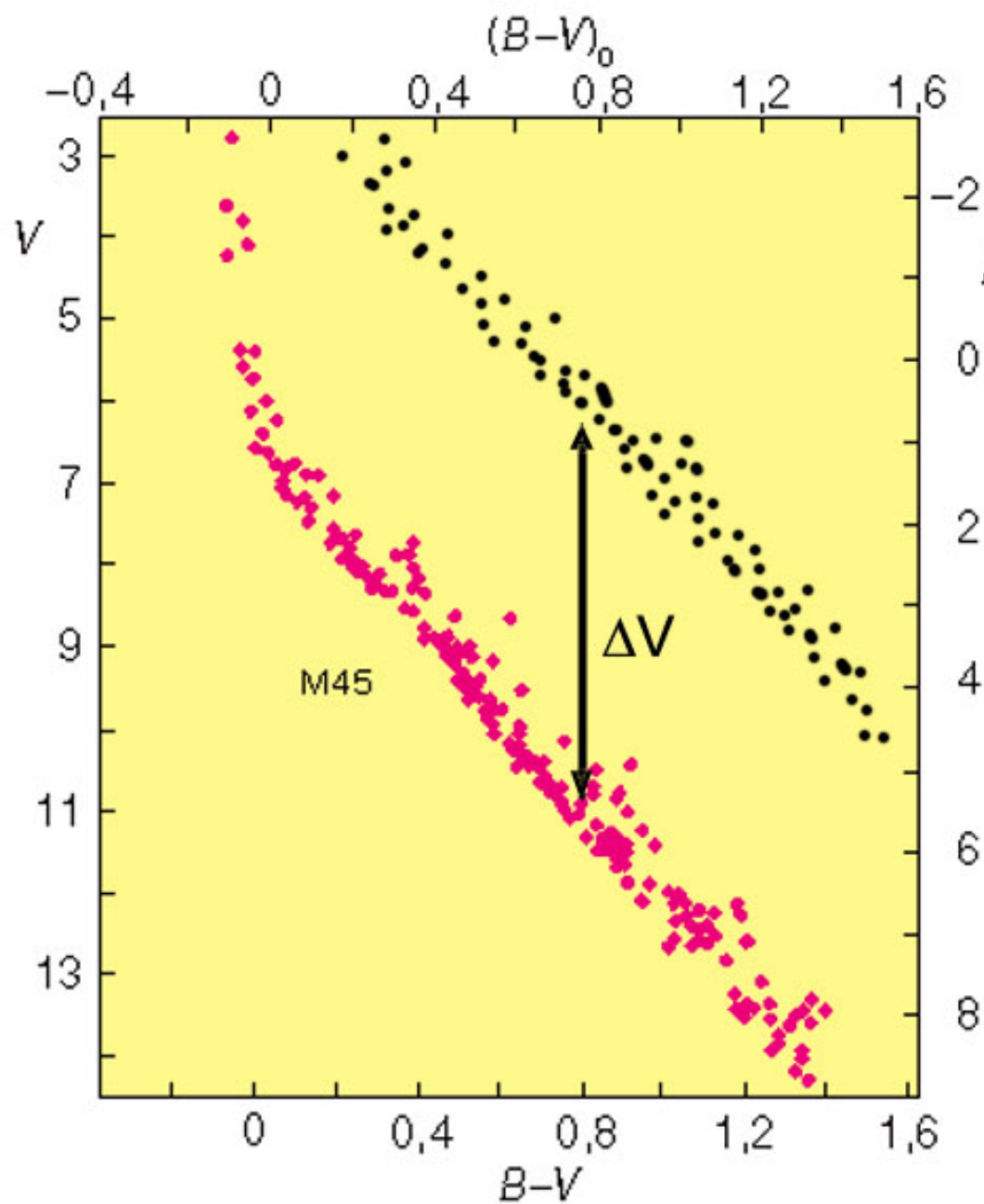


- Молодое близкое скопление M6 в созвездии Скорпиона

Знаменитая пара очень молодых рассеянных скоплений χ и h в созвездии Персея



- Большинство звезд рассеянных скоплений лежит на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела, это звезды-карлики (не по размерам и блеску, а по своему эволюционному статусу).
- Источник энергии – «горение» водорода в ядре

