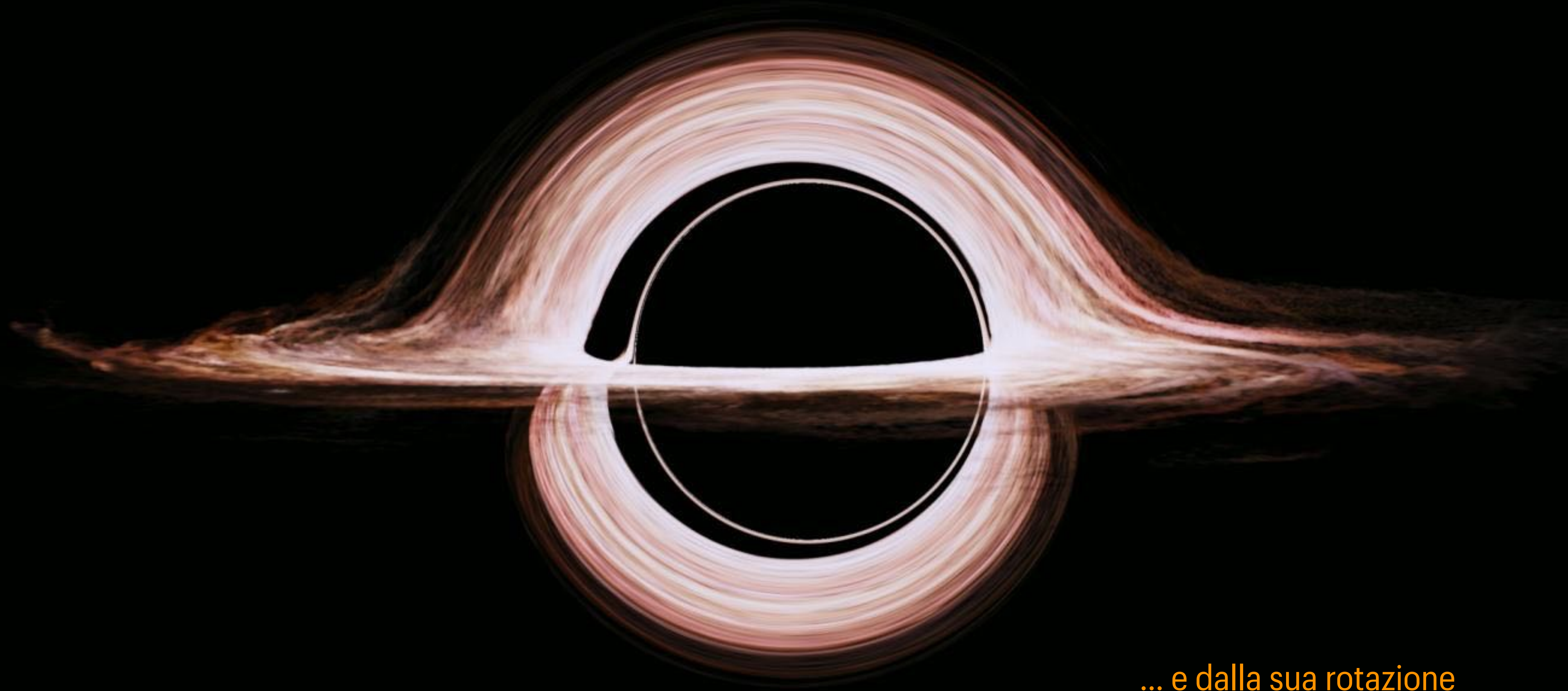


BH: interamente descritto dalla sua massa



... e dalla sua rotazione

ASTROFISICA DEI BUCHI NERI

buchi neri come oggetti astrofisici

e come possiamo osservarli

DUE TIPI DI BUCHI NERI

BH stellari

$$M \sim 5 - 40 M_{\text{Sole}}$$

osservati all'interno della nostra galassia,
specialmente accompagnati da altre stelle

