

Dark matter distribution and annihilation at the Galactic Center

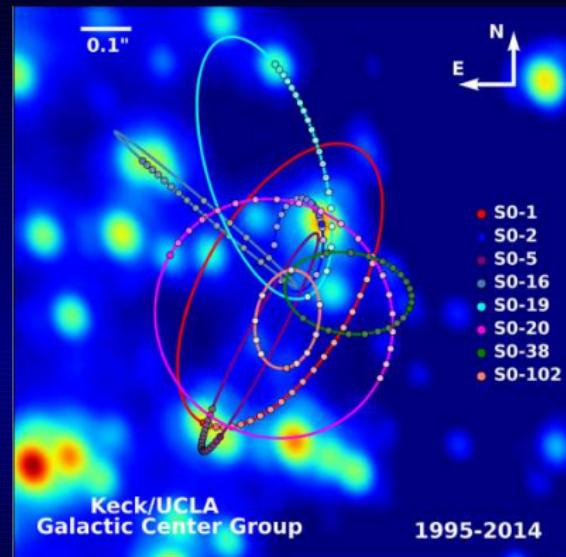
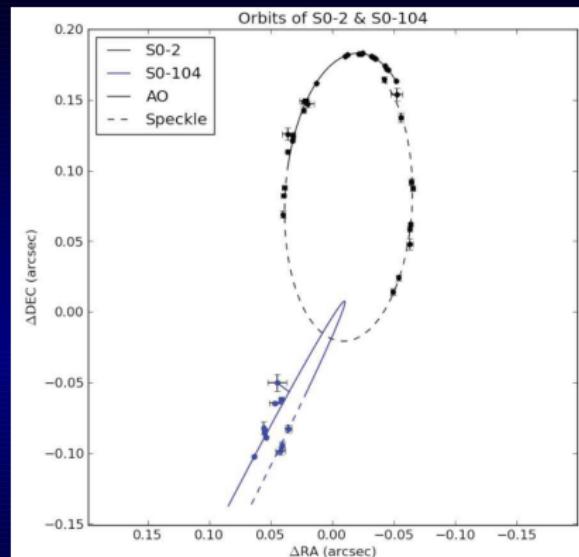
Vyacheslav Dokuchaev & Yury Eroshenko

