

Un viaggio nell'universo di Einstein: buchi neri, stelle di neutroni e onde gravitazionali

Luciano Rezzolla

Institute for Theoretical Physics, Frankfurt

Frankfurt Institute for Advanced Studies, Frankfurt

ECT* 25

EUROPEAN CENTRE FOR THEORETICAL STUDIES
IN NUCLEAR PHYSICS AND RELATED AREAS



Programma della presentazione

- * un'introduzione alla gravità

Programma della presentazione

- * un'introduzione alla gravità
- * la visioni della gravità di Newton e di Einstein

Programma della presentazione

- * un'introduzione alla gravità
- * la visioni della gravità di Newton e di Einstein
- * buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali

Programma della presentazione

- * un'introduzione alla gravità
- * la visioni della gravità di Newton e di Einstein
- * buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali
- * gravità numerica: laboratori teorici

Programma della presentazione

- * un'introduzione alla gravità
- * la visioni della gravità di Newton e di Einstein
- * buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali
- * gravità numerica: laboratori teorici
- * Alcuni esempi dell'universo di Einstein

Programma della presentazione

- * un'introduzione alla gravità
- * la visioni della gravità di Newton e di Einstein
- * buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali
- * gravità numerica: laboratori teorici
- * Alcuni esempi dell'universo di Einstein

Interrompetemi senza esitazione!

La nostra nozione della gravità

* Nozione **istintiva** (Moro)



La nostra nozione della gravità

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

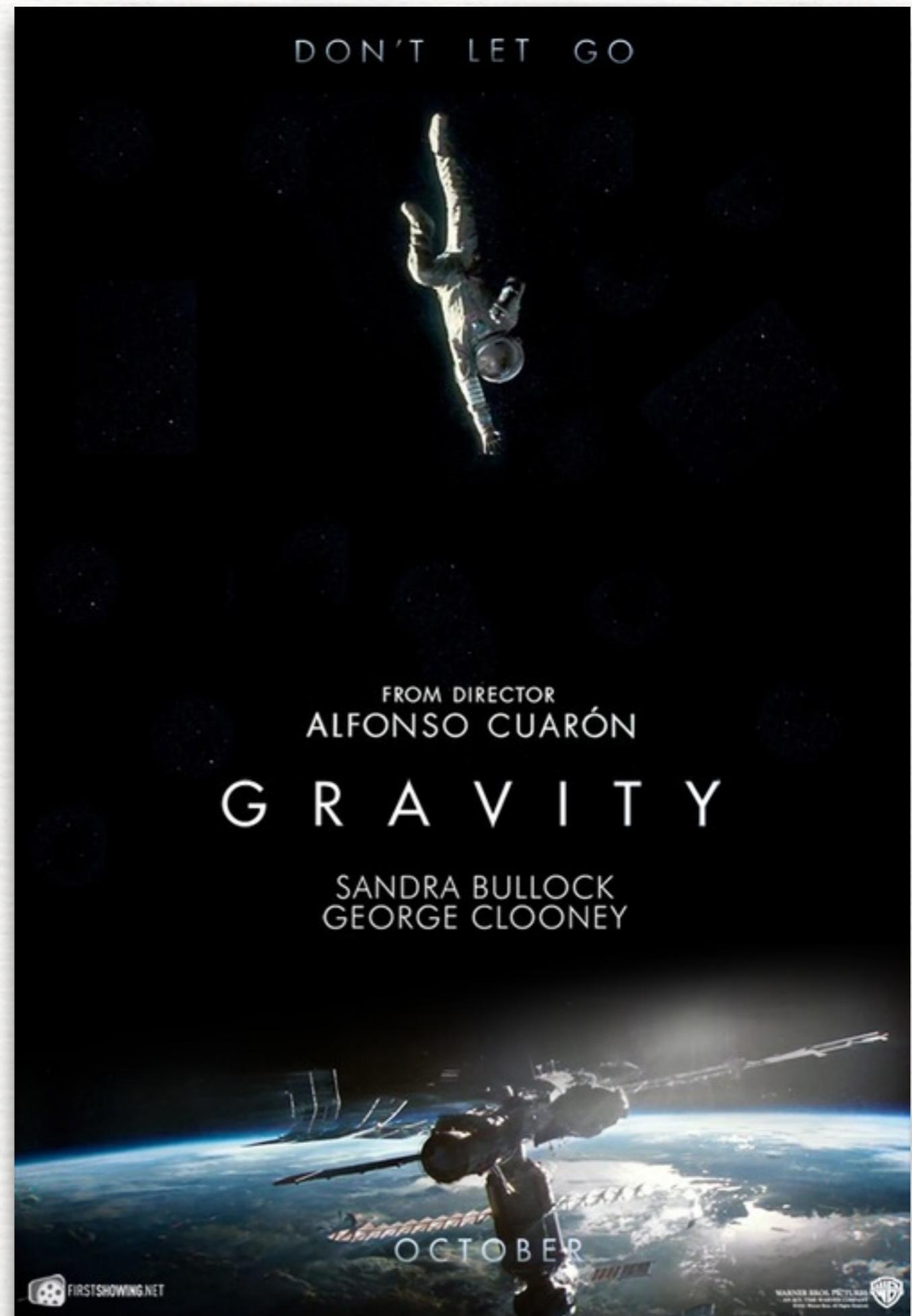


La nostra nozione della gravità

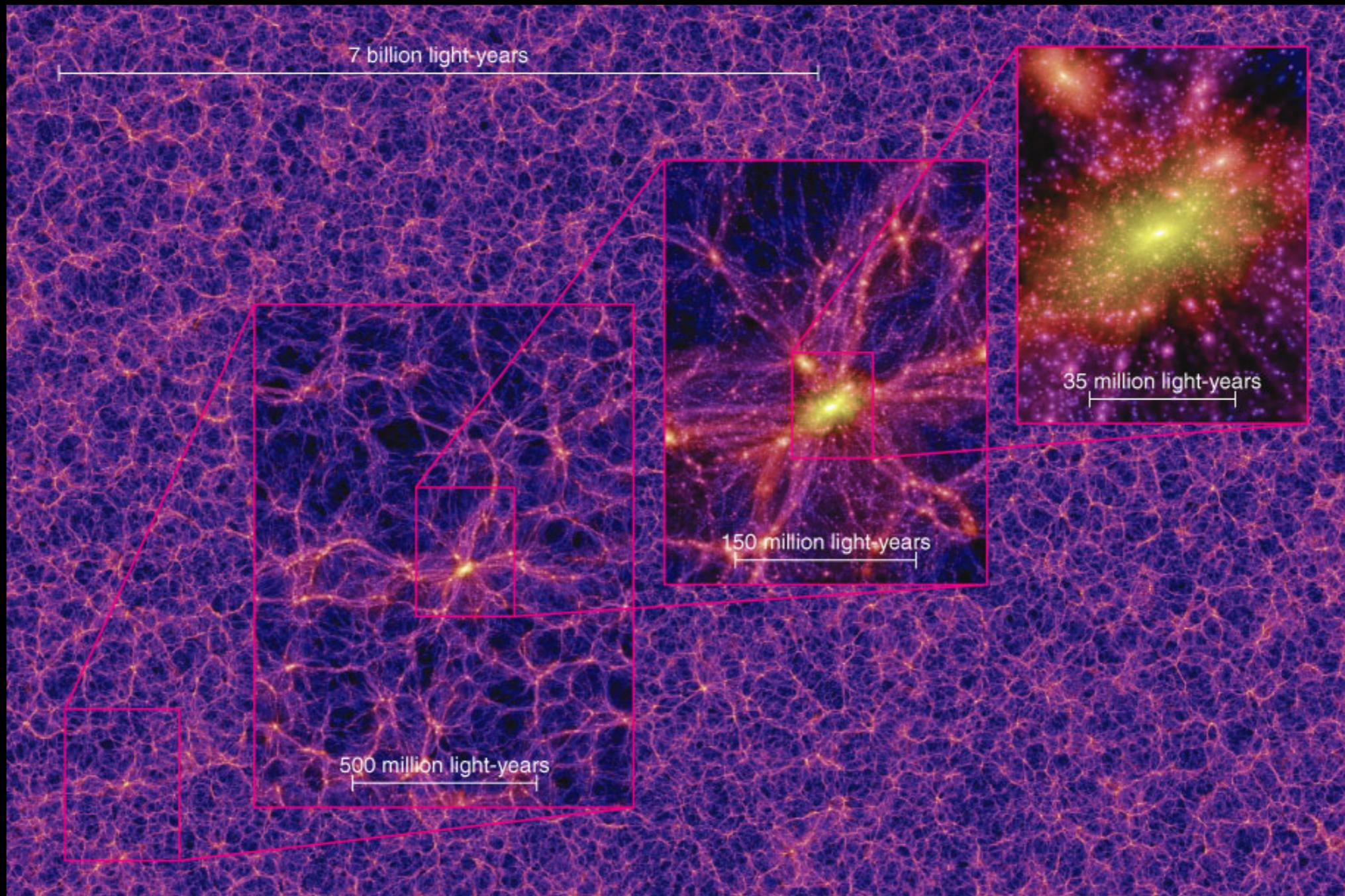
* Nozione **istintiva** (Moro)

* Nozione **razionale**

* Nozione **immaginativa**



La forza piu' diffusa e misteriosa

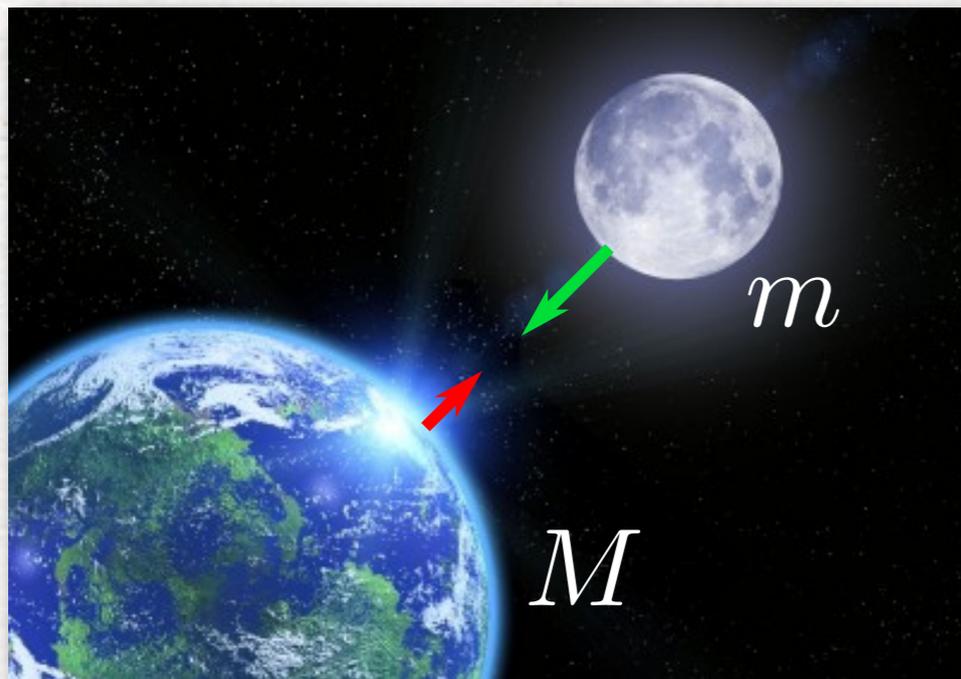


Su scale macroscopiche è **l'unica forza** che conti. Essa regola la formazione di strutture nell'universo e la sua evoluzione

I padri della gravità

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

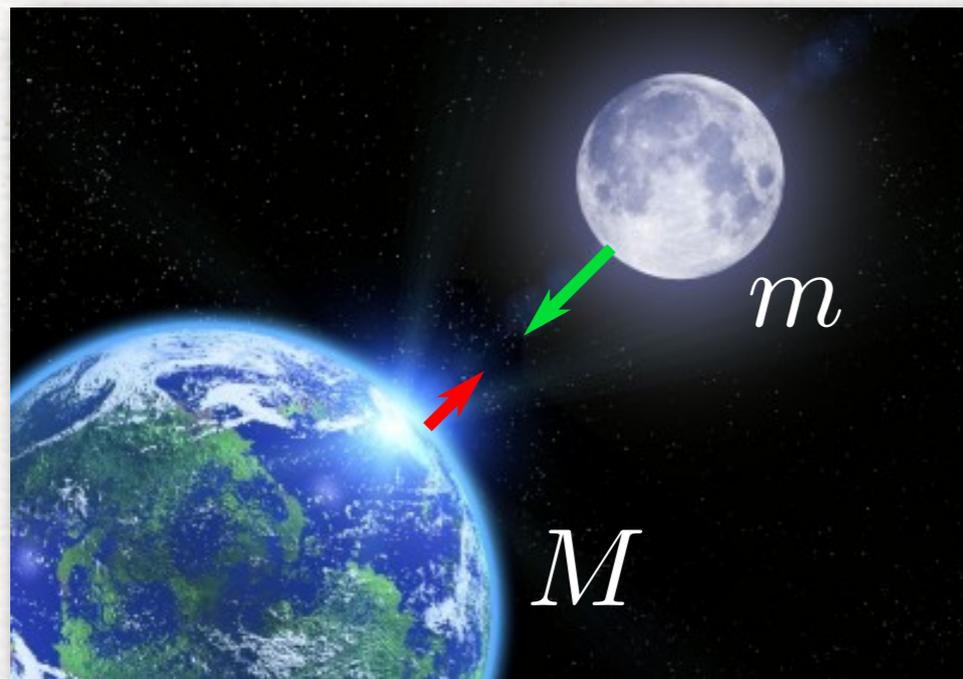
Per lui la gravità è una **forza** istantanea tra due masse che è proporzionale alle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza.



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.



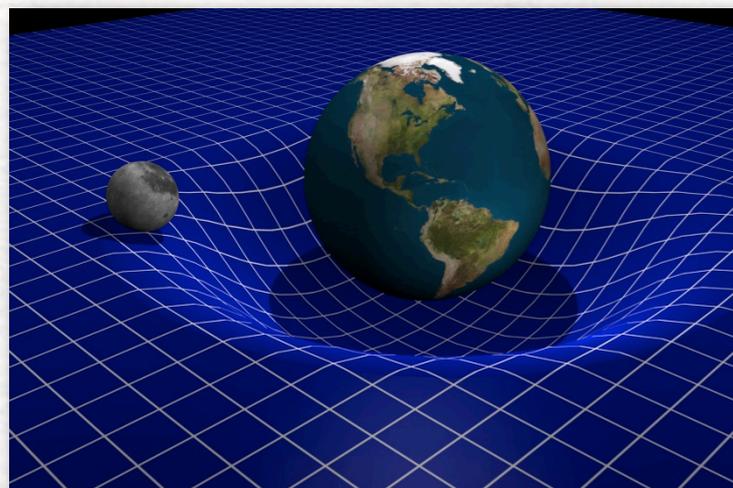
Con questa teoria egli era in grado di spiegare **tutte** le **osservazioni astronomiche** dei suoi tempi.

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.

Le equazioni di Einstein

Il nome di Einstein è normalmente associato a questa equazione

$$E = mc^2$$

The diagram shows the equation $E = mc^2$ with three red arrows pointing from labels below to the variables above. The arrow from 'energia' points to 'E', the arrow from 'massa' points to 'm', and the arrow from 'velocità luce' points to 'c'. The '2' is a superscript on 'c'.

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

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

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

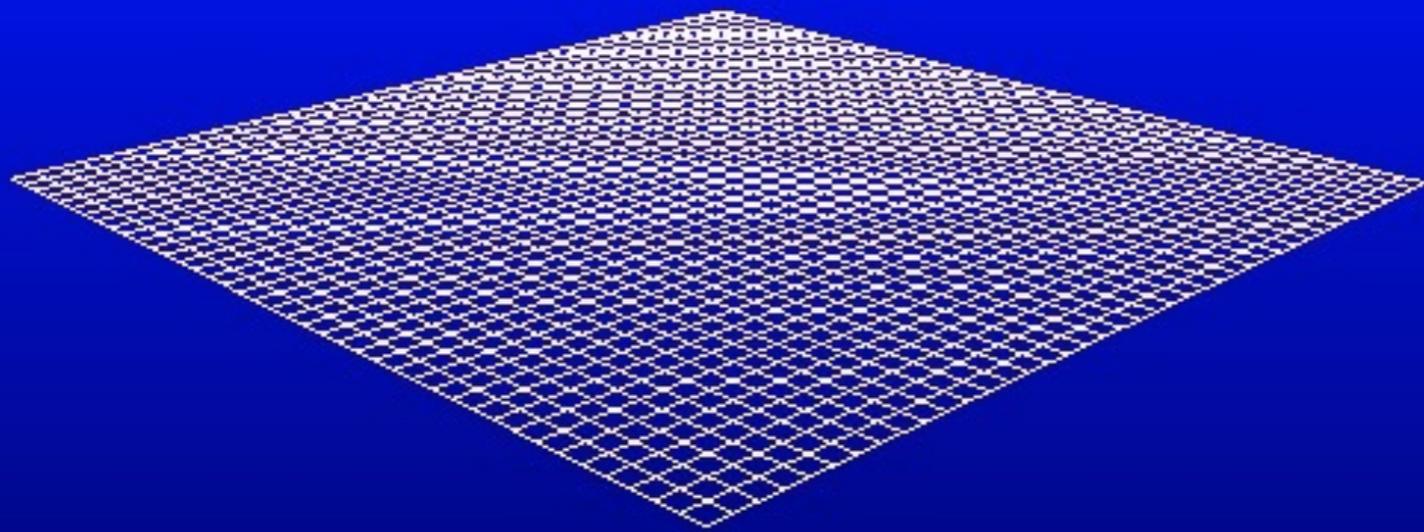
curvatura/geometria

massa/energia

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

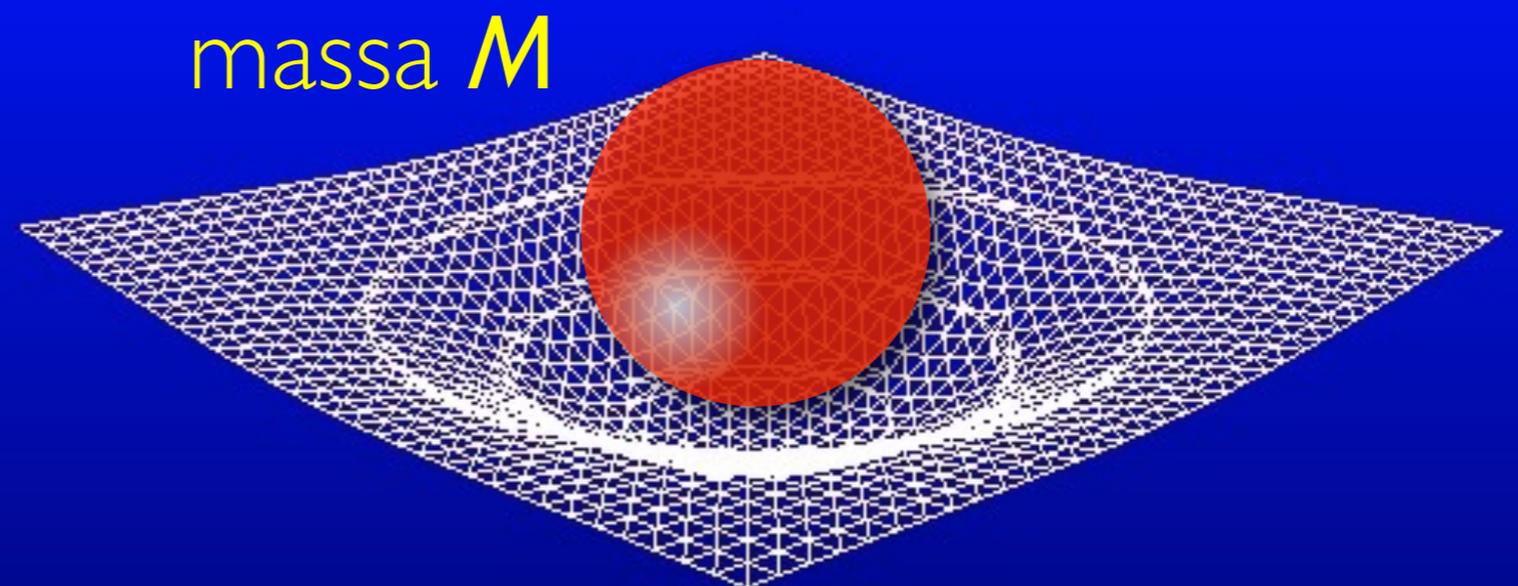
Ma cos'è la curvatura dello spazio-tempo?...



