



Università della Terza Età "Cardinale
Giovanni Colombo" - Milano

A. A. 2022 - 2023
Corso di Astrofisica

Docente:
Adriano Gaspani

Le Galassie e i Quasar

LE GALASSIE

Con il termine galassia i greci indicavano la Via Lattea, quella striscia lattescente che attraversa il nostro cielo notturno e ben visibile sotto cieli sufficientemente bui.

Oggi con questo termine indichiamo degli immensi sistemi composti da gas, polveri e fino a diverse centinaia di miliardi di stelle tenuti insieme dalla forza di gravità.

Il numero di stelle che costituiscono una galassia va da circa 10^8 a più di 10^{11} .

Il Sole fa parte di una galassia chiamata Galassia.

La Via Lattea è una parte della Galassia, quella visibile dalla Terra.

Agli inizi del 1900 non era ancora chiaro se le varie nebulose visibili nel cielo fossero oggetti appartenenti alla nostra galassia o esterni ad essa.

LE GALASSIE

Le galassie non hanno un bordo netto, le stelle diminuiscono andando dal centro verso la periferia.

Quando si parla di diametro di una galassia si intende il diametro di una circonferenza con centro nel centro della galassia e che contenga metà della sua luce totale.

Il diametro delle galassie è dell'ordine di alcune decine o addirittura centinaia di migliaia di anni luce.

Le stelle che compongono le galassie hanno un moto di rotazione intorno al centro con velocità che possono andare da qualche decina di chilometri al secondo per le galassie più piccole fino a centinaia di chilometri al secondo per quelle più grandi.

Dalle misure di velocità delle stelle ci si è accorti che nelle galassie c'è molta più materia di quella che si vede.

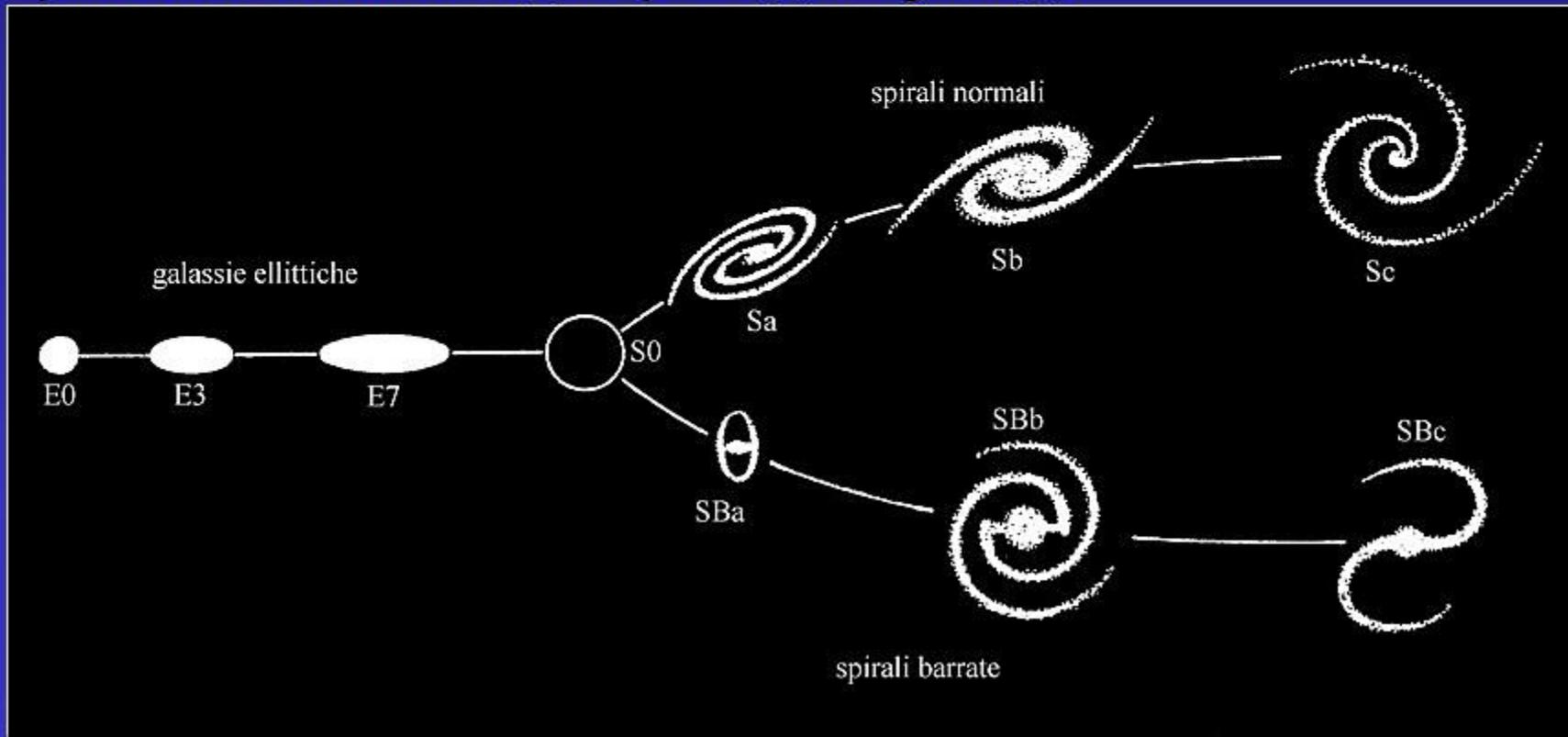
CLASSIFICAZIONE DELLE GALASSIE

CLASSIFICAZIONE DELLE GALASSIE

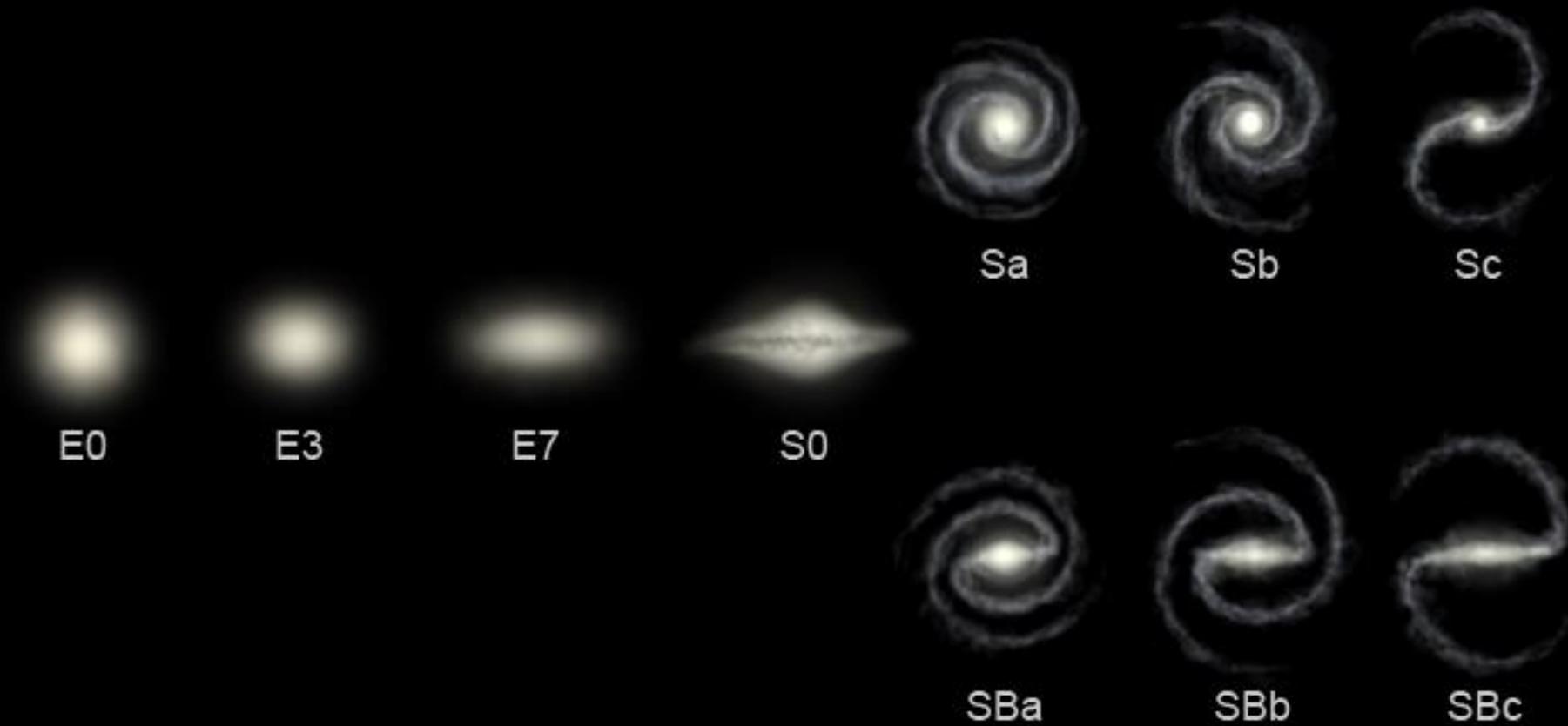
Tra il 1924 e il 1926 Edwin Hubble, con il telescopio di 2,54 m dell'Osservatorio di Mount Wilson in California, ottenne delle foto della nebulosa di Andromeda nelle quali erano evidenti le stelle che formano i bracci della spirale.

Successivamente altre nebulose furono risolte in stelle risultando simili a quelle della Galassia ed anche esse presero il nome di galassie.

Hubble propose una classificazione delle galassie ancora oggi utilizzata: le divise in tre tipi fondamentali: ellittiche (E); a spirale (S); irregolari (I).



Classificazione di Hubble



GALASSIE ELLITTICHE

Sono così chiamate per la loro forma ellittica o circolare.

Sono composte da stelle di Popolazione II, cioè da stelle giganti rosse o gialle, nane rosse o gialle e da una quantità di stelle bianche di luminosità non troppo alta; mancano le giganti e le supergiganti bianco-blu.

Pur contenendo polvere interstellare non mostrano segni di attività di formazione stellare in corso.

Dall'esterno le galassie differiscono solo per il loro maggiore o minore appiattimento. Hubble chiamò *indice di ellitticità* la quantità

$$10 \frac{a-b}{a}$$

dove a è il semiasse maggiore e b quello minore. Il valore che si ottiene è generalmente un numero frazionario, Hubble propose di approssimarlo all'unità, per cui i valori possibili per tale parametro sono gli interi da 0 a 10. In realtà non si osservano galassie ellittiche con indici di ellitticità superiori a 7.

La massa varia da $10^6 M_{\odot}$ a $10^{12} M_{\odot}$.

Le galassie ellittiche dovrebbero essere il 60% di tutte le galassie.

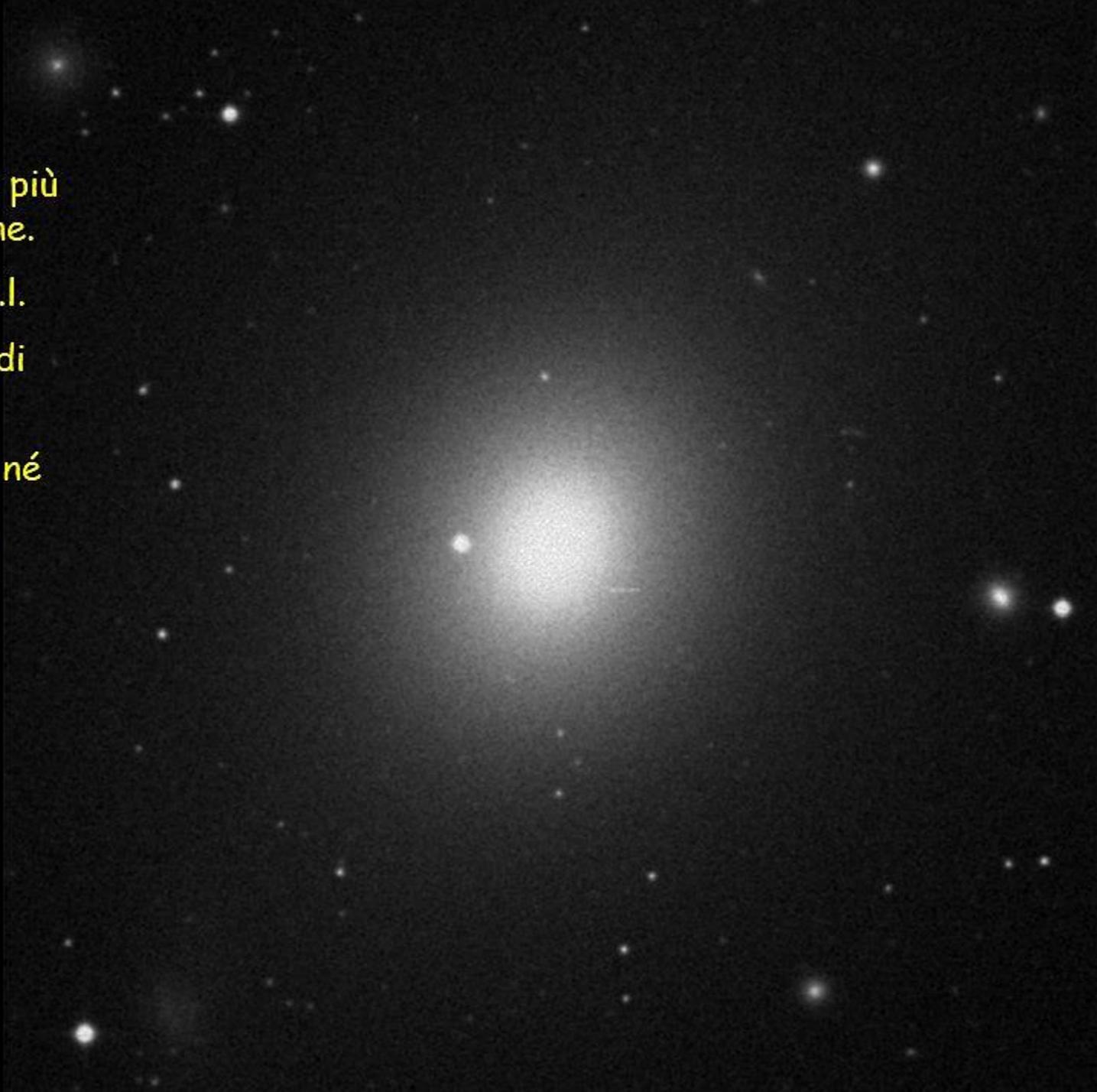
M49 - Tipo E4

È la galassia ellittica più luminosa della Vergine.

Diametro: 180.000 a.l.

Distanza: 55 milioni di a.l.

Non contiene né gas né polvere o sistemi di formazione stellare.



M60 - Tipo E1

Ellittica gigante nell'ammasso della Vergine.

Diametro di 120.000 a.l.

Luminosità di circa 60 milioni di volte il Sole.

La sua dinamica interna suggerisce la presenza di un buco nero centrale di 10^9 masse solari.

Nello spettro radio ha emissioni deboli e lobi che indicano pure un nucleo attivo.

Il suo spettro indica una recente formazione stellare.

La galassia vicina è NGC4647.



M87 - Tipo E3

È una galassia ellittica gigante distante circa 50 milioni di a.l.

È la galassia al centro dell'ammasso della Vergine.

È quattro volte più luminosa di quanto la nostra Via Lattea apparirebbe alla stessa distanza. M49 è più luminosa del 22%.



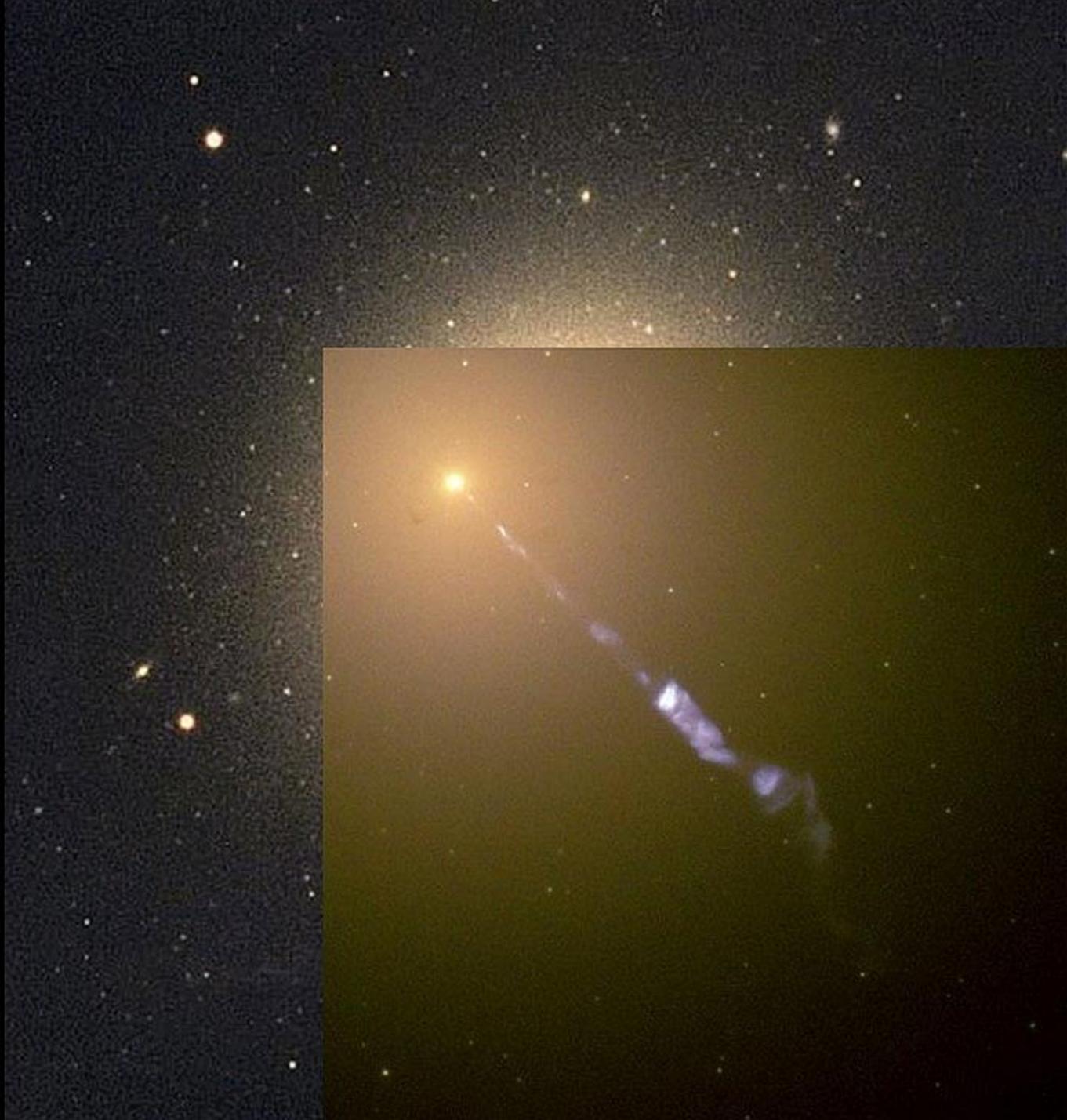
M87 - Tipo E3

È una galassia ellittica gigante distante circa 50 milioni di a.l.

È la galassia al centro dell'ammasso della Vergine.

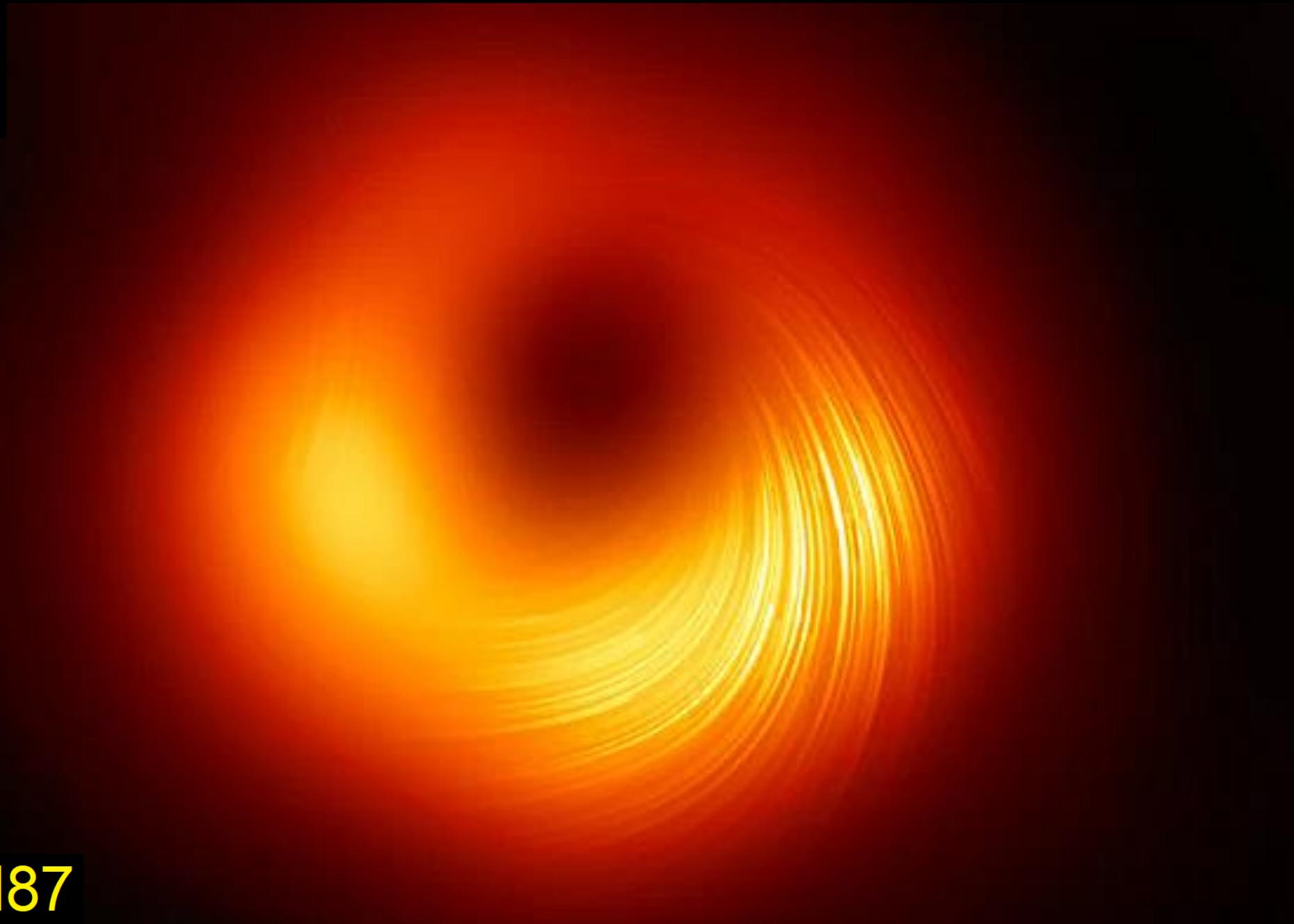
È quattro volte più luminosa di quanto la nostra Via Lattea apparirebbe alla stessa distanza. M49 è più luminosa del 22%.

Ospita l'intensa radiosorgente Virgo A e l'emissione associata al suo nucleo galattico attivo.



Virgo A

Buco nero di M87



GALASSIE A SPIRALE

Sono costituite da un rigonfiamento centrale e di regola da due bracci a spirale che fuoriescono da punti diametralmente opposti del nucleo: essi sono simmetrici e si perdono in due regioni opposte alla periferia della galassia. Sono noti esempi di galassie con un numero maggiore di bracci a spirale. In altri casi i due bracci non sono simili.

Hubble divise le galassie a spirale in sottoclassi in base allo sviluppo dei bracci e alle dimensioni del nucleo.

Sa con bracci poco sviluppati o appena accennati; il nucleo è grande: spesso è circa la metà delle dimensioni della galassia. Le galassie Sa poco sviluppate sembrano ellittiche.

Sb sono galassie i cui bracci sono sensibilmente sviluppati, ma non hanno ricche ramificazioni. Il nucleo è minore che in Sa.

Le galassie con bracci fortemente sviluppati, divisi a loro volta, e con nuclei piccoli in confronto a questi appartengono al tipo **Sc**.

Tutte le galassie a spirale mostrano regioni oscure costituite da gas e polveri.

I bracci delle spirali sono formati dalle stelle di Popolazione I, cioè da stelle calde giganti; inoltre nei bracci si condensano le masse di materia diffusa, cioè gas e polvere interstellari.

L'appiattimento delle galassie a spirale dà valori prossimi a 8 per le galassie Sa, valori tra 8,5 e 9 per le galassie Sb e per le Sc valori maggiori di 9.



M31 Andromeda

NGC1300



M64 - Tipo Sb

Nella Chioma di Berenice è chiamata anche galassia "Occhio Nero".

Dista di circa 12 milioni di a.l.

Ha un'insolita struttura dinamica: ha un disco interno di gas e stelle e uno esterno (che gira in senso contrario) soprattutto di gas. Le strisce di polvere dell'Occhio Nero sono nel disco interno.



I due dischi sono complanari entro circa 7 gradi.

La regione di transizione fra di loro è in una situazione di instabilità e mostra una vivace attività di formazione stellare.

In origine si pensava che questo sistema venisse dall'unione con una galassia compagna, ma anche questo modello non spiega esaurientemente il comportamento dinamico e neppure perché sistemi simili siano così rari (a tutt'ora sono state scoperte solo tre galassie con dischi in controrotazione).

M63 - Tipo Sc.

Galassia "Girasole" nei Cani da Caccia.

È fisicamente in gruppo con M51 e parecchie galassie minori.

Mostra una debole struttura a due bracci.

Ha anche un nucleo blandamente attivo



M81 - Tipo Sb

Nota come "galassia di Bode", è molto luminosa e, in condizioni favorevoli, può essere vista a occhio nudo nell'Orsa Maggiore.

Forma un piccolo gruppo con M82 con la quale sembra avere avuto un incontro ravvicinato.

Dista 12 milioni di a.l.

Ha un nucleo denso che emette fortemente in onde radio e raggi X quindi il centro ospita un AGN (Active Galactic Nucleus) a bassa luminosità.



M104 - Tipo Sa/Sb.

Chiamata "Sombbrero", al limite tra la Vergine e il Corvo.

È inclinata di 6° .

Le foto mostrano un grande rigonfiamento centrale attraversato da una scura banda di polvere nel piano galattico.

Questa banda scura fu rilevata la prima volta da William Herschel.

Sebbene sia nell'ammasso della Vergine, Sombbrero non ne fa probabilmente parte, ma è più vicina a noi, a circa 35 milioni di a.l.



M96 - Tipo Sa/Sb

Nel Leone.

Appare arrotondata con centro luminoso e tracce dei bracci.

Di solito si accetta distanza di 25 milioni di a.l., ma le osservazioni di HST delle variabili Cefeidi hanno dato una distanza di 40 milioni di a.l.

M96, con M95 e M105, sono parte di un piccolo ammasso, il Gruppo di Galassie del Leone, che comprende anche M65 e M66.



NGC2403 - Tipo SBc

Galassia spirale vista di faccia nella Giraffa.

Si vedono molte nebulose di emissione luminose che appaiono come zone brillanti nei bracci.

Si estende ben al di là del campo di questa immagine.

I bracci sono molto deboli e intensamente azzurri che vanno verso i bordi della struttura.

La sua distanza è stimata sui 12 milioni di a.l.

È associata al gruppo di M81.



NGC4565 - Tipo Sc

Esempio di spirale vista di taglio nella Chioma di Berenice.

La Galassia avrebbe un aspetto assai simile vista alle stesse condizioni.

La striscia scura è l'insieme di gas e polvere che blocca la luce dall'interno, rendendola rossastra.



GALASSIE A SPIRALE BARRATE

Sono galassie in cui il nucleo è situato nel mezzo di una "barra" dritta di stelle ed i bracci a spirale iniziano proprio dagli estremi di queste barre.

Come quelle normali, le spirali barrate si suddividono in tre sottoclassi indicate con **SBa**, **SBb**, **SBc** a seconda del grado di sviluppo dei bracci.

Non è ancora chiara la ragione dell'esistenza della barra.

M109 - Tipo SBb/SBc

Nell'Orsa Maggiore.

È evidente la barra di materia galattica.

Gran parte della sua regione centrale mostra uno spettro di linee di emissione dovuto a gas ionizzato, prova di attività nel nucleo.



M95 - Tipo SBb

Nel Leone.

Si presenta quasi di faccia mostrando una barra centrale e bracci spirali strettamente avvolti che insieme creano la forma della lettera greca θ .

Forma una coppia con la vicina M96.

Considerata distante circa 25 milioni di a.l., misure con l'HST suggeriscono una distanza maggiore del 50%.



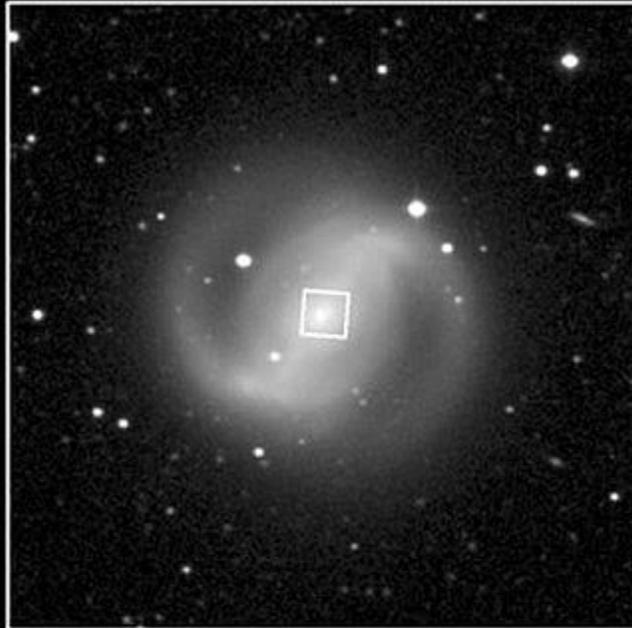
M91 - Tipo SBb

Nella Chioma di Berenice.



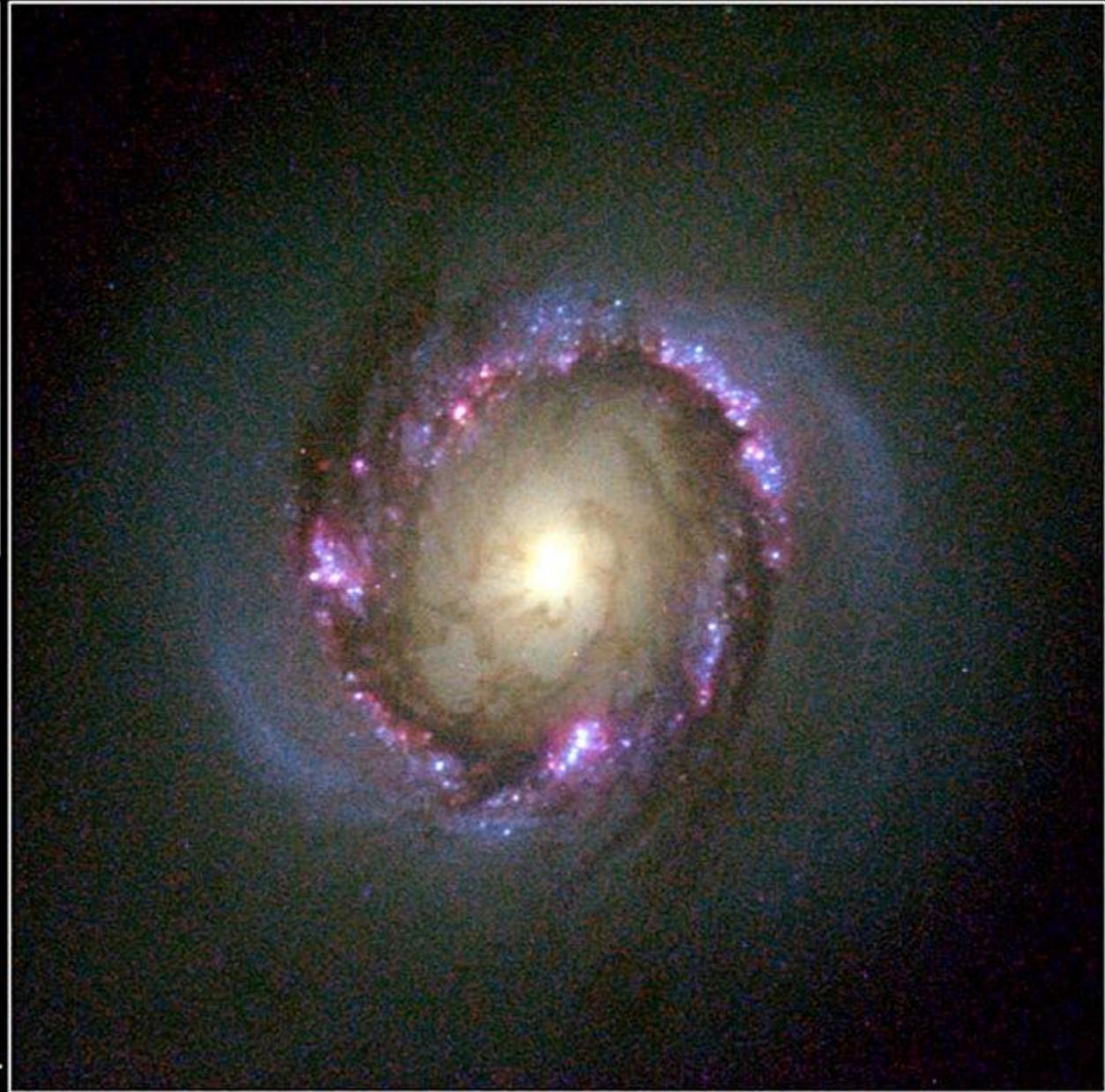
Galaxy NGC 4314

Hubble Space Telescope • WFPC2



McDonald Observatory

PRC98-21 • June 11, 1998
ST ScI • OPO
G. F. Benedict (University of Texas)
and NASA



HST

GALASSIE IRREGOLARI

Sono galassie di forma irregolare, senza nessuna regola d'insieme per la loro struttura.

GRANDE NUBE
DI MAGELLANO



PICCOLA NUBE
DI MAGELLANO



M82



La sua forma suggerisce una galassia "in esplosione". Questo aspetto deriva dalle conseguenze dell'attività di formazione di stelle.

La formazione stellare è associata ad un ricchissimo mezzo interstellare con grandi quantità di gas molecolare, polvere, gas ionizzato e plasma a emissione di raggi X.

È una galassia a disco parecchio più piccola della Via Lattea e si trova nel gruppo di M81 a 12 milioni di a.l.

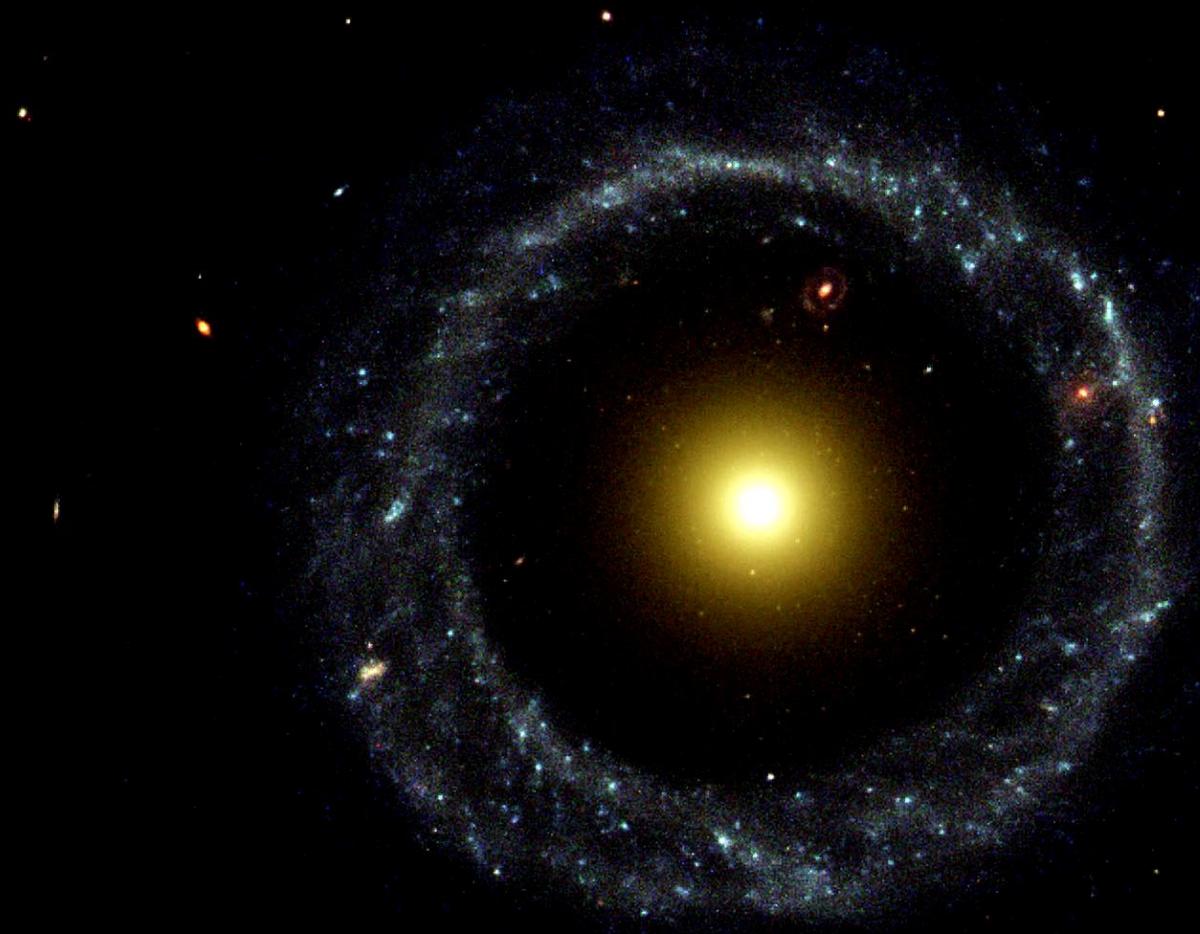
Tra i membri del gruppo c'è stata una interazione mareale che ha strappato idrogeno neutro dalle parti esterne di M81 e M82. Questa interazione avvenne circa 10^8 anni fa ed ha disturbato le parti interne di M82 producendo la barra di stelle nella regione del rigonfiamento.

La presenza della barra e il disturbo mareale del disco gassoso hanno portato ad una immissione di gas dal disco verso il nucleo della galassia. Questo accumulo di gas si è verificato piuttosto velocemente ed ha portato ad una rapida formazione stellare che è avvenuta in una regione relativamente ridotta.

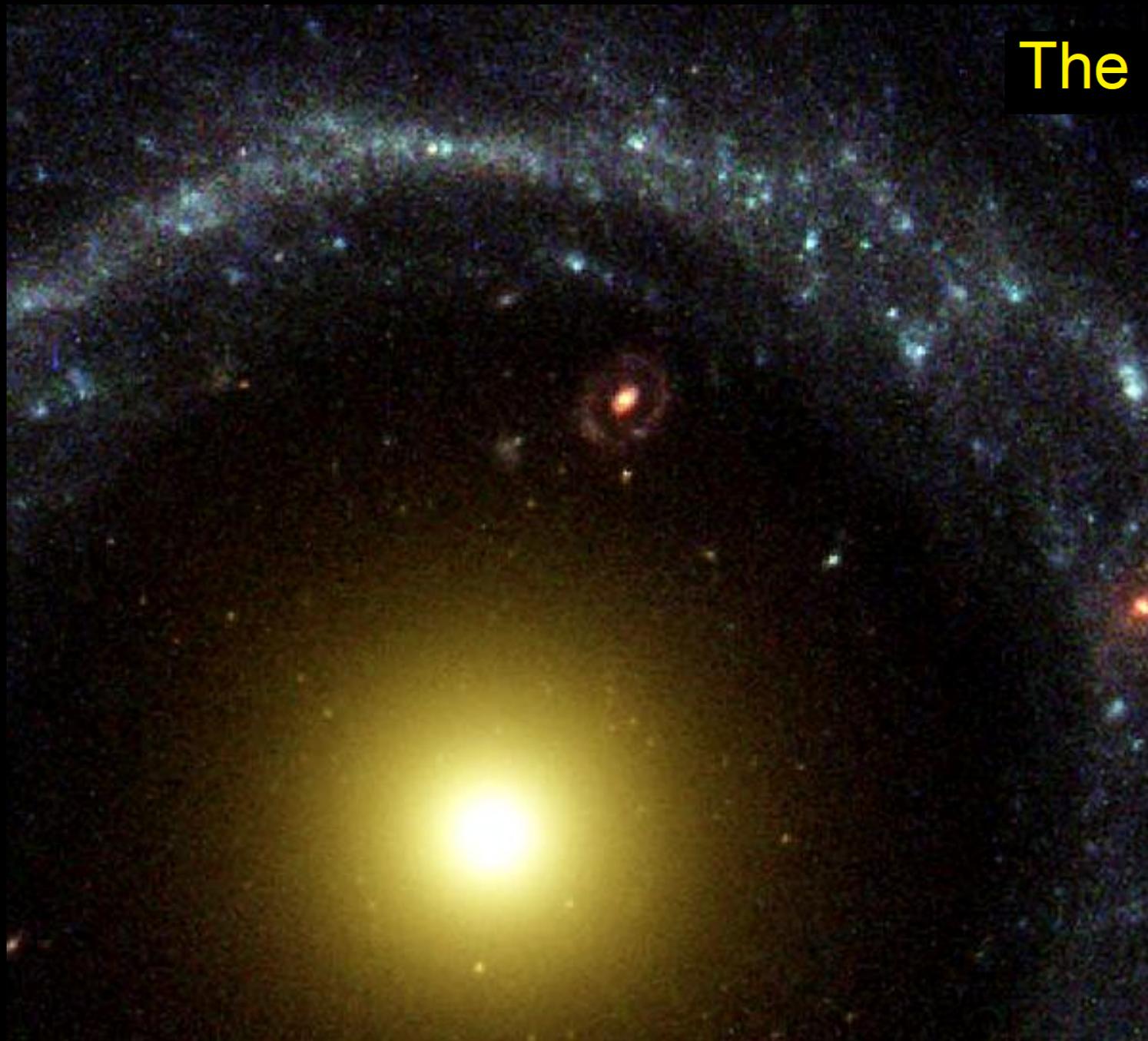
L'energia emessa dalla moltitudine di stelle di grande massa ha prodotto un "ribollimento" di gas caldo che è fuoriuscito dal disco e sta fuggendo rapidamente dalla galassia.

Galassie Peculiari

The Hoag Object



The Hoag Object







Galassie nane

M110



STRUTTURA DELLA GALASSIA

...la nostra

Struttura della Galassia

La Galassia è costituita da circa duecento miliardi di stelle simili al Sole disposte a formare un disco.

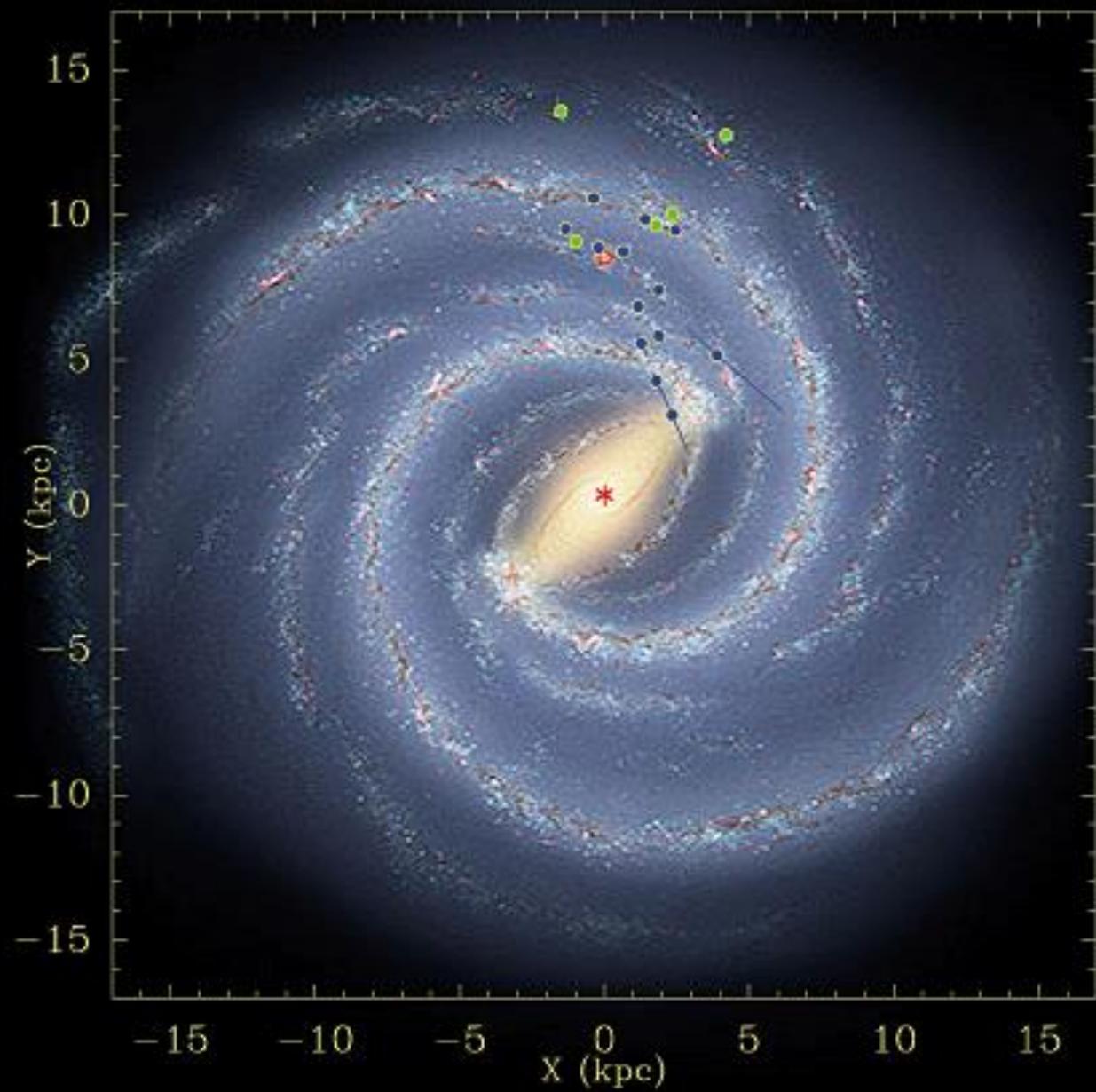
È circondata da un alone costituito da ammassi globulari visibili e immersa in un alone ancora più ampio di materia invisibile, rilevabile solo per i suoi effetti gravitazionali.

La Via Lattea vera e propria è invece una debole striscia luminosa (di più nella parte visibile nell'emisfero meridionale) costituita di un gran numero di stelle risolvibili già con un binocolo, ed è la parte del disco galattico visibile dalla Terra.

Nella Via Lattea sono presenti dei buchi ovvero nubi di polveri e gas freddi che oscurano la visuale delle parti retrostanti.

Le osservazioni nelle onde radio hanno permesso di stabilire che il materiale della Galassia ha una struttura a disco con braccia spirali che si avvolgono nello stesso piano.

Un elemento che ci ha permesso di individuare la struttura della Galassia è stato l'esistenza di altre galassie a spirale viste in tutte le inclinazioni.

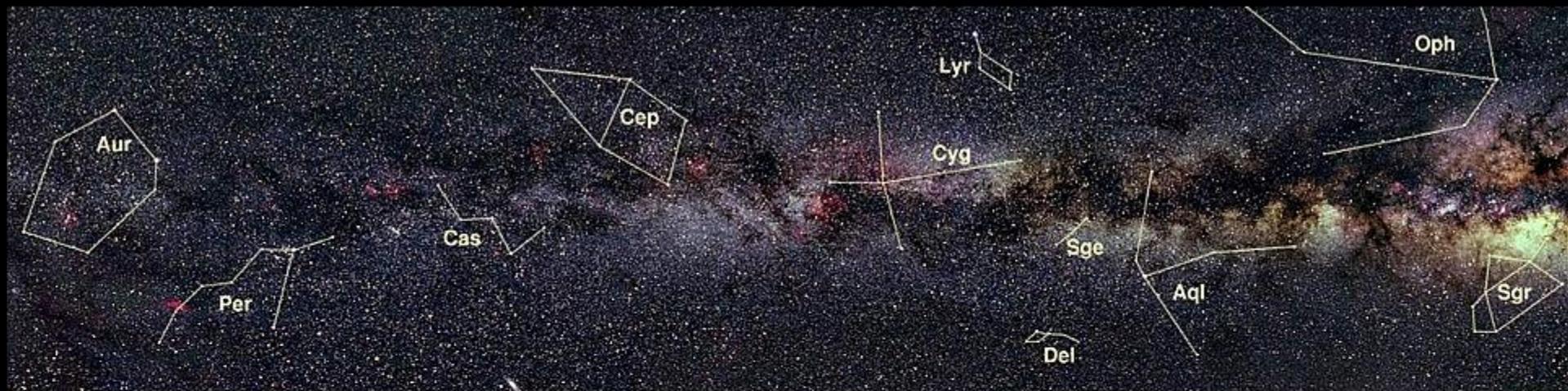


La Via Lattea



La Via Lattea nel Sagittario





La Galassia vista dalla Terra



La Galassia

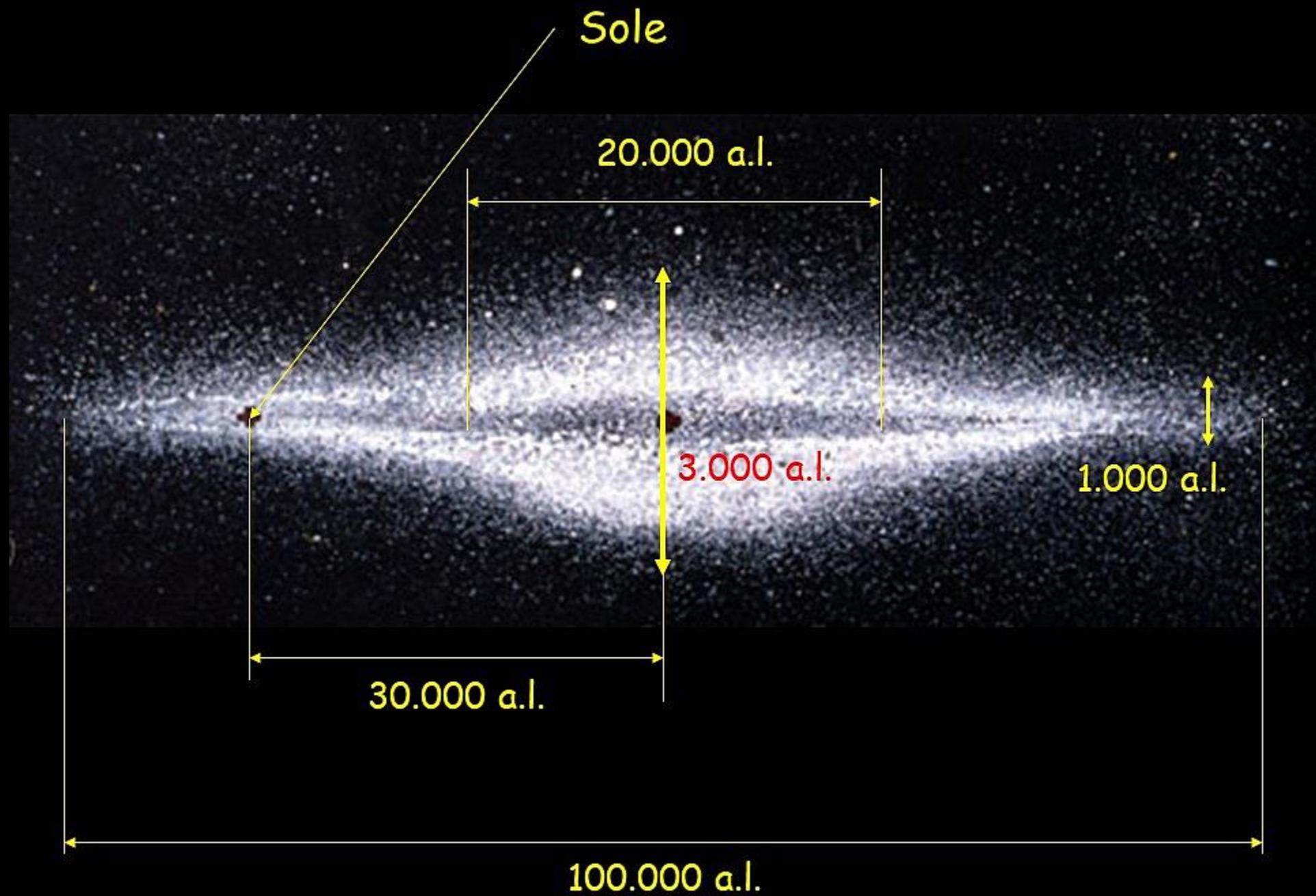
Schema della Galassia vista di fronte.

I tratti in rosso sono le zone che è stato possibile studiare con metodi statistici applicati agli oggetti visibili.

I tratti in verde sono zone che è stato possibile studiare con le onde radio (di 21 cm di lunghezza d'onda) emesse dall'idrogeno neutro che si concentra nei bracci a spirale.

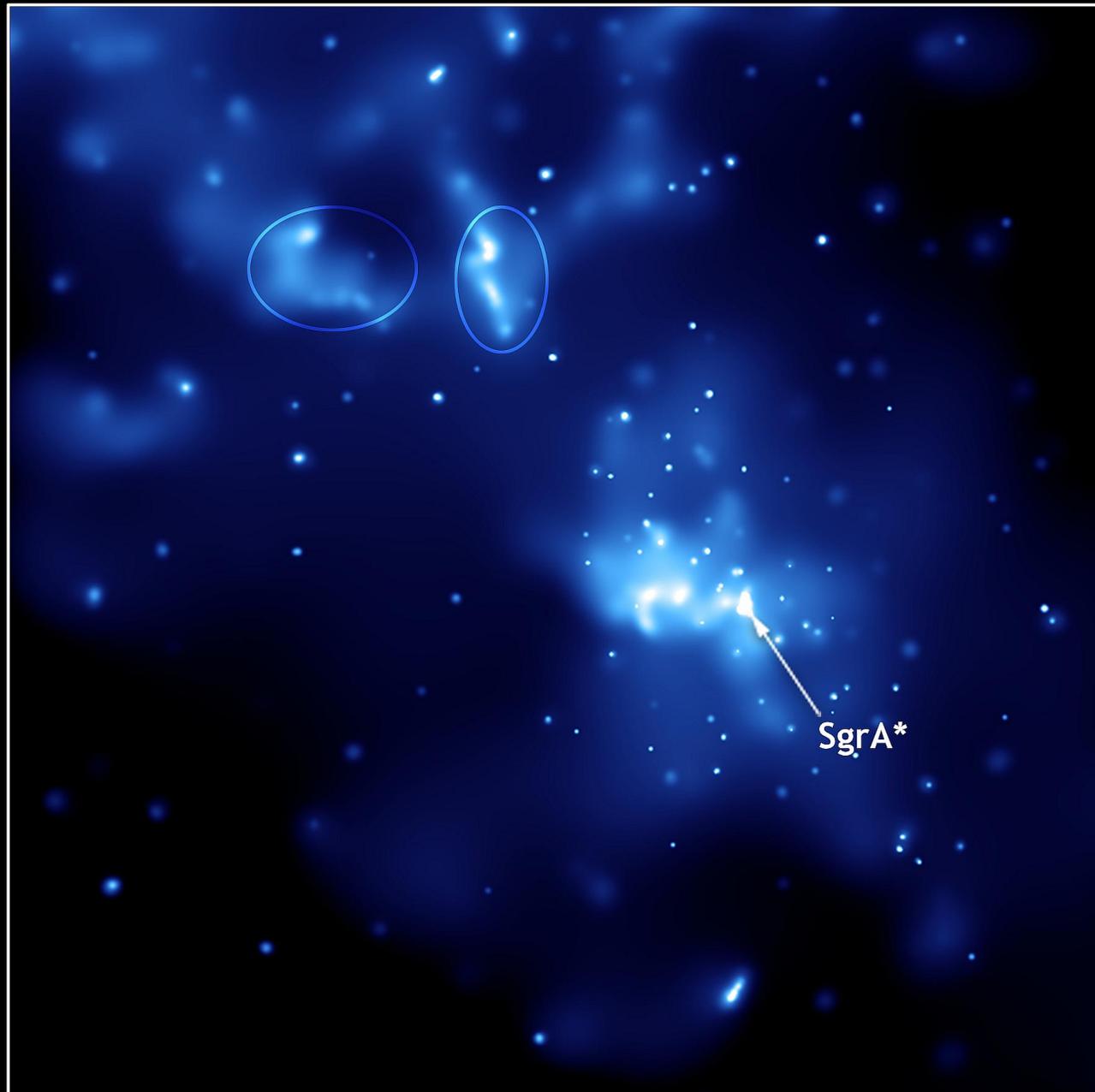
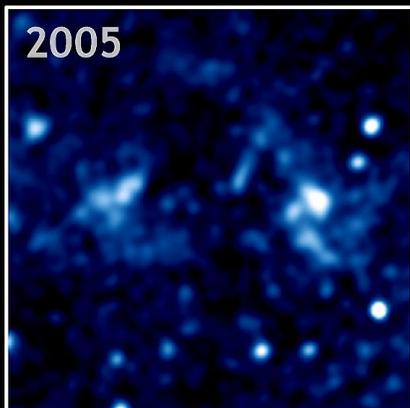
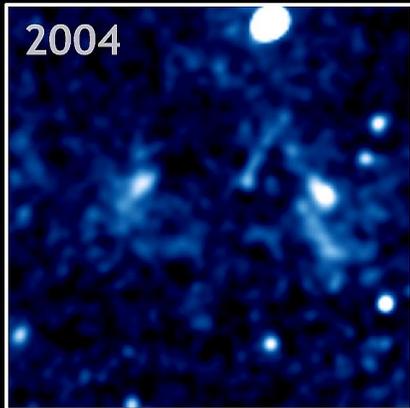
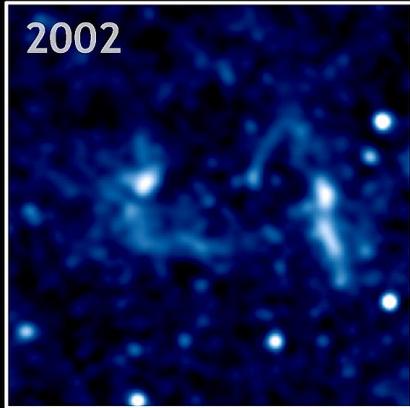


La Galassia

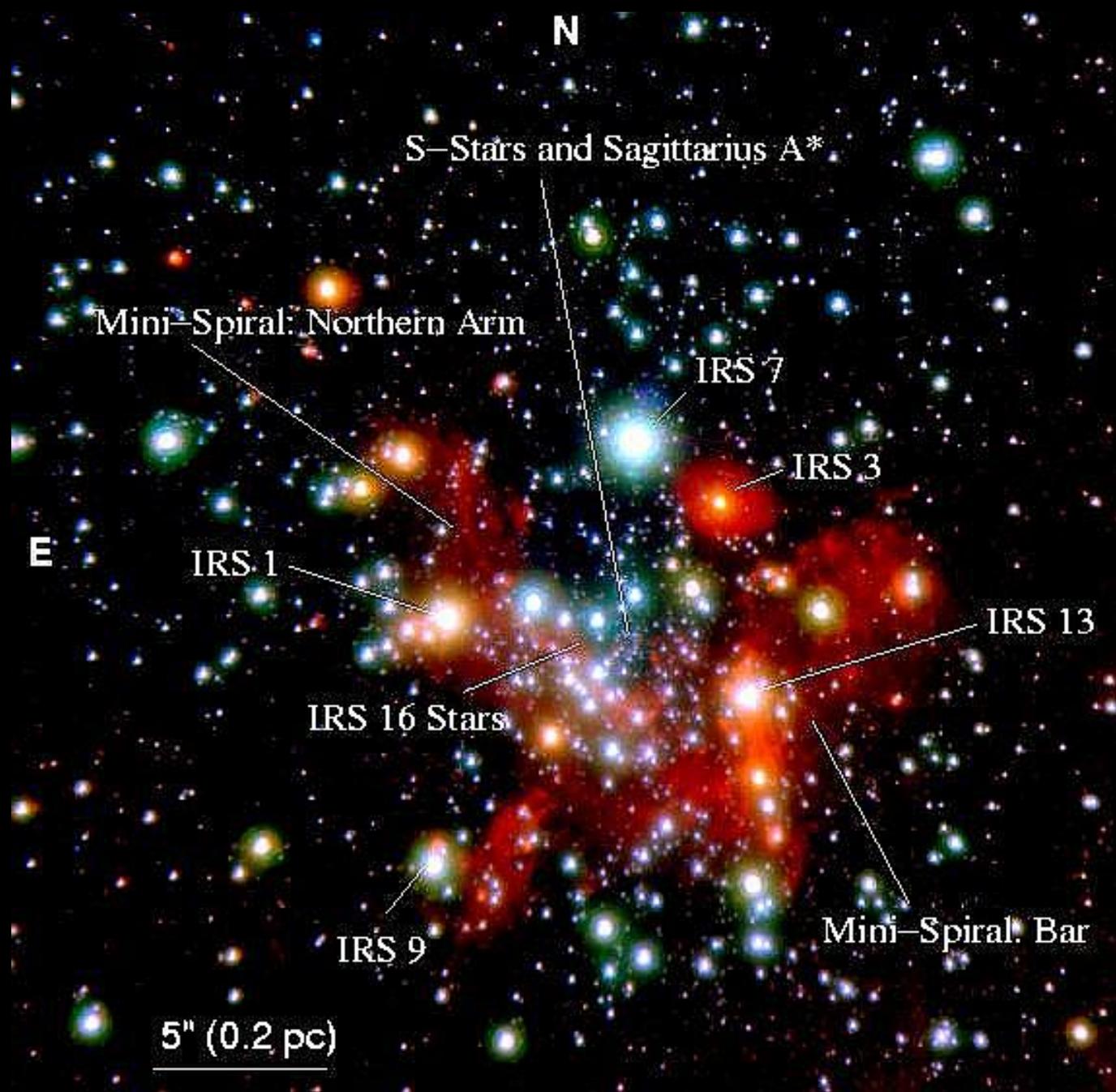


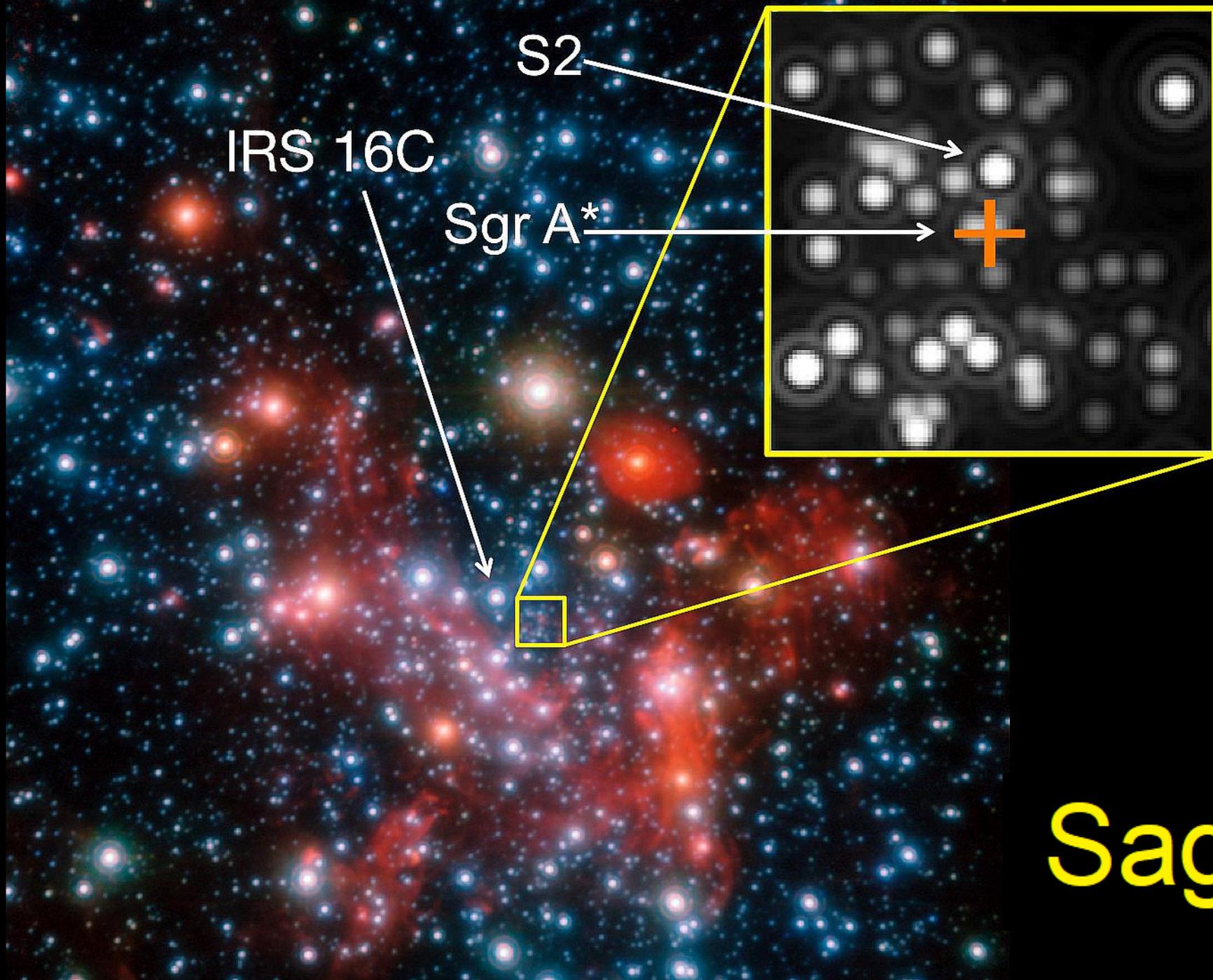
Il Centro della Galassia

Sagittarius A

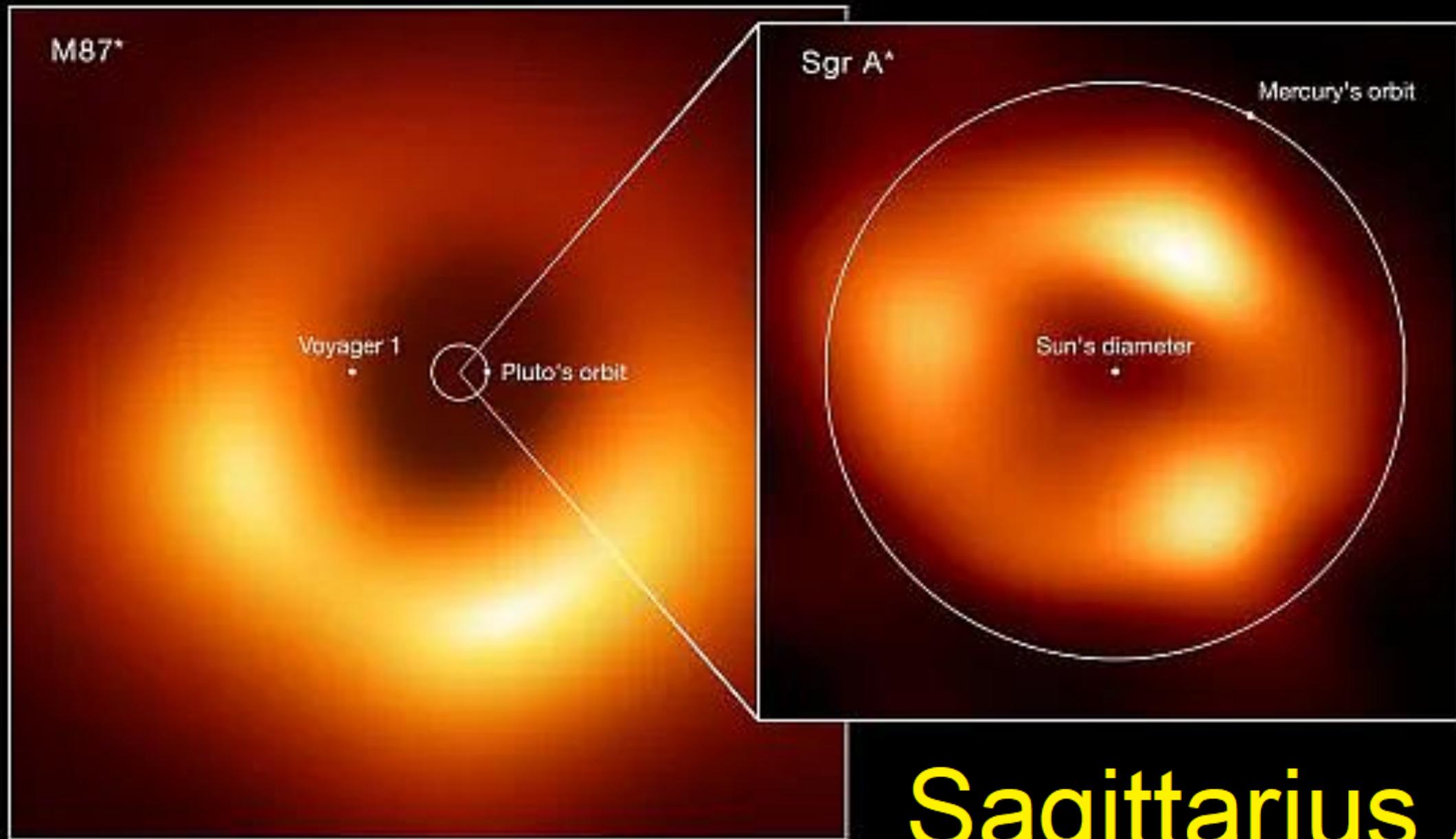


Sagittarius A



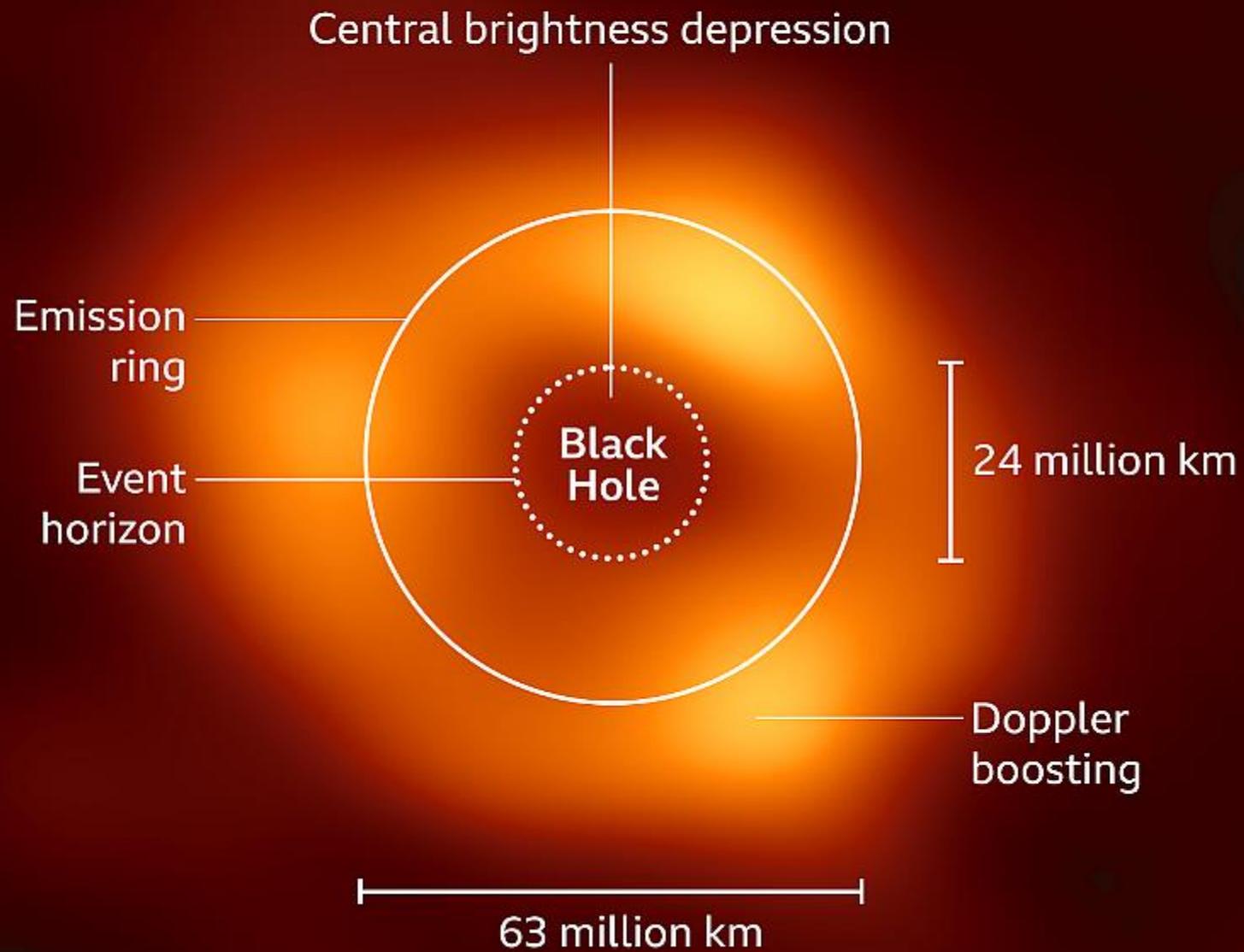


Sagittarius A



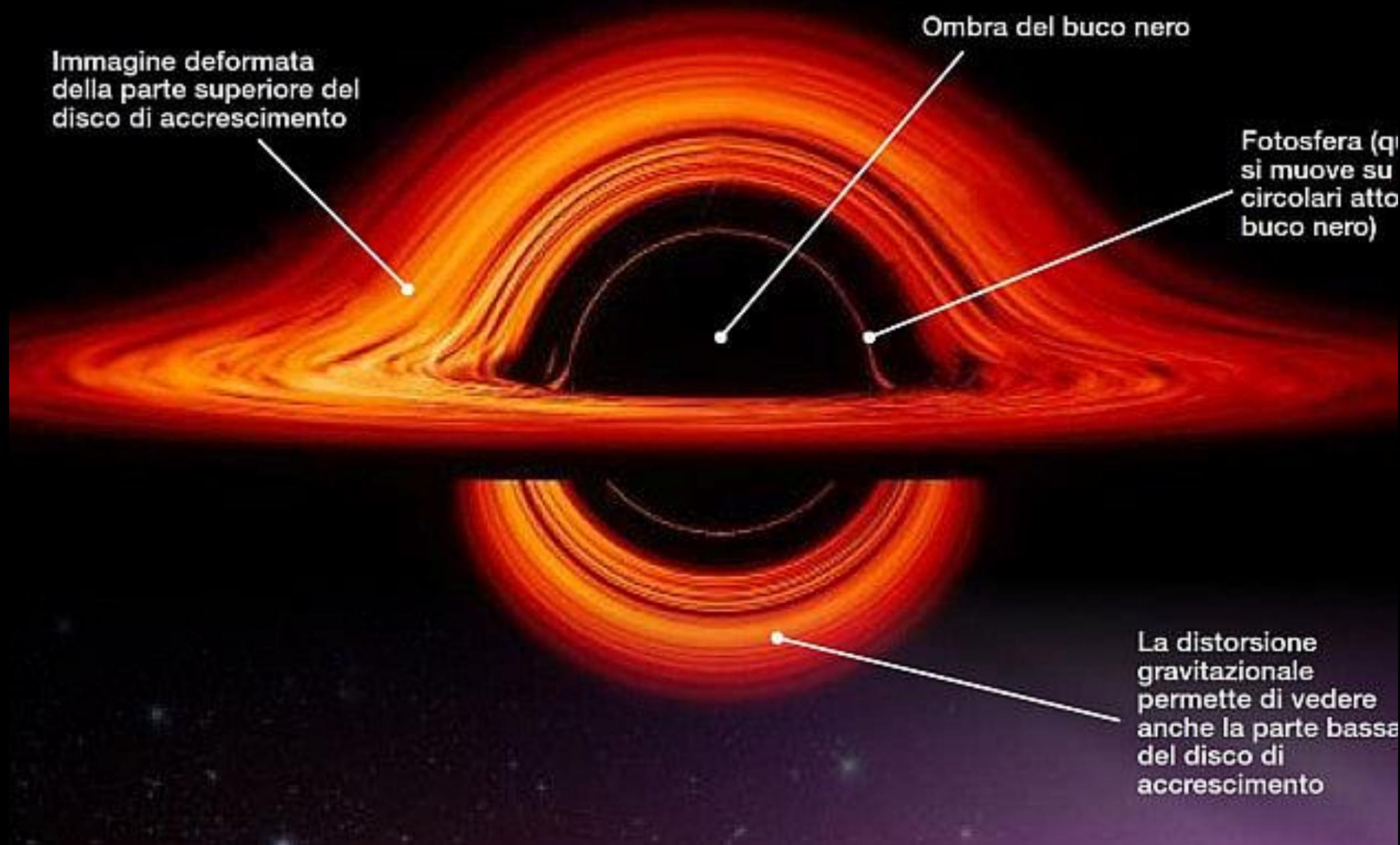
Sagittarius A

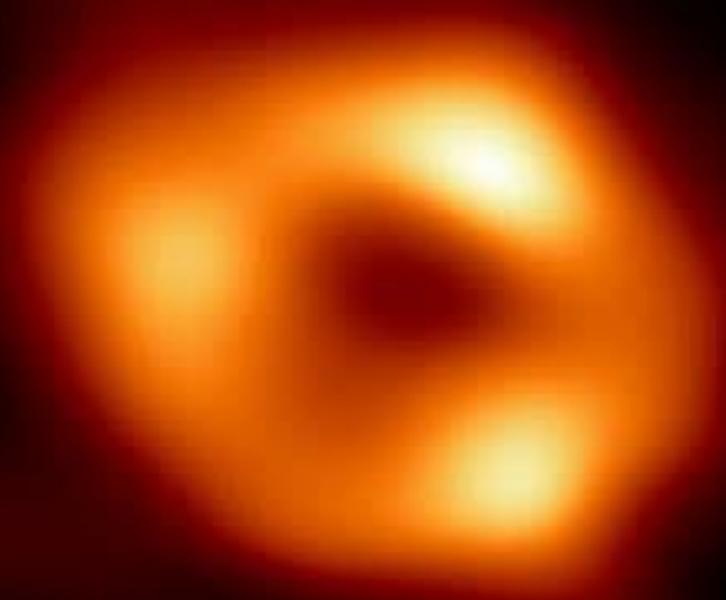
Deciphering the image of Sagittarius A*



Sagittarius A







Sagittarius A*



M87

Struttura della Galassia

Nella Galassia si osservano stelle di tutte le età.

Stelle molto vecchie (circa 15 miliardi di anni) sono distribuite nel bulge e nell'alone (stelle di Popolazione II) e si ritiene siano quanto rimane del primo periodo di grande formazione stellare all'epoca della formazione della Galassia stessa.

Stelle giovani (di Popolazione I) concentrate in uno strato di circa 500 pc (1500 anni luce) di spessore medio sul piano del disco, in cui la formazione delle stelle è ancora in atto.

Stelle di età intermedia, tra i 2 e 5 miliardi di anni, e delle quali fa parte anche il Sole, che sono distribuite sull'intero disco.

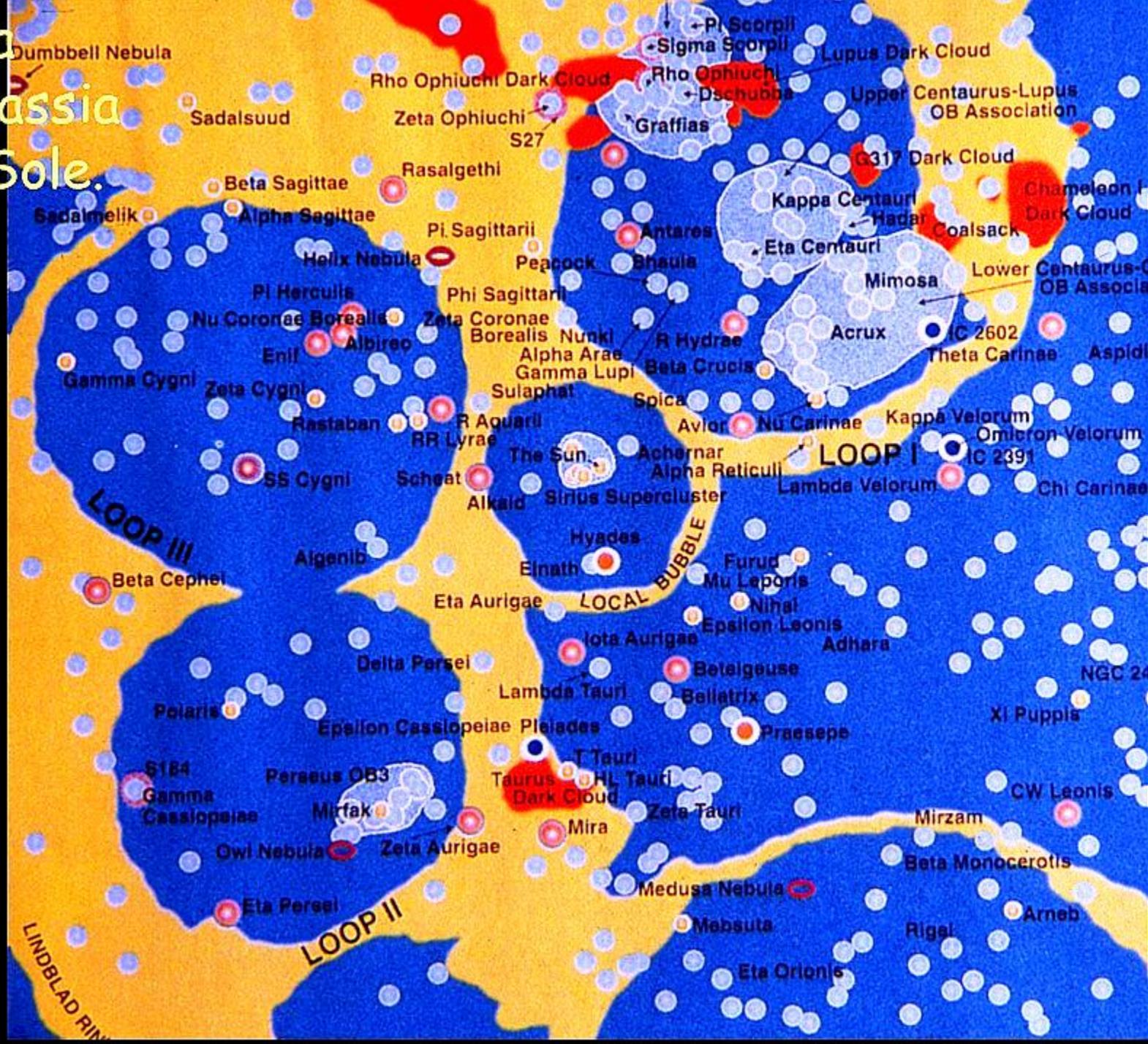
Le stelle del disco orbitano intorno al centro della Galassia e la loro velocità dipende dalla distanza: stelle più lontane dal centro sono più lente. Il Sole ha una velocità di 250 km/s e impiega circa 225 milioni di anni a compiere un giro completo.

Lo studio del moto delle stelle permette di determinare la massa complessiva della Galassia (circa 1000 miliardi di masse solari) ossia circa 10 volte la massa dedotta dalla materia visibile. È questa una prova dell'esistenza della materia oscura.

Struttura della Galassia vicino al Sole.



Struttura della Galassia vicino al Sole.



Ammassi globulari

Sono densi raggruppamenti di centinaia di migliaia (o addirittura milioni) di stelle.

Gli ammassi globulari della nostra galassia si trovano in un alone sferico in cui la Galassia è immersa e contengono le stelle più vecchie che si conoscano.

Ammassi globulari sono stati osservati negli aloni di altre galassie.

Nella Galassia sono noti 150 ammassi globulari e le distanze vanno da 6.000 a.l. a oltre 55.000 a.l.

La densità centrale è tale che in un cubo di un anno luce di lato ci sono una trentina di stelle (intorno al Sole non ce n'è nessuna !!!).

La distribuzione, le piccole abbondanze di metalli negli spettri, l'età delle stelle conducono ad un'età per gli ammassi di 15 miliardi di anni.

Ammassi globularari



ORIGINE
ED
EVOLUZIONE
DELLE
GALASSIE

Origine ed evoluzione delle galassie

Le galassie ellittiche e quelle a spirale nascono come tipi diversi oppure una è l'evoluzione dell'altra ?

Nel primo caