# Космические струны во Вселенной: достижения и перспективы исследования

Сажина О.С.

ГАИШ МГУ 18 марта 2013





## Российско-итальянская группа

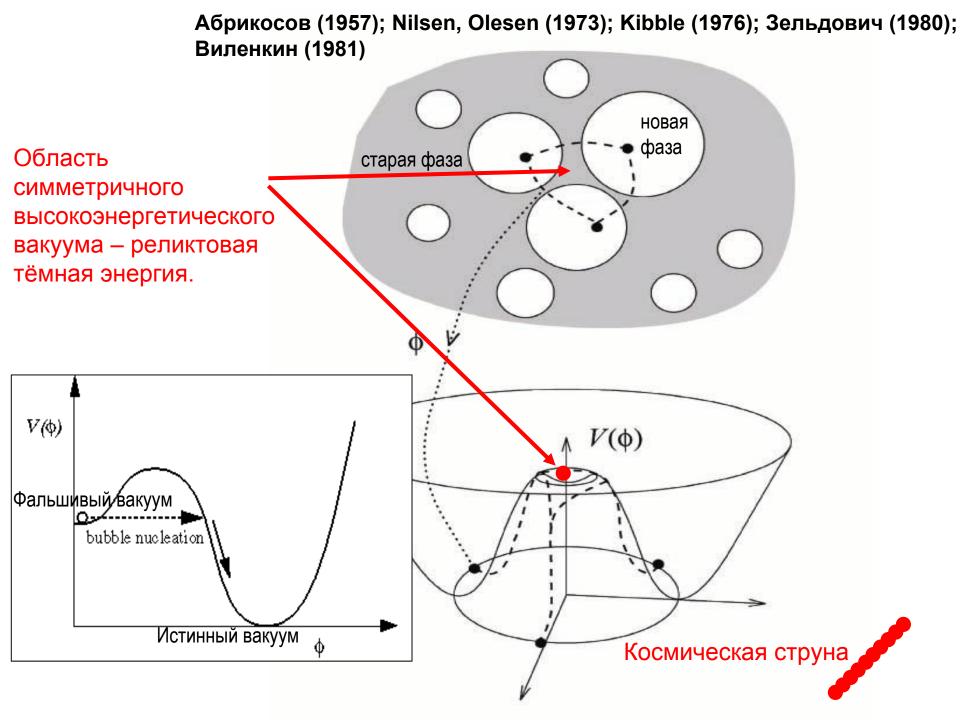
- проф. Сажин М.В. (ГАИШ МГУ, Москва)
- Семенцов В.Н. (ГАИШ МГУ, Москва)

- Prof. M. Capaccioli, (Very Large Telescope Survey Center (VSTceN), Университет Федерико II, Неаполь, Италия)
- Prof. G. Longo (Университет Федерико II, Неаполь, Италия)
- Dr. M. Paolillo (Университет Федерико II, Неаполь, Италия)
- G. Riccio (Университет Федерико II, Неаполь, Италия)

## Цель работы:

 Поиск наблюдательных проявлений линейных топологических дефектов пространства фемени – макроскопических космических струн – в нашей Вселенной с помощью оптических телескопов и радиотелескопов.

Разработка аналитической теории динамики одиночной космической струны, численное моделирование, составление заявок на телескопы, наблюдения, статистическая обработка данных, интерпретация результатов.



#### «Реликт»

(Струков И.А. и др. MNRAS 258 37P 1992)

#### **COBE**

(Smoot G.F. et al. Astrophys. J. 396 L1 1992)

#### **BOOMERanG**

(de Bernardis P. et al. Nature 404 955 2000)

## **Archeops**

#### **WMAP**

(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, http://map.gsfc.nasa.gov)

Согласно последним данным по анизотропии реликтового излучения, космические струны не могут являться основным источником первичных возмущений плотности.

Многие теоретические модели ранней Вселенной предсказывают космические струны. Такие объекты могли формироваться после инфляционного периода, «дожить» до нас и обладать специфическими наблюдательными свойствами

Минимальная модель, содержащая космические струны:

$$L = D^{\mu} \phi^* D_{\mu} \phi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \lambda \left( \phi^* \phi - \frac{\eta^2}{2} \right)$$

Множество отличных от нуля вакуумов:

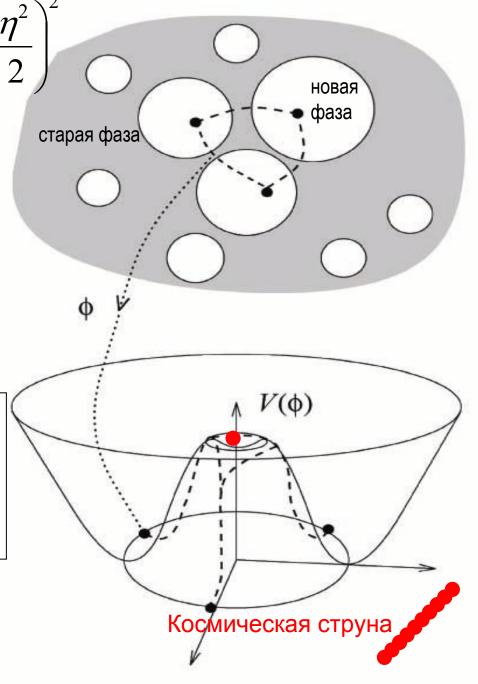
$$\left|\left\langle \phi\right\rangle \right|^2 = \frac{\eta^2}{2}$$

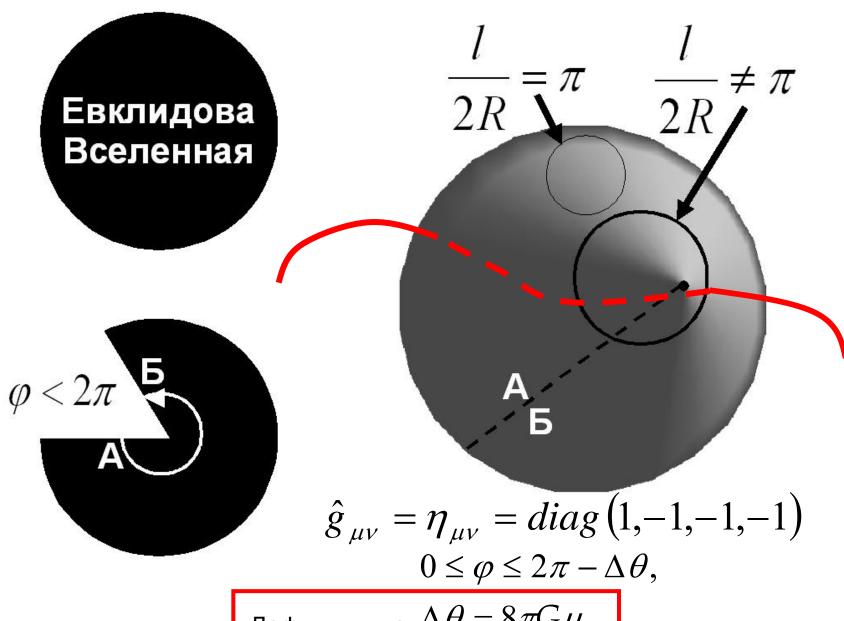
$$\langle \phi \rangle = \frac{\eta}{\sqrt{2}} \exp\{i\alpha(x)\}$$

Масса струны на единицу длины

$$\mu \sim \eta$$

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





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

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

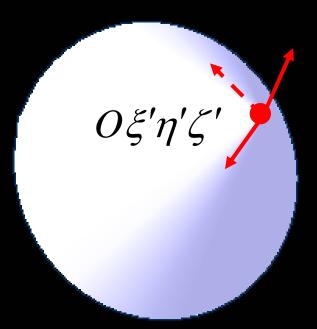
## Космическая струна во Вселенной

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

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

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

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



## Космическая струна во Вселенной

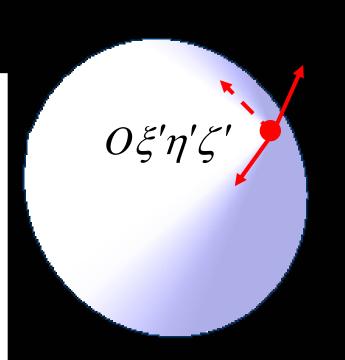
$$\rho' = \sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}$$

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

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

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

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



## Современные методы обнаружения космических струн

Оптические обзоры

Поиск событий гравитационного линзирования

Радиообзоры

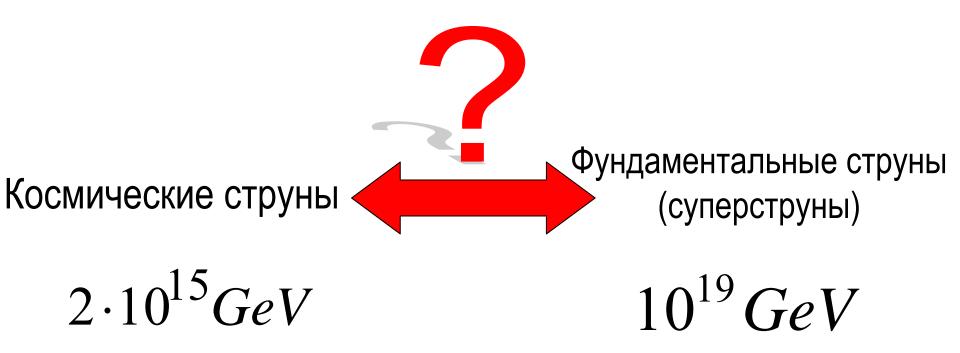
Исследование структуры анизотропии CMBR

 Объединение оптических методов и методов радиоастрономии

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

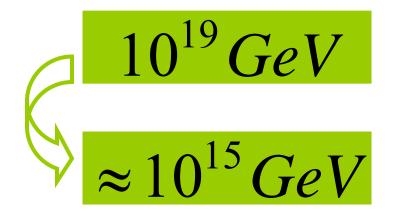
**...** 

# **Космические струны и многомерные** теории (**F-струны**)





В моделях с большими дополнительными измерениями энергетическая шкала суперструн может быть меньше планковской – до энергий теории Великого объединения и даже ниже.



