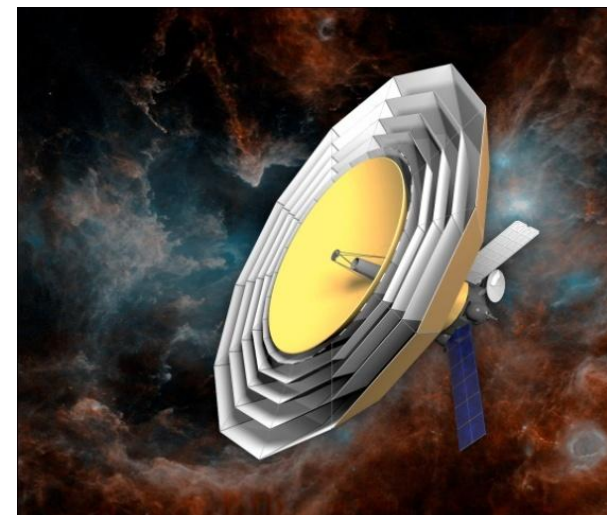
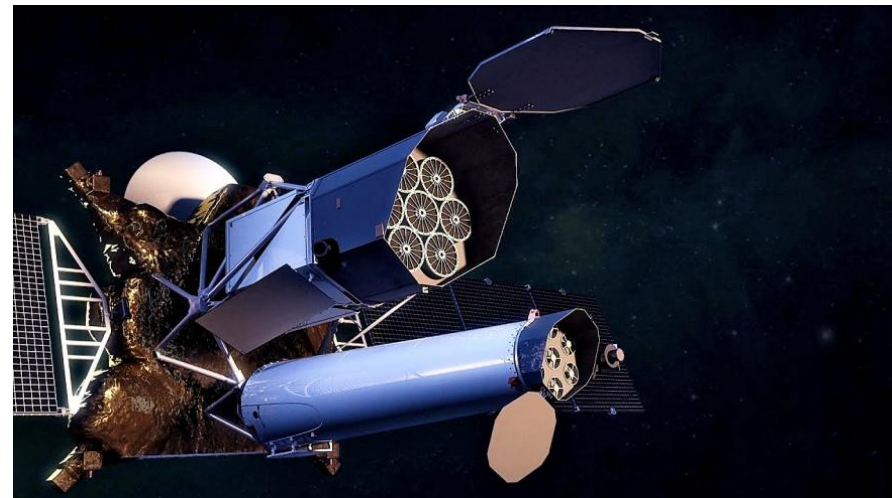
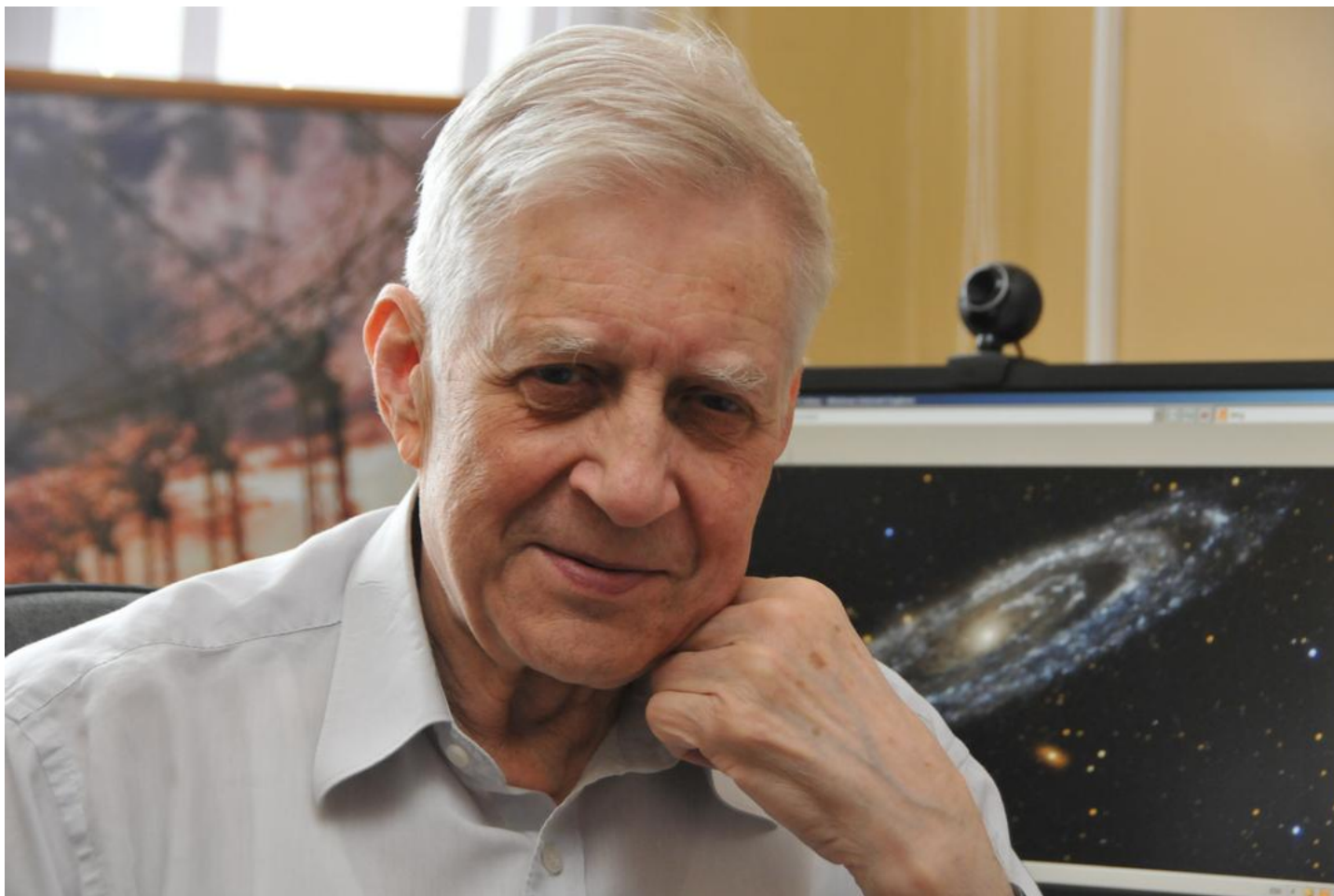


Научная программа обсерватории «Миллиметрон»

Татьяна Ларченкова, АКЦ ФИАН
от имени коллектива проекта «Миллиметрон»

Серия «Спектр»





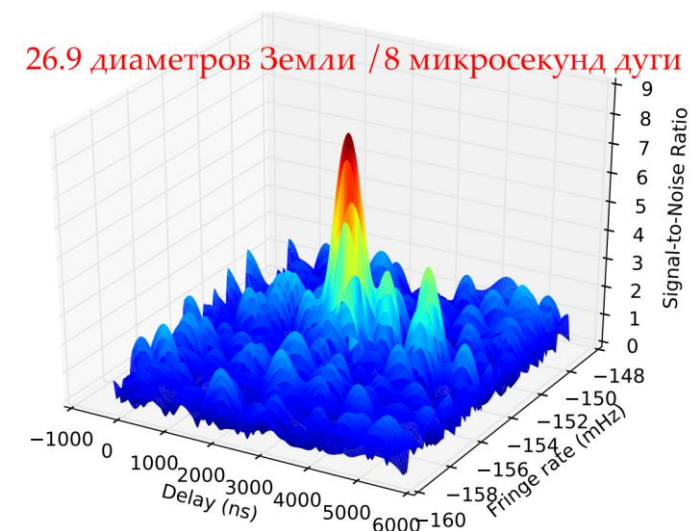
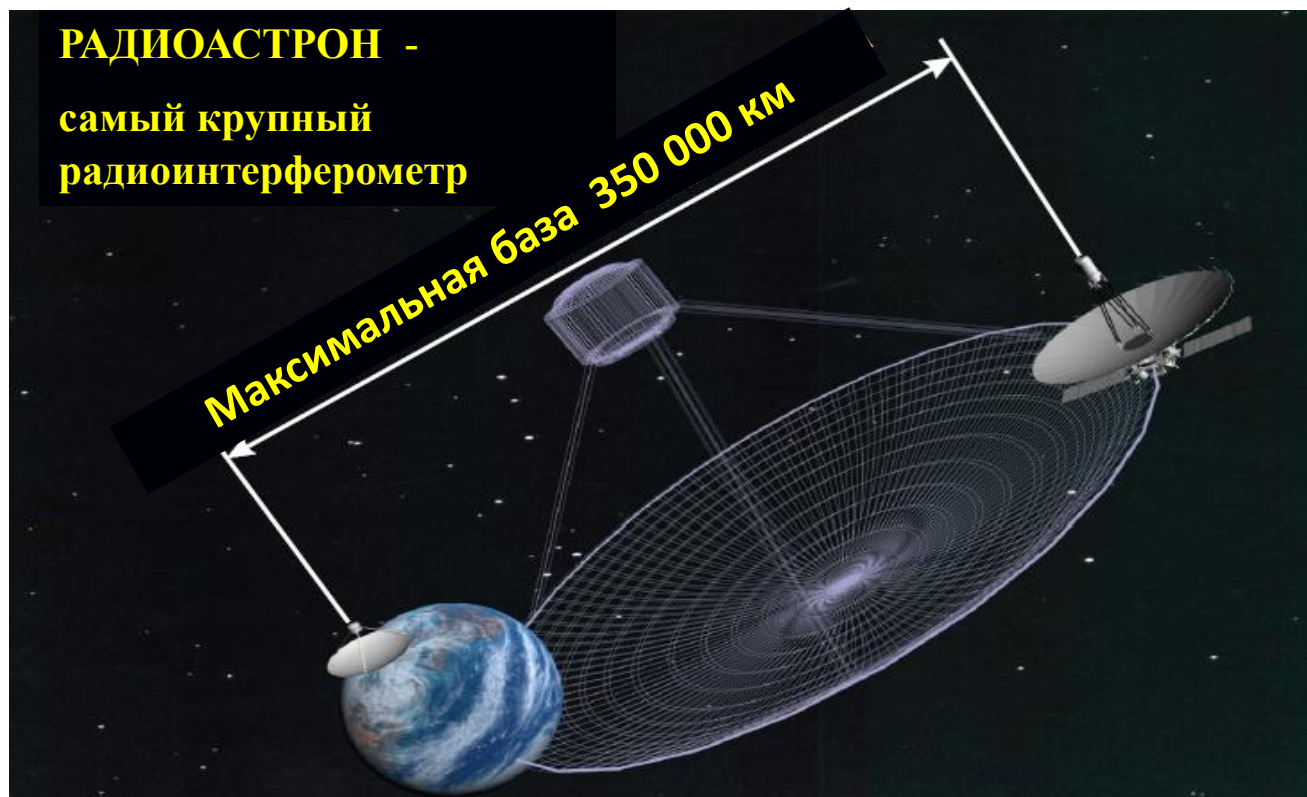
Николай Семенович Кардашев
1932 - 2019

Радиотелескопы

чувствительность (собирающая площадь, диаграмма направленности, шумы приемника)

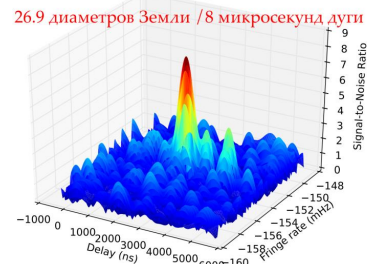
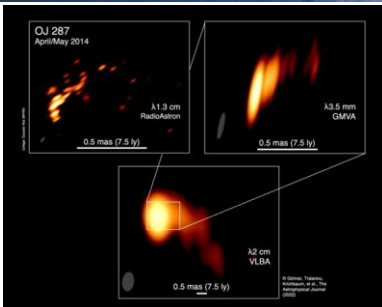
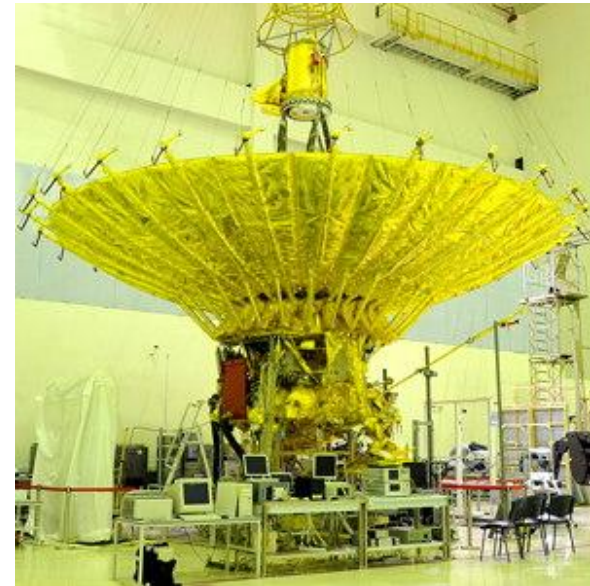
разрешающая способность λ/D , где λ - длина волны, D – диаметр антенны

λ/B , где λ - длина волны, B – расстояние между РТ (база)



Спектр-Р («Радиоастрон») - предтеча Спектр-М («Миллиметрон»)

«Радиоастрон» и «Миллиметрон» -
международные космические миссии, опыт
миссии «Радиоастрон» используется при
подготовке обсерватории «Миллиметрон».



Обсерватория «Миллиметрон» (Спектр-М)

- Дальний ИК, субмиллиметровый и миллиметровый диапазоны
- Адаптивное зеркало диаметром 10 метров
- Активное охлаждение (<10 K)
- Орбита в окрестности точки Лагранжа L2 (Земля-Солнце)
- Срок активного существования: 10 лет; с охлаждением >3 лет

Два режима работы обсерватории:

1. **Интерферометр (РСДБ)** в диапазоне 0.7 – 9 мм

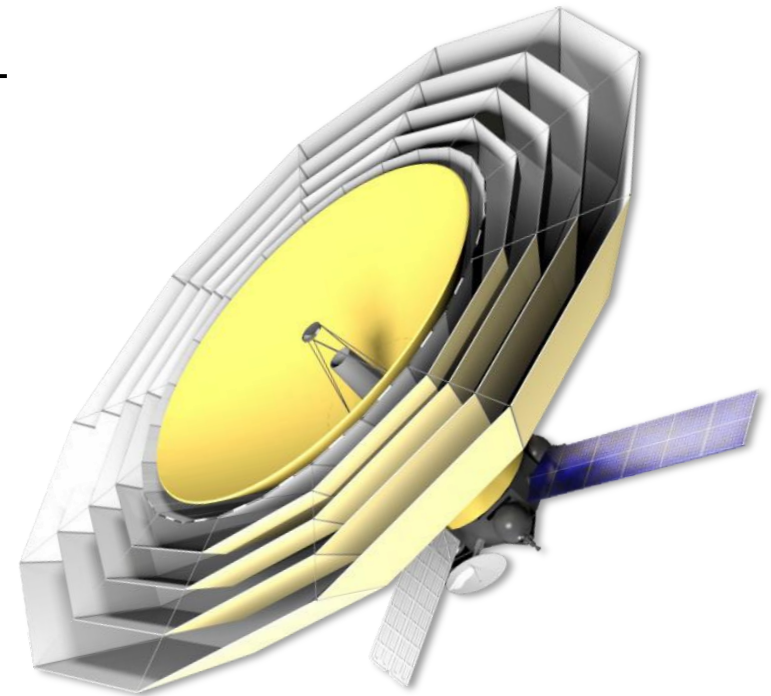
+ многочастотный синтез

чувствительность 10^{-4} Ян

2. **Одиночная антенна** в диапазоне 0.1– 3 мм

чувствительность для спектроскопии 10^{-22} Вт/м²

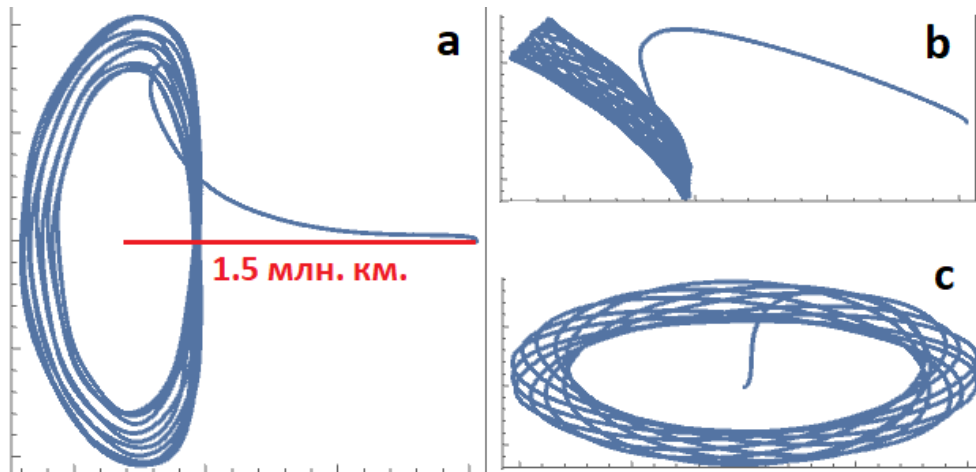
чувствительность для фотометрии 0.5 мкЯн



