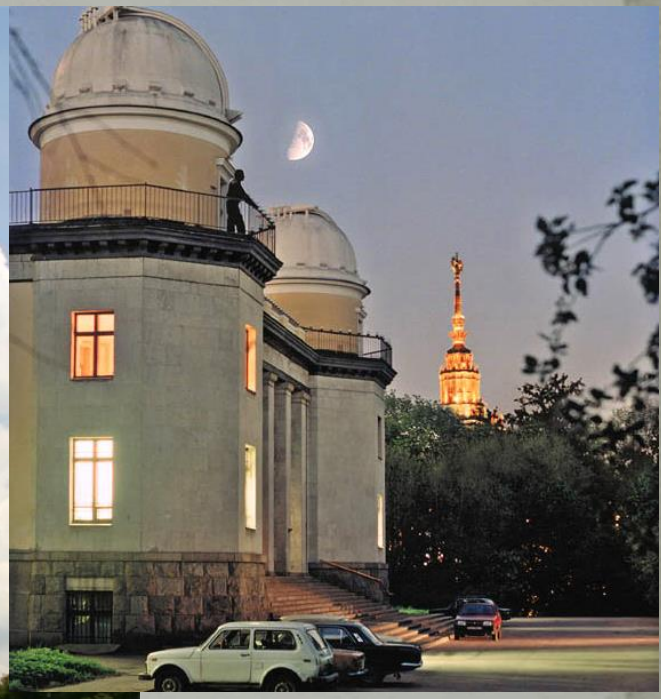
Млечный Путь – наша Галактика



Расторгуев Алексей Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. экспериментальной астрономии физического факультета МГУ; зав. отд. изучения Галактики и переменных звёзд ГАИШ МГУ

WEB: http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway

- **Часть #1**

- Современные астрономические наблюдения:
  - Млечный Путь в мире галактик
  - Крупные наземные и космические телескопы
  - Проекты, нацеленные на изучение Млечного Пути
  - “Всенебесные” каталоги и базы данных

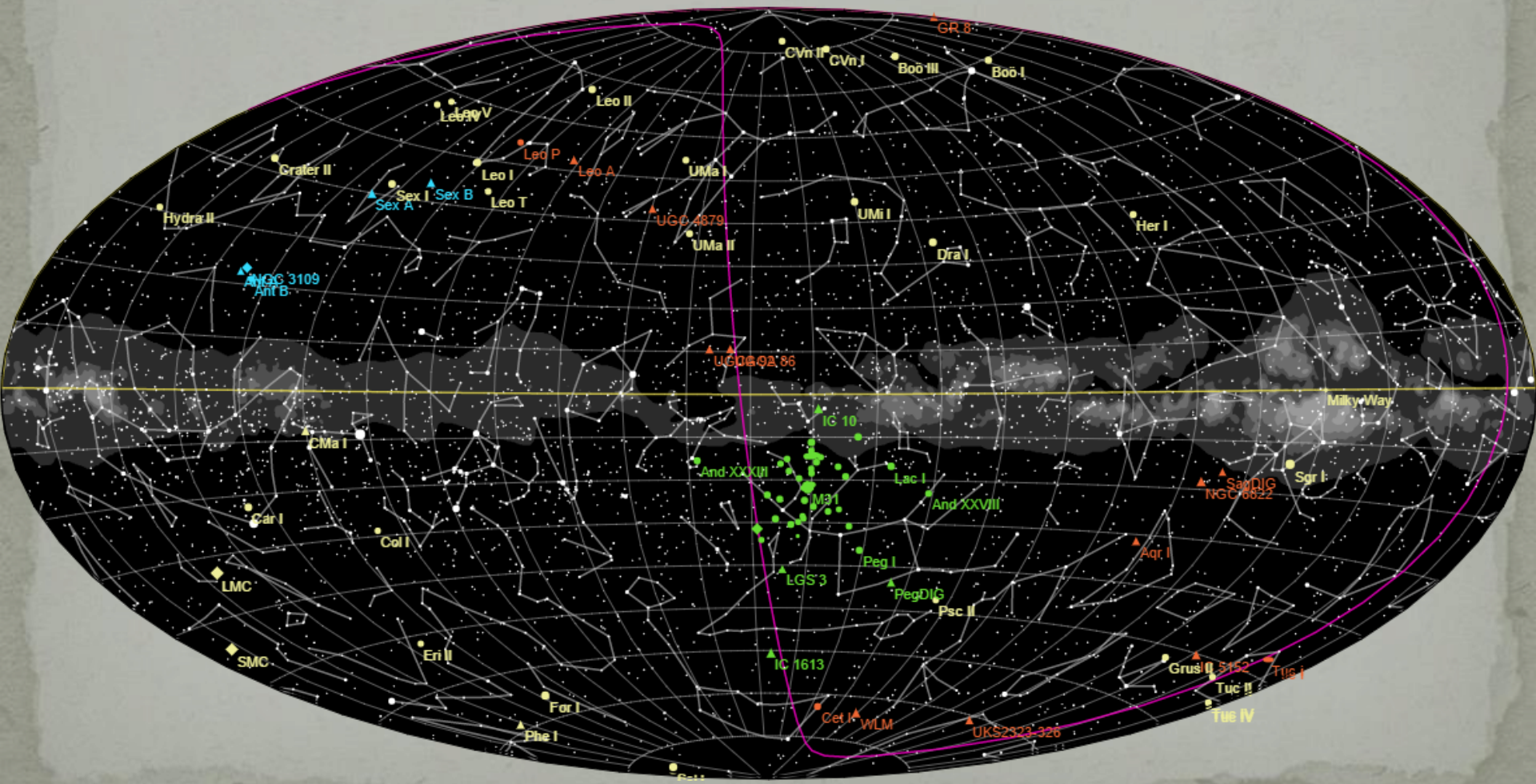
VLT (ESO, г. Паранал, Чили)

На Кавказе есть места, где Млечный Путь иногда виден вот так:

Млечный Путь в оптике

Яркое свечение звёзд,
“перемешанных” с облаками пыли

Млечный Путь неотделим от своего окружения: Местная Группа галактик



- **2018 г.:**
- ~90 членов:
- MW: ~32
- M31: ~42
- 9 спиральных
- 5 эллиптич.
- 18 неправ.
- 41 карл.сфер.
- 21 UFD (ультраслабых)

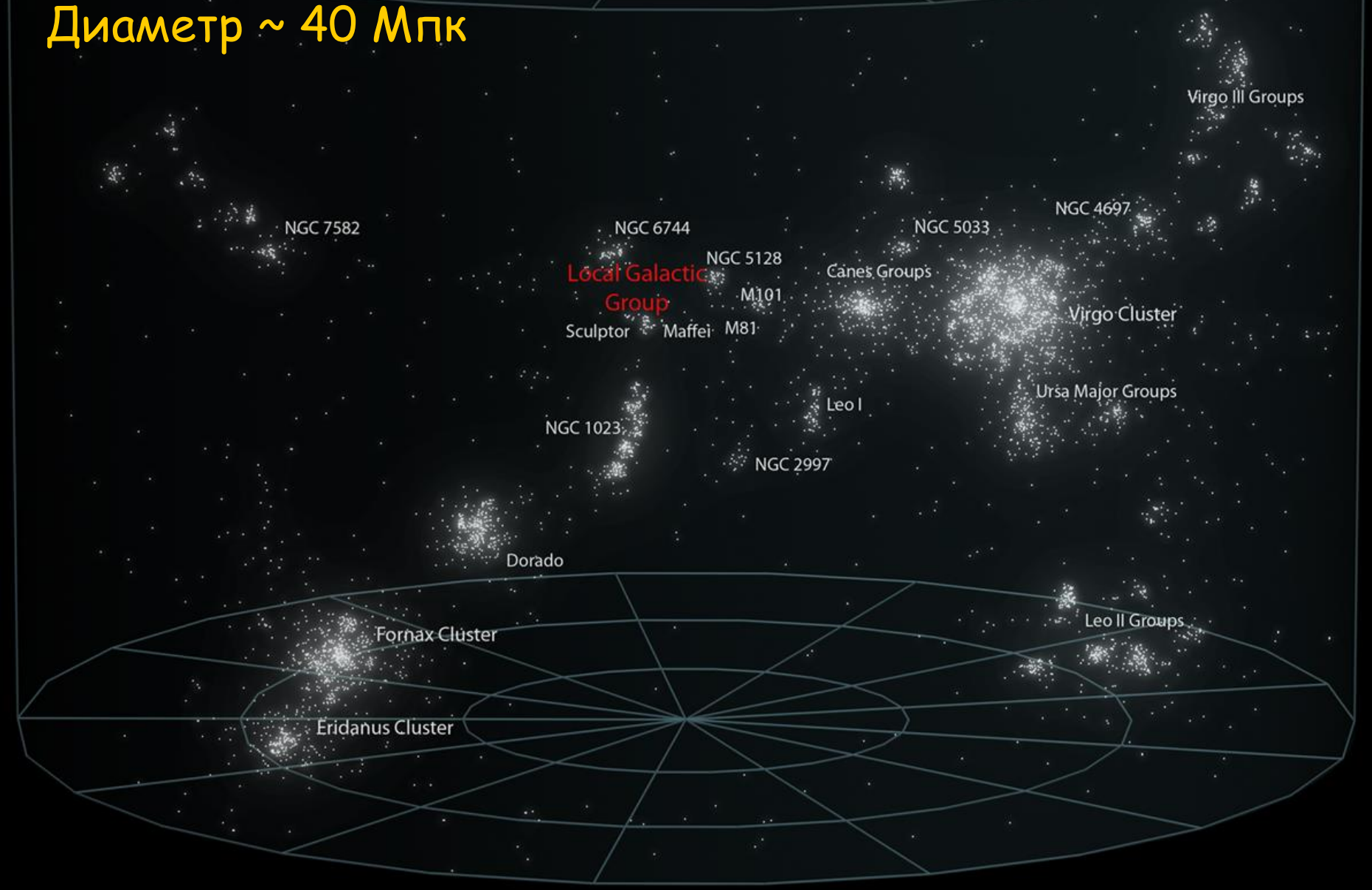
Name	Alt. Name	l °	b °	M mag	Rh pc	Dh kpc	Dnear kpc	Metal. [Fe/H]	Type	Subgroup
Milky Way	GC	0	0	-20.9		8.5	460		SABbc I-II	MW
Sgr I	SagDEG	5.57	-14.16	-13.8	1550	24.0	16.0	-0.5	dSph(t)	MW
UKS2323-326	UGCA 438	11.87	-70.86	-13.1		770	1350		IBm V-VI pec	LG??
SagDIG	Sgr dw	21.06	-16.28	-10.7		930	1180	-2.3	IBm V-VI:	LG
NGC 6822	DDO 209	25.35	-18.38	-16.0		490	670	-1.2	IBm V-VI	LG
Boö III		27.39	55.43	-5.8	170	46.0	44.0	-2.1	UFD?	MW
Her I		28.73	36.87	-6.2	330	138.0	134.2	-2.41	UFD	MW
Aqr I	DDO 210	34.05	-31.34	-11.3	216	565	960	-1.0	IBm V-VI	LG
CVn I		74.31	79.82	-7.9	564	220.0	219.8	-1.98	dSph	MW
WLM	DDO 221	75.86	-73.62	-14.4	917	1122	810	-0.87	IBm V-VI	LG
Psc II		79.21	-47.11	-5.0	60	180	180		UFD	MW
Dra I	DDO 208	86.37	34.72	-8.6	196	82	82	-1.93	dSph pec	MW
And XXVIII		91.03	-22.93	-8.5	210	650	365	-2.0	dSph	M31
PegDIG	DDO 216	94.78	-43.55	-12.3		783	410	-1.5	Im V-VI	M31?
Lac I	And XXXI	101.1	-16.7	-11.7	912	756	275		dSph	M31
Cet I	KKS 1	101.46	-72.85	-10.1	590	755	620	-1.7	dSph	LG
UMi I	DDO 199	104.97	44.80	-8.9	280	66.0	68.0	-2.13	dSph	MW
Peg I	And VI	106.04	-36.32	-10.6	424	919	265	-1.7	dSph	M31
Cas I	And VII	109.46	-9.95	-9.5	740	763	215	-1.5	dSph	M31
And XXIX		109.80	-30.77	-8.3	360	730	207	-1.8	dSph	M31
And XXI		111.9	-19.2	-9.8	842	827	135	-1.8	dSph	M31
And XX		112.9	-26.9	-6.3	114	741	128	-1.5	UFD	M31
CVn II		113.58	82.70	-4.8	74	151.0	150.7	-2.21	UFD	MW
And XVIII		113.9	-16.9	-9.7	325	1214	357	-1.8	dSph	M31?
And XIX		115.6	-27.4	-9.6	1481	821	115	-1.9	dSph	M31
And XXVI		118.1	-14.7	-7.1	219	754	103	-1.9	dSph	M31
IC 10		118.96	-3.33	-16.3	500	660	255	-1.3	IBm V-VI	M31?
And XXV		119.2	-15.9	-9.7	642	736	90	-1.8	dSph	M31
And III	KK 5	119.37	-26.26	-10.2	360	723	86	-1.7	dSph	M31
NGC 147	DDO 3	119.82	-14.25	-15.1	503	712	118	-1.1	dE5	M31
And XVII		120.23	-18.47	-8.5	262	727	67	-1.9	dSph	M31
And XXVII		120.4	-17.4	-7.9	657	1255	482	-1.7	dSph	M31
Cas II	And XXX	120.46	-13.15	-8.0	267	681	145	-1.7	dSph	M31
Cas III	And XXXII	120.5	-11.2	-12.3	1456	772	144		dSph	M31
M110	NGC 205	120.72	-21.14	-16.4	673	824	60	-0.5	dE5/p	M31
NGC 185		120.79	-14.48	-15.2	266	620	181	-0.8	dE3	M31
And VIII	M31 part	121.02	-22.22			830	-		dSph pec:	M31
And IV		121.11	-22.27	-12.6		6300	-		dIrr:	??
M32	NGC 221	121.15	-21.98	-16.5	220	770	6	-1.1	cE2	M31
M31	NGC 224	121.17	-21.57	-21.2	4760	785	300	0.42	SAb II	M31
And I	KK 8	121.68	-24.82	-11.8	600	727	68	-1.4	dSph/dE3	M31
And XI		121.72	-29.06	-6.9	158	763	102	-1.9	UFD	M31
And XII		122.00	-28.49	-6.4	324	928	181	-2.0	UFD	M31
And XIV		122.97	-33.17	-8.3	413	793	161	-2.2	dSph	M31
And XIII		123.03	-29.87	-6.7	172	760	115	-2.0	UFD	M31
And IX		123.21	-19.68	-8.1	530	600	182	-2.2	dSph	M31
And XVI		124.91	-30.46	-9.2	170	476	319	-1.7	dSph	M31
And X		125.75	-17.98	-8.1	340	670	130	-2.0	dSph	M31
And V		126.22	-15.12	-10.2	302	742	113	-1.9	dSph	M31
LGS 3	Psc I	126.76	-40.89	-10.4		769	285	-2.1	dIrr/dSph	M31?
And XXIV		127.8	-16.3	-7.6	548	898	169	-1.8	dSph	M31
And XV		127.88	-24.53	-9.4	270	626	174	-1.1	dSph	M31

- Продолжение

Name	Alt. Name	l °	b °	M mag	Rh pc	Dh kpc	Dnear kpc	Metal. [Fe/H]	Type	Subgroup
And II	KK 12	128.92	-29.16	-11.8	1230	630	195	-1.5	dSph	M31
IC 1613	DDO 8	129.74	-60.58	-15.3	1440	715	505	-1.3	IBm V-VI	M31?
And XXIII		131.0	-23.6	-10.2	1001	748	127	-1.8	dSph	M31
And XXII	(Tri I)	132.6	-34.1	-6.5	252	920	275	-1.8	UFD	M31
M33	NGC 598	133.61	-31.33	-18.9	3320	820	210	-0.3	SAcd III-IV	M31?
UGCA 86		139.76	10.65	-17.7		525	3770		Im V-VI:	LG??
UGCA 92		144.71	10.52	-14.5		640			Im V-VI:	LG??
And XXXIII	Perseus I	147.8	-15.5	0,3	400	785	374		dSph	M31
UMa II		152.46	37.44	-4.2	140	32.0	36.5	-2.47	UFD	MW
UMa I		159.43	54.41	-5.5	318	97.0	104.9	-2.18	UFD	MW
UGC 4879	VV 124	164.67	42.88	-11.5		1100	1000	-1.37	IAm	LG??
Leo A	DDO 69	196.90	52.42	-11.5	475	950	980	-2.1	IBm V-VI	LG
Leo T		214.85	43.66	-7.1	178	420	425	-1.99	UFD	MW?
Leo P		219.65	54.43		290	1750			dSph	LG?
Leo II	DDO 93	220.17	67.23	-10.1	151	205	208	-1.62	dSph pec	MW
Leo I	DDO 74	225.99	49.11	-11.9	246	250	254	-1.43	dSph	MW
Col I		231.62	-28.88	-4.5	103	182			UFD	MW
Sex B	DDO 70	233.20	43.78	-14.3	715	1630	730	-1.9	IBm V-VI	N310
For I	ESO 356-4	237.10	-65.65	-13.1	668	138	140	-0.99	dSph	MW
CMa I		239.99	-8.00	-8.3		13.0	8.0		dIrr	MW
Sex I		243.50	42.27	-9.5	682	86	89	-1.93	dSph	MW
Sex A	DDO 75	246.15	39.88	-9.5	300	1380	530	-1.9	IBm V-VI	N310
Eri II		249.78	-51.65	-6.6	172	380		-1.5	UFD	MW
Ant B		259.41	21.08	-9.7	273	1290	70	-.5	dSph	N310
Car I		260.11	-22.22	-9.4	241	101	103	-2.0	dSph	MW
Leo V		261.86	58.54	-4.3	42	180	180.8		UFD	MW
NGC 3109	DDO 236	262.10	23.07	-15.8		1285	1720	-1.7	SBm V	N310
Ant A		263.10	22.31	-10.7		1320	40	-1.9	IABm V-VI	N310
Leo IV		265.44	56.51	-5.8	116	158	160.6	-2.54	UFD	MW
Phe I	ESO 245-7	272.16	-68.95	-9.8		445	445	-1.9	IAm V-VI	MW?
LMC		280.47	-32.89	-18.5	3000	51.0	50	-0.6	SBm V	MW
Crater II		282.91	42.03	-8.2	1066	120		-1.7	dSph	MW
Scl I		287.54	-83.16	-9.8	260	79	79	-1.68	dSph	MW
Hydra II		295.61	30.46	-4.8	68	134	128	-2.2	UFD	MW
SMC	NGC 292	302.80	-44.30	-17.1	1000	60	57	-1.2	SBm V pec	MW
GR 8	DDO 155	310.74	76.98	-12.5	108	940	2500	-2.0	Im V-VI	LG??
Tuc IV		313.29	-55.29	-3.5	127	48		-2.3	UFD	MW
Tuc I		322.91	-47.37	-9.6	207	875	1110	-1.7	dE4	LG
Tuc II		328.08	-52.33	-4.4	199	69			UFD	MW
IC 5152	ESO 237-27	343.92	-50.19	-15.7		590	1830	-1.4	IAm V-VI	LG??
Grus II		351.15	-51.94	-3.9	93	53		-2.0	UFD	MW
Boö I		358.08	69.62	-5.7	242	60.0	57.6	-2.5	UFD	MW

Местная Группа – периферийная часть Местного Сверхскопления галактик (с центром в скоплении в Деве (Virgo cluster)

Диаметр ~ 40 Мпк



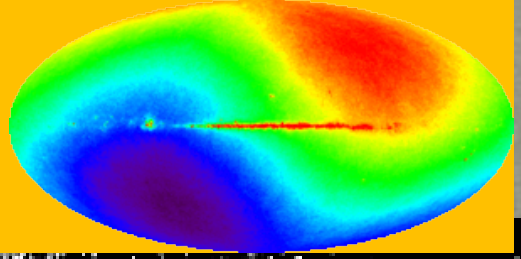
Близкие сверхскопления галактик и пустоты ("войды")

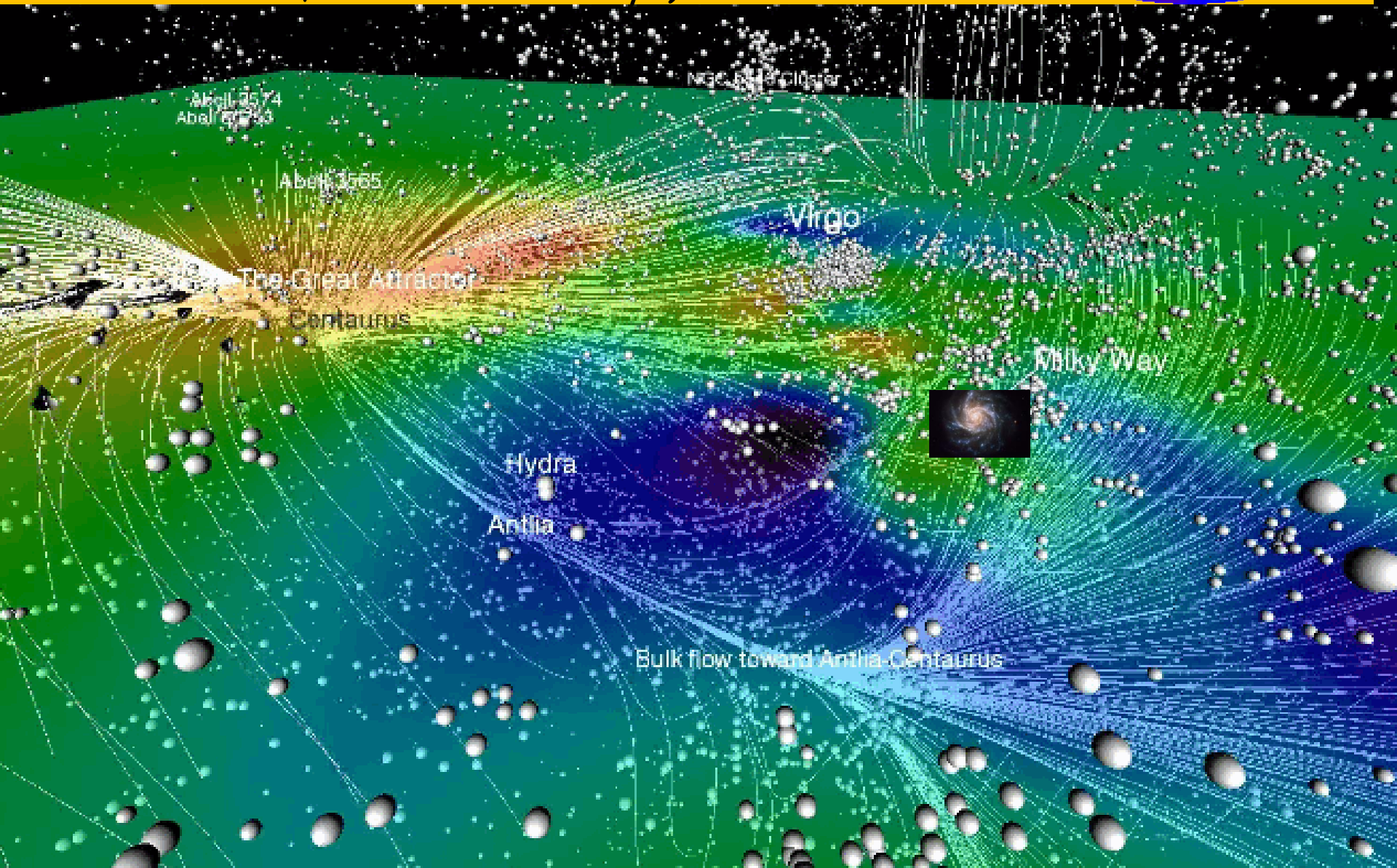
~300 Мпк

Сверх-сверхскопление Laniakea – "Неизмеримые небеса" (по-гавайски)

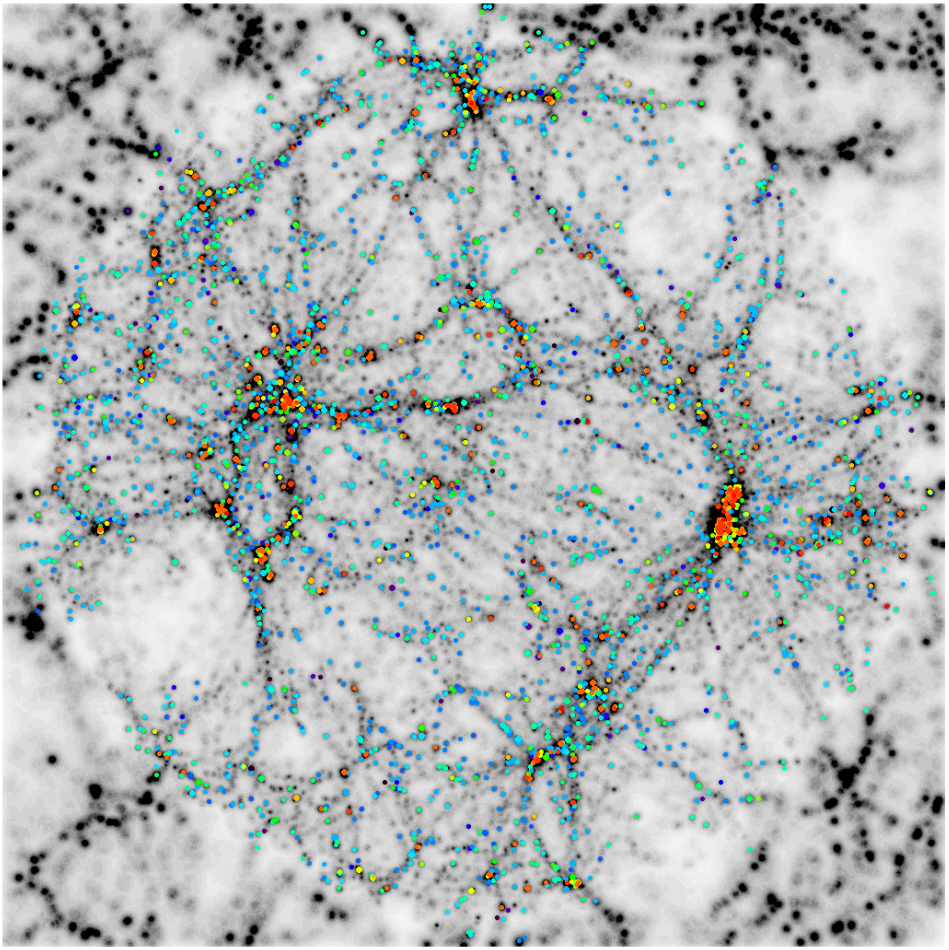
The Great Attractor ("Великий аттрактор")

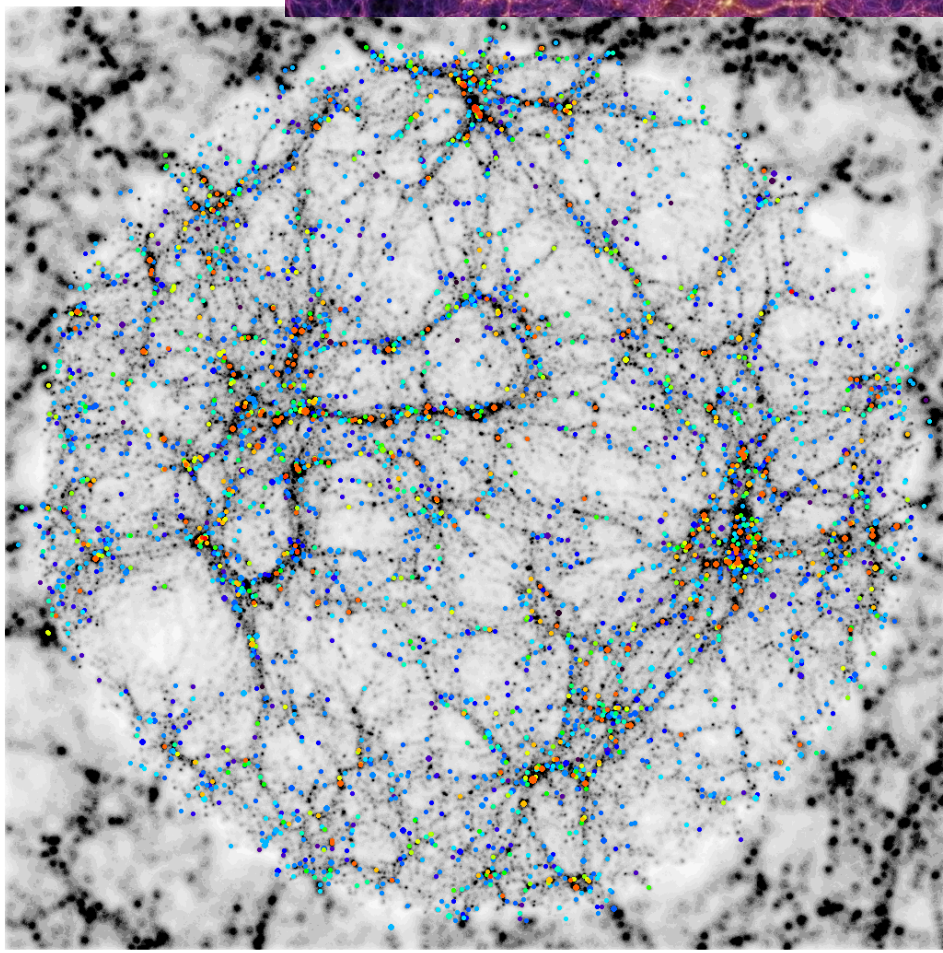
Скорость Млечного Пути ~627±22 км/с (по дипольной анизотропии реликтового излучения, ± 4 mK: l ~ 276°, b ~ 30° ⟶ Hya)

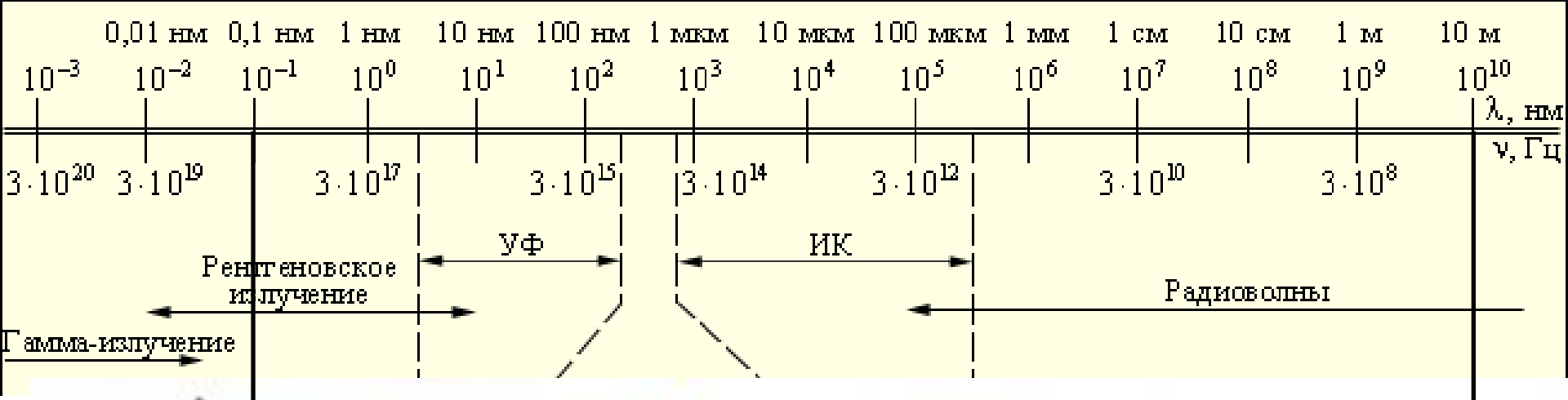


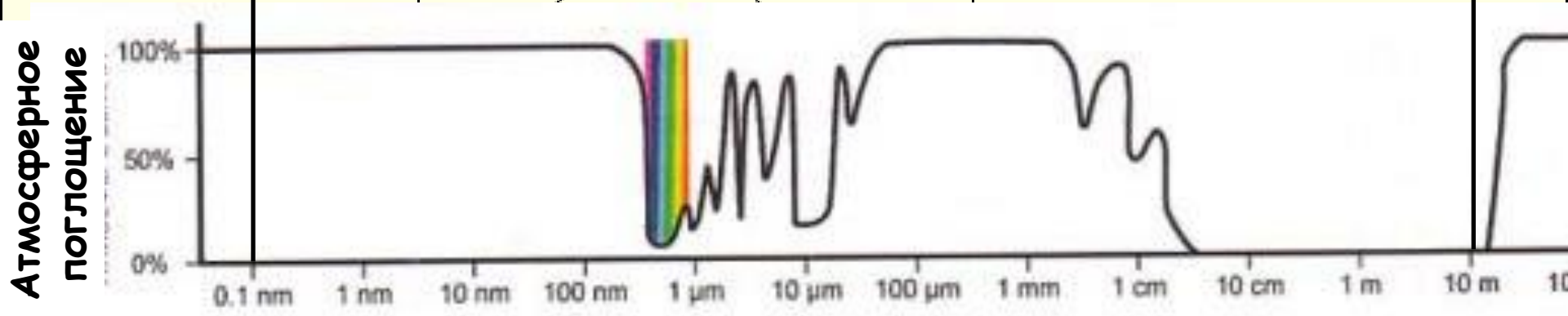


Элементы смоделированной “Вселенской паутины”: узлы (nodes), волокна (filaments), пустоты (voids)

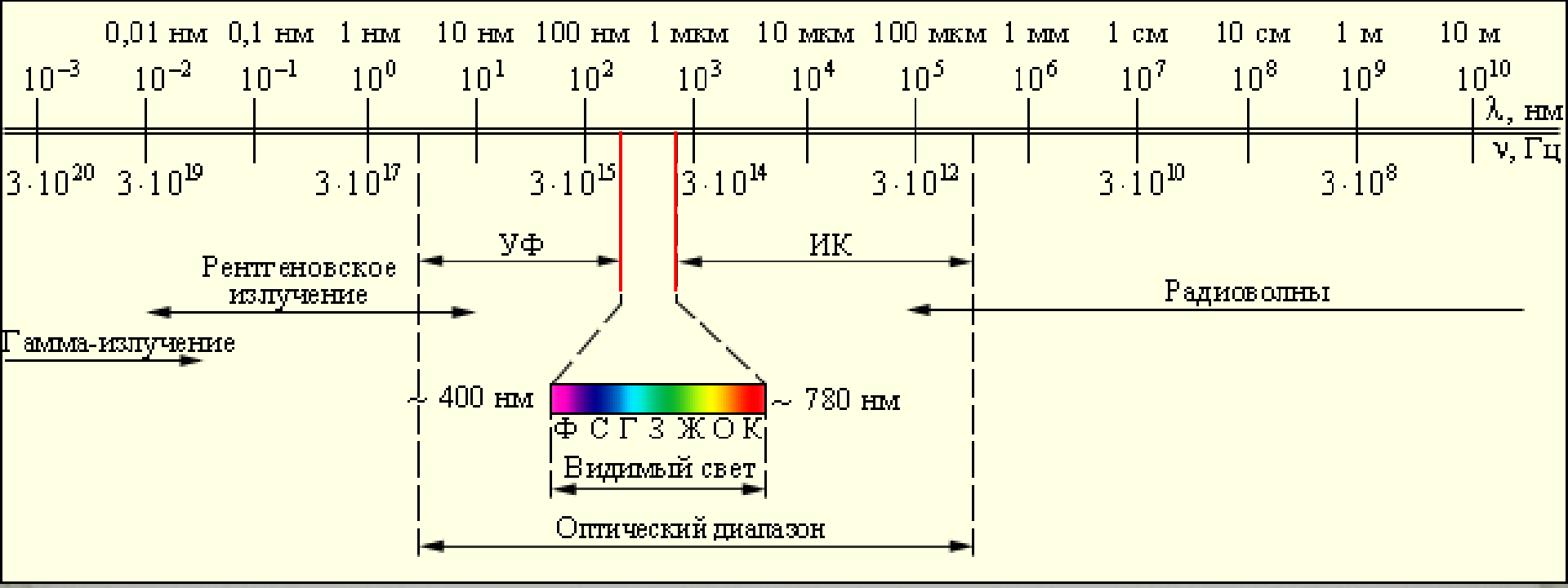








Что мешает наблюдениям с земли ? -
Поглощение излучения земной атмосферой



Весь спектр электромагнитного излучения космических объектов: от ~30 м (радио) до ~10^{-13} м (10^{-4} нм, жёсткое гамма-излучение); это **~48 октав!**

Видимый свет: ~360-800 нм – **всего ~1 октава !!!**

Вселенная на самом деле гораздо "богаче" событиями и явлениями, чем кажется нашему глазу

Благодаря космическим исследованиям современная астрономия и её астрофизические разделы стали “всеволновыми” науками:

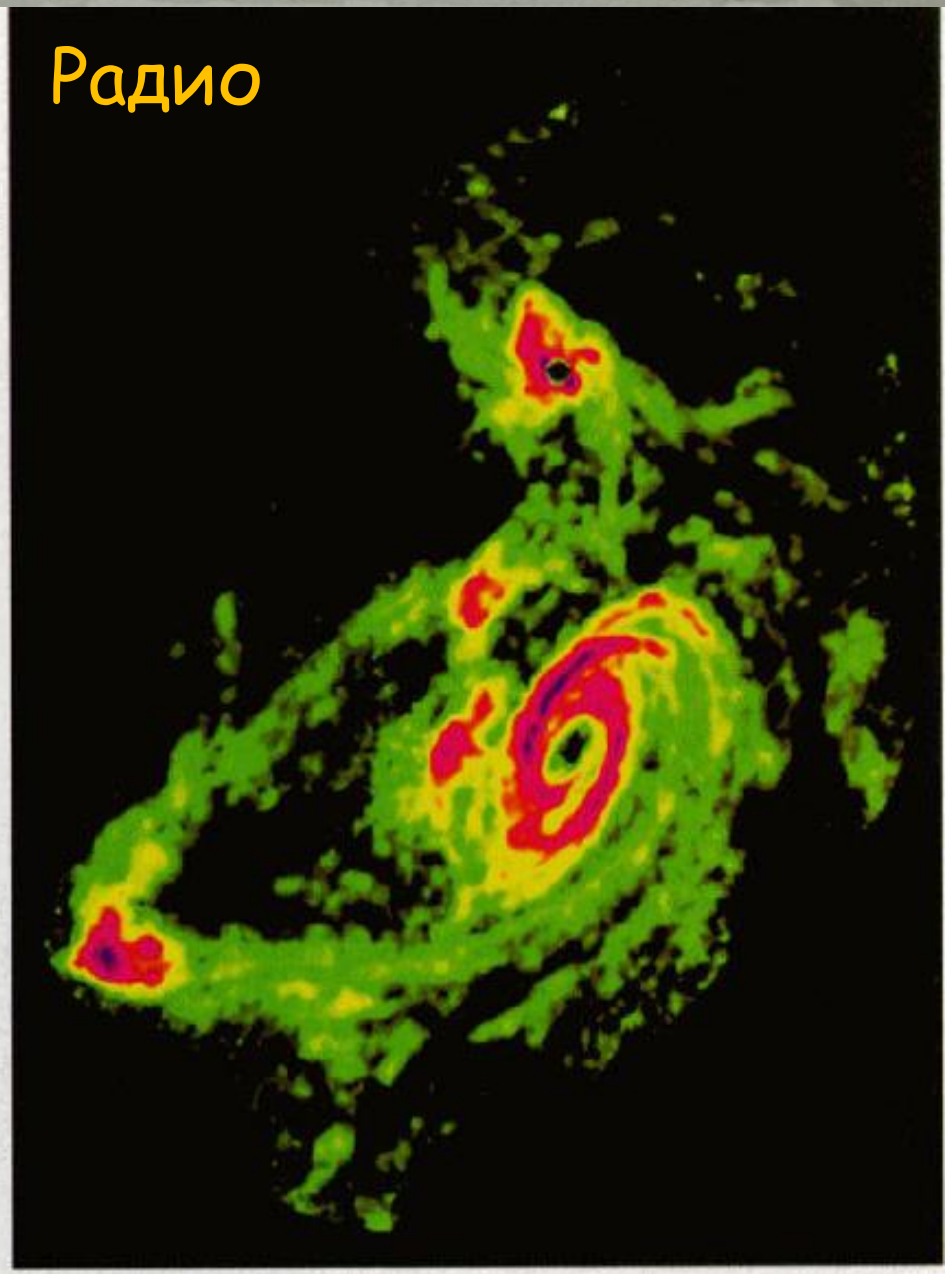
- вклад в излучение в разных диапазонах электромагнитного спектра вносят разные объекты,
- при этом за излучение “отвечают” физические процессы с разной “энергетикой”

Следствие: галактики выглядят по-разному в разных спектральных диапазонах

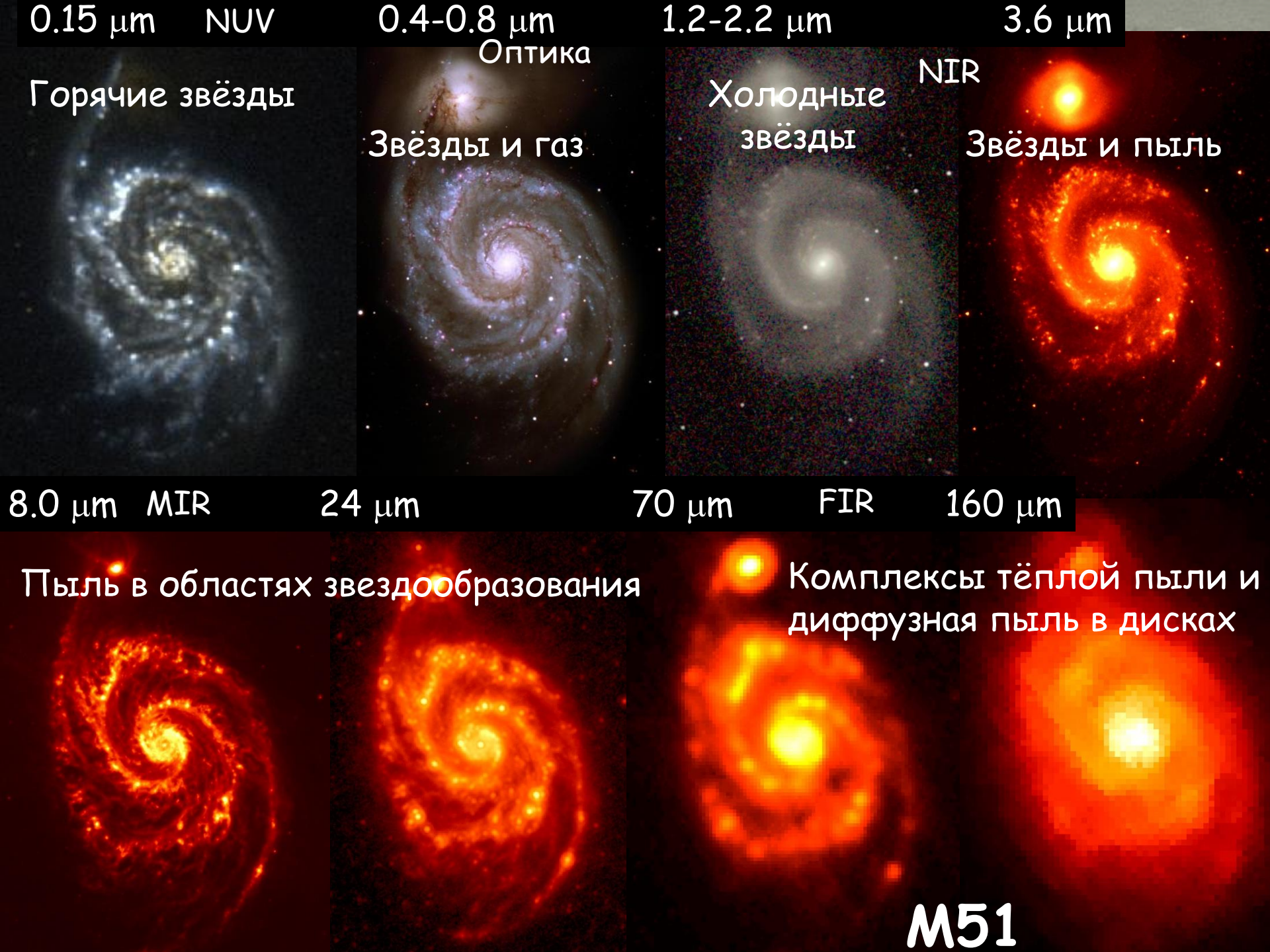
- **Характерный пример:**
- Размеры спиральных галактик в разных диапазонах (оптика / радио, 21 см)
- Газовый диск (в основном нейтральный водород, HI - радио, 21 см) заметно больше звездного (УФ, оптика)
- Млечный Путь:

  ~60 кпк – диаметр газового диска

  ~30-35 кпк – диаметр звёздного диска (он меньше, т.к. звёзды рождаются в самых плотных облаках газа, ближе к центральным областям галактик)



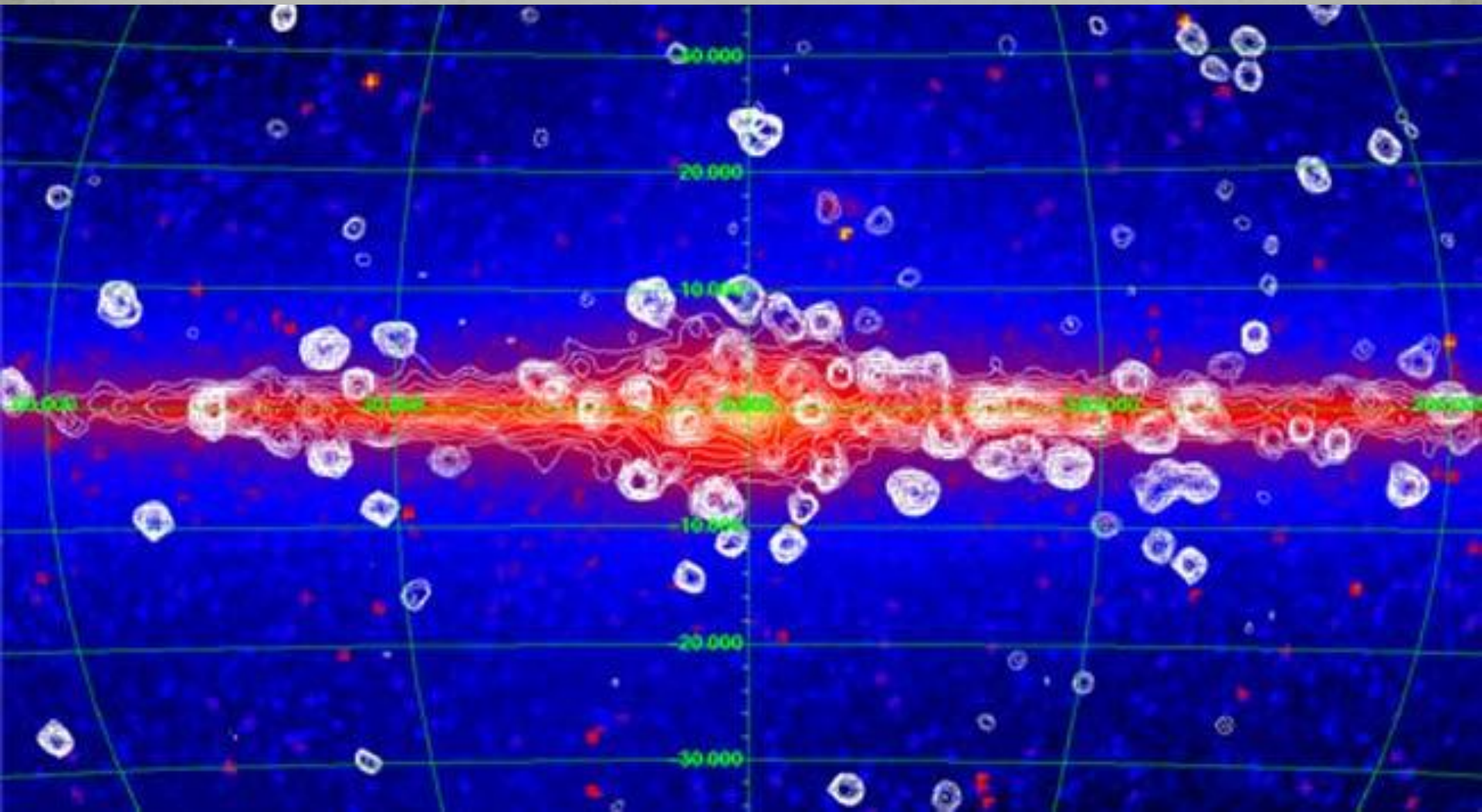
Группа M81 + M82: Оптика и радио (21 см, нейтральный водород)


0.15 μm NUV
0.4-0.8 μm
Оптика
1.2-2.2 μm
NIR
3.6 μm
Горячие звёзды
Звёзды и газ
Холодные звёзды
Звёзды и пыль
8.0 μm MIR
24 μm
70 μm
FIR
160 μm
Пыль в областях звездообразования
Комплексы тёплой пыли и диффузная пыль в дисках
M51

В ИК диапазоне (1.1–2.2 мкм) хорошо видна центральная область, и Млечный Путь напоминает другие галактики, видимые "с ребра"

Равномерное свечение обеспечивают множество слабых красных звёзд

Млечный Путь в рентгеновских лучах
Белые кружки – остатки Сверхновых
Равномерное свечение дают звёзды-карлики



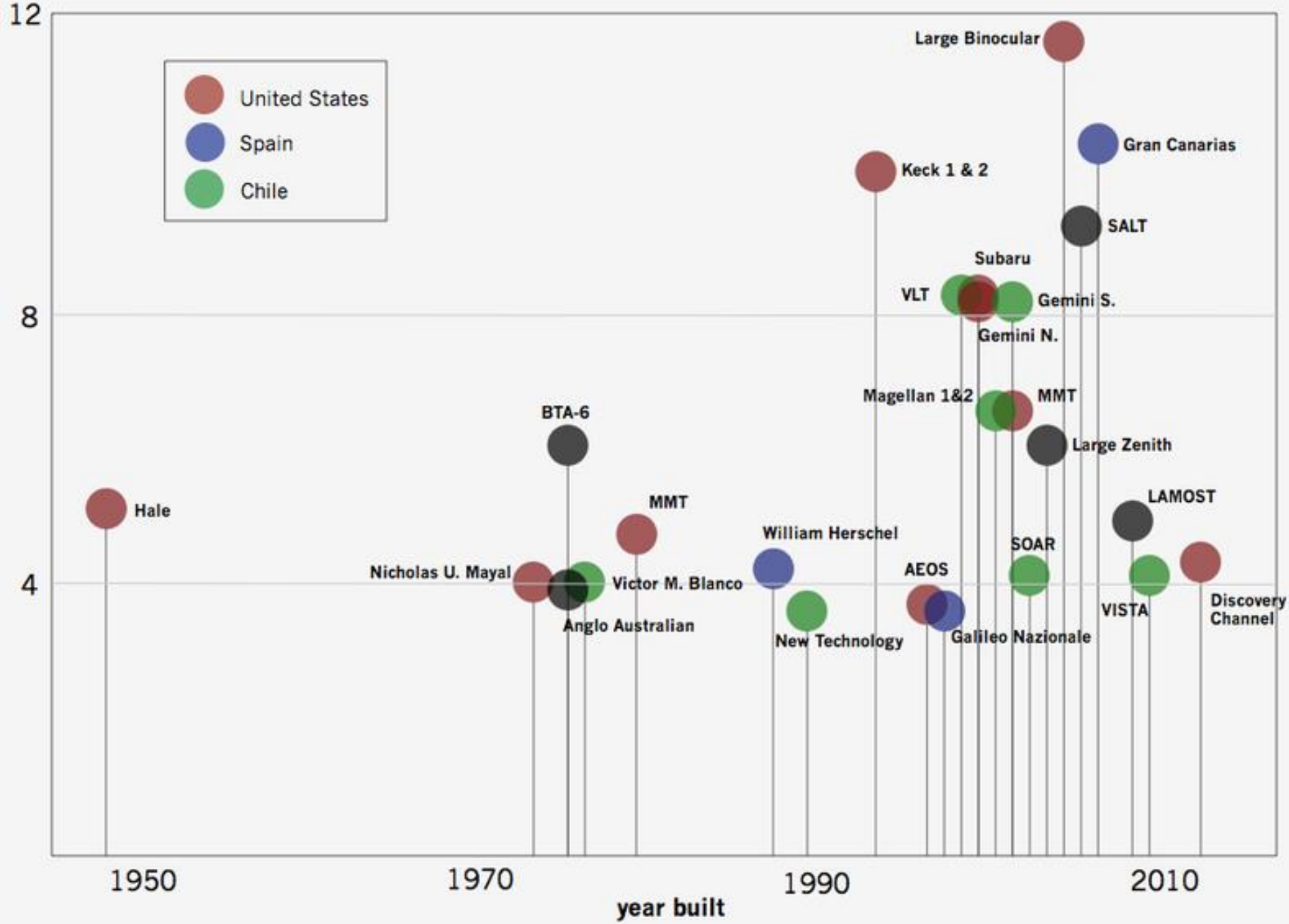
- Зачем строить большие и дорогие – очень дорогие ! (~ неск. млрд. $) – телескопы ?