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

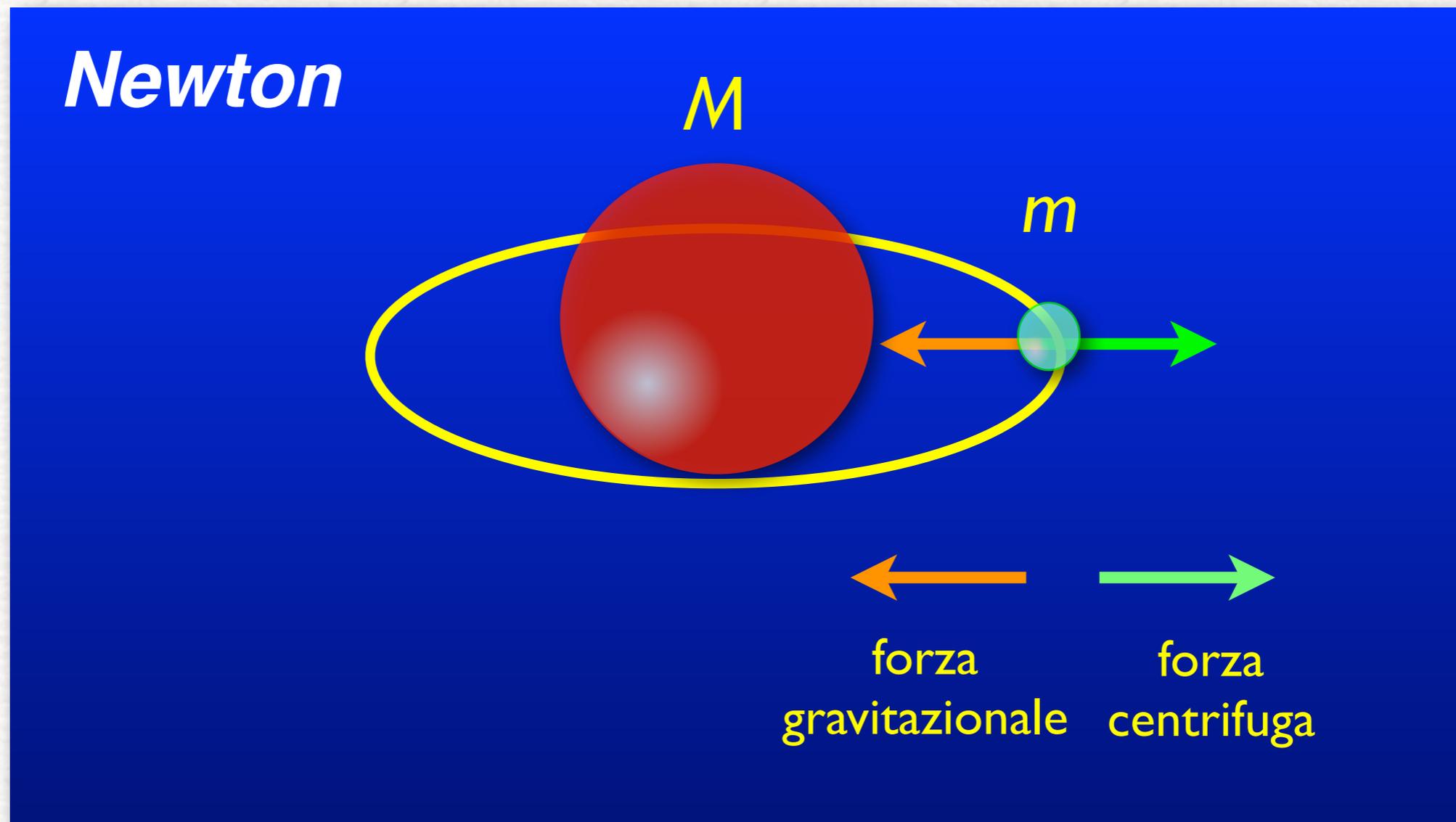
La gravità secondo Newton

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

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).

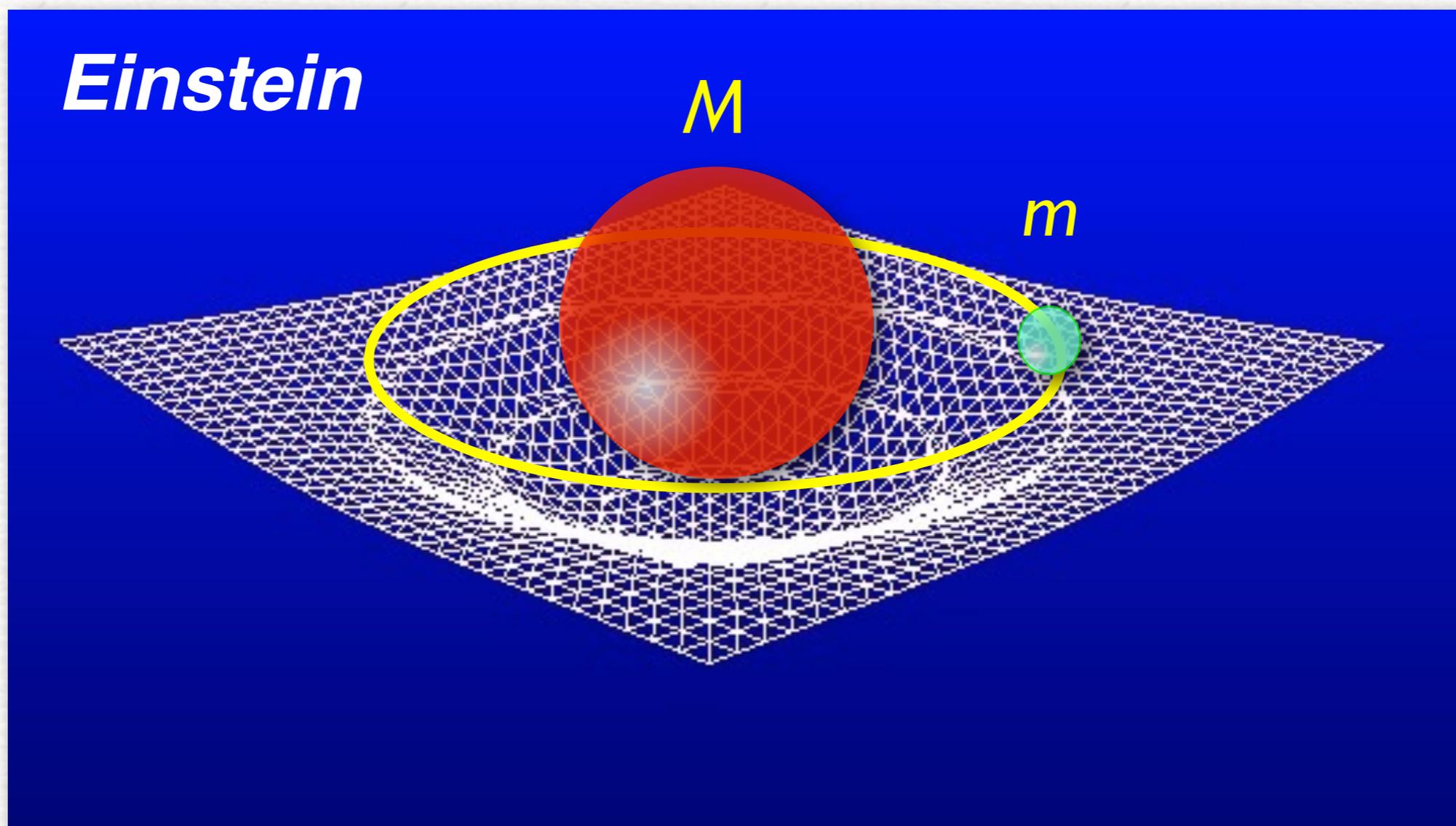
Per **Newton**: l'orbita è il risultato del bilanciamento tra la forza gravitazionale (attrattiva) e quella centrifuga (repulsiva)



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).

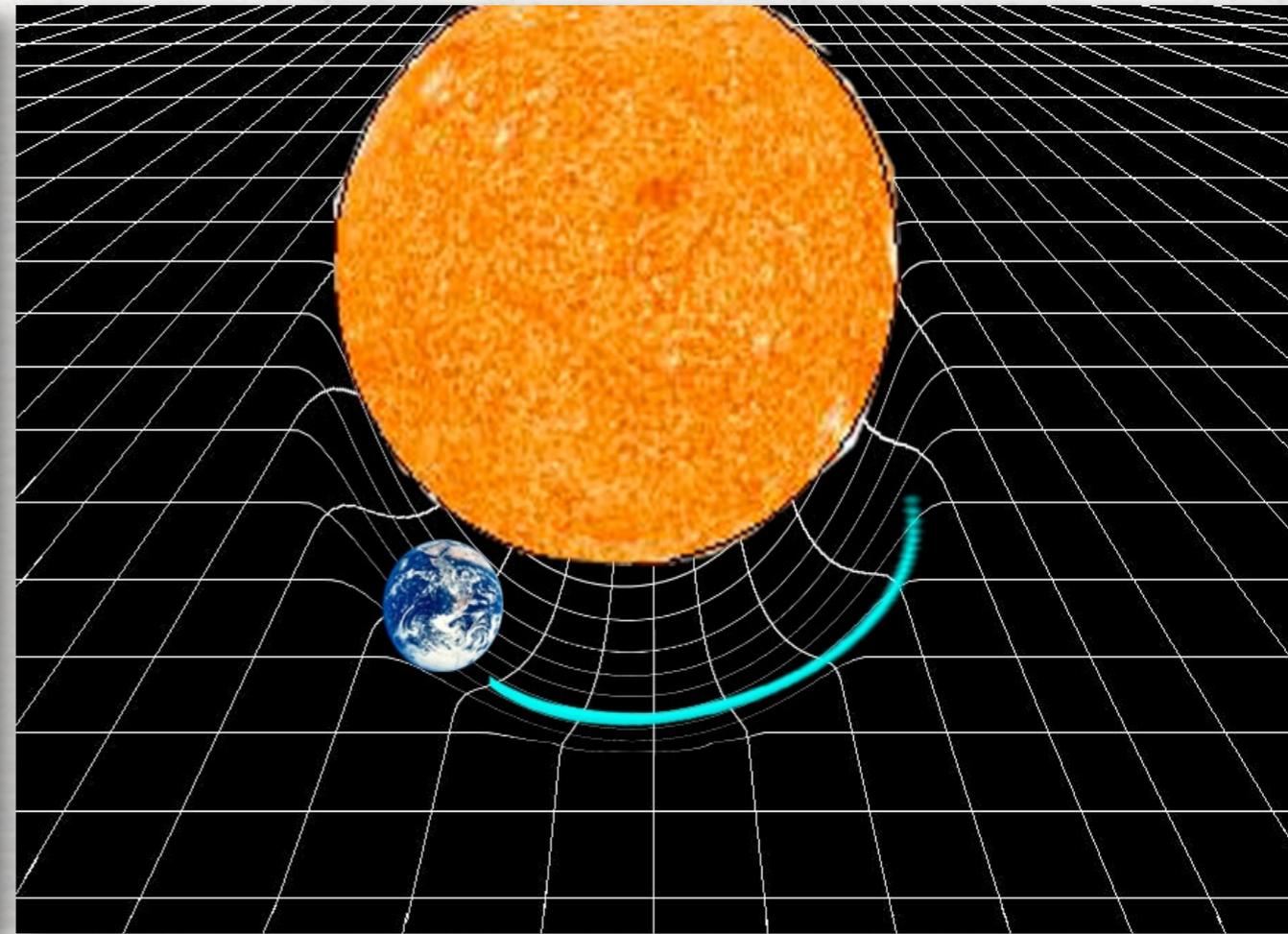
Per **Einstein**: non ci sono forze. L'orbita è necessaria al piccolo m per evitare di cadere nella curvatura generata dal grosso M .



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 .*



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**)?

$$\frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}} \simeq \frac{5.97 \times 10^{24} \text{ kg}}{6372 \text{ km}} \simeq 3 \times 10^{-9} \simeq 0.00000000003$$

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

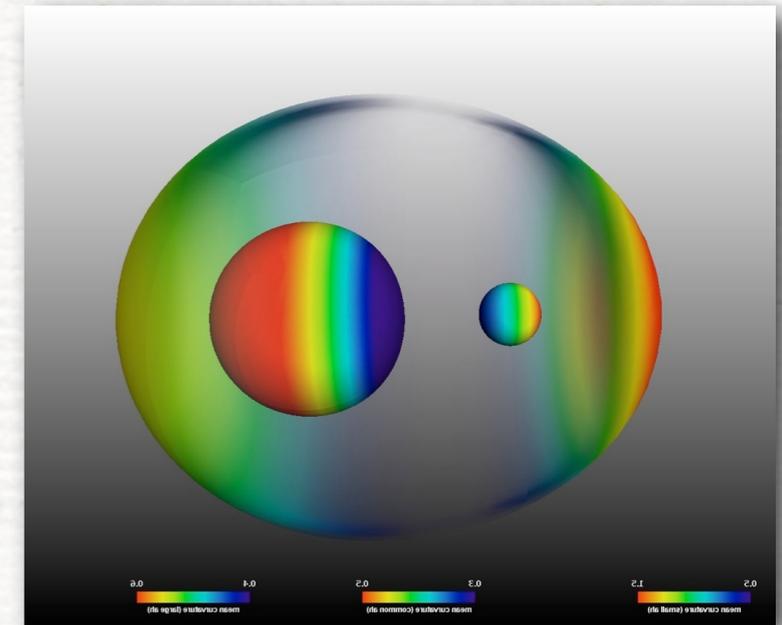
$$\frac{M_{\odot}}{R_{\odot}} \simeq \frac{1.98 \times 10^{30} \text{ kg}}{6.95 \times 10^7 \text{ km}} \simeq 2 \times 10^{-6} \simeq 0.000002$$

Lo spazio-tempo è **difficile da curvare!**

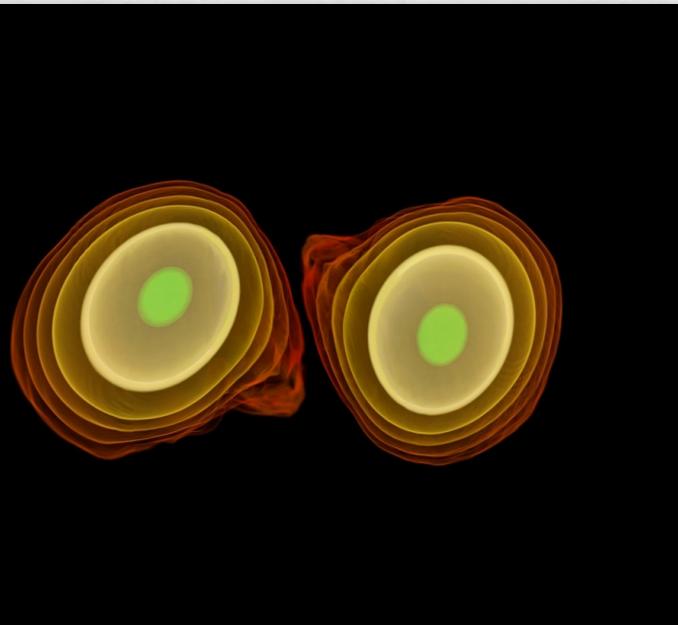
Le conseguenze della gravità di Einstein

Il concetto **rivoluzionario** della gravità proposto da Einstein ha conseguenze alcune delle quali lui stesso considerava **incomprensibili**:

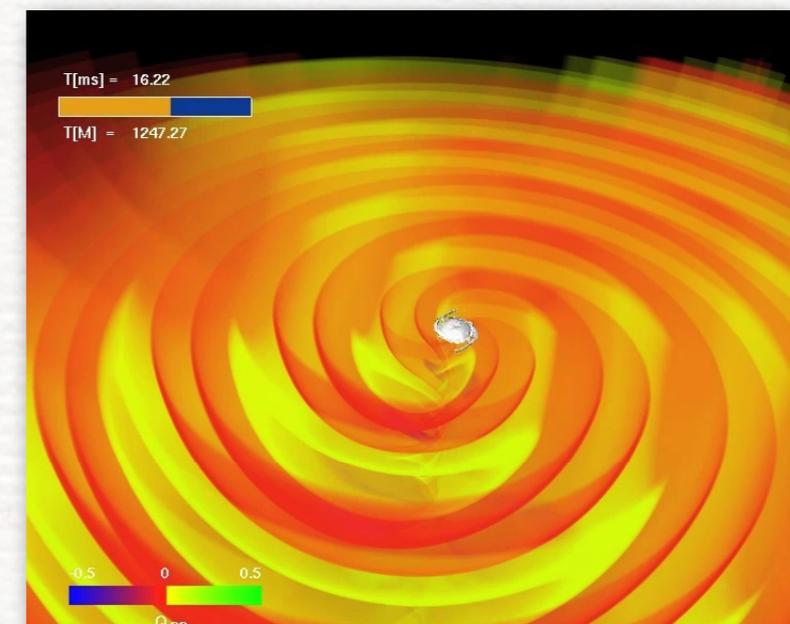
- Buchi neri



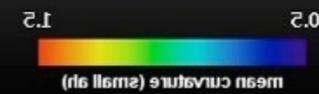
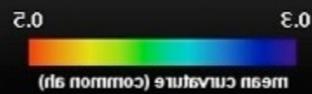
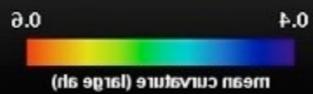
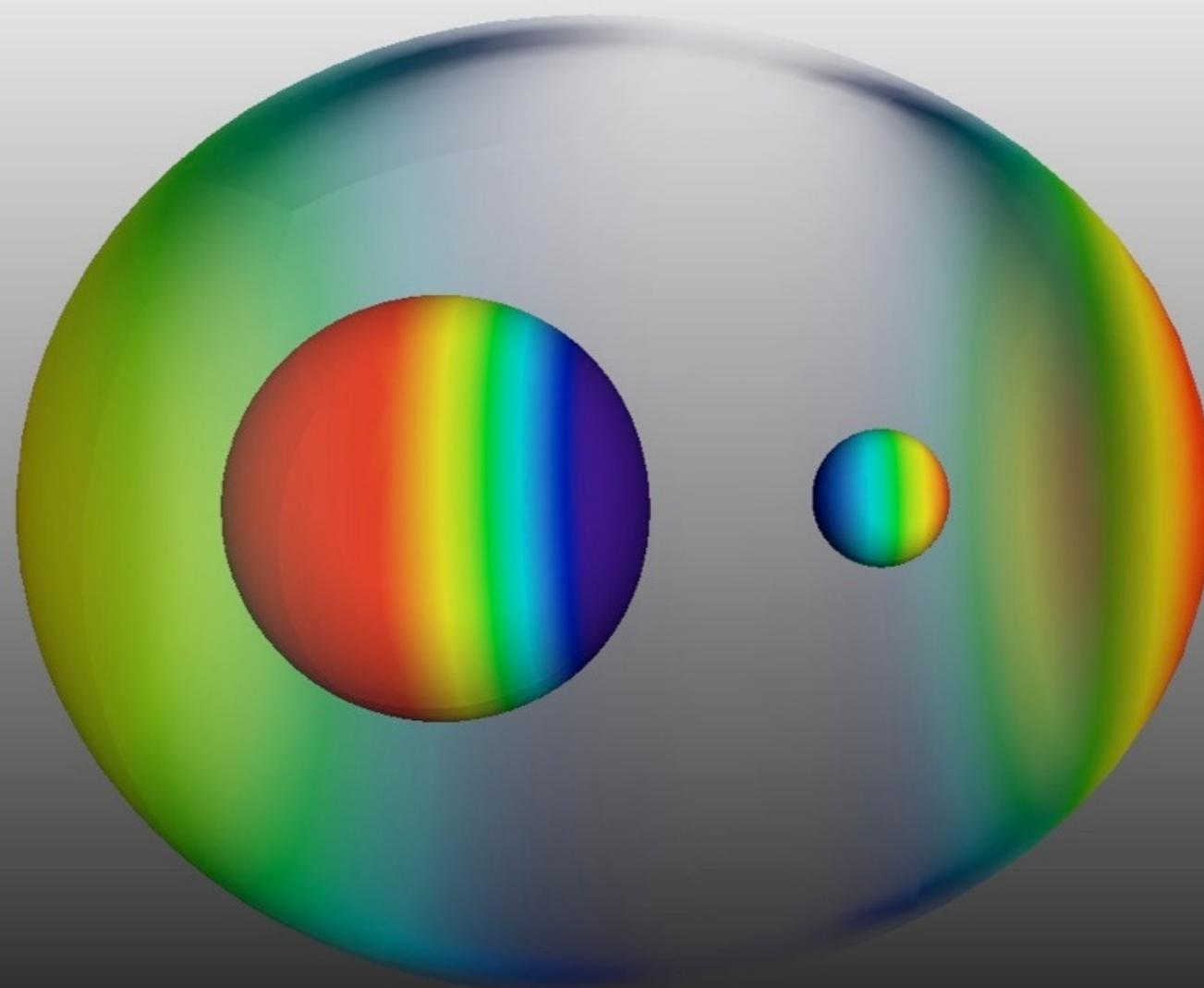
- Stelle di neutroni



- Onde gravitazionali



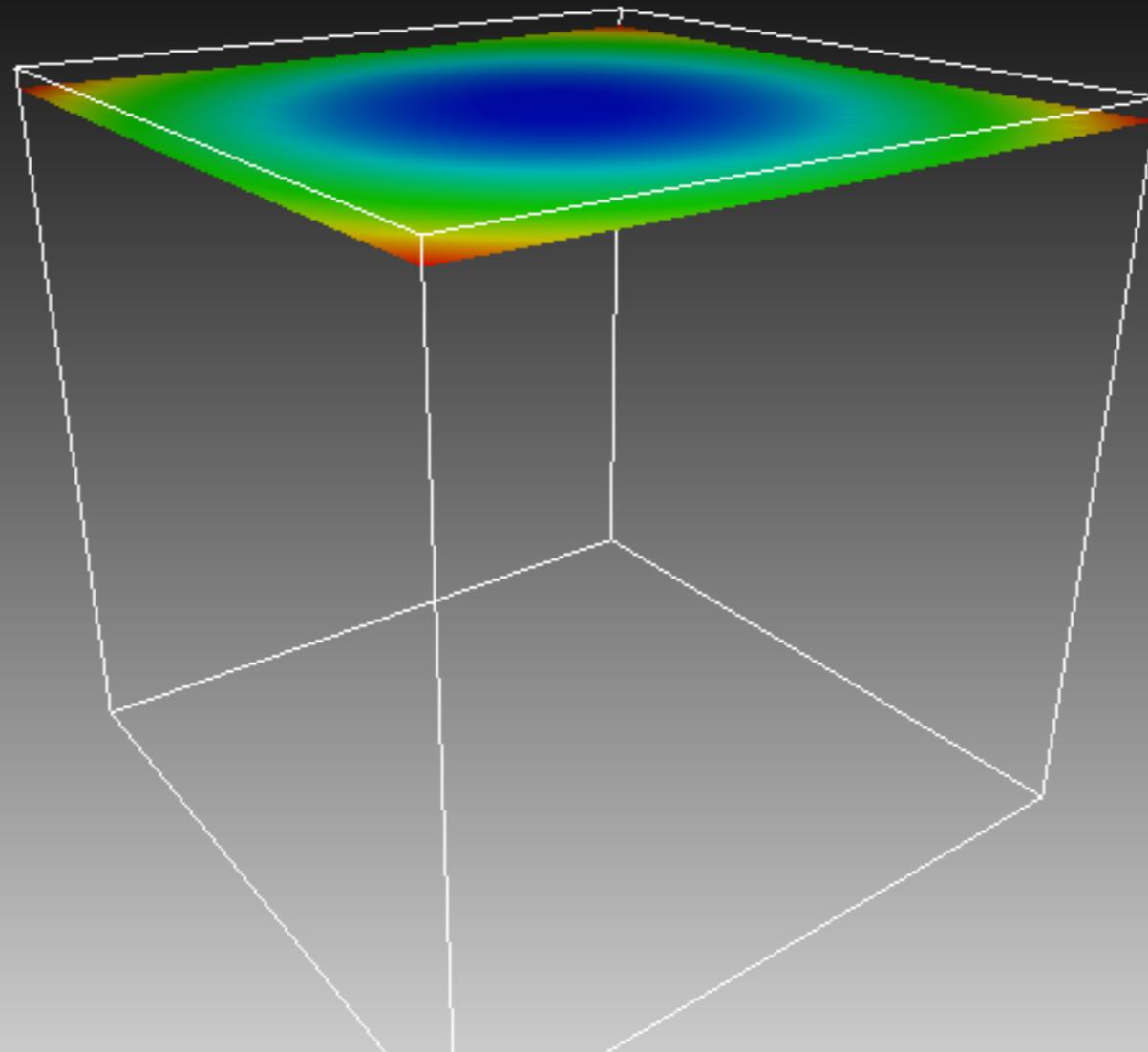
Buchi Neri



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 .

