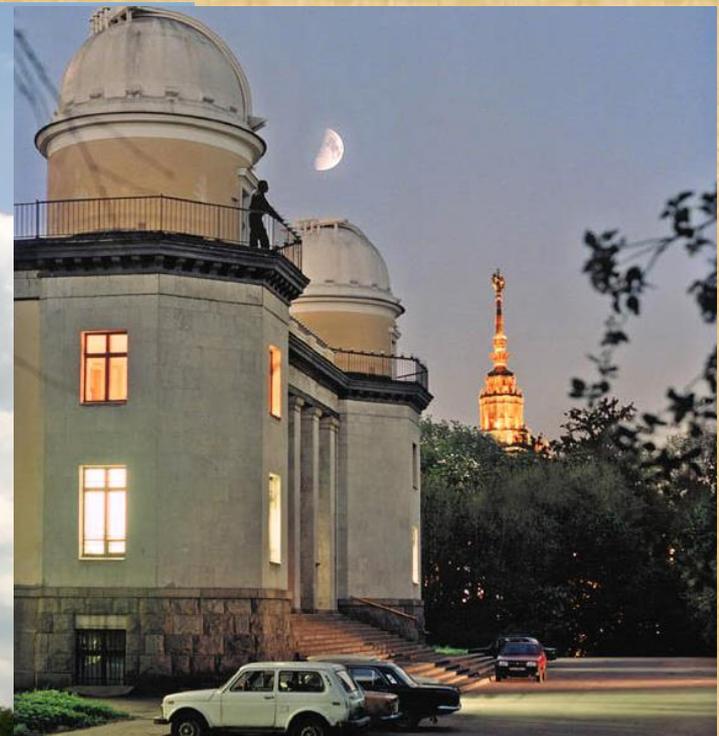


# GAIA: шаг к новой астрономии



gaia

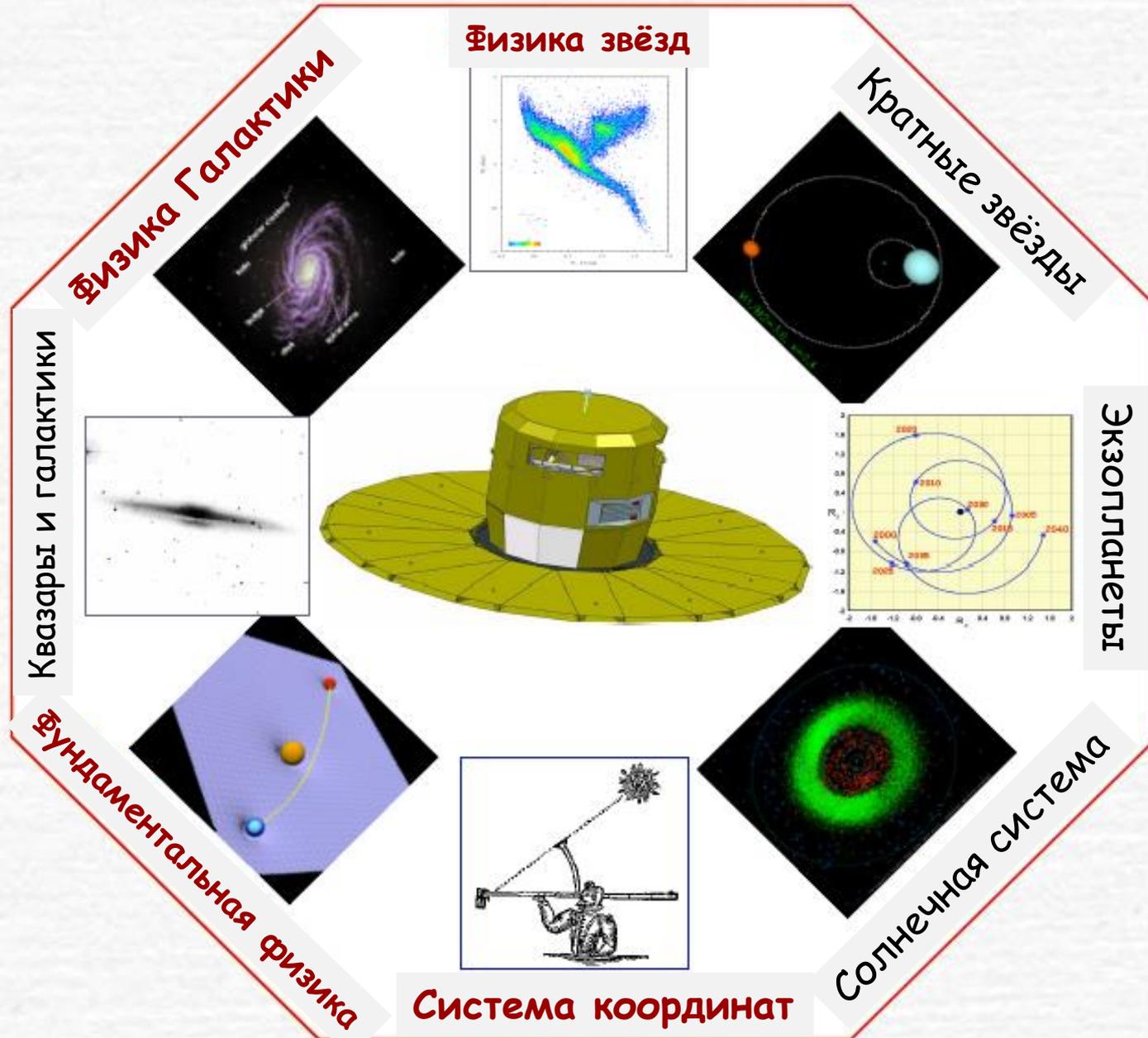


**Расторгуев Алексей Сергеевич**, д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой экспериментальной астрономии физического факультета МГУ; зав. отделом изучения Галактики и переменных звёзд ГАИШ МГУ



- 19 декабря 2013 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана) носителем "Союз-Фрегат" запущена космическая обсерватория Европейского Космического Агентства **GAIA**
- Это одна из важнейших и самых долгожданных космических астрономических миссий начала XXI века

# Задачи многогранного проекта GAIA: от фундаментальной физики до изучения объектов Солнечной системы



- **Ключевые разделы лекции:**
- **Современная прецизионная астрометрия: что она даёт астрономии ?**
- **“Начинка” космического аппарата и принципы астрометрических, фотометрических и спектральных измерений**
- **Современное состояние и перспективы миссии GAIA**
- **Некоторые результаты миссии GAIA и их использование**

- **Часть I: задачи прецизионной космической астрометрии**

- Создание фундаментальной системы координат, опирающейся на квазары – самые далёкие звездообразные объекты
- Измерение тригонометрических расстояний: от Земли и Солнечной Системы до звёзд
- Определение видимых движений звёзд (годовых “собственных движений”)
- Уточнение универсальной шкалы расстояний и светимостей “стандартных свечей”: от звёзд к галактикам

- Для начала разберёмся с малыми углами, о которых пойдёт речь:

- Полный круг -  $360^\circ$

- $1^\circ = 60'$  (угловых минут)

- $1' = 60''$  (сд) - предельное разрешение глаза

- $1''$  (угл. сек) = 1000 мсд (толщина волоса на расстоянии  $\sim 20$  м)

- 1 мсд - толщина волоса на расстоянии  $\sim 20$  км

- 10 мксд - толщина волоса на расстоянии  $\sim 2000$  км и человек на расстоянии  $\sim 40$  млн. км

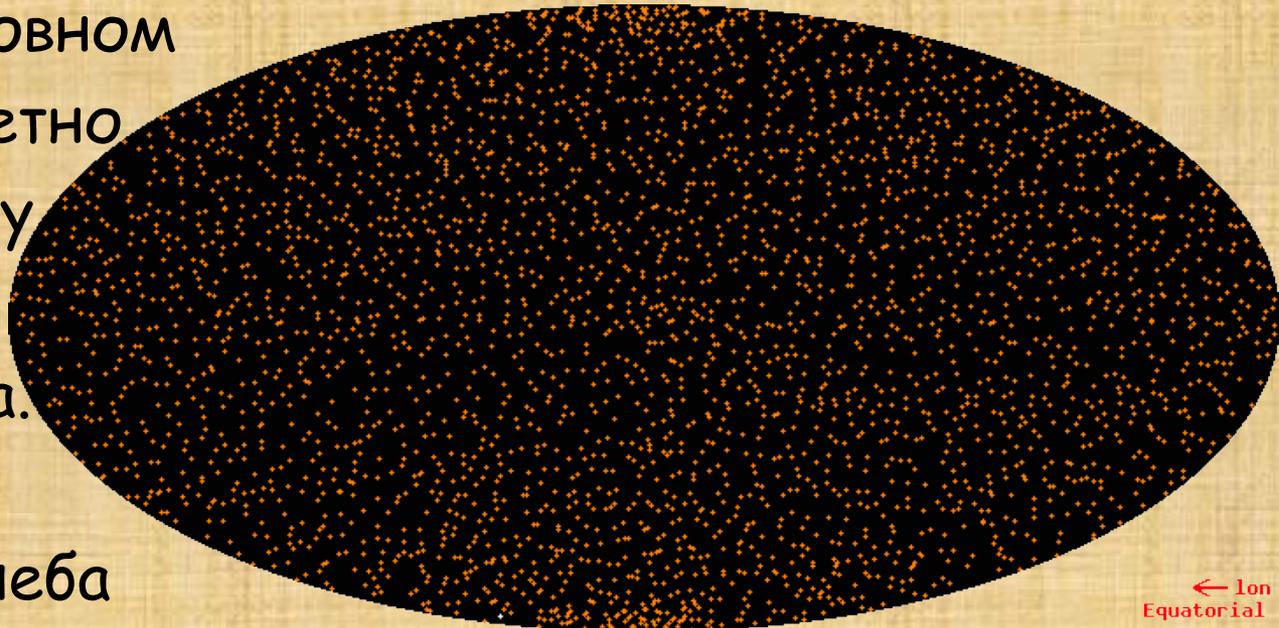


- Таковы предельные возможности современной технологии измерений углов !

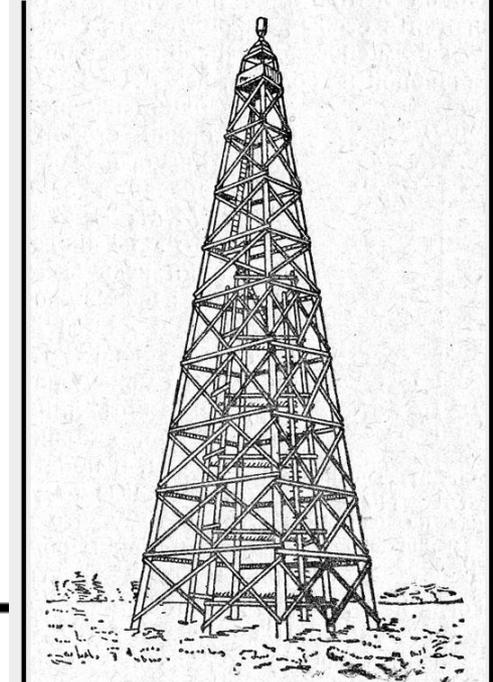
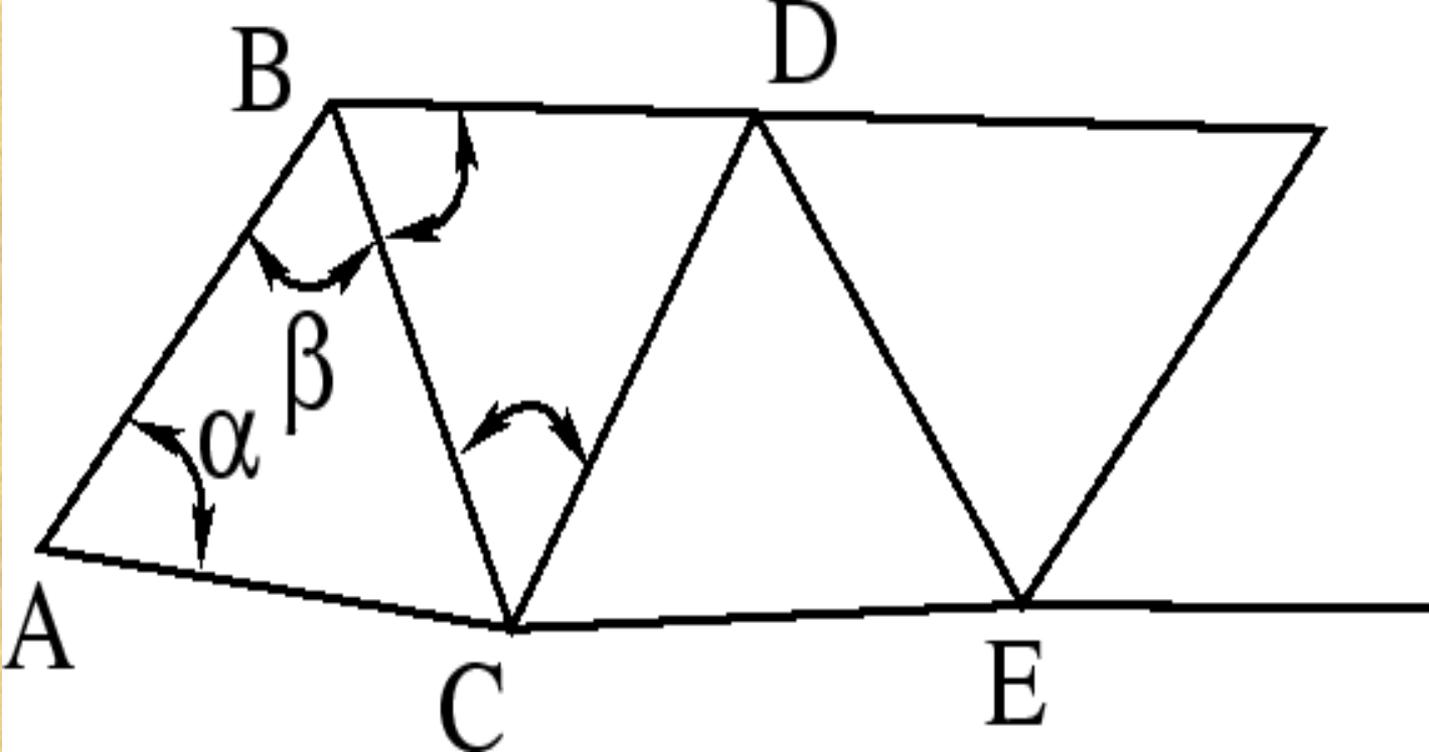
- Земля вращается вокруг своей оси со скоростью на экваторе около 470 м/с (ось вращения ещё и прецессирует!)
- Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с
- Солнце движется в Млечном Пути со скоростью около 250 км/с
- Млечный Путь движется относительно локального реликтового фона со скоростью порядка 630 км/с
- ... и т. д.; всё находится в движении и вращении
- **Всем нужна фундаментальная система координат, в идеале не вращающаяся (т.е. инерциальная система отсчёта)**

- Координаты звёзд всегда определяются относительно каких-то объектов...
- **Что для этого лучше далёких звёзд ? -**
  - **только самые далёкие объекты, которые можно считать практически неподвижными: квазары, положения которых определялись средствами РСДБ (радиоинтерферометры со сверхдлинной базой)**
- **Астрометрия пошла именно по такому пути развития**
- **Каждый космический астрометрический проект вызывает новый всплеск астрофизических исследований**

- **1997 г.:** по итогам миссии HIPPARCOS Международный Астрономический Союз принял решение о создании новой Международной Небесной Системы Отсчёта (International Celestial Reference Frame, ICRF), **опирающейся на положения примерно 220 квазаров как практически неподвижных объектов...**
- ... а до этого в астрономии господствовала система FK5 (5-й Фундаментальный Каталог 1535 + 3117 опорных звёзд с точностью координат порядка 1-2 мсд);
- Звёзды FK5 в основном близкие, они заметно движутся, поэтому система реперов FK5 недолговечна. Вдобавок было ~0.1 зв./кв. град. неба



- Что обеспечивает ценность миссии GAIA для всей современной физики ? -  
**Прецизионная астрометрия**, т.е.  
возможность измерять координаты и  
годовые смещения звёзд на небе с  
фантастической (планируемой) точностью  
порядка **10 угловых микросекунд (мксд)**
- **Это ключ к определению**
  - **расстояний до звёзд**
  - **звёздных параметров - светимостей**  
(т.е. энерговыделения) и радиусов



- До эры GPS/GLONASS: **метод триангуляции** (**БАЗА** AB + 2 прилежащих угла  $\rightarrow$  стороны AC, BC и т.д.) "работает" не только на Земле, но и в космосе
- Только надо измерять углы с **намного** **бОльшей** точностью (малые доли угл. сек.)



U r b i et O r b

Гравюра К.Фламмарiona

# Масштабы Солнечной системы

Экваториальный радиус Земли - 6371 км

- до Луны ~384000 км

- до Солнца ~149.6 млн. км (радиус земной орбиты = **1 а.е.**  $\approx$  8 свет. мин.)

- **а.е.** - новая единица измерения расстояния ("астрономическая единица")
- Радиус Солнечной системы: ~100 ... 1000 а.е. (Sedna ?) (> 13 свет. час.)

## **Первые попытки измерить расстояния до звезд предприняли:**

- Х. Гюйгенс (1694) - если Сириус похож на Солнце, то он должен быть в 28000 раз дальше (на самом деле он в 540000 раз дальше, потому что он в 23 раза ярче Солнца...)
  - Д. Брэдли и В. Гершель (середина XVIII в.) показали, что расстояния до звезд больше 200000 а.е.
  - В. Струве (1835-1840) первым измерил более или менее точное расстояние до Веги
- 

- **Расстояния до звёзд на много порядков больше размеров Солнечной системы**

- Расстояния до относительно близких звезд измеряются старым добрым **методом триангуляции**, только в качестве БАЗЫ треугольника используется уже радиус орбиты Земли, равный

$$1 \text{ а.е.} = 149.6 \text{ млн. км}$$

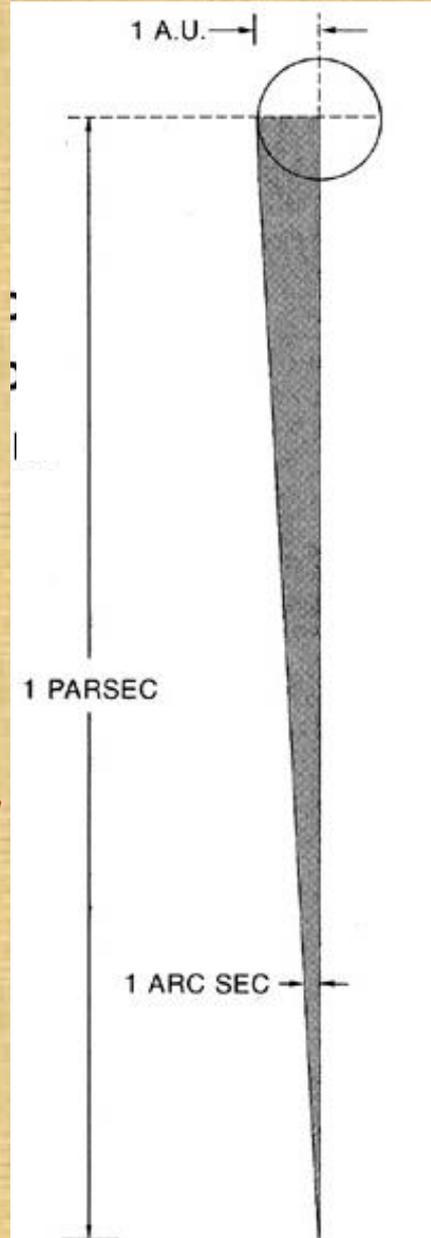
- Измеряется **годичный параллакс** (или просто тригонометрический параллакс) звезд - это угол, противоположный БАЗЕ - радиусу земной орбиты

# Вводится новая единица измерения расстояний - парсек (от "параллакс-секунда", сокр. пк)

Parsec = **PAR**allax +  
**SEC**ond of arc:

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

Из-за малости угла  
 $D$  (пк) =  $1/p''$



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

Большие расстояния:

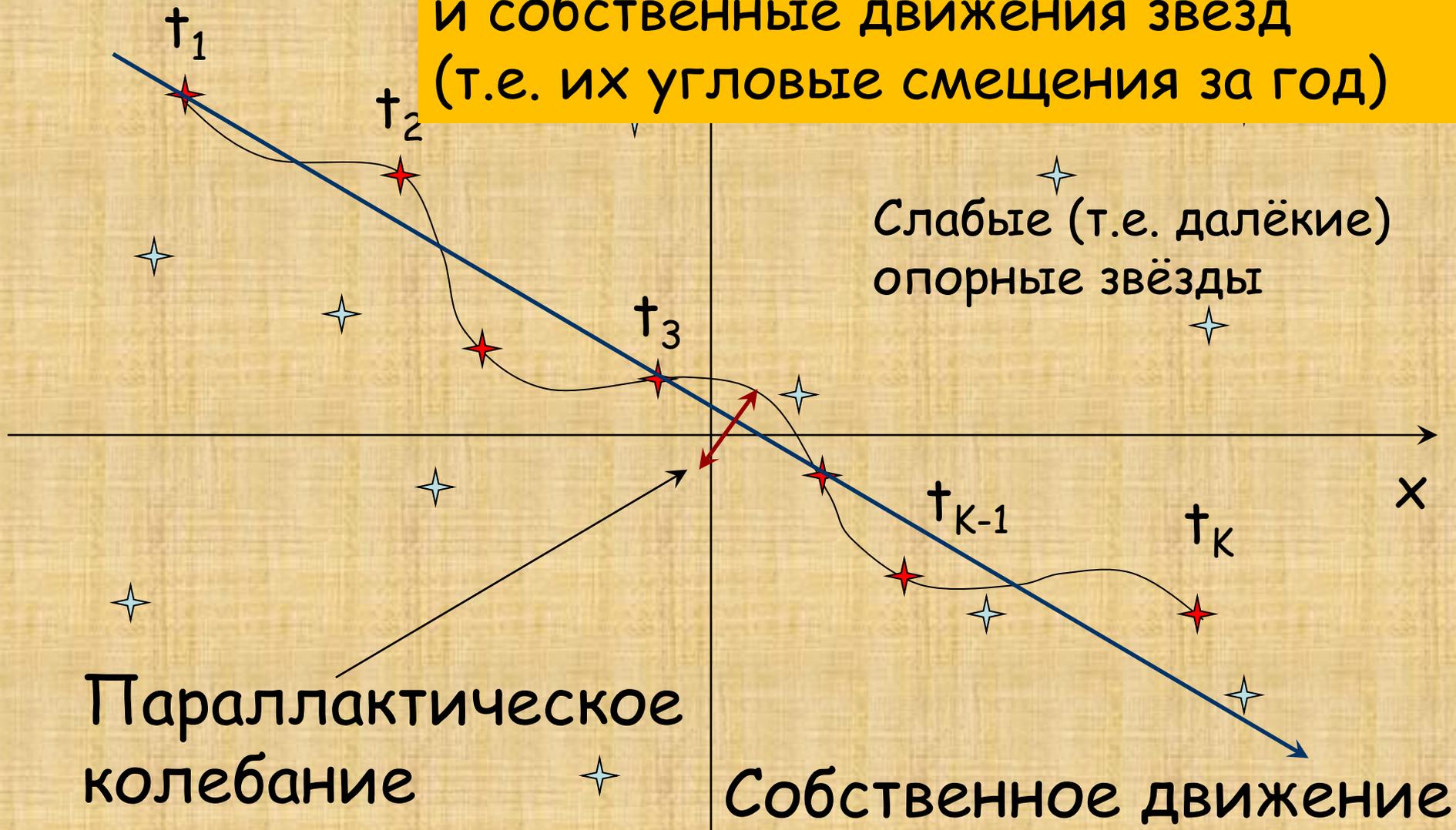
1 кпк =  $10^3$  пк

1 Мпк =  $10^6$  пк

1 Гпк =  $10^9$  пк

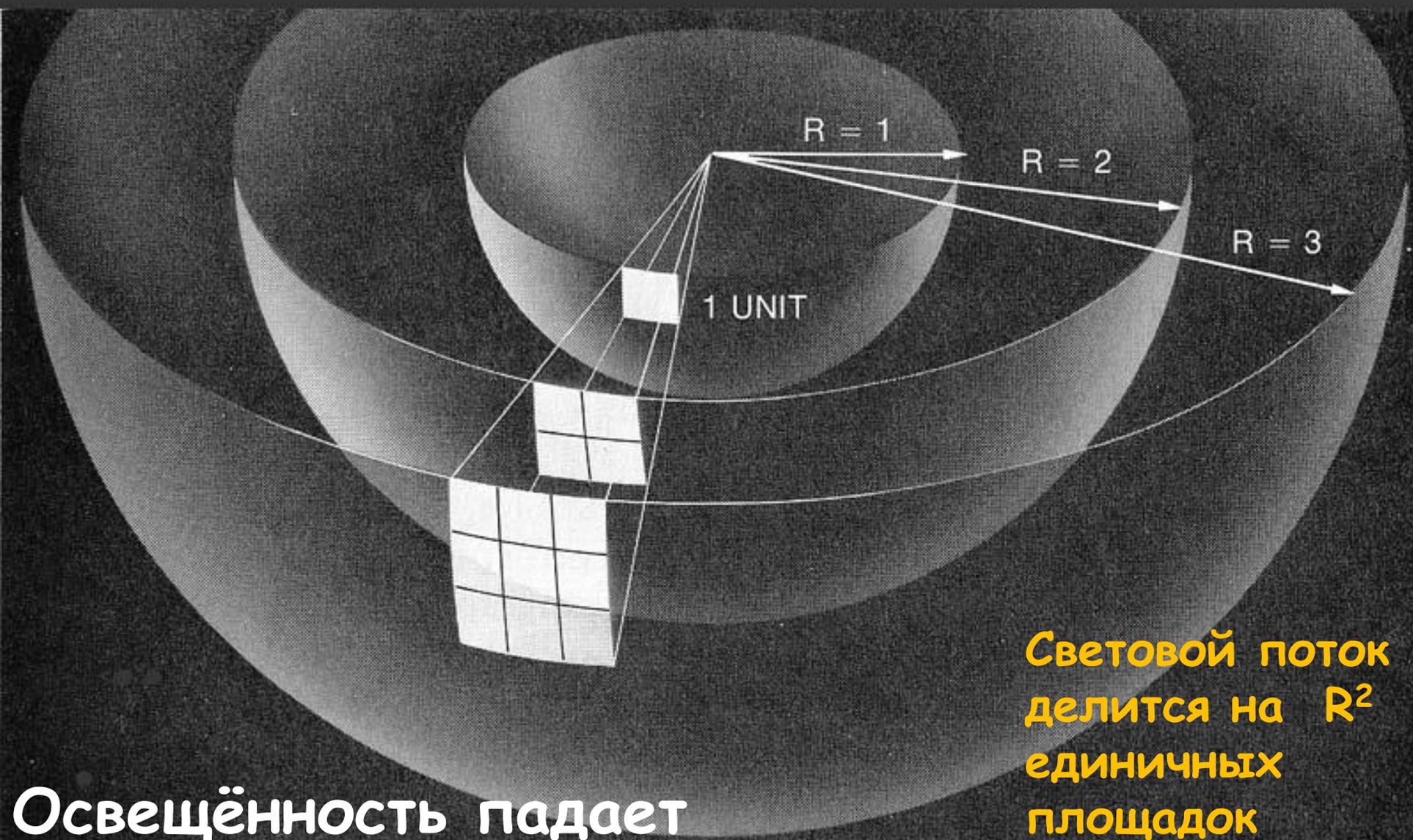
(До центра Млечного Пути примерно 8.2 кпк)

**Принцип измерения параллакса:** Чем больше измерений и чем длиннее интервал наблюдений, тем точнее измеряются параллаксы и собственные движения звёзд (т.е. их угловые смещения за год)



- **Важные замечания:**
- **(1)** Определение многих астрофизических характеристик звёзд - светимости, радиуса - требует знания расстояний  $D$  до них (например, светимости оцениваются из тех соображений, что освещённость, создаваемая звездой,  $\sim D^{-2}$ )
- **(2)** Высокоточные параллаксы звёзд лежат в основании **Универсальной Шкалы Расстояний**, позволяющей оценивать расстояния вплоть до самых далёких галактик и изучать эволюцию галактик и Вселенной как целого
- **Именно эти обстоятельства предопределили ведущую роль астрометрии как науки на рубеже XX и XXI веков**

# Закон "обратных квадратов" в фотометрии - основа метода "стандартной свечи"



# “Стандартные свечи”

# Диапазон применения



- **Абсолютные, или прямые методы:**
  - Тригонометрический параллакс звёзд - основа основ всей шкалы расстояний; его определение опирается на самые простые геометрические построения
- **Относительные или вторичные методы (в т.ч. "стандартой свечи"):**
  - Подавляющее большинство методов сводятся к сравнению видимого блеска объекта с известным блеском "стандартной свечи"

# Как пользоваться "стандартными свечами":

- Шаг № 1 - сначала **калибруем** светимость "стандартной свечи"  $L_0$ :

- зная освещённость  $E_0$  и расстояние  $D_0$ ,

- определяем светимость  $L_0$  из  $E_0 \sim L_0 / D_0^2$

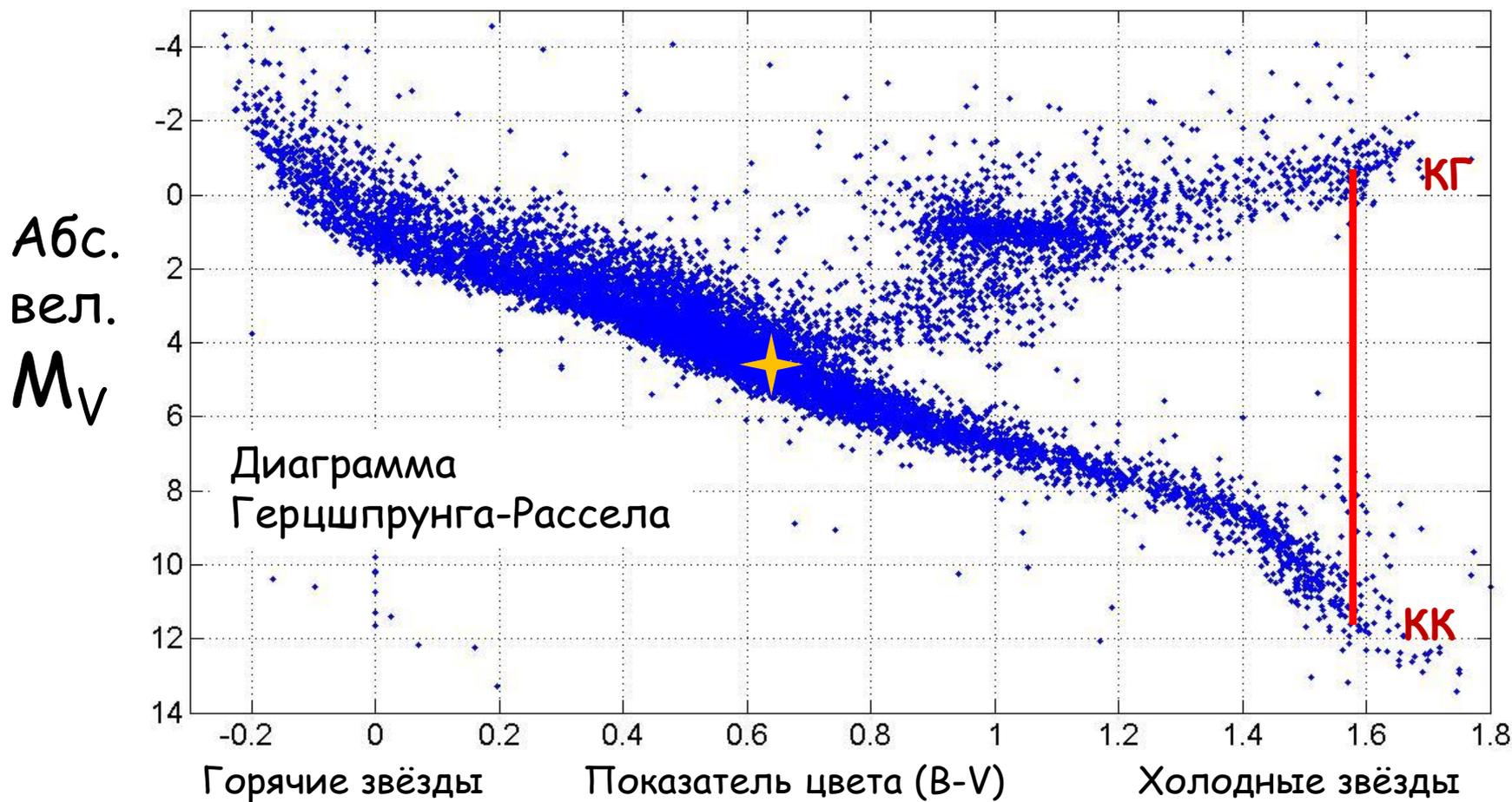
**Важно знать:** для калибровки светимостей необходимы параллаксы / расстояния!

