

BUCHI NERI:

un biglietto di sola andata

Andrea Comastri



**INAF-Osservatorio
Astronomico di Bologna**

Syllabus

- Introduzione e un po' di storia
- Il Buco Nero del **Matematico**
- Il Buco Nero dell' **Astrofisico**
- Il Buco Nero del **Fisico Teorico**



La legge di gravitazione universale

1687

Legge di Newton: è una forza **istantanea** che spiega la mutua attrazione fra i corpi



La legge di gravitazione universale

$$F = -G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

1687

Legge di Newton: è una forza **istantanea** che spiega la mutua attrazione fra i corpi



La legge di gravitazione universale

$$F = -G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

1687

Legge di Newton: è una forza **istantanea** che spiega la mutua attrazione fra i corpi

Niente può evitarla:



La legge di gravitazione universale

$$F = -G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

1687

Legge di Newton: è una forza **istantanea** che spiega la mutua attrazione fra i corpi

Niente può evitarla:
né sostanze, né particelle, neppure la luce!

Leggi di Keplero

Leggi di Keplero

1) I pianeti si muovono lungo orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi

Leggi di Keplero

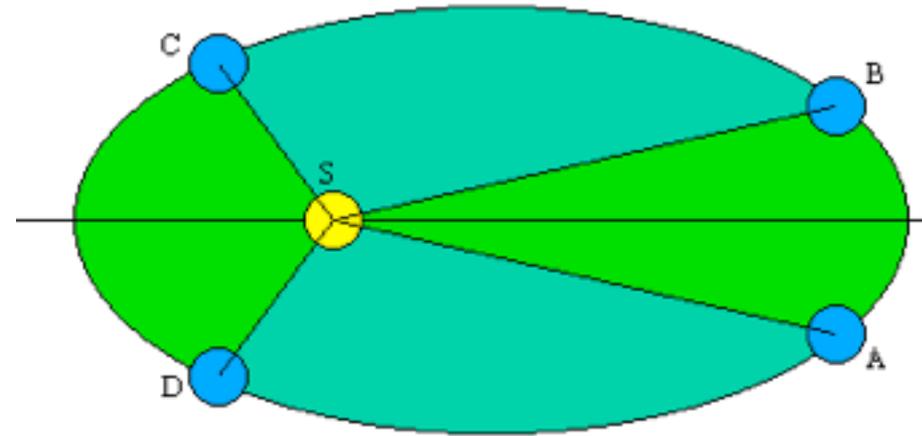
1) I pianeti si muovono lungo orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi

2) I raggi vettori congiungenti i pianeti al centro del Sole descrivono aree uguali in tempi uguali;

1) I pianeti si muovono lungo orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi

2) I raggi vettori congiungenti i pianeti al centro del Sole descrivono aree uguali in tempi uguali;

Leggi di Keplero



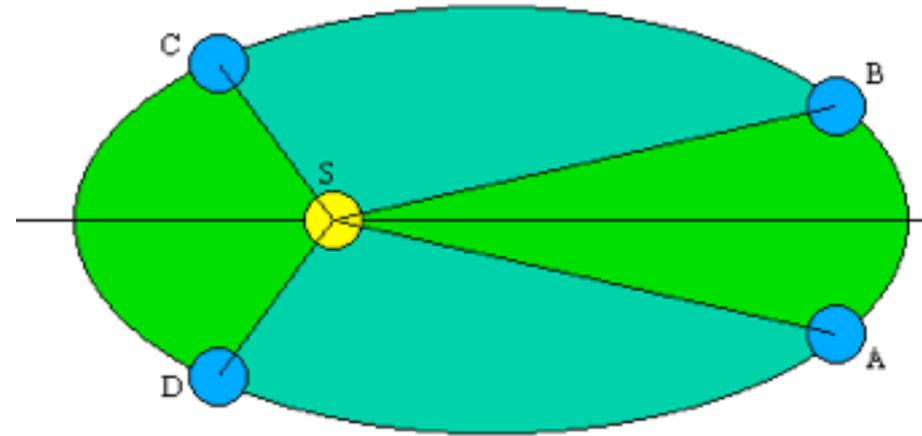
(1), (2)

1) I pianeti si muovono lungo orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi

2) I raggi vettori congiungenti i pianeti al centro del Sole descrivono aree uguali in tempi uguali;

3) I quadrati dei tempi di rivoluzione sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori dell'orbita

Leggi di Keplero



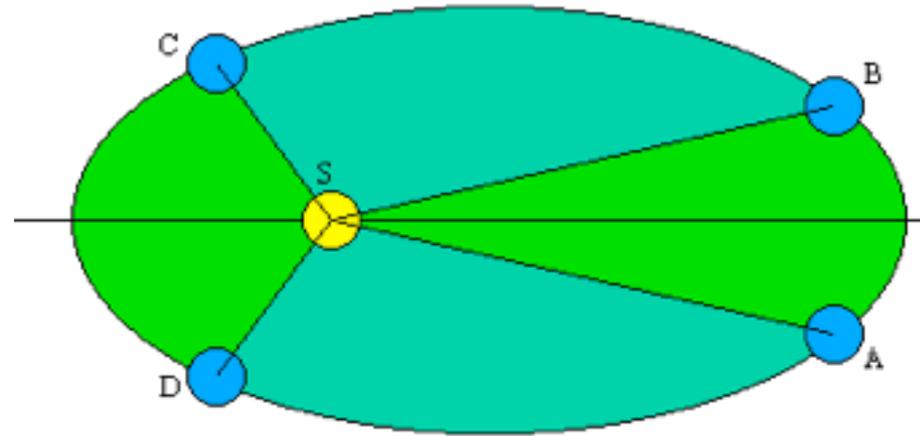
(1), (2)

1) I pianeti si muovono lungo orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi

2) I raggi vettori congiungenti i pianeti al centro del Sole descrivono aree uguali in tempi uguali;

3) I quadrati dei tempi di rivoluzione sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori dell'orbita

Leggi di Keplero



(1), (2)

$$R^3/T^2$$

misura la
massa del
Sole!

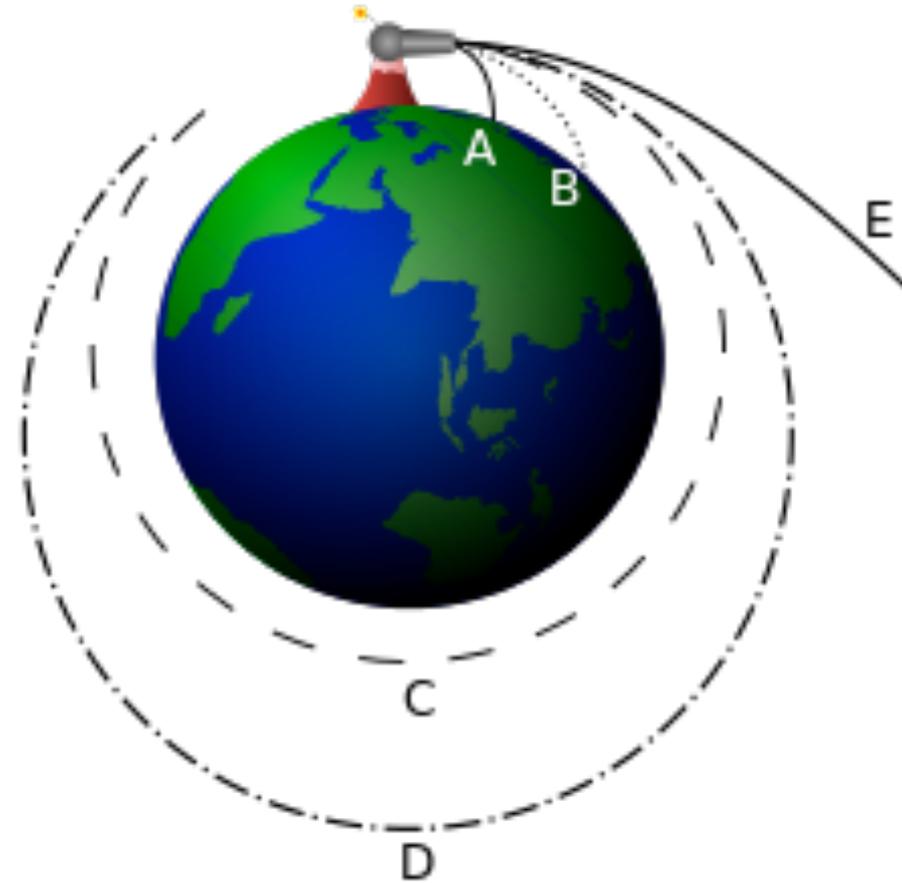
$$R^3/T^2 = GM/4\pi^2 \quad (3)$$

Esempio : La massa del Sole

- **Periodo** orbitale della Terra intorno al Sole: 1 yr
- **Distanza** Terra - Sole:
1AU = 150 milioni di chilometri \Rightarrow massa del Sole:

$$M = 2 \times 10^{33} \text{ grammi}$$

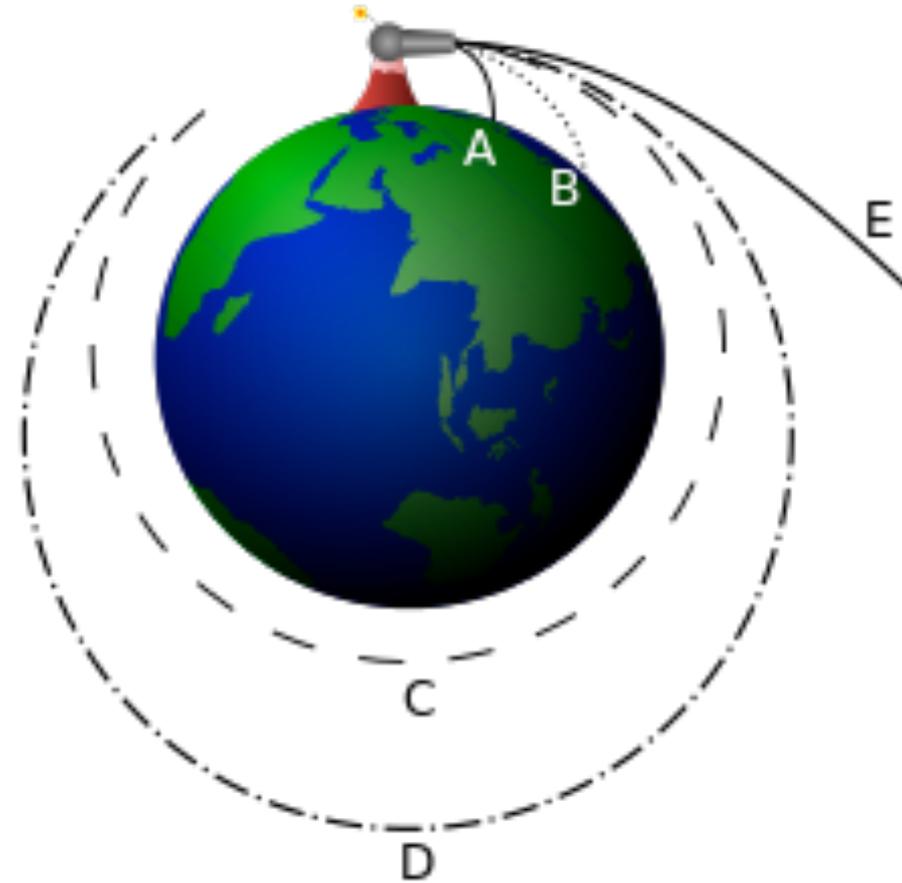
Nota: l'uso delle tonnellate non avrebbe aiutato



$$V_{\text{fuga terra}} = 11 \text{ km/s} = 39\,000 \text{ km/h}$$

$$V_{\text{fuga sole}} = 600 \text{ km/s circa } 500 V_{\text{fuga terra}}$$

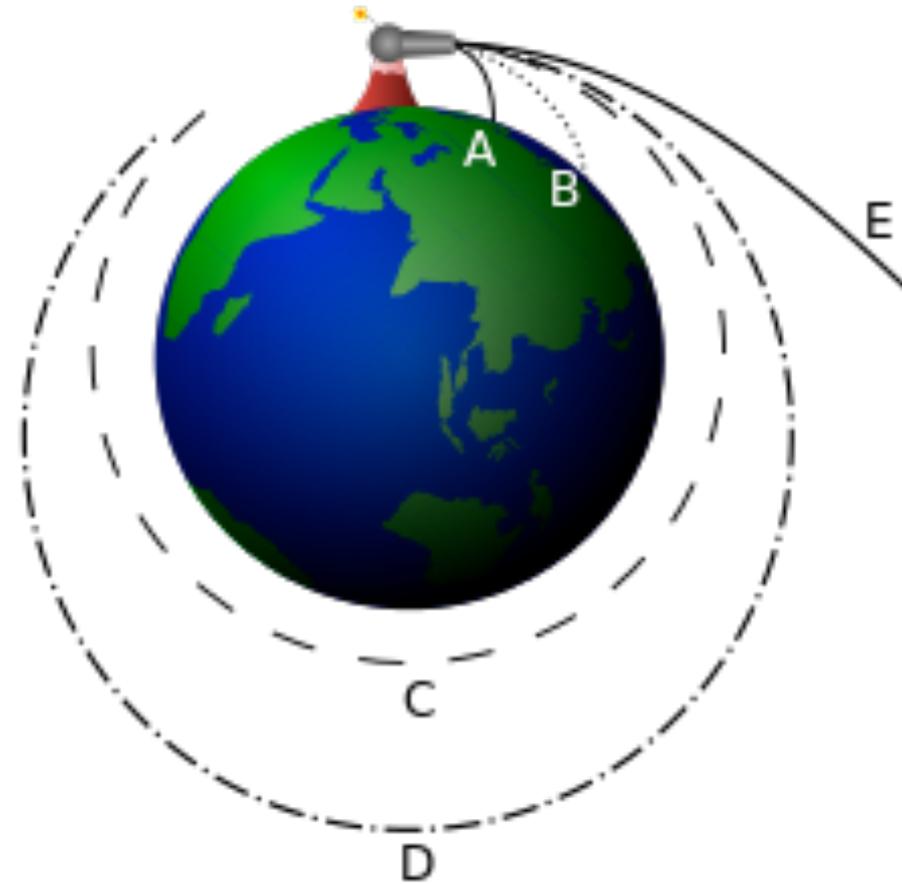
L'effetto della gravità sulla superficie di un corpo e' proporzionale alla compattezza M/R aumenta **all'aumentare della massa o al diminuire della dimensione**



$$\begin{aligned} V_{\text{fuga terra}} &= 11 \text{ km/s} = 39\,000 \text{ km/h} \\ V_{\text{fuga sole}} &= 600 \text{ km/s} \text{ circa } 500 V_{\text{fuga terra}} \end{aligned}$$