$$M/R = 0.00998$$

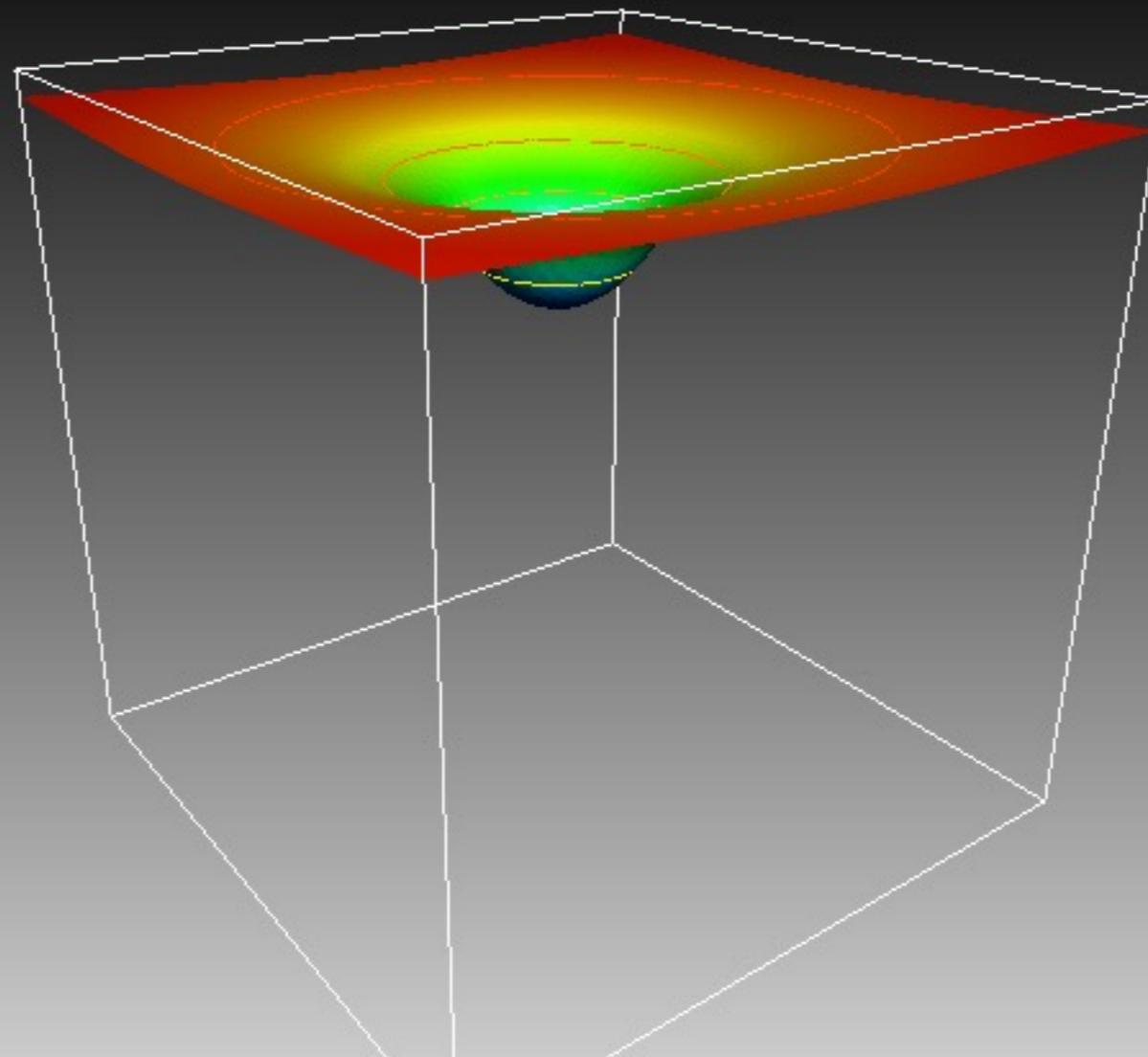
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



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 .

$$M/R = 0.09980$$

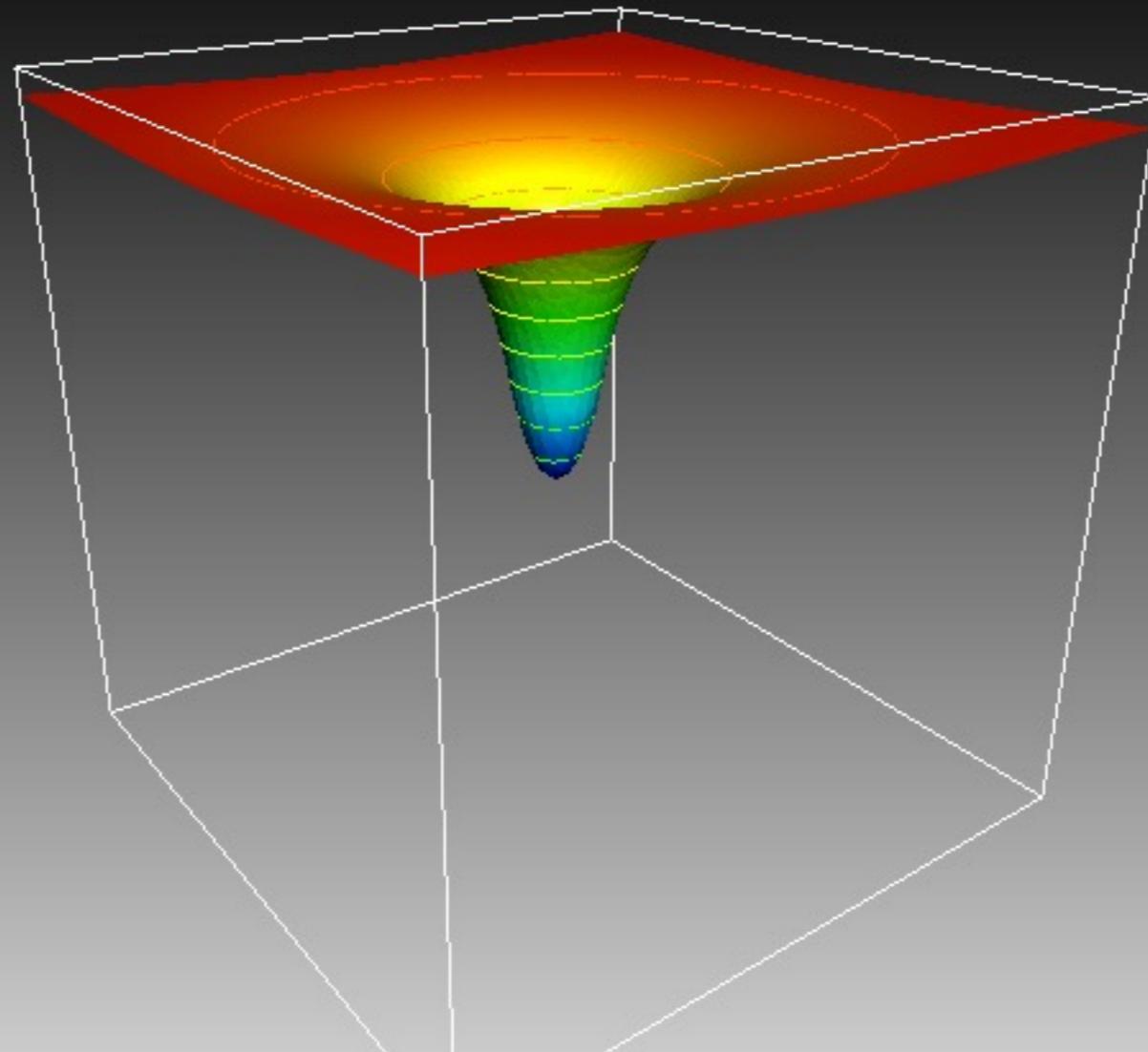
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



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 .

$$M/R = 0.19230$$

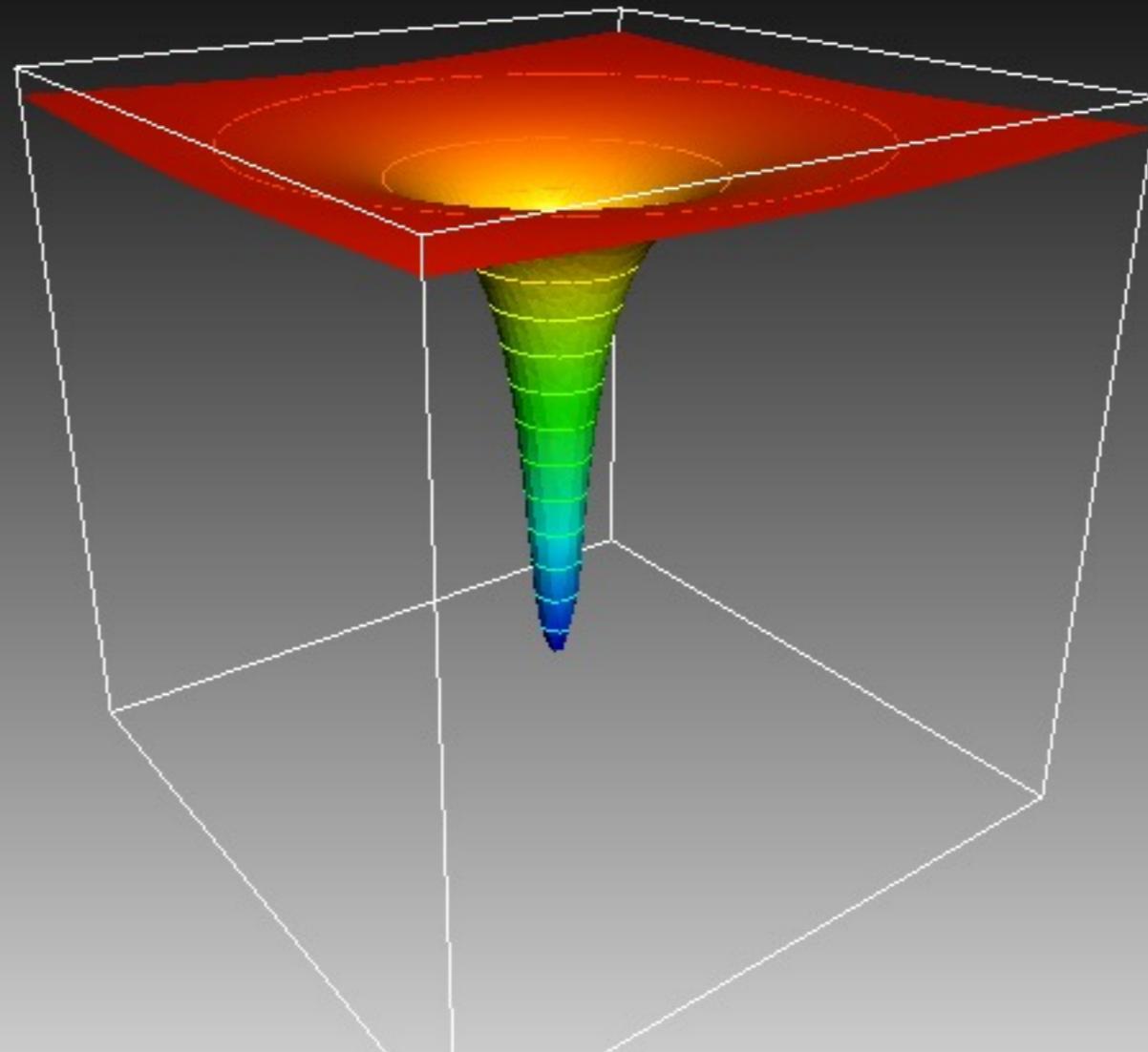
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



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 .

$$M/R = 0.3125$$

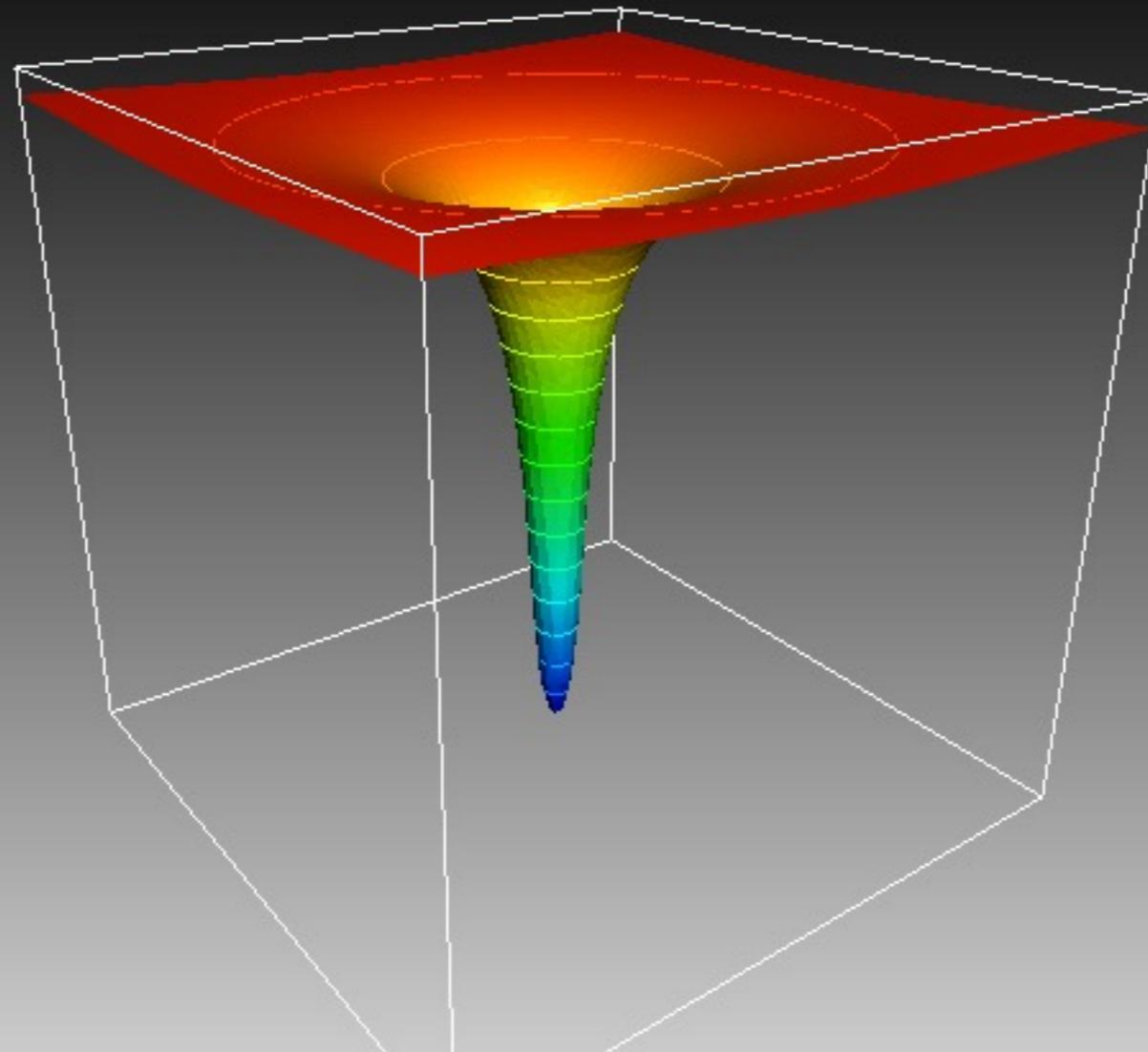
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



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 .

$$M/R = 0.37037$$

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

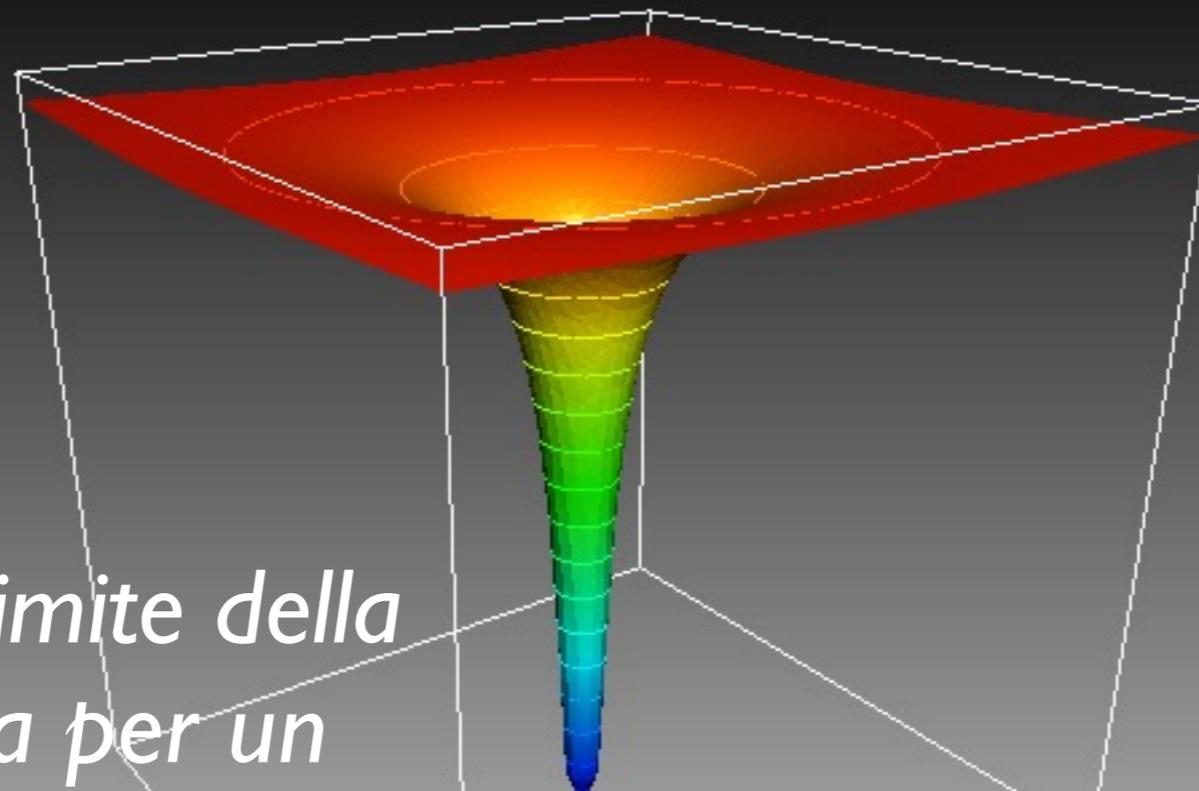


Facciamo un “*gedanken experiment*”: prendiamo un oggetto di massa M e comprimiamolo riducendo R . La curvatura (mostrata in colore) si comporterebbe così aumentando compattezza M/R .

$$M/R = 0.44444$$

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

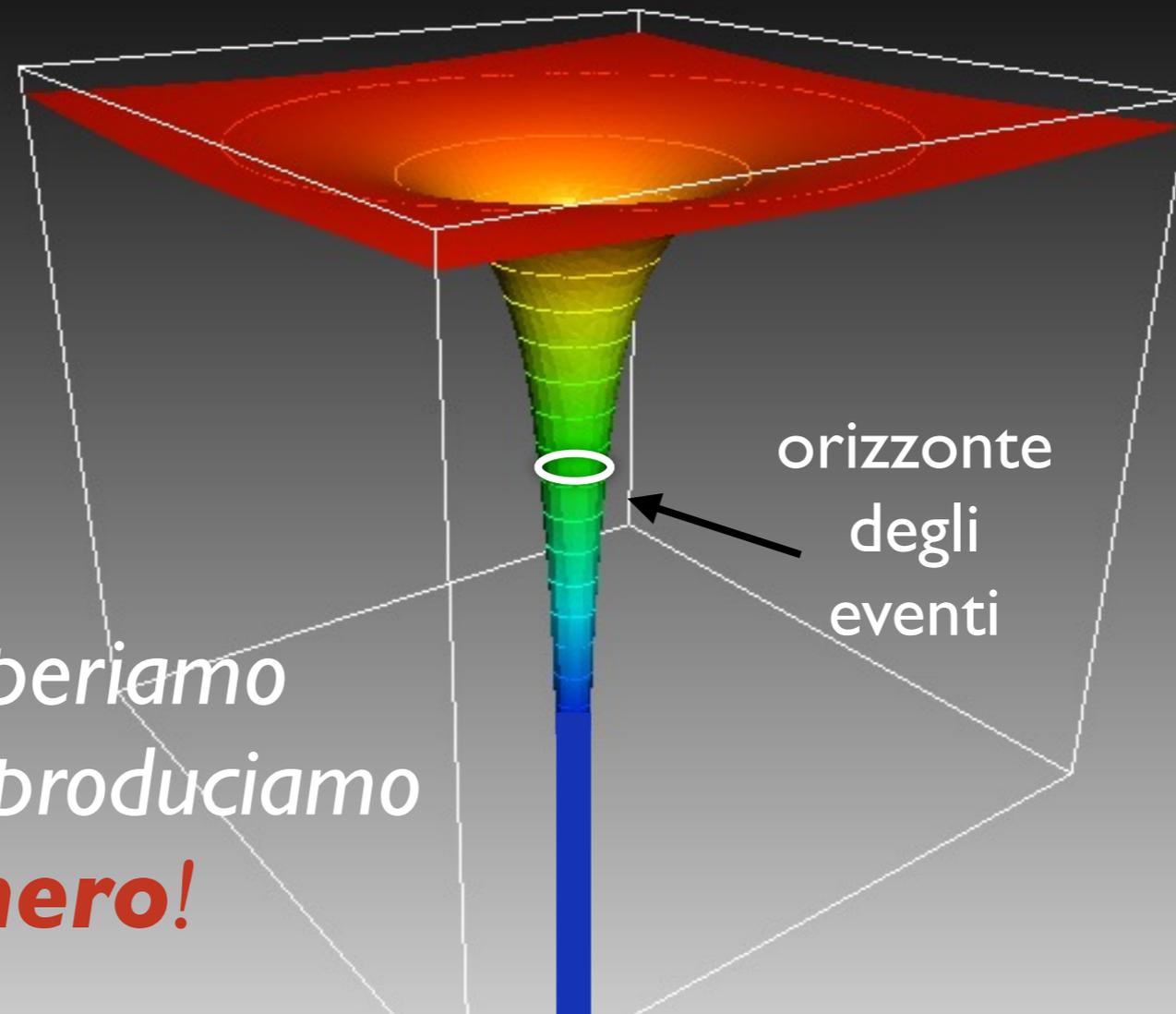
Questo è il limite della compattezza per un oggetto con una *superficie solida*



