

Генерация релятивистских струй черными дырами

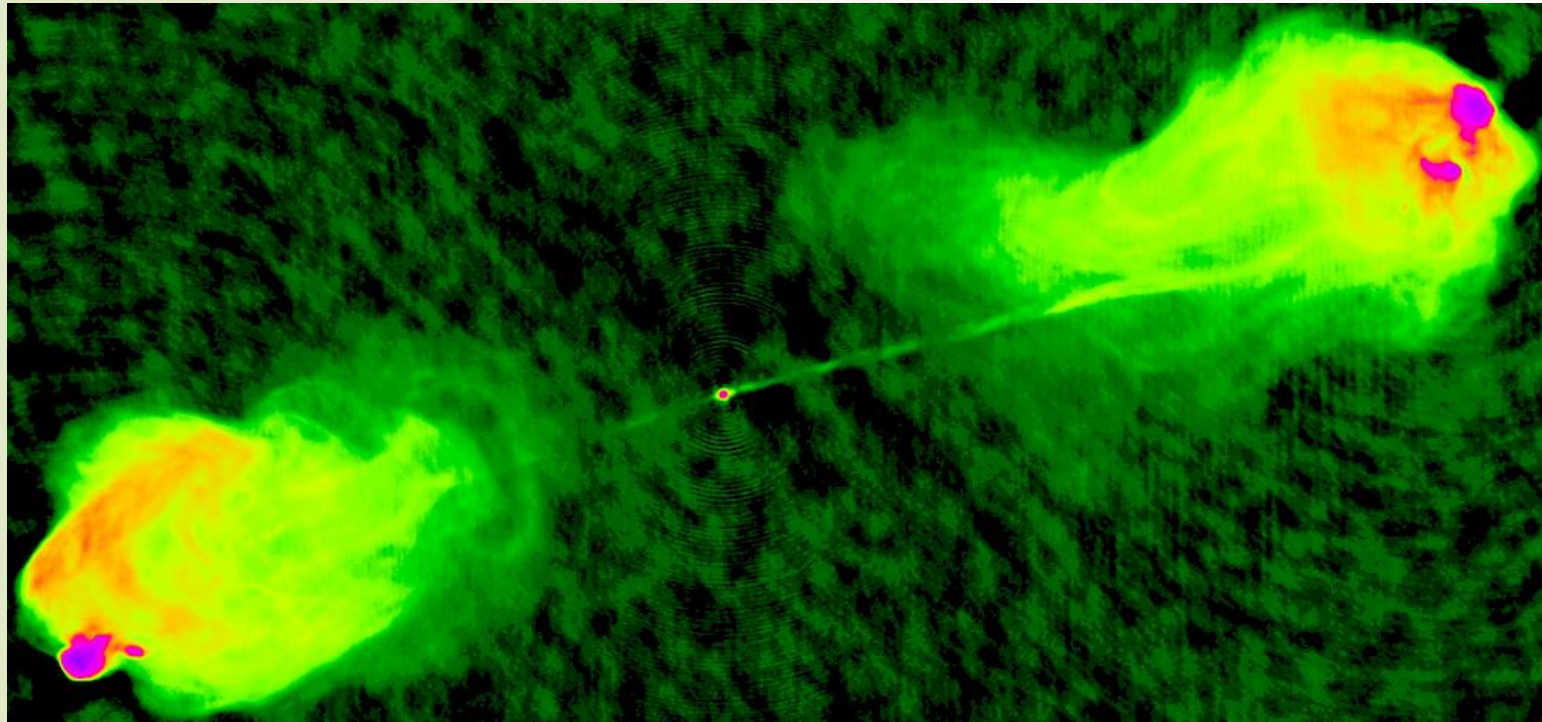
Вячеслав Иванович Докучаев и Константин Эдуардович Прокопьев

Институт ядерных исследований Российской Академии Наук

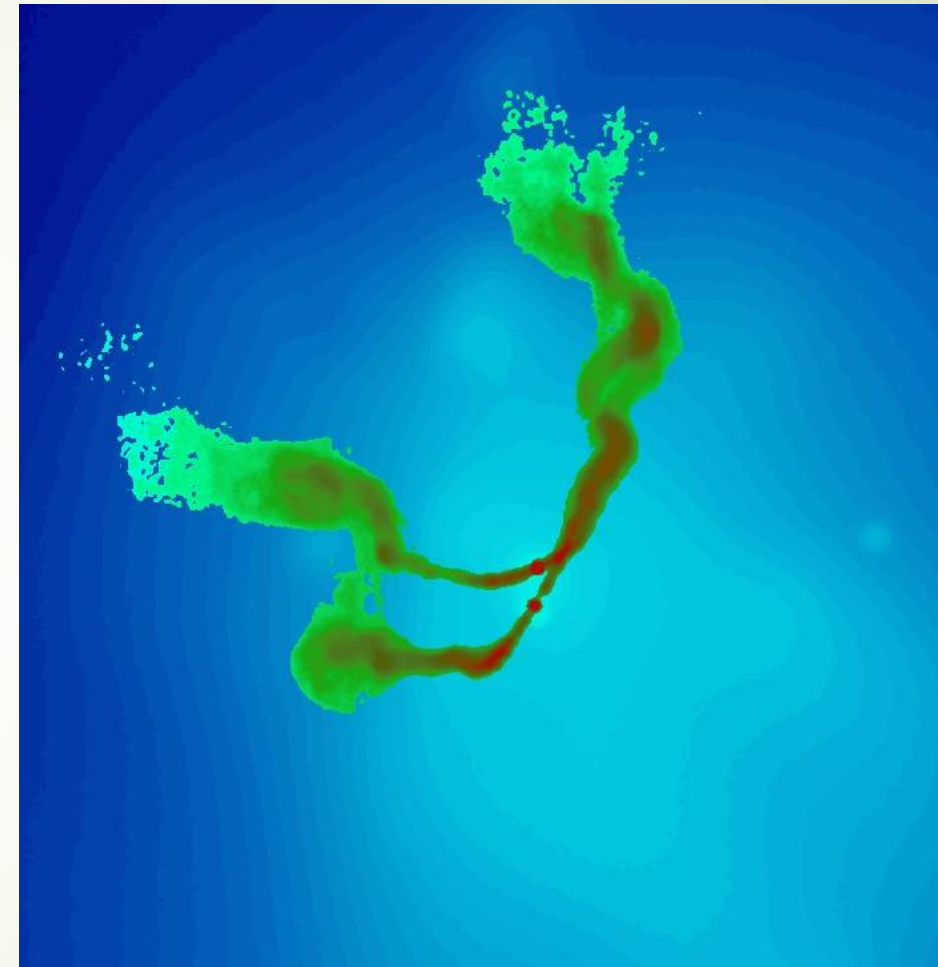
Современная астрономия наука и образование

ГАИШ - 270 лет МГУ - 23-27 июня 2025 года

Релятивистские струи (jets) от астрофизических черных дыр



Радио-струя – Лебедь А (Cygnus A)