L'effetto della gravità sulla superficie di un corpo e' proporzionale alla compattezza M/R aumenta **all'aumentare della massa o al diminuire della dimensione**

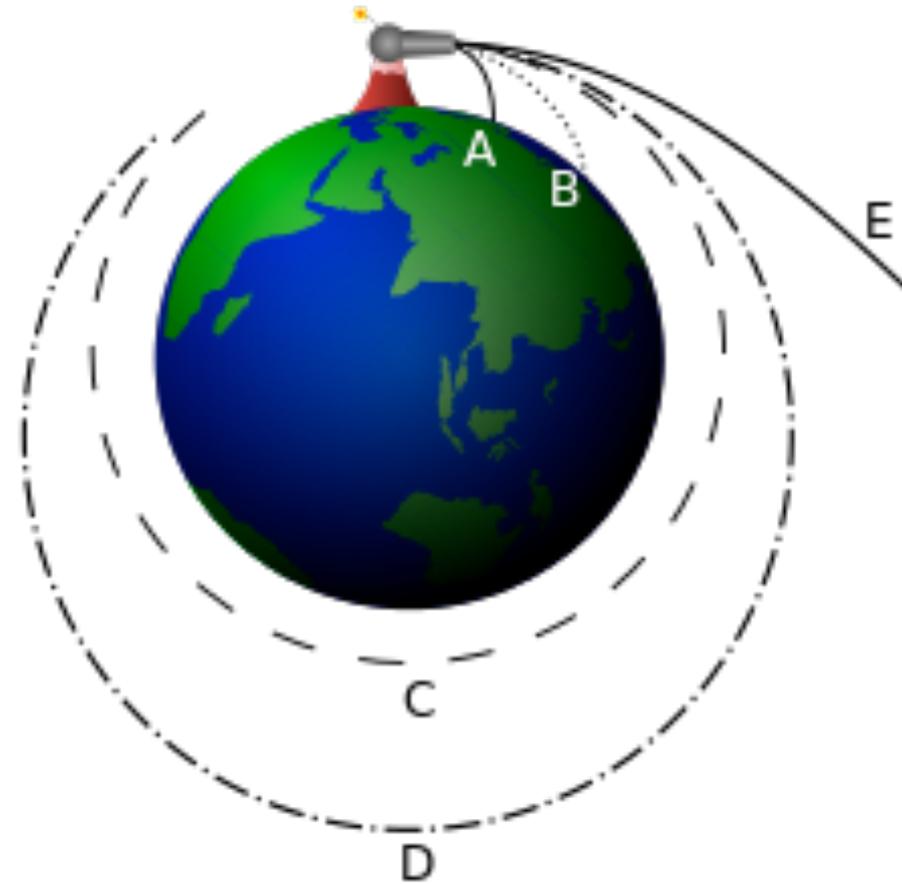
si puo' esprimere attraverso una velocita' caratteristica detta **velocita' di fuga**



$$\begin{aligned} V_{\text{fuga terra}} &= 11 \text{ km/s} = 39\,000 \text{ km/h} \\ V_{\text{fuga sole}} &= 600 \text{ km/s} \text{ circa } 500 V_{\text{fuga terra}} \end{aligned}$$

L'effetto della gravità sulla superficie di un corpo e' proporzionale alla compattezza M/R aumenta **all'aumentare della massa o al diminuire della dimensione**

si puo' esprimere attraverso una velocita' caratteristica detta **velocita' di fuga**



$$\begin{aligned} V_{\text{fuga terra}} &= 11 \text{ km/s} = 39\,000 \text{ km/h} \\ V_{\text{fuga sole}} &= 600 \text{ km/s} \text{ circa } 500 V_{\text{fuga terra}} \end{aligned}$$

John Michell, 1783:

(232 anni fa ...)

“supponiamo che le particelle di luce siano attratte
nella stessa maniera di tutti gli altri corpi ...
dovrebbero esistere in natura dei corpi, dai quali la
luce non potrebbe arrivare a noi ...

Cosa succede se $V_{\text{fuga}} = c$? Quale è l'effetto della gravità intorno ad un oggetto la cui velocità di fuga è uguale alla velocità della luce?

John Michell, 1783:

(232 anni fa ...)

“supponiamo che le particelle di luce siano attratte nella stessa maniera di tutti gli altri corpi ... dovrebbero esistere in natura dei corpi, dai quali la luce non potrebbe arrivare a noi ...

Buchi neri

nome recente (1967)

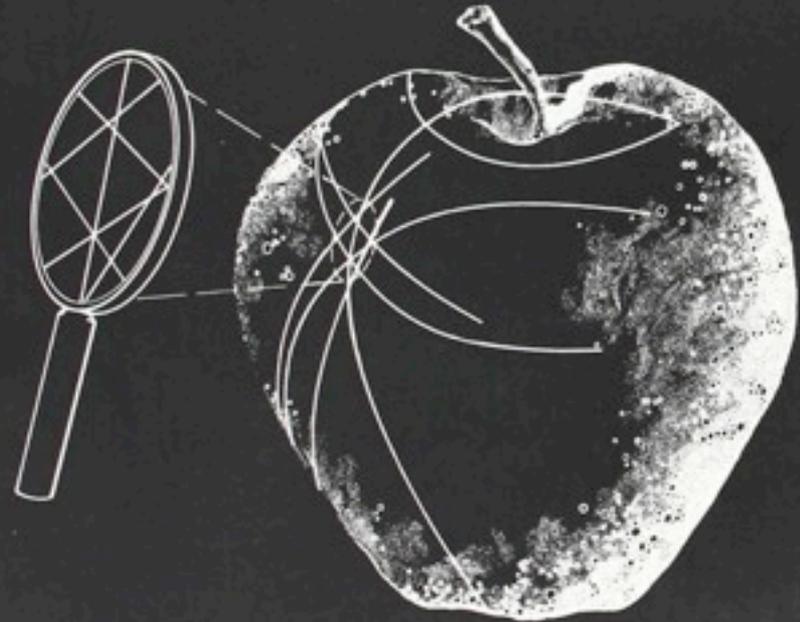
Cosa e' un Buco Nero?

Soluzione delle equazioni di campo della Relativita' Generale in presenza di una Massa M .

John A. Wheeler
(1911- 2008)

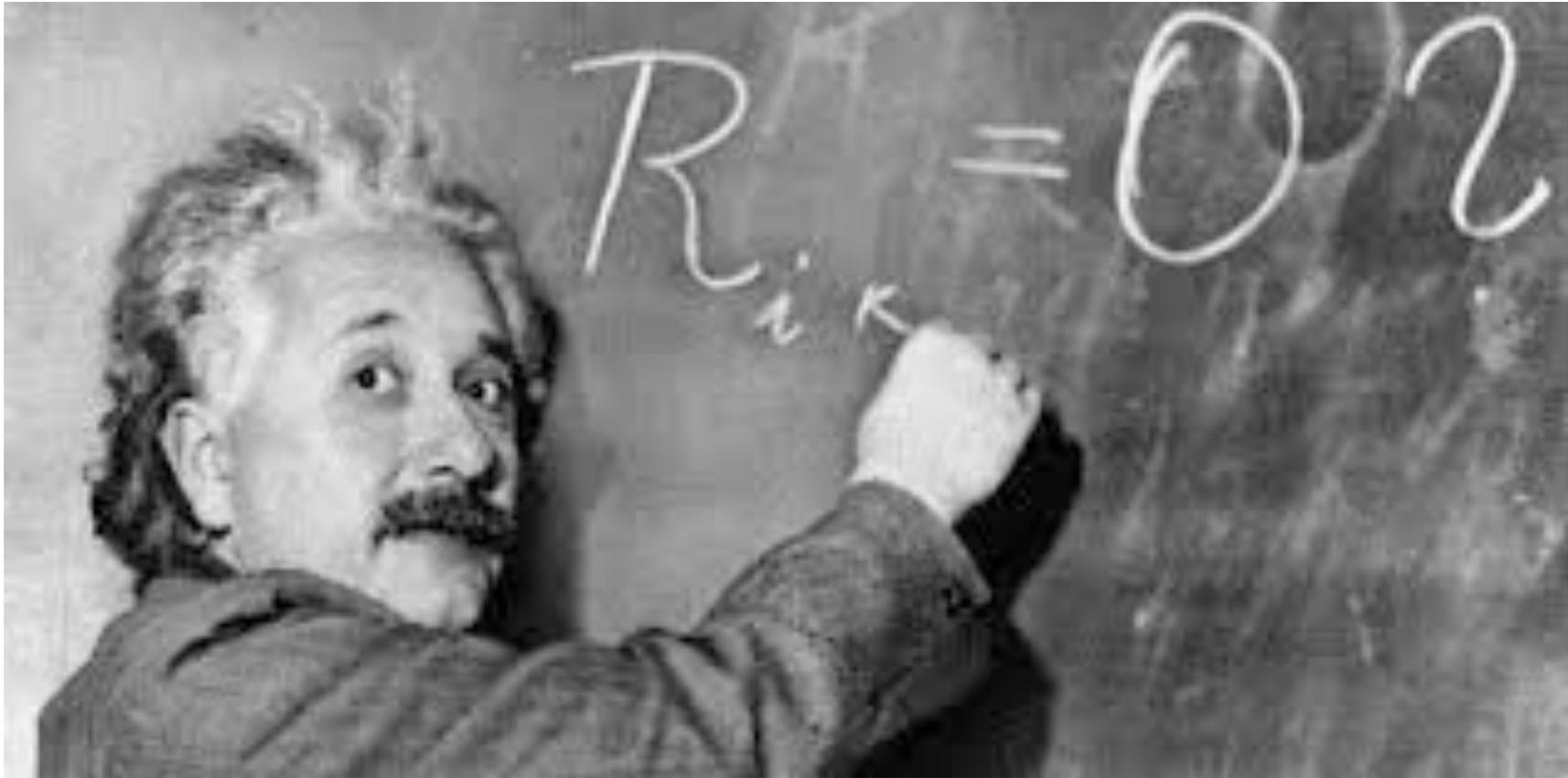
GRAVITATION

Charles W. MISNER Kip S. THORNE John Archibald WHEELER





Nel 1916, Einstein completa la teoria della Relatività
Generale = Teoria della Gravitazione

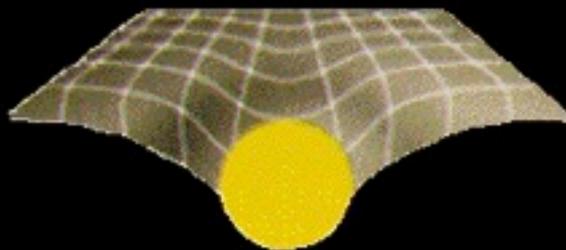
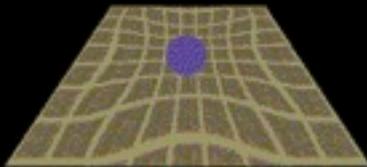
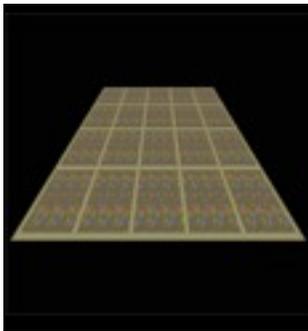


Effetti evidenti per velocità prossime a *quelle della luce* e per campi gravitazionali molto intensi

Mentre Newton concepisce la gravità come una **forza istantanea**, Einstein interpreta la gravità come manifestazione della curvatura dello spaziotempo (x,y,z,t)

Mentre Newton concepisce la gravità come una **forza istantanea**, Einstein interpreta la gravità come manifestazione della curvatura dello spaziotempo (x,y,z,t)