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 .

$$M/R = 0.5000$$

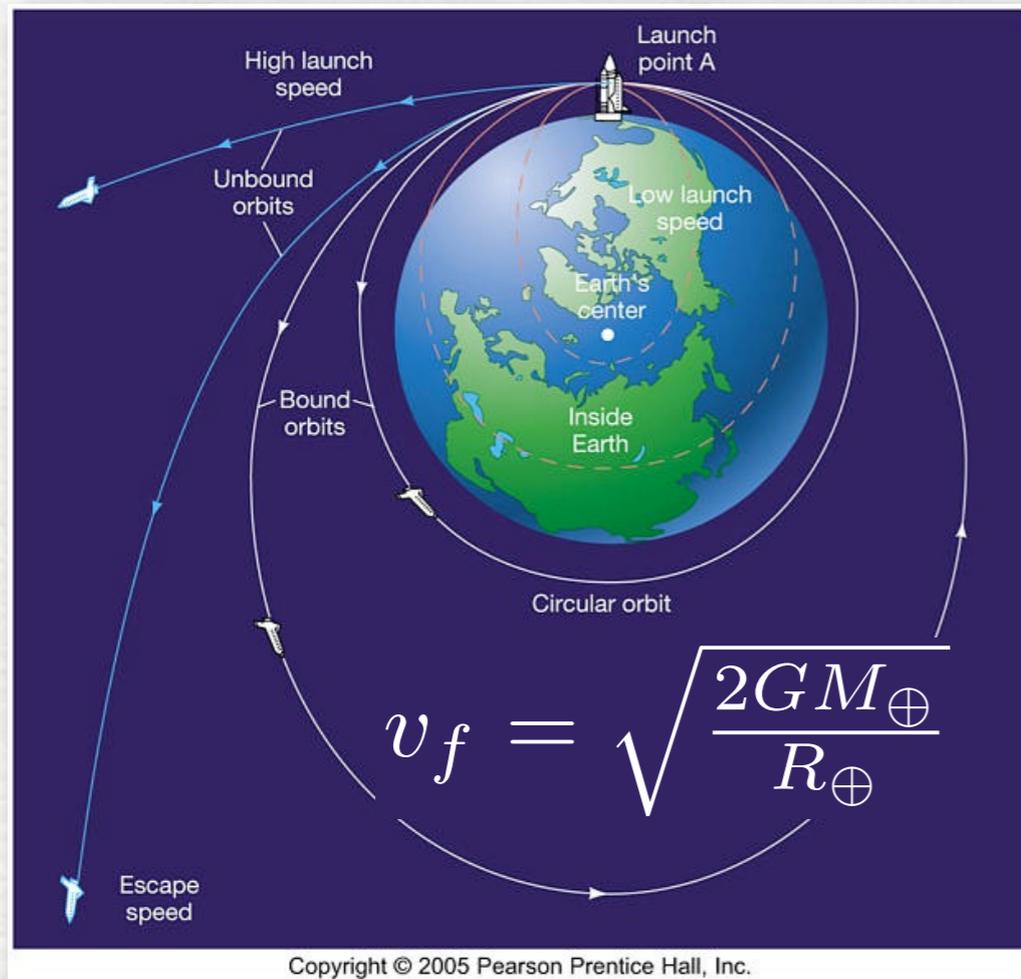
$$\sqrt{-g_{tt}}$$



Quando superiamo quel limite produciamo un **buco nero!**

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.

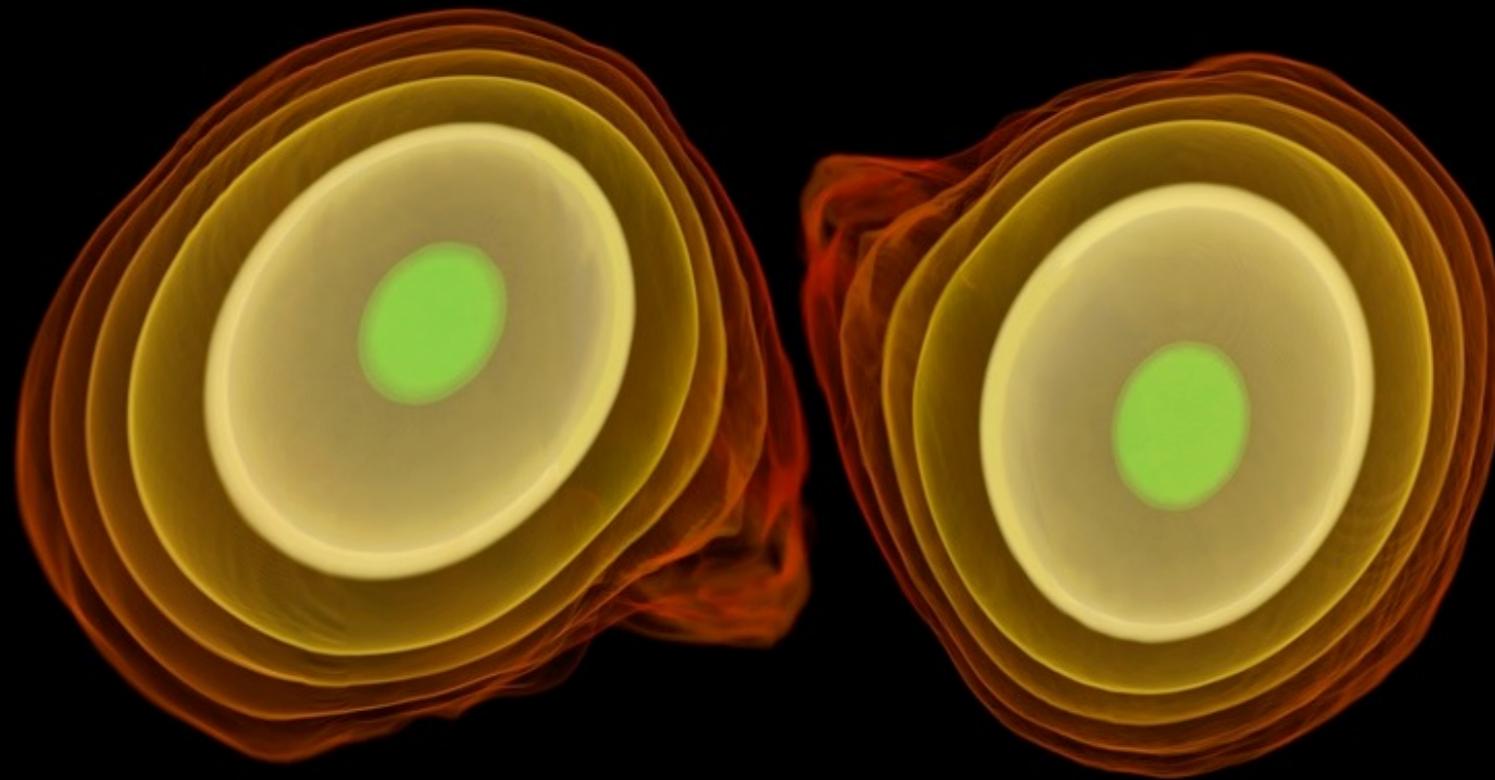


M_{BH} : black hole mass

R_{EH} : radius of event horizon

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

Stelle di Neutroni

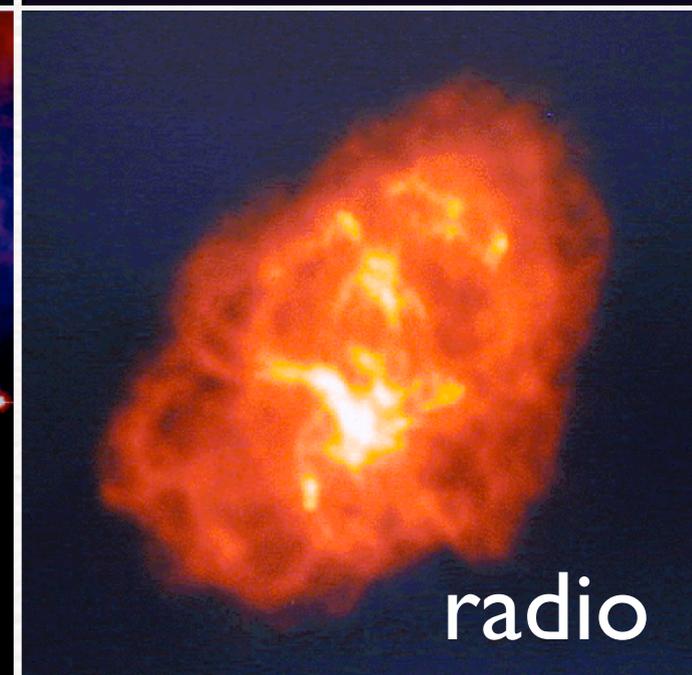
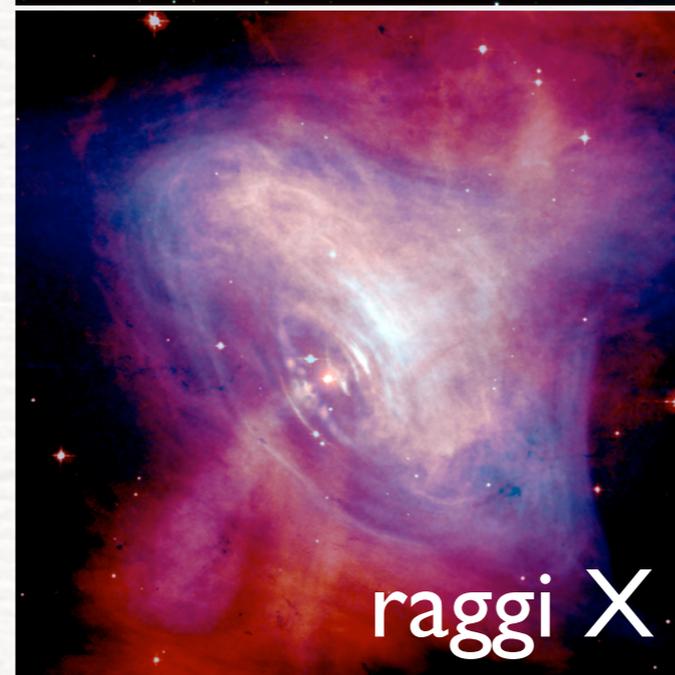
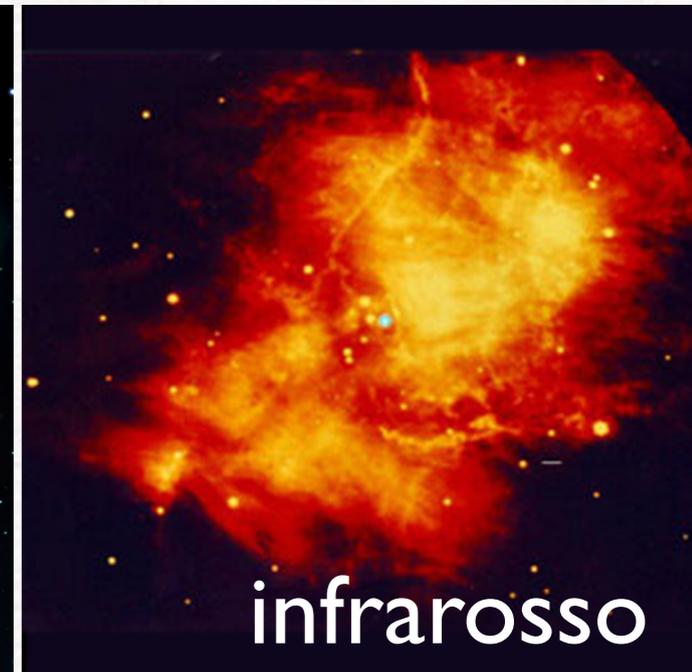
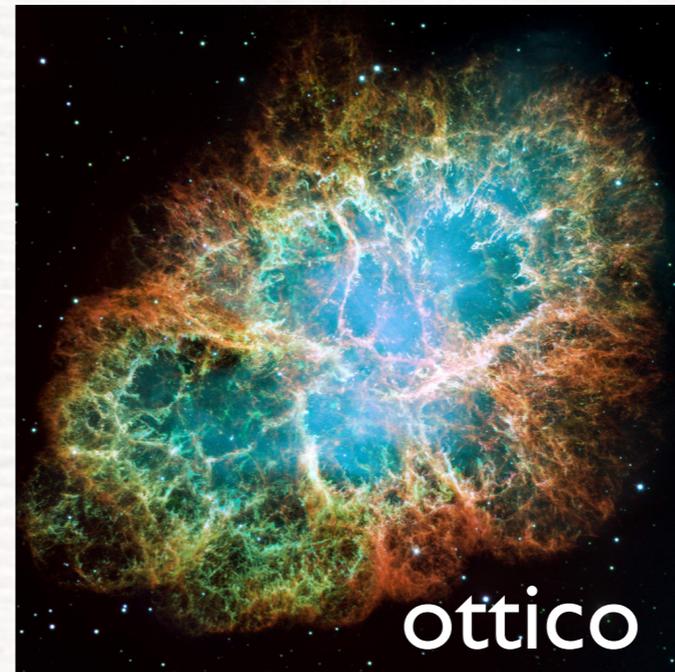


Cos'è una stella di neutroni?

Alla termine della vita, stelle con massa $10M_{\odot} \lesssim M \lesssim 100M_{\odot}$ esplodono come **supernovae**. Il nocciolo che rimane è una **stella di neutroni**

1054 AC: una **supernova** produce una **stella di neutroni**, la famosa **"Crab"**.

La Crab è visibile a molte lunghezze d'onda: **infrarosso**, **ottico**, **X**, **gamma**.



Quanto è grande una stella di neutroni?

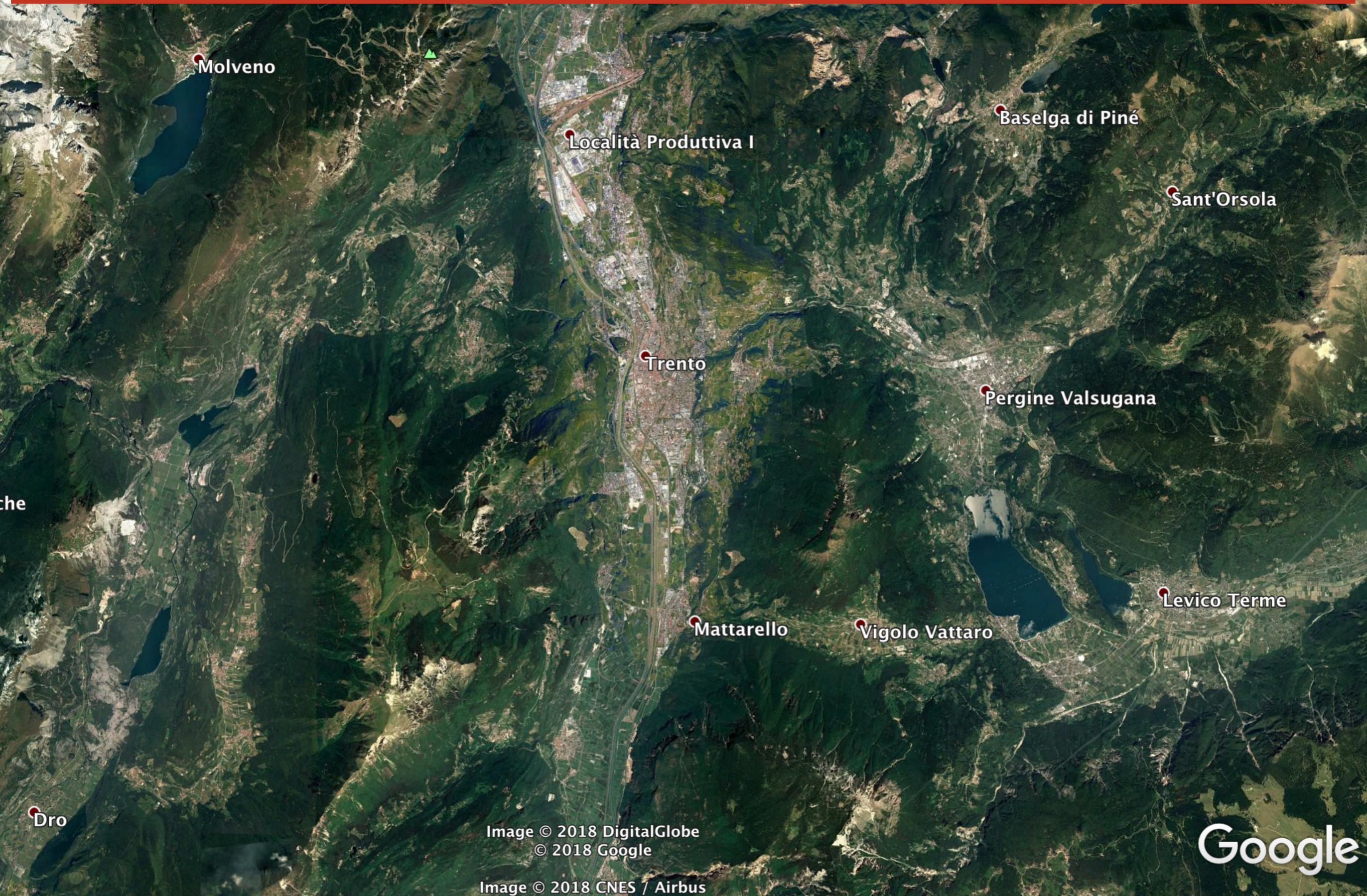


Image © 2018 DigitalGlobe
© 2018 Google

Image © 2018 CNES / Airbus

Google

Quanto è grande una stella di neutroni?

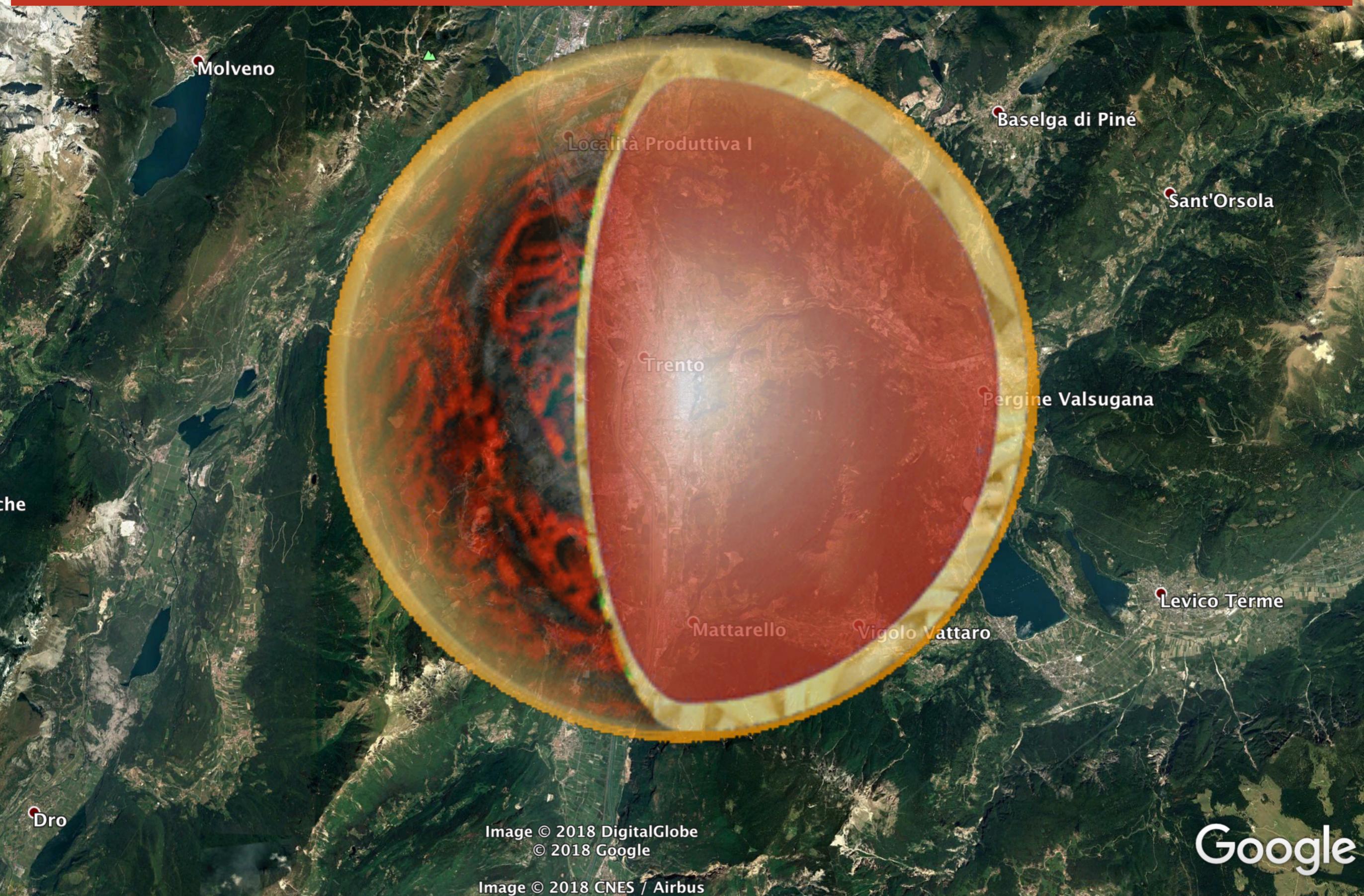


Image © 2018 DigitalGlobe
© 2018 Google

Image © 2018 CNES / Airbus

Google

Quanto è grande una stella di neutroni?



