

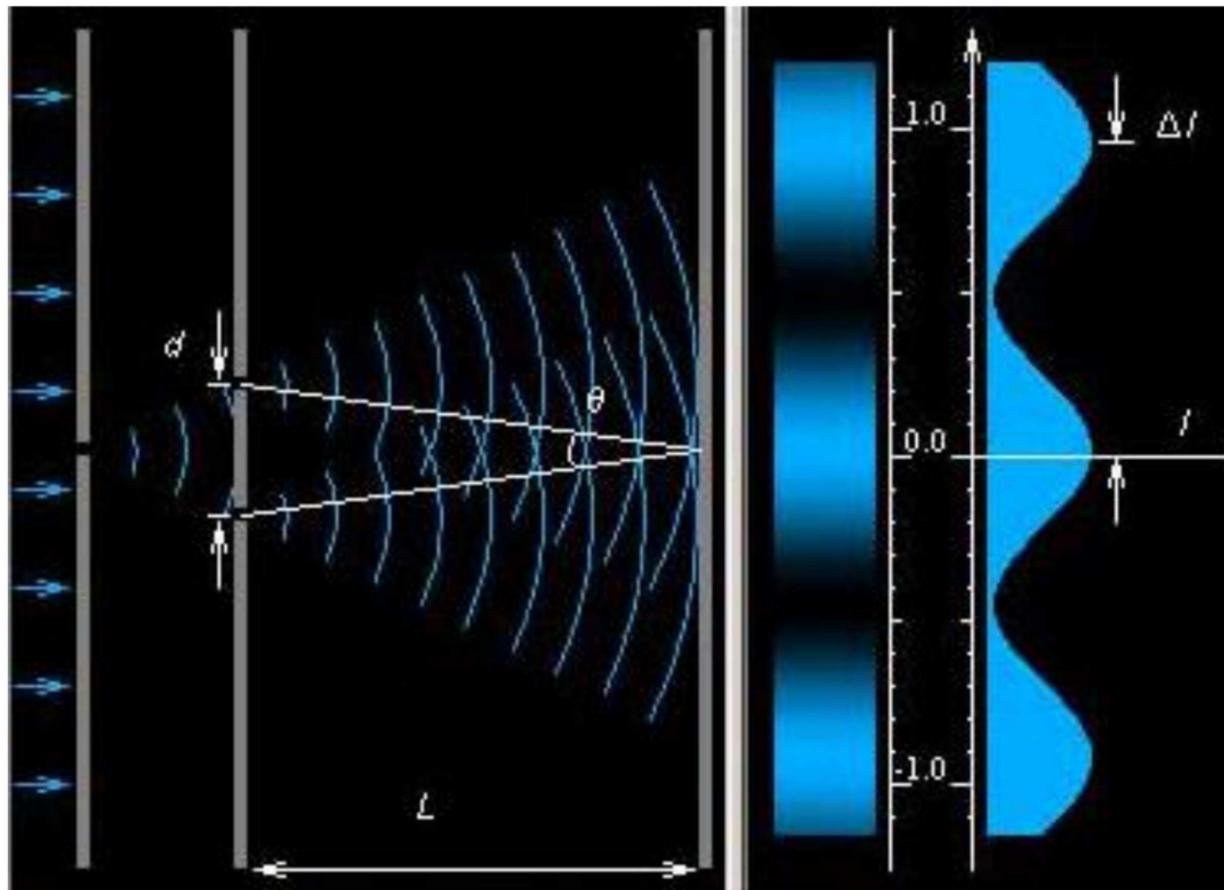
Проект “РадиоАстрон”: основные результаты

Бургин М.С. (Астрокосмический Центр ФИАН)

- Статистическая оптика и РСДБ
- КРТ, Спектр-Р, РадиоАстрон
- Астрономия
 - “Томография” неоднородностей межзвездной плазмы
 - Внегалактические источники в континууме
 - Мазерные источники в линиях OH и H₂O
- Физика: грав. замедление времени (проверка ОТО)

Статистическая оптика
и
радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами
(РСДБ)
за 5 минут

"Лепестки" в опыте Юнга



Полное электродинамическое описание: $E(\vec{r}, t)$

В статистической оптике свойства поля излучения описывается функцией взаимной когерентности

$$\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = \Gamma_{12}(\tau) = \langle u(\vec{r}_1, t) u^*(\vec{r}_2, t + \tau) \rangle,$$

где аналитический сигнал

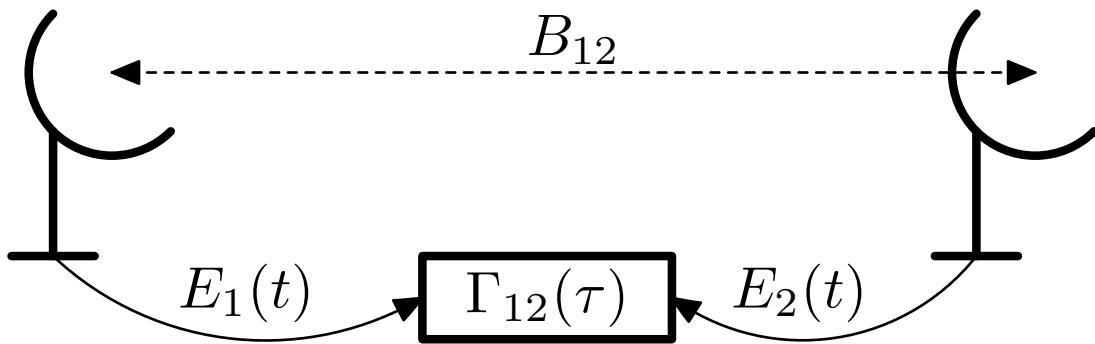
$$u(\vec{r}, t) = E(\vec{r}, t) + \frac{i}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E(\vec{r}, \zeta) d\zeta}{\zeta - t}$$