- Чем больше диаметр зеркала, тем больше света собирает телескоп и тем более слабые объекты он “видит”
- 1 час наблюдательного времени на них стоит 30-50 тыс. $, поэтому на них решаются предельные задачи (высокое угловое разрешение, предельно слабые объекты)

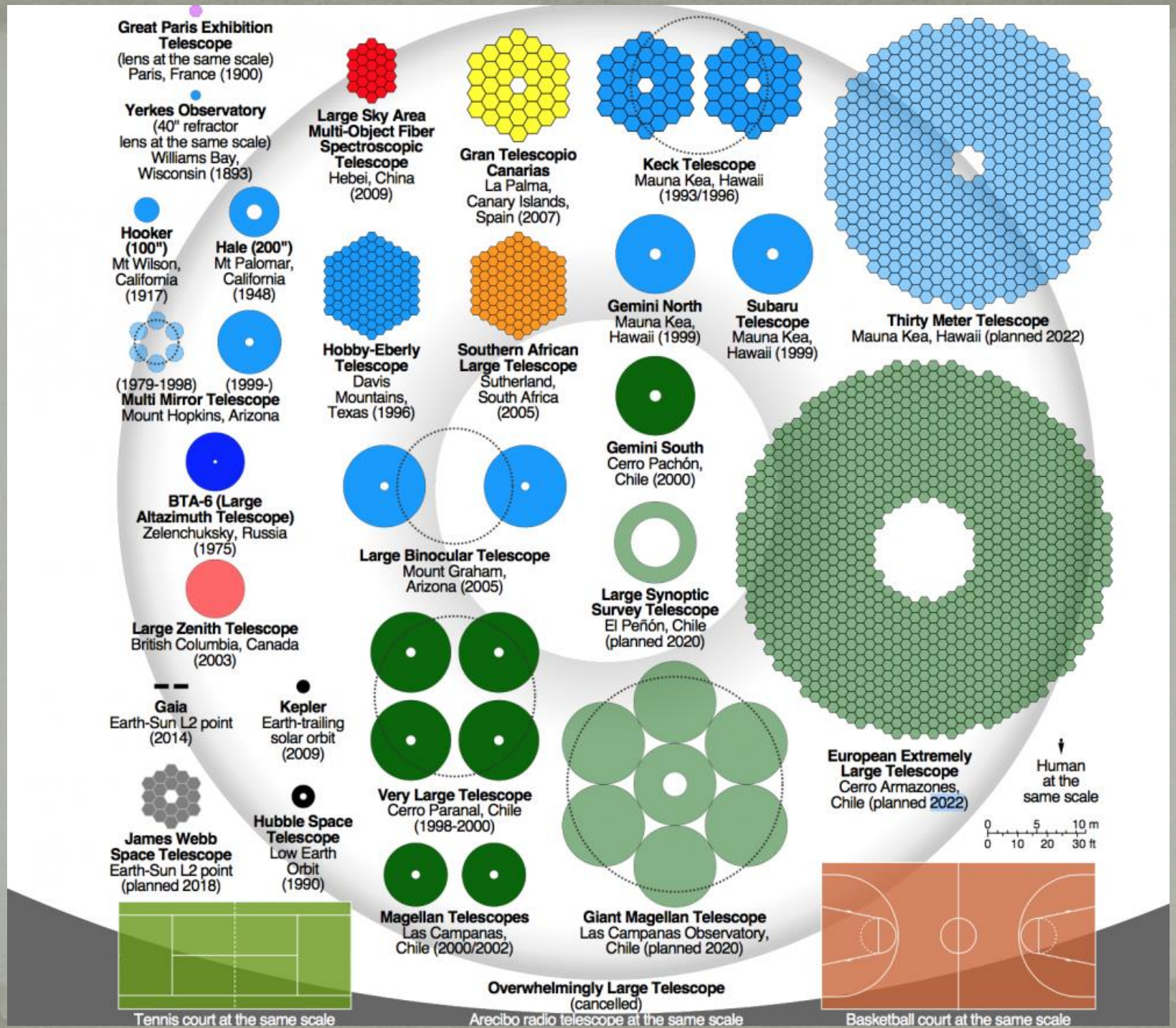
Телескопы – наземные и космические – остаются основными инструментами исследования Вселенной

Крупнейшие наземные телескопы:

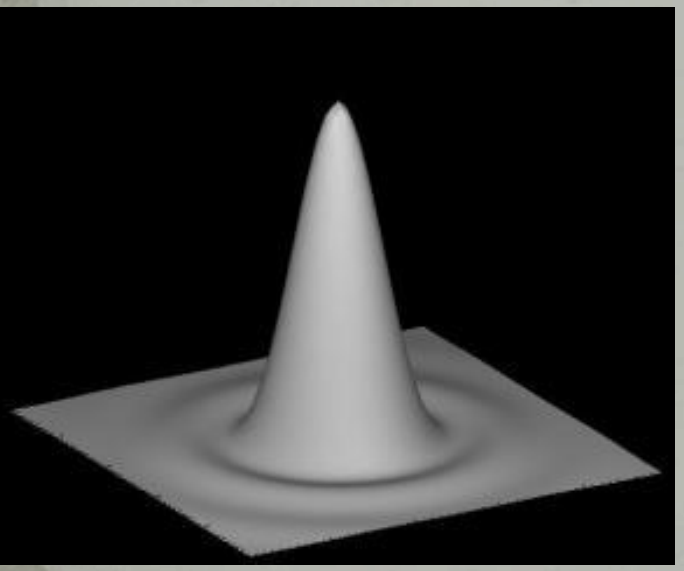
- **1976-1994:** 6-м БТА РАН (КЧР, Сев. Кавказ, РФ)
- **2018: > 15 телескопов с диаметром зеркал более 6 м** (тонкие "гибкие" или "сотовые" зеркала для активной/адаптивной оптики – меняющие форму поверхности для компенсации атмосферных искажений)
- Где устанавливают крупные телескопы ? – В местах с хорошим "астроклиматом" (Чили, Гавайские и Канарские о-ва), т.е. там, где
  - много ясных ночей
  - меньше "дрожание" атмосферы (лучше "качество изображений")
  - меньше водяного пара (для наблюдений в ИК)


12
8
4
United States
Spain
Chile
Large Binocular
Gran Canarias
Keck 1 & 2
SALT
Subaru
VLT
Gemini S.
Gemini N.
Magellan 1&2
MMT
BTA-6
Large Zenith
LAMOST
Hale
MMT
William Herschel
SOAR
Nicholas U. Mayal
AEOS
Victor M. Blanco
Anglo Australian
New Technology
Galileo Nazionale
VISTA
Discovery Channel
1950
1970
1990
2010
year built

Телескоп	Диаметр зеркала, м	Главное зеркало, год установки	Место установки телескопа
KECK (I-II)	2 x 10	Сотовое активное (1994-1996)	Mauna Kea, Hawaii (USA)
VLT (I-IV)	4 x 8.2	Тонкое активное (1998)	Paranal, Chile
GEMINI (N-S)	2 x 8	Тонкое активное (1998-2000)	Mauna Kea, Hawaii (USA) Cerro Pachon, Chile
SUBARU	8.2	Тонкое активное (1998)	Mauna Kea, Hawaii (USA)
LBT (бинокулярный)	2 x 8.4	Сотовое толстое (2001)	Mt. Graham, AZ (USA)
HET(Hobby&Eberly)	11 (эффект. 9.5)	Ограниченный обзор (1998)	Mt. Fowlkes, TX (USA)
MMT	6.5	Сотовое толстое (1998)	Mt. Hopkins , AZ (USA)
MAGELLAN (I-II)	2 x 6.5	Сотовое толстое (1999)	Las Campanas, Chile
БТА САО РАН	6.0	Сплошное толстое 1976)	г. Пастухова, КЧР (РФ)
GTC	10	Аналог KECK II (2002)	La Palma, Canaries (Spain)
LAMOST	5-7	В меридиане; сотовые	Китай
SALT	11	Ограниченный обзор (2005)	Sutherland (SAR)
E-ELT	39	После 2022	Chile
TMT	30	После 2025	Mauna Kea, Hawaii (USA)

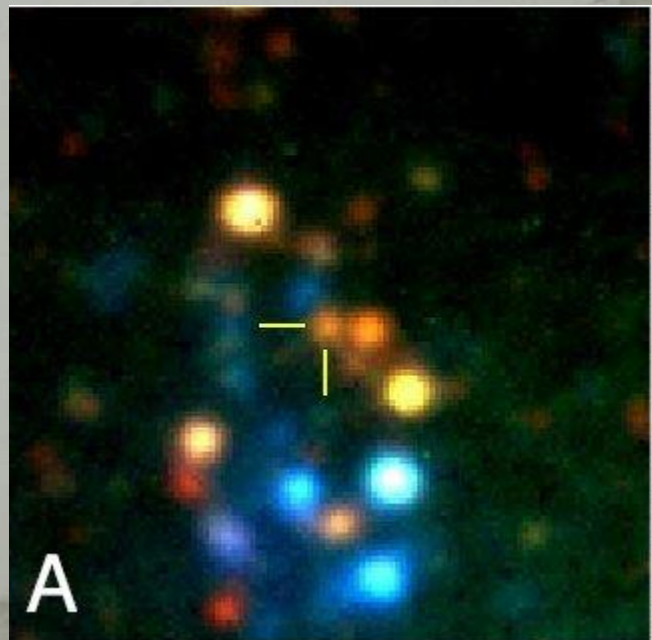

Great Paris Exhibition Telescope
(lens at the same scale)
Paris, France (1900)
Yerkes Observatory
(40" refractor
lens at the same scale)
Williams Bay, Wisconsin (1893)
Hooker (100")
Mt Wilson, California (1917)
Hale (200")
Mt Palomar, California (1948)
(1979-1998)
(1999-)
Multi Mirror Telescope
Mount Hopkins, Arizona
BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)
Zelenchuksky, Russia (1975)
Large Zenith Telescope
British Columbia, Canada (2003)
Gaia
Earth-Sun L2 point (2014)
Kepler
Earth-trailing solar orbit (2009)
James Webb Space Telescope
Earth-Sun L2 point (planned 2018)
Hubble Space Telescope
Low Earth Orbit (1990)
Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
Hebei, China (2009)
Hobby-Eberly Telescope
Davis Mountains, Texas (1996)
Gran Telescopio Canarias
La Palma, Canary Islands, Spain (2007)
Southern African Large Telescope
Sutherland, South Africa (2005)
Large Binocular Telescope
Mount Graham, Arizona (2005)
Very Large Telescope
Cerro Paranal, Chile (1998-2000)
Magellan Telescopes
Las Campanas, Chile (2000/2002)
Keck Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)
Gemini North
Mauna Kea, Hawaii (1999)
Subaru Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1999)
Gemini South
Cerro Pachón, Chile (2000)
Large Synoptic Survey Telescope
El Peñón, Chile (planned 2020)
Giant Magellan Telescope
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)
Thirty Meter Telescope
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)
European Extremely Large Telescope
Cerro Armazones, Chile (planned 2022)
Overwhelmingly Large Telescope
(cancelled)
Human at the same scale
0 5 10 m
0 10 20 30 ft
Tennis court at the same scale
Arecibo radio telescope at the same scale
Basketball court at the same scale

- **Задача:** не только собрать как можно больше света, но и максимально сконцентрировать его
- Самая большая помеха астрономическим наземным наблюдениям – атмосферная турбулентность, размывающая детали

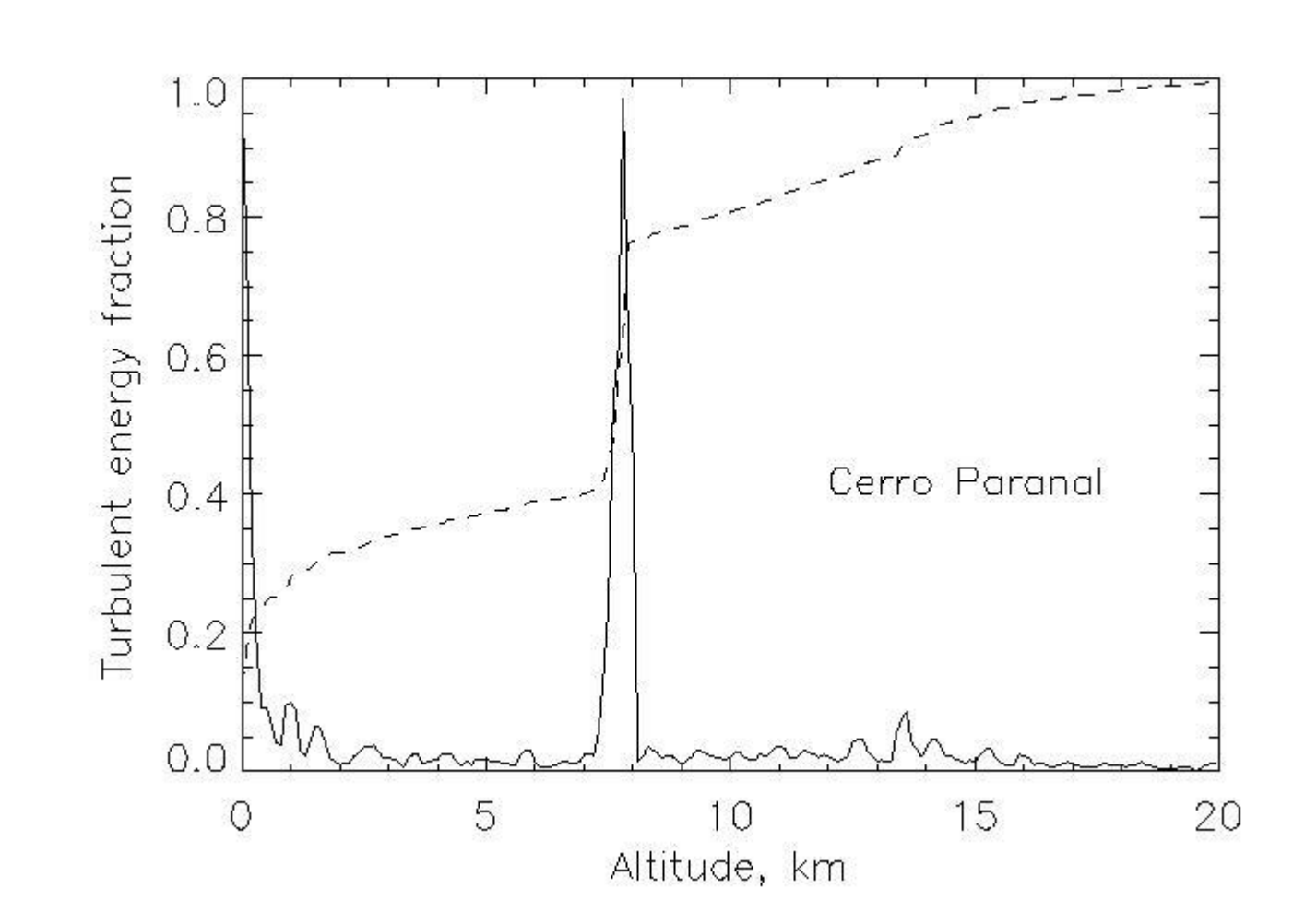


Так выглядело бы дифракционное изображение звезды в идеальном телескопе

- … а так выглядит на самом деле:



- Высотное распределение энергии турбулентных движений на г. Паранал (Чили), где установлены 4x8.2-м телескопа VLT



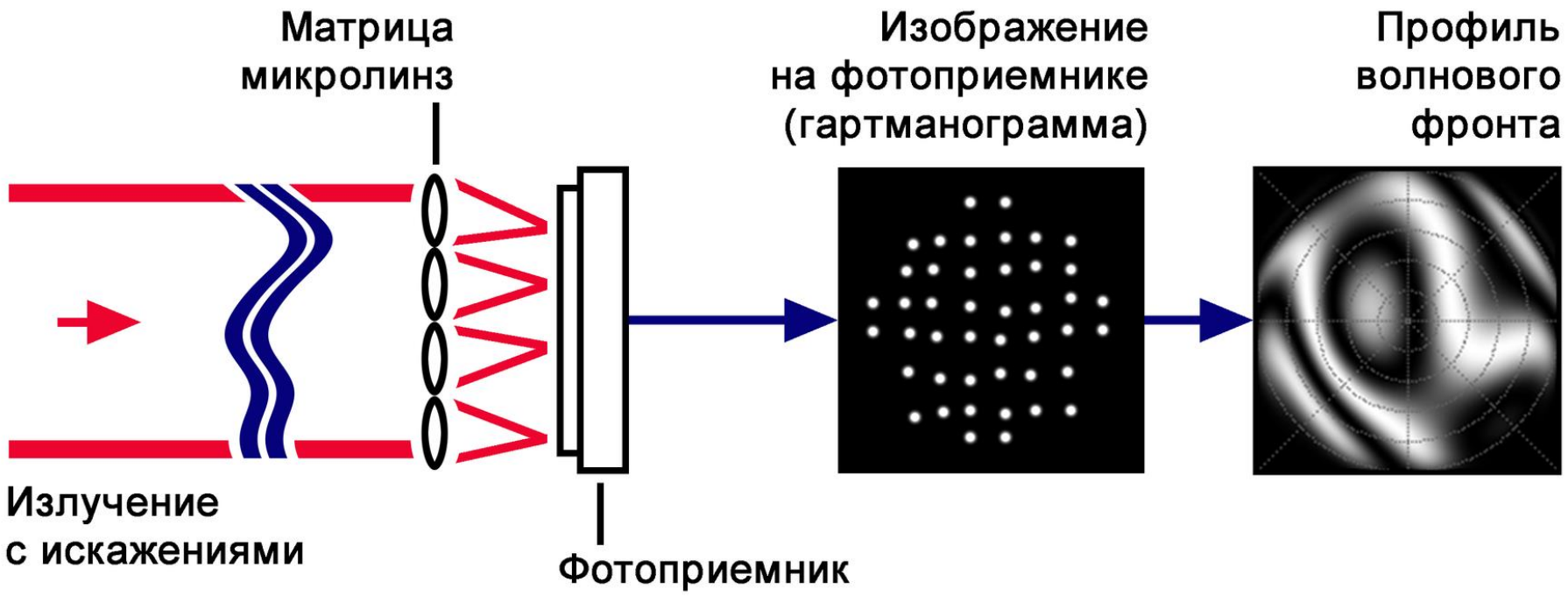
Приземный слой и верхняя граница тропосферы вносят самый большой вклад
Как решают эти проблемы ?

Плоские волны от удалённого источника

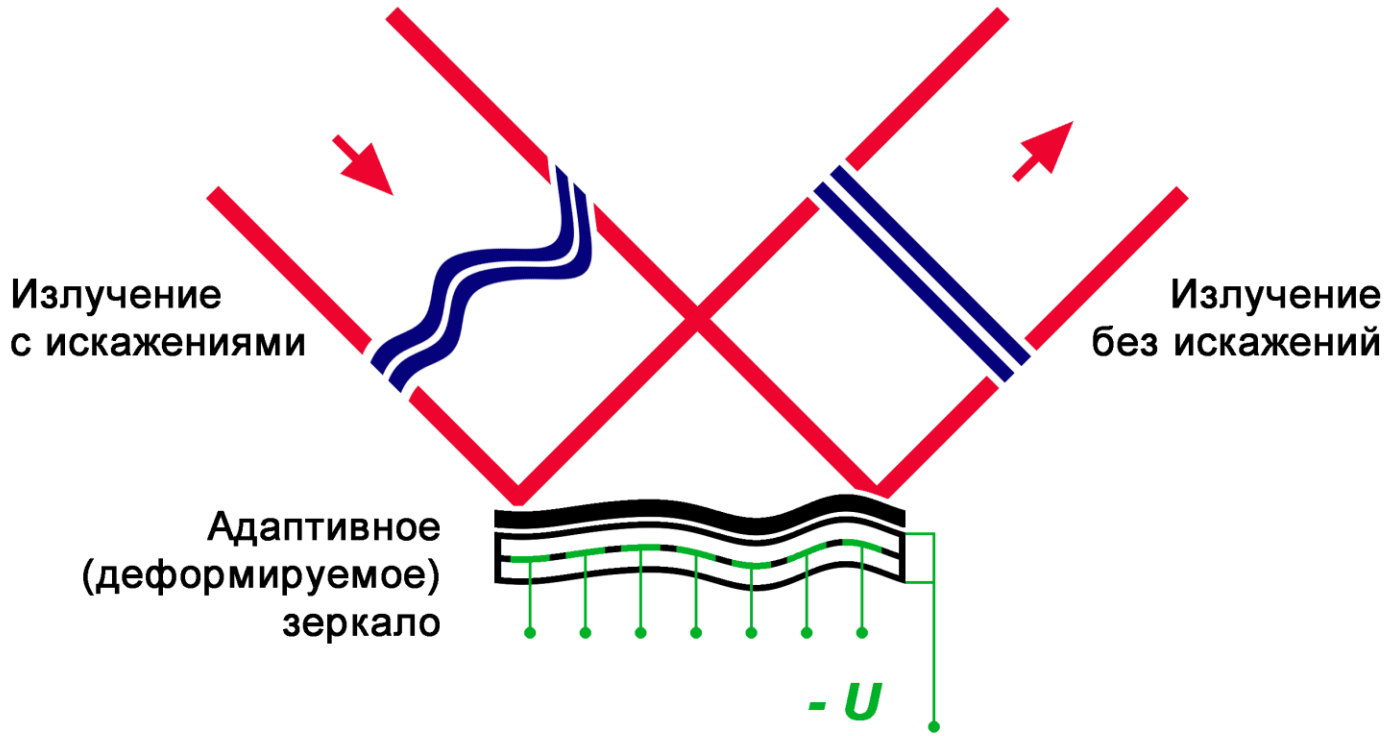
Турбулентный слой
в атмосфере

Искажённые
волны

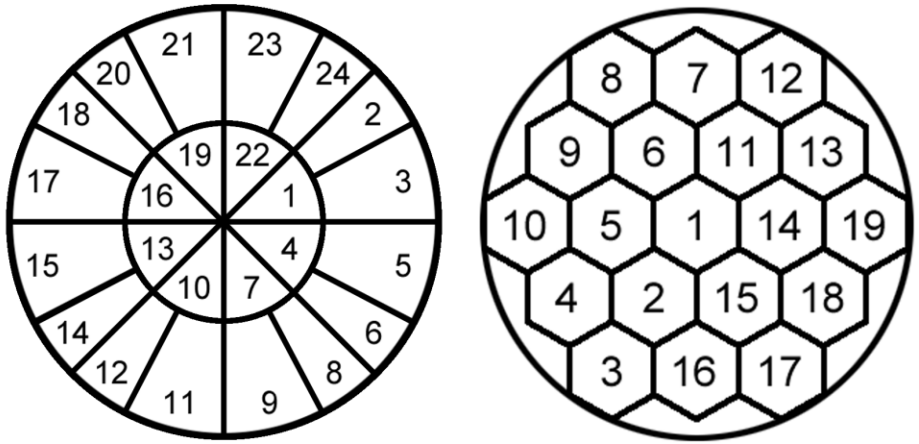
- Анализ профиля волнового фронта: диафрагма Шэка-Гартмана



- Восстановленный фронт используется системой управления коррекцией зеркала / зеркал



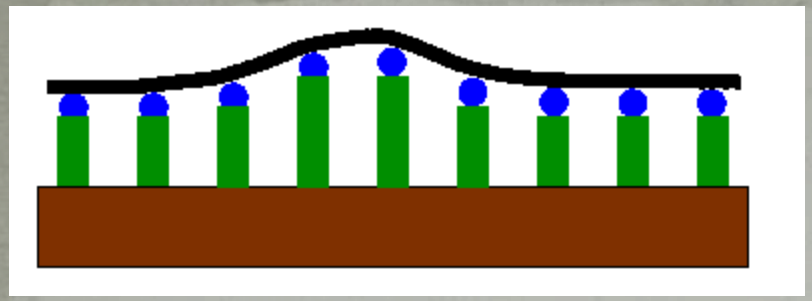
Варианты расположения электродов на зеркале



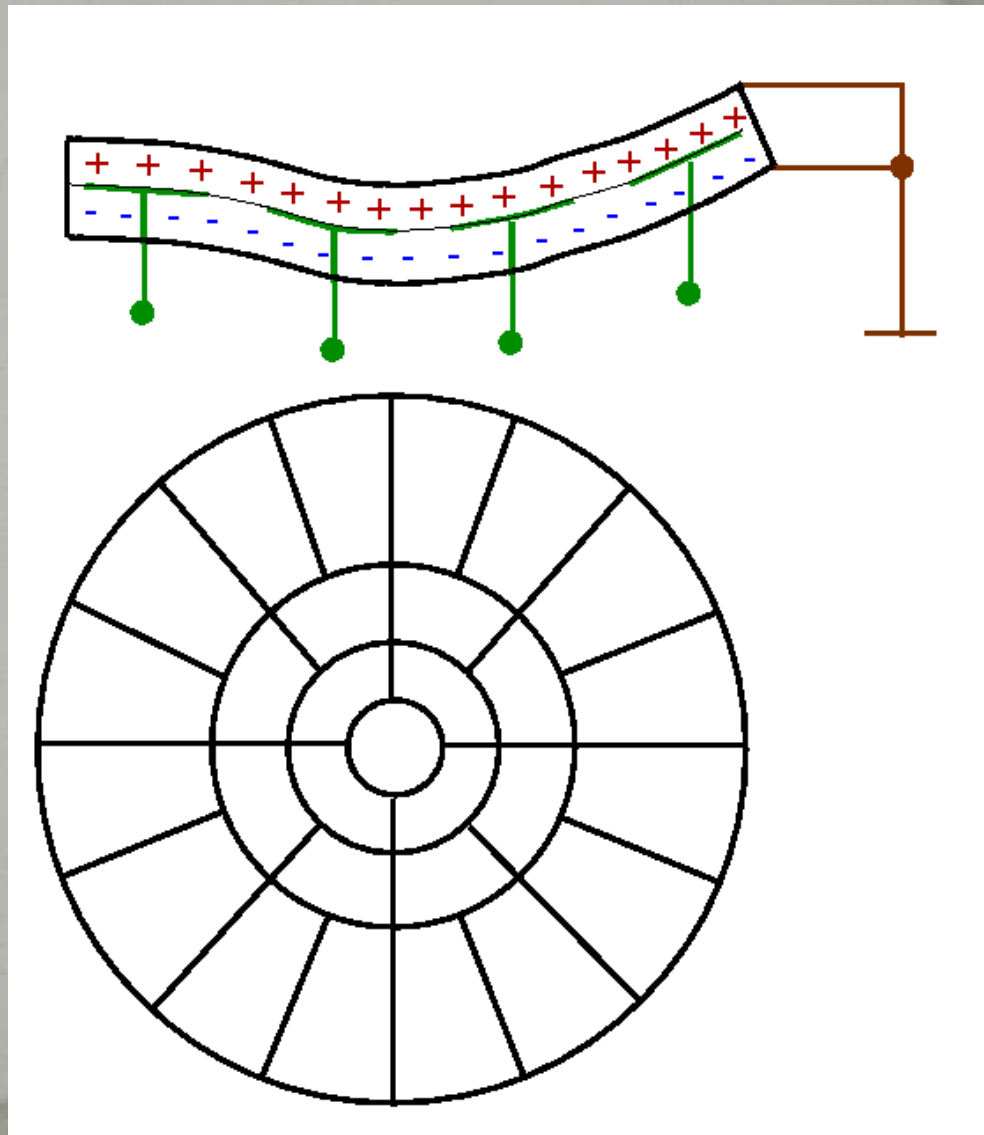
Биморфное деформируемое зеркало

Две пьезоэлектрических пластины с разной поляризацией

При подаче напряжения одна укорачивается, другая удлиняется, создавая изгиб зеркала

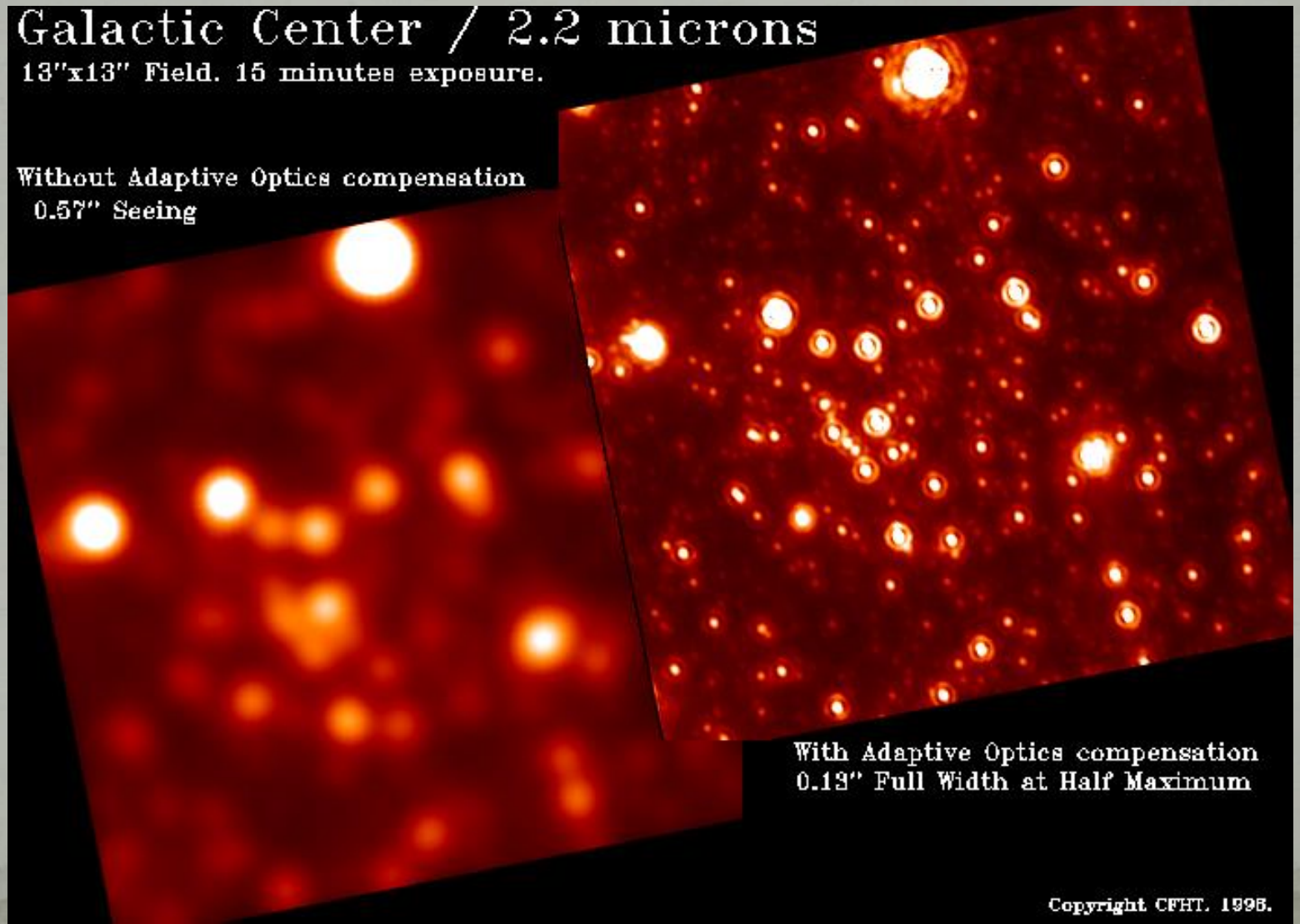


Пьезокристаллические актуаторы (толкатели)



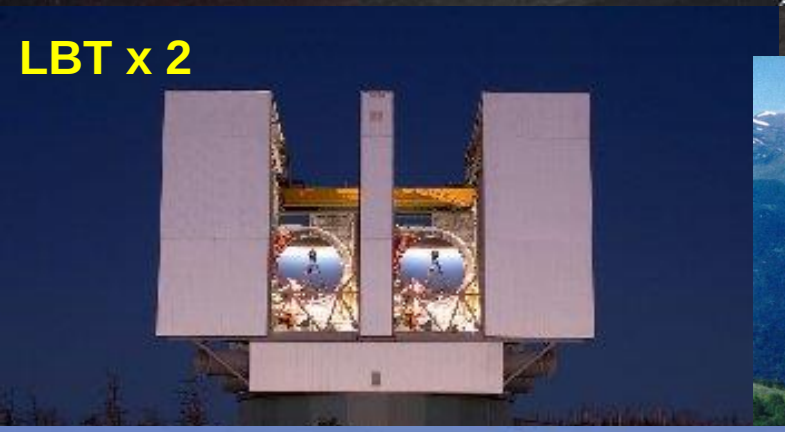
Биморфные зеркала с разной поляризацией деформируются напряжения

- Результат применения адаптивных систем к исследованию центра Галактики (CFHT – 4-м телескоп, Гавайи, США)

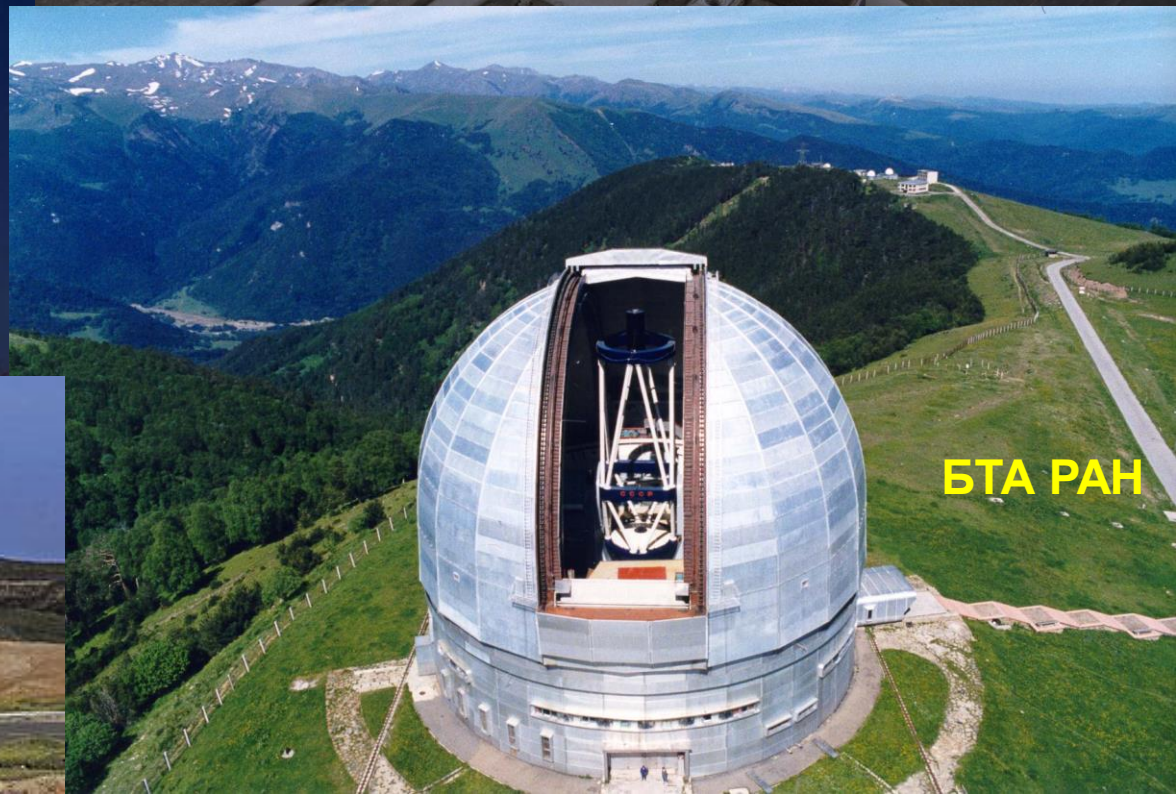


Keck x 2

VLT x 4 + 4


LBT x 2

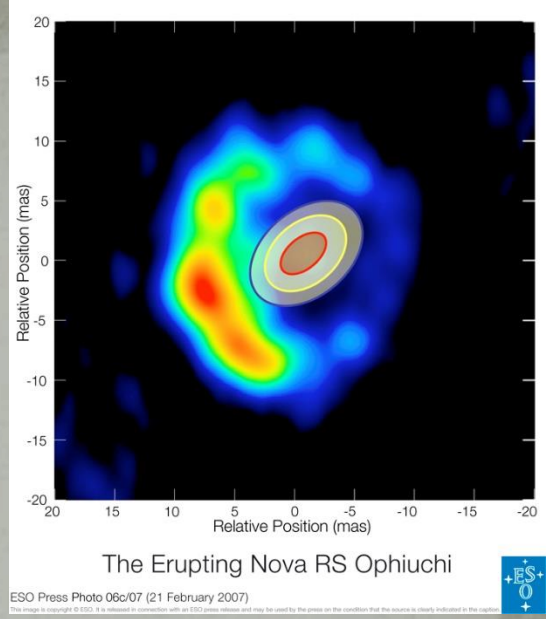
GTC

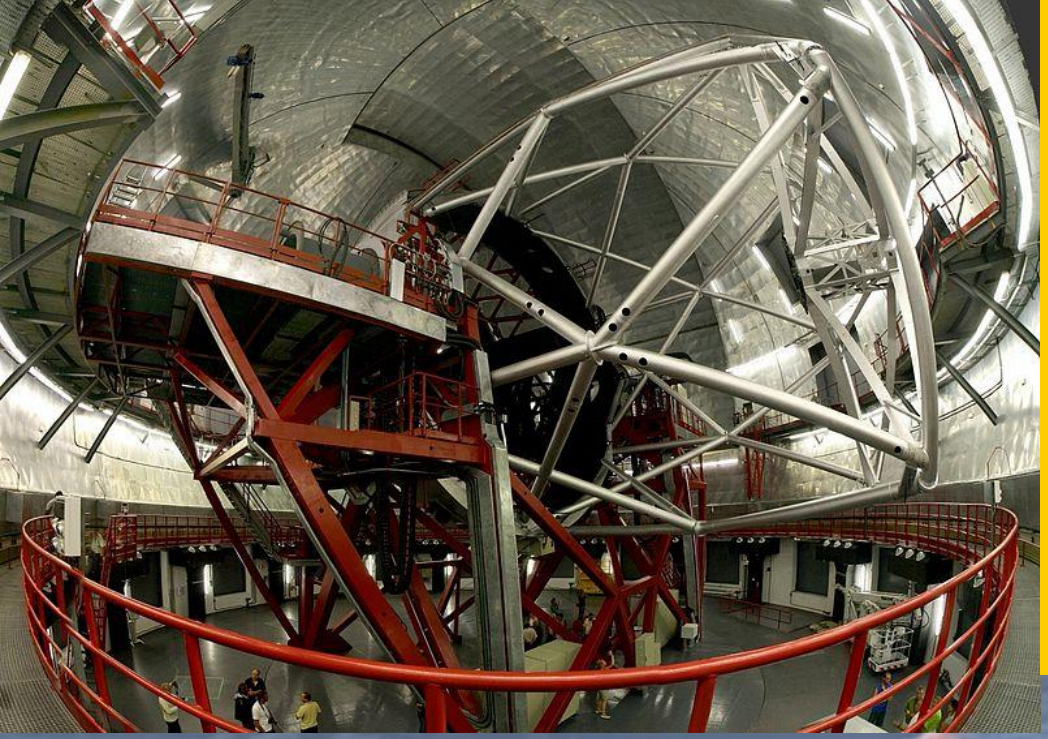

БТА РАН

- 2 x 10-м телескопа **Keck** – вулкан Mauna Kea (Hawaii, USA), высота ~4100 м

Адаптивные мозаичные зеркала из 36 сегментов

- VLT: адаптивные изображения богатого звёздного скопления Arches в центре Галактики (слева) и оболочки Новой (справа)





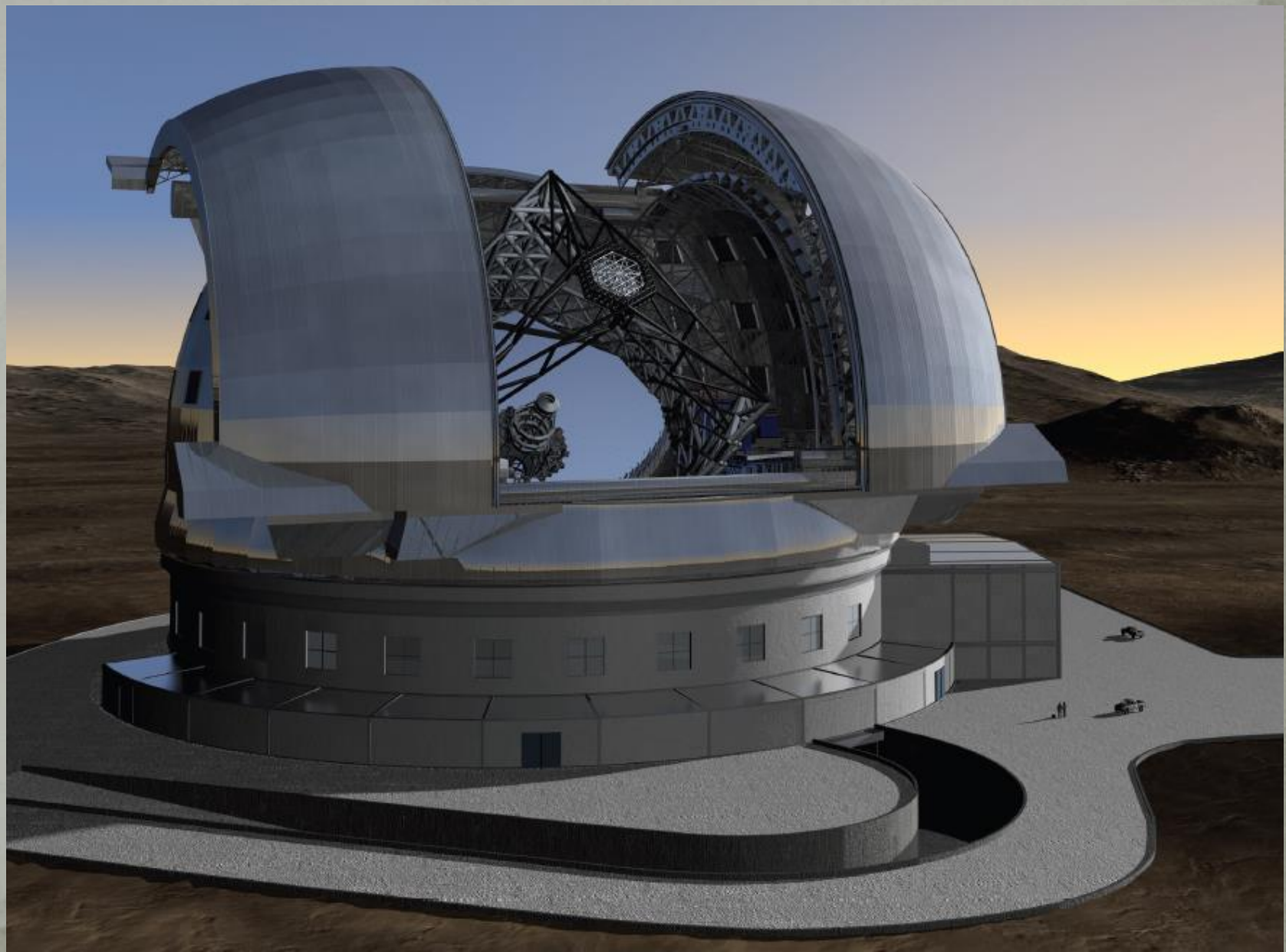
10.4-м телескоп GTC
(Gran Telescopio Canarias)
обсерватории
Roque de los Muchachos
(La Palma, Canaries,
Испания, 2267 м)
36 сегментов, 2007
f = 16.5 м

Полевая спектроскопия
в оптике и ИК (OSIRIS)
Камера CanariCam (7.5-25 мкм)

E-ELT (European Extremely Large Telescope)

http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html

ESO

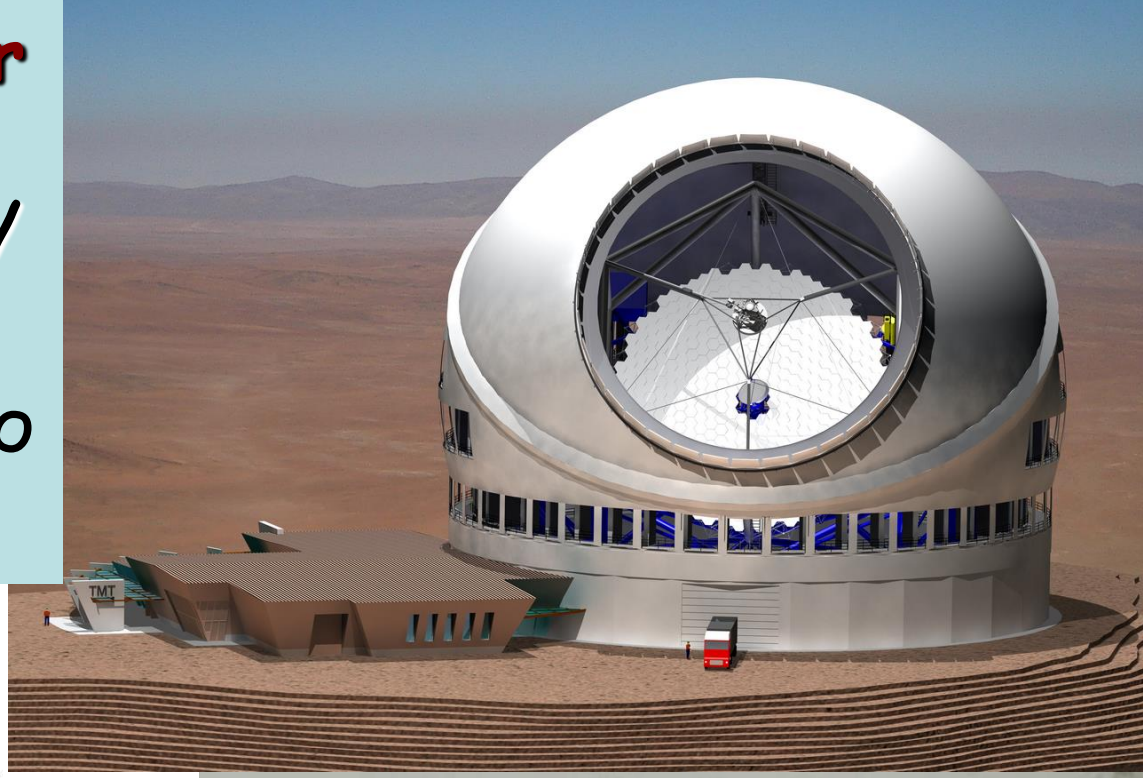


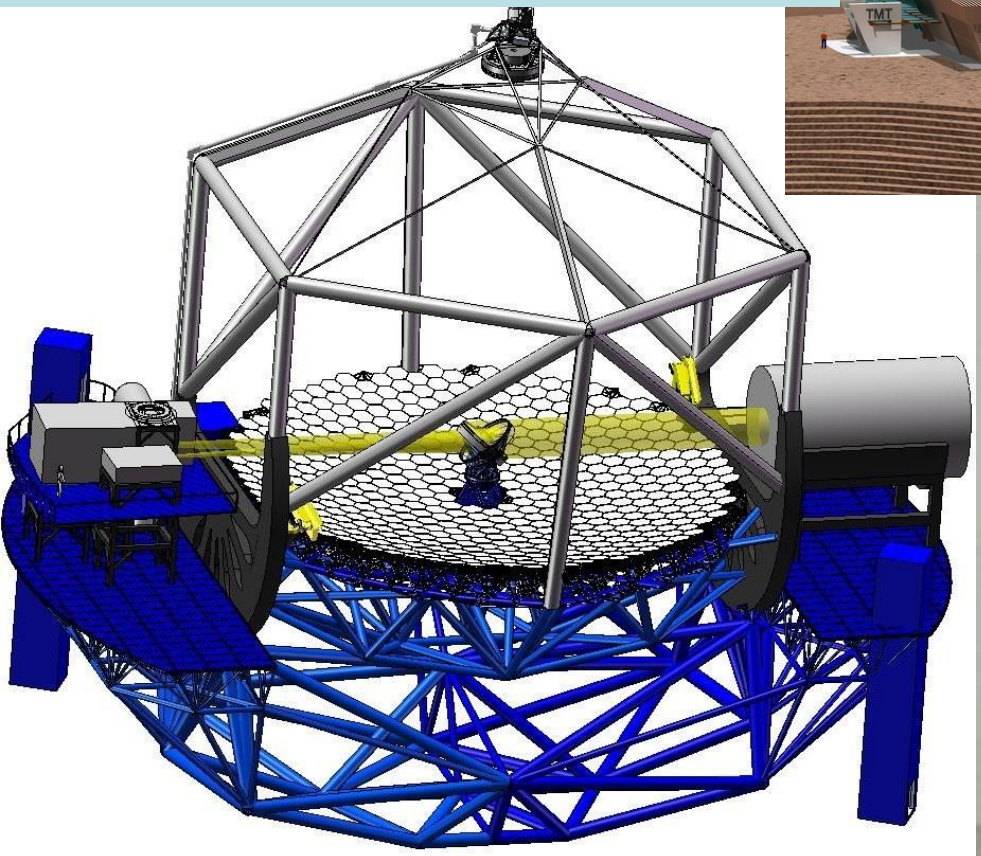
- **E-ELT:** 39-м адаптивное зеркало, состоящее из ~798 1.4-м шестиугольных сегментов (мозаика)

- Установка: Чили (г. Cerro Armazones, 3060 м)
- Первый свет ожидается в 2024 (?)
- Предельные задачи по разрешению и глубине

- **Стоимость: ~1 млрд. Е (~ кубу диаметра)**

- **TMT (Thirty Meter Telescope)**
  http://www.tmt.org/
  Мозаичное адаптивное зеркало 30 м





Mauna Kea (4050 м), Hawaii, USA

Первый свет в 2027 ?

- **Консорциум ESO: 1-я обсерватория в La Silla (Чили)**
- Высота 2400 м
- Крупнейшие телескопы:
- 3.5-м NTT – адаптивная оптика
- 3.6-м – поиск экзопланет, спектрограф HARPS

…+ 1.2-м, 1.5-м, 2.2-м телескопы

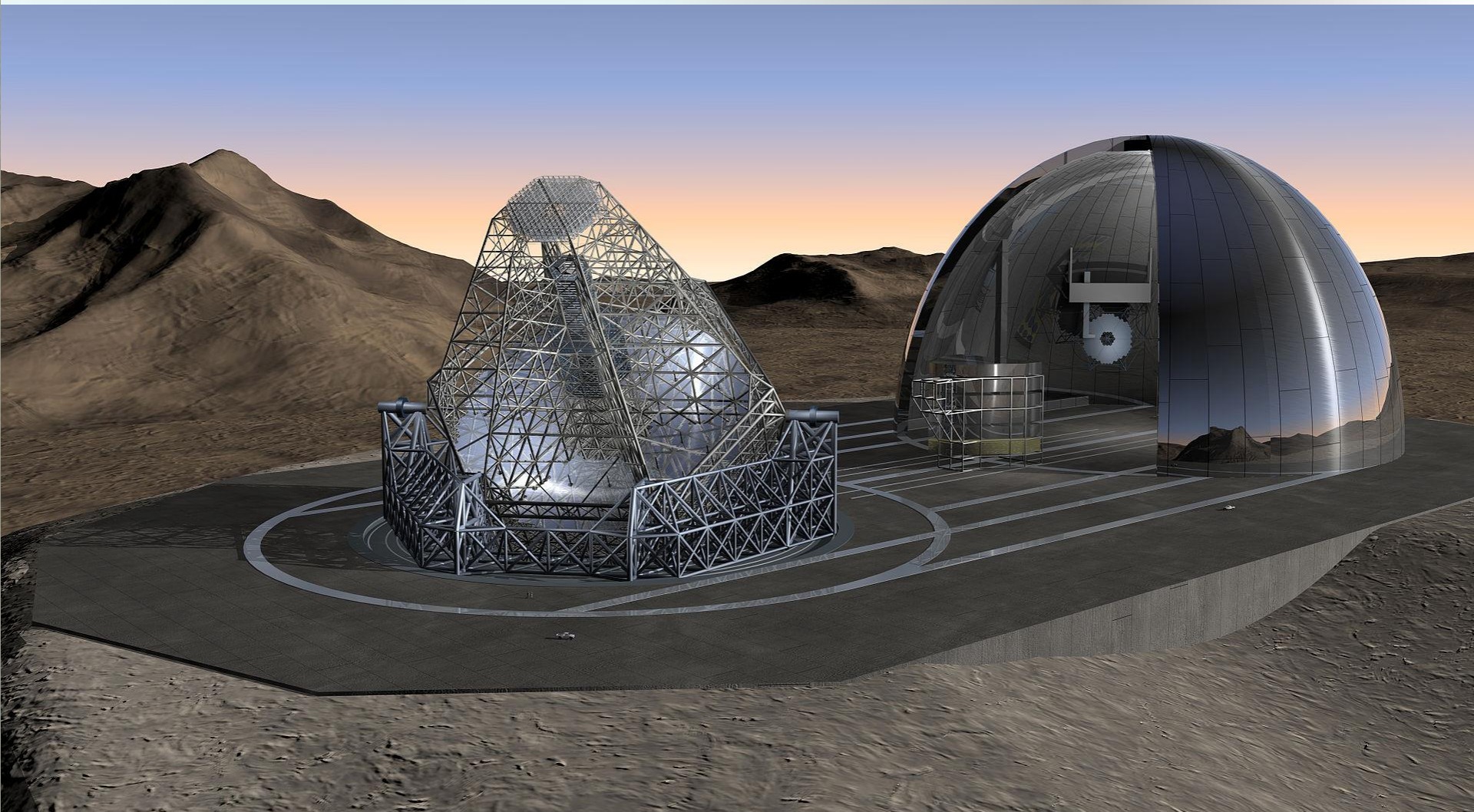
- **ESO (2-я обсерватория на г. Паранал, Чили)** – консорциум ESO (15 европейских стран)
- 4 x 8.2-м VLT + 4 x 1.8-м мобильных телескопа для оптической и ИК-интерферометрии (первый свет 1998; все 4 телескопа с 2000) + VISTA (4.1-м) + VLT Survey Telescope (2.5-м)

- **VISTA** (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) - 4.1-м телескоп с камерой VIRCAM (VISTA InfraRed CAMera, поле зрения 1.65 гр.) (с 2009)

- **VST** (VLT Survey Telescope) - 2.6-м широкопольный обзорный телескоп (с 2011)

Дополнительные инструменты ESO (Паранал)

OWL: OverWhelmingly Large Telescope или “Потрясающе Большой Телескоп” (100 м !) (ESO – проект пока отменён)

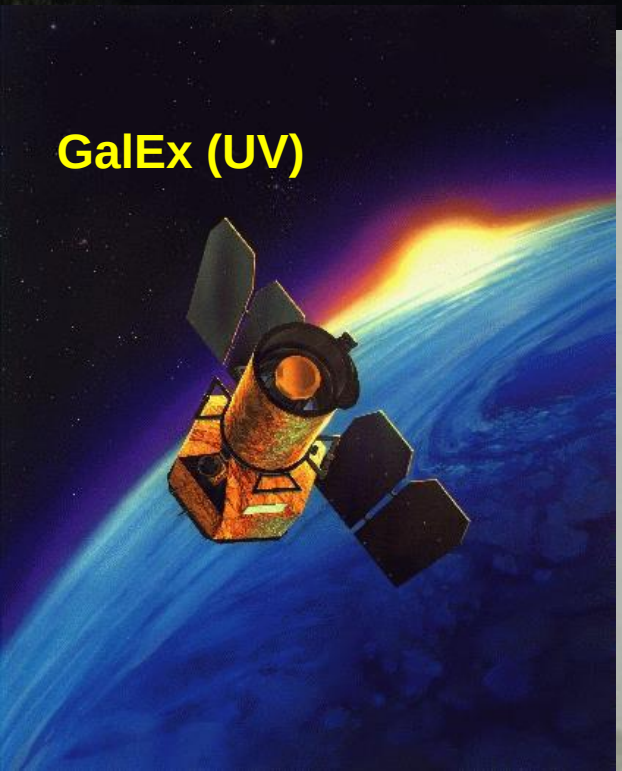


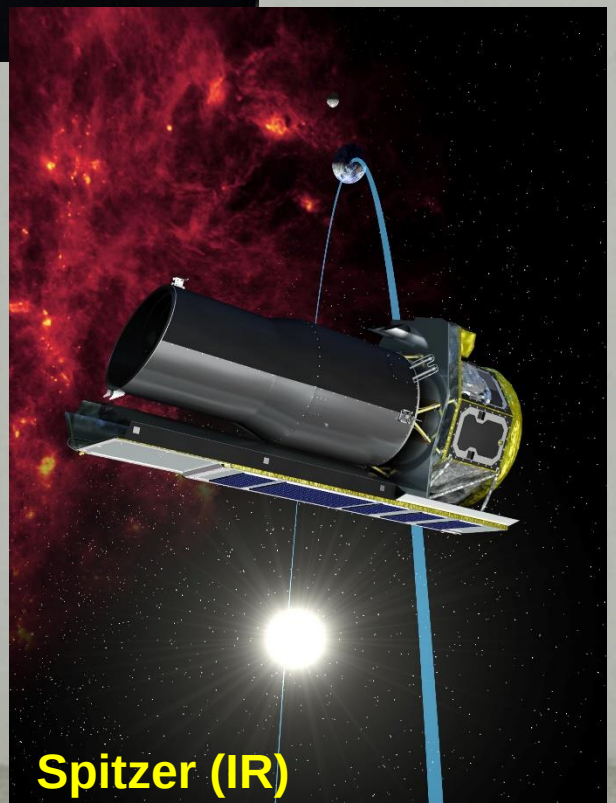
А есть ещё и радиотелескопы…

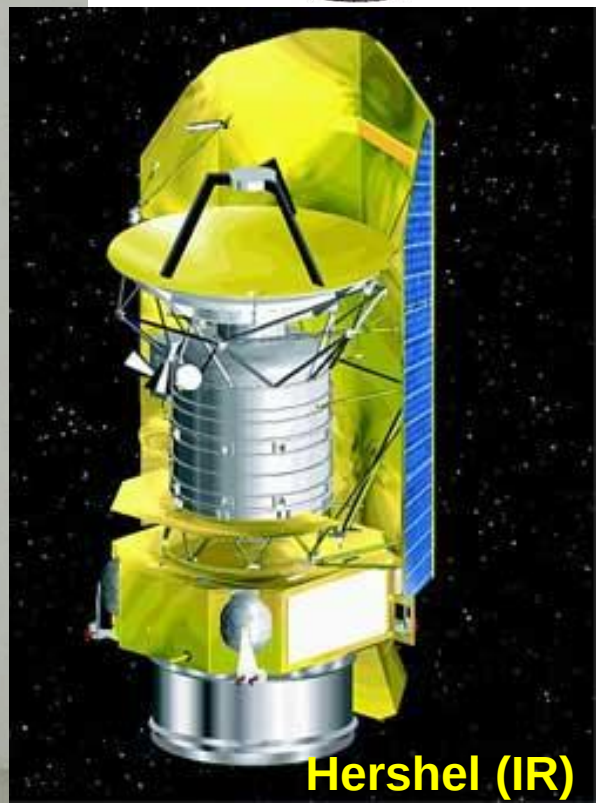
Действующие и будущие космические телескопы

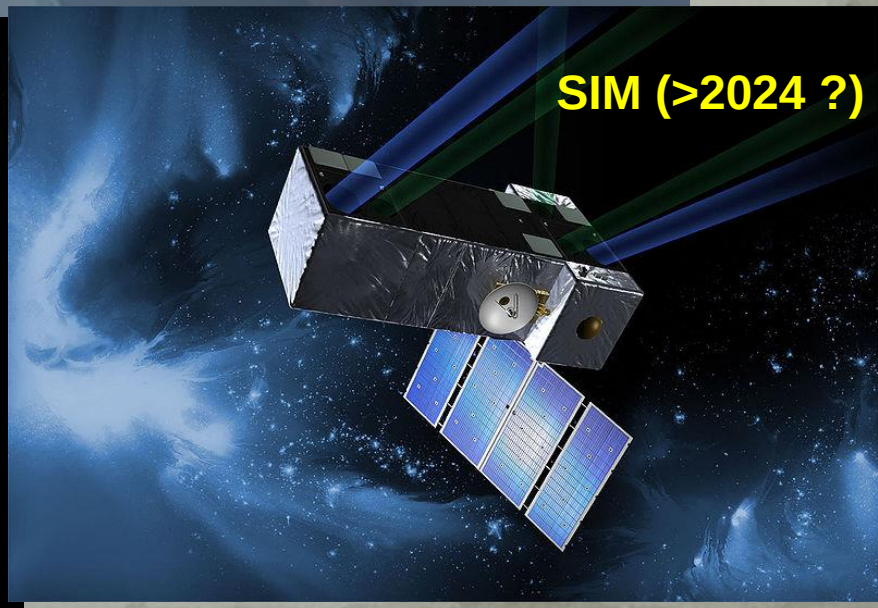
- За ~60 лет космической эры было реализовано более 120 астрономических проектов, сделавших астрономию **всеволновой наукой:**
  - Гамма- и рентгеновские лучи (< 10 nm)
  - Ультрафиолетовое излучение (100-300 nm)
  - Оптика (300-700 nm)
  - Инфракрасный диапазон (700 nm – 100 mkm)
  - Микроволновый диапазон (100 mkm – 2 mm)
  - Радиодиапазон (> 2 mm)

Реализованные:









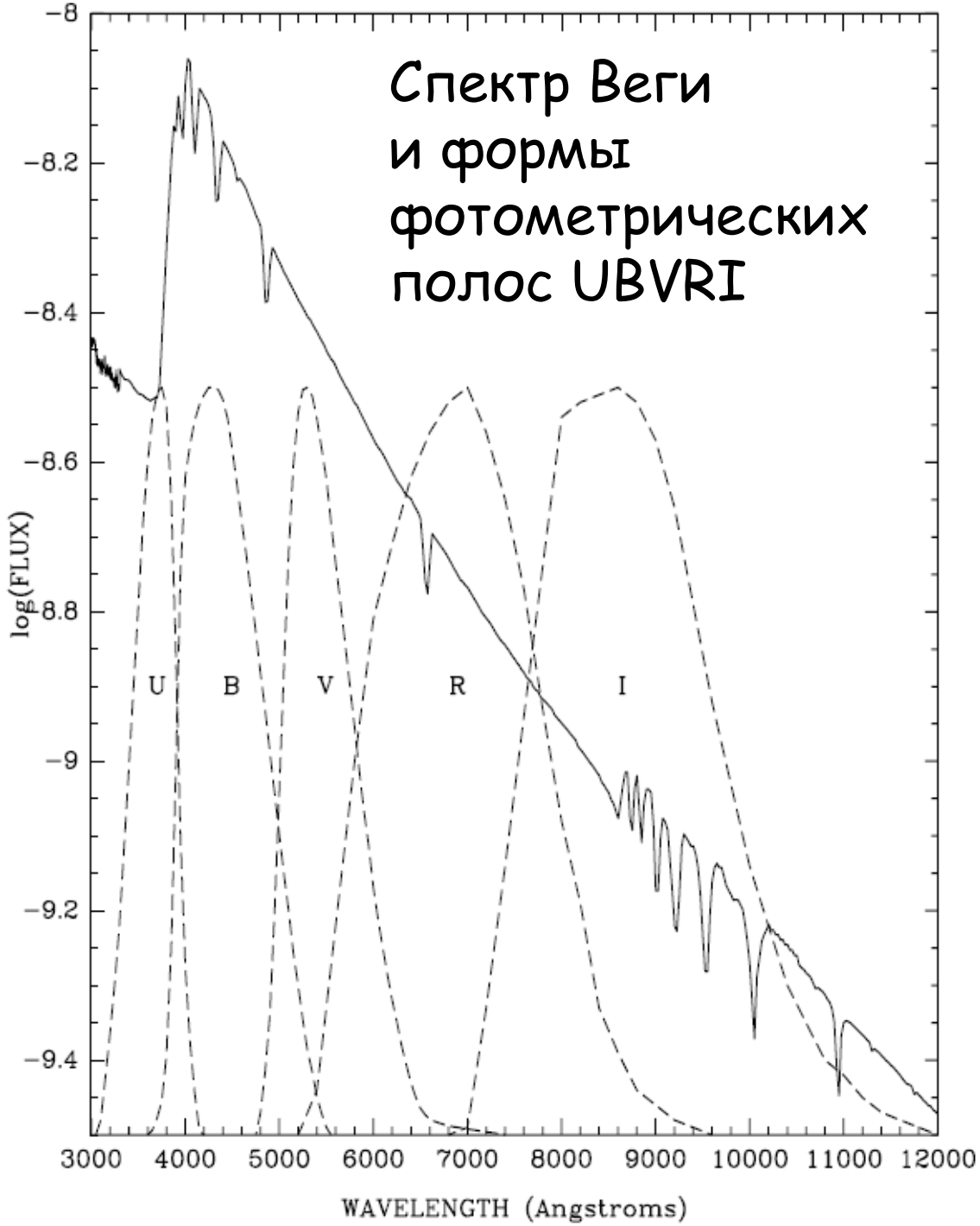
Ожидаемые

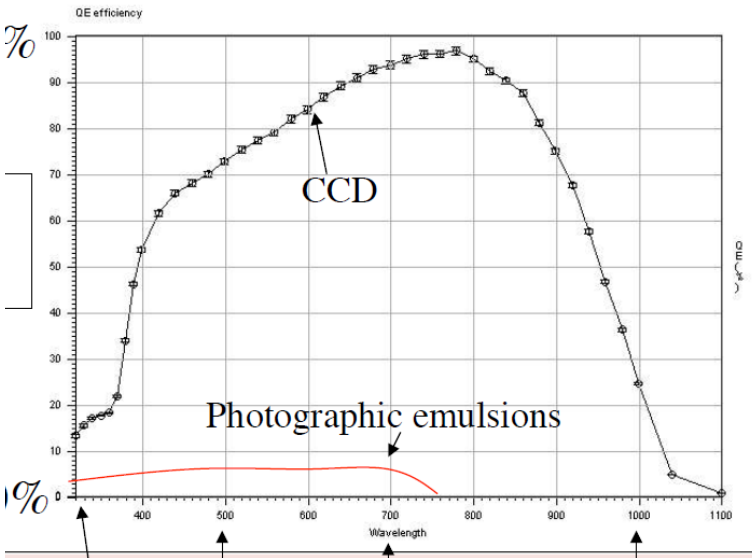
- **Крупнейшие наземные и космические телескопы благодаря большим апертурам решают предельные задачи:**
  - По блеску - звёзды слабее 24^m (в 15 млн. раз слабее, чем видит глаз)
  - По угловому разрешению – до 0.1″ (критерий Рэлея: $\delta \approx 1.22\ \lambda/D$)
  - Спектроскопия слабых звёзд: определение химического состава, лучевых скоростей
  - Изучение далёких галактики и их населения
- **Наблюдательное время на них дорого: порядка $30-50 тыс./час**
- **Приоритет: уникальные наблюдения**

- **“Рабочие лошадки” наземной астрономии – телескопы умеренной апертуры: 1 – 4 м для изучения Млечного Пути**

- Именно они ведут “всенебесные” обзоры, обеспечивая астрономию массовым наблюдательным материалом:
  - Многоцветные фотометрические (оптика/ИК) наблюдения
  - Спектральные (лучевые скорости / химический состав звёзд) измерения
  - Открытие и изучение переменных звёзд

Спектр Веги и формы фотометрических полос UBVRI





Кривая чувствительности современной ПЗС-матрицы

Блеск звёзд измеряют в разных полосах спектра излучения

- **XXI век – эпоха многочисленных мегапроектов – “всенебесных” (all-sky) обзоров и каталогов**

Основные мегапроекты:

- USNO B1.0
- UCAC5
- **2MASS**
- **WISE**
- **SDSS**
- RAVE
- SuperCosmos
- SkyMapper
- UKIDS
- **IPHAS-VPHAS+**
- ASAS 3
- CATALINA
- **LAMOST**
- **Pan-STARRS**
- **GAIA (DR2)**

…

Уже содержат до 2-х миллиардов (!) объектов

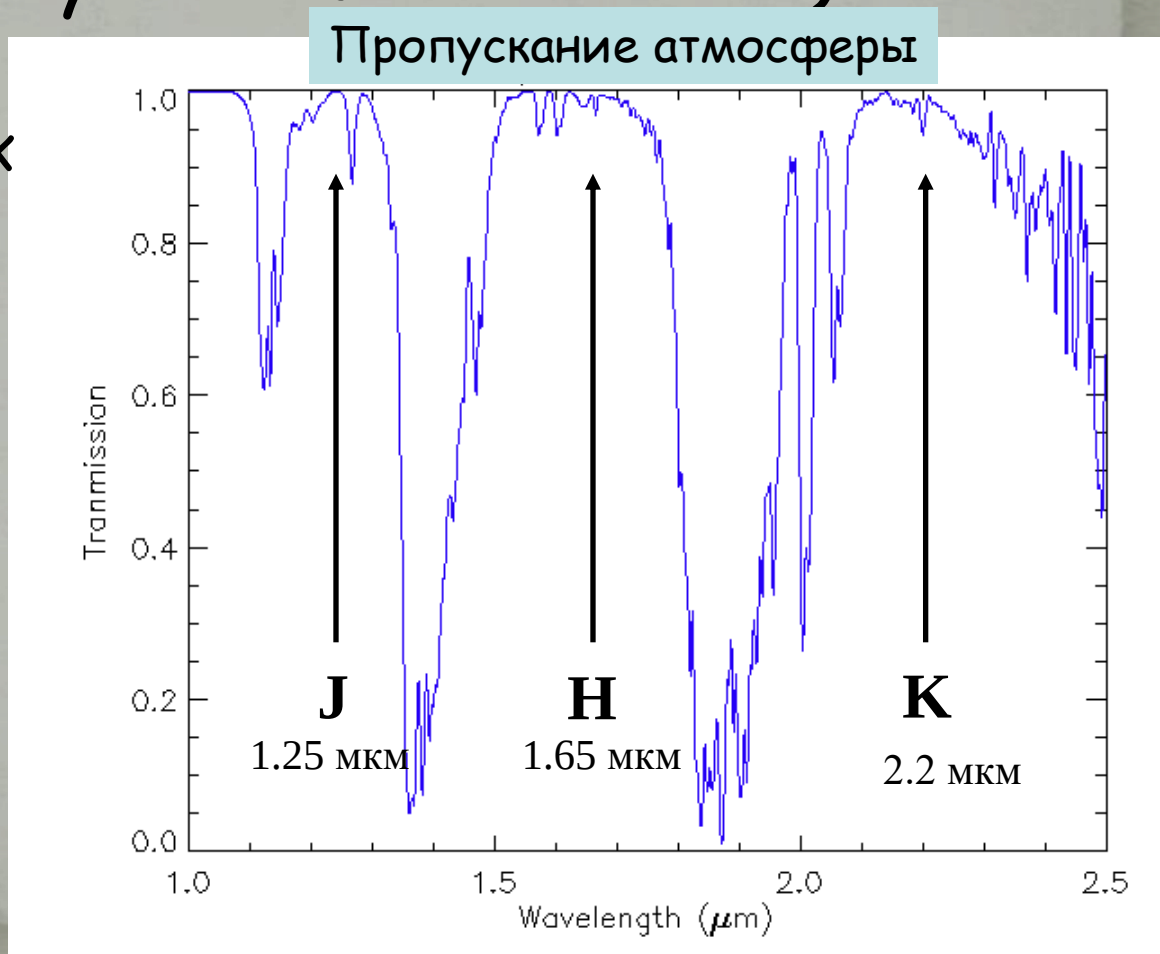
- **Многие проекты ориентированы на ИК-диапазон**
- **Межзвёздная пыль** сосредоточена в тонком диске толщиной ~200 кпк, и Солнце находится в самой толще газо-пылевого диска Галактики - мы видим Млечный Путь "с ребра"
- Пыль ослабляет свет звезд: на пути в 1 кпк в оптике в среднем в 4 раза, искажает картину распределения объектов
- Поглощение в направлении на центральную область Галактики (~8 кпк) достигает **20 – 30^m, т.е. свет ослабляется в ~100 млн. раз !**
- **В ИК (~2 мкм) ослабление всего в 10 раз…**

Самые популярные массовые ("всенебесные") обзоры после HIPPARCOS

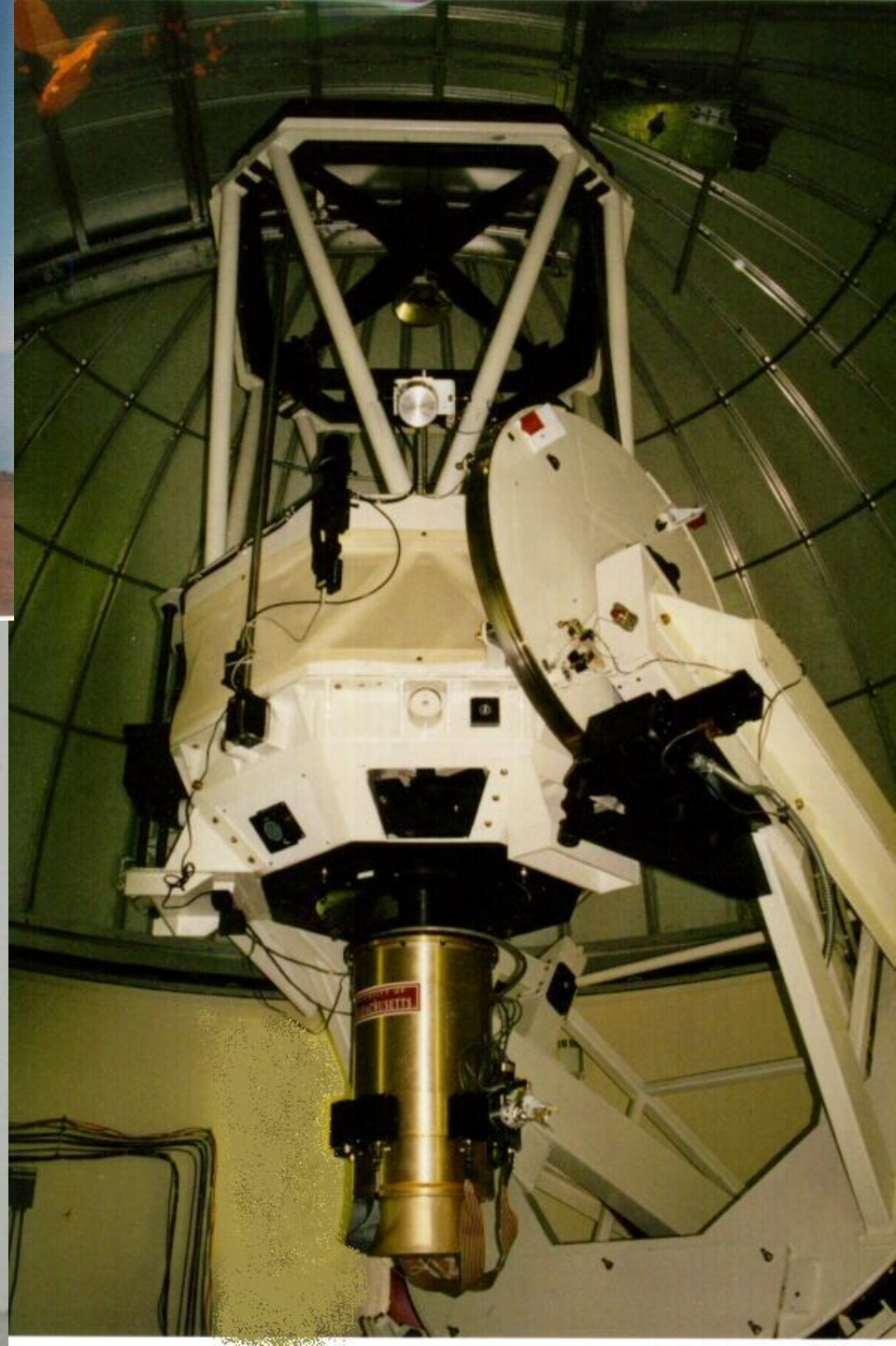
- **2MASS: Two Micron All Sky Survey :**
- http://www.ipac.caltech.edu/2mass/

(Массачусетский ун-т + JPL/Caltech)

Один из самых крупных и успешных проектов в астрономии. Диапазон JHK (окна прозрачности атмосферы, **поглощение света** пылью $A_K \sim 0.12\ A_V$ (в звёзд. величинах).

