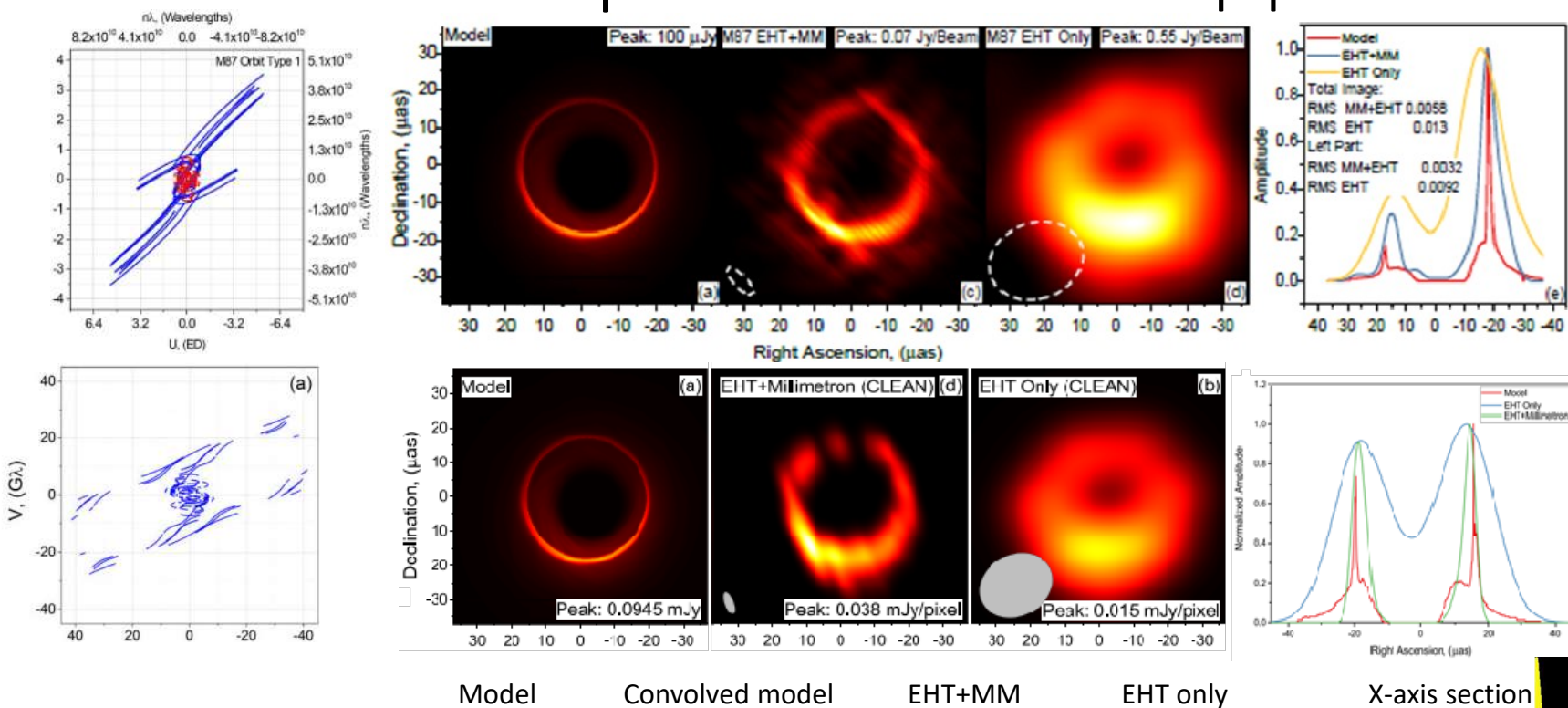


Наблюдение сверхмассивных черных дыр и кротовых
нор при помощи наземно-космического РСДБ в
проекте "Миллиметрон".

