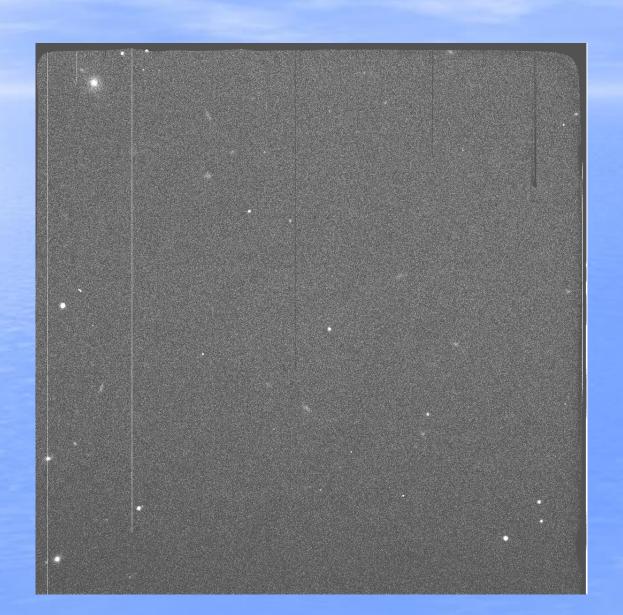
# РСДБ и общая теория относительности

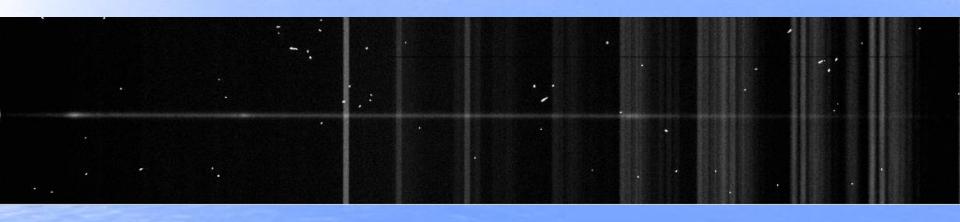
Олег Титов (Geoscience Australia)

Санкт-Петербургский Университет 21 апреля 2015

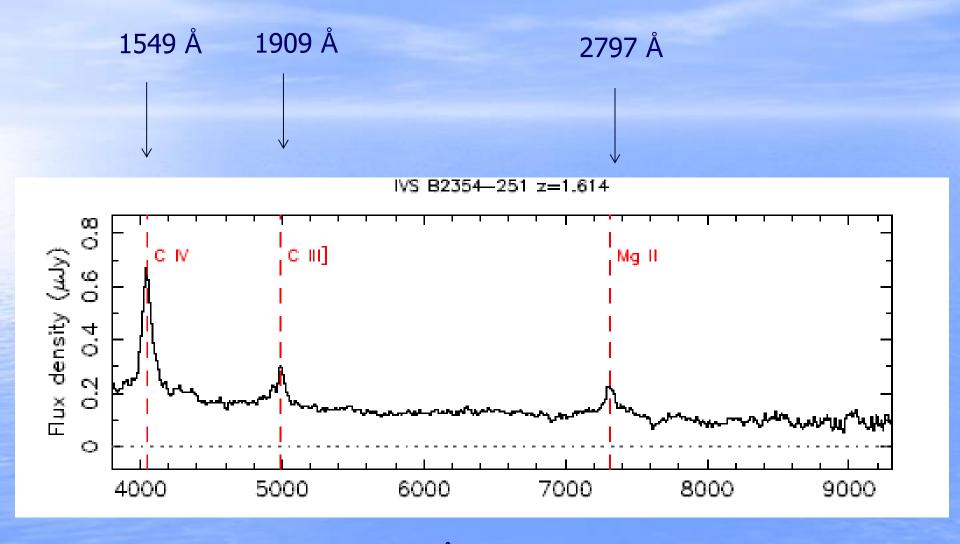
### Квазар 2354-251



### Спектр квазара 2354-251

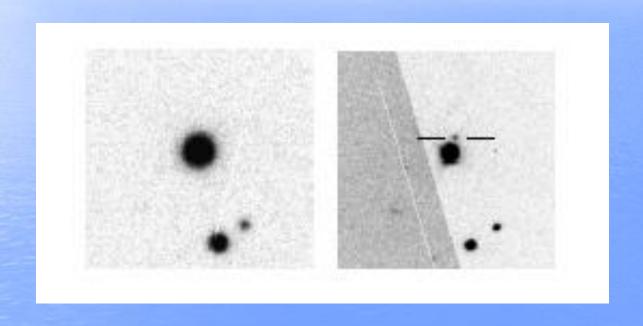


#### Спектр квазара 2354-251



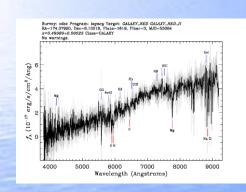
$$z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{rest}} - 1$$

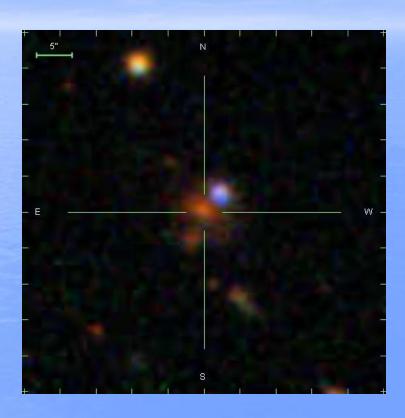
#### Квазары любят прятаться за спиной у звезд...

