Galassie e lenti gravitazionali

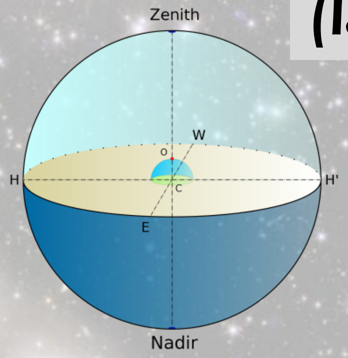
OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI CAPODIMONTE

INAF ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA

Crescenzo Tortora

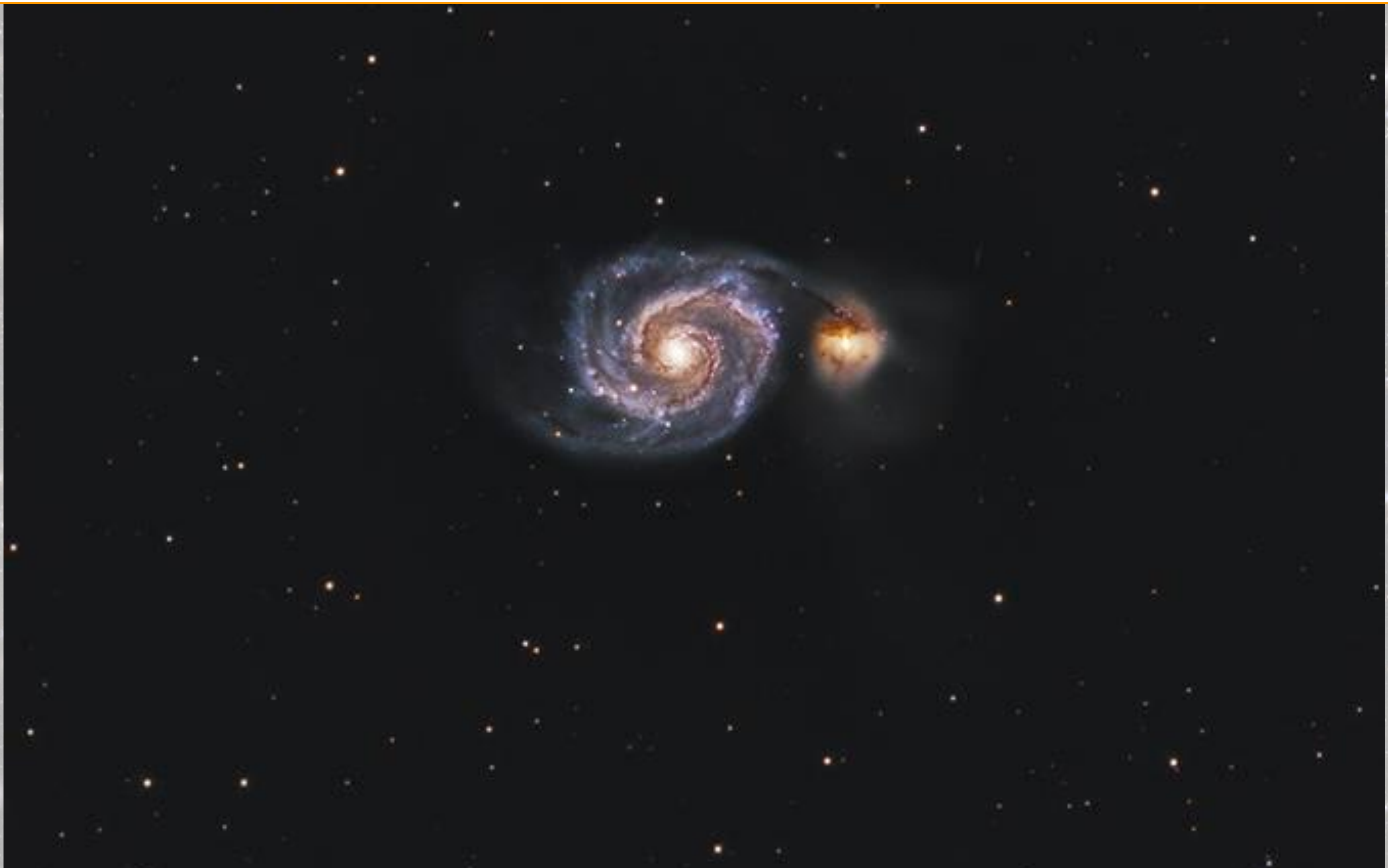
Glossario

Velocità della luce:	300 000 km/s (nel vuoto)
Anno luce:	Distanza percorsa dalla luce in 1 anno (la luce del Sole arriva in poco più di 8 minuti)
Massa solare:	2 x 10^{30} kg (valore usato come riferimento)
Secondo d'arco:	3600esima parte del grado (la Luna si estende per circa mezzo grado)



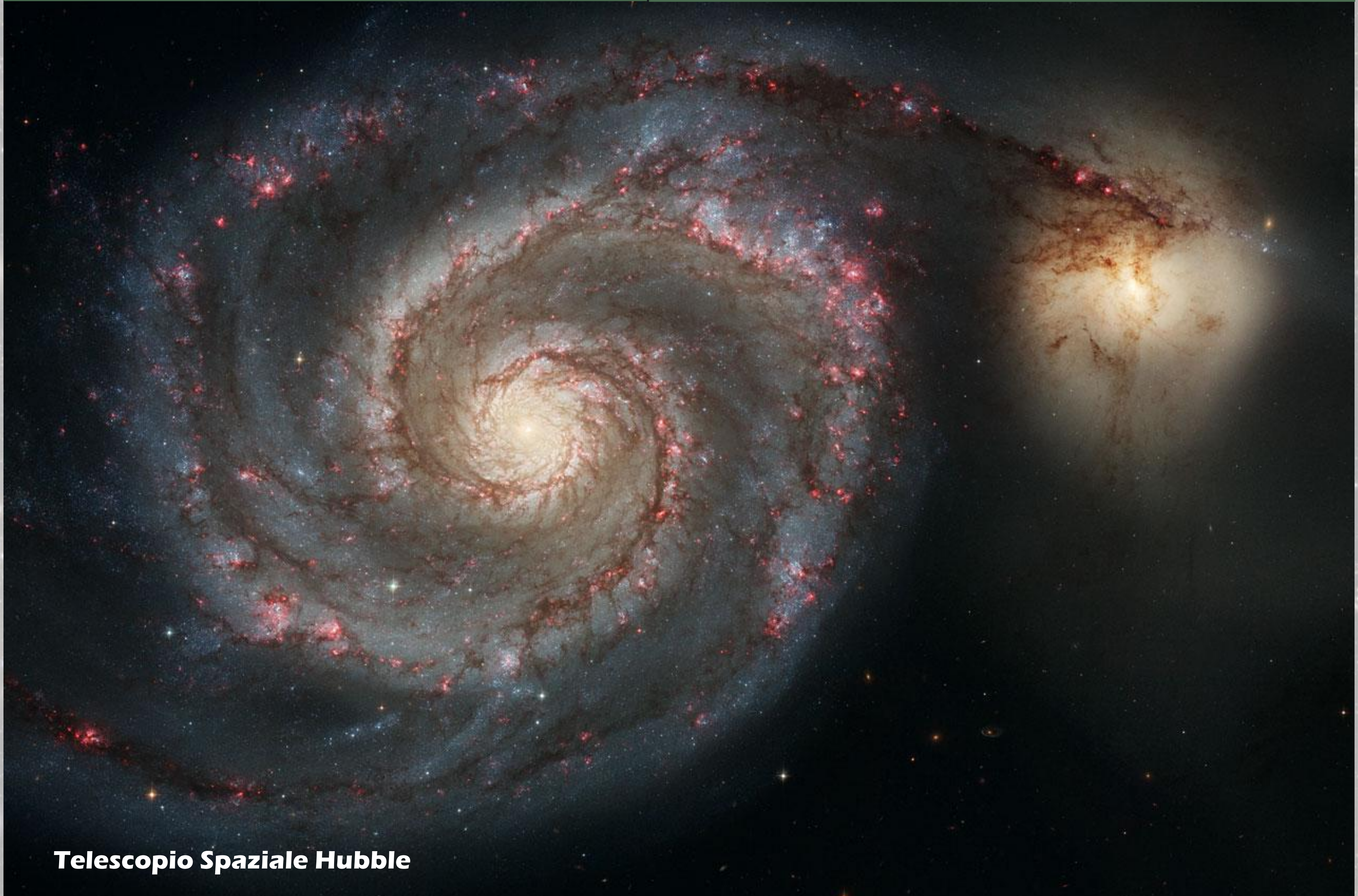
Giochiamo

M51 (Galassia Vortice)



1 Come la racconterei a chi non l'ha vista?

2 Che cosa mi incuriosice e cercherei di scoprire?

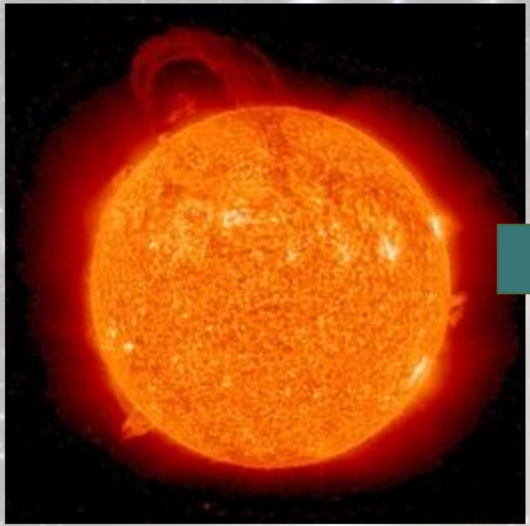


Telescopio Spaziale Hubble

Come sono fatte le galassie?

Da cosa sono composte?

Stelle



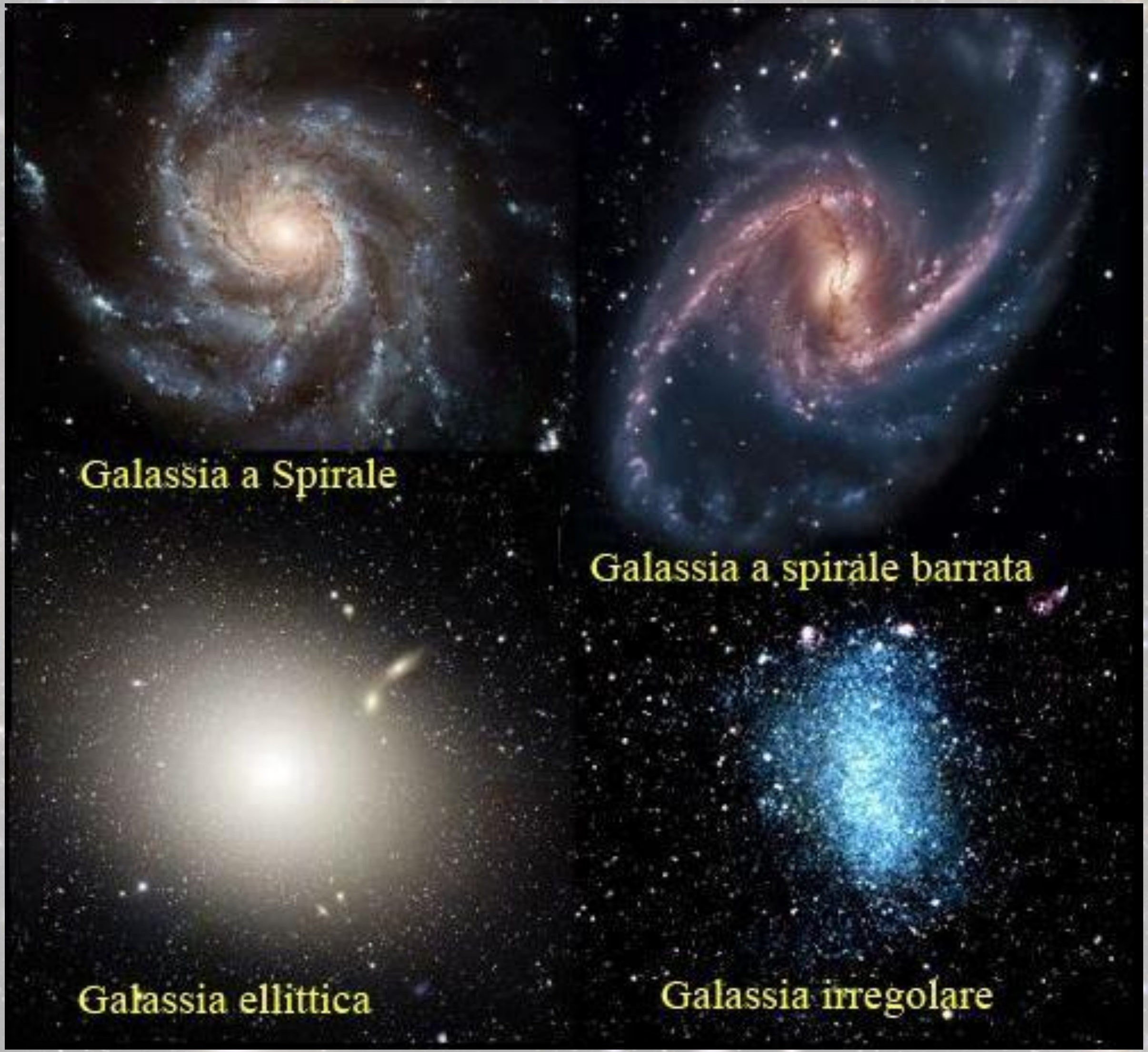
Ammassi di stelle

Gas interstellare

Polveri

Materia Oscura

Forma/struttura

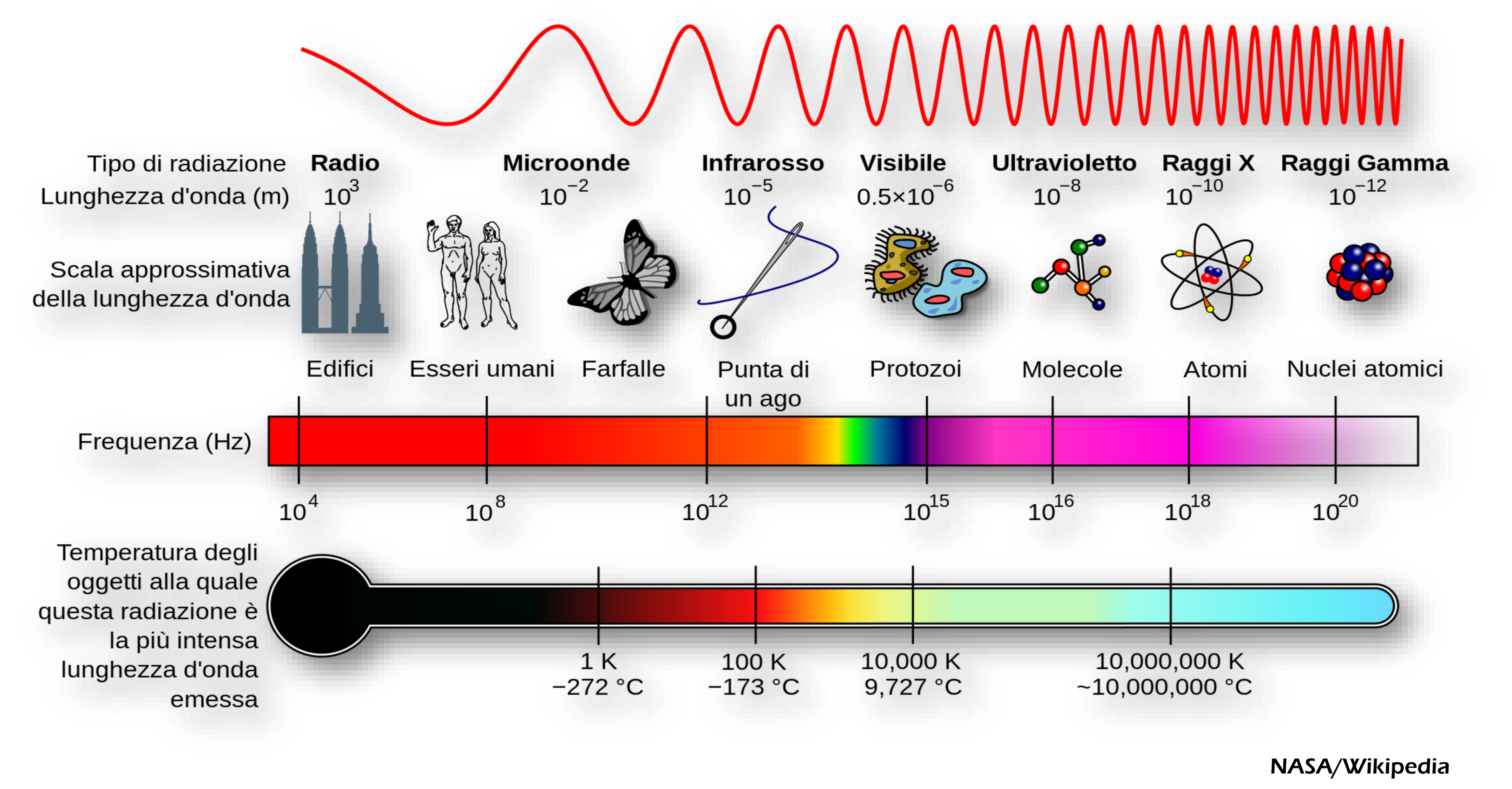

Galassia a Spirale
Galassia a spirale barrata
Galassia ellittica
Galassia irregolare

Dimensioni:
~10000-100000 anni luce

Massa:
~ 1 milione a 1000 miliardi
la massa del Sole

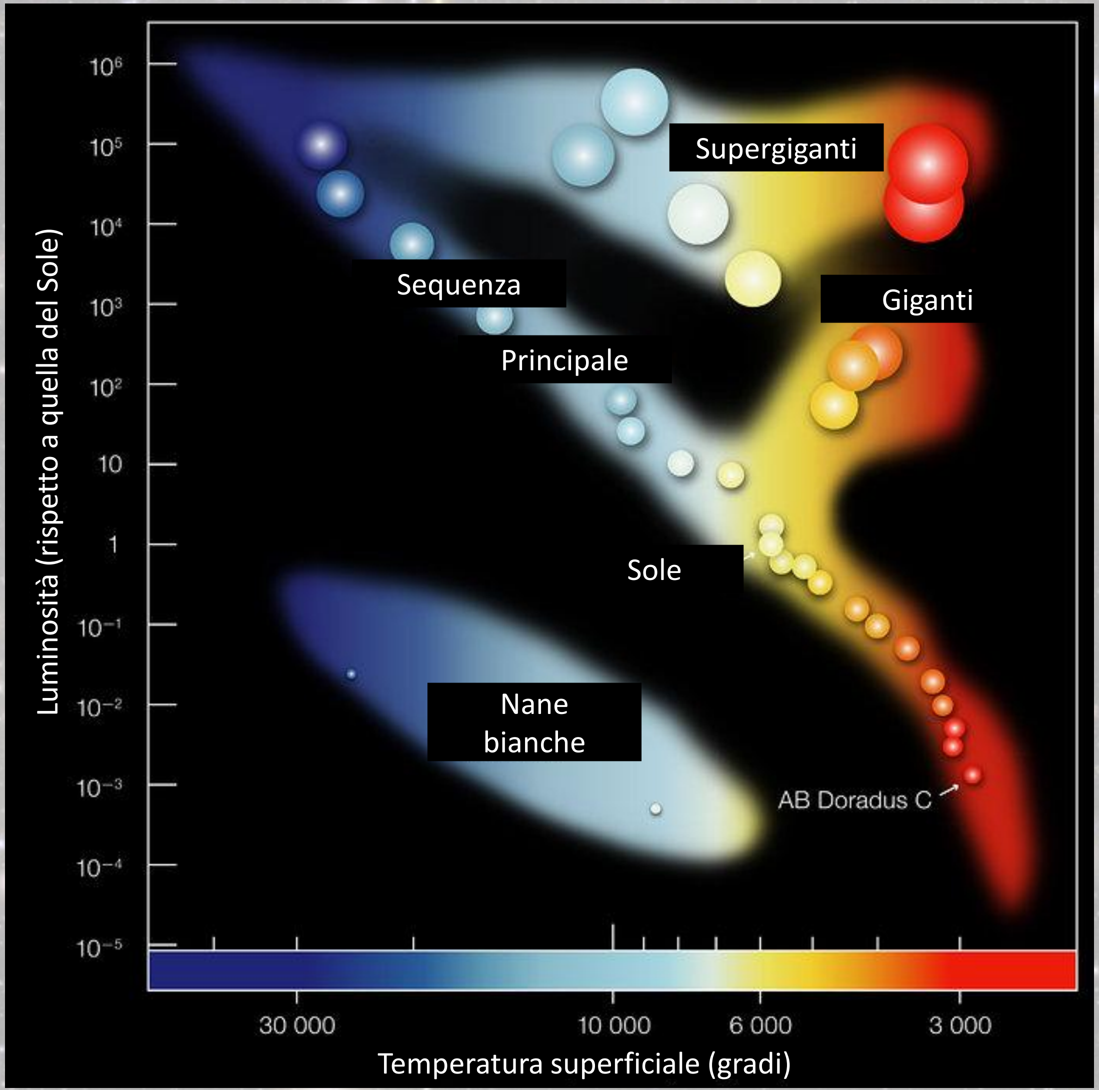
Velocità stelle:
Centinaia di km al secondo

Luce: luminosità e colore - 1


Tipo di radiazione
Lunghezza d'onda (m)
Radio
10^{3}
Microonde
10^{-2}
Infrarosso
10^{-5}
Visibile
0.5×10^{-6}
Ultravioletto
10^{-8}
Raggi X
10^{-10}
Raggi Gamma
10^{-12}
Scala approssimativa della lunghezza d'onda
Edifici
Esseri umani
Farfalle
Punta di un ago
Protozoi
Molecole
Atomi
Nuclei atomici
Frequenza (Hz)
10^{4}
10^{8}
10^{12}
10^{15}
10^{16}
10^{18}
10^{20}
Temperatura degli oggetti alla quale questa radiazione è la più intensa lunghezza d'onda emessa
1 K
−272 °C
100 K
−173 °C
10,000 K
9,727 °C
10,000,000 K
~10,000,000 °C

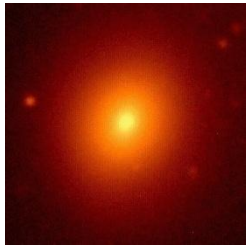
NASA/Wikipedia

Luce: luminosità e colore - 2

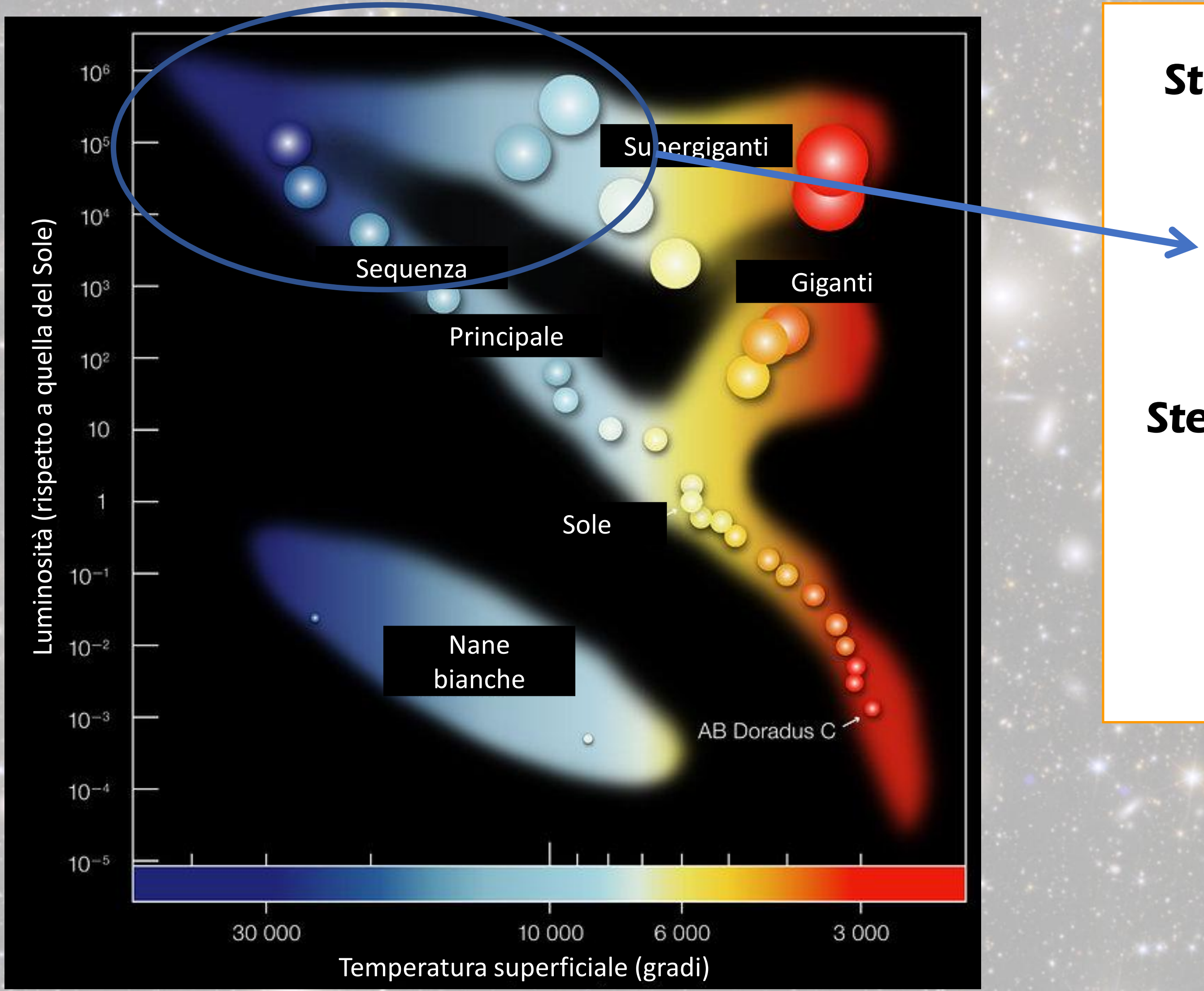


Stelle blu: più giovani

Stelle rosse: più vecchie

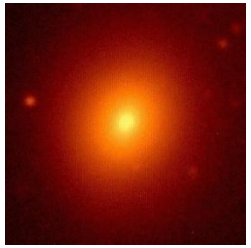


Luce: luminosità e colore - 2

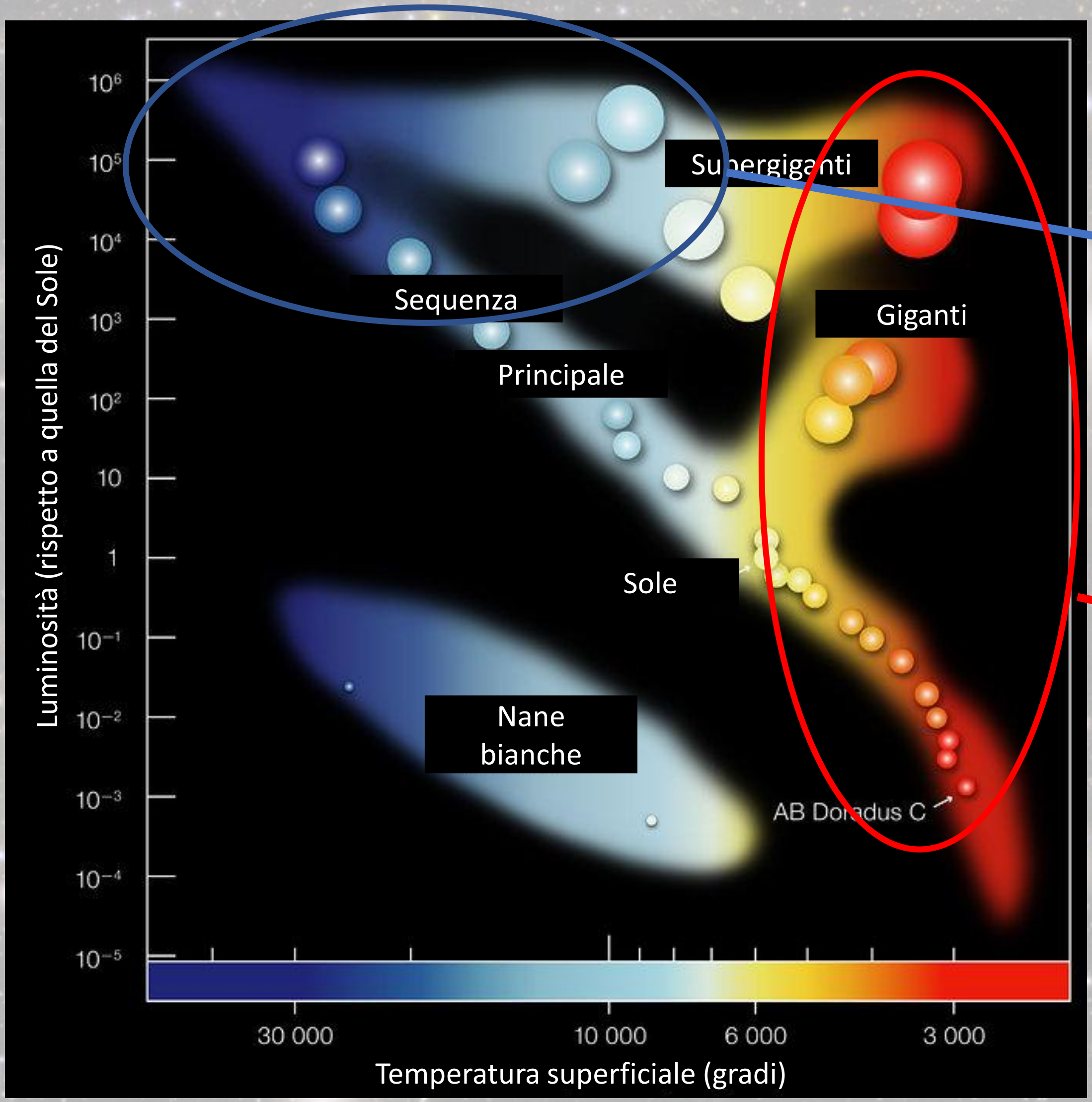


Stelle blu: più giovani

Stelle rosse: più vecchie

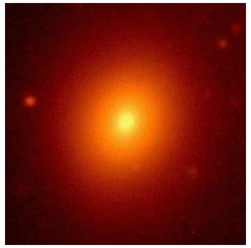


Luce: luminosità e colore - 2

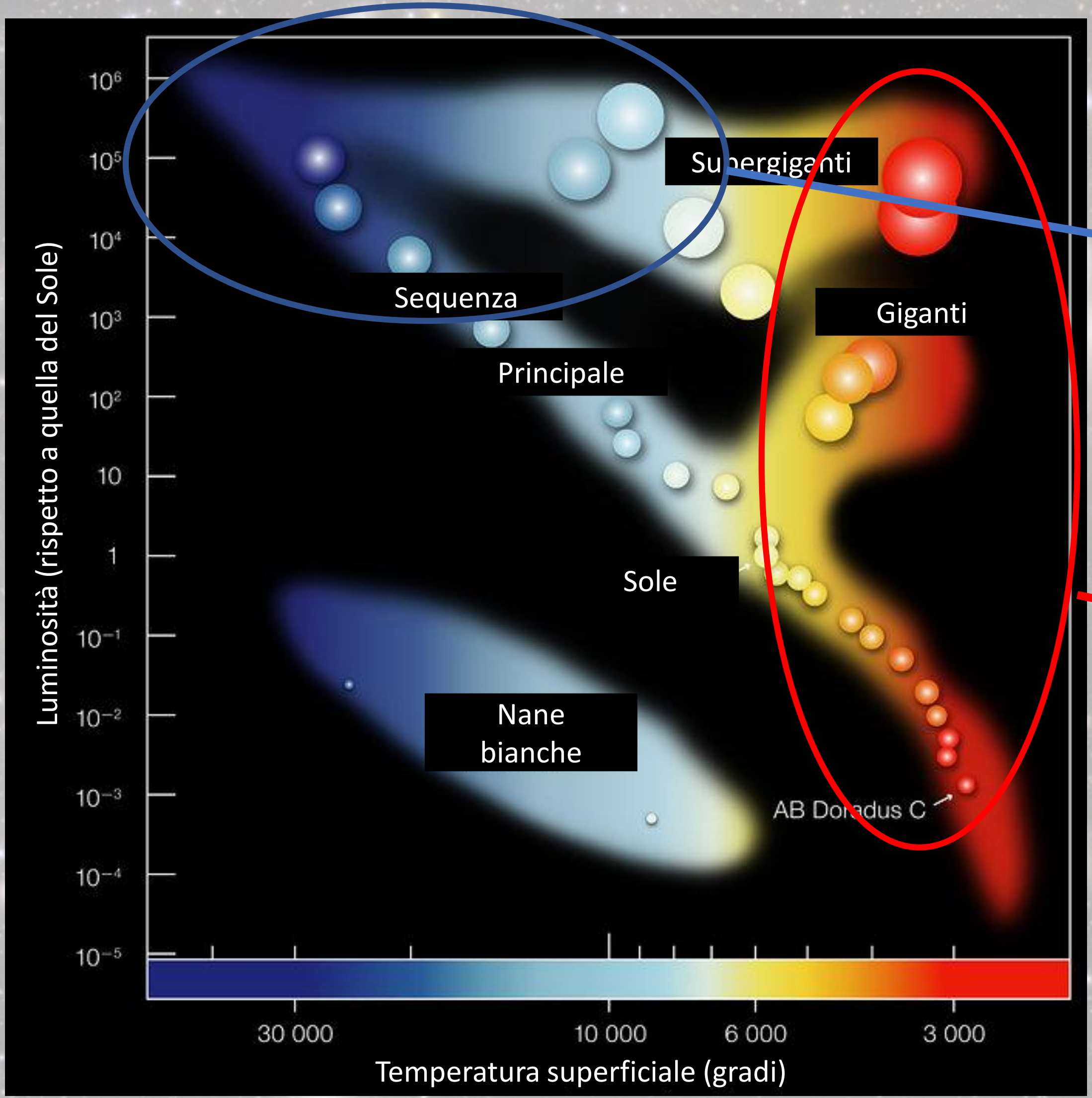


Stelle blu: più giovani

Stelle rosse: più vecchie

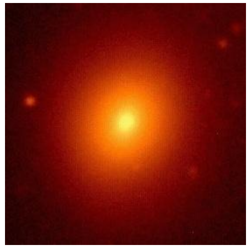


Luce: luminosità e colore - 2



Stelle blu: più giovani

Stelle rosse: più vecchie

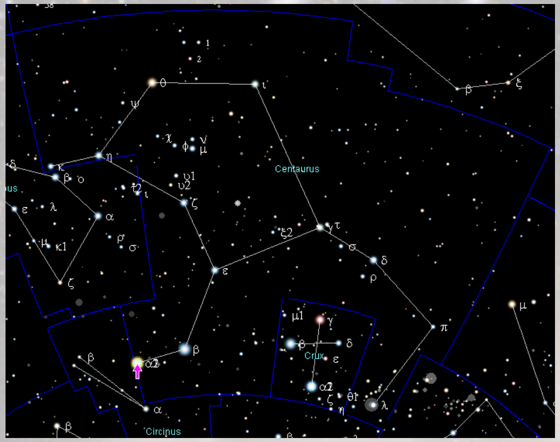


E ci sono molte più stelle nelle parti centrali, e la densità diminuisce andando verso l'esterno

….ma c'è anche il gas che emette luce, come vedremo dopo

Distanza

Alpha Centauri ~ 4.4 a. l.