А.С. Андрианов

Астрокосмический центр ФИАН

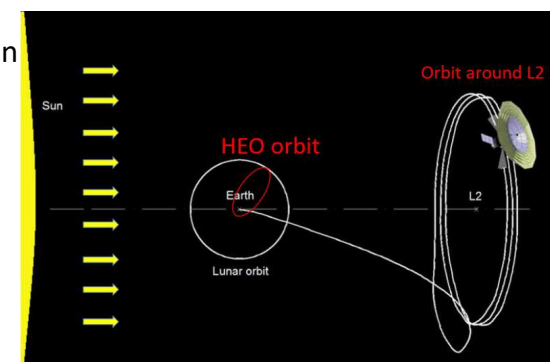
Изображение тени ЧД в М87



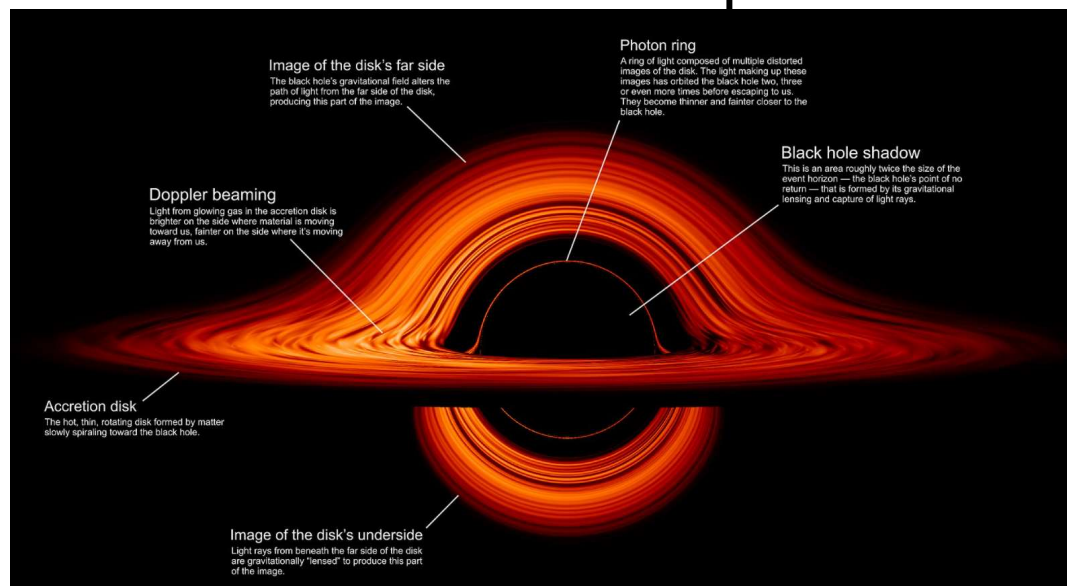
Картографирование на околоземной орбите

- Частота 240 GHz
- Время наблюдения 20 ч
- Изображение можно получить раз в период орбиты (~10 дней)

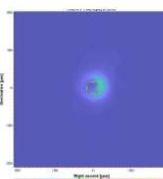
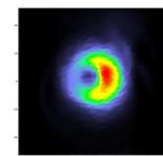
- Картографирование на орбите вокруг L2 возможно на малых проекциях РСДБ базы, когда направление на КА "Миллиметрон" близко к направлению на источник
- Картографирование может быть выполнено раз в период орбиты (~180 дней)
- Угловое разрешение в 5-10 раз выше, чем у EHT



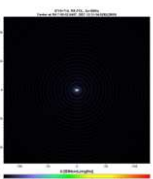
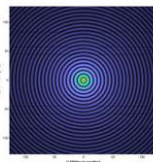
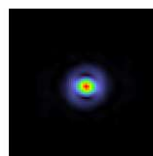
Следующий шаг – тонкая структура тени, фотонные кольца



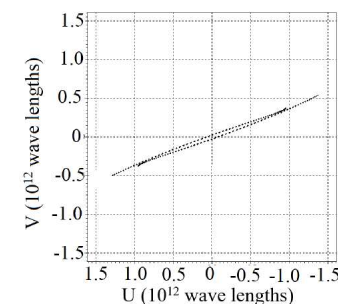
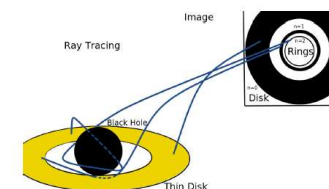
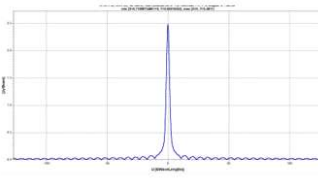
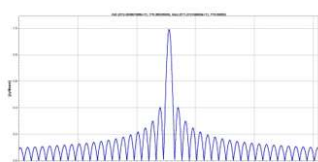
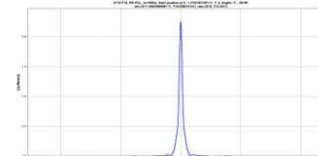
Изображение



