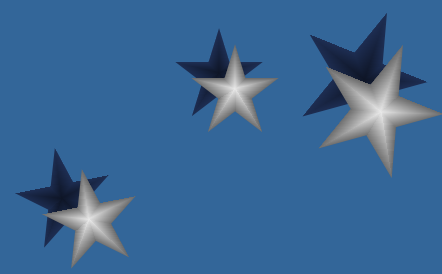
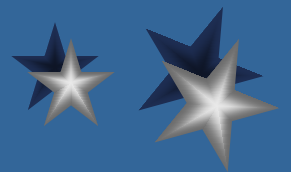


**Радиоастрономия и
радиоинтерферометрия со
сверхдлинными базами**





Радиоастрономия — раздел астрономии, в котором небесные объекты — Солнце, звёзды, галактики и др. — исследуются на основе наблюдений излучаемых ими радиоволн в диапазоне от долей миллиметра до нескольких километров.



История радиоастрономии

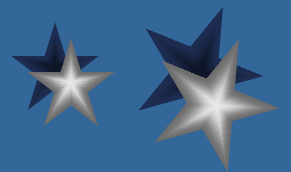


1931 г. — К. Янский (США) на волне 14,6 м случайно обнаружил ощутимое радиоизлучение Млечного Пути.

1942 г. — обнаружено радиоизлучение спокойного Солнца.

1945 г. — обнаружено радиоизлучение Луны.

1946 г. — открыт первый «дискретный» (т. е. малого размера) источник радиоизлучения в созвездии Лебедя.



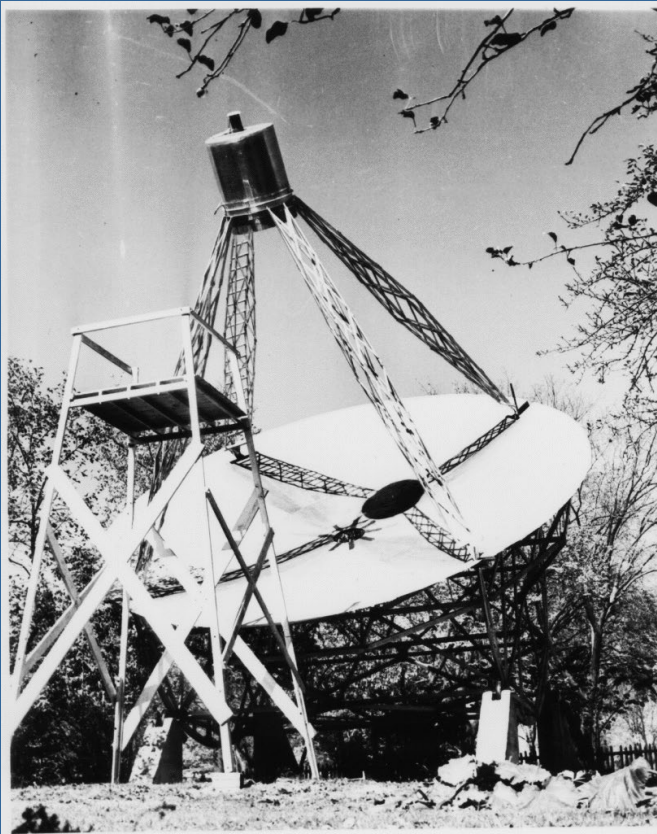
Антенна Карла Янского - 1931



(Реконструкция в Грин Бенк)



Гроут Ребер – пионер радиоастрономии



1937 - Wheaton, IL

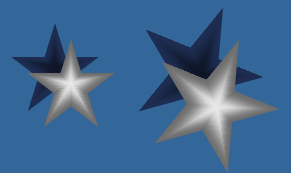


Гроут Ребер (1911-2002)



Эффельсберг

100 м



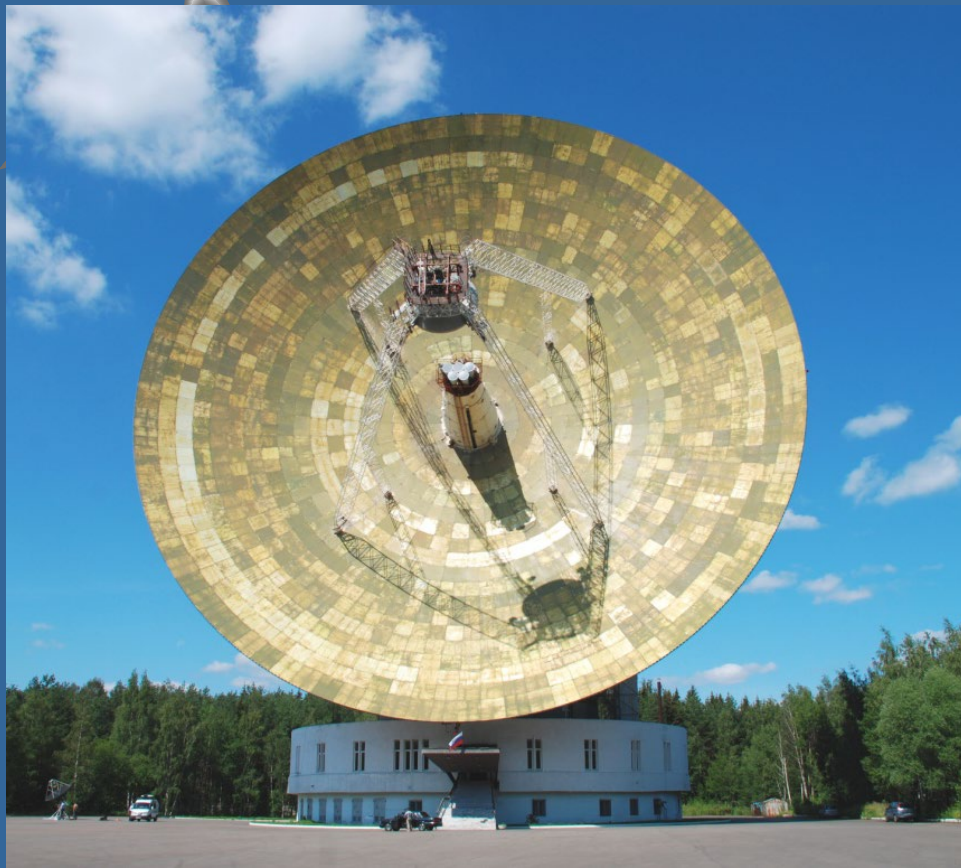


Евпатория

РТ-70

Уссурийск





Медвежьи Озера

РТ-64



Калязин



Пушино



Использовалась как наземная станция слежения по проекту Радиоастрон

РТ-22

Симеиз



Участвует в наблюдениях в сети IVS

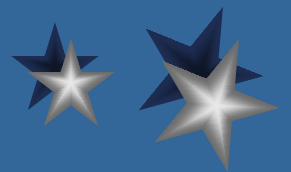
★ Радиотелескопы РСДБ-комплекса «Квазар-КВО»

Светлое

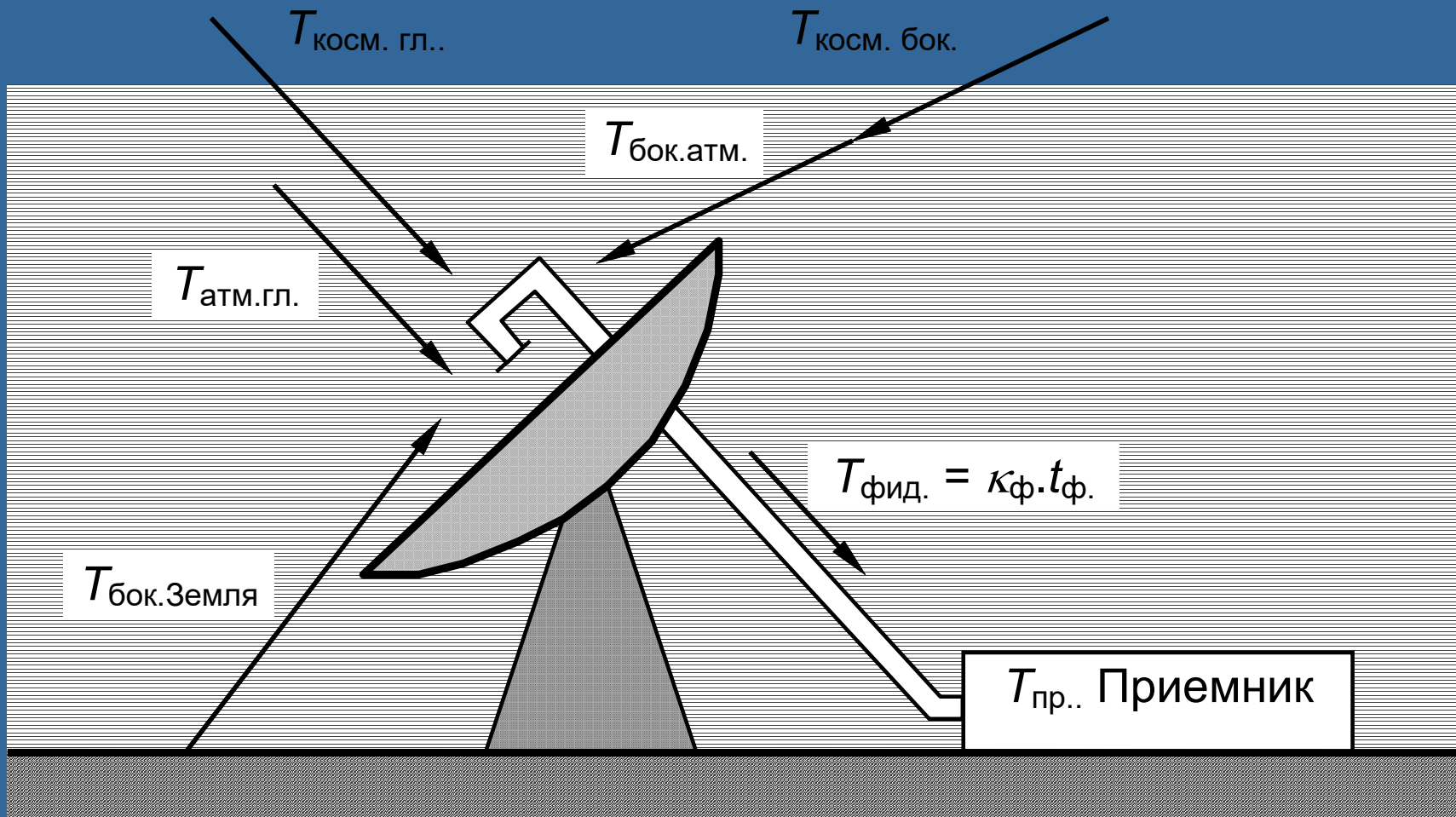
Бадары



Зеленчукская



Шумовая температура системы



$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш а}} + T_{\text{ш пр.}} + T_{\text{ш фид.}}$$



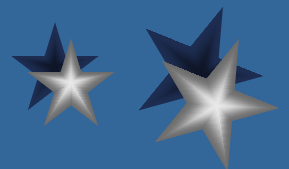
Открытие реликтового излучения

Реликтовое излучение (Cosmic Microwave Background) – равномерно заполняющее Вселенную тепловое излучение, возникшее в эпоху первичной рекомбинации водорода

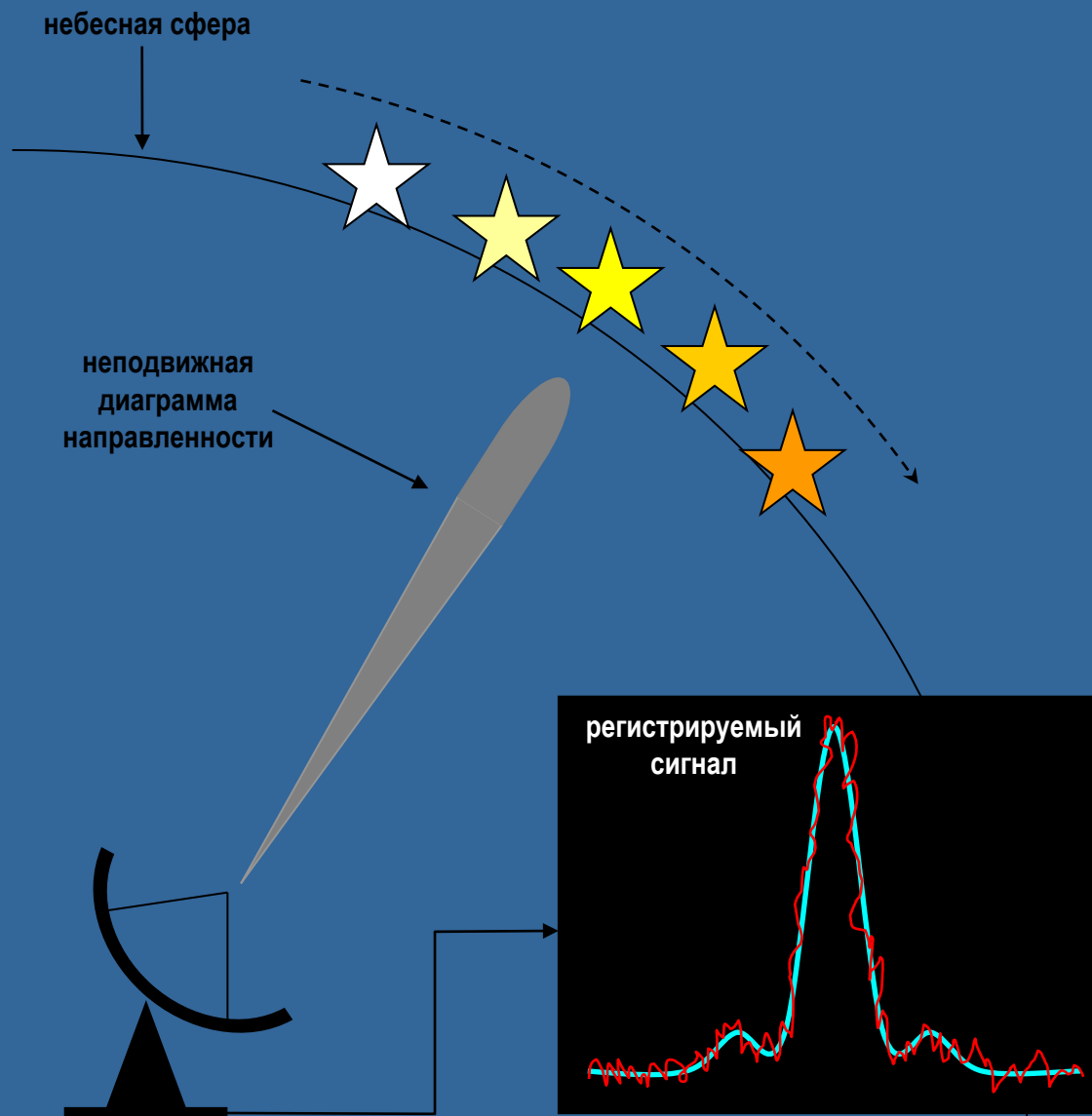
Предсказано Г. Гамовым в 1948 г. рамках теории Большого Взрыва

Экспериментально обнаружили А. Пензиас и Р. Вильсон в 1955 г.

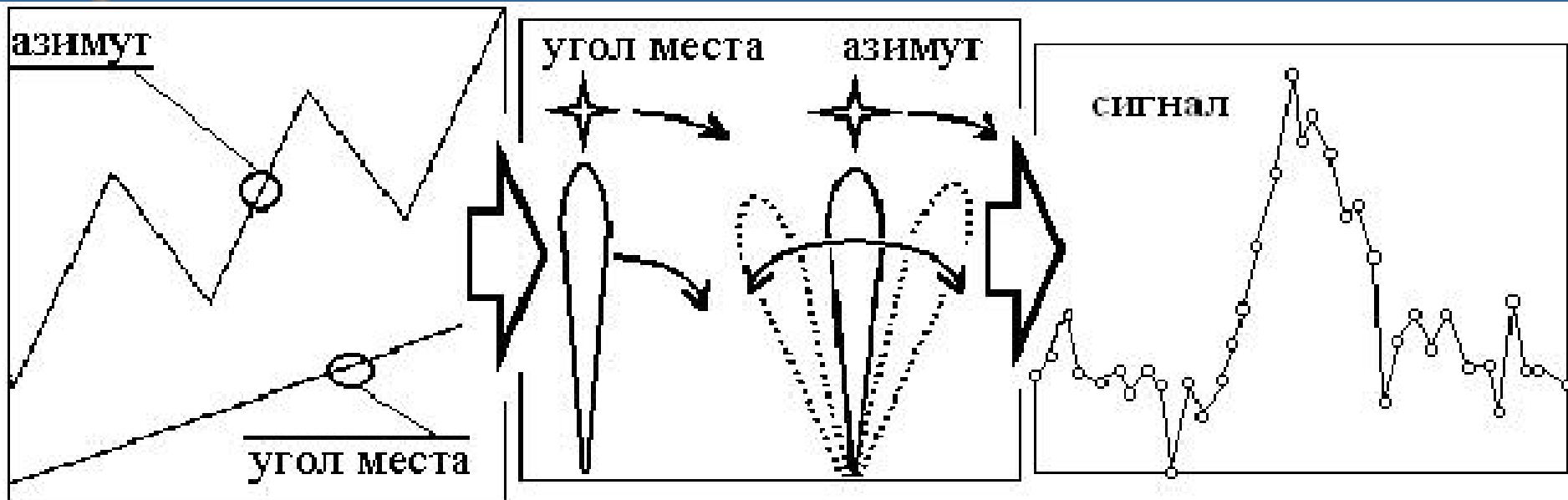
Нобелевская премия 1978 г.



Прохождение источника через диаграмму направленности



Плавное сканирование

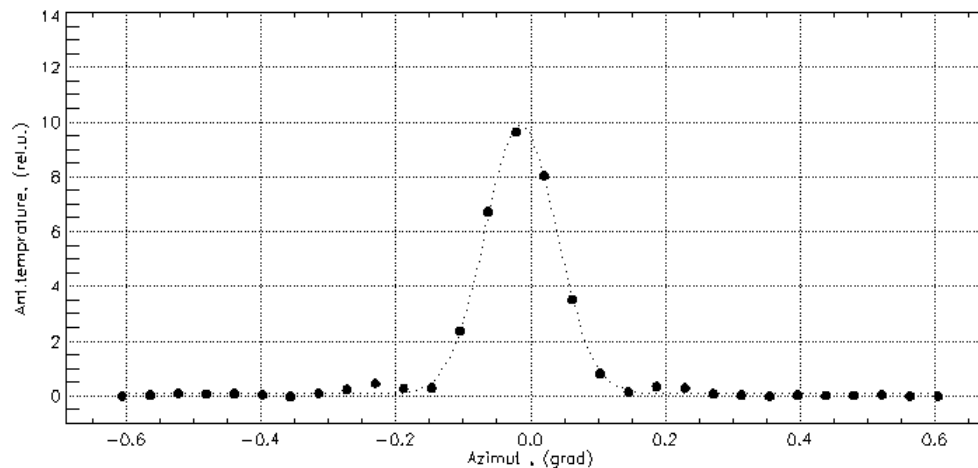
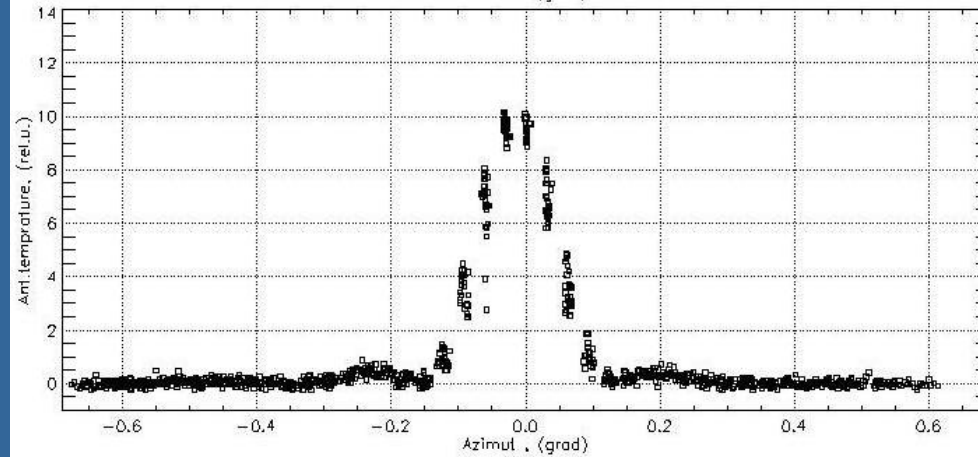
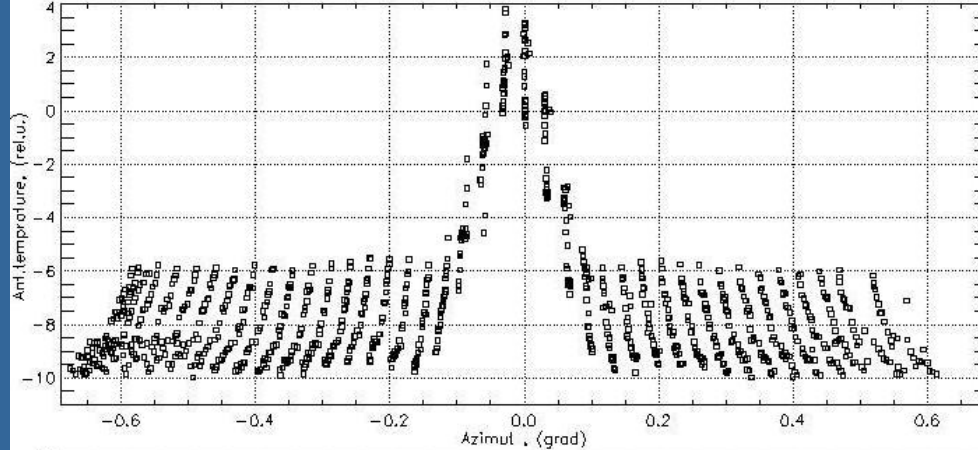


Метод наблюдения Плавное сканирование.

Слева направо:

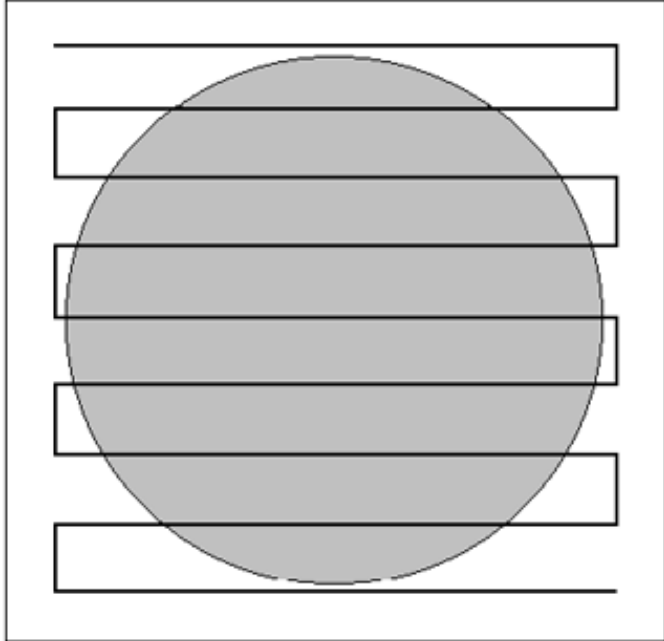
изменение координат антенны при плавном сканировании радиоисточника, соответствующая модель сканирования диаграммой направленности, и запись сигнала на выходе регистрирующей аппаратуры.

Усреднение отдельных сканов при плавном сканировании

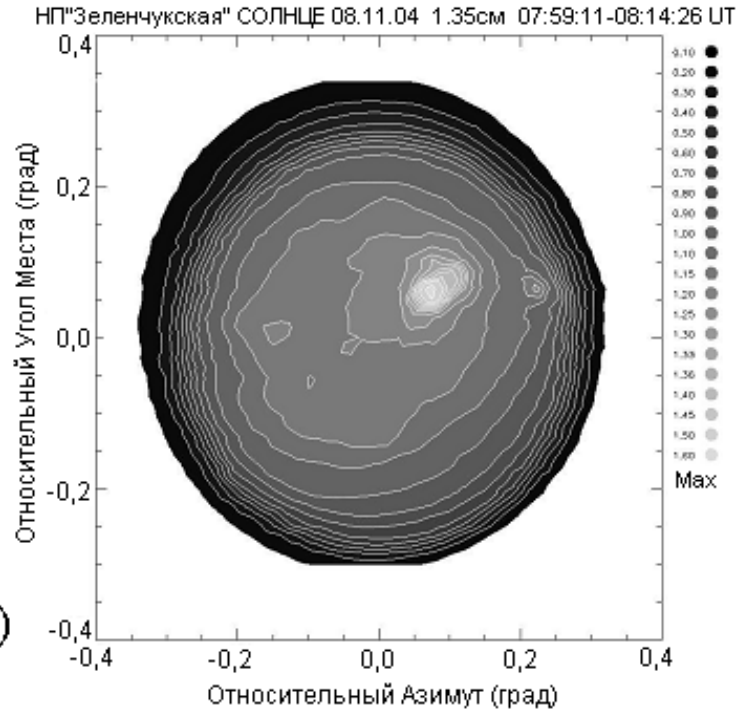


Растровое сканирование

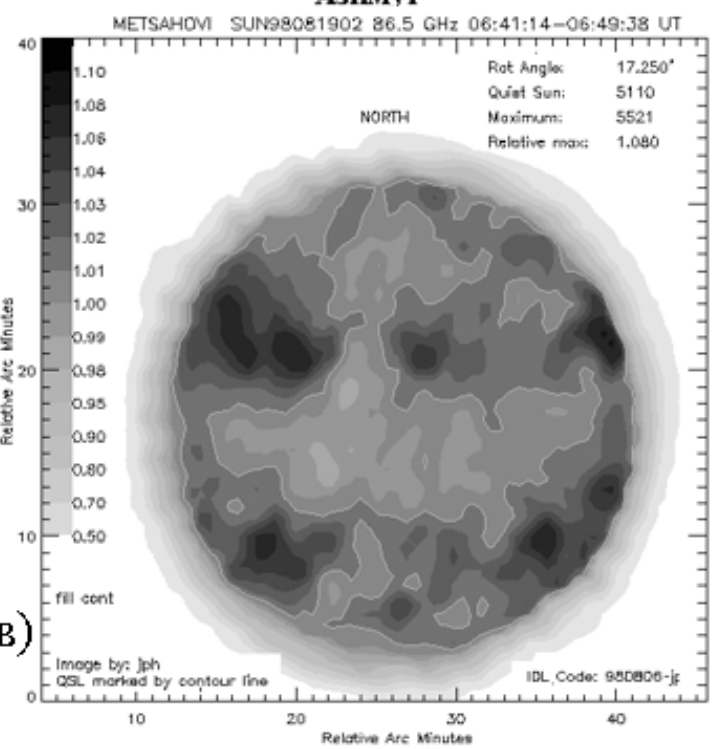
УГОЛ МЕСТА



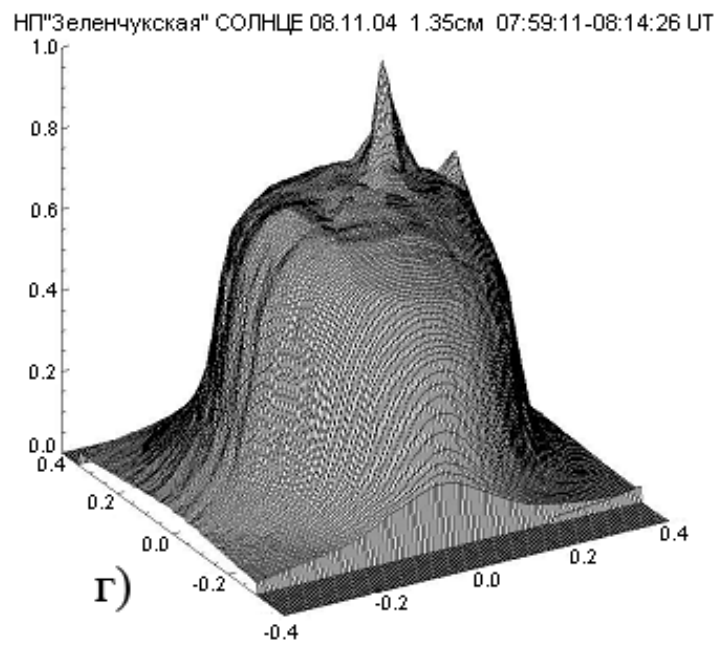
а)



б)

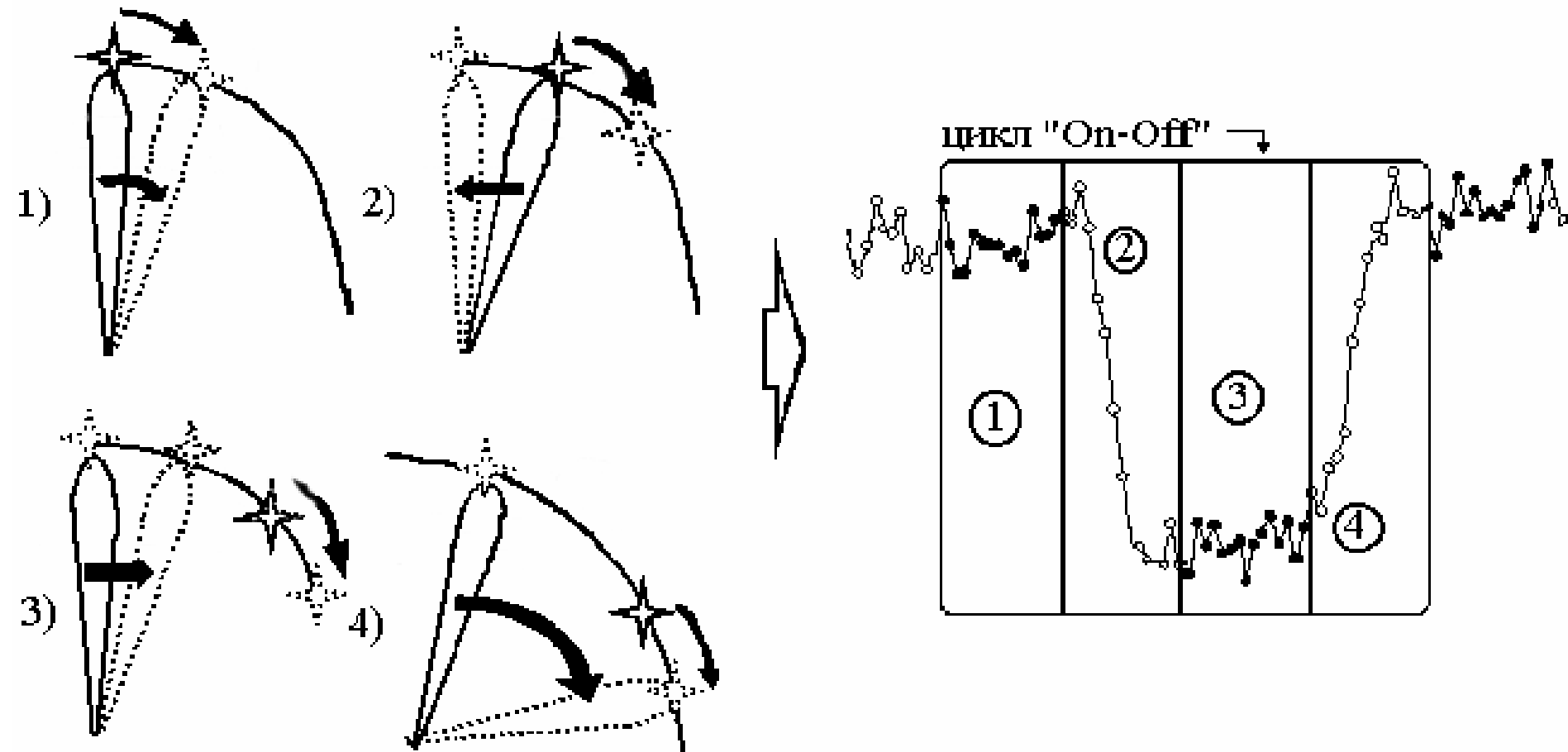


в)



г)





Метод наблюдения On-Off.

Цифрами обозначены:

1) сопровождение источника;

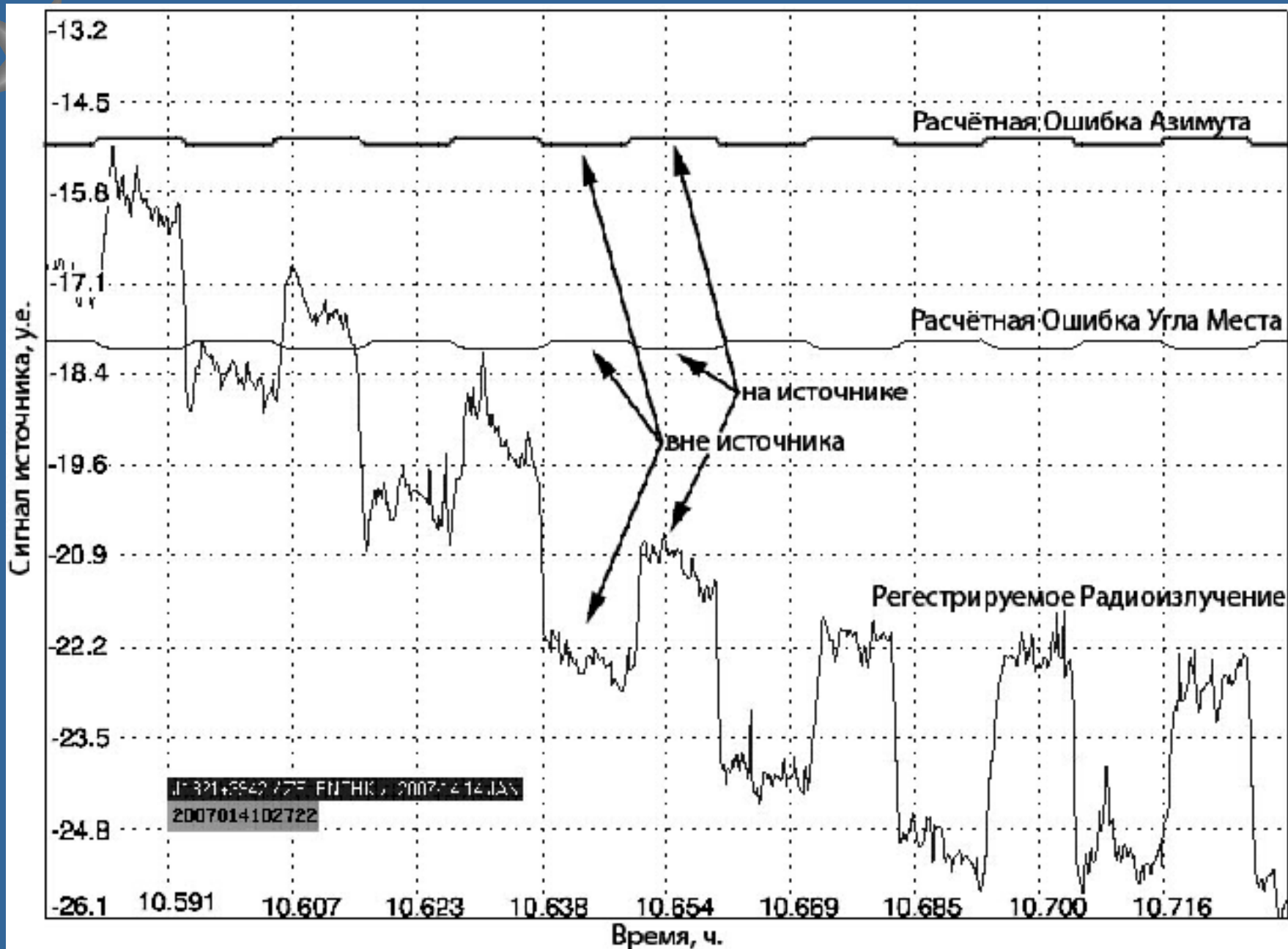
2) переброс антенны на сопровождение опорной точки;

3) сопровождение опорной точки;

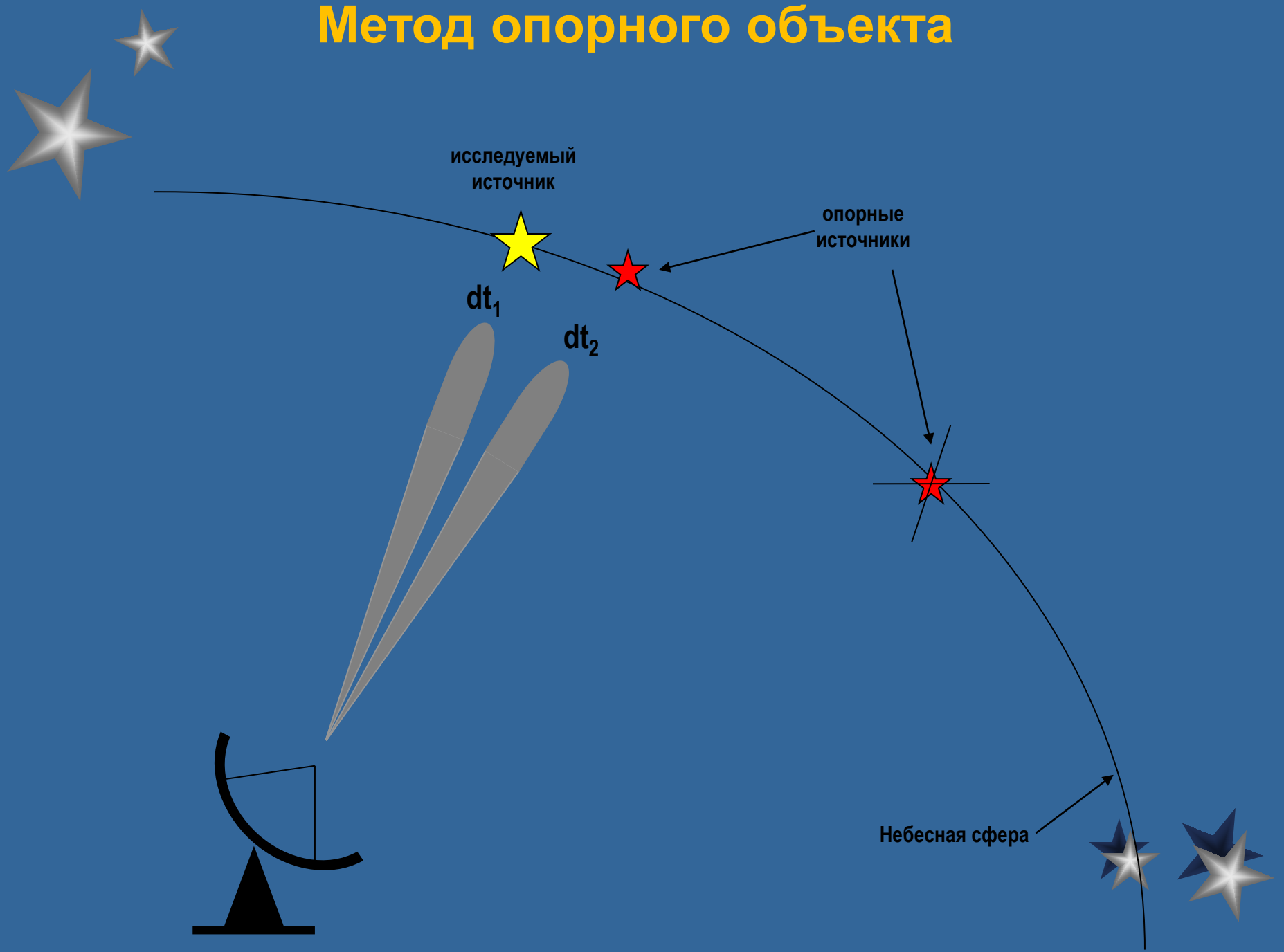
4) возвращение антенны на сопровождение источника.