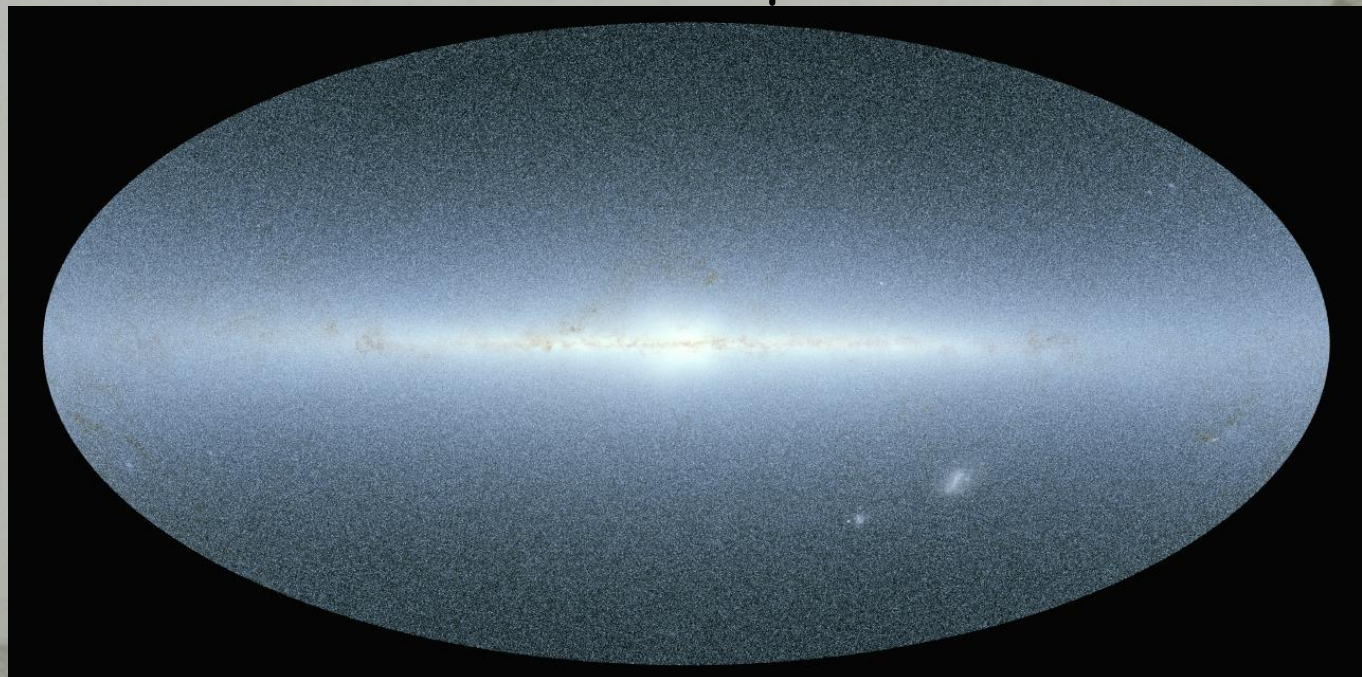


Башня в Аризоне
и 1.3-м телескоп



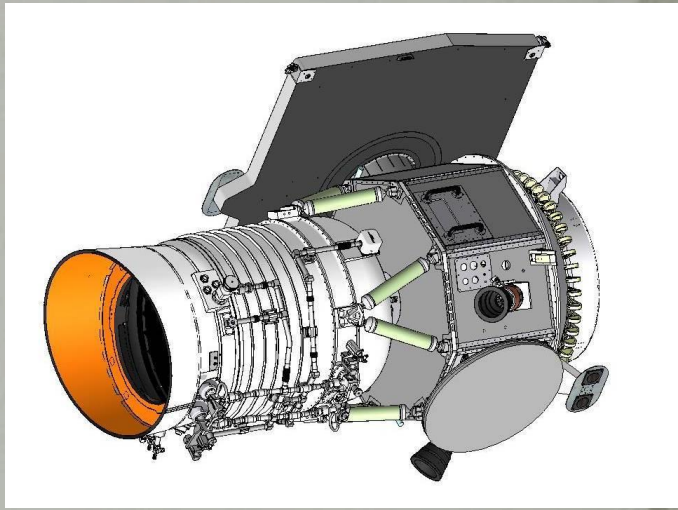
- **~ 471 млн. звезд и 1.6 млн. протяженных источников**
- До ~16^m в полосах JHK (1.25, 1.65, 2.2 мкм)
- Наблюдения на двух идентичных 1.3-м телескопах: Mt. Hopkins, AZ (США) и CTIO (Чили)
- **Достоинства:**
  - Массовость
  - Поглощение света пылью в ИК на порядок меньше, чем в оптике

Вид Млечного Пути в ИК



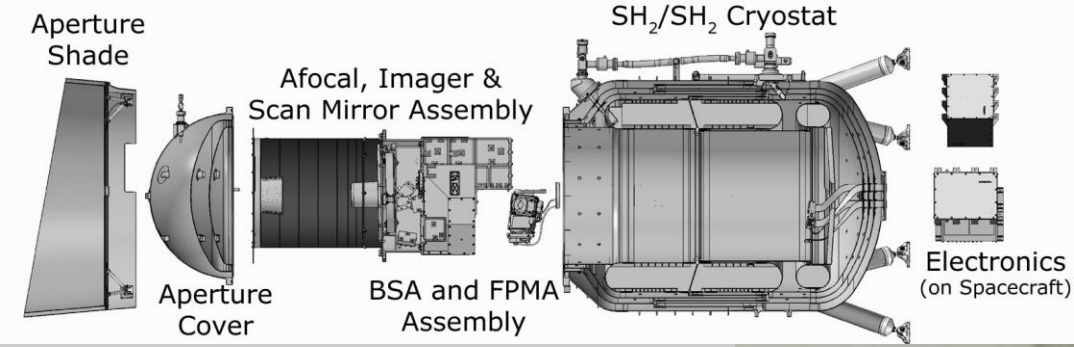
WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) (UCLA-Caltech/JPL, NASA, 2009-2011)

- 40-см орбитальный ИК телескоп для обзора всего неба
- Полосы **W1–W4 (3.35, 4.6, 11.6, 22.1 мкм)**, поле зрения 47′
- “Расширение” обзора 2MASS
- Каталог (DR 2013) содержит данные о **~748 млн.** объектов ярче 14-15^m



Успешный поиск “бурых карликов”

-



Ссылка CDS:
http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?II/328
(Cutri et al. 2013)

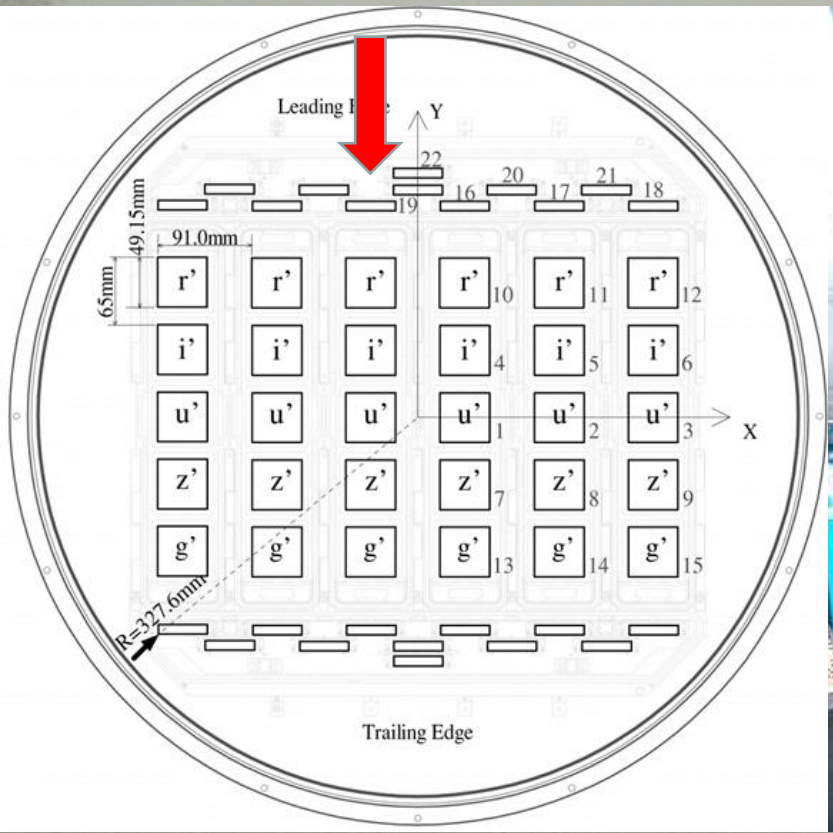
Один из самых успешных мировых проектов -

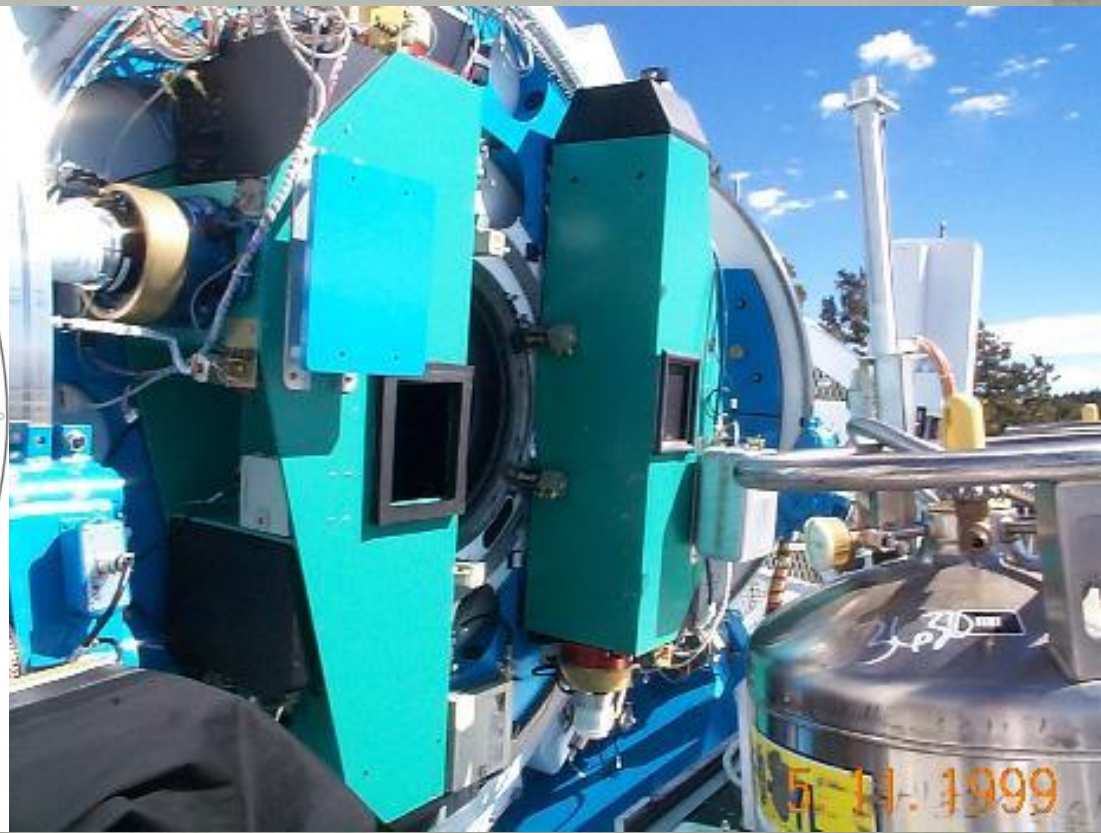
- **SDSS: Sloan Digital Sky Survey (I-III)**

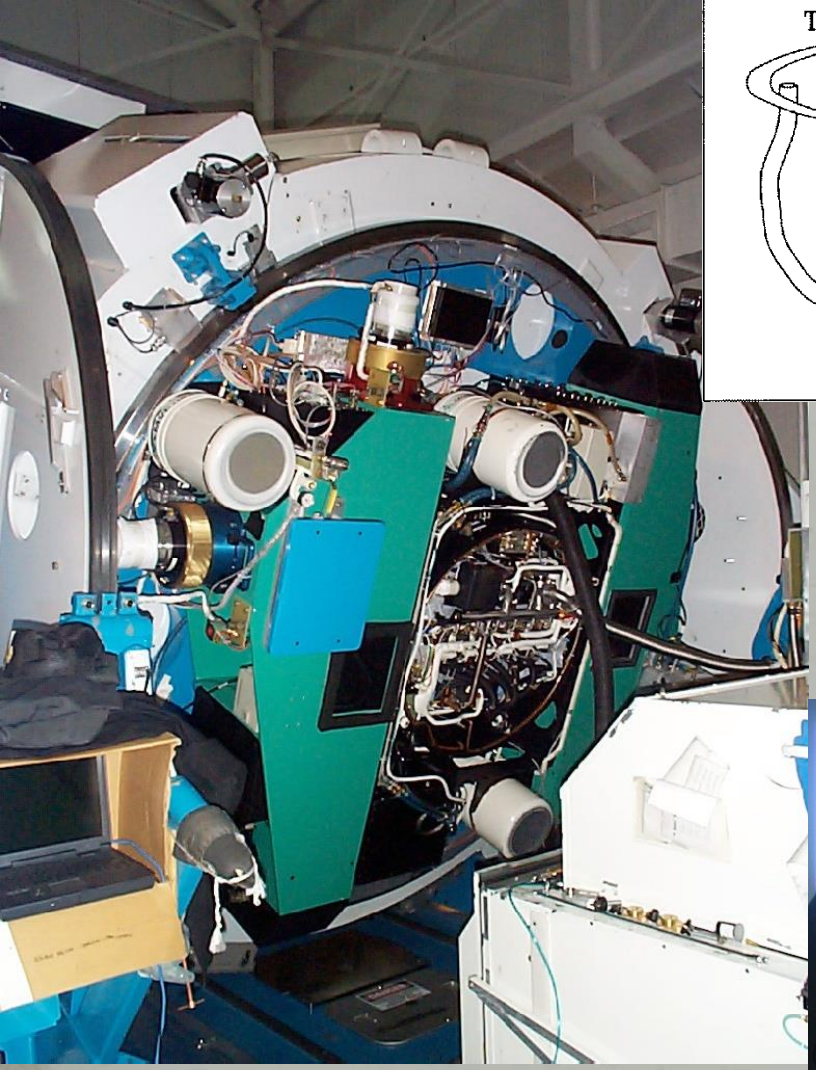
  http://www.sdss.org/

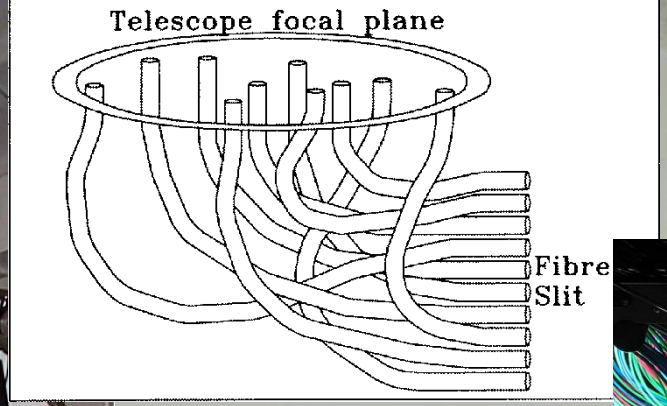
  > 150 участников из > 25 институтов
- **Задачи проекта:**
  - Изображения объектов ярче 23^m
  - Спектроскопия (лучевые скорости, химсостав и классификация объектов)
  - Поиск звёздных скоплений и карликовых галактик
  - Поиск экзопланет (с 2009)

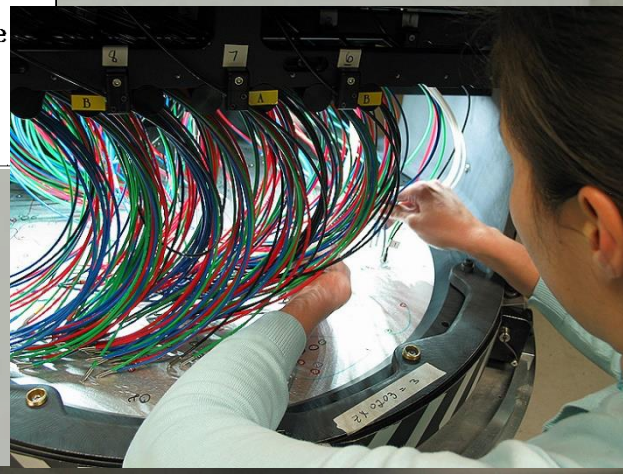
- Наблюдения: 2.5-м телескоп в Apache Point, NM (США)
  - поле зрения 2.5°, 120 Мрх, камера (30 CCD 2к х 2к)
  - фотометрия в сканирующем режиме
  - 2 оптоволоконных спектрографа (по 1000 объектов)

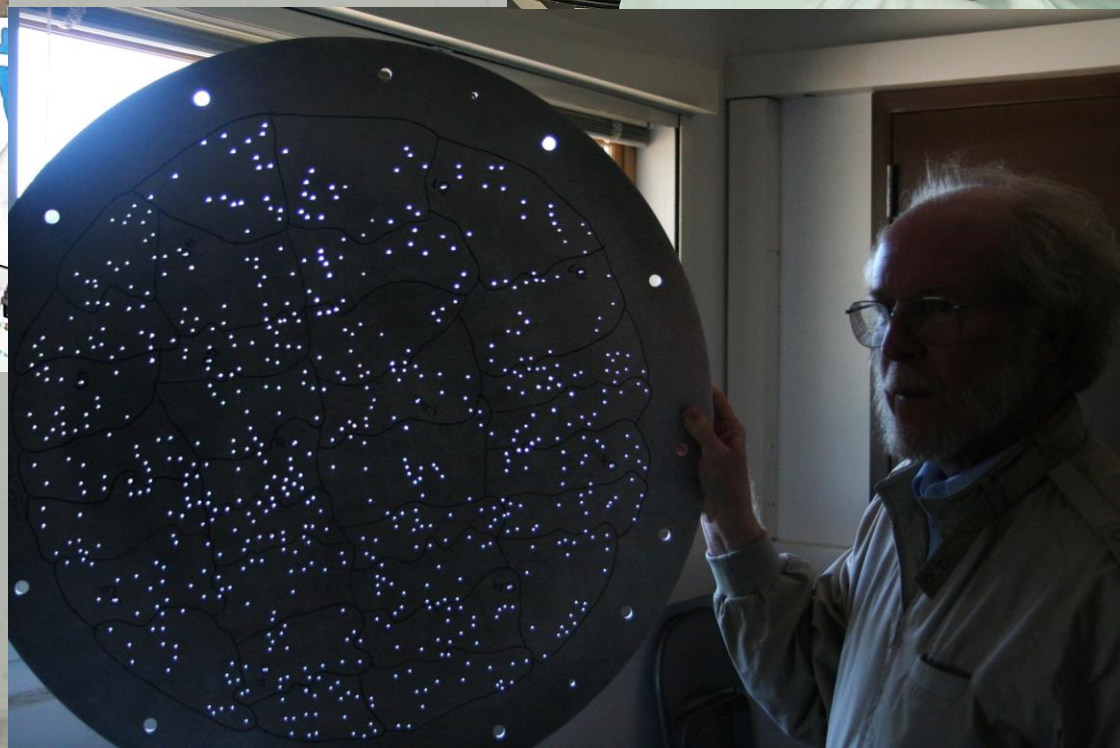












- 2 спектрографа и шаблон для оптоволокон

Изображения: ~14555 кв. град. (~35% небесной сферы)

Запланировано начало работы 2-го телескопа SDSS в Чили

Статистика:

~1 млрд. изображений объектов (пределы u=22^m, z=20.5^m)

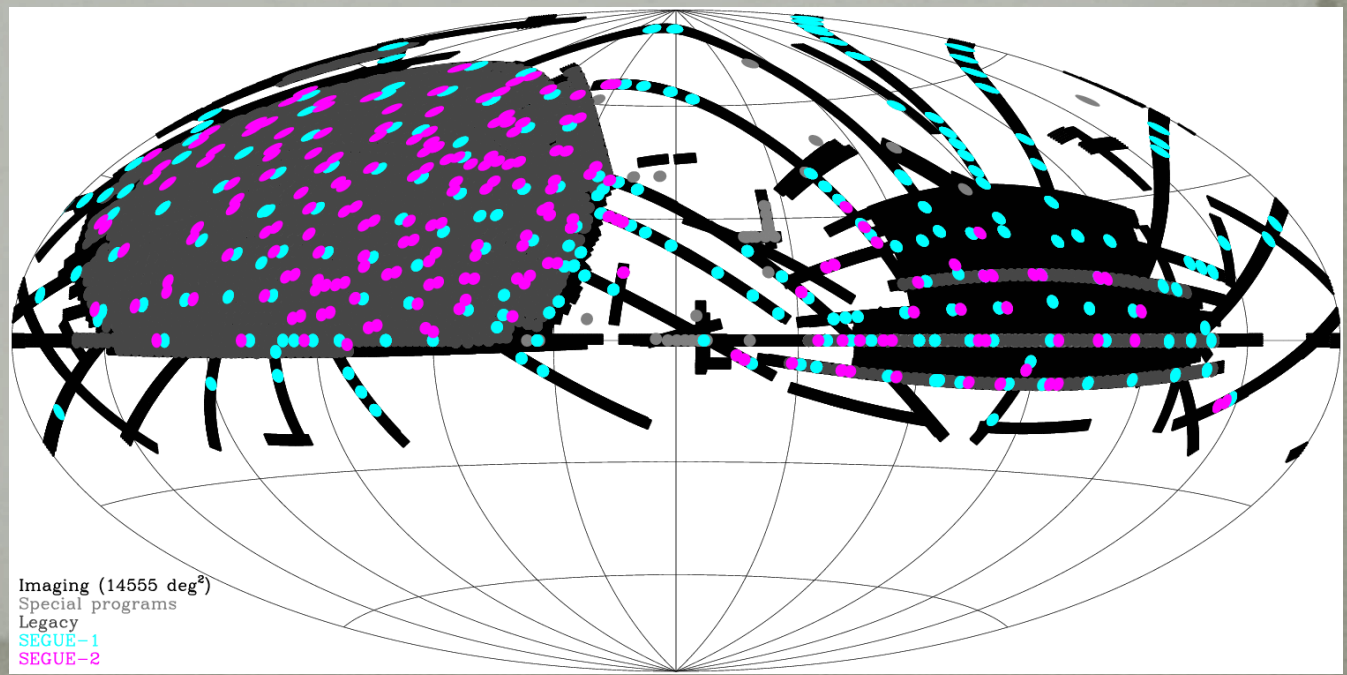
~261 млн. звёзд, ~208 млн. галактик

~4.36 млн. спектров (~2.4 млн гал.,477 тыс. квазаров, 852 тыс. звёзд)

Изображения:

~1 млн. полей

Карта покрытия неба на 2016

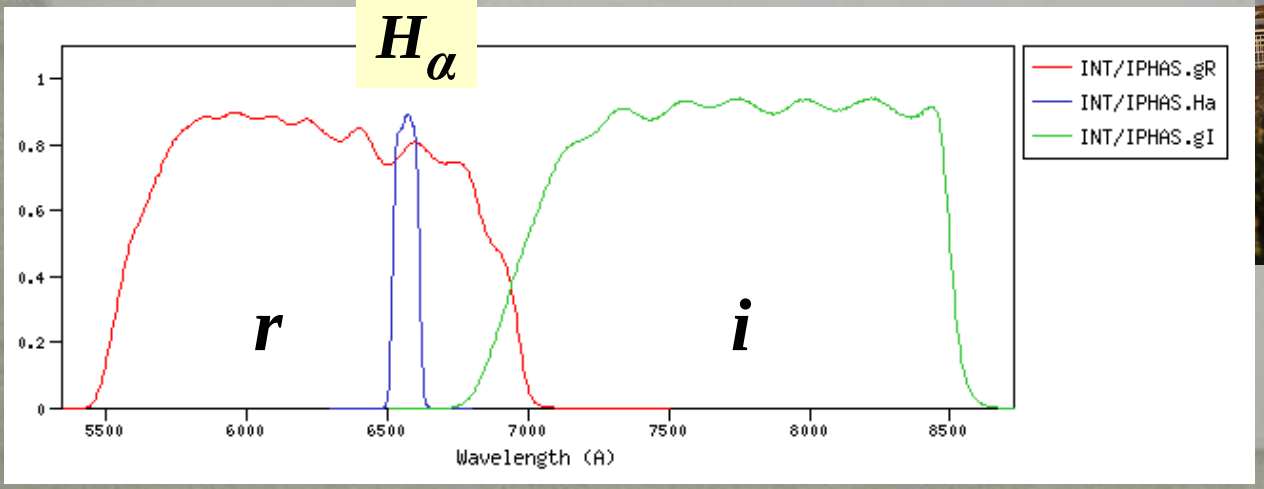


- **IPHAS** – INT (2.5-m Isaac Newton Telescope) Photometric Hα Survey (Canarias Inst. Astr.)

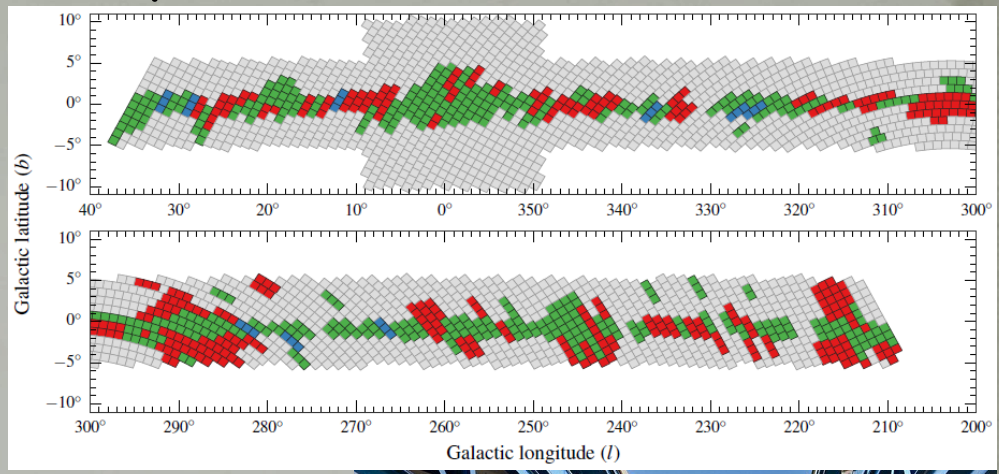
  + мозаика WFC

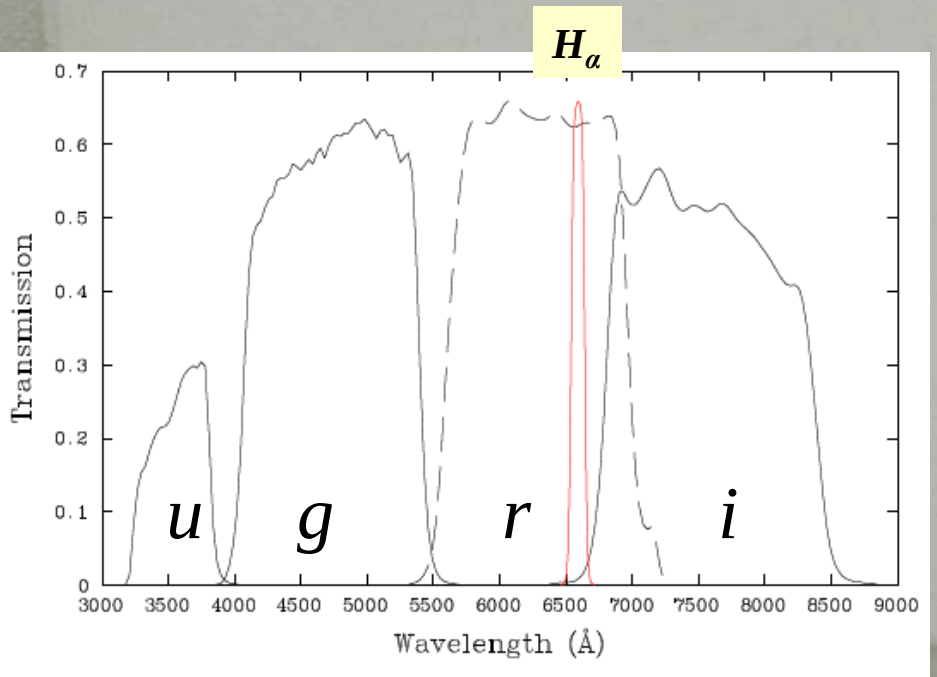
  Поле 0.3 кв. град.

- Обзор северной части Галактики
- 1860 кв. гр. (2002-2012)
- **2012: 220 млн. объектов**
- Пределы: 21.8 (*r*), 20,.2 (*i*), 20.6 (H_α)



- **VPHAS+** VLT Survey telescope (2.6-m, Paranal, Chile)
  Расширение **IPHAS** на южное небо
- ~2000 кв. гр. всего
- + изображения полей
- |b| < 5°
- Пределы: ~21^m
- **2016: ~319 млн. объектов**





- Спектроскопия – куда более сложная задача, требующая гораздо большего драгоценного наблюдательного времени

- Даже миллионы спектральных измерений звёзд и галактик – это очень много

- **LAMOST:** **L**arge sky **A**rea **M**ulti-**O**bject fiber **S**pectroscopic **T**elescope (Китай, с 2009)
- Крупнейший спектральный телескоп (системы Шмидта) с сегмент. адаптивной (1.1 м) оптикой. Первичное плоское зеркало-корректор - 24 сегмента (5.72 × 4.4 м), вторичное сферическое - 37 сегментов (6.67 × 6.09 м). Фокальная плоскость диаметром 1.75 м (поле 5 градусов) позволяет подключить **до 4000 оптоволокон к 16-ти 250-канальным спектрографам (!)**
- **Уже обработаны спектры ~3.8 млн. звёзд !**

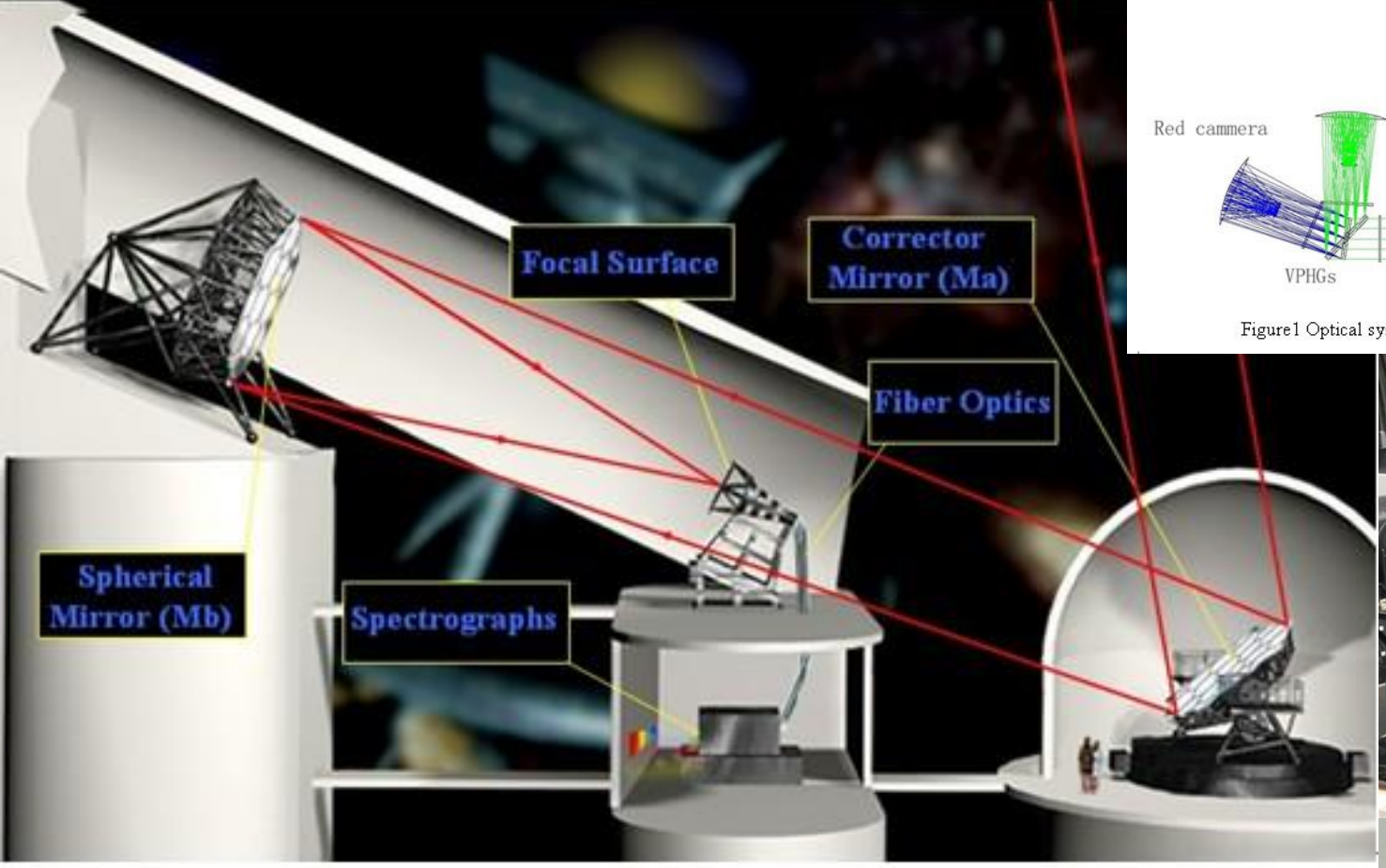


Figure 2 LAMOST overview

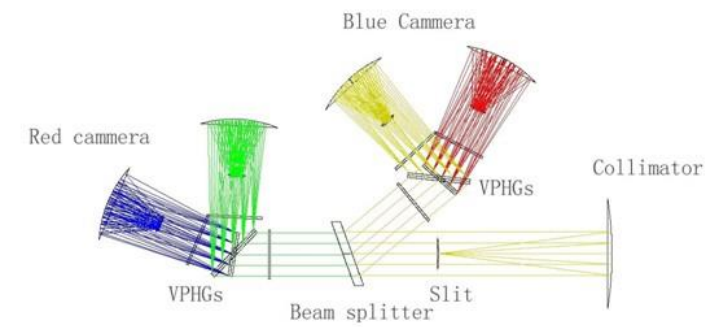
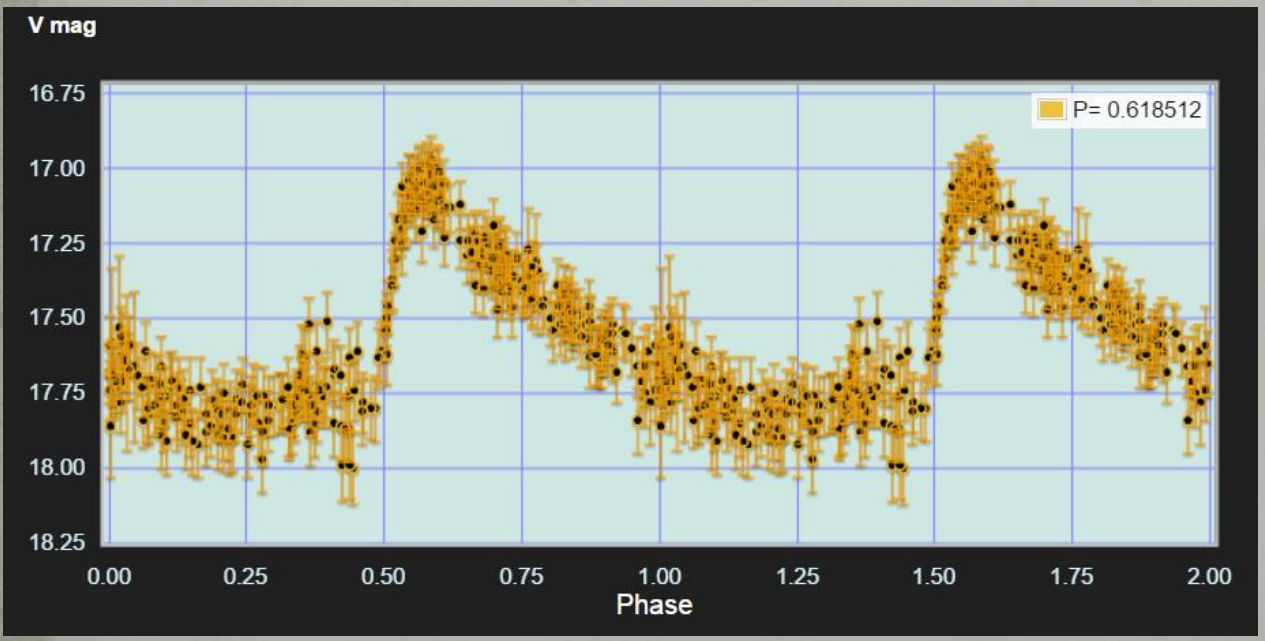


Figure1 Optical system of the low resolution spectrograph

- Спектральные диапазоны: 370-590 и 570-900 нм со спектральным разрешением до R~1800
- Звёзды до 19-20^m
- **Около 10000 спектров звёзд за ночь !**

- **Catalina Sky Survey (Arizona University + Siding Spring Observatory)** – многоцелевой проект поиска и изучения транзиентов (переменность, оптические вспышки, астероиды и пр.) – с 1998

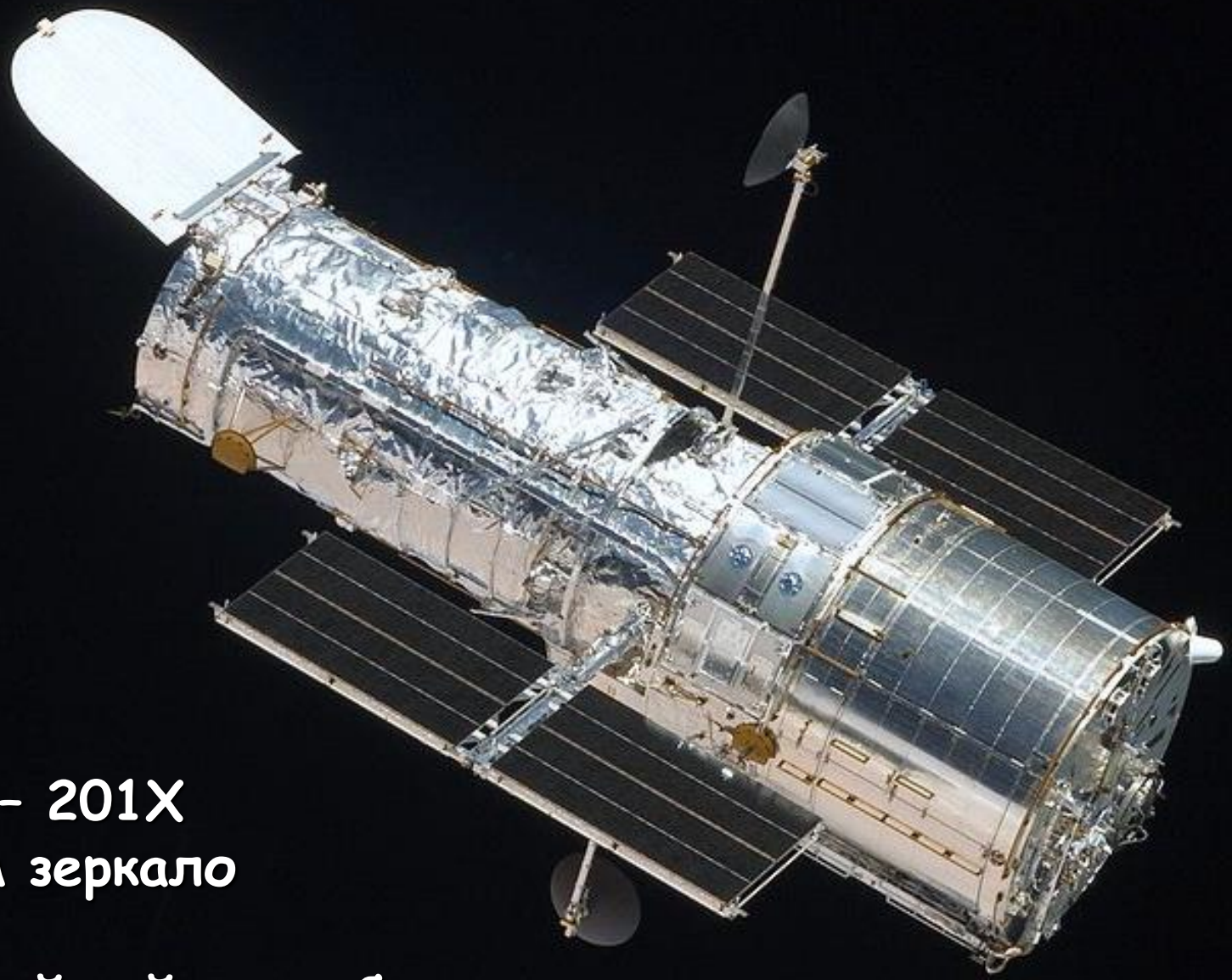
- ~40 млрд. измерений блеска для ~500 млн. объектов (V 11.5-21.5^m)



RR-Лирида

- Крупные космические проекты: недавние и ещё действующие

HST (Hubble Space Telescope) NASA



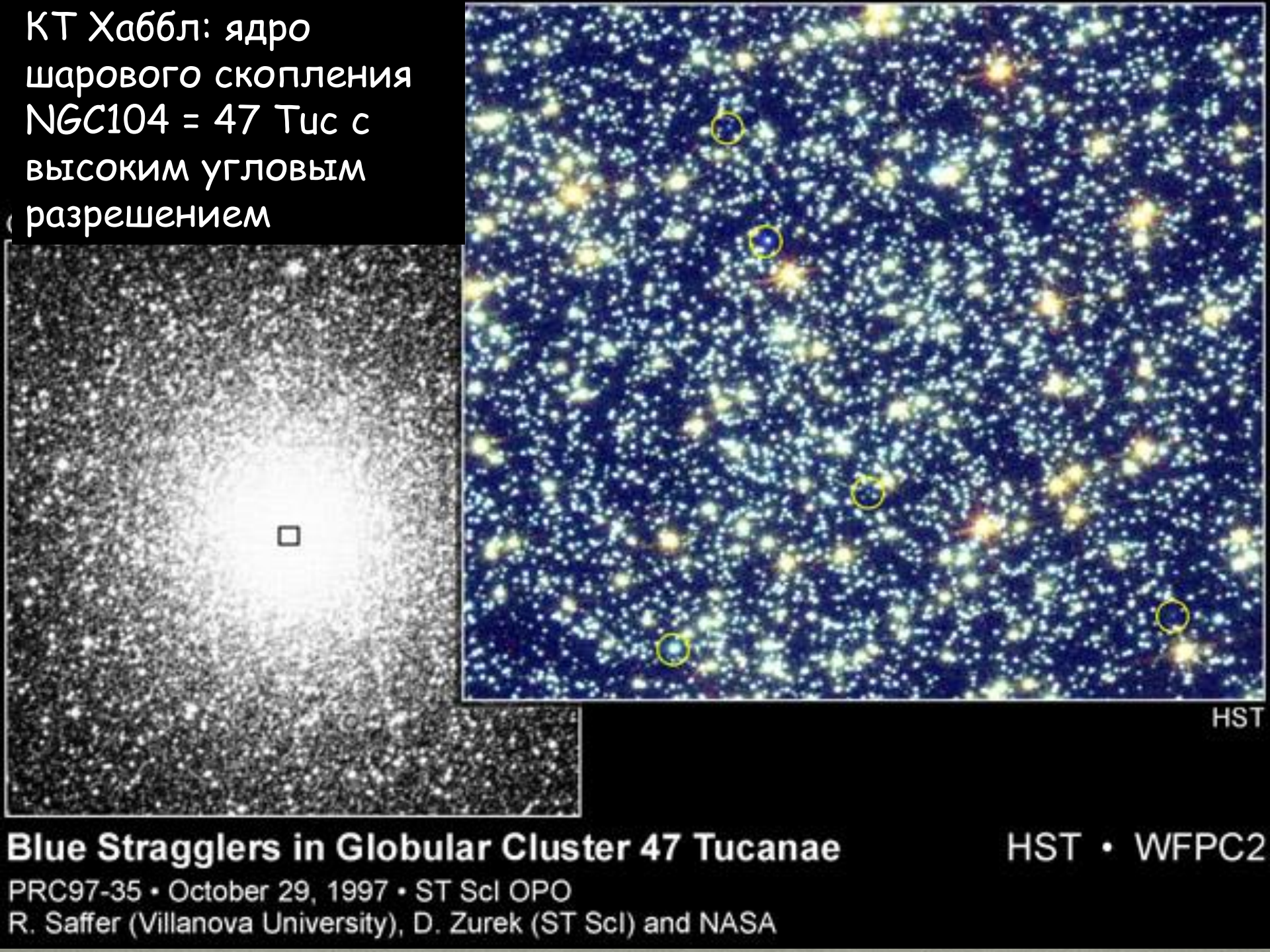
1990 - 201X
2.4-м зеркало

Крупнейший и наиболее
успешный космический проект

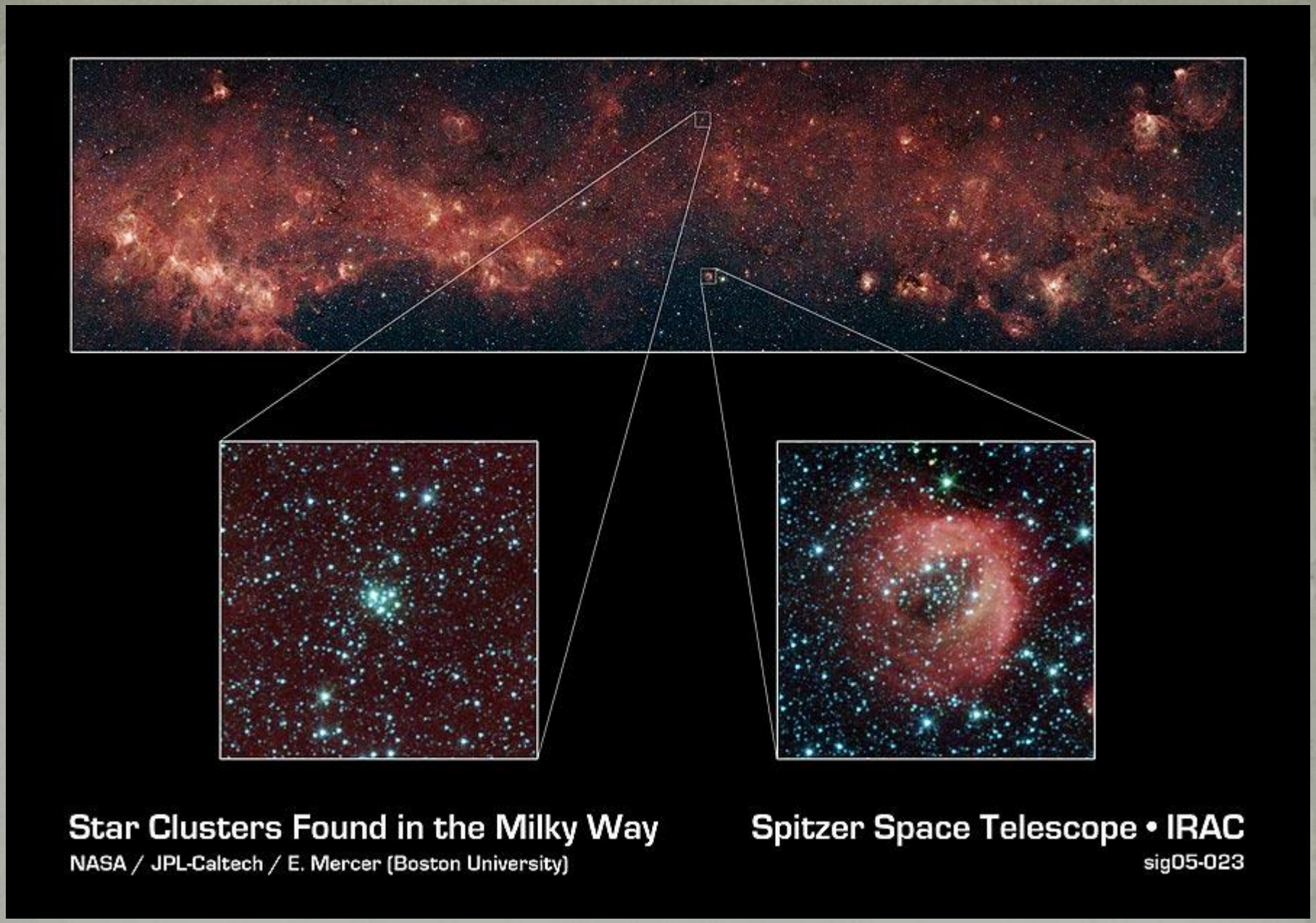
- **Направления работы:**
- Прямые изображения и спектры:
  - Зас
  - Пр
    гал z
  - На
    разрешением (~100 мсд)
  - Космическая астрометрия – параллаксы и собственные движения
  - Распределение энергии в спектрах

Наблюдения с HST принесли революционные результаты во все области современной астрономии

КТ Хаббл: ядро шарового скопления NGC104 = 47 Tuc с высоким угловым разрешением

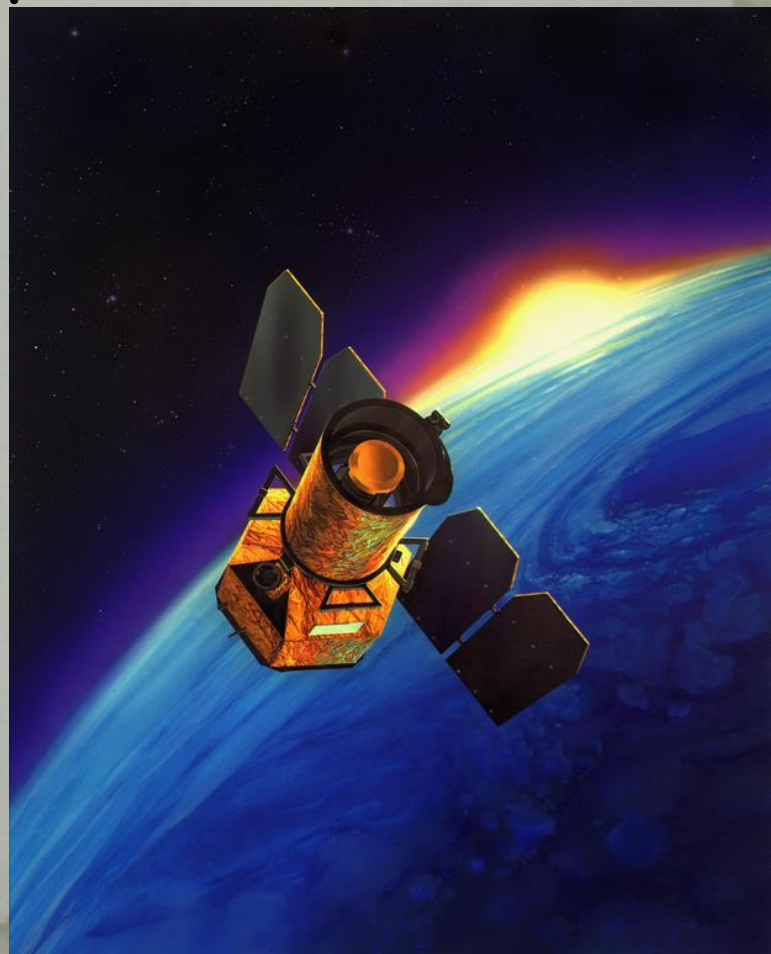


- **SPITZER = SIRTF (Space Infrared Telescope Facility)** **http://www.spitzer.caltech.edu/**
- Зеркало 0.85 м
- ИК: от 3 до 180 мкм
- **Запущен NASA в 2003 (с 2009 – warm mission)**
- Практически свободен от влияния поглощения света пылью (NIR/MIR)
- Наблюдения областей звездообразования: молекулярные облака, звёзды с пылевыми оболочками и т.д.



Открытие звёздных скоплений и остатков Сверхновых в центральной области Галактики

- **GALEX (Galaxy Evolution Explorer)**
- Запущен NASA в 2003
- Зеркало 0.5 м
- Наблюдения в заатмосферном FUV (~0.13 мкм) и NUV (~2.8 мкм)
- Предназначен для наблюдения горячих объектов: молодых массивных звёзд, горячего газа в областях звездообразования и в молодых галактиках



- **KEPLER (NASA, 2009-2013)**
  http://kepler.nasa.gov/

- Зеркало 140/95 см (система Шмидта)
- Задачи: фотометрический мониторинг > 155 000 ярких звёзд в поле ~ 100 кв. град.