Подробнее: <http://millimetron.ru/>

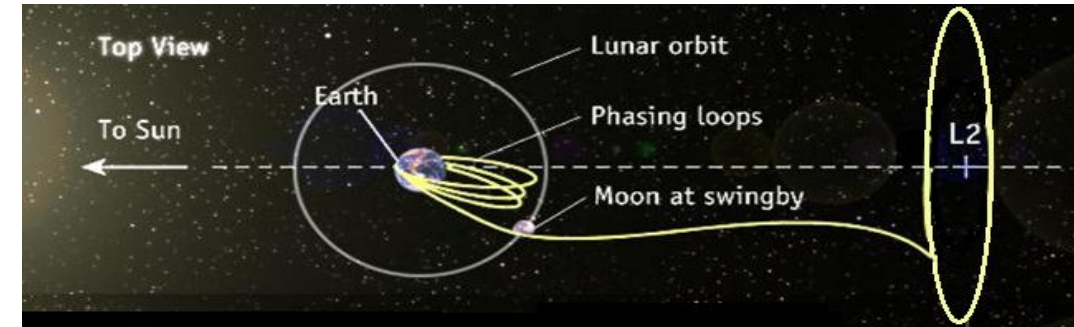
Орбита L2

- Гало орбита в окрестности точки L2 системы Солнце-Земля на расстоянии 1.5 млн. км
- Период орбиты – 178 дней.
- Максимальная проекция базы – 1 500 000 км



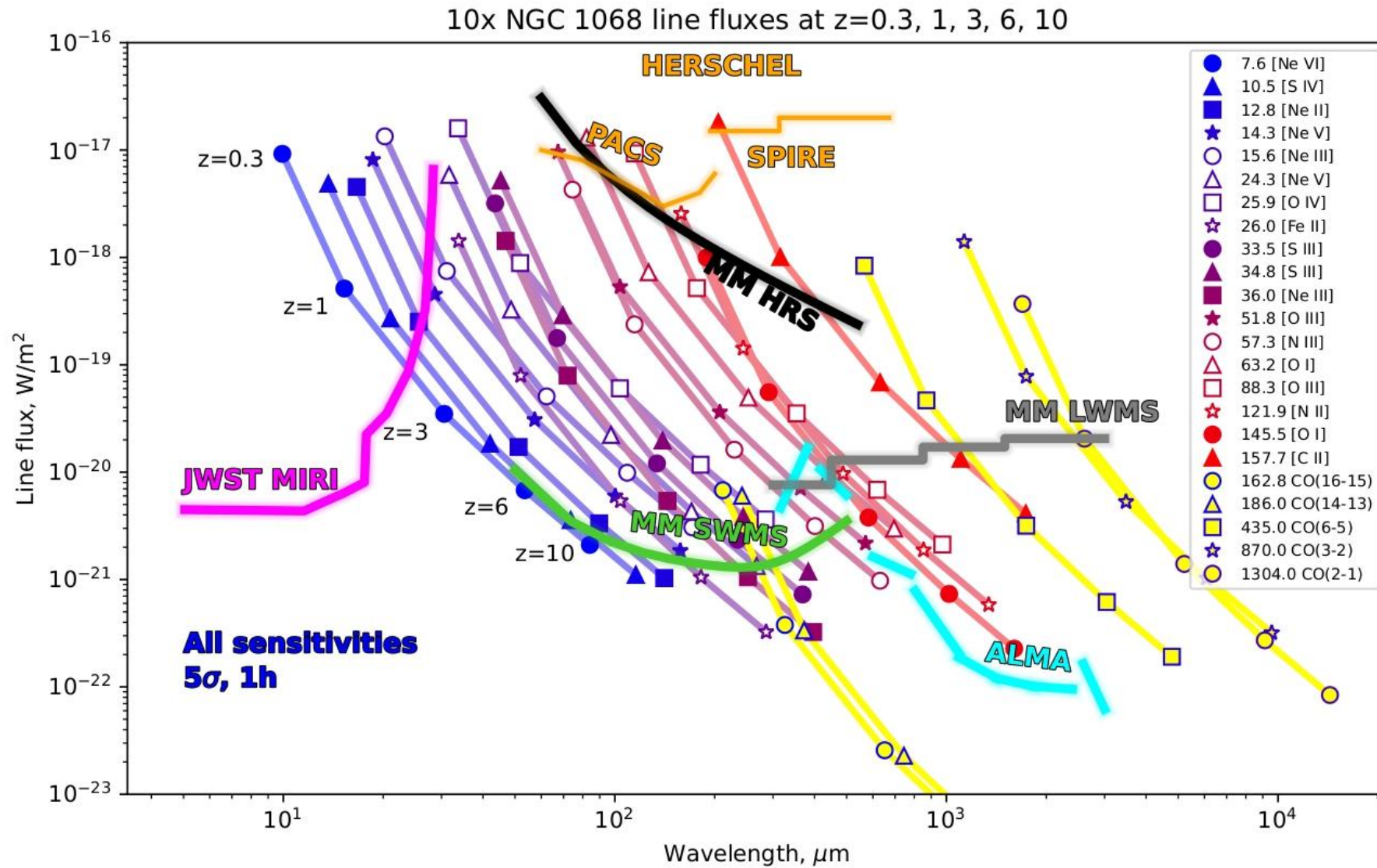
Проекция гало орбит: (a) – плоскость XY, (b) – плоскость XZ, (c) – плоскость YZ

Доклад Татьяны Сячиной



Орбита/ телескопы	Макс. угл. разрешение, (μ as)				
	43 ГГц	90 ГГц	240 ГГц	330 ГГц	690 ГГц
Круговая 40000 км	36	18	5.9	4.8	2.2
ВЭО 350000 км	4.5	2.1	0.8	0.6	0.27
L2 1500000 км	0.8	0.4	0.14	0.1	0.05
ЕНТ	--	--	23	15	--
ngЕНТ	--	--	15	13	--

Чувствительность обсерватории «Миллиметрон»



Научная концепция обсерватории «Миллиметрон» представляет собой **целенаправленный** набор **актуальных научных задач.**

Новиков и др. УФН, 191, № 4, с. 404-443 (2021)

Для подготовки научной программы «Миллиметрон» приглашены **ведущие мировые эксперты**, включая Нобелевских лауреатов. Созданы научные группы по шести научным направлениям.

Ключевые научные задачи обсерватории «Миллиметрон»

- **Физика сверхмассивных черных дыр и кротовых нор, их образование и эволюция.** Детальные изображения горизонта событий сверхмассивной черной дыры (Sgr A*, M87, ...) в режиме РСДБ.
- **Физика ранней Вселенной и эпоха реионизации.** Измерение искажений частотного спектра реликтового излучения.
- **Происхождение и перенос воды во Вселенной.** Спектроскопия в линиях CO, C+, N₂, O и многих других.
- **Звздообразование,** протопланетные диски, физика филаментов в МЗС, структура магнитного поля, поляризация.



Выбор научных задач и построение концепции научных приборов использует опыт и результаты крупных наземных и космических проектов Herschel, Spitzer, JWST, ALMA (включая ЕНТ).

Режимы работы обсерватории «Миллиметрон»

- **Режим РСДБ** — наблюдения поздней Вселенной (10 – 20% наблюдательного времени, рекордное угловое разрешение $3 \cdot 10^{-8}$ угловых секунды).
- **Режим одиночного телескопа** — исследование ранней Вселенной и поиск потенциальных источников жизни (80 – 90% наблюдательного времени, чувствительность превышает в 100 раз чувствительность телескопа **Herschel**)

Приёмный комплекс обсерватории «Миллиметрон»

1. Комплект интерферометрических приемников (КПИИТ):

33 - 50 ГГц
84 - 116 ГГц
211 - 275 ГГц
275 - 373 ГГц

АКЦ ФИАН, КБ РЭ, ИРЭ РАН

2. Спектрометр Высокого Разрешения

- рабочий диапазон частот: 0,5 – 2,6 ТГц
- спектральное разрешение $\geq 10^6$

АКЦ ФИАН, КБ РЭ, ИРЭ РАН, МПГУ

3. Длинноволновый Матричный Спектрометр (Камера + Спектрометр)

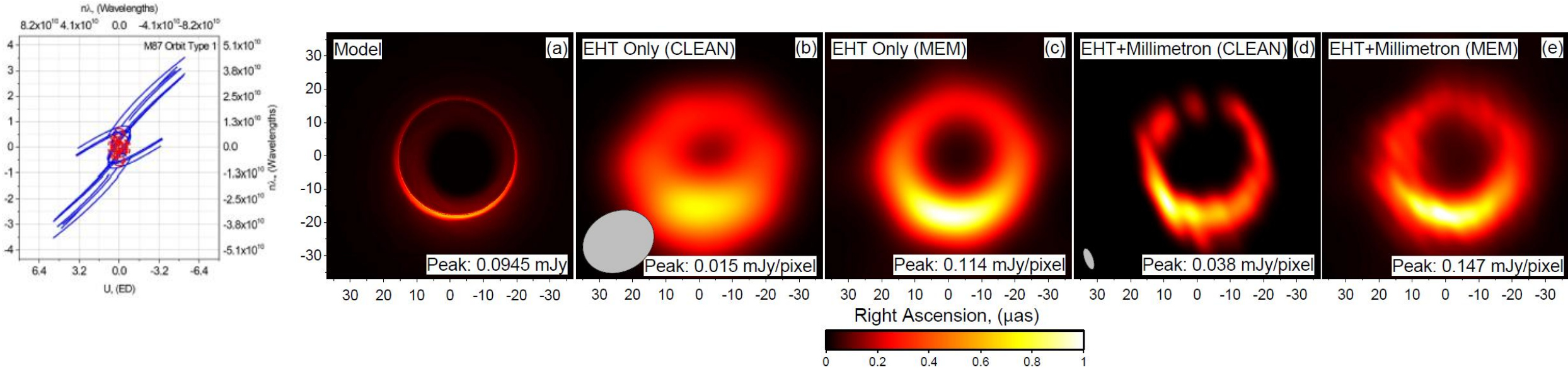
- рабочий диапазон частот: 0,1 – 1 ТГц
- спектральное разрешение ≥ 100

University of Rome - ASI (Италия)

Задачи научной группы «Релятивистская астрофизика и КРСДБ»:

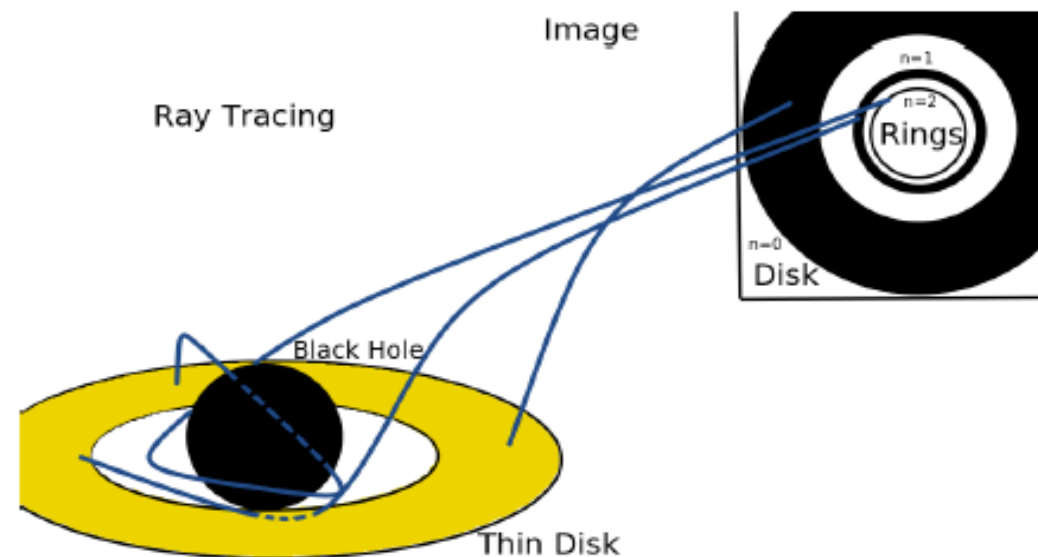
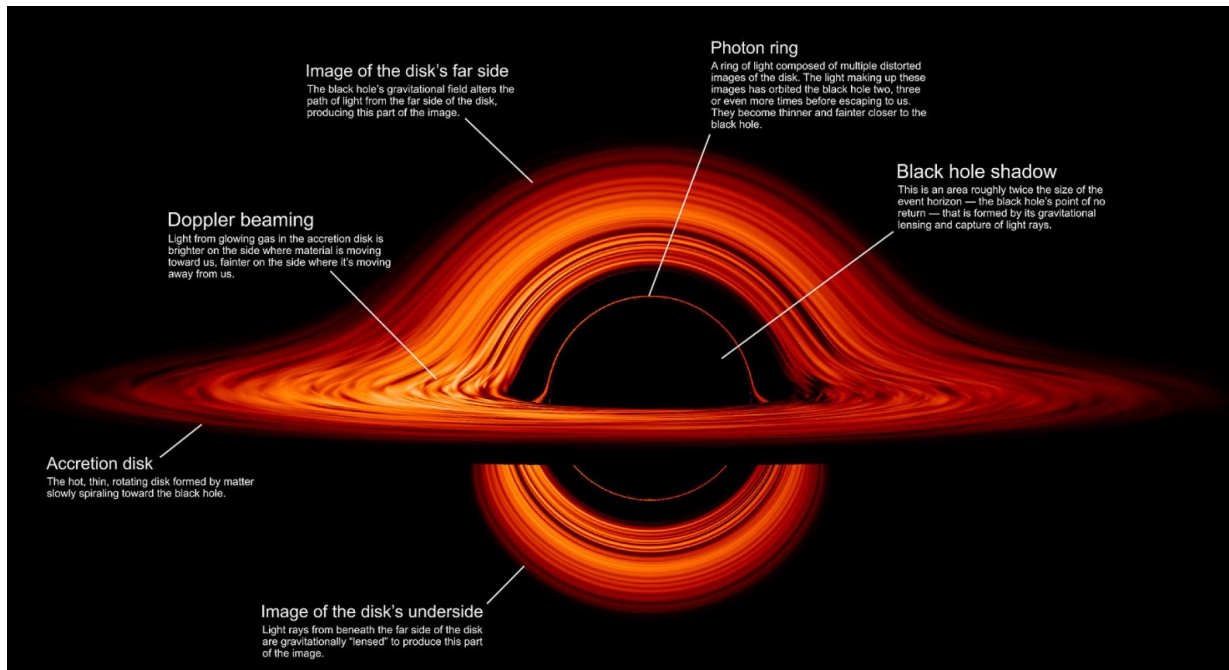
- **Исследование параметров метрики пространства-времени в окрестности горизонта событий.** Изучение природы компактных сверхмассивных объектов с помощью изображений, получаемых интерферометром Земля-Миллиметрон.
- **Поляриметрические измерения в режиме КРСДБ.** Программа для определения напряженности магнитного поля, его пространственного изменения и топологии.
- **Поиск гипотетических объектов («кротовые норы»), проявляющихся как сверхмассивные тела в центрах галактик.**

КРСДБ наблюдения из точки L2



Модельные двумерные изображения тени черной дыры в галактике М87. Два крайних правых изображения (d) и (e) — результаты наземно-космического интерферометра Миллиметрон-Телескоп Горизонта Событий. Изображения (b) и (c) — известный результат наземного интерферометра Телескоп Горизонта Событий.

