Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИЯ 10

Космические струны: модели, свойства, основные методы поиска наблюдательными методами

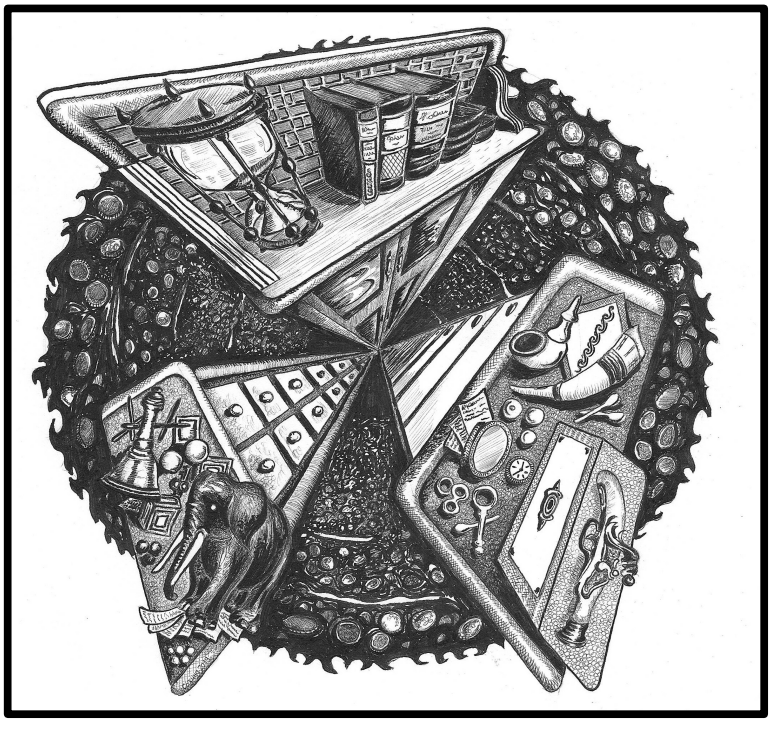
д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна
(cosmologia@yandex.ru)

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



1. Симметрии в физике*

- Симметрии – фундаментальное понятие физики, в том числе, физики элементарных частиц.
- Физические законы должны быть инвариантны при определенных видах преобразований (группах преобразований).
- Поиск единой теории взаимодействий – это поиск единой симметрии взаимодействий частиц и полей.

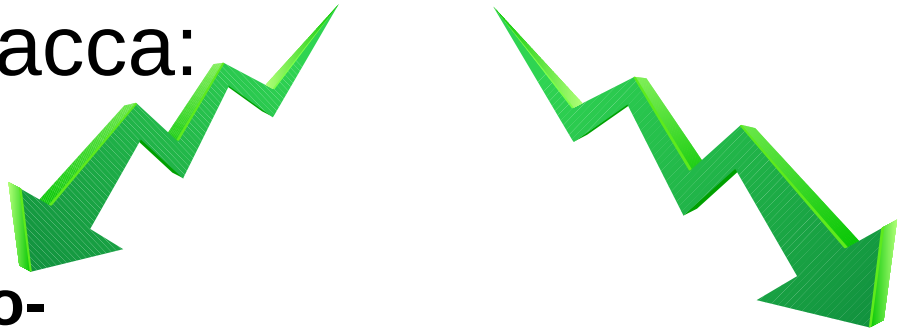
* Дополнительный материал, не входит в зачет МФК

Симметрии в физике. Теорема Нётер

- Однородность пространства (симметрия относительно трансляций) – **закон сохранения импульса**
- Изотропность пространства (симметрия относительно поворотов) – **закон сохранения момента импульса**
- Однородность времени (произвол выбора начала отсчета по времени) – **закон сохранения энергии**

Симметрии в физике

- Симметрии квантовой теории поля делятся на два класса:



Пространственно-временные симметрии

Относятся к пространству-времени, через которое распространяется поле;

Пустое пространство обладает группой **симметрии Пуанкаре** (перемещения, вращений и преобразование Лоренца).

Внутренние симметрии

Связывают поля друг с другом, преобразуя их одно в другое.

Чтобы реализовать эти симметрии, поле должно иметь некоторые четко определенные свойства преобразования под действием группы симметрии (т.н. **представление группы**).

Метки различных представлений часто называют **квантовыми числами** (массы частиц, спины частиц и др.).

Релятивистская квантовая теория поля определяется представлениями составляющих ее полей (т. е. их масс, спинов и внутренних квантовых чисел), которые затем “собираются” в инвариантный лагранжиан.

Симметрии в физике

- **Калибровочные** (локальные), при которых лагранжиан инвариантен при преобразованиях, разных в каждой точке.
- **Глобальные** или жесткие, если инвариантность существует только для преобразований, которые постоянны в пространстве и времени

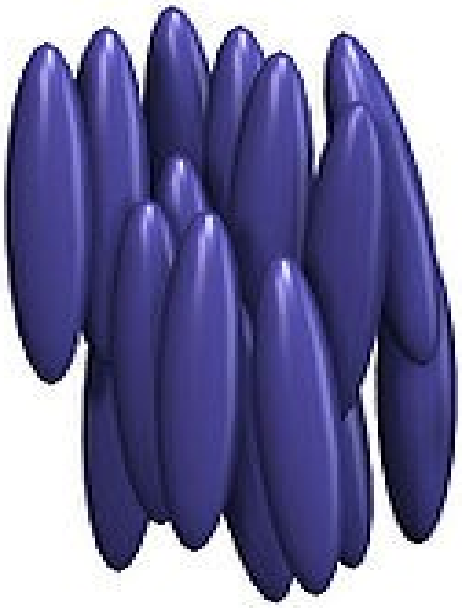
Суперсимметрия объединяет пространственно-временную и внутреннюю симметрии, устанавливая соответствие между бозонами (полями) и фермионами (веществом).

Скрытые и нарушенные симметрии

- Пусть лагранжиан обладает какой-то симметрией G (например, относительно вращений) и той же самой симметрией G обладает основное состояние для рассматриваеомй теории (т.е. состояние, минимизирующее плотность энергии).
- Тогда частицы-переносчики взаимодействия в этой теории должны быть безмассовыми. Но это верно только для электромагнитного поля. Глюоны и W,Z бозоны – массивны.
- Решением проблемы – нарушение симметрии основного состояния с помощью т.н. **механизма Хиггса:**

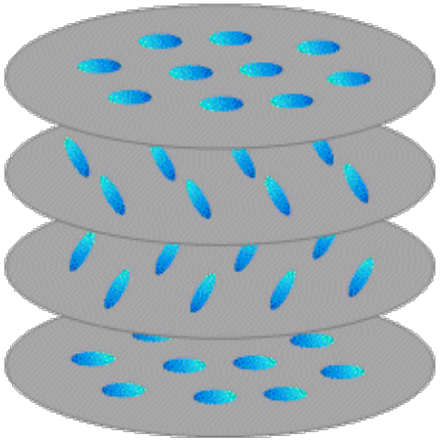
Вводится скалярное поле φ, которое преобразующих нетривиально под группой симметрии G, и построения для них плотности энергии, которая минимизируется при некотором ненулевом значении φ0. Тогда теория имеет основное состояние, инвариантное только под подгруппой G, которая оставляет φ0 неизменным. Мы говорим, что симметрия G нарушена до некоторой симметрии H.

Аналогии из физики конденсированных сред

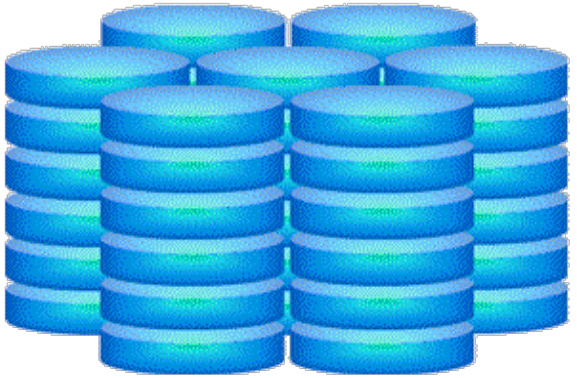


Nematic Phase

Smectic Phase



Cholesteric Phase
(Chiral Nematic Phase)



Discotic Phase
(Columnar Phase)

Потенциал

Пусть в теории есть скалярное поле φ.

Среднее значение этого поля есть его вакуумное значение <φ>. Это вакуумное среднее дает массы частицам (т.н. механизм Хиггса в Стандартной модели физики частиц).

$$\mathbf{m_i = h_i \langle \varphi \rangle}$$

(масса W и Z бозонов появляется за счет появления вакуумного среднего поля Хиггса)

Лагранжиан – характеристика динамики системы. В простейшем случае – это разность кинетической и потенциальной энергии:

$$\mathcal{L} = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - V(\phi)$$

Потенциал, эффективный потенциал

При T=0 поле φ должно быть однородно в пространстве и во времени и должно доставлять минимум потенциалу V(φ), т.к. при этом энергия системы будет минимальна.

плотность энергии

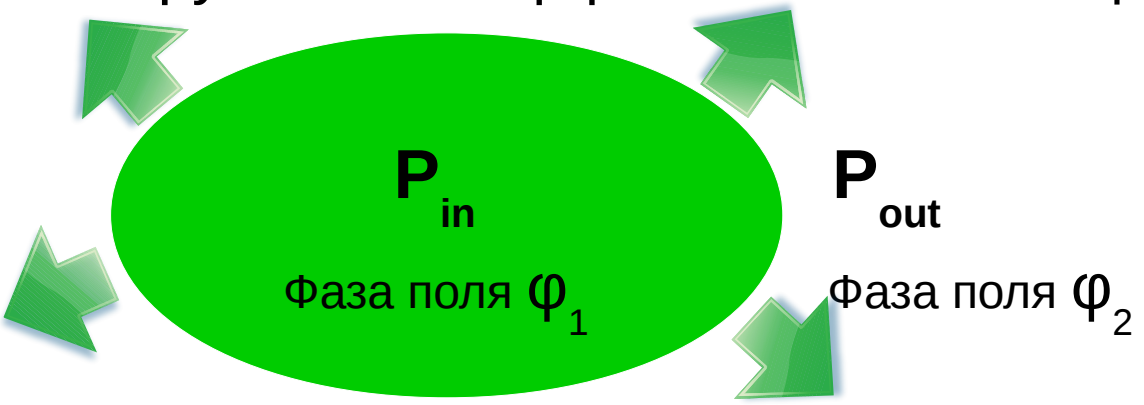
$$\mathcal{L} = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - V(\phi)$$

Из условия минимума потенциала и определяется величина поля, которое развиватся в данной среде.

При T ≠ 0 минимизируется т.н. эффективный потенциал $V_{eff} = -P$

Если $P_{in} > P_{out}$

То внутренняя область стремится расшириться и преобладать над остальными



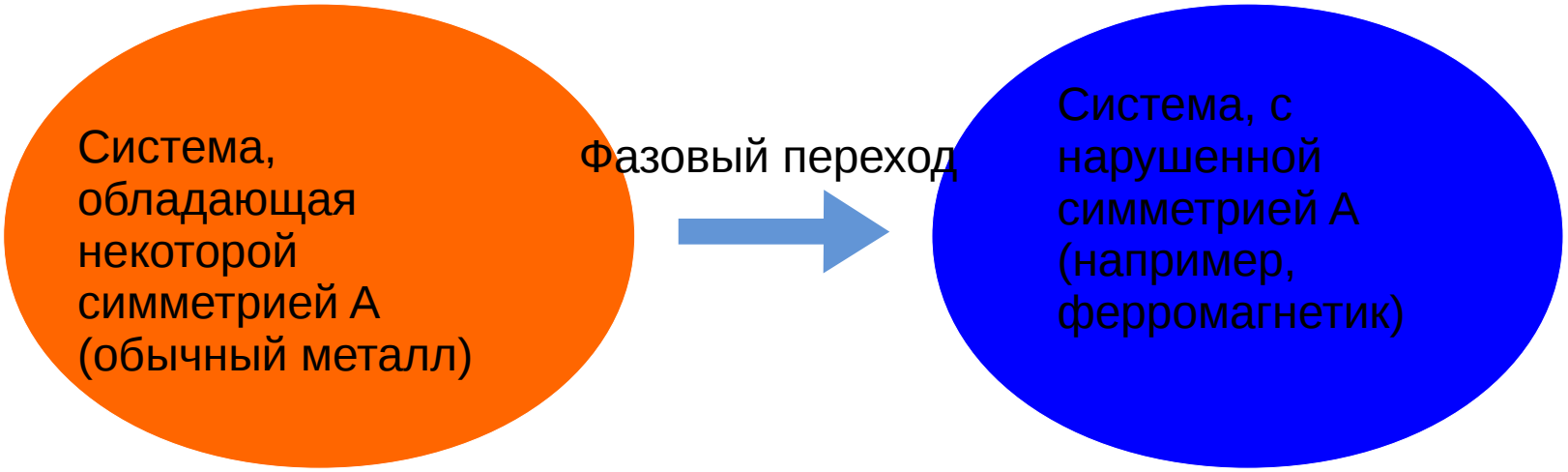
Фазовые переходы в ранней Вселенной

- Периоды в развитии ранней Вселенной, когда было нарушено тепловое равновесие, наблюдательные проявления которых могут быть и в современной Вселенной: поиск кандитатов темной материи, объяснение барионной асимметрии, топологические дефекты

Фазовые переходы

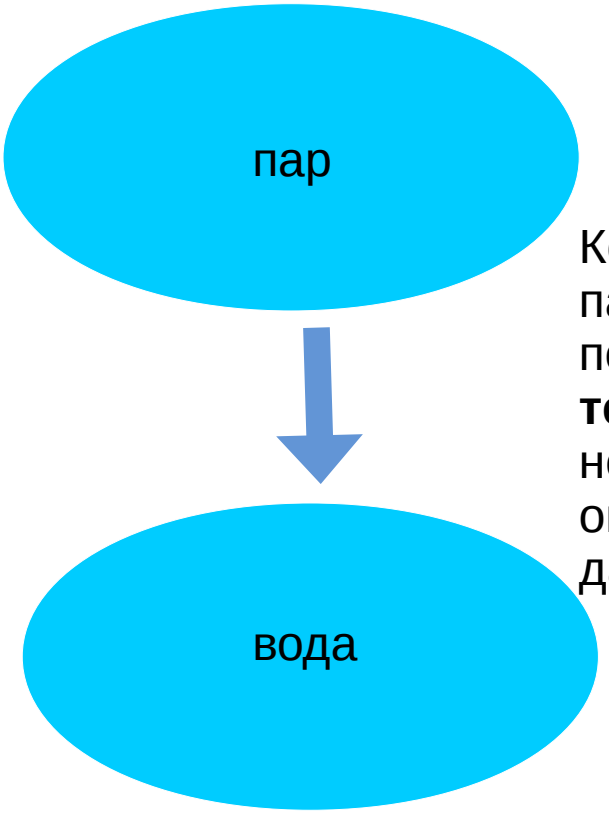
- Фазовые переходы – хорошо известное понятие для теории конденсированных сред, в термодинамике, в статистичекой физике, в теории поля и в физике элементарных частиц

Магнетик, при понижении **температуры**, нормальный металл превращается в ферромагнетик, возникает намагниченность, нарушается симметрия относительно вращений, потому что возникает избранное направление, связанное с магнитным полем



Фазовые переходы

Наличие фазового перехода определяется уже вторым параметром, **давлением**



Конденсация пара при понижении **температуры,** но при определенном давлении

Фазовые переходы в физике элементарных частиц

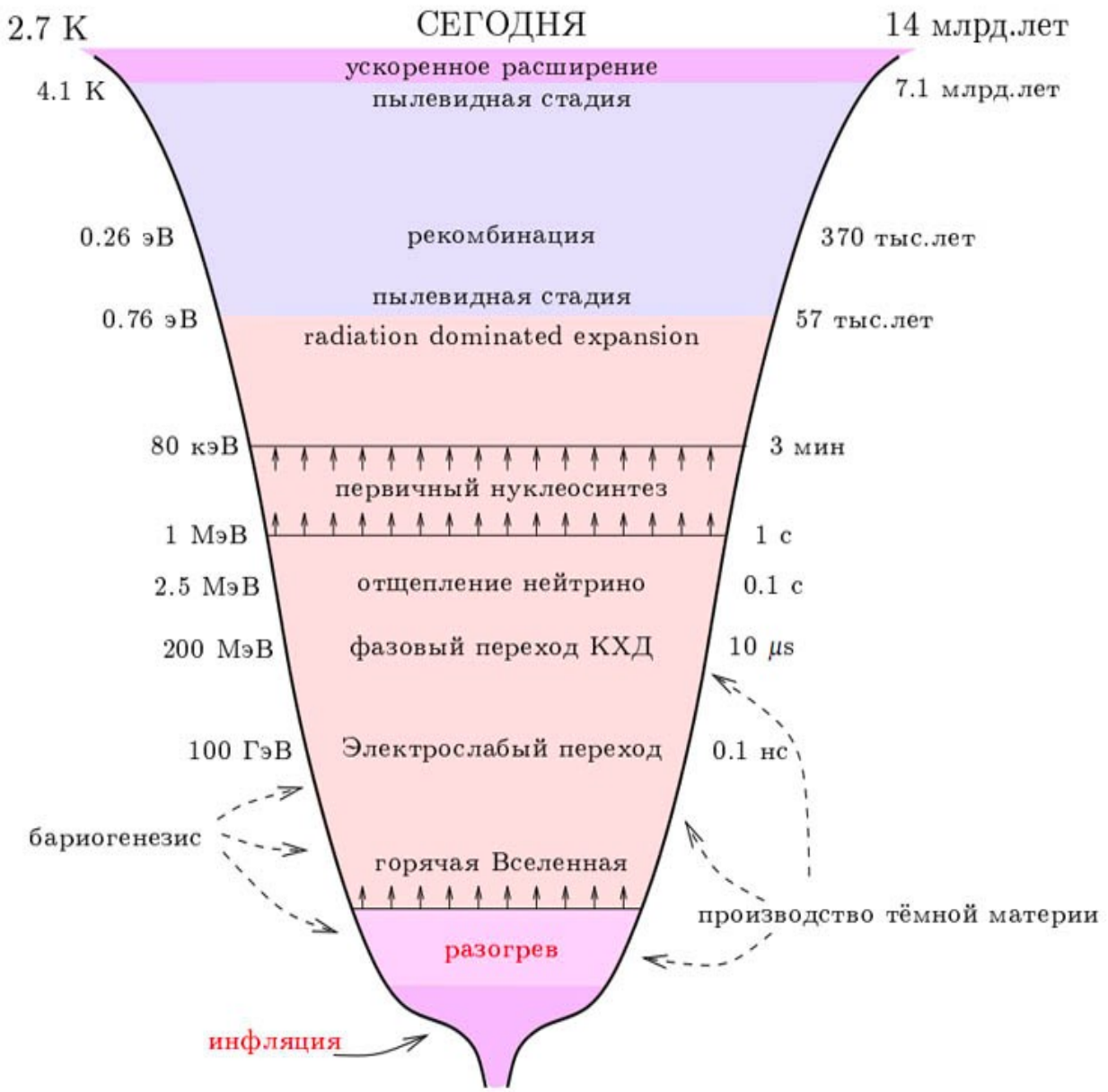
Теория Великого объединения

?

Ненарушенная электрослабая симметрия (безмассовые W, Z бозоны)

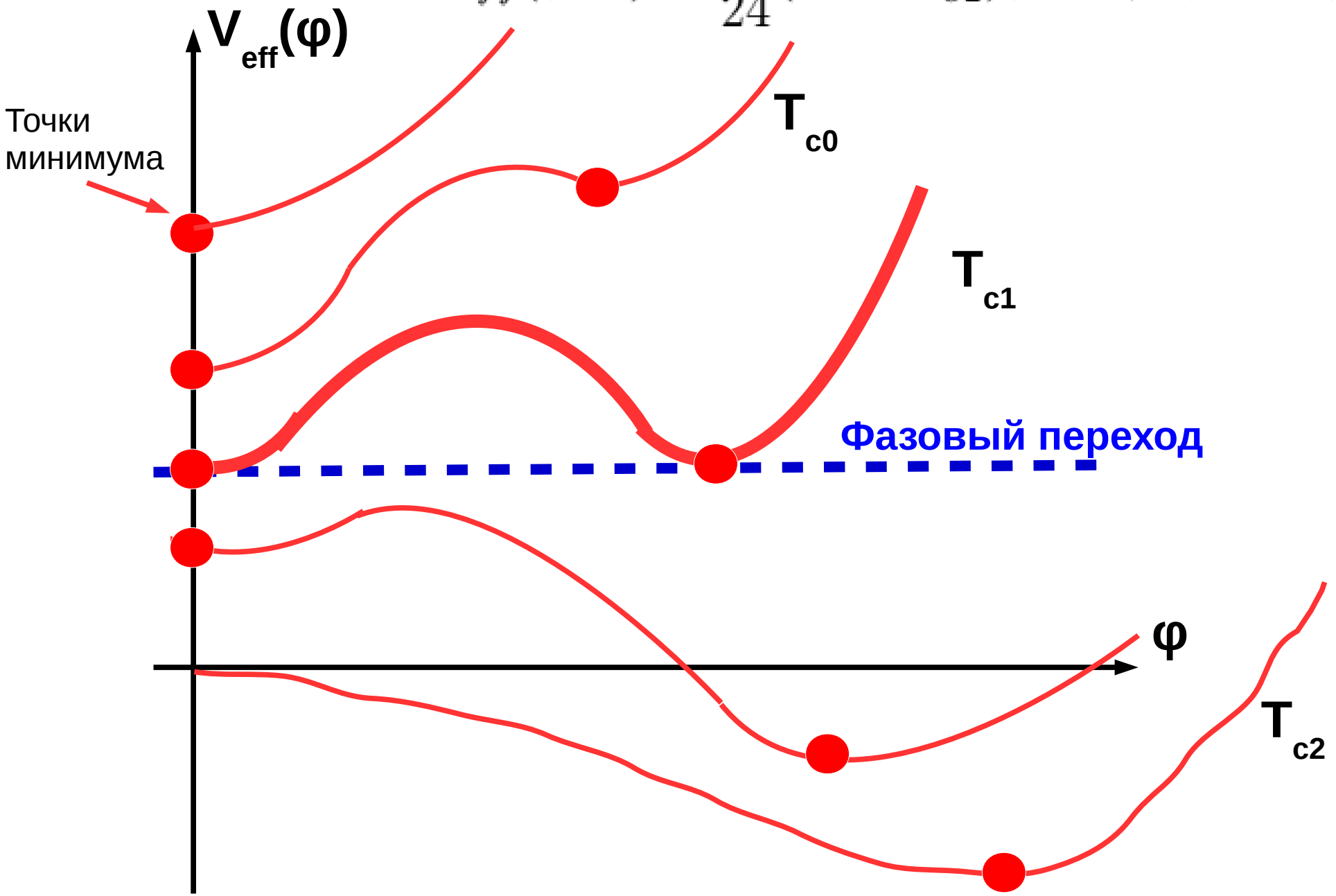
?

Нарушенная электрослабая симметрия (массивные W,Z бозоны)

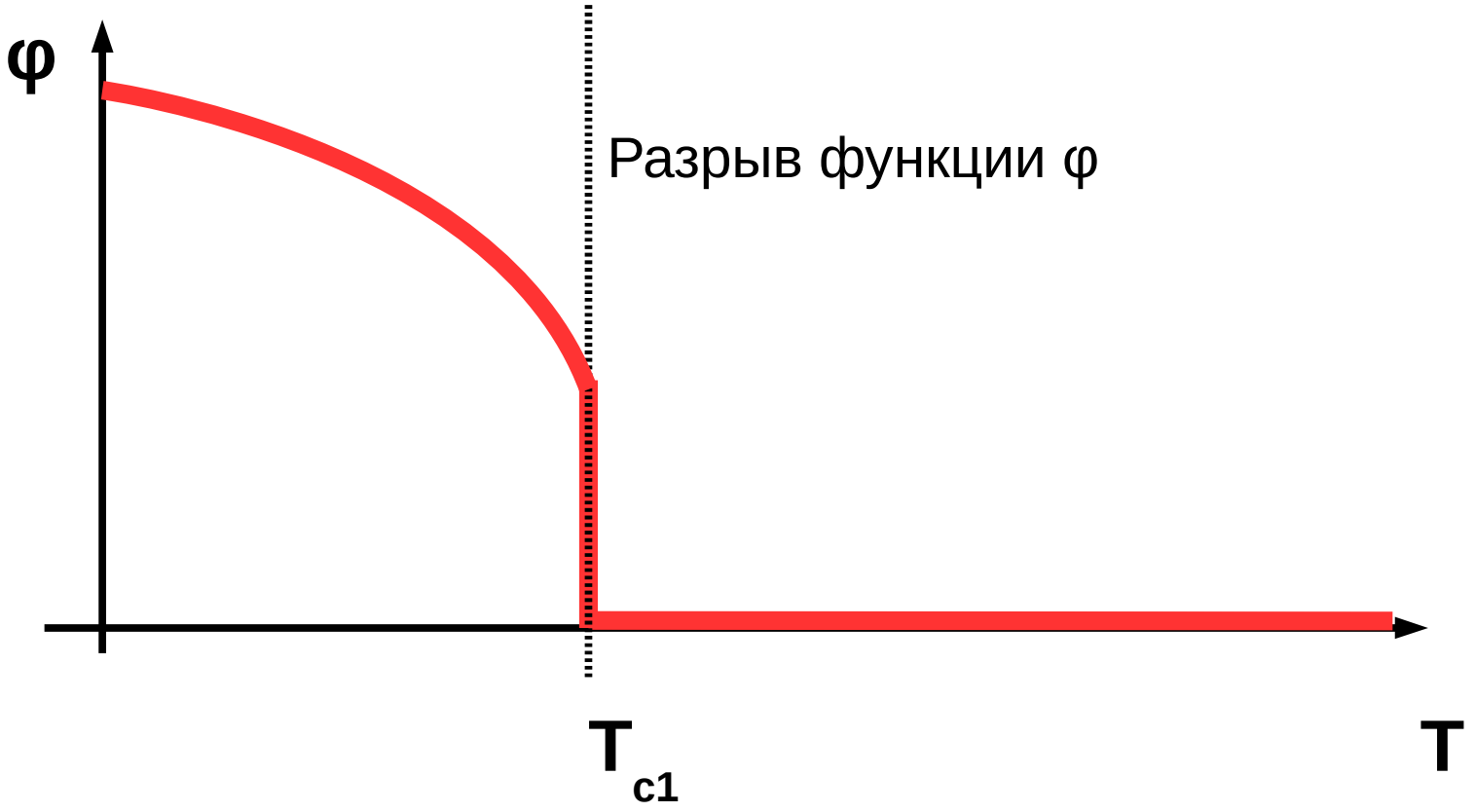


Фазовые переходы I рода

$$V_{eff}(\phi, T) = \frac{\alpha}{24}(T^2 - T_{c2}^2)\phi^2 - \gamma T \phi^3 + \lambda \phi^4$$



φ(T)



$$V_{eff}(\phi, T) = \frac{\alpha}{24}(T^2 - T_{c2}^2)\phi^2 - \gamma T\phi^3 + \lambda\phi^4$$

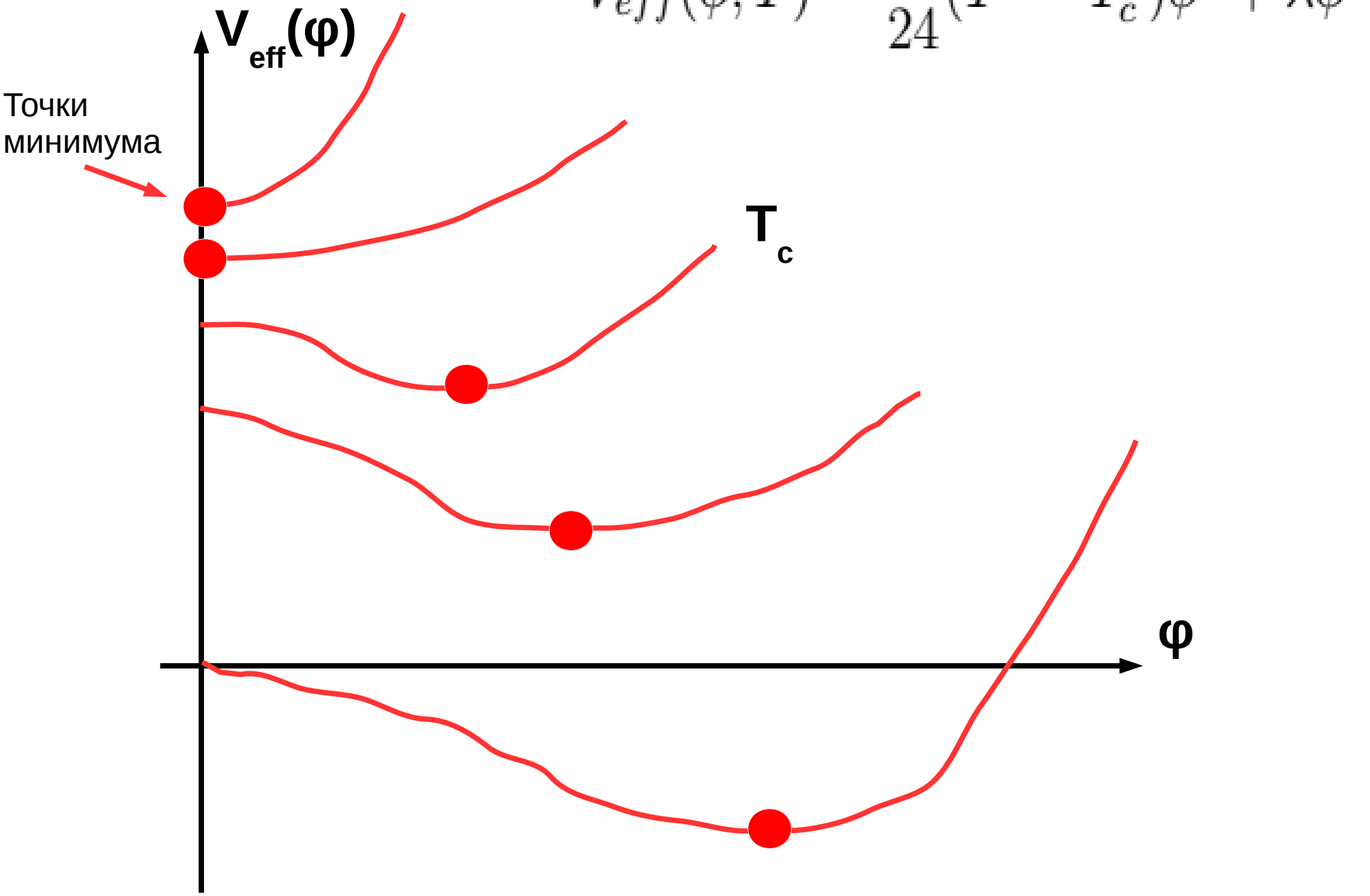
При T=0: $\langle\varphi\rangle = \sqrt{\frac{\alpha}{48\lambda}}T_{c2}$

При $T=T_{c2}$: $\varphi(T_{c2}) = \frac{3\gamma}{4\lambda}T_{c2}$

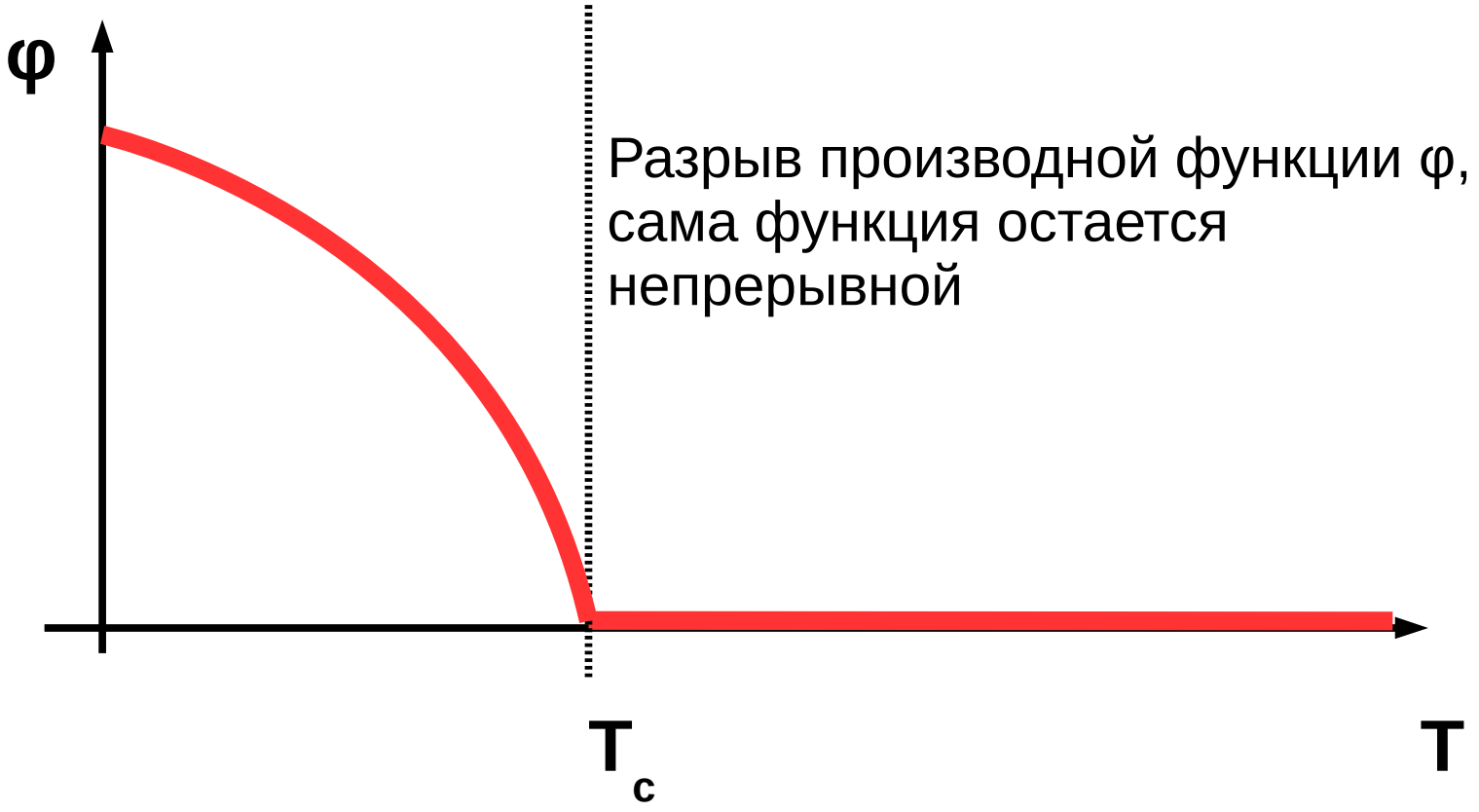
При $T=T_{c1}$: $\varphi(T_{c1}) = \frac{\gamma}{2\alpha}T_{c1}$

Фазовые переходы II рода

$$V_{eff}(\phi, T) = \frac{\alpha}{24}(T^2 - T_c^2)\phi^2 + \lambda\phi^4$$



φ(T)


φ
Разрыв производной функции φ, сама функция остается непрерывной
T c
T

$$V_{eff}(\phi, T) = \frac{\alpha}{24}(T^2 - T_c^2)\phi^2 + \lambda\phi^4$$

При $T>T_c$: $\varphi(T)=0$

При $T<T_c$: $\varphi(T)=$ $\sqrt{\frac{\alpha}{48\lambda}}\sqrt{T_c^2 - T^2}$

2. Топологические дефекты

- Монополи
- Космические струны
- Доменные стенки
- Текстуры
- Комбинированные дефекты

Доменные стенки

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 + V(\phi).$$

– полная энергия системы (сумма кинетической и потенциальной энергий)

$$\phi \leftrightarrow -\phi.$$

– скалярное поле с симметрией относительно отражения

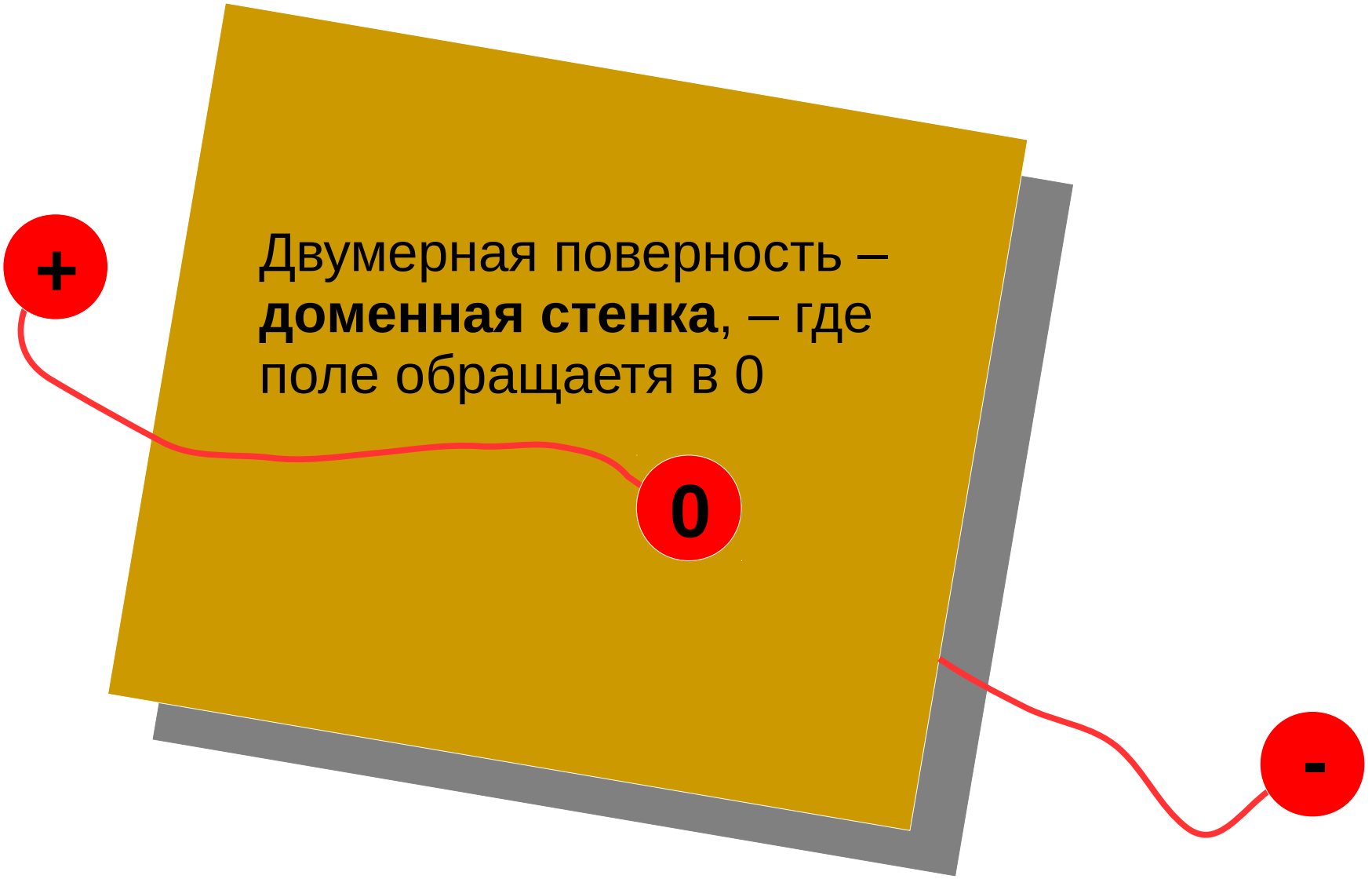
$$V(\phi) = \frac{1}{8}\lambda(\phi^2 - \eta^2)^2$$

– потенциал скалярного поля с симметрией относительно отражения

$$\phi = \phi_{\pm} = \pm\eta.$$

– состояние равновесия (значения поля, в которых потенциал обращается в ноль)

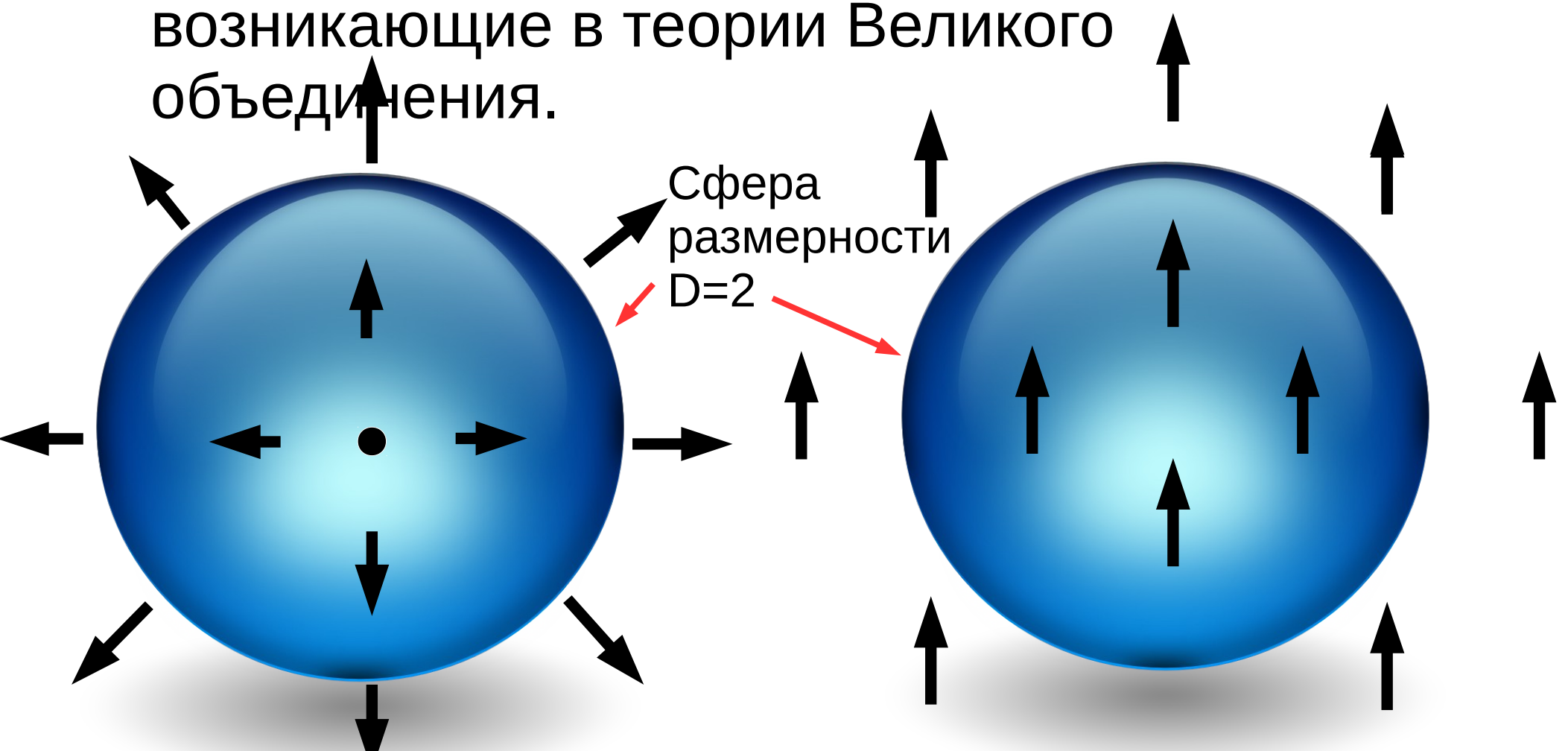
Доменные стенки



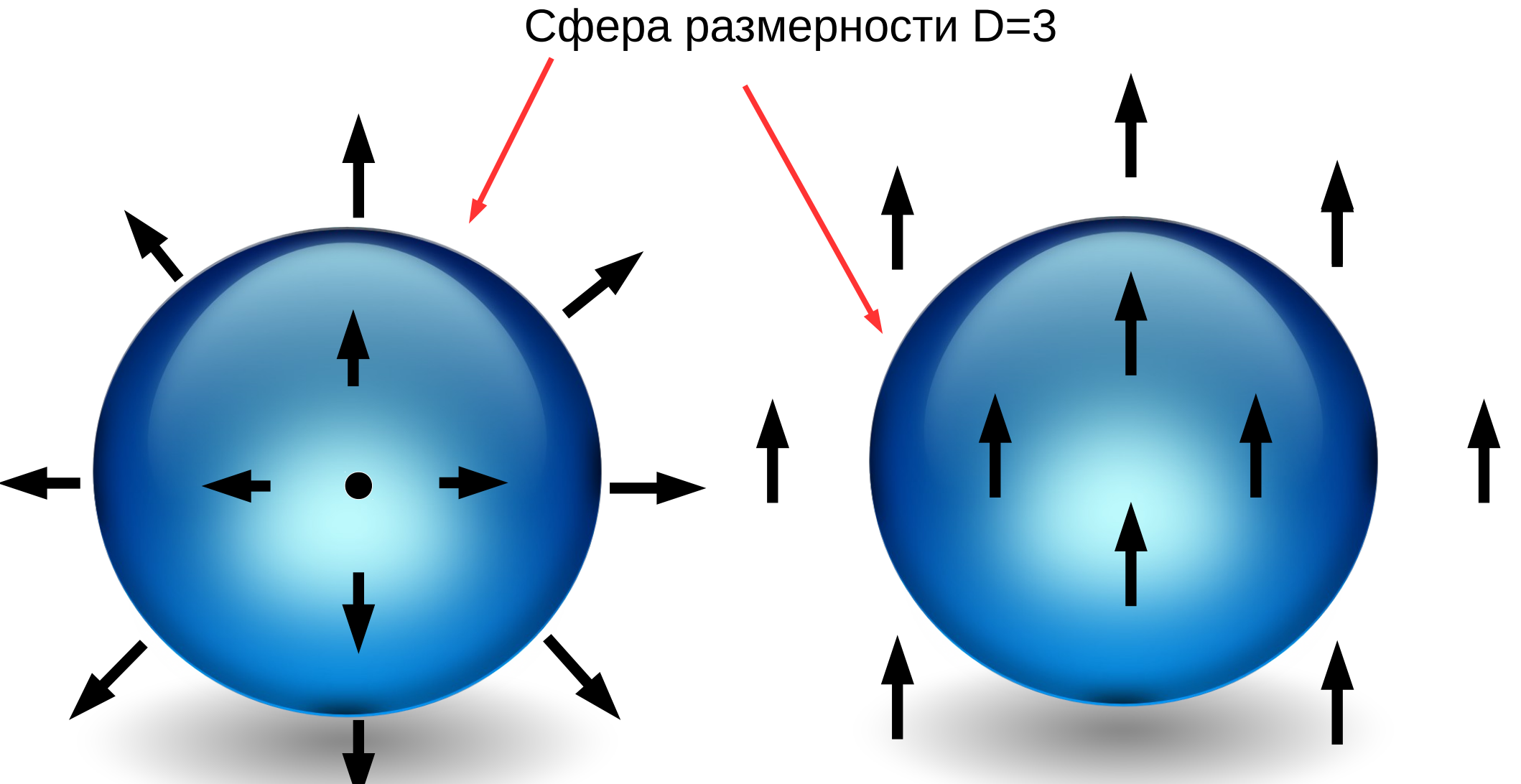
Магнитные монополи

Нарушение симметрии SO(3)

- Монополи т'Хофта-Полякова. Солитоноподобные компактные объекты, возникающие в теории Великого объединения.