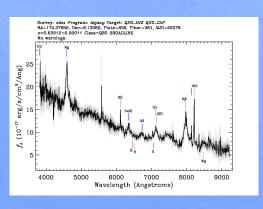


Квазар 2300-307 на телескопе NTT, слева при плохом качестве изображения (2", август 2010) и при хорошем (0".6, декабрь 2011)

#### ... и галактик

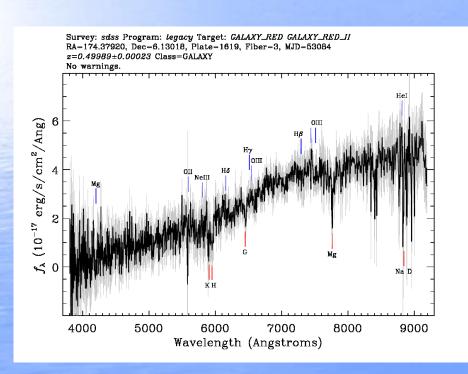


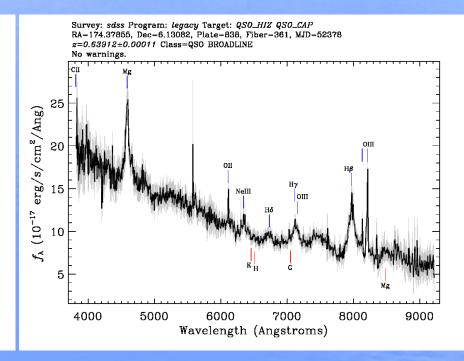




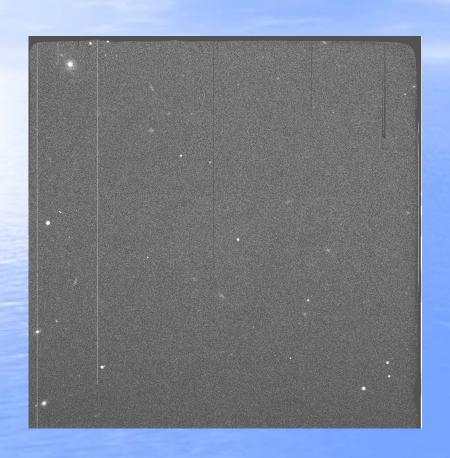
Тесная пара "галактика - квазар" (SDSS DR9)

#### Линии поглощения в спектре более далекого объекта соответствуют красному смещению более близкого





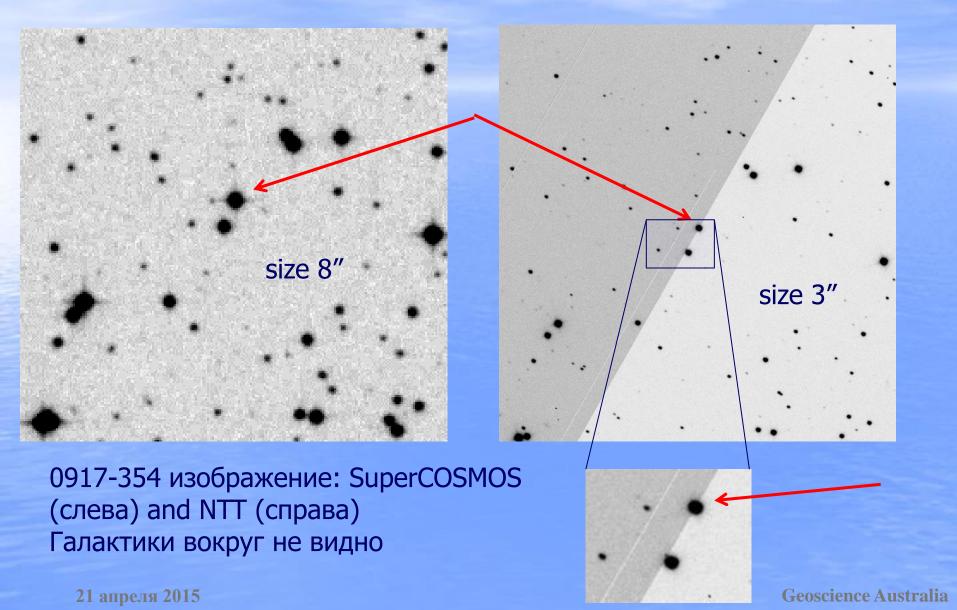
#### Как отличить галактику от квазара?



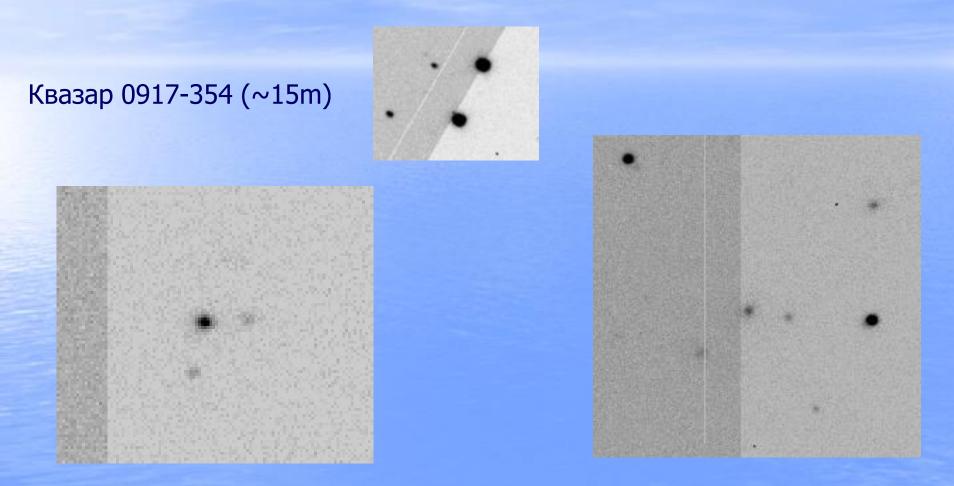


2354-251 (слева) and секстет Сейферта (справа)

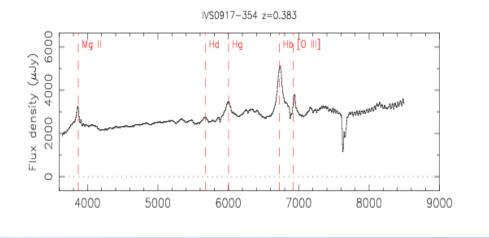
# Квазар 0917-354 (~15m)

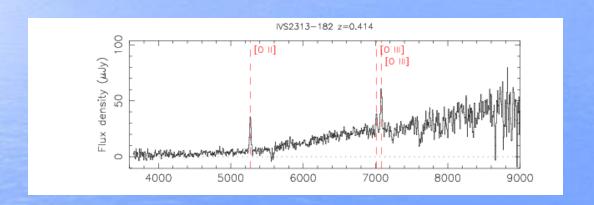


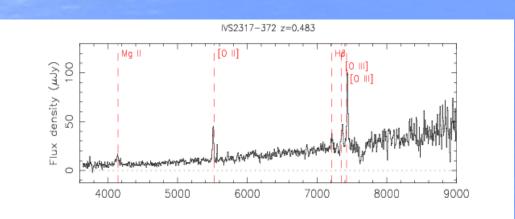
#### Как отличить галактику от квазара?