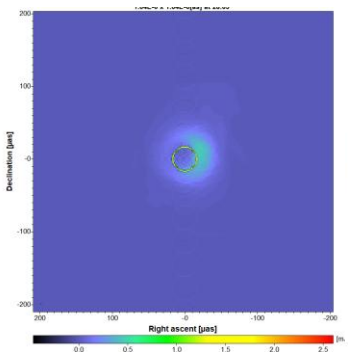
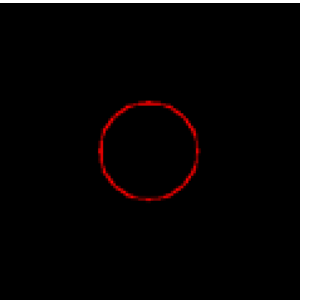
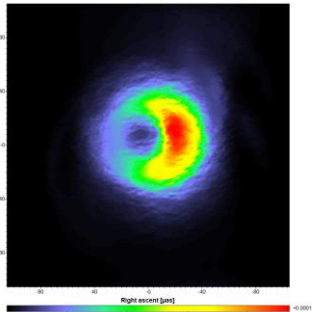
Тонкая структура тени - фотонные кольца



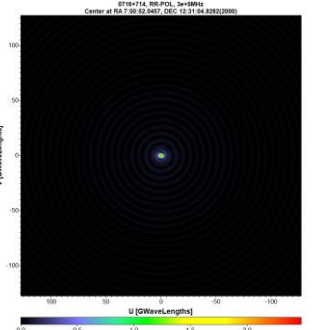
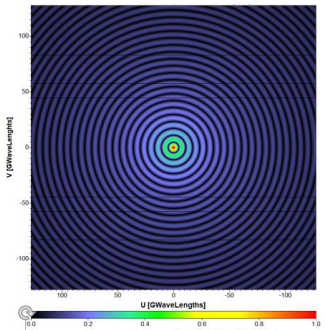
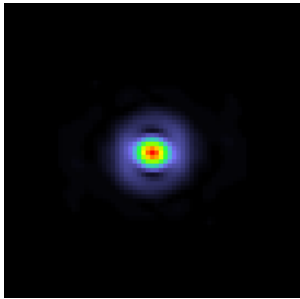
- Фотонные кольца (линзированные изображения аккреционного диска) слабо зависят от распределения вещества в аккреционном диске, полностью определяются метрикой пространства-времени вблизи центрального объекта и являются хорошим маркером для ее исследования.
- Полный поток в каждом следующем кольце составляет 4-13% от полного потока предыдущего
- Необходим следующий уровень углового разрешения (космическое РСДБ - Миллиметрон, EHT Imager, VHEX) и **чувствительности**.

Фотонные кольца удобны для РСДБ наблюдений на длинной базе

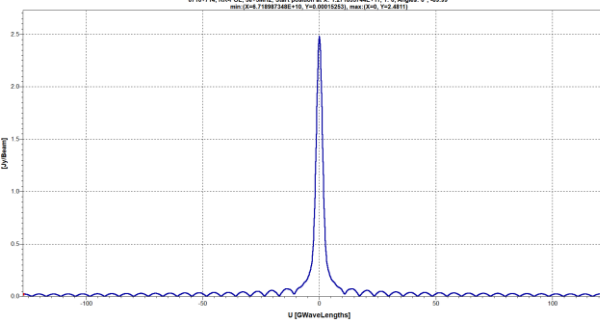
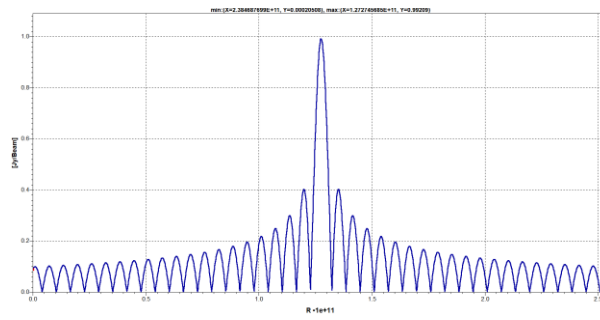
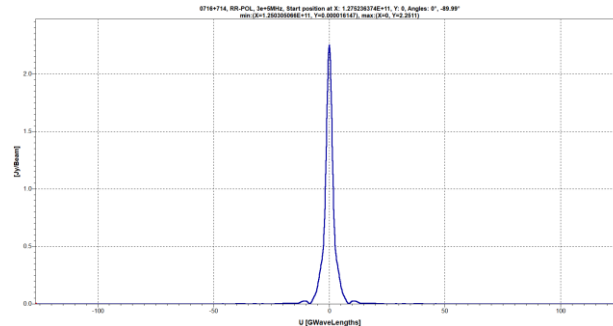
Изображение



Видность

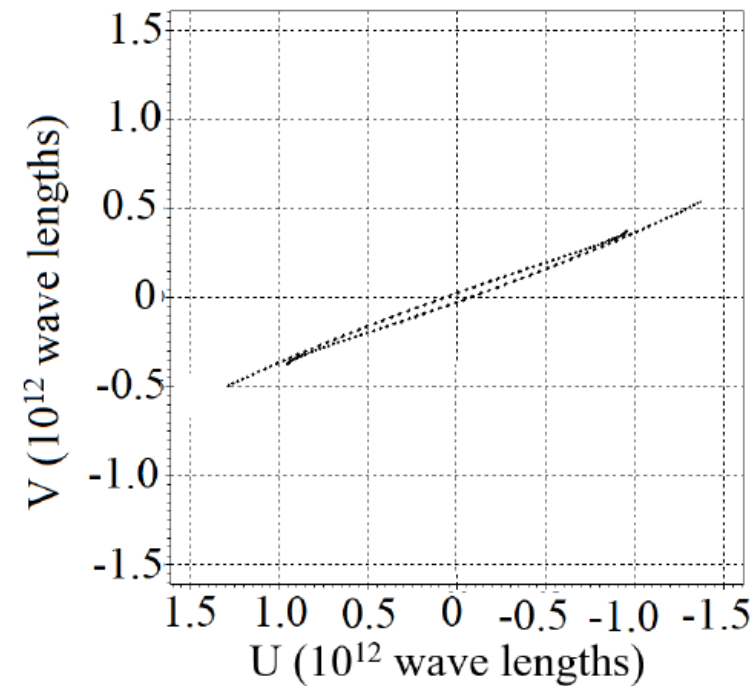
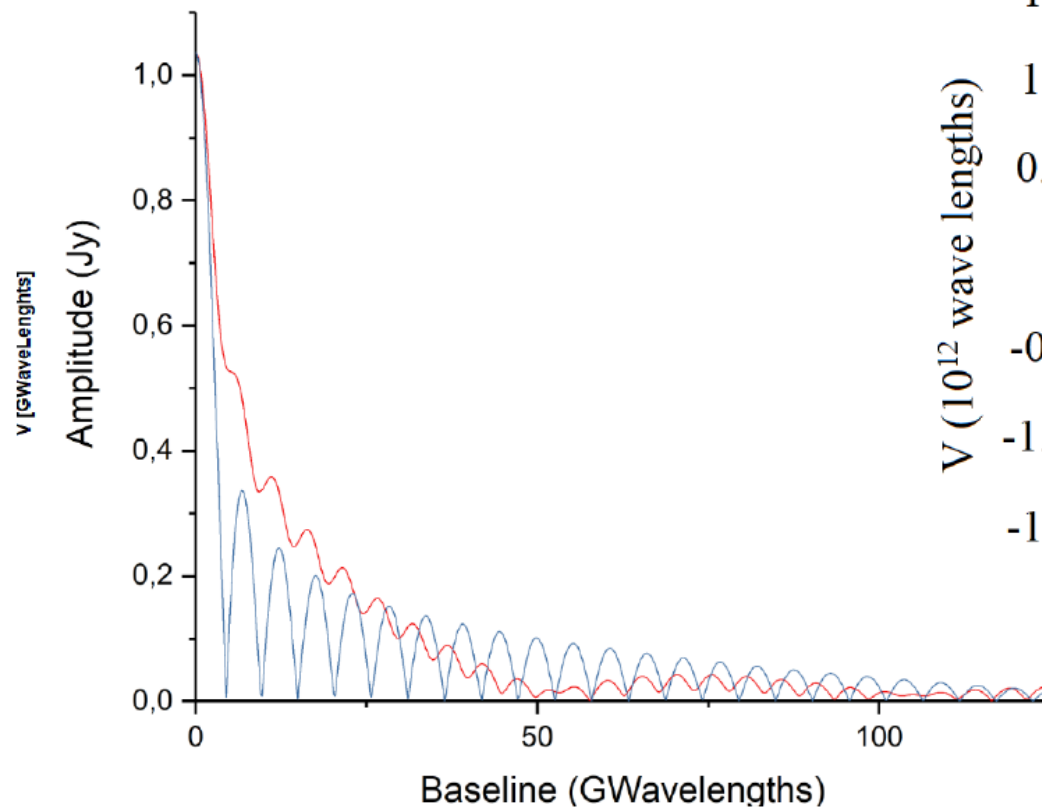
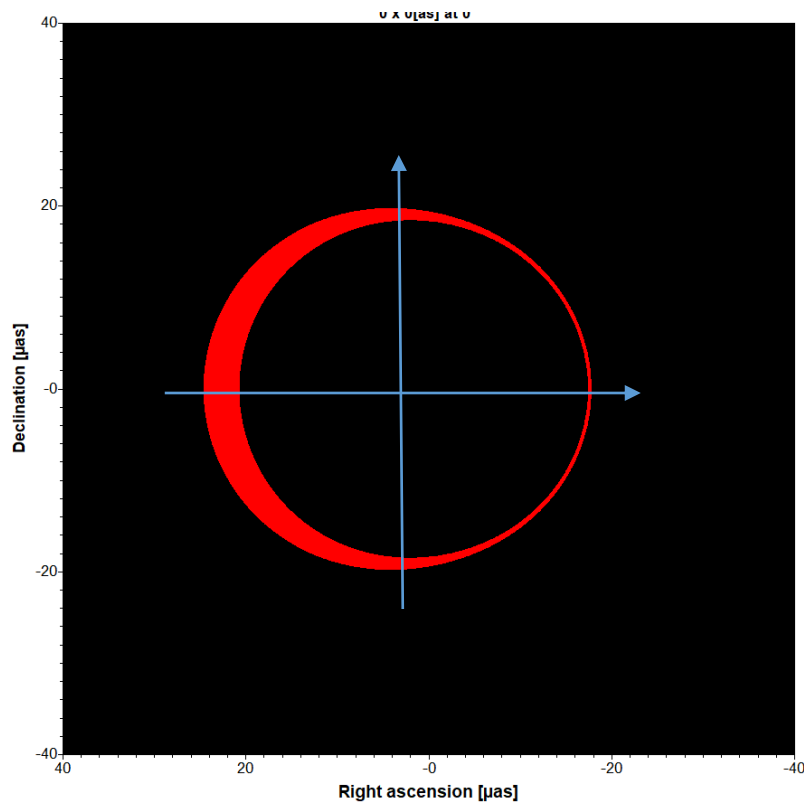


Проекция видности



- Измеряемая величина в РСДБ экспериментах не распределение яркости по небу, а интерферометрическая функция видности (Фурье образ по пространственным координатам)
- Из-за компактности кольца на большой базе (высокие пространственные гармоники) измеряемая функция видности определяется только фотонным кольцом.
- Для наблюдения фотонных колец не требуется восстанавливать изображение источника. Не нужно хорошее UV-заполнение. Не нужна информация о фазе функции видности, достаточно амплитуды.

Первое фотонное кольцо $n=1$

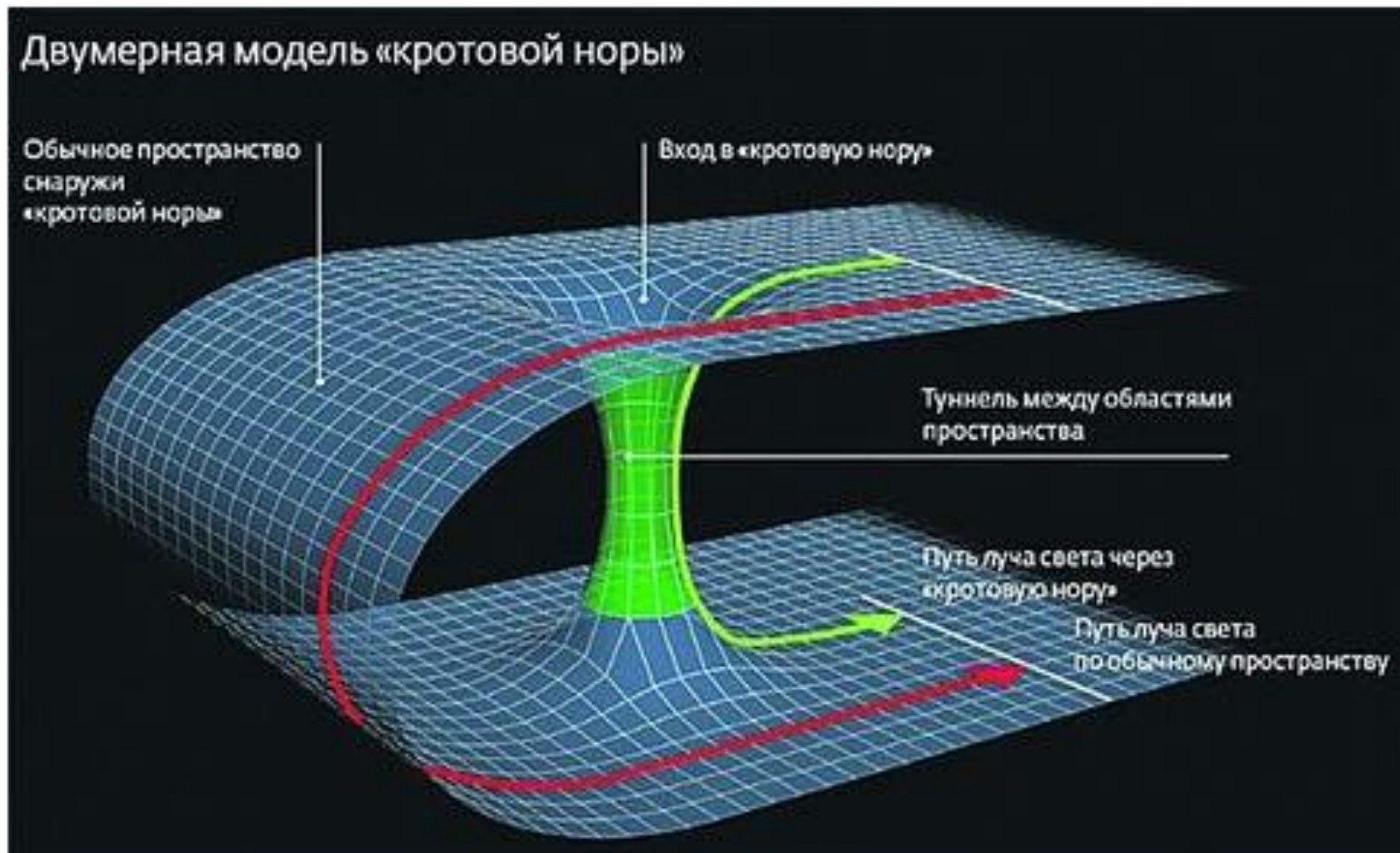


- Ассиметрия дает информацию о спине
- Достаточно двух сечений UV-плоскости
- Полный поток в кольце $n=1$ составляет $\sim 10\text{-}20\%$ от полного потока источника

Черная дыра или кротовая нора ?