Un cucchiaino di questa materia pesa più del Monte Bianco

La gravità è 100 milioni di volte più forte che sulla Terra

Sono sfere quasi perfette: montagne più basse di 10 mm

Sole

$$R_{\odot} \simeq 700,000 \text{ km}; M/R \simeq 10^{-6}$$

nana bianca

$$R_{\text{nana bianca}} \simeq 10,000 \text{ km}; M/R \simeq 10^{-4} - 10^{-5}$$

nana bianca

stella di
neutroni

$$R_{\text{stella neutroni}} \simeq 12 \text{ km}; M/R \simeq 0.15 - 0.26$$

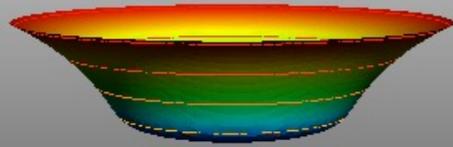
stella di
neutroni

buco nero

$$R_{\text{buco nero}} \simeq 1.5 \text{ km}; M/R \simeq 0.5$$

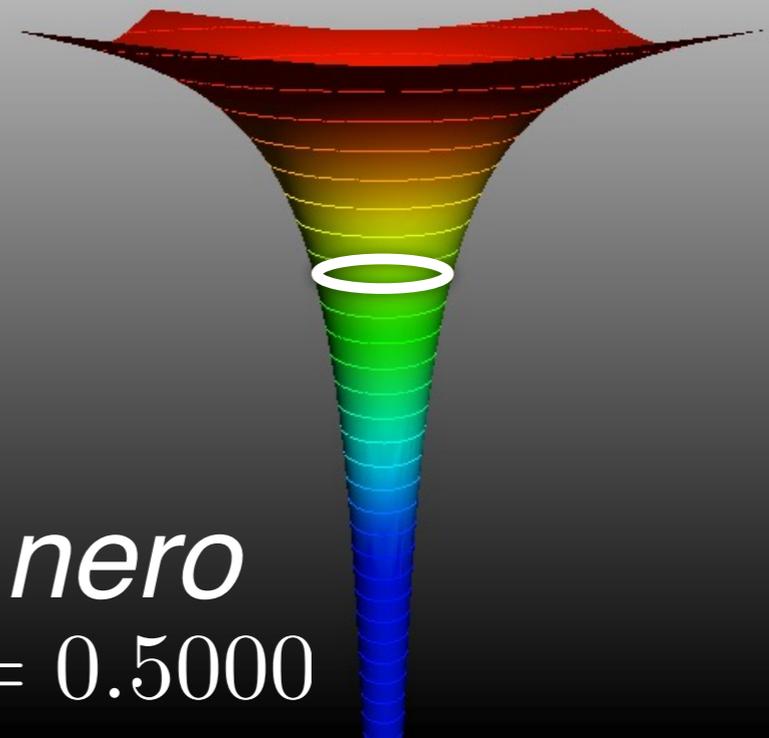
Stella di neutroni vs buco nero

In termini di **gravità**, stelle di neutroni e buchi neri sono molto simili: **estreme** in entrambi i casi!



stella di neutroni

$$M/R = 0.44444$$

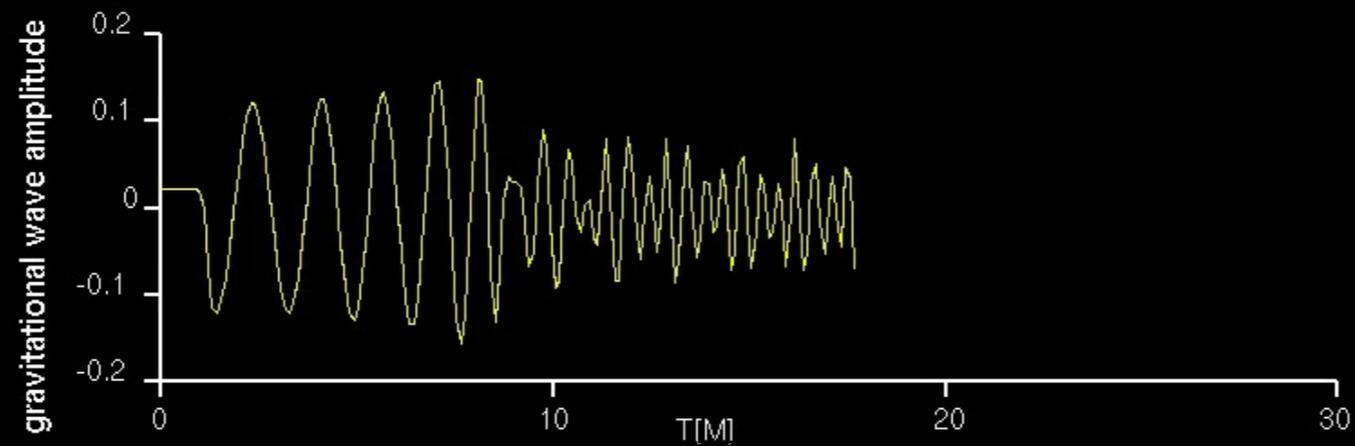


buco nero

$$M/R = 0.50000$$

In due cose differiscono: le stelle di neutroni hanno una **superficie rigida** e la curvatura è **finita**; i buchi neri **non hanno una superficie** e la curvatura al centro è **infinita!**

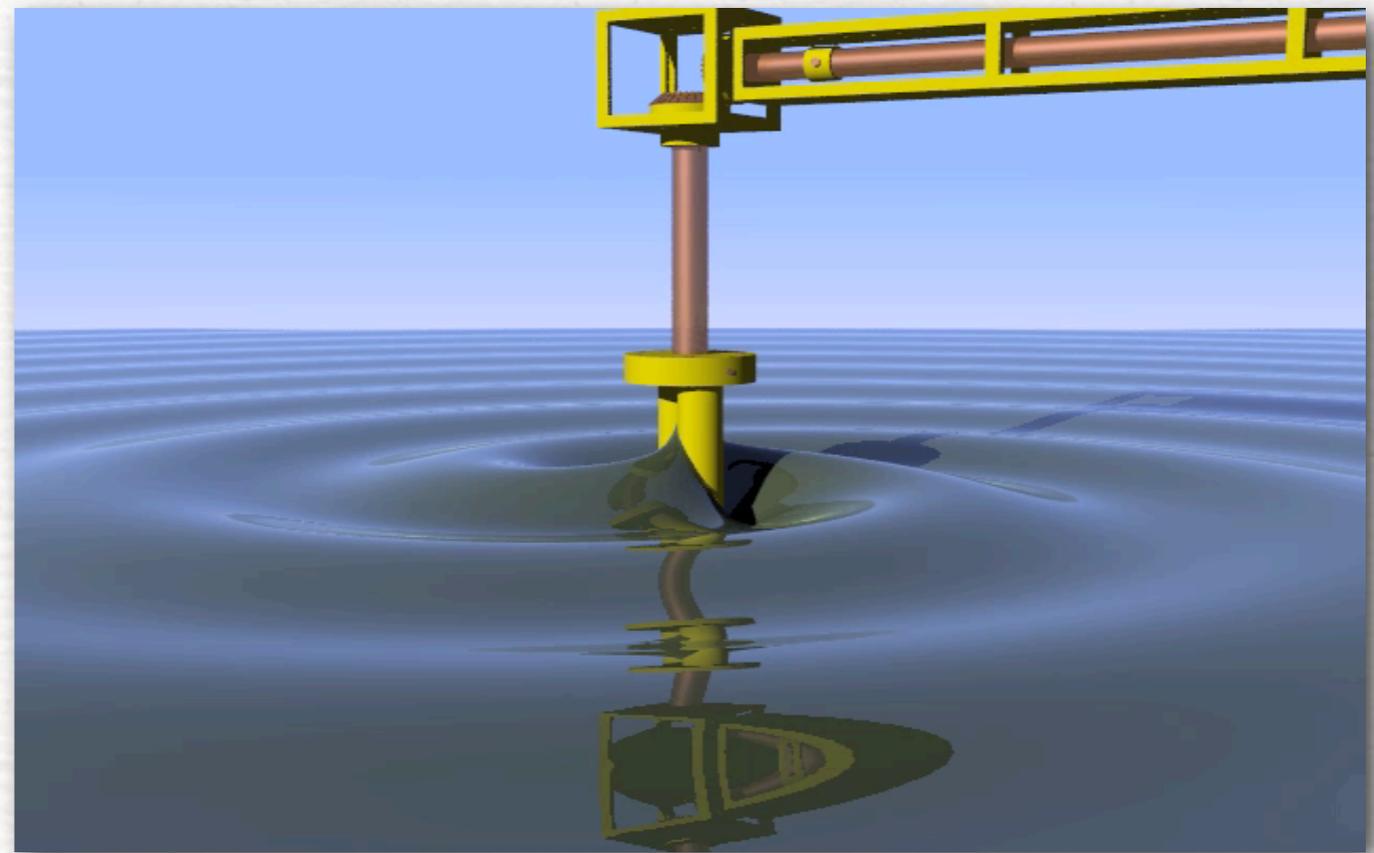
OG: Onde Gravitazionali



OG: increspature dello spazio-tempo

Abbiamo visto che buchi neri e stelle di neutroni sono capaci di **curvare** lo spazio-tempo intorno ad essi.

- Cosa succede alla curvatura quando questi oggetti si **muovono**?
- Cosa succede alla curvatura se questi oggetti sono in **sistemi binari**?



- Le **onde gravitazionali (OG)** vengono prodotte quando delle masse **non-sferiche** vengono accelerate.
- Le **OG** sono quindi “**increspature di curvatura**” che si propagano alla velocità della luce.

Come si producono le OG?

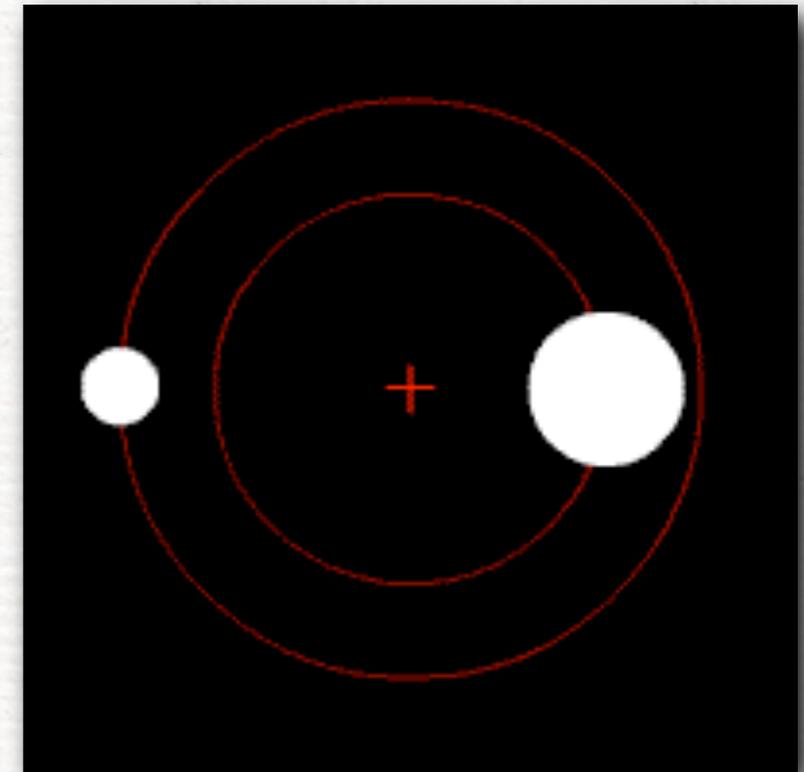
Le OG sono prodotte quando una distribuzione di materia **priva** di una simmetria **sferica** è **accelerata**.

Poiché è difficile curvare lo spazio-tempo, è **difficile** produrre OG; **impossibile** farlo in un laboratorio!

Sono necessari:

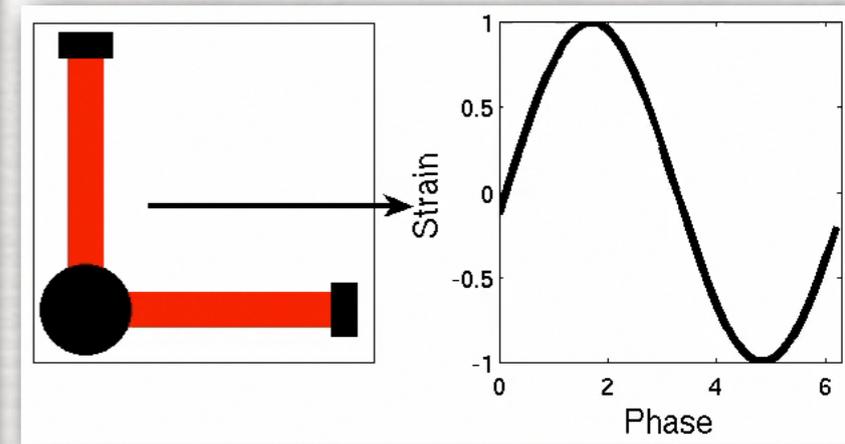
- oggetti compatti: grosse masse in piccoli volumi
- velocità prossime a quella della luce

Sistemi binari di **buchi neri** e **stelle di neutroni** sono le sorgenti più intense.



Come si rivelano le OG?

I rivelatori di OG sono enormi **interferometri**: raggi laser sono emessi a 90 gradi creando una interferenza dopo una lunghezza L .

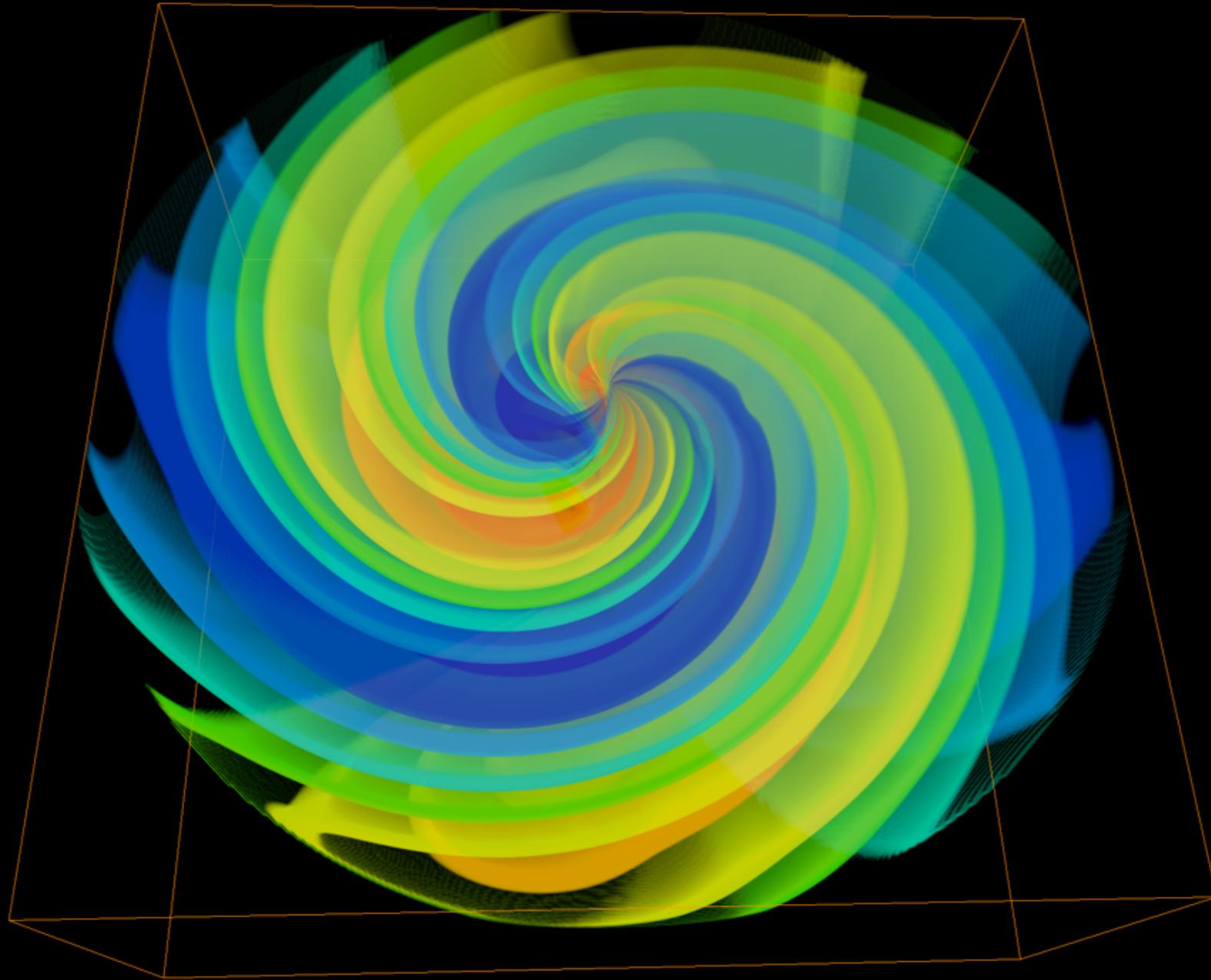


C. Hanna

Le OG producono variazioni di lunghezza dei bracci pari a: $\frac{\Delta L}{L} \simeq 10^{-21}$

Queste differenze sono **infinitesime!** È come misurare la distanza tra la **Terra** e **Sole** con la precisione di un **micron!**

Gravità numerica



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$\nabla_{\mu}T^{\mu\nu} = 0$$

$$\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) = 0$$

Da quasi 100 anni queste equazioni hanno attratto migliaia di scienziati per via della loro **bellezza** e delle profonde **implicazioni** fisiche.

Tuttavia, la **"bellezza"** delle equazioni scompare presto quando si fanno calcoli realistici...

$$\partial_t \tilde{\gamma}_{ij} = -2\alpha \tilde{A}_{ij}^{\text{TF}} + 2\tilde{\gamma}_{k(i} \partial_{j)} \beta^k - \frac{2}{3} \tilde{\gamma}_{ij} \partial_k \beta^k + \beta^k \partial_k \tilde{\gamma}_{ij},$$

$$\begin{aligned} \partial_t \tilde{A}_{ij} = & \phi^2 [-\nabla_i \nabla_j \alpha + \alpha (R_{ij} + \nabla_i Z_j + \nabla_j Z_i - 8\pi S_{ij})]^{\text{TF}} + \alpha \tilde{A}_{ij} (K - 2\Theta) \\ & - 2\alpha \tilde{A}_{il} \tilde{A}_j^l + 2\tilde{A}_{k(i} \partial_{j)} \beta^k - \frac{2}{3} \tilde{A}_{ij} \partial_k \beta^k + \beta^k \partial_k \tilde{A}_{ij}, \end{aligned}$$

$$\partial_t \phi = \frac{1}{3} \alpha \phi K - \frac{1}{3} \phi \partial_k \beta^k + \beta^k \partial_k \phi,$$

$$\partial_t K = -\nabla^i \nabla_i \alpha + \alpha (R + 2\nabla_i Z^i + K^2 - 2\Theta K) + \beta^j \partial_j K - 3\alpha \kappa_1 (1 + \kappa_2) \Theta + 4\pi \alpha (S - 3\tau),$$

$$\begin{aligned} \partial_t \hat{\Gamma}^i = & 2\alpha \left(\tilde{\Gamma}_{jk}^i \tilde{A}^{jk} - 3\tilde{A}^{ij} \frac{\partial_j \phi}{\phi} - \frac{2}{3} \tilde{\gamma}^{ij} \partial_j K \right) + 2\tilde{\gamma}^{ki} \left(\alpha \partial_k \Theta - \Theta \partial_k \alpha - \frac{2}{3} \alpha K Z_k \right) - 2\tilde{A}^{ij} \partial_j \alpha \\ & + \tilde{\gamma}^{kl} \partial_k \partial_l \beta^i + \frac{1}{3} \tilde{\gamma}^{ik} \partial_k \partial_l \beta^l + \frac{2}{3} \tilde{\Gamma}^i \partial_k \beta^k - \tilde{\Gamma}^k \partial_k \beta^i + 2\kappa_3 \left(\frac{2}{3} \tilde{\gamma}^{ij} Z_j \partial_k \beta^k - \tilde{\gamma}^{jk} Z_j \partial_k \beta^i \right) \\ & + \beta^k \partial_k \hat{\Gamma}^i - 2\alpha \kappa_1 \tilde{\gamma}^{ij} Z_j - 16\pi \alpha \tilde{\gamma}^{ij} S_j, \end{aligned}$$

$$\partial_t \Theta = \frac{1}{2} \alpha \left(R + 2\nabla_i Z^i - \tilde{A}_{ij} \tilde{A}^{ij} + \frac{2}{3} K^2 - 2\Theta K \right) - Z^i \partial_i \alpha + \beta^k \partial_k \Theta - \alpha \kappa_1 (2 + \kappa_2) \Theta - 8\pi \alpha \tau,$$

$$\partial_t \alpha = -2\alpha (K - 2\Theta) + \beta^k \partial_k \alpha,$$

$$\partial_t \beta^i = f B^i + \beta^k \partial_k \beta^i,$$

$$\partial_t B^i = \partial_t \hat{\Gamma}^i - \beta^k \partial_k \hat{\Gamma}^i + \beta^k \partial_k B^i - \eta B^i,$$

Gravità Numerica

- La teoria della Relatività di Einstein è tanto bella quanto è **intrattabile** analiticamente.
- Ad eccezione di alcune soluzioni per oggetti ad alta simmetria, le soluzioni **analitiche** sono **pochissime**.
- La **gravità numerica** rappresenta l'unica maniera per esplorare le equazioni di Einstein ed il suo universo.
- **Codici numerici** diventano “**laboratori teorici**”
- In questi laboratori **simuliamo** la fusione di **buchi neri** e **stelle di neutroni** senza approssimazioni.