Галактики 2313-182 (слева) and 2317-372 (справа)

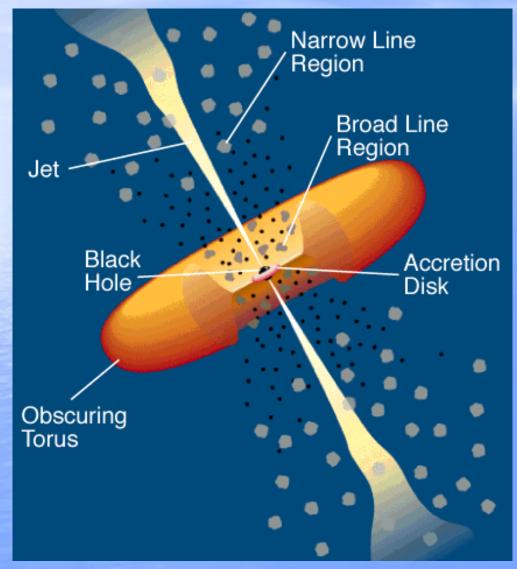






Спектры у них разные!

#### Модель активного галактического ядра (AGN)



 $http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/agn/agn\_model.html\\$ 

Credit: C.M. Urry and P. Padovani, 1995

Schematic of

Active Galactic Nuclei

Redshift z~ 0.1 to 5

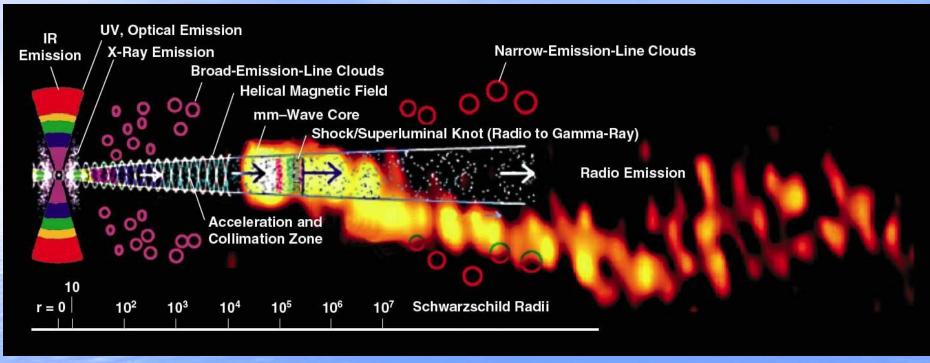
Distance:
billions light years

Parallax = 0

Proper motion
< 0.1 nrad/yr

Видимый размер центральной области излучения (черная дыра) становится меньше с ростом частоты наблюдения Ка-band (32 GHz) лучше, чем X-band (8.4 GHz)

# Active Galactic Nuclei (Marscher)



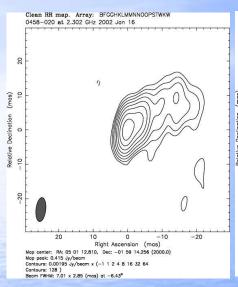
R~0.1-1 μas

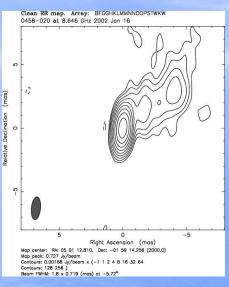
1mas

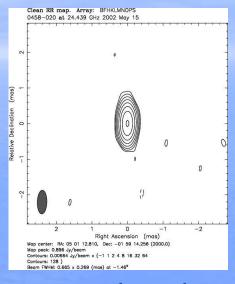
Features of AGN: Note the Logarithmic length scale.

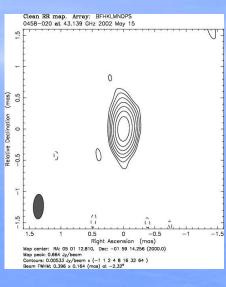
Credit: Alan Marscher, `Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei and their relationship to the Central Engine,' Proc. of Science, VI Microquasar Workshop: Microquasars & Beyond, Societa del Casino, Como, Italy, 18-22 Sep 2006. Overlay (not to scale): 3 mm radio image of the blazar 3C454.3 (Krichbaum et al. 1999)

#### Структура радиоисточника в зависимости от частоты излучения









S-band
2.3 GHz
13.6cm

X-band 8.6 GHz 3.6cm K-band 24 GHz 1.2cm

Q-band 43 GHz 0.7cm

Угловой размер становится меньше

Ka-band 32 GHz 0.9cm РСДБ –

Радиоинтерферометрия на Сверх Длинной Базе

#### РСДБ

Появилась в 1964-1965 гг,

после изобретения атомных часов и открытия квазаров

Разделилась на астрономическую РСДБ и геодезическую РСДБ в ~1980,

Астрономическая РСДБ – построение изображений, пульсары, радиоспектры и т.д.

Геодезическая РСДБ — координаты квазаров, координаты радиотелескопов, ПВЗ, движение континентов и т.д.

