# Weighing of dark matter in the Galactic Center



▲□▶ ▲□▶ ▲ □▶ ▲ □▶ ▲ □ ● ● ● ●

#### Standard Astrophysical Model: "dormant" quasar Milky Way: normal galaxy and "Fermi bubble"



# Keck Observatory: Twin Telescopes on Mauna Kea, Hawaii Interferometer: $2 \times ø 10 \text{ m} \times 36$ , segments



#### Very Large Telescope Array, ESO Interferometer: $4 \times \emptyset \ 8.2 \ m + 4 \times \emptyset \ 1.8 \ m$



#### Weighing the supermassive black hole SgrA\* in the Galactic Center Elliptic orbits of fast S-stars



Virial star velocity S-star velocities  $v\sim 10^2$  km/s  $v_{50-2}\simeq 1.5\,10^3$  km/s  $v_{50-16}\simeq 1.2\,10^4$  km/s

Mass of the central star cluster  $10^7 M_{\odot}$ ,

radius 1 pc

# Supermassive black hole SgrA\* in the Galactic

Center



# Supermassive black hole SgrA\* in the Galactic

Center



S2-star:  $T_{\varphi} = 16$  yrs,  $M_h = (4.1 \pm 0.4) \prod_{\varphi \to \varphi} M_{\varphi} = 0.4$ 

#### Periodic motion in the central field

#### ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Если область допустимого изменения r ограничена лишь одими условием r ≥ r<sub>min</sub>, то движение частицы инфинитно – ее траектория приходит из бесконечности и уходит на бесконечность.

Если область изменения г имеет дое границы  $f_{min}$  и  $f_{max}$  и  $f_{max}$  с даяжение является финитным и траектория целиком лежит внутри кольца, ограниченного окружностями  $r = f_{min}$ Эго, однако, не означает, что траектория испременно является замизутой кривой. За врежя, в течение которого r изменяется от  $f_{max}$  до  $r_{min}$  и затем до  $f_{max}$  раднус-вектор повернется на уго  $A_{\phi}$  равивый согласно (14.7)

$$\Delta \varphi = 2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\frac{M}{r^2} \, dr}{\sqrt{2m (E - U) - \frac{M^2}{r^2}}} \,. \tag{14.10}$$

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



 $\Delta \phi := 2\pi m/n$ , гле m, n целые числа. Тогда через п повторений этого периода времени раднусвектор точки, сделав m полных оборотов, совпадет со своим первоначальным значением, т. е. траектория замкиется.

Однако такие случан исключительны, и при произвольном виде U(г) угол Аф не является рациональной частью от 2т. Поэтому в общем случае трасктория финитного движения не замкиута. Она бесчисленное число раз проходит через минимальое и максимальное расстояние (как, напри-

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

Существуют лиць два типа центральных полей, в которых все траектории финигных данжений замкнуты. Это поля, в которых потещилальная энергия частицы пропоршюпальна 1/ лиг <sup>27</sup>. Первый из этих случаев рассмотрен в следующем параграфе, а второй соответствует так называемому пространственному сещилялогоу (ск. заядачу 3 § 23).

ГГЛ. П.В.

#### Power density profile of dark matter (DM)

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

Influence radius of black hole

$$r_h = rac{GM_h}{\langle v_h 
angle} \sim 1 \; {
m pc}, \qquad \langle v_h 
angle \sim 10^2 \; {
m km/s}$$

 $\begin{array}{ll} \beta = 7/4 & - \text{ finite DM} \\ \beta = 1/2 & - \text{ infinite DM} & Zeld \\ \beta = 1.7 - 1.9 & - \text{ DM galactic halo} & G \\ \beta = 1 - 3 & - \text{ numerical DM halo simulation} \end{array}$ 

Gurevich 1964 Zeldovich & Novikov 1971 Gurevich & Zybin 1988 NFW 1995

#### Precession angle during one orbital period $\delta \phi$ Power DM profile $ho \propto r^{-eta}$

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)

$$\delta\phi = \frac{\partial}{\partial L} \left( \frac{2m}{L} \int_{0}^{\pi} r^{2}(\phi) \delta U d\phi \right)$$

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

◆□▶ ◆□▶ ▲目▶ ▲目▶ 目 ののの

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

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

VD & Yu.N.Eroshenko 2015

$$p = L^2/(GM_{\rm BH}m) = a(1 - e^2)$$
 — orbit parameter  
 $L$  — conserved angular momentum of star  
Hypergeomertic function

$${}_{2}F_{1}(a,b,c,z) = \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(b)\Gamma(c-b)} \int_{0}^{1} t^{b-1} (1-t)^{c-b-1} (1-tz)^{-a} dt$$

1. Gauss relations for the adjacent Hypergeomertic 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: $M_{\rm DM} = ?$

Total mass of DM inside sphere of radius *r* 

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

 $R_{\min}$  — minimal radius of DM distribution

DM fraction inside S0 star orbit

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

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

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



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  $\beta$ 



Colored region excluded by DM particles annihilation (neutralino)

SAC

# Mass fraction of DM $\xi$

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



Colored region excluded by DM particles annihilation (neutralino)

□ ▶ ▲□ ▶ ▲ 三 ▶ ▲ 三 ● の < @

### Sommerfeld enhancement

DM mass fraction  $\xi$  in dependence of  $\eta$ 

$$\langle \sigma \mathbf{v} \rangle = \langle \sigma \mathbf{v} \rangle_0 \left( \frac{\mathbf{v}_0}{\mathbf{v}} \right)^{\eta}$$



(□ ▶ ▲母 ▶ ▲目 ▶ ▲目 ▶ ▲日 ●

#### New projects of very large telescopes ø 39.3 m European Extremely Large Telescope (E-ELT), Chile ~ 2020



# New projects of very large telescopes

ø 30 m, 492 segments Thirty Meter Telescope (TMT), Hawaii  $\sim$  2021



#### New projects of very large telescopes USA, Australia, South Korea

 $\phi$  24.5 m (7  $\times \phi$  8.4 m) Giant Magellan Telescope (GMT), Chile  $\sim$  2020



#### **Results and Conclusion**

- Observations of nonrelativistic precession of the 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
- In the near future, modern telescopes will be able to measure the precession of the orbits of S0 stars or to obtain a strong bound on it