osservati solo quando attivi

BH supermassicci

$$M \sim 10^6 - 10^{10} M_{\text{Sole}}$$

situati al centro di ogni galassia

osservati sia in fase attiva che quiescente

meccanismo di formazione non ancora chiaro

BUCHI NERI STELLARI: PRODOTTO DELL'EVOLUZIONE DI STELLE MASSICCE

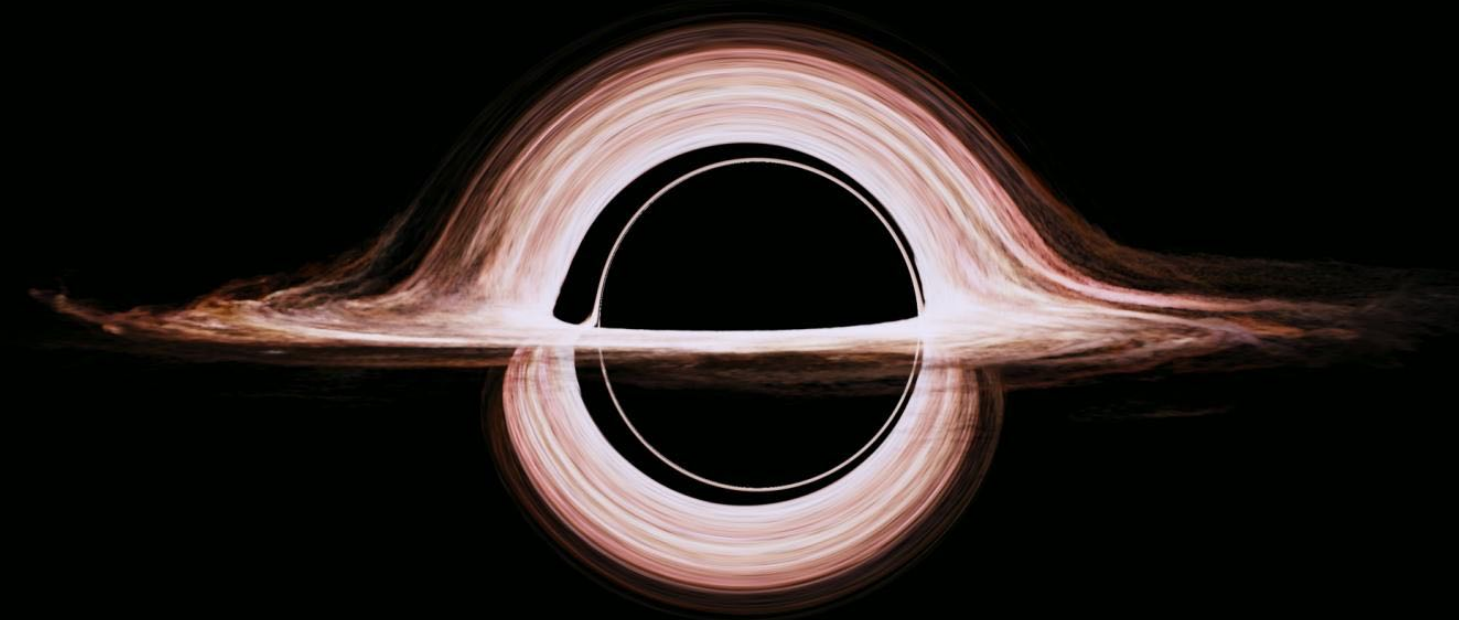
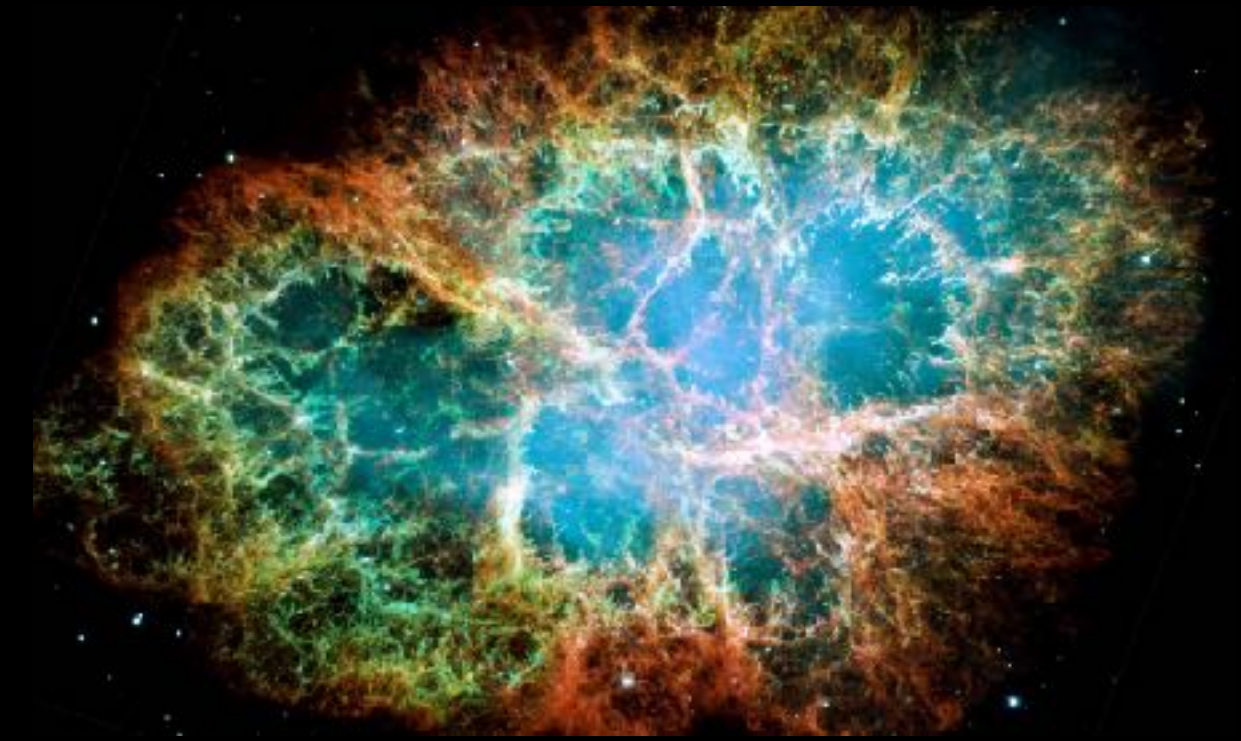
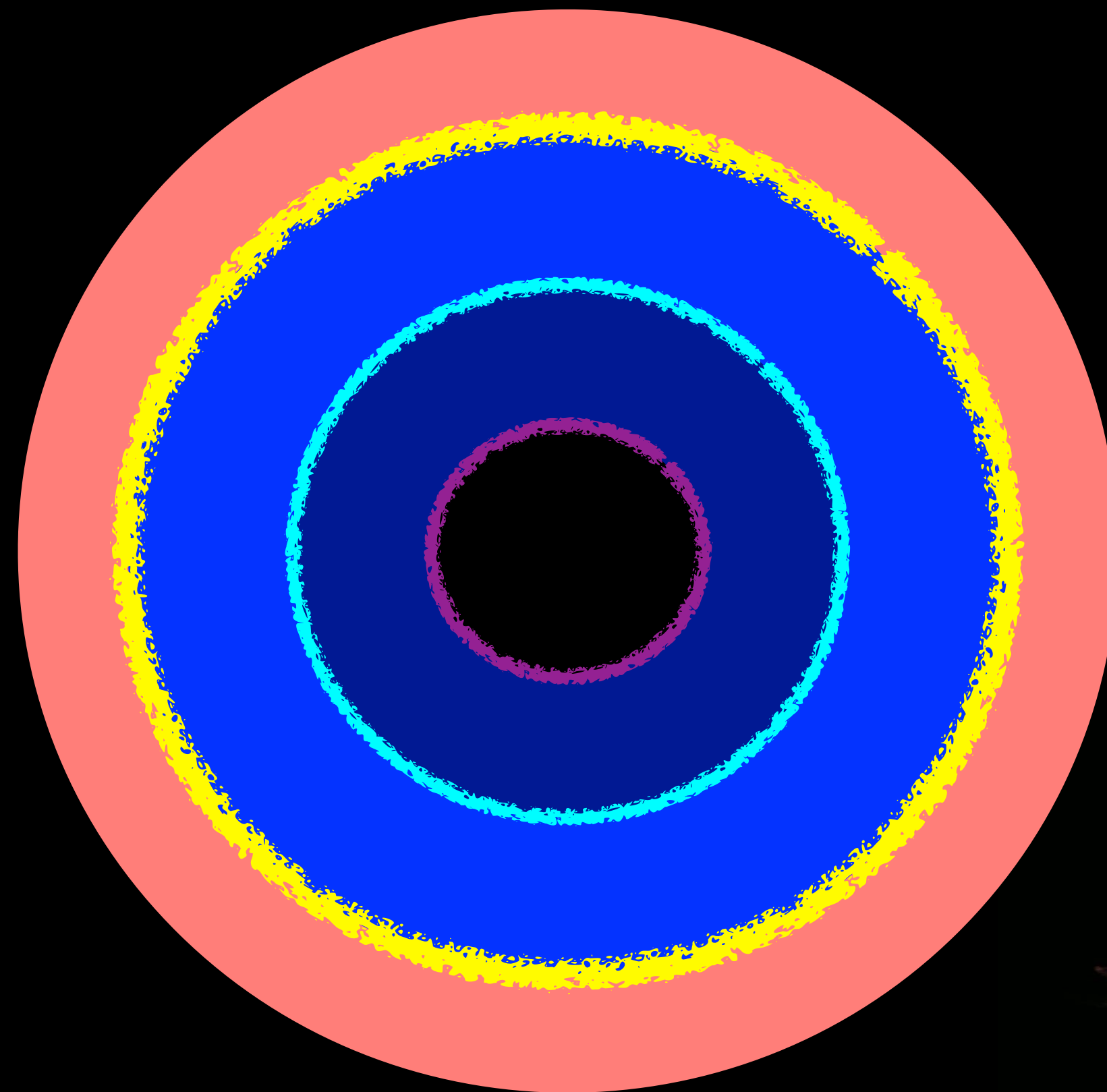