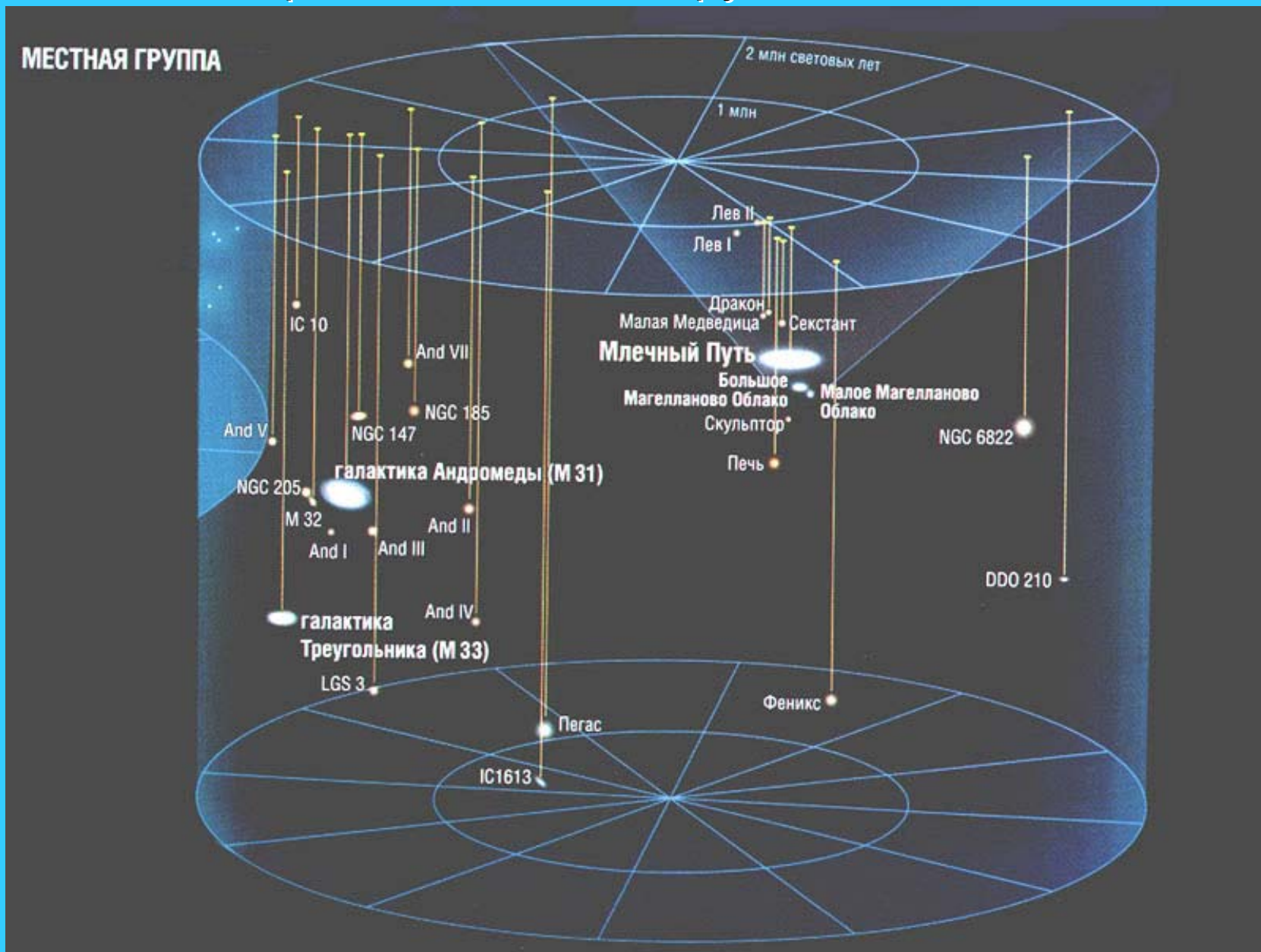


**Определение расстояния
до звездного скопления
методом
совмещения главных
последовательностей
на диаграмме
“цвет - величина”**

Расстояния до рассеянных скоплений

- Измеряют **разность блеска - смещение главной последовательности** - по сравнению со скоплениями Гиады или Плеяды (M45), расстояния до которых определены тригонометрическими методами.
- Сдвиг главной последовательности на **$\Delta V = 5$** звездных величин означает, что расстояния до скоплений отличаются **в 10 раз**.

Благодаря этим методам у нас есть представление о строении Местной Группы галактик