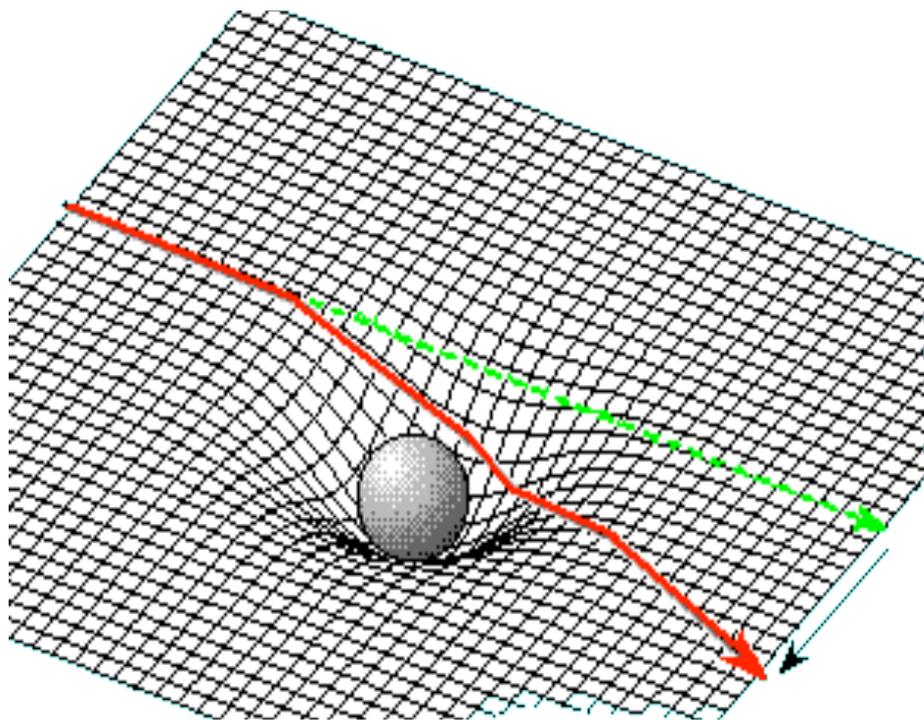
Quindi le masse **NON** attraggono i corpi, la loro presenza **distorce lo spazio** intorno ad esse



Terra

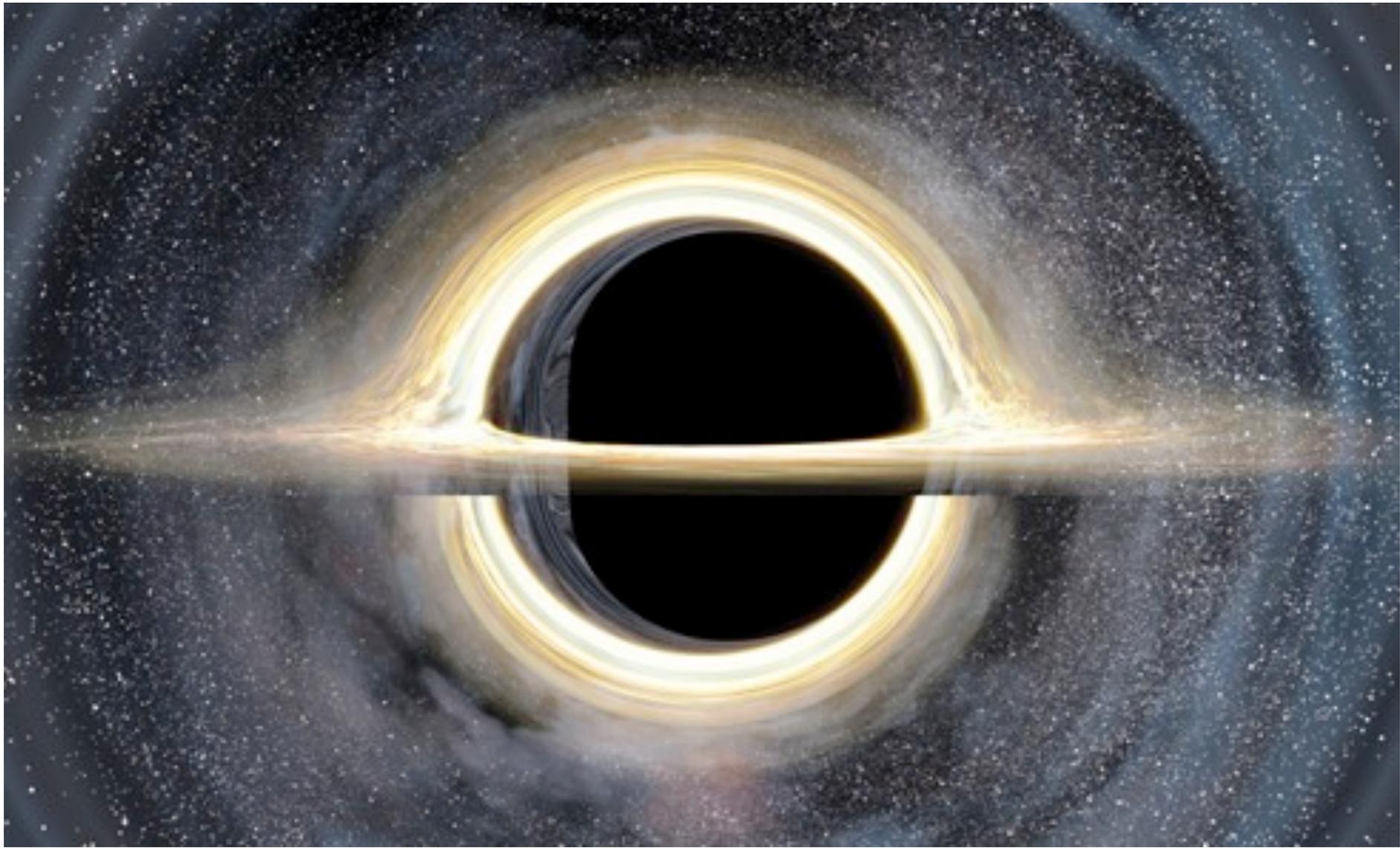
Sole

Stella di
neutroni

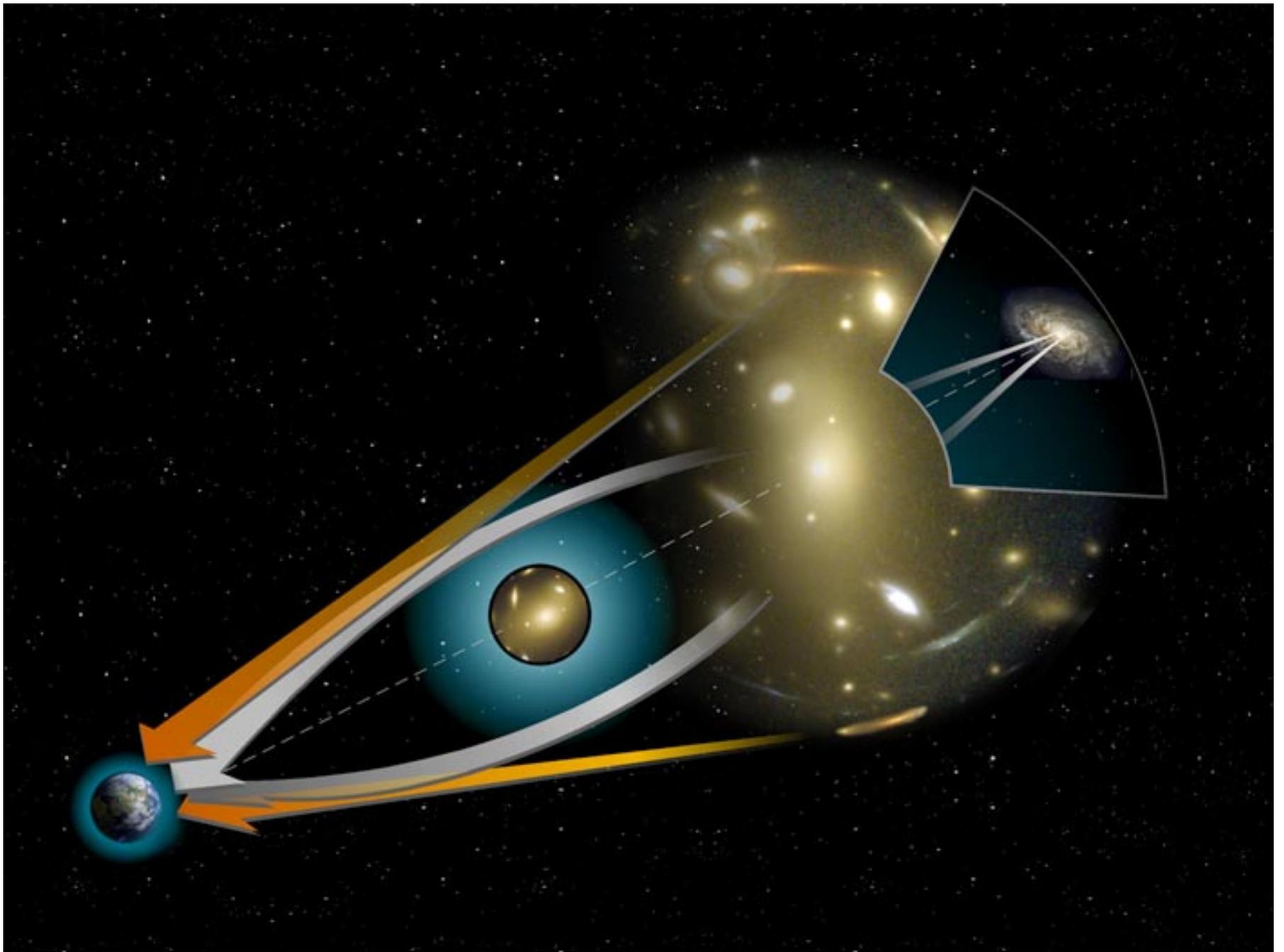


Lo spazio dice
alla materia come
muoversi, la
materia dice allo
spazio come
curvarsi.

J.A. Wheeler

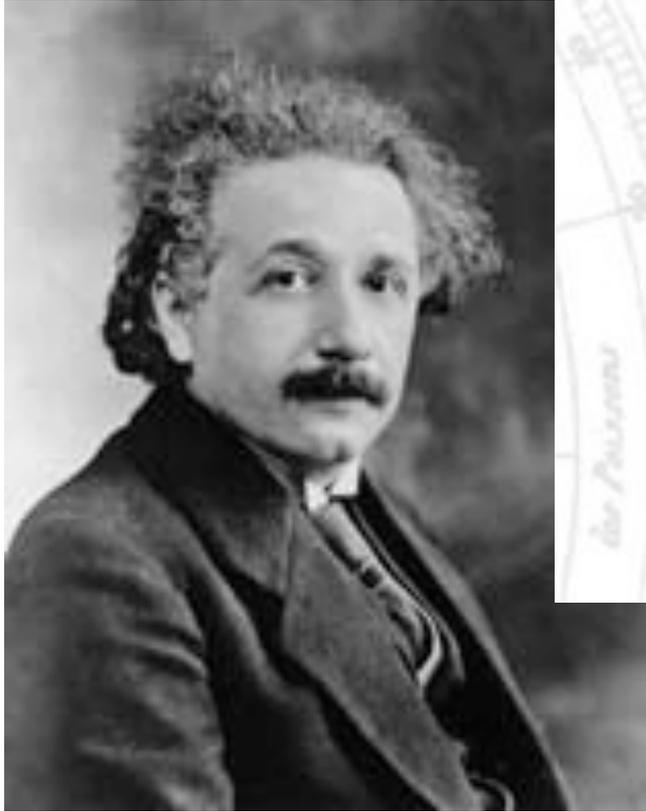


Gargantua il Buco Nero di Interstellar





Equazioni di "Campo"



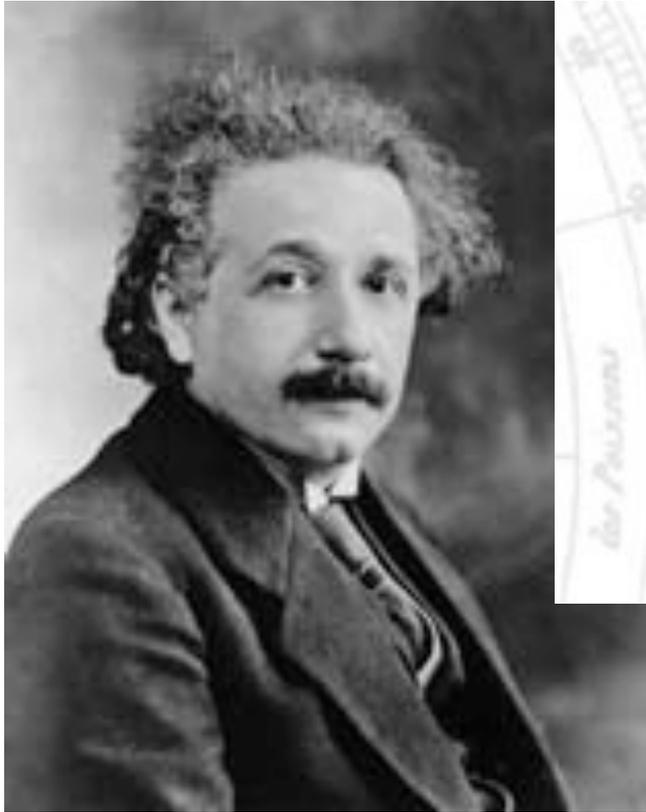
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Spazio-tempo

Materia

GEOMETRIA dello SPAZIO-TEMPO =
DISTRIBUZIONE DI MATERIA (ENERGIA)

Equazioni di "Campo"



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

Spazio-tempo

Materia

GEOMETRIA dello SPAZIO-TEMPO =
DISTRIBUZIONE DI MATERIA (ENERGIA)

INSIEME DI EQUAZIONI DIFFERENZIALI NON LINEARI



Tullio Levi-Civita



Gregorio Ricci Curbastro
Lugo 1853 Bologna 1925

“E’ in generale noto che la teoria di Riemann dei continui metrici, quasi dimenticata verso la fine del secolo scorso, ricevette nuova vita e fu approfondita da Ricci Curbastro e Levi-Civita e che le loro ricerche hanno decisamente reso possibile la formulazione della teoria generale della relatività”

Albert Einstein

Nel 1916 Karl Schwarzschild produsse il calcolo della deformazione dello spaziotempo intorno ad un oggetto sferico di massa M .

Nel 1916 Karl Schwarzschild produsse il calcolo della deformazione dello spaziotempo intorno ad un oggetto sferico di massa M .

