

La prima immagine di un buco nero

Luciano Rezzolla

Institute for Theoretical Physics, Frankfurt
Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration



8 Ottobre 2019



INAF OAS
BOLOGNA

Programma

- * un'introduzione alla gravità
- * la visioni della gravità di Newton e di Einstein
- * cosa sono buchi neri?
- * come è possibile vedere un buco nero?
- * Siamo sicuri?...

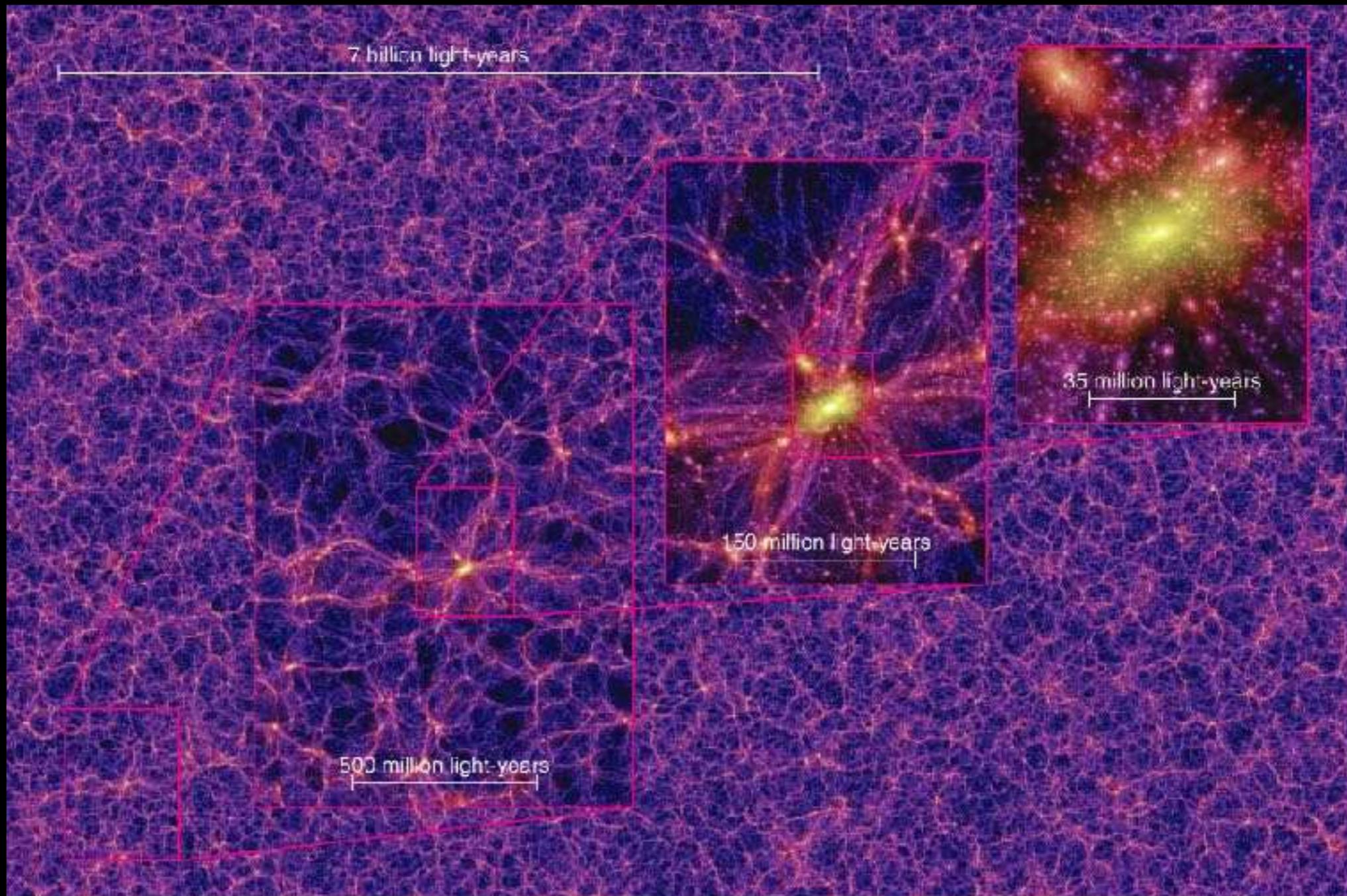
Interrompetemi senza esitazione!

La nostra nozione della gravità

- * Nozione istintiva (Moro)
- * Nozione razionale
- * Nozione immaginativa



La forza più diffusa e misteriosa

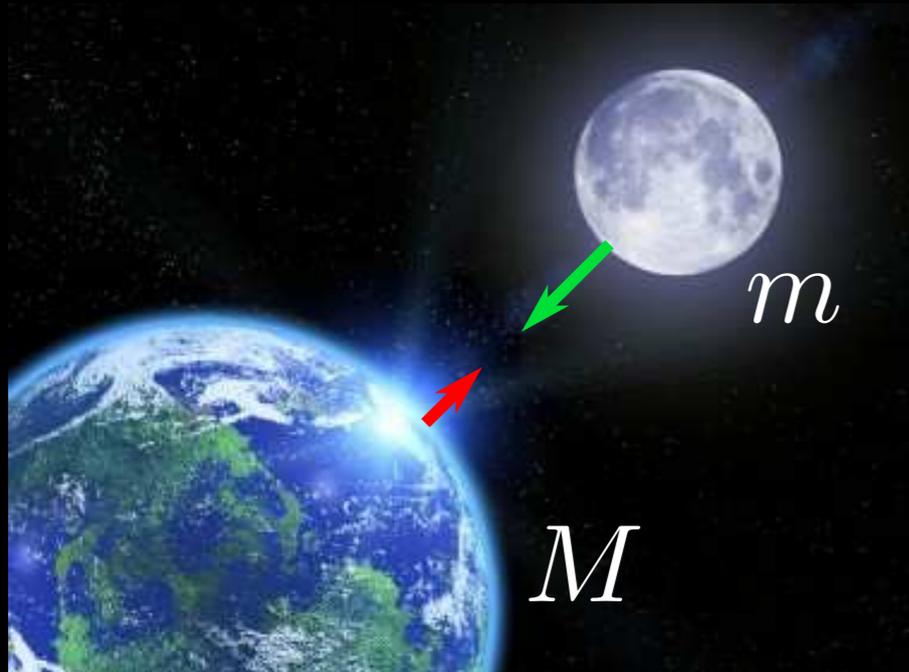


Su scale macroscopiche è **l'unica forza** che conti. Essa regola la formazione di strutture nell'universo e la sua evoluzione

I padri della gravità

Nel **1679** Newton pubblica la sua teoria della gravità.

Per lui la gravità è una **forza** istantanea tra due masse che è proporzionale alle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza.



Con questa teoria egli era in grado di spiegare **tutte** le **osservazioni astronomiche** dei suoi tempi.

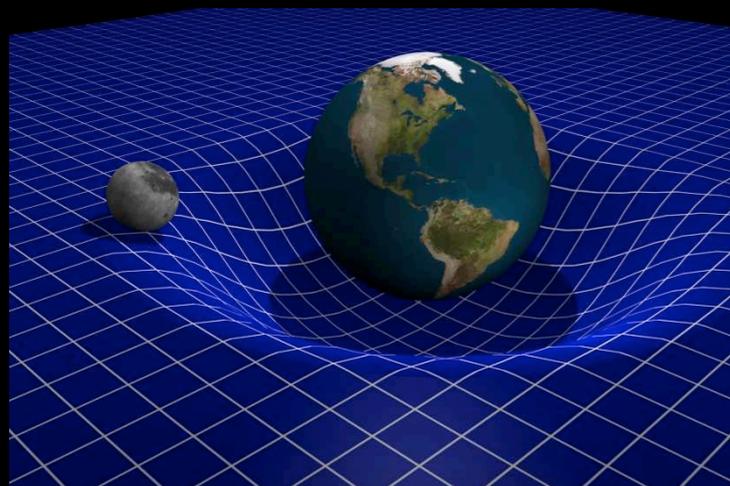
Con questa teoria potete costruire ponti e persino grattacieli!

I padri della gravità

Nel **1915** Einstein pubblica la sua teoria della gravità (**Teoria della Relatività Generale**) cambiando radicalmente la nostra comprensione della gravità.



Per Einstein, la gravità è la manifestazione della **curvatura** dello spazio-tempo.



Ogni massa (o energia) curva lo spazio-tempo (spazio e tempo non differiscono). Le implicazioni di questa **visione** sono numerose e gran parte ignote ad Einstein.

Un'equazione famosa...

Il nome di Einstein è normalmente associato a questa equazione

$$E = mc^2$$

energia massa velocità luce

Questa equazione esprime l'equivalenza tra **energia** (sinistra) e **massa** (destra)

Questa **non** è una delle equazioni di Einstein ed infatti non è parte della teoria della **gravità!**

Le equazioni di Einstein

tensore di Einstein

tensore energia-impulso

$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$

curvatura/geometria

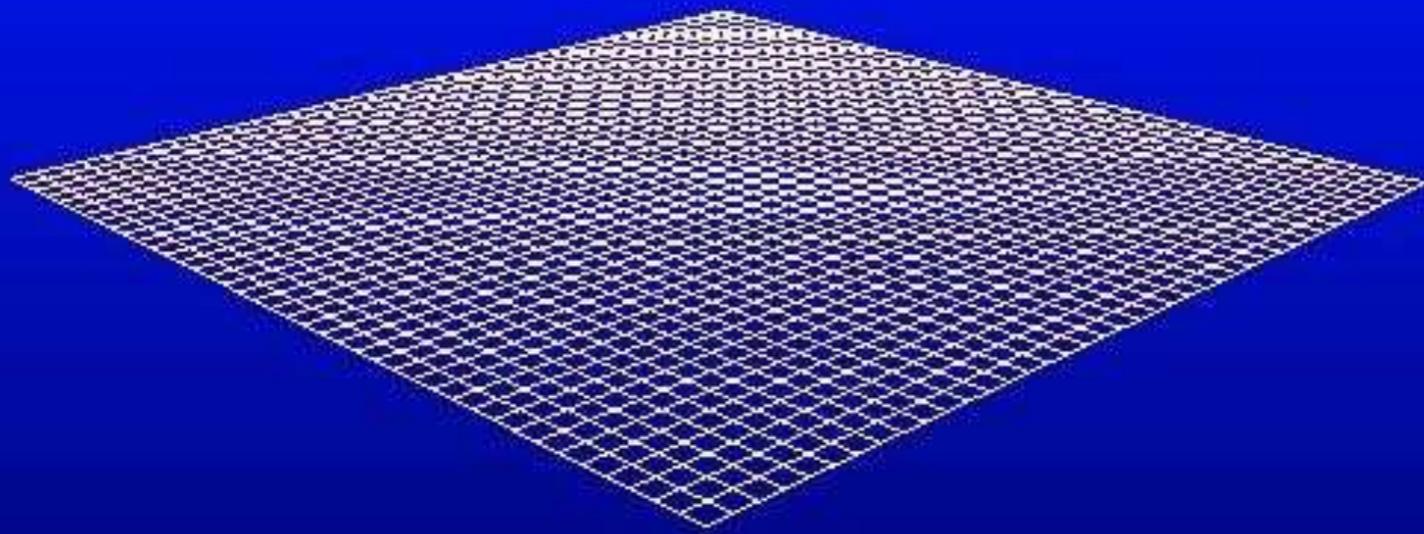
massa/energia

The diagram shows the equation $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ in white text. A white arrow points from the text 'tensore di Einstein' to the $G_{\mu\nu}$ term. Another white arrow points from 'tensore energia-impulso' to the $T_{\mu\nu}$ term. A red arrow points from 'curvatura/geometria' to the $G_{\mu\nu}$ term. A red arrow points from 'massa/energia' to the $T_{\mu\nu}$ term. A large red double-headed arrow is positioned below the equation, connecting the two concepts.

In essenza, esiste una relazione tra la curvatura dello spazio-tempo e la massa/energia

La gravità è la manifestazione della curvatura dello spazio-tempo

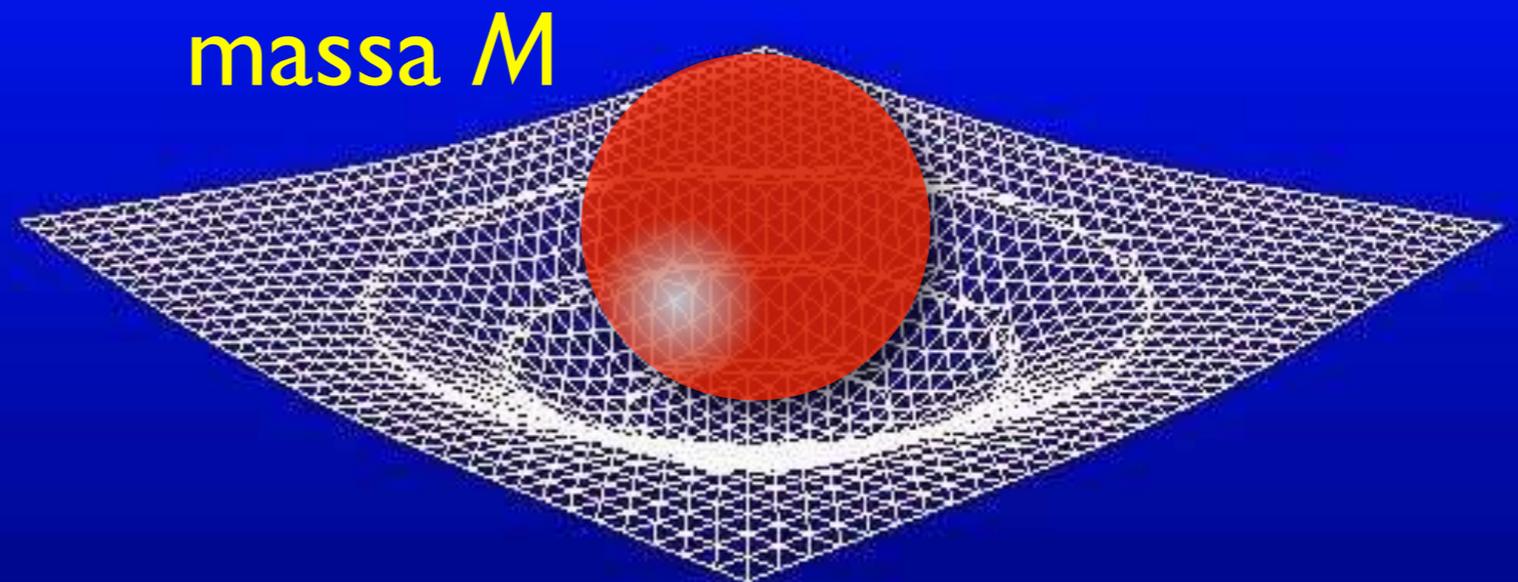
Ma cos'è la curvatura dello spazio-tempo?...



spazio-tempo piatto

Consideriamo una regione di spazio-tempo priva di materia (vuoto). Essa avrà una curvatura *nulla* (zero) e sarà uno *spazio-tempo piatto*

Se la regione contiene invece una massa *M*, avrà una curvatura *non-nulla* e sarà quindi uno *spazio-tempo curvo*

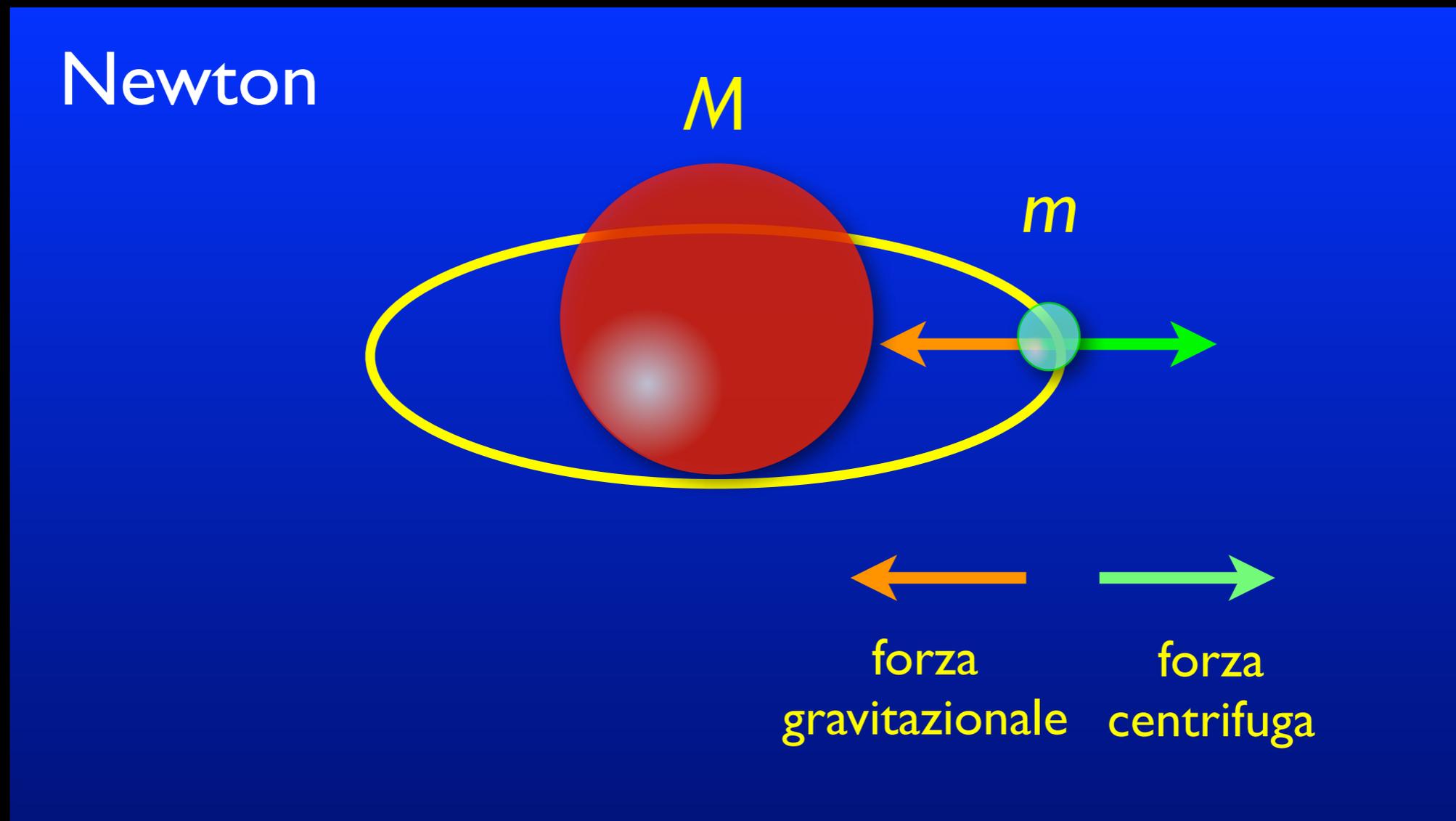


spazio-tempo curvo

La gravità secondo Newton

Consideriamo l'orbita di un oggetto di piccola massa m attorno ad un altro oggetto di massa più grande M (e. g., Terra-Sole).

