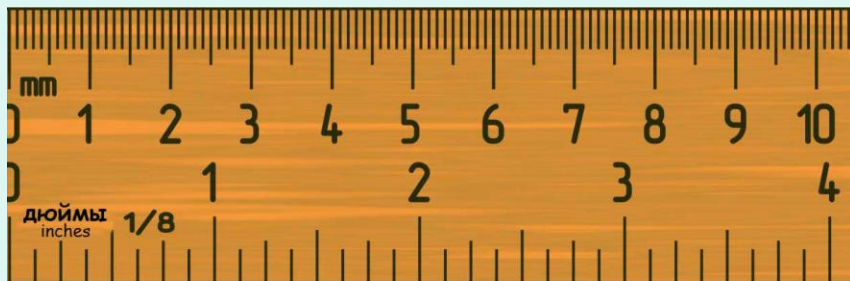


Измеряя Вселенную

шкала расстояний в астрономии

Чем измерить расстояние

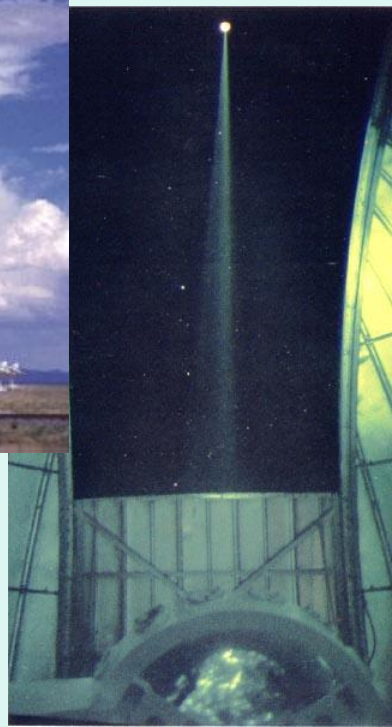


Скорость света

299 792 458 м/с ровно

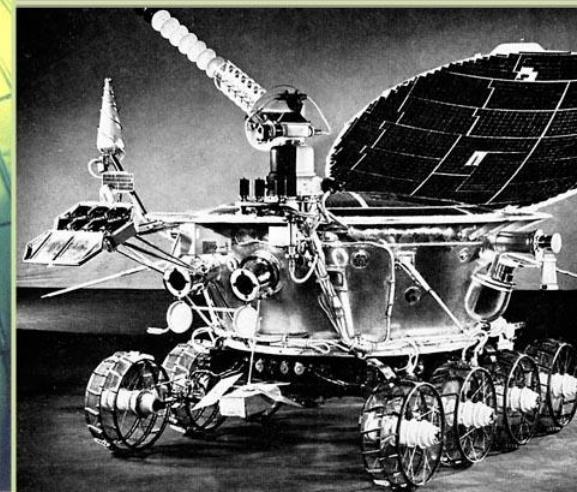
С 1983 года метр в определён, как расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1 / 299\,792\,458$ секунды

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



Лазерная локация
Луны

(точность $\sim 1 \text{ см}$)



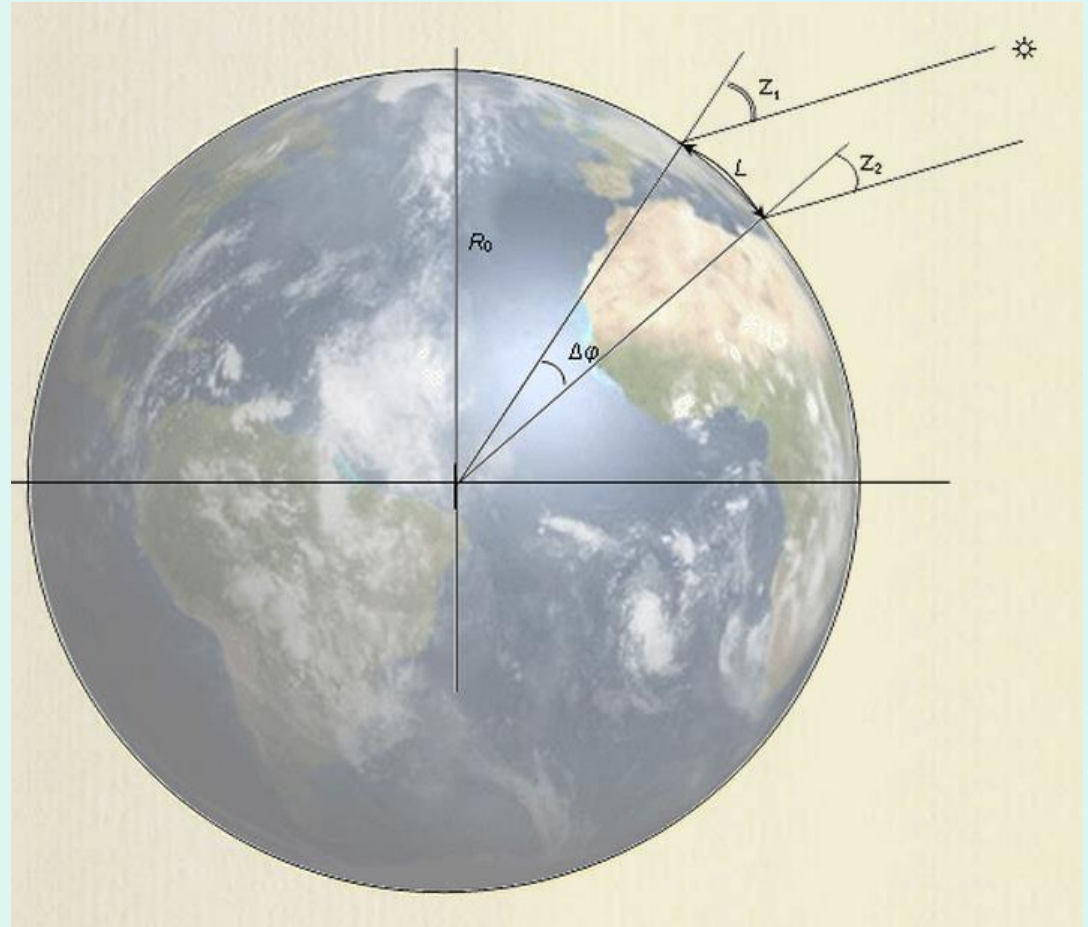
А дальше? - Геометрия!



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

$$\Delta\varphi = z_1 - z_2$$

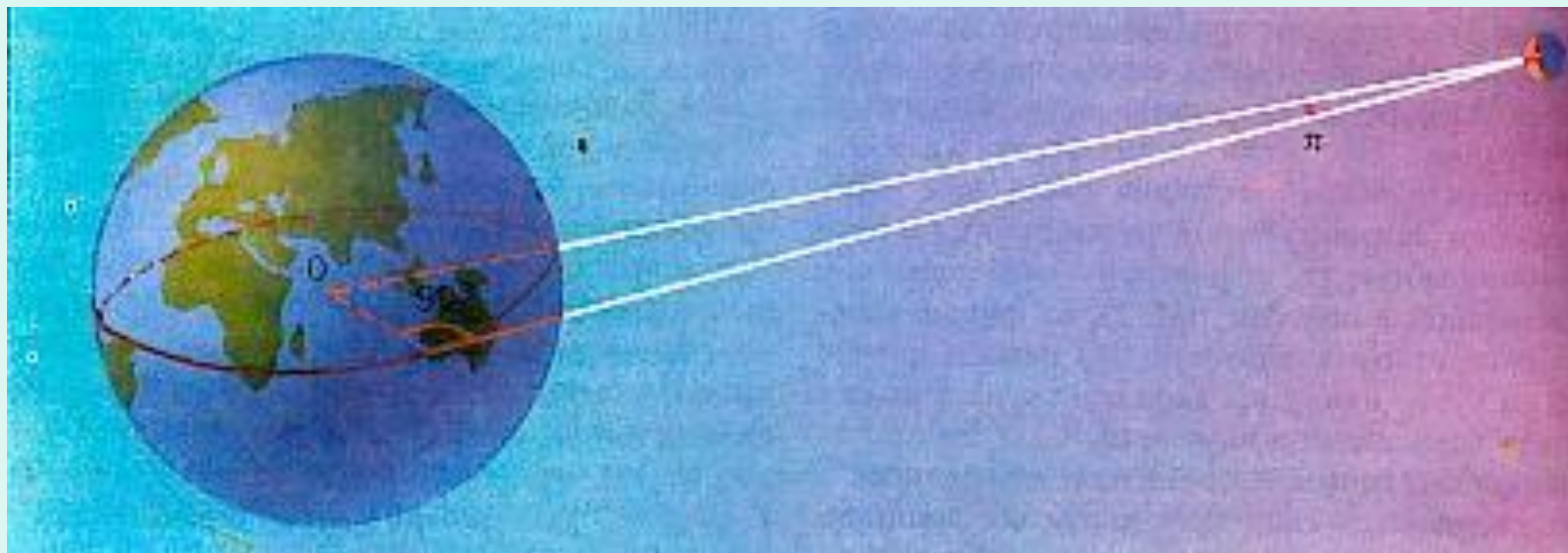
$$\frac{2\pi R_0}{L} \approx \frac{360^0}{\Delta\varphi}$$



z_1, z_2 - зенитное расстояние Солнца в двух пунктах, различающихся широтой

- Предположив, что Земля - шар (что было весьма 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) - 44500 км
- египетский стадий (~172.5 м) - 43125 км
- Современное значение - около **40030 km**
- Точность ~10% !!!

Современная модификация метода Эратосфена — метод “суточного параллакса”