#### Геодезическая РСДБ

Разрабатывалась в 1970е годы

Первые «приличные» наблюдения – в 1979 году

Регулярные наблюдения – в конце 1983 года (4 станции – один раз в 5 дней)

Wettzell (Германия) HRAS 085, Richmond, Westford (США) Onsala60 (Швеция) — 1 раз в месяц

### Westford



## Hobart26



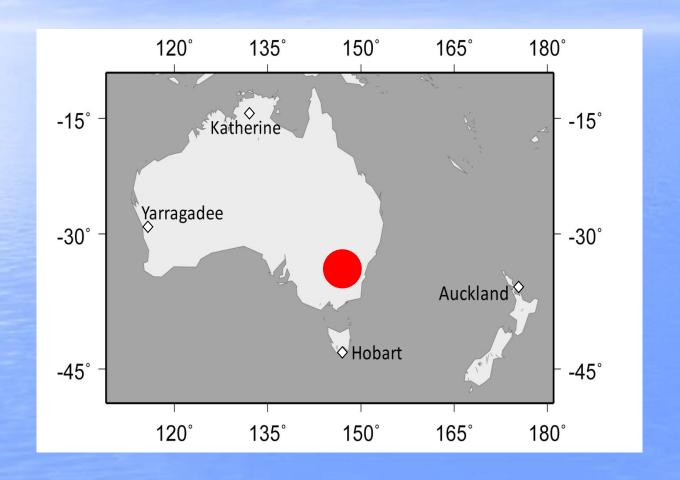
a



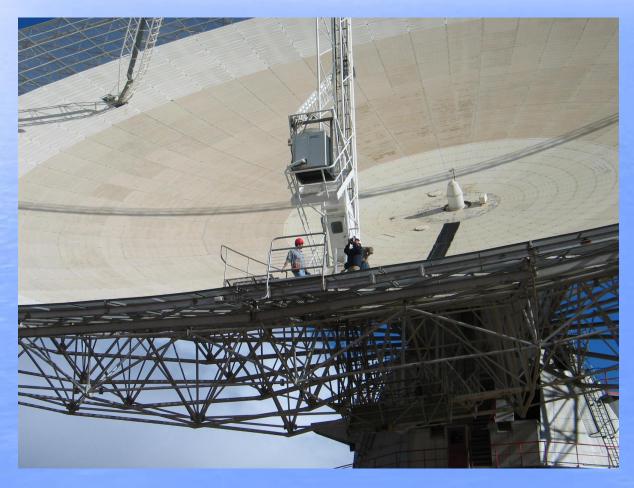
## IVS сеть РСДБ антенн (2015)



#### Australian (AuScope) – New Zealand network



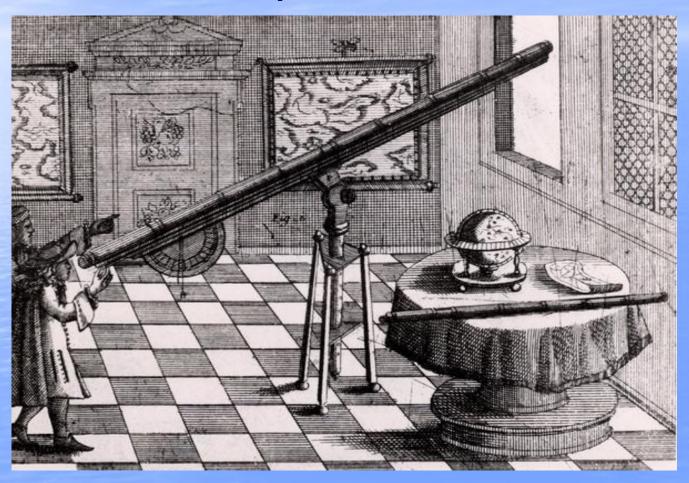




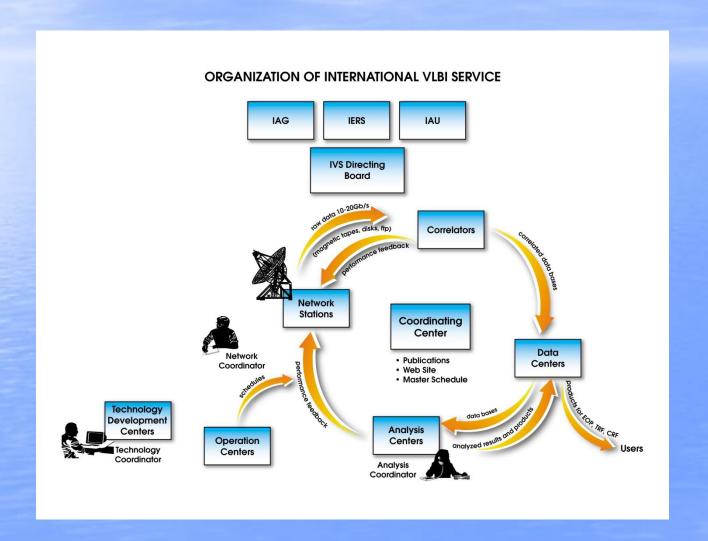




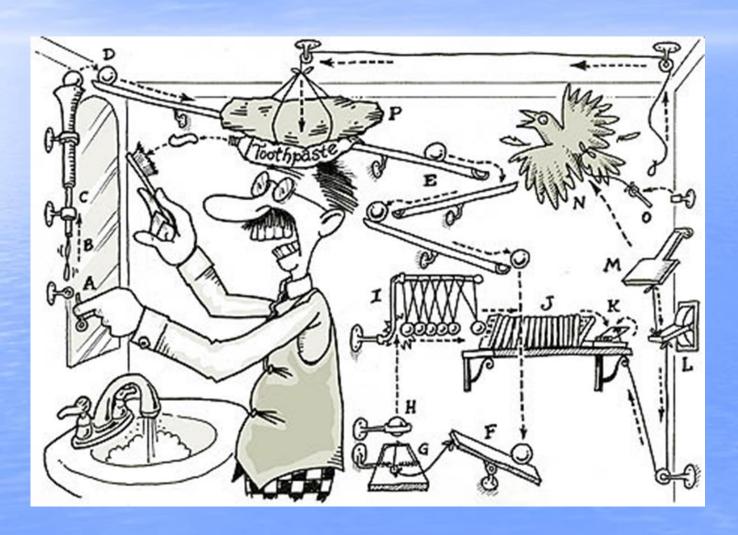
# Как работает оптическая наземная астрономия!



