Buchi neri e Venti galattici

Marcella Brusa

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Universita' di Bologna

S

INAF-Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio di Bologna

grazie a:

Hubble, ESO, Chandra, XMM-Newton, Spitzer (NASA+ESA)

Alma, VLT, PdBI

Wikipedia+Google

Buchi neri

Galassie

Venti (Galattici)



Le Galassie

Le Galassie sono grandi insiemi di Stelle, Gas e Polveri, legati dalla reciproca forza di gravità

Possono contenere da qualche milione a più di mille miliardi di stelle

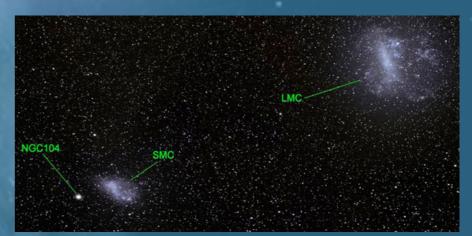
Fino agli anni 20 del secolo scorso non sapevamo che fossero oggetti così lontani, ma «nebulose» all'interno della Via Lattea



La Via Lattea

Galassia di Andromeda 2,56 milioni di anni luce





Nubi di Magellano circa 200 000 anni luce

Galassie a Spirale

La Via Lattea come la Galassia di Andromeda sono Galassie a Spirale, formate da un disco di gas, stelle e polveri in rotazione

I bracci a spirale sono più densi e ricchi di gas

le stelle si formano nei bracci a spirale e a partire dalle nubi di Gas presente

i bracci a spirale sono popolati soprattutto da stelle"blue" (stelle GIOVANI)

galassie **ISOLATE**

il moto delle stelle e' ORDINATO (rotazione)





Galassie a Spirale



Credits: Hubble, VLT, Nature

Galassie Ellittiche

Le galassie in cui le stelle non si muovono in un disco ma hanno orbite orientate a caso si dicono **Ellittiche**

Sono solitamente **povere di gas**, e caratterizzate da **stelle vecchie e rosse**

Sono galassie «morte» perché si formano pochissime nuove stelle non presentano formazione stellare ne' riserve di gas da cui formare stelle

in genere non sono isolate ma risiedono al centro di ammassi di galassie

il moto delle stelle e' DISORDINATO (no rotazione)





Gas molecolare

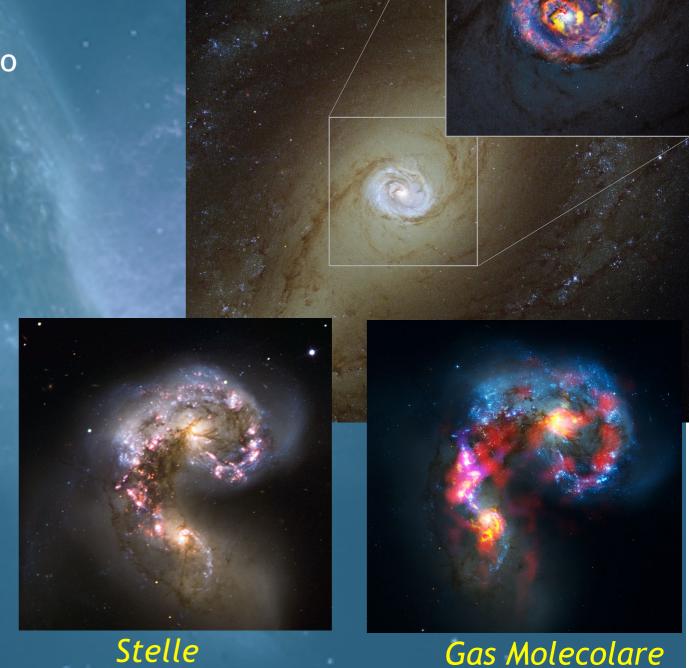
Le nuove stelle si formano da nubi di idrogeno molecolare (H₂).

Il gas e' denso, freddo (T<-200 °C) e spesso ricco di polveri.

Se il gas nelle galassie a spirale viene eliminato o consumato velocemente, la formazione di nuove stelle viene fermata



M16 - Eagle Nebula

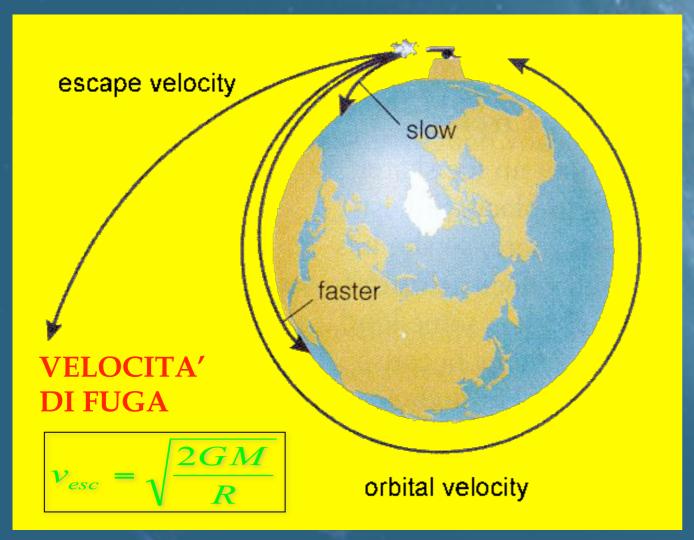


Galassia Antenne

NGC 1433



I Buchi Neri sono oggetti astrofisici caratterizzati da un'estrema compatezza, tale per cui neppure la luce, quando si avvicina troppo, può fuggire alla loro attrazione gravitazionale



per sfuggire alla forza di gravità (che attrae qualsiasi corpo, la mela di Newton!), il proiettile deve avere una certa velocità

Piu' il rapporto M/R (compattezza) e' grande, piu' bisogna andare veloci per sfuggire all'attrazione gravitazionale

Oggetti molto "massivi" (M grande) e molto "piccoli" (R piccolo) hanno una grande velocità di fuga

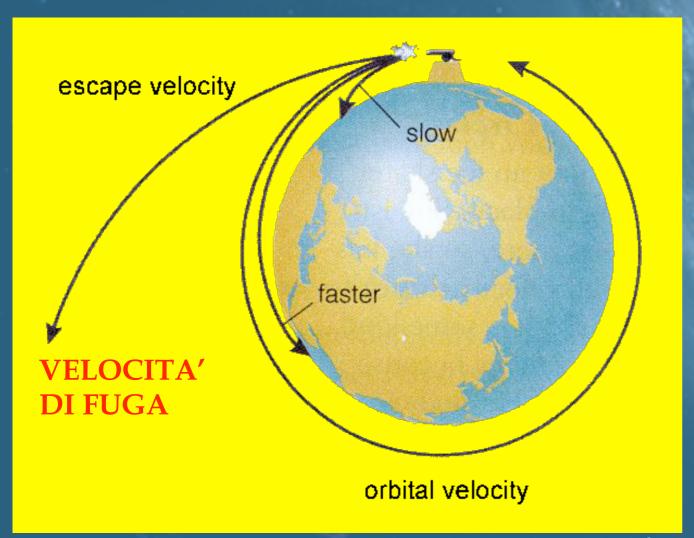
$$V_{fuga\ Terra} = 11 \text{ km/s} = 39\ 600 \text{ km/h}$$

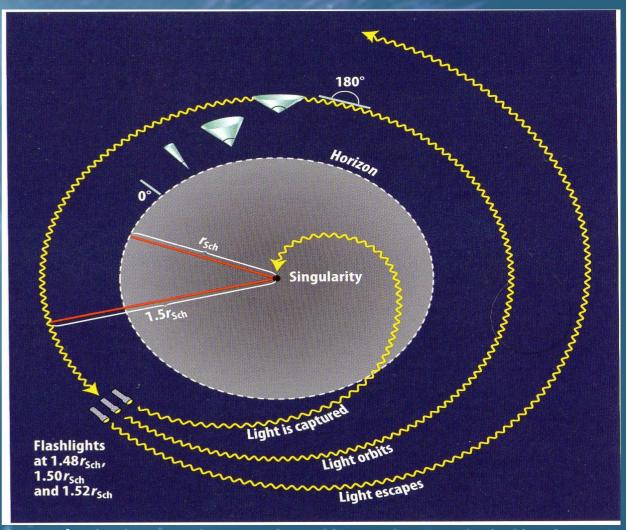
 $V_{fuga\ Sole} = 600 \text{ km/s} = 2\ 160\ 000 \text{ km/h}$

la velocita' di fuga dal sistema solare e' 500 volte minore della

velocita' della luce, c=300 000 km/s

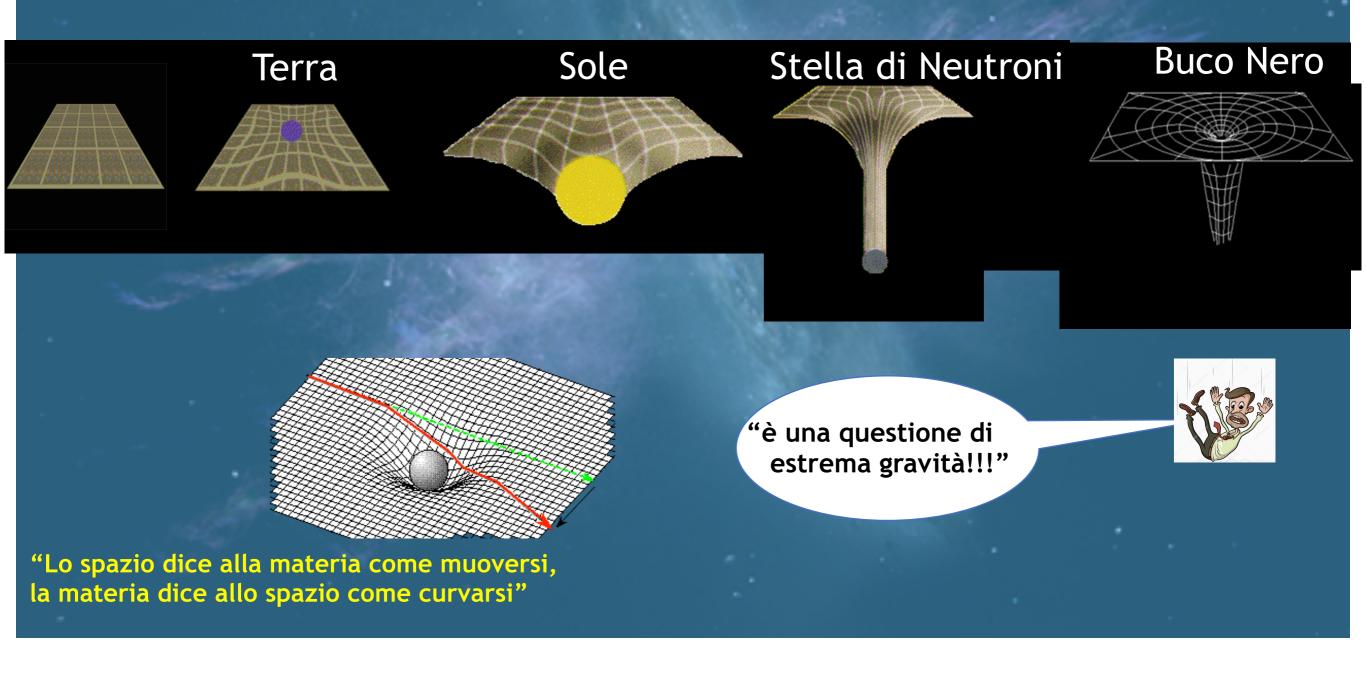
I Buchi Neri sono oggetti astrofisici caratterizzati da un'estrema compatezza, tale per cui neppure la luce, quando si avvicina troppo, può fuggire alla loro attrazione gravitazionale