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences

ICPPA, Moscow — 2015

The first Galactographic discovery of the XXI century

Elliptic orbits of fast S0 stars around the supermassive black hole SgrA*



Virial star velocity

S0 star velocities

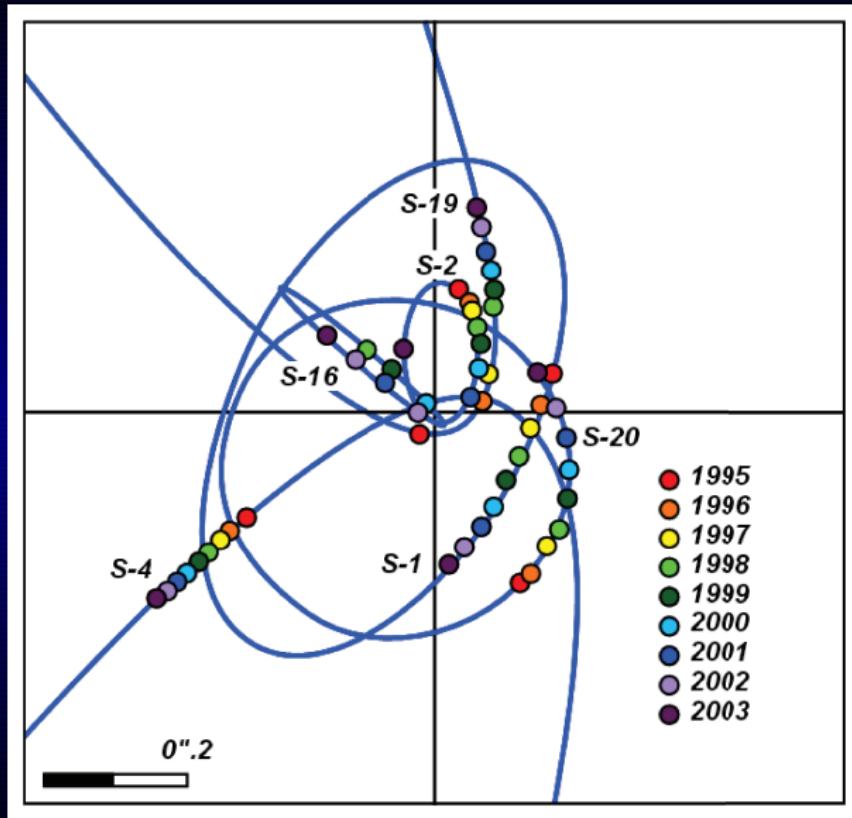
$$v \sim 10^2 \text{ km/s}$$

$$v_{S0-2} \simeq 1.5 \cdot 10^3 \text{ km/s}$$

$$v_{S0-16} \simeq 1.2 \cdot 10^4 \text{ km/s}$$

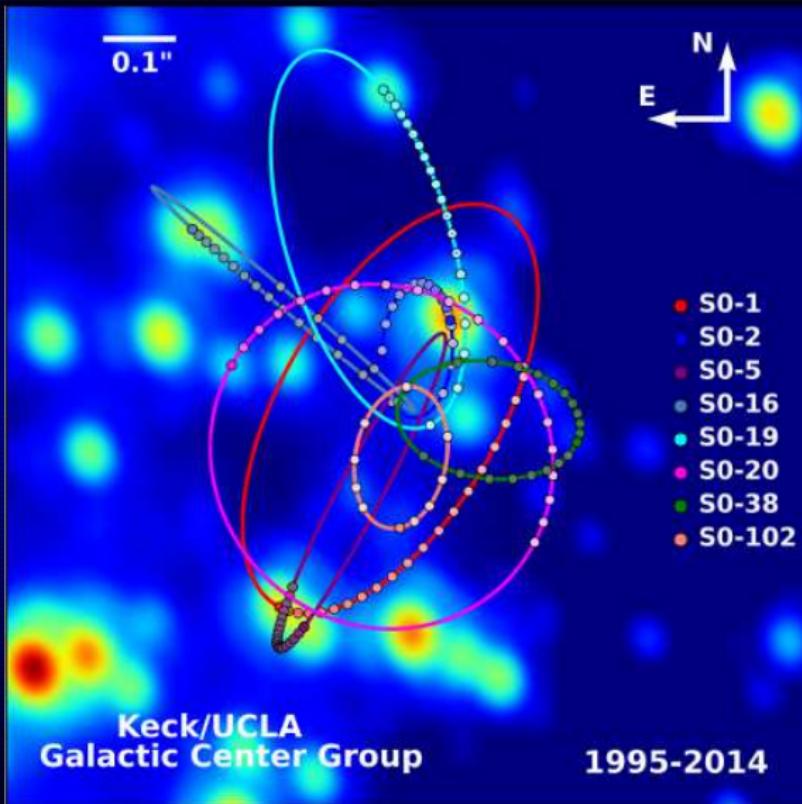
Mass of the central star cluster $10^7 M_\odot$, radius 1 pc

The nearest supermassive black hole SgrA*



$$M_h = (4.1 \pm 0.4) 10^6 M_{\odot}$$

The nearest supermassive black hole SgrA*



S0-102: $T_\varphi = 11.5$ yrs S0-2: $T_\varphi = 16$ yrs, $M_h = (4.1 \pm 0.4)10^6 M_\odot$

Periodic motion in the central field (Landau & Lifshitz, Mechanics)

Если область допустимого изменения r ограничена лишь одним условием $r \geq r_{\min}$, то движение частицы инфинитно — ее траектория приходит из бесконечности и уходит на бесконечность.