Per **Newton**: l'orbita è il risultato del bilanciamento tra la forza gravitazionale (attrattiva) e quella centrifuga (repulsiva)

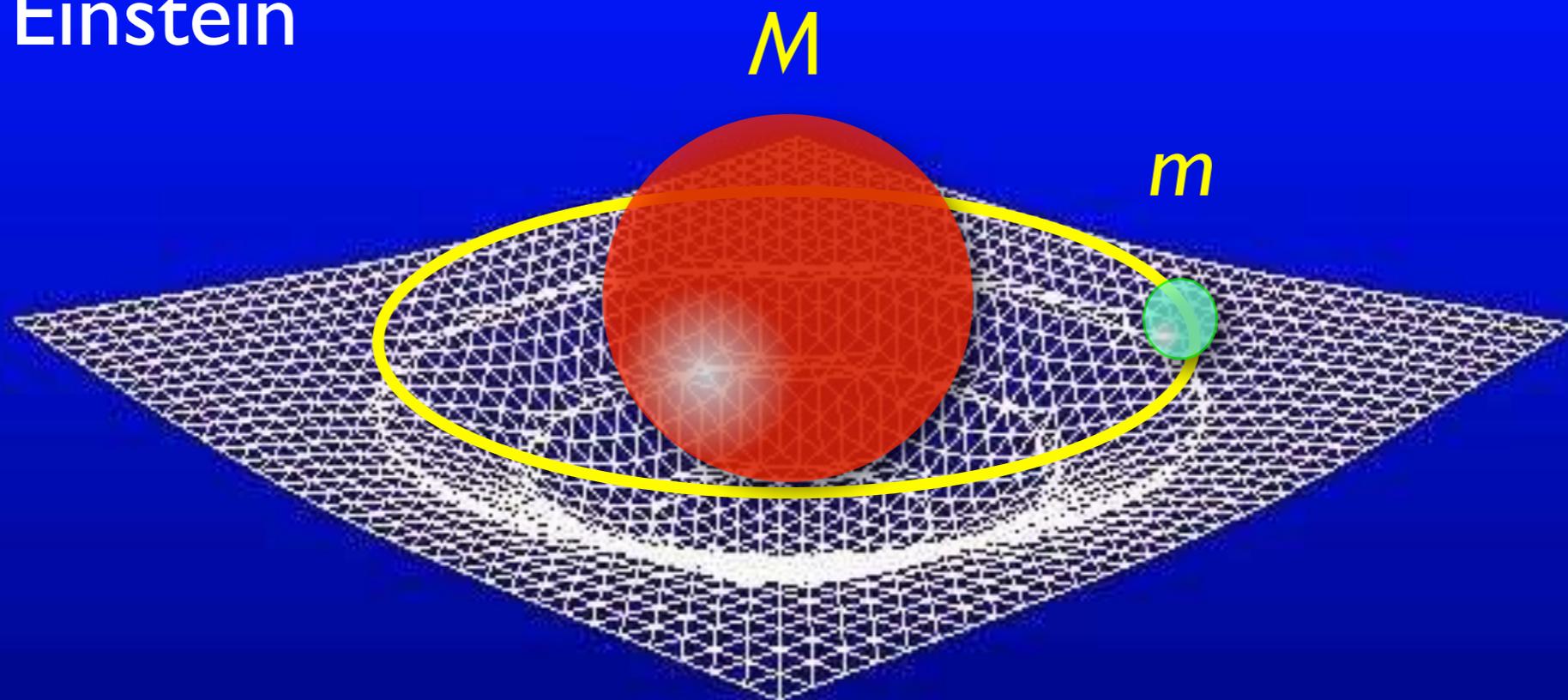


La gravità secondo Einstein

Consideriamo l'orbita di un oggetto di piccola massa m attorno ad un altro oggetto di massa più grande M (e. g., Terra-Sole).

*Per **Einstein** non ci sono forze. L'orbita è necessaria al piccolo m per evitare di cadere nella curvatura generata dal grosso M*

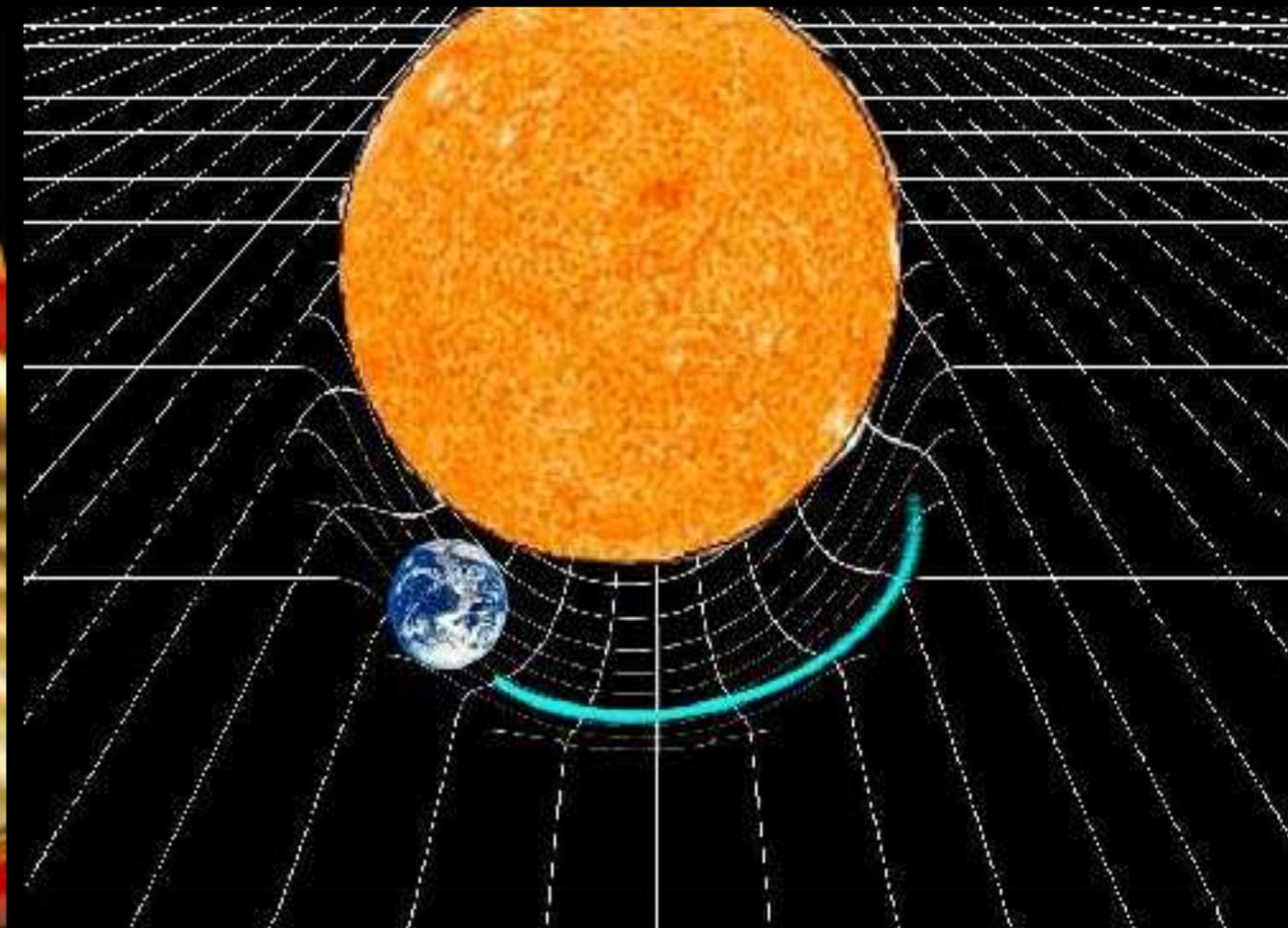
Einstein



La gravità secondo Einstein

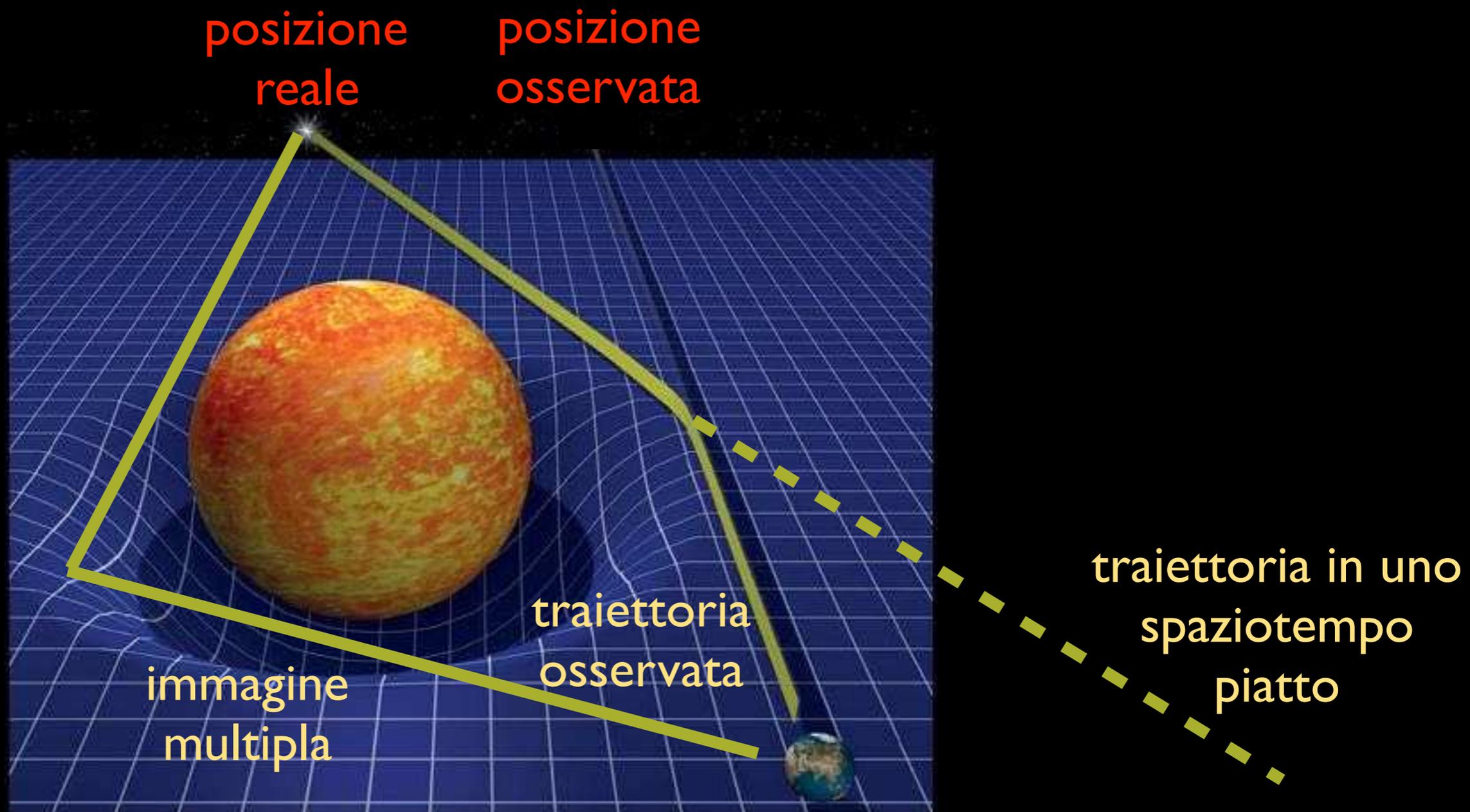
Consideriamo l'orbita di un oggetto di piccola massa m attorno ad un altro oggetto di massa più grande M (e. g., Terra-Sole).

*Per **Einstein** non ci sono forze. L'orbita è necessaria al piccolo m per evitare di cadere nella curvatura generata dal grosso M*



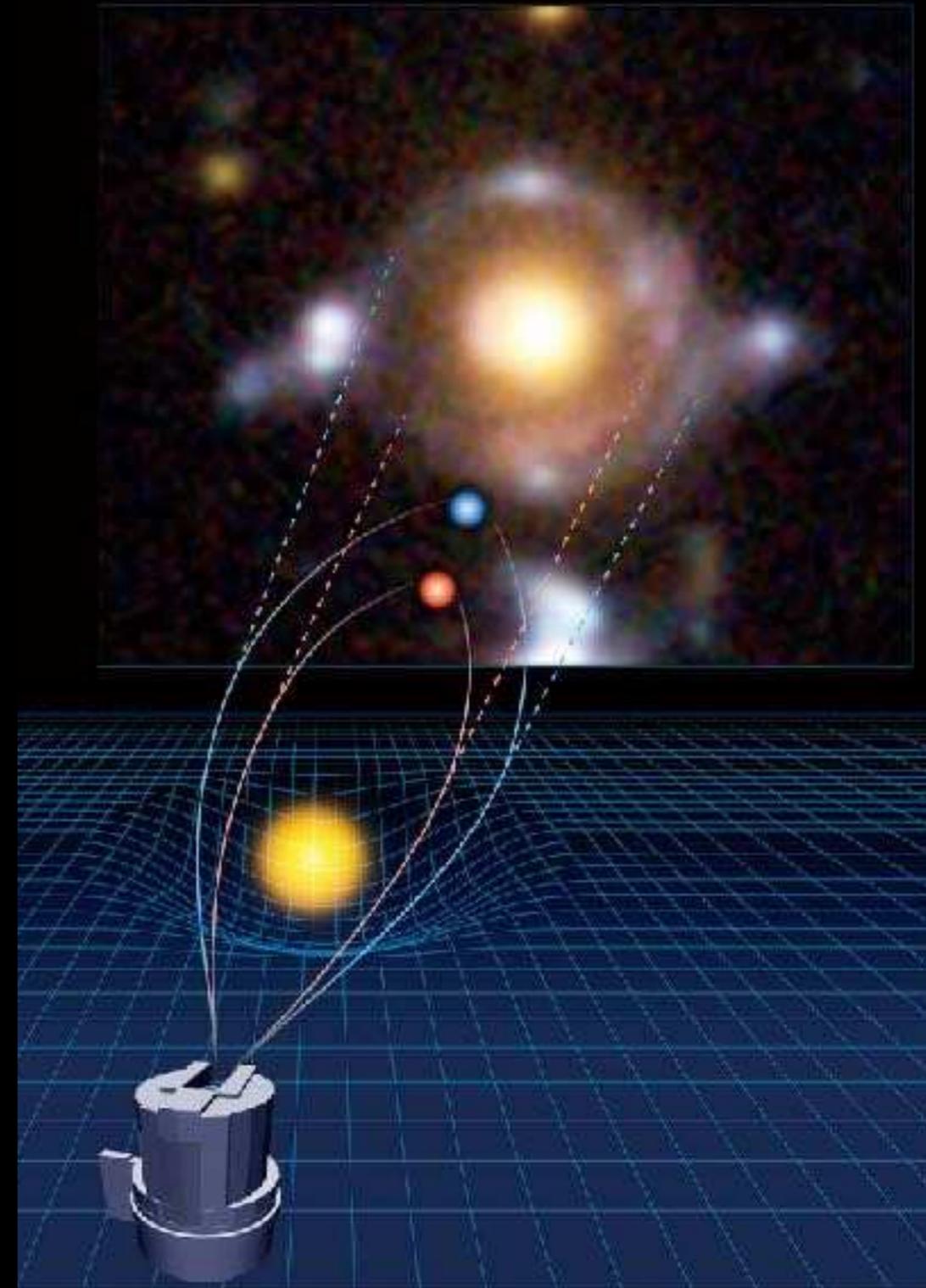
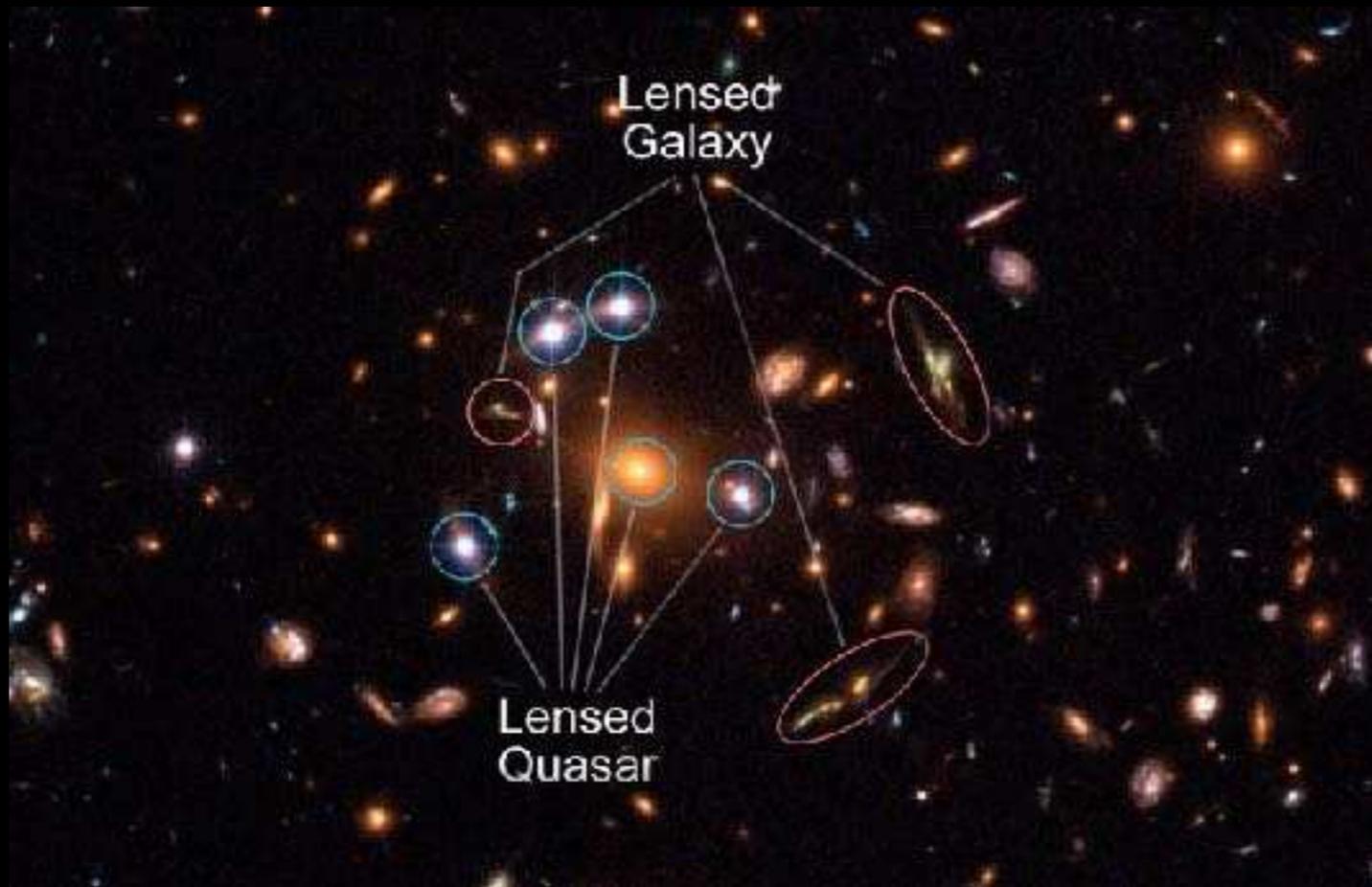
Un'importante conseguenza

Anche la luce sente gli effetti della curvatura dello spaziotempo: i raggi di luce non si propagano in linea retta, ma seguono la curvatura prodotta dalle presenza di materia!



Un fenomeno molto comune...

Questo fenomeno è detto di **lente gravitazionale** ed è uno strumento molto importante per comprendere ad esempio la distribuzione di **materia oscura** nell'universo.



Come si misura la curvatura?

Dato un oggetto di massa M e raggio R il rapporto M/R si chiama **compattezza** ed è un numero puro.

Maggiore è la **compattezza** maggiore la **curvatura**.

