

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

# Galaktična črna luknja Strelec A\* (Sgr A\*)

**Avtor:** Primož Skale

**Mentor:** dr. Andrej Čadež

Seminar II

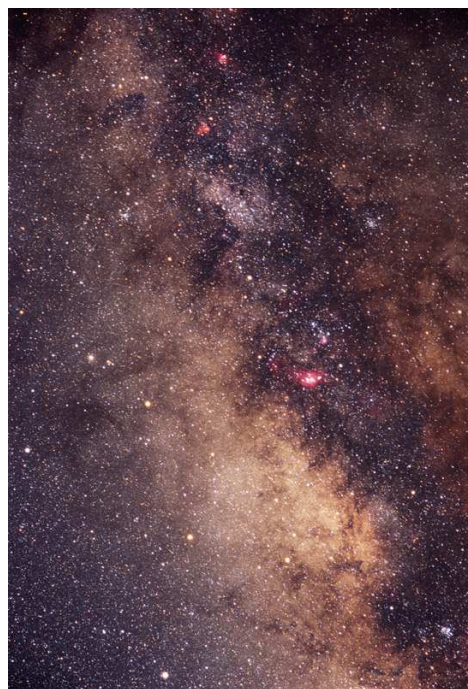
20 December 2006

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Porazdelitev temne mase v Galaktičnem jedru</b>	<b>5</b>
2.1	Ocena prvega reda . . . . .	5
2.2	Jeansova metoda . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Strelec A*</b>	<b>7</b>
3.1	Orbite zvezd v notranji kopici . . . . .	8
3.2	Pospeševanje zvezd v okolici Sgr A* . . . . .	9
3.3	Orbite zvezd okoli Sgr A* . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Zaključek</b>	<b>12</b>

## Povzetek

Jedro Galaksije, ki leži na razdalji 8 kpc od Sonca v smeri ozvezdja Strelec nam predstavlja edinstven laboratorij za raziskavo fizikalnih procesov, ki se odvijajo v bližini masivnih teles. Preučevanja z visokoločljivimi teleskopi v zadnjem desetletju so nam prinesla nepojemljive rezultate, ki kažejo na nedvomen obstoj masivne črne luknje z maso  $3 - 4 \times 10^6 M_{\odot}$  v središču, ki jo povezujejo z kompaktnim radio izvorom Sgr A\*. Preučevanja v bližnje IR področju so nam omogočila določitev posameznih orbit zvezd, ki krožijo okoli Sgr A\* in se ji približajo celo na razdaljo 45 AU. Raziskave opravljata v večini dve skupini, prva na Max Planck inštitutu, druga na univerzi v Kaliforniji.



Galaktično središče v vidni svetlobi.

# 1 Uvod

Na razdalji komaj 8 kpc<sup>1</sup> (26 000 svetlobnih let) leži Galaktični center, ki nam je najbližje jedro galaksije, celo 100- do 1000-krat bližje kot katerikoli drugi najbližji izvengalaktični sistem. Ta bližina nam predstavlja edinstveni laboratorij za raziskavo fizikalnih procesov, ki so v splošnem enaki v vseh galaktičnih sistemih, in to pri najboljši možni kotni ločljivosti. Raziskave zadnjih 10 ali 20 let so dale nedvomen dokaz za obstoj masivne črne luknje v središču Galaksije mase približno  $3 - 4 \times 10^6 M_{\odot}$ . V tesni povezavi z spektroskopskimi merjenji so rezultati pokazali, da naj bi v središču vsake masivne galaksije bivala črna luknja. Bližina jedra Galaksije in natančna merjenja nam omogočajo ne samo potrditev obstoja masivne črne luknje v jedru, temveč tudi merjenje in opazovanje podrobnih lastnosti sistema, kot so, masa, dinamika, rojevanje zvezd, ter sestava okolice.

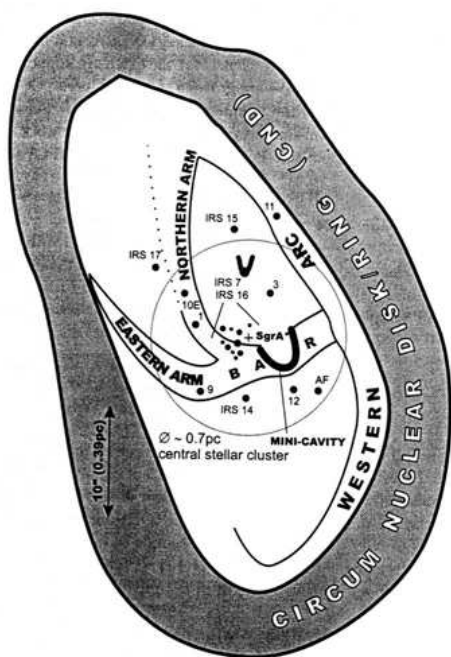
Plini in prah nam preprečujejo, da bi lahko videli Galaktično jedro v vidni ali ultravijolični svetlobi, zato smo omejeni na opazovanja v radijskem, infrardečem in rentgenskem področju elektromagnetnega spektra. Naša domača galaksija je navadna spiralna galaksija tipa Sbc. Centralnih nekaj 100 pc je območje polno enkratnih pojavov. Preučevanje pojavov v središču Galaksije je odličen način, da izdelamo model, ki bi veljal za katerikoli podobno galaksijo. V tem seminarju se bomo osredotočili na samo Galaktično črno luknjo in njene lastnosti, zato si v uvodu na hitro pogledimo še njeno okolico.