Per ogni oggetto di massa M e' possibile identificare un raggio R_S tale per cui se $R < R_S$ l'oggetto **scompare**

Raggio di **Schwarzschild**

Nel 1916 Karl Schwarzschild produsse il calcolo della deformazione dello spaziotempo intorno ad un oggetto sferico di massa M .

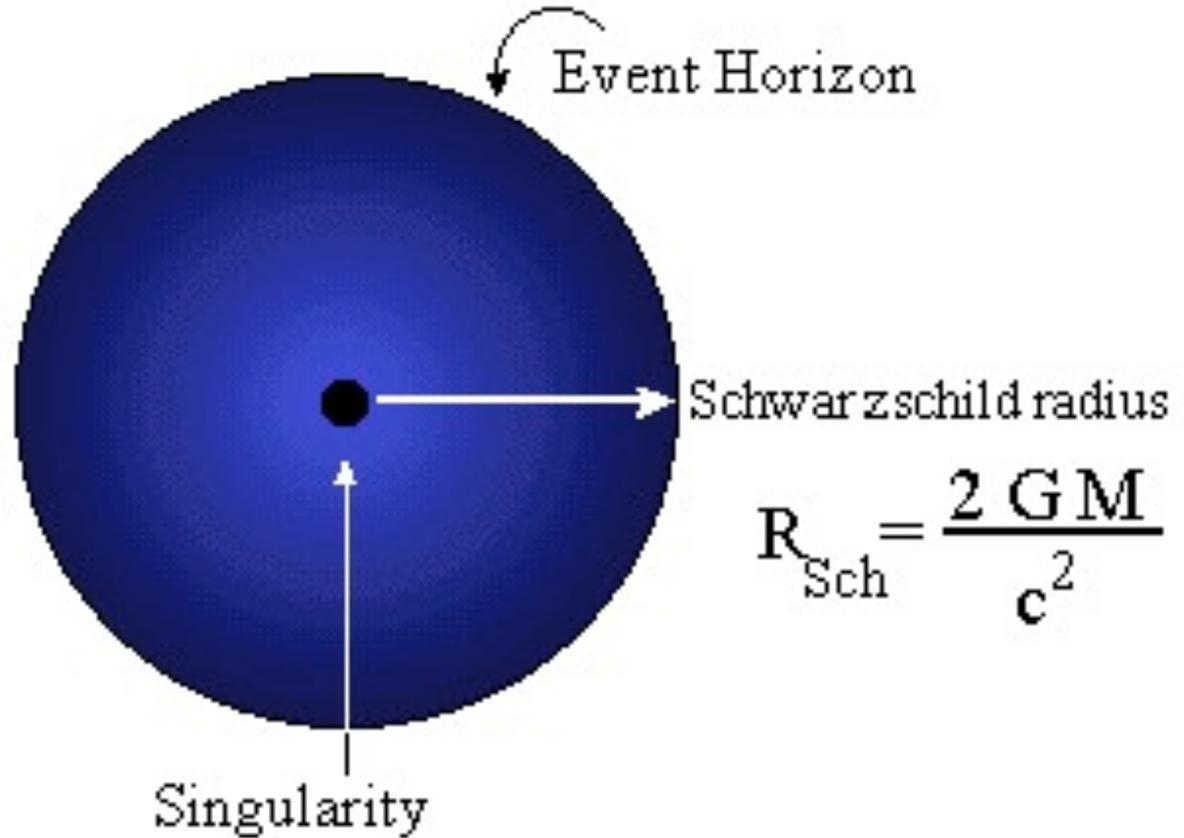
Per ogni oggetto di massa M e' possibile identificare un raggio R_S tale per cui se $R < R_S$ l'oggetto **scompare**

Raggio di **Schwarzschild**

Nasce così il concetto di **Orizzonte degli eventi**, ovvero il raggio minimo dal quale la luce può emergere.

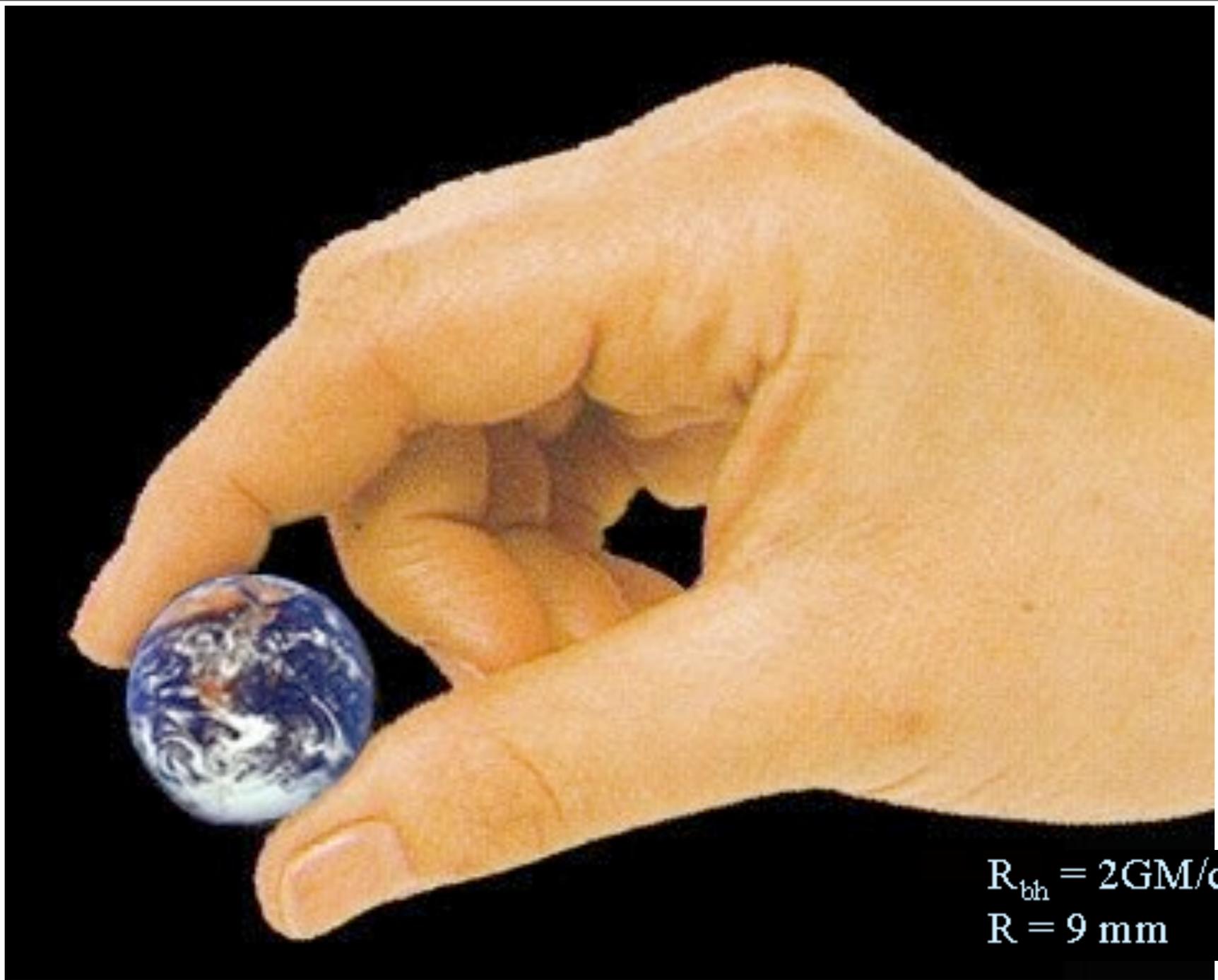


Raggio di Schwarzschild



$$V_{\text{fuga}} = 300\,000 \text{ km/s}$$

$$R_{\text{bh}} = 2GM/c^2$$
$$R = 9 \text{ mm}$$



$$R_{bh} = 2GM/c^2$$
$$R = 9 \text{ mm}$$

- **Un buco nero non ha capelli solo:**
 - **Massa**
 - **Momento angolare**
 - **Carica elettrica**

No Hair Theorem

- Schwarzschild (1916)
 - massa

- Un buco nero non ha capelli solo:
 - Massa
 - Momento angolare
 - Carica elettrica

**No Hair
Theorem**

- Schwarzschild (1916)
 - massa
- Reissner-Nordström (1916, 1918)
 - massa, carica elettrica

- Un buco nero non ha capelli solo:
 - Massa
 - Momento angolare
 - Carica elettrica

**No Hair
Theorem**

- Schwarzschild (1916)
 - massa
- Reissner-Nordström (1916, 1918)
 - massa, carica elettrica
- Kerr (1963)
 - massa, momento angolare

- Un buco nero non ha capelli solo:
 - Massa
 - Momento angolare
 - Carica elettrica

**No Hair
Theorem**

- Schwarzschild (1916)
 - massa
- Reissner-Nordström (1916, 1918)
 - massa, carica elettrica
- Kerr (1963)
 - massa, momento angolare
- Kerr-Newman (1965)
 - massa, momento angolare, carica elettrica

- Un buco nero non ha capelli solo:
 - Massa
 - Momento angolare
 - Carica elettrica

No Hair Theorem

Perché cercare i BH?

Perché cercare i BH?

Fisica: si può studiare l'elevatissima gravità

Perché cercare i BH?

Fisica: si può studiare l'elevatissima gravità

Astrofisica: Studio degli ultimi stadi dell'evoluzione stellare. Possibili semi di nuove galassie. Origine dei potentissimi getti che si osservano con i radiotelescopi

Perché cercare i BH?

Fisica: si può studiare l'elevatissima gravità

Astrofisica: Studio degli ultimi stadi dell'evoluzione stellare. Possibili semi di nuove galassie. Origine dei potentissimi getti che si osservano con i radiotelescopi

Oggi i BH sono considerati oggetti astrofisici e si studiano le loro proprietà: spin, massa, curvatura dello spaziotempo e accuratezza rispetto alle previsioni teoriche della Relatività Generale.

Stelle di piccola massa (< 1.4 Masse Solari) sopravvivono
come Nane Bianche (e.g. Sole)

Stelle di piccola massa (< 1.4 Masse Solari) sopravvivono come Nane Bianche (e.g. Sole)

Stelle massicce collassano in **NS** (stelle di neutroni) se $1.4 < M < 2-3$ Masse solari o **BH** (buchi neri) se piu' massiccie.

Stelle di piccola massa (< 1.4 Masse Solari) sopravvivono come Nane Bianche (e.g. Sole)

Stelle massicce collassano in **NS** (stelle di neutroni) se $1.4 < M < 2-3$ Masse solari o **BH** (buchi neri) se piu' massiccie.

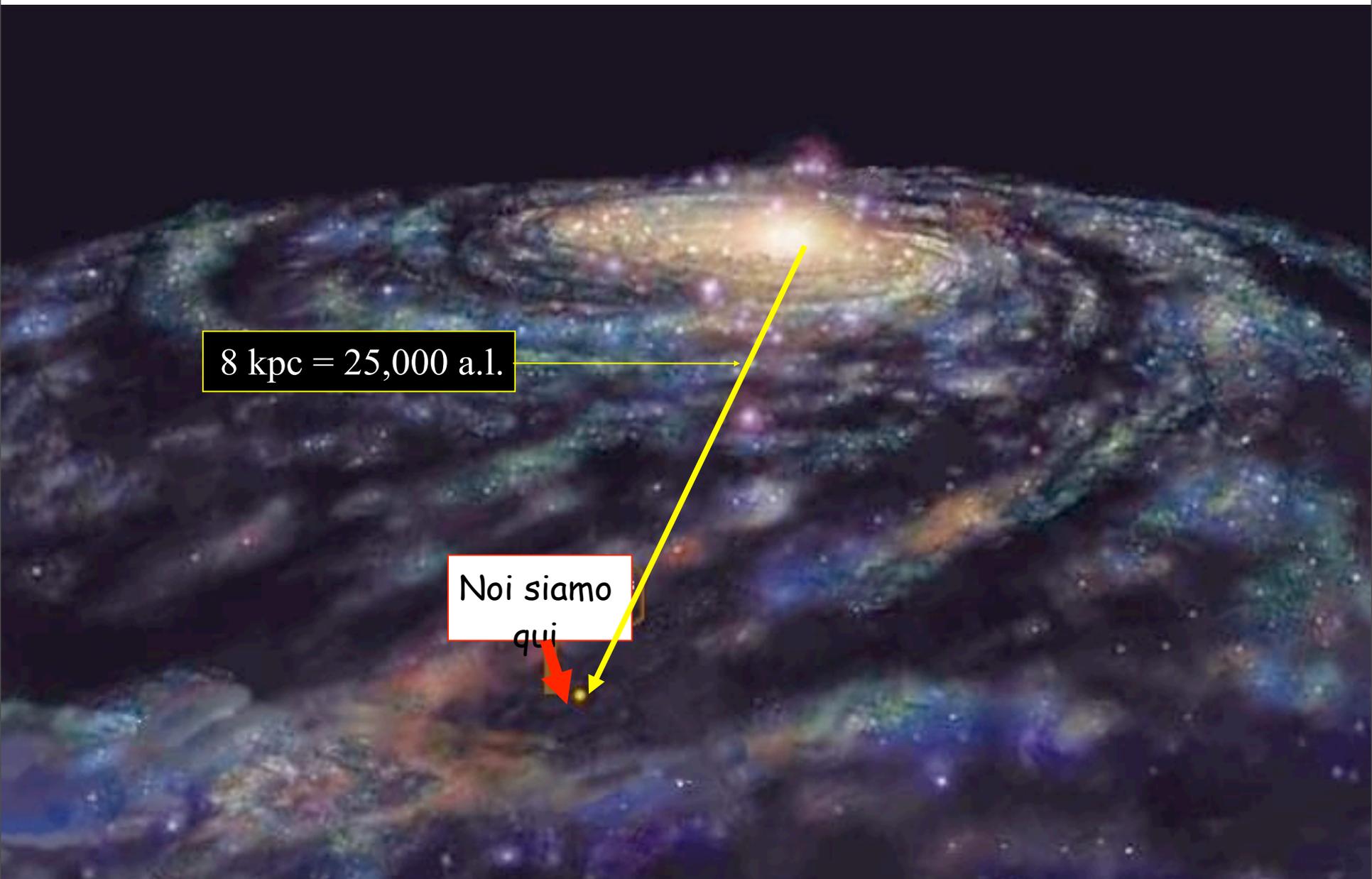
I **BH si rivelano** solo se materia viene catturata (accrescimento) allora diventano "**stelle**" X.