- Шаг № 2 - определяем расстояние для объекта **того же "стандартного" типа:**

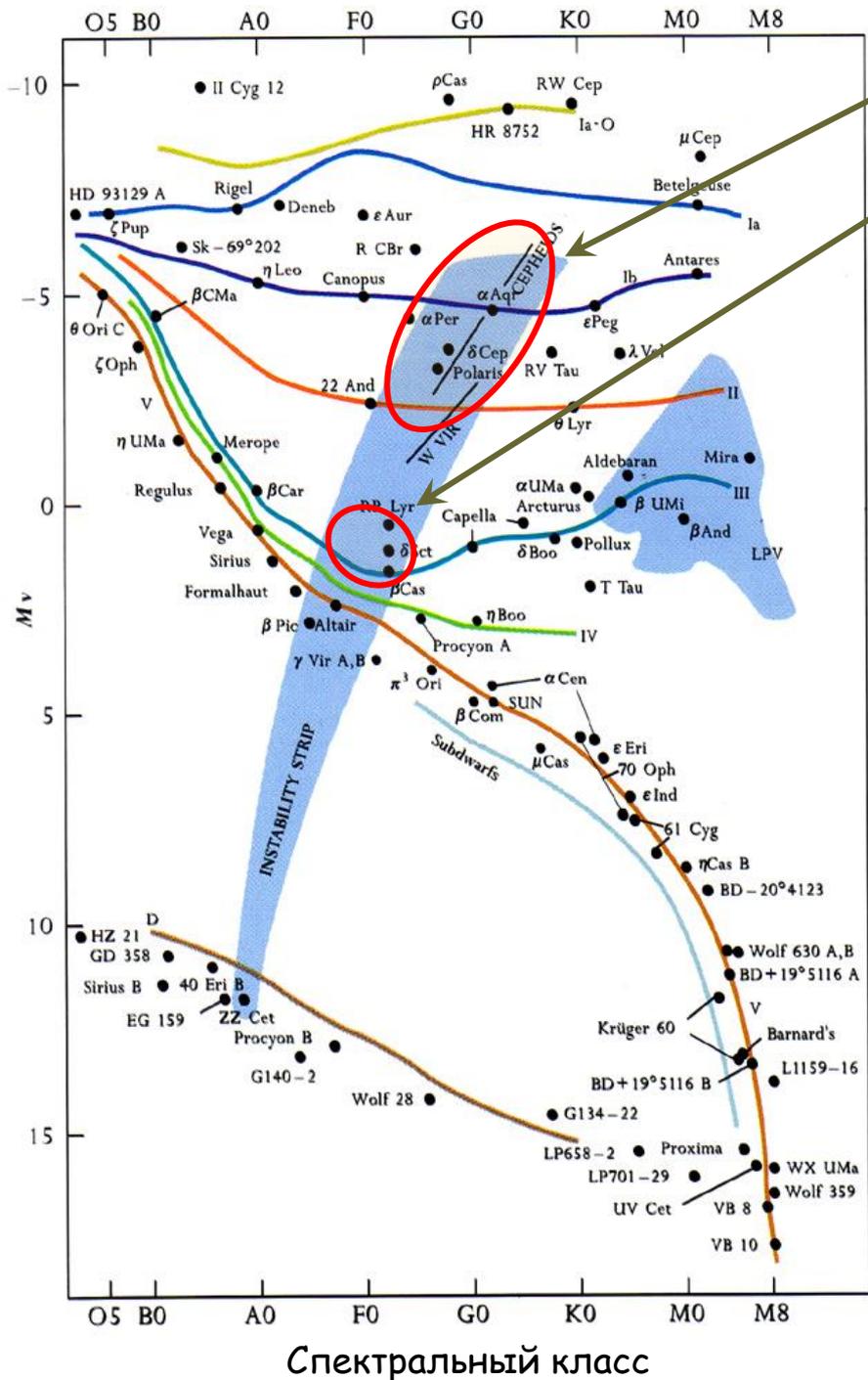
- Зная освещённость  $E$  и светимость  $L_0$ ,

- оцениваем расстояние  $D$  из  $D^2 \sim L_0 / E$

**Пример:** 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 занизим его расстояние примерно в **150 раз** !)



- Лучше всего использовать **уникальные "стандартные свечи"**, обладающие особыми свойствами, позволяющими легко различать и изучать их среди других объектов в галактиках
- Хорошо, когда уникальные "стандартные свечи"
  - Очень яркие, легко различимые даже в далеких галактиках
  - Меняют блеск (переменные звёзды) тогда их легко обнаружить и изучать на фоне звёзд постоянного блеска
- Лучшие "стандартные свечи", используемые для построения универсальной шкалы расстояний:
  - Некоторые переменные звёзды - Цефеиды, Лириды и переменные красные гиганты
  - Сверхновые звёзды типа Ia

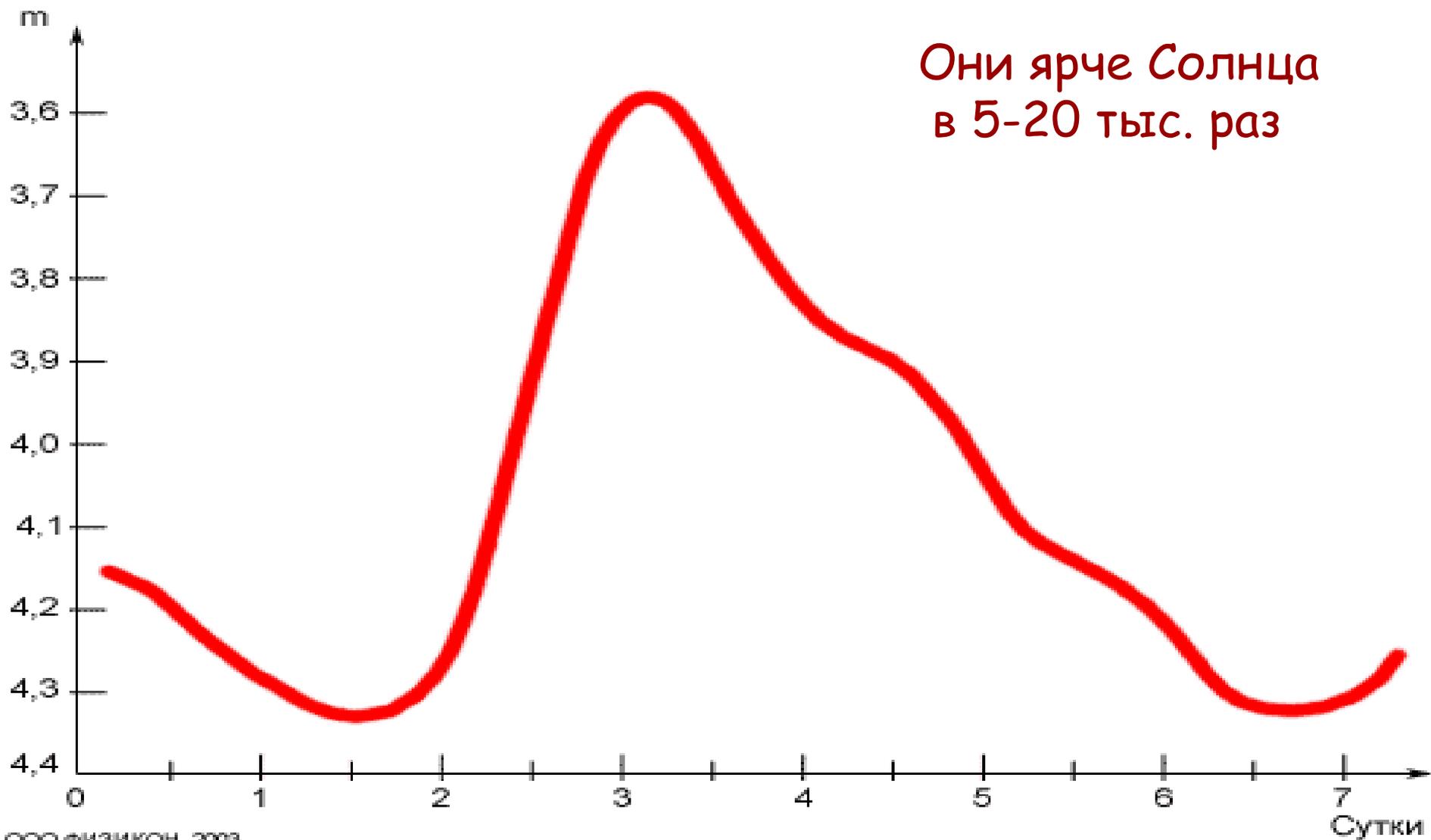


**Цфеиды и Лириды** - радиально пульсирующие переменные звёзды, жёлтые Сверхгиганты и белые гиганты соответственно, населяющие **полосу неустойчивости (ПН)** на диаграмме ГР (синяя полоса)

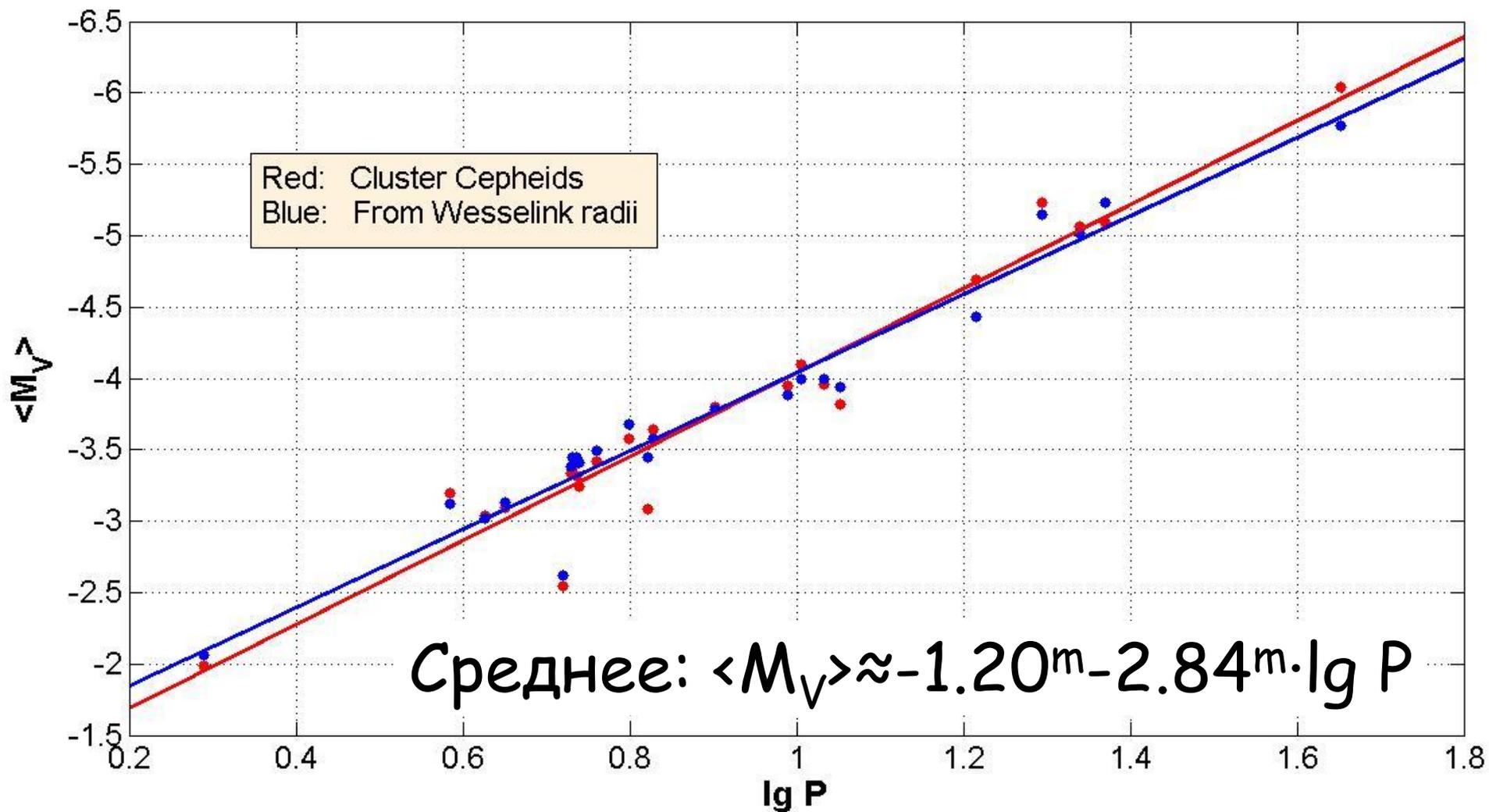
- Периоды пульсаций Цфеид от ~1 до 100 сут.,
- Лирид - менее 1 сут.
- Более 100 тыс. в МП



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



Зависимость "период - светимость" для цефеид Млечного Пути делает их довольно надёжными "стандартными свечами": период  $\longrightarrow$  светимость

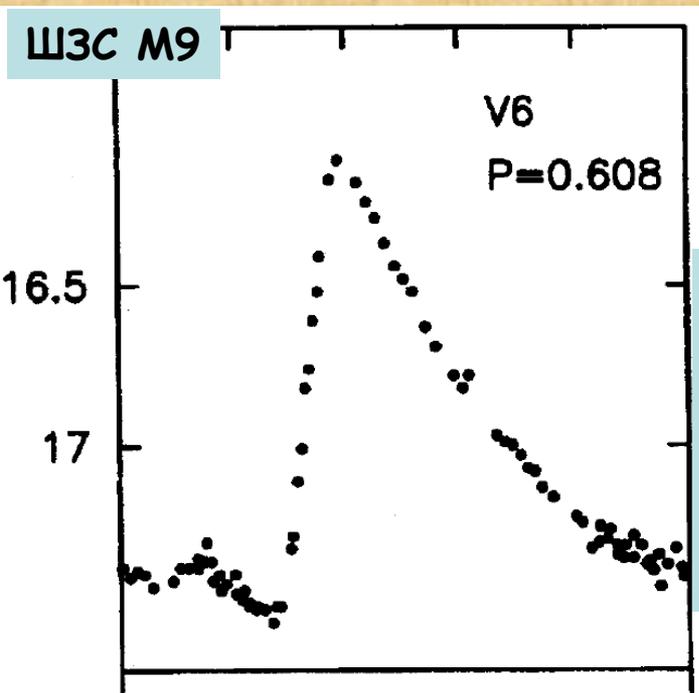


# “Стандартные свечи”: переменные типа RR Лиры

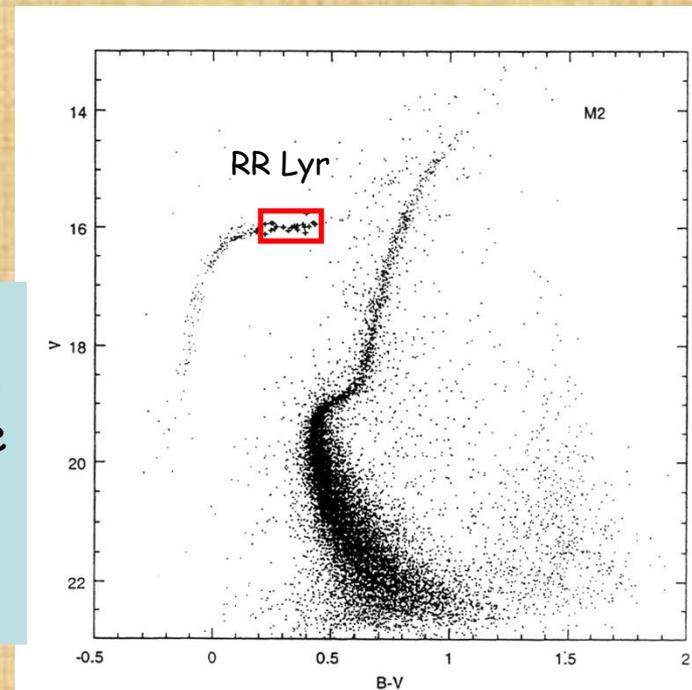
- Переменные звёзды гало и толстого диска
- $P < 1^d$ ,  $\langle M_V \rangle_I \sim 0.75 - 1.1^m$  ( $\langle M_V \rangle_I \approx a + b \cdot [Fe/H]$ )

В шаровых скоплениях и гало Галактики известно более 100000 RR-Лирид

- Зависимость “период - светимость - металличность” в ИК и “период - металличность” в оптике

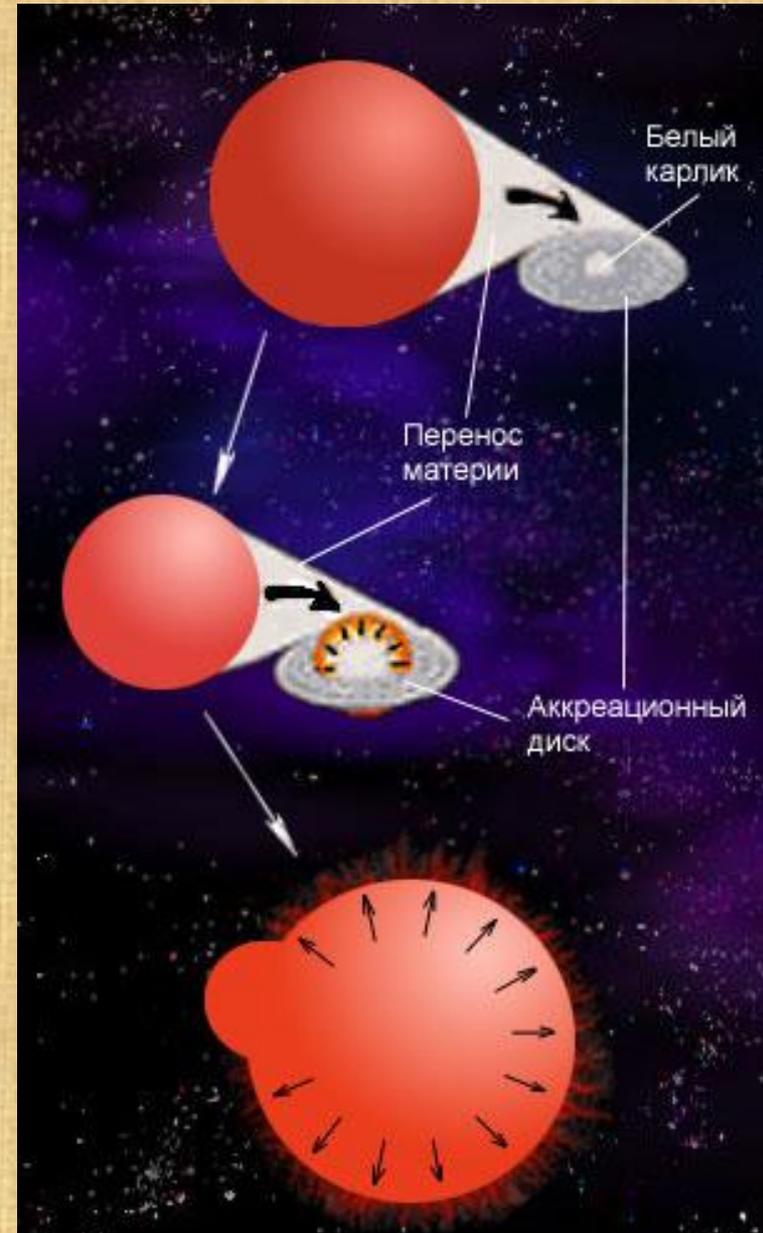


Эволюционная стадия горизонтальной ветви: “горение” гелия в ядре (“2-я ГП”) Длительность ~100 млн. лет



# Сверхновые звёзды типа Ia

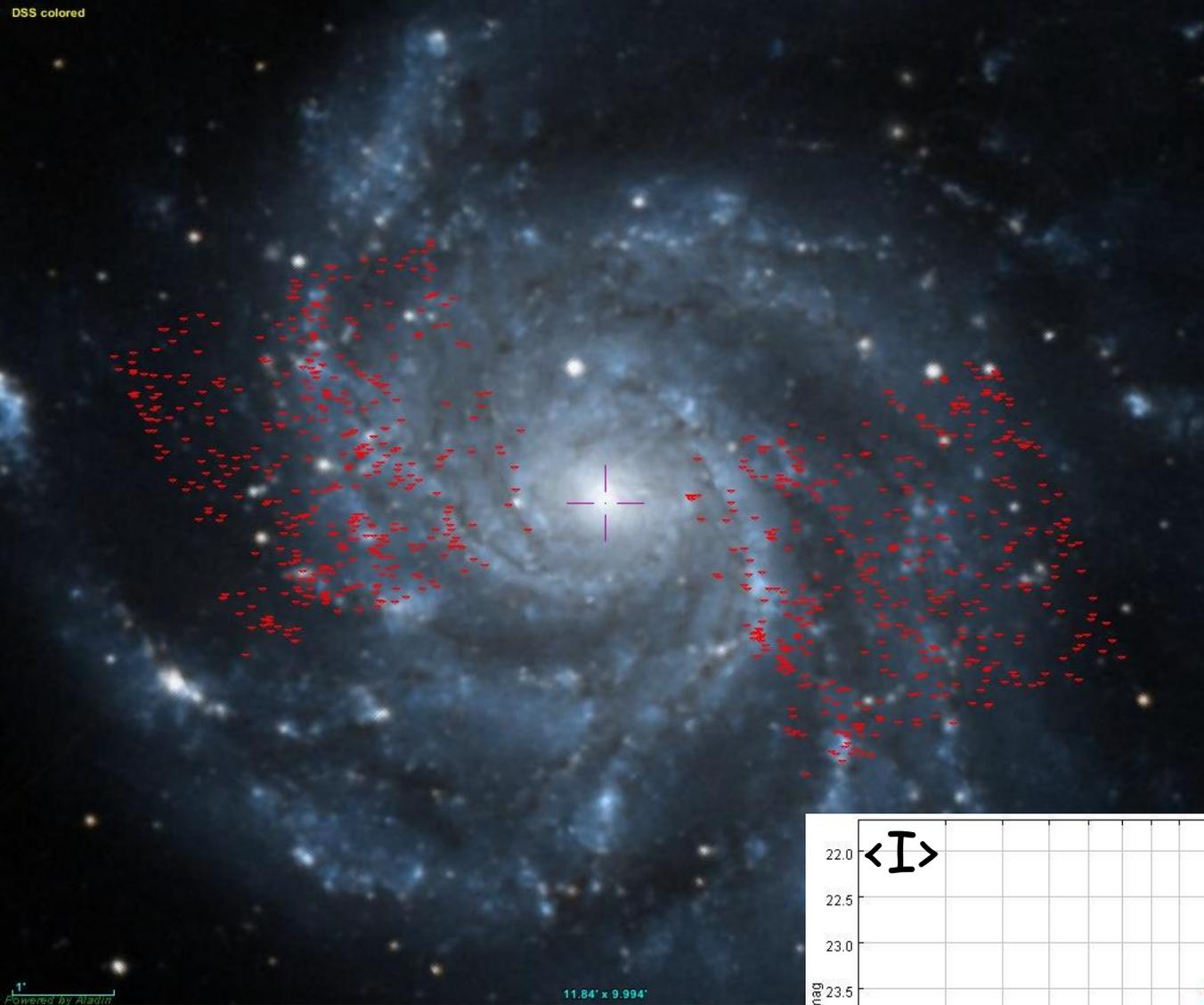
- **SN Ia** - термоядерный взрыв кислородно-углеродного белого карлика в результате слияния двух белых карликов или аккреции (перетекания) вещества от спутника, приводящих к превышению массы выше Chandrasekara предела устойчивости БК,  $\sim 1.40 M_{\text{Sun}}$
- $M_V(\text{max}) \approx -19.5^m$  (в 10 млрд. раз ярче Солнца !) - самые яркие "стандартные свечи"



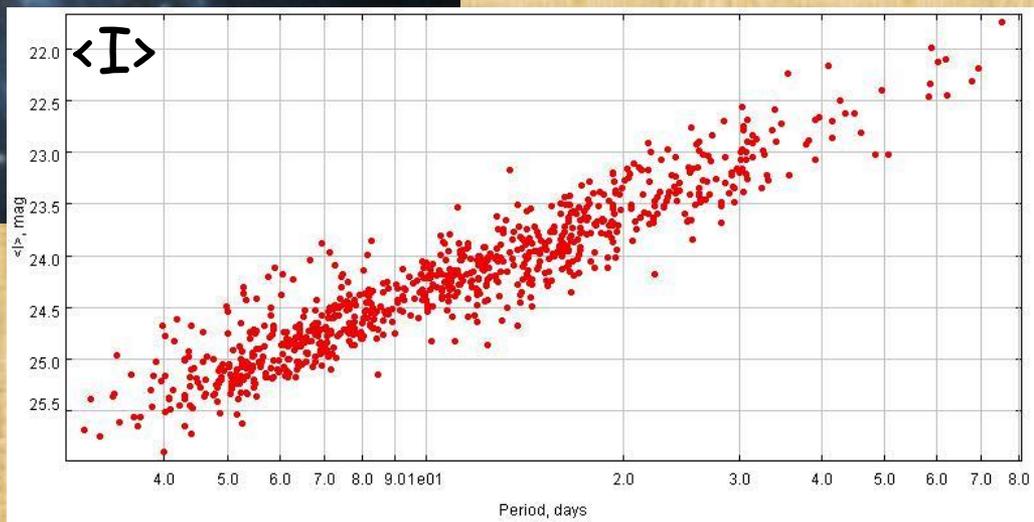
- Сливающиеся за время  $\sim 1$  млрд. лет из-за излучения гравитационных волн белые карлики - основной "сценарий" SN Ia

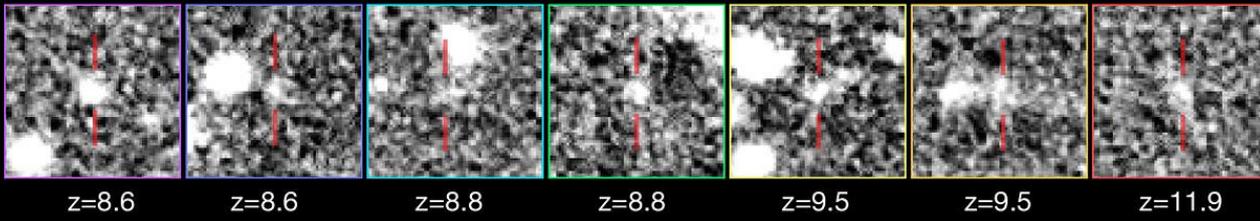


- От звёзд Млечного Пути до далёких галактик:
- Яркие Цефеиды и Сверхновые звёзды типа Ia в большом количестве встречаются в далёких галактиках и позволяют оценивать расстояния до них
- SN Ia как самые яркие объекты видны до расстояний порядка 10 млрд. св. лет (возраст таких галактик - всего около 3 млрд. лет)
- Это лучшее средство изучения строения и эволюции галактик и всей Вселенной !



- Цефеиды в М 101
- $D \sim 6.8$  Мпк





# Астрономическая "Машина Времени" - глубокое поле КТ Хаббл:

суммарная  
экспозиция ~550  
часов за 10  
лет наблюдений в  
оптике и ИК

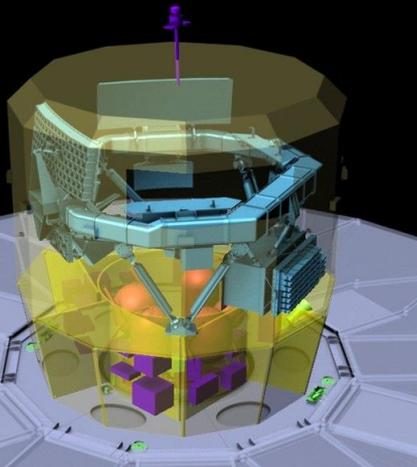
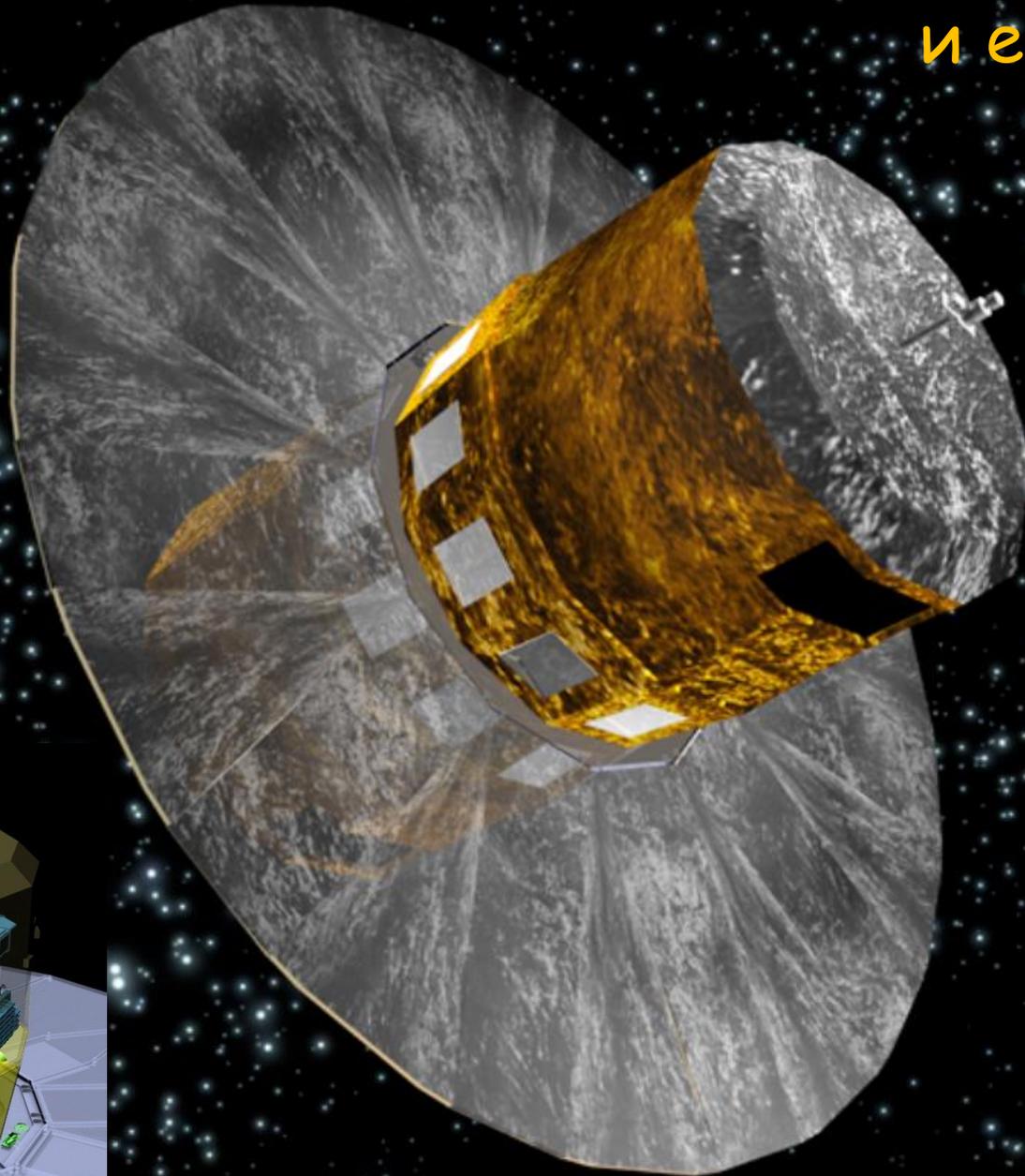
Предел ~30<sup>m</sup>  
~300 тыс. гал./кв.  
град.

