



Lezione di Astronomia II - 7

Maurizio Tomasi (maurizio.tomasi@unimi.it)

18 Aprile 2024



Il centro galattico

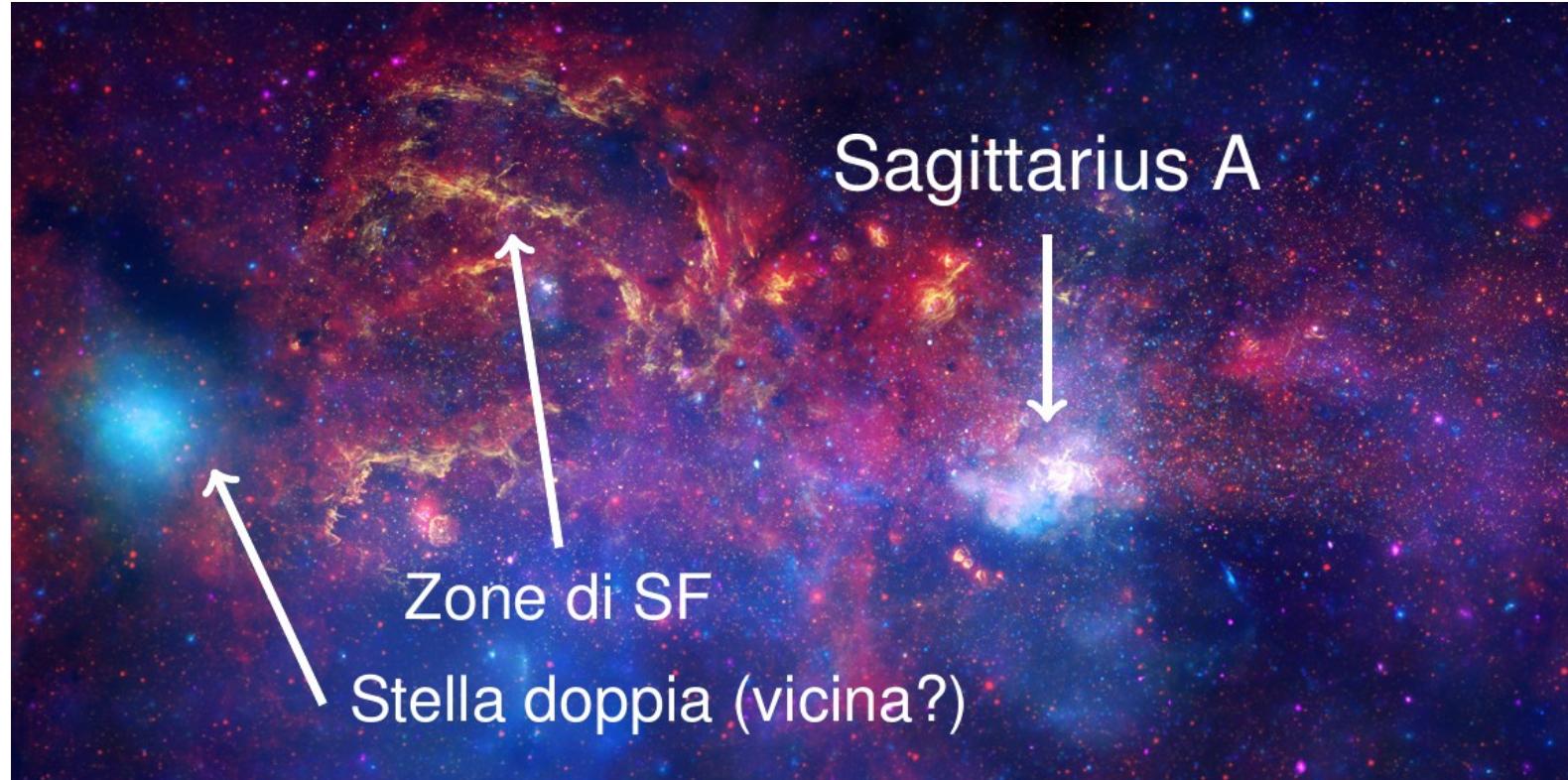


Studio del Centro Galattico

- È impossibile osservare il CG ($R < 500$ pc) nel visibile, a causa dell'estinzione della polvere. Le bande più usate sono due:
 1. Nel *radio* è visibile l'emissione continua di gas (HII) e l'emissione di righe da nubi molecolari e molecole interstellari;
 2. Nell'*infrarosso* è visibile la polvere (continuo) e gas neutri e ionizzati (righe).
- A causa della distanza (8 kpc), le osservazioni sono generalmente di limitata risoluzione: ad es. Spitzer risolve solo strutture più grandi di 0.1 pc.



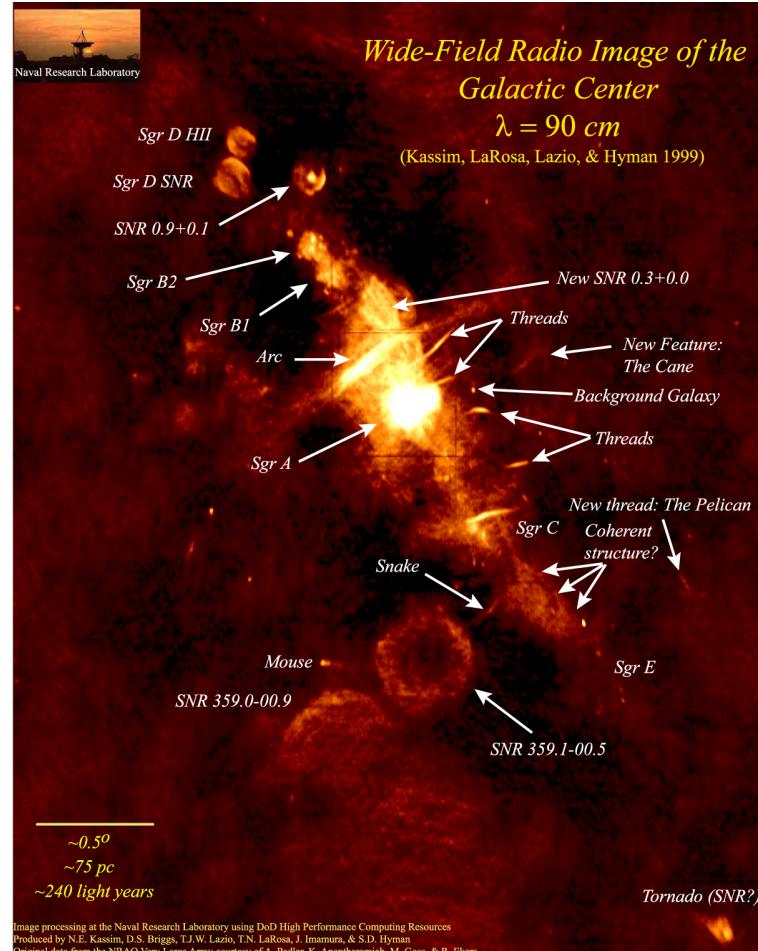
Immagine multibanda del CG



Dimensioni: $32' \times 16'$. Giallo: near-IR (Hubble), rosso: IR (Spitzer), blu: X ([Chandra](#)).