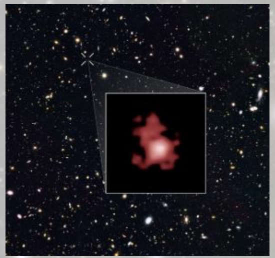
Galassia di Andromeda ~ 2.5 milioni di a.l.

Galassia Vortice ~ 23 milioni di a.l.

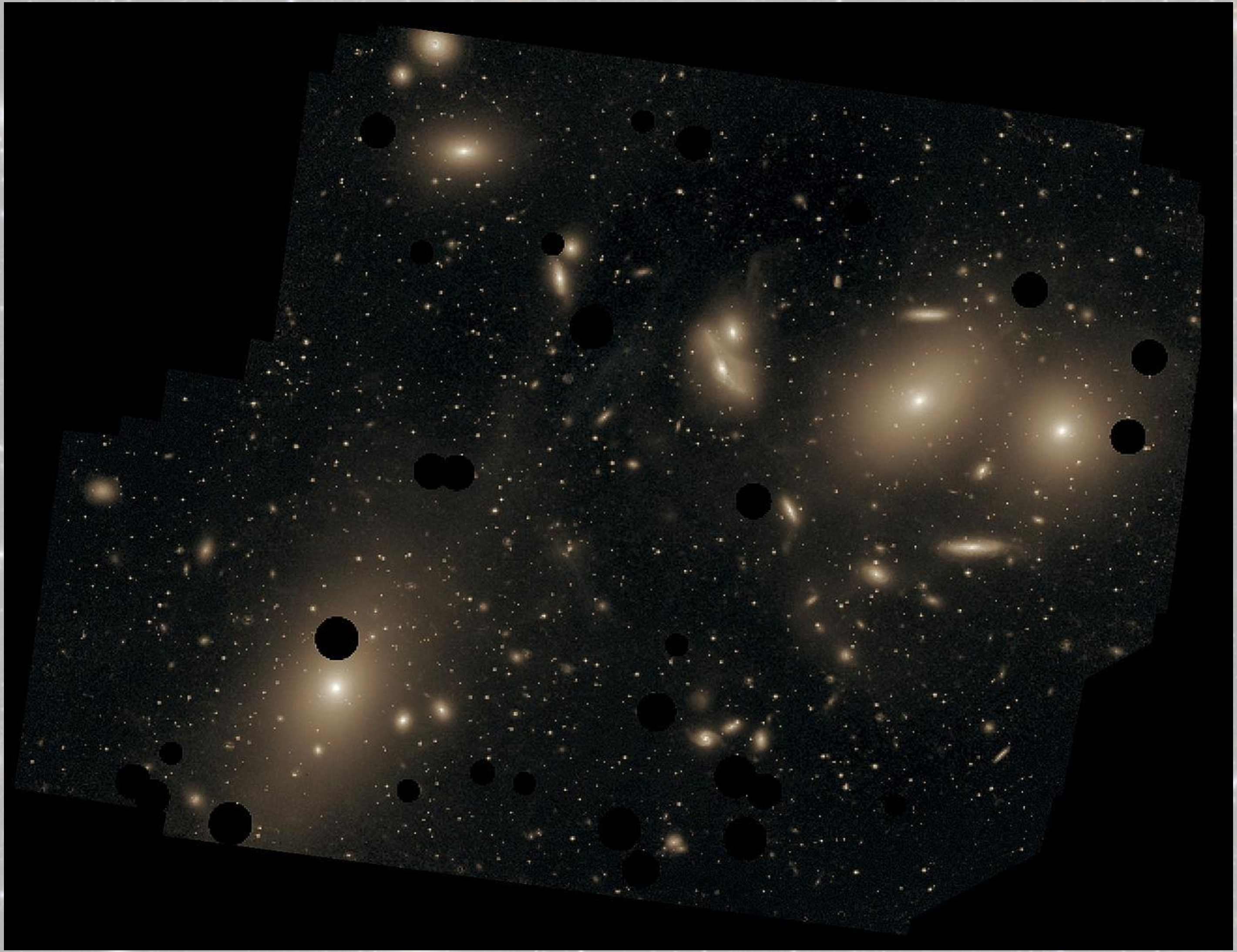
Ammasso della Vergine ~ 65 milioni di a.l.

Dettaglio dell'ammasso della Vergine
Crediti ESO/Digitized Sky Survey 2

GN-z11~ 13.5 miliardi di a.l.



E’ isolata o in compagnia?

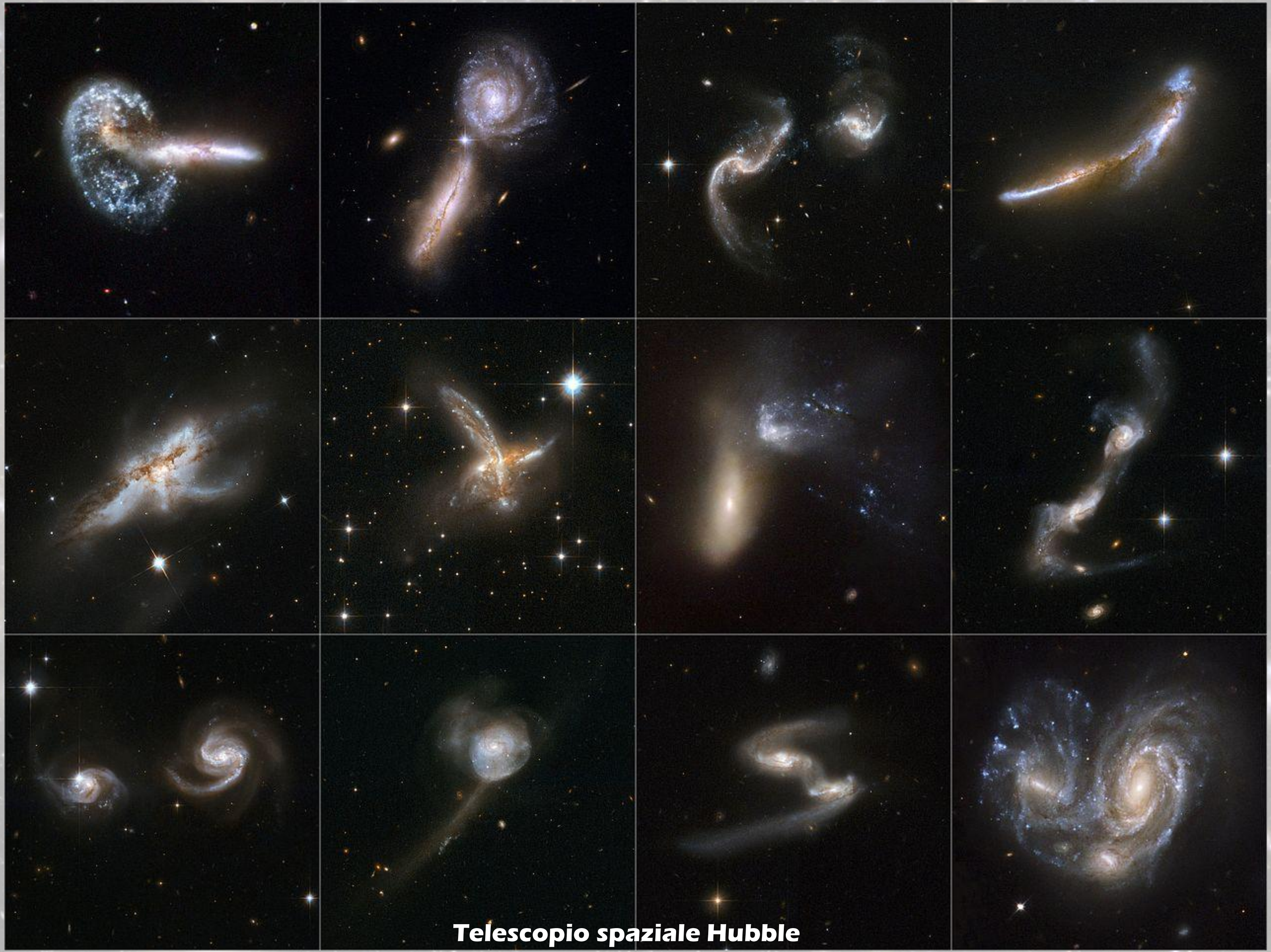


Dimensioni:
~5-10 milioni di a.l.

Massa:
~ 1 milione di miliardi la massa del Sole

Velocità galassie:
Fino a 1000 km al secondo

Interazioni con altre galassie



Telescopio spaziale Hubble

Come osserviamo le galassie?

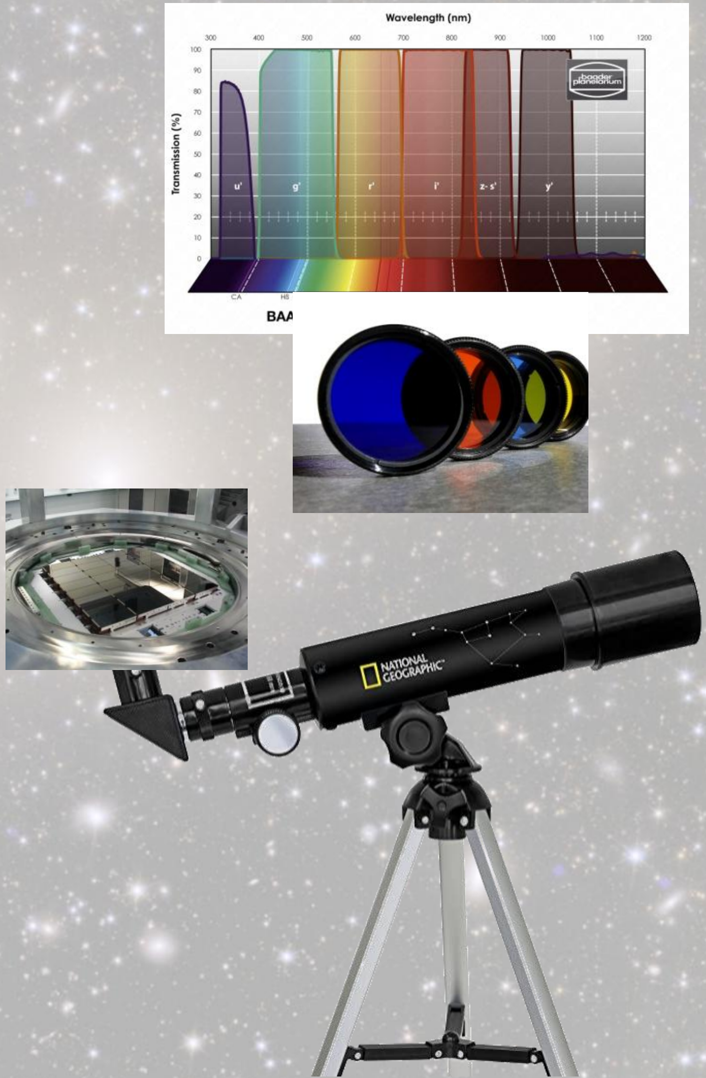
Tanti ingredienti

- Diametro dello specchio primario del telescopio e ottiche
- Elettronica
- Sensore di rilevamento, CCD (scala di pixel)
- Strumenti: immagini (filtri), spettroscopia (spettrografo)
- Lunghezze d'onda
- Campo di vista
- Luogo dove si trova il telescopio (seeing atmosferico)
- Se dedicato a survey specifiche o aperto alla comunità
- ecc. ecc.

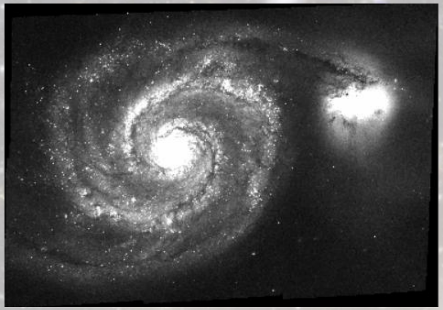
Come otteniamo le immagini?

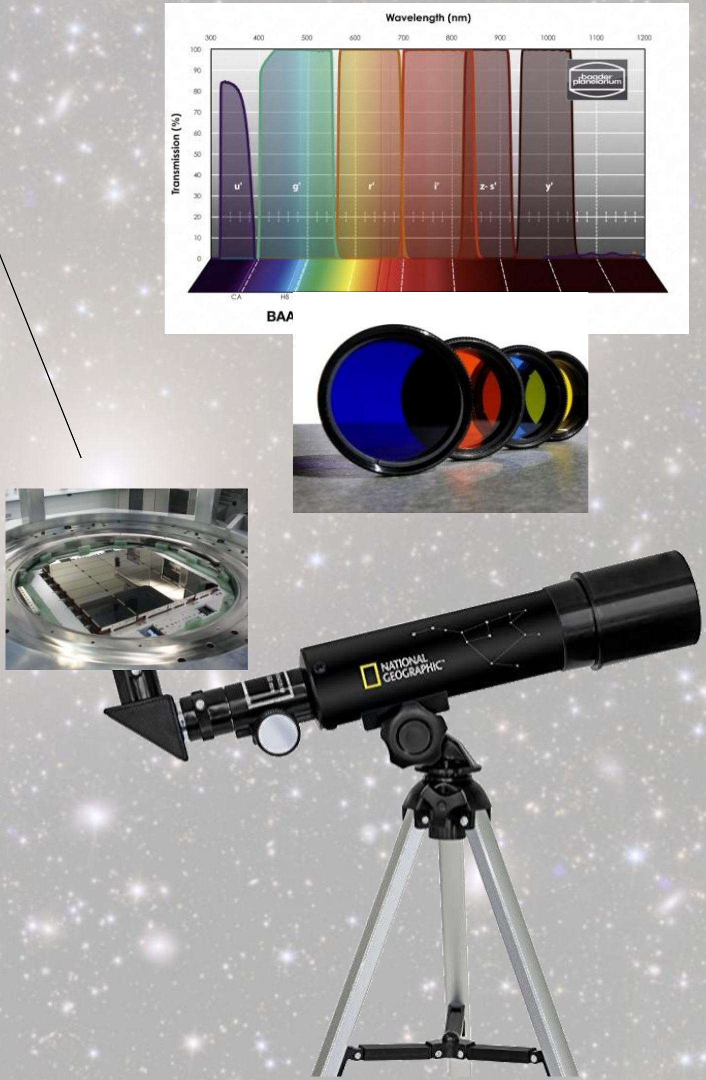
NATIONAL GEOGRAPHIC

Come otteniamo le immagini?

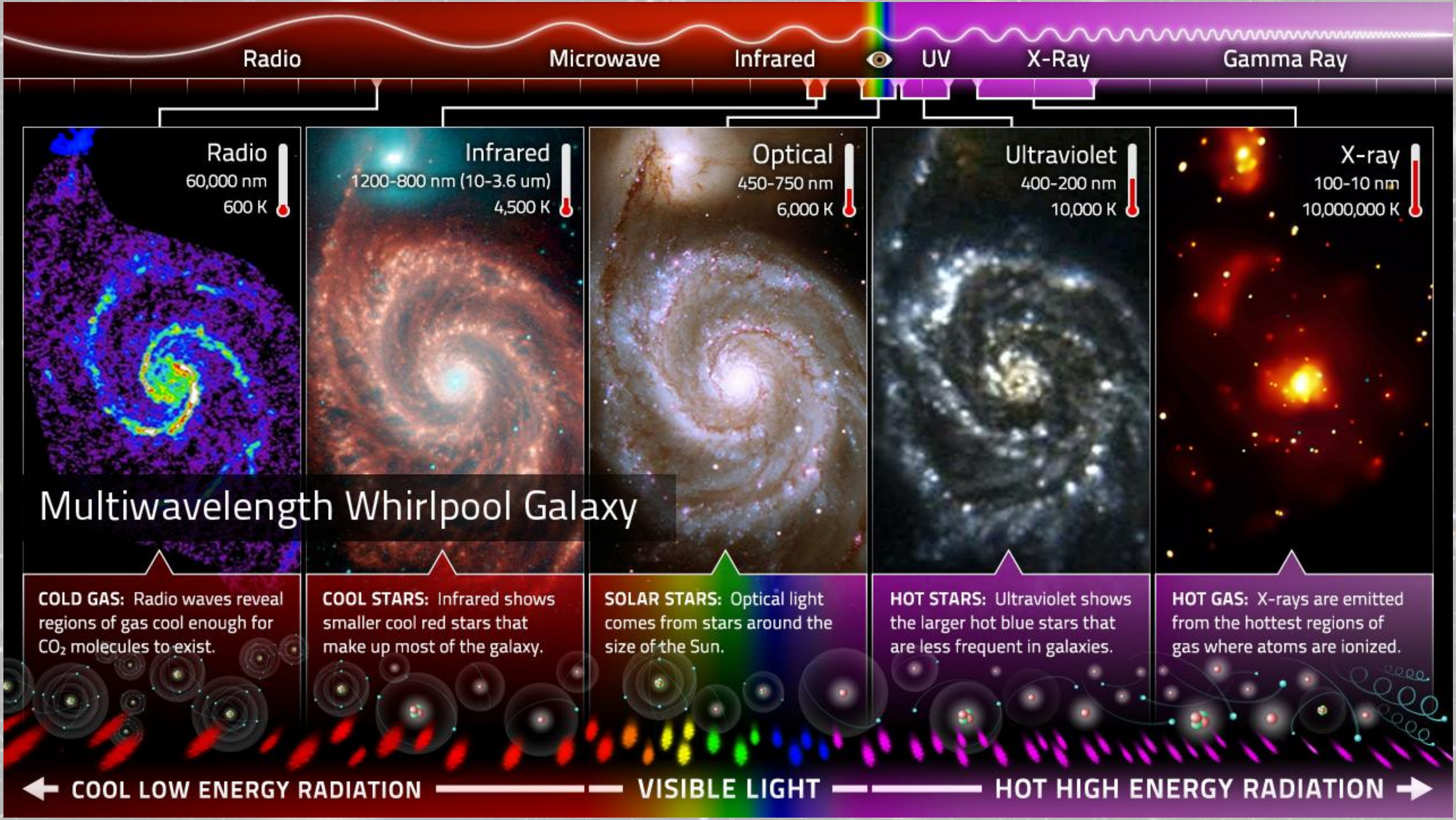

Wavelength (nm)
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
Transmission (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
u'
g'
r'
i'
z-s'
y'
CA
HB
baader planetarium
BAA
NATIONAL GEOGRAPHIC

Come otteniamo le immagini?




Wavelength (nm)
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
Transmission (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
u'
g'
r'
i'
z-s'
y'
baader planetarium
CA
HB
BAA
NATIONAL GEOGRAPHIC

Come otteniamo le immagini?


Radio
Microwave
Infrared
UV
X-Ray
Gamma Ray
Radio
60,000 nm
600 K
Infrared
1200-800 nm (10-3.6 um)
4,500 K
Optical
450-750 nm
6,000 K
Ultraviolet
400-200 nm
10,000 K
X-ray
100-10 nm
10,000,000 K
COOL LOW ENERGY RADIATION
VISIBLE LIGHT
HOT HIGH ENERGY RADIATION

Multiwavelength Whirlpool Galaxy

COLD GAS: Radio waves reveal regions of gas cool enough for CO_2 molecules to exist.

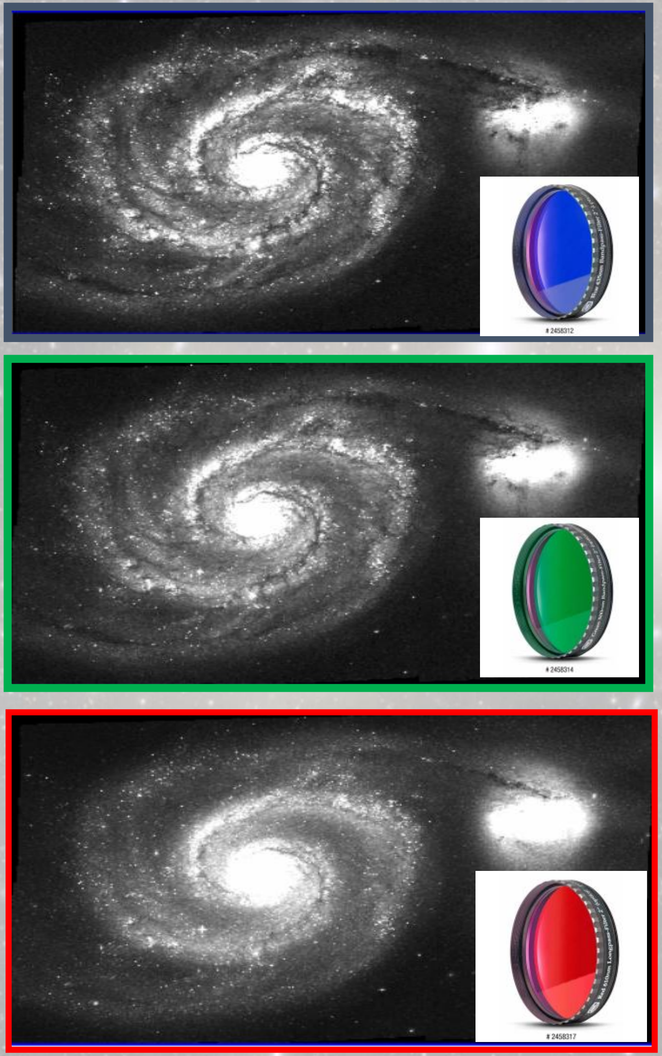
COOL STARS: Infrared shows smaller cool red stars that make up most of the galaxy.

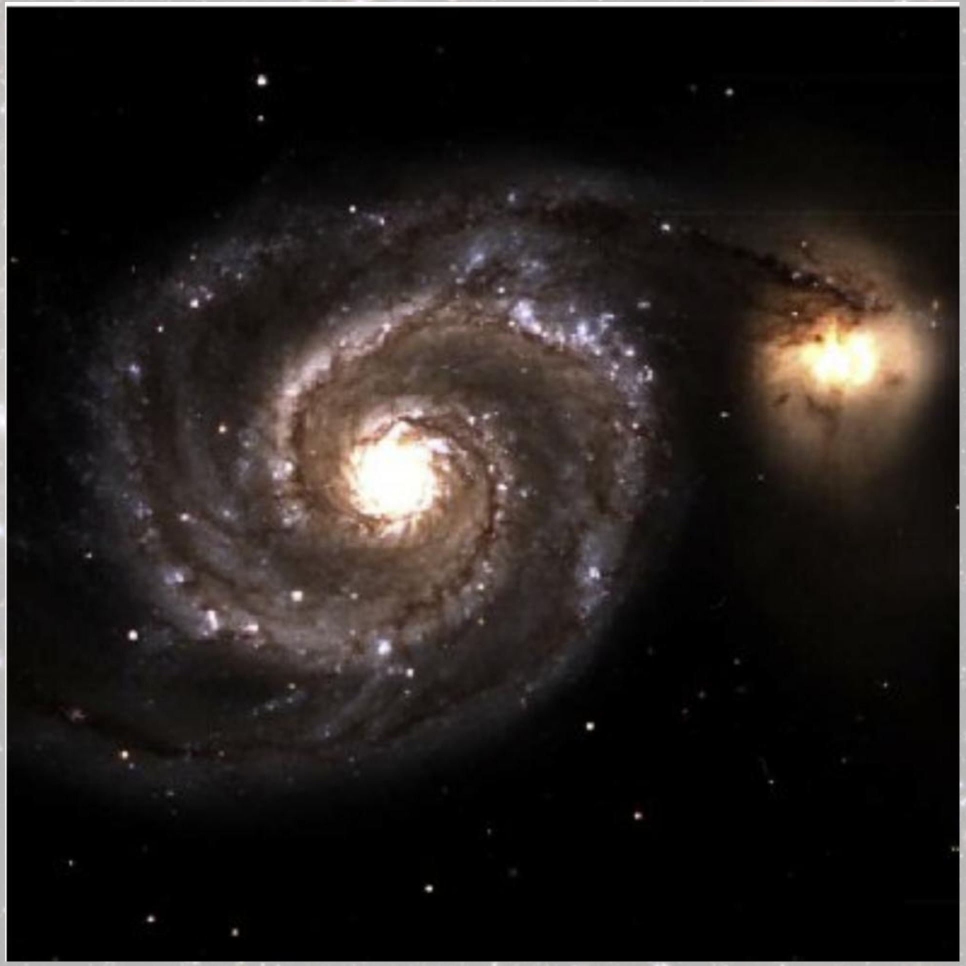
SOLAR STARS: Optical light comes from stars around the size of the Sun.

HOT STARS: Ultraviolet shows the larger hot blue stars that are less frequent in galaxies.

HOT GAS: X-rays are emitted from the hottest regions of gas where atoms are ionized.