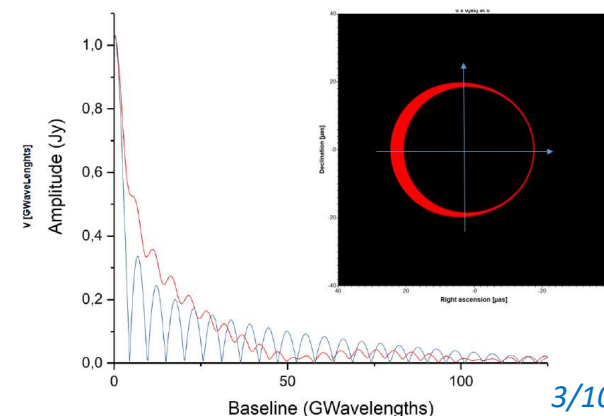
Видность



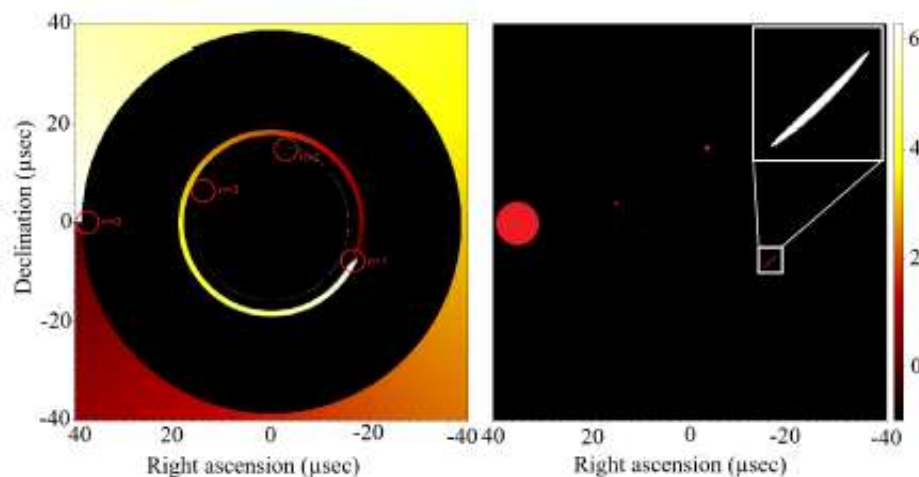
Проекция видности



- Фотонные кольца (линзированные изображения аккреционного диска) слабо зависят от распределения вещества в аккреционном диске, полностью определяются метрикой пространства-времени вблизи центрально 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 - Миллиметр, EHT Imager, VHEX) и чувствительности