ovviamente per fare questi calcoli sono
indispensabili i **supercomputers!**

$$\partial_t \tilde{\gamma}_{ij} = -2\alpha \tilde{A}_{ij}^{\text{TF}} + 2\tilde{\gamma}_{k(i}\partial_{j)}\beta^k - \frac{2}{3}\tilde{\gamma}_{ij}\partial_k\beta^k + \beta^k\partial_k\tilde{\gamma}_{ij},$$

$$\begin{aligned} \partial_t \tilde{A}_{ij} = & \phi^2 [-\nabla_i\nabla_j\alpha + \alpha(R_{ij} + \nabla_i Z_j + \nabla_j Z_i - 8\pi S_{ij})]^{\text{TF}} + \alpha\tilde{A}_{ij}(K - 2\Theta) \\ & - 2\alpha\tilde{A}_{il}\tilde{A}_j^l + 2\tilde{A}_{k(i}\partial_{j)}\beta^k - \frac{2}{3}\tilde{A}_{ij}\partial_k\beta^k + \beta^k\partial_k\tilde{A}_{ij}, \end{aligned}$$

$$\partial_t\phi = \frac{1}{3}\alpha\phi K - \frac{1}{3}\phi\partial_k\beta^k + \beta^k\partial_k\phi,$$

$$\partial_t K = -\nabla^i\nabla_i\alpha + \alpha(R + 2\nabla_i Z^i + K^2 - 2\Theta K) + \beta^j\partial_j K - 3\alpha\kappa_1(1 + \kappa_2)\Theta + 4\pi\alpha(S - 3\tau),$$

$$\begin{aligned} \partial_t \hat{\Gamma}^i = & 2\alpha \left(\tilde{\Gamma}_{jk}^i \tilde{A}^{jk} - 3\tilde{A}^{ij} \frac{\partial_j \phi}{\phi} - \frac{2}{3} \tilde{\gamma}^{ij} \partial_j K \right) + 2\tilde{\gamma}^{ki} \left(\alpha \partial_k \Theta - \Theta \partial_k \alpha - \frac{2}{3} \alpha K Z_k \right) - 2\tilde{A}^{ij} \partial_j \alpha \\ & + \tilde{\gamma}^{kl} \partial_k \partial_l \beta^i + \frac{1}{3} \tilde{\gamma}^{ik} \partial_k \partial_l \beta^l + \frac{2}{3} \tilde{\Gamma}^i \partial_k \beta^k - \tilde{\Gamma}^k \partial_k \beta^i + 2\kappa_3 \left(\frac{2}{3} \tilde{\gamma}^{ij} Z_j \partial_k \beta^k - \tilde{\gamma}^{jk} Z_j \partial_k \beta^i \right) \end{aligned}$$

$$+ \beta^k \partial_k \hat{\Gamma}^i - 2\alpha\kappa_1 \tilde{\gamma}^{ij} Z_j - 16\pi\alpha \tilde{\gamma}^{ij} S_j,$$

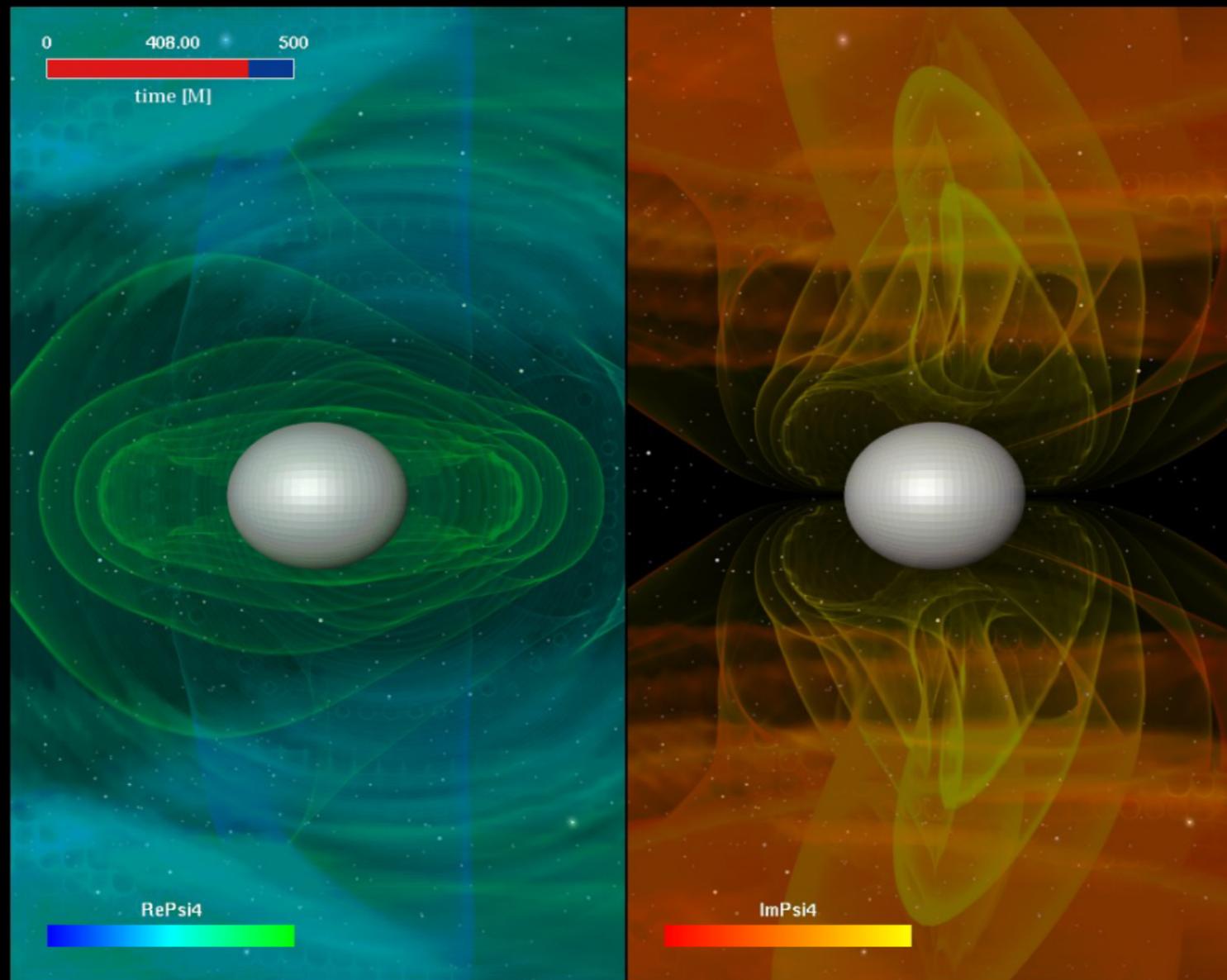
$$\partial_t \Theta = \frac{1}{2}\alpha \left(R + 2\nabla_i Z^i - \tilde{A}_{ij} \tilde{A}^{ij} + \frac{2}{3} K^2 - 2\Theta K \right) - Z^i \partial_i \alpha + \beta^k \partial_k \Theta - \alpha\kappa_1(2 + \kappa_2)\Theta - 8\pi\alpha\tau,$$

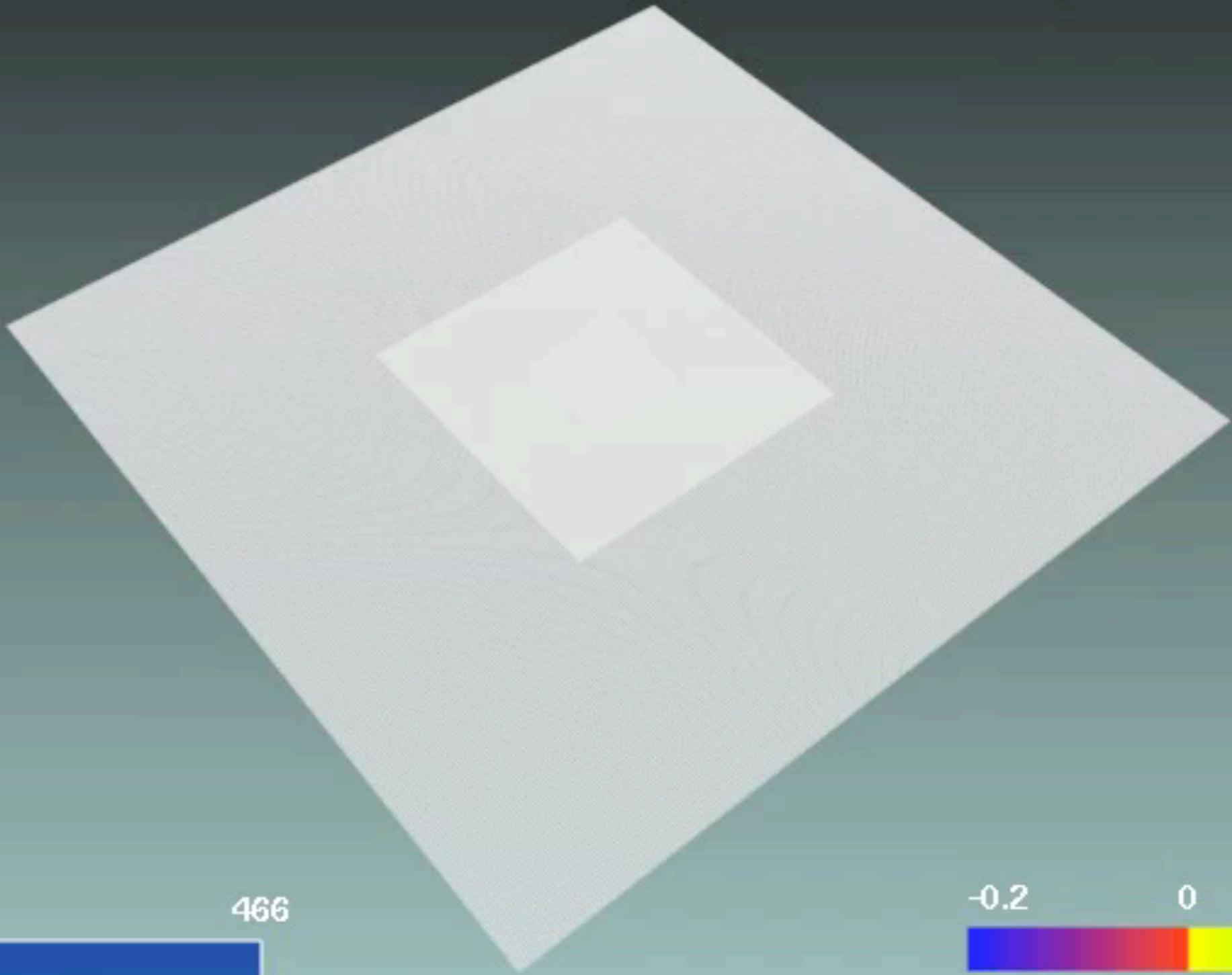
$$\partial_t \alpha = -2\alpha(K - 2\Theta) + \beta^k \partial_k \alpha,$$

$$\partial_t \beta^i = fB^i + \beta^k \partial_k \beta^i,$$

$$\partial_t B^i = \partial_t \hat{\Gamma}^i - \beta^k \partial_k \hat{\Gamma}^i + \beta^k \partial_k B^i - \eta B^i,$$

Fusione di buchi neri e stelle di neutroni

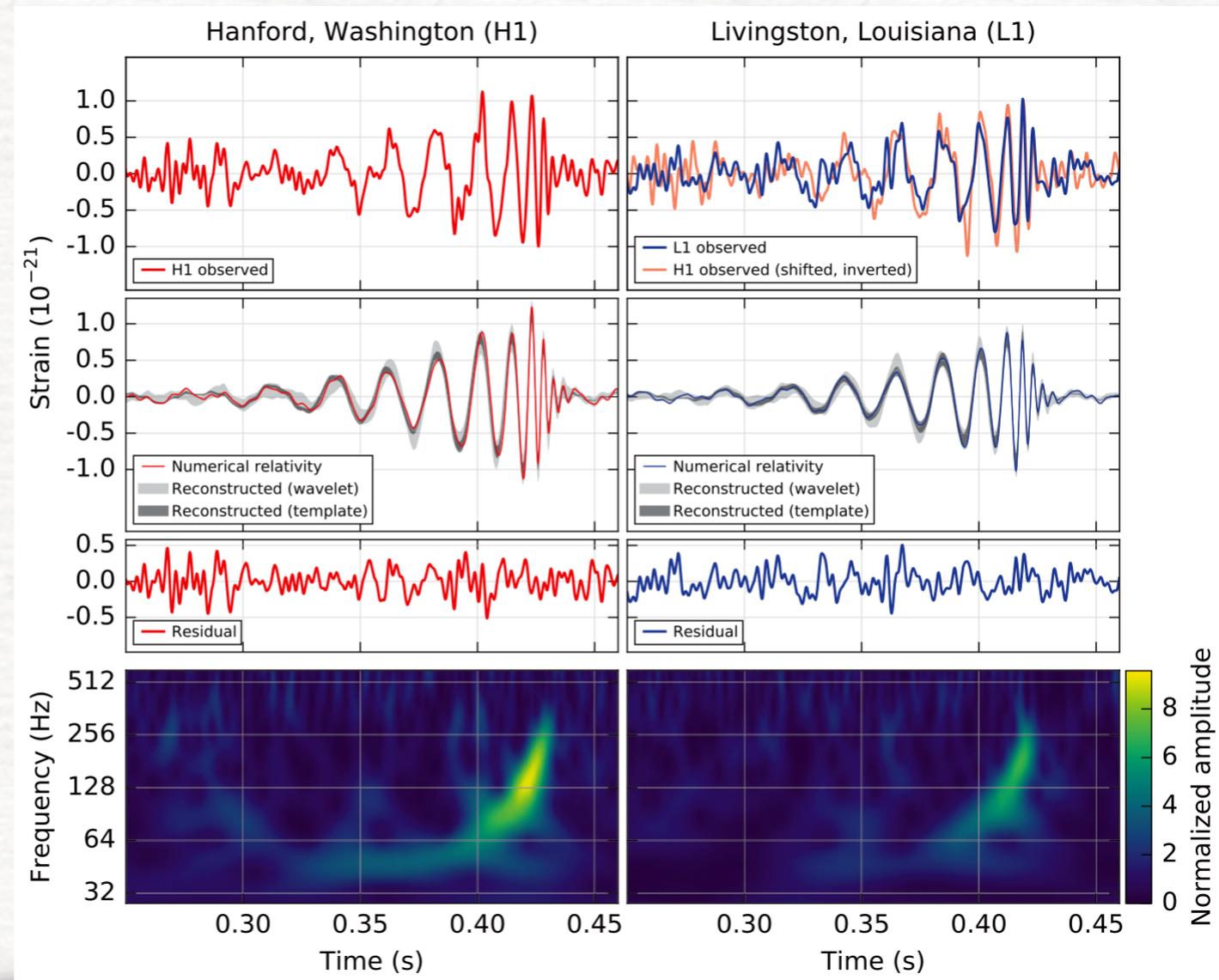




GW150914 è il primo segnale rivelato da un sistema binari di buchi neri.

Abbott+ 2016

Questo segnale è in **ottimo** accordo con le predizioni **teoriche** di gravità numerica.



Fusione di stelle di neutroni

- La fusione di due **stelle di neutroni** è molto più complessa e ricca della fusione di due **buchi neri**.

Fusione di stelle di neutroni

- La fusione di due **stelle di neutroni** è molto più complessa e ricca della fusione di due **buchi neri**.
- Nel caso di **stelle di neutroni**, la fusione non porta immediatamente ad un **buco nero**.

Fusione di stelle di neutroni

- La fusione di due **stelle di neutroni** è molto più complessa e ricca della fusione di due **buchi neri**.
- Nel caso di **stelle di neutroni**, la fusione non porta immediatamente ad un **buco nero**.
- Si crea invece una stella di neutroni “**ipermassiva**”.

Fusione di stelle di neutroni

- La fusione di due **stelle di neutroni** è molto più complessa e ricca della fusione di due **buchi neri**.
- Nel caso di **stelle di neutroni**, la fusione non porta immediatamente ad un **buco nero**.
- Si crea invece una stella di neutroni “**ipermassiva**”.
- Questo oggetto **collassa** dopo $\sim 1-2$ s in un **buco nero**.

Fusione di stelle di neutroni

- La fusione di due **stelle di neutroni** è molto più complessa e ricca della fusione di due **buchi neri**.
- Nel caso di **stelle di neutroni**, la fusione non porta immediatamente ad un **buco nero**.
- Si crea invece una stella di neutroni “**ipermassiva**”.
- Questo oggetto **collassa** dopo $\sim 1-2$ s in un **buco nero**.
- La fusione di stelle di neutroni è all'origine delle **esplosioni** più energetiche in astrofisica (**lampi gamma**).

Fusione di stelle di neutroni

- La fusione di due **stelle di neutroni** è molto più complessa e ricca della fusione di due **buchi neri**.
- Nel caso di **stelle di neutroni**, la fusione non porta immediatamente ad un **buco nero**.
- Si crea invece una stella di neutroni “**ipermassiva**”.
- Questo oggetto **collassa** dopo $\sim 1-2$ s in un **buco nero**.
- La fusione di stelle di neutroni è all'origine delle **esplosioni** più energetiche in astrofisica (**lampi gamma**).
- In aggiunta elementi pesanti come **oro** e **platino** vengono prodotti dal materiale espulso.

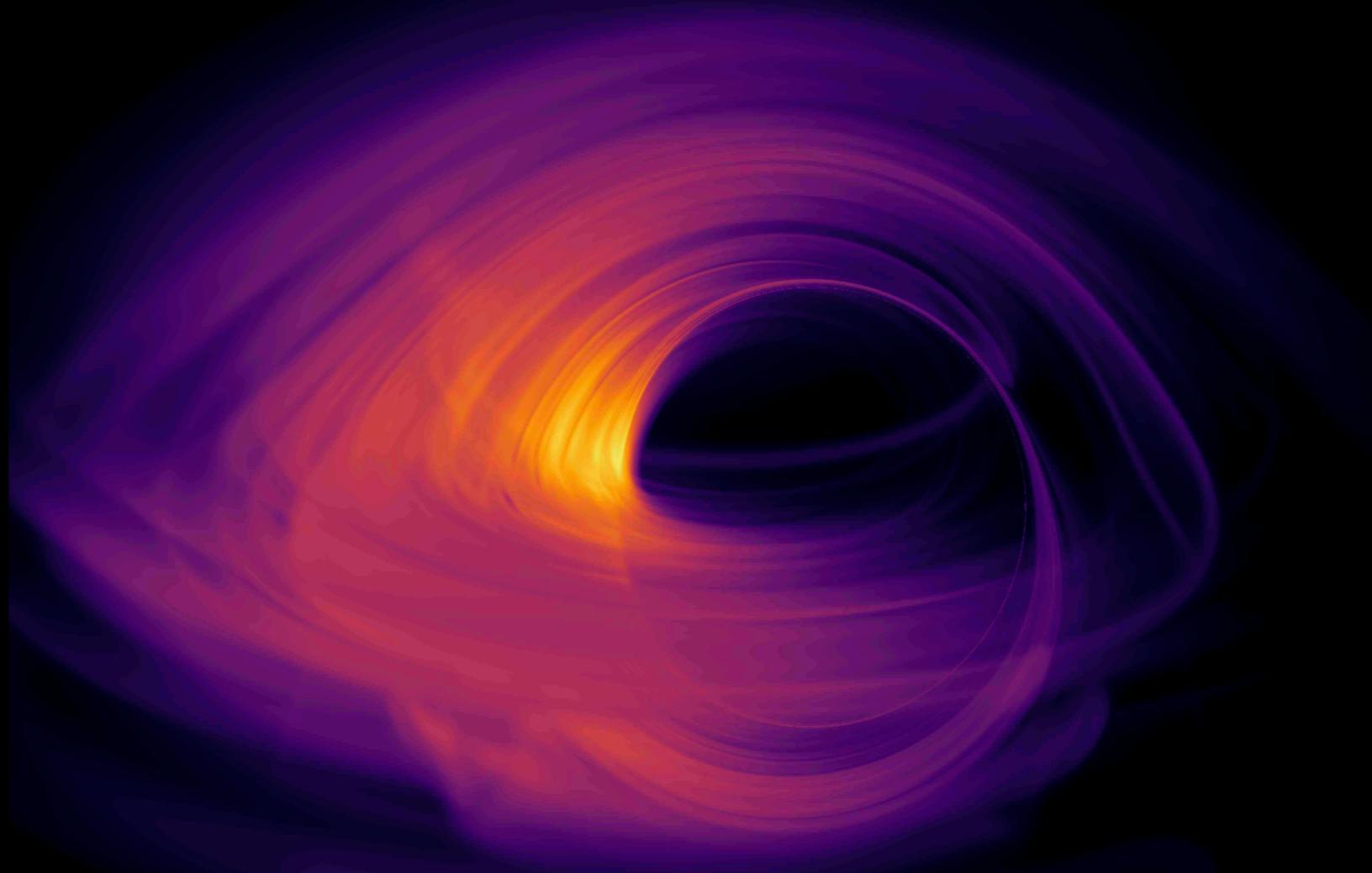
Animazioni: Breu, Radice, LR



$$M = 2 \times 1.35 M_{\odot}$$

LS220 EOS

Ma i buchi neri esistono davvero?...



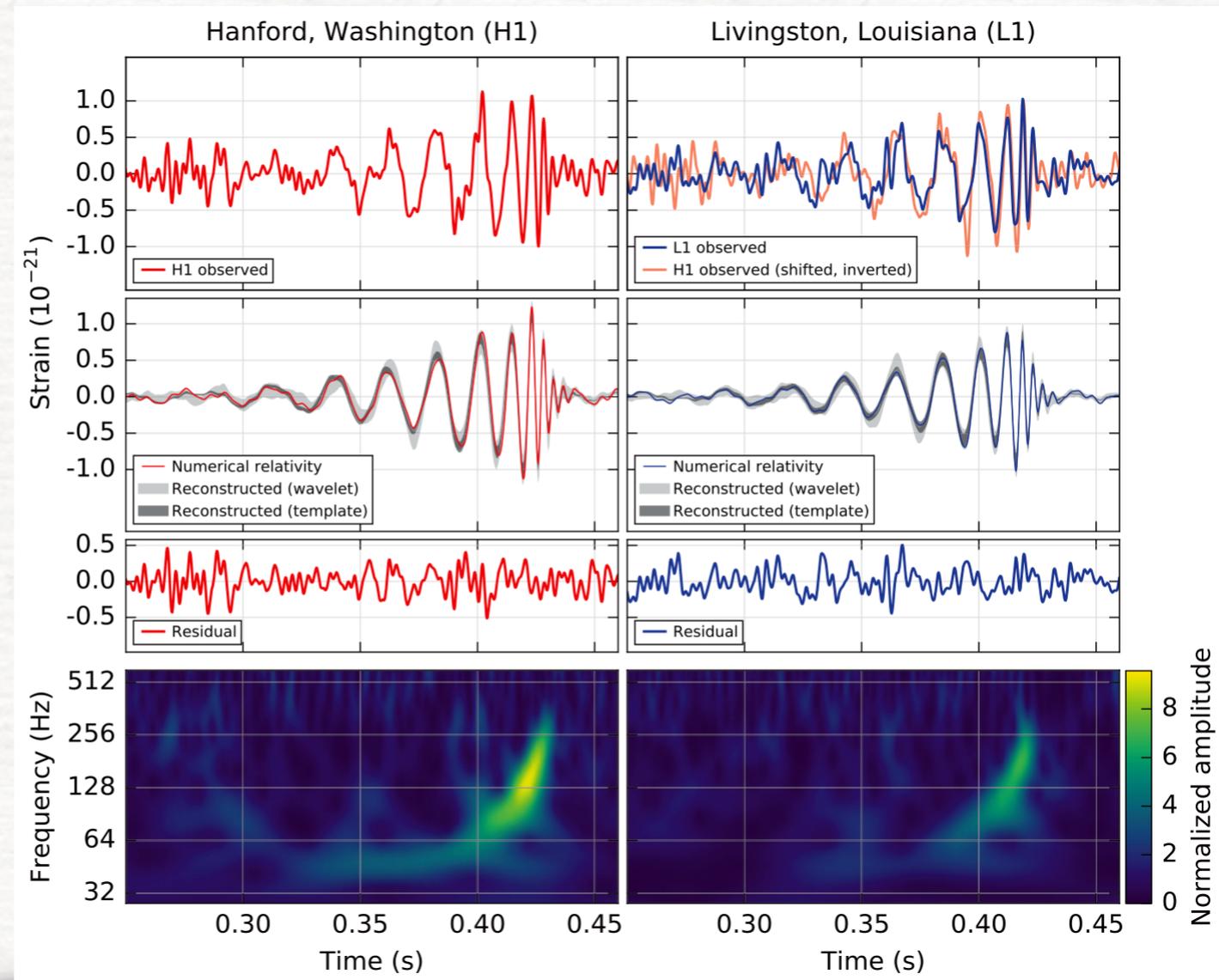
GW150914 è il primo segnale rivelato da un sistema binari di buchi neri.