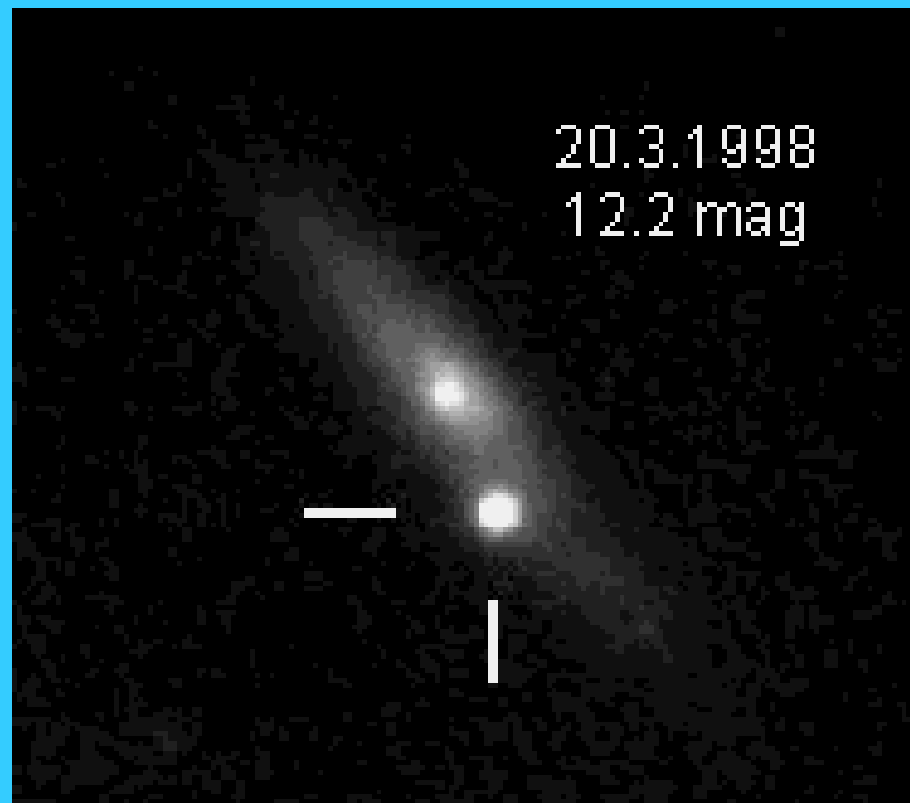
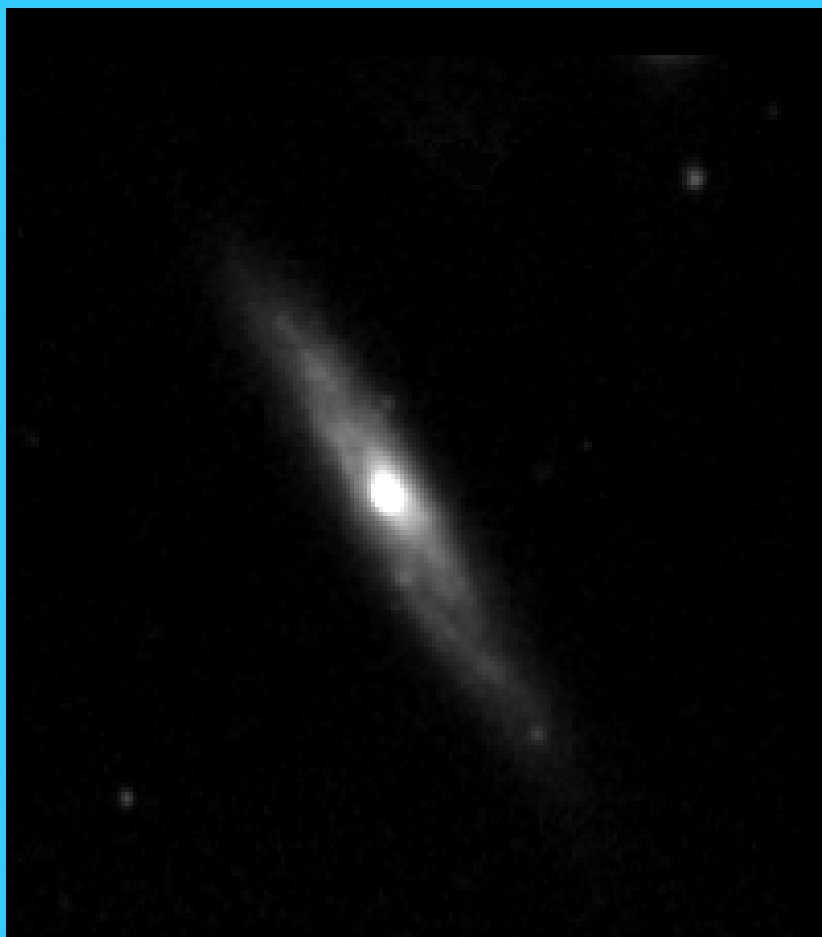
4. Сверхновые звезды как «стандартные свечи»

