

illustrazioni create da Alice Beniero,
per il libro "Apri gli Occhi al Cielo"
Mondadori Ragazzi

(ASTRO)FISICA DEI BUCHI NERI

TULLIA SBARRATO
INAF - OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI BRERA



OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI BRERA

la più antica istituzione scientifica ancora attiva di Milano

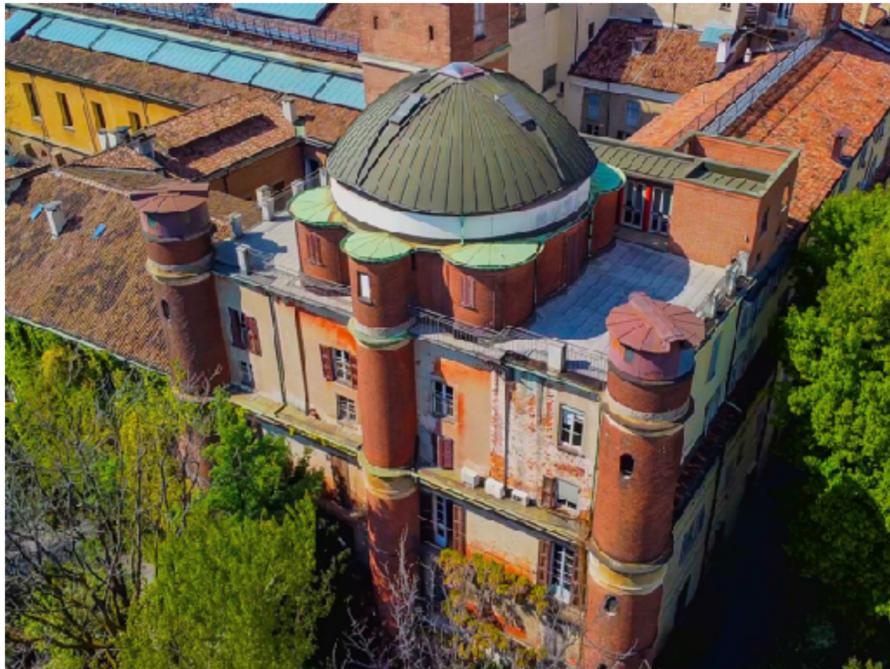
1762: Padre Lagrange istituisce a Palazzo Brera un istituto per l'osservazione astronomica professionale

1764: Padre Ruggero Boscovich costruisce la prima specola

1860-1900: Giovanni Virginio Schiaparelli studia stelle doppie, comete e Marte

1923: gran parte delle attività scientifiche sono trasferite a Villa San Rocco (Merate)

1999: OAB confluisce nell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)



SEDE DI BRERA

- telescopio Merz rifrattore voluto e utilizzato da Schiaparelli, in particolare per le osservazioni di Marte
- MusAB
- attività di ricerca
- divulgazione e attività educativa



SEDE DI MERATE

- due telescopi degli anni '20 e '40
- gran parte delle attività di ricerca
- sviluppo tecnologico di specchi e tecnologie per telescopi