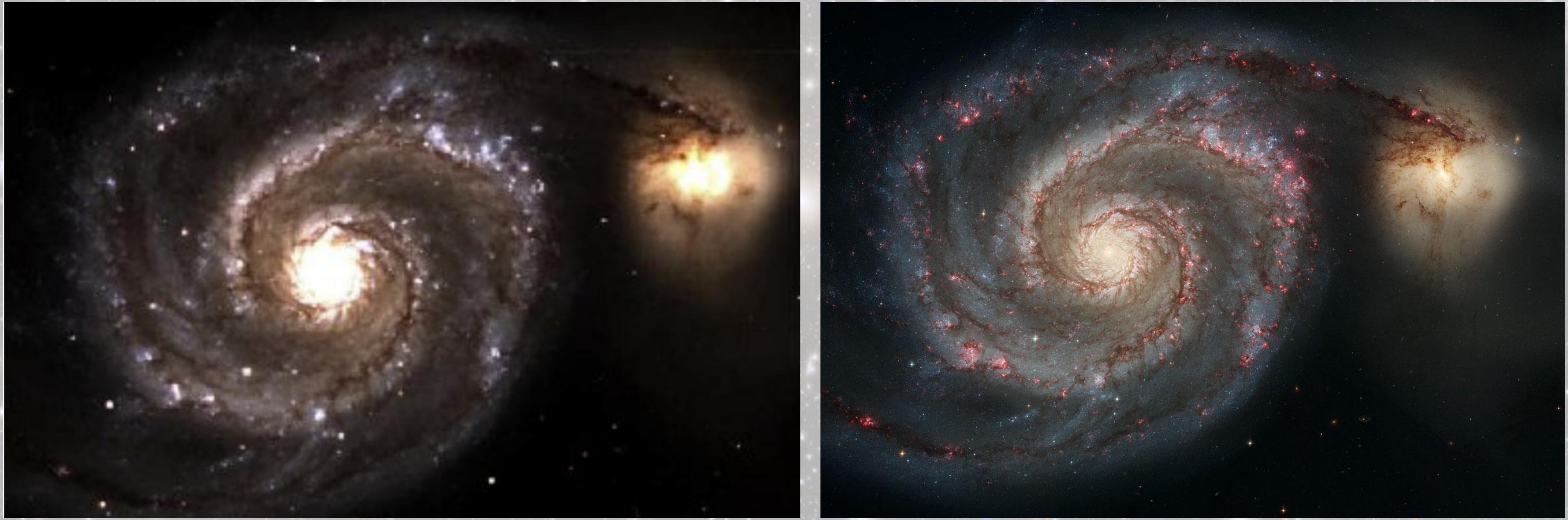
Modello rgb


# 2458312
# 2458314
# 2458317



Credits: Eraldo Pereira Marinho

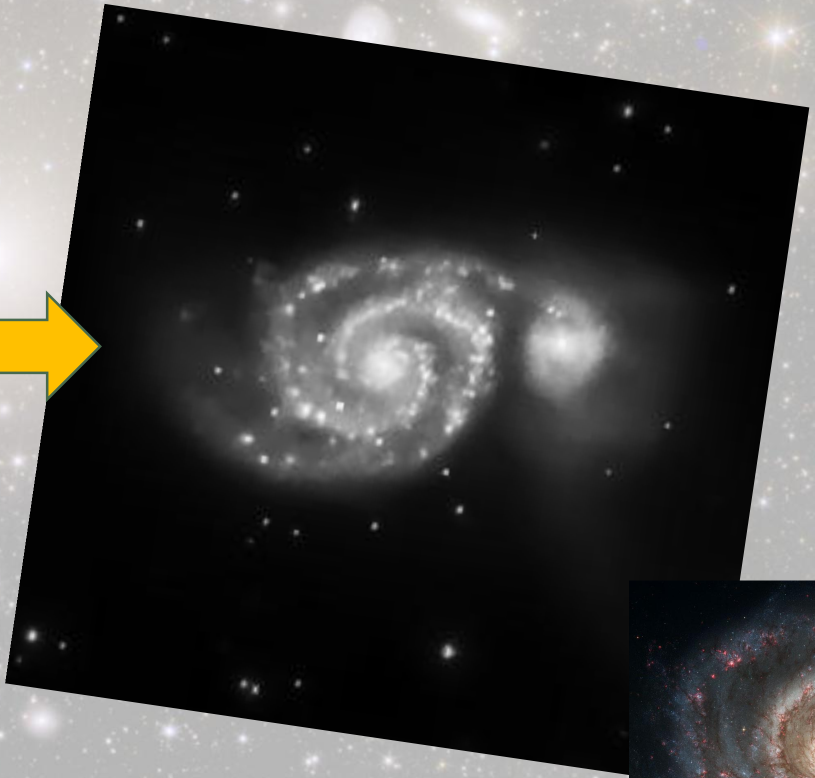
Trova le differenze nei colori

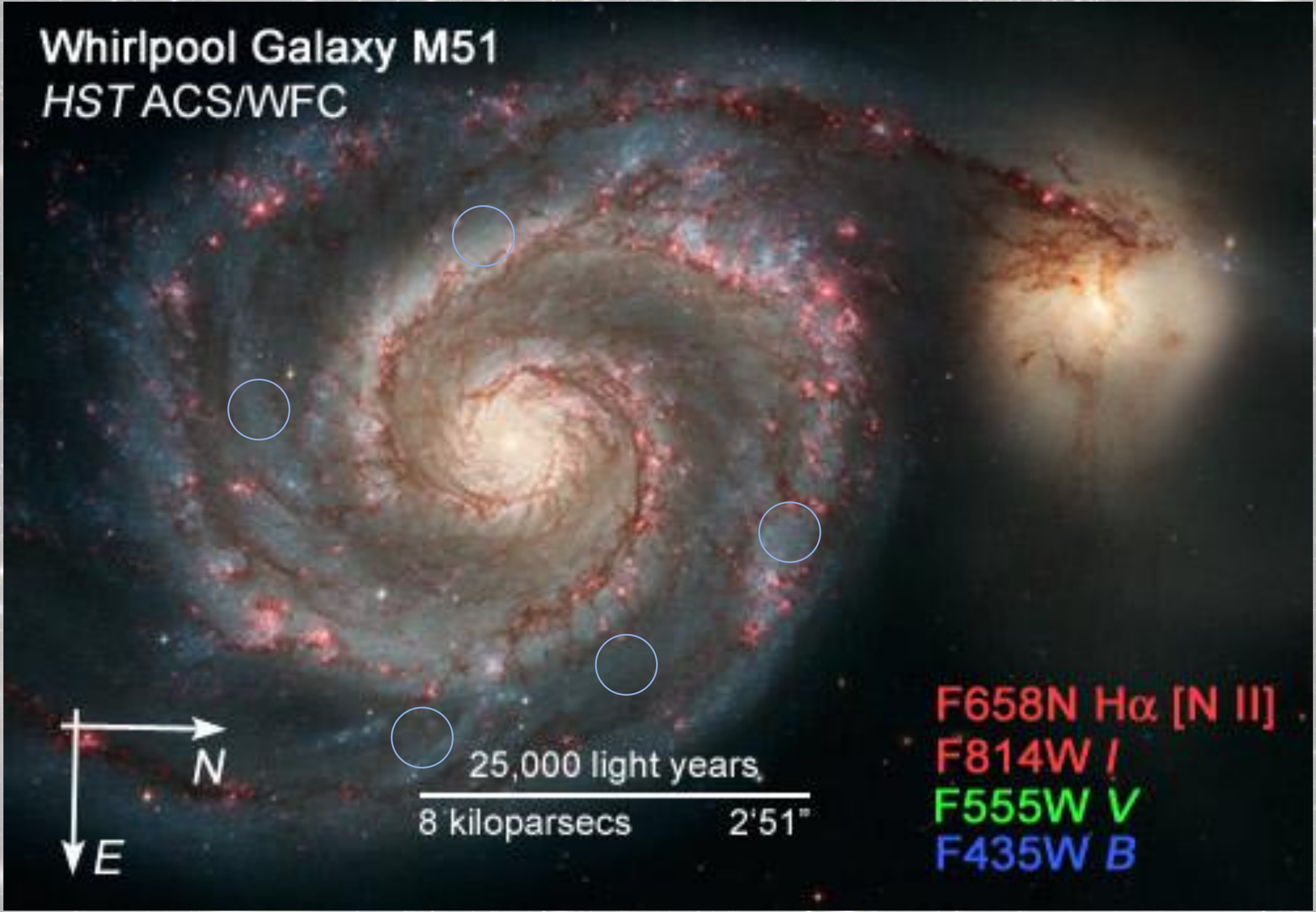


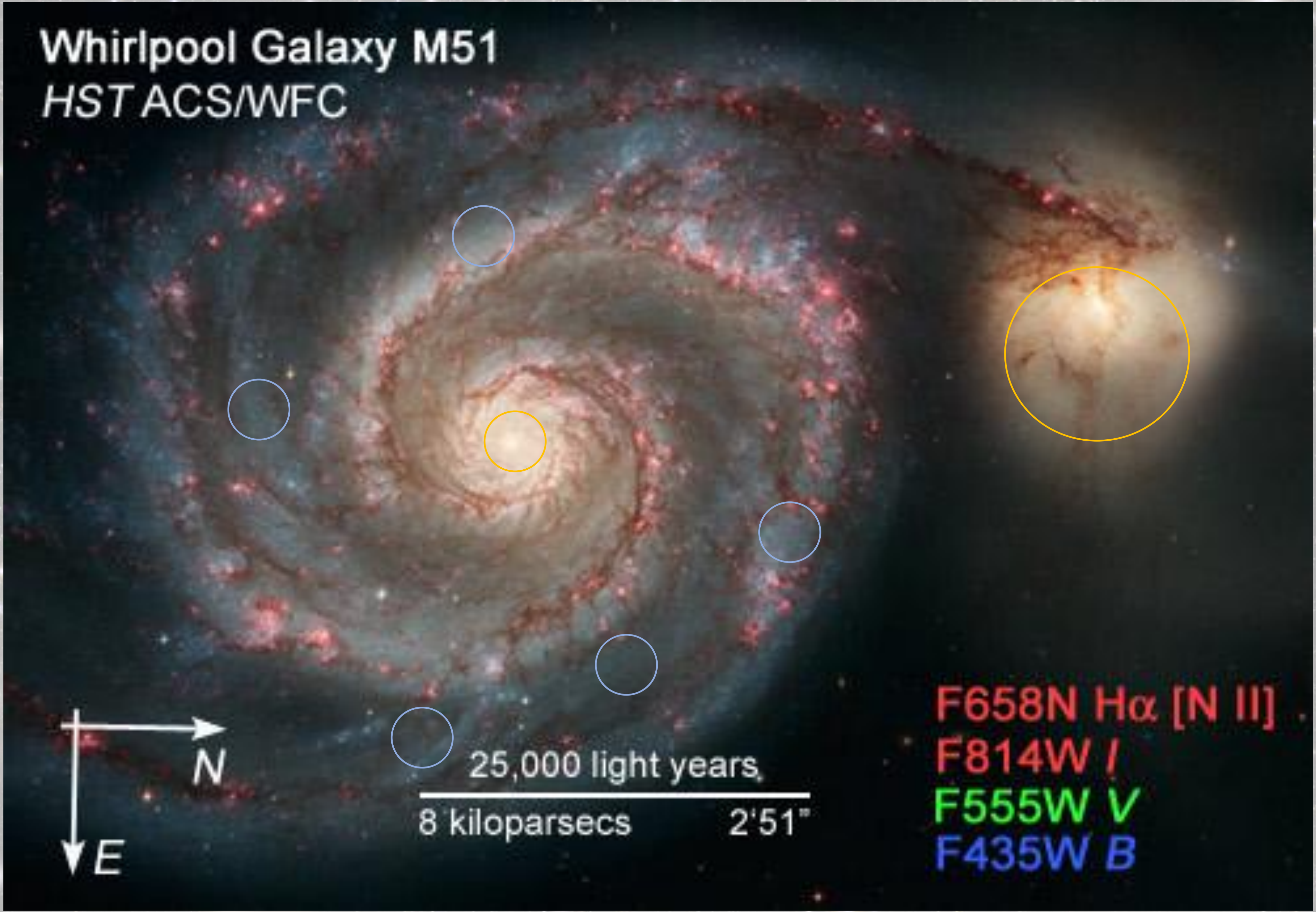
C'è qualcosa che manca

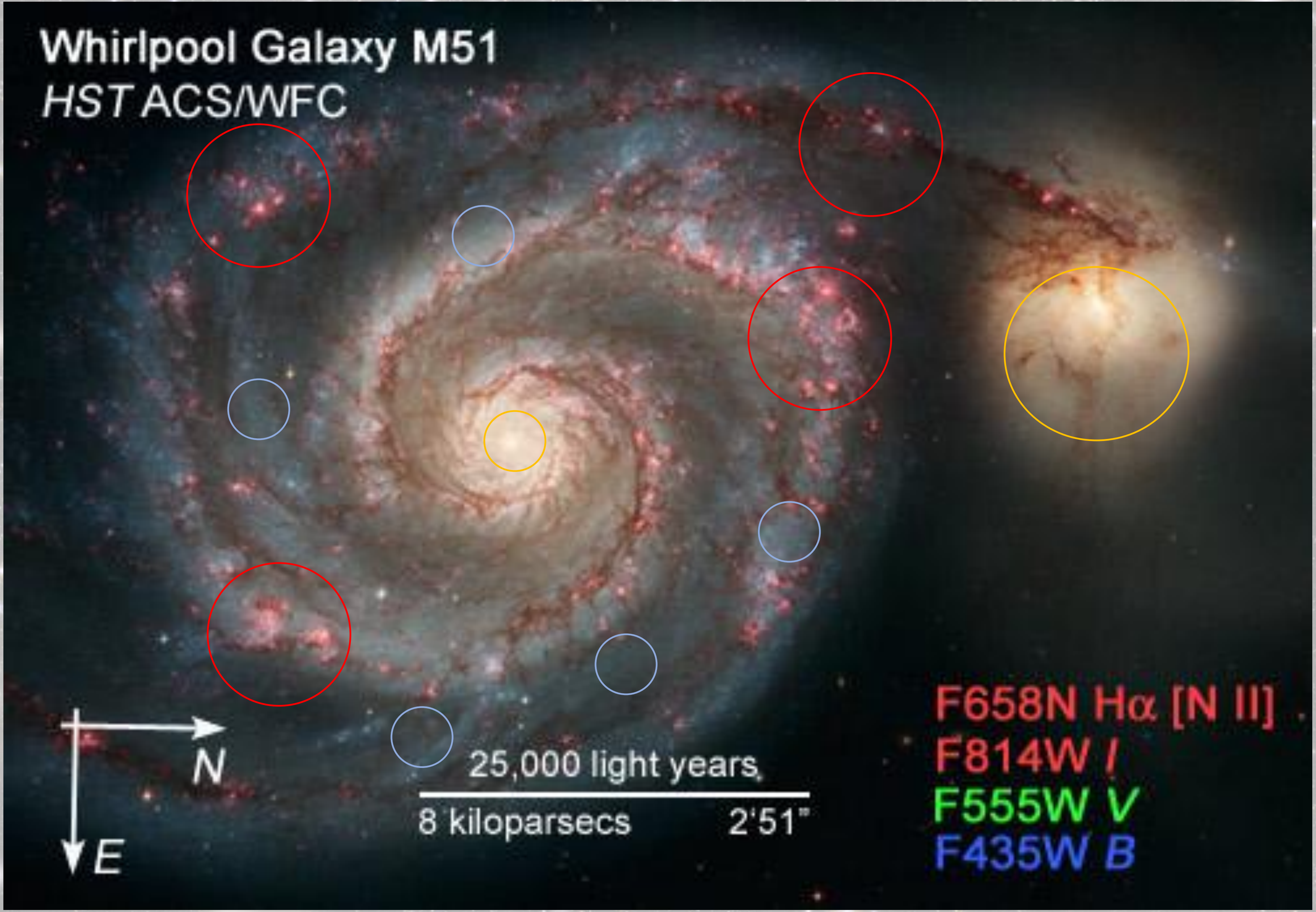
Ad una lunghezza d'onda di ~656 nm (nel rosso) l'idrogeno ionizzato (nelle nubi di gas) emette molta più luce che alle lunghezze d'onda adiacenti (riga di emissione, spettro)

Filtro Hα che seleziona solo questa frequenza




Whirlpool Galaxy M51
HST ACS/WFC
N
E
25,000 light years
8 kiloparsecs
2'51"
F658N Hα [N II]
F814W I
F555W V
F435W B

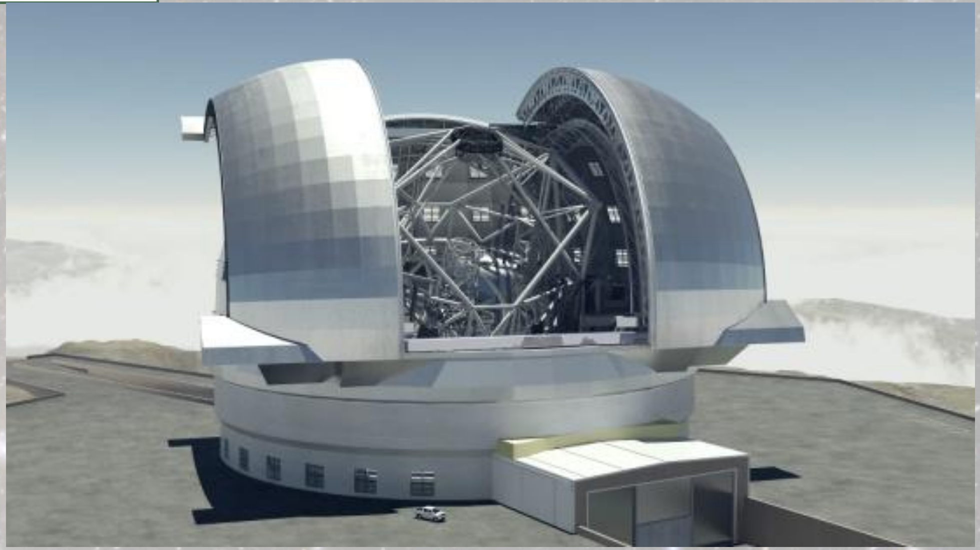

Whirlpool Galaxy M51
HST ACS/WFC
N
E
25,000 light years
8 kiloparsecs
2'51"
F658N Hα [N II]
F814W I
F555W V
F435W B


Whirlpool Galaxy M51
HST ACS/WFC
N
E
25,000 light years
8 kiloparsecs
2'51"
F658N Hα [N II]
F814W I
F555W V
F435W B

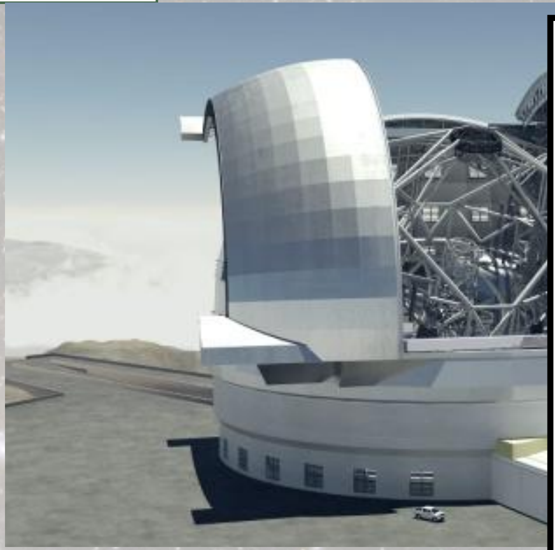
Ciò che vediamo va sempre interpretato con cura!

Quanto è grande il telescopio e per quanto tempo osserviamo?

NATIONAL GEOGRAPHIC



Quanto è grande il telescopio e per quanto tempo osserviamo?

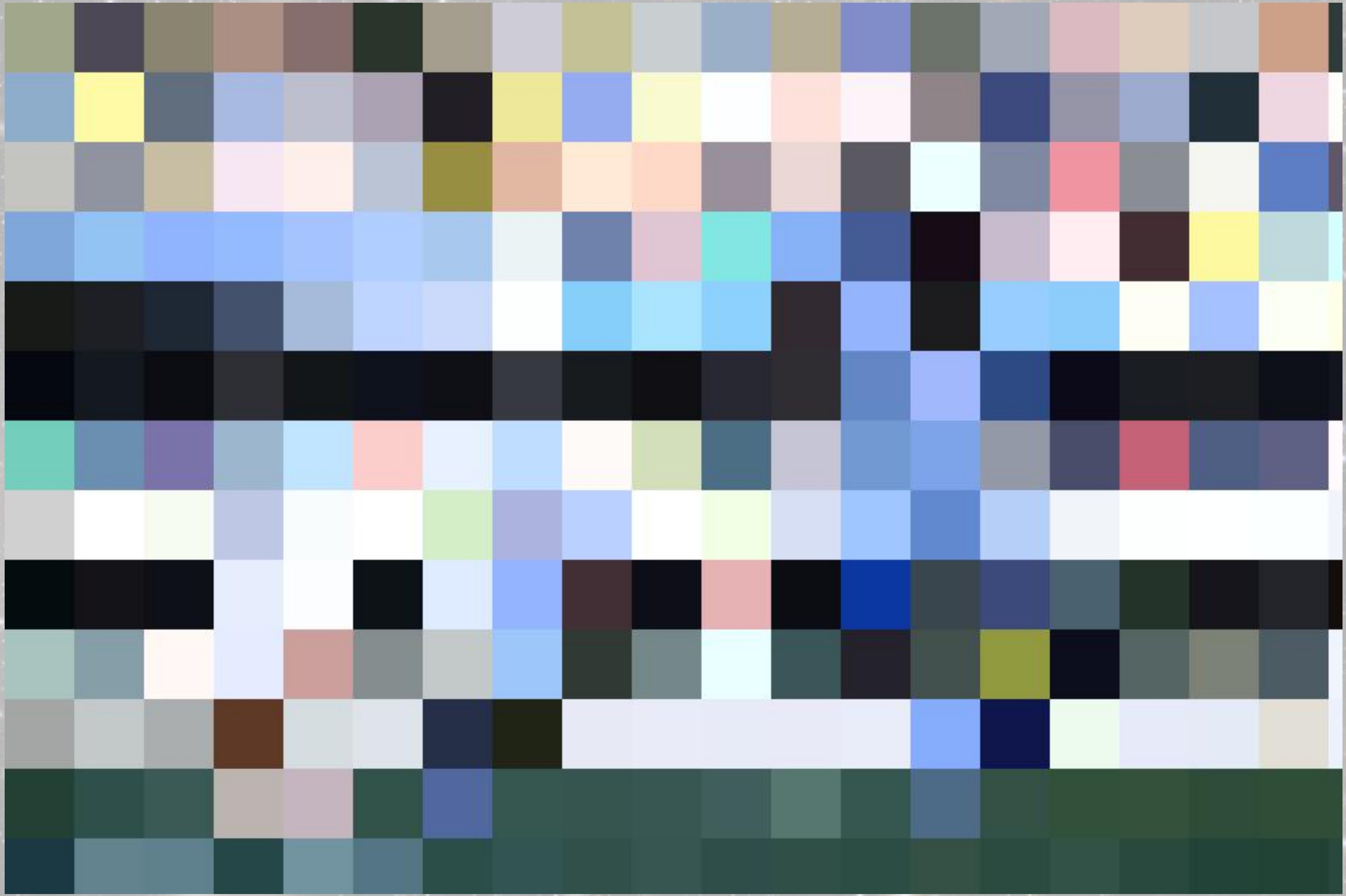


Attivi
INT: 2.54m (Canarie, Spagna)
TNG: 3.58m (Canarie , Spagna)
WHT: 4.2m (Canarie , Spagna)
LBT: 2 x 8.4m (Arizona, US)
VST: 2.6m (Cerro Paranal, Cile)
VLT: 8.2m (Cerro Paranal, Cile)

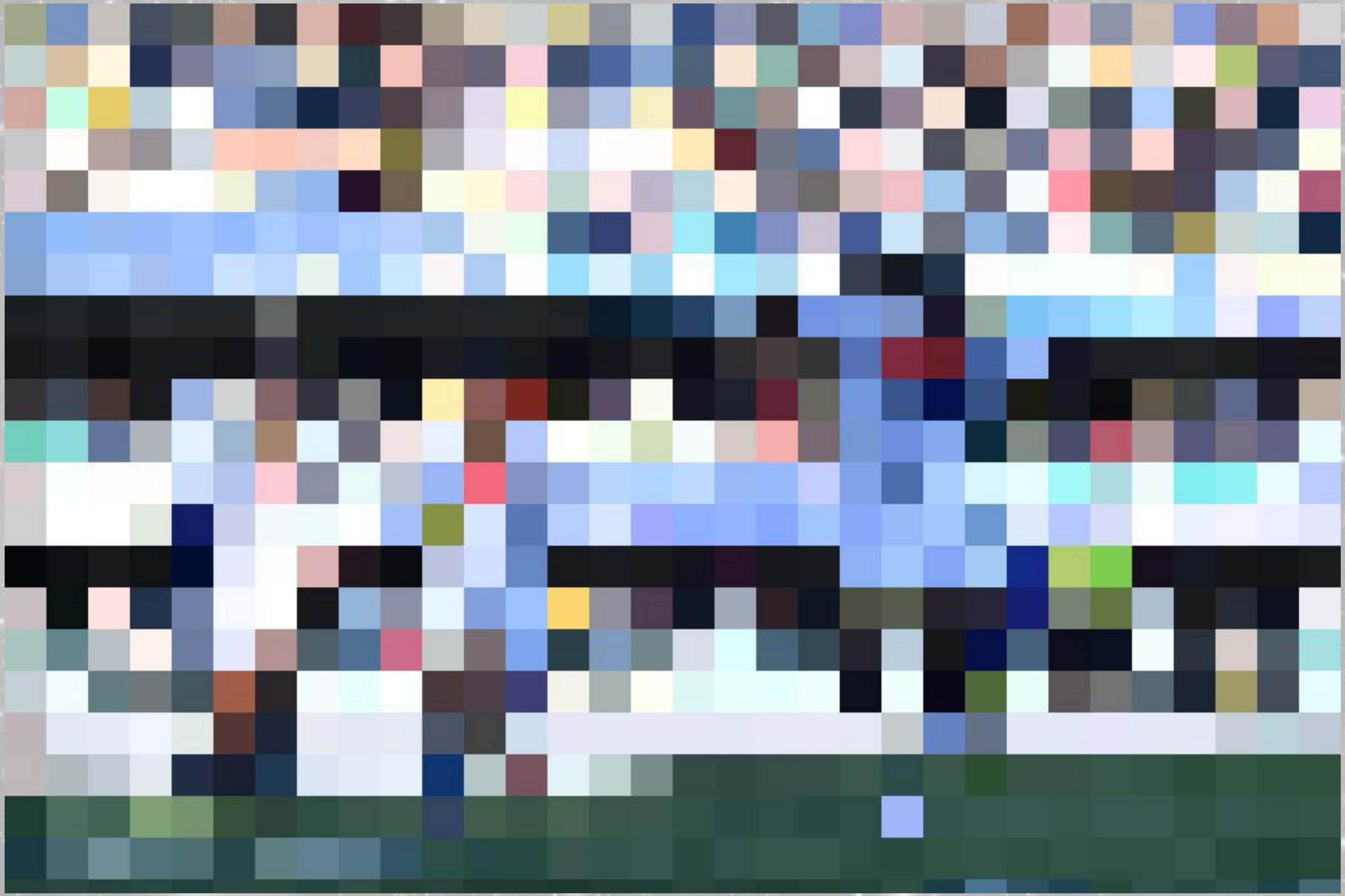
HST: 2.4m (spazio)
Euclid: 1.2m (spazio)
JWST: 6.5m (spazio)

Futuro
Rubin: 8.4m (Cile)
ELT: 39m (Cile)
Roman: 2.4m (spazio)

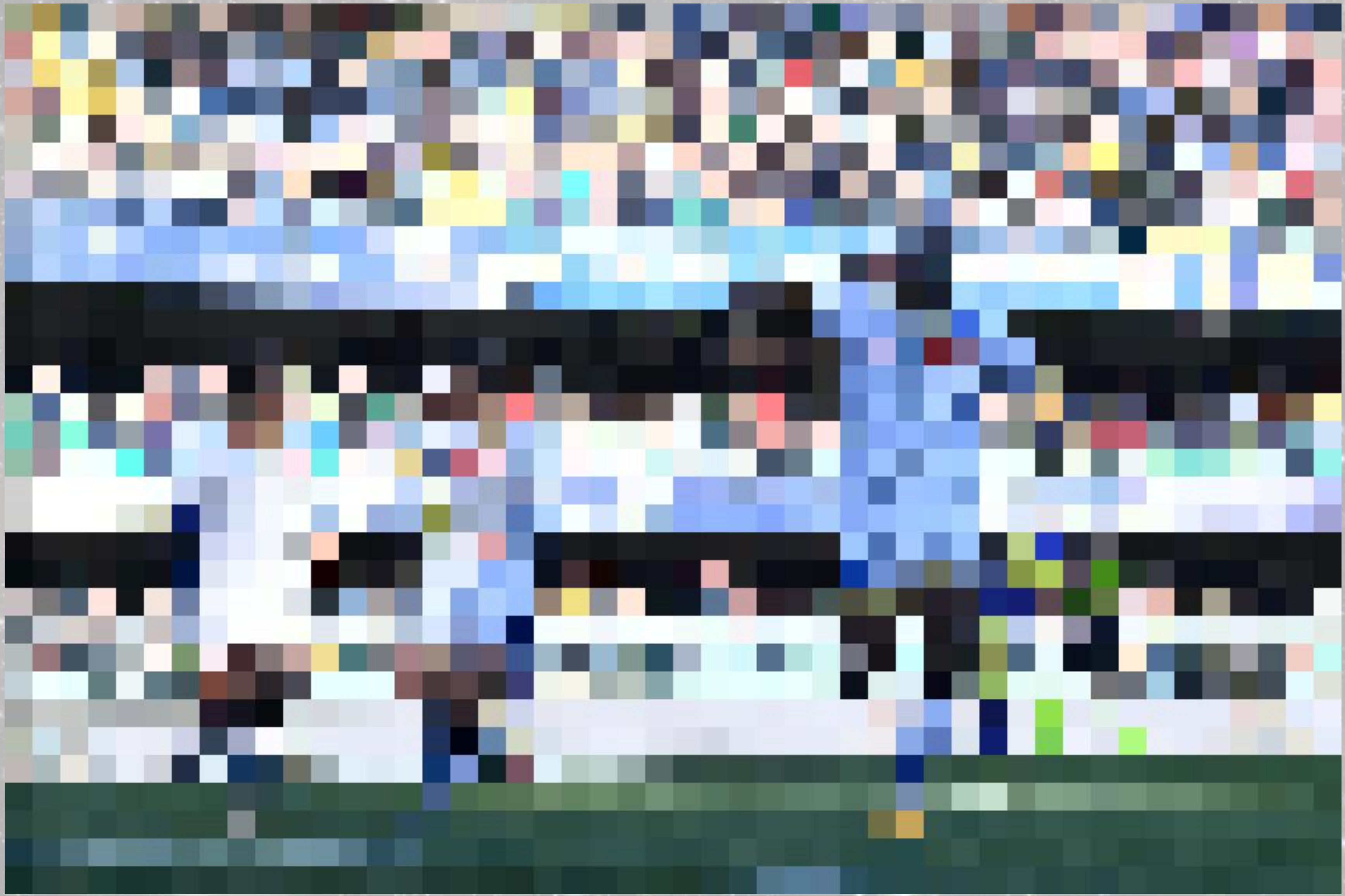
Quanti pixel ha la camera?



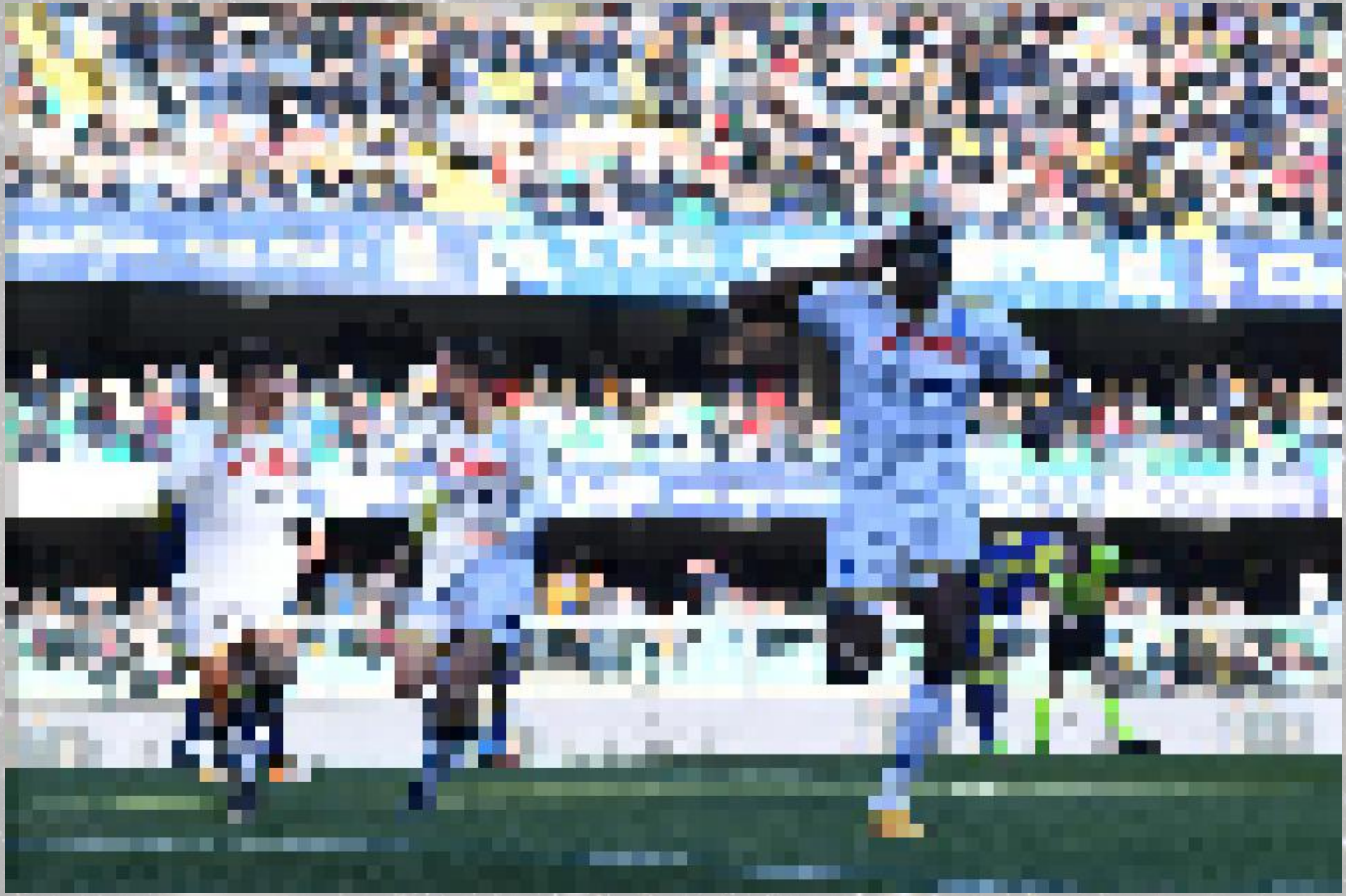
Quanti pixel ha la camera?



Quanti pixel ha la camera?



Quanti pixel ha la camera?



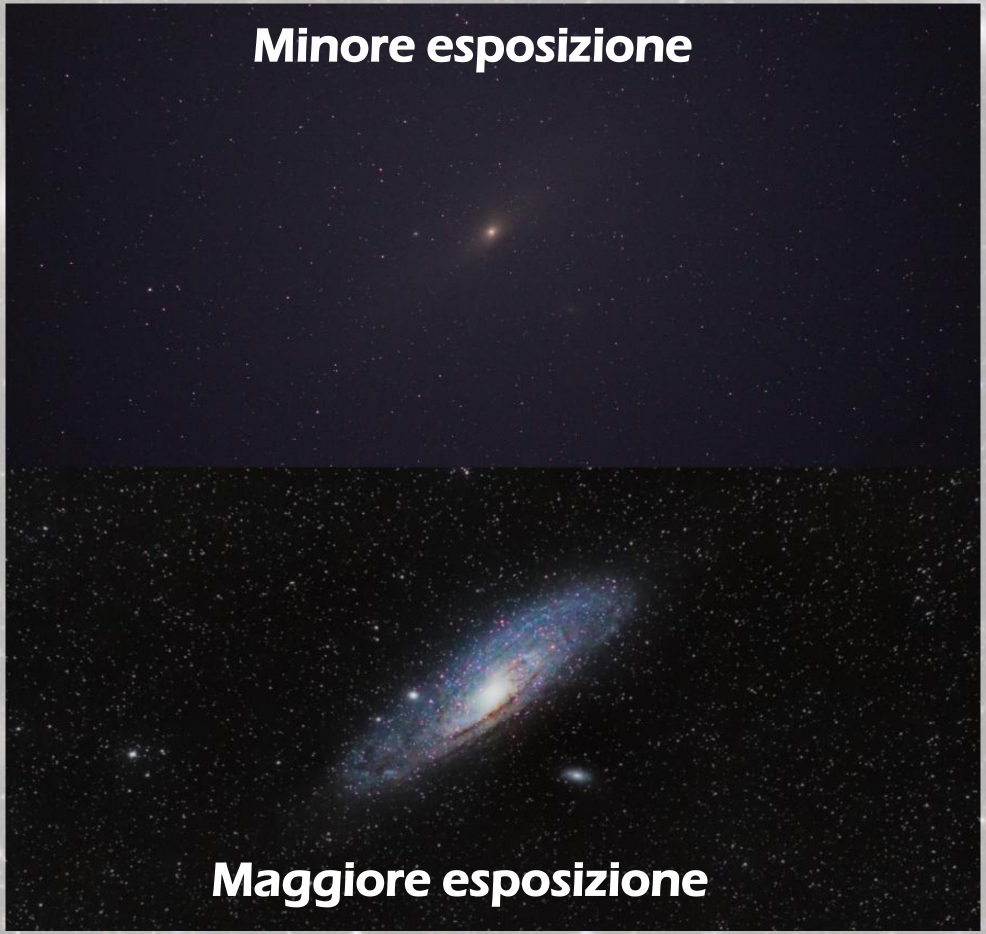
Quanti pixel ha la camera?

andiera, una città !
THE
Lete
MSC
RESTRUCTURE
8
DIDOFA

Esposizione fotografica

Esposizione fotografica

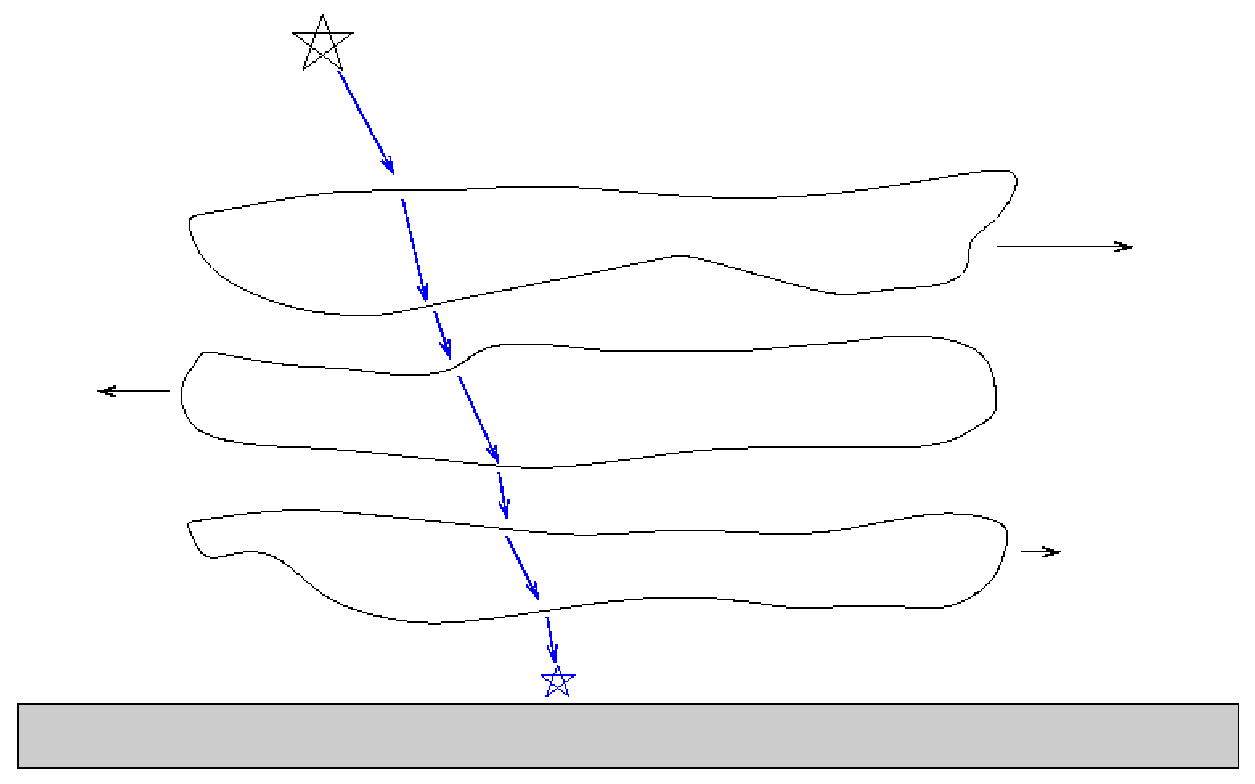
https://www.reddit.com/r/Astronomy/



Minore esposizione
Maggiore esposizione

E l'atmosfera?

Rifrazione

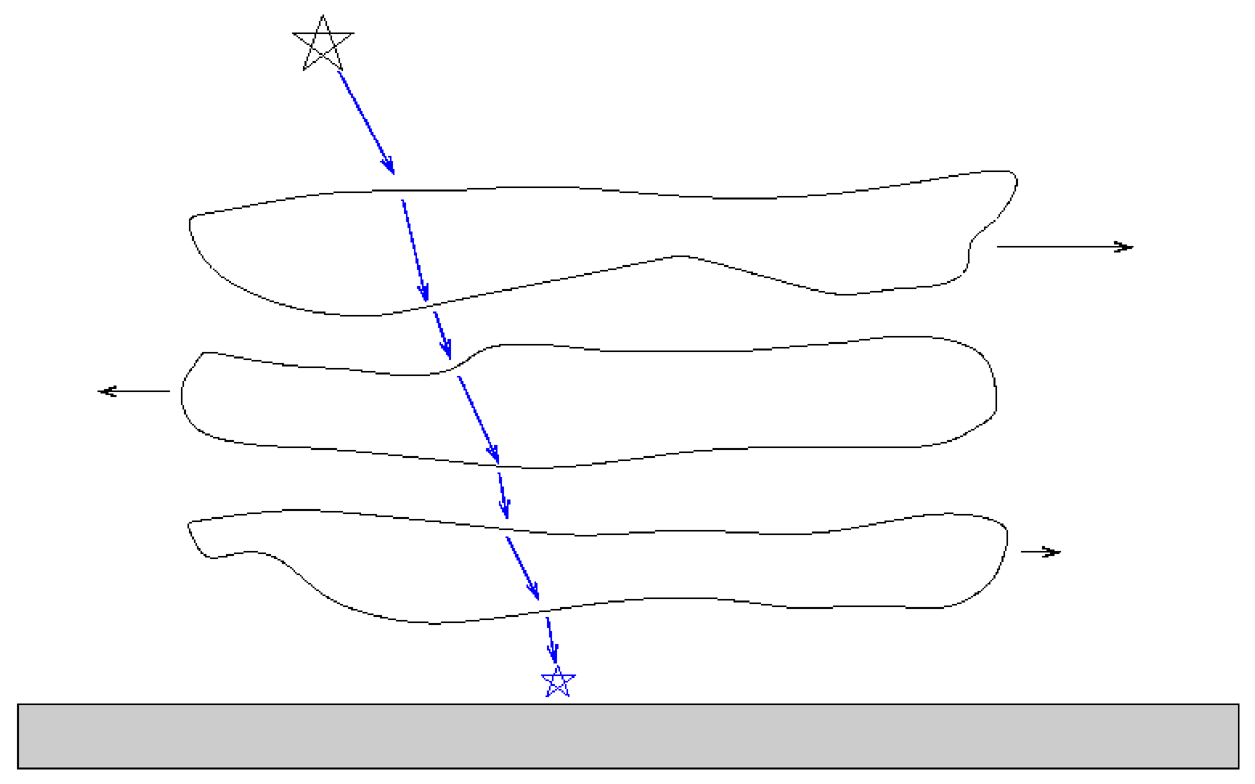


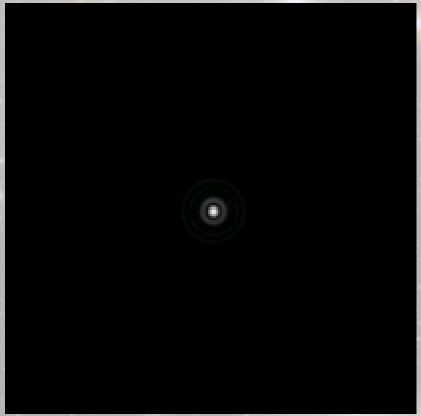
Dipende dalle condizioni di temperatura
e densità del luogo dove si trova il telescopio

http://www.astrofototecnica.it

E l'atmosfera?