Qual'è la curvatura dello spazio-tempo qui (**Terra**)?

$$\frac{G M_{\oplus}}{c^2 R_{\oplus}} \simeq \frac{5.97 \times 10^{24} \text{ kg}}{6372 \text{ km}} \simeq 3 \times 10^{-9}$$

Nel nostro “vicinato” la curvatura è massima sul **Sole**:

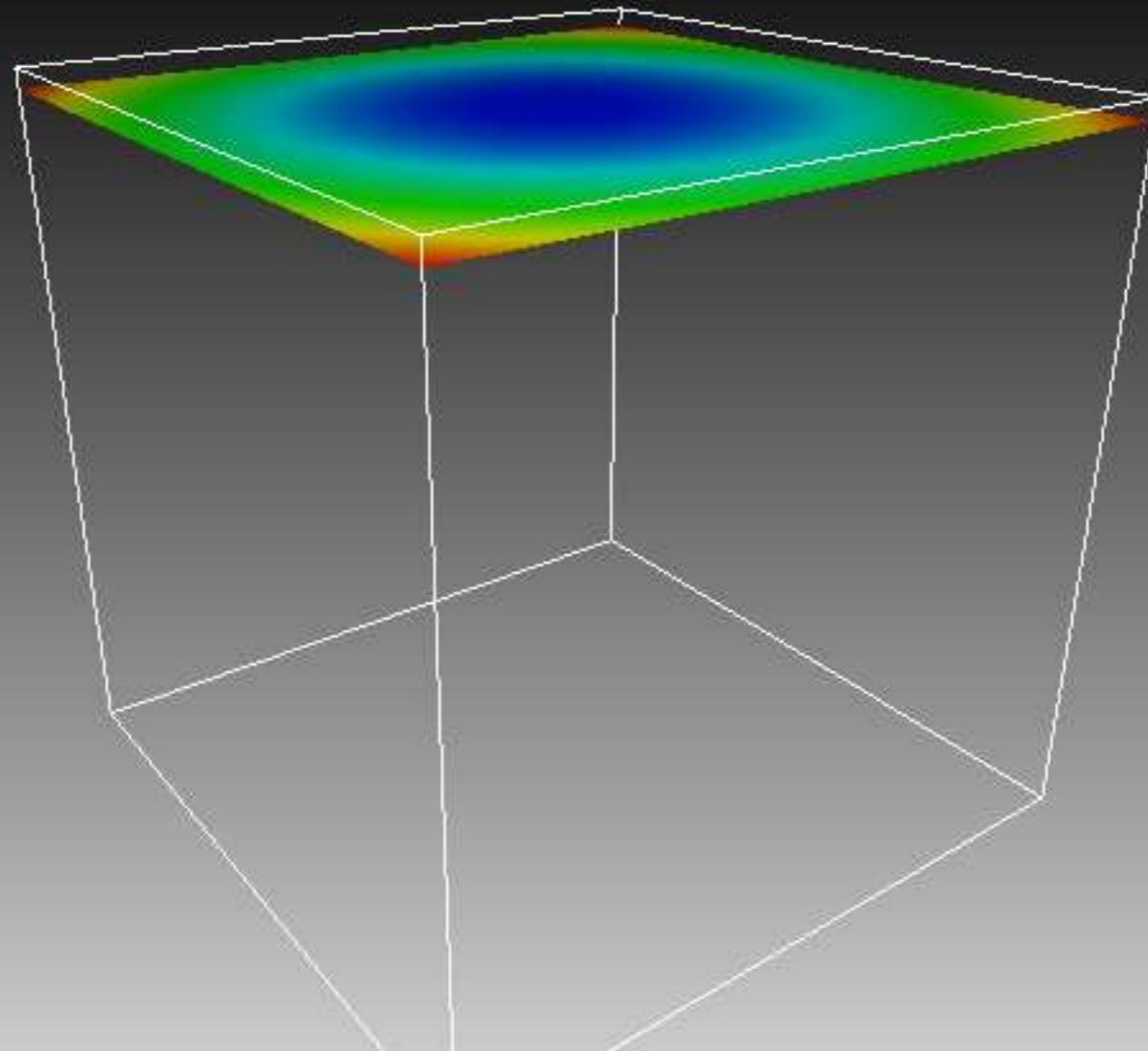
$$\frac{G M_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} \simeq \frac{1.98 \times 10^{30} \text{ kg}}{6.95 \times 10^7 \text{ km}} \simeq 2 \times 10^{-6} \simeq 0.000002$$

Lo spazio-tempo è difficile da curvare!

Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R .
La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.00998$$

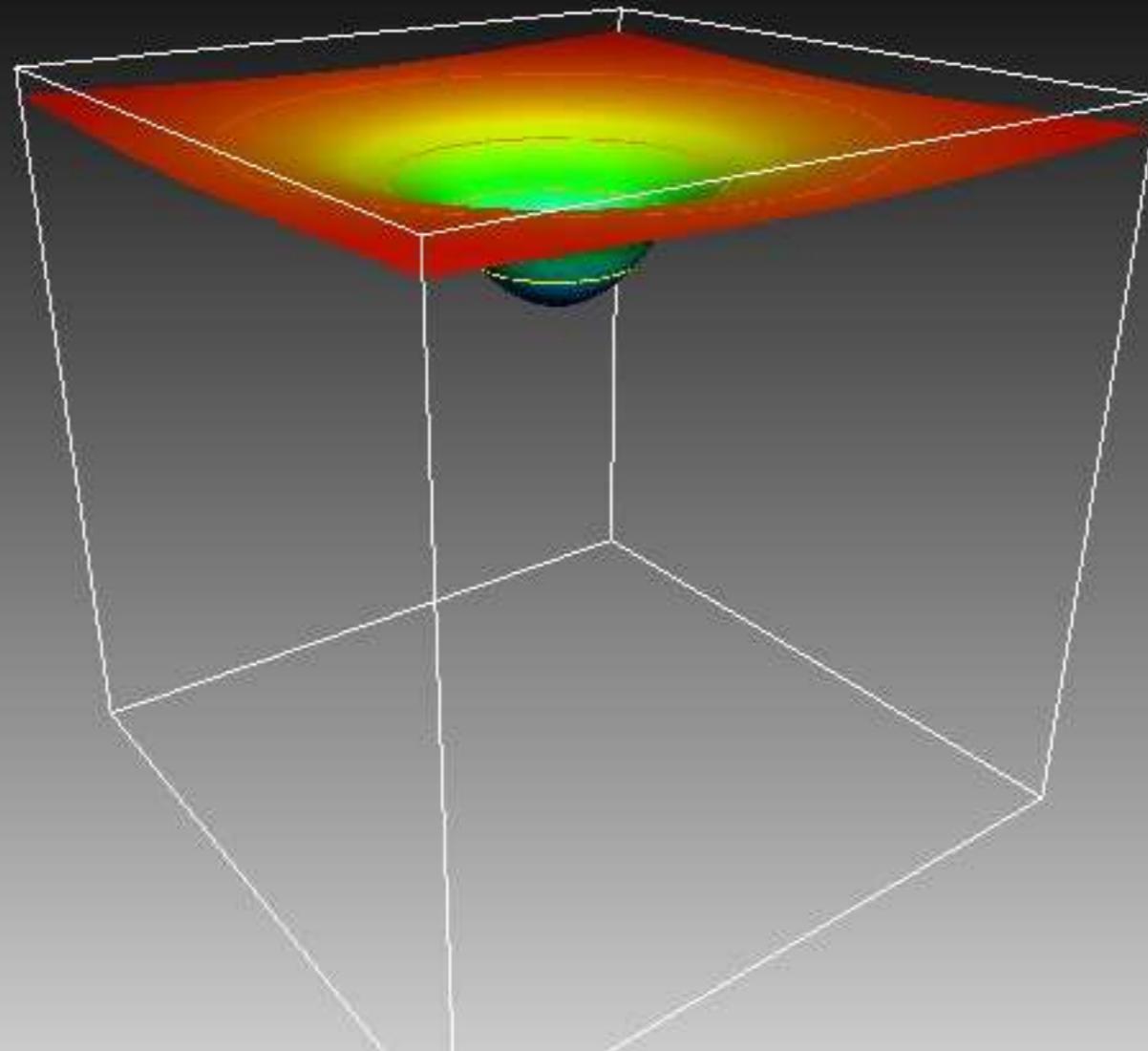
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R .
La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.09980$$

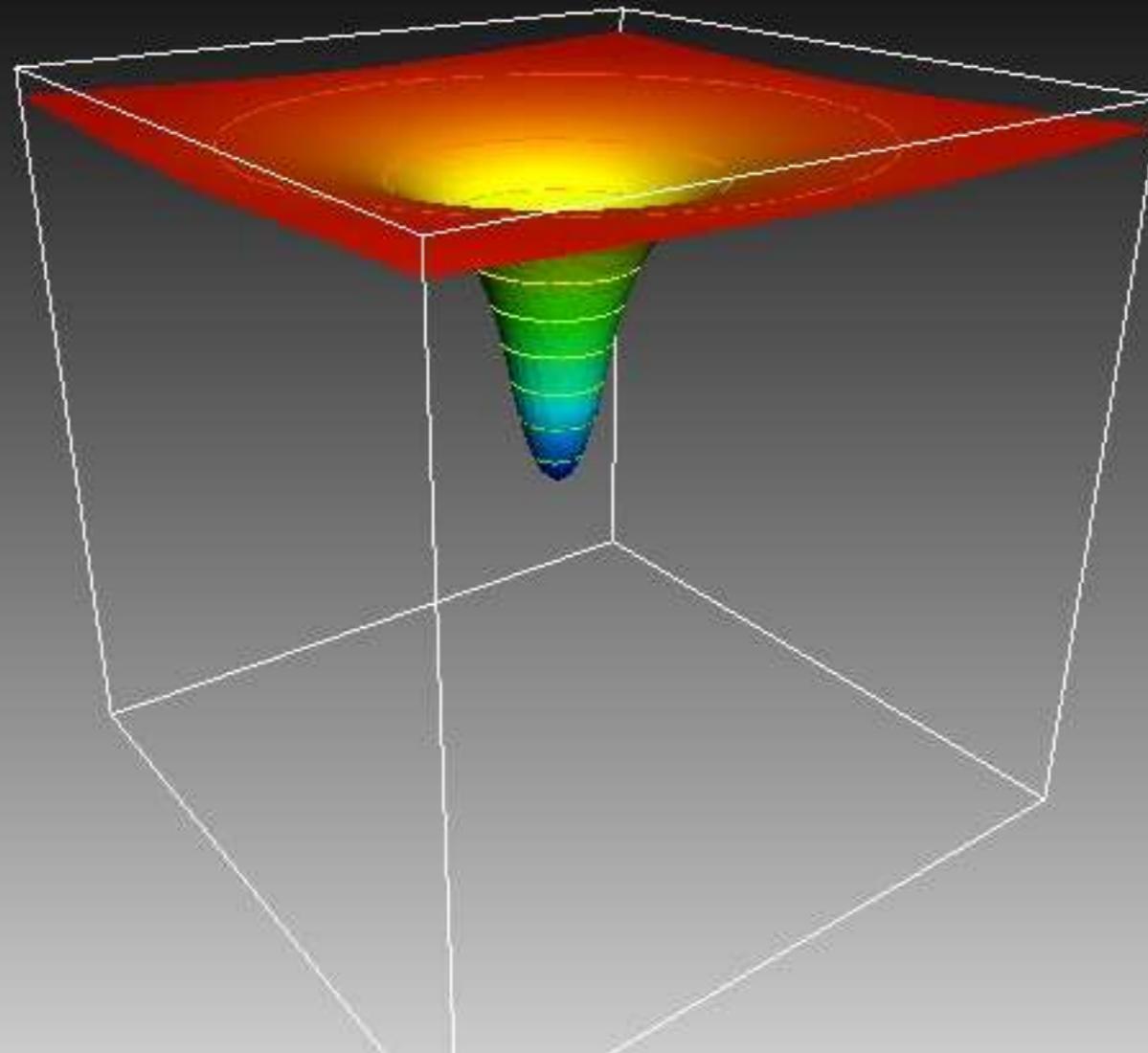
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R .
La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.19230$$

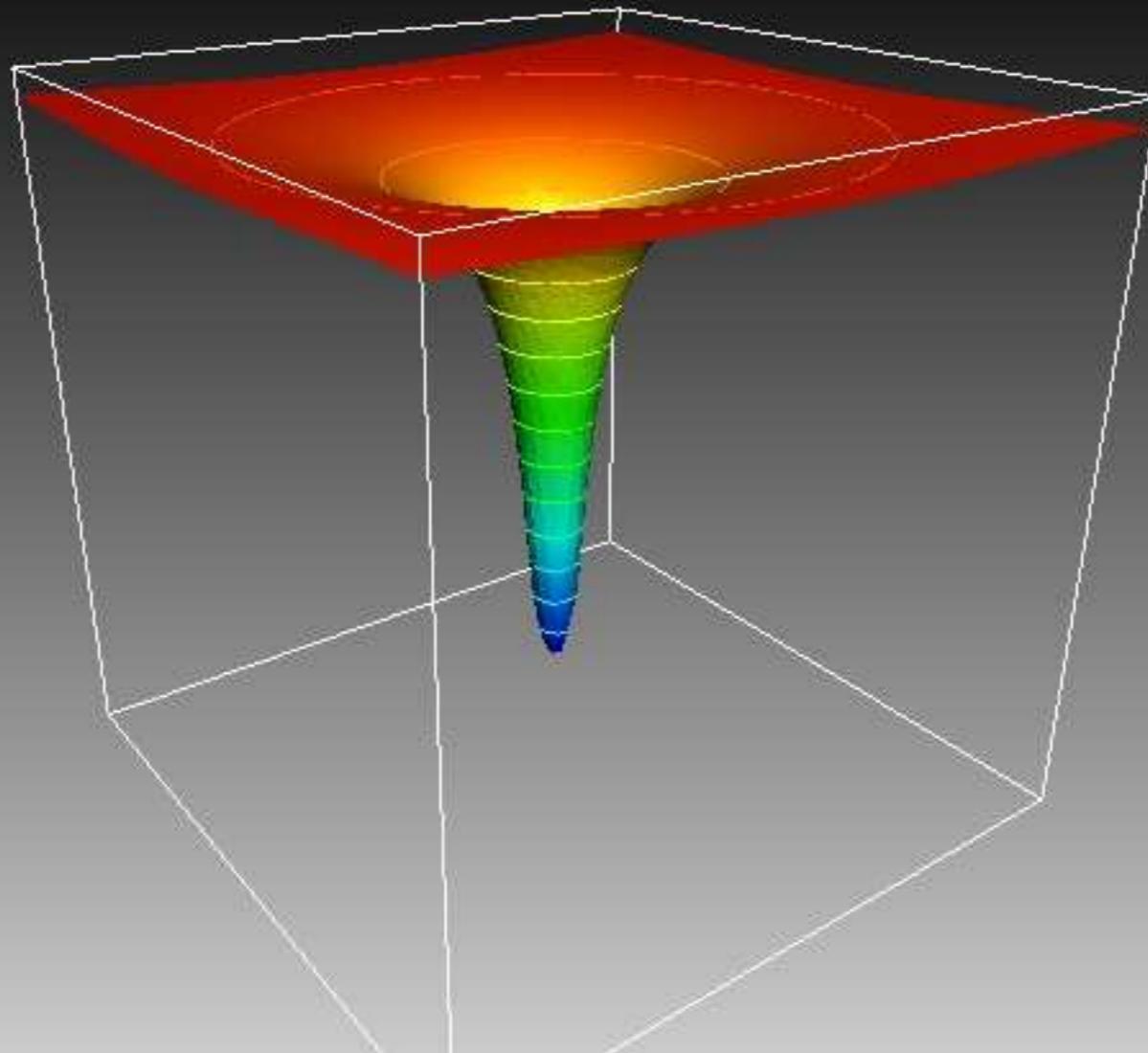
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R .
La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.3125$$

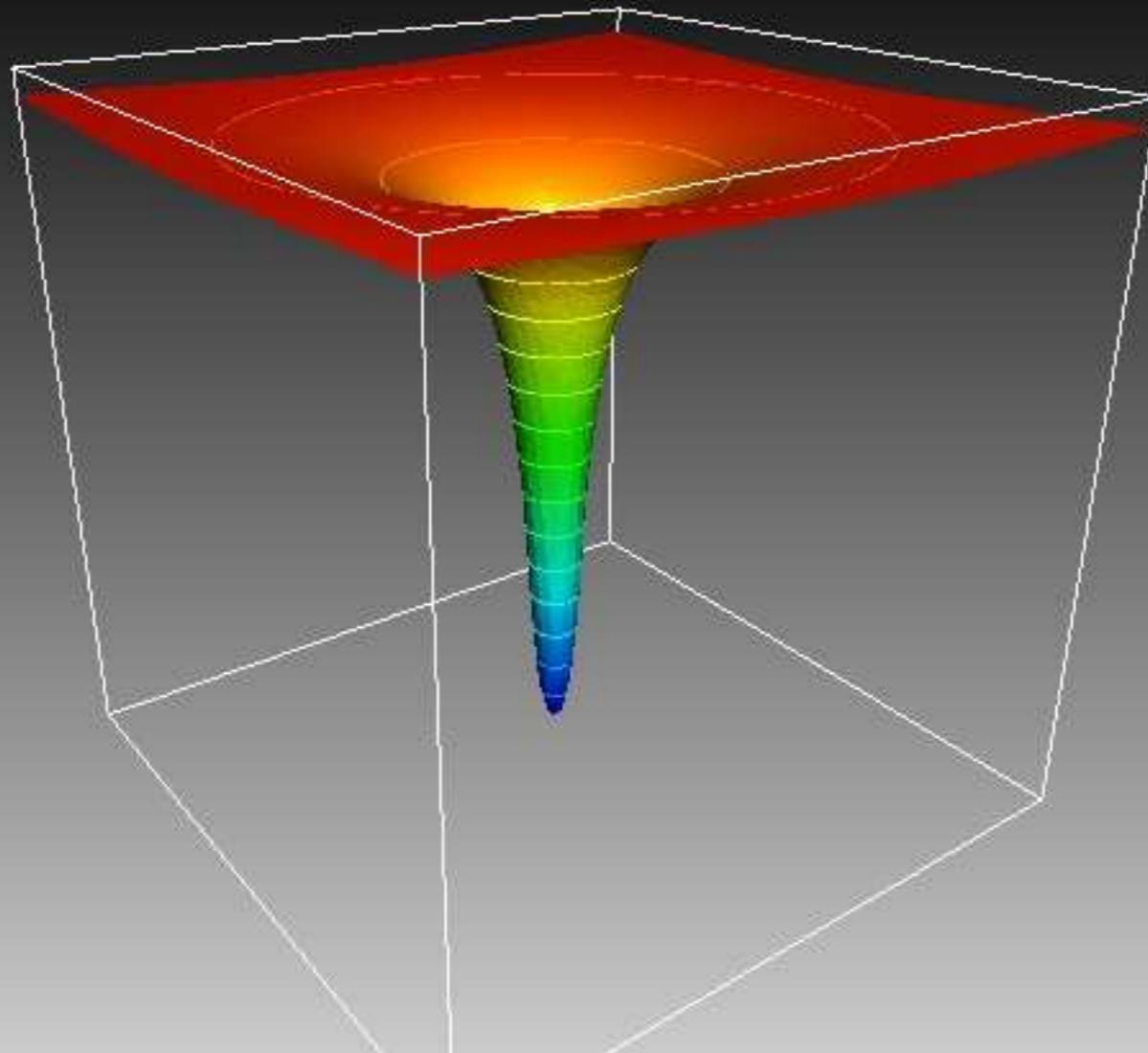
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R .
La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.37037$$