- метод суточного параллакса
- радиолокация
- законы Кеплера

позволили надёжно вычислить
расстояния в Солнечной системе

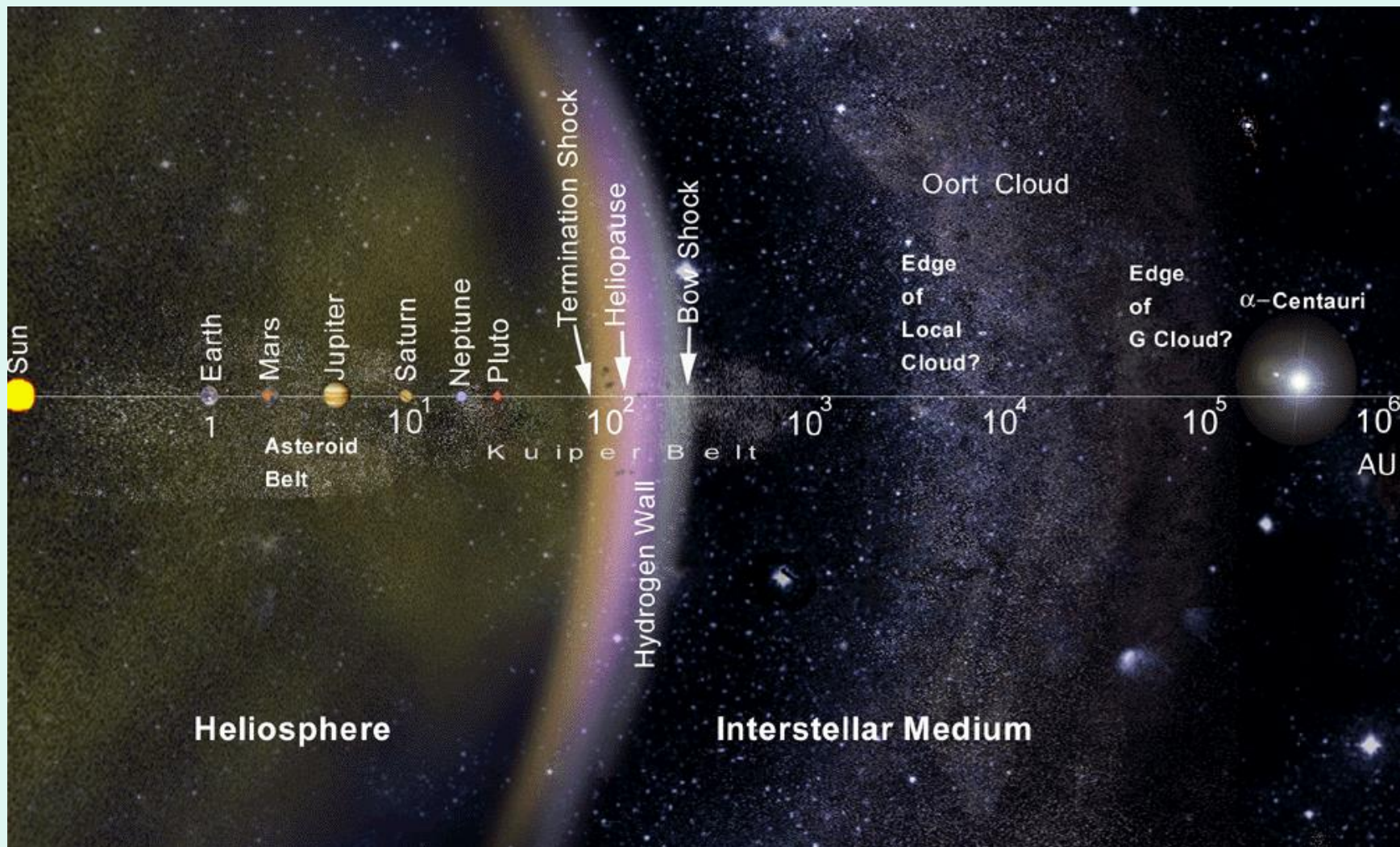
Расстояния в Солнечной системе

Радиус Земли - 6371 км

- до Луны - 384000 км

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

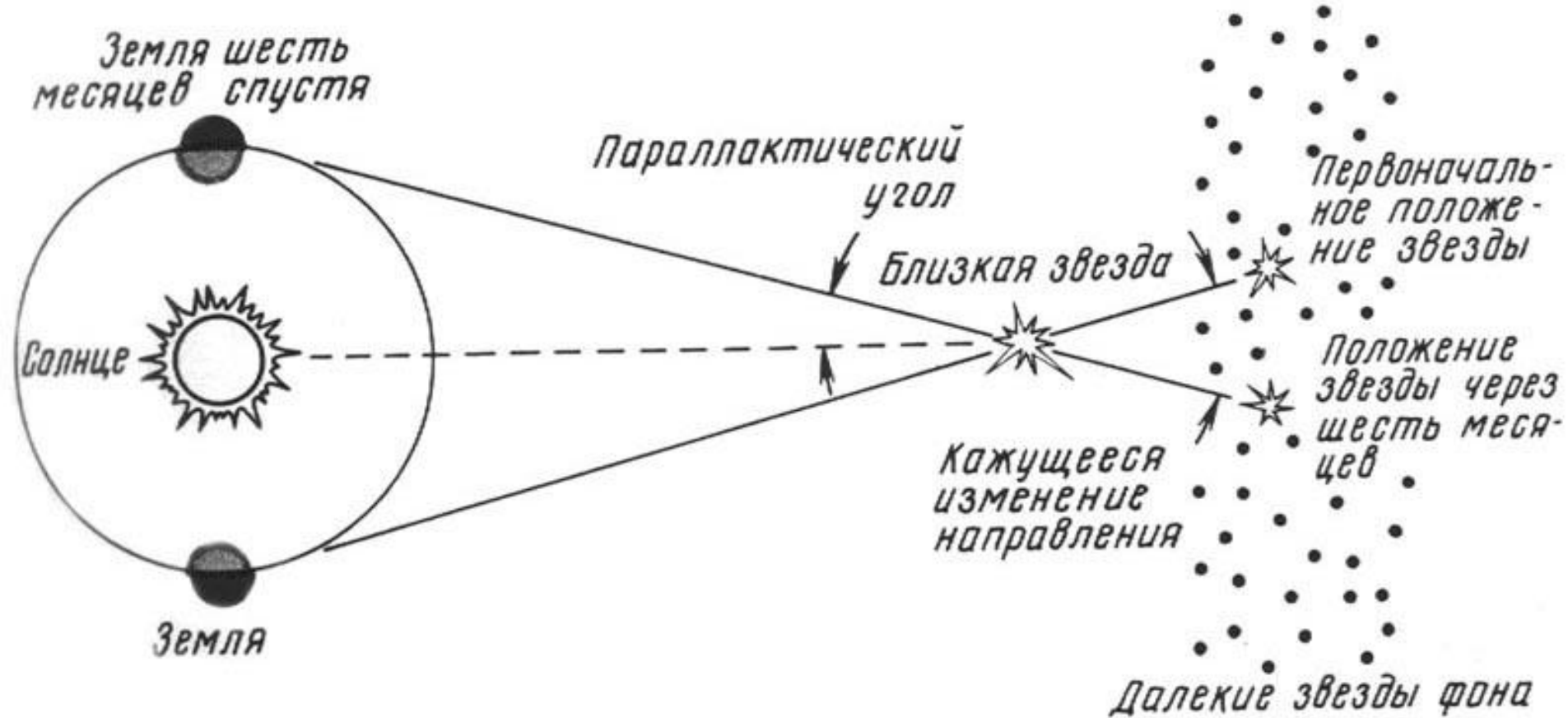
- 1 а.е. - новая единица измерения расстояния - "астрономическая единица"
- Радиус Солнечной системы: > 40 а.е. $\approx$ 5 световых часов (Плутон + Харон)



А дальше?

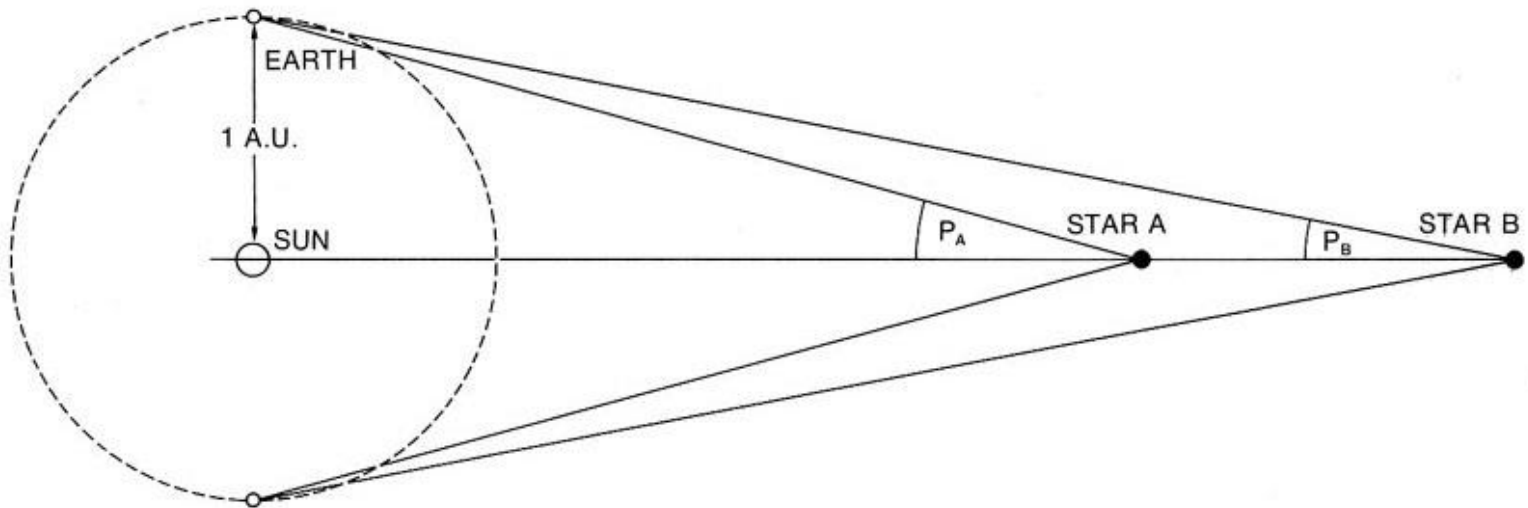
- Расстояния до близких звезд измеряются старым добрым методом триангуляции, только в качестве БАЗЫ используется радиус орбиты Земли, равный
1 а.е. = 149 600 000 000 м
- Измеряется годичный параллакс (или просто параллакс) звезд

Эффект параллактического смещения звезд



На практике измеряют не абсолютный, а относительный параллакс звёзд, т.к. определяют положение изучаемой звезды относительно слабых звёзд фона, считая их очень далёкими

От чего зависит параллакс?
- От расстояния до звезды



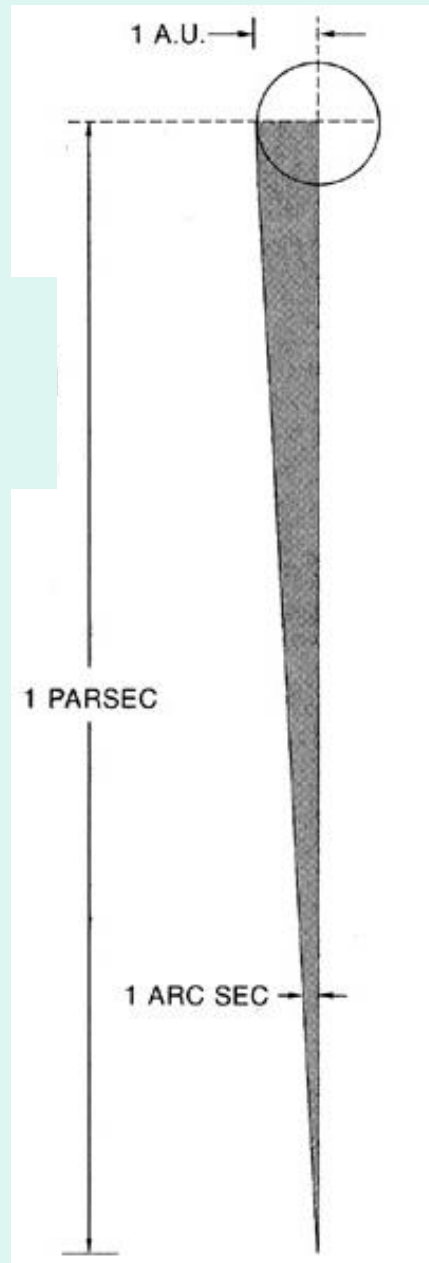
Для малых углов $p \sim 1/D$

Парсек – новая единица измерения расстояний

Parsec = **PAR**allax
SECond of arc:

Расстояние, с
которого 1 а.е.
видна под углом
1 угл. сек.

$$D(\text{pc}) = 1/p''$$



1 pc $\approx$ 206265 а.е.
 $\approx 3.086 \cdot 10^{16}$ м
 $\approx$ 3.26 свет. года

Большие расстояния:

1 кpc = 10^3 pc

1 Мpc = 10^6 pc

1 Gpc = 10^9 pc

1" (1 угловая секунда):

Под таким углом человеческий волос толщиной 0.1 мм виден с расстояния около 20 м

Проксима Центавра $p'' = 0.769''$

1 килопарсек (1000 пк = 1 кпк, $p'' = 1$ мсд,

миллисекунда (0.001")) – под таким углом волос виден с 20 км

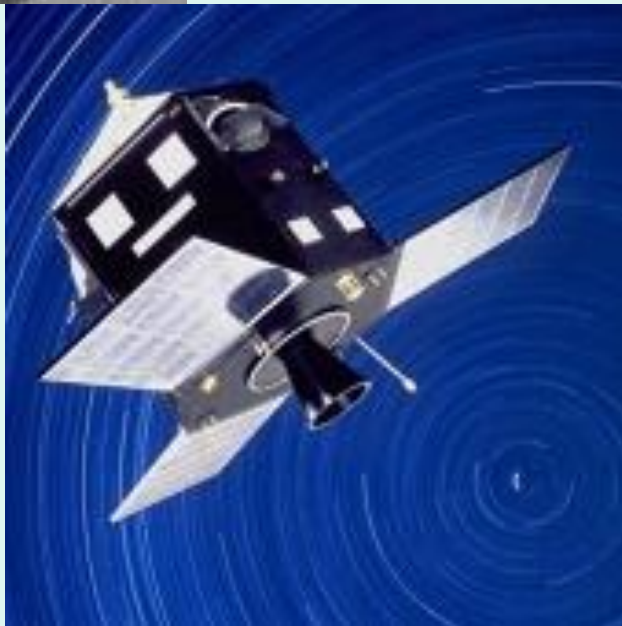
1 мегапарсек (1000000 пк = 1 Мпк, $p'' = 1$ мксд,

микросекунда (0.000001"))

– пока не достигнутая точность)

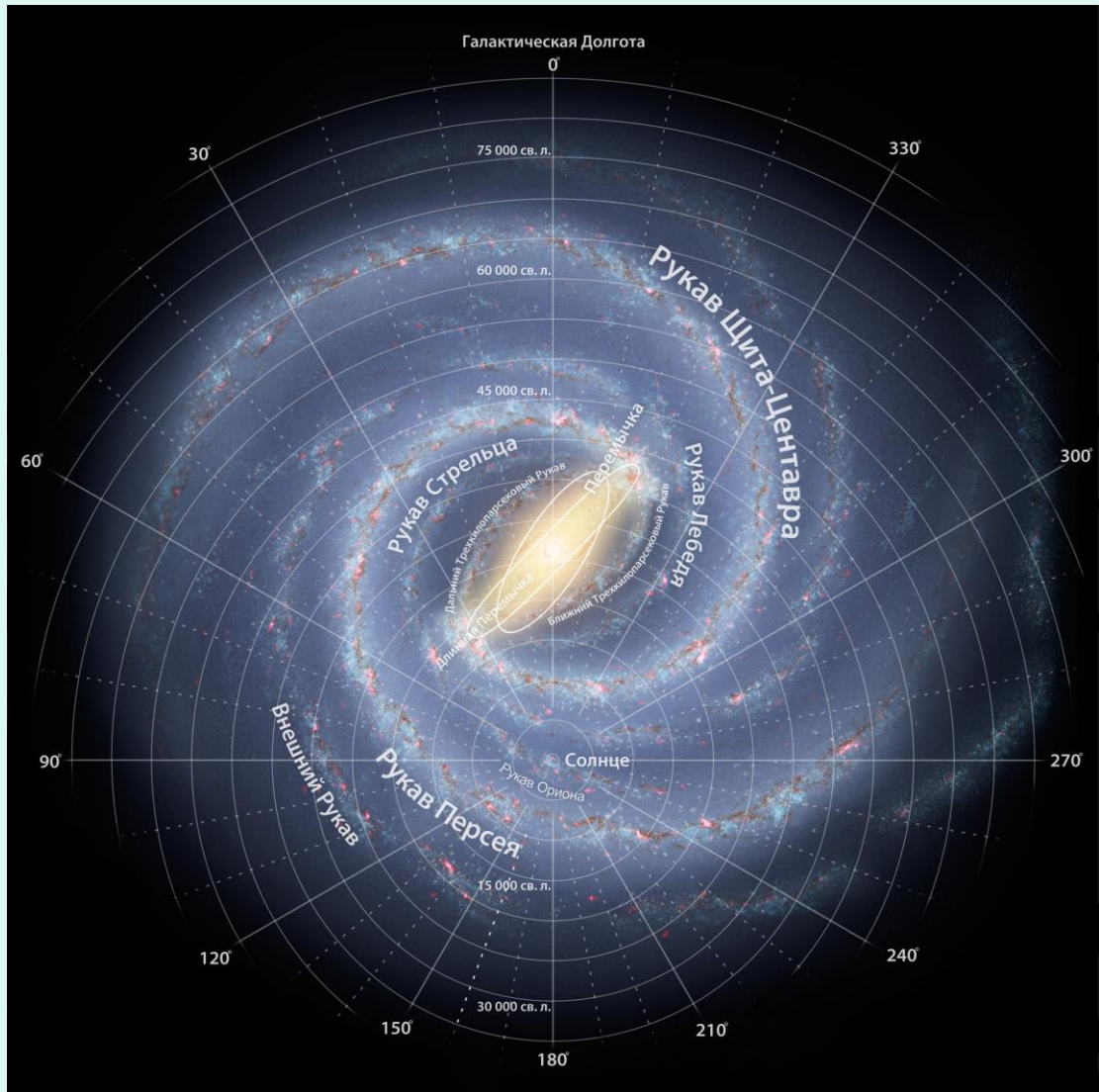
По состоянию на 1992 г. наземными телескопами измерено около 13000 параллаксов звёзд с точностью до $\pm 0.01''$