Rifrazione



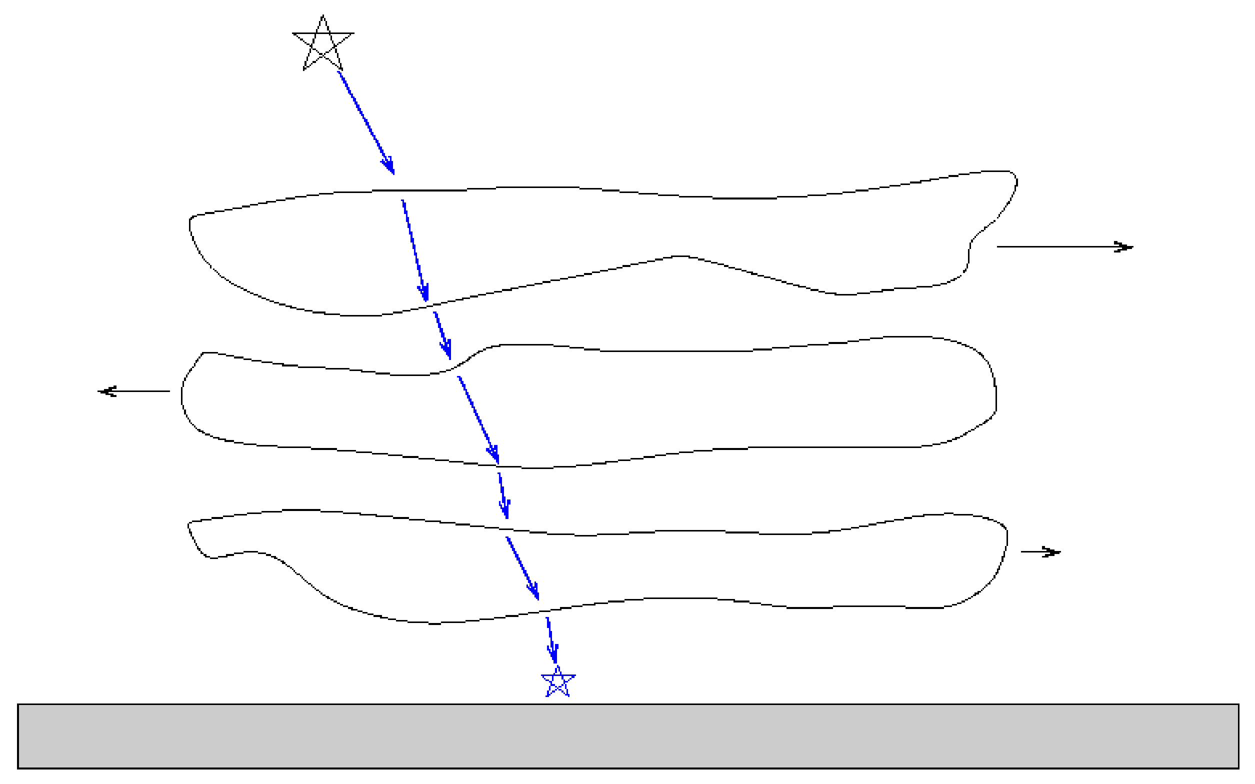


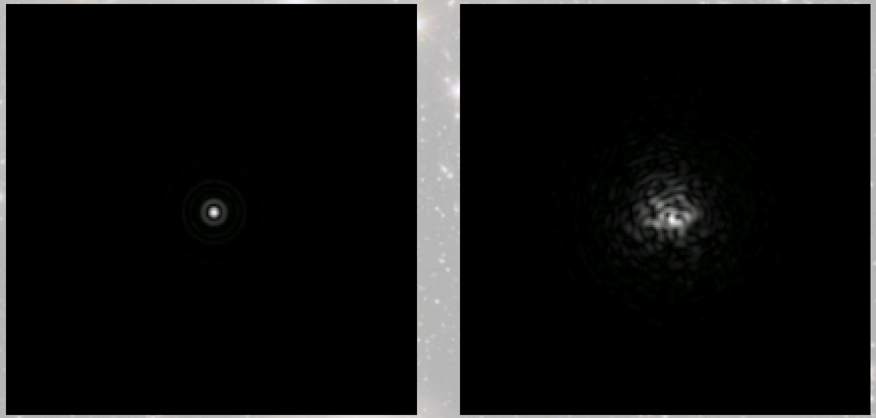
Dipende dalle condizioni di temperatura
e densità del luogo dove si trova il telescopio

http://www.astrofototecnica.it

E l'atmosfera?

Rifrazione





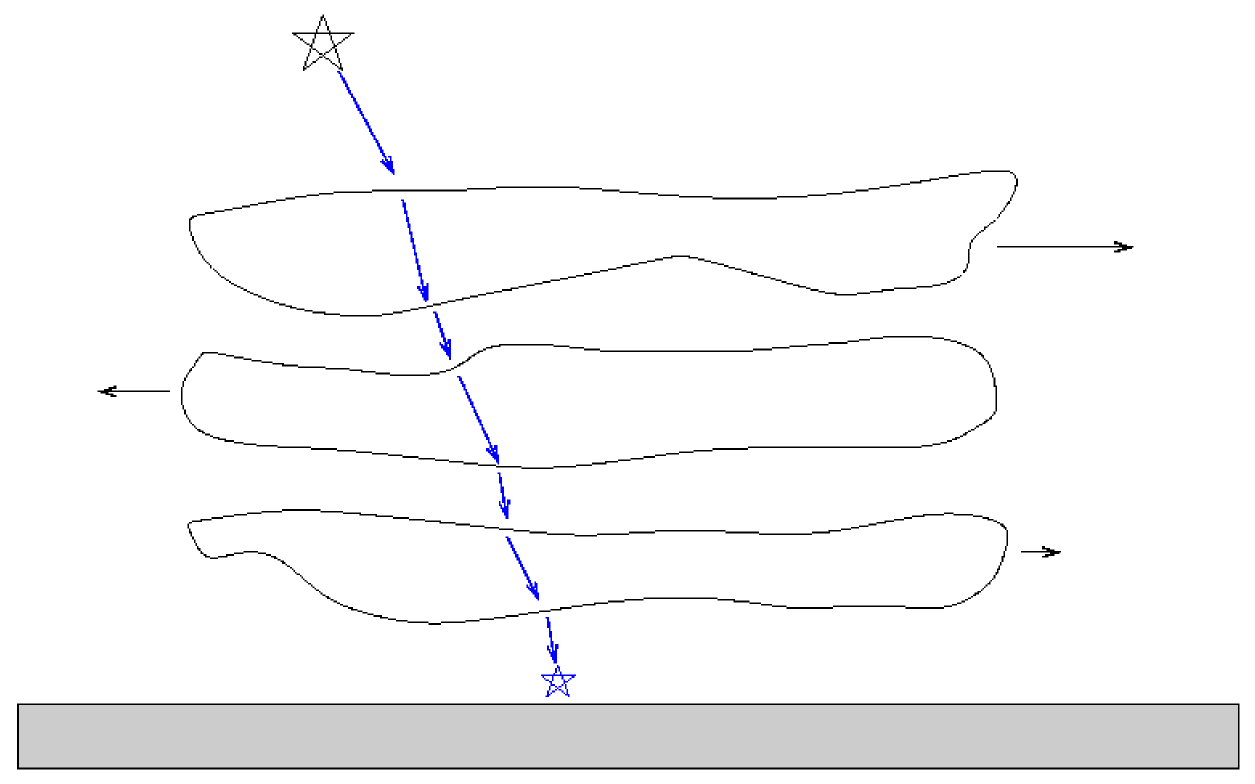
Ecco perché le stelle scintillano!

Dipende dalle condizioni di temperatura
e densità del luogo dove si trova il telescopio

http://www.astrofototecnica.it

E l’atmosfera?

Rifrazione

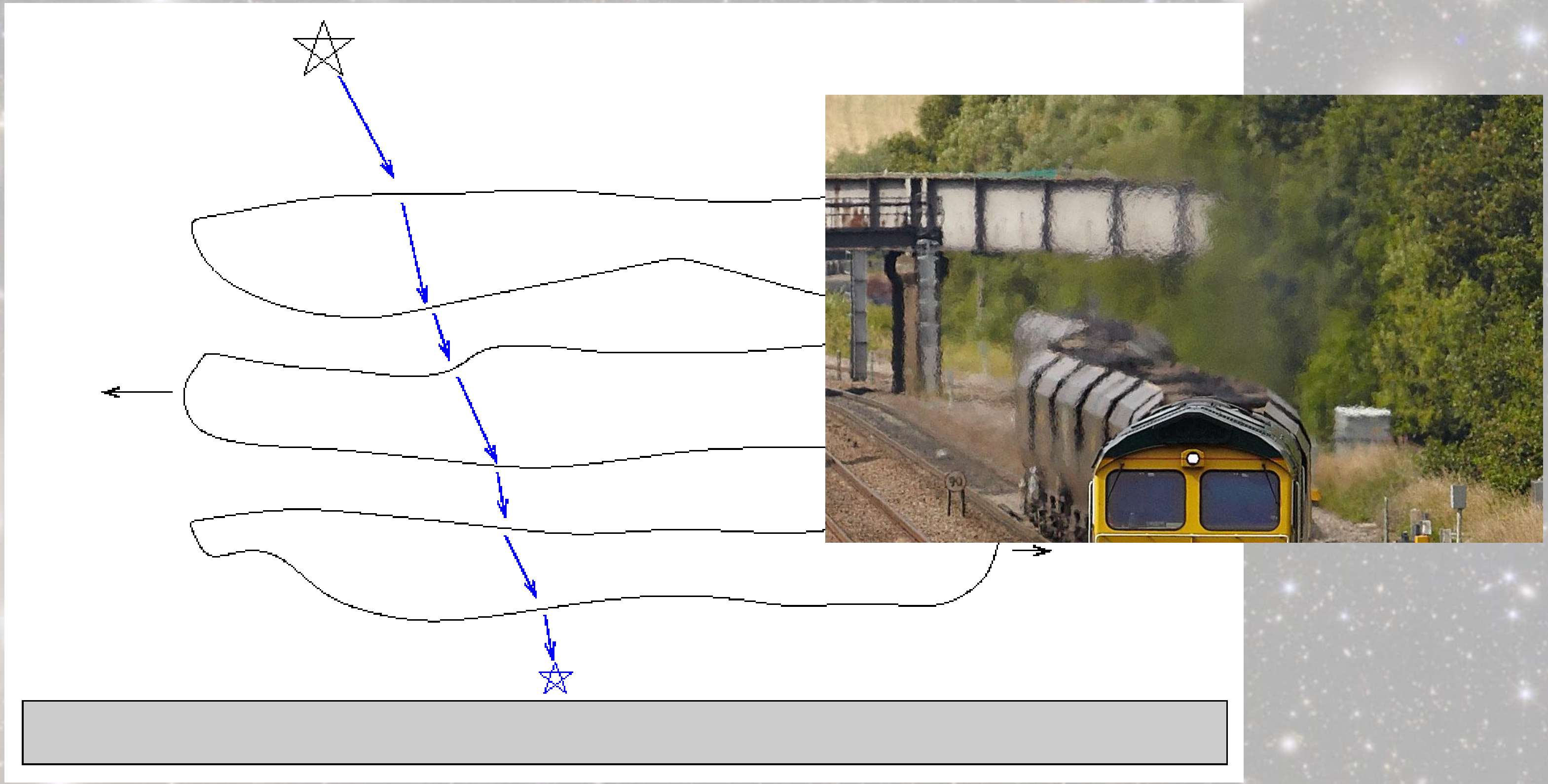


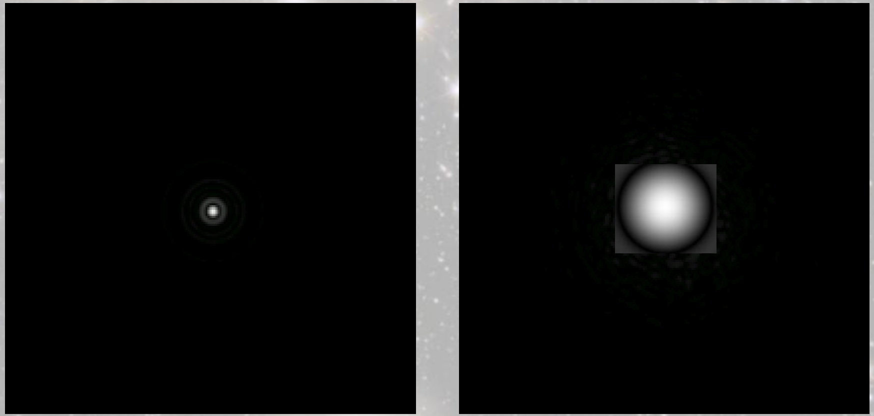
Ecco perché le stelle scintillano!

Dipende dalle condizioni di temperatura
e densità del luogo dove si trova il telescopio

http://www.astrofototecnica.it

E l'atmosfera?





Ecco perché le stelle scintillano!

Dipende dalle condizioni di temperatura
e densità del luogo dove si trova il telescopio

http://www.astrofototecnica.it

Riassumendo

Le galassie

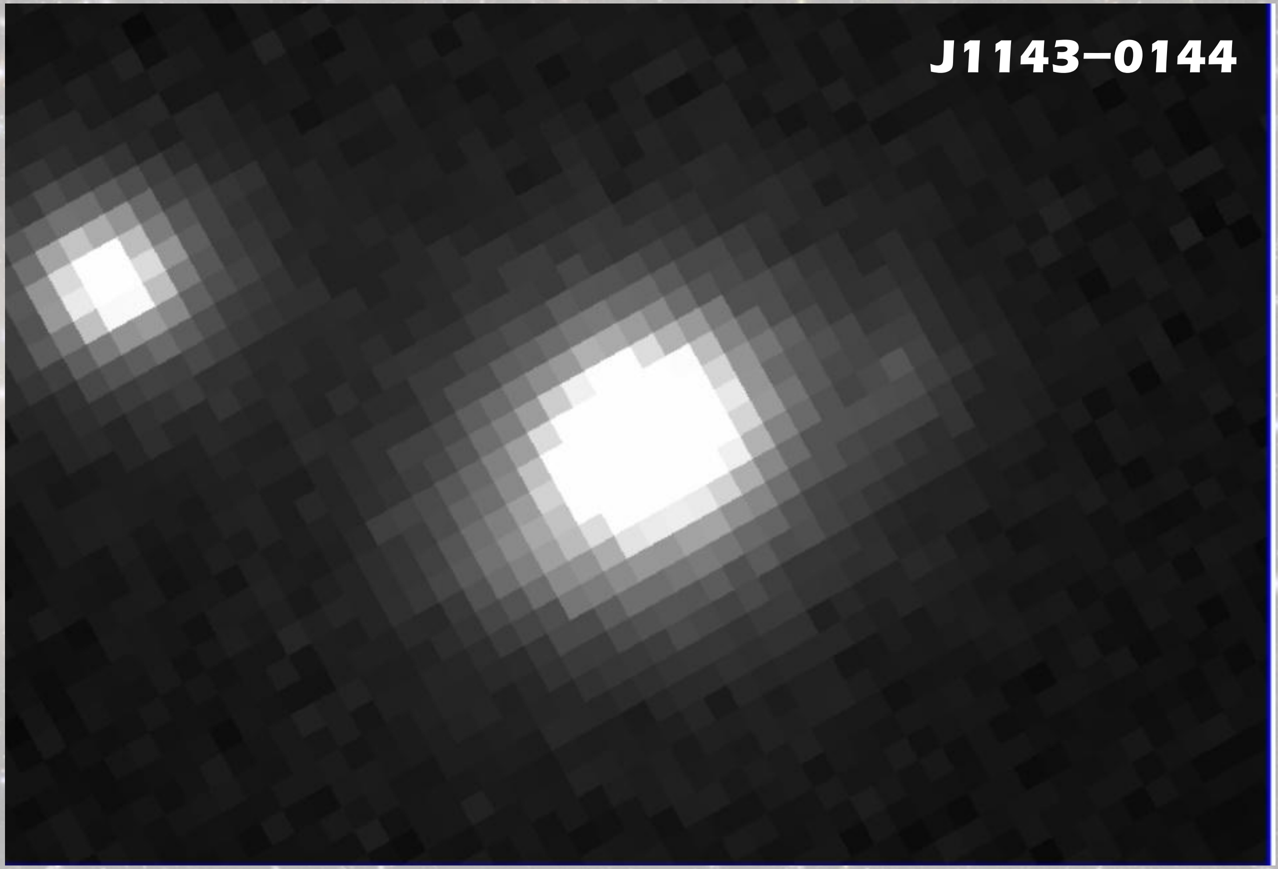
- Sono fatte di stelle, gas, polvere e materia oscura
- Ci sono più stelle nelle regioni centrali
- Hanno forma, luminosità, colore e massa diverse e si trovano a varie distanze
- Sono sorrette dall'equilibrio tra gravità e moti stellari: le stelle possono muoversi lungo orbite quasi circolari o muoversi caoticamente
- Possono essere isolate o vivere vicino ad altre galassie
- Si scontrano e si fondono con altre galassie

Metodo di osservazione: immagini di galassie

- Proprietà del telescopio, ad esempio il diametro
- Filtri per osservare in una specifica frequenza
- Tempi di esposizione
- Numero e dimensione dei pixel della camera (influenza la risoluzione)
- Seeing atmosferico (influenza la risolzuione)

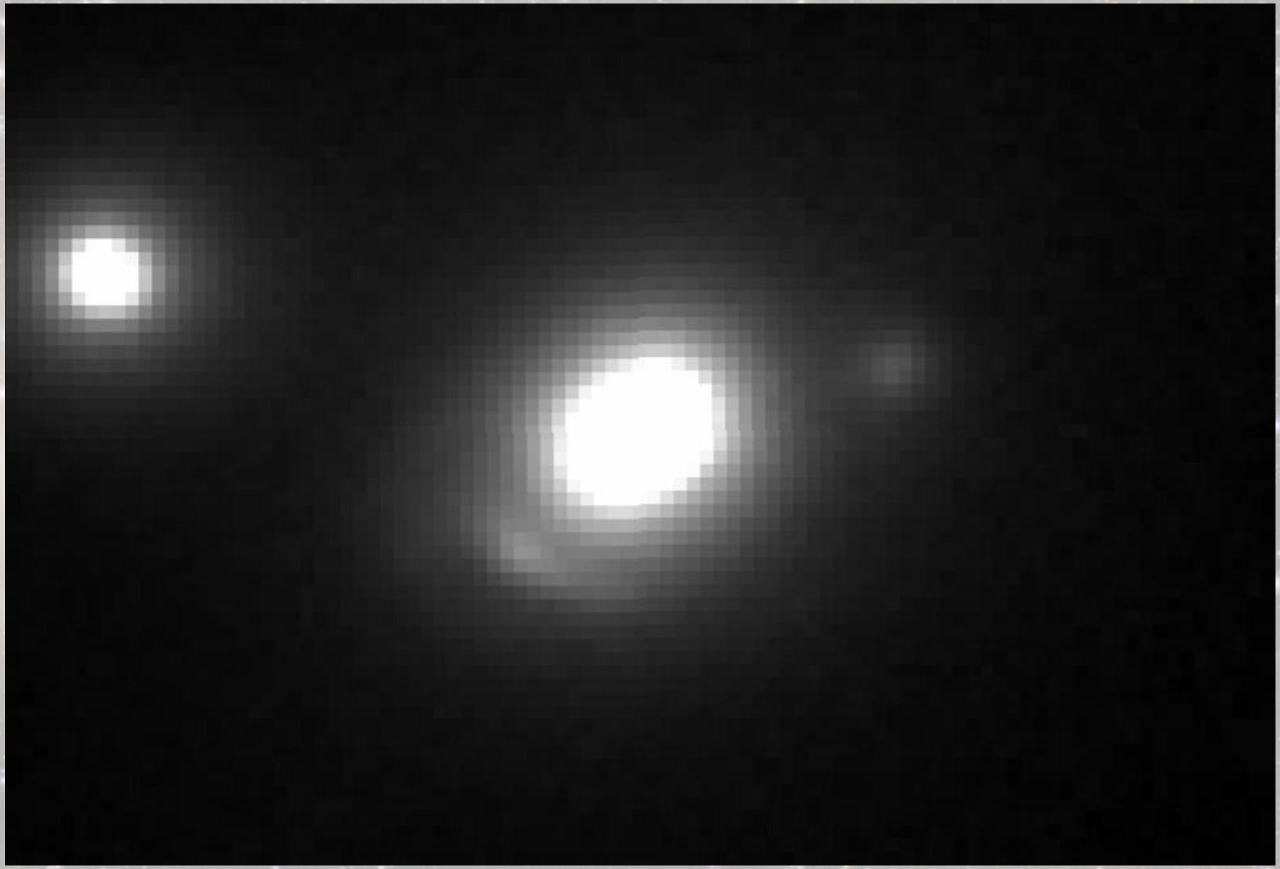
Giochiamo ancora

SDSS (telescopio da Terra)
banda rossa (r)
pixel = 0.4 secondi d’arco
seeing = 1.3 secondi d’arco



Dimensione pixel e seeing

KiDS (telescopio da Terra)
banda rossa (r)
pixel = 0.2 secondi d'arco
seeing = 0.7 secondi d'arco

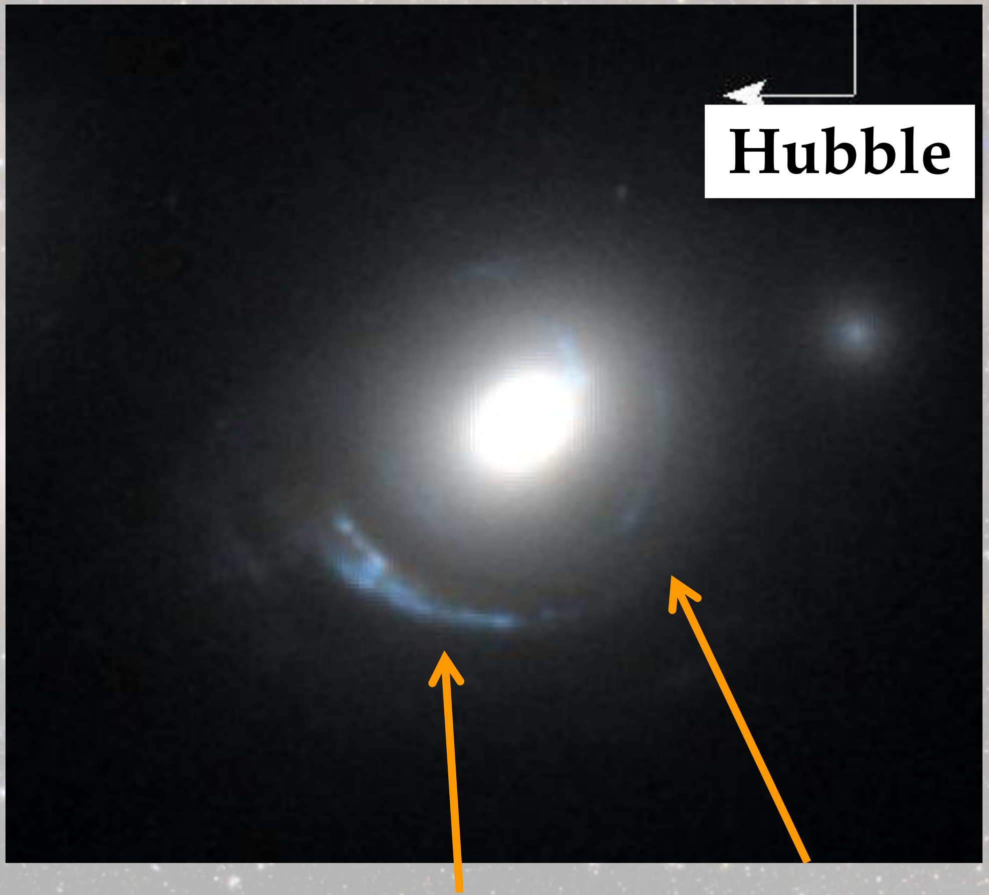


Vediamo un arco in basso, coloriamo l'immagine

KiDS (telescopio da Terra),
combinazione delle bande g (green), r (arancione), i (rosso)

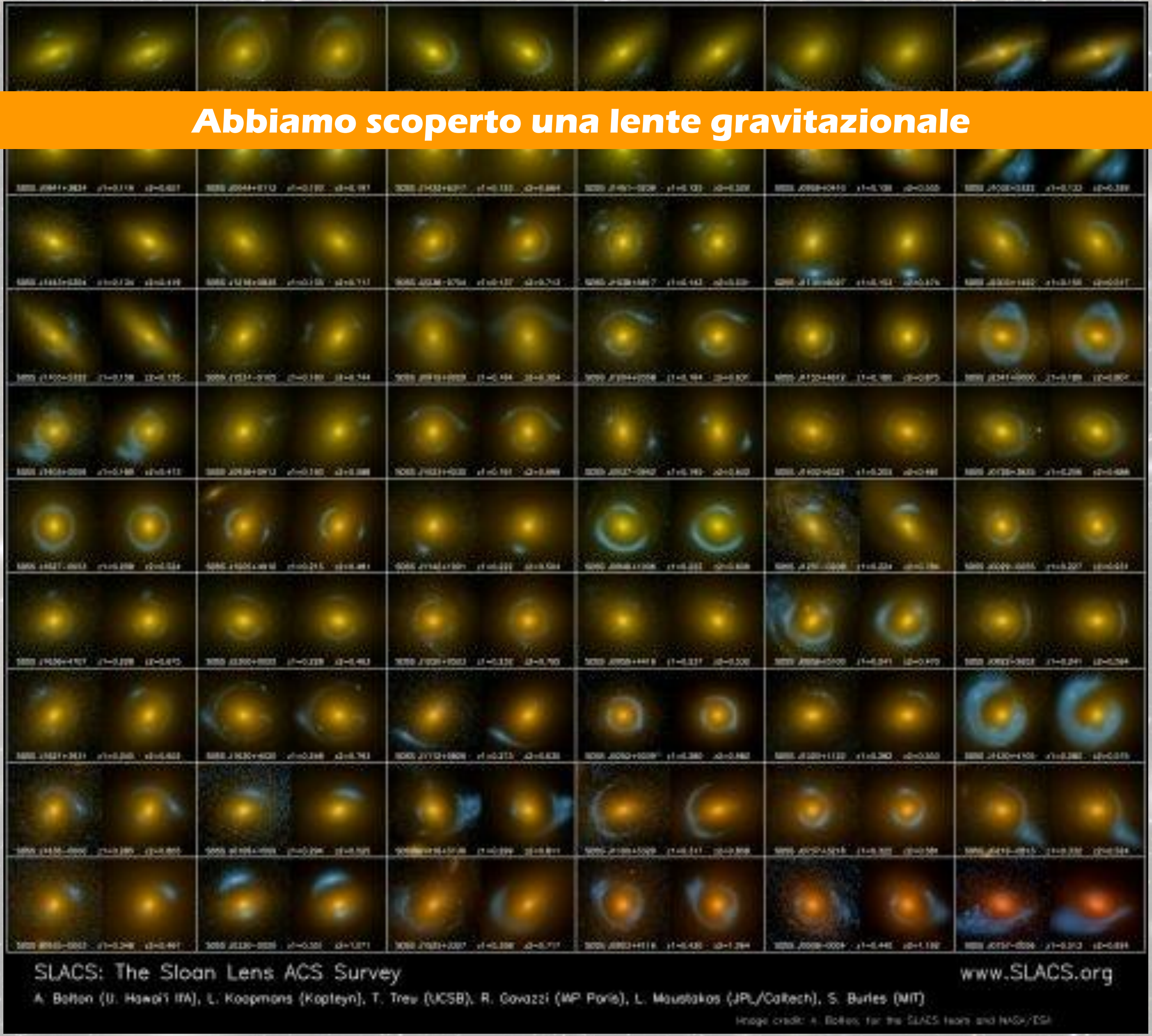
Miglioriamo ancora pixel e seeing

Telescopio Spaziale Hubble

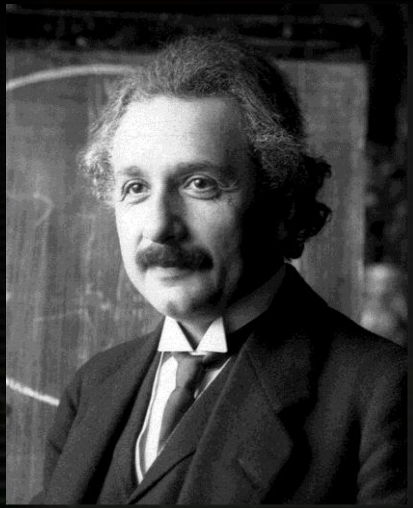


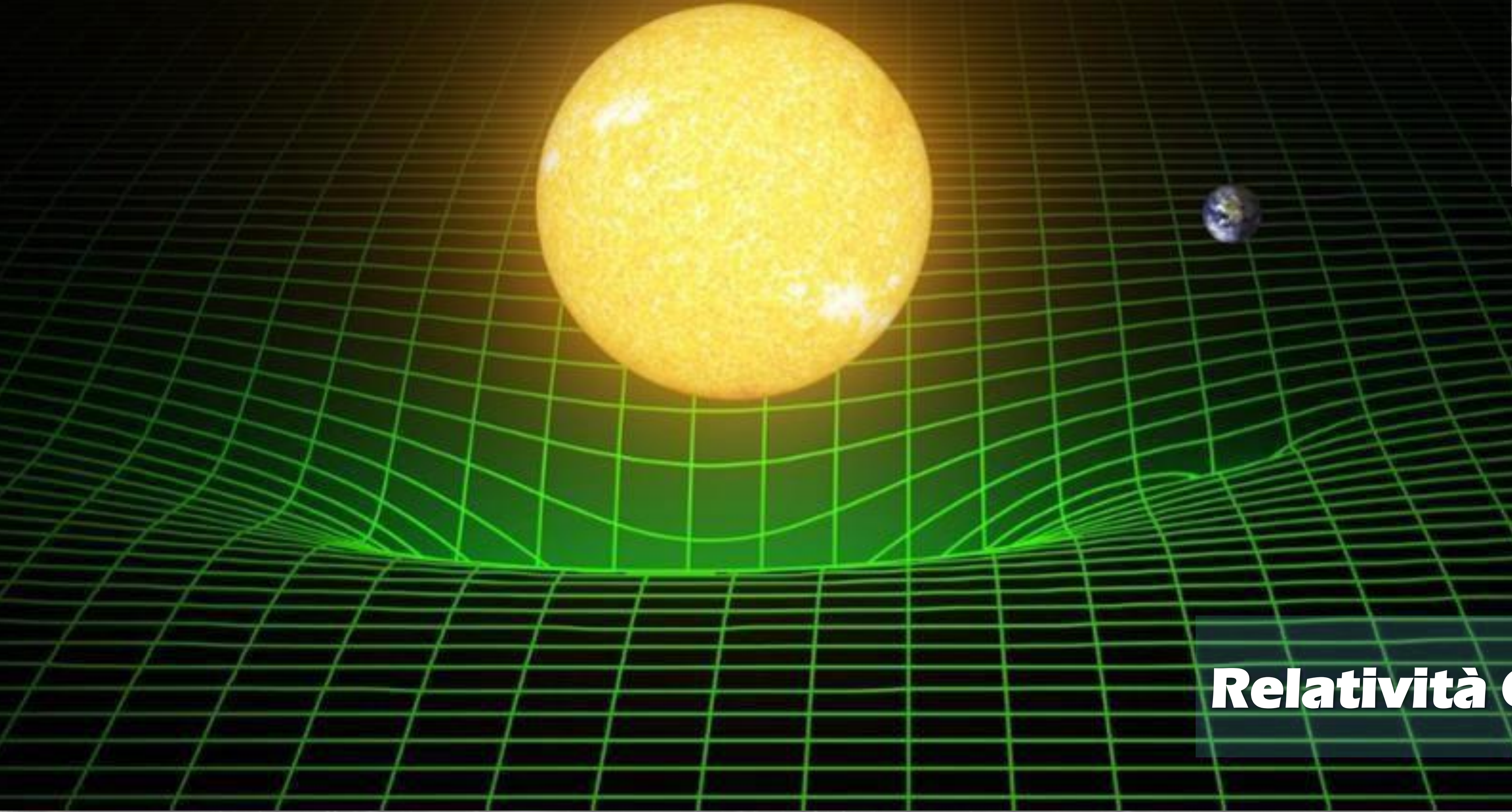
Attraverso altre osservazioni abbiamo scoperto che quegli archi sono più distanti della galassia al centro

Abbiamo scoperto una lente gravitazionale

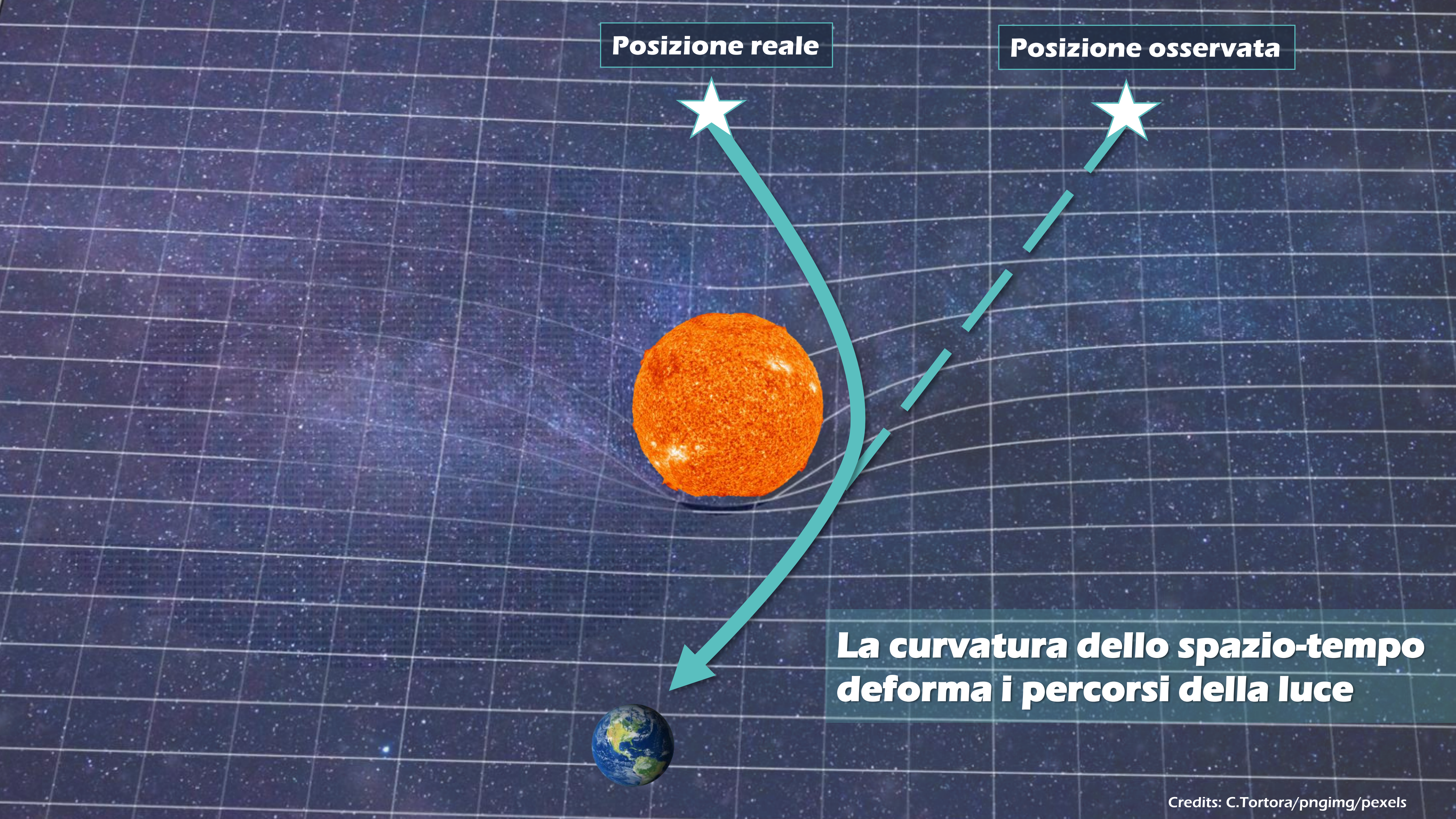

SLACS: The Sloan Lens ACS Survey
www.SLACS.org
A. Bolton (U. Hawai'i IfA), L. Koopmans (Kapteyn), T. Treu (UCSB), R. Gavazzi (IAP Paris), L. Moustakas (JPL/Caltech), S. Burles (MIT)
Image credit: A. Bolton, for the SLACS team and NASA/ESA

Cosa sono le lenti gravitazionali?