$$\sqrt{-g_{tt}}$$

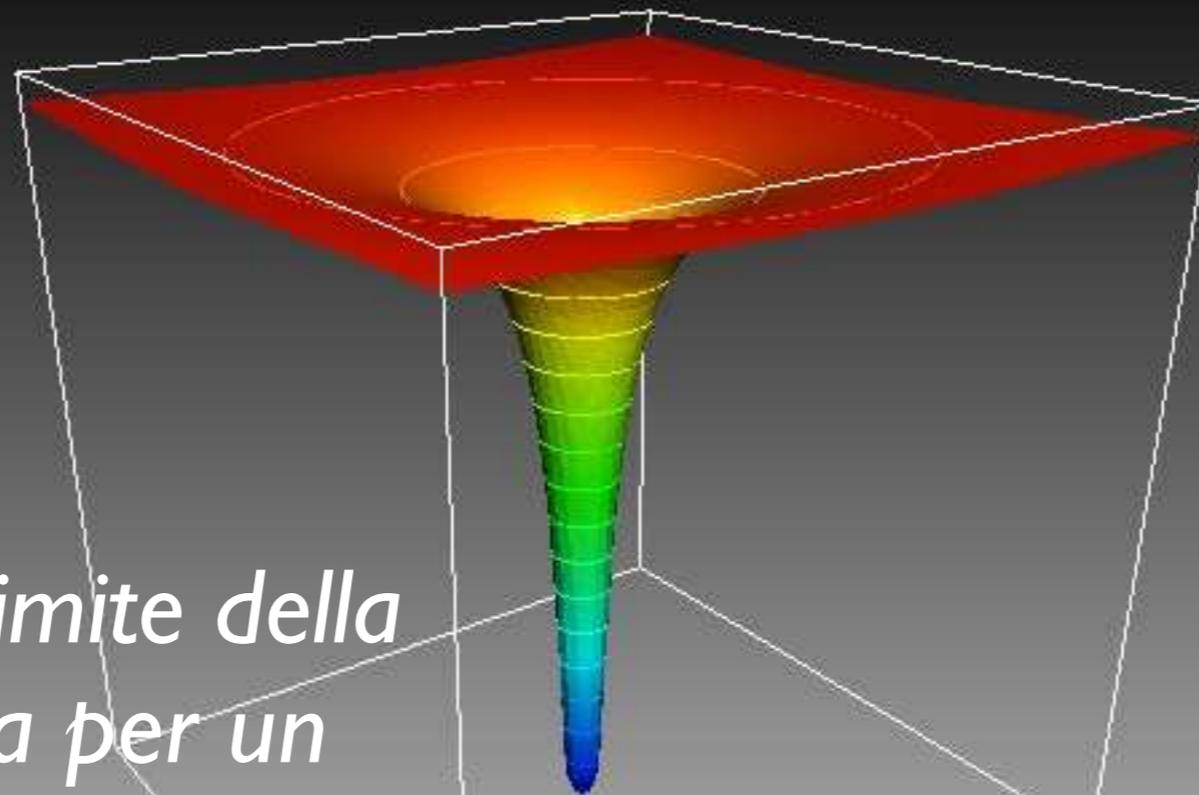


Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R .
La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.44444$$

$$\sqrt{-g_{tt}}$$

Questo è il limite della compattezza per un oggetto con una *superficie solida*

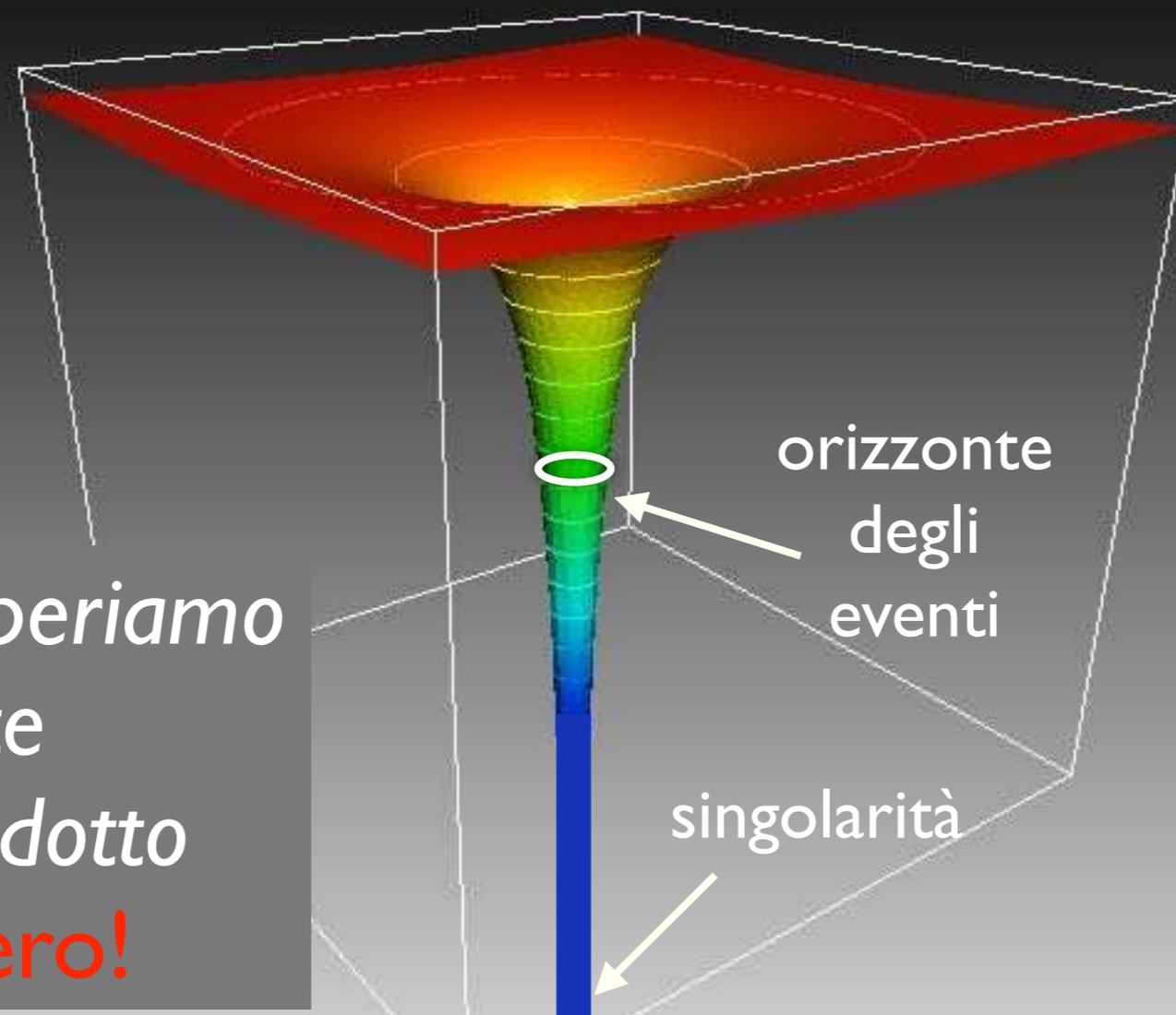


Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R . La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.5000$$

$$\sqrt{-g_{tt}}$$

Quando superiamo questo limite avremo prodotto un **buco nero!**

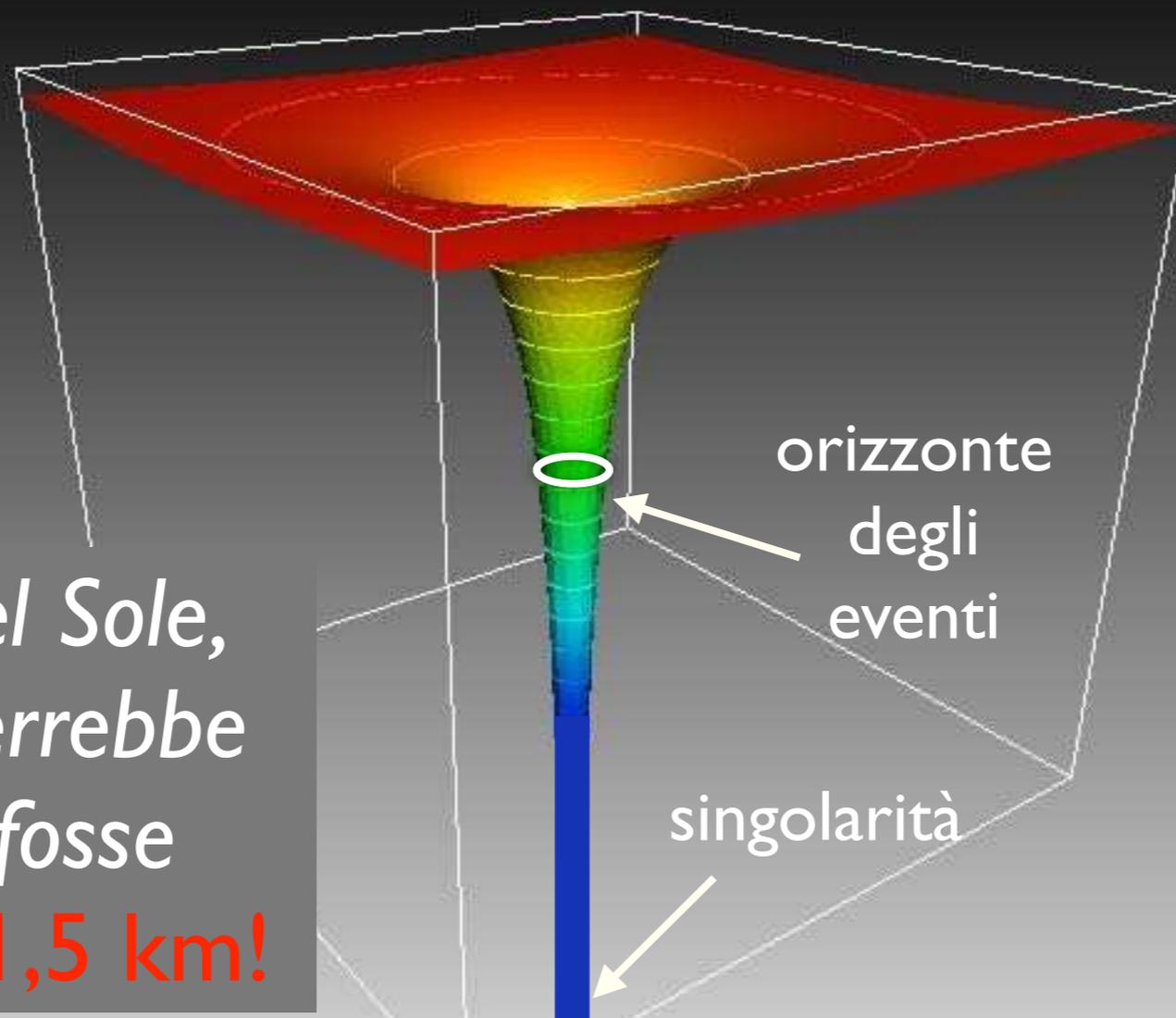


Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R . La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.5000$$

$$\sqrt{-g_{tt}}$$

Nel caso del Sole, questo avverrebbe se il raggio fosse ridotto a $\sim 1,5$ km!

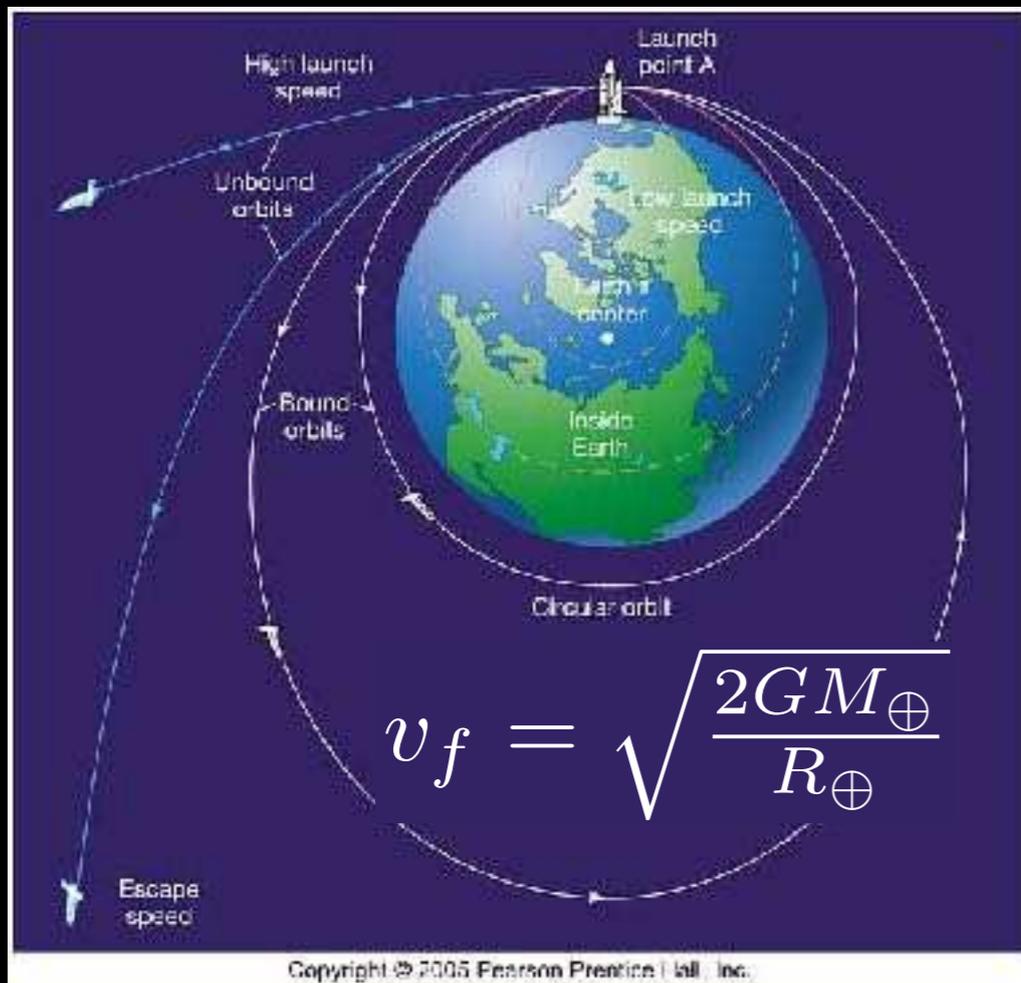


Buchi neri



Ma cos'è un buco nero in pratica?

Ci sono molti modi di descrivere un buco nero, ma è utile pensare alla **velocità di fuga** v_f , ossia, la velocità necessaria a sfuggire ad un campo gravitazionale



È **possibile** sfuggire alla gravità terrestre: ci vuole una velocità sufficiente.



È **impossibile** sfuggire alla gravità di un buco nero: neanche la luce ci riesce!

A caccia di buchi neri...



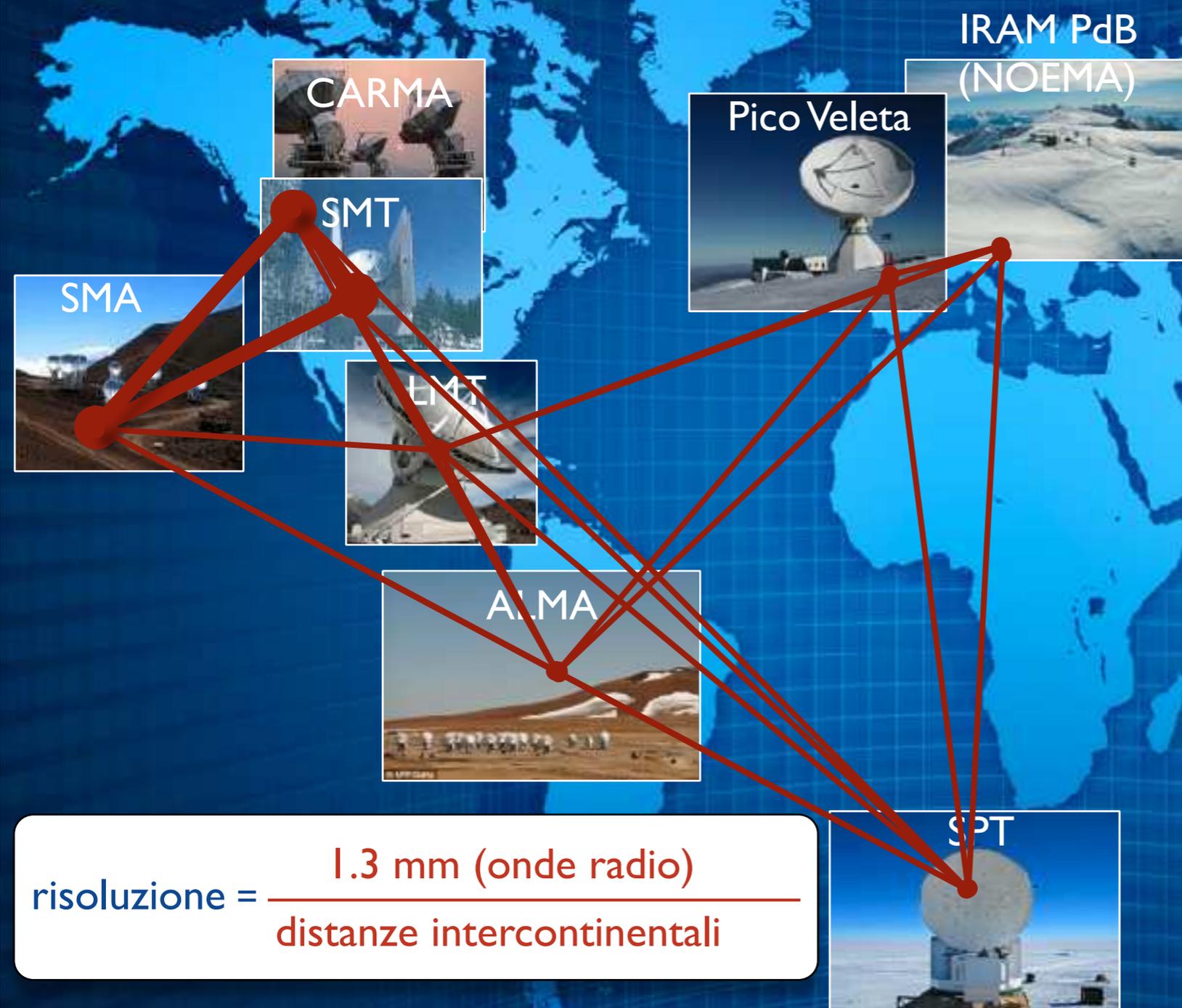
VLBI: Long Baseline Interferometry (Interferometria con lunga linea di base)

A world map with a grid overlay, showing various colored lines representing VLBI baselines connecting different locations across the globe. The lines are colored in shades of blue, green, and red, indicating different baseline lengths or configurations. The map is centered on the Atlantic Ocean, showing the Americas on the left and Europe, Africa, and Asia on the right.