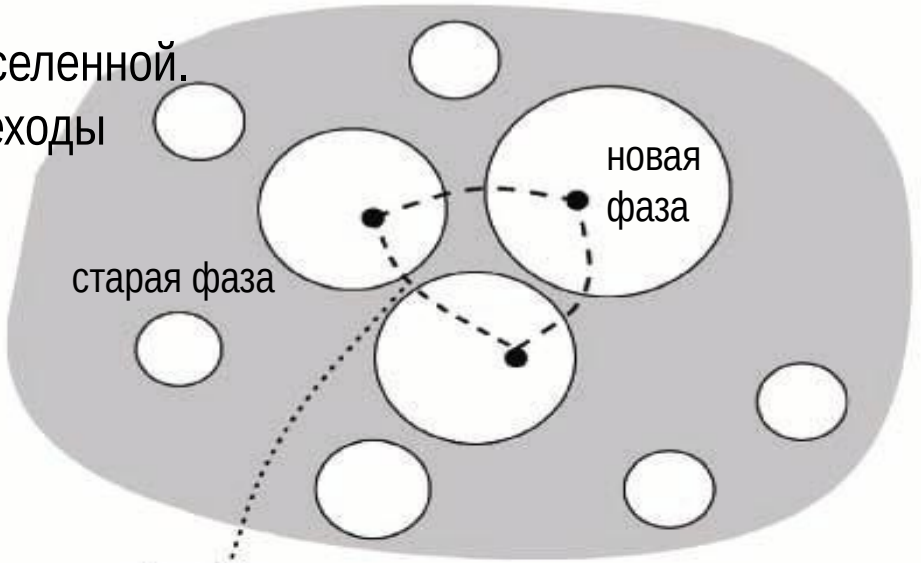


Текстуры

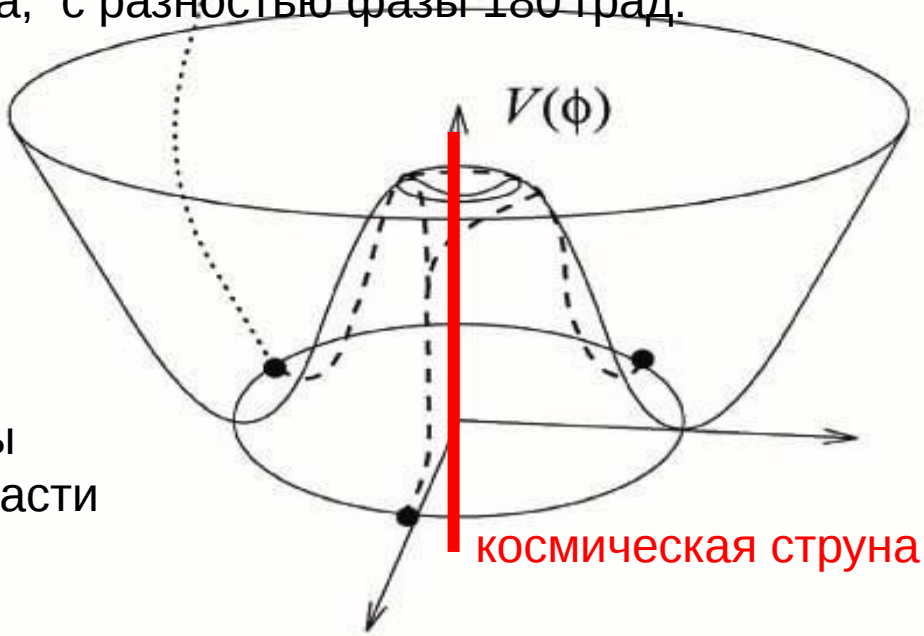


3. Космические струны

Остывание Вселенной.
Фазовые переходы



Замкнутый путь в физическом пространстве может соответствовать тому, что поле “обертывается” один раз по кругу минимума, с разностью фазы 180 град.

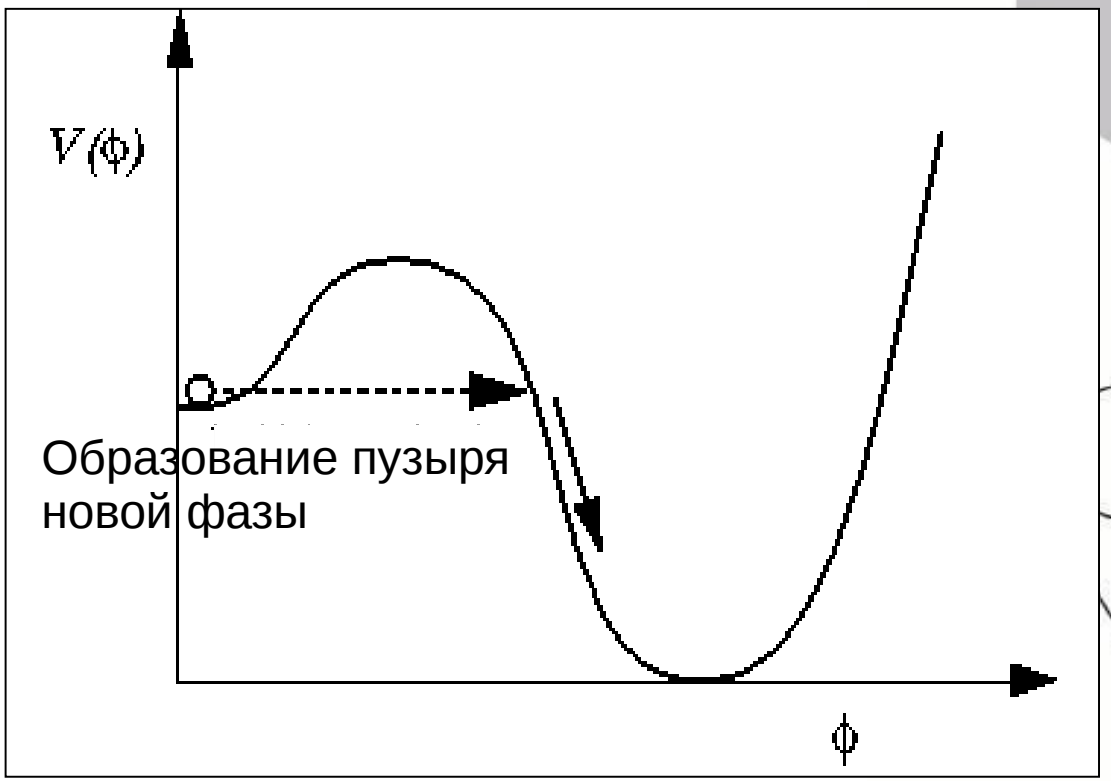


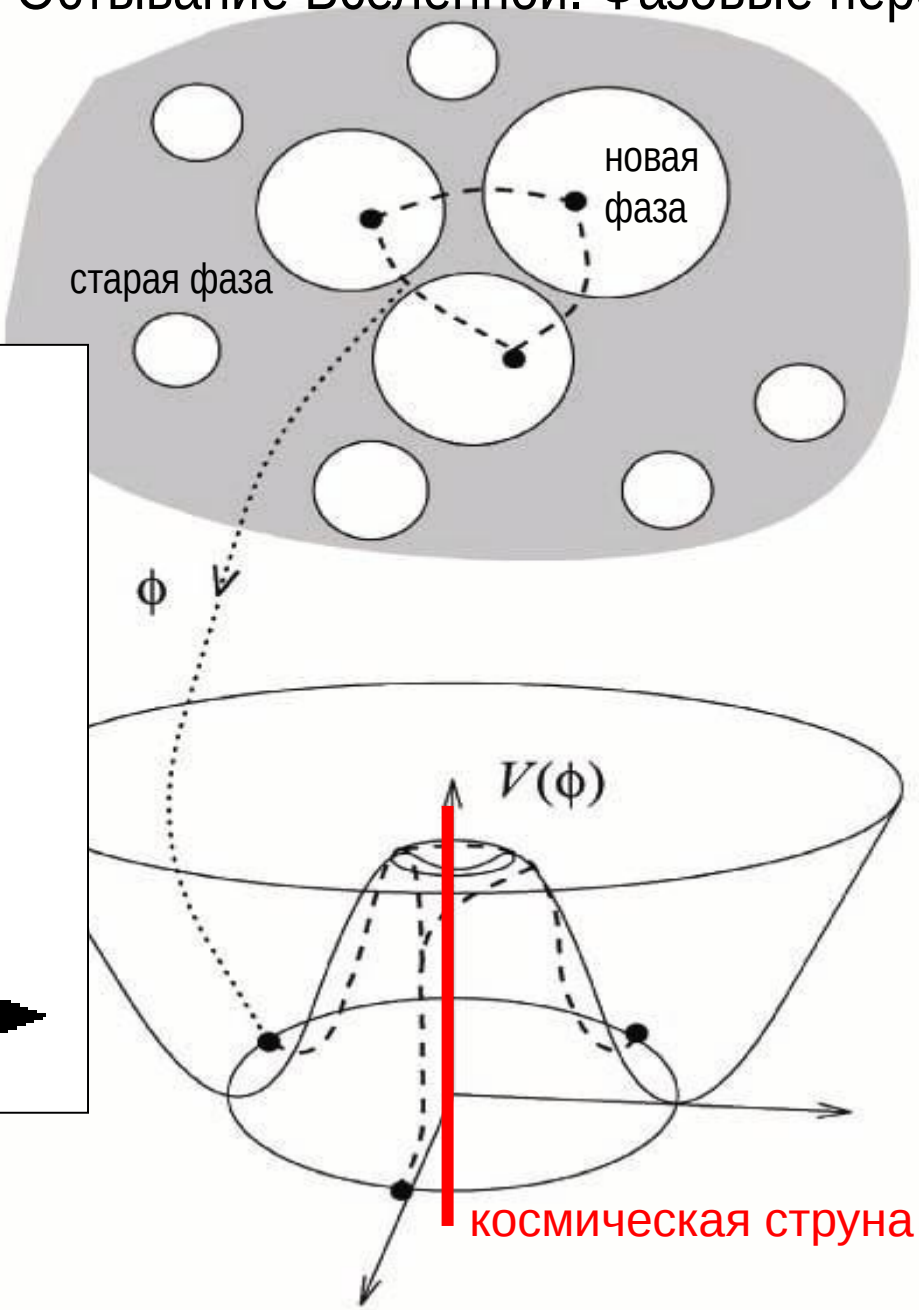
Топологическое пространство (вакуумное многообразие φ) не связанно: в случае космических струн пространство новой фазы содержит несвертываемые петли вокруг области старой фазы.

Космические струны

Остывание Вселенной. Фазовые переходы

Старая фаза – область симметричного высокоэнергетического вакуума – реликтовая тёмная энергия.



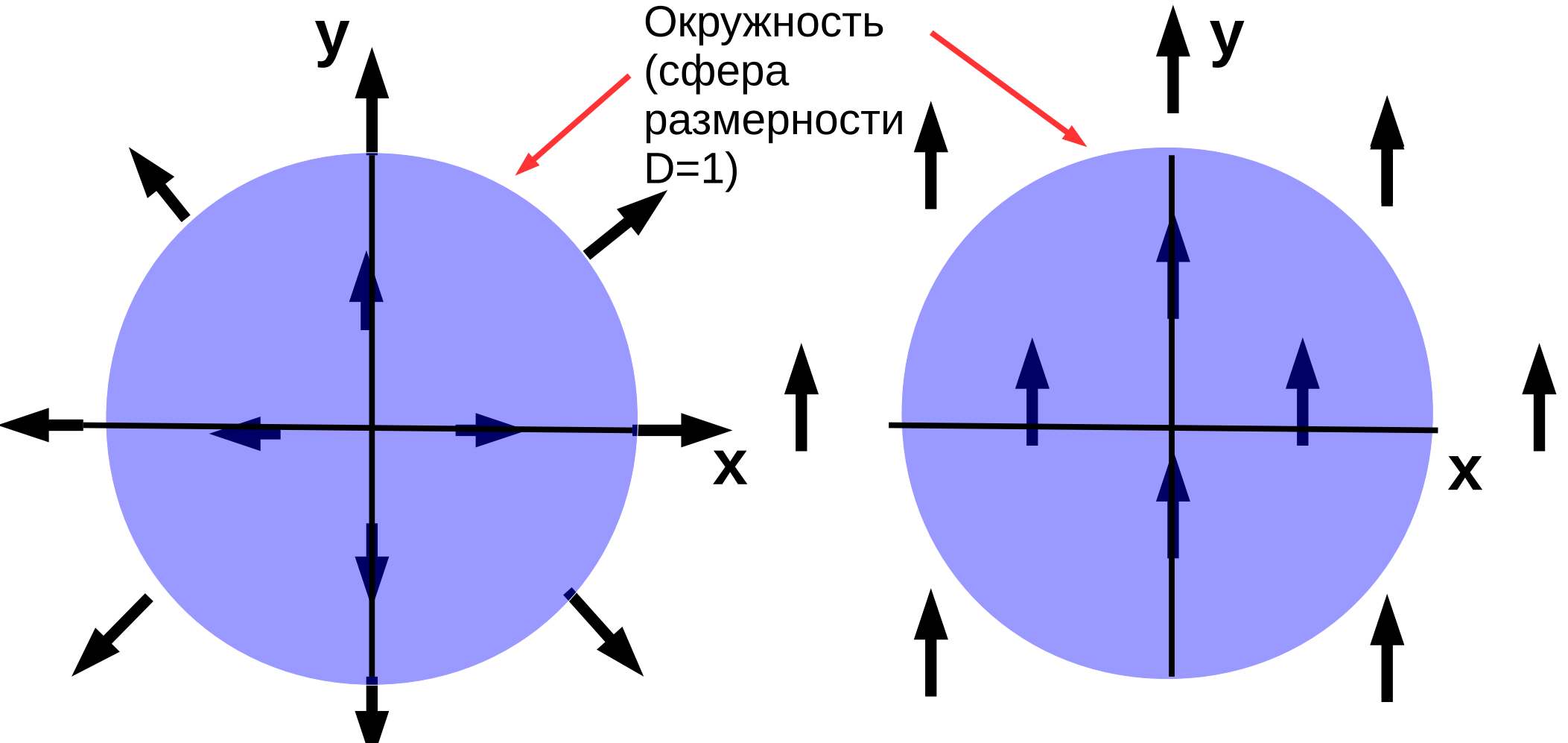


Нарушение симметрии U(1)

Космические струны

Конфигурация скалярного поля при наличии струны.

Петля в физическом пространстве вокруг струны отображается в круг минимумов потенциала поля φ



Потенциал для решения типа струны

$$\mathcal{L} = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - V(\phi),$$

– лагранжиан системы (разность кинетической и потенциальной энергий)

$$V = \tfrac{1}{2}\lambda(|\phi|^2 - \tfrac{1}{2}\eta^2)^2$$

– потенциал скалярного поля

$$\left|\langle\phi\rangle\right|^2 = \frac{\eta^2}{2}$$

$$\langle\phi\rangle = \frac{\eta}{\sqrt{2}}\exp\{i\alpha(x)\}$$

– средняя величина скалярного поля в положении равновесия

Энергия космических струн

$$\mu \sim \eta^2 \approx 2.09 \cdot 10^7 M_{SUN} \text{пк}^{-1}$$

$$G\mu \sim \eta^2 / m_{Pl}^2 \sim 10^{-6}$$

μ – натяжение (или линейная плотность) космической струны определяется величиной скалярного поля, нарушение симметрии которого в ранней Вселенной и породило эту струну.

Оценка на плотность всех имеющихся во вселенной струн дается современными наблюдательными данными по анизотропии реликтовго излучения.

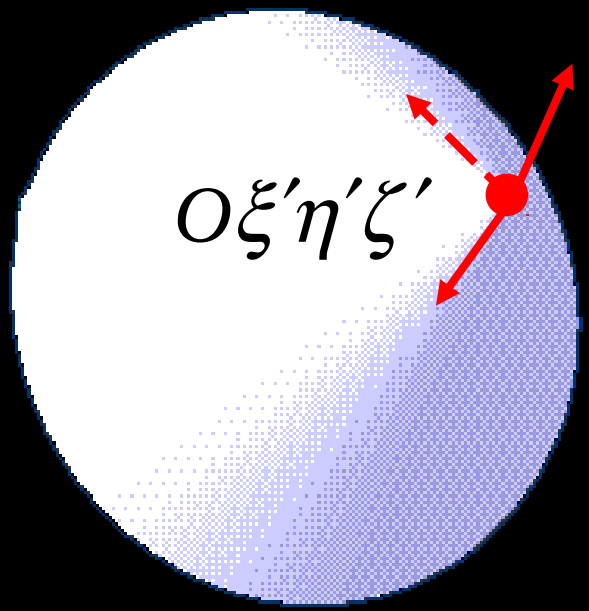
Космические струны

$$\hat{\tau} = \tau$$

$$\hat{\xi}' = \xi' + 4G\mu \cdot \left(1 - \ln\left(\frac{\rho}{r_0}\right)\right) \cdot \xi' + 4G\mu\varphi\eta'$$

$$\hat{\eta}' = \eta' + 4G\mu \cdot \left(1 - \ln\left(\frac{\rho}{r_0}\right)\right) \cdot \eta' - 4G\mu\varphi\eta'$$

$$\hat{\zeta}' = \zeta'$$



Космические струны

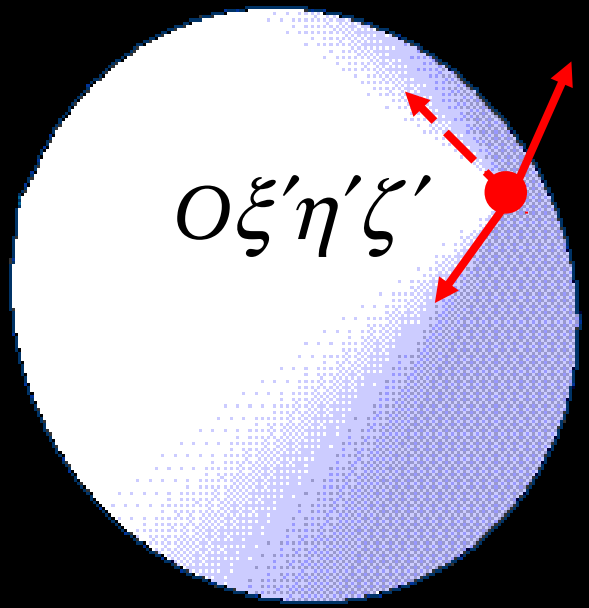
$$\rho' = \sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}$$

$$\xi' = \rho' \cos\varphi, \quad \eta' = \rho' \sin\varphi$$

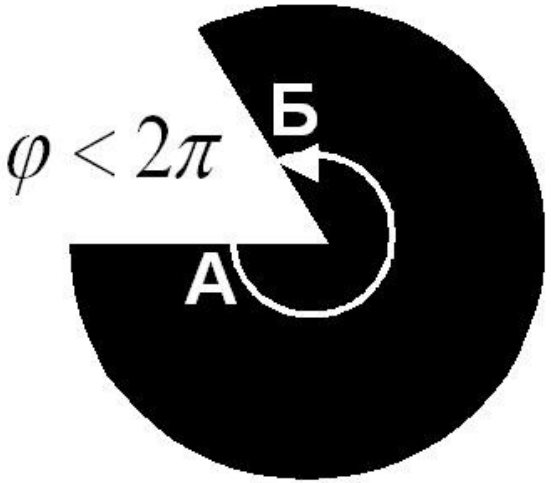
$$\boxed{g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}}$$

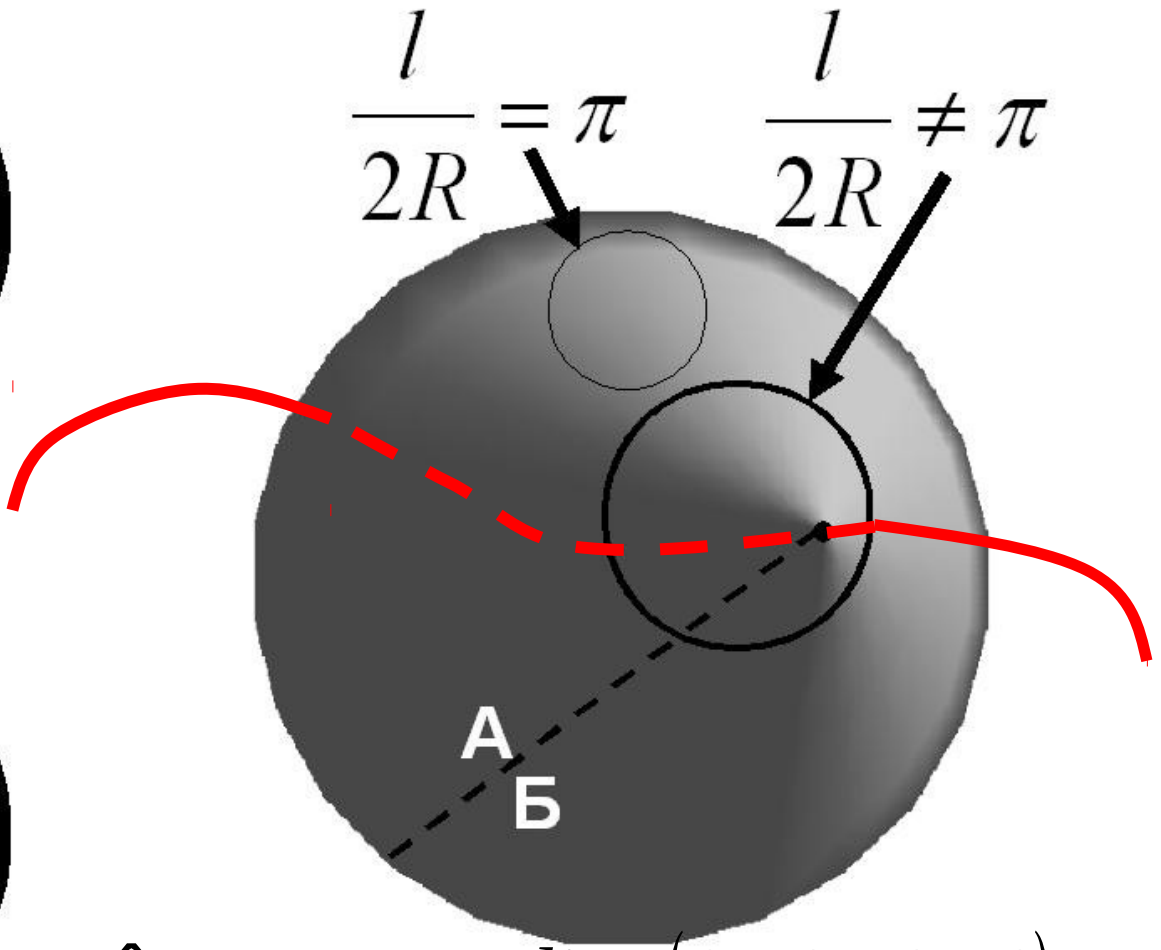
$$\eta_{\mu\nu} = diag(1,-1,-1,-1)$$

$$h_{\mu\nu} = 8G\mu \cdot \ln\left(\frac{\rho'}{\rho_0}\right) \cdot diag(0,1,1,0)$$



Коническая Вселенная, образующаяся в присутствии космической струны, эквивалентна не искривленному пространству-времени, а евклидовой Вселенной с вырезом.





$$\hat{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = diag(1,-1,-1,-1)$$

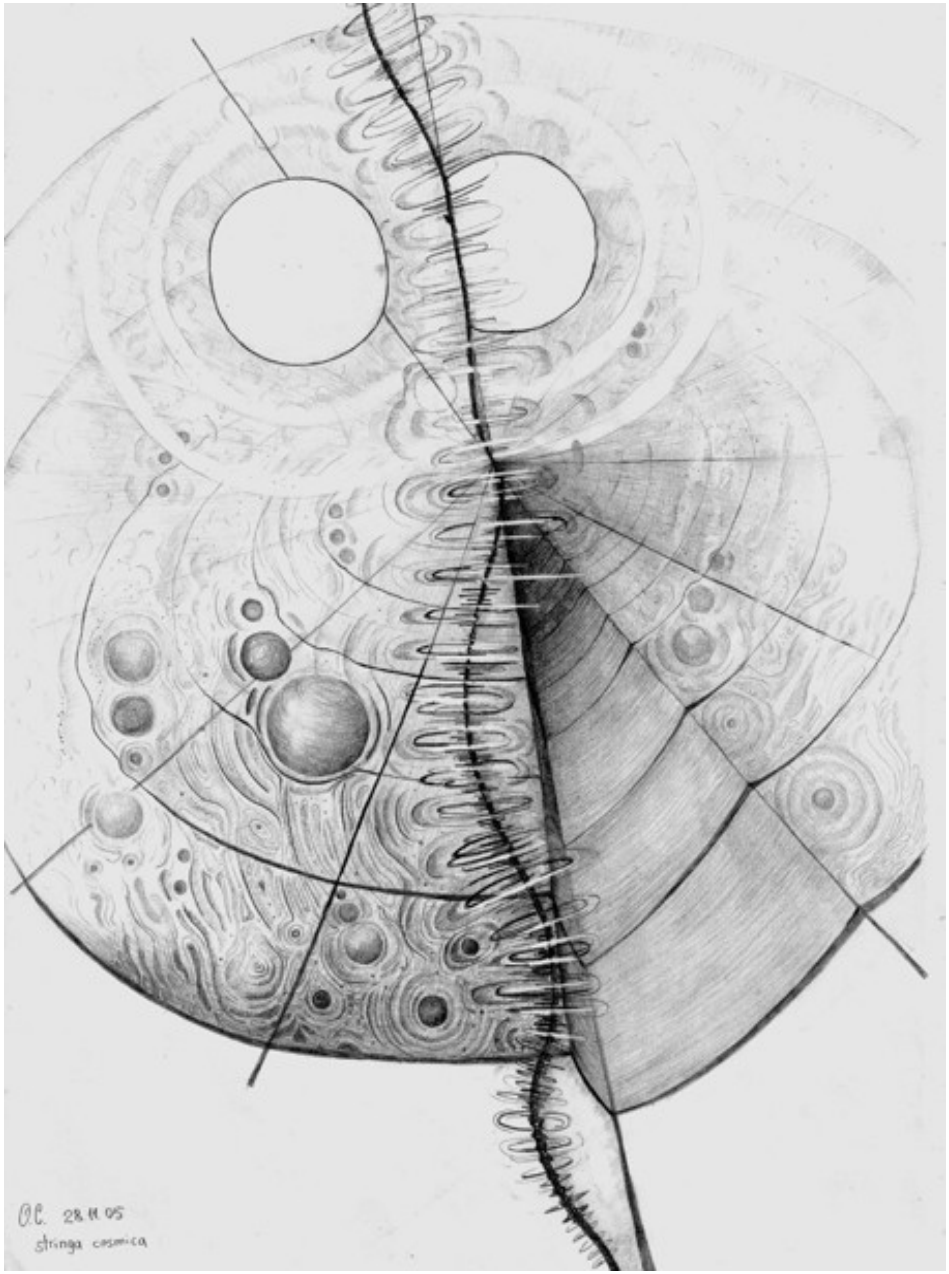
$$0 \le \varphi \le 2\pi - \Delta\theta,$$

Дефицит угла: $\Delta\theta = 8\pi G\mu$

$$G\mu \le 3 \cdot 10^{-7}$$

Статус космических струн в современной космологии

1. Гравитационное линзирование галактик на космических струнах.
2. Поиск следов космических струн в данных анизотропии реликтового излучения.
3. Космические струны в теории суперструн.



4. Современные методы обнаружения космических струн

- Оптические обзоры

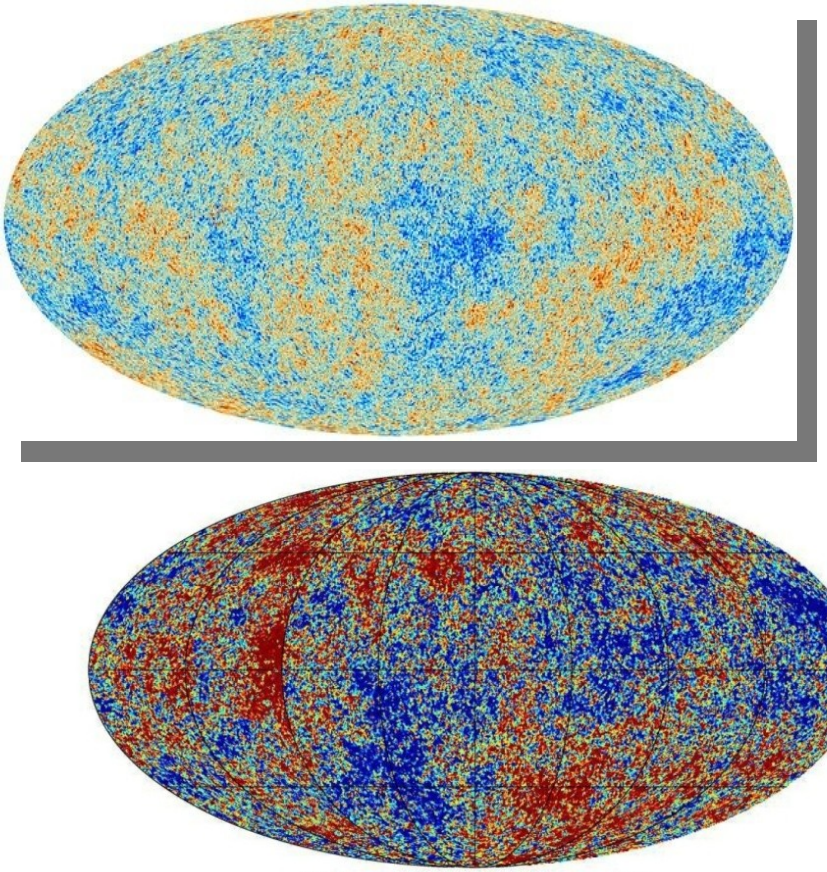
Поиск событий гравитационного линзирования

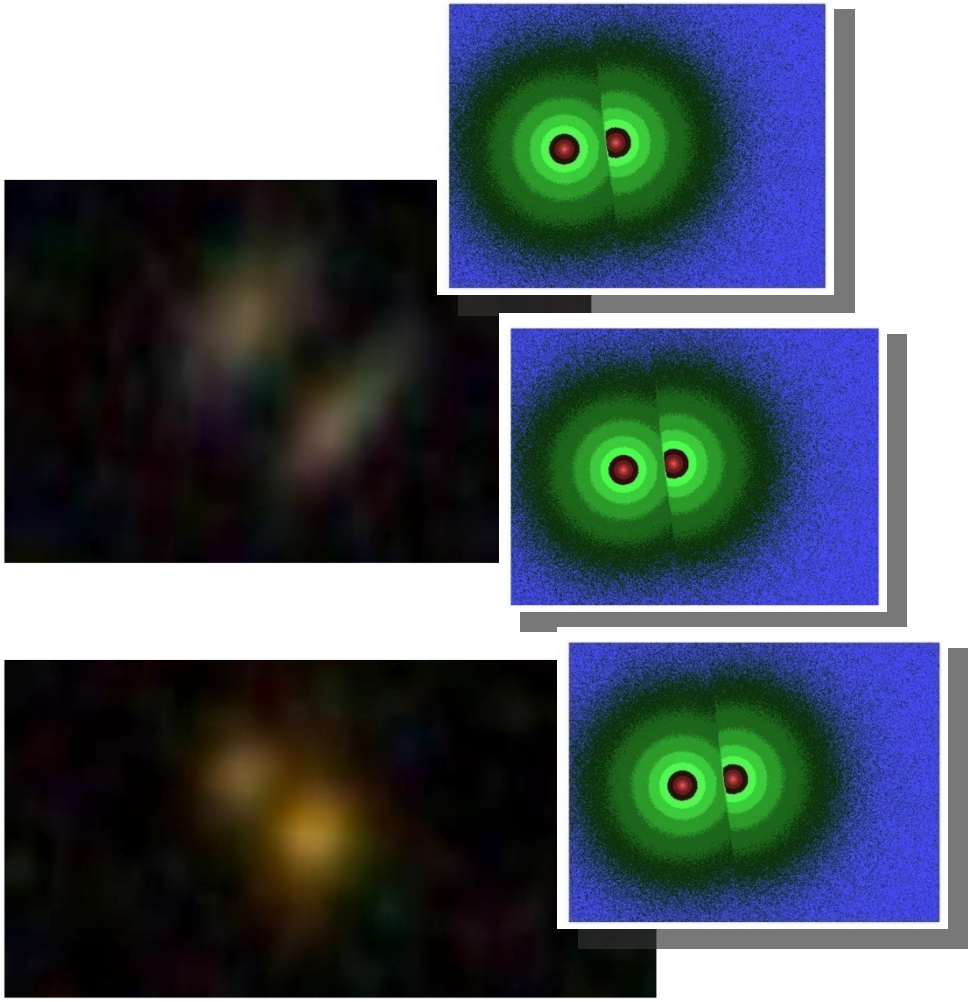
- Радио обзоры

Исследование структуры анизотропии микроволнового реликтового излучения

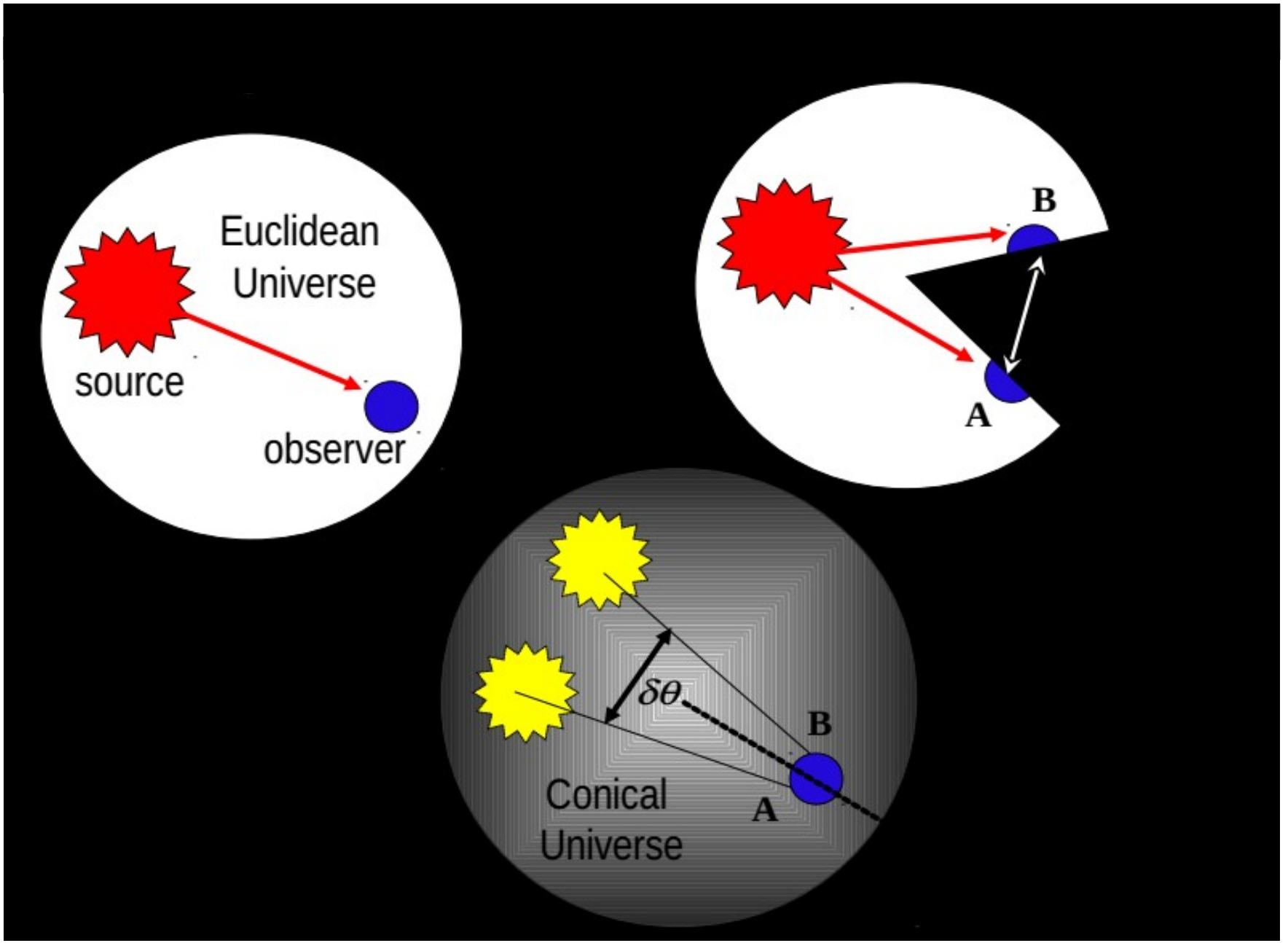
- Гравитационное излучение петель космических струн
- Взаимодействие космической струны с черной дырой
- Распад тяжелых частиц, излучаемых космической струной
- Взаимодействия космических струн друг с другом
- ...

Два основных метода поиска космических струн

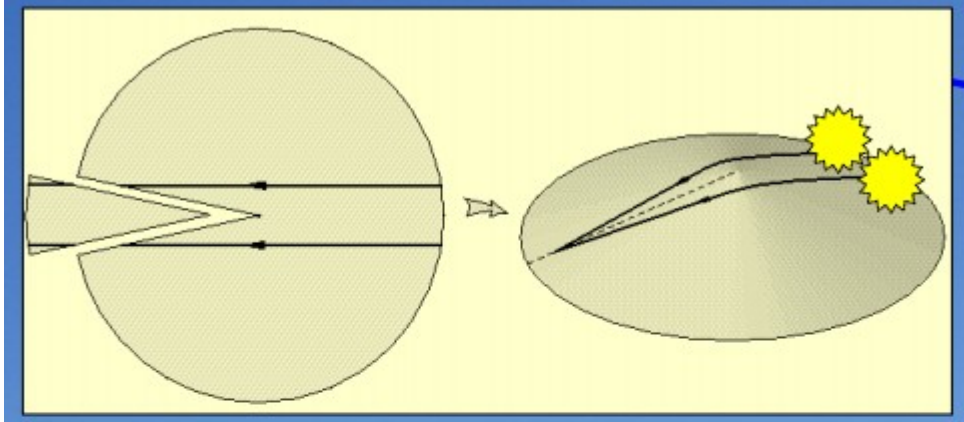




Гравитационное линзирование космических объектов (галактик) на космической струне



Поиск событий гравитационного линзирования.

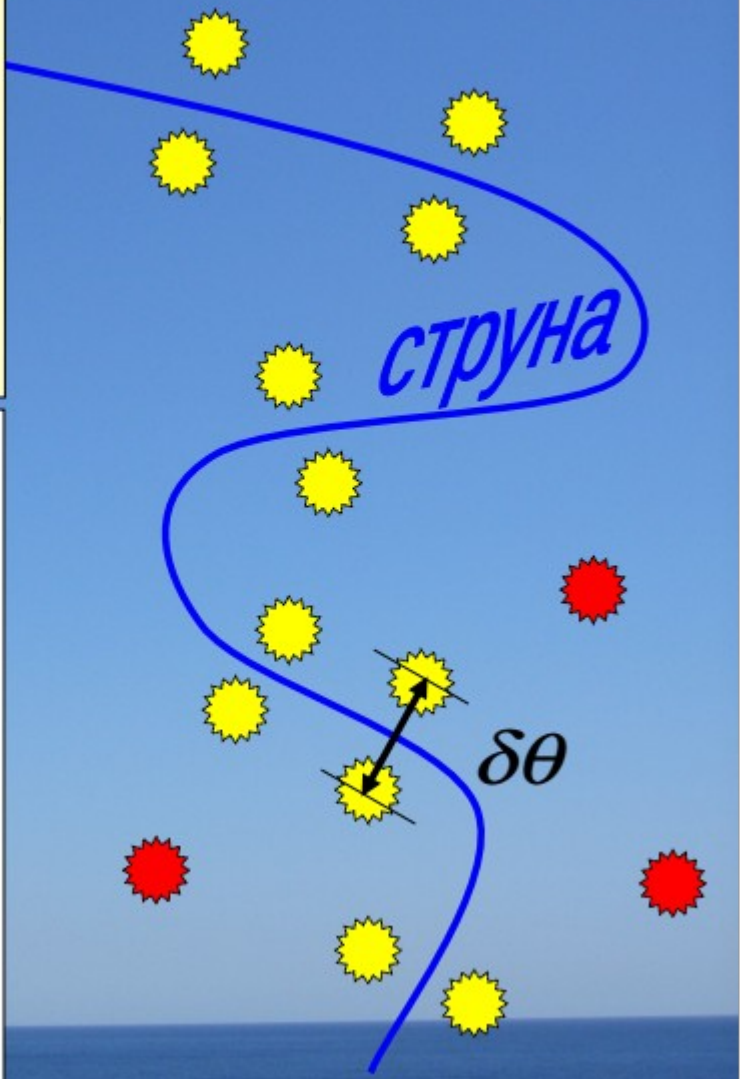


$$\delta\theta = \alpha \frac{R_g - R_s}{R_g}$$

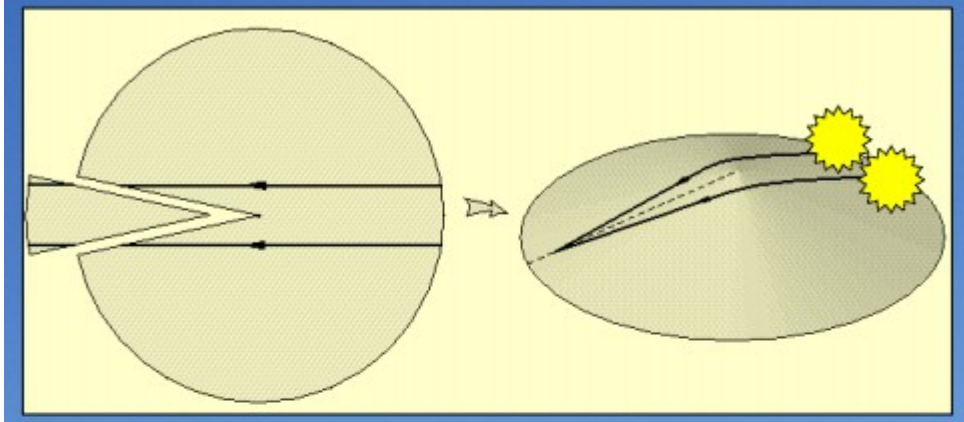
Дефицит угла $\alpha = 8\pi G\mu$

R_s -расстояние от наблюдателя до струны

R_g -расстояние от фонового линзируемого источника до наблюдателя



Поиск событий гравитационного линзирования.

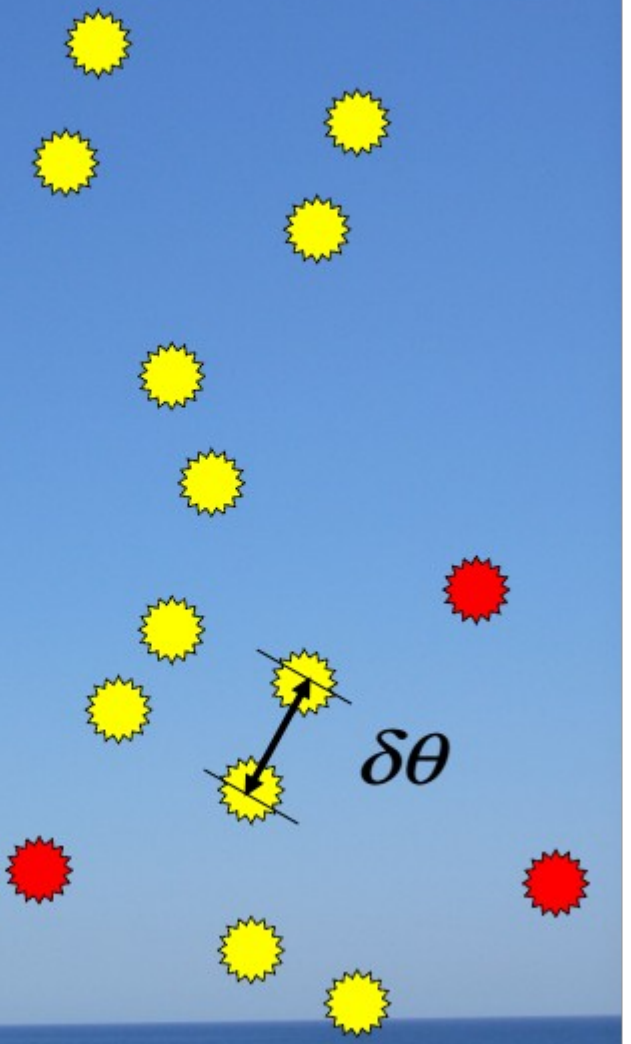


$$\delta\theta = \alpha \frac{R_g - R_s}{R_g}$$

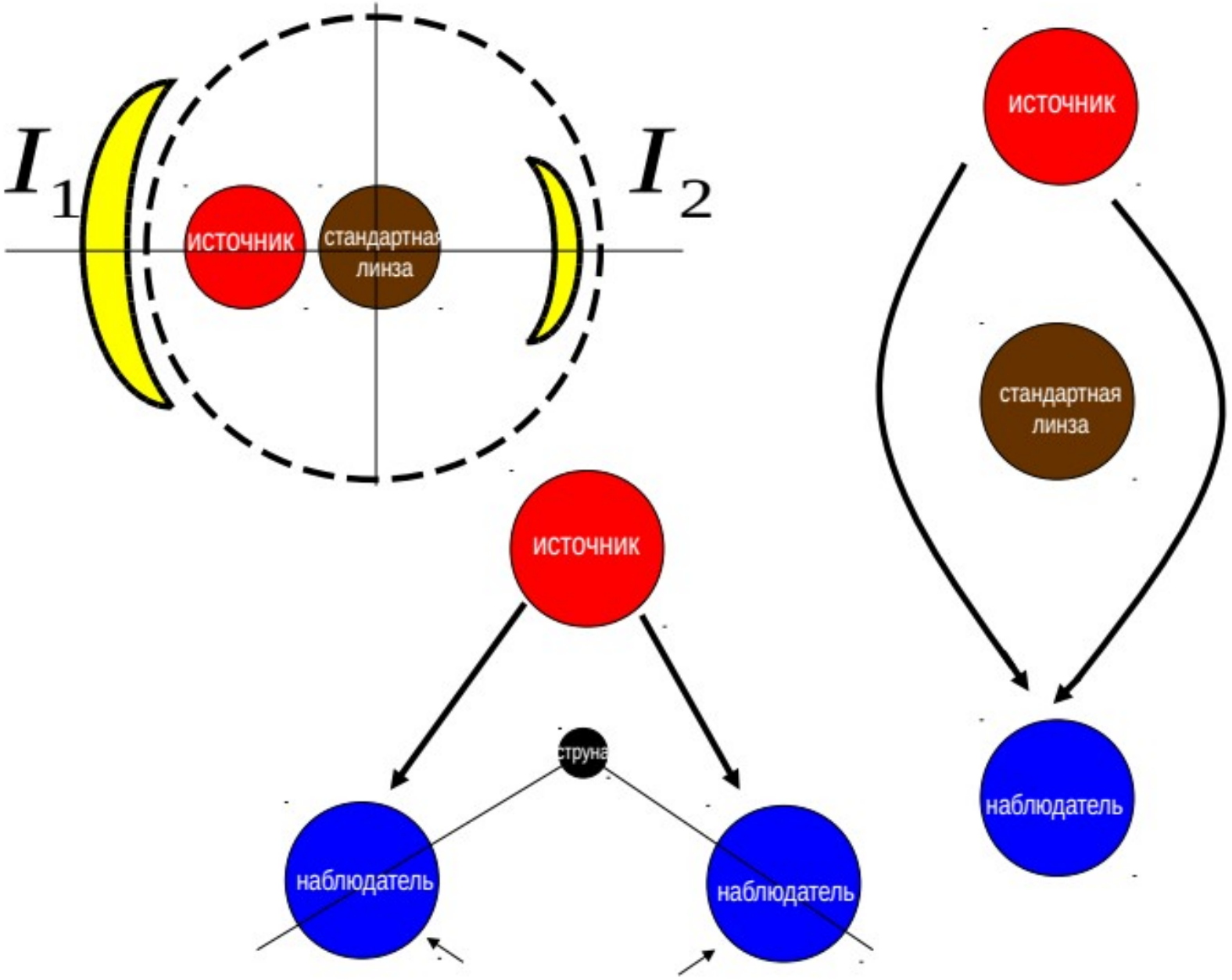
Дефицит угла $\alpha = 8\pi G\mu$

R_s -расстояние от наблюдателя до струны

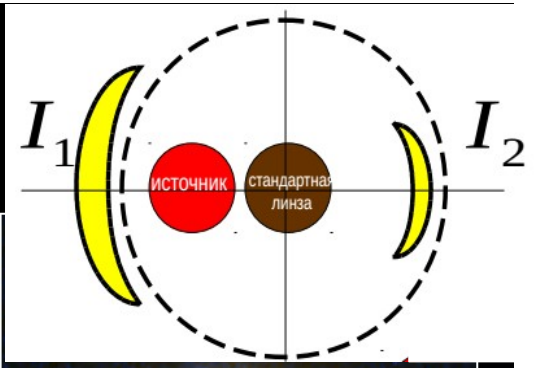
R_g -расстояние от фонового линзируемого источника до наблюдателя

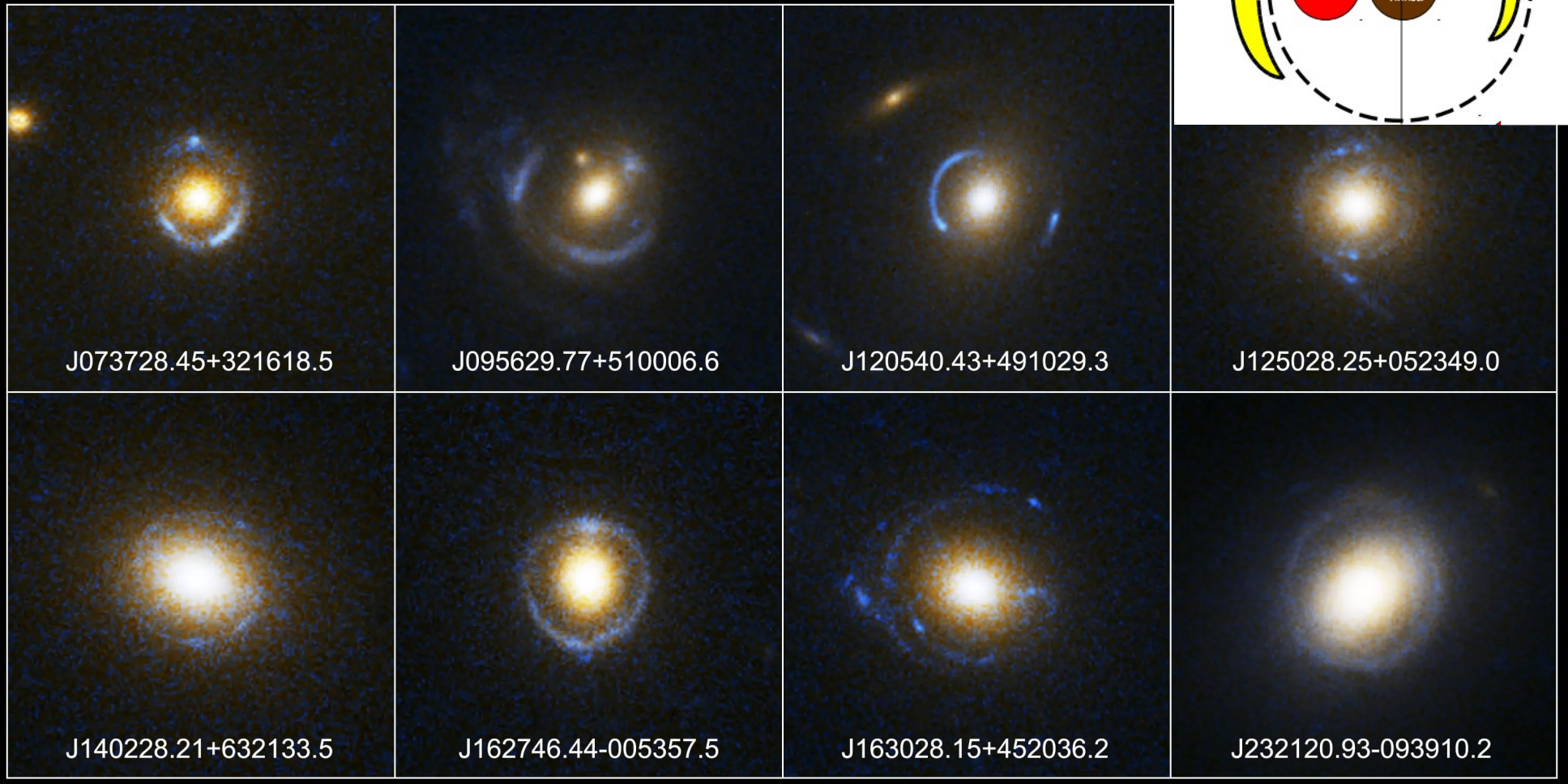


Поиск событий гравитационного линзирования.