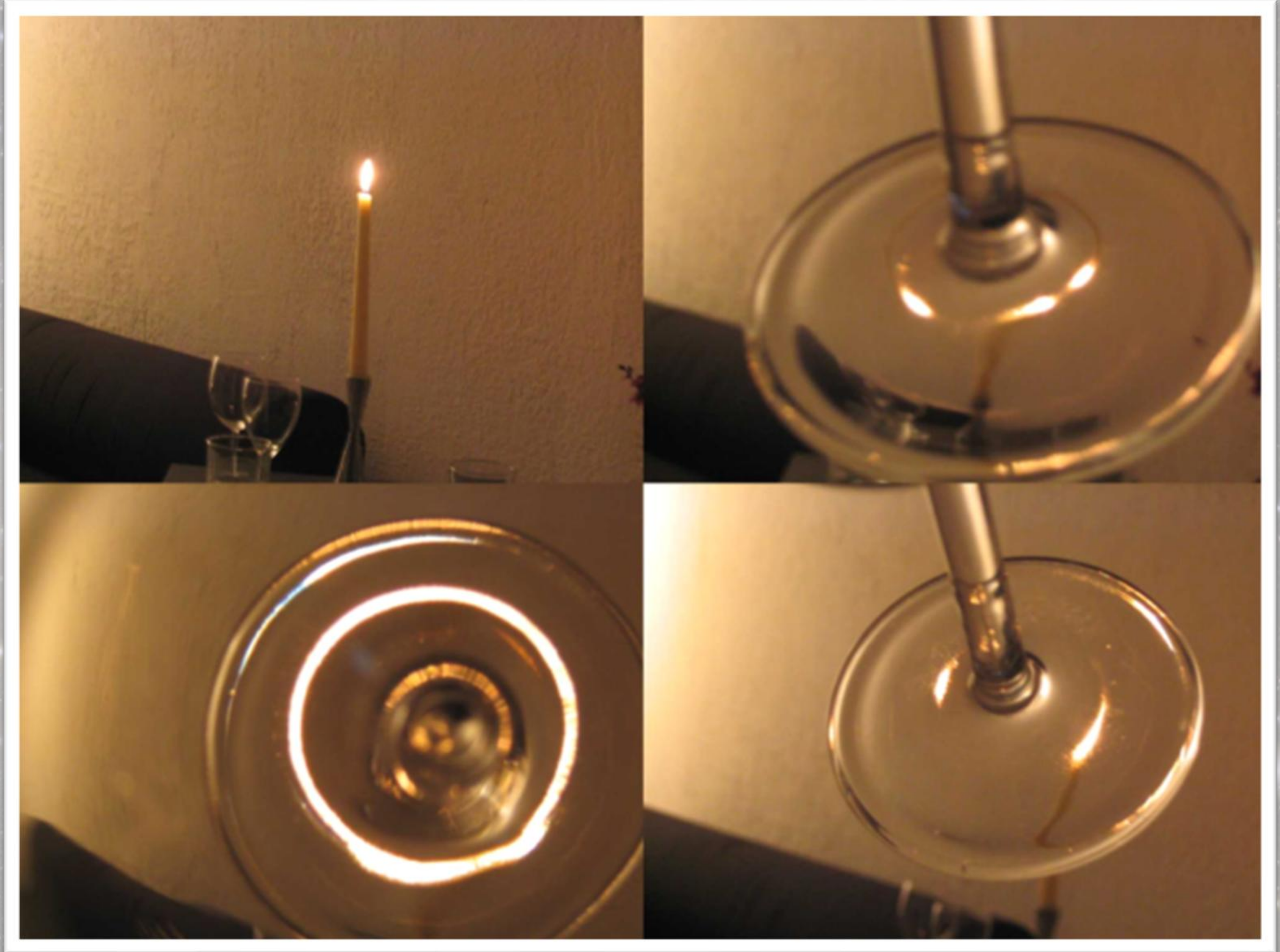
Relatività Generale


Posizione reale
Posizione osservata

La curvatura dello spazio-tempo deforma i percorsi della luce

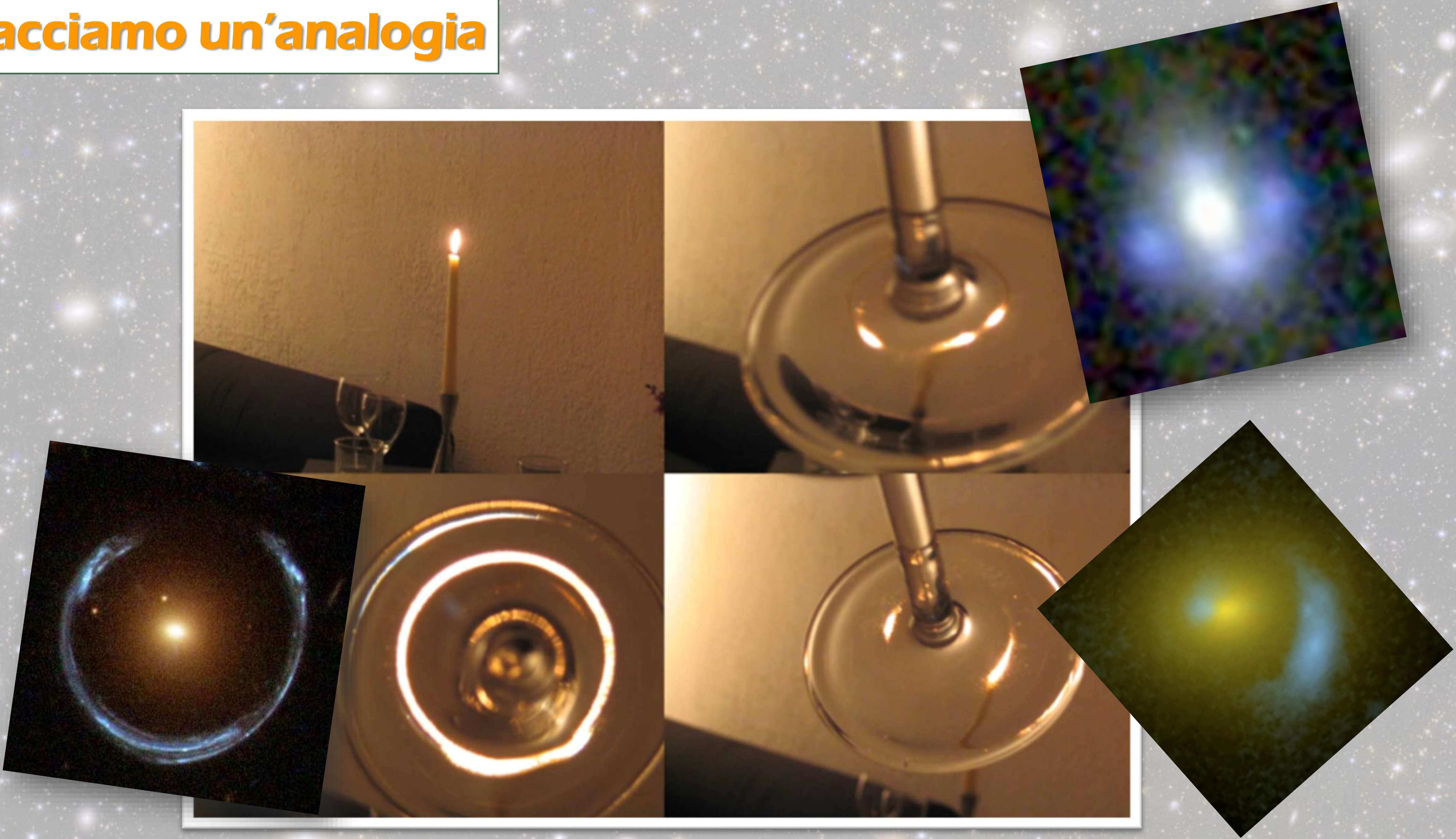
Credits: C.Tortora/pngimg/pexels

Facciamo un’analogia

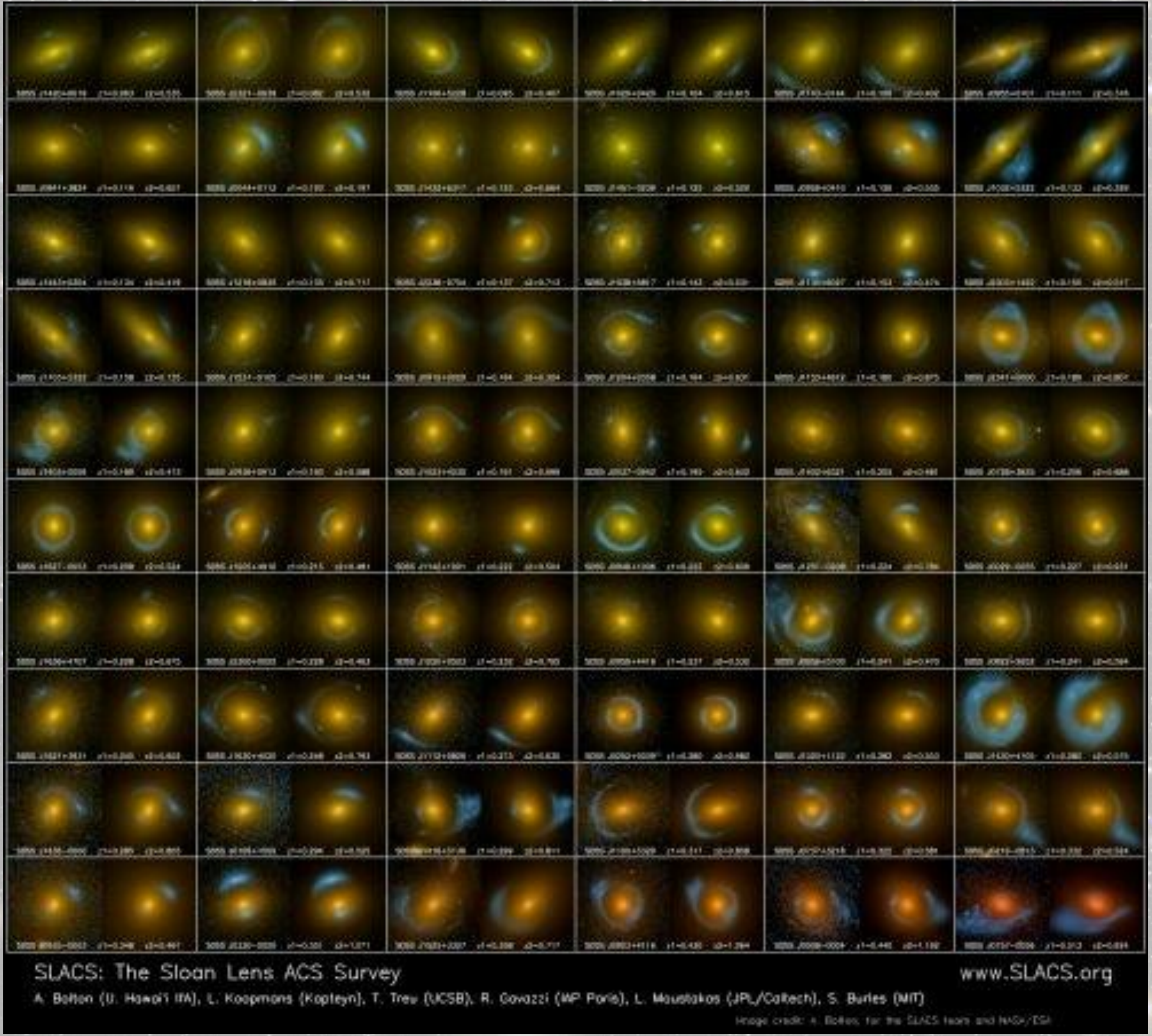


Credits: P. Marshall/ESA/NASA/KiDS@VST

Facciamo un'analogia



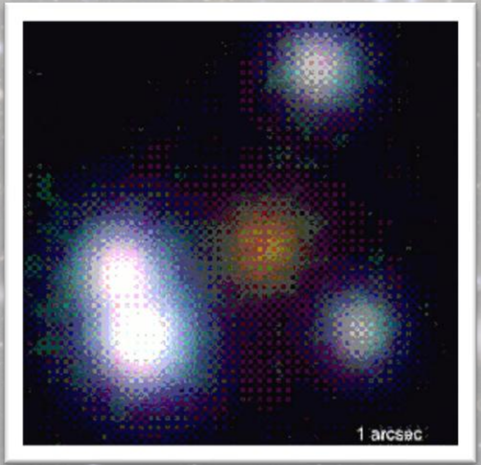
Credits: P. Marshall/ESA/NASA/KiDS@VST

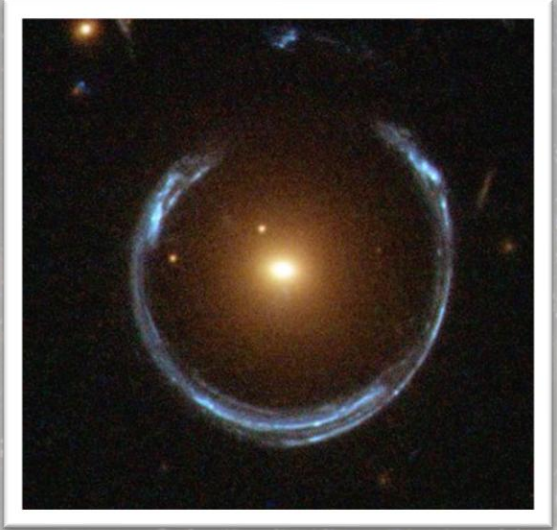

SLACS: The Sloan Lens ACS Survey

www.SLACS.org

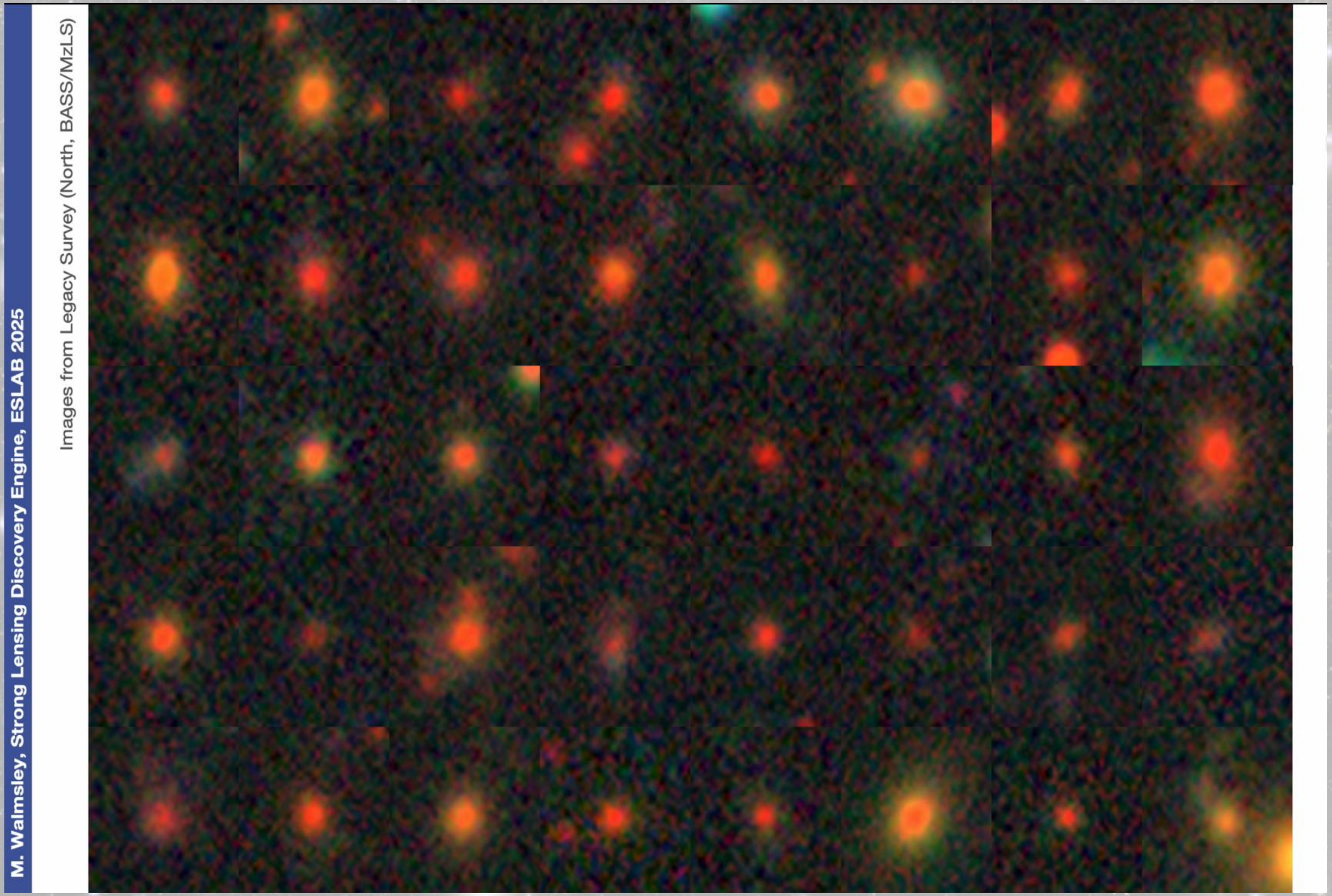
A. Bolton (U. Hawai'i IfA), L. Koopmans (Kapteyn), T. Treu (UCSB), R. Gavazzi (IAP Paris), L. Moustakas (JPL/Caltech), S. Burles (MIT)

Image credit: A. Bolton, for the SLACS team and NASA/ESA



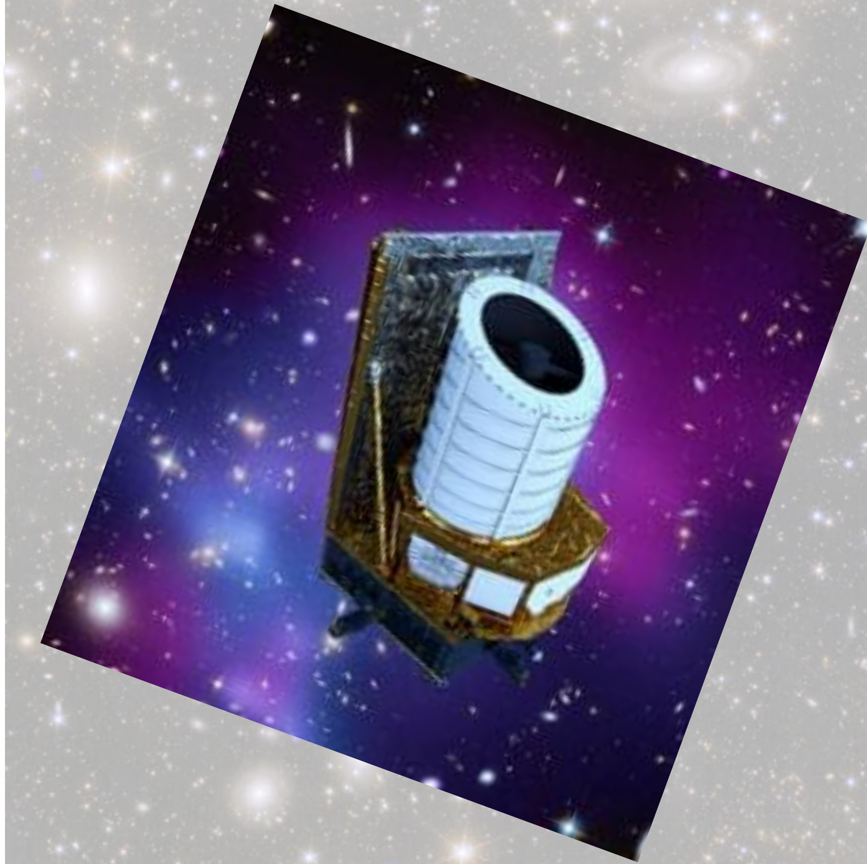


Vi ricordate del seeing atmosferico?

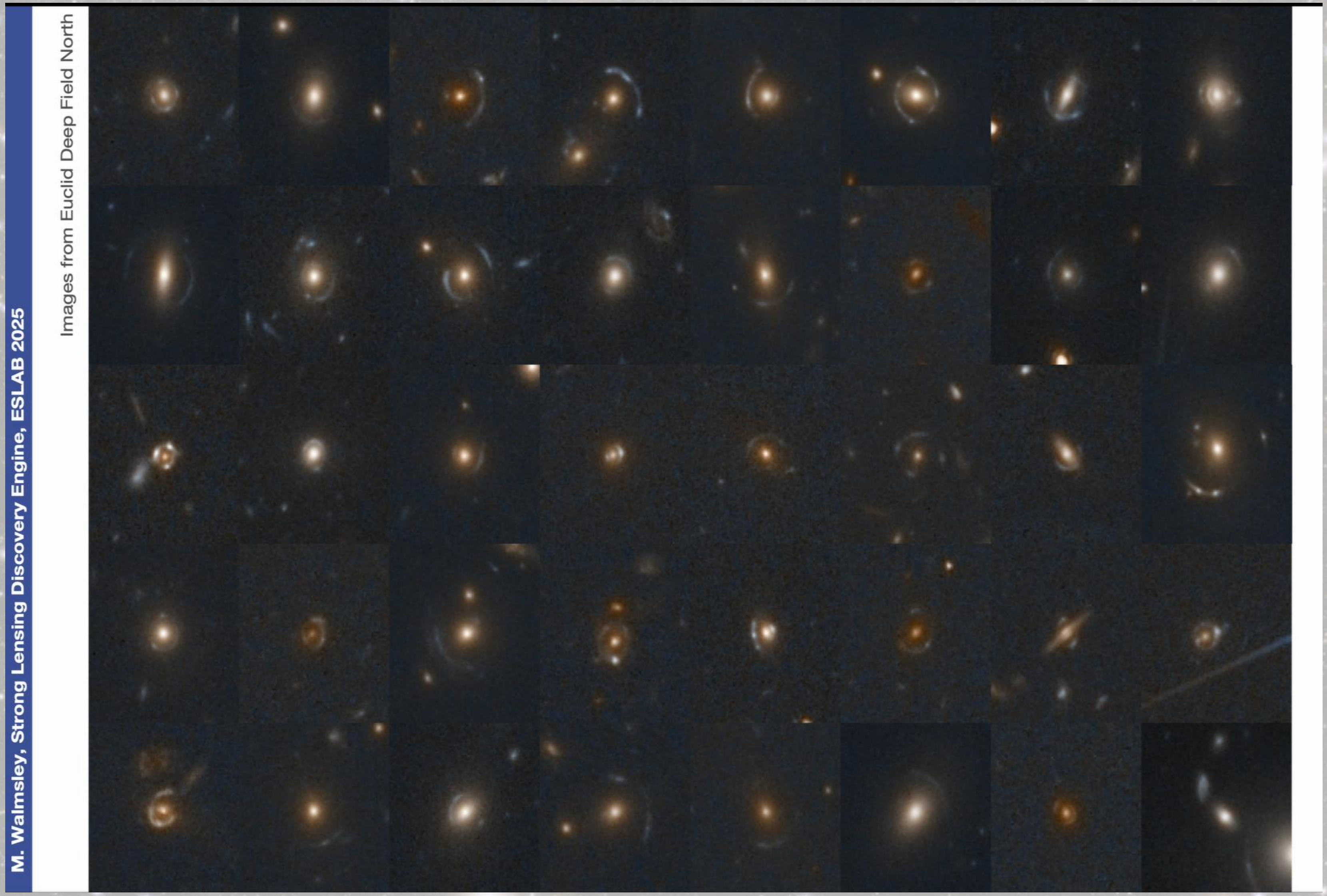


M. Walmsley, Strong Lensing Discovery Engine, ESLAB 2025

Images from Legacy Survey (North, BASS/MzLS)

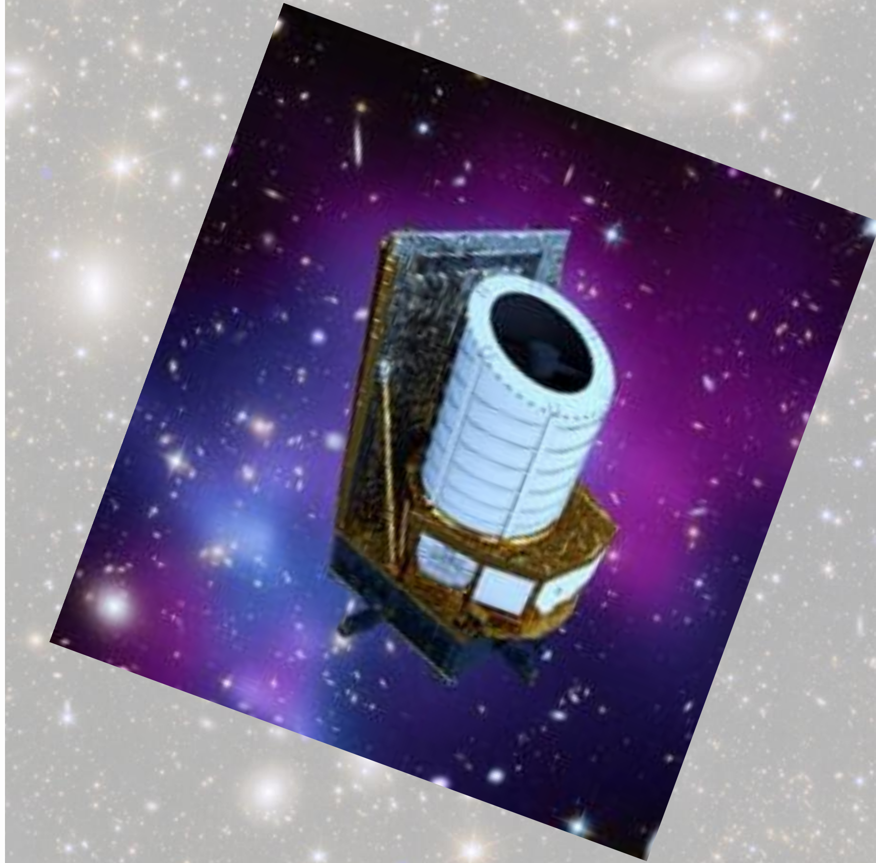


Vi ricordate del seeing atmosferico?



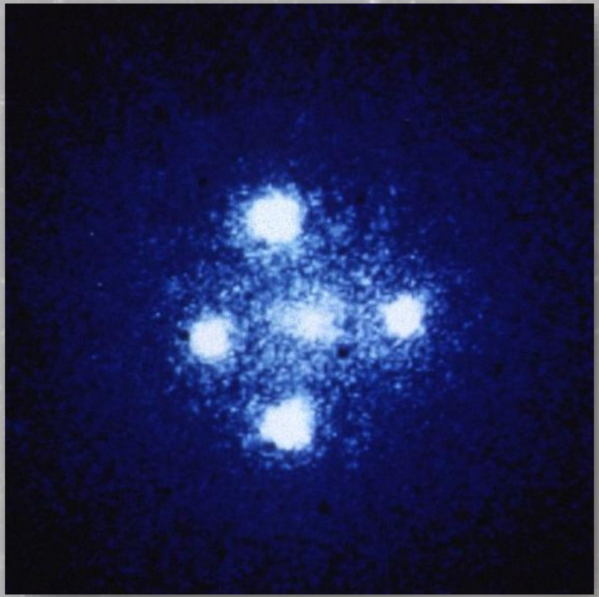
M. Walmsley, Strong Lensing Discovery Engine, ESLAB 2025

Images from Euclid Deep Field North

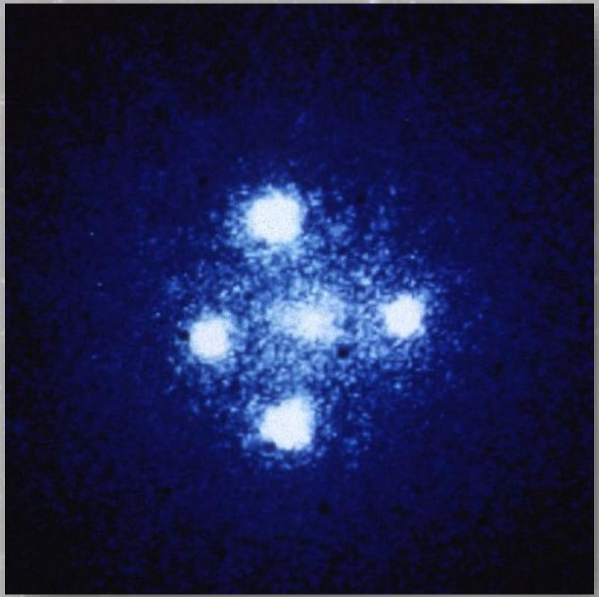


Perché sono importanti le lenti gravitazionali?