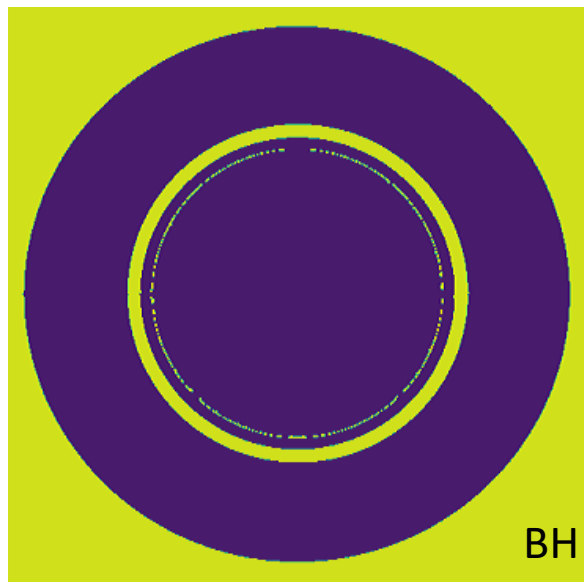
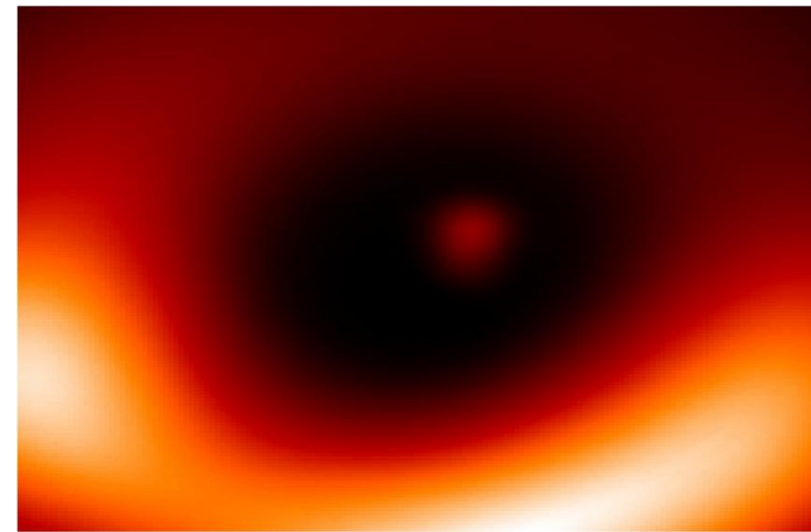
ЕНТ, 2019



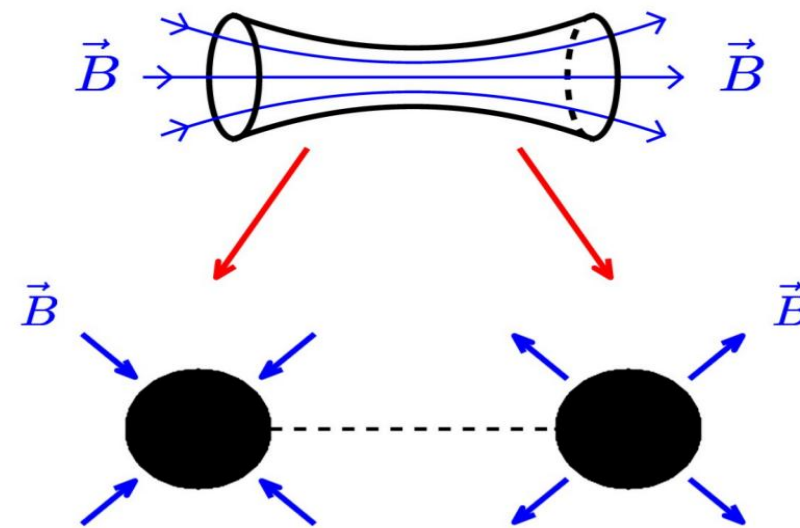
I.Flamm, Phys. Z. 17, 448 (1916); J.A.Wheeler, Phys Rev 97, 511 (1955)

Наблюдательные проявления кротовых нор

1. Излучение из кротовой норы
2. Магнитный монополяр
3. Синее гравитационное смещение
4. Различие в размерах и форме тени и фотонных колец

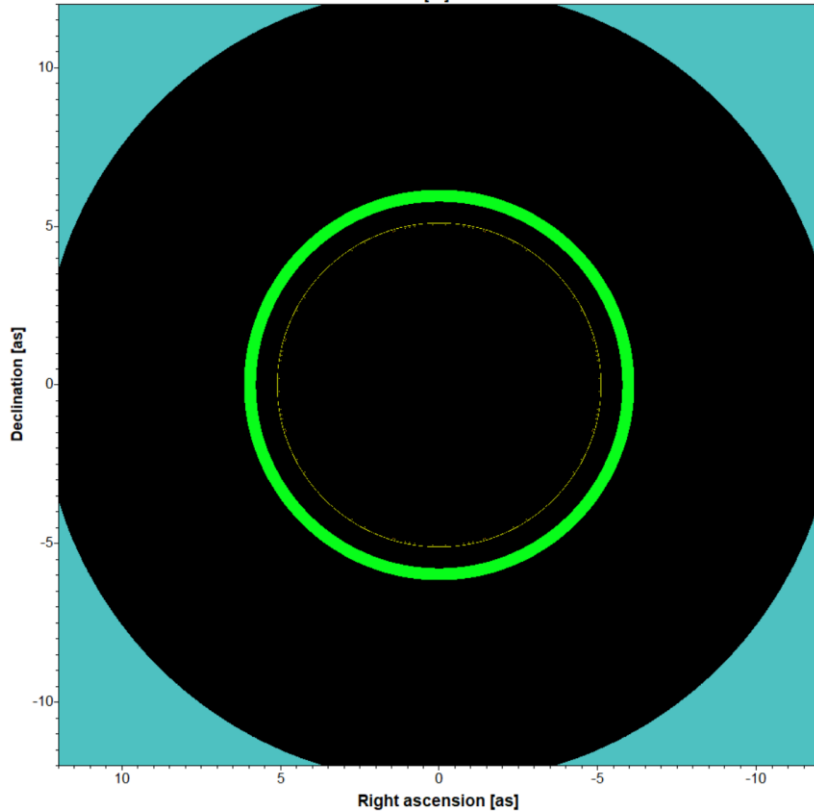


Credit: A. Andrianov, ASC LPI



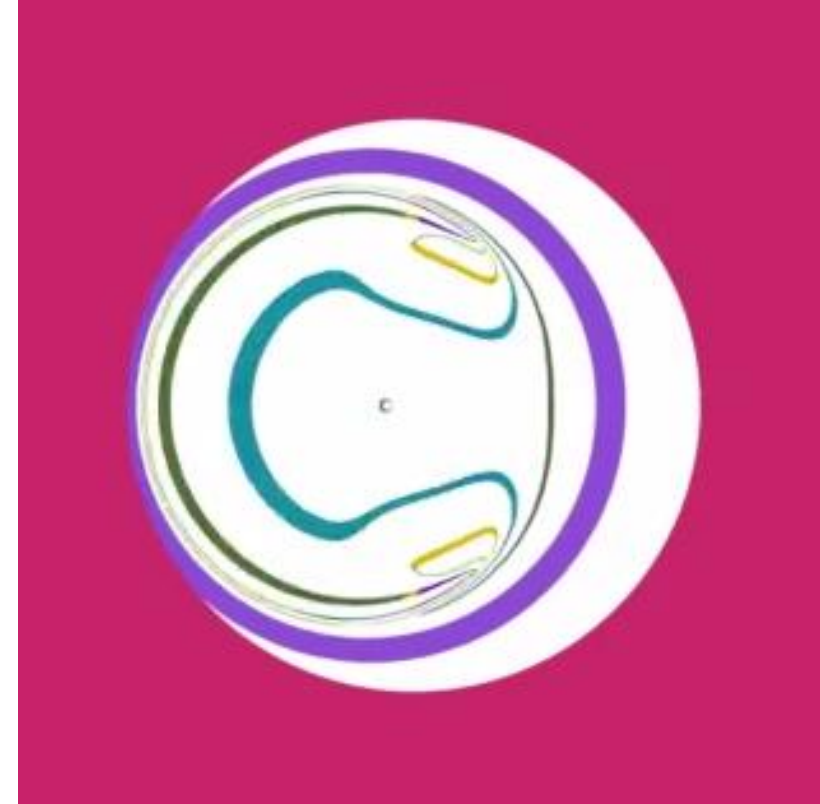
Igor Novikov, 2019

Черная дыра



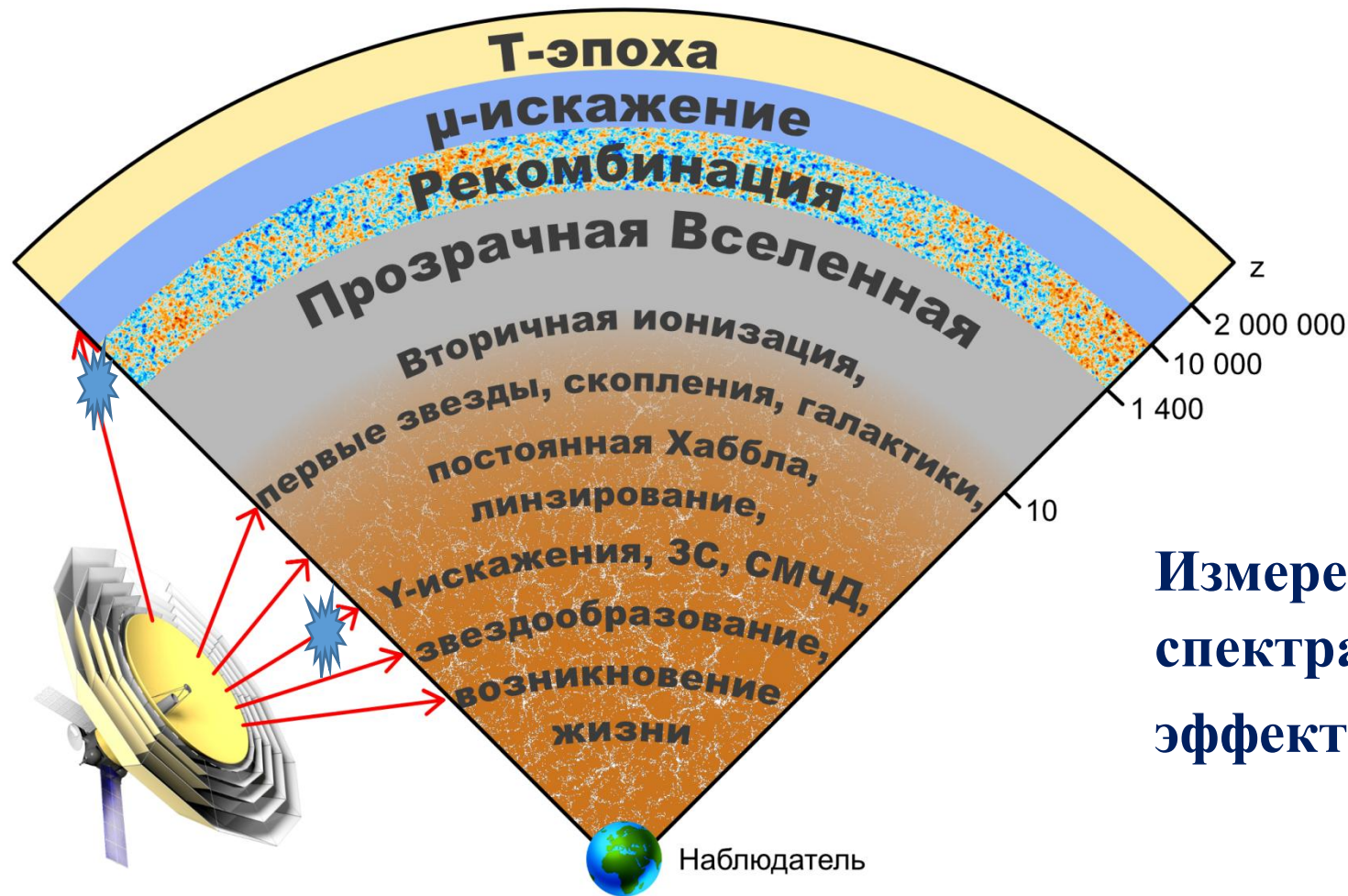
Аккреционный диск – синим цветом. Его линзированные изображения (фотонные кольца), образованные фотонами, сделавшими n полуоборотов вокруг ЧД, перед тем как достичь наблюдателя: фотонное кольцо $n=1$ – зеленым, $n=2$ – желтым цветом.

Кротовая нора



Тень кротовой норы в метрике Лами с тонкой структурой фотонных колец. Разными цветами показаны аккреционный диск (красный) и его линзированные изображения (фотонные кольца).