- **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.**

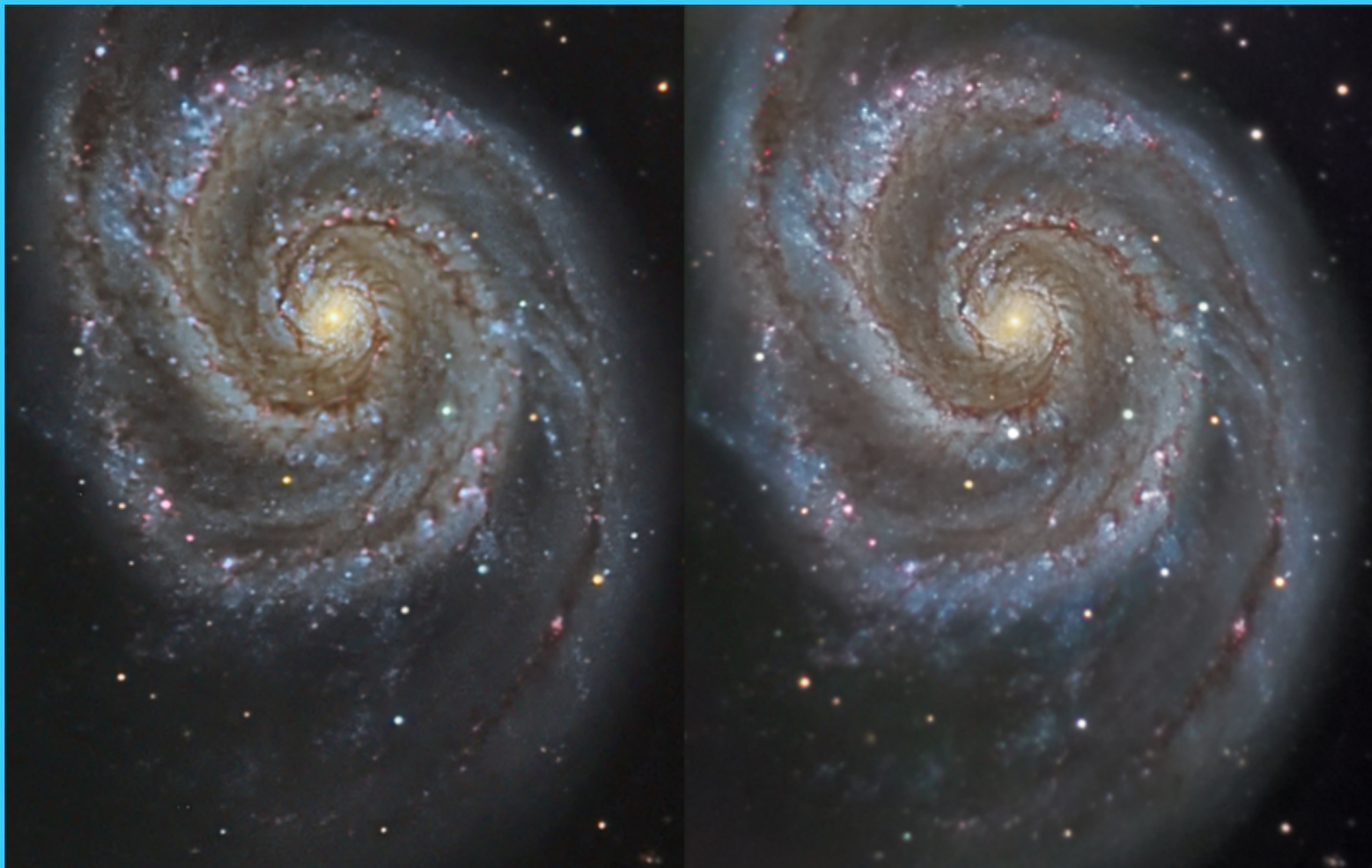
Сопровождается сбросом оболочки со скоростями в тысячи км/с.