Orologio cosmico

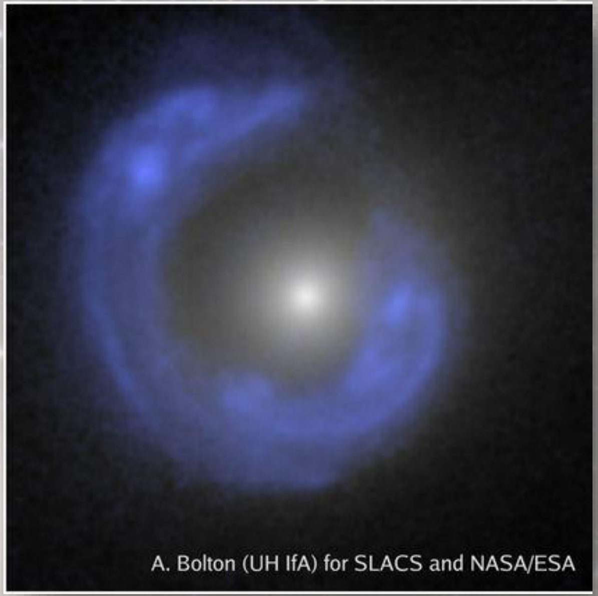


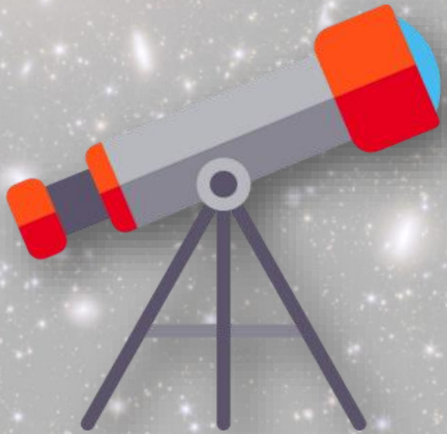
Orologio cosmico



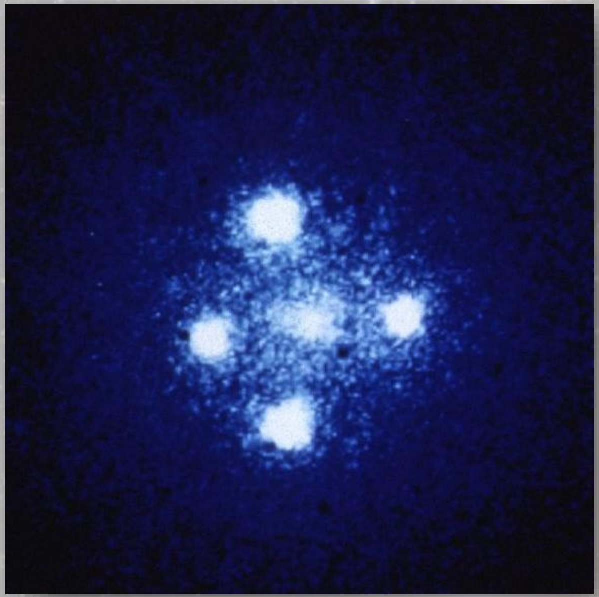
60
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
10
20
30
40
50

Telescopio cosmico


A. Bolton (UH IfA) for SLACS and NASA/ESA



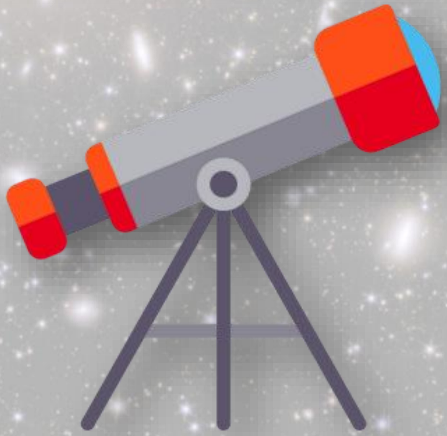
Orologio cosmico



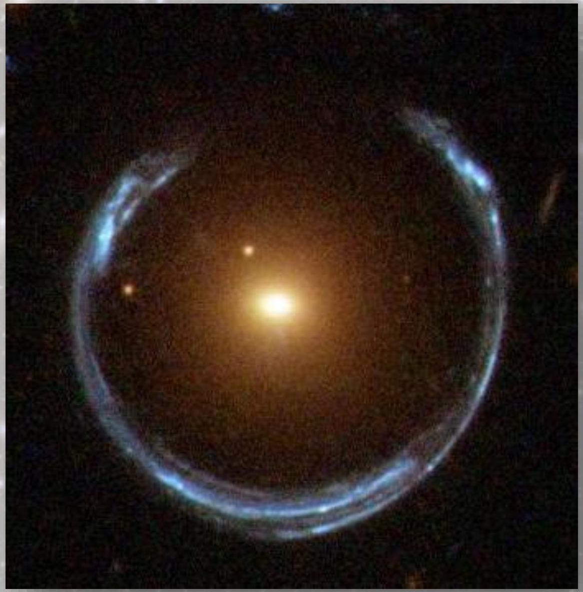
55
50
10
40
20
30
5
50
10
45
15
40
20
35
25
30

Telescopio cosmico

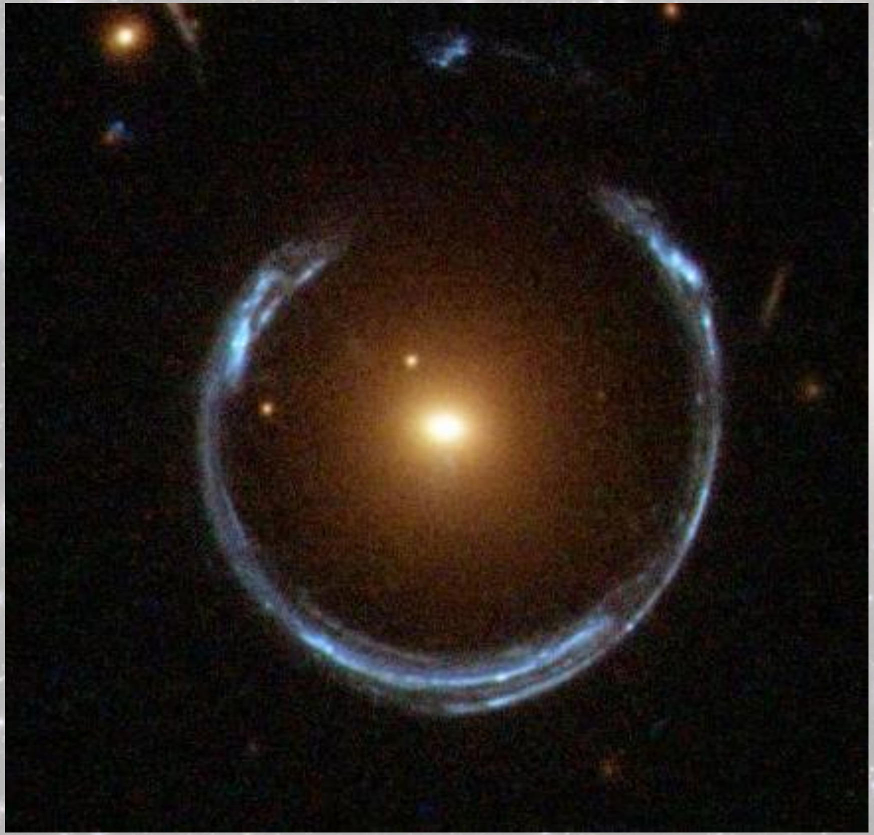
A. Bolton (UH IfA) for SLACS and NASA/ESA



Bilancia cosmica

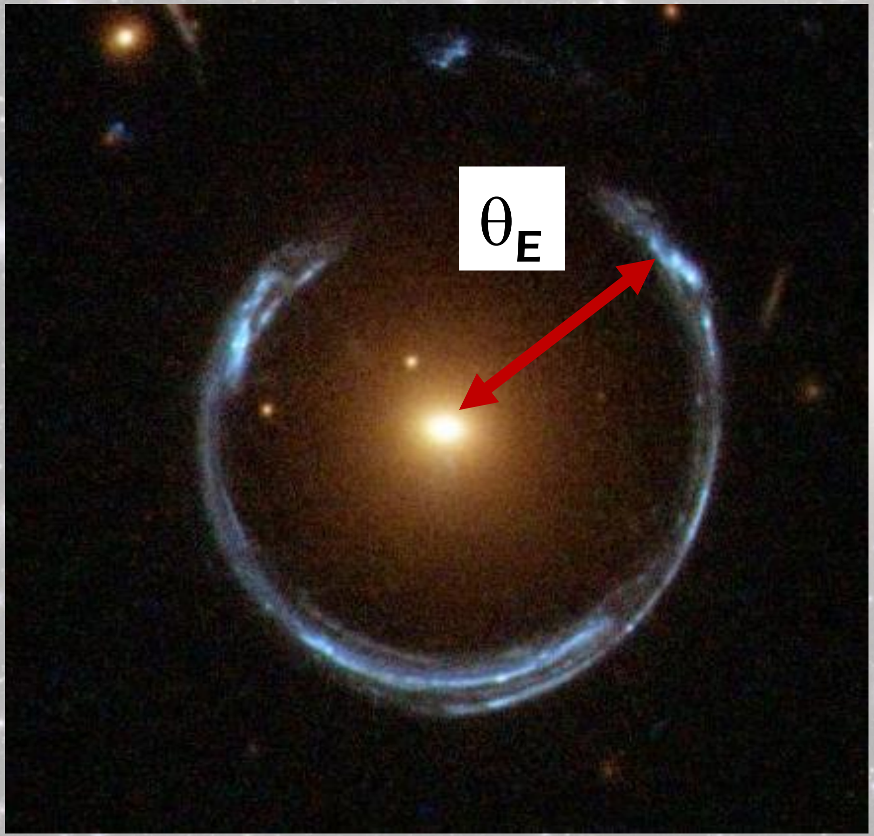


La stima di massa più precisa nell’Universo



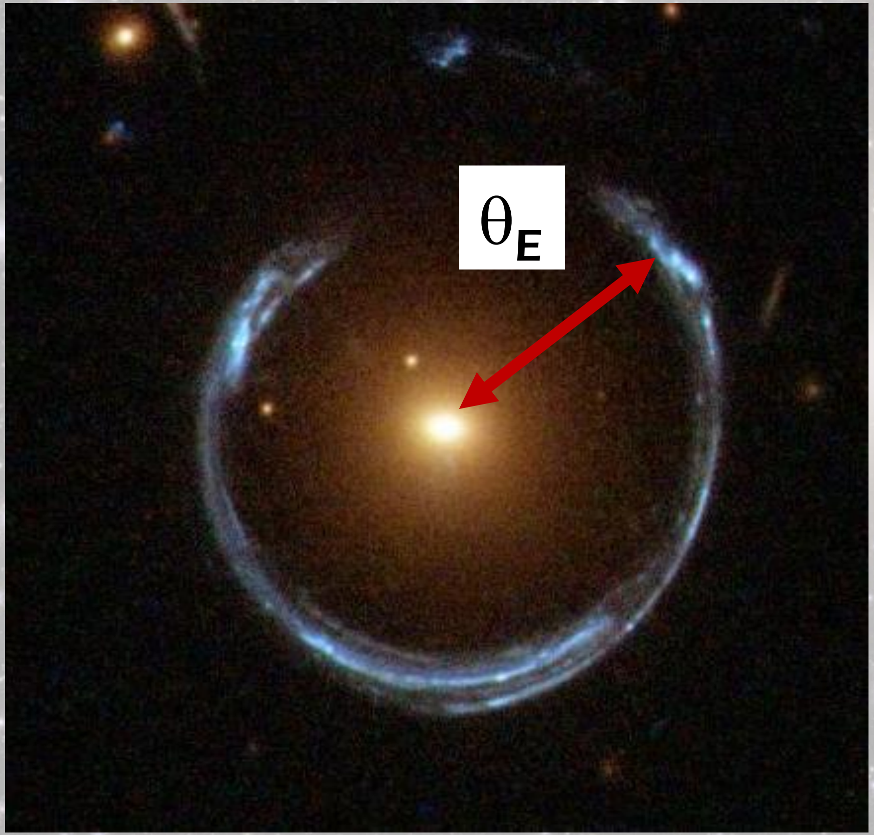
La stima di massa più precisa nell'Universo

Raggio di Einstein (θ_E)



La stima di massa più precisa nell’Universo

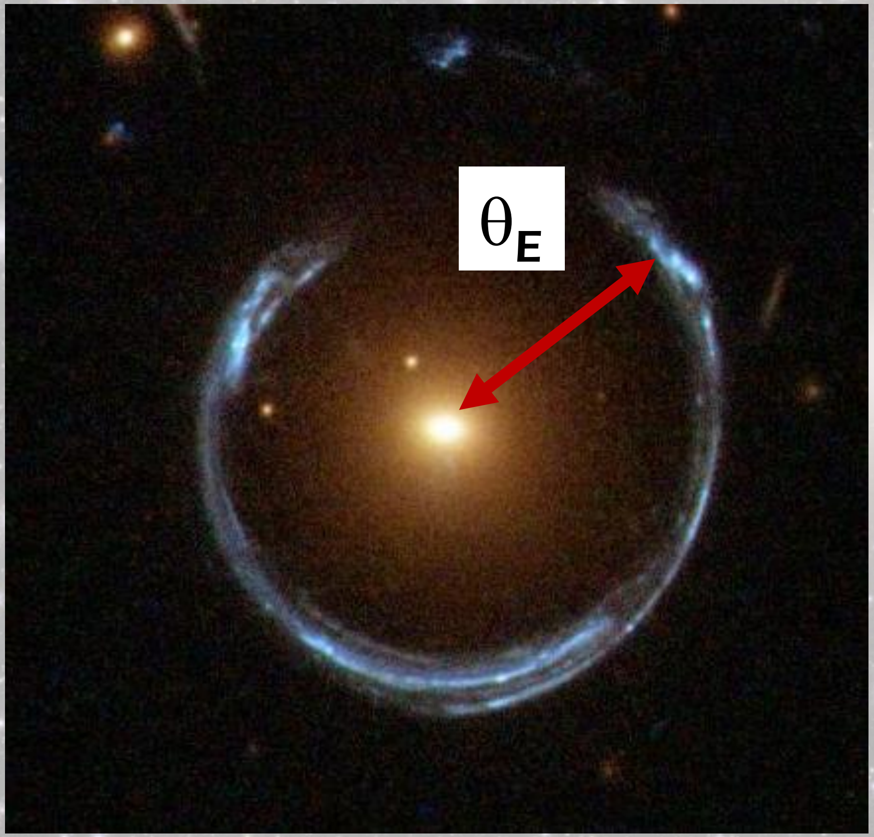
Raggio di Einstein (θ_E)



$$\theta_E = \sqrt{\frac{D_{LS}}{D_S D_L}\frac{4GM}{c^2}}$$

La stima di massa più precisa nell'Universo

Raggio di Einstein (θ_E)

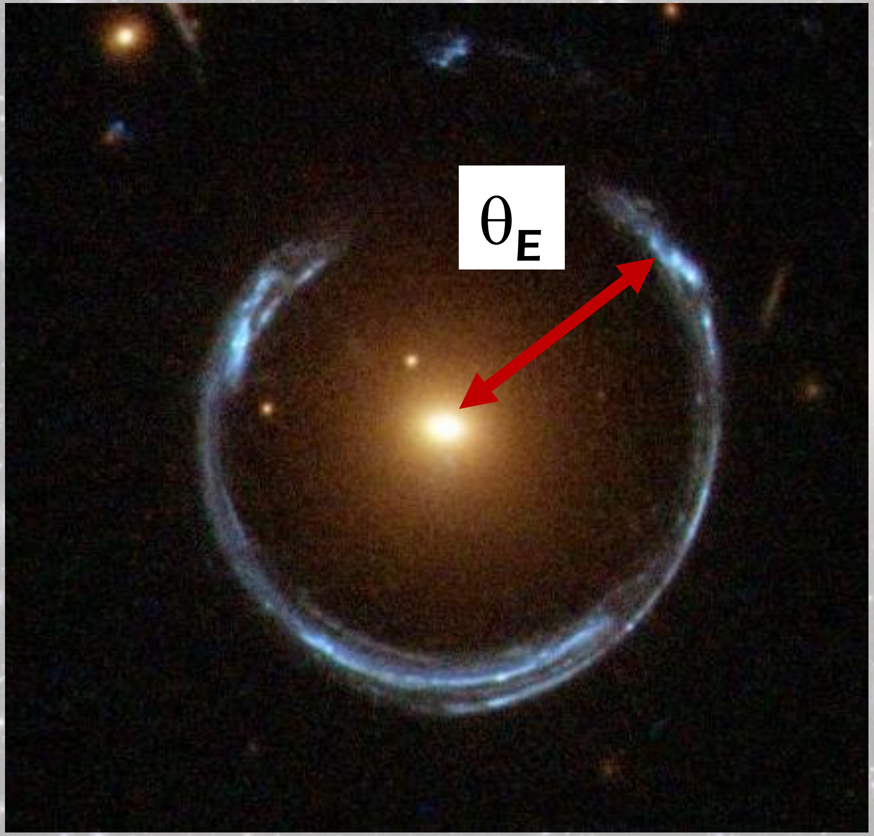


Massa della lente

$$\theta_E = \sqrt{\frac{D_{LS}}{D_S D_L} \frac{4GM}{c^2}}$$

La stima di massa più precisa nell'Universo

Raggio di Einstein (θ_E)



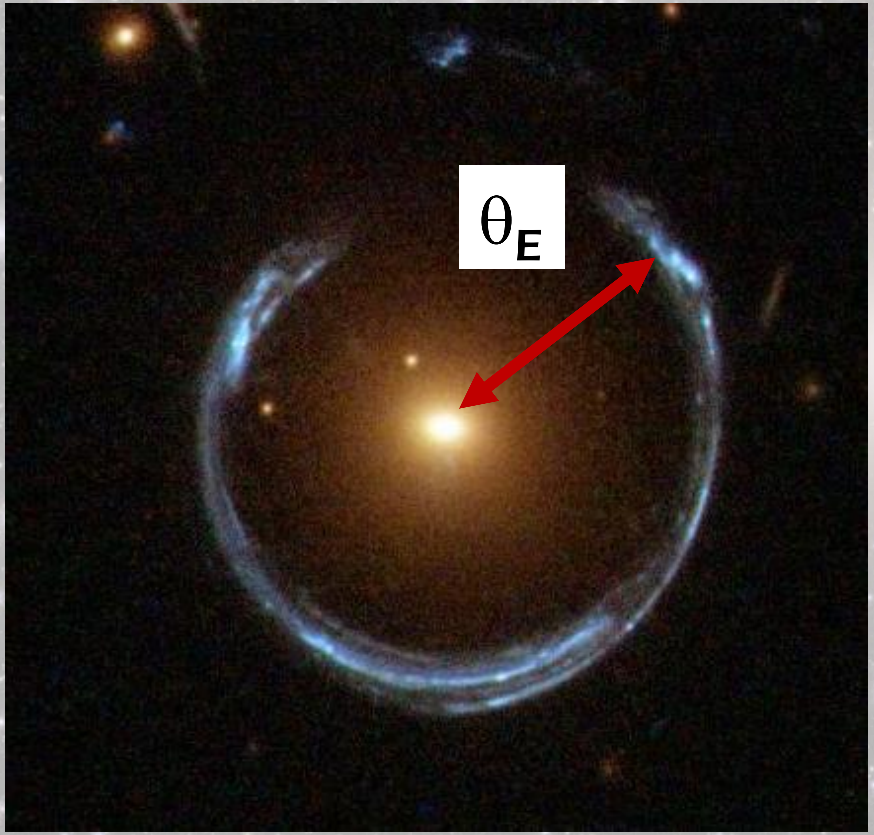
Distanze tra lente e sorgente D_{LS},
dalla sorgente D_S,
dalla lente D_L

Massa della lente

$$\theta_E = \sqrt{\frac{D_{LS}}{D_S D_L}\frac{4GM}{c^2}}$$

La stima di massa più precisa nell'Universo

Raggio di Einstein (θ_E)



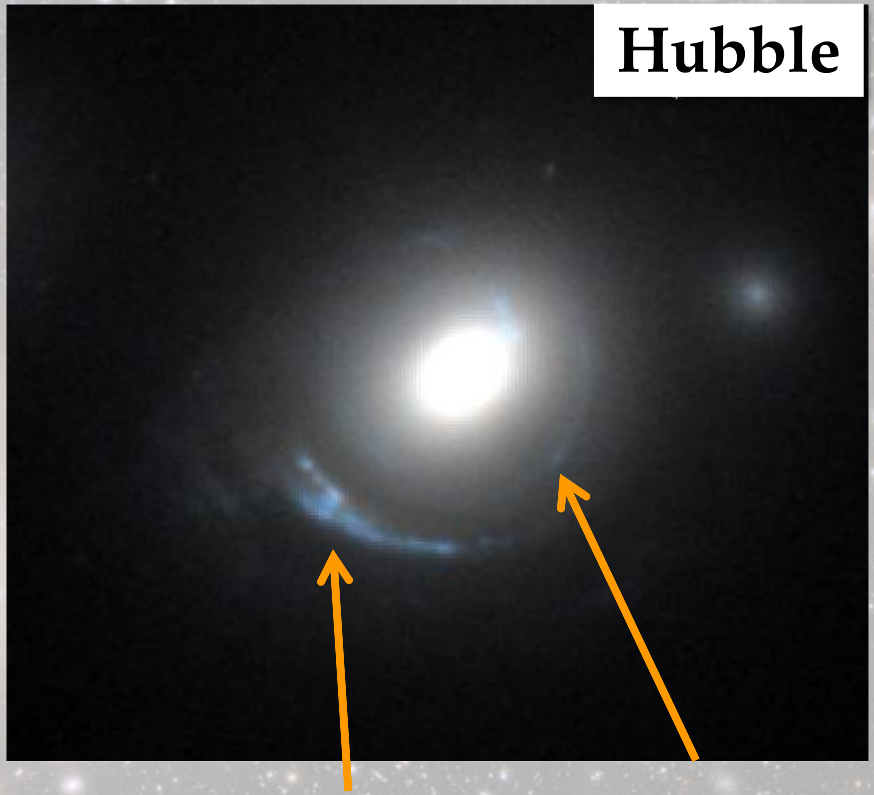
Distanze tra lente e sorgente D_{LS},
dalla sorgente D_S,
dalla lente D_L

Massa della lente

$$\theta_E = \sqrt{\frac{D_{LS}}{D_S D_L} \frac{4GM}{c^2}}$$

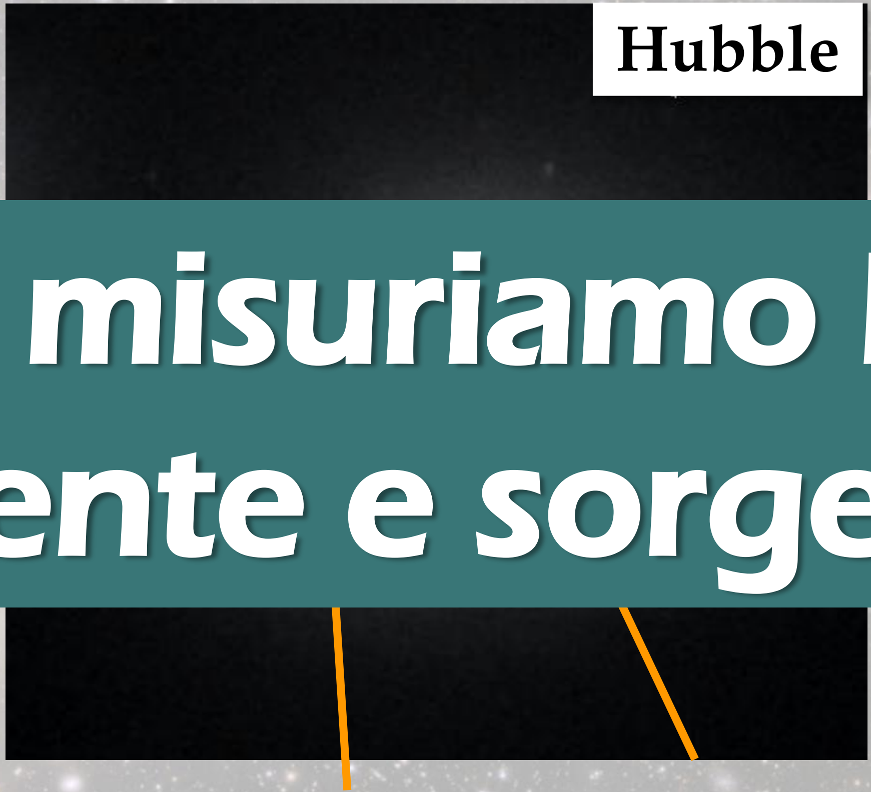
$$\boxed{M(\theta_E) \propto \theta_E^2}$$

Telescopio Spaziale Hubble



Attraverso altre osservazioni abbiamo scoperto che quegli archi sono più distanti della galassia al centro

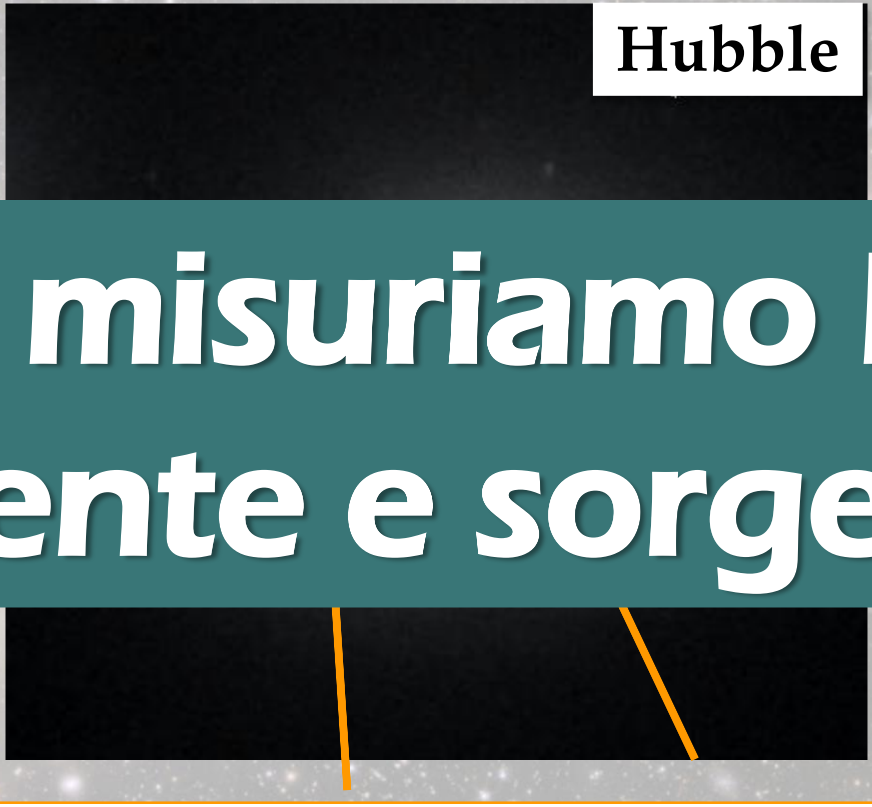
Telescopio Spaziale Hubble



Ma come misuriamo le distanze di lente e sorgente?

Attraverso altre osservazioni abbiamo scoperto che quegli archi sono più distanti della galassia al centro

Telescopio Spaziale Hubble

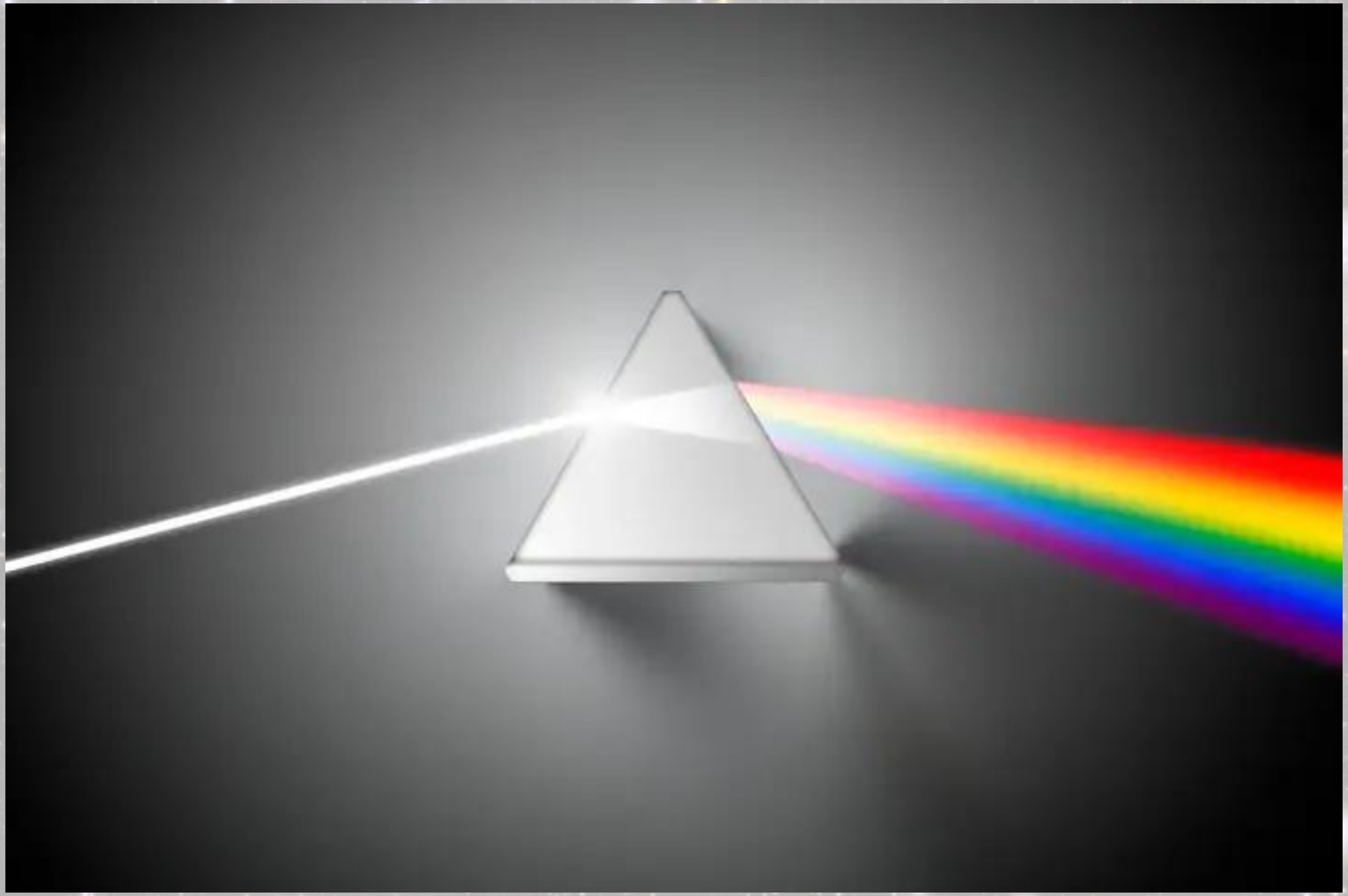


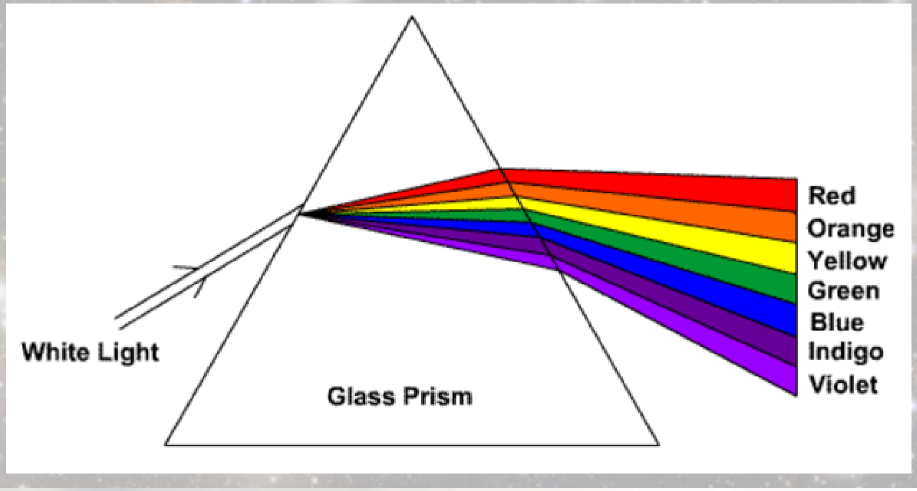
Ma come misuriamo le distanze di lente e sorgente?