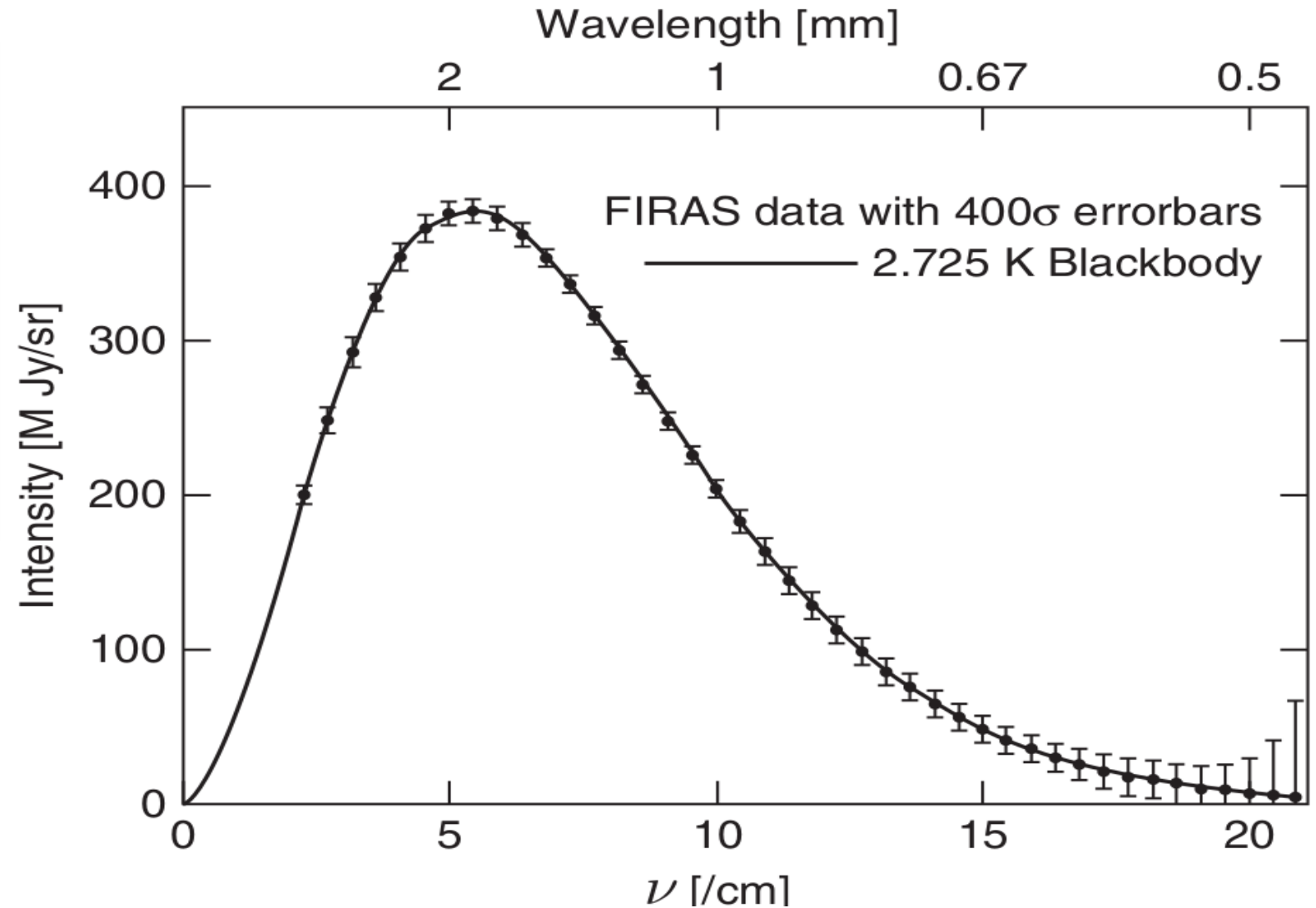
Задачи научной группы «Космология»

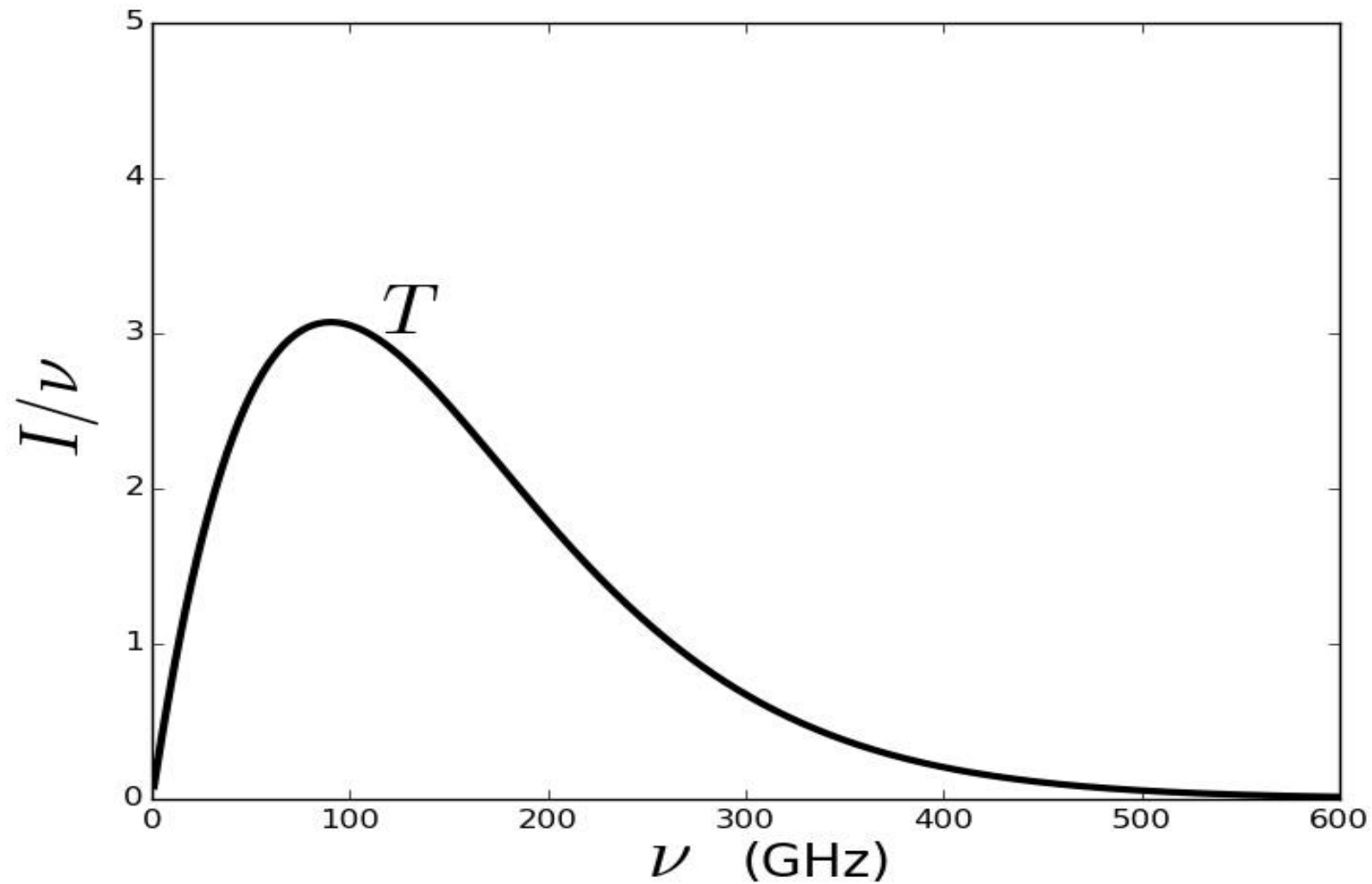


Измерение частотных искажений
спектра РИ:
эффекты от $z \sim 0$ до $z \sim 2\,000\,000$

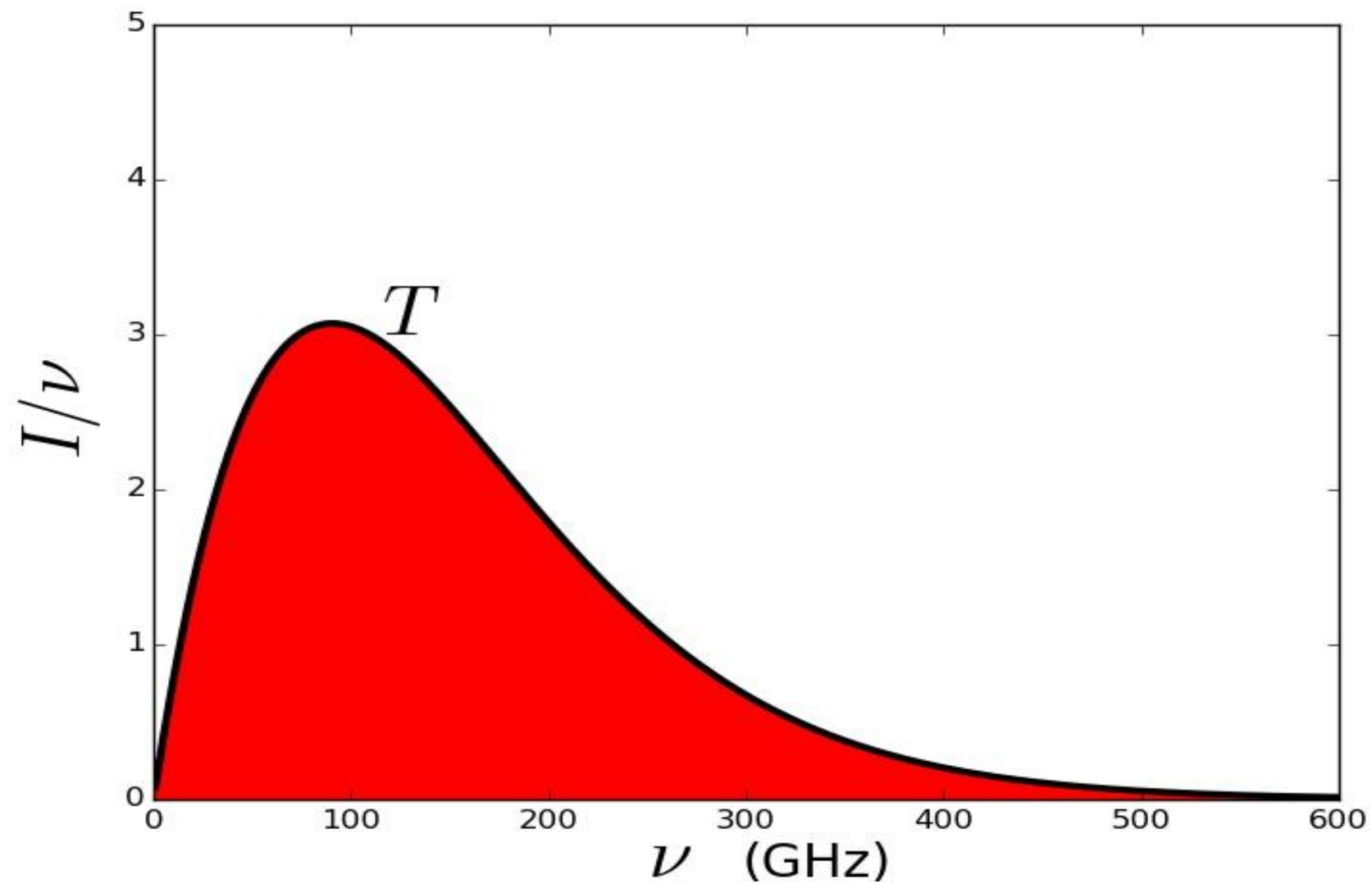
Искажения частотного спектра РИ

Cosmic Background Explorer (CoBE), launched 1989

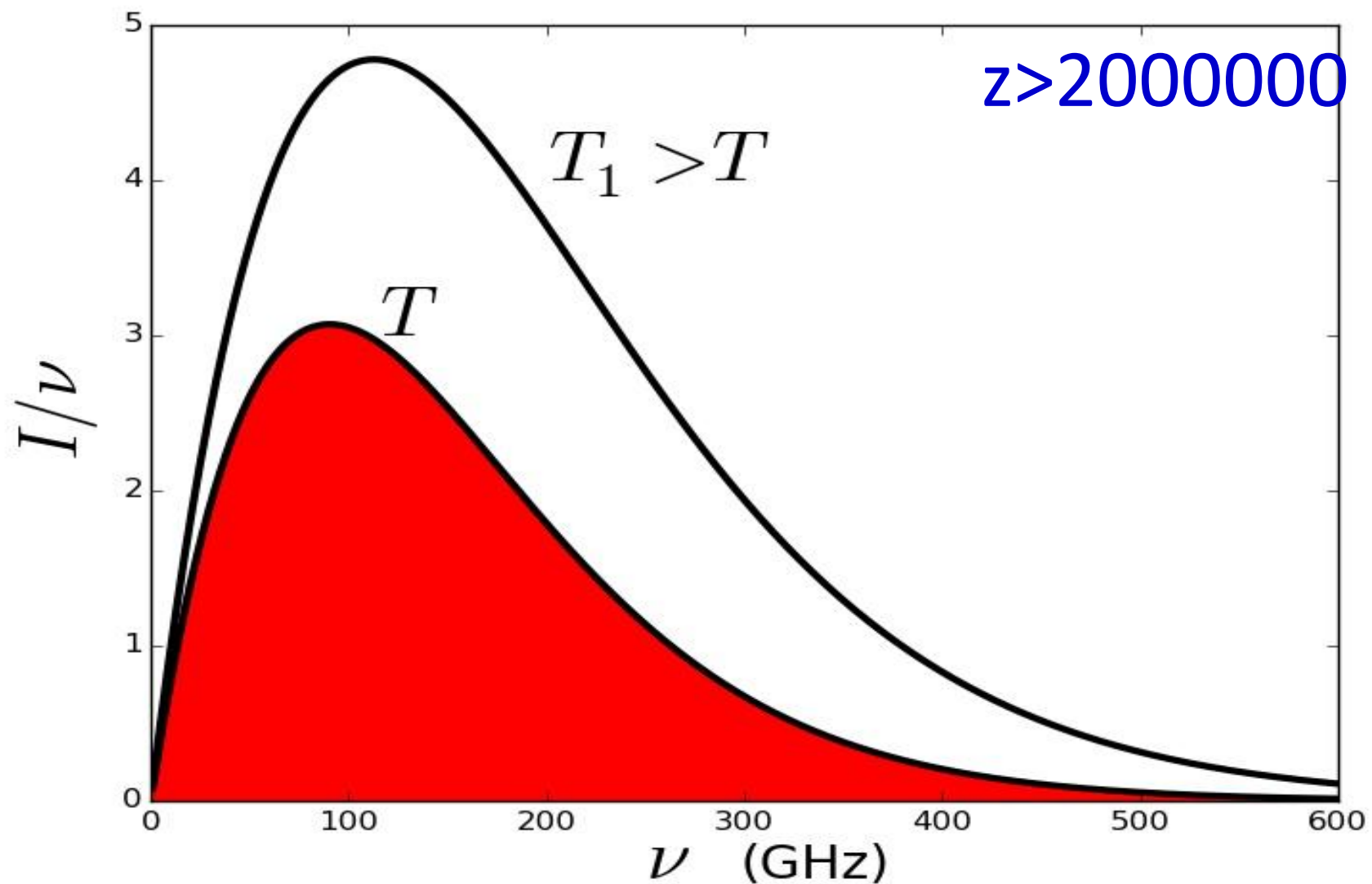




$$I/\nu \sim \nu^2 n(\nu) = \nu^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT_e}} - 1 \right)^{-1}$$