Indirettamente dallo studio del moto delle stelle nelle loro vicinanze ...

Due "classi" di BH

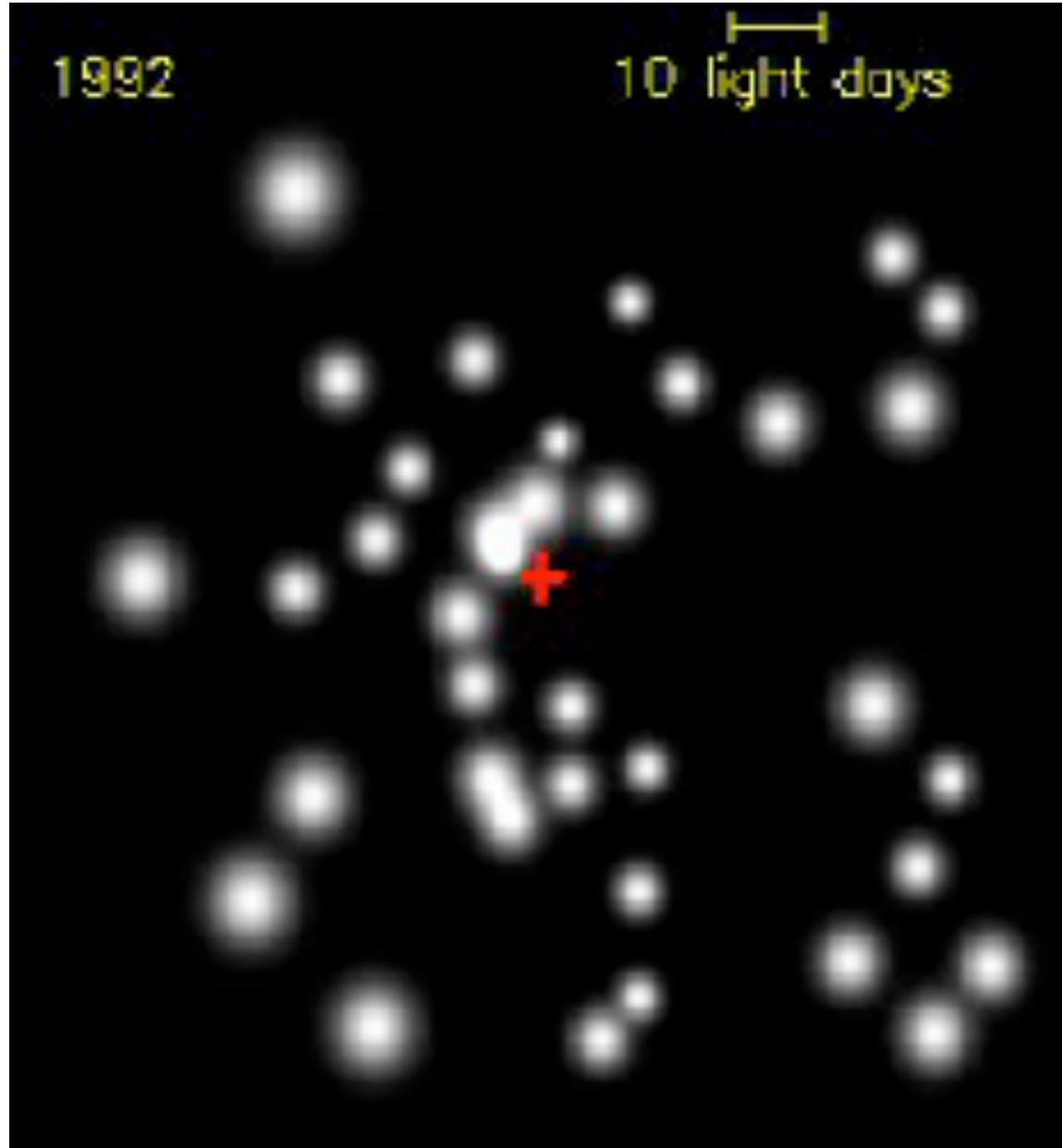
- Buchi neri di **massa solare**: creati dal collasso di stelle massive al termine della loro vita,
 $\sim 3-100 M_{\text{solari}}$
- Buchi neri **supermassivi** (SMBH): si trovano nel centro di galassie, forniscono potenza a quasars e AGN,
 $\sim 10^6 - 10^9 M_{\text{solari}}$

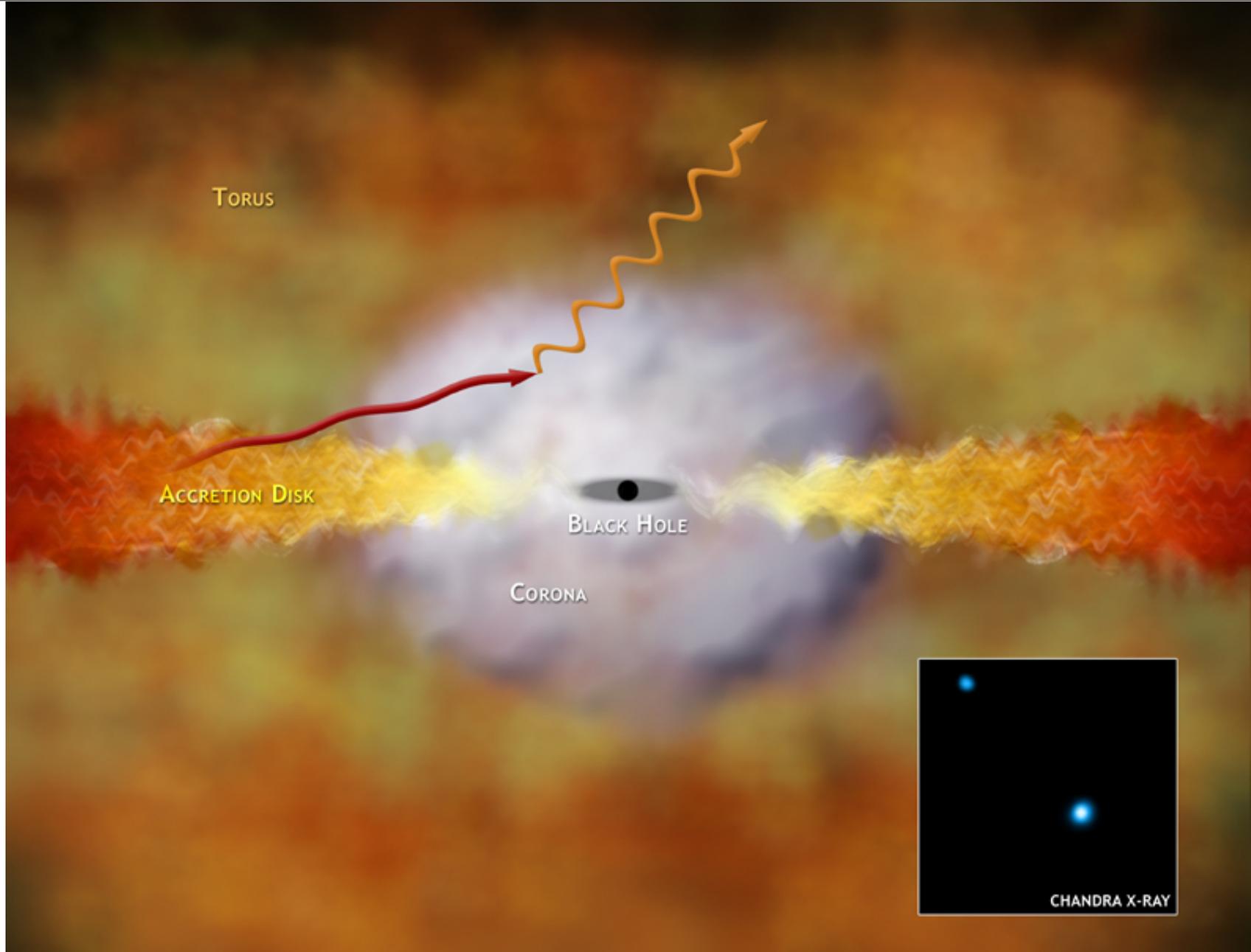
La Via Lattea (la nostra Galassia) e dove siamo noi

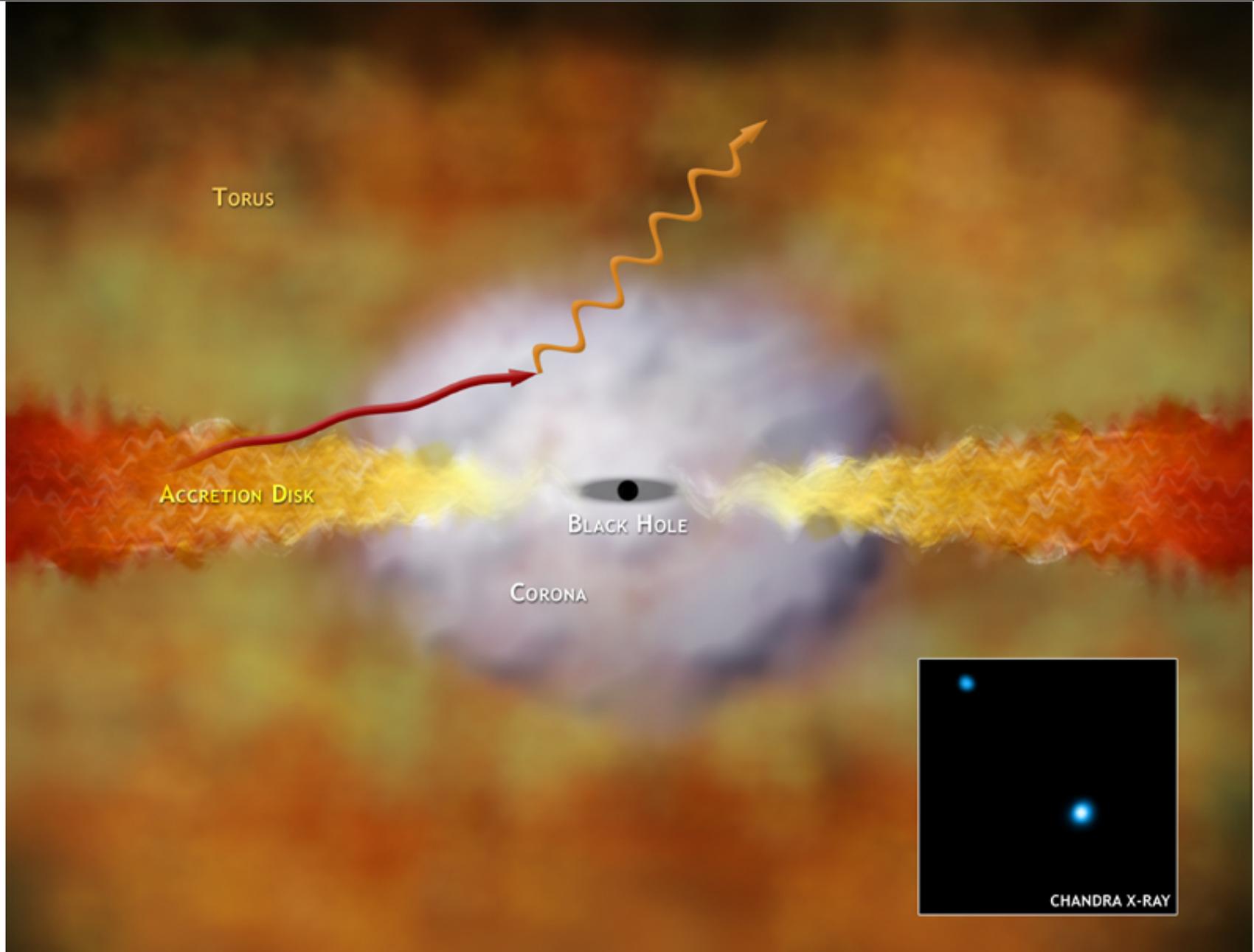


8 kpc = 25,000 a.l.