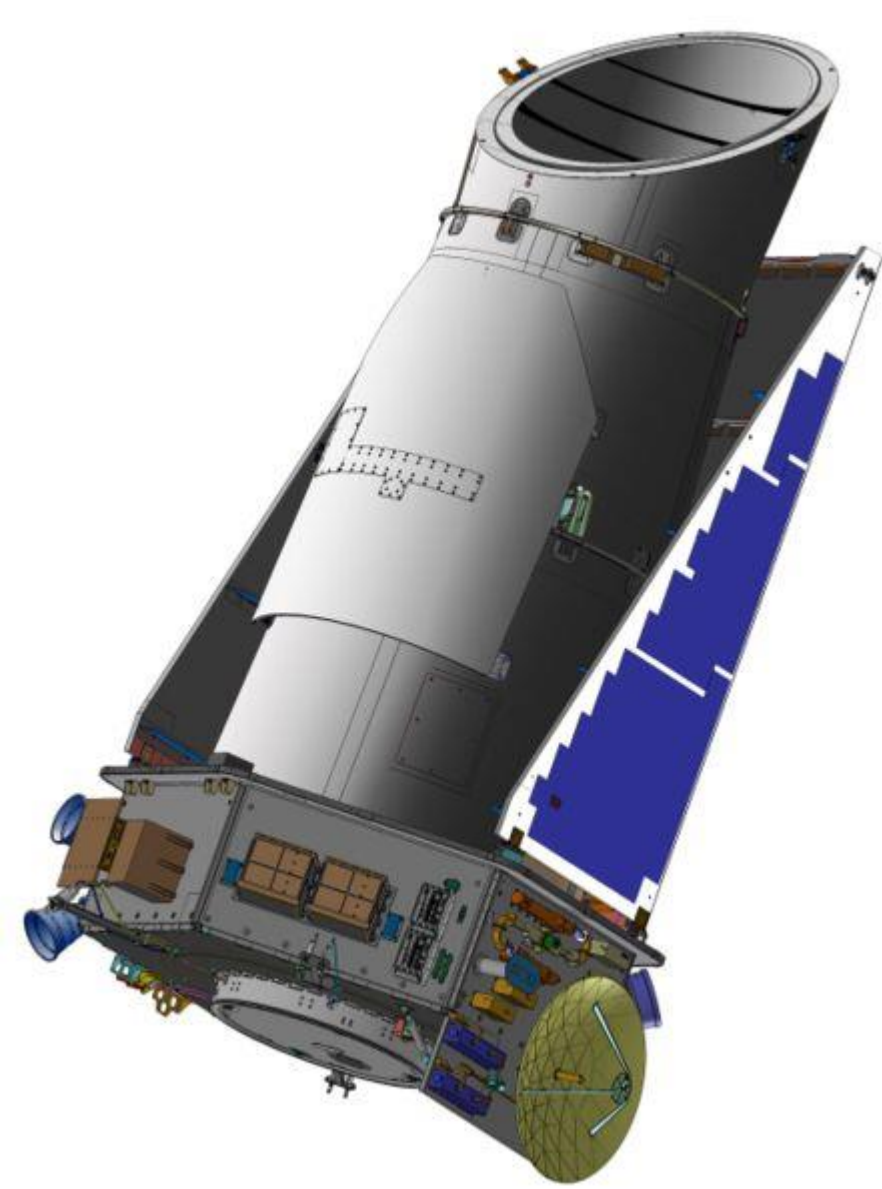
  – поиск экзопланет
- Фотометрическая точность

  ~ 0.0005^m позволяет искать планеты земного типа методом затмений (прохождений)

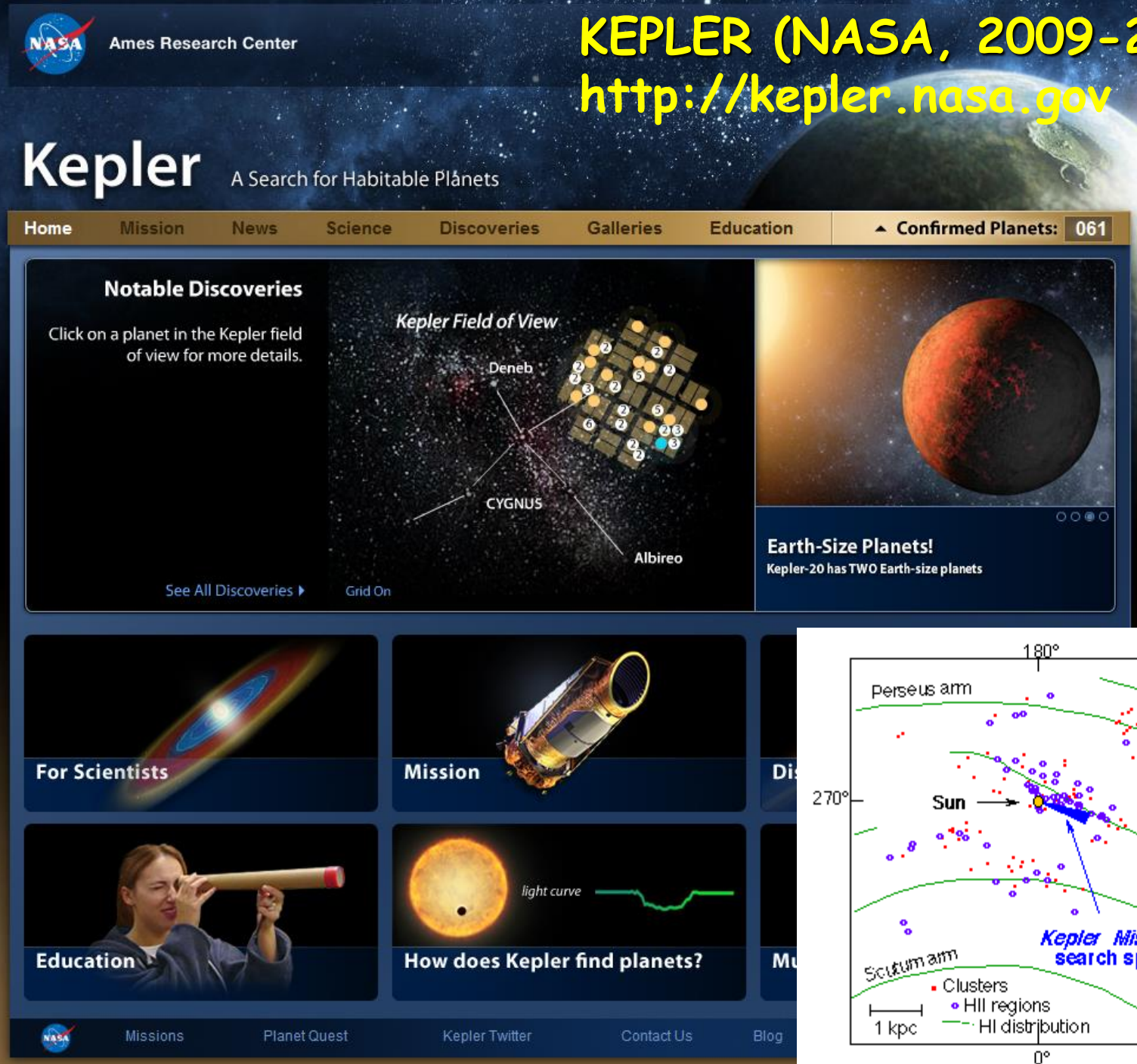
  > **1000 подтверждённых планет**

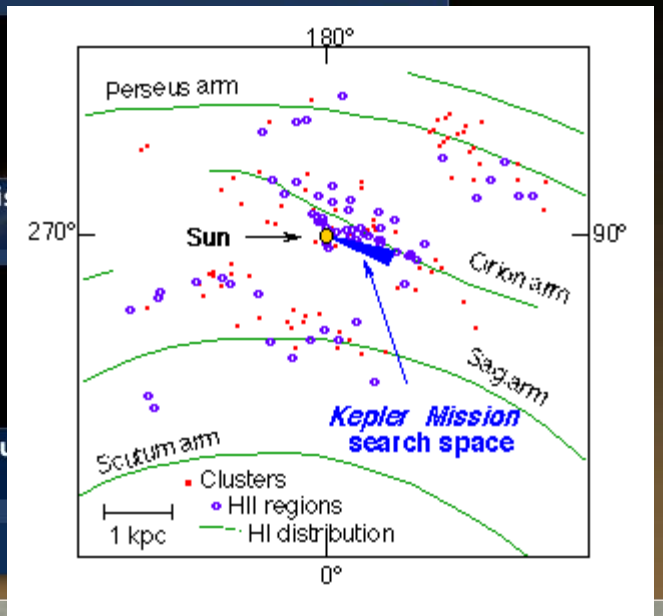
  (из 3559 на 28.01.2017)
- Kepler-10b: ~1.4 R_E

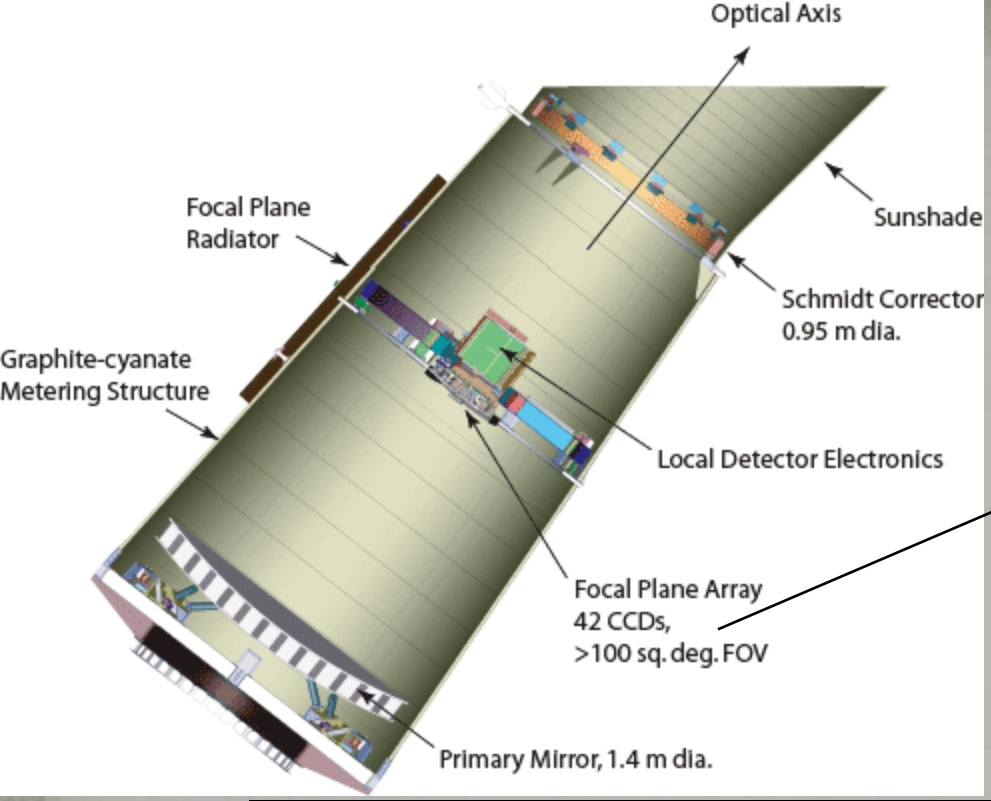
  + много переменных звёзд



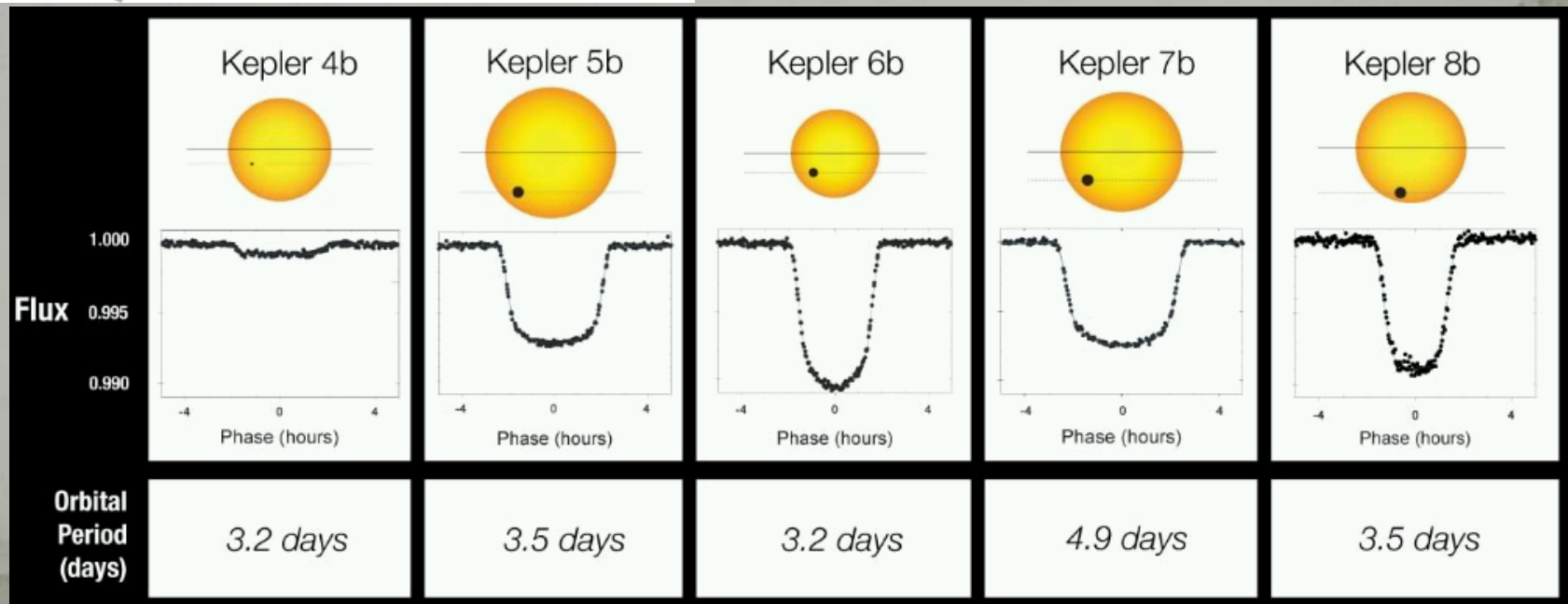
KEPLER (NASA, 2009-2013)
http://kepler.nasa.gov



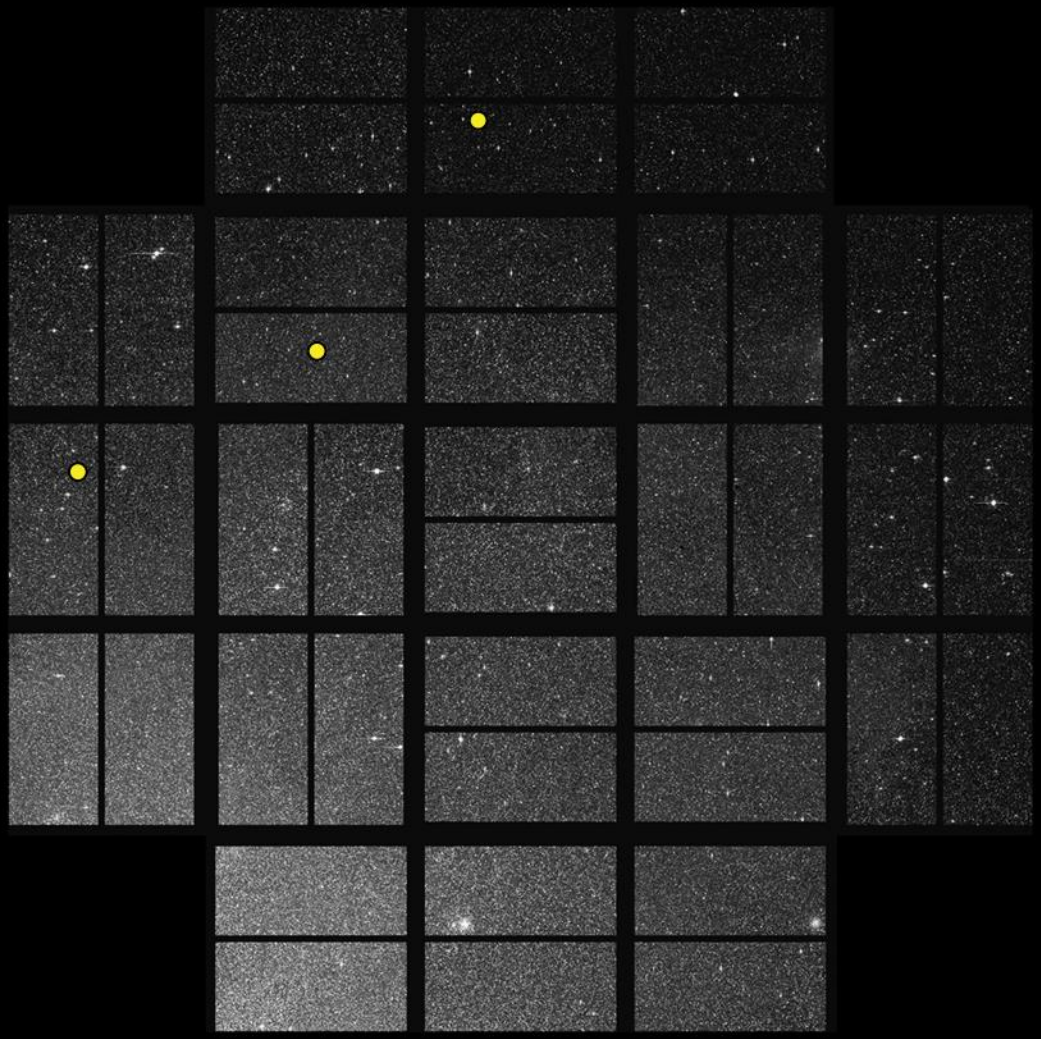




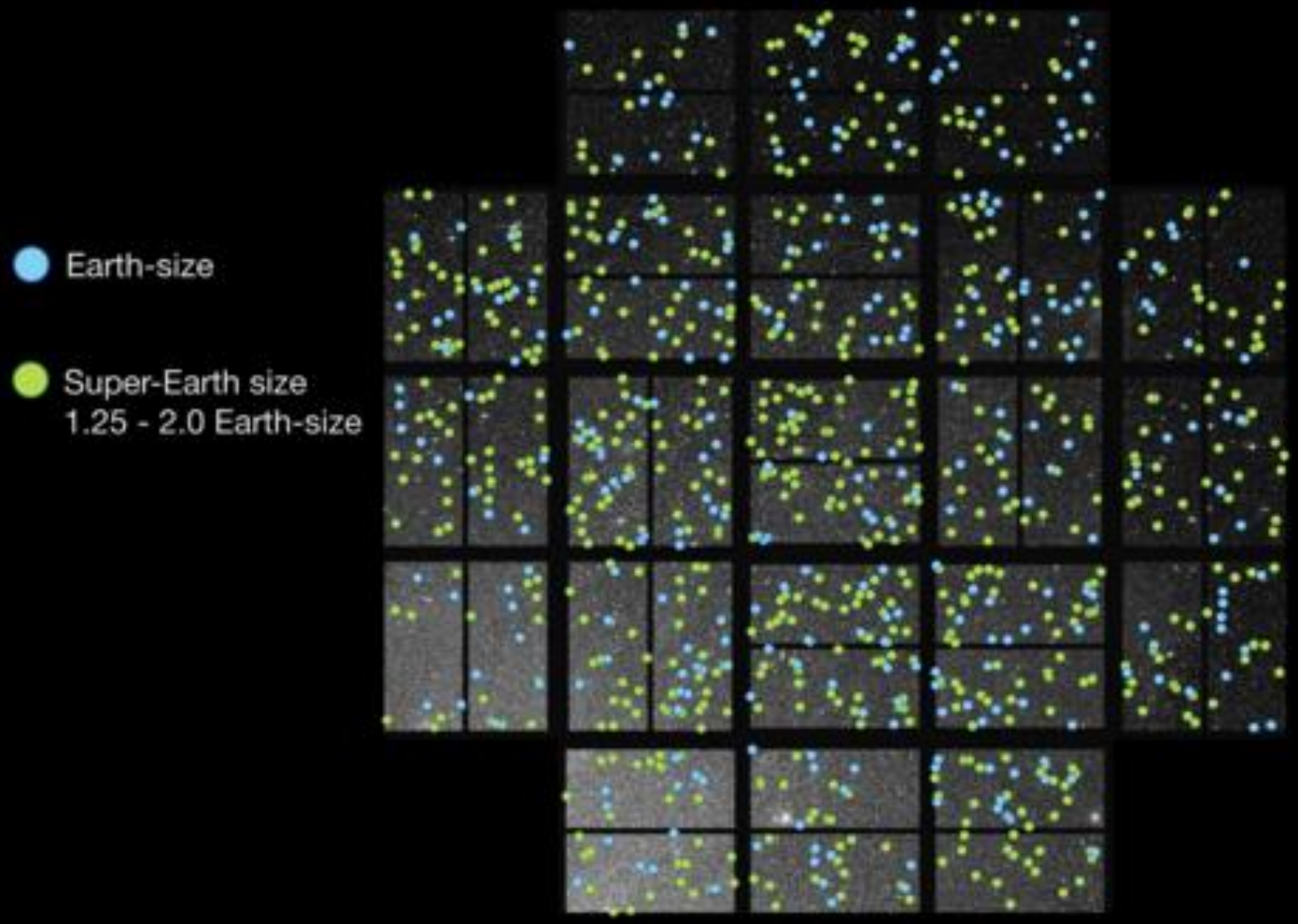
- Поле зрения ~12°, 42 CCD (2Kx1K)



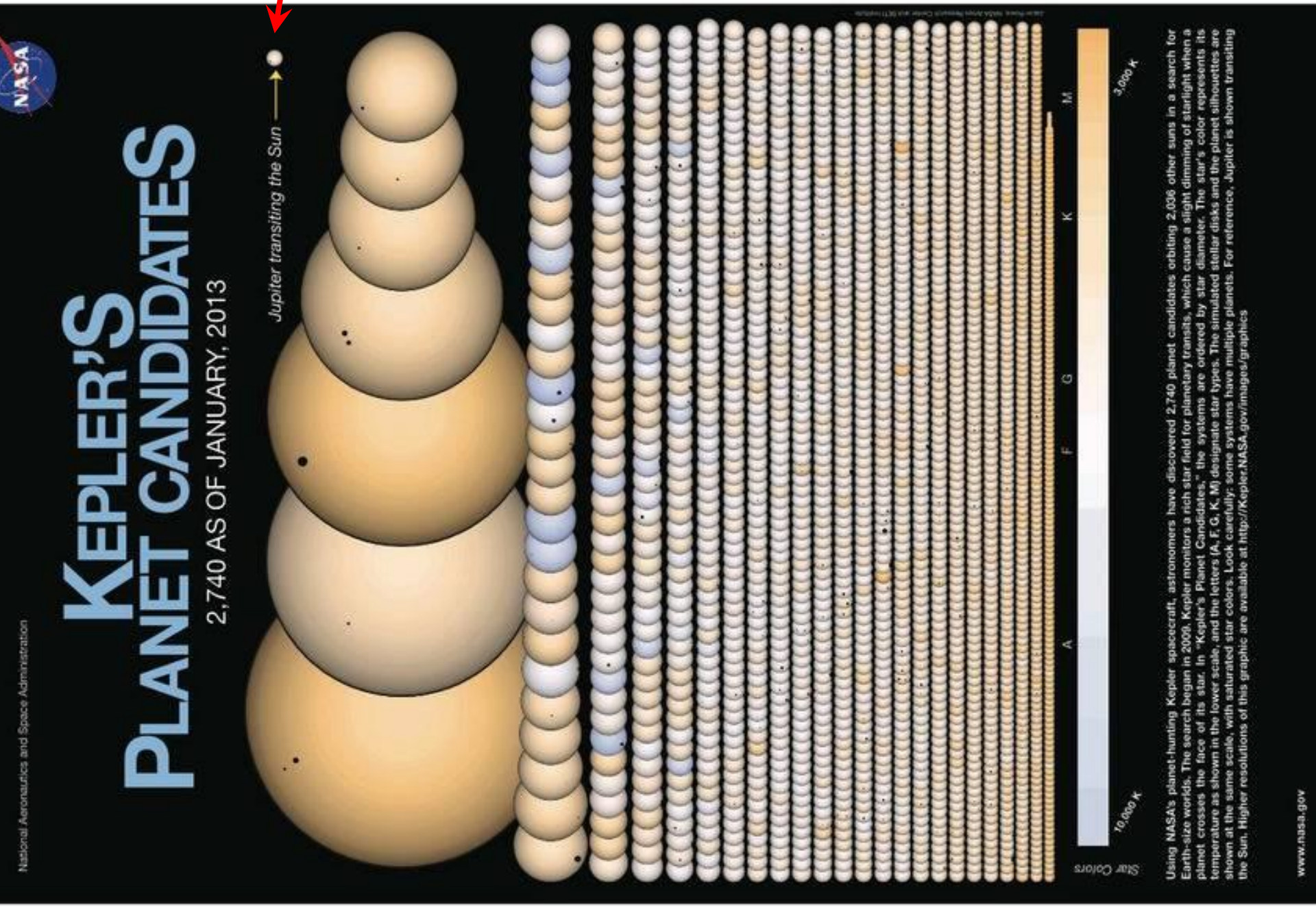
Кандидаты в экзопланеты в Лебеде до запуска аппарата KEPLER



“Мелкие” кандидаты в экзопланеты KEPLER (и гораздо больше крупных экзопланет)

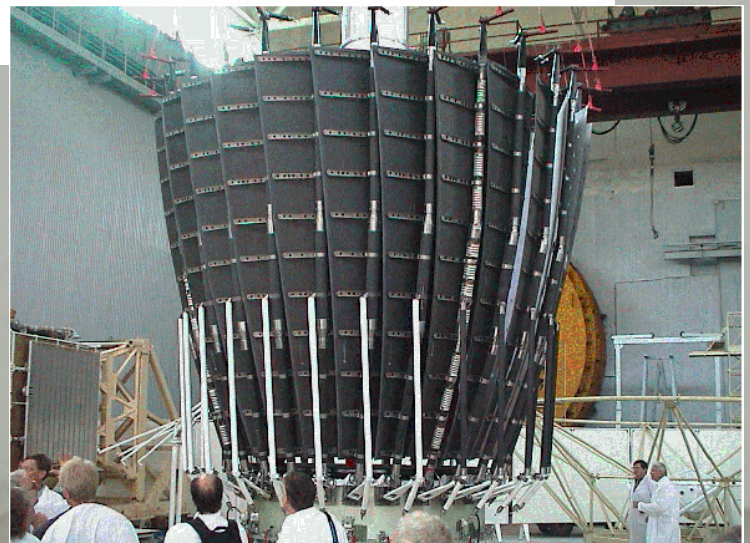


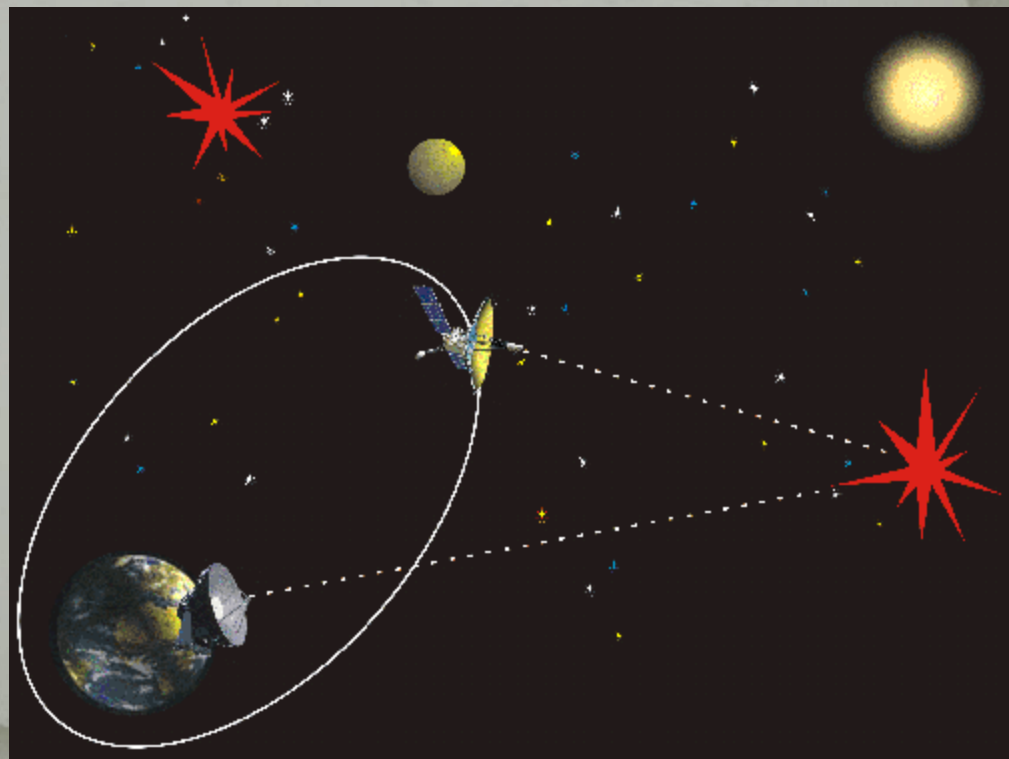
Солнце с Юпитером



- **RadioAstron** (Российский проект, поддержанный 20 странами)
- 10-м орбитальный радиотелескоп-интерферометр (0.3-25 GHz)

Запущен в 2011 (РКА)

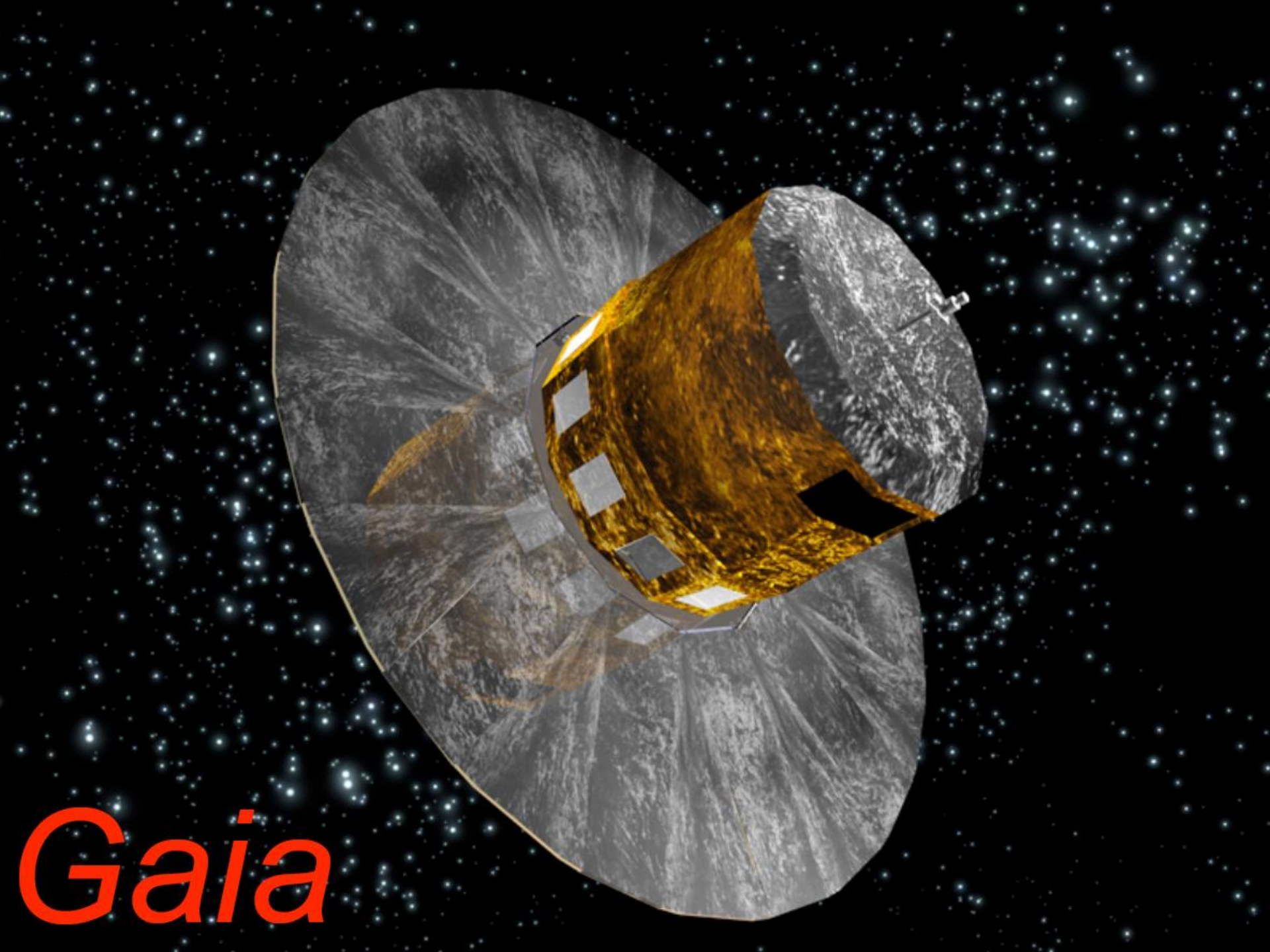




- **GAIA: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (ESA (Европейское космическое агентство, 2013-2021+)**

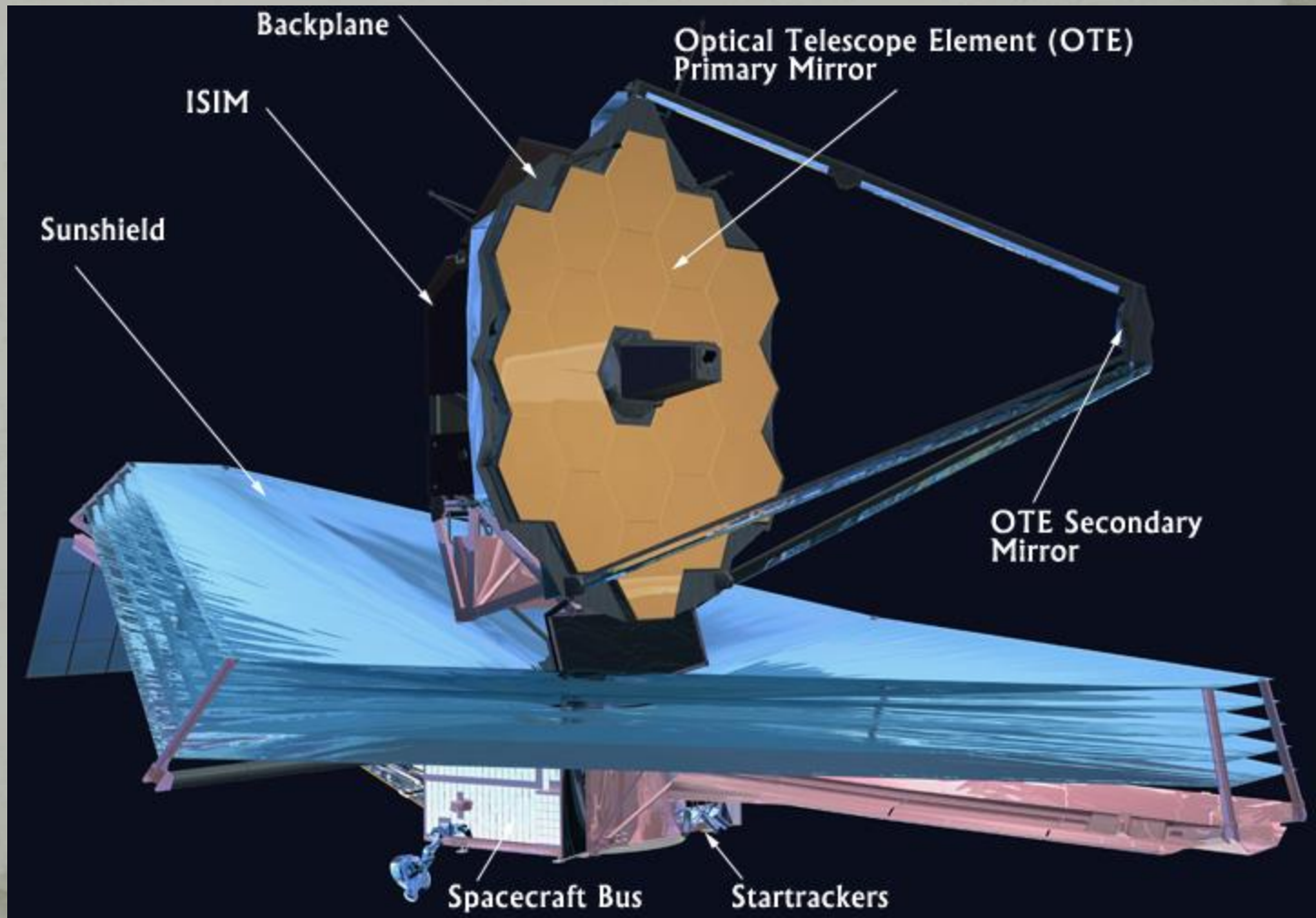
(сохранено первоначальное название, предложенное в 198X, но принцип измерения радикально изменили: никакой интерферометрии, а астрометрия + фотометрия + спектроскопия !)

Прямой "наследник" миссии HIPPARCOS – запущен 19.12.2013 в точку Лагранжа L2 (~1.5 млн. км)


Gaia

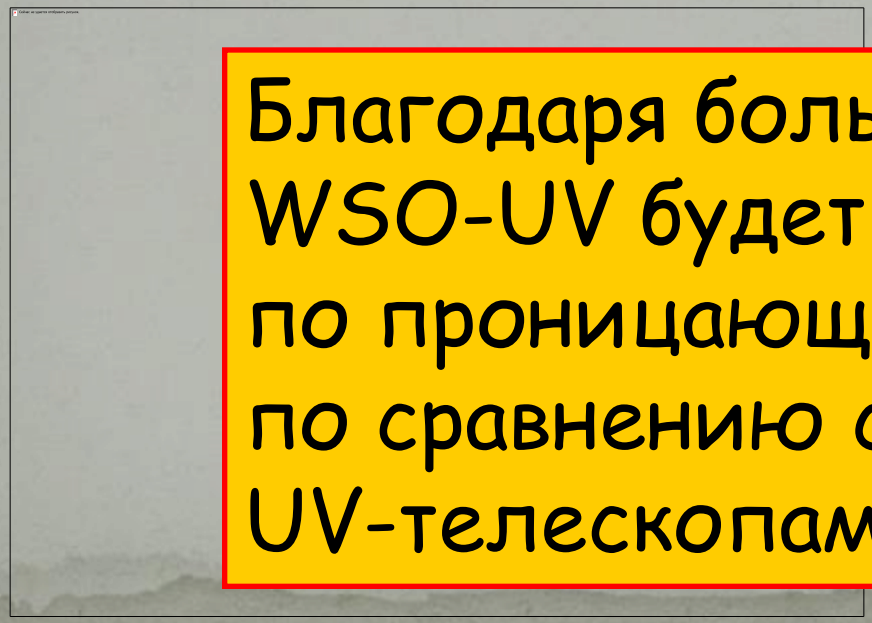
- **JWST (James Webb Space Telescope)** **http://www.jwst.nasa.gov/**
- Крупнейший космический телескоп (NASA)
- 6-м сегментированное зеркало для наблюдений в NIR/MIR

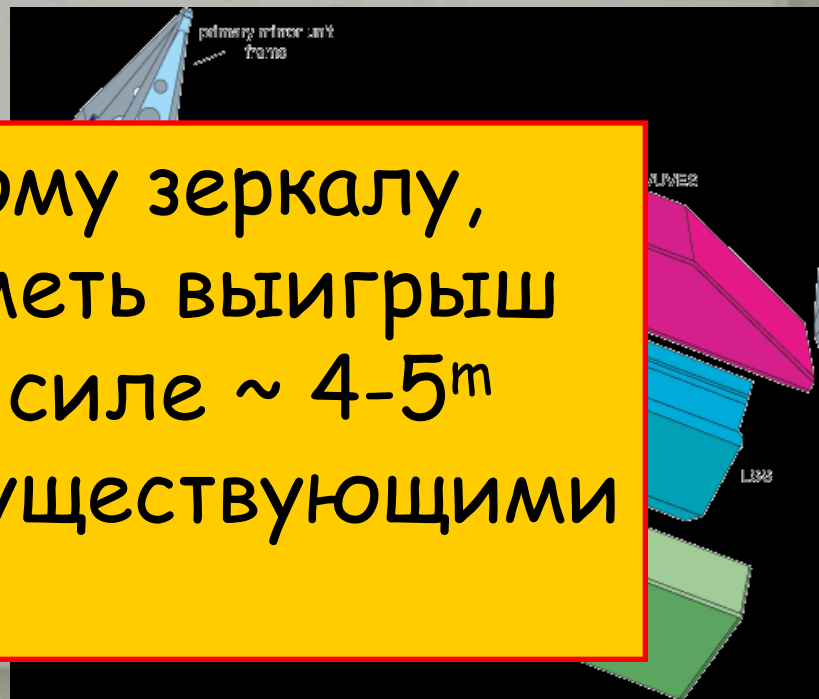
Запуск в 2020+ ?



- **WSO-UV (World Space Observatory – UV)**
- Европейский проект с решающим участием РФ
- 1.7-м зеркало **Запуск 2024+ (РКА)**
- Диапазоны: FUV (~0.1-0.2 мкм), NUV и оптика (~0.2-0.6 мкм)
- Прямые изображения и спектроскопия с разрешением от 2500 до 55000 (!) (FIR – NIR):

LSS – UVES – VUVES





Благодаря большому зеркалу, WSO-UV будет иметь выигрыш по проницающей силе ~ 4-5^m по сравнению с существующими UV-телескопами

- **Астростатистика:**
- Объём наблюдательных астрономических данных увеличивается вдвое каждые три года
- Число практикующих астрономов возрастает вдвое каждые 15 лет

- **Наблюдательная "нагрузка" на каждого астронома каждый год возрастает на 20%**

- **Что делать, чтобы не остаться вне науки ?**

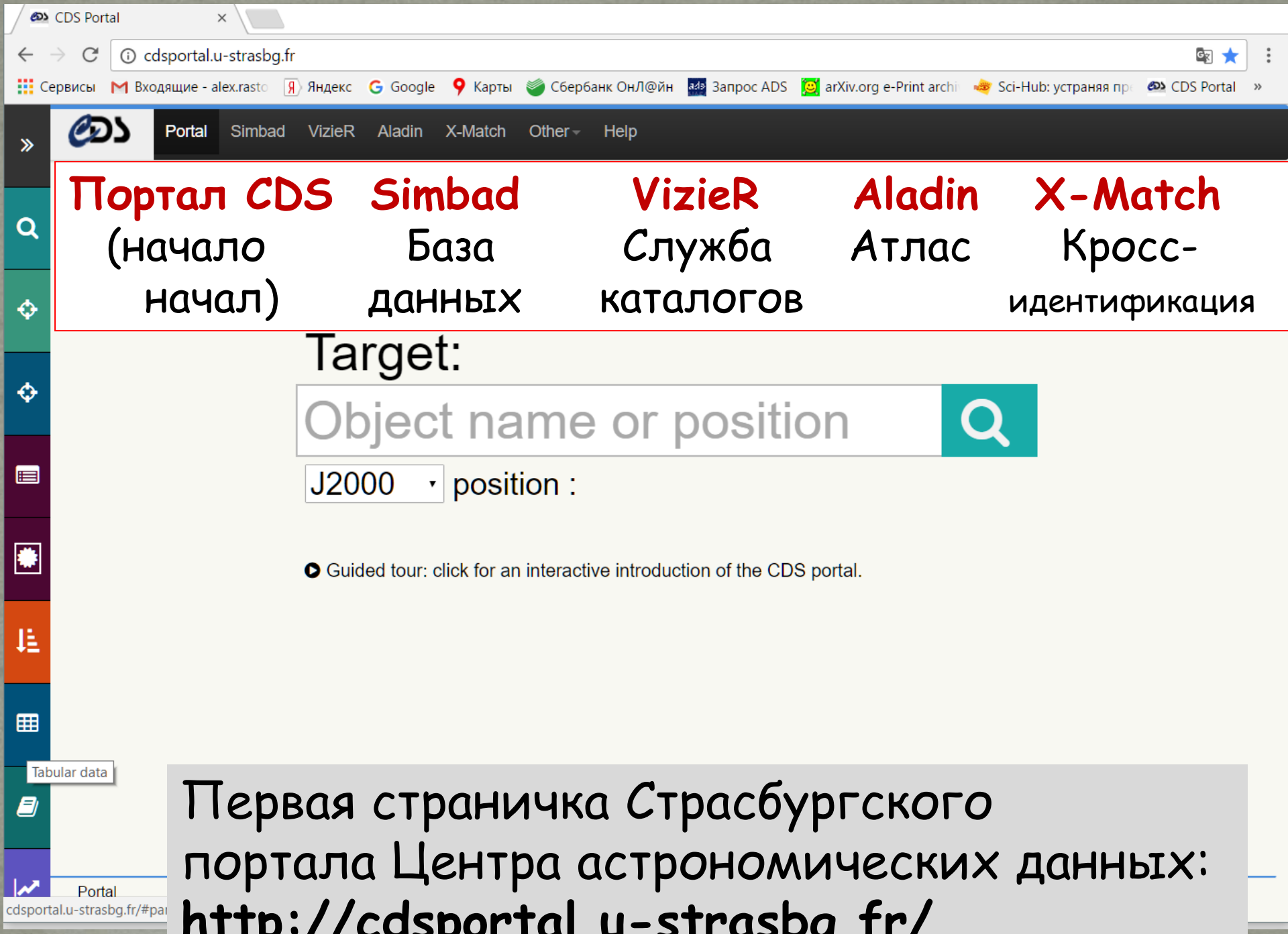
- **Задачи, актуальные практически для всех астрономов-профессионалов и многих любителей:**

  - Как и где можно найти разнообразные наблюдательные **данные** об изучаемых объектах ?
  - Как и где можно найти **публикации** по теме исследования ?
  - Как и где можно найти **средства** для работы с данными ?

Центры Астрономических Данных

Cooperation
The CDS cooperates with the French Space Agency CNES,
European Space Agency ESA,
European Southern Observatory ESO, NASA,
the US NASA (including NASA *Astrophysics Data System* ADS
and the *NASA Extragalactic Database* NED),
the Inter-University Centre of Astronomy and Astrophysics (IUCAA),
the National Observatory of China (NAOC),
the National Observatory of Japan (NAOJ),
the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN).
CDS is a member of the *World Data System*.

- **Задач**
астрономическим сообществом, и обеспечение доступа к ним по сети Интернет
- ***Centre de Données astronomiques de Strasbourg*** (CDS, Страсбург, Франция) – **http://cdsportal.u-strasbg.fr/** – главный мировой ЦАД, есть многочисленные “зеркала”, в том числе в РФ (ИНАСАН) (http://vizier.inasan.ru/vizier/)



Портал CDS (начало начал)

Simbad База данных

VizieR Служба каталогов

Aladin Атлас

X-Match Кросс-идентификация

Первая страничка Страсбургского портала Центра астрономических данных: **http://cdsportal.u-strasbg.fr/**

Библиографические базы данных

Большая часть работы астронома – чтение астрономической литературы (статей, обзоров, книг и др.)

The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System

http://adsabs.harvard.edu/

Библиографическая база данных по астрономии и астрофизике.

The Astrophysics Data System (ADS) is a NASA-funded project which maintains four bibliographic databases containing more than 12.5 mill. records: Astronomy and Astrophysics, Instrumentation, Physics and Geophysics, and preprints in Astronomy. The main body of data in the ADS consists of bibliographic records, which are searchable through our Abstract Service query forms, and full-text scans of much of the astronomical literature which can be browsed though our Browse interface.

Библиографические базы данных: архивы электронных препринтов *arXiv* (с последующей публикацией в реферируемых журналах)

http://arxiv.org/

Cornell University Library

http://arxiv.org

Cornell University Library

Search for

(Help | Advanced search)

a

All papers

Go!

Open access to ~1228000 e-prints in Physics, Mathematics,

На 24.01.2017
Их число быстро растет

- **Часть #2**

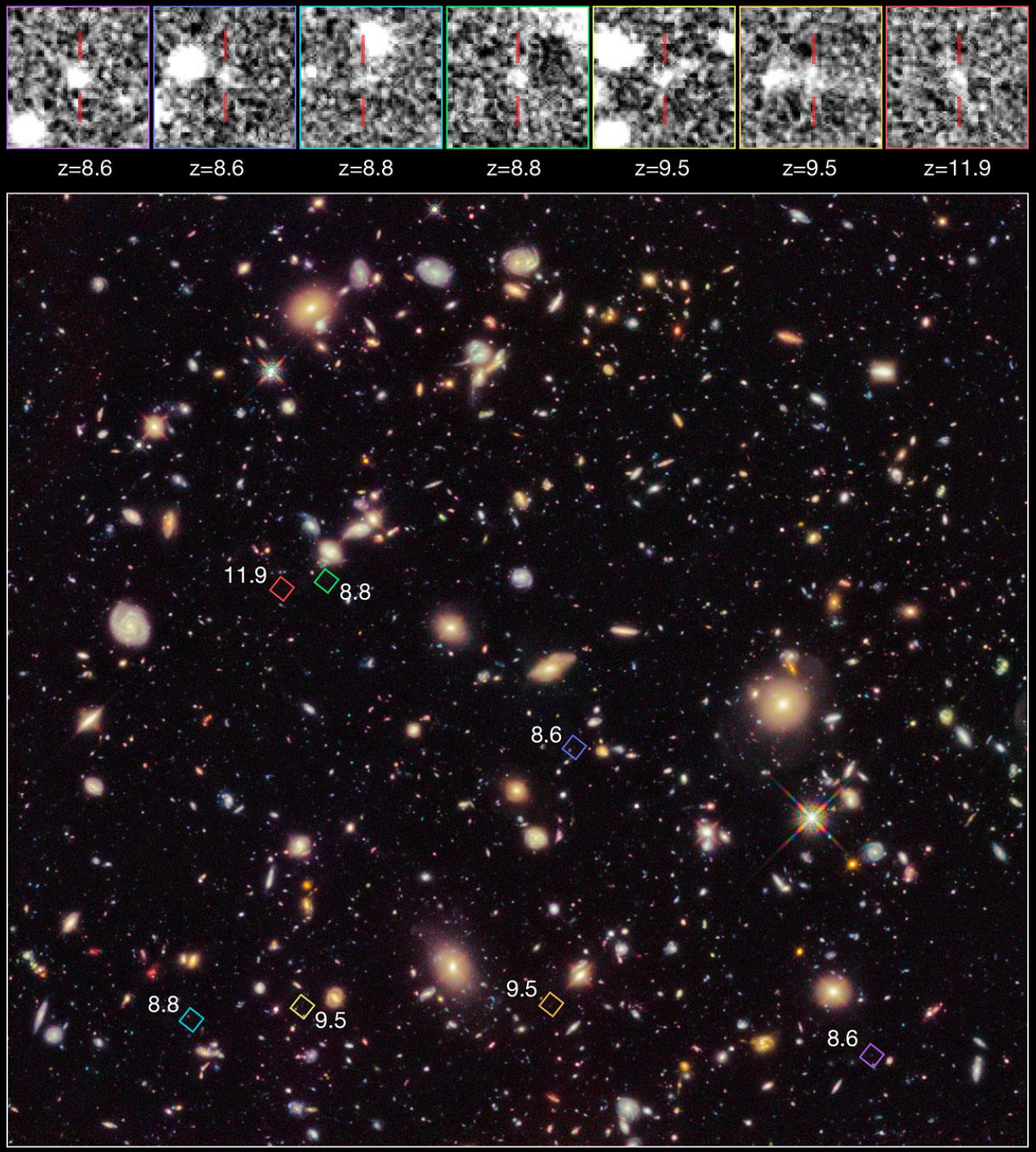
- Наша Галактика – Млечный Путь:
  - Галактики во Вселенной
  - Происхождение галактик
  - Строение Млечного Пути
  - Население спиральных галактик
  - Млечный Путь и его окружение

Размер Хаббловского сверхглубокого поля на небе

Созвездие Печи (Fornax) на южном небе

Размер поля ~1'

Много ли галактик во Вселенной ?



Hubble XDF: Хаббловское сверхглубокое поле (суммарная экспозиция ~550 часов за 10 лет наблюдений в оптике и ИК)

Предел V~30^m ~300 тыс. гал./кв. град.

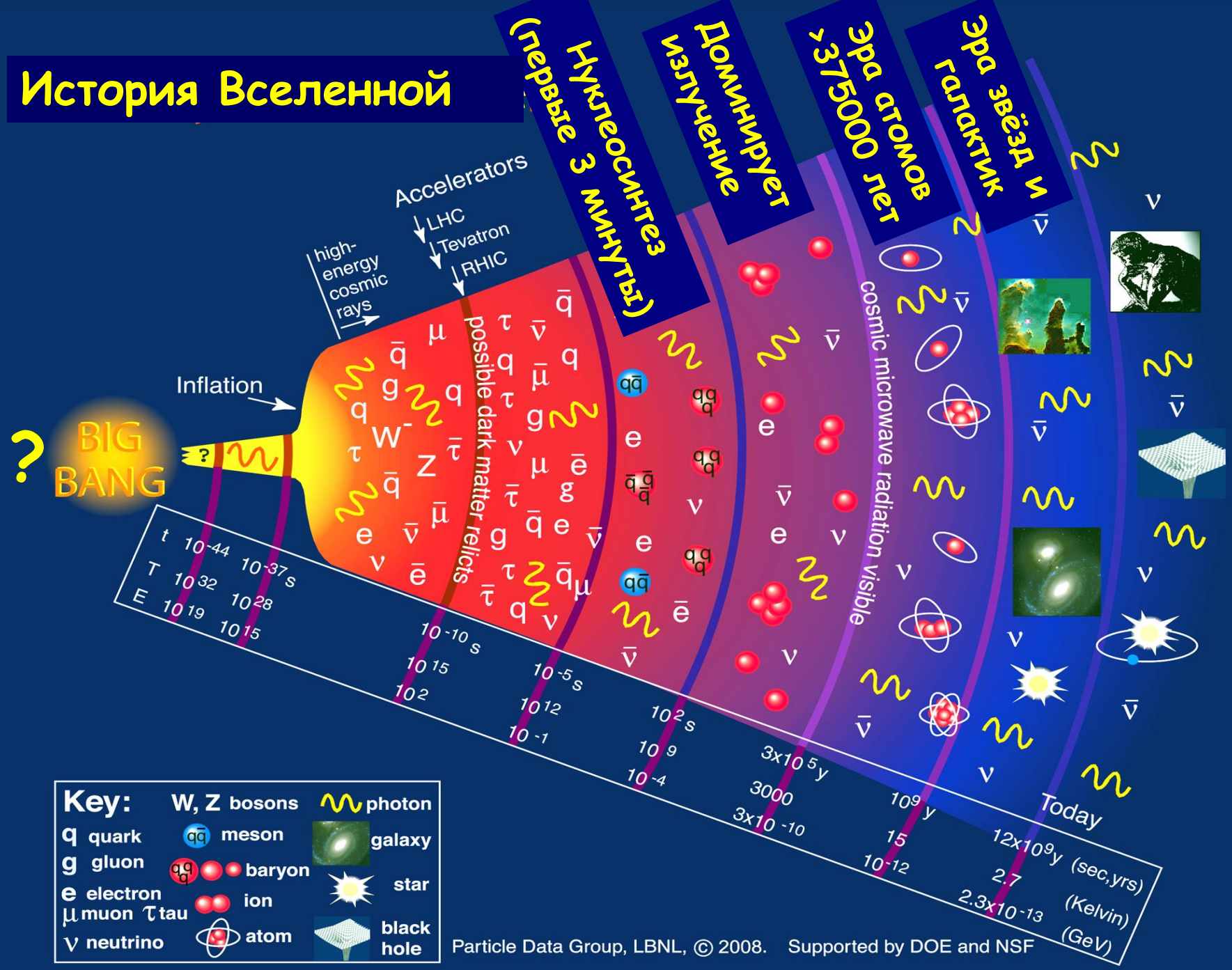
До z ≈ 11.9 (возраст Вселенной ~400-600 млн. лет)

Краткая история Вселенной и рождение галактик

“Большой Взрыв”, барионы, “тёмная материя”

- **Барионы:** протон, нейтрон, электрон (высокостабильные частицы), $\Lambda,\Sigma,\Xi,\Omega$ - гипероны, мезоны: это частицы, из которых состоит ***обычное вещество***

История Вселенной



Предсказания теории первичного нуклеосинтеза (первые три минуты жизни Вселенной, до T ~ 1 млрд. K):

Барионы: H (70% массы) - водород, ^{4}He (25% массы) - гелий + совсем мало D, Li, ^{3}He

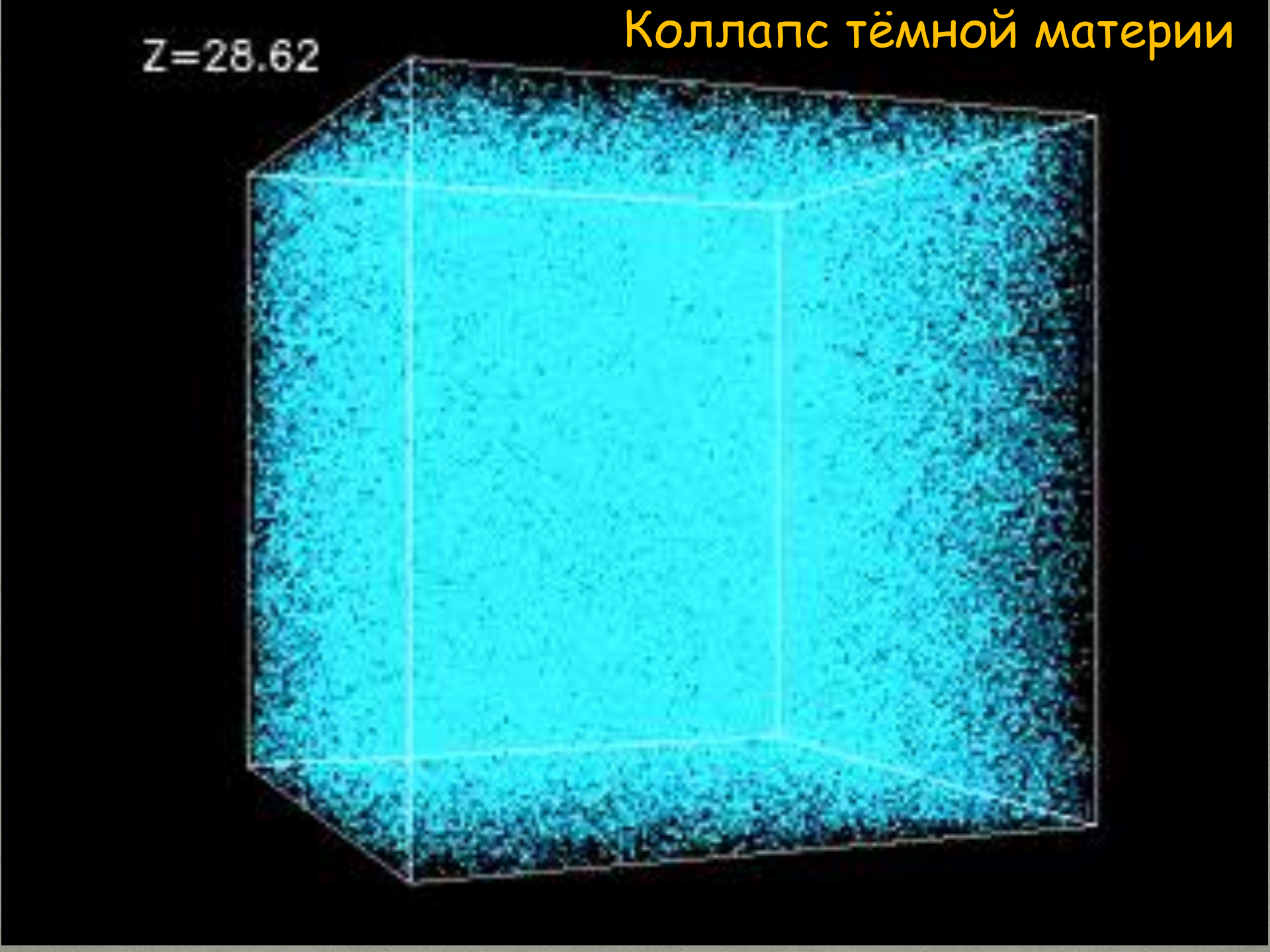
Доля барионного вещества (по массе) составляет примерно 4.5%

Доля "тёмной материи" (образовалась, вероятно, в первые 10^{-9} с) – около 24%

По вкладу в общую плотность энергии доминирует "тёмная энергия" (~72%)

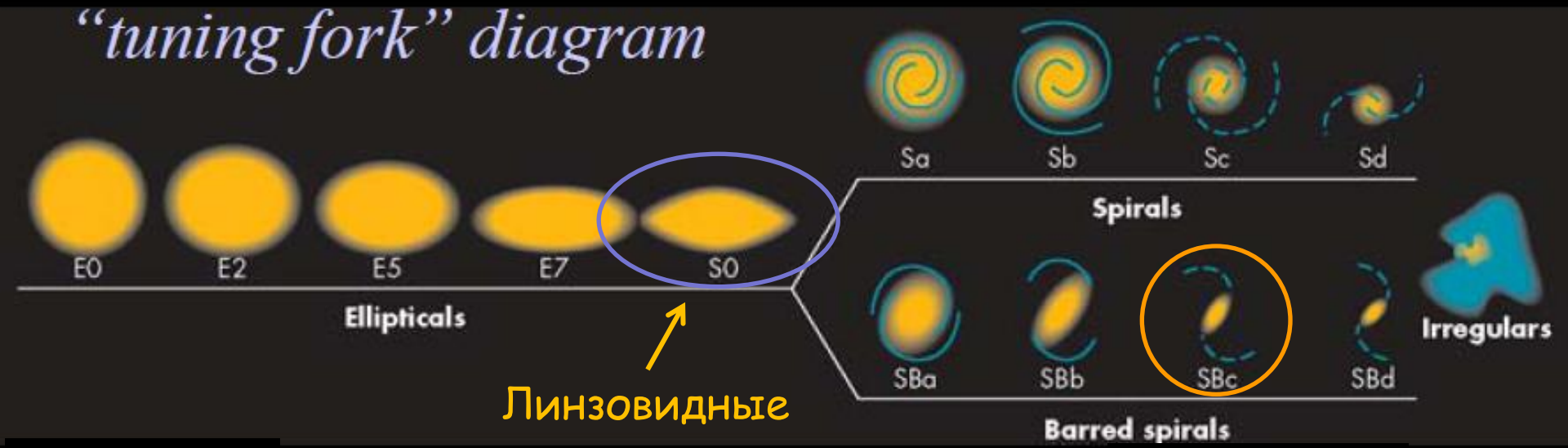
- Особая фаза – **“эпоха рекомбинации”**: при охлаждении первичной плазмы до температуры ~3000 К протоны и электроны объединились в атомы водорода; началась эра атомов **(возраст Вселенной в тот момент ~375000 лет)**.
- ***Реликтовое излучение (с длиной волны ~2 мм и температурой Т≈2.72548 К)*** – слабый “след” эпохи “отрыва” излучения от вещества: при дальнейшем расширении Вселенной **излучение “остыло”** примерно в 1100 раз
- **Малые (~0.00001) вариации температуры – отражение флуктуаций материи, породивших позднее галактики и звёзды путём *гравитационного сжатия***

Коллапс тёмной материи



Рождение спиральной галактики путём слияния небольших фрагментов газа

Хаббловская схема классификации галактик по форме и морфологическим типам (1-я половина XX века) (“камертонная” диаграмма)



Краснее
Мало газа
Балджи ярче
Много старых звёзд

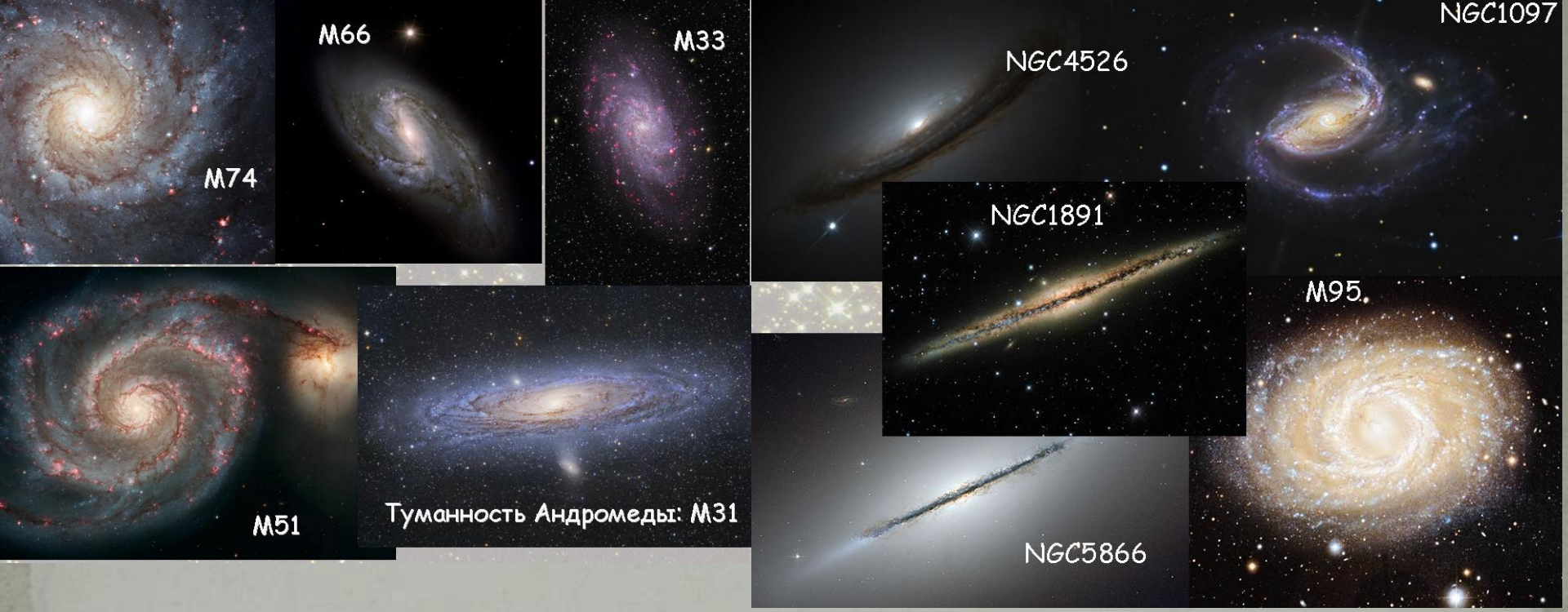
<----------------------------------->

<----------------------------------->

<----------------------------------->

Голубее
Много газа
Балджи слабее
Много молодых звёзд

- **Эллиптические галактики:** правильные формы
- Практически нет газа, пыли и молодых горячих (голубых) звёзд; видны в основном старые (красные) звёзды
- Практически не вращаются, но скорости звёзд на вытянутых орбитах достигают ~200-300 км/с (как в галактическом гало !)