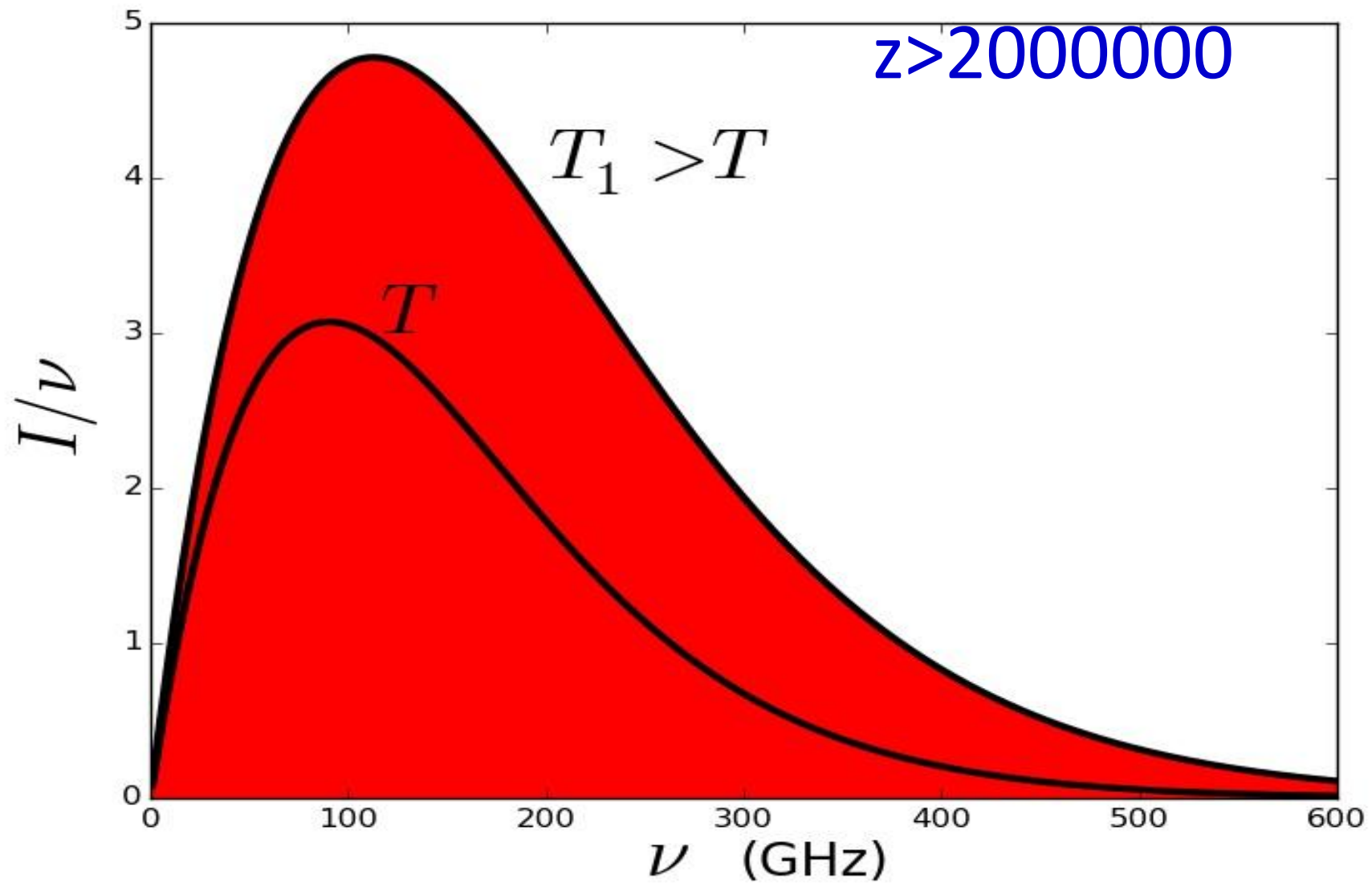


$$\int_0^{\infty} I \frac{d\nu}{\nu} \sim \text{total number of photons.}$$

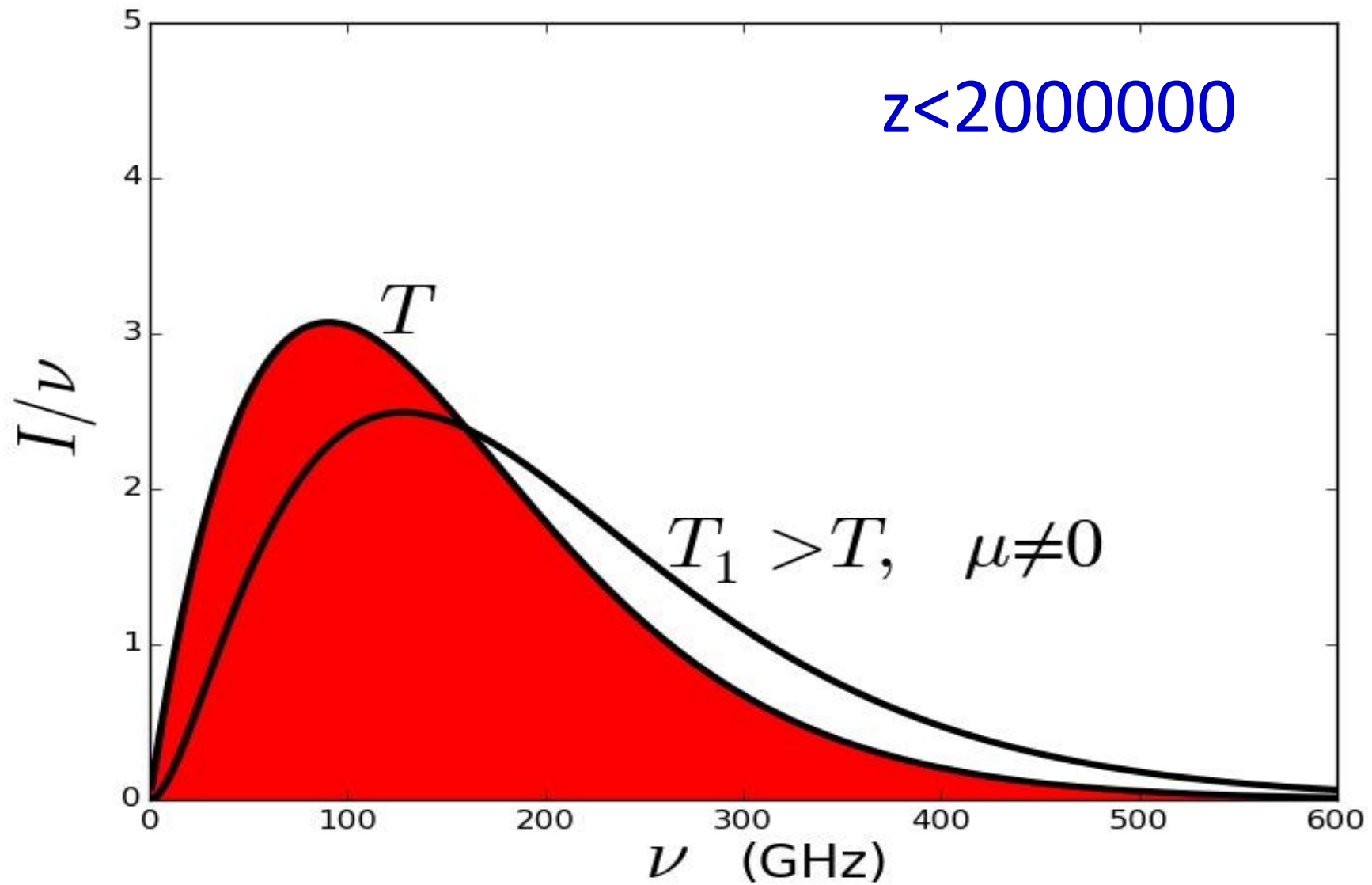


Тормозное
излучение,
двойное
комptonовское
рассеяние

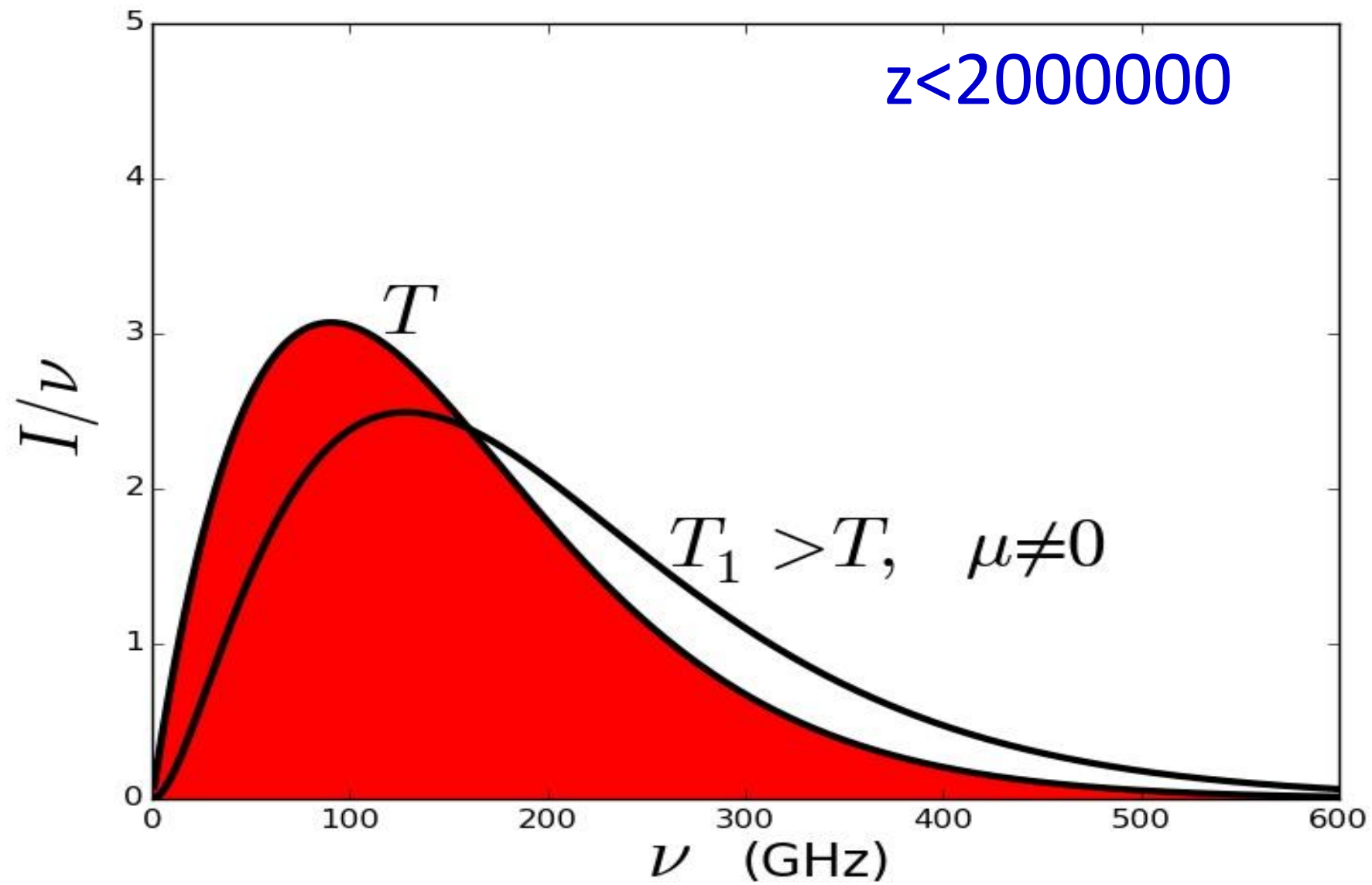
$$\int_0^{\infty} I \frac{d\nu}{\nu} \sim \text{total number of photons.}$$



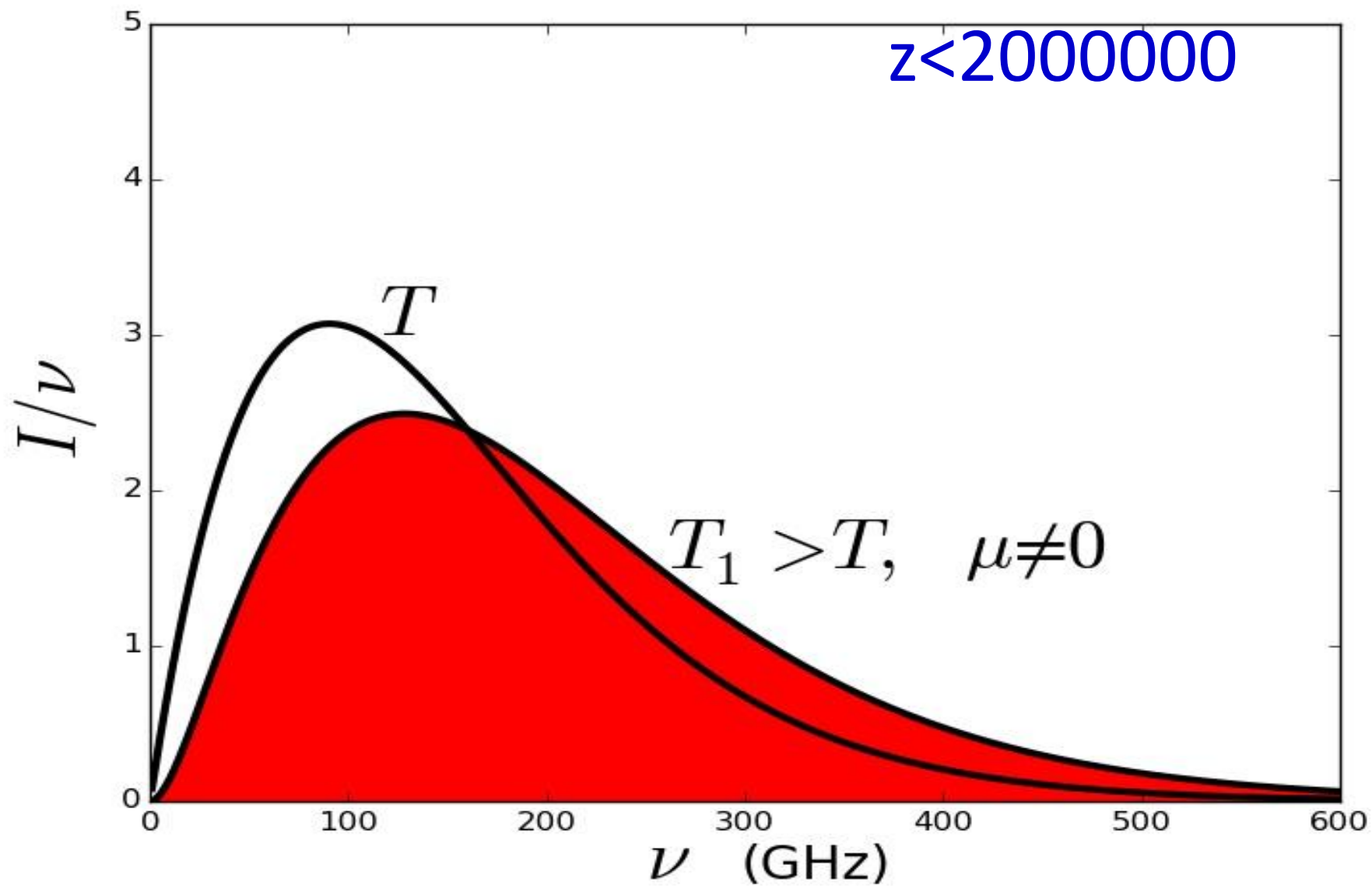
$$\int_0^{\infty} I \frac{d\nu}{\nu} \sim \text{total number of photons.}$$



$$\int_0^{\infty} I \frac{d\nu}{\nu} \sim \text{total number of photons.}$$



$$n(\nu) = \left(e^{\frac{h\nu}{kT_e}} - 1 \right)^{-1} \rightarrow n(\nu) = \left(e^{\frac{h\nu}{kT_e} + \mu} - 1 \right)^{-1}$$



$$n(\nu) = \left(e^{\frac{h\nu}{kT_e}} - 1 \right)^{-1} \rightarrow n(\nu) = \left(e^{\frac{h\nu}{kT_e} + \mu} - 1 \right)^{-1}$$

Источники спектральных искажений РИ

μ -искажения ($10000 < z < 20000000$): распад частиц темной материи, испарение первичных черных дыр, подавление флуктуаций плотности на малых масштабах и др.