(Справа показан пример сигнала на выходе радиометра)

Пример наблюдения методом "On-Off"

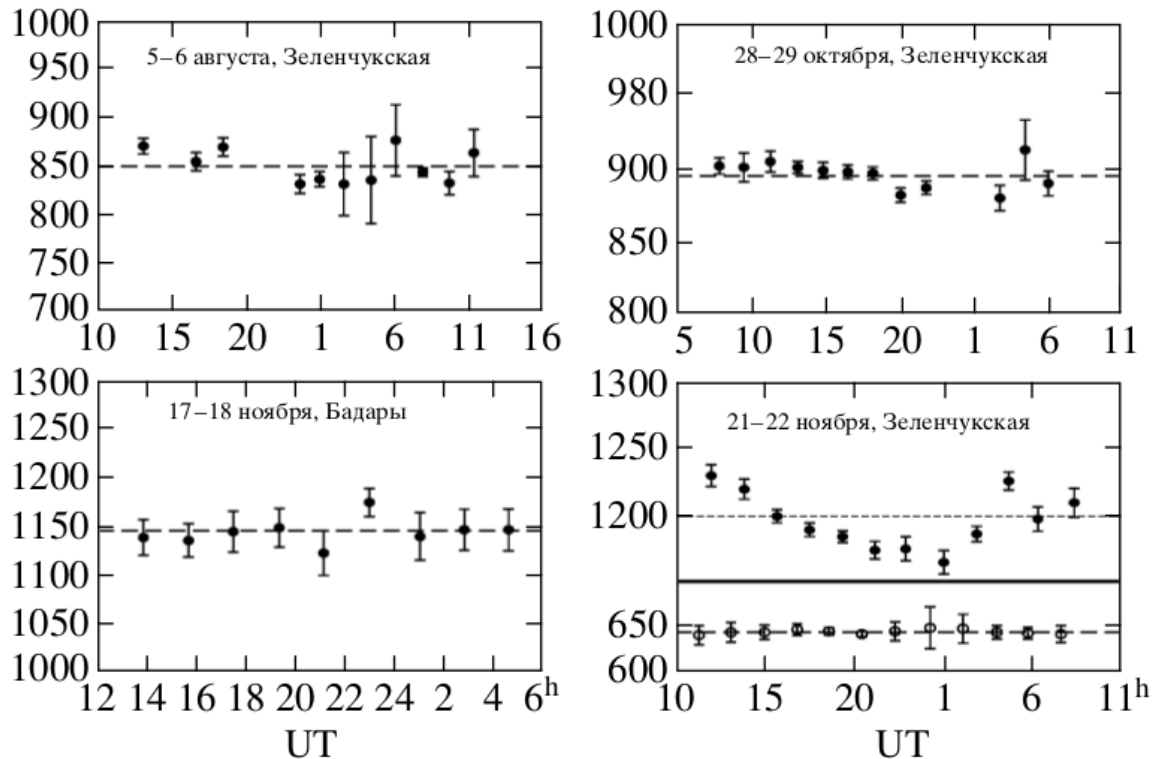


Метод опорного объекта



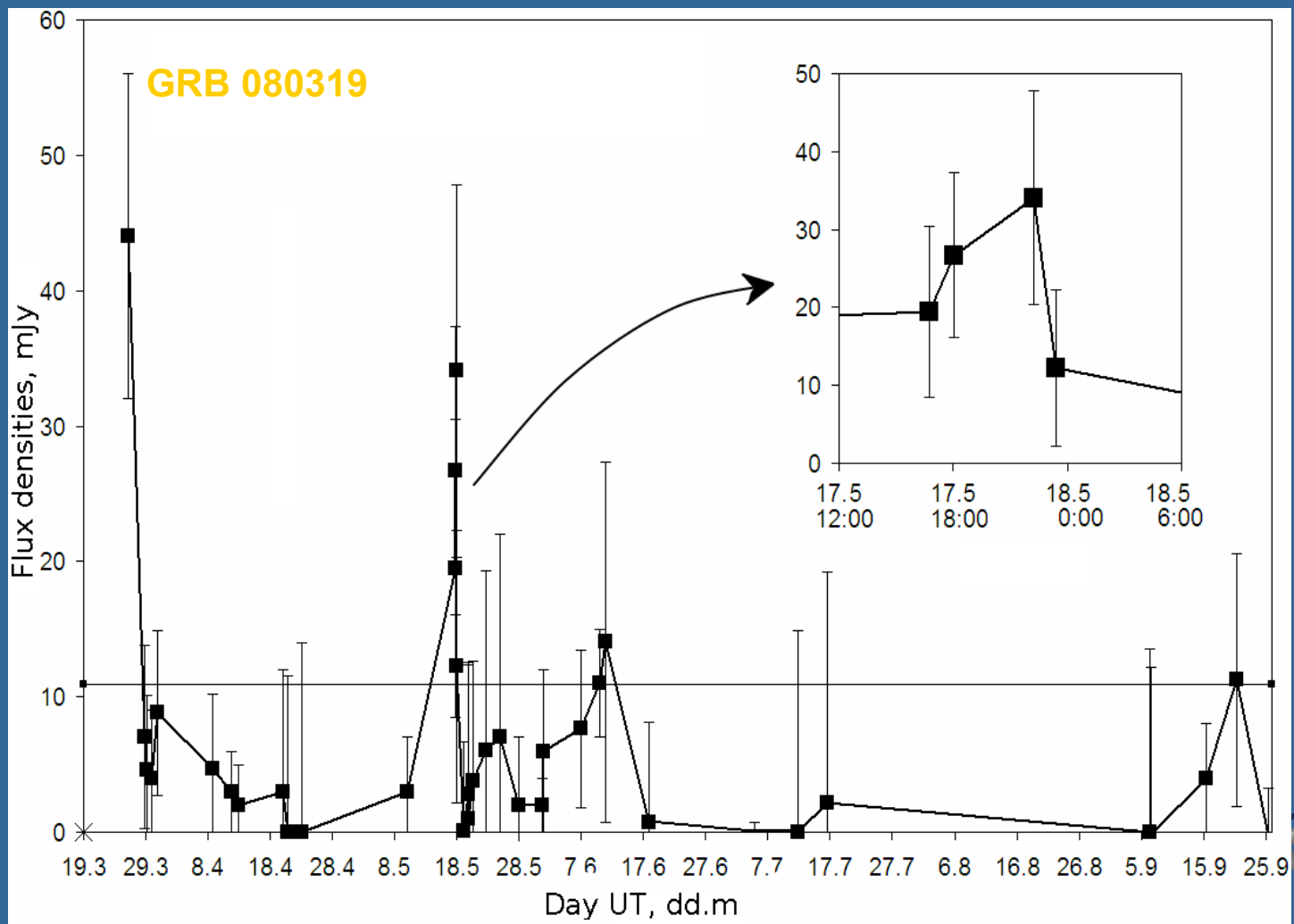
Внутрисуточные вариации внегалактических источников (IDV)

Поиск и исследование микроарксекундных компонент внегалактических радиоисточников по наблюдениям внутрисуточной переменности (IDV).



Кривые блеска радиоисточника J0721+7120 в течение сеанса наблюдений (темные кружки) и источника сравнения J0701+6951 (светлые кружки). Каждая точка на графиках — усредненная за цикл плотность потока.

Обнаружение радиопослесвечений от космических гамма-всплесков

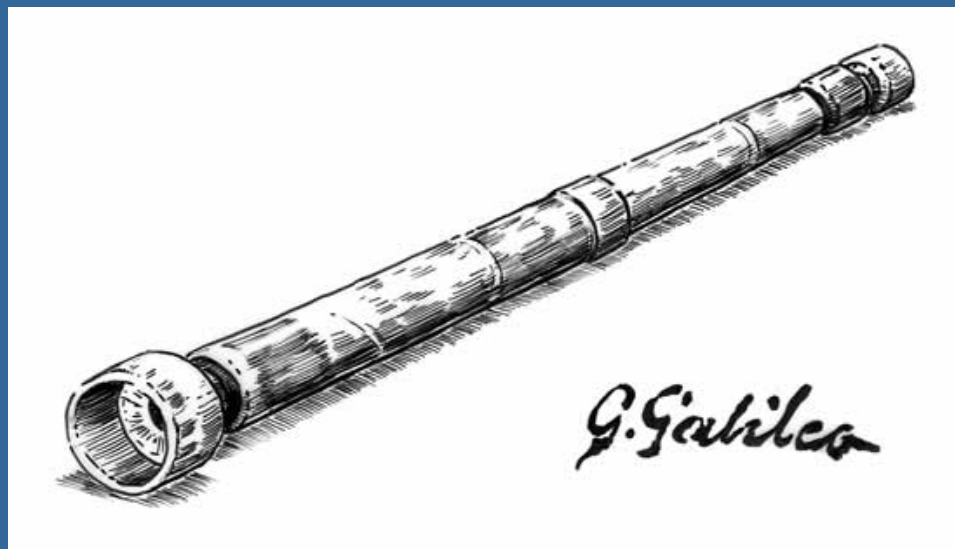




Со времен Галилея наблюдательная астрономия преследует две цели:

Разрешение – насколько малые детали видимы в удаленных объектах

Чувствительность – насколько хорошо видимы слабые объекты

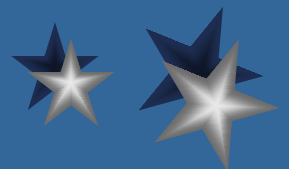




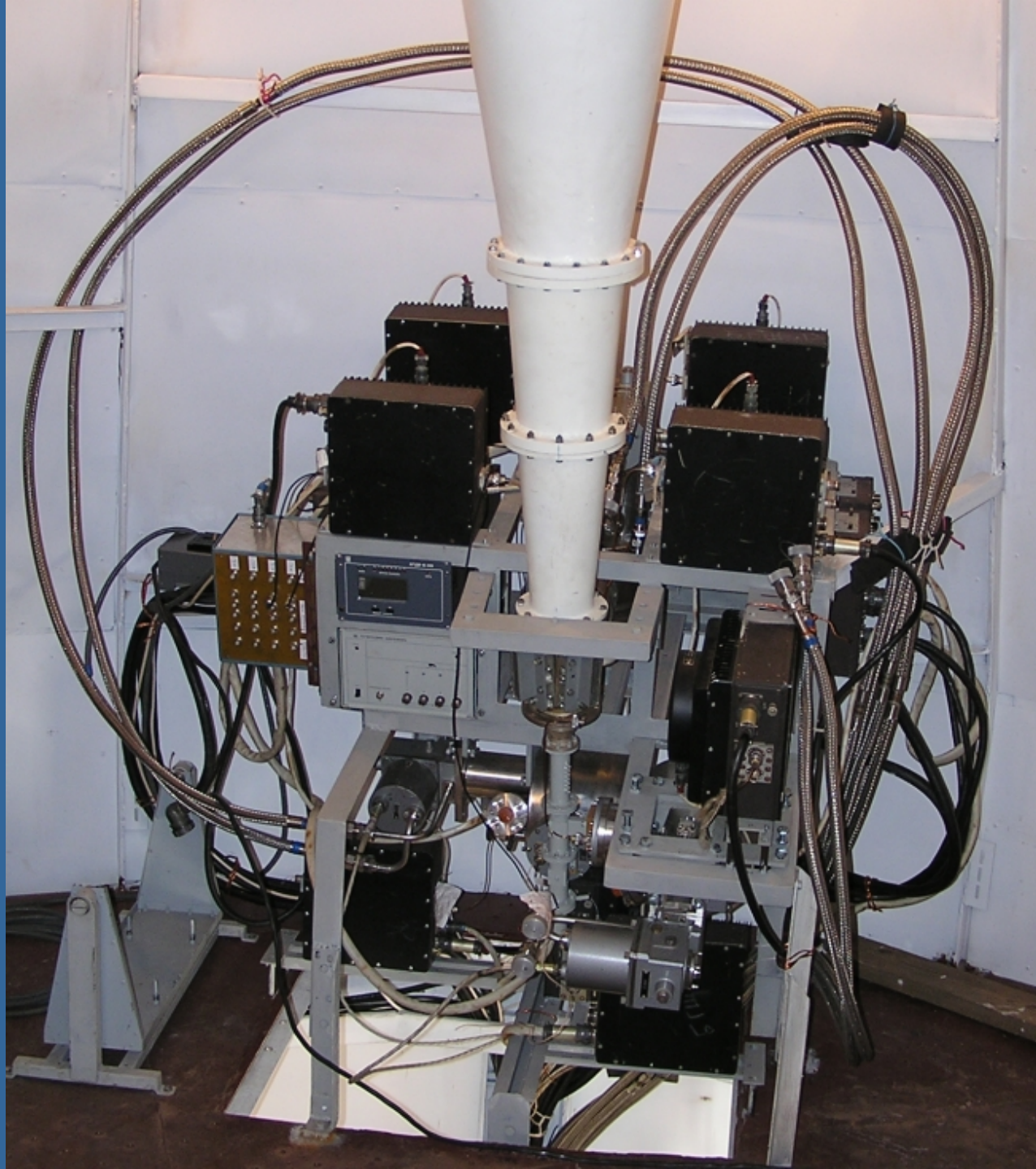
Чем определяется чувствительность?

Чувствительность астрономического инструмента определяется:

- Количеством **принятой энергии**
 - Размером собирающей поверхности (размером апертуры)
 - Шириной спектра частот принимаемого сигнала
- **Шумами** приемной системы









Чем определяется разрешение?

Мы являемся заложниками фундаментальной физики, которая утверждает.....

Угловое разрешение приблизительно равно*

$$\frac{\lambda}{D} \quad (\text{радианы})$$

где

λ = длина волны

D = размер апертуры

* Только для когерентной апертуры;
хуже для некогерентной апертуры

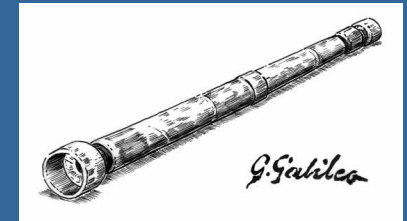


Разрешение оптических телескопов

Глаз человека → $\sim 60 \text{ arcsec} = 1 \text{ arcmin}$
(диаметр Солнца $\sim 30 \text{ arcmin}$)



Телескоп Галилея → $\sim 4 \text{ arcsec}$
(диаметр Юпитера $\sim 40 \text{ arcsec}$)



Телескоп 10 см → $\sim 1 \text{ arcsec}$
($\sim 2 \text{ км}$ на поверхности Луны)



Телескоп 10 м → $\sim 0.01 \text{ arcsec}$
(но ограничен атмосферой $\sim 0.2 \text{ arcsec}$)



Телескоп Хаббл (2.4 м) → $\sim 0.05 \text{ arcsec}$
($\sim 100 \text{ м}$ на поверхности Луны)



Разрешение радиотелескопов

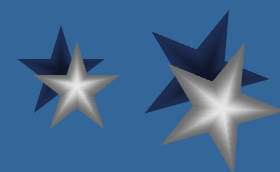
100 м телескоп $\lambda=1\text{cm} \rightarrow \frac{\lambda}{D} \sim 20 \text{ arcsec}$
(Юпитер $\sim 40 \text{ arcsec}$)

VLA ($\sim 35 \text{ км}$) $\lambda=1\text{cm} \rightarrow \frac{\lambda}{D} \sim 0.1 \text{ arcsec}$
($\sim 2 \text{ км}$ на поверхности Луны;
 $\sim 2 \text{ м}$ на расстоянии 5000 км)

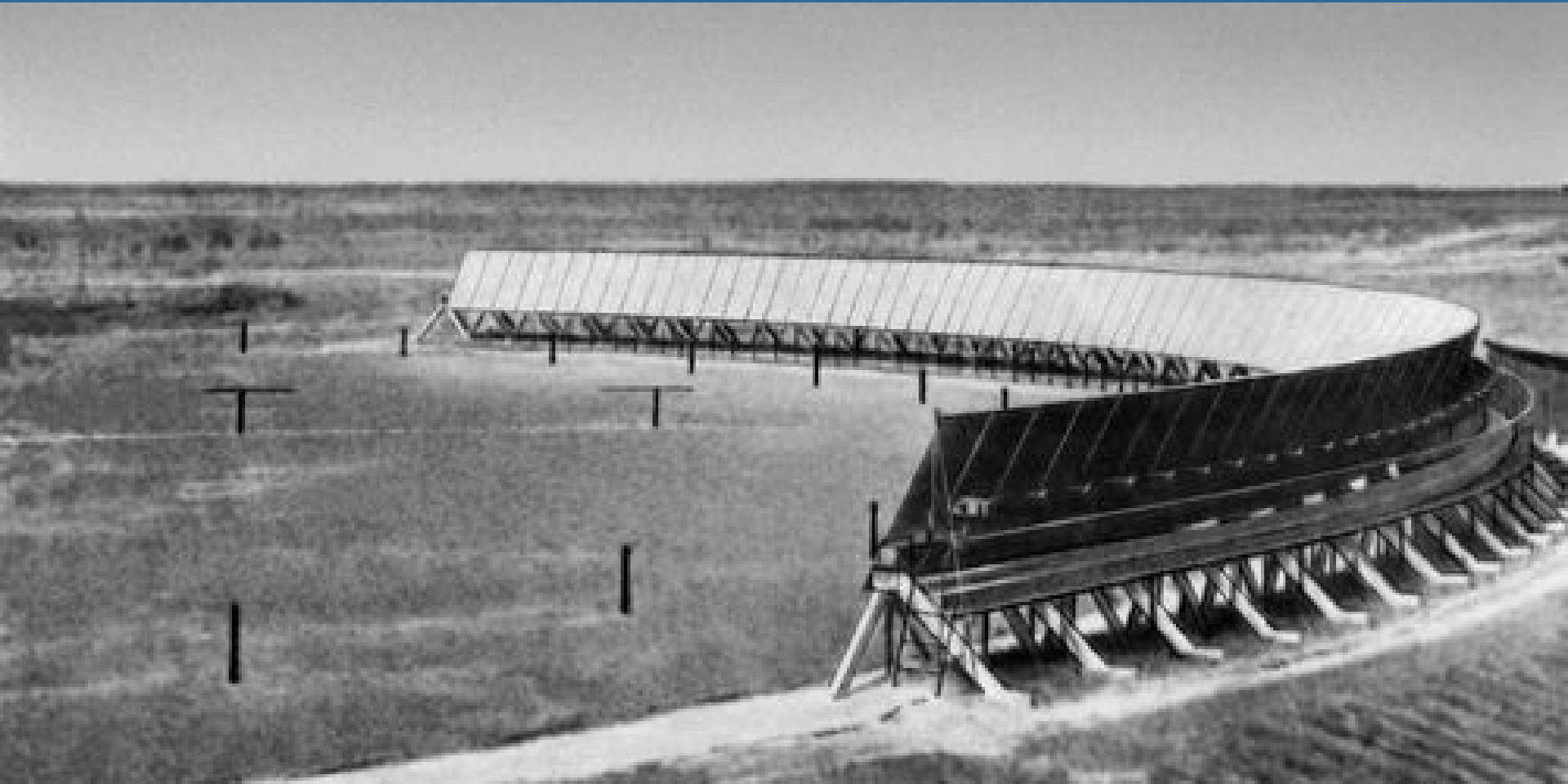
10 000 км телескоп $\lambda=1\text{cm} \rightarrow \frac{\lambda}{D} \sim 200 \text{ micro-arcsec}$
($\sim 40 \text{ см}$ на поверхности Луны;
 $\sim 5 \text{ мм}$ на 5000 км)