Расчет лепестков:

характеристики источника $\rightarrow \Gamma_{12}(\tau) \rightarrow$ лепестки

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР С НЕ ОЧЕНЬ ДЛИНОЙ БАЗОЙ

$$I(\vec{n}, f) =$$



Коррелятор:

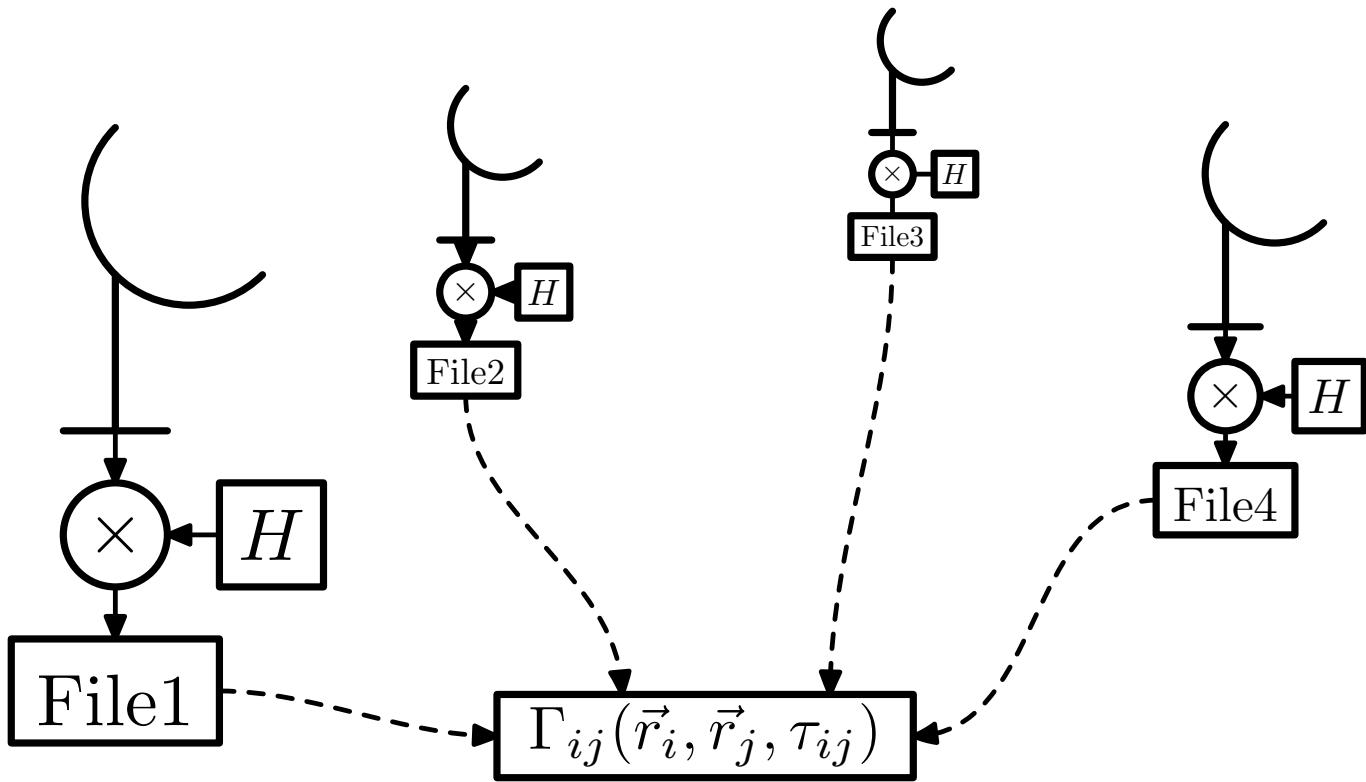
$E(\vec{r}_1, t), E(\vec{r}_2, t) \rightarrow$ лепестки $\rightarrow \Gamma_{12}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2, \tau)$,
 $\Gamma_{12}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2, \tau) \xrightarrow{\text{теорема Ван Циттерта - Цернике}} I(\vec{n}, f)$
Максимальное разрешение $\approx \lambda/B_{12}$

Матвеенко Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б.

О радиоинтерферометре с большой базой.

Изв. ВУЗов. Радиофизика, т.8, 4, с. 651-654, 1965.