1989-1992: HIPPARCOS (**HI**gh **P**recision **PAR**allax **CO**llecting **S**atellite)



- измерены параллаксы
~118000 звёзд с
точностью,
достигающей 0.001"
- HIPPARCOS расширил
сферу для изучения
Галактики до 1 кпк, то
есть примерно в 1000
раз по отношению к
наземным измерениям

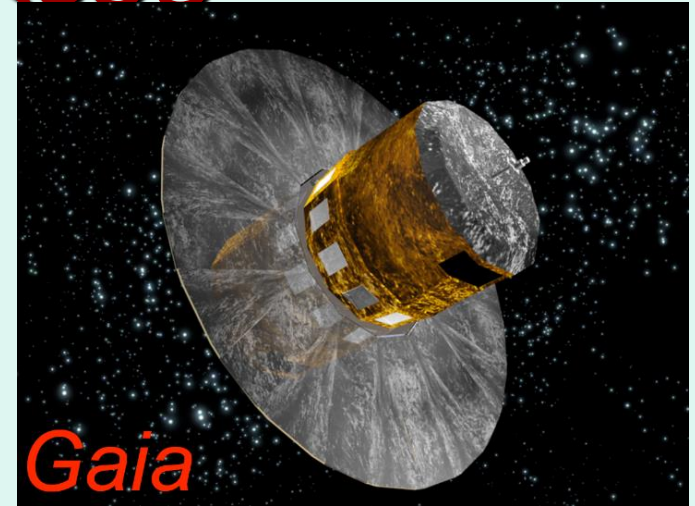
И всё же...



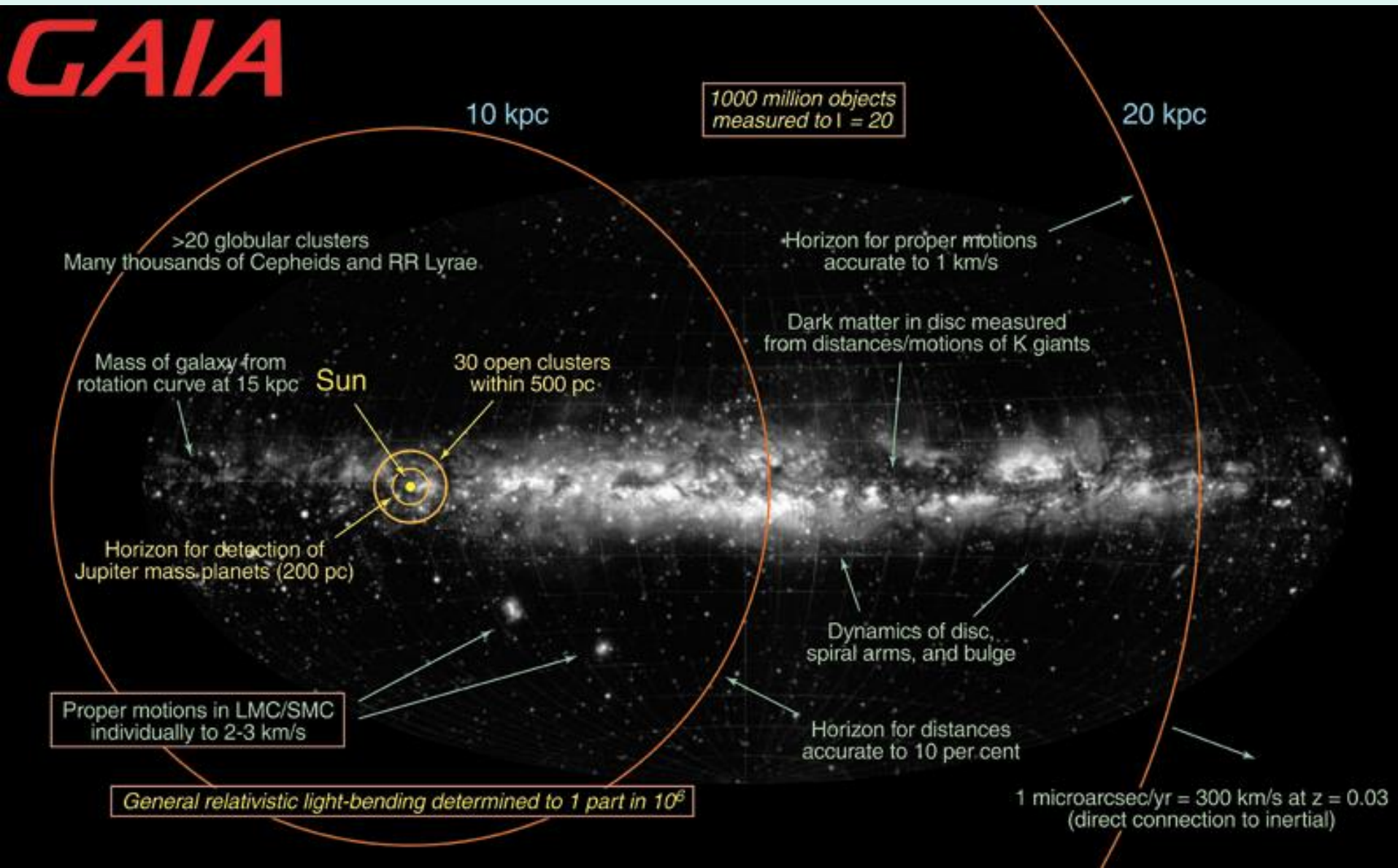
До центра
Галактики
~ 8.5 кпк

GAIA: самый современный астрометрический космический проект после HIPPARCOS

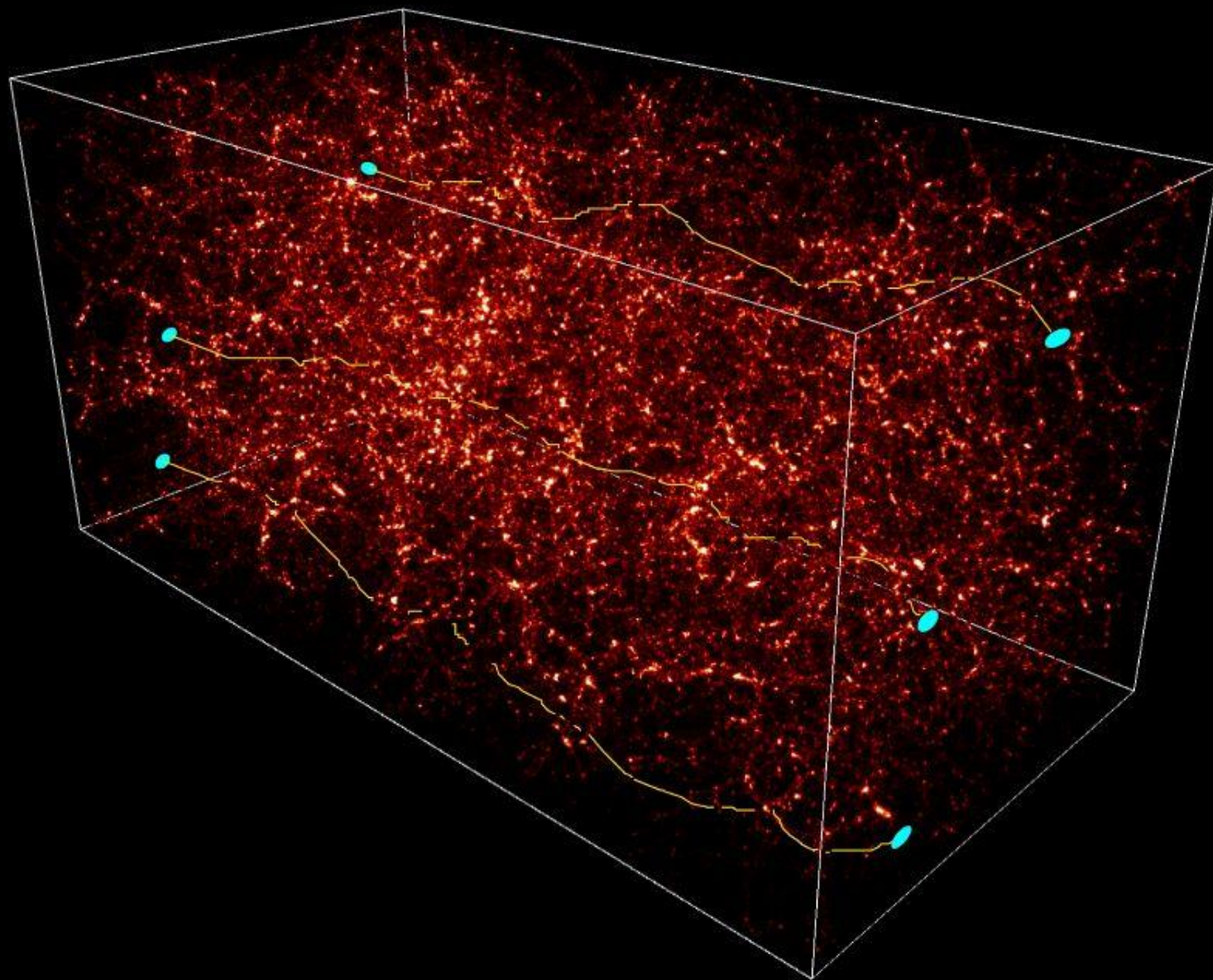
- **П**роjekt Европейского Космического агентства
- Запущен 19 декабря 2013,
- Наблюдения продлятся до ~2020
- Предполагается измерить параллаксы ~ 1 млрд. звезд ярче 20^m с точностью до 10 мксд (волос с расстояния в 2000 км)
- Мы, наконец, узнаем, как устроена почти вся наша Галактика



Будет создана 3-мерная карта Галактики вплоть расстояния ~ 10 кпк



Путь световых лучей в поле тяготения



- Расстояния “движущихся скоплений” или “метод радианта”
- Что такое “скопление”? – Группа звезд совместного происхождения, одинакового возраста и химического состава
- Звездные скопления:
 - Шаровые (ШЗС): очень массивные ($\sim 10^5$ – $10^6 M_{\odot}$) и старые (>10 Gyr)
 - Рассеянные (РЗС): бедные ($<10^4 M_{\odot}$, обычно $\sim 100 M_{\odot}$)
возрасты от 1 Myr до ~ 10 Gyr