Если область изменения r имеет две границы r_{\min} и r_{\max} , то движение является финитным и траектория целиком лежит внутри кольца, ограниченного окружностями $r = r_{\max}$ и $r = r_{\min}$. Это, однако, не означает, что траектория непременно является замкнутой кривой. За время, в течение которого r изменяется от r_{\max} до r_{\min} и затем до r_{\max} , радиус-вектор повернется на угол $\Delta\varphi$, равный согласно (14,7)

$$\Delta\varphi = 2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\frac{M}{r^2} dr}{\sqrt{2m(E - U) - \frac{M^2}{r^2}}}. \quad (14,10)$$

Условие замкнутости траектории заключается в том, чтобы этот угол был равен рациональной части от 2π , т. е. имел вид

$\Delta\varphi = 2\pi m/n$, где m , n — целые числа. Тогда через n повторений этого периода времени радиус-вектор точки, сделав m полных оборотов, совпадет со своим первоначальным значением, т. е. траектория замкнется.

Однако такие случаи исключительны, и при произвольном виде $U(r)$ угол $\Delta\varphi$ не является рациональной частью от 2π . Поэтому в общем случае траектория финитного движения не замкнута. Она бесчисленное число раз проходит через минимальное и максимальное расстояние (как, напри-

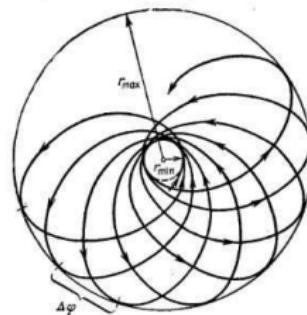


Рис. 9

мер, на рис. 9) и за бесконечное время заполняет все кольцо между двумя граничными окружностями.

Существуют лишь два типа центральных полей, в которых все траектории финитных движений замкнуты. Это поля, в которых потенциальная энергия частицы пропорциональна $1/r$ или r^2 . Первый из этих случаев рассмотрен в следующем параграфе, а второй соответствует так называемому пространственному осциллятору (см. задачу 3 § 23).

Power density profile of dark matter (DM)

$$\rho(r) = \rho_h \left(\frac{r}{r_h} \right)^{-\beta}$$

Influence radius of black hole

$$r_h = \frac{GM_h}{\langle v_h \rangle} \sim 1 \text{ pc}, \quad \langle v_h \rangle \sim 10^2 \text{ km/s}$$

$\beta = 7/4$ — finite DM

Gurevich 1964

$\beta = 1/2$ — infinite DM

Zeldovich & Novikov 1971

$\beta = 1.7 - 1.9$ — DM galactic halo

Gurevich & Zybin 1988

$\beta = 1 - 3$ — numerical DM halo simulation

NFW 1995

Precession angle during one orbital period $\delta\phi$

Power DM profile $\rho \propto r^{-\beta}$

Correction to the black hole potential

$$\delta U = \begin{cases} Ar^{2-\beta} + \frac{C_1}{r} + C, & \text{if } \beta \neq 2, \\ 4\pi G \rho_h r_h^2 m \ln r + \frac{C_2}{r} + C, & \text{if } \beta = 2, \end{cases}$$

$$A = 4\pi G \rho_h r_h^\beta m / [(3 - \beta)(2 - \beta)]$$

Precession angle (*Landau & Lifshitz, Mechanics*)

$$\boxed{\delta\phi = \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{2m}{L} \int_0^\pi r^2(\phi) \delta U d\phi \right)}$$

$$r(\phi) = p(1 + e \cos \phi)^{-1}, \quad p = L^2 / (GM_h m) = a(1 - e^2)$$
$$e = 0.89, \quad r_p = a(1 - e) = 0.58 \text{ mpc}, \quad r_a = a(1 + e) = 9.4 \text{ mpc}$$