- Последняя Сверхновая в нашей Галактике вспыхнула в 1604 г. (SN Кеплера), она достигла яркости -3^m
- В других галактиках SN вспыхивают чаще...

Иногда блеск SN в максимуме сравним с блеском
всей галактики:



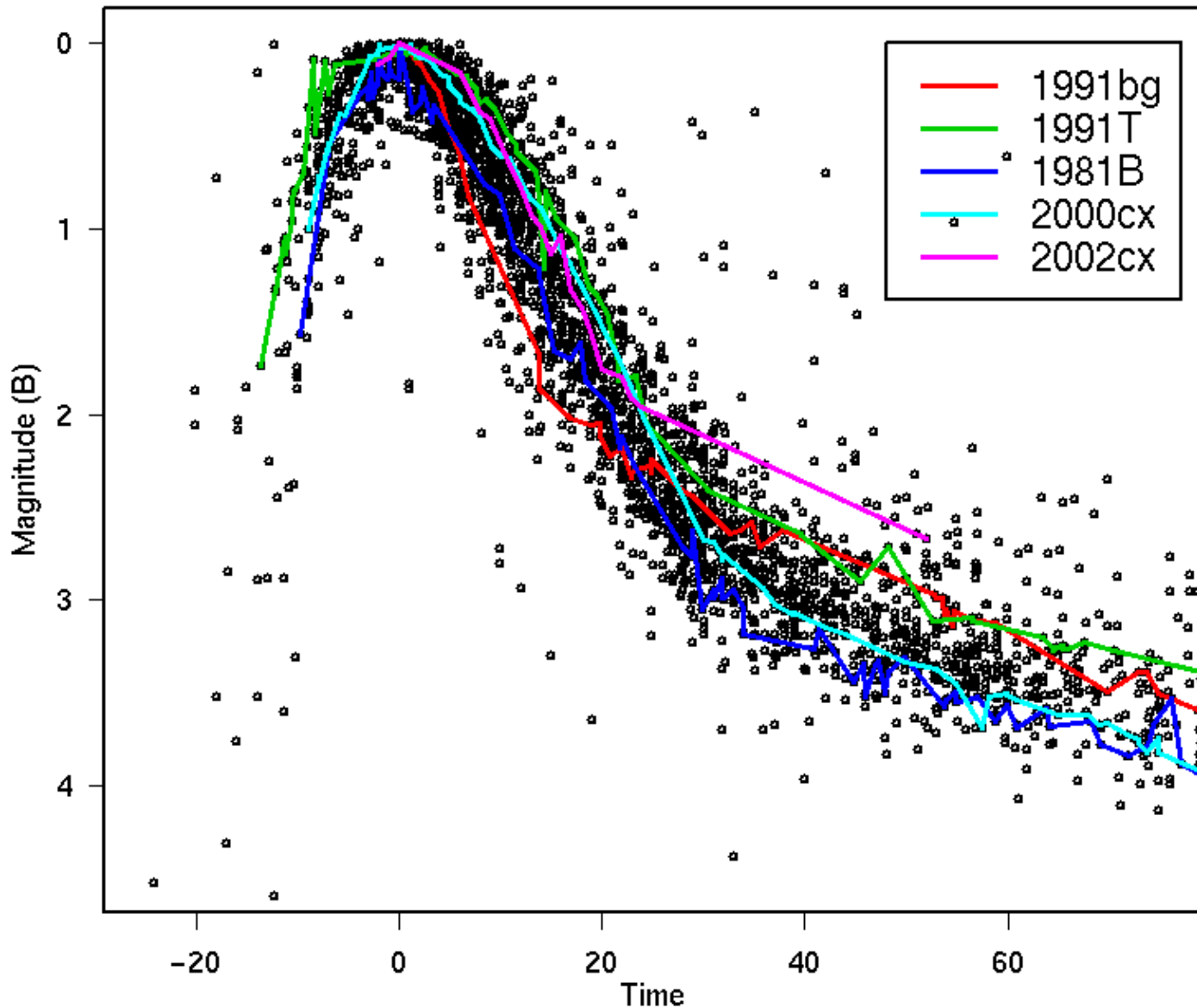
SN 2005 г. в галактике M51 «Водоворот»



