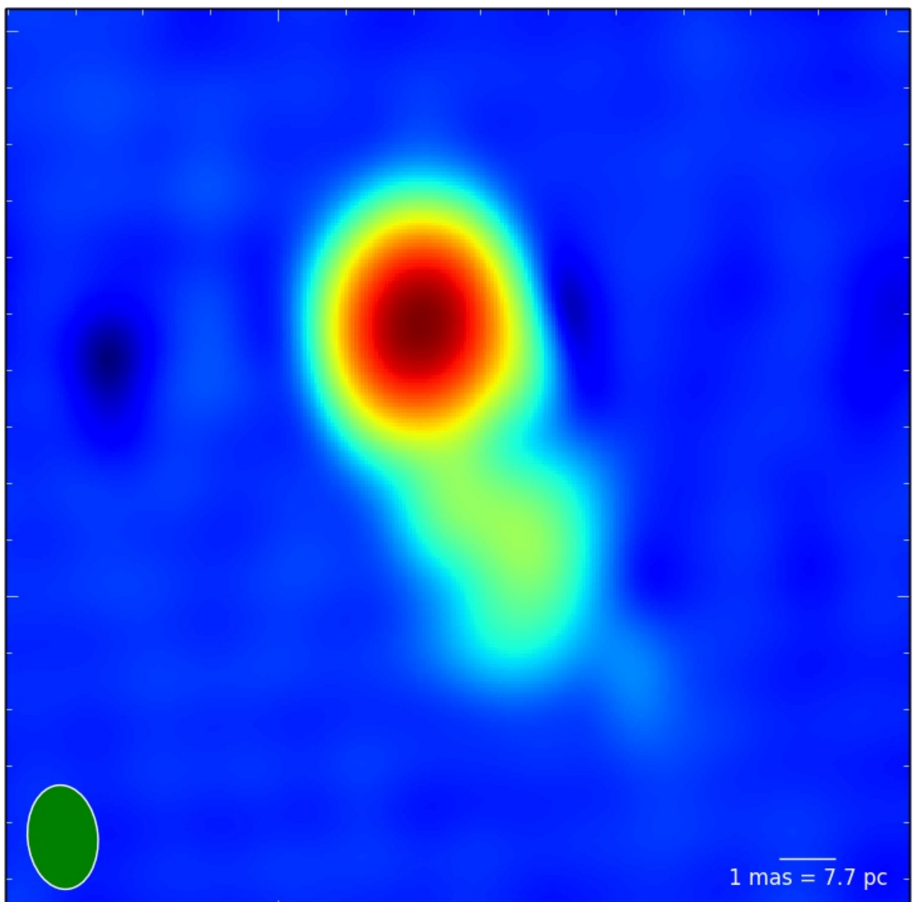
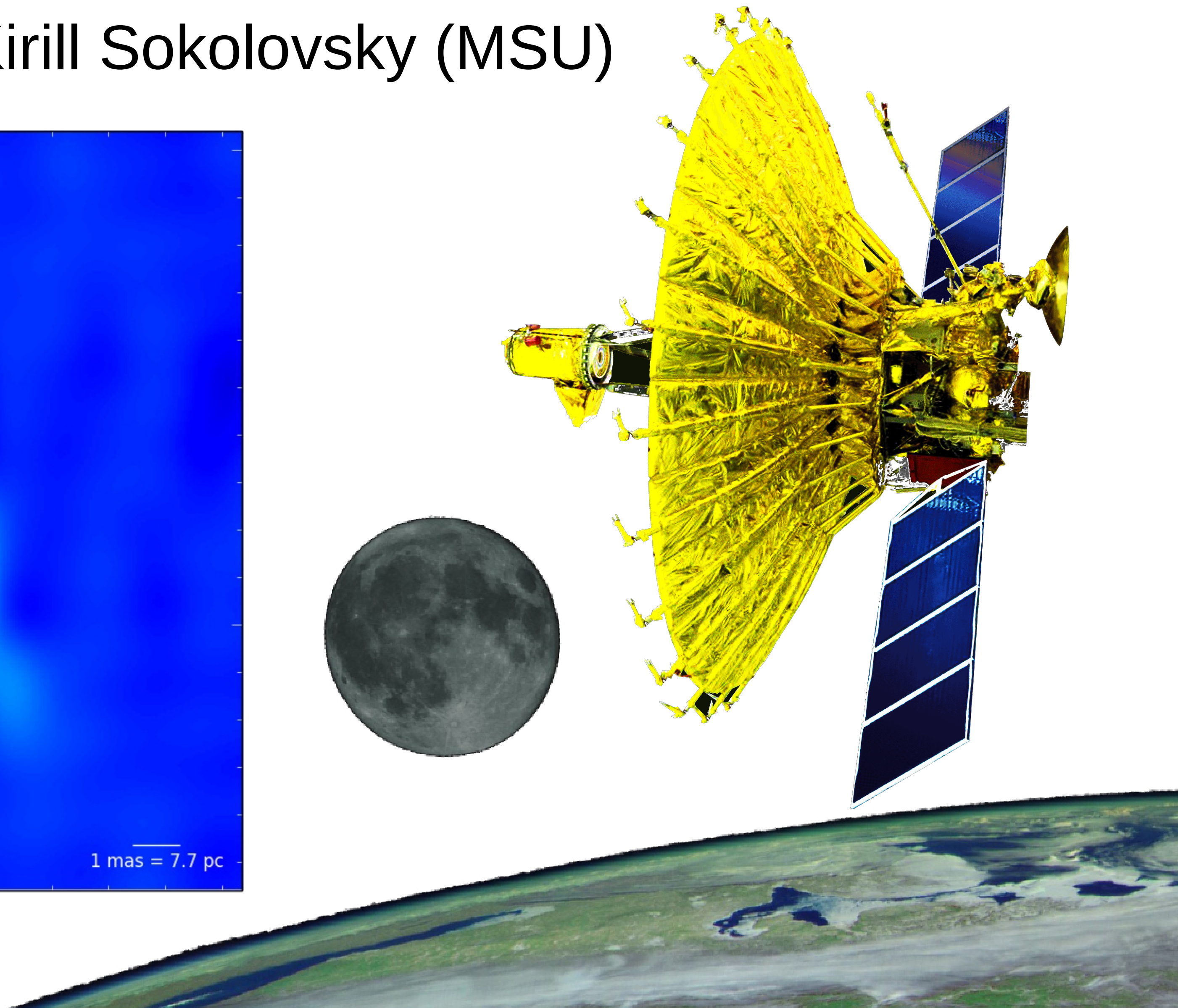
VLBI observations from space with RadioAstron

Kirill Sokolovsky (MSU)





Nikolai Kardashev
April 25, 1932 - August 3, 2019

Nikolai Kardashev
April 25, 1932 - August 3, 2019

Not logged in Talk Contributions Create account Log in

Article Talk Read Edit View history Search Wikipedia

WIKIPEDIA
The Free Encyclopedia

Main page
Contents
Featured content
Current events
Random article
Donate to Wikipedia
Wikipedia store

Interaction

Help
About Wikipedia
Community portal
Recent changes
Contact page

Tools

What links here
Related changes
Upload file

Kardashev scale

From Wikipedia, the free encyclopedia

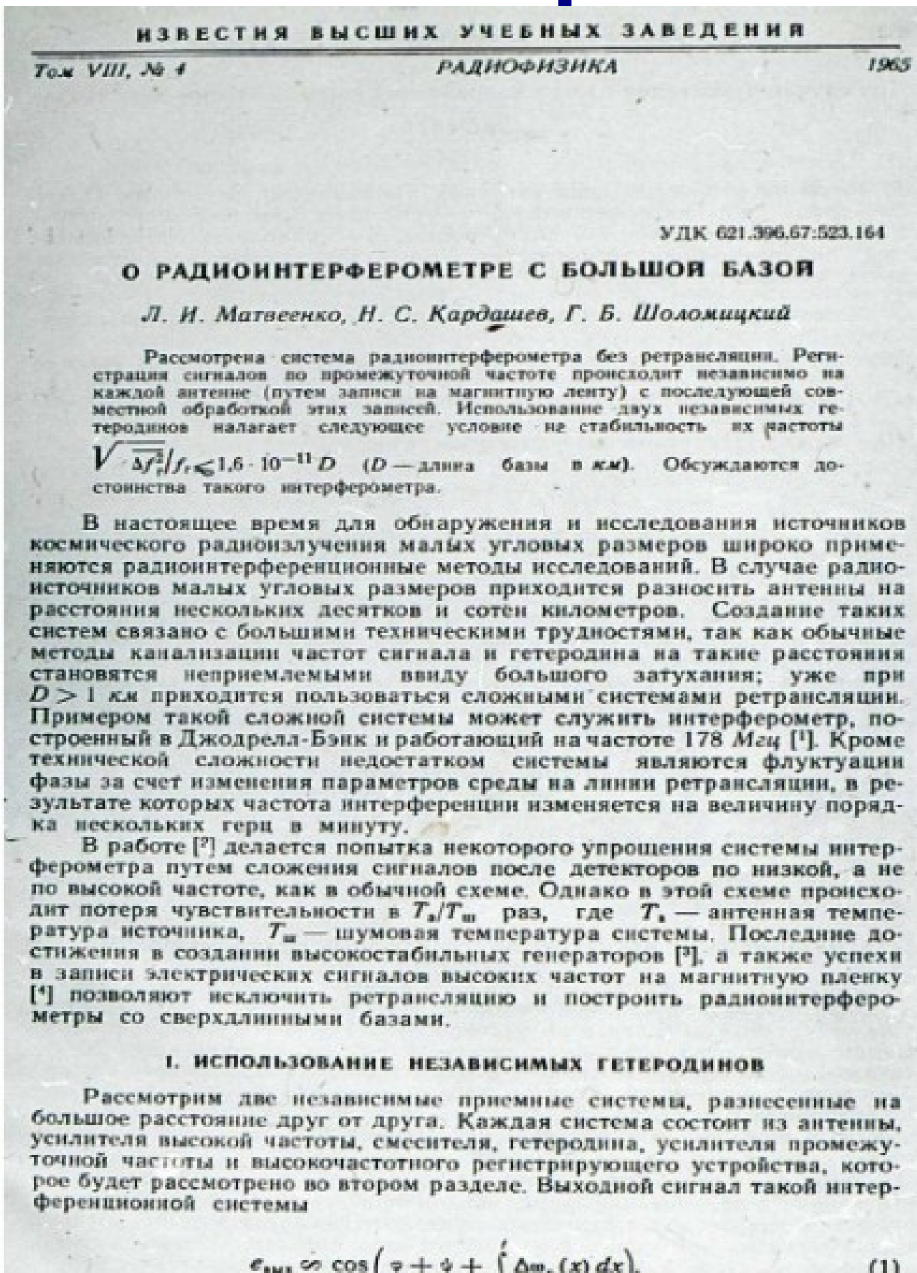
This article is about a measuring method. For the album by Greydon Square, see The Kardashev Scale (album).

The **Kardashev scale** is a method of measuring a civilization's level of technological advancement based on the amount of energy they are able to use. The measure was proposed by Soviet astronomer Nikolai Kardashev in 1964.[1] The scale has three designated categories:

- A Type I civilization, also called a planetary civilization—can use and store all of the energy available on its planet.
- A Type II civilization, also called a stellar civilization—can use and control energy at the scale of its stellar system.
- A Type III civilization, also called a galactic civilization—can control energy at the scale of its entire host galaxy.

Contents [hide]

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) = telescopes have independent clocks



ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том VIII, № 4 — РАДИОФИЗИКА — 1965

УДК 621.396.67:523.164

О РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ

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

Рассмотрена система радиоинтерферометра без ретрансляции. Регистрация сигналов по промежуточной частоте происходит независимо на каждой антенне (путем записи на магнитную ленту) с последующей совместной обработкой этих записей. Использование двух независимых гетеродинов налагает следующее условие на стабильность их частоты $\sqrt{\overline{\Delta f_г^2}}/f_г \leq 1{,}6 \cdot 10^{-11} D$ (D — длина базы в *км*). Обсуждаются достоинства такого интерферометра.

В настоящее время для обнаружения и исследования источников космического радиоизлучения малых угловых размеров широко применяются радиоинтерференционные методы исследований. В случае радиоисточников малых угловых размеров приходится разносить антенны на расстояния нескольких десятков и сотен километров. Создание таких систем связано с большими техническими трудностями, так как обычные методы канализации частот сигнала и гетеродина на такие расстояния становятся неприемлемыми ввиду большого затухания; уже при $D > 1$ *км* приходится пользоваться сложными системами ретрансляции. Примером такой сложной системы может служить интерферометр, построенный в Джодрелл-Бэнк и работающий на частоте 178 *Мгц* [1]. Кроме технической сложности недостатком системы являются флуктуации фазы за счет изменения параметров среды на линии ретрансляции, в результате которых частота интерференции изменяется на величину порядка нескольких герц в минуту.

В работе [2] делается попытка некоторого упрощения системы интерферометра путем сложения сигналов после детекторов по низкой, а не по высокой частоте, как в обычной схеме. Однако в этой схеме происходит потеря чувствительности в $T_а/T_ш$ раз, где $T_а$ — антенная температура источника, $T_ш$ — шумовая температура системы. Последние достижения в создании высокостабильных генераторов [3], а также успехи в записи электрических сигналов высоких частот на магнитную пленку [4] позволяют исключить ретрансляцию и построить радиоинтерферометры со сверхдлинными базами.

I. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ГЕТЕРОДИНОВ

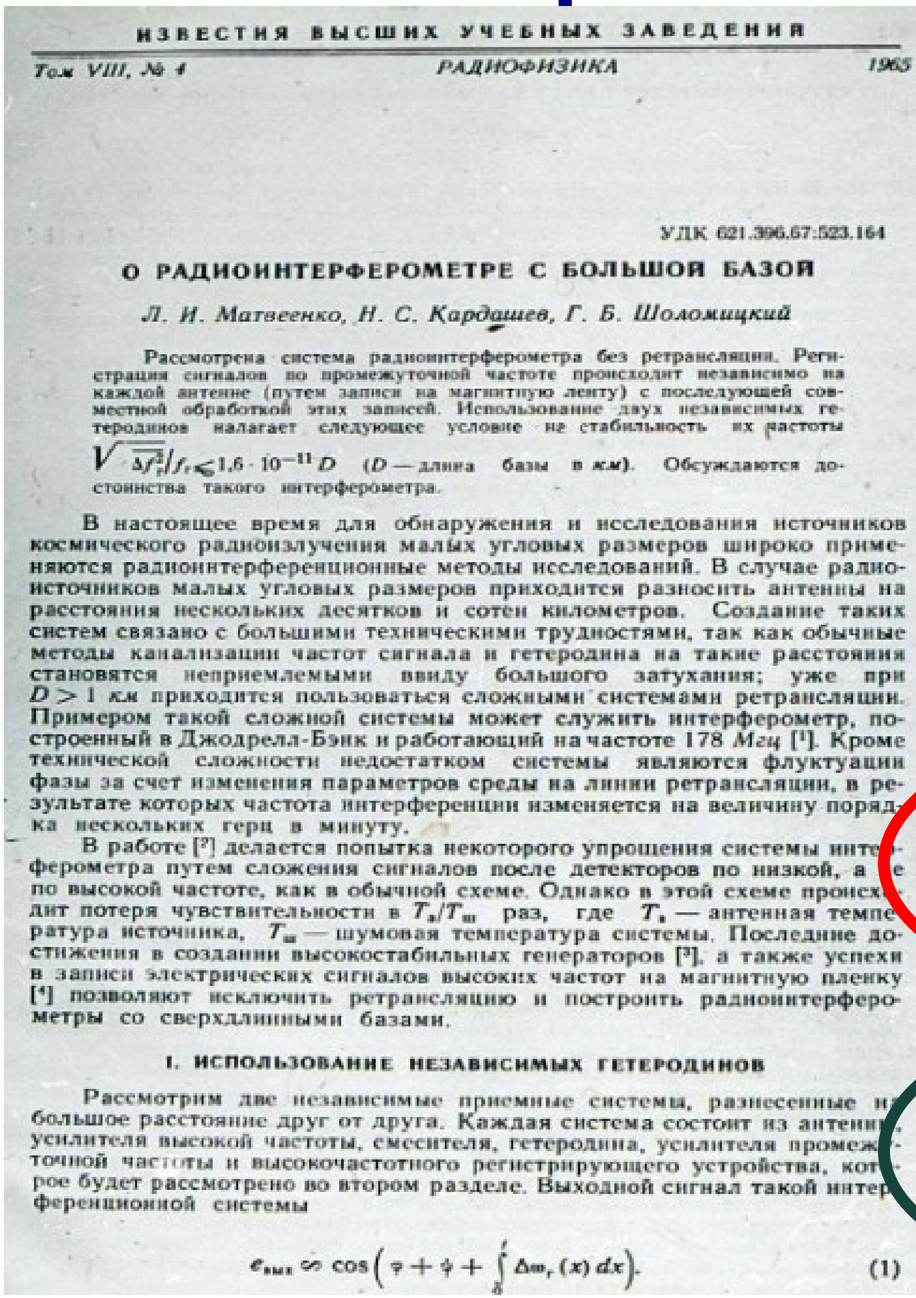
Рассмотрим две независимые приемные системы, разнесенные на большое расстояние друг от друга. Каждая система состоит из антенны, усилителя высокой частоты, смесителя, гетеродина, усилителя промежуточной частоты и высокочастотного регистрирующего устройства, которое будет рассмотрено во втором разделе. Выходной сигнал такой интерференционной системы

$$e_{вых} \sim \cos\left(\varphi + \psi + \int_0^t \Delta\omega_г(x)\,dx\right). \quad (1)$$

Matveenko, **Kardashev** & Sholomitsky suggested independent recording in their 1965 paper

- frequency
- polarization
- amplitude
- phase

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) = telescopes have independent clocks


ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том VIII, № 4 РАДИОФИЗИКА 1965

УДК 621.396.67:523.164

О РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ

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

Рассмотрена система радиоинтерферометра без ретрансляции. Регистрация сигналов по промежуточной частоте происходит независимо на каждой антенне (путем записи на магнитную ленту) с последующей совместной обработкой этих записей. Использование двух независимых гетеродинов налагает следующее условие на стабильность их частоты $\sqrt{\overline{\Delta f_r^2}}/f_r \leqslant 1{,}6 \cdot 10^{-11} D$ (D — длина базы в *км*). Обсуждаются достоинства такого интерферометра.