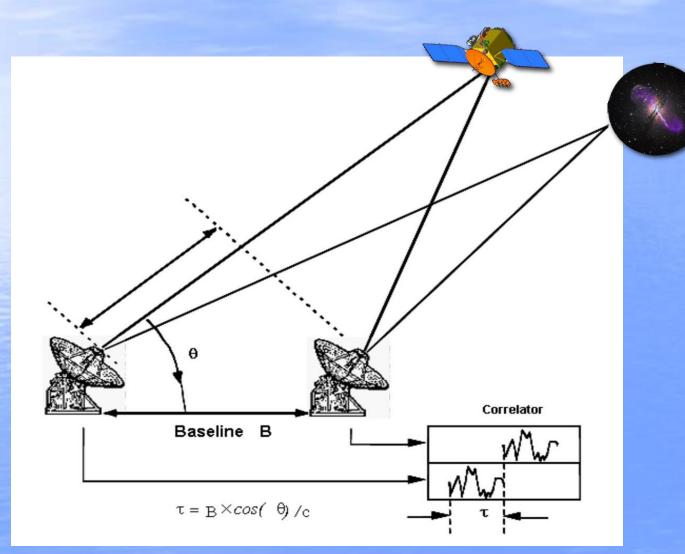
# Как работает РСДБ!



# Как работает РСДБ!



# Что измеряет РСДБ?



$$\tau = -\frac{b}{c}\cos\theta$$

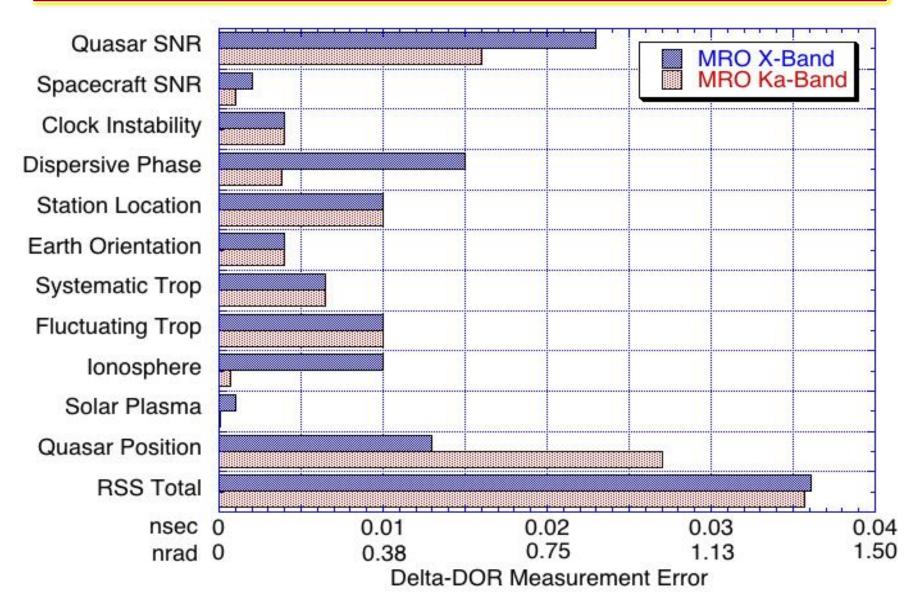
$$\tau = -\frac{(\bar{b}, \bar{s})}{c}$$

Временная задержка



#### ΔVLBI Error Budget





# Каталог ICRF2 (2009)

3414 sources separated into 3 groups

- 1. 295 defining sources with the positional accuracy ~0.04 mas
- 2. 922 "non-defining" sources
- 3. 2197 VCS sources

# Что получается из РСДБ?

- 1. Параметры вращения Земли (UT1-UTC и координаты полюса)
- 2. Ориентация Земли в пространстве (углы нутации)
- 3. Точные координаты радиотелескопов (Земная система координат)
- 4. Тектонические скорости движения материковых плит
- 5. Точные координаты радиоисточников

# Общая теория относительности (ОТО)

Эйнштейн (1916)

Деформация пространства-времени в присутствие гравитационных полей

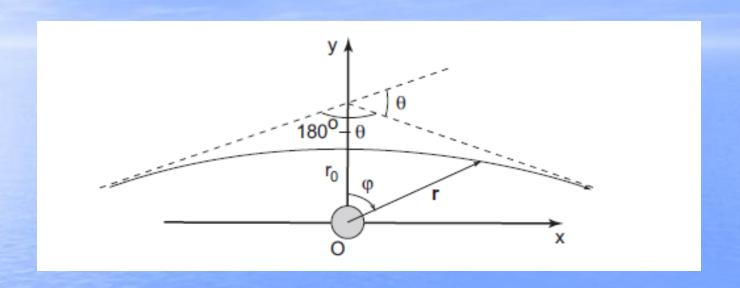
$$c^{2}d\tau^{2} = \left(1 - \frac{r_{s}}{r}\right)c^{2}dt^{2} - \left(1 - \frac{r_{s}}{r}\right)^{-1}dr^{2} - r^{2}\left(d\theta^{2} + \sin^{2}\theta \,d\varphi^{2}\right),$$

$$\frac{2Gm}{c^2} = r_s$$

# Общая теория относительности Тесты

- 1. Движение перигелия Меркурия
- 2. Искривления луча света в поле тяготения Солнца (1919)
- 3. Гравитационное красное смещение
- 4. "Forth test of general relativity", I. Shapiro (1964) Запаздывание луча света в поле тяготения Солнца

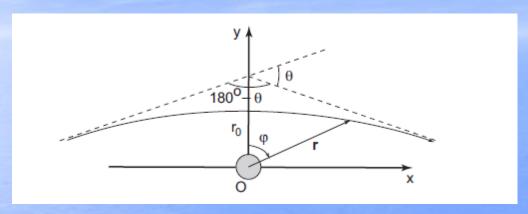
## Искривление луча света



Данное представление "работает" только для приближения малых углов!