Centralnih nekaj parsekov je obkroženo z oblaki gostega ( $10^4 - 10^7 \text{cm}^{-3}$ ) in toplega (nekaj sto Kelvinov) molekulskega plina, ki ga imenujemo obhodni jedrski obroč [CND] (angl. *circum nuclear disk*), ki vsebuje približno  $10^4 M_{\odot}$  plina in prahu. Plin, ki pada proti središču Galaksije iz gostih molekulskih oblakov na razdalji večji od 10 pc od centra, je gonilna sila CND, ki pa se ne razteza dlje od 7 pc od središča in ima oster notranji rob pri razdaji 1.5 pc. Znotraj 1.5 pc od središča je v večini prazen prostor, kjer lahko obstaja le atomaren in ioniziran plin. Molekulski plin je izredno redek in ga skoraj ni. Nekaj tokov plina in prahu pada proti središču Galaksije iz notranjega robu CND, ki krožijo okoli središča in interagirajo z močnimi vetrovi, ki jih proizvajajo zvezde v bližini jedra. Tokovi ioniziranega plina tvorijo t.i. mini spiralo, močan termo-radijski izvor Sgr A West. Celotna masa plina in prahu v mini spirali ne preže nekaj deset sončevih mas. Mini spirala predstavlja najsvetlejši del izvora Sgr A West. Centralnih 1.5 pc je dokaj praznih, in vsebujejo zelo malo snovi, zato ta prostor predstavlja t.i. centralno votlino.

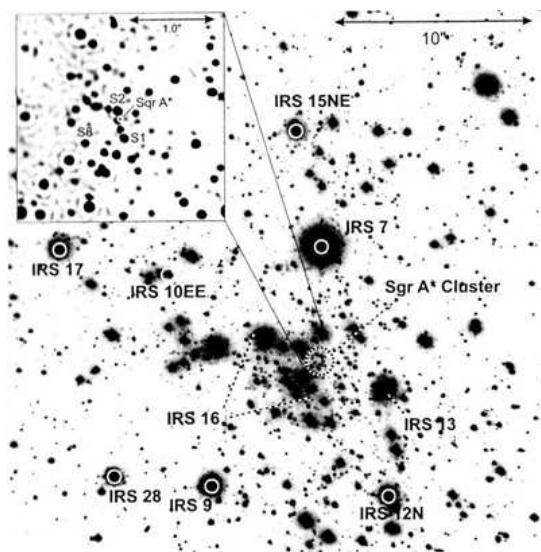
Opazovanja z adaptivno optiko na 8 metrskih teleskopih v bližnje infrardečem področju z visoko ločljivostjo nam omogočajo določitev porazdelitve zvezd v Galaktičnem centru, ki so svetlejše od  $\approx 18$  magnitudo v K-pasu (valovna dolžina  $2.2 \mu\text{m}$ ). Ta porazdelitev vključuje vse rdeče in večino modrih super orjakinj, ter vse zvezde glavnega pasu do nekako dveh sončnih mas. Čeprav je bilo preučenih že nekaj tisoč zvezd, ki ležijo v centralnih nekaj ločnih sekund od Galaktičnega centra se moramo zavedati, da vse ugotovitve ležijo le na preučitvi okoli 1% vseh zvezd v Galaktični zvezdni kopici. Na razdaljah  $\geq 0.5$  pc od središča Galaksije so zvezde porazdeljene na način, kot jim ga narekuje bližje-izotermalna kopica. Štetje zvezd kaže, da zvezdna prostorninska gostota pada z kvadratom razdalje  $\propto R^{-2}$ , v območju od  $100''$  do  $10''$  od jedra. Znotraj  $10''$  ( $1''$  ustreza razdalji  $0.039$  pc od središča Galaksije) število zvezd naglo pade, kar ustreza polmeru jedra celotne kopice okoli  $0.34 \pm 0.2$  pc.

---

<sup>1</sup> 1 pc - *parsek* je okrajšava za paralaktično sekundo. Uporablja se kot enota v astronomiji. 1 parsek je enak razdalji, na kateri bi bila zvezda s trigonometrično paralakso 1 ločno sekundo. En parsek je  $3086 \times 10^{16}$  m ali 206265 AU ali 3.26 svetlobnega leta. Najbližje zvezde so od nas oddaljene 1-2 parseka. Premer Galaksije je približno 30.000 parsekov.



(1)



(2)

**Slika 1:** Shematična slika različnih delov Galaktičnega jedra. Kraki ioniziranega plina mini spirale povezujejo centralno zvezdno kopico z obhodnim jedrskim obročem. Nekaj izrazitih zvezd je označenim z IRS (angl. *InfraRed source*) številko. Velikost centralne zvezdne kopice (dvakratna velikost jedra) je označena z točkastim krogom. Položaj močnega radijskega izvora Sgr A\* je označen z križcem.

**Slika 2:** Slika je bila posneta 10. maja 2003 v K-pasu ( $2.2 \mu\text{m}$ ) z VLT in pokriva centralnih  $\sim 1.2 \times 1.2$  pc Galaktičnega centra. Svetel izvor v bližina centra slike je super orjakinja IRS 7, ki so jo uporabili za kalibracijo adaptivne optike. Označeni sta kopici IRS 16 in IRS 13, ki predstavljata izvor HI/HeI emisijskih črt. Krog v središču slike predstavlja območje kopice zvezd, ki so v neposredni bližini Sgr A\* t.i. kopice Sgr A\*. Kvadrat v zgornjem levem kotu predstavlja območje  $\sim 0.08 \times 0.08$  pc kopice Sgr A\*. Položaj Sgr A\* je označen z belim krogom. Srednje svetli izvori (K  $\sim 14 - 15$ ) S1, S2 in S8 v bližini Sgr A\* so označeni z pripadajočimi imeni. Te zvezde in nekaj ostalih izvorov podobne svetlosti v bližini Sgr A\* so potencialne zvezde tipa O/B.