Спиральные галактики:

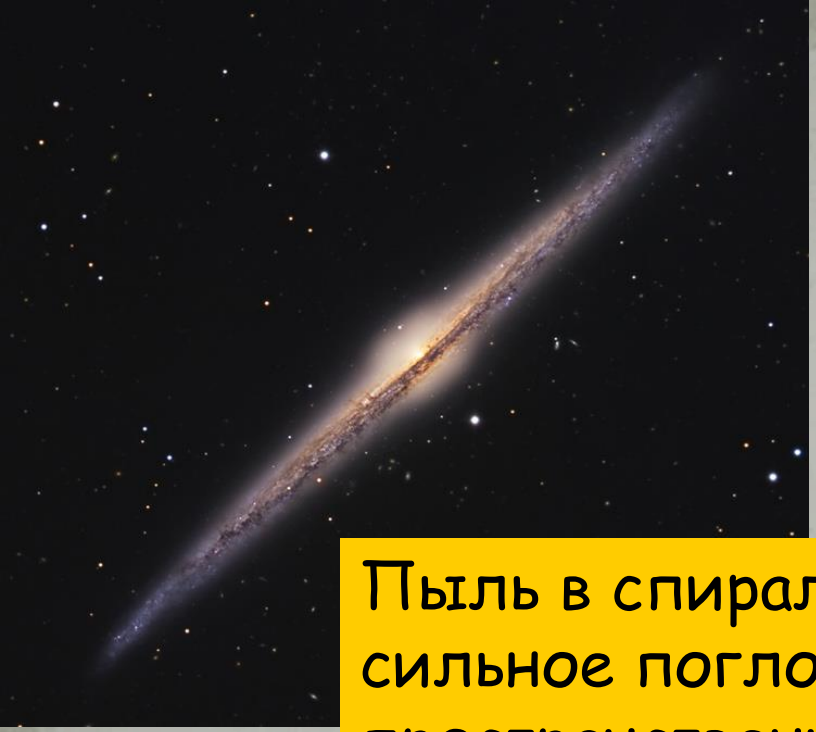
Дисковидные; показывают богатство и многообразие форм и сложное многокомпонентное строение

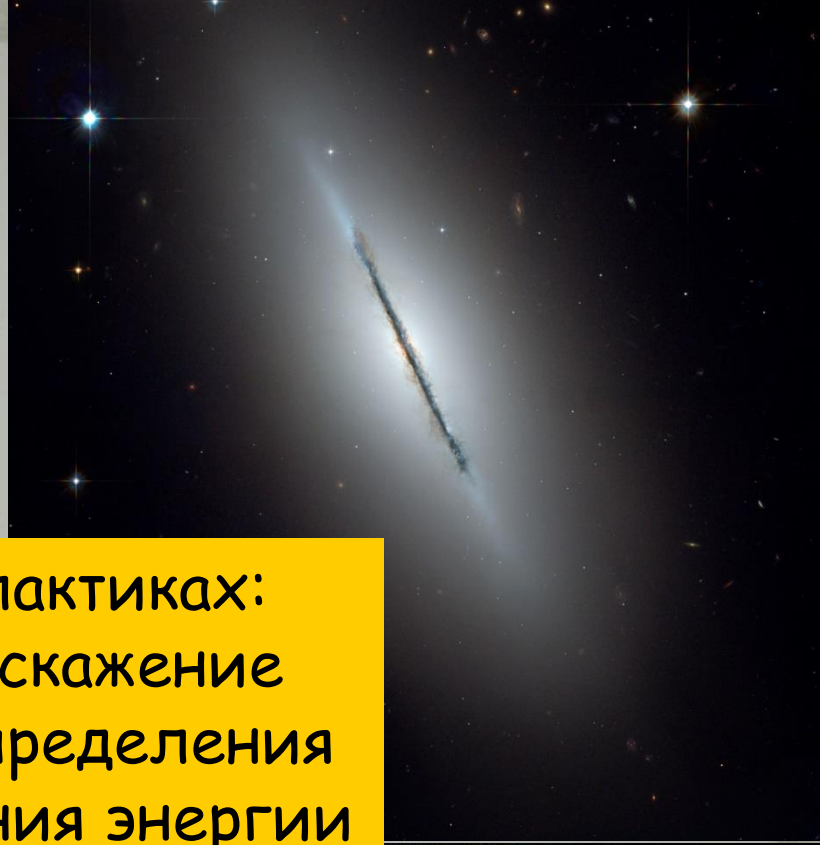
Много газа и пыли

Много молодых горячих (голубых) звёзд

Быстрое вращение (~200-300 км/с)

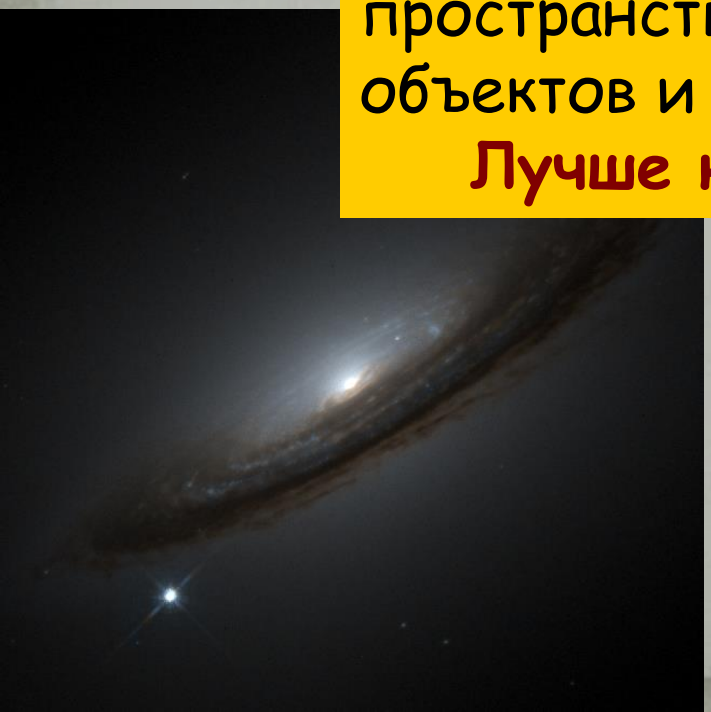
Спиральный узор





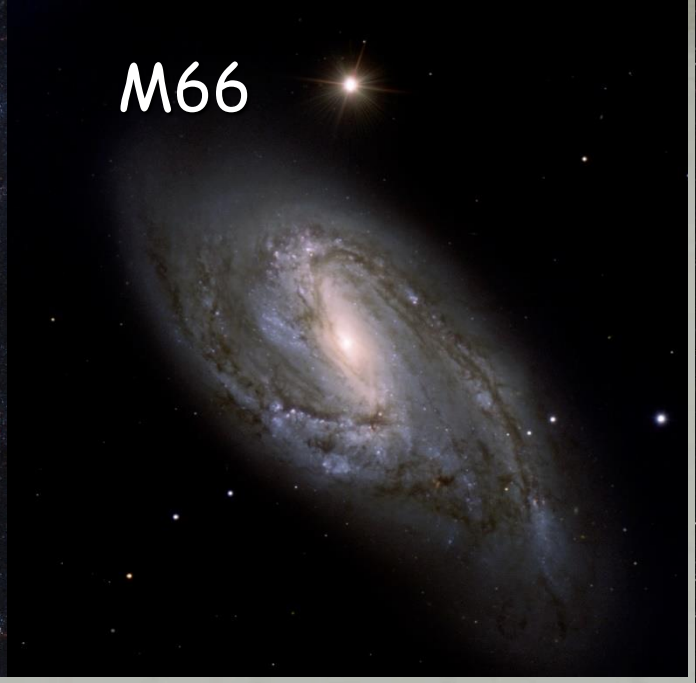
Пыль в спиральных галактиках: сильное поглощение, искажение пространственного распределения объектов и распределения энергии

Лучше наблюдать в ИК !

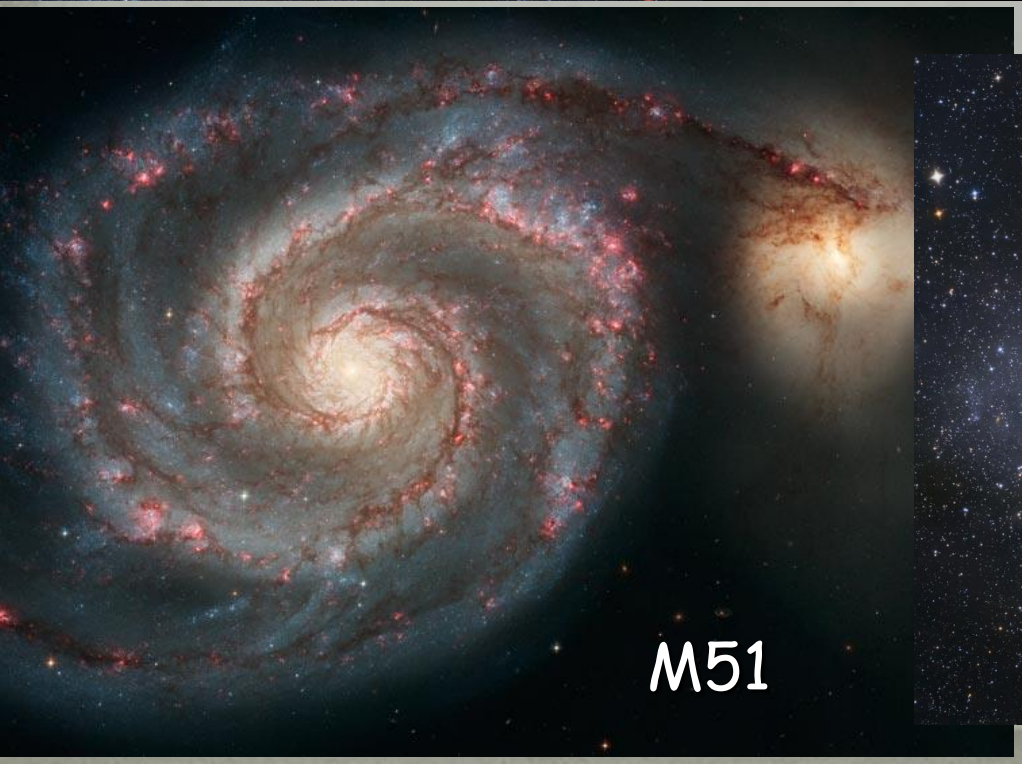


- **Спиральные галактики “устроены” намного сложнее большинства эллиптических:**
  - Включают ряд компонентов разной формы
  - Включают разновозрастные населения
  - По движению звёзд, химсоставу и эволюции - разные типы населений
- Типичная эллиптическая галактика по большинству свойств ≈ похожа на шаровое скопление

M74


M66

M33

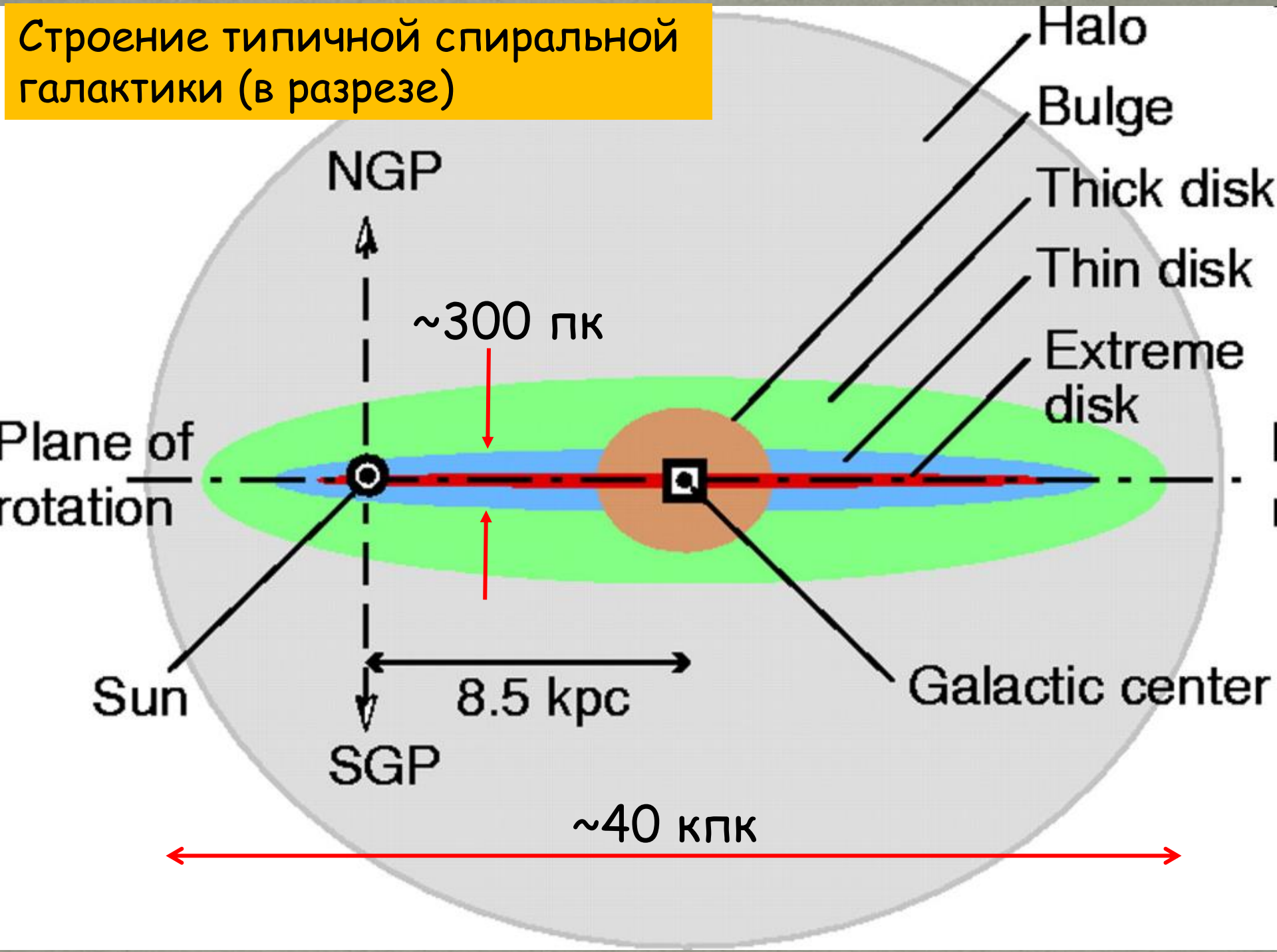

M51

M31

Вехи истории

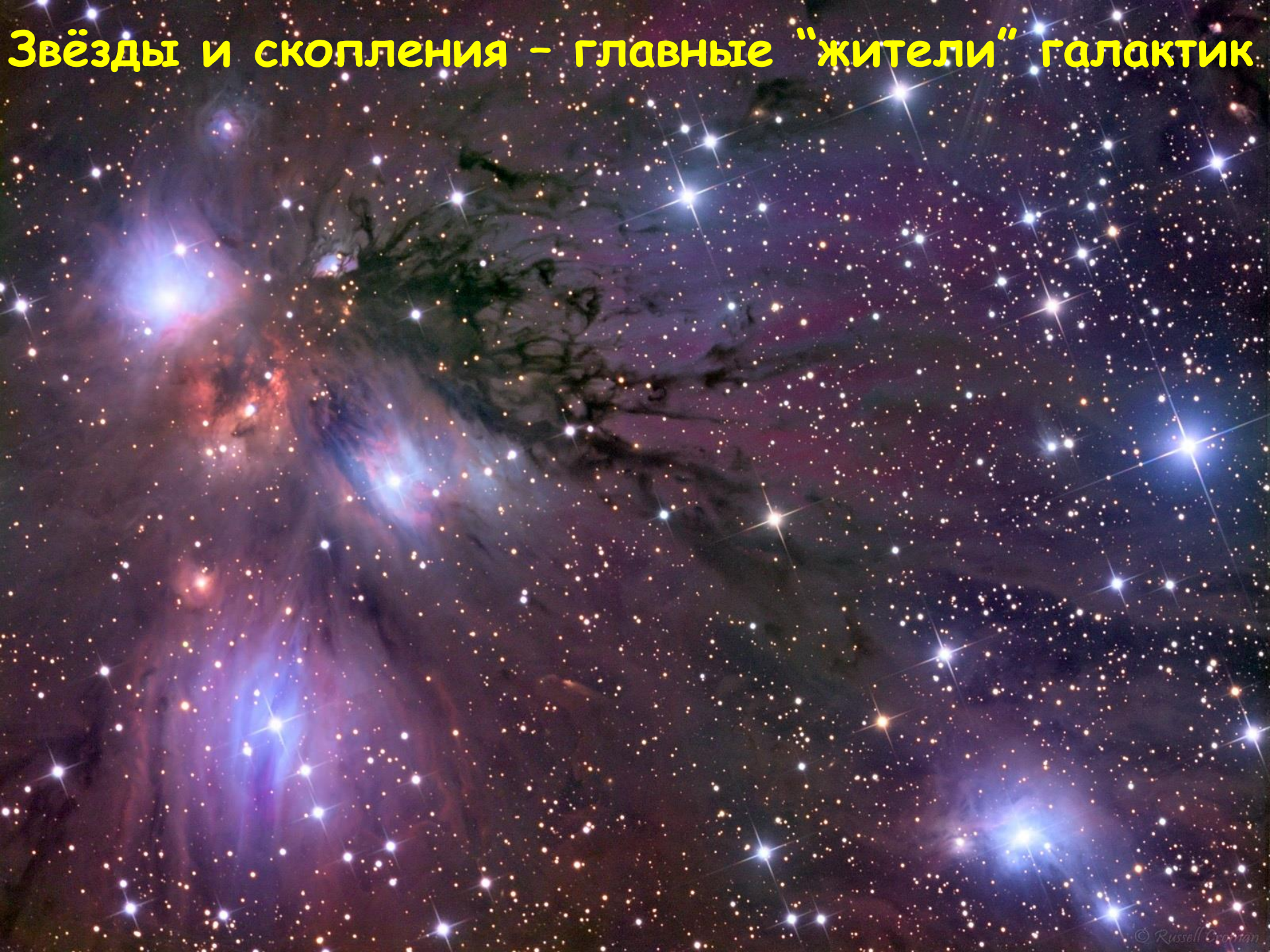
- **~1610:** Галилей “разрешил” на звезды видимую туманность Млечного Пути
- **~1750:** Кант – Млечный Путь – диск, состоящий из звезд; идея о том, что туманности - это “островные вселенные”
- **1920:** “Великий спор” Шапли и Кертиса о природе “спиральных туманностей”. Кертис: “островные вселенные” типа Млечного Пути
- **1923/24:** Хаббл по наблюдениям на новом 2.5-м телескопе Маунт Вильсон (США) окончательно установил природу “спиральных туманностей”, “разрешил” на звезды M31 и M33 и оценил их расстояния

Строение типичной спиральной галактики (в разрезе)



- Тонкий галактический диск – 100 млрд. звёзд
  - Звёзды, скопления и ассоциации молодых звёзд
  - Спиральный узор
  - Нейтральный, молекулярный, ионизованный газ
  - Межзвёздная пыль
- Толстый диск
- Балдж/бар
- Центральная область Галактики
  - Сверхмассивная чёрная дыра
  - Ядерное звёздное скопление
- Барионное гало – менее 10% массы диска
  - Субкарлики
  - Шаровые звёздные скопления и галактики-карлики
- Тёмное гало – в 10 раз массивнее диска

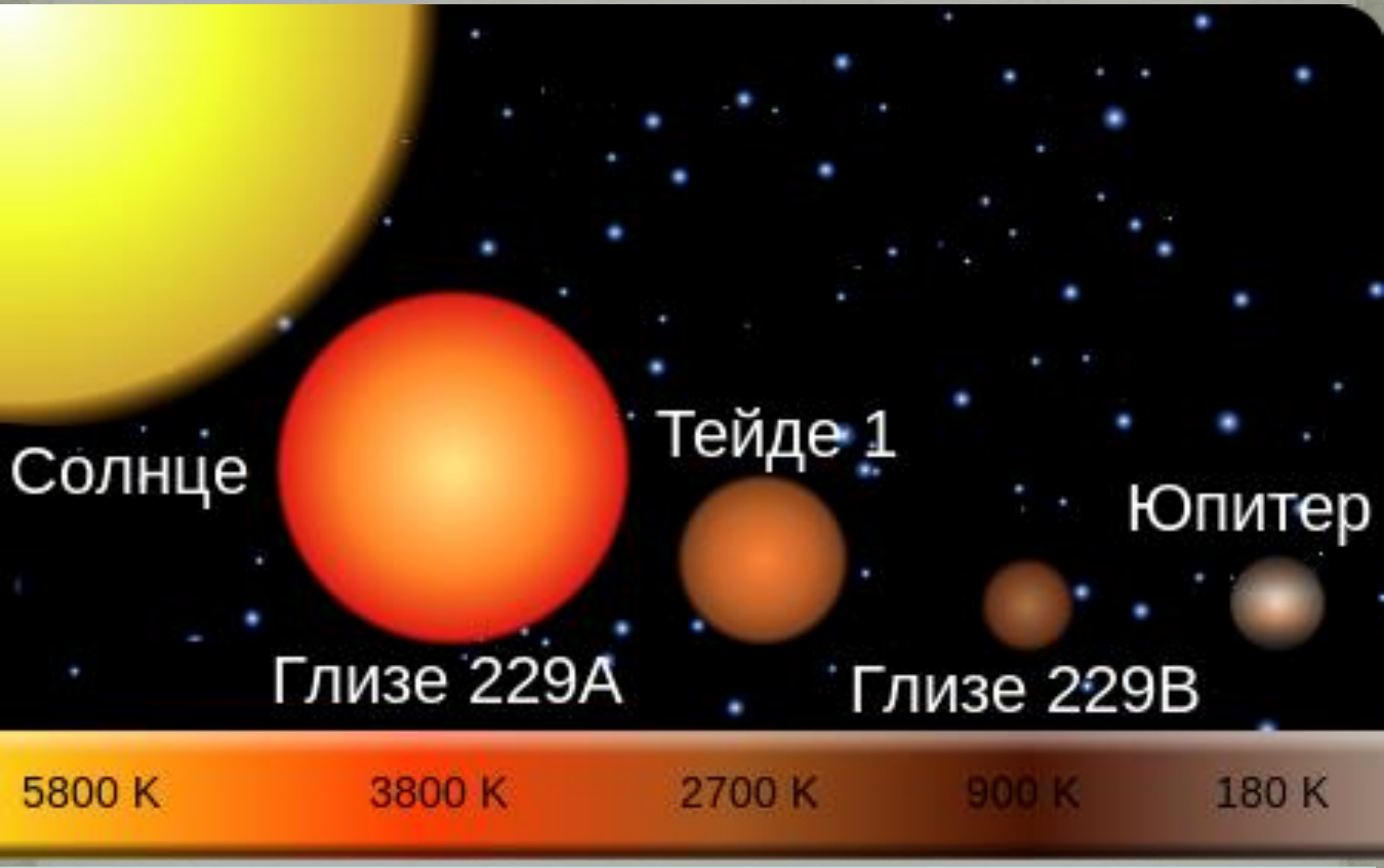
Звёзды и скопления – главные “жители” галактик



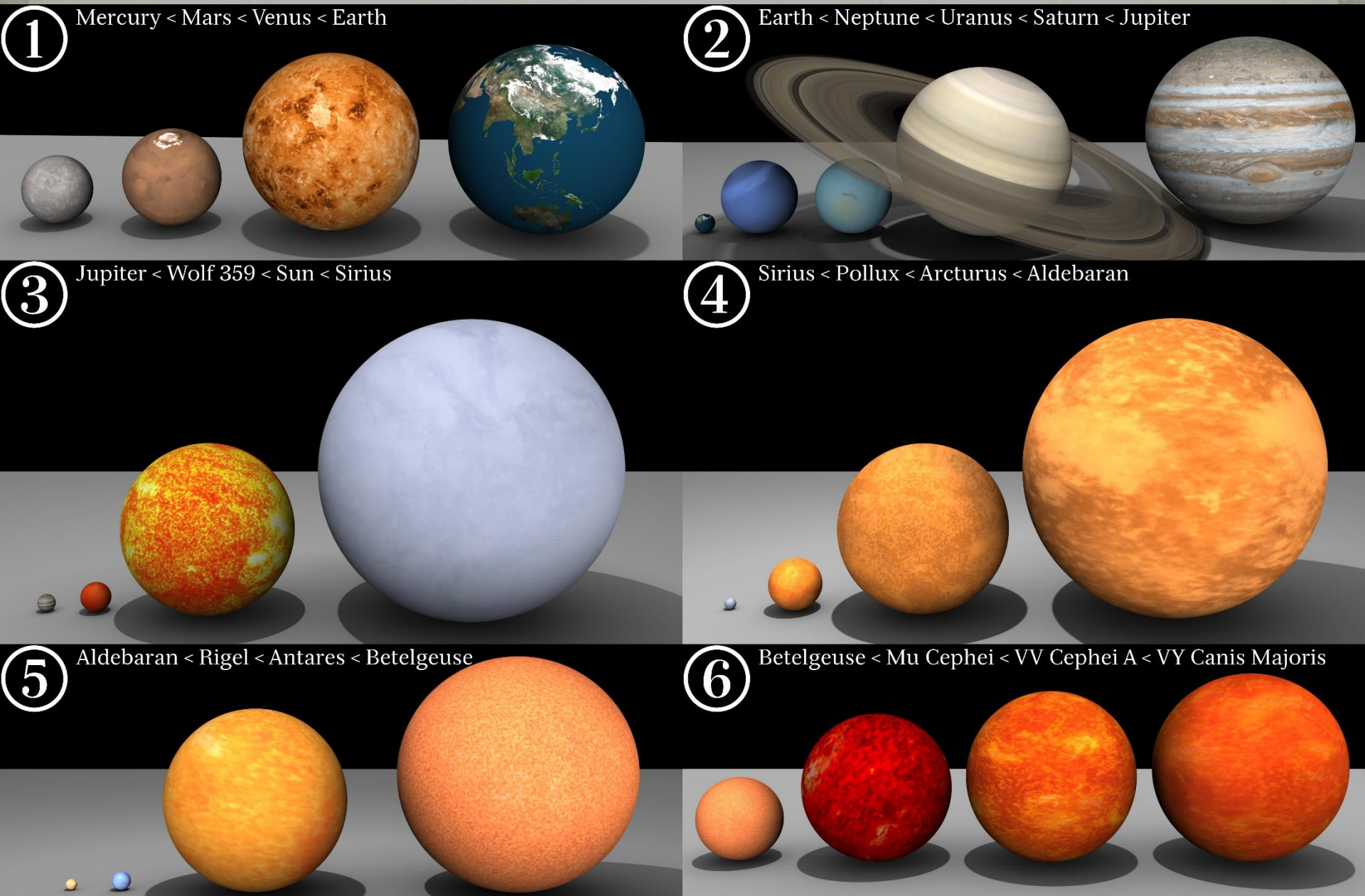
- **Звёзды-крохи:**

  белые карлики, самые плотные астрономические объекты, наблюдаемые в оптическом диапазоне

Планеты, бурые и красные карлики, Солнце…



Карлики и гиганты



Мир видимых звёзд: от бурых карликов до гипергигантов

- **Разные массы:**
  - 0.012 - 0.077 M_{Sun} (~12 – 80 масс Юпитера) - бурые (коричневые) карлики, или субзвёзды
  - 0.077 – ~150 (?) M_{Sun} – нормальные звёзды
  - < 1.40 M_{Sun} – белые карлики (плотные звёздные остатки)

- **Разные размеры:**
  - 5000-10000 км – белые карлики (размер Земли !)
  - ~0.01 – 0.2 R_{Sun} - бурые карлики
  - ~0.1 – 50 R_{Sun} – большинство нормальных звёзд
  - ~100 - 1500 R_{Sun} – звёзды от гигантов до гипергигантов

Легче воздуха ! - Мир видимых звёзд: от бурых карликов до гипергигантов

- **Средняя плотность вещества звёзд:**
  - 1.4 г/см^3 – Солнце (в его центре 130 г/см^3) – **плотность воды !**
  - 50 – 70 г/см^3 - бурые карлики
  - ~10^3 кг/см^3 = 1 т/см^3 – белые карлики
  - ~ 4 мг/см^3 – красные гиганты
  - ~ 0.03 мг/см^3 – сверхгиганты
  - ~ 0.0001 мг/см^3 – гипергиганты
  - **1.29 мг/см^3 – нормальная плотность воздуха (для сравнения)**

- **Температуры на поверхности звёзд:**
  - ~250 – 3000 К - бурые карлики
  - ~5000 – 70000 К – белые карлики
  - ~3000 – 50000 К – нормальные звёзды
  - ~50000 – 70000 К – горячие массивные звёзды типа Вольфа-Райе
  - **0 К = -273.16°С – начало отсчёта абсолютных температур**

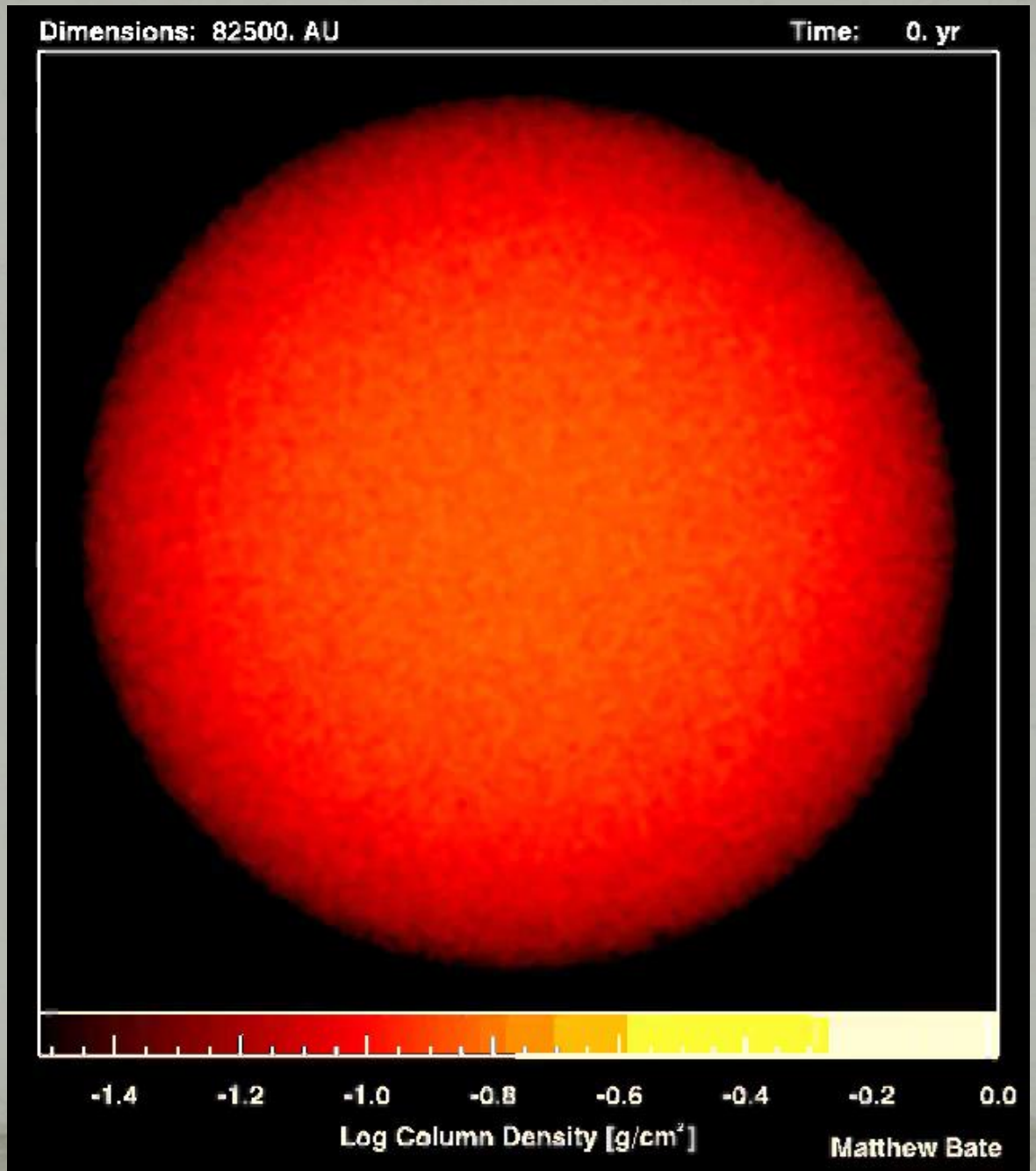
- Рождением и жизнью звёзд и звёздных скоплений управляет **гравитация**

- Звёзды рождаются в холодных газовых облаках, когда сила тяготения в облаке превысит давление газа (зависящее от температуры газа и его химического состава)
- Самая холодная среда – молекулярный водород (T ~ 10-50K)
- Чем ниже температура, тем легче сжимается облако
- Внешнее давление может стимулировать образование звёзд

Наблюдаем рождение звёзд в молекулярном газе (наблюдения звёздных "коконов" в ИК и радио)

Скопление M 16 и молекулярный газ в туманности Орёл = IC 4703

Рождение скопления звёзд в молекулярном облаке



Новорождённые горячие звёзды “выдувают” газ давлением света и звёздным “ветром”

Молодое рассеянное скопление NGC 3603

Формирование звёздных скоплений

- Иерархическая фрагментация холодных (~10-50K) молекулярных облаков
- Джинсовская масса (гравитационная неустойчивость)

$$M_J \approx \left(\frac{\gamma RT}{\mu G}\right)^{3/2} \rho^{-1/2} \approx 17 \frac{\gamma^{3/2}}{\mu^2} \left(\frac{T^3}{n}\right)^{1/2} M_{SUN}$$

- Для типичных условий (***μ ~ 0.7-2.4, γ ~ 5/3-7/5*** (атомный вес одной частицы и показатель адиабаты) – от межоблачной среды до молекулярных облаков) получаются оценки массы и радиуса (с точностью до фактора 3-4):

$$M_J \approx 20 \left(\frac{T^3}{n}\right)^{1/2} M_{SUN}, R_J \approx 5 \left(\frac{T}{n}\right)^{1/2} pc$$

(T в K, n в см$^{-3}$)

Формирование рассеянных скоплений

- Для холодных и плотных межзвёздных облаков (T ~ 20 K и n ~ 10 см$^{-3}$)

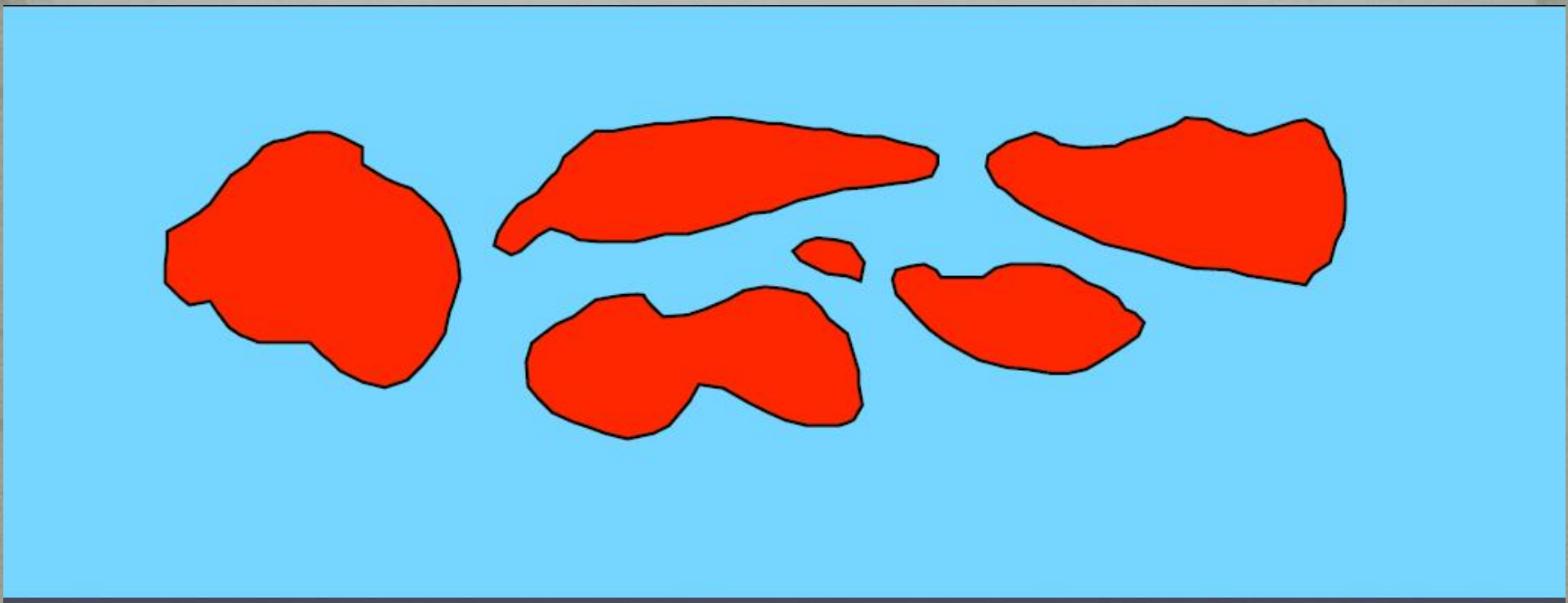
  (Джинсовские) масса и радиус неустойчивого облака равны соответственно по порядку величины

$$M_J \approx 600 M_{SUN}, R_J \approx 7 \text{ пк}$$

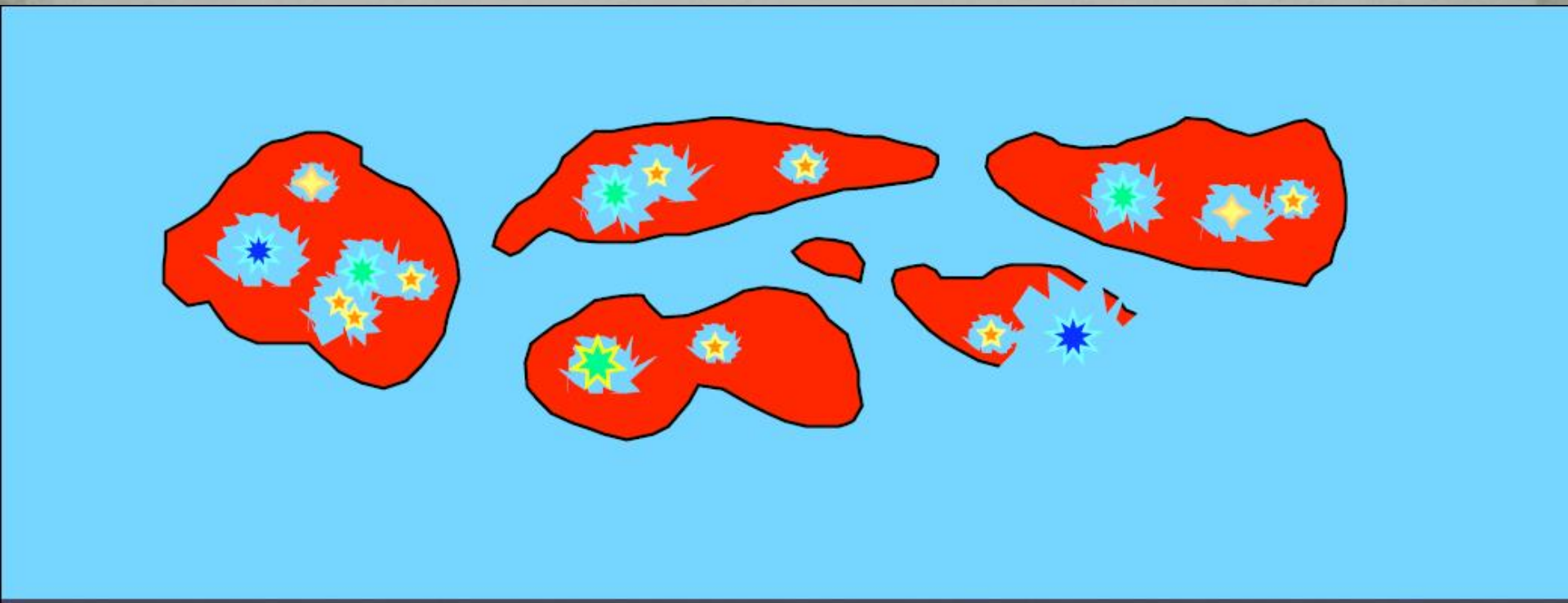
- это масса и размер типичного рассеянного скопления

Рождение звёзд и звёздных скоплений

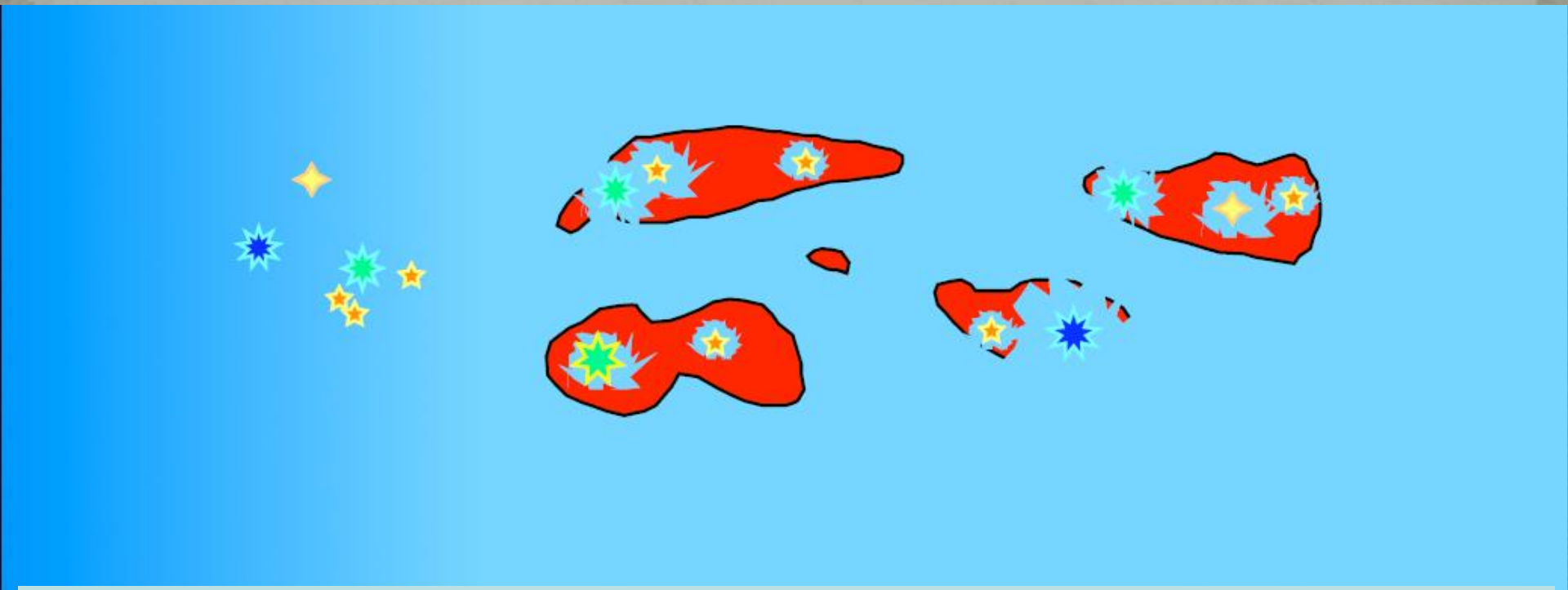
- Процессы звездообразования в молекулярном газе



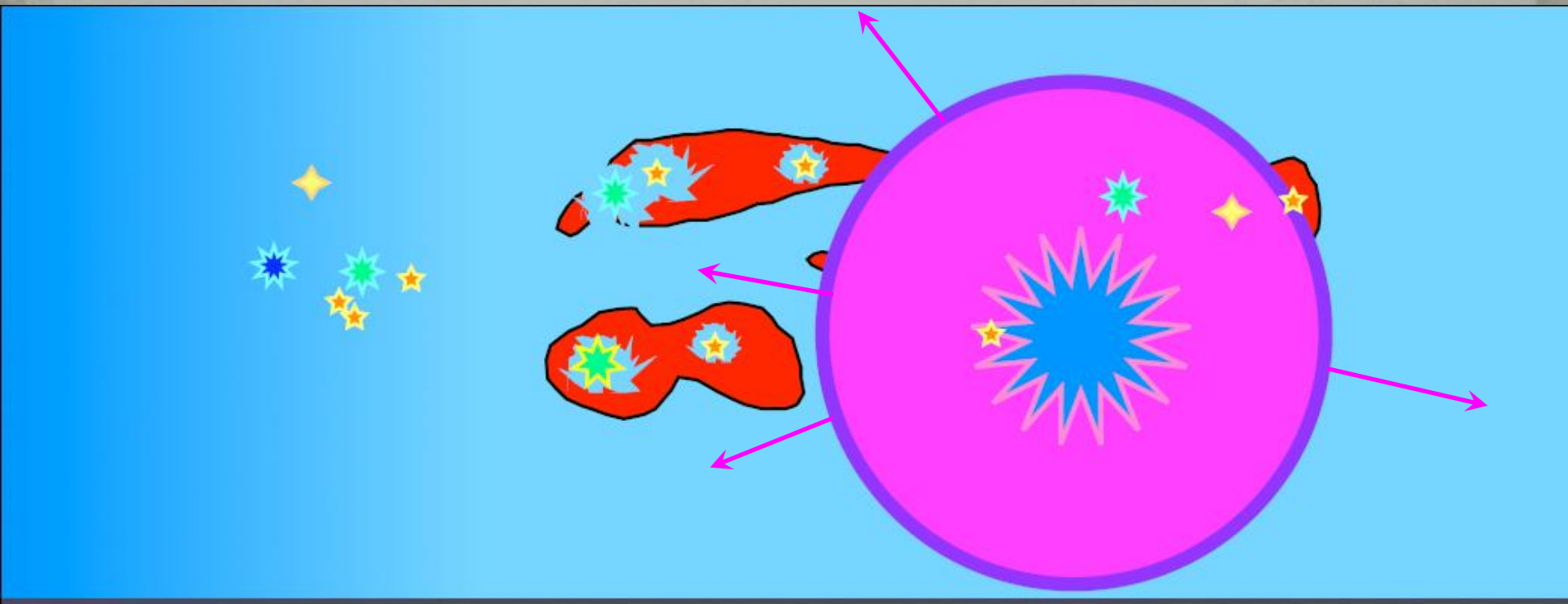
При большой плотности в результате охлаждения молекулярный газ разбивается на отдельные облака (фрагментация: Джинсовская неустойчивость)



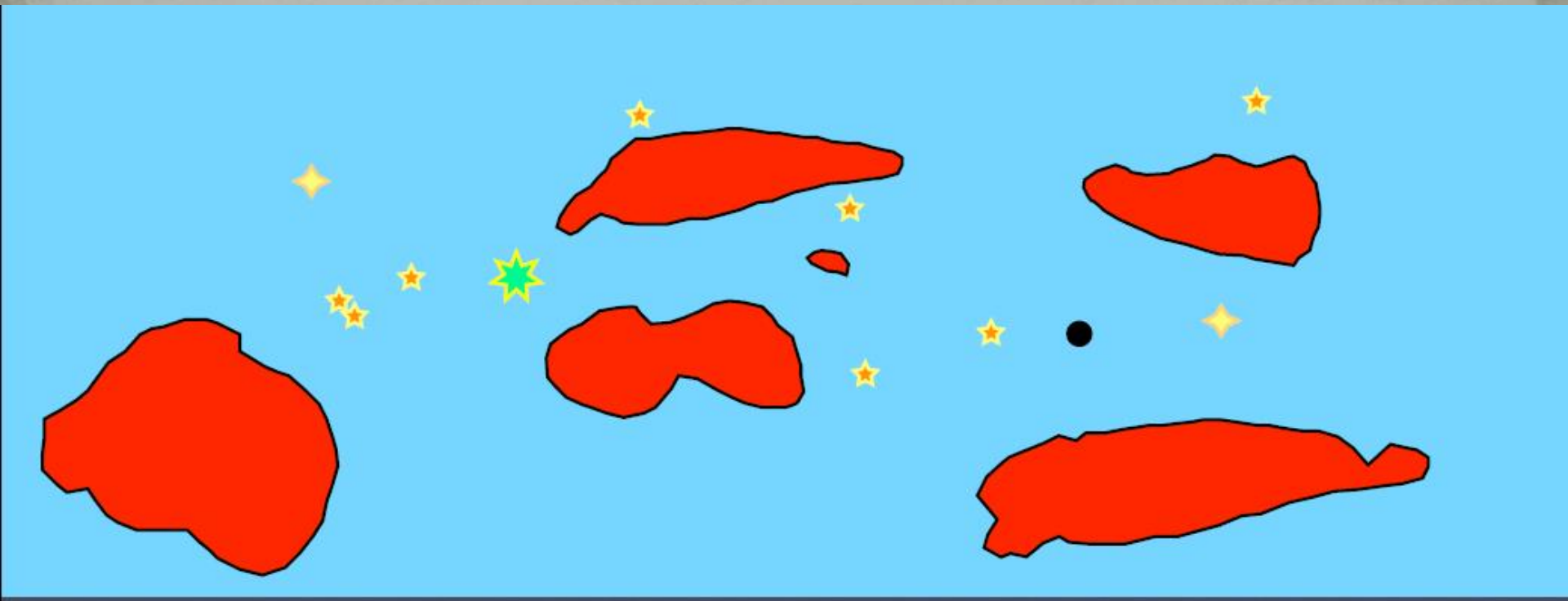
Формируются первые звезды, интенсивность излучения растет. Ультрафиолетовые кванты частично разрушают молекулы (диссоциация)



Излучение подавляет звездообразование в облаках с малой плотностью.
В некоторых облаках весь молекулярный газ диссоциирует, эффективность охлаждения падает и газ нагревается. Даже при малом характерном времени охлаждения звездообразование практически прекращается.



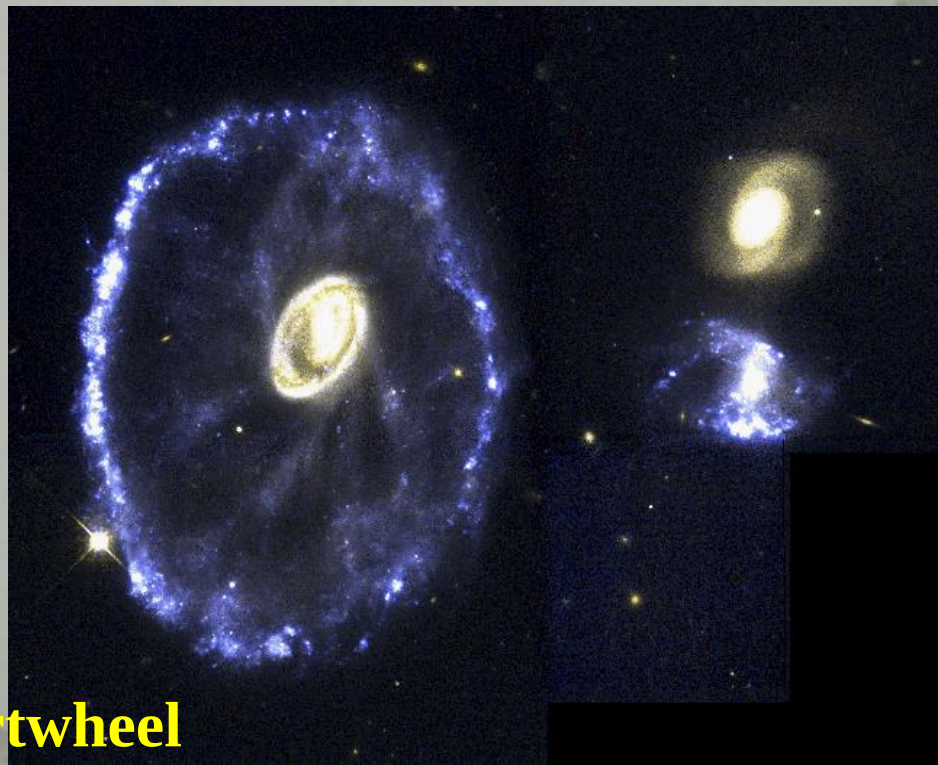
Взрывы массивных Сверхновых (SN II, Ib/c) могут ударными волнами оболочек снова уплотнять газ и стимулировать продолжение звездообразования.



По мере угасания молодых горячих звезд молекулярные облака частично восстанавливаются, давая начало новому витку звездообразования .

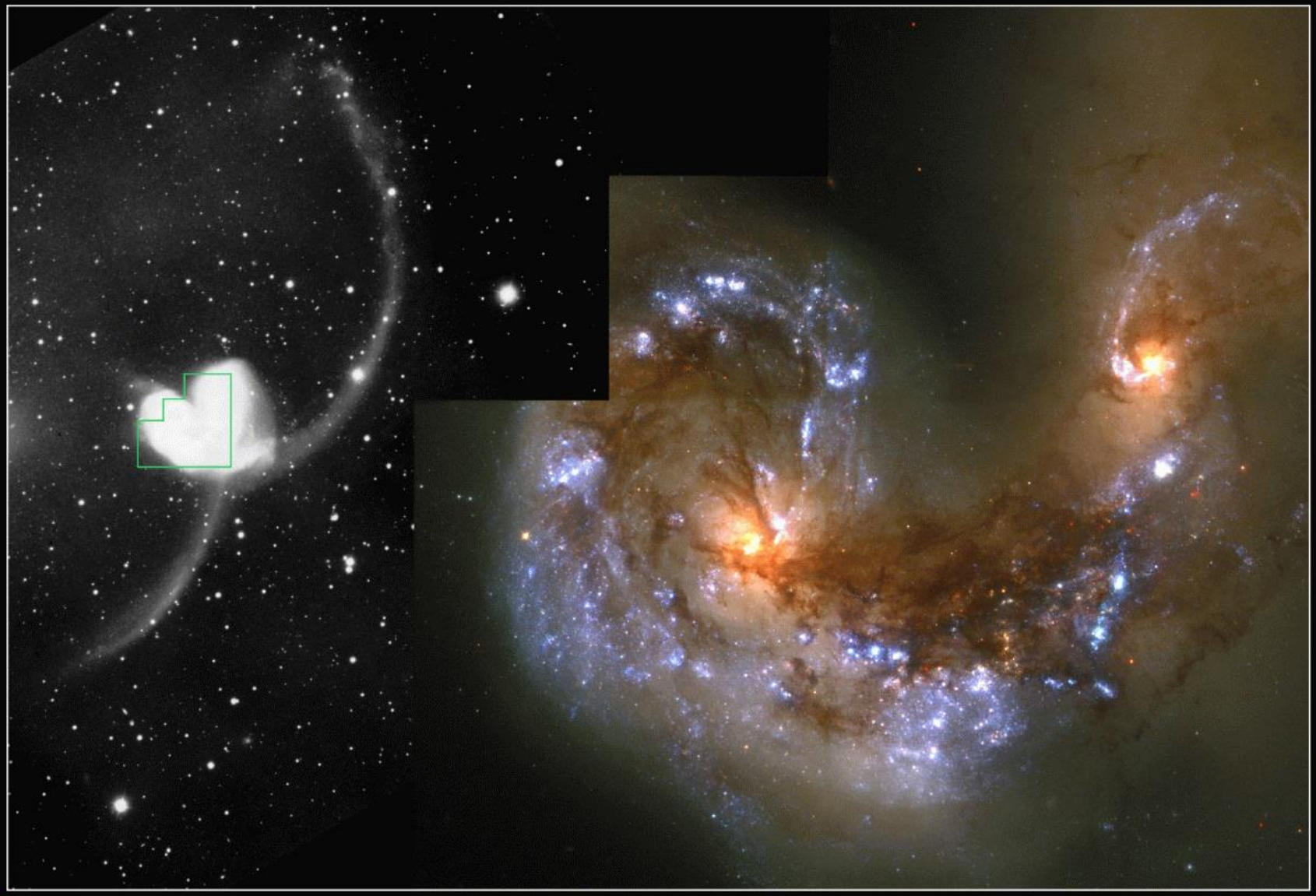
- В современную эпоху массивные (шаровые) скопления рождаются там, где высока эффективность звездообразования, например, есть сильные ударные волны в газе – во взаимодействующих галактиках или в дисковых галактиках с падением на диск высокоскоростных облаков газа

Mice



Cartwheel

“Каннибализм” (слияния галактик)



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039

Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B. Whitmore (ST ScI) and NASA

Источники звёздной энергии

- **100 лет назад считалось, что звёзды светят за счёт запасённой в них гравитационной энергии** – чтобы сдерживать “вес” оболочки, газовый шар должен сжиматься и разогреваться

- Запаса гравитационной энергии в Солнце хватило бы только на 17-20 млн. лет свечения, в то время как Земля существует более 4 млрд. лет (данные геологии)

Источники звёздной энергии

- **Нужно искать длительный источник энергии, которого должно хватить на миллиарды лет !**
- **Помогли СТО Эйнштейна и квантовая механика: это термоядерные реакции** синтеза более тяжёлых атомных ядер из водорода, затем из гелия и других элементов
- Масса исходных частиц БОЛЬШЕ массы синтезированных ядер.
- **Дефект массы - эффект СТО:**

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

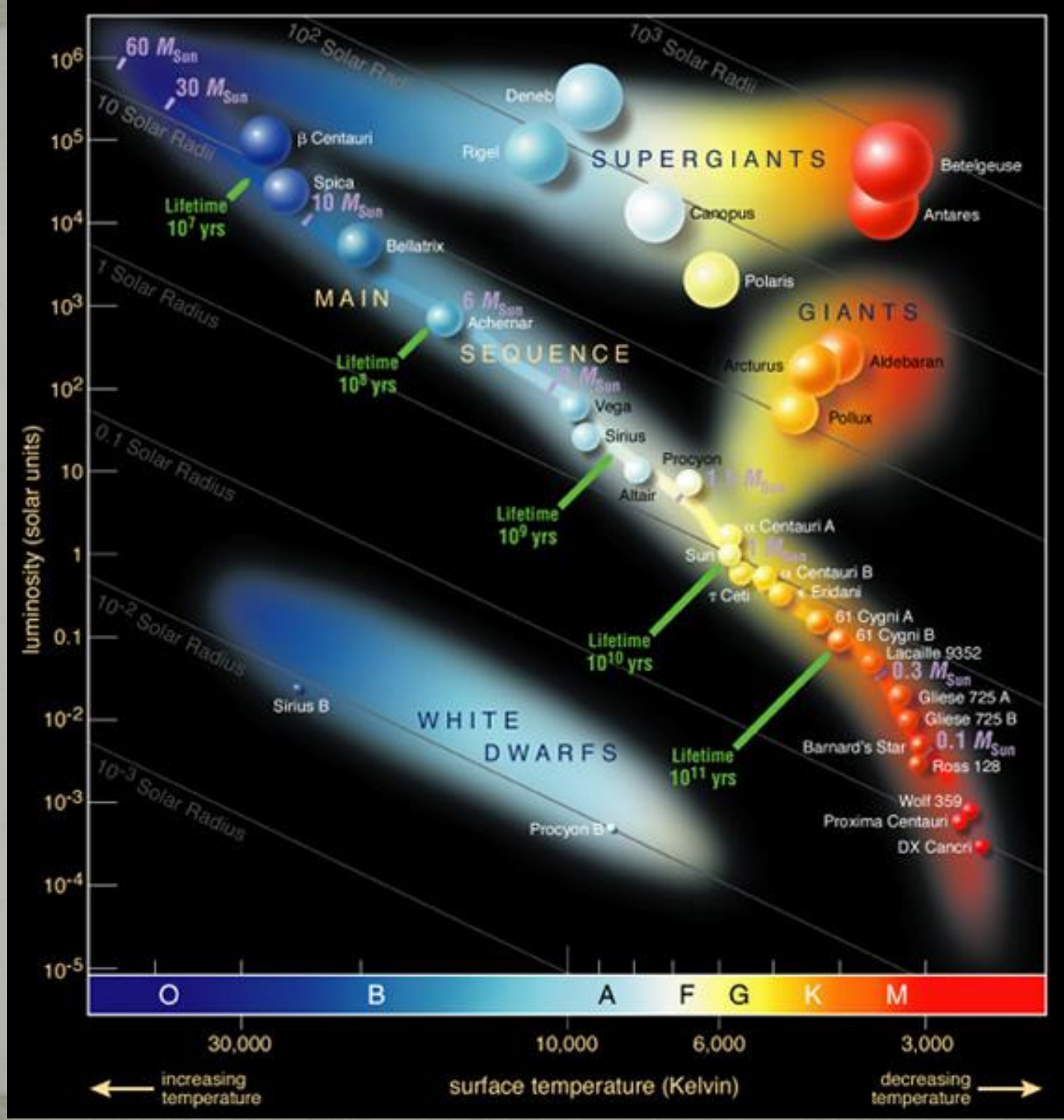
От газового шара к звезде

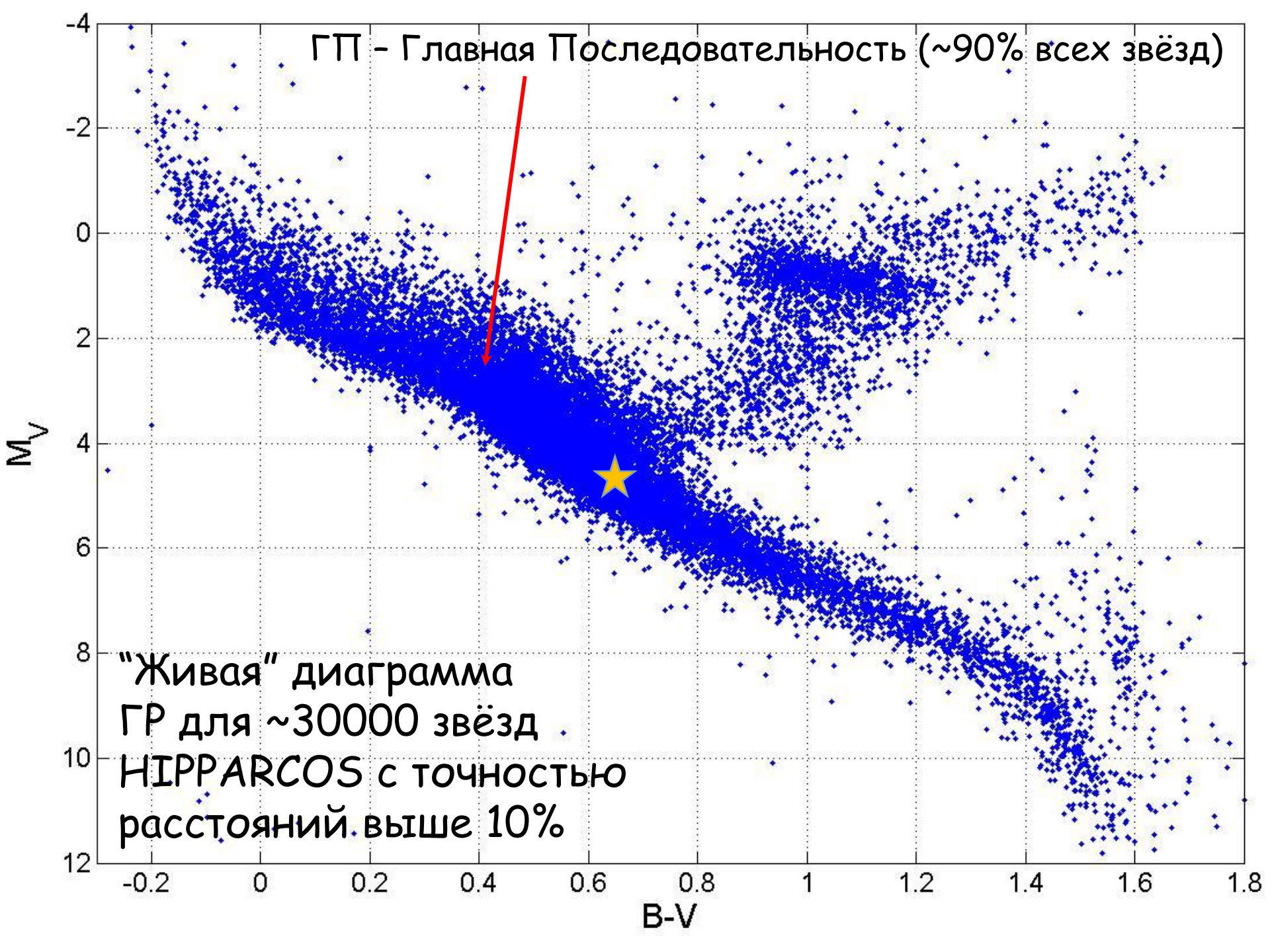
- а
- водорода в гелий.
- **Это начало первого этапа настоящей жизни звезды**