В отличие от обычной линзы, чем дальше проходит свет, тем меньше преломление!

# Замедление сигнала (эффект Шапиро)



$$ds^{2} = c^{2}(1 - 2\phi)dt^{2} - (1 + 2\phi)dr^{2}$$

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = c^2 \frac{1 - 2\phi}{1 + 2\phi}$$

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{n}, \quad n \approx 1 + 2\phi,$$

$$\frac{dr}{dt} = c\sqrt{\frac{1-2\phi}{1+2\phi}} \approx c(1-2\phi).$$

$$\tau = \frac{b}{c} \qquad \tau' = \frac{b}{c'}$$

Если координатная скорость больше, сигналу требуется дополнителньое время, чтобы пройти то же самое расстояние

## Эффект ОТО в РСДБ

$$\tau_{GR} = \tau_{grav} + \tau_{coord} = \frac{(1+\gamma)GM}{c^3} \ln \frac{|\mathbf{r}_1| + (\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{s})}{|\mathbf{r}_2| + (\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{s})} + \frac{(\mathbf{b} \cdot \mathbf{s})}{c} \frac{(1+\gamma)GM}{c^2 r}$$

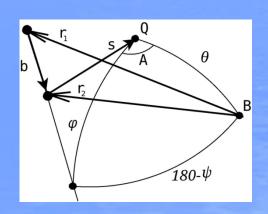
В эту формулу входят сразу два эффекта ОТО

- 1. Искривление луча света
- 2. Замедление скорости распространения сигнала

# Эффект ОТО в РСДБ

$$\tau_{GR} = \tau_{grav} + \tau_{coord} = \frac{(1+\gamma)GM}{c^3} \ln \frac{|\mathbf{r}_I| + (\mathbf{r}_I \cdot \mathbf{s})}{|\mathbf{r}_2| + (\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{s})} + \frac{(\mathbf{b} \cdot \mathbf{s})}{c} \frac{(1+\gamma)GM}{c^2 r}$$

$$\tau_{GR} = \frac{(1+\gamma)GMb}{c^3 r} \frac{\sin \varphi \sin \theta \cos A}{1-\cos \theta}$$



# Эффект ОТО в РСДБ

$$\tau_{GR} = \frac{(1+\gamma)GMb}{c^3 r} \frac{\sin \varphi \sin \theta \cos A}{1-\cos \theta} + \dots$$

$$\alpha = \frac{(1+\gamma)GM}{c^2r} \frac{\sin\theta}{1-\cos\theta}$$

$$\tau_{GR} = \alpha \frac{b}{c} \cos A \sin \varphi + \dots$$

Формула связи угла отклонения света и временной задержки (не ограничивается случаем ОТО)

# Эффект ОТО в РСДБ (приближение малых углов: $\theta \rightarrow 0$ )

$$\frac{\sin\theta}{1-\cos\theta} = \frac{R/r}{1-(1-R^2/2r^2)}$$

$$\tau_{GR} = \frac{(1+\gamma)GMb}{c^3 r} \frac{\sin\varphi\sin\theta\cos A}{1-\cos\theta} + \dots$$

$$\alpha = \frac{(1+\gamma)GM}{c^2r} \frac{\sin\theta}{1-\cos\theta}$$

$$\gamma \equiv 1$$

$$\tau_{GR} = \frac{4GMb}{c^3} \frac{\sin \varphi \cos A}{R} + \dots$$

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2R}$$

$$\tau_{GR} = \alpha \frac{b}{c} \cos A \sin \varphi + \dots$$

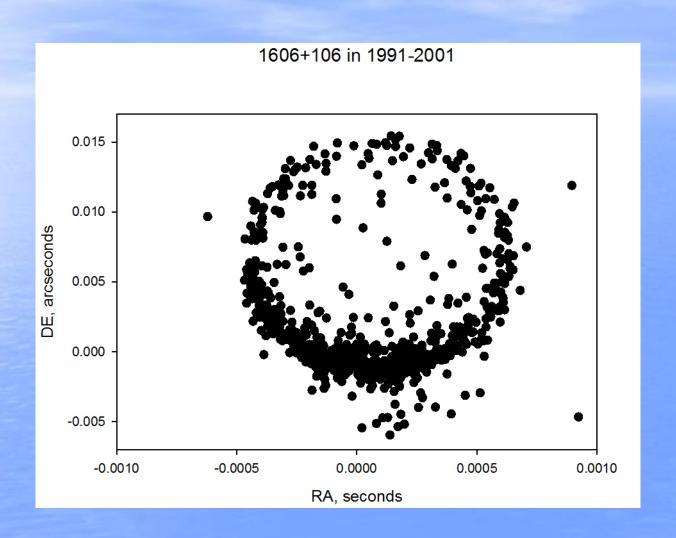
# Наблюдения радиоисточников возле Солнца

- 1. Квазары часто наблюдались возле Солнца в 1991-2002
- 2. Специальная кампания (S. Lambert) in 2011/2012
- 3. Наблюдения на сети AuScope+ (2014/2015)
- 4. Оценка параметра  $\gamma$  ( $\gamma$ ≡1 in GR)