До  $z \approx 11.9$   
(возраст Вселенной  
~400-600 млн. лет)



- Часть II: Научная "начинка" GAIA и принципы астрометрических, фотометрических и спектральных измерений
  - Самая большая фотокамера (~1 Грх)
  - Сканирует всё небо с 2014 г. по 2021 г. +
  - Измеряет блеск звёзд
  - Определяет расстояния и движения звёзд
  - Определяет химический состав и температуры звёзд
  - Открывает новые объекты

# Космическая "шляпа" GAIA и её "начинка"



- Первоначальное название проекта - **Global Astrometric Interferometer for Astrophysics**
- Позднее принцип измерений был радикально изменён, от интерферометрии отказались, но название решили не менять: **GAIA = "ГЕЯ", "Земля"**
- **GAIA** - наследник миссии **HIPPARCOS** (1989-1992 г.)
- Проект утверждён ЕКА в 2000 г.
- Стоимость самого аппарата ~320 млн. Е
- Стоимость обработки данных > 130 млн. Е
- Запущен 19 декабря 2013 г.



В цехе с раскрытой (а) и сложенной (б) солнцезащитной "юбкой"; перед установкой в "Союз" (в)

- Наземные стадии подготовки GAIA.

Сборка кольца научного модуля

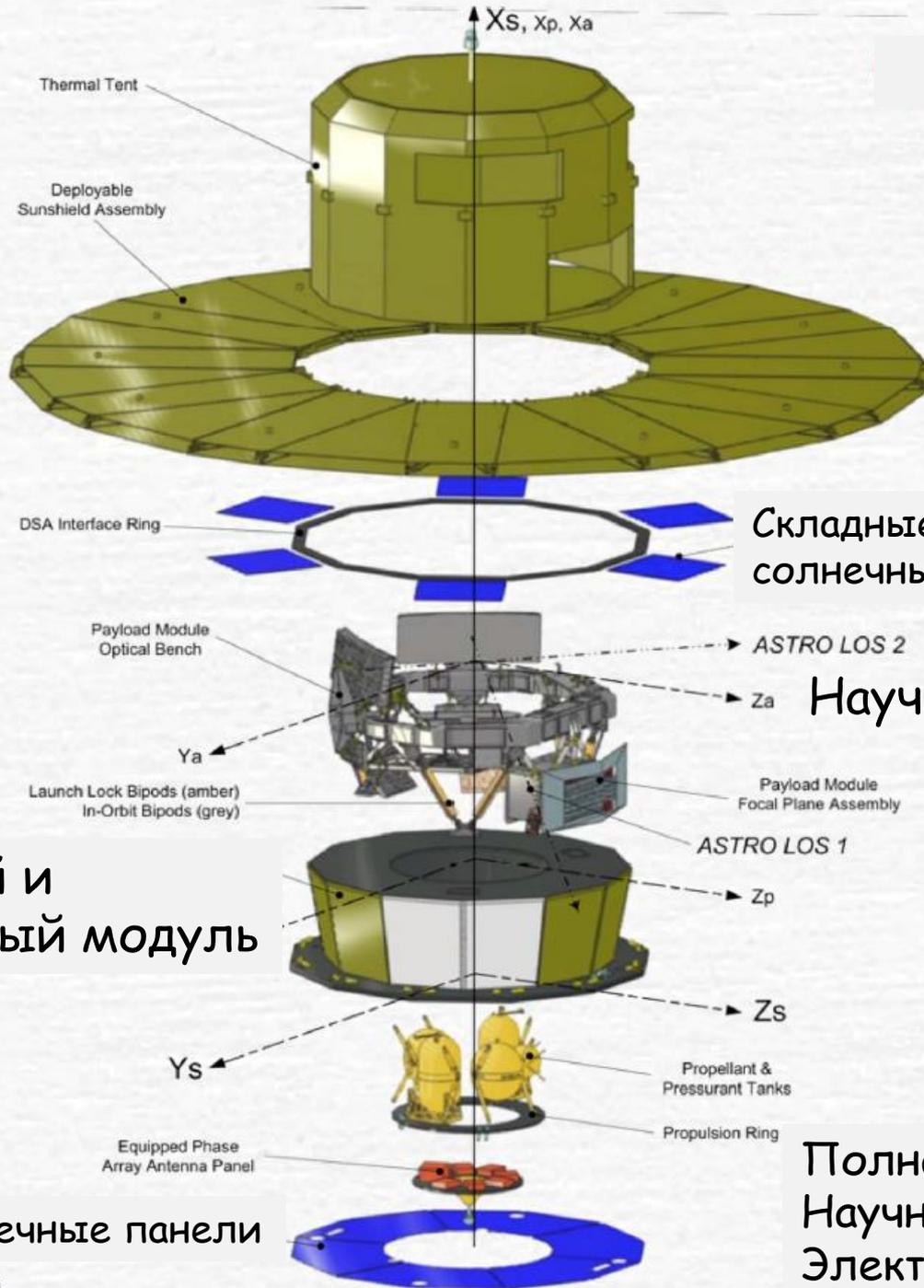


© 2013 ESA AND ARIANESPACE. Optique Vidéo de CSG - O. HANVASTE

© 2013 ESA AND ARIANESPACE. Optique Vidéo de CSG - S. MARTIN

# Модули GAIA

Солнцезащитная  
"юбка"



Складные элементы  
солнечных панелей

Научный модуль

Силовой и  
служебный модуль

Солнечные панели

Полная масса 2030 кг  
Научный модуль 690 кг  
Электр. мощность ~2 кВт

Оптический тракт  
- сердце GAIA

Зеркало #1

Зеркала под углом  
 $106.5^\circ$  посылают  
свет на общую  
фокальную  
плоскость,  
"смешивая"  
изображения  
двух областей неба

Общая  
фокальная  
плоскость

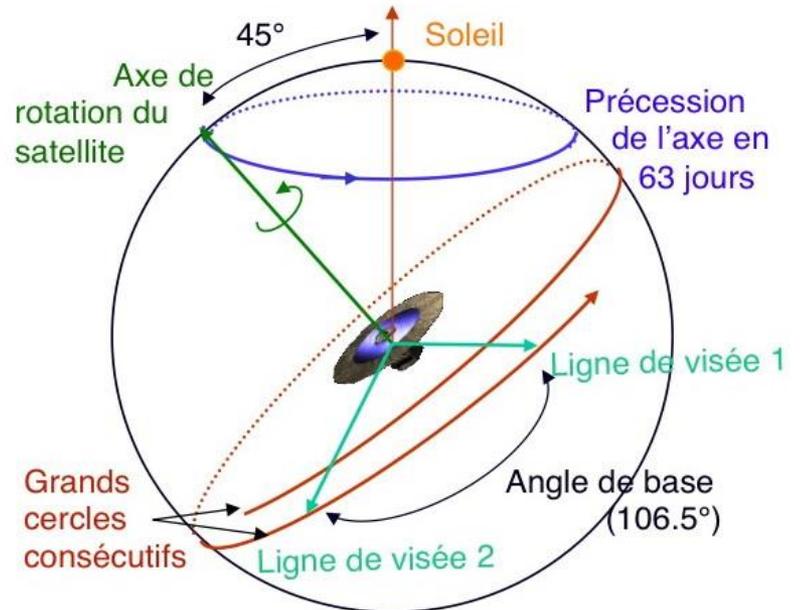
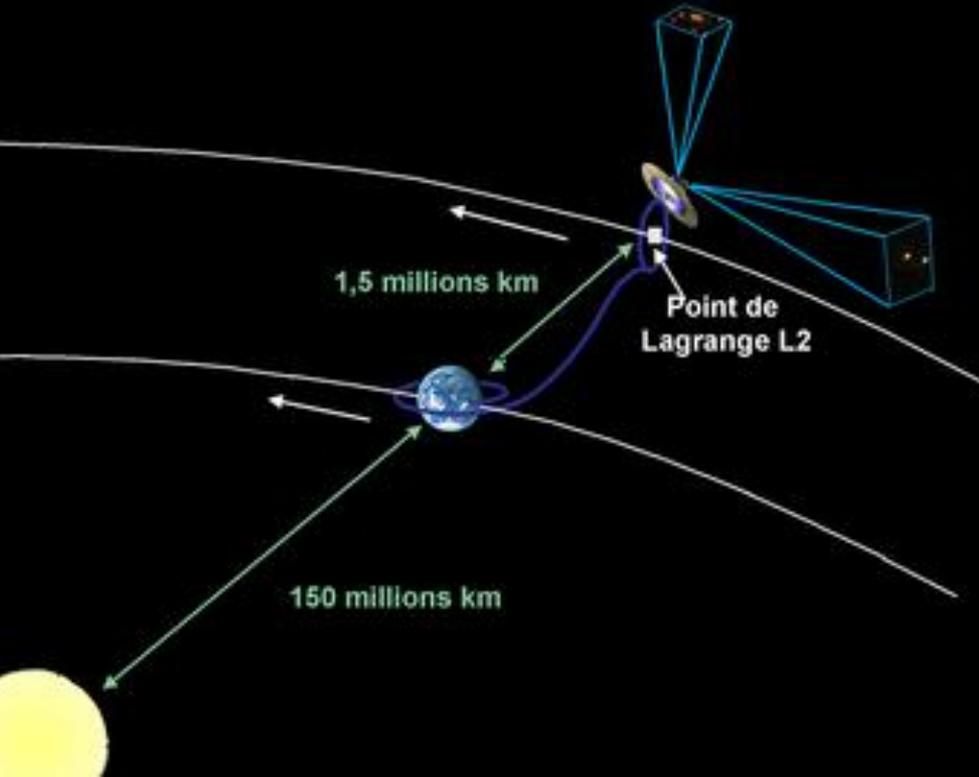
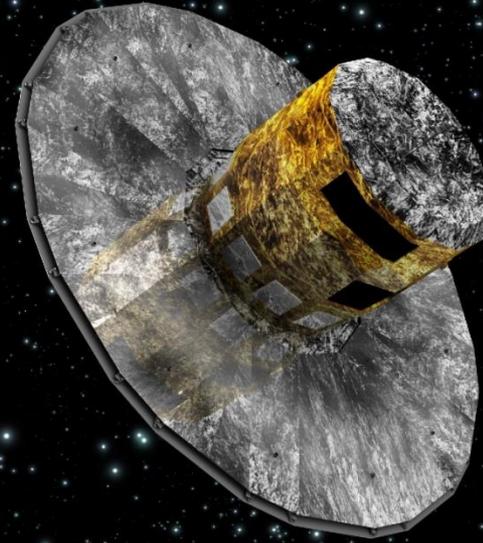
Зеркало #2



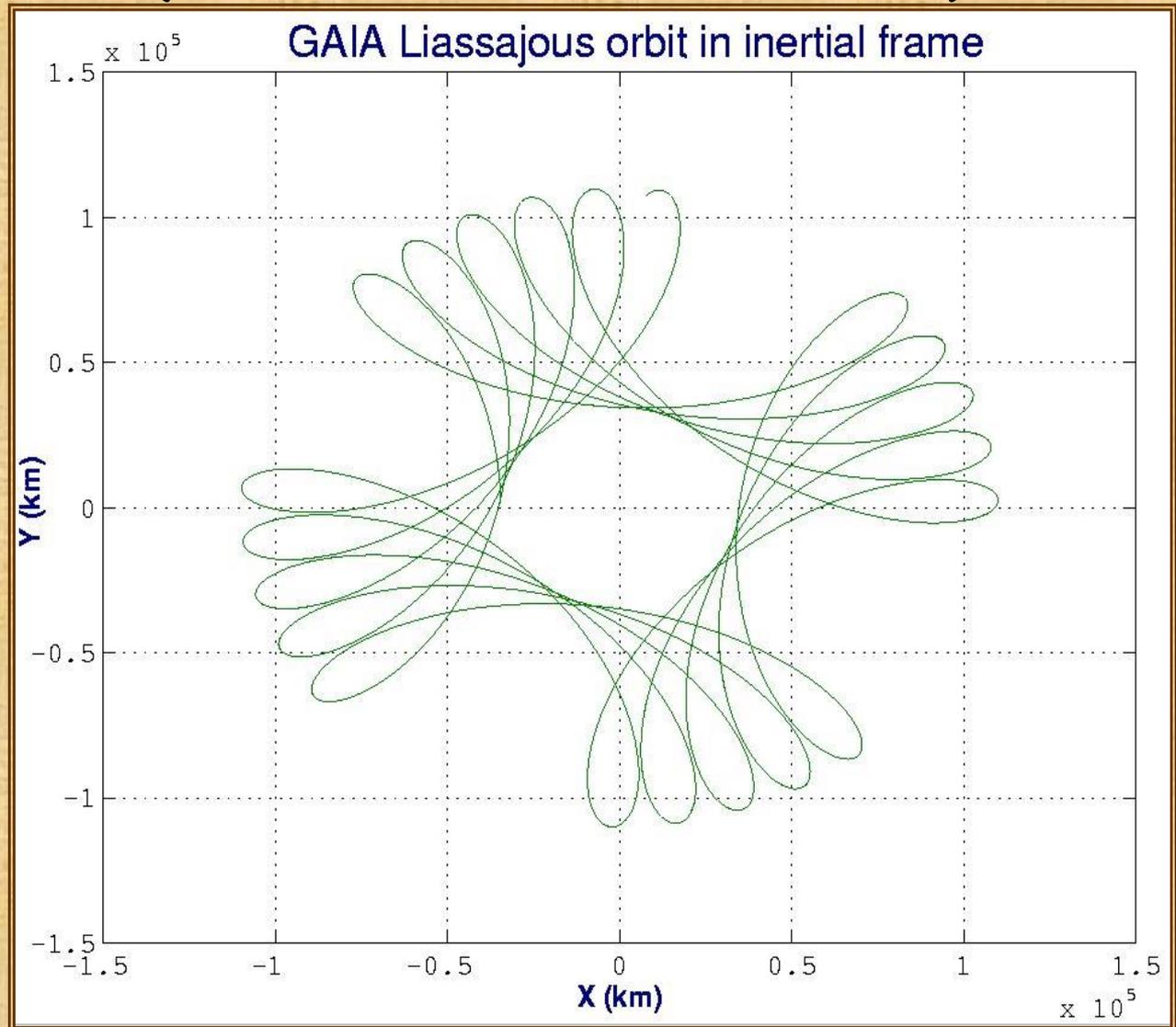
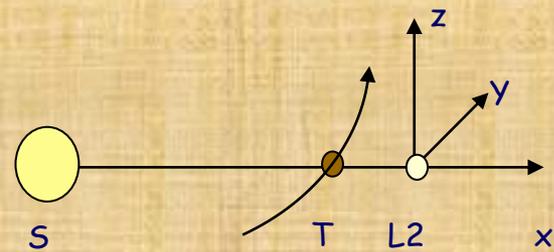
В HIPPARCOS (1989-1992) и GAIA реализован революционный принцип астрометрии широкого поля  
Преимущество - возможность взаимной "привязки" далеко расположенных объектов друг к другу в рамках единой реперной сети квазаров

# GAIA на орбите и схема сканирования небесной сферы:

~1.5 млн. км от Земли (L2),  
6 часов - осевое вращение,  
63 дня - период прецессии,  
1 год - орбитальный оборот

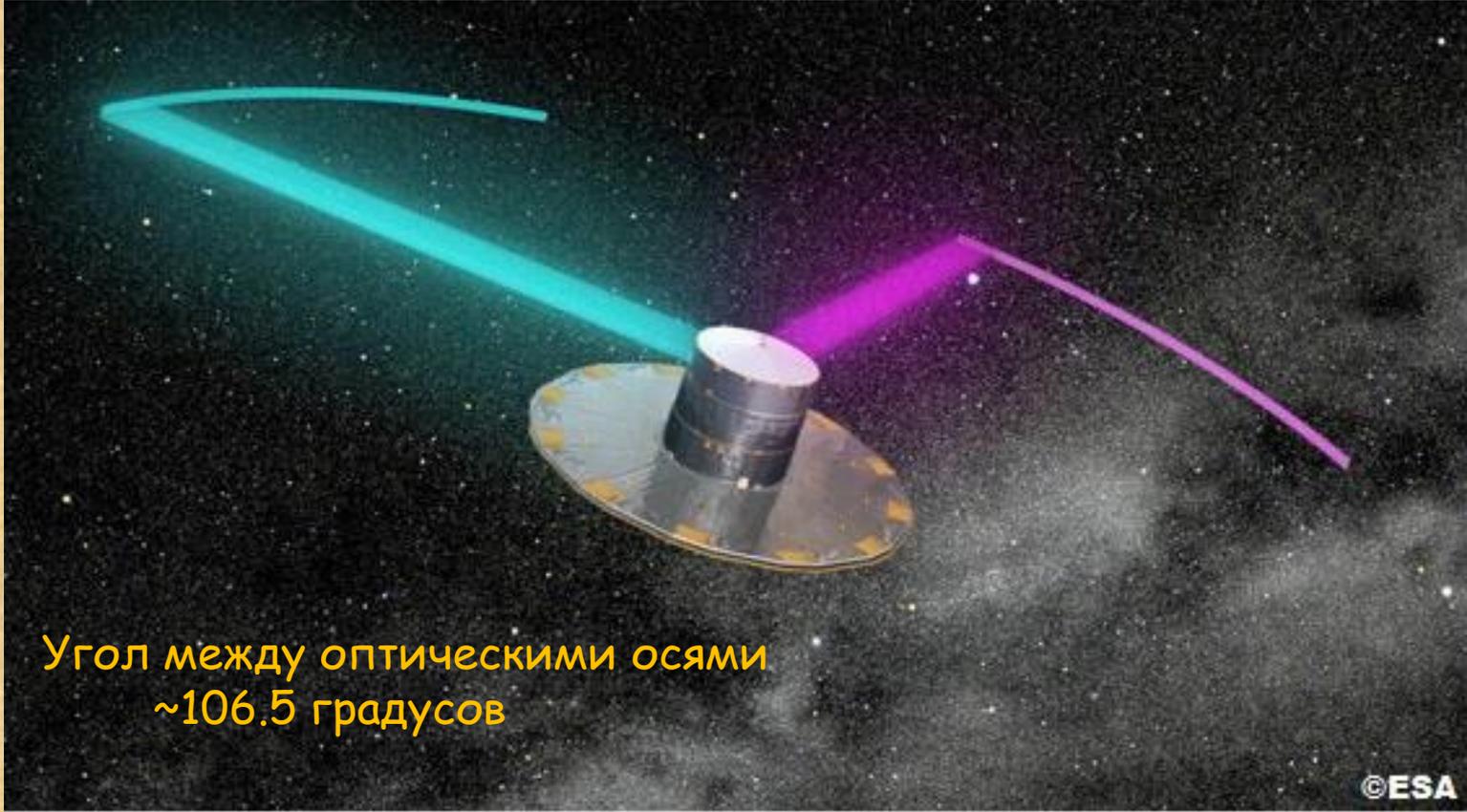


# Устойчивая орбита спутника: осевая точка Лагранжа L2 (~1.5 млн. км за Землей)



Колебания с амплитудой ~100000 км по 3-м координатам F. Mignard, 2003

- 2 главных зеркала  
145 x 50 см
- Эквивалентное  
фокусное расстояние  
- 35 м

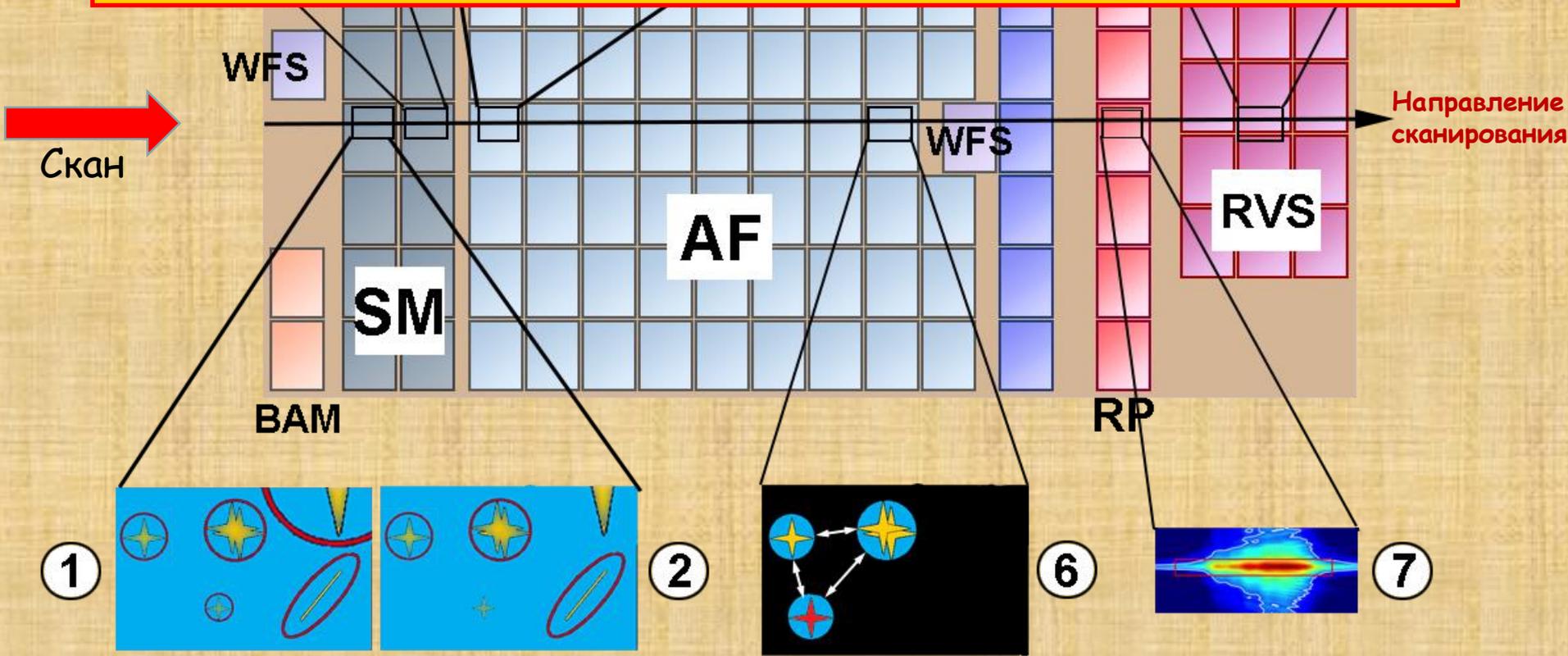


Угол между оптическими осями  
~106.5 градусов

3

8

Режим считывания ПЗС при сканировании:  
 ВЗН - Временная Задержка с Накоплением -  
 обеспечивается синхронным перемещением заряда  
 за звездой по массиву матриц в течение ~60 сек.  
 Требования к стабильности массива матриц и  
 положению зеркал на уровне ~0.001 мкм



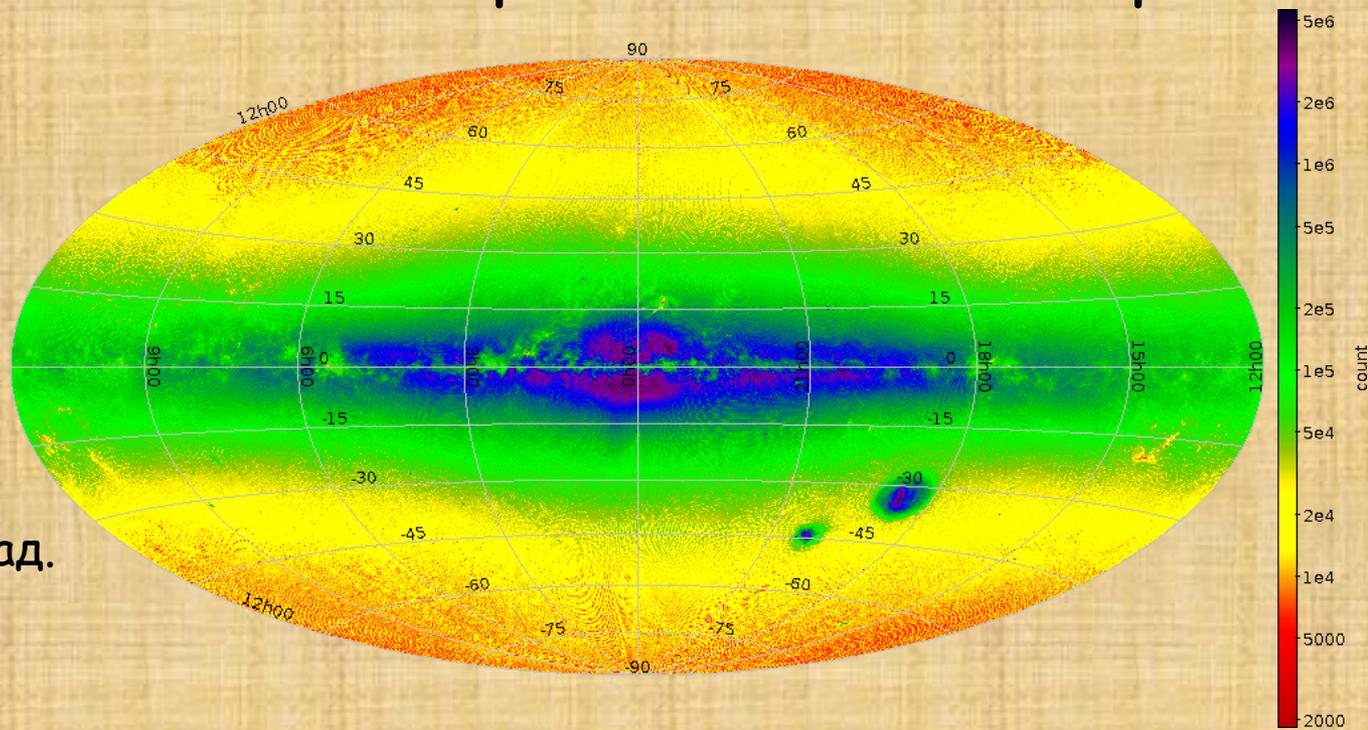
**Фокальная плоскость GAIA:** 104 x 43 см, 106 ПЗС-матриц  
 (4500 x 1966 px) размером 6 x 4.7 см

- Для чего нужны два зеркала с углом  $106.5^\circ$  между ними:

- Угол выбирался из тех соображений, чтобы через период осевого вращения (~6 часов) наблюдались не те же, а соседние области неба
- Для взаимного согласования положений звёзд и опорных источников (квазаров) в широком поле и, в конечном счёте, создания единой системы координат сразу на всём небе
- Для достижения большой точности определения параллаксов, т.к. в разнесённых на этот угол полях параллактические смещения звёзд имеют разные фазы

## • Трудности:

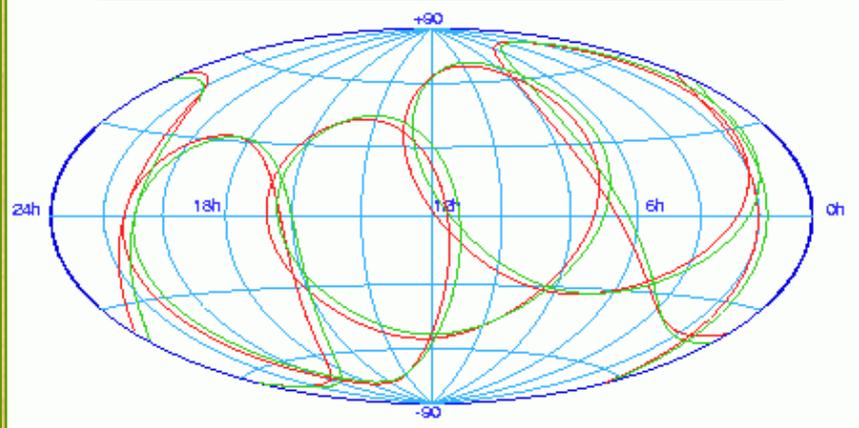
- В самых плотных полях на массиве матриц видны одновременно миллионы (!) звёзд
- Для их правильного отождествления от скана к скану применялись алгоритмы машинного самообучения с распознаванием объектов и мощный бортовой компьютер



Число звезд на 1 кв. град.  
(Млечный Путь в  
разрезе) GAIA DR2

# След оси аппарата при сканировании и покрытие неба:

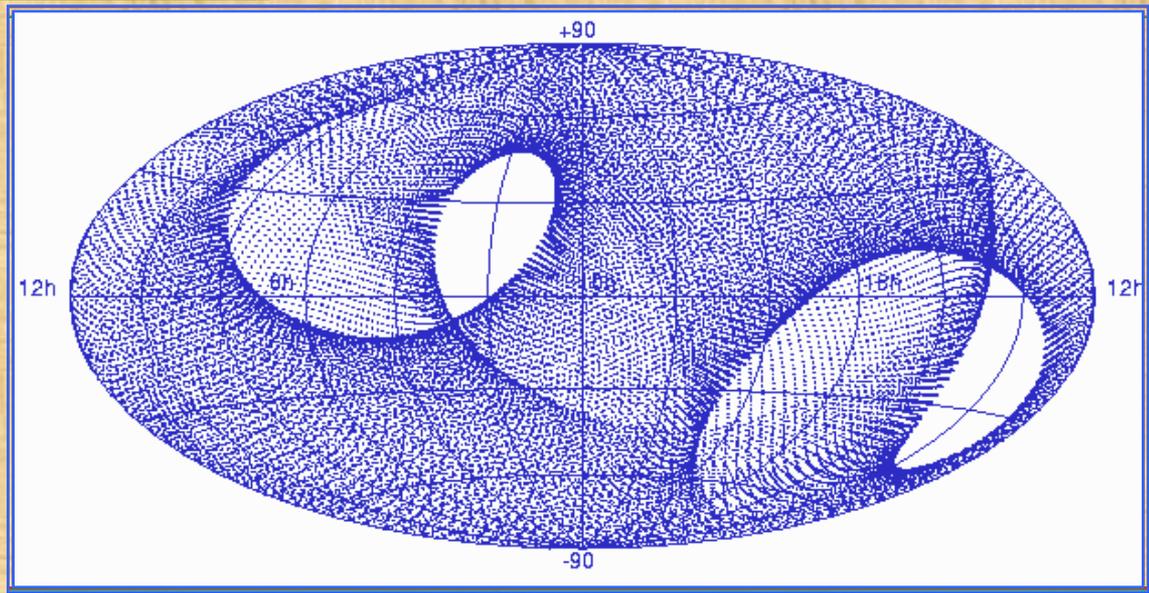
Траектория оси вращения  
за 2 года наблюдений



30 сут.