Y -искажения (SZ эффект и релятивистские поправки, $z < 10$): группы и скопления галактик

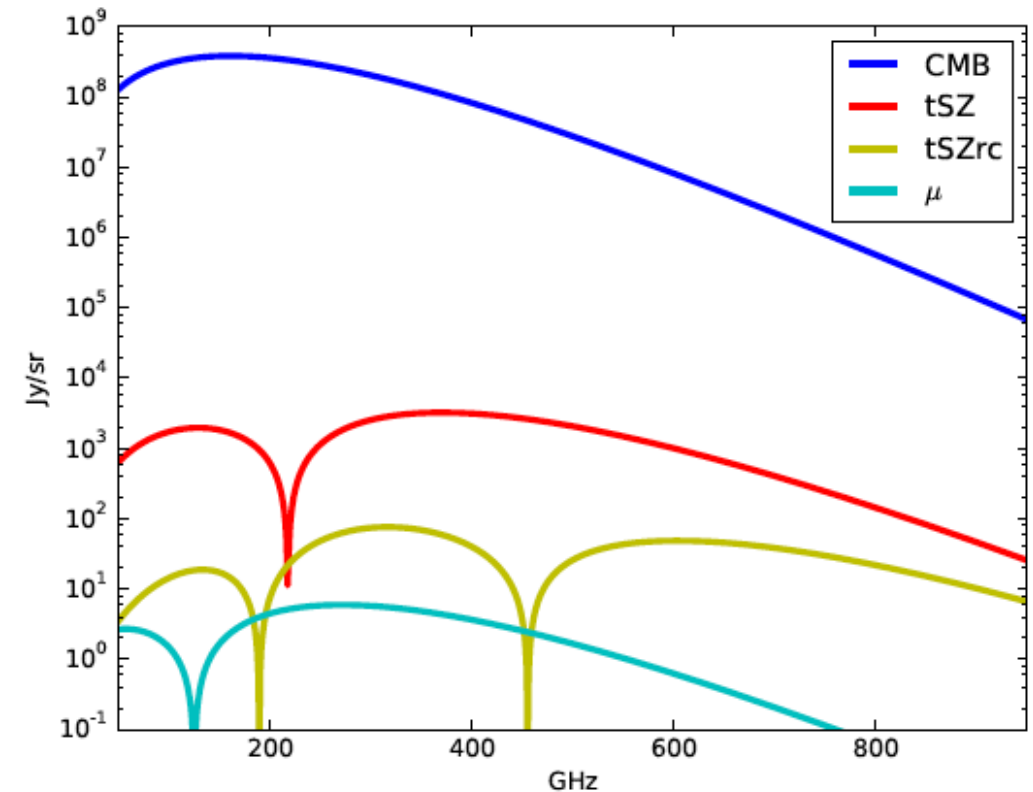
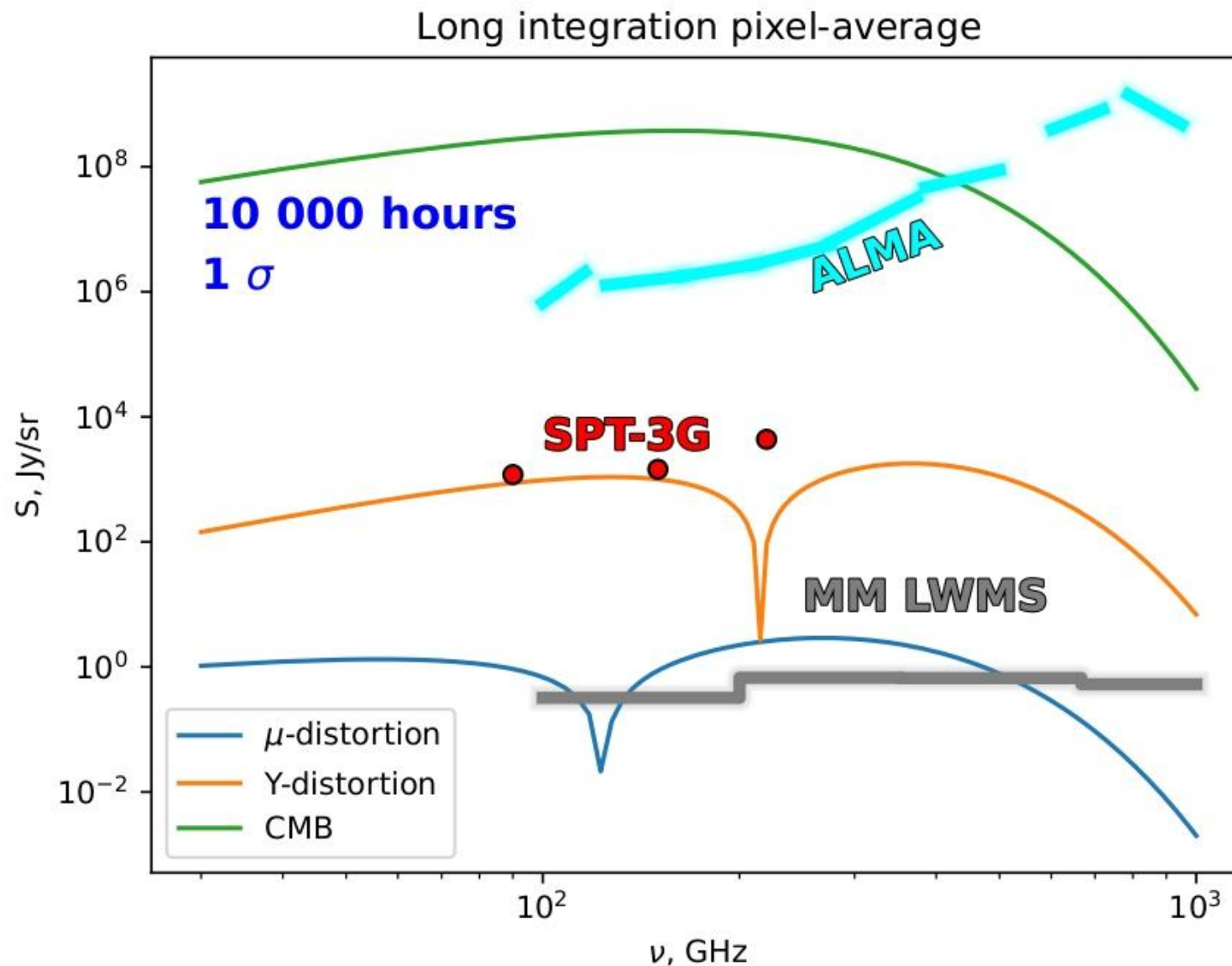


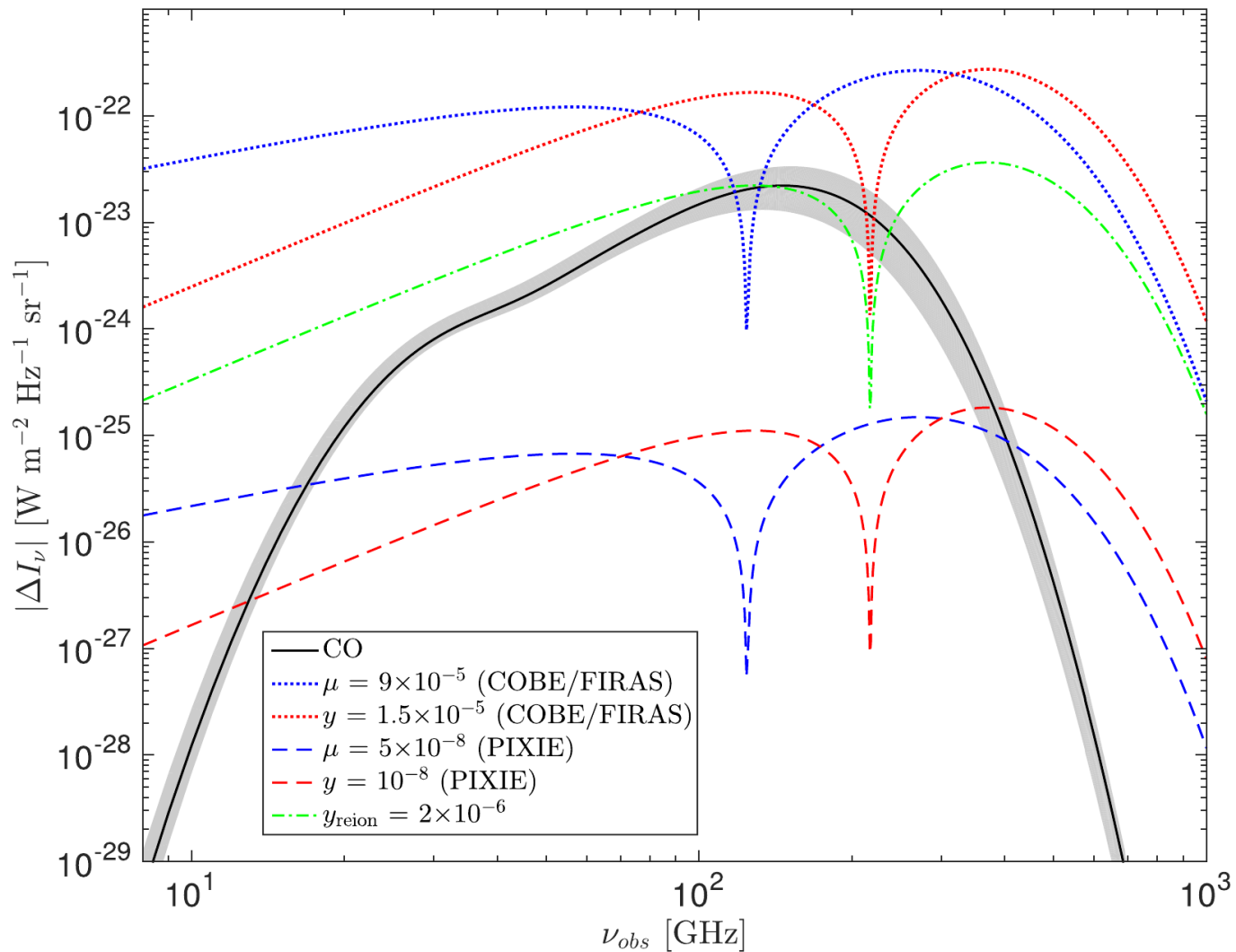
Fig. 1.— CMB black body spectrum together with y -distortion, its 1-st relativistic correction and μ distortion.

Чувствительность «Миллиметрона»



Credit S.Pilipenko

Средний по небу спектр фона линий CO в далеких галактиках



Novikov+ 2025

Доклад Сергея Пилипенко



Спектрометр Высокого Разрешения (СВР)

№	f , ГГц	Основные линии	Количество пикселей	T_n , К (технология)	Θ , "
M1	500 – 600	Орто- H_2O $1_{1,0} - 1_{0,1}$ 556,9 Орто- $H_2^{18}O$ $1_{1,0} - 1_{0,1}$ 547,7 Орто- $H_2^{17}O$ $1_{1,0} - 1_{0,1}$ 552,0 Орто-HDO $1_{1,0} - 1_{0,1}$ 509,3	3	200 (SIS)	14
M2	750 – 900	Пара- H_2O $2_{1,1} - 2_{0,2}$ 752,0 Пара-HDO $1_{1,1} - 0_{0,0}$ 893,6 Орто-HDO $2_{1,2} - 1_{1,1}$ 848,9	3	400 (SIS)	9
M3	1080 – 1230	Пара- H_2O $1_{1,1} - 0_{0,0}$ 1113,3 Пара- $H_2^{18}O$ $1_{1,1} - 0_{0,0}$ 1101,7 Пара- $H_2^{17}O$ $1_{1,1} - 0_{0,0}$ 1107,2 Пара- H_2O $2_{2,0} - 2_{1,1}$ 1228,8 Пара- $H_2^{18}O$ $2_{2,0} - 2_{1,1}$ 1199,1 Орто- H_2O $3_{1,2} - 3_{0,3}$ 1097,4 Орто- H_2O $3_{1,2} - 2_{2,1}$ 1153,1 Орто- H_2O $3_{2,1} - 3_{1,2}$ 1162,9 Пара- H_2O $4_{2,2} - 4_{1,3}$ 1207,6 Пара- $H_2^{18}O$ $4_{2,2} - 4_{1,3}$ 1188,9 Орто- $H_2^{18}O$ $3_{1,2} - 3_{0,3}$ 1095,6	3	1000 (SIS)	7
M4	1300 – 1400	Орто- H_2O $6_{2,5} - 5_{3,2}$ 1322,0 Пара- H_2O $7_{4,4} - 8_{1,7}$ 1344,7	7	1000 (HEB)	6
M5	1890 – 1910	СII $2P_{3/2} - 2P_{1/2}$ 1900,5 ^{13}CII $2P_{3/2} - 2P_{1/2}$ 1900,1 – 1900,9	7	1200 (HEB)	4
M6	2390 – 2410	Пара- H_2O $4_{0,4} - 3_{1,3}$ 2391,573 Пара-HDO $5_{3,3} - 5_{2,4}$ 2399,218 Пара- D_2O $6_{5,1} - 6_{4,2}$ 2400,383	7	1400 (HEB)	3
M7	2660 – 2680	HD $1 - 0$ 2674,986	7	1400 (HEB)	3

Доклад Ивана Третьякова

Научные задачи для СВР



1. Происхождение и перенос воды во Вселенной (наблюдение изотопологов воды и дейтерированной воды):

- наблюдения “холодной воды” в протозвездах, дозвездных ядрах, дисках, кометах (M1, M2)
- наблюдение “теплой воды” в протозвездах, дисках, кометах (M3)
- наблюдения “горячей воды” в протозвездах, дисках и кометах (M6)
- наблюдение линий [CII] и [13CII] в дисках (M5)

~65% наблюдательного времени

Доклад Марии Кирсановой

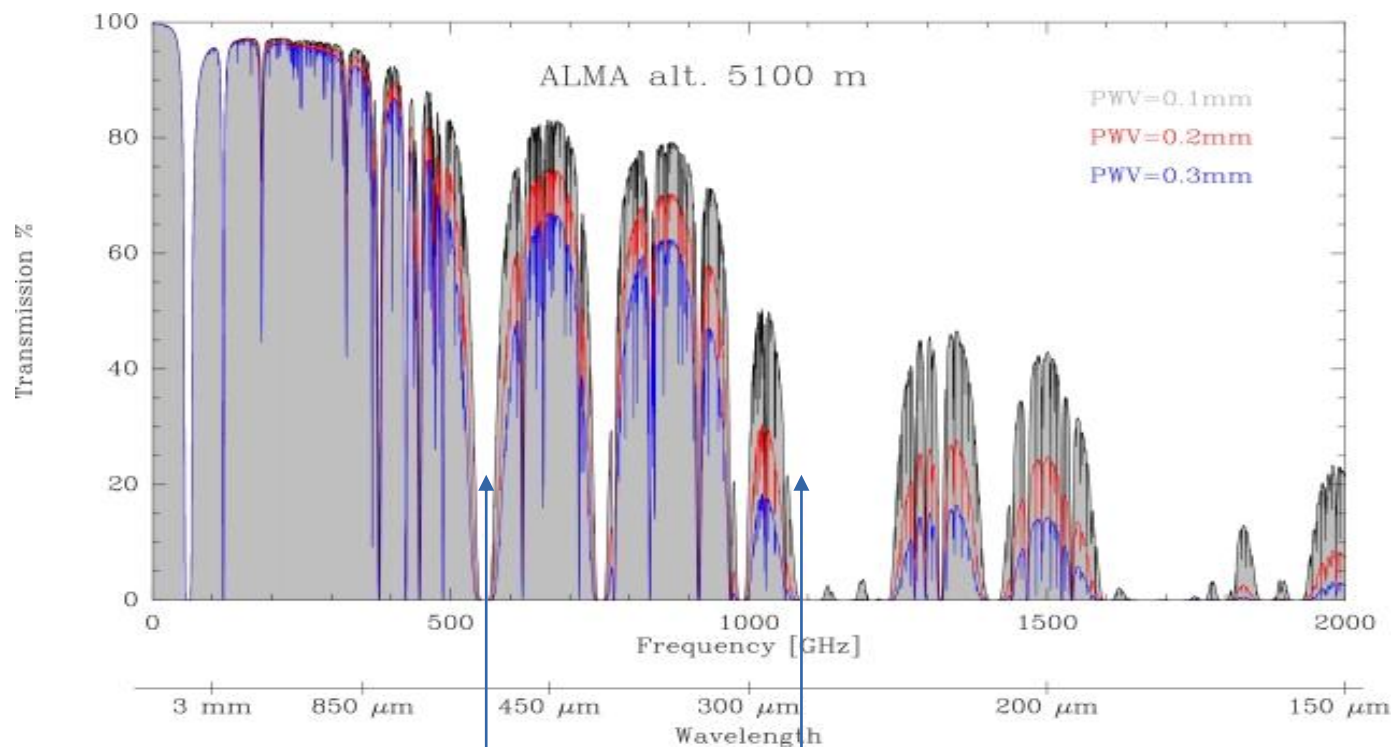


АКЦ ФИАН

«Происхождение и перенос воды во Вселенной»

Линии молекул воды, возбуждаемые в холодном газе, излучают на частотах 500–1700 ГГц, недоступных наземным приборам из-за экранирования водяным паром в атмосфере.