В отличие от звездных ассоциаций, звезды скопления **гравитационно связаны общим тяготением:**

$$E_{\text{total}} < 0$$



© Anglo-Australian Observatory

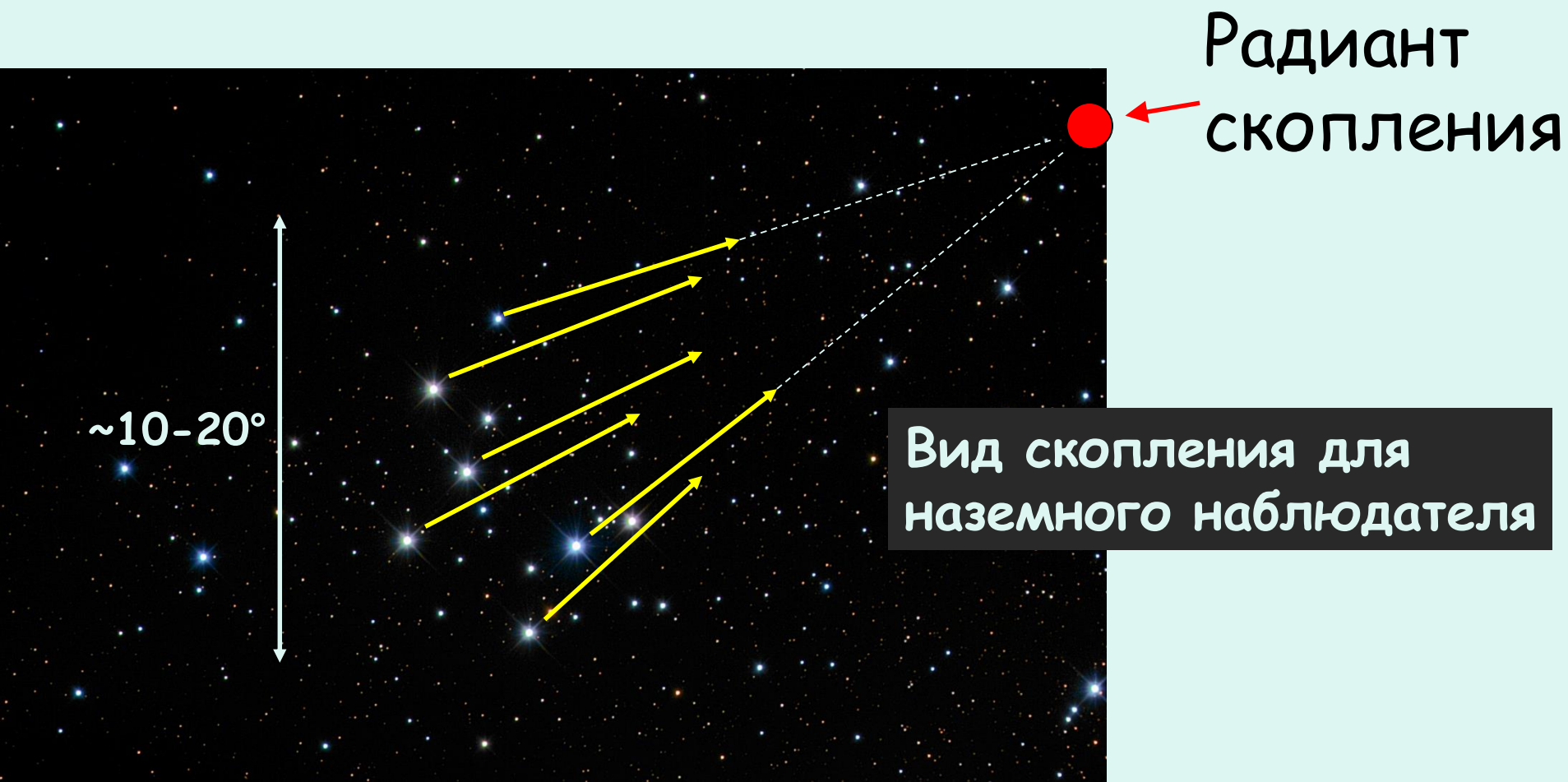


- **Основная идея:** скопление движется в пространстве как *единое тело*, почти с одинаковыми скоростями звезд, т.к. относительные скорости членов скопления очень малы: **$\sim 0.1-0.5$ км/с**

Вид движущегося скопления "издалека":
векторы скорости
параллельны



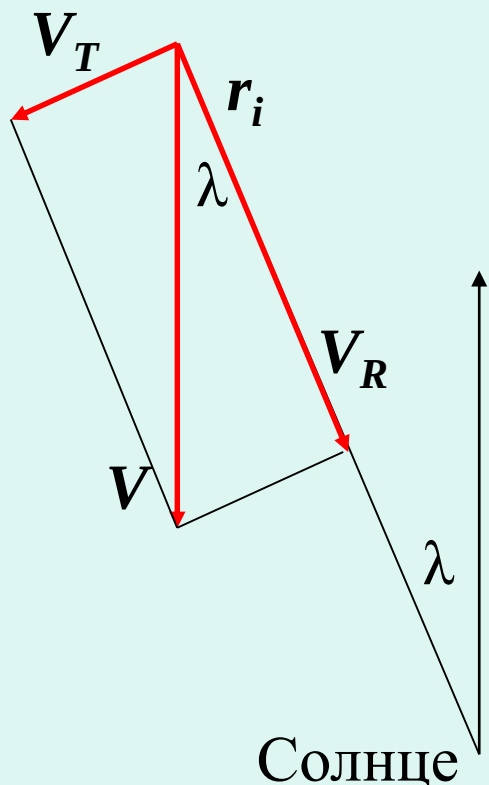
эффект перспективы



Геометрия вычисления компонентов скорости

$$V_{Ri} = -V \cos \lambda_i,$$

$$V_{Ti} = V \sin \lambda_i = k r_i \mu_i$$



$$r_i = \frac{-V_R \operatorname{tg} \lambda_i}{k \mu_i}$$

**Определяются
индивидуальные
расстояния до звёзд !**

Для Гиад **$\langle r \rangle \approx 46.5 \pm 0.3$ пк**
До HIPPARCOS именно этот метод лежал в
основе шкалы расстояний во Вселенной

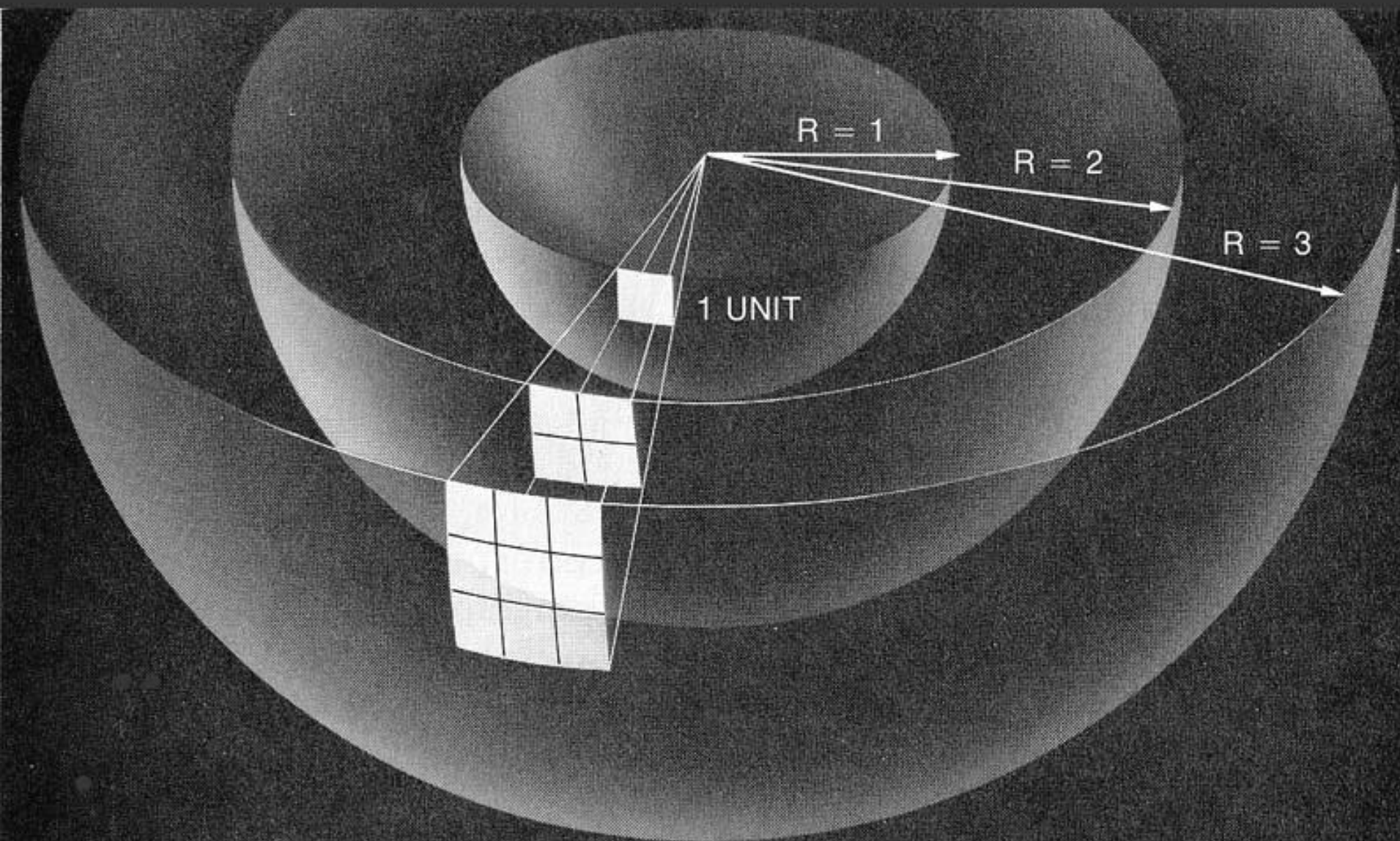
А дальше?

Метод стандартной свечи



25-вт лампочка на расстоянии 1 м дает такую же освещенность, как и 100-вт лампочка, отнесенная на 2 м.

Фотометрические методы



Основы фотометрии

Фотометры измеряют освещенность, то есть поток световой энергии через единицу площади.

Яркость звезды, «блеск», выражают в **звёздных величинах**, введенных Гиппархом ~2000 лет назад

Современное определение: 100-кратное отношение освещённостей соответствует разности блеска в 5^m (логарифмическая шкала):

$$m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \lg \frac{E_1}{E_2}$$

- Более ярким звёздам соответствуют меньшие значения звёздной величины **m**, чем более слабым

Видимая (m) и абсолютная (M) звёздные величины

- Абсолютная величина M звезды (по определению) равна ее видимой величине, если бы расстояние до звезды было равно стандартному - 10 пк:

$$\Delta m = m - M = -2.5 \cdot \lg \frac{\left(\frac{1}{d(pc)} \right)^2}{\left(\frac{1}{10 pc} \right)^2} = -5 \cdot \lg \frac{10 pc}{d(pc)} =$$
$$= -5 + 5 \cdot \lg d(pc) = 5 \cdot \lg d(kpc) + 10$$

$$(m - M) = 5 \lg d(pc) - 5$$

(в отсутствие межзвёздного поглощения)

А на самом деле...



Если величина межзвёздного поглощения равна ***A***,
ВИДИМЫЙ МОДУЛЬ расстояния можно записать в
виде

$$(m-M) = 5 \lg d(\text{pc}) - 5 + A = (m-M)_0 + A$$

Истинный модуль расстояния, $(m-M)_0$, можно использовать наравне с расстоянием, d

$(m-M)_0$

Расстояние,
пк/кпк/Мпк

• 0 m	10 пак
• 5 m	100 пак
• 10 m	1 кпк
• 15 m	10 кпк
• 20 m	100 кпк
• 25 m	1 Мпк

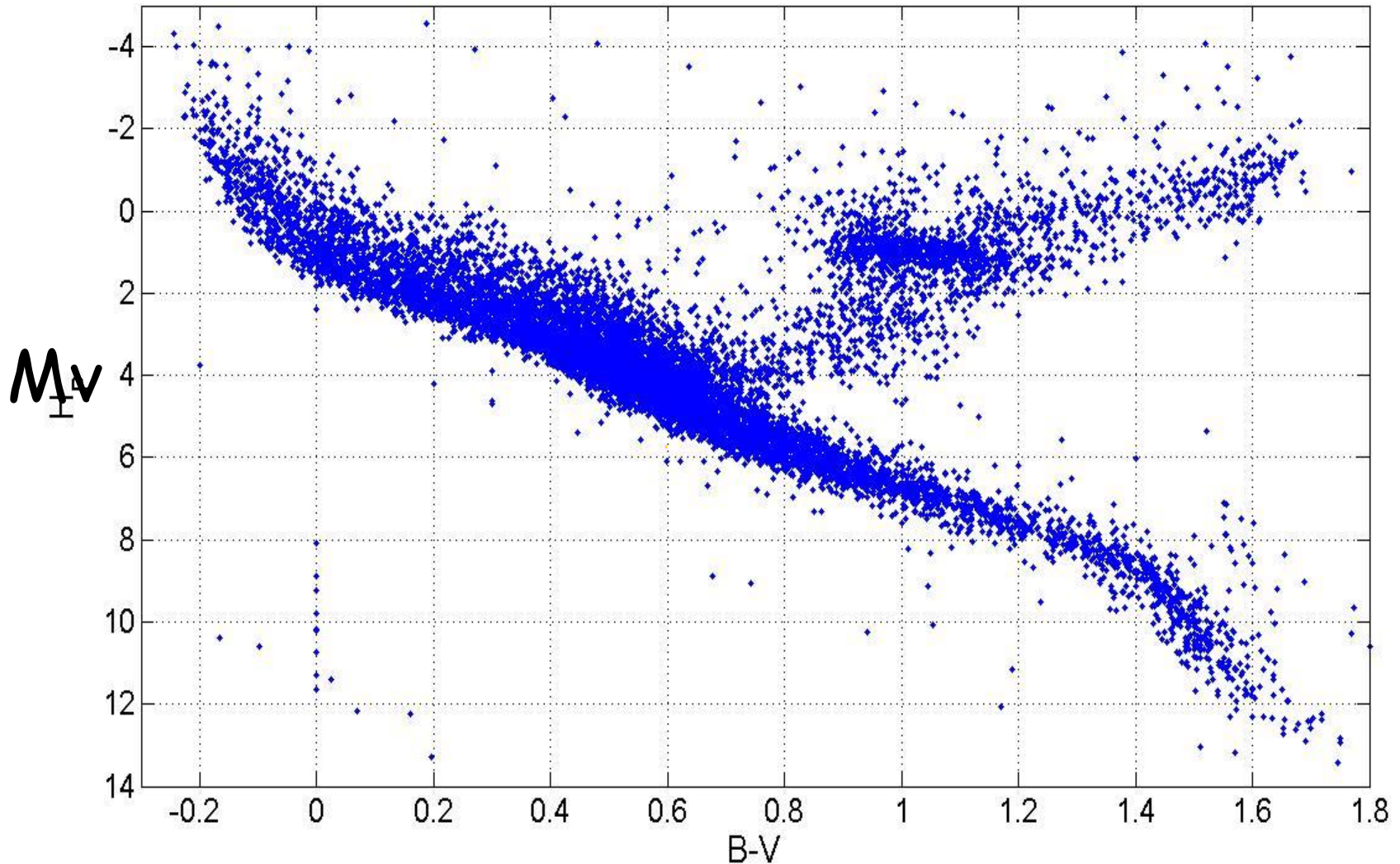
$(m-M)_0$ часто используется в астрономии для обозначения фотометрических расстояний