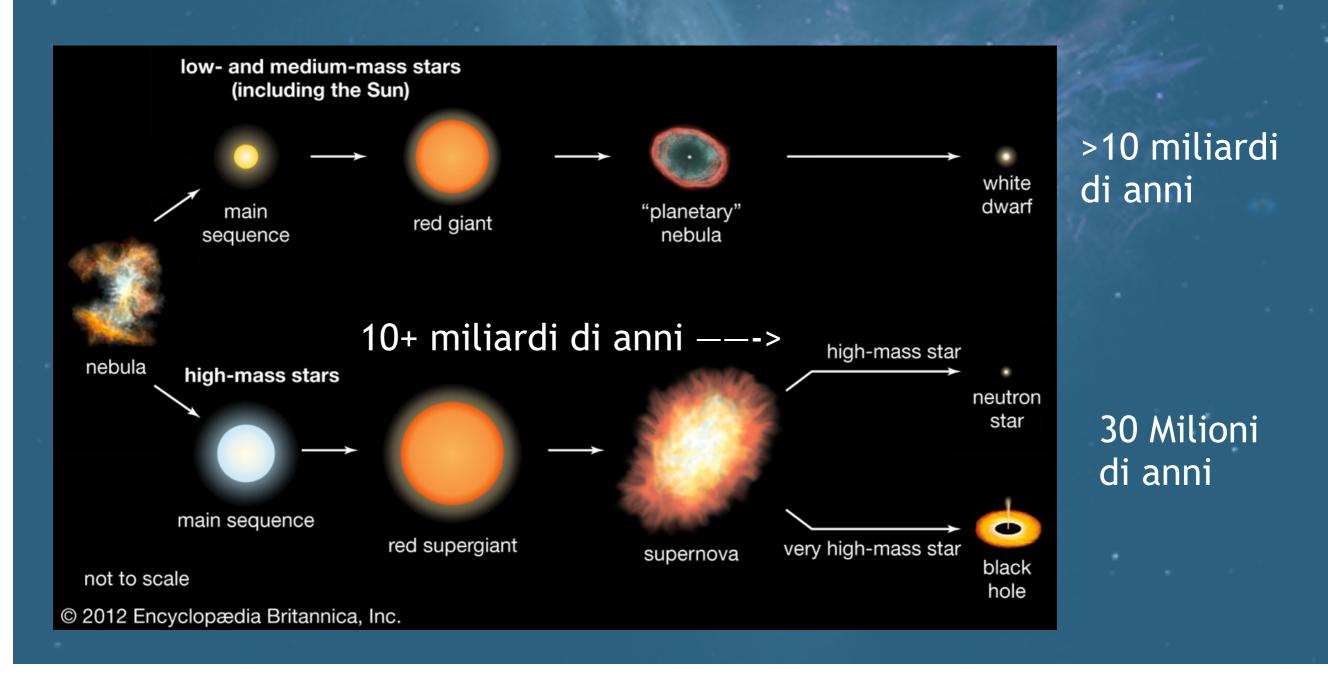


Esistono corpi per cui la velocità di fuga e'uguale alla velocita' della luce? Se nemmeno la luce può uscire, nessun altro corpo o particella può farlo!

I Buchi Neri sono oggetti astrofisici caratterizzati da un'estrema compatezza, tale per cui neppure la luce, quando si avvicina troppo, può fuggire alla loro attrazione gravitazionale



I Buchi Neri stellari o di piccola massa (poco più grandi del Sole, 2-10 M_{\odot}) si formano nel collasso delle stelle massicce al termine della loro vita, a seguito delle esplosioni di Supernova

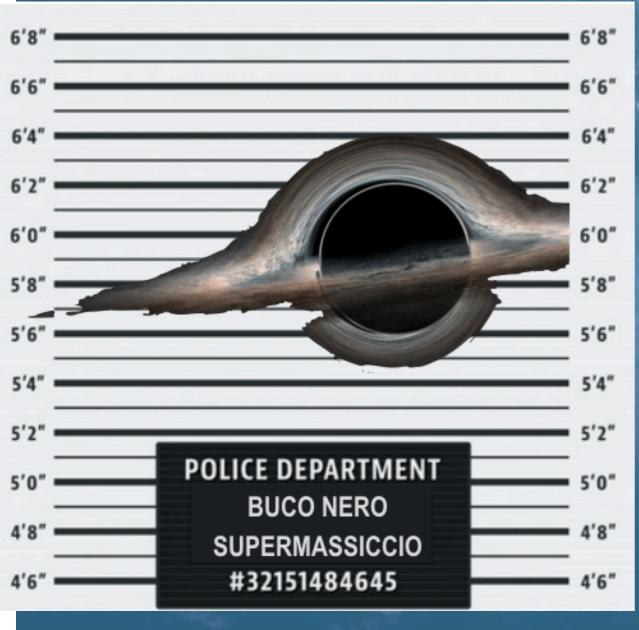


Buchi Neri "Supermassicci"

Nell'Universo esistono anche buchi neri di massa molto più grande, chiamati per questo motivo "supermassicci" che si nascondono nelle zone centrali delle galassie...



Carta d'Identità



Nome: BUCO NERO SUPERMASSICCIO

Peso: da ~1 milione a ~10 miliardi

di volte il Sole

Dimensioni: Raggio di Schwarschild

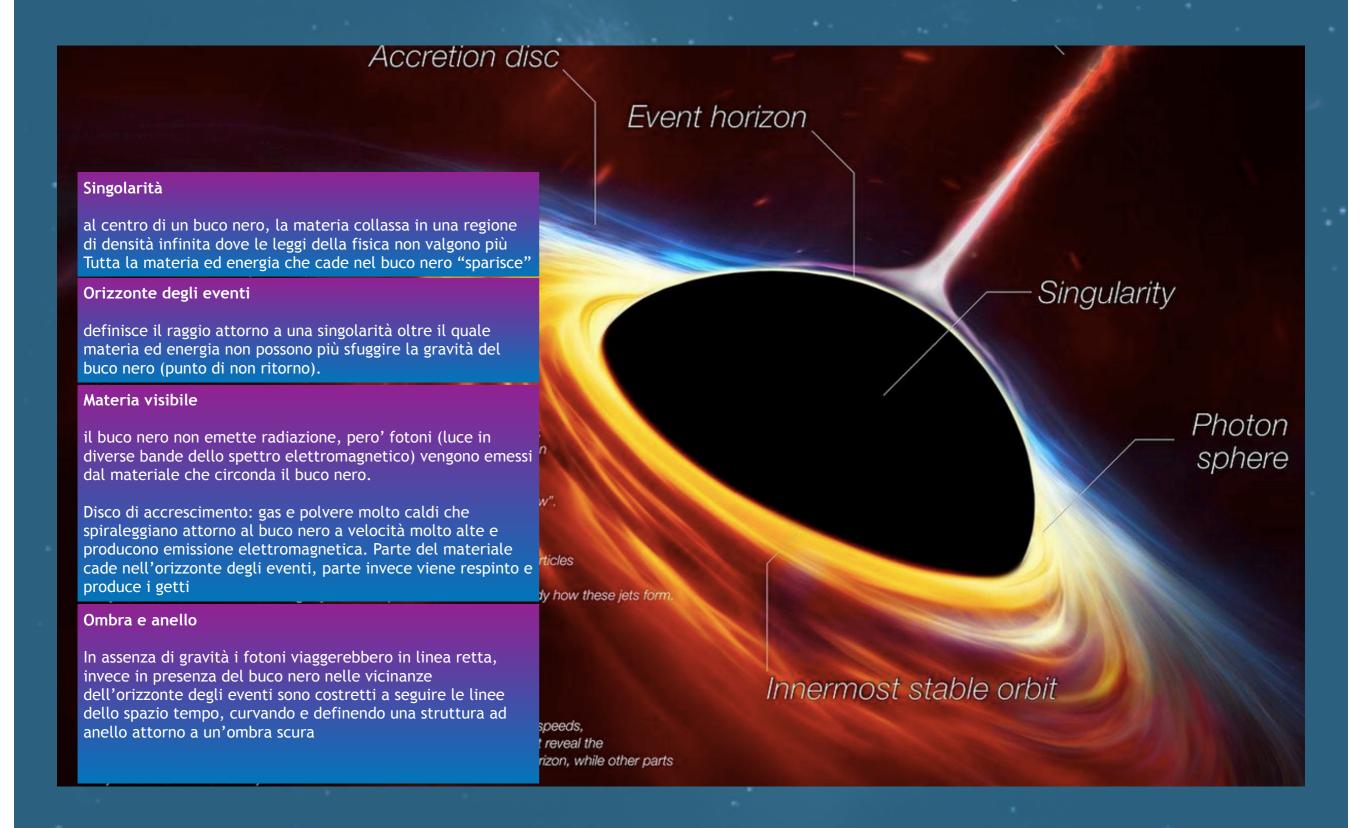
$$\mathsf{R_S}^-\left(rac{2GM}{c^2}
ight) pprox \ 2.95rac{M}{M_{Sole}} \ \mathrm{km},$$

(da ~ 0.02 a 200 volte la distanza Terra-Sole)



Residenza: Al centro delle galassie

Segni particolari



Gli astronomi misurano indirettamente gli "effetti" della presenza di buchi neri

È possibile individuare la presenza di un Buco nero solo attraverso effetti legati all'attrazione gravitazionale che esercita sul materiale circostante:

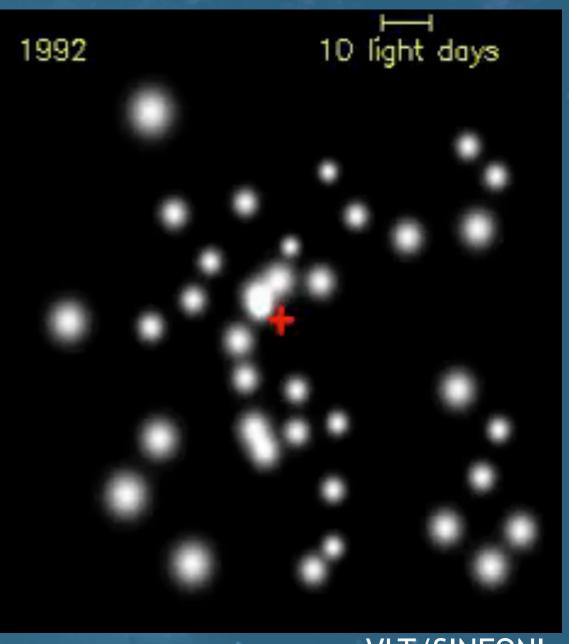
1) osservando il moto della materia che vi orbita attorno (stelle e/o gas)

> Mappa della zona centrale della **nostra galassia** con il telescopio da 8m VLT e con tecnologia all'avanguardia (ottica adattiva).

I telescopi sono stati puntati su questa regione di cielo per >15 anni (ad oggi >25 anni!)

Applicazione delle Leggi di Keplero!