Znotraj nekaj ločnih sekund (okoli 0.1 pc) močnega radijskega izvora Sgr A\* (Stelec) se nahaja močan vrh števila zvezd, kar potrjuje teorijo o sestavi gostih zvezdnih sistemov okoli supermasivne črne luknje. V preteklosti, ko merjenja niso bila natančna, niso bili prepričani ali jedro Galaksije leži točno na Sgr A\* ali je malce stran. Novejša in natančnejša merjenja so potrdila, da leži center Galaksije točno na Sgr A\* in tako predstavlja središče naše Galaksije. Sgr A\* je supermasivna črna luknja, ki s svojo gravitacijo deluje kar na razdalji enega svetlobnega leta od središča.

Najsvetlejši izvor v središčnem parseku je rdeča superiorjakinja IRS 7, s temperaturo okoli 3400 K, ki leži nekako  $6''$  severno od Sgr A\*. Je spremenljivka z dolgo periodo in ima navidezno amplitudo okoli 6.5 v K-pasu. Dva ducata zvezd v centralnih nekaj ločnih sekund prevladujejo v izsevu svetlobe. To so vroče, masivne, svetle modre zvezde amplitude  $\sim 9 - 12$ , ki imajo izrazite HI/HeI emisijske črte. Ena izmed t.i. He-zvezd, IRS 16 SW, je po vsej verjetnosti utripajoča dvojna zvezda s periodo 9.72 dni z maso  $\leq 100 M_{\odot}$ . He-zvezde imajo površinsko temperaturo okoli 20000- 30000 K in so izvor močnih zvezdnih vetrov. Te zvezde so večinoma

del kopic IRS 16 in IRS 13 in so nastale približno pred 3 do 7 milijoni let. Zvezde z amplitudo  $\sim 14 - 15$  se večinoma nahajajo v območju 1" od Galaktičnega središča. Nekaj teh zvezd se giblje z projecirano hitrostjo, ki preseže  $1000 \text{ km s}^{-1}$  in celo kažejo znake pospeševanja.

Ker zvezde v središču Galaksije niso pod vplivom sil, ki jih povzročajo magnetna polja ali vetrovi, temveč le pod vplivom gravitacije, so idealen izvor za določitev oblike gravitacijskega potenciala v centru. Opazovanja nam omogočajo določitev položaja zvezd v neposrednji bližini Sgr A\* na nekaj mili ločnih sekund natančno. To nam je omogočilo natančno merjenje hitrosti in pospeškov posameznih zvezd v jedrski kopici. Merjenje pospeševanja nekaterih najbolj notranjih zvezd nam je potrdilo natančen položaj črne luknje. Prav tako je opazovanje orbit zvezd, ki so najbližje centralni črni luknji potrdilo obstoj le-te in zavrglo nekaj drugačnih teorij, ki so namesto črne luknje postavile kopice temnih objektov, ali zvezde sestavljene iz težkih, degeneriranih nevtrinov.

## 2 Porazdelitev temne mase v Galaktičnem jedru

Tridimenzionalne radialne in transverzalne hitrosti, ki jih lahko izluščimo iz spektroskopskih in vizualnih meritev nam dokazujejo možnost obstoja masivnega objekta v Galaktičnem jedru. Spodnja meja mase je ocenjena na  $\sim 10^5 M_\odot$  in vsi dosedanji poskusi določitve mase so ocenjeni na  $\sim 3 - 4 \times 10^6 M_\odot$ .

Zaradi prevelikih razdalj med galaksijami ne moremo neposredno opazovati gibanje posameznih zvezd v bližini jedra, ampak lahko merimo le hitrosti skupnine zvezd. Mase objekta okoli katerega krožijo zvezde ne moremo določiti po Keplerjevem zakonu, temveč s pomočjo statistične obdelave hitrosti večje skupine zvezd.

V nadaljevanju si bomo pogledali nekaj modelov, ki nam omogočajo grobo ocenitev mase.

### 2.1 Ocena prvega reda

Prva groba ocena mase in gostote temnega objekta se lahko oceni na način, da privzamemo da so najbolj notranje zvezde, ki potujejo z visoko hitrostjo, vezane na orbiti okoli objekta; da so njihove radialne hitrosti zanemarljive in da je njihova razdalja  $r$  do Sgr A\* enaka kar projecirani razdalji na ravnino neba  $p$ . Spodnjo mejo za maso lahko tako določimo kot:

$$M_{min}(p) \geq v_{sky}^2 p / 2G,$$

kjer je  $v_{sky}$  hitrost zvezde glede na ravnino ozadja in  $G$  gravitacijska konstanta.

Oceno mase lahko določimo z opazovanjem skupine zvezd ali pa posameznih zvezd. Ker sta  $p$  in  $v_{sky}$  le projekciji resničnih tridimenzionalnih količin ta ocena predstavlja spodnjo mejo. Izmerjene hitrosti  $v_{sky}$  so tipično reda nekaj sto km/s in spodnja meja je tako ocenjena na  $1 - 2 \times 10^6 M_\odot$ . Gostota centralnega območja pa se oceni kot:

$$\rho_{min} = 3v_{sky}^2 / (8\pi Gr^2)$$

Ker je prava razdalja  $r$  od središča do zvezde nasplošno neznan, se jo lahko deloma oceni z projecirano razdaljo  $p$ , ki privzame naključno porazdelitev razdalj:

$$r = \frac{4}{\pi} p$$

Minimalna gostota je tipično ocenjena na  $10^{12} M_\odot pc^{-3}$ .