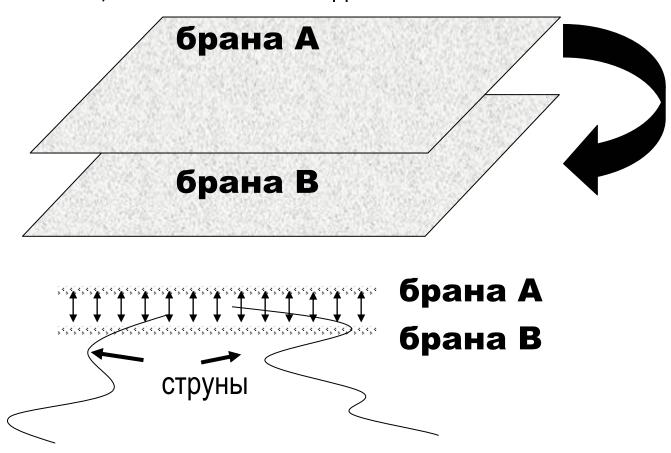
# Космические струны и многомерные теории (F-струны)

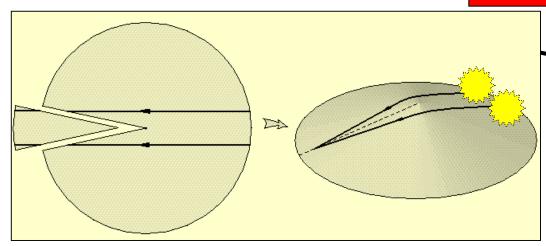
$$\mu \sim m_s^2 \sim m_{Pl}^2$$
1.  $G\mu \sim 1 >> 10^{-7}$ 
2.  $ds^2 = F(y)\eta_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu} + ds_y^2$ 

$$\mu_{eff} = F(y_0)\mu$$

# Космические струны и многомерные теории (D-струны)

Браны, присутствующие в теории суперструн, могут взаимодействовать и генерировать космические струны. В космологии на бране образование струн предпочтительнее, чем монополей и доменных стенок.

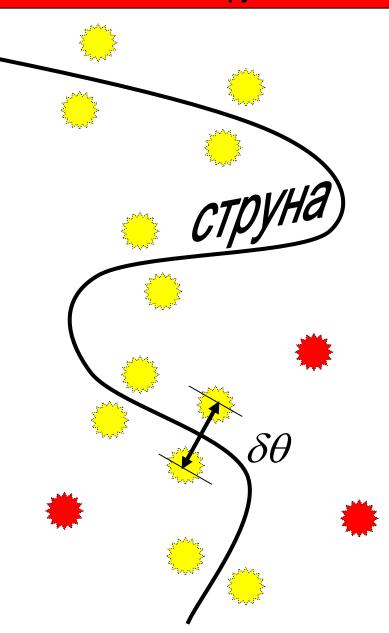


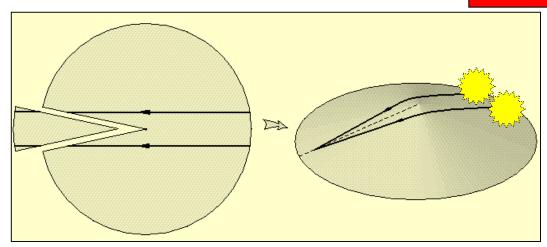


$$\delta\theta = \Delta \theta \, \frac{R_g - R_s}{R_g}$$

Дефицит угла  $\Delta\, heta\, = 8\,\pi G\,\mu$ 

 $R_{\!\scriptscriptstyle S}$  -расстояние от наблюдателя до струны



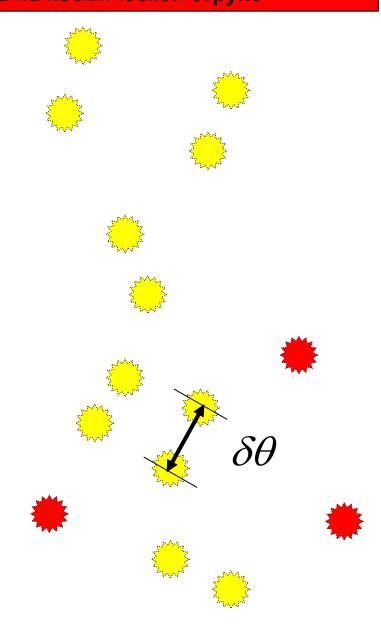


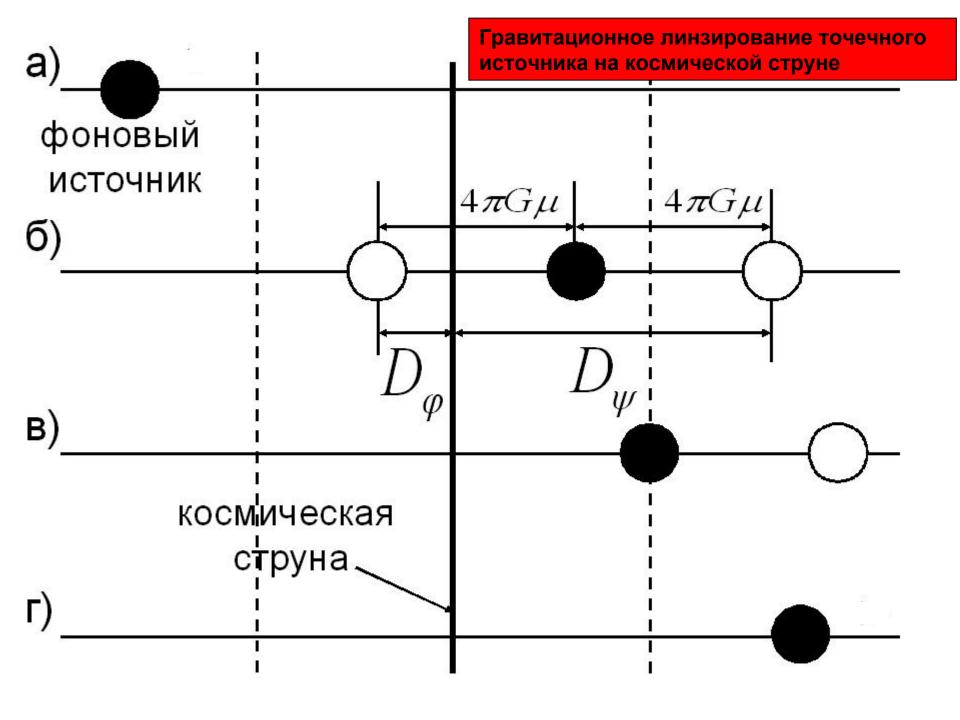
$$\delta\theta = \Delta \theta \frac{R_g - R_s}{R_g}$$

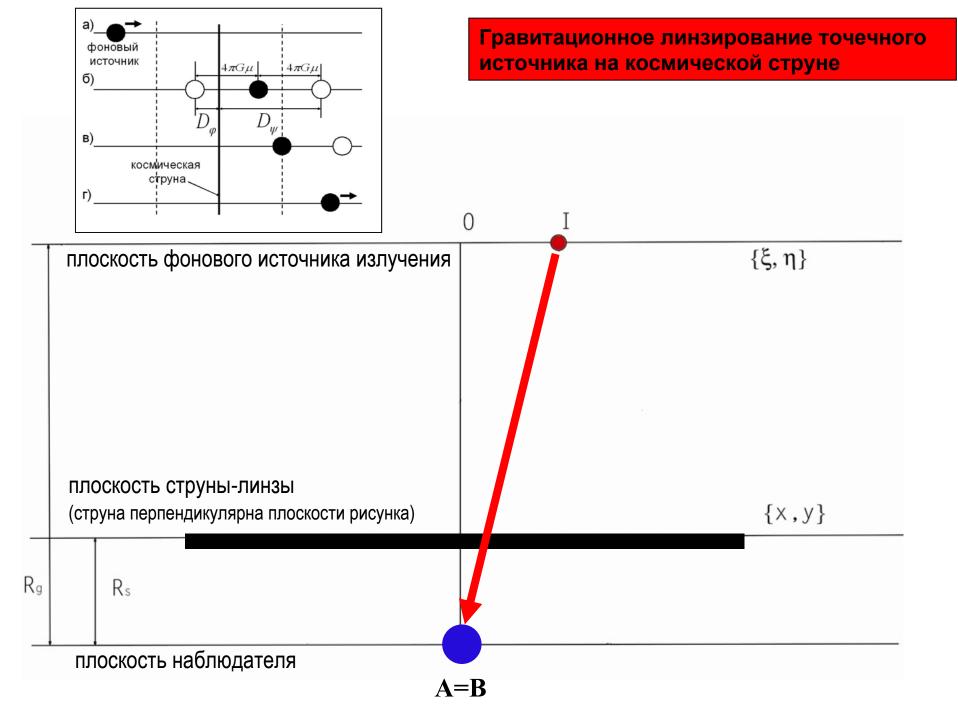
Дефицит угла  $\Delta\, heta\, =\, 8\,\pi G\, \mu$ 

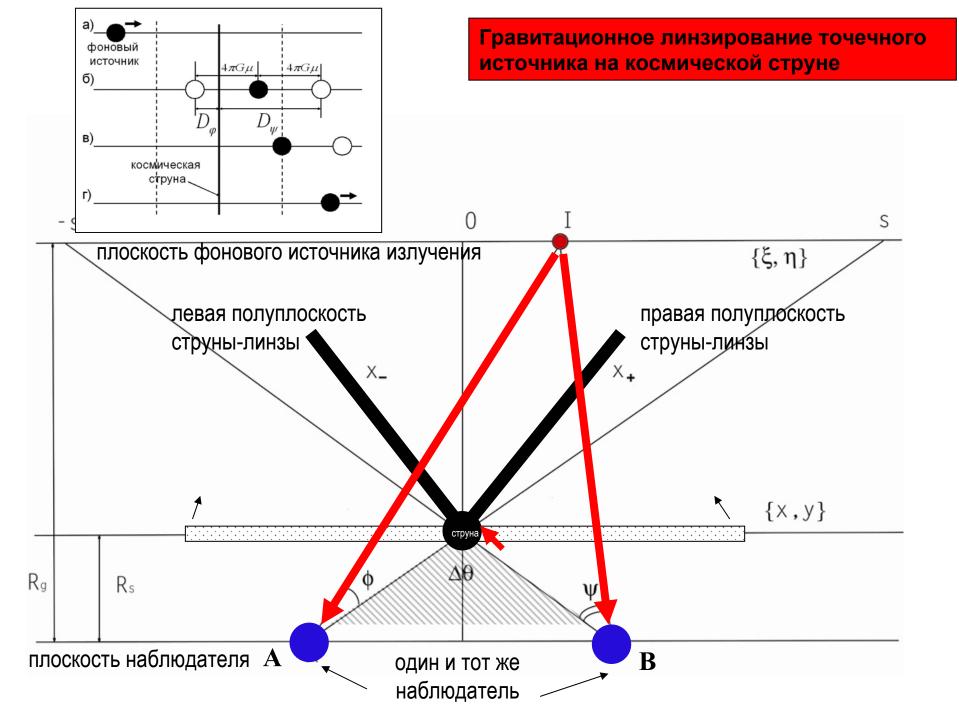
 $R_{\!\scriptscriptstyle S}$  -расстояние от наблюдателя до струны