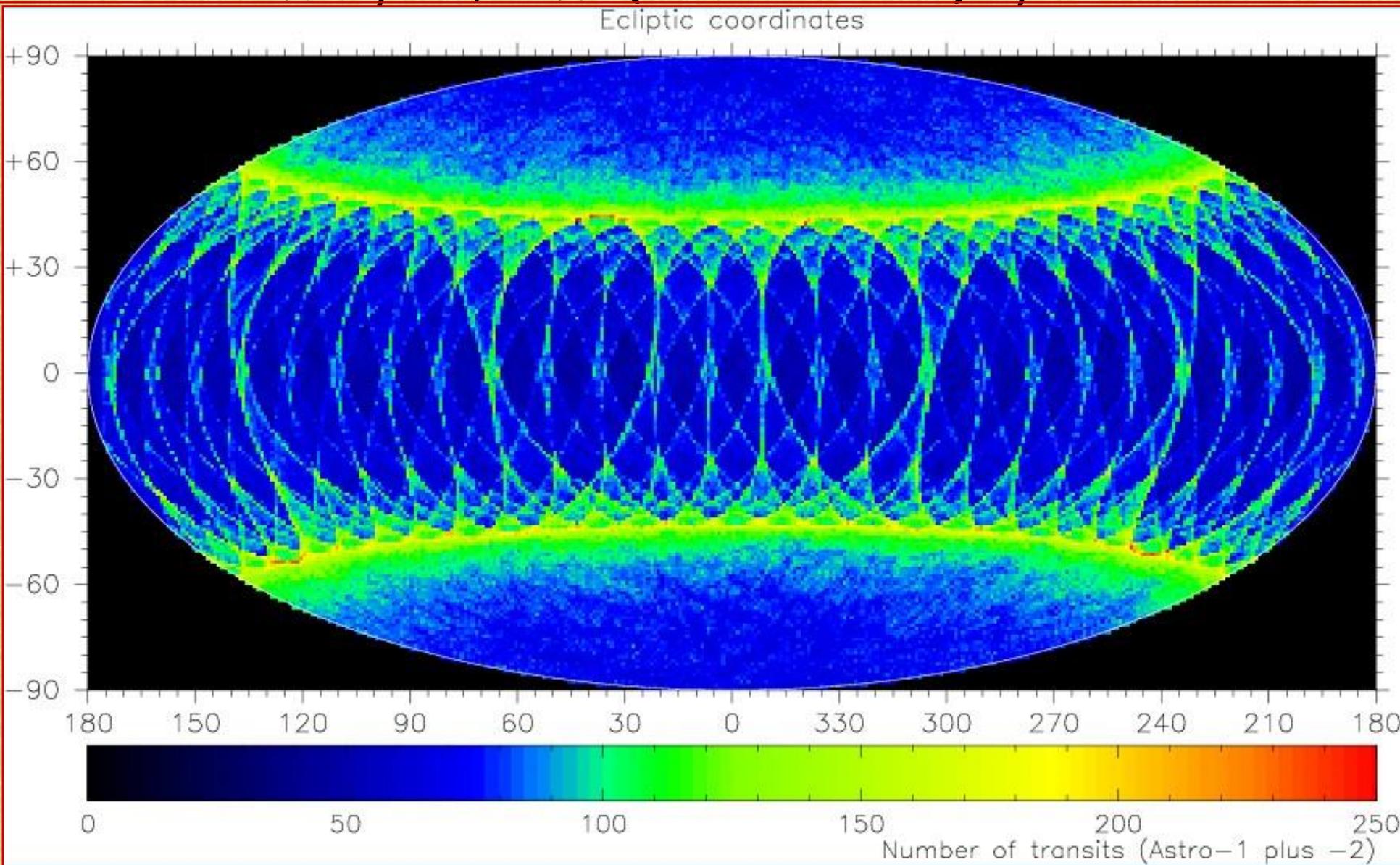
60 сут.

100 сут.



- Сканирование неба

Распределение числа наблюдений звёзд  
(в эклиптических координатах) -  
где густо, а где (относительно) пусто...



# Число измерений

В среднем ~ 150 эпох наблюдений объекта, в том числе в среднем:

- **80 астрометрических;**
- 120 спектральных;
- 180 фотометрических

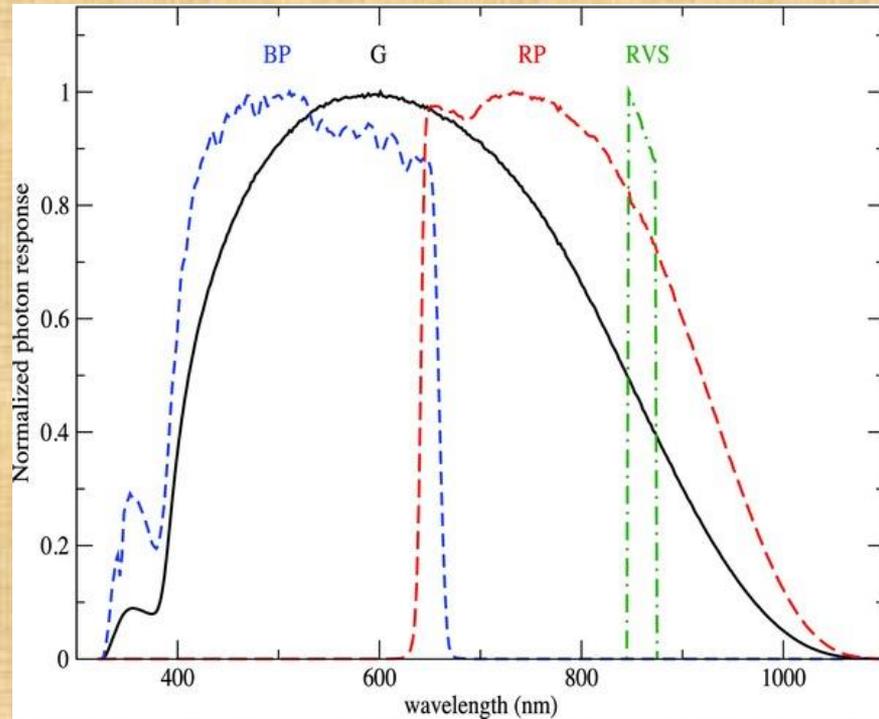
**Суммарная экспозиция >3000 с**

(по сравнению с ~ 500 с HIPPARCOS)

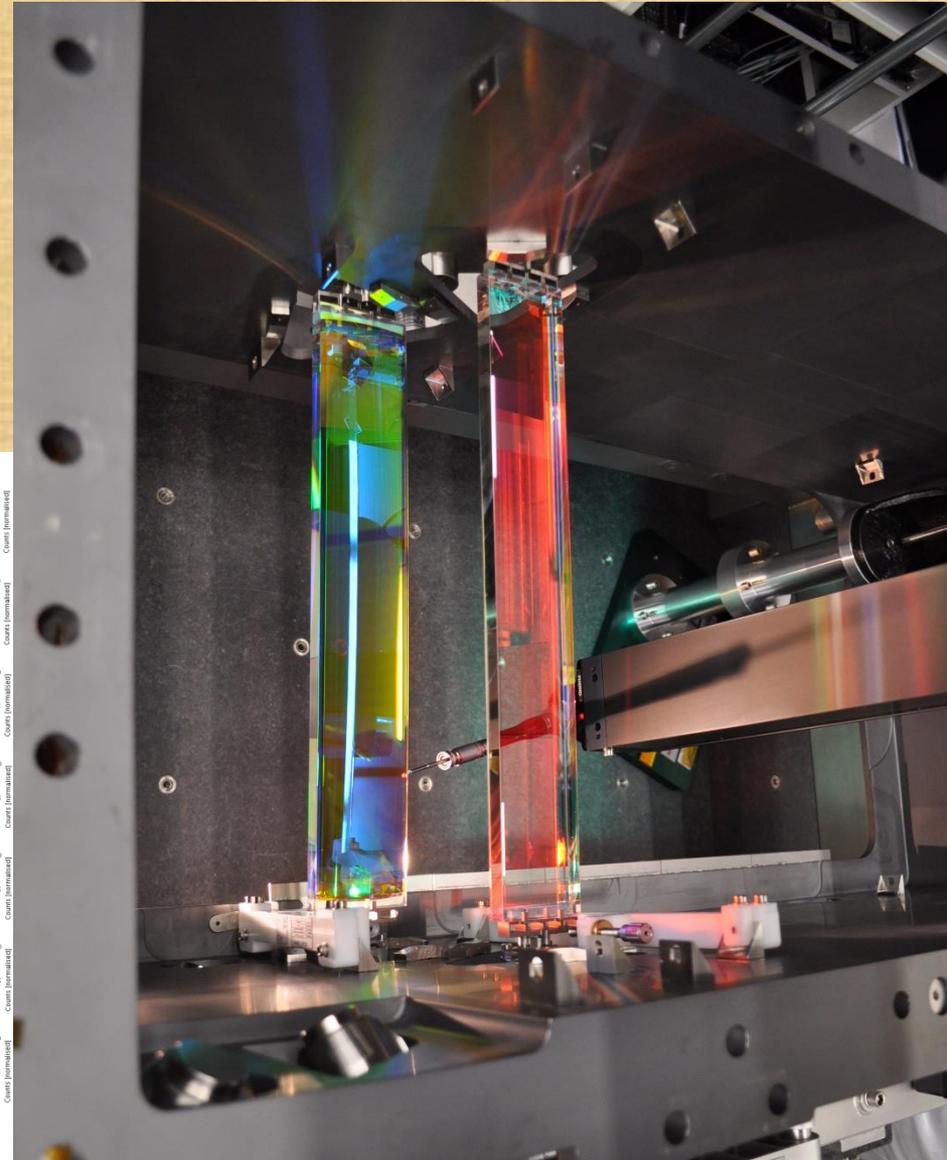
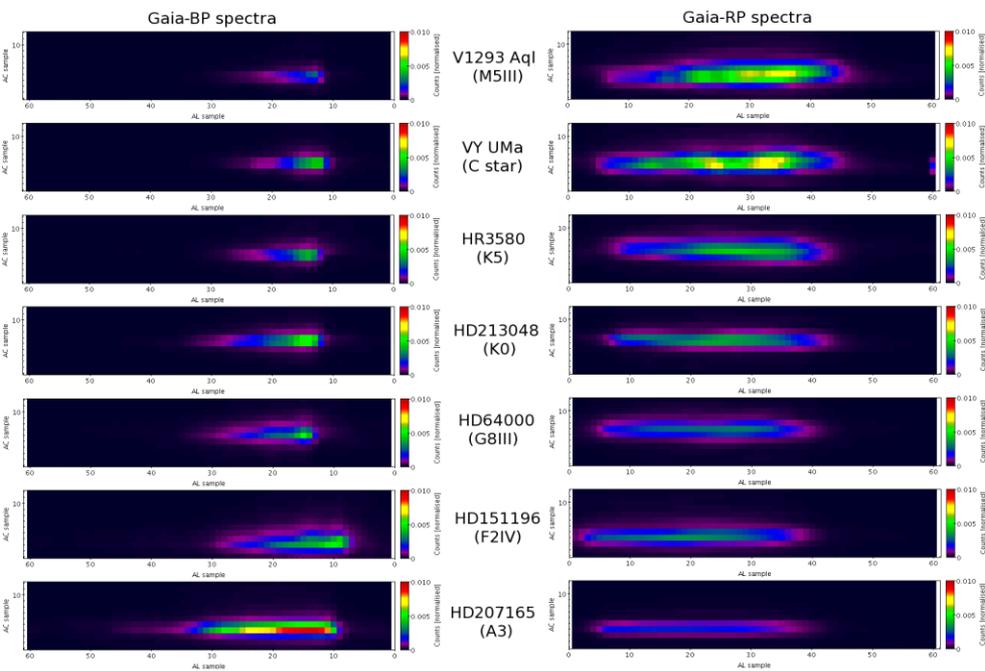
За полгода - 1 скан всего неба.

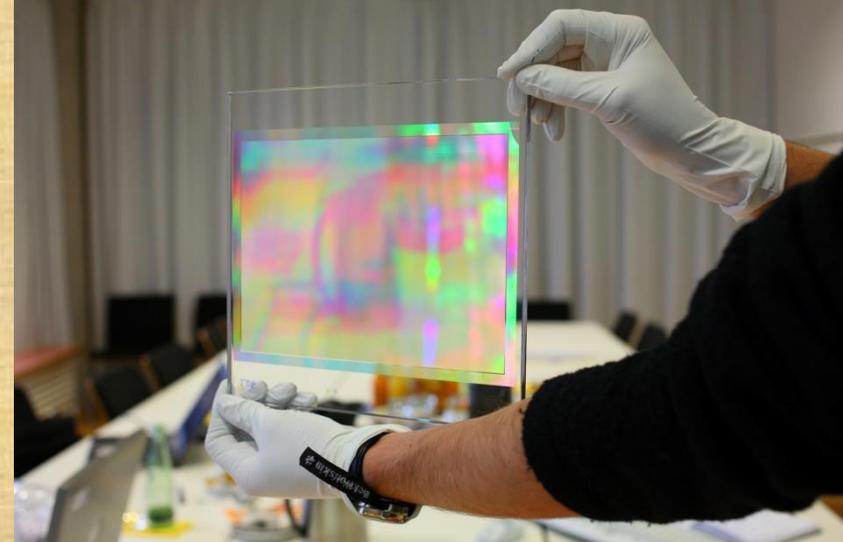
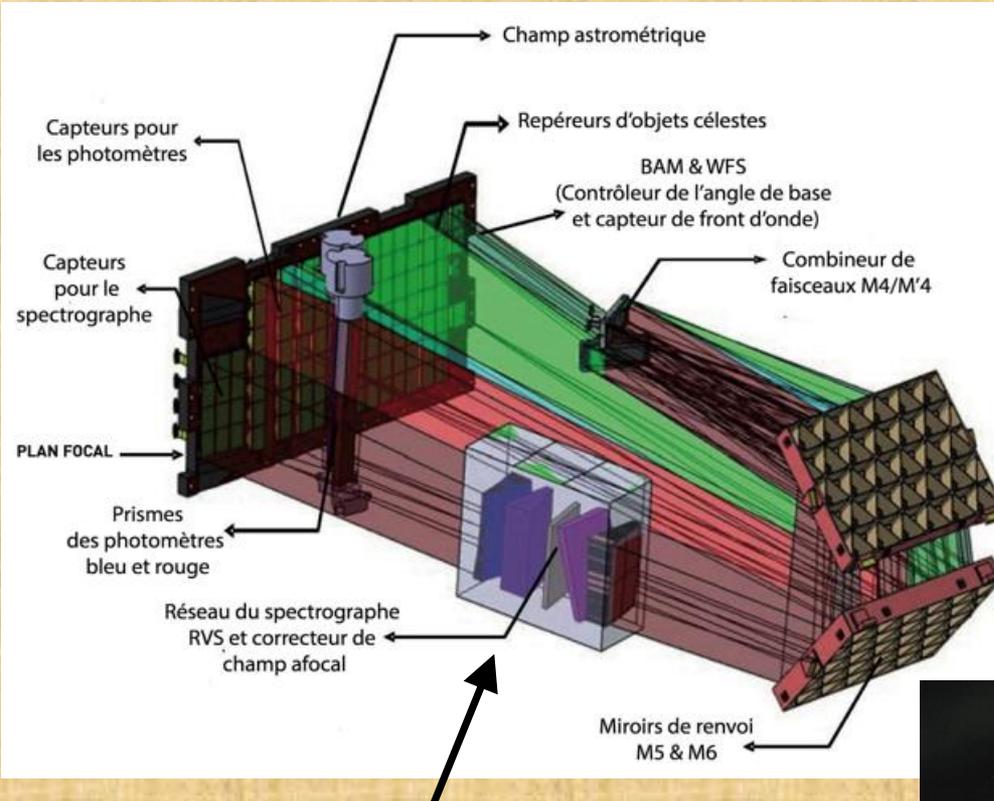
Получено уже почти 8 сканов (на 04.2018)

**Суб-мсд астрометрическая точность обеспечивается большой длиной одиночного скана объекта (~18000 pixels) и большим числом таких сканов**



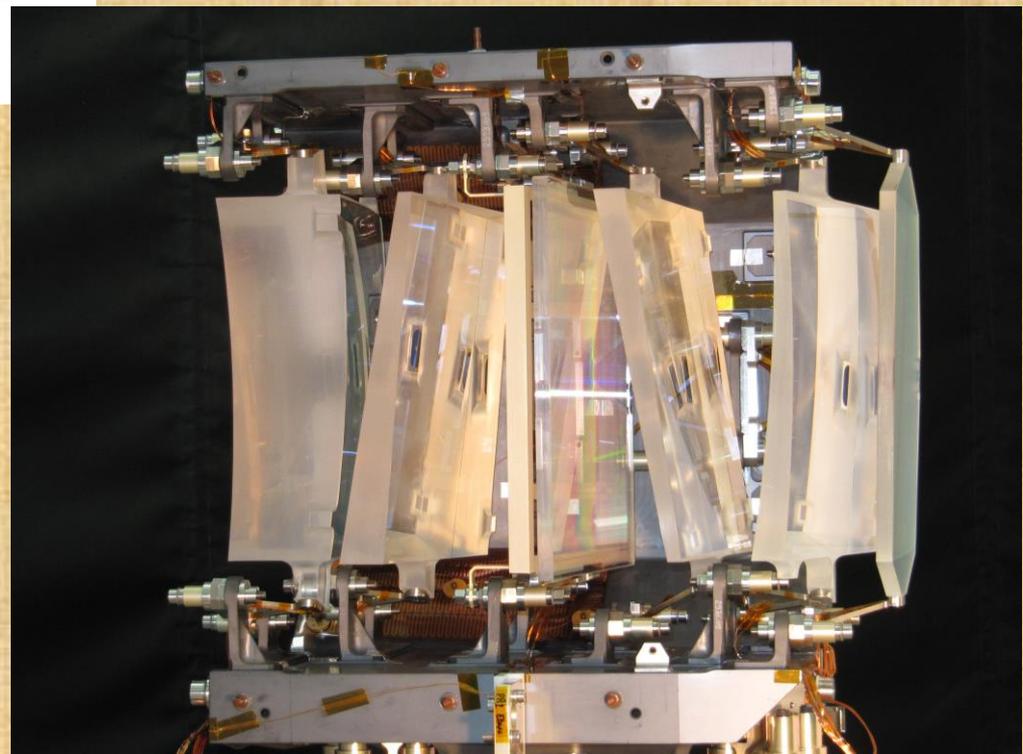
Фотометрия *GAIA*: две призмы  
 От холодных до горячих звёзд  
 (сверху вниз)



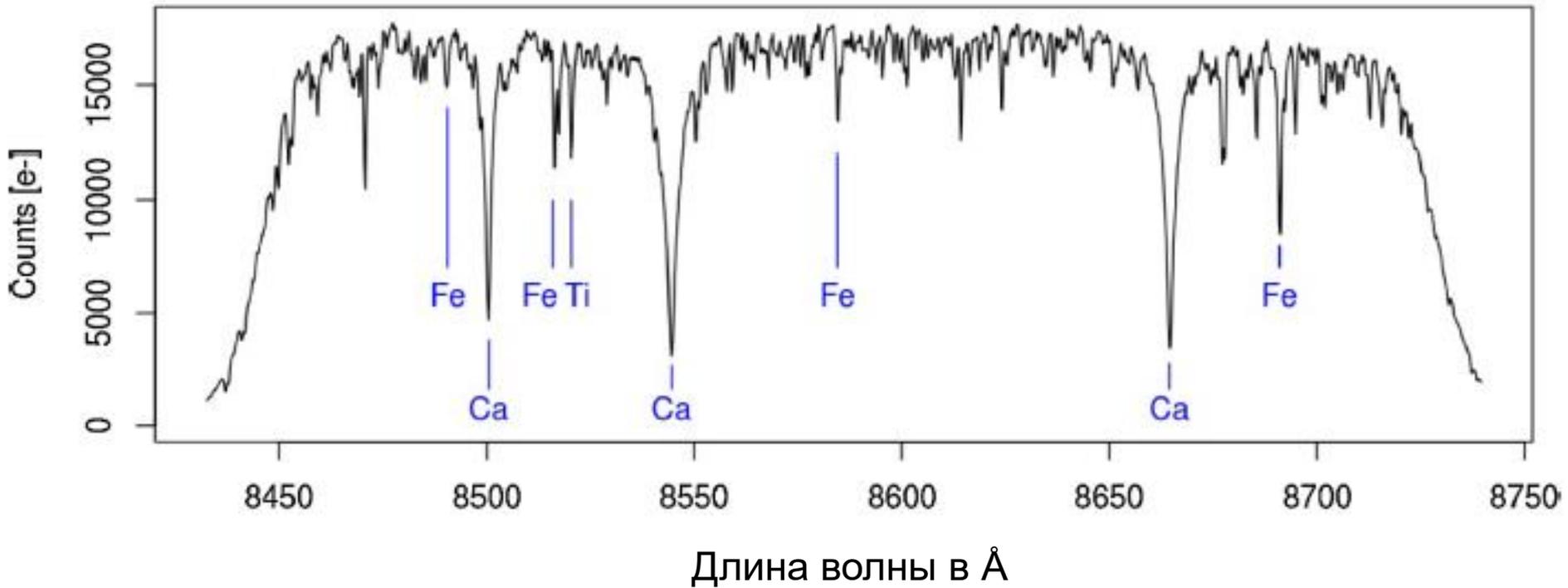


Дифракционная решётка

- **Спектроскопия GAIA:**
- Измерение лучевых скоростей
- Определение температур и химсостава звёзд



## Gaia-RVS spectrum of HIP 86564



- **Выбор спектрального диапазона:**
- 1) Сильный триплет Ca II
- 2) Мало линий - обработка на борту намного проще
- 3) Протестирован в проекте RAVE (RArial Velocity Experiment) (Австралия) - измерено около 1 млн. звёзд
- по глубине и ширине линии определять температуру и класс светимости звёзд

- 1) С уменьшением эффективной температуры растёт глубина спектральных линий
- 2) С уменьшением содержания тяжёлых элементов уменьшается эффективная ширина спектральных линий
- 3) С уменьшением светимости (и ростом ускорения силы тяжести на поверхности) растёт ширина спектральных линий
- **Для определения физических параметров и доплеровских смещений используются теоретические шаблоны спектров**

# Спектроскопия *GAIA* ( $R \sim 11500$ ):

$T_{\text{eff}}$  и химический состав  $[\text{Fe}/\text{H}]$

$T_{\text{eff}}$

NI

$[\text{Fe}/\text{H}]$

Ca II

Ca II

850 855

$T = 6030 \text{ K } g = 4.35$

$\lambda/\Delta\lambda = 20,000$

$[Z/Z_{\odot}] = -2.0$

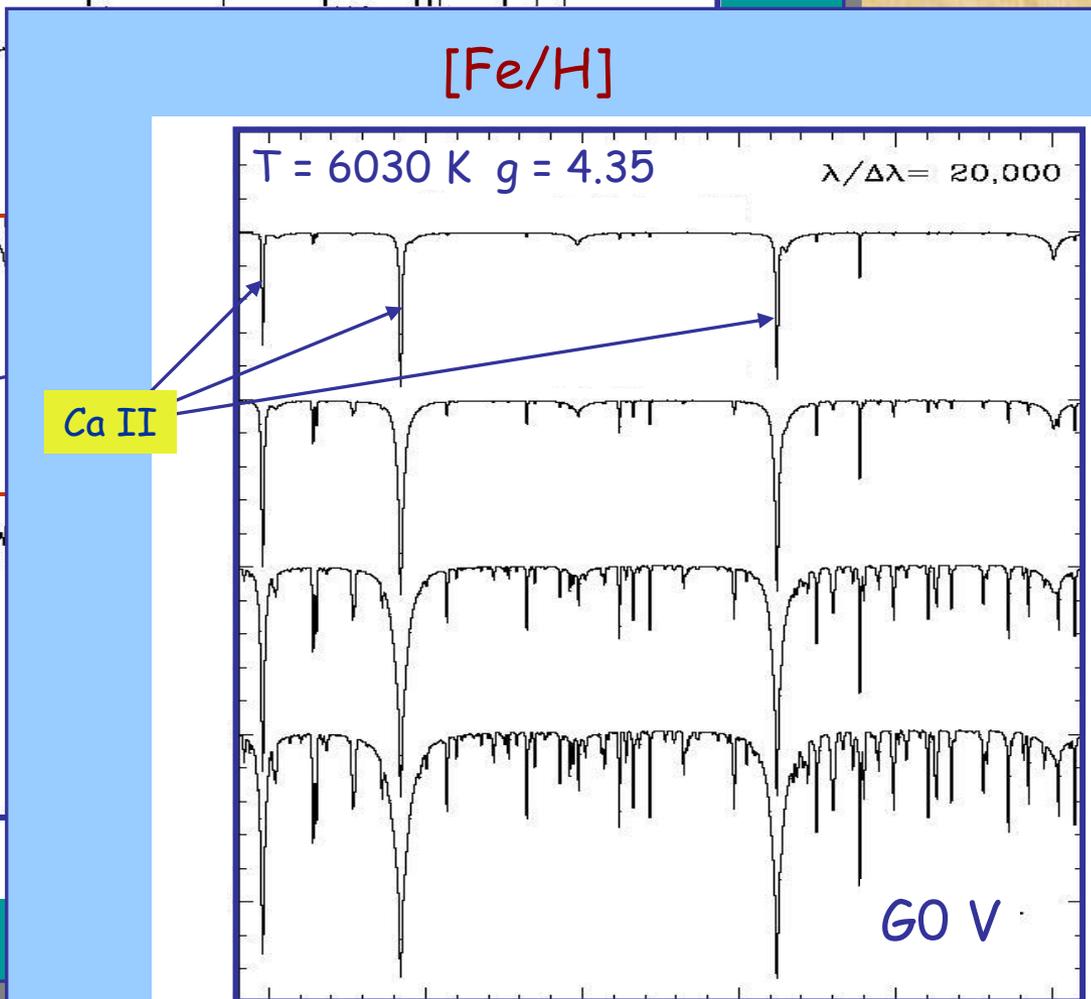
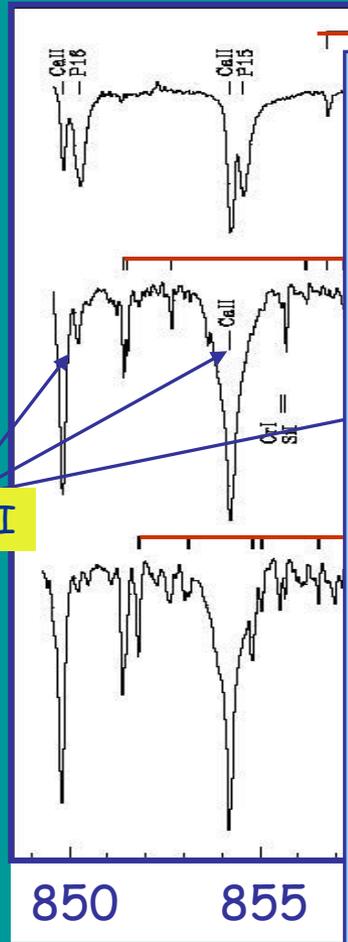
$[Z/Z_{\odot}] = -1.0$

$[Z/Z_{\odot}] = -0.0$

$[Z/Z_{\odot}] = +0.5$

GO V

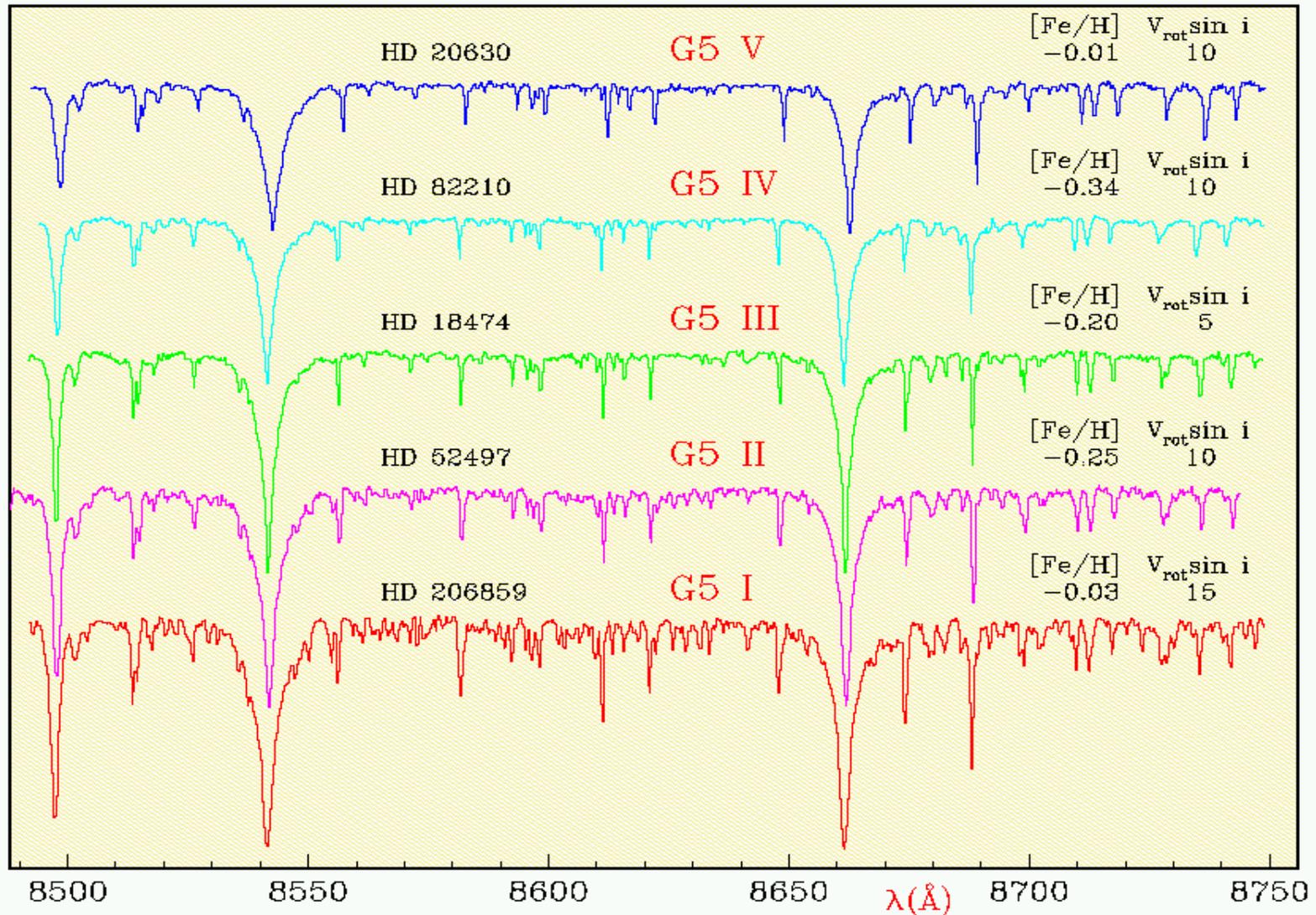
$\lambda \text{ (nm)}$  850 855 860 865 870 875