Обычные гравитационные линзы, получаемые линзированием фоновых источников на компактных трехменых объектах





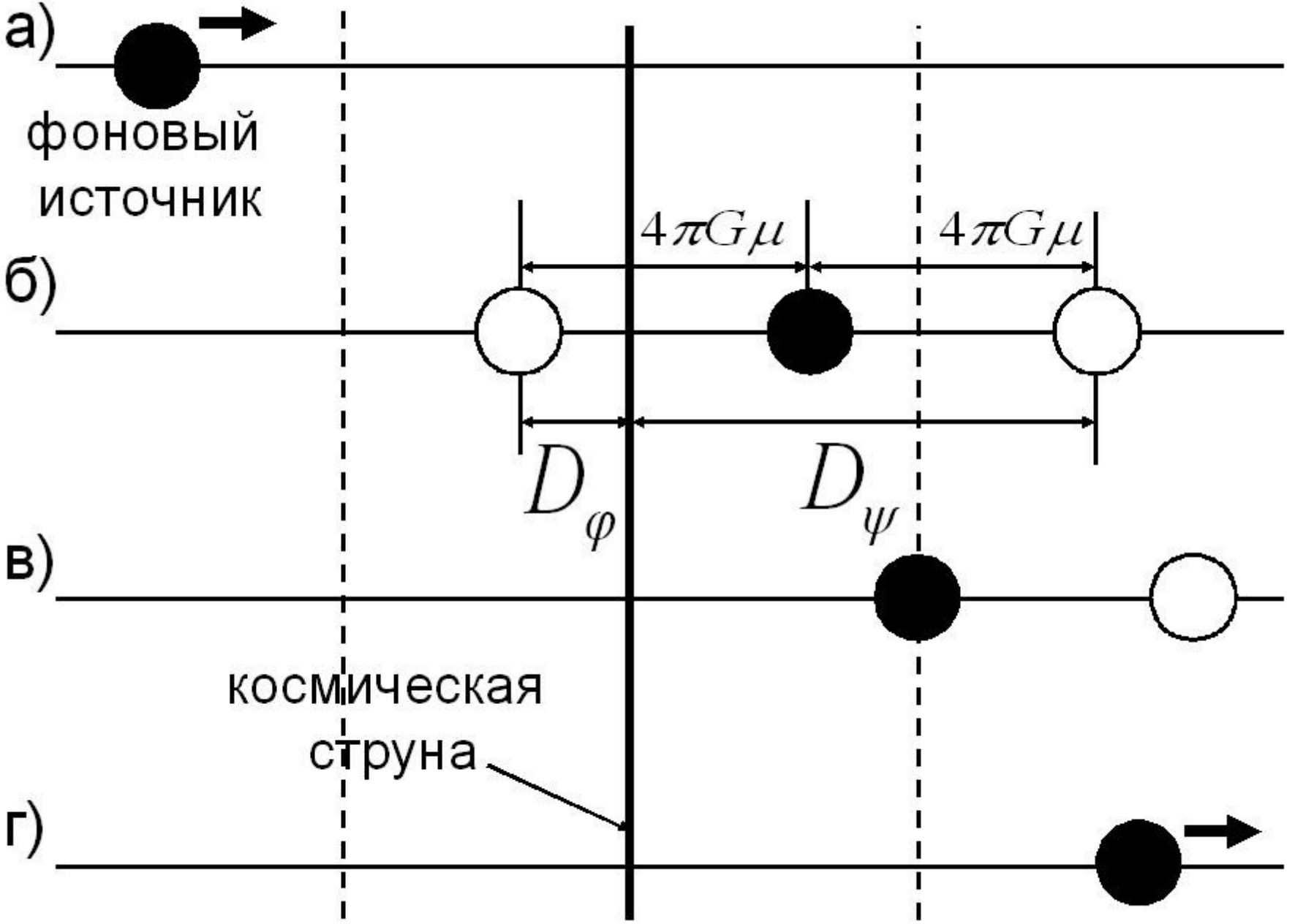
Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

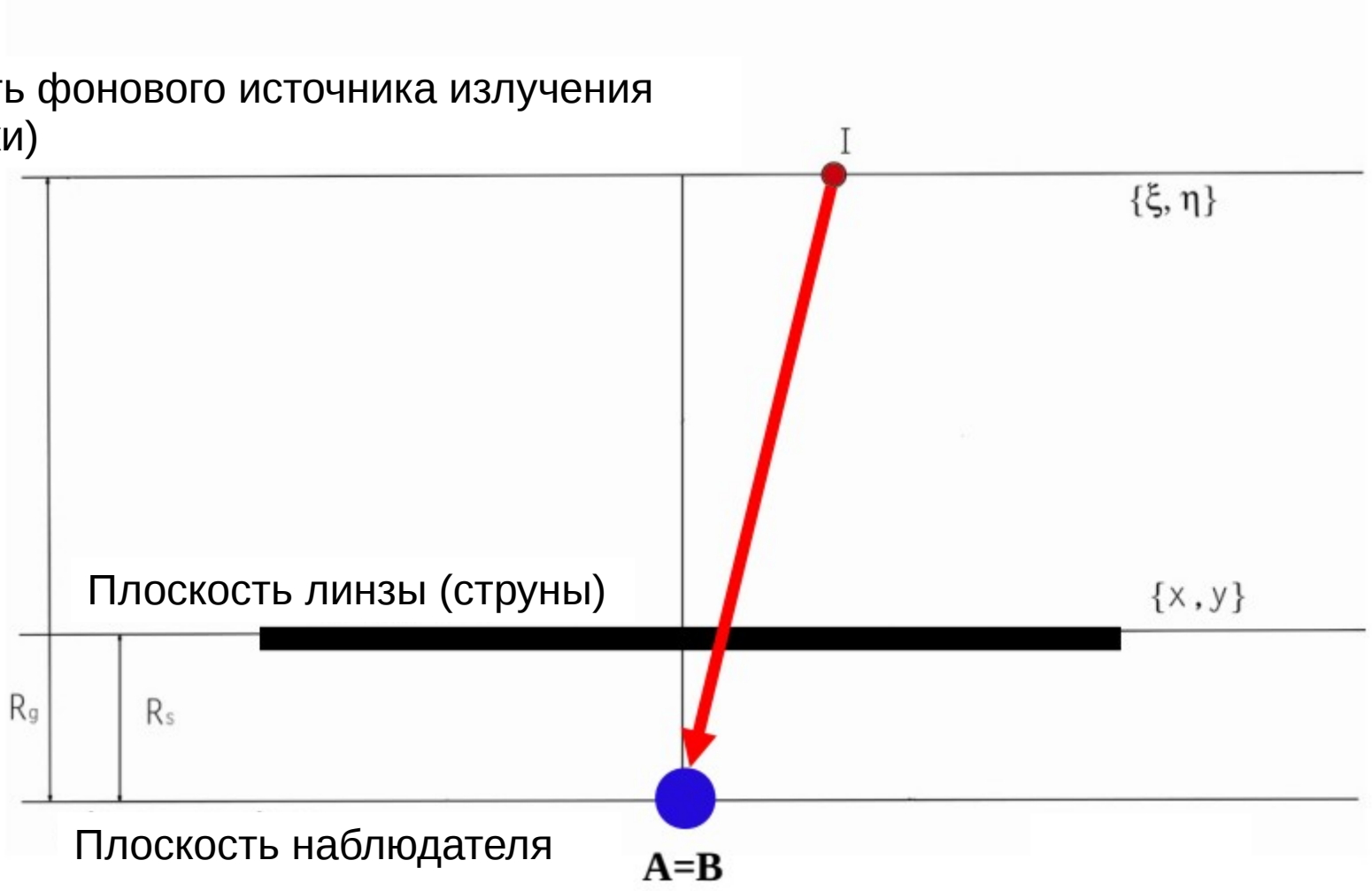
NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

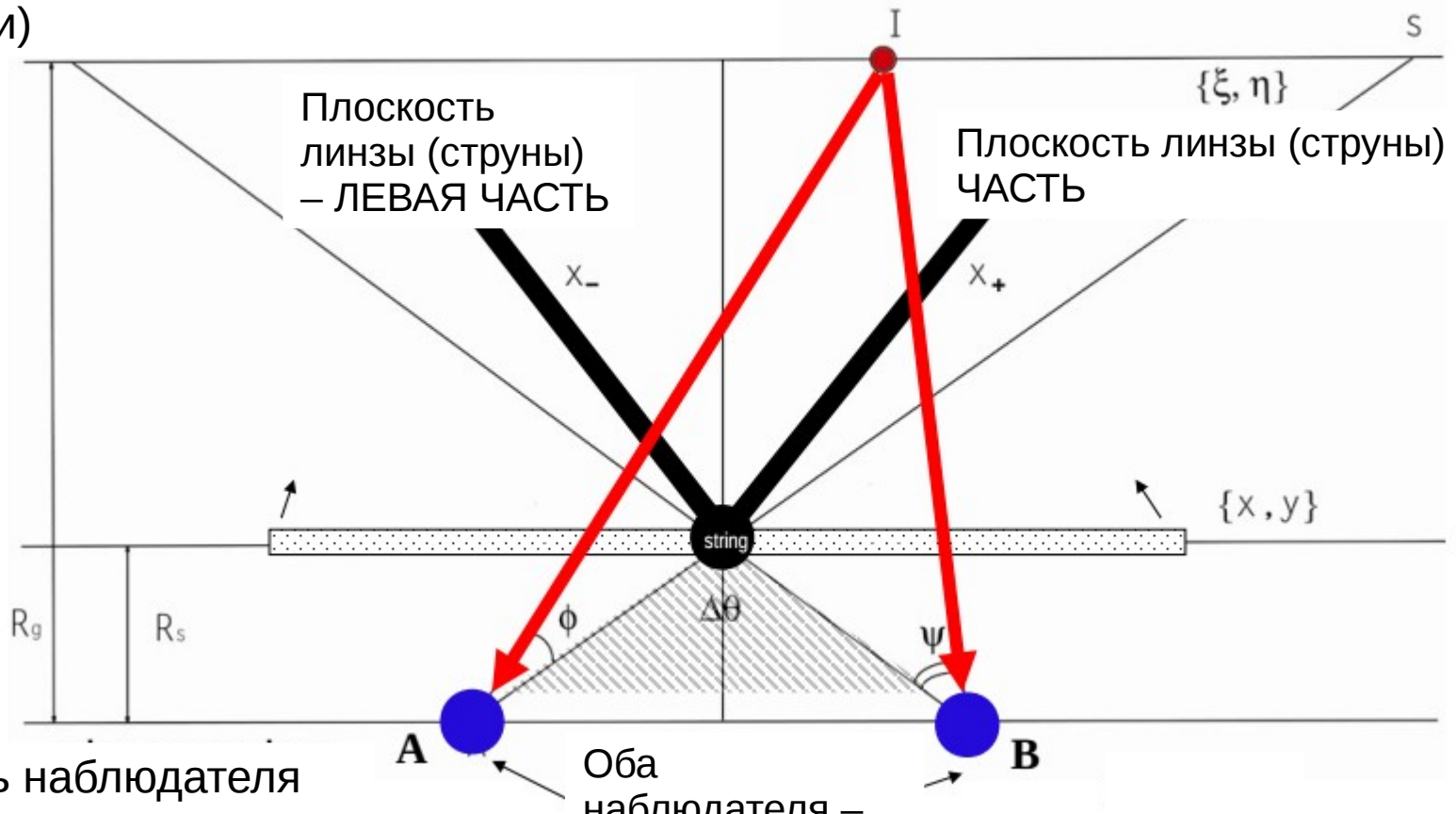
Схема образования двойного гравитационно-линзового изображения на струне



Плоскость фонового источника излучения (галактики)

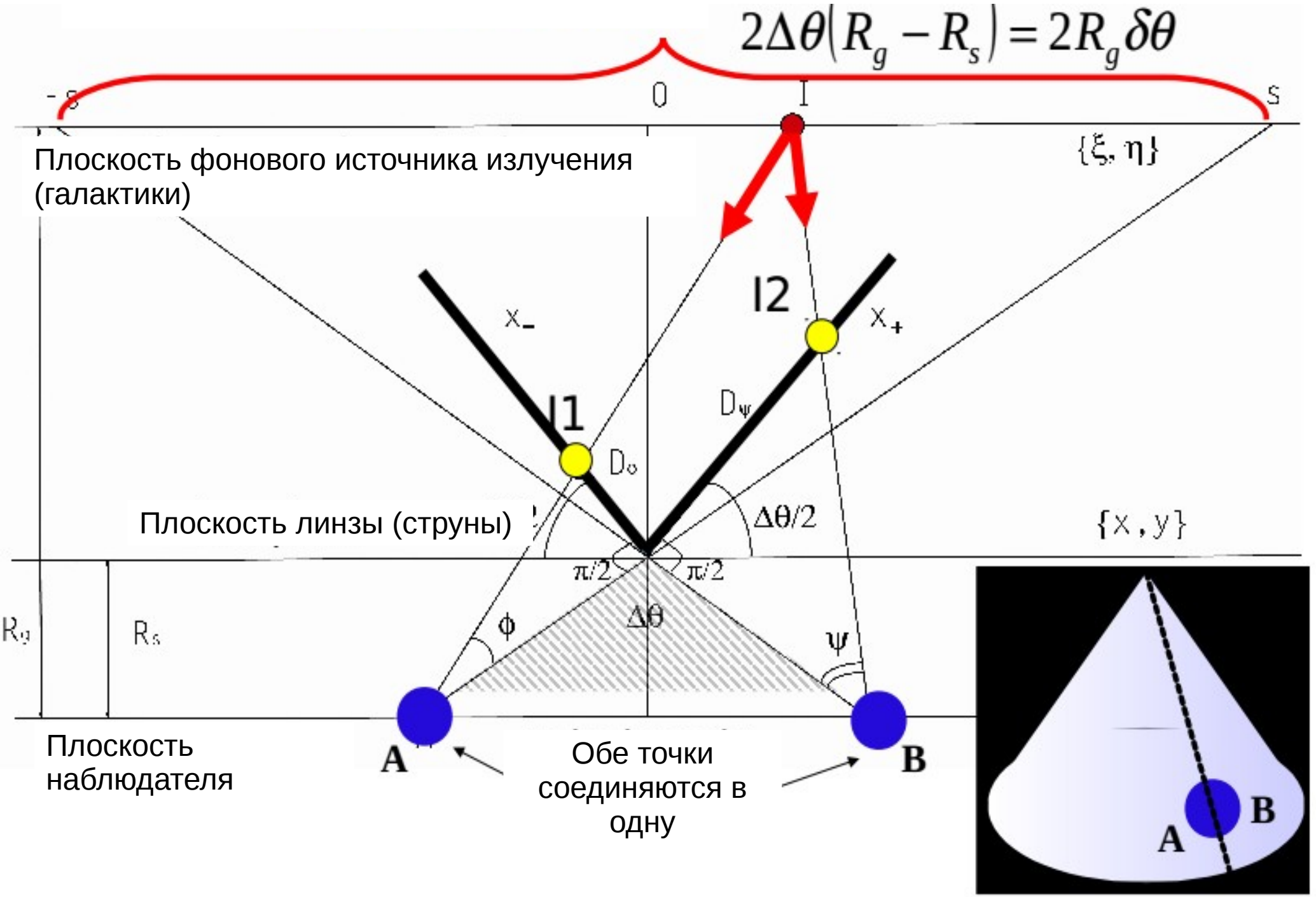


Плоскость фонового источника излучения (галактики)

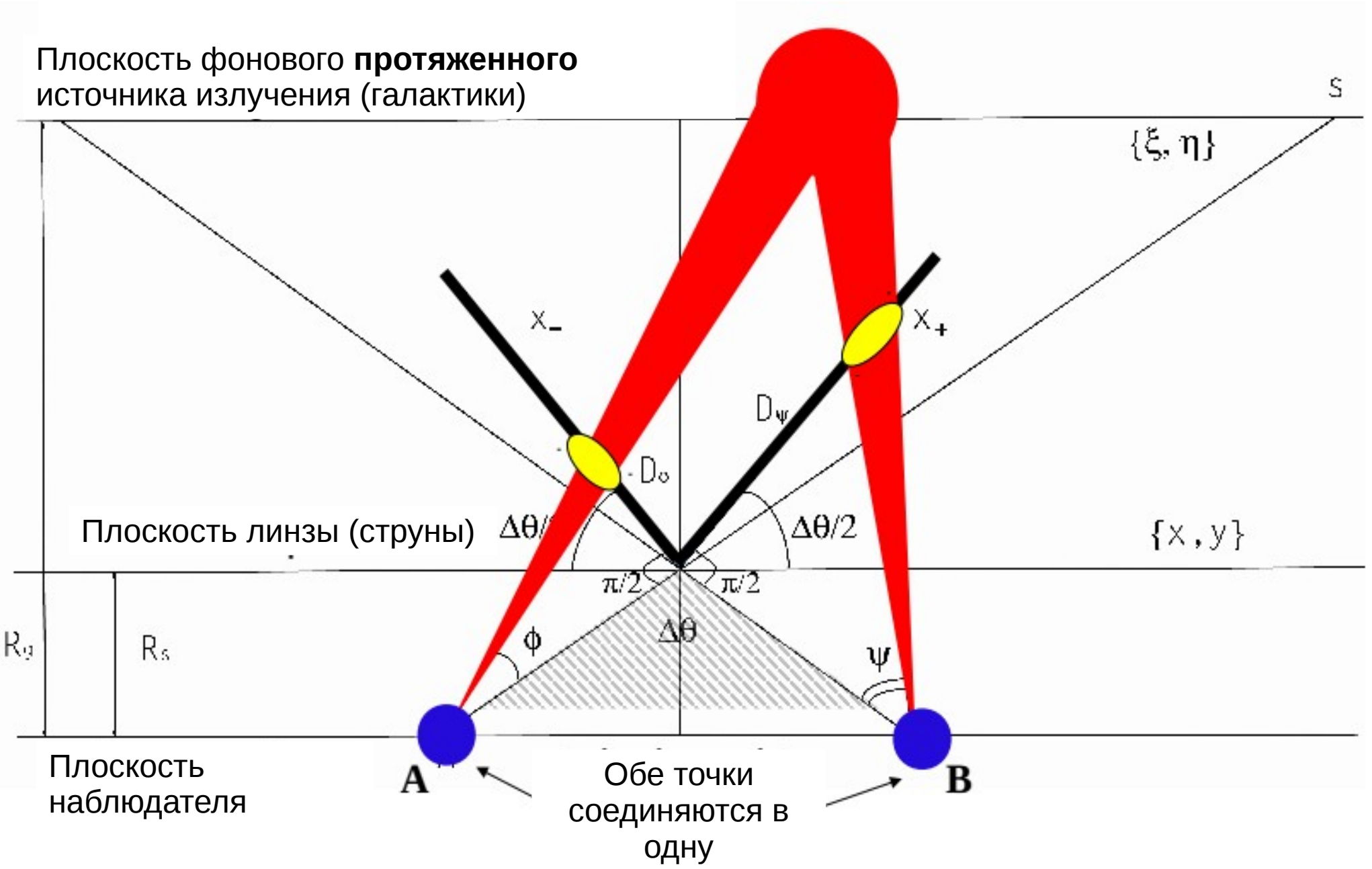


Плоскость наблюдателя

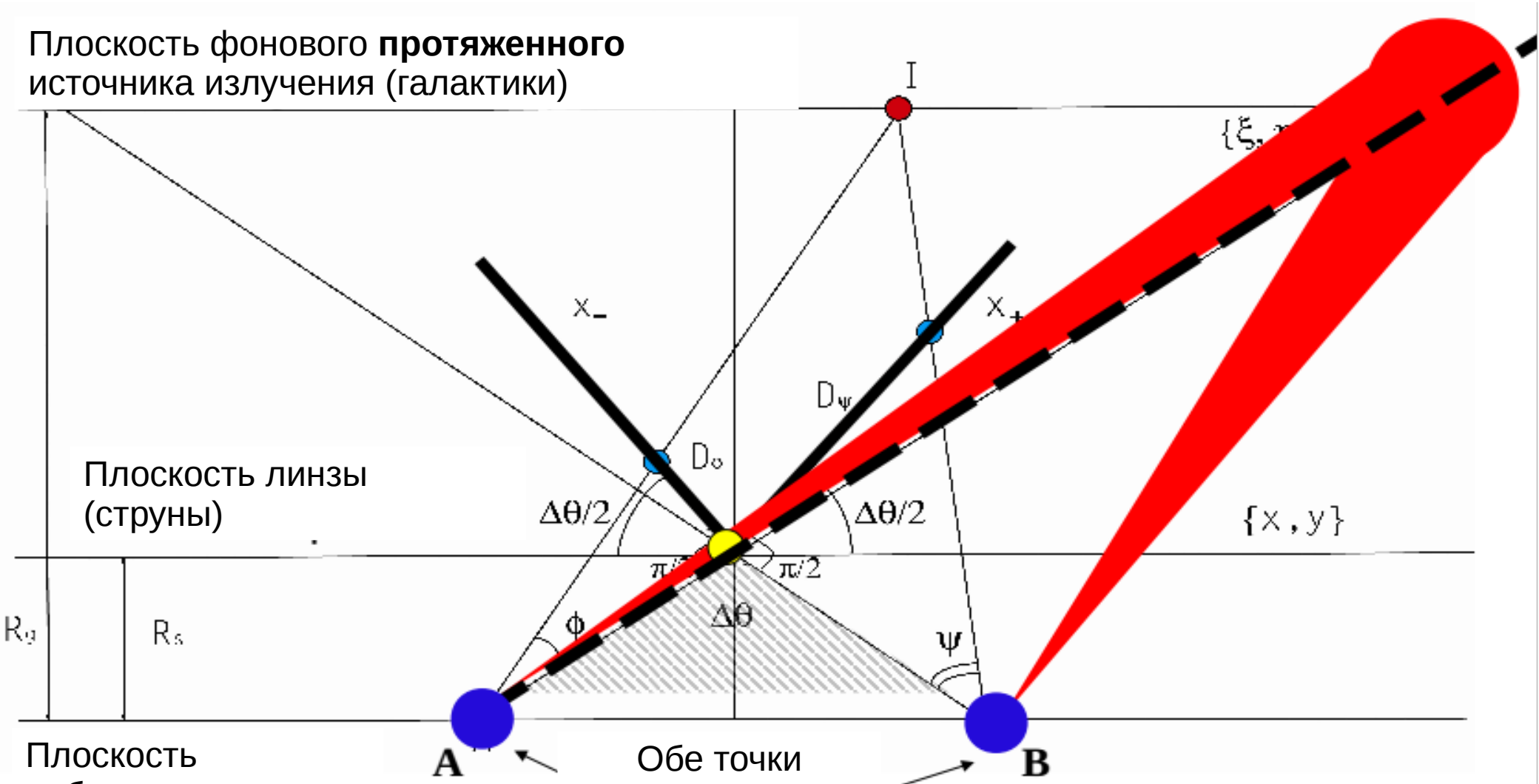
Оба наблюдателя – это на само деле один наблюдатель; обе точки соединяются в одну



$2\Delta\theta(R_g - R_s) = 2R_g\delta\theta$
-s
0
I
s
{ξ, η}
Плоскость фонового источника излучения (галактики)
I2
x₋
x₊
I1
Dψ
D₀
Плоскость линзы (струны)
Δθ/2
{x, y}
π/2
π/2
Δθ
φ
ψ
Rg
Rs
Плоскость наблюдателя
A
B
Обе точки соединяются в одну
A
B


Плоскость фонового **протяженного** источника излучения (галактики)
S
{ξ, η}
x₋
x₊
Dψ
Do
Плоскость линзы (струны)
Δθ/2
Δθ/2
{x , y}
π/2
π/2
Rψ
Rs
ϕ
Δθ
ψ
A
B
Плоскость наблюдателя
Обе точки соединяются в одну

Плоскость фонового **протяженного** источника излучения (галактики)



Плоскость линзы (струны)

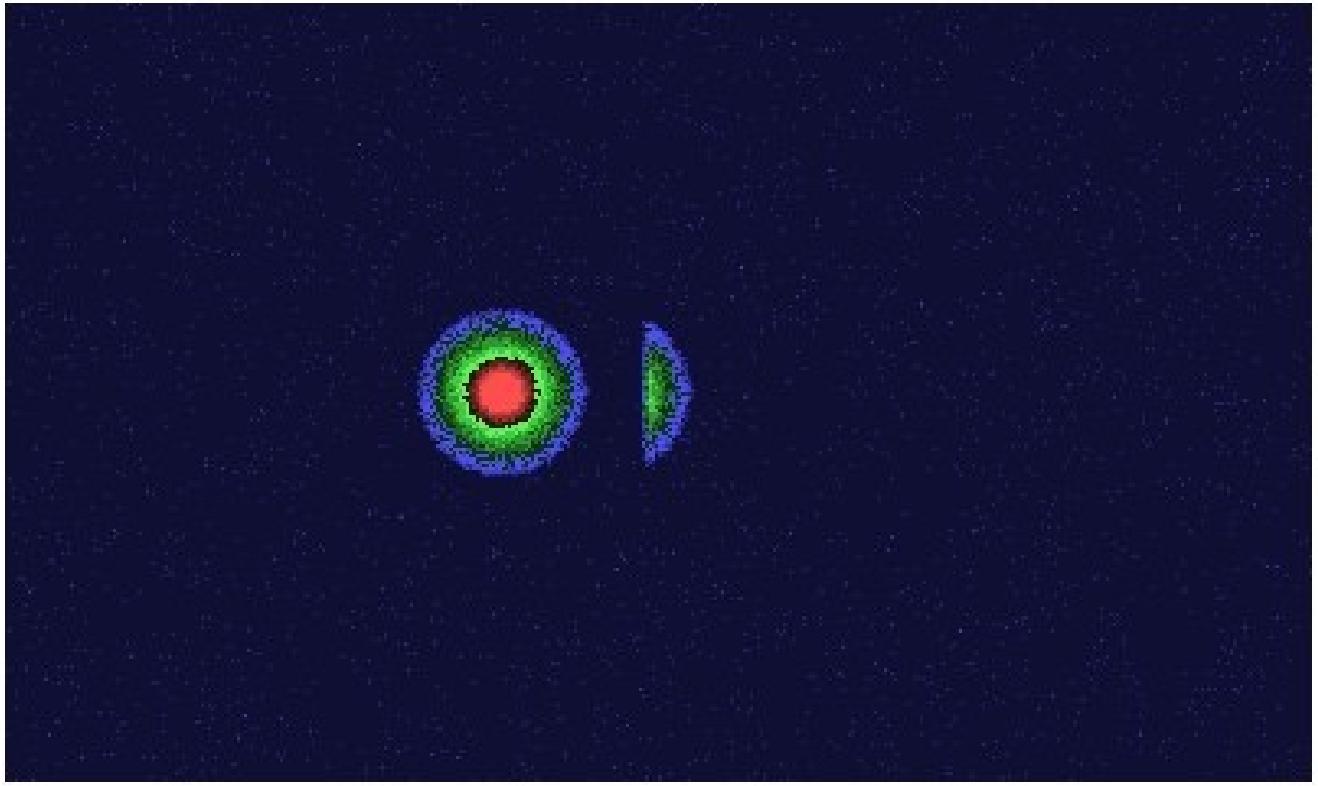
Плоскость наблюдателя

Обе точки соединяются в одну

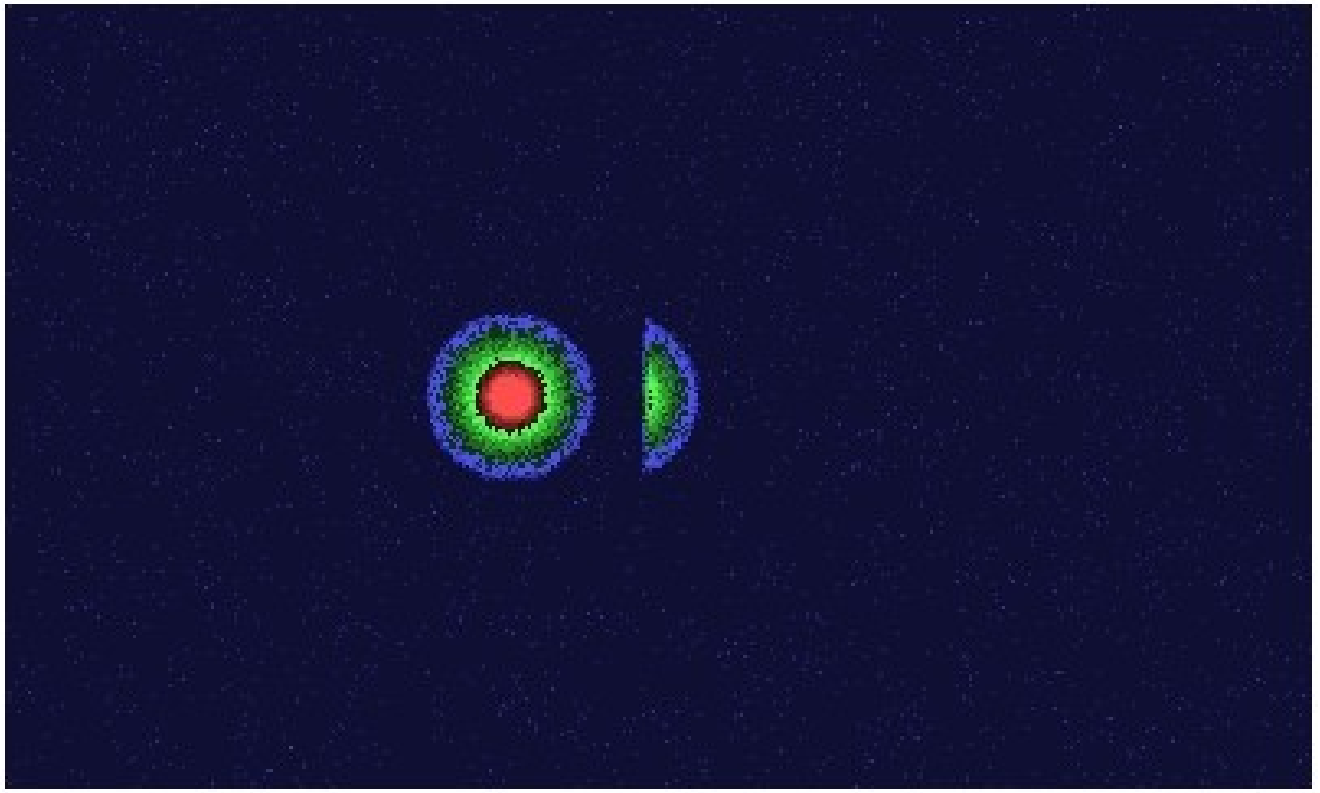
$$\{\xi,\eta,\Delta\theta,R_s,R_g\}\rightarrow\{D_\phi,D_\psi\}$$

1

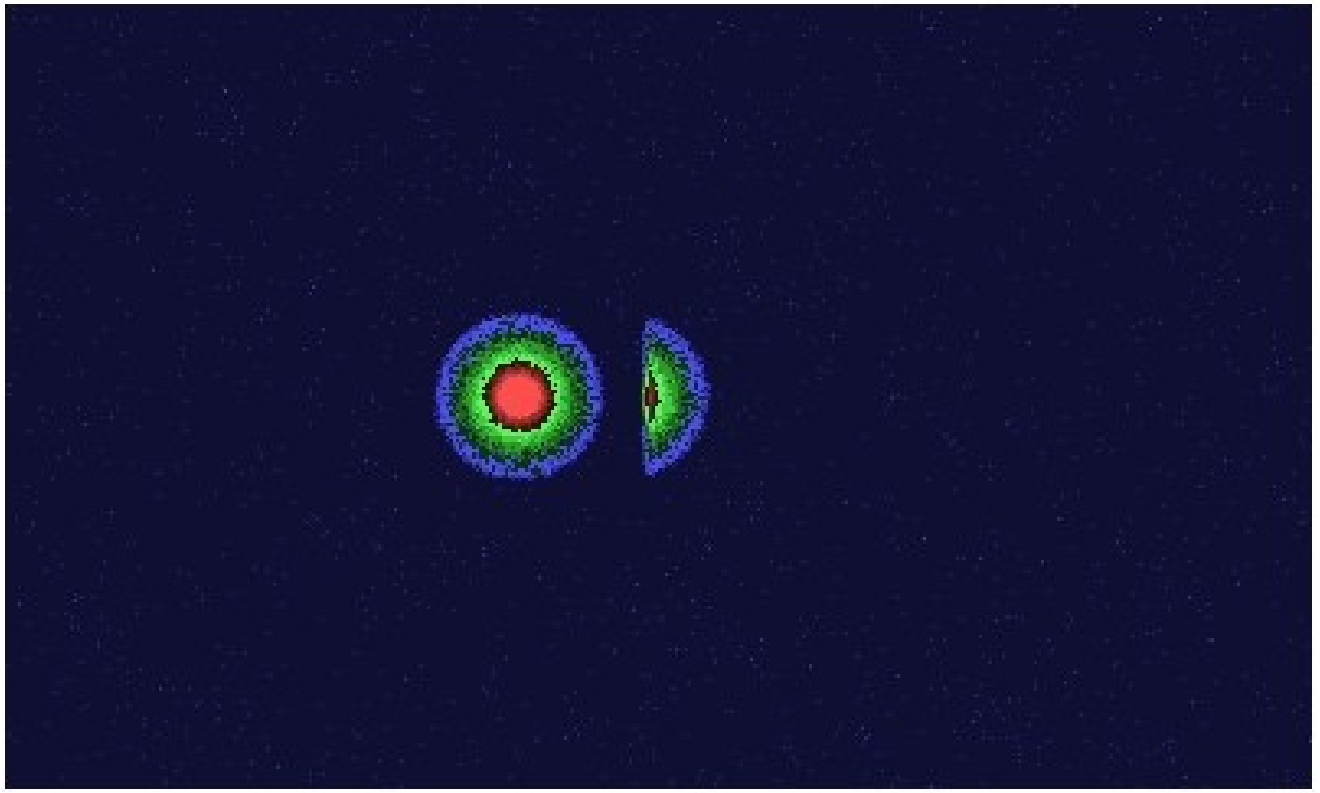
Моделирование линзирования фоновой протяженной галактиики на прямом участке космической струны (в зависимости от взаимного расположения струны и галактики относительно наблюдателя)