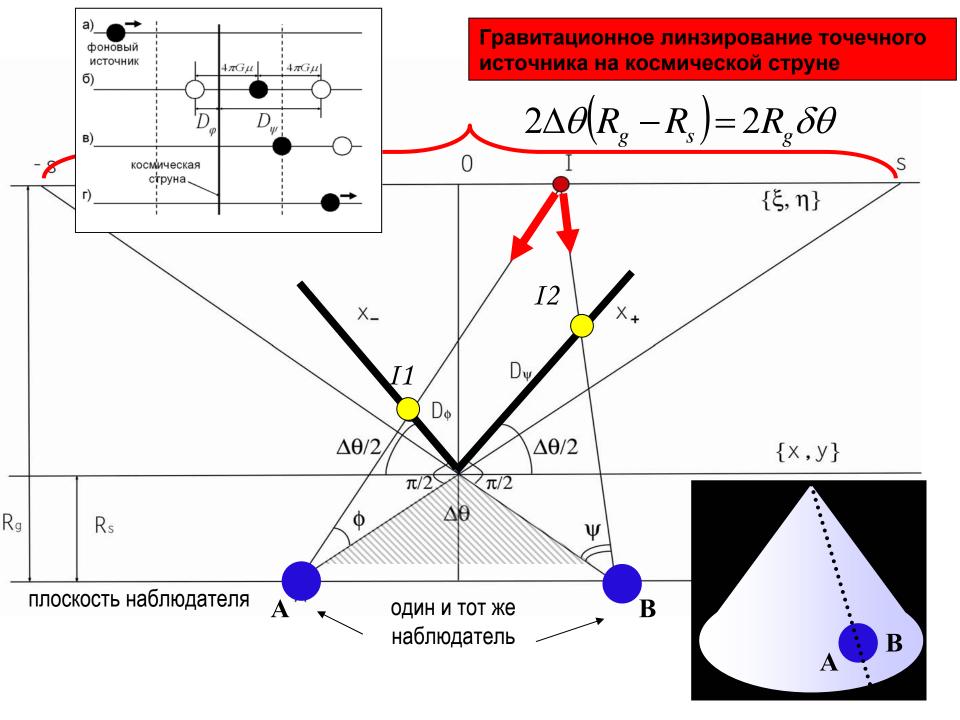
 $R_g$  -расстояние от фонового линзируемого источника до наблюдателя











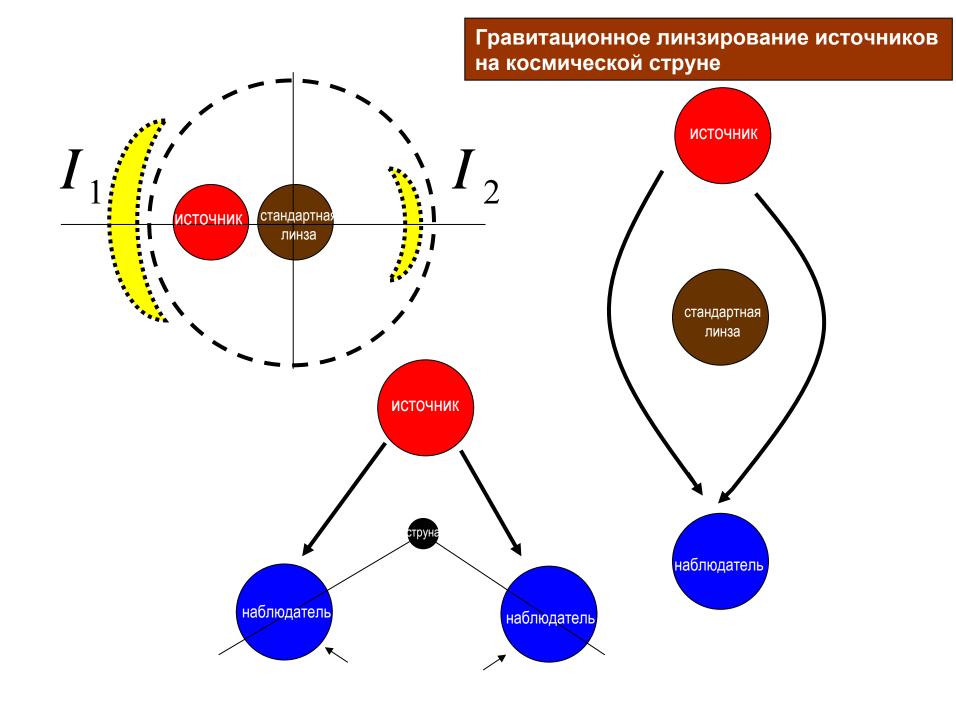
## Что такое уравнение гравитационной линзы?

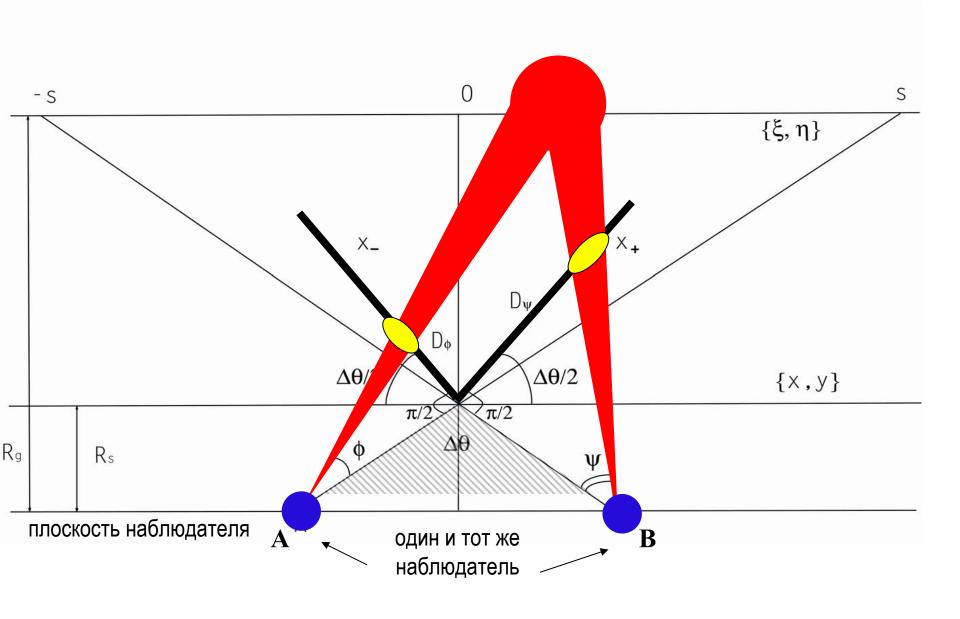
Уравнение гравитационной линзы связывает физические расстояния в плоскости линзы с расстояниями в плоскости линзируемого фонового источника как функцию дефицита угла струны, расстояния от наблюдателя до линзы (струны) и расстояния от наблюдателя до плоскости фонового источника.

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

в плоскости фонового источника

в плоскости линзы (струны)



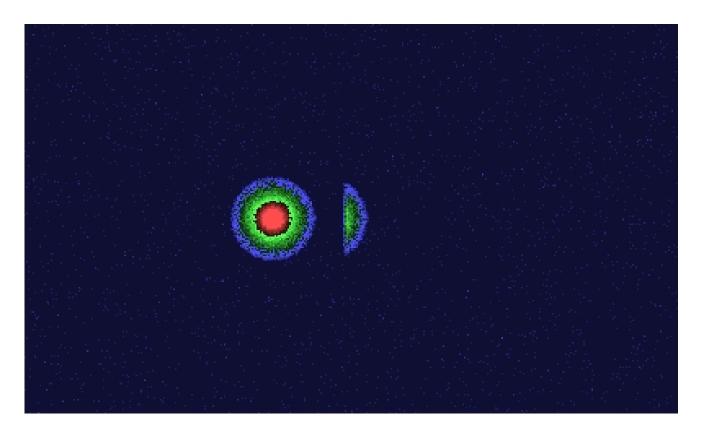


Общее уравнение гравитационной линзы: отображение протяженного фонового источника при его линзировании космической струной:

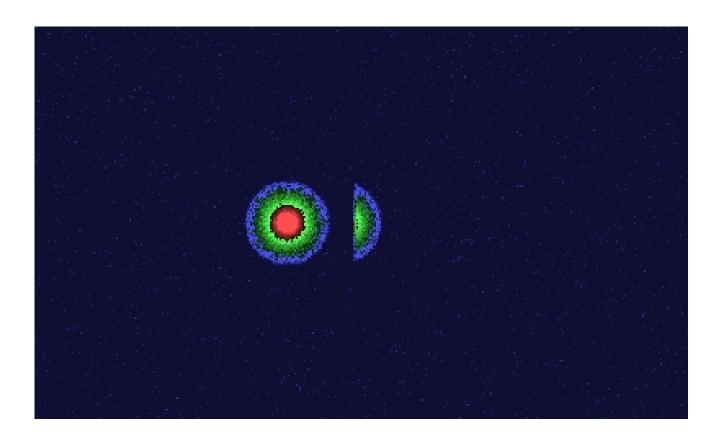
$$I\left(\frac{R_{s}}{R_{g}}(\xi+s/2),\frac{R_{s}}{R_{g}}\eta\right),s<\xi$$

$$I\left(x,y\right)=\begin{cases}I\left(\frac{R_{s}}{R_{g}}(\xi+s/2),\frac{R_{s}}{R_{g}}\eta\right)+I\left(\frac{R_{s}}{R_{g}}(\xi-s/2),\frac{R_{s}}{R_{g}}\eta\right),-s\leq\xi\leq s\\I\left(\frac{R_{s}}{R_{g}}(\xi-s/2),\frac{R_{s}}{R_{g}}\eta\right),\xi<-s\end{cases}$$

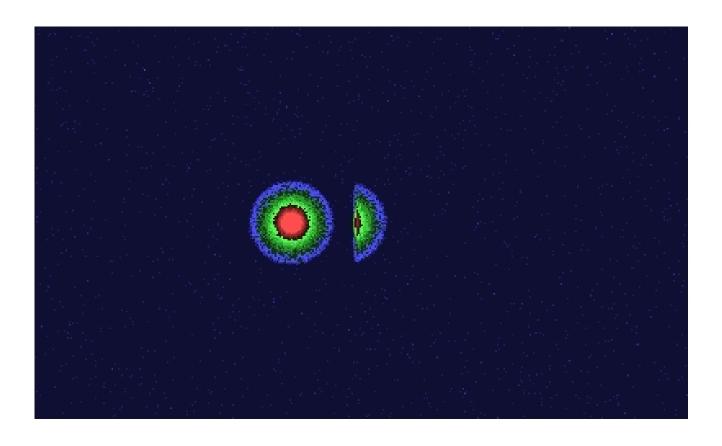
## Моделирование с высоким угловым разрешением