В недрах Солнца каждую секунду в гелий превращается ~50 млн. тонн ядерного горючего – водорода

Это непрерывный термоядерный “взрыв”, управляемый тяготением

- Диаграмма Герцшпрунга-Рассела (цвет – абсолютная величина, спектр – светимость, температура – светимость) – основное средство изучения звёздных населений галактик




ГП – Главная Последовательность (~90% всех звёзд)
"Живая" диаграмма
ГР для ~30000 звёзд
HIPPARCOS с точностью
расстояний выше 10%
M_V
B-V
-4
-2
0
2
4
6
8
10
12
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8

- В течение “жизни” звезды на ГП в её ядре “сгорает” примерно 10% всей массы водорода, дефект массы этой реакции $\Delta M/M \approx 0.7\%$, и выделяется полная энергия $E_{ГП} = \Delta M \cdot c^2 \approx (M/M_{Sun}) \cdot 10^{51}$ эрг
- Мощность излучения звезды на ГП

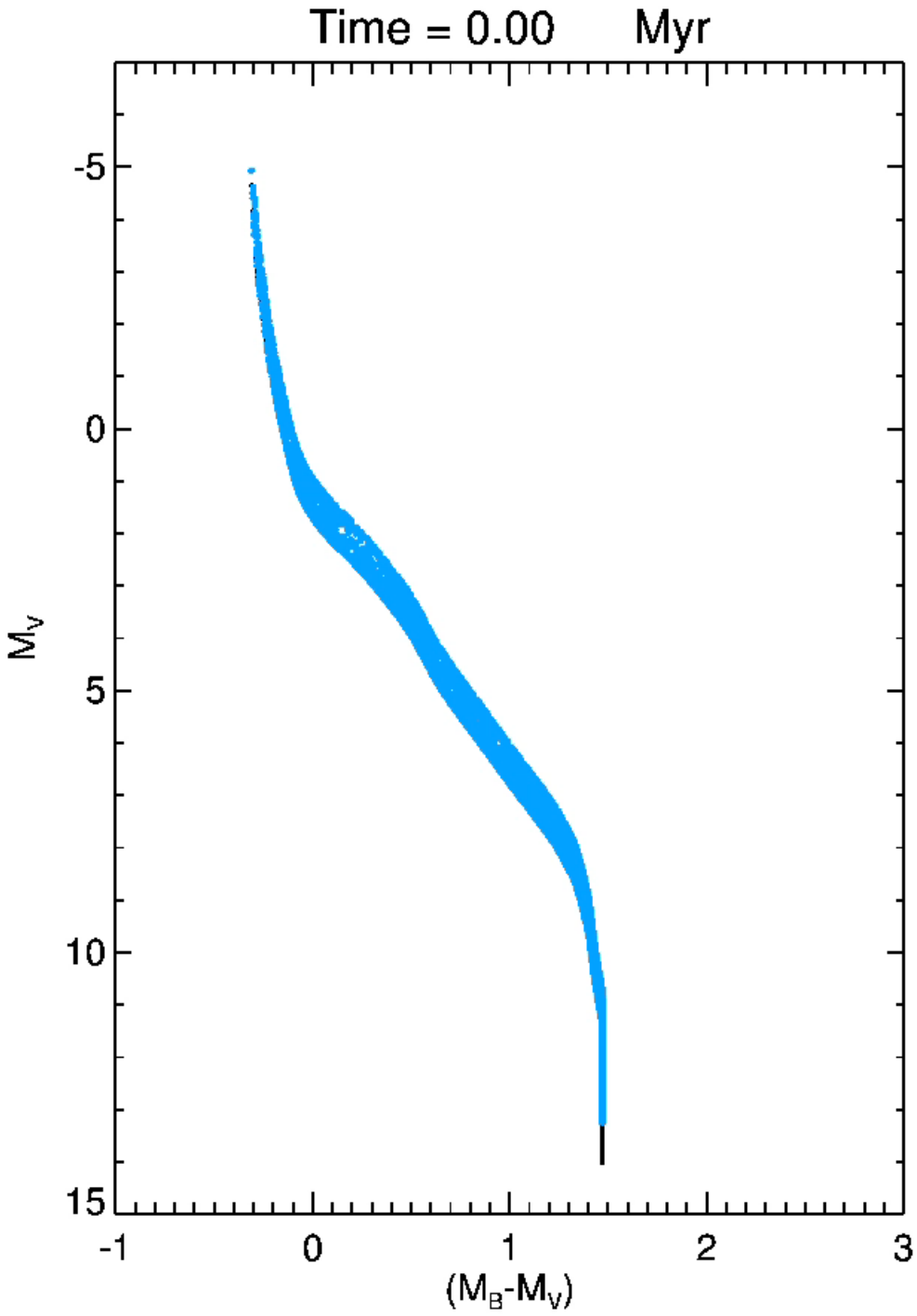
  $L_{ГП} \sim (M/M_{Sun})^3 \cdot 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с
- Значит, время жизни на ГП
- $T_{ГП} \approx E_{ГП} / L_{ГП} \approx (M/M_{Sun})^{-2} \cdot 10^{10}$ лет

  быстро уменьшается с ростом массы звезды (у Солнца $T_{ГП} \approx$ 9-10 млрд. лет)

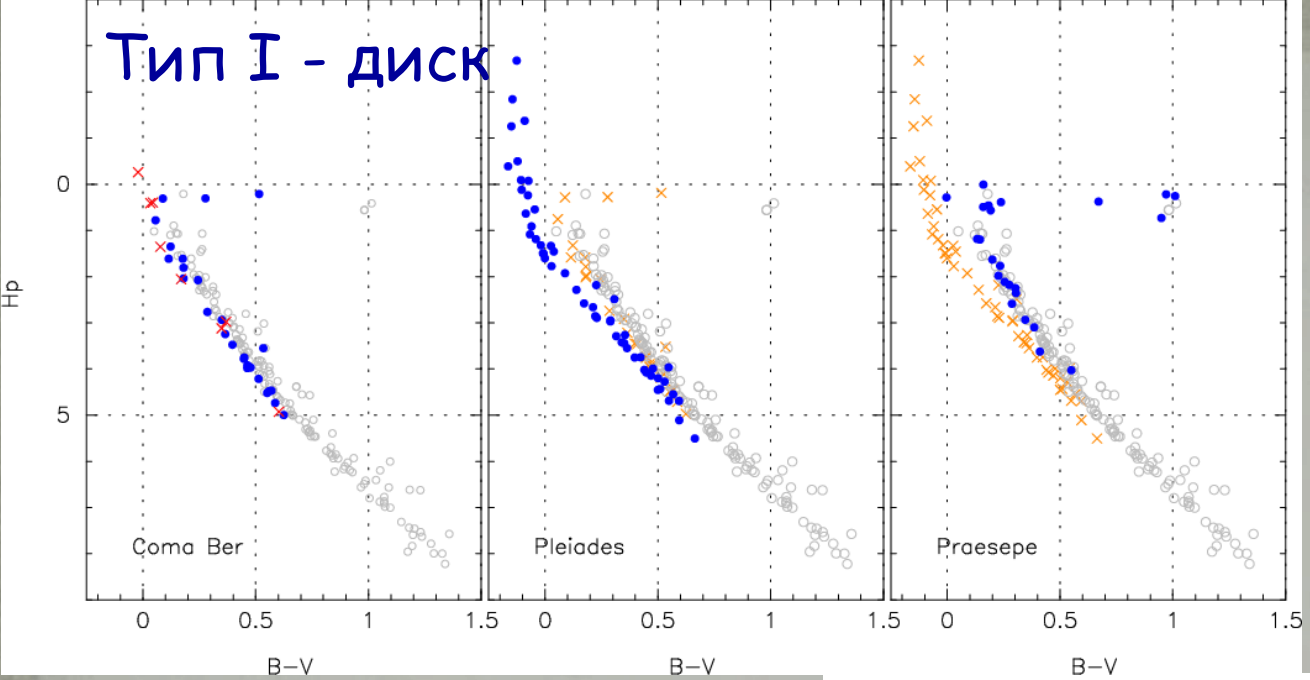
Следующие стадии эволюции намного короче

Скопление NGC 188:

Из-за того, что время жизни на ГП резко падает с ростом массы, вид диаграммы ГР в ходе эволюции непрерывно меняется – “выгорают” ярчайшие звёзды



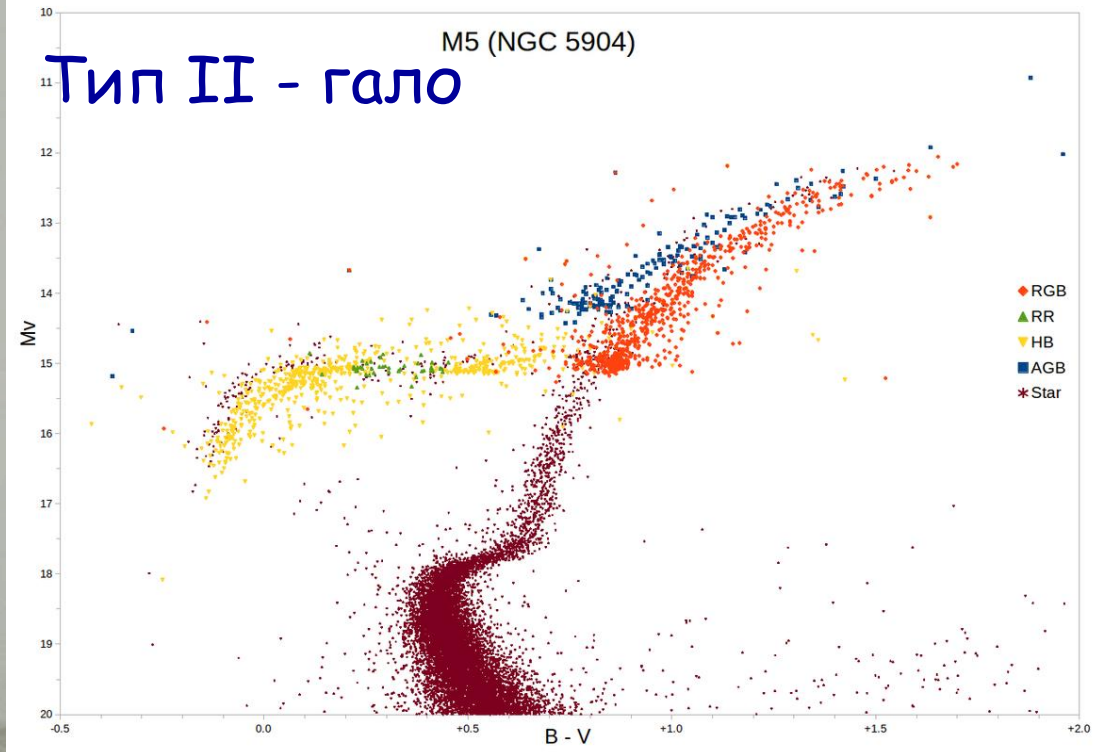
- **Пример: бурная, но короткая жизнь звезды 25 M_{Sun}**
- Горение водорода 7 млн. лет
- Горение гелия 500 тыс. лет
- Горение углерода 600 лет
- Горение кислорода 0.5 года
- Горение неона 10 суток
- Горение кремния 1 сутки
- Коллапс железно-никелевого ядра 0.1 сек
- Разлёт оболочки, Сверхновая II типа, образование чёрной дыры
- ----------
- **Полное время жизни ~8 млн. лет**

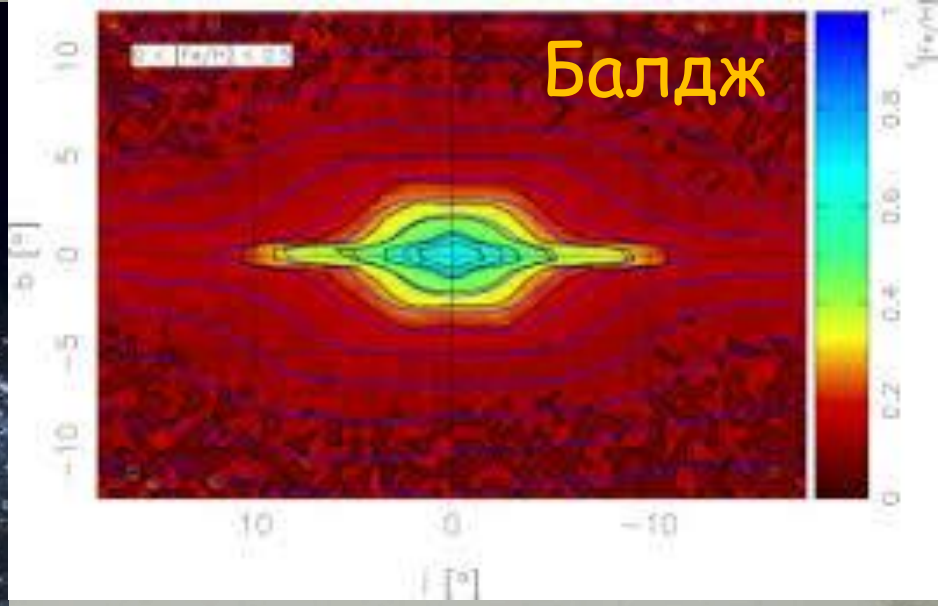


I – типичное молодое население диска

II – типичное старое население гало

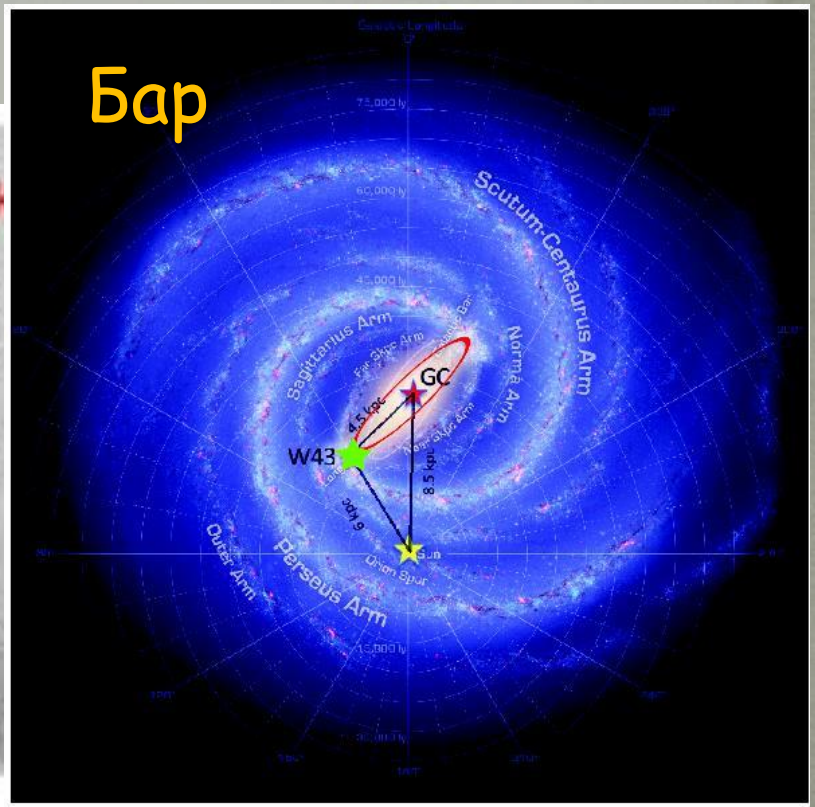
- **В. Бааде (1948):** классификация населений по виду диаграммы ГР
- Типы I – II не соответствуют порядку формирования





Тонкий диск

Толстый диск



Компоненты спиральной галактики

Тонкий диск:

Возрасты звёзд от ~1 млн. до ~10 млрд. лет, химический состав ~солнечный.

Газ (~10%): нейтральный, ионизованный и молекулярный водород.

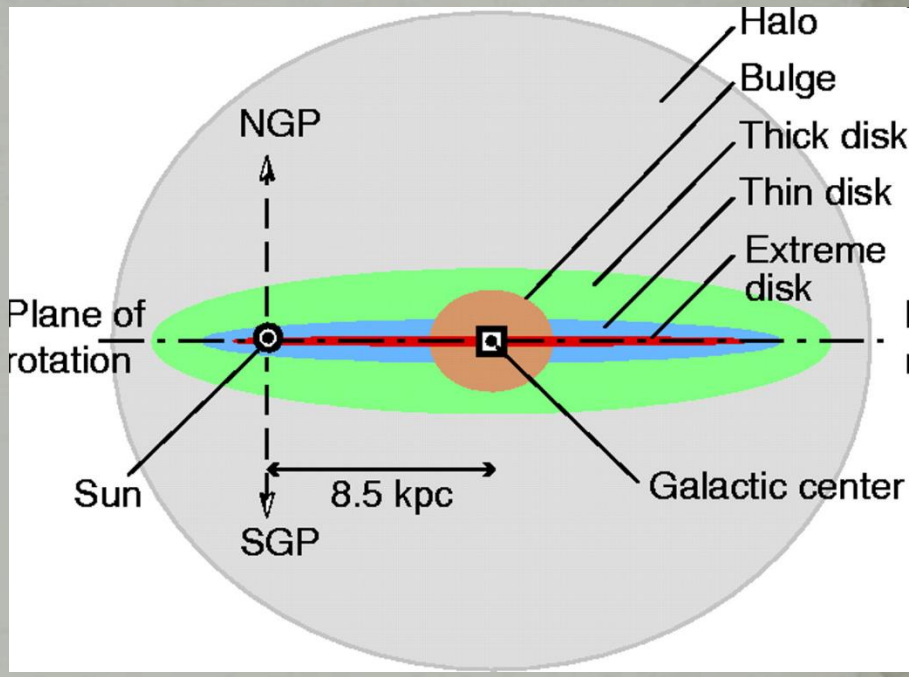
Пыль. Рассеянные скопления и OB-ассоциации. Звездообразование.

Спиральный узор.

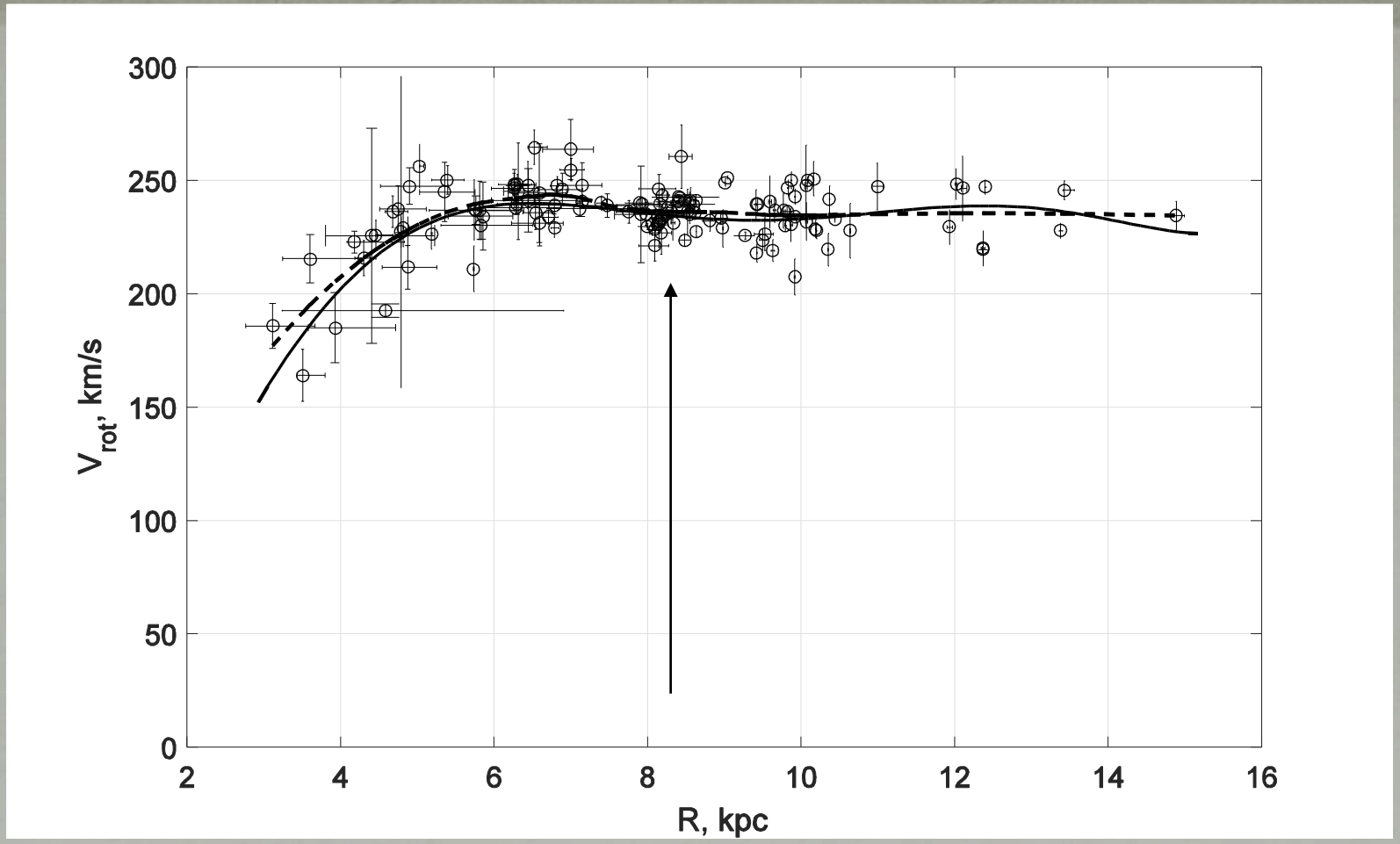
Быстрое вращение и почти круговые орбиты звёзд.

Характерный размер 200 пк x 30 кпк.

Масса диска ~ 100 млрд. M_{sun}

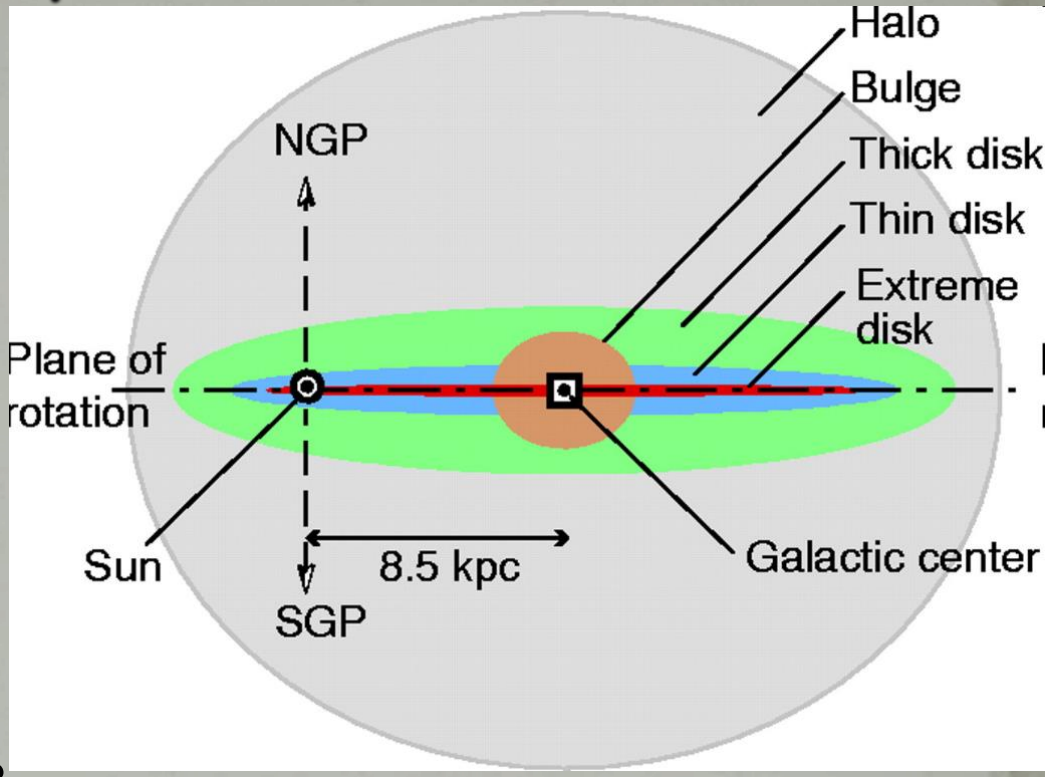


От Солнца до центра Галактики ~8.2 кпк



- Скорость вращения тонкого диска Млечного Пути (по мазерным источникам)
- “Плоская” кривая вращения (V ~ 240 км/с)
- **Толстый диск вращается несколько медленнее**

Компоненты спиральной галактики



Барионное гало:

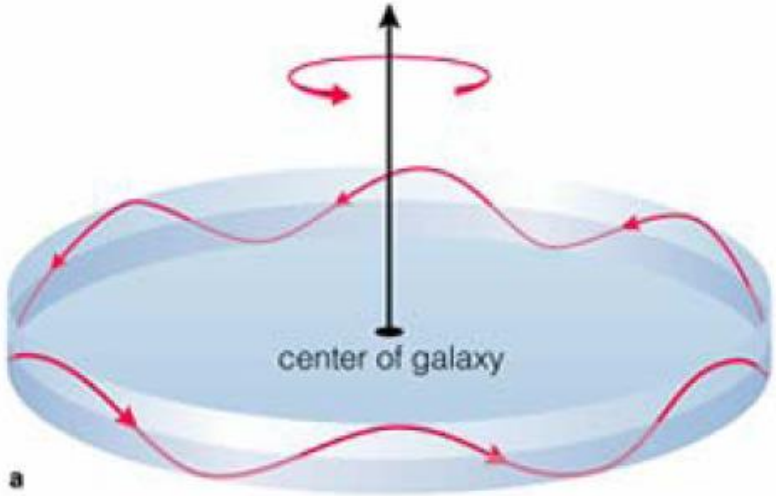
Старые (>10 млрд. лет) звёзды, мало тяжелых химических элементов.
Шаровые скопления.
Почти не вращается.
Вытянутые орбиты.
Характерный размер ~10-20 кпк

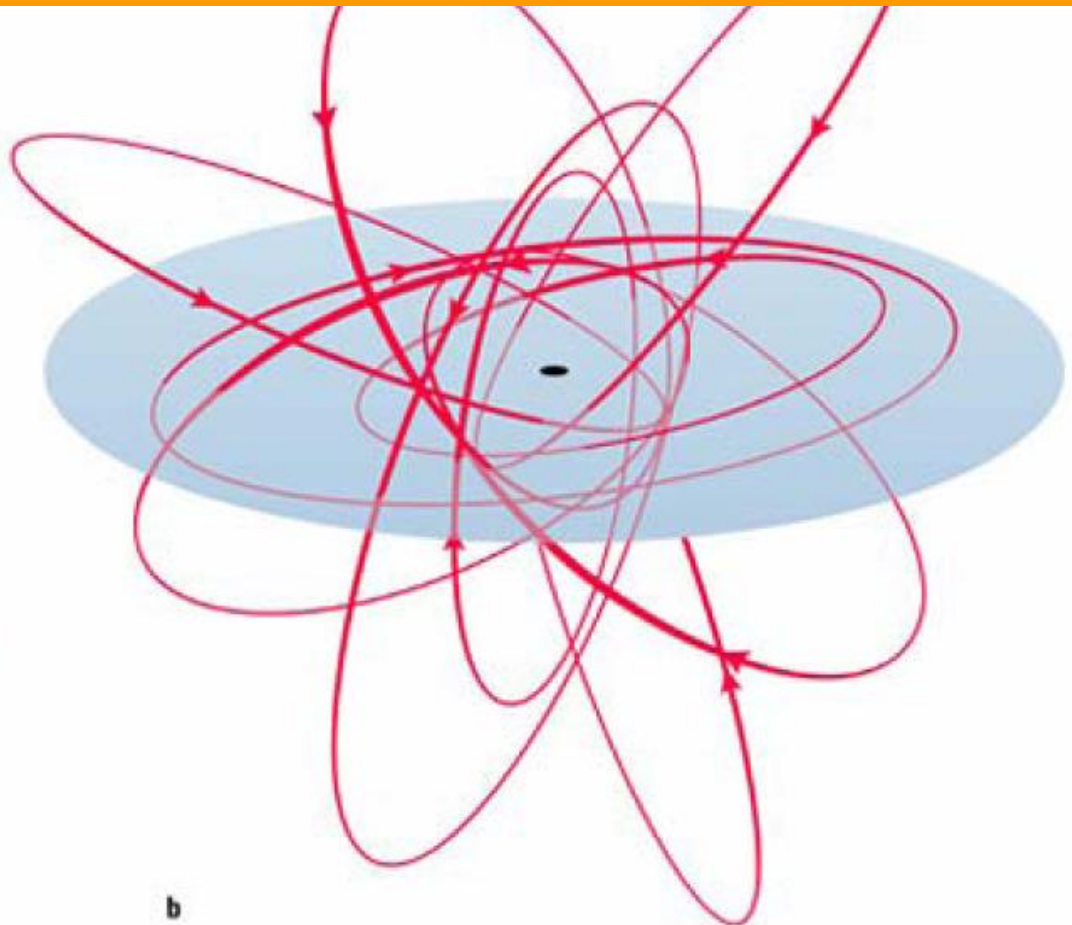
Масса гало <10 млрд. M_{sun}

Движение звёзд в типичной спиральной галактике

В диске:
общее вращение

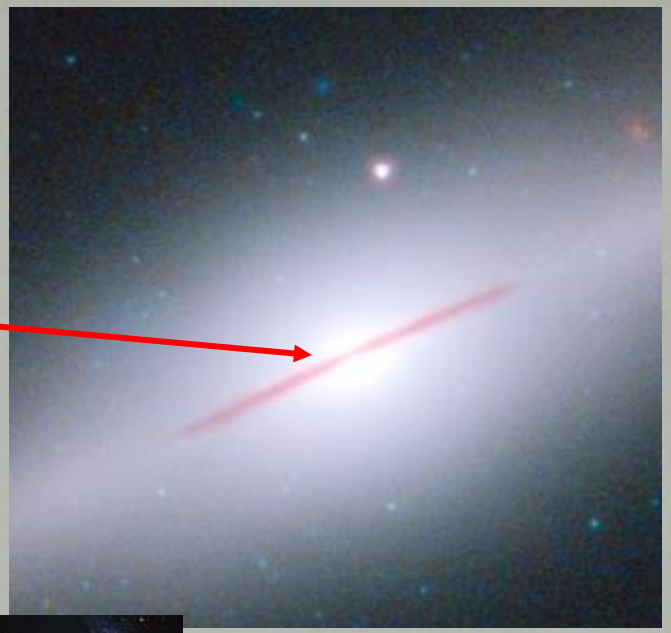
В гало: хаотически ориентированные преимущественно вытянутые орбиты





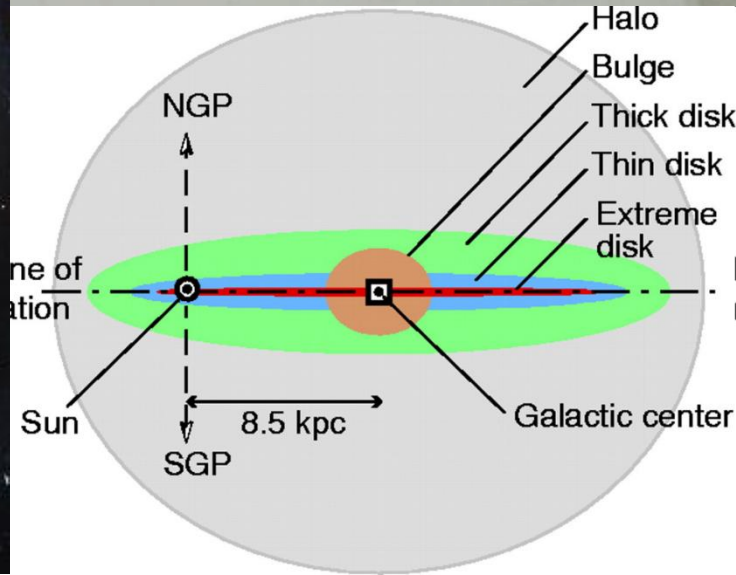
Компоненты спиральной галактики

- **Балдж:**
- Центральное (трёхосное) сгущение старых (>10 млрд. лет) звезд; химический состав – промежуточный. Вращение. Характерный размер ~1 кпк.



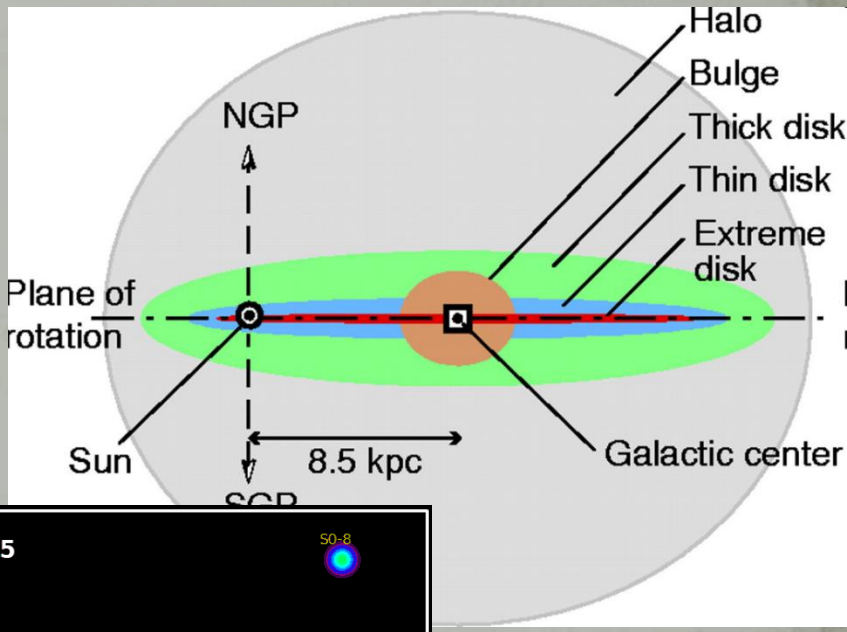
- **Бар:**
- Вытянутая структура длиной ~8 кпк. Вращение.

Масса <10 млрд. M_{sun}

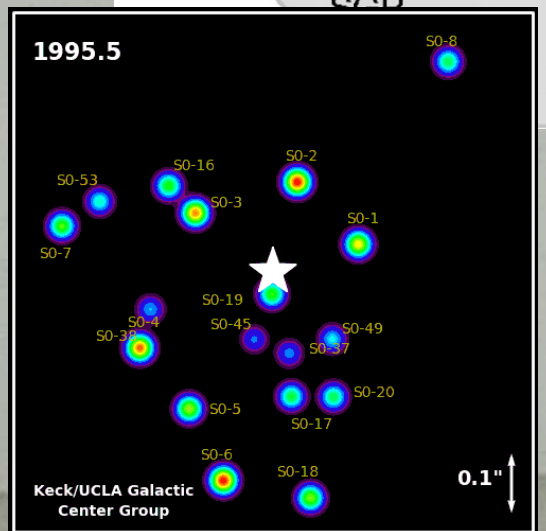


Компоненты спиральной галактики

- **Темное гало:** Характерный размер > 100 кпк. Даёт основной вклад в массу за пределами 10 кпк от центра. Полная масса на порядок выше барионной. Небарионная материя ? Субзвёзды (коричневые карлики)? Планеты, …?
- Полная масса ~1000 млрд. M_{sun}



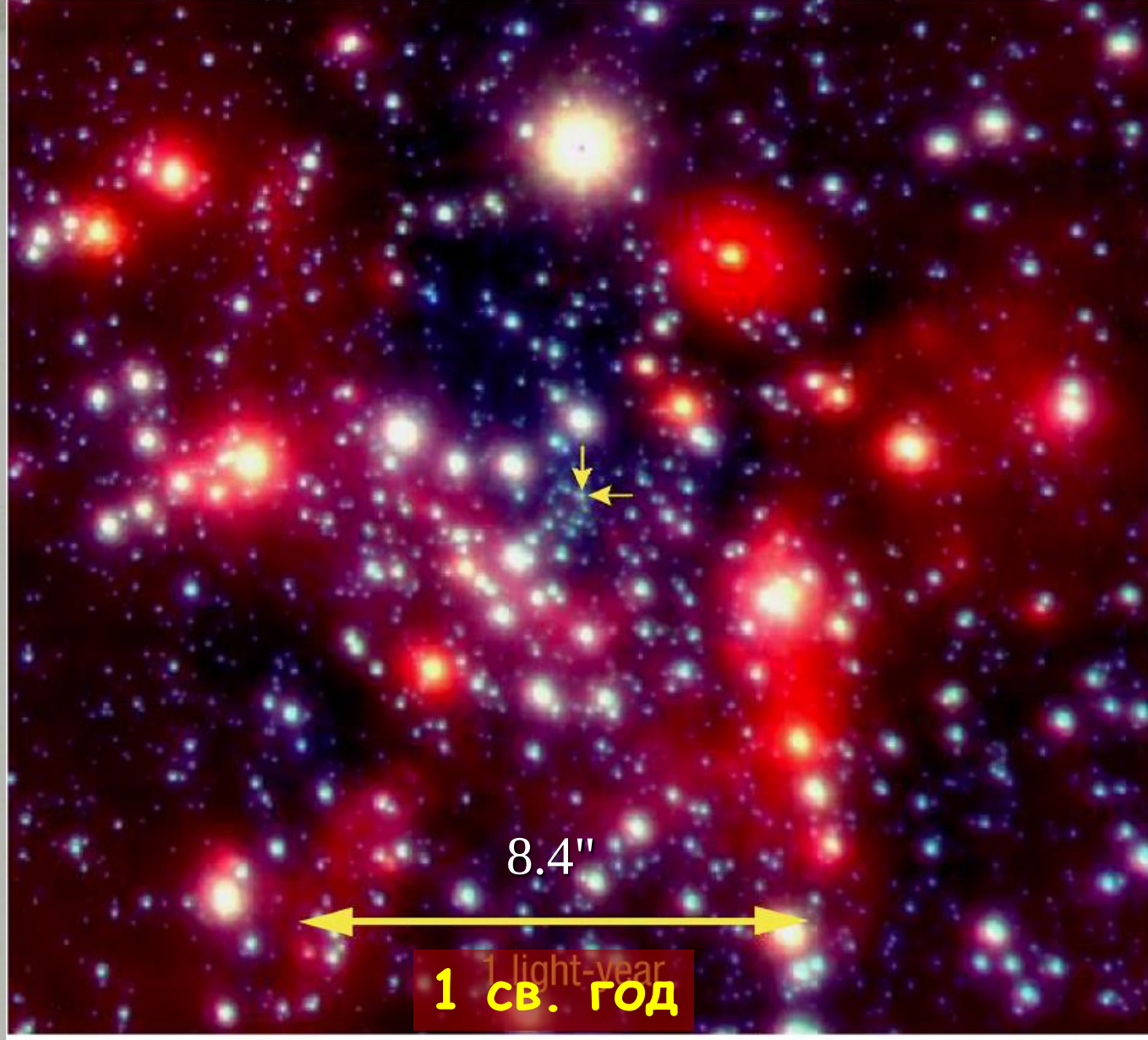
- **Ядро:** Экстремально горячий газ. Ядерное звёздное сверхскопление.
- Высокие скорости газа и звёзд (>1000 км/с).
- Сверхмассивная (иногда двойная) черная дыра (10^6 – 10^9 M_0)
- 4.5×10^6 M_0 в Млечном Пути



Что происходит в центре Млечного Пути ?

Изображение с 8-м телескопа VLT (Чили)

Мониторинг в ИК (наземными и космическими телескопами) проводился с 1992 г. (измерялись смещения и скорости звёзд)



The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

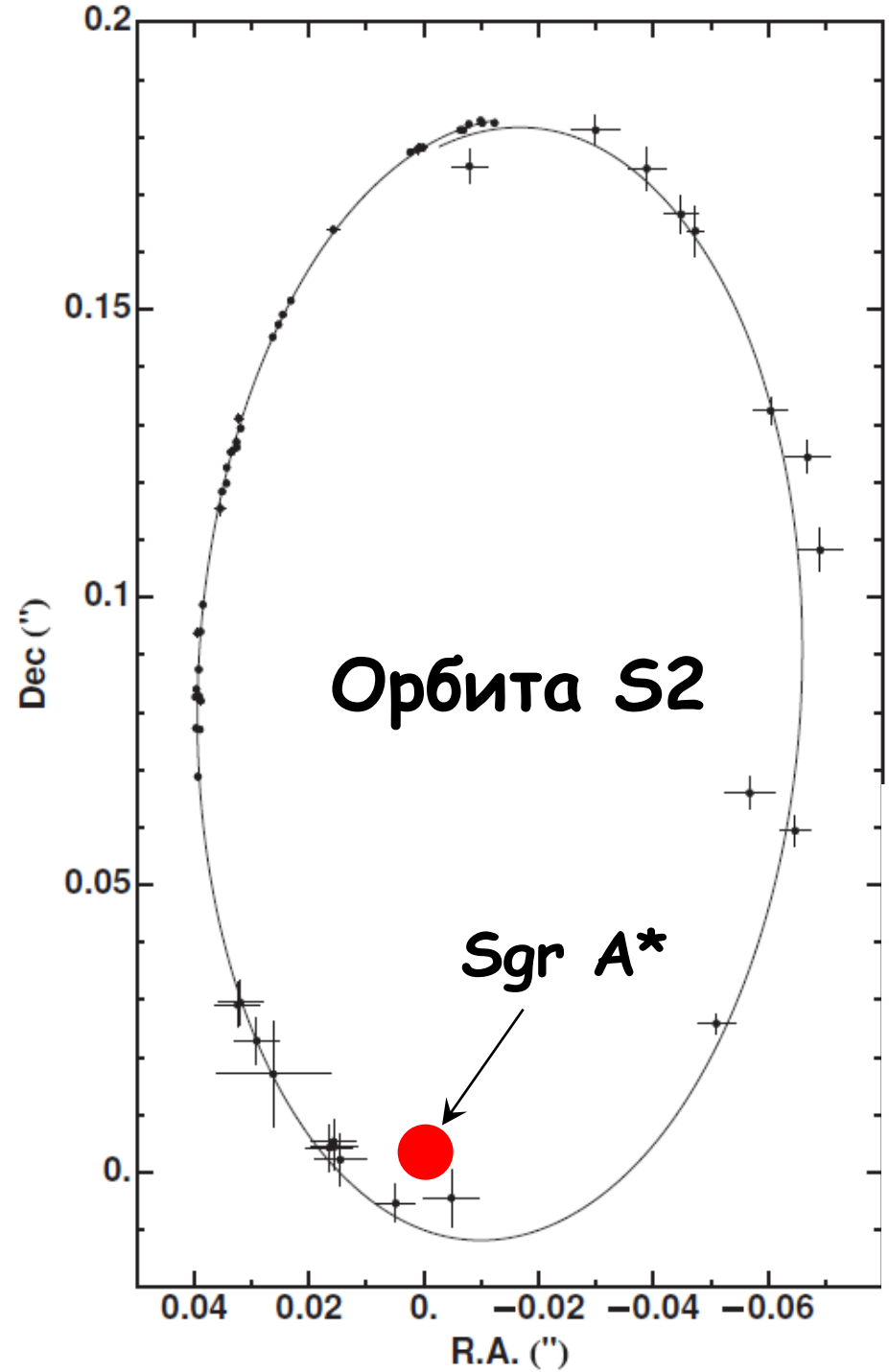
©European Southern Observatory

Анимация движения звёзд

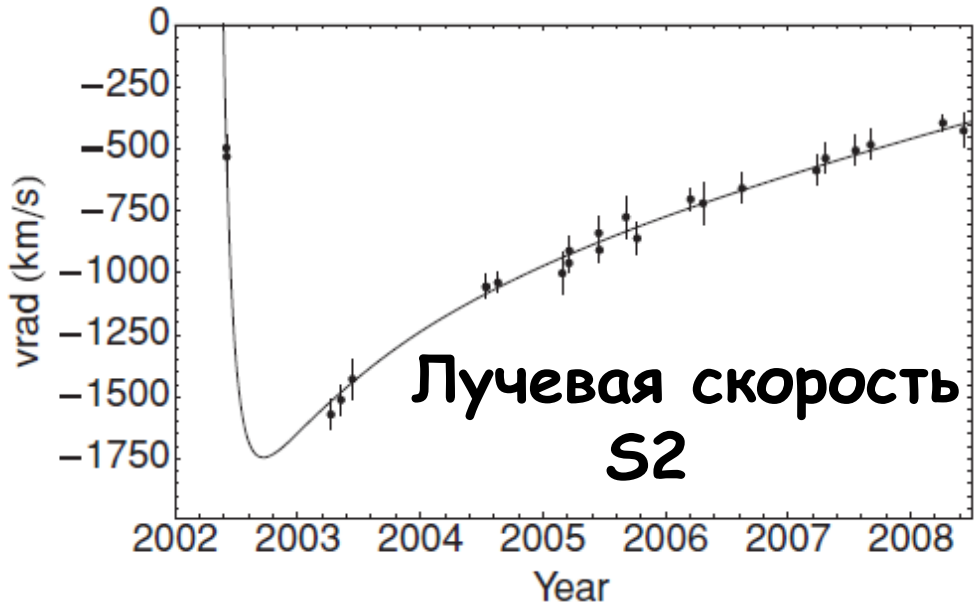
В 2007 г. S0-2 завершила полный оборот

S0-16 движется по сильно вытянутой орбите.

Скорости достигали 5000 км/с



- Прохождение через перицентр – 2002 г. на расстоянии всего ~117 а.е. →
- **В центре – чёрная дыра с массой 4.5 млн. солнечных**



Наша Галактика – не исключение!

- По высоким скоростям объектов (порядка 1000 км/с) в центрах многих гигантских галактик тоже найдены сверхмассивные черные дыры, в некоторых случаях по массе превышающие ***МИЛЛИАРД*** солнечных
- Массивные черные дыры есть в M31 и в M32 (спутнике Туманности Андромеды); их массы больше массы "нашей" черной дыры
- *Они на некоторых стадиях жизни галактик отвечают за явление активности ядер*

Звёзды как фабрики химических элементов

- **Первые звёзды** состояли из водорода (H – 75%, D – 0.003%), гелия (^{4}He – 25%, ^{3}He – 0.002%) лития (Li – 10^{-7}%): эти элементы образовались в ходе первичного нуклеосинтеза в ранней горячей Вселенной в первые три минуты, при T ~ 1… 0.1 MeV (10… 1 млрд. K)
- **---- Современный состав: ----**
- **Водород (H) – 75% массы**
- **Гелий (He) – 23-25% массы**
- Все остальные (“тяжёлые”) элементы (C, N, O, Mg, Si, S, Ca, …) – < **2-3% массы**

- На стадиях эволюции после “горения” водорода идёт ***термоядерный синтез*** ещё более тяжёлых элементов в реакциях вида:
- $3\,{}^{4}He \rightarrow {}^{12}C$ (тройной α-процесс)
  - ${}^{4}He + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O$
  - $2\,{}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$
  - ${}^{4}He + {}^{20}Ne \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$
  - $2\,{}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^{4}He$ …
  - (в порядке роста температуры от ~100 млн. К до ~3 млрд. К)
- Реакции ***синтеза*** завершаются на элементах “железного пика” (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu)
- Элементы за железным пиком: радиоактивный ***распад*** ядер (захват нейтрона, бета-распад, увеличение заряда ядра)

Химическая эволюция: круговорот вещества в Галактике

Звёздные скопления

- строительные “блоки” галактик

Звёзды, как и люди, не любят одиночества

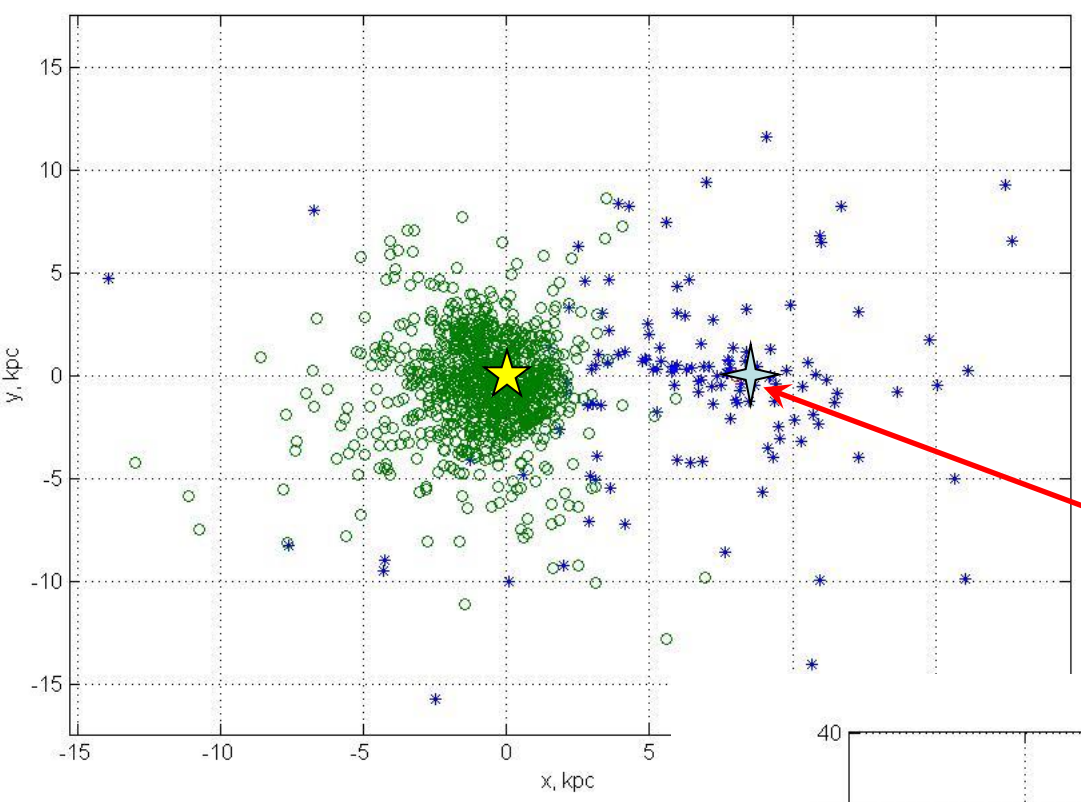
- **Звездные скопления** (рассеянные - РЗС, шаровые - ШЗС) – богатые (N ~ 100…1000000) связанные гравитацией, т.е. устойчивые, компактные группы звёзд (d ~ 1 – 100 пк).
- **Основная роль тоже принадлежит гравитации: звёзды устойчиво движутся в поле тяготения, которое они сами и создают**
- Большинство ЗС хорошо выделяются на небе среди других звёзд и представляют собой самые красивые объекты космоса

Пример: яркие молодые богатые РЗС χ и h Per
Их можно увидеть невооружённым глазом

Шаровые скопления

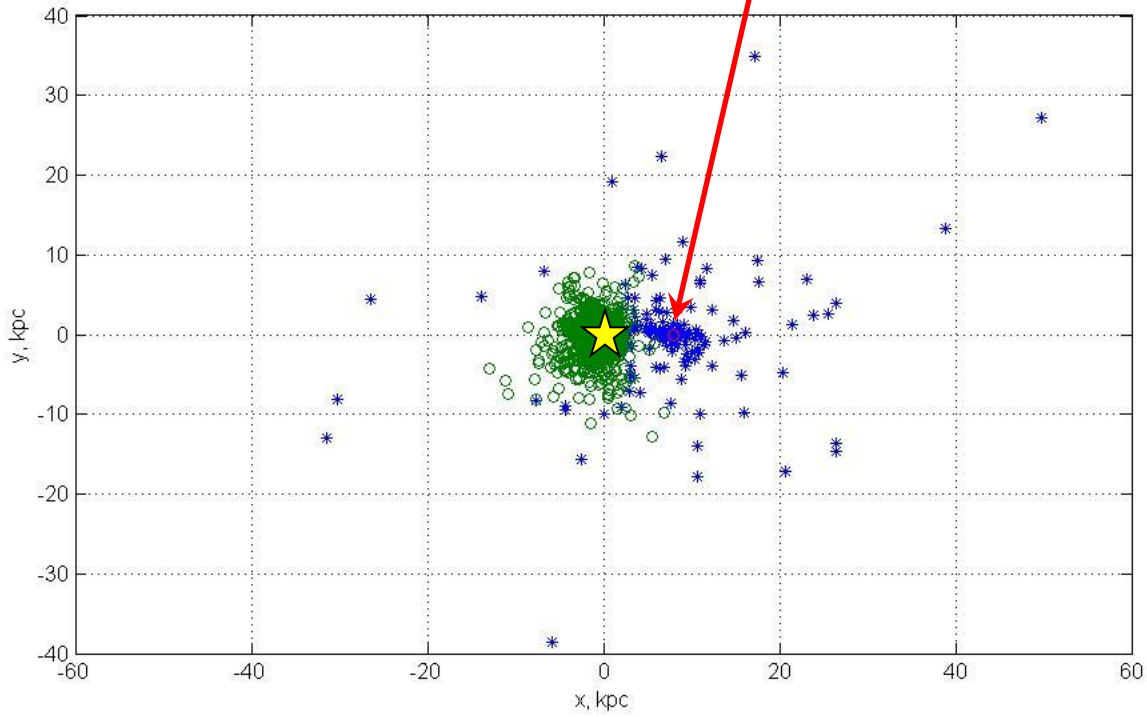
Изображения с HST

Яркие звёзды – красные гиганты с массой ~0.7 M_{Sun}

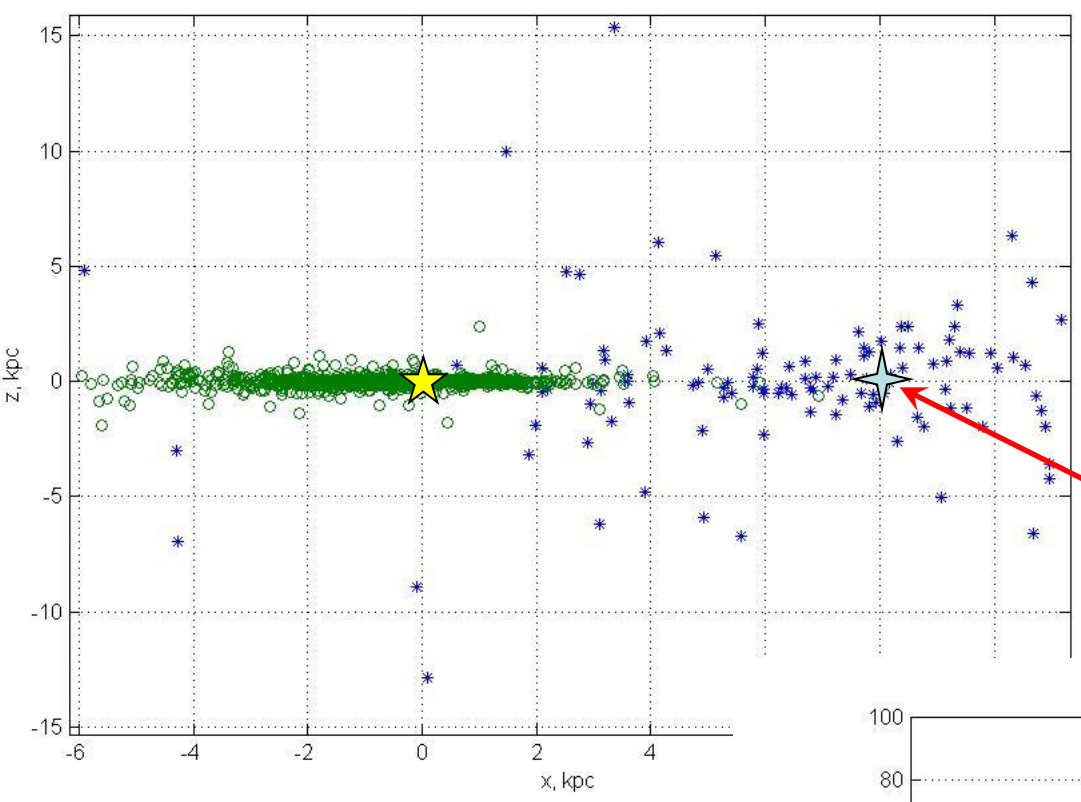


- Солнце

Центр Галактики

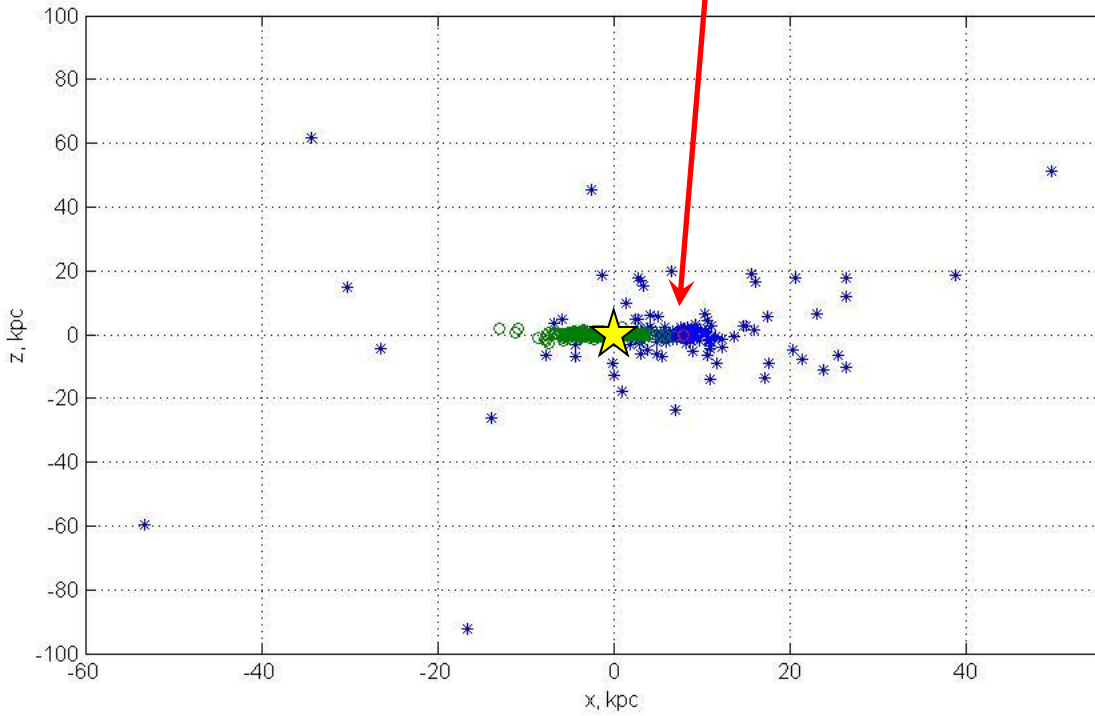


Распределение известных **рассеянных** и **шаровых** скоплений в Галактике: вид “сверху”



- Солнце

Центр Галактики

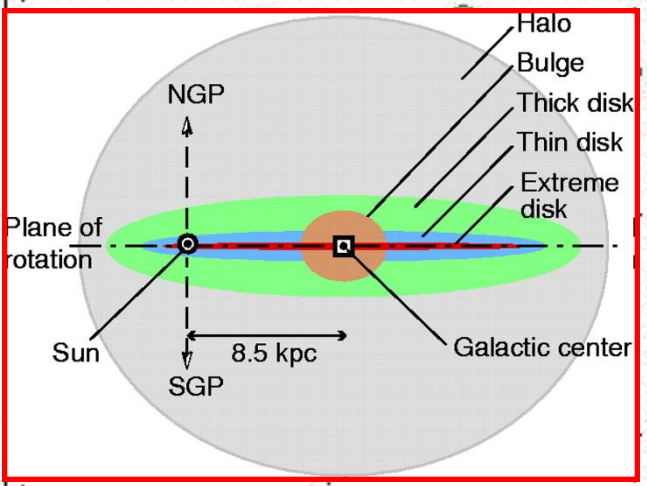


Распределение известных **рассеянных** и **шаровых** скоплений в Галактике: вид “сбоку”

Рассеянные скопления населяют диск Млечного Пути толщиной около 1000 пк

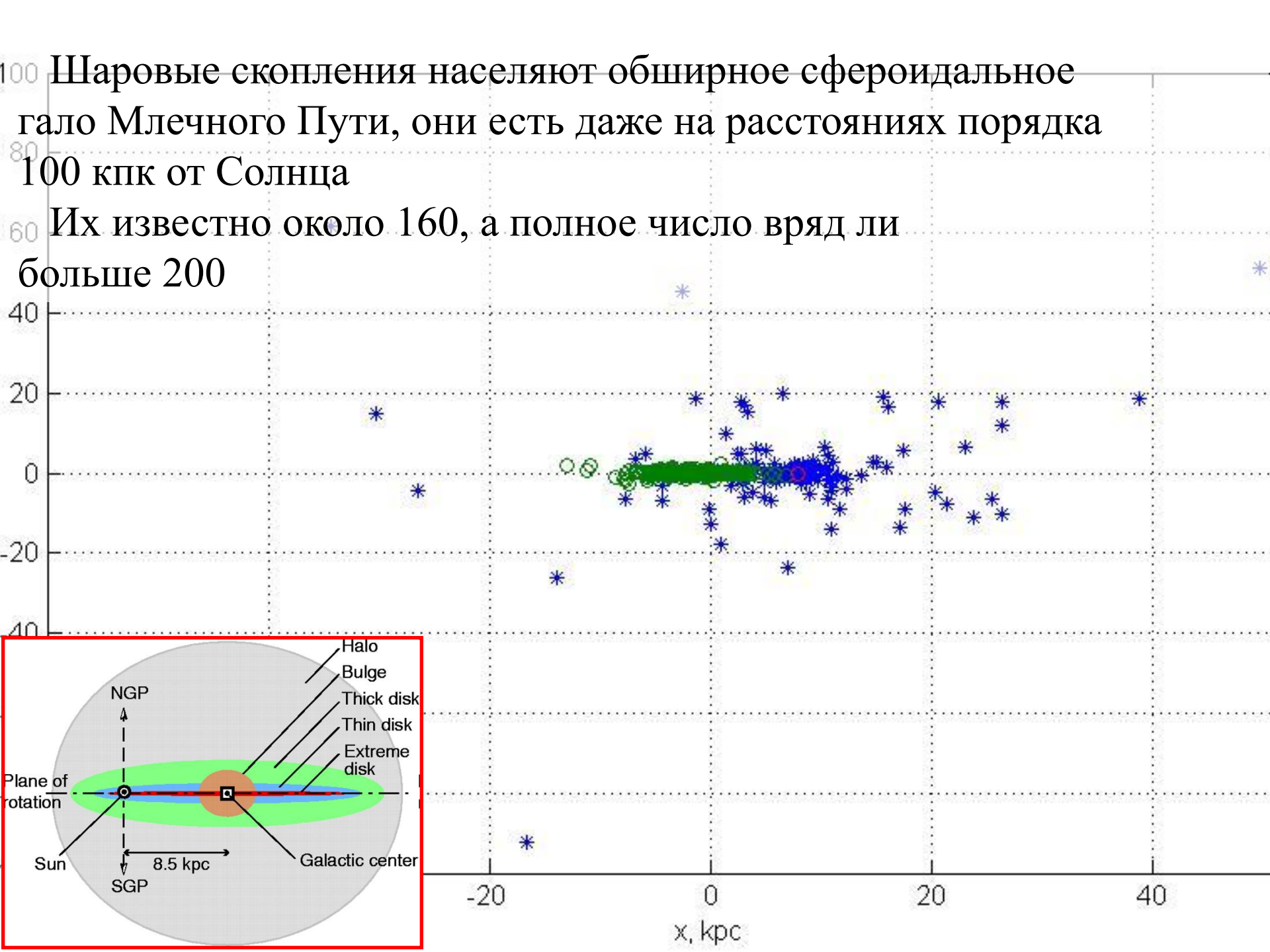
Из-за межзвёздной пыли нам известно всего около 3000 близких скоплений до расстояния около 5 кпк от Солнца

Полное число рассеянных скоплений в Млечном Пути оценивается в 50 – 100 тыс. !