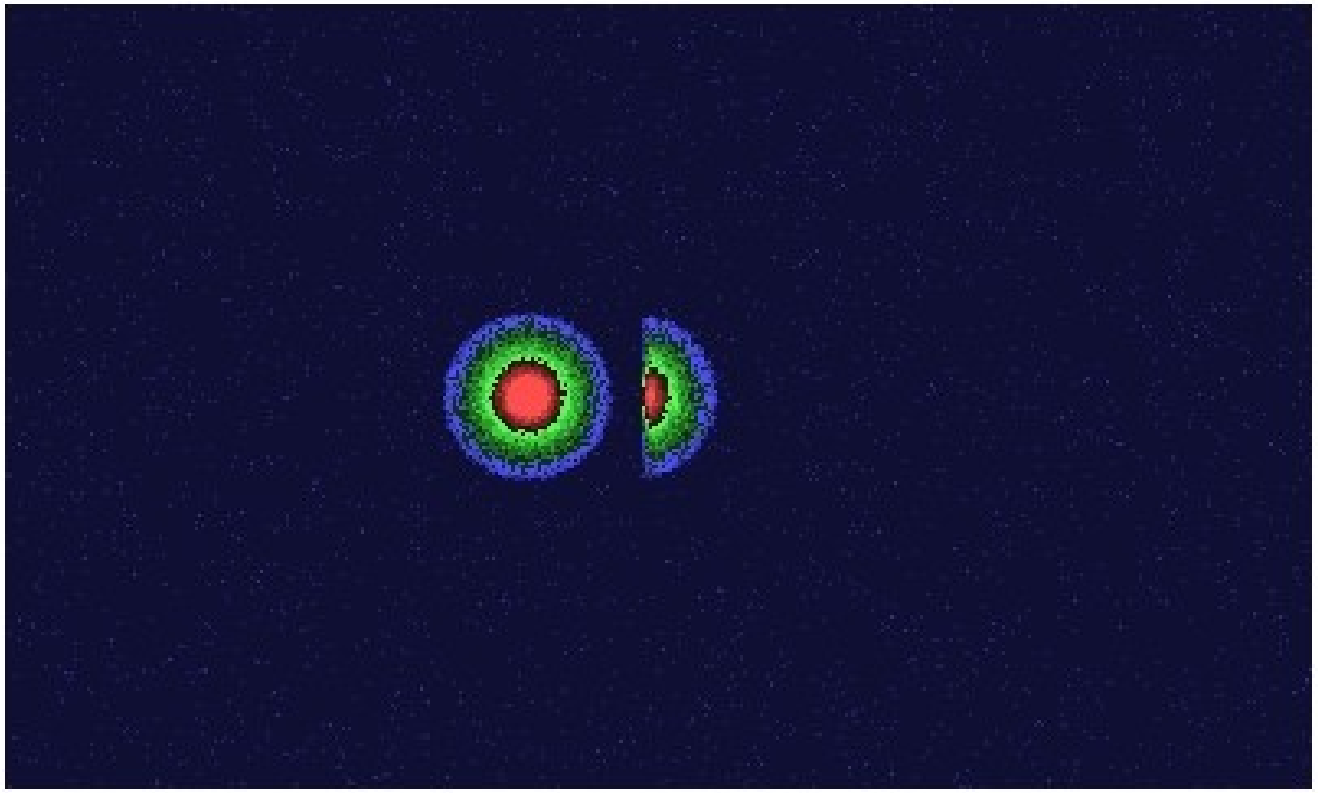
2



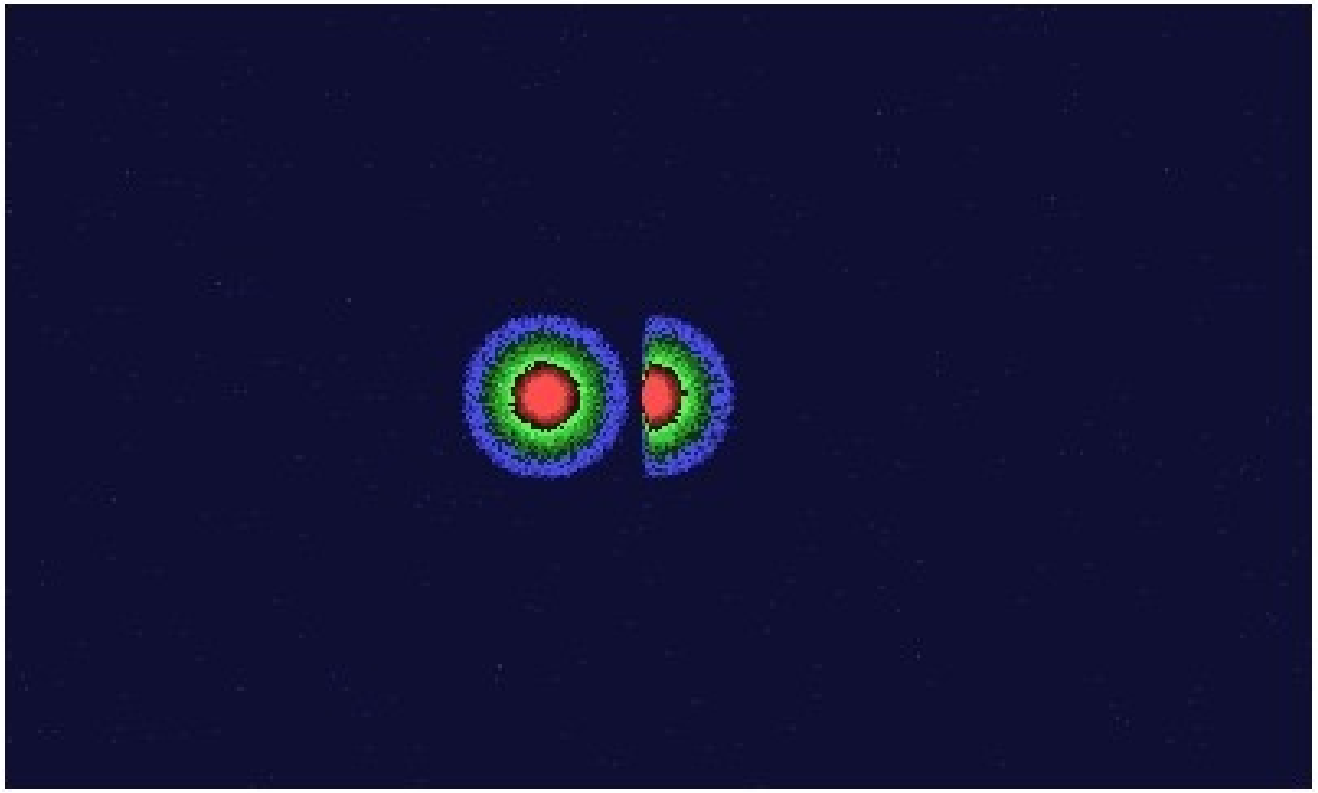
3



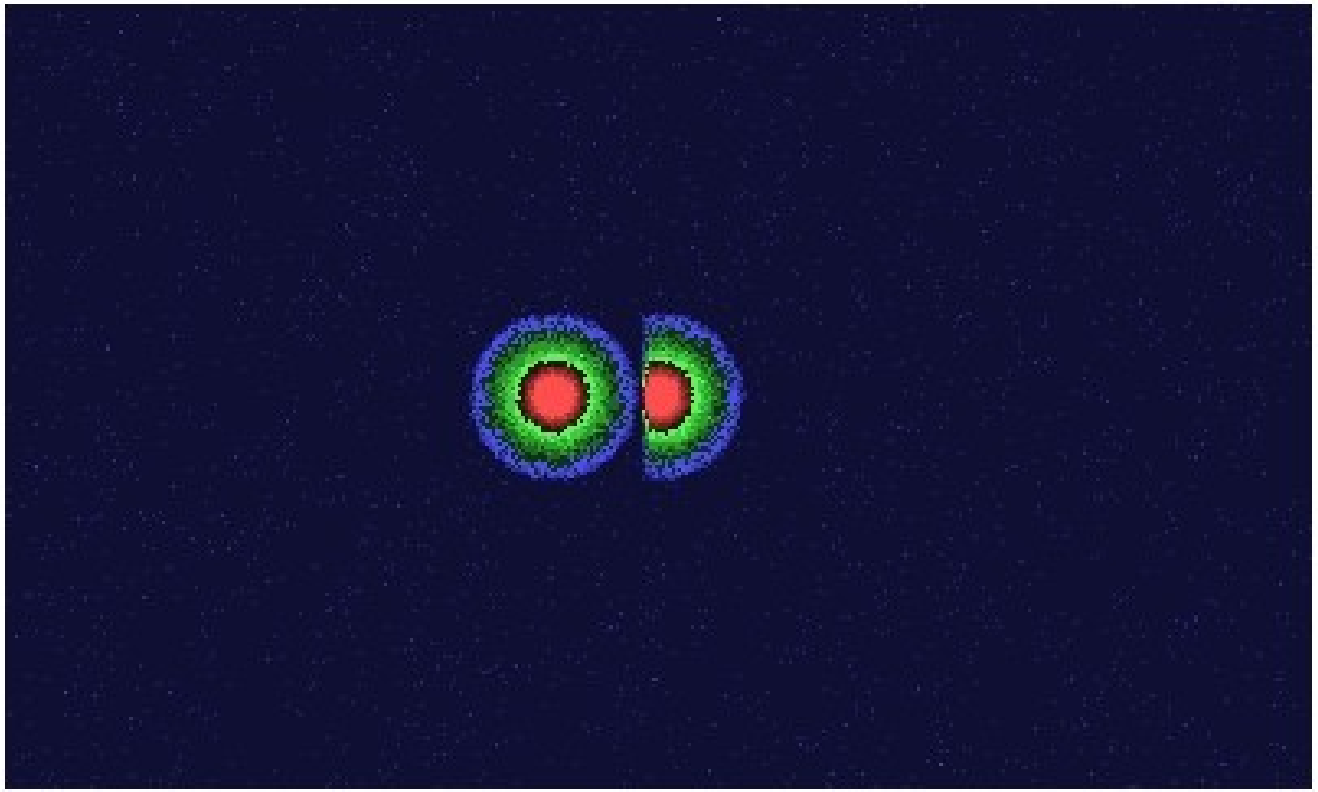
4



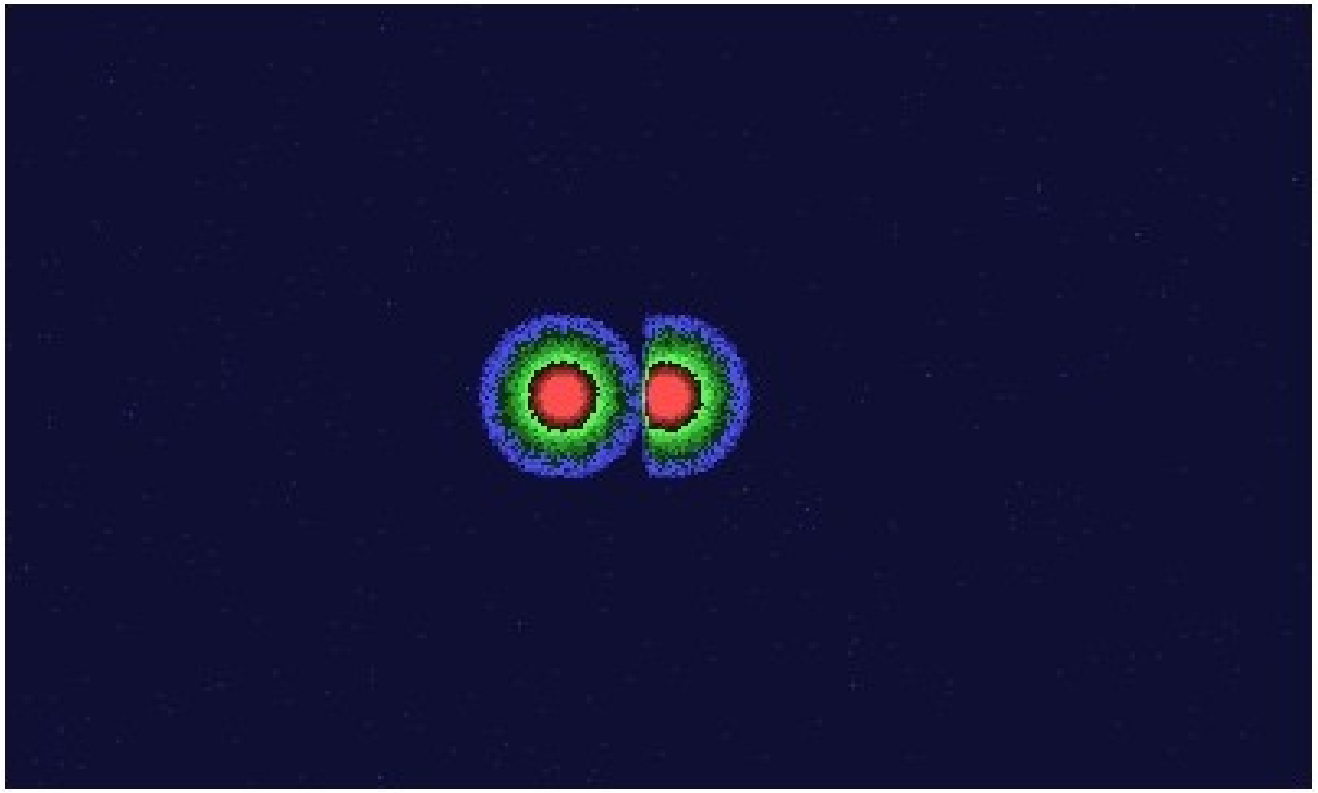
5



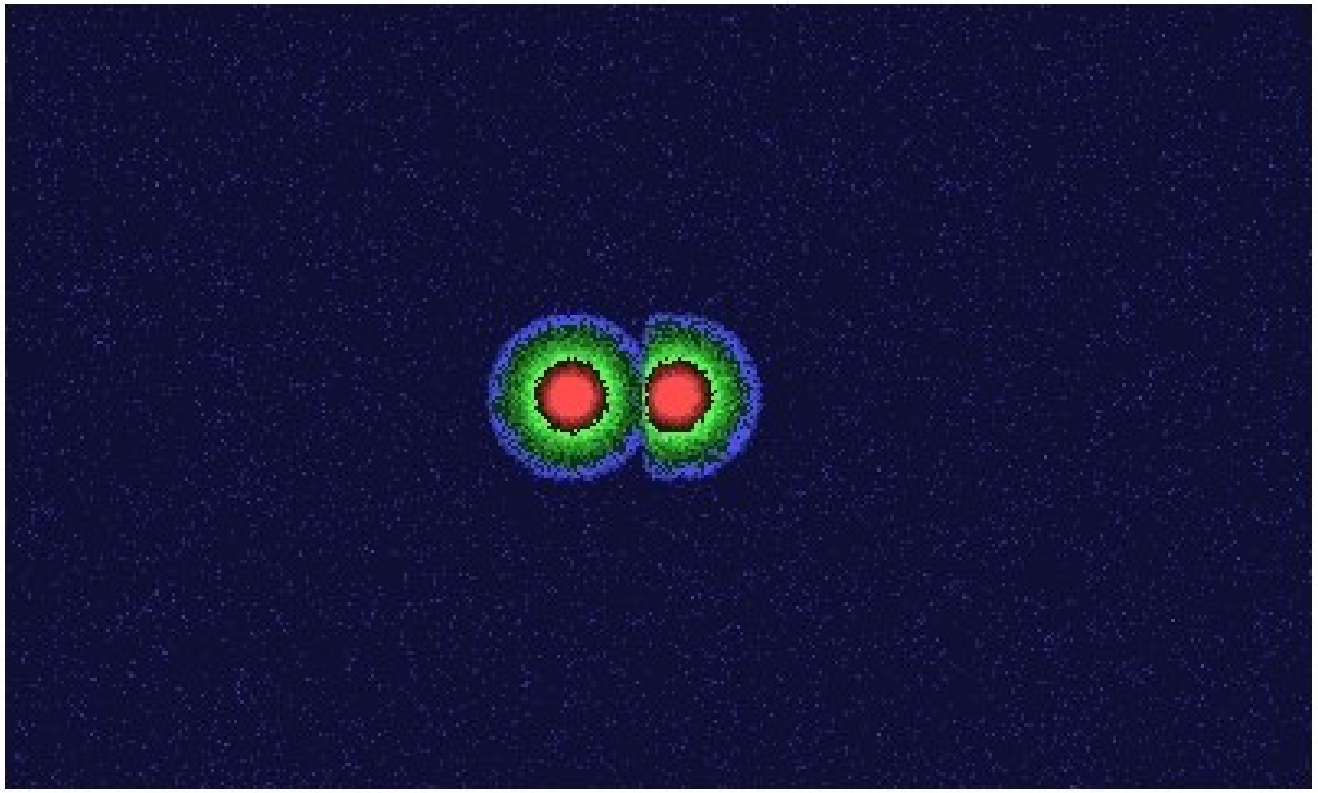
6



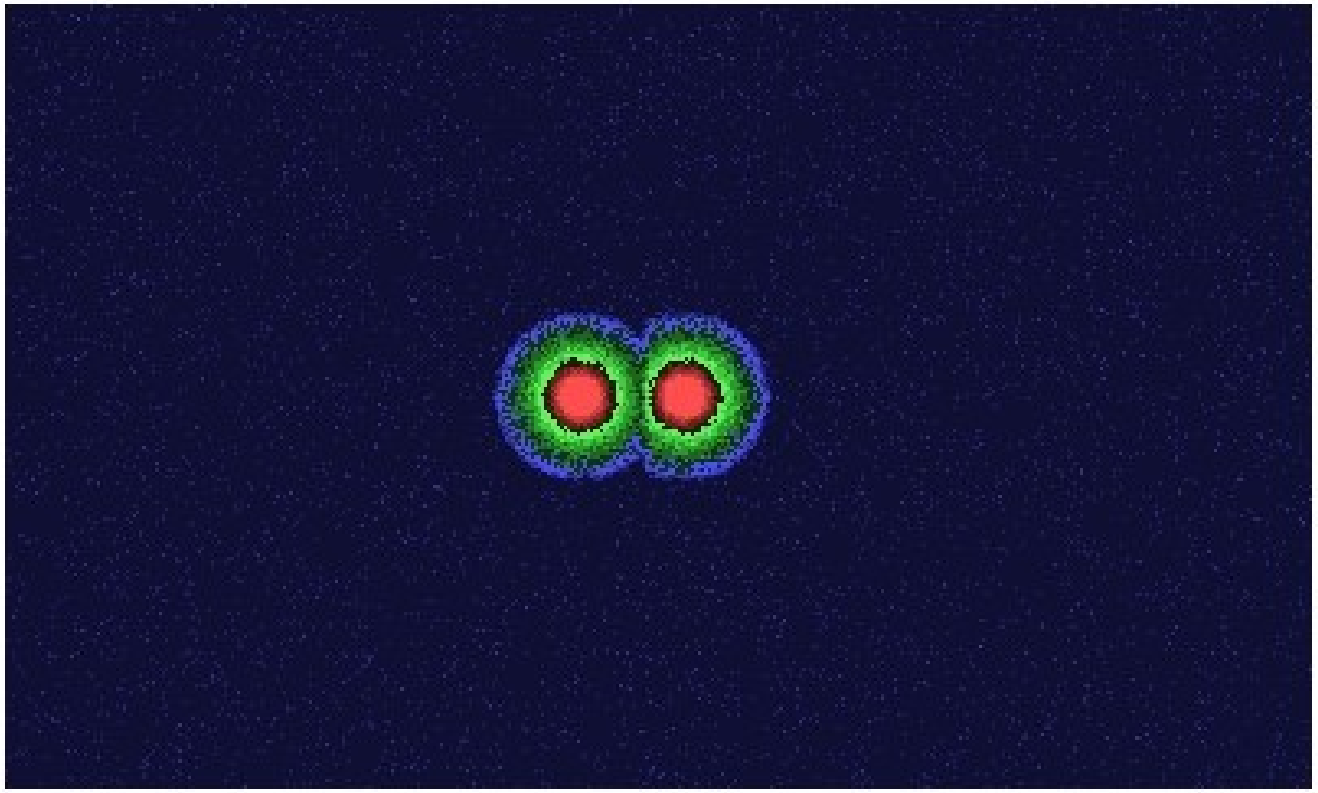
7



8



9



$f_2=0$, $|f_1-f_2|=f_1$

Разность длин срезов изофот изображений $|f_1-f_2|$

2”
1.5”
1”
0.5”
0

f_1

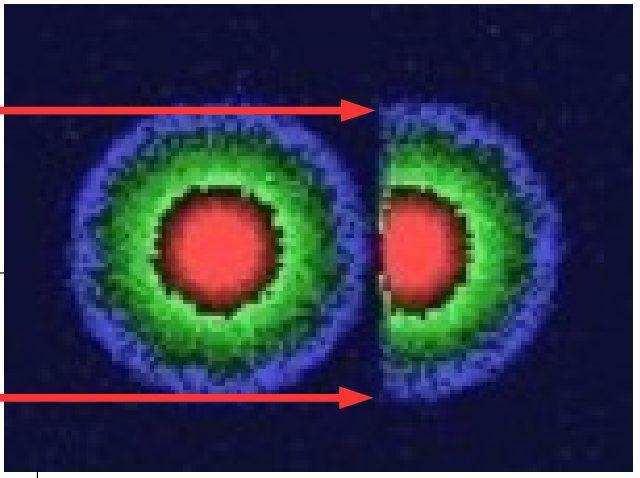
Минимальная величина среза, которую можно наблюдать на телескопе Хаббла

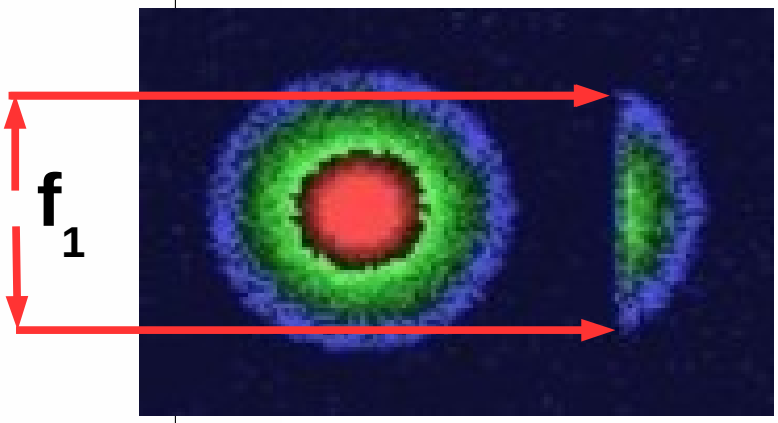
0.1”

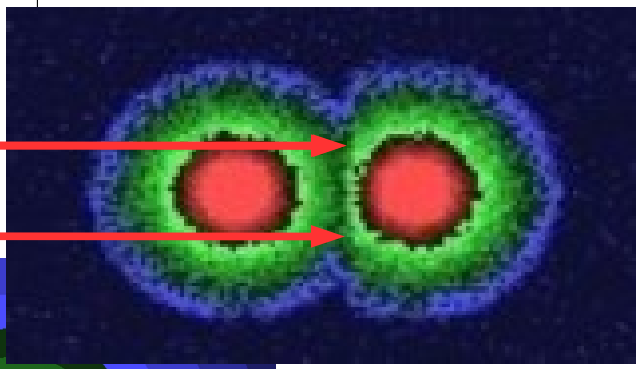
R=0.1

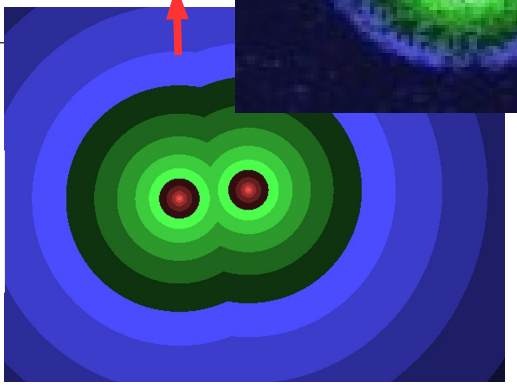
R=1

Отношение интенсивностей изображений

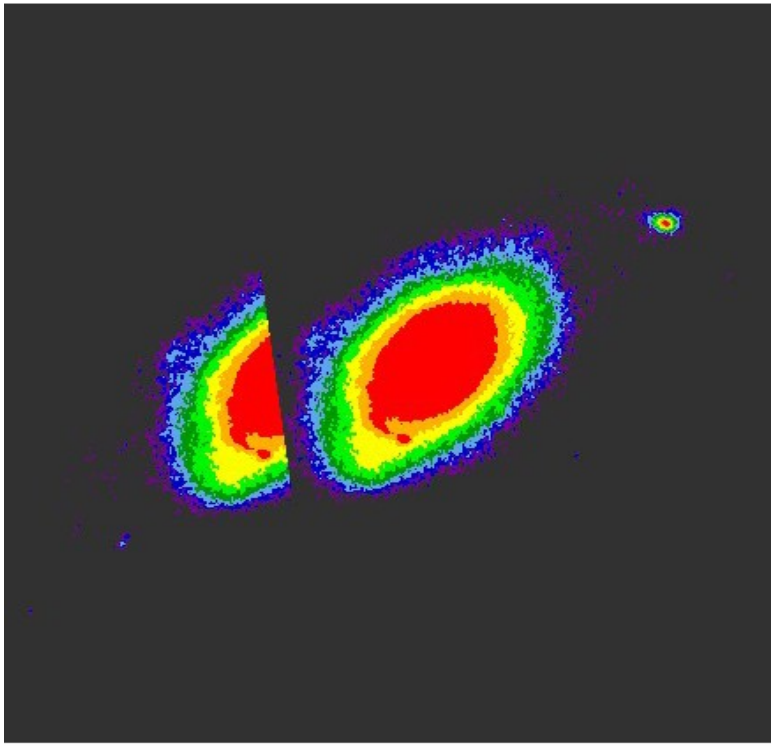


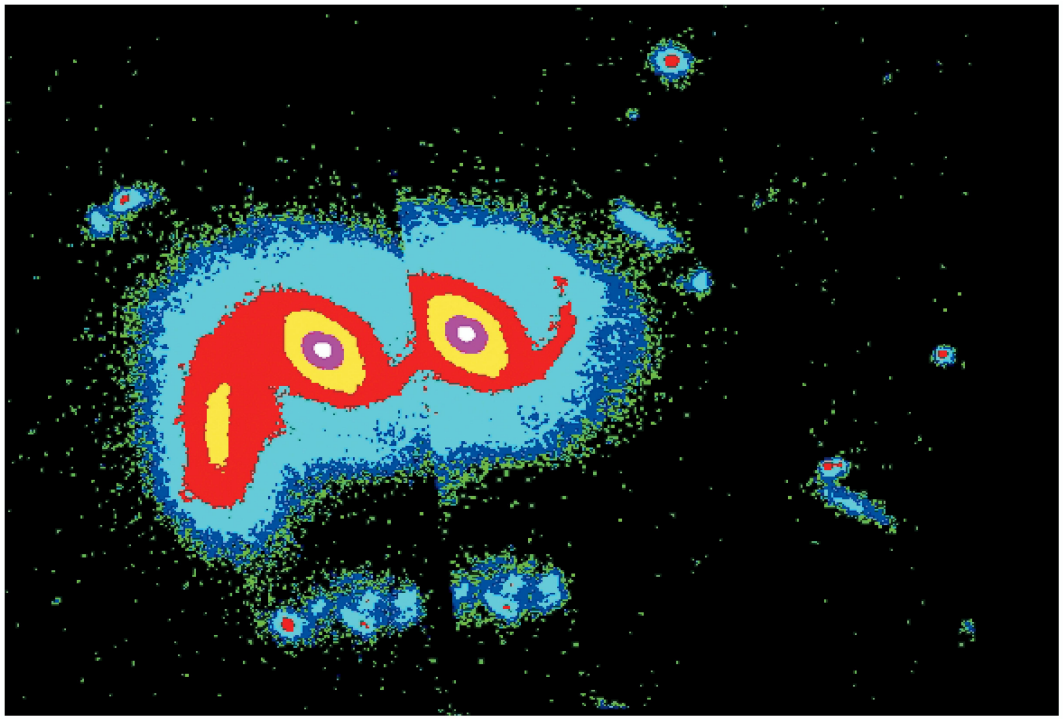






Моделирование линзирования на прямом участке космической струны реальных галактик (в псевдоцветах). Отчетливо видны срезы внешних изофот яркости

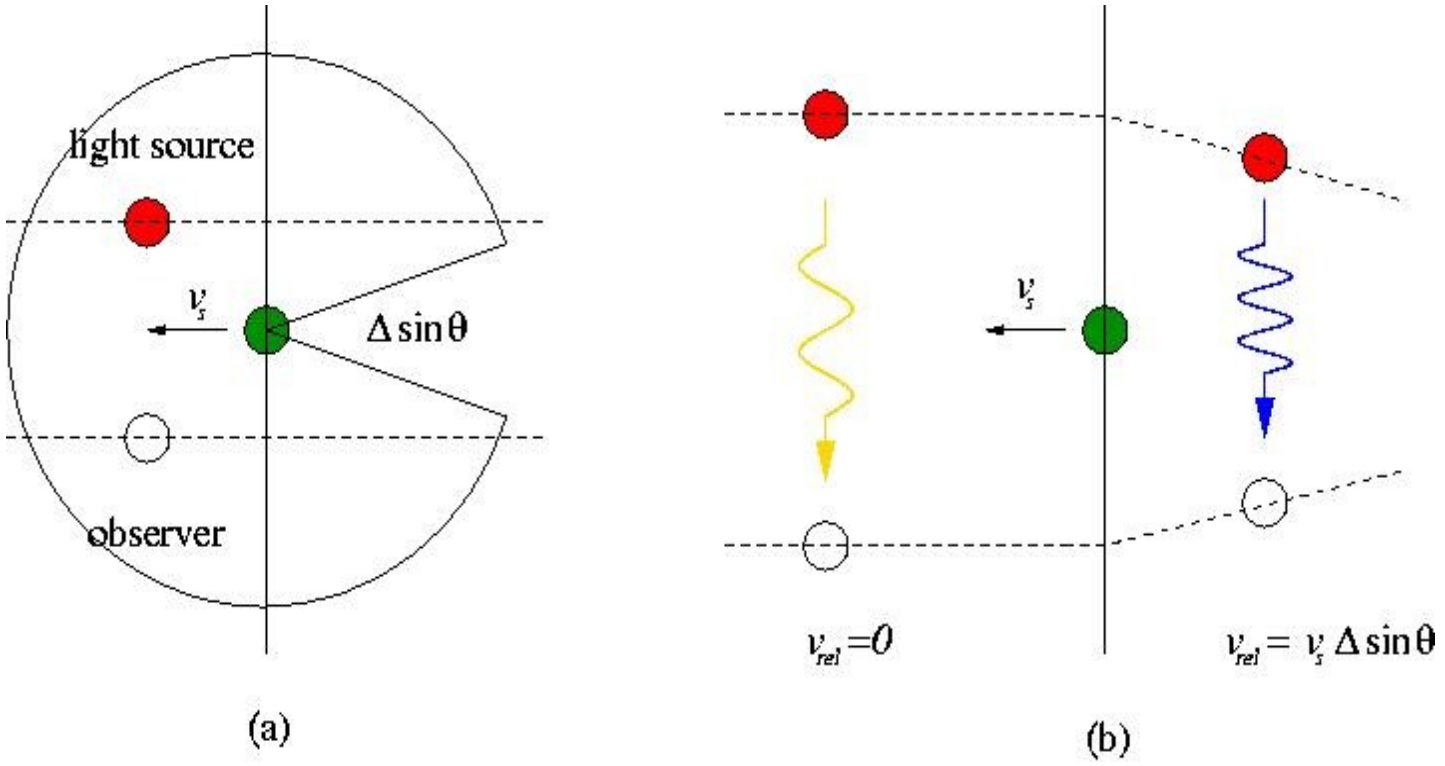


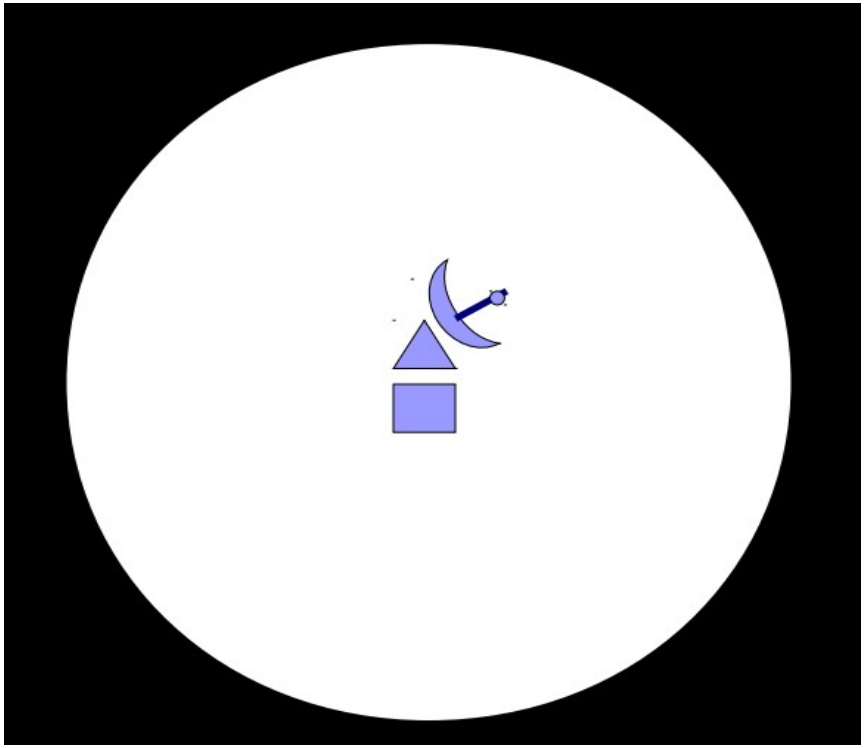


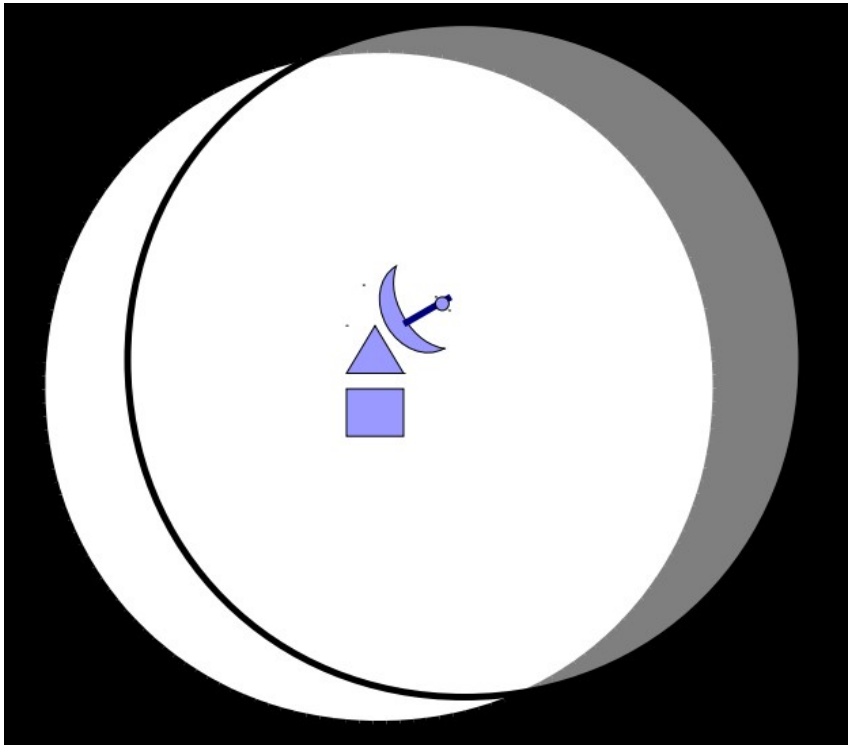
Анизотропия реликтового излучения, индуцированная космической струной

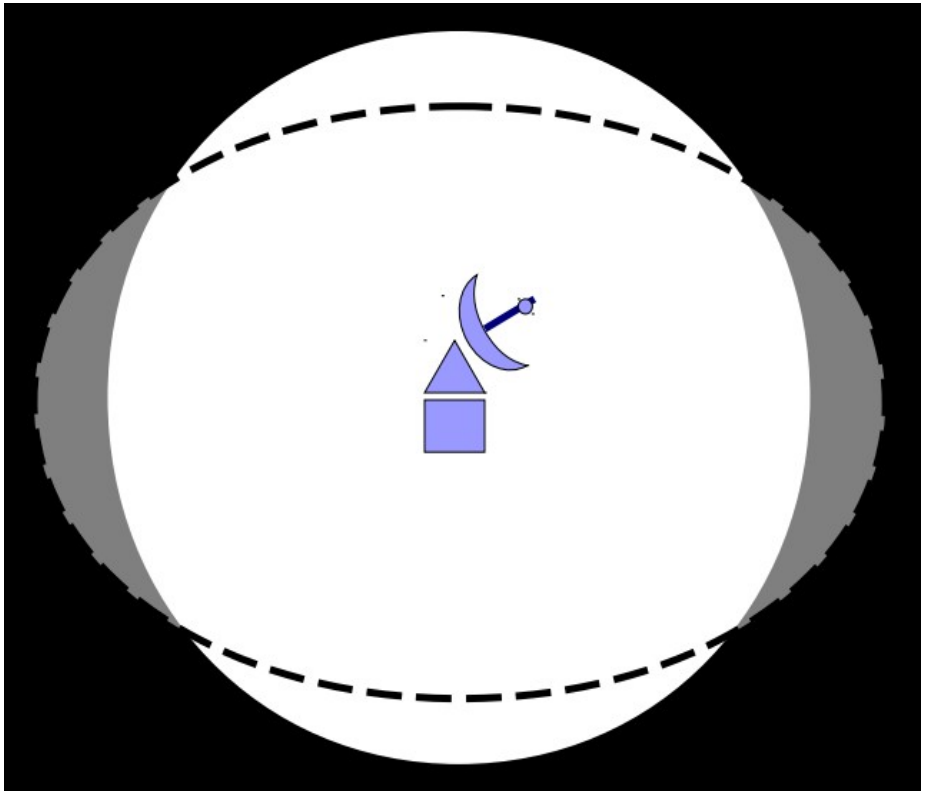
Механизм Кайзера-Стеббинса

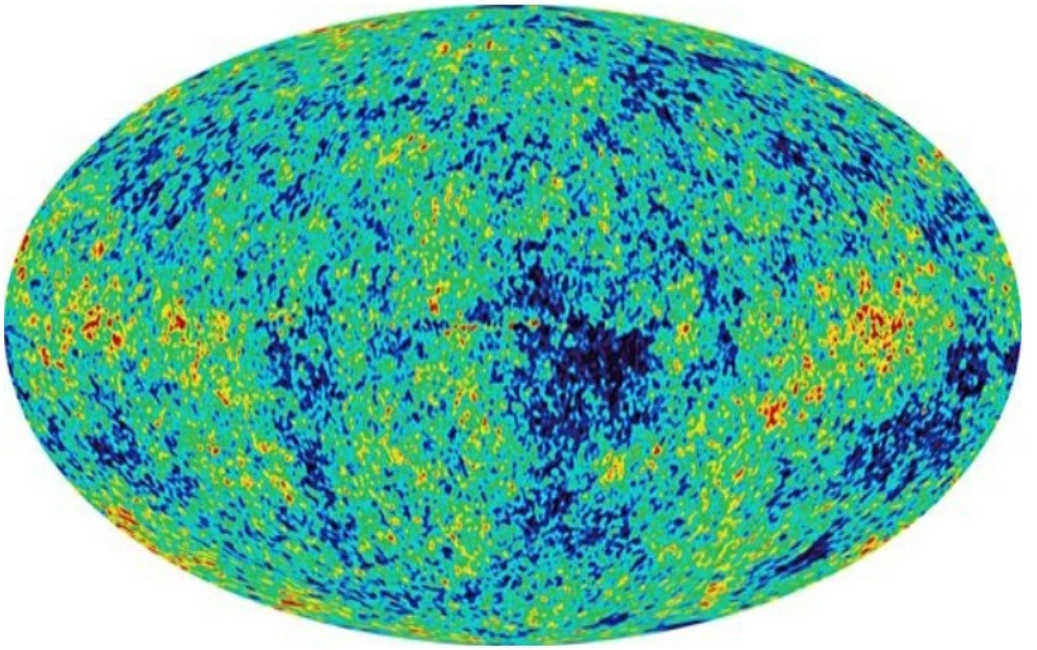
Движущаяся струна вызывает красное или голубое смещение частоты фотонов







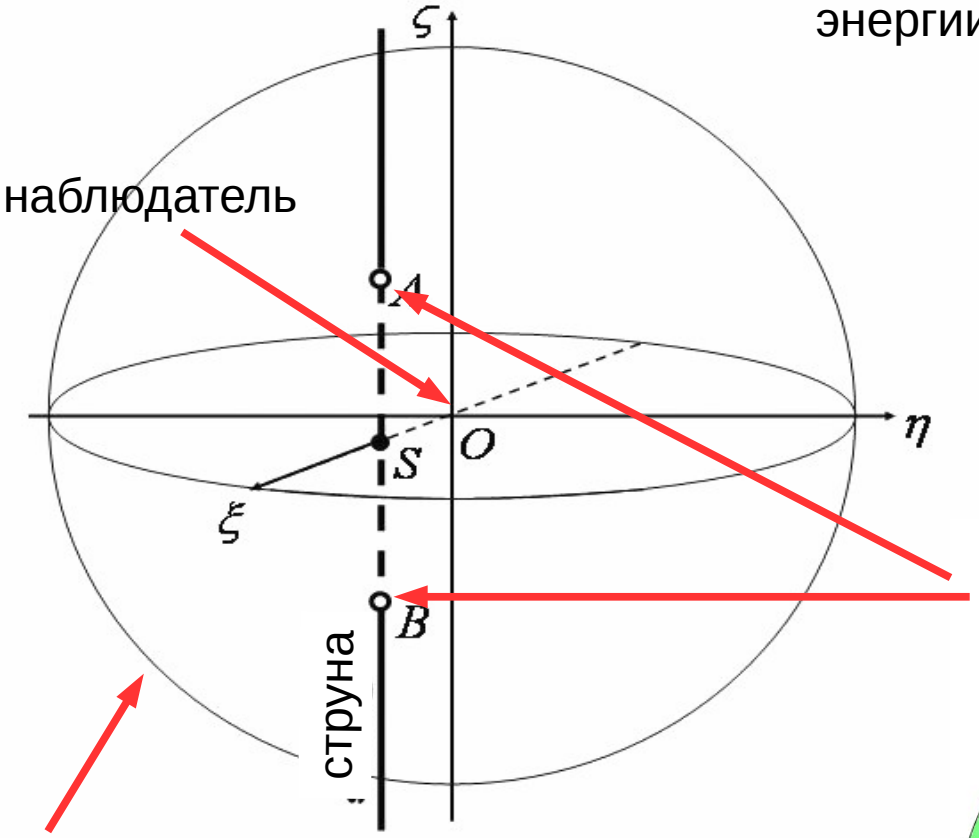




Моделирование движения прямой космической струны и общий вид индуцируемой ей анизотропии модельного фонового излучения

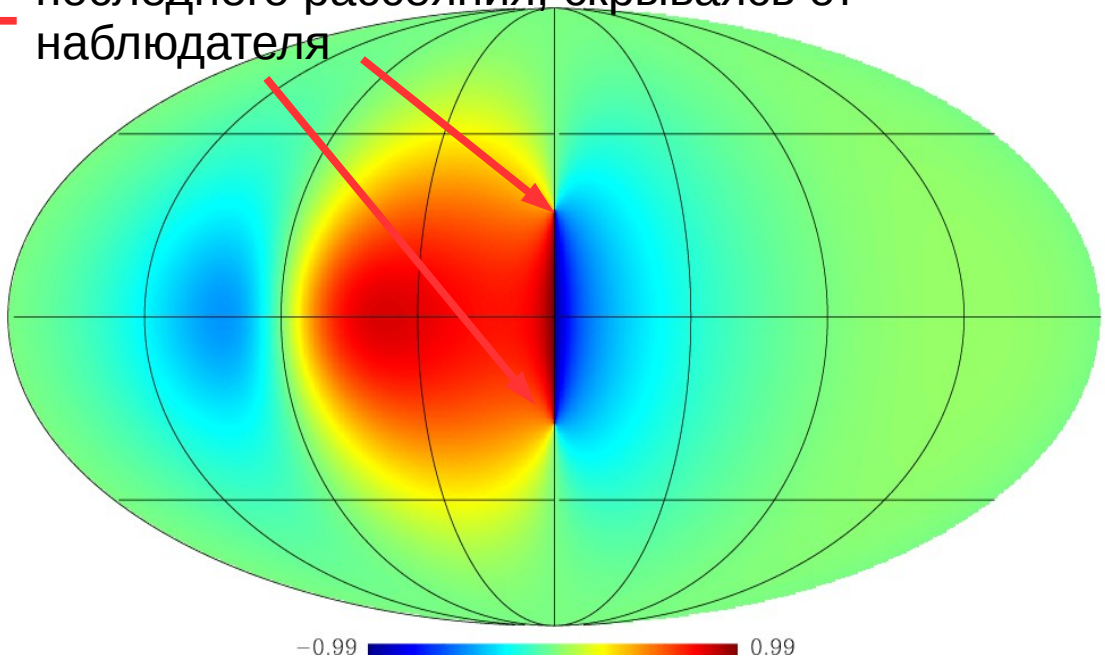
Анизотропия реликтового излучения, порождаемая на поверхности последнего рассеяния струной, зависит от энергии струны и ее скорости:

$$\frac{\delta T}{T} \approx 8\pi G \mu \gamma \frac{v}{c}$$



Точки “протыкания” космической струной поверхности последнего рассеяния. Прямая струна в такой модели не может иметь концов и поэтому продолжается за поверхность последнего рассеяния, скрываясь от наблюдателя

Поверхность последнего рассеяния



Анизотропия на струне

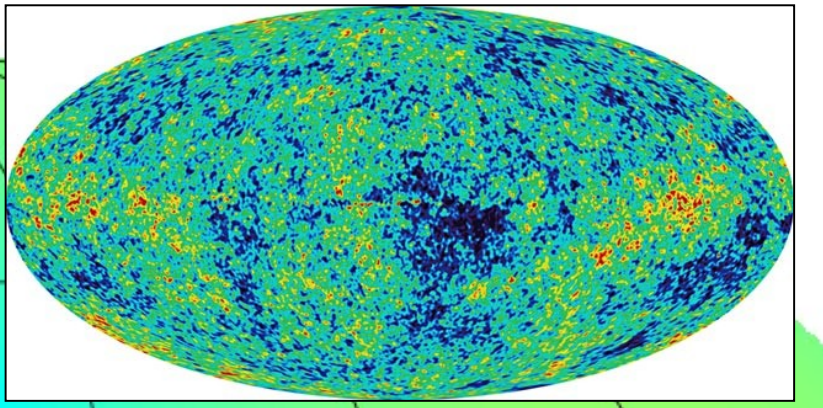
Вычисление анизотропии реликтового излучения, индуцированной прямой движущейся космической струной.

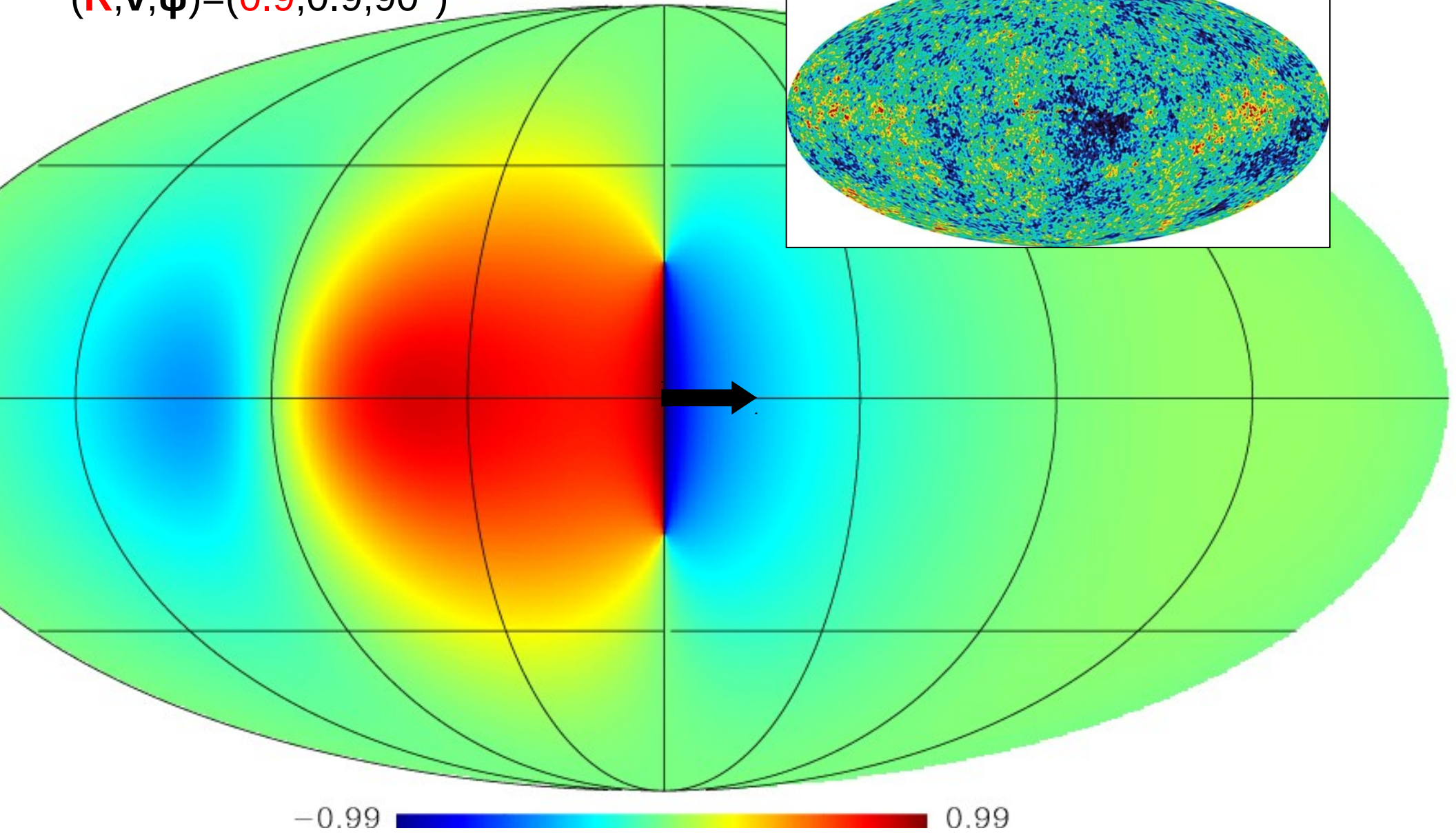
- **R** – расстояние от наблюдателя до струны (в единицах расстояния до поверхности последнего рассеяния);
- **v** – скорость струны (в единицах **c**);
- **ψ** – направление движения струны.

(**R**,**v**,**ψ**)

Анизотропия на струне

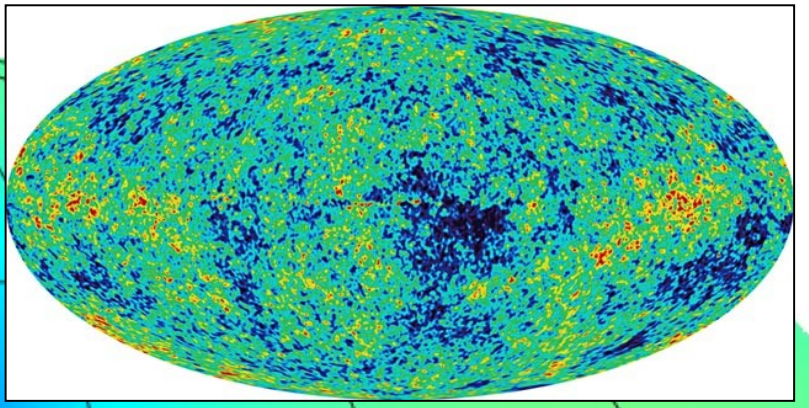
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.9,90°)

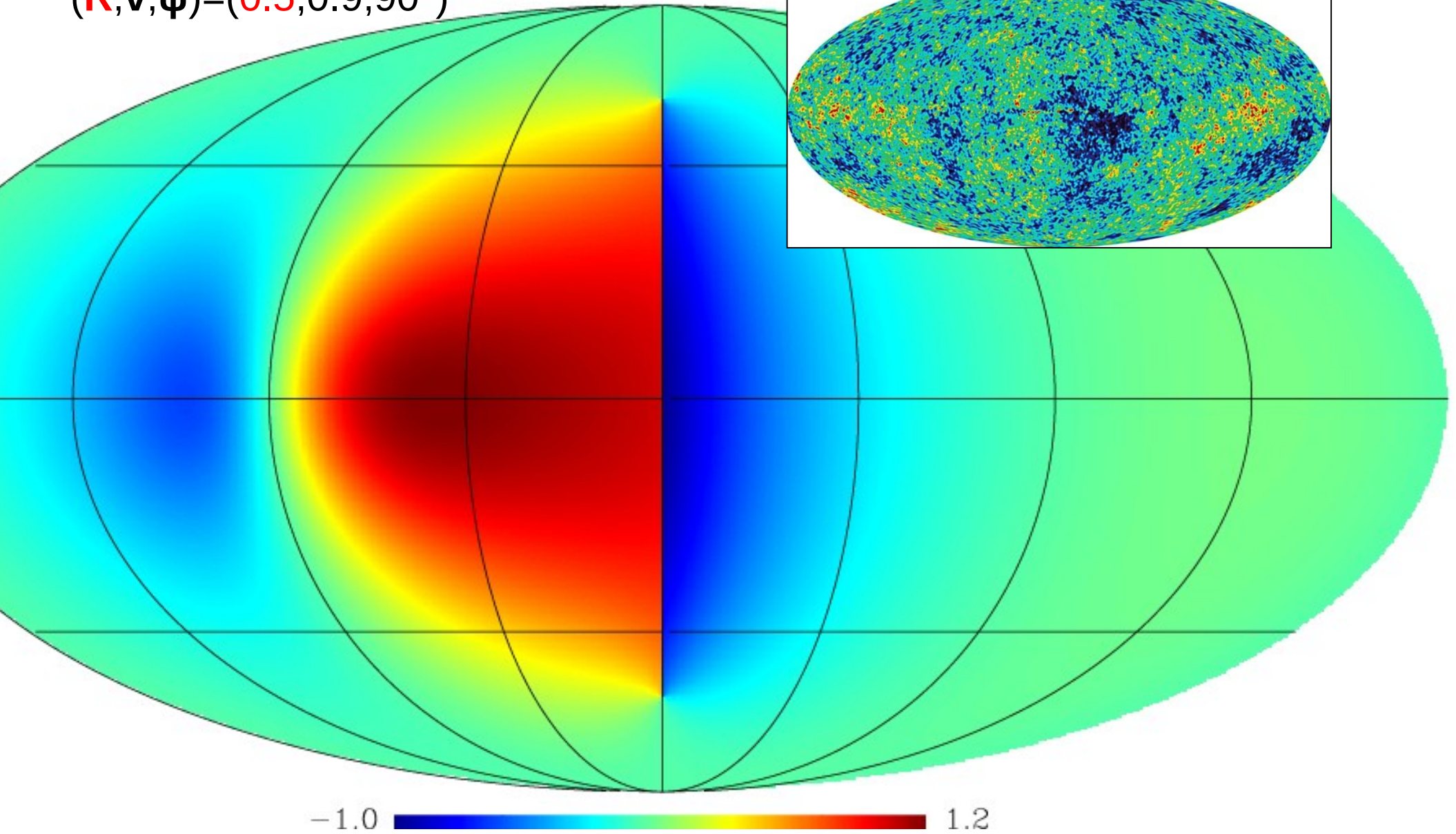




Анизотропия на струне

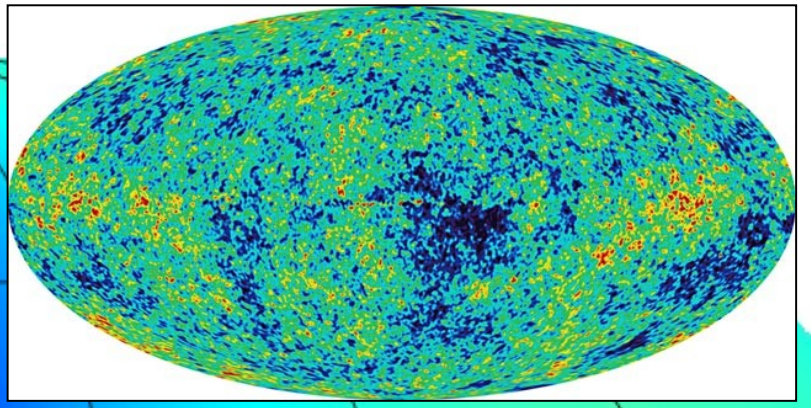
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.5,0.9,90°)

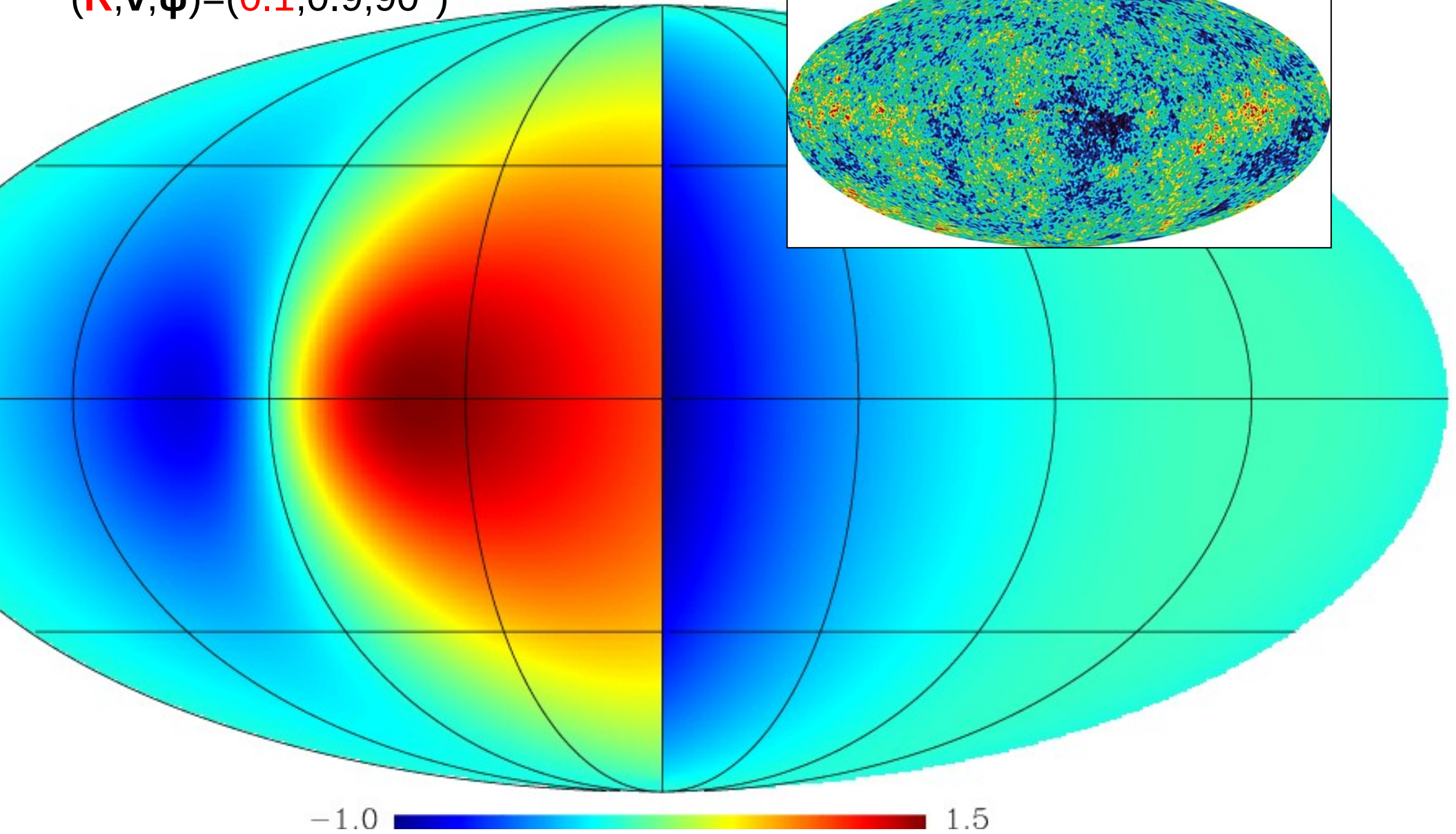




Анизотропия на струне

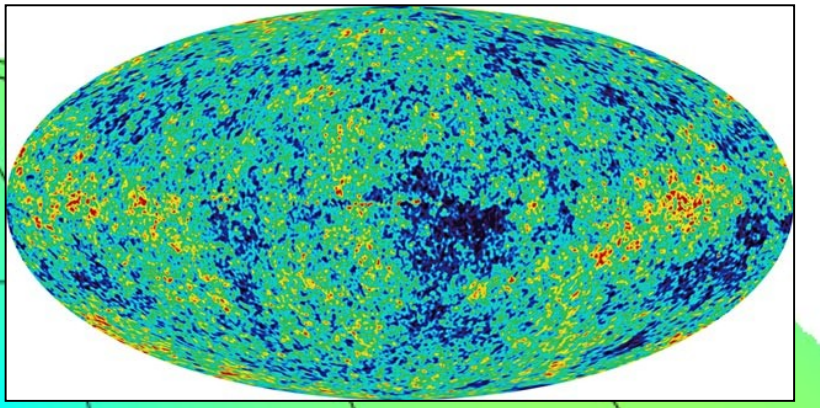
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.1,0.9,90°)