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ (РСДБ)



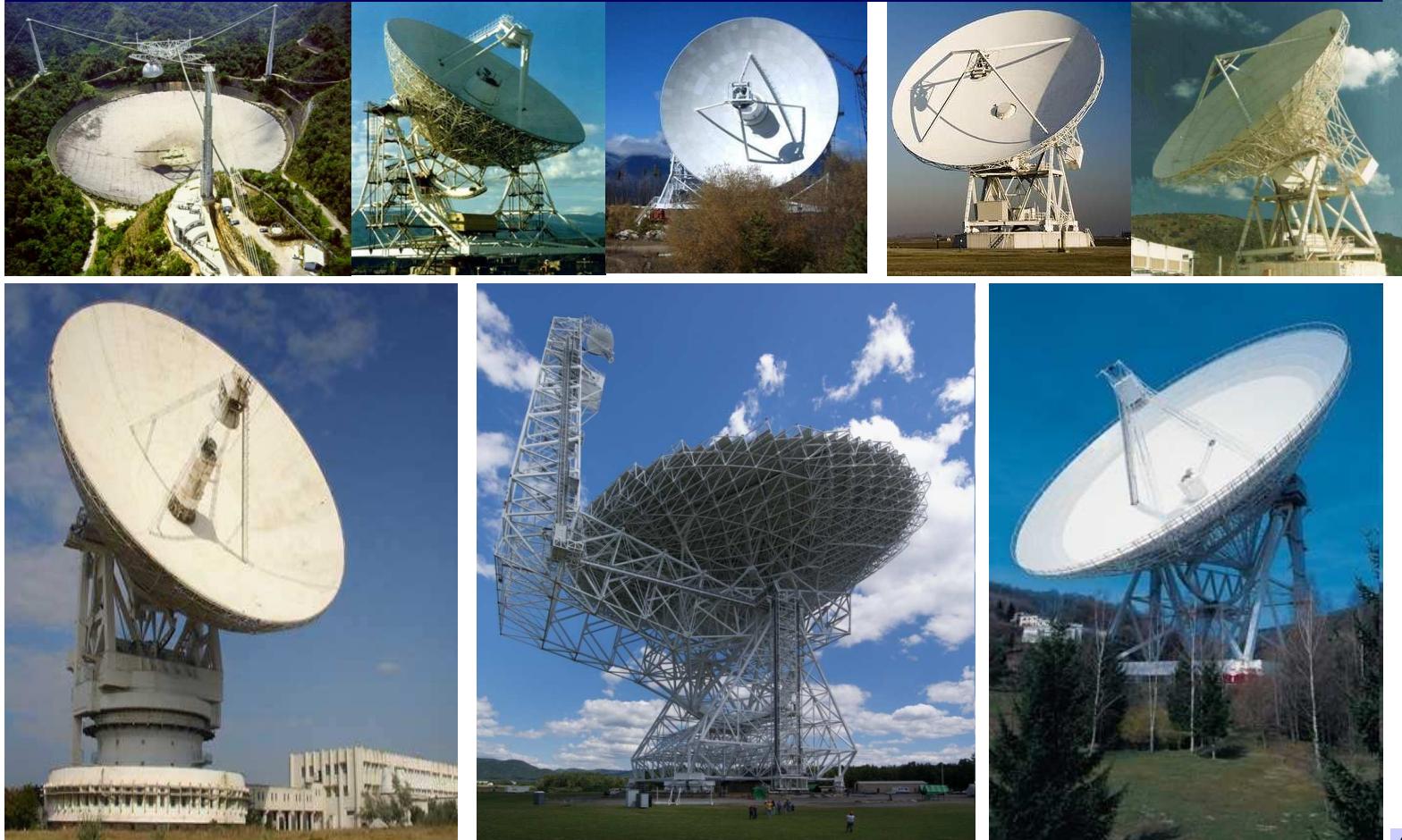
Для наземных РТ база ограничена только размером Земли

РадиоАстрон

- Спутник Спектр-Р
 - Платформа (НПОЛ)
 - КРТ (космический радиотелескоп, АКЦ ФИАН)
 - Научные станции слежения (НСС) в Пущино и ГВ
 - Наземные радиотелескопы (по всему миру)
 - Центр хранения и обработки РСДБ данных (АКЦ)
 - Система экспресс-диагностики КРТ (АКЦ)
- + РТ системы связи и определения орбиты, лазерная локация, . . .

Наземное РСДБ плечо: более 40 телескопов

Российская сеть Квазар, телескопы Европы, США, Южной Африки, Австралии, Китая, Кореи, Японии...



Спектр-Р

- Раскладная антена КРТ ϕ 10 м
- Приемники (1.35 см, 6 см, 18 см, 92 см) \times (2 канала)
- Н мазер, Rb мазер, аппаратура синхропетли
- Преобразователь радио \rightarrow дискретный видеосигнал
- Высокоинформационный радиокомплекс (ВИРК), ϕ 1.5 м, скорость передачи 144 мбит/с