В настоящее время для обнаружения и исследования источников космического радиоизлучения малых угловых размеров широко применяются радиоинтерференционные методы исследований. В случае радиоисточников малых угловых размеров приходится разносить антенны на расстояния нескольких десятков и сотен километров. Создание таких систем связано с большими техническими трудностями, так как обычные методы канализации частот сигнала и гетеродина на такие расстояния становятся неприемлемыми ввиду большого затухания; уже при $D > 1$ *км* приходится пользоваться сложными системами ретрансляции. Примером такой сложной системы может служить интерферометр, построенный в Джодрелл-Бэнк и работающий на частоте 178 *Мгц* [1]. Кроме технической сложности недостатком системы являются флуктуации фазы за счет изменения параметров среды на линии ретрансляции, в результате которых частота интерференции изменяется на величину порядка нескольких герц в минуту.

В работе [2] делается попытка некоторого упрощения системы инте- ферометра путем сложения сигналов после детекторов по низкой, а е по высокой частоте, как в обычной схеме. Однако в этой схеме происх- дит потеря чувствительности в $T_a/T_ш$ раз, где T_a — антенная темпе ратура источника, $T_ш$ — шумовая температура системы. Последние достижения в создании высокостабильных генераторов [3], а также успехи в записи электрических сигналов высоких частот на магнитную пленку [4] позволяют исключить ретрансляцию и построить радиоинтерферометры со сверхдлинными базами.

I. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ГЕТЕРОДИНОВ

Рассмотрим две независимые приемные системы, разнесенные н большое расстояние друг от друга. Каждая система состоит из антенн усилителя высокой частоты, смесителя, гетеродина, усилителя промеж- точной частоты и высокочастотного регистрирующего устройства, кот- рое будет рассмотрено во втором разделе. Выходной сигнал такой интер ференционной системы

$$e_{вых} \backsim \cos\left(\varphi + \psi + \int_0^t \Delta\omega_r(x)\,dx\right). \quad (1)$$

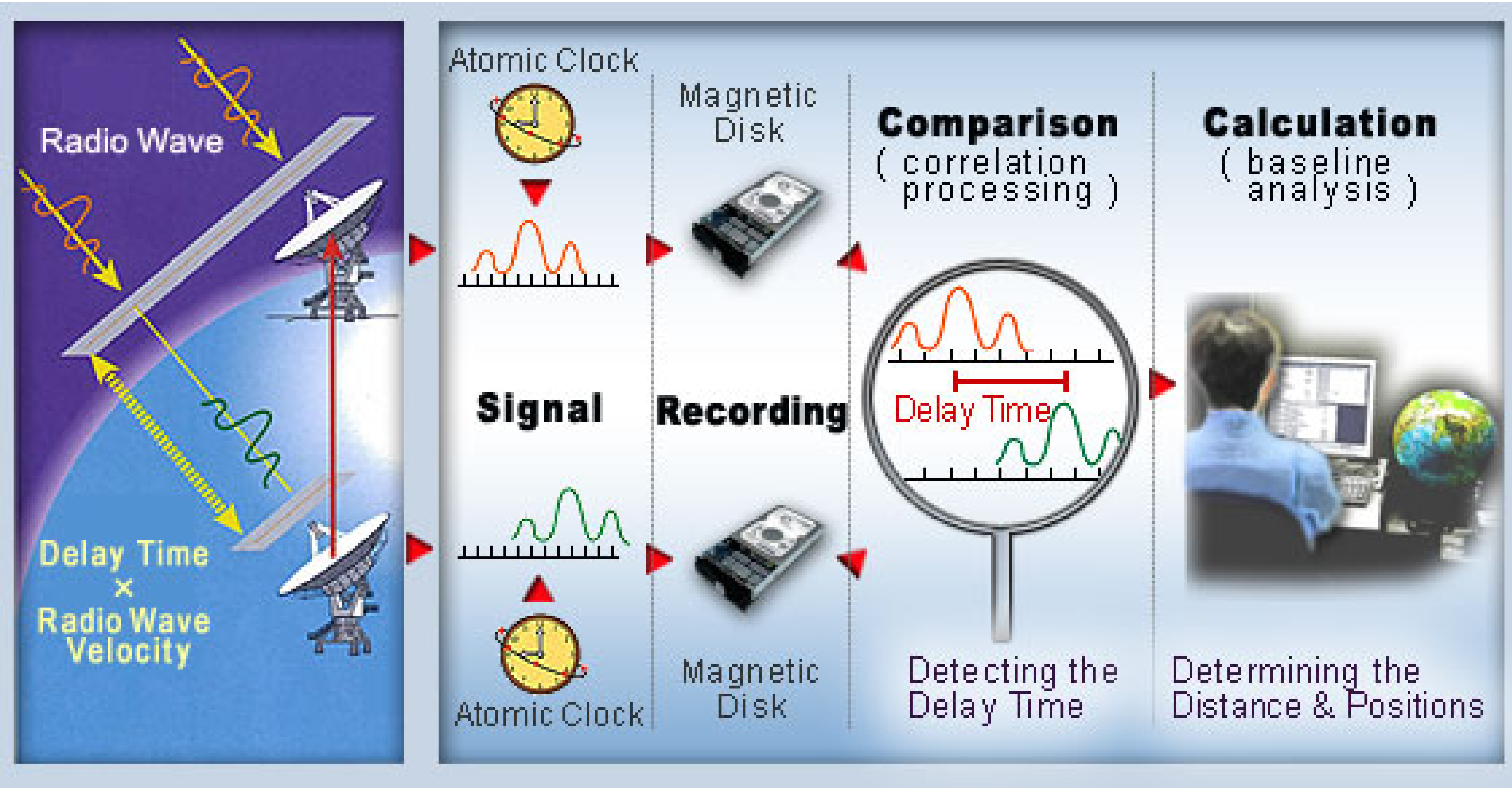
Matveenko, **Kardashev** & Sholomitsky suggested independent recording in their 1965 paper

Easy to filter

- frequency
- polarization
- amplitude
- phase

Easy to record (in radio)

Very Long Baseline Interferometry



Filtering & amplification → down-conversion → digitization → time-stamping → recording (?) → correlation → amplitude calibration (correlation coefficient to Jy) → imaging (?)

Two ways to lower the diffraction limit:

$$\theta_{\mathrm{lim}} \sim \lambda / \mathrm{D}$$

- Observe at a shorter wavelength λ
- Increase D (telescope diameter / interferometer baseline)

Ways to lower diffraction limit

Observe at a shorter wavelength λ

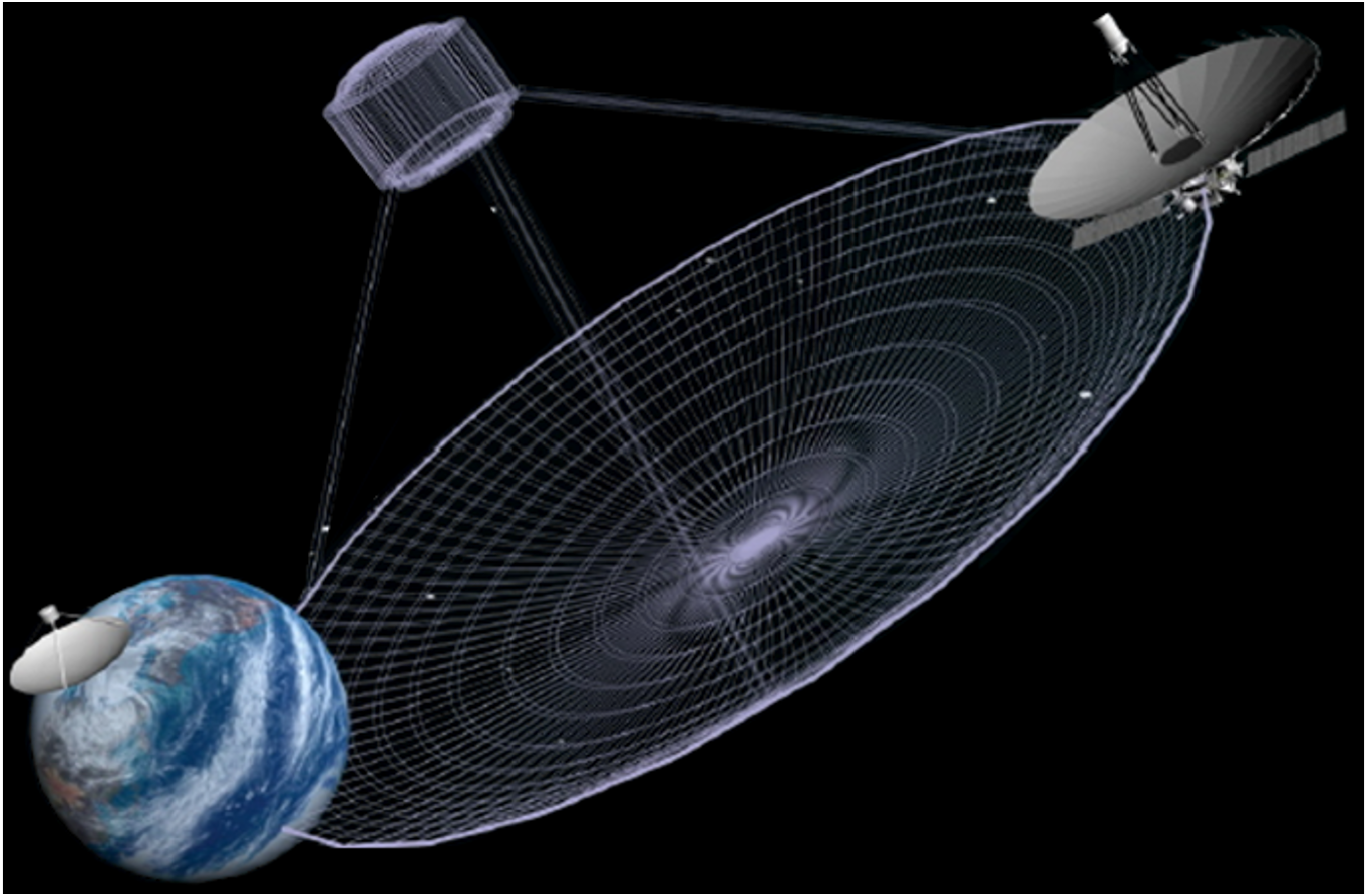
mm-VLBI (Event Horizon Telescope)

- Atmospheric opacity
- Short coherence time
- Faint sources
- Small antennas (except ALMA)

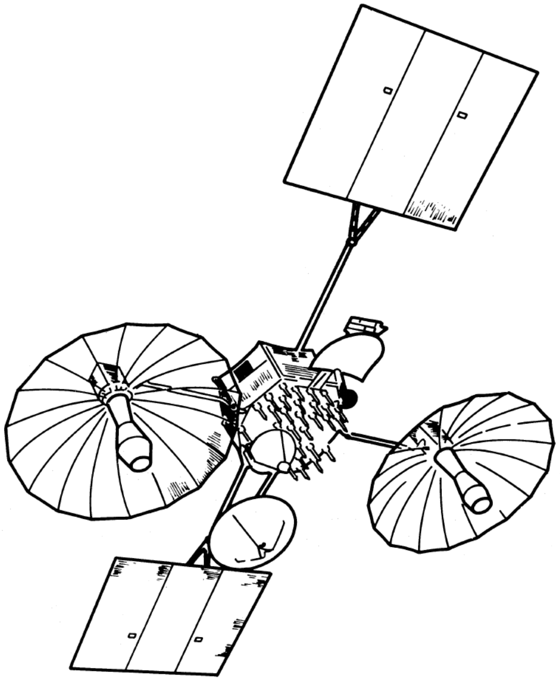
Increase D *Space-VLBI*

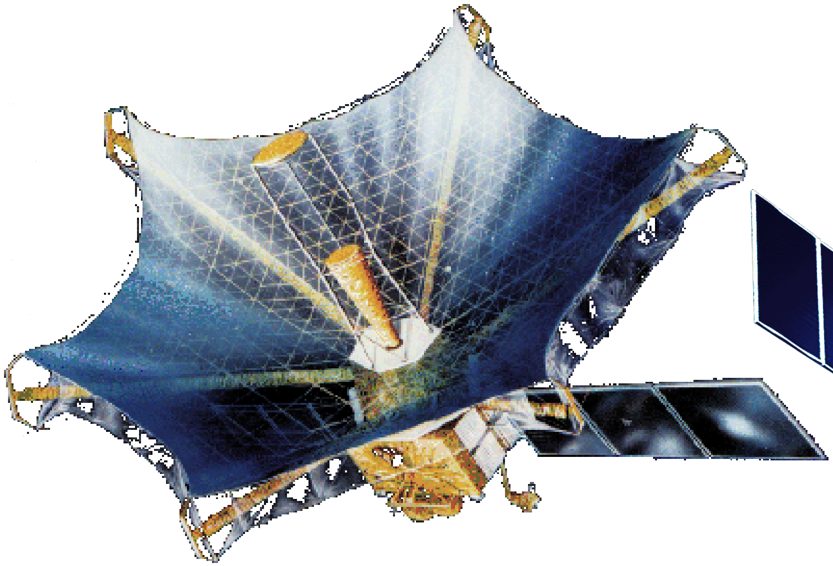
- Small antenna flying fast (uncertain distance/speed/acceleration)
- Intrinsic opacity and Interstellar scattering