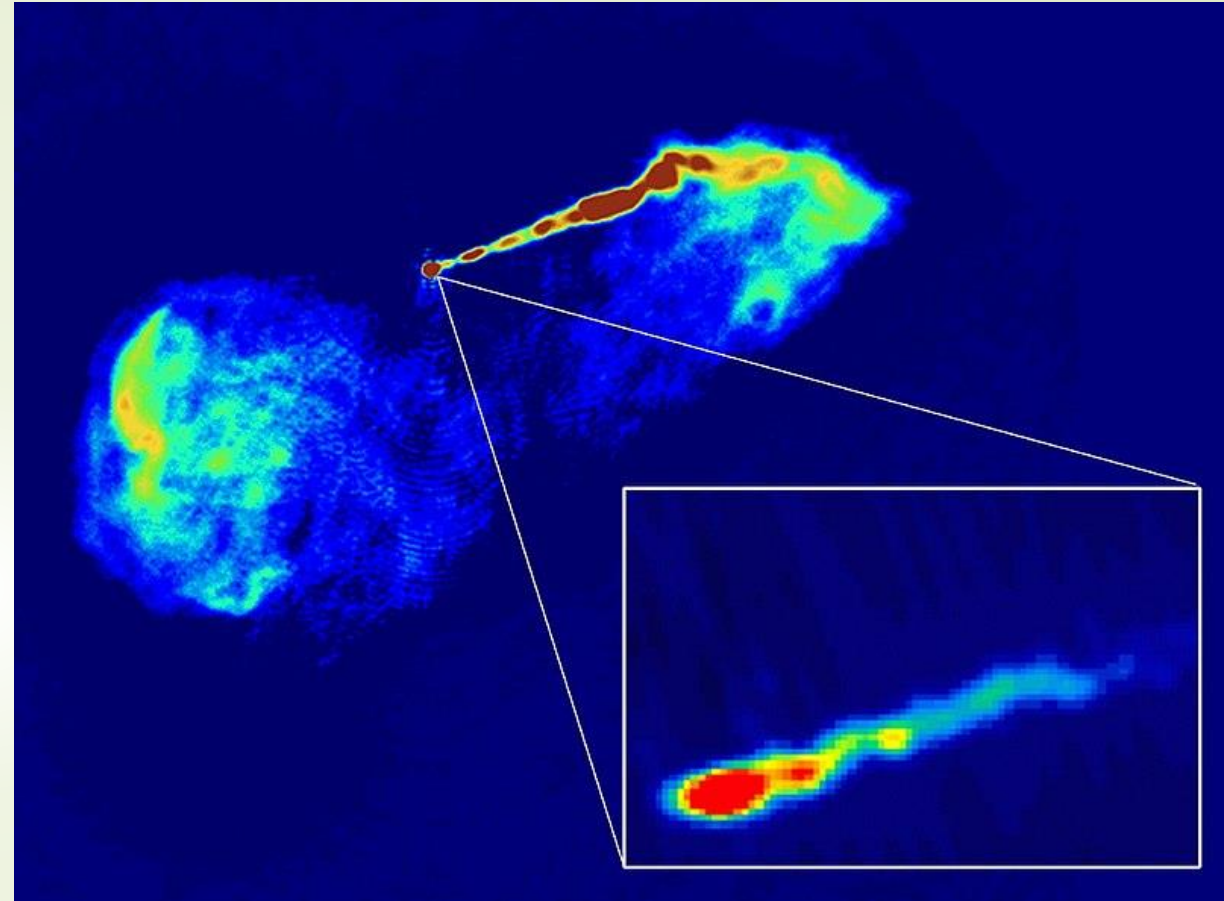


Радио-струи от двойных черных дыр
3C 75 (NGC 1128, Abell 400)
VLA и Chandra



Галактика Centaurus A (NGC 5128)