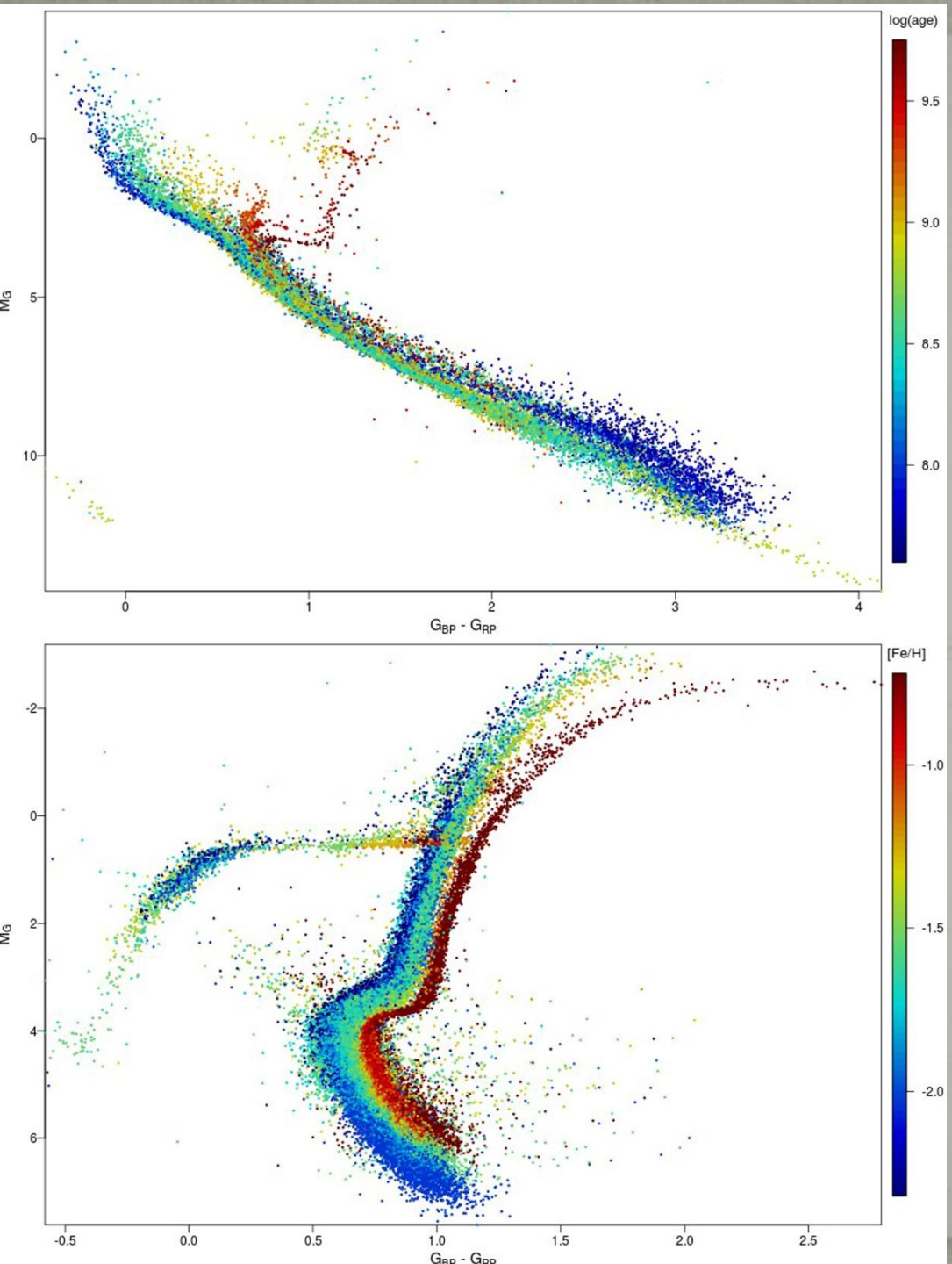
Шаровые скопления населяют обширное сфероидальное гало Млечного Пути, они есть даже на расстояниях порядка 100 кпк от Солнца

Их известно около 160, а полное число вряд ли больше 200



Почему звёздные скопления особенно важны для науки ?

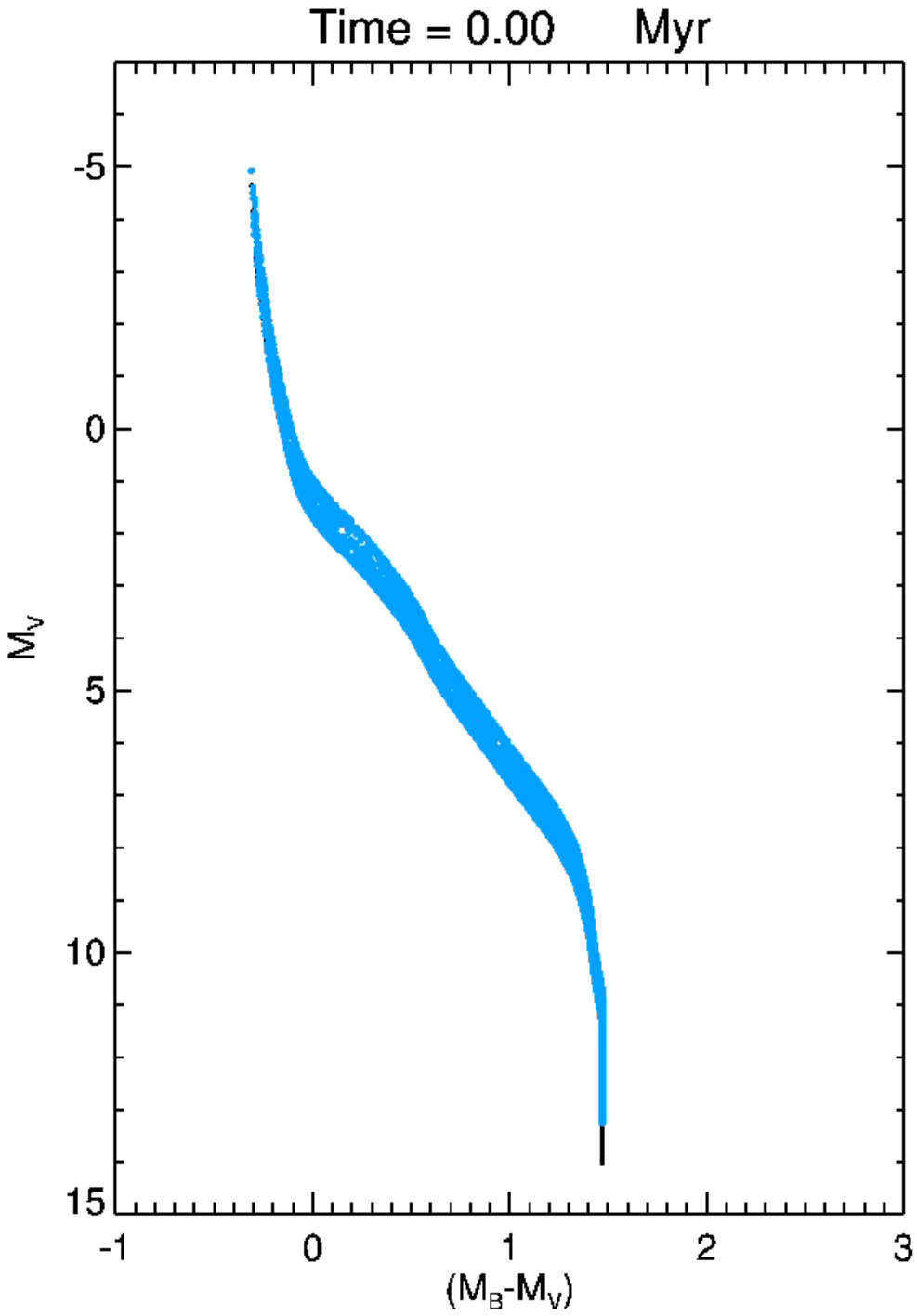
- Звёзды скопления родились в одном плотном молекулярном облаке
- **У них:**
  - Одинаковое расстояние от Солнца
  - Практически одинаковый возраст
  - Почти одинаковый химический состав
- **Поэтому их видимые различия (по блеску и цвету звёзд) объясняются различием масс звёзд и стадий звёздной эволюции**
- **Астрономы хорошо умеют определять возраст скоплений и одновременно расстояние до них**



Диаграммы ГР для рассеянных скоплений разного возраста (вверху) и шаровых скоплений (внизу)

Скопление NGC 188:

Из-за того, что время жизни на ГП резко падает с ростом массы, вид диаграммы ГР в ходе эволюции непрерывно меняется – “выгорают” ярчайшие звёзды



Возраст ~300 млн. лет

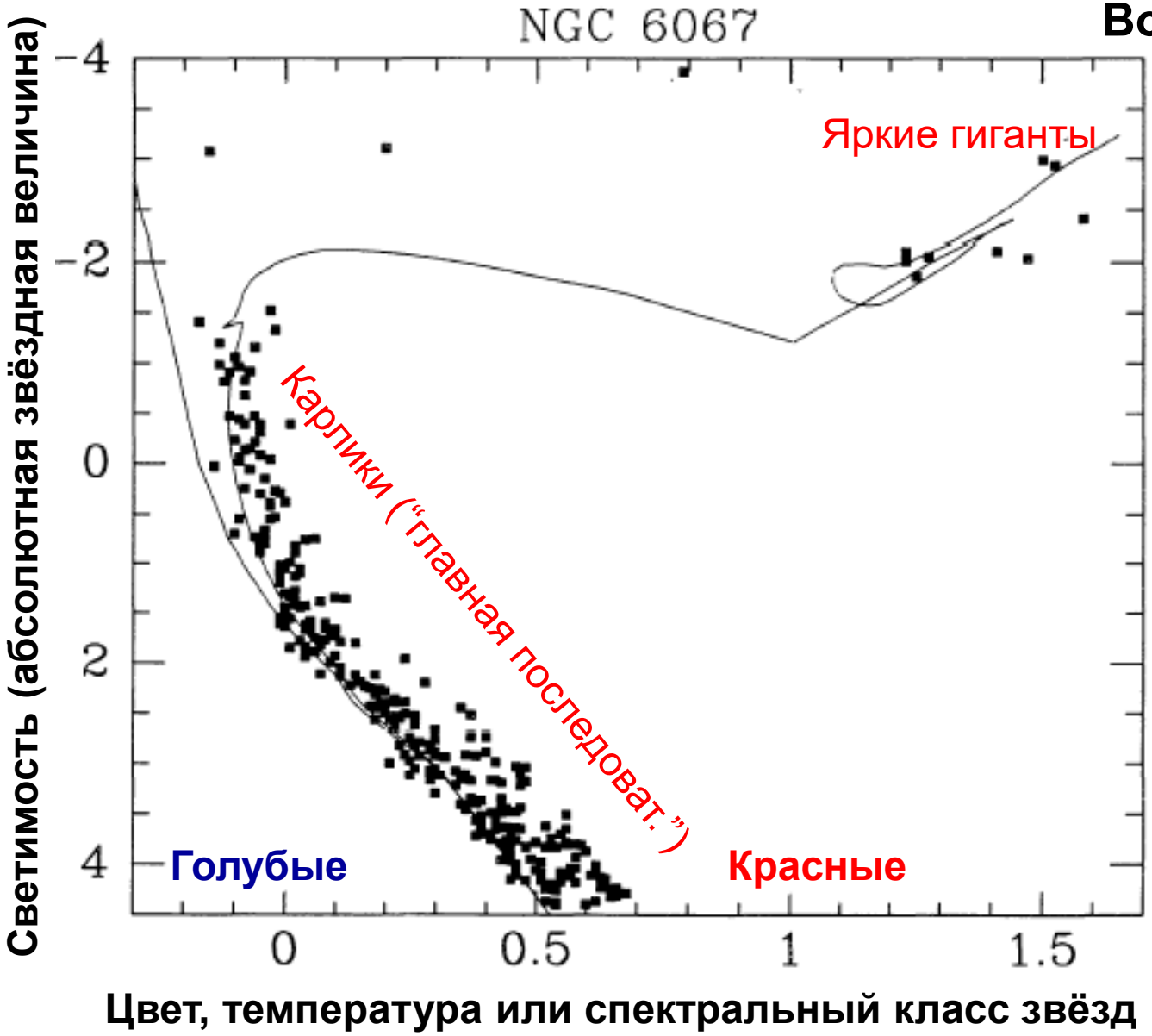


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела (ГР): основной инструмент изучения звёздного населения Галактик и звёздных скоплений

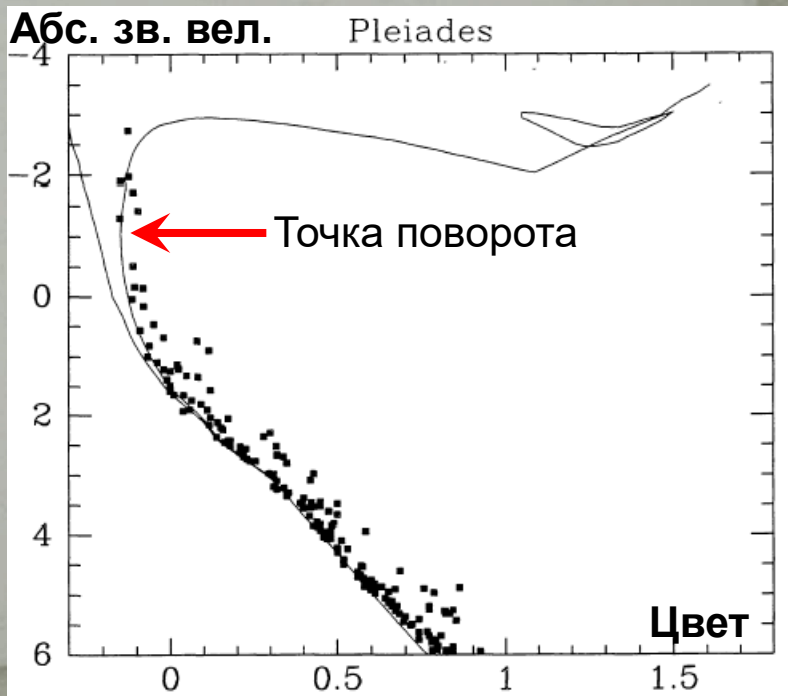
Возраст и расстояние оцениваются по виду ГП методом наложения *теоретических изохрон*

- Принципы оценки возраста звёздных скоплений по виду ГП опираются на простые физические соображения

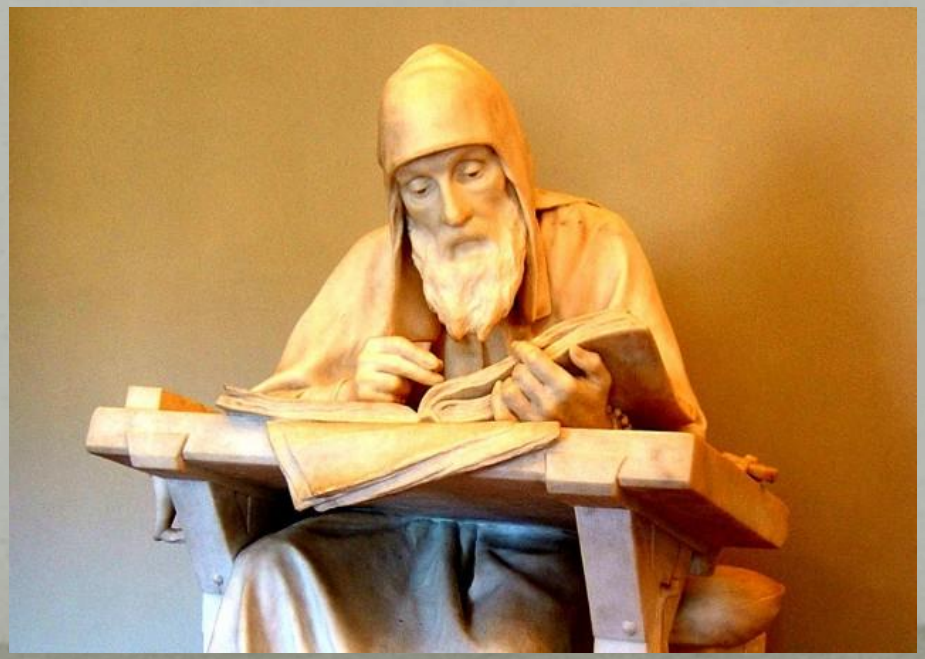
- Основные идеи:
  - ***В скоплении*** рождаются звёзды разных масс, от самых малых (~0.1 M_{Sun}) до очень больших (~50-100 M_{Sun})
  - У массивных звёзд жизнь короткая, у маломассивных - долгая
  - **В старых скоплениях на ГП нет массивных, т.е. ярких и горячих, звёзд**

Очень важно для астрофизики:

- Звёздные скопления (РЗС, ШЗС) стали самой надежной основой для проверки и “шлифовки” теории звёздной эволюции
- **Чем старше скопление, тем слабее и краснее ярчайшие звёзды на Главной Последовательности**
- Подбором подходящей теоретической изохроны определяются возраст скопления и расстояние



- Надёжные оценки возрастов и расстояний, спектроскопические данные о химическом составе звёзд и их скоростях, делают звёздные скопления прекрасным средством изучения строения Галактики и распределения массы в ней и её истории
- **Звёздные скопления – “летописцы” истории Галактики**



- Рассеянное скопление Плеяды (М45) и шаровое скопление М9
- **Что отличает шаровые скопления от рассеянных ?** – Не только и не столько внешний вид.

Фундаментальные различия между рассеянными и шаровыми скоплениями

- **ШЗС – скопления первых поколений:**
  - Возраст больше 10 млрд. лет
  - Населяют галактическое гало
  - Мало (в 10-1000 раз) химических элементов тяжелее гелия (по сравнению с Солнцем)
  - Очень “богатые” (10^5 – 10^7 M_{Sun})
- **РЗС – скопления последующих поколений:**
  - Возраст от ~1 млн. лет до 8-10 млрд. лет
  - Населяют диск Млечного Пути
  - Химический состав – почти как у Солнца
  - Не очень “богатые” (< 10^3 – 10^4 M_{Sun})

Такие разные звёздные скопления

- **Самые известные:**

Плеяды = M45,
~100 млн. лет, ~120 пк

Гиады = NGC1647
и Альдебаран
~650 млн. лет, 46 пк

Ясли = Praesepe = NGC2632,
~300 млн. лет, 160 пк

χ+h Per = NGC869/884,
~10 млн. лет, ~2.3 кпк

- Самые молодые:

Orion clusters (ближайшая к нам область звездообразования):
NGC2366
NGC6231
NGC6530

Лебедь: NGC6913 (M29)

- все с возрастом от ~2 до 10 млн. лет и, как правило, “погружены ” в родительские облака газа

- Самые старые из рассеянных скоплений:

NGC2682 (M67) 4 млрд. лет
NGC2243 6 млрд. лет
Melotte 66 6 млрд. лет
NGC2420 ~10 млрд. лет

NGC188 ~10 млрд. лет

Вплотную приближаются к возрасту ШЗС !

4.2 m телескоп VISTA (ESO, Чили)

Шаровое скопление

NGC 104 = 47 Tuc

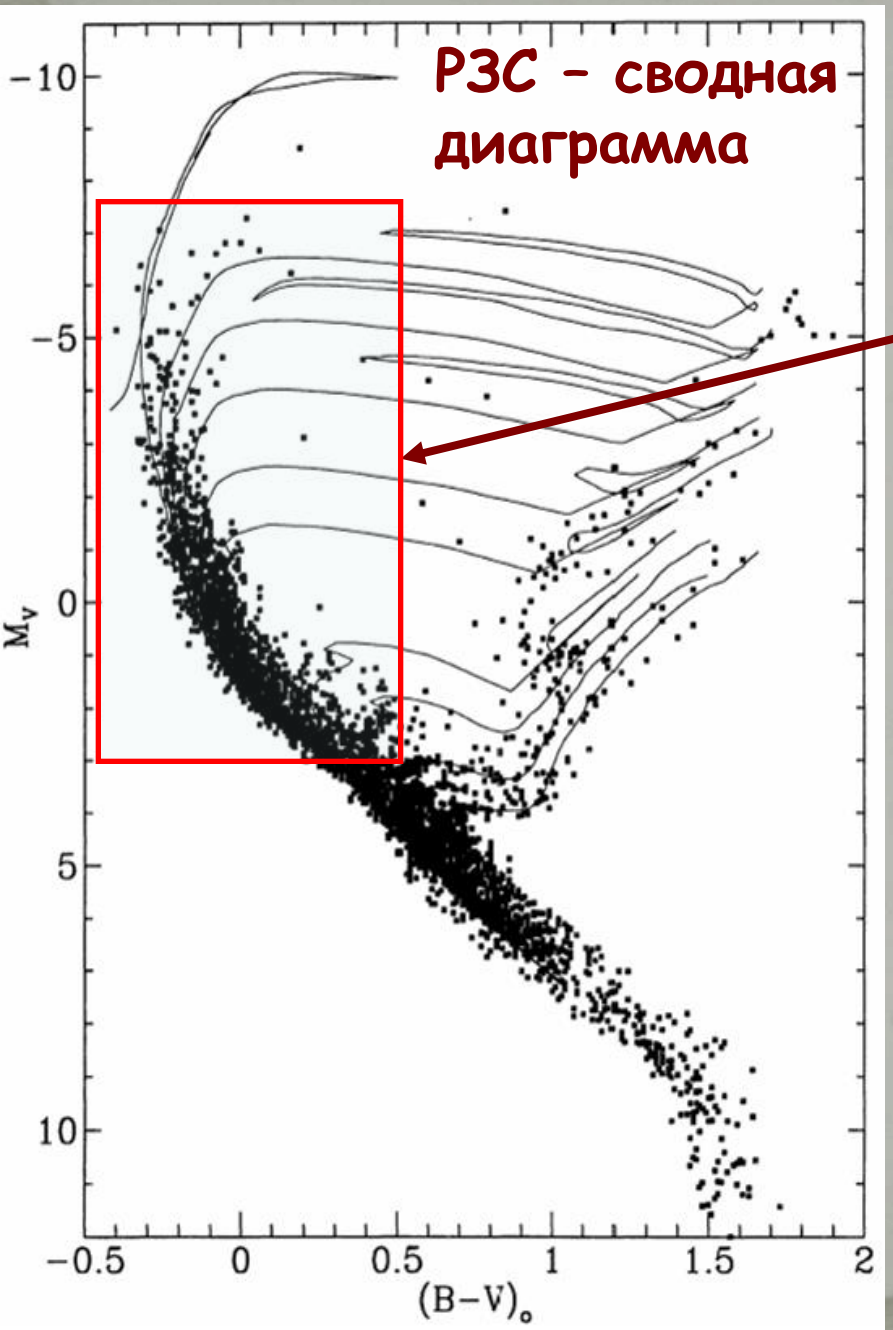
Плотно упакованное ядро (HST)

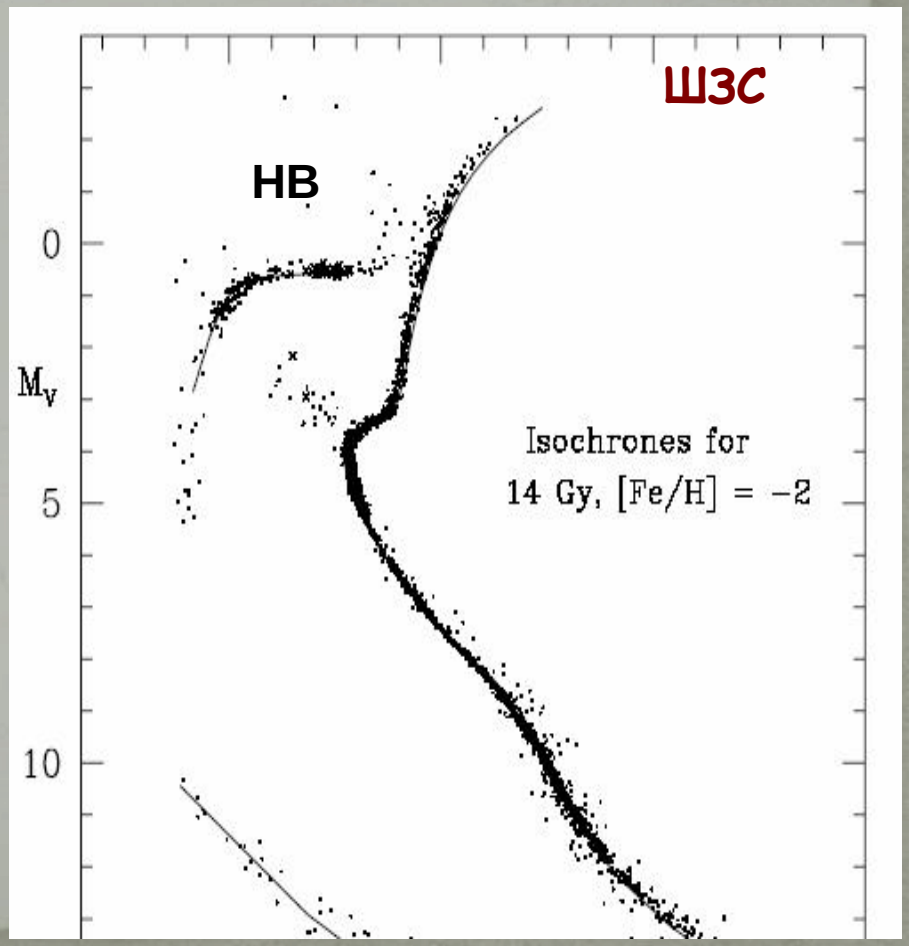
Изображения
с КТ Хаббл

Большинство видимых
звёзд – красные гиганты
и карлики малых масс
(< 0.7 M_{Sun})

VISTA: шаровое скопление NGC 5139 = ω Cen
самое яркое и массивное скопление Млечного Пути
Ядро разрушенной карликовой галактики ?

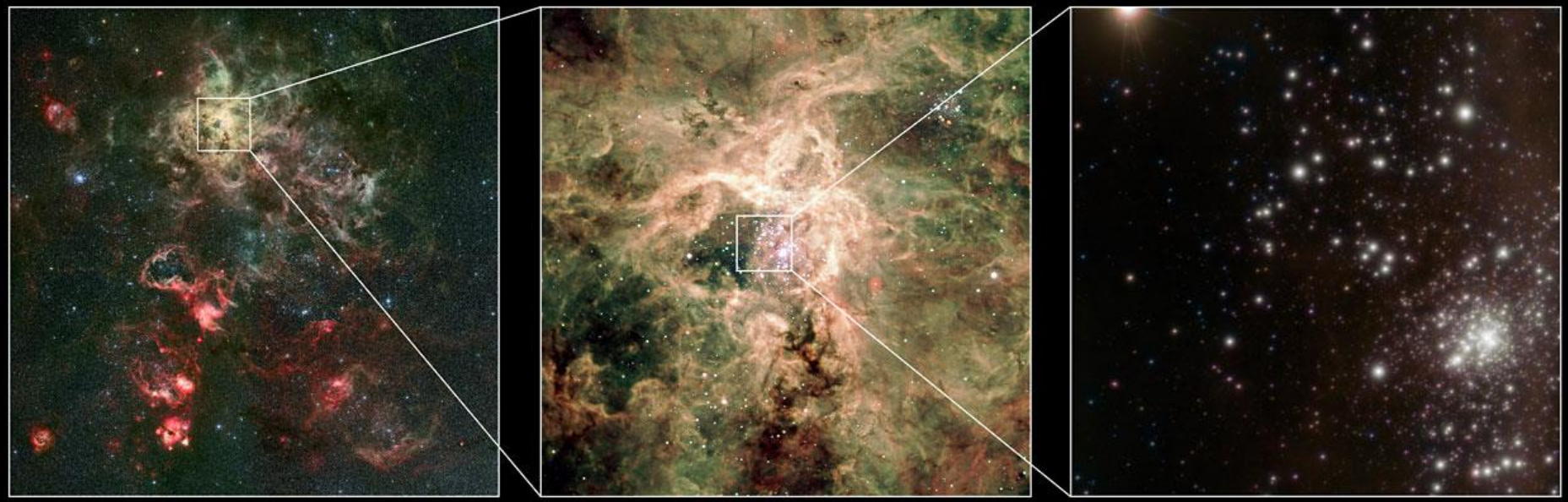
Сравнение диаграмм цвет-абсолютная величина РЗС и ШЗС свидетельствует о различиях их возрастов (в ШЗС нет ярких, т.е. молодых и горячих, звезд на ГП)





Звёздные сверхскопления или скопления сверхзвёзд ?

- Это необычайно компактные и яркие скопления звёзд, обнаруженные как в других галактиках, так и в Млечном Пути
- R136, сверхскопление в туманности Тарантул (Большое Магелланово Облако); в этой туманности вспыхнула Сверхновая 1987



Большую массу звёзд объясняют их слиянием в тесных парах

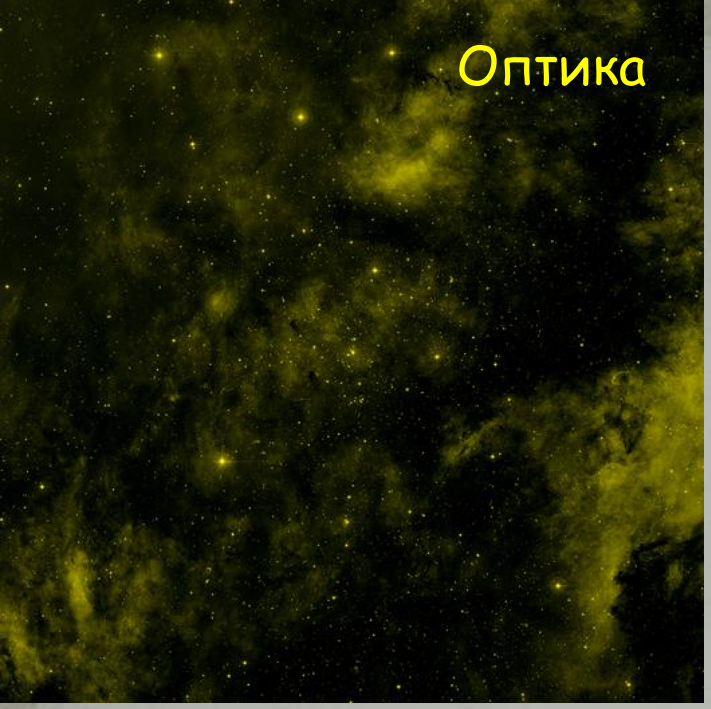
R136 во всей красе (HST)

Возраст 1-2 млн. лет

Множество горячих голубых массивных звёзд

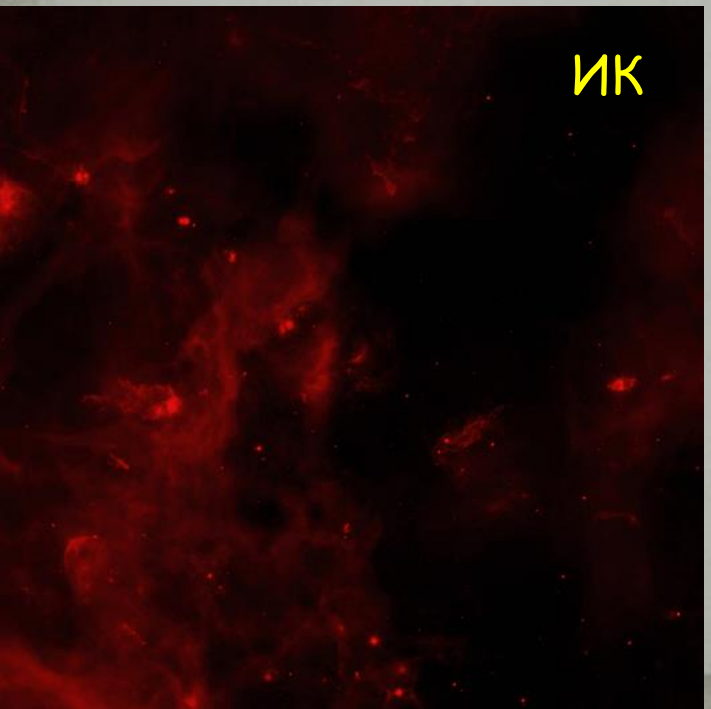
Ярчайшая звезда ярче Солнца в 9 млн. раз, а её масса ~265 M_{Sun}

Считается, что R136 через неск. млрд. лет превратится в типичное шаровое скопление

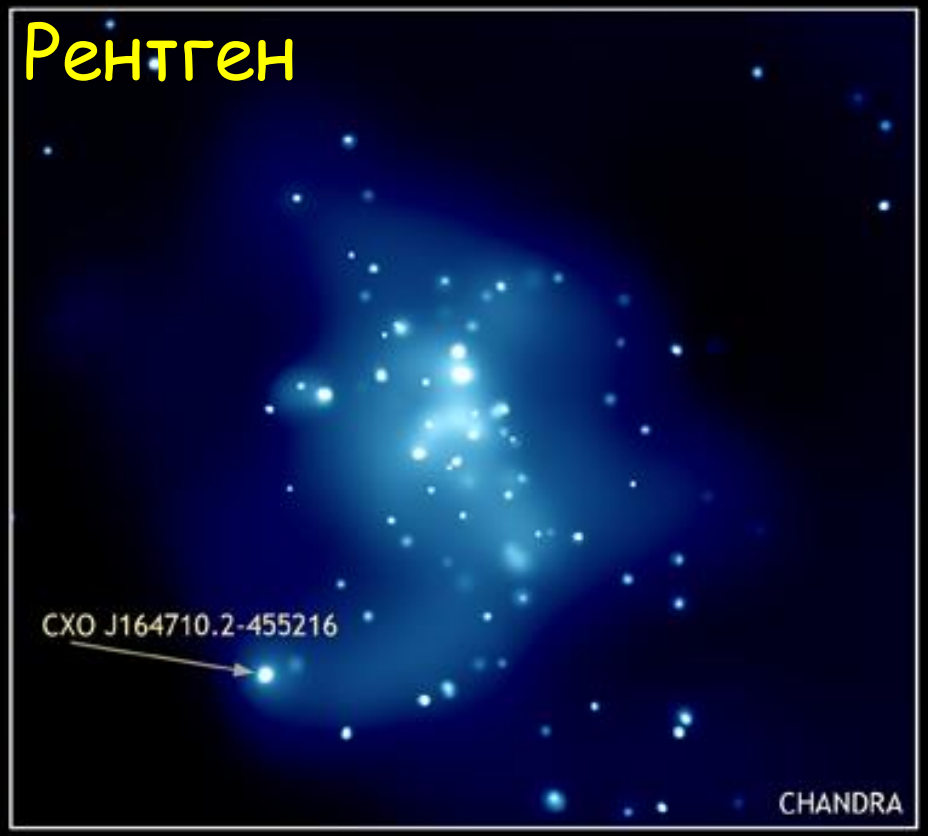


Звёздная ассоциация Лебедь OB1: одно из самых массивных молодых скоплений Млечного Пути

Огромное поглощение света пылью



- **Westerlund 1:** первое открытое в Млечном Пути звёздное сверхскопление, самое массивное из известных
- Множество красных и голубых сверхгигантов, гипергигантов, звёзд Вольфа-Райе
- Масса ~100000 M_{sun}
- Будущее шаровое скопление ?



Спиральный узор –

- **Наиболее заметная общая черта всех спиральных галактик**

- Обычно его форму описывают логарифмическими спиралями

- У некоторых галактик спиральный узор выражен очень хорошо (глобальный спиральный узор)

M 51 “Водоворот”:
глобальный узор

Население спиральных рукавов

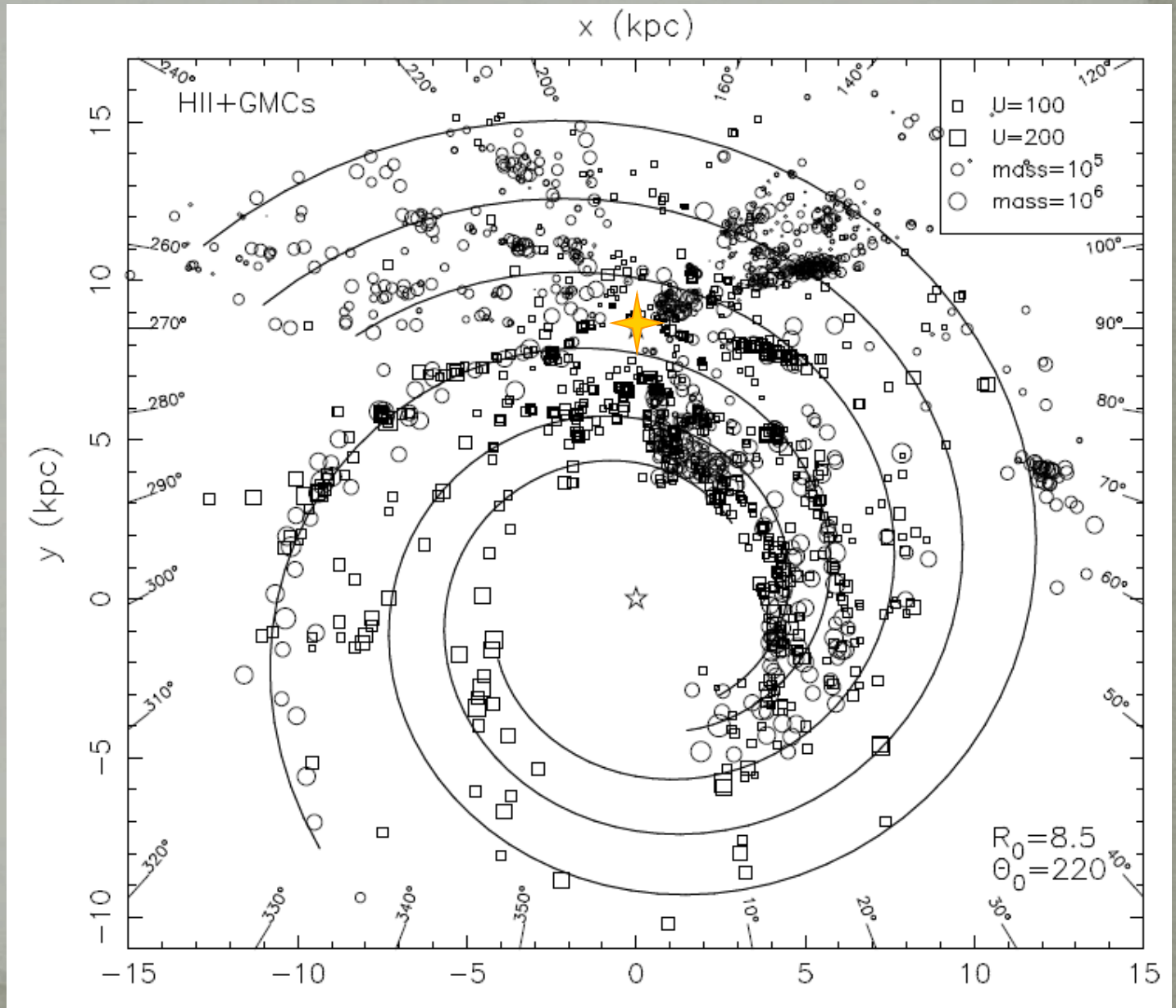
- В спиральных рукавах рождаются звезды, поэтому характерный вид им придают объекты, связанные со звездообразованием:
- Молодые яркие горячие звезды **имеют голубой цвет**
- Облака ионизованного водорода HII вокруг горячих звёзд **имеют красный цвет**
- Молодые звездные скопления и ассоциации (ярчайшие **голубые** протяженные образования)

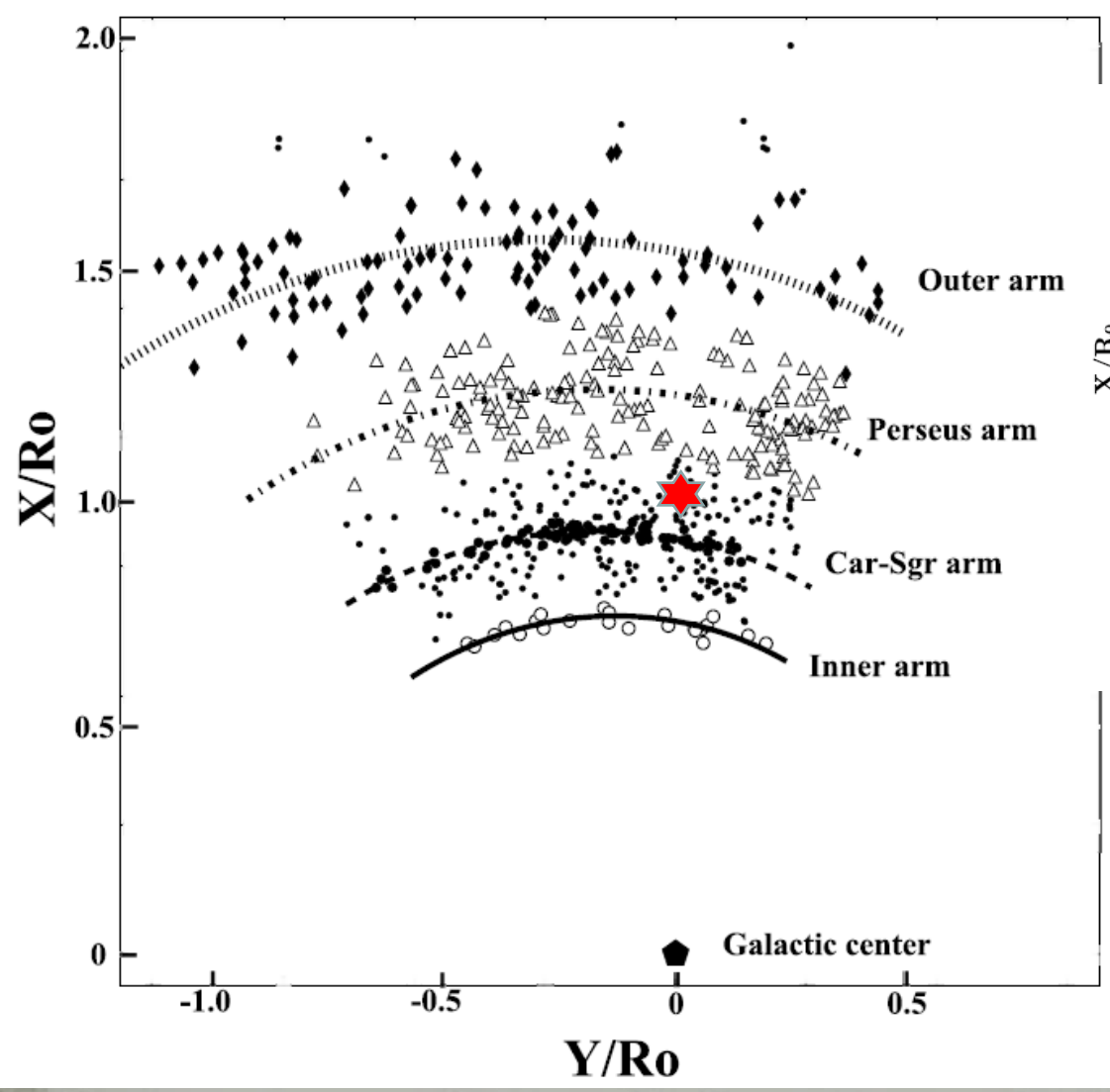
- В галактиках, видимых “плашмя”, форма спирального узора (число спиральных рукавов, их гладкость, степень закрутки) видна отчётливо

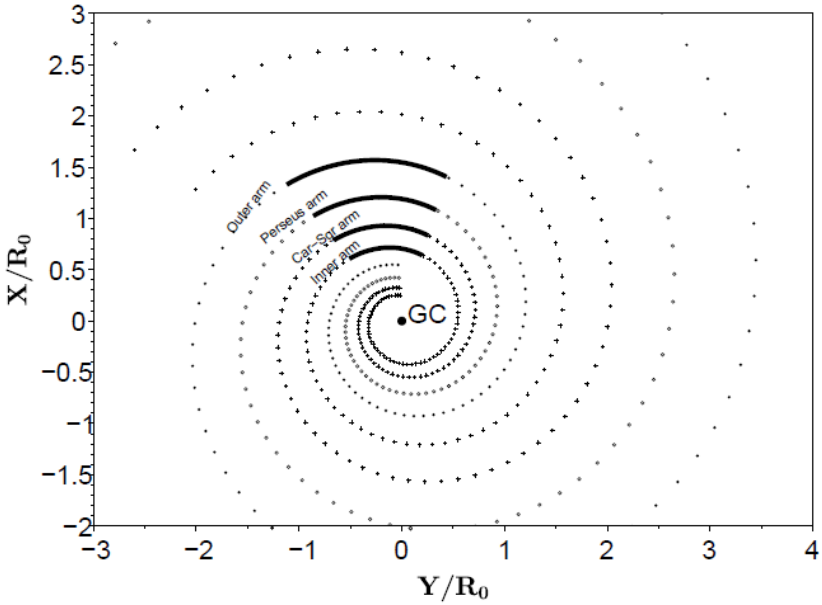
- **Но точного вида спирального узора (и даже числа спиральных рукавов !) в Млечном Пути мы пока не знаем – сильно мешает межзвёздная пыль**

Hou et al. (2009): 4-рукавный спиральный узор Галактики (горячий HII и молекулярный газ)

- Одна из причин трудностей: ненадёжные расстояния до объектов







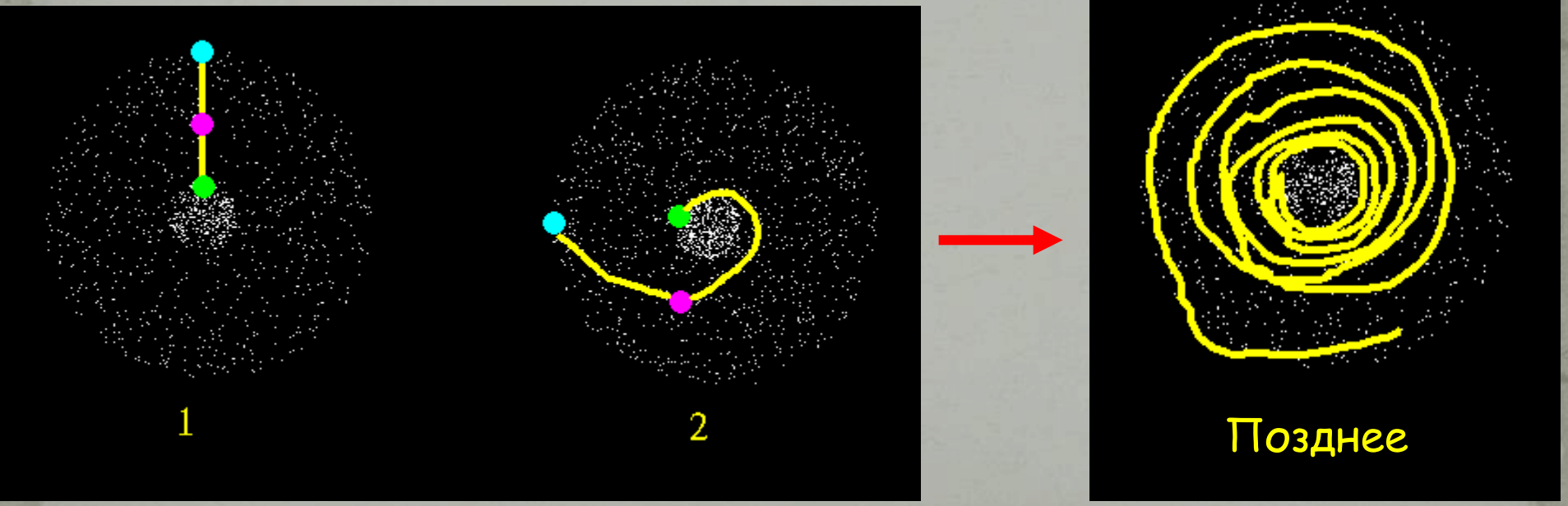
Фрагмент спирального узора, восстановленный по распределению цефеид Галактики:

4-рукавный глобальный узор с углом закрутки ~10°

Природа спирального узора в галактиках

Многие гигантские дисковые галактики обладают спиральной структурой: узор долгоживущий !

Спиральные рукава не могут вращаться с той же угловой скоростью, что и диск, иначе бы они быстро “скрутились” в тугое кольцо:



(Т.к. угловая скорость вращения диска падает к периферии)

- **Вывод:** спиральные рукава – не могут всё время состоять из одних и тех же объектов) !

- Тогда что же они собой представляют ?

В разные моменты времени спиральные рукава включают разные объекты !

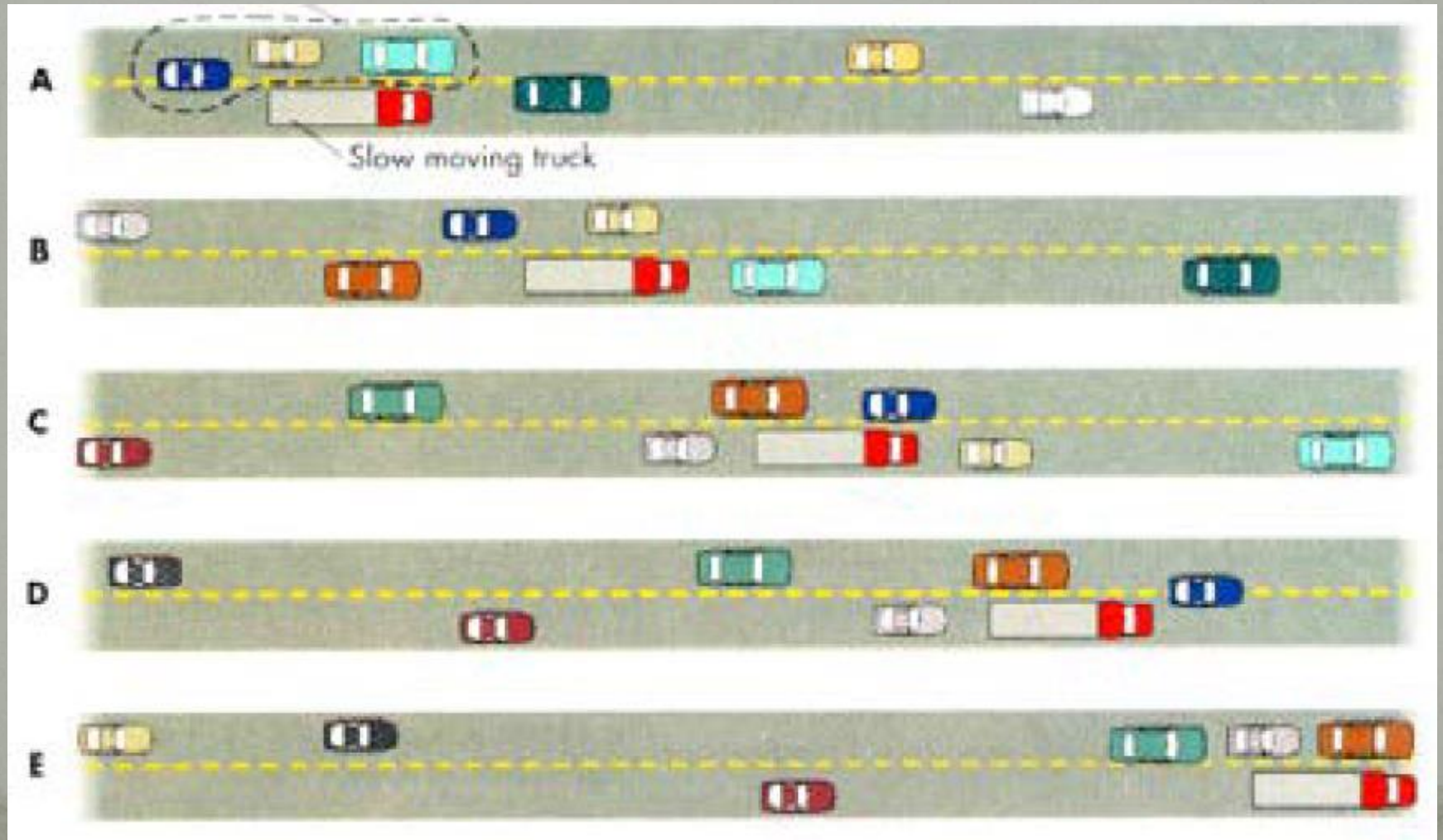
↓

Спиральные рукава представляют собой **волны плотности и возмущения гравитационного поля**, в которые попадают газ и звёзды. Типичное отклонение – ~10% от средней плотности.