(ASTRO) FISICA DEI BUCHI NERI

fisica dei buchi neri

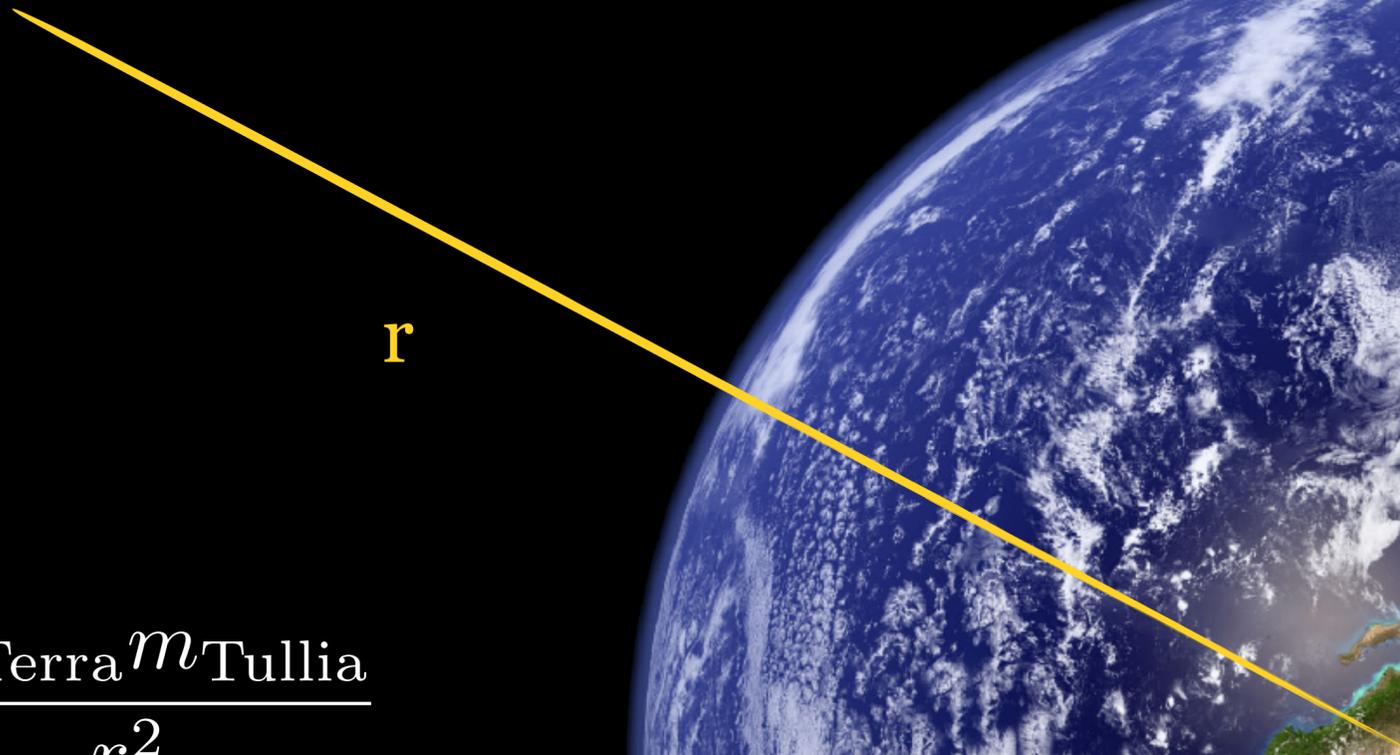
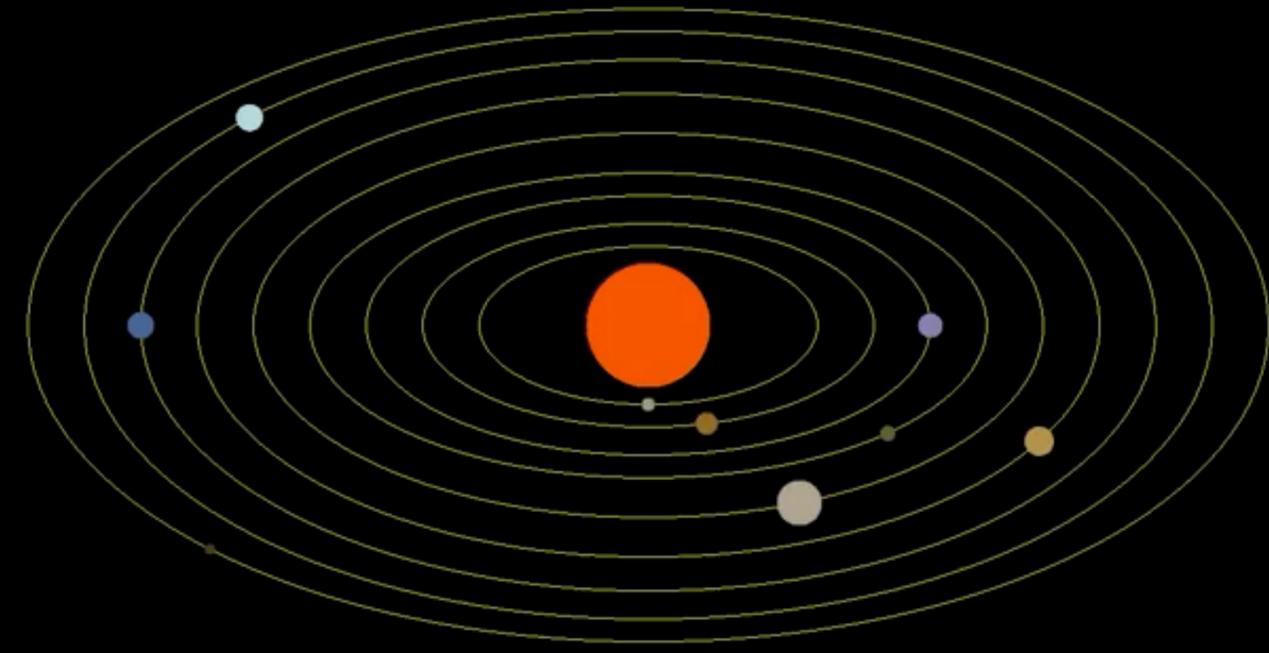
astrofisica dei buchi neri e "osservazioni":