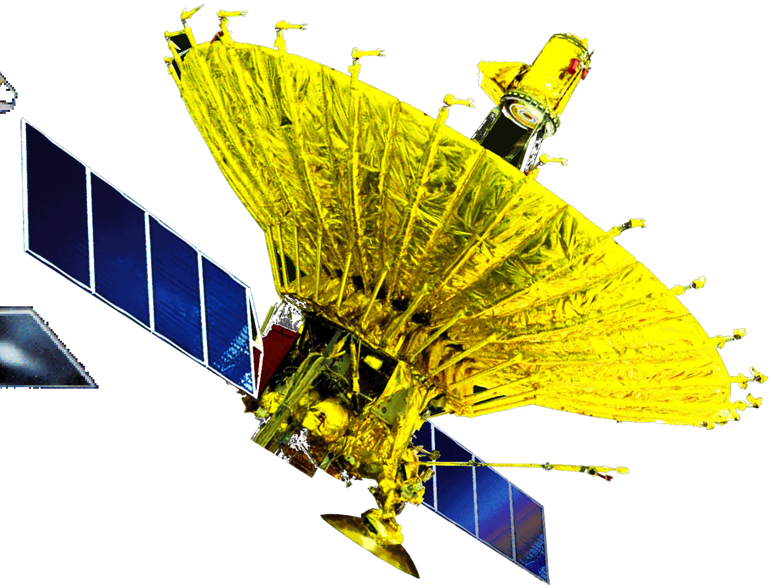
Space-VLBI



Space-VLBI history



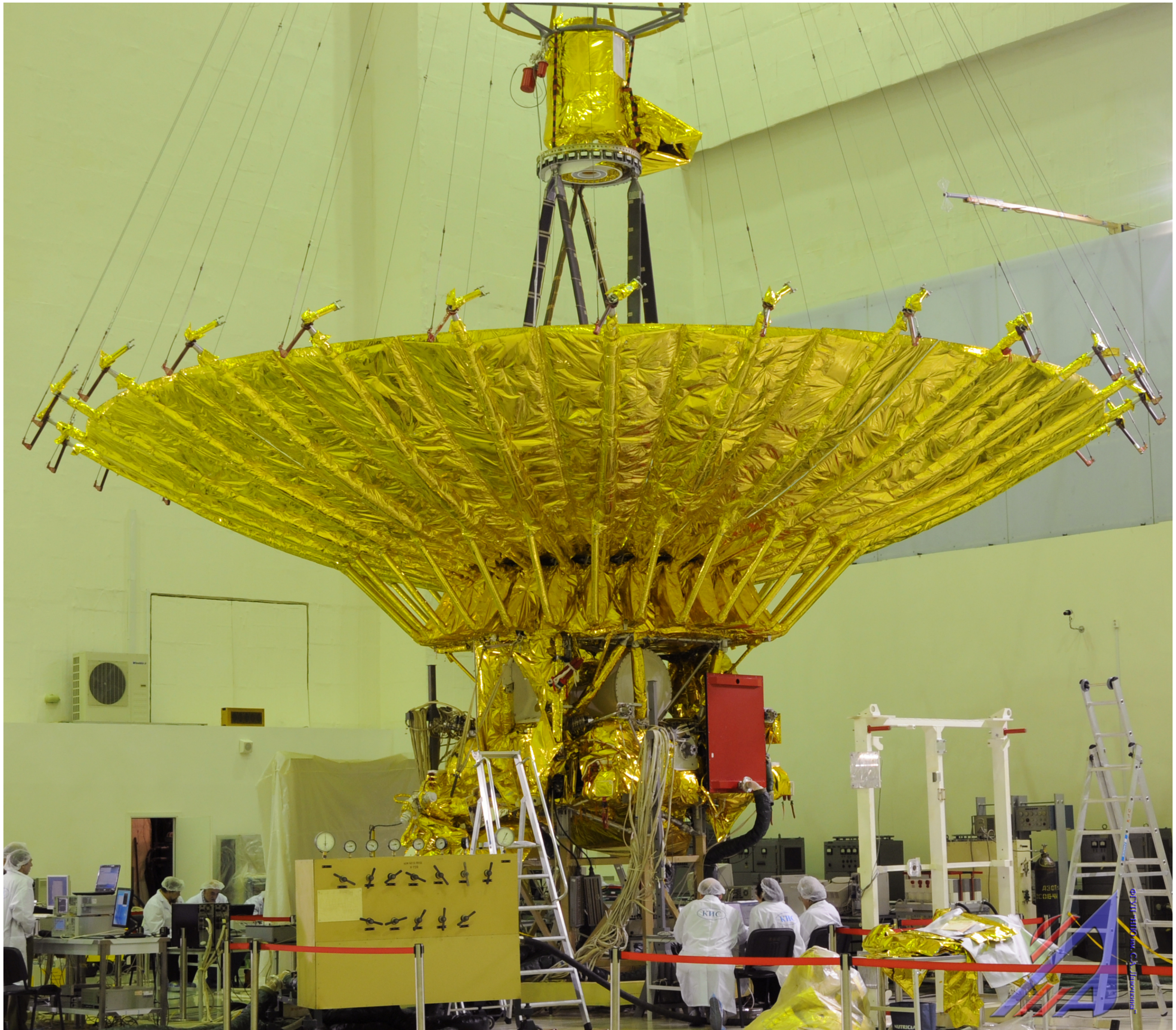




	TDRSS	VSOP	RadioAstron
	1986-1988	1997-2003	2011-2019
λ (cm) =	13, 2	18, 6, ~~1.3~~	92, 18, 6, 1.3
Dmax (D⊕)	~2.4	~2.4	27
	fringe tracking	imaging	both

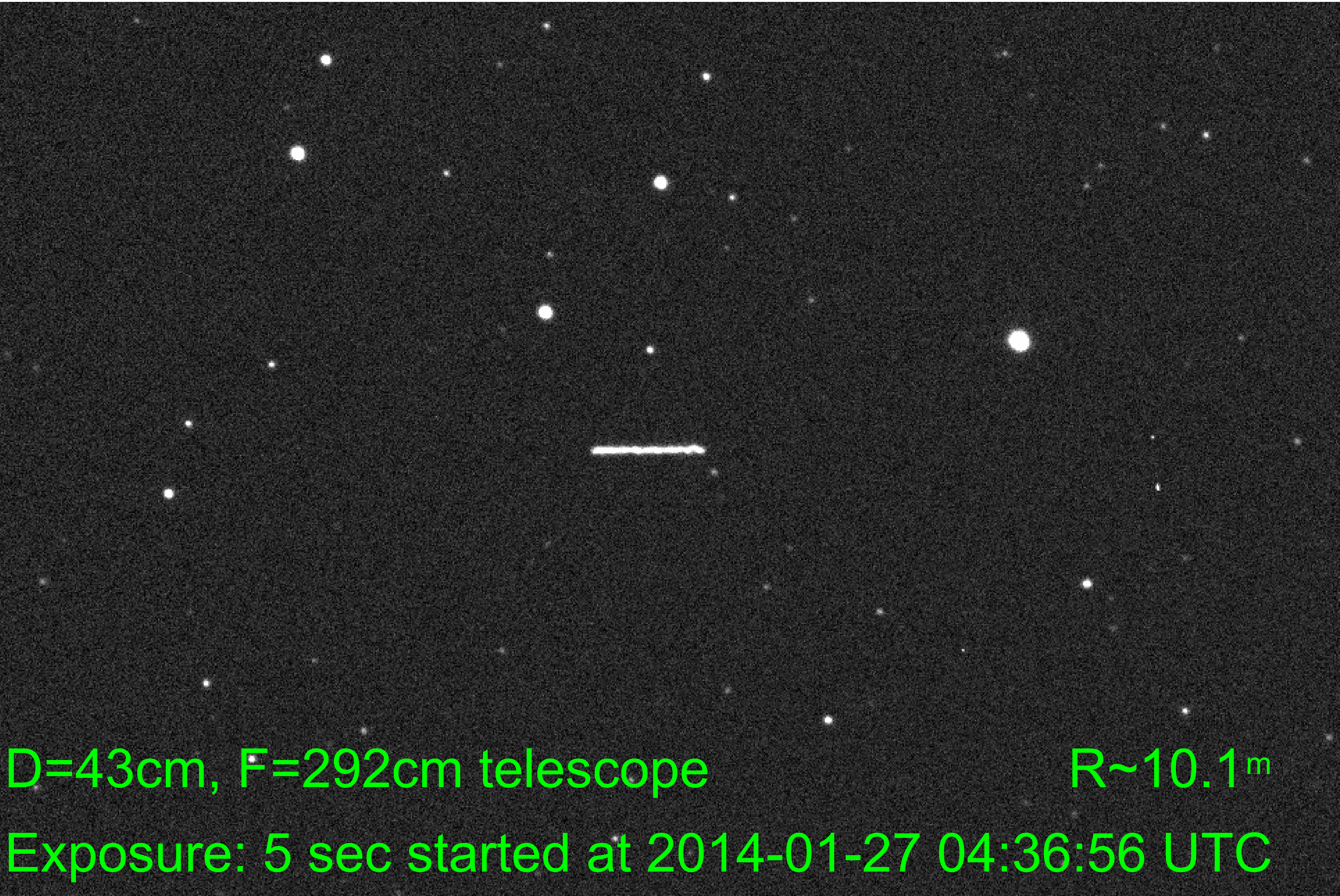
Space radio telescope

is installed on the dedicated spacecraft Spektr-R constructed by the Lavochkin association



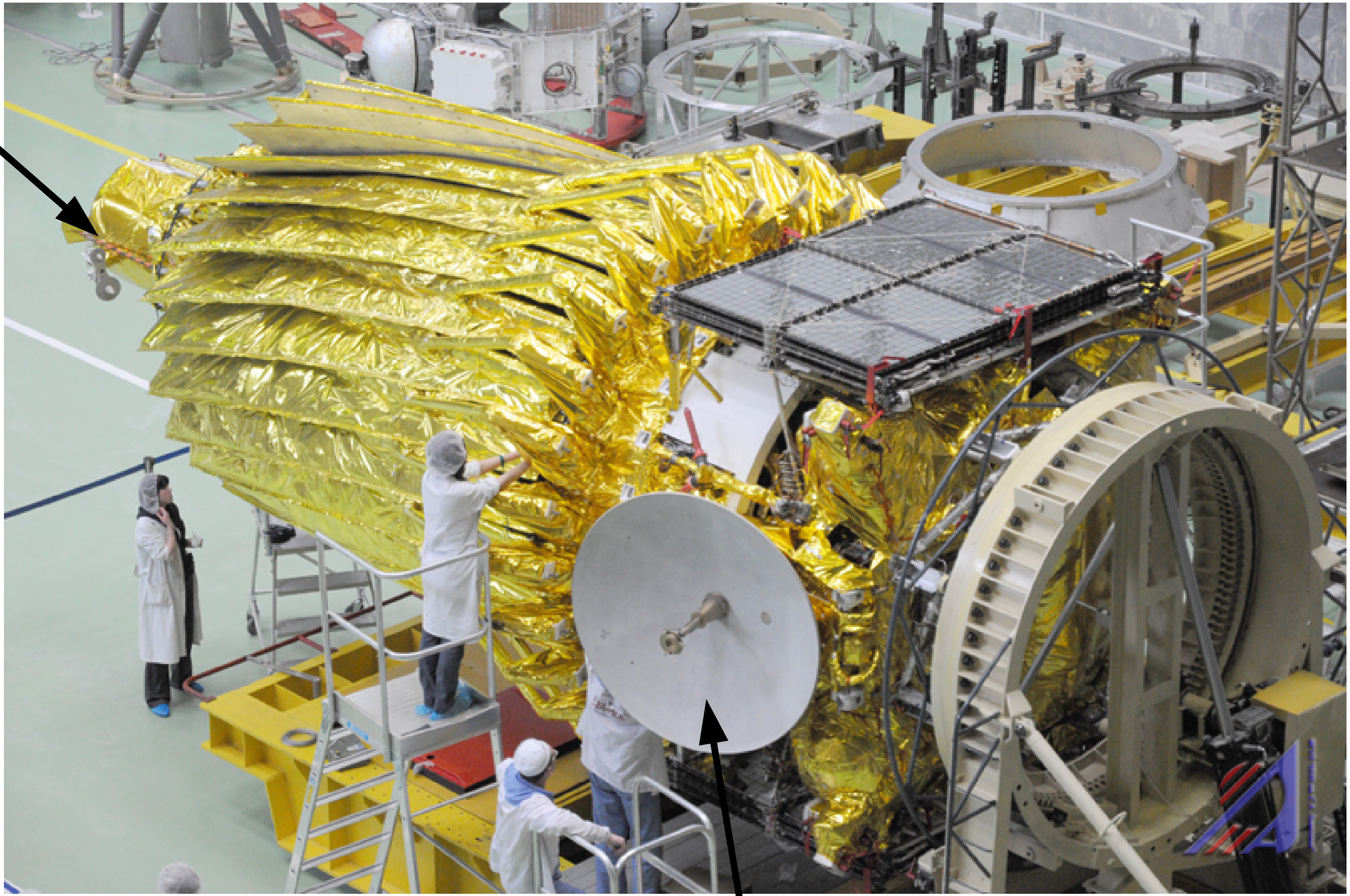
Launched from Baikonur
July 18, 2011

RadioAstron (Spektr-R) in orbit



Communication with Spektr-R

Omnidirectional antenna for commands/telemetry (1 of 3)



High-gain antenna for VLBI data downlink (144 Mbit/sec)

Communication with Spektr-R

Command & control stations near Moscow and Ussuriysk
+ VLBI data receiving stations:

- 22m telescope in Puschino, Russia
- 43m telescope in Green Bank, WV, USA

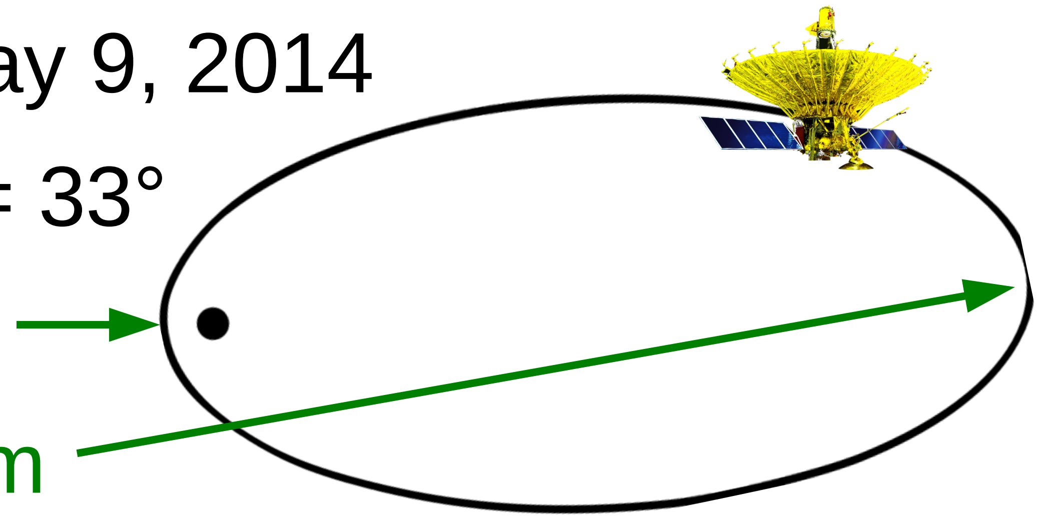
RadioAstron (Spektr-R) orbit

Orbit parameters as of May 9, 2014

P = 8.8 d   e = 0.88   i = 33°

Perigee hight: 14 000 km

Apogee hight: 330 000 km

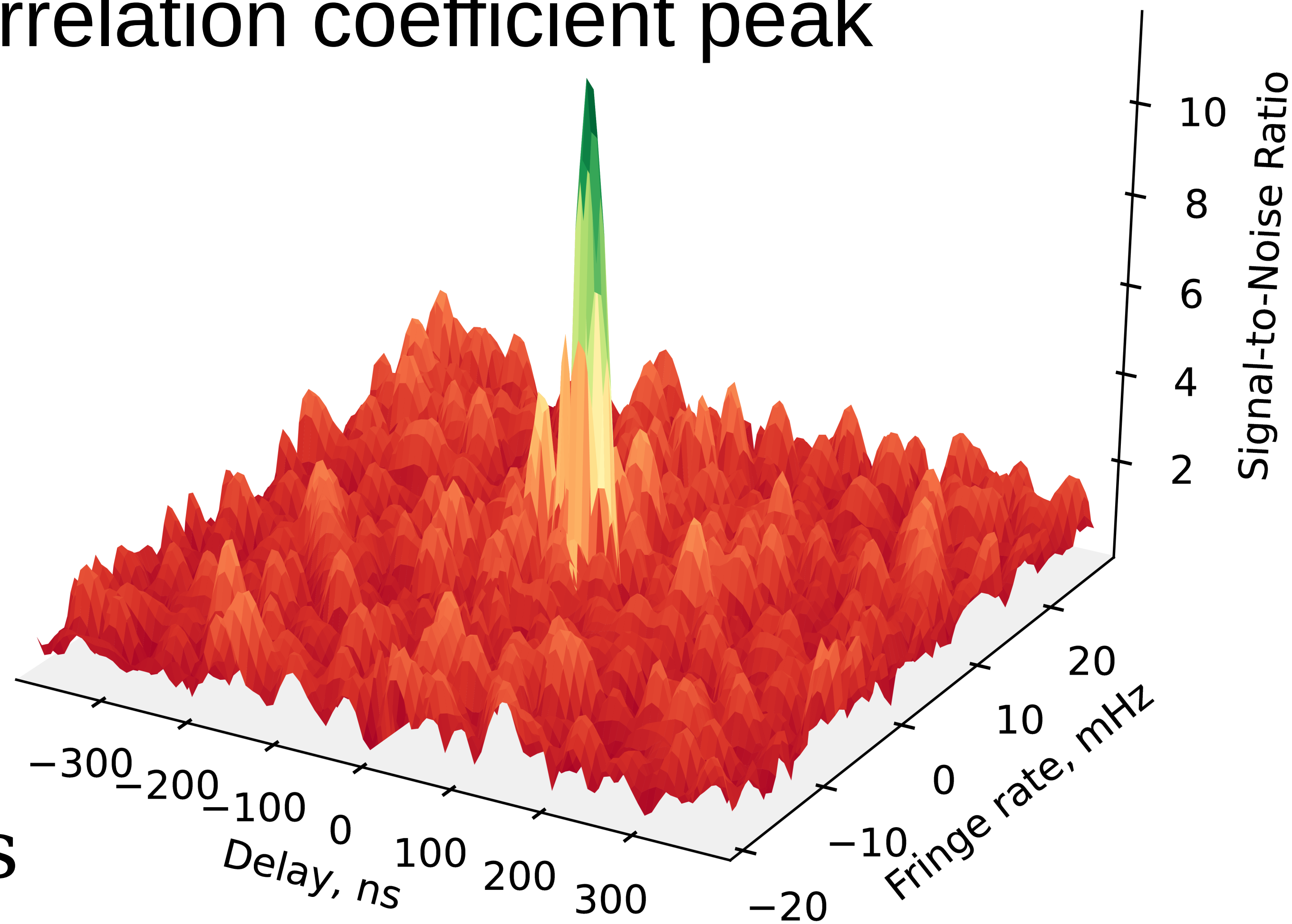


- Orbit is **quickly evolving** thanks to the Moon
- Significant solar **radiation pressure** (10m mirror)
- **Reaction wheel unloading** by firing thrusters