Sgr A* (centro galattico)



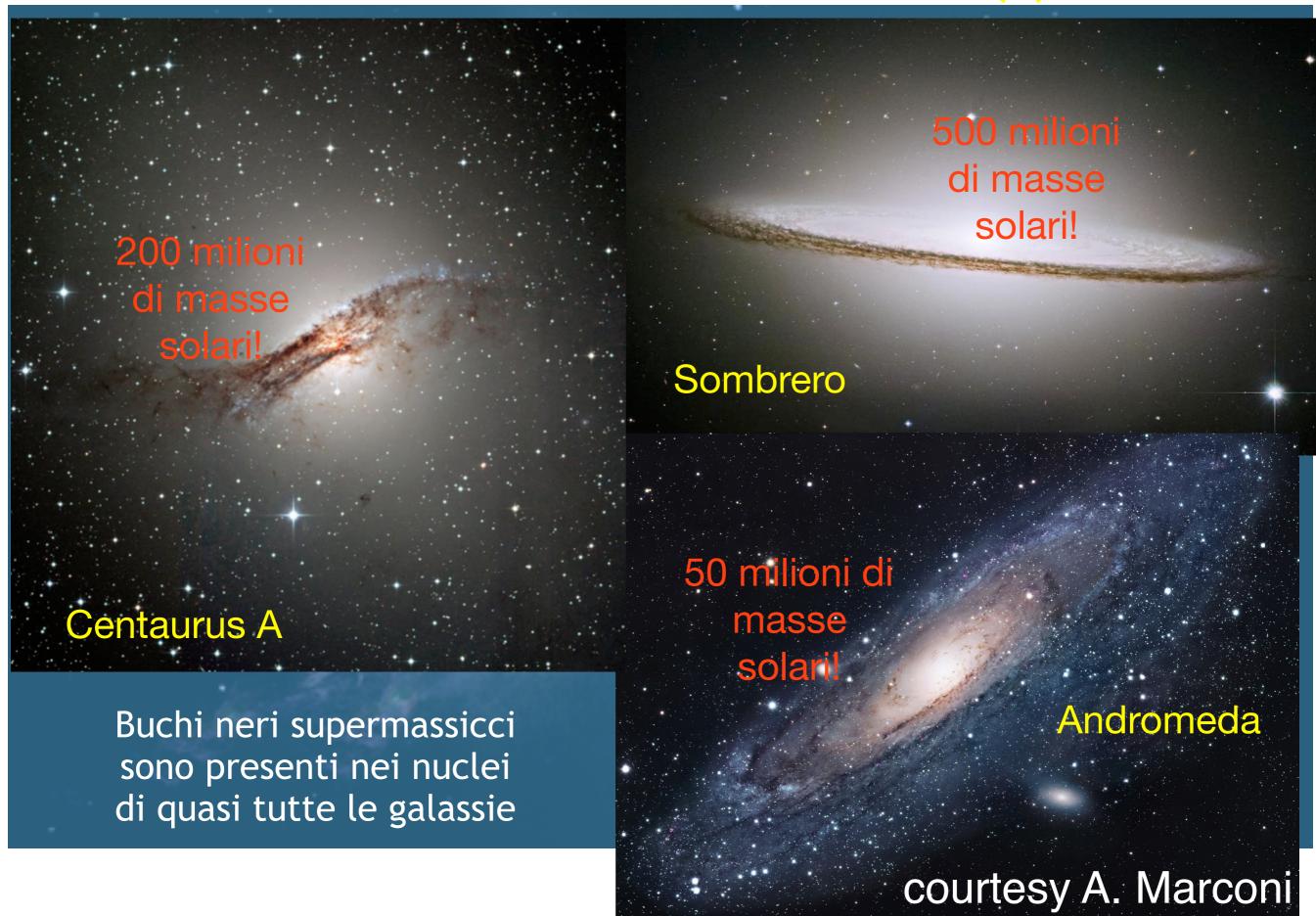
VLT/SINFONI Genzel group @ MPE

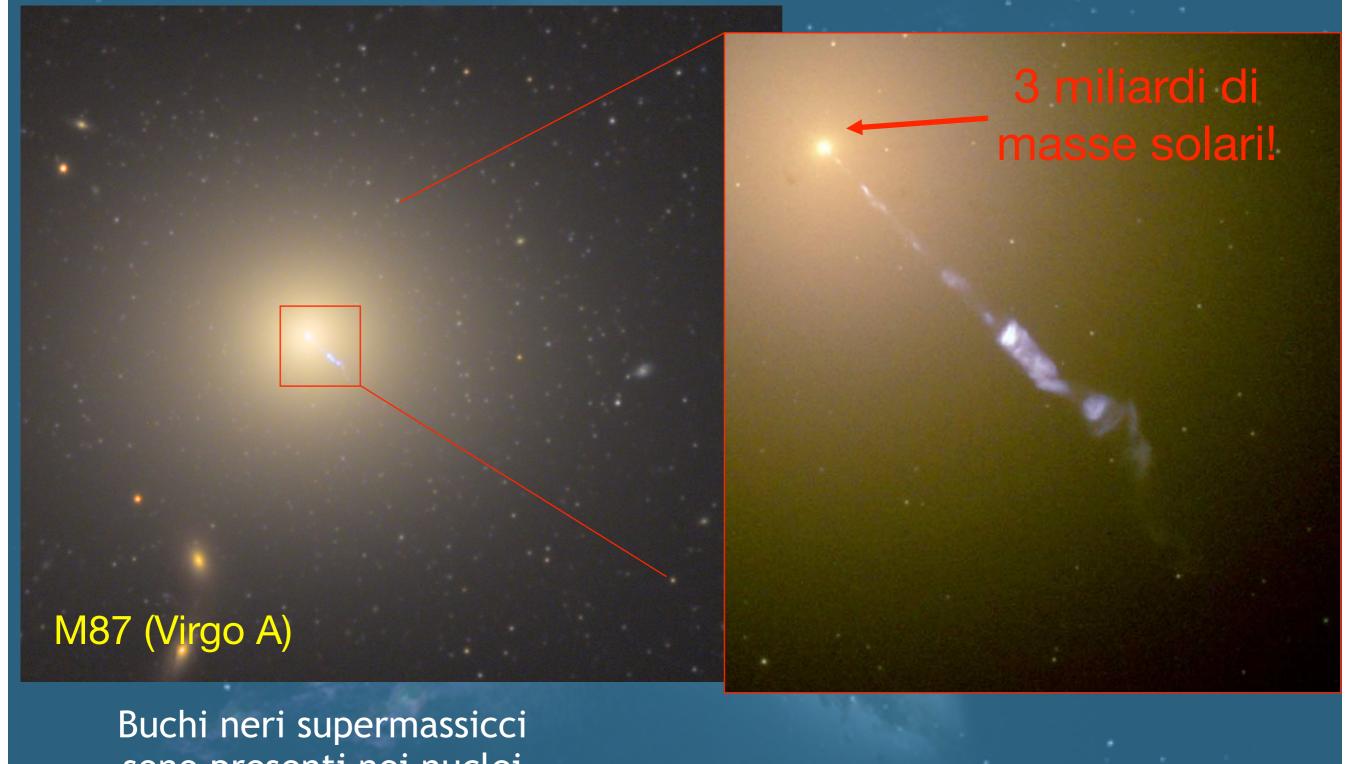
Buchi neri sono stati scoperti in circa 80 galassie vicine a noi usando il gas e le stelle come traccianti di velocità nelle regioni nucleari

Contributi fondamentali sono venuti dal Telescopio Spaziale Hubble (HST) e dal Very Large Telescope (VLT) dell'European Southern Observatory (Cile). Limitato all'Universo "vicino". Buchi neri supermassicci sostanzialmente "spenti"









Buchi neri supermassicci sono presenti nei nuclei di quasi tutte le galassie

Gli astronomi misurano indirettamente gli "effetti" della presenza di buchi neri

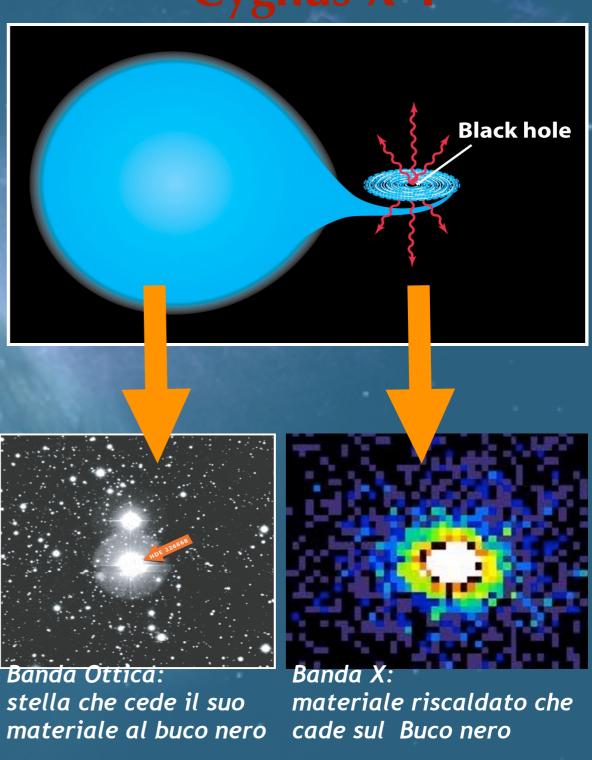
È possibile individuare la presenza di un Buco nero solo attraverso effetti legati all'attrazione gravitazionale che esercita sul materiale circostante:

- 1) osservando il moto della materia che vi orbita attorno (stelle e/o gas)
- 2) osservando la radiazione prodotta dalla materia che vi cade sopra (accrescimento)

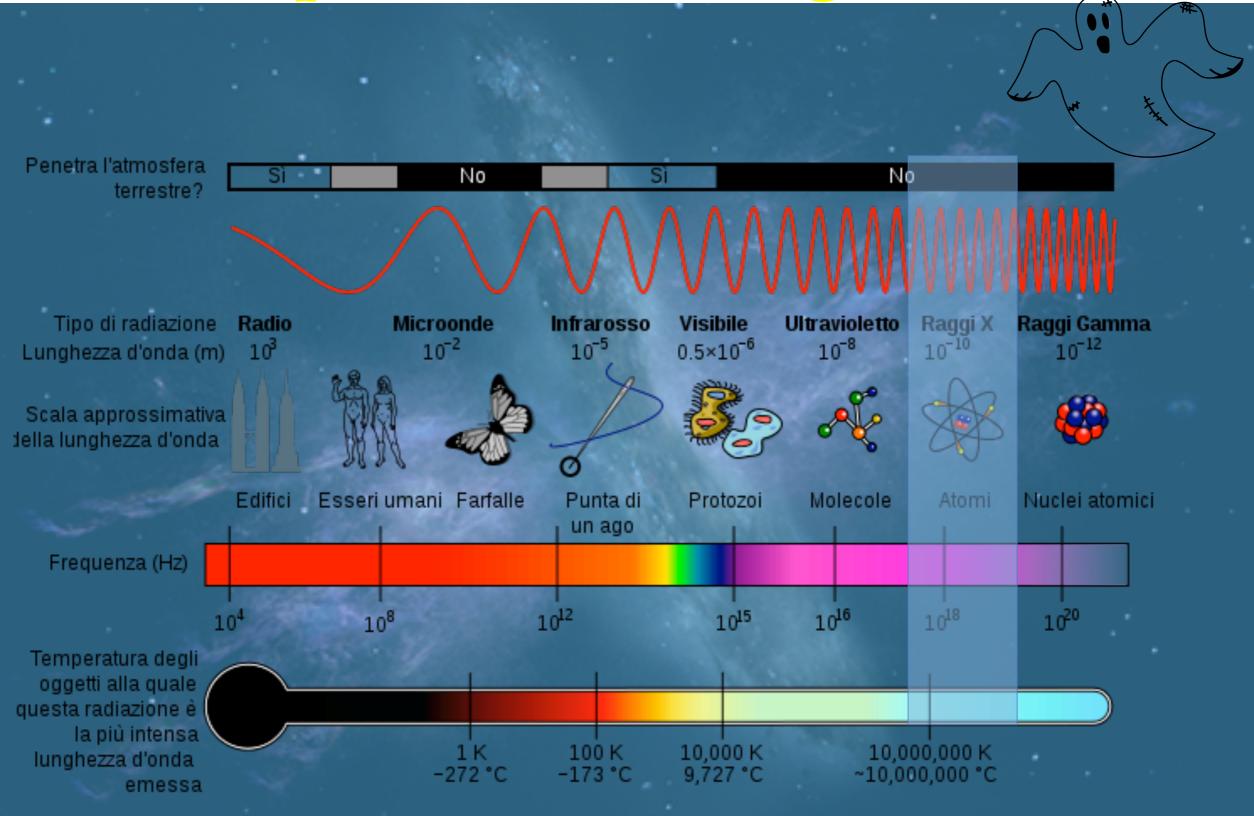
Il processo di accrescimento è tanto più energetico tanto più materiale cade sul buco nero $(E=mc^2)$

Durante il processo di accrescimento gas e polvere vengono riscaldati fino a vari milioni di gradi e vengono emesse onde elettromagnetiche nella banda Ultravioletta e X

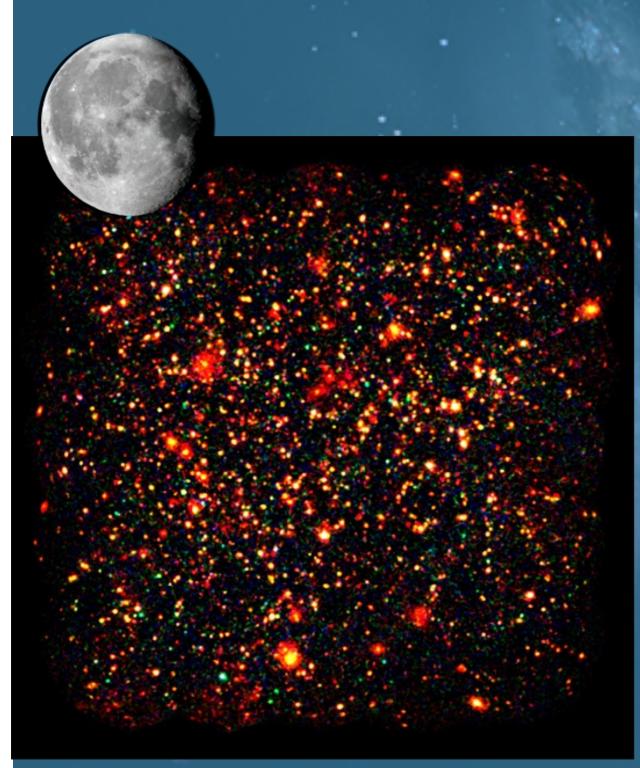
Cygnus X-1



Lo spettro elettromagnetico



Buchi Neri Supermassicci Attivi



~1800 Nuclei Galattici Attivi!