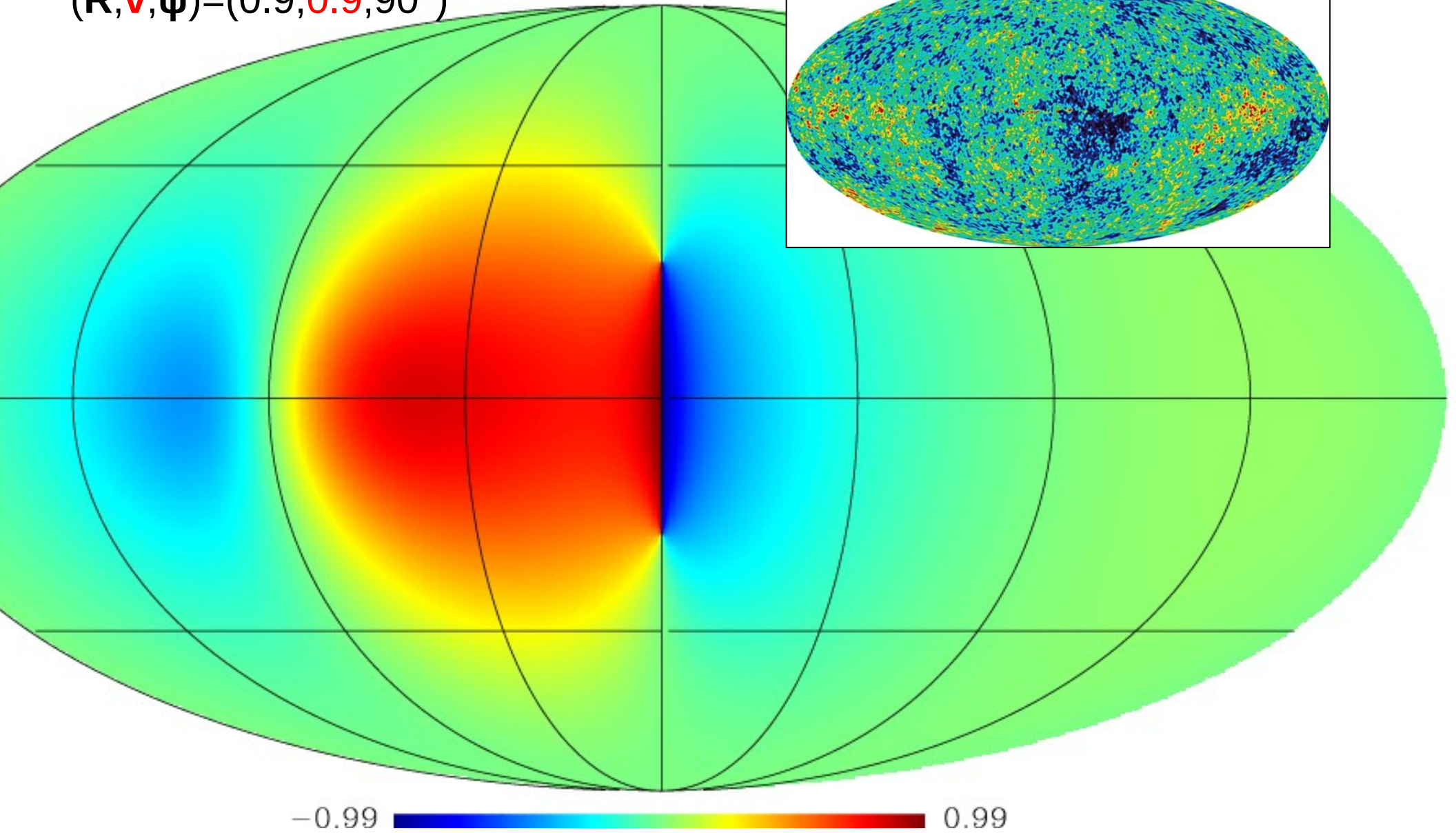




Анизотропия на струне

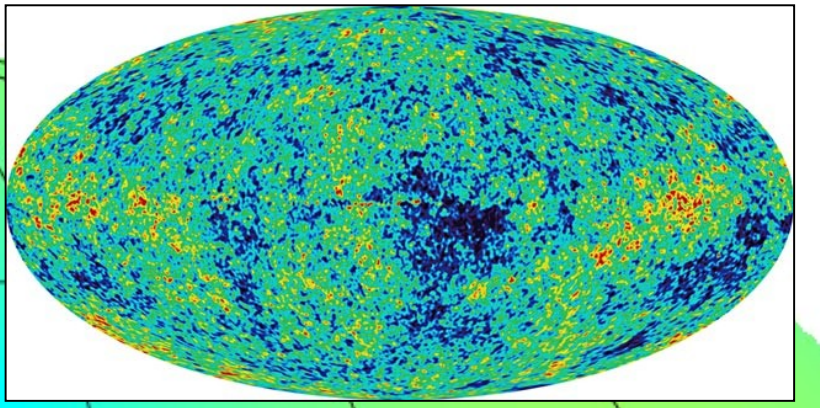
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.9,90°)

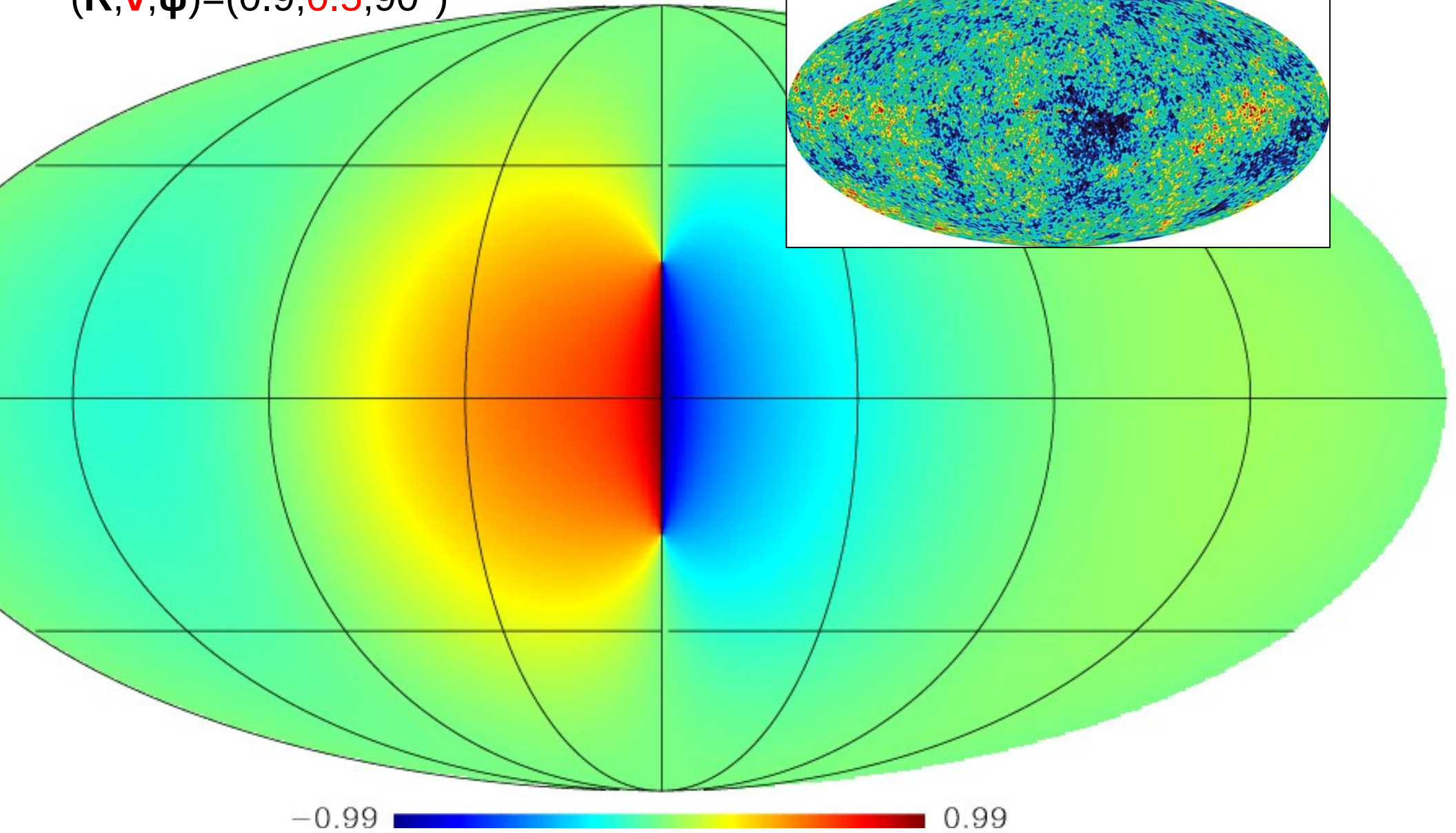




Анизотропия на струне

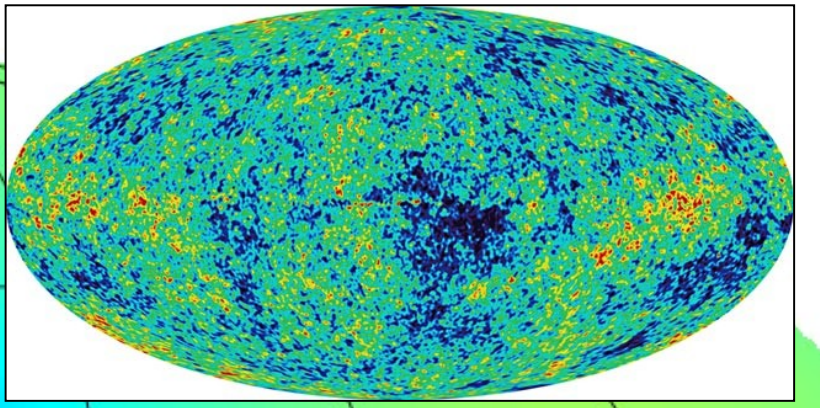
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.5,90°)

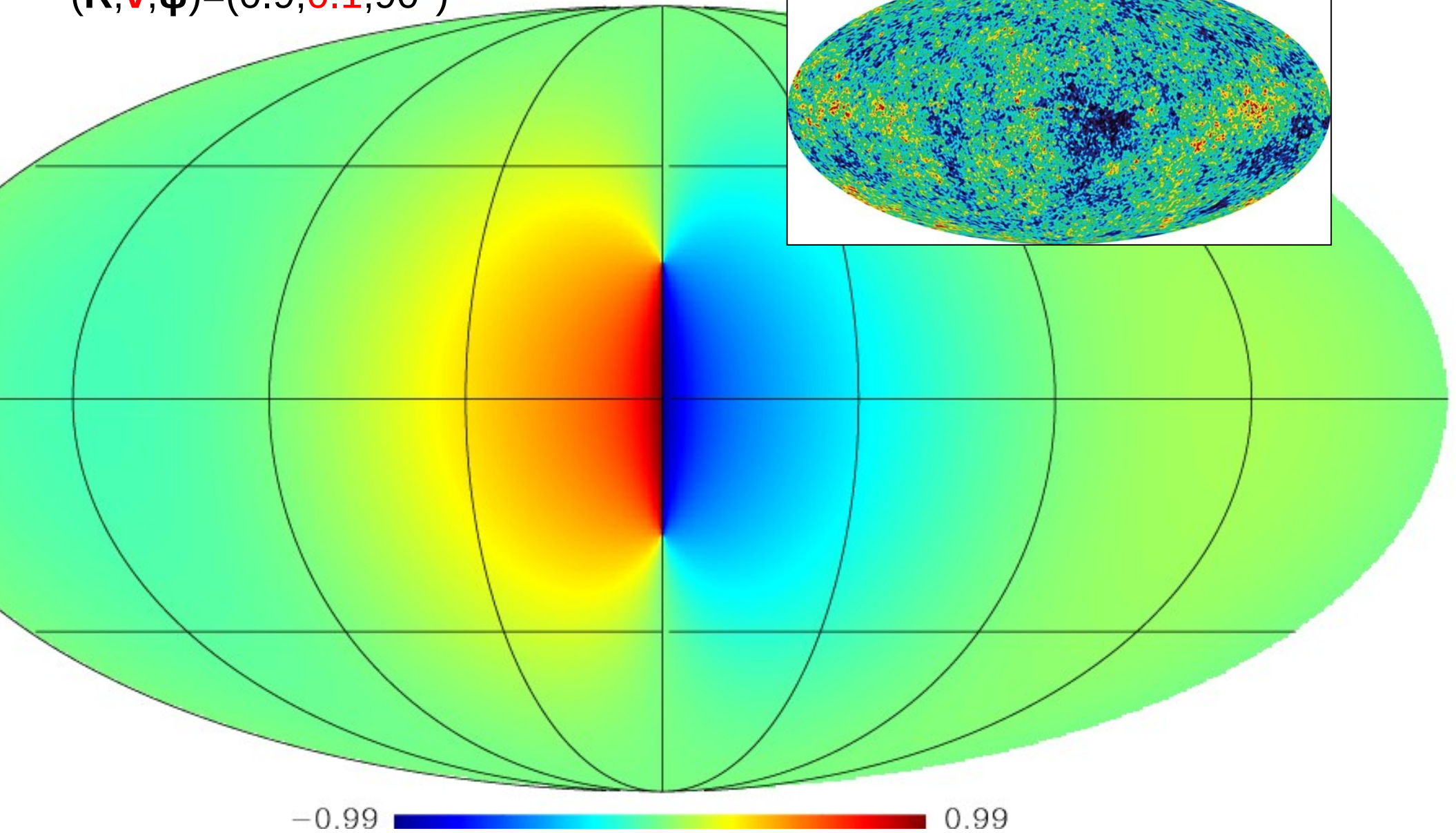




Анизотропия на струне

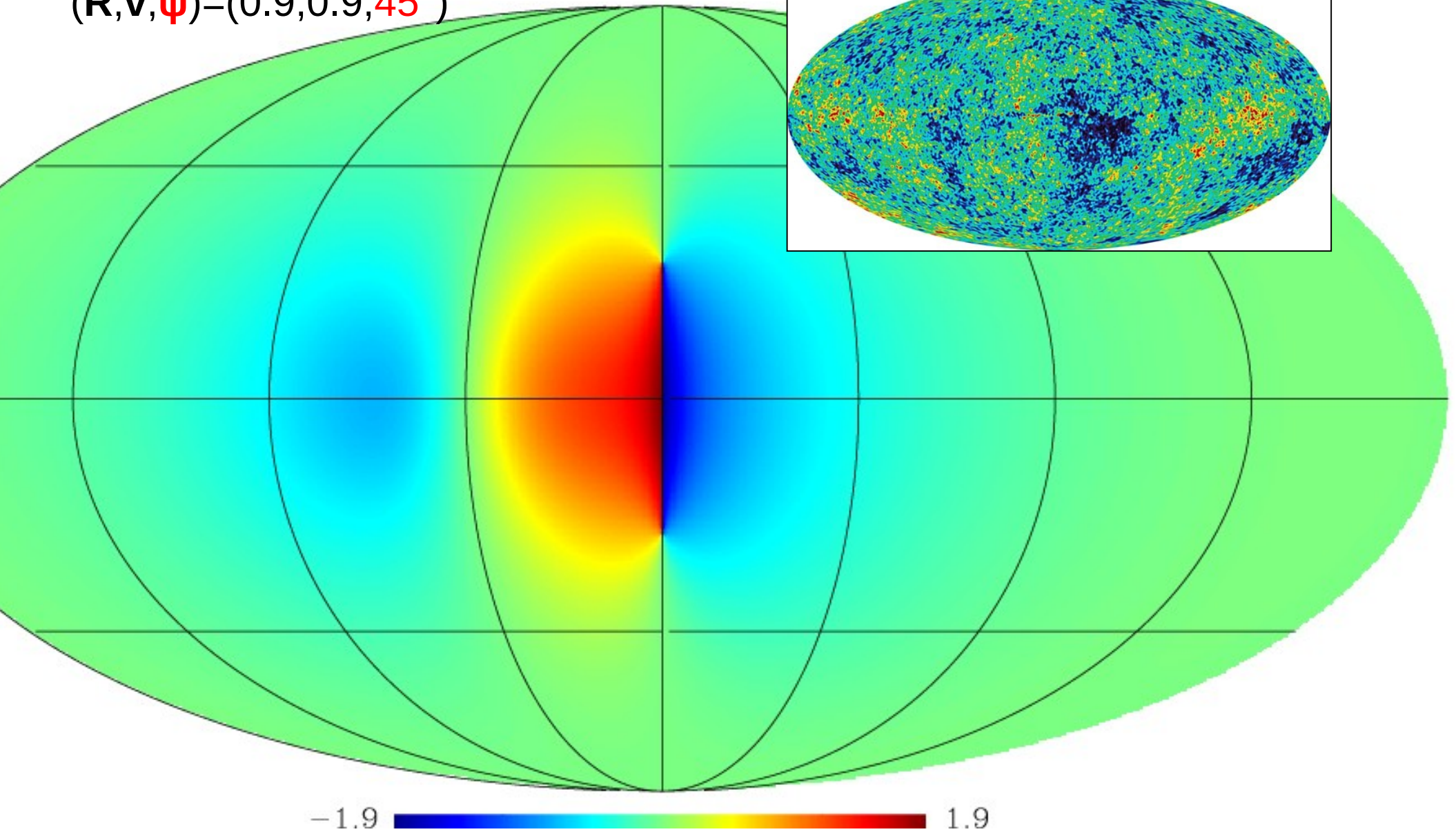
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.1,90°)





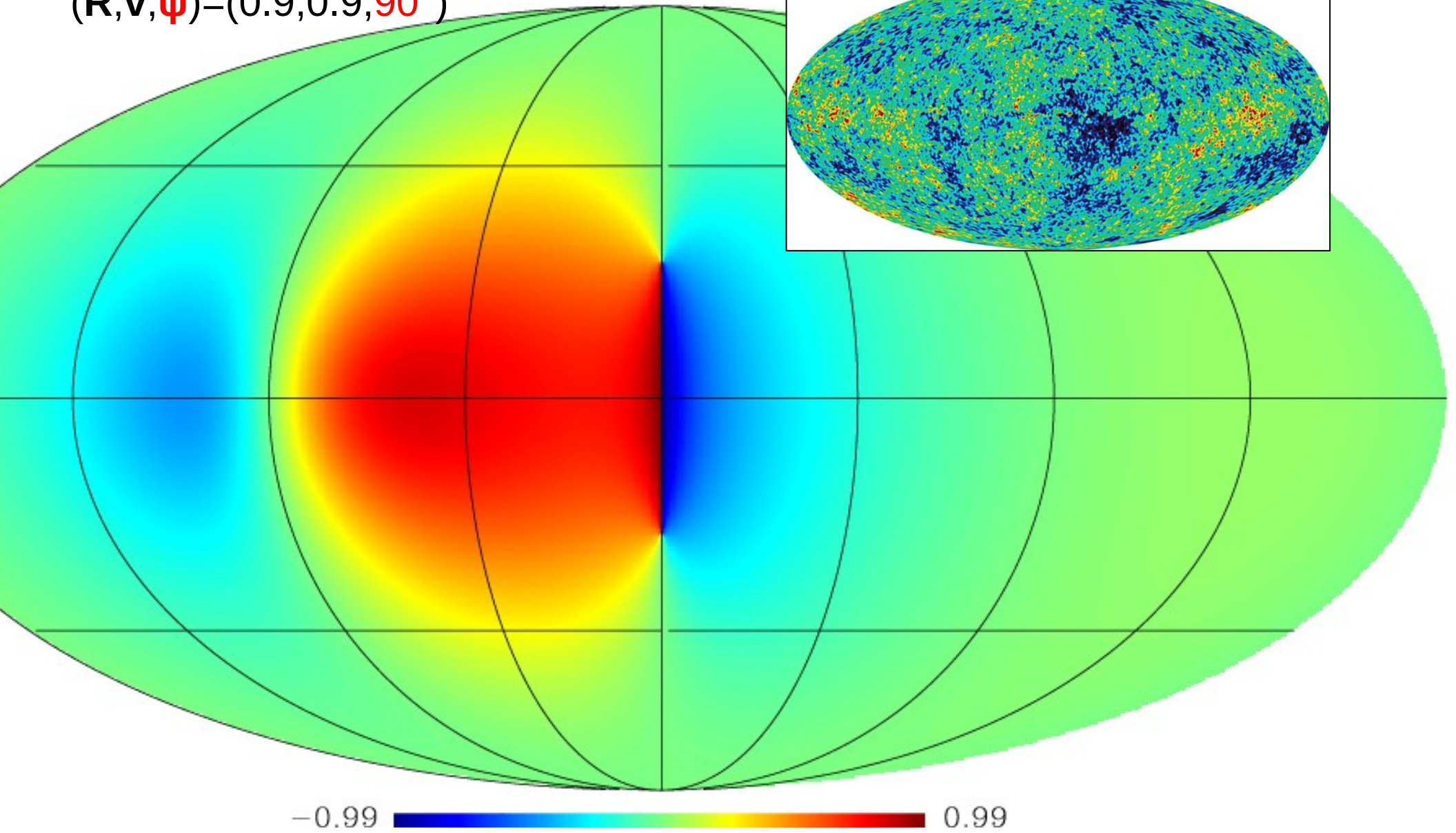
Анизотропия на струне

(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.9,45°)



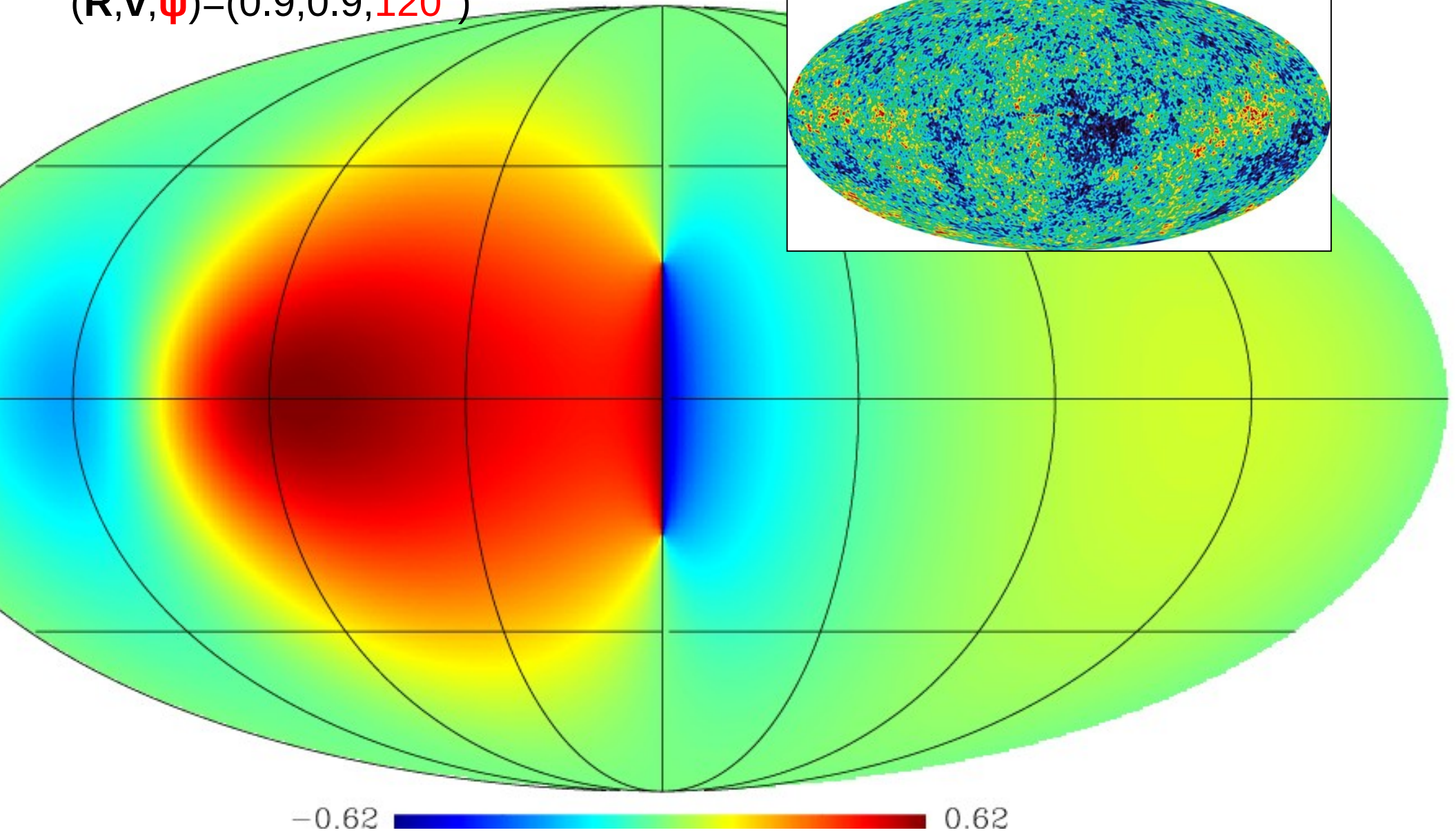
Анизотропия на струне

(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.9,90°)



Анизотропия на струне

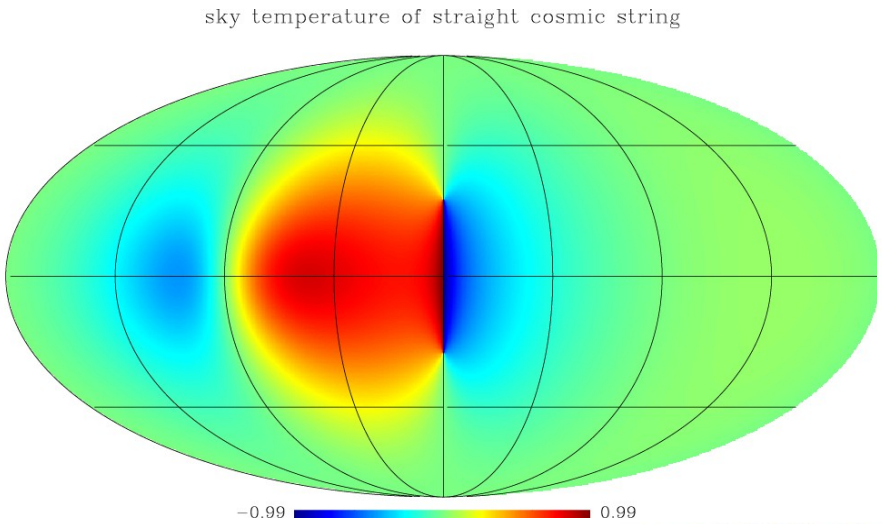
(**R**,**v**,**ψ**)=(0.9,0.9,120°)

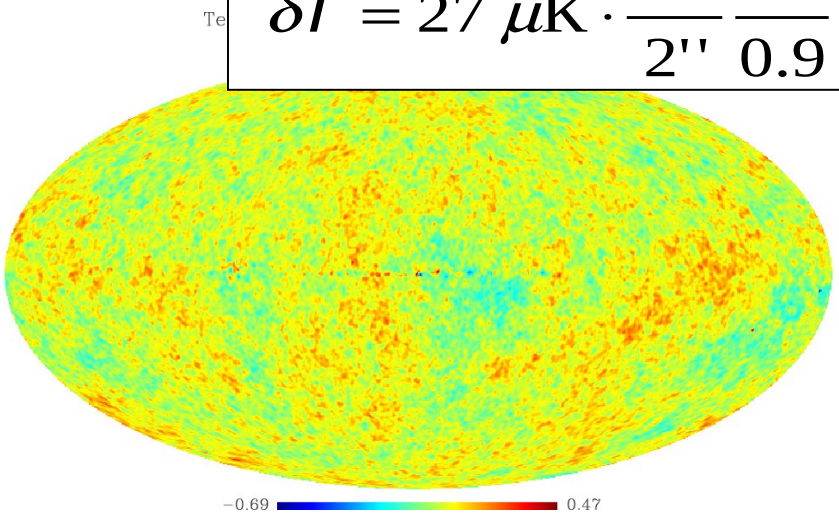


Анизотропия на струне

$$\frac{\delta T}{T} \approx 8\pi G\mu\gamma\frac{v}{c}$$

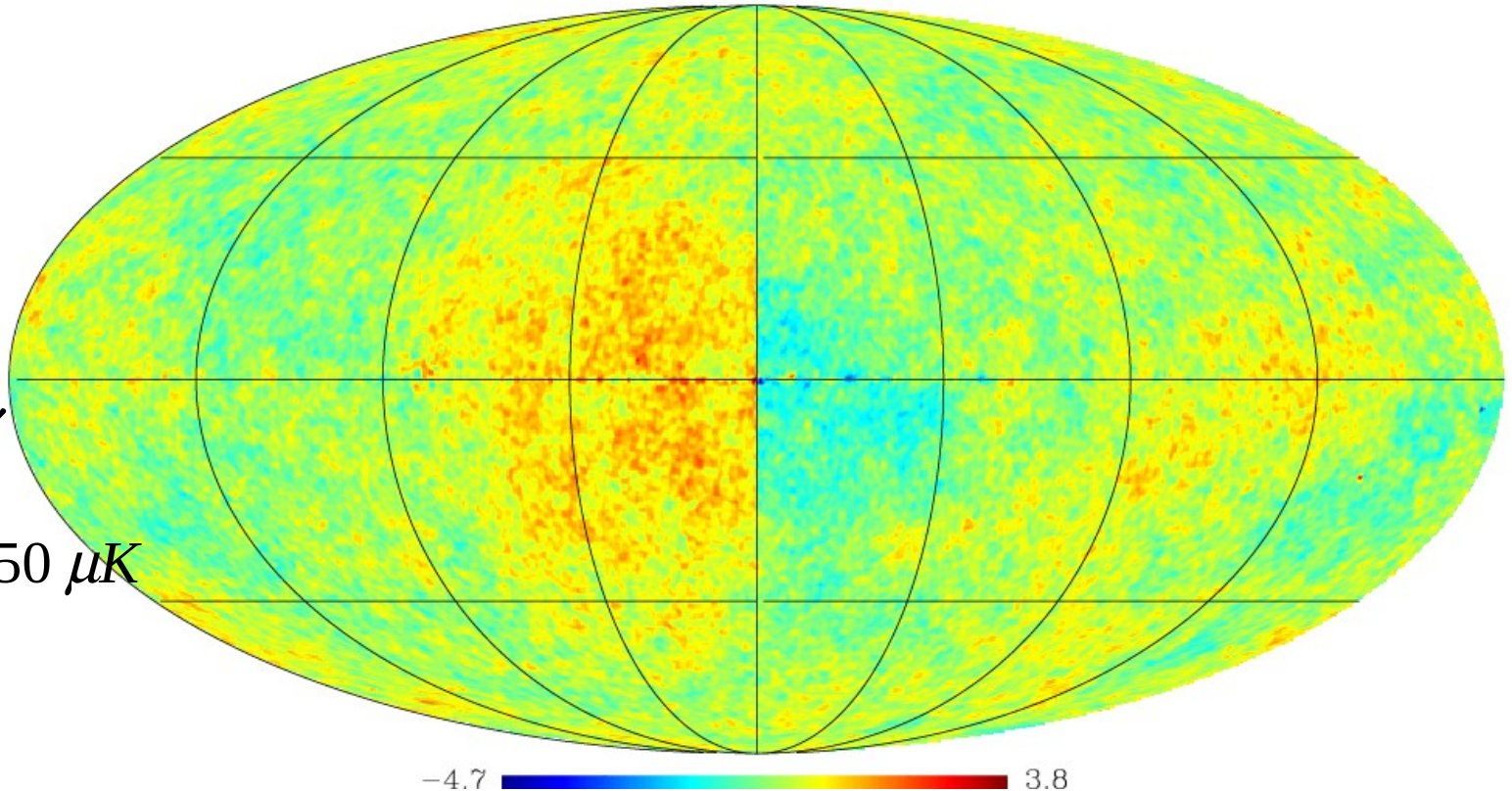
$$\delta T = 27\ \mu\mathrm{K}\cdot\frac{\Delta\theta}{2''}\frac{v}{0.9}F(\psi,\varphi,\theta)$$

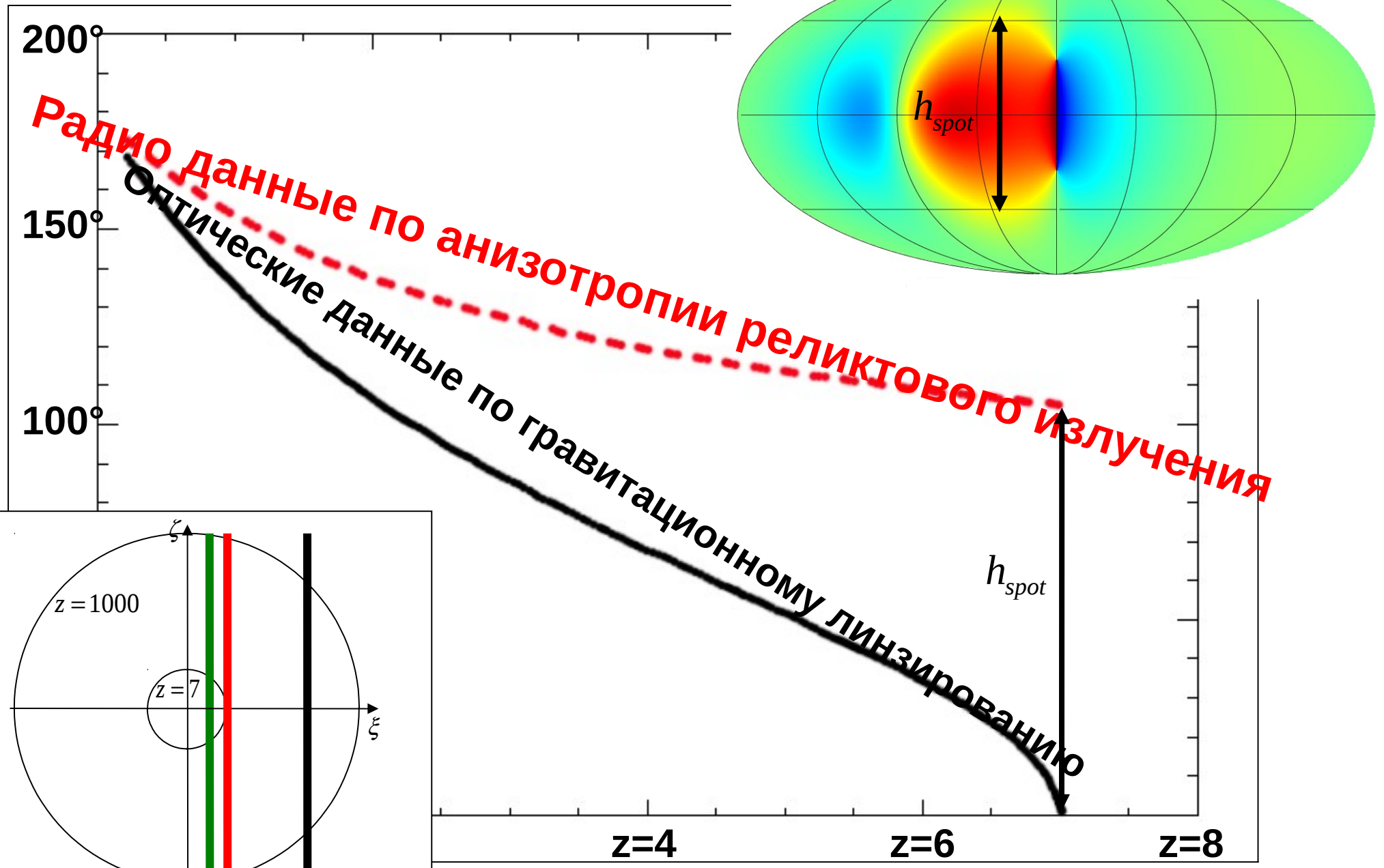


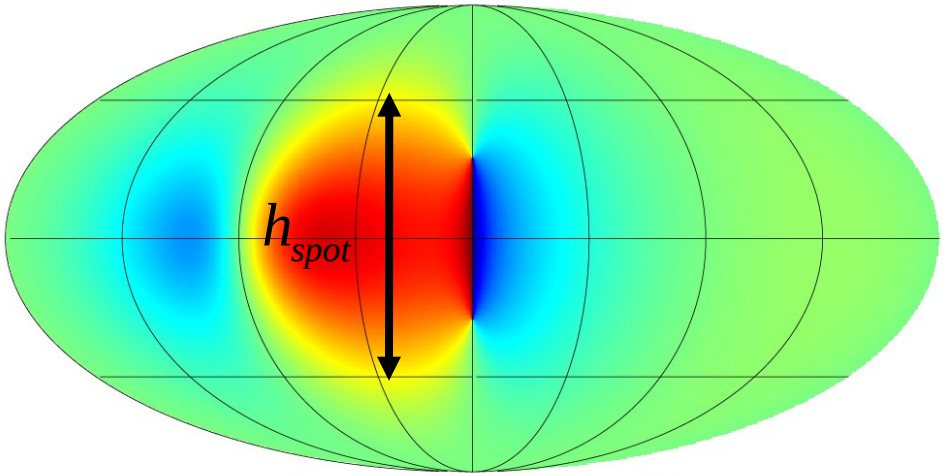


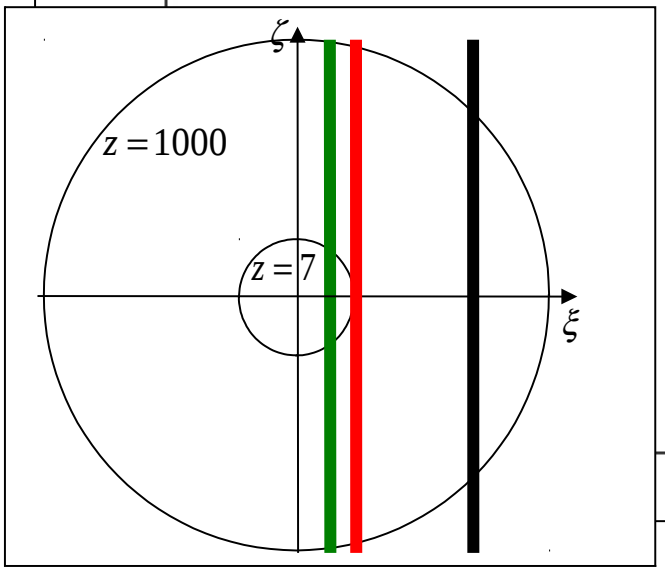
$$\alpha = 10''$$

$$\frac{\delta T}{T} \approx 150\ \mu K$$




200°
150°
100°
Радио данные по анизотропии реликтового излучения
Оптические данные по гравитационному линзированию
h_{spot}
z=4
z=6
z=8


h_{spot}

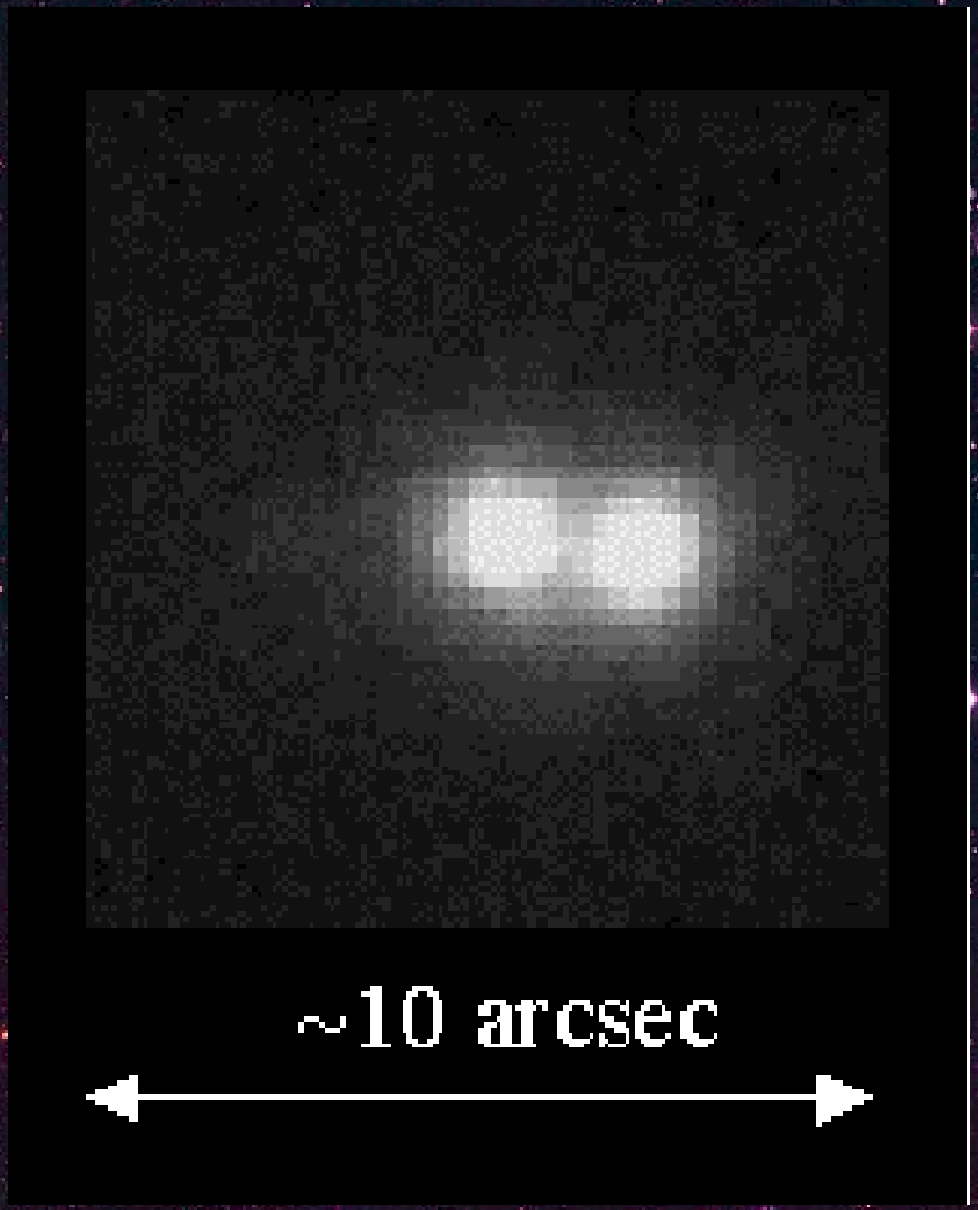

ζ
z = 1000
z = 7
ξ

5. Объект CSL-1

CSL-1 – Capodimonte-Sterbrg-Lens-1 – это двойной внегалактический объект, обнаруженный в OACDF (Osservatorio Astronomico di Capodimonte — Deep Field), 2003 — 2006 гг.

MPG/ESO 2.2-м телескоп обсерватории Ла Силья (Чили)

Объект CSL-1, 2003 — 2006 гг.