To find VLBI fringes

1) Apply a priori **delay model**

2) Search the **residual delay, rate, acceleration** (?) space for the correlation coefficient peak



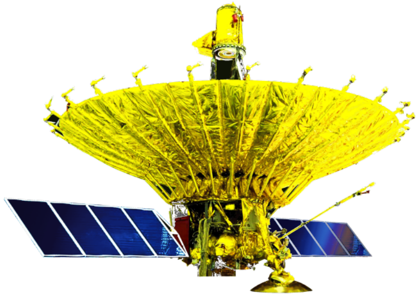
$\lambda / D = 0.1$ mas

OJ 287   D = 10xD⊕   λ = 6 cm   RadioAstron-Arecibo

Ground VLBI delay model includes

- Station / Source positions: different frames (ITRF, ICRF), motions
- Times: UTC; TAI, TT; UT1; TDB/TCB/TCG
- Orientation: Precession ($50''$/yr), Nutation ($9.6''$, 18yr), Polar Motion ($0.6''$, 1yr)
- Diurnal Spin: Oceanic friction (2ms/cy), CMB (5ms, dcds), AAM (2ms, yrs)
- Tides: Solid-earth (30cm), Pole (2cm)
- Loading: Ocean (2cm), Hydrologic (8mm), Atmospheric (2cm), PGR (mm's/yr)
- Antennas: Axis offset, Tilt, Thermal expansion
- Propagation: Troposphere (dry [7ns], wet [0.3ns]), Ionosphere
- Relativistic $\tau(t)$ calculation: Gravitational delay, Frame choice/consistency

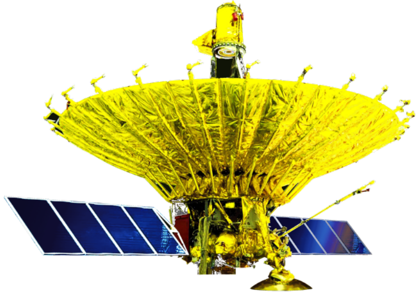
slide by Bob Campbell (JIVE)



Orbit reconstruction

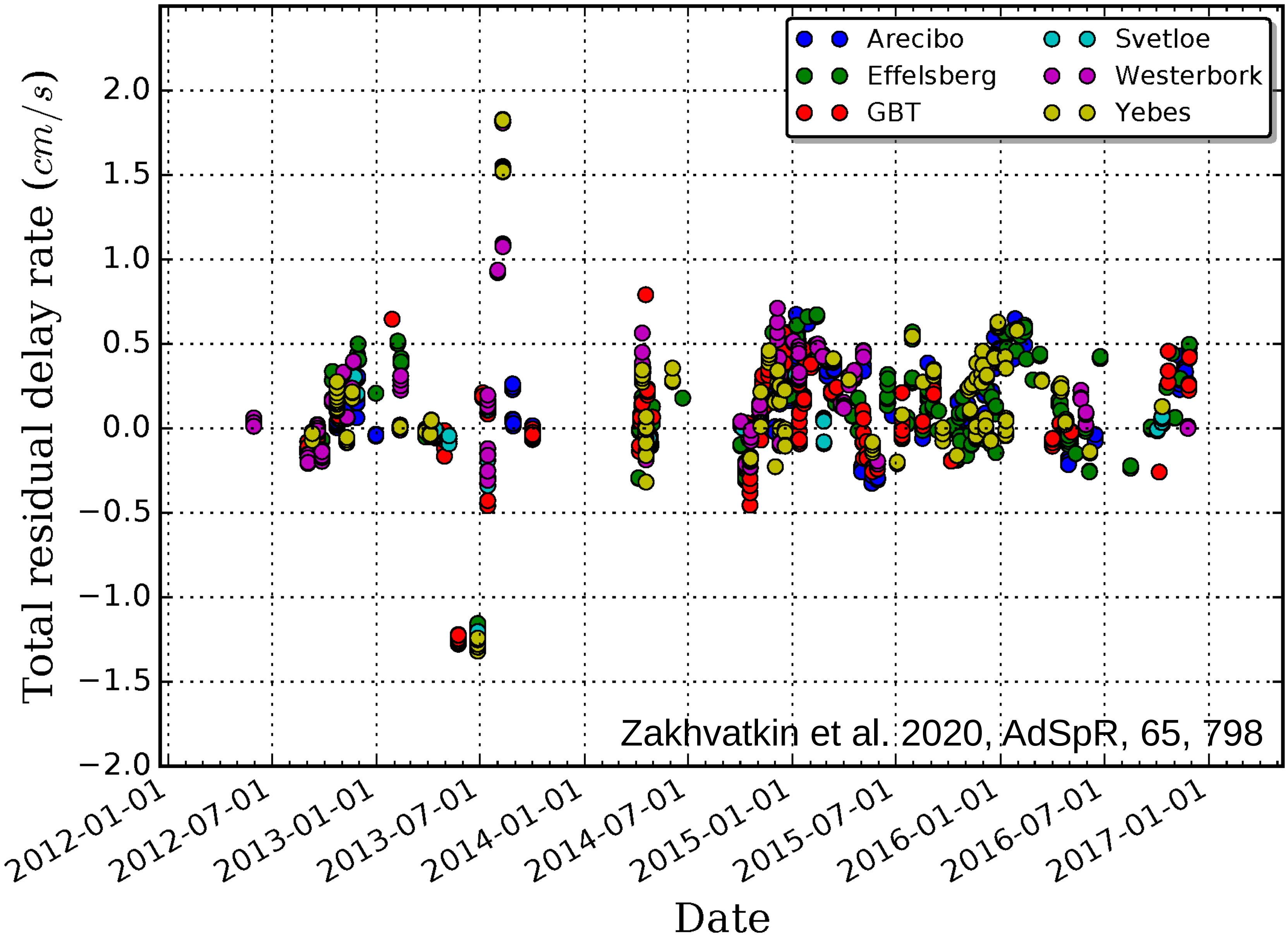
performed by Keldysh Institute of Applied Mathematics

- **Radiometric ranging** during command sessions
- **Doppler measurements** during VLBI sessions
- Satellite **laser ranging**
- **Optical astrometry** (R.A. Dec. from imaging)
- **VLBI observations of the spacecraft** itself (experimental)



Orbit reconstruction

typically accurate to ~1km and <1cm/s

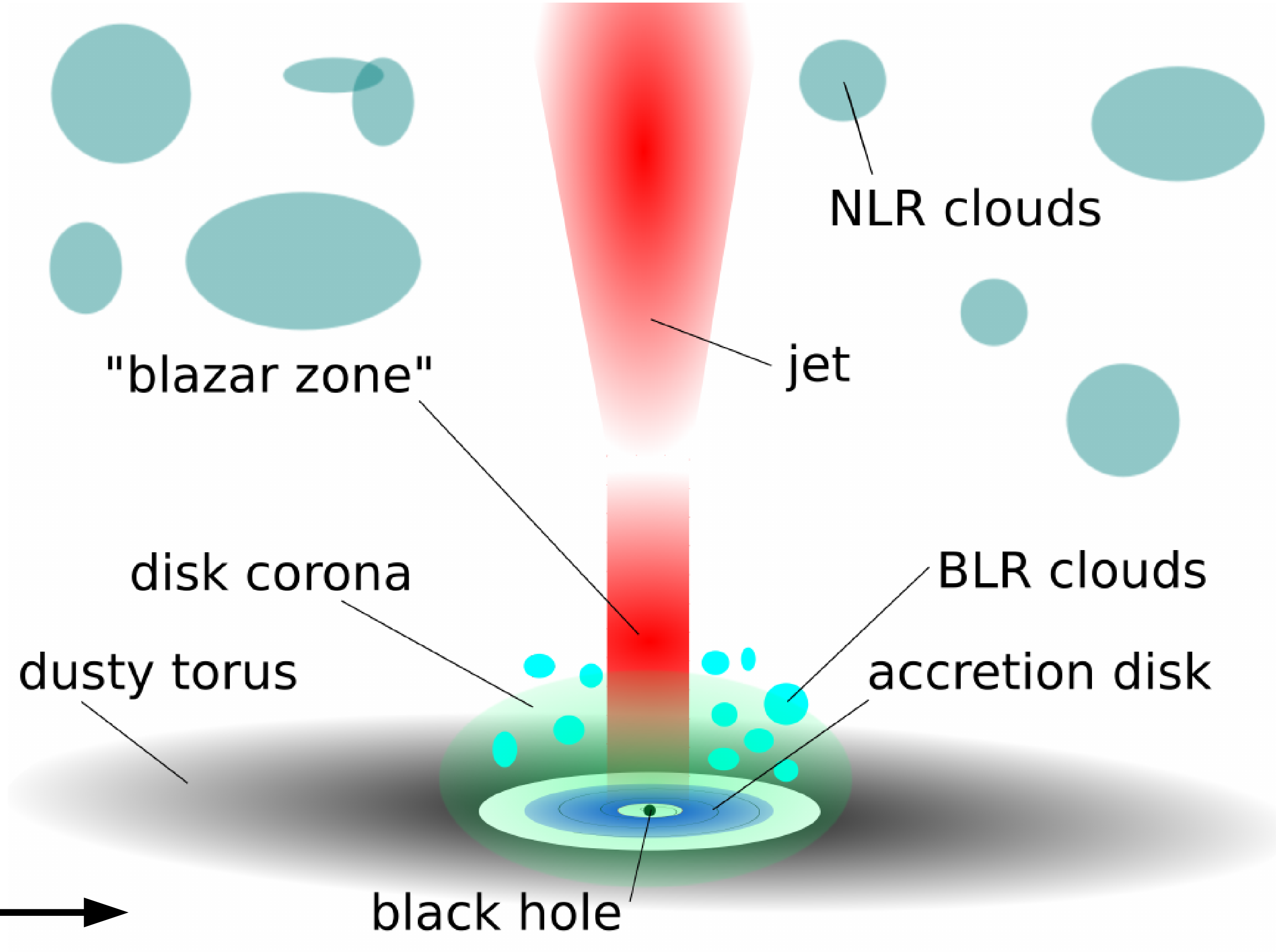


RadioAstron can observe only exceptionally bright things

(in terms of surface brightness)

- **Pulsars**
- **Masers**
- **AGN jets**

AGN sketch

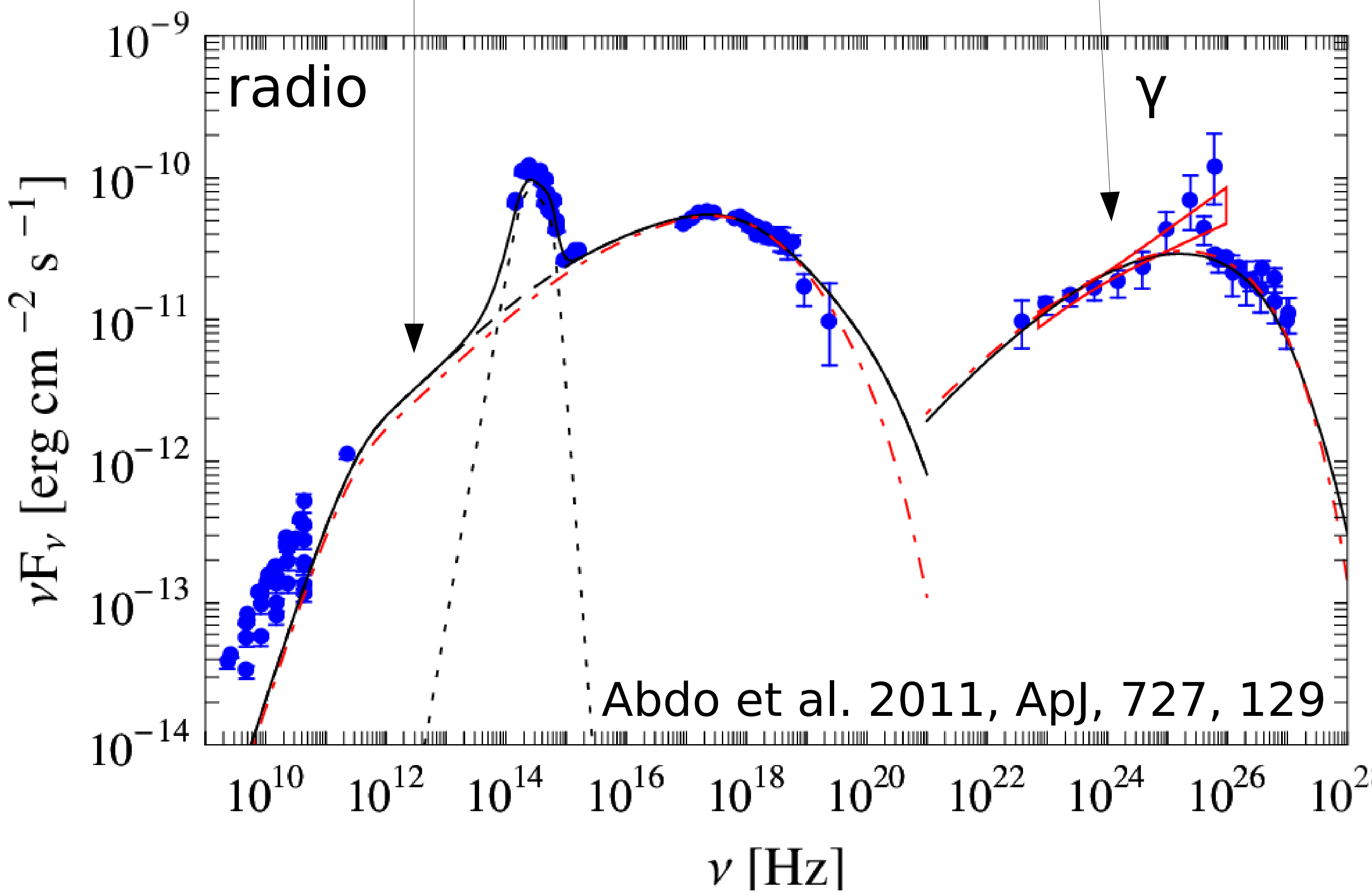


Jet radiation mechanism

The “standard” view

Incoherent synchrotron radiation + Inverse Compton

by leptons (e+/e-) scattering



RadioAstron AGN survey goals

- **Test the incoherent synchrotron radiation model** as the mechanism of pc-scale core radio emission
- **Resolve the “Doppler factor crisis”** (short-timescale variability and SED modeling require *large* δ while VLBI measurements of jet feature speeds imply *small* δ)

Brightness temperature (Tb)