SN 1993 в галактике M81 на стадии ослабления блеска



Типичные кривые блеска Сверхновых ($T=0$ – момент максимума блеска)



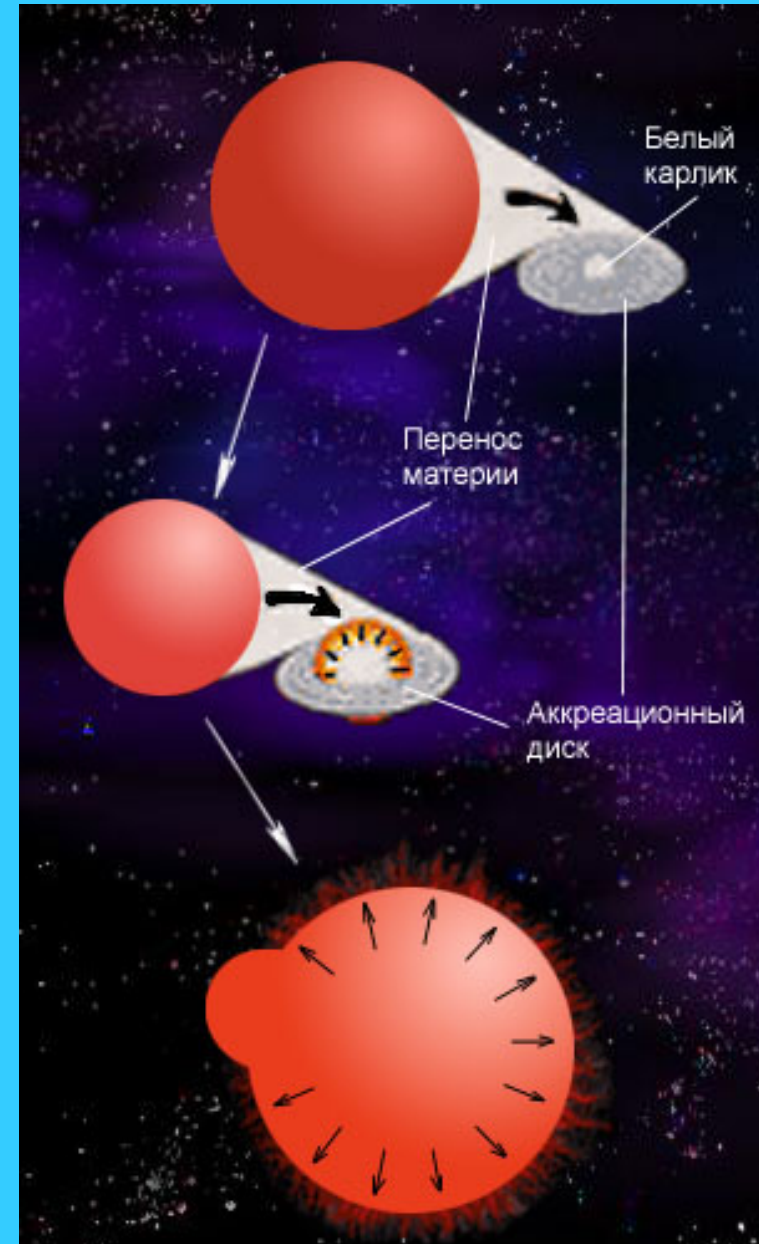
Природа Сверхновых II типа

- Тип II – 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 на поверхности белого карлика
- $M_V(\text{max}) \approx -19.5^m$
 - **«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 ним определяется **постоянная Хаббла**, описывающая расширение Вселенной и характеризующая ее возраст: $V \approx H \times R$
- **Заглядывая вдаль, мы пытаемся рассмотреть прошлое**

Этапы построения шкалы расстояний

- Тригонометрические параллаксы близких звезд и звездных скоплений



- Светимости цефеид и RR-Лирид в скоплениях



- Фотометрические расстояния галактик, содержащих цефеиды, RR-Лириды.

Определение светимостей Сверхновых звезд.