Noi siamo
qui







È possibile “osservare” un BH solo se la materia “cade”: accrescimento



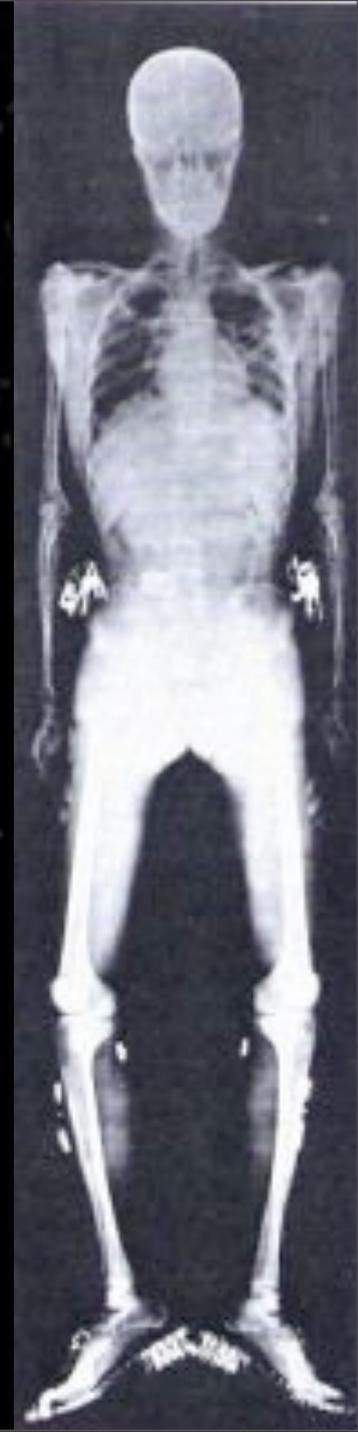


**immagine
ottica
HST**



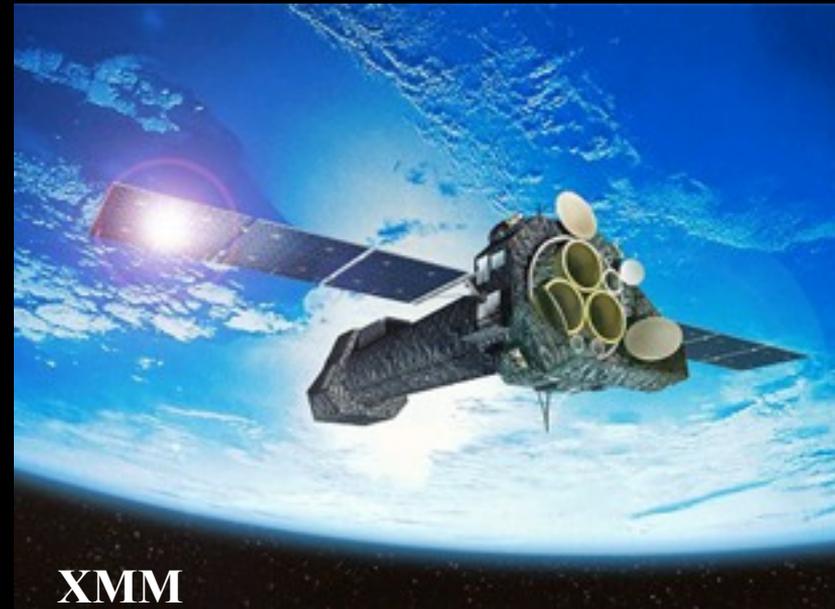
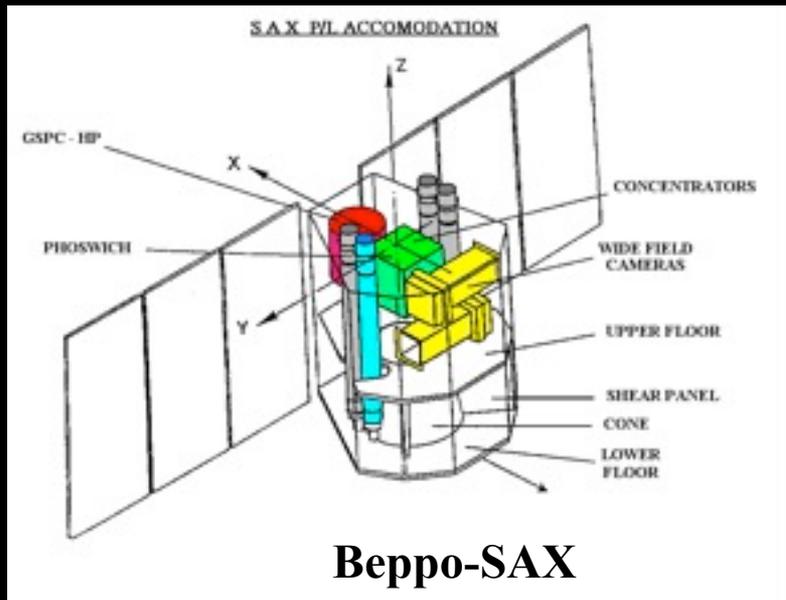
Chandra