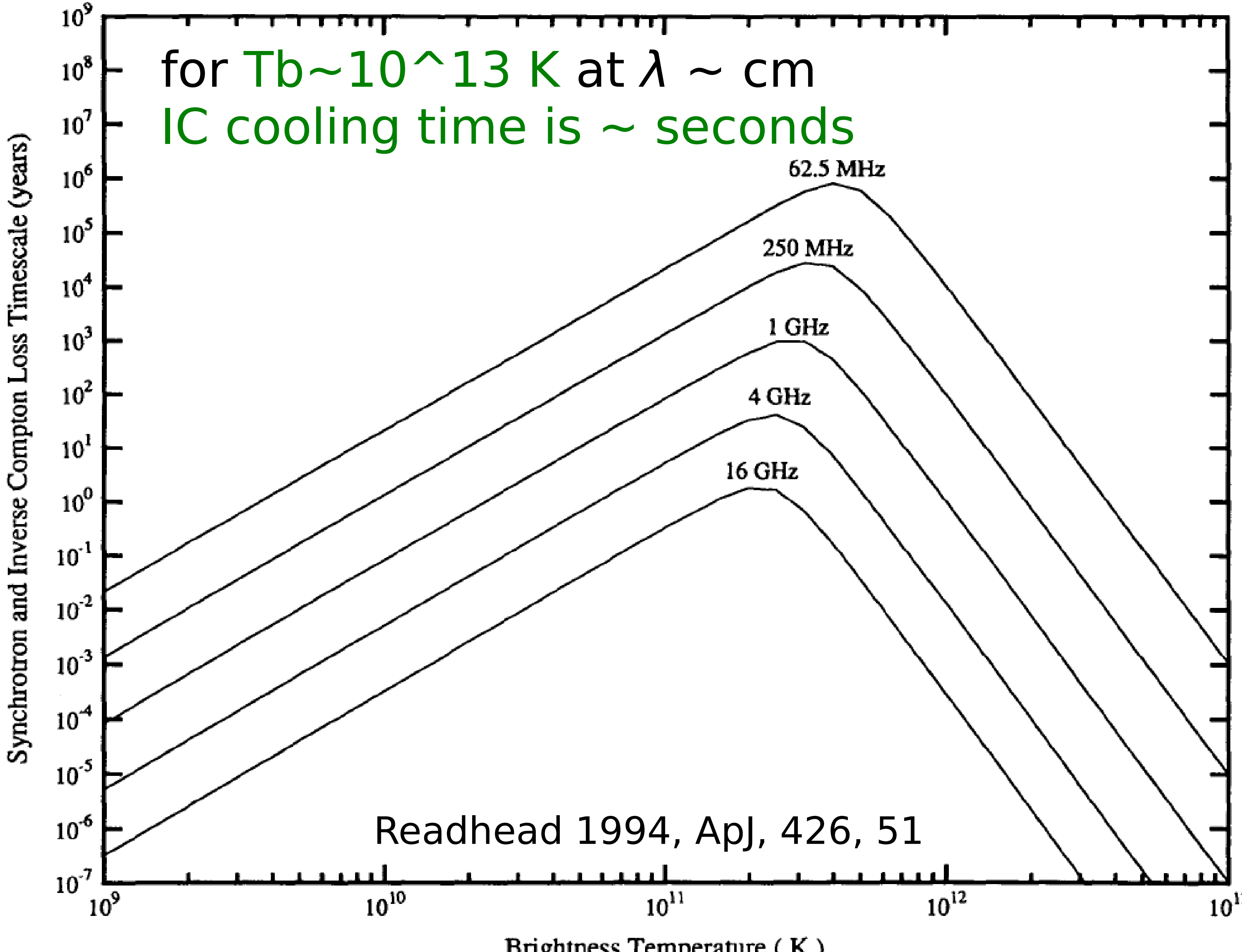
Tb is a measure of surface brightness

$$T_b = \frac{S}{2k}\frac{\lambda^2}{\theta^2}\delta(1+z)$$

$$\theta_{\rm lim} \sim \lambda/\mathrm{D}$$

- Maximum *measurable* Tb depends on **D**, not **λ**
- Observed **Tb ~ $\boldsymbol{\delta}$** for a given intrinsic Tb

“Inverse-Compton catastrophe”



RadioAstron AGN survey

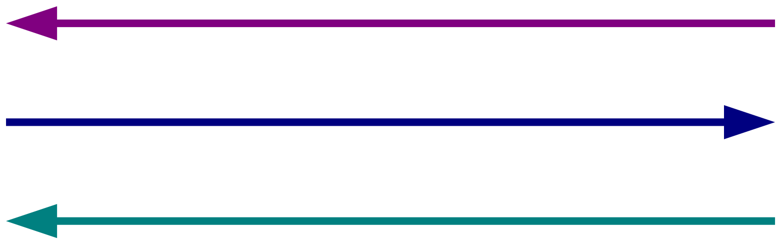
The most bright and compact AGN according to ground-based VLBI (249 objects, 3000 RA experiments)

Bands: 18, 6 and 1.3 cm

sensitivity

resolution

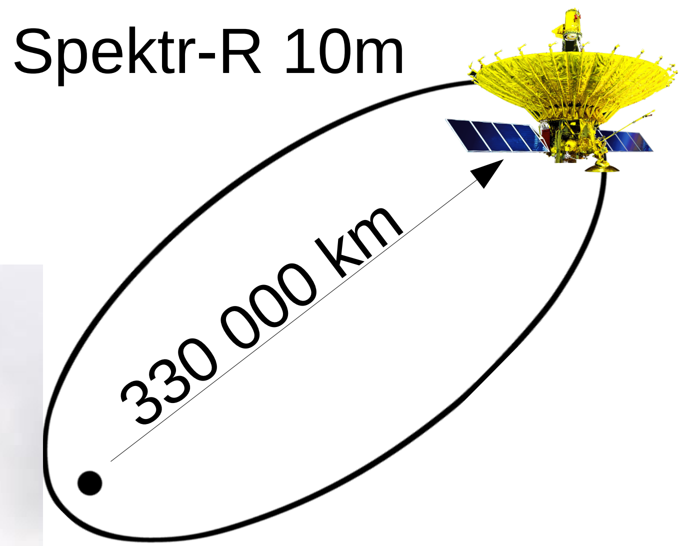
ISM scattering



The sources are observed at a few baselines starting from 2-3 D⊕ (VSOP/TDRSS scale) up to >10 D⊕ *(uncharted territory)*

AGN survey observations

Visibility tracking with space telescope + large ground telescope + small ground telescope



Ground telescopes observing with RA:

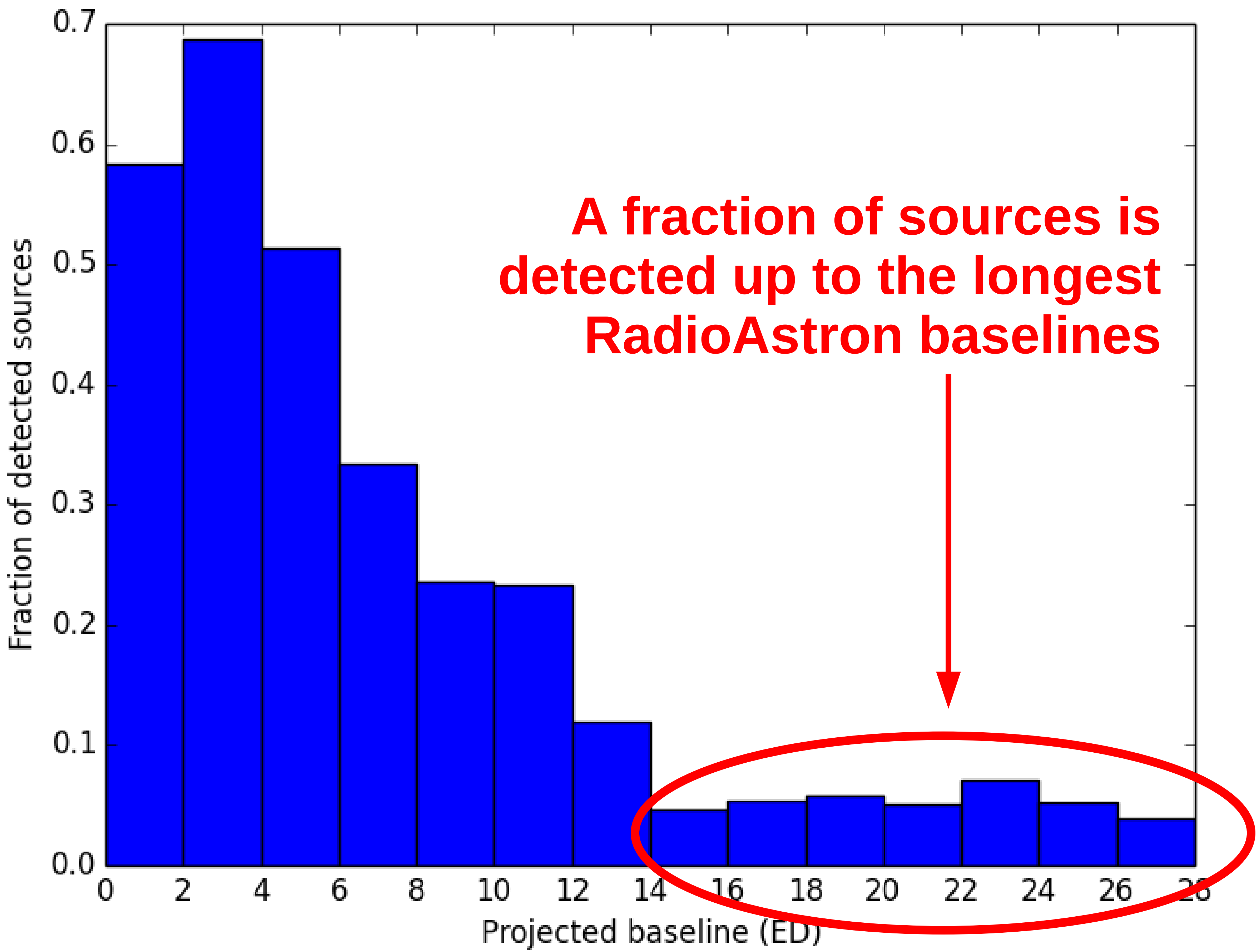
Svetloe, Badary, Zelencuk, Kalyazin *(Russia)*
Evpatoriya *(Ukraine)*; Shanghai 25 & 64, Urumqi *(China)*
Effelsberg *(Germany)*; WSRT *(Netherlands)*; Torun *(Poland)*
Medicina, Noto, Sardinia *(Italy)*; Jodrell Bank 1 & 2 *(UK)*
Yebes, Robledo *(Spain)*; GBT, Arecibo, VLA *(USA)*
Usuda *(Japan)*
HartRAO *(South Africa)*


Kalyazin 64m

Networks:

- EVN
- LBA+Tid
- KVN
- VLBA
- Global Array

18 cm fringe detection statistics



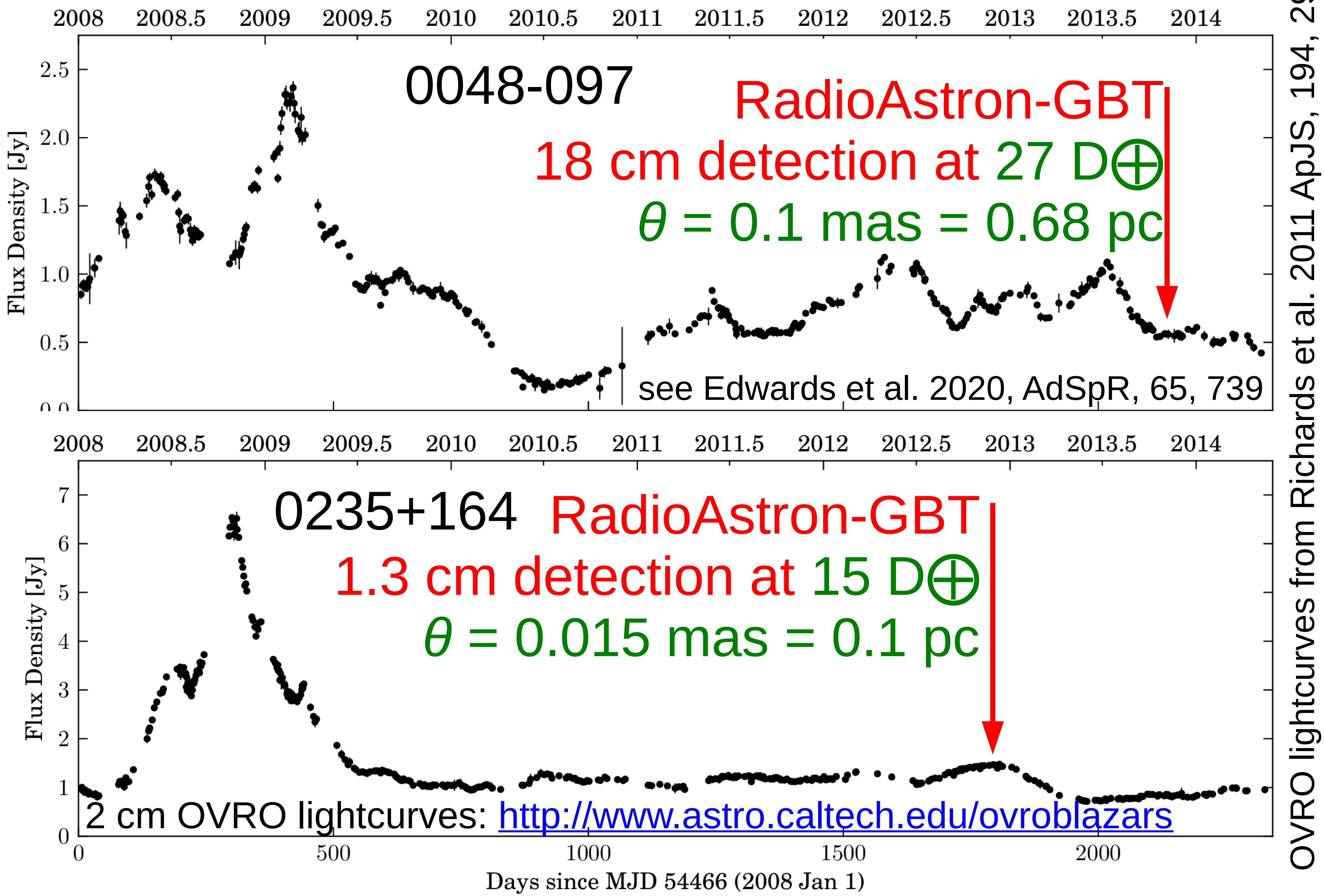
6/18 cm detections at >14 D⊕

0048-097
0119+115
0235+164
0529+483
0716+714
0814+425
OJ 248
OJ 287
1005+066
1040+244
1044+719
1055+018
3C 279
1642+690
BL Lac
CTA102
3C 454.3

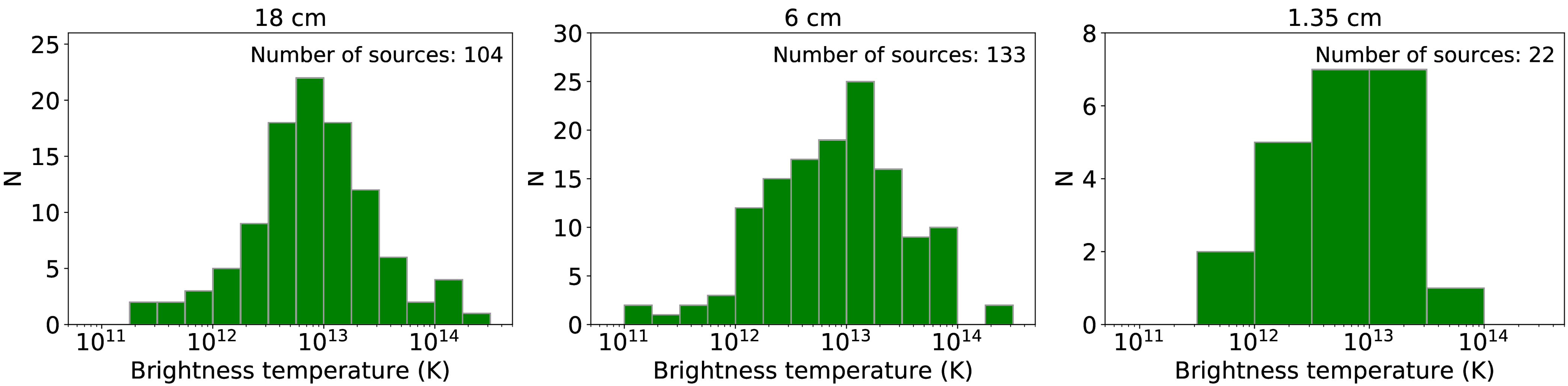
What is special about these sources?

- Most are GeV-bright while the same is true for only half of the non-detected sources *(large δ?)*
- No radio-galaxies detected at long baselines, only blazars *(large δ?)*
- Larger app. speeds? *(large δ?)*
- A mixture of FSRQs and BL Lacs in both sub-samples
- No difference in Gal. latitude *(scattering is not the issue)*

Active sate?