Boljšo ocenitev mase lahko dobimo preko virialnega teorema ali z uporabo Bahcall-Tremaine masne ocenitve, ki uporablja projecirane količine:

$$M_{virial} = \frac{3\pi}{2G} \frac{\sum_i w(i)v_i^2}{\sum_i w(i)/p_i}$$

in

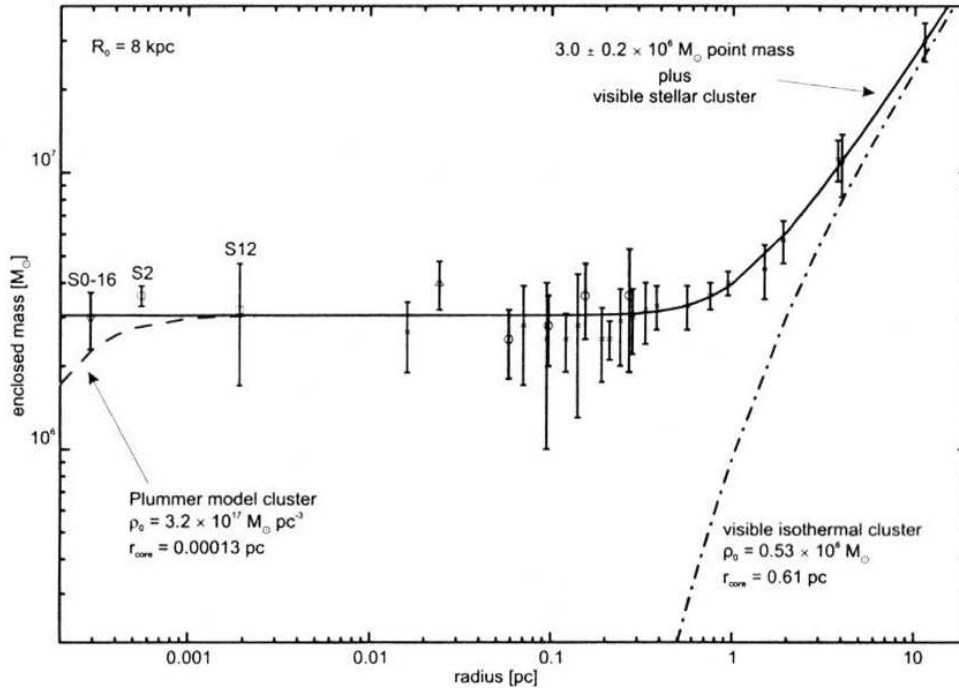
$$M_{BT} = \frac{16}{\pi G \sum_i w(i)} \sum_i w(i)p_i v_i^2,$$

kjer je  $p_i$  projicirana razdalja do zvezde  $i$  pri radiju  $r_i$ , utežena z  $w(i)$  in enodimenzionalno hitrostjo  $v_i$ . Obe oceni privzameta enakomerno porazdelitev zvezd. Virialni teorem dodatno privzame še izotropnost hitrostnega polja. BT masna ocenitev prav tako še dodatno privzame, da se zvezde gibljejo po izotropnih orbitah okoli temnega objekta. Žal pa ti privzetki niso izpolnjeni v neposredni bližini Galaktičnega jedra.

Z opazovanjem tangencialnih in radialnih hitrosti zvezd projiciranih na ravnino ozadja lahko ocenimo maso tudi z uporabo še bolj natančne metode. Leonard-Merrit masna ocenitev je manj občutljiva na možne anizotropnosti v zvezdni kopici. Za sistem s konstantnim izsevom<sup>2</sup> se masa lahko oceni z:

$$\langle M(r) \rangle = \frac{16}{G\pi} \langle R(\frac{2}{3}v_R^2 + \frac{1}{3}v_T^2) \rangle$$

Če to oceno opremimo s podatki, ki jih dobimo iz podatkov kopice Sgr A\* dobimo oceno centralne mase okoli  $2 - 4 \times 10^6 M_\odot$  v mejah projiciranega radija<sup>3</sup> približno 10 mpc.



**Slika 3:** Porazdelitev mase v središču Galaksije. Točke so določene po različnih metodah: Jeansova metoda, LM metoda, Keplerska metoda. Os  $x$  označuje razdaljo do Sgr A\*, os  $y$  pa maso. Črna zvezna črta predstavlja najboljše prilaganje podatkom. Rezultat prilaganja je točkasta masa ter kopica zvezd z ocenjeno maso  $3.0 \pm 0.2 \times 10^6 M_\odot$ .

<sup>2</sup>constant mass-to-light ratio - pomeni, da je masa določena preko izseva sistema.

<sup>3</sup>Odvisno od opazovalnih tehnik.

## 2.2 Jeansova metoda

Velika boljša pot ocenitve temne mase  $M(r)$ , ki je omejena z (tridimenzionalnim) radijem  $r$  je z uporabo Jeansove enačbe. Ta metoda nam omogoča izračun mase brez predhodne predpostavke o izotropiji hitrostnega polja. Jeansova enačba se lahko izpelje iz Boltmannove enačbe, ki ne upošteva trkov:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v\nabla f + \nabla\Phi\frac{\partial f}{\partial v} = 0,$$

kjer je  $f = f(t, r, v)$  število zvezd v faznem prostoru z prostornino  $d^3\vec{r}$  ob času  $t$  in  $\Phi$  gravitacijski potencial.  $v$  in  $r$  so vse tridimenzionalne količine. Če predpostavimo, da imajo vse zvezde enako maso  $m$ , potem velja za gravitacijski potencial sledeča enačba:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi Gm \int f(t, r, v)d^3v = 4\pi Gmn(r),$$

kjer je  $n(r)$  številna gostota zvezd. Če upoštevamo, da so v splošnem jedra galaksij sferično simetrična, in da imamo disperzijo hitrosti v smereh  $\phi$  in  $\theta$ :

$$\sigma_\phi^2(r) = \sigma_\theta^2(r)$$

in privzetek o ohranjanju števila zvezd ( $\partial f/\partial t = 0$ ), dobimo:

$$\Phi_r = \frac{GM(r)}{r} = v_{rot}^2(r) - \sigma_r^2(r) \left( \frac{d \ln n(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln \sigma_r^2(r)}{d \ln r} + 2\beta \right)$$

S tem lahko ocenimo maso  $M(r)$  omejeno z radijem  $r$  kot funkcijo večih spremenljivk:

$$M(r) = M(v_{rot}(r), \sigma_r(r), n_r(r), \beta),$$

kjer je  $v_{rot}$  povprečna hitrost kroženja svetlih zvezd okoli objekta. Ocena anizotropnosti hitrostnega polja  $\beta$  vključuje radialno in transverzalno hitrostno disperzijo:

$$\beta = 1 - \frac{\sigma_\phi^2(r)}{\sigma_r^2(r)}$$

Za izotropno hitrostno polje je  $\beta = 0$ .