# Спектроскопия GAIA: светимость (ускорение силы тяжести $lg g$ )

Munari & Tomasella:  
(1999) A&AS 137, 521

High Resolution spectroscopy over 8500–8750 Å for GAIA  
I. Mapping the MKK classification systems



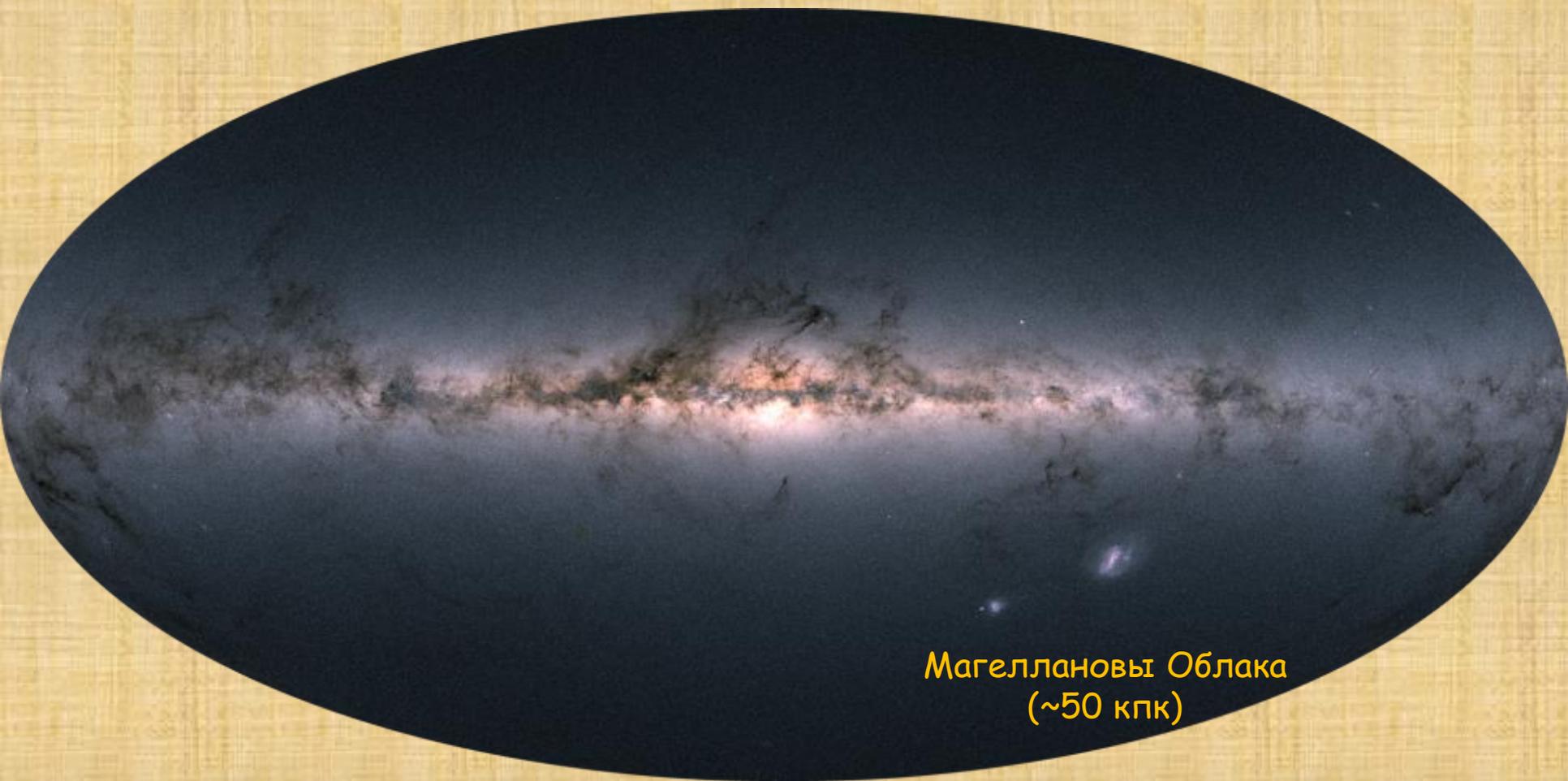
- **GAIA (ESA, работа в 2014-2021+)**
  - Основные наблюдательные задачи проекта:
    - Измерение высокоточных координат, тригонометрических параллаксов и собственных движений  $>1.7$  млрд. звёзд до  $22^m$  (В 100 раз точнее HIPPARCOS !)
    - Двухцветная фотометрия и спектроскопия
- 

- За первые 22 месяца работы на орбите (Data Release 2, 25.04.2018) получены самые точные современные координаты, параллаксы и собственные движения  
~1.33 млрд. звёзд

- **Часть III: первые результаты проекта**

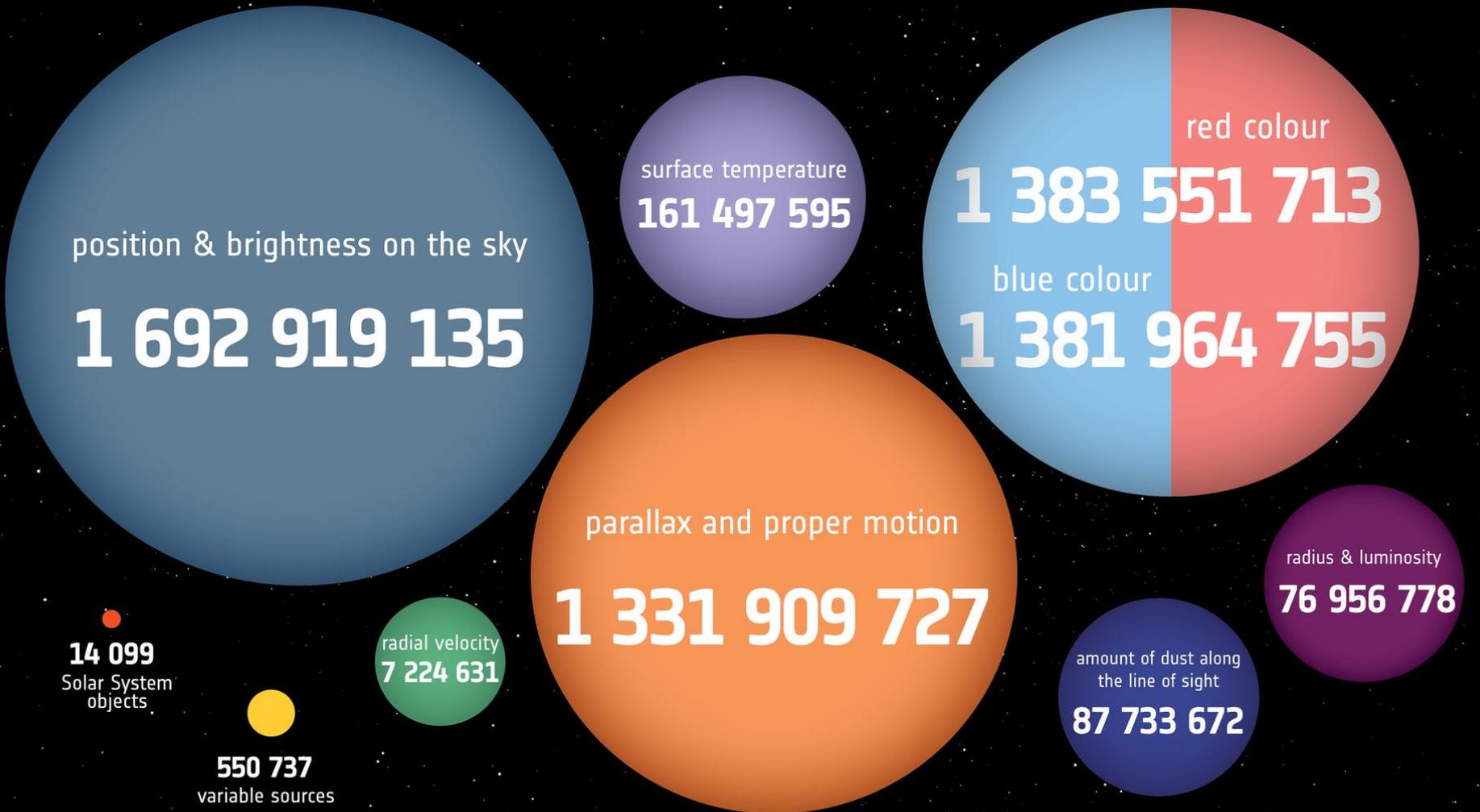
- Диаграмма Герцшпрунга-Рассела
- Переменные звёзды
- Кинематика Галактики

# Цветная карта Млечного Пути по данным GAIA DR2



# На сайте GAIA: Data Release 2

Статистика измерений GAIA DR2 (25.04.2018)



Статистика  
GAIA  
DR2  
(25.04.  
2018)

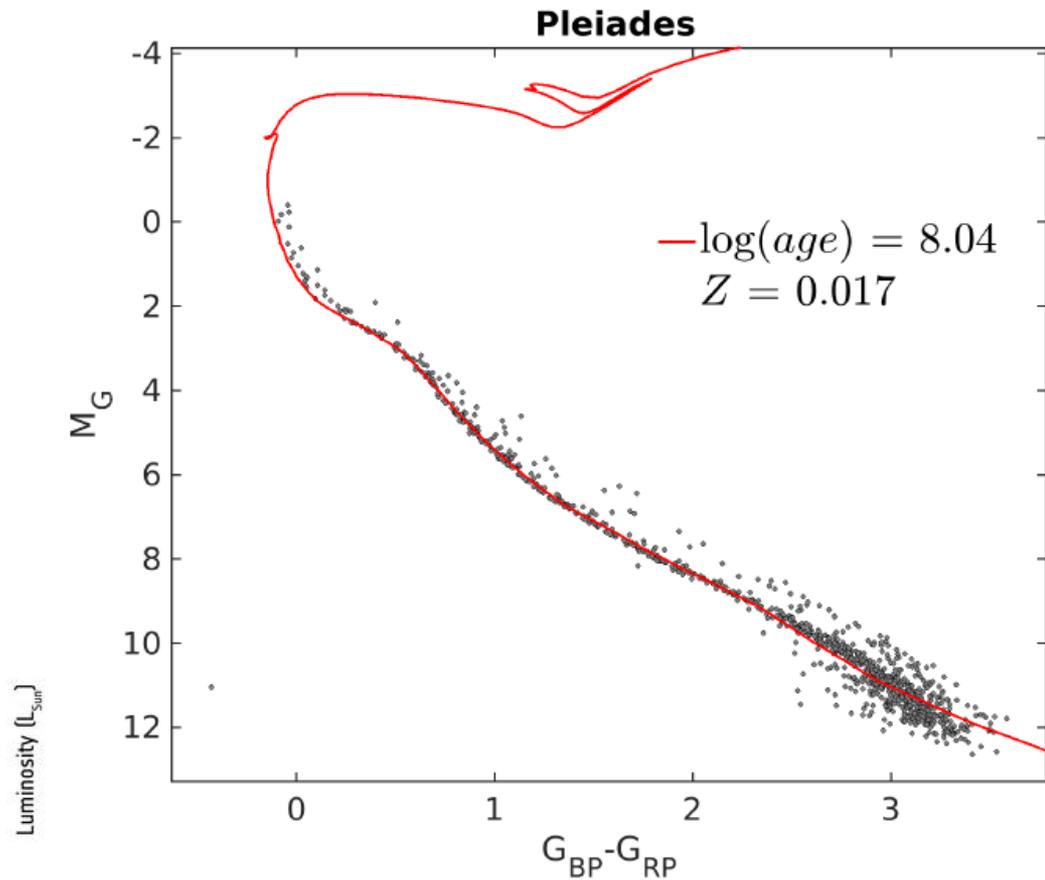
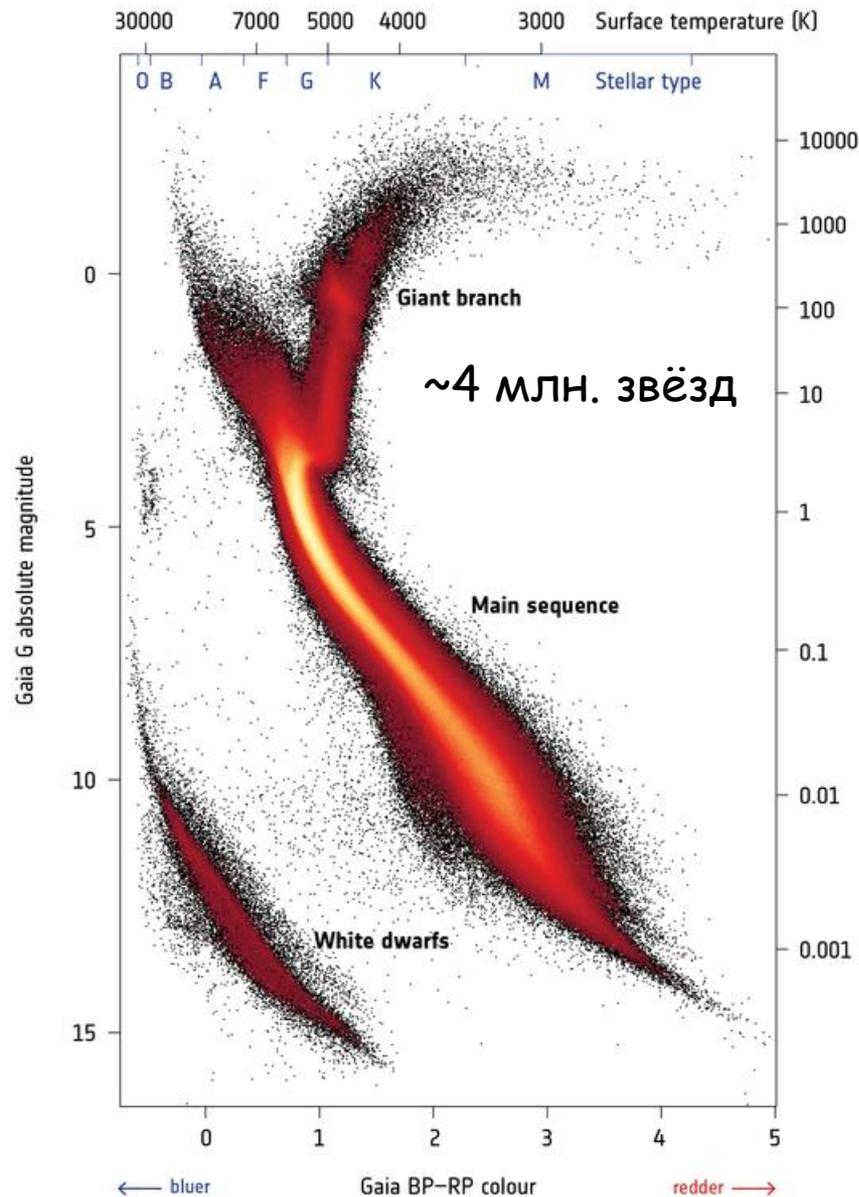
Типы объектов	Число объектов
Всего объектов	1 692 919 135
Полное решение (коорд.+парал.+собств. движ.)	1 331 909 727
Только координаты	361 009 408
<b>Квazarы, задающие систему координат ICRF3</b>	2820
Открыто квазаров	556 869
Блеск в полосе G	1 692 919 135
Блеск в полосе $G_B$	1 381 964 755
Блеск в полосе $G_R$	1 383 551 713
Лучевые скорости	7 224 631
Переменные звёзды	550 737
ПЗ: классифицировано по типам	363 969
Кривые блеска	390 529
Эффективная температура	161 497 595
Поглощение	87 733 672
Избыток цвета	87 733 672
Радиусы	76 956 778
Светимости	76 956 778
Объекты Солнечной Системы	14 099

- Точность измерений в каталоге GAIA DR2 (используются только измерения GAIA !):
- Параллакс -
  - 40 мксд для  $G < 15 \text{ mag}$
  - 100 мксд для  $G = 17 \text{ mag}$
  - $\sim 0.7$  мксд для  $G \sim 20 \text{ mag}$
- Собственных движений -
  - 60 мксд/год для  $G < 15 \text{ mag}$
  - 200 мксд/год для  $G = 17 \text{ mag}$
  - $\sim 1.2$  мксд/год для  $G \sim 20 \text{ mag}$
- Лучевых скоростей ( $> 6$  млн. для  $4 < G < 13 \text{ mag}$  и  $3550\text{K} < T_{\text{eff}} < 6900\text{K}$ ) -
  - $\sim 0.2 - 0.3$  км/с для яркого конца и  $T_{\text{eff}} \sim 4750 \text{ K}$
  - $\sim 1.2$  км/с для слабого конца и  $T_{\text{eff}} \sim 4750\text{K}$
  - $\sim 2.5$  км/с для слабого конца и  $T_{\text{eff}} \sim 6500\text{K}$

- Громадные объёмы разнородной ("многомерной") информации ставят серьёзные задачи перед астрономами, использующими результаты работы GAIA
- **Big Data Analysis !**
- Опубликованы новые алгоритмы, например, поиска линейных структур (таких как звёздные потоки и "шлейфы" распадающихся звёздных скоплений и карликовых галактик) - STREAMFINDER

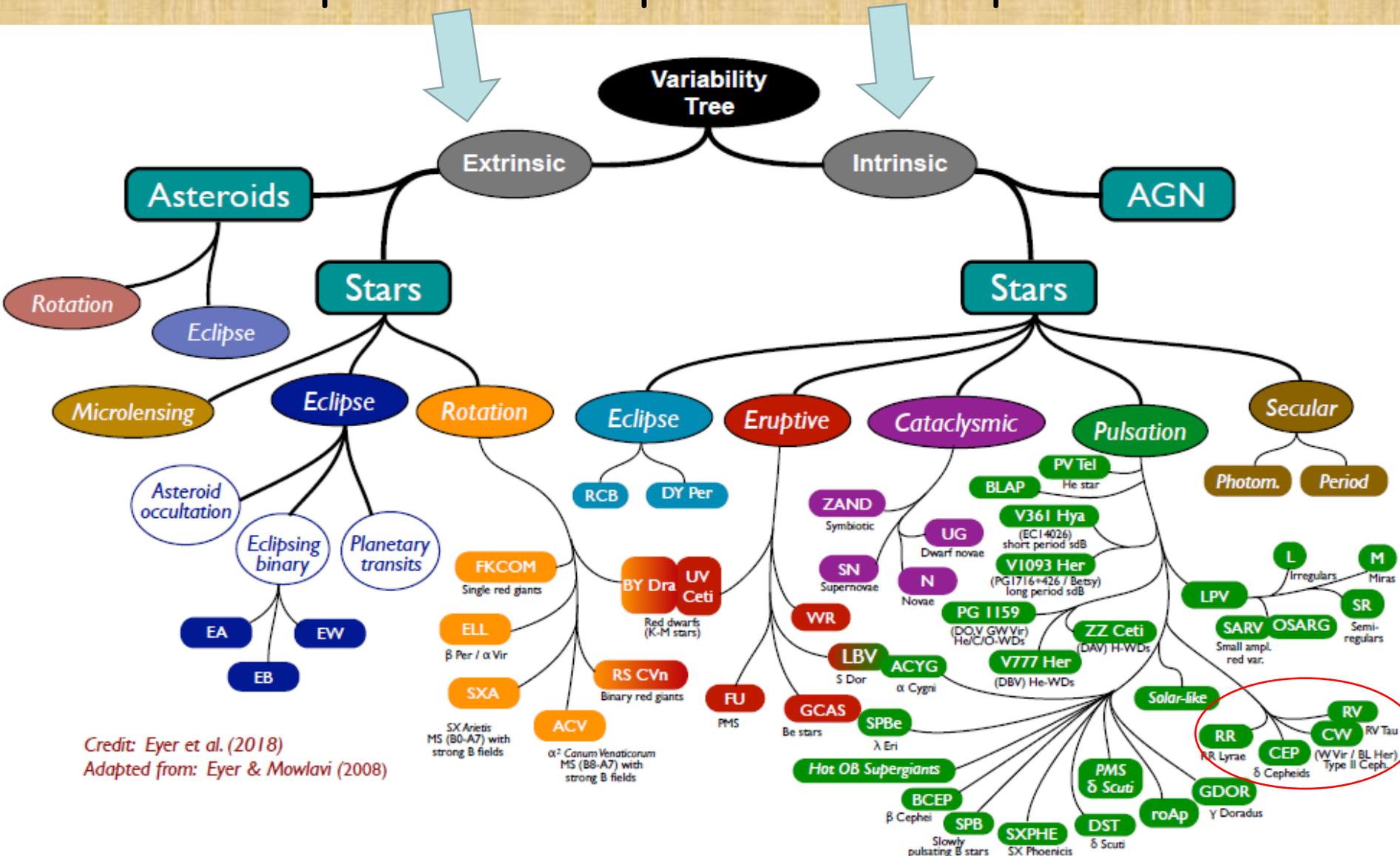
- Реальные измерения GAIA (DR2):
  - Анимация параллактических смещений звёзд приполярной области (для наглядности увеличены в 100000 раз)
  - Анимация собственных движений
- [ESA\\_Gaia\\_DR2\\_parallax\\_proper\\_motion\\_northern\\_sky.mp4](#)

# → GAIA'S HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAM



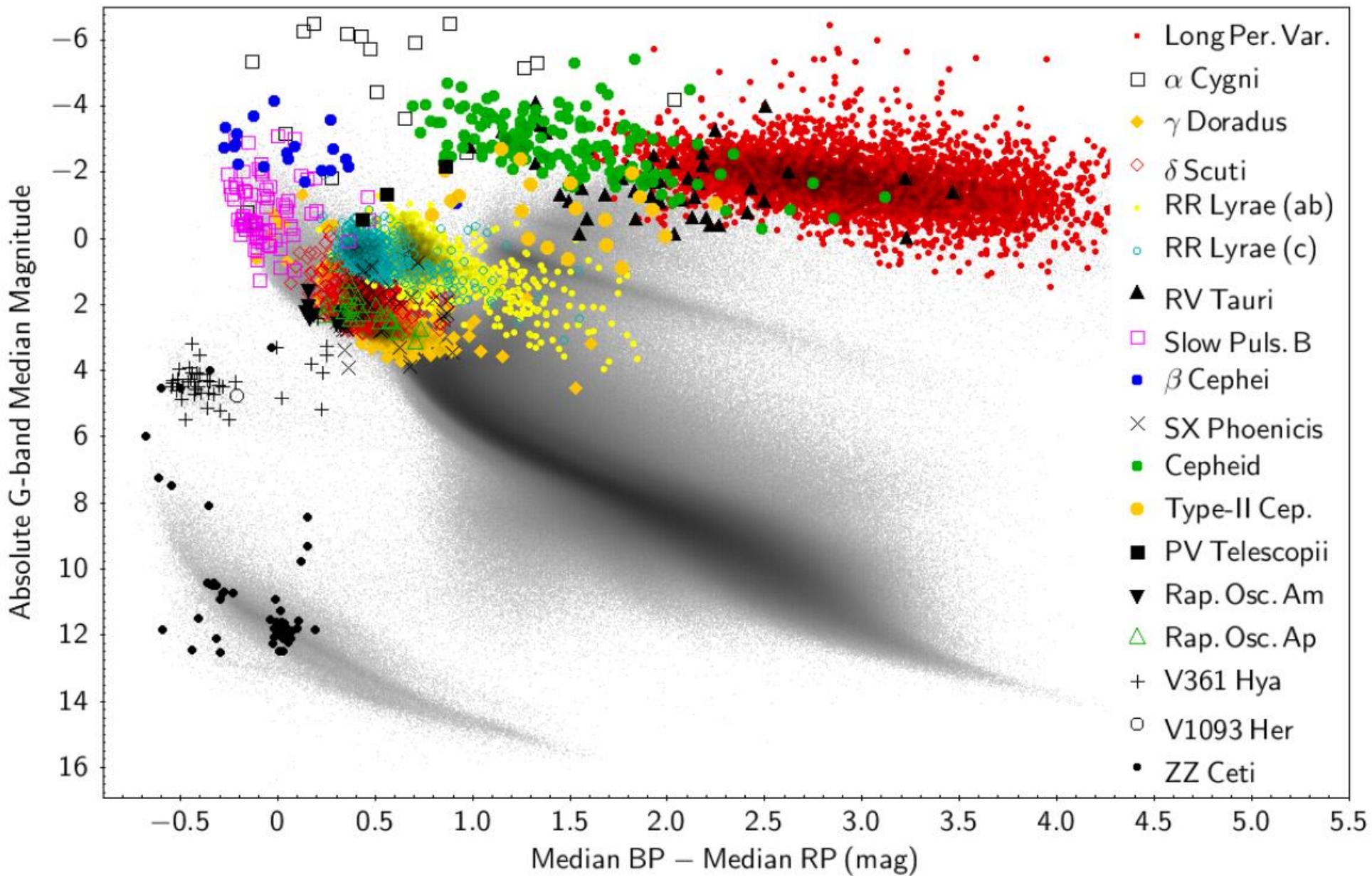
Наблюдаемая диаграмма ГР для Плеяд (справа) идеально согласуется с современными расчётами звёздной эволюции (показана изохрона ~100 млн. лет)

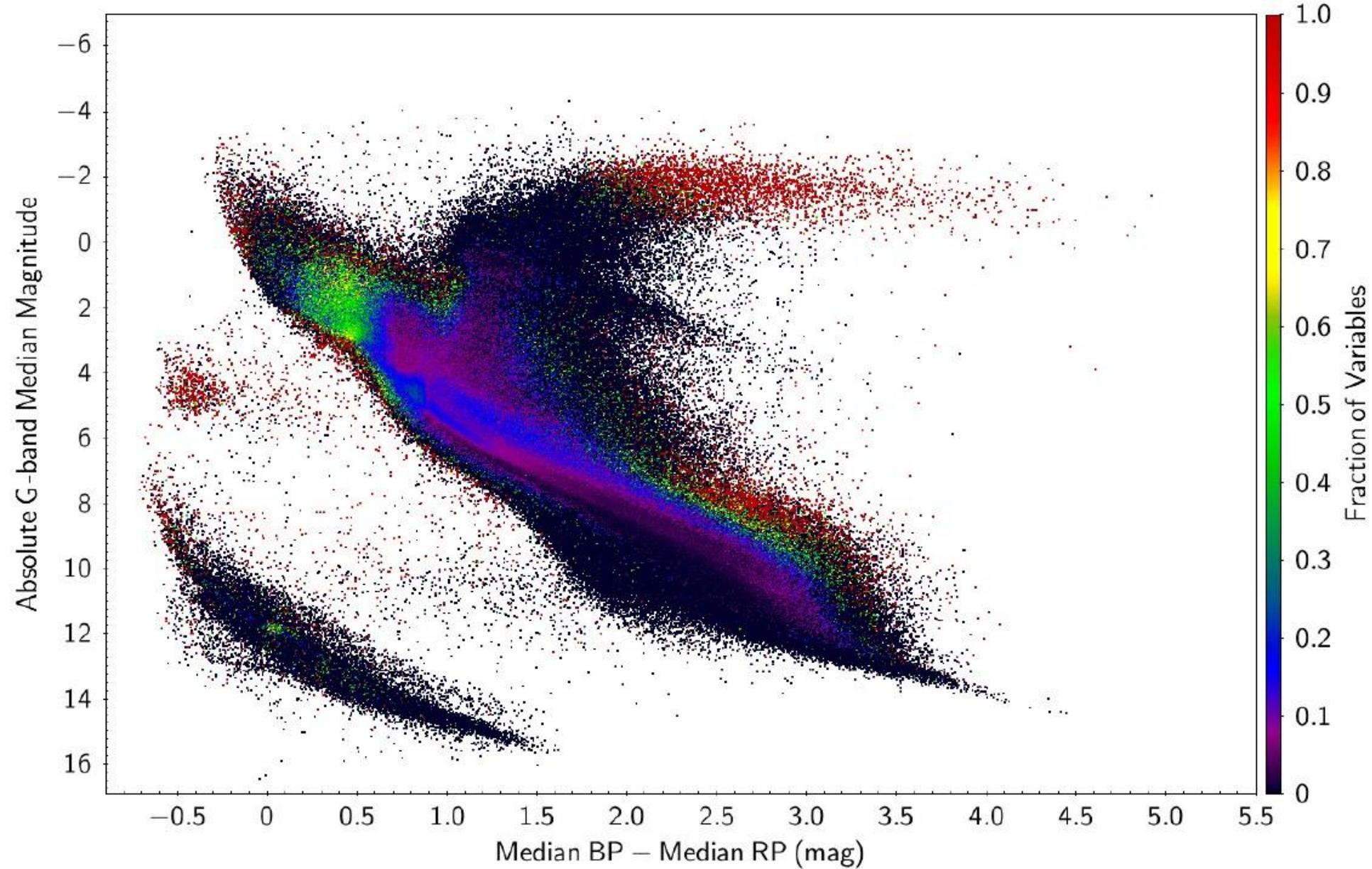
# Изучено более 500 тыс. переменных объектов “Генеалогическое древо” переменных звёзд: “геометрическая” и физическая переменность



Credit: Eyer et al. (2018)  
 Adapted from: Eyer & Mowlavi (2008)