Un buco nero supermassiccio catturato nel momento in cui accresce materiale viene chiamato "attivo" e le galassie che ospitano questi buchi neri al loro centro vengono chiamate Nuclei Galattici Attivi (AGN)

Mentre cadono nel buco nero gas e polvere vengono riscaldati fino a vari milioni di gradi Un AGN si manifesta quindi come una brillante sorgente nei raggi UV e X

I più brillanti sono detti Quasar

Osservatori spaziali come Chandra (NASA) e XMM-Newton (ESA) sono risultati fondamentali nello scovare decine di migliaia di buchi neri "attivi" nel cosmo!

Una mappa a raggi X ("lastra") di una regione di cielo grande 2 gradi quadrati (circa 16 volte la dimensione della luna piena).

Osservazioni con il satellite XMM-Newton del campo COSMOS / credit: N. Cappelluti, XMM-COSMOS, ESA

Energie enormi in volumi piccolissimi

L'energia di un nucleo attivo è prodotta in una regione delle dimensioni del Sistema Solare

Se il Buco nero fosse grande come una moneta da 1 euro ... la Via Lattea sarebbe grande quanto l'Europa!

Una galassia come la via lattea produce l'energia di 100 miliardi di Soli; dall' "euro" è prodotta l'energia equivalente di 100-10000 miliardi di Soli

L'accrescimento su buchi neri è molto più efficiente della fusione nucleare che ha luogo nelle stelle

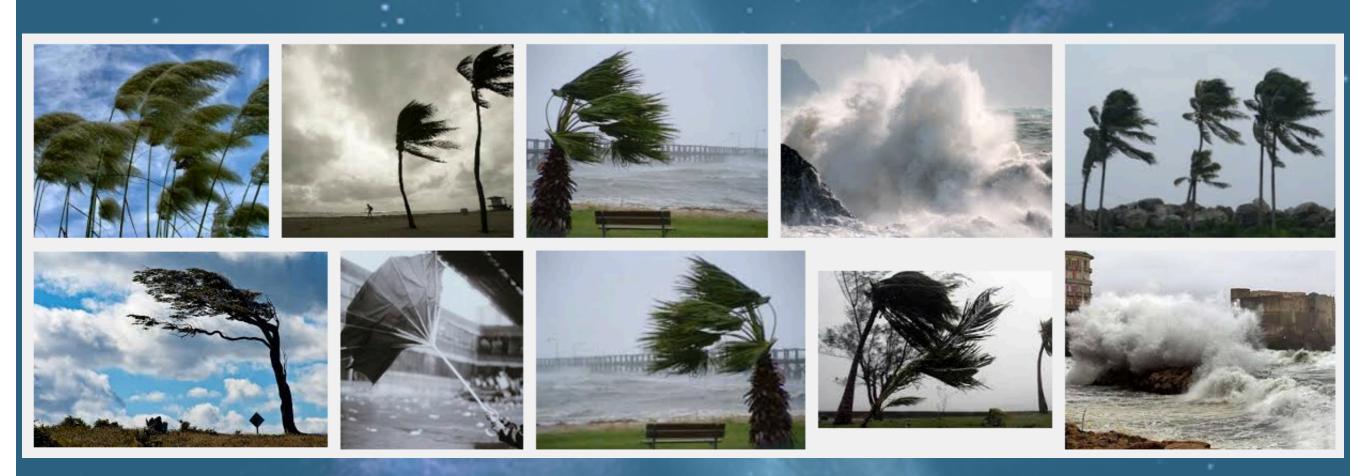




Venti (Galattici)

Venti terrestri

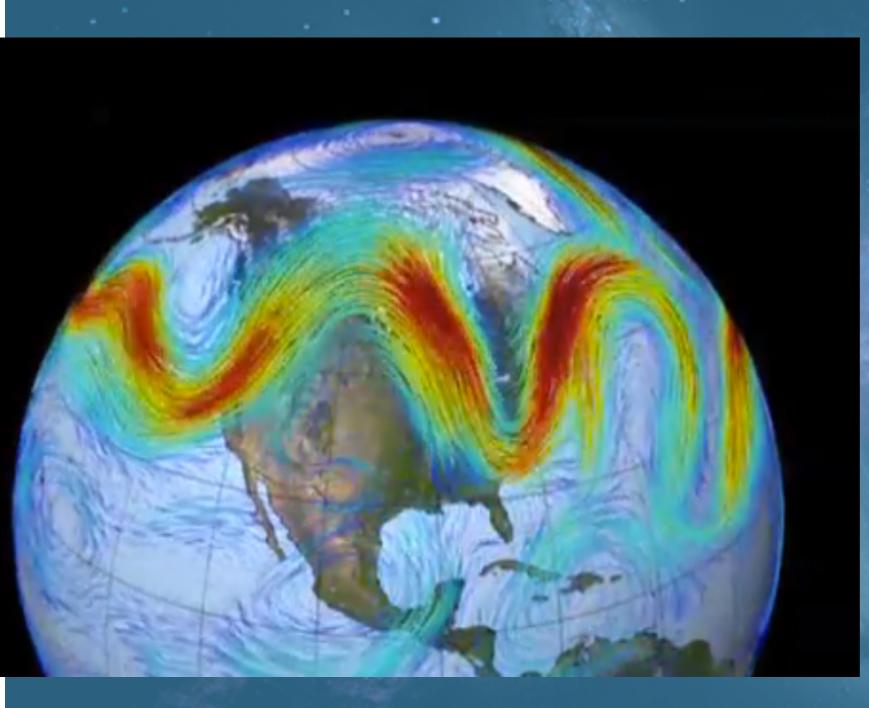
I venti sono masse d'aria che si spostano orizzontalmente sulla superficie terrestre, da zone di pressione maggiore verso zone di pressione minore



Qualche numero:

- dalla "brezza" al "tifone"
- la "bora" ha una velocita' di circa 120 km/h
- nel novembre 2013, durante il passaggio del Tifone Haiyan nelle Filippine, sono stati registrati venti sostenuti per un minuto di circa 445 km/h

Correnti a getto (jet-streams)



correnti (venti) causati dalla differenza di temperatura sulla superficie terrestre

altezza di circa 10.000 metri

soffiano da ovest verso est

velocita' fino a 160-200 km/hr

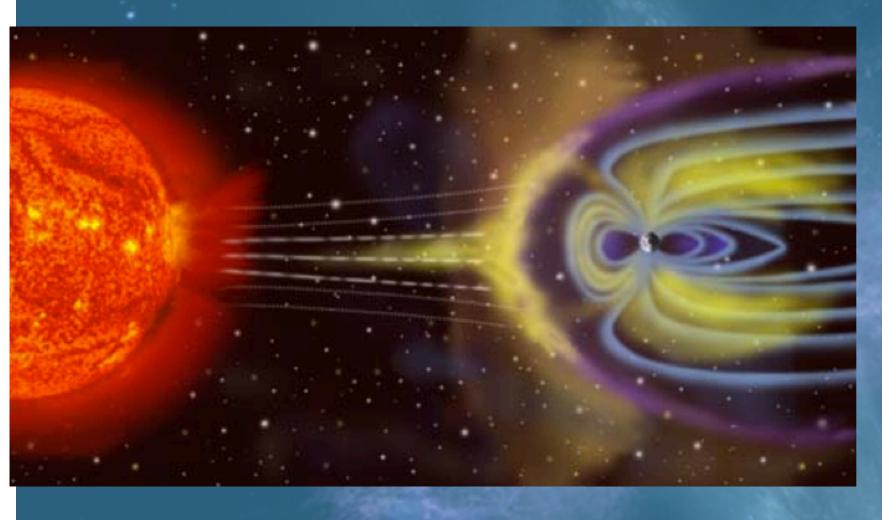
Venti in contesto astrofisico

venti planetari (e.g. jet streams su Giove)
vento solare
venti stellari (e.g. esplosioni di supernovae)
venti galattici

Venti planetari



Vento solare



flusso continuo di particelle provenienti dal Sole (protoni ed elettroni)

raggiunge le regioni più estreme del Sistema solare, fino all'orbita di Plutone (40 Unità astronomiche)

origine: espansione della corona solare

le particelle del vento solare riempiono lo spazio interplanetario

Alla distanza della Terra:

- velocità circa 300-600 km al secondo (circa 1-2 milioni di km all'ora)
- il campo magnetico terrestre agisce da schermo....

Effetti del Vento solare





Aurora boreale

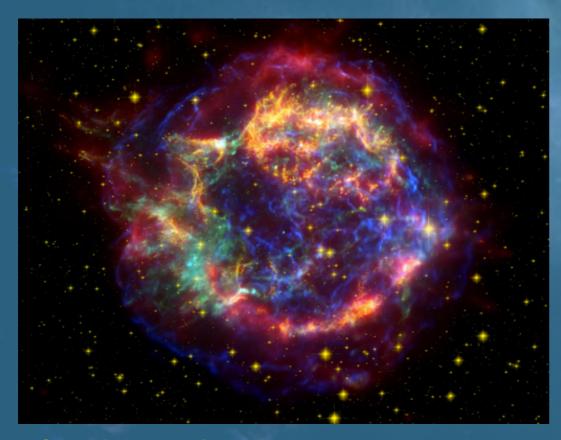
http://video.focus.it/dettagliovideo/dentro-l-aurora-5763



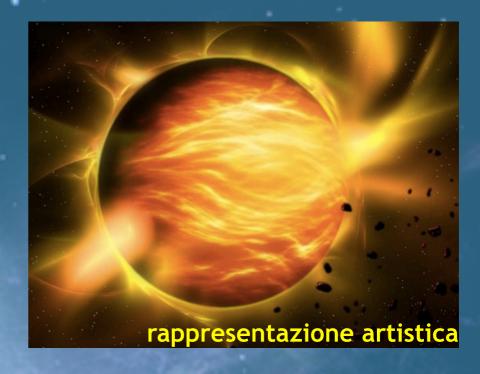
Venti Stellari

processi continui che rimuovono frazioni piccole della massa delle stelle

venti da 10 km/s a 1000 km/s



Cassiopea A Hubble+Spitzer+Chandra



processi esplosivi (Supernovae)