## 3 Strelec A\*

Močan izvor Strelec A\* (Sgr A\*) je bil sprva odkrit v radijskem področju februarja leta 1974. Odkrila sta ga Bruce Balick in Robert L. Brown. Skoraj takoj je bil povezan z obstojem potencialne masivne črne luknje v središču Galaksije. Dokaz za to je postajal trdnejši, ko so bila narejena natančnejša merjenja in opazovanja porazdelitve mase v oddaljenosti enega parseka od središča z raziskavo dinamike plinov in zvezd. Zadnja merjenja potrjujejo obstoj supermasivnega objekta mase  $3 - 4 \times 10^6 M_\odot$ . Taka masa pa lahko obstaja le v obliki črne luknje, kar potrjujejo tudi astrofizikalne ugotovitve in opazovanja orbit zvezd, ki so v neposredni bližini Sgr A\*.

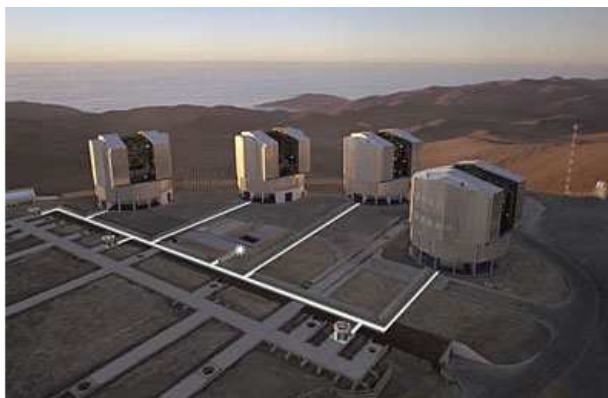
Balick in Brown sta uporabila Green Bank-ov interferometer v povezavi z 15 metriskim radijskim teleskopom na razdalji 35 km v zahodni Virginiji. Posamezni ločljivosti pri valovnih dolžinah 11 in 3.7 cm sta bili 0.7" in 0.3". Prvo uspešno odkritje Sgr A\* z VLBI (*very long baseline interferometry*, interferometrija z zelo dolgo osnovnico) je bilo maja leta 1975 z uporabo 242

km interferometrije med observatorijem Owens Valley Radio Observatory in NASA Goldstone 64 metrsko anteno pri valovni dolžini 3.7 cm.

Opazovanja v poznih devetdesetih letih prejšnjega stoletja so potrdila, da Sgr A\* leži natanko v centru Galaksije, saj je vsakršno koli gibanje Sgr A\* glede na ozadje manjše od  $20 \text{ km s}^{-1}$  (po zadnjih ocenah celo manjše od  $8 \text{ km s}^{-1}$ ). Ta majhna hitrost potrjuje domnevo, da leži Sgr A\* natanko na dinamičnem centru Galaksije.

V prejšnjem odseku je bilo podanih nekaj ocen za določitev mase temnega objekta, če smo opazovali skupino zvezd. Vendar pa lahko maso določimo tudi tako, da opazujemo orbito posamezne zvezde, ki kroži okoli temnega objekta. V zadnjem desetletju že tečeta dva projekta, ki imata glavno nalogo opazovanje gibanja posameznih zvezd, ki so v neposredni bližini Sgr A\*. Od leta 1992 skupina astrofizikov na Max Planck inštitutu (Eckart, Genzel, Ott, Schödel, et al.) opazuje gibanje zvezd s pomočjo ESO VLT teleskopov v Čilu, le nekaj let kasneje pa je druga skupina astrofizikov na univerzi v Kaliforniji (Ghez, Moriss, Becklin, et al.) uporabila Havajski teleskop Keck za enak namen.

Trenutno je bilo podrobno opazovanih že več kot 100 zvezd za katere imamo vse tri komponente hitrosti, ter več kot 1000 zvezd za katere sta znani le dve komponenti hitrosti.



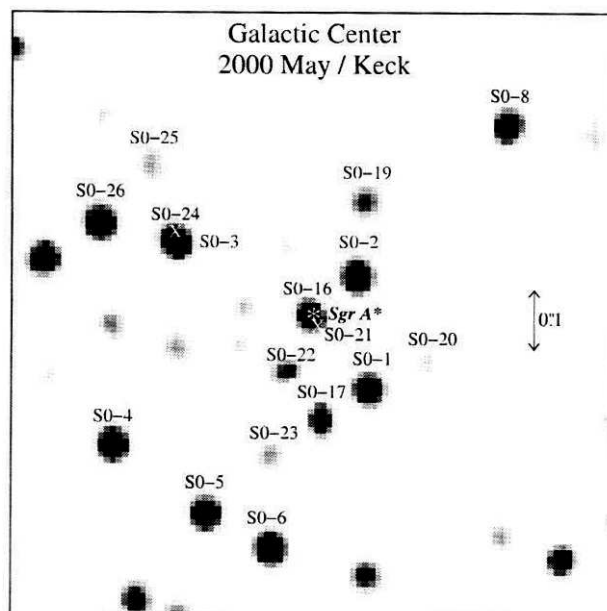
**Slika 3:** Sliki Keck in VLT teleskopov. ESO VLT (desno) se nahaja v Čilu na Paranalu. Vsebuje štiri 8.4 m teleskope. Keck-ova teleskopa (levo) se nahajata na Mauna Kea, Havaji oba s premerom zrcala 10 m.