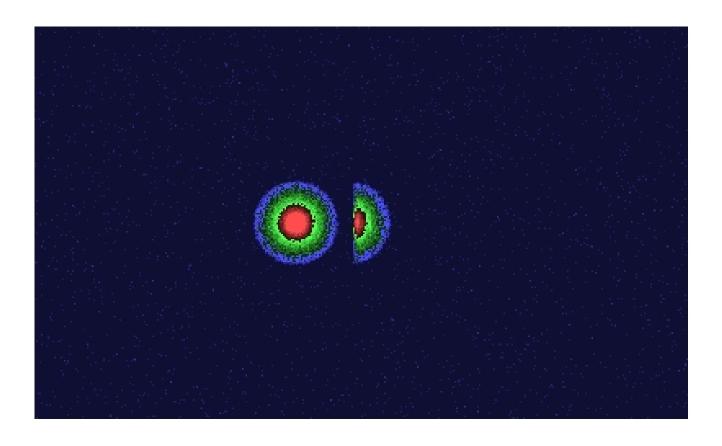
## Моделирование с высоким угловым разрешением



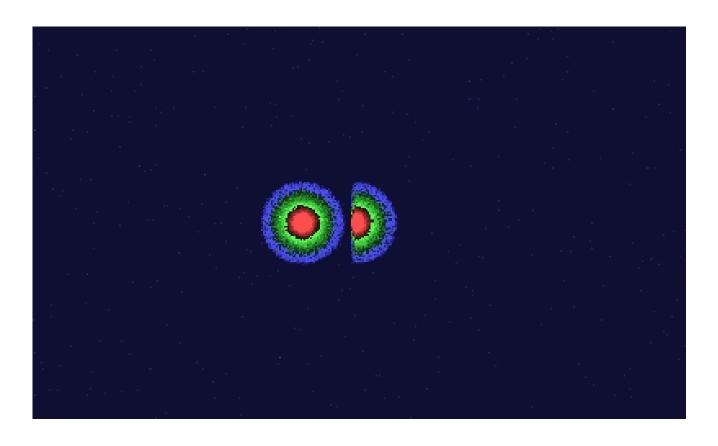
## Моделирование с высоким угловым разрешением



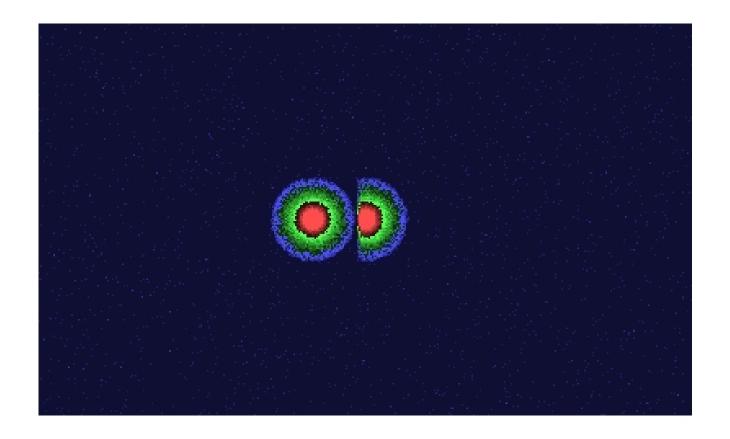
## Моделирование с высоким угловым разрешением



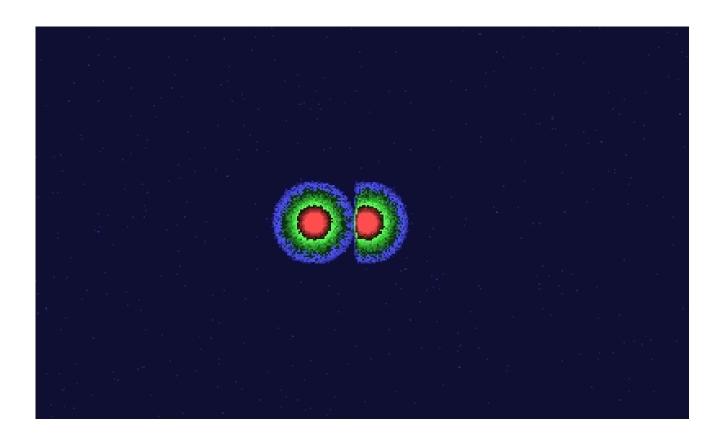
## Моделирование с высоким угловым разрешением



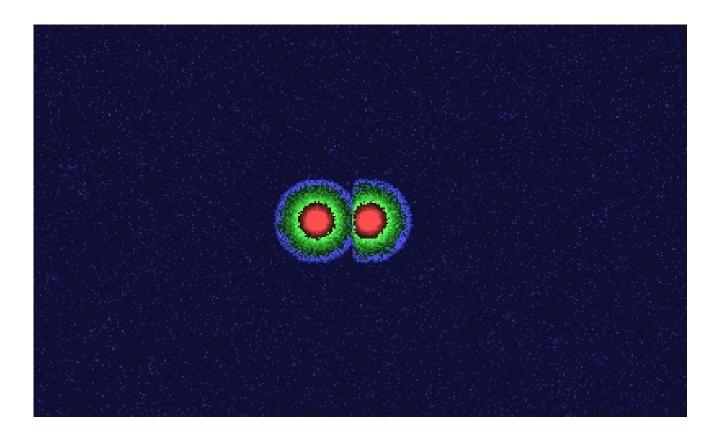
## Моделирование с высоким угловым разрешением



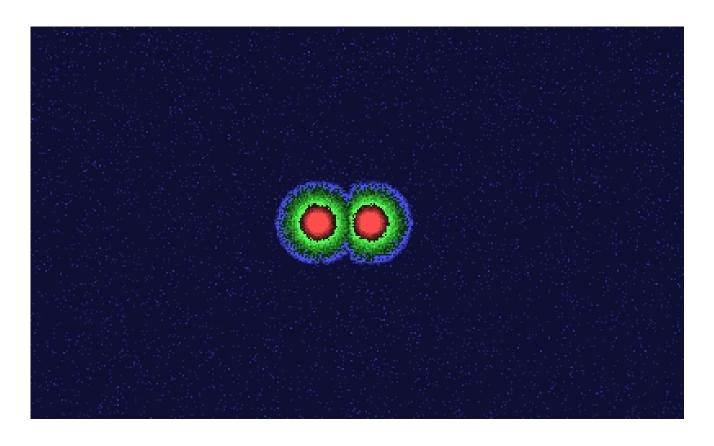
## Моделирование с высоким угловым разрешением