Il Centro Galattico nel Radio





Il buco nero centrale

- Nel 2022 le osservazioni dell'*Event Horizon Telescope* (EHT) hanno dimostrato che al centro della nostra Galassia si trova un buco nero di $\sim 10^6 M_\odot$, Sgr A* (a volte denominato CBH, *Central Black Hole*).
- L'esistenza dei buchi neri supermassivi è stata osservata prima di essere predetta, contrariamente ai buchi neri stellari. (Ma la prima immagine di un CBH è stata ottenuta solo nel 2019, quando EHT ha pubblicato le osservazioni del CBH della galassia M87, di $\sim 10^9 M_\odot$).
- Le caratteristiche del CBH della nostra Galassia erano però già state dedotte dall'orbita delle stelle vicine a Sgr A*.



Misurare la massa del CBH

- Per la terza legge di Keplero, più una stella è vicina a Sgr A*, minore è il suo periodo orbitale P :

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi}{MG},$$

con a semiasse maggiore dell'orbita e M massa di Sgr A*.

- Basta quindi osservare una stella vicina finché non completa un'orbita attorno a Sgr A*: dalla misura di P e di a si ottiene M .



Misurare la massa del CBH

- Risolvendo l'equazione della slide precedente per a , si ottiene

$$a = \sqrt[3]{\frac{GM P^2}{4\pi}}.$$

- Ipotizzando di poter osservare per ~ 20 anni i dintorni di Sgr A*, e che $M \approx 10^6 M_\odot$, allora compiranno almeno un periodo completo le stelle tali per cui

$$a < \sqrt[3]{\frac{6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot 4 \times 10^{36} \text{ kg} \cdot (6.3 \times 10^8 \text{ s})^2}{4\pi}} \approx 2 \times 10^{14} \text{ m}.$$



Misurare la massa del CBH

- Il limite diffrattivo di un telescopio è $\theta \sim \lambda/D$, dove λ è la lunghezza d'onda e D è la dimensione dello specchio.
- Per risolvere un moto $a = 10^{14}$ m a una distanza $R_0 = 8$ kpc e assumendo $\lambda \sim 2 \mu\text{m}$ (filtro K), occorre quindi che

$$\frac{\lambda}{D} = \frac{a}{R_0} \quad \Rightarrow \quad D = \frac{R_0 \lambda}{a} \approx \frac{8 \text{ kpc} \cdot 2 \mu\text{m}}{10^{14} \text{ m}} \approx 500 \text{ cm},$$

(Lo specchio più grande di Merate è il Ruths, da 134 cm!)



Studio del buco nero centrale

- Avere a disposizione uno specchio da 5 m non è sufficiente, perché c'è l'atmosfera che introduce molto disturbo e va corretto.
- Le prime misure delle orbite del centro galattico non erano quindi **astrometriche** ma **spettroscopiche**: misuravano le velocità radiali.
- Dalla distribuzione di velocità si possono comunque ottenere indicazioni importanti, confrontandole con simulazioni di orbite intorno a un corpo massivo.
- Potete vederne un esempio in Eckart, Genzel (1996): *Observations of stellar proper motions near the Galactic Centre* (purtroppo è dietro un *paywall*)



Prime misure

- Grazie all'impiego di ottiche adattive e all'uso di grandi telescopi, come il Keck alle Hawaii (10 m!), negli anni 2008–2009 è stato possibile misurare le prime orbite.
- Queste misurazioni vennero fatte dai gruppi di Reinhard Genzel (Max Planck Institut, Germania) e di Andrea Ghez (Università di Los Angeles, USA).
- Genzel e Ghez hanno vinto il premio Nobel nel 2020 (25% ciascuno del premio), insieme a Roger Penrose (Università di Oxford, 50% del premio), che ha sviluppato i modelli matematici che descrivono i buchi neri





MEASURING DISTANCE AND PROPERTIES OF THE MILKY WAY'S CENTRAL SUPERMASSIVE BLACK HOLE WITH STELLAR ORBITS

A. M. GHEZ,^{1,2} S. SALIM,^{1,3} N. N. WEINBERG,^{4,5} J. R. LU,¹ T. DO,¹ J. K. DUNN,¹ K. MATTHEWS,⁴ M. R. MORRIS,¹ S. YELDA,¹ E. E. BECKLIN,¹ T. KREMENEK,¹ M. MILOSAVLJEVIC,⁶ AND J. NAIMAN^{1,7}

Received 2008 June 17; accepted 2008 August 20

Take a New Screenshot

ABSTRACT

We report new precision measurements of the properties of our Galaxy's supermassive black hole. Based on astrometric (1995–2007) and radial velocity (RV; 2000–2007) measurements from the W. M. Keck 10 m telescopes, a fully unconstrained Keplerian orbit for the short-period star S0-2 provides values for the distance (R_0) of 8.0 ± 0.6 kpc, the enclosed mass (M_{bh}) of $4.1 \pm 0.6 \times 10^6 M_\odot$, and the black hole's RV, which is consistent with zero with 30 km s^{-1} uncertainty. If the black hole is assumed to be at rest with respect to the Galaxy (e.g., has no massive companion to induce motion), we can further constrain the fit, obtaining $R_0 = 8.4 \pm 0.4$ kpc and $M_{\text{bh}} = 4.5 \pm 0.4 \times 10^6 M_\odot$. More complex models constrain the extended dark mass distribution to be less than $3–4 \times 10^5 M_\odot$ within 0.01 pc, ~ 100 times higher than predictions from stellar and stellar remnant models. For all models, we identify transient astrometric shifts from source confusion (up to 5 times the astrometric error) and the assumptions regarding the black hole's radial motion as previously unrecognized limitations on orbital accuracy and the usefulness of fainter stars. Future astrometric and RV observations will remedy these effects. Our estimates of R_0 and the Galaxy's local rotation speed, which it is derived from combining R_0 with the apparent proper motion of Sgr A*, ($\theta_0 = 229 \pm 18 \text{ km s}^{-1}$), are compatible with measurements made using other methods. The increased black hole mass found in this study, compared to that determined using projected mass estimators, implies a longer period for the innermost stable orbit, longer resonant relaxation timescales for stars in the vicinity of the black hole and a better agreement with the $M_{\text{bh}}-\sigma$ relation.

Subject headings: black hole physics — Galaxy: center — Galaxy: kinematics and dynamics — infrared: stars — techniques: high angular resolution