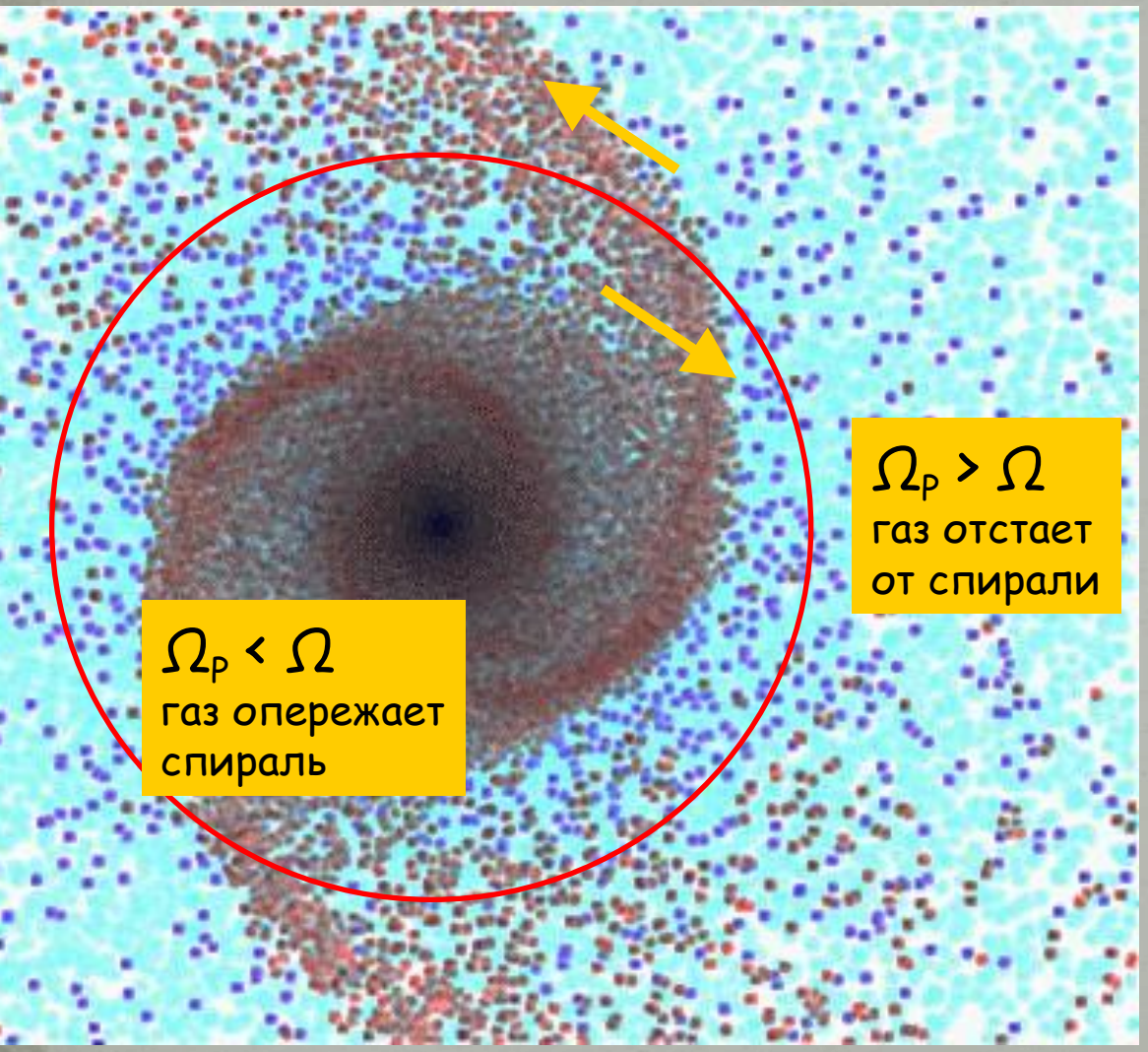
(Вращающийся газо-звездный диск обладает упругими свойствами и "разрешает" распространение волн)

Простой пример волны плотности

- Медленно едущая фура на узком шоссе создаёт бегущую ***волну замедления***

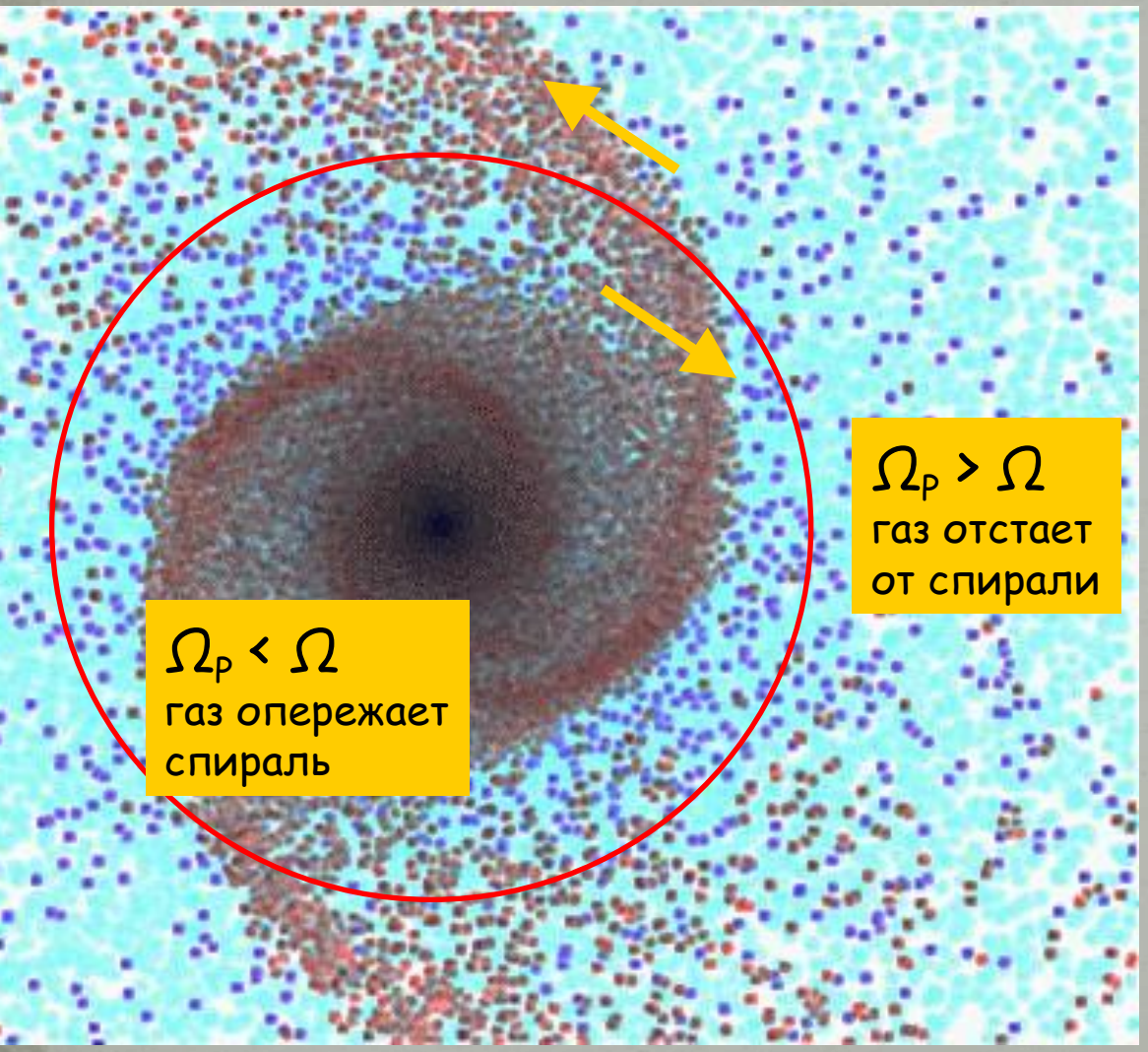


Спиральный узор и звездообразование



- Узор вращается твердотельно (Ω_P = const)
- Диск вращается дифференциально (Ω падает с R)
- $\Omega_P = \Omega$ – **коротация** (синхронное вращение)
- Стрелки: скорость газа относительно спирального узора

Спиральный узор и звездообразование



- В месте встречи газа и спиральной ветви может возникать ударная волна, уплотнение газа и рождение звезд
- **До коротации:** молодые звезды на **внутренней** кромке рукава
- **После коротации:** молодые звезды на **внешней** кромке рукава

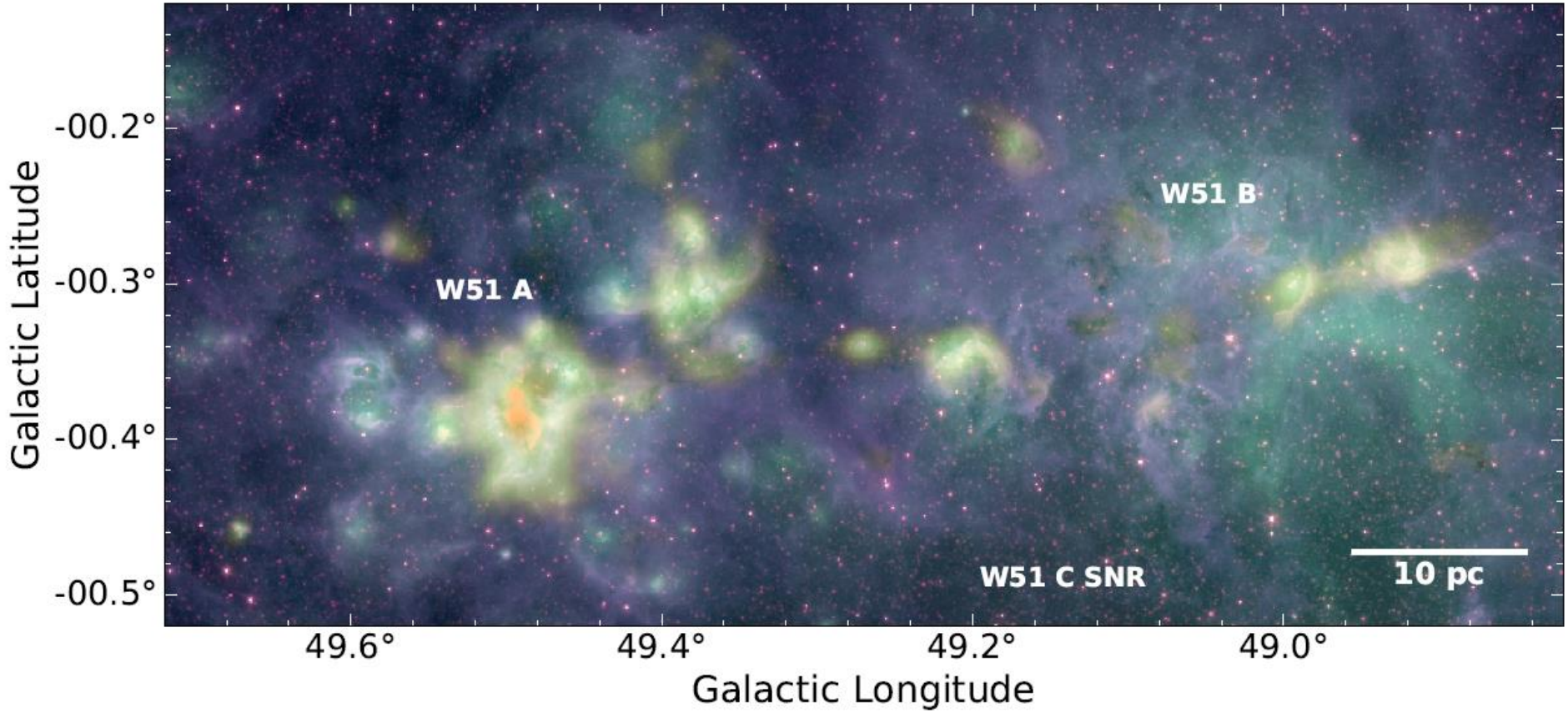


FIG. 1.— A color composite of W51 with major regions, W51 A, B, and C, labeled. W51 A contains the protoclusters W51 Main and W51 IRS 2; these are blended in the light orange region around 49.5-0.38. The blue, green, and red colors are WISE bands 1, 3, and 4 (3.4, 12, and 22 μm) respectively. The yellow-orange semitransparent layer is from the Bolocam 1.1 mm Galactic Plane Survey data (Aguirre et al. 2011; Ginsburg et al. 2013). This figure was reproduced from Ginsburg et al. (2015a).

- Область массивного звездообразования Westehout 51: скопление > 5000-10000 M_{SUN} и возрастом 1-3 млн. лет на расстоянии ~5.5 кпк (Car-Sgr). Возможно, образование стимулировано взрывом Сверхновой. ~20 OB-звёзд.
- Масса молекулярного облака > 10^6 M_{SUN} (Ginsburg 2017)

Красный цвет: остаток Сверхновой (радио, 90 см – циклотронное излучение)

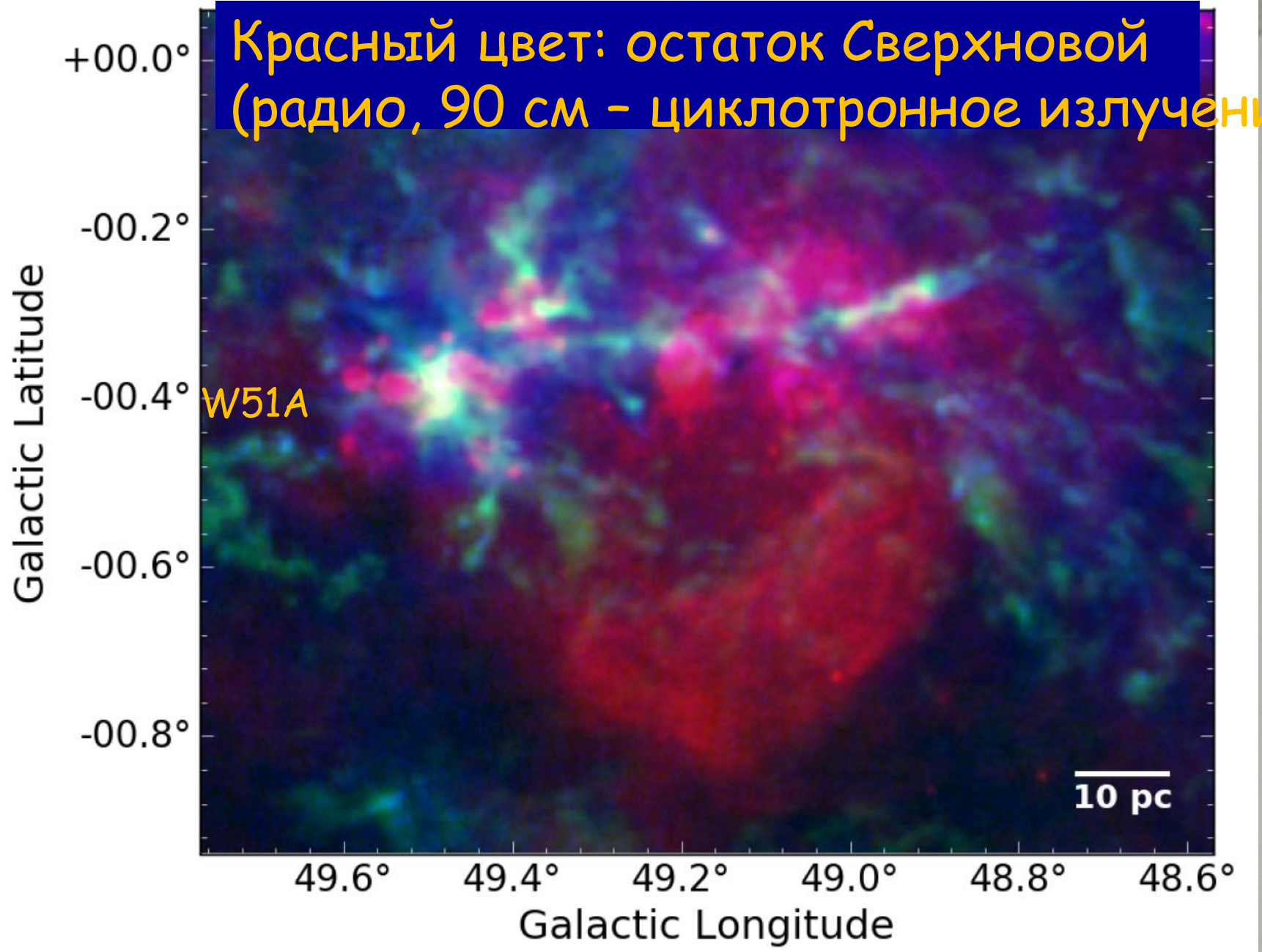
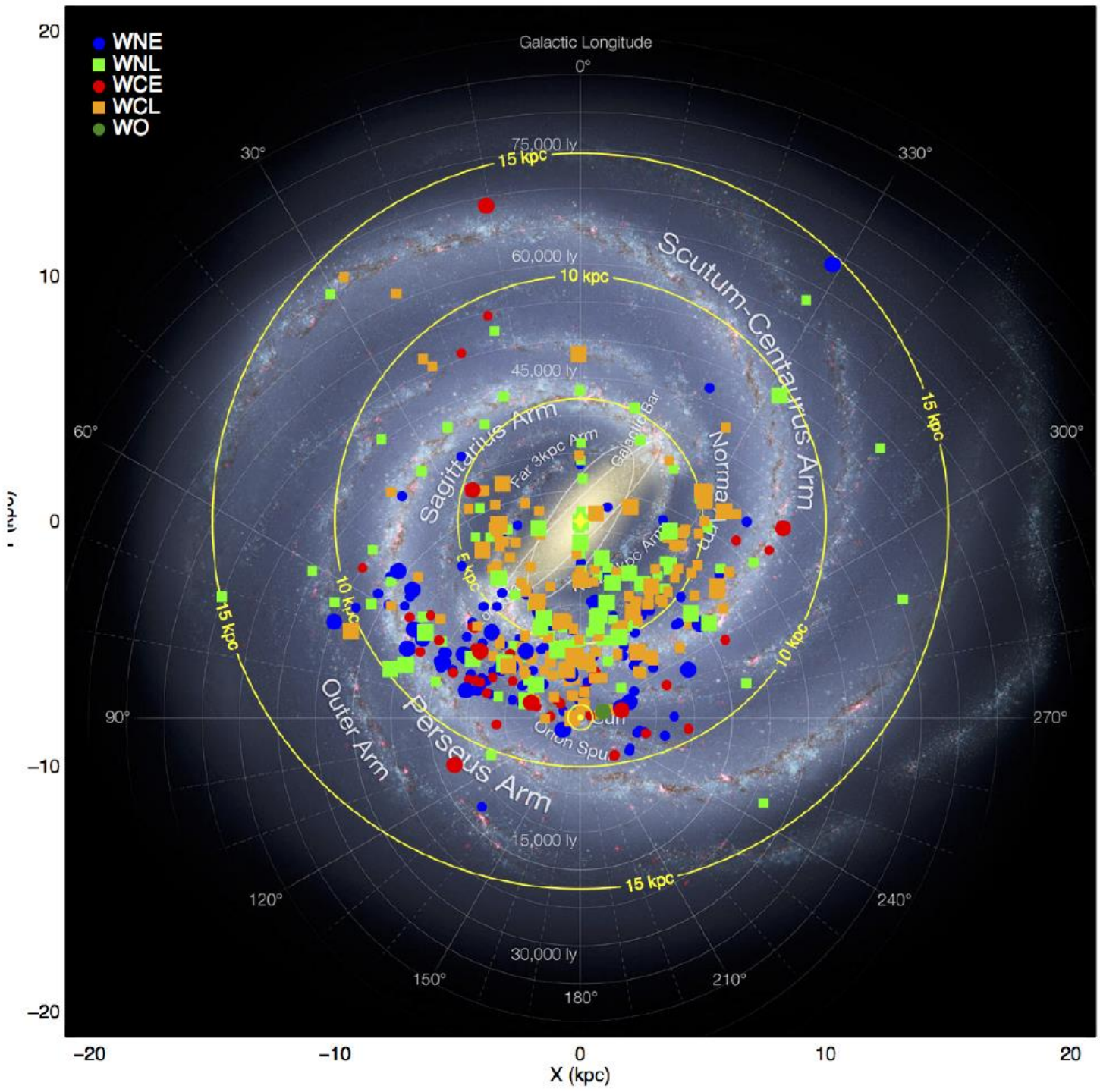


FIG. 2.— Another RGB figure of the W51 region on an even larger scale. The red layer shows the 90 cm continuum measured with the VLA Brogan et al. (2013), highlighting the W51 C supernova remnant as the extended haze that dominates the image. Blue shows ATLASGAL 870 μm continuum. Green shows the integrated ^{13}CO emission from 30 to 90 km s^{-1} from the Galactic Ring Survey (Jackson et al. 2006).

- Распределение самых массивных звёзд
- (типа Вольфа-Райе, WR)
- Kanarek (PhD, 2017)



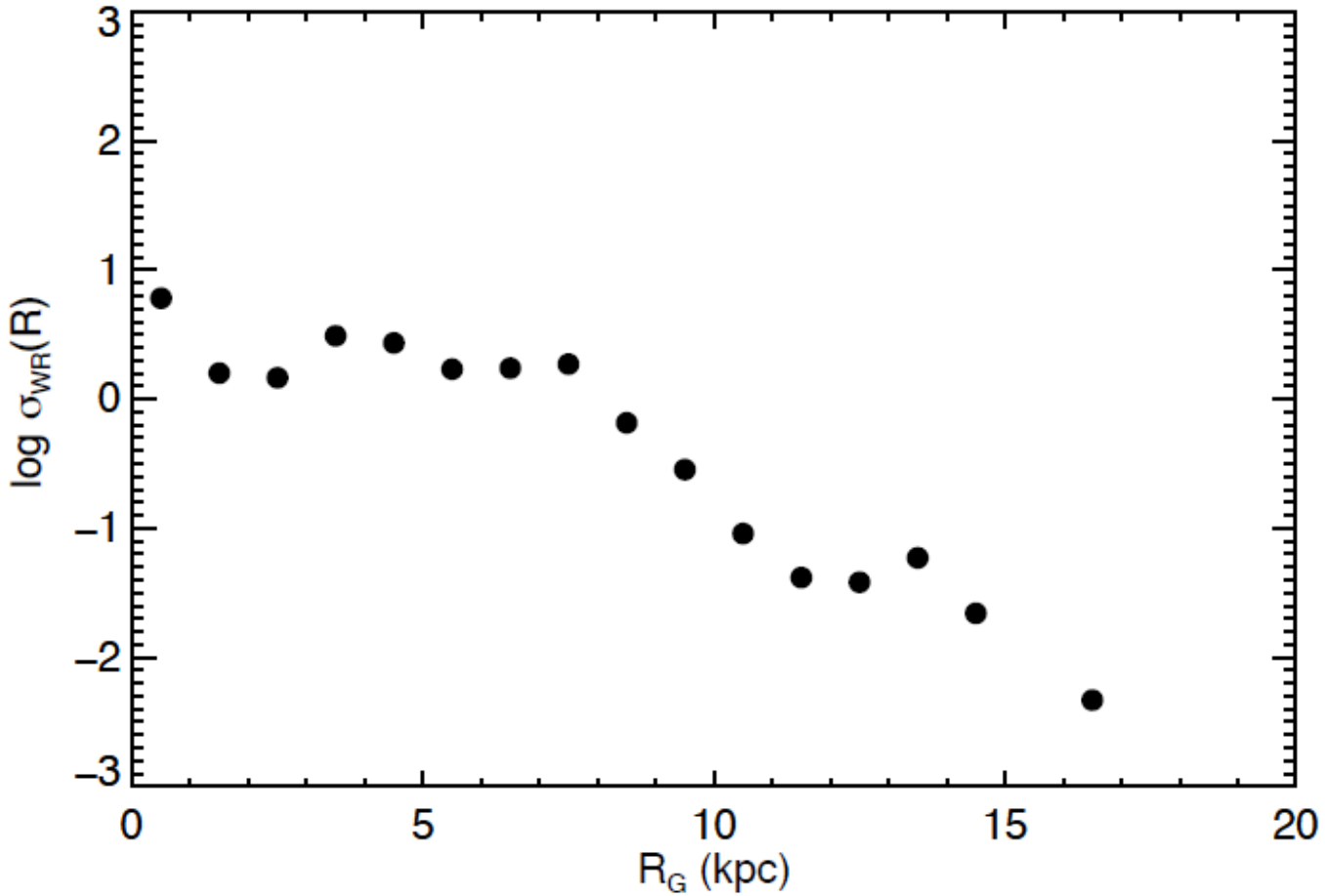


Figure 4.1: Surface density of Galactic WRs as a function of Galactocentric radius, as an update to van der Hucht (2001, Figure 10). No effort has been made to correct for incompleteness.

Радиальное распределение звёзд WR (без учёта эффектов селекции): отражает изменение темпа звездообразования?

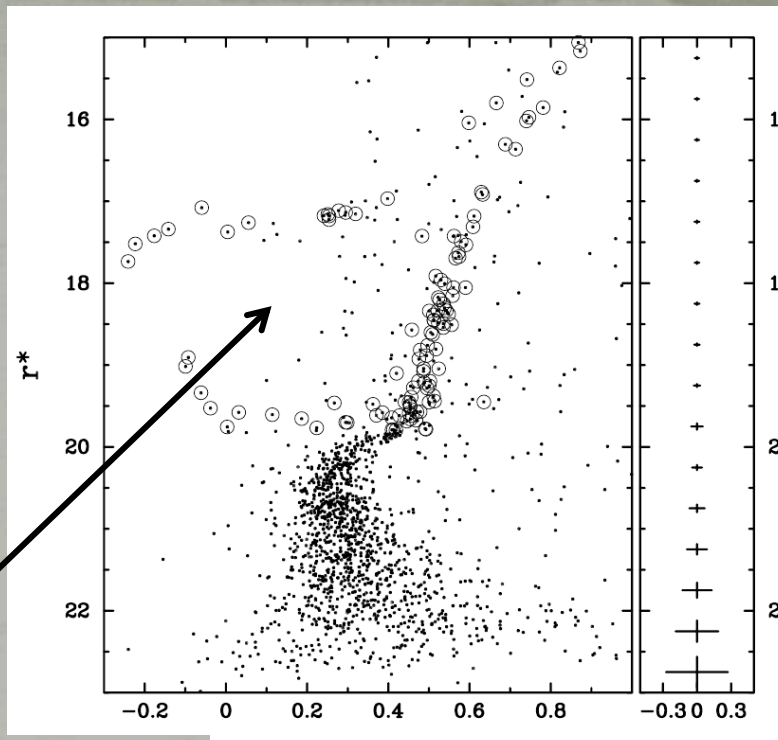
Оценка полного числа звёзд WR в Галактике: ~2600

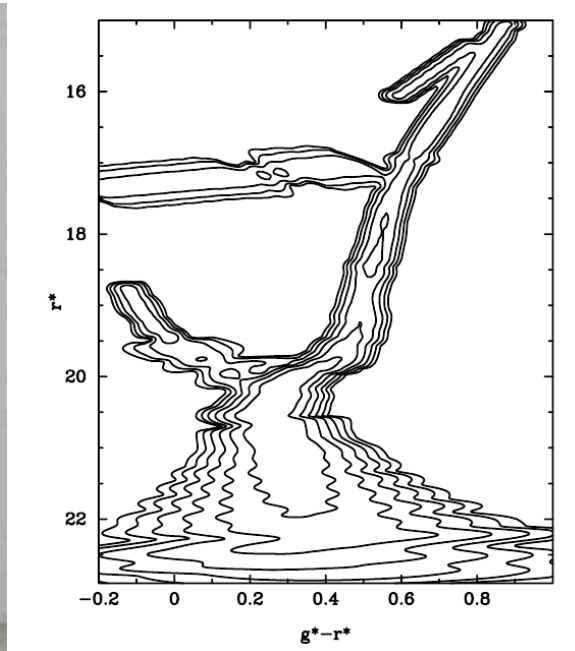
Поиск следов взаимодействия Галактики со спутниками и их распада: “малый каннибализм”

- Поиск и изучение приливных “шлейфов” шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути, открытие его новых спутников и скоплений с помощью КТ Хаббл и “всенебесных” обзоров SDSS, ИК-обзоров 2MASS, UKIDSS и др. дали в последние 10-15 лет важную информацию о процессах формирования структур в наблюдаемых ныне галактиках

Методы поиска и критерии открытия новых спутников галактик на крупных телескопах:

- Поиск областей повышенной звёздной плотности на небе("overdensity") по данным "всенебесных" обзоров
- Сходство диаграмм Герцшпрунга-Рассела (ГР) (цвет – блеск) с диаграммами для старых звёздных населений (типа шаровых скоплений)
- Близость скоростей звёзд (лучевых скоростей и собственных движений)

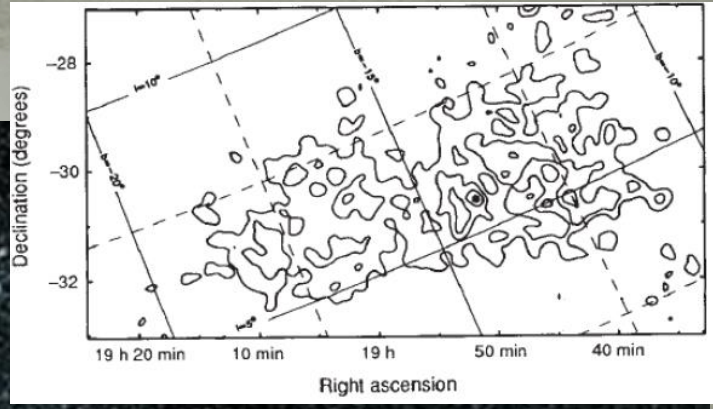


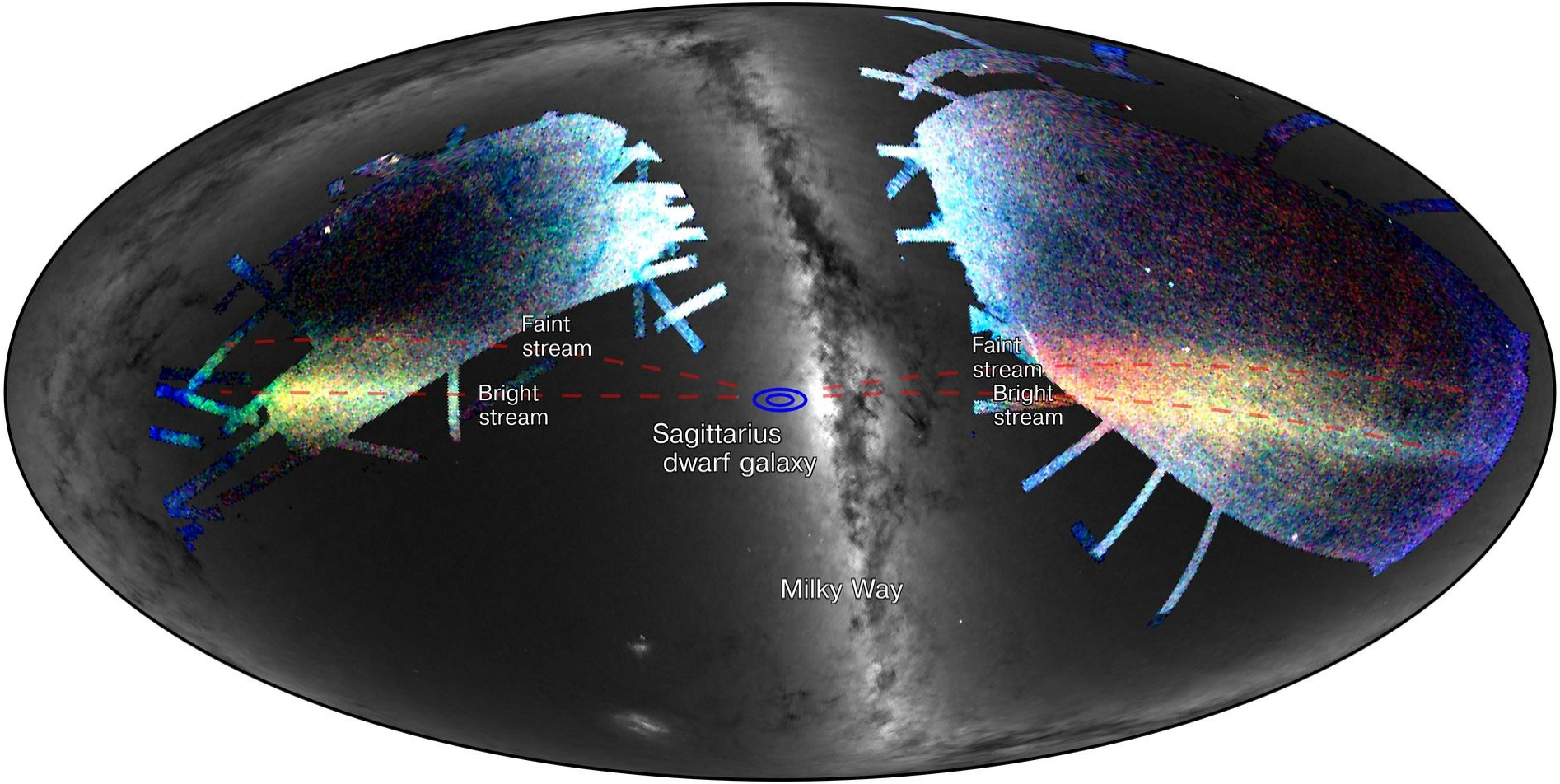


Koposov 1, Koposov 2 – новые шаровые скопления Галактики (Koposov et al., 2007)

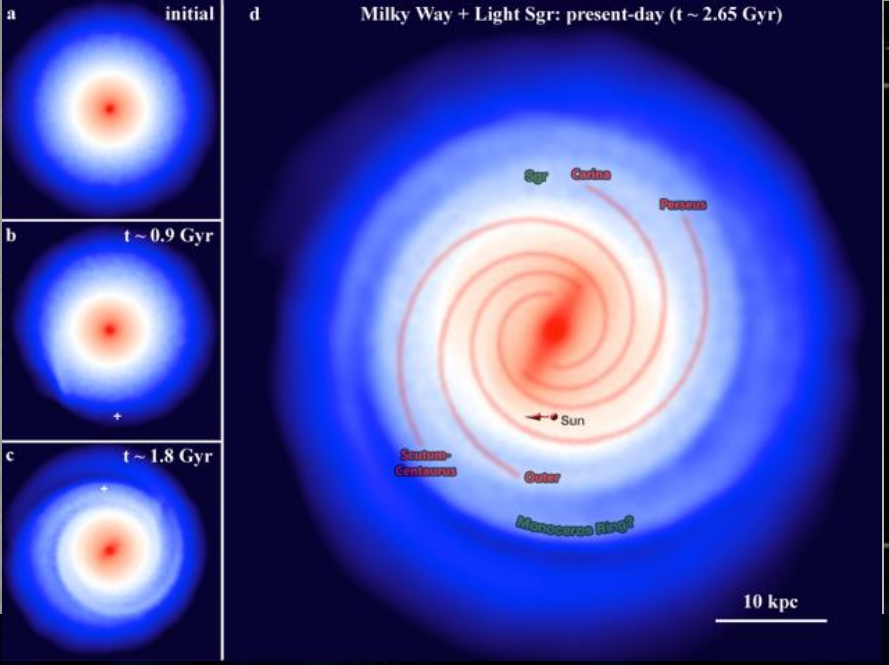
- Расстояние – более 40 кпк от центра Галактики

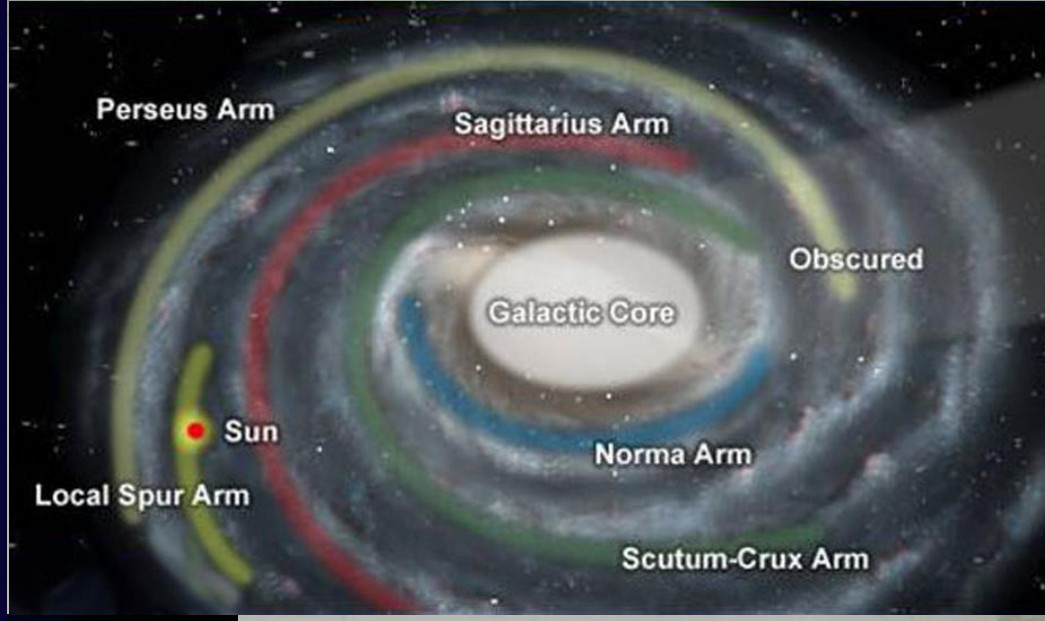
Sgr dSph: открытие в 1994
~20 кпк за центром Галактики
Орбитальный период ~800 млн.

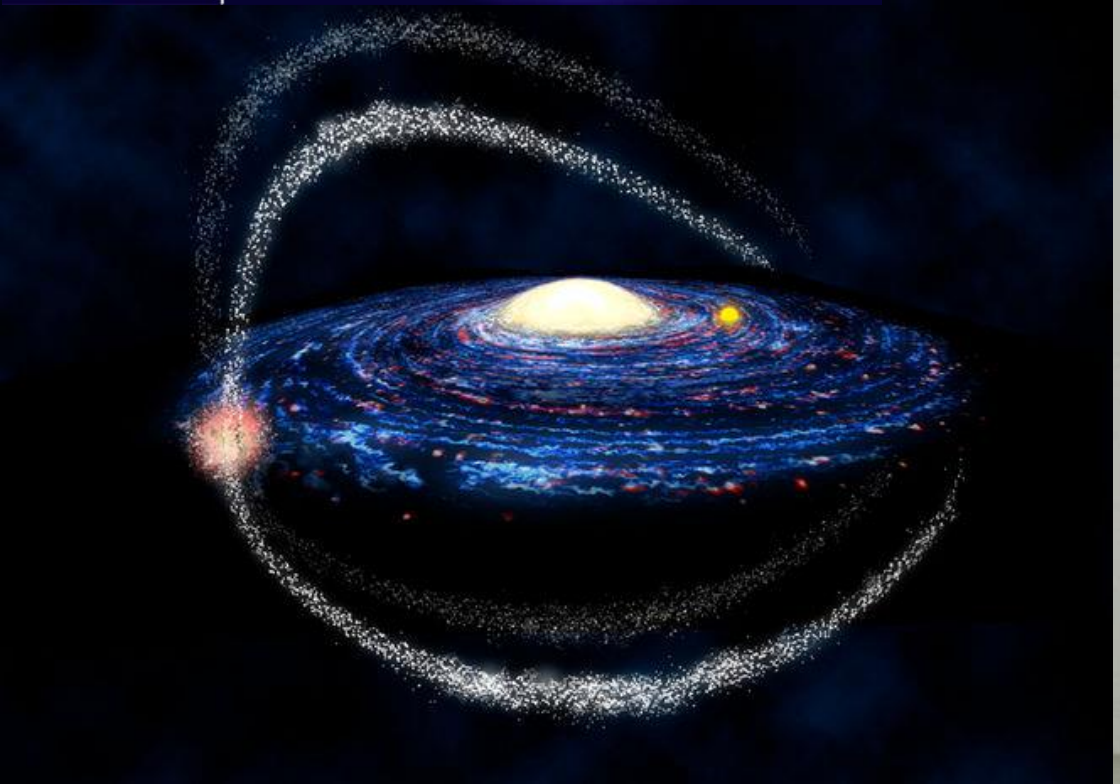




- Приливные “шлейфы” карликовой галактики Sgr dSph (Стрелец) на северном (справа) и южном (слева) небе **(SDSS: Koposov et al., 2011)**:
- 4 ветви – последовательные витки орбиты

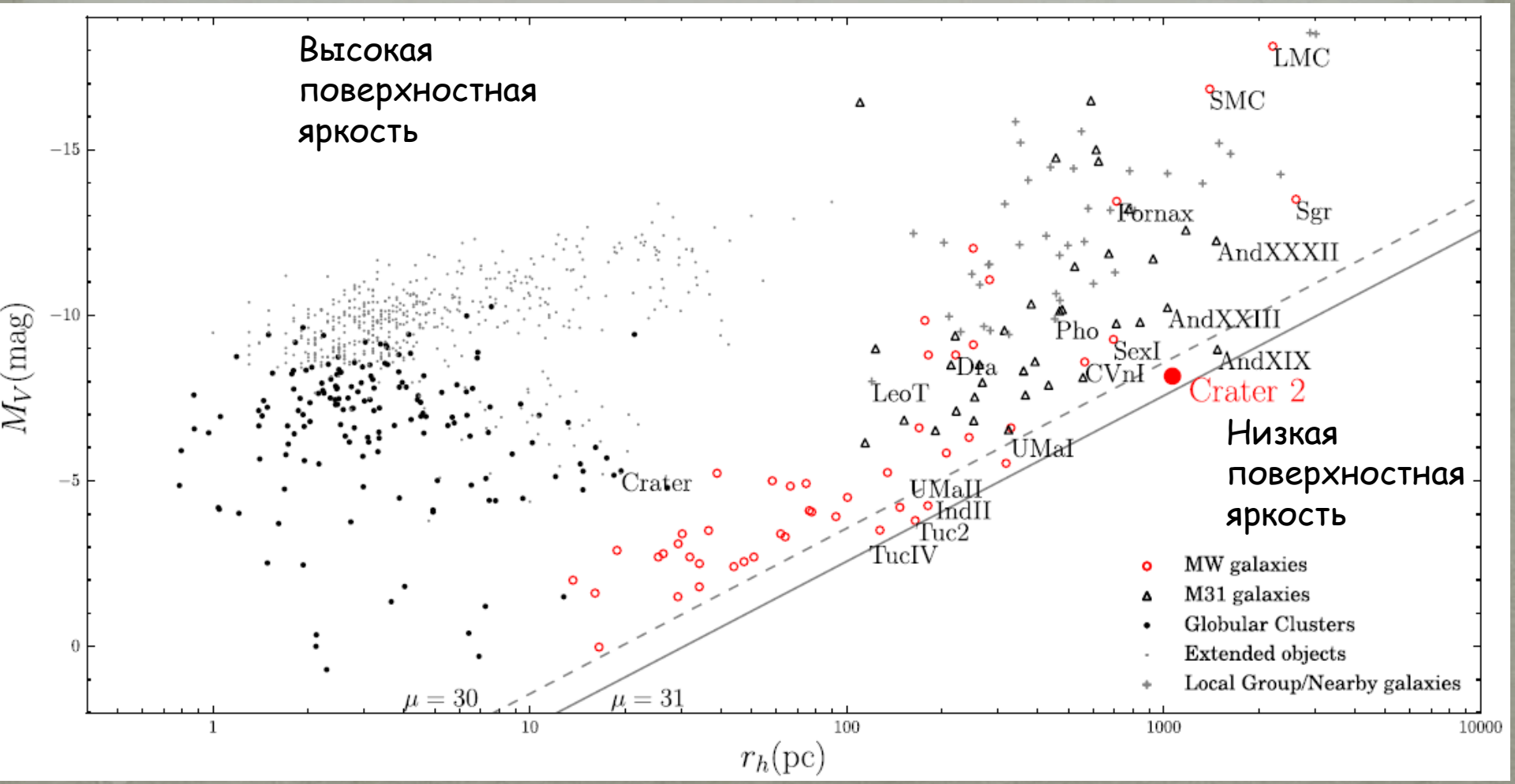




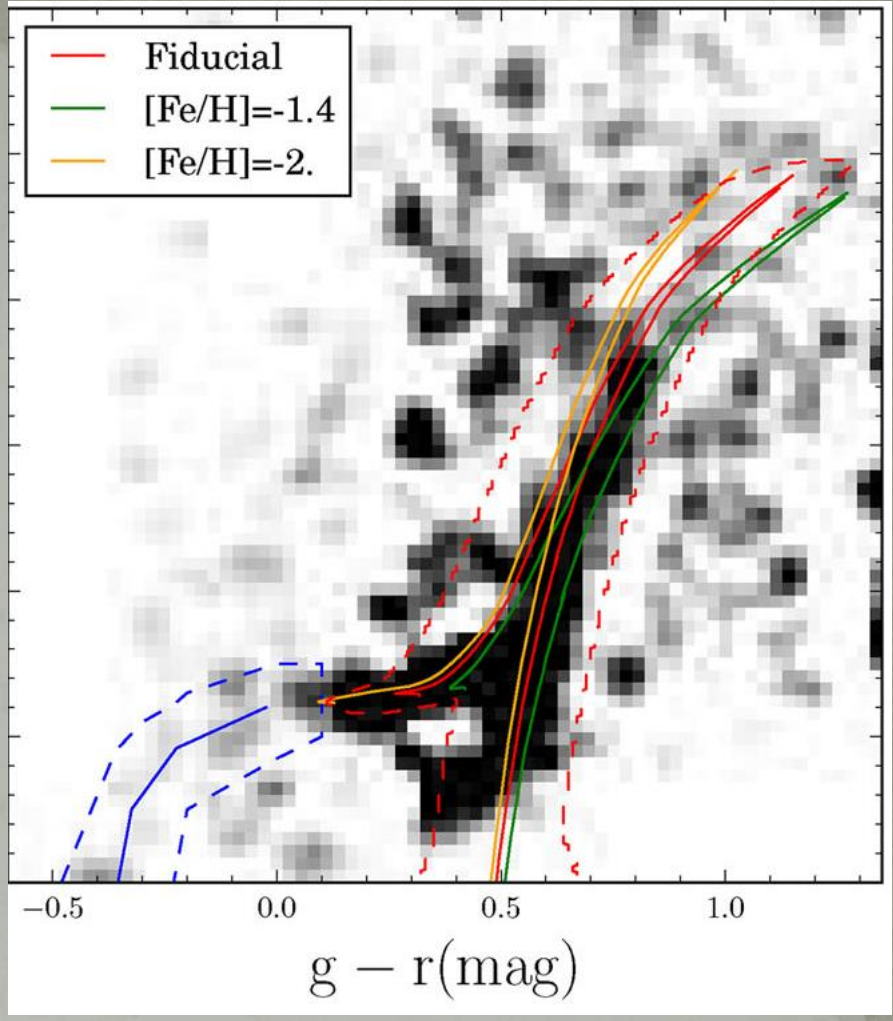


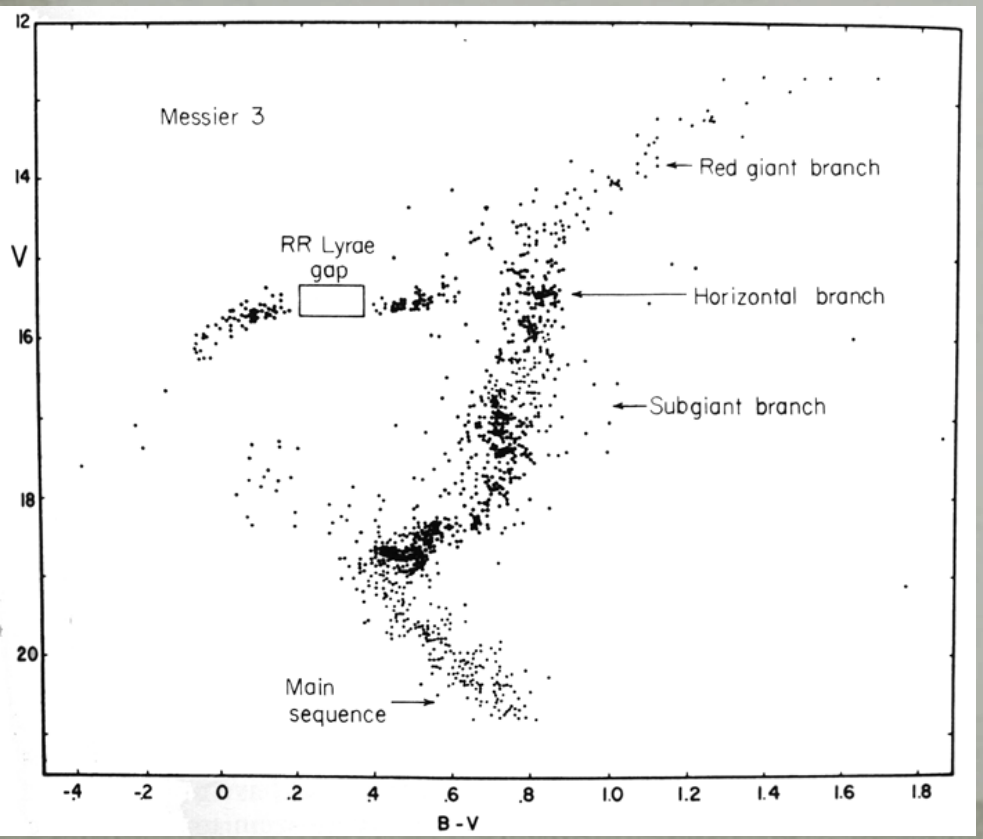
Не только Галактика влияет на Sgr dSph, но и спутник, вероятно, возбуждает спиральный узор Млечного Пути

- О сложности открытия новых слабых членов Местной Группы гаактик (Torrealba, Koposov, Belokurov, Irwin, 2016)



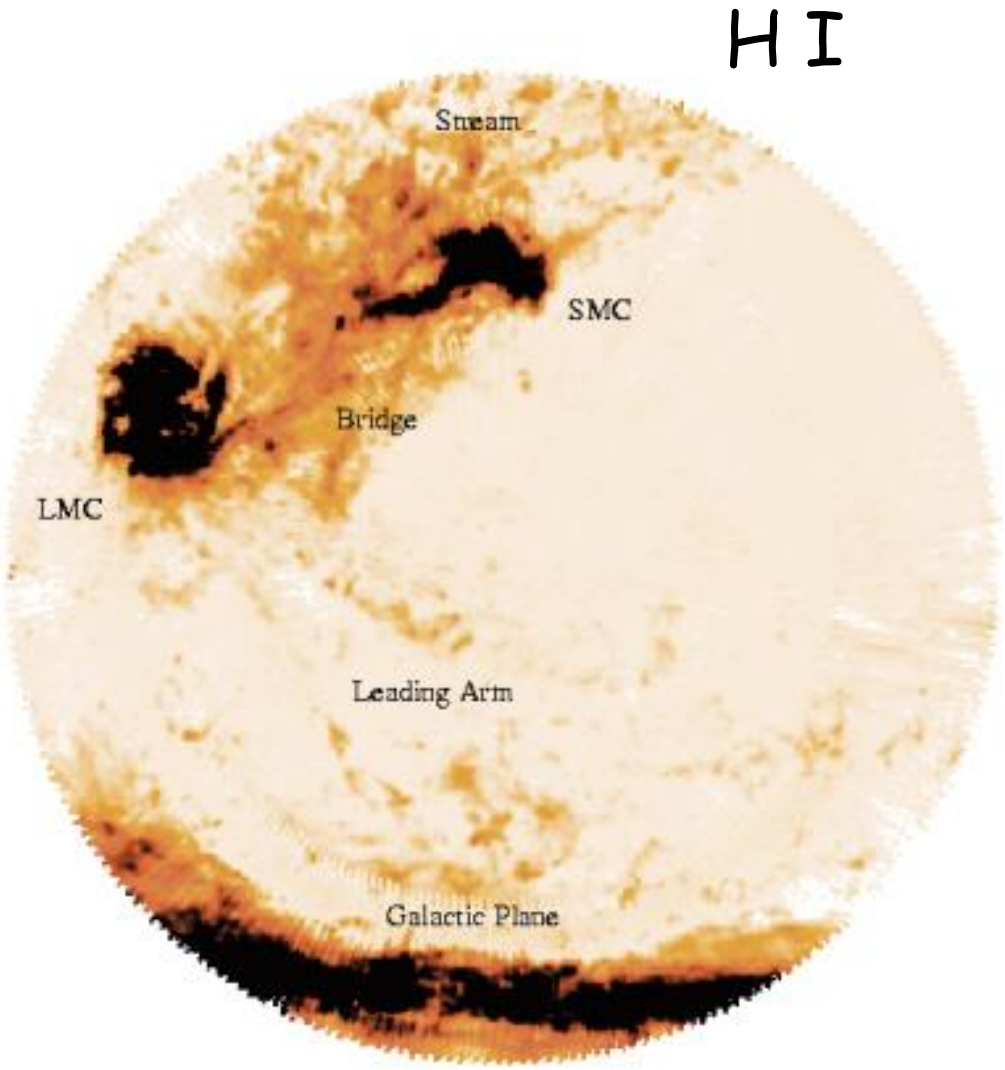
- 2016:
- UFD Crater 2

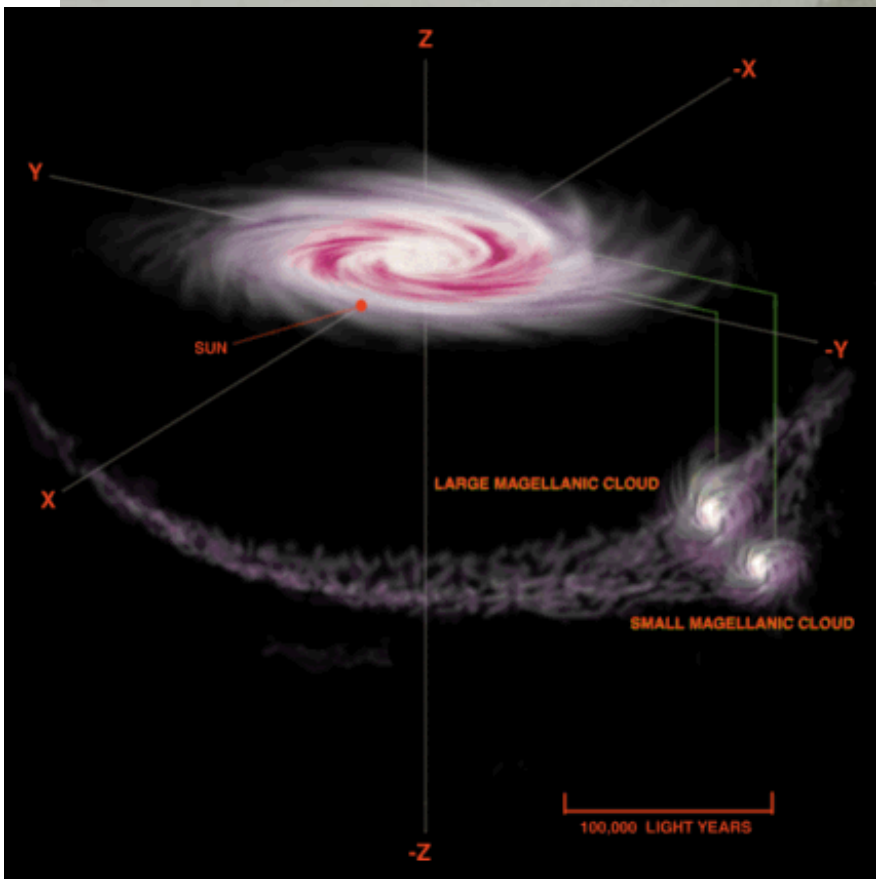




Для сравнения: типичная диаграмма ГР шарового скопления M3 (старой звёздной системы)

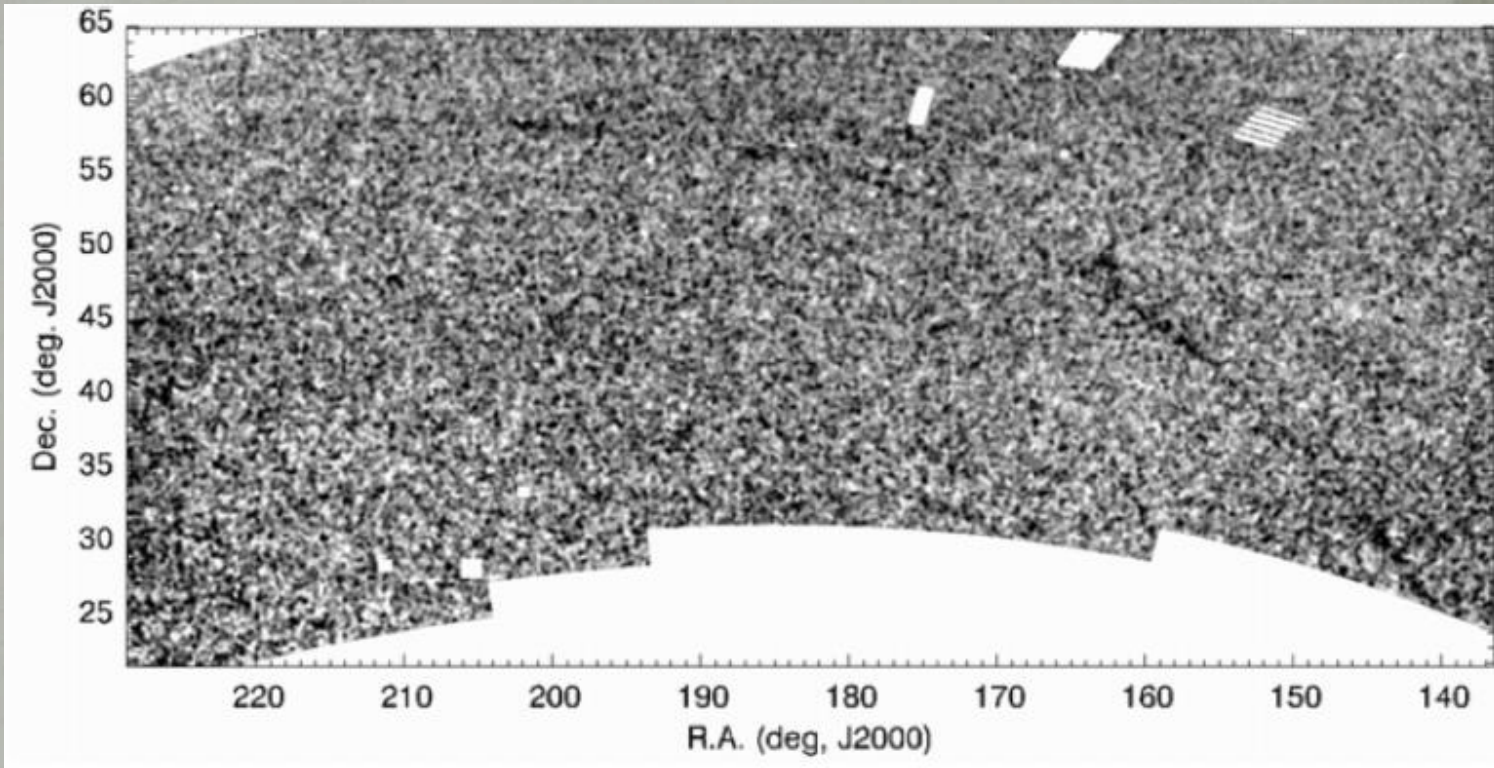
- **Взаимодействие Млечного Пути с БМО и ММО (50 – 70 кпк)**



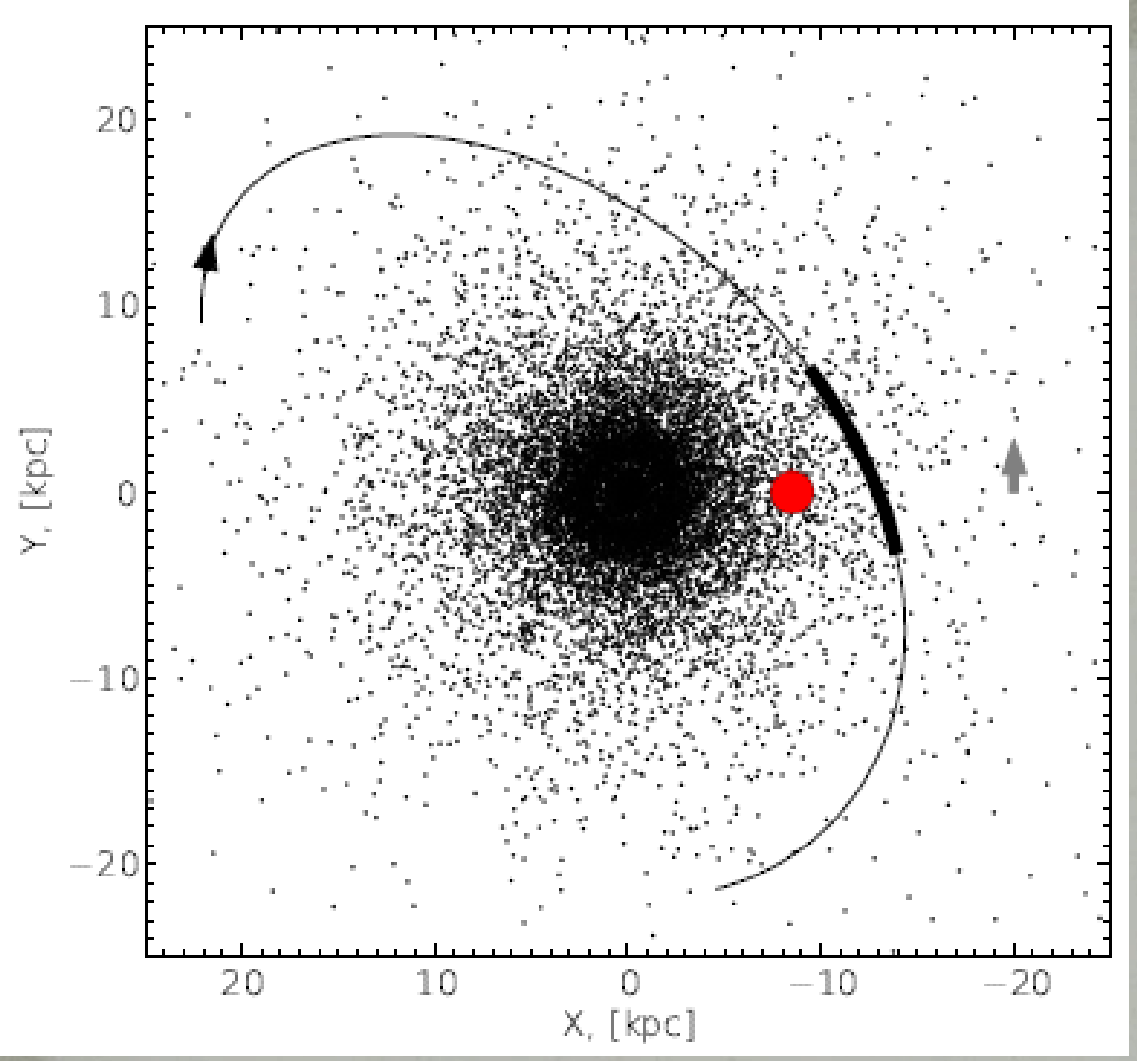


Взвешивая Галактику…

- Grillmair, Donatos, 2006: открытие потока GD-1 протяжённостью ~63° на небесной сфере:



- Скорее всего, это “шлейф” пока не обнаруженного (или уже разрушенного) шарового скопления

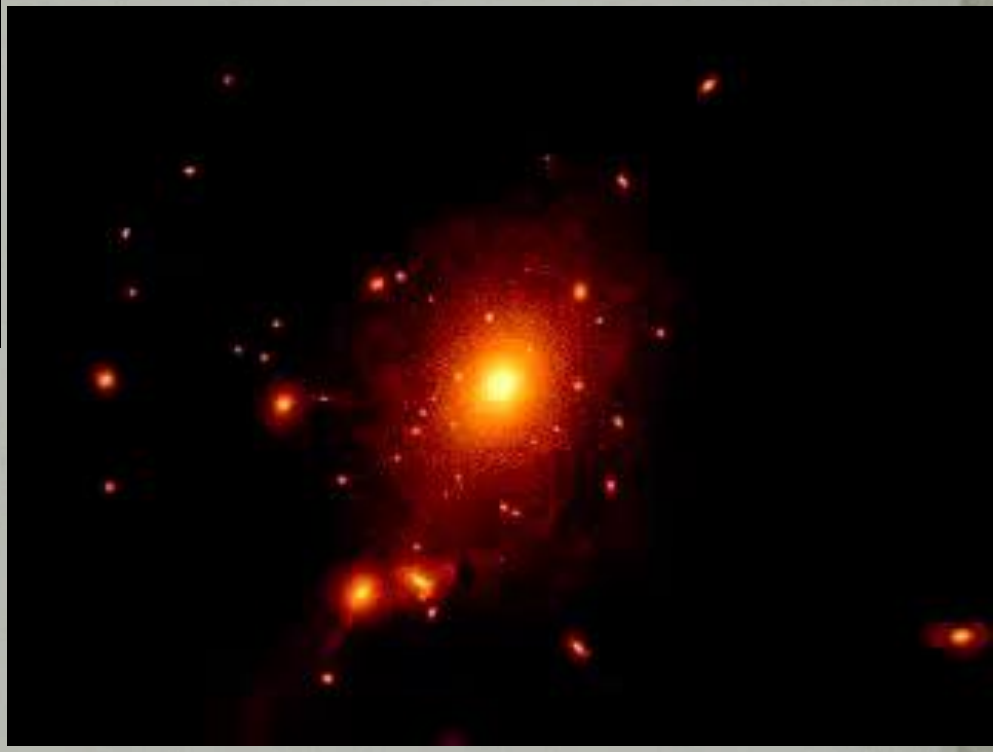


Koposov et al. (2009):
Круговая скорость на периферии Галактики:
V_0 ~ 224 км/с
Полная масса Галактики:
~1000 млрд. солн.
(барионная масса в 10 раз меньше)
Сжатие тёмного гало ~0.87

- Реконструкция орбиты GD-1 и наблюдения
- Кружком отмечено положение Солнца

Проекция x-y

Эллиптичесие галактики: слияния дисковых галактик ?



Конечная конфигурация (облёт)

Проекция x-z

Моделирование столкновения Млечного Пути и галактики Андромеды

Информация к размышлению:

- Эре телескопов – 410 лет (Галилей, 1609)
- Все наши наблюдения – это всего лишь мгновенный “снимок” современного состояния Вселенной
- **Законы Физики + Логика = Объяснение происхождения и эволюции оьъектов дальнего космоса – это ли не доказательство могущества современной науки ?**

- **Нобелевские лауреаты последних десятилетий по физике за работы в области астрономии:**

- **2002: R.Davies Jr., M.Koshiba, R.Giacconi** – обнаружение космических нейтрино, открытие космических рентгеновских источников
- **2006: J.Mather, G.Smoot** – открытие анизотропии космического фонового (реликтового) излучения
- **2011: S.Perlmutter, B.Schmidt, A.Rees** – открытие ускорения расширения Вселенной (“тёмной энергии”)
- **2017: R.Weiss, B.Barish, K.Thorne** – наблюдение гравитационных волн

Как стать астрономом ?

- **Астрономическое отделение физического факультета МГУ – только здесь обучение астрономии начинается с 1 курса (ещё на матмехе СПбГУ, и больше нигде в мире)**
- **Научная база АО – ГАИШ МГУ (www.sai.msu.ru)**
- **Форма и срок обучения: Специалитет, 6 лет**
- **Приём – 20 бюджетных и до 5 платных мест**
- **Экзамены: ЕГЭ (русский язык, математика, физика) + дополнительный экзамен по физике**
- Льготы для призёров крупных астрономических олимпиад (Всероссийской – без экзаменов)
- **Контакты:**
- Е.В.Глушкова glushkova@gmail.com
- А.С.Расторгуев alex.rastorguev@gmail.com

Благодарю за внимание !

- WEB:
- http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway

- Москва, ГАИШ МГУ, 2019