Precession angle during one orbital period $\delta\phi$

$$\delta\phi = -\frac{4\pi^2 \rho_h r_h^\beta p^{3-\beta}}{(1-e)^{4-\beta} M_{\text{BH}}} {}_2F_1\left(4-\beta, \frac{3}{2}; 3; -\frac{2e}{1-e}\right)$$

$p = L^2/(GM_{\text{BH}}m) = a(1-e^2)$ — orbit parameter

L — conserved angular momentum of star

Hypergeometric function

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(b)\Gamma(c-b)} \int_0^1 t^{b-1} (1-t)^{c-b-1} (1-tz)^{-a} dt$$

1. Gauss relations for the adjacent Hypergeometric functions
2. Method of osculating elements
3. P. E. El'yasberg "Theory of Flight of Artificial Earth Satellites" (Nauka, Moscow, 1965; Israel Program for Sci. Transl., Jerusalem, 1967), Chap. 11

Weighing of DM in the Galactic Center: $M_{\text{DM}} = ?$

Total mass of DM inside sphere of radius r

$$M_{\text{DM}}(r) = \frac{4\pi\rho_h r_h^\beta}{3 - \beta} [r^{3-\beta} - R_{\min}^{3-\beta}]$$

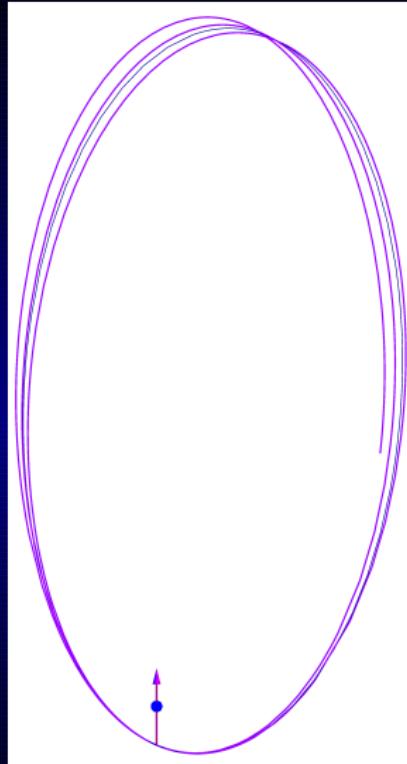
R_{\min} — minimal radius of DM distribution

DM fraction inside S0 star orbit

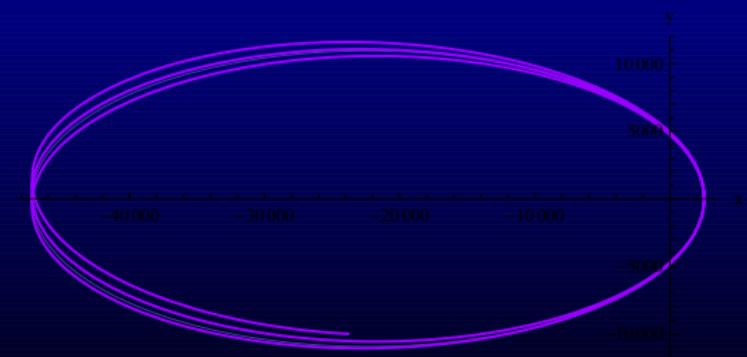
$$\xi \equiv \frac{M_{\text{DM}}(r_a)}{M_h} = ?$$