Чандра (*Chandra*) рентгеновская струя



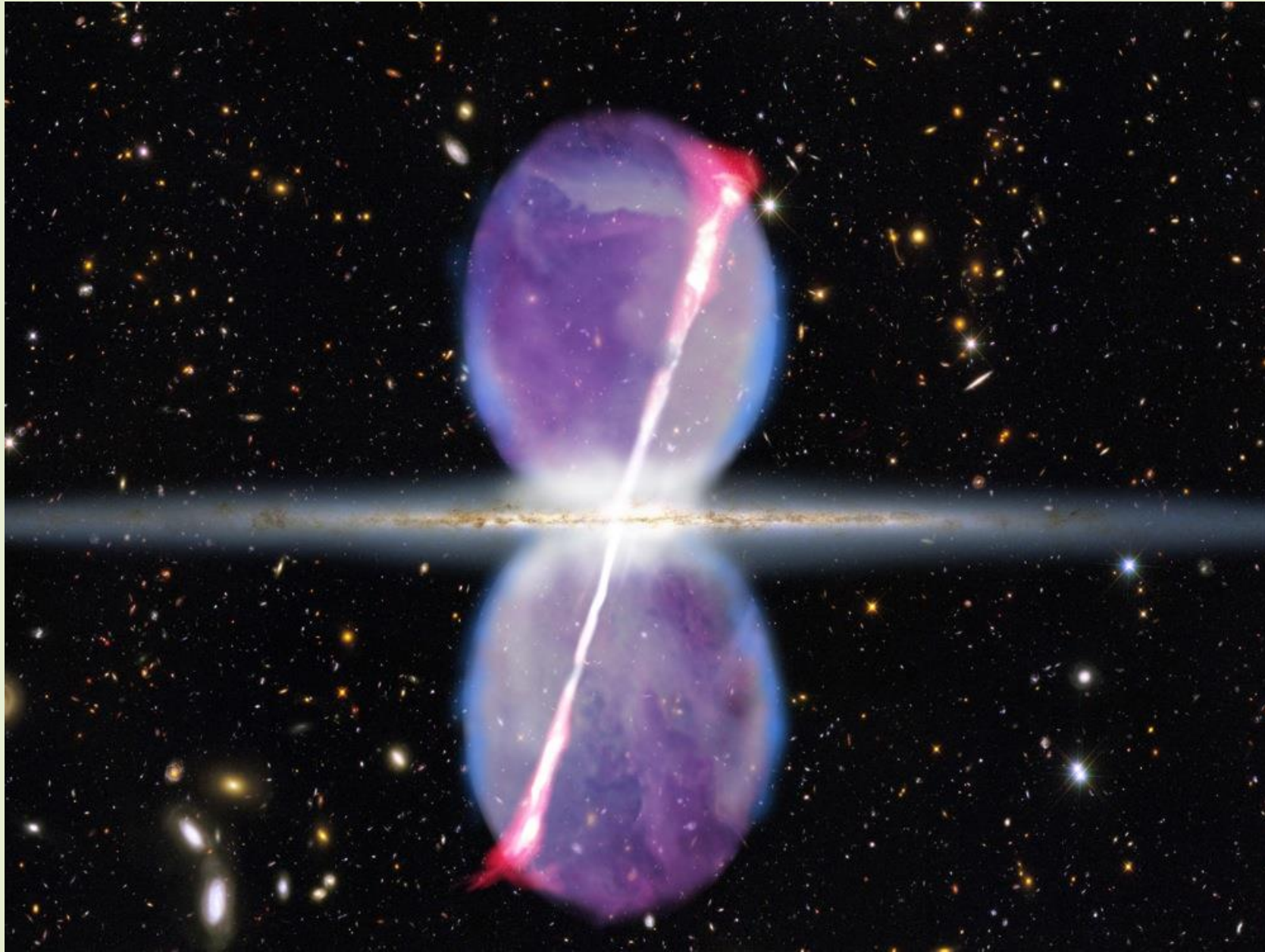
Галактика M87

РСДБ (*VLBI*) радио-струя

Галактика М87: Телескоп Хаббл (*Hubble*) оптическая струя

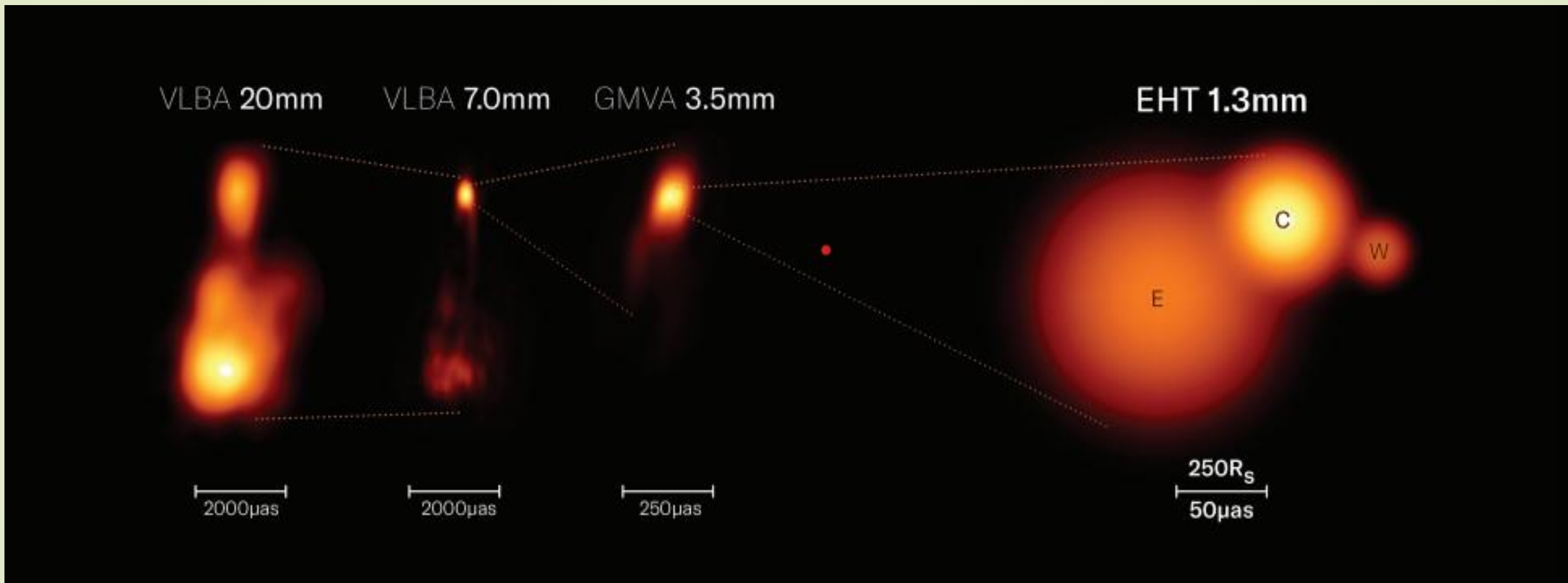


Галактика Млечный Путь: пузыри Ферми (Fermi Bubbles) --- доказательство 1-100 GeV гамма-струй

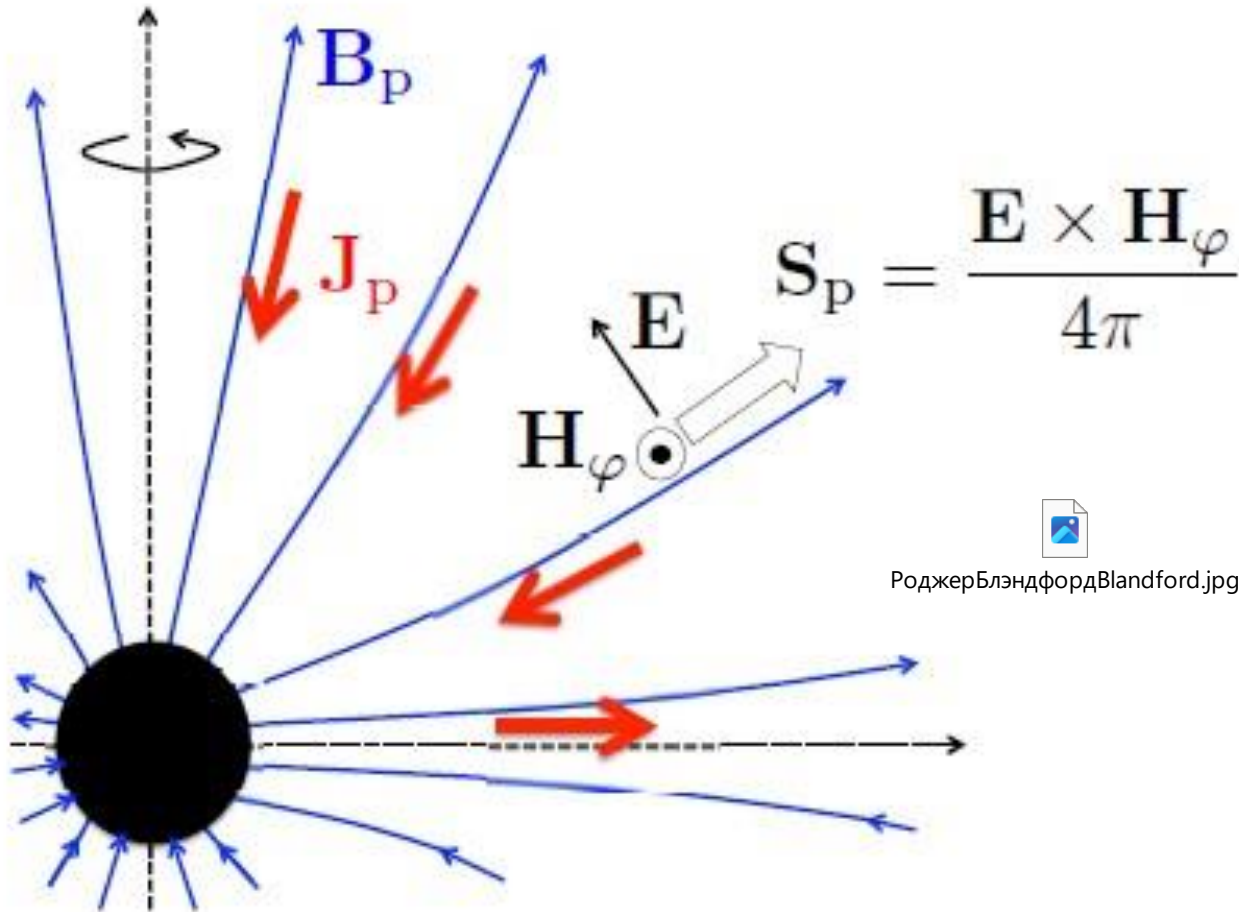


Meng Su and Douglas P. Finkbeiner, Astrophys. J. 753:61, 2012

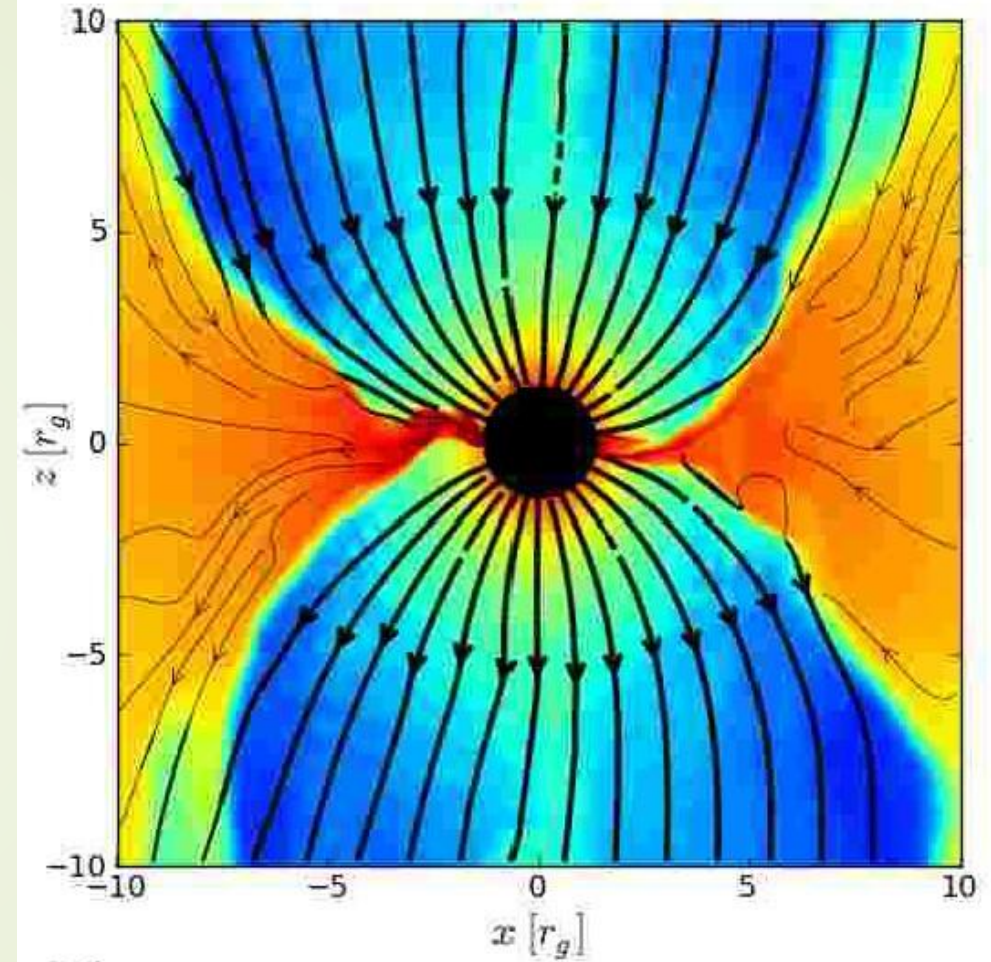
Галактика 3C84 Телескоп для Горизонта Событий: магнитное поле ~1 Гс в струе