Звездная величина

$$M_R = -22.3 \pm 0.1$$

Красное смещение

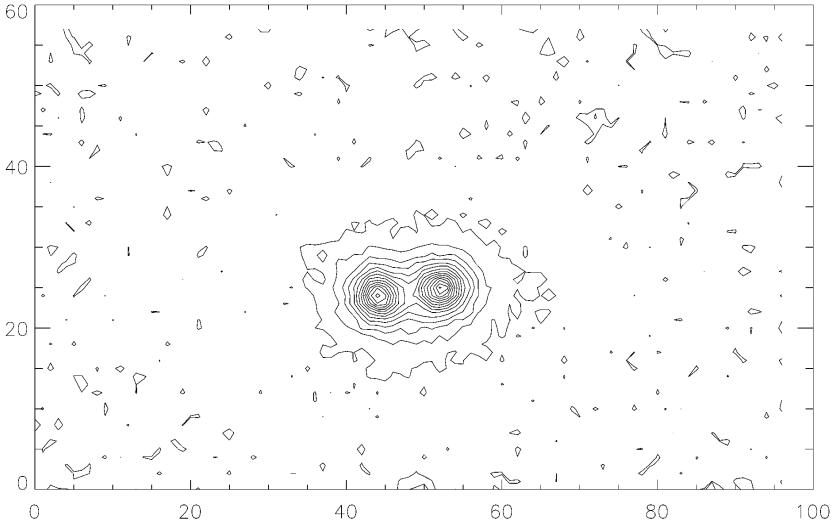
$$z = 0.46 \pm 0.008$$

Расстояние от Солнечной системы до CSL-1 **1900 Мпк** (для величины постоянной Хаббла **H=65 км/с/Мпк**)

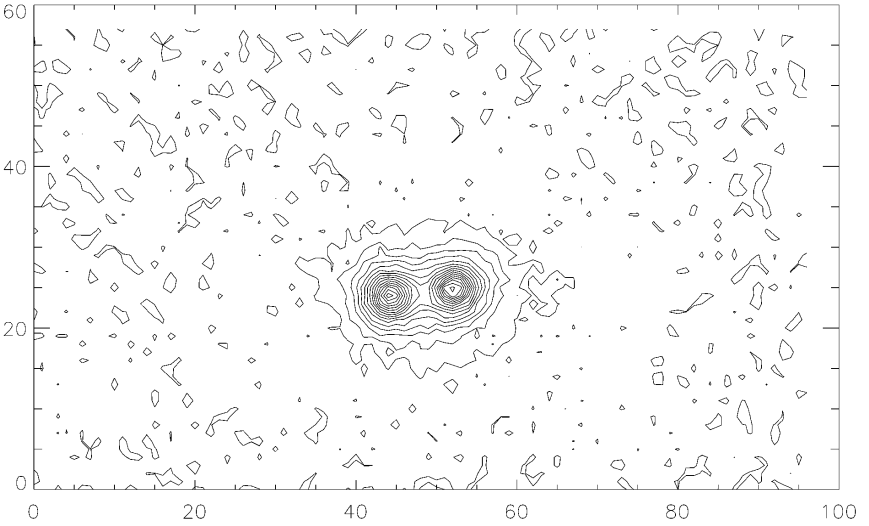
Масса каждого компонента ~4 массы нашей Галактики

Изофоты (уровни постоянной яркости) объекта CSL-1 на частоте 914 нм

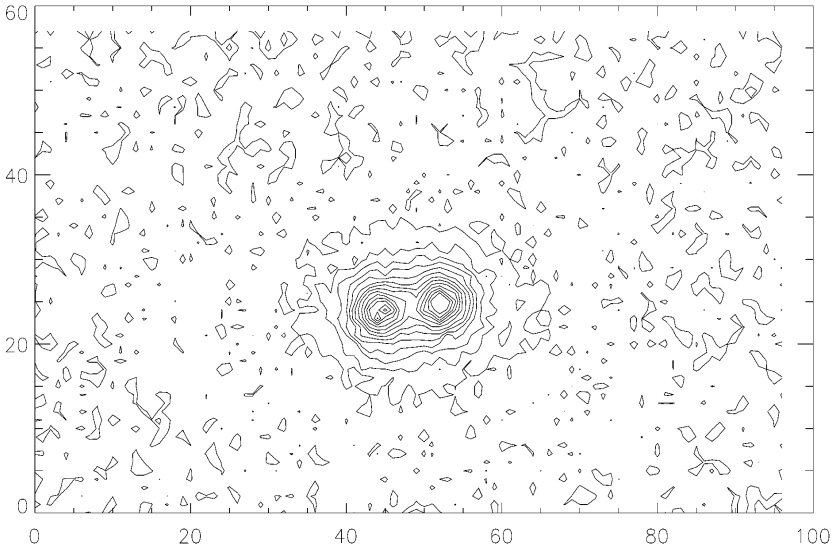
914 нм



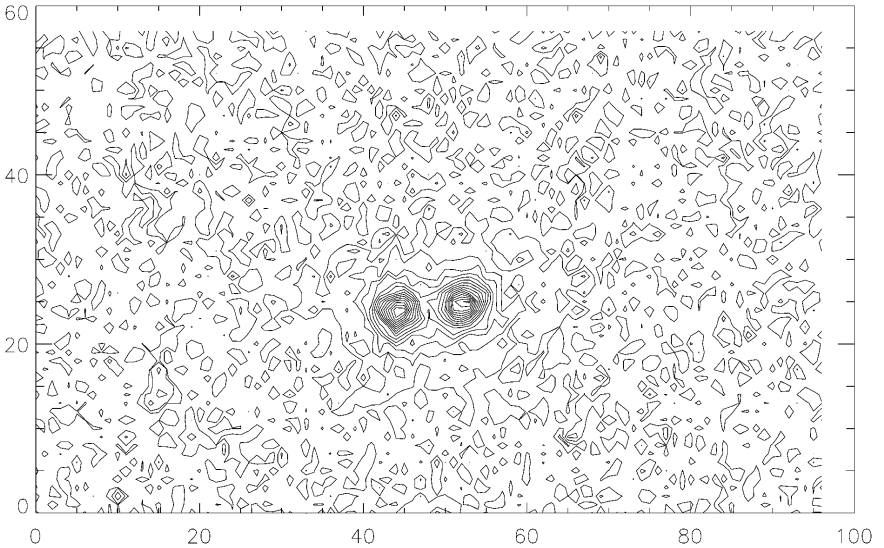
753 нм

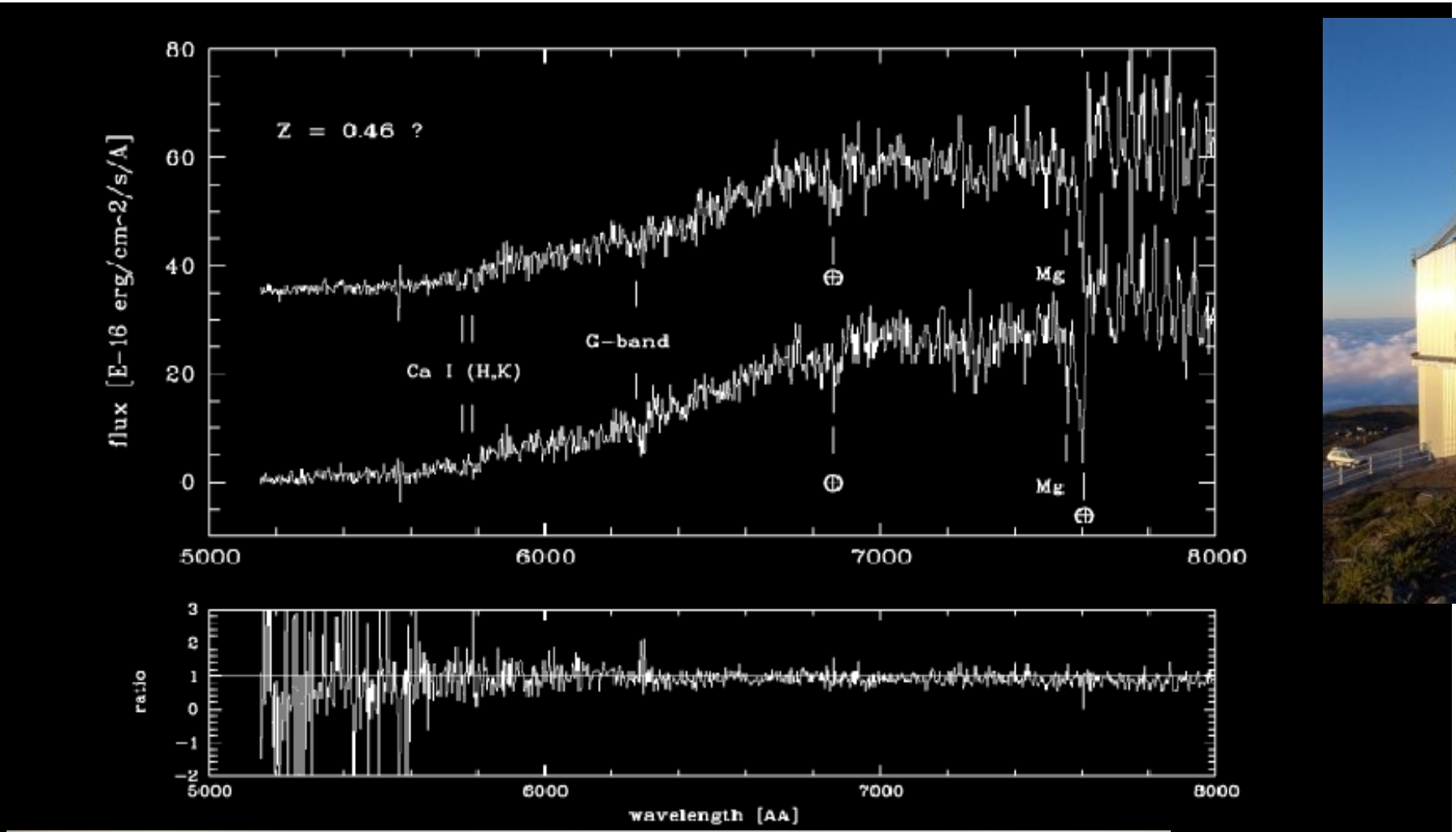


B-фильтр (“blue” – полоса частот с максимумом ~440 нм)



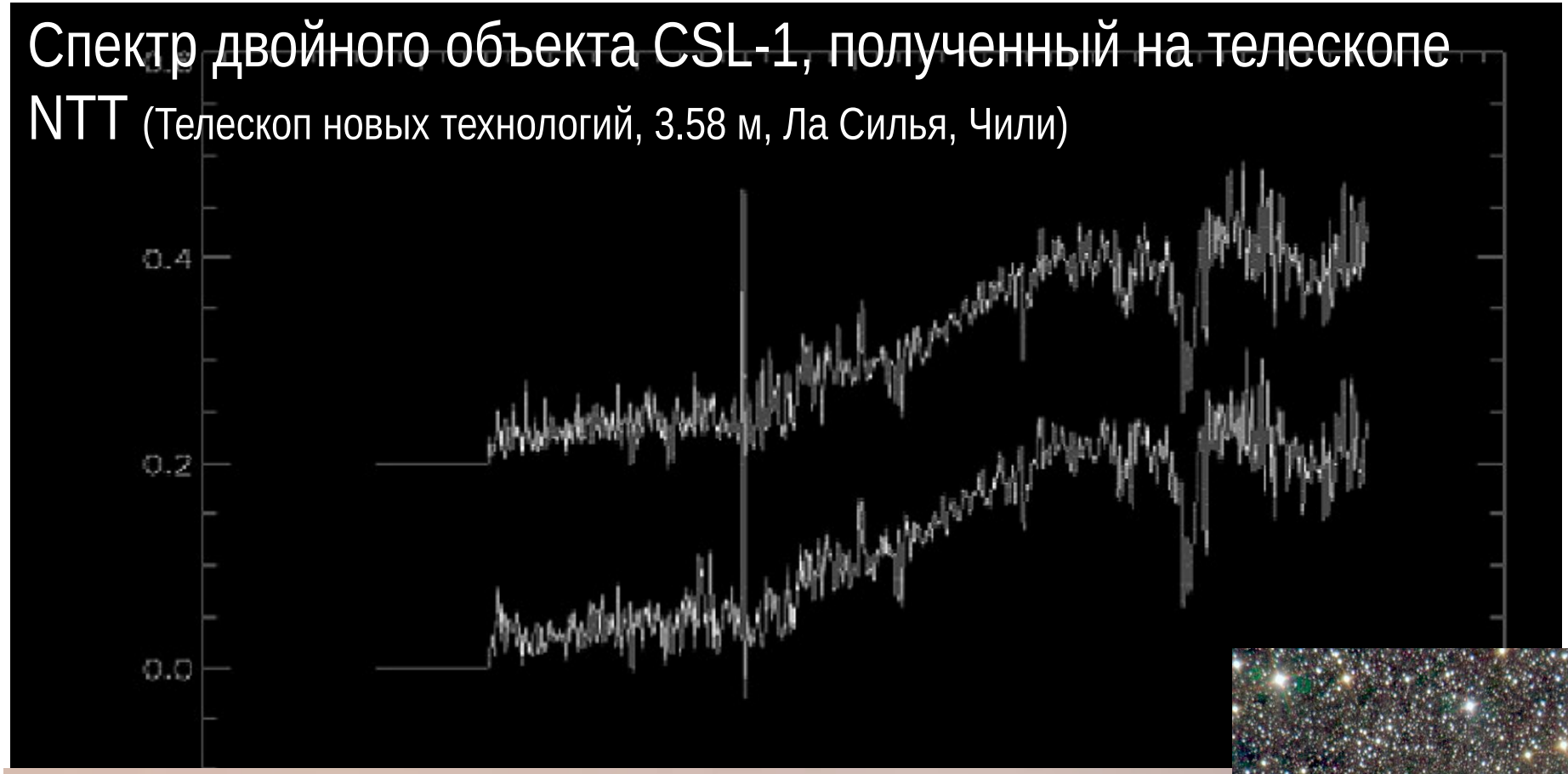
R-фильтр (“red” – полоса частот с максимумом ~ 700 нм)

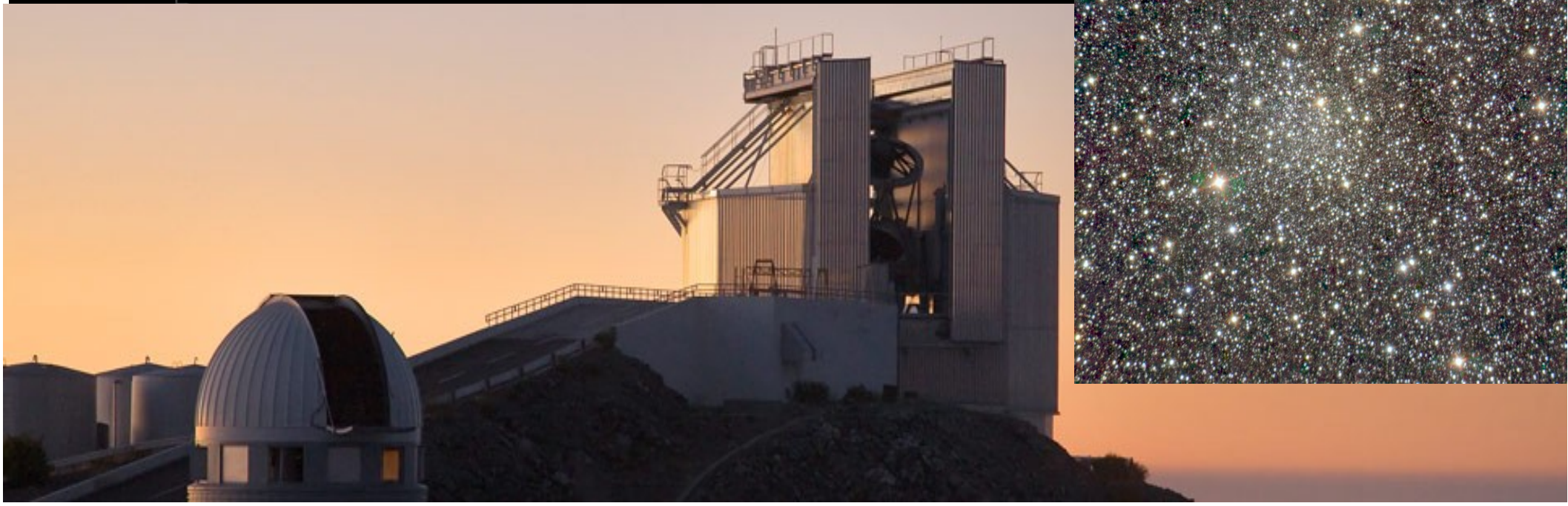




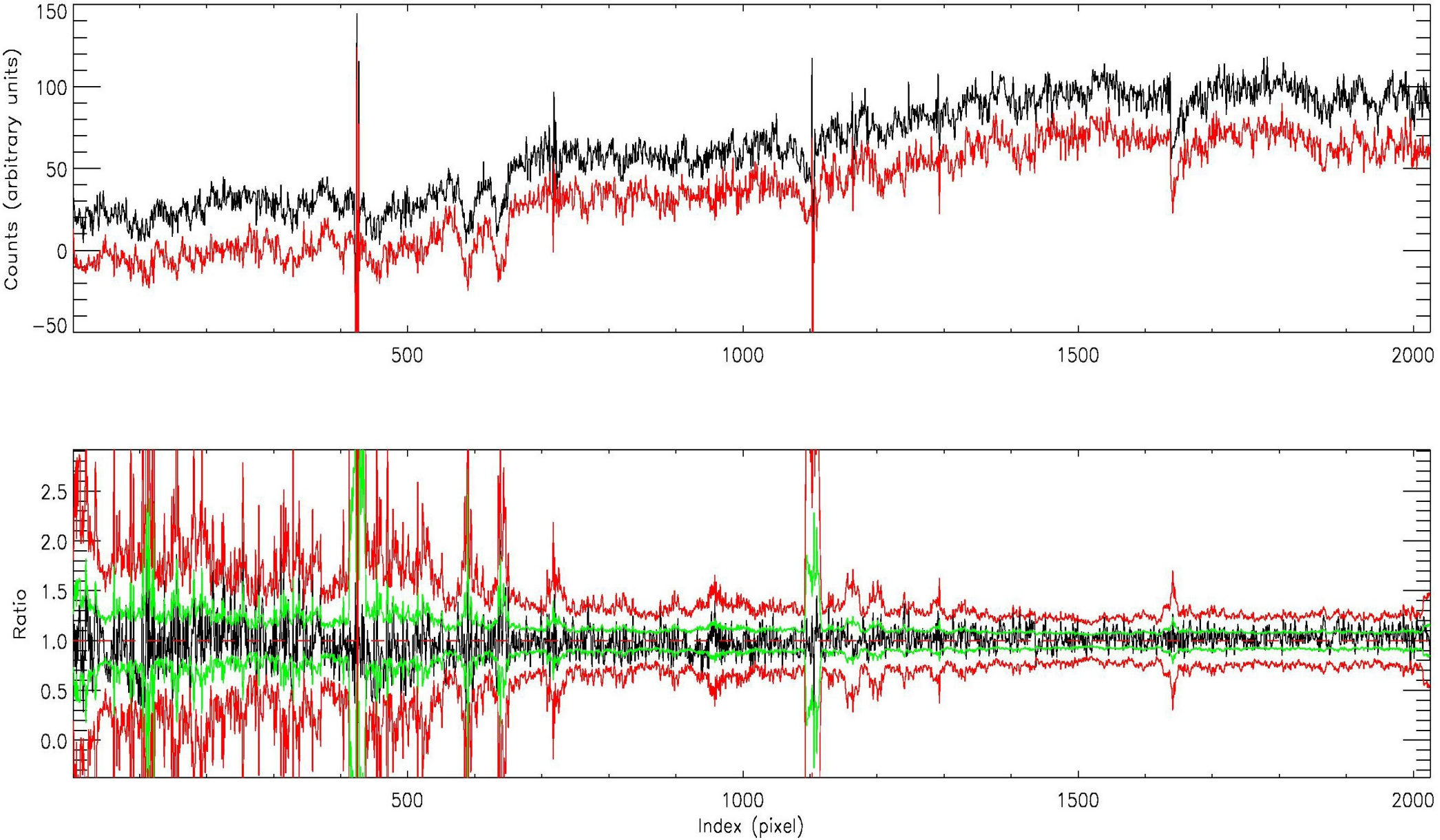
Спектр двойного объекта CSL-1, полученный на телескопе TNG (Национальный телескоп Галилея, **3.58 м**, Канарские о-ва)

Спектр двойного объекта CSL-1, полученный на телескопе NTT (Телескоп новых технологий, 3.58 м, Ла Силья, Чили)

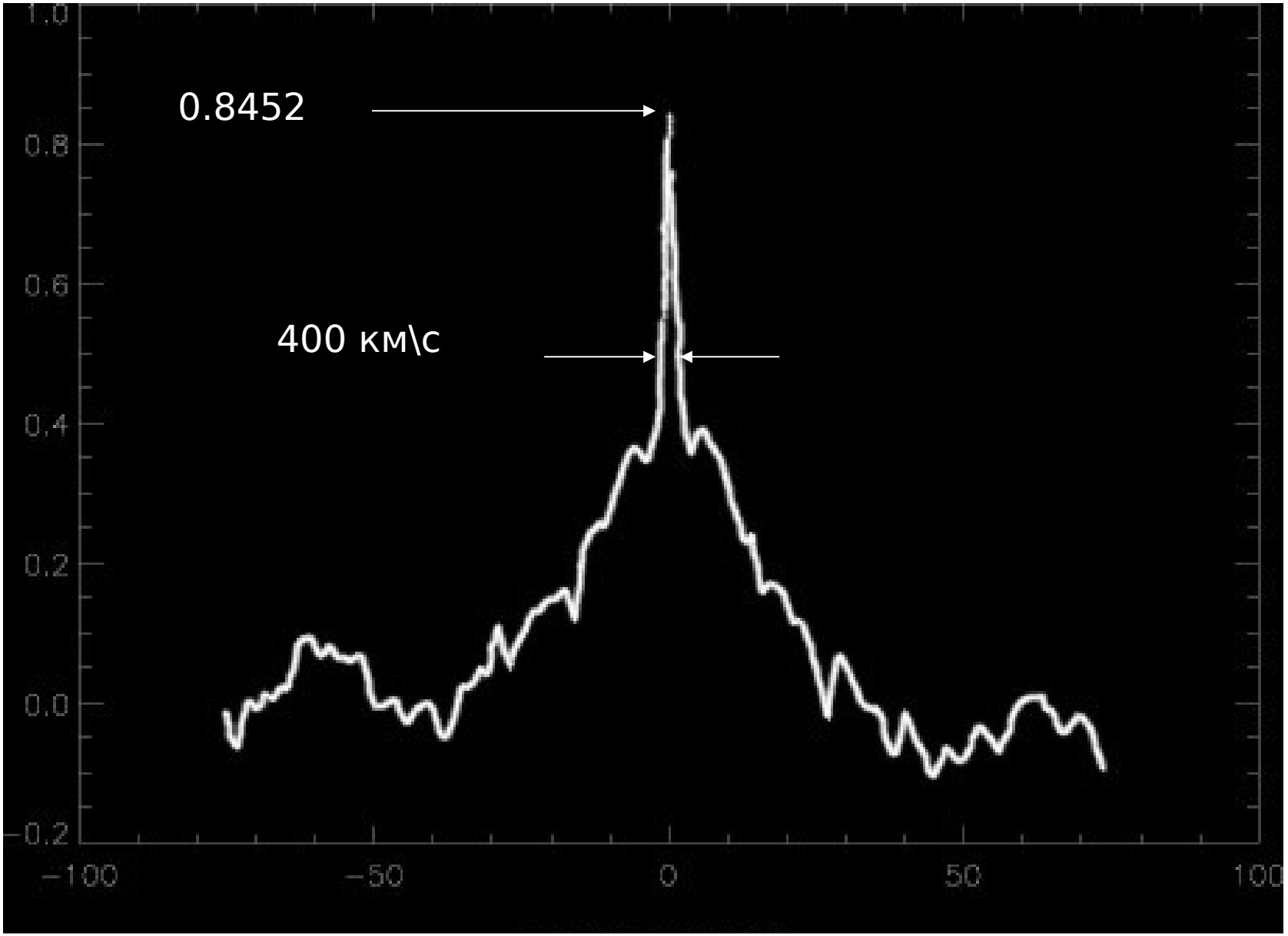




Спектр двойного объекта CSL-1, полученный на телескопе VLT (Очень большой телескоп – комплекс из четырех телескопов по 8.2 м и четырех вспомогательных телескопов по 1.8 м, гора Сьерро-Паранал, Чили)



Взаимная корреляция двух спектров компонент объекта CSL-1 (после удаления фона, телескоп NTT)



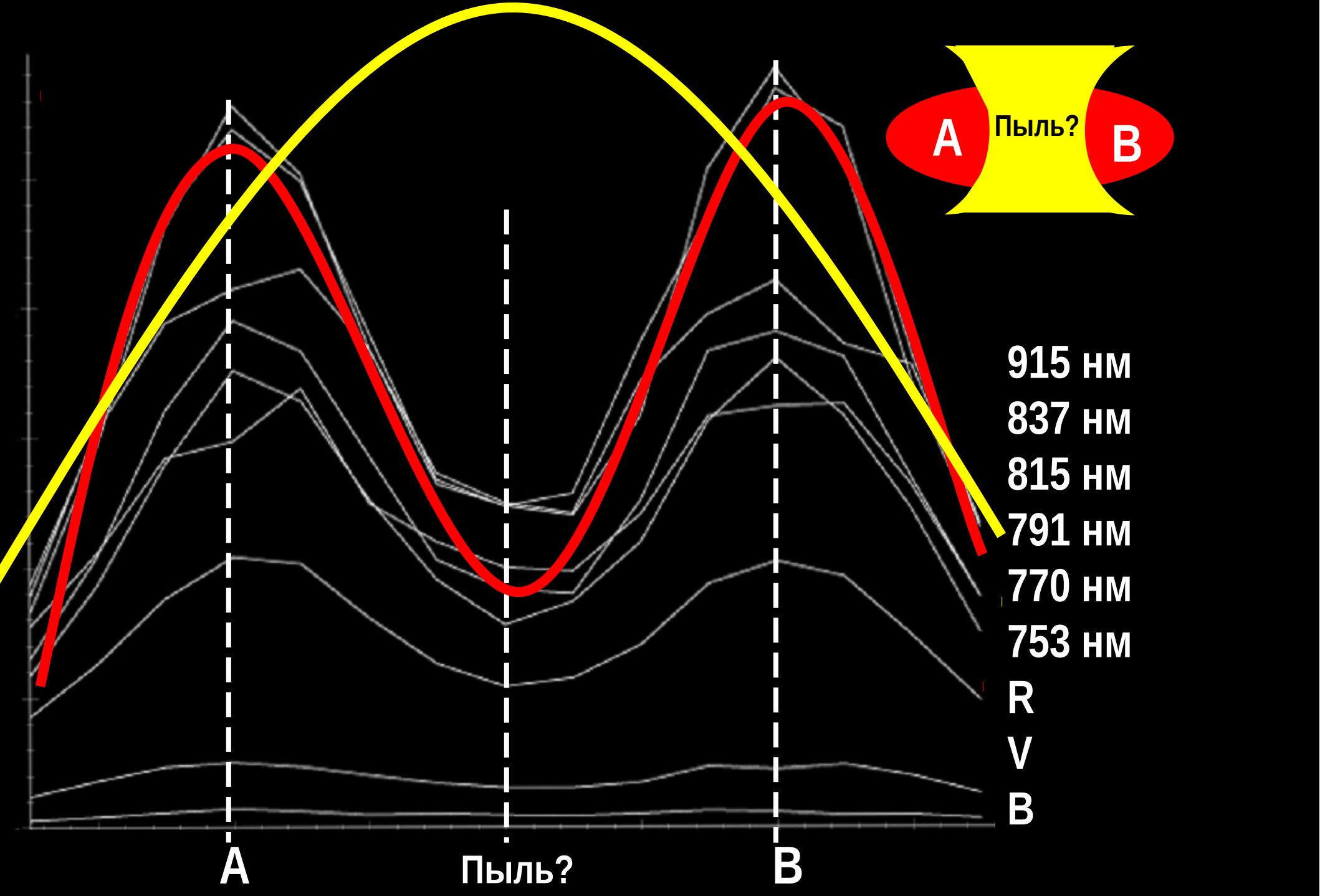
Скорость компонент пары (в ед. 100 км\с)

Необходимые условия того, что пара объектов есть гравитационно-линзовое изображение одного фонового источника

- Одинаковые красные смещения
- Одинаковое отношение интенсивностей компонент на всех частотах
- Одинаковые спектры

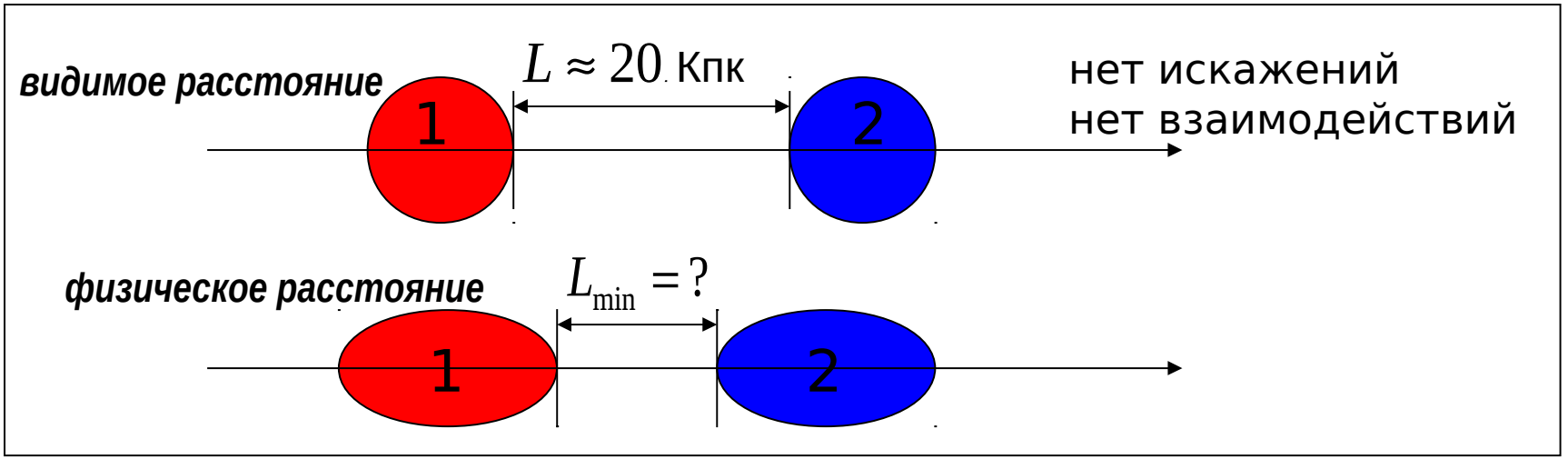
Возможные варианты объяснения природы объекта CSL-1

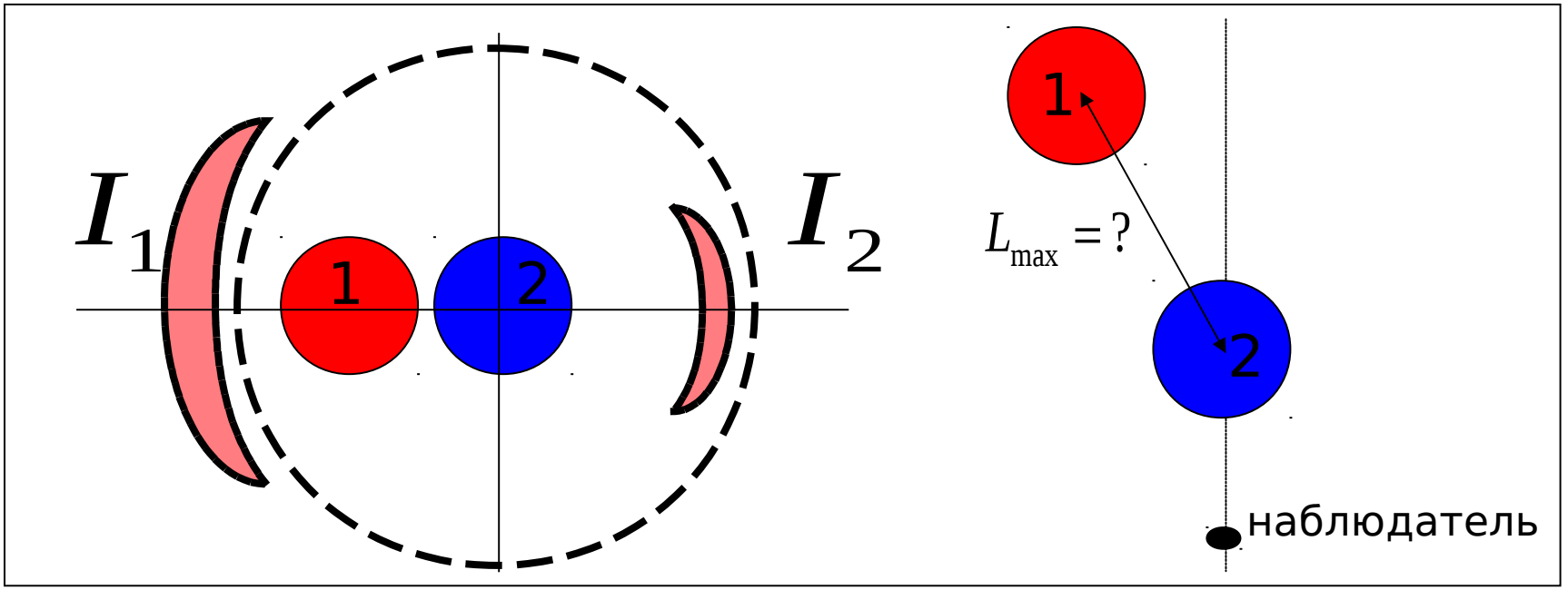
- Одна гигантская эллиптическая галактика, пересеченная посередине пылевой перемычкой в форме песочных часов.
- Эффект случайной проекции двух разных галактик, находящихся друг от друга на малом угловом расстоянии, но на достаточно большом физическом расстоянии.
- Результат гравитационного линзирования фоновой далекой галактики на компактном объекте.
- Результат гравитационного линзирования фоновой далекой галактики на космической струне.

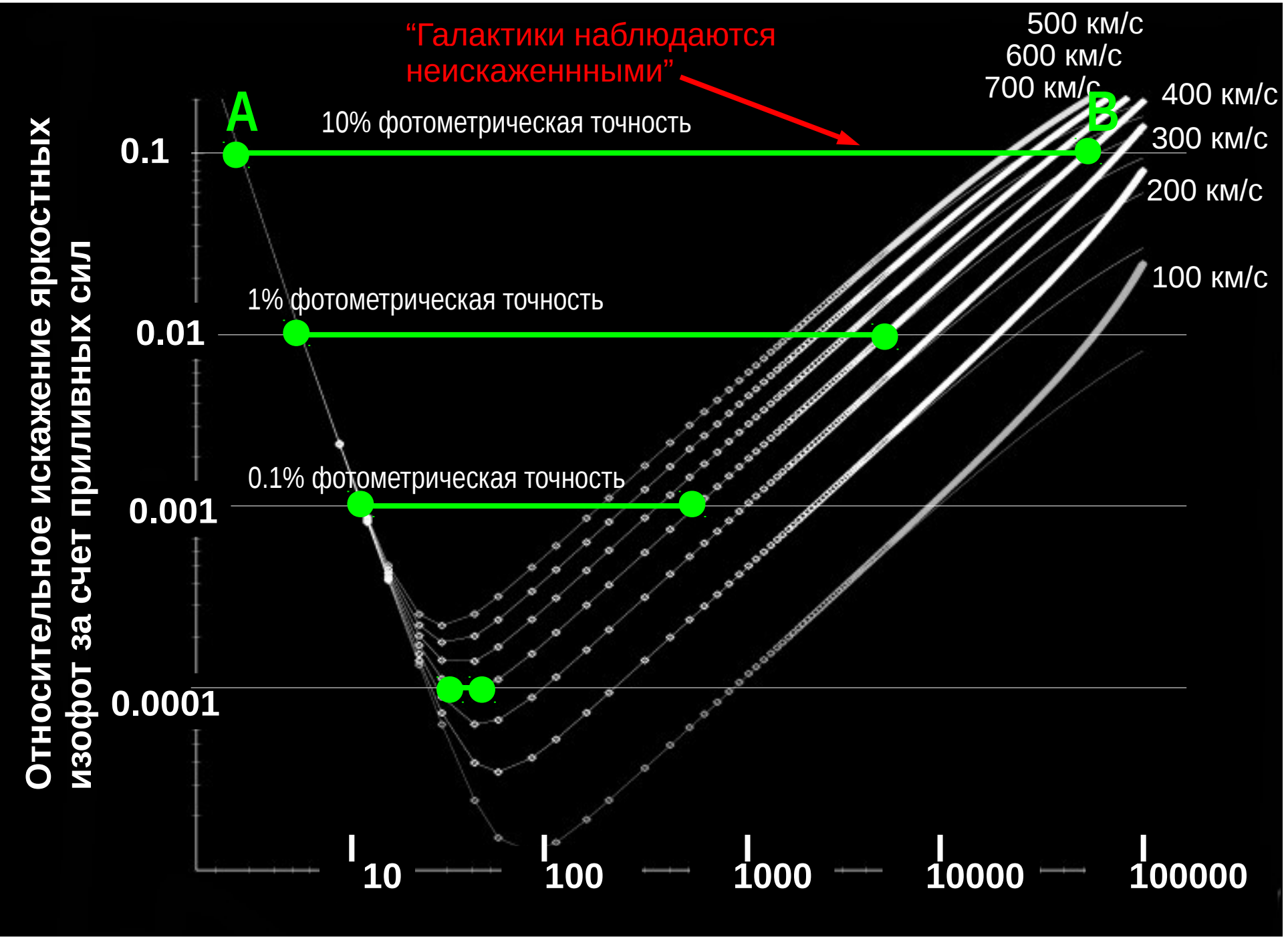


Наблюдаемые профили яркости объекта CSL-1 во всех доступных фильтрах

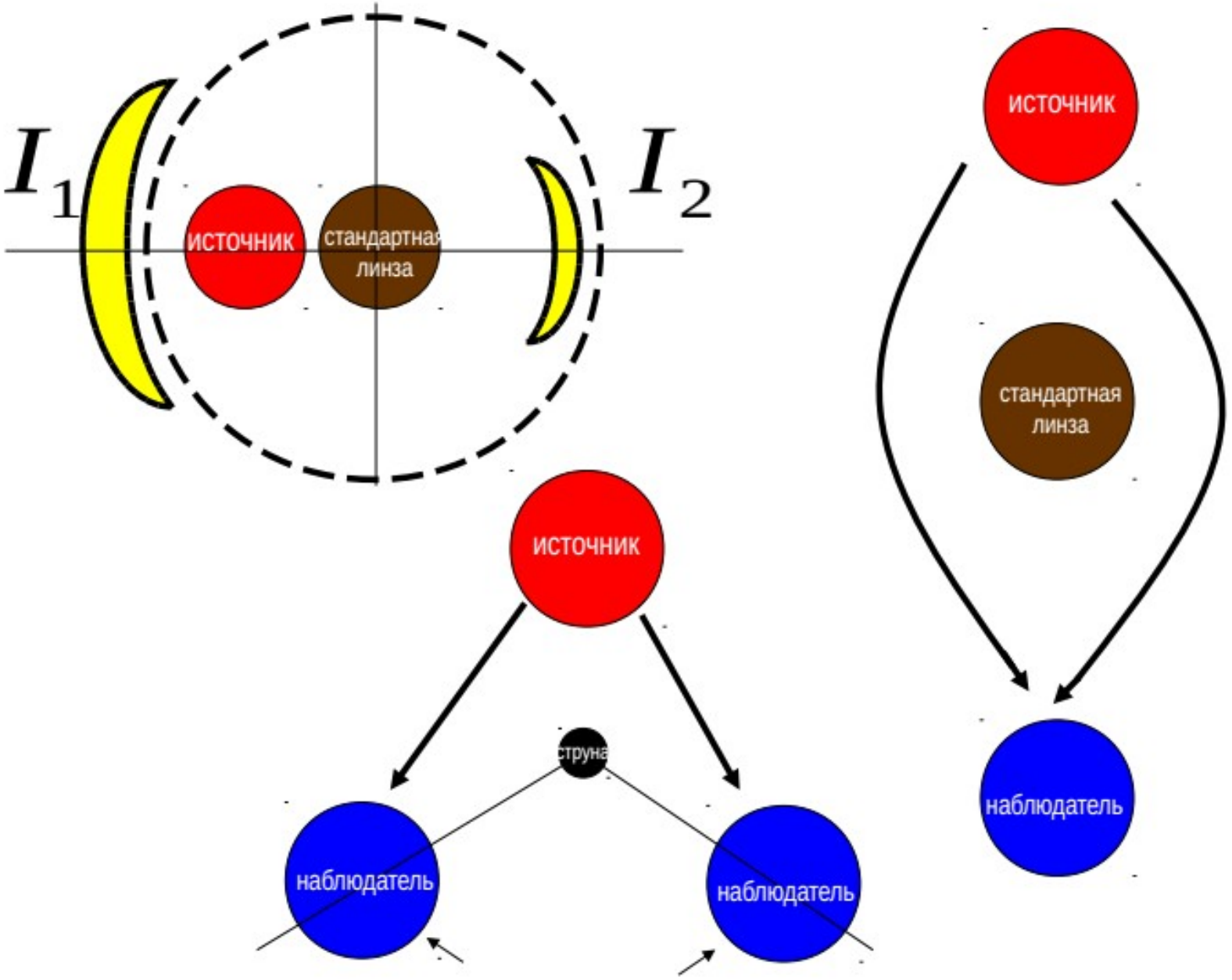
Эффект случайной проекции двух разных галактик?

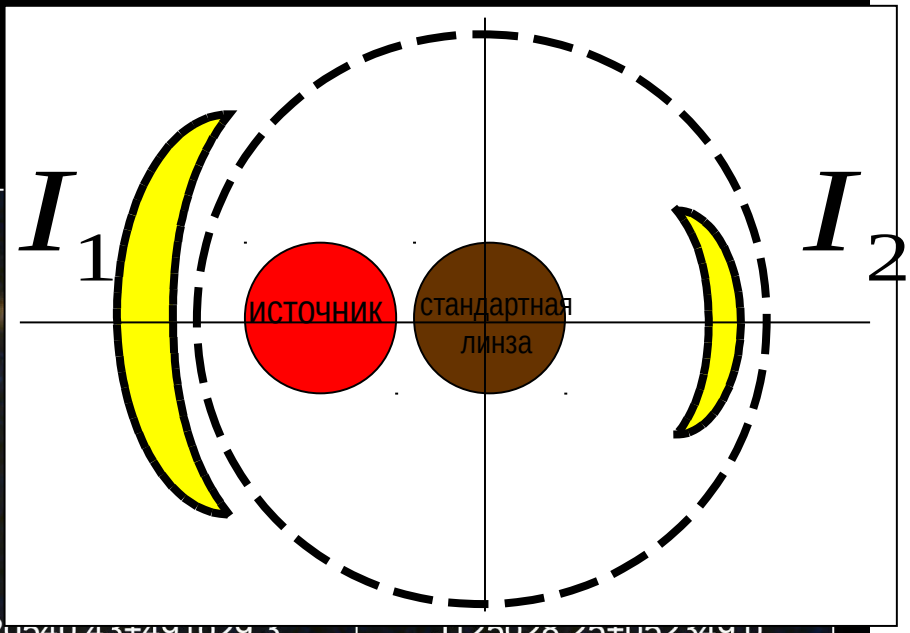





“Галактики наблюдаются неискаженнными”
500 км/с
600 км/с
700 км/с
400 км/с
300 км/с
200 км/с
100 км/с
A
B
10% фотометрическая точность
1% фотометрическая точность
0.1% фотометрическая точность
0.1
0.01
0.001
0.0001
Относительное искажение яркостных изофот за счет приливных сил
10
100
1000
10000
100000
Расстояние между галактиками в единицах радиуса галактики

Поиск событий гравитационного линзирования.





J073728.45+321618.5

J095629.77+510006.6

J140228.21+632133.5

J162746.44-005357.5

J163028.15+452036.2

J232120.93-093910.2

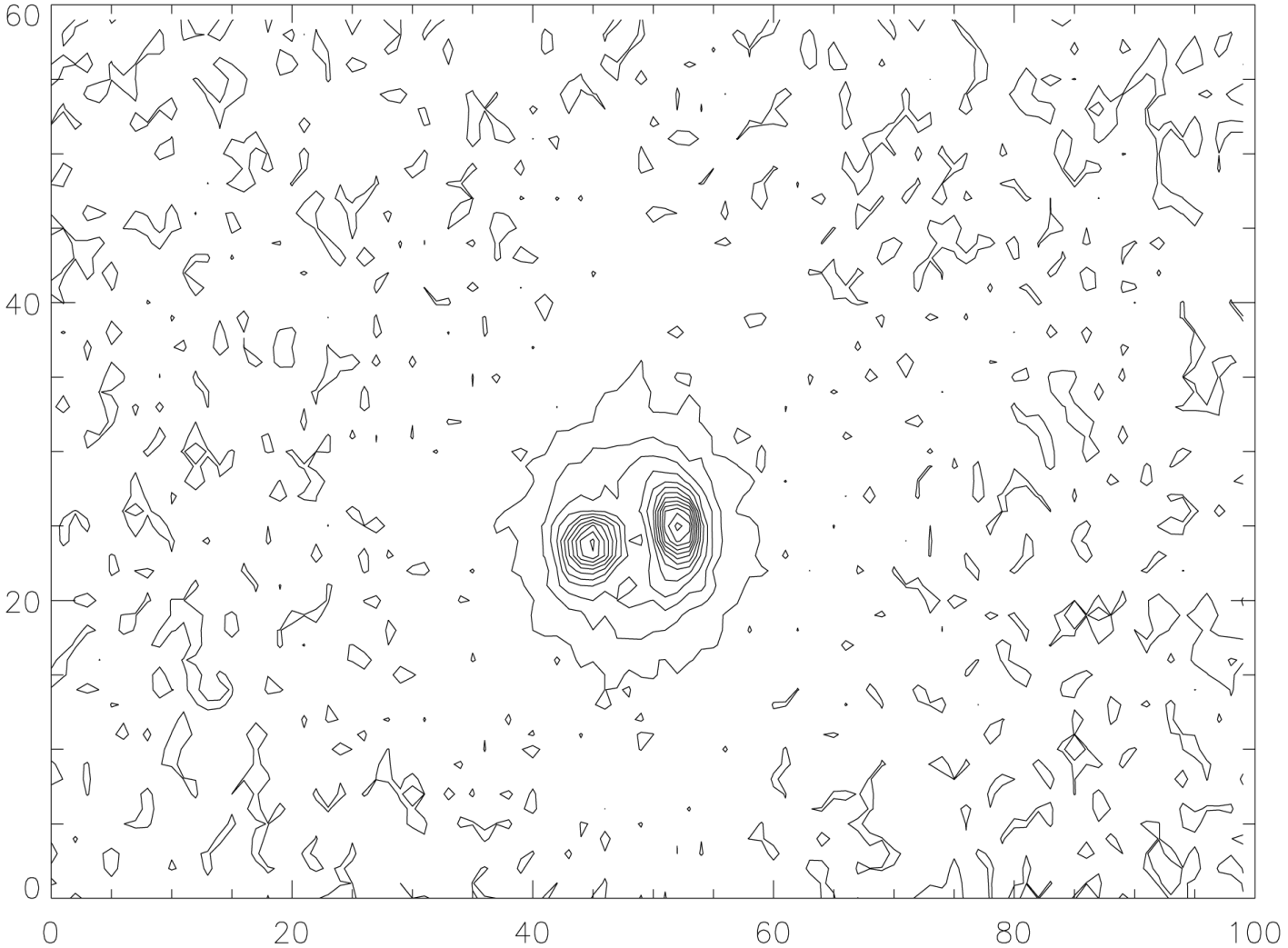
Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

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

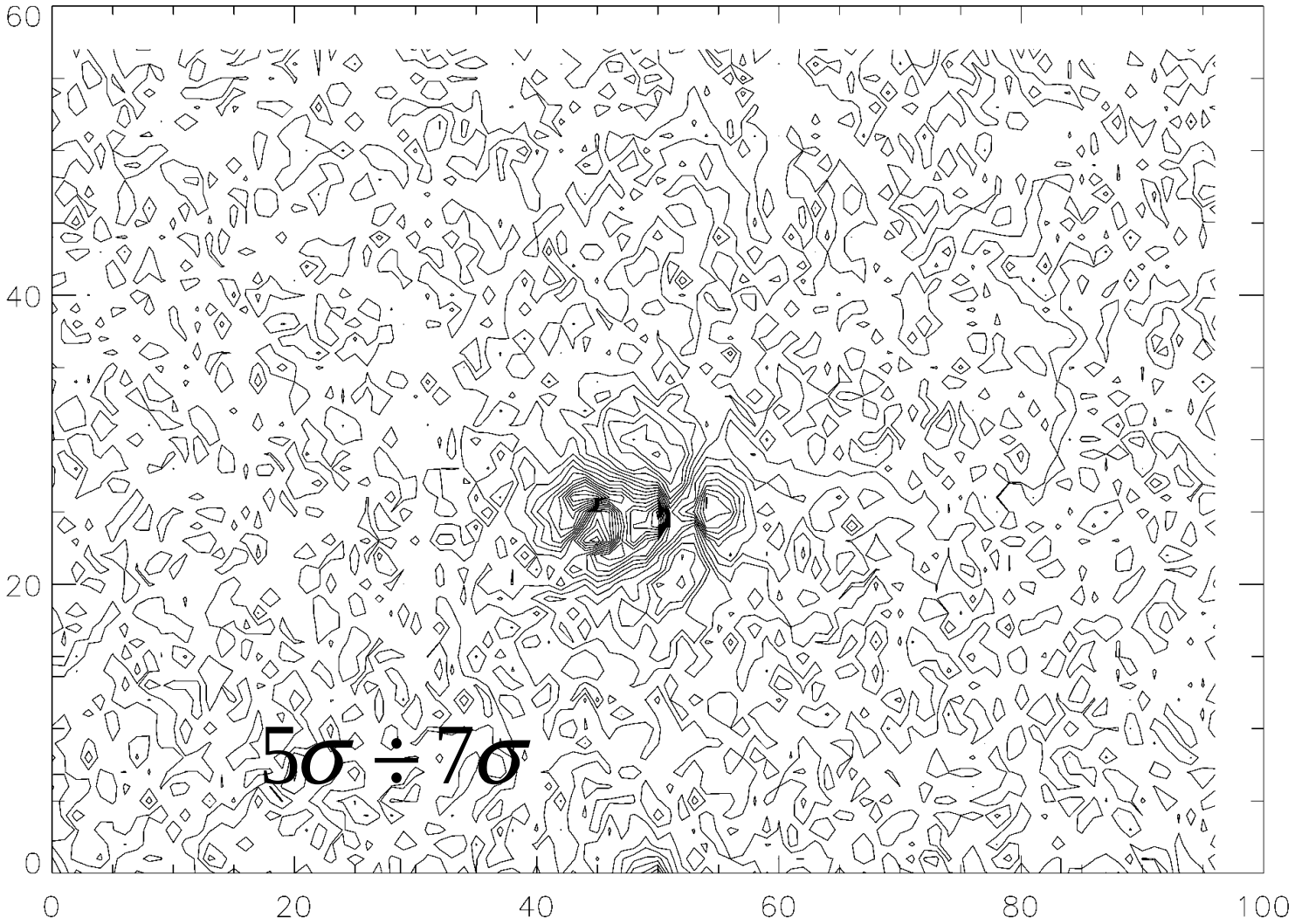
STScI-PRC05-32

- Результат гравитационного линзирования фоновой далекой галактики на компактном объекте?



Модель гравитационного линзирования фоновой галактики на сферическом компактном объекте (т.н. SIS-сфере из каталога Китона, частота 914 нм).

- Результат гравитационного линзирования фоновой далекой галактики на компактном объекте?



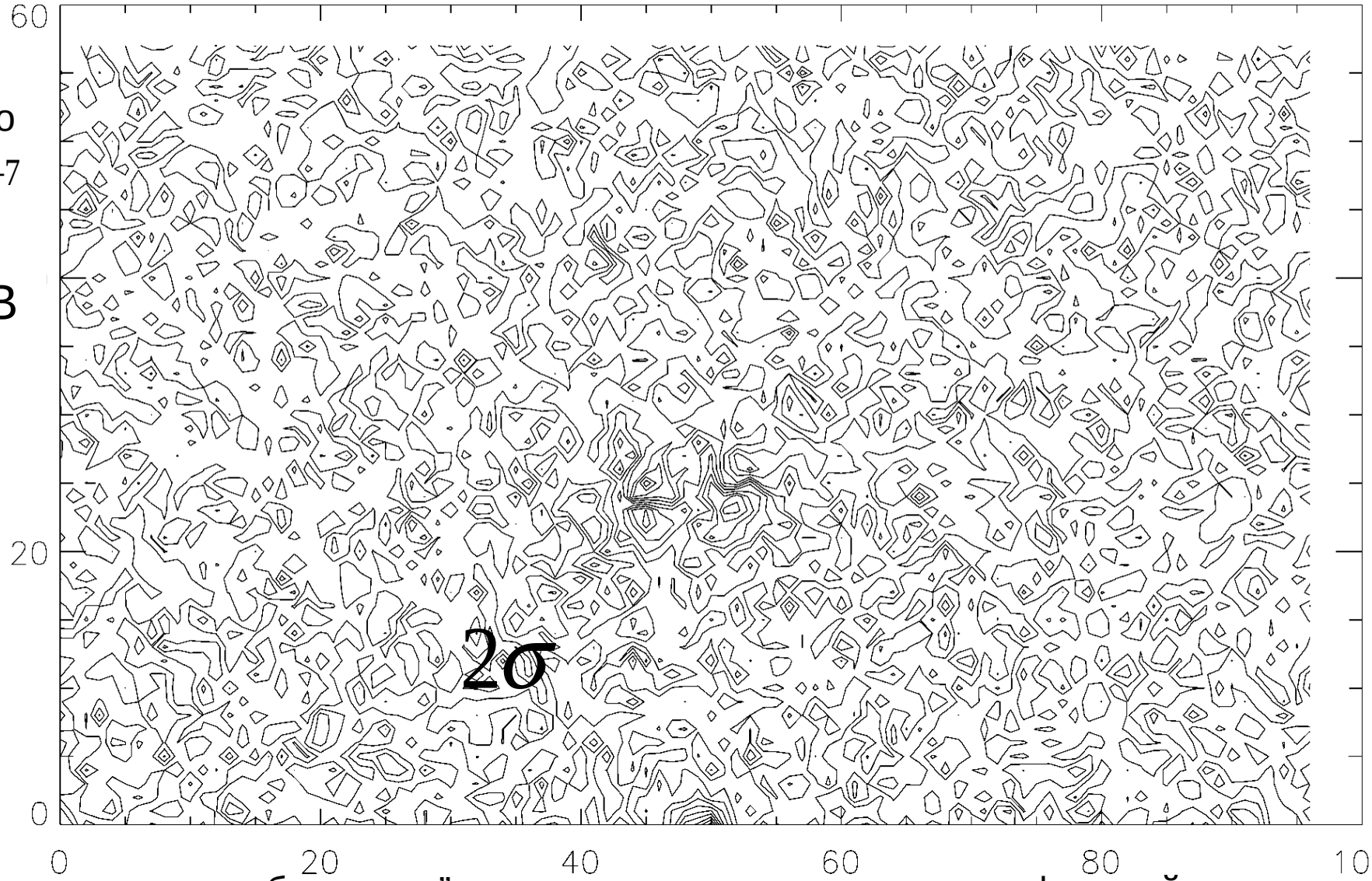
Результат “модель минус наблюдения”, где модель – это линзирование фоновой галактики на сферическом компактном объекте (т.н. SIS-сфере из каталога Китона, частота 914 нм). Даже это результат с наименьшим отношением “сигнал\шум” плохо описывает наблюдения.