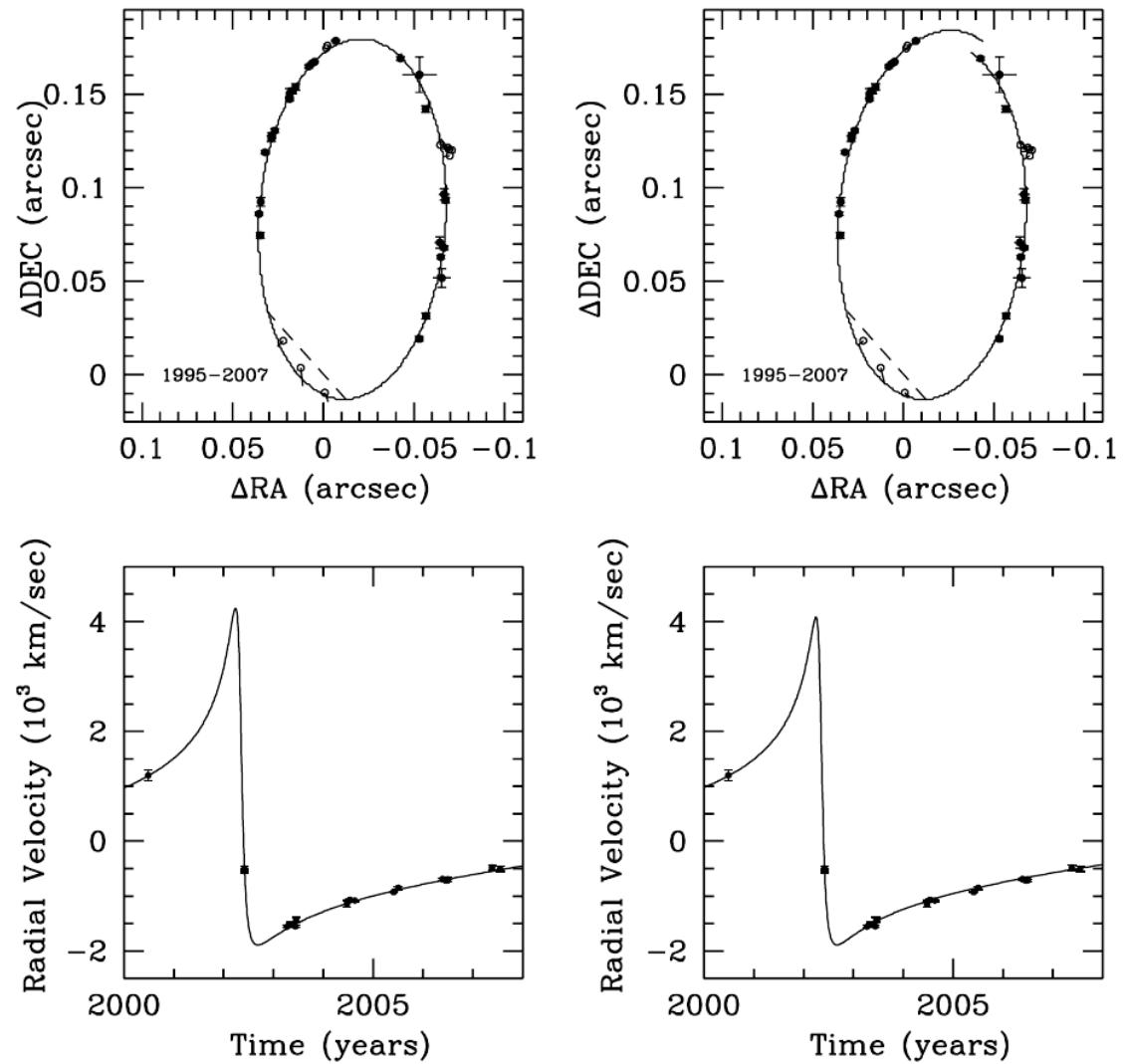


FIG. 9.—Best fit to the astrometric and RV data, assuming a Keplerian orbital model. The filled points were included in the formal fit, while the open points are measurements that are excluded due to source confusion. Uncertainties are plotted on all points, except the open/excluded points (here the uncertainties are comparable to the size of the points) for clarity. *Left:* To compare with what has been done in the past to estimate R_0 , we show the fit to the data with a 10-parameter model, which includes the black hole's mass (M_{bh}), distance (R_0), and location in the plane of the sky (X_0 , Y_0) as free parameters and which fixes the black hole's three-dimensional velocity (V_x , V_y , V_z) to zero. This results in a $\chi^2/\text{dof} \sim 1.4$. *Right:* The data are better reproduced by a 13-parameter model, which includes the black hole's mass (M_{bh}), distance (R_0), location in the plane of the sky (X_0 , Y_0), and three-dimensional velocity (V_x , V_y , V_z) as free parameters, and results in a $\chi^2/\text{dof} \sim 0.97$. Adding these extra free parameters, and in particular V_z , increases the uncertainties in the black hole's properties by a factor of 2.



TABLE 5
ORBITAL ELEMENTS FOR S0-2 AND THE IMPLIED BLACK HOLE PROPERTIES

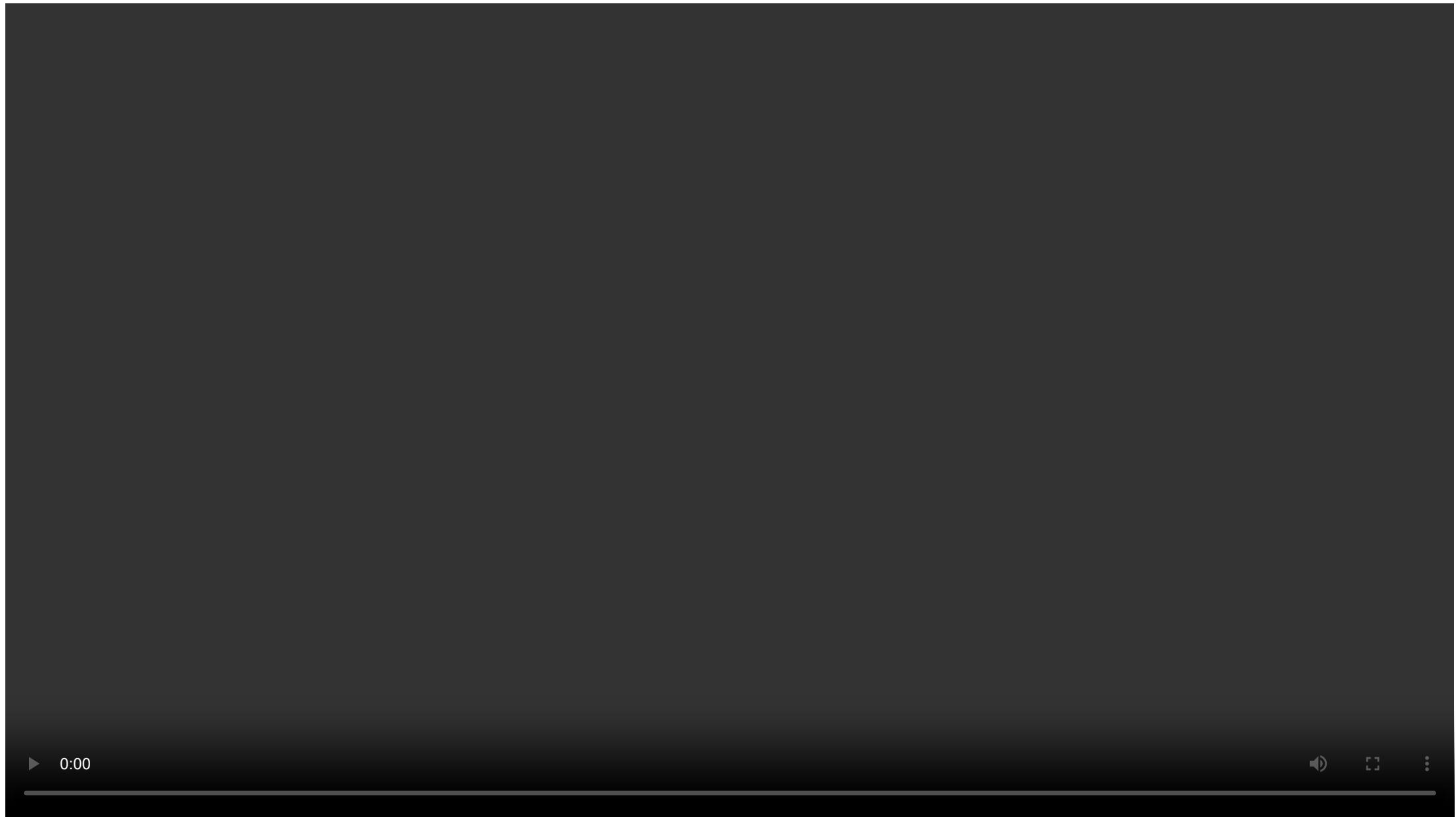
Parameter	$V_z = 0$ Case ^a	V_z Unconstrained Case
Distance (R_0) (kpc) ^b	$8.36 \pm^{0.30}_{0.44}$	$7.96 \pm^{0.57}_{0.70}$
Period (P) (yr)	15.78 ± 0.35	$15.86 \pm^{0.10}_{0.45}$
Semimajor axis (a) (mas)	$124.4 \pm^{2.4}_{3.3}$	$126.5 \pm^{1.8}_{5.0}$
Eccentricity (e)	0.8866 ± 0.0059	$0.8904 \pm^{0.0051}_{0.0075}$
Time of closest approach (T_0) (yr)	$2002.3358 \pm^{0.0065}_{0.0093}$	2002.342 ± 0.010
Inclination (I) (deg)	135.3 ± 1.3	134.6 ± 1.3
Position angle of the ascending node (Ω) (deg)	225.9 ± 1.3	$226.44 \pm^{0.71}_{1.4}$
Angle to periapse (ω) (deg)	65.18 ± 1.2	$66.0 \pm^{1.1}_{1.7}$
X dynamical center ($X_0 - X_{\text{Sgr A}^*-\text{radio}}$) (mas) ^{b, c}	$0.95 \pm^{0.46}_{1.4}$	$1.49 \pm^{1.1}_{0.87}$
Y dynamical center ($Y_0 - Y_{\text{Sgr A}^*-\text{radio}}$) (mas) ^{b, c}	$-4.8 \pm^{2.2}_{1.6}$	-5.4 ± 2.0
X velocity (V_x) (mas yr $^{-1}$)	-0.40 ± 0.25	$-0.47 \pm^{0.12}_{0.33}$
Y velocity (V_y) (mas yr $^{-1}$)	$0.39 \pm^{0.09}_{0.18}$	0.36 ± 0.12
Z velocity (V_z) (km s $^{-1}$)	...	$-20 \pm^{29}_{37}$
Mass (M_{bh}) ($10^6 M_\odot$)	$4.53 \pm^{0.34}_{0.55}$	$4.07 \pm^{0.52}_{0.78}$
Density (ρ) ($10^{15} M_\odot$ pc $^{-3}$)	$5.83 \pm^{0.28}_{0.97}$	$6.3 \pm^{0.56}_{1.4}$
Periapse distance (R_{\min}) (mpc)	0.570 ± 0.037	$0.535 \pm^{0.049}_{0.071}$

NOTE.—Parameters below the horizontal line are derived from those above the line and are provided for convenience.

^a Allowing for the uncertainty in the LSR in V_z (± 2 km s $^{-1}$; Gould 2004) produces results that are not distinguishable from those reported above for the $V_z = 0$ case.

^b The reference time for the position of the black hole, when the velocity is a free parameter, is J2000.0.

^c Uncertainties in the position of Sgr A * –radio are not incorporated into the uncertainties of X_0 and Y_0 .





Osservazione del CBH

- Le osservazioni di Genzel e di Ghez hanno portato a stimare una massa $M_{\text{CBH}} \approx 4 \times 10^6 M_\odot$.
- Questa corrisponde a un raggio di Schwarzschild pari a

$$r_s = \frac{2GM_{\text{CBH}}}{c^2} \approx \frac{2 \cdot 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot 1.6 \times 10^{37} \text{ kg}}{9.0 \times 10^{16} \text{ m/s}} = \\ \approx 2.4 \times 10^{10} \text{ m} = 0.16 \text{ AU.}$$

- Il CBH ovviamente non è visibile, ma ci si aspetta che sia visibile l'inviluppo di gas caldo per $r \gtrsim 3r_s$



Event Horizon Telescope

- Usiamo di nuovo la relazione $\lambda/D \sim 3r_s/R_0$ per stimare le dimensioni del telescopio necessarie a vedere il disco di gas caldo:

$$D = \frac{R_0 \lambda}{3r_s} \approx \frac{8 \text{ kpc} \cdot 2 \mu\text{m}}{5 \text{ AU}} \approx 660 \text{ m.}$$

Questo è assolutamente impossibile!

- L'Event Horizon Telescope è una collaborazione che ha sfruttato l'interferometria per ottenere un'immagine del CBH. Come hanno fatto?



Interferometria

- L'interferometria è una tecnica che consiste nel raccogliere il segnale di diversi telescopi e combinarlo in fase.
- La risoluzione ottenibile è sempre $\theta \sim \lambda/D$, ma in questo caso D è la distanza tra telescopi!
- Purtroppo la coerenza di fase richiede che eventuali difetti delle guide ottiche siano molto inferiori alla lunghezza d'onda, il che lo rende indicato solo per osservazioni nelle microonde e nel radio.
- Questo è però un problema!



Interferometria per il CBH

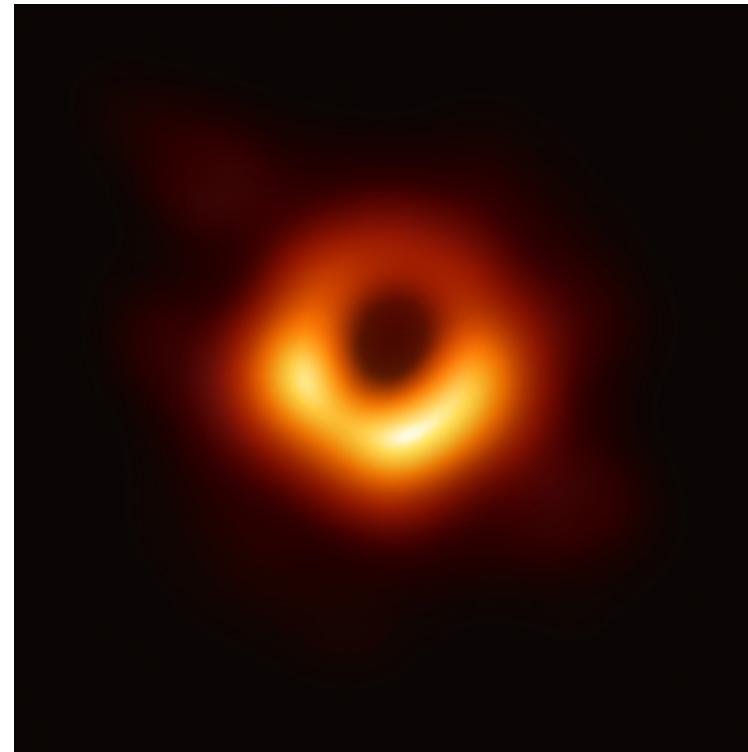
- Se aumentiamo λ , aumentano anche le dimensioni D necessarie a ottenere la risoluzione desiderata! EHT ha fatto le misure con $\lambda = 1.3$ mm, quindi

$$D = \frac{R_0 \lambda}{3r_s} \approx \frac{8 \text{ kpc} \cdot 1 \text{ m}}{5 \text{ AU}} \approx 4 \times 10^5 \text{ m} = 430 \text{ km.}$$

- Per EHT è stato quindi necessario operare telescopi che coprissero una buona parte delle terre emerse!



CBH di M87 (10 aprile 2019)



Perché il buco nero di M87 è stato misurato prima?

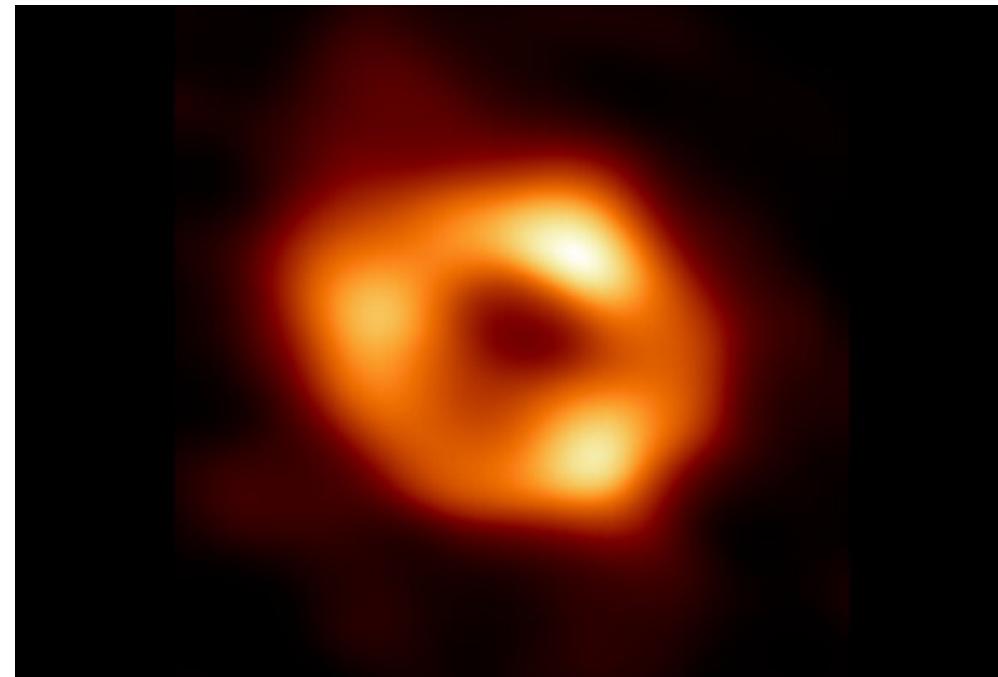


CBH a confronto

- Il CBH di M87 è 1000 volte più lontano di Sagittarius A* (16 Mpc contro 8 kpc).
- Però non si trova sul piano galattico, quindi l'oscuramento delle polveri è inferiore (anche perché è una galassia ellittica).
- Inoltre il buco nero è 1000 più massivo, il che vuol dire che r_s è 1000 volte maggiore:
 1. Il diametro apparente è lo stesso;
 2. Il periodo orbitale del gas è $P \propto r_s^{3/2} / M^{1/2}$, quindi $P' = 10^3 P$: il gas impiega diversi giorni anziché decine di minuti a orbitare, e l'immagine risulta meno sfuocata.



Sagittarius A* (12 maggio 2022)





Easter lecture di Genzel

Reinhard Genzel: A 40 year Journey



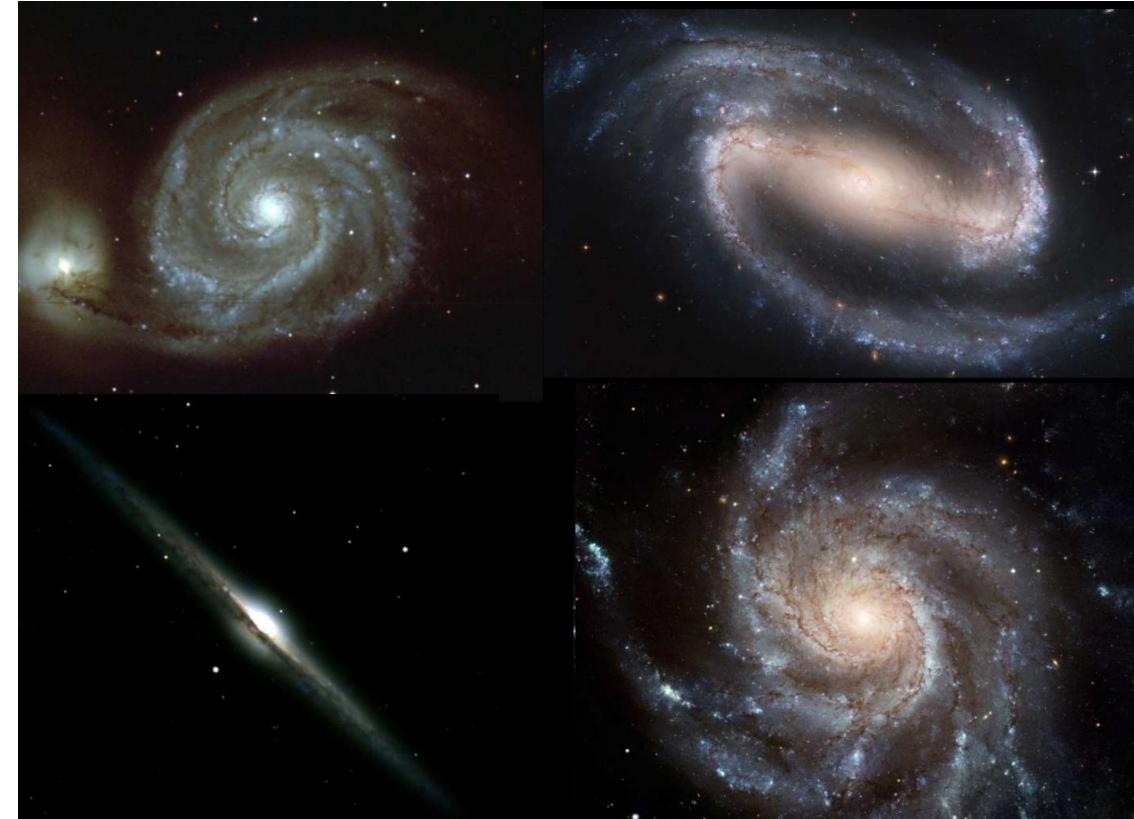
[Testing the Massive Black Hole Paradigm in the Galactic Centre \(Bologna, 2022\)](#)



Osservare la Via Lattea



Aspetto esterno della Via Lattea

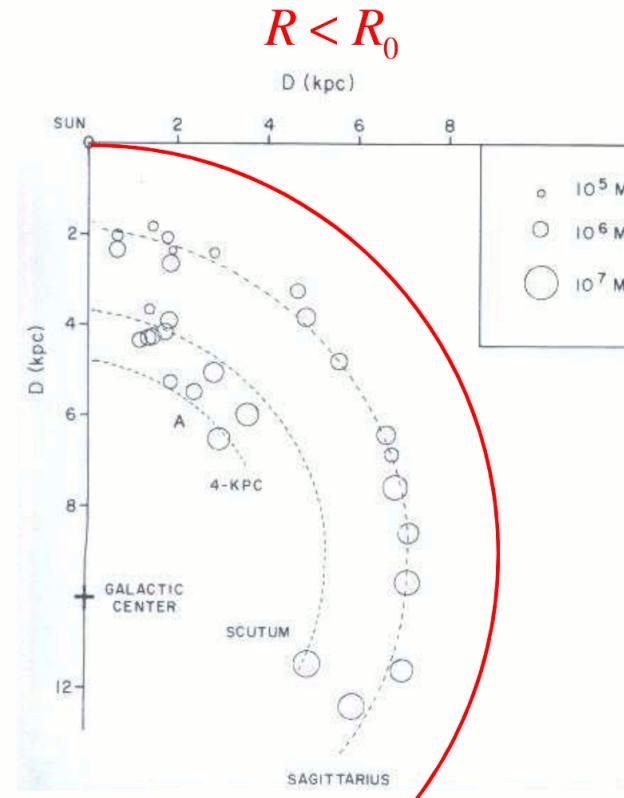


Abbiamo l'evidenza che esistano galassie con bracci avvolti in spirale. È così anche per la Via Lattea?



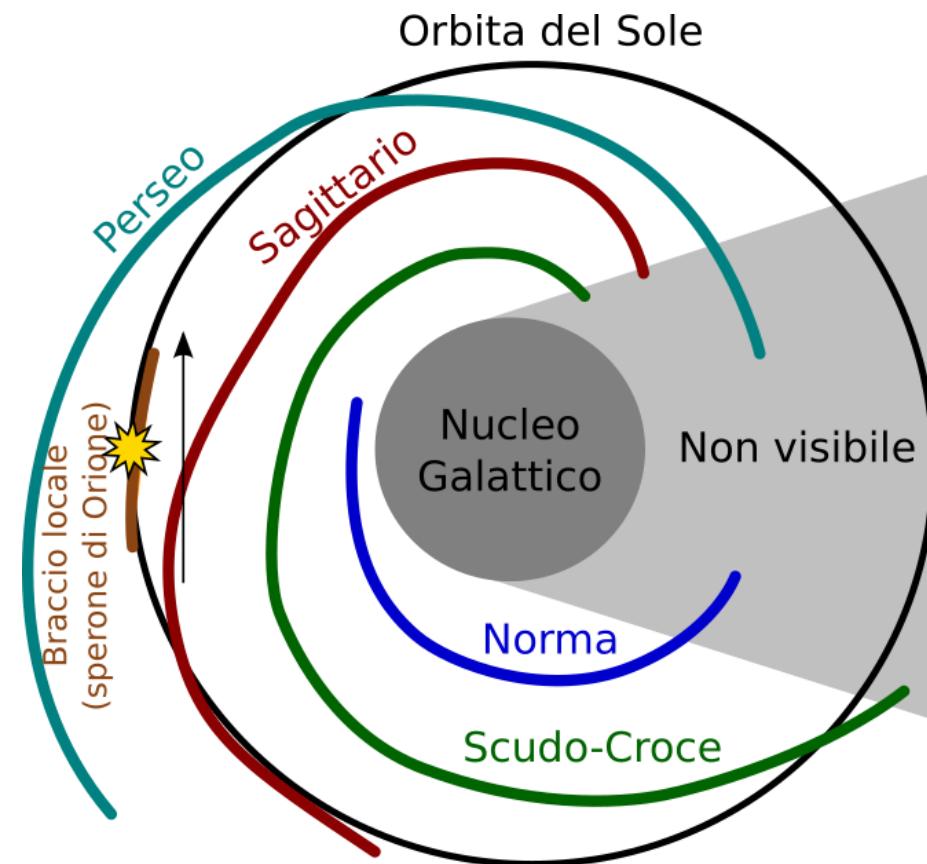
Aspetto esterno della Via Lattea

Studiando nubi molecolari giganti si intuisce che anche la Via Lattea possieda strutture simili.



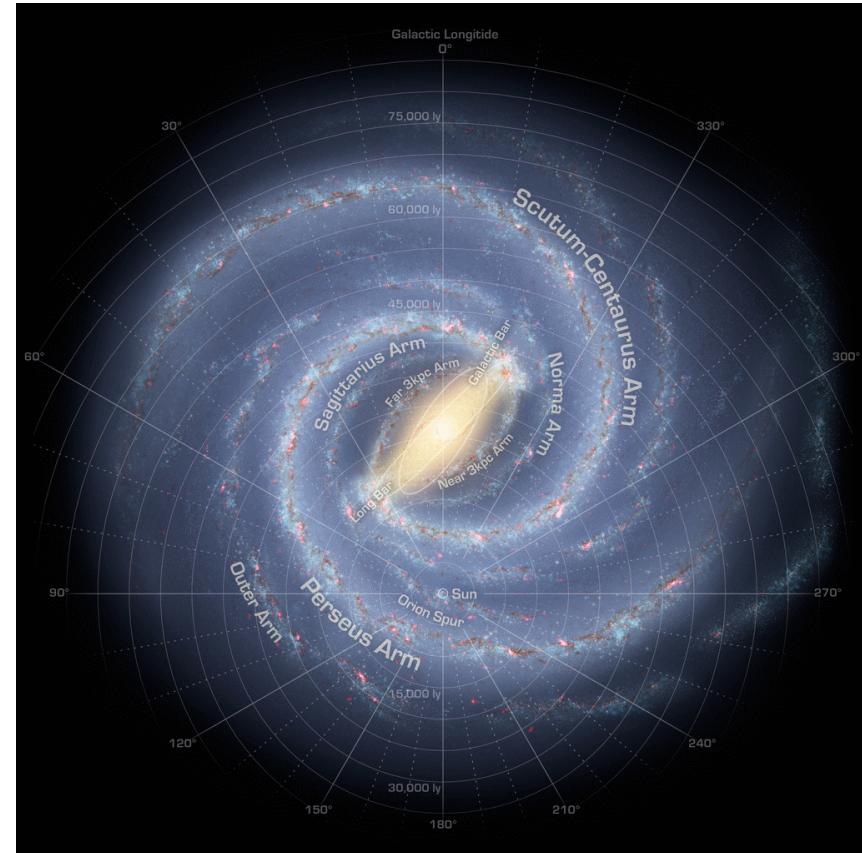


Aspetto esterno della Via Lattea





Spitzer 2008



Come siamo arrivati a scoprire che la via Lattea apparirebbe davvero così ad un osservatore esterno?



Thomas Wright (1711-1786)

- Matematico, astronomo, architetto e progettista di giardini
- Nel libro *An original theory or new hypothesis of the Universe* (1750) espone un'originale teoria cosmoteologica:
 - Molti sistemi solari;
 - Stelle invisibili;
 - Distribuzione a simm. sferica.