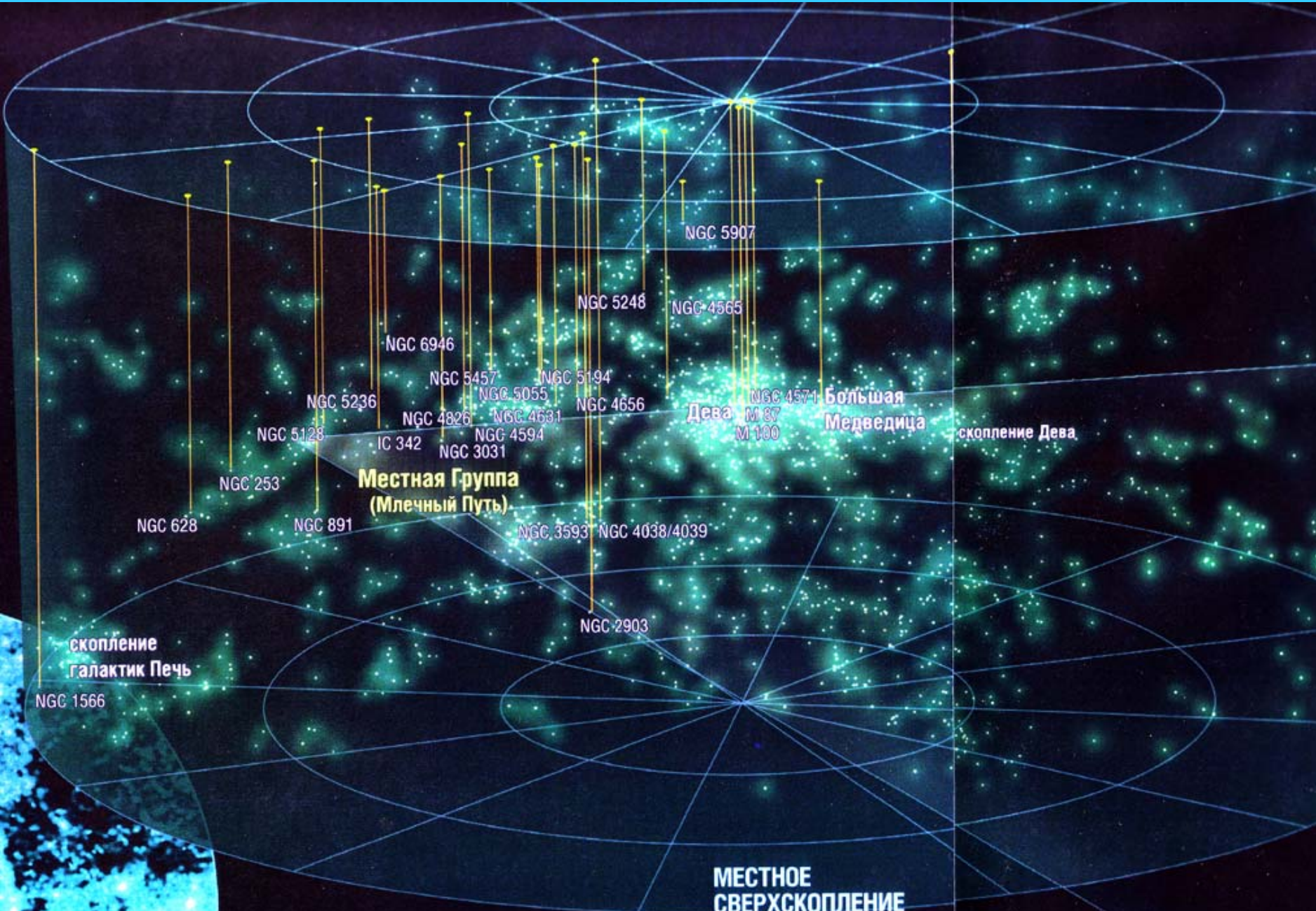
- Фотометрические расстояния далеких галактик, измеренные по Сверхновым

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

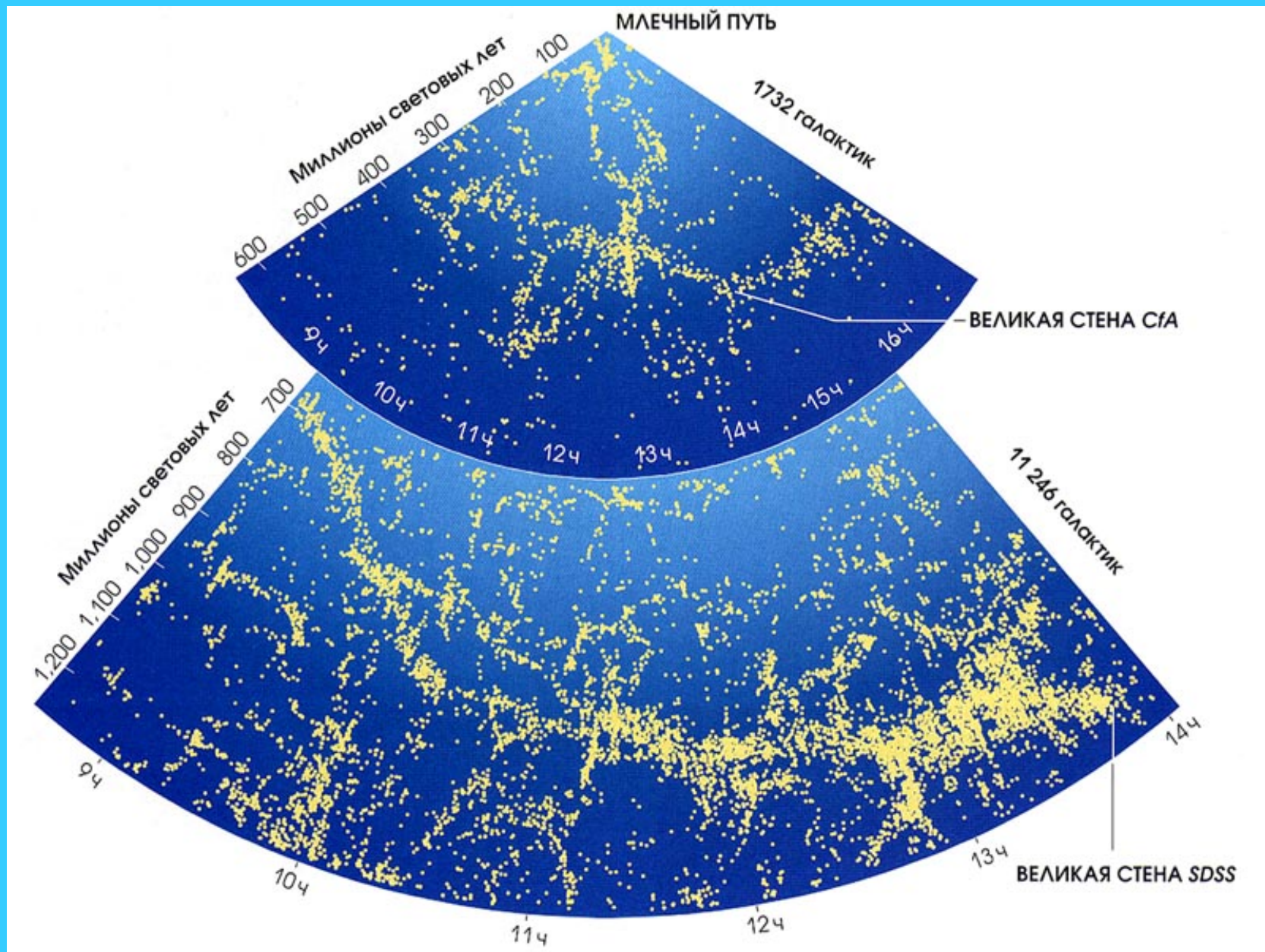
Основные достижения наблюдательной космологии