Misurando gli spettri e i redshift

In astronomia, uno spettro non è un fantasma

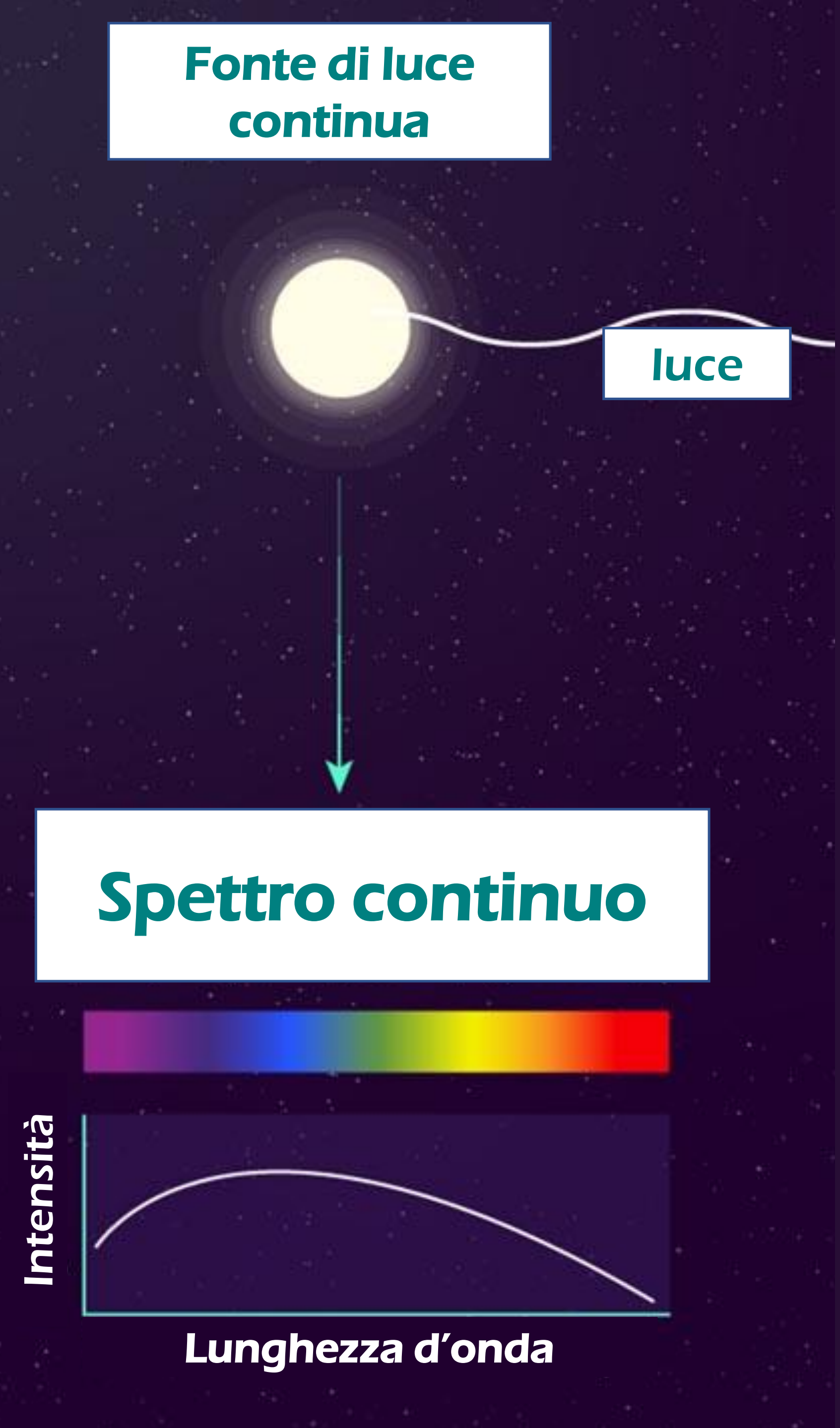
Scomponiamo ancora di più di quanto fatto con i filtri




White Light
Glass Prism
Red
Orange
Yellow
Green
Blue
Indigo
Violet

Vari tipi di spettri

Credit: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)/Tortora&Leccia



Fonte di luce continua

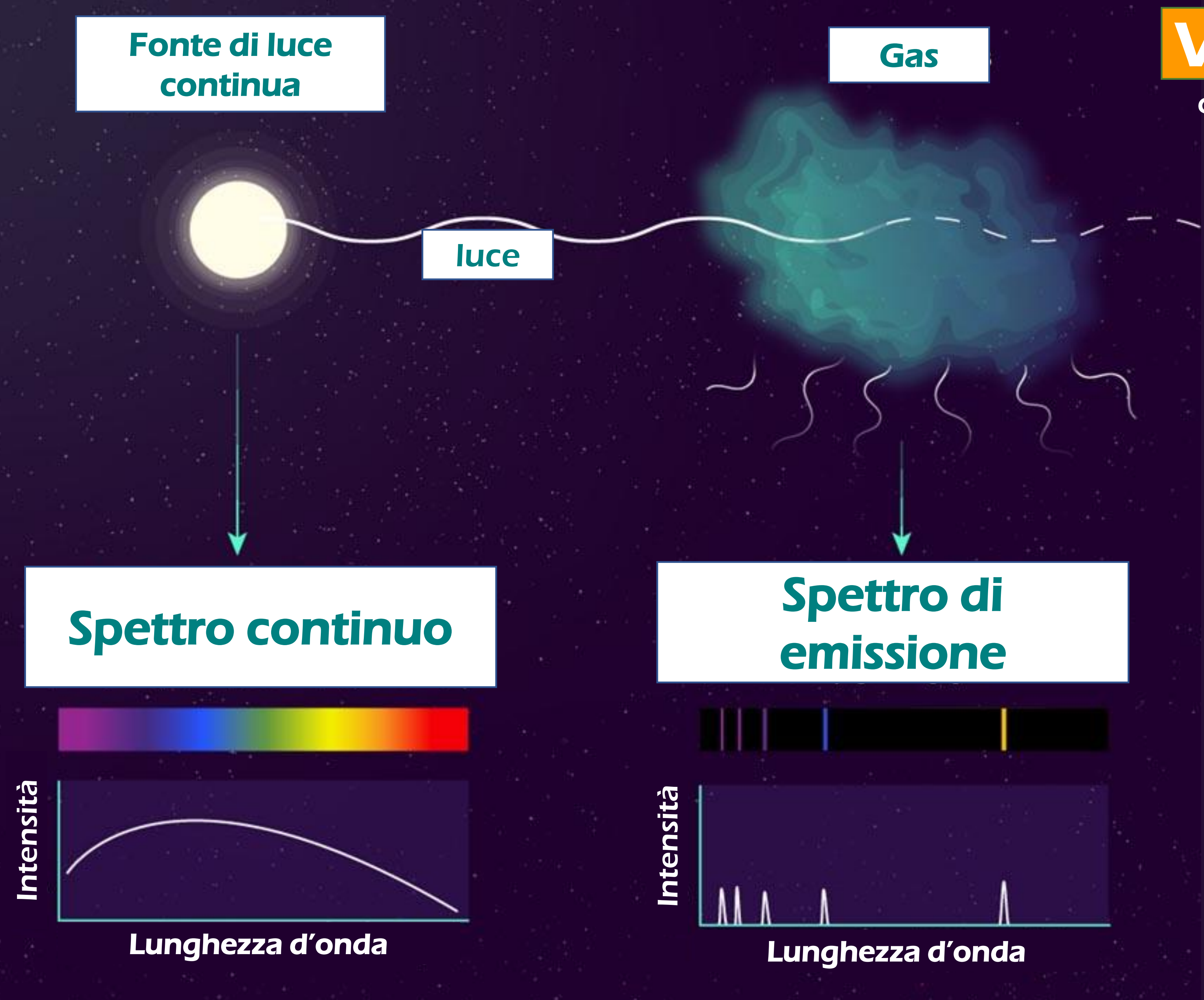
luce

Spettro continuo

Intensità
Lunghezza d’onda

Vari tipi di spettri

Credit: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)/Tortora&Leccia



Fonte di luce continua

luce

Gas

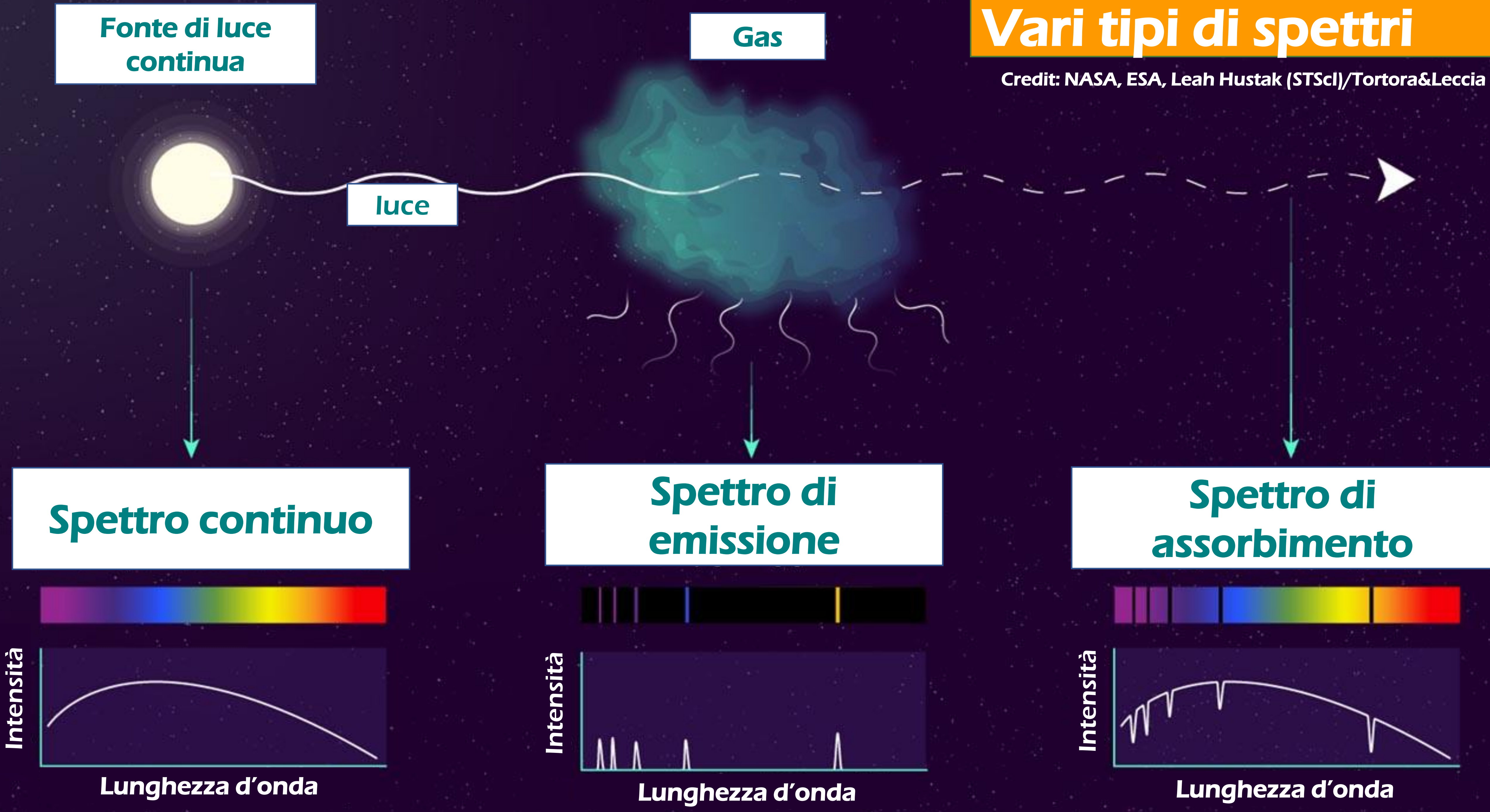
Spettro continuo

Spettro di emissione

Intensità
Lunghezza d’onda
Intensità
Lunghezza d’onda

Vari tipi di spettri

Credit: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)/Tortora&Leccia



Fonte di luce continua

luce

Gas

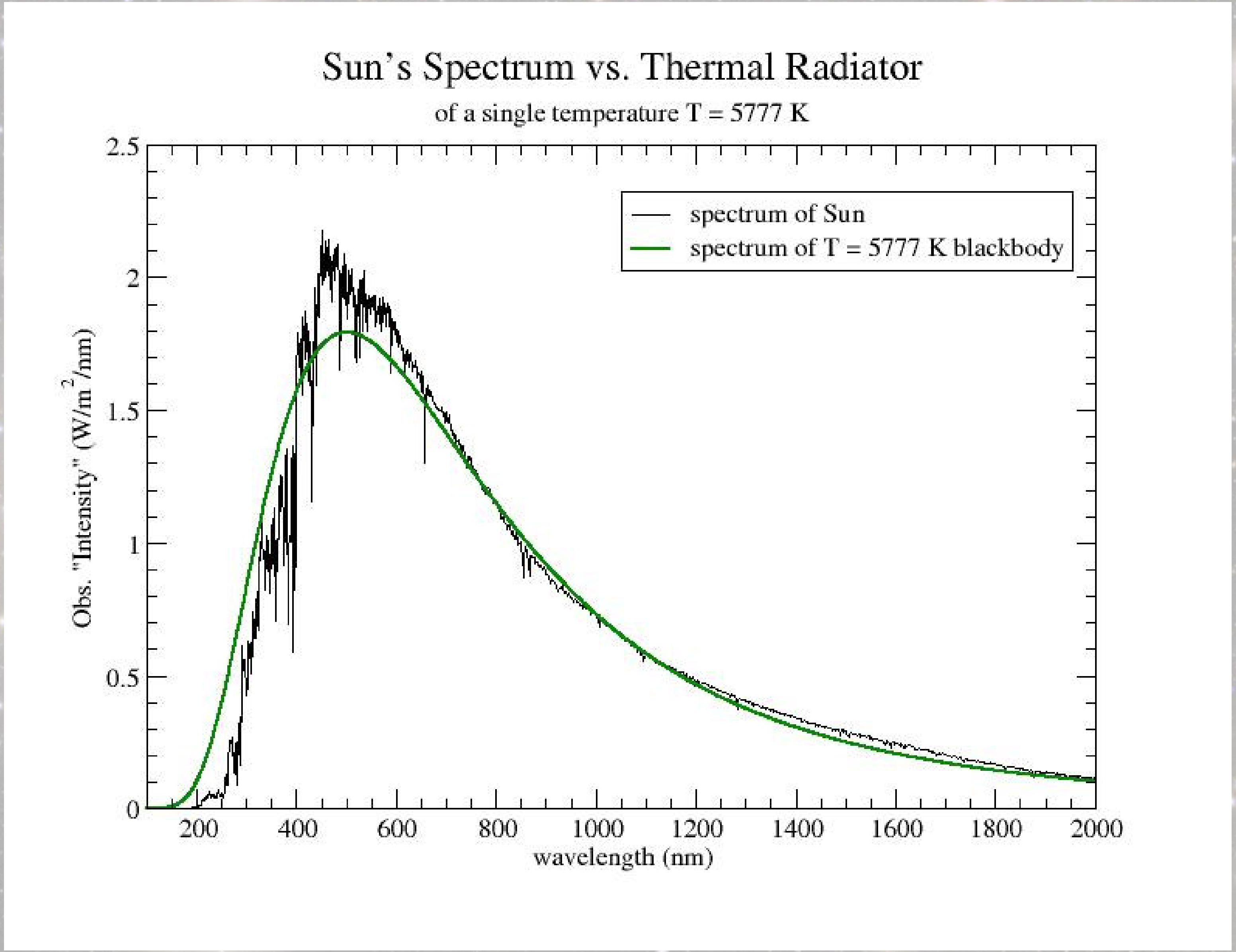
Spettro continuo

Spettro di emissione

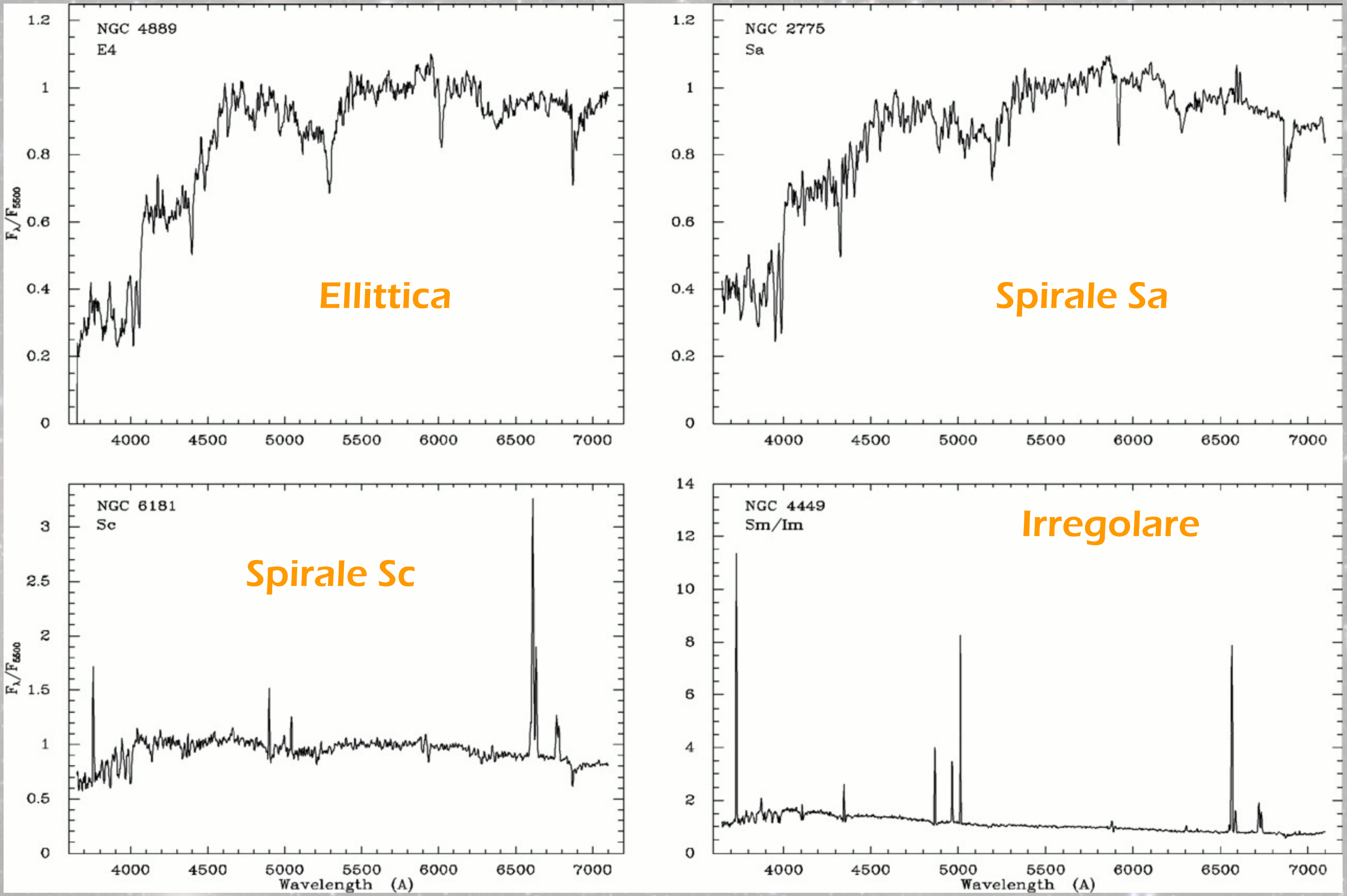
Spettro di assorbimento

Intensità
Lunghezza d'onda
Intensità
Lunghezza d'onda
Intensità
Lunghezza d'onda

Lo spettro del sole



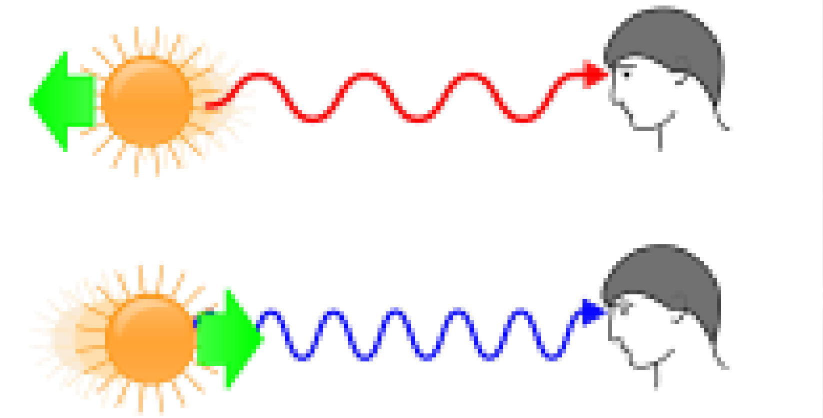
Lo spettro delle galassie



Kennicutt 1992

Redshift: spostamento verso il rosso

Effetto Doppler

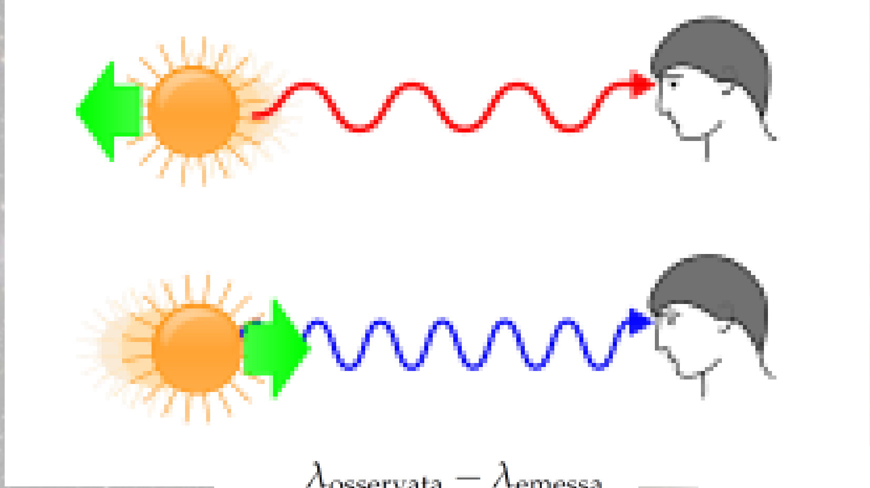


$$z = \frac{\lambda_{\mathrm{osservata}} - \lambda_{\mathrm{emessa}}}{\lambda_{\mathrm{emessa}}}$$

$$v \approx z \cdot c$$

bassi z

Effetto Doppler

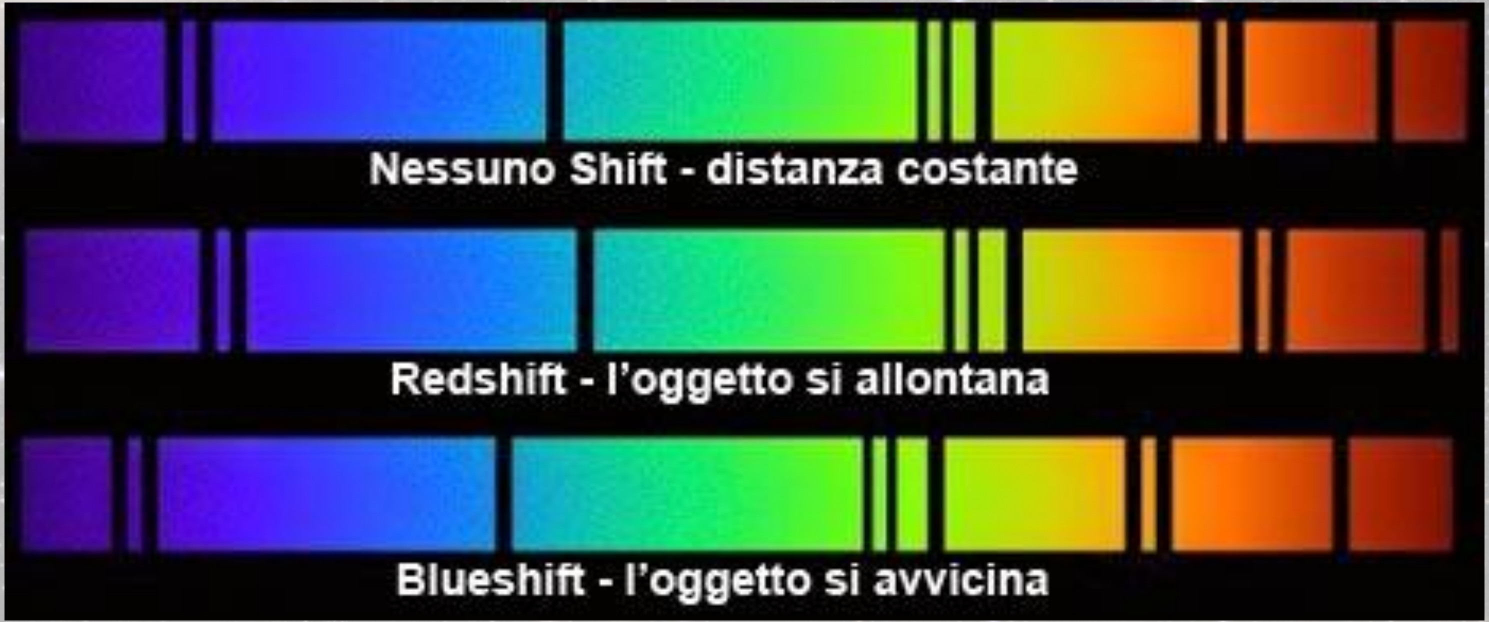


$$z = \frac{\lambda_{\mathrm{osservata}} - \lambda_{\mathrm{emessa}}}{\lambda_{\mathrm{emessa}}}$$

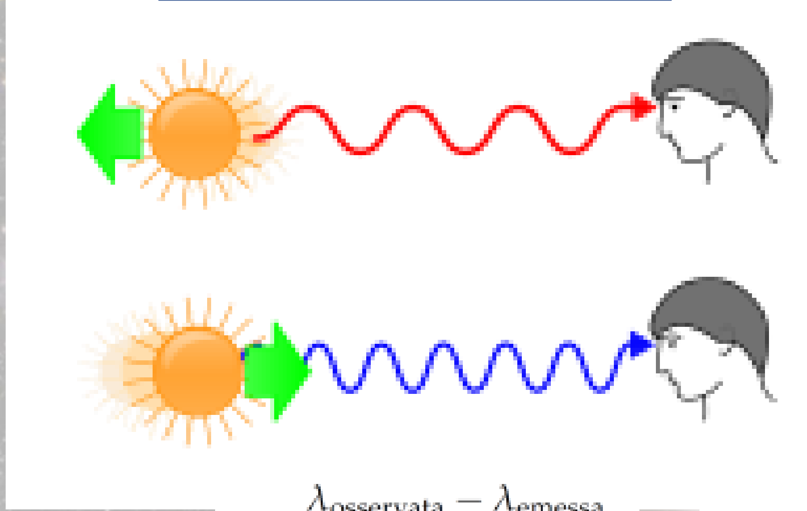
$$v \approx z \cdot c$$

bassi z

Come riferimento si usa una lampada per la quale sappiamo dove sono le righe


Nessuno Shift - distanza costante
Redshift - l'oggetto si allontana
Blueshift - l'oggetto si avvicina

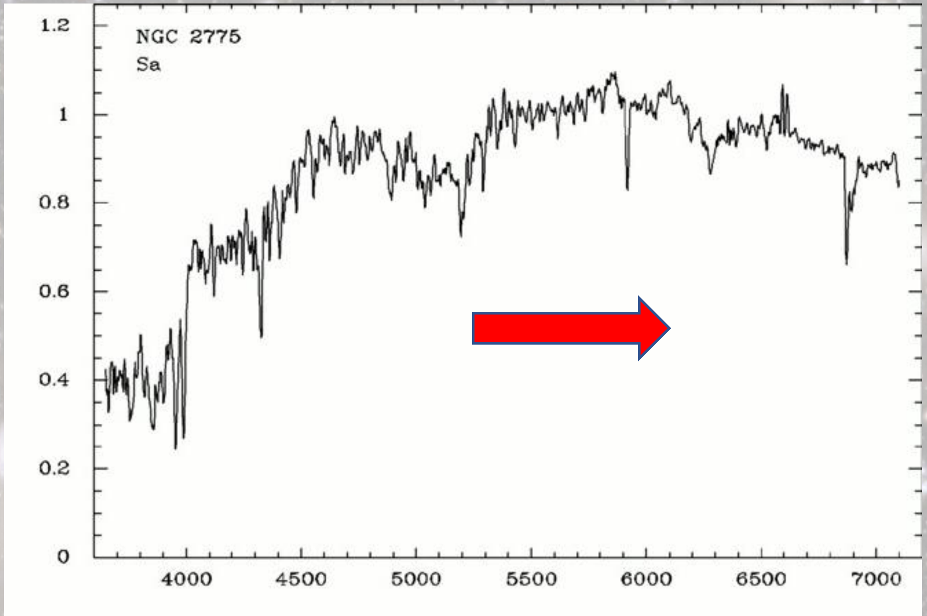
Effetto Doppler



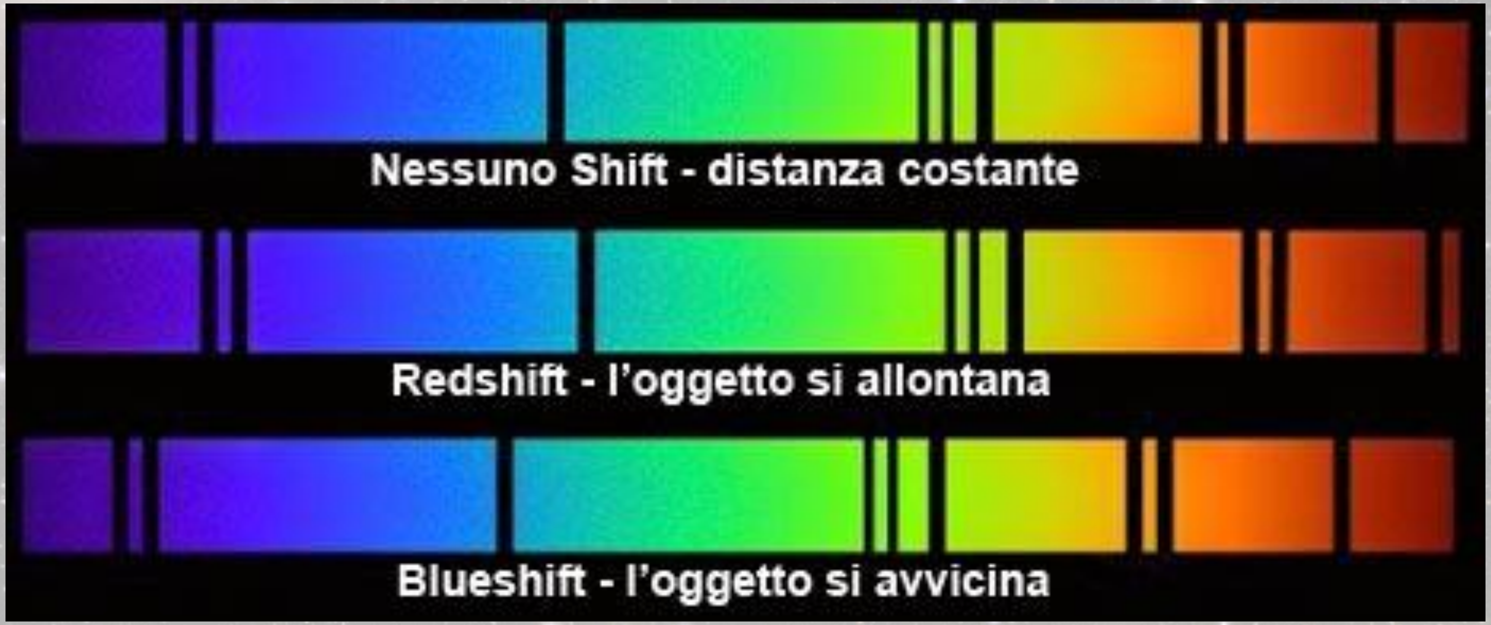
$$z = \frac{\lambda_{\text{osservata}} - \lambda_{\text{emessa}}}{\lambda_{\text{emessa}}}$$

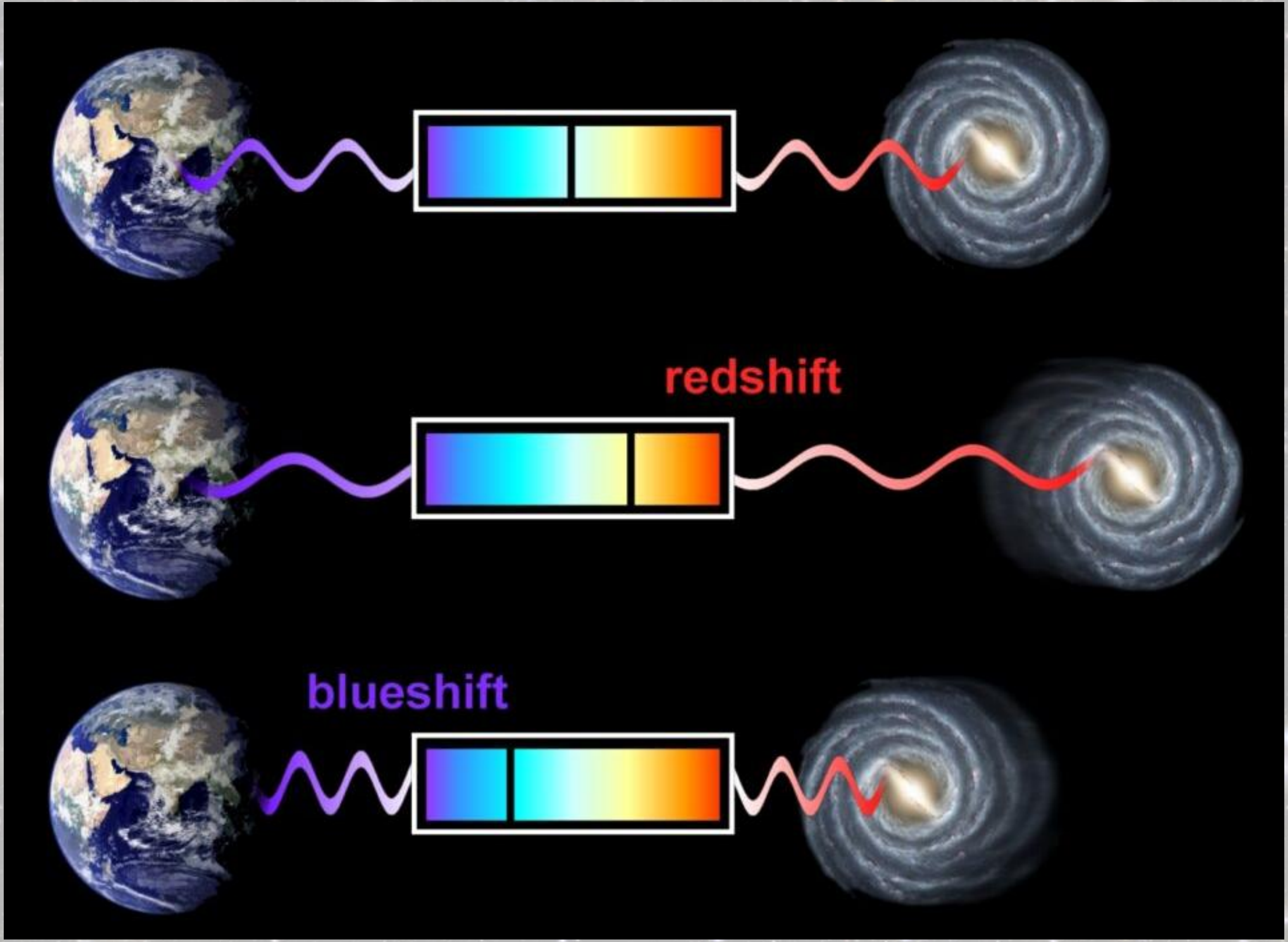
$$v \approx z \cdot c$$

bassi z

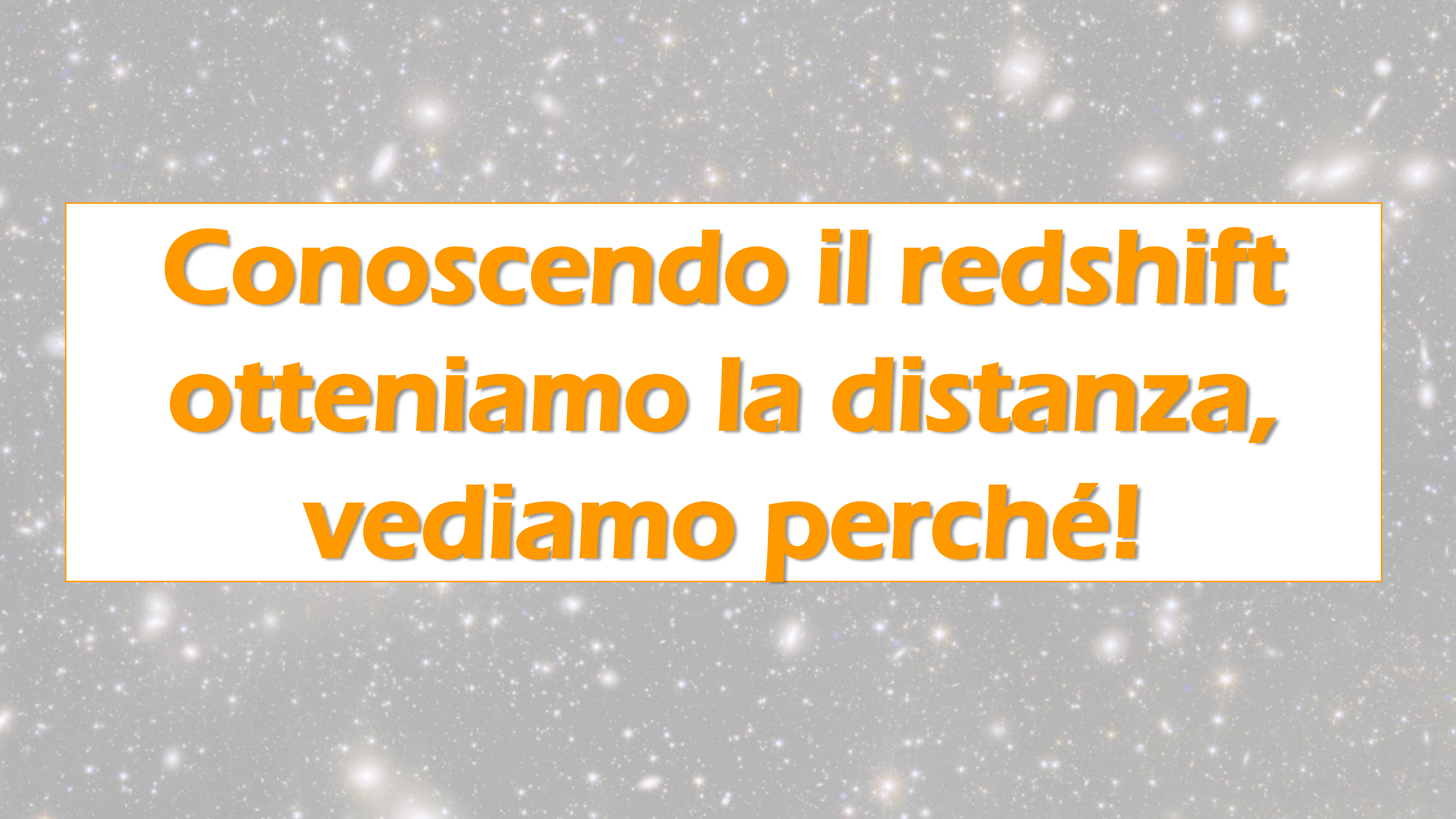


Come riferimento si usa una lampada per la quale sappiamo dove sono le righe


Nessuno Shift - distanza costante
Redshift - l'oggetto si allontana
Blueshift - l'oggetto si avvicina