Процесс (механизм) Блэндфорда-Знаека



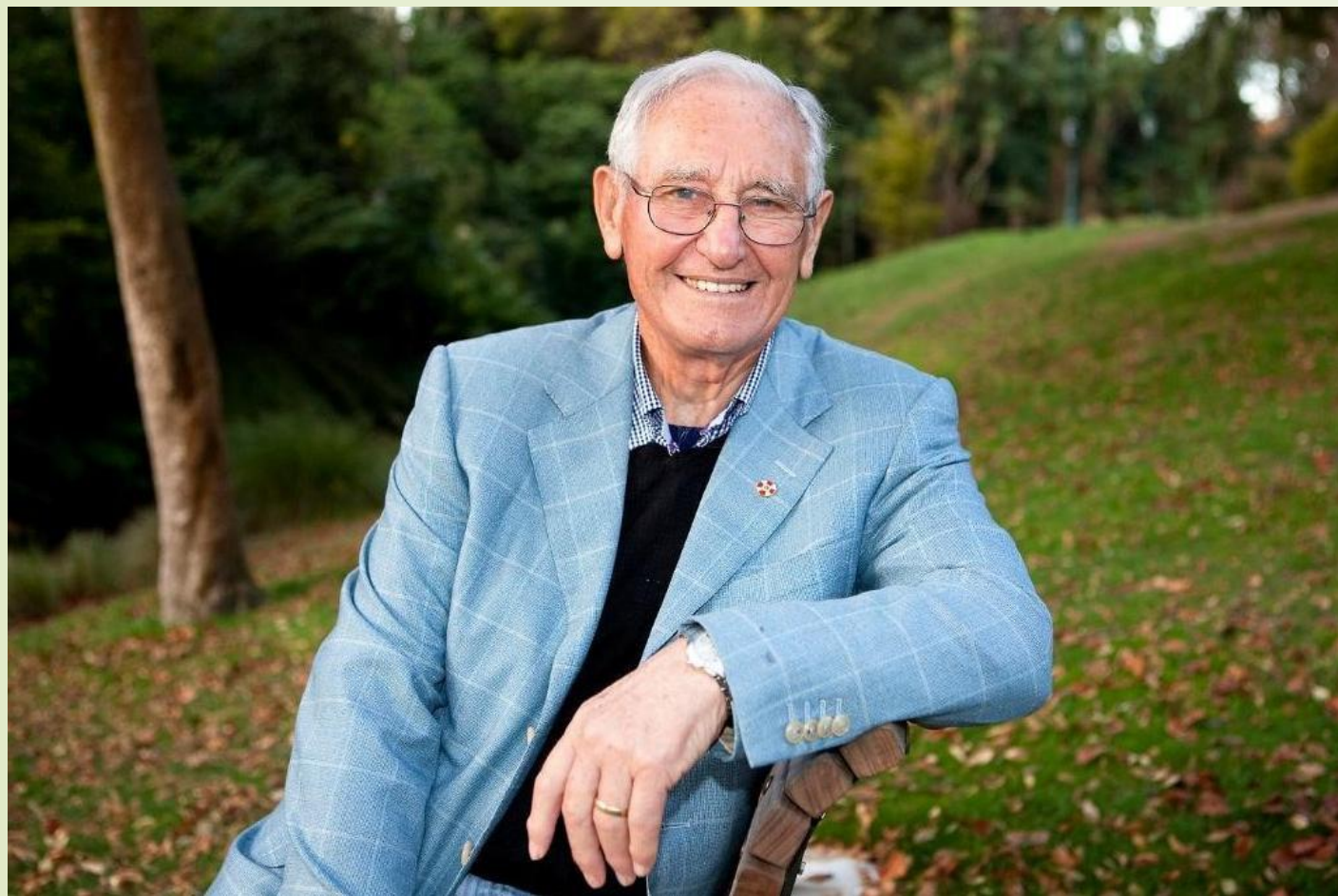
 РоджерБлэндфордBlandford.jpg



В процессе (механизме) Блэндфорда-Знаека (слева) через вращающуюся черную дыру Керра протекает электрический ток, генерируемый в аккрецируемой плазме. Этот электрический ток сильно нагревает плазму в непосредственной близости к горизонту событий черной дыры и приводит к образованию разреженных каверн вдоль оси вращения черной дыры (справа), в которых генерируется поток электромагнитной энергии в виде вектора Пойнтинга. Этот поток электромагнитной энергии в свою очередь генерирует релятивистские струи. Общорелятивистские МГД симуляции на суперкомпьютерах подтверждают эффективность механизма Блэндфорда-Знаека.

J.C. McKinney, A. Tchekhovskoy, R.D. Blandford (2012)

Рой Керр (Roy Kerr)



Р. Д. Влэндфорд (R. D. Blandford)



Метрика Керра-Ньюмена в координатной системе Бойера-Линдквиста (t, r, θ, φ)

$$ds^2 = \frac{\rho^2 \Delta}{\mathcal{A}} dt^2 - \frac{\mathcal{A} \sin^2 \theta}{\rho^2} (d\varphi - \omega dt)^2 - \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 - \rho^2 d\theta^2$$

Потенциал: $\Lambda = e\rho^{-2}r(du - a \sin^2 \theta d\varphi)$, $u = t + r$, $F = 2d\Lambda$

$$\rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad \Delta = r^2 - 2r + a^2 + e^2, \quad \mathcal{A} = (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta$$

$$\omega = (2Mr - e^2) \frac{a}{\mathcal{A}}$$

Горизонты: $\Delta = 0$, $r_{\pm} = 1 \pm \sqrt{1 - a^2 - e^2}$

R-области ($\Delta > 0$): $r > r_+$ и $0 < r < r_- < r_+$

T-области ($\Delta < 0$): $r_- < r < r_+$

Локально невращающаяся система отсчета

(Locally Nonrotating Frame, LNRF):

$$r = \text{const}, \quad \theta = \text{const}, \quad \varphi_0 = \omega t + \text{const}$$

J. M. Bardeen 1970

$$S = \frac{1}{2}\mu^2\tau - Et + \Phi\varphi + \int^{\theta} \sqrt{V_{\theta}}d\theta + \int^r \frac{\sqrt{V_r}}{\Delta}dr$$

$$V_{\theta} = Q + a^2(E^2 - \mu^2)\cos^2\theta - \Phi^2\cot^2\theta, \quad \Delta = r^2 - 2r + a^2 + e^2$$

$$V_r = r[r(r^2 + a^2) + 2a^2]E^2 - 4arE\Phi - (r^2 - 2r)\Phi^2 - \Delta(r^2\mu^2 + Q)$$

$$\int^r \frac{dr}{\sqrt{V_r}} = \int^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{V_{\theta}}}, \quad \tau = \int^{\theta} \frac{a^2\cos^2\theta}{\sqrt{V_{\theta}}}d\theta + \int^r \frac{r^2}{\sqrt{V_r}}dr$$

$$t = \int^{\theta} \frac{a^2E^2\cos^2\theta}{\sqrt{V_{\theta}}}d\theta + \int^r \frac{r^2(r^2 + a^2)E + 2ar(aE - \Phi)}{\Delta\sqrt{V_r}}dr$$