5 000 км телескоп $\lambda=1\text{mm} \rightarrow \frac{\lambda}{D} \sim 40 \text{ micro-arcsec}$
($\sim 8 \text{ см}$ на поверхности Луны;
 $\sim 0.1 \text{ мм}$ на расстоянии 1000 км ;

35 диаметров Солнца на расстоянии $25\,000 \text{ св.лет}$))



★ ★ Антенна переменного профиля
★ Большой Пулковский радиотелескоп



PATAH-600





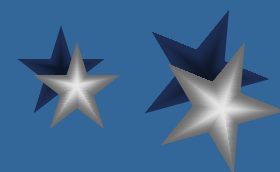
ССРТ (СИБИЗМИР)

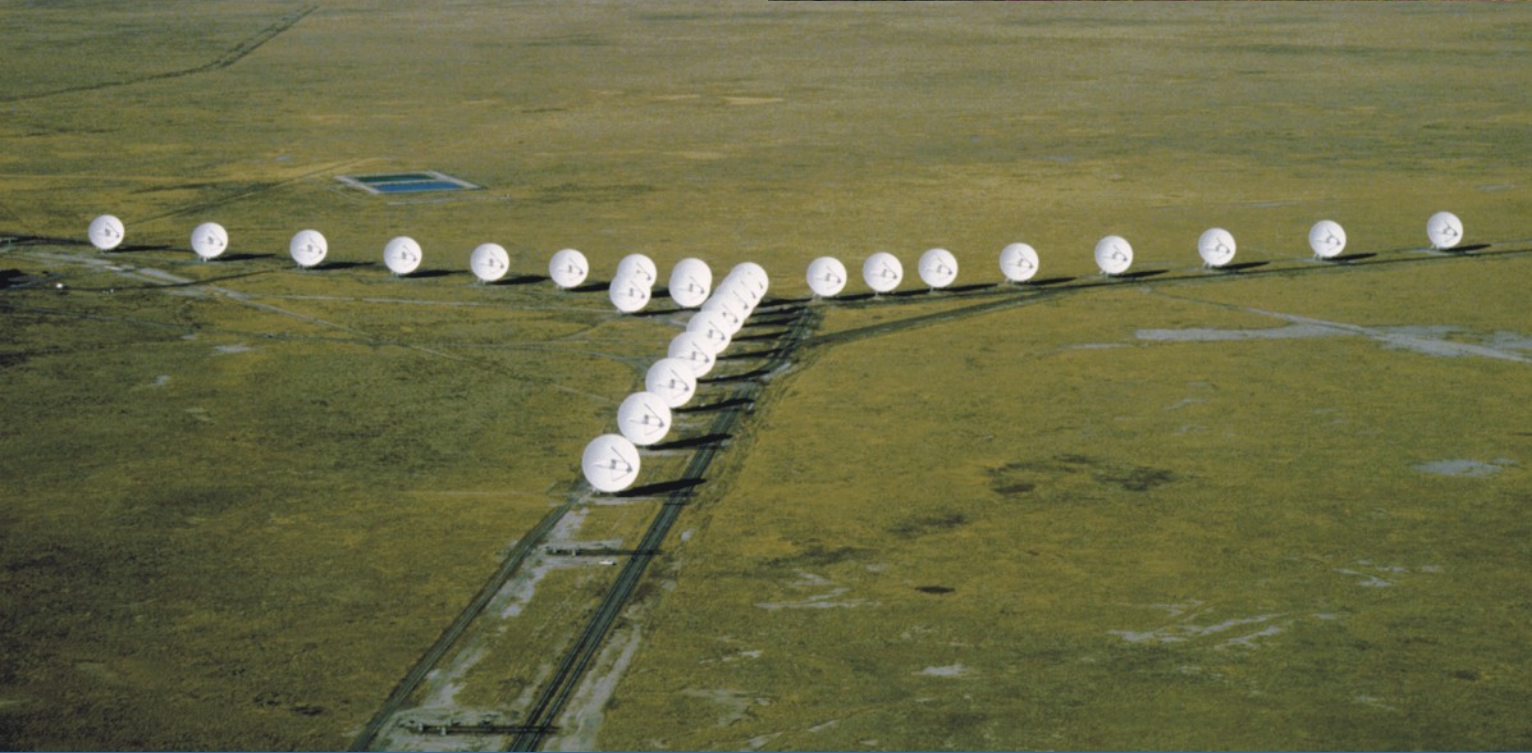


VLA – Very Large Array



27 антенн диаметром 25 м

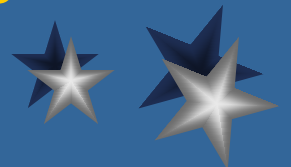




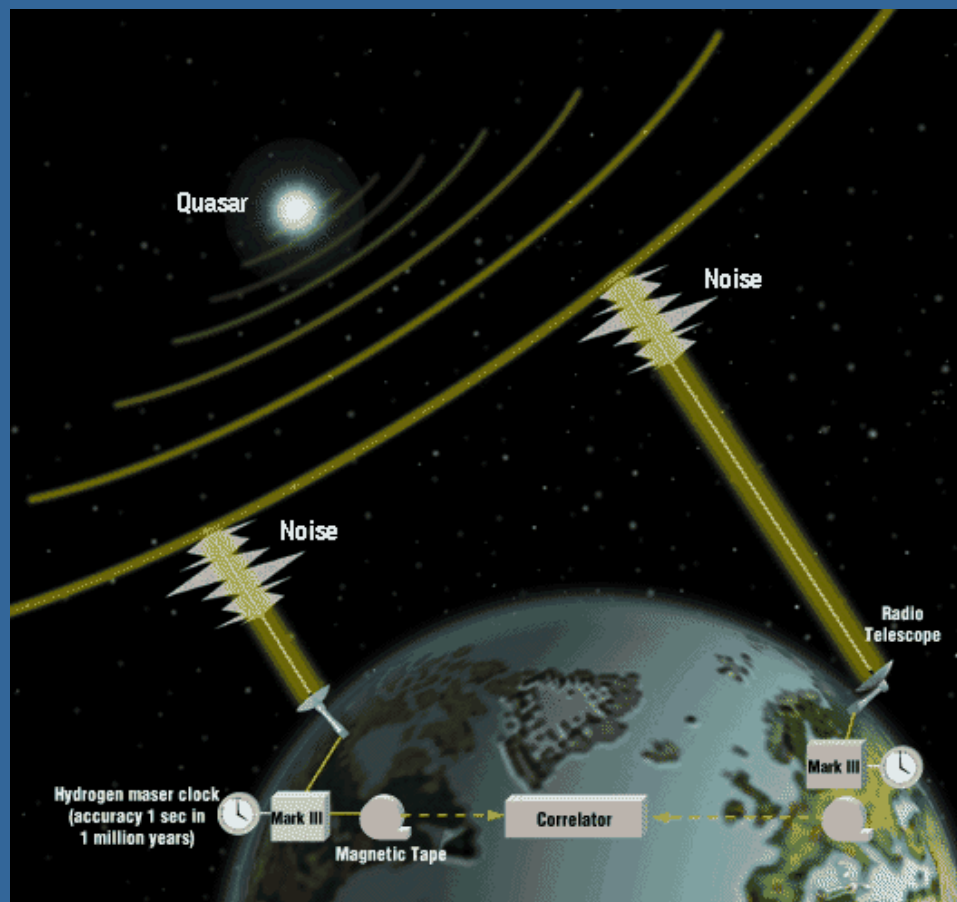


Как построить радиотелескоп диаметром 10 000 км?

- Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ)
- Как (коротко)?
 - Разместить телескопы **во многих местах** на Земле
 - Установить на каждом **атомные часы**
 - Наблюдать **один и тот же источник**, одновременно, на **той же частоте**, с той же поляризацией
 - Переслать данные **в центр обработки** (обычно записывается и пересылается на носителе)
 - **Синтезировать телескоп размером с Землю** на компьютере



Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ)



Антенны РСДБ в мире



Первая выделенная сеть РСДБ в мире - VLBA

Mauna Kea
HI



Owens Valley
CA



Brewster
WA



N. Liberty
IA



Hancock
NH



Green Bank
WV



Arecibo
PR



Kitt Peak
AZ



Pie Town
NM



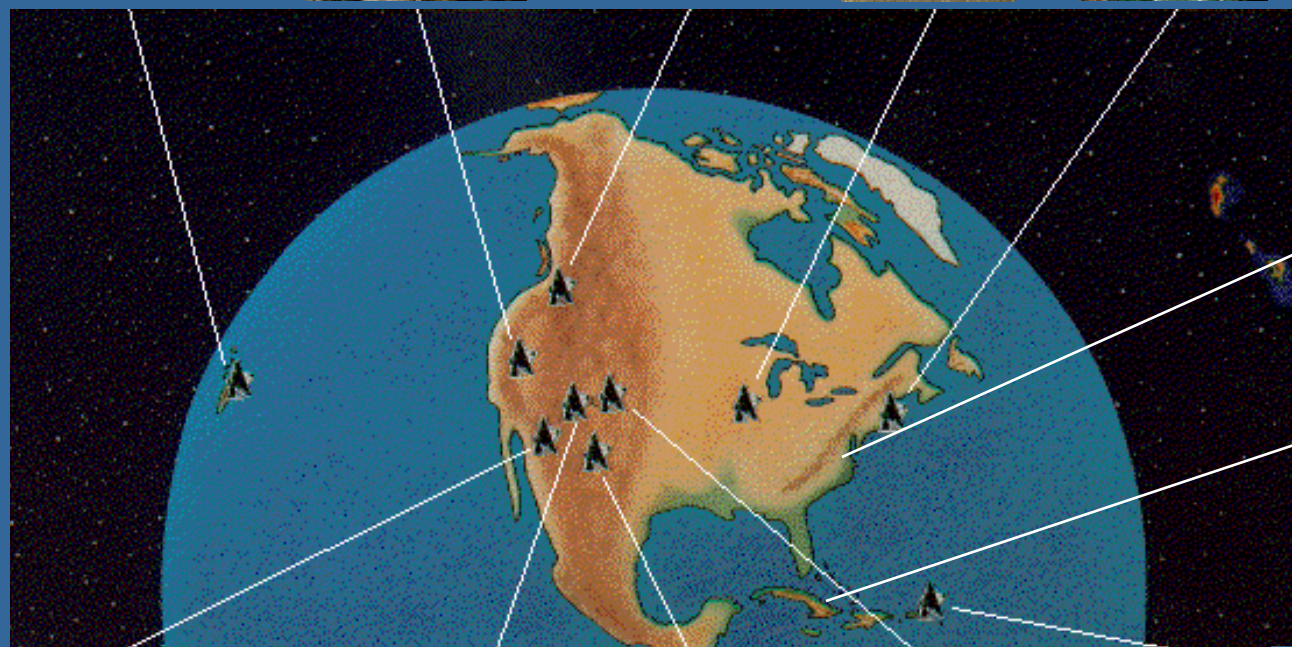
Fort Davis
TX



Los Alamos
NM

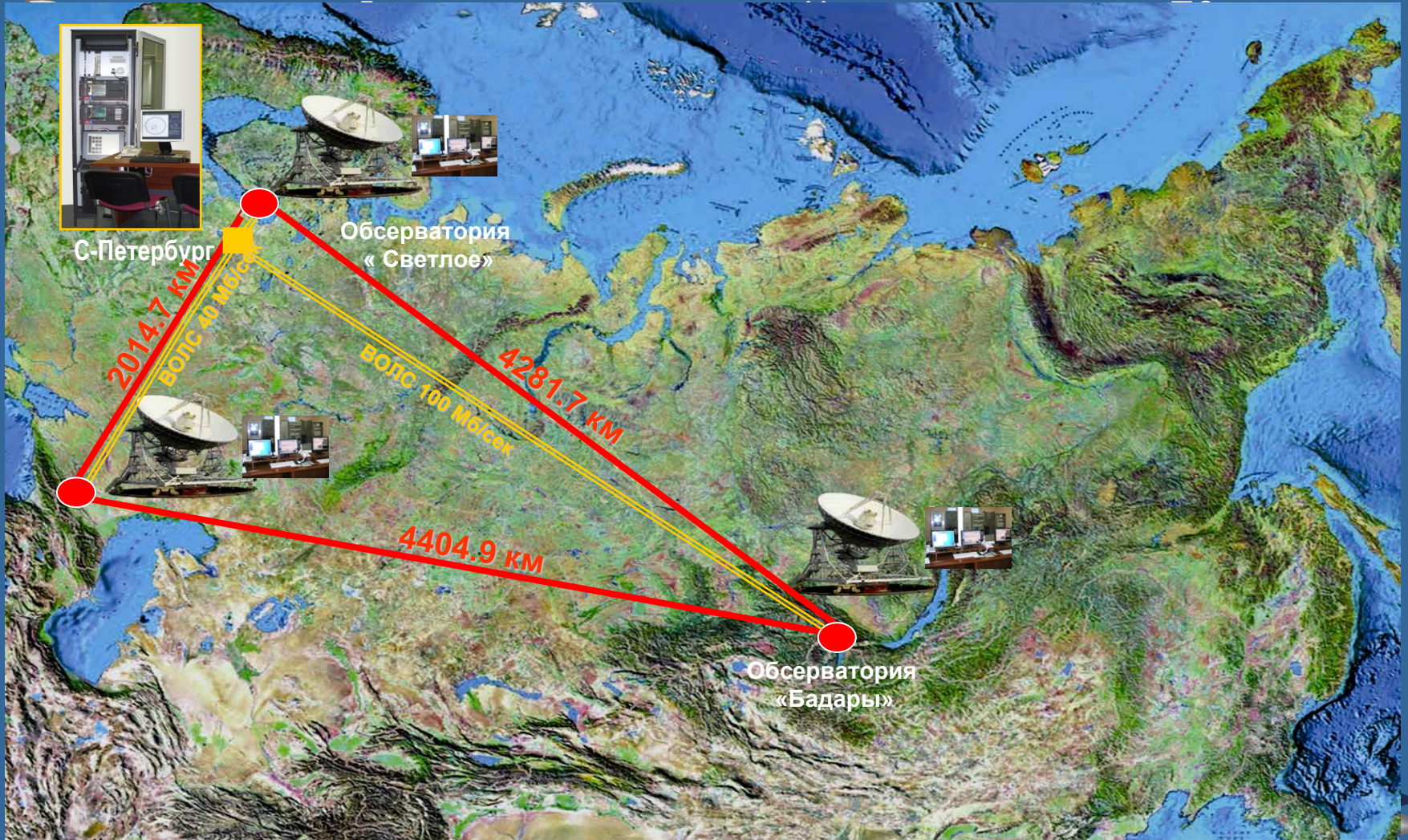


St. Croix
Virgin Is.



Только Арецибо подключен

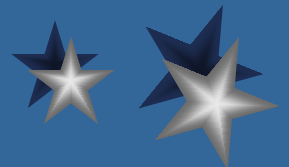
Сеть РСДБ «Квазар-КВО»






Отличительные признаки РСДБ

- **Главные свойства РСДБ:**
 - Стремление к предельной чувствительности;
Лучше чувствительность → меньше шумов → лучше измерения
 - Сверхстабильные часы и стандарты частоты;
особенно для геодезической и коротковолновой РСДБ
 - Огромные объемы сохраняемых и обрабатываемых данных





Способы повышения чувствительности

- Большие антенны, но их стоимость растет как $D^{2.7}$
- Малошумящие приемники, но многие приемники уже достигли квантового предела или уровня ниже шумов атмосферы
- Широкие полосы частот
 - Чувствительность улучшается как квадратный корень от полосы принимаемых частот
 - Расширение полосы частот обычно самый доступный способ улучшения чувствительности
 - В результате в РСДБ всегда применяются самые высокие достижения в технологии записи данных!