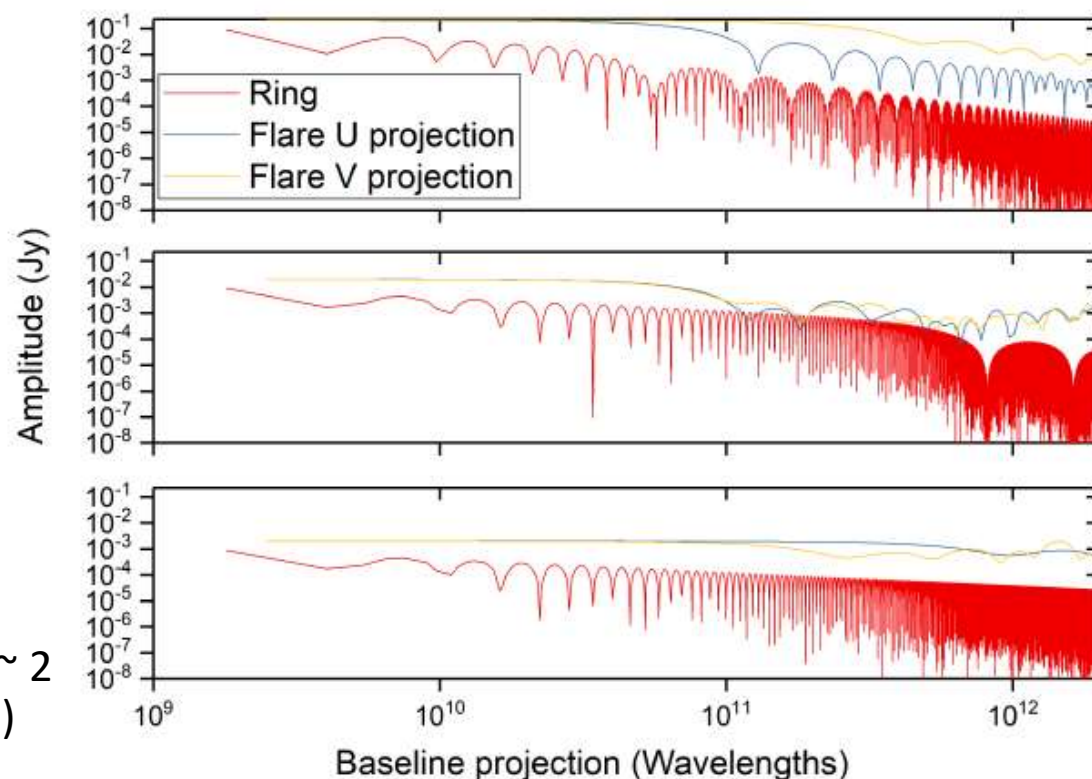
Ослабляем требования к чувствительности - вспышки в аккреционном диске



Вспышки в Sgr A* в суб-мм:

- Длительность от нескольких минут до 1-4 часов
- Полный поток источника может увеличиваться ~ 2 раза (может и больше, но такие вспышки редки)