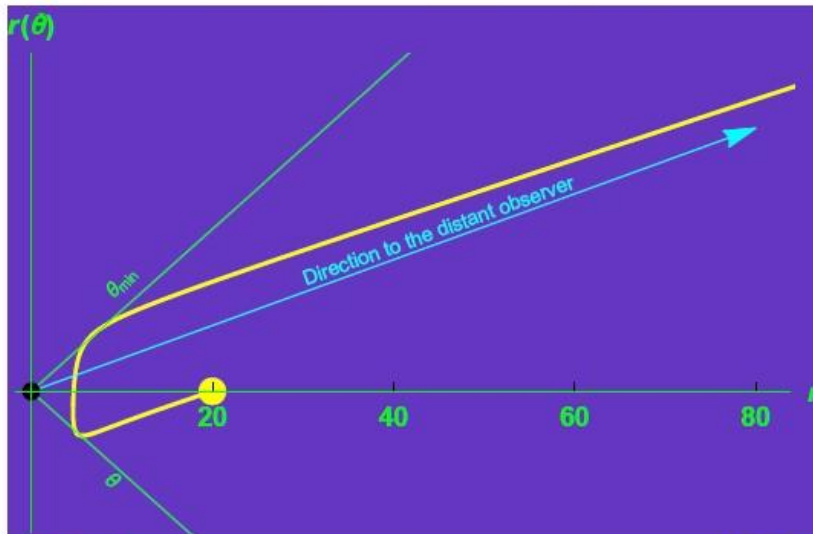
$$\varphi = \int^{\theta} \frac{\Phi\cot^2\theta}{\sqrt{V_{\theta}}}d\theta + \int^r \frac{r^2\Phi + 2ar(aE - \Phi)}{\Delta\sqrt{V_r}}dr$$

$$\int^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{V_{\theta}}} = \int^{r} \frac{dr}{\sqrt{V_r}}, \quad V_{\theta}(\theta_{\min}) = 0, \quad V_r(r_{\min}) = 0$$

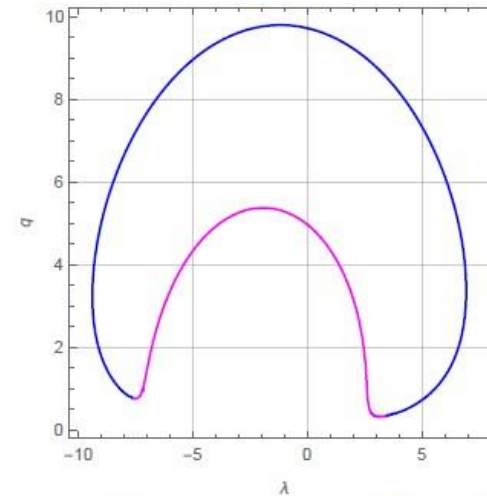
Перечеркнутые интегралы являются интегралами второго рода вдоль траектории фотона с прицельными параметрами $\lambda = \Phi/E$ and $q = Q^{1/2}/E$.

Пример интегрального уравнения для первого светового эха:

$$\int_{\theta_s}^{\theta_{\max}} \frac{d\theta}{\sqrt{V_{\theta}}} + \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{d\theta}{\sqrt{V_{\theta}}} + \int_{\theta_0}^{\theta_{\min}} \frac{d\theta}{\sqrt{V_{\theta}}} = \int_{r_s}^{r_{\min}} \frac{dr}{\sqrt{V_r}} + \int_{r_{\min}}^{r_0} \frac{dr}{\sqrt{V_r}}$$

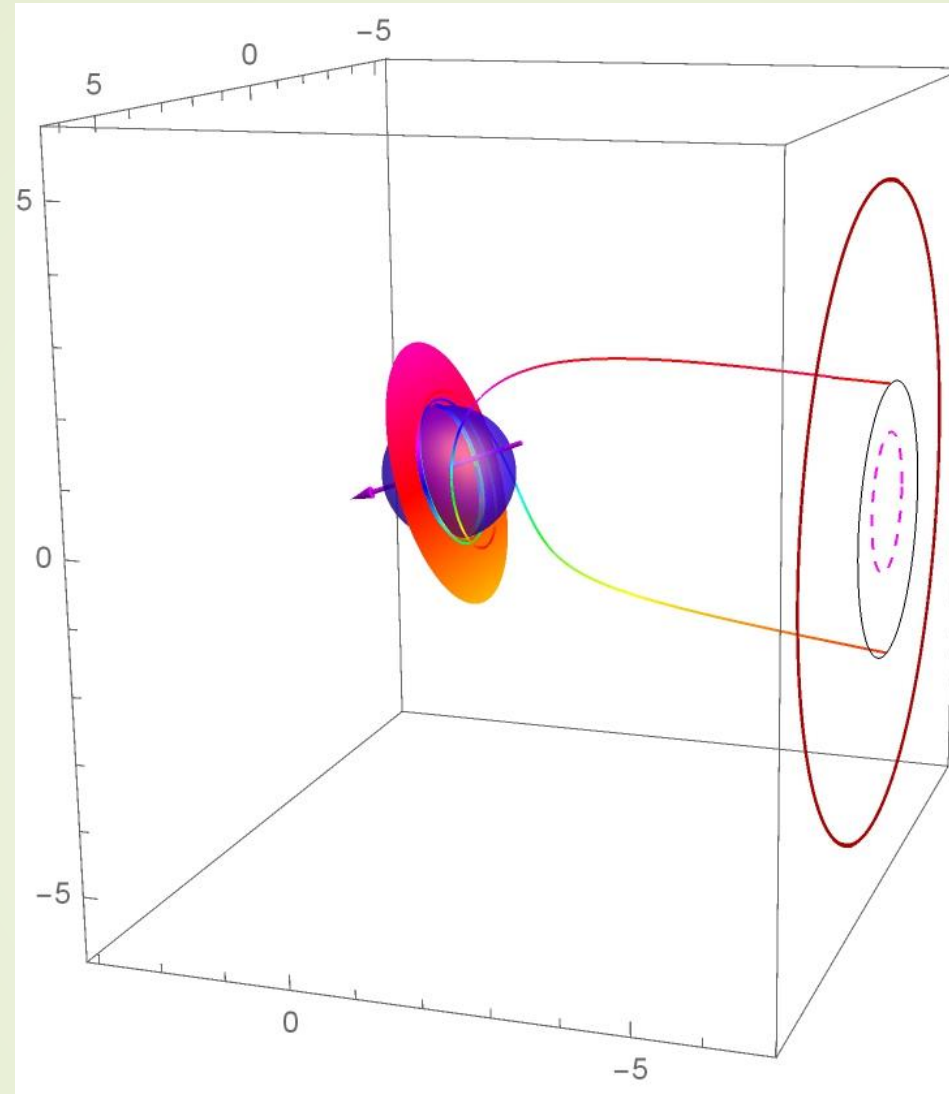


2D фотонная траектория $r(\theta)$



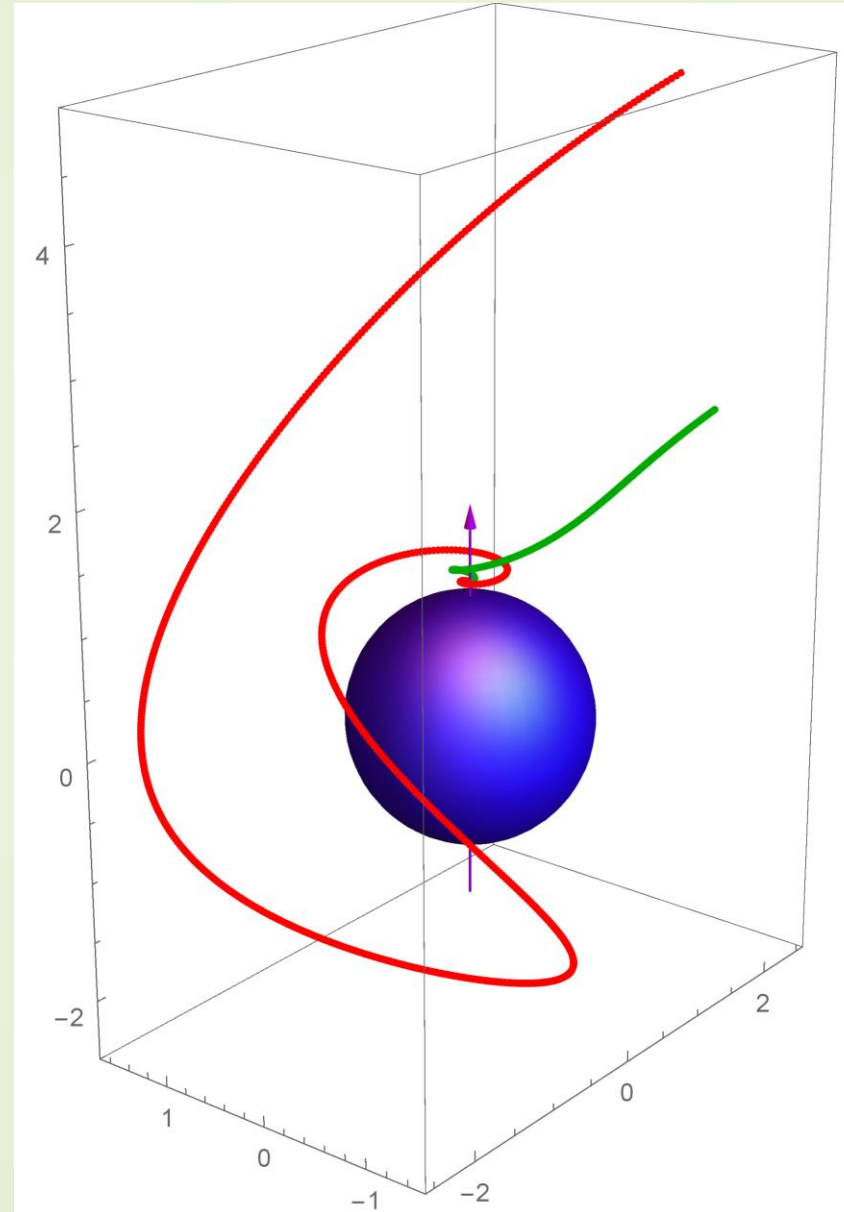
Решения: (λ, q)