- buchi neri stellari
- buchi neri supermassicci

CAMPO DI RICERCA ANCORA MOLTO APERTO ...

BUCHI NERI
=
GRAVITÀ ESTREMA

GRAVITÀ: FORZA DI NEWTON



r

$$F_{\text{grav}} = G \frac{M_{\text{Terra}} m_{\text{Tullia}}}{r^2}$$



RELATIVITÀ GENERALE

risolvere le mancanze della relatività Galileiana

spiegare fenomeni astrofisici non compresi

NUOVA FORMULAZIONE DELLA GRAVITÀ

non esiste una “forza” di gravità, ma i corpi si muovono naturalmente in uno spazio che viene curvato e modificato dalla presenza di altre masse

su piccola scala, la relatività generale è ben descritta dalla gravità Newtoniana



RELATIVITÀ GENERALE

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

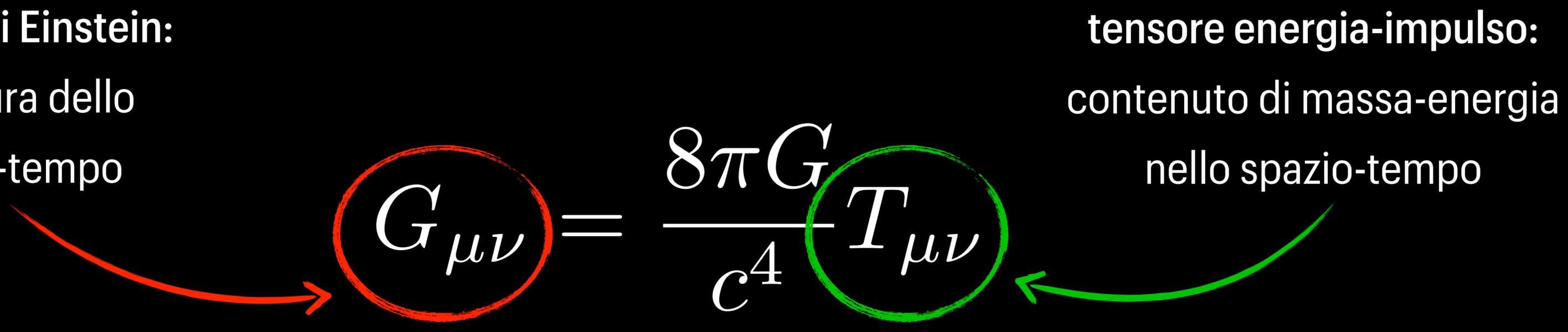
RELATIVITÀ GENERALE

tensore di Einstein:

curvatura dello
spazio-tempo

tensore energia-impulso:

contenuto di massa-energia
nello spazio-tempo


$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

The diagram shows the Einstein field equation $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$. The term $G_{\mu\nu}$ is circled in red, and an orange arrow points from the text 'curvatura dello spazio-tempo' to it. The term $T_{\mu\nu}$ is circled in green, and a green arrow points from the text 'contenuto di massa-energia nello spazio-tempo' to it. The constants $8\pi G$ and c^4 are in the denominator.

“la materia dice allo spazio come curvarsi,
lo spazio dice alla materia come muoversi”

J. A. Wheeler

RELATIVITÀ GENERALE

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

$$c \simeq 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{8\pi G}{c^4} \simeq 2.07 \times 10^{-43} \frac{\text{s}^3}{\text{m kg}}$$

RELATIVITÀ GENERALE

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

RELATIVITÀ GENERALE

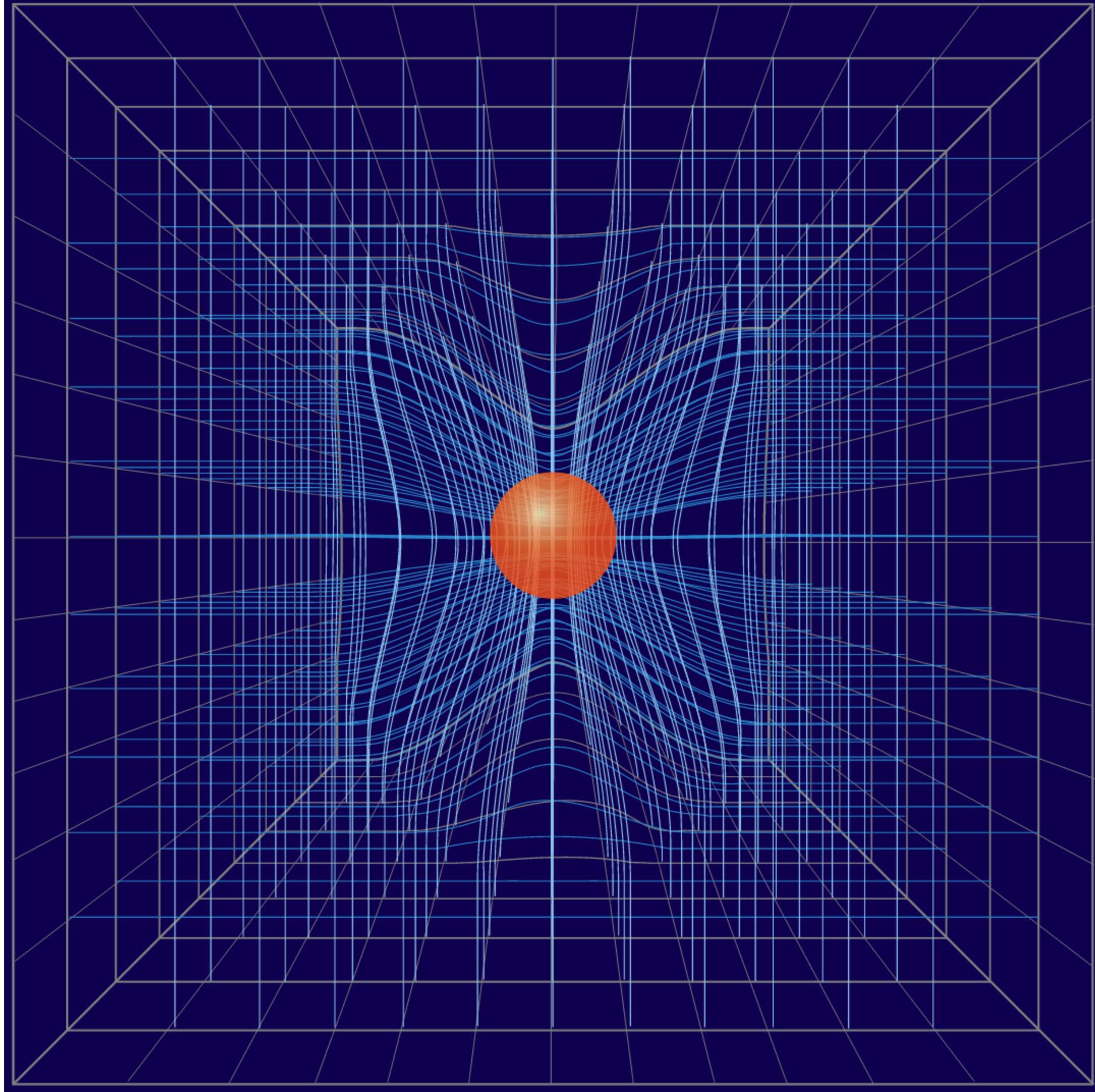
$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Λ = costante cosmologica