### 3.1 Orbite zvezd v notranji kopici

Notranja kopica Galaktičnega jedra obsega približno  $1'' \times 1''$  vidnega polja. Nekatere zvezde v bližini Sgr A\* presežejo hitrost 25 mls/leto (1 mls - 1 mili ločna sekunda) oziroma približno 1000 km/s. Schödel je z pomočjo 10 letnih opazovanj leta 2003 končno določil gibanje posameznih zvezd, ki so bile bližje kot  $1.2''$  od Sgr A\*. Ti podatki so tudi potrdili radialno anizotropijo kopice zvezd v radiju  $1''$  od Sgr A\*.

V začetku sta bili odkriti dve zelo svetli in hitro gibajoči se zvezdi S1 in S2. Hitrost zvezde S1 je bila ocenjena na takrat impresionističnih 1400 km/s. Pri kasnejši analizi pa se je potrdilo, da je zvezda S2 celo prešla najbližjo točko k Sgr A\* aprila 2002 na razdalji komaj 122 AU z hitrostjo približno 6950 km/s.





**Slika 3:** Položaj zvezd v centralnih  $1'' \times 1''$  posnetih z Keckovim teleskopom maja leta 2000 pod vodstvom dr. Chezove.

Dve leti kasneje je skupina na univerzi v Kaliforniji (Chez et al.) objavila podatek o novo odkriti zvezdi S0-16 (ali S14 v nekaterih publikacij) za katero je potrdila celo bližje srečanje z Galaktično črno luknjo le na razdalji komaj 45 AU s hitrostjo 12000 km/s. Ta razdalja je ustrezala nekako  $600 \times R_s$ , kjer je  $R_s$  Schwarzcildov radij, ki ustreza črni luknji z maso približno  $4 \times 10^6 M_\odot$ . To opazovanje je tudi postavilo zgornjo mejo za razsežnost Galaktične črne luknje, ter dokončno odstranilo dvom o obstoju katerega koli drugega objekta namesto črne luknje.

### 3.2 Pospeševanje zvezd v okolici Sgr A\*

Prve meritve pospeševanja zvezd v okolici Sgr A\* je opravila skupina pod vodstvom doktorice Ghez že leta 2000. Meritve je dve leti kasneje potrdila skupina pod vodstvom doktorja Eckarta. Z opazovanjem gibanja zvezd lahko določimo njihove orbite in tudi kdaj se zvezda giblje hitreje ali počasneje po svoji orbiti.

Že dolgo je znano, da iz preleta sonde mimo planeta lahko določimo približno maso planeta. Na podoben način poskušata obe skupini določiti maso črne luknje okoli katere krožijo zvezde. Ker nekatere krožijo na zelo kratki razdalji od črne luknje je meritev pospeševanja zvezde v točki, ki je najbližja črni luknji najboljša saj je tam sprememba pospeška največja. Pospeške se v astronomiji meri v mili-ločnih sekundah na kvadratno leto ( $1 \text{ mls leto}^{-2} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ km s}^{-2}$ ). Zvezde, ki krožijo okoli Sgr A\* le na razdalji nekaj mili-ločnih sekund so podvržene pospeškom reda nekaj mls leto<sup>-2</sup>, kar ustresa približno enakemu pospešku kot ga čuti Zemlja na orbiti okoli sonca. Čeprav pravzaprav opazujemo projecirane pospeške na ozadje, vektor pospeška vseeno kaže proti gravitacijskem središču neznane mase (to je seveda črna luknja). To nam tako omogoča, da določimo natančen položaj črne luknje.

Merjenje orbitalnih pospeškov omogoča določitev zgornje limite mase črne luknje. Za zvezdo na projecirani razdalji  $R$  od črne luknje z opazovalnim projeciranim pospeškom  $a_{obs}$ , lahko celotno maso črne luknje določimo iz enačbe:

$$M = a_{obs} R^2 G^{-1} \cos^{-3}(\phi),$$

kjer je  $\phi$  kot med radialnim vektorjem do zvezde in ravnino ozadja (neba), ki vsebuje centralno maso. Če grafiramo spodnjo limito  $M \cos^3(\phi)$  kot funkcijo projeciranega radija, to pomeni, da smo privzeli, da vse zvezde krožijo v isti ravnini okoli Sgr A\*. Ta privzetek seveda ni splošno zagovarjan, in za bolj realne analize moramo privzeti, da orbite ne ležijo v isti ravnini. Člen  $(\cos \phi)^{-1}$  monotonno narašča z razdaljo od ravnine ozadja (neba) v kateri leži Sgr A\* in njegova srednja vrednost se lahko izračuna iz danih zvezdnih porazdelitev  $n(r)$ . Statistična ocena mase M se lahko torej izpelje z pomočjo srednjih vrednosti  $(\cos \phi)^{-1}$  za katerokoli privzeto porazdelitev  $n(r)$ .

Zvezda <sup>a</sup>	P [leta]	A [AU]	$T_0$ [leta]	e	q [AU]
S0-2 (S2)	$14.53 \pm 0.65$	$919 \pm 23$	$2002.308 \pm 0.013$	$0.867 \pm 0.0046$	$122.2 \pm 2.7$
S0-16 (S14)	$36 \pm 17$	$1680 \pm 510$	$2000.201 \pm 0.025$	$0.974 \pm 0.016$	$45 \pm 16$
S0-19 (S12)	$37.3 \pm 3.8$	$1720 \pm 110$	$195.758 \pm 0.050$	$0.833 \pm 0.018$	$287 \pm 25$
S0-20 (S13)	$43 \pm 45$	$1900 \pm 1400$	$2005.4 \pm 3.6$	$0.40 \pm 0.21$	$1160 \pm 490$
S0-1 (S1)	$190 \pm 180$	$5100 \pm 3200$	$1994.04 \pm 0.52$	$0.70 \pm 0.21$	$1530 \pm 180$
S0-4 (S8)	$2600 \pm 1.3 \cdot 10^5$	$30,000 \pm 9.5 \cdot 10^5$	$1987.1 \pm 7.5$	$1.00 \pm 0.15$	$140 \pm 270$
S0-5 (S9)	$9900 \pm 4.3 \cdot 10^5$	$70,000 \pm 2.1 \cdot 10^6$	$2004.5 \pm 4.7$	$1.0 \pm 1.3$	$3206 \pm 79$

**Tabela 1: Lastnosti posameznih orbit okoli Sgr A\*:**  $P$  je orbitalna perioda;  $T_0$  leto najbližje točke k Sgr A\*;  $A$  velikost glavne polosi;  $e$  ekscentričnost in  $q$  najbližja razdalja do Sgr A\*. Vse vrednosti so izračunane z upoštevanjem razdalje 7.94 kpc do Galaktičnega centra; <sup>a</sup> - drugo ime zvezde, kot jo poimenujejo Eckart, Genzel in Schödel et al. je zapisana v oklepaju.

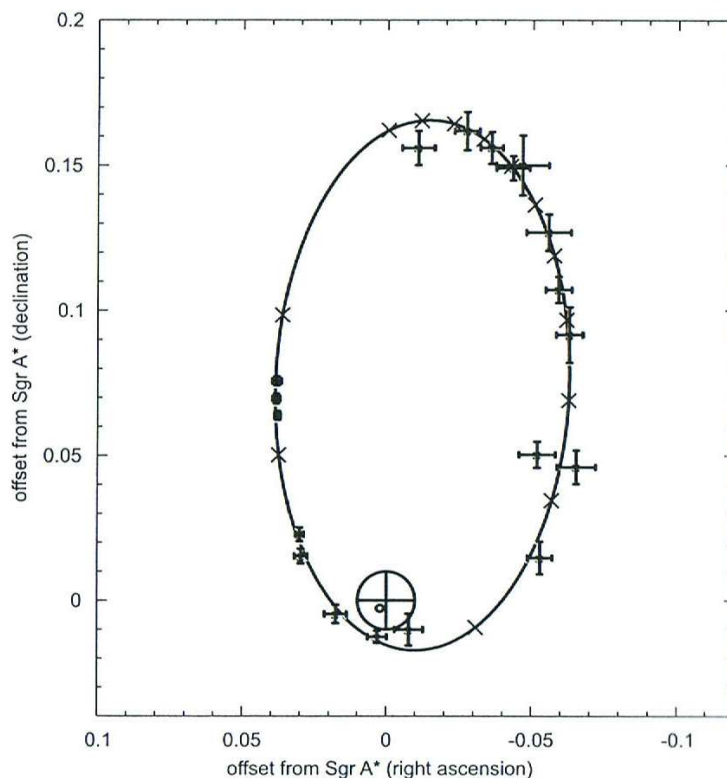
### 3.3 Orbite zvezd okoli Sgr A\*

Prve meritve orbitalnih pospeškov zvezd S1 in S2 so pokazale, da ima Galaktična črna luknja maso  $\sim 3 M_\odot$  in za en red povečalo minimalno masno gostoto centralne snovi od meritve, ki je opravljena s pomočjo meritev orbitalnih gibanj. Z privzetkom, da se zvezdi S1 in S2 gibljeta na zaprtih orbitah, so teoretično določili orbitalne periode in ekscentričnosti.

Eckart et al. je leta 2002 eksperimentalno dokazal, da je zvezda S2 zares na zaprti orbiti okoli Sgr A\* in je lahko podal prve ocene orbitalnih lastnosti. Ta raziskava je pokazala, da so zvezde S1, S2 in S8 na pretežno nagnjenih in ekscentričnih orbitah.

Opazovanje prehoda pericentra zvezde S2 je omogočilo Schödelu et al. (2002) in Ghez et al. (2003) izračun natančnih orbitalnih rešitev. Schödel je odkril, da zvezda kroži okoli centralne temne mase (t.j. črne luknje) z maso  $3.7 \pm 1.5 \times 10^6 M_\odot$  s periodo 15 let in s ekscentričnostjo 0.87. Pericenter je bil na razdalji komaj 17 svetlobnih ur (122.4 AU). Ghez et al. je leto kasneje prišla do podobnih izračunov. Istega leta je Eisenhauer et al. s pomočjo teh opazovanj določil razdaljo  $R_0$  do zvezde S2 in jo ocenil na  $7.9 \pm 0.4$  kpc, ki ustreza prvim nedirektnim opazovanjem. Ghez et al. in Schödel et al. sta oba leta 2003 določila, da center leži na istem položaju kot Sgr A\* ki je omejen v 2 mls, kar ustreza 0.08 mpc ali 2.2 svetlobnih ur na razdalji 8 kpc.

Slika (4) prikazuje opazovano orbito zvezde S2 glede na Sgr A\*. Črna elipsa je Keplerska orbita, ki jo je določil Eisenhauer et al. leta 2003.