Mk1



1967
720 kbps
1st VLBI

Mk2

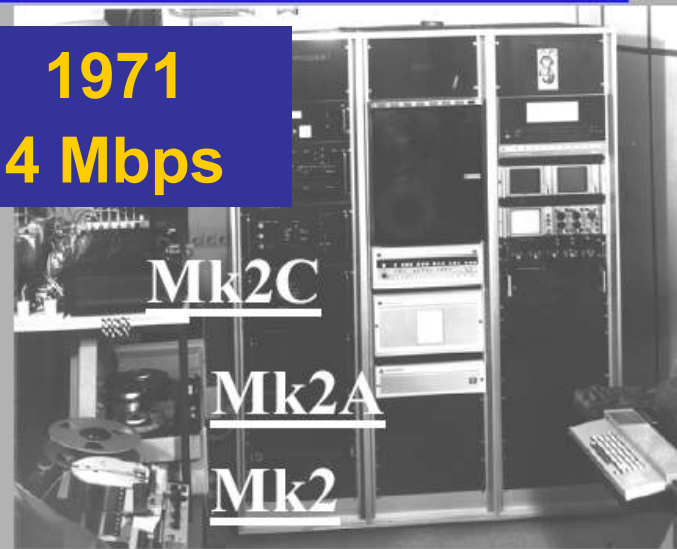


1971
4 Mbps

Mk2C

Mk2A

Mk2



Mk5



2002
1 Gbps
1st mag disk

2006
2 Gbps

2010
4 Gbps

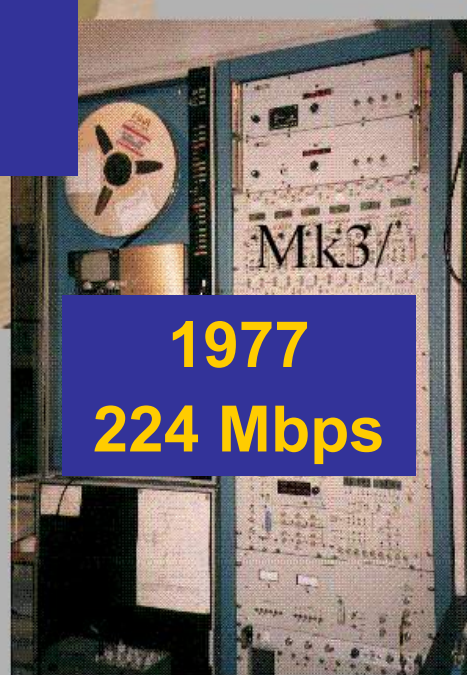
2012
16 Gbps

PC EVN



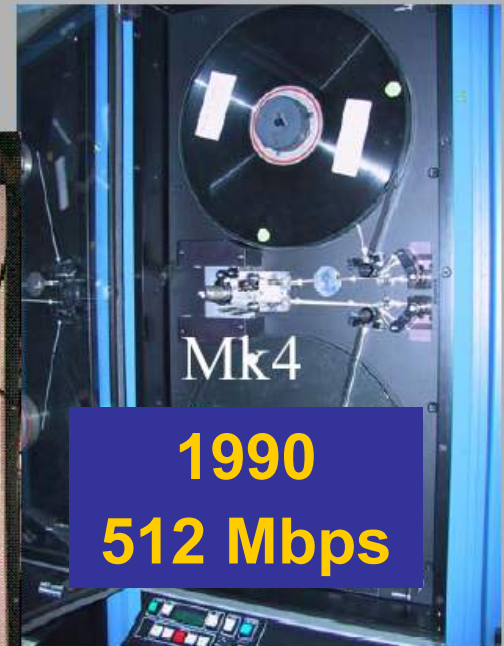
1977
224 Mbps

Mk3/



Mk4

1990
512 Mbps





2

3

4

1

5



Какие данные записываются?

Ответ: Точно привязанные по времени отсчеты чистого шума
– чистый **белый, Гауссов шум!**

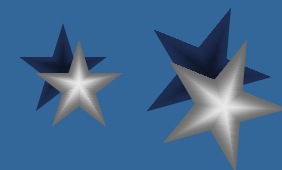


Интересный факт: Обычно сигнал
оцифровывается как **1 или 2 бит/отсчет**

Важное следствие: Данные **не сжимаются!**


Другое важное следствие:

**Если потеряно небольшое количество
данных, это обычно не проблема!**



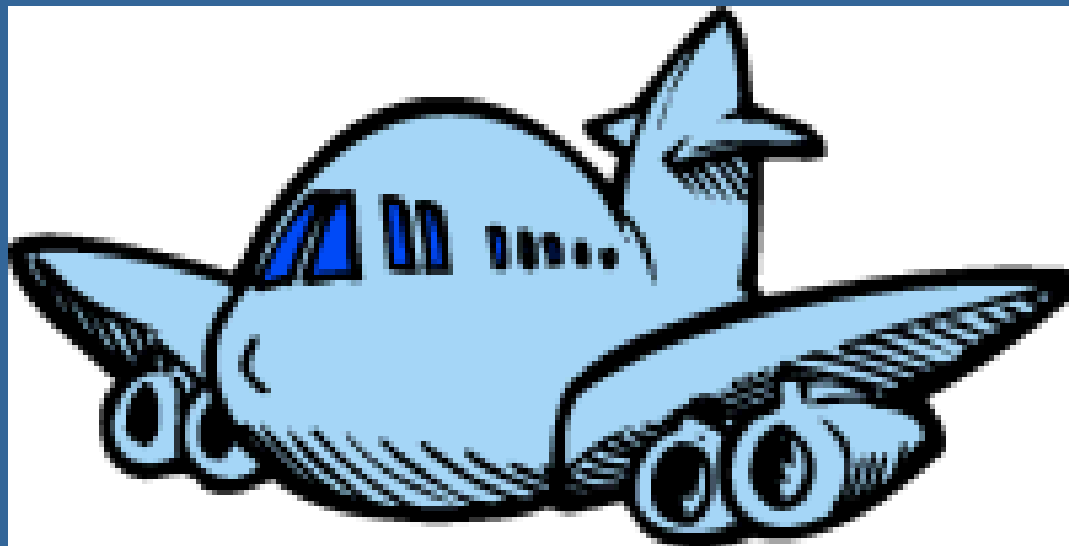


Объемы и потоки данных в РСДБ

- **Астрономические эксперименты 1-4 Гбит/с от станции, от 4 до 20 станций**
 - **~5-40 ТВ от станции в день**
 - **Глобальный эксперимент 10 станций 4 Гбит от станции → до ~400 ТВ в день**
 - **Один 10-дневный эксперимент – до ~4 РВ**
 - **Большие потоки (8-32 Гбит/с) уже на горизонте; больше потоки → лучше чувствительность**
 - **Существующие дисковые носители могут обеспечить только несколько дней наблюдений с такими потоками**
 - **Все парные комбинации телескопов должны быть обработаны**
- 



Традиционно, эти данные пересылаются
в центр обработки



....но это требует времени и использования
большого количества дорогих носителей
информации



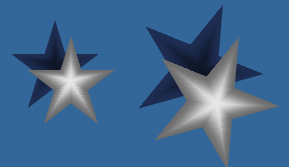


Начало «е-РСДБ»:

электронная передача данных РСДБ

Конечно, идея не новая, но только недавно ставшая экономически доступной и практически применимой

- **1977** – В Канаде через **спутник** передали данные в реальном времени из Грин Бенк в Алгонкин с потоком **20 Мбит/с** (впечатляет для того времени!)
- **1979** – В Хайстэке разрабатывается коррелятор квазиреального времени с передачей данных с потоком **1200 бит/с** через телефонный модем
- **1990-е гг.** – В Японии создается специализированная сеть из 4-х станций вокруг Токио, работающая на скорости **256 Мбит/с** через выделенные оптоволоконные линии





Научные преимущества e-РСДБ

Увеличение полосы регистрации для повышения чувствительности

Потенциал увеличения полосы передачи e-РСДБ превосходит возможности систем записи (запись практически ограничена потоком $\sim 10^{-16}$ Гбит/с)

Малое время от наблюдения до обработки

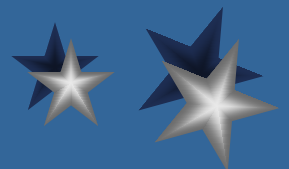
– Астрофизика

Возможность изучения эпизодических явлений с обратной связью для управляемых наблюдений

– Геодезия

Высокоточные измерения для геофизических исследований

Лучшее предсказание параметров вращения Земли, особенно UT1, важно для военной и гражданской навигации



Практические преимущества e-РСДБ

Лучше надежность

Исключается записывающее оборудование

Возможность удаленного контроля работы и управления в реальном времени

Дешевле

Возможны полностью автоматические наблюдения

Исключение ручных операций и пересылки носителей

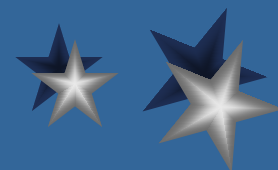
Обработка в реальном и квазиреальном времени

Выигрыш за счет экономии на задействованных носителях возрастает с ростом полосы

Исключение банка носителей (миллионы \$\$\$!)

Исключение непредсказуемых проблем при пересылке

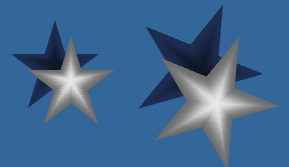
Потери и/или задержки



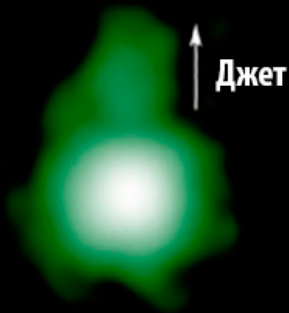


РСДБ для астрофизики

- Самое высокое разрешение, доступное для астрономов (и не только!) – десятки угловых микросекунд
- Позволяет детально исследовать **самые удаленные объекты** – квазары, гравитационные линзы, гамма-всплески, а также **черную дыру** в центре Млечного Пути



GB1508+5714

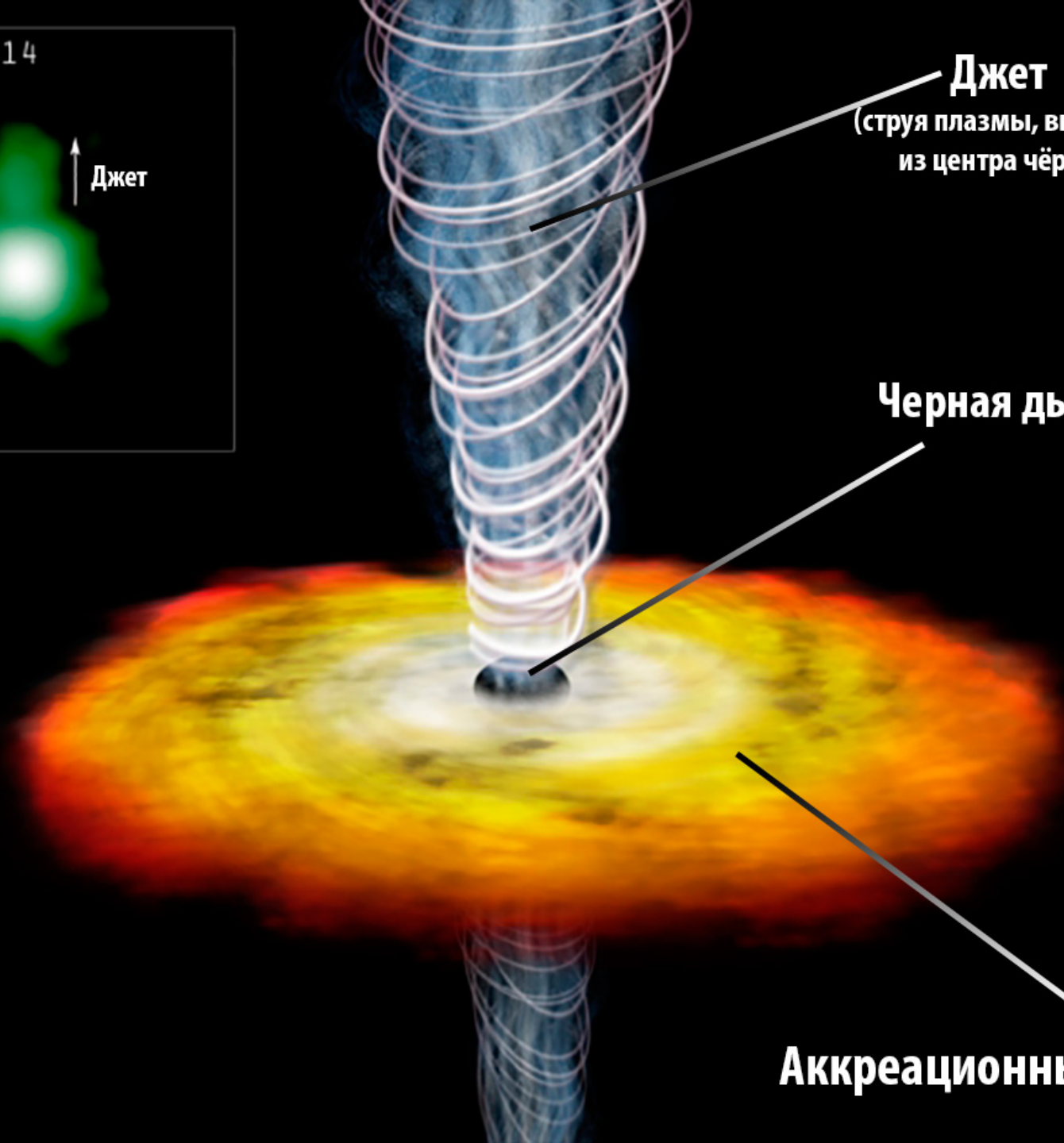


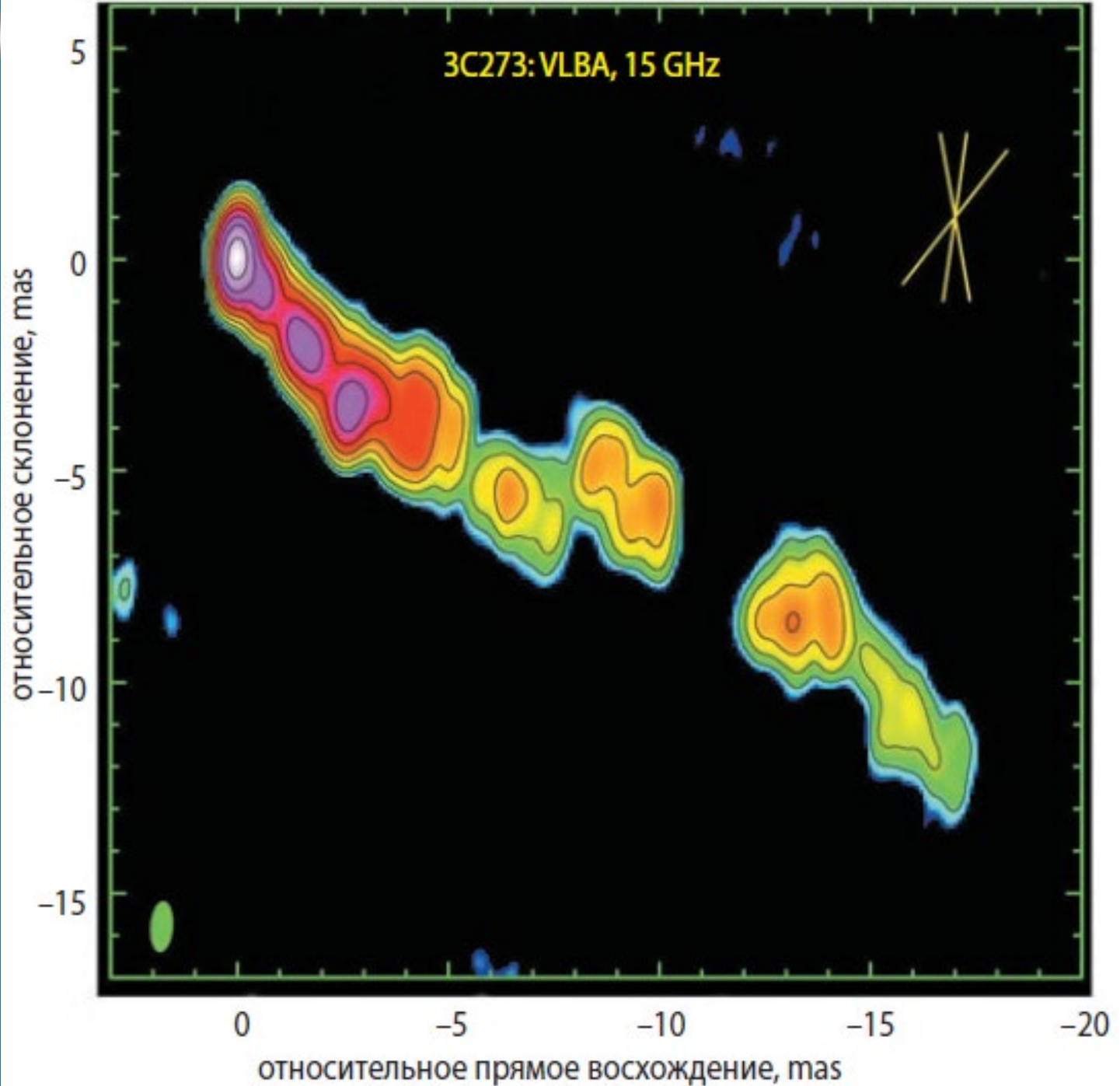
Джет

(струя плазмы, вырывающаяся из центра чёрной дыры)

Черная дыра

Аккреционный диск





NGC 6251

1 MEGAPARSEC

100 KILOPARSECS

1 PARSEC



NGC6251

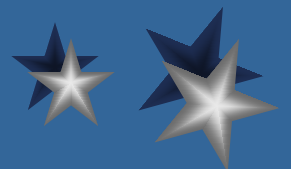
Расстояние 350 Mly = 107 Mpc

← Изображение с
одиночного
радиотелескопа
(1 Mpc → 30 arcmin)

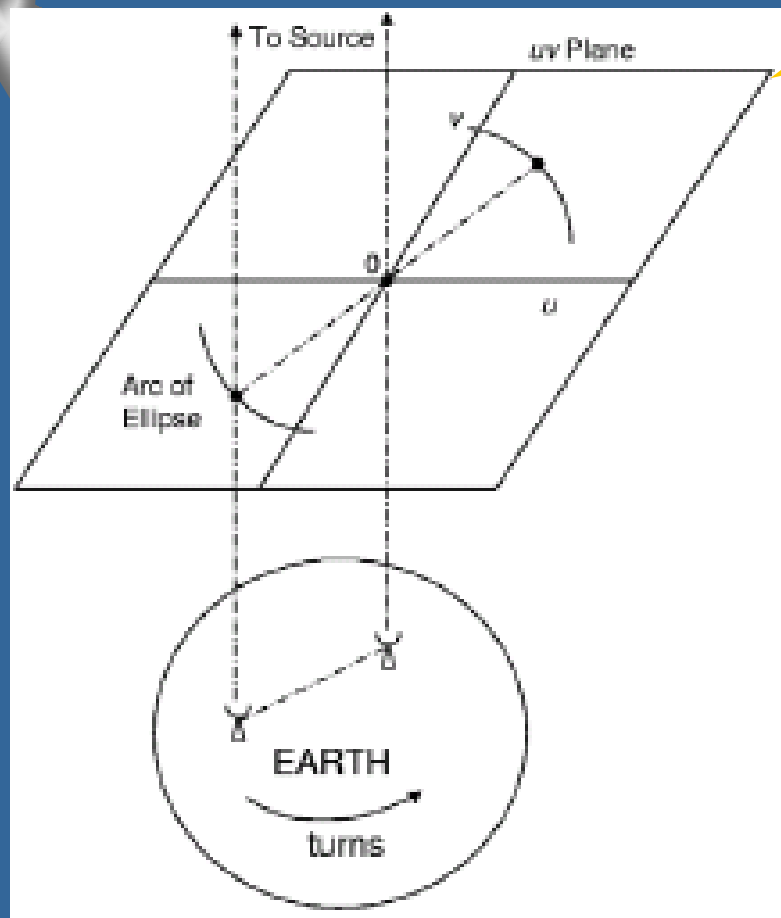
← Изображение на VLA
(100 kpc → 3 arcmin)

← Изображение РСДБ
(1 pc → 2 milli-arcsec)

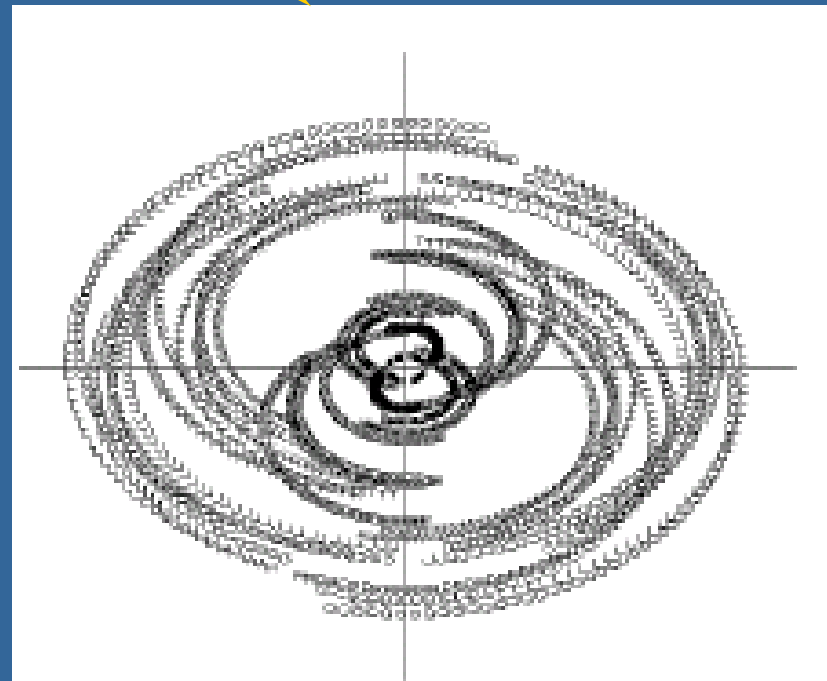
Увеличение 1 000 000 раз!