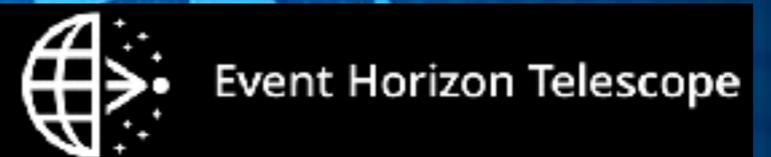
risoluzione = $\frac{1.3 \text{ mm (onde radio)}}{\text{distanze intercontinentali}}$

VLBI: Long Baseline Interferometry (Interferometria con lunga linea di base)

The Event Horizon Telescope



Creare un radio-telescopio virtuale grande quanto il diametro della Terra usando frequenze radio



Falcke, Kramer, Rezzolla

$$\text{risoluzione} = \frac{1.3 \text{ mm (onde radio)}}{\text{distanze intercontinentali}}$$

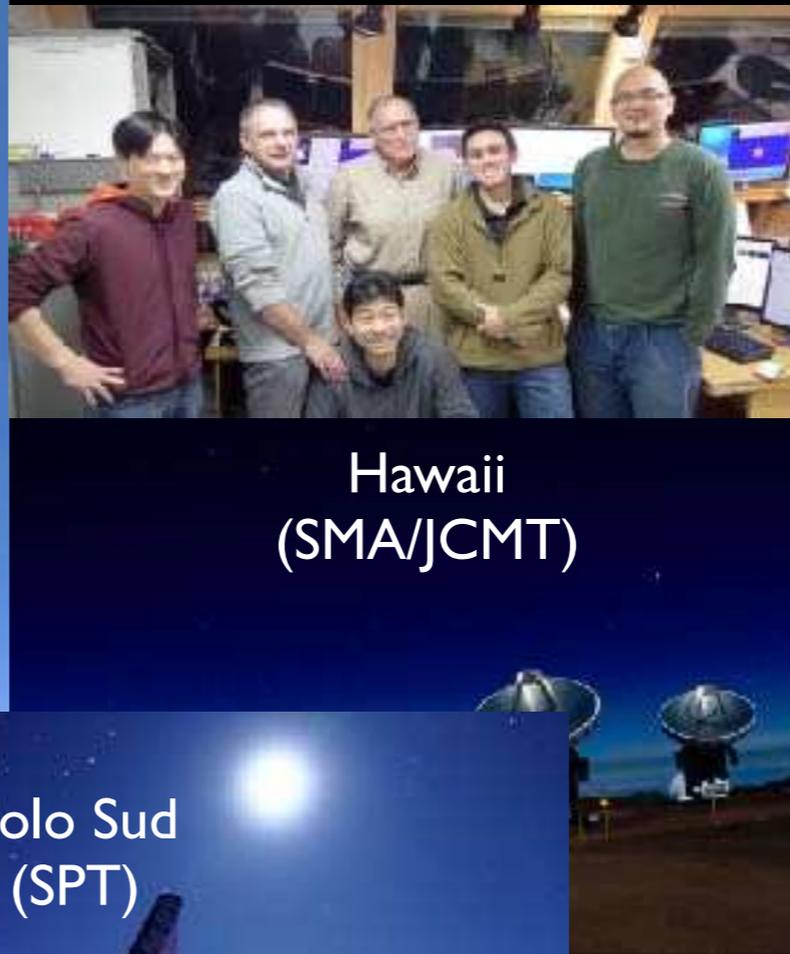
Messico
(LMT)



Arizona
(SMT)



Hawaii
(SMA/JCMT)



Polo Sud
(SPT)



Spagna
(IRAM 30m,
Pico Veleta)



Cile
(ALMA/APEX)



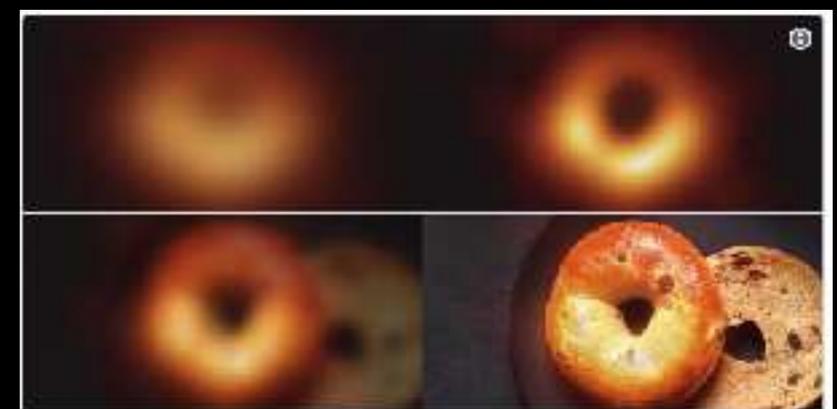
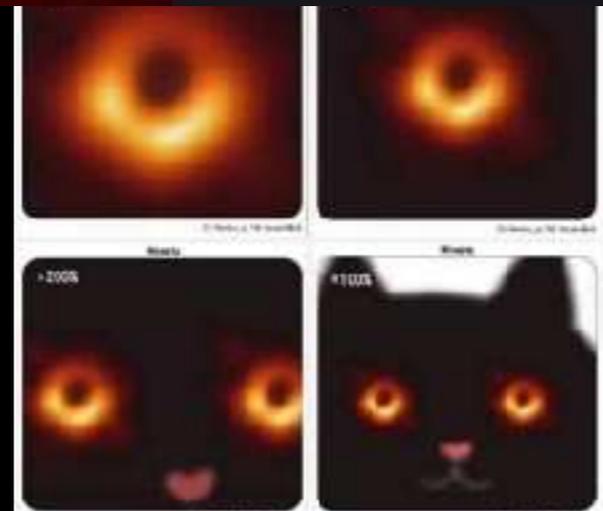
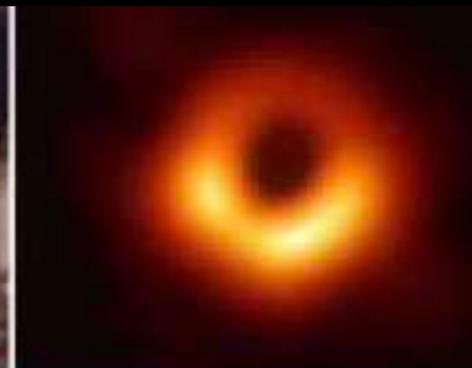
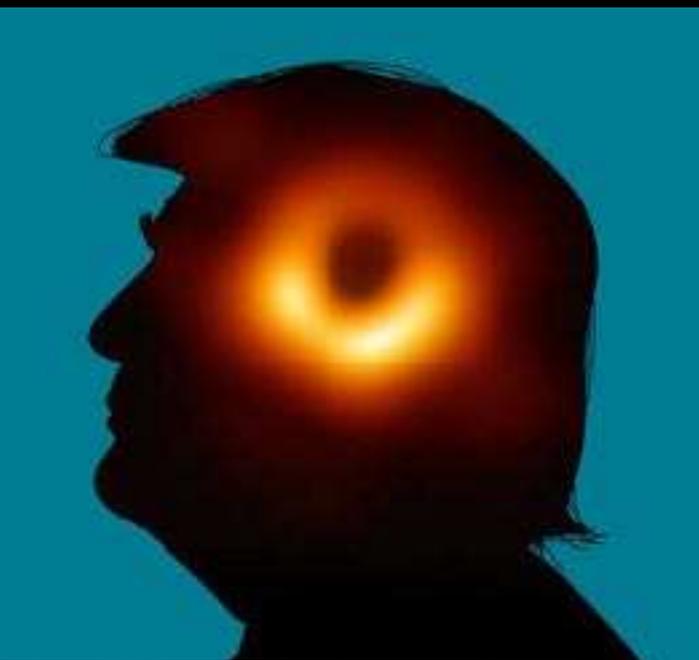
L'antipriaggio in reazione Messier 87 (M87)



L'immagine ha fatto il giro del mondo molto in fretta...



diventando una grande risorsa per i social...

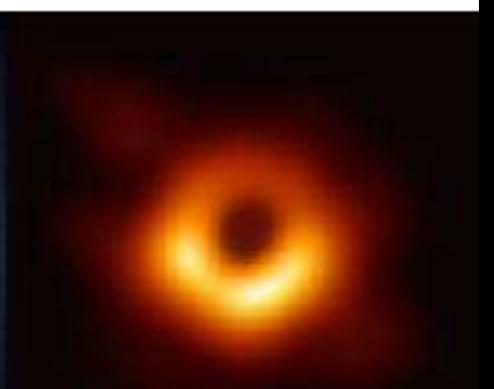


EXPECTATION	
REALITY	



ME AFTER BUYING THE IPHONE XS

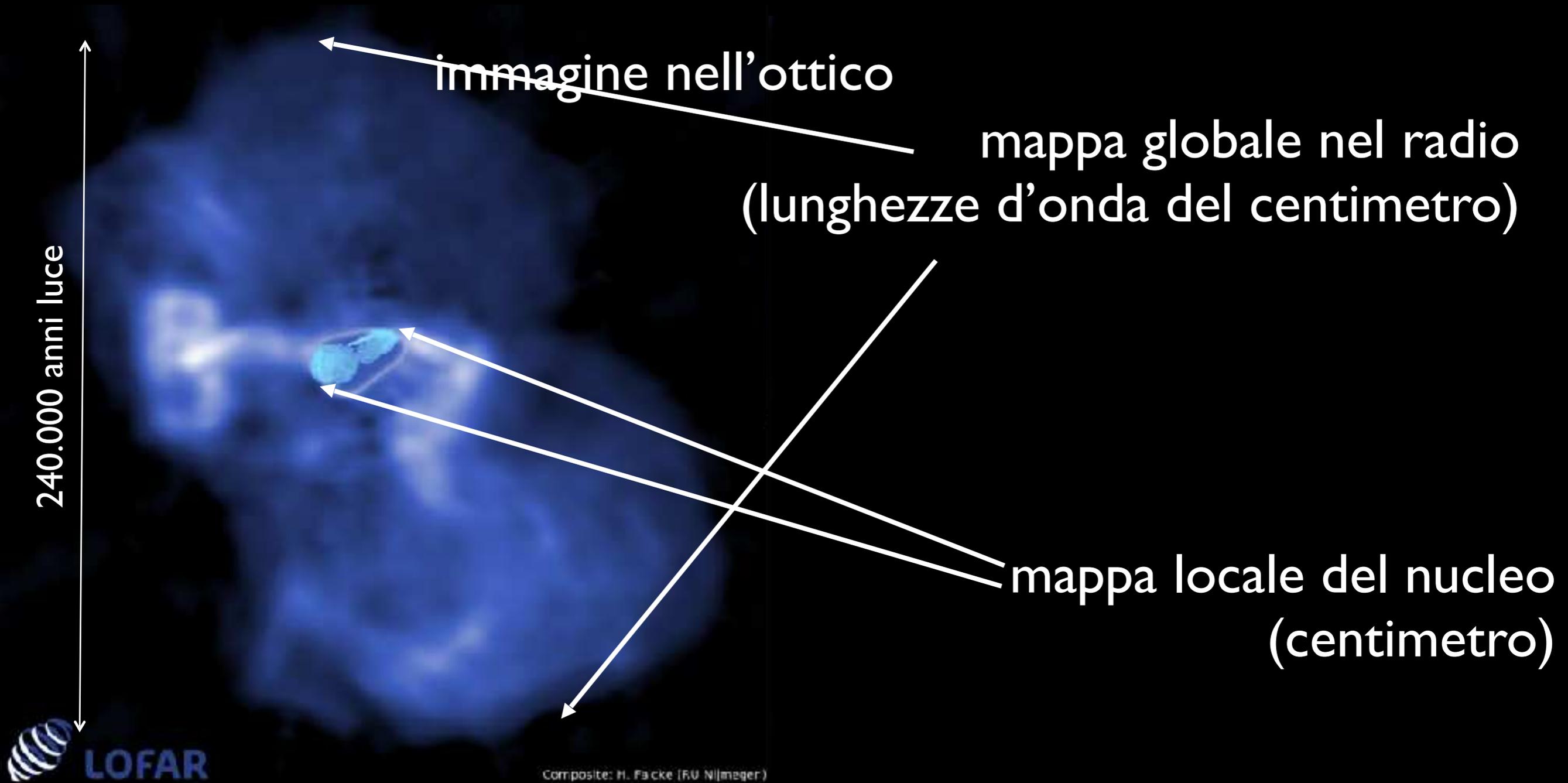
INSTAGRAM **REAL LIFE**



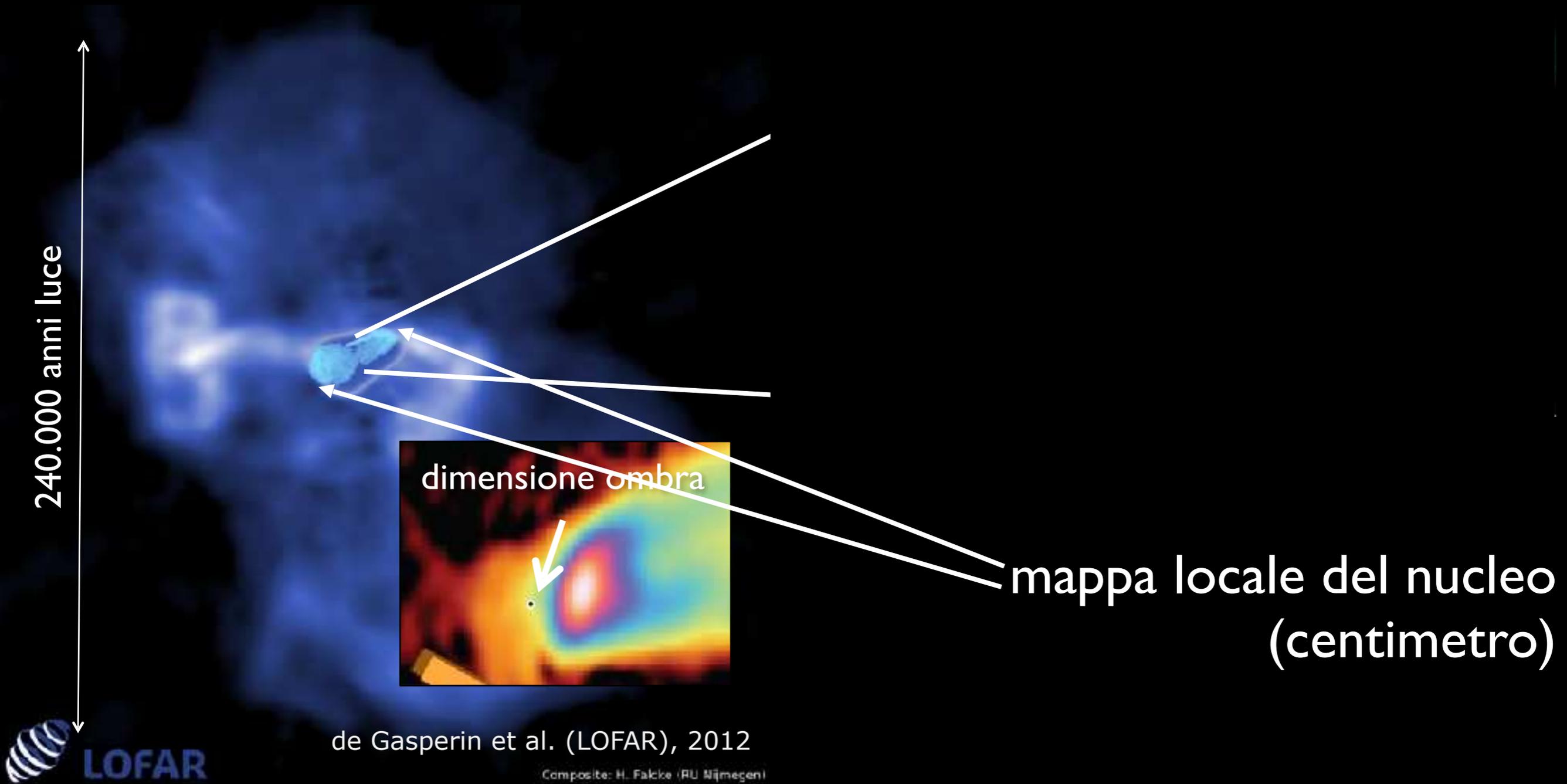
visto da Bologna

Il getto radio in M87 (Virgo A)

M87 è una galassia al centro dell'ammasso di Virgo ad una distanza di 55 milioni di anni luce; la massa è stimata in miliardi di masse solari



M87 è una galassia al centro dell'ammasso di Virgo ad una distanza di 55 milioni di anni luce; la massa è stimata in miliardi di masse solari



EHT BLACK HOLE IMAGE
SOURCE: NSF

... per avere un'idea
delle scale...



Come si produce l'immagine?

Osservazioni

EHT telescopes



Come si produce l'immagine?

Osservazioni

EHT telescopes



U - V coverage

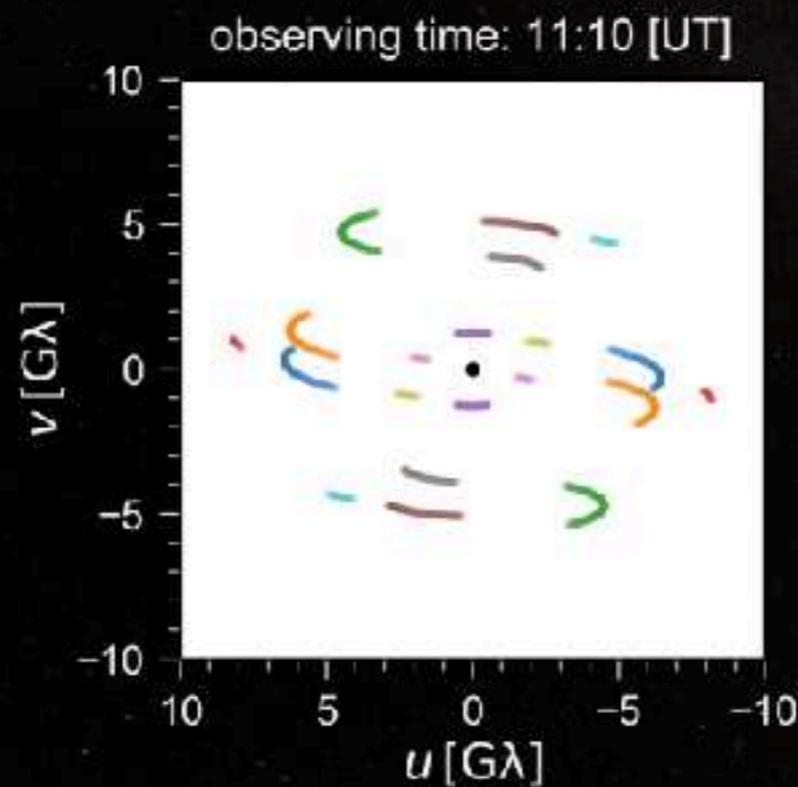
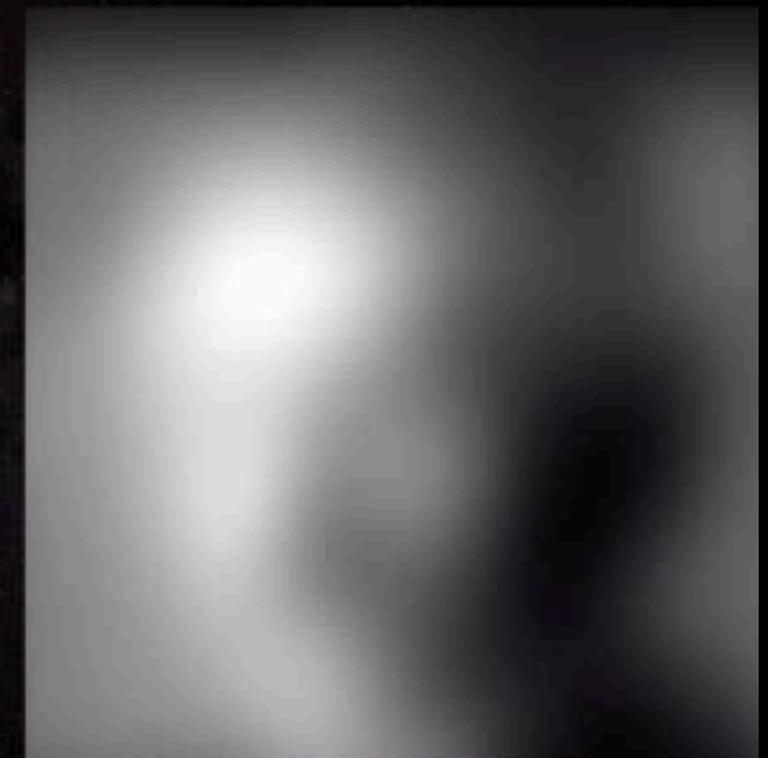


image reconstructed



Come si produce l'immagine?