- Современное значение постоянной Хаббла $H \sim 75$ км/с/Мпк
- Открытие галактик с $z = V/c \approx 6 - 7$
($V \approx 0.96 c$!!!) на границе видимой Вселенной
- Уточнение крупномасштабной структуры Вселенной
- Открытие ускоренного расширения Вселенной, космологического вакуума («темной энергии»)

Строение Местного Сверхскопления (с центром в скоплении в Деве) Точки – это галактики...

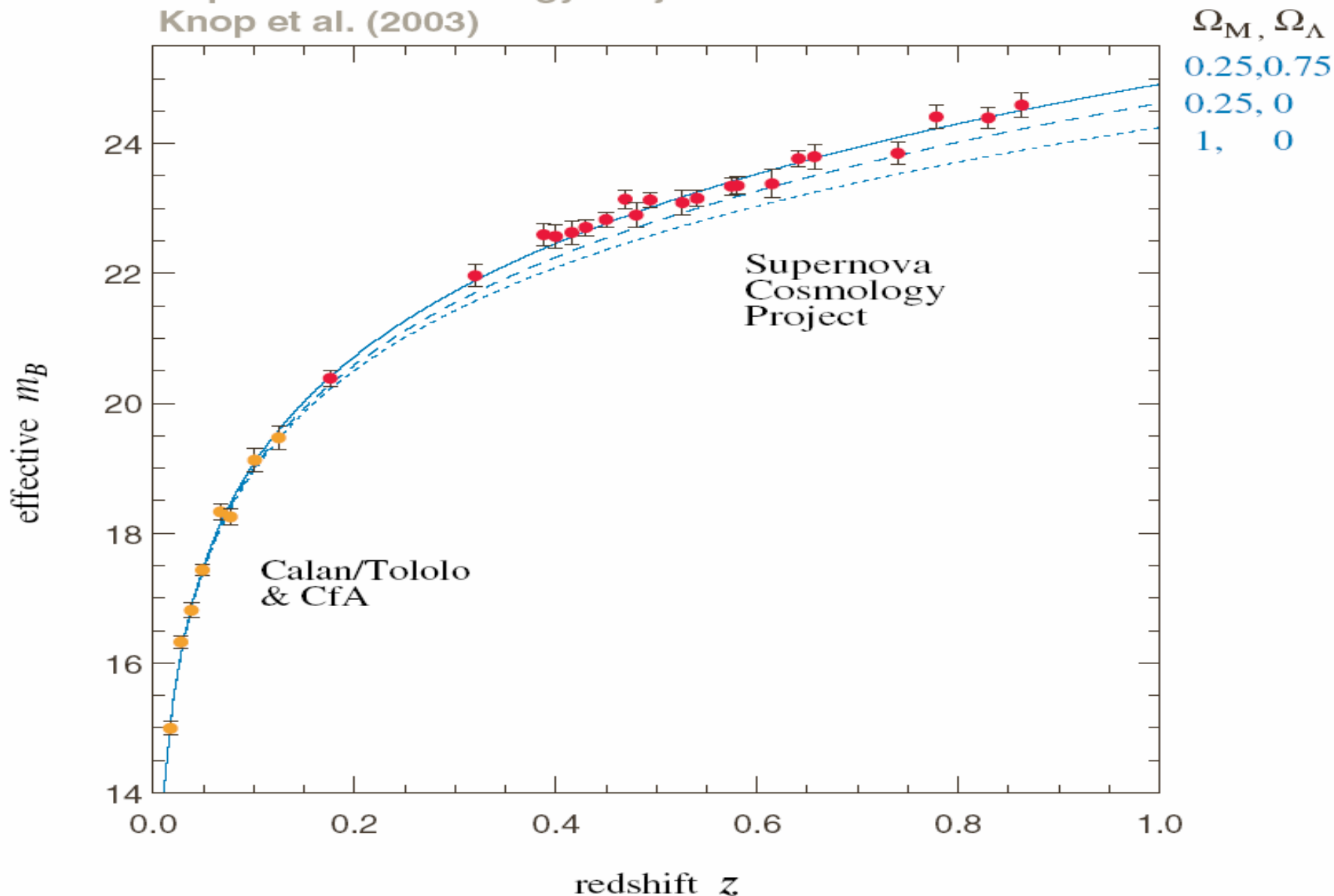


Фрагмент крупномасштабной структуры Вселенной
(по данным Слоановского обзора). Точки – это галактики...

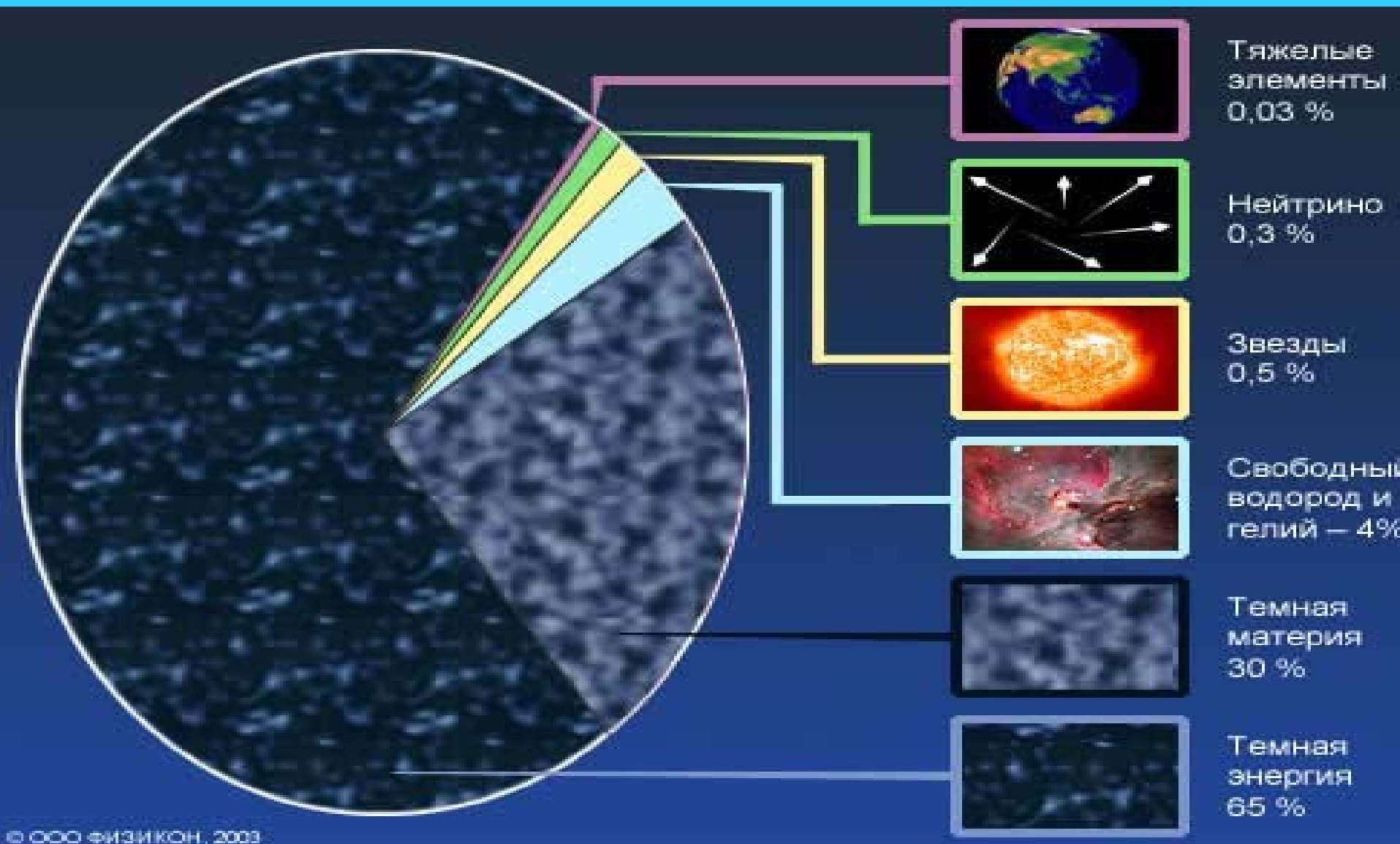


Сол Перлмуттер (Lawrence Berkeley Laboratory, UC),
руководитель проекта «Сверхновые Ia в космологии»

Supernova Cosmology Project
Knop et al. (2003)



- Впервые показано, что расширение Вселенной происходит с ускорением.
- Для объяснения этого явления привлекается гипотеза «космологического вакуума» («темной энергии»), обеспечивающего отталкивание на масштабах, превышающих 2 - 3 Мпк
- Проблема «темной материи» отходит на второй план... Ее плотность уменьшается втрое.



- **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