sintesi di metalli pesanti, fino a un nucleo di ferro che non permette nuove reazioni nucleari

collasso non uniforme:

in alcuni strati intermedi si possono innescare nuove reazioni: esplosione di Supernova e formazione di un oggetto compatto

collasso uniforme:

formazione diretta di un buco nero, senza shock



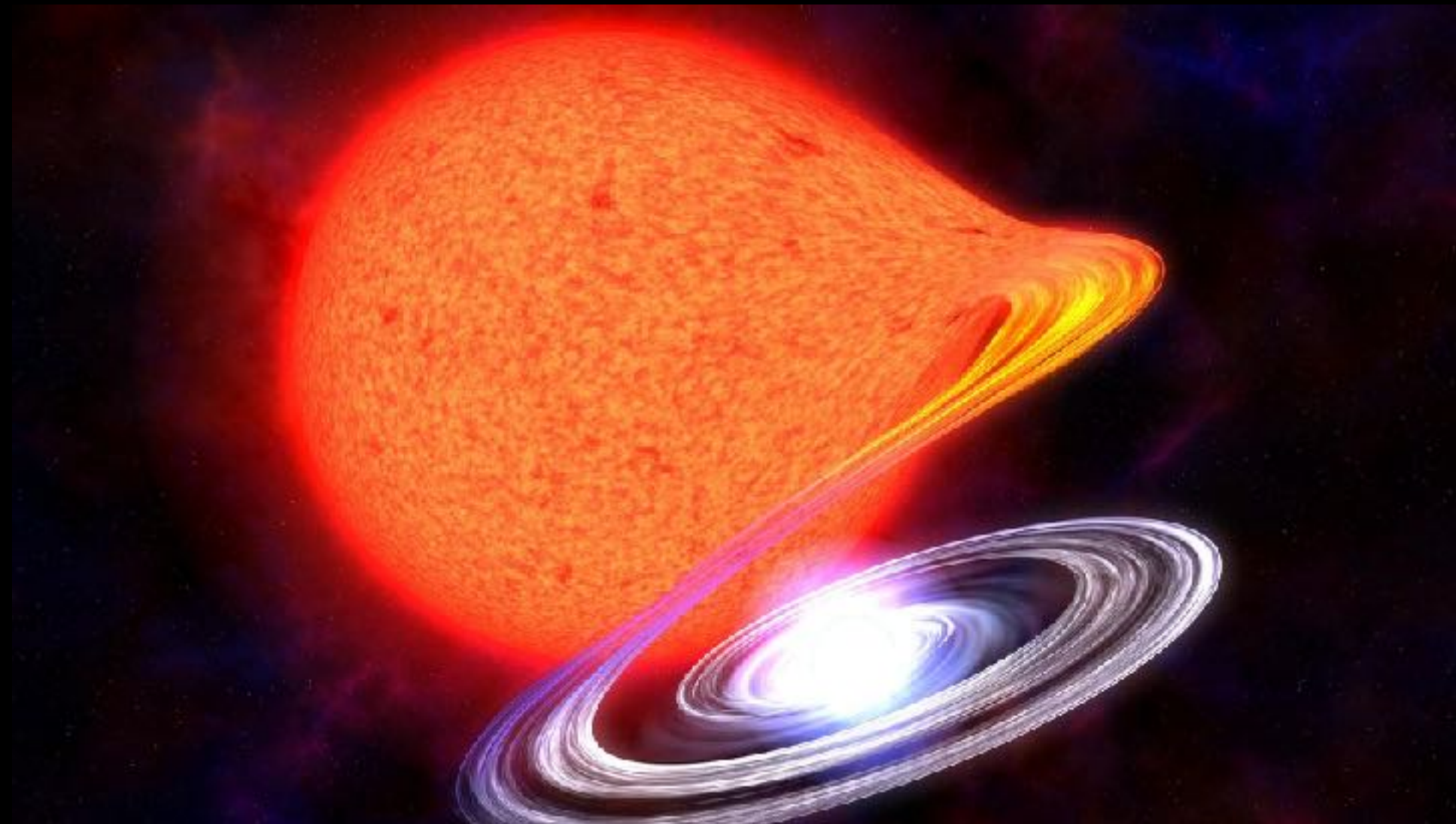
BUCHI NERI STELLARI: COSA OSSERVIAMO?