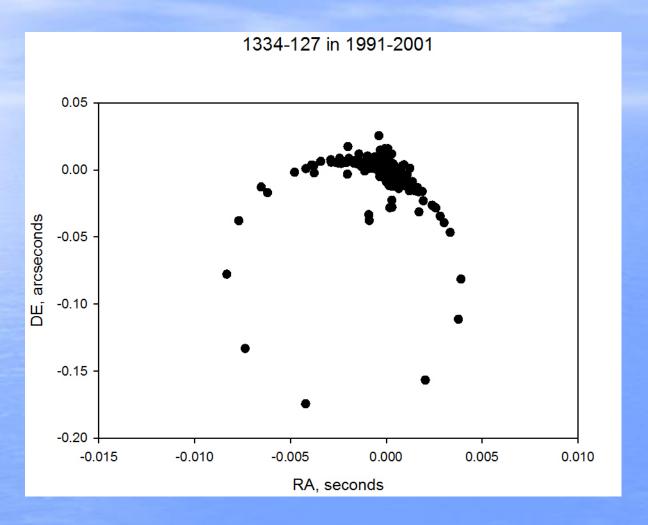
Наблюдения с "Кассини" (2005)  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ 

Глобальные РСДБ решения  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ 

#### Угол отклонения света для 1606+106

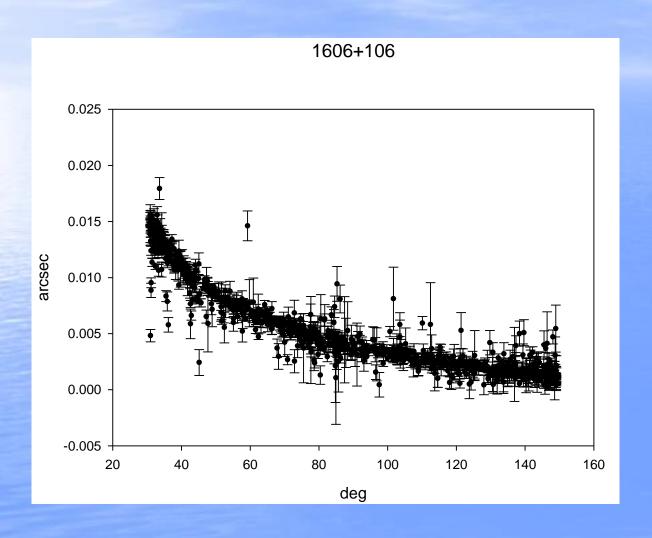


#### Угол отклонения света для 1334-127



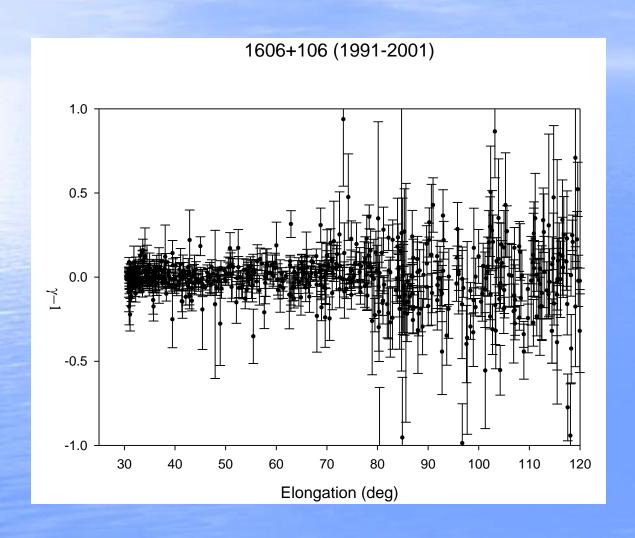
Минимальное расстояние от Солнца 2°.6

# Угол отклонения в зависимости от элонгации



$$\alpha = \frac{2GM}{c^2 r} \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta}$$

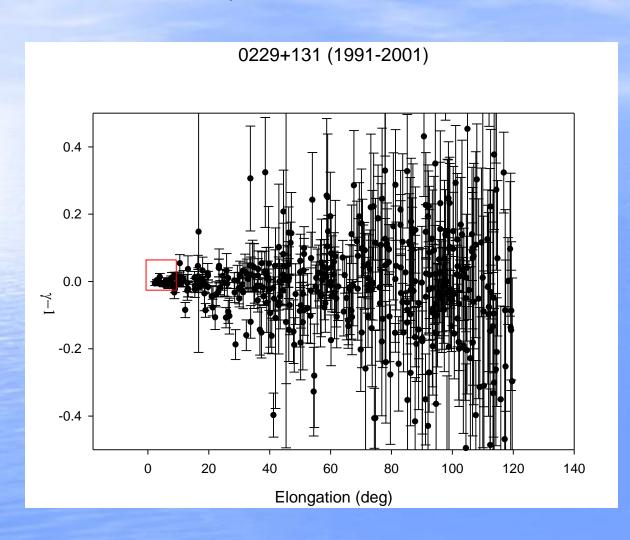
#### Параметр у в зависимости от элонгации



$$\alpha = \frac{(1+\gamma)GM}{c^2r} \frac{\sin\theta}{1-\cos\theta}$$

$$\gamma = \frac{\alpha c^2 r}{GM} \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta}$$

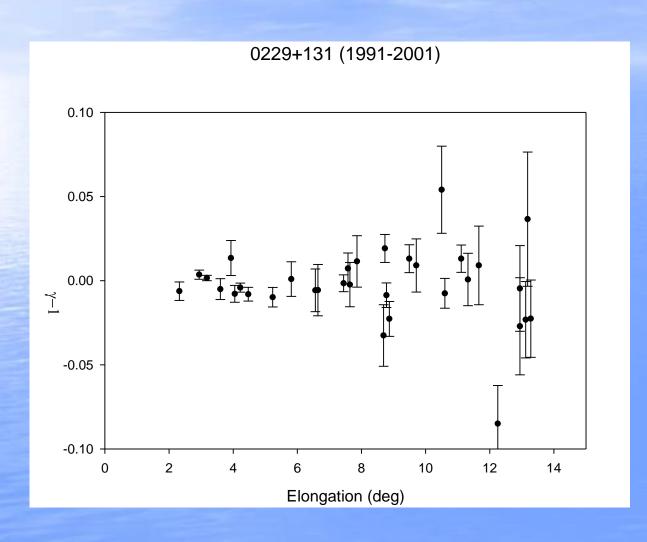
#### Параметр у в зависимости от элонгации



$$\alpha = \frac{(1+\gamma)GM}{c^2r} \frac{\sin\theta}{1-\cos\theta}$$

$$\gamma = \frac{\alpha c^2 r}{GM} \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta}$$