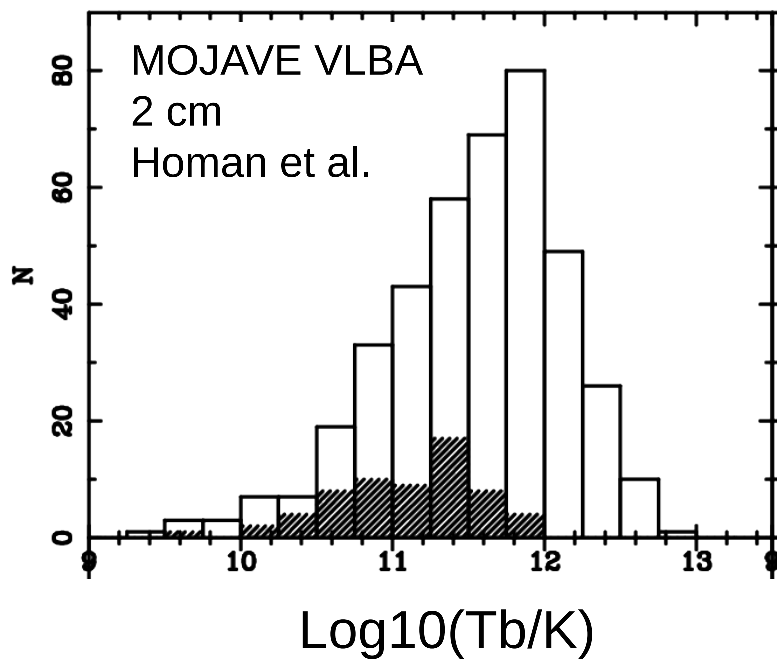

2008 2008.5 2009 2009.5 2010 2010.5 2011 2011.5 2012 2012.5 2013 2013.5 2014
Flux Density [Jy]
0048-097
RadioAstron-GBT
18 cm detection at 27 D⊕
θ = 0.1 mas = 0.68 pc
see Edwards et al. 2020, AdSpR, 65, 739
0235+164
RadioAstron-GBT
1.3 cm detection at 15 D⊕
θ = 0.015 mas = 0.1 pc
2 cm OVRO lightcurves: http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars
Days since MJD 54466 (2008 Jan 1)
OVRO lightcurves from Richards et al. 2011 ApJS, 194, 29

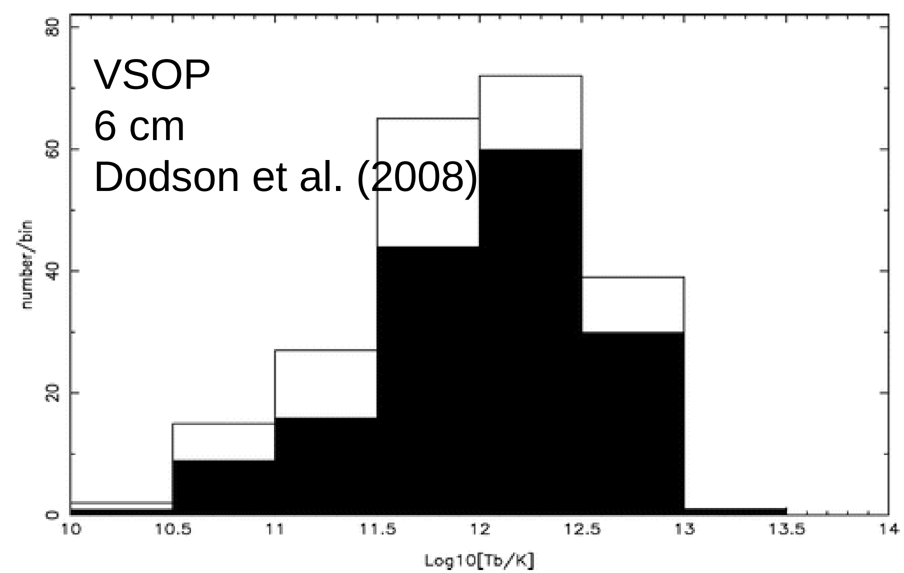
RadioAstron Tb distributions



initial RA AGN survey results presented by Kovalev et al. 2020, AdSpR, 65, 705

Previous Tb measurements





Apparent $T_b \propto \delta$

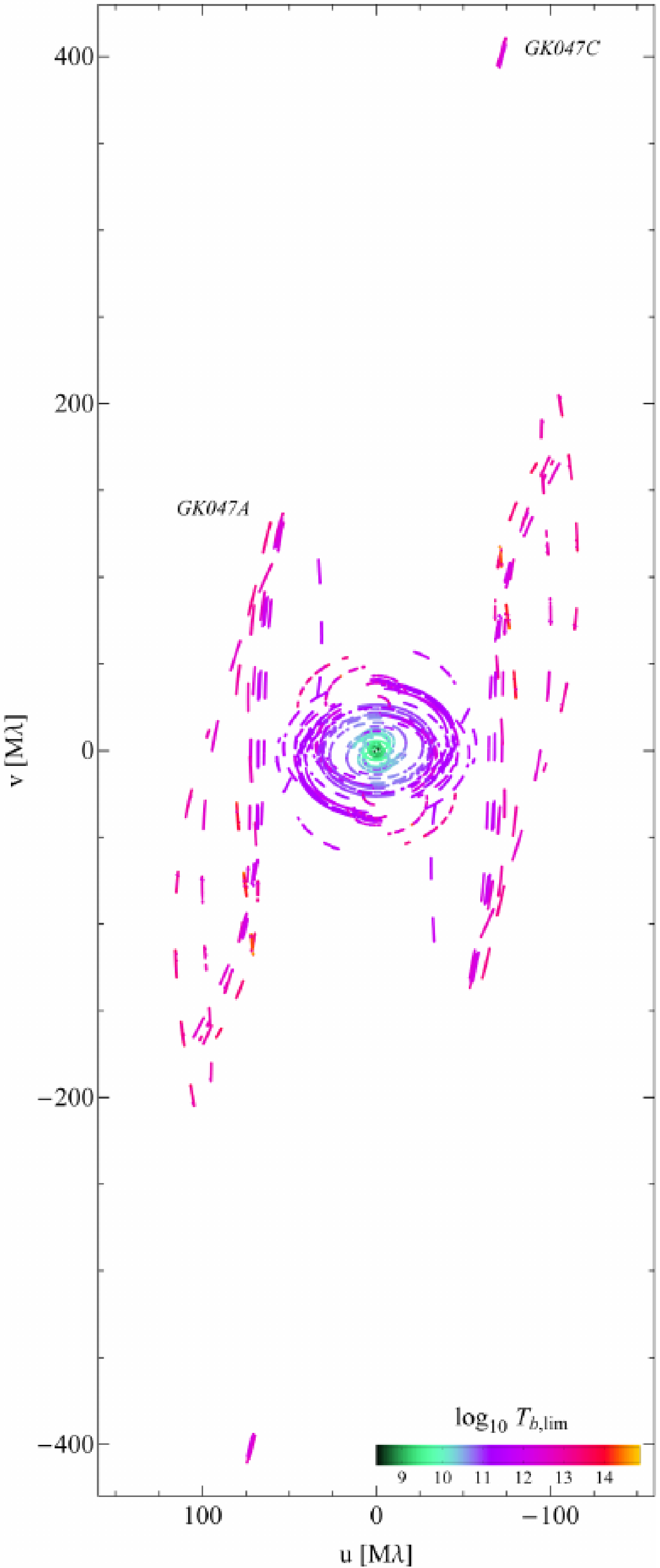
RadioAstron observes **Tb up to ~10^14 K**

implying that either **δ ~ 100**

or **intrinsic Tb is not ~10^12 K**

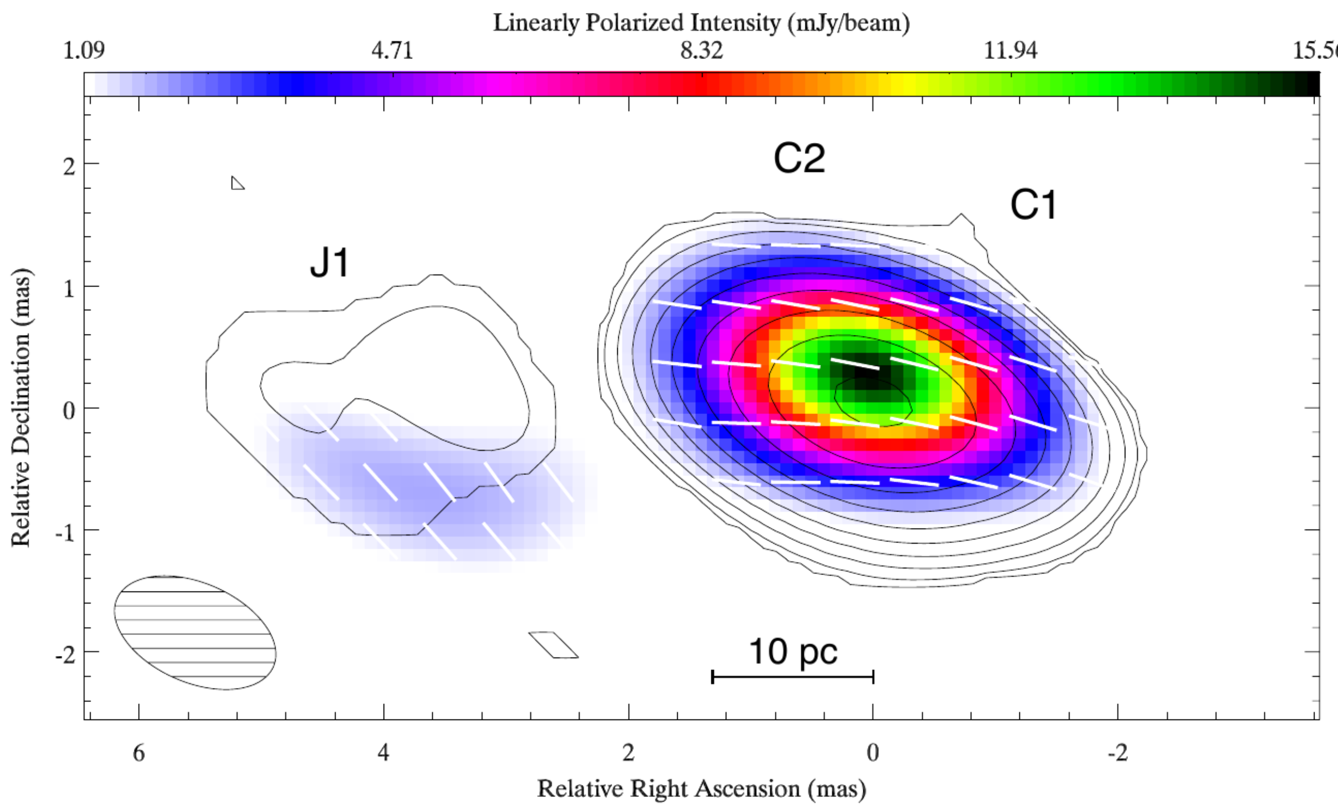
Possibilities to avoid IC limit of 10^12 K:

- Constant particle re-acceleration
- Proton synchrotron emission
- “Funny” particle energy distribution
- Coherent emission *(like in pulsars???)*