$r_a = a(1 + e) \leq 10^{-2}$ pc — apsidal radius of S0 star

Fitting of S0-2 star orbit: $\xi = 3 \cdot 10^{-2}$

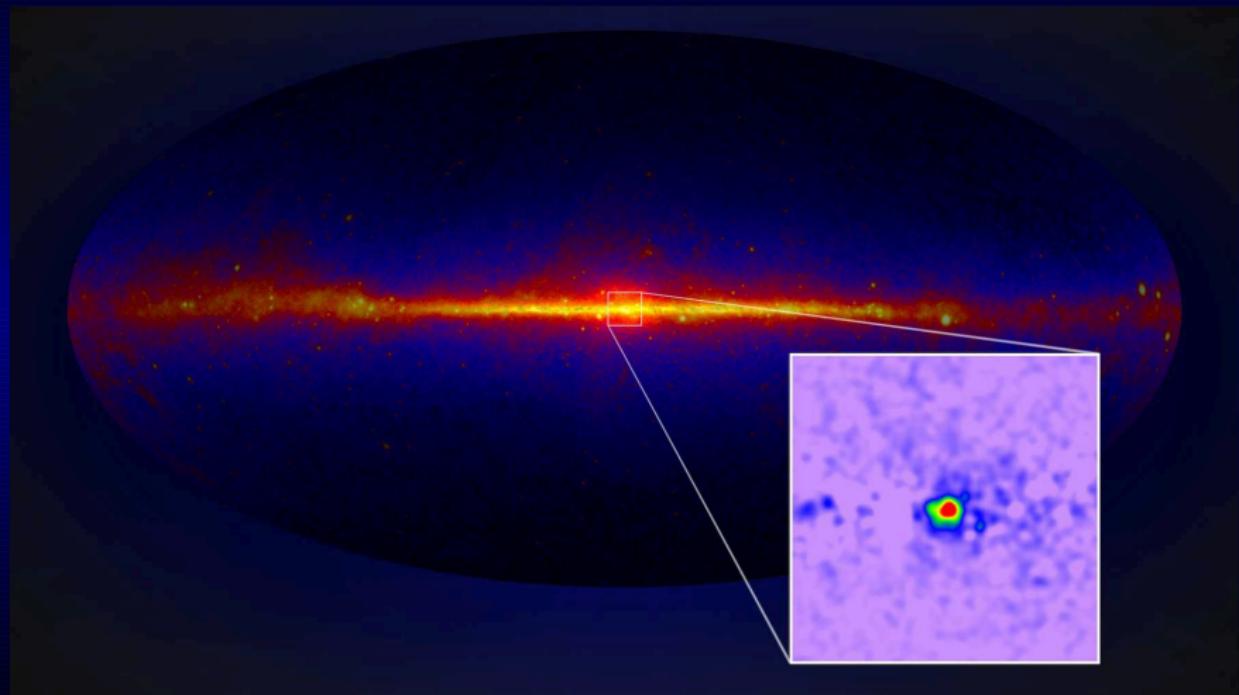


Left: star trajectory in the viewing plane
Right: star trajectory in the orbit plane