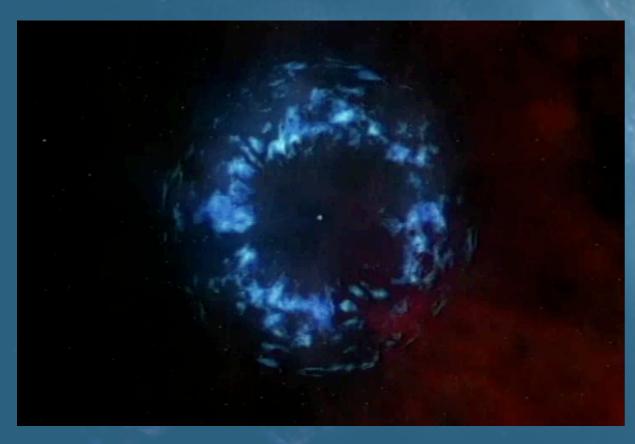
"vento" (flusso di particelle) con velocita' fino a 30.000 km/s (onda d'urto)

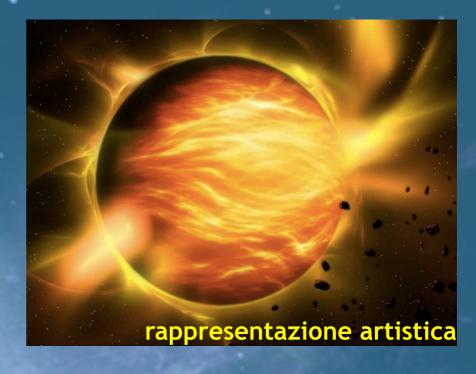
effetto: distribuisce elementi come Carbonio, Ossigeno e Ferro nel mezzo interstellare

Venti Stellari

processi continui che rimuovono frazioni piccole della massa delle stelle

venti da 10 km/s a 2000 km/s





processi esplosivi (Supernovae)

"vento" (flusso di particelle) con velocita' fino a 30.000 km/s (onda d'urto)

effetto: distribuisce elementi come Carbonio, Ossigeno e Ferro nel mezzo interstellare

Venti Galattici

I venti galattici sono flussi di particelle cariche ad alta energia emessi dalle galassie, con velocità elevatissime: da 300 a 3000 km al secondo, pari a 1-10 milioni di km/h.

Vengono prodotti da due tipi di sorgenti: le galassie con intensa formazione stellare e i buchi neri giganti nel centro di molte galassie.

STARBURSTS

NUCLEI GALATTICI ATTIVI (AGN)

Venti da Starbursts



M82 (HST+Chandra+Spitzer)

ORIGINE:

scoppio di stelle molto massicce in un meccanismo di esplosioni successive di Supernovae (spinta a catena) Il vento galattico corrisponde alla somma dei venti generati da supernove a dalle stelle.

venti a "bassa" velocita' (<500 km/s) il gas spostato dal vento può ricadere sulla galassia Fontane Galattiche

venti a "alta" velocita' (>1000 km/s) espellono direttamente il gas dalla galassia fino a distanze >60 mila anni luce

Venti da Starbursts



Il vento provoca una emorragia di materia sottratta alla formazione di nuove stelle

La zona più densamente popolata di stelle è il disco della galassia; il vento quindi si sviluppa in direzione perpendicolare al disco della galassia

La perdita di questo materiale prezioso rallenta e a lungo andare ferma la crescita delle galassie

M82 (HST+Chandra+Spitzer)

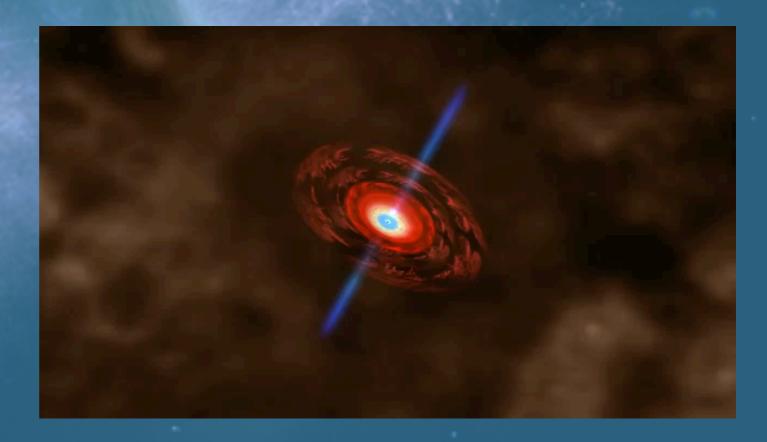
Venti da AGN

Il buco nero centrale durante l'accrescimento libera una gran quantità di energia che può venire "espulsa" sotto forma di vento

La velocità dipende dalla massa del buco nero centrale, ma si possono raggiungere velocità >1000 km/s



La perdita di materia può arrivare anche a 100-1000 volte la massa del Sole in *un anno!*



Venti da AGN



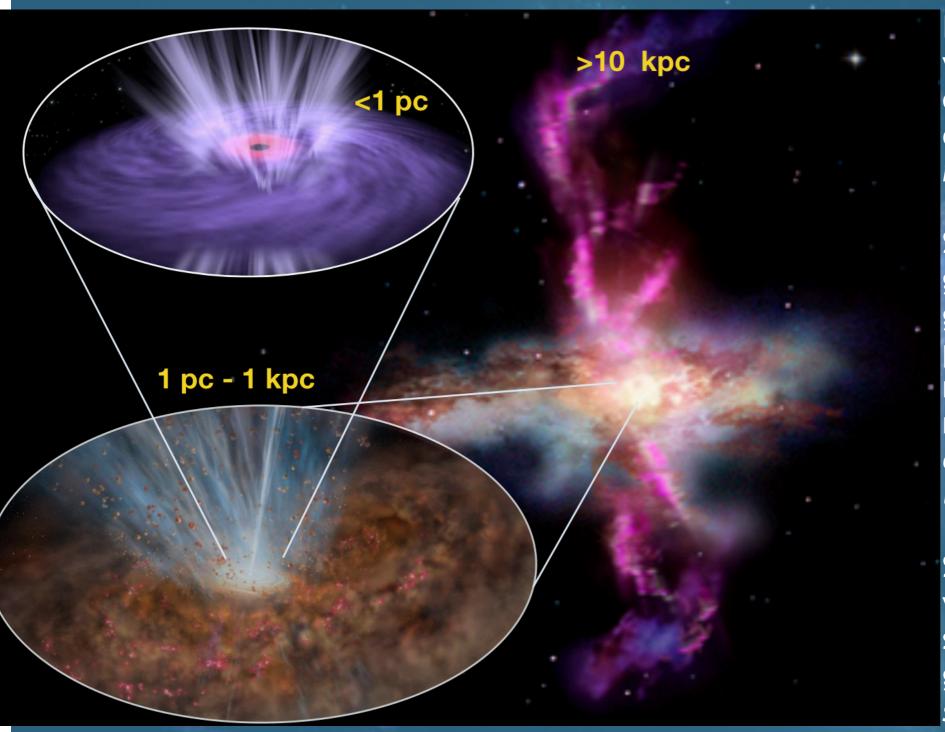
M106 (Hubble+Chandra+Spitzer+VLA)

Nucleo Galattico attivo in una galassia a spirale; mostra bracci non allineati al piano galattico che emettono fortemente nella banda X e radio

Evaporazione del gas galattico perpendicolare al piano e lungo i getti relativistici

La galassia contiene una quantita' di gas inferiore a quella aspettata e il tasso di formazione stellare e' 10 volte minore rispetto a quello di galassie come la nostra

Propagazione dei venti



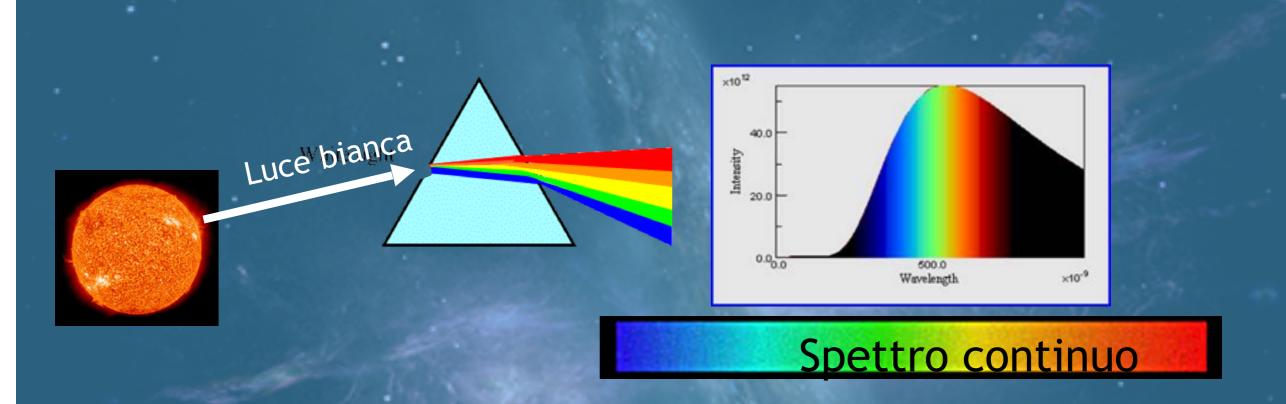
Il vento si origina nelle vicinanze del buco nero centrale (sulla scala del disco di accrescimento; molto minore di 1 anno luce)

Si propaga attraverso la galassia interagendo con il gas che incontra lungo il percorso e smuovendo man mano quantità sempre maggiori di materia (fino a qualche migliaio di anni luce)

Se abbastanza potente e veloce, riesce anche a scappare all'attrazione gravitazionale della Galassia! su scale >30.000 anni luce

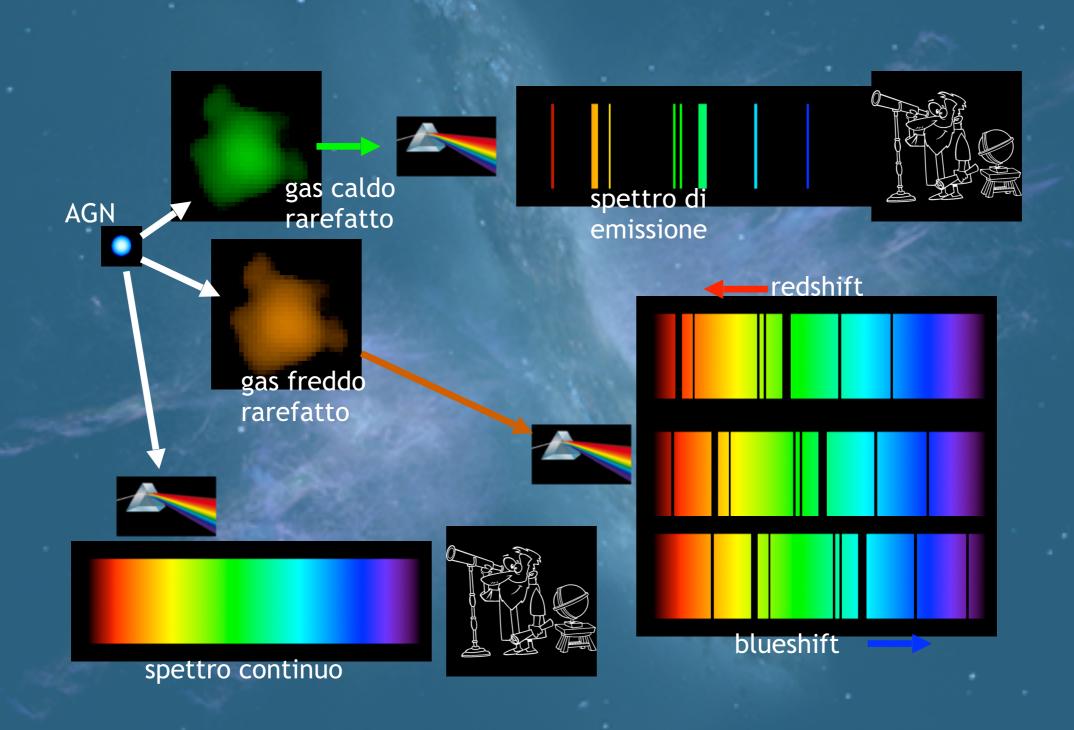
E' fondamentale misurare la velocità dei venti