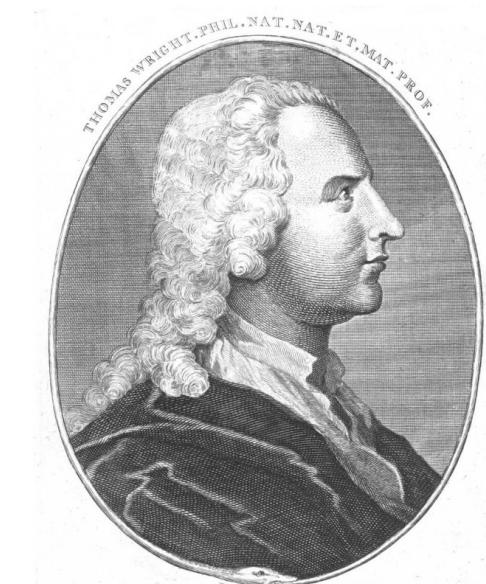
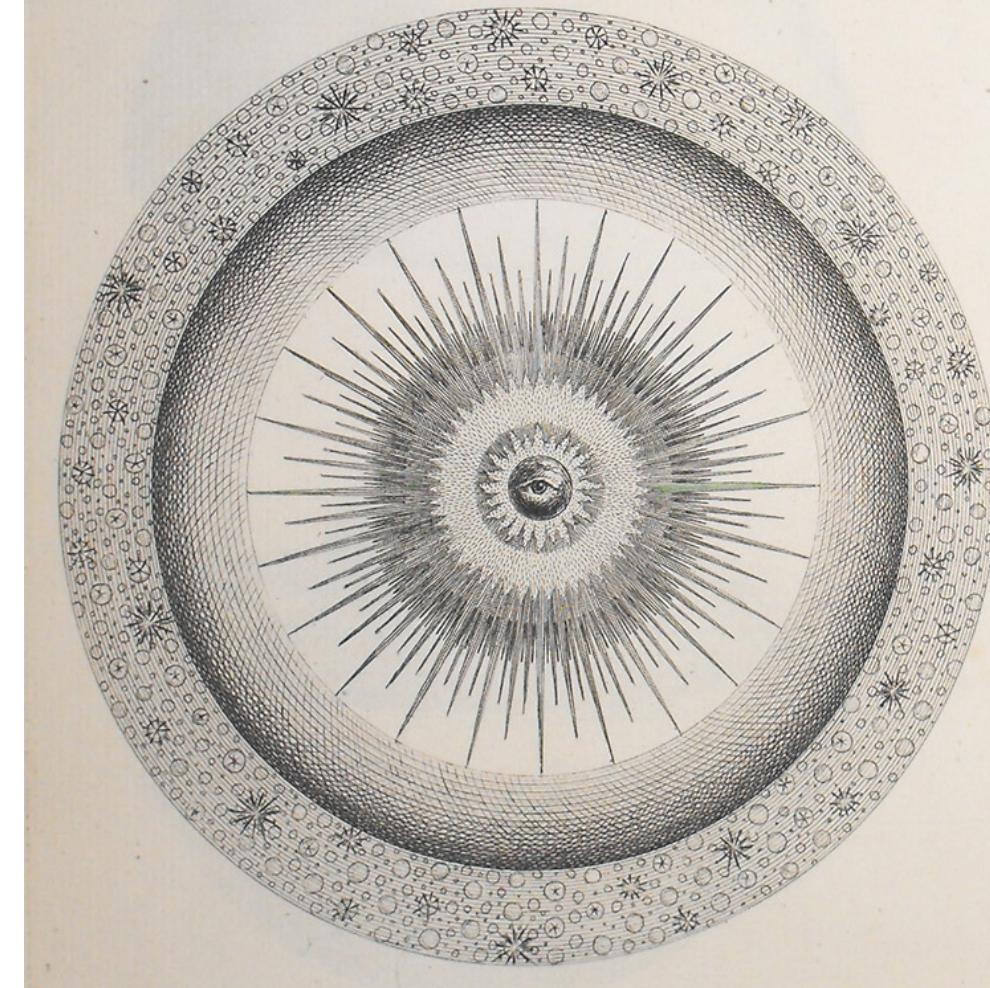
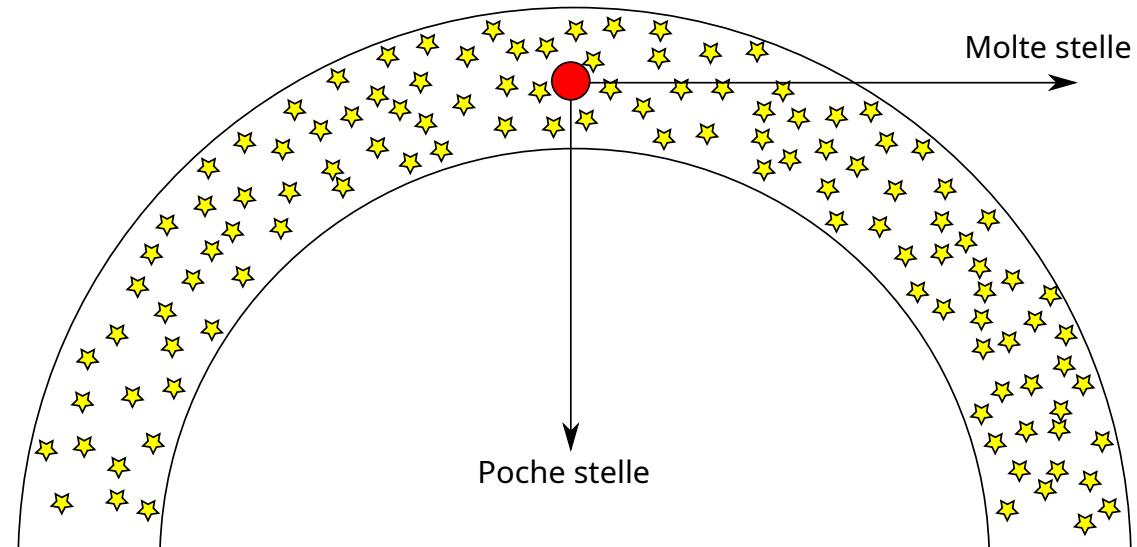




PLATE XXV.

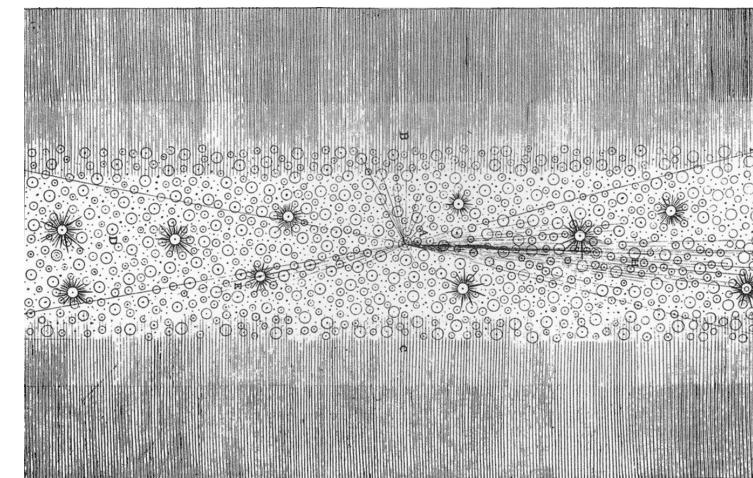




Il modello spiega la forma apparente della Via Lattea. Inoltre ipotizza che tutte le stelle abbiano la medesima luminosità: quelle più distanti sono dunque invisibili.