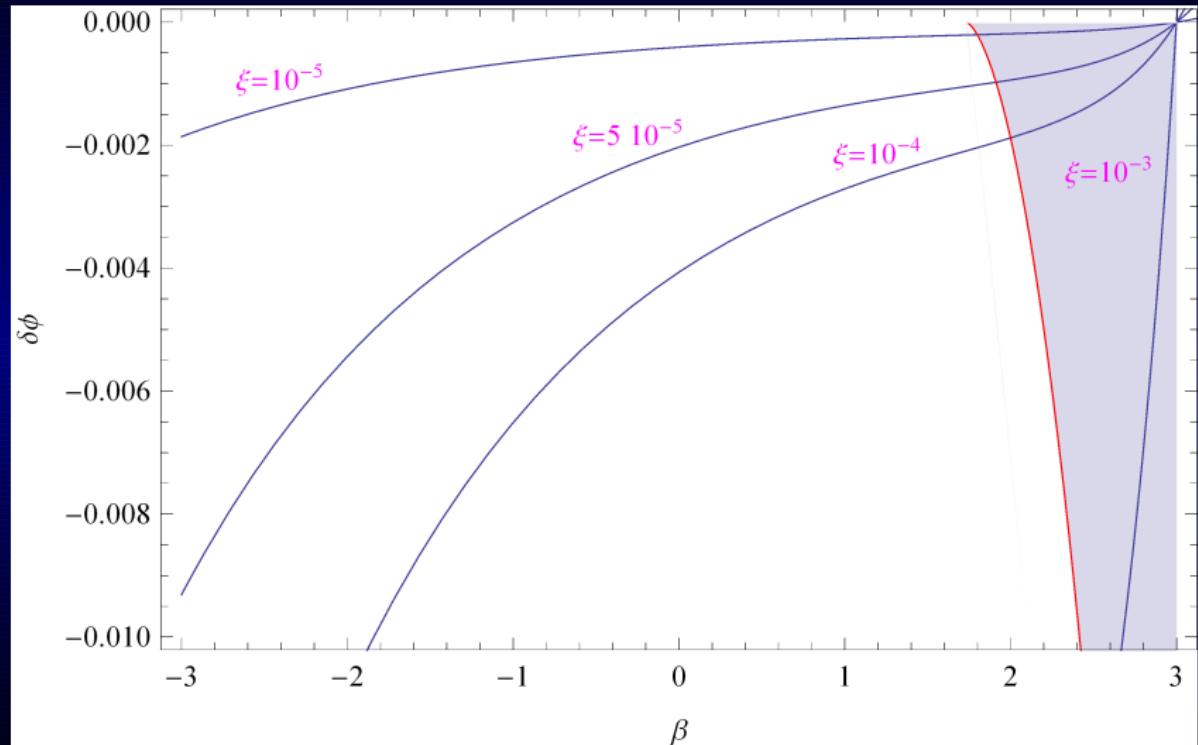
Fermi-Lat: gamma-radiation from Galactic Center

After reduction of the known background sources



Orbit precession of S0-2 star $\delta\phi$

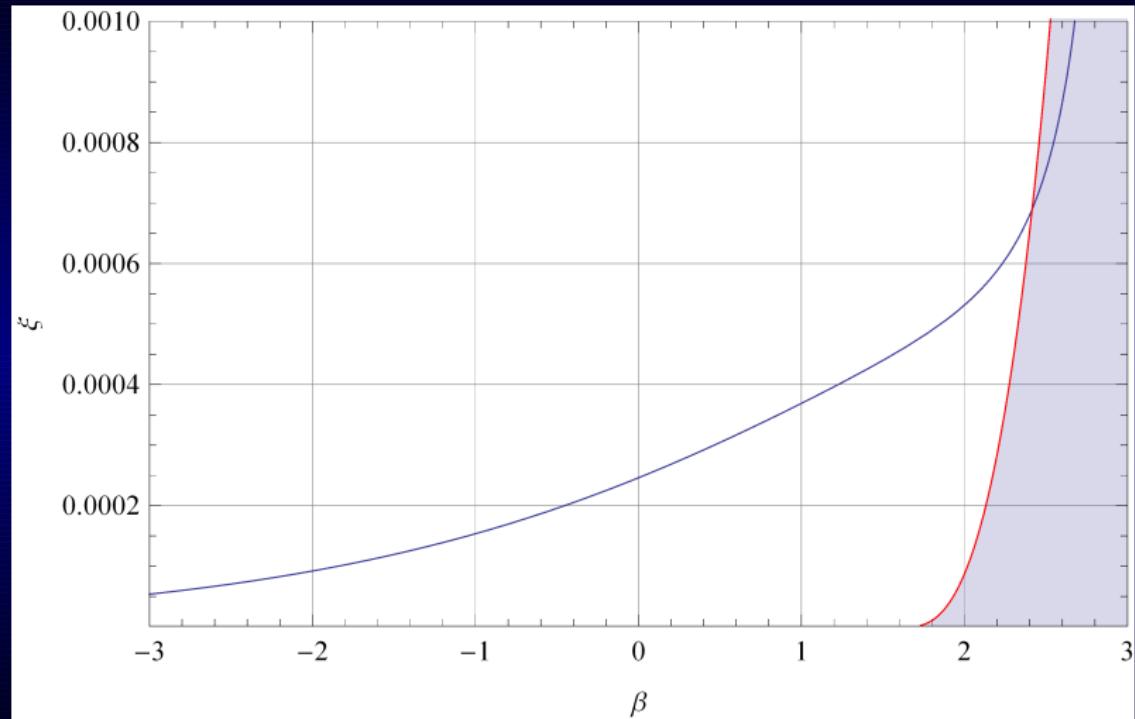
in dependence of density profile index of DM distribution β