Ориентация сверхмассивной черной дыры M87*, $\theta_0 = 17^\circ$

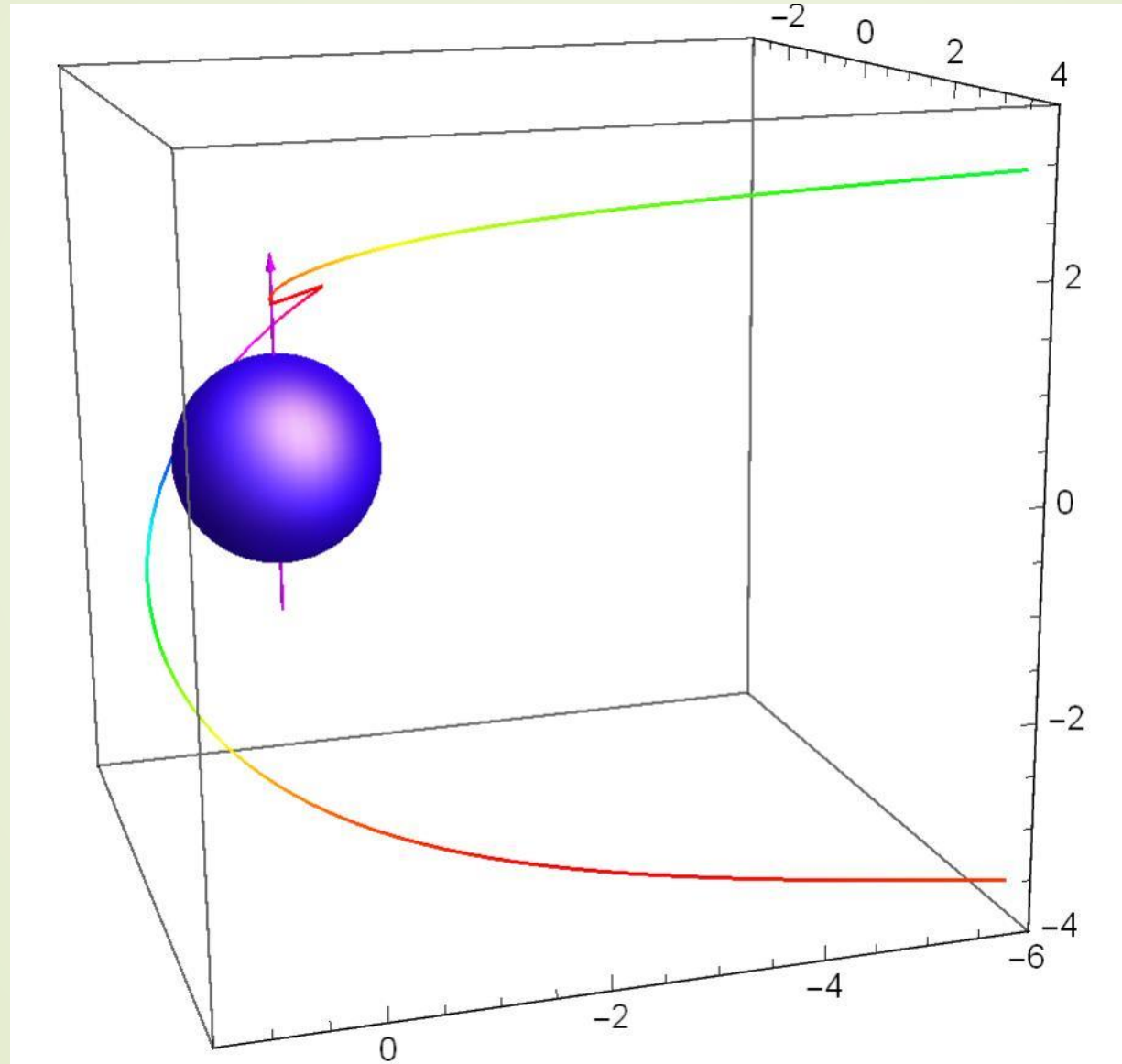


Силуэт линзированного изображения южной полусферы горизонта событий черной дыры (серая область) проектируется внутри тени черной дыры (пурпурная) замкнутая кривая. **Оранжевый** овал – тонкий аккреционный диск. **Красная** пунктирная окружность – размер горизонта событий черной дыры в пространстве Эвклида (без гравитации). Многоцветные траектории двух фотонов, излученных вблизи экватора горизонта событий черной дыры, вычислены численно с помощью пакета Mathematica.

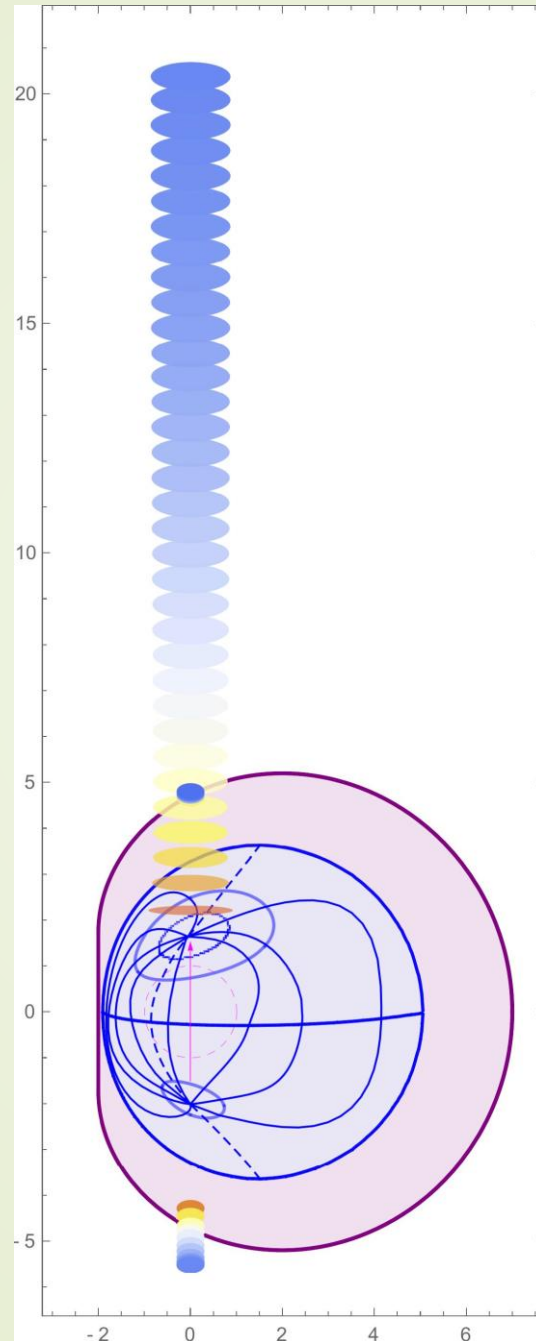
3D траектории двух фотонов, стартующих с радиуса $r = 1.1MG/c^2$ на северном полюсе горизонта событий черной дыры и дающих прямое изображение (зеленая траектория) и 2-е световое эхо (красная траектория 2 раза пересекает экваториальную плоскость черной дыры)