Апертурный синтез за счет вращения Земли



Апертура «виртуальной антенны»

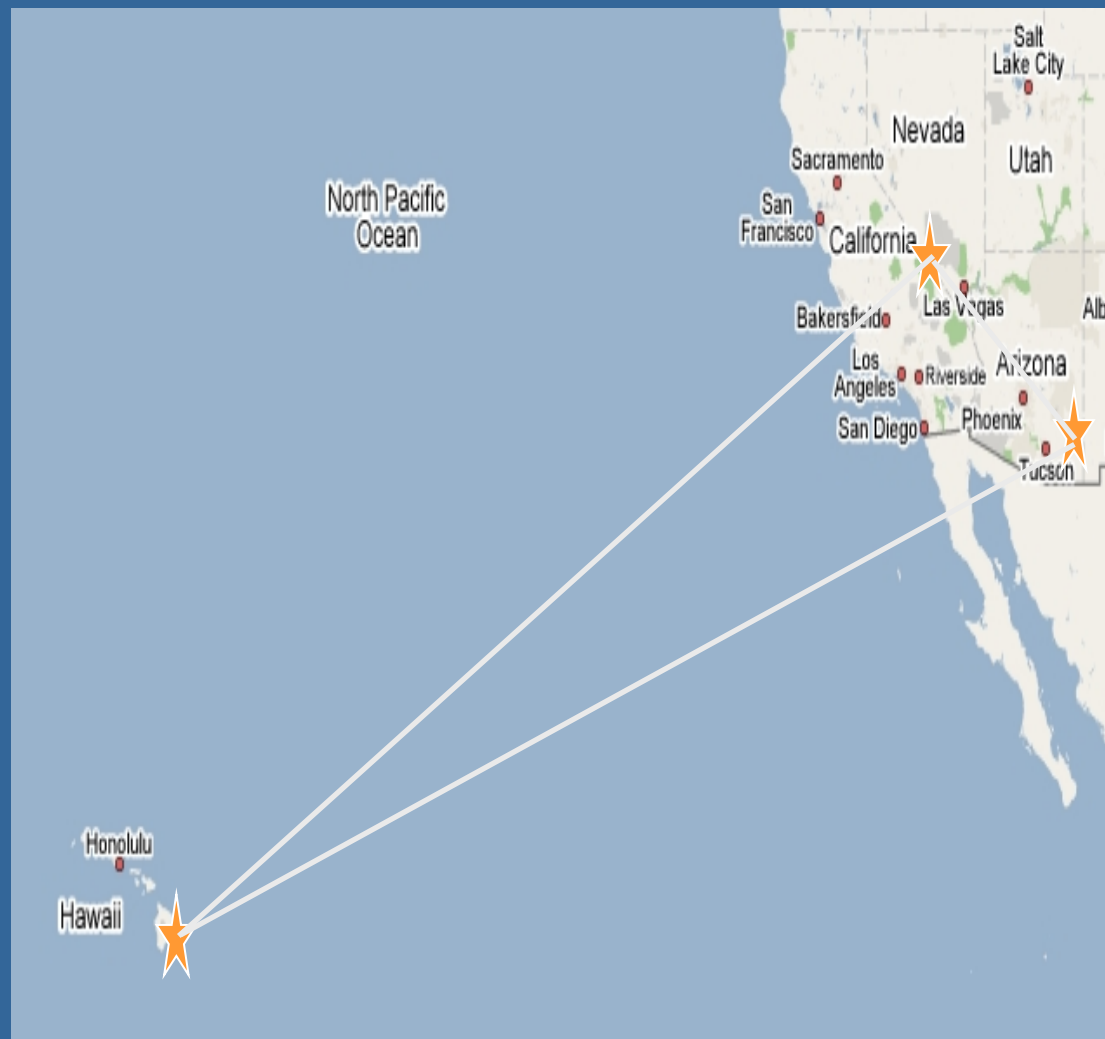



При вращении Земли каждая пара антенн создает эллипс в апертуре «виртуальной антенны» размером с Землю; много таких эллипсов от разных пар антенн помогают «заполнить» апертуру виртуальной антенны

★ 230GHz РСДБ: Апрель 2007

★ SMTO, JCMT/SMA, CARMA

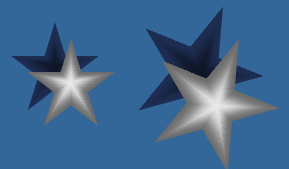
- Первые успешные наблюдения РСДБ на трех станциях в диапазоне 230 ГГц (длина волны 1 мм)
- Рекордное разрешение на базах с Гавайи ~40 угл. микросек.
- Предельно сложные наблюдения



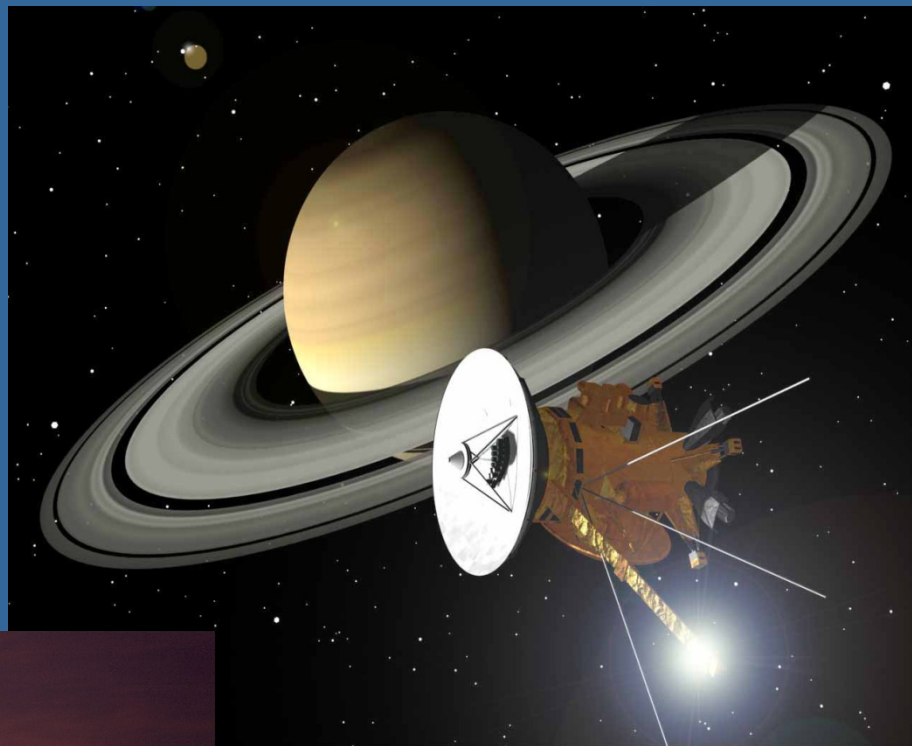


Дифференциальная РСДБ для сопровождения аппаратов в дальнем космосе

- Сопровождает космический аппарат в **2-х измерениях**, определяя разность положений с близким (обычно очень слабым) квазаром
- Совместно с традиционным измерением дальности по задержке сигнала дает **трехмерное положение**

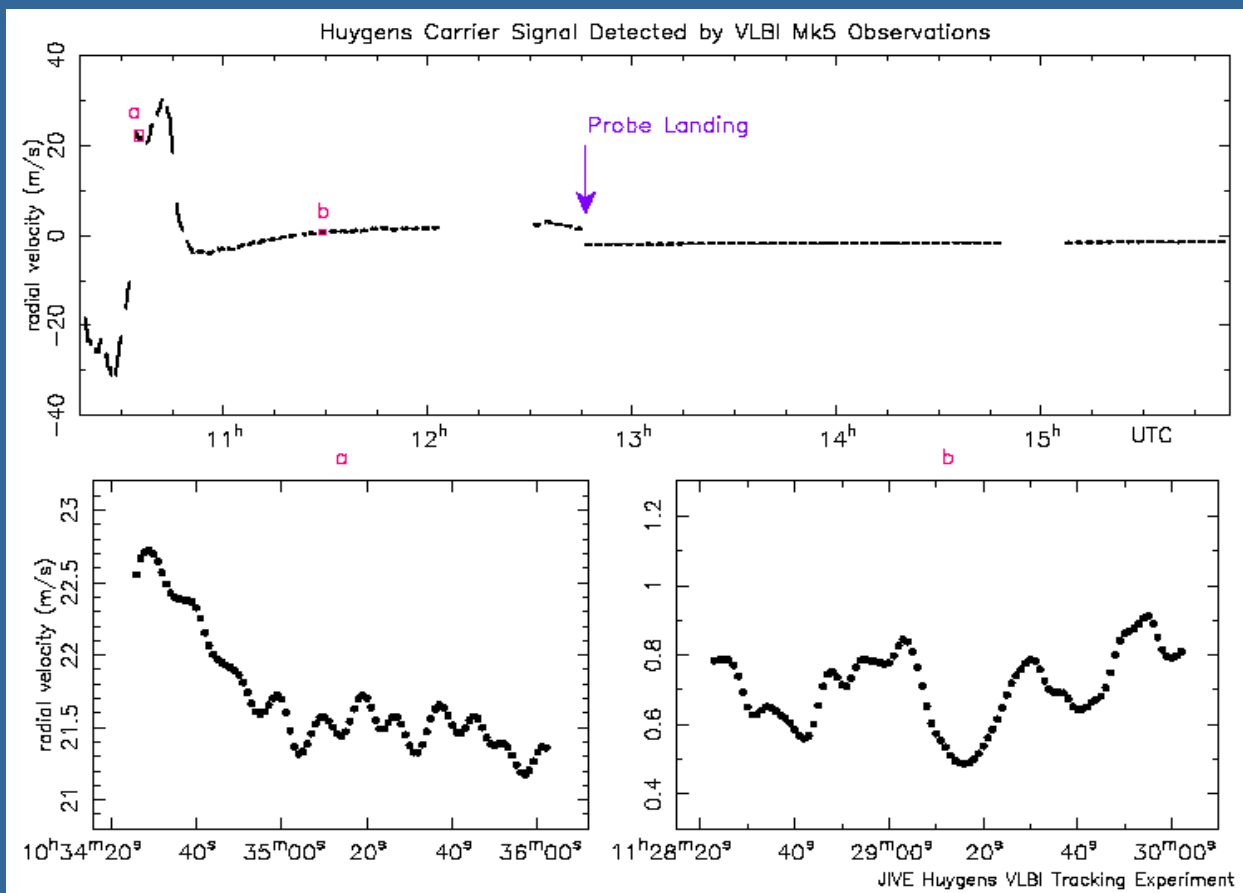


Кассини-Гюйгенс
зонд к Сатурну
(14 января 2005)



← Спуск зонда
Гюйгенса к
Титану

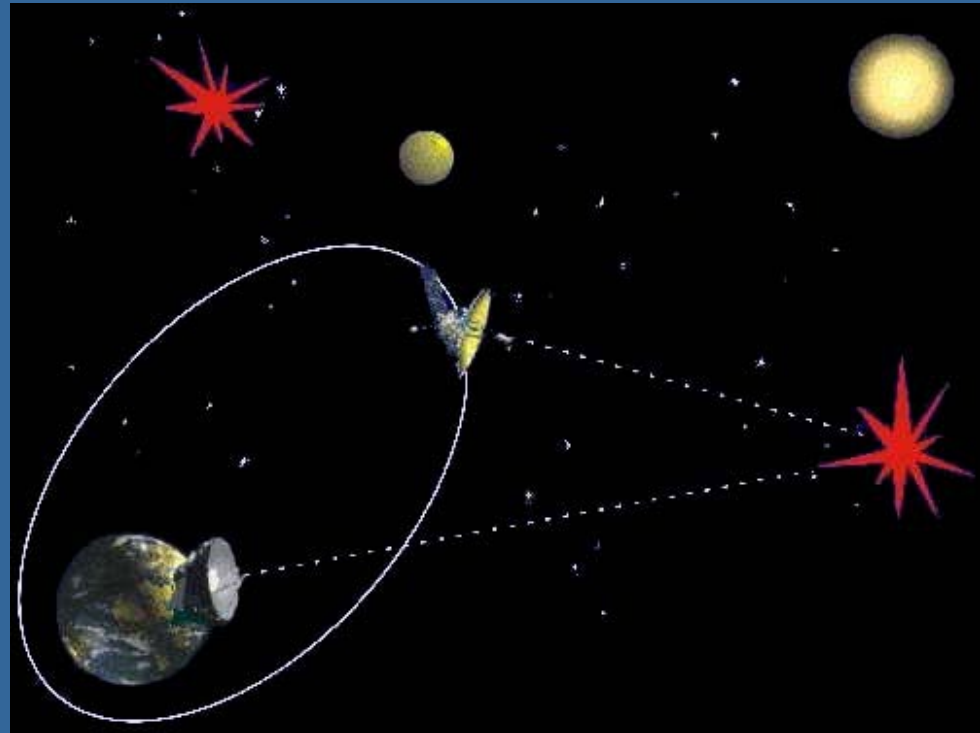
РСДБ наблюдения зонда Гюйгенса



Дифференциальная РСДБ совместно с доплеровскими измерениями с Земли обеспечивает трехмерное сопровождение зонда при падении

Наземно-космический интерферометр – радиотелескоп размером больше Земли

- **VSOP** (Япония) –
1997-2003 гг.
- **Радиоастрон** (Россия) –
запущен в 2011 г.





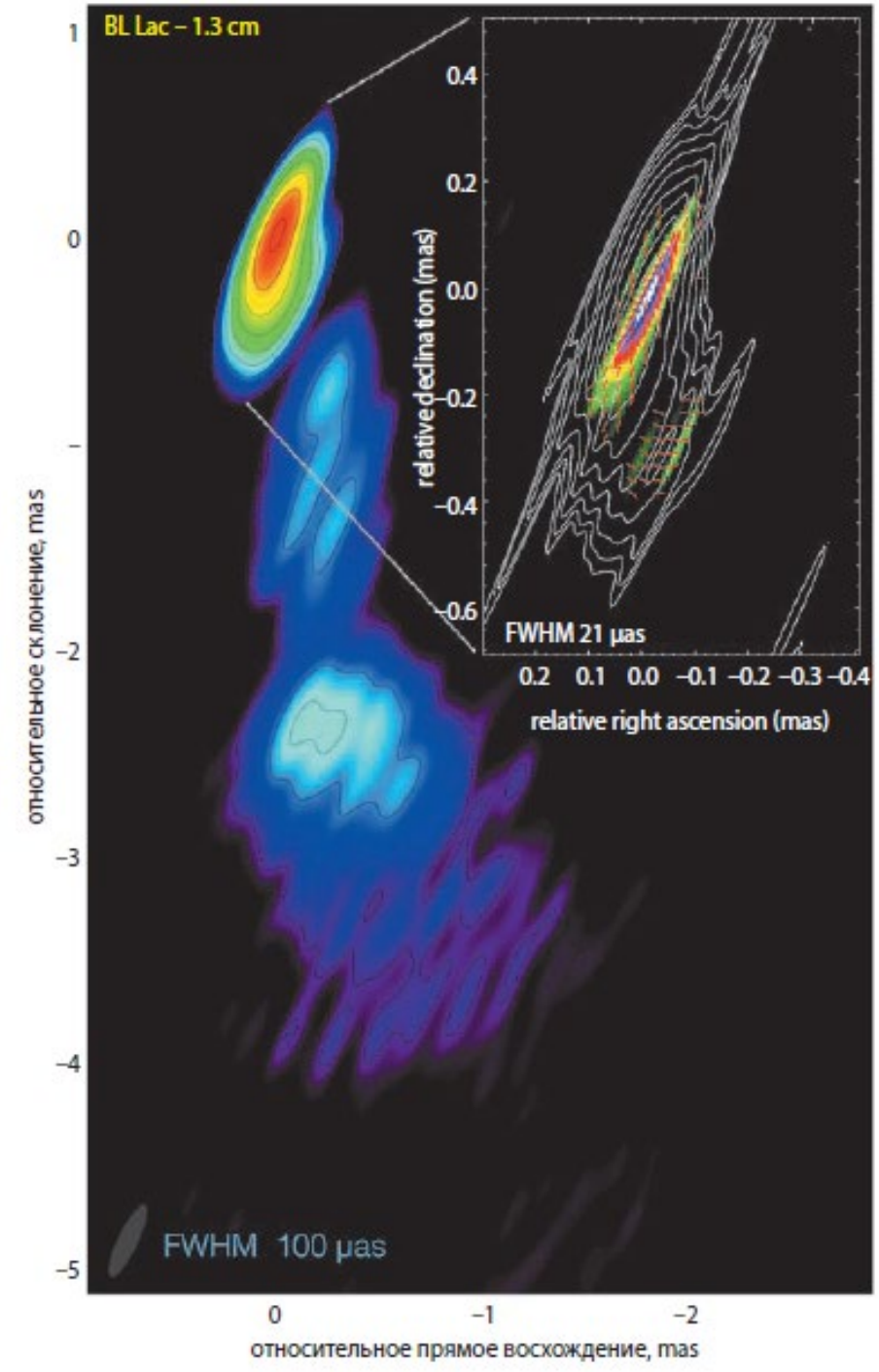
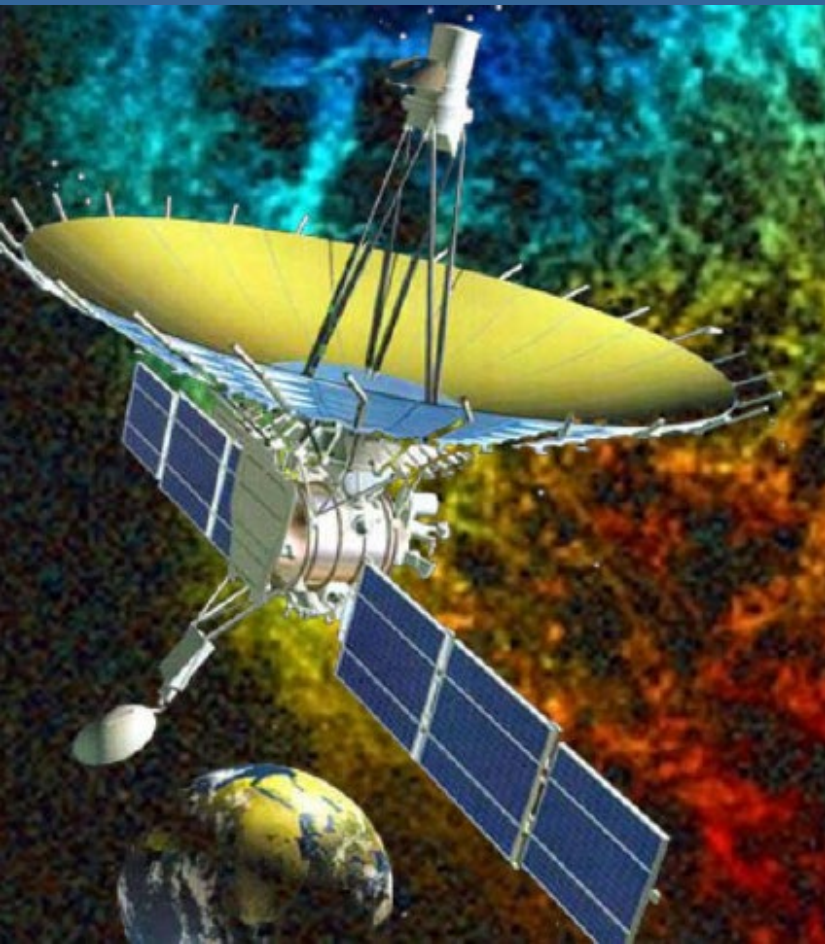
Проект «Радиоастрон»