immagine X



**immagine
ottica
HST**

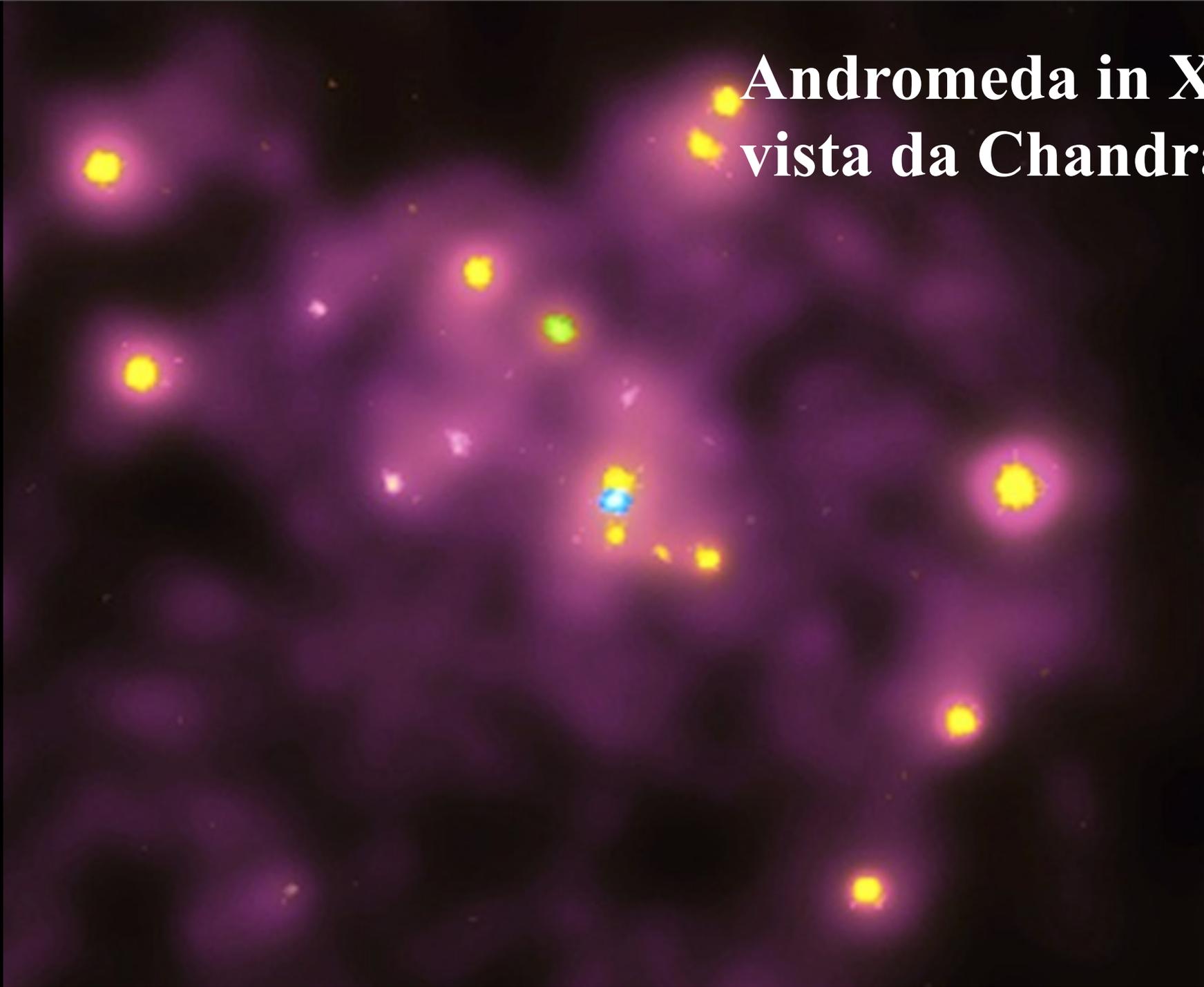
Gli strumenti





M31

Andromeda in X vista da Chandra

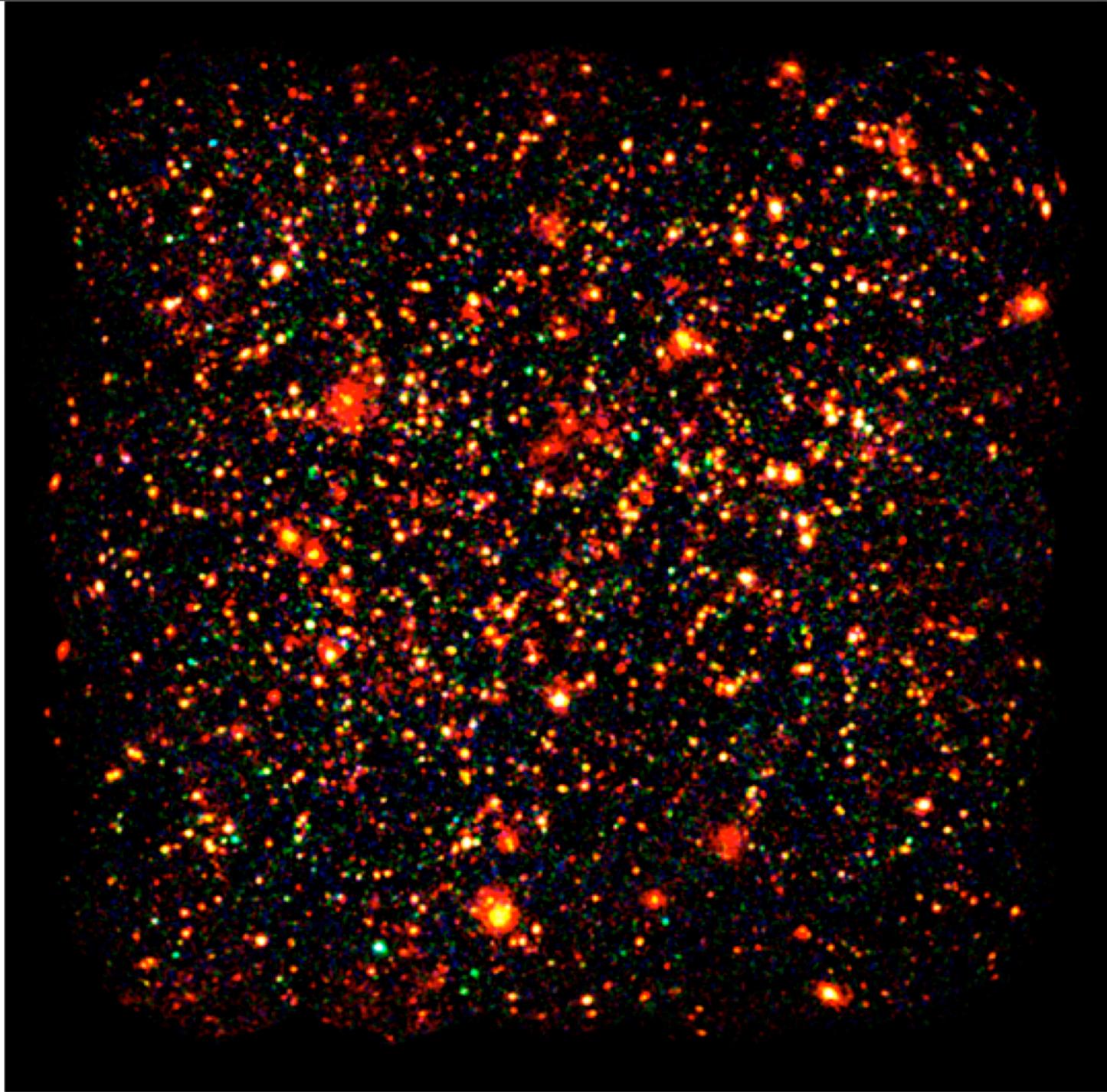


COSMOS SURVEY

2 deg²



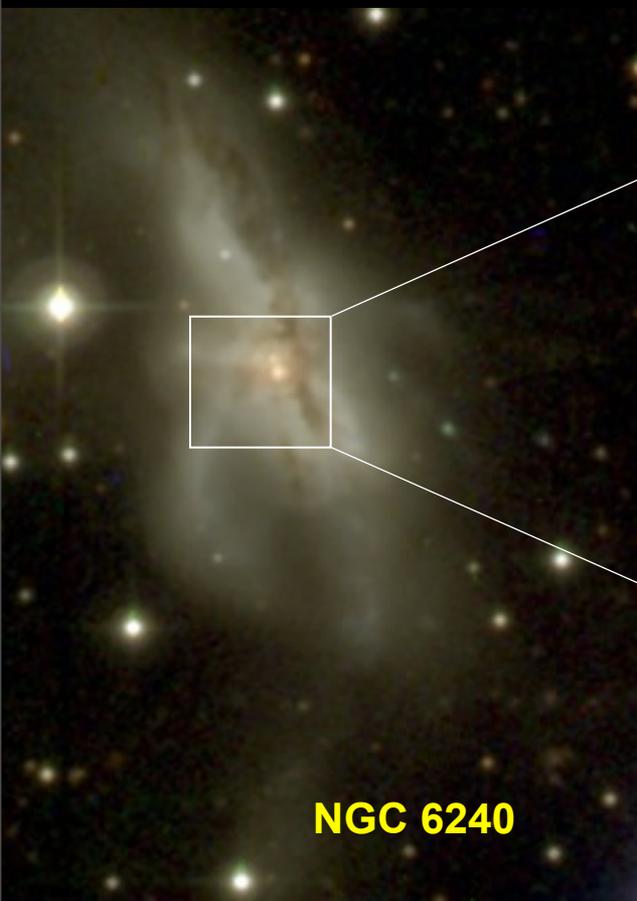
X-ray/XMM



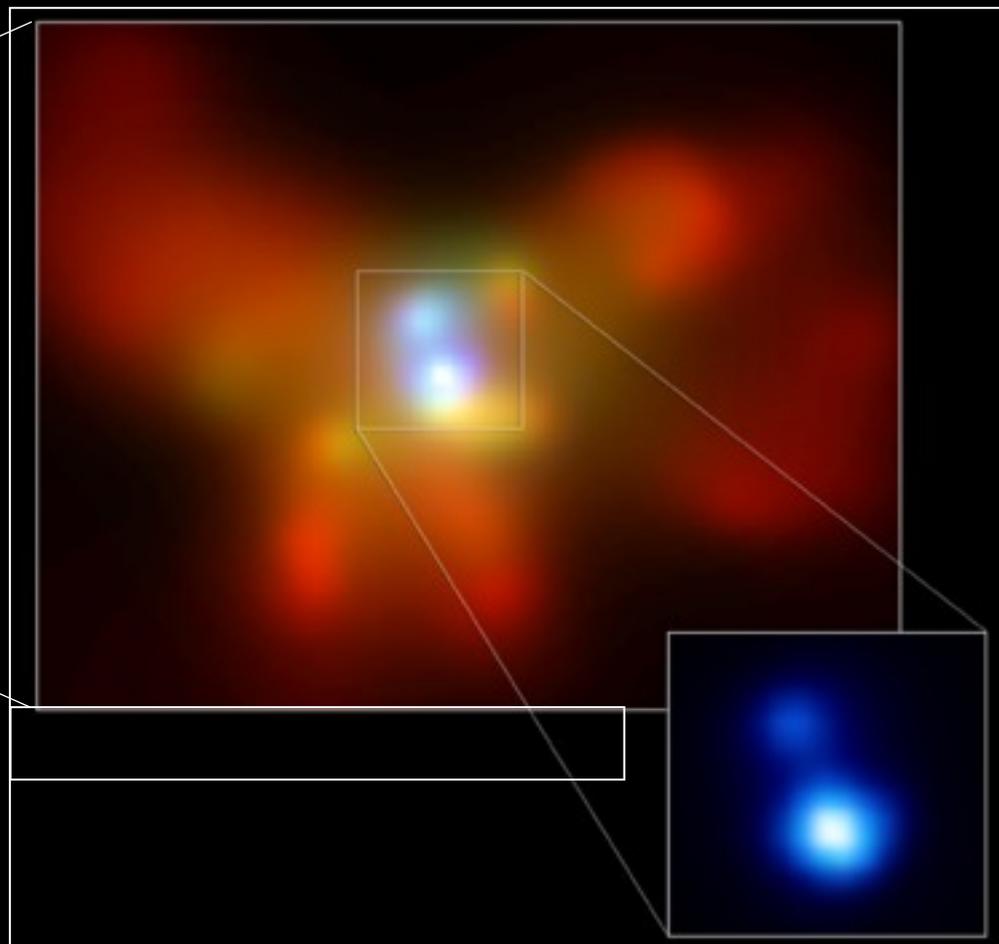


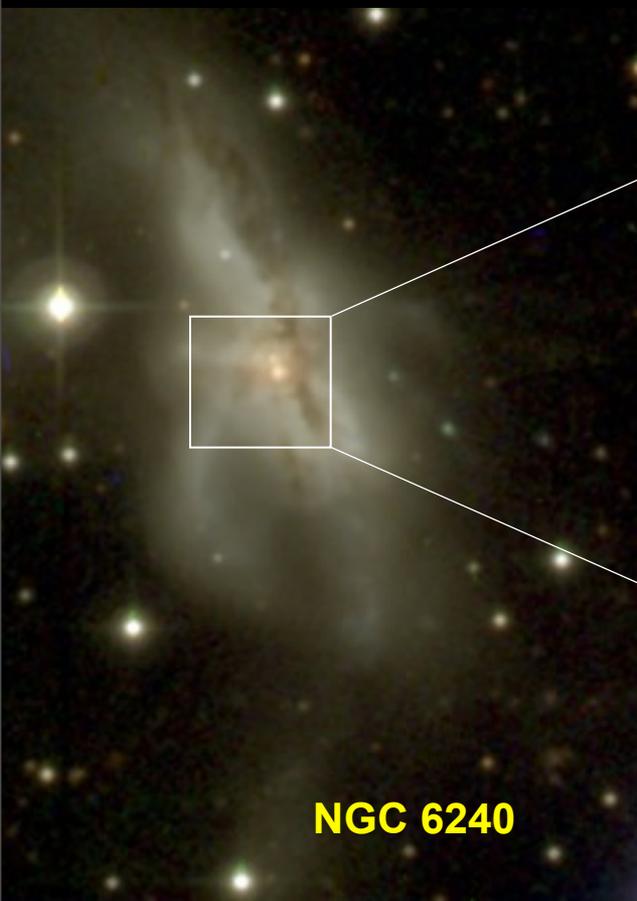
NGC 6240

Friday, June 5, 15

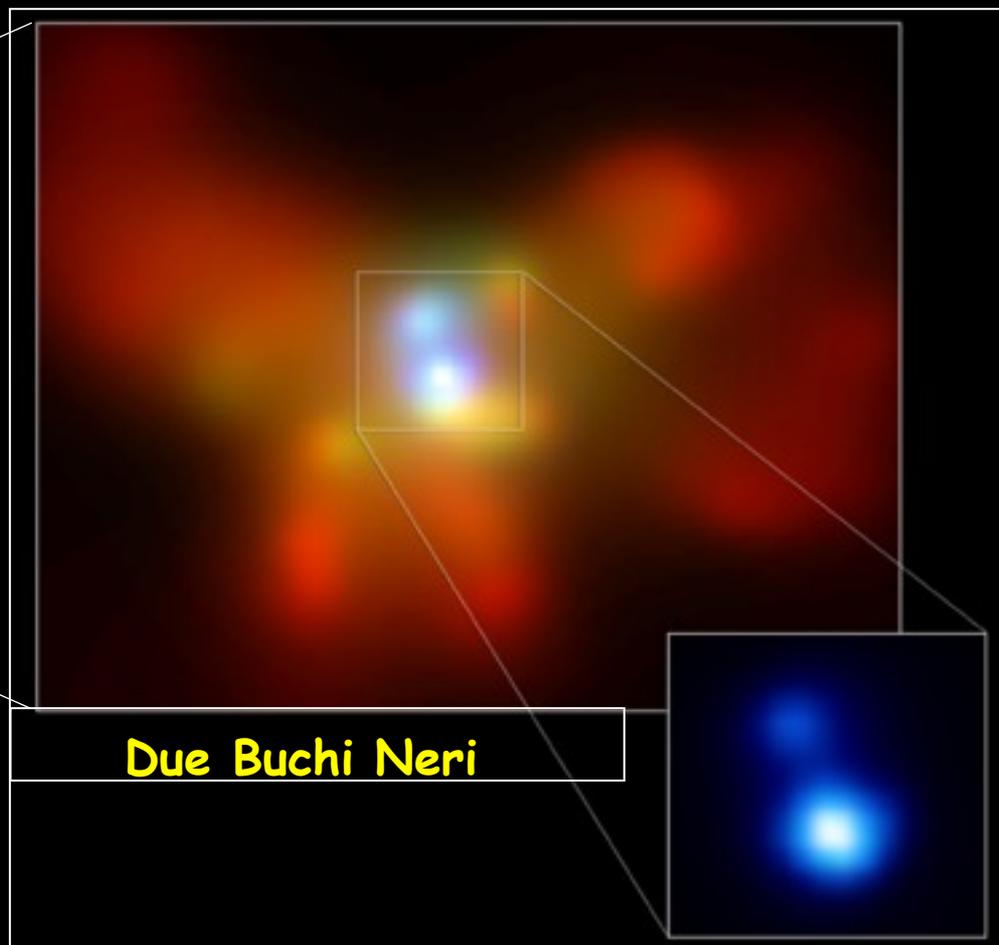


NGC 6240

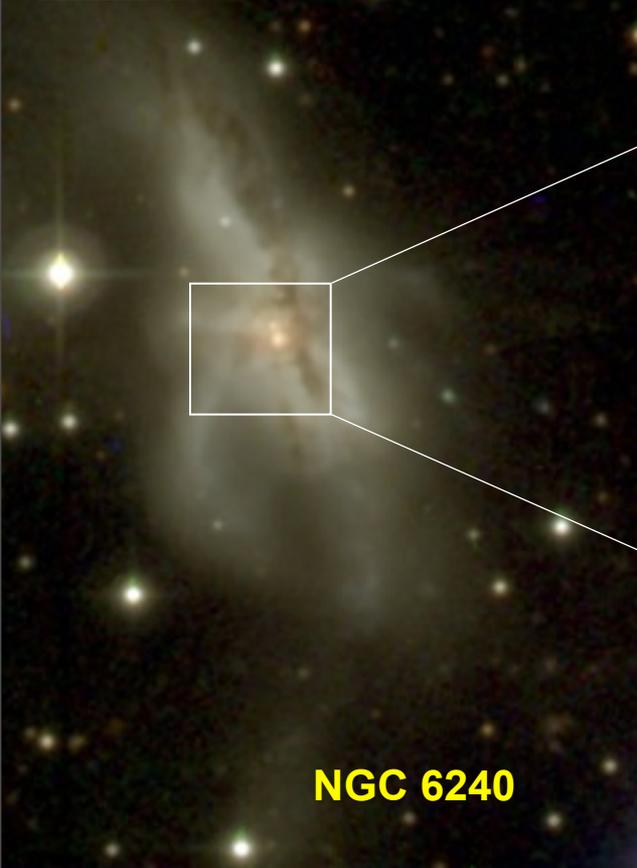




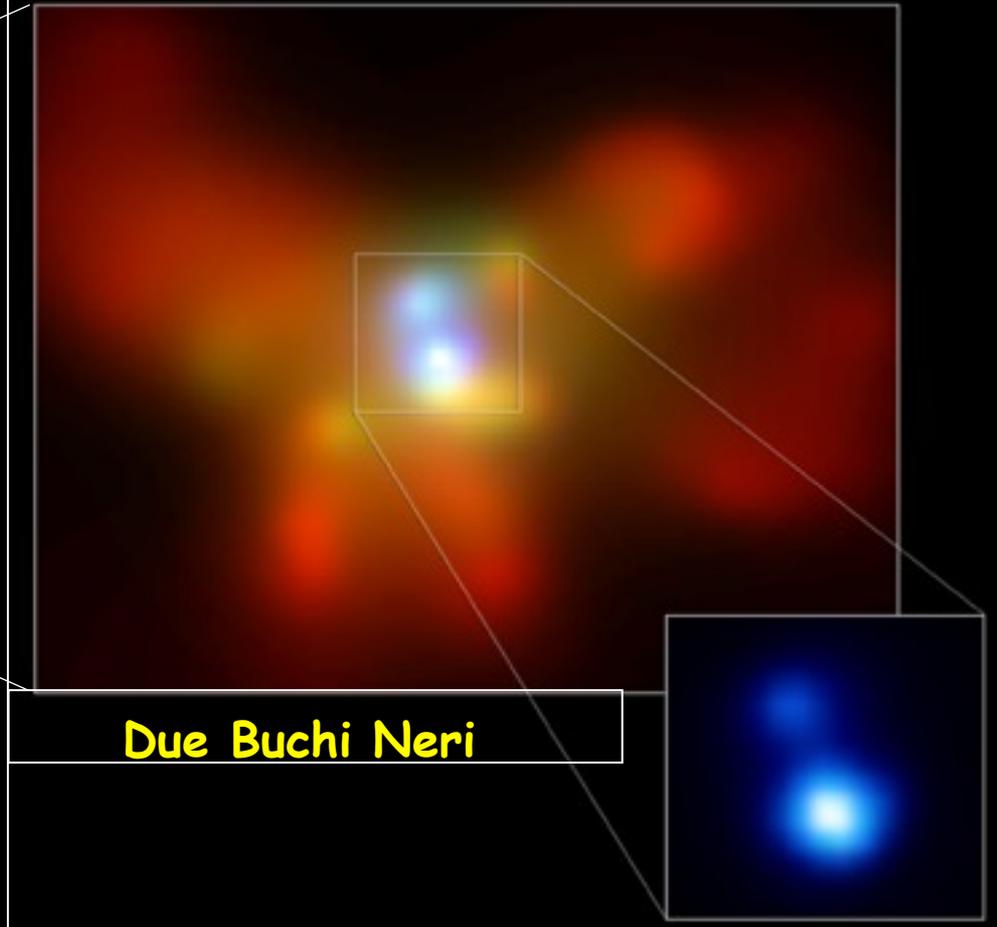
NGC 6240



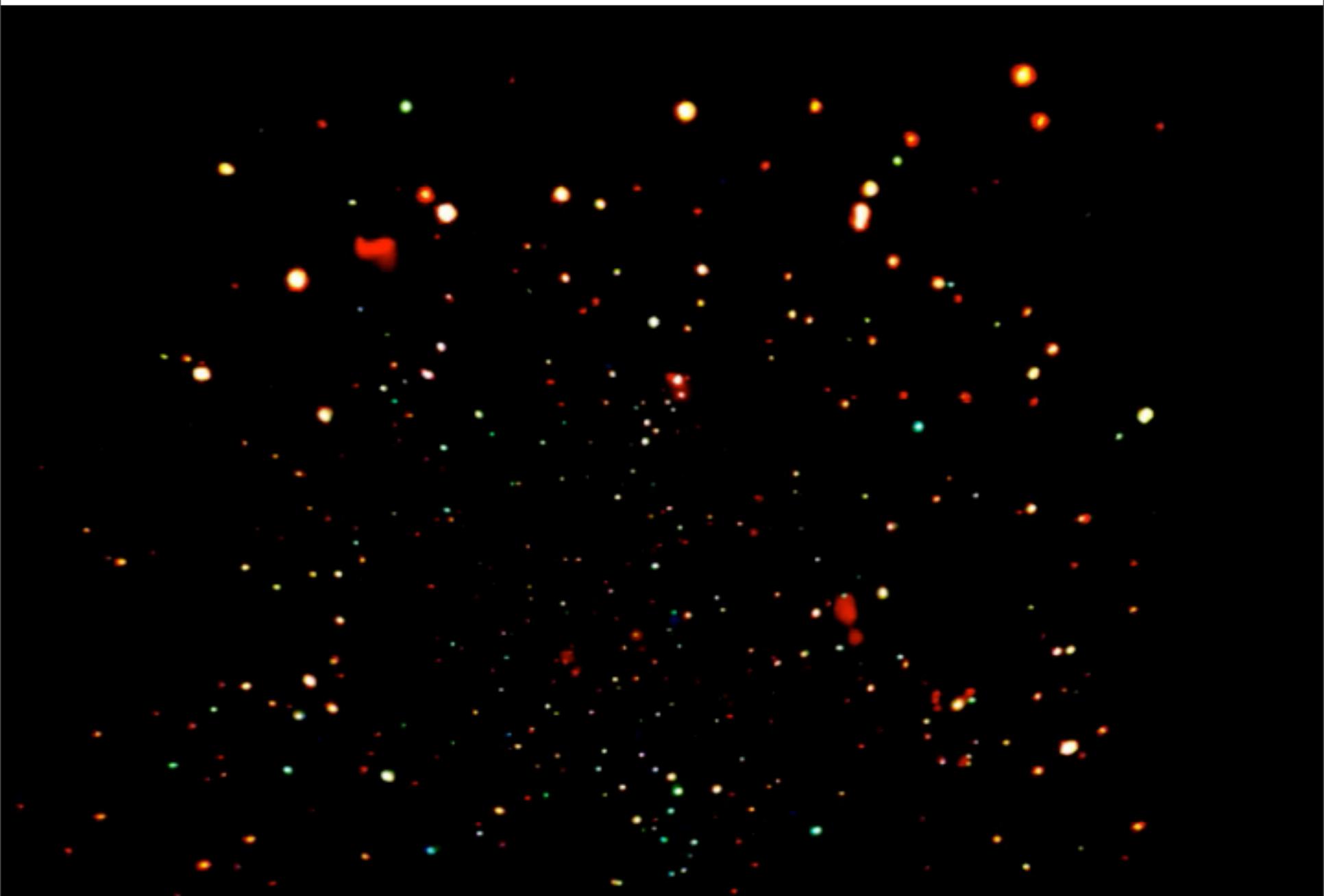
Due Buchi Neri



NGC 6240



Due Buchi Neri



Friday, June 5, 15

Schwarzschild vs. Kerr



IL BUCO NERO DEL FISICO TEORICO

Hanno superfici semi permeabili

Si perde traccia di ciò che cade all'interno (non si vede dentro); non si vedono le cose cadere dentro.

Cose complesse cadute in un BH (o diventano BH) mostrano poi semplici caratteristiche. Questo genera implicazioni filosofiche: entropia, informazione,etc.

IL BUCO NERO DEL FISICO TEORICO

Hanno superfici semi permeabili

Si perde traccia di ciò che cade all'interno (non si vede dentro); non si vedono le cose cadere dentro.

Cose complesse cadute in un BH (o diventano BH) mostrano poi semplici caratteristiche. Questo genera implicazioni filosofiche: entropia, informazione,etc.

I Buchi Neri potrebbero costruire la chiave per risolvere il piu' grande problema della Fisica: l'unificazione delle forze e la teoria della **Gravita` Quantistica**

Le forze della natura ...

Gravitazionale, agisce a grande distanza

Elettromagnetica, agisce su atomi e molecole

Debole, decadimento radioattivo naturale

Forte, tiene uniti i nuclei atomici

L'intensità di queste interazioni è data dalle corrispondenti costanti universali adimensionali: per la gravitazione

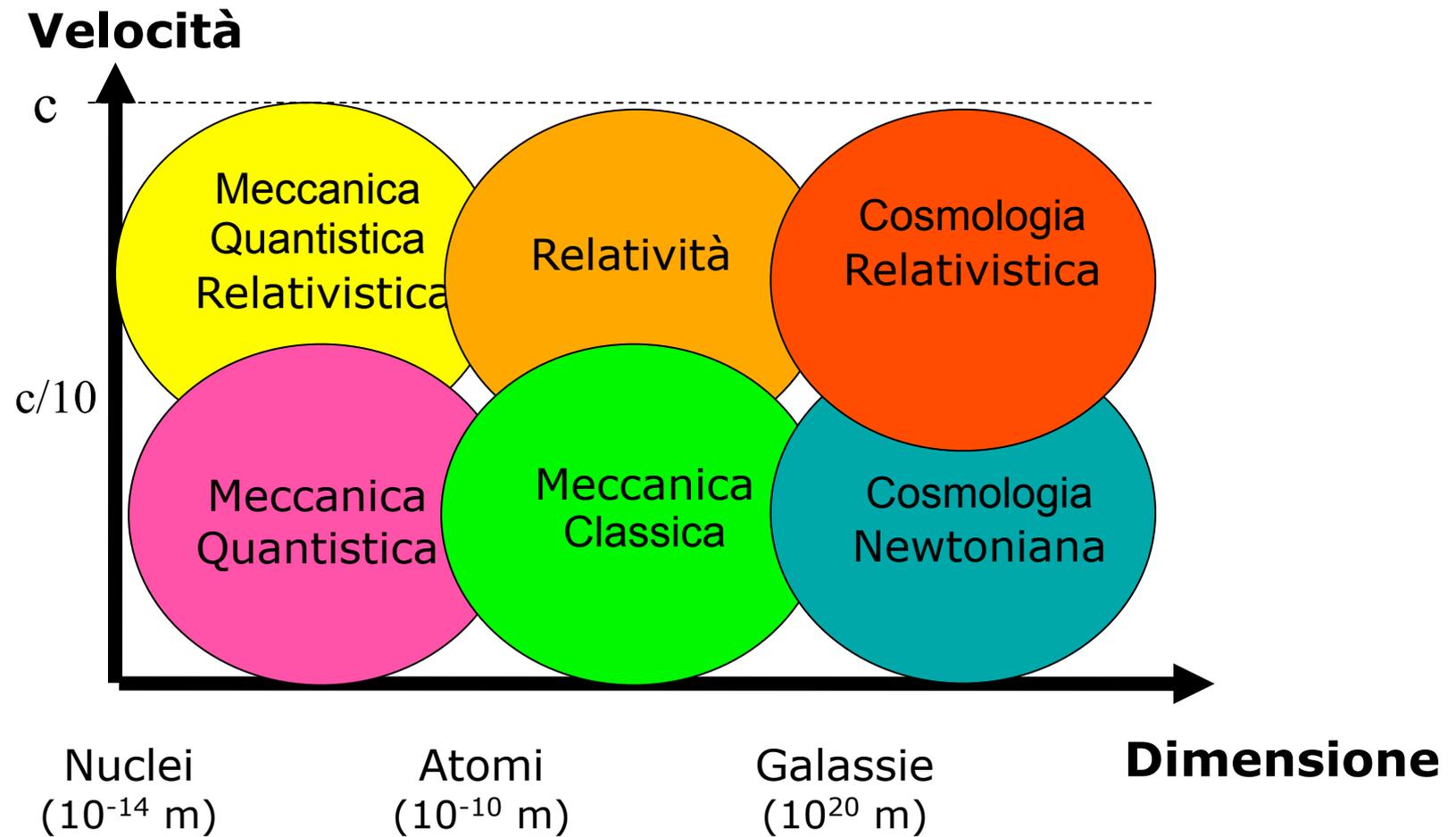