***Где найти стандартную
свечу ???***

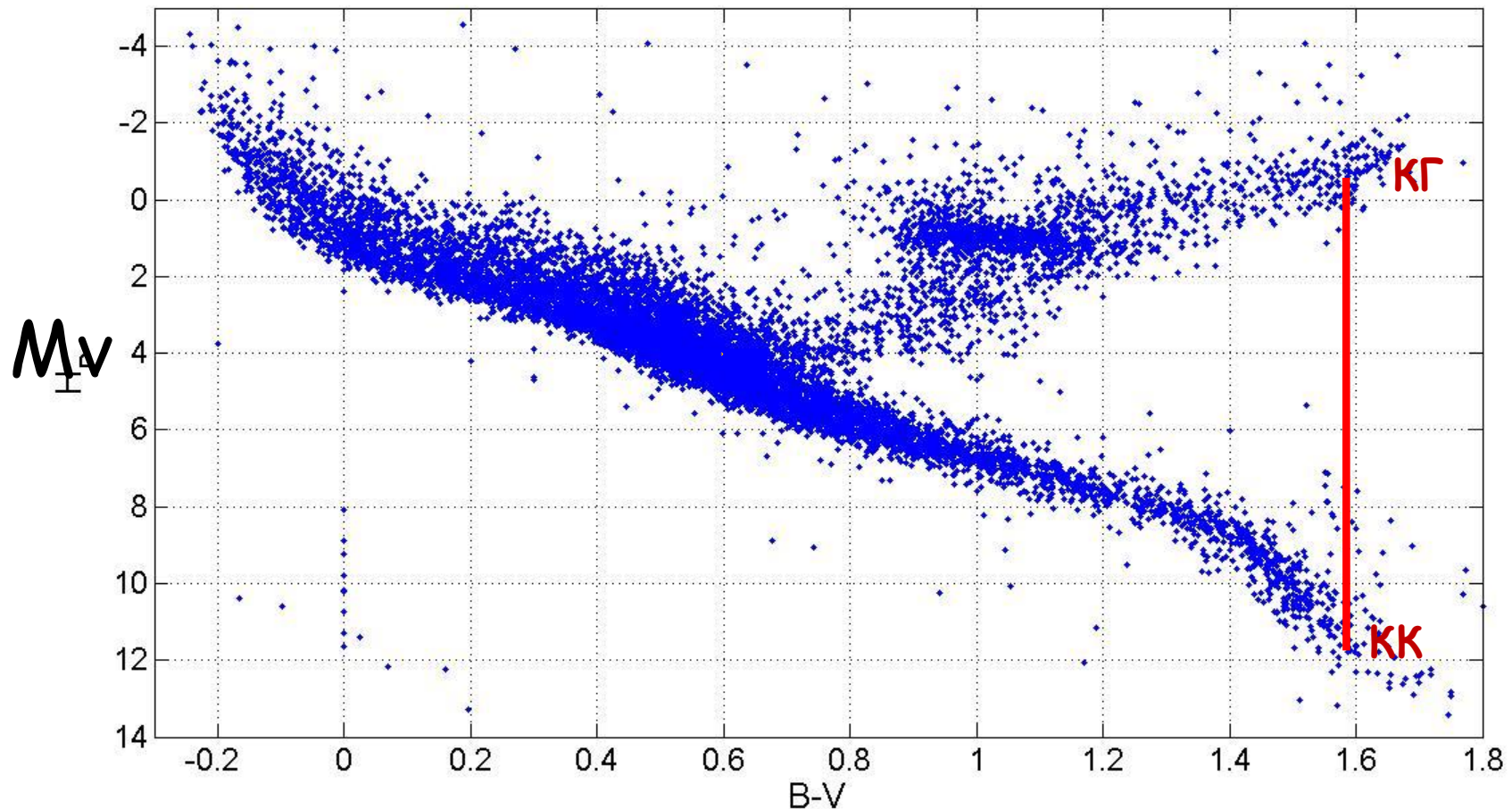
- **Калибровка светимости:** зная видимый блеск звезды и надёжное расстояние, найденное тригонометрическими методами, мы можем определить абсолютное энерговыделение (светимость) звезды
- **Обратная задача:** если мы знаем видимый блеск звезды и **её тип**, то, сравнив видимый блеск с известной светимостью звёзд **такого же типа** (т.е. используя их как "стандартные свечи") можем оценить расстояние до звезды

звезды Главной Последовательности как "стандартные свечи" (HIPPARCOS)

HR diagram for 11454 HIPPARCOS stars with parallaxes accurate within 5%

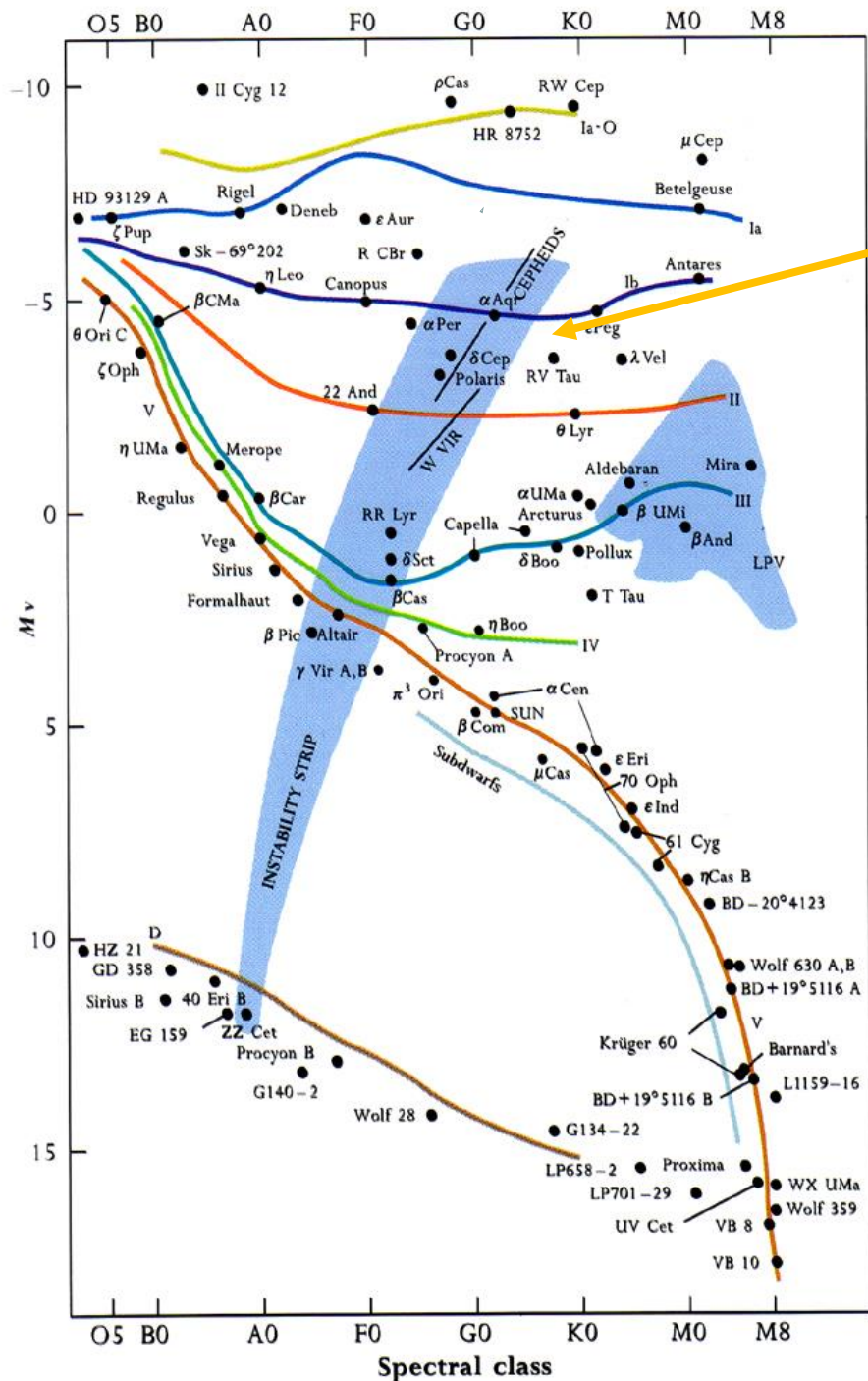


Чтобы определить расстояние до обычной звезды, нужно знать её ТИП (цвет, спектр), иначе можно сильно ошибиться в вычислении расстояния (например, приняв красный гигант (КГ) за красный карлик (КК), мы ошибёмся в расстоянии - занизим его примерно в **150 раз** !)



уникальные “Стандартные свечи”,
фактически лежащие в основе шкалы
расстояний:

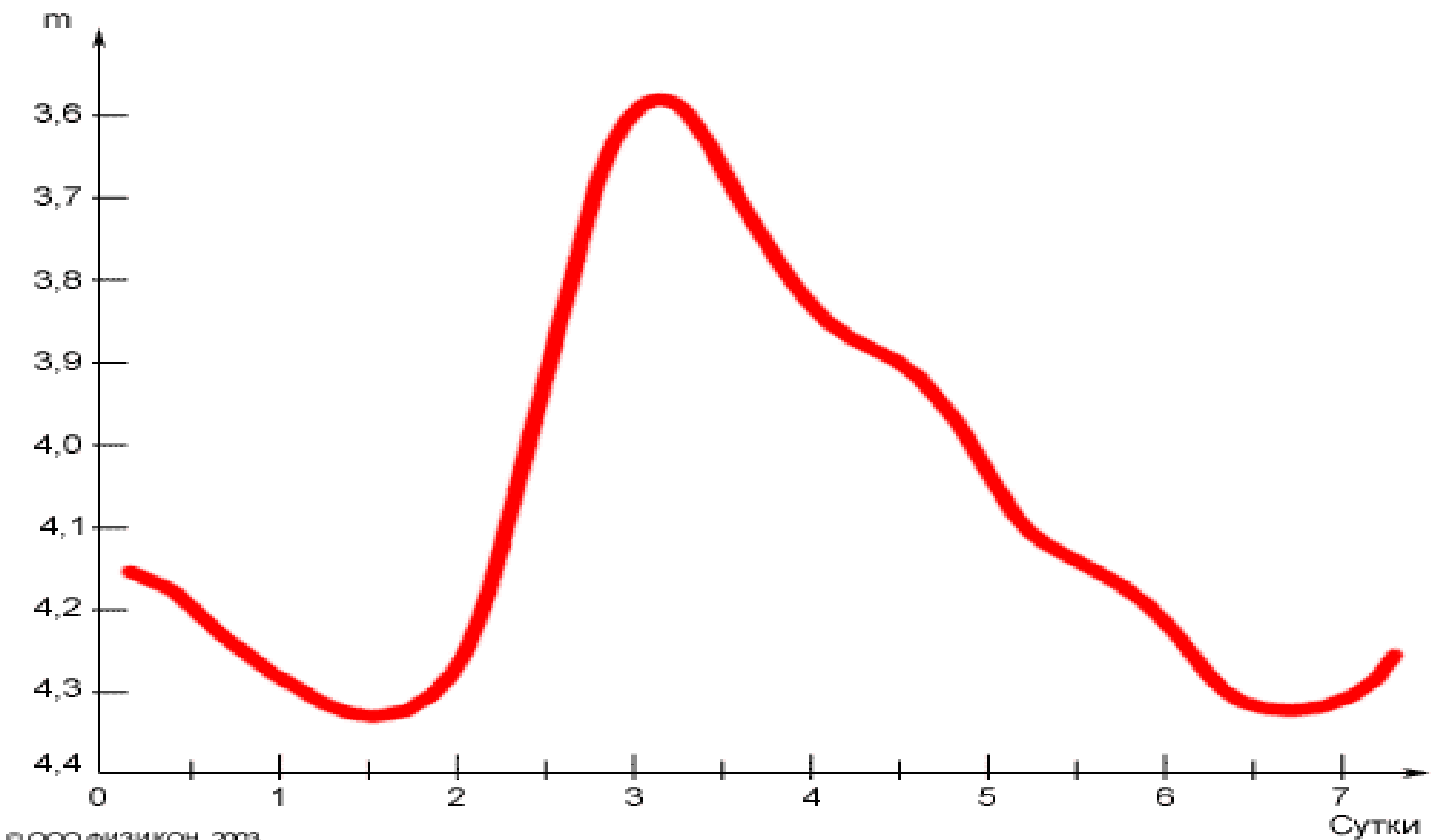
- Переменные звёзды - цефеиды
- Сверхновые звёзды типа Ia