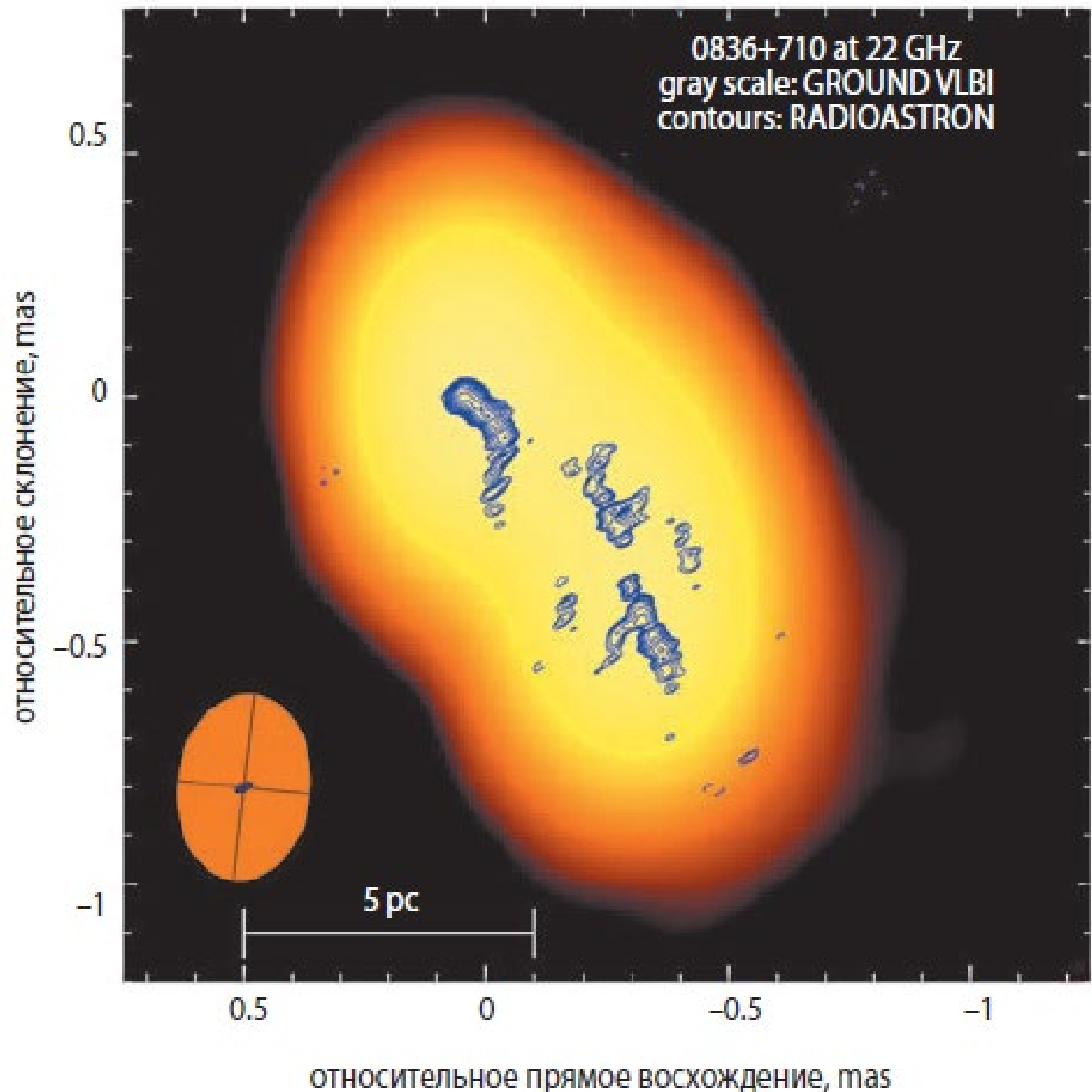
- Диаметр антенны 10 м
- База до 350 000 км
- Период орбиты 7-10 дней
- Диапазоны длин волн 1.35, 6.2, 18 и 92 см
- Угловое разрешение до 1 мкс дуги
- Полоса регистрации 128 мбит/с
- Запуск 18 июля 2011 г.
- Работал до 2019 г.





Рекордное угловое разрешение 21 мкс





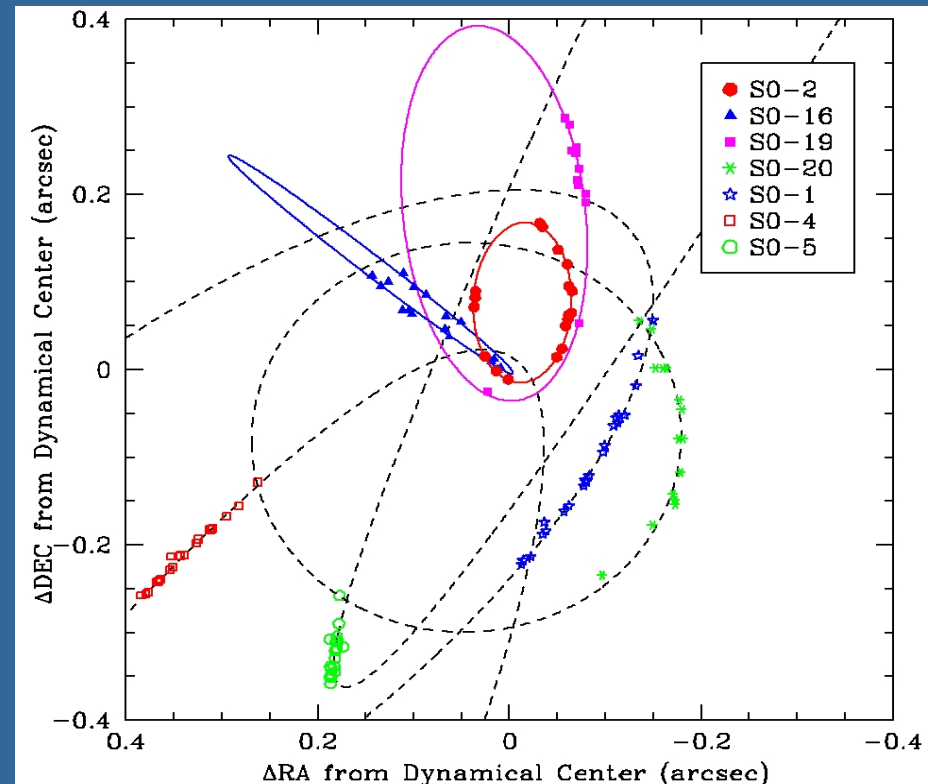
Достижение горизонта событий: центр галактики

Радиоисточник SgrA* обозначает положение сверхмассивной черной дыры (~4M масс Солнца) в центре галактики:

Собственное движение SgrA* мало, и мы видим окружающие звезды, вращающиеся вокруг невидимой массы.

Ghez et al 2005

- Измерение орбит окружающих звезд показывает, что масса черной дыры 4 миллиона масс Солнца!
- Для определения размеров черной дыры требуется РСДБ на волне 1 мм



Коллаборация «Телескоп горизонта событий»»

(Event Horizon Telescope (EHT) collaboration)

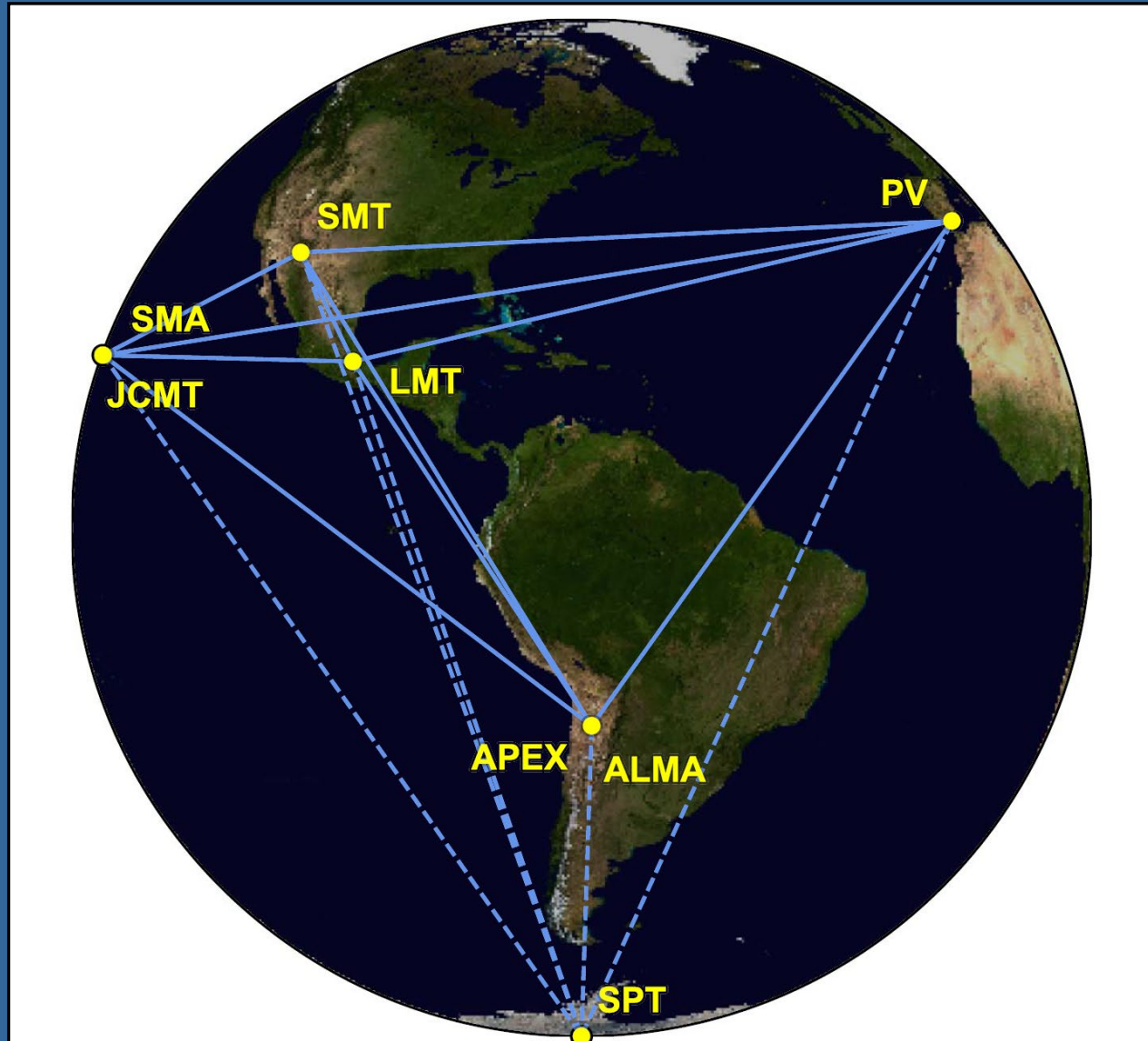
Основана 2014

Сейчас около 200
участников

8 обсерваторий
(APEX и ALMA, Чили
SMA и JCMT, Гавайи
LMT,
Мексика
PV,
Испания
SMT,
Аризона
SPT, Южный
полюс)

1.3 мм

Разр. 20 μ угл. сек.




Первое фото черной дыры

(Event Horizon Telescope (EHT) collaboration)
(5,6,10 и 11 апреля 2017 г., 2 года обработки,
прессрелиз 10 апреля 2019 + 6 статей)

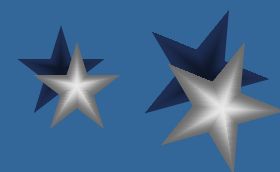
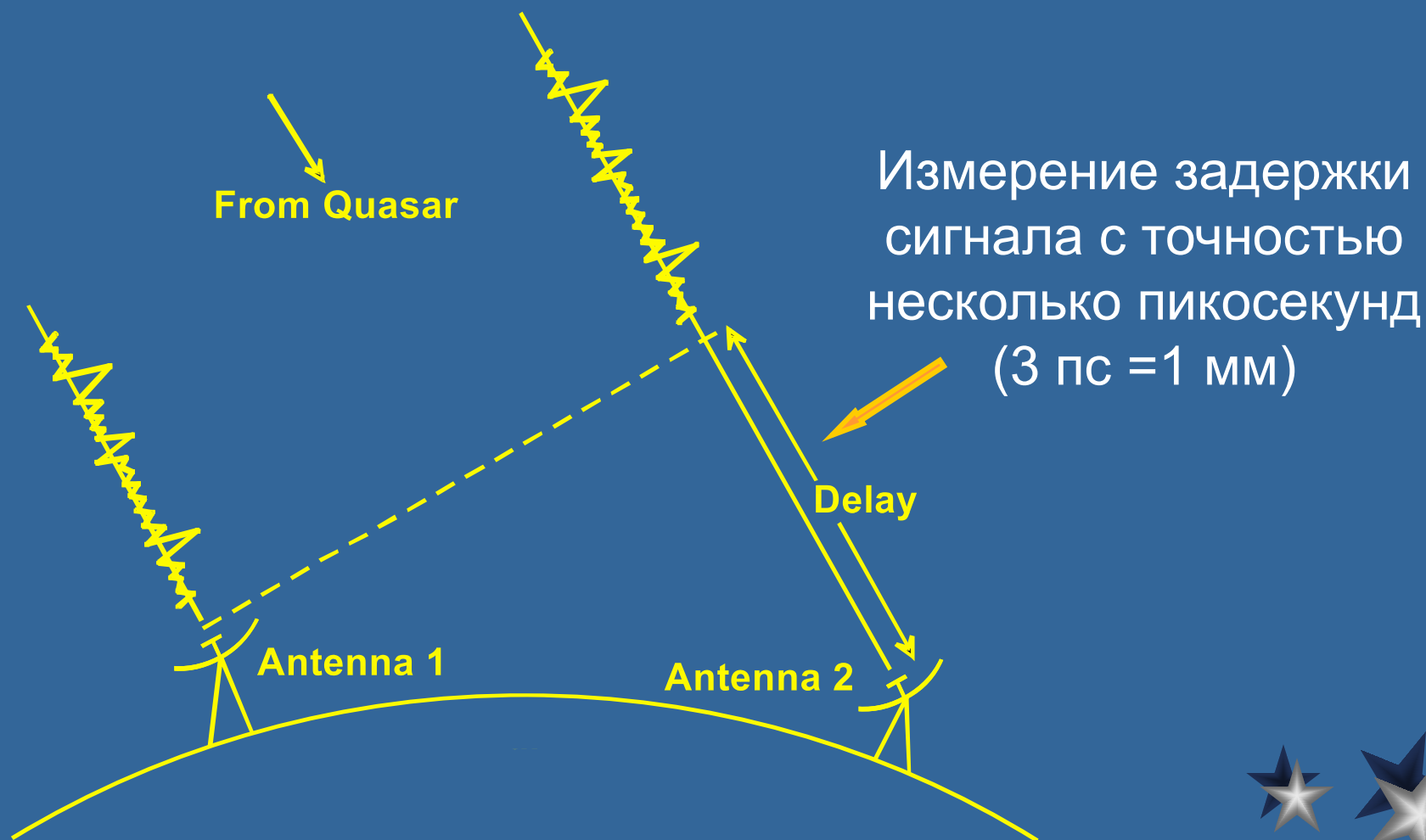




РСДБ для геодезии

- Самый высокоточный (несколько мм) метод, существующий для измерений глобальной тектоники
 - Измерения вращения Земли важны для военной и гражданской навигации
 - Фундаментальная калибровка спутниковой группировки ГНСС в небесной системе координат
 - Измерения с высоким пространственным и временным разрешением для изучения внутреннего строения Земли
- 