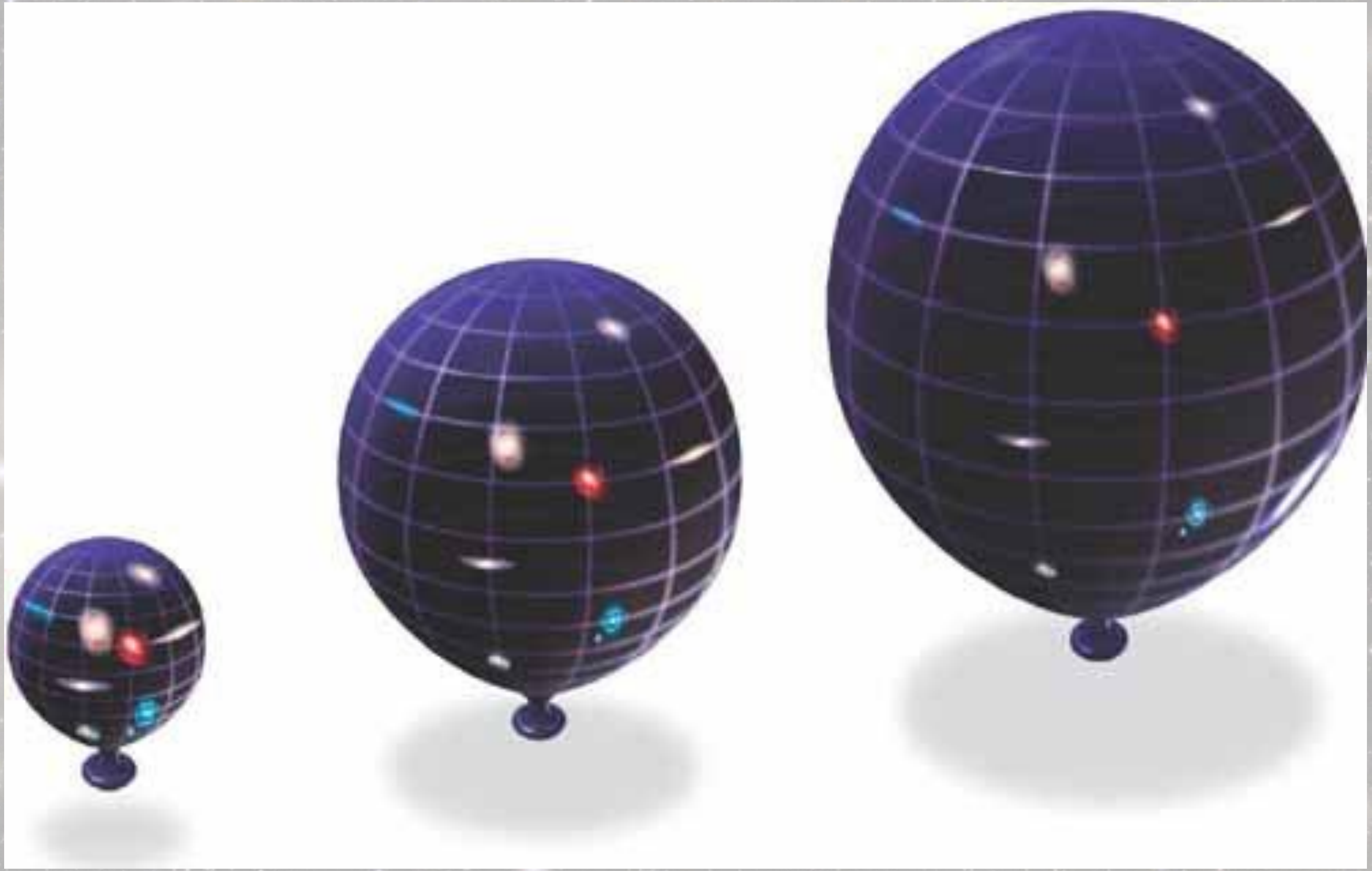

redshift
blueshift

https://spacegalaxy.altervista.org/red-shift-e-blue-shift/



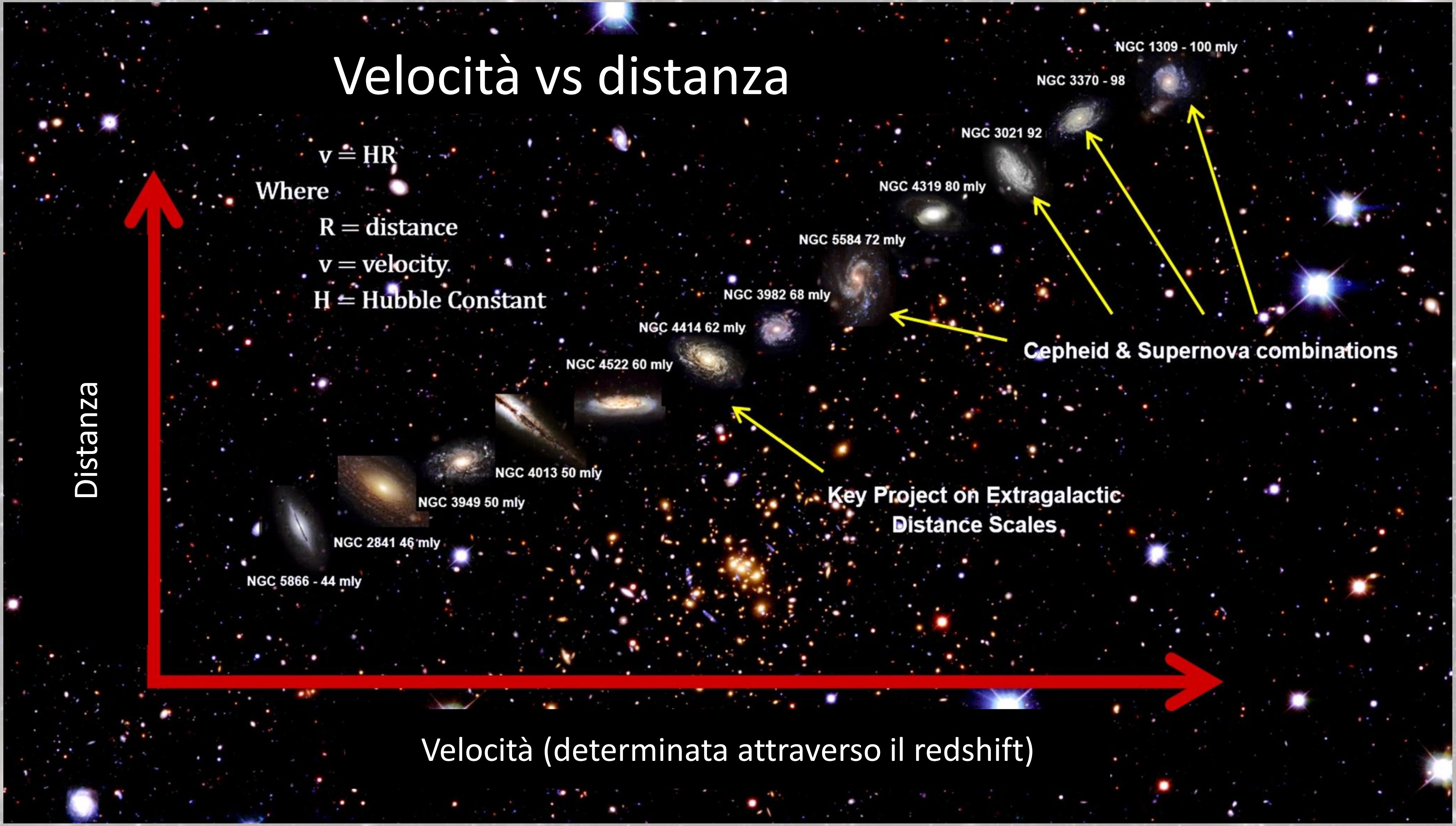
Conoscendo il redshift otteniamo la distanza, vediamo perché!

L’universo si sta espandendo



La Relatività Generale è la teoria che ci ha permesso di descrivere l’evoluzione dell’Universo

Velocità vs distanza

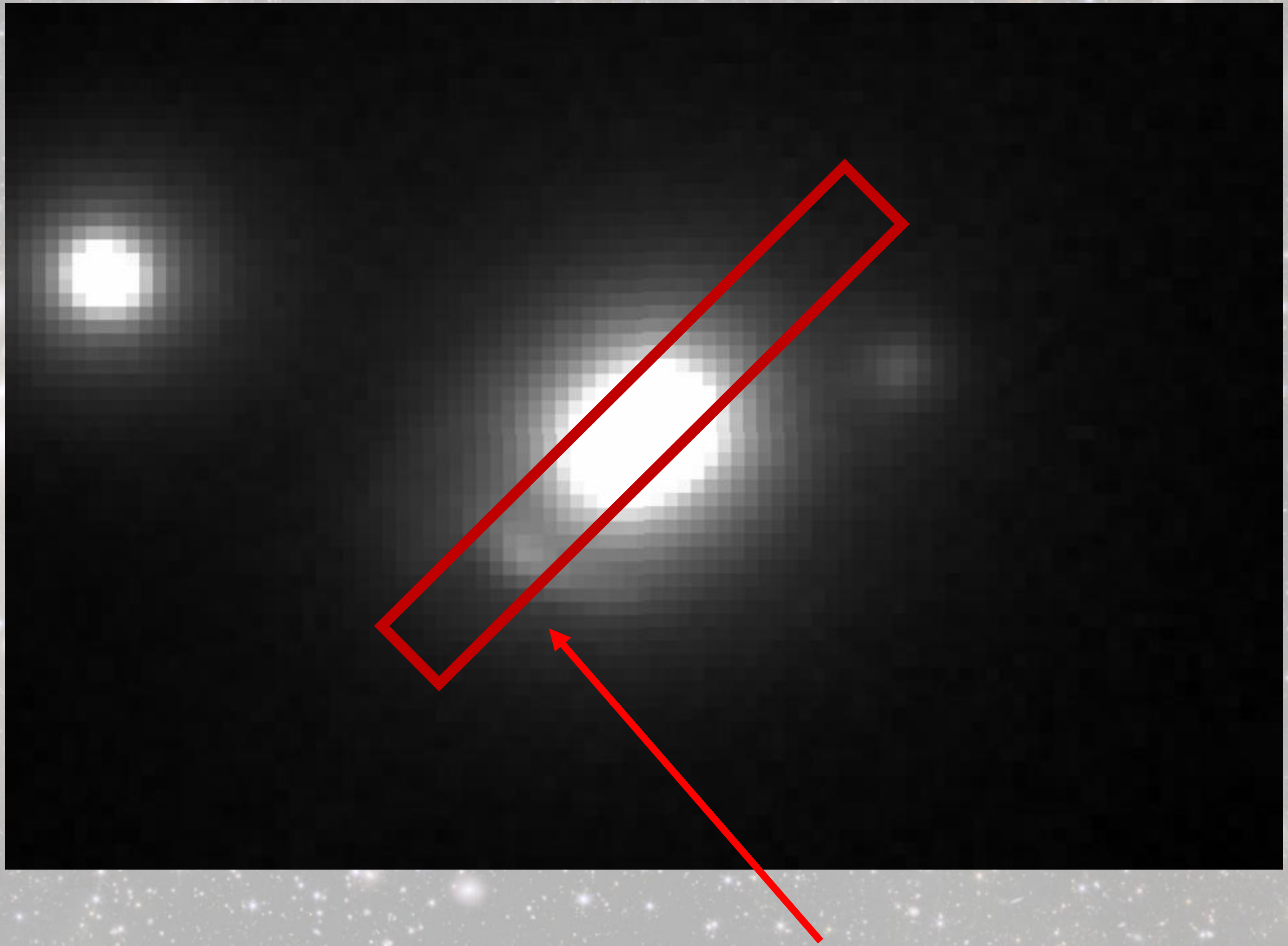

v = HR
Where
R = distance
v = velocity
H = Hubble Constant
Distanza
Velocità (determinata attraverso il redshift)
NGC 1309 - 100 mly
NGC 3370 - 98
NGC 3021 92
NGC 4319 80 mly
NGC 5584 72 mly
NGC 3982 68 mly
NGC 4414 62 mly
NGC 4522 60 mly
NGC 4013 50 mly
NGC 3949 50 mly
NGC 2841 46 mly
NGC 5866 - 44 mly
Cepheid & Supernova combinations
Key Project on Extragalactic Distance Scales

https://cosmosatyourdoorstep.com/2023/03/31/what-is-the-hubble-law/

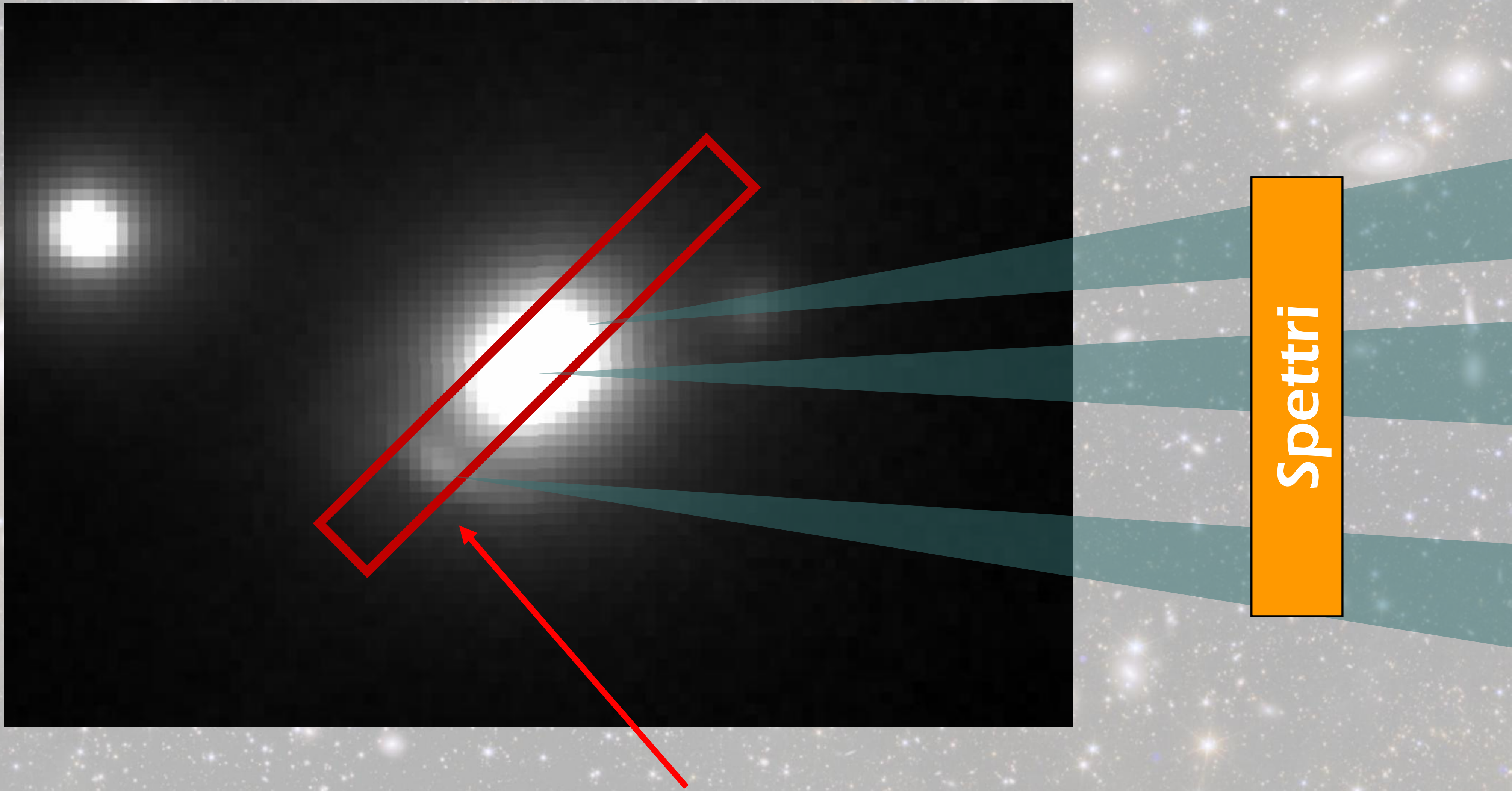
Quindi, se misuriamo il redshift conosciamo la distanza della galassia!!!

Questa è una relazione che vediamo sperimentalmente e attraverso la Relatività Generale di Einstein

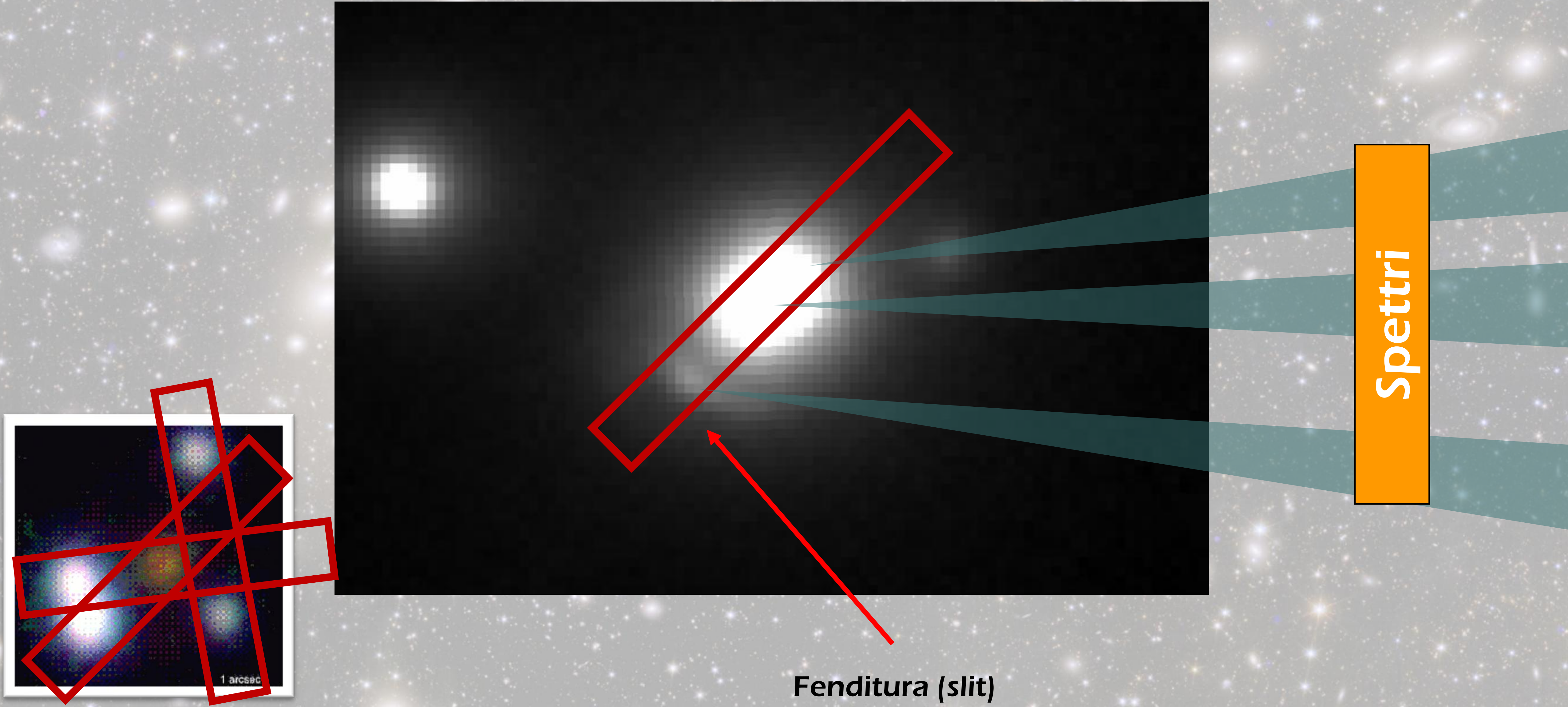
In pratica come misuriamo il redshift?



Fenditura (slit)



Fenditura (slit)



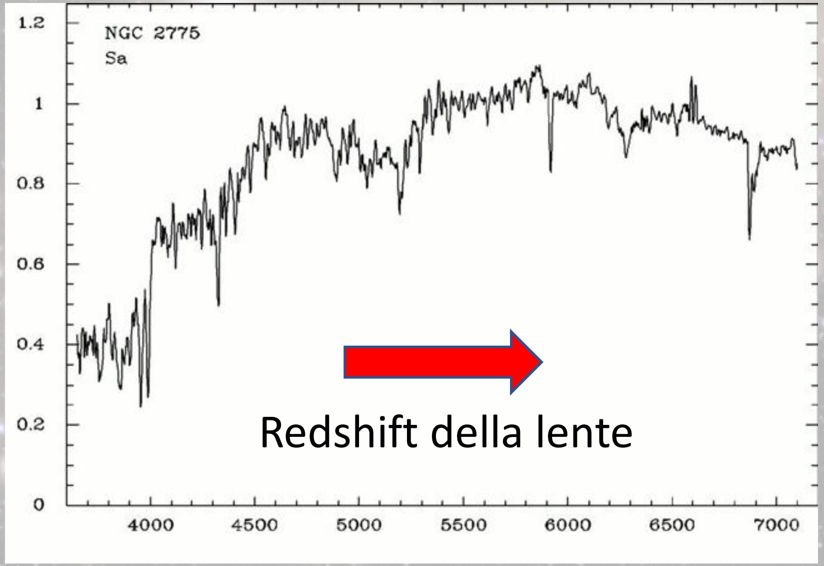
Spettri

Fenditura (slit)

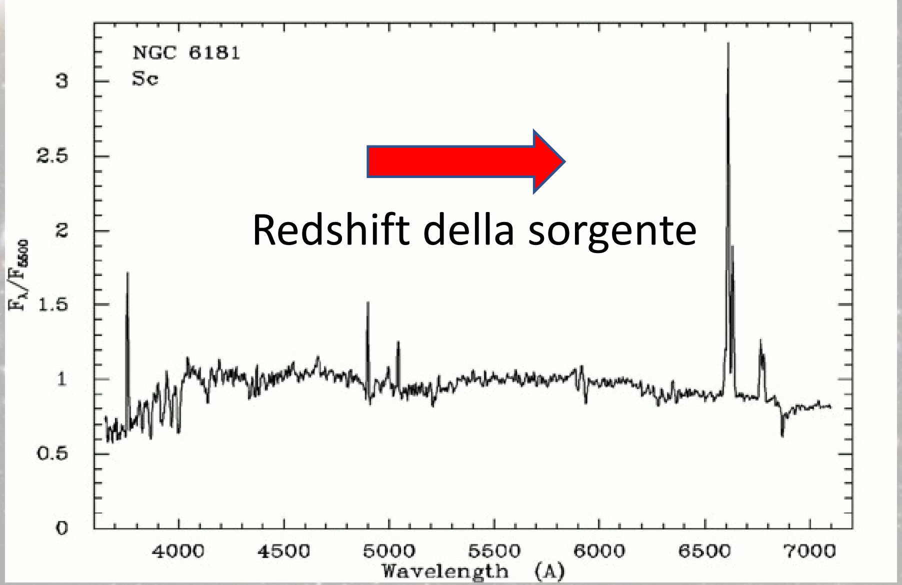
In funzione del valore del **Raggio di Einstein**, la **dimensione del pixel** (0.252 arcsec/px per il TNG), il **seeing atmosferico** e il **rapporto segnale-rumore**, potremmo avere due casi

1

Riusciamo a risolvere spettro di lente e sorgente



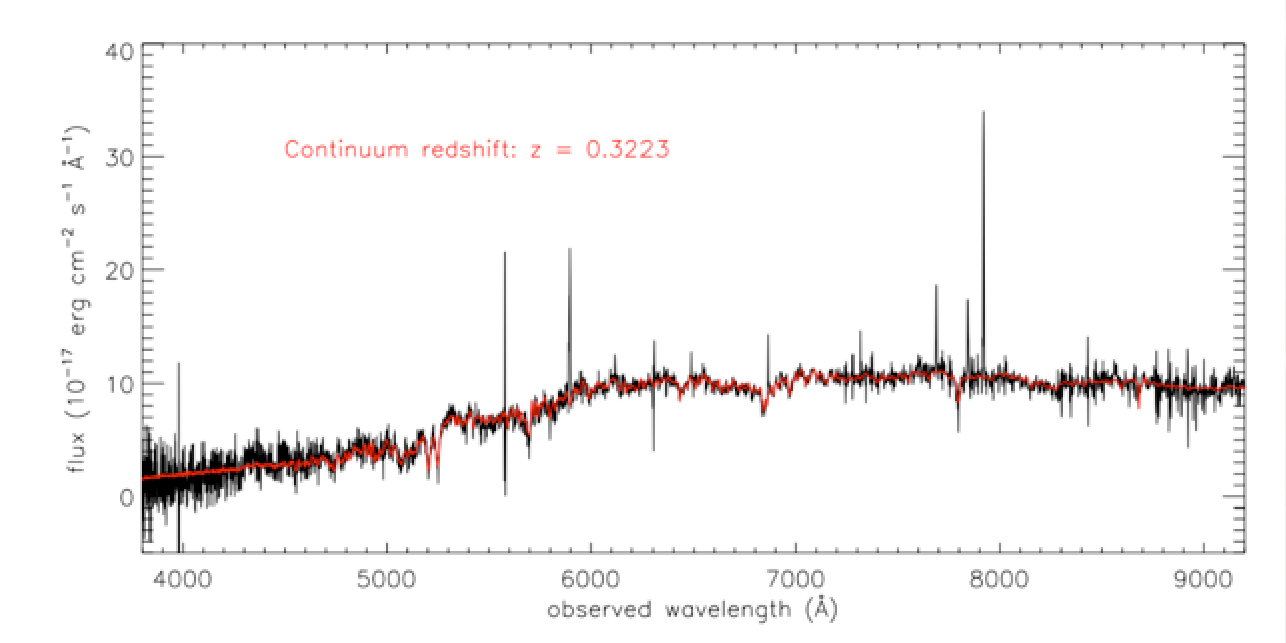
Redshift della lente



Redshift della sorgente

Non riusciamo a risolvere spettro di lente e sorgente

2

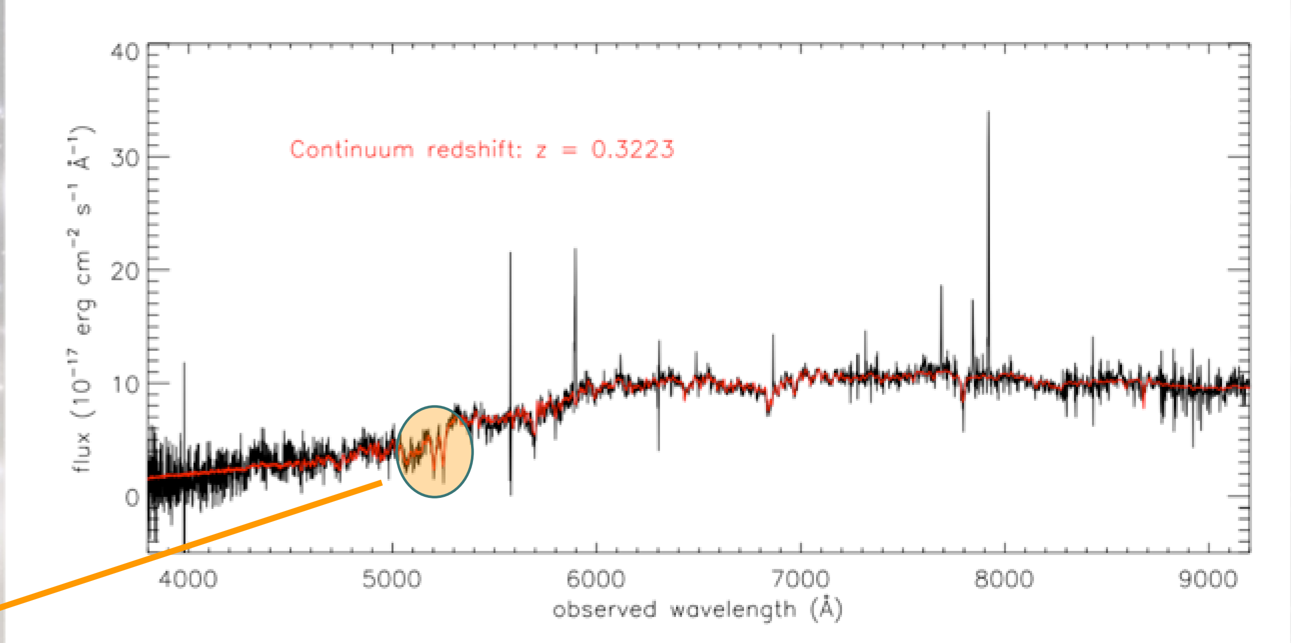


Spettro misurato

Lente

Non riusciamo a risolvere spettro di lente e sorgente

2



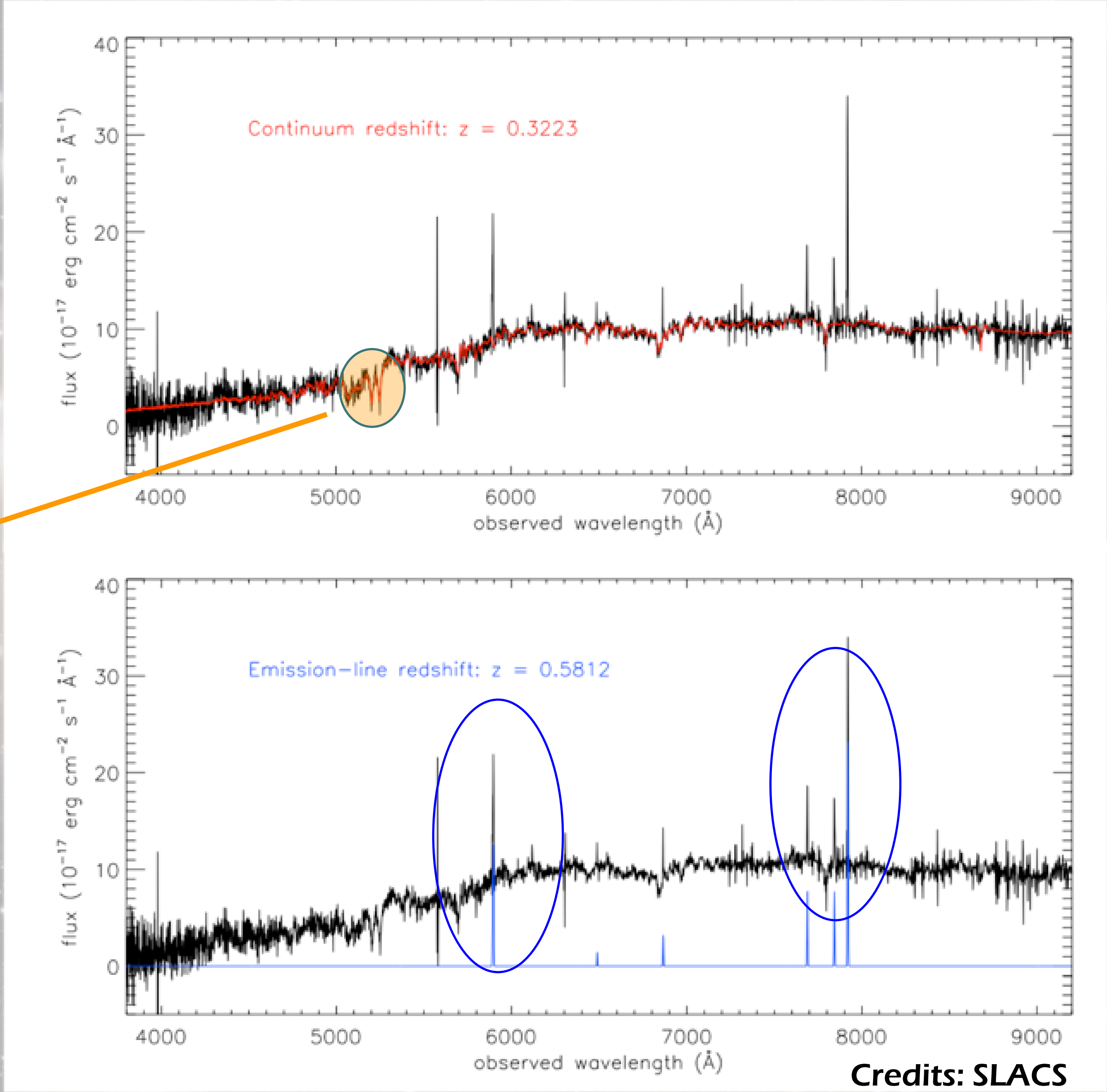
Spettro misurato

Lente

Queste righe di assorbimento hanno una lunghezza d’onda nel sistema a riposo di ~4000 Å

Non riusciamo a risolvere spettro di lente e sorgente

2



Credits: SLACS

Spettro misurato

Lente

Sorgente

Queste righe di assorbimento hanno una lunghezza d'onda nel sistema a riposo di ~4000 Å

Struttura della proposta

Perché

Domande dalle quali partiamo:
Come si formano le galassie?
Nel nostro caso le più massive che potrebbero essere lenti gravitazionali!

Cosa?

Per esempio, vogliamo caratterizzare le galassie stimando la loro massa totale!

Come?

Usiamo le lenti gravitazionali, che forniscono la stima di massa più precisa nell'Universo

Come?

Per misurare le masse, abbiamo bisogno di sapere le distanze di lente e sorgente

Dove?

Al TNG con Dolores

WHY?
HOW
WHAT?
WHO?
WHEN?
WHERE?

Voi

Ott-Dic 2025

Struttura della proposta

I target da osservare devono essere osservabili da nord e nel periodo ott-dic 2025

Osservabilità: https://astro.ing.iac.es/staralt/index.php

Survey nel nord:
KiDS@VST (https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ApJ...923...16L/abstract);
DESI (https://sites.google.com/usfca.edu/neuralens/publications?authuser=0);
UNIONS (https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/10/aa42505-21/aa42505-21.html)
CFHTLS (https://academic.oup.com/mnras/article/471/1/167/3868797)
Euclid
....

Calcolate con l'*exposure time calculator* i tempi necessari per avere il giusto S/N (assumendo la magnitudine di lente e sorgente)

ricordatevi che l'arco o le immagini multiple in genere sono più deboli della lente

Qualche referenza:
Tran+22: https://arxiv.org/pdf/2205.05307,
Nagam+24: https://arxiv.org/pdf/2502.09802,
Spiniello+19: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019MNRAS.485.5086S/abstract,
.....

Studiate la possibile configurazione di telescopio, spettrografo, range spettrale, fenditura, fase lunare, seeing, ecc. ecc.

Gustatevi questa esperienza, indipendentemente dall’esito

Simulerete il lavoro di un ricercatore
(qualcuno di voi forse intraprenderà questa carriera)

Esportate questo approccio scientifico anche nella vita quotidiana, per fronteggiare fake news e credulonerie varie

In bocca al lupo!