Запущен 2011-07-18

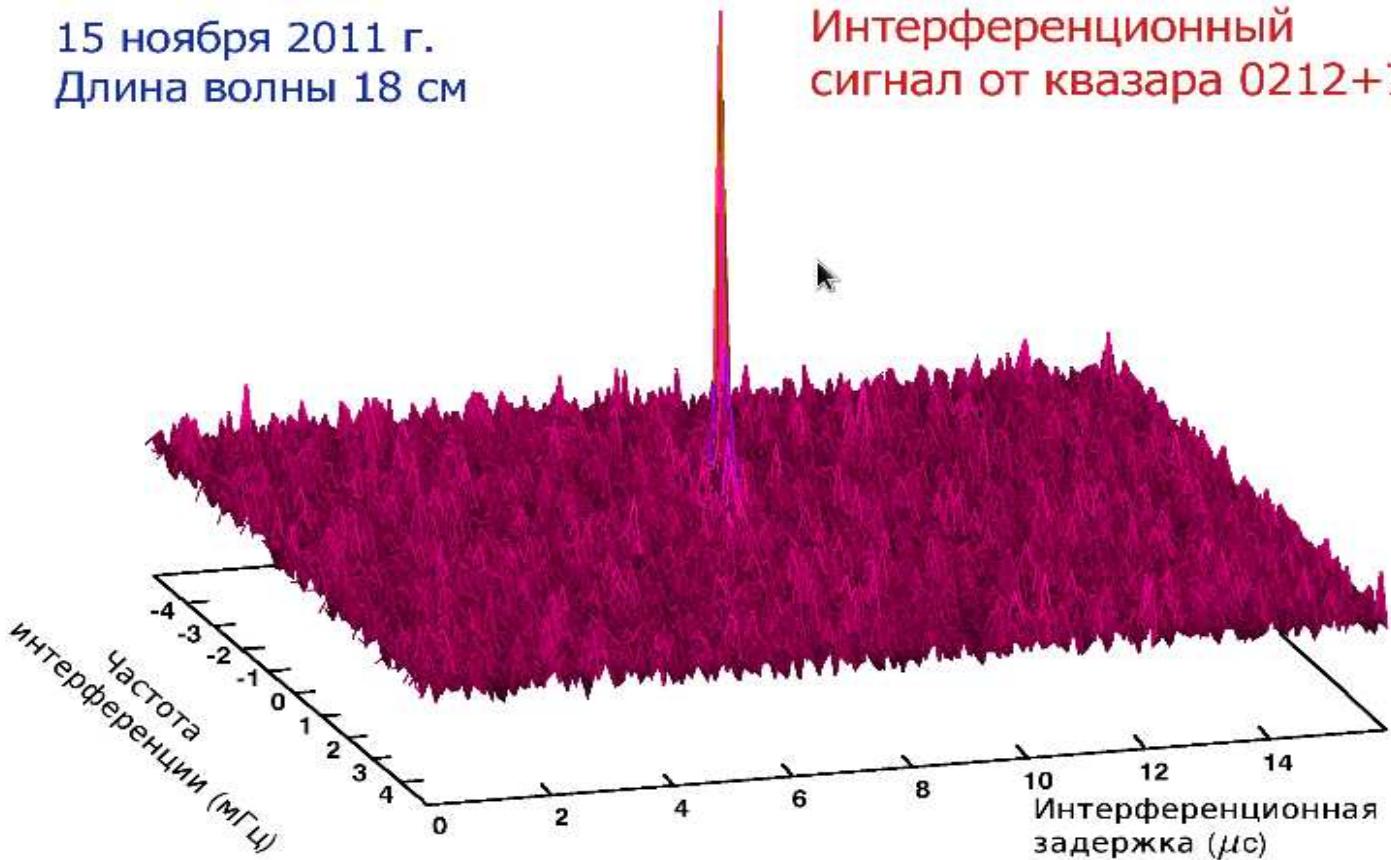
Перигей 7000 – 80 000 км, апогей 270 000 – 370 000 км

РАДИОАСТРОН

100 000 км от Земли

15 ноября 2011 г.
Длина волны 18 см

Интерференционный
сигнал от квазара 0212+735



“Томография” межзвездной плазмы
(пульсары и активные ядра галактик)