se isolati o quiescenti,
non possono essere osservati

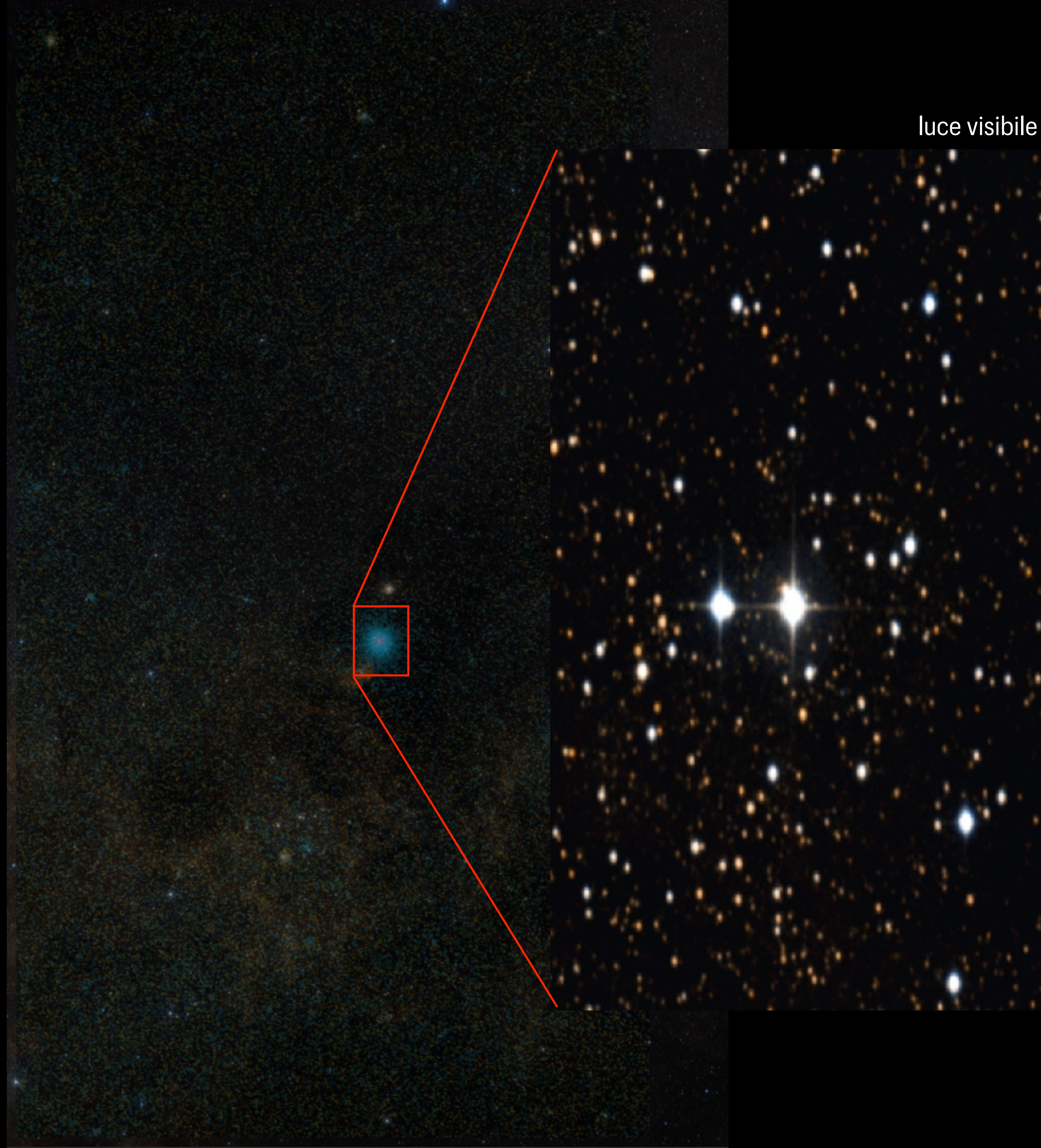
binarie X

sistemi binari con emissione a raggi X

condizione ideale per osservare presenza e
influenza di buchi neri



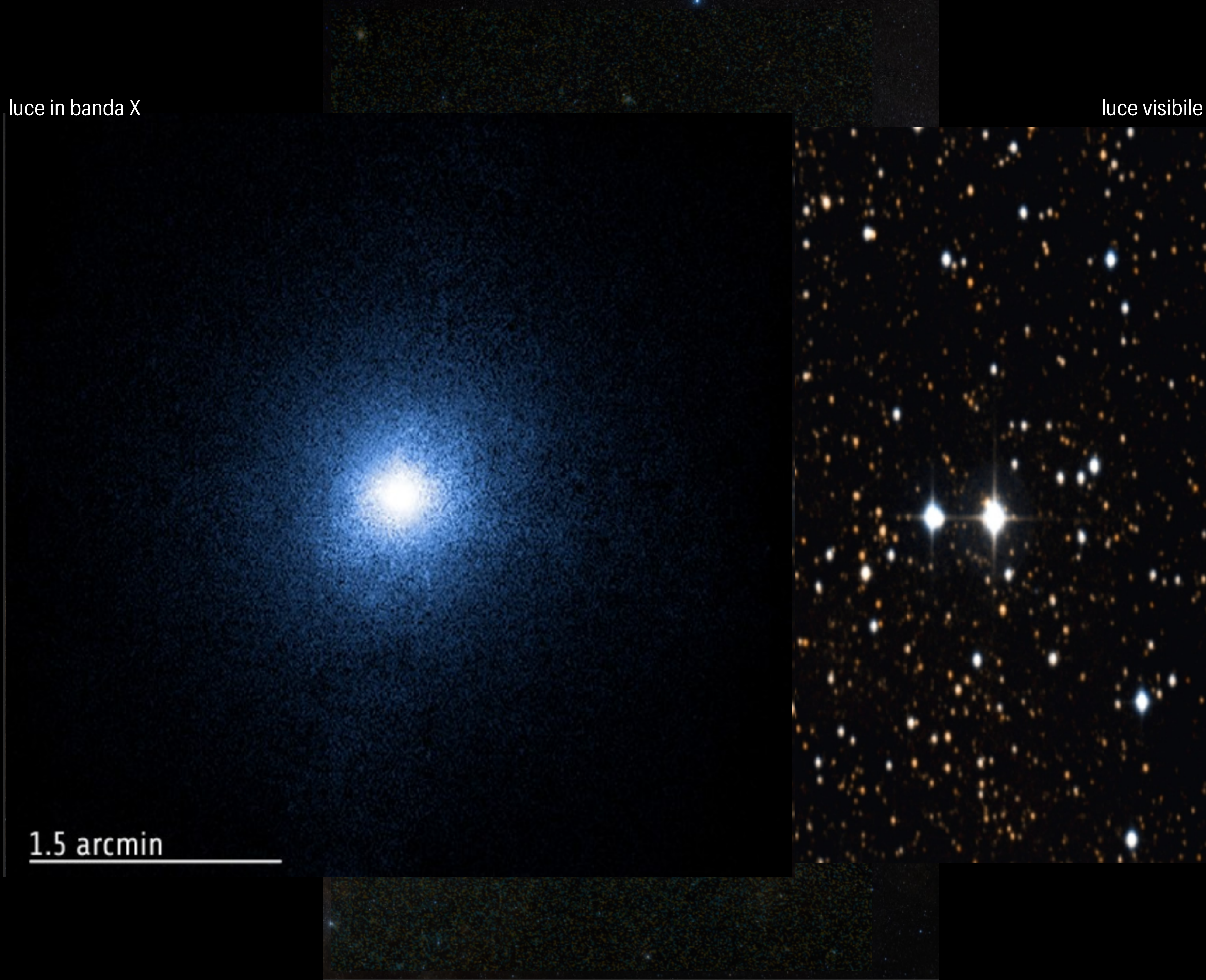
luce visibile



luce in banda X

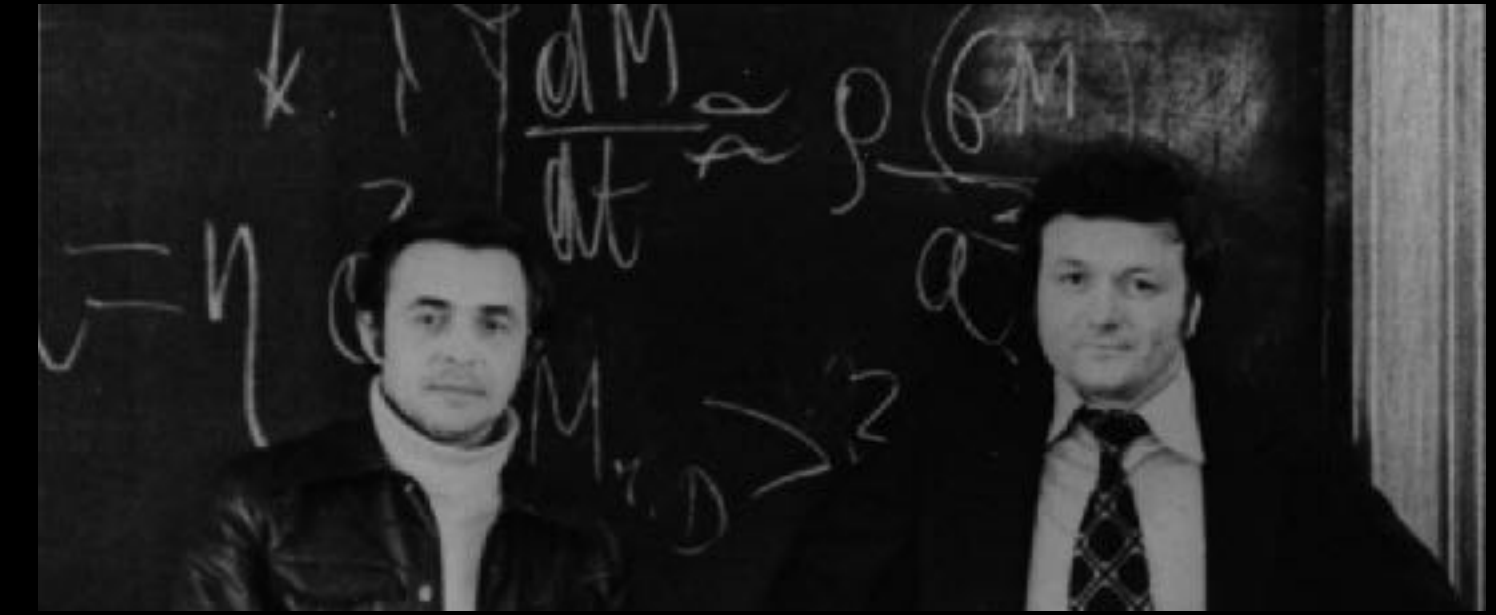
luce visibile

1.5 arcmin



DISCO DI ACCRESCIMENTO

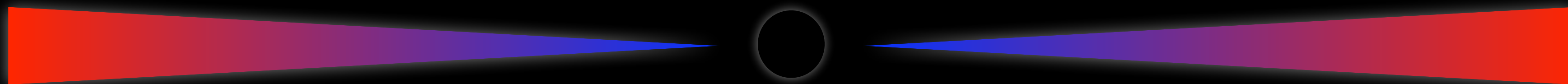
- ✓ disco geometricamente sottile e otticamente spesso
- ✓ plasma denso, dominato da fenomeni viscosi
- ✓ raggio interno: varia al variare dello spin del buco nero



Shakura & Sunyaev 1973

$$R_{\text{in}} = 3 R_{\text{S}} = 6 \frac{GM}{c^2}$$

per buco nero non rotante



DISCO DI ACCRESCIMENTO

approssimazione Newtoniana + teorema viriale:

metà dell'energia gravitazionale acquistata durante l'accrescimento viene irraggiata

energia irraggiata
durante l'accrescimento = luminosità emessa dal
disco di accrescimento

$$L = \frac{1}{2} \frac{GM}{R_{\text{in}}} \frac{dM}{dt} = \frac{1}{12} \dot{M} c^2 = \eta \dot{M} c^2$$

efficienza molto più alta rispetto
alle reazioni nucleari!

$\eta_{\text{nucleare}} \simeq 0.7\%$

$\eta_{\text{accrescimento}} \simeq 8\%$

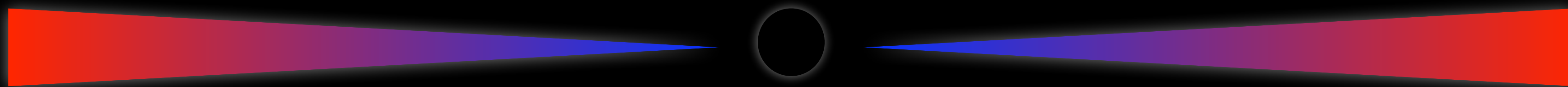
DISCO DI ACCRESCIMENTO

emissione di corpo nero:

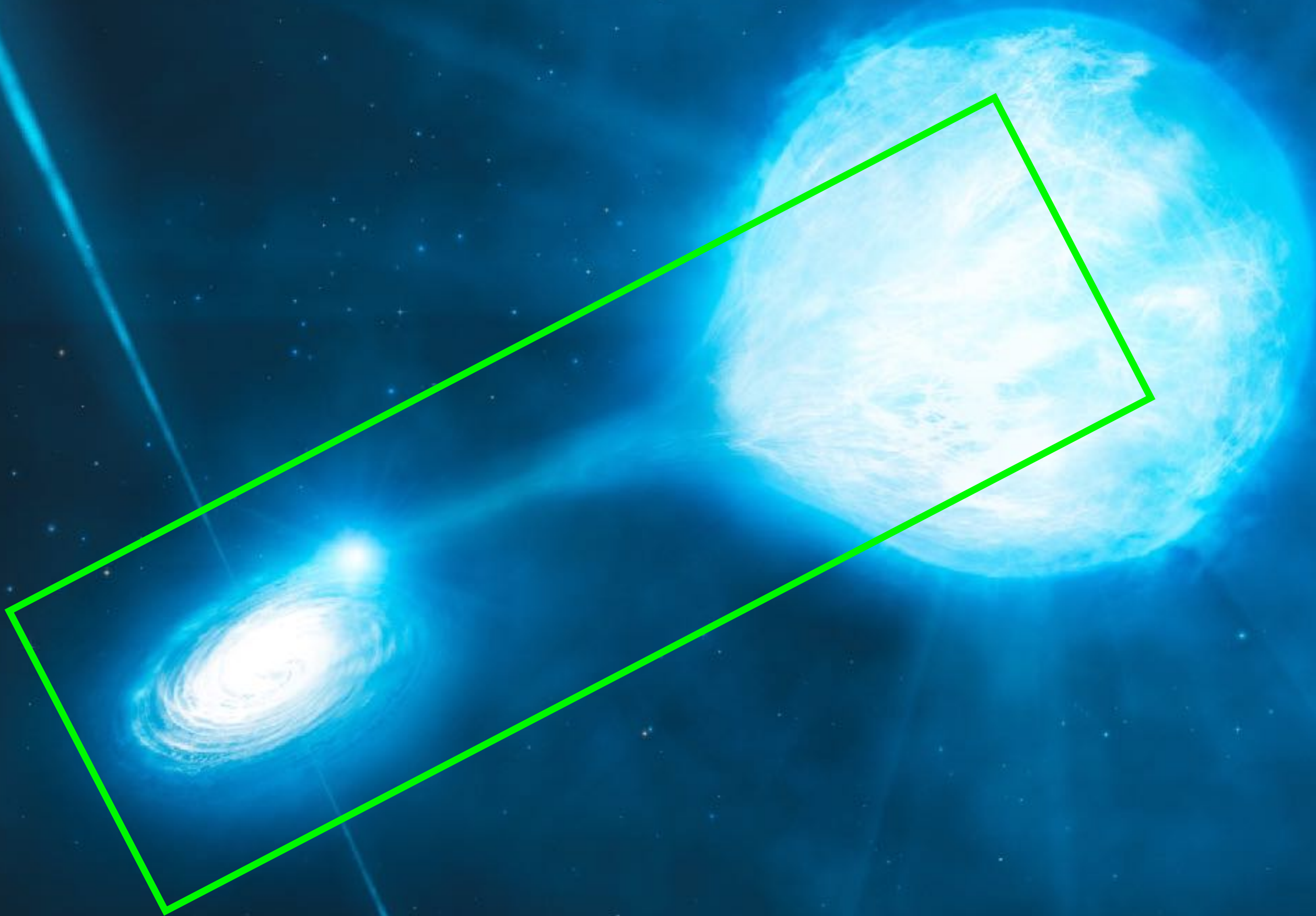
diverse temperature a diversi raggi

intensità dipende dalla velocità (tasso) di accrescimento

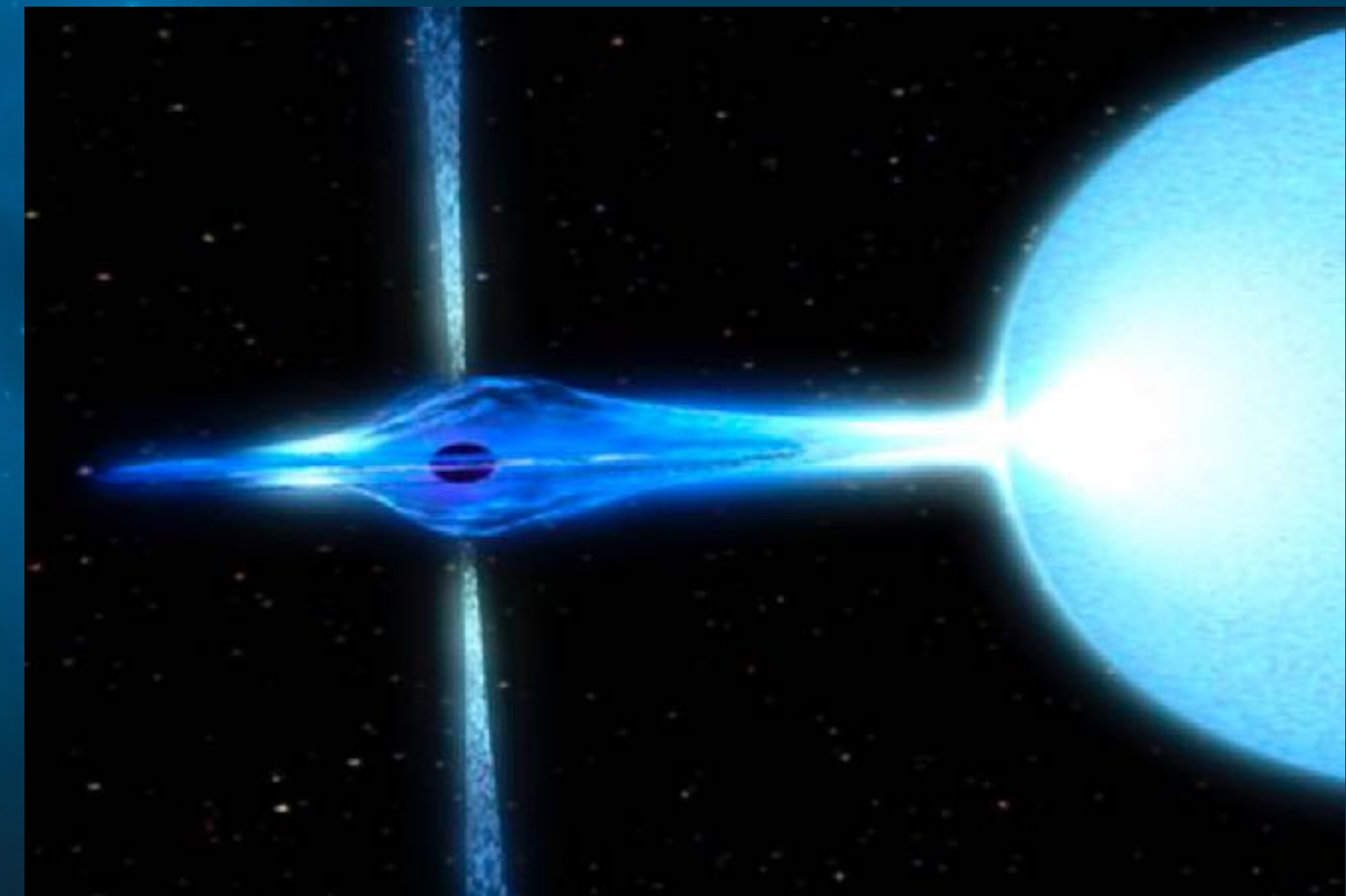
colore dipende soprattutto da massa e accrescimento,
ma soprattutto dalla massa



vicino al buco nero, può esserci un getto che si muove a velocità relativistiche



come si forma e si accelera il getto?
questione ancora irrisolta...



BUCHI NERI STELLARI: COSA OSSERVIAMO?

binaria X = stella massiccia + BH attivo



Osserviamo:

- ▶ radiazione **termica** dalla materia densa che cade verso il buco nero lungo il **disco di accrescimento**
- ▶ radiazione **collimata** emessa dagli elettroni che formano il **getto relativistico**

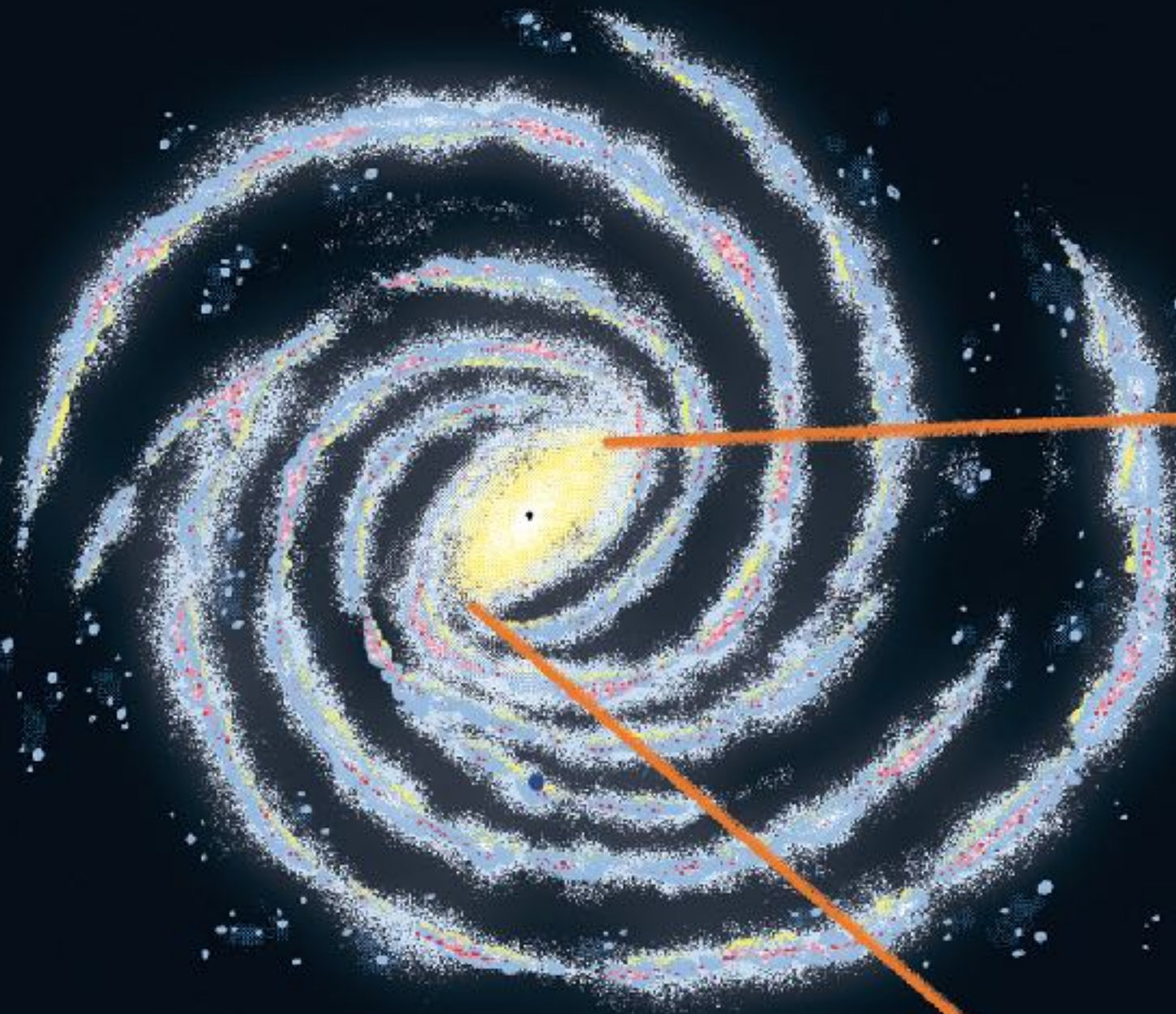
BUCHI NERI SUPERMASSICCI

$$M \sim 10^6 - 10^{10} M_{\text{Sole}}$$

presenti al centro di ogni galassia

alcuni sono **attivi**,
ovvero si pensa che stiano
accrescendo materia


la maggior parte è **quiescente**



BUCHI NERI SUPERMASSICCI

grandi incognite sul **meccanismo di formazione:**

collasso diretto di una grande quantità di materia?

fusione di più buchi neri meno massicci?  dimostrato dalla rivelazione di onde gravitazionali

devono arrivare a un $10^6 - 10^9$ masse solari!