Osservazioni

EHT telescopes



Come si produce l'immagine?

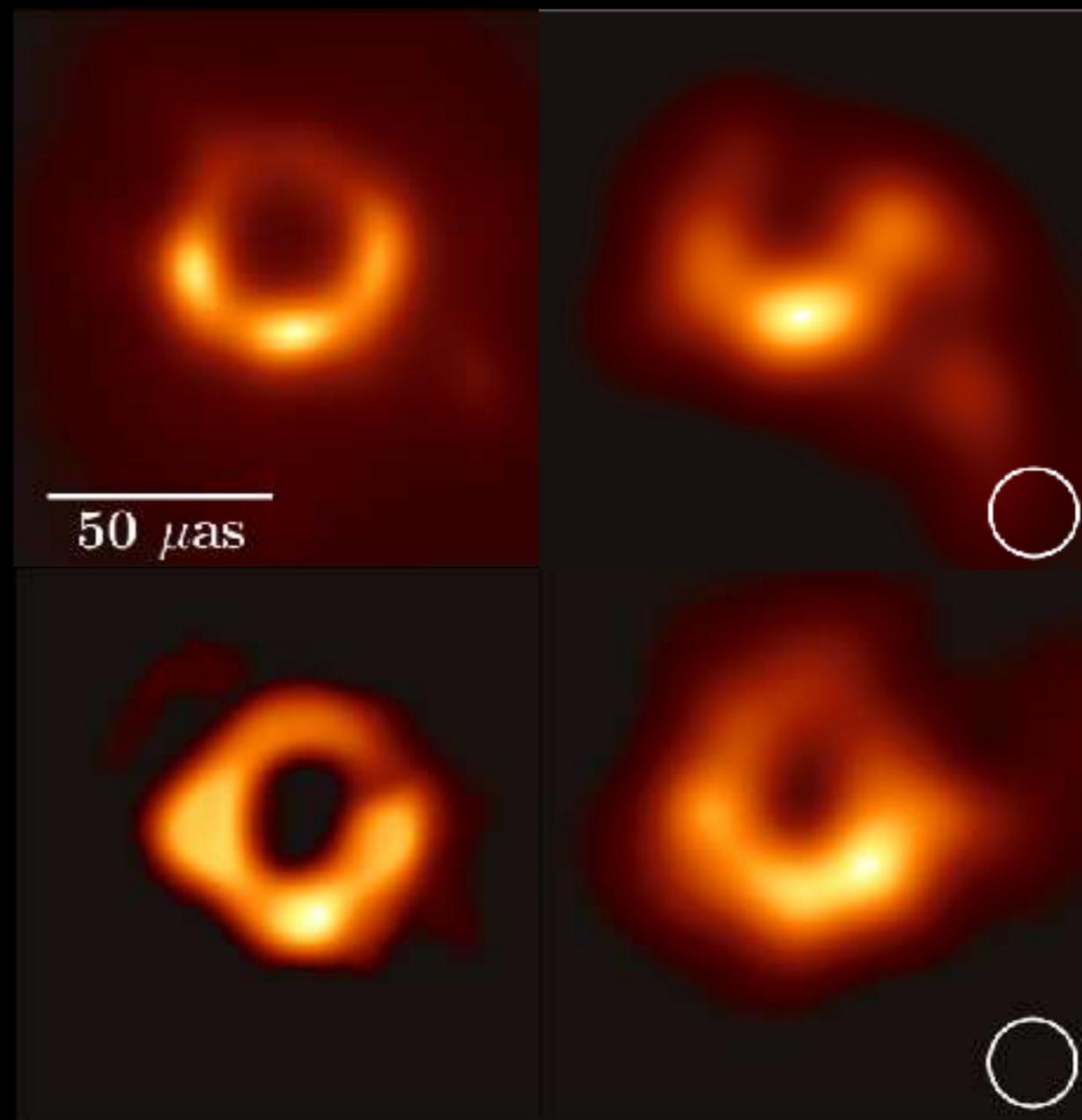
Osservazioni



Dopo aver preso i dati, averli convertiti e calibrati, quattro squadre diverse sono state incaricate di fare un'analisi dei dati in maniera indipendente

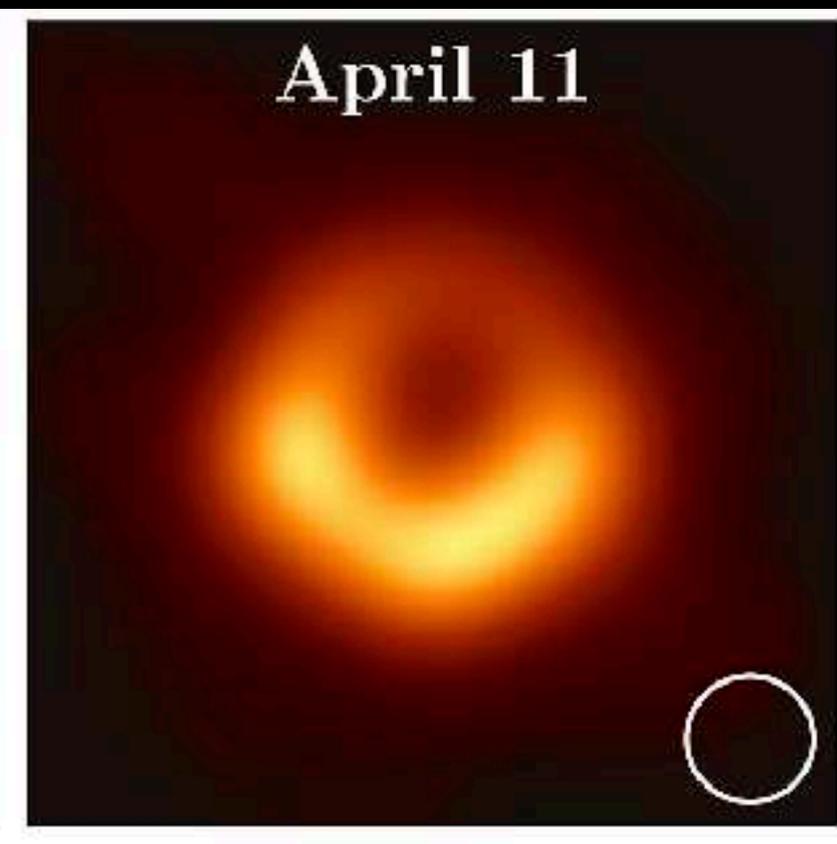
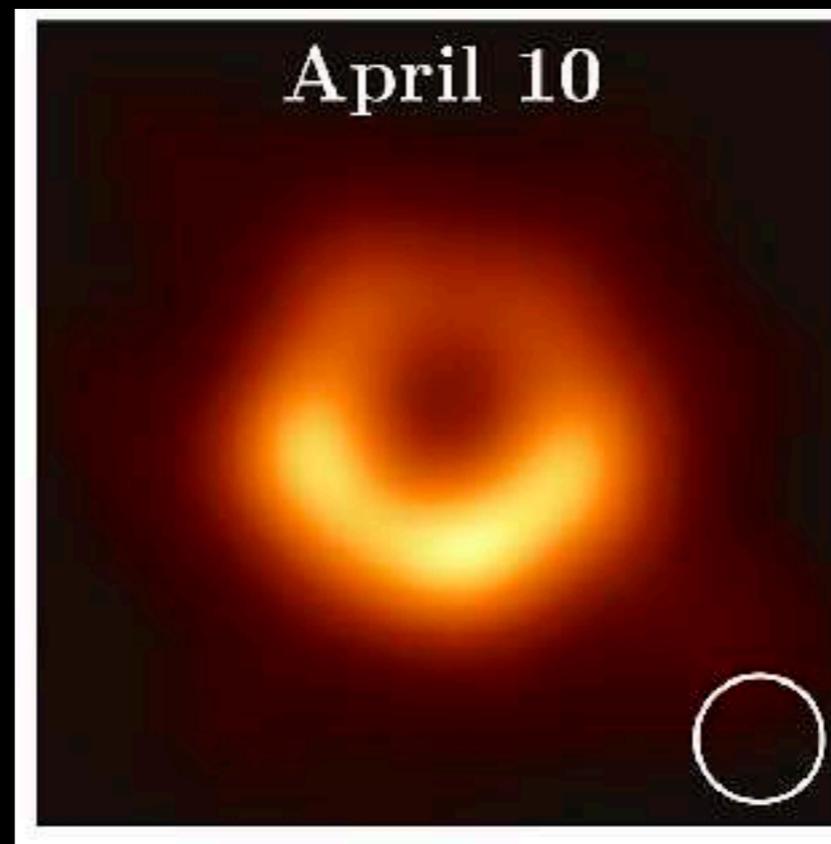
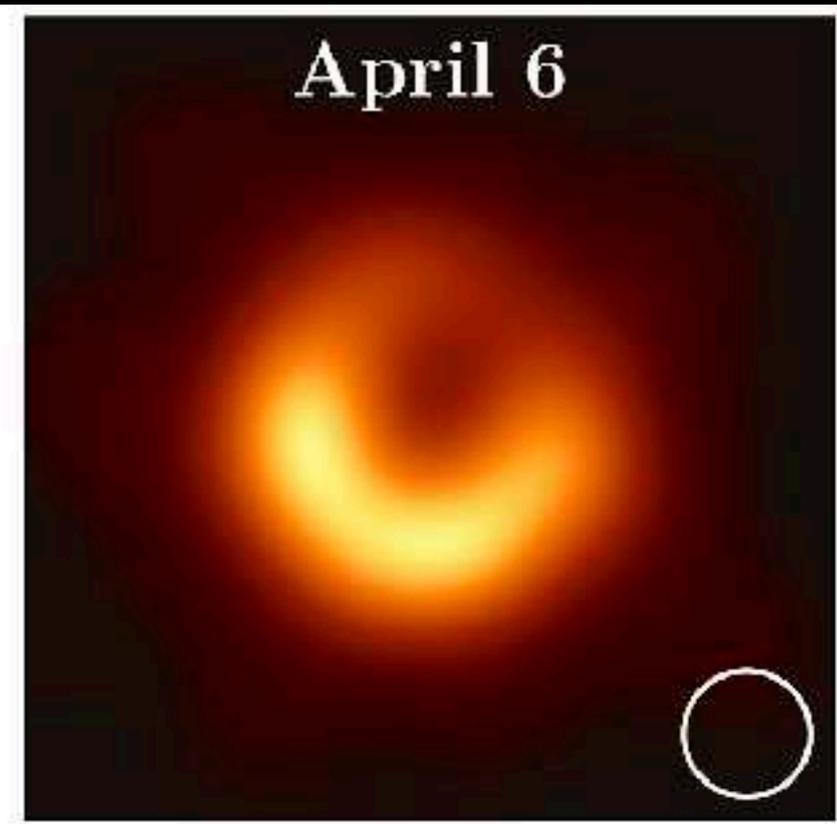
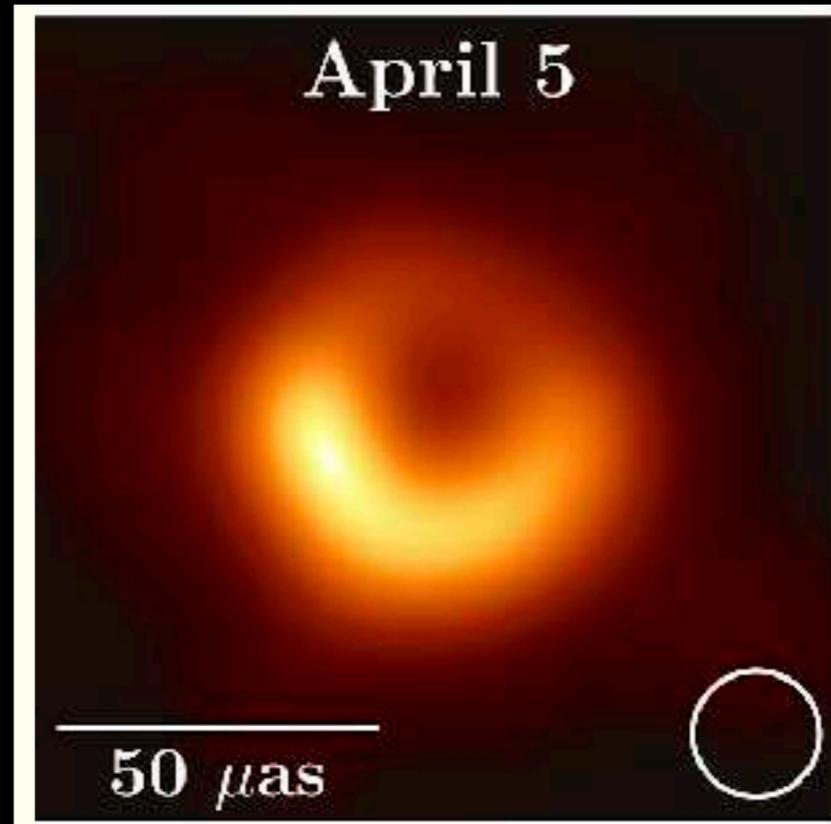
Le quattro squadre hanno usato software vario e diverso lavorando al buio e senza confrontarsi.

Alla fine i risultati sono stati rivelati: tutte le squadre hanno trovato un anello di emissione asimmetrico



M87 è stato osservato per diversi giorni (otto) dando vita a quattro immagini distinte.

Le immagini sono leggermente diverse ma mostrano che l'emissione dall'anello asimmetrico è stabile così come previsto su questi tempi scala.



Come si produce l'immagine?

Teoria

In generale sono necessari tre elementi essenziali

1. Simulazioni di magnetoidrodinamica (GRMHD)
2. Trasporto radiativo ed immagini ray-traced
3. Errori strumentali e confronto osservazioni

Il progetto Europeo **BlackHoleCam** (LR, Falcke, Kramer)
ha sviluppato un'infrastruttura che fa tutto questo

BHAC / BHOSS / GENA

C. Fromm

R. Gold

Y. Mizuno

H. Olivares

O. Porth

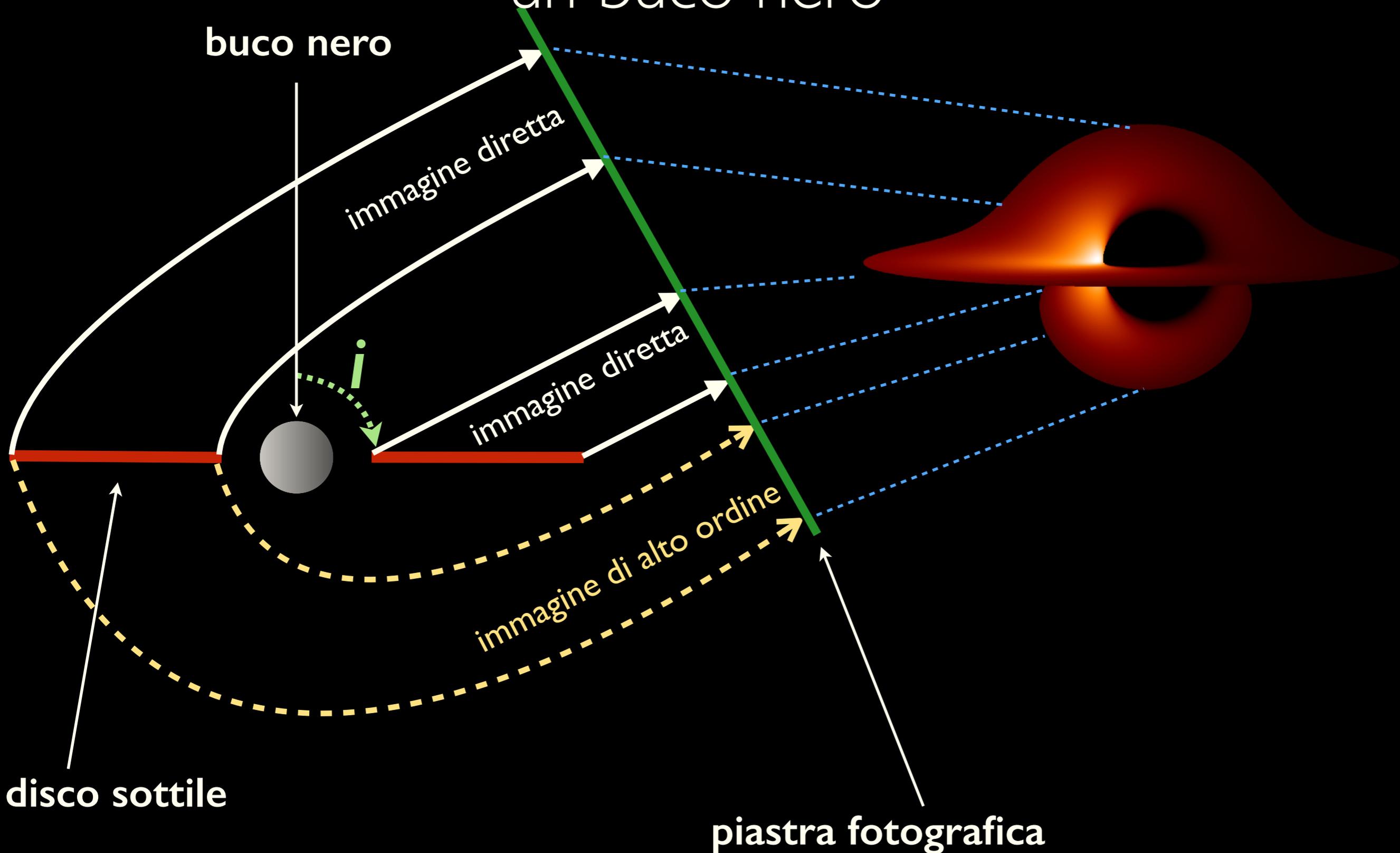
Z. Younsi



now UA

now UCL

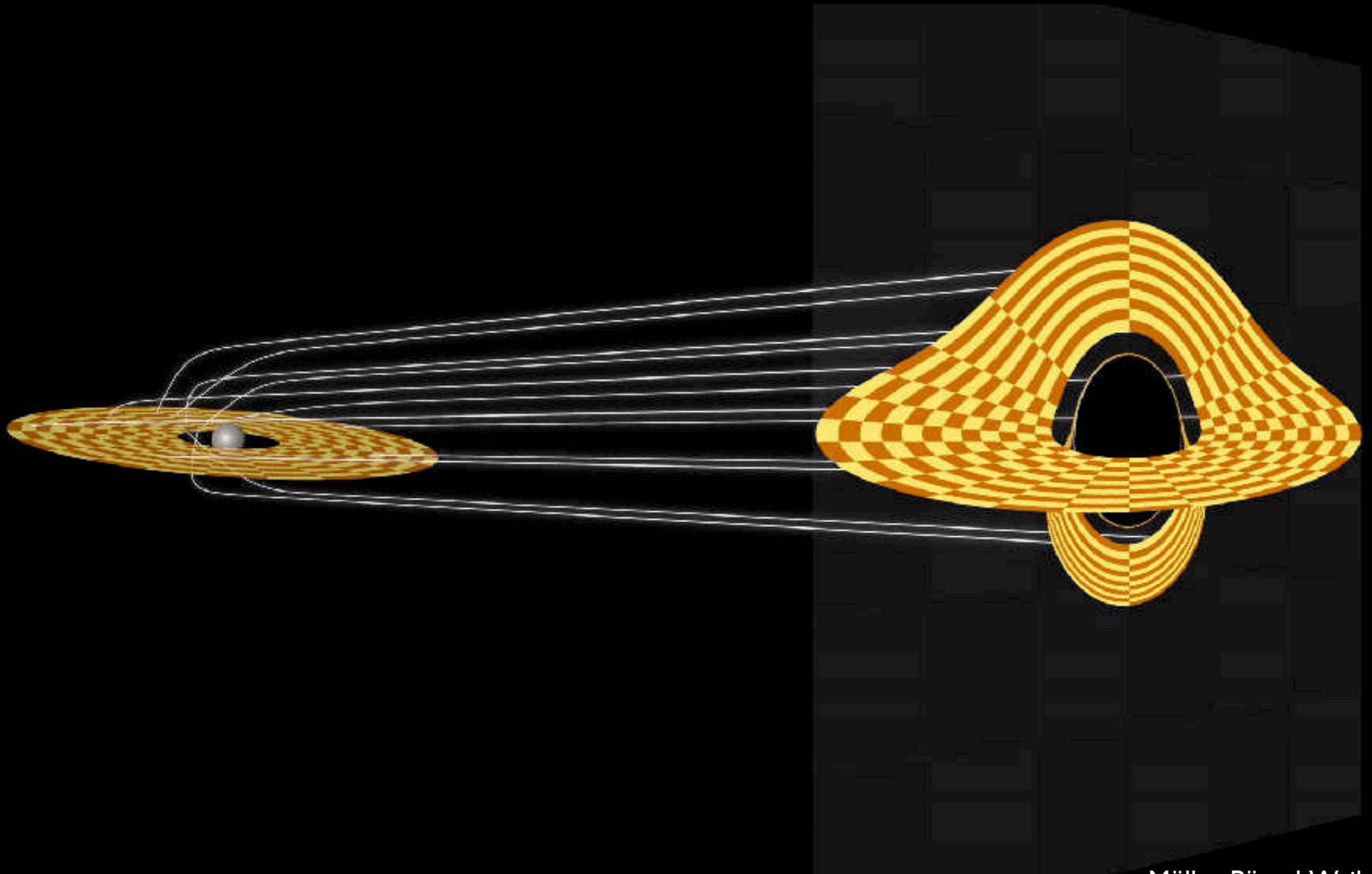
Il comportamento della luce è bizzarro vicino ad un buco nero