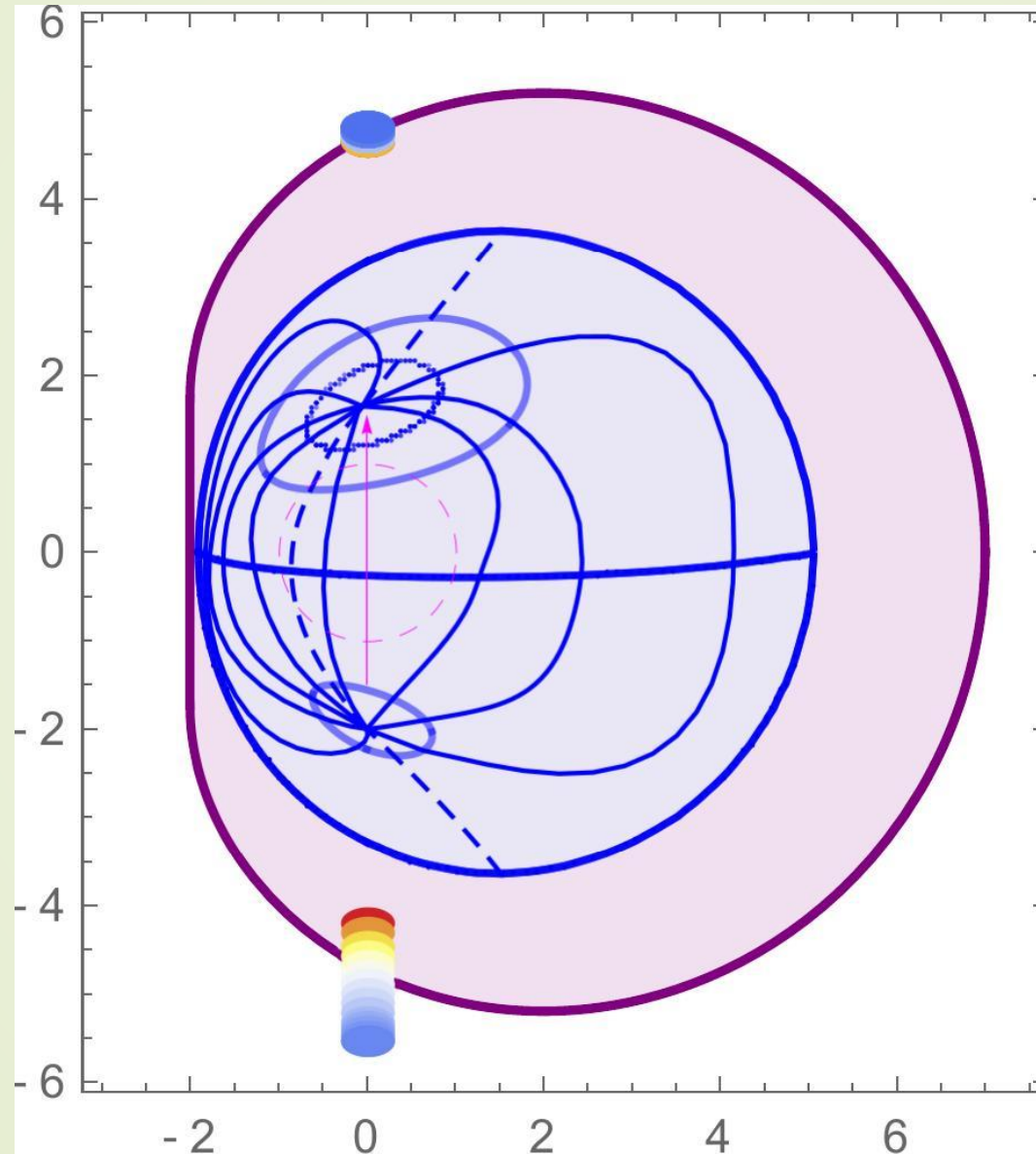
3D траектории фотонов от движущегося наружу яркого пятна, стартующего на радиусе $r = 1.5GM/c^2$ летит. Показаны траектории фотонов прямого изображения и 1-го светового эха (фотон летит **против часовой стрелки**)



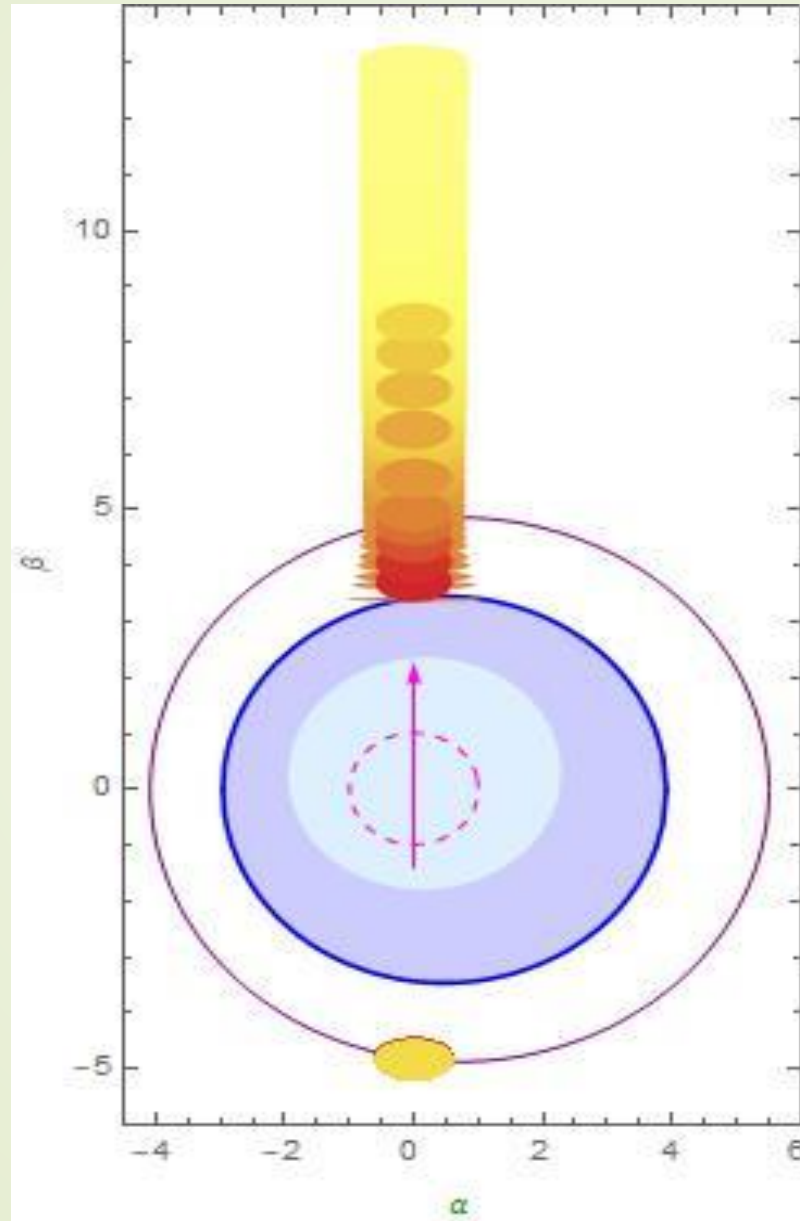
Движущееся пятно в струе от SgrA* через дискретные интервалы времени