**Slika 4:** Orbita zvezde S2, merjena med letoma 1992 in 2002.

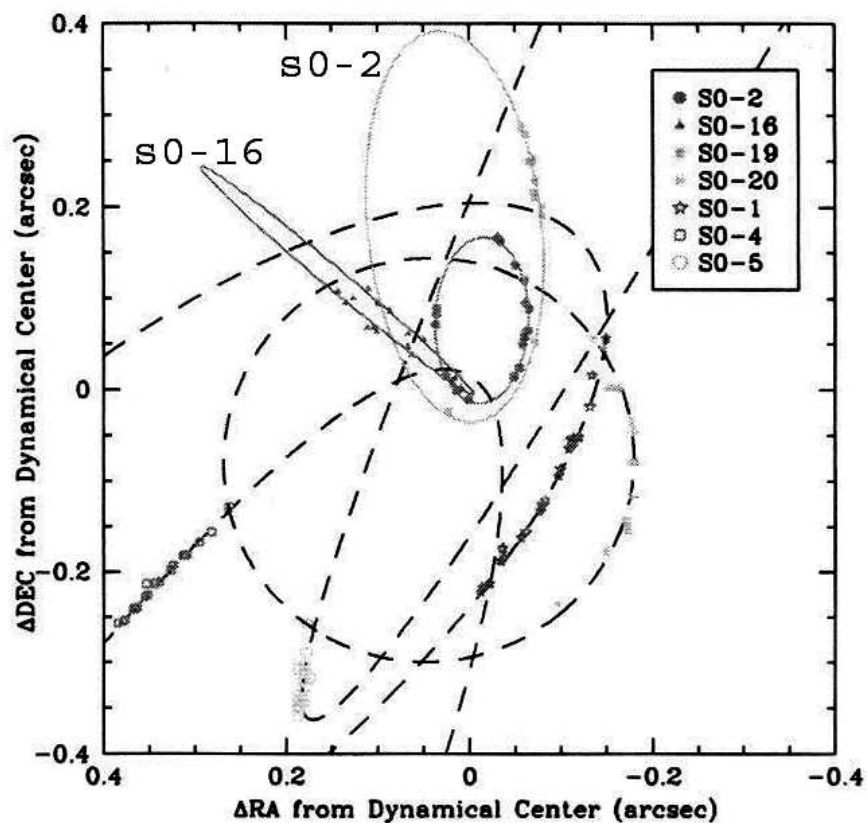
Orbita zvezde S2 omejuje koncentracijo centralne temne mase na le 114 AU oziroma komaj 600  $R_S$ , ki ustreza črni luknji z maso  $3 \times 10^6 M_\odot$ . Pozneje je odkritje zvezde S0-16 omejilo radij temne mase na največ 45 AU in določilo minimalno gostoto te mase na  $8 \times 10^{16} M_\odot pc^{-3}$ . Ta odkritev je dokončno ovrgla kakršno koli drugo hipotezo o drugem telesu namesto črne luknje v središču Galaksije saj bi bil predvideni življenjski čas za telo, ki ni črna luknja, s tako velikansko maso omejen na  $\sim 10^5$  let, kar pa je občutno manj kot pa že obstaja naša Galaksija.

Z določitvijo posameznih lastnosti orbite lahko iz podatkov in Keplerjevem zakonu izračunamo maso črne luknje  $M$ :

$$M = \frac{4\pi^2}{G} \times \frac{A^3}{P^2}$$

kjer ustrezne podatke lahko prebermo iz tabele (1).

Nasljednja slika prikazuje orbite nekaterih zvezd v neposredni bližini Sgr A\*. Ker je bila zvezda S0-16 odkrita pozneje od S0-2 je v starih poročilih ni zaslediti. Ghez et al. je obstoj potrdila šele leta 2004. Zvezda S0-16 se črni luknji približa mnogo bolj kot pa S0-2. To je lepo vidno tudi na sliki, kjer zelo ozka orbita predstavlja zvezdo S0-16.



Slika 7: Orbite nekaterih zvezd kot jih poroča Ghez et al. (2004).

## 4 Zaključek

Opazovanja orbit posameznih zvezd z visokoločljivimi teleskopi v bližnje IR področju so v zadnjih letih potrdila obstoj črne luknje v središču Galaksije in omejile njen radij na vsega 45 AU. Z prihajajočimi leti se bo tehnologija opazovanja izboljšala in nam ponudila še boljše izsledke in rezultate. Falcke et al. je že leta 2000 predlagal metodo, ki bi nam omogočila neposredno opazovanje akrecijskega toka okoli črne luknje. Za tako opazovanje bi potrebovali interferometer, ki bi deloval v pod milimetrskem področju, kar pa trenutno zaradi omejitve tehnologije še ni možno. Pričakovano je, da bomo že v naslednjih desetih letih tako tehnologijo razvili, in tako neposredno opazovali dogodkovni horizont Galaktične črne luknje. Le zamislimo si lahko kaj bi prinesla taka opazovanja. Do takrat pa bodo še vedno v polnem teku potekala opazovanja posameznih zvezd in njihove dinamike okoli Sgr A\*.

## Literatura

- [1] Andreas Eckart, Rainer Schödel, Christian Straubmeier: *The black hole at the center of the Milky way*, Imperial College Press, 2005.
- [2] A. M. Ghez, S. Salim, S. D. Hornstein, A. Tanner, J. R. Lu, M. Morris, E. E. Becklin, G. Duchene: *Stellar orbits around the Galactic center black hole*, The Astrophysical Journal, 620:744-757, 2005
- [3] A. M. Ghez, M. Morris, E. E. Becklin, A. Tanner, T. Kremenek: *The accelerations of stars orbiting the Milky way's central black hole*, Nature, 2000
- [4] D. C. Backer, R. A. Sramek: *Proper motion of the compact, nonthermal radio source in the Galactic center, Sagittarius A\**, The Astrophysical Journal, 524:805-815, 1999
- [5] D. Tsiklauri, R. D. Viollier: *Dark matter concentration in the Galactic center*, The Astrophysical Journal, 500:591-595, 1998
- [6] D. F. Torres, S. Capozziello, G. Lambiase: *A supermassive scalar star at the Galactic center?*, The Astrophysical Journal, 2000
- [7] M. J. Reid, R. N. Treuhaft: *The proper motion of Sagittarius A\*. First VLBA results*, The Astrophysical Journal, 524:816-823, 1999