La tecnica della Spettroscopia



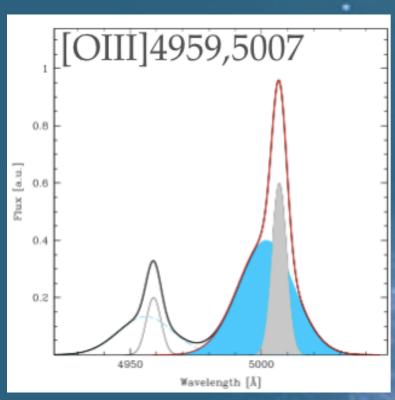
La spettroscopia e' lo studio della luce emessa da una sorgente scomposta in funzione del suo colore o lunghezza d'onda

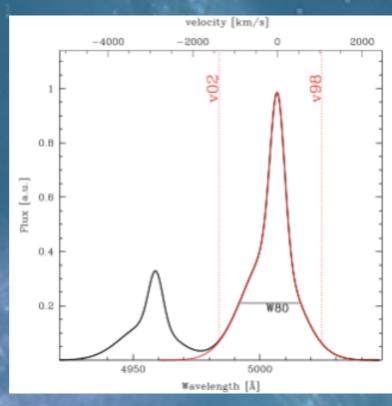
Spettroscopia e misura della velocita'



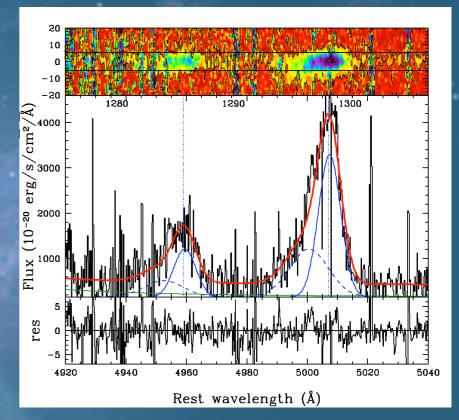
Rivelazione dei venti

Simulazioni





strumento: X-shooter Brusa etal. 2015, MNRAS

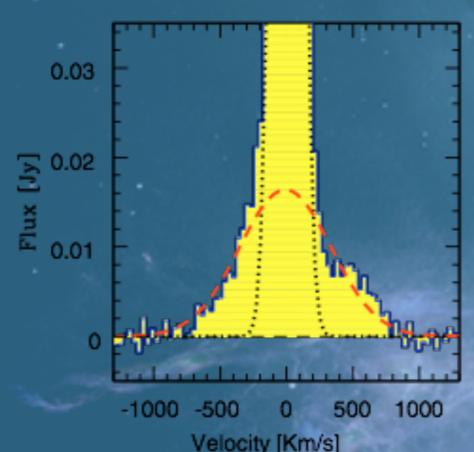


in *assenza* di venti le righe (in questo caso di Ossigeno ionizzato, [OIII] visibile in banda ottica, che traccia il gas "tiepido") sarebbero **strette** e **simmetriche**

INDIZIO di vento: extra componente "spostata" (shifted) o larga (broad)

Rivelazione dei venti

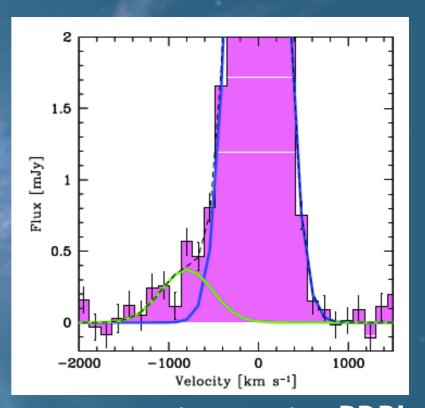
Universo vicino



strumento: PDBI

Feruglio et al. 2010, A&A

Universo lontano (~12 miliardi di anni fa)



strumento: PDBI Feruglio et al. 2017, A&A

in *assenza* di venti le righe (in questo caso di Monossido di Carbonio, CO, visibile in banda radio, che traccia il gas "freddo") sarebbero **strette** e **simmetriche**

INDIZIO di vento: extra componente "spostata" (shifted) o larga (broad)

Prime conclusioni

i venti galattici (sia da starbursts sia da buchi neri) rimuovono il gas dalla galassia

i buchi neri sembrano essere piu' efficienti (producono piu' energia e quindi danno origine a venti piu' veloci e massicci)

in assenza di gas (soprattutto molecolare) la formazione di stelle nelle galassie e' soppressa

la mancata formazione di nuove stelle determina il "futuro" di una galassia!

I venti galattici però si osservano solo in una frazione (1-30%) di tutte le galassie...

(c) Interaction/"Merger" (d) Coalescence/(U)LIRG (f) Quasar (e) "Blowout" - now within one halo, galaxies interact & 'Coeval unobscured **Compton Thick** lose angular momentum SFR starts to increase **BH Growth SB-AGN QSO** - stellar winds dominate feedback - rarely excite QSOs (only special orbits) **INFRARED OPTICAL** X-RAY (b) "Small Group" 1000 100 [40 yr-1] 10 Q5O luminosity fades rapidly halo accretes similar-mate - tidal features visible only with very deep observations tur over a wide mass range remnant reddens rapidly (E+A/K+A) still similar to before: "hot halo" from feedback dynamical friction merges. - sets up quasi-static cooling the subhalos efficiently (a) Isolated Disk (h) "Dead" Elliptical galassie rali isolate -2 - star formation terminated Time (Relative to Merger) [Gyr] halo & disk grow, most stars formed - large BH/spheroid - efficient feedback secular growth builds bars & pseudobulges

"Seyfort" fueling (AGN with Ms >-23)

cannot redden to the red sequence

NO GAS = **NO FORMAZIONE STELLARE**

la fase di "vento" potrebbe essere una fase intermedia da collocarsi tra le spirali e le ellittiche

modello di "co-evoluzione" di galassie e AGN

halo grows to "large group" scales:

- growth by "dry" mergers

mergers become inefficient

Hopkins et al. 2008



- now within one halo, galaxies interact & lose angular momentum
- SFR starts to increase
- stellar winds dominate feedback
- rarely excite QSOs (only special orbits)

(b) "Small Group"



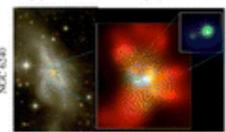
- halo accretes similar-mass companion(s)
- can occur over a wide mass range
- M_{MO} still similar to before: dynamical friction merges the subhalos efficiently

(a) Isolated Disk



- halo & disk grow, most stars formed
- secular growth builds bars & pseudobulges
- "Seyfert" fueling (AGN with Me>-23)
- cannot redden to the red sequence

(d) Coalescence/(U)LIRG



Compton Thick BH Growth

INFRARED

1000

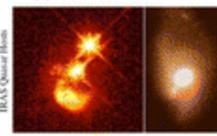
100

10

10

[40 yr-1]

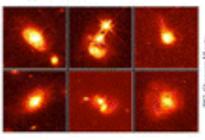
(e) "Blowout"



Coeval SB-AGN X-RAY

Time (Relative to Merger) [Gyr]

(f) Quasar



unobscured QSO OPTICAL

tidal features visible only with very deep observations remnant reddens rapidly (E+A/K+A) "hot halo" from feedback

- sets up quasi-static cooling

galassia

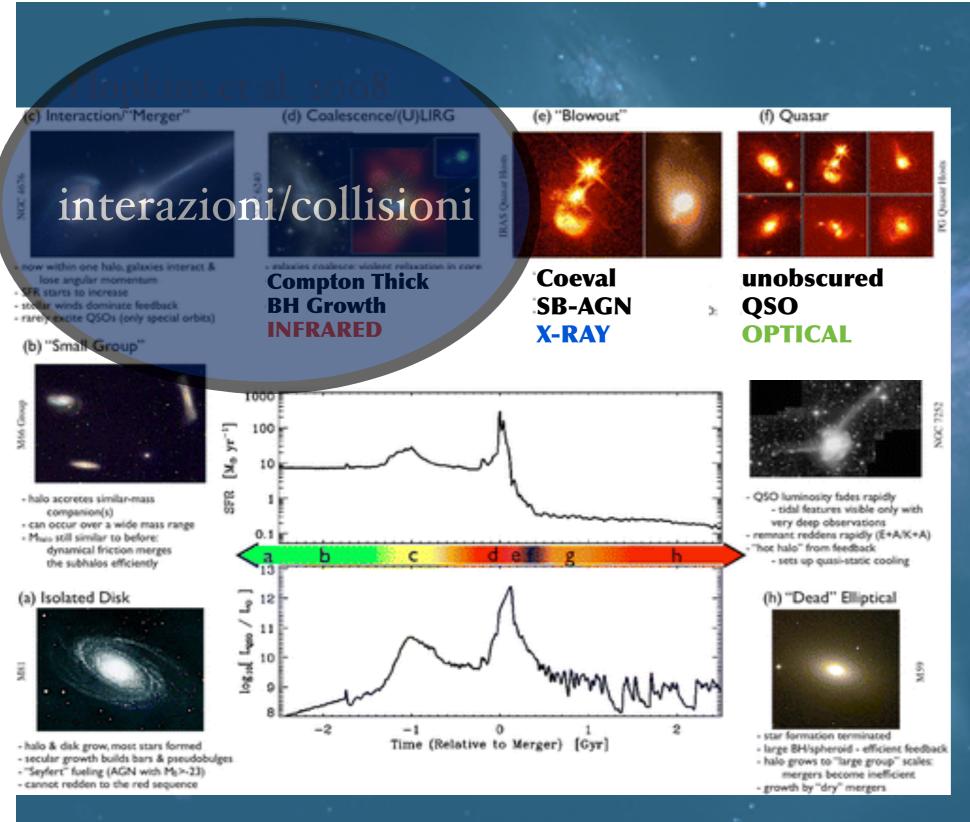
ellittica

- star formation terminated
- large BH/spheroid efficient feedback
- halo grows to "large group" scales: mergers become inefficient
- growth by "dry" mergers

NO GAS = NO FORMAZIONE STELLARE

la fase di "vento"
potrebbe essere una
fase intermedia da
collocarsi tra le spirali e
le ellittiche

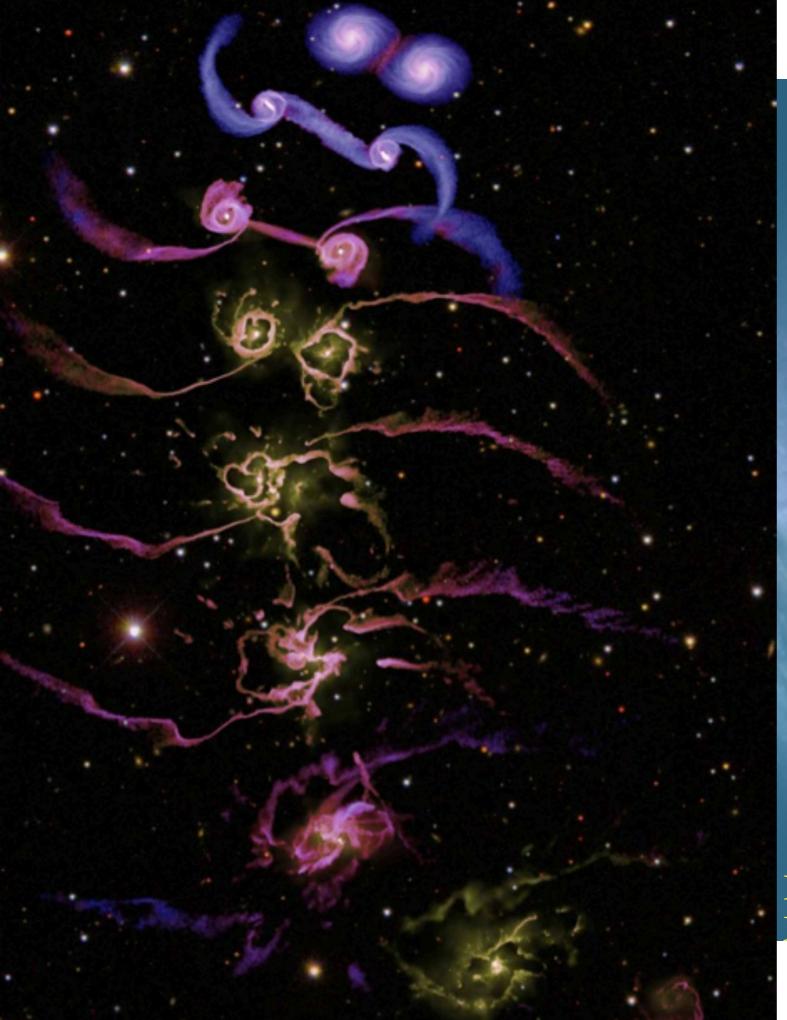
modello di "co-evoluzione" di galassie e AGN