costante correttiva introdotta da Einstein
per ottenere un Universo statico

(l'equazione restituisce naturalmente un universo dinamico, inaccettabile)

reintrodotta dopo la misura
dell'Universo accelerato



RELATIVITÀ GENERALE

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

equazione generale



quali soluzioni?

SOLUZIONE DI SCHWARZSCHILD

curvatura dello spazio-tempo intorno ad una massa sferica, non rotante

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

elemento di linea:

spostamento infinitesimo in tempo e spazio



K. Schwarzschild.

SOLUZIONE DI SCHWARZSCHILD

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2$$

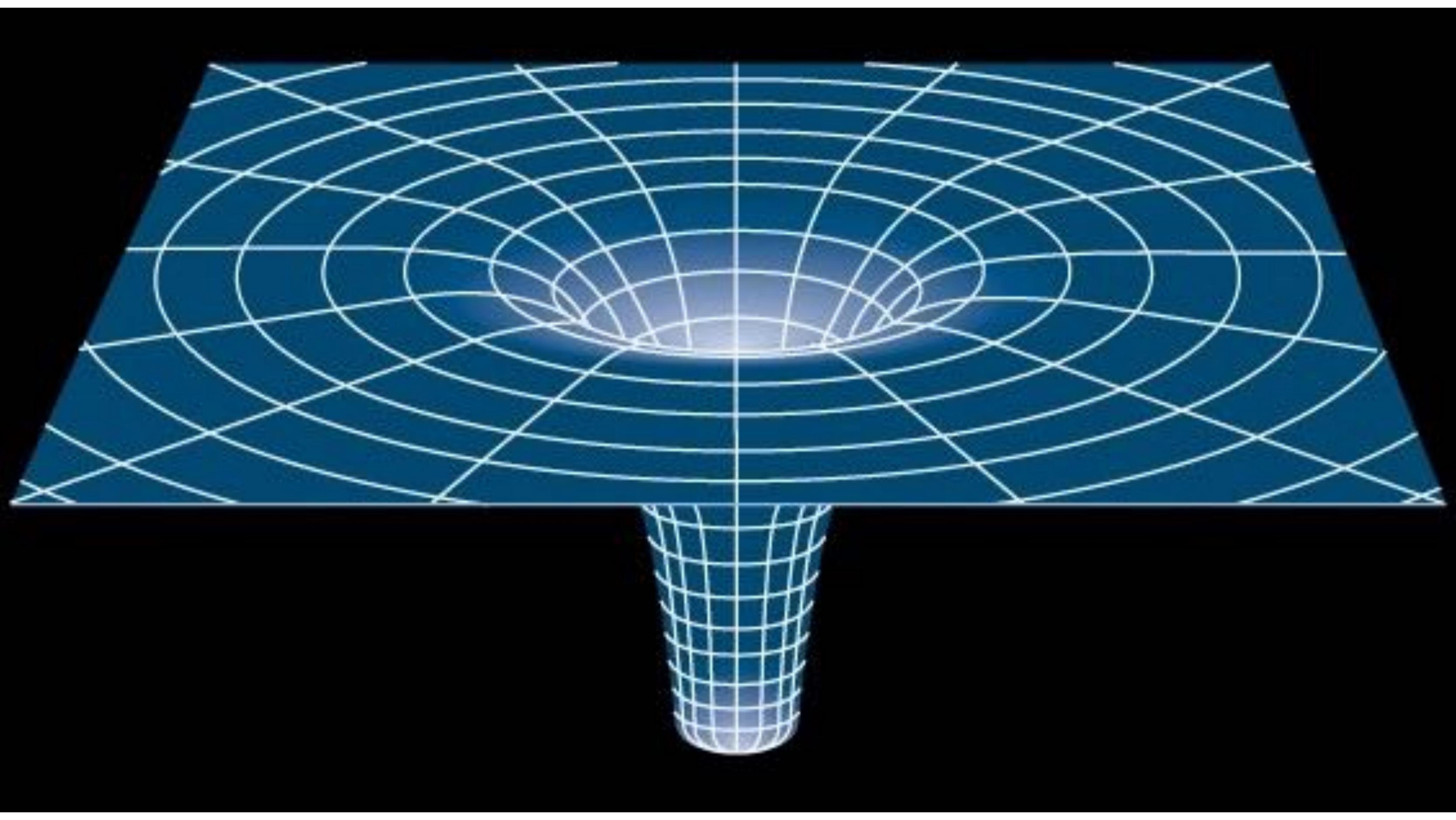
SOLUZIONE DI SCHWARZSCHILD

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2$$

✓ singularità:

- $r = 0$
- $r = \frac{2GM}{c^2}$

✓ simmetria sferica
coordinate angolari non dipendono dalla massa



SOLUZIONE DI SCHWARZSCHILD

a quali condizioni si sfugge alla gravità di un corpo?

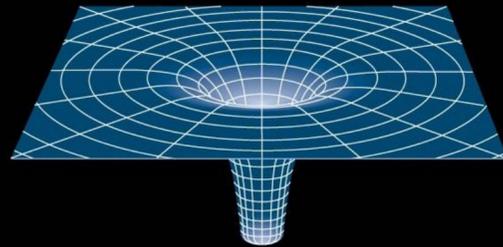


$$U = -\frac{GMm}{r}$$

SOLUZIONE DI SCHWARZSCHILD

a quali condizioni si sfugge alla gravità di un ~~corpo?~~

buco nero?



$$U = -\frac{GMm}{r}$$

$$\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} = \frac{GM}{r}$$

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

raggio di Schwarzschild

DARK STAR

If the semi-diameter of a sphere of the same density as the Sun were to exceed that of the Sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it would have acquired at its surface greater velocity than that of light, and consequently supposing light to be attracted by the same force in proportion to its vis inertiae, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity.

This assumes that light is influenced by gravity in the same way as massive objects.

John Michell, 1783, lettera a Henry Cavendish

suggerito indipendentemente da
Pierre-Simon Laplace nel 1796



idea stralciata dopo lo sviluppo della
teoria ondulatoria della luce

*la luce è un fronte d'onda, dunque non ha
massa e non è influenzata dalla gravità*

SOLUZIONE DI KERR

soluzione dell'equazione di Einstein per masse a simmetria assiale, rotanti

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M\rho}{\rho^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) c^2 dt^2 - \left(\frac{\rho^2 + a^2 \cos^2 \theta}{\rho^2 + a^2 - 2M\rho}\right) d\rho^2 +$$
$$-(\rho^2 + a^2 \cos^2 \theta) d\theta^2 - \left[(\rho^2 + a^2) \sin^2 \theta + \frac{2M\rho a^2 \sin^4 \theta}{\rho^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right] d\phi^2 +$$
$$-2 \frac{2M\rho a \sin^2 \theta}{\rho^2 + a^2 \cos^2 \theta} c dt d\phi$$



BUCHI NERI

a quali condizioni sfuggo alla gravità di un corpo?