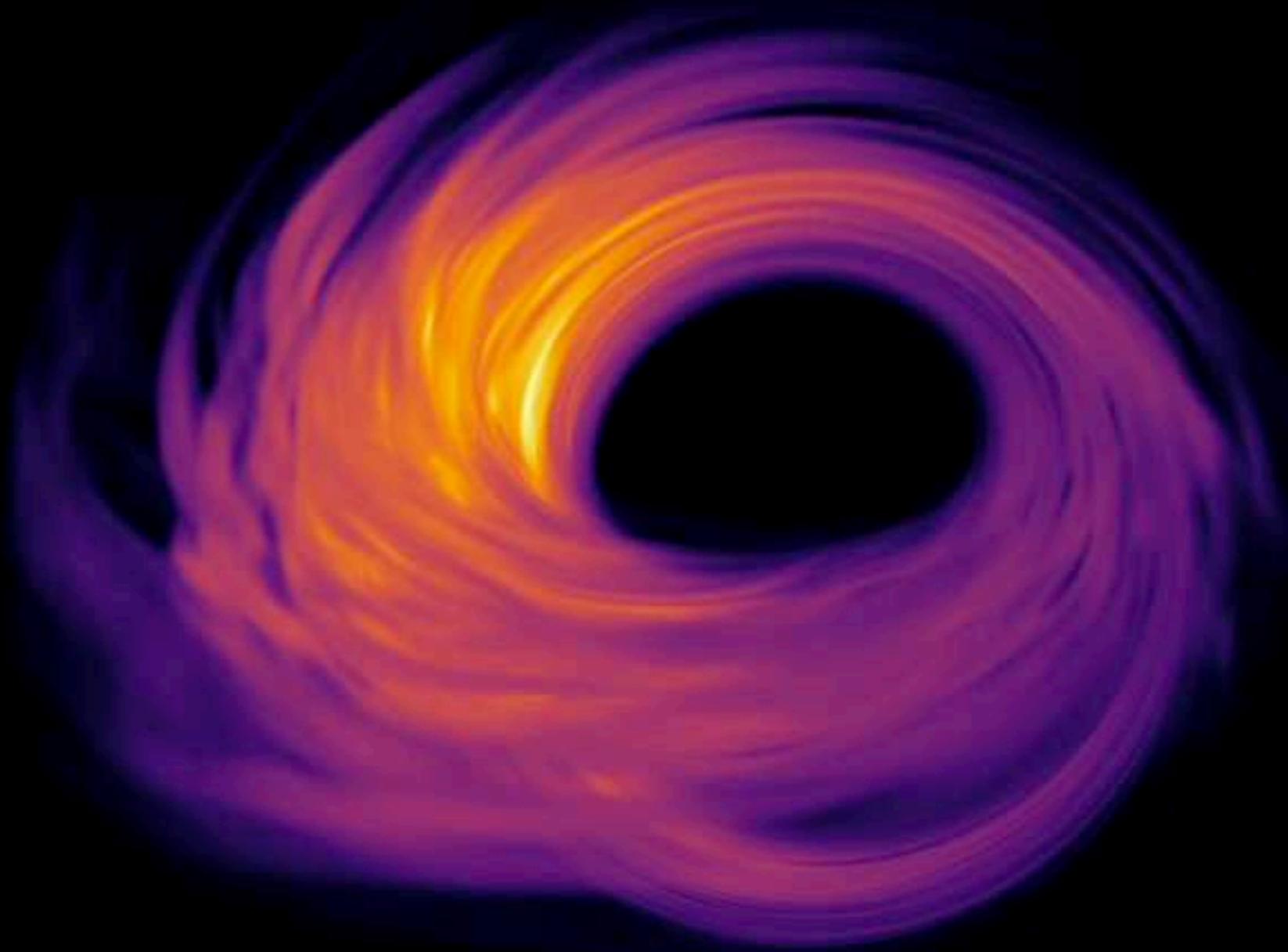
A glowing, ethereal ring of light in space, representing the luminous disk of the planet Gargantua. The ring is composed of multiple concentric, slightly blurred bands of light, creating a sense of depth and motion. The light is a warm, golden-yellow color, contrasting sharply with the dark, star-filled background of space. The ring is centered horizontally and vertically in the upper half of the image.

L'immagine bizzarra di Gargantua in Interstellar mostra quindi anche le parti nascoste di un disco **sottile** luminoso

L'immagine dipende anche
dall'inclinazione rispetto all'osservatore...

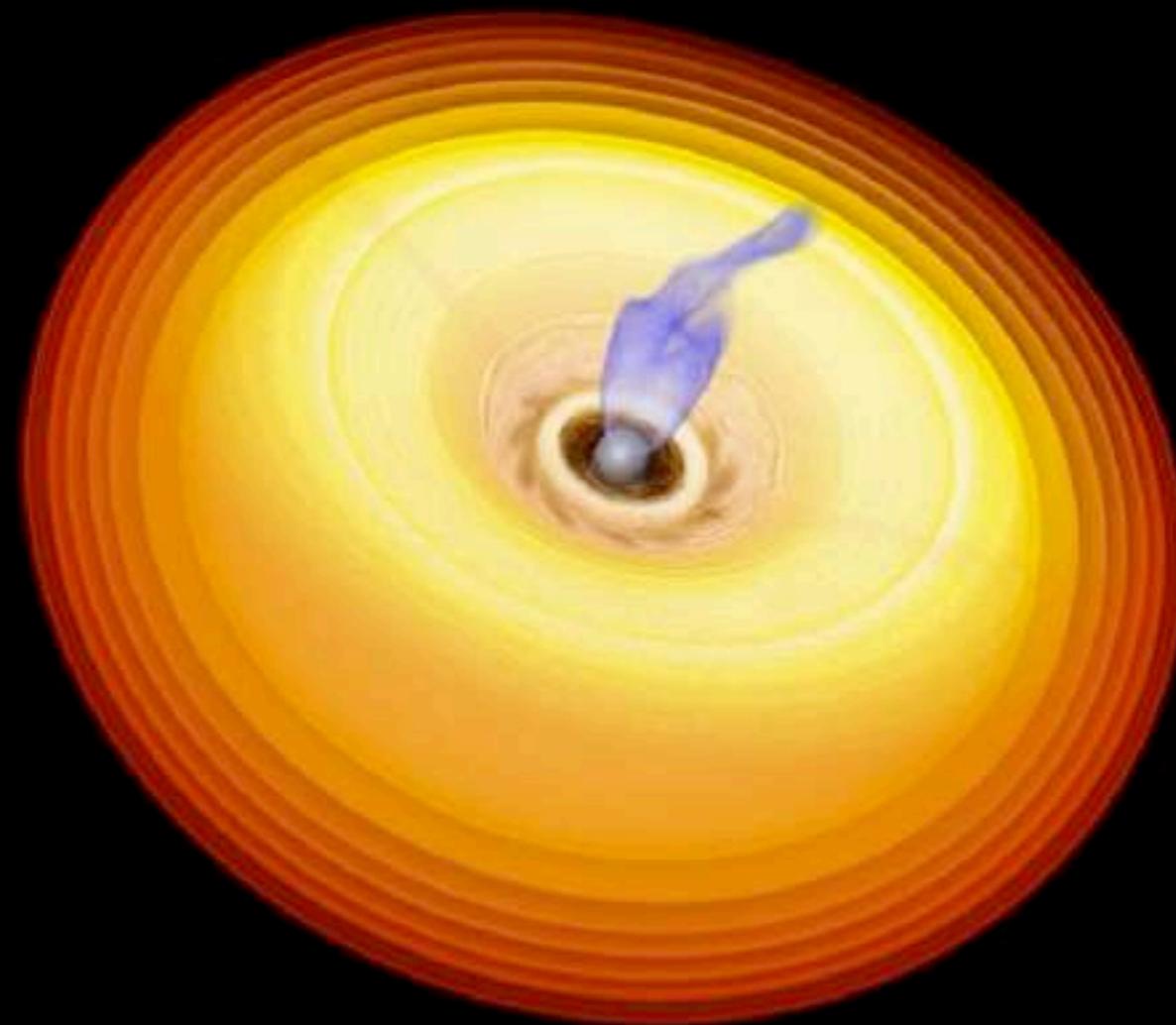


In realtà il disco non è sottile ma spesso...



Una tipica simulazione da supercomputer...

Accrescimento di un toro soggetto all'instabilità magnetorotazionale che accresce su un buco nero rotante di Kerr ($a=0.9375$) risolto in coordinate di Kerr-Schild

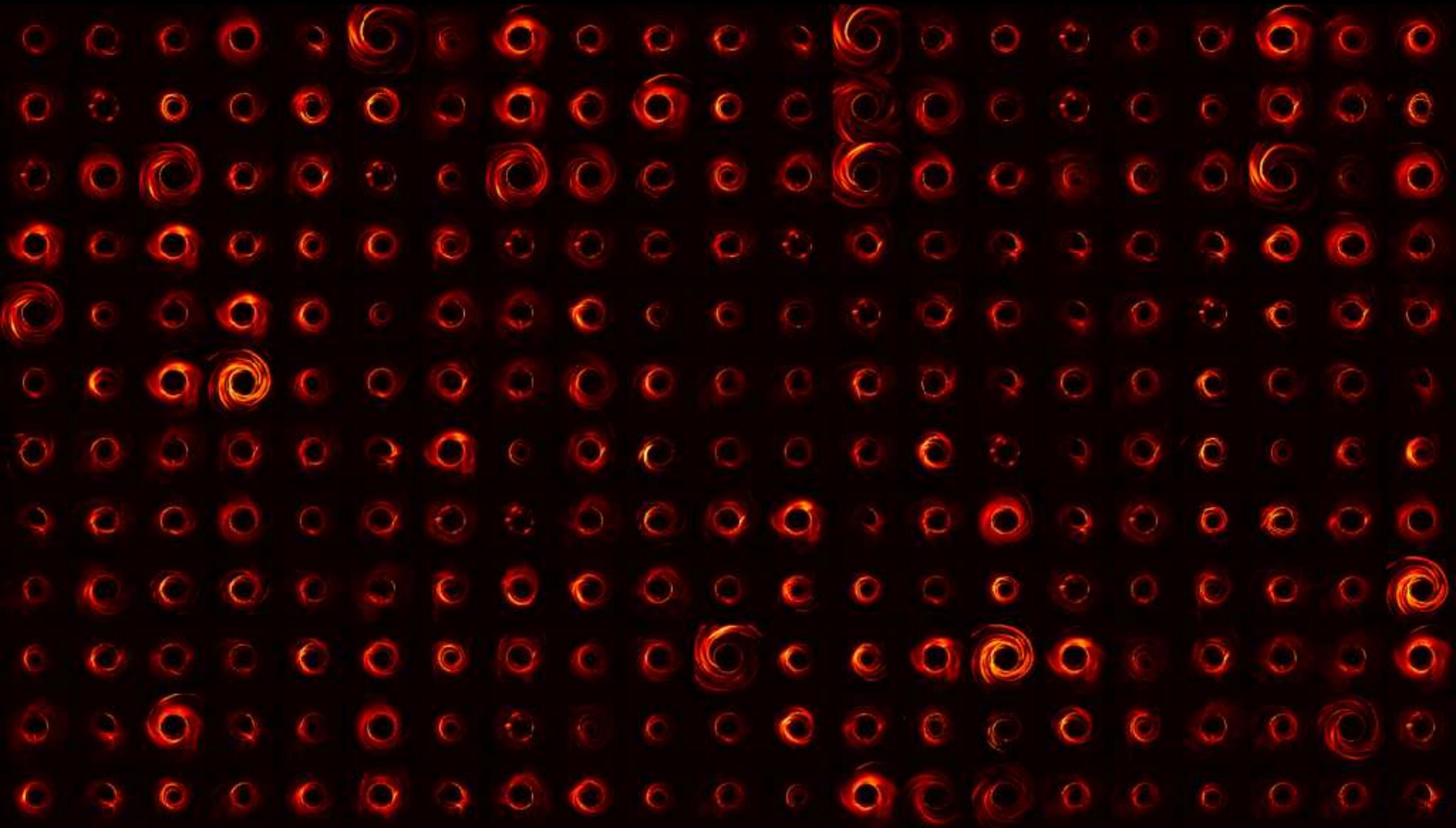


L. R. Weih & L. Rezzolla
(Goethe University Frankfurt)

L. Weih, LR

- Prese certe assunzioni fisiche (spin del buco nero, tipo di disco, etc), **simulazioni** 3D in GRMHD sono state realizzate: ~ **50** *simulazioni ad alta risol.*
- Da ogni simulazione sono stati costruiti diversi **scenari** variando la *termodinamica degli elettroni* e *producendo circa 400 scenari.*

un intero catalogo di simulazioni...



- Prese certe assunzioni fisiche (spin del buco nero, tipo di disco, etc), **simulazioni** 3D in GRMHD sono state realizzate: ~ **50 simulazioni ad alta risol.**
- Da ogni simulazione sono stati costruiti diversi **scenari** variando la *termodinamica degli elettroni* e *producendo circa 400 scenari.*
- Da ogni scenario sono state prodotte **immagini sintetiche** tenendo conto del trasporto radiativo e della curvatura della luce: ~ **60,000 immagini.**
- Algoritmi genetici e di Markov-Chain Monte Carlo hanno quindi cercato il **riscontro migliore.**