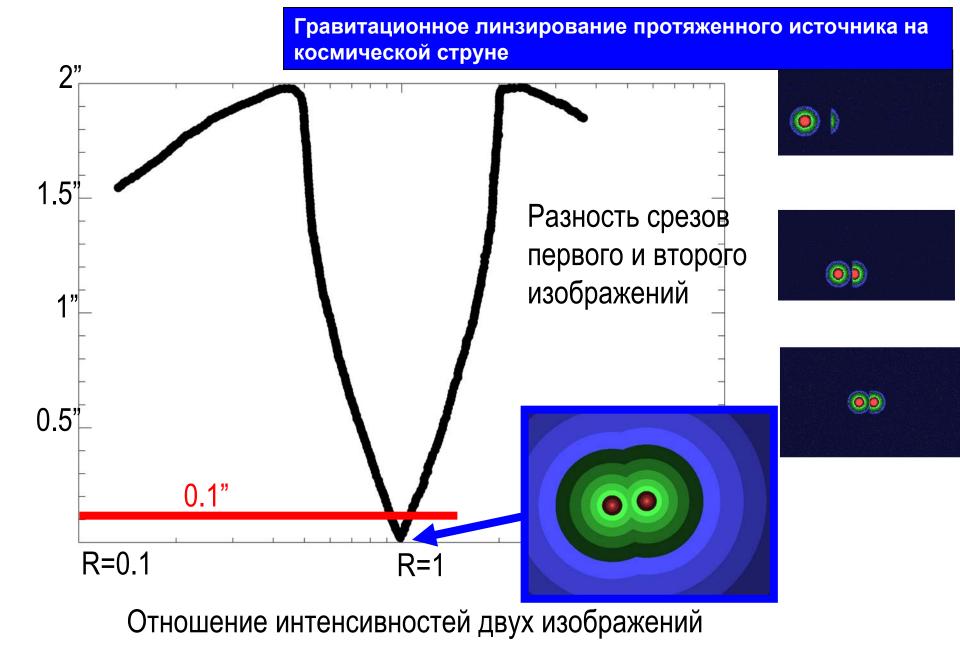


## Моделирование с высоким угловым разрешением

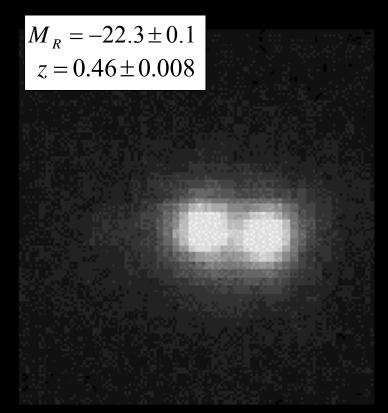


## Моделирование с высоким угловым разрешением

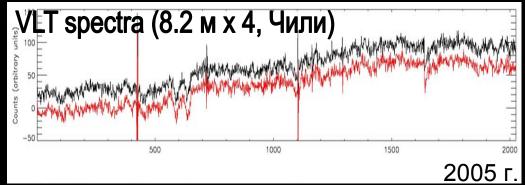


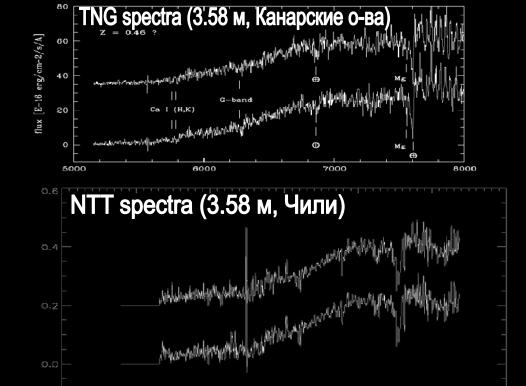


# **Объект CSL-1** 2002 г.









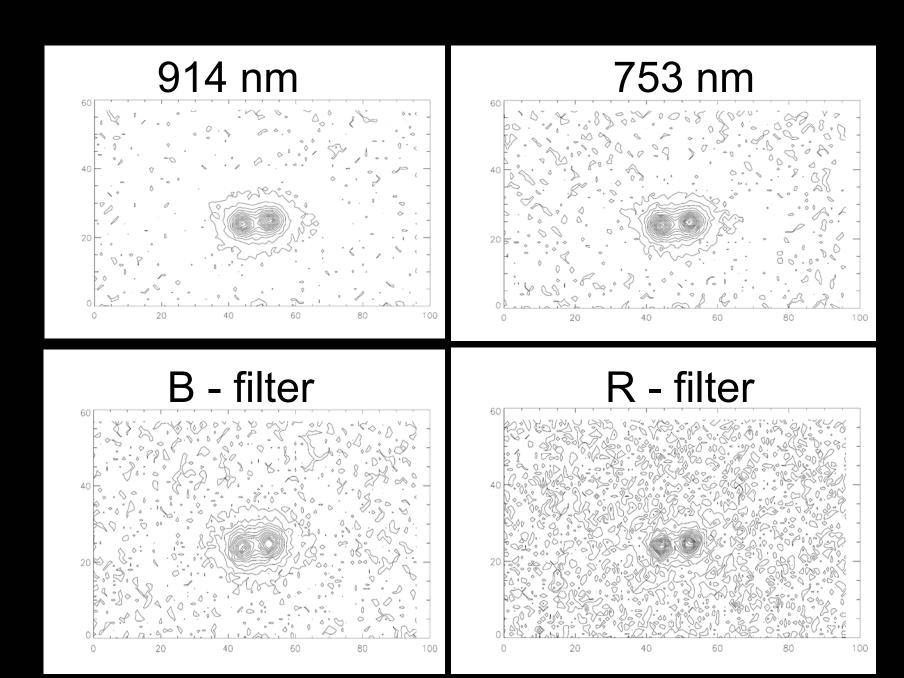
6000

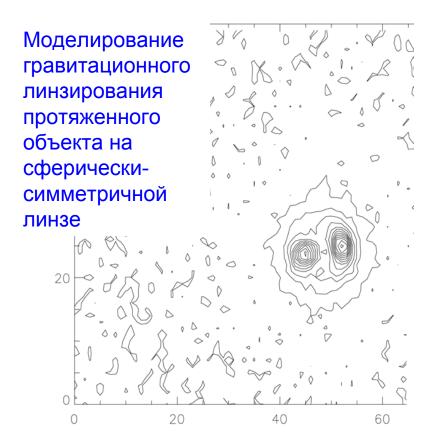
NTT spectro, versus wavelenght

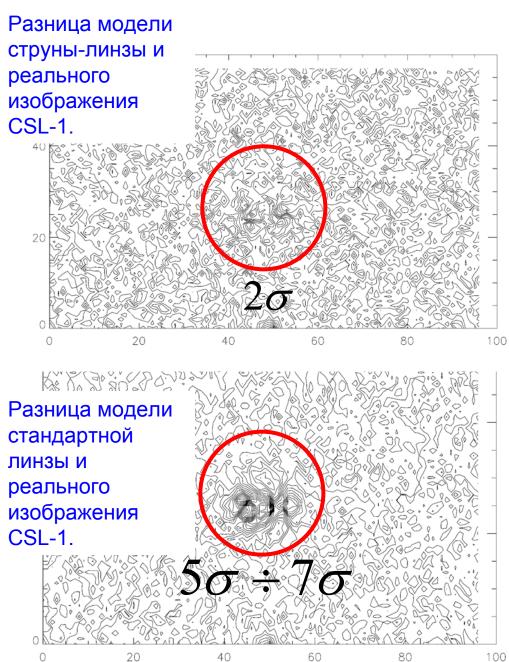
4000

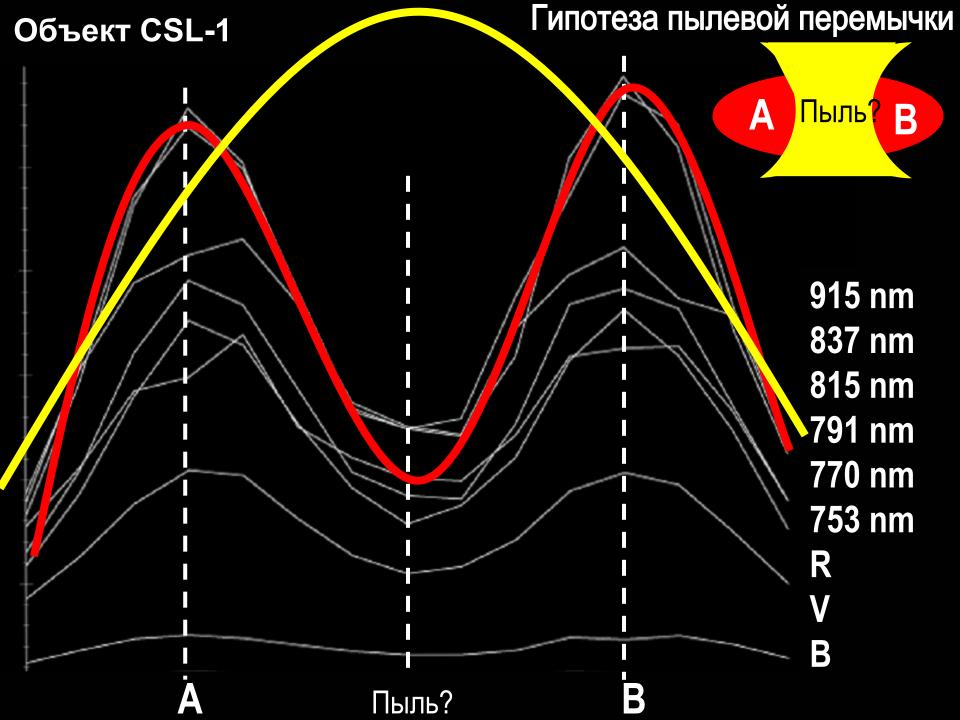
ಕರಿರರಿ

## Объект CSL-1



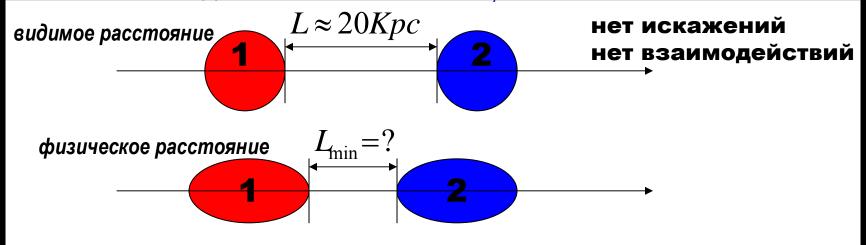




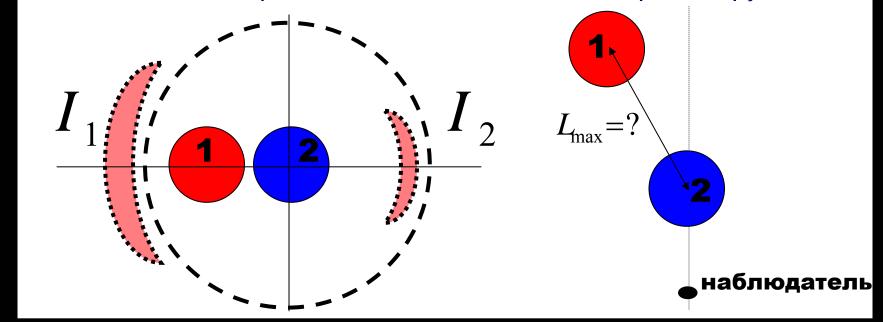


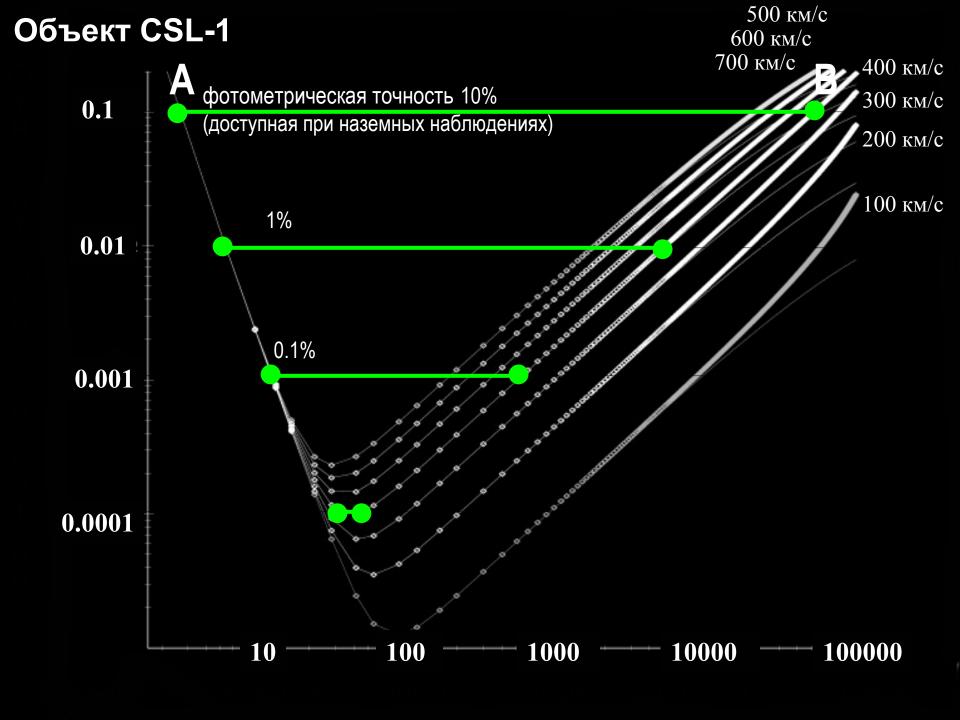
# Эффект проекции

Приливные взаимодействия компонент пары



Гравитационное линзирование одной компоненты пары на другой

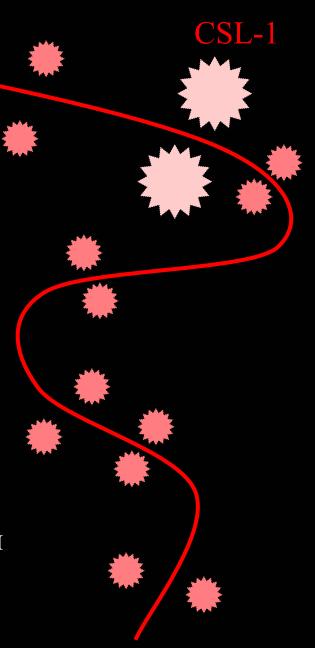




Для независимого подтверждения того, что в поле присутствует космическая струна, необходимо найти дополнительные события гравитационного линзирования (т.н., «новый млечный путь» из пар изображений фоновых галактик)

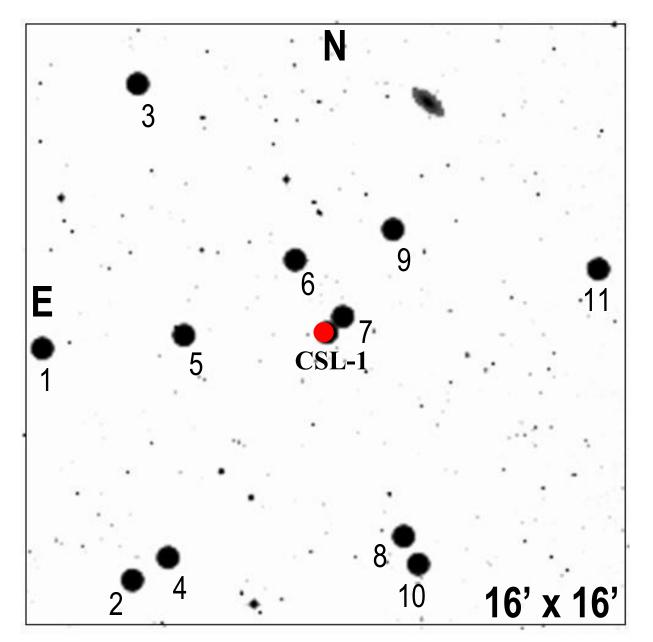


- 1. наличие не менее двух изображений с угловыми расстояниями от 1" до 4".5
- 2. одинаково отношение интенсивностей на различных частотах

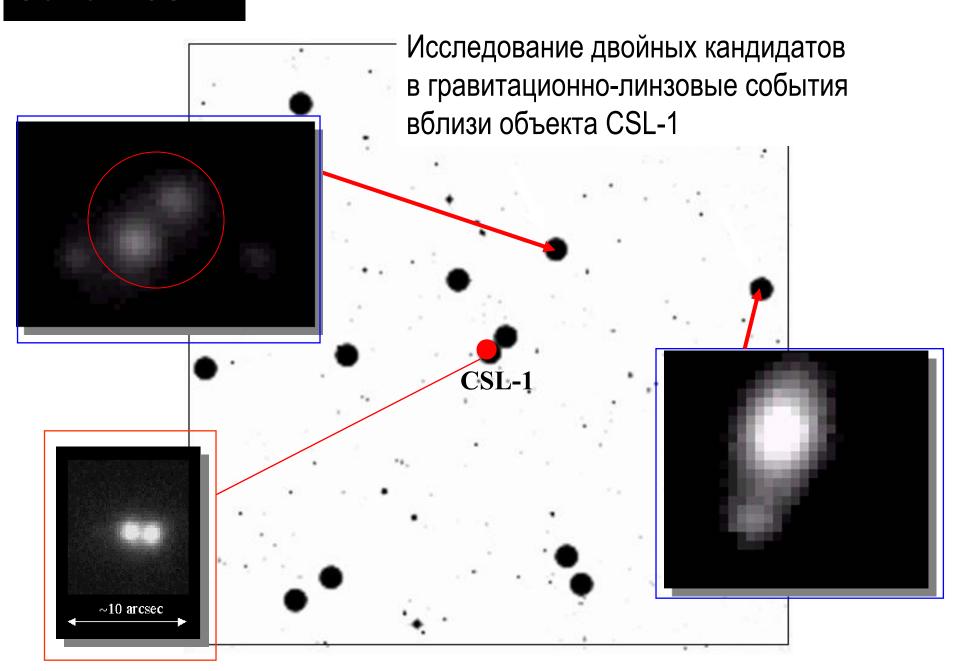


В случае наличия в поле космической струны ожидается порядка 10-ти событий гравитационного линзирования.

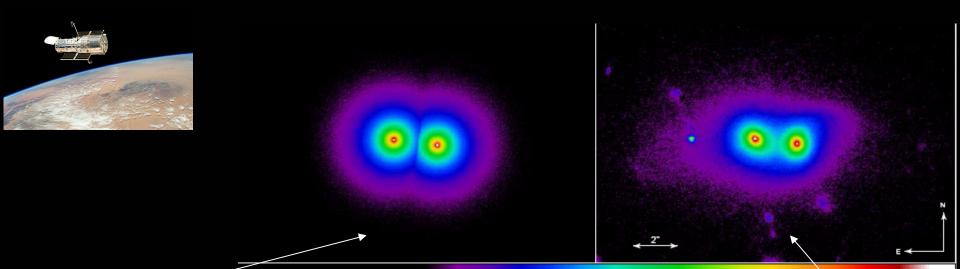
Без струны ожидаете не более 2-х таких событий.



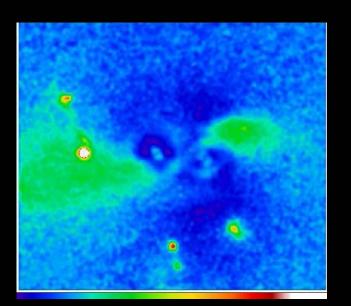
каждая точка на рисунке – двойной объект, кандидат в гравитационно-линзовое событие



# Наблюдения CSL-1 на HST



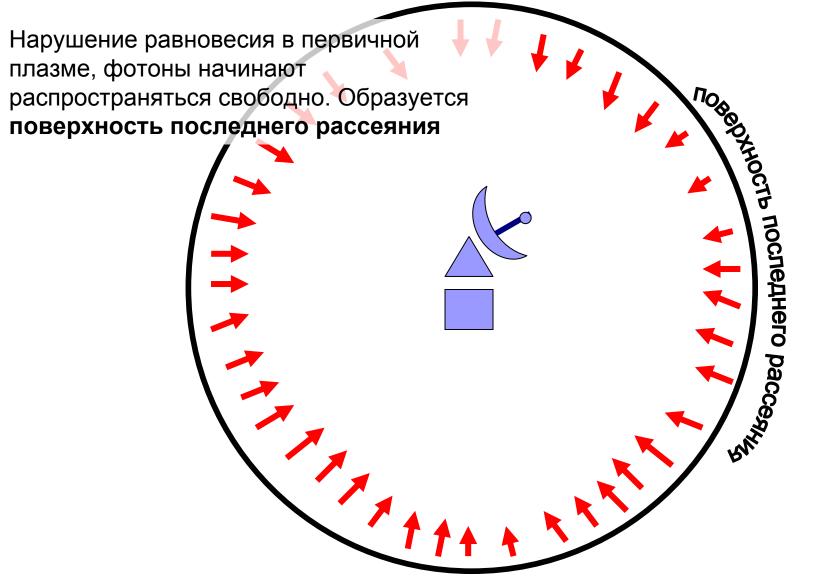
Моделирование гравитационнолинзового изображения эллиптической галактики с профилем яркости де Вокулера [r<sup>1/4</sup>]. Характеристики объекта CSL-1, шум HST. Разрешение 0.1"



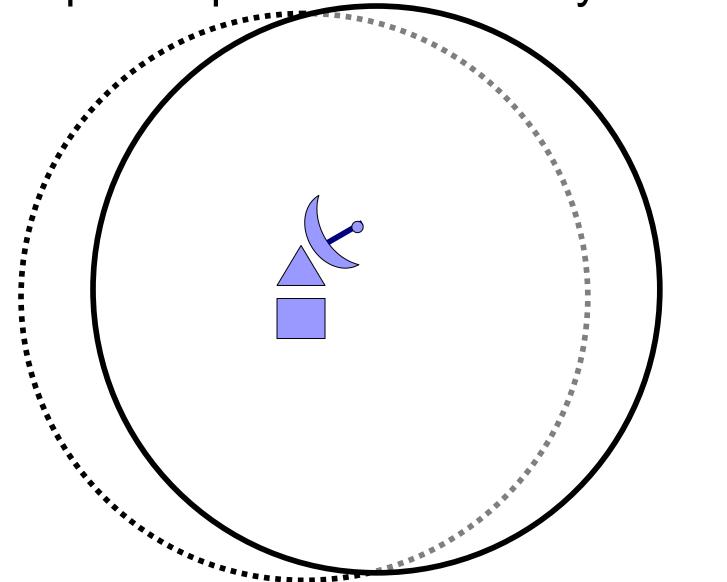
Область вблизи объекта CSL-1 на телескопе HST

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

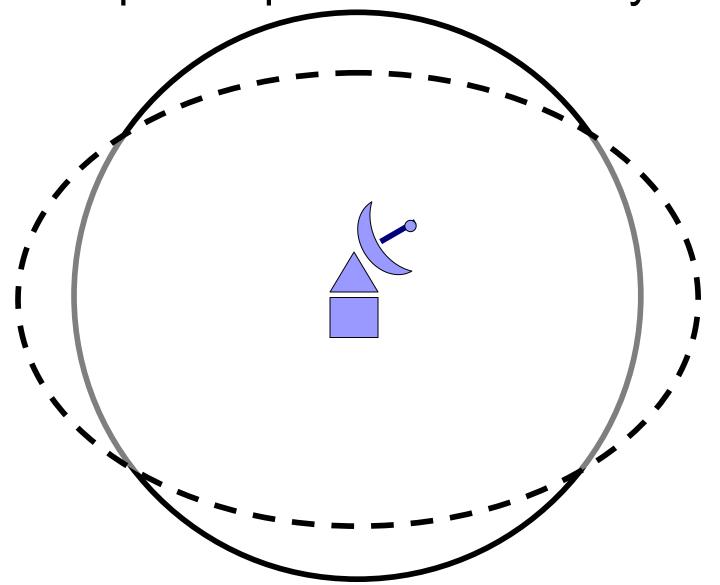
Анизотропия реликтового излучения



Анизотропия реликтового излучения

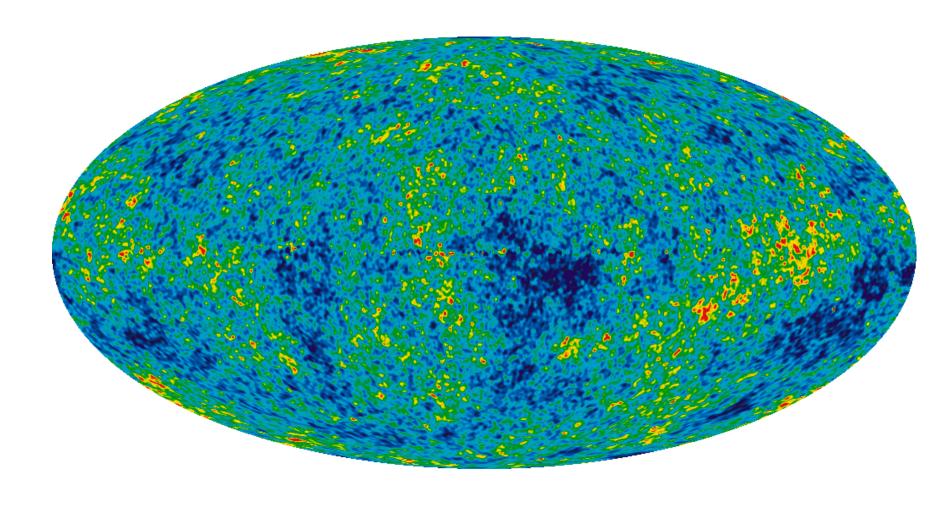


# Анизотропия реликтового излучения

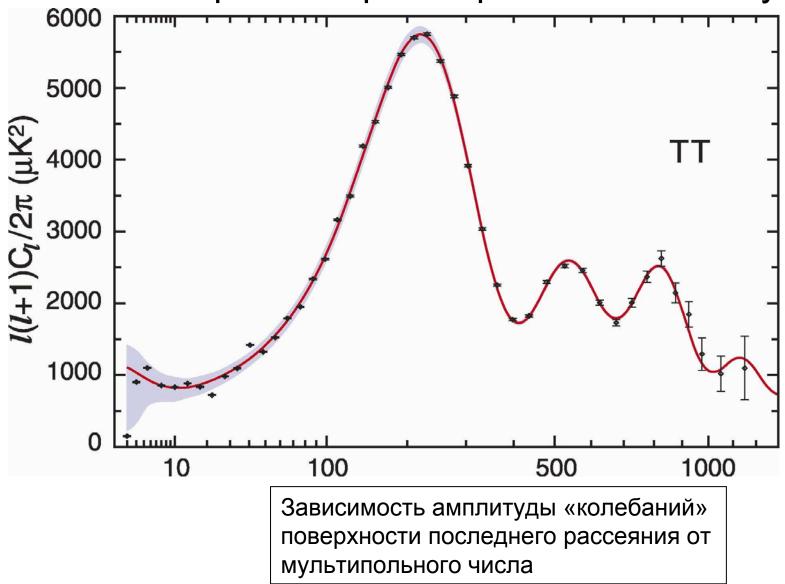


# Анизотропия реликтового излучения

Internal Linear Combination (ILC) map (9 лет наблюдений)