Турбулентность в межзвездной плазме



Флуктуации электронной плотности N_e



Флуктуации показателя преломления $n \approx 1 - A\lambda^2 N_e$

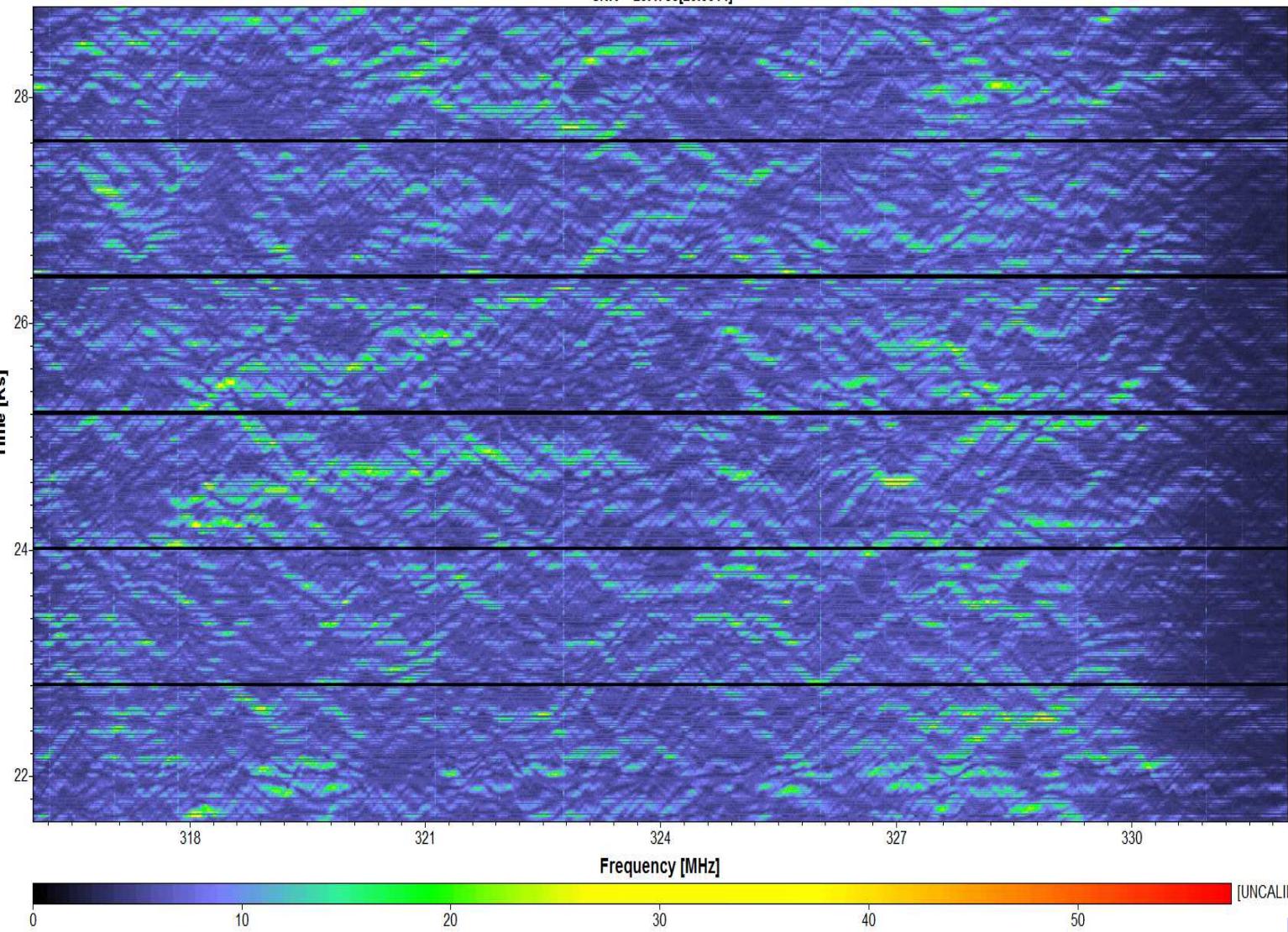


Искривление траектории лучей

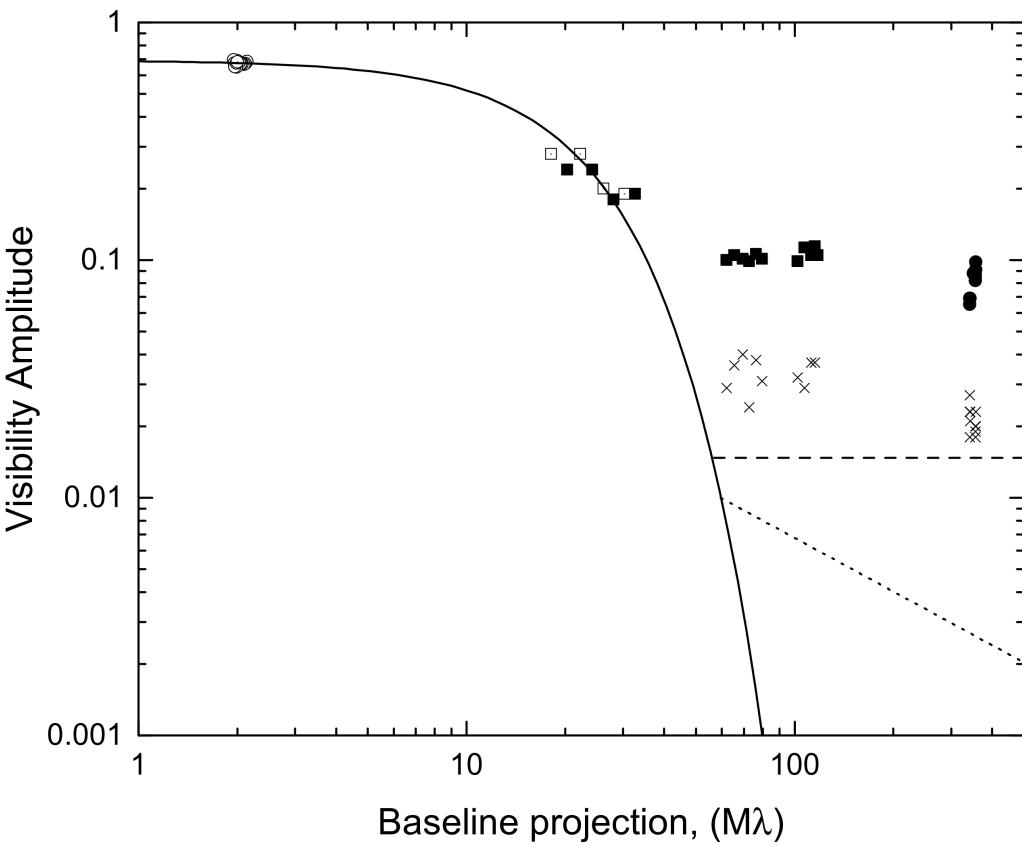


“Расплывание” изображения, изменение интенсивности из-за [де]фокусировки и – для пульсаров – “расплывание” импульсов по времени.

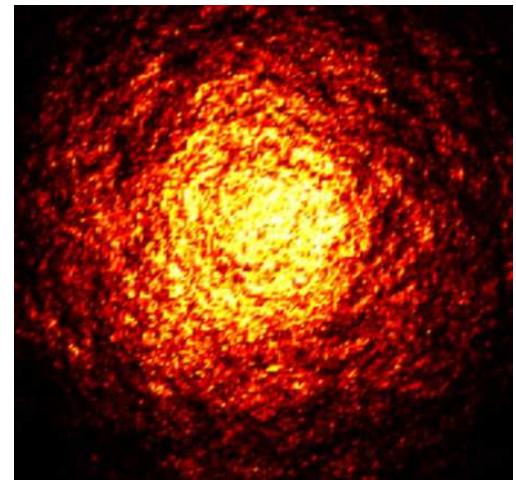
B1133+16, LL-POL, Start frequency 316MHz, Baseline 2-2, Max. val.: 57.3499 at (3.185E+8,25489.7129)[3.185E+8,25489.7129]
SNR = 20.4785[23.3314]



Микроструктура кружка рассеяния



Модельный расчет
структуре кружка

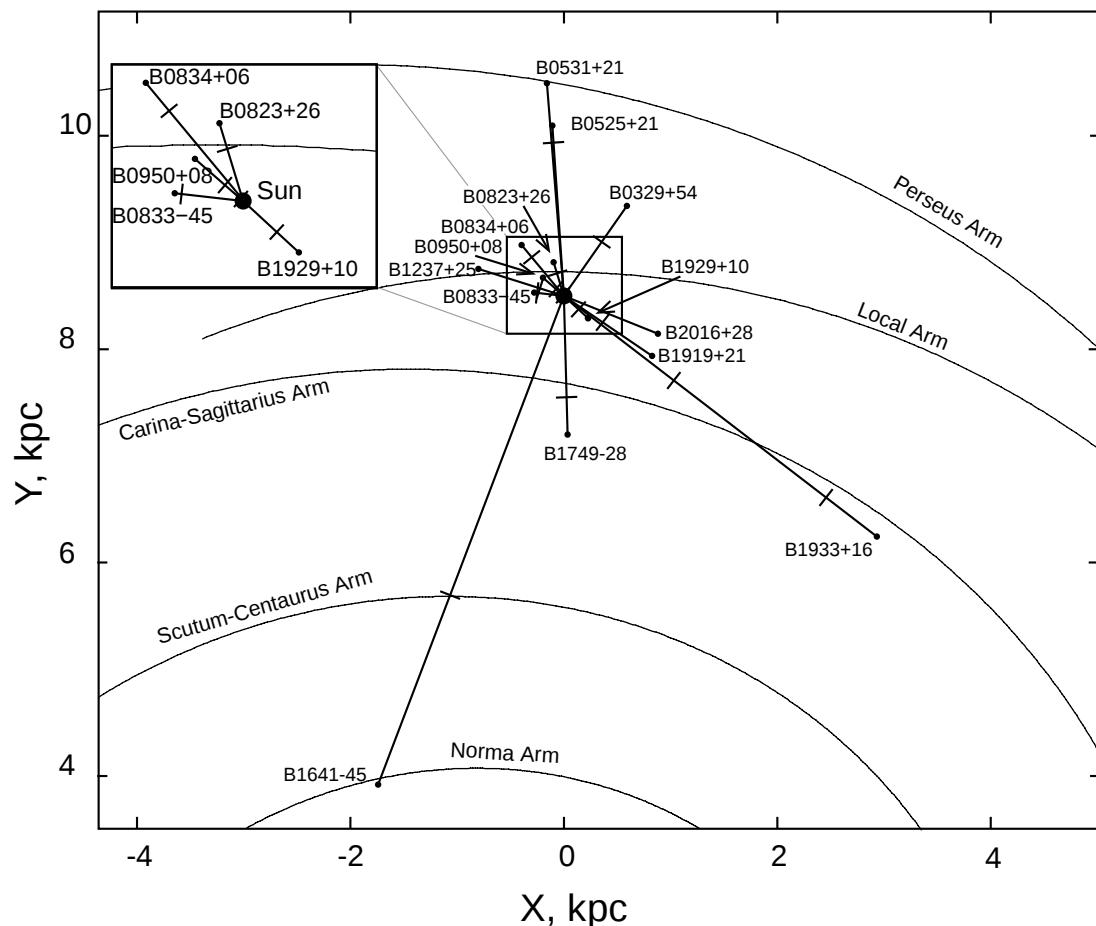


Сверхразрешение ("межзвездный интерферометр").

Сpirальная галактика, похожая на “Млечный путь”



Расположение "экранов" относительно спиральных рукавов



$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ св.г.} = 206265 \text{ а.е.} = 9.5 \cdot 10^{17} \text{ см}$$

Наблюдения активных галактических ядер

- Центральная машина: черная дыра с аккр. диском.
- Джеты: потоки плазмы и релятивистских электронов, вытекающие вдоль линий магнитного поля из центра.

Стандартная модель излучения в радиодиапазоне:

Магнитное поле +
релятивистские электроны } \Rightarrow Синхротронное излучение

В этой модели обратный эффект Комптона ограничивает яркостную температуру T_b :

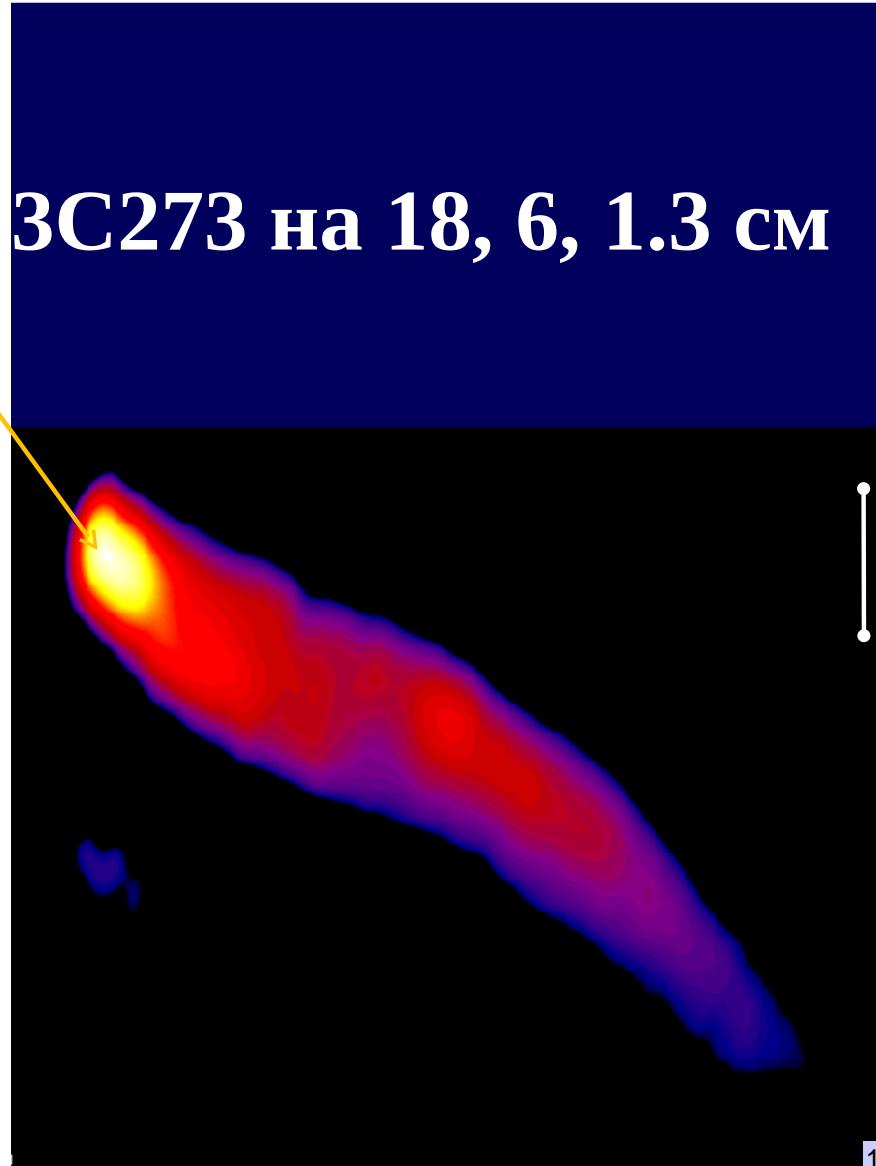
Радиоизлучение +
релятивистские электроны } \Rightarrow X- и γ -излучение