original image

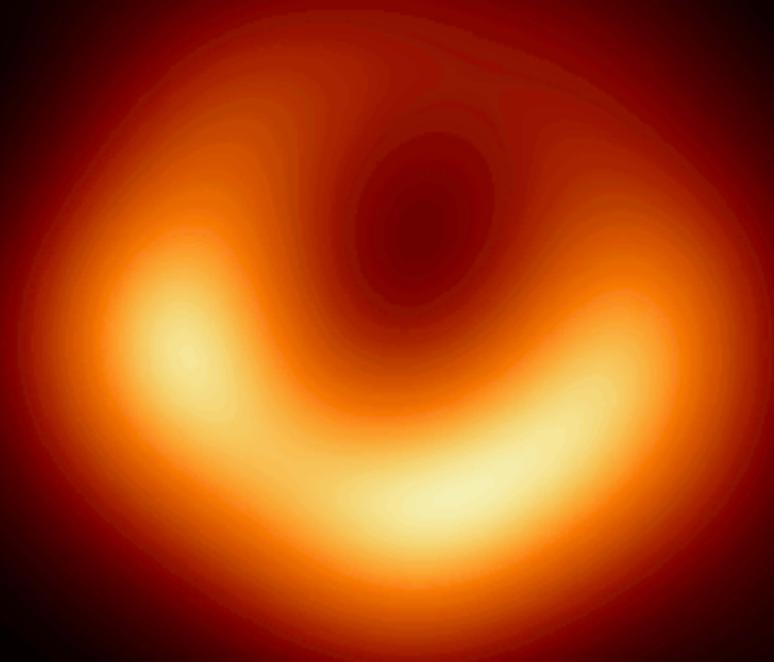


test image 0

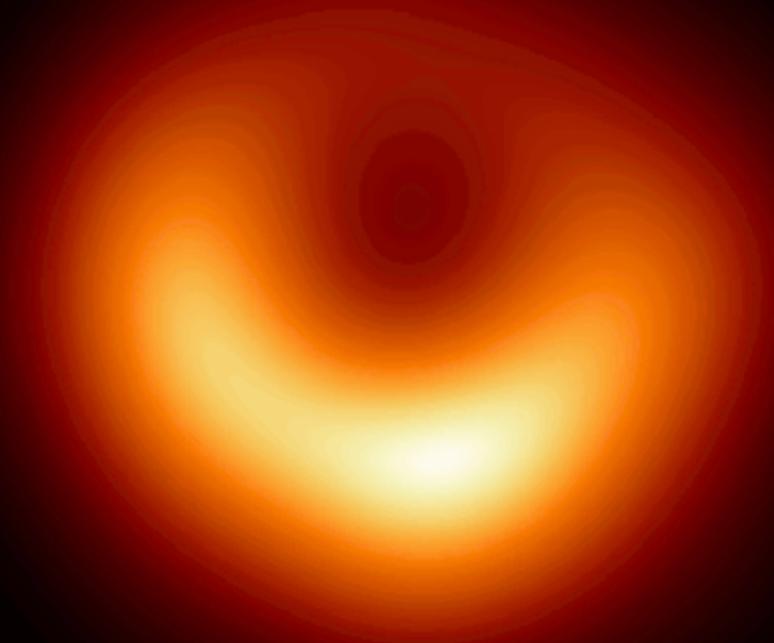


Top-10 best matches

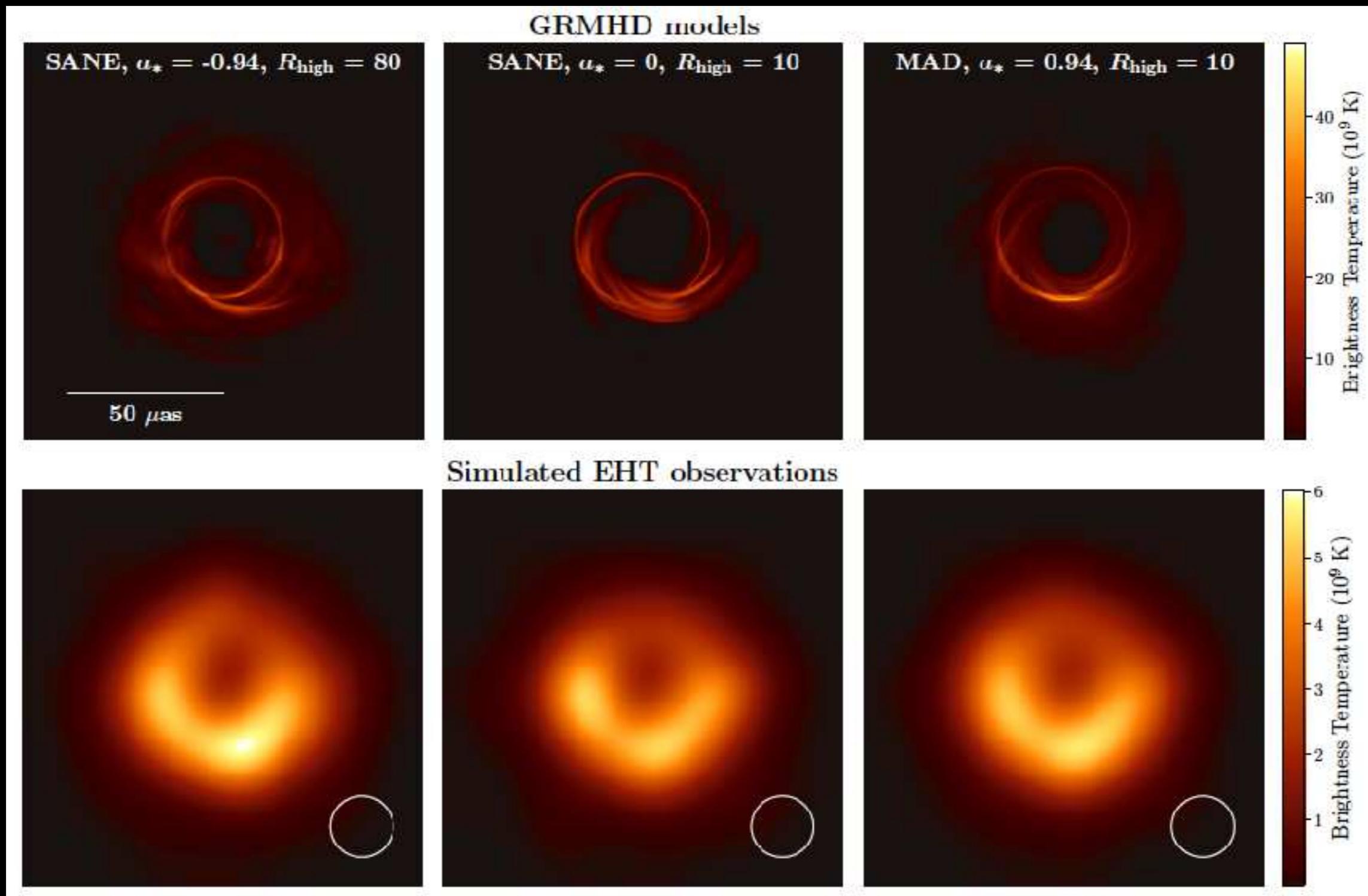
Come trovare l'immagine giusta...



OSSERVAZIONI



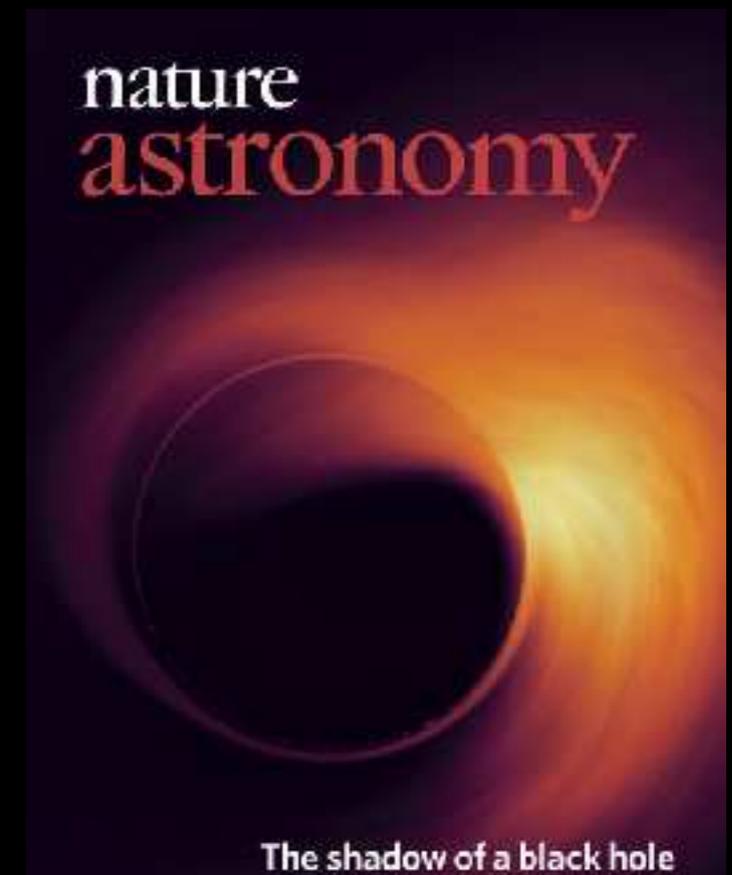
MODELLO TEORICO



- Degenerazioni sono presenti nello spazio dei parametri. Questo è un **bene** ed un **male**: non sappiamo ancora che tipo di buco nero è, ma deve essere un buco nero!

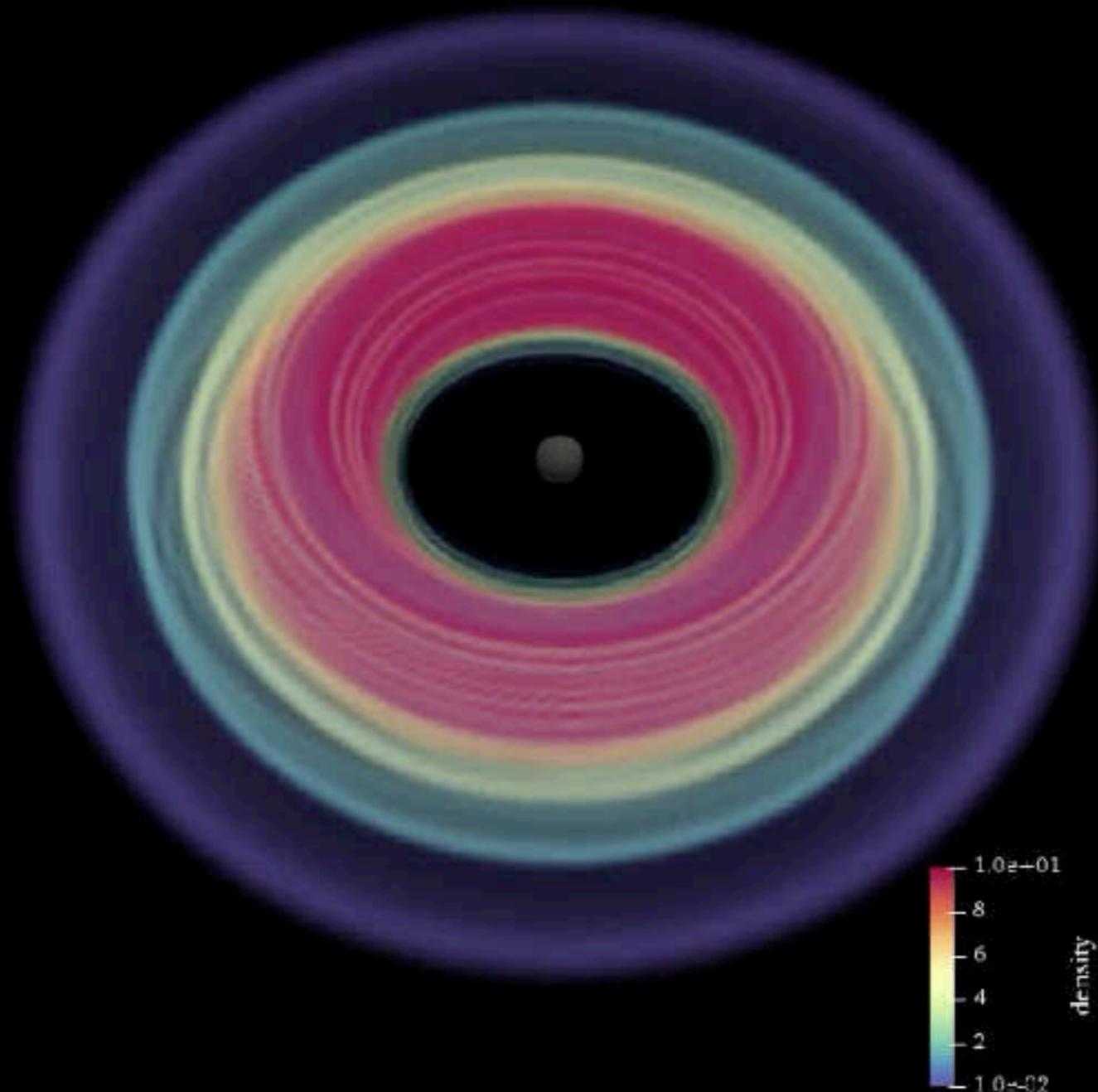
- Le osservazioni sono in ottimo accordo con le previsioni teoriche per un buco nero.
- Siamo altrettanto sicuri che si tratti di un buco nero della teoria di Einstein e non di un'altra teoria?
- Siamo altrettanto sicuri che non si tratti di qualcosa che è simile ad un buco nero ma non lo è?

Alternative a buchi neri
di Einstein:
accrescimento su un
buco nero dilatónico

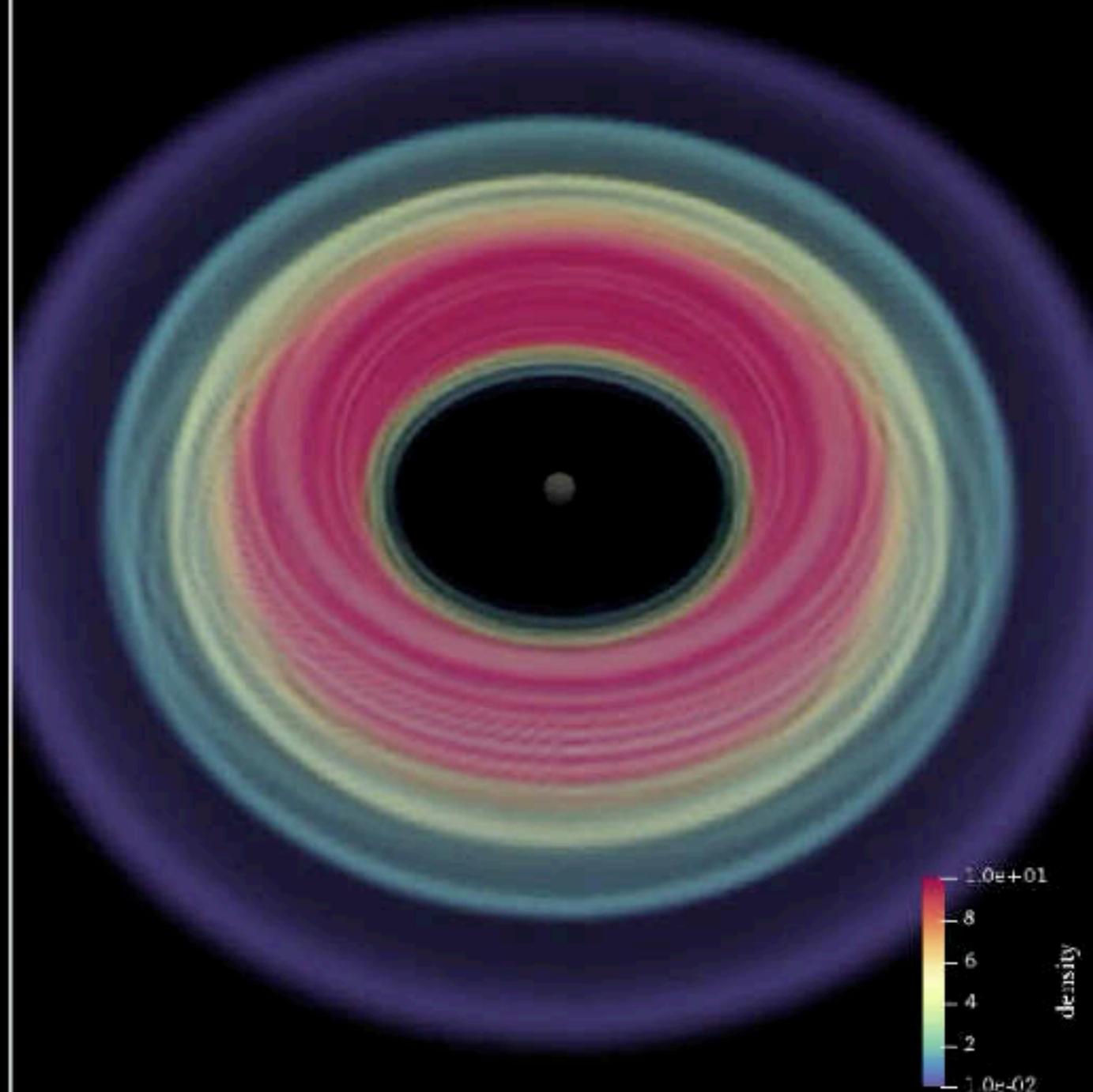


simulazioni GRMHD

Kerr



Dilaton

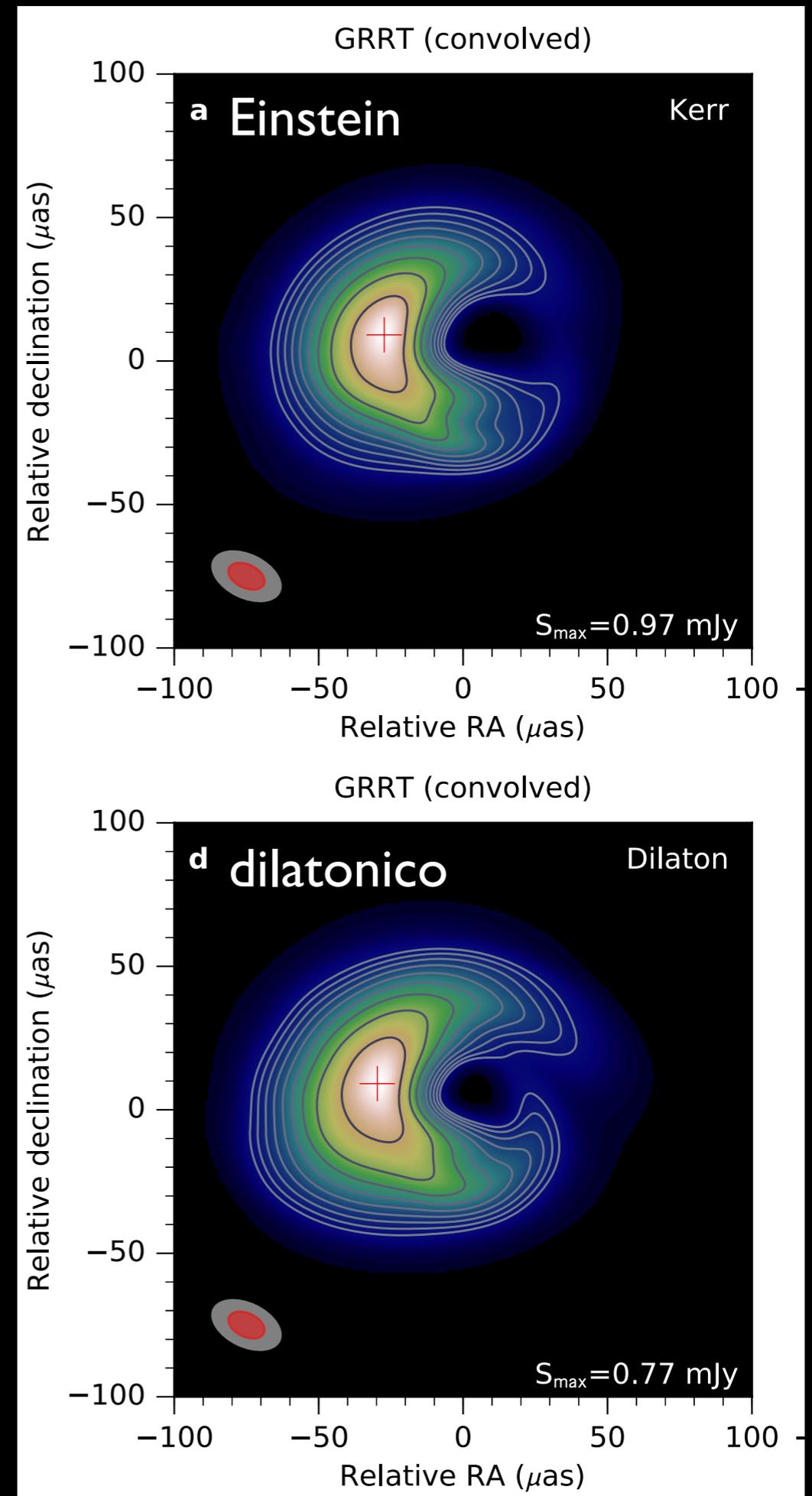


simulazioni in 3D e GRMHD di un toro magnetizzato in accrescimento su un **buco nero di Kerr** ($a=0.6$) e un **buco nero dilatonic** ($b=0.5$)

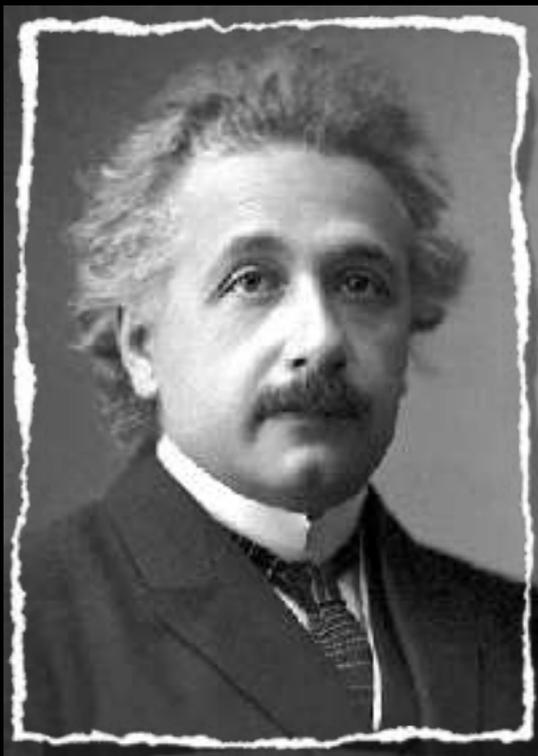
Quello che conta è se saremmo in grado di distinguere le immagini.

Come apparirebbe un buco nero dilattonico?

Conclusioni: alla risoluzione attuale è **difficile distinguere** buchi neri di Einstein da quelli di altre teorie.



Conclusioni



- Einstein ha proposto un'interpretazione **rivoluzionaria** della **gravità**.
- Le equazioni di questa nuova teoria portano a predizioni **bizzarre** e spesso **incomprensibili** ma sempre **corrette!**
- **EHT** ha mostrato che buchi neri supermassicci esistono e sono al centro delle galassie: è un risultato **epocale**.
- **EHT** e **LIGO/Virgo** forniranno nuove osservazioni di **buchi neri, stelle di neutroni e onde gravitazionali**.
- Insieme a queste osservazioni potremo esplorare nuovi e forse inaspettati dettagli dell'**universo di Einstein**.