## Угловой спектр анизотропии реликтового излучения



# Космологическая модель

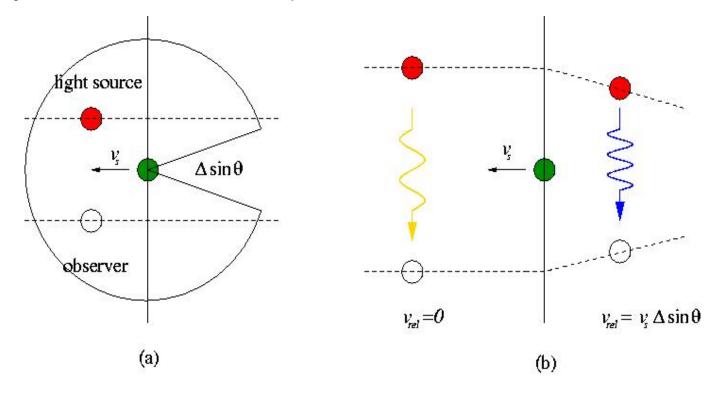
$$ds^{2} = c^{2}dt^{2} - a^{2}(t) \cdot (d\xi^{2} + d\eta^{2} + d\zeta^{2})$$

$$\left(\frac{a'(t)}{a(t)}\right)^{2} = \frac{8\pi}{3}G\rho_{c}\left[\Omega_{M}\left(\frac{a(t_{0})}{a(t)}\right)^{3} + \Omega_{\Lambda}\right]$$

# Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Механизм.

#### Эффект Кайзера-Стеббинса:

движущаяся космическая струна может приводить к красному или голубому смещению частоты фотонов.



# Анизотропия реликтового излучения, индуцируемая прямой движущейся космической струной

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{E_o - E_r}{E_r} = \frac{k^{\alpha} u_{\alpha(o)} - k^{\alpha} u_{\alpha(r)}}{k^{\alpha} u_{\alpha(r)}},$$

$$u^{\alpha} = \gamma \left( 1, \frac{v}{c} \cos(\psi - 4G\mu\varphi), \frac{v}{c} \sin(\psi - 4G\mu\varphi), 0 \right)$$

$$k^{\alpha} = \frac{\omega}{c} \cdot (1, \mathbf{n})$$

# Анизотропия реликтового излучения, индуцируемая прямой движущейся космической струной

$$\frac{\delta T}{T} = 4\pi G \mu \frac{v}{c} \cdot \left( sign(\Phi_r) - \frac{\Phi_r}{\pi} \right) \cdot \frac{\sin(\psi - \varphi)\sin\theta}{1 - \frac{v}{c}\cos(\psi - \varphi)\sin\theta},$$

$$\tan(\Phi_r) = \frac{\sin\varphi\sin\theta}{\cos\varphi\sin\theta - R},$$

$$R = \frac{\rho_s}{\rho_{ls}}$$

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

Анизотропия реликтового излучения, индуцируемая прямой движущейся космической струной. **Моделирование** 

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

 $(\textbf{R}, \textbf{v}, \boldsymbol{\psi})$ 

Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.9, 0.9, 90^{\circ})$ 

-0.99

Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.5, 0.9, 90^{\circ})$ 

Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.1, 0.9, 90^{\circ})$ 

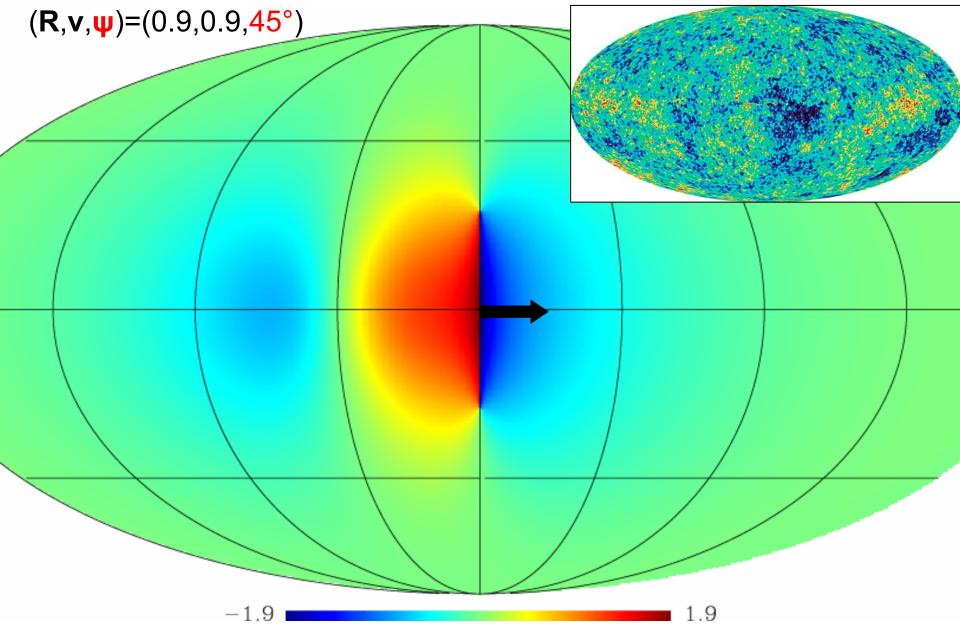
Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.9, 0.9, 90^{\circ})$ -0.99

Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.9, 0.5, 90^{\circ})$ 

-0.99

Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.9, 0.1, 90^{\circ})$ -0.99

Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.

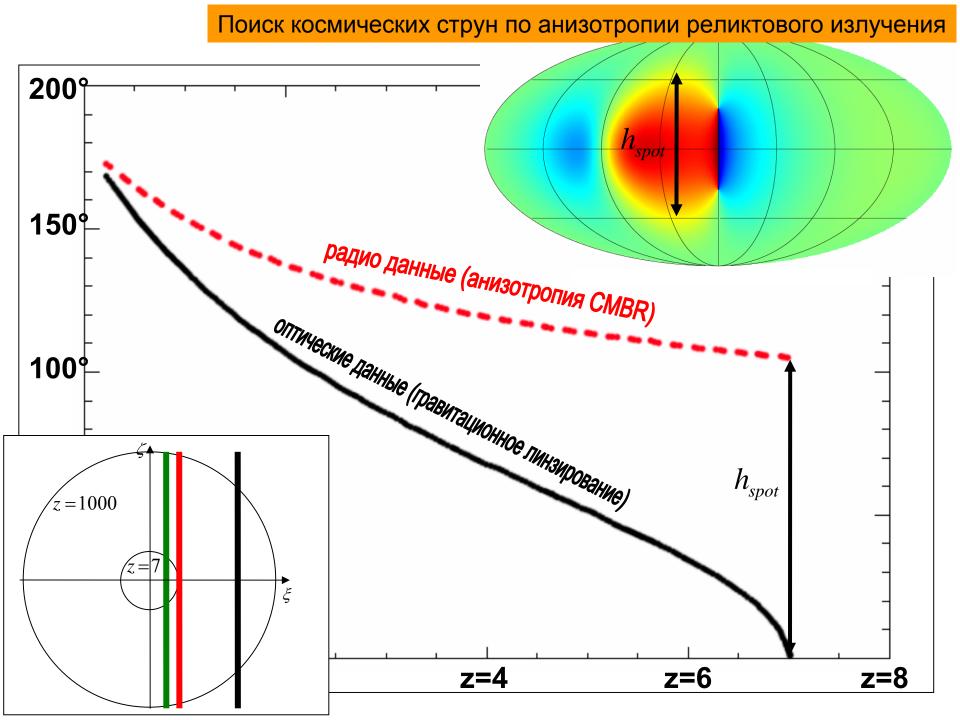


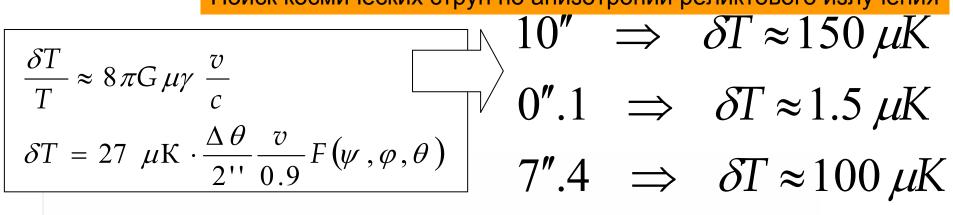
Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.9, 0.9, 90^{\circ})$ 

-0.99

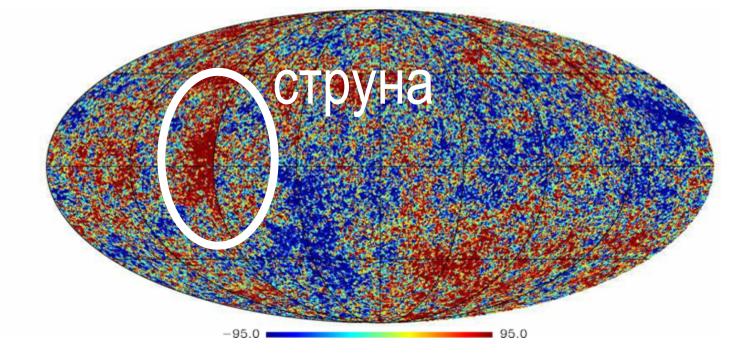
Анизотропия реликтового излучения на космической струне. Результаты моделирования.  $(\mathbf{R}, \mathbf{v}, \mathbf{\psi}) = (0.9, 0.9, 120^{\circ})$ 

-0.62





Анизотропия CMBR совместно с анизотропией от одиночной прямой струны. Моделирование:

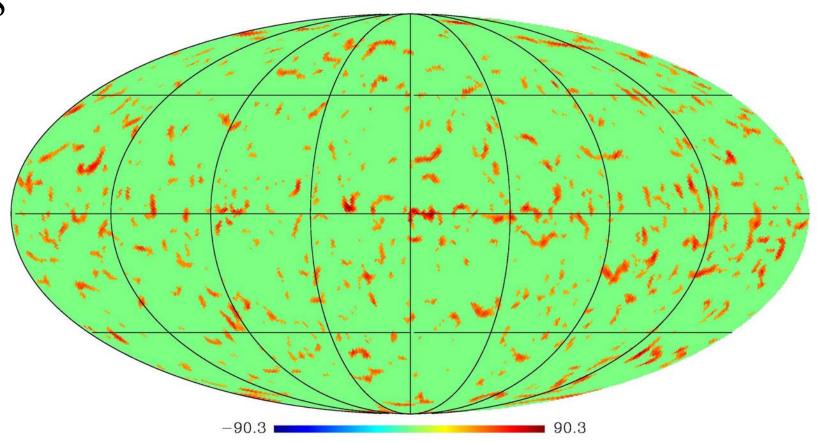


 $3\sigma$ 

 $\delta T \approx 38.2 \ \mu K$ 

2".8

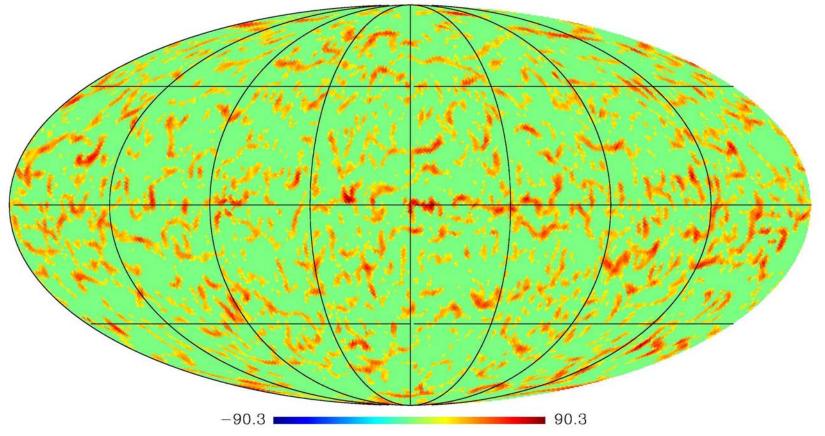
Локализация кандидатов в космические струны, найденных на карте ILC WMAP после анализа данных с помощью модифицированных функций Хаара.



 $2\sigma$   $\delta T \approx 25.3 \ \mu K$ 

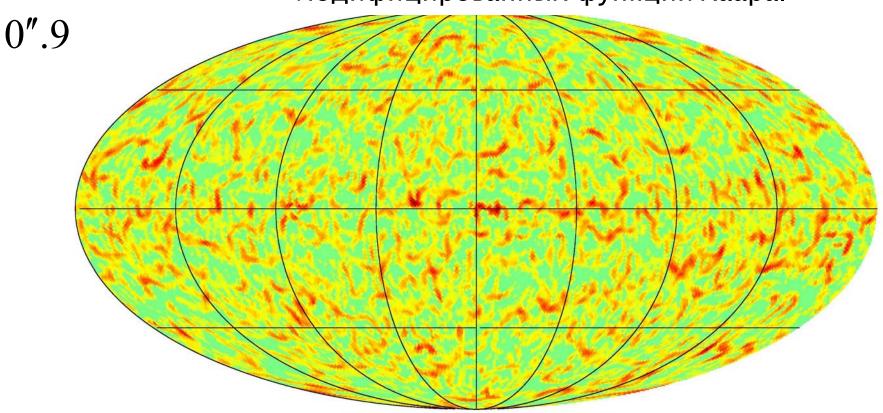
Локализация кандидатов в космические струны, найденных на карте ILC WMAP после анализа данных с помощью модифицированных функций Хаара.

1".9



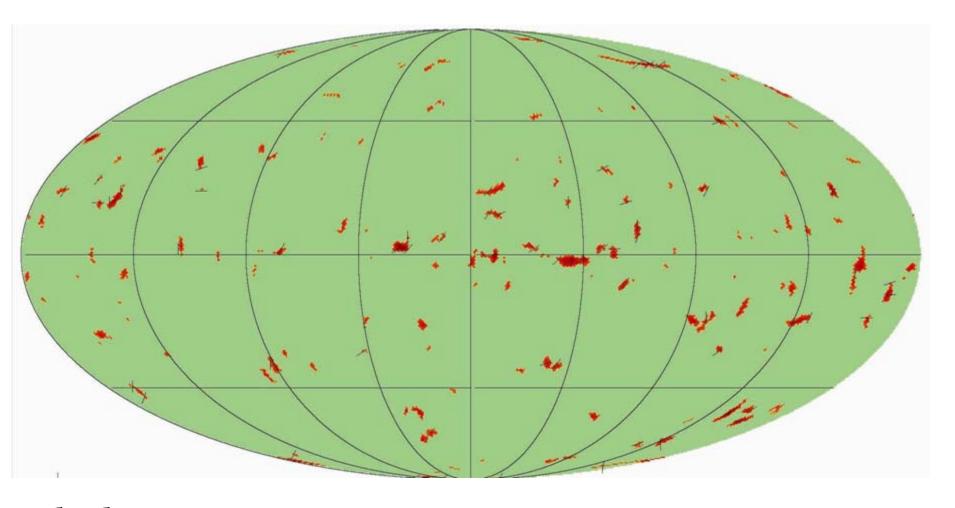
 $1\sigma$   $\delta T \approx 12.6 \ \mu K$ 

Локализация кандидатов в космические струны, найденных на карте ILC WMAP после анализа данных с помощью модифицированных функций Хаара.

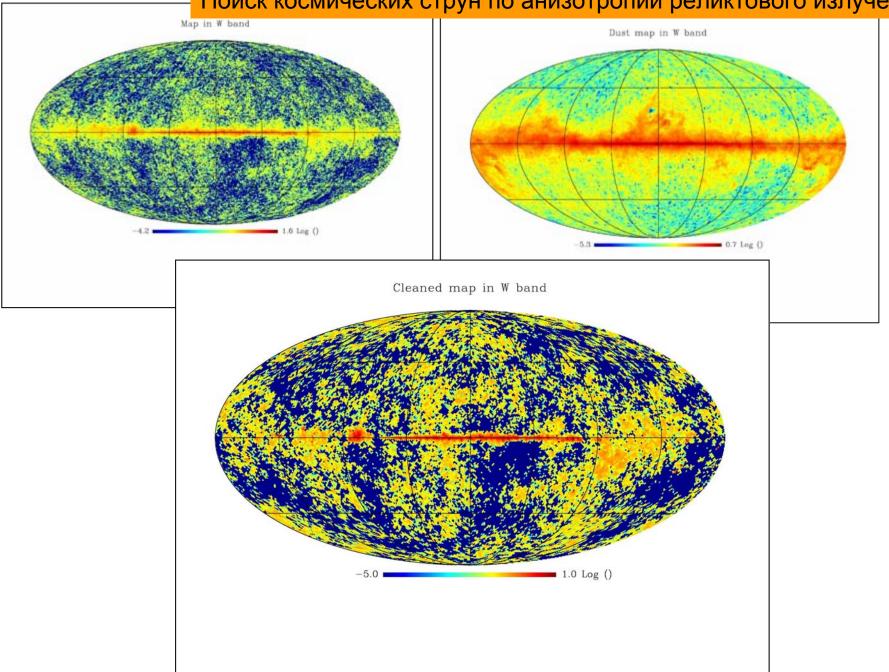


- 1. Наличие большого количества ложных кандидатов.
- 2. Кандидаты обладают малой длинной, то есть, в большинстве не могут быть обнаружены в оптических обзорах. Возможно, что отдельные структуры являются частью единого кандидата.

### Ограничение на энергии космических струн

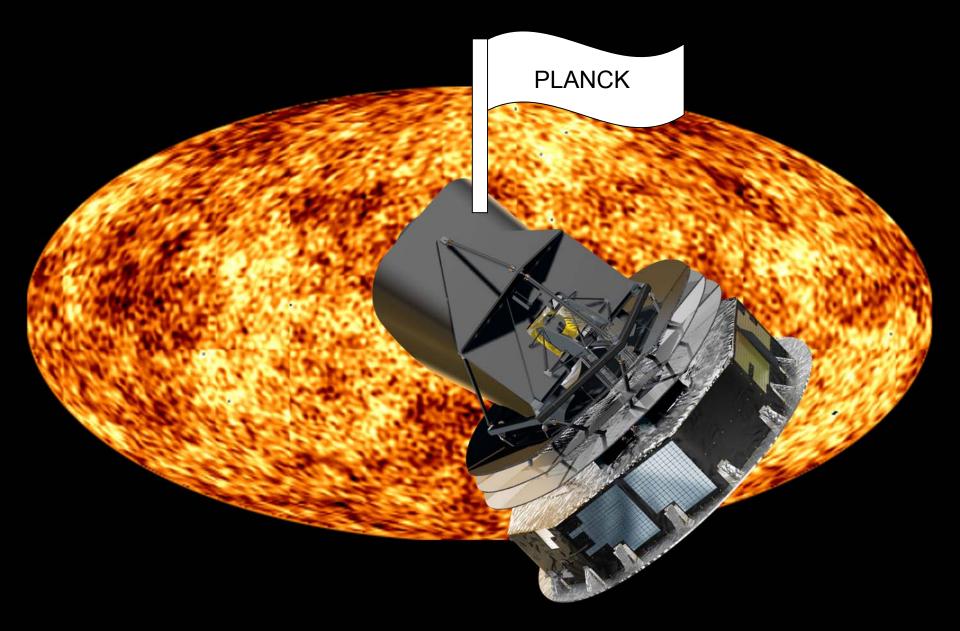


Обработка карты ILC WMAP с помощью модифицированных функций Хаара. Выше уровня  $\delta T \approx 40~\mu K$  следов космических струн нет.



## Основные выводы работы

- Создана теория гравитационного линзирования протяженных источников на космических струнах применительно к телескопам высокого углового разрешения
- Разработана теория для поиска космических струн в диапазоне дефицита угла от 0".1 до 6" по картам анизотропии реликтового излучения.
- Разработан новый алгоритм (основанный на модифицированных функциях Хаара) для выделения слабого сигнала космической струны на фоне стандартного адиабатического шума РИ на уровне от 10 μK (при уровне адиабатических возмущений в 100 μK). По результатам обработки радио данных составлен список кандидатов в космические струны. Предложенный алгоритм в 8 -10 раз чувствительнее к выявлению космических струн по сравнению с предложенными другими авторами. Он также дает жесткое ограничение на допустимую наблюдательными данными амплитуду анизотропии космических струн; не существует космических струн, генерирующих анизотропию выше 38.5 μK (в то время как предыдущие исследования, основанные на поисках негауссовости в данных анизотропии РИ, давали ограничения на амплитуду анизотропии космических струн порядка 100 μK).
- Составлен предварительный список кандидатов в космические струны с дефицитом угла примерно 1". Данные PLANCK позволят увеличить чувствительность метода до 0.3", а также исследовать В-моду поляризации на струнах.



Спасибо за внимание!