# GAIA DR2: Переменные звёзды на диаграмме ГР

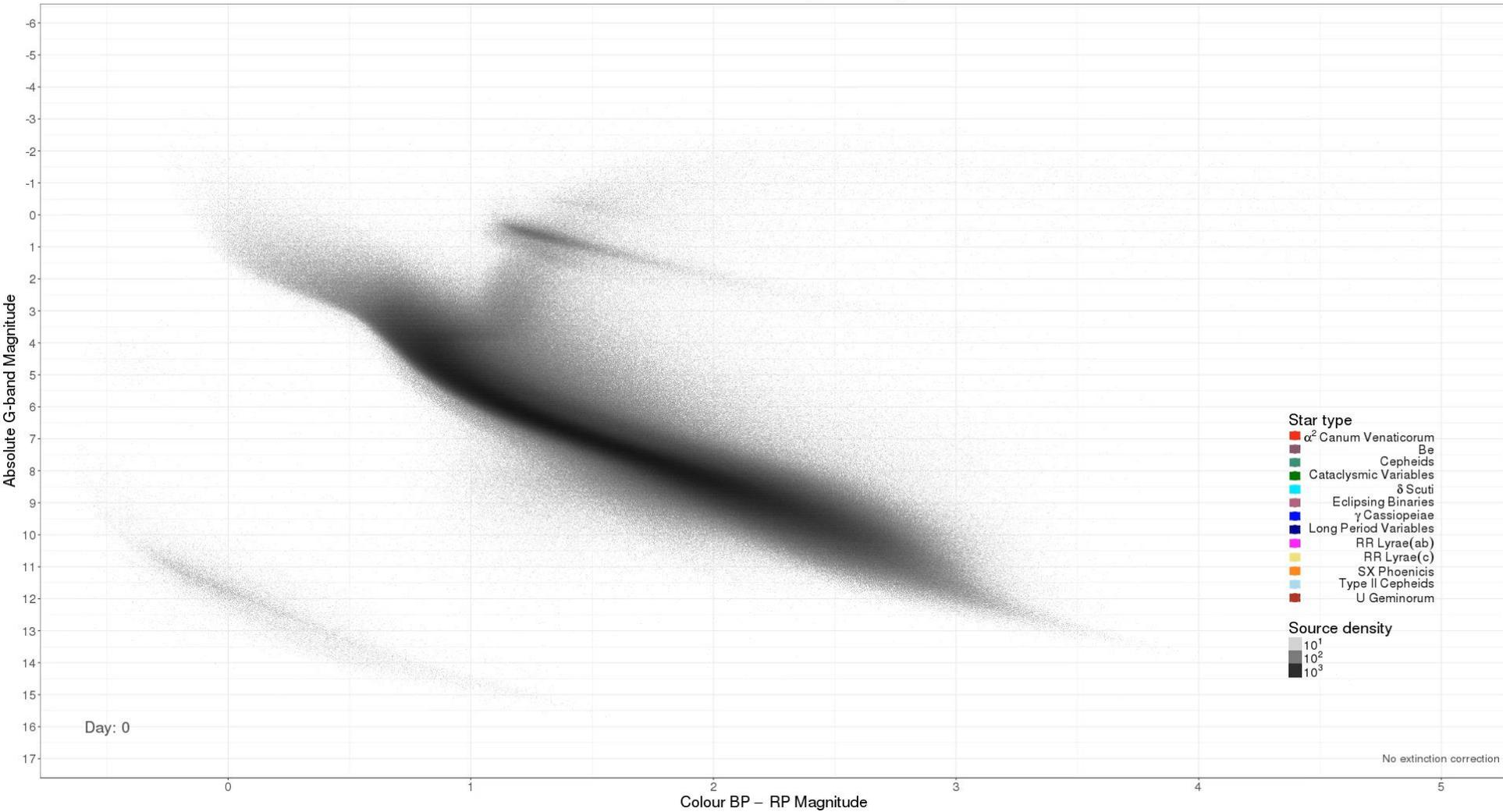




- Доля звёзд на диаграмме ГР, меняющих блеск

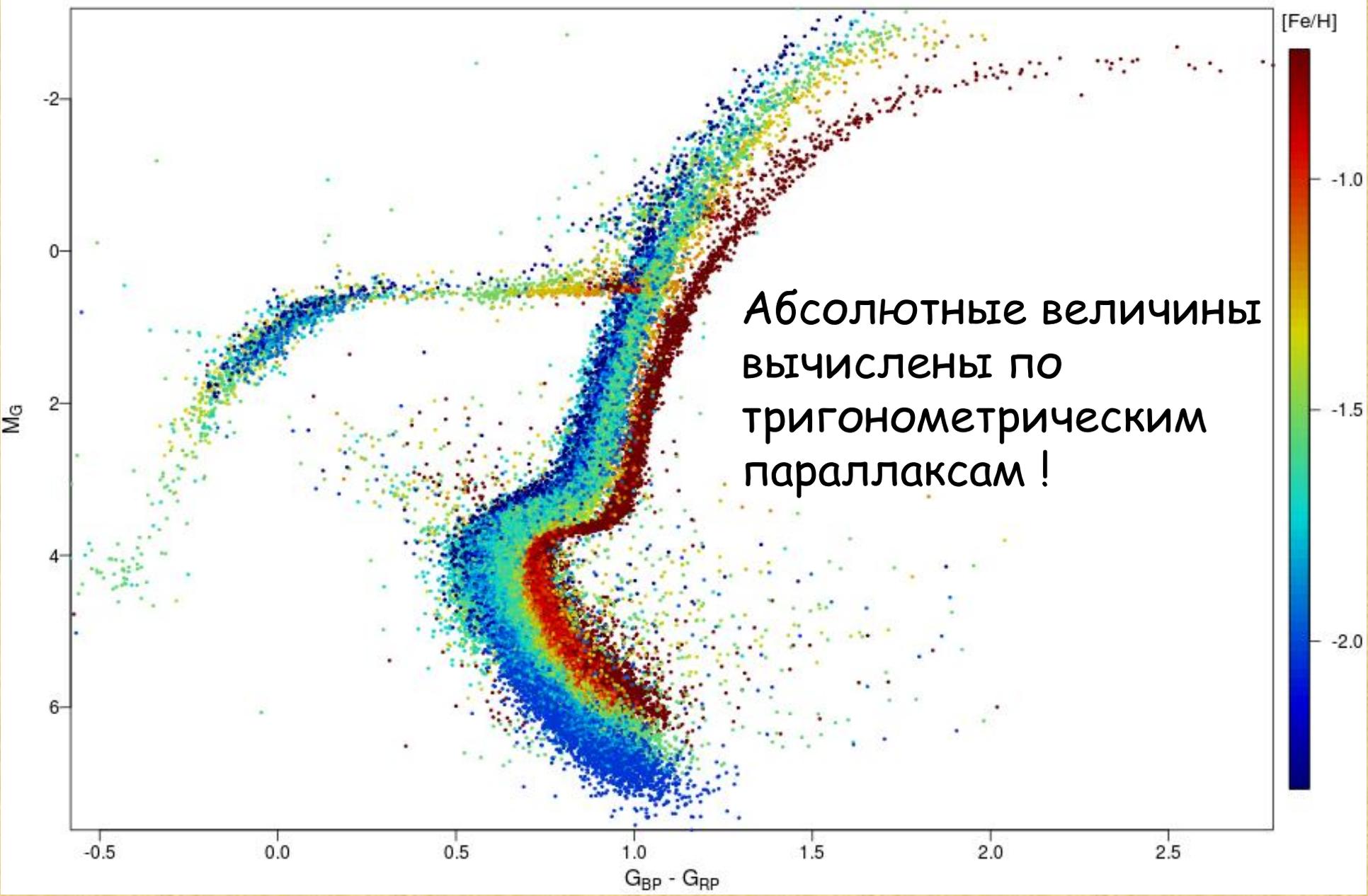
- “Треки” переменных звёзд разных типов на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (показатель цвета - абсолютная звёздная величина) по данным GAIA DR2
- Файл [ESA\\_Gaia\\_DR2\\_Variable\\_stars\\_in\\_HRD.mp4](#)

Motion in the colour-magnitude diagram

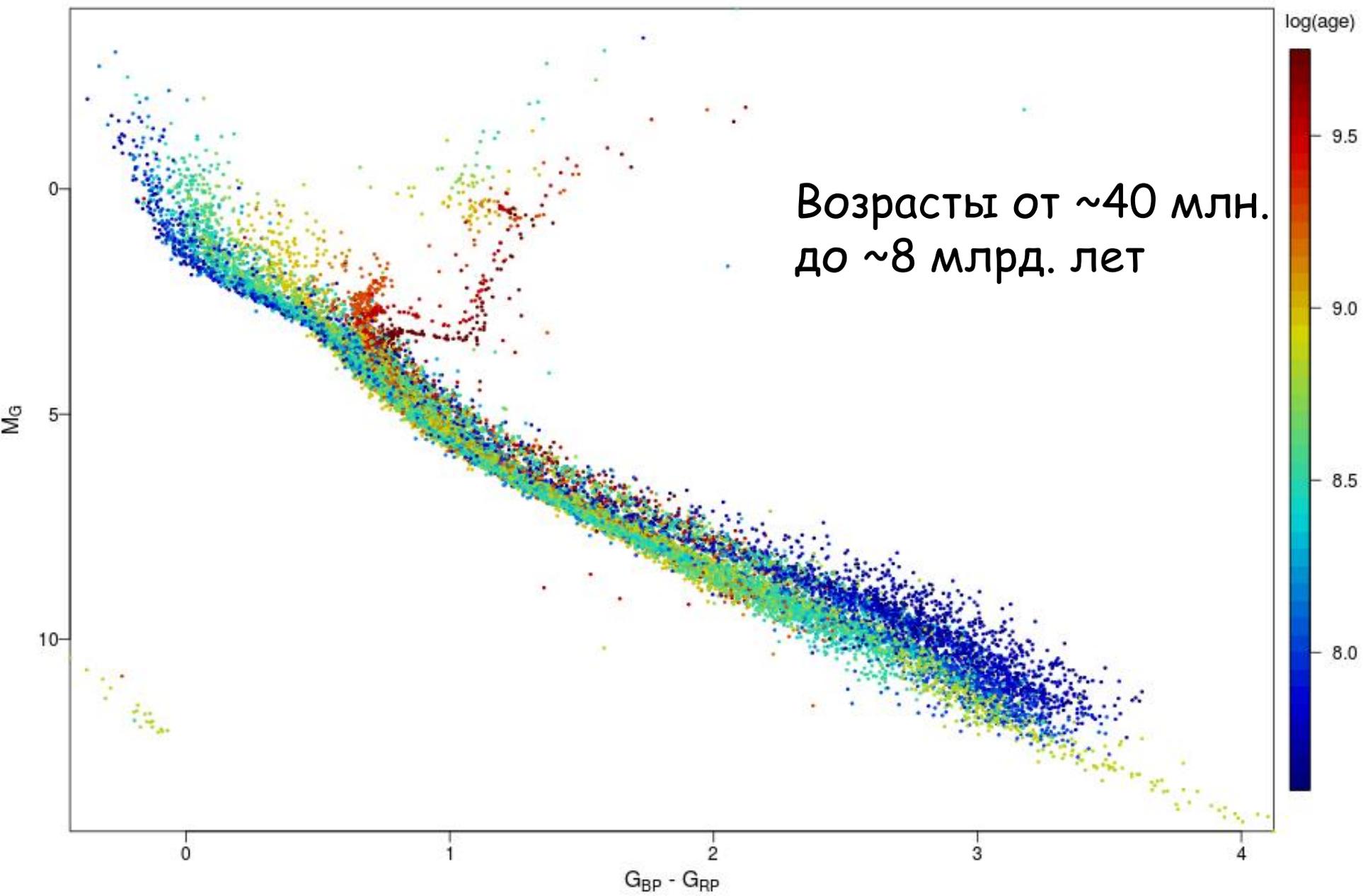


- Треки переменных звёзд на диаграмме "цвет - светимость (абсолютная звёздная величина)" по наблюдениям GAIA

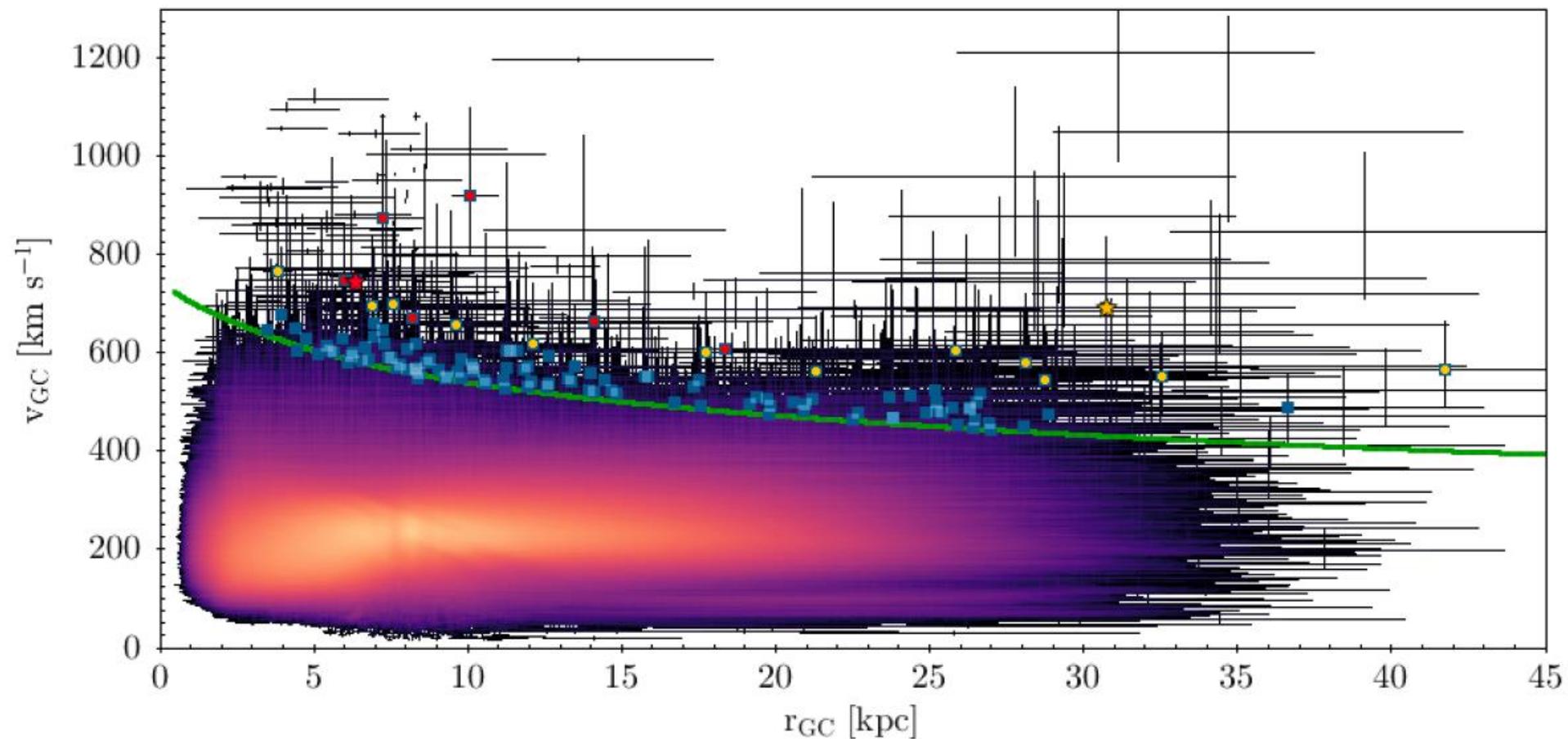
# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для 14 близких шаровых скоплений разной металличности в GAIA DR2



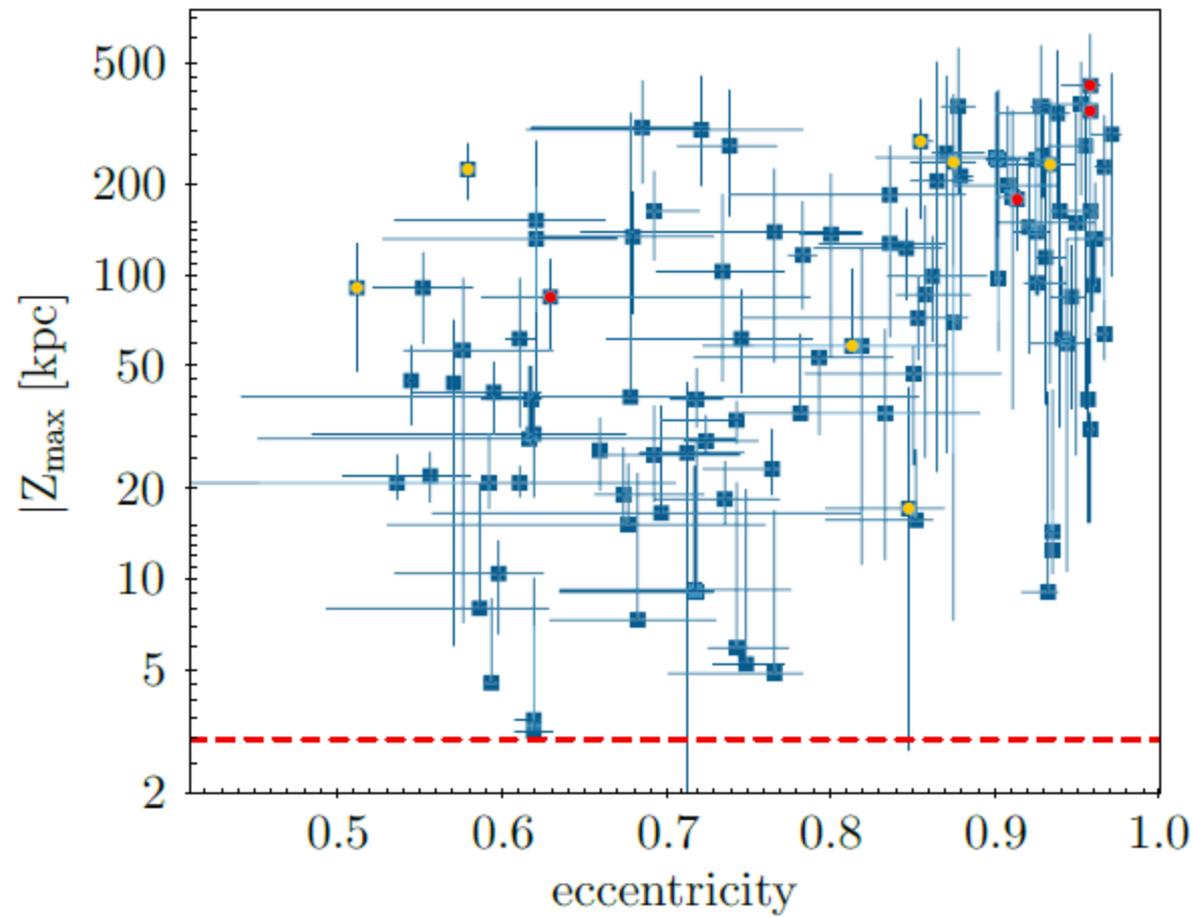
# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для 32 рассеянных скоплений разного возраста в *GAIA* DR2



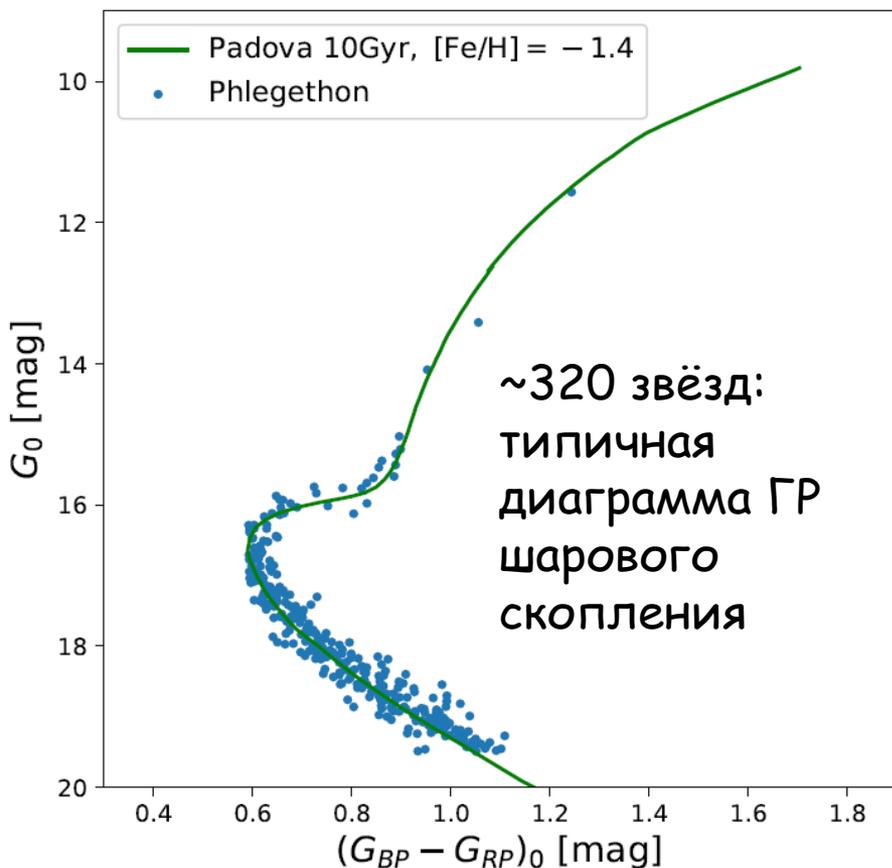
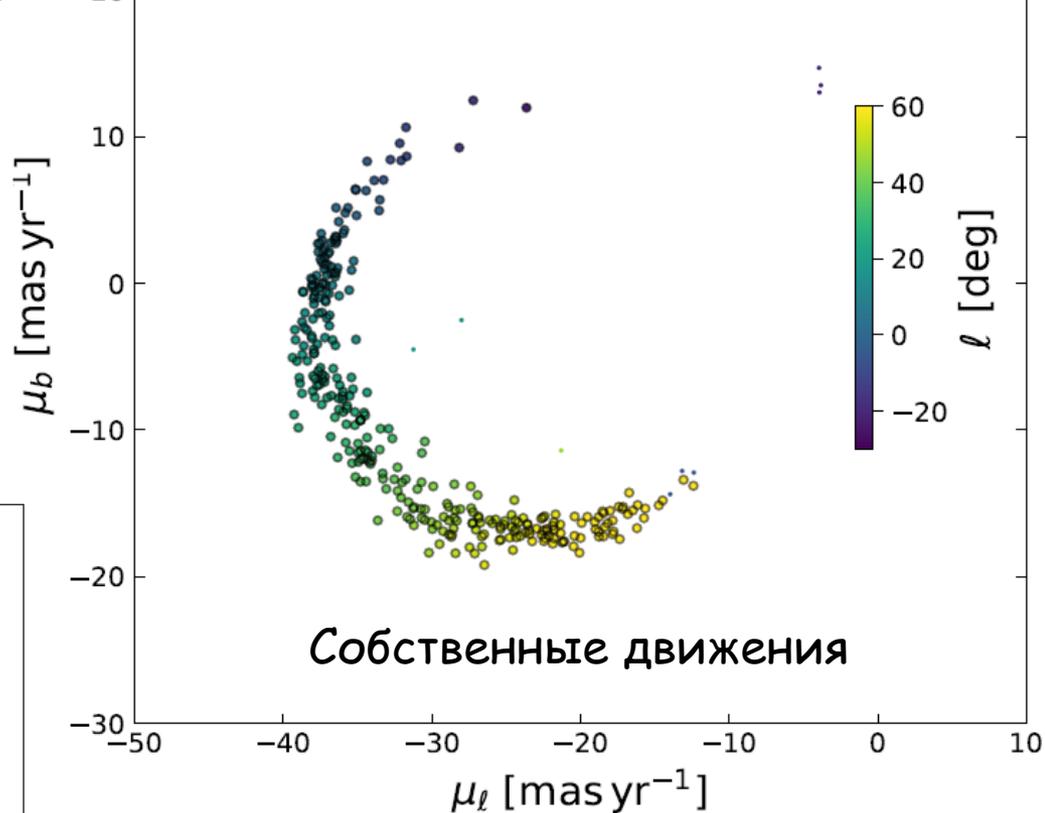
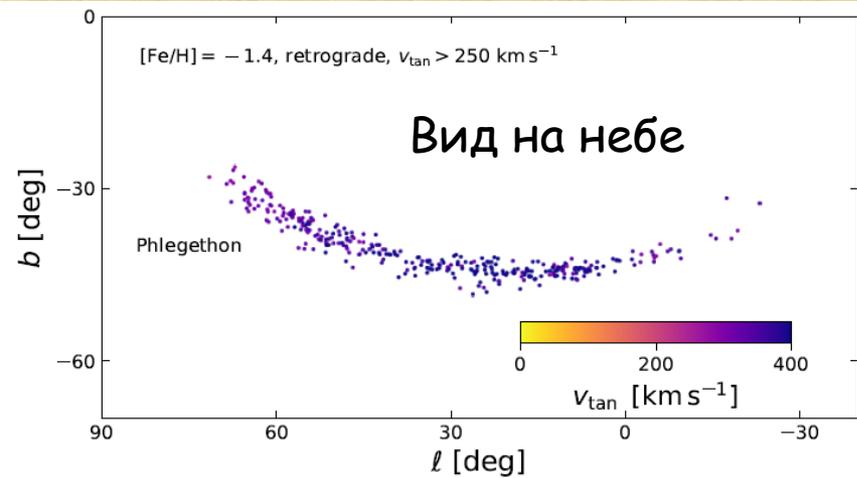
- Результаты GAIA особенно важны для изучения звёздных движений: беспрецедентно высокая точность (угловых) собственных движений звёзд и, следовательно, тангенциальных скоростей
- Характерная точность собственных движений порядка 0.040 мсд/год означает, что на расстоянии  $\sim 5$  кпк мы знаем скорость звёзды поперёк луча зрения с ошибкой порядка 1 км/с – **впервые поперечные скорости стали не хуже скоростей вдоль луча зрения !**
- Можно исследовать “тонкие” кинематические эффекты в диске Млечного Пути (например, влияние возмущений гравитационного потенциала) и надёжно выделять звёздные потоки



- Поиск быстролетающих звёзд по данным *GAIA* DR2
- **Зелёная линия:** изменение 2-й космической (критической) скорости с расстоянием от центра Млечного Пути



- Высота над плоскостью Млечного Пути (в кпк) и эксцентричность орбит быстрых звёзд
- Около 20 звёзд, вероятно, гравитационно не связаны с нашей Галактикой



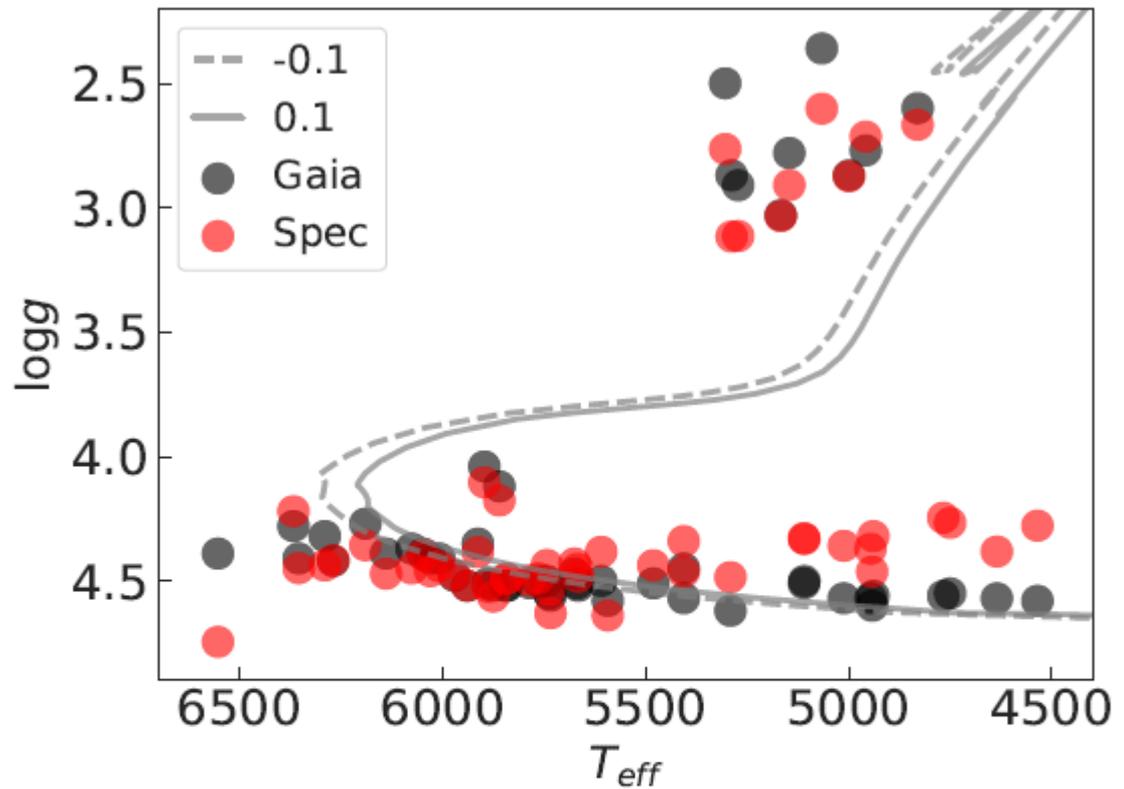
75-градусная звёздная "дуга" ~в 3.8 кпк от Солнца: остаток распавшегося из-за приливных сил и динамического трения шарового скопления "Флегетон" возрастом ~10 млрд. лет

Хорошее средство изучения гравитационного поля Млечного Пути

Поиск "сестёр"  
Солнца (по  
общему звёздному  
скоплению, в  
котором они  
родились ~4.5  
млрд. лет назад)  
по спектральным,  
астрометрическим  
и химическим  
данным,

полученных также  
наземными  
средствами

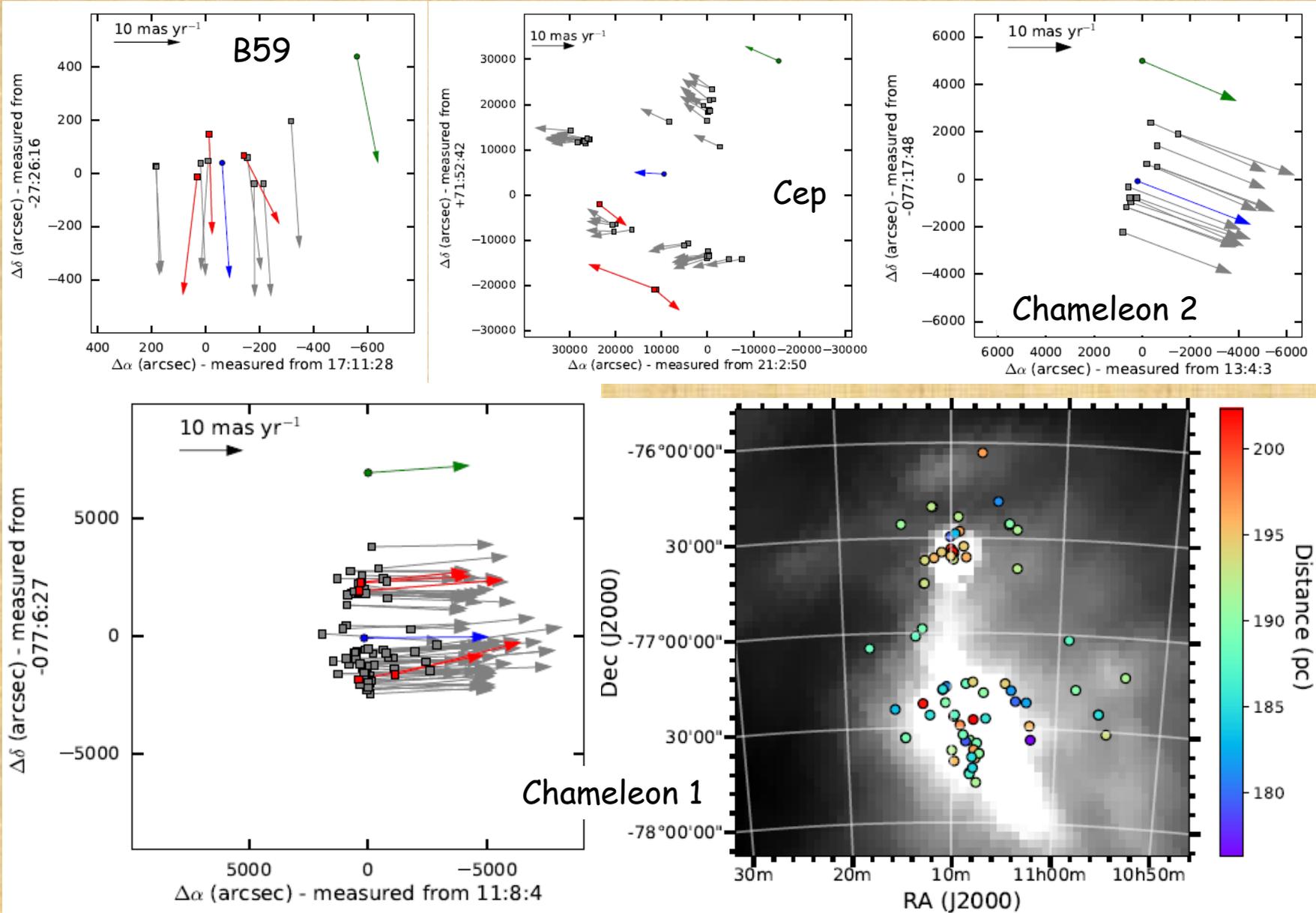
Из 55 звёзд  
найдено 4  
кандидата, лучший  
из них **HD186302**

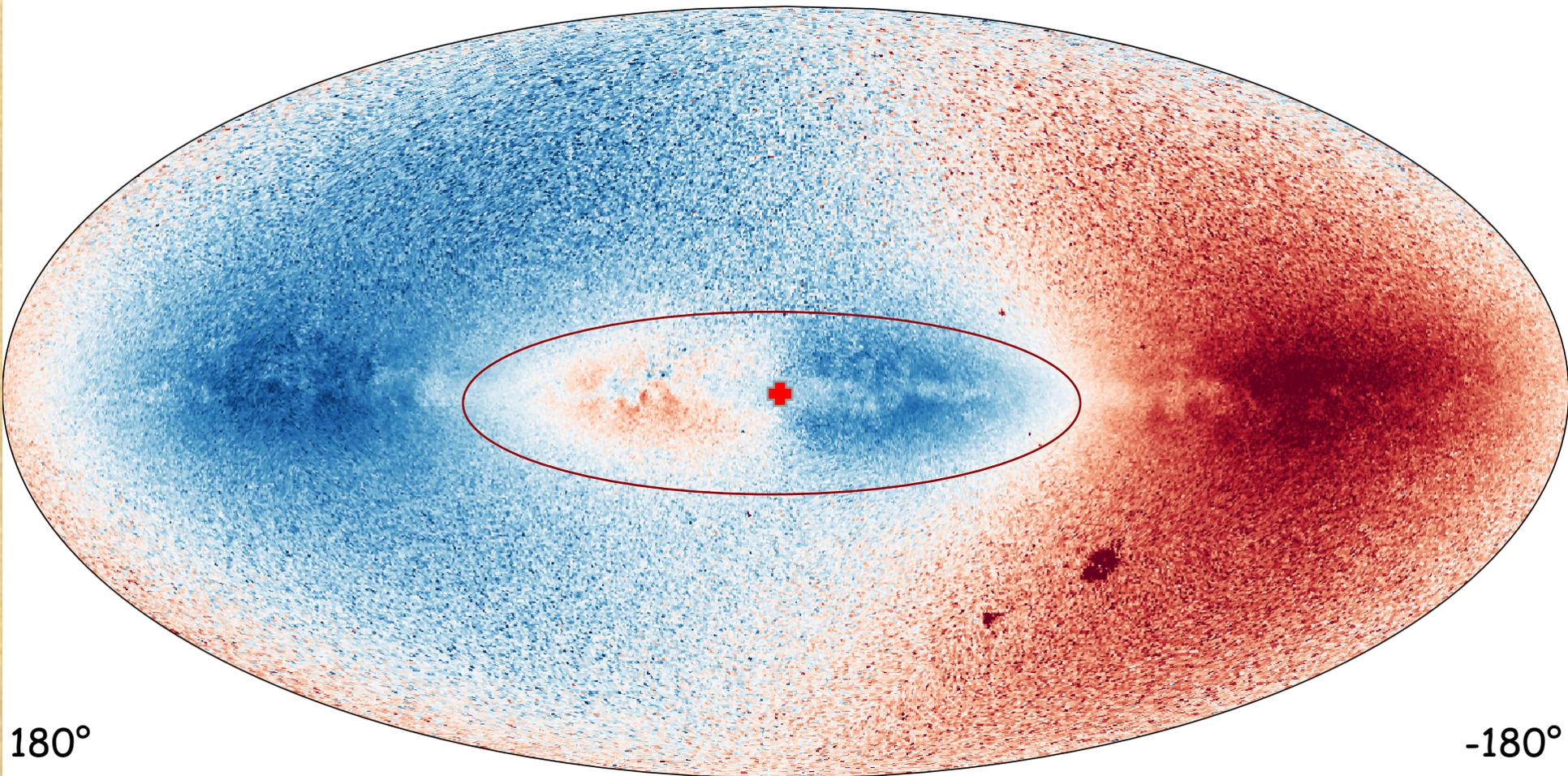


**Fig. 2.** HR diagram for the sample stars with the spectroscopic (Spec) and trigonometric (Gaia) surface gravities. The solar age isochrones for stars with metallicity  $-0.1$  and  $0.1$  dex are shown in gray.