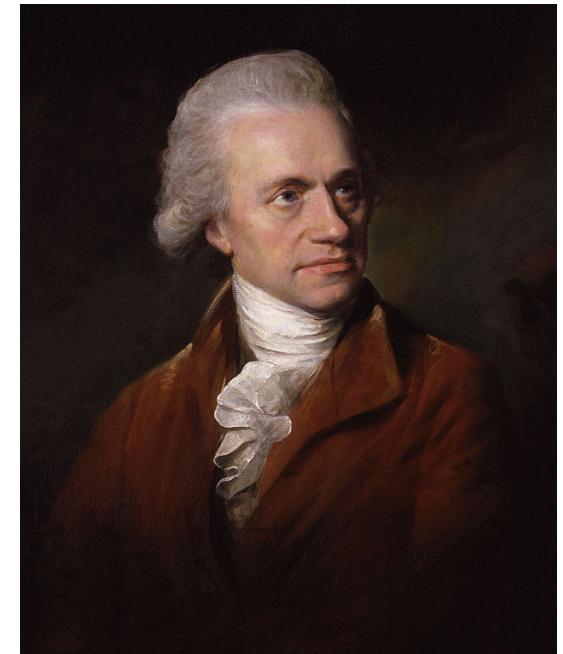
- Nel lavoro *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (1755), Immanuel Kant cita esplicitamente Wright.
- Si basa però su una recensione del lavoro di Wright che fraintende il senso dell'immagine seguente:

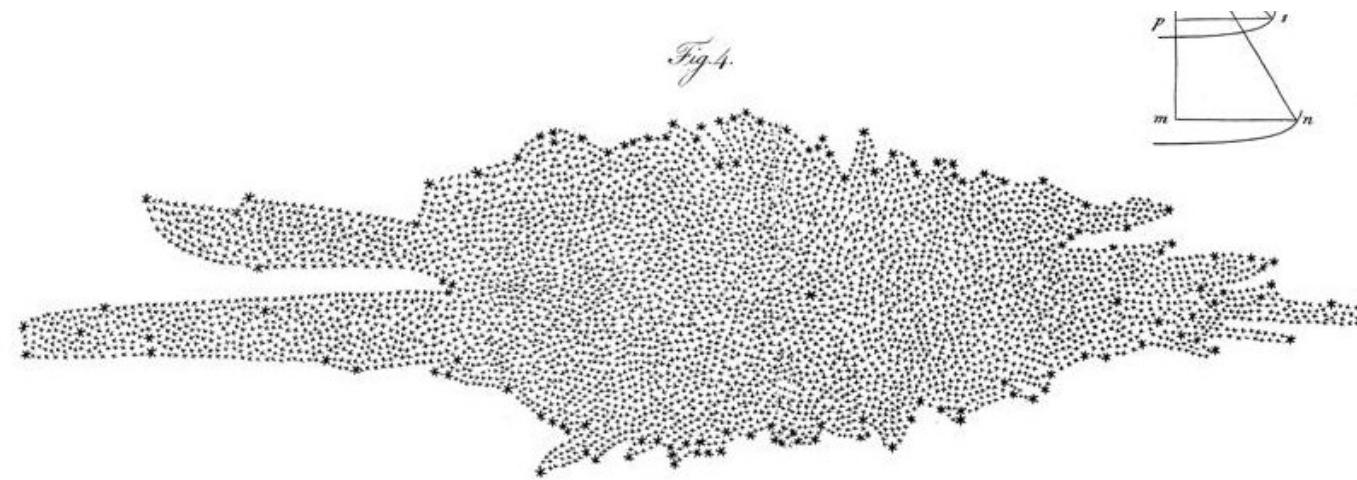




William Herschel (1738–1822)

- Musicista convertito all'astronomia.
- Lui e i fratelli Alexander e Caroline sono stati formidabili costruttore di telescopi, che costruivano per sé stessi e per la nobiltà.
- A differenza di Wright, il suo modello è strettamente connesso alle osservazioni (che faceva lui stesso).



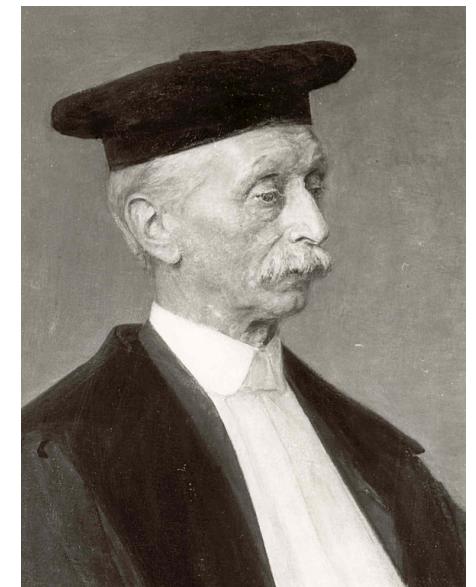


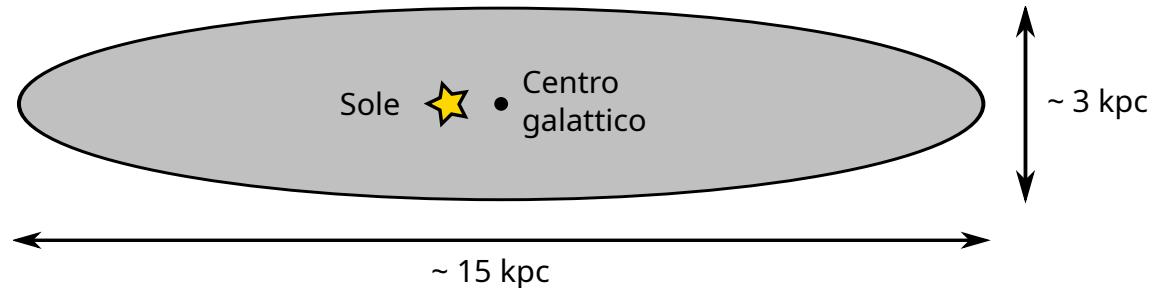
- Propone una struttura piatta per la Via Lattea (*On the construction of the Heavens*, 1802)
- Assume che le stelle siano distribuite con densità numerica n costante, e dalla misura della densità colonnare n_{col} calcola la profondità $l = n_{\text{col}}/n$.
- La forma è basata su conteggi di stelle in 675 regioni di cielo (alcuni punti sono media di più osservazioni). Il Sole si trova approssimativamente al centro.



Jacobus Kapteyn (1851-1922)

- In *First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system* (1922) usa le parallassi e criteri statistici per stimare la forma della Via Lattea.
- Sottostima molto l'arrossamento, e il suo modello è accurato solo ad alte latitudini Galattiche.







Harlow Shapley (1885-1972)

- Stima la distanza degli ammassi globulari usando le RR Lyrae.
- Non corregge per l'assorbimento interstellare
- Intuisce la struttura della Via Lattea e la posizione del Sole.





Conclusione



Conclusione

- Vi raccomando di pensare **subito** a dei commenti liberi relativi a queste lezioni da inserire nei questionari della didattica!
- Domani ci sarà la lezione *jolly* su come si scrive un testo scientifico. Vi chiederei di iniziare un quarto d'ora prima, alle 8,45, in modo da essere sicuri di finire alle 10,30.
- A partire da settimana prossima, la dott.ssa Mariachiara Rossetti (INAF di Milano) terrà una serie di lezioni sull'astrofisica galattica.