- Результат гравитационного линзирования фоновой далекой галактики на космической струне?

Если струна, то

$$G\mu = 4 \cdot 10^{-7}$$

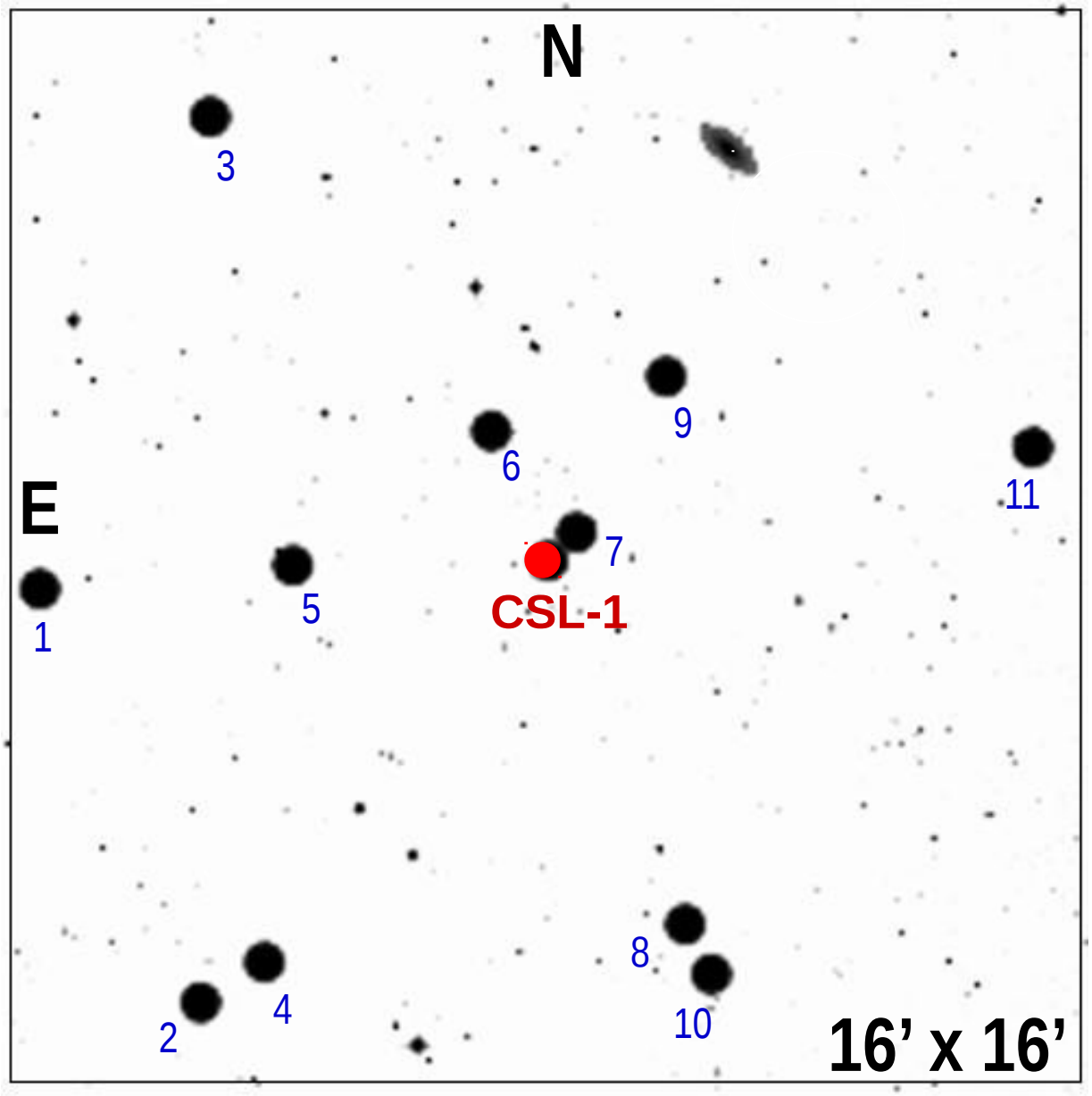
$$2 \cdot 10^{15}\ \text{ГэВ}$$

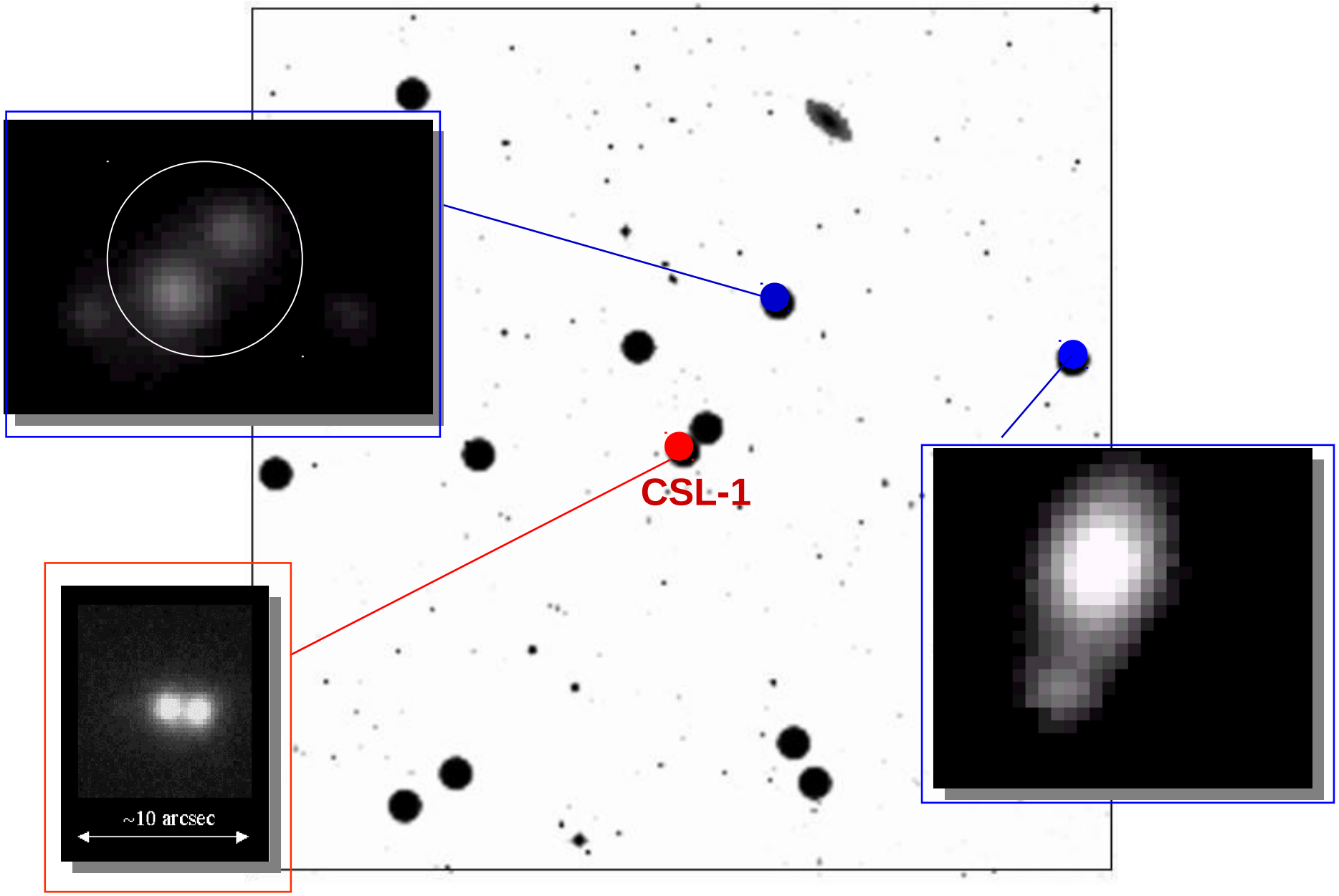


Результат “модель минус наблюдения”, где модель – это линзирование фоновой галактики на прямой космической струне (частота 914 нм). Модель хорошо согласуется с наблюдениями.

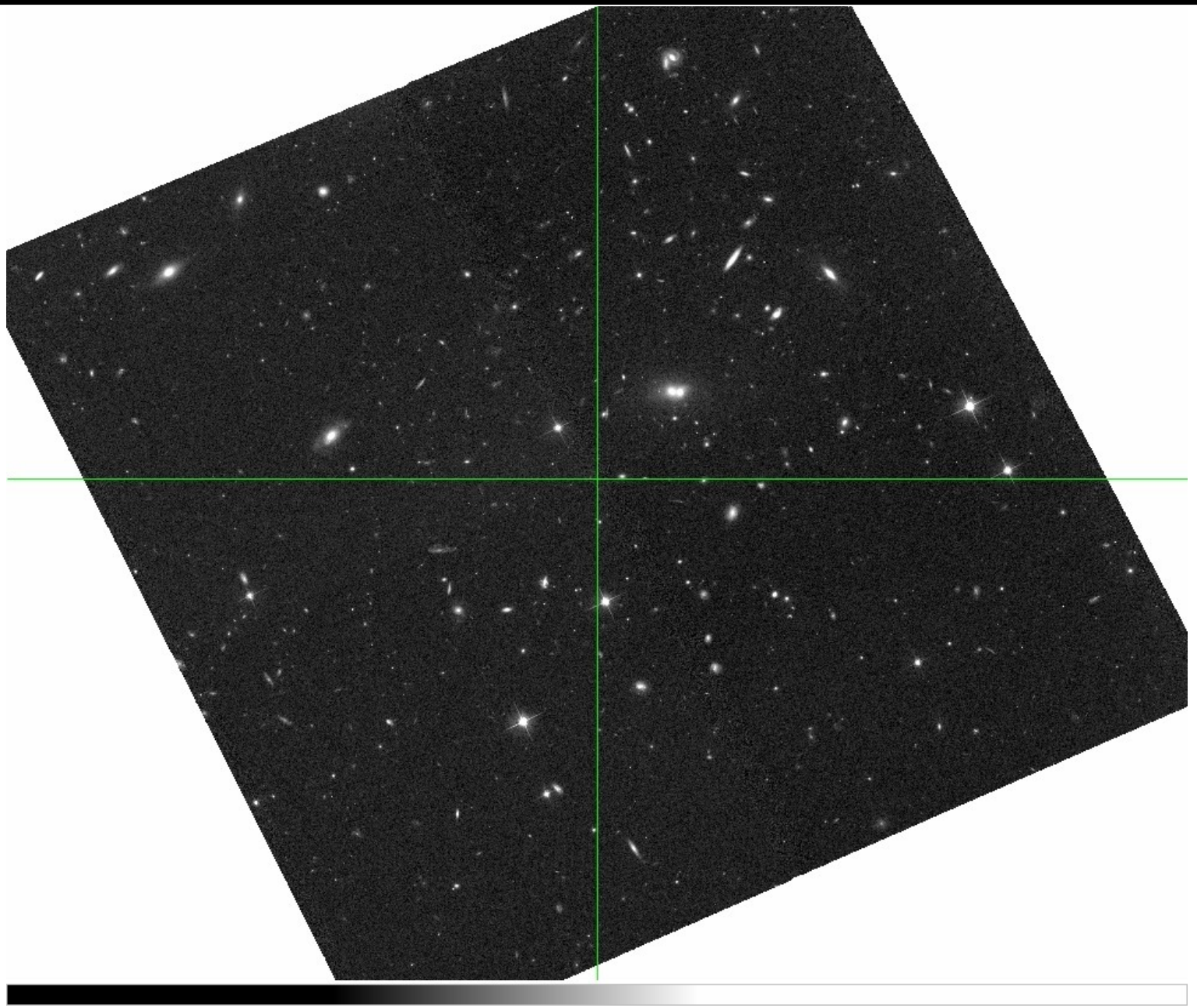
В случае гравитационного линзирования на космической струне ожидается от 9 (прямая струна) до 200 (сильно искривленная струна) гравитационно-линзовых пар фоновых галактик.

В случае классического гравитационного линзирования ожидается около 2 гравитационно-линзовых пар

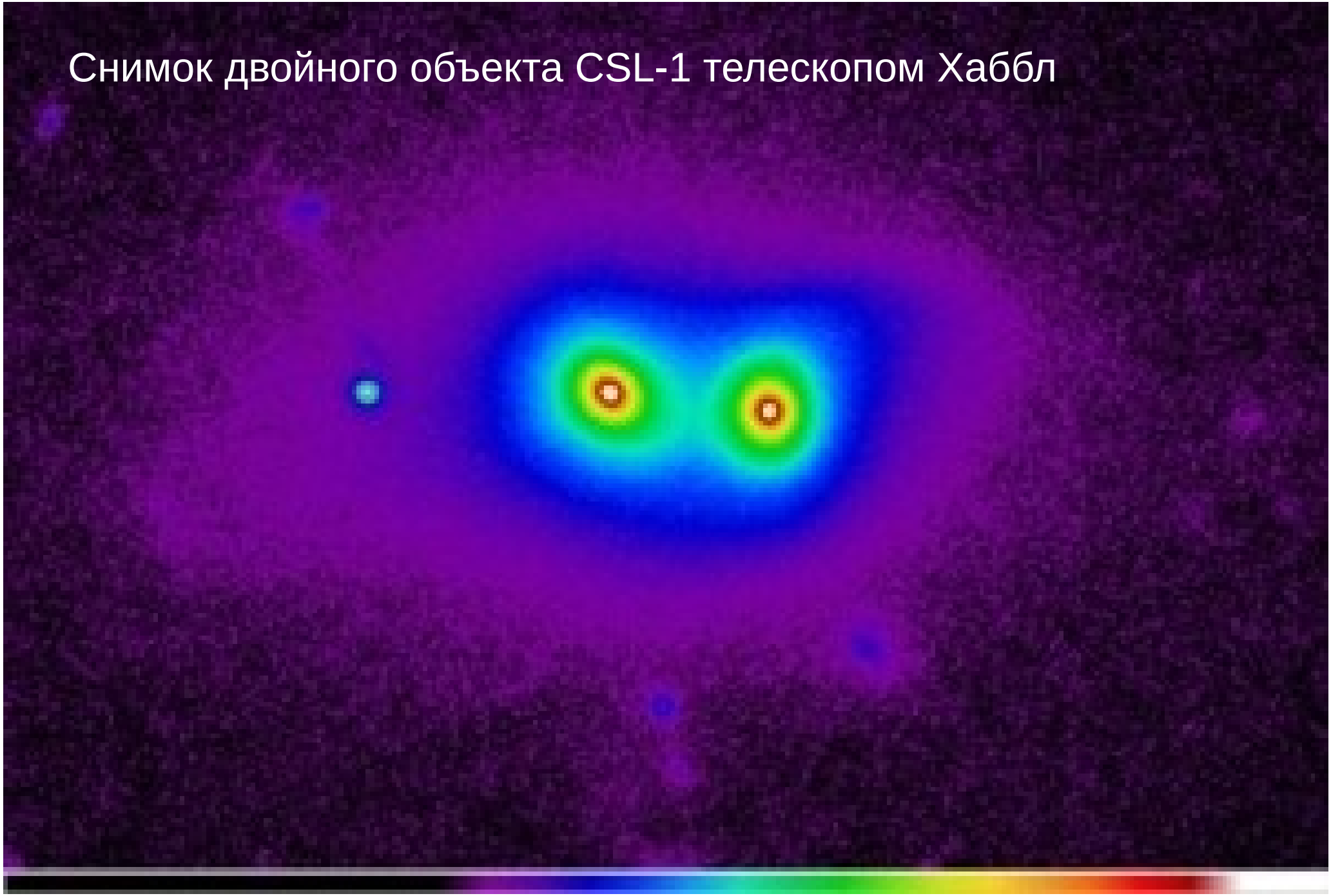



CSL-1
~10 arcsec

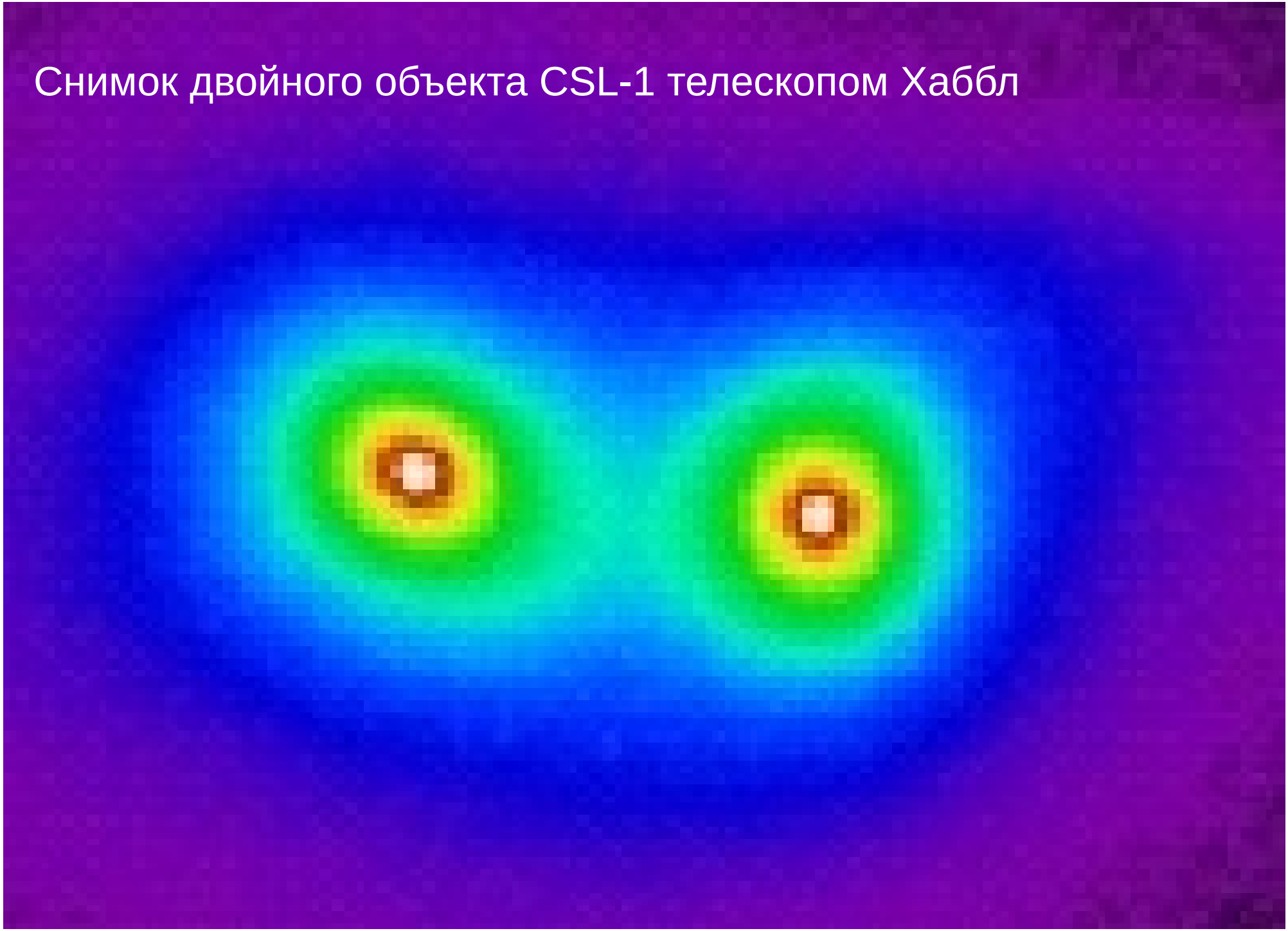
Для окончательной проверки, является ли объект CSL-1 результатом линзирования фоновой галактики на космической струне, было получено его изображение на космическом телескопе Хаббла (Director's Discretionary time, 6 Hubble Space Telescope orbits during Cycle 14; 11.01.2006 г.; ACS camera, F814W-фильтр; общее время наблюдений ~14800 с.

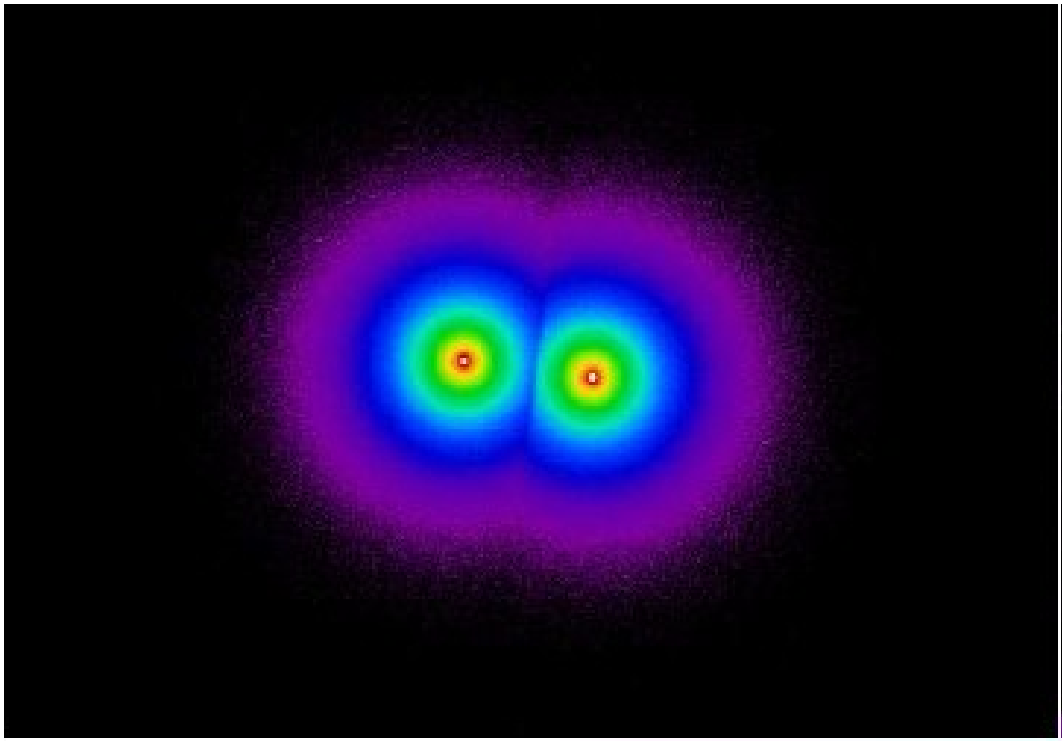


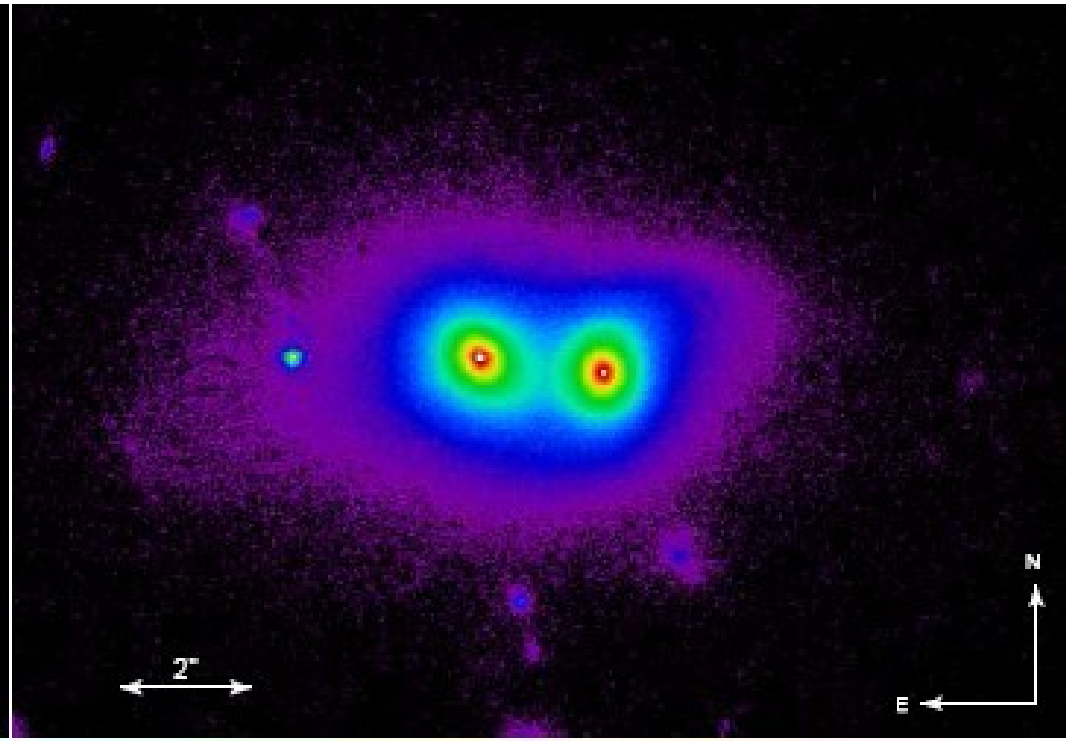
Снимок двойного объекта CSL-1 телескопом Хаббл



Снимок двойного объекта CSL-1 телескопом Хаббл

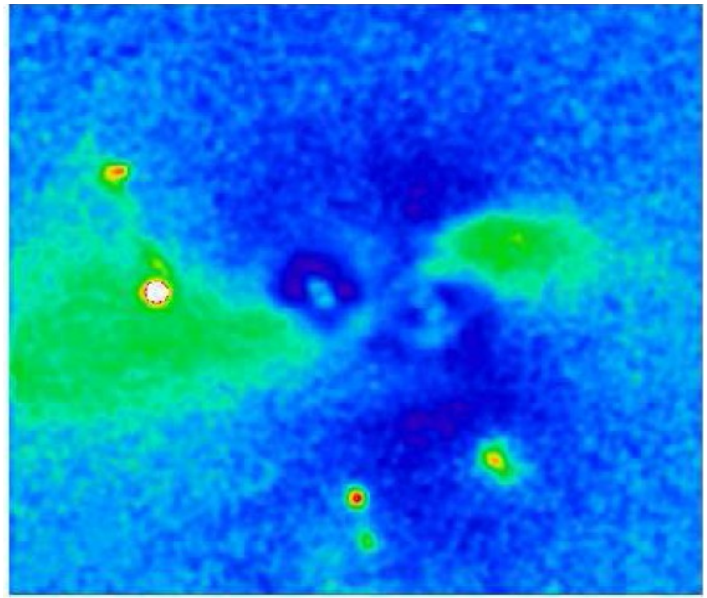






Моделирование гравитационно-линзового изображения эллиптической галактики с профилем яркости де Вокулера [$r^{1/4}$]. Характеристи объекта CSL-1, шум HST. Разрешение 0.1”

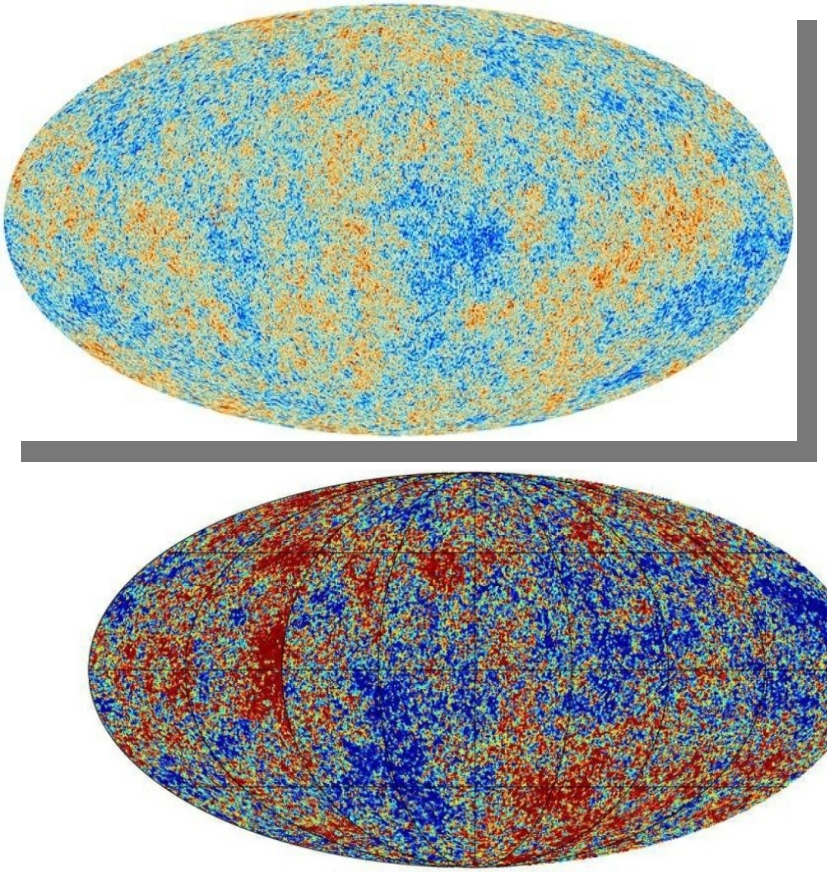
Таким образом, объект CSL-1 не является космической струной

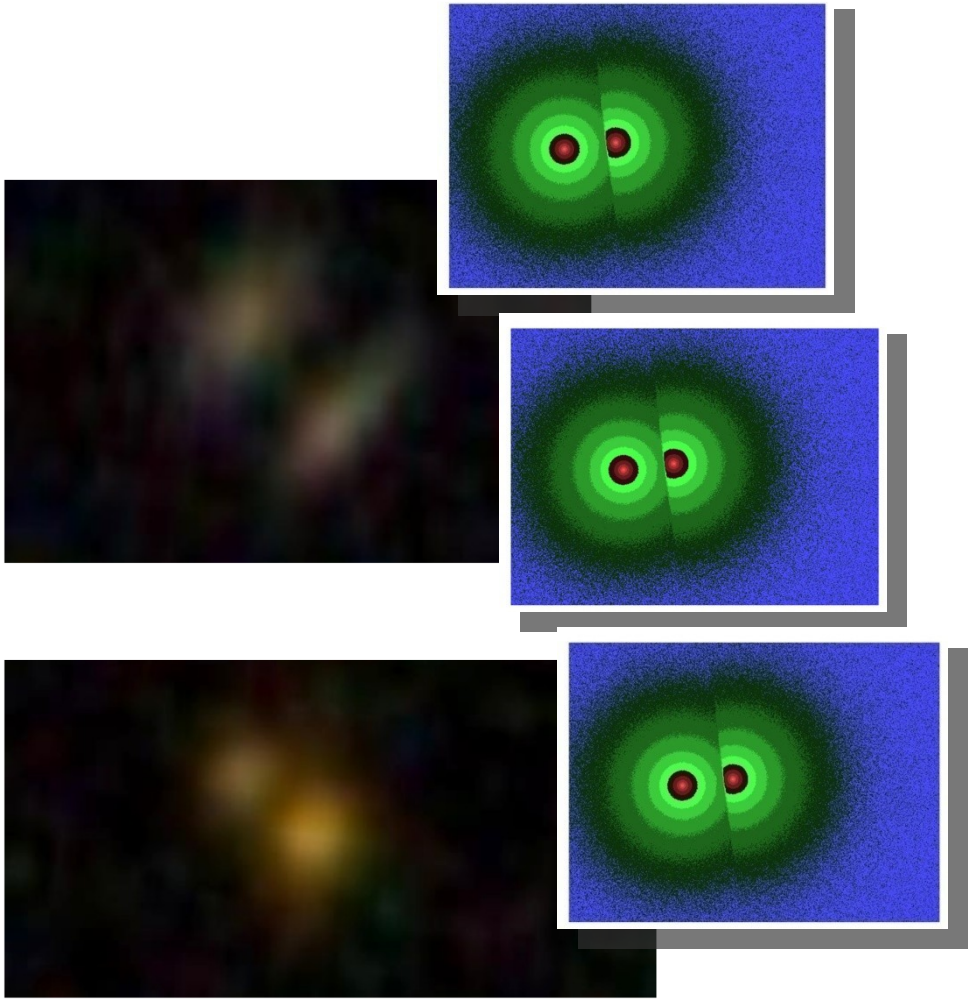


Остаточные структуры после вычитания из изображения модели двух галактик с профилями яркости де Вокулера

Область вблизи объекта CSL-1 на телескопе HST

Два основных метода поиска космических струн





Объект CSc-1

Ограничения на линейную плотность космических струн

1) ограничение на угловой спектр мощности от сети космических струн (Намбу-Гото и полулокальные) [“**Planck 2013 results. XXV. Searches for cosmic strings and other topological defects” by Planck Collaboration**]

$$G\mu/c^2 \le 1.5\cdot 10^{-7}$$

$$G\mu/c^2 \le 11.0\cdot 10^{-7}$$

2) то же для моделей Абеля Хиггса [**New CMB constraints for Abelian Higgs CS, by J.Lizarraga et al., (2016) 1609.03386**]

$$G\mu/c^2 \le 2.0\cdot 10^{-7}$$

3) прямой поиск одиночных космических струн

а) метод, основанный на априорном предположении, что известна плотность числа космичских струн [**E. Jeong and G. F. Smoot, Astrophys.J. 624, 21 (2005) astro-ph/0406432**]

$$G\mu/c^2 \le 3.7\cdot 10^{-6}$$

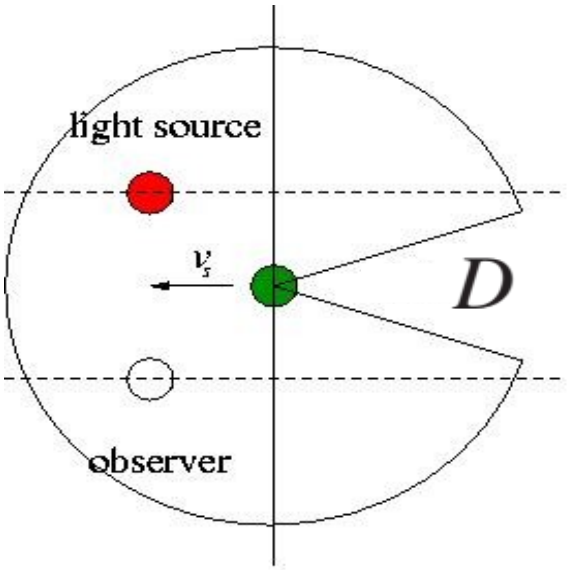
б) метод, основанный на конволюции карт CMB модифицированными функциями Хаара **[O.S.Sazhina, D. Scognamiglio , M.V. Sazhin; Eur. Phys. J. C (2014) 74:2972],** дает ограничения на полулокальные струны (**T.W.B. Kibble, T. Vachaspati “Monopoles on string” 2015**)

$$G\mu/c^2 \le 7.36\cdot 10^{-7}$$

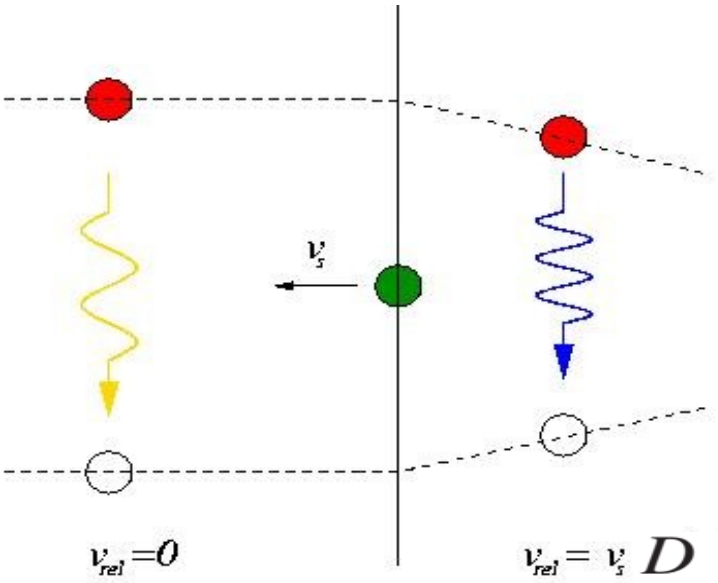
в) прогнозы использования алгоритма Канни для будущих экспериментов по CMB [**R. J. Danos and R. H. Brandenberger, Int.J.Mod.Phys. D19, 183 (2010), 0811.2004; L. Hergt et al. (2016) 1 04**]

$$G\mu/c^2 \le 3.0\cdot 10^{-8}$$

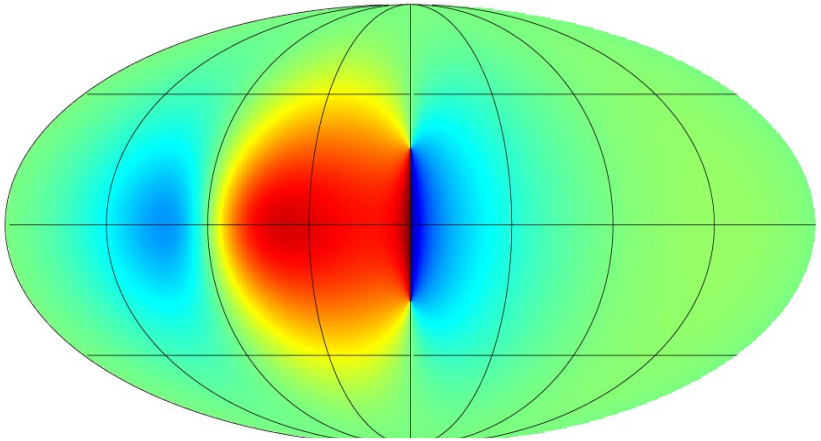
$$G\mu/c^2 \le 1.4\cdot 10^{-7}$$

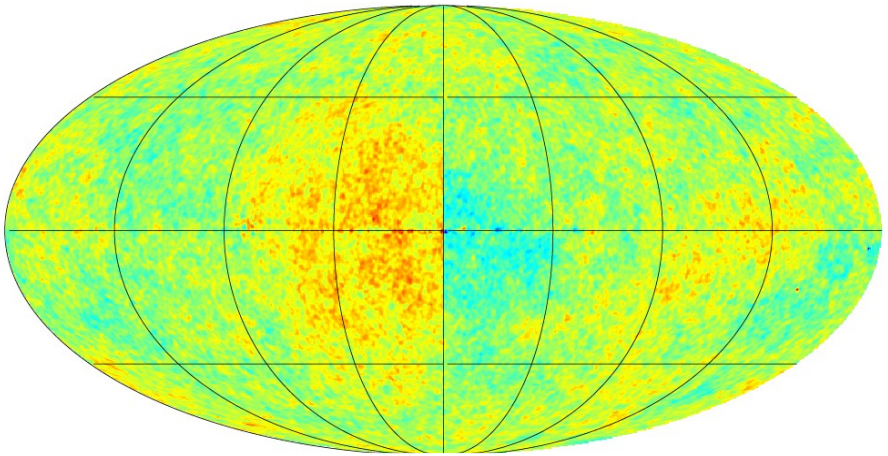


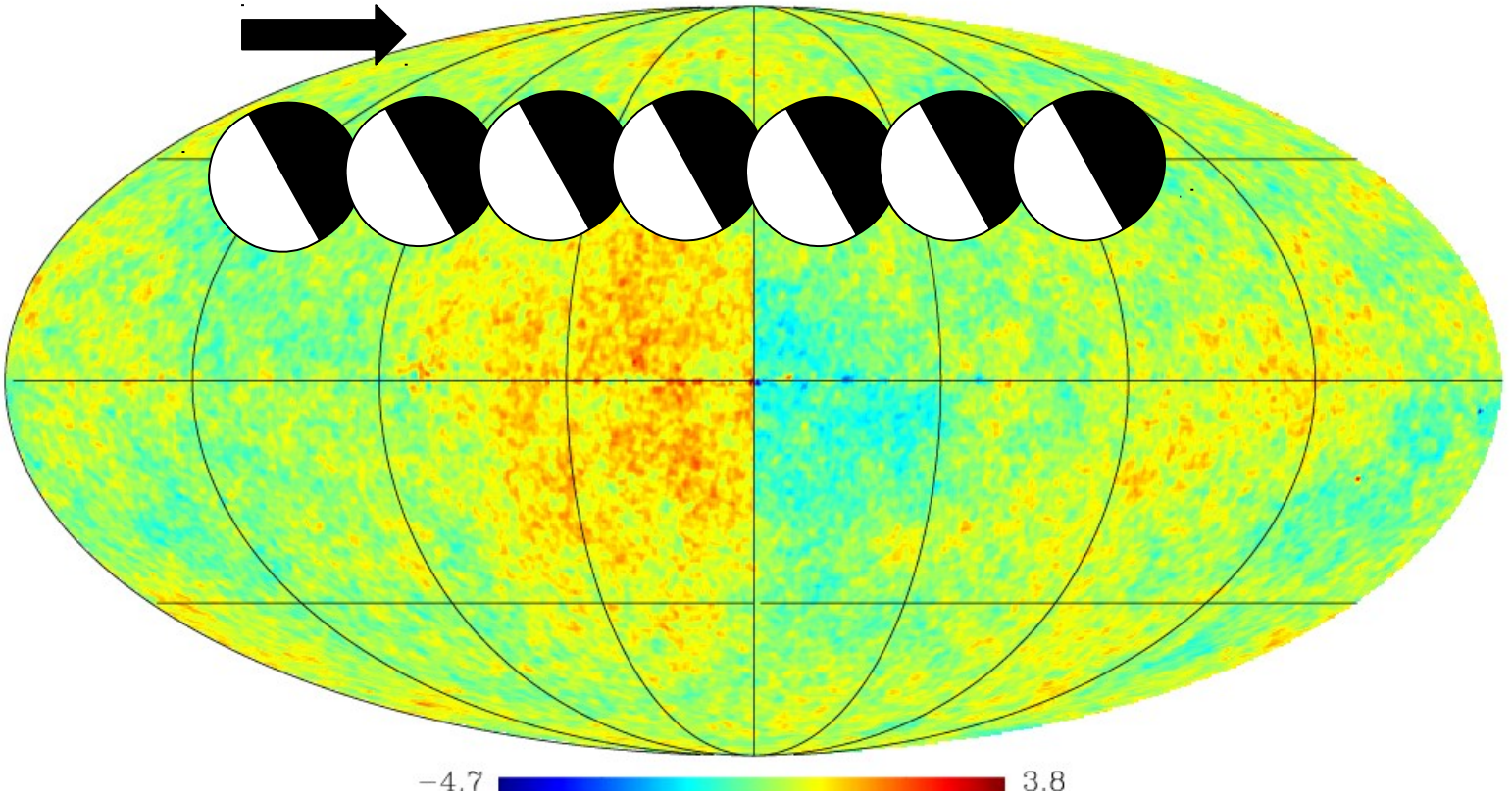
(a)

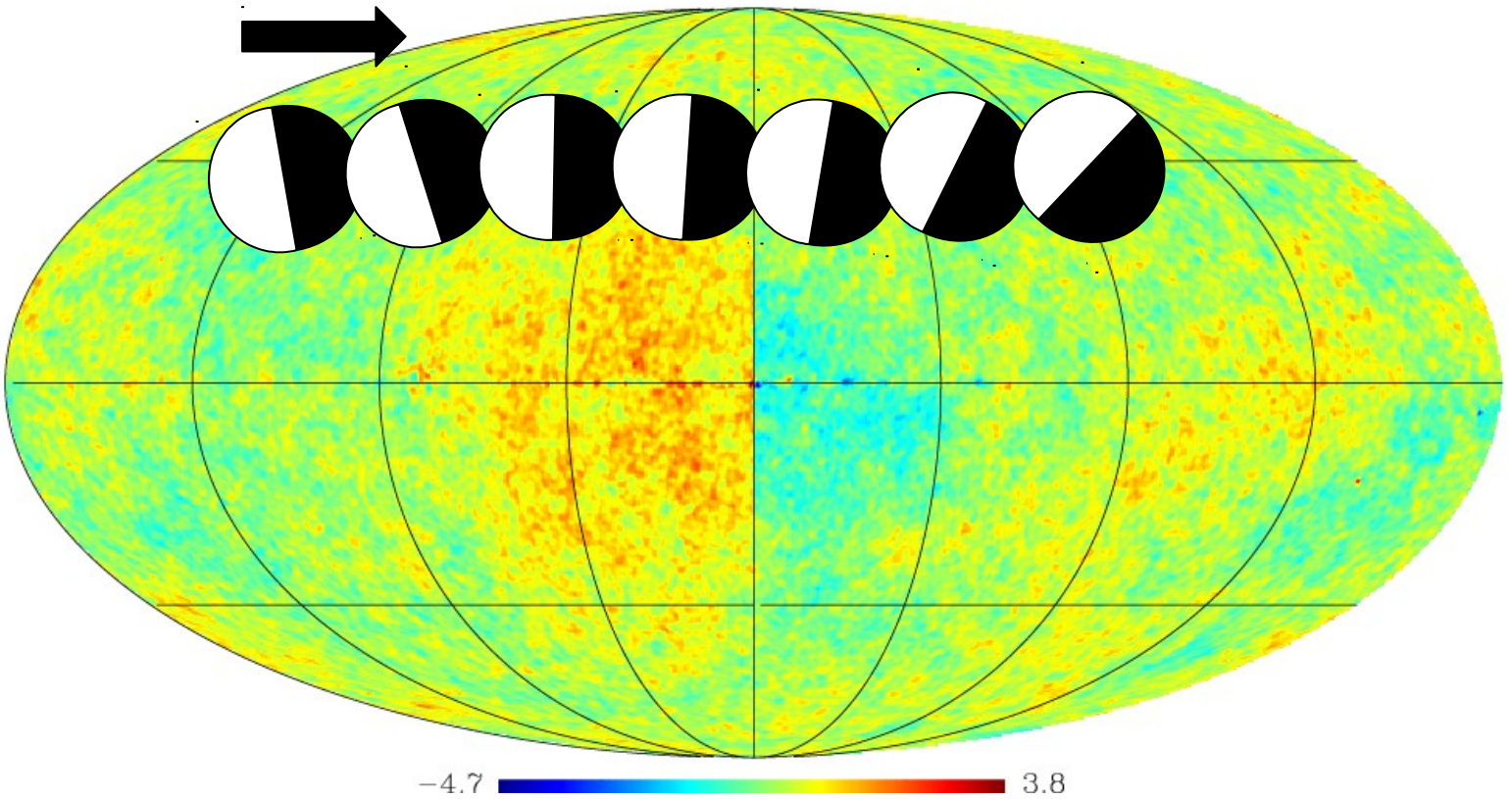


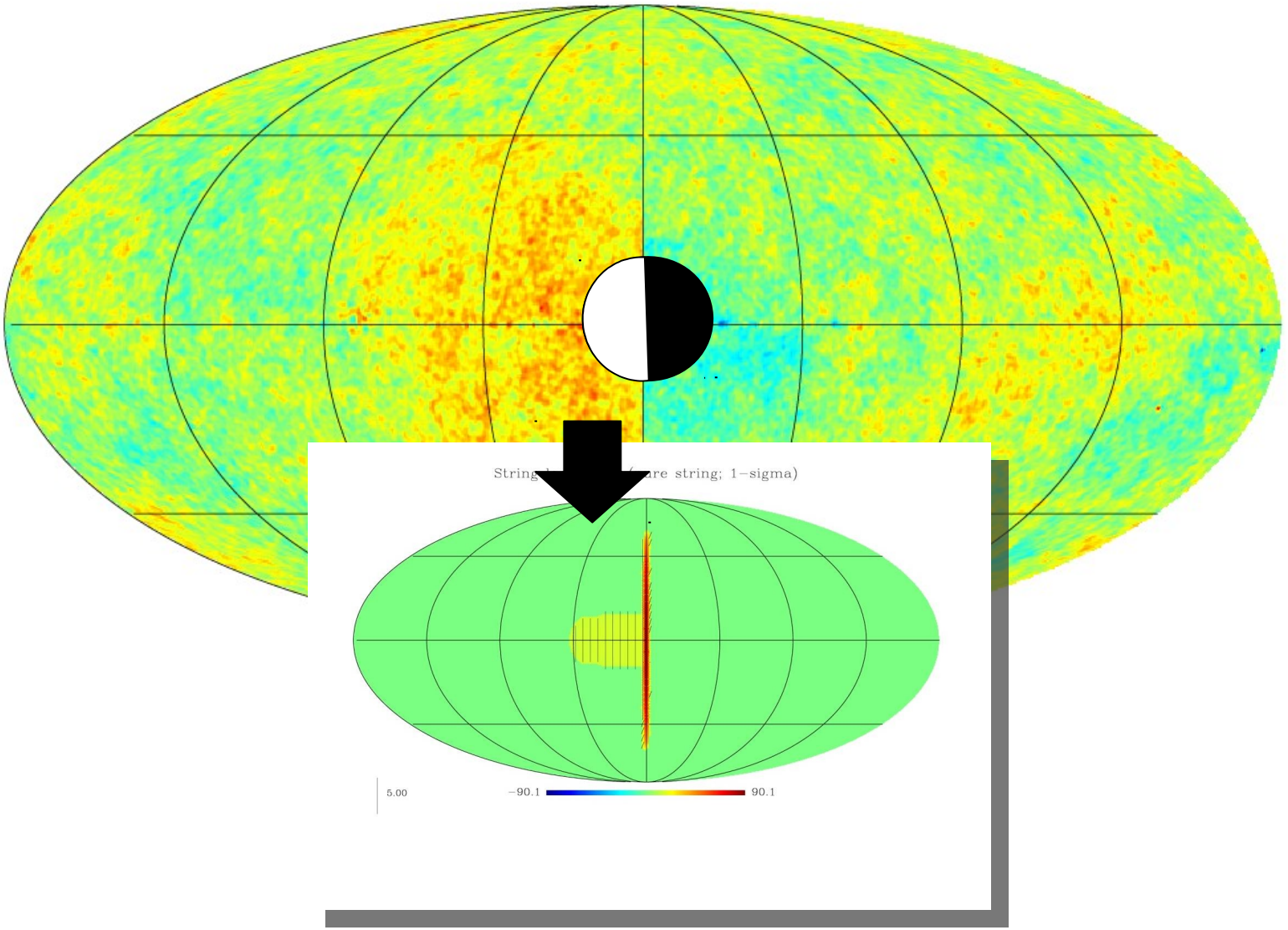
(b)