Это карлик спектрального класса G3V  
на расстоянии около 6 пк от Солнца

# Дружное движение молодых звёздных объектов в близких областях звездообразования в GAIA DR2





180°

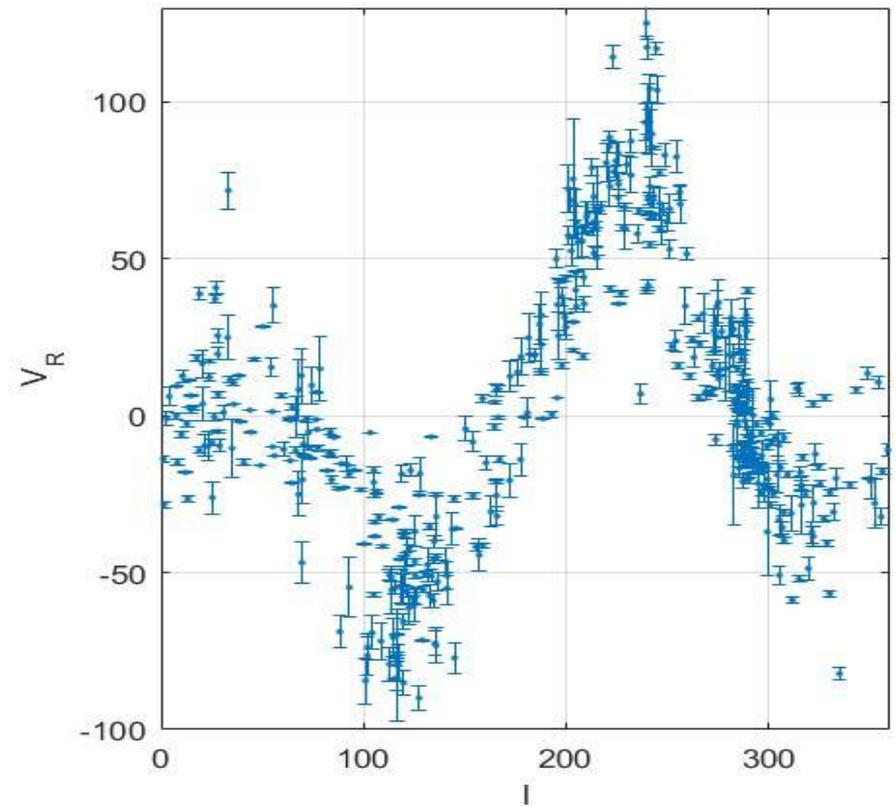
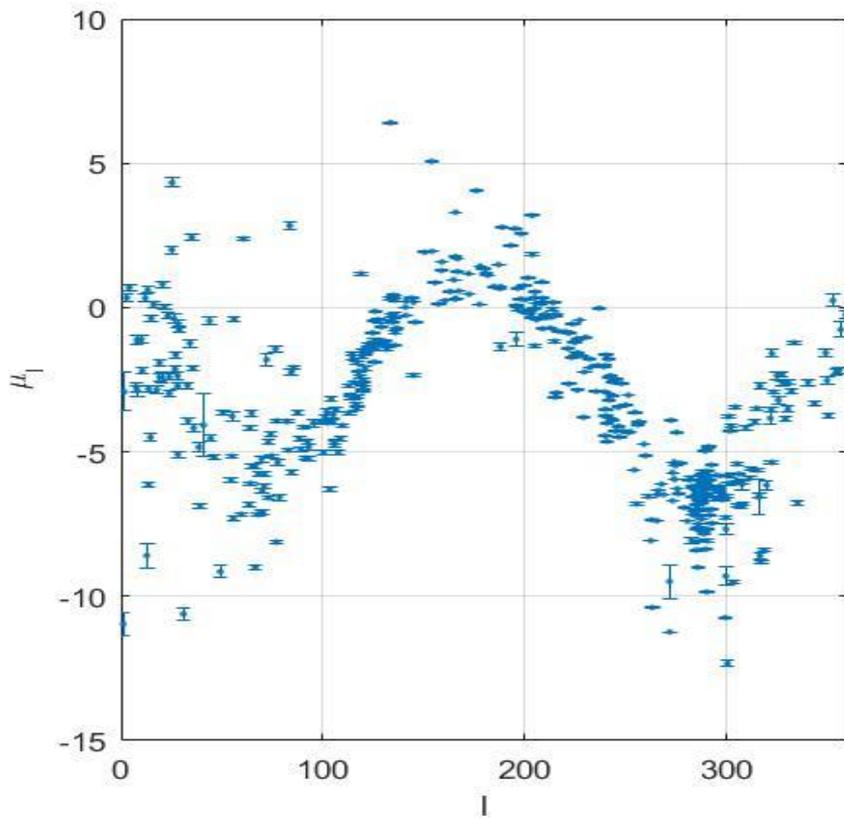
-180°

Средние лучевые скорости звёзд *GAIA* DR2 в зависимости от галактической долготы

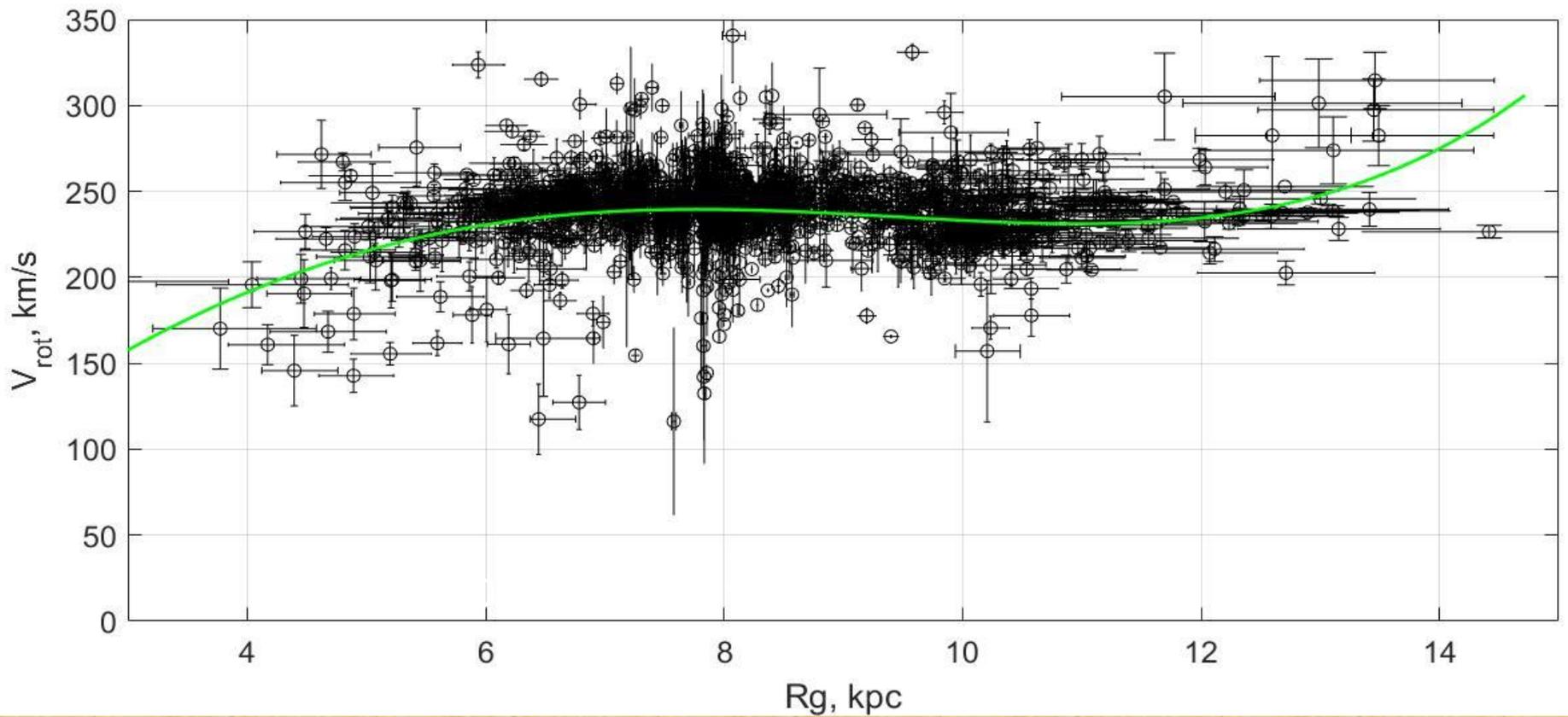
Красный цвет: удаление

Синий цвет: приближение

Следствие вращения диска Галактики

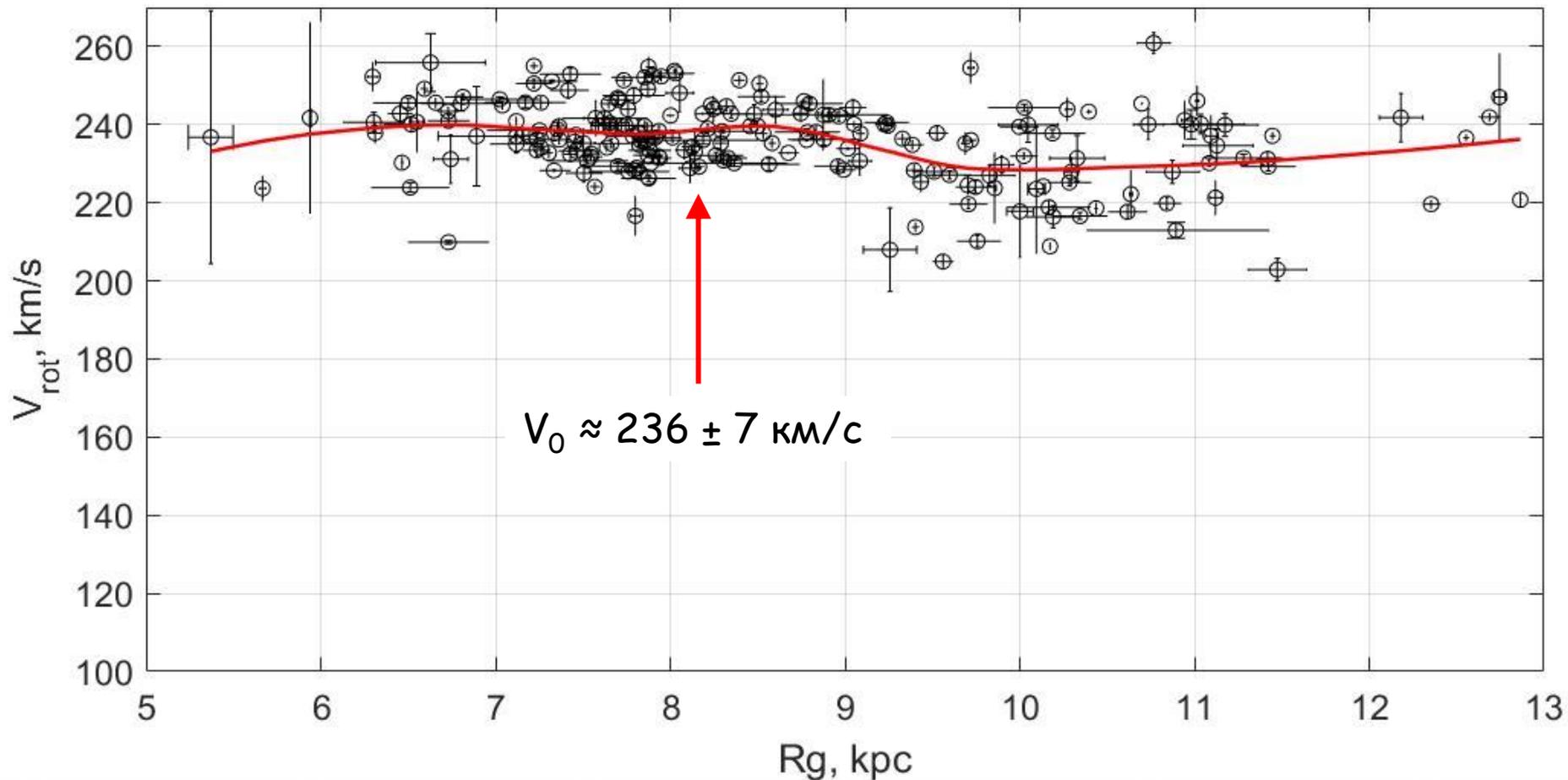


“Двойная волна” в собственных движениях по галактической долготе и в лучевых скоростях для выборки 530 Цфеид Млечного Пути (GAIA DR2) – свидетельство дифференциального вращения Галактики (с угловой скоростью, зависящей от расстояния до центра Галактики)  
**Потрясающая точность собственных движений !**



Скорость вращения Млечного Пути, определённая по 2010 горячим OB-звёздам с параллаксами GAIA DR2

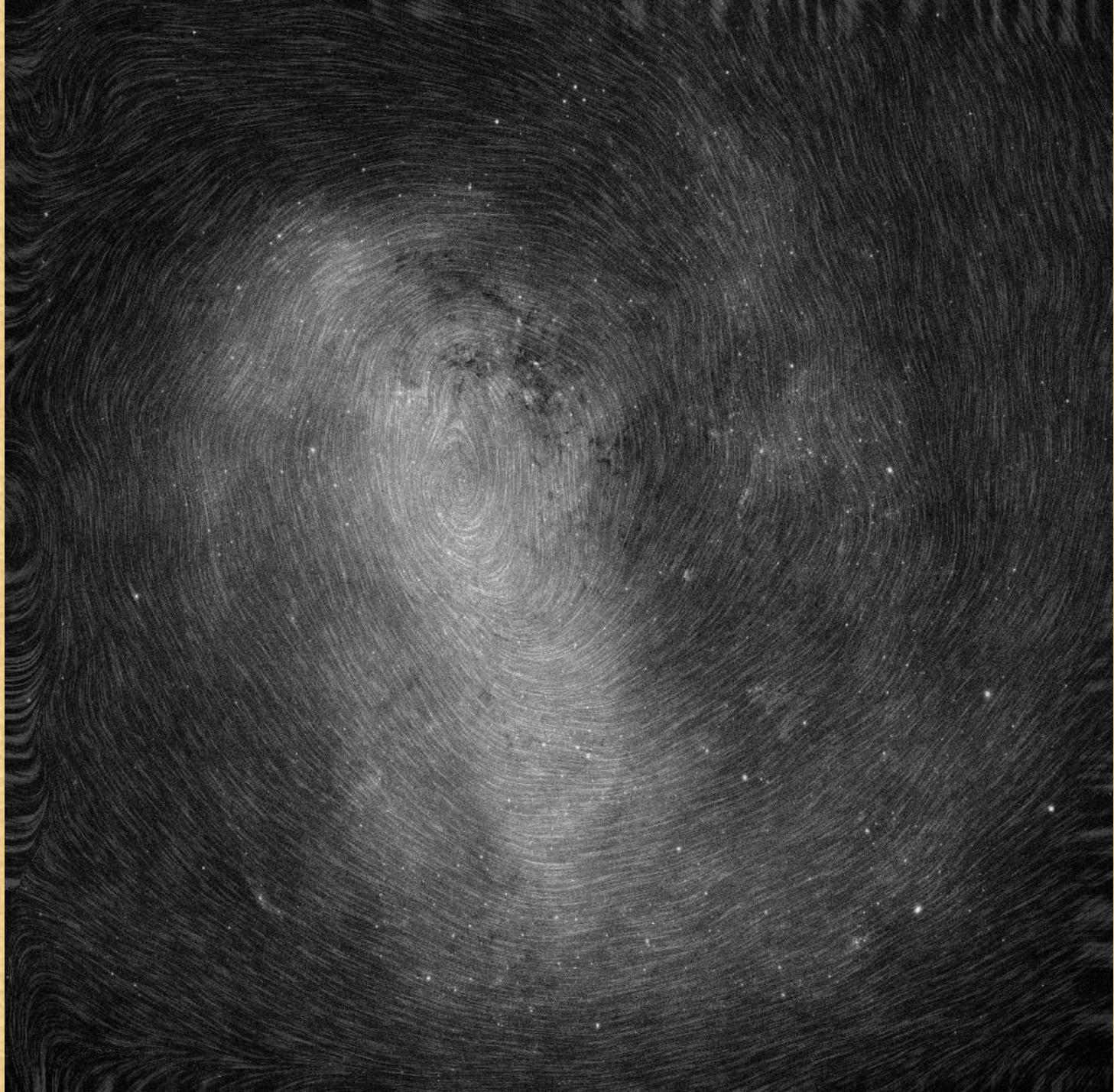
Скорость вращения на расстоянии Солнца (~8.2 кпк) примерно 240 км/с



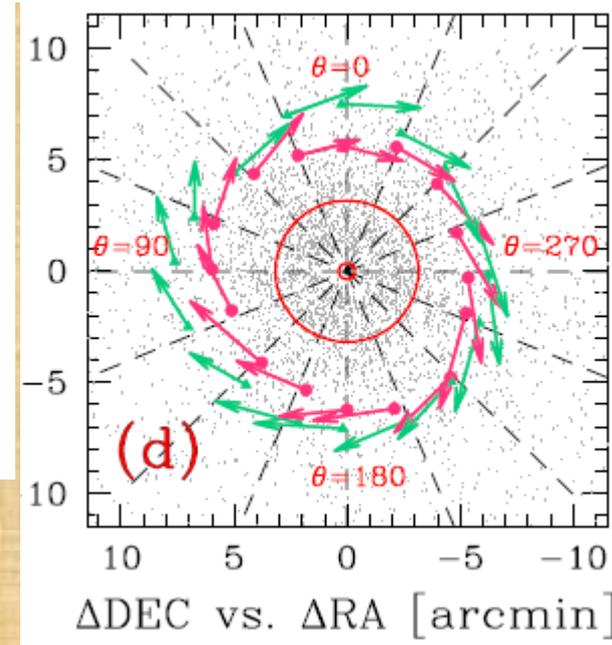
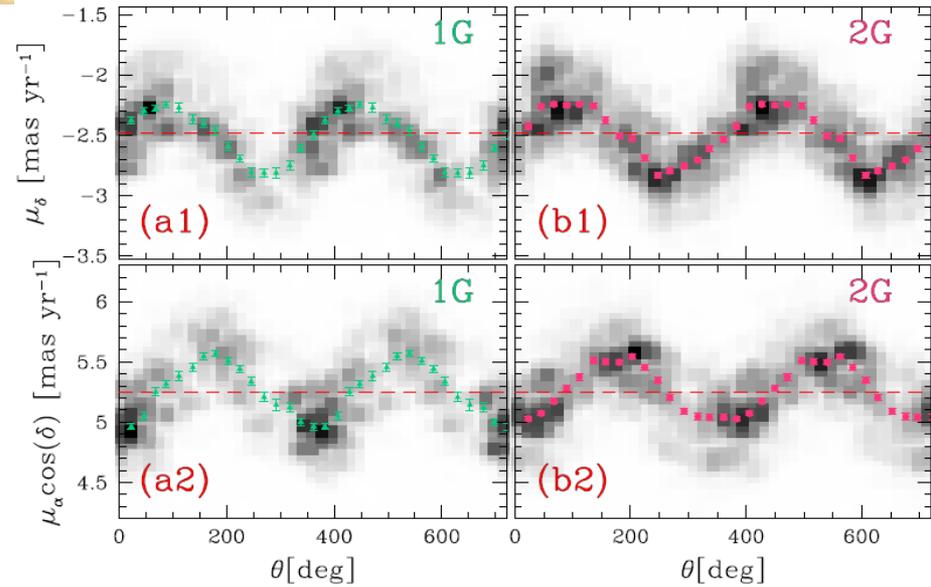
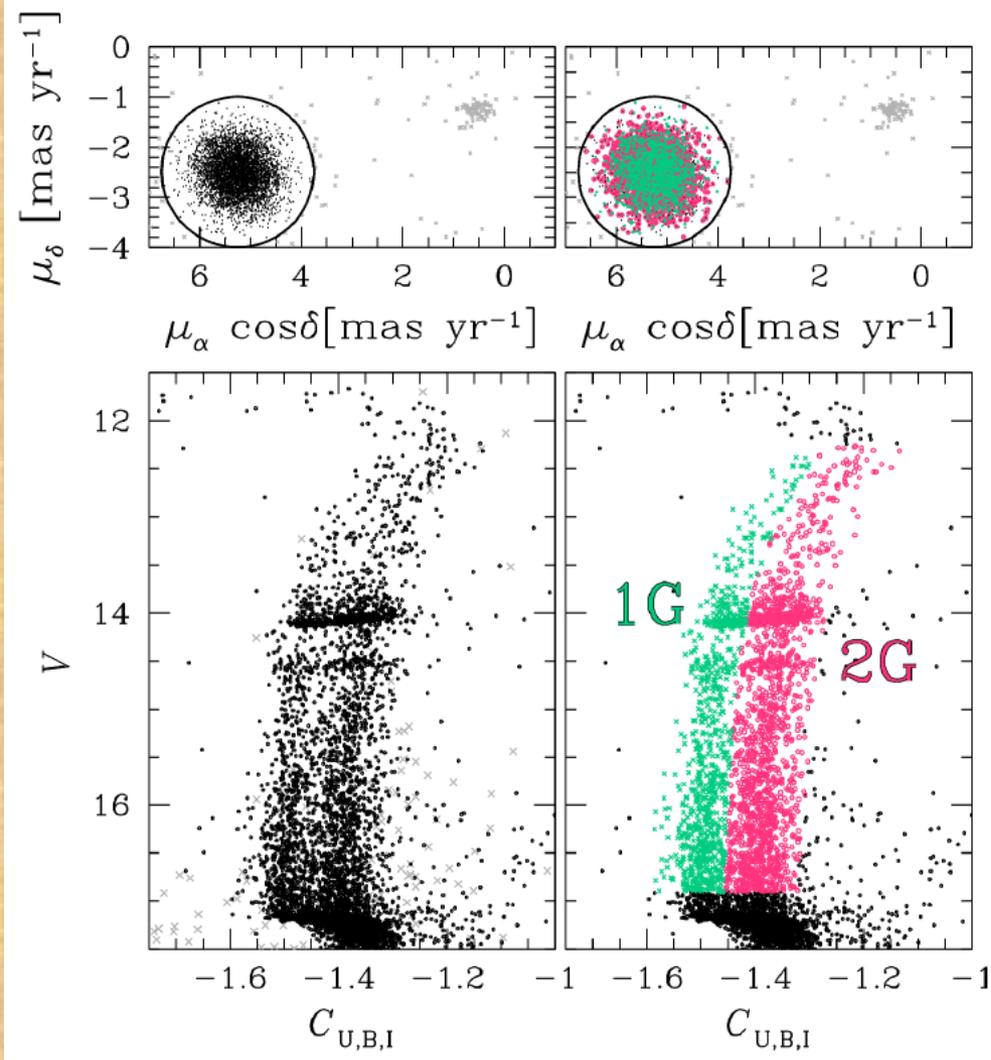
Скорость вращения Млечного Пути, определённая по Цефеидам Млечного Пути с собственными движениями GAIA DR2

Фотометрические шкалы расстояний Цефеид пока лучше...

Прямые  
наблюдения  
вращения  
Большого  
Магелланова  
Облака  
(расстояние  
~50 кпк !)