- Цефеиды - радиально пульсирующие переменные звёзды, жёлтые Сверхгиганты, населяющие **полосу неустойчивости (ПН)** на диаграмме ГР (голубой цвет)
- Периоды пульсаций - от 1 до 100 суток

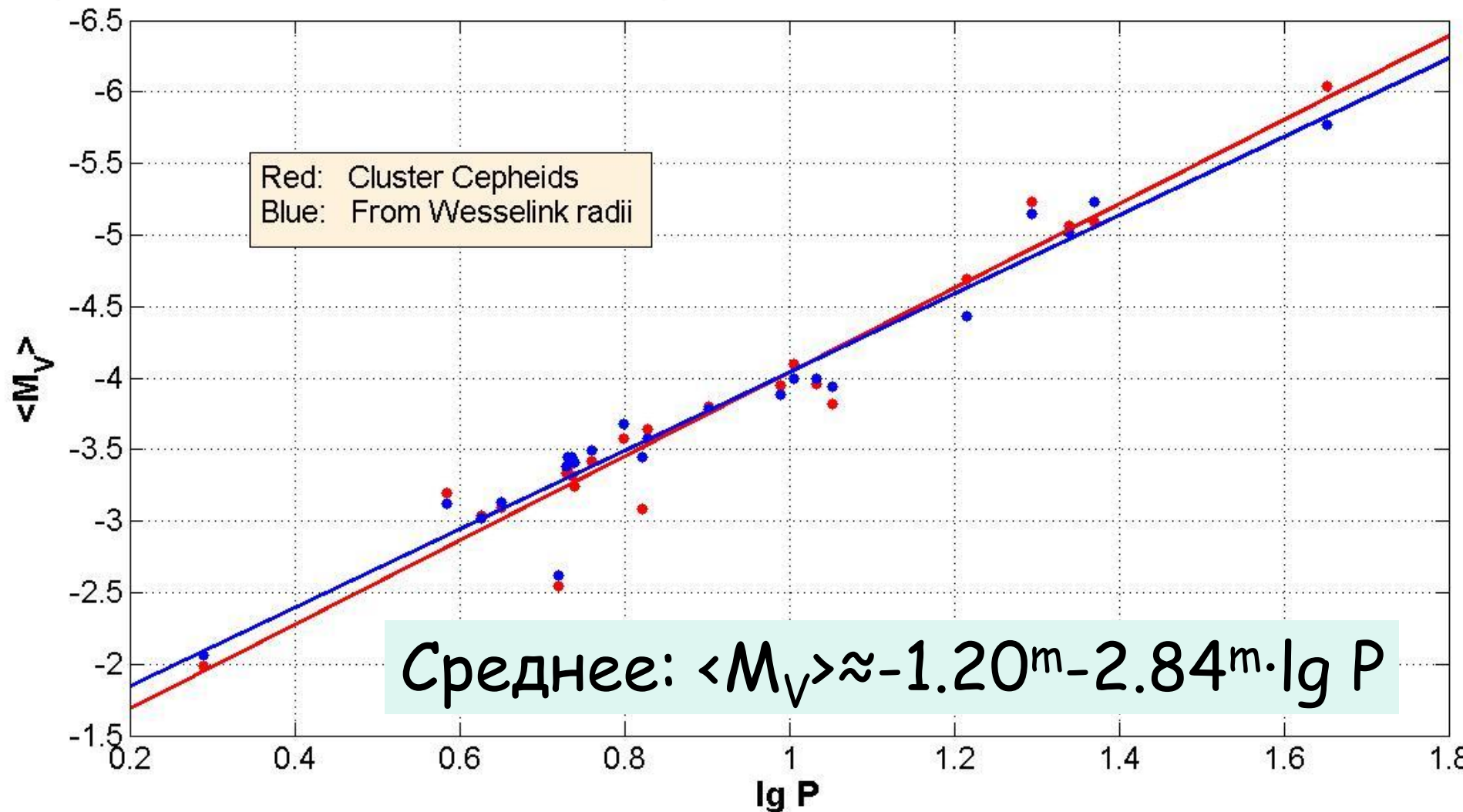


Кривая блеска цефеиды:
Период и форма кривой соблюдаются с огромной
точностью на протяжении многих лет



Светимости цефеид, вычисленные по их радиусам
(красная линия) и по членству в скоплениях (синяя
линия)

(D.Turner & J.Burke, 2002)

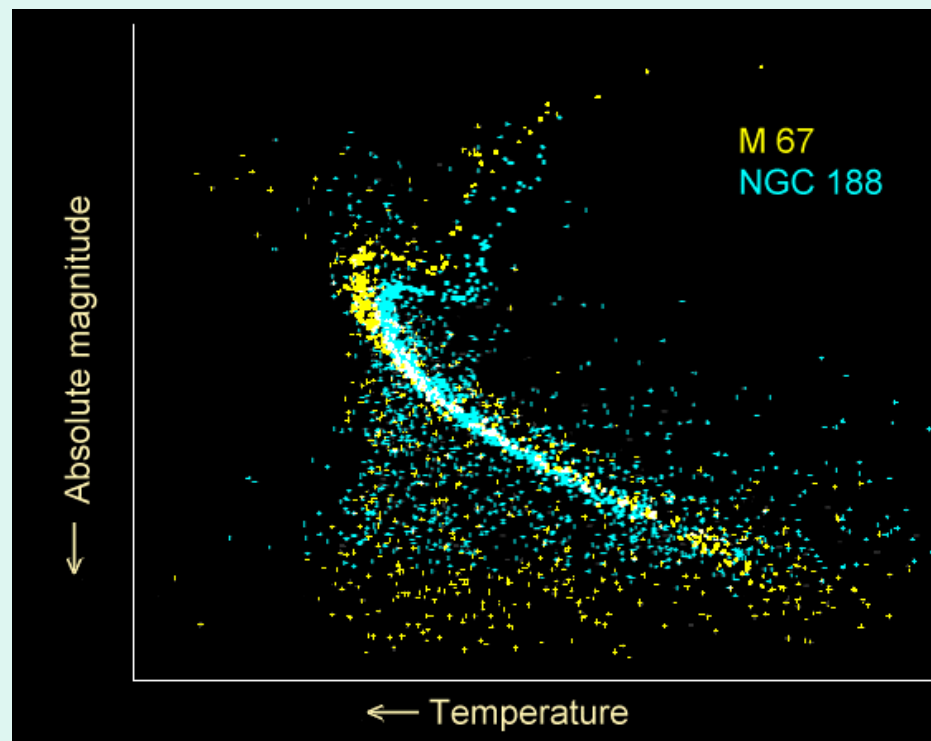


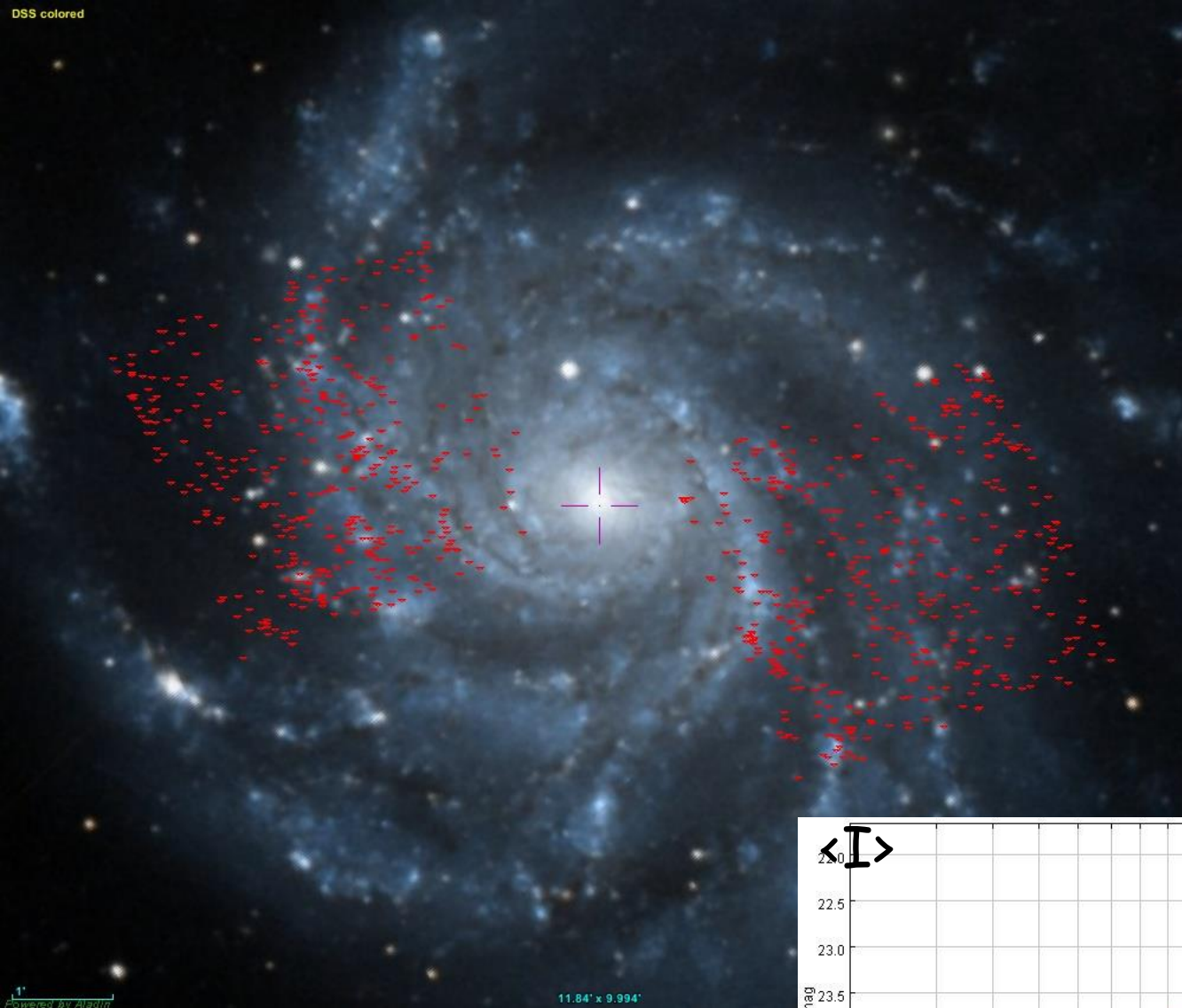
- Как найти светимости цефеид Галактики?
- Надёжные тригонометрические параллаксы немногочисленны и недостаточно точны
- Возможные решения:
 - Использовать цефеиды - члены рассеянных скоплений с расстояниями, определенными методом совмещения изохрон с ГП