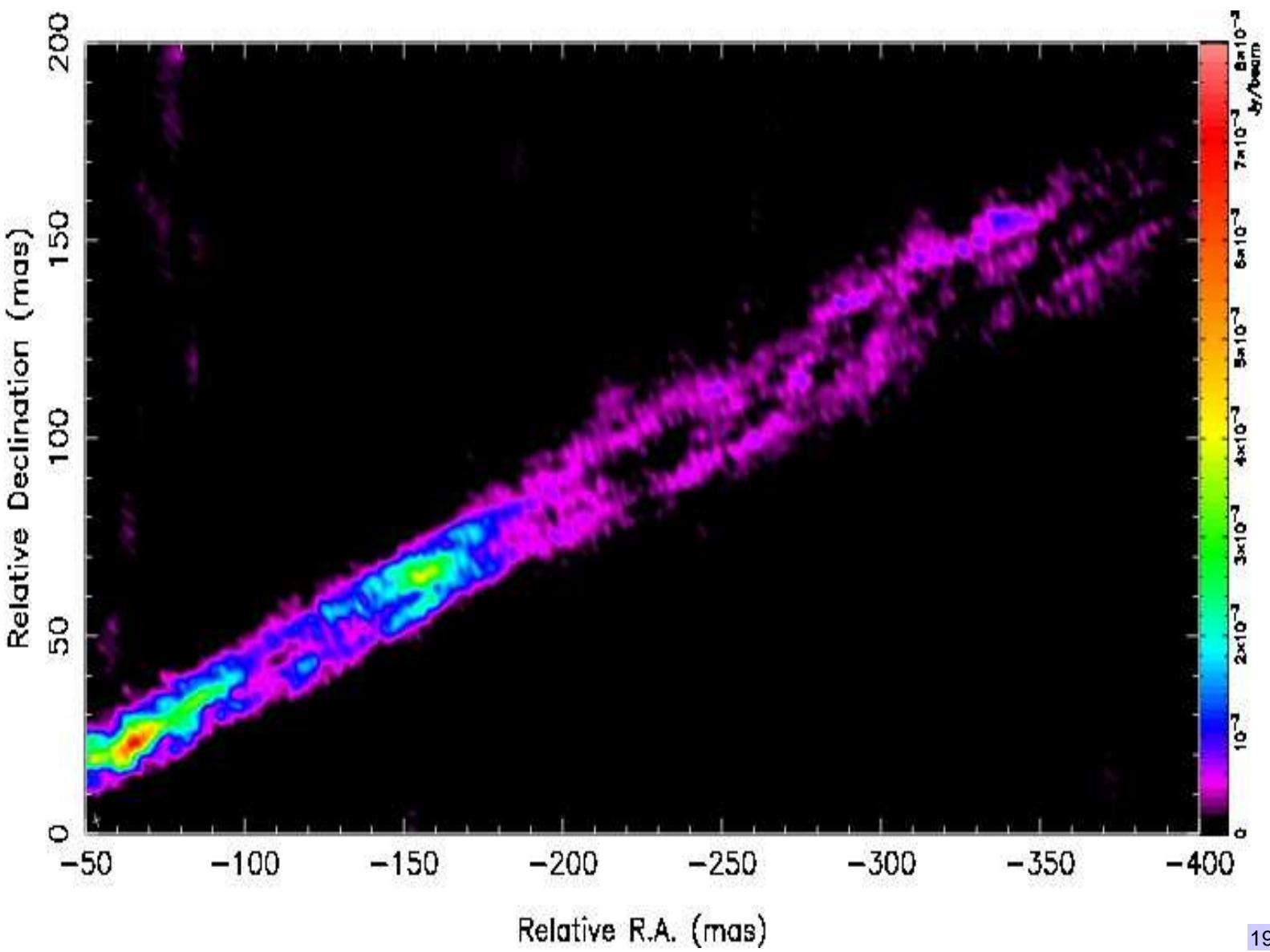
Яркостная температура
ядра: $2\text{-}4 \cdot 10^{13}$ К.

Источник фотонов –
синхротронное
излучение.

Ограничение на T_{br} –
обратный
Комpton-эффект

Комptonовский предел
в $10^{11.5}$ К нарушается.





Наблюдения в линиях H_2O (1.3 см) и OH (18 см)

Большой поток в узком диапазоне частот от области
малого размера ($T_b > 10^{12} \text{ K}$)



вынужденное излучение

Механизмы “накачки” – создания инверсной населенности:

- радиационная, излучение от соседних зон HII
- столкновительная, в ударных волнах

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Мазеры наблюдаются в:

- Областях звездообразования
- Околозвездных оболочках вокруг старых звезд
- Областях взаимодействия остатков сверхновых с молекулярными облаками
- Других галактиках (мегамазеры, области звездообразования)

Красным шрифтом выделены объекты, наблюдаемые с интерферометром “РадиоАстрон”.

Космические мазеры

Космические источники, в которых происходит усиление излучения в линиях молекул за счет вынужденных процессов.

$$I = I_0 \exp(-\tau), \tau < 0$$

Мазерные линии молекул, наблюдавшиеся в ходе проекта “РадиоАстрон”:

ОН ($\nu=1665$ и 1667 МГц)
H₂O ($\nu=22235.08$ МГц)

Мазеры H₂O в Галактике

- Наблюдалось 7 источников с базами до 9.6 $\phi \oplus$
- Наблюдения на РадиоАстроне достигли предела T_b (насыщение мазера и/или влияние турбулентности?)
- В источнике Сер А – области звездообразования – обнаружены два ярких пятна размером \approx Солнце (протозвезды?) → внутренний масштаб турбулентности ≈ 0.1 а.е.

Мегамазер H₂O в галактике NGC 4258



Галактика на расстоянии 7.6 Мпс, активное ядро и кеплеровский диск.

Наблюдалась 13 раз, 11 раз – успешно.

Максимальная длина базы 340000 км (26.7 диаметров Земли), разрешение $8 \cdot 10^{-6}$ секунды дуги (1.5 см на поверхности Луны, 62 а.е. в NGC 4258).

Показано, что диск имеет очень малую толщину, обнаружено несколько излучающих областей размером ≈ 100 а.е., ширина линий ≈ 5 км/с, $T_b > 3.5 \cdot 10^{14} K$

ПРОВЕРКА ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ: ГРАВИТАЦИОННОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ ХОДА ЧАСОВ

$$\frac{\Delta T_{\text{grav}}}{T} = \frac{\gamma M_{\oplus}}{r_{\oplus} c^2} (1 + \epsilon) \approx 10^{-9} (1 + \epsilon),$$

где в ОТО $\epsilon = 0$.

Известно, что $\|\epsilon\| < 1.4 \cdot 10^{-4}$, цель – точность $(1-2) \cdot 10^{-5}$

Средства для увеличения точности:

- Комбинация (бортовой Н-мазер)/петля
- Лазерная локация из Грасса
- РСДБ наблюдения самого спутника
- “Вылизование” аппаратуры на НСС