#### Параметр у в зависимости от элонгации



$$\alpha = \frac{(1+\gamma)GM}{c^2r} \frac{\sin\theta}{1-\cos\theta}$$

$$\gamma = \frac{\alpha c^2 r}{GM} \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta}$$

### Восприятие искривления света

Что думает публика	Что следует из РСДБ
Только в оптике	В радиодиапазоне
Только во время затмений	В любое время
Только возле Солнца	При любой элонгации
Только в хорошую погоду	При любой погоде
Только днем	В любое время суток

21 апреля 2015 Geoscience Australia

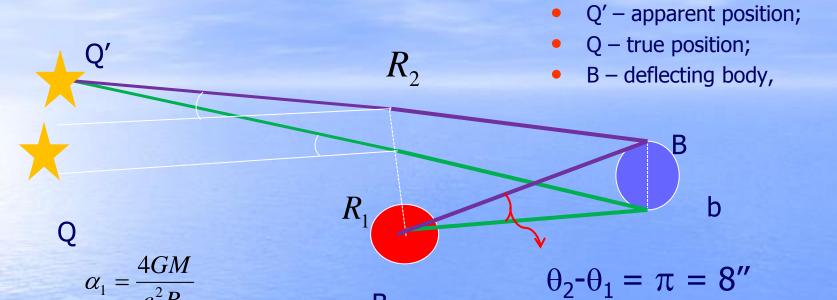
# Наблюдения радиоисточников возле Солнца

Date and session	Radio source	θ	Number of delays	γ
19-Oct 2014, Aust55	1334-127	2°.7	44 (400)	1.002 +/- 0.002
1-May 1996, NAVEX-S11	0229+131	3°.2	122	1.001 +/- 0.002
29-Apr 1997, NEOS-A209	0229+131	1°.6	7	1.007 +/- 0.006
2-Oct 2012, R&D1208	1243-072	3°.9	21	1.005 +/- 0.002

Глобальные РСДБ решения  $2 \cdot 10^{-4}$ 

"Кассини"  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ 

## Дифференциальное отклонение света



Traditional deflection angle (unobservable)

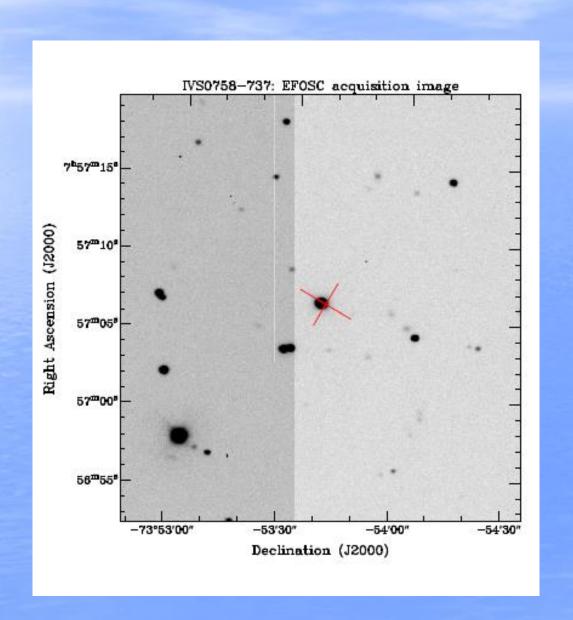
$$\alpha'' = \alpha_2 - \alpha_1 \sim \frac{4GMb}{c^2 R^2}$$

Additional deflection angle (observable), if  $b/R \sim 0.1$ 

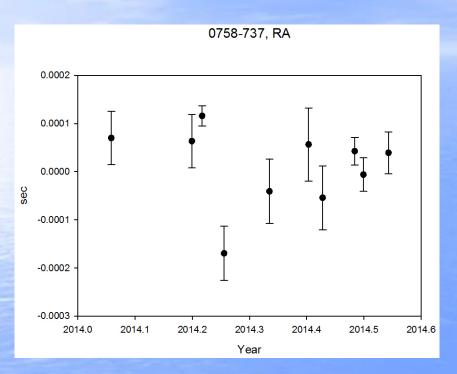
# Наблюдения радиоисточников возле Солнца

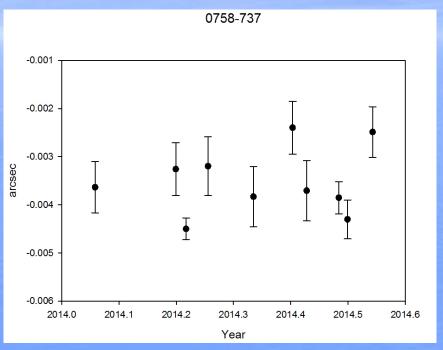
R (km) and $\theta$	α	α'	
		b=3000km	b=10000km
700,000 (0°.25)	1".75	0".0038	0".0125
$2.8 \times 10^6$ (1°)	0".45	0".00024	0".00078
5.610 <sup>6</sup> <b>(2°)</b>	0".22	0".00006	0".00019
$15 \times 10^6$ (5°)	0".09	0".00001	0".00003

### 0758-737 – квазар за звездой



#### 10 наблюдательных сессий в 2014





- 1. Поправка по склонению в 3 миллисекунды дуги
- 2. Радио источник расположен в пределах 1"
- 3. Линзирование или "плохие" начальные координаты?

#### Выводы

- 1. Квазары и галактики разные объекты, как в радио, так и в оптике
- 2. РСДБ технология, очень удобная для тестирования ОТО (сразу 2 теста). Ежедневно РСДБ тестирует ОТО умеренной точностью.
- 3. При правильной постановке эксперимента можно оценить параметр  $\gamma$  с очень большой точностью при минимальных затратах.

21 апреля 2015 Geoscience Australia

# Благодарю за внимание!