Кривая пропускания для ALMA при лучшей погоде на высоте 5100 м



<http://transmissioncurves.free.fr/alma.html>

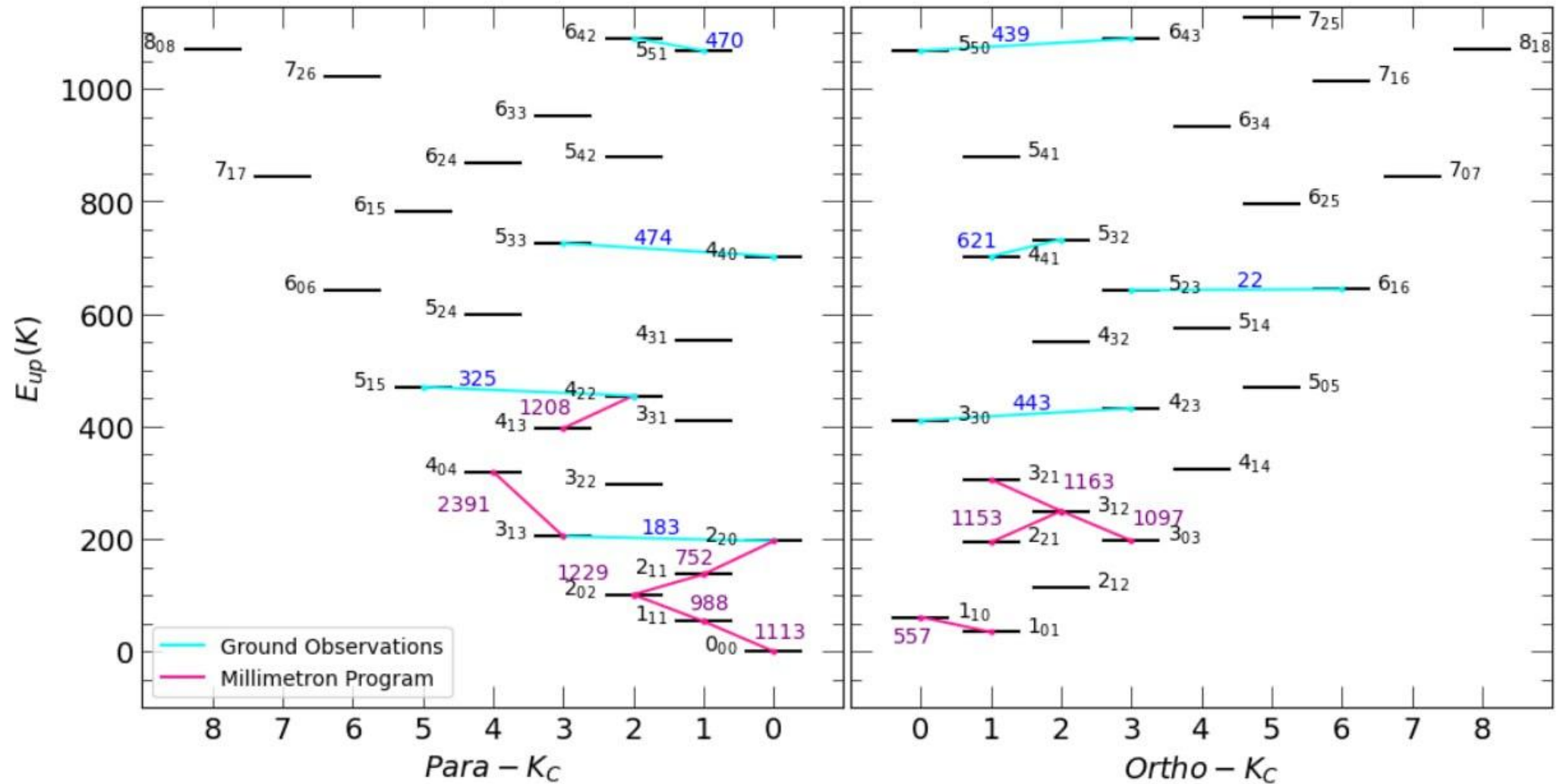
557 ГГц

1113 ГГц

окна прозрачности



Схема энергетических уровней молекул воды



Kirsanova + 2025



Происхождение и перенос воды во Вселенной»

Нерешенные вопросы

- **Пути образования воды в условиях МЗС.** Вода в ледяных мантиях пылинок – основной резервуар кислорода? Каков вклад газофазных реакций интруза?
- **Содержание воды в космических объектах.** Проблема дефицита кислорода и недостаток воды в областях звездообразования.
- **Перенос воды между космическими объектами.** Как вода попадает из мантий пылинок в газ? Особенности десорбции мантий.
- **Роль комет в происхождении воды на Земле.** Наследуют ли кометы воду с периферии протозвездных облаков/дисков?

Научные задачи для СВР



1. Происхождение и перенос воды во Вселенной (наблюдение изотопологов воды и дейтерированной воды):

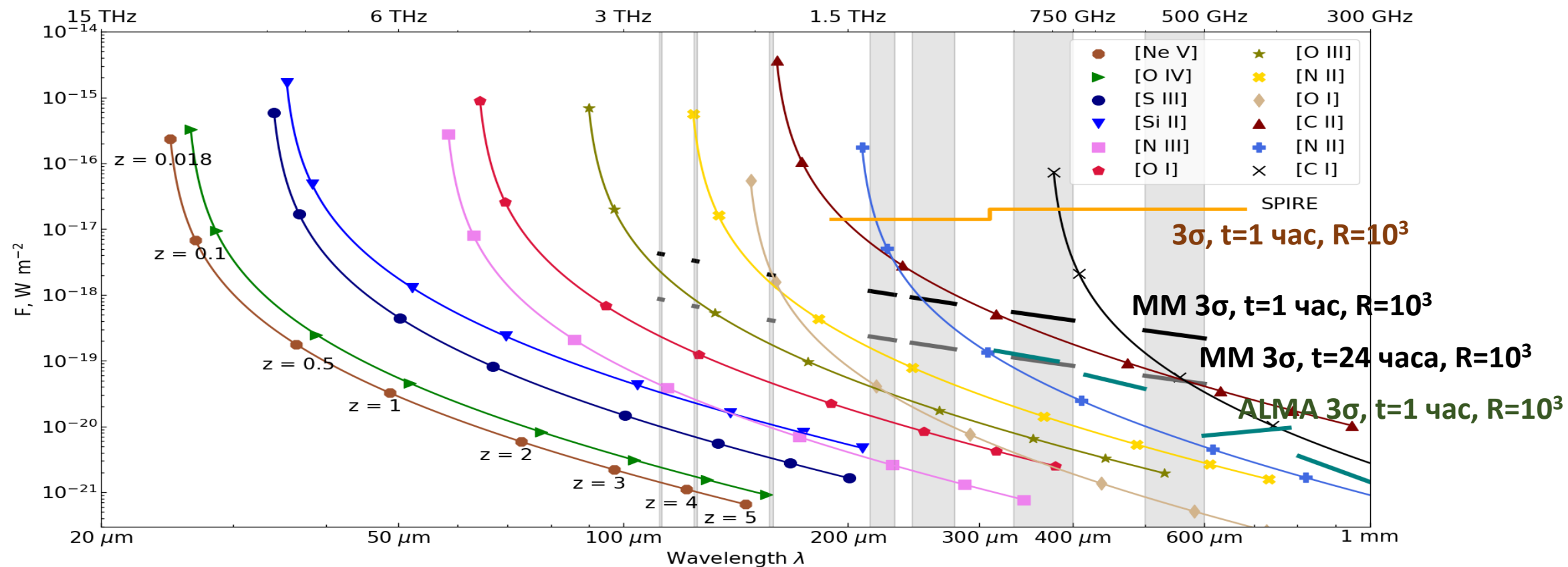
- наблюдения “холодной воды” в протозвездах, дозвездных ядрах, дисках, кометах (M1, M2)
- наблюдение “теплой воды” в протозвездах, дисках, кометах (M3)
- наблюдения “горячей воды” в протозвездах, дисках и кометах (M6)
- наблюдение линий [CII] и [13CII] в дисках (M5)

2. Оценка массы молекулярного газа в протопланетных дисках по наблюдению линии HD (изотополога молекулярного водорода) (M7)
~5% наблюдательного времени

Научные задачи для СВР



1. **Происхождение и перенос воды во Вселенной** (наблюдение изотопологов воды и дейтерированной воды):
 - наблюдения “холодной воды” в протозвездах, дозвездных ядрах, дисках, кометах (M1, M2)
 - наблюдение “теплой воды” в протозвездах, дисках, кометах (M3)
 - наблюдения “горячей воды” в протозвездах, дисках и кометах (M6)
 - наблюдение линий [CII] и [13CII] в дисках (M5)
2. **Оценка массы молекулярного газа в протопланетных дисках по наблюдению линии HD** (изотополога молекулярного водорода) (M7)
3. **Наблюдения ультраярких инфракрасных галактик (ULIRGs)**
~15% наблюдательного времени

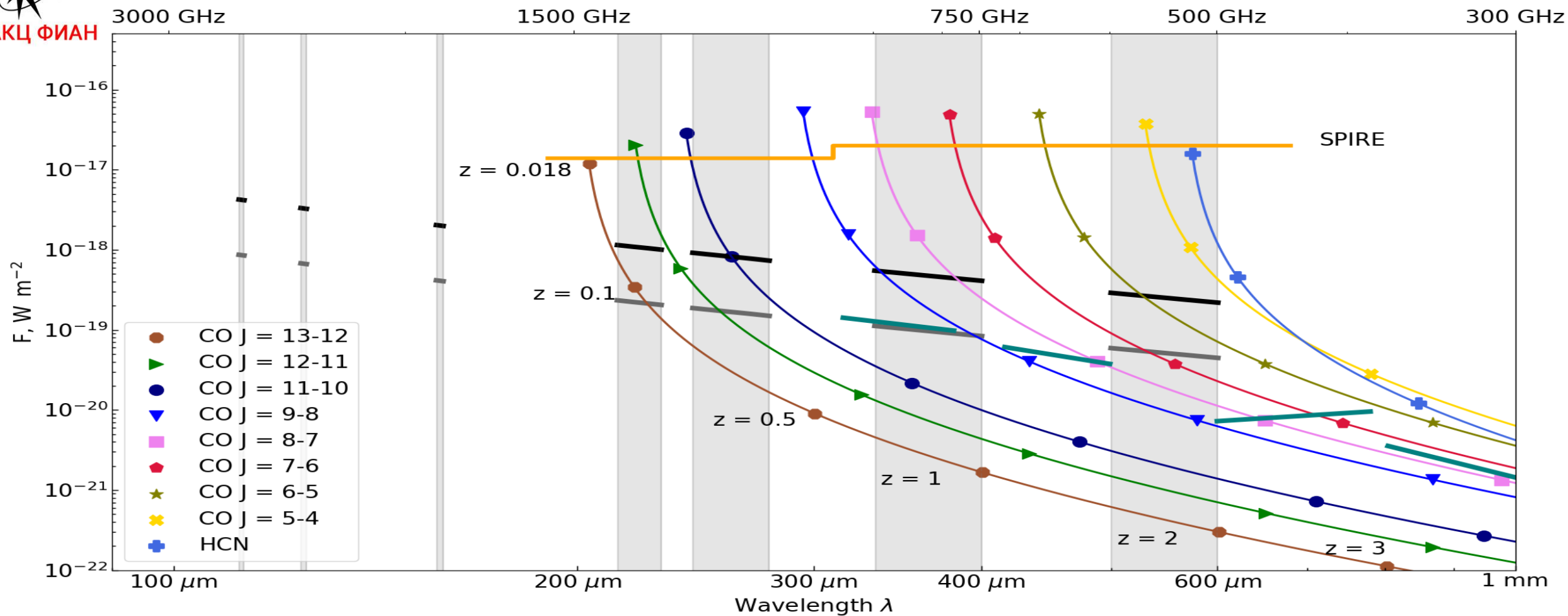


Vasiliev+ 2025

Ожидаемые потоки в линиях ионов металлов от галактики, подобной UGC 5101, на разных z . Потоки для $z = 0.038$ соответствуют наблюдаемым в UGC5101 и масштабированы на полную светимость в ИК диапазоне $10^{12} L_{\odot}$.



АКЦ ФИАН



Vasiliev+ 2025

Ожидаемые потоки в линиях молекул CO и HCN от галактики, подобной Arp 220, на разных z . Потоки нормированы на полную светимость в ИК диапазоне $10^{12}L_{\odot}$.

Научные задачи для СВР



1. **Происхождение и перенос воды во Вселенной** (наблюдение изотопологов воды и дейтерированной воды):
 - наблюдения “холодной воды” в протозвездах, дозвездных ядрах, дисках, кометах (M1, M2)
 - наблюдение “теплой воды” в протозвездах, дисках, кометах (M3)
 - наблюдения “горячей воды” в протозвездах, дисках и кометах (M6)
 - наблюдение линий [CII] и [13CII] в дисках (M5)
2. **Оценка массы молекулярного газа в протопланетных дисках по наблюдению линии HD** (изотополога молекулярного водорода) (M7)
3. **Наблюдения ультраярких инфракрасных галактик (ULIRGs).**
4. **Картографирование в линии [CII] 157.7 мкм ближайших галактик, ЦМЗ, БМО и остатков сверхновых в MW** (M5).
~5% наблюдательного времени

Научные задачи для СВР



1. Происхождение и перенос воды во Вселенной (наблюдение изотопологов воды и дейтерированной воды):

- наблюдения “холодной воды” в протозвездах, дозвездных ядрах, дисках, кометах (M1, M2)
- наблюдение “теплой воды” в протозвездах, дисках, кометах (M3)
- наблюдения “горячей воды” в протозвездах, дисках и кометах (M6)
- наблюдение линий [CII] и [13CII] в дисках (M5)

2. Оценка массы молекулярного газа в протопланетных дисках по наблюдению линии HD (изотополога молекулярного водорода) (M7)

3. Наблюдения ультраярких инфракрасных галактик (ULIRGs).

4. Картографирование в линии [CII] 157.7 мкм ближайших галактик, ЦМЗ, БМО и остатков сверхновых в MW (M5).

5. Физика мазеров водяного пара по многоволновым наблюдениям мазерного излучения (M1,M2,M3,M4) и изучение **формирования и эволюции пыли в МЗС** по наблюдениям **мазеров SiO** (M1,M2,M3,M4,M7).

~5% наблюдательного времени

Доклад Надежды Шахворостовой

Научные задачи для СВР



1. **Происхождение и перенос воды во Вселенной** (наблюдение изотопологов воды и дейтерированной воды):
 - наблюдения “холодной воды” в протозвездах, дозвездных ядрах, дисках, кометах (M1, M2)
 - наблюдение “теплой воды” в протозвездах, дисках, кометах (M3)
 - наблюдения “горячей воды” в протозвездах, дисках и кометах (M6)
 - наблюдение линий [CII] и [13CII] в дисках (M5)
2. **Оценка массы молекулярного газа в протопланетных дисках по наблюдению линии HD** (изотополога молекулярного водорода) (M7)
3. **Наблюдения ультраярких инфракрасных галактик (ULIRGs).**
4. **Картографирование в линии [CII] 157.7 мкм** ближайших галактик, ЦМЗ, БМО и остатков сверхновых в MW (M5).
5. **Физика мазеров водяного пара** по многоволновым наблюдениям мазерного излучения (M1,M2,M3,M4) и изучение **формирования и эволюции пыли в МЗС** по наблюдениям мазеров SiO (M1,M2,M3,M4,M7)
6. **Наблюдение остатков сверхновых** в MW в континууме (M1-M7).

Заключение

- В настоящее время «**Миллиметрон**» - единственная разрабатываемая космическая обсерватория субмм и дальнего ИК диапазонов **в ближайшие 20-30 лет**, имеющая уникальную научную программу и оборудование.
- Подготовка научной программы проводится **научными рабочими группами**. Постановка ключевых научных задач охватывает диапазон исследования от **ранней Вселенной до ее поздней стадии**.

Спасибо за внимание!