Abbott+ 2016

Questo segnale è in **ottimo** accordo con le predizioni **teoriche** di gravità numerica.

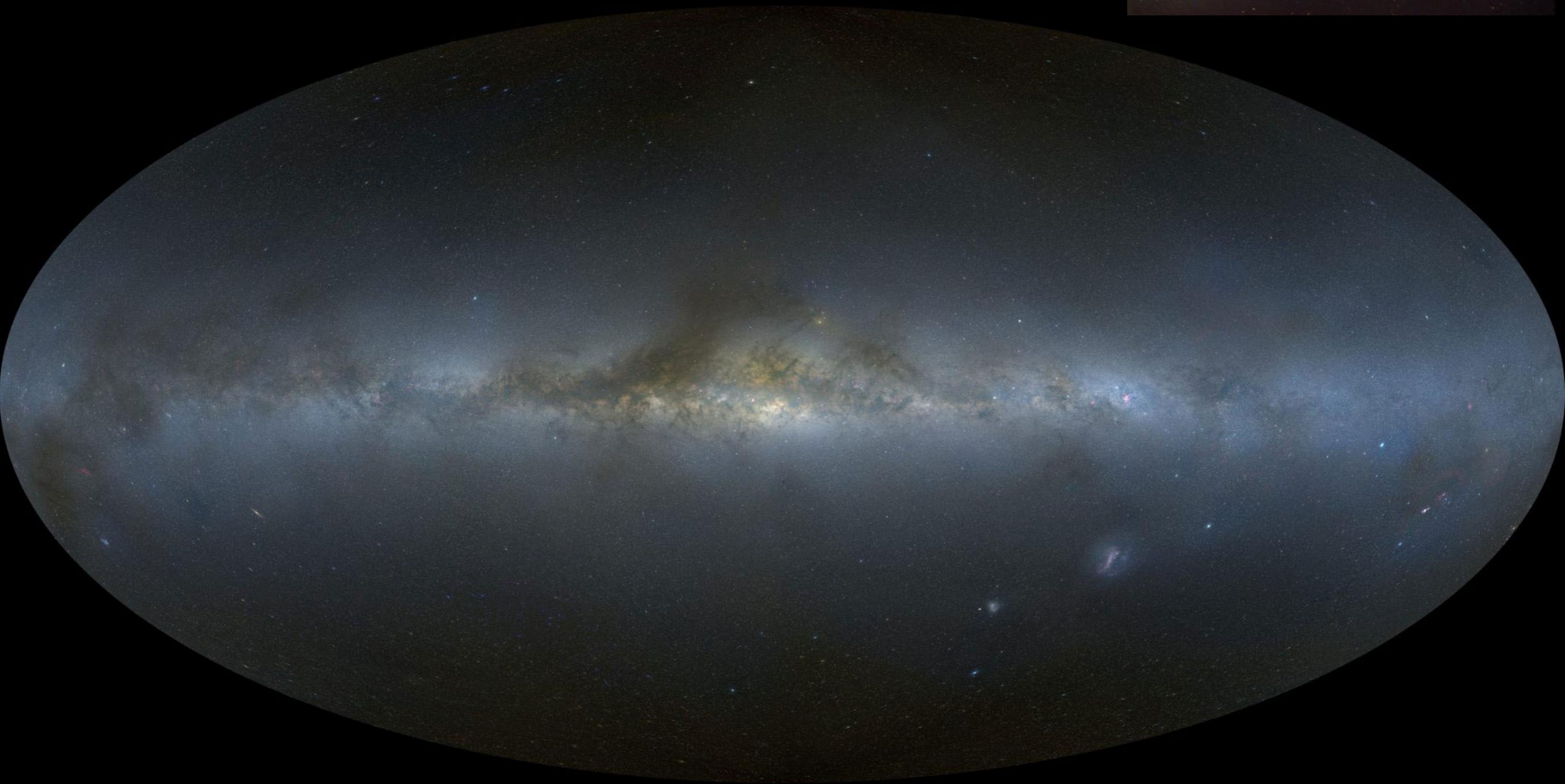
Nonostante l'accordo teorico, altri oggetti compatti (**non buchi neri**, **buchi neri** in altre teorie) danno **risultati simili**.

Ci sono altre **prove** dell'esistenza di buchi neri?



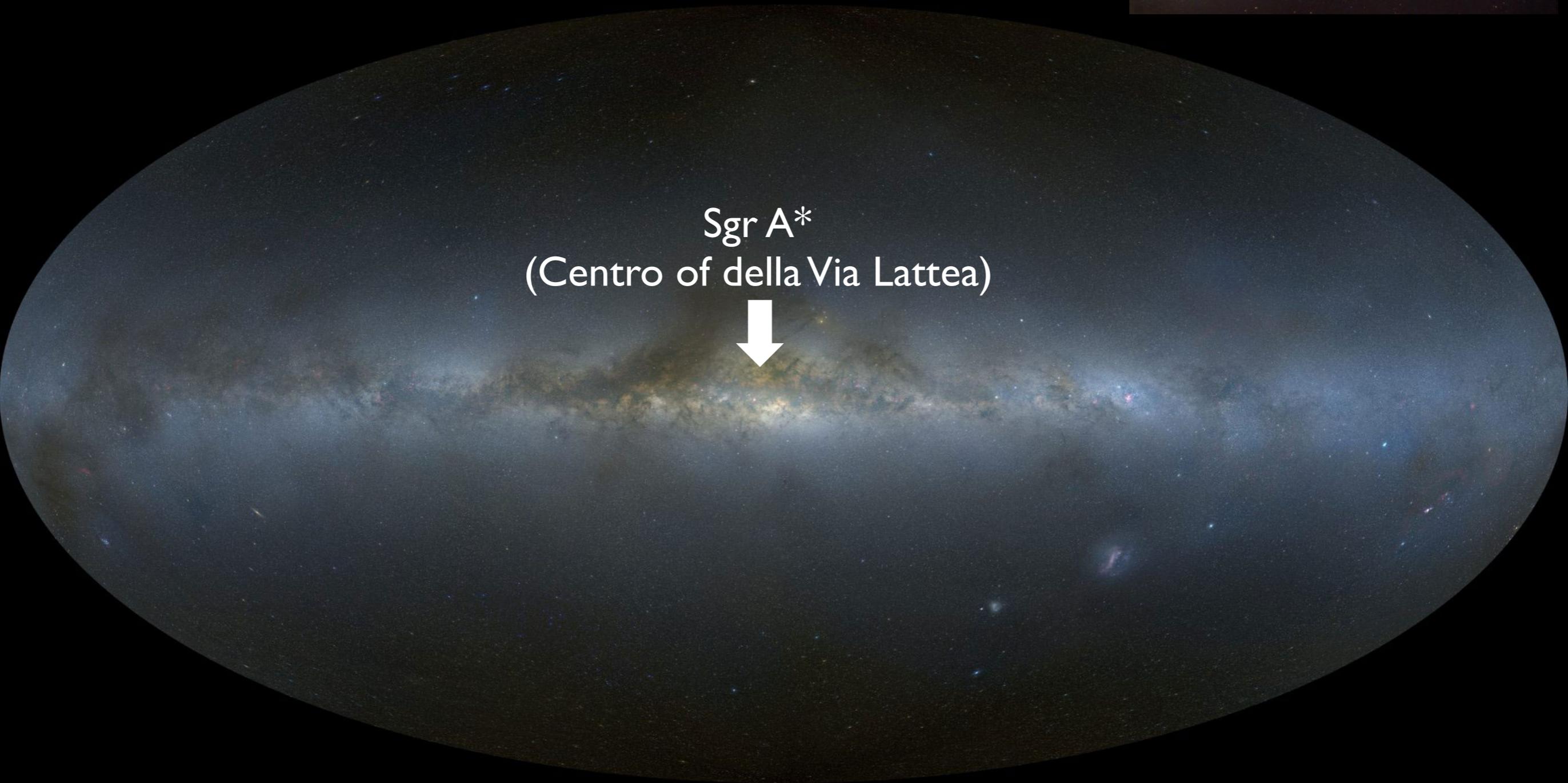
La Via Lattea

Vista nell'ottico dell'intero cielo galattico (nord e sud)



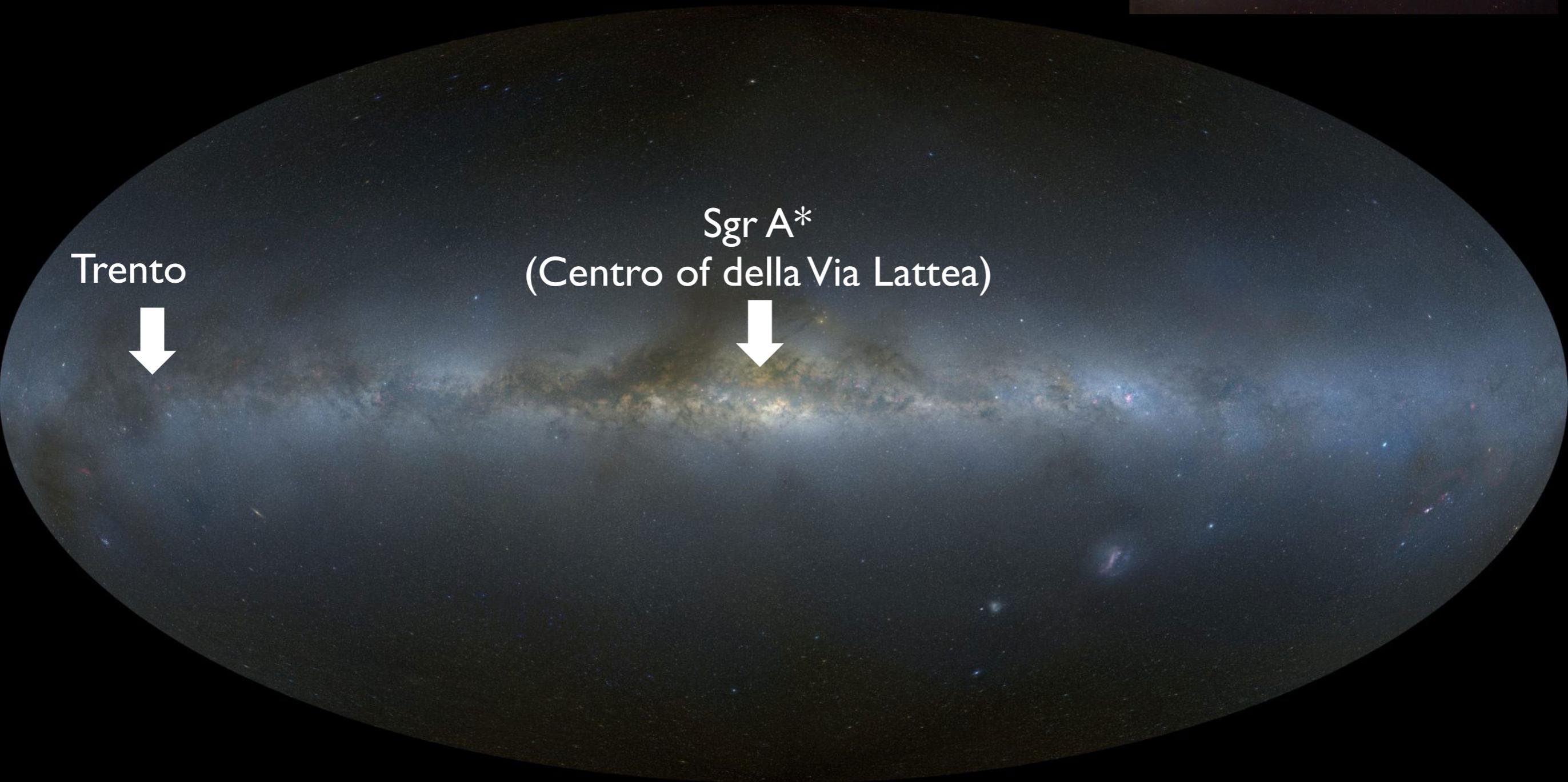
La Via Lattea

Vista nell'ottico dell'intero cielo galattico (nord e sud)



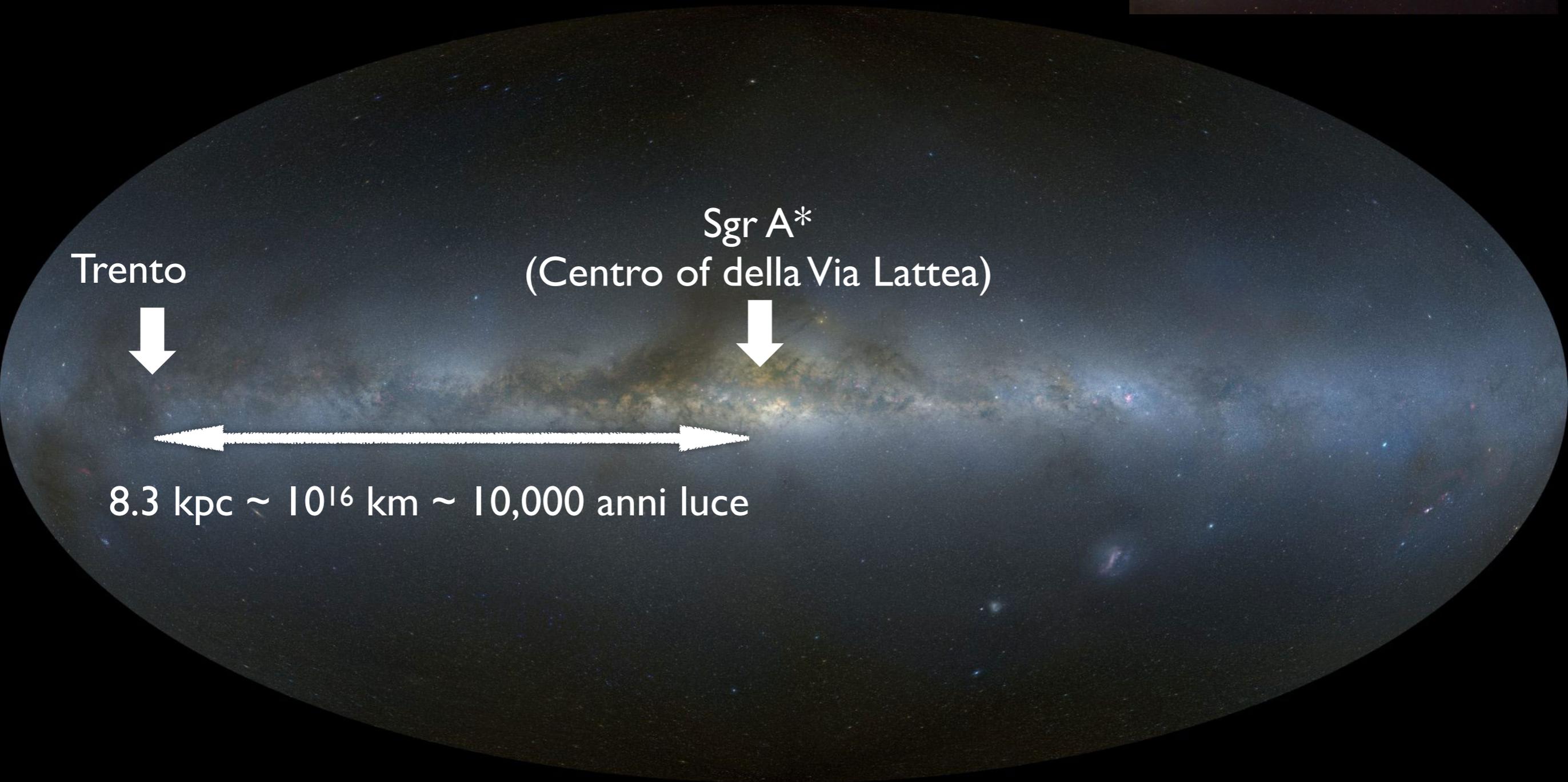
La Via Lattea

Vista nell'ottico dell'intero cielo galattico (nord e sud)



La Via Lattea

Vista nell'ottico dell'intero cielo galattico (nord e sud)



Trento



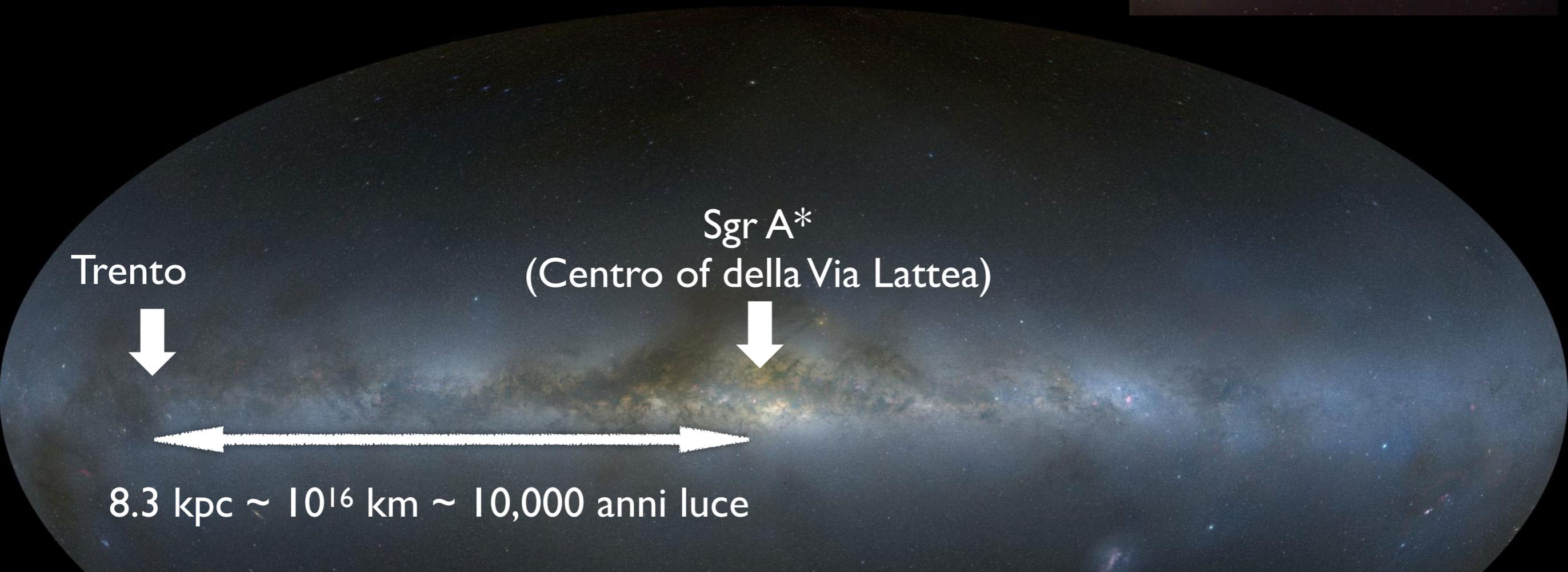
Sgr A*
(Centro of della Via Lattea)



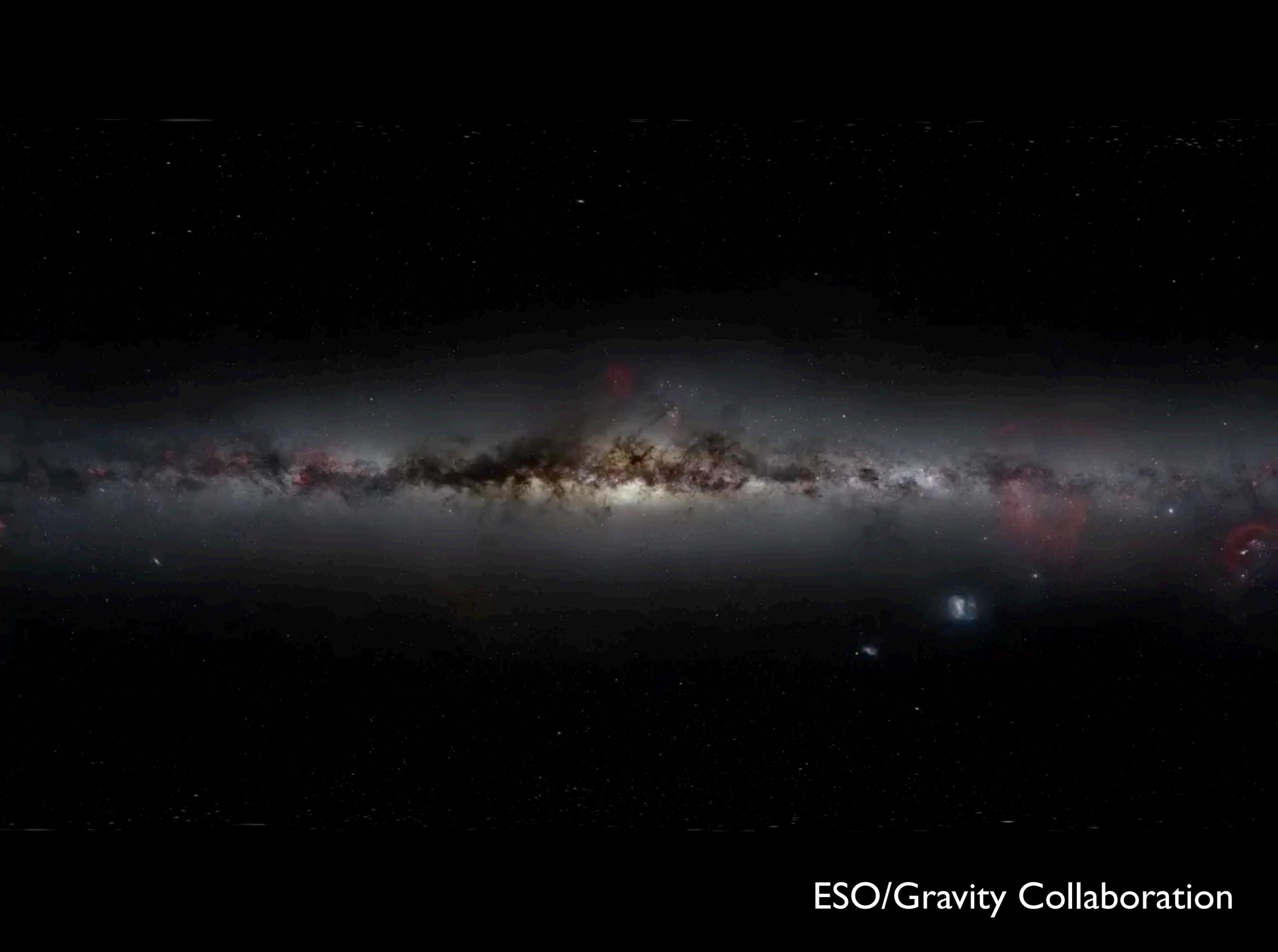
8.3 kpc $\sim 10^{16}$ km $\sim 10,000$ anni luce

La Via Lattea

Vista nell'ottico dell'intero cielo galattico (nord e sud)



- Il **raggio** di un buco nero scala con la massa: $R_S = 2GM/c^2$
- I buchi neri più massicci (**grandi**) sono al centro di galassie
- Il buco nero con il raggio **maggiore** è al centro della Galassia



ESO/Gravity Collaboration

- Lo studio delle orbite rivela un oggetto oscuro con una massa \sim **4.3 milioni** volte quella del Sole.