Рассеянные скопления

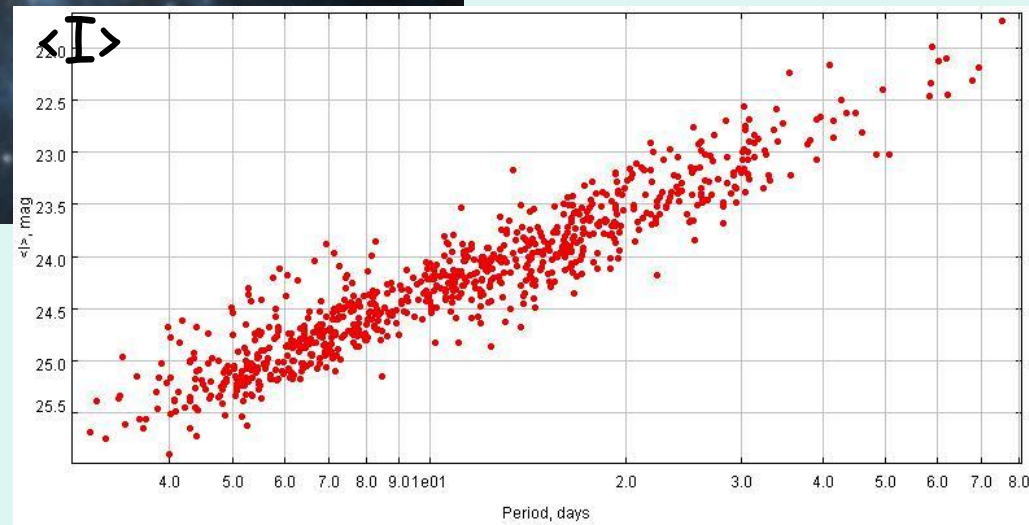


M 11





- Цефеиды в М 101
- $D \sim 6.8$ Мпк

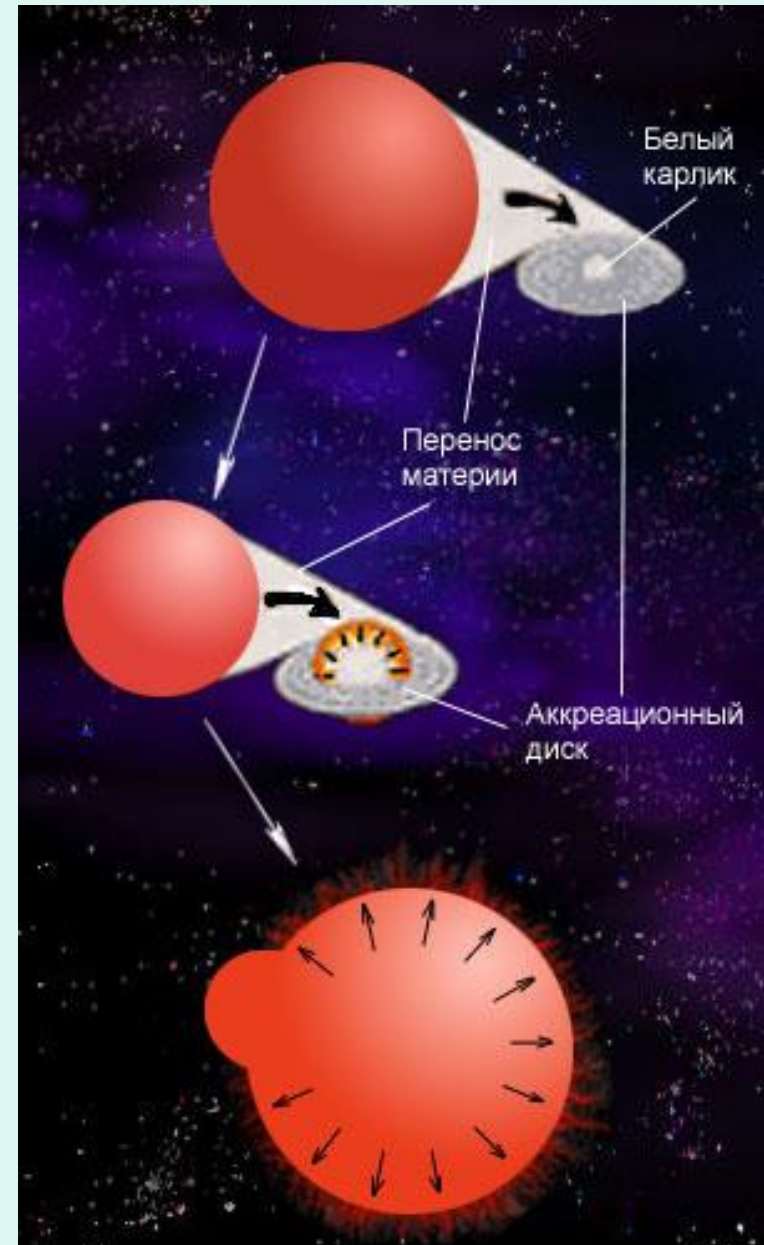


А дальше?

- Сверхновые типа Ia !

Природа Сверхновых типа Ia

- **Тип Ia** - термоядерный взрыв кислородно-углеродного белого карлика в результате слияния двух белых карликов или аккреции (перетекания) вещества от спутника, приводящей к росту массы до критического значения, $\sim 1.4 M_{\text{Sun}}$
- $M_V(\text{max}) \approx -19.5m$ (в 10 млрд. раз ярче Солнца !)
 - **"стандартная свеча" !!!**



Почему SN Ia считаются "стандартными свечами" ?

(а) Фиксированная предельная масса белого карлика (~ 1.4 солнечной)

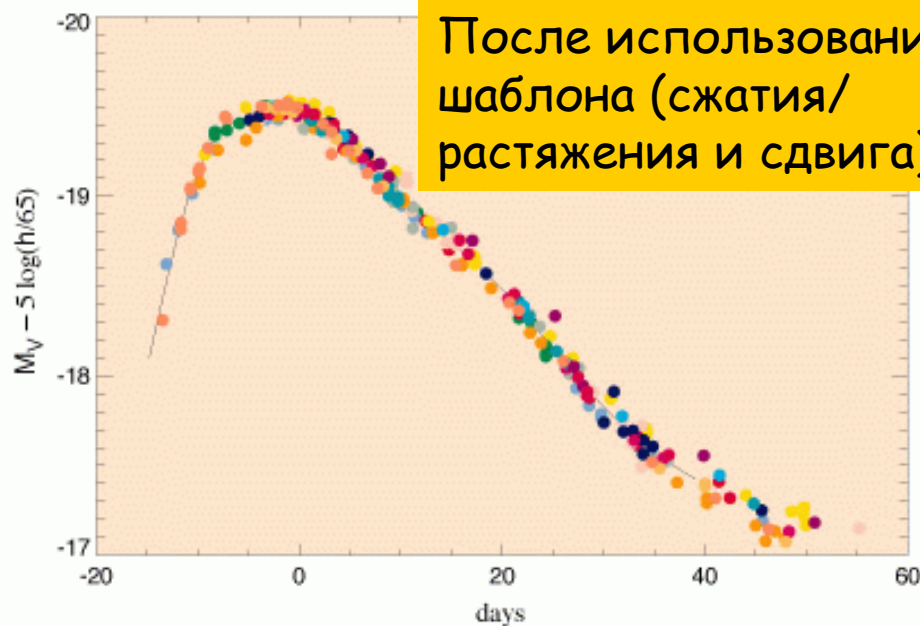
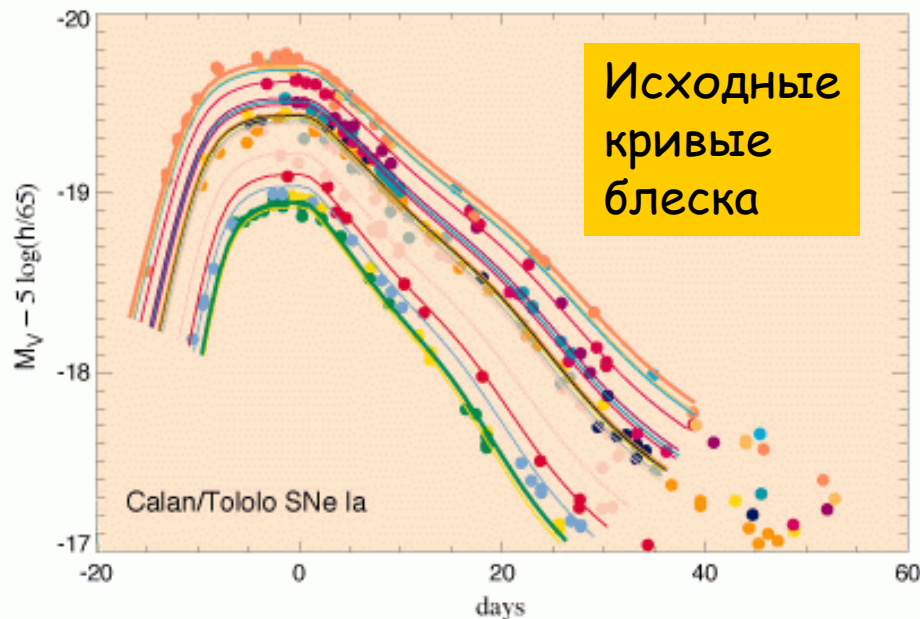
(б) Неплохо известное физическое описание термоядерных реакций с участием углерода (C) и кислорода (O)

Это аргументы в пользу близости свойств всех SN Ia

(хотя эта точка зрения не общепринятая !)

Считается, что в максимуме блеска
 $\langle MB \rangle = -19.48m \pm 0.07m$

V Band

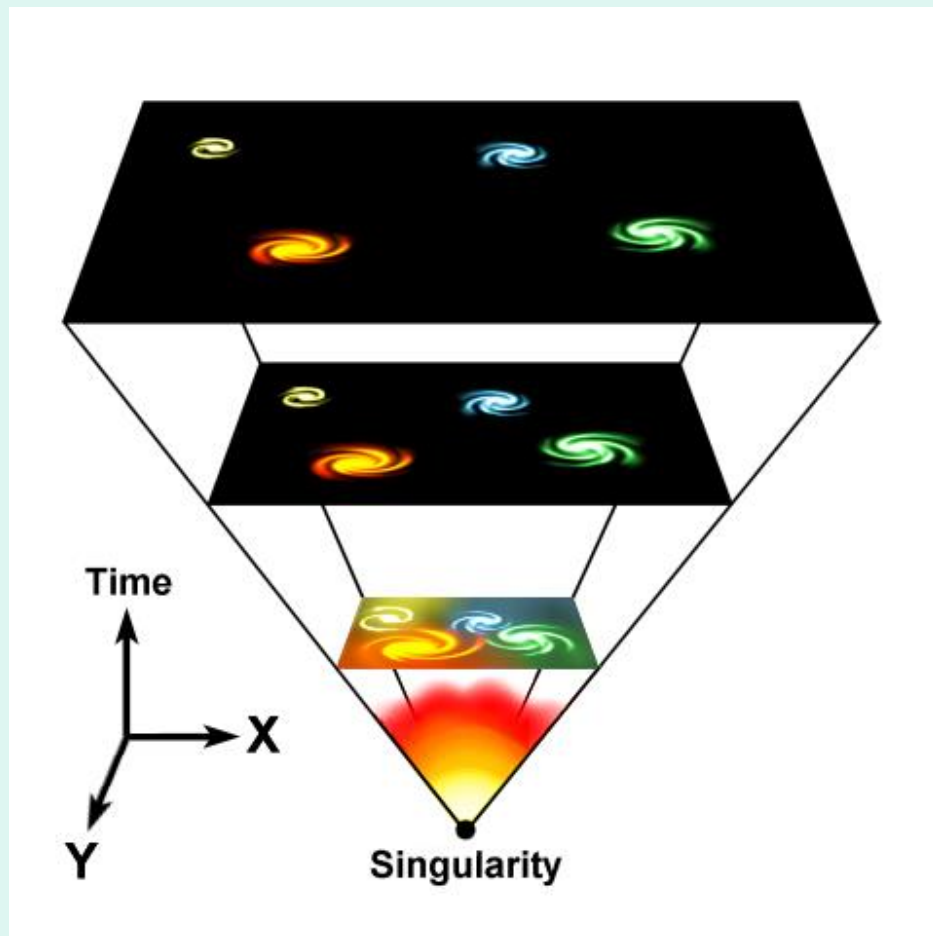


- Все SN Ia разные, но есть корреляции:
- медленные - яркие, голубые - яркие (закон Псковского-Филипса)
- Есть несколько методов использования шаблонов кривых блеска
- Шаблон: блеск в максимуме **$\sim 19.48^m \pm 0.07$ (V)**

- Следующий шаг - калибровка светимостей термоядерных Сверхновых типа Ia по расстояниям галактик, содержащих цефеиды (~40 галактик с расстояниями более 10 Мпк)

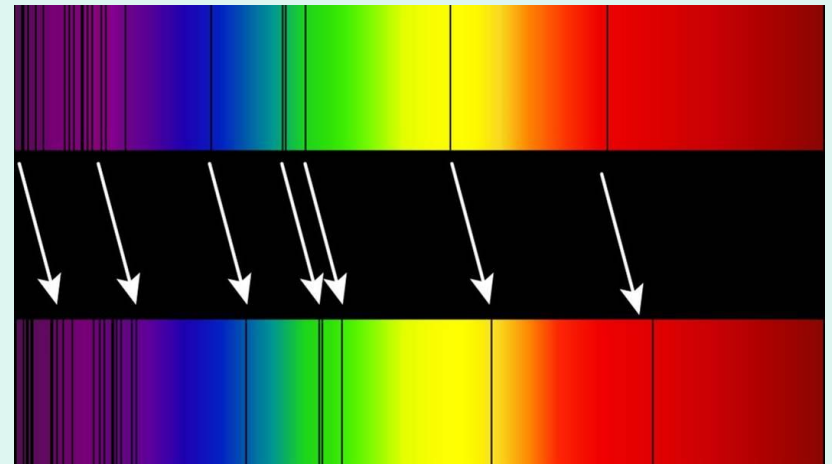
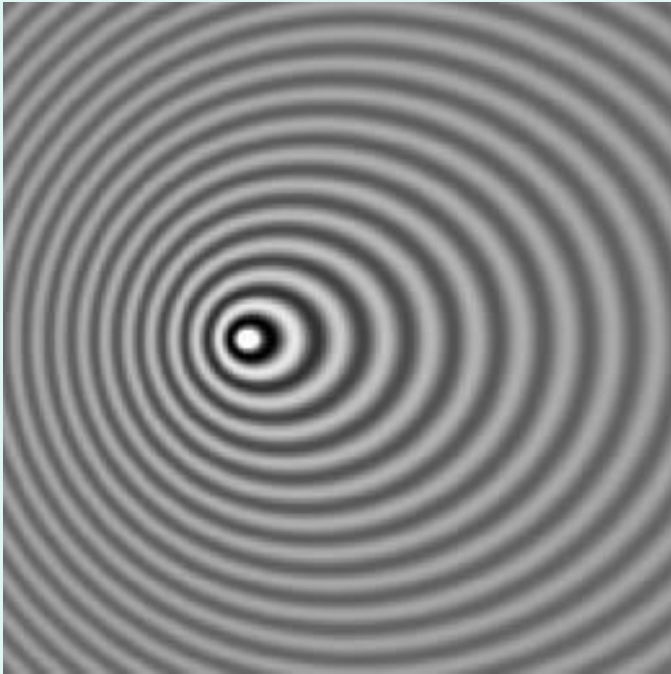
- Блеск Сверхновых (в максимуме достигающий $-19m \dots -20m$) позволяет наблюдать их на больших красных смещениях ($\Delta\lambda / \lambda = z > 1$, расстояниях более 7 млрд. св. лет)
- Это, возможно, одно из лучших средств исследования строения Вселенной, её динамики и истории