“né materia né luce ne può fuoriuscire”



la velocità di fuga di un buco nero è **maggiore** della
velocità della luce

BUCHI NERI

tutta la massa è concentrata in un solo punto

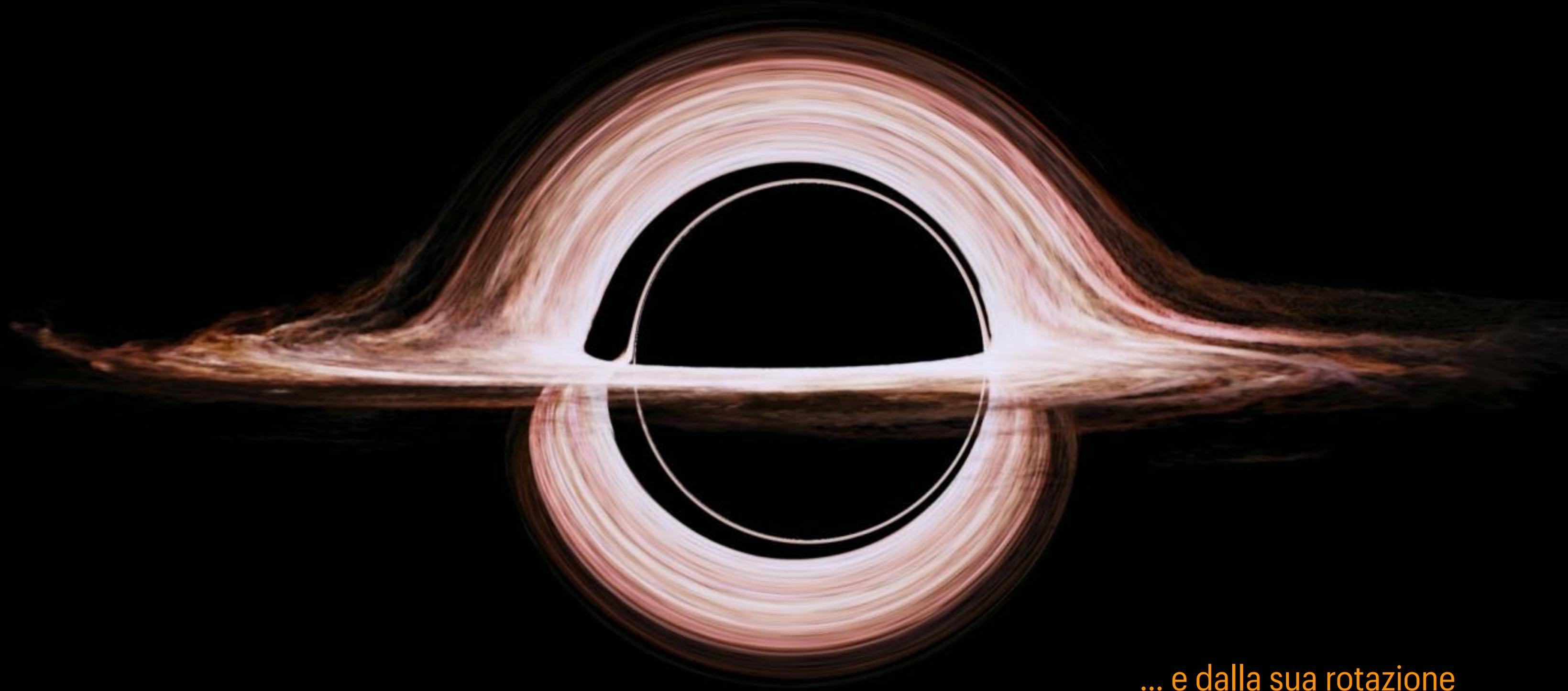
MA posso definire una “dimensione” del buco nero:

distanza alla quale la luce non può più sfuggire

orizzonte degli eventi

$$R_S = \frac{2GM_{\text{BH}}}{c^2}$$

BH: interamente descritto dalla sua massa



... e dalla sua rotazione