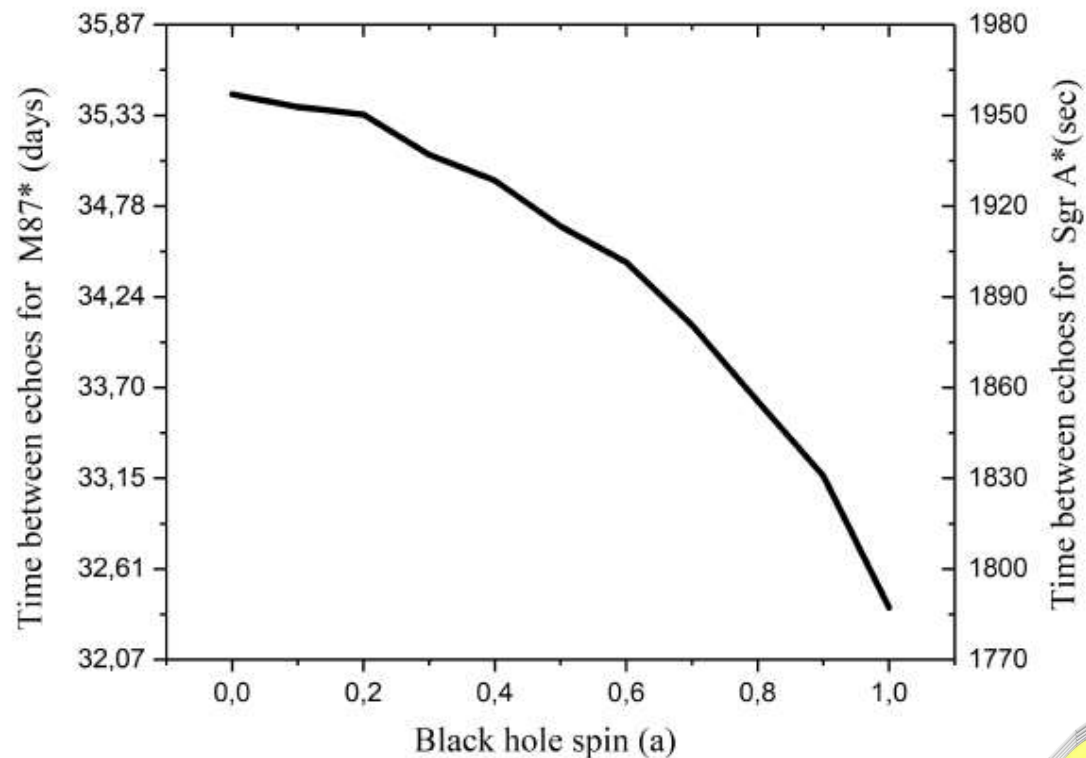
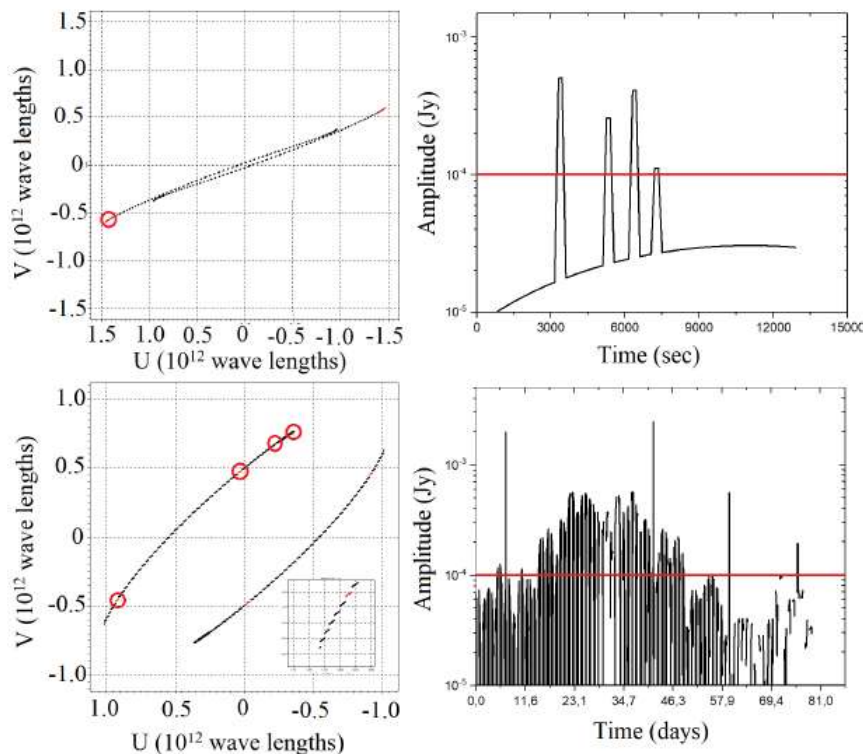
Вспышка еще более компактна, чем соответствующее кольцо, за счет чего амплитуда функции видности от вспышки на большой РСДБ базе может на 1-2 порядка превышать амплитуду функции видности от соответствующего кольца.



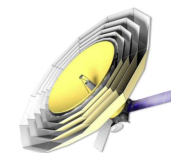
Наблюдение вспышки и нескольких ее отражений в фотонных кольцах позволит определить спин ЧД

Короткая вспышка – наблюдаем зависимость потока на РСДБ базе от времени

(длительность вспышки $\ll$ времени между приходом сигнала от вспышки и от ее эха в кольцах)