Colored region excluded by DM particles annihilation (neutralino)

Mass fraction of DM ξ

in dependence of DM density profile index β for $\delta\phi = 0.01$

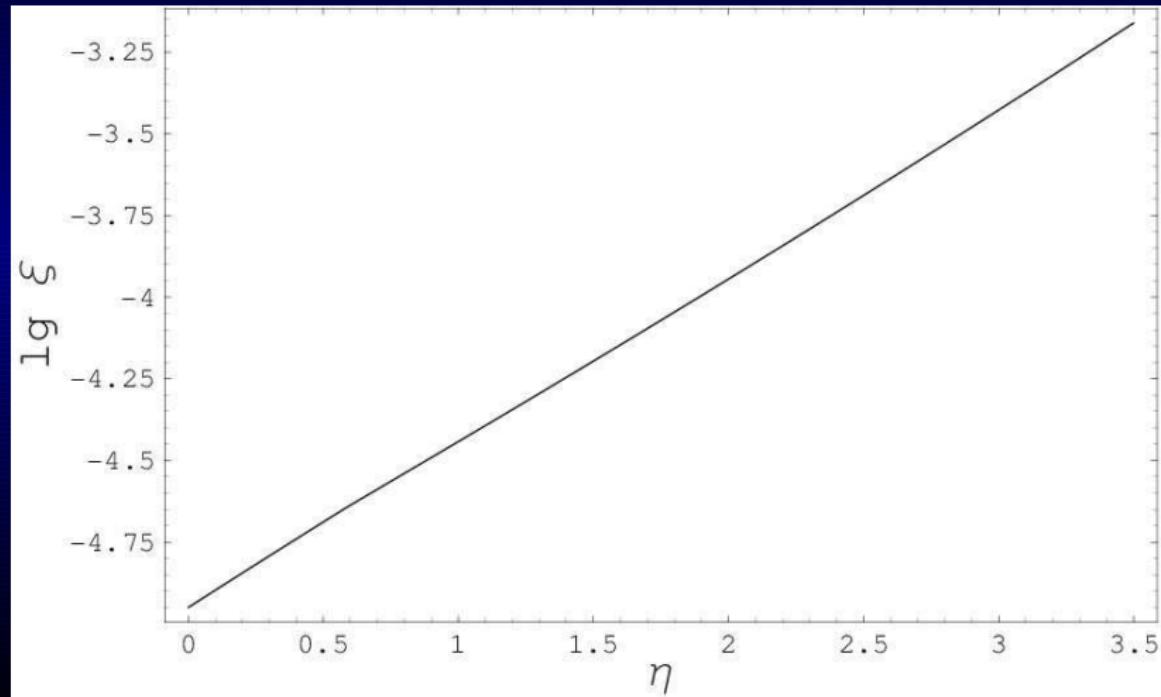


Colored region excluded by DM particles annihilation (neutralino)

Sommerfeld enhancement

DM mass fraction ξ in dependence of η

$$\langle \sigma v \rangle = \langle \sigma v \rangle_0 \left(\frac{v_0}{v} \right)^\eta$$



Conclusion

- Observations of the nonrelativistic precession of S0 star orbits is a promising method for measuring the total DM mass near the supermassive black hole SgrA* at the Galactic Center
- An analytical expression for the precession angle has been obtained under the assumption of a power-law profile of the DM density
- The large telescopes in the near future will be able to measure or constrain the precession of S0 star orbits, providing the strong DM limitation