- Lo studio delle orbite rivela un oggetto oscuro con una massa \sim **4.3 milioni** volte quella del Sole.
- Il problema è che le orbite di queste stelle sono ancora troppo “lontane” dall'**orizzonte degli eventi**.

- Lo studio delle orbite rivela un oggetto oscuro con una massa \sim **4.3 milioni** volte quella del Sole.
- Il problema è che le orbite di queste stelle sono ancora troppo “lontane” dall'**orizzonte degli eventi**.
- Bisognerebbe fare una **“foto”** del buco nero e questo è possibile usando un telescopio **enorme...**

- Lo studio delle orbite rivela un oggetto oscuro con una massa \sim **4.3 milioni** volte quella del Sole.
- Il problema è che le orbite di queste stelle sono ancora troppo “lontane” dall'**orizzonte degli eventi**.
- Bisognerebbe fare una “**foto**” del buco nero e questo è possibile usando un telescopio **enorme**...
- Questo telescopio infatti è grande quanto la **Terra!**...

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

A world map with a grid of latitude and longitude lines. Red lines connect various locations across the globe, representing the baselines of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) stations. The connections are most dense in the Northern Hemisphere, particularly in North America, Europe, and Asia. The text 'Event Horizon Telescope' is overlaid on the map in the upper central region.

$$\text{risoluzione} = \frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$$

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

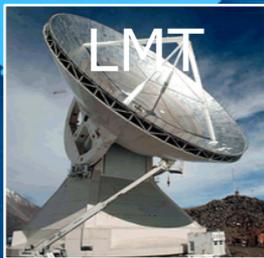
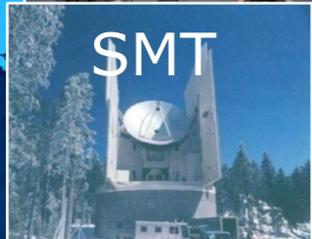
Creare un radio-telescopio virtuale grande quanto il diametro della Terra usando frequenze radio

risoluzione = $\frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

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

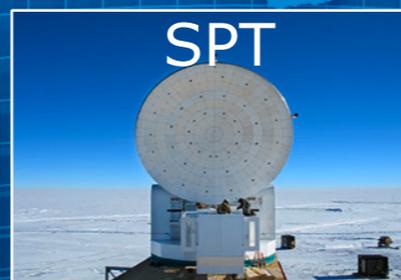
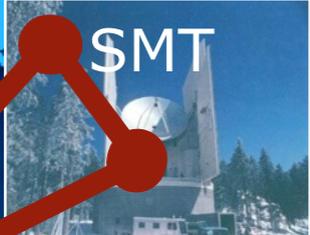


$$\text{risoluzione} = \frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$$

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

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



$$\text{risoluzione} = \frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$$

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

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



$$\text{risoluzione} = \frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$$

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

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



Falcke, Kramer, Rezzolla

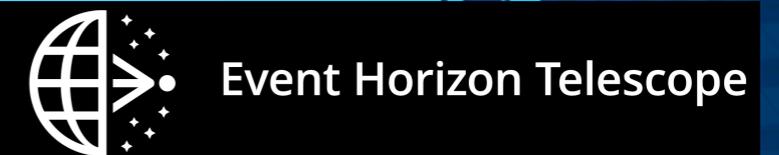


$$\text{risoluzione} = \frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$$

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Event Horizon Telescope

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



Falcke, Kramer, Rezzolla

Osservazioni di EHTC effettuate nel 2017 saranno annunciate all'inizio del 2019



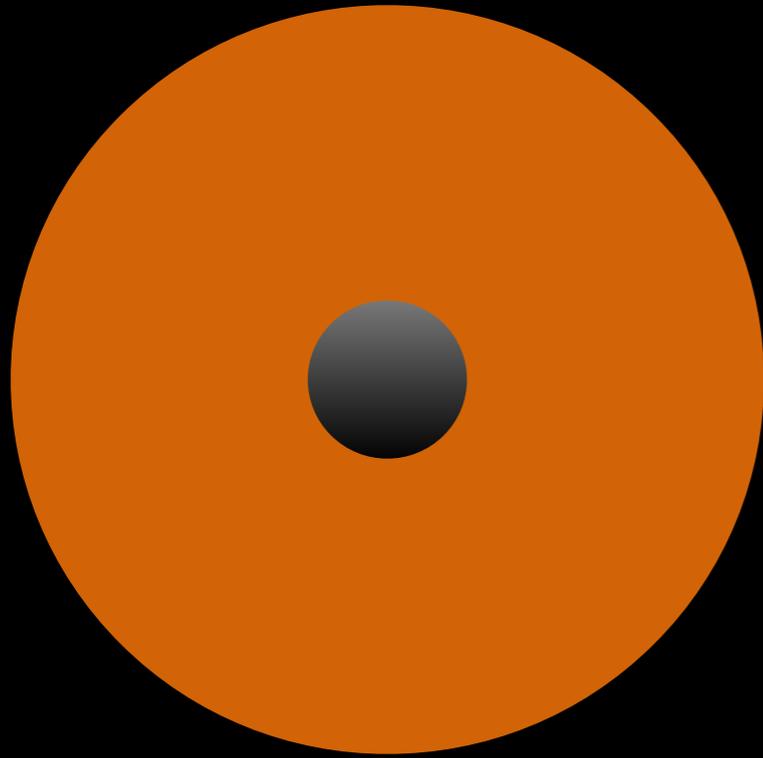
$$\text{risoluzione} = \frac{\text{lunghezza d'onda misurabile}}{\text{dim. telescopio (separazione)}}$$

Cosa ci si aspetta di vedere?

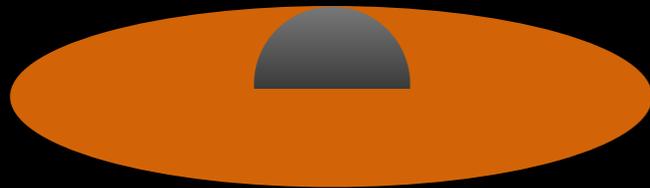
- Il buco nero non sarà nel vuoto ma accrescerà materia da un disco di accrescimento magnetizzato.
- Simulazioni numeriche consentono di predire le proprietà del plasma e la formazione di un getto.

Cosa ci si aspetta di vedere?

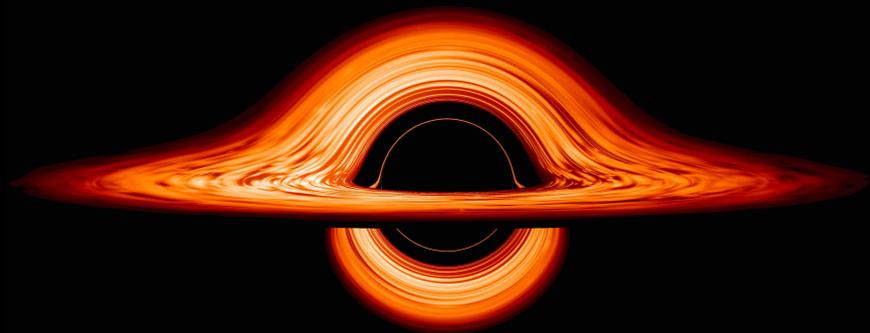
- Il buco nero non sarà nel vuoto ma accrescerà materia da un disco di accrescimento magnetizzato.
- Simulazioni numeriche consentono di predire le proprietà del plasma e la formazione di un getto.
- Alle simulazioni di accrescimento vanno accoppiate altre simulazioni per ottenere delle immagini che tengano conto dello spaziotempo curvo.



- disco con un “bucò” visto dall’alto in uno spaziotempo **piatto**



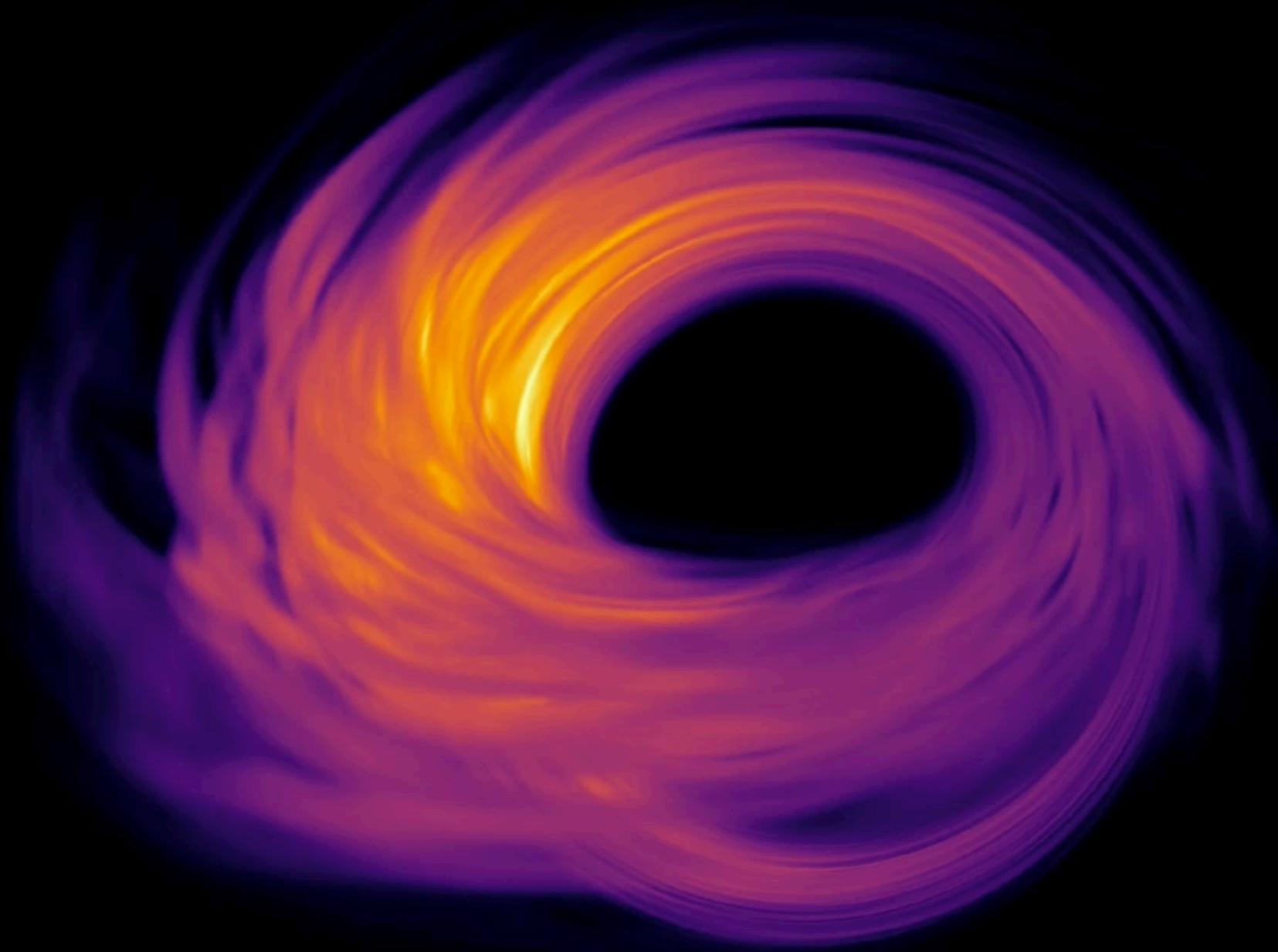
- disco con un “bucò” visto quasi di taglio in uno spaziotempo **piatto**



- disco con un “bucò nero” visto quasi di taglio in uno spaziotempo **curvo**.
- in uno spaziotempo curvo le zone dietro il buco nero diventano visibili!

In realtà non è così semplice....

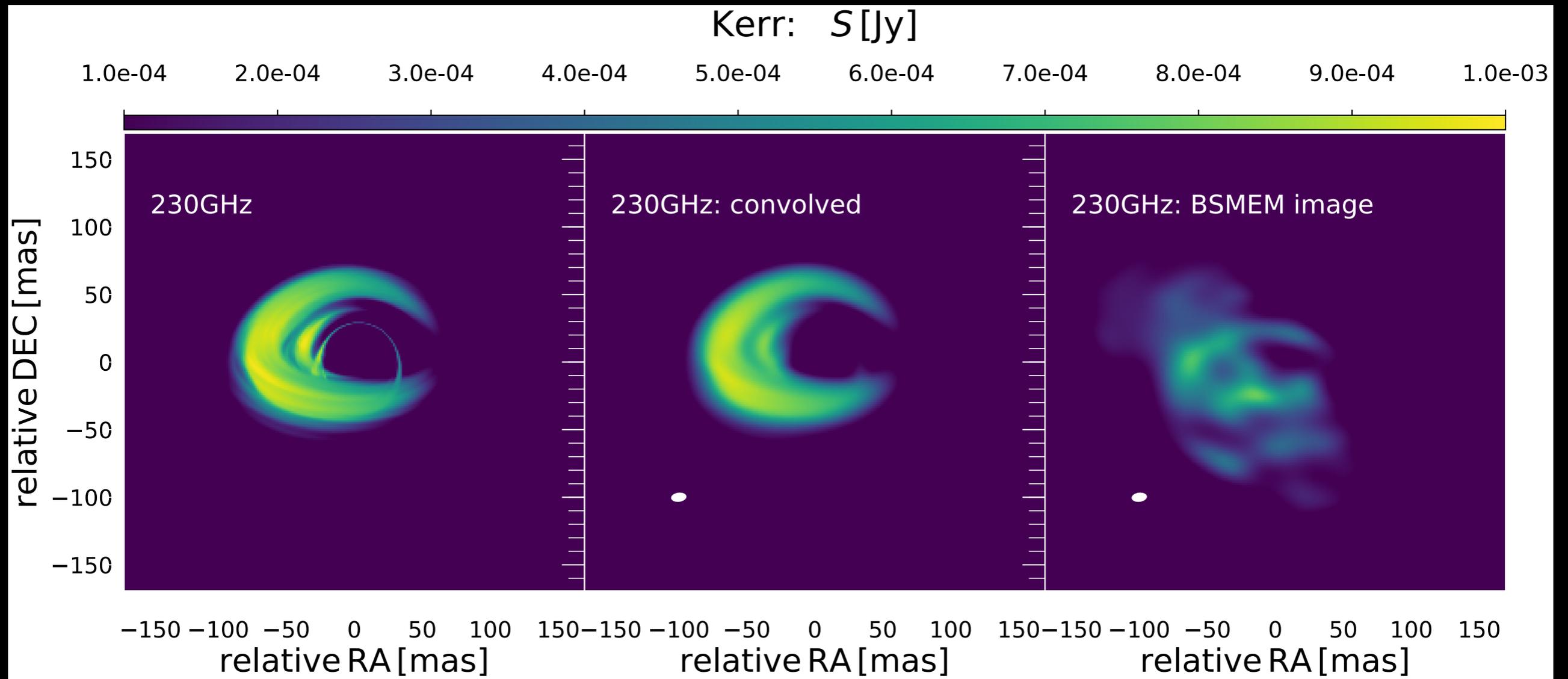
- L'immagine prodotta tramite le simulazioni è considerevolmente più complessa
- Bisogna tenere conto della presenza del plasma e degli effetti relativistici che amplificano la radiazione emessa verso di noi.



In realtà non è così semplice....

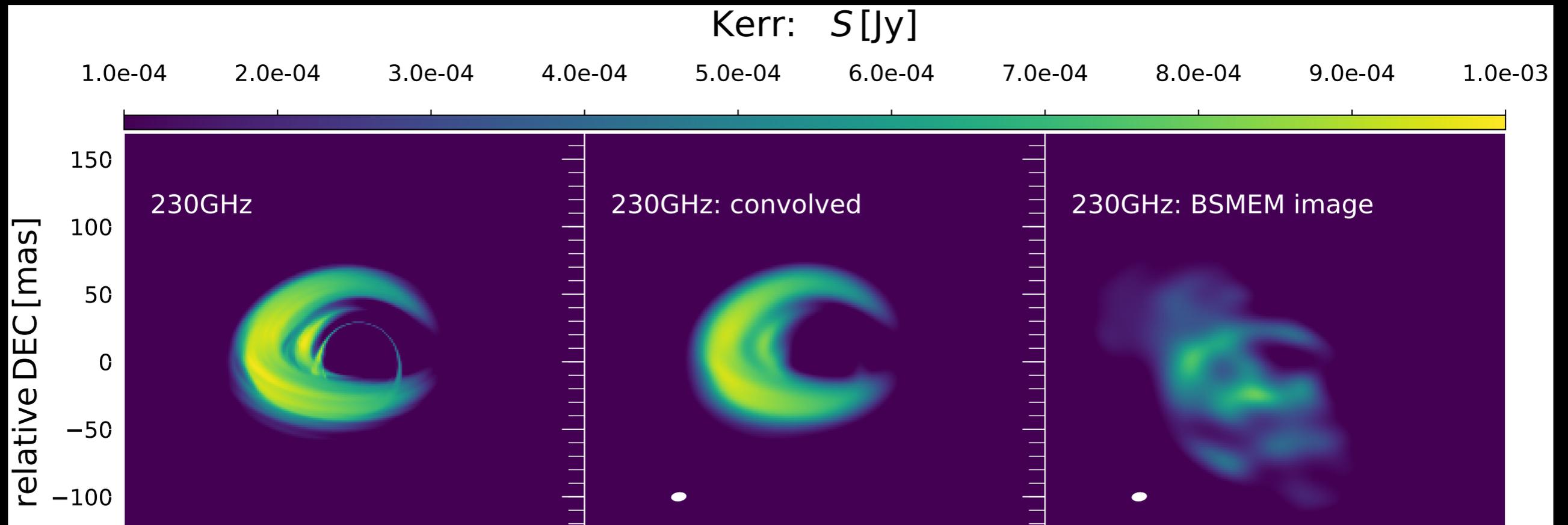
- L'immagine prodotta tramite le simulazioni è considerevolmente più complessa
- Bisogna tenere conto della presenza del plasma e degli effetti relativistici che amplificano la radiazione emessa verso di noi.
- Infine, bisogna tenere conto del fatto che gli strumenti non sono perfetti e c'è sempre **“rumore”**

In realtà non è così semplice...



- Infine, bisogna tenere conto del fatto che gli strumenti non sono perfetti e c'è sempre “rumore”

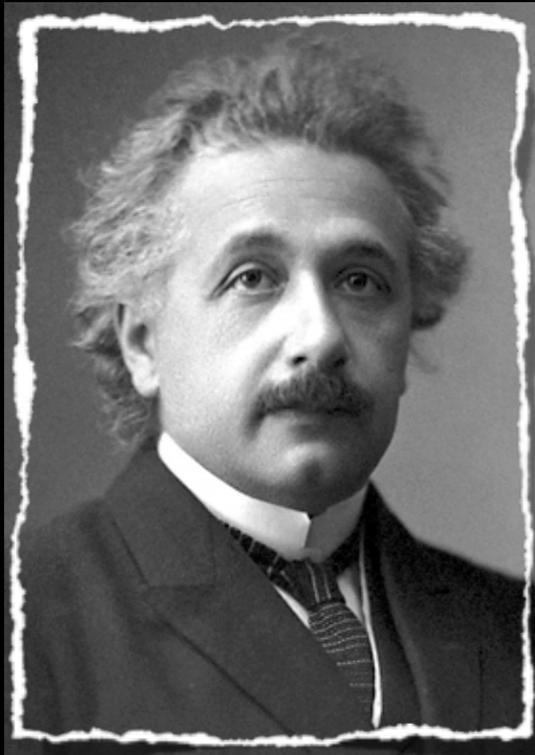
In realtà non è così semplice....



Le osservazioni di EHTC sono nelle fasi finali dell'analisi e saranno rese note all'inizio del 2019!

- Infine, bisogna tenere conto del fatto che gli strumenti non sono perfetti e c'è sempre "rumore"

Conclusioni



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$\nabla_{\mu} T^{\mu\nu} = 0$$

$$\nabla_{\mu} (\rho u^{\mu}) = 0$$

- Abbiamo visto come Einstein abbia proposto un'interpretazione **rivoluzionaria** della **gravità**.
- Le equazioni di questa nuova teoria portano a predizioni **bizzarre** e spesso **incomprensibili** ma sempre **corrette!**

Conclusioni

- Nei prossimi anni **LIGO/Virgo**, e **Event-Horizon Telescope**, forniranno nuove e sorprendenti osservazioni di **buchi neri**, **stelle di neutroni** e **onde gravitazionali**.
- Siamo estremamente **fortunati** di poter **contribuire** a questo incredibile **progresso**.
- Insieme a queste osservazioni potremo esplorare nuovi e forse inaspettati dettagli dell'**universo di Einstein**.