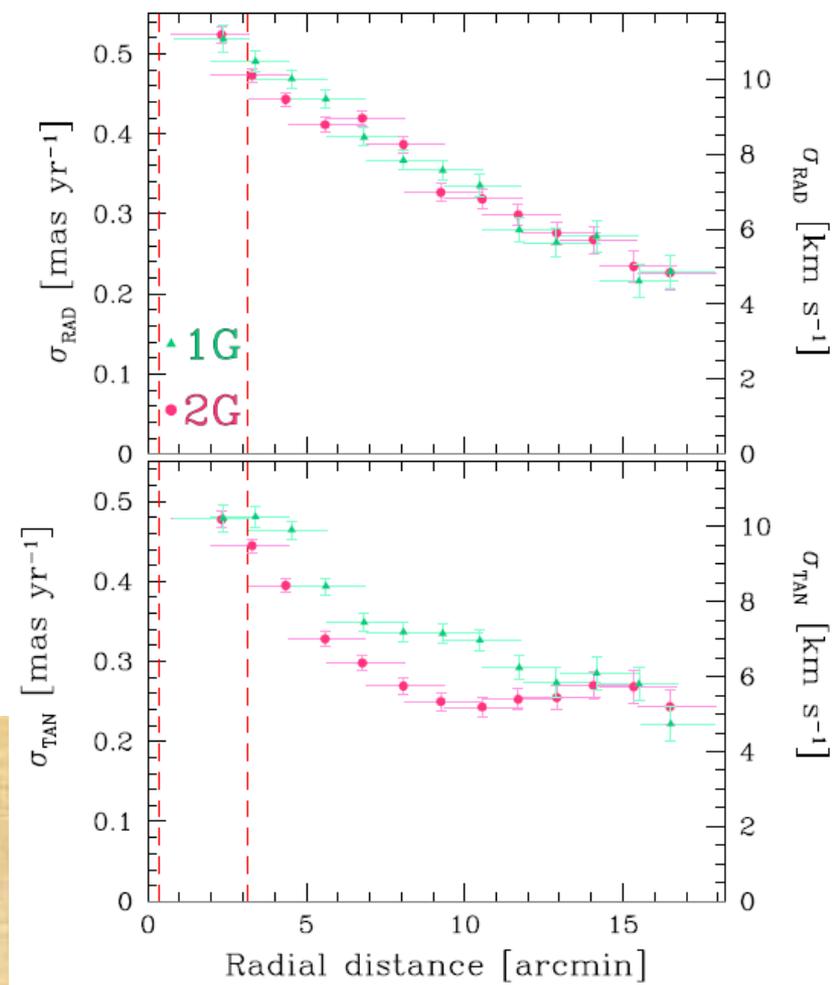
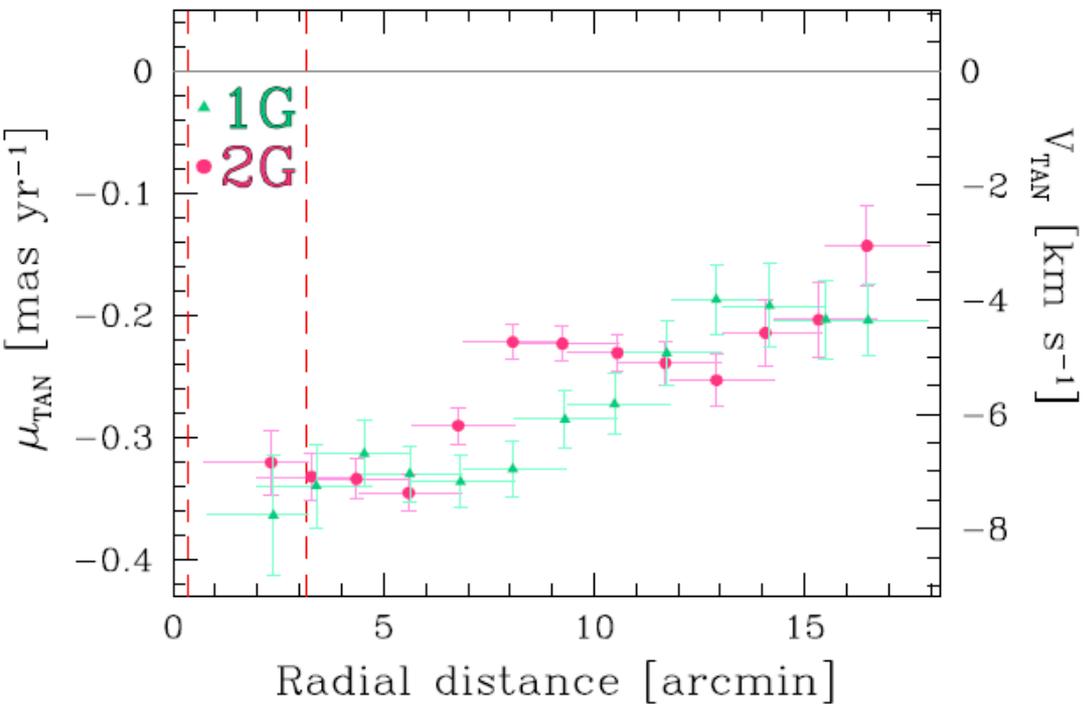


# Движение звёзд разных популяций в шаровом скоплении 47 Тис



Вращение  
скопления

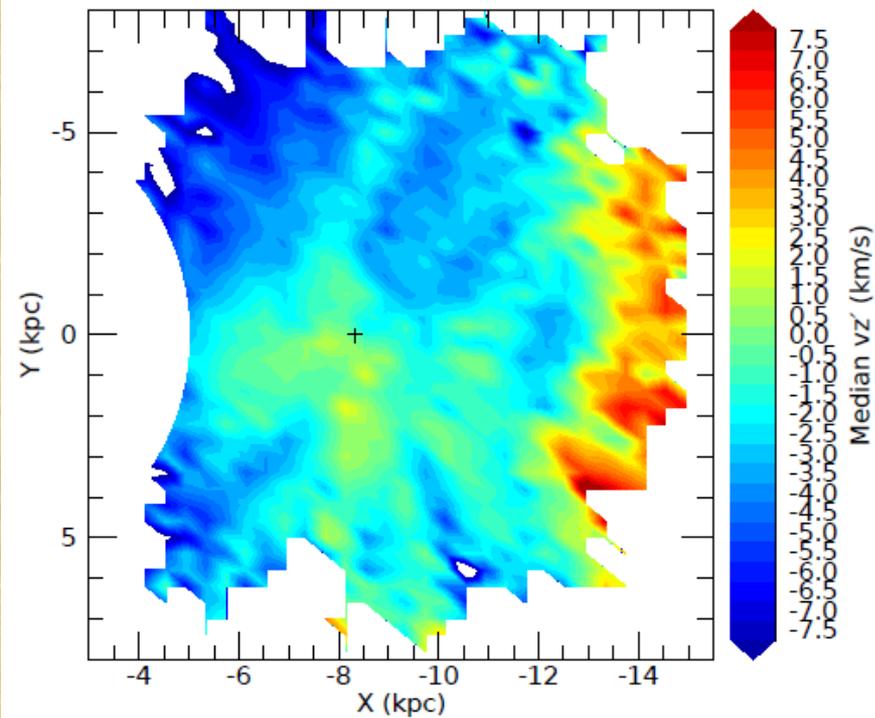
Две популяции (поколения?) звёзд –  
Красных Гигантов, различающиеся  
химическим составом



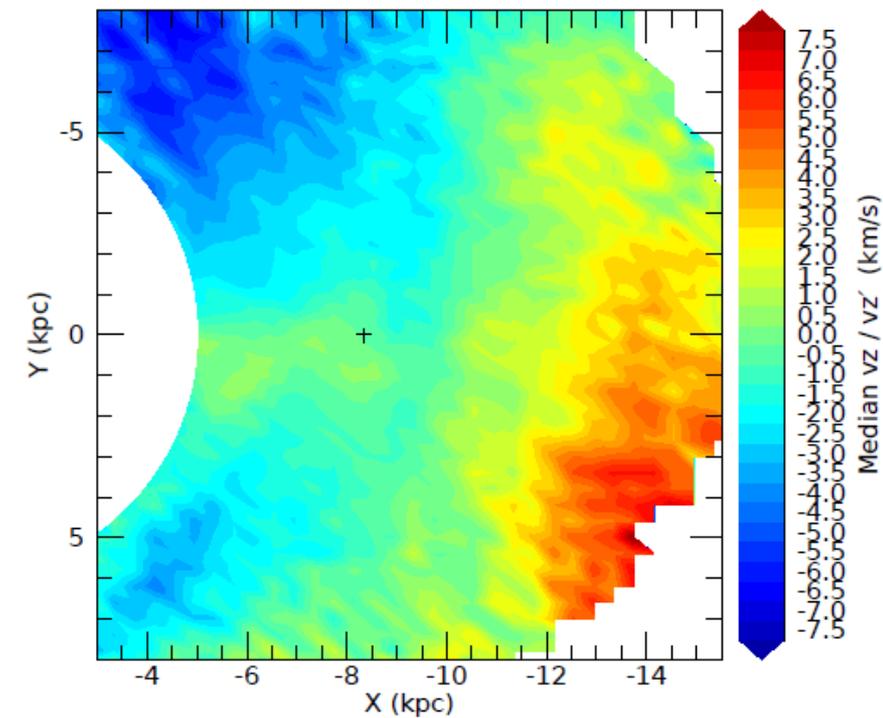
- Изменение скорости вращения (слева) и дисперсии (разброса) скоростей (справа) с расстоянием от центра скопления
- Оцифровка справа - в км/с
- Угловая скорость почти постоянна

Намёки на вращение обнаружены ещё у целого ряда шаровых скоплений

(C) UMS sample: vertical velocity



(D) Giant sample: vertical velocity



- **Искривление (warp) плоскости Млечного Пути (уже наблюдавшееся ранее по распределению звёзд):**
- Средние вертикальные скорости горячих звёзд (слева, ~600 тыс. объектов) и красных гигантов (справа, ~12.6 млн. объектов) в разных областях диска
- Солнце на рисунках почти в центре (+)
- Систематические различия скоростей движения "вверх-вниз" достигают 15 км/с

# • Первые проблемы и странности с результатами в каталоге GAIA DR2

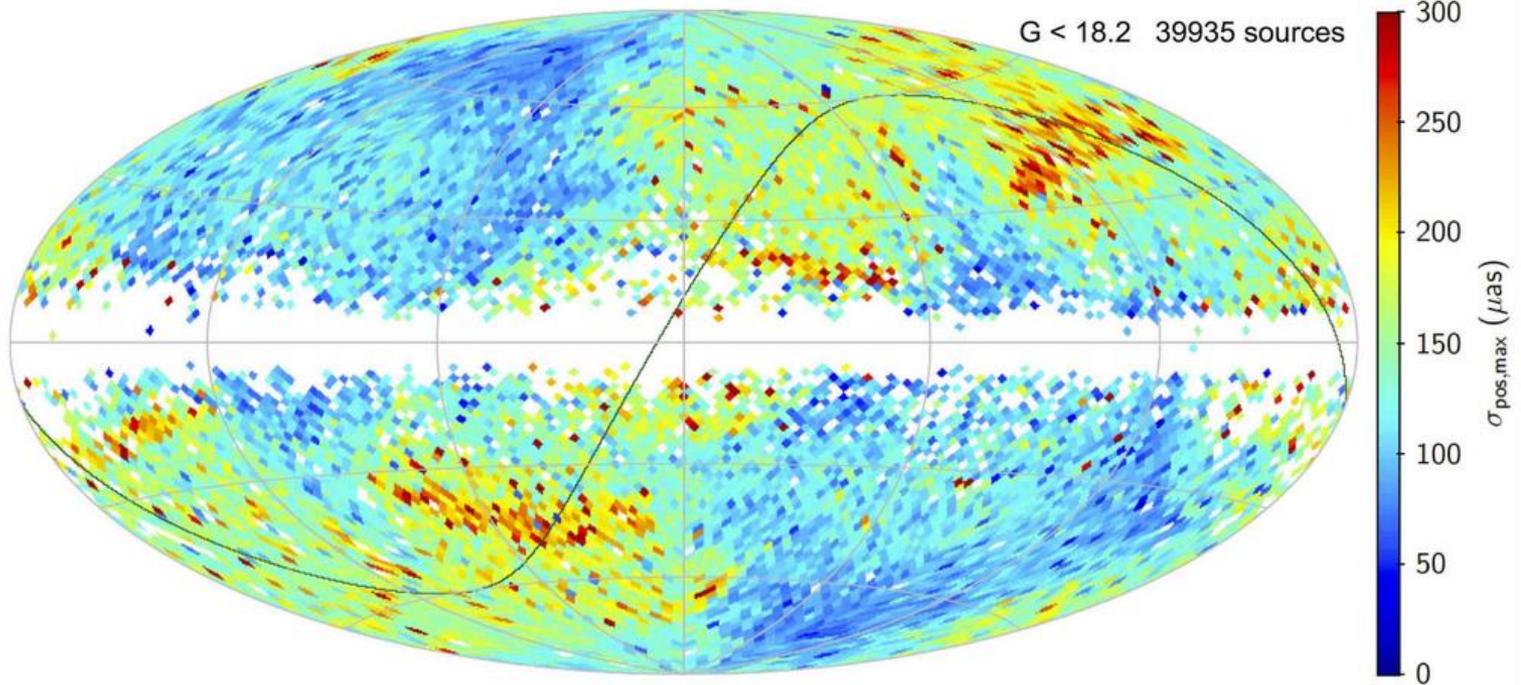
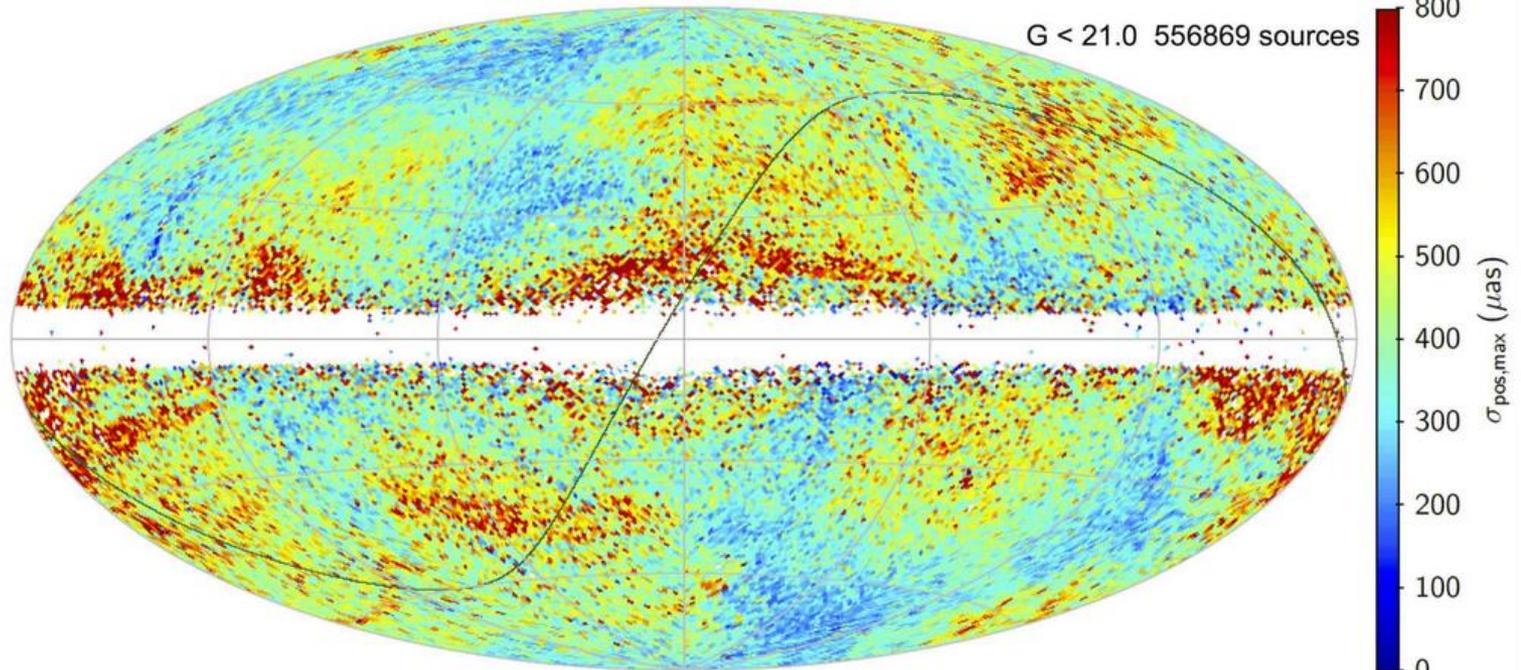
- Параллаксы GAIA DR2 систематически занижены примерно на 35-80 мксад по данным о разных объектах (двойных

Эти обстоятельства пока не дают возможности заметного уточнения светимости "стандартных свечей", таких как Цефеиды, Лириды, яркие красные гиганты, гиганты красного сгущения и др.

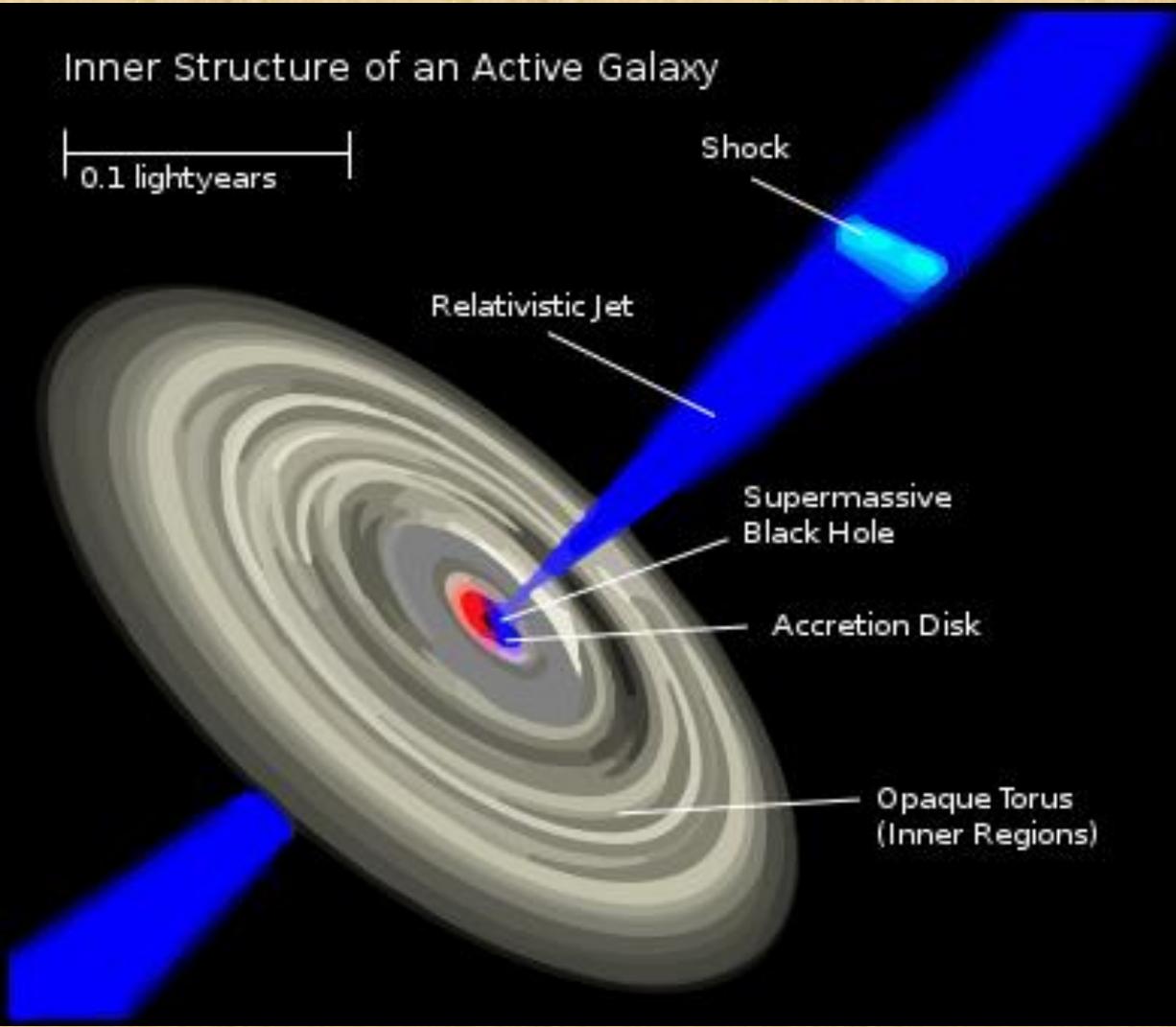
Перспективы: переработка измерений для GAIA DR3, ожидаемого в 2021 г.

Взглянем на квазары как далёкие "реперы" системы ICRF/ICRS

Распределе-  
ние всех  
(вверху) и  
ярких  
(внизу)  
квazarов по  
данным  
GAIA DR2 и  
точность  
оценки их  
координат  
(цветовая  
гамма, в  
мксд)



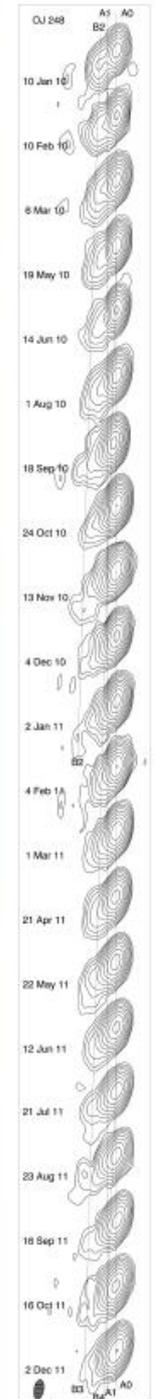
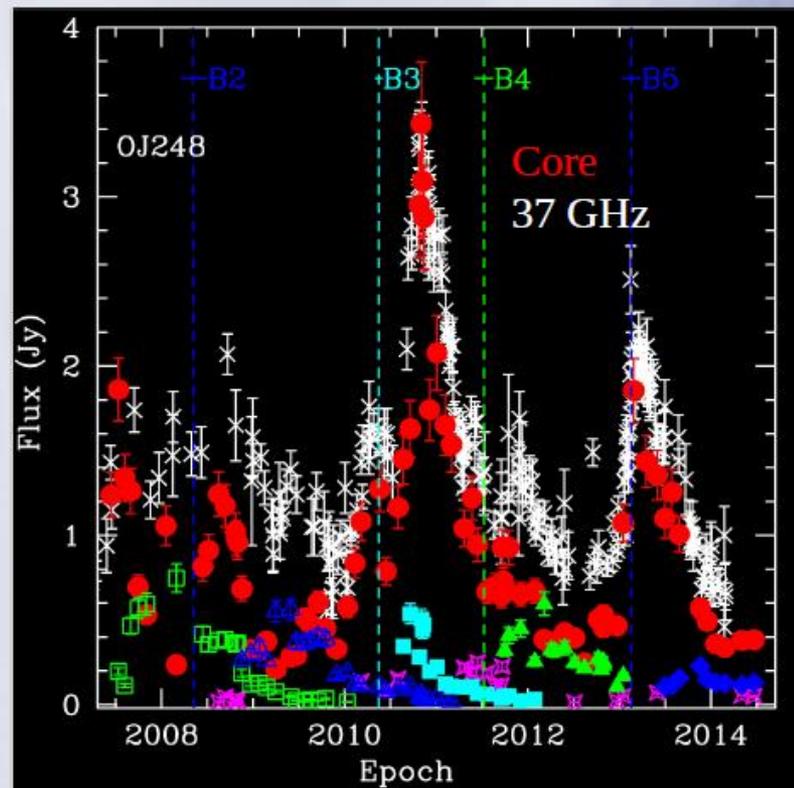
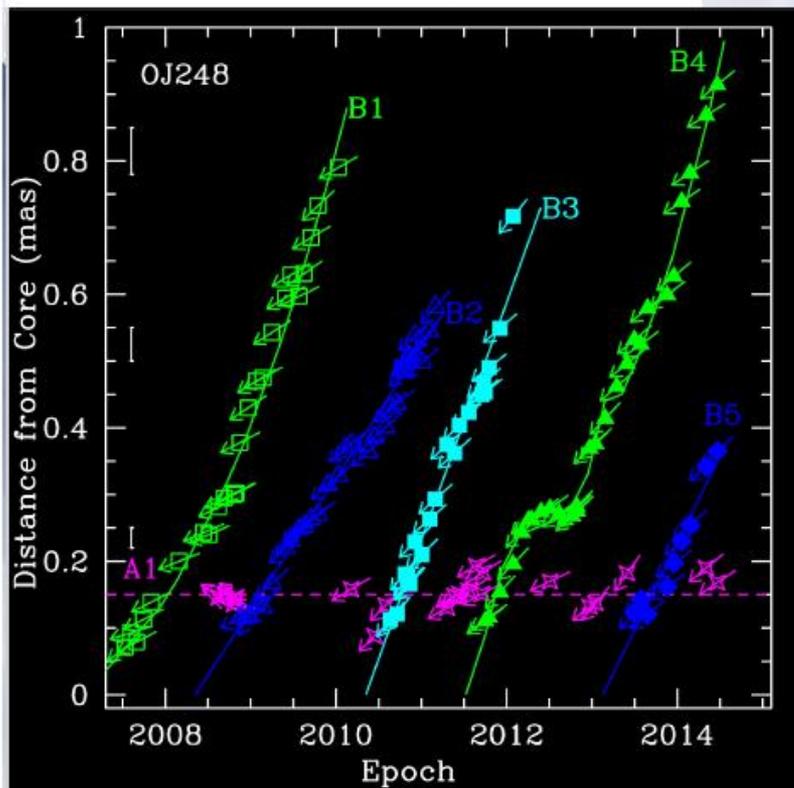
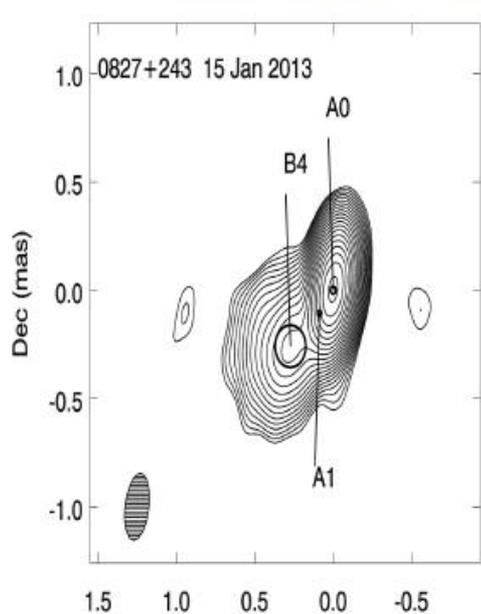
- Схематическое изображение джета (релятивистской струи) квазара



# An Example of the VLBA data for Kinematical Analysis {quasar 0827+243 (OJ248)}

79 epochs from 2007 June to 2013 Dec

For each object: from 43 to 79 (3C120: 24)  
Classification of features: Core (A0),  
Stationary knots (A#), Moving knots (B#)

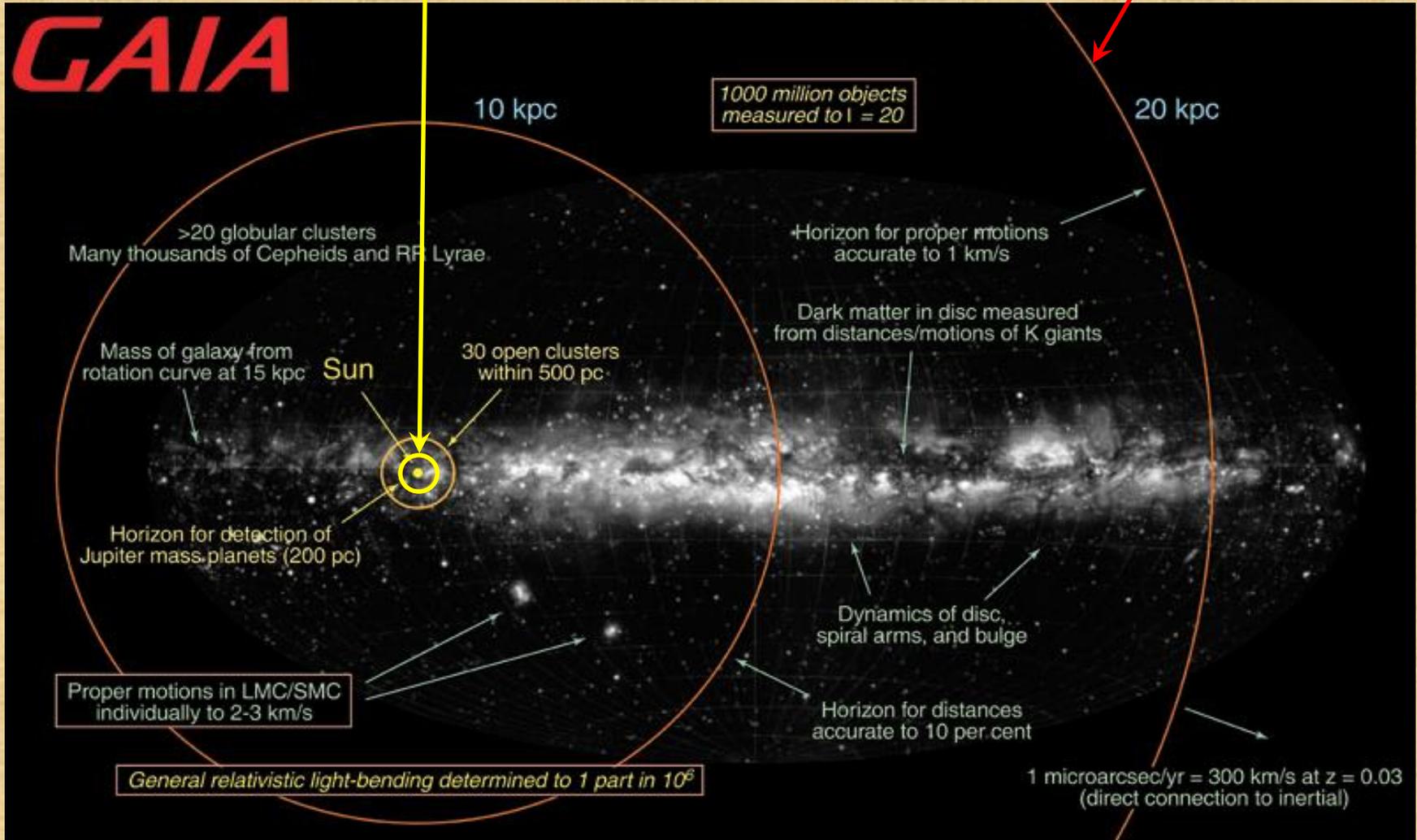


- **Что означает точность параллаксов порядка 10 мксд ?**
- Измерение расстояний до 10 кпк с относительной точностью 10%, расстояний до 5 кпк с относительной точностью 5%
- Маловато для межгалактических масштабов, но выручат **калибровки светимости "стандартных свечей"**

# Как могли бы расшириться наши знания об устройстве Млечного Пути

Сфера HIPPARCOS

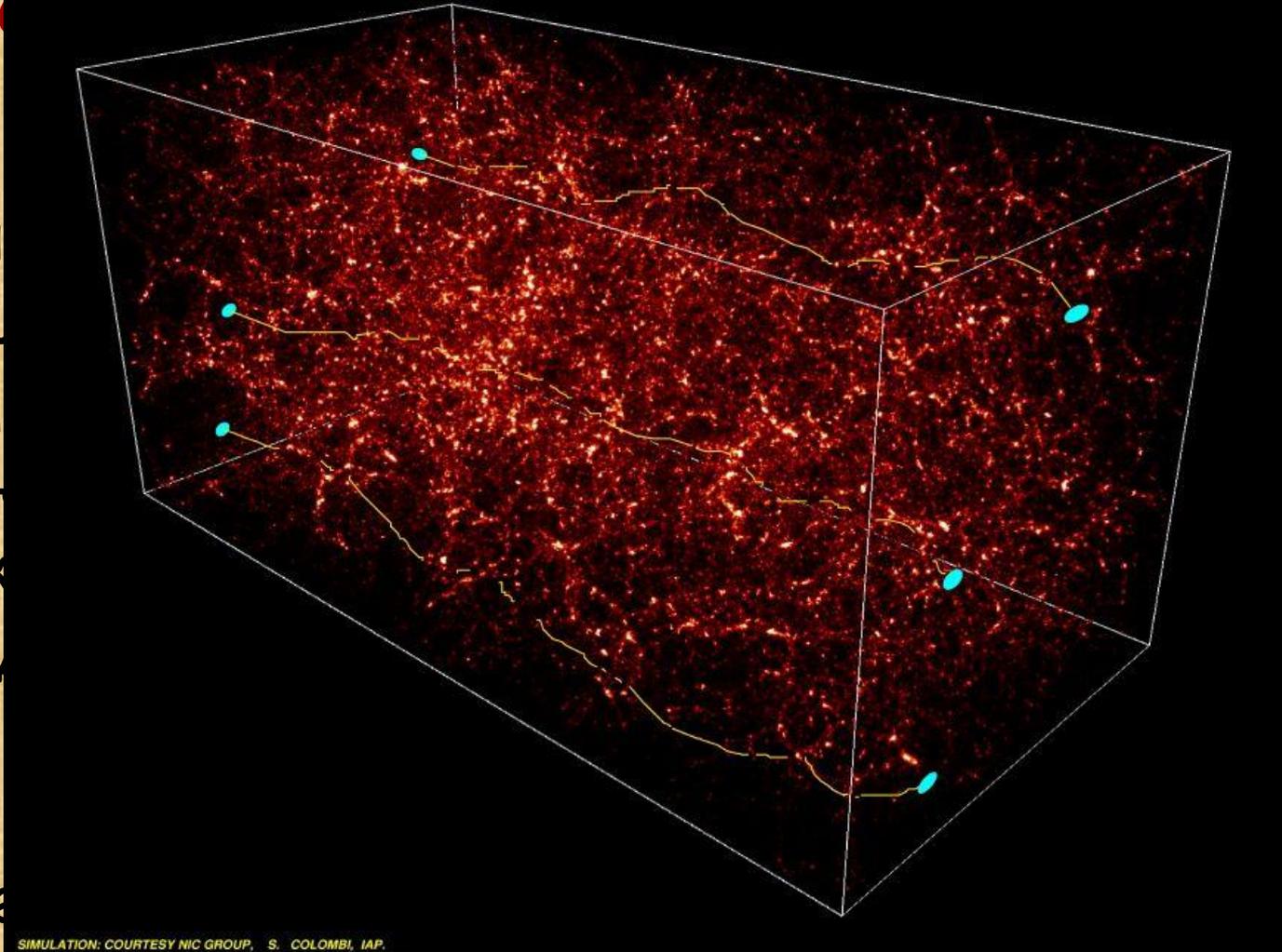
Сфера GAIA



Е

И

- Точн  
пара  
пред  
такун  
флук  
всле  
лучи  
прив  
Обще



НЫМ  
енно

И  
д на

екты  
на)

---

Действительно ли это предел? - Пока не ясно.



**gaia**

- **Спасибо за внимание !**
- **<http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway>**