BUCHI NERI SUPERMASSICCI

qualche certezza in più sul **ciclo evolutivo**?

alternanza di fasi attive e quiescenti

o prima attivo e poi in quiete?

ovvero:

esaurisce subito il gas circostante o lo ingloba
a intermittenza?

BUCHI NERI SUPERMASSICCI

maggior parte dei BH supermassicci è in quiete

+

osserviamo solo le emissioni del gas molto vicino, non direttamente il BH



come osserviamo i BH quiescenti?

BUCHI NERI SUPERMASSICCI: COSA OSSERVIAMO?

la materia non è abbastanza vicina da essere scaldata
fino ad emettere radiazione



comunque influenzata dalla presenza del BH
nel suo moto

analizzando il **moto di stelle e gas**, possiamo studiare un buco nero supermassiccio quiescente

Andrea Ghez

Premio Nobel per la Fisica 2020
con R. Genzel e R. Penrose



BUCHI NERI SUPERMASSICCI: COSA OSSERVIAMO?

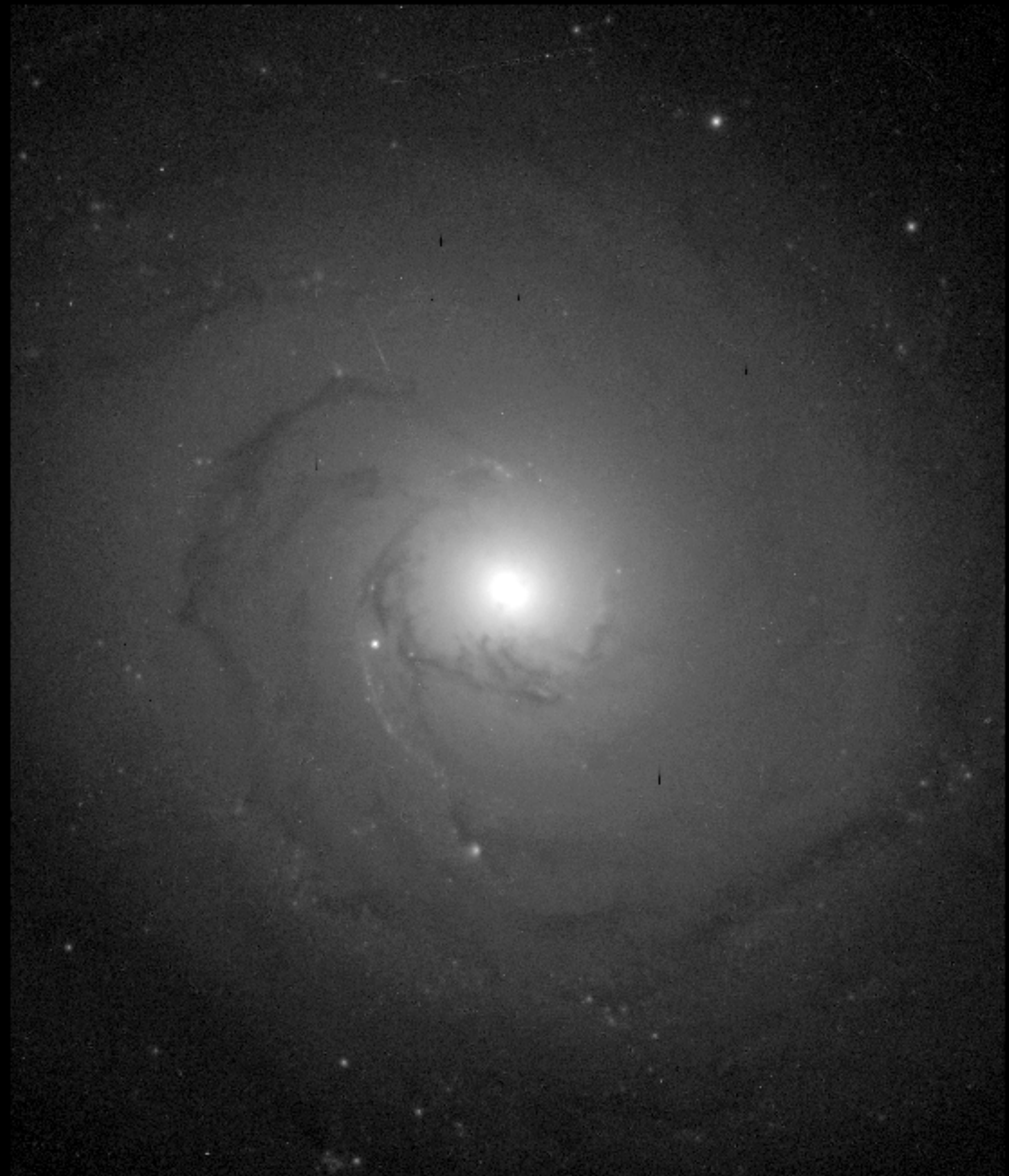
SMBH quiescente circondato da gas e stelle



Osserviamo:

▶ la materia intorno al buco nero e il suo moto, per tracciare il suo potenziale gravitazionale

nucleo galattico attivo



BUCHI NERI SUPERMASSICCI ATTIVI

~1-10% delle galassie presenta una luminosità in eccesso in corrispondenza del nucleo

nucleo galattico attivo (AGN)



luminosità è troppa per essere emessa da reazioni nucleari

$L_{\text{galassia}} \sim 10^{11} L_{\text{Sole}}$

$L_{\text{AGN}} \sim 10^{13} L_{\text{Sole}}$



BUCHI NERI SUPERMASSICCI ATTIVI

reazioni nucleari: efficienza dello 0.7%

*viene trasformato in radiazione
lo 0.7% della massa*

l'area in cui viene prodotta la luminosità è troppo piccola per contenere la massa necessaria

c'è bisogno di un nuovo meccanismo di emissione:

luminosità da **disco di accrescimento** intorno a un buco nero supermassiccio

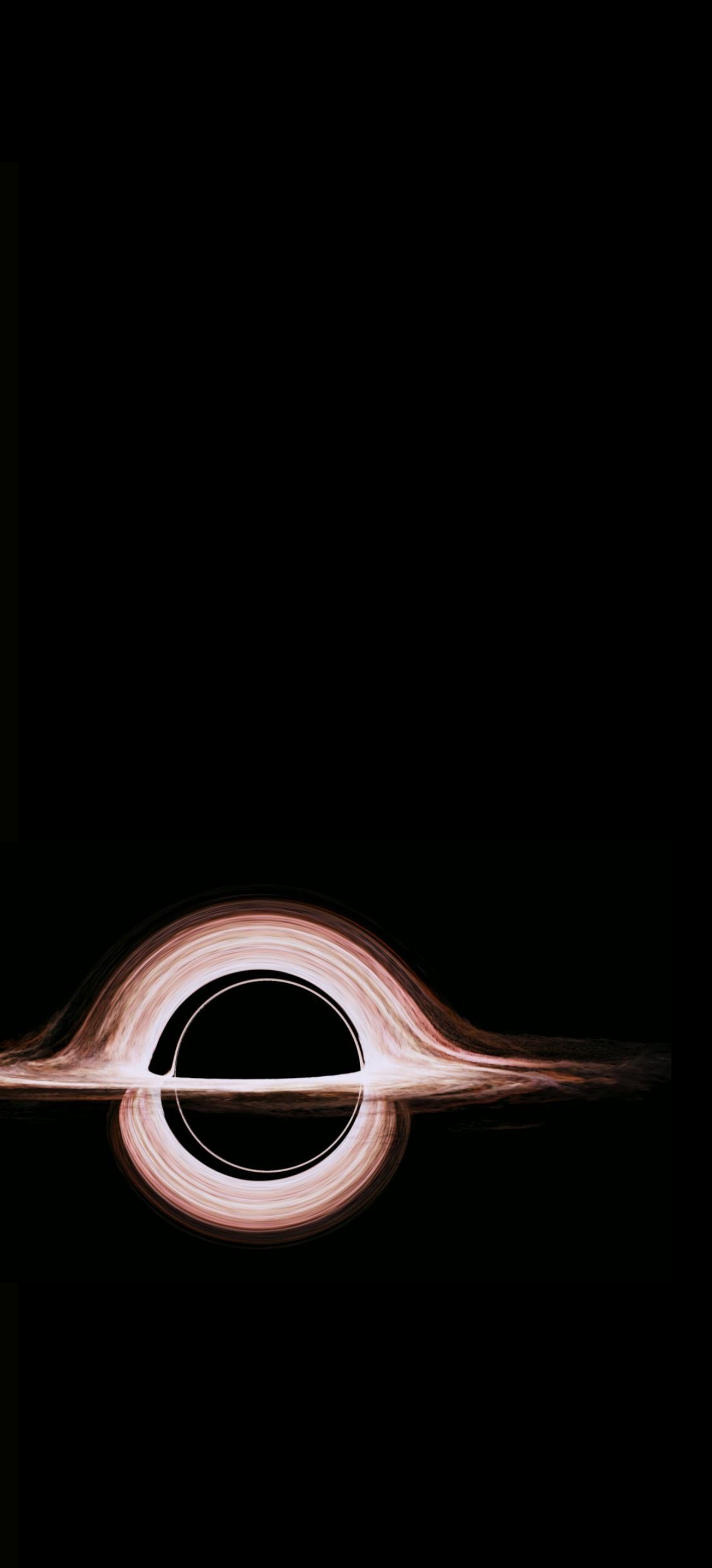
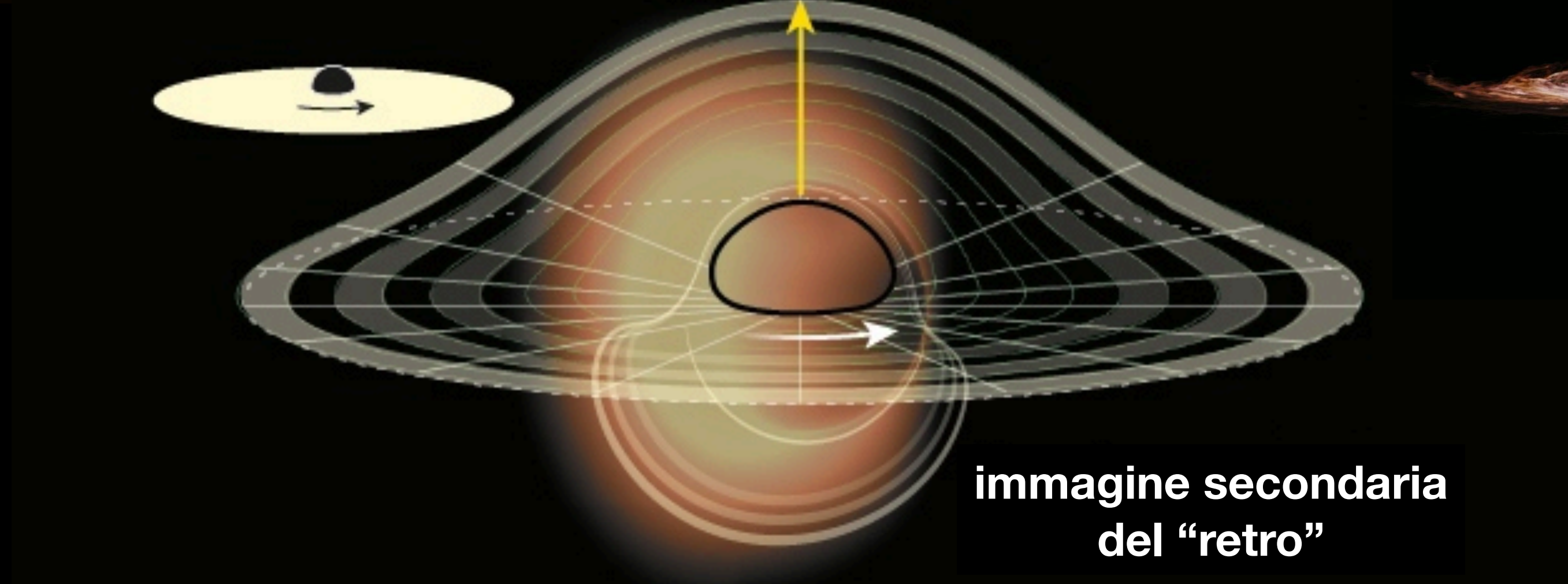
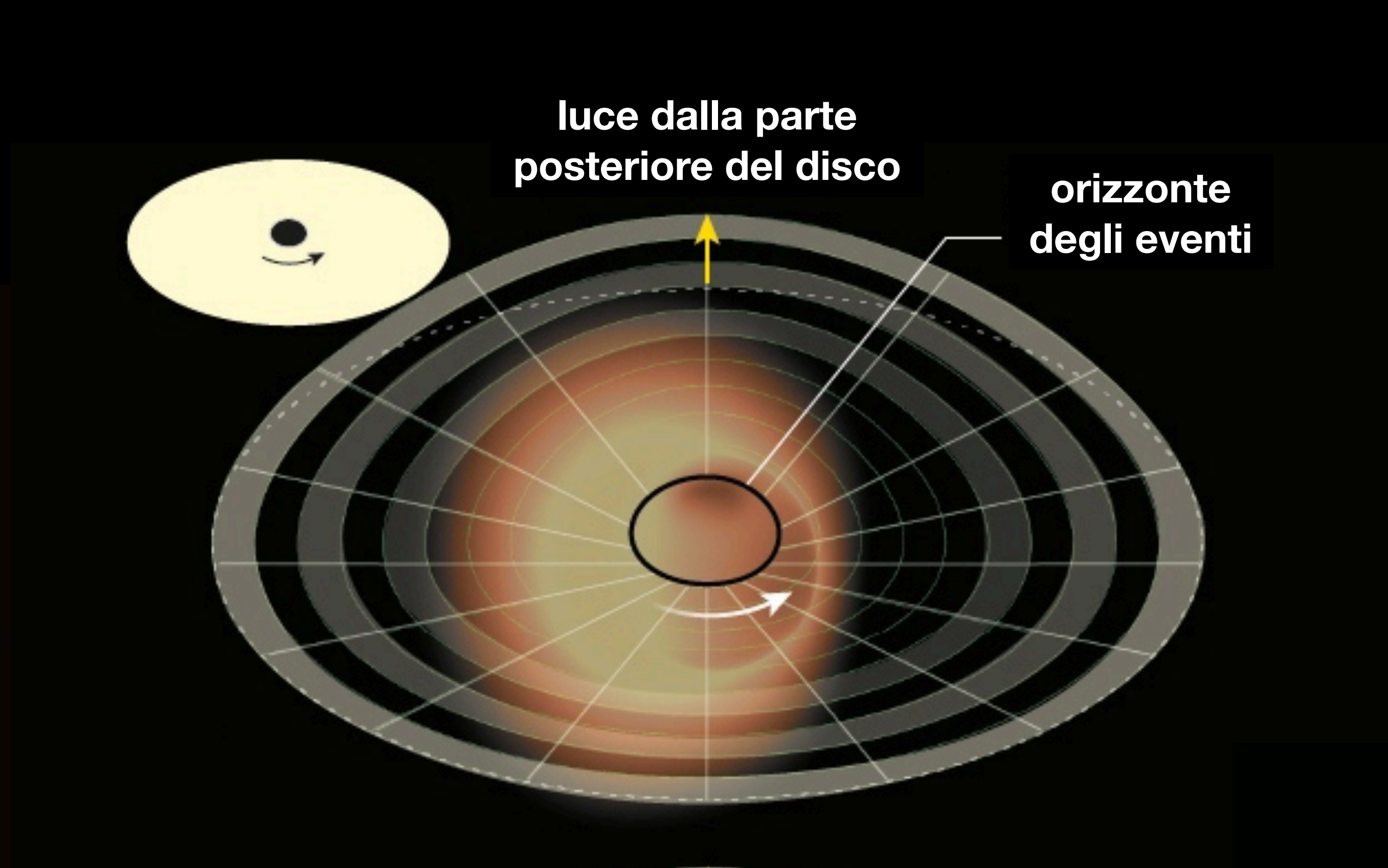
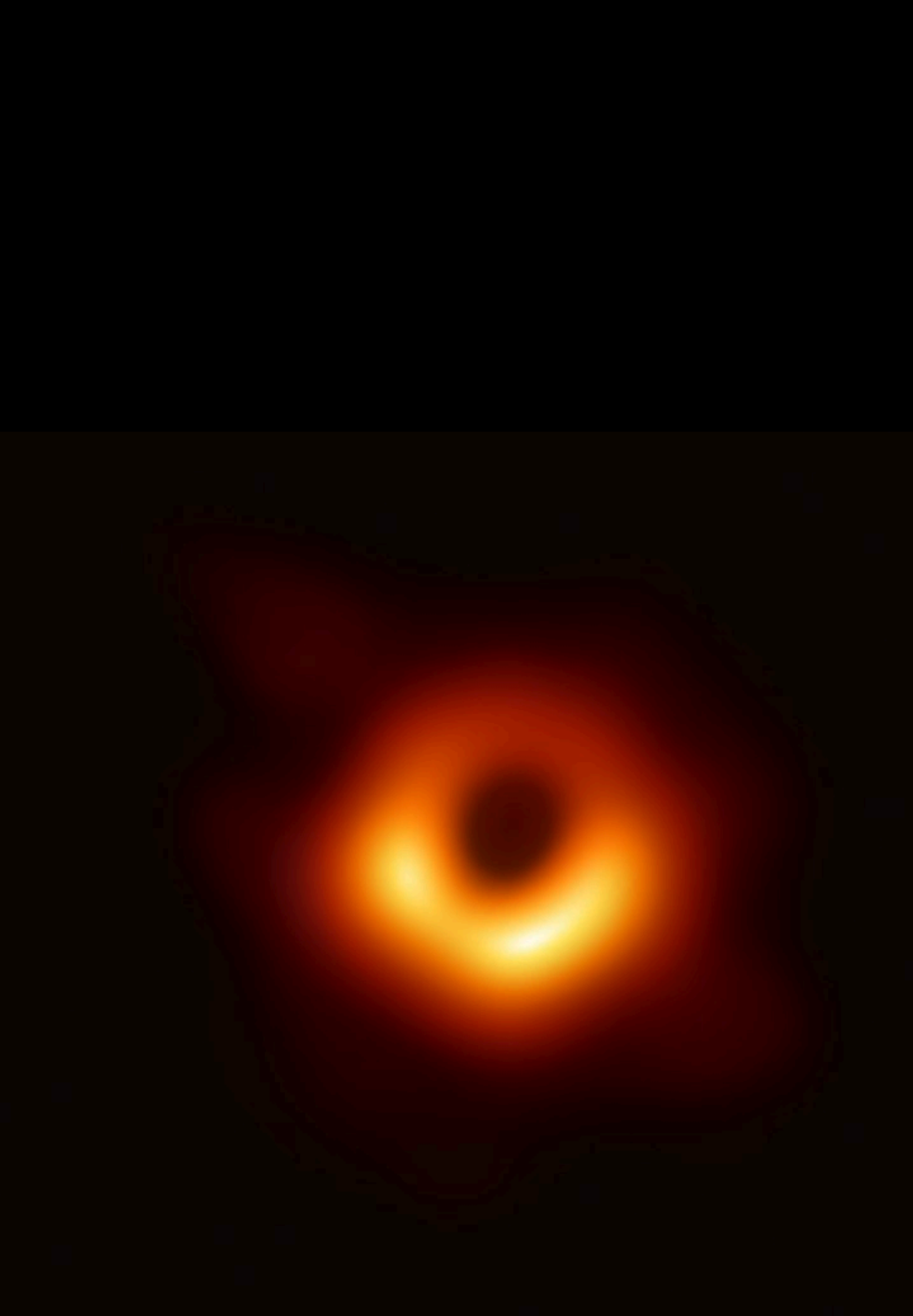