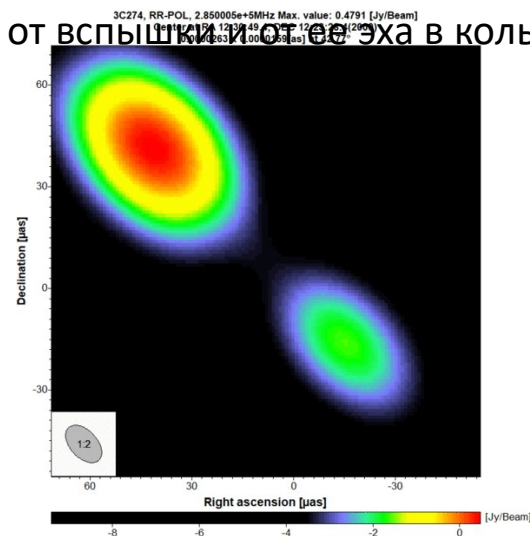
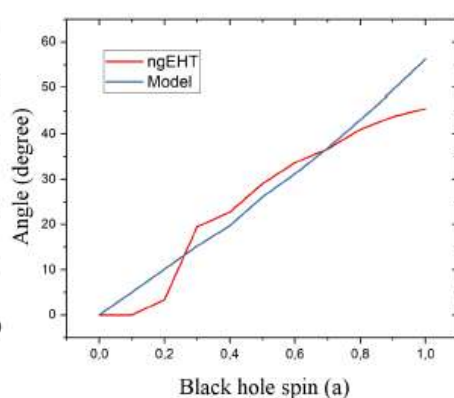
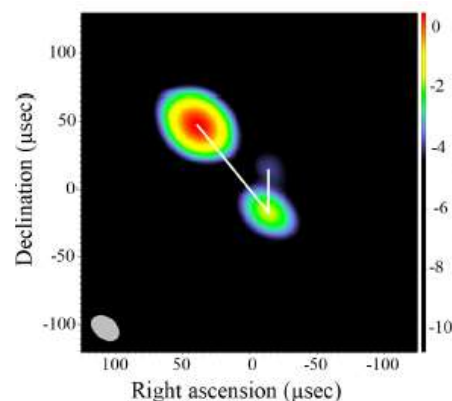
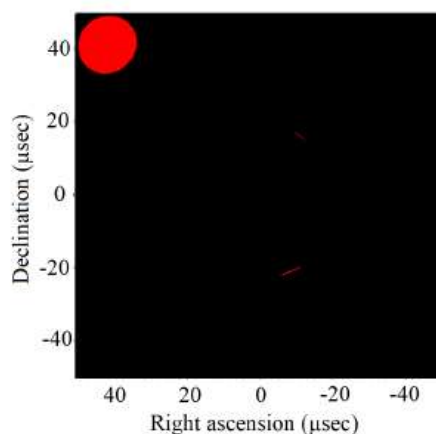
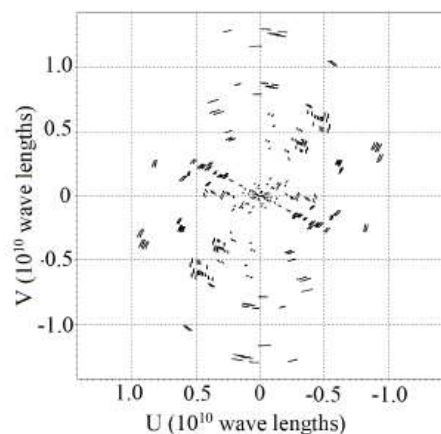


- Запаздывание между временами прихода эха от вспышки в двух фотонных кольцах позволяет определить спин ЧД
- Характерное время наблюдений для Sgr A* составит 1 час, для M87 около 3 дней (можно с перерывами)