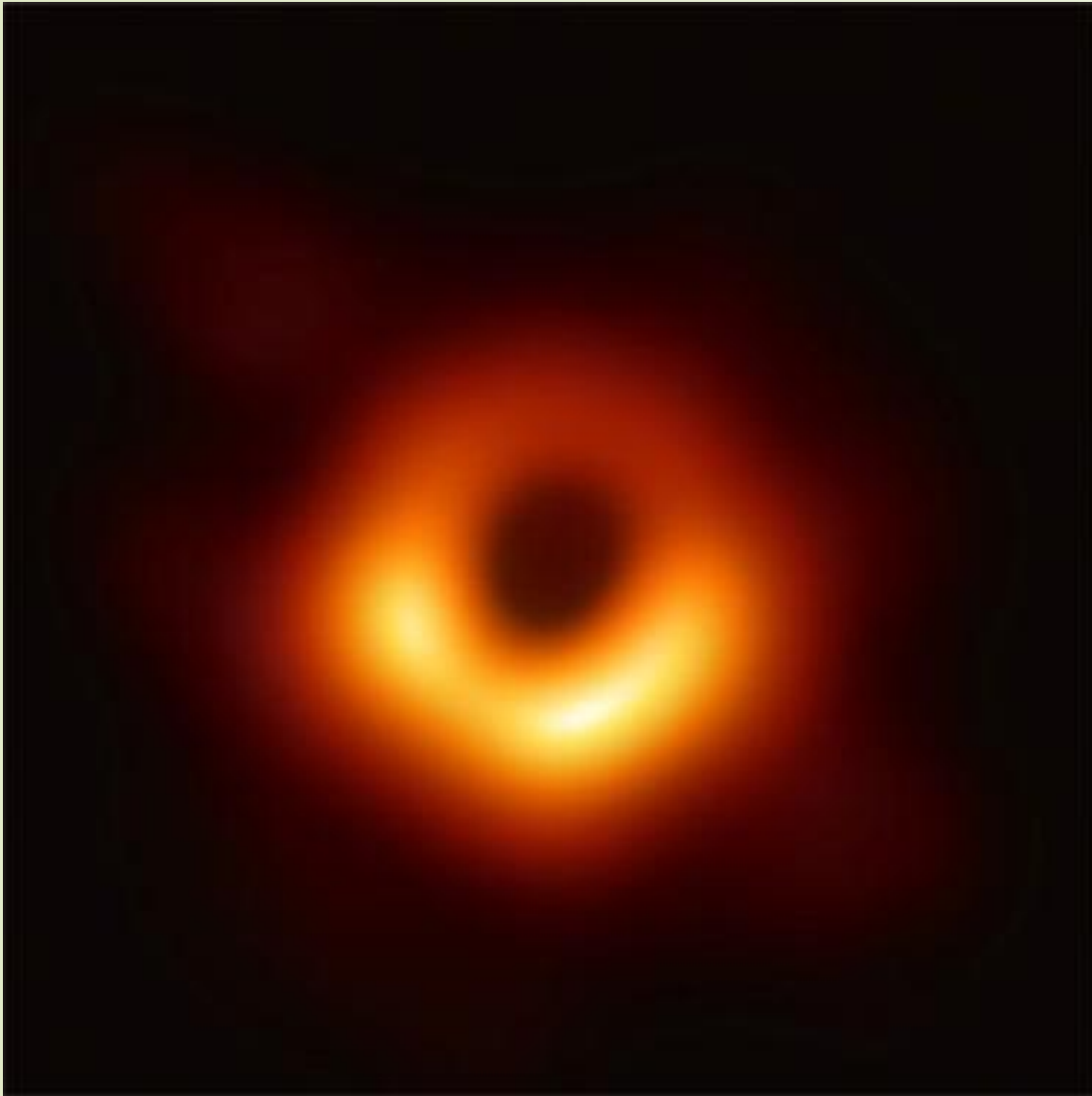
1-е и 2-е световые эхо от яркого пятна в струе от SgrA* через дискретные промежутки времени вблизи границы тени черной дыры (замкнутая пурпурная кривая)



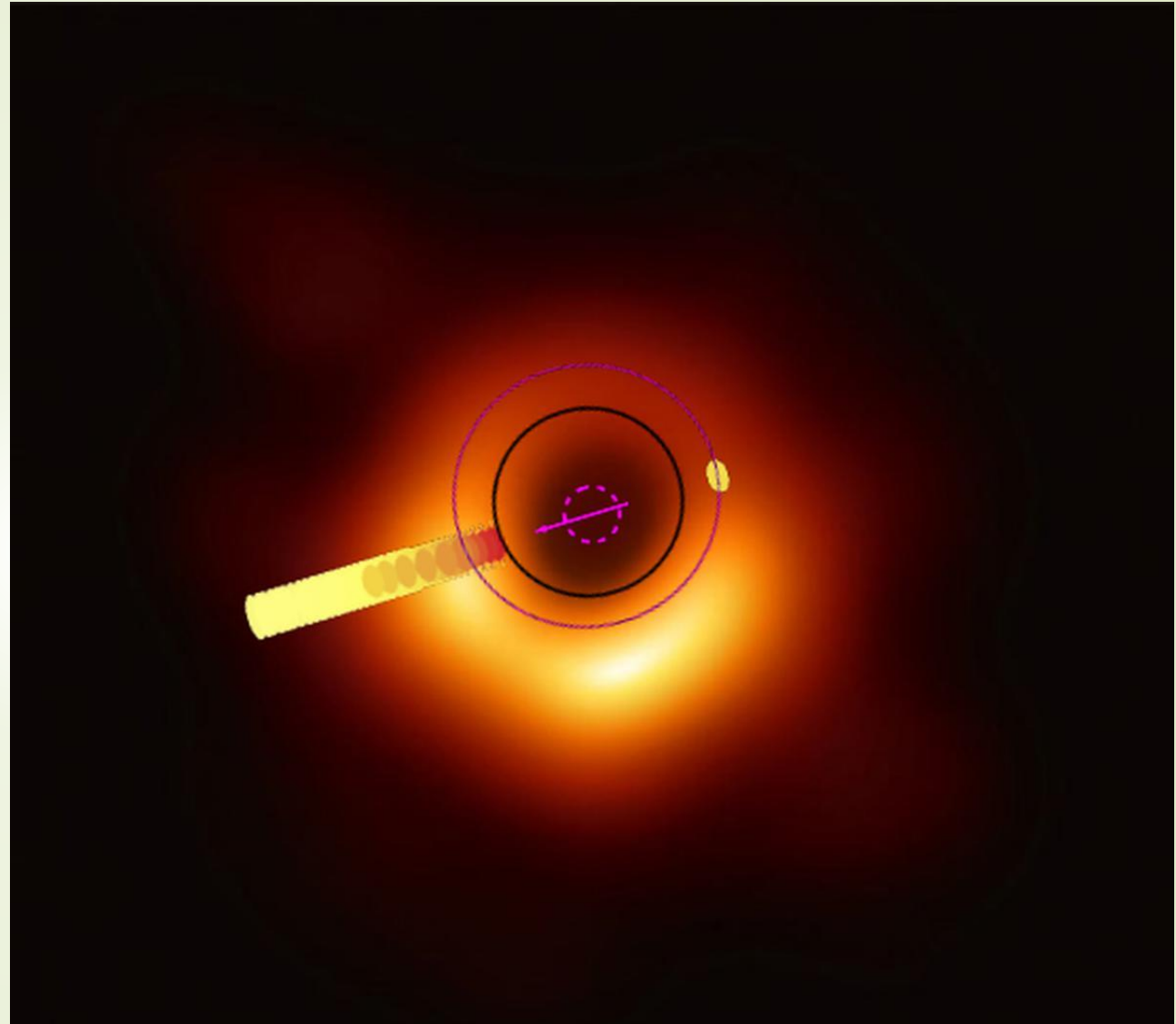
Прямое изображение и 1-е световое эхо движущегося яркого пятна в струе сверхмассивной черной дыры M87* через дискретные интервалы времени



Телескоп для Горизонта Событий(2019)



Космическая Обсерватория Миллиметрон (2030?)



Сверхмассивная черная дыра M87*

Заключение

Уникальную информацию для проверки (или фальсификации) различных теорий гравитации в режиме **сильного** поля (когда эффективный **гравитационный потенциал** порядка квадрата скорости света) обеспечат детальные наблюдения изображений черных дыр, включая движение ярких пятен в струях

См. детали в ArXiv статьях: [2010.01885](#), [2007.14121](#), [1911.07695](#), [1906.07171](#), [1903.09594](#),
[1812.06787](#), [1804.08030](#), [1802.00817](#)

См. Аннимации: youtube.com/watch?v=P6DneV0vk7U, youtu.be/7j8f_vITuI8,
youtu.be/zQzC-IVgdjg, youtu.be/fps-3frL0AM