M87, galassia ellittica gigante, domina l'ammasso di galassie della Vergine

Aprile 2019 — pubblicata la prima fotografia di un buco nero: M87*



massa: circa 6.000.000.000 masse solari
immagine in luce radio



Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes



2017 OBSERVATIONS

ALMA



Atacama Large Millimeter/
submillimeter Array
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE

APEX



Atacama Pathfinder EXperiment
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE

30-M



IRAM 30-M Telescope
PICO VELETA, SPAIN

JCMT



James Clerk Maxwell Telescope
MAUNAKEA, HAWAII

LMT



Large Millimeter Telescope
SIERRA NEGRA, MEXICO

SMA



Submillimeter Array
MAUNAKEA, HAWAII

SMT



Submillimeter Telescope
MOUNT GRAHAM, ARIZONA

SPT



South Pole Telescope
SOUTH POLE STATION

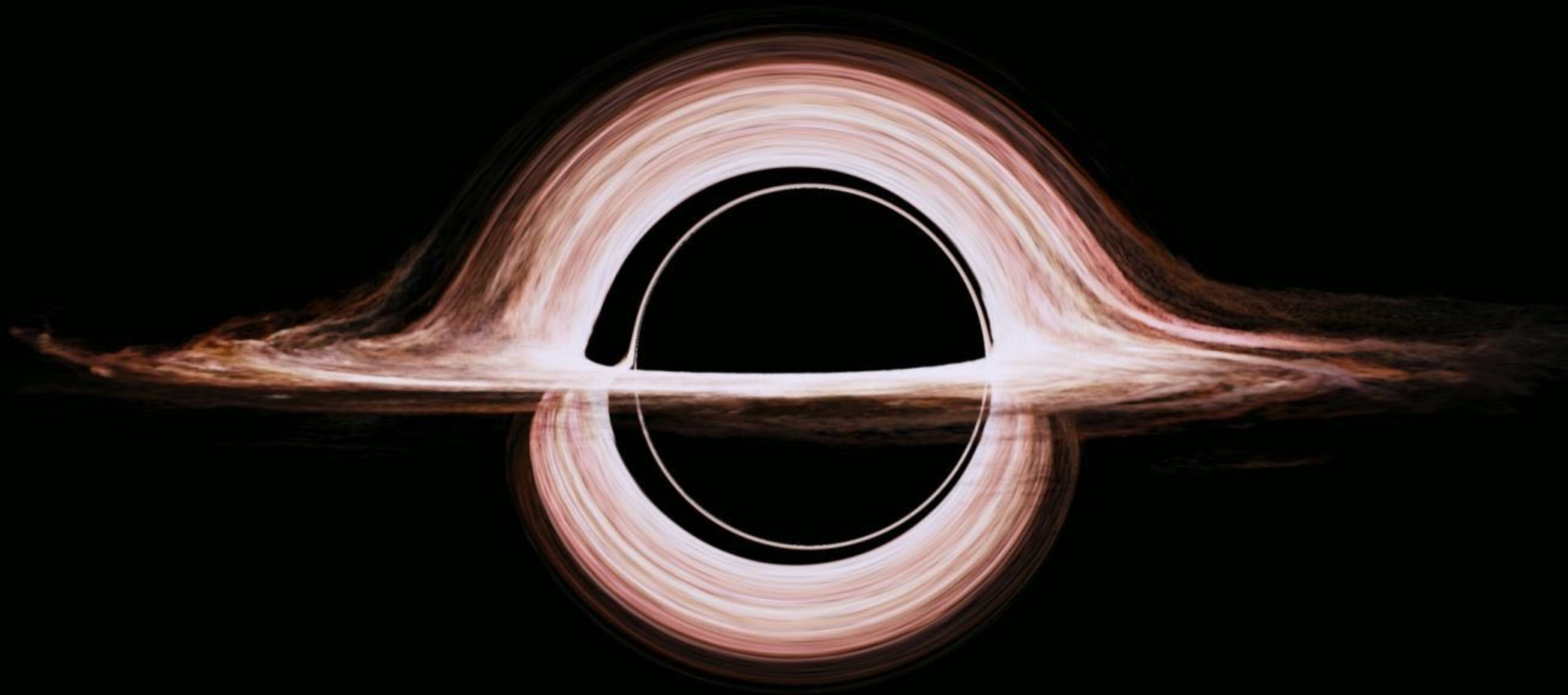


BUCHI NERI SUPERMASSICCI ATTIVI: COSA OSSERVIAMO?

SMBH attivo è circondato da materia densa e calda

Osserviamo:

- ▶ emissioni molto intense, più luminose della galassia ospite, dovute al moto della materia che cade verso il buco nero



REALISTICAMENTE?

intensità della luce
=
velocità di accrescimento

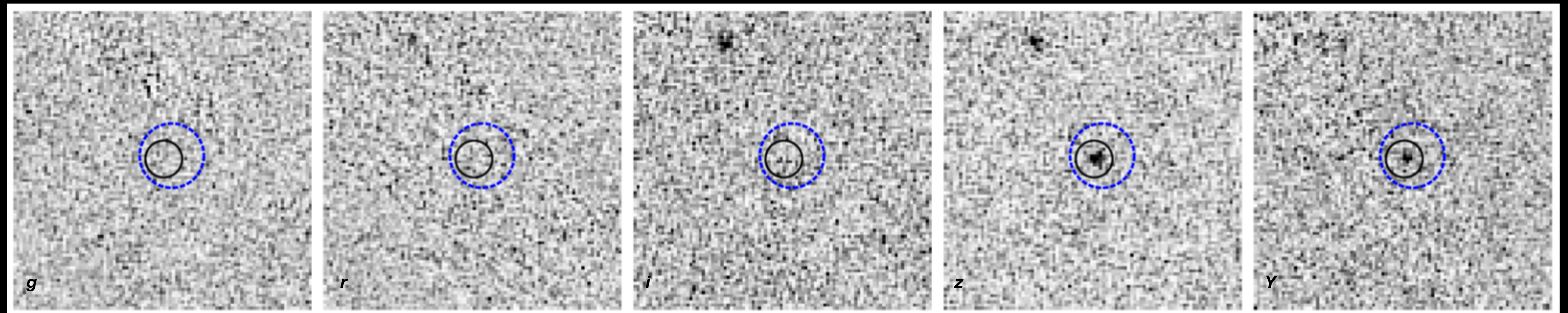
colore
=
**massa del buco nero
accrescimento estremo**

REALISTICAMENTE?

intensità della luce
=
velocità di accrescimento

colore
=
massa del buco nero
accrescimento estremo

Pan-STARRS PS1



REALISTICAMENTE?