NO GAS = NO FORMAZIONE STELLARE

la fase di "vento"
potrebbe essere una
fase intermedia da
collocarsi tra le spirali e
le ellittiche

modello di "co-evoluzione" di galassie e AGN



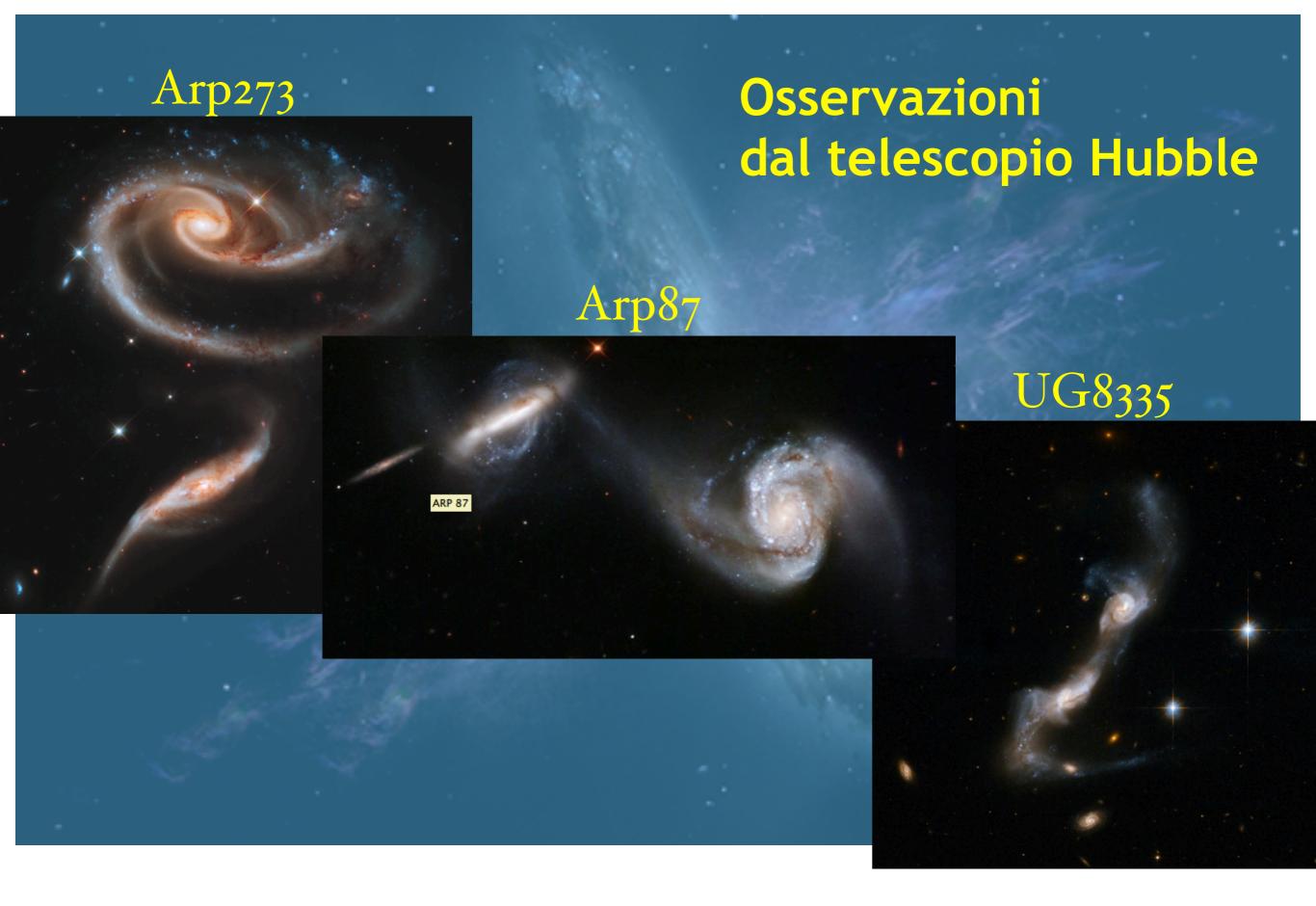
Sequenze di interazioni e collisioni

Simulazioni

basate sul comportamento del gas sotto l'azione della forza di gravita' delle galassie e delle interazioni dei barioni (i.e. emissione)

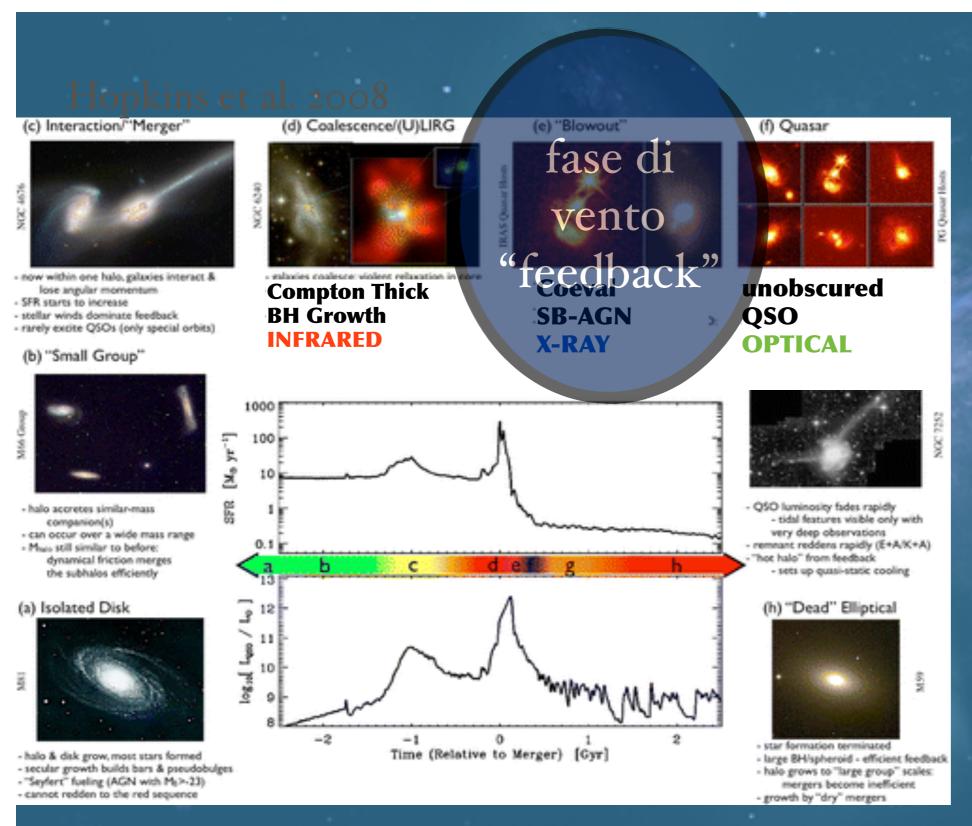
Di Matteo et al. 2005 Nature

Interazioni Galattiche



Collisioni Galattiche

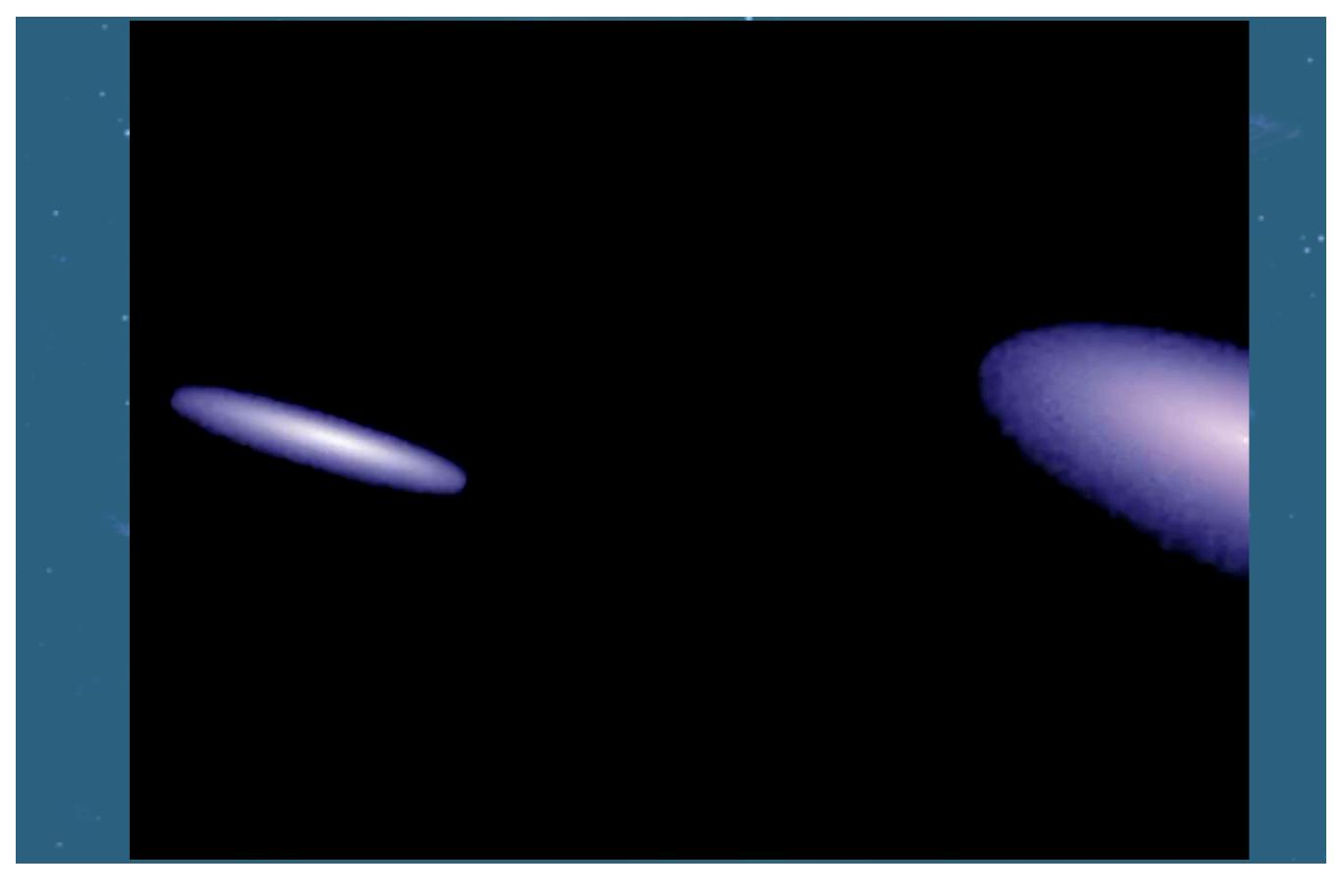




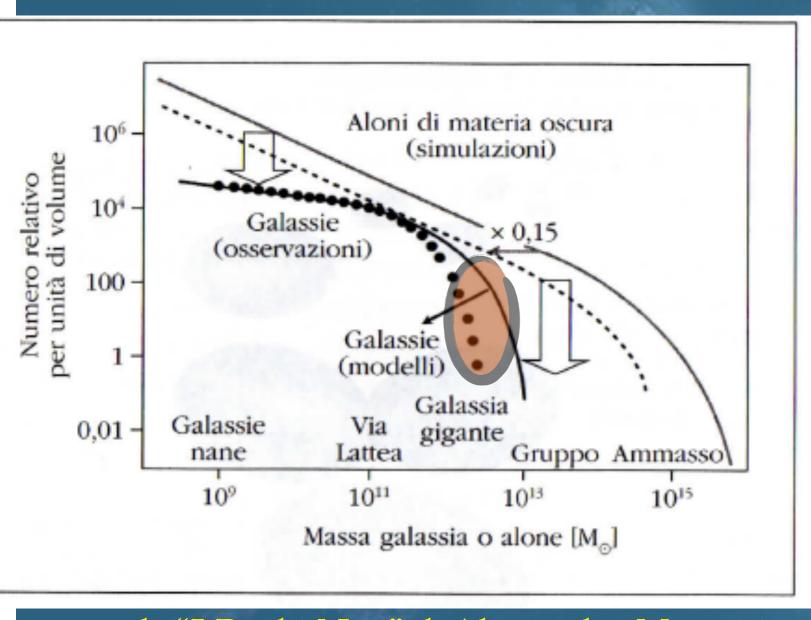
NO GAS = NO FORMAZIONE STELLARE

la fase di "vento"
potrebbe essere una
fase intermedia da
collocarsi tra le spirali e
le ellittiche