$$a_g = 10^{-40} = 0,000000\ 000000\ 000000\ 000000\ 000000\ 000000\ 000001$$

$$a_{em} = 1/137 = 0,007 \text{ per l'elettromagnetismo,}$$

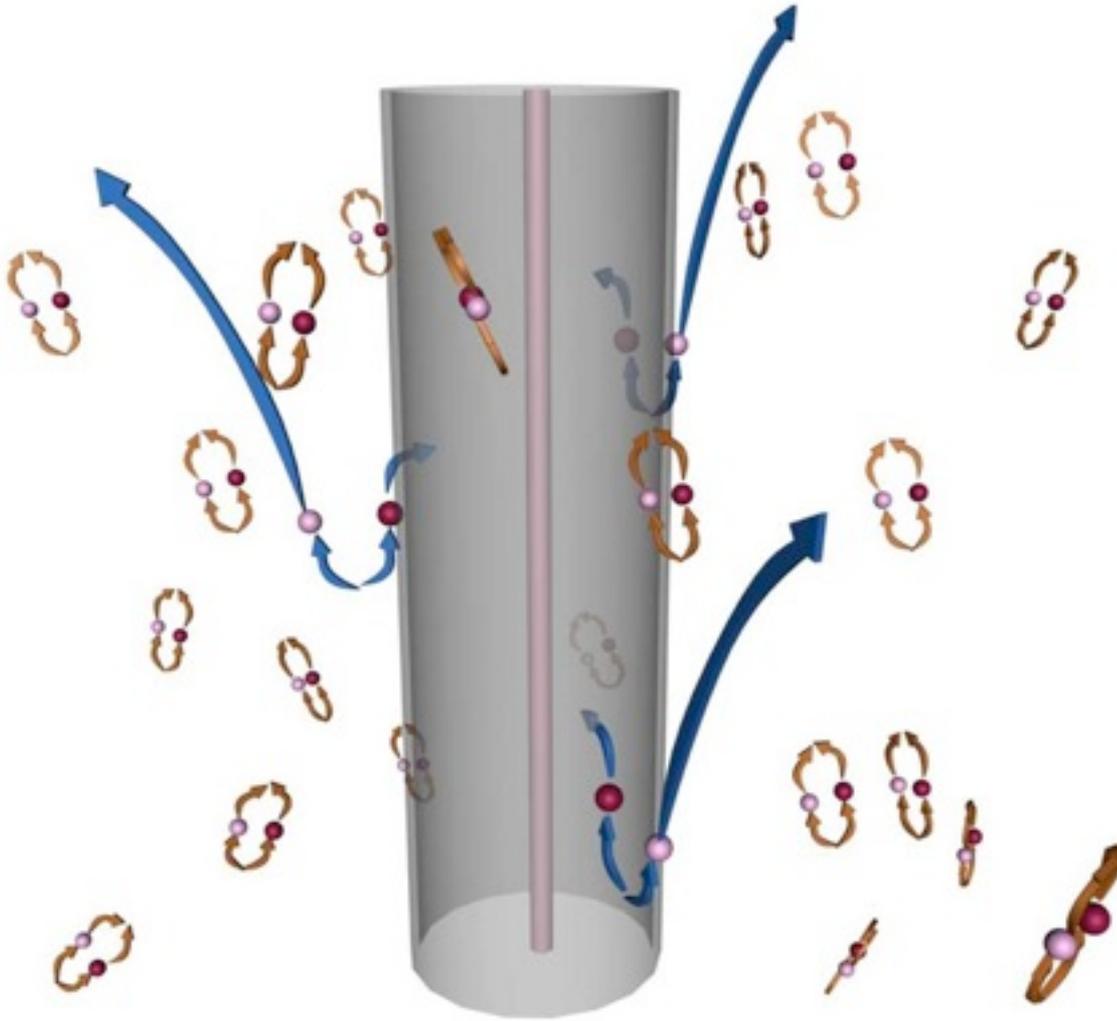
$$a_w = 0,03 \text{ per l'interazione debole e}$$

$$a_s = 0,12 \text{ per l'interazione forte.}$$

I campi della Fisica



Evaporazione dei Buchi Neri



$T \sim 1/M$
Temperatura

$t \sim M^3$
tempo di
evaporazione

Hawking e i Buchi Neri

Se i BH evaporano secondo il meccanismo di Hawking si incontra un paradosso

“... se un BH evapora completamente come richiesto da il principio di conservazione CPT (Carica Parita` Tempo), si avrebbe una transizione da uno stato puro iniziale a uno stato misto finale violando l'unitarieta`. La corrispondenza ADS-CFT richiede che un BH in evaporazione sia duale a una Teoria di Campo Conforme sul bordo dello spazio Anti De Sitter. Questo e' il paradosso dell'informazione.”

Hawking 2014 <http://arxiv.org/abs/1401.5761>

Hawking e i Buchi Neri

Il paradosso in fisica significa che la teoria che descrive il fenomeno e' incompleta.

L'evaporazione dei buchi neri "viola" alcuni importanti teoremi di conservazione dell'energia e dell'informazione

Hawking suggerisce che l'orizzonte degli eventi (o la superficie del BH) sia apparente e che all'interno dell'orizzonte la geometria dello spazio tempo e la materia si comporti in modo caotico. Il BH irraggia senza violare le leggi della fisica, ma in modo cosi caotico che l'informazione puo' essere "perduta", analogamente alle previsioni del tempo che non sono accurate oltre qualche giorno.⁴²

Finis

*There are known knowns.
These are things we know that we know.*

*There are known unknowns.
That is to say, there are things that we know we don't know.*

*But there are also unknown unknowns.
There are things we don't know we don't know.*

— Donald Rumsfeld, 2003
US Secretary of Defense and Poet