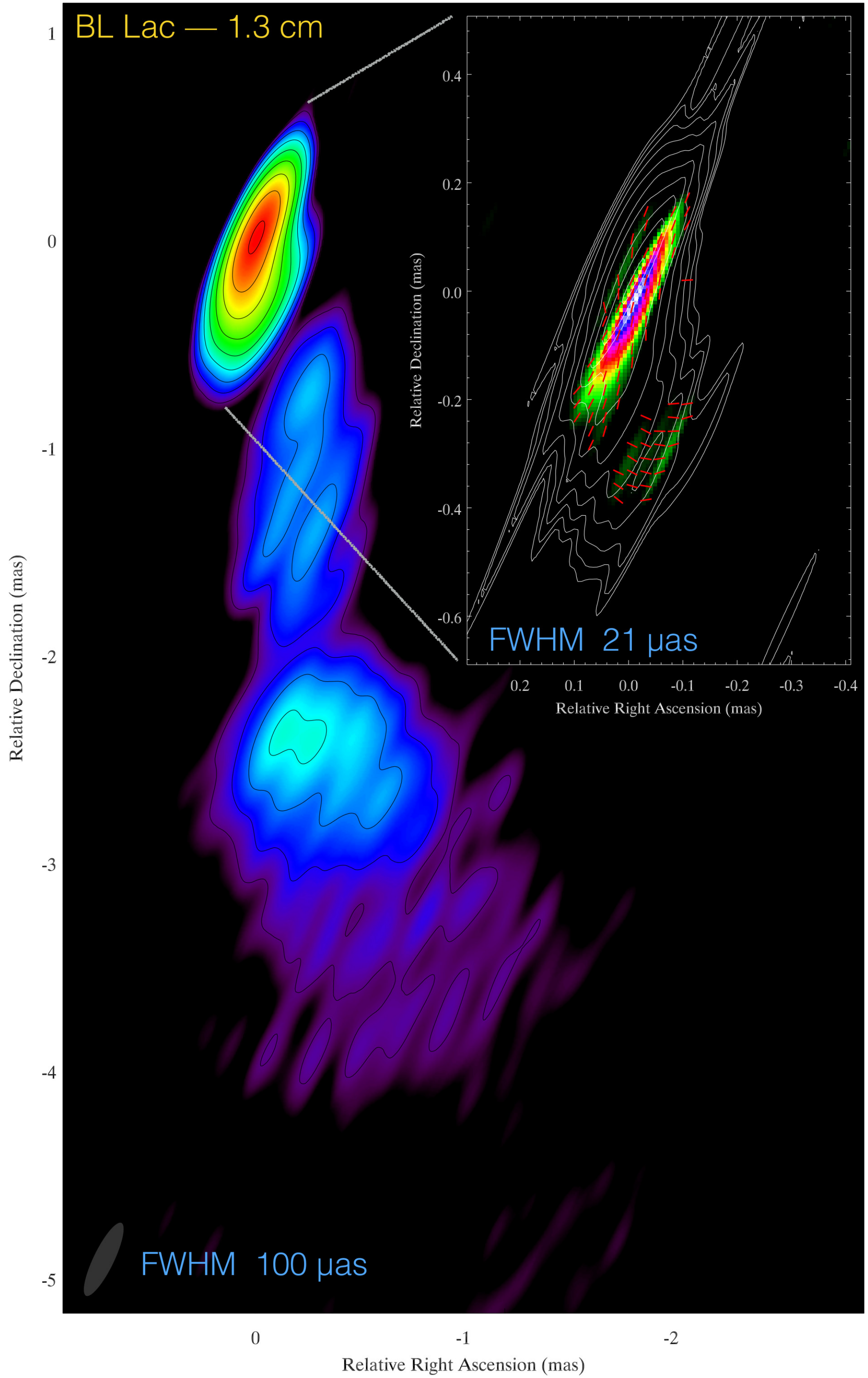


Perigee imaging with RadioAstron

0642+449 at 18 cm



Lobanov et al. 2015, A&A, 583, A100

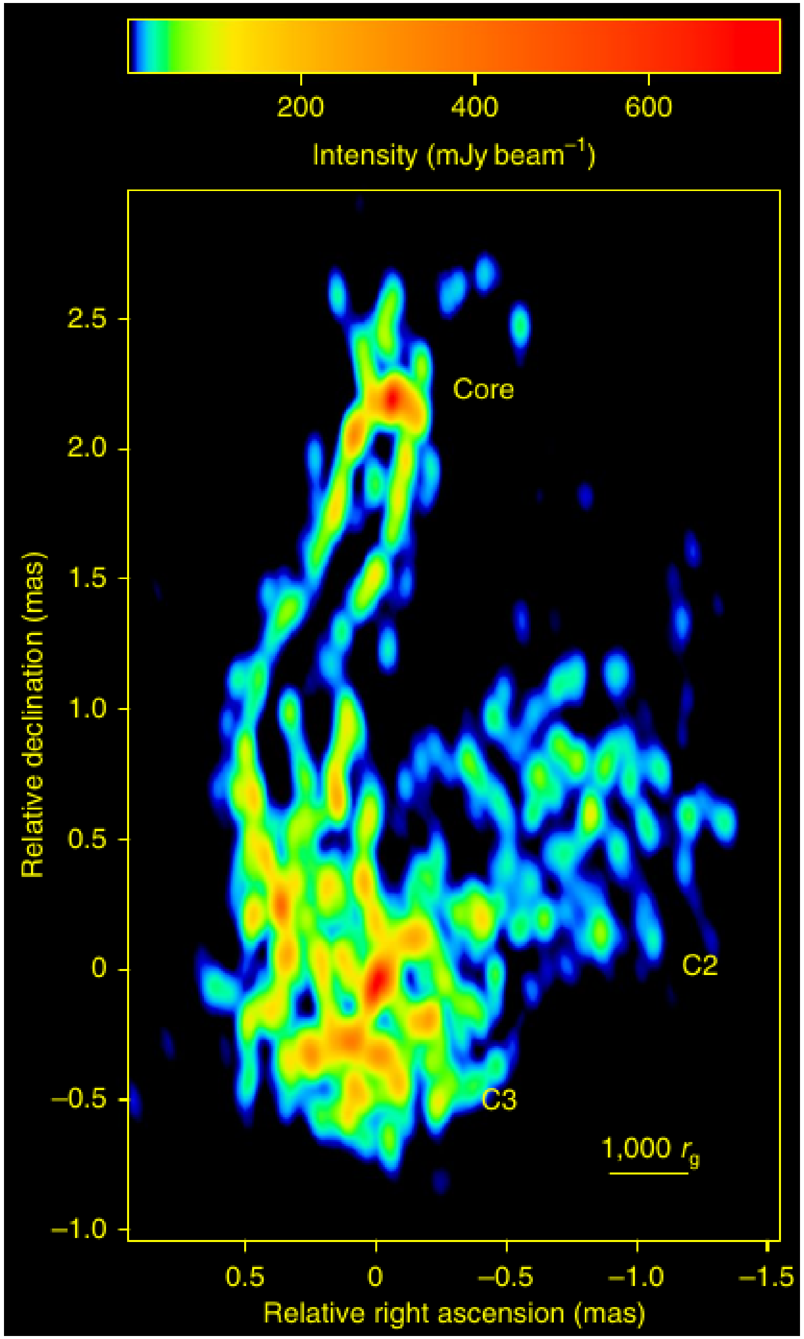


0.65 pc

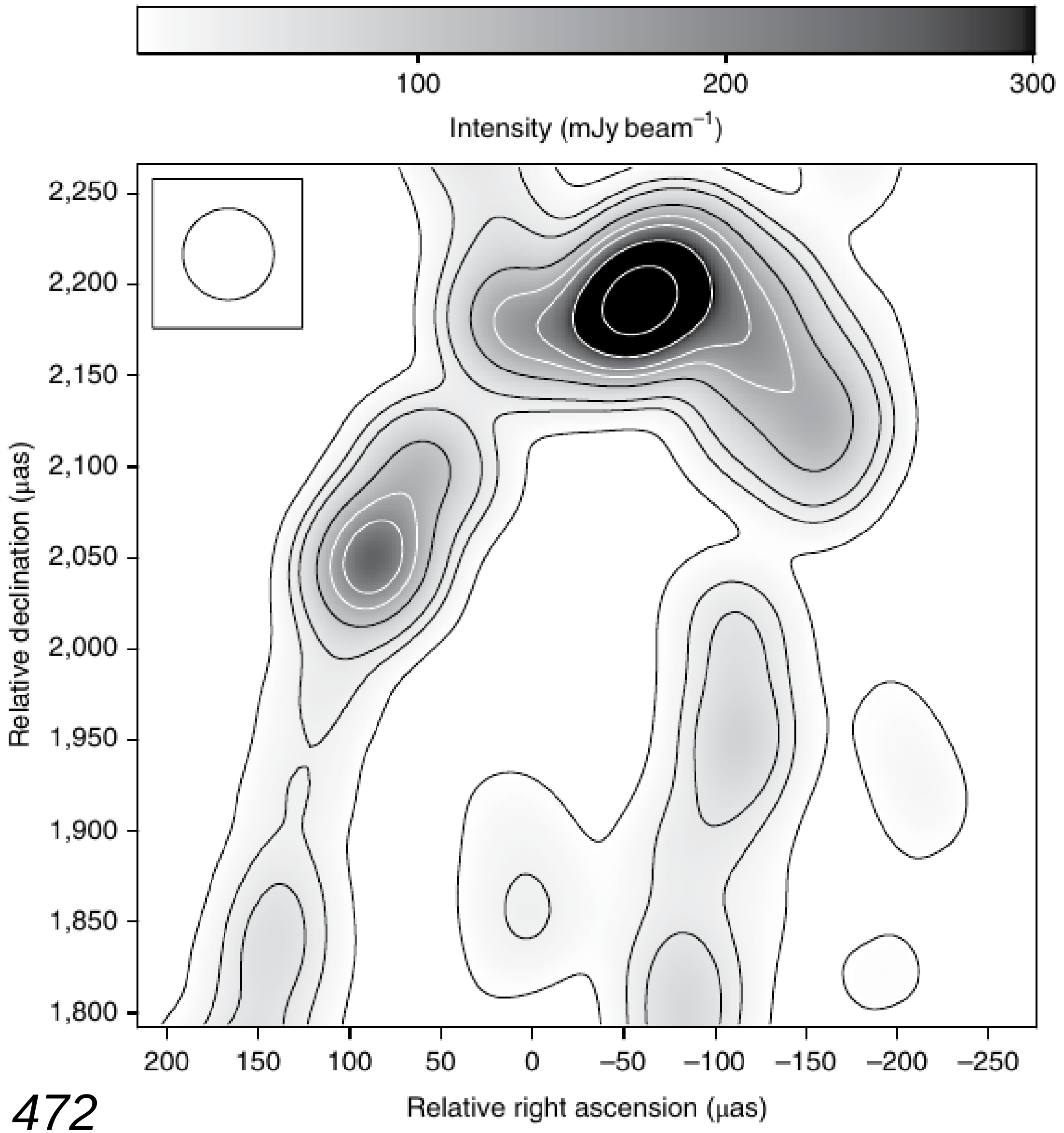
Polarization image of BL Lac at 1.3 cm

Gomez et al. 2016, ApJ, 817, 96

3C 84 at 1.35 cm

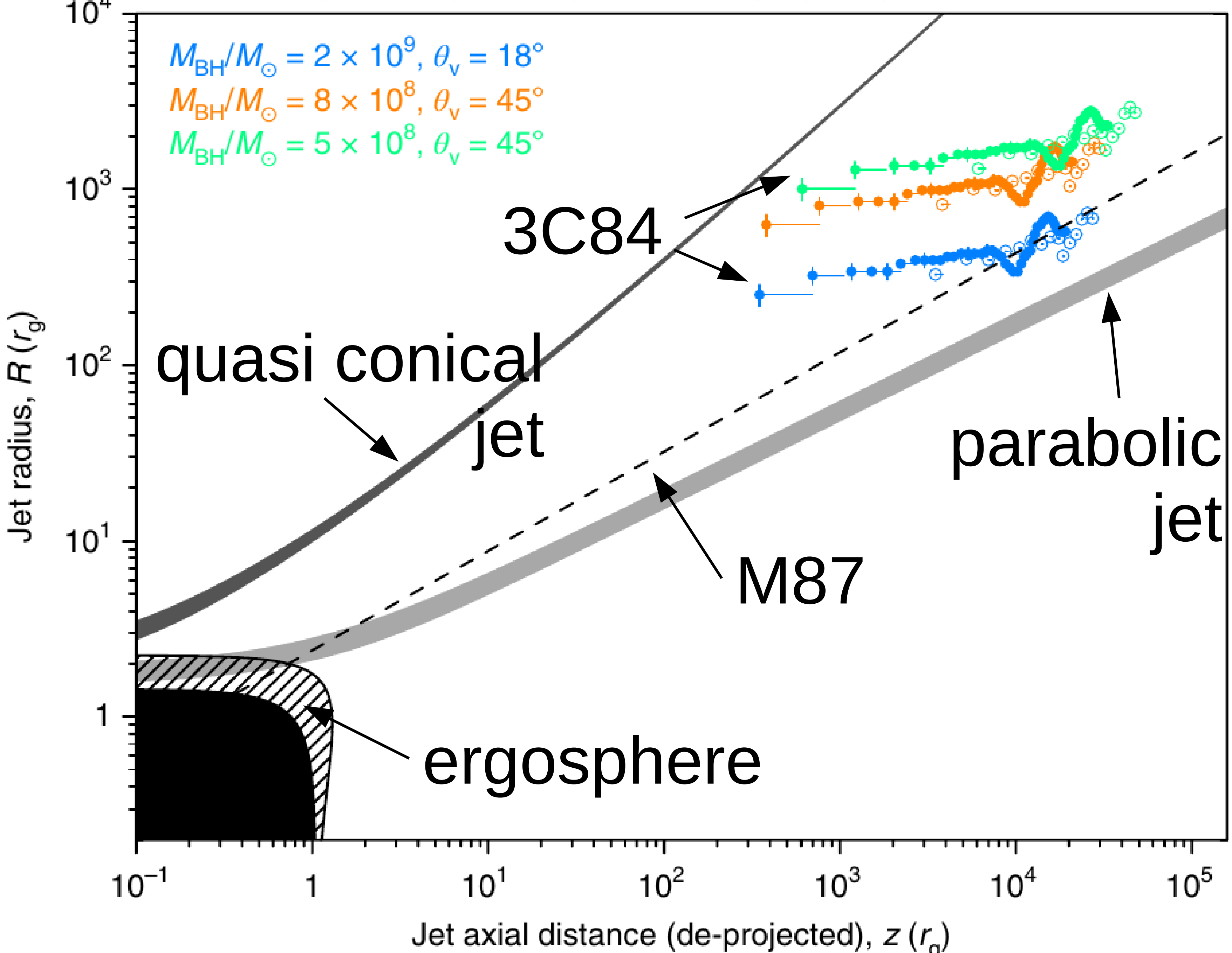


The jet is 250 rg wide only 350 rg from the BH



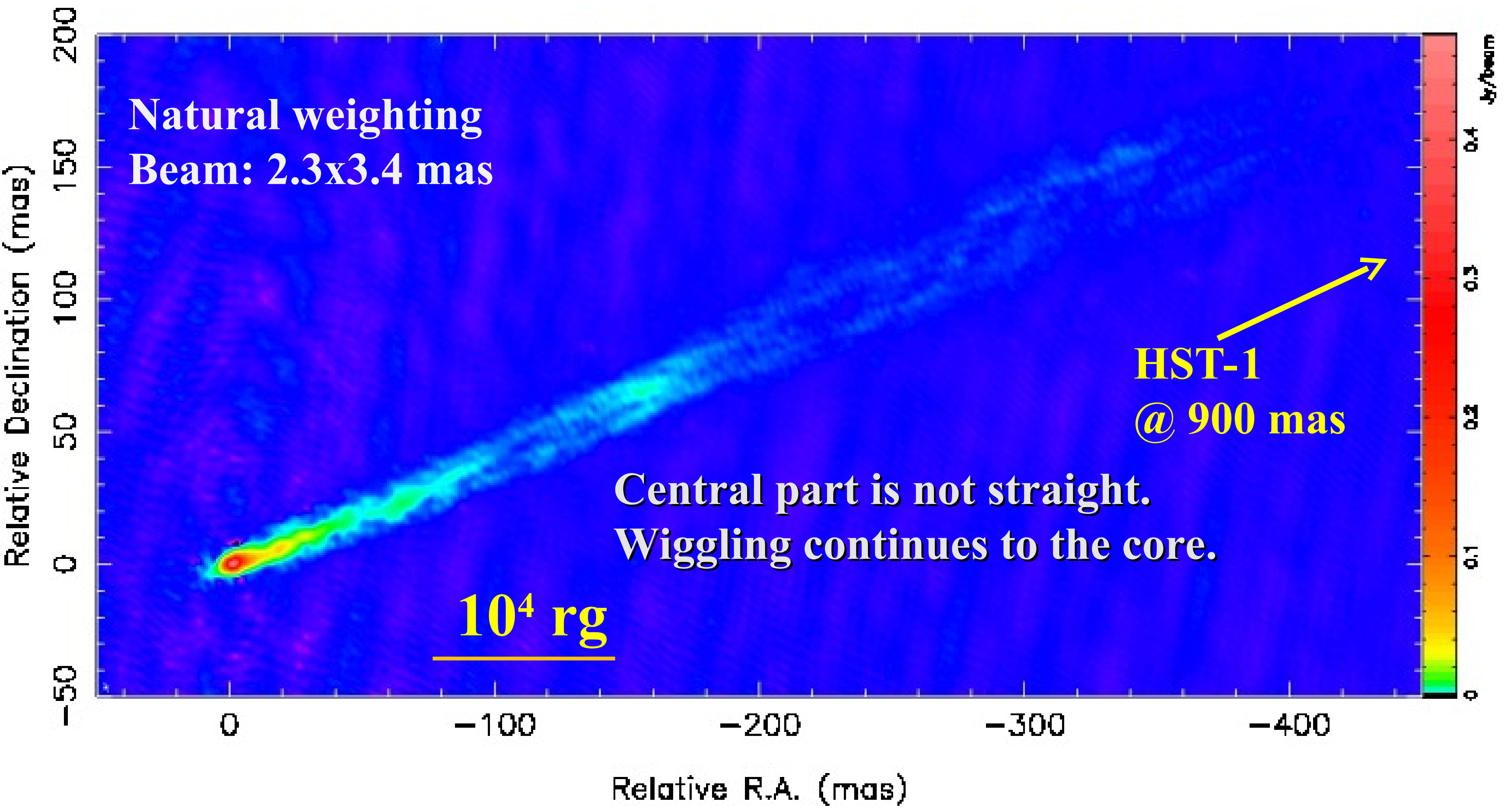
Giovannini et al. 2018, NatAs, 2, 472

3C 84 at 1.35 cm



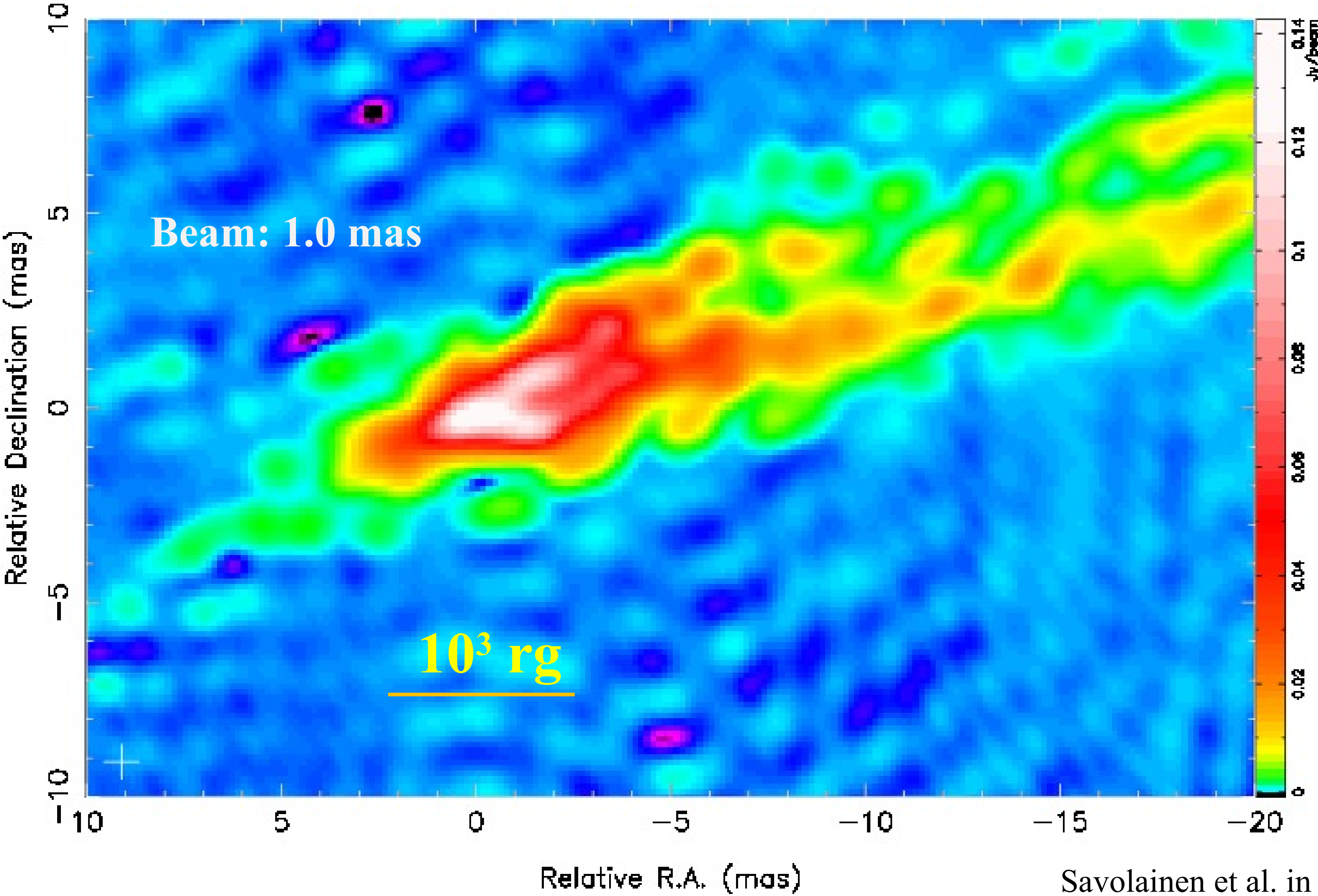
Giovannini et al. 2018, NatAs, 2, 472

Jet in M87 at 18cm



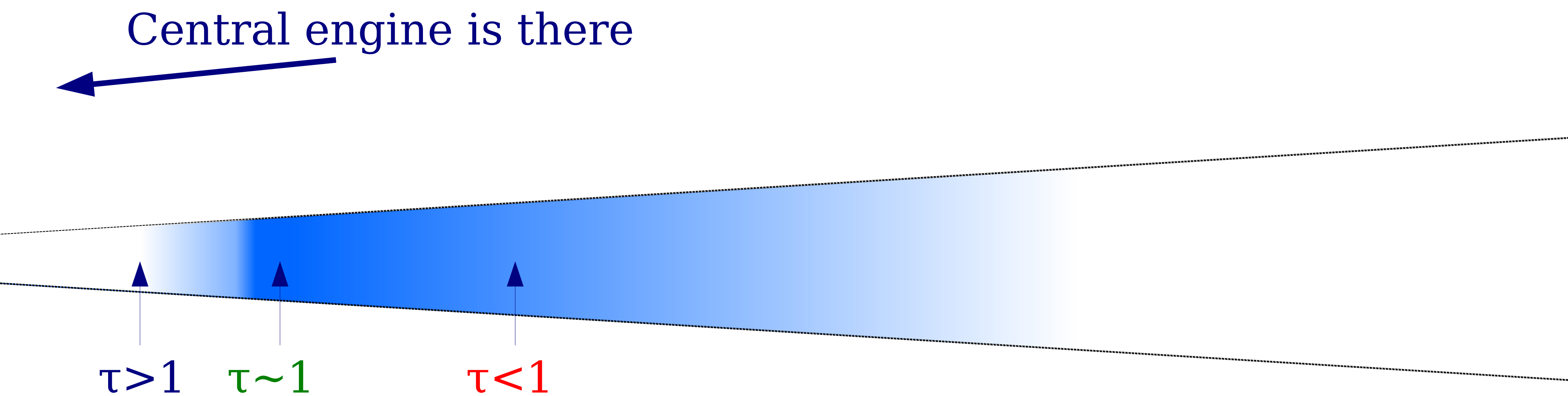
Savolainen et al. in prep.

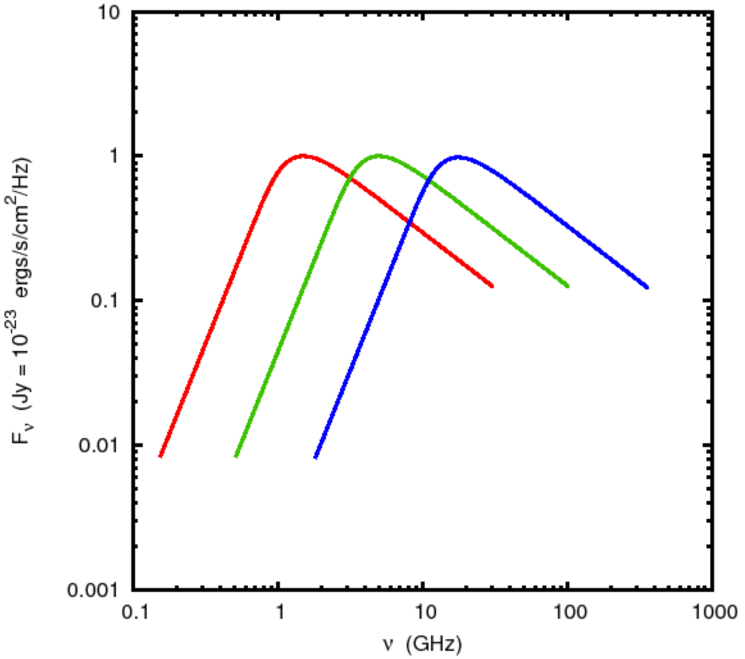
Jet in M87 at 18cm



Savolainen et al. in prep.

Core is the τ=1 region in the jet

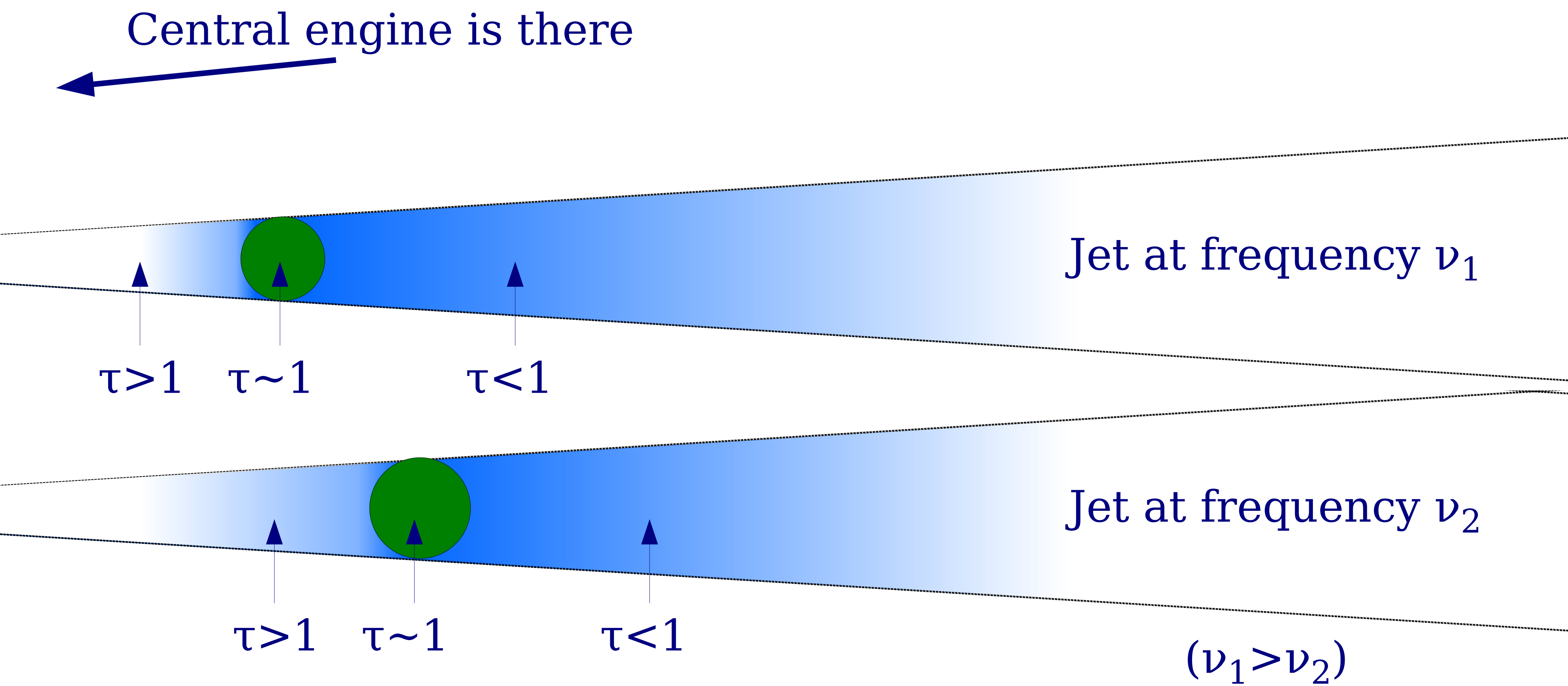




- Optical depth (τ) at a given observing frequency (ν) varies with distance from the central engine.

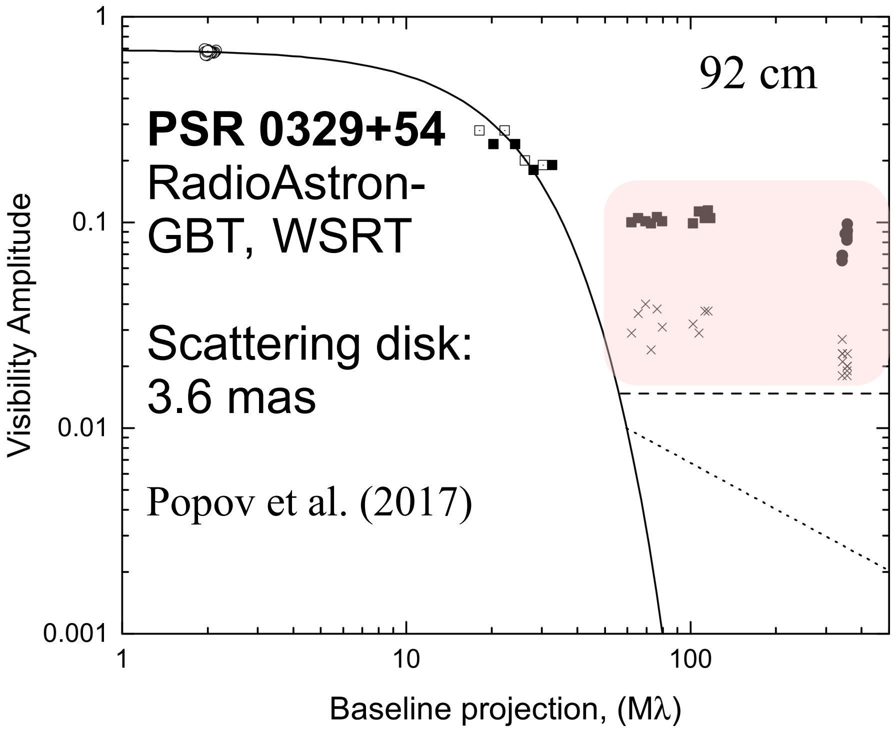
- Most of the emission comes from τ~1 region (photosphere).

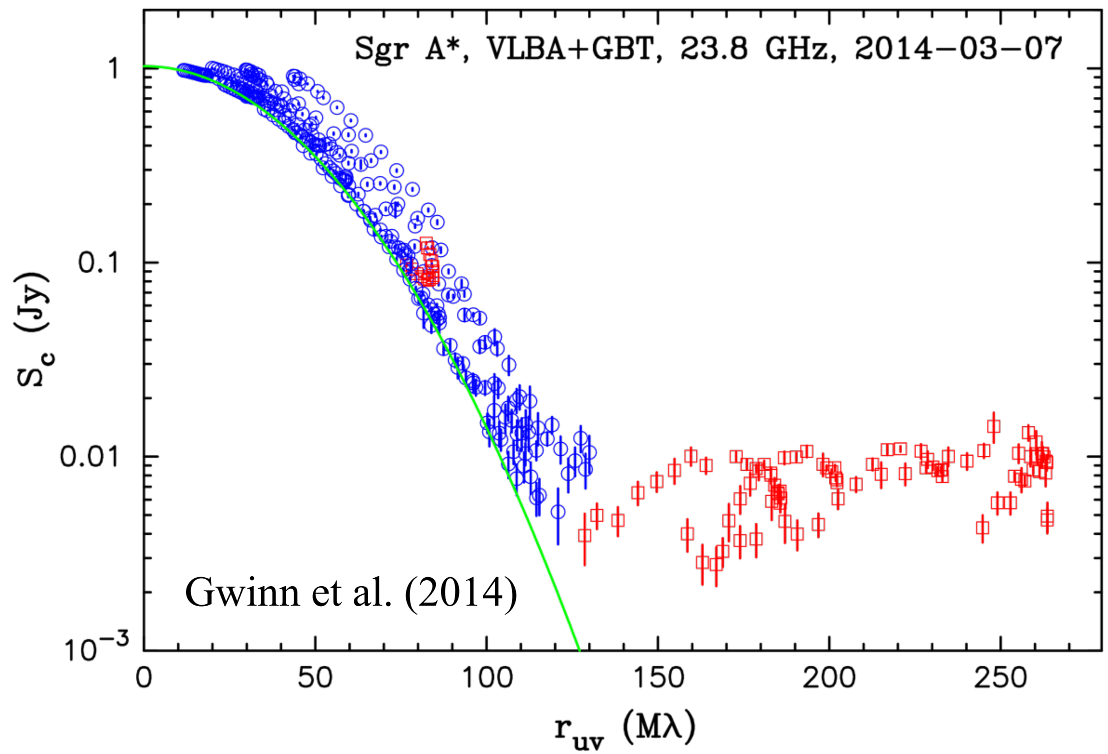
Core position and size change with ν

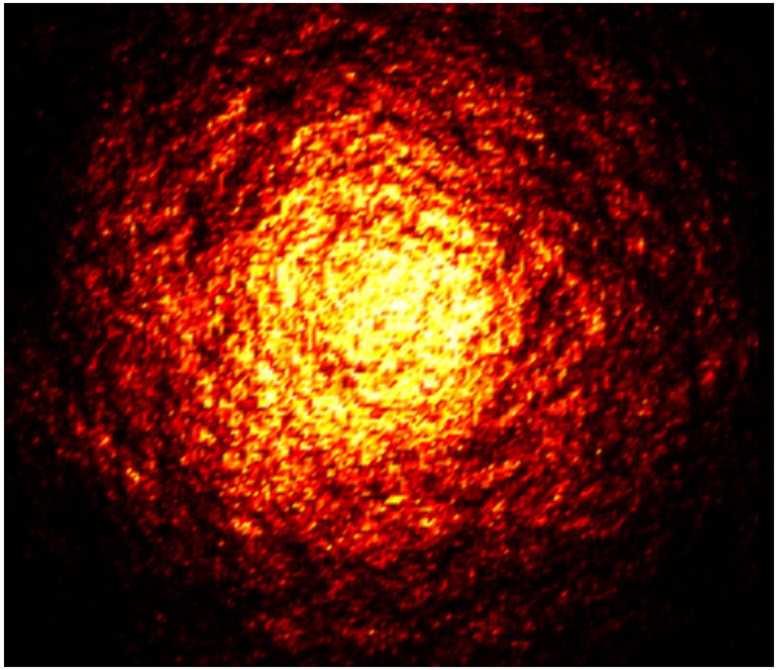


Core size ~ jet cross-section → depends on ν

Discovery of the scattering sub-structure







scattering model by
Johnson 2016, ApJ, 833, 74

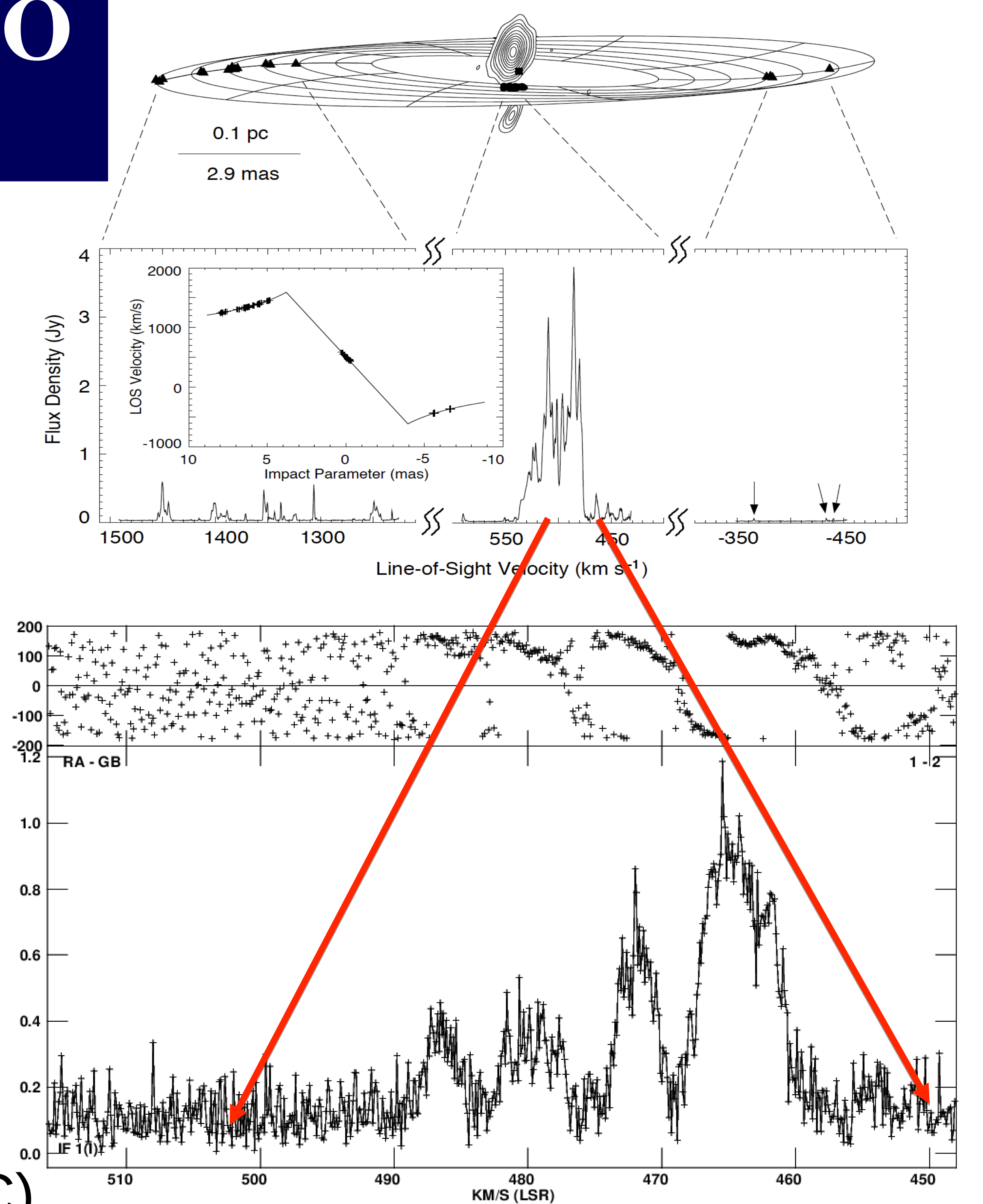
slide by Yuri Kovalev (ASC)

Extragalactic H_2O maser (1.3 cm)

RadioAstron has found ultra-compact regions of maser emission in the accretion disk of the galaxy **NGC4258**: detection at projected baseline of **26 D⊕, 8 μas.**

Individual components probably unresolved (≤3 μas)
Thickness of accretion disk is ~10 μas.
Constraints kinematics and dynamics of the disk

Alakoz et al. in prep.



slide by Yuri Kovalev (ASC)

Summary

- RadioAstron was working in both imaging and fringe tracking (longest baselines) modes
- Fringe tracking at 8 µas (1.3 cm) for H_2O maser in NGC4258
- Resolves >90% of the brightest radio-loud AGNs down to tens of mJy level
- $T_b \sim$ a few $\times 10^{13}$ K found in a number of AGNs
- First Space-VLBI polarization images at 18 and 1.3cm
- Wide edge brightened jet in 3C84
- First observation of scattering substructure