modello di "co-evoluzione" di galassie e AGN



"Feedback" da AGN



La presenza di venti galattici spiega come mai vediamo meno galassie massicce di quelle previste dai modelli

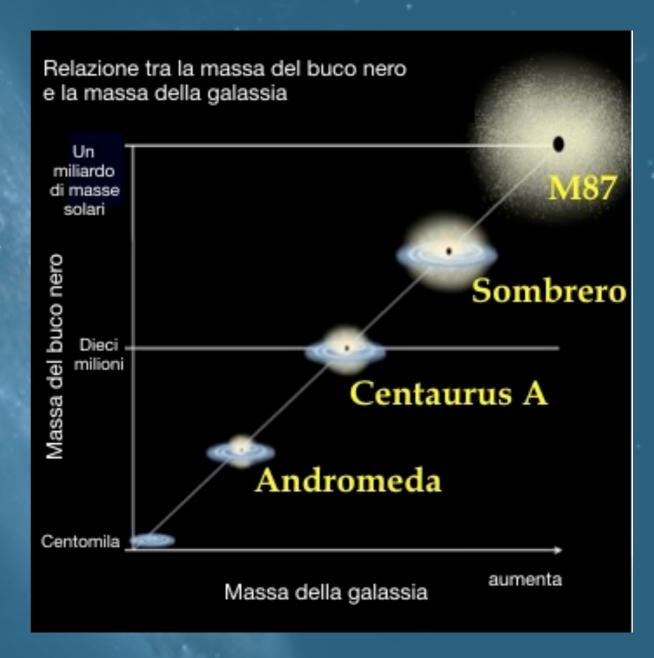
con le nostre osservazioni
multifrequenza (che provano
l'esistenza di questi venti in
galassie e AGN) sia nell'universo
locale, sia nell'universo
"giovane" siamo riusciti ad
avere un quadro completo della
evoluzione delle galassie e dei
buchi neri al centro

tratto da "I Buchi Neri" di Alessandro Marconi collana "Farsi una idea" (Il Mulino)

"Feedback" da AGN

Esiste una relazione fra la massa del Buco Nero e la massa della galassia che lo ospita (Magorrian et al. 1998)

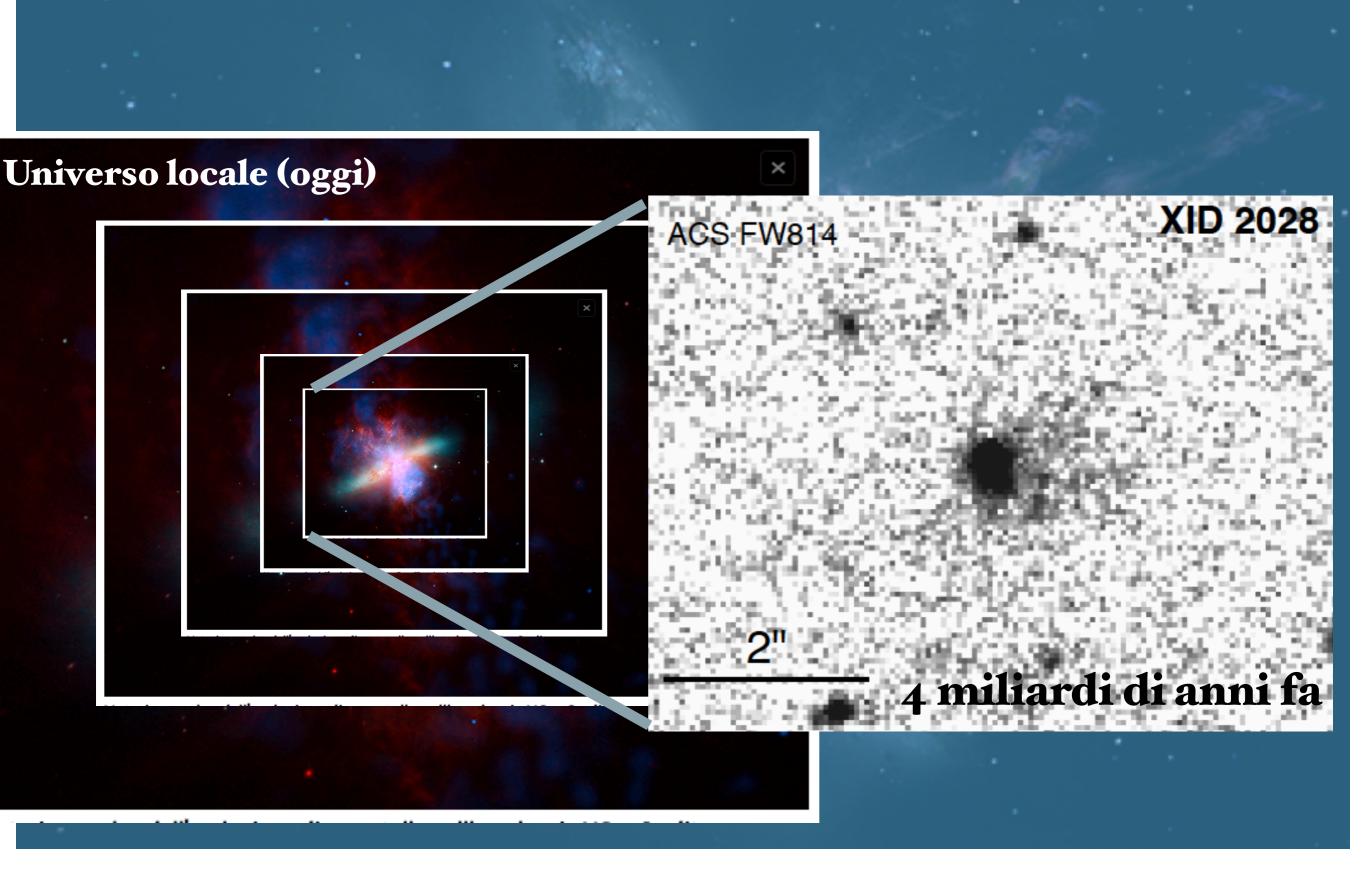
> Il Buco Nero regola la crescita della galassia, impedendole di ingrassare più velocemente di lui



"Feedback" negativo e positivo



Il problema della risoluzione



Conclusioni

i venti galattici (sia da starbursts sia da buchi neri) rimuovono il gas dalla galassia

i buchi neri sembrano essere piu' efficienti (producono piu' energia e quindi danno origine a venti piu' veloci e massicci)

in assenza di gas (soprattutto molecolare) la formazione di stelle nelle galassie e' soppressa

la mancata formazione di nuove stelle determina il "futuro" di una galassia!

L'emissione di venti galattici caratterizza una "fase" dell'evoluzione delle galassie (difficili da "osservare")!

Rari oggi ma molto piu' comuni in passato, quando l'universo aveva solo 1-5 miliardi di anni; importanza di osservare l'universo lontano

Il futuro

Le ricerche in questo campo procedono a ritmo serrato Nuovi strumenti in fase di studio o costruzione ci permetteranno di investigare molti più oggetti, con maggior risoluzione e spingendoci più lontano nello spazio e nel tempo

TELESCOPI A RAGGI X SU SATELLITI (per scovare i buchi neri)

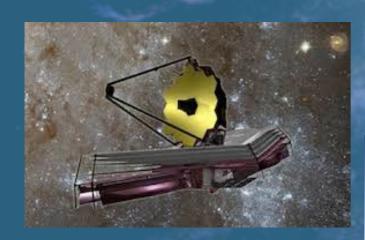


eROSITA Telescope X-rays (Giugno 2019) 3 milioni di AGN!

Athena Telescope X-rays (>2030)



GRANDI TELESCOPI A TERRA (per studiare le proprieta' dei venti galattici)



James Webb Space Telescope - 6.5m (2021)

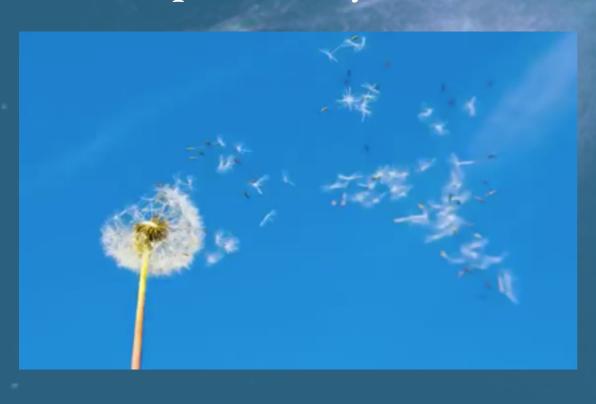
Atacama Large Millimeter Array (ALMA) 66 antenne da 12mt





Winds: here, there, everywhere (venti: qui, la', dappertutto)

http://hte.si.edu/wind.html
https://www.youtube.com/watch?v=hSjArzavS7E



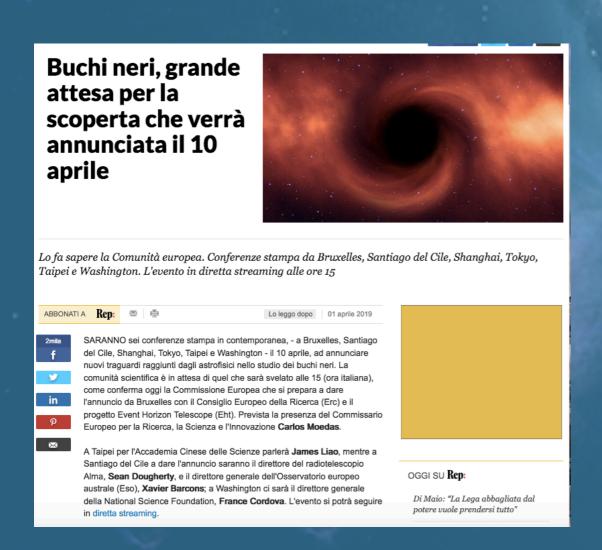


GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Event Horizon Telescope

Tutto pronto per la foto del secolo!

Mercoledi' 10 Aprile, ore 15:00 6 conferenze stampa in contemporanea in tutto il mondo Brussels, Santiago del Chile, Shanghai, Tokyo, Taipei, Washington





https://www.media.inaf.it/2019/03/15/eht-intervista-goddi/