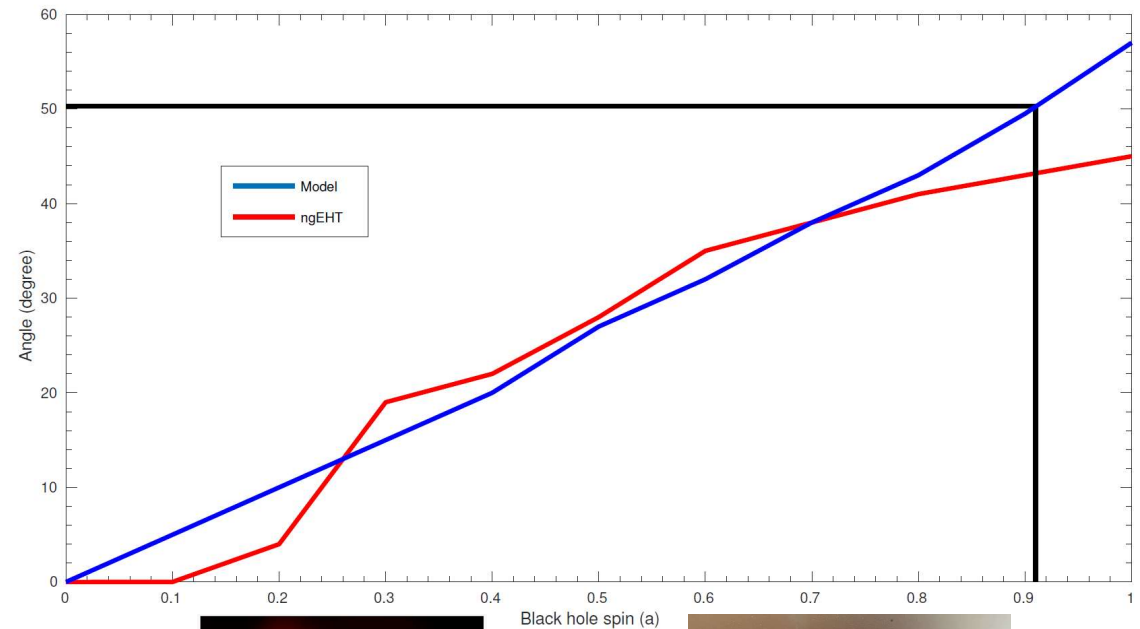
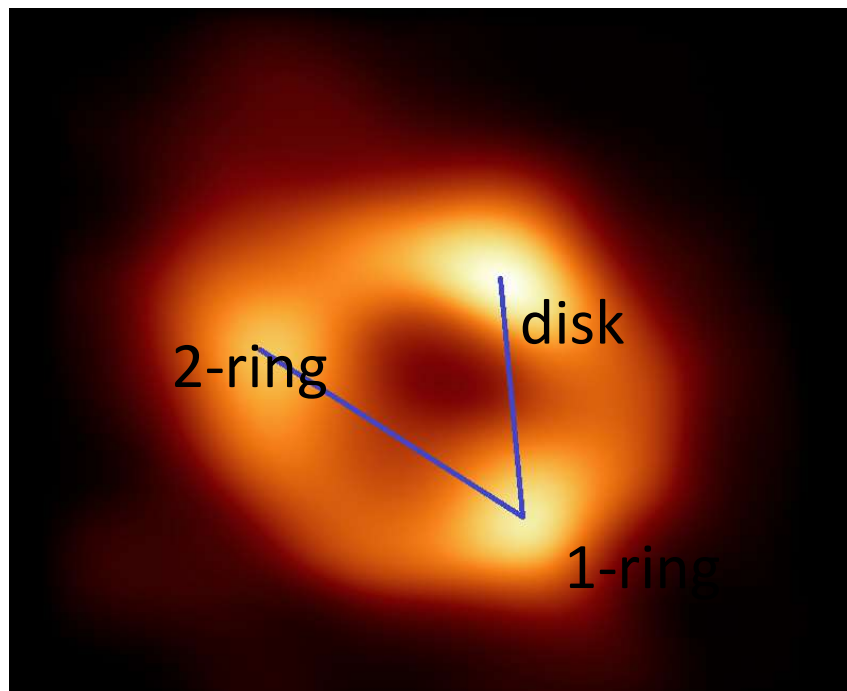
Длительная вспышка – анализируем РСДБ изображения

(длительность вспышки > времени между приходом сигнала от вспышки и от ее эха в кольцах)

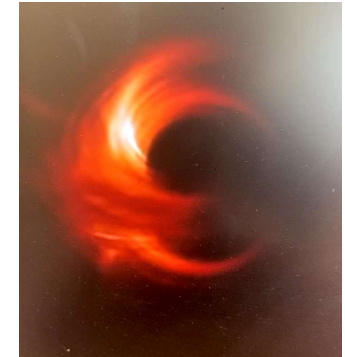
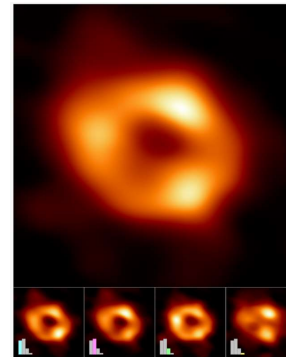


- UV-заполнения и чувствительности ngEHT за 0.5 часа достаточно для построения “мгновенного” РСДБ изображения вспышки и ее отражения в первых двух кольцах
- Измерение угла между эхом в кольцах $n=1$ и $n=2$ позволит определить спин ЧД

Оценка спина Sgr A* по данным ЕНТ – можно обойтись даже без высокого углового разрешения!



- Можно анализировать кольца с $n > 1$ даже без космических баз!
- Независимый способ оценки спина
- $a = 0.9$ для Sgr A*

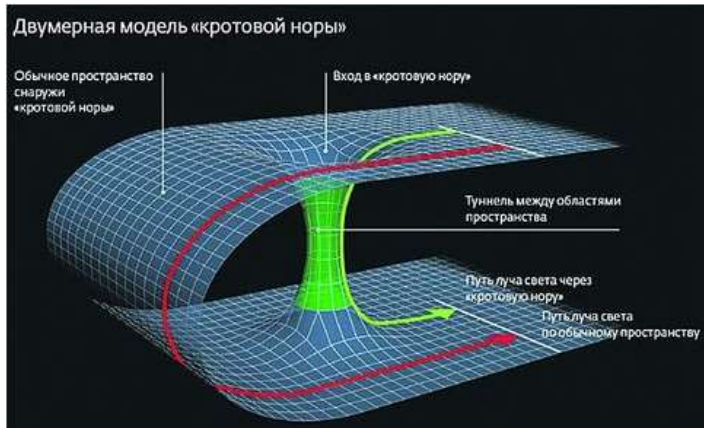


Кротовые норы

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2rM(r)}{\Sigma}\right)dt^2 - \frac{4arM(r)\sin^2\theta}{\Sigma}dtd\phi + \frac{\Sigma}{\Delta}dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \sin^2\theta\left(r^2 + a^2 + \frac{2a^2rM(r)\sin^2\theta}{\Sigma}\right)d\phi^2$$

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2\theta \quad \Delta = r^2 - 2M(r)r + a^2 \quad M(r) = m \frac{|r|^3}{|r|^3 + 2mb^2}$$

F. Lamy, et.al., Classical and Quantum Gravity, 35, 115009 (2018)



Картина фотонных колец $n > 1$ в случае кротовой норы кардинально отличается от картины фотонных колец в случае черной дыры



Тень черной дыры



Тень кротовой норы

Вспышки в фотонных кольцах кротовых нор



$a = 0.1$



$a = 0.9$

Выводы

- Миллиметрон позволит получить полноценные РСДБ изображения с угловым разрешением в 5-10 раз лучше ЕНТ
- Миллиметрон позволит напрямую определять параметры метрики по измерениям фотонных колец $n > 1$. С угловым разрешением в 100 раз выше ЕНТ. Подходят несколько десятков объектов (у ЕНТ только два – M87* и Sgr A*)
- Наблюдения вспышек в аккреционном диске и их отражений в кольцах также позволяют напрямую определять параметры метрики, имея при этом на порядок более мягкие требования к чувствительности интерферометра. Хотя и требуют дополнительного мониторинга при планировании наблюдений
- Картина фотонных колец (и вспышек) кардинально отличается для черной дыры и кротовой норы, что дает способ отличить эти два класса объектов

Больше информации:

- Andrianov A.S., Baryshev A.M., Falcke H.; et al. "Simulations of M87 and Sgr A* imaging with the Millimetron Space Observatory on near-Earth orbits" (MNRAS, Volume 500, Issue 4, Page 4866-4877, 2021)
- Novikov I.D., Likhachev S.F., Shchekinov Yu.A.; et al. "Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization" (Physics-Uspekhi, Volume 64, Issue 4, Page 386-419, 2021)
- Likhachev S.F., Rudnitskiy A.G., Shchurov M. A.; et al. "High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around lagrange point l2" (MNRAS Volume 511, Issue 1, Page 668-682, 2022)
- Andrianov A., Chernov S., Girin I.; et al. "Flares and their echoes can help distinguish photon rings from black holes with space-Earth very long baseline interferometry" (PhysRevD Volume 105, Issue 6, Article Number 063015, 2022)
- А. С. Андрианов, С. В. Чернов, "Оценка спина сверхмассивной черной дыры в Стрельце А*" (Астрономический журнал, 2024, том 101, № 3, с. 2–6)
- <http://millimetron.ru/>