Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИИ 3, 4

Поиск темной материи методами наблюдательной космологии. Гравитационное линзирование

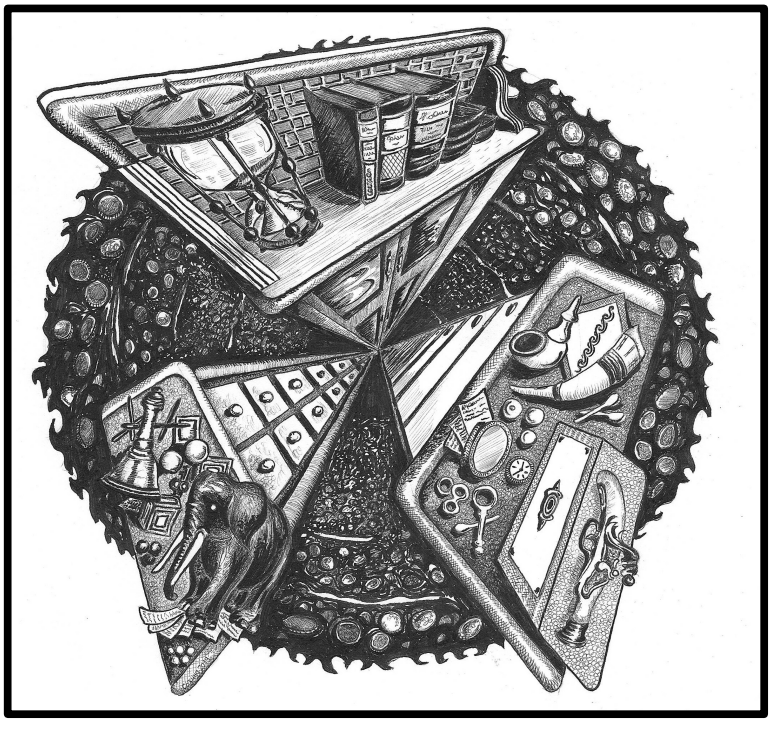
д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна
(cosmologia@yandex.ru)

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

МФК-2020

Программа курса

ЛЕКЦИЯ 1. Предмет науки космологии. Современная Стандартная космологическая модель
ЛЕКЦИЯ 2. Расширение Вселенной. Возраст Вселенной. Понятие горизонта частиц. Основные эпохи эволюции Вселенной
ЛЕКЦИЯ 3. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии. Гравитационное линзирование
ЛЕКЦИЯ 4. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии. Гравитационное линзирование (ПРОДОЛЖЕНИЕ)
ЛЕКЦИЯ 5. Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной. Ускоренное расширение современной Вселенной. Теория инфляции
ЛЕКЦИЯ 6. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия
ЛЕКЦИЯ 7. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ПРОДОЛЖЕНИЕ)
ЛЕКЦИЯ 8. Планетные системы, галактики. Крупномасштабная структура Вселенной
ЛЕКЦИЯ 9. Распространенность легких химических элементов. Образование химических элементов в звездах
ЛЕКЦИЯ 10. Космические струны: модели, свойства, основные методы поиска наблюдательными методами
ЛЕКЦИЯ 11. Гравитационные волны
ЛЕКЦИЯ 12. Модели будущего Вселенной, основанные на современных наблюдательных данных

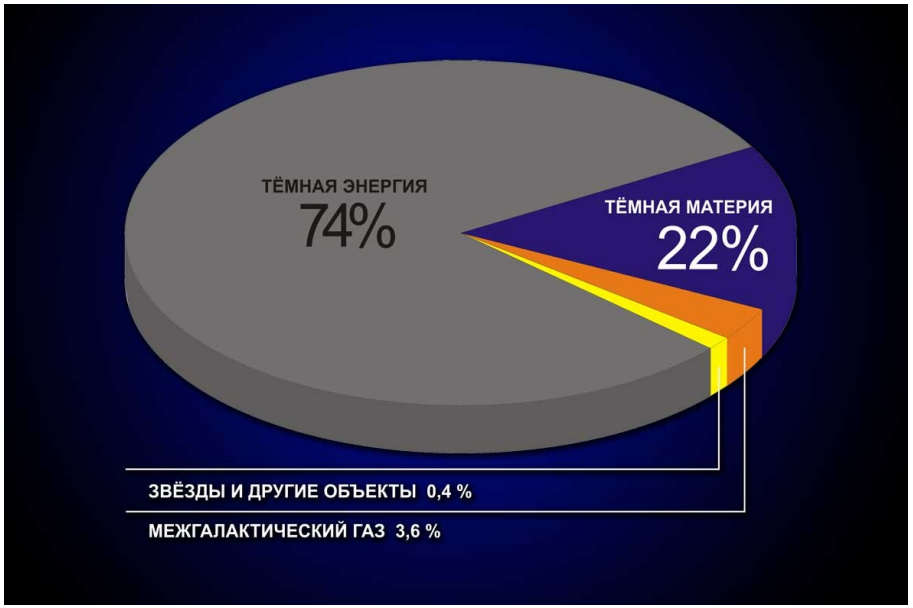


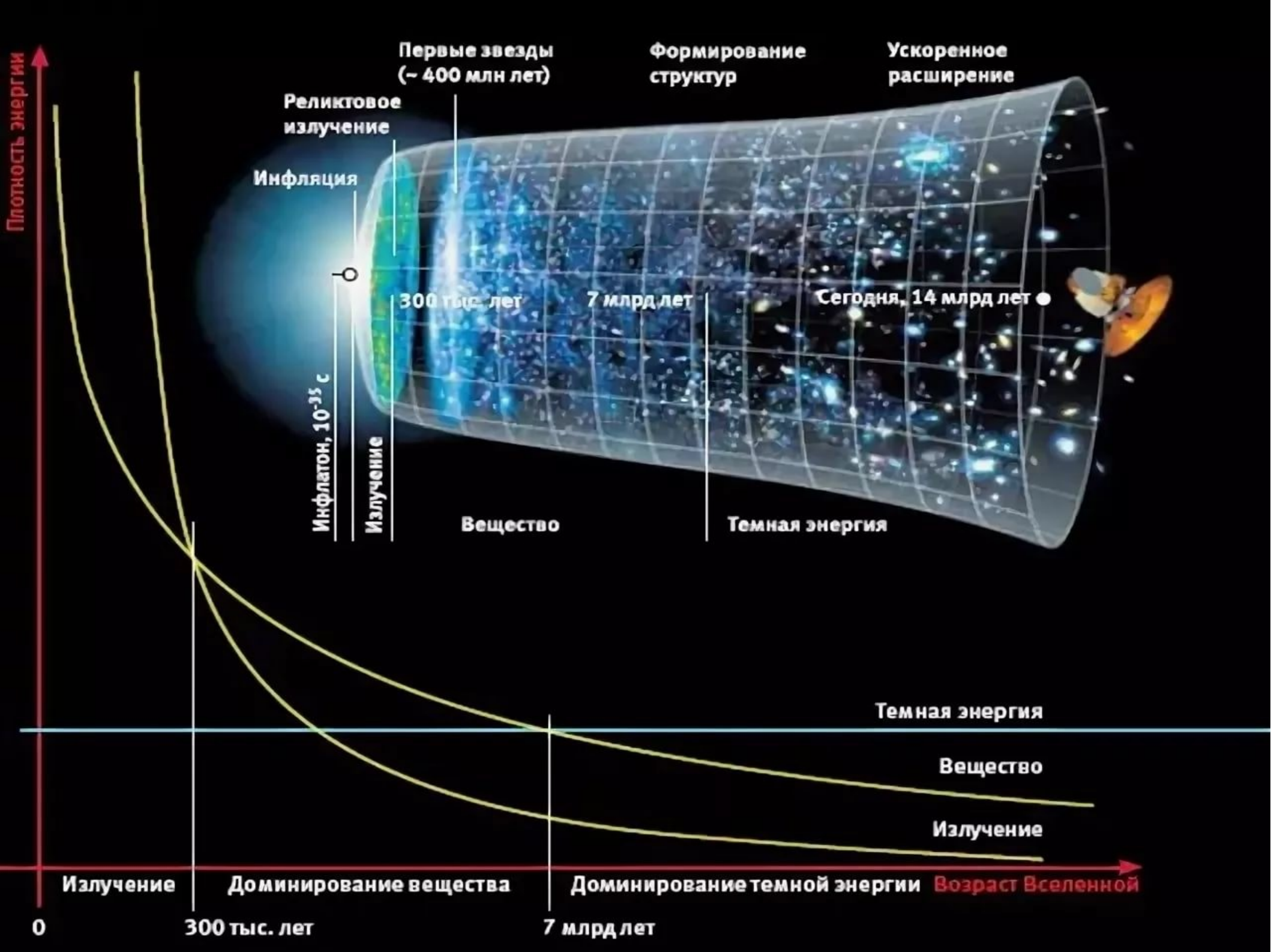
Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологичской модели

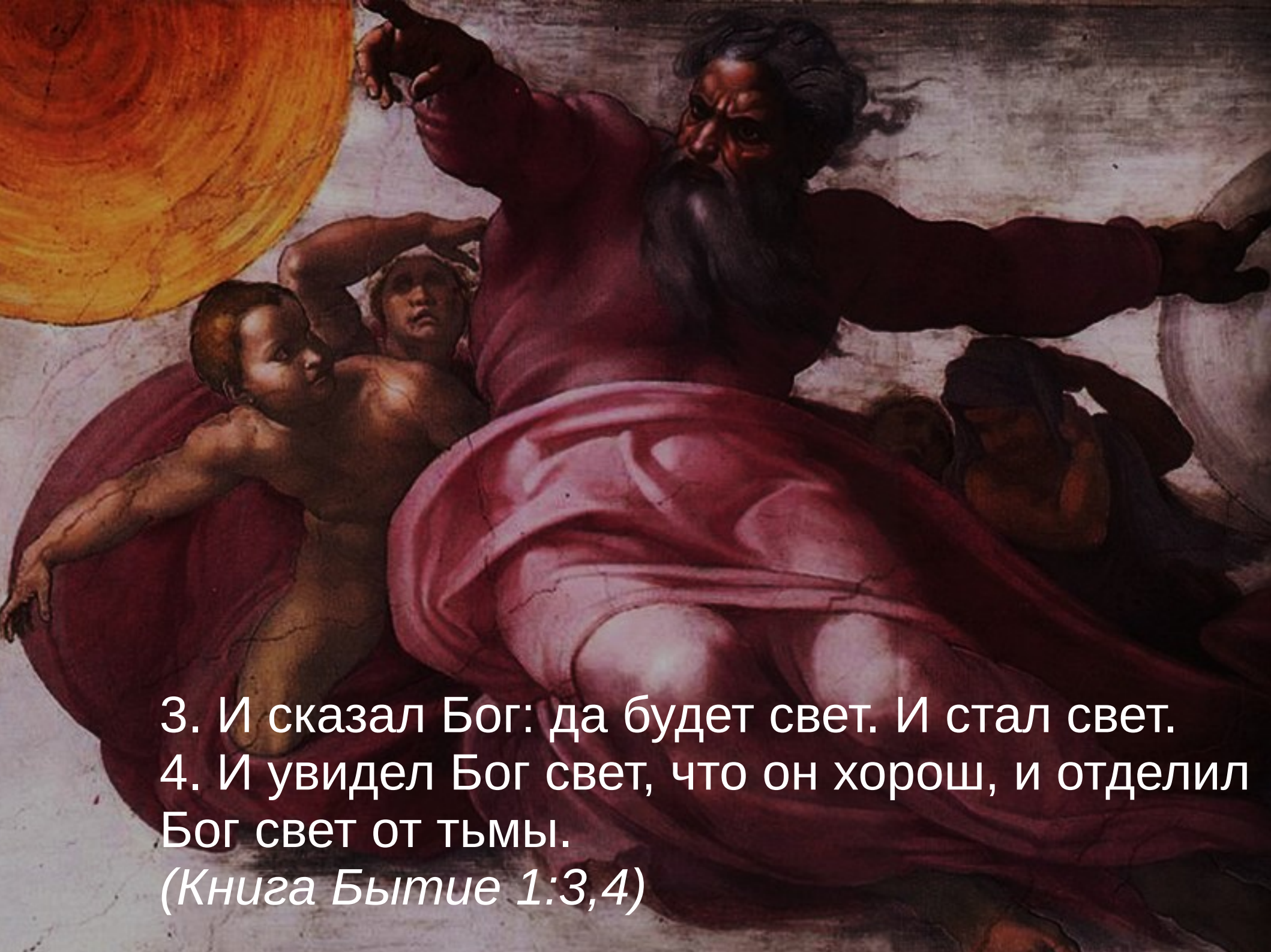
ΛCDM

1. Расширение Вселенной
2. Реликтовое излучение
3. Крупномасштабная структура Вселенной
4. Распространенность легких химических элементов
5. Анизотропия реликтового излучения

6*. Темная материя
7*. Темная энергия
8*. Гравитационные волны




Плотность энергии
Первые звезды
(~ 400 млн лет)
Формирование
структур
Ускоренное
расширение
Реликтовое
излучение
Инфляция
300 тыс. лет
7 млрд лет
Сегодня, 14 млрд лет
Инфлатон, 10^{-35} с
Излучение
Вещество
Темная энергия
Темная энергия
Вещество
Излучение
Излучение
Доминирование вещества
Доминирование темной энергии
Возраст Вселенной
0
300 тыс. лет
7 млрд лет



3. И сказал Бог: да будет свет. И стал свет.
4. И увидел Бог свет, что он хорош, и отделил Бог свет от тьмы.
(Книга Бытие 1:3,4)

Источники излучения, состоящие из обычного светящегося (барионного) вещества

Вселенная содержит около 100 млрд галактик, каждая из которых состоит их миллиардов звезд, гигантских облаков газа и пыли, а также планетных систем и более мелких космических обломков

Скопление галактик Абель 1689 в сверхскоплении Девы. Изображение, полученное космическим телескопом Хаббл (HST)

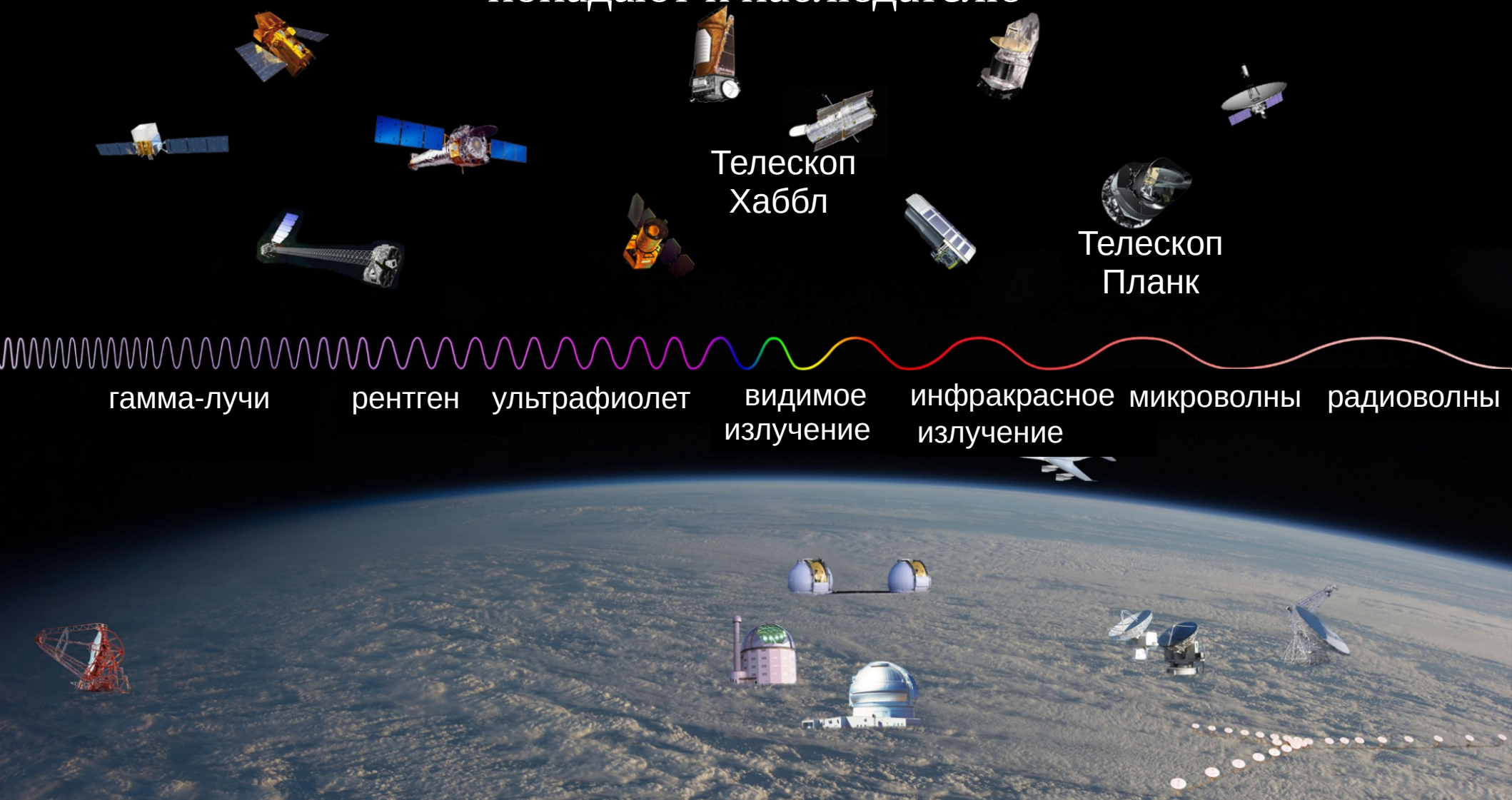
Самые большие оптические наземные приборы для астрономических наблюдений

Сегментное зеркало телескопа ***ELT*** диаметром около 40 м состоит из 798 шестиугольных сегментов диаметром 1.4 м и толщиной 50 мм

ELT – Extremely Large Telescope, ***будет расположен в Чили***

Необъятный мир “хищников” и их “добычи”

Космические объекты излучают в очень широком дапазаоне: от радиоволн до гамма-лучей, которые пересекают Вселенную и попадают к наблюдателю



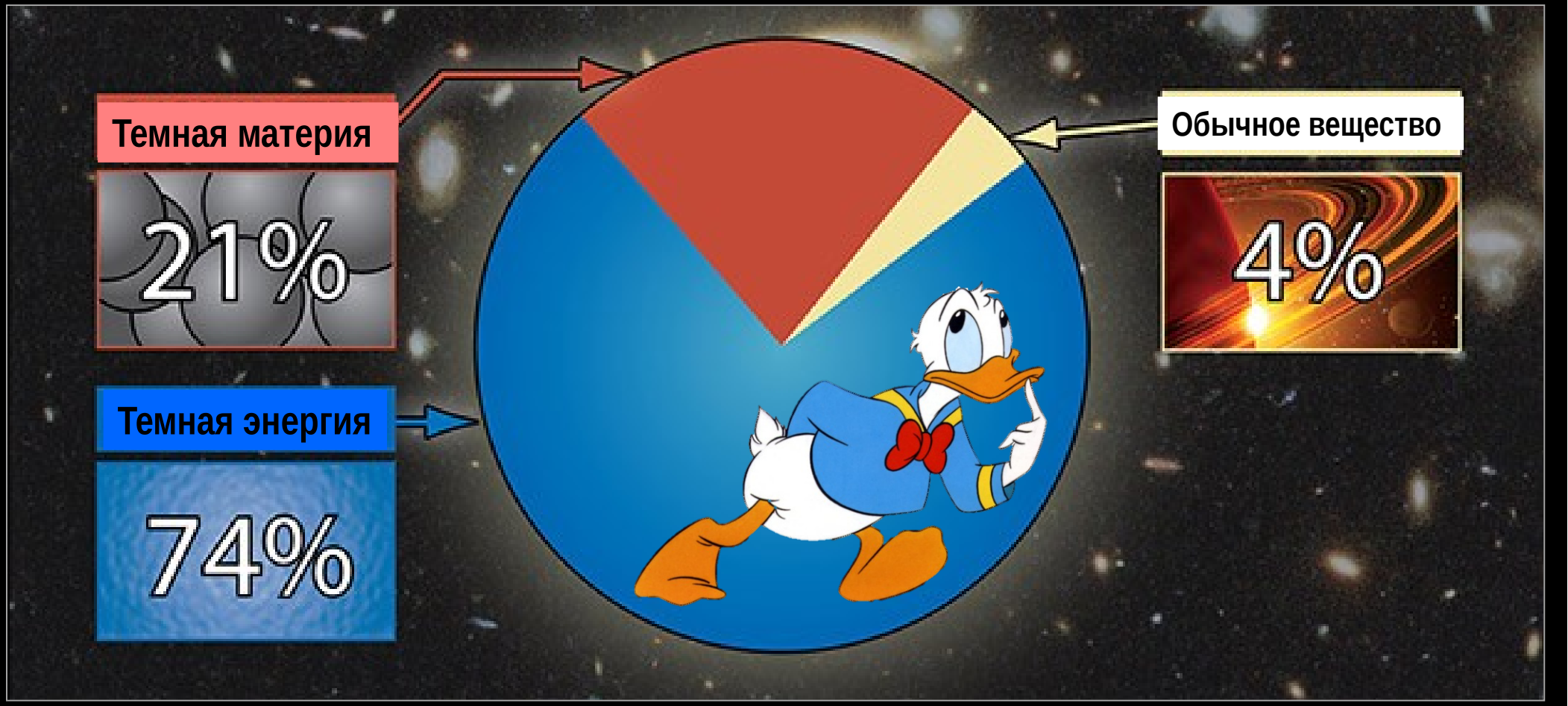
Теперь новая философия ставит все под сомнение

Джон Донн

Исследования последних десятилетий показали, что то вещество, которое мы видим – это всего лишь вершина айсберга

В космологии возникла новая парадигма: “темный космос”

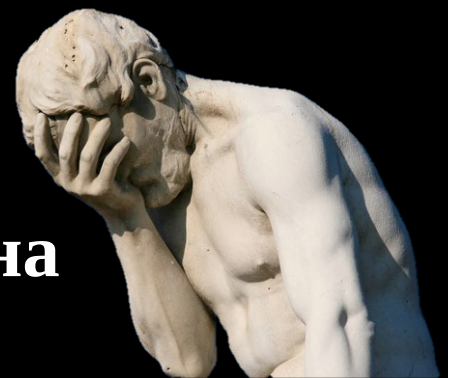
Более 95% вещества Вселенной недоступно для электромагнитных наблюдений.



Это вещество, которое просто “темное” (DM)

Около 21% космического вещества находится в некоторой неизвестной и экзотической “темной” форме.

- Считается, что темная материя – это своего рода “гравитационный клей”, который удерживает как единое целое галактики и скопления галактик
- В ранней Вселенной темная материя играла ключевую роль в формировании крупномасштабной структуры, послужив “зародышами” для формирования галактик: обычное вещество притягивалось и группировалось около уже существовавших областей темной материи



Однако темная материя до сих пор не обнаружена

Темная материя невидима, но воздействует гравитационно на обычное видимое вещество

Темная материя не излучает и не поглощает электромагнитное излучение на всех известных и доступных наблюдениям частотах

В попытках понять природу темной материи...

“Наука должна начинать с мифов и с критики мифов”

Карл Поппер

Что – или кого? – следует винить, когда наблюдения не соответствуют теоретическим предсказаниям?

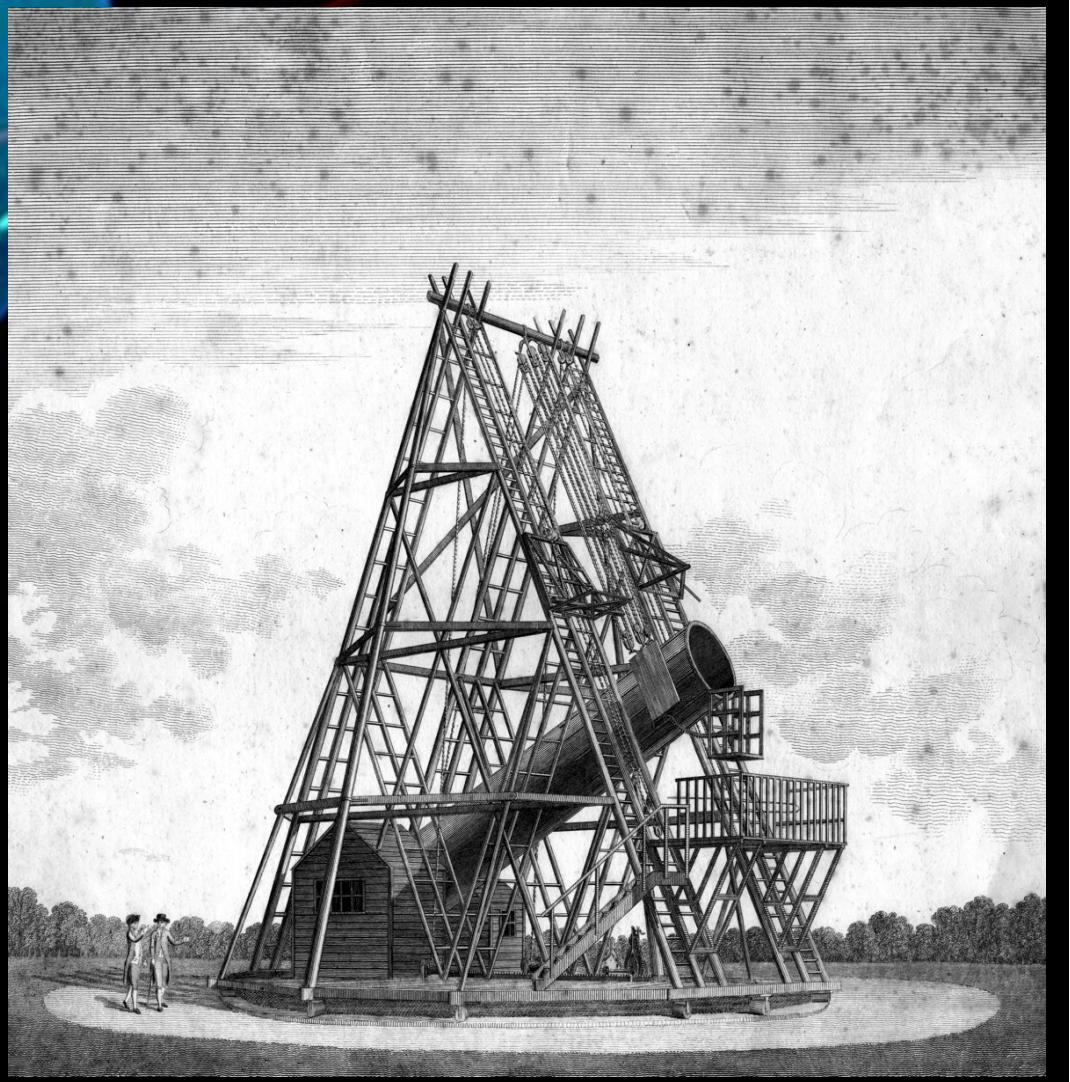
Отсутсвующие или до сих пор не обнаруженные компоненты?

Проблема в существующей физической модели природы?

Открытие планеты Уран

Дата открытия
13 марта 1781 г.

Уильям Гершель



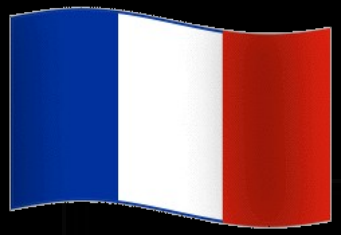
Вычисление параметров орбиты Урана

Решение задачи движения N массивных тел, подчиняющихся законам механики Ньютона (*N* – это Солнце и все известные планеты).

Вычисленная скорость Урана не совпала с наблюдаемыми значениями скорости.

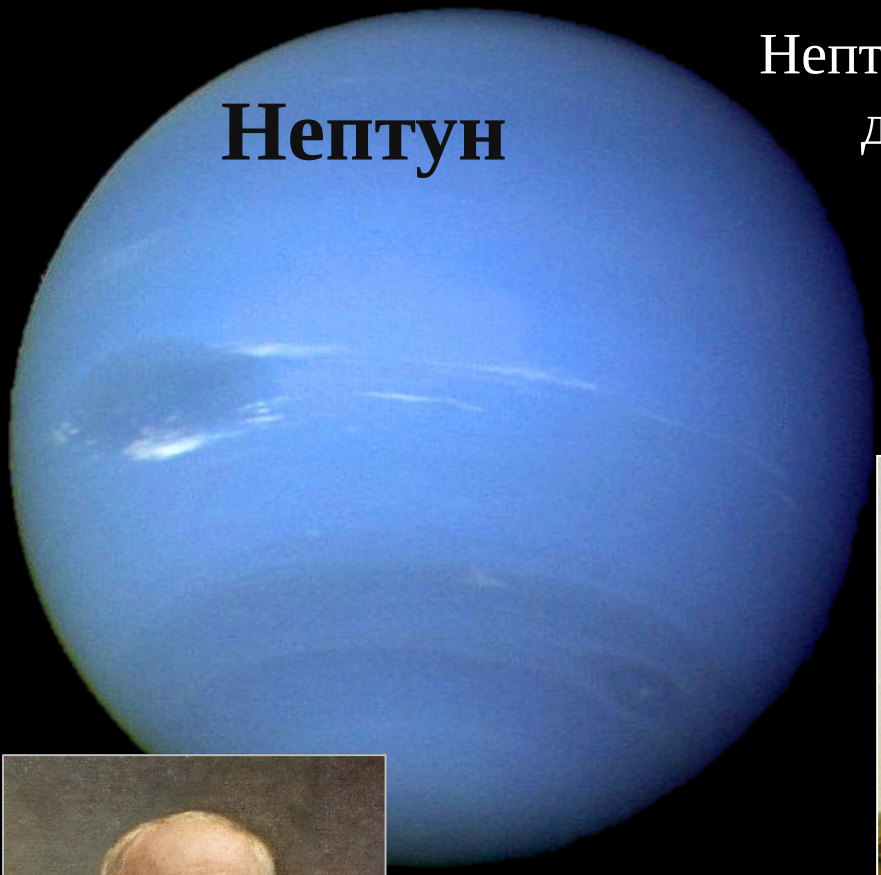
Решение проблемы: предположение о наличии невидимого тела, своей массой искажающего орбиту Урана

Урбен Леверье



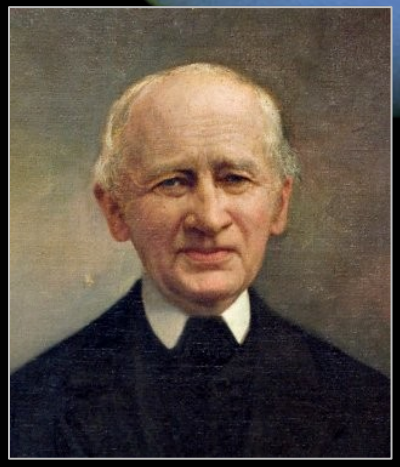
Джон Адамс

“Темная” недостающая масса была обнаружена



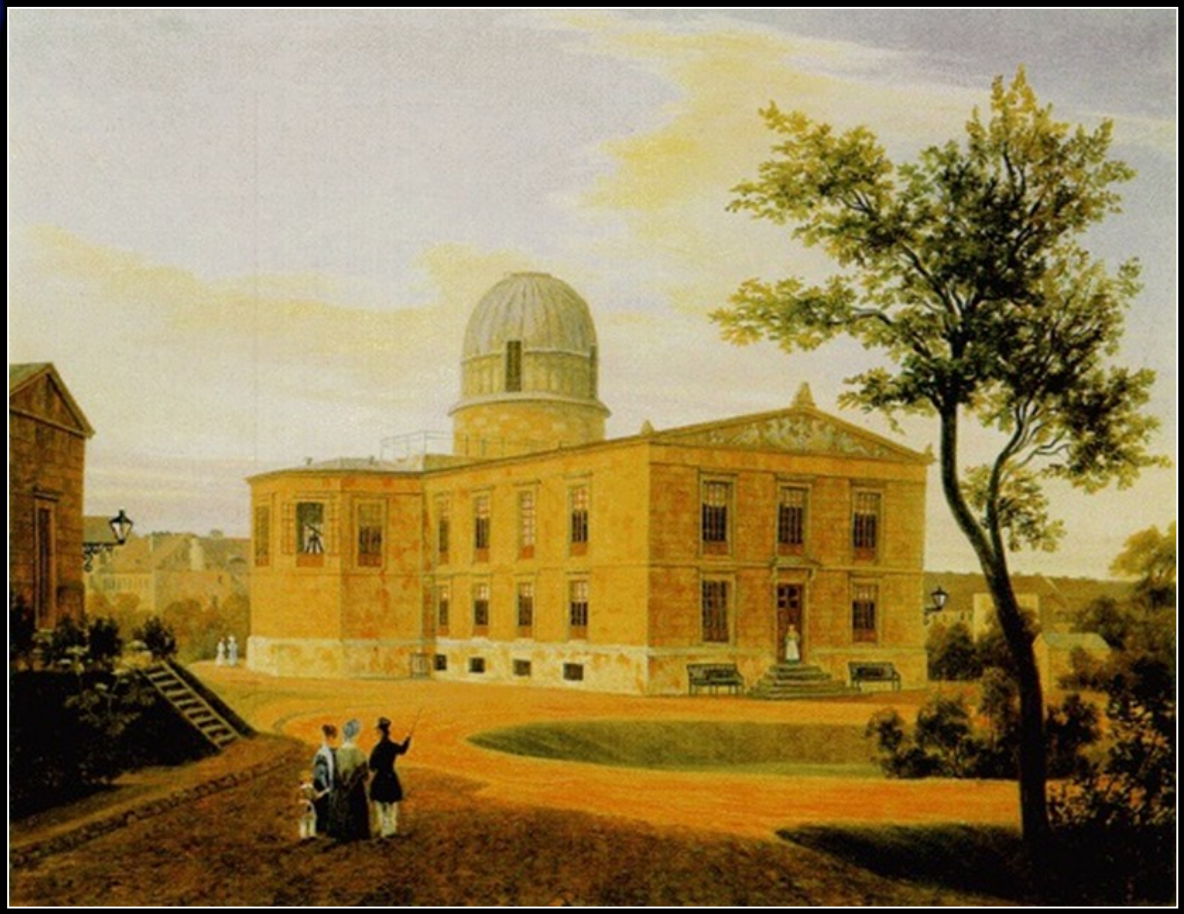
Нептун был открыт по расчетам Леверье и Адамса двумя астрономами Берлинской обсерватории: Иоганном Галле и Генрихом Луи д'Арре

«la planète dont le lieu que vous avez [calculé] existe vraiment»



Иоганн Галле

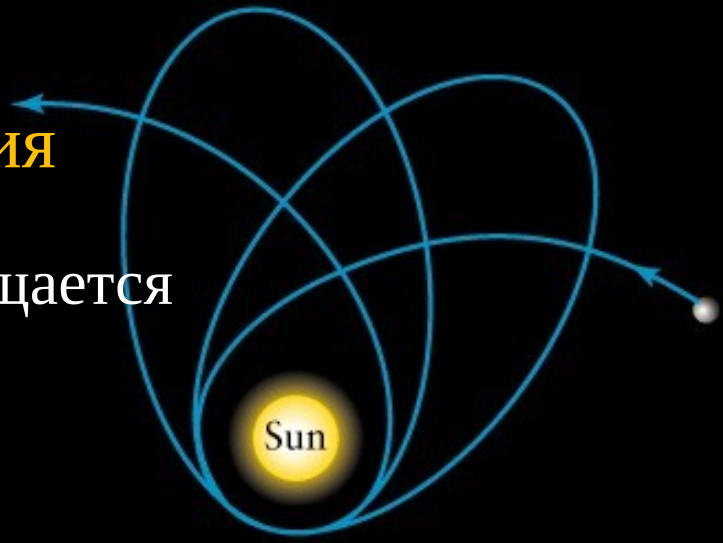
Дата открытия
23 сентября 1846 г.



Берлинская обсерватория

Однако предположение о наличии недостающей массы не всегда верно

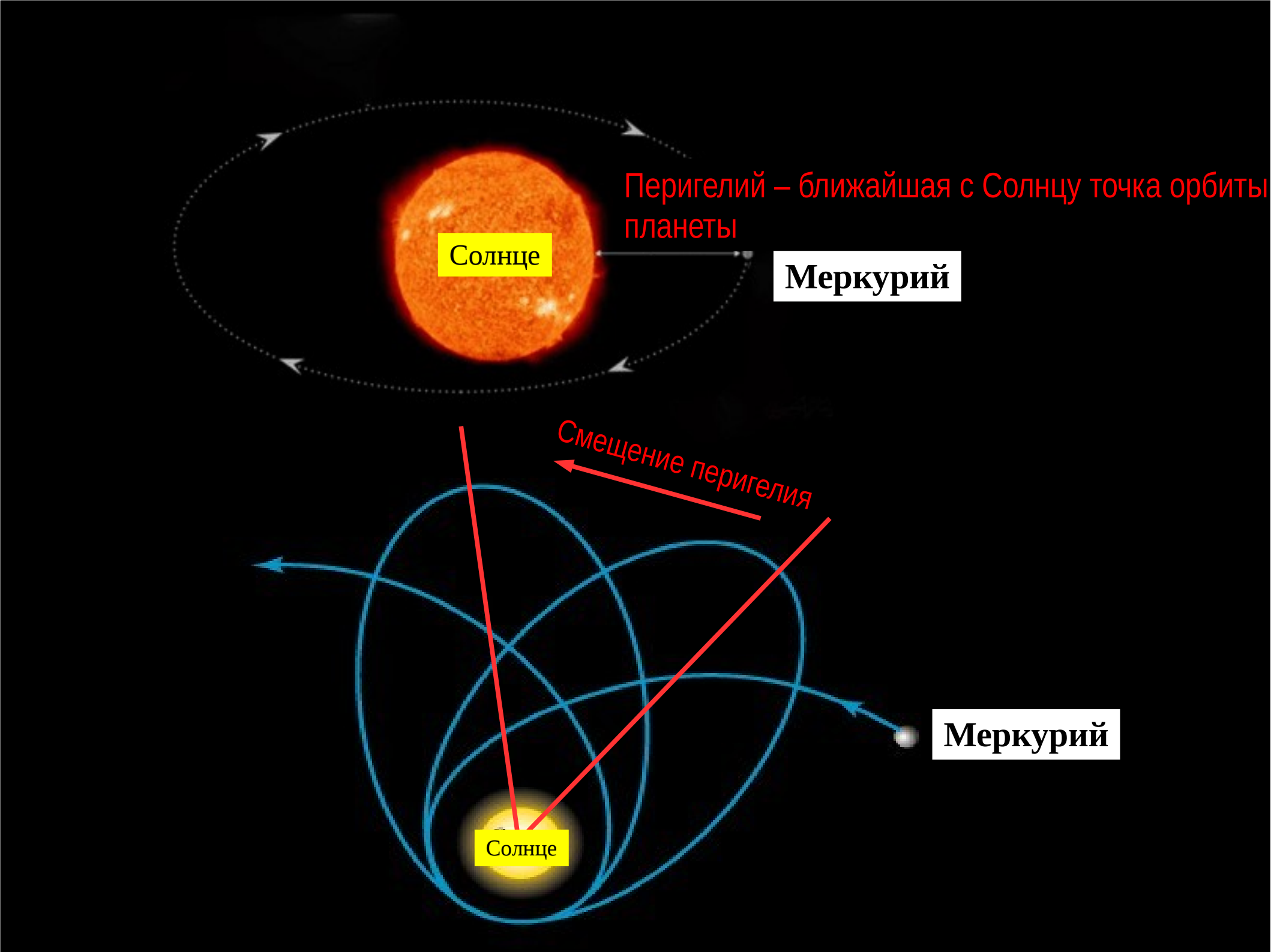
Контрпример:
прецессия (смещение) перигелия Меркурия



По наблюдениям с Земли орбита Меркурия смещается на 5600″ за 100 лет.

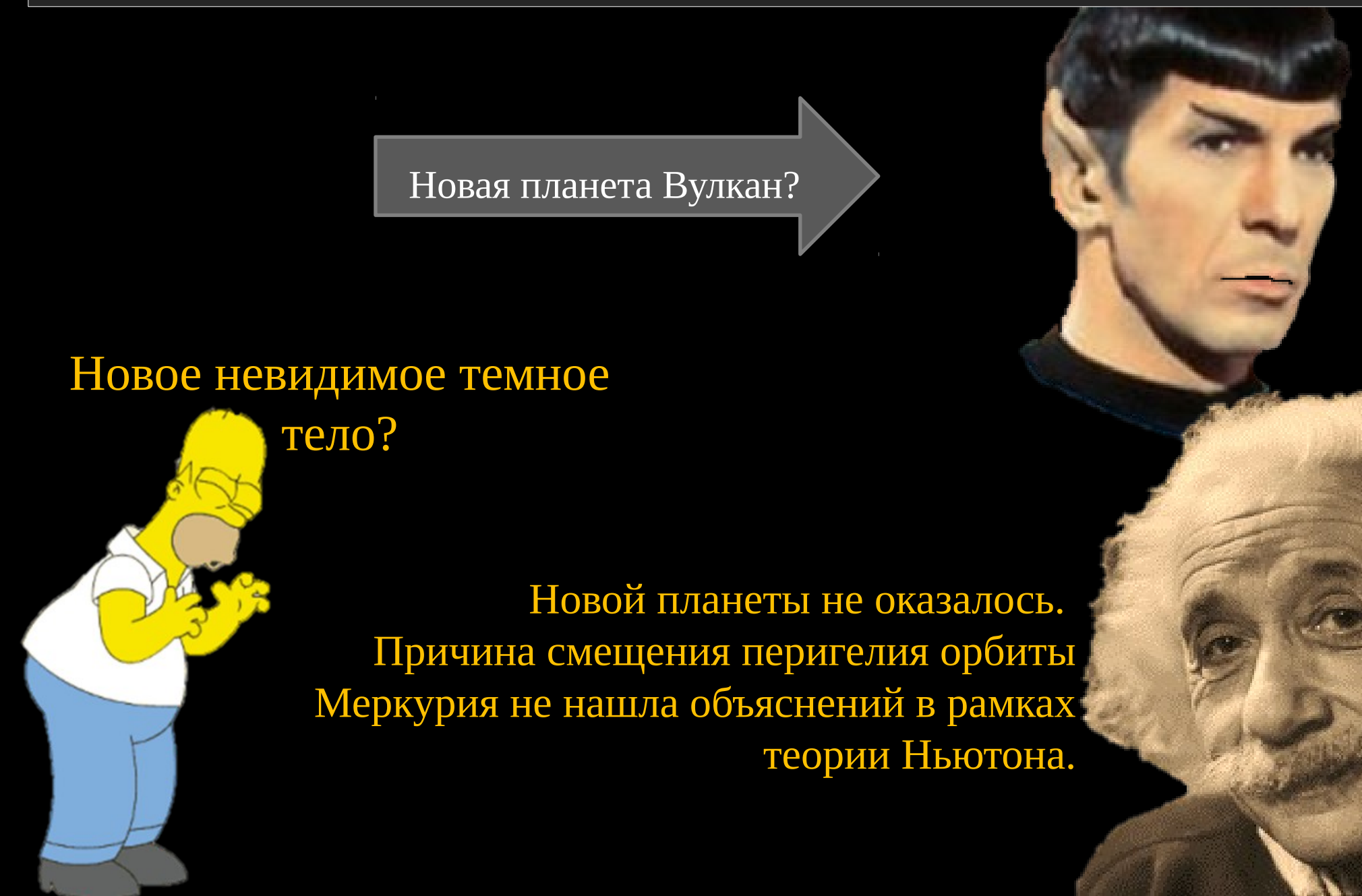
Уравнения Ньютона с учетом влияния:
- всех других планет,
- небольшого сплющивания фигуры Солнца при его вращении,
- скорости движения самого наблюдателя (Земли),
дают предсказание смещения перигелия орбиты Меркурия на **5557″ за 100 лет.**

Остается несоответствие примерно в 43″ за 100 лет (с ошибкой меньше одного процента)


Перигелий – ближайшая с Солнцу точка орбиты планеты
Солнце
Меркурий
Смещение перигелия
Меркурий
Солнце

Существовало ли вблизи Солнца новое неоткрытое небесное тело?

Новая планета Вулкан?



Новое невидимое темное тело?

Новой планеты не оказалось.
Причина смещения перигелия орбиты Меркурия не нашла объяснений в рамках теории Ньютона.

Между Солнцем и Меркурием существует новя планета Вулкан?

Как выглядело бы в 1859 г.
“прохождение Вулкана”
по диску Солнца.

Картина была бы аналогичной
прохождению Венеры по диску
Солнца в1882 г.

Historia magistra vitae est

Cicero's *De Oratore*, II, 36

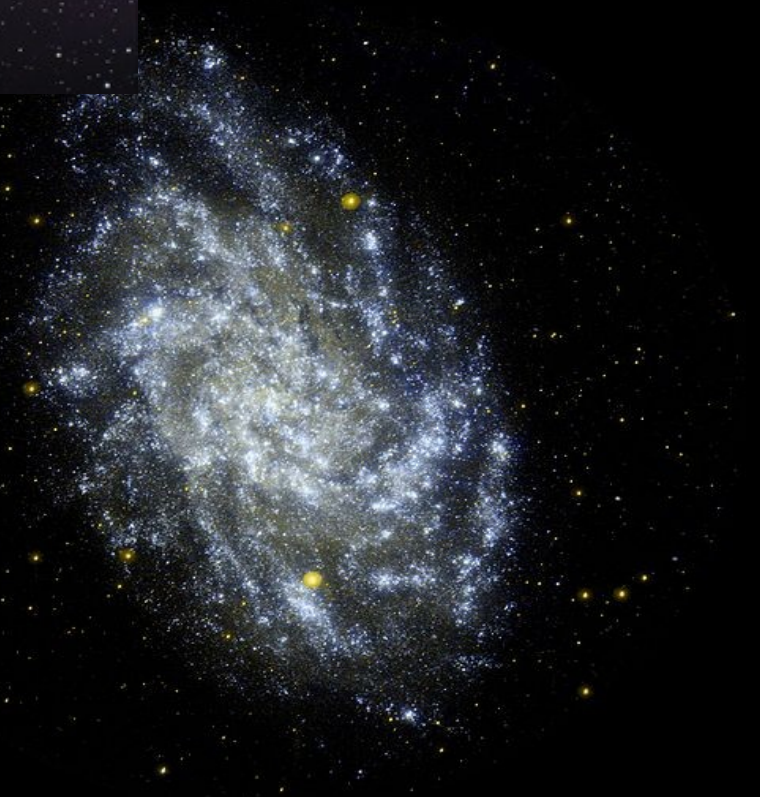
К концу 20-х годов прошлого века «белесые туманности» (M31, M33) были переведены в разряд галактик.

Астрономы, во главе с голландцем **Якобом Каптейном**, были убеждены, что во Вселенной существование малосветящейся или просто невидимой материи – исключение, а не правило.

Этот вывод был сделан по аналогии с выводом о нашем ближайшем окружении, о Солнечной системе, в которой невидимое (т.е. “темное”, ненаблюдаемое) вещество составляет примерно одну тысячную часть.

Галактика Андромеды или Туманность Андромеды (M31, NGC 224) — спиральная галактика типа Sb.

Эта ближайшая к **Млечному Пути** галактика расположена в созвездии Андромеды и удалена от нас на расстояние 772 килопарсек.

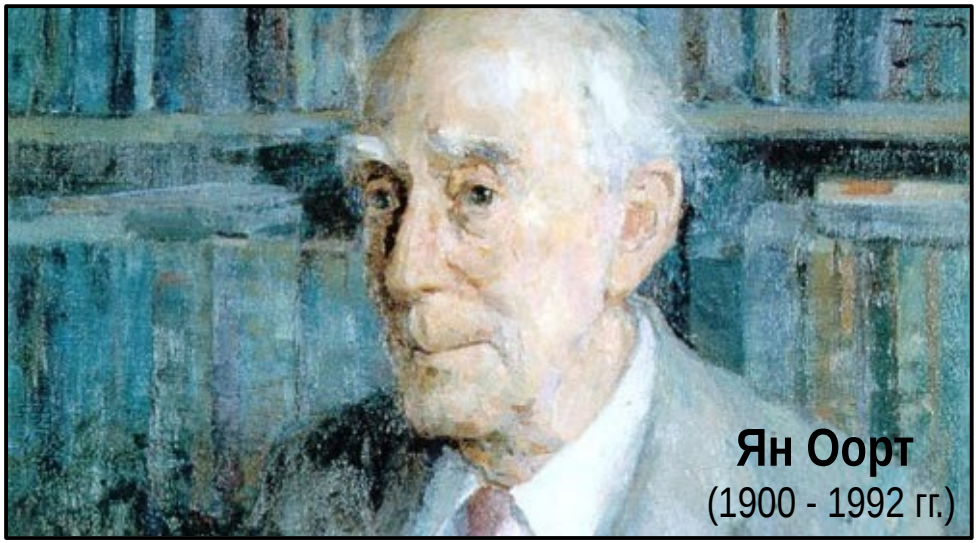


Галактика Треугольника (M33, NGC 598) — спиральная галактика типа Sc в созвездии Треугольника. Третья по величине после **Галактики Андромеды** и **Млечного Пути** галактика местной группы, в 5-10 раз меньше Млечного Пути по массе. По диаметру в 2 раза меньше Млечного Пути и в 4 раза меньше галактики Андромеды. Ее диаметр около 50 тыс. св. лет соответствует средней величине, типичной для спиральных галактик.

Расположена на расстоянии 730 килопарсек

1932 г.: “предел Оорта” – недостаток видимого вещества

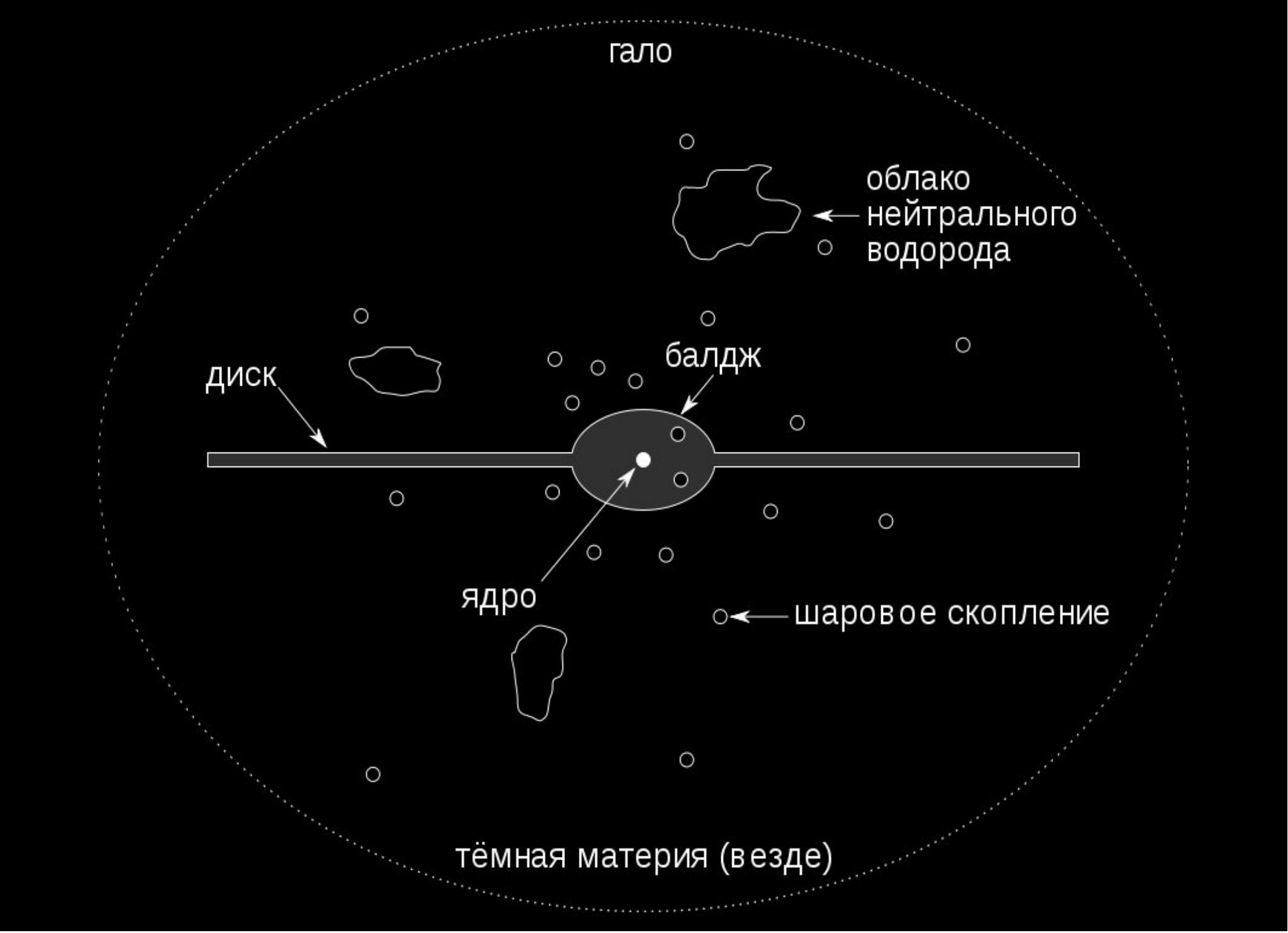
Стратегия Оорта. Выбрать (внутри вертикального цилиндра, содержащего Солнце) звезды примерно одинаковой массы и возраста. Оценить (по средним скоростям и вертикальным расстояниям) гравитационную силу, необходимую для их связи в единую систему.



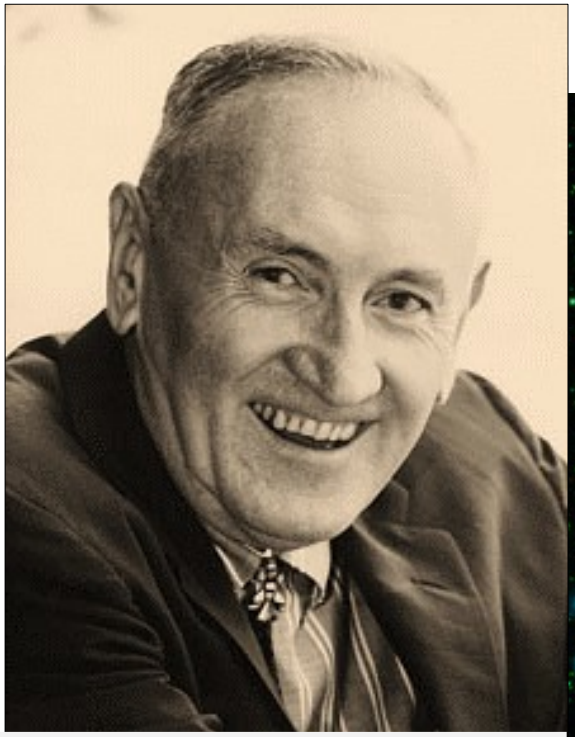
Плотность вещества, требуемая для состояния устойчивого равновесия, превышала более чем вполовину плотность видимого вещества, количество которого было посчитано по наблюдаемым звездам

Темное вещество не обязательно должно было быть экзотическим – быть может, просто тусклым (белые и черный звезды-карлики). Результат неожиданный, но не требующий пересмотра законов Ньютона или новых гипотез о “темном веществе”.

Кроме того, в расчетах Оорта не было учтено наличие у Млечного пути сферической составляющей в центре (т.н. “балдж”), что привело к сильному завышению плотности диска.


гало
облако
нейтрального
водорода
диск
балдж
ядро
шаровое скопление
тёмная материя (везде)

1937 г.: недостающая масса в скоплении галактик Волосы Вероники



Фриц Цвикки
(1898-1974)

По красному смещению галактик, измеренных Хабблом, Цвикии обратил внимание на то, что разброс скоростей для многих галактик скопления Волосы Вероники сильно отличаются, более чем на

2000 км/с

Оценка скорости вращения эквивалентна оценке массы галактики

NGC 4889

NGC 4874

Но для поддержания гравитационной устойчивости всего скопления требовалось всего

80 км/с

Идеи Цвикки не были восприняты всерьез по нескольким причинам:

1. Недоставало кандидатов для источников обычного барионного вещества

Сегодня известно, что **яркие звезды составляют малую долю массы скопления галактик**, а большая часть барионов обнаруживается в состоянии горячей плазмы, расположенной в пространстве между скоплениями и видимой в рентгеновских лучах. Количество таких барионов тем обильнее (превышая звездную плотность до величины, в 15 раз большей), чем населеннее скопление.

Во времена Цвикки еще **не умели наблюдать рентгеновское излучение горячих газов и излучение в инфракрасном диапазоне от пыли.**

Еще не пришло время даже представить, что материя может быть небарионной.

Цитируемость работ Цвикки

Year	No. citations
1955-59	2
1960-64	6
1965-69	5
1970-74	2
1975-89	63
1990-99	71

2. Статья Цвикки была написана по-немецки

2. Цвикки обладал скандальной репутацией!

Скандальная репутация Цвикки

Цвикки называл своих коллег-ученых «сферическими идиотами» “*spherical bastards*”, потому что, по его мнению, они были таковыми со всех сторон, как ни взгляни,

а во Введении к своей самолично изданной работе “*Catalogue of compact galaxies*” в 1971 г. он так отзывался о своих коллегах:

“...бездельники, подхалимы и просто воры ... [которые] врачуют данные собственных наблюдений, чтобы скрыть свои недостатки ... [и публиковать] бесполезный мусор в астрономических журналах”.

Полученные уроки

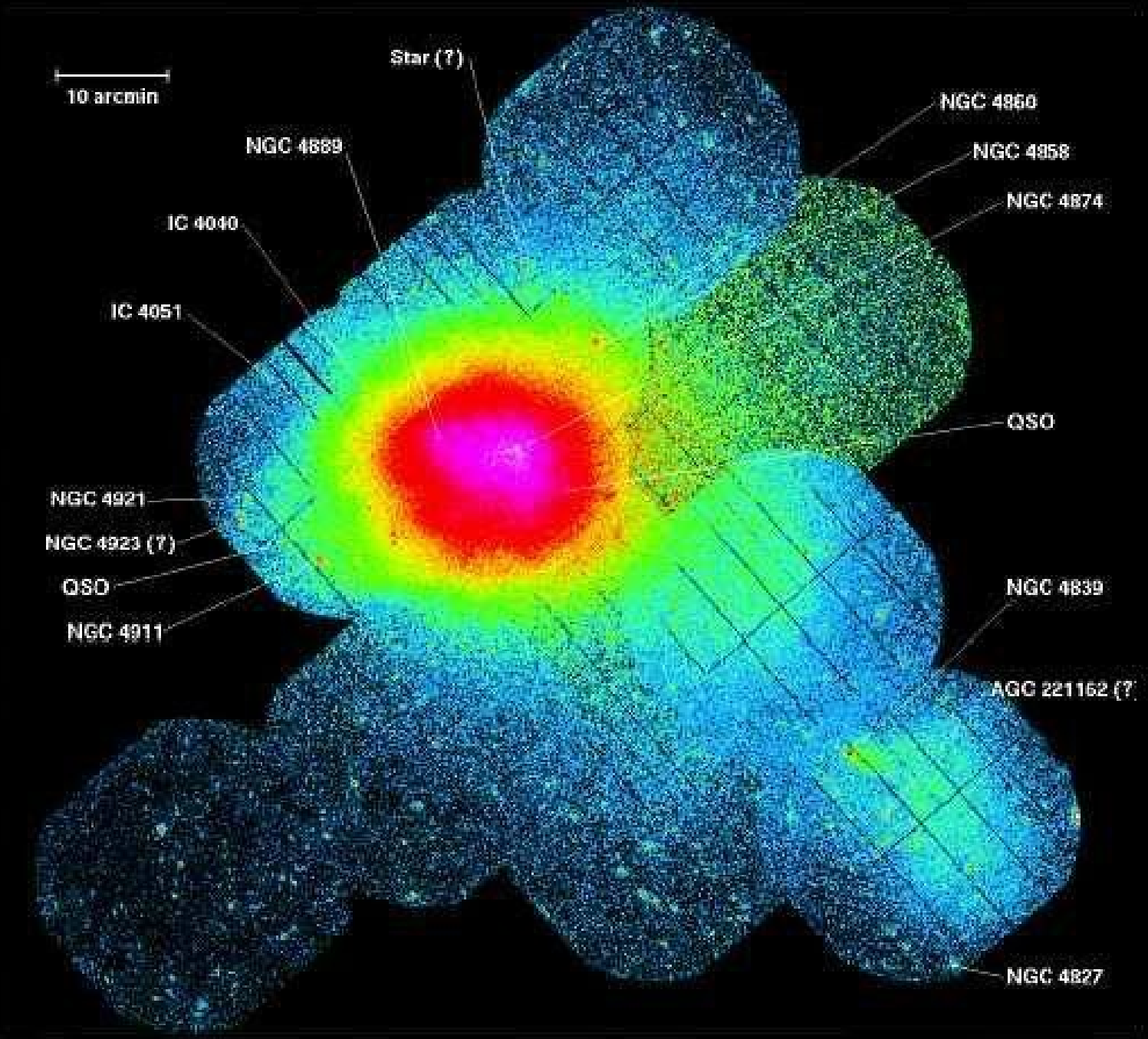
Со времени работ Оорта и Цвикки, благодаря наблюдениям, ученые изменили свое представление о составе скоплений галактик.

- Светящиеся звезды составляют очень небольшую долю от общей массы скопления галактик.

- Существует “обычное” (барионное, т.е. состоящее из протонов, нейтронов и электронов) горячее межгалактическое вещество (intracluster medium), которое можно наблюдать в рентгеновском диапазоне.

- Богатые скопления обычно обладают большими массами, сосредоточенными в горячем газе, а не в звездах.Так, в одном из самых больших скоплений галактик (Волосы Вероники) состав вещества такой: **85% темная материя**, **14% горячее межгалактическое вещество** и всего **1% звезды**.

Скопление галактик Волосы Вероники в рентгеновских лучах



Чем выше температура межгалактического газа, тем больше должна быть общая масса скопления галактик.

Наблюдаемая высокая температура свидетельствует в пользу наличия дополнительной, “невидимой” массы.

Какие наблюдательные данные указали на существование темной материи?

- Несоответствие наблюдений галактик и их теоретических моделей (моделей, расчитанных на основе теории гравитации Ньютона).

  Либо теоретическая модель галактик правильна, но не был учтен какой-то “дополнительный ингредиент”, либо неверна сама теоретическая модель.

- Данные по анизотропии реликтового излучения.

Скорость вращения галактики (км\с)

Наблюдаемая скорость вращения

Теоретически вычисленная (по видимому веществу) скорость вращения

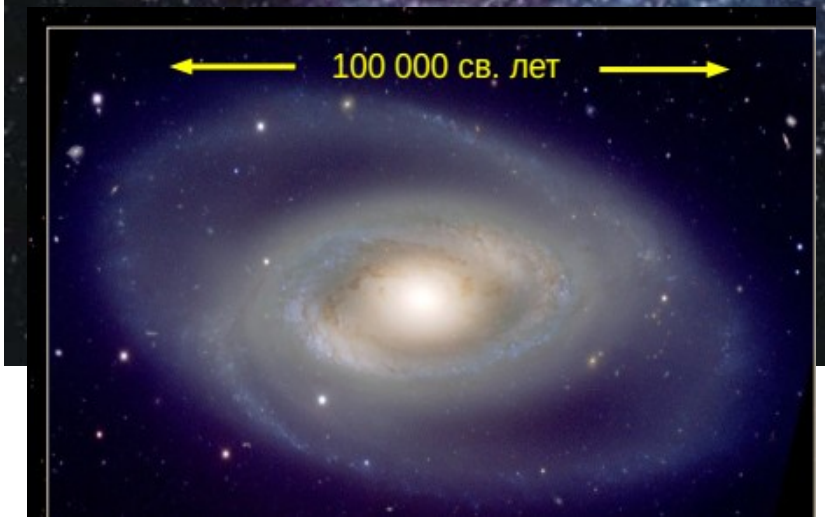
200

100

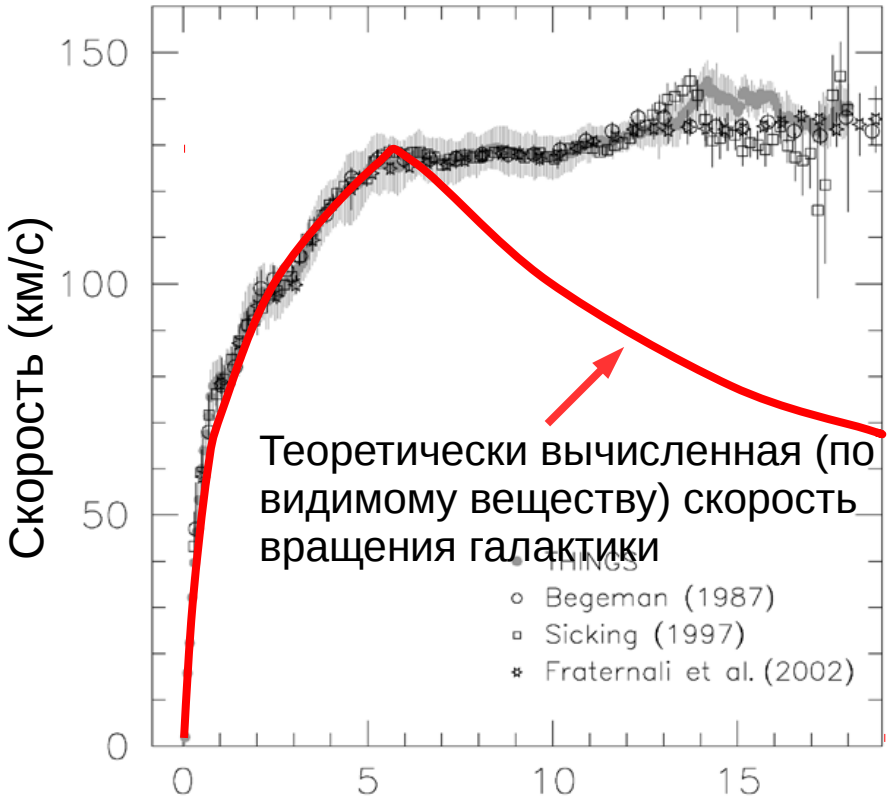
50000

100000

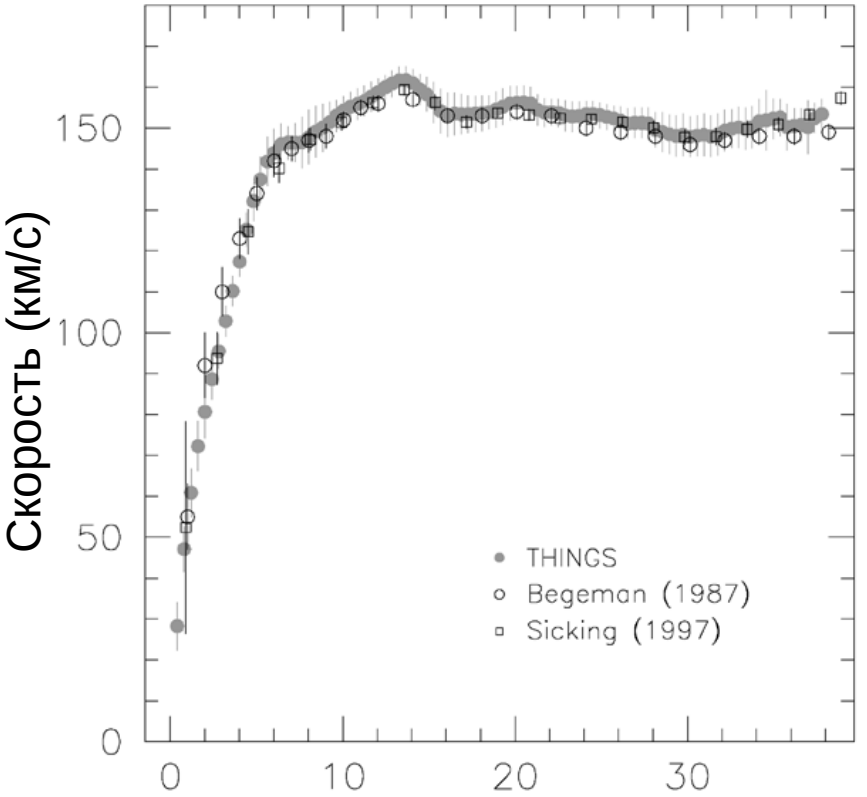
Расстояние от центра галактики (св. годы)



NGC 2403

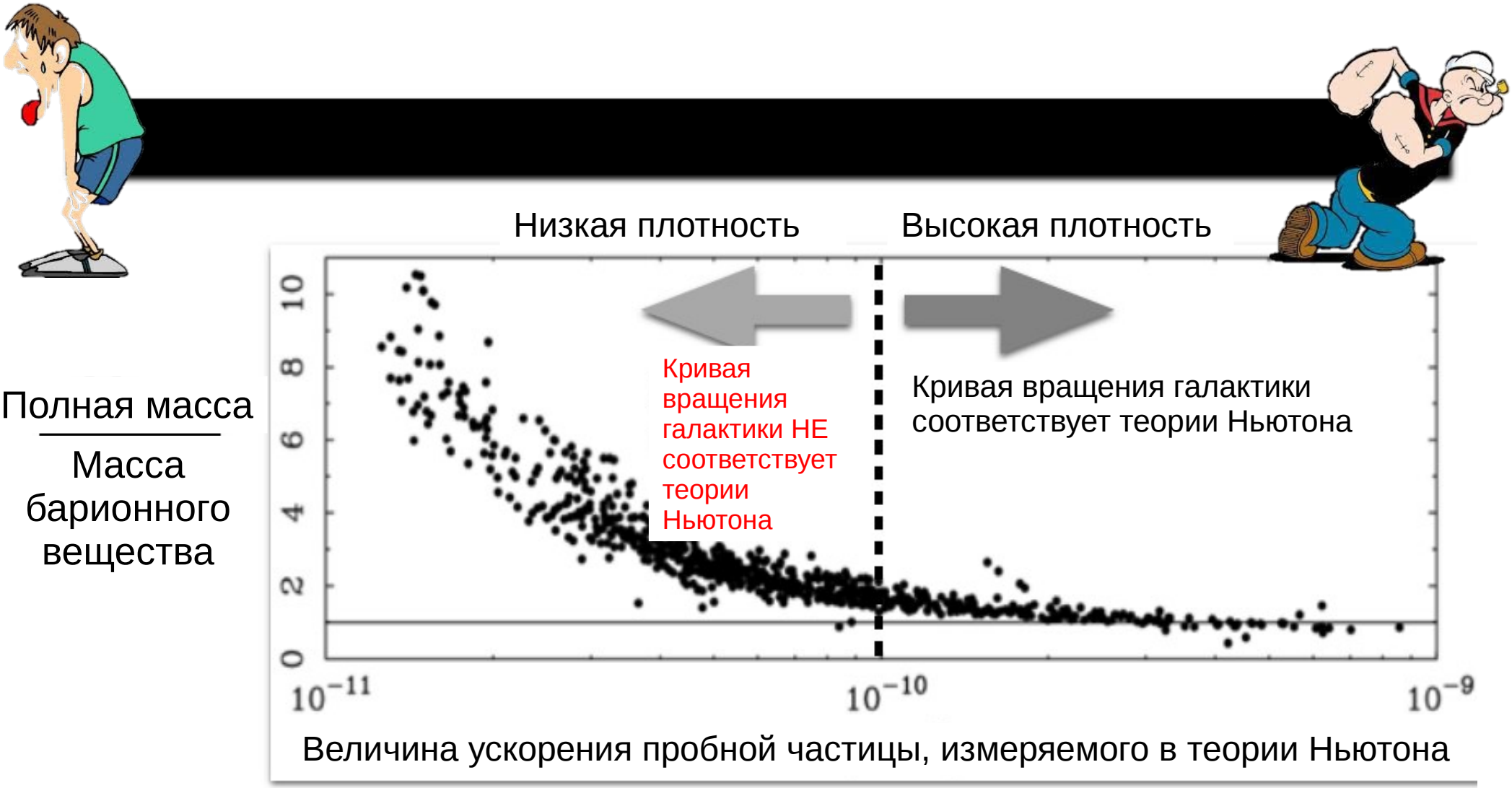


NGC 3198

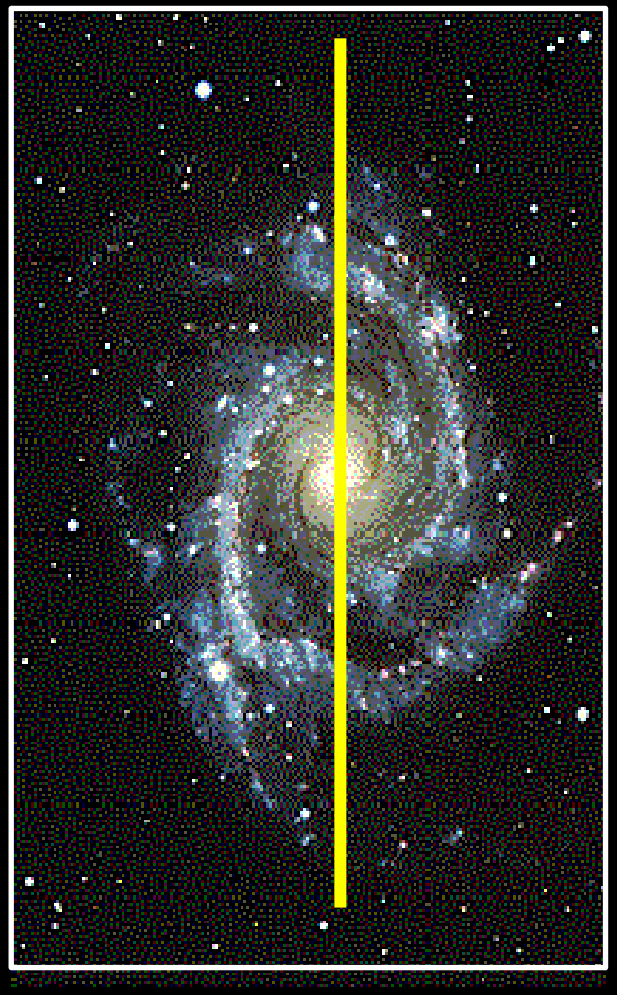


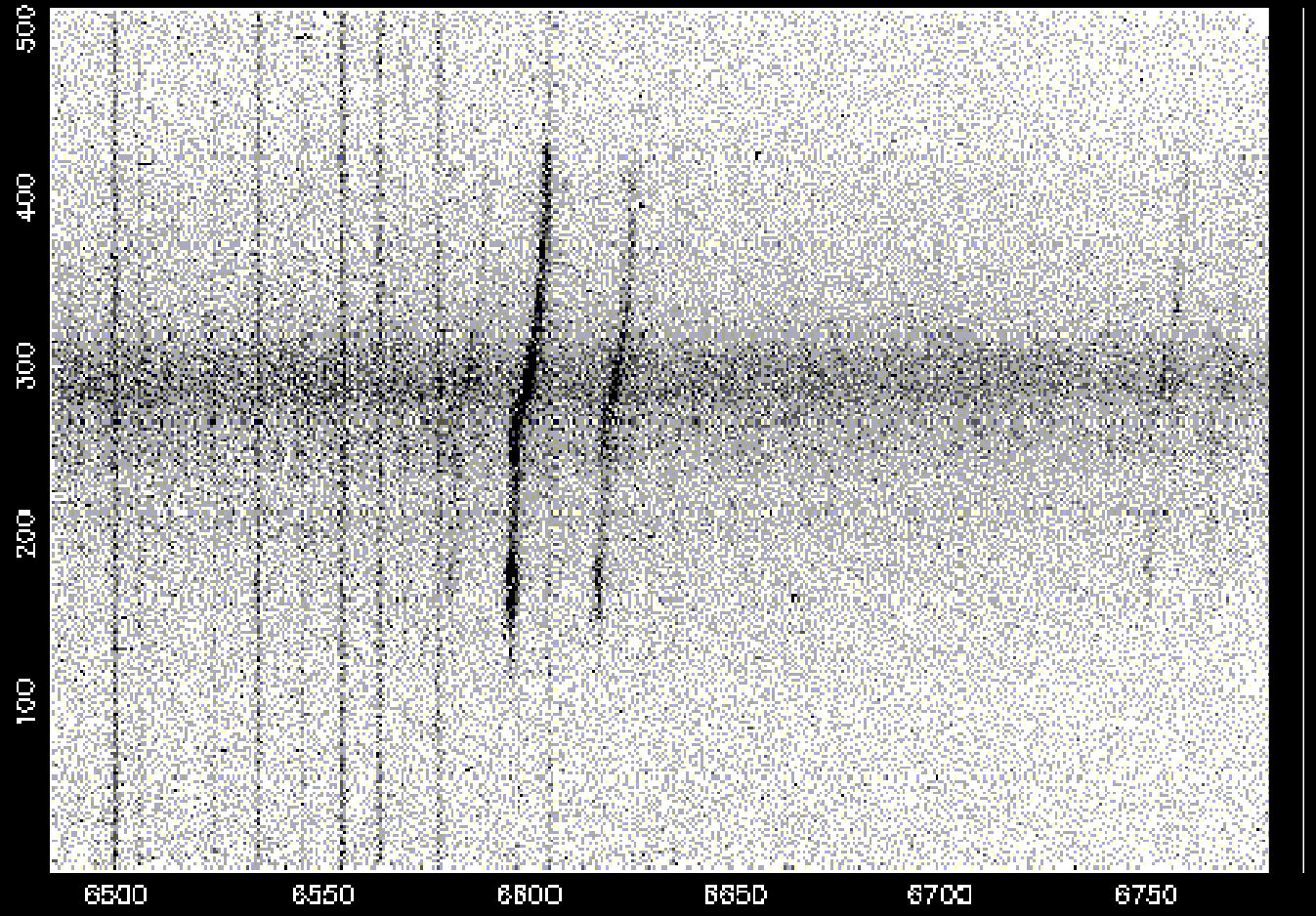
Наблюдаемые скорости вращения галактик NGC2403 и NGC3198 (км\с)

Режимы сильного и слабого гравитационного поля



Вращение спиральных галактик

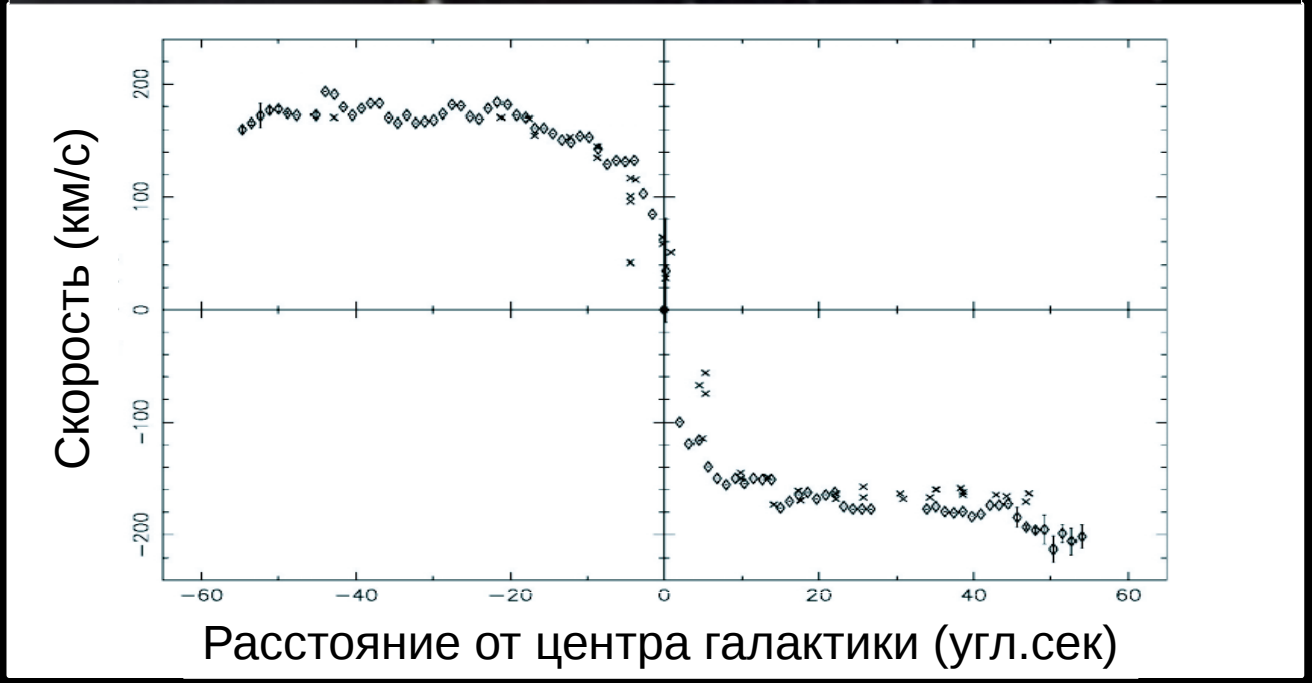




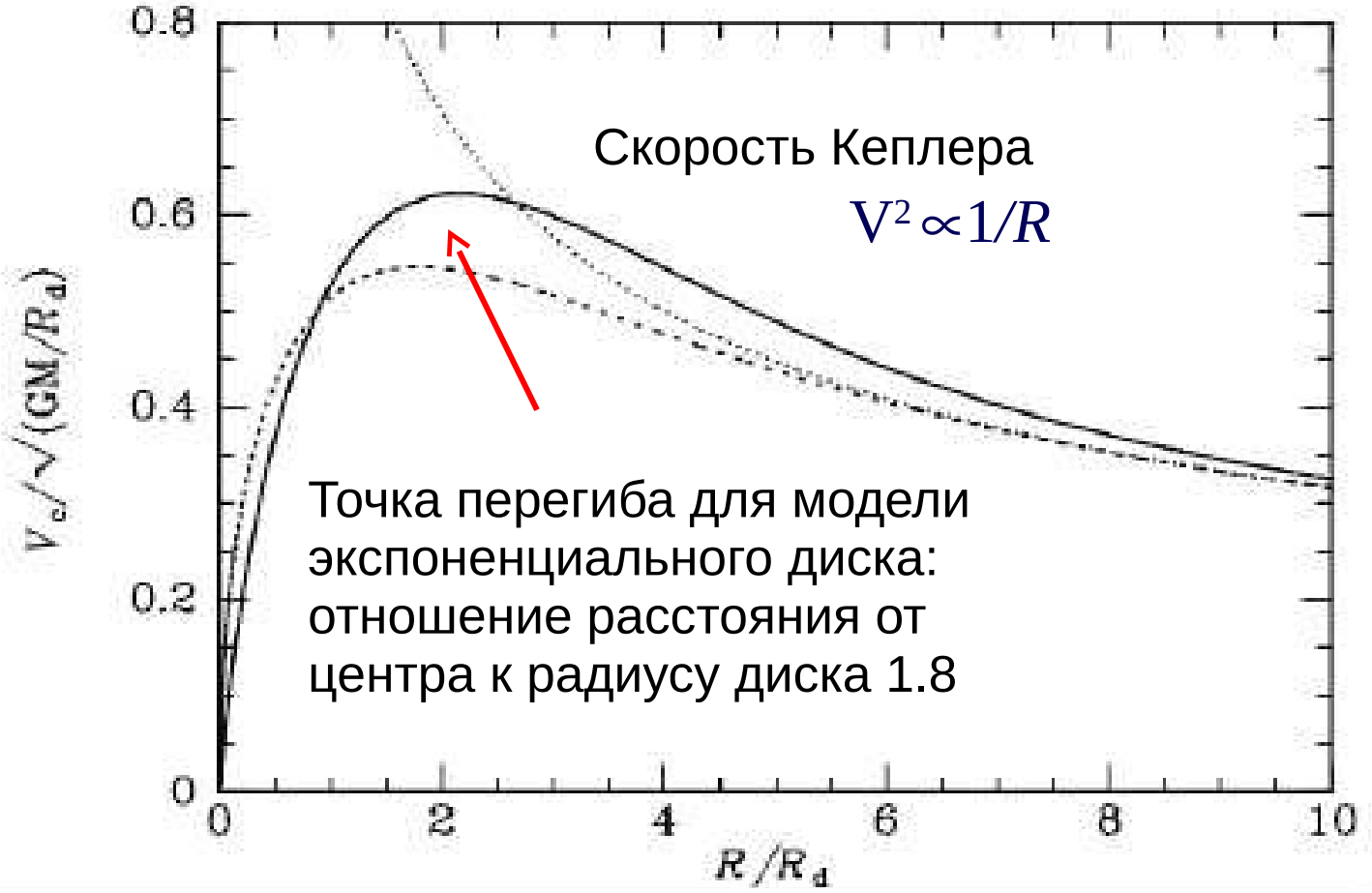
Наклон линий спектра излучения указывает на вращение галактики. По скорости вращения можно оценить массу галактики.

Пример кривой вращения галактики

Галактика NGC 5426 (часть взаимодействующей системы Arp 271)



Ожидаемый вид кривой вращения для разных моделей галактики (разный закон изменения массы с радиусом) и при постоянном отношении массы к светимости



Скорость вращения V_c (нормированная на радиус диска R_d) для экспоненциального диска (непрерывная линия), для экспоненциальной сферы (штрих-пунктирная линия) и для точечной массы (точки). Общая масса везде одинаковая.

Использование излучения на длине волны 21 см (линия излучения нейтрального водорода HI)

Более половины массы межзвездного вещества составляет нейтральный водород. Его можно исследовать только по излучению в линии 21 см.

Гендрик ван де Хюлст и
Ян Оорт

И.С. Шкловский

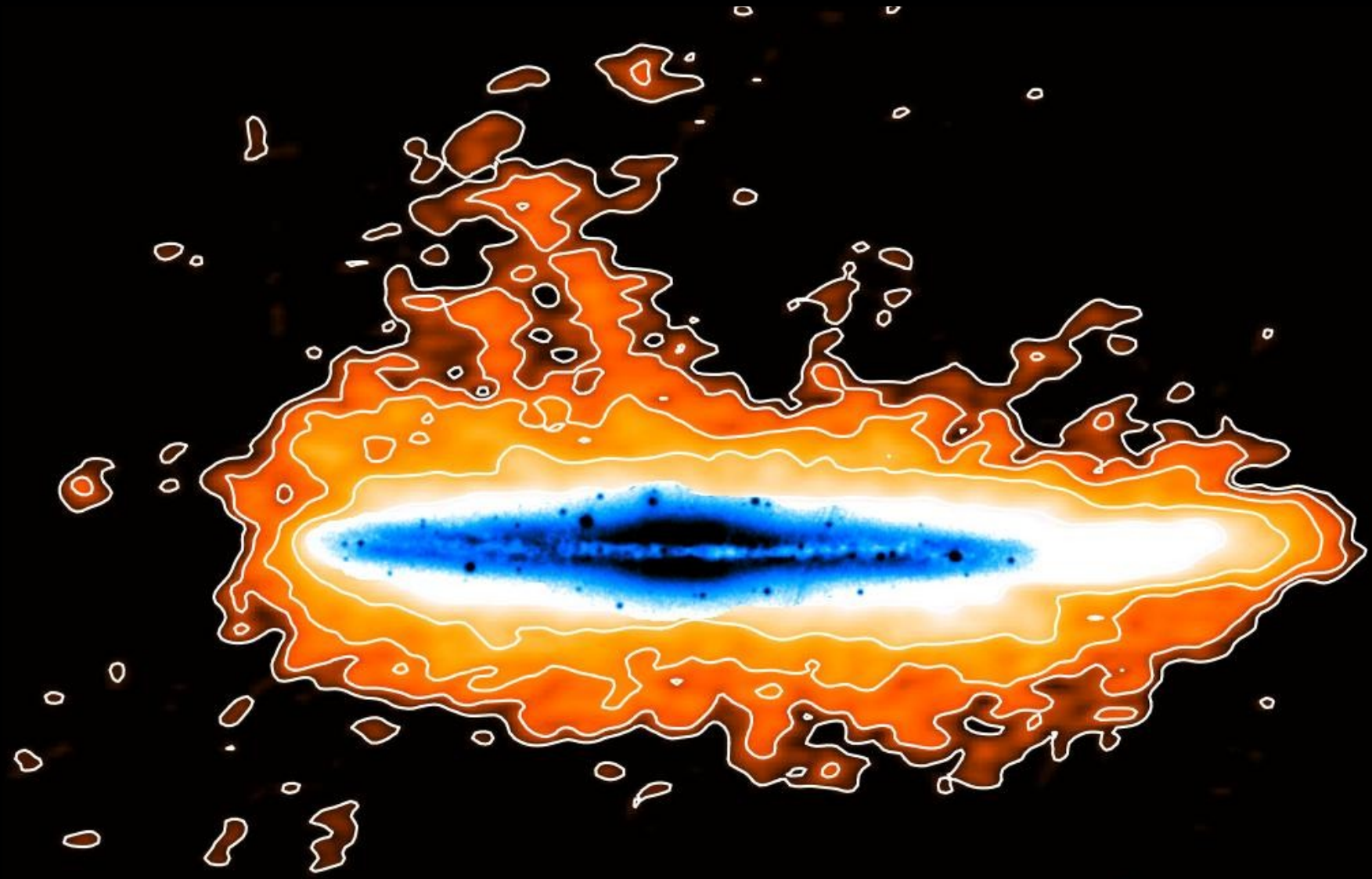
Использование излучения на длине волны 21 см (линия излучения нейтрального водорода HI)

Спиральные галактики окружены гало из нейтрального водорода, и, привлекая механизм Доплера к монохроматическому излучению линии 21 см, оказалось возможным построить кривые вращения значительно расширенные за пределы, доступные оптическим инструментам.

Новый метод измерения общей массы галактики, вместо экстраполяции в предположении постоянства с радиусом отношения массы к светимости.

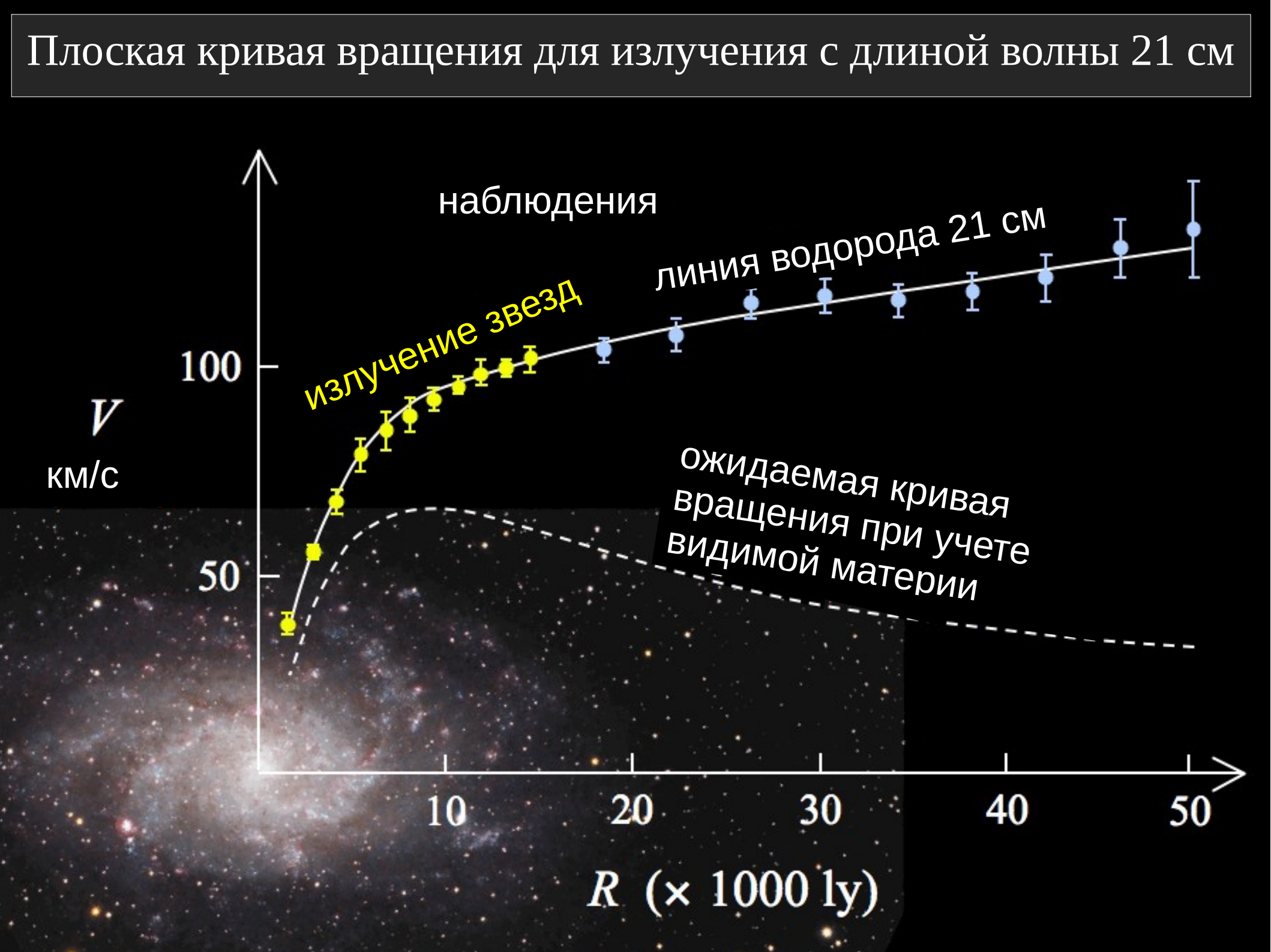
Westerbork Radio Telescope

Вид спиральной галактики на длине волны 21 см

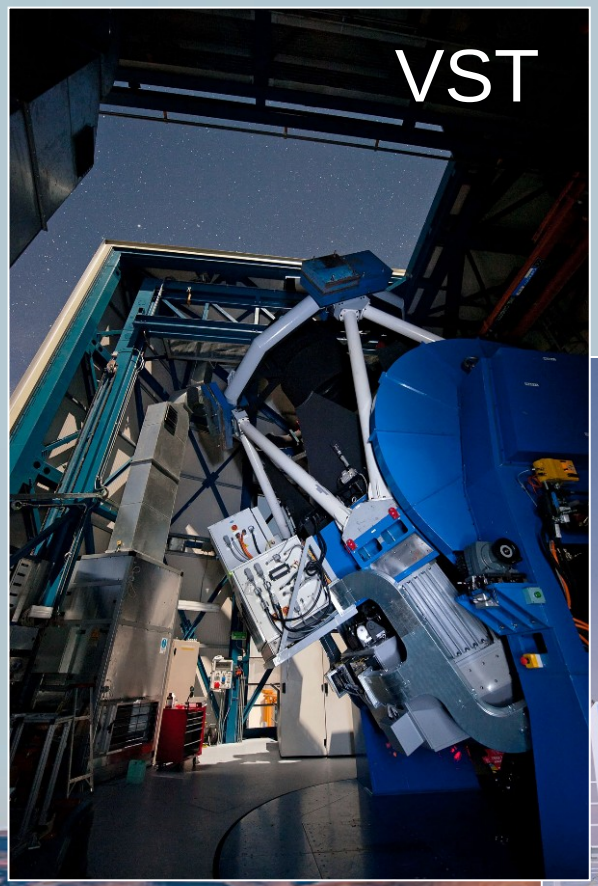


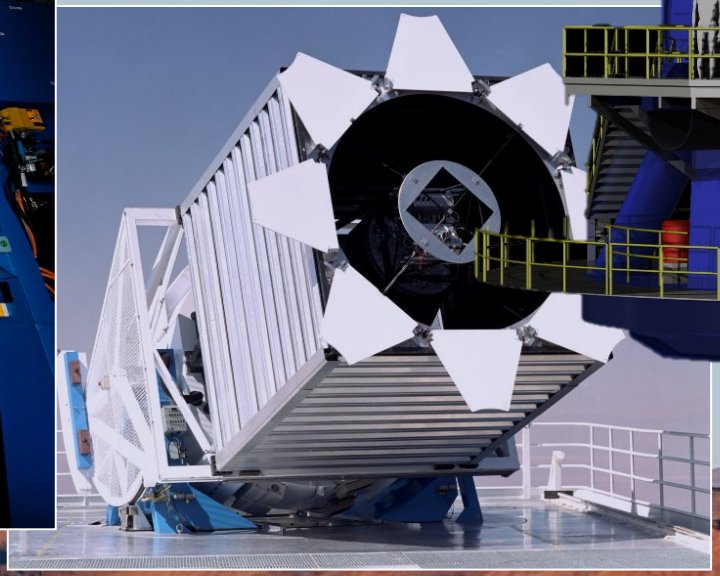
Гало нейтрального водорода спиральной галактики NGC 891

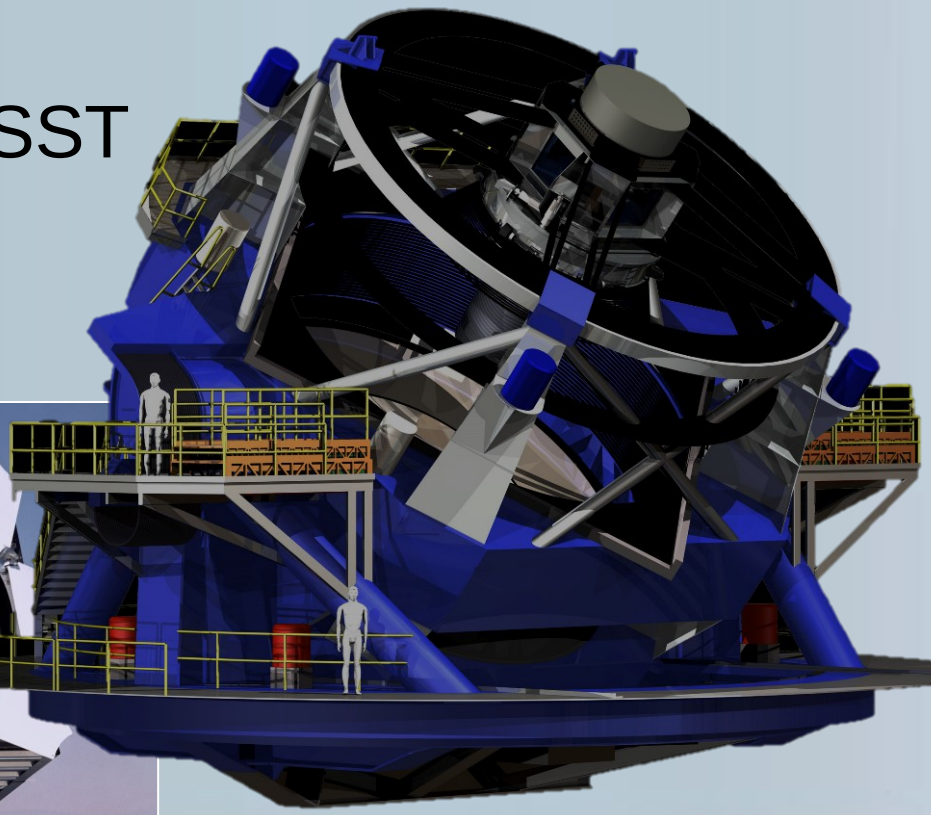
Плоская кривая вращения для излучения с длиной волны 21 см



Современные телескопы







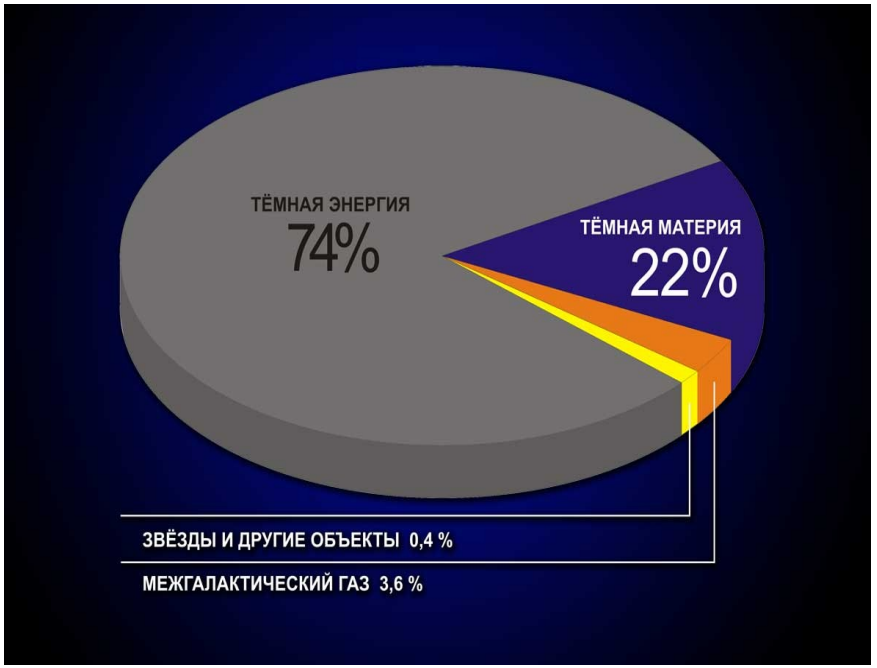
Космический телескоп “Евклид”

Наземный радиотелескоп

Темная материя до сих пор не обнаружена физическими методами, хотя астрономическими методами ее существование можно считать доказанным

Если речь идет о невидимом веществе, то вероятные кандидаты: **нейтрино**, **вимп-частицы** (WIMP), **мачо-объекты** (MACHO) и **аксионы.**

Если речь идет о новой теории, то основные претенденты на модификацию гравитации – это **MOND** и **f(R)-гравитация**.



Кандидаты в темную материю

- **Нейтрино** – нейтральная частица, участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях. Введена В. Паули для того, чтобы при бета-распаде ядра не был нарушен закон сохранения энергии.
- **Вимп-частицы** – WIMP – обширная категория слабо взаимодействующих массивных частиц; например: (1) *нейтралино* (массивные суперпартнеры нейтрино, предсказываемые теориями суперсимметрии элементарных частиц), (2) *частицы Калуцы-Клейна* (частицы, размеры которых сопоставимы с размерами компактных дополнительных пространственных измерений, предсказываемых теориями суперструн) и др. Такие частицы можно искать на земных ускорителях, на Большом адронном коллайдере (LHC), на Большом подземном ксеноновом детекторе (LUX).
- **Мачо-объекты** – MACHO – массивные астрофизические компактные объекты в гало галактик. Они состоят из *обычного вещества*, просто они очень тусклые. Напрмер, черные дыры, нейтронные звезды, коричневые карлики, небольшие планетные массы вне системы и др.. Поиск таких объектов ведется в нашей Галактике по эффекту микролинзирования.
- **Аксионы** – гипотетические нейтральные маломассивные элементарные частицы. Частицы можно искать в наземных экспериментах, например, с помощью микроволнового резонатора, сверхпроводящего магнита (эксперимент ADMX – Axion Dark Matter eXperiment; аксион теоретически должен превращаться в фотоны, на частоту которых настраивается резонатор).

Типы темной материи

1. **холодная темная материя** (Cold Dark Matter, CDM)

2. **теплая темная материя** (Warm Dark Matter, WDM)

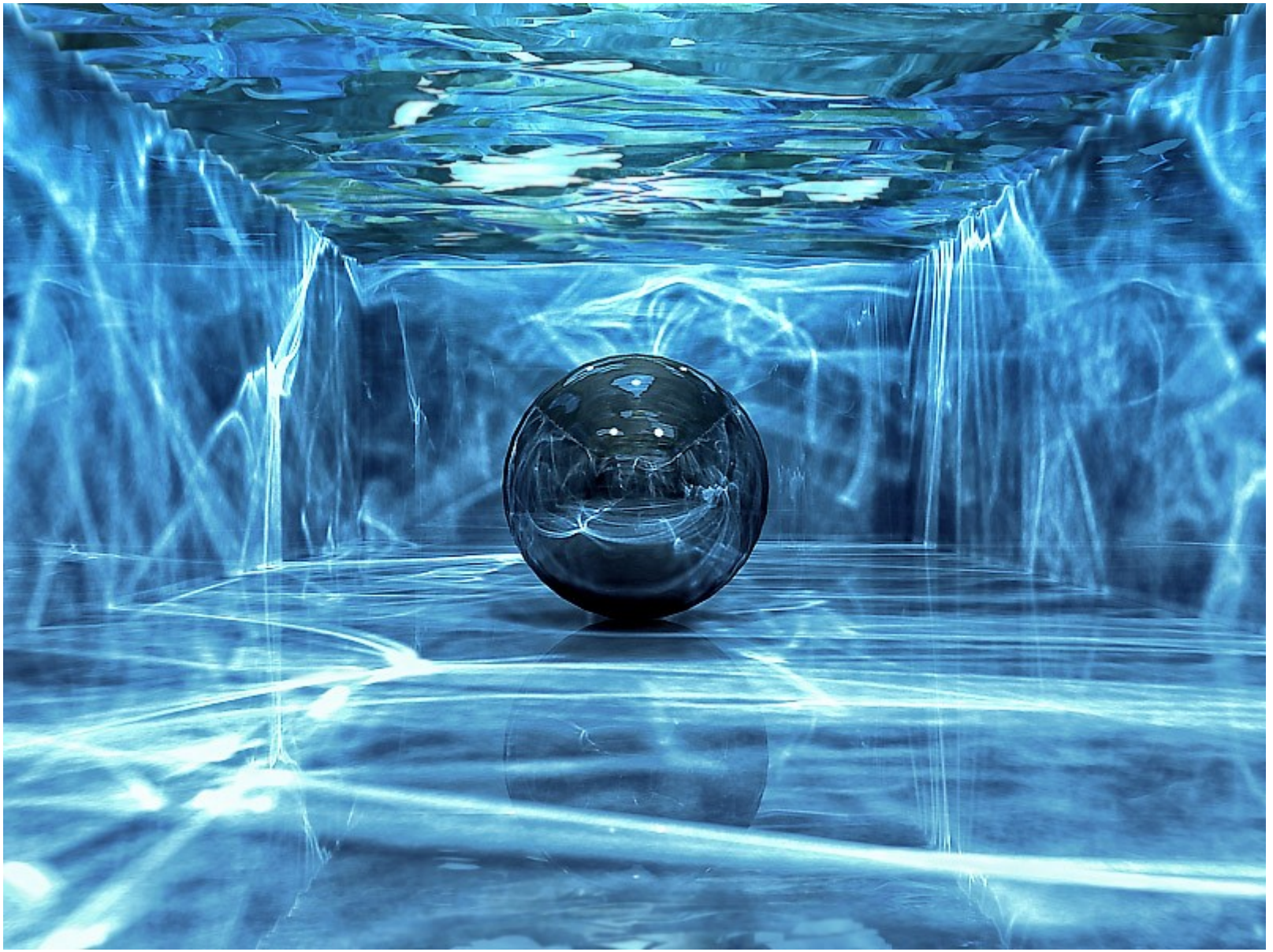
3. **горячая темная материя** (Hot Dark Matter, HDM)

Частицы **холодной темной материи** отщепляются от первичной плазмы будучи уже нерелятивистскими (т.е. их скорости много меньше скорости света), а частицы **теплой темной материи** и **горячей темной материи** отщепляются еще релятивистскими.

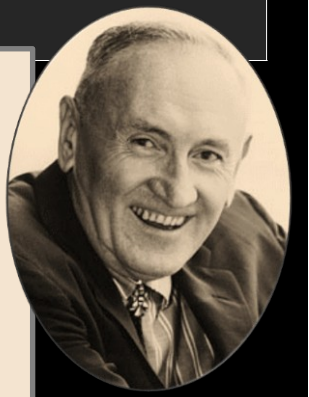
Различие между **теплой темной материей** и **горячей темной материей** определяется в момент перехода от радиационно-доминированной стадии к стадии доминирования пыли.

Если на стадии перехода частицы темной материи нерелятивистские, то такая темная материя называется **теплой темной материей**. Если же они остаются релятивистскими, то такая темная материя называется **горячей темной материей**.

Элементы теории гравитационного линзирования

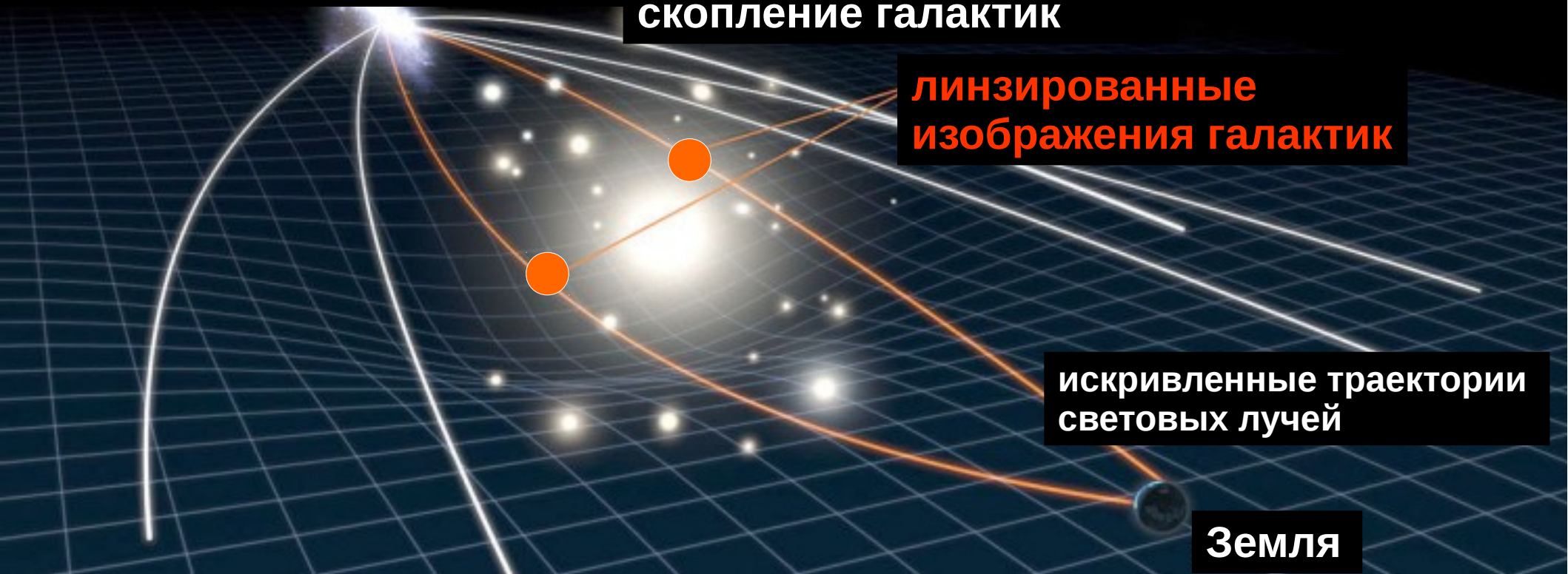


Цвикки об использовании метода гравитационного линзирования для определения масс “туманностей”

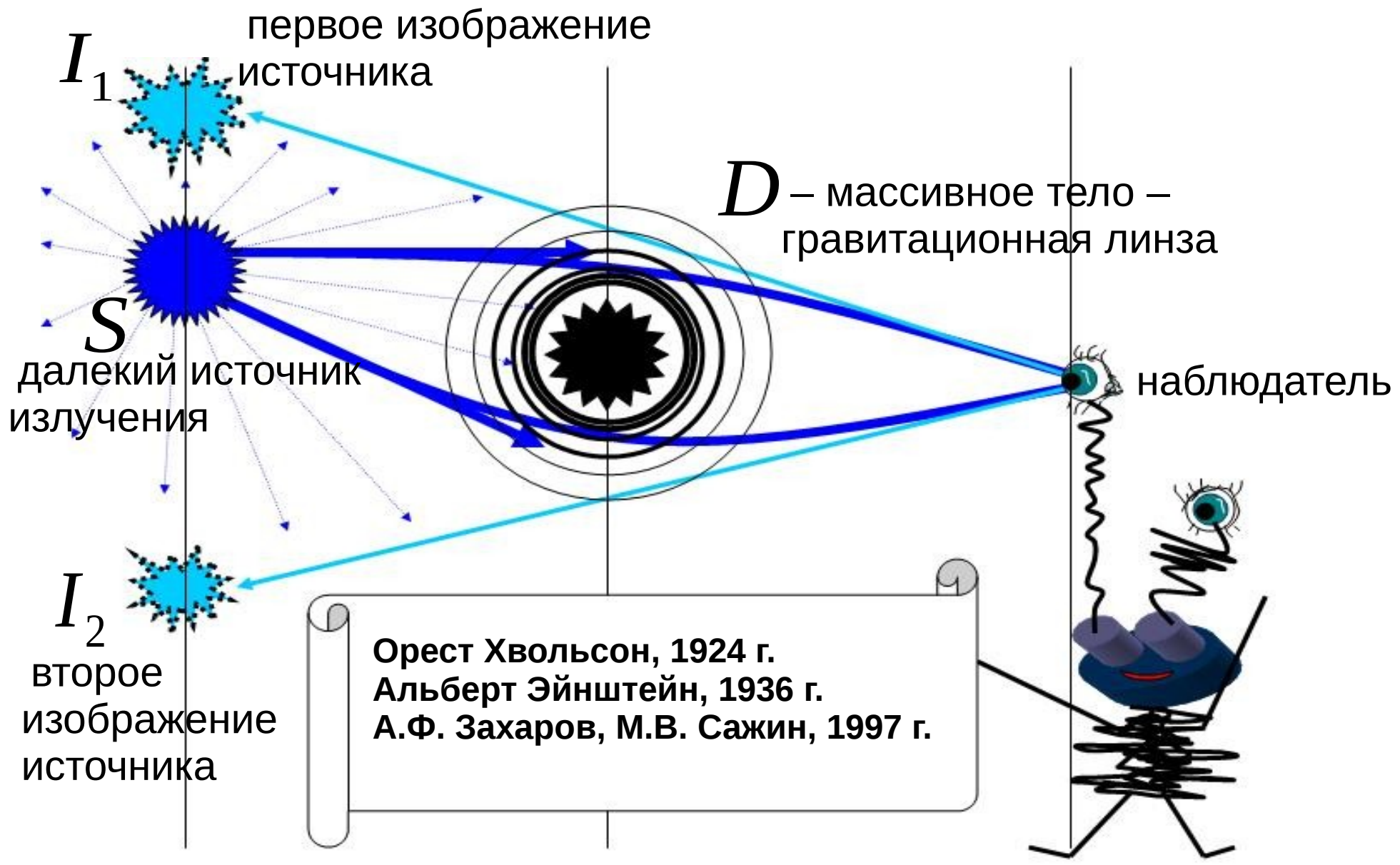


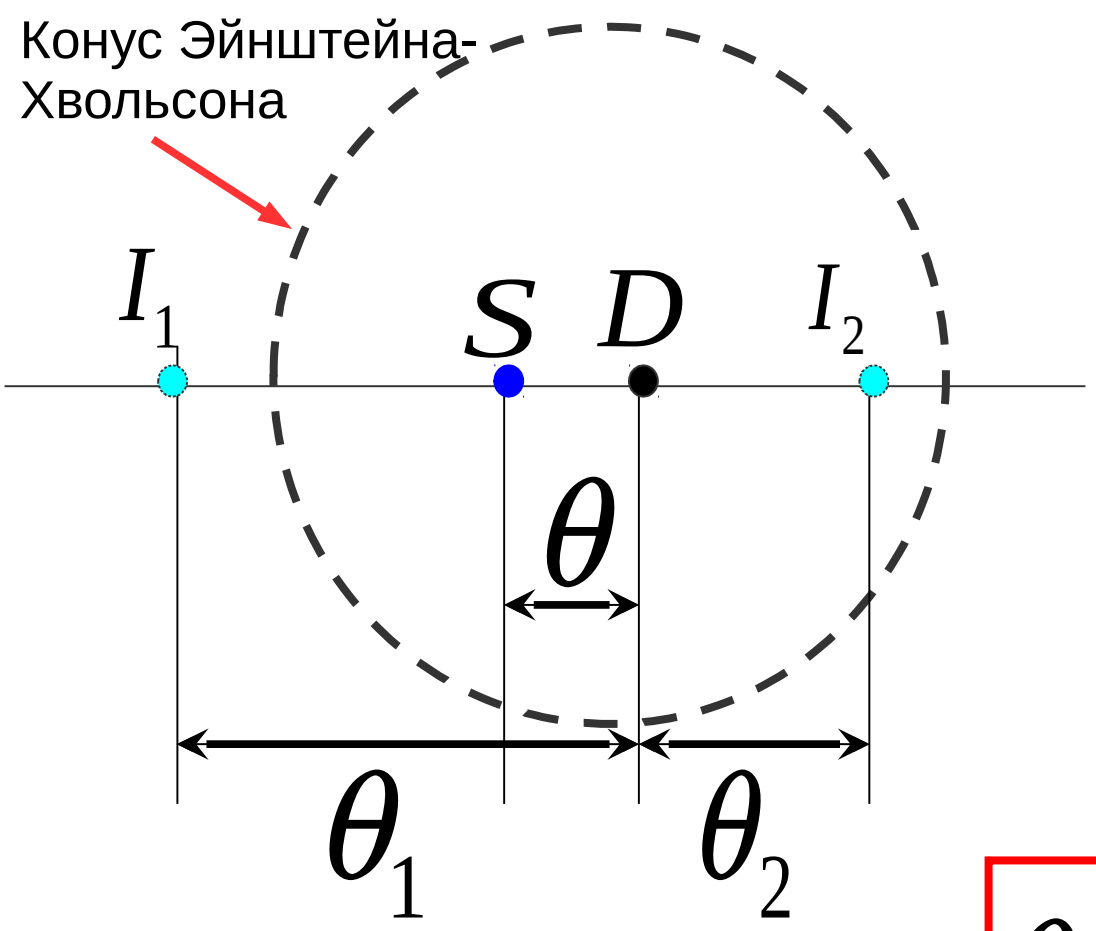
IV. NEBULAE AS GRAVITATIONAL LENSES

As I have shown previously,[6] the probability of the overlapping of images of nebulae is considerable. The gravitational fields of a number of “foreground” nebulae may therefore be expected to deflect the light coming to us from certain background nebulae. The observation of such gravitational lens effects promises to furnish us with the simplest and most accurate determination of nebular masses.



Поиск темной материи с помощью эффекта гравитационного линзирования



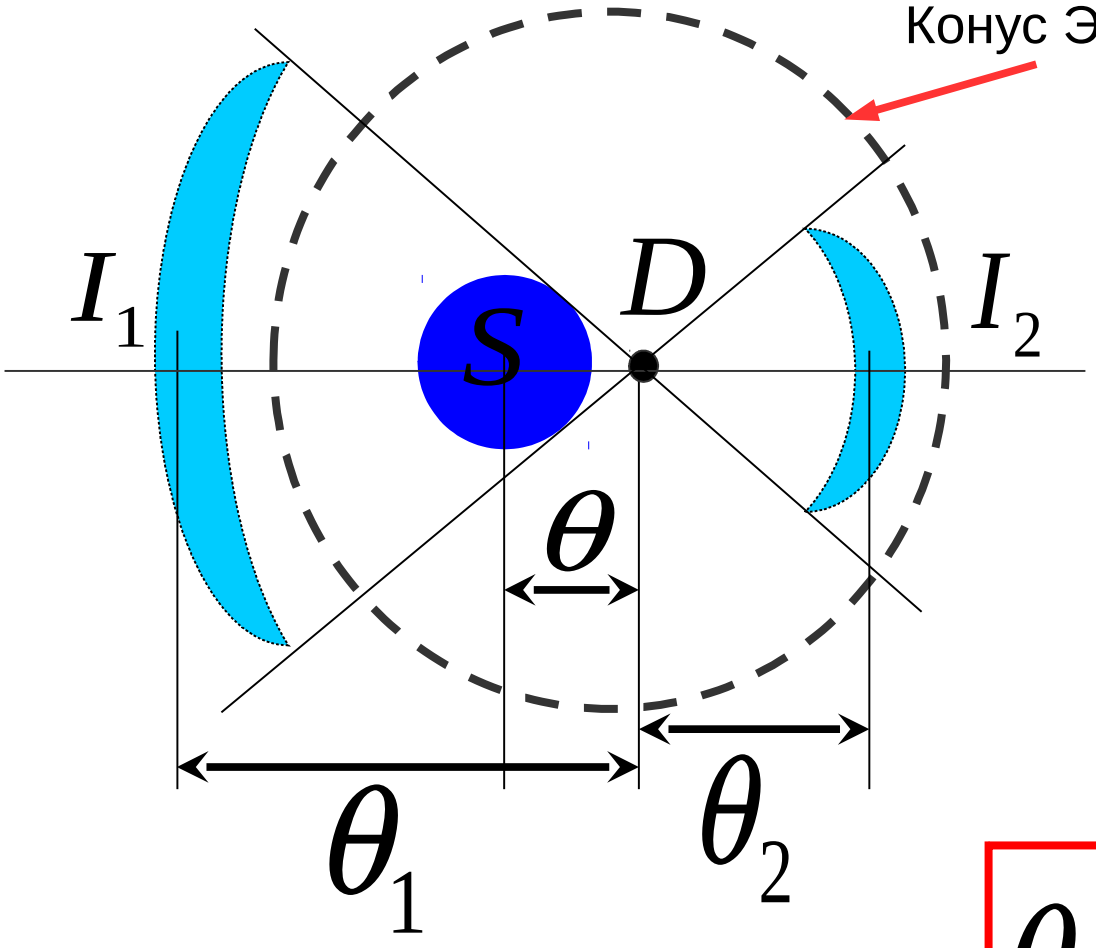


Уравнение гравитационной линзы – это зависимость угловых расстояний между изображениями от параметров системы (рисунок для точечной линзы и точечного источника):

$$\theta_{1,2}^{\ 2} - \theta\theta_{1,2} - \theta_0^{\ 2} = 0$$

радиус Эйнштейна-Хвольсона:

$$\theta_0^{\ 2} = \frac{4GM}{c^2}\frac{D_{ds}}{\left(D_{ds}+D_d\right)D_d}$$

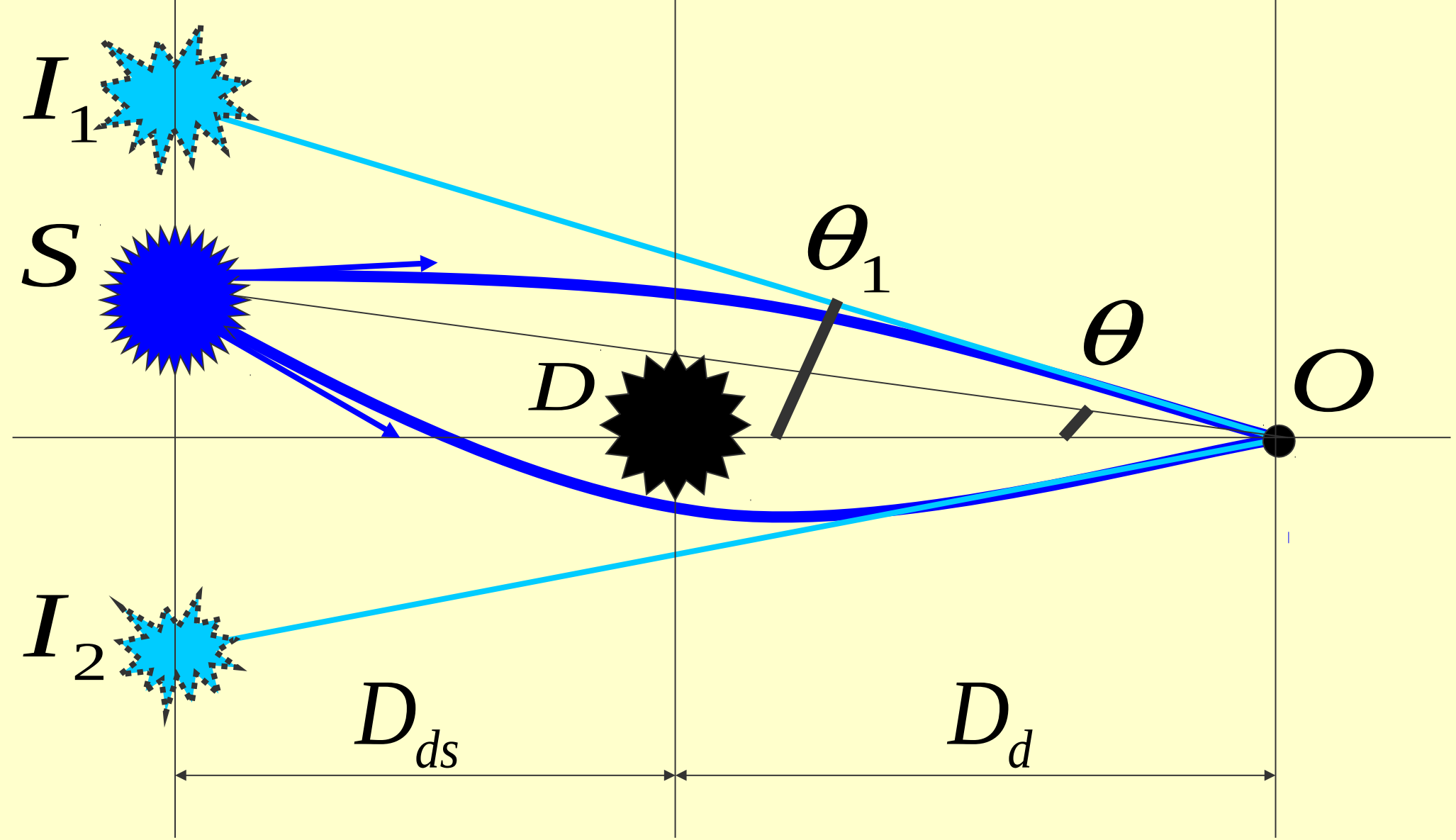


Уравнение гравитационной линзы – это зависимость угловых расстояний между изображениями от параметров системы (рисунок для точечной линзы):

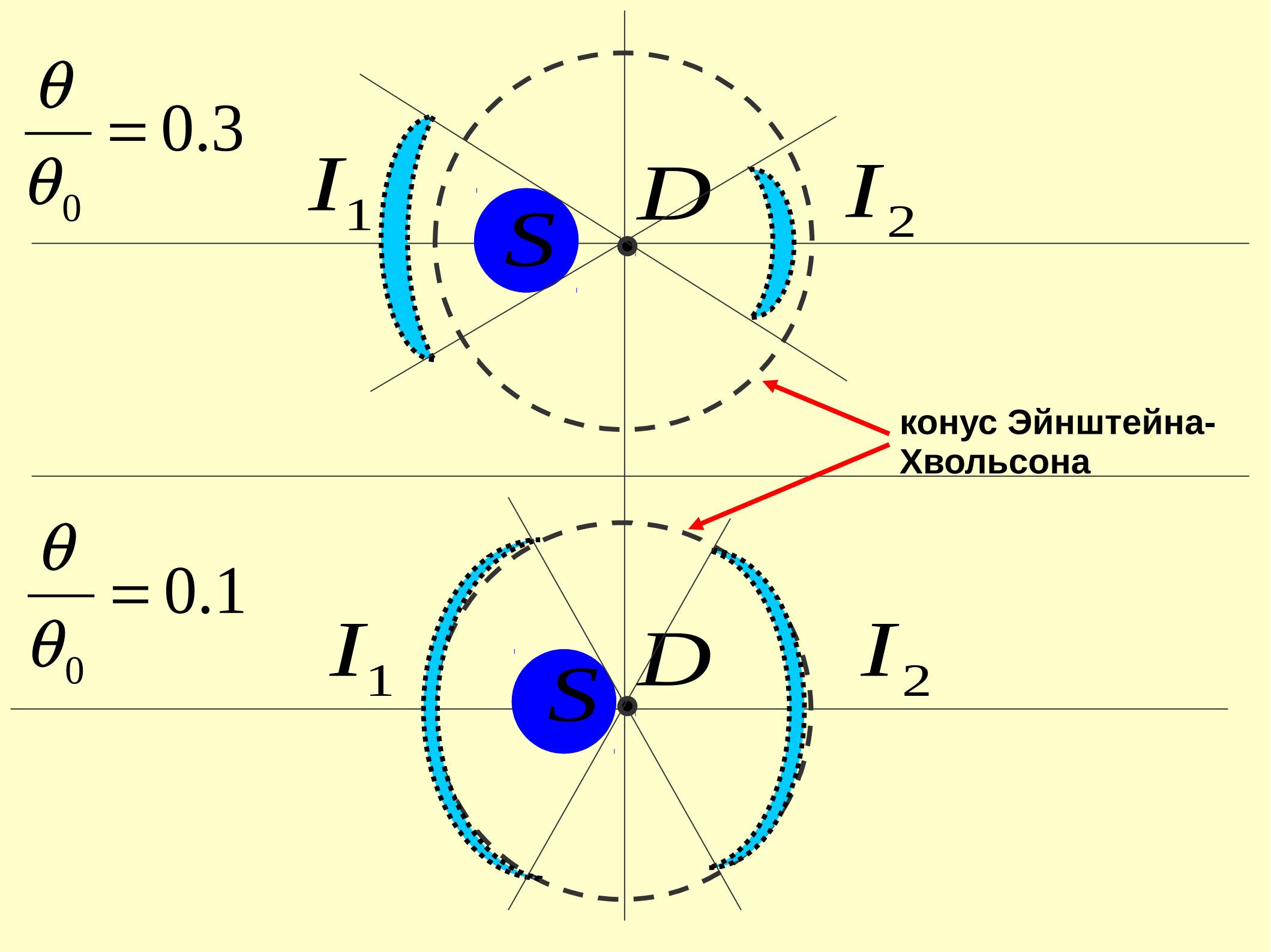
$$\theta_{1,2}^{\ 2} - \theta\theta_{1,2} - \theta_0^{\ 2} = 0$$

радиус Эйнштейна-Хвольсона:

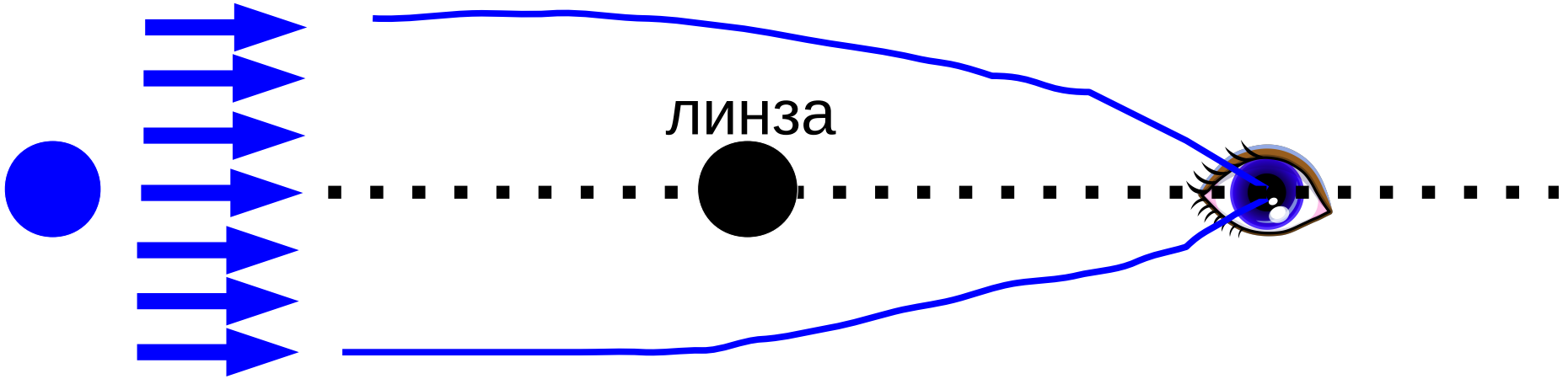
$$\theta_0^{\ 2} = \frac{4GM}{c^2}\frac{D_{ds}}{\left(D_{ds}+D_d\right)D_d}$$



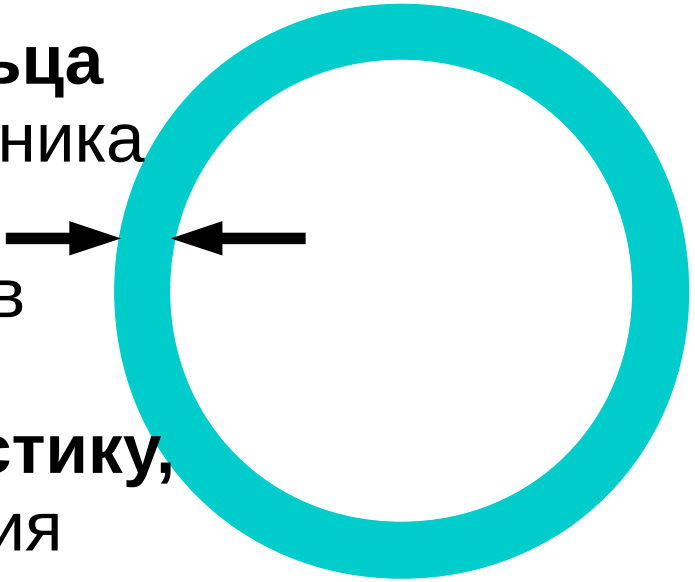
$$\theta_1^2 - \theta\theta_1 - \theta_0^2 = 0, \qquad \theta_0^2 = \frac{4GM}{c^2}\frac{D_{ds}}{\left(D_{ds}+D_d\right)D_d}$$


$\frac{\theta}{\theta_0} = 0.3$
I_1
S
D
I_2
конус Эйнштейна-Хвольсона
$\frac{\theta}{\theta_0} = 0.1$
I_1
S
D
I_2

Свет в виде плоской волны, идущий от далекого источника



Толщина наблюдаемого т.н. **“кольца Эйнштейна”** равна радиусу источника



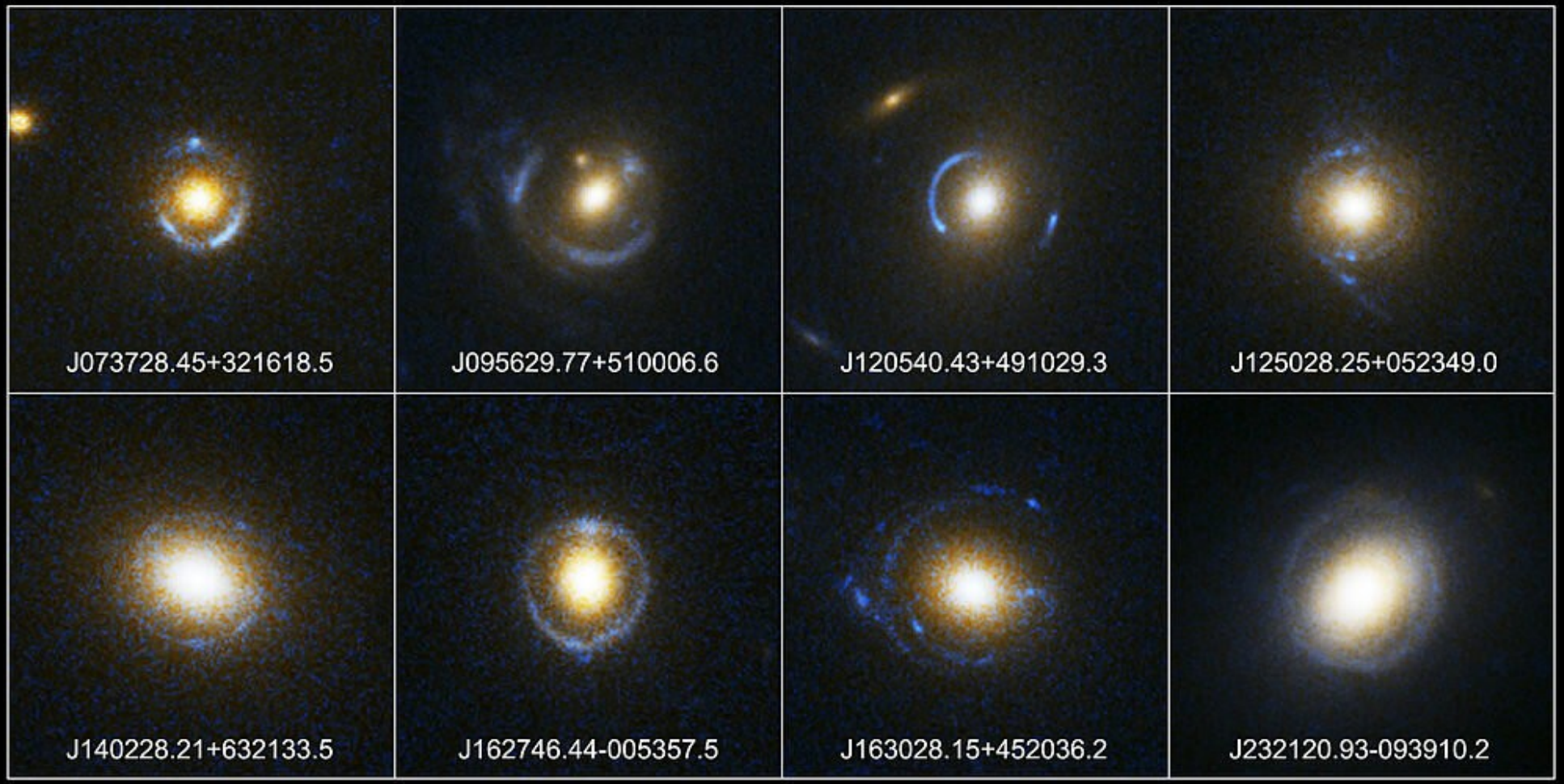
Точечный источник отображается в яркую окружность. Этот точечный источник представляет собой **каустику,** т.к. для него коэффициент усиления яркости становится бесконечно большим.

В случае сферически-симметричной линзы, представляющей собой точечную массу, существует только одна точка в плоскости источника, которой соответствует бесконечное значение коэффициента усиления. Отображение этой точки на плоскость линзы – это яркая окружность с диаметром, равным диаметру коннуса Эйнштейна-Хвольсона.

Для произвольной линзы вместо окружности более сложная кривая. А вмето единственной точки-источника – линия-каустика. Например, для случая, когда линза – это две точечные массы, одна из которых много меньше другой вместо точки-каустики будет **астроида-каустика**.

Схематичная модель гравитационного линзирования спиральной галактики на темном объекте-линзе

“Кольцо Эйнштейна” (реальные наблюдения)

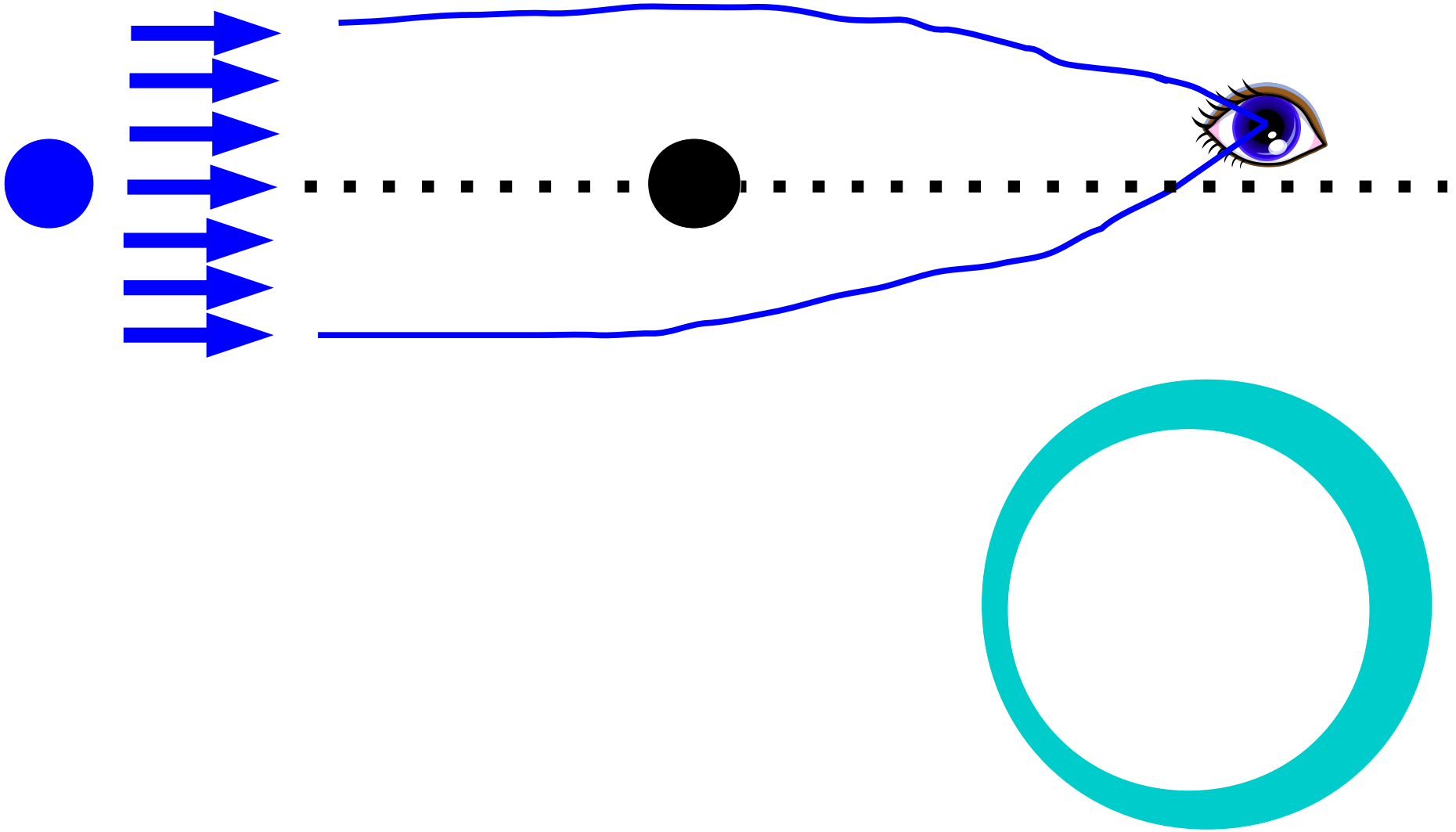


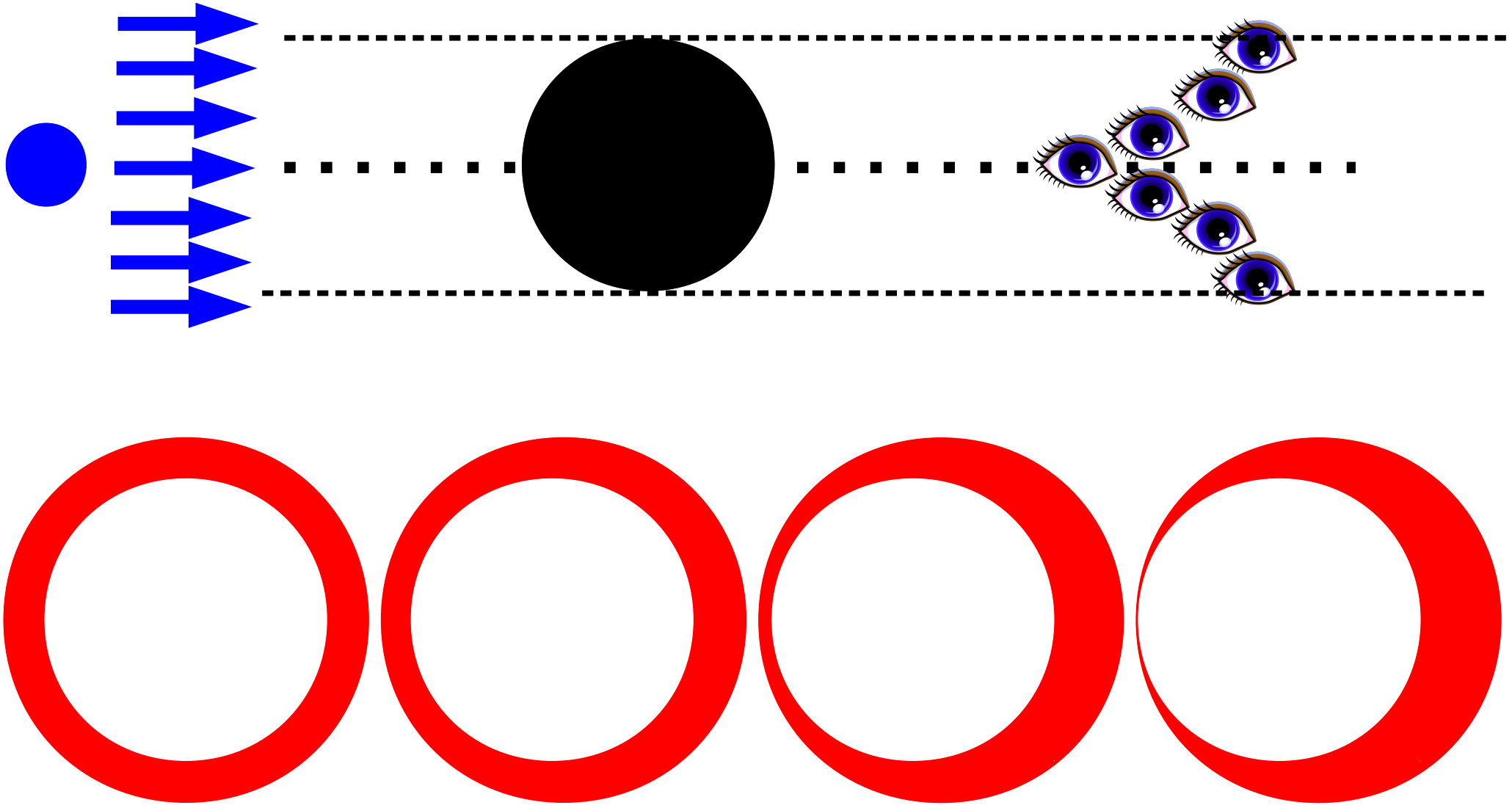
Einstein Ring Gravitational Lenses

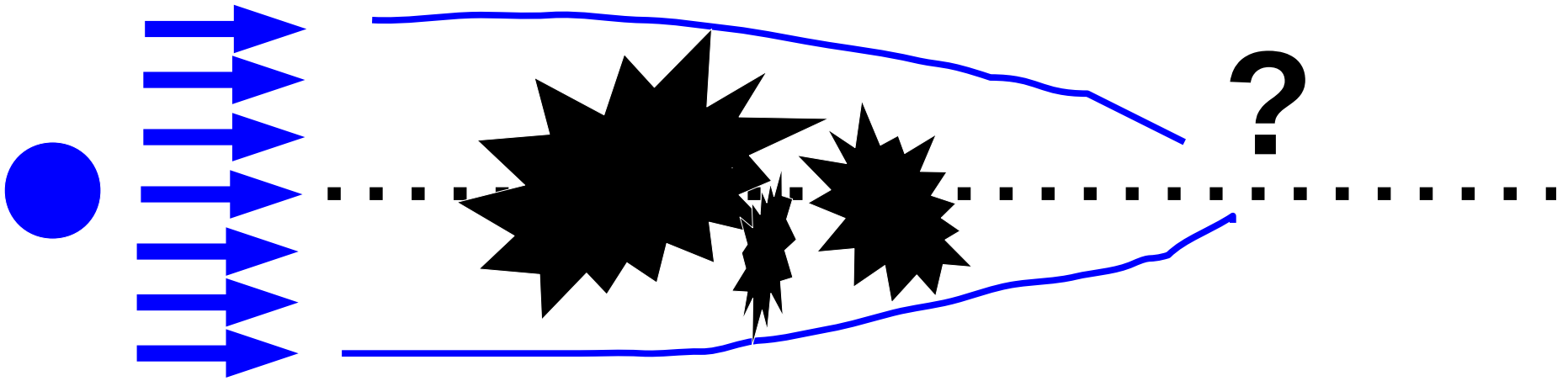
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32



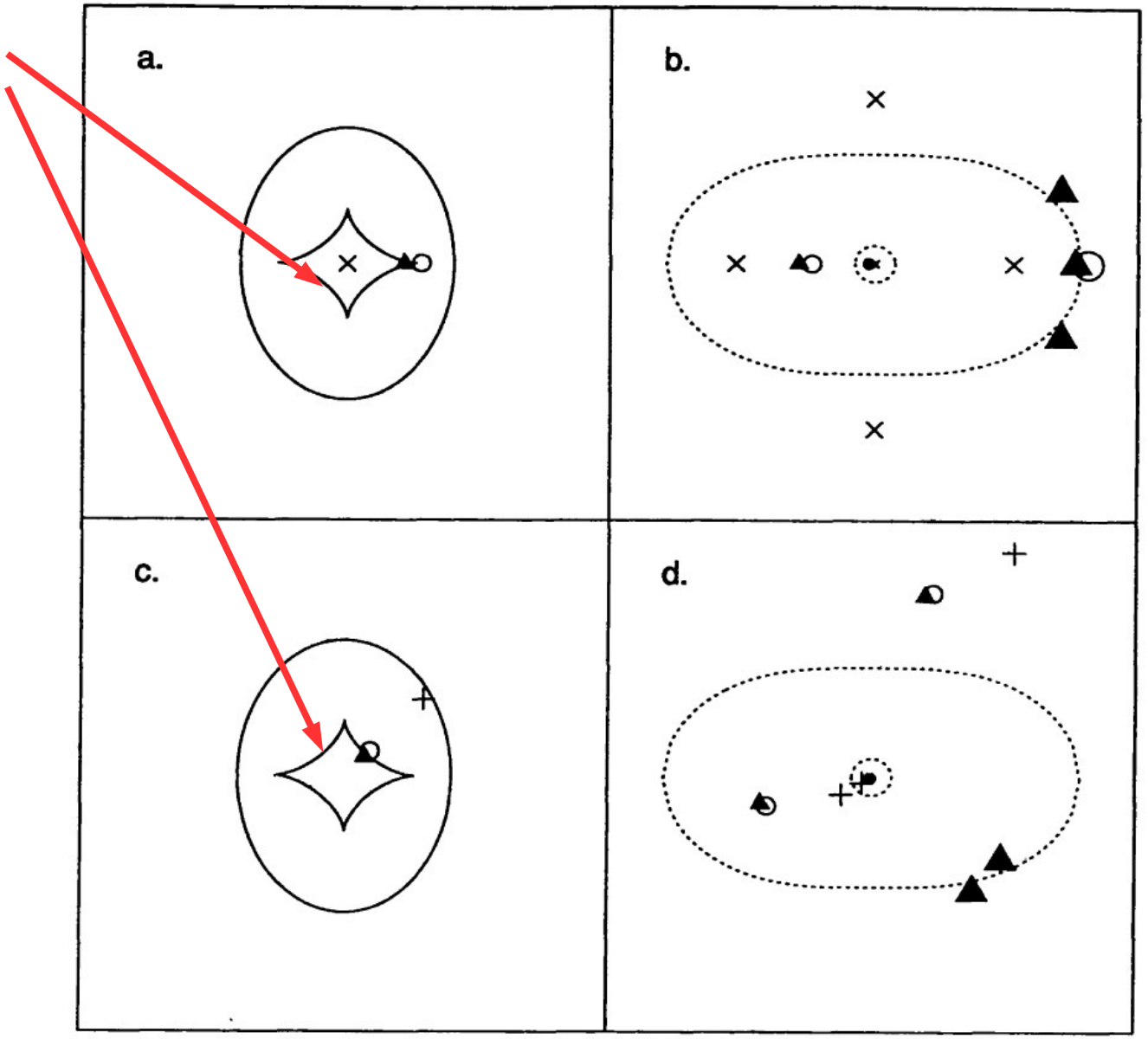


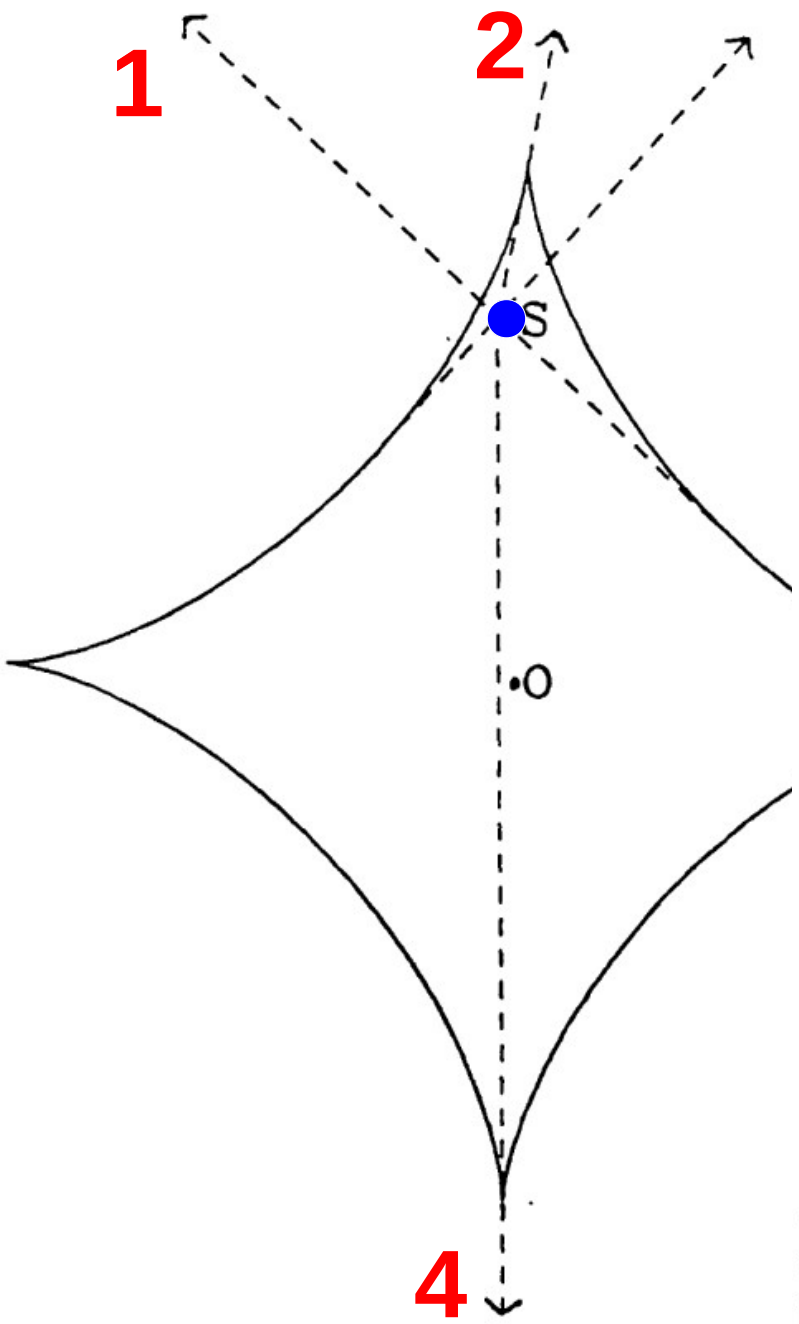


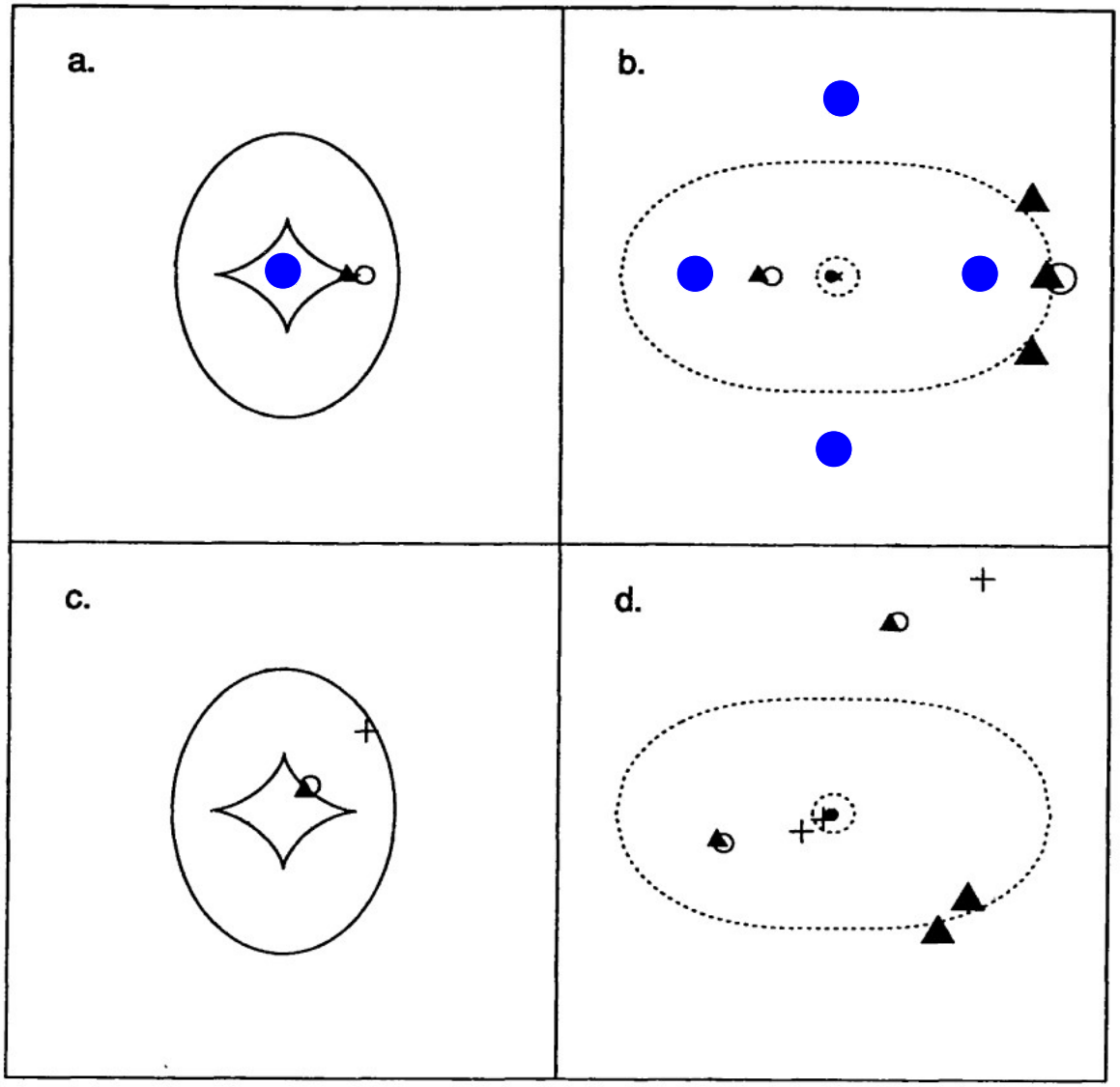
Что увидит наблюдатель при гравитационном линзировании источника на линзе, **не обладающей сферической симметрией** или представляющей собой **совокупность массивных тел** (скопление галактик)?

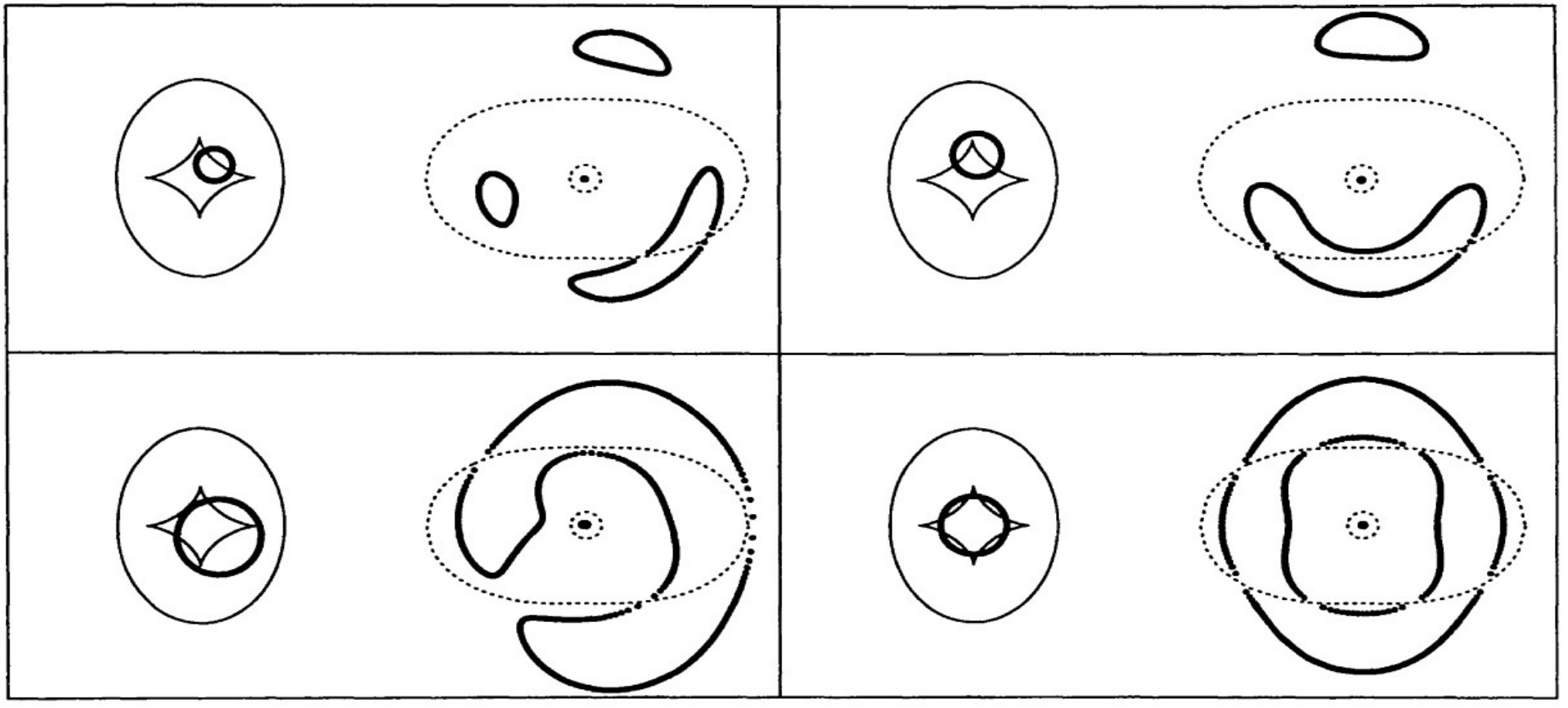
Если линза представляет собой систему двух точечных масс, и одна из них много меньше другой, то образуется не два, а больше изображений

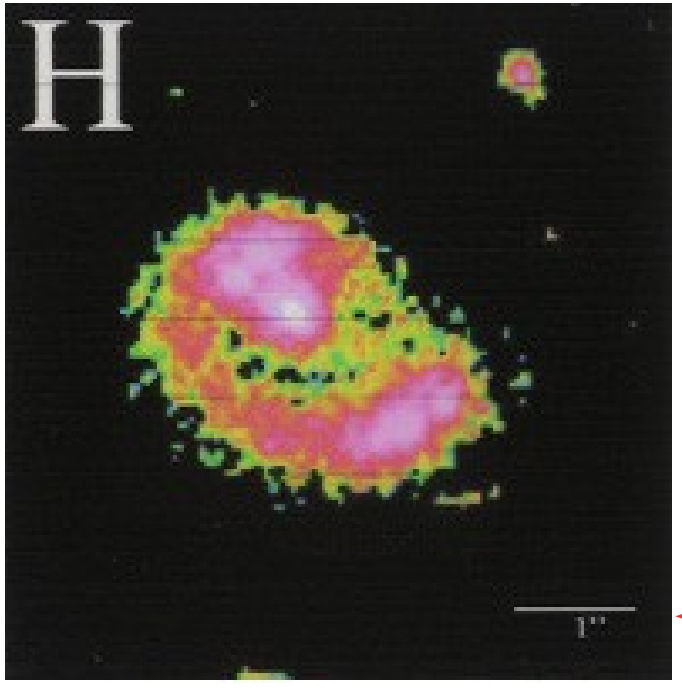
Каустика-астроида – геометрическое место точек источника, в которых коэффициент усиления бесконечно большой: каждая точка астроиды отображается в яркую точку изображения.




1
2
3
S
O
4


a.
b.
c.
d.



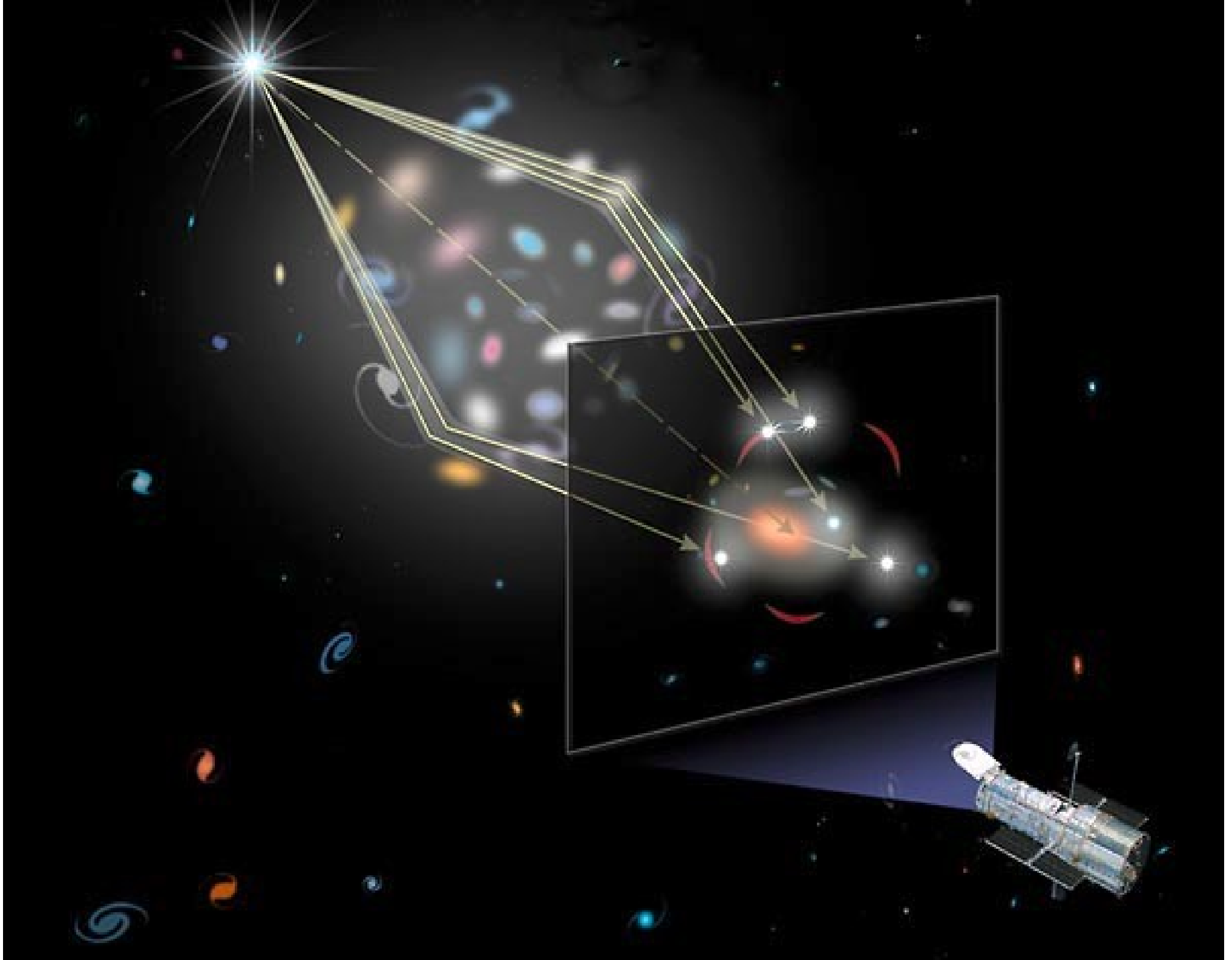


Варианты линзирования протяженного источника на двух точечных массах, одна из которых много меньше другой.

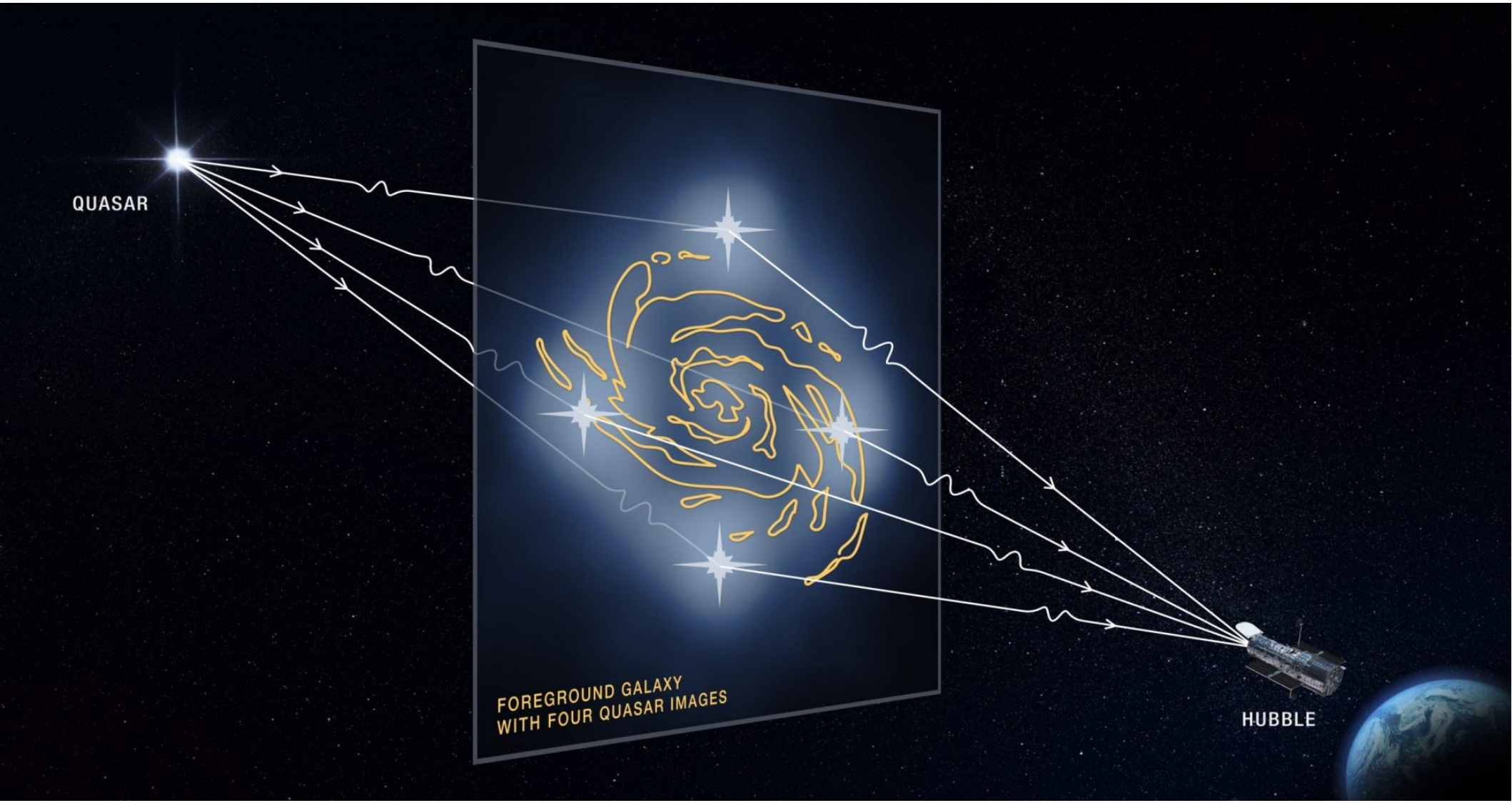
Реальный снимок (в псевдоцветах)

Эффект гравитационного линзирования:
“космическая змея”

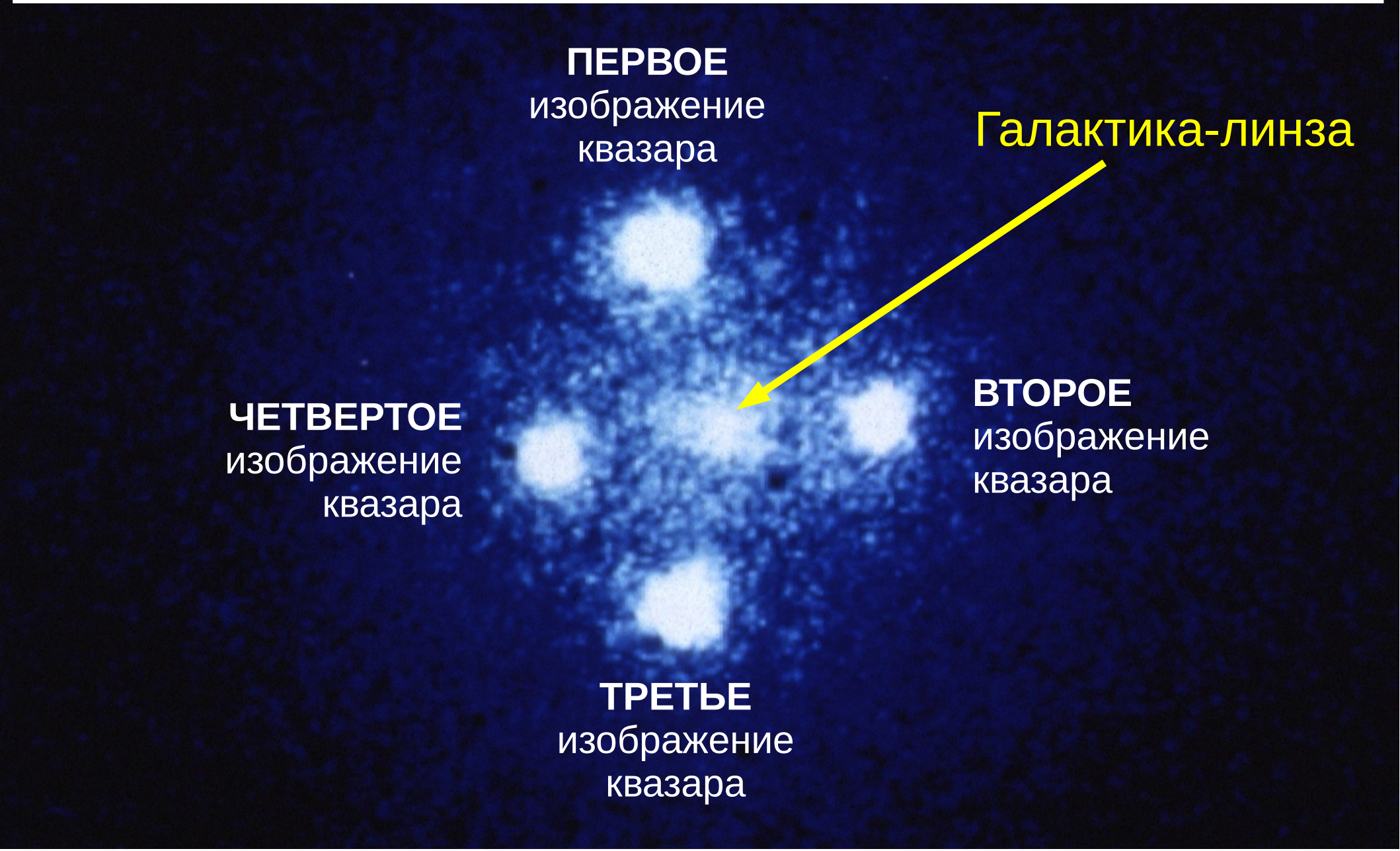
Galaxy Cluster SDSS J1004+4112: "Quintuple Quasar"
HUBBLESITE.org

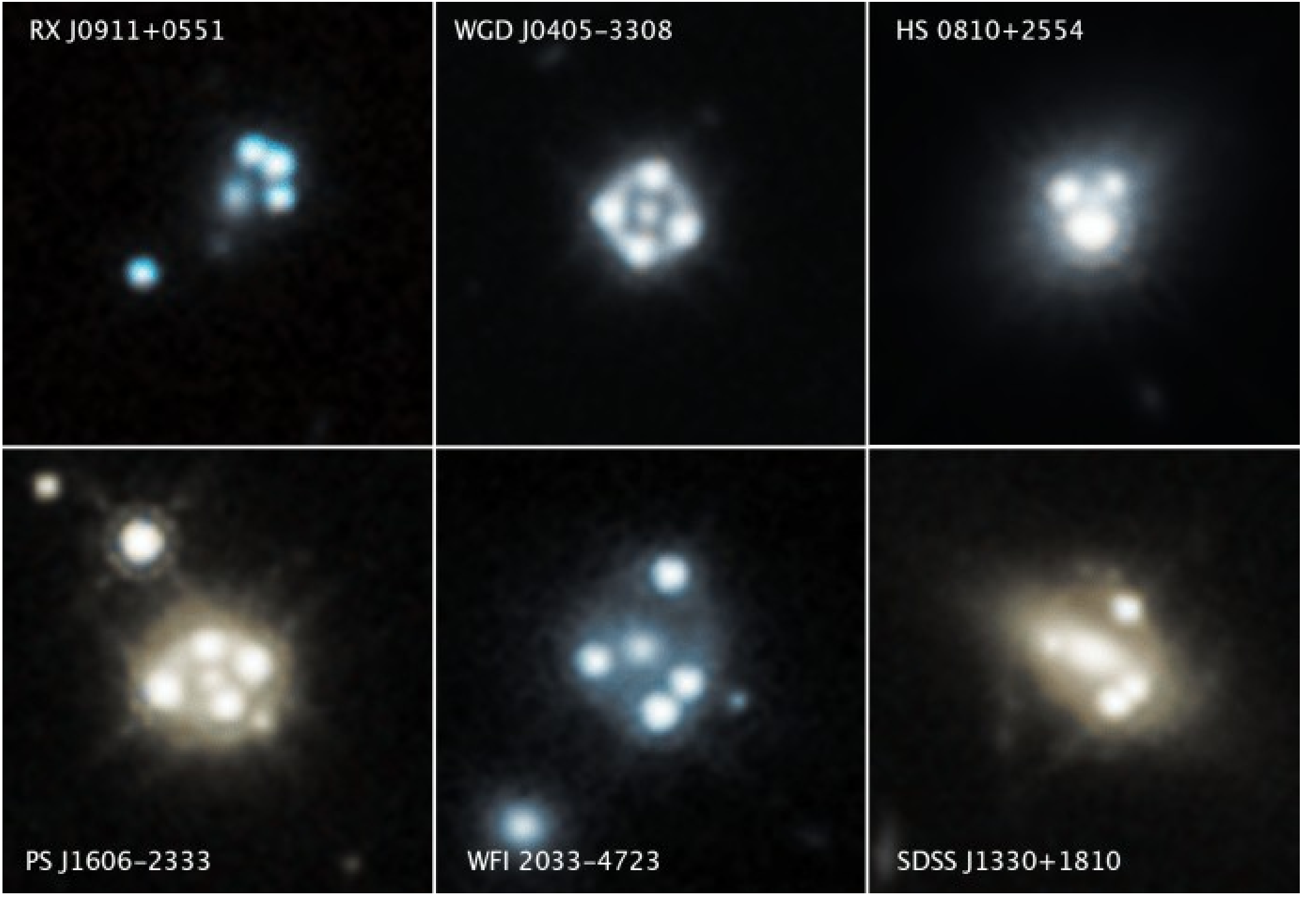


Гравитационная линза - “крест Эйнштейна”

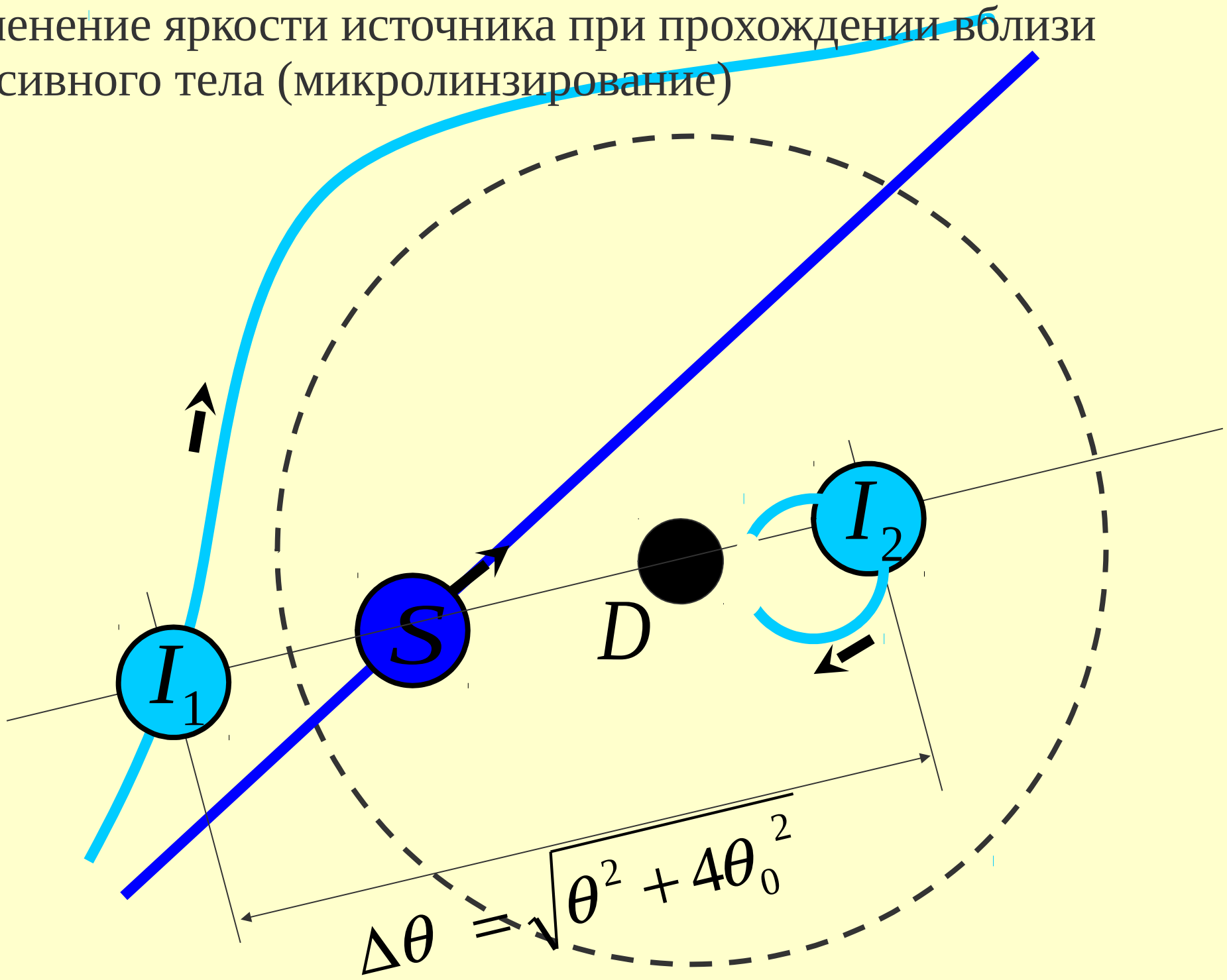

QUASAR
FOREGROUND GALAXY
WITH FOUR QUASAR IMAGES
HUBBLE

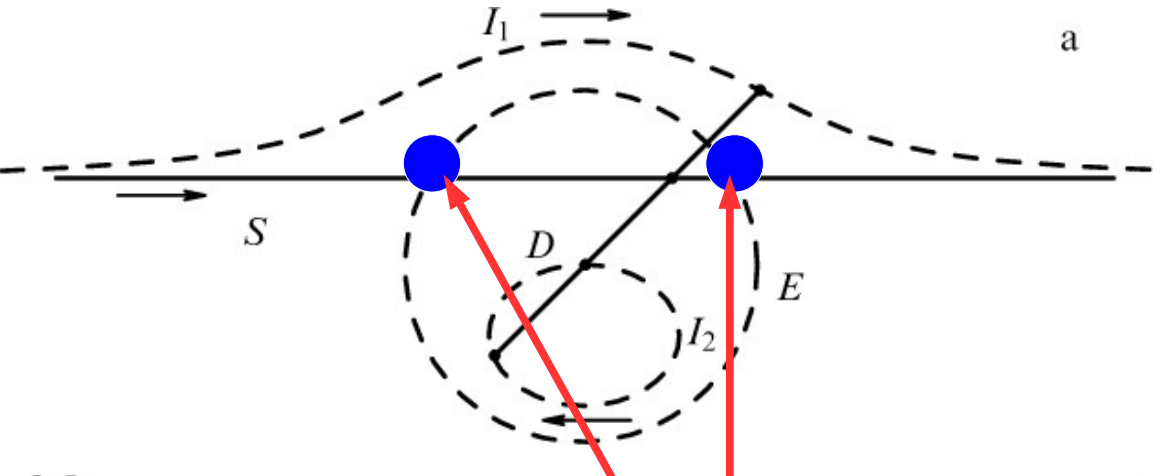
Квазар располагается примерно в **8 млрд св. лет** от Земли, а линзирующая галактика — в **400 млн св. лет**, то есть в 20 раз ближе.




RX J0911+0551
WGD J0405−3308
HS 0810+2554
PS J1606−2333
WFI 2033−4723
SDSS J1330+1810

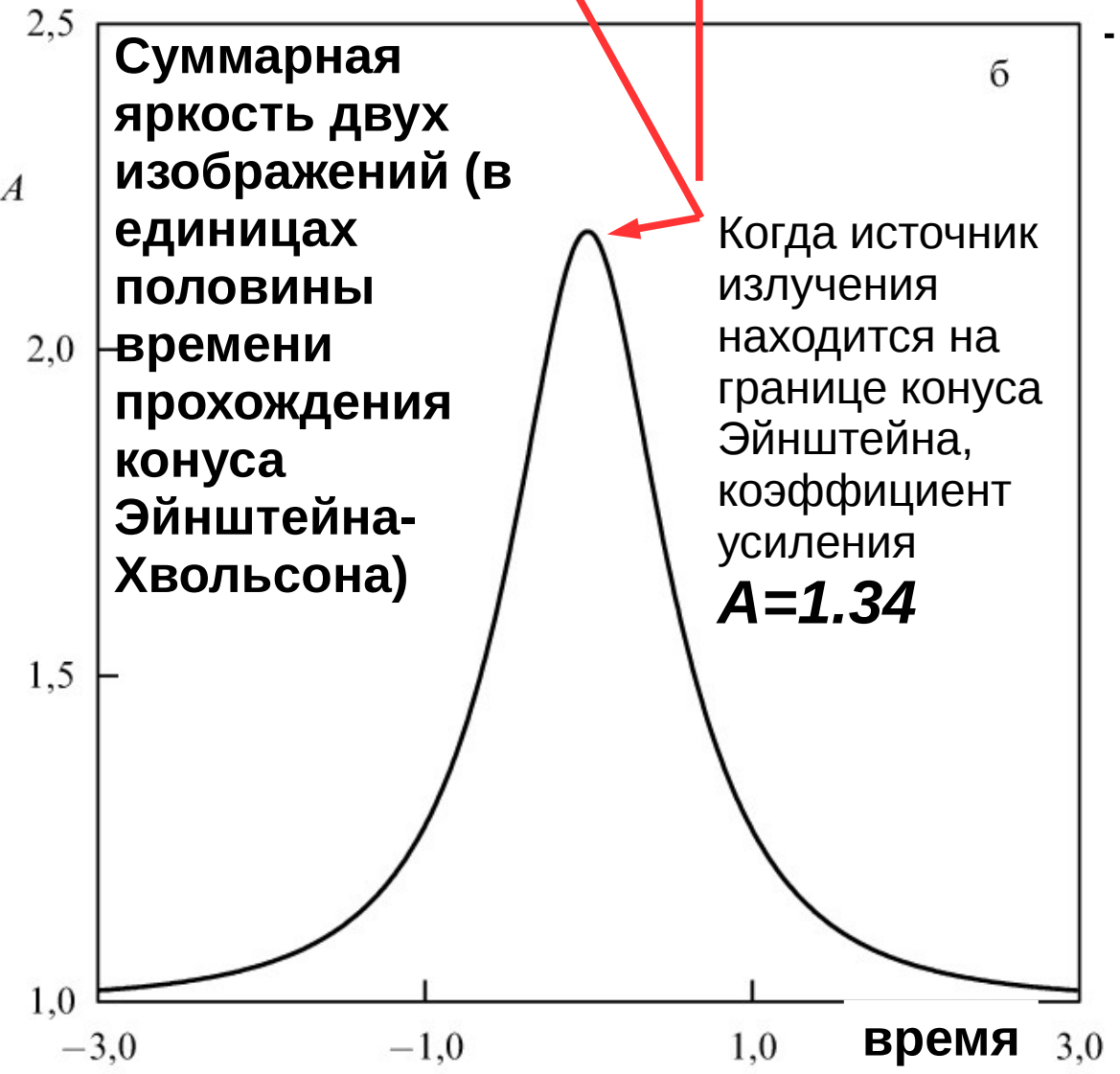
Изменение яркости источника при прохождении вблизи массивного тела (микролинзирование)





$$I = I_1 + I_2 = \frac{1}{2} I_0 \left(u + \frac{1}{u} \right),$$

$$u = \sqrt{1 + 4 \frac{\theta_0^{\,2}}{\theta^2}}$$



Суммарная яркость двух изображений (в единицах половины времени прохождения конуса Эйнштейна-Хвольсона)

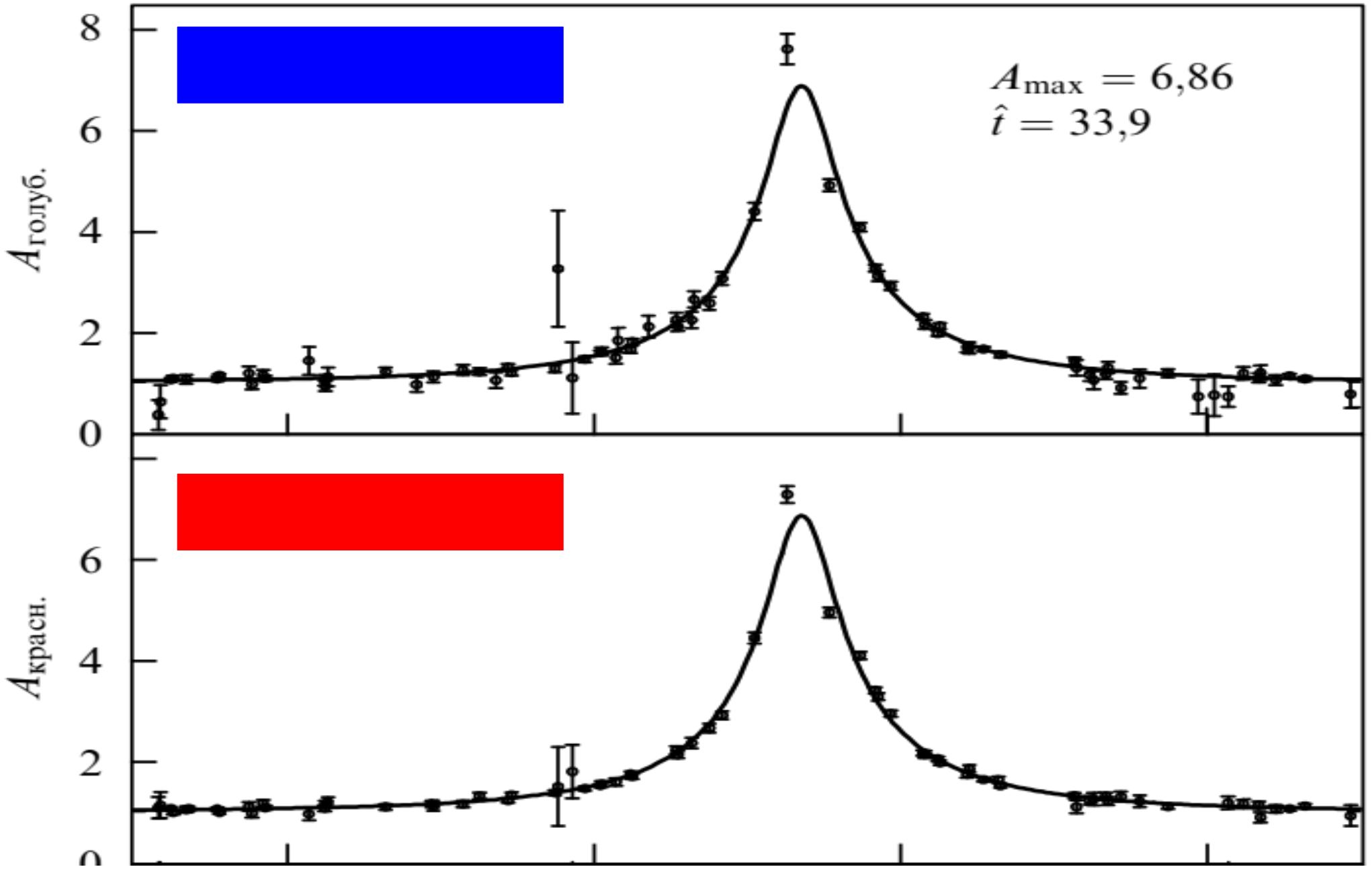
Когда источник излучения находится на границе конуса Эйнштейна, коэффициент усиления ***A=1.34***

Коэффициент усиления изображений при микролинзировании

Суммарная яркость двух изображений больше яркости исходного источника

$$A = \frac{I_1 + I_2}{I_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{u} + u \right)$$

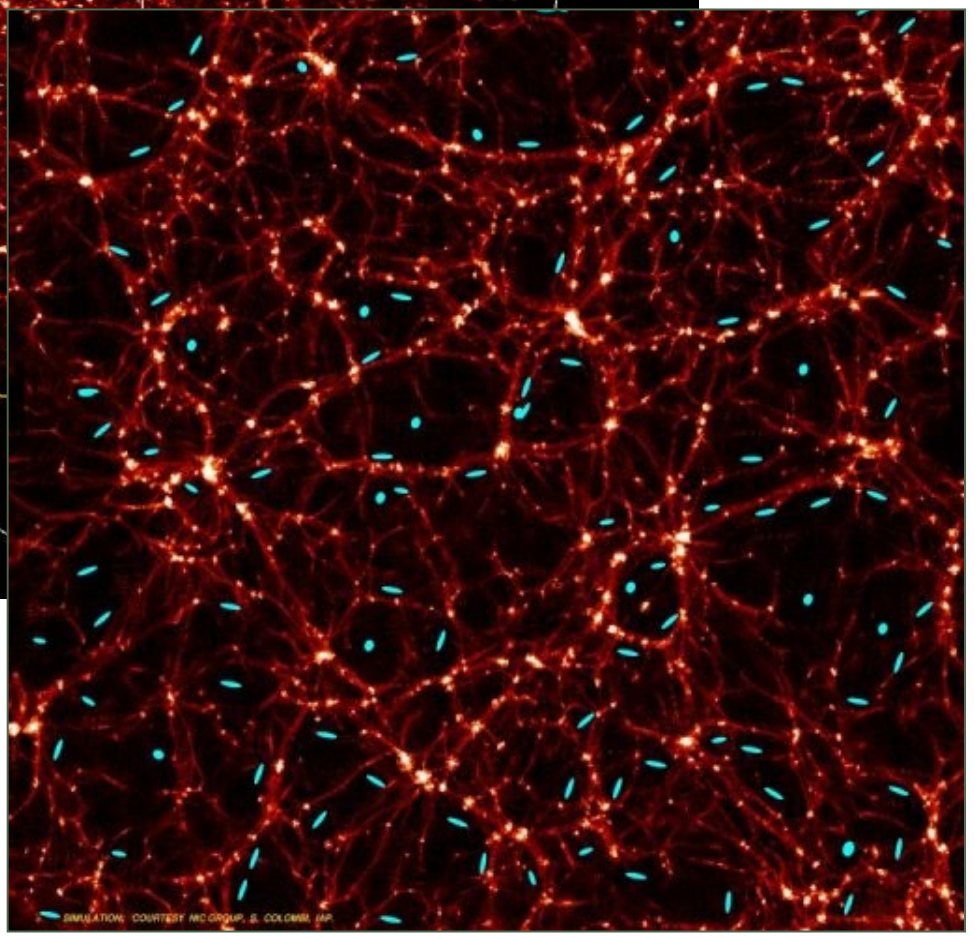
Микролинзирование



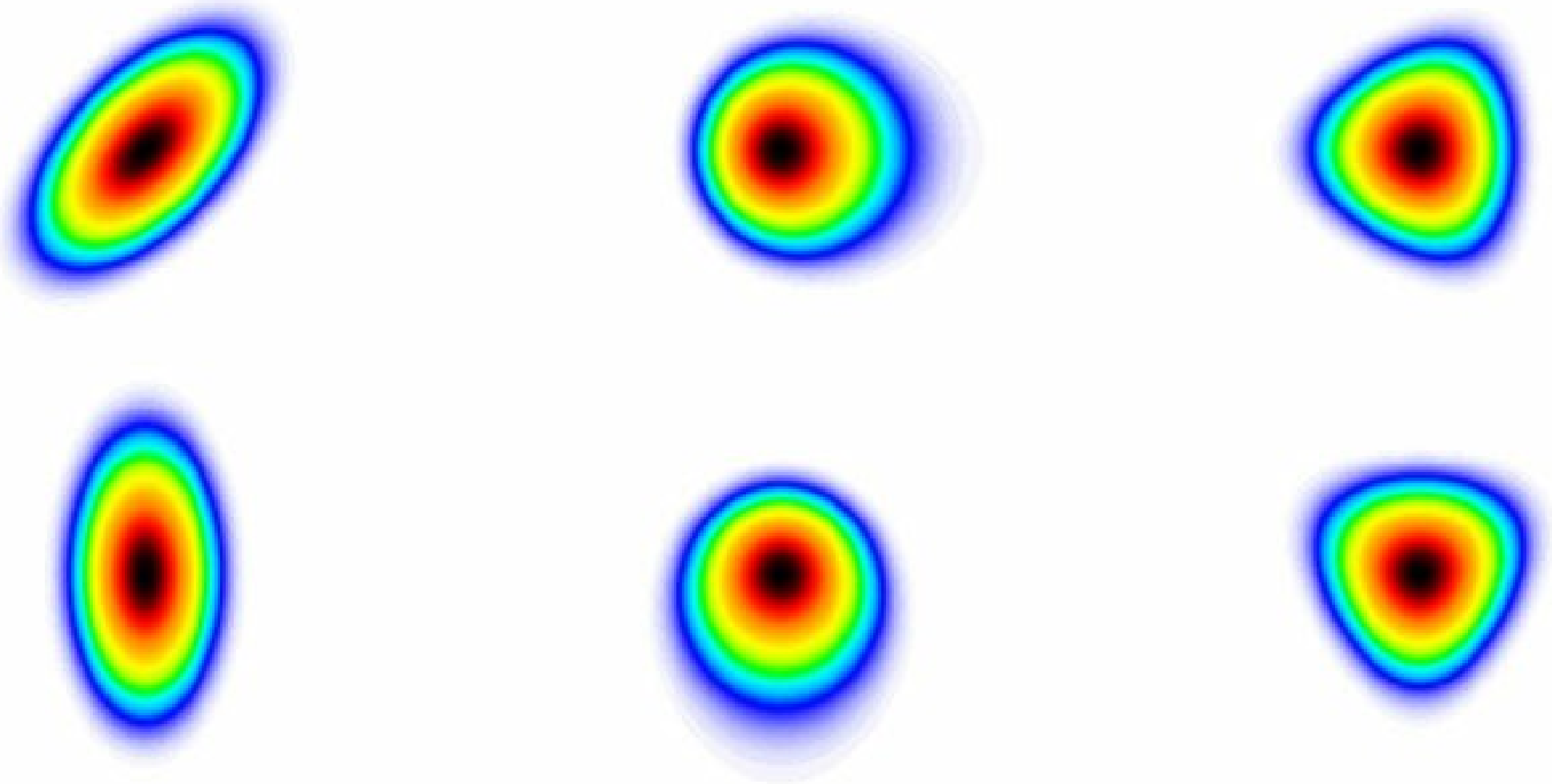
Численные оценки параметров эффекта усления яркости при прохождении источника через конус Эйнштейна

- Размер конуса Эйнштейна для темного тела-линзы с массой Солнца, находящегося на расстоянии **10 кпк**, есть **0.001''**. В линейных единицах это **10 а.е.**
- При движении со скоростью **300 км\с** (типичные скорости объектов в Галактике) время пересечения конуса Эйнштейна **3.5 месяца**. В течение этого времени меняется и яркость источника.
- Для внегалктических линз период изменения блеска очень велик, **100 тыс. лет**. Для таких линз ищут изображения с угловыми расстояними от **секунд дуги** (линза-галактика) до **минут дуги** (если линза – скопление галактик)

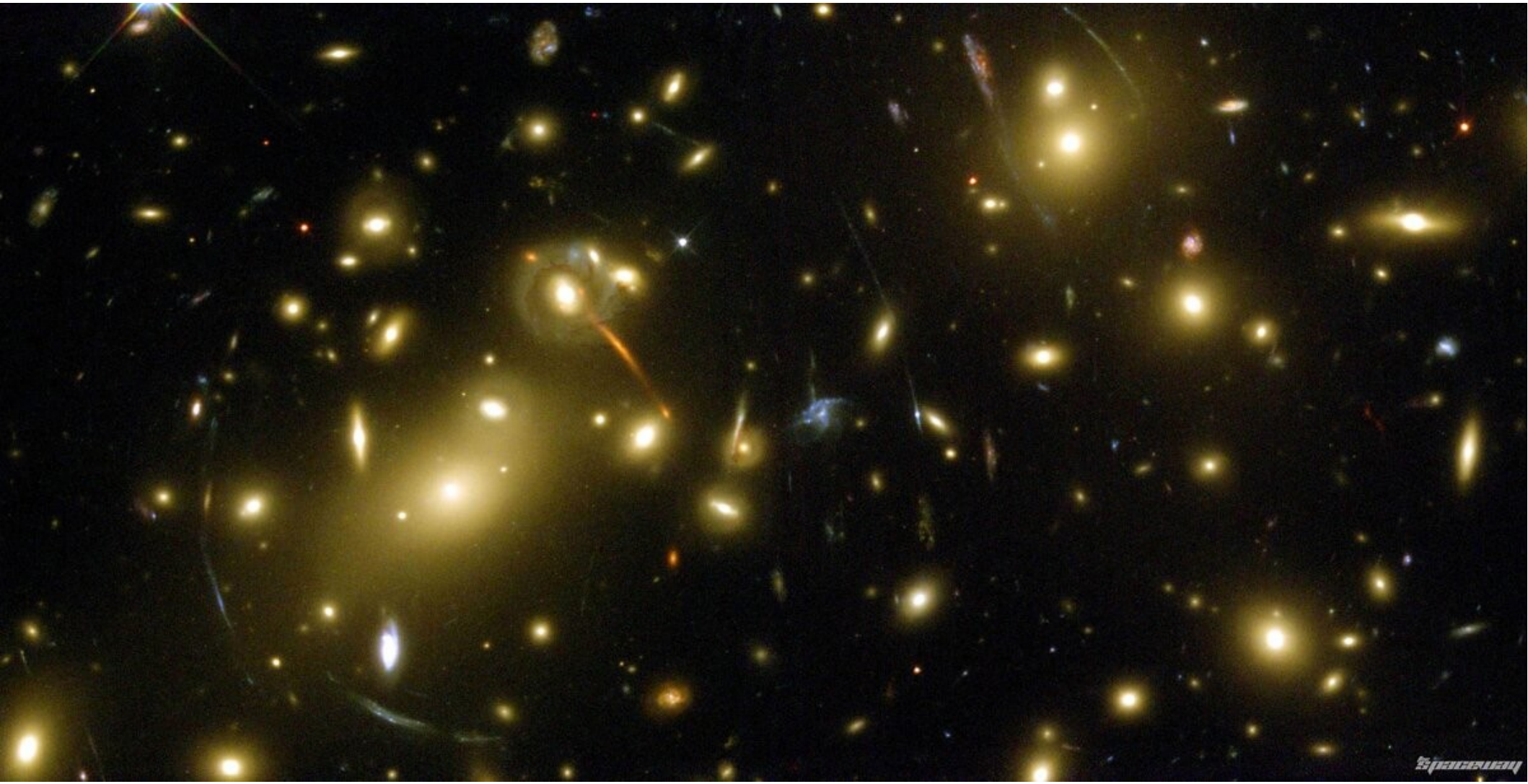
Слабое гравитационное линзирование



Примеры деформаций далеких источников (галактик) под действием эффекта слабого линзирования



По структуре искажений галактик и положению изображений галактик можно воостановить распределение темной материи



Крупномасштабная структура Вселенной — результат моделирования MareNostrum. Красным цветом обозначена темная материя, зеленым — газ, синим — излучение (температура). Каждый узел — это скопление сотен галактик. *MareNostrum Simulation project*

Режимы гравитационного линзирования

1. Сильное линзирование

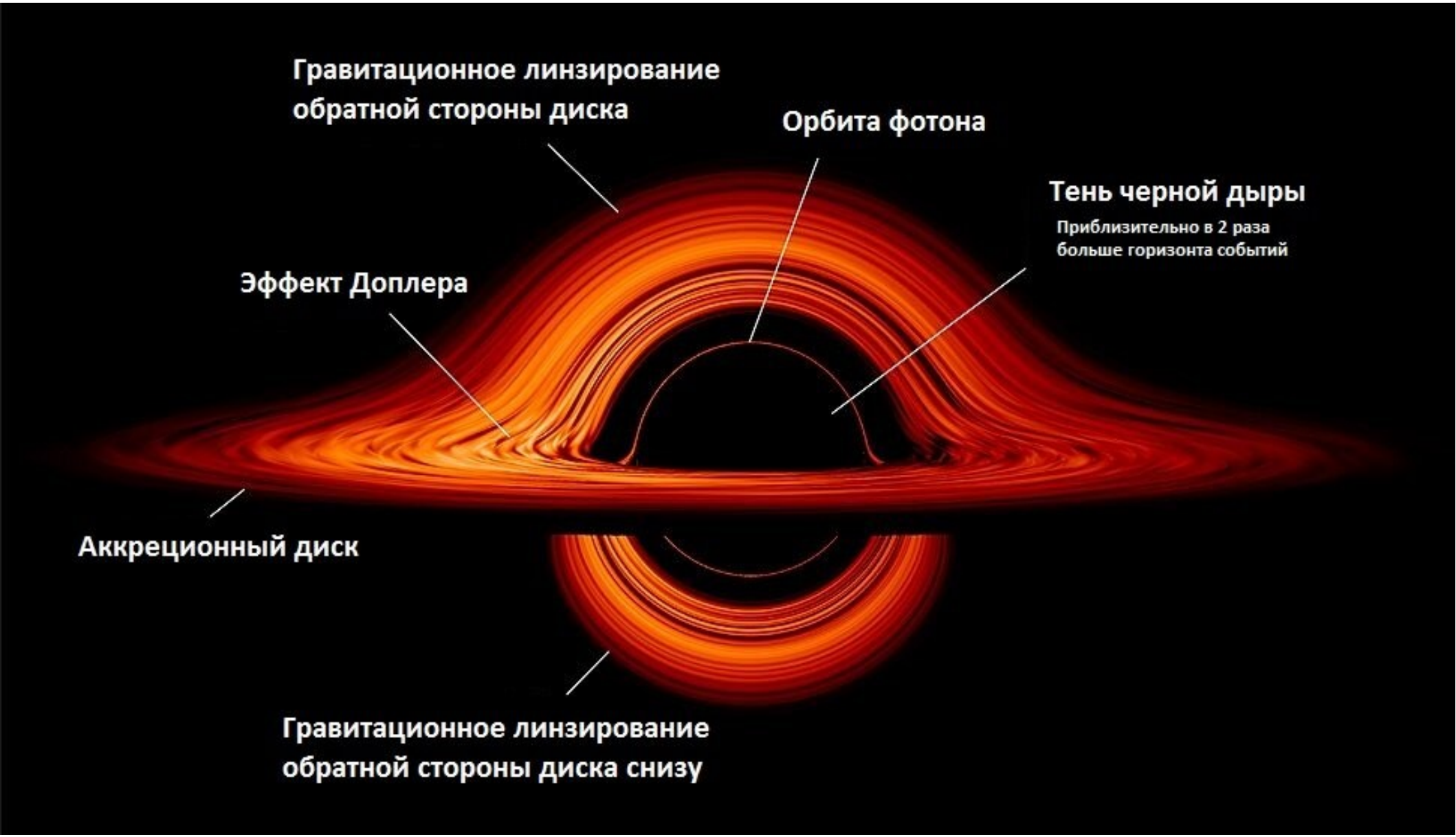
Сильное гравитационное линзирование происходит в том случае, когда линза очень массивна, а угловое расстояние между линзой и фоновым источником излучения мало – другими словами, они оба лежат практически «на одной оси» с наблюдателем (внутри конуса Эйнштейна).

2. Слабое линзирование

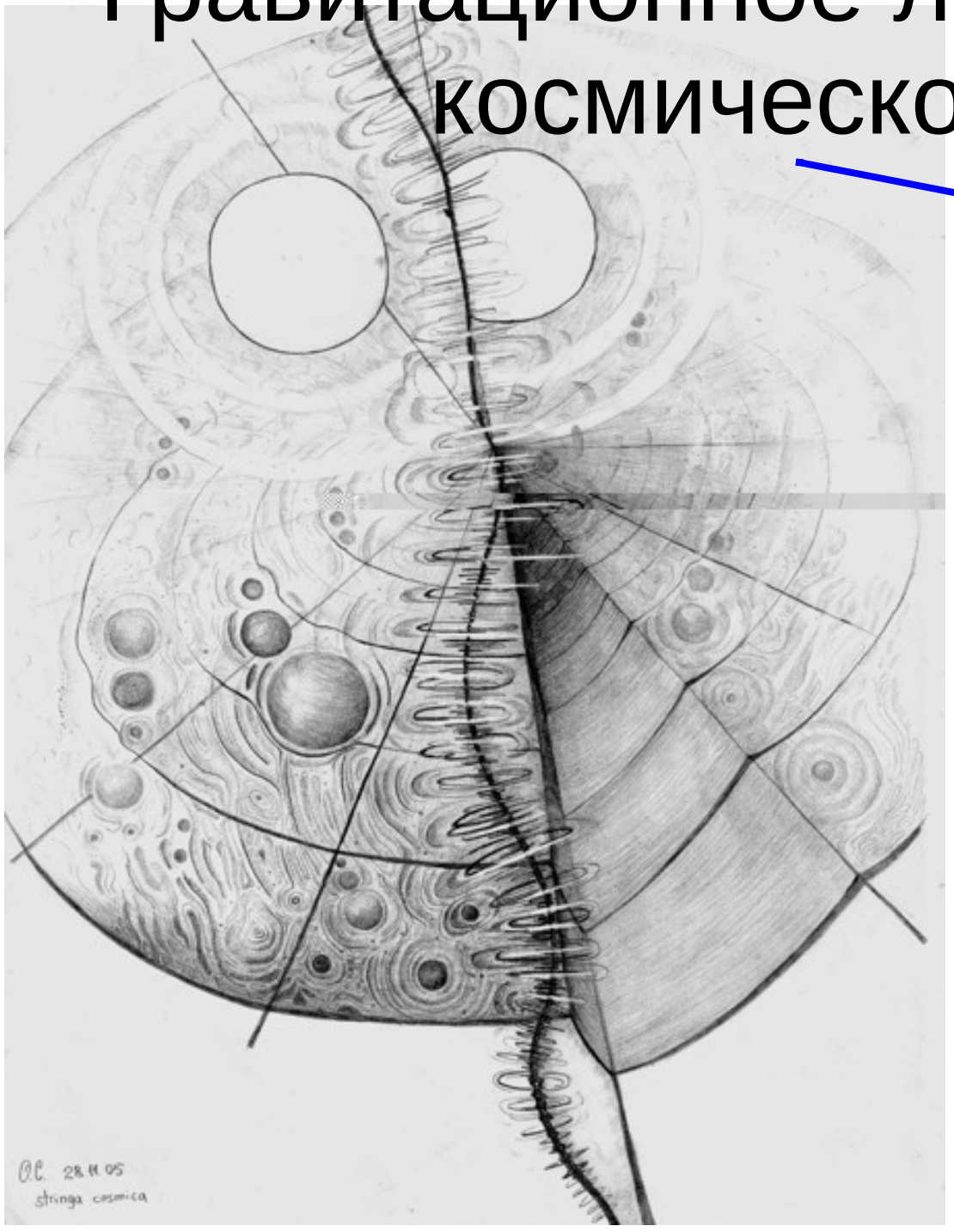
В режиме *слабого гравитационного линзирования* линза лежит далеко «вне оси», и ни изображений, ни дуг источника не формируется. Угловое расстояние между линзой и источником больше конуса Эйнштейна. Эффект линзирования в этом случае выражает себя только в том, что фоновый источник слегка искажается, становясь более узким и вытянутым. Этот эффект может стать мощным статистическим инструментом в поиске невидимых линз и их распределений при наличии большого количества хорошо определенных фоновых источников (проект KiDS).

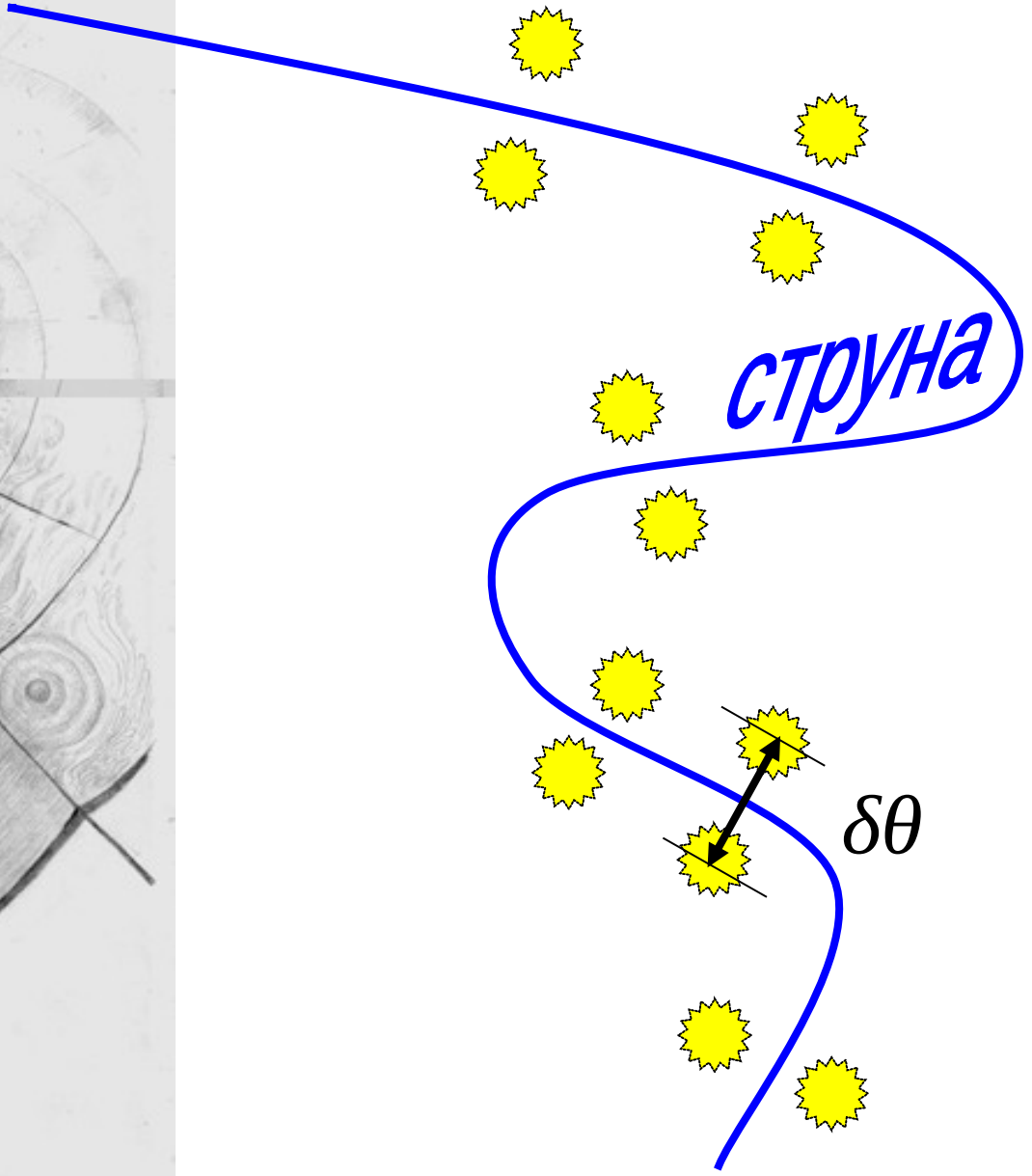
3. Микролинзирование

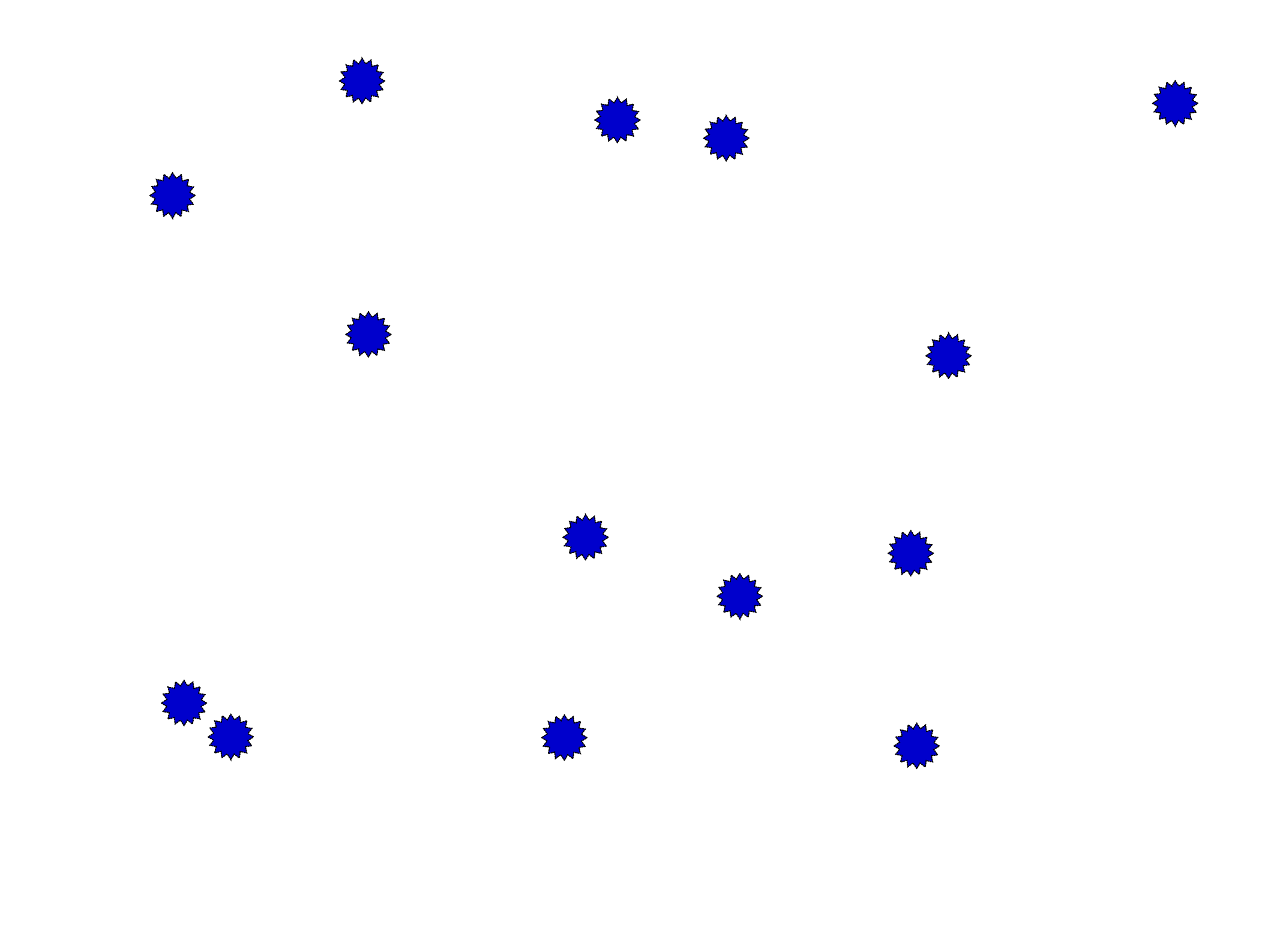
При *микролинзировании* источники настолько малы или слабы, что их изображения не видны, несмотря на почти идеальное расположение «на оси» с наблюдателем. В результате источник света кратковременно увеличивает свою яркость, что может быть наблюдаемо.

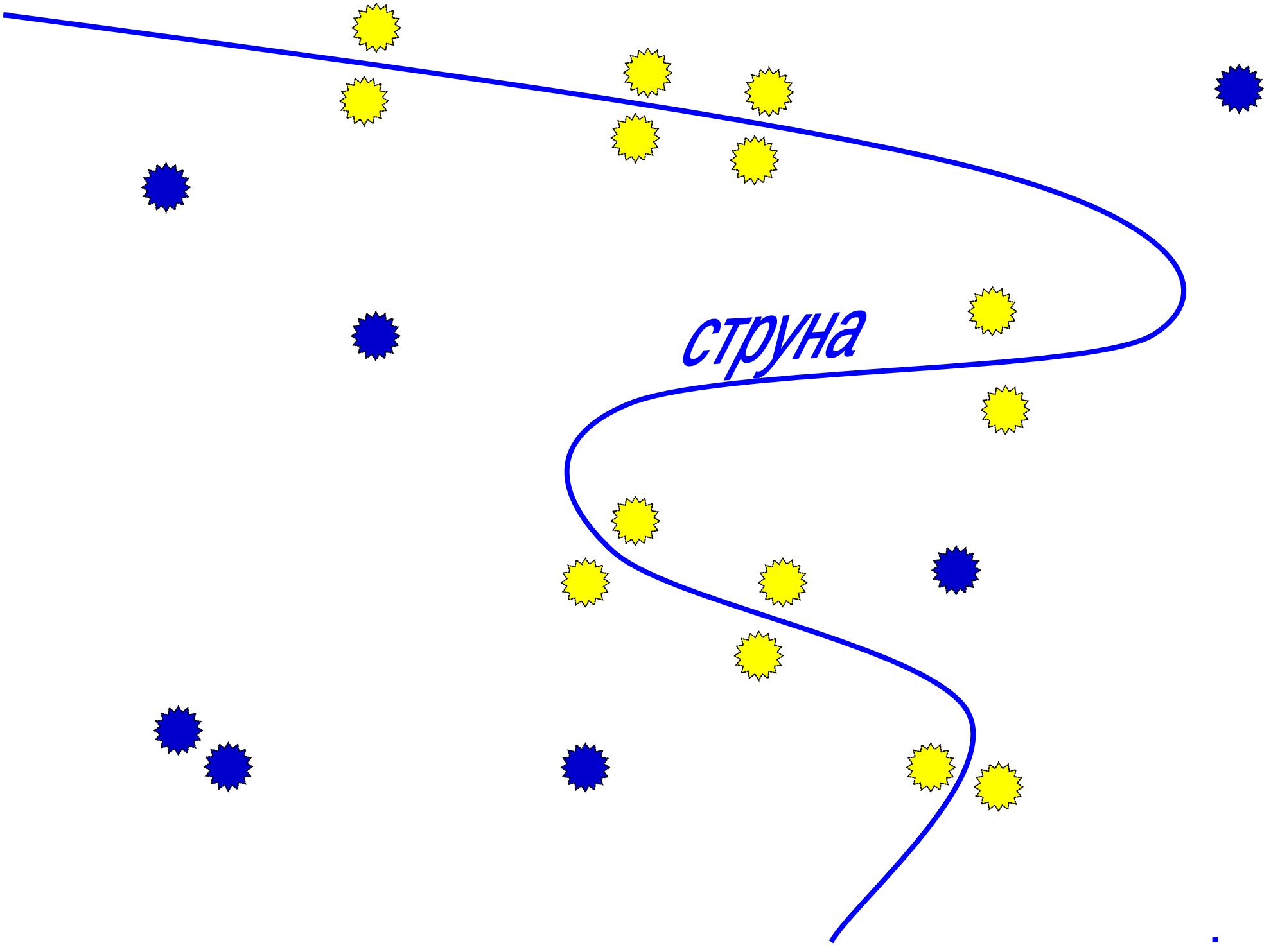

Гравитационное линзирование обратной стороны диска
Орбита фотона
Тень черной дыры
Приблизительно в 2 раза больше горизонта событий
Эффект Доплера
Аккреционный диск
Гравитационное линзирование обратной стороны диска снизу

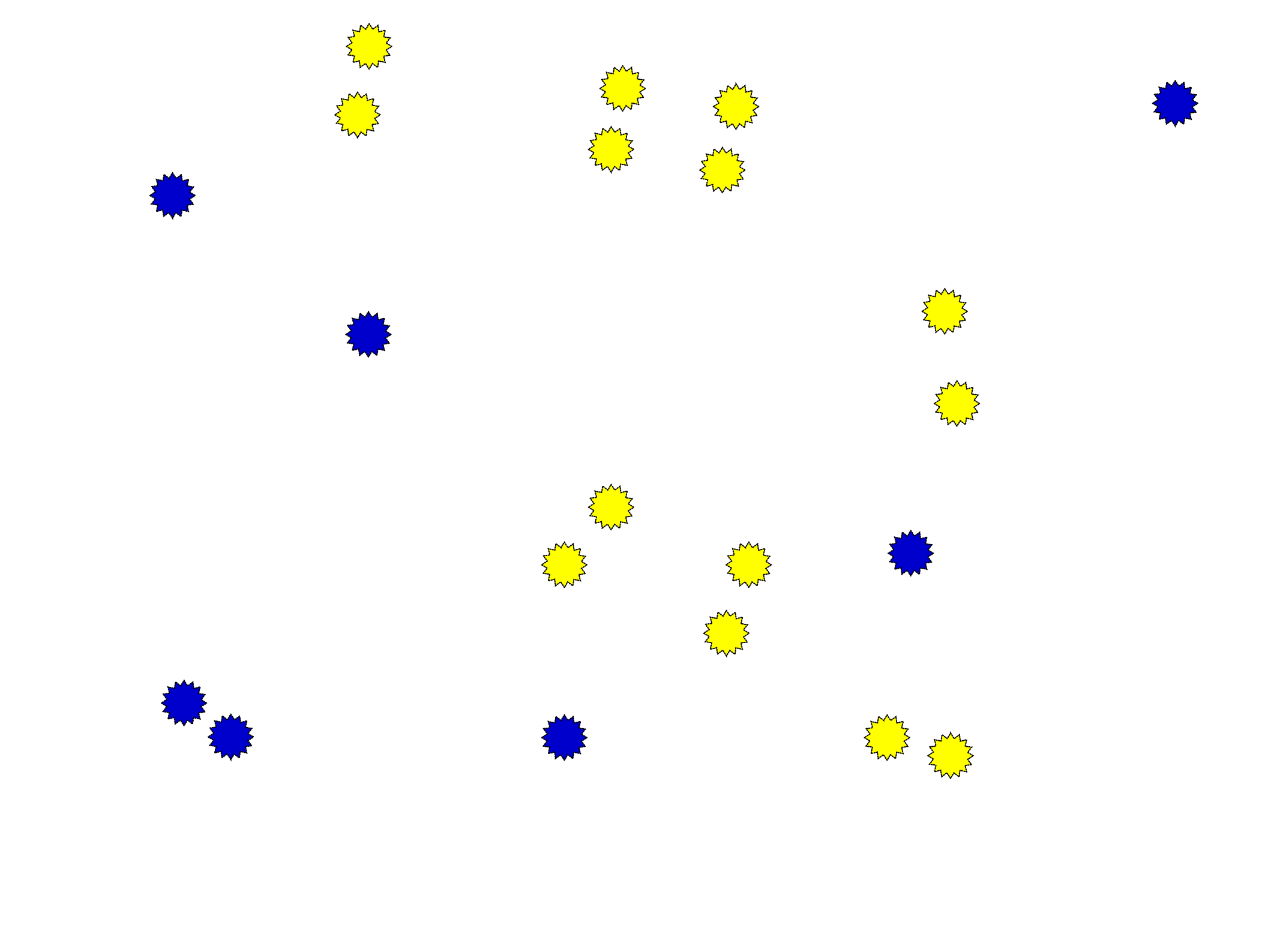
Гравитационное линзирование на космической струне



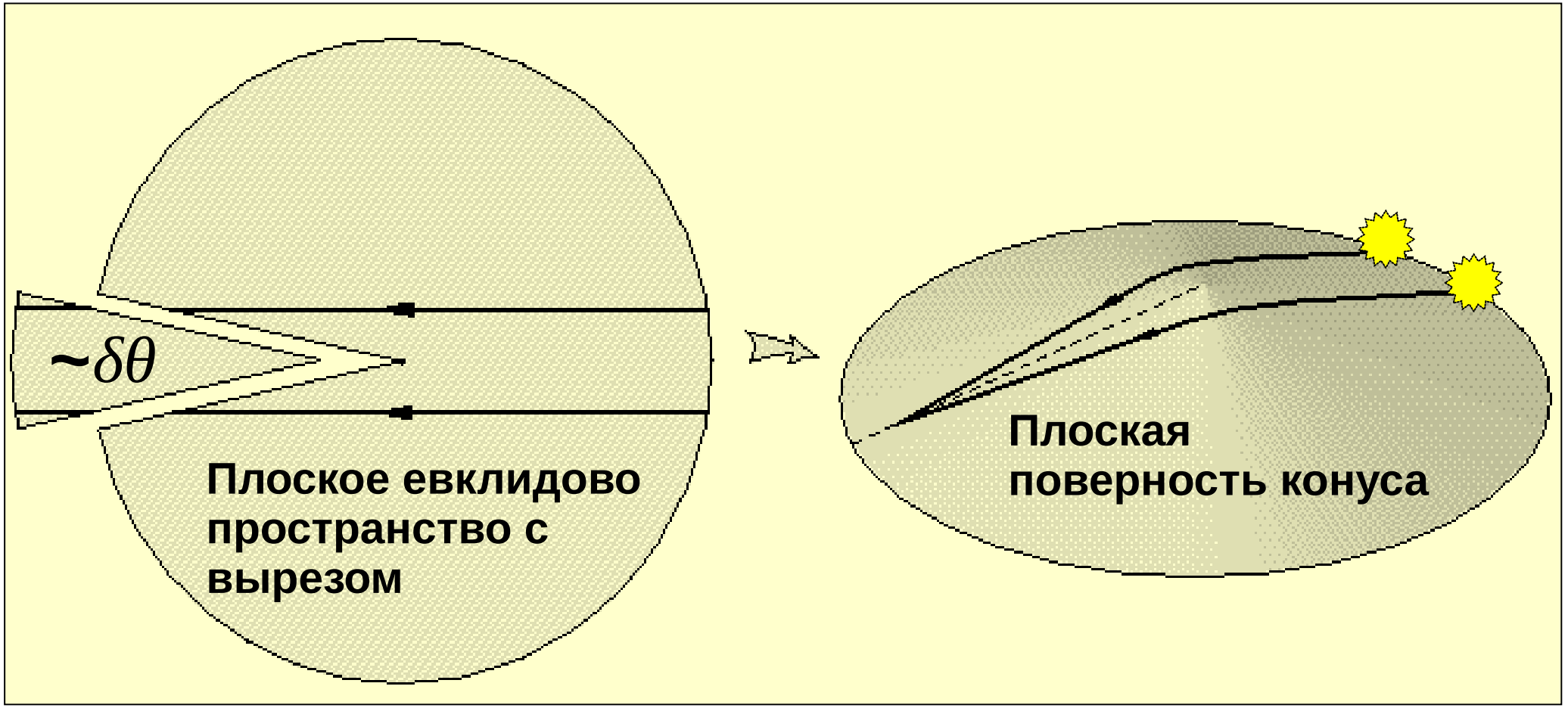




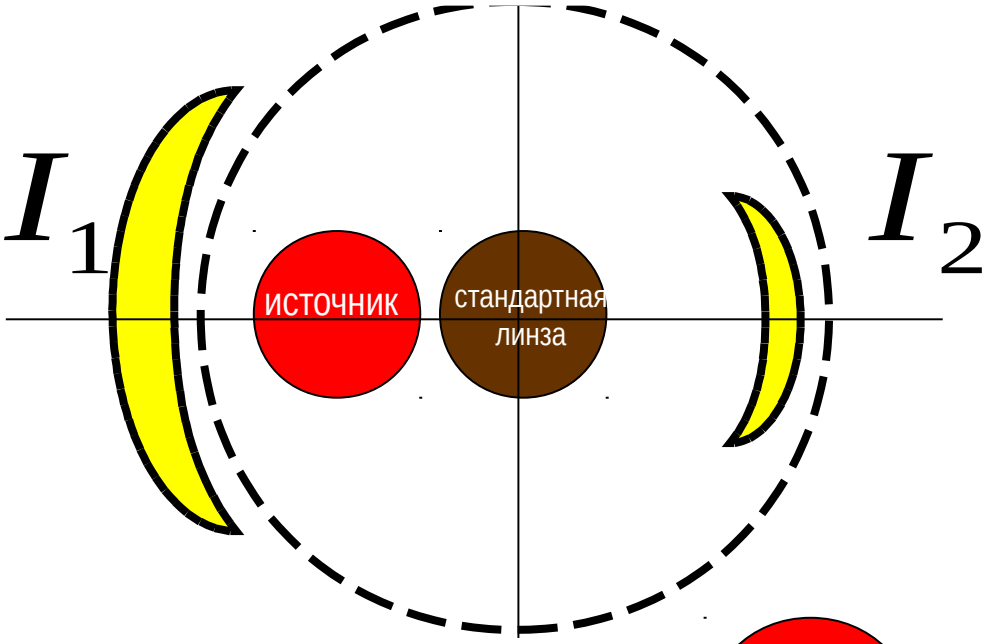

струна

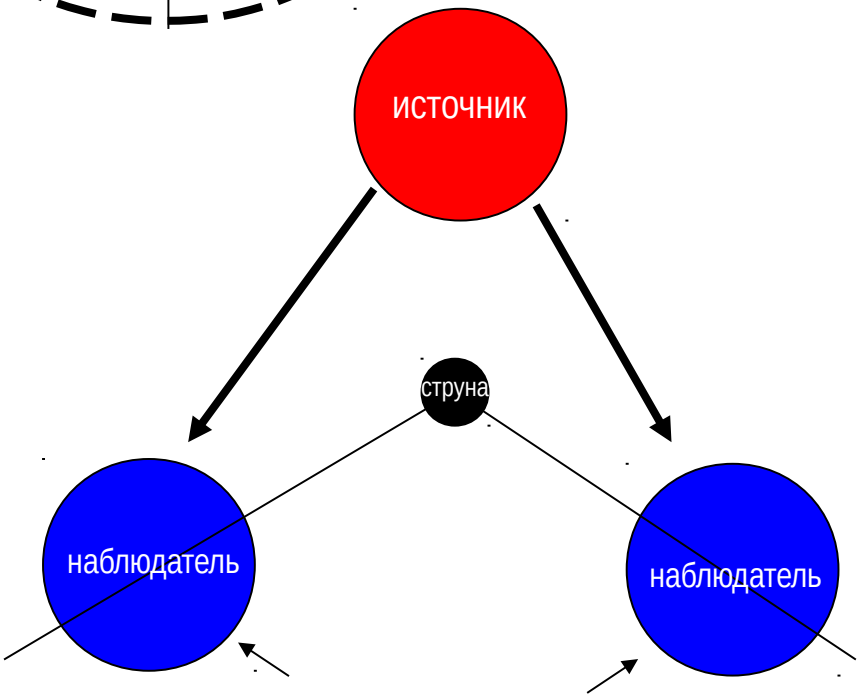


Вселенная в присутствии космической струны

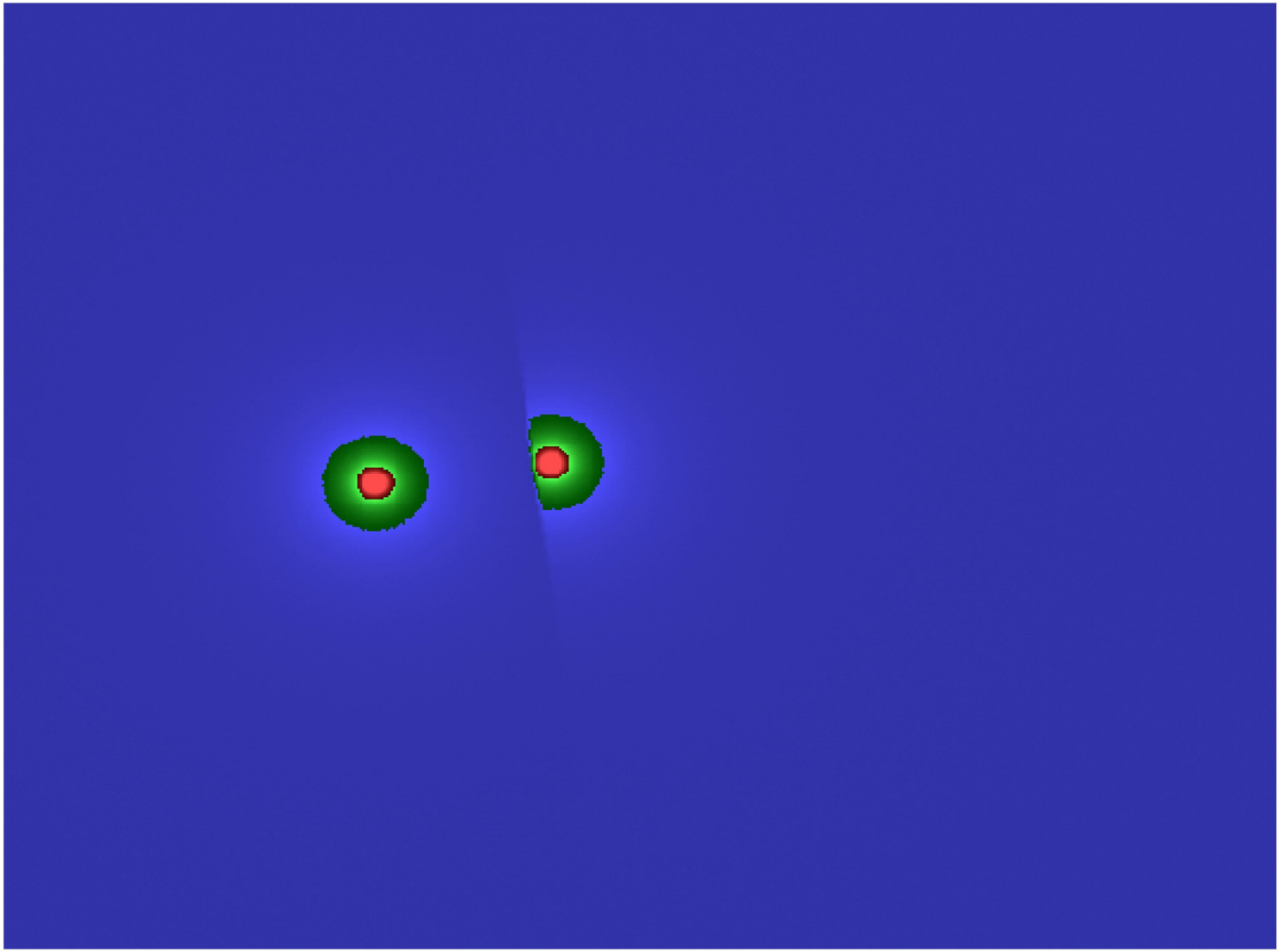


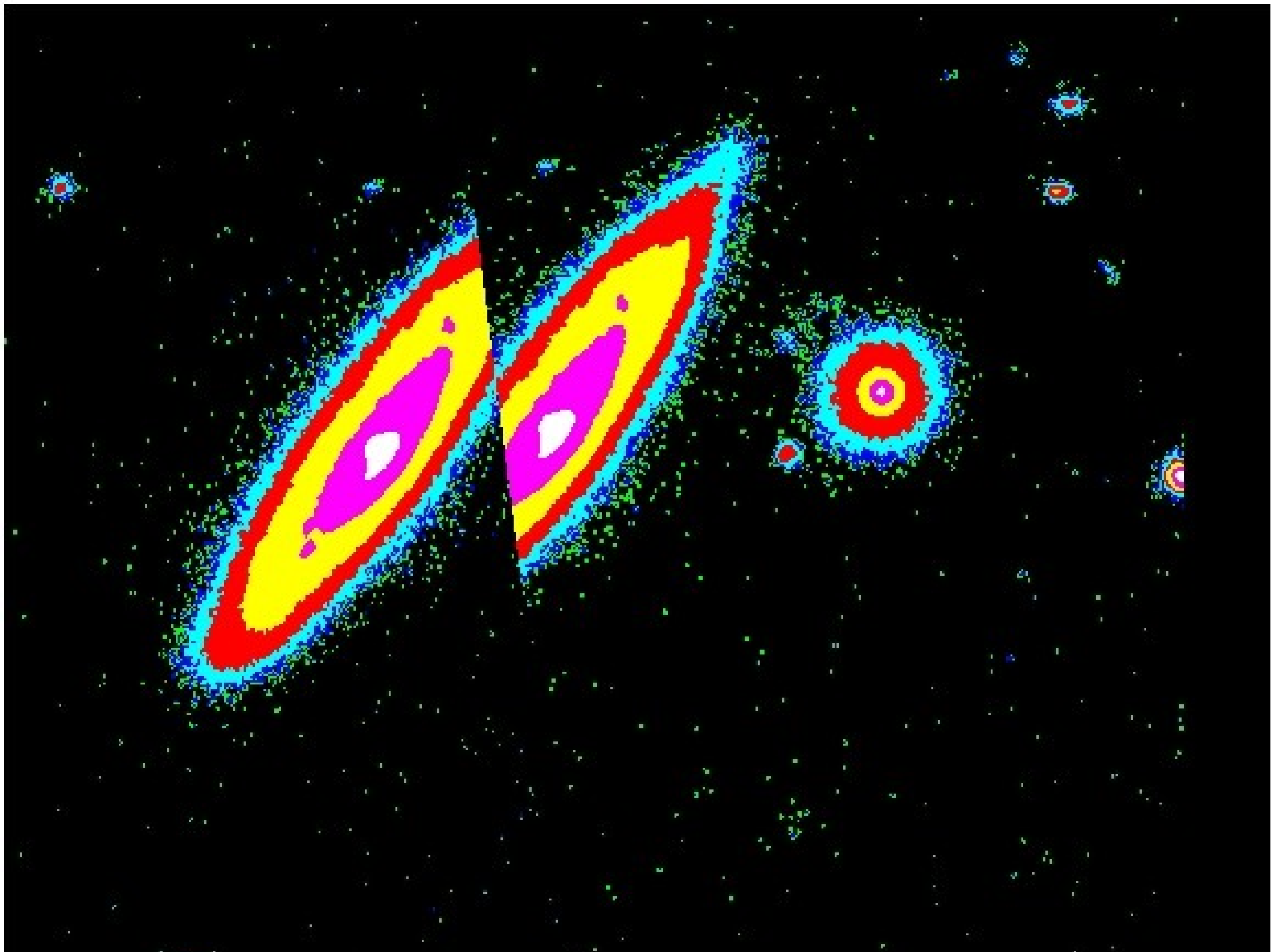
Отличие обычного гравитационного линзирования от линзирования космической струной

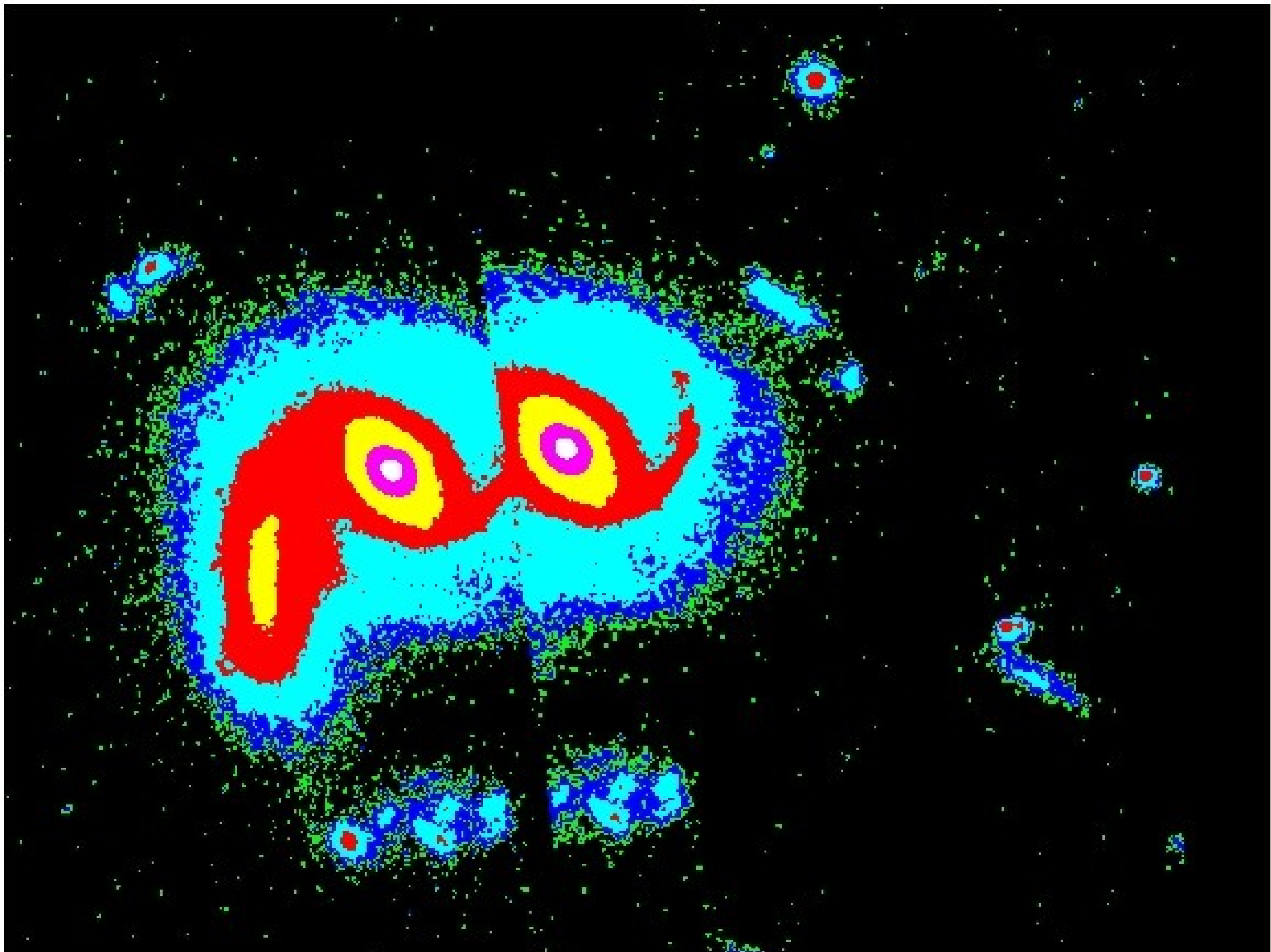


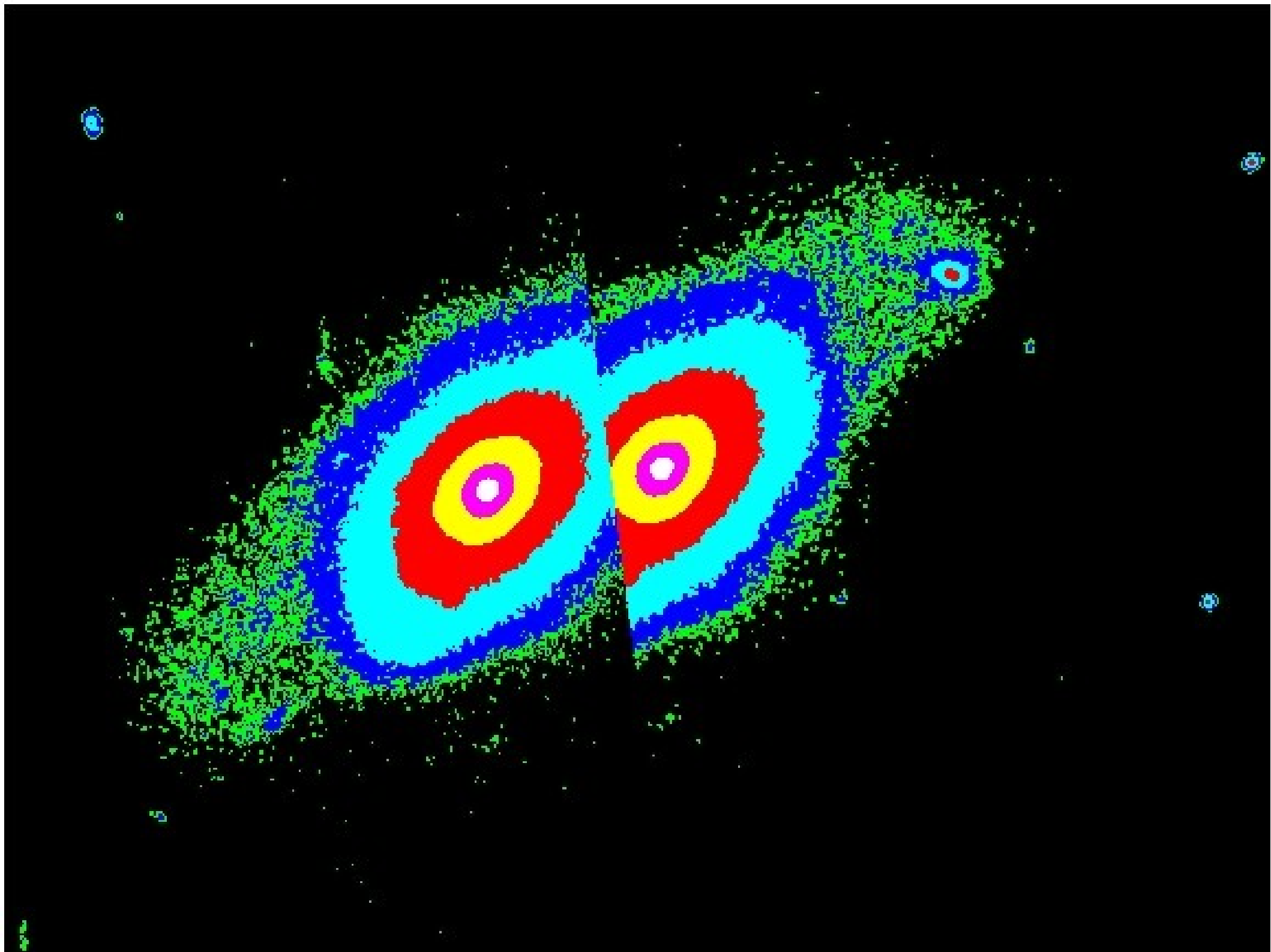


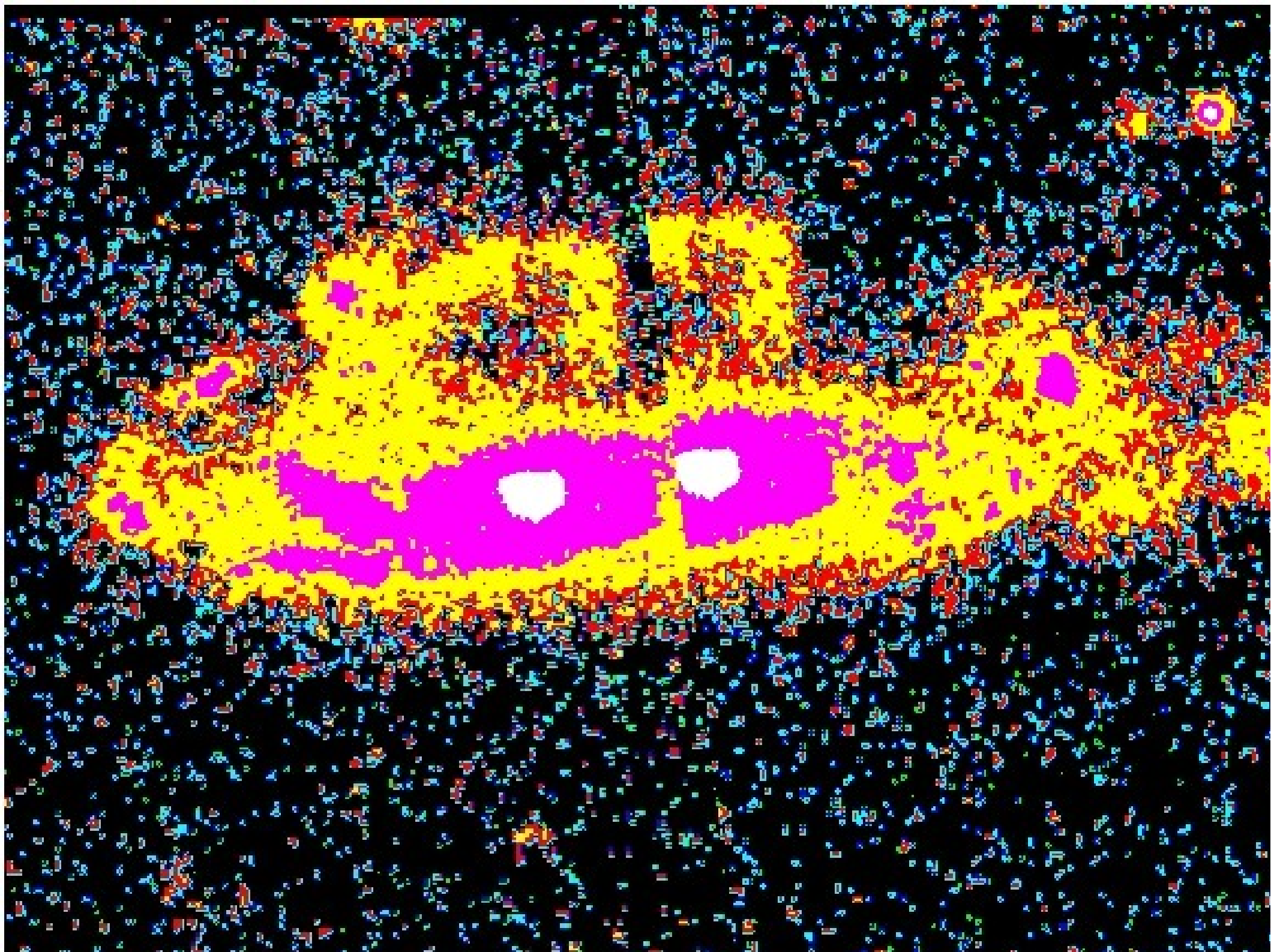
Модель эллиптической галактики, линзируемой на космической струне











MOND и f(R)-гравитация

$$a_N = G\frac{M}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

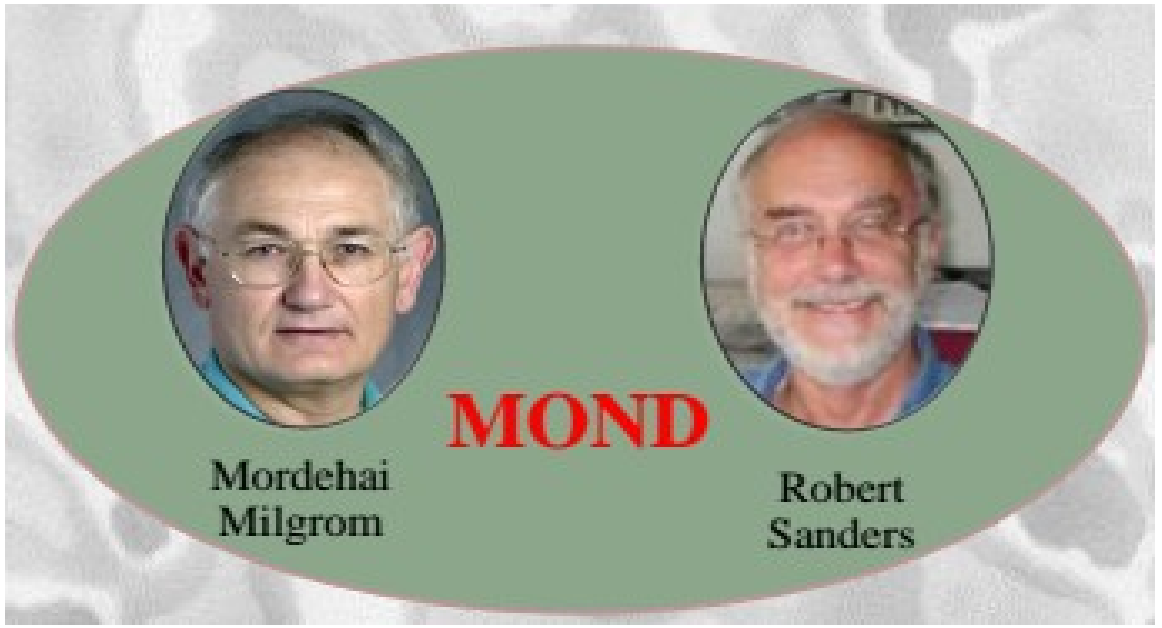
$$a_N = \mu\left(a/a_0\right)\cdot a$$

$$\mu\left(a/a_0\right) = \begin{cases} 1 & \text{для } a >> a_0 \\ a/a_0 & \text{для } a << a_0 \end{cases}$$

классический закон Ньютона $f = ma$

модифицированный закон Ньютона $f = ma^2$

$a_0 = 1.2\times 10$ м/сек^2 .



MOND и f(R)-гравитация

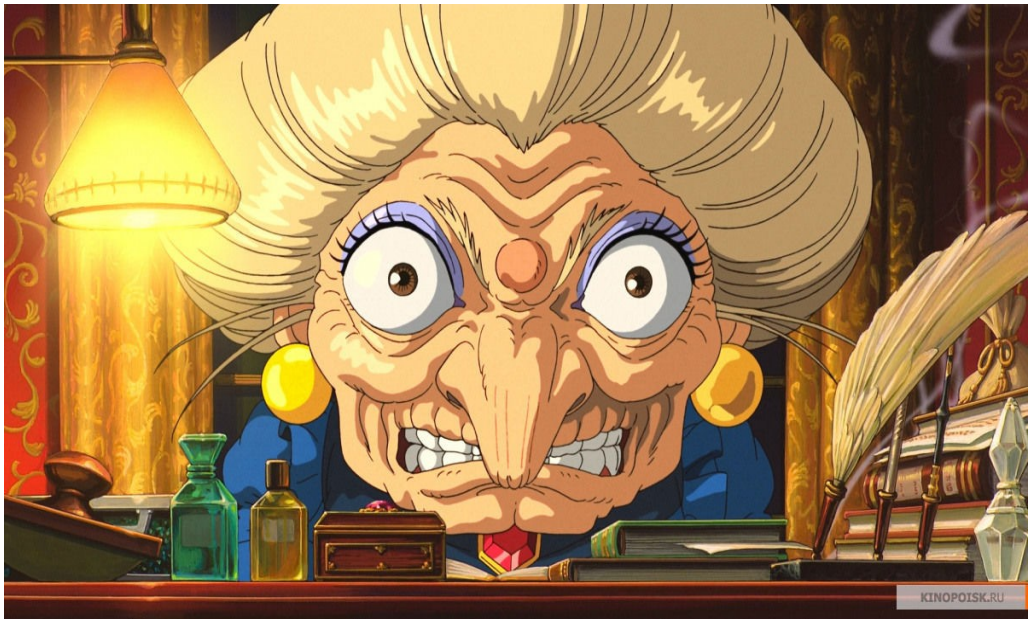
Видоизменение уравнений движения в общей теории относительности: вместо кривизны R в уравнениях стоит некоторая функция этой кривизны, f(R).

$$S = \int \frac{1}{2\kappa} R\sqrt{g}\ d^4x \quad \rightarrow \quad S = \int \frac{1}{2\kappa} f(R)\sqrt{g}\ d^4x$$

$$\kappa = 8\pi G c^{-4}$$

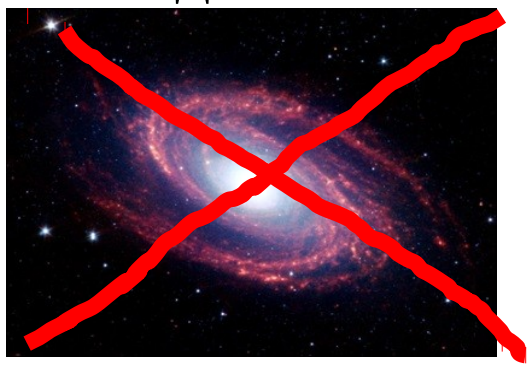
Внезапная смена парадигмы

БАРИОННЫЙ КРИЗИС

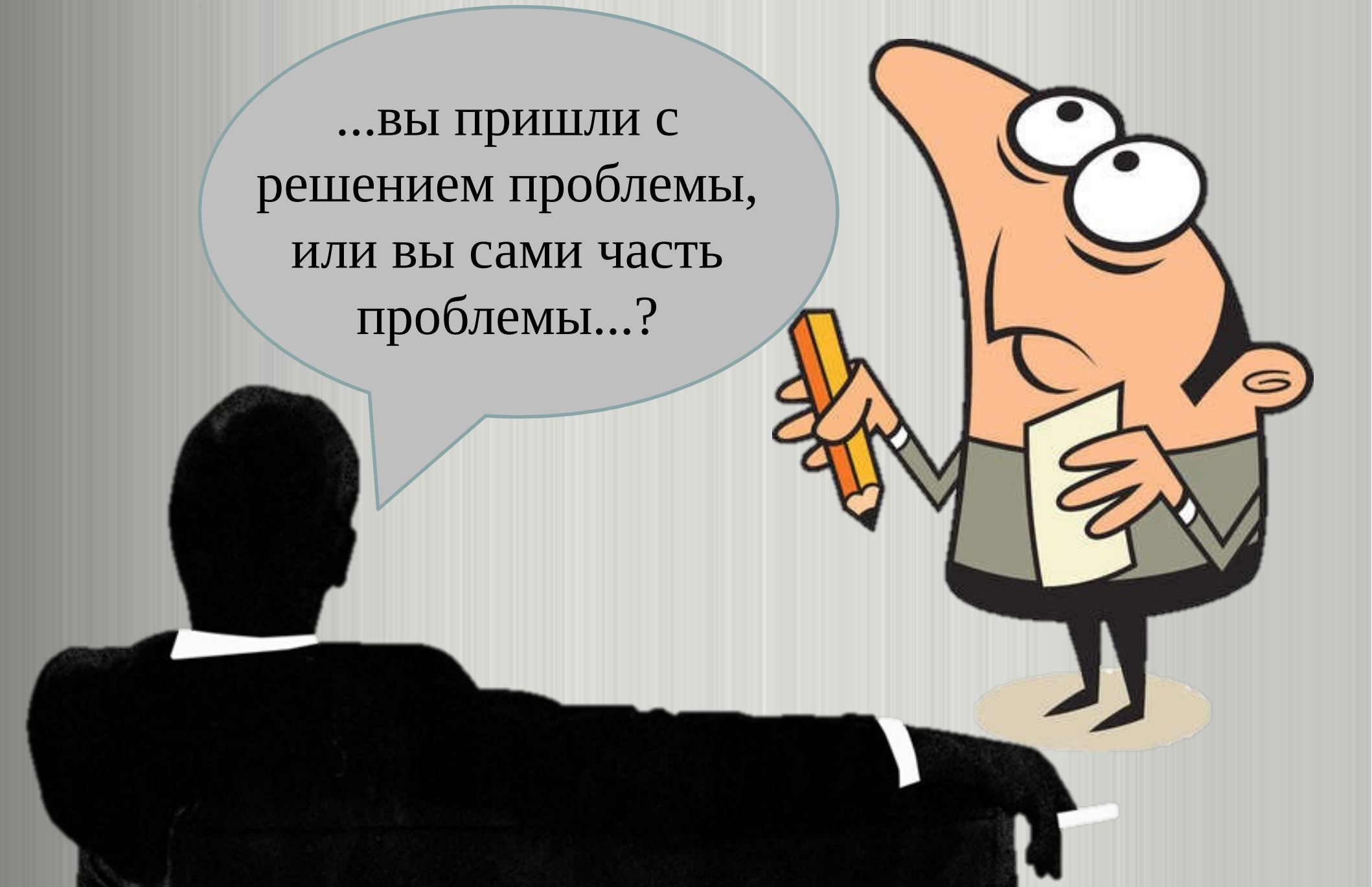


1. Механизм образования легких элементов в ранней Вселенной, подтвержденный наблюдениями, дает плотность барионов порядка $0.04\rho_c$, где критическая плотность есть: $\rho_c=3H^2/8\pi G$

2. Первичных флуктуаций барионной материи, которые видны в анизотропии реликтового излучения, сильно недостаточно, чтобы “запустить” процесс образование глалактик.



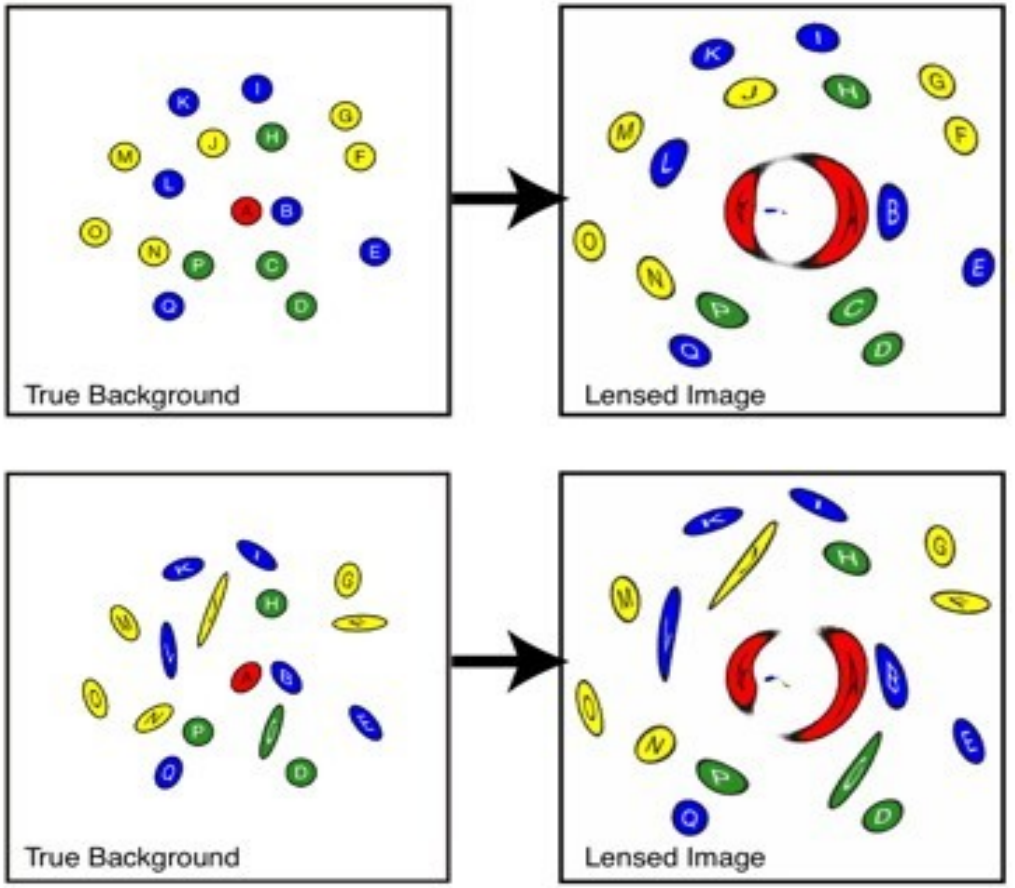
Темная материя как “спасательный жилет” для космологов

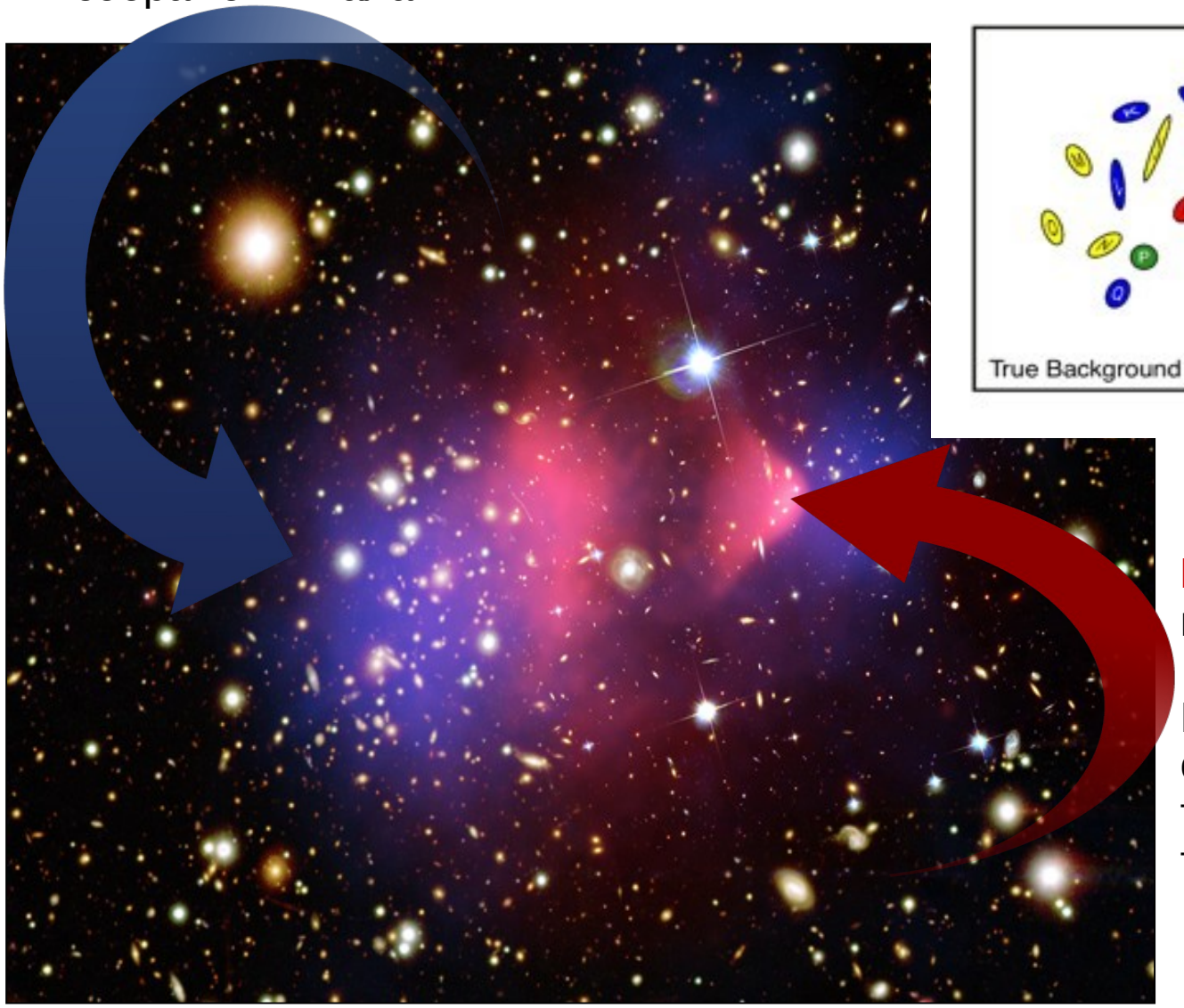


Аргумент в пользу темной материи

Скопление Пуля

Гравитационное взаимодействие скоплений галактик, образование ударной волны в межгалактической плазме (скопление Пуля)
Искусственным **синим цветом** показано распределение “невидимого вещества”, полученное по анализу распределения гравитационных полей, по искажениям изображений галактик.





Красный цвет – скопление газа высокой температуры.

Несовпадение красной и синей областей служит поддержкой теории темной материи и против теории MOND.

Насколько “темна” темная материя?

Взаимодействует ли
темная материя сама
с собой?

Барионное вещество показывает распределение темной материи

но…

гравитационно-
линзированное изображение
значительно более
удаленной галактики,
находящейся за скоплением

четыре сливающиеся галактики

Скопление галактик Абель 3827

Следы взаимодействия темной материи?

Наблюдения четырех сливающихся галактик (в центре снимка) свидетельствуют о том, что темная материя вокруг одной из этих галактик не движется вместе с этой галактикой, что, возможно, говорит о наличии взаимодействий неизвестной природы с участием темной материи.

Вопросы вместо заключения

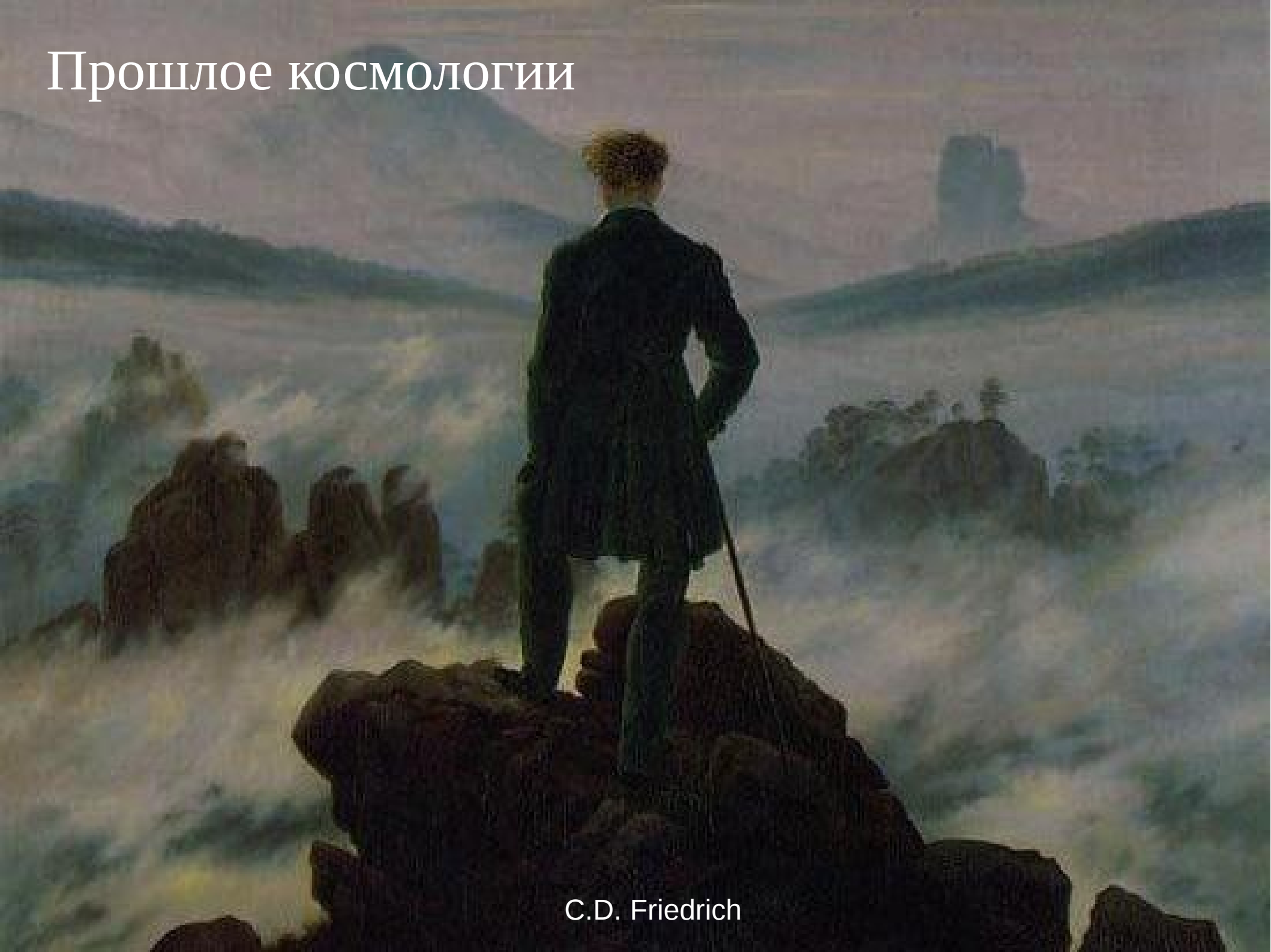
- Существует ли темная материя?
- Вспомним историю с планетой Вулкан.

- Как много темной материи?
- Благодаря темной энергии, темной материи меньше, чем предполагалось.

- Из чего состоит темная материя?
- Пока неизвестно.

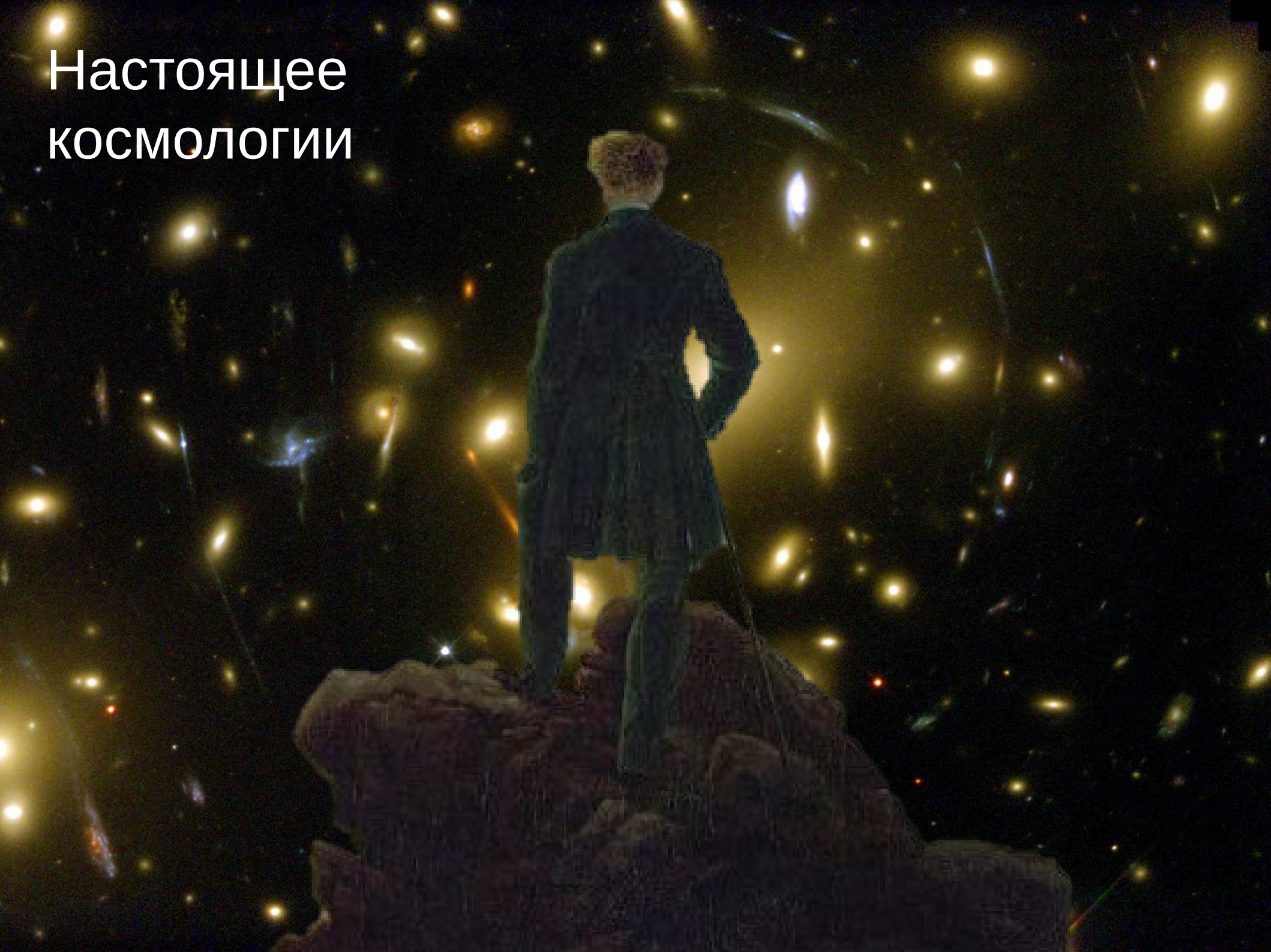
- Взаимодействует ли темная материя сама с собой?
- Возможно…

Прошлое космологии

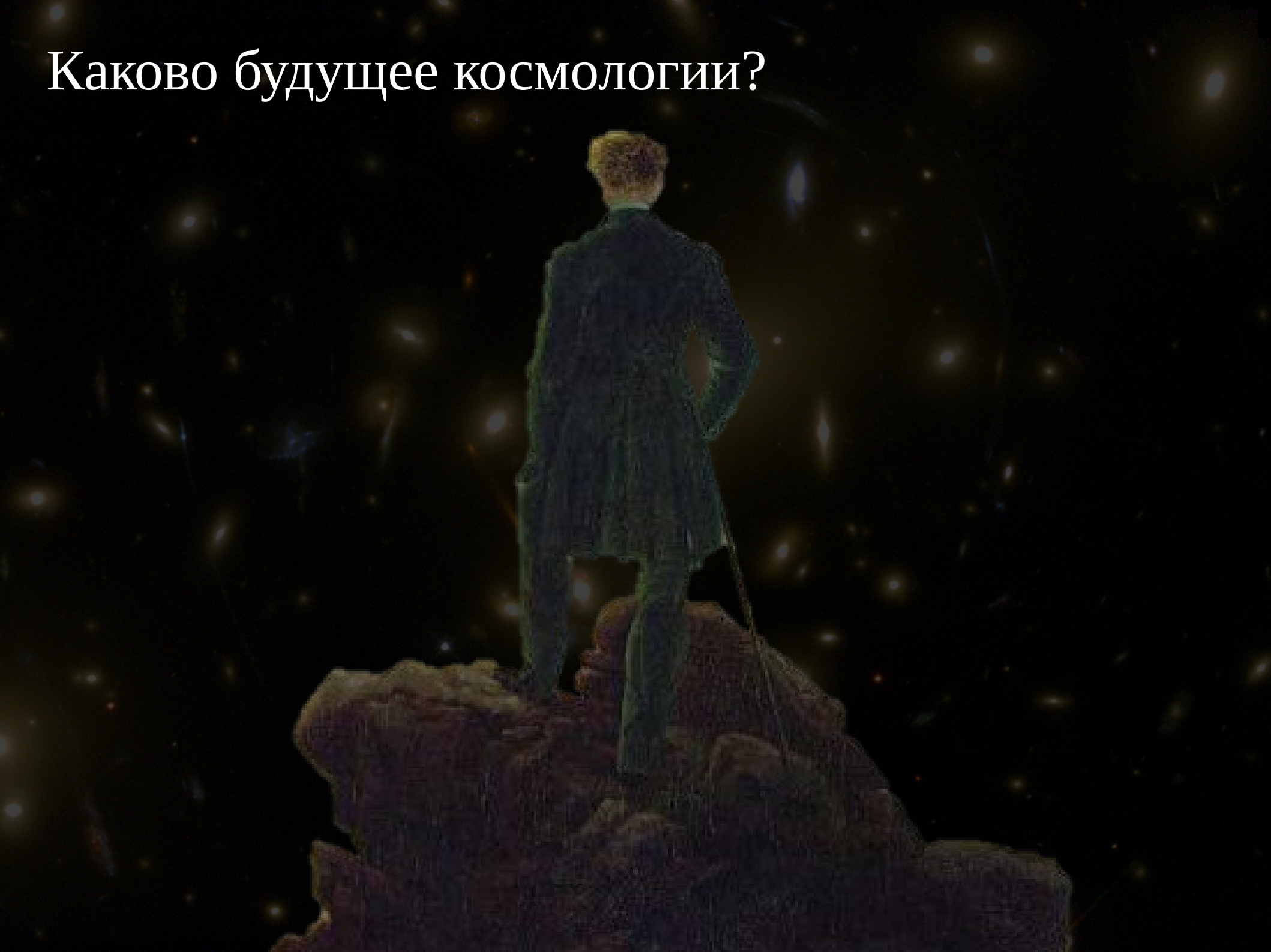


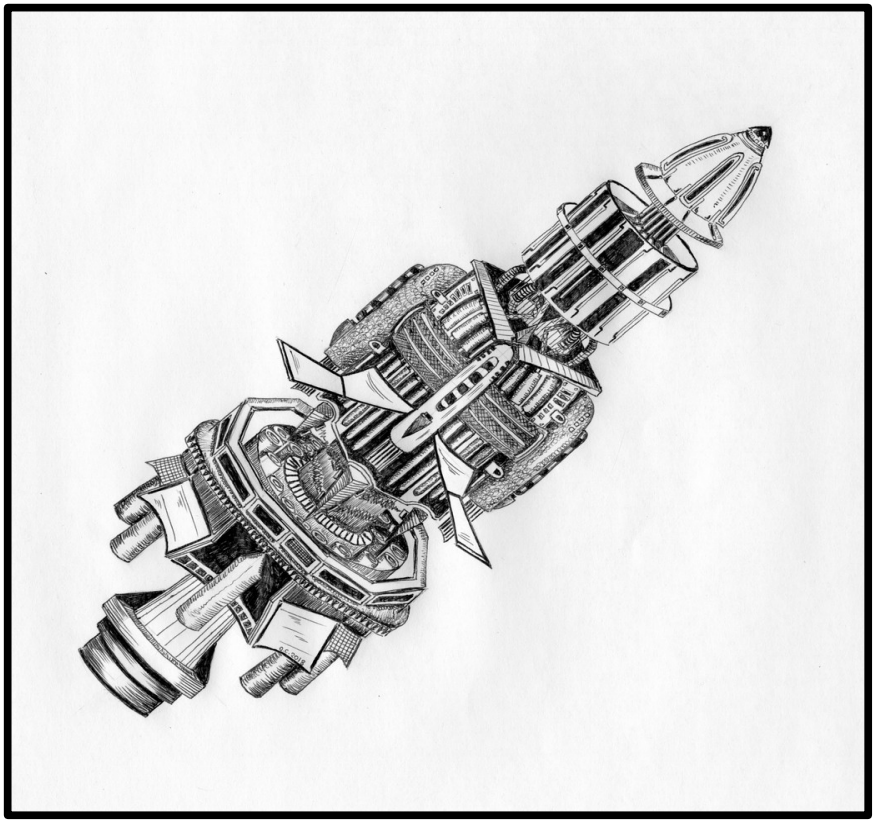
C.D. Friedrich

Настоящее космологии



Каково будущее космологии?



ЛЕКЦИЯ 5

Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной. Ускоренное расширение современной Вселенной. Теория инфляции