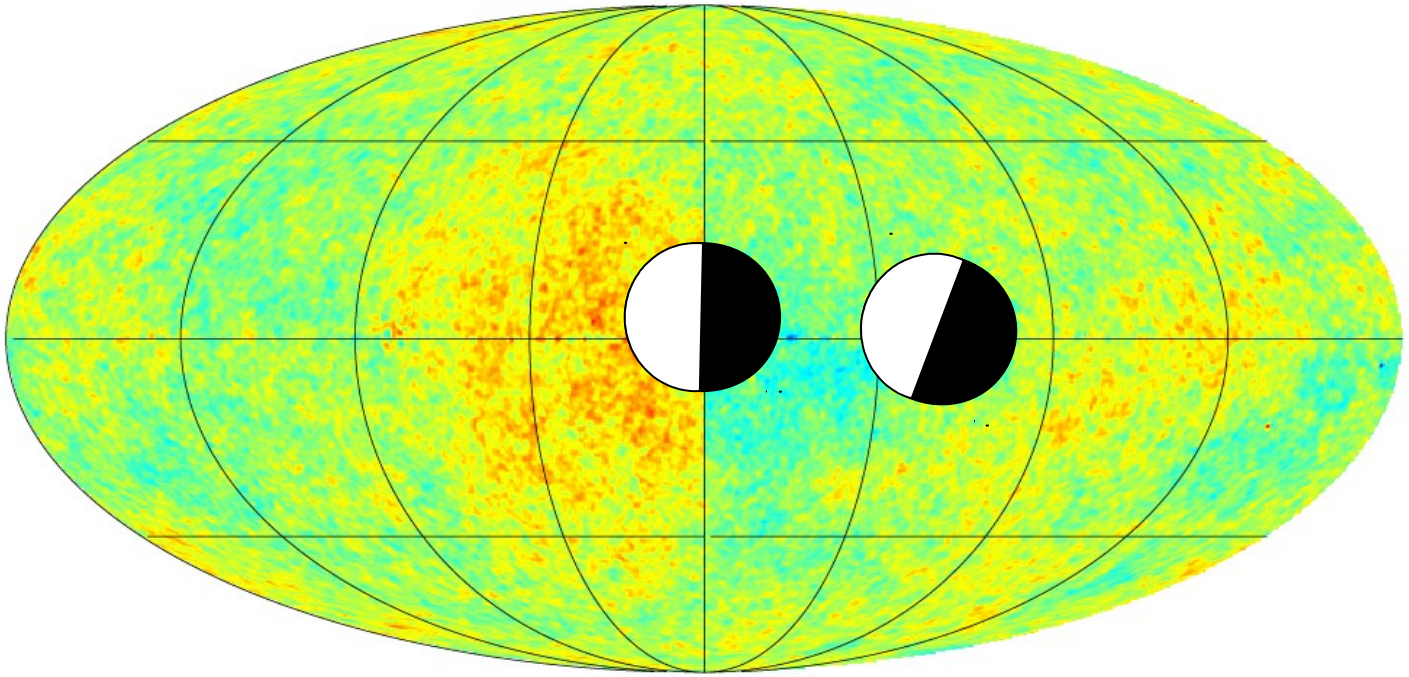


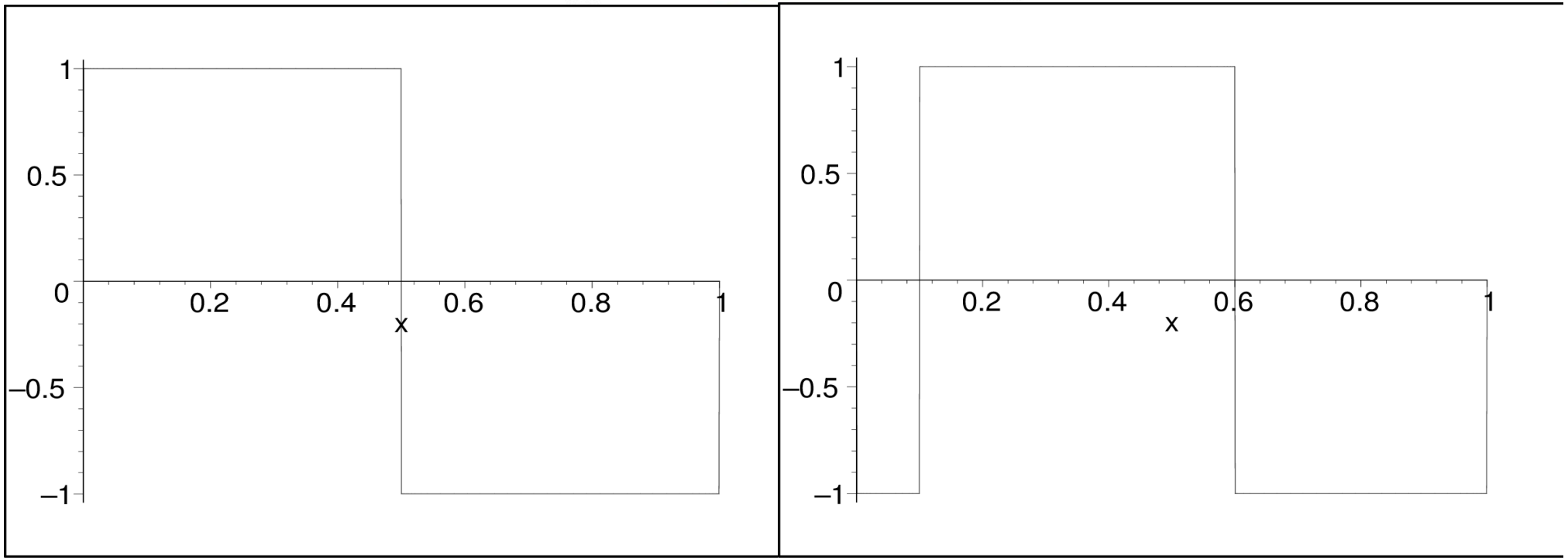



−4.7
3.8


−4.7
3.8


re string; 1−sigma)
5.00
−90.1
90.1

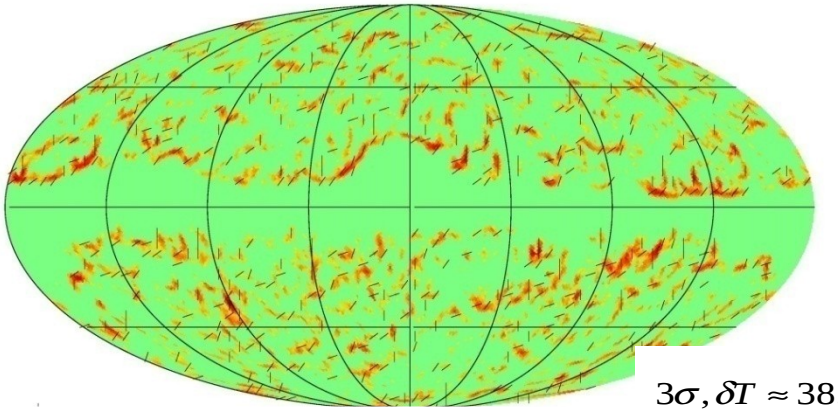




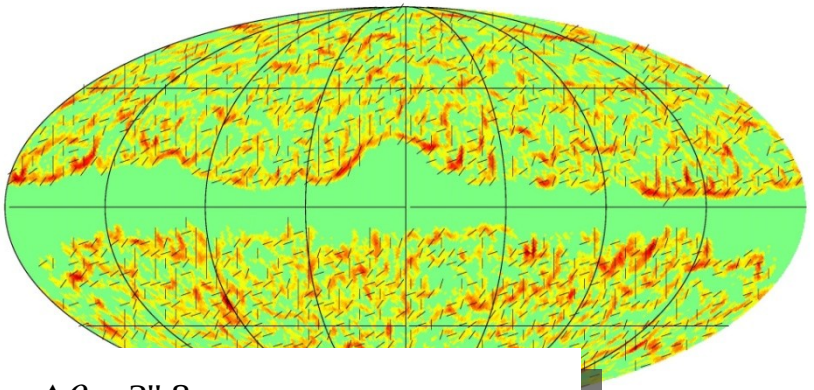
Ступенчатый фильтр (фильтр Хаара) для поиска скачков анизотропии, производимой струной

Кандидаты в космические струны по данным CMB (v~0.9.c)

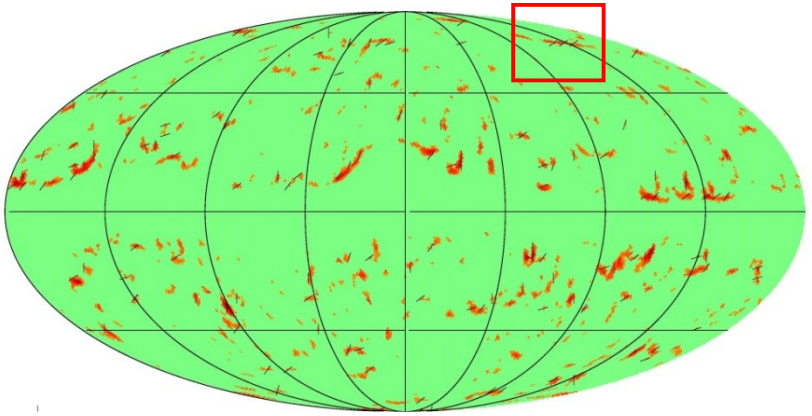
$2\sigma, \delta T \approx 25.3\ \mu K, \quad \Delta\theta = 1''.9$



$1\sigma, \delta T \approx 12.6\ \mu K, \quad \Delta\theta = 0''.9$



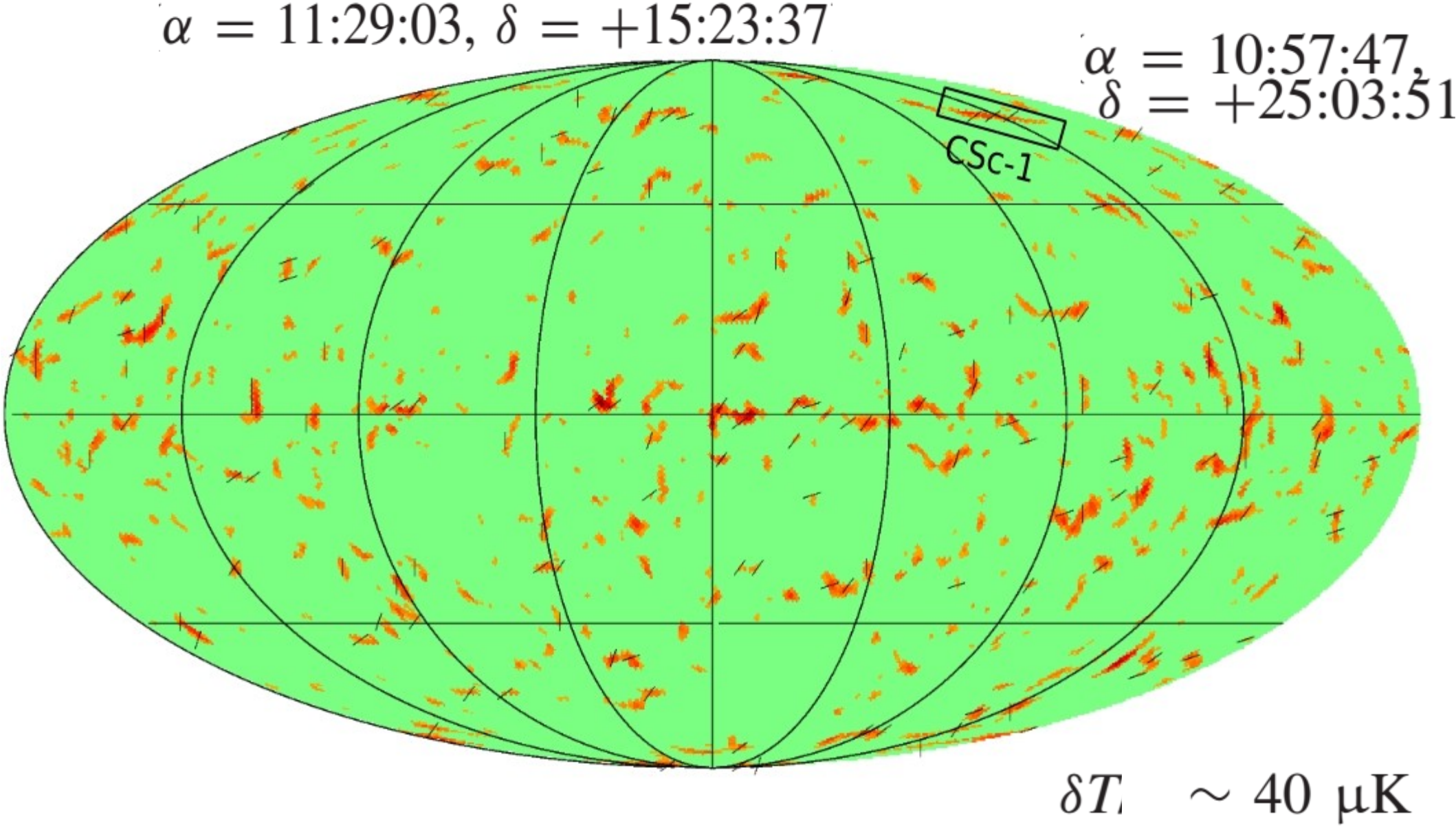
$3\sigma, \delta T \approx 38.2\ \mu K, \quad \Delta\theta = 2''.8$

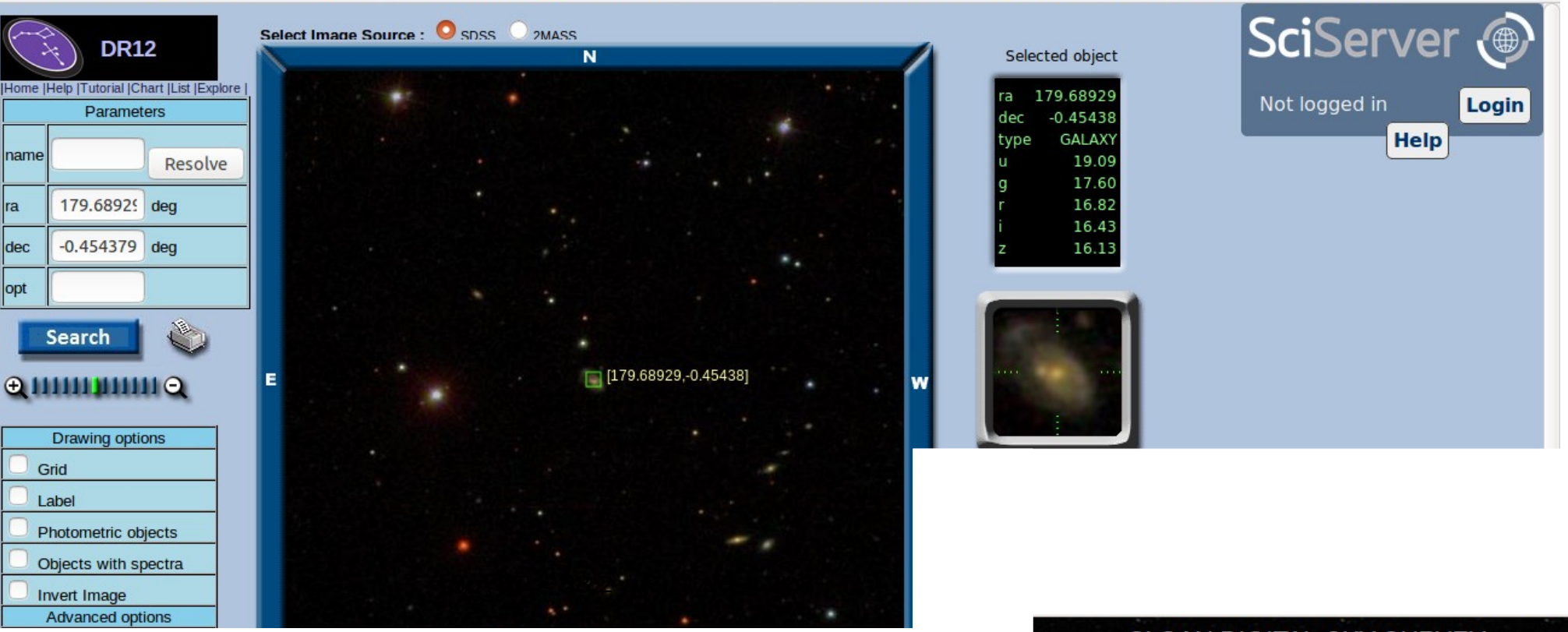


$$\frac{\delta T}{T} \approx 8\pi G \mu_0 \gamma \frac{v}{c}$$

$$\delta T_{\text{string}} = 27\ \mu\text{K} \cdot \frac{\Delta\theta}{2''} \frac{v}{0.9} F(\psi, \varphi, \theta)$$

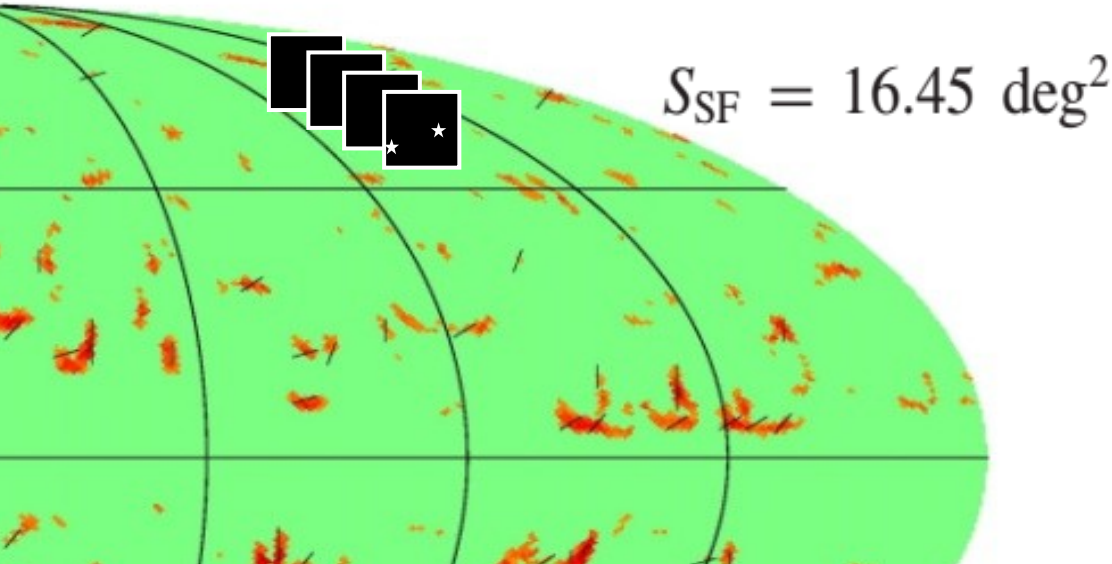
Результат обратобки карты CMB (данные Planck) фильтром Хаара





Поля кандидата Csc-1

31 пересекающееся поле 1^0 X 1^0



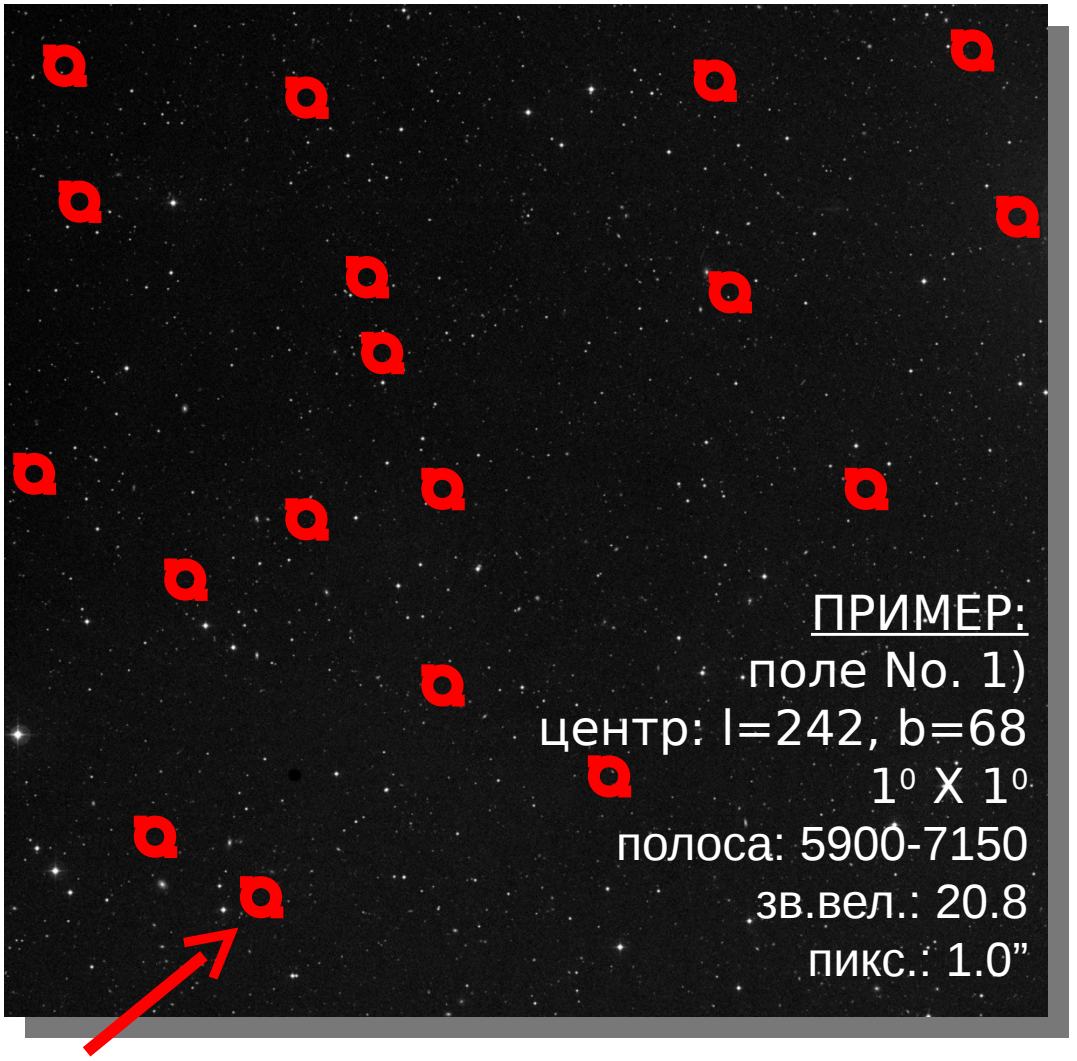
$$S_{SF} = 16.45 \text{ deg}^2$$

Первичный визуальный поиск кандидатов в гравитационно-линзовые пары (по каталогам галактик)

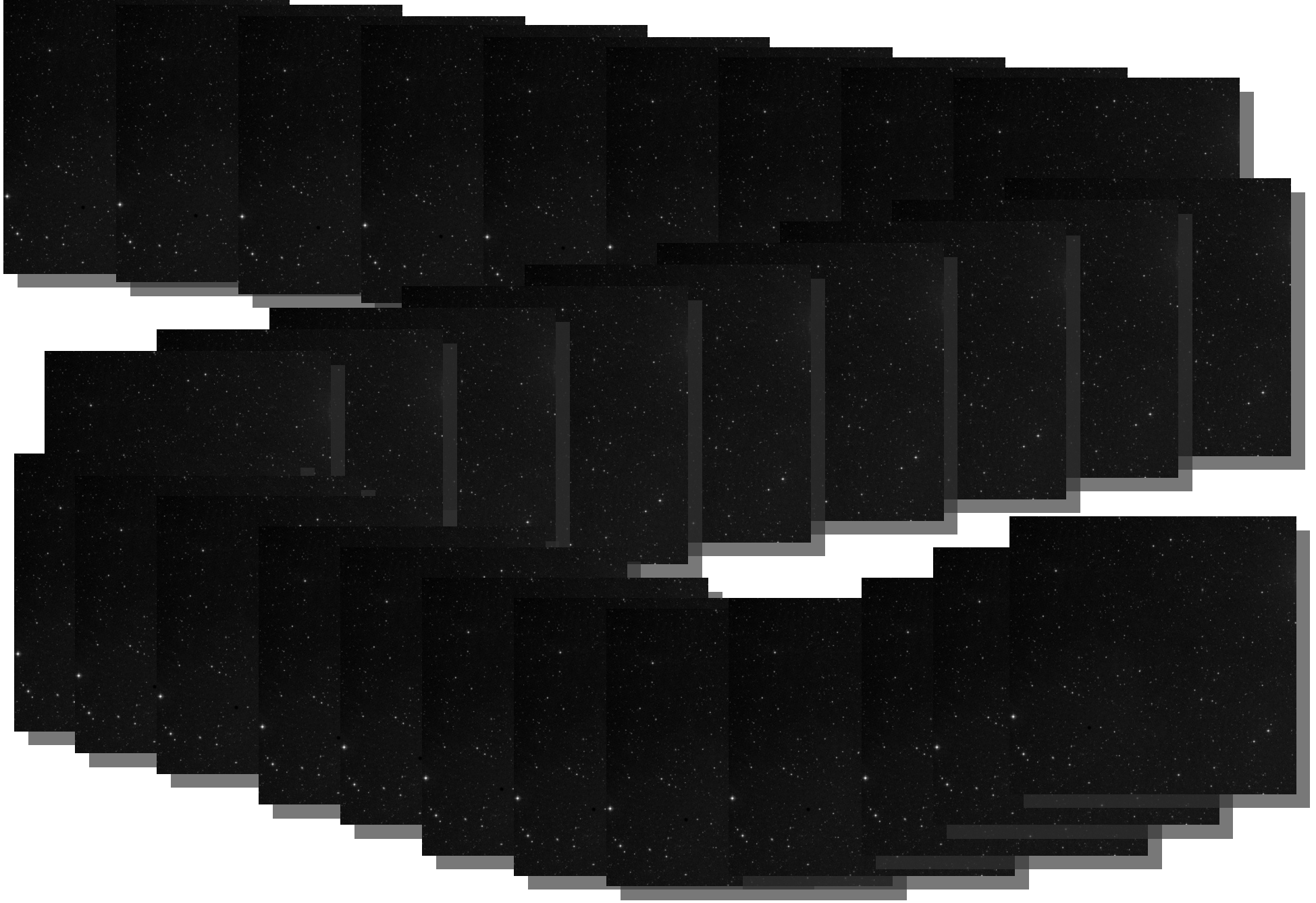
Галактические координаты (l,b)

1) 242, 68

2) 241, 68
3) 240, 68
4) 239, 68
5) 238, 68
6) 237, 68
7) 236, 68
8) 235, 68
9) 234, 67
10) 233, 67
11) 232, 67
12) 231, 67
13) 230, 67
14) 229, 67
15) 228, 67
16) 227, 66
17) 226, 66
18) 225, 66
19) 224, 66
20) 223, 66
21) 222, 66
22) 221, 66
23) 220, 66
24) 219, 66
25) 218, 66
26) 217, 66
27) 216, 66
28) 215, 66
29) 214, 66
30) 213, 66
31) 212, 65



Кандидат в гравитационно-линзовую пару



Для доказательства того, что найденный по результатам обработки анизотропии реликтового излучения кандидат в струну действительно струна, необходимо обнаружить избыток гравитационных линз в поле этого кандидата, потому что струна должна производить цепочки гравитационно-линзовых пар фоновых по отношению к ней галактик

Отбор кандидатов в гравитационно-линзовые пары

(автоматический, по каталогам галактик)

- Угловое расстояние между компонентами пар [2",9"]
- Объекты со звездными величинами, ограниченными визуальным поиском
- Одинаковые (в пределах известных ошибок) фотометрические красные смещения
- Одинаковое (в пределах известных ошибок) отношение интенсивности компонент во всех доступных полосах частот

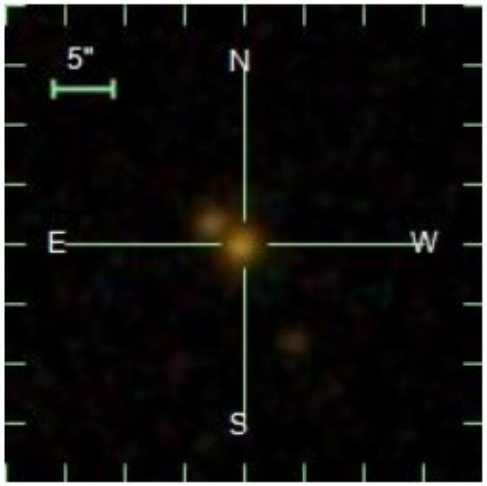
Not logged in Help

Type	run	rerun	camcol	field	obj	SDSS Object ID
GALAXY	5183	301	6	240	177	1237667736649203889

RA, Dec		Galactic Coordinates (*l*, *b*)	
Decimal	Sexagesimal	*l*	*b*
167.362011215, 22.659893665	11:09:26.88, +22:39:35.61	218.242868481	66.487111818

Imaging

Flags	DEBLENDED_AT_EDGE STATIONARY BINNED1 INTERP COSMIC_RAY MANYPETRO CHILD



Magnitudes				
u	g	r	i	z
22.19	20.75	19.10	18.55	18.26

Magnitude uncertainties				
err_u	err_g	err_r	err_i	err_z
0.35	0.04	0.02	0.02	0.04

Image MJD	mode	Other observations	parentID	nChild	extinction_r	PetroRad_r (arcsec)
53439	PRIMARY	0	1237667736649203888	0	0.04	3.85 ± 0.571

Mjd-Date	photoZ (KD-tree method)	Galaxy Zoo 1 morphology
03/10/2005	0.330 ± 0.0256	-

Explore Home
Search
Imaging Summary
FITS
Finding chart
Other Observations
Neighbors
Galaxy Zoo
PhotoTag
Field
Frame
PhotoObj
PhotoZ
Cross-ID
Spec Summary
All Spectra
NED search
SIMBAD search
ADS search
Notes
Save in Notes
Show Notes
Print

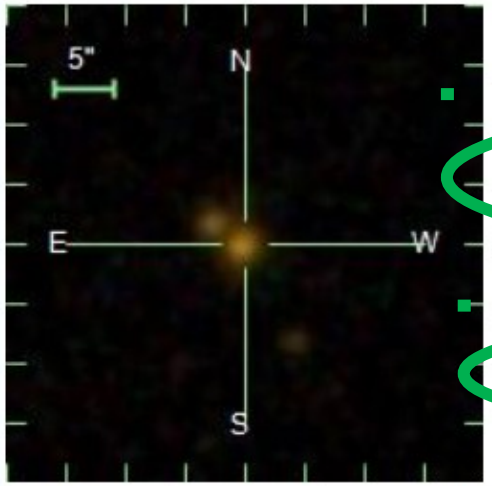
Not logged in Help

Type	run	rerun	camcol	field	obj	SDSS Object ID
GALAXY	5183	301	6	240	177	1237667736649203889

RA, Dec		Galactic Coordinates (*l*, *b*)	
Decimal	Sexagesimal	*l*	*b*
167.362011215, 22.659893665	11:09:26.88, +22:39:35.61	218.242868481	66.487111818

Imaging

Flags	DEBLENDED_AT_EDGE STATIONARY BINNED1 INTERP COSMIC_RAY MANYPETRO CHILD



6 полос

Magnitudes				
u	g	r	i	z
22.19	20.75	19.10	18.55	18.26

Magnitude uncertainties				
err_u	err_g	err_r	err_i	err_z
0.35	0.04	0.02	0.02	0.04

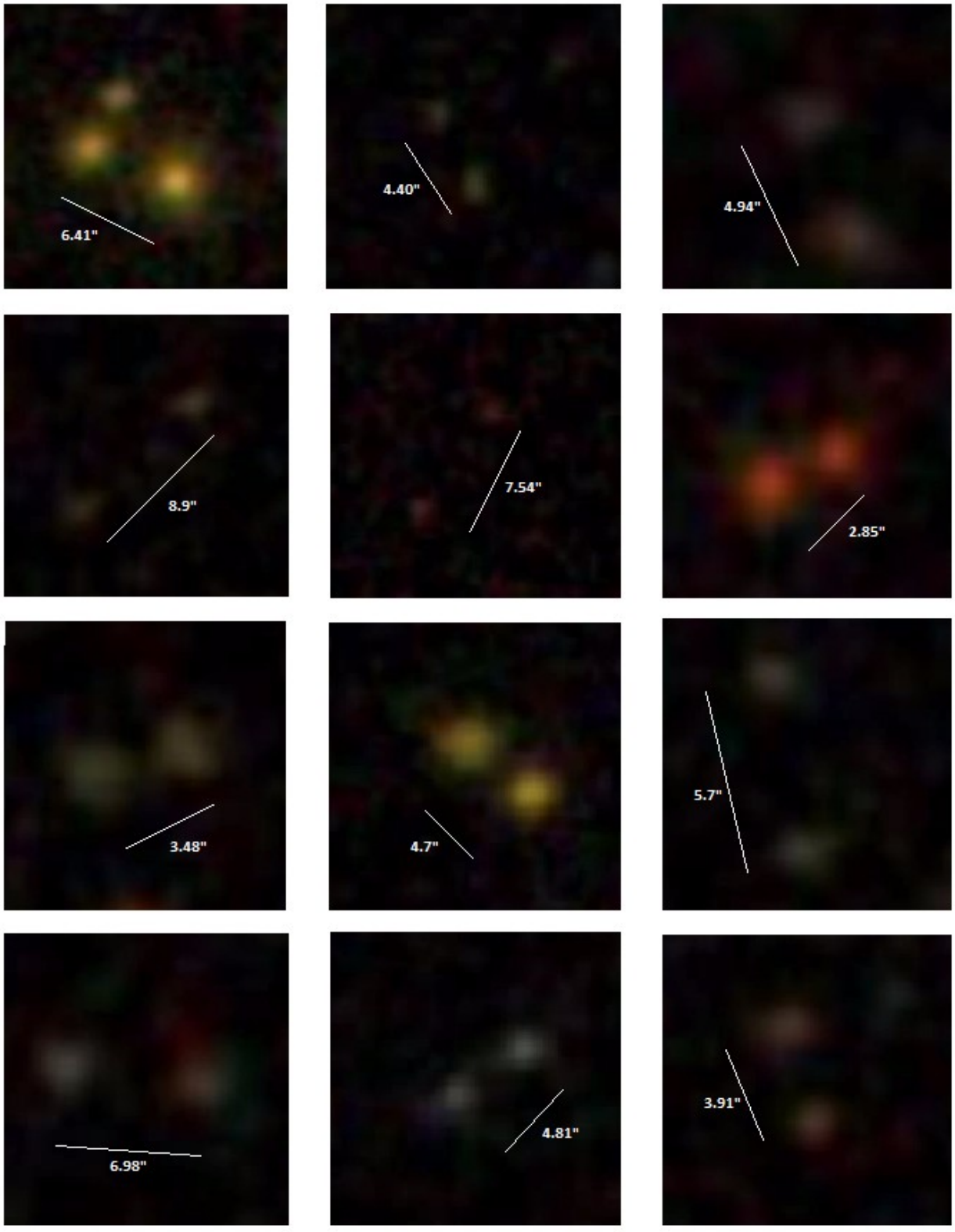
1σ-ошибка

Image MJD	mode	Other observations	parentID	nChild	extinction_i	(arcsec)
53439	PRIMARY	0	1237667736649203888	0	0.04	3.85 ± 0.571

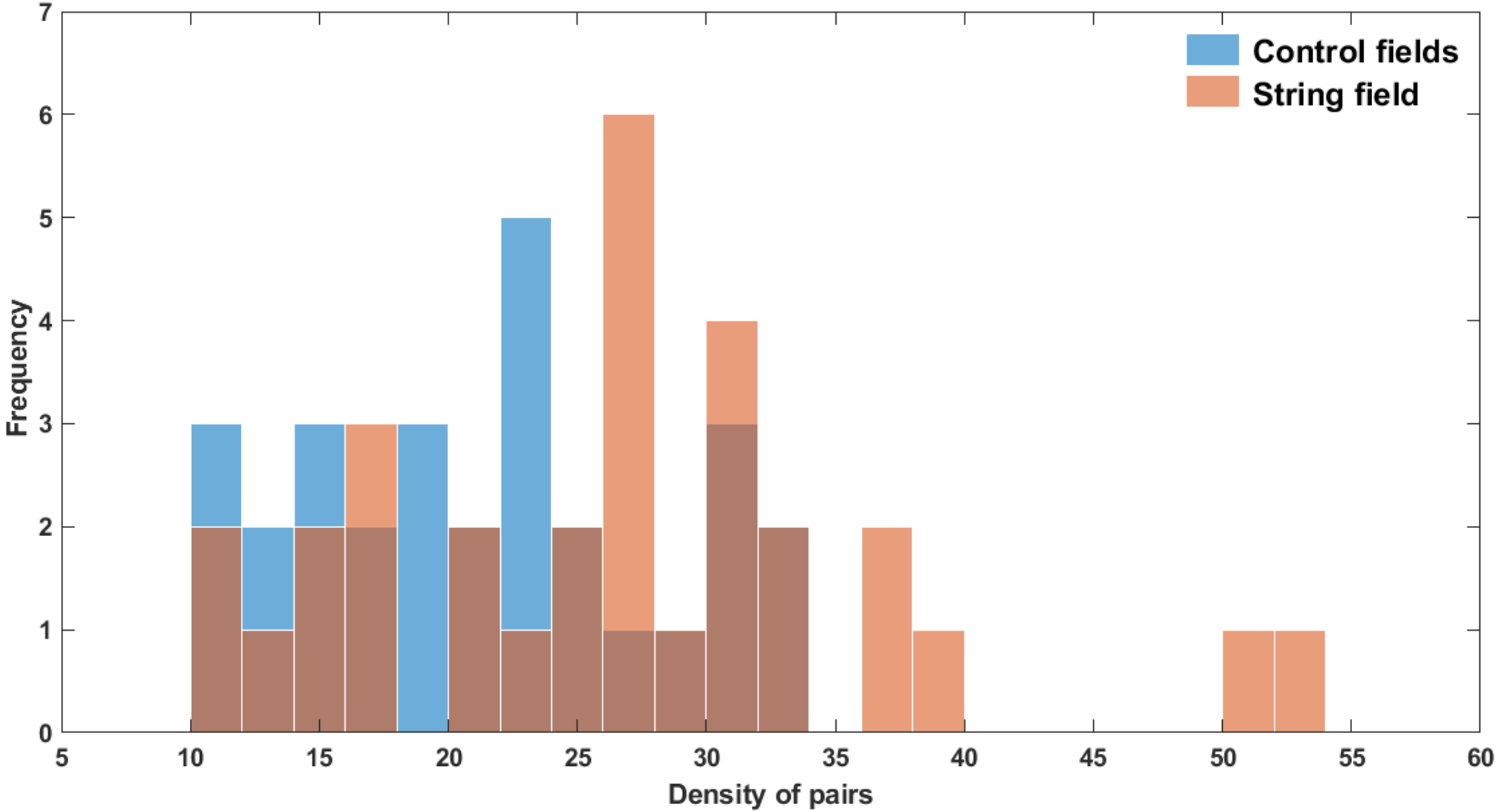
Mjd-Date	photoZ (KD-tree method)	Galaxy Zoo 1 morphology
03/10/2005	0.330 ± 0.0256	-

Фотометрическое красное смещение

Примеры кандидатов в гравитационно-линзовые пары, найденные путем автоматического поиска в каталоге галактик SDSS-DR12



Сравнение распределения гравитационно-линзовых пар в областях, где нет кандидатов в струны, с полем, где есть кандидат в струну. Статистически доказано, что эти распределения разные, и количество линз в поле со струной существенно превышает количество линз в поле без струны (в полях без струны тоже должны быть линзы, но “обычные”).



Количество гравитационно-линзовых пар в полях CSc-1 и контрольных полях

- в полях CSc-1: 425
- в контрольных полях: 635

$$S_{\mathrm{SF}} = 16.45 \ \mathrm{deg}^2$$

$$S_{\mathrm{CF}} = 30.06 \ \mathrm{deg}^2$$

$$\langle N_{\mathrm{SF}} \rangle = 26.6 \pm 1.8$$

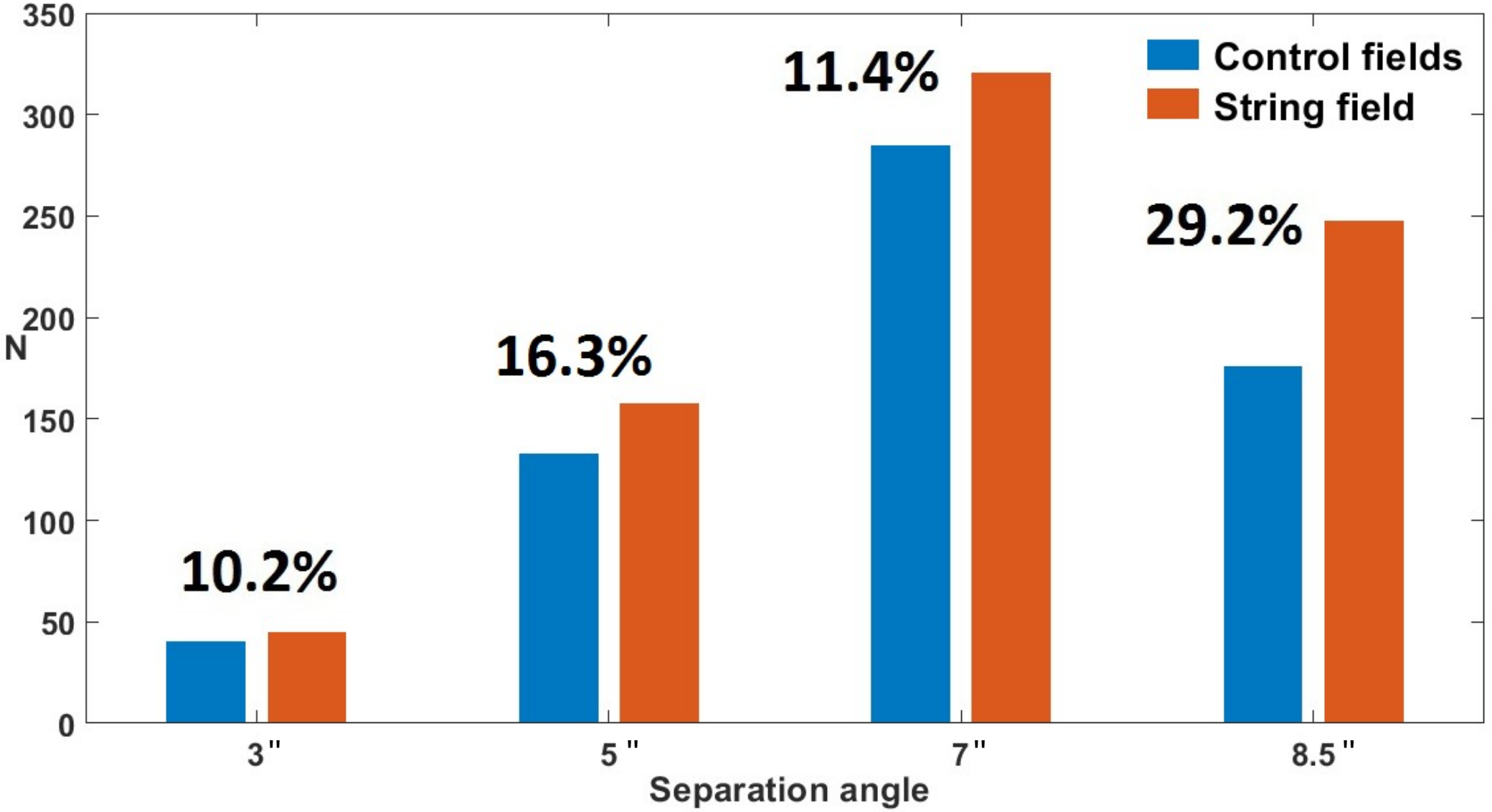
$$\langle N_{\mathrm{CF}} \rangle = 21.2 \pm 1.3$$

$$N_{\mathrm{SF}}^{\mathrm{deg}^2} = 25.8$$

$$N_{\mathrm{CF}}^{\mathrm{deg}^2} = 21.1$$

Статистически значимое превышение 22% (на 1 кв. град.) количества пар кандидатов в гравитационно-линзовые события в полях CSc-1 по сравннеию с контрольными полями полями.
Превышение количества пар на 4.6 (на 1 кв. град.) на уровне значимости 3σ

Статистически предпочтительное расстояние между компонентами пар



Предварительные выводы

- Кандидат в космическую струну CSc-1 подтвержден двумя независимыми методами: по радиоданным (WMAP, Planck) и по оптическим данным (статистическая оценка распределений кандидатов в события гравитационного линзирования)
- Требуются дополнительные исследования:

  (1) увеличить разрешение при анализе CMB-карт;

  (2) провести спектроскопические исследования кандидатом в гравитационно-линзовые события

  (3) провести наблюдения с высоким угловым разрешением для поиска характерных в случае струны срезов внешни изофот изображений

Предварительные выводы

- Оценки скорости CSc-1:

$$\frac{\delta T}{T} = 8\pi G\mu \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$T = 2.73\ \mathrm{K}$ $\quad \Delta\Theta = 5''$ → β = 0.5c

δT = 40 μK $\quad \Delta\Theta = 8.5''$ → β = 0.3c

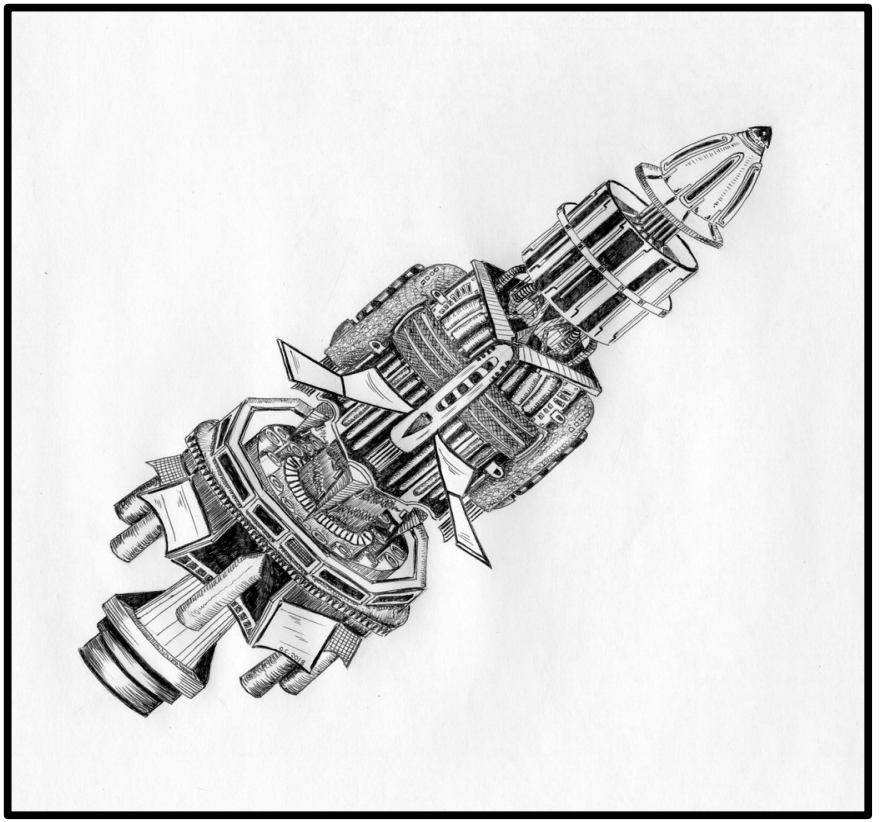
по визуальному контролю

$$\langle \Delta\theta \rangle = 7.78'' \pm 0.72''$$

$$\langle \Delta\theta \rangle = 5.30'' \pm 0.55''$$

Epoch	Radiation		Matter	
	Bennet & Bouchet, 1990	Allen & Shellard, 1990	Bennet & Bouchet, 1990	Allen & Shellard, 1990
v_{string}	0.66 c	0.62 c	0.61 c	0.58 c

From “Cosmic strings and Other Topological Defects” A. Vilenkin, E.P.S. Shellard 1994

ЛЕКЦИЯ 11

Гравитационные волны