Принцип геодезической РСДБ



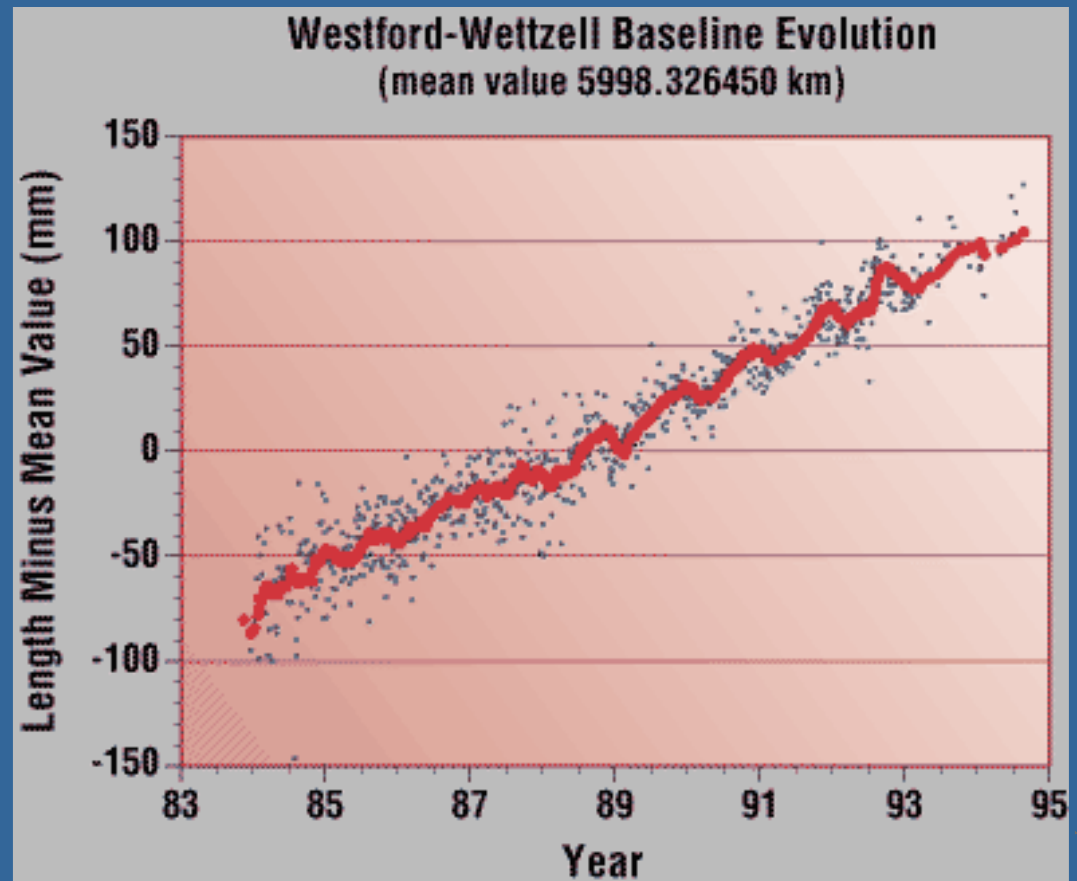
РСДБ измерения дрейфа КОНТИНЕНТОВ



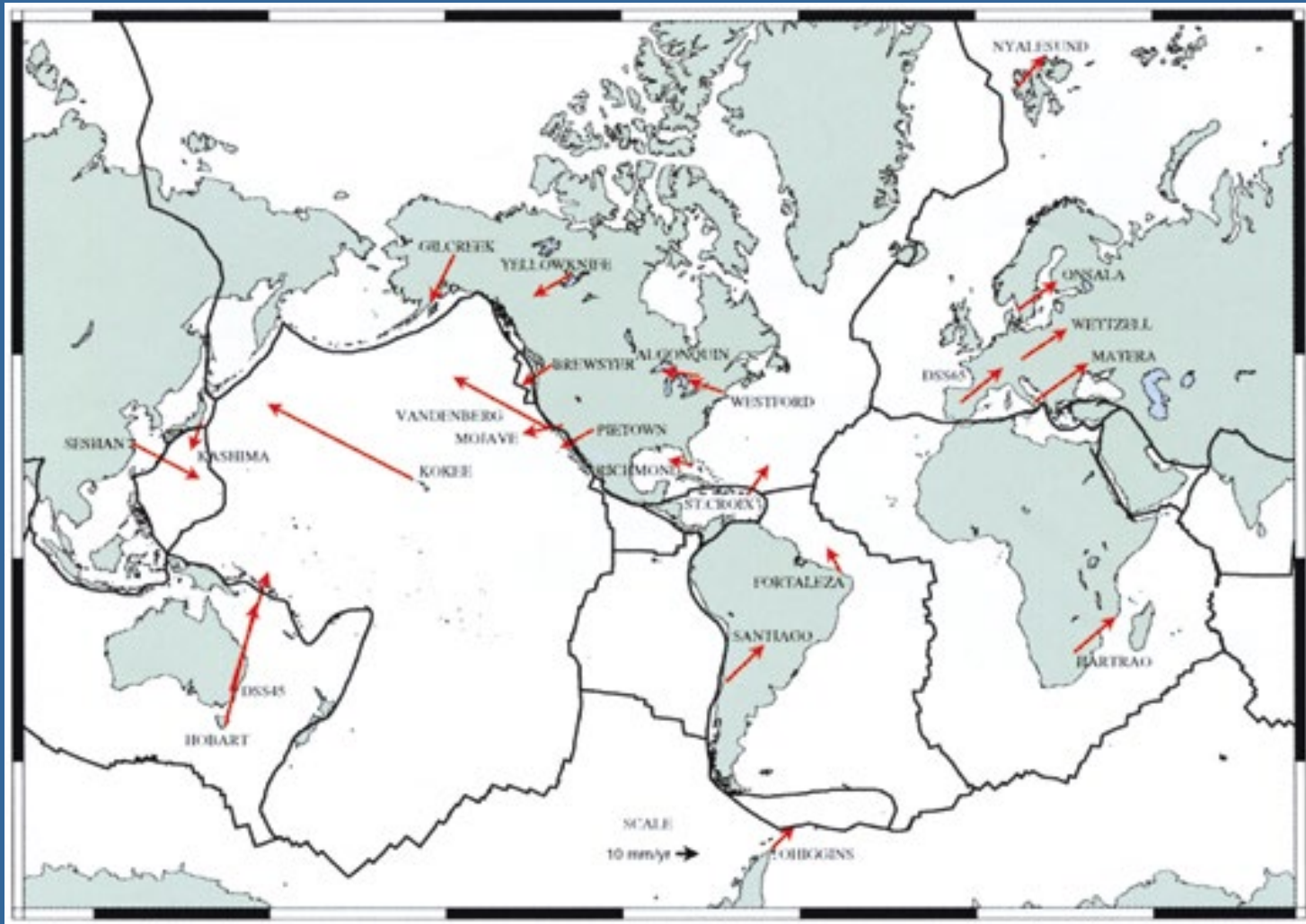
Движение Земной
коры:

Смещения при
землетрясениях

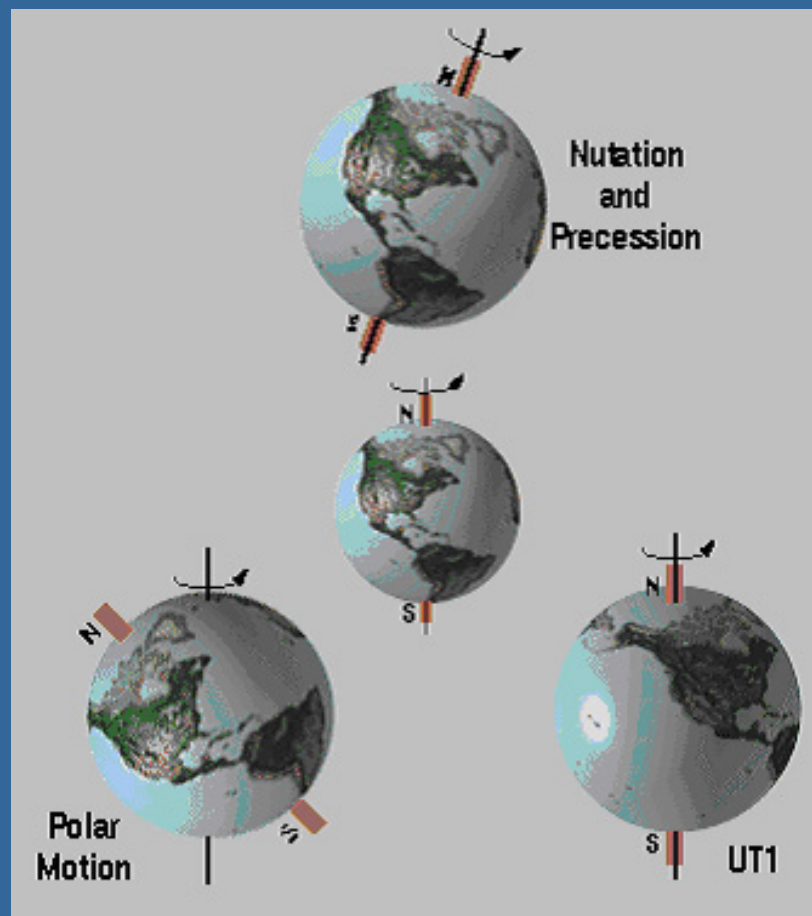
Движение
тектонических
плит



Непосредственные РСДБ измерения движения тектонических плит



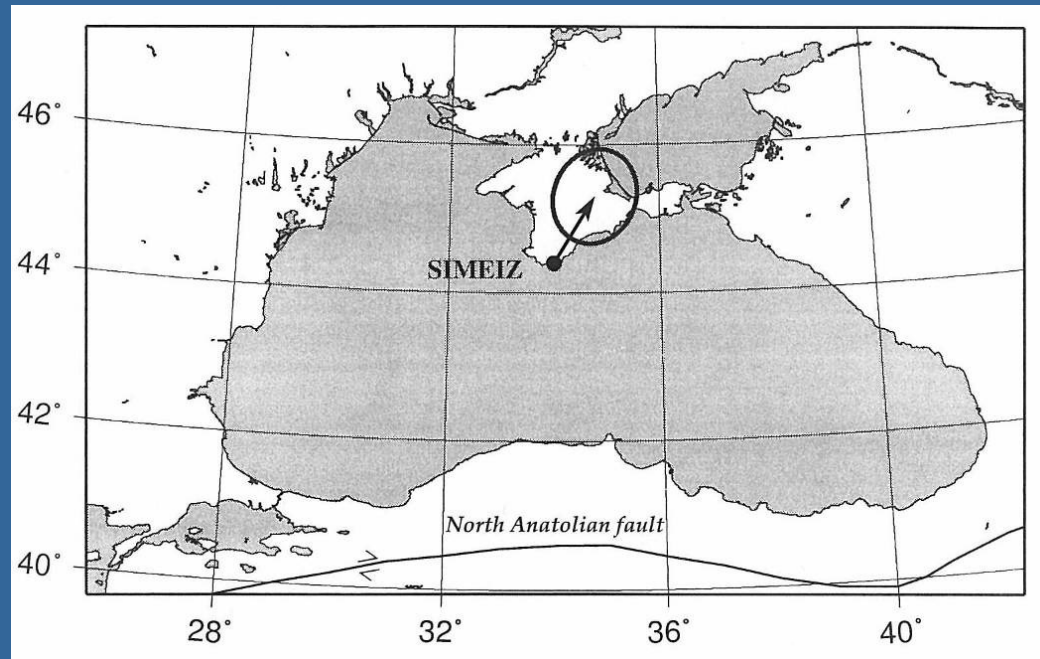
Колебания Земной оси



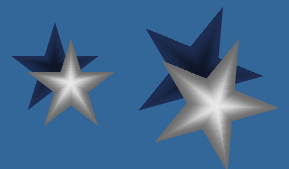
Куда движется Крым?



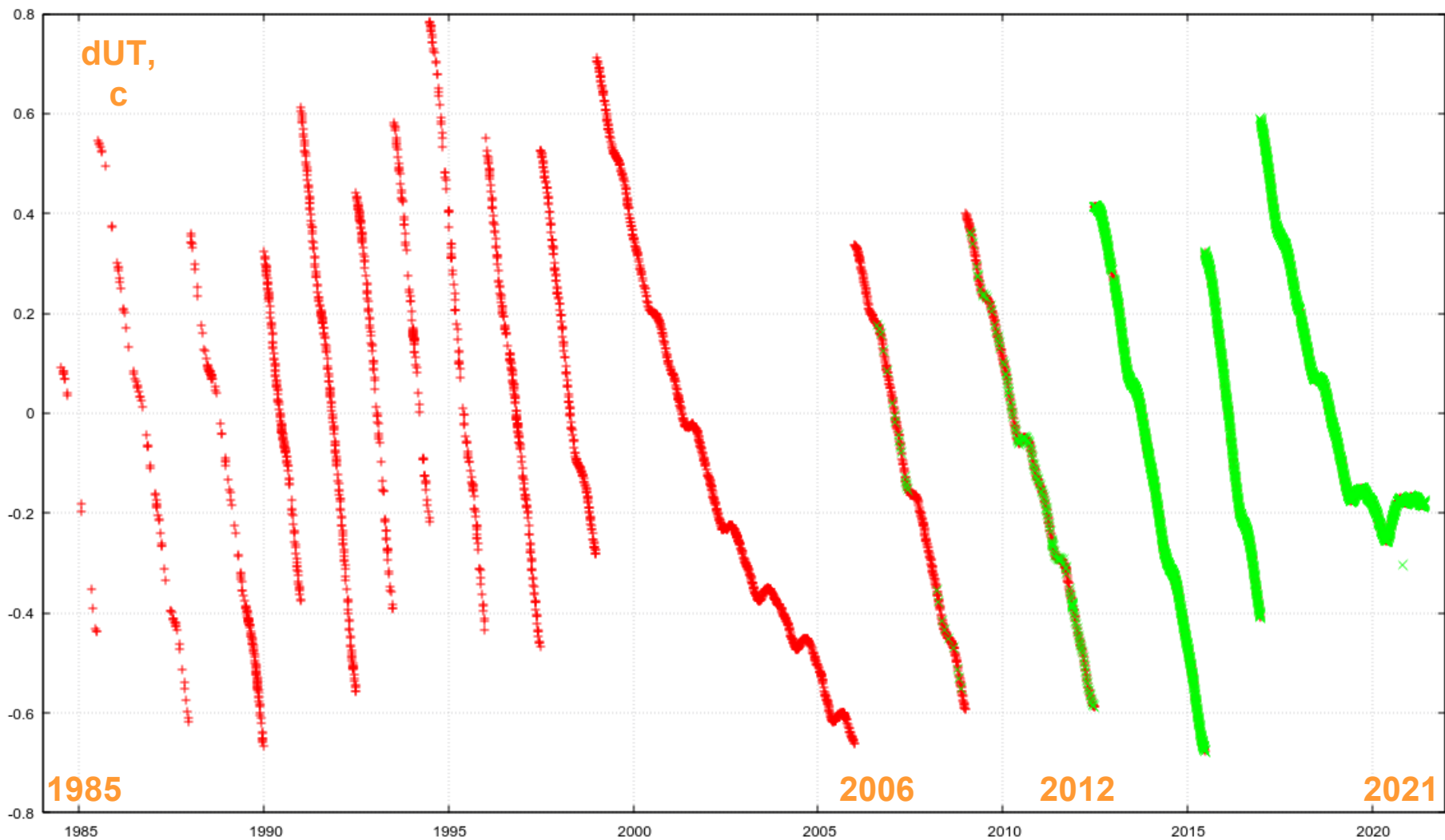
Скорости европейских станций РСДБ



Измеренная методом РСДБ скорость станции Симеиз **~2.9 мм в год**



Определение поправки всемирного времени

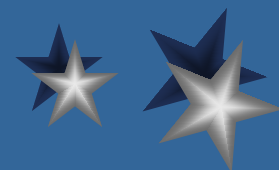


IERS – красный, ИГА - зеленый

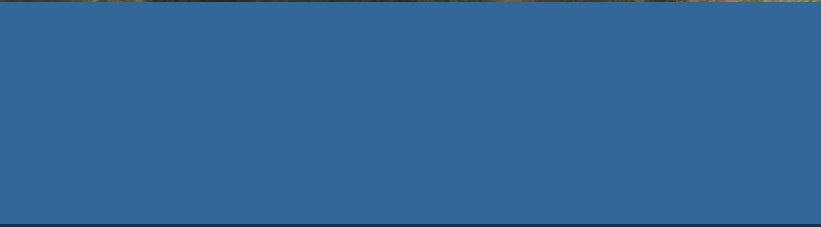


Проект VLBI2010

- Измерения несколько раз в сутки
- Антенны малого диаметра
- Широкие полосы регистрируемого сигнала
- Режим реального времени



Строительство фундамента и опорной башни радиотелескопа РТ-13 в Бадарах



Сборка антенны радиотелескопа РТ-13 в Бадарах



Радиотелескоп РТ-13






Панорама обсерватории Бадары





Программный РСДБ-коррелятор на гибридном процессорном кластере

- **Входной поток данных 16 Гбит/с от каждой станции:**
 - 2-битовое квантование
 - Основные режимы регистрации сигналов:
 - 4 частотных диапазона, 1 поляризация, ширина полосы пропускания 1024 МГц, поток данных 4 Гбит/с
 - 4 частотных диапазона, 2 поляризации, ширина полосы пропускания 512 МГц, поток данных $4=2 \times 2$ Гбит/с
 - 8 частотных диапазонов, ширина полосы пропускания 512 МГц, поток данных 2 Гбит/с
 - **Одновременно обрабатываемых сигналов станций – до 6**
 - **Вычисление точек кросс-спектров – до 4096**
 - **Выделение тонов ГПИ в каждом частотном канале – до 16**
 - **Точность вычисления групповых задержек – не хуже 10 пс.**
- 

Вычислительный комплекс коррелятора



- Количество ЦПУ Intel E5-2670, 8-core, 2.6 GHz – 80
- Количество ГПУ Nvidia Tesla K20 – 80
- Суммарная пиковая производительность кластера – 85,5 Tflops



Радиометр водяного пара

Контролируемые параметры атмосферы:

«влажностная» тропосферная задержка (ВТЗ) распространения радиосигнала, обусловленная наличием водяного пара в нижних слоях тропосферы;

интегральное содержание водяного пара в зенитном направлении;

интегральное содержание конденсированной воды;

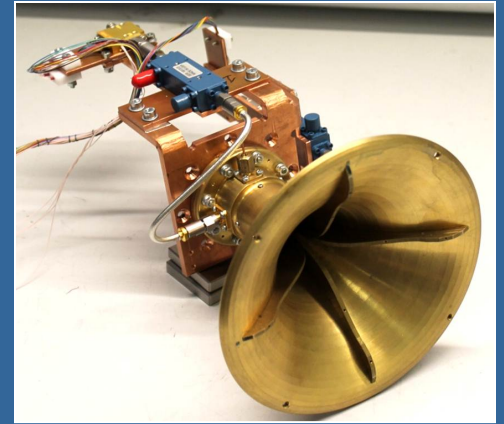
коэффициенты поглощения радиосигнала на двух частотах К и Ка диапазонов;

эффективная температура излучения атмосферы на склонах H_2O линии излучения (21ГГц и 32ГГц);

вертикальное распределение температуры атмосферы, измеряемое до высот 1000 м и её расчётные значения вплоть до высот 10000 м.

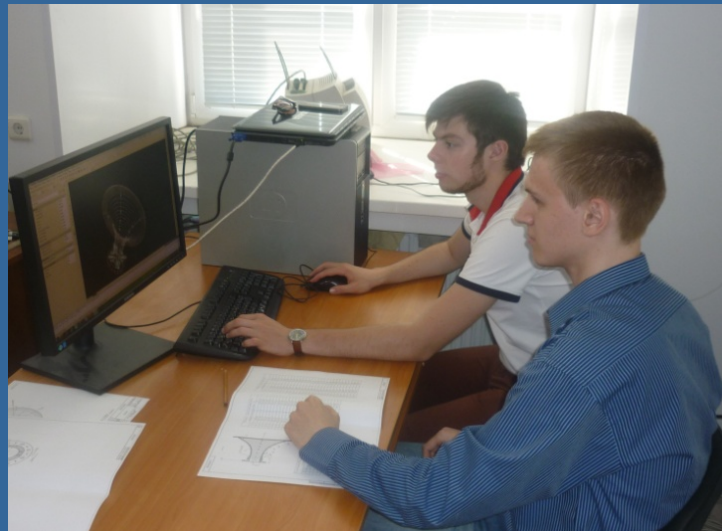


Аппаратура радиотелескопа РТ-13



Базовые кафедры ИПА РАН

- Базовая кафедра «Радиоастрономия» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»
- Базовая кафедра «Прикладная радиоастрономия» в составе Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета



Спасибо за внимание!



Обсерватория «Бадары»