Расширение Вселенной



$$VR \approx H \times R$$

Эффект Доплера

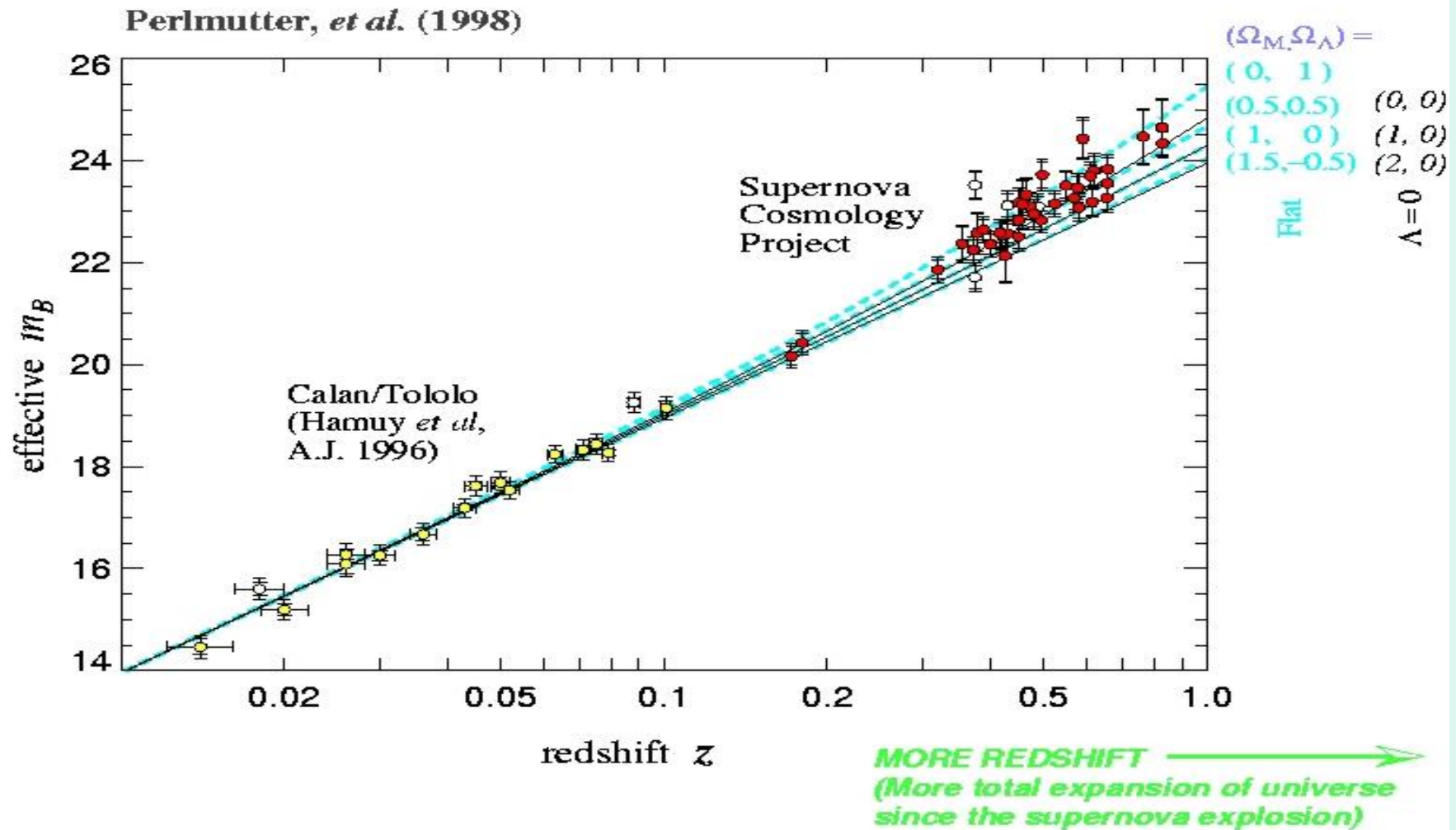


$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

При небольших скоростях
пропорциональное лучевой
скорости (v): $z = v/c$,
где c - скорость света

- 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 звёздам в далёких галактиках, определяется величина **постоянной Хаббла**, описывающей скорость расширения Вселенной и характеризующей ее возраст:
- $$VR \approx H \times R$$
- По современным данным, $H \approx (67 - 72) \text{ км/с/Мпк}$

Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт, Адам Риесс (Нобелевская премия 2011 г. за открытие ускоренного расширения Вселенной)



- Сверхновые типа Ia как средство исследования динамики Вселенной и проверки космологических моделей:
- Сопоставление фотометрических расстояний SN Ia со скоростями удаления галактик привело к гипотезе ускоренного расширения Вселенной и существования "темной энергии" (всемирного антитяготения)
- Точность определения расстояний $\sim 10\%$

Этапы построения шкалы расстояний

Тригонометрические параллаксы близких звёзд и звёздных скоплений



Светимости цефеид (точность расстояний $\sim 10\%$)



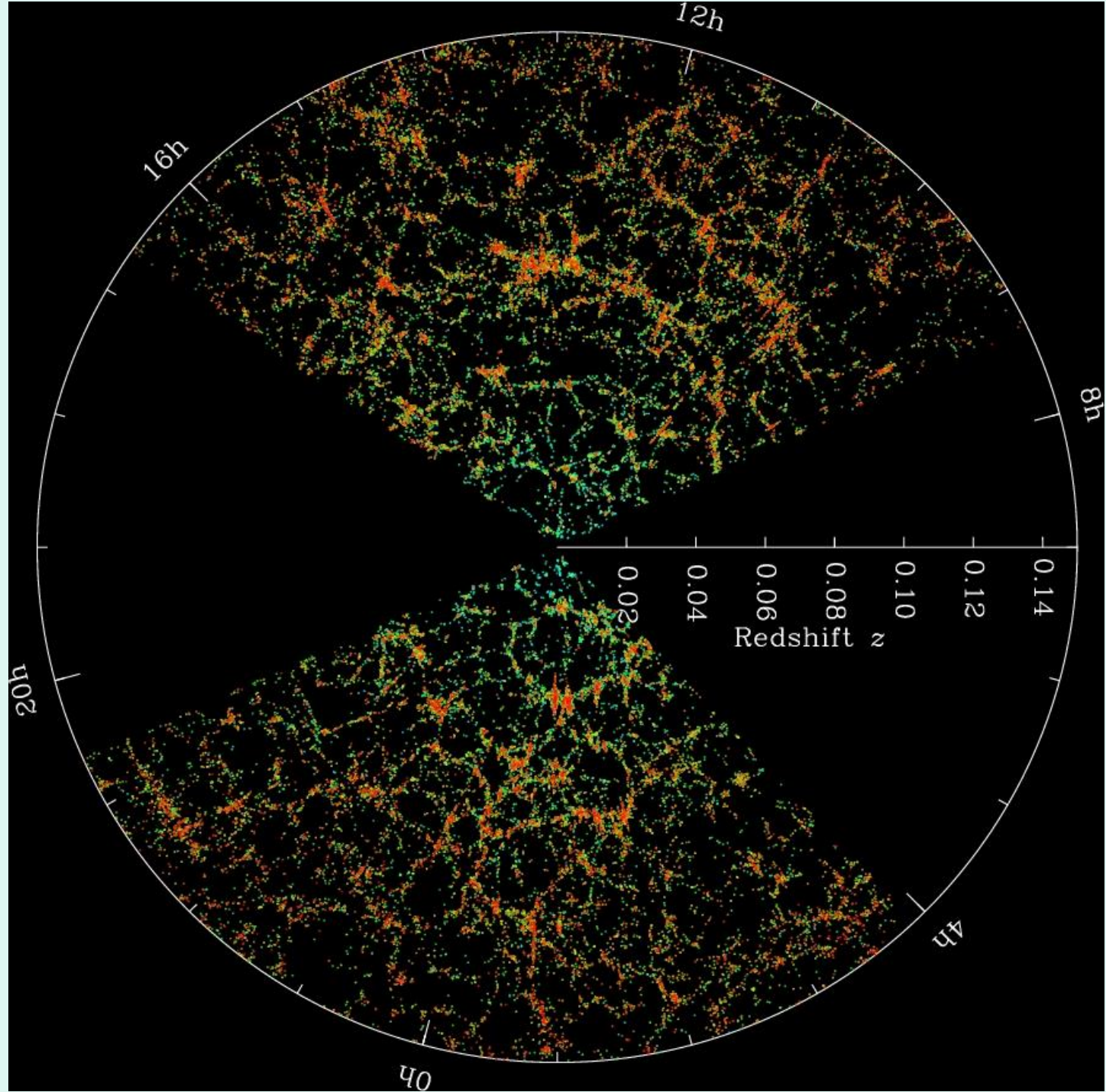
Фотометрические расстояния галактик, содержащих цефеиды. Калибровка светимостей Сверхновых звёзд.



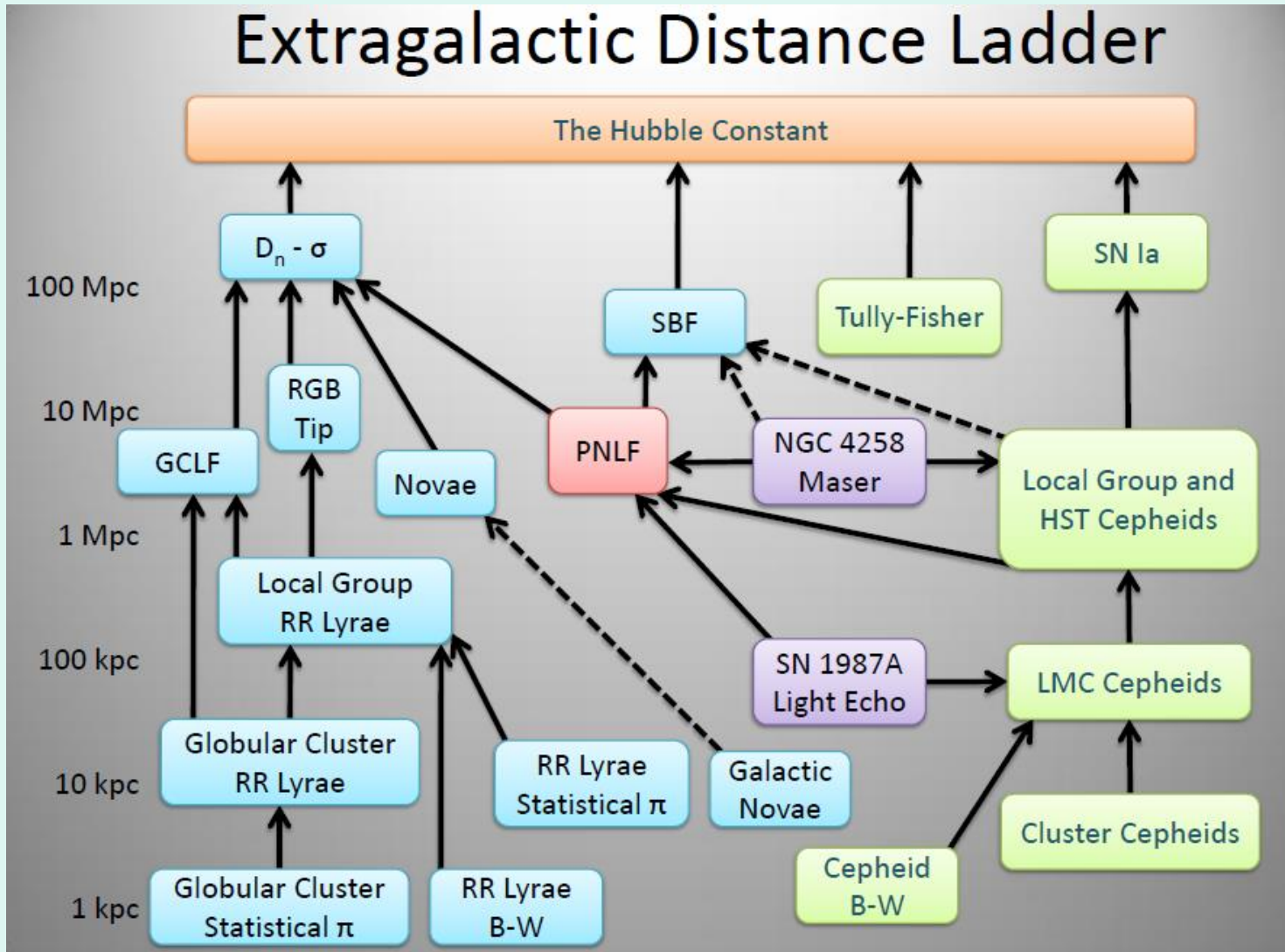
Определение постоянной Хаббла и других космологических параметров Вселенной. Изучение крупномасштабной структуры Вселенной.

- **SDSS
Legacy
Survey:**

Крупно-
масштабная
ячеистая
структура
Вселенной:
сверхскоплени
я,
группы,
войды



Связь разных методов определения расстояний



Иерархия методов определения расстояний

Distance
Determination



Относительные
(вторичные) методы,
"откалиброванные"
по *p*"

Redshift
0.01 0.1 1

1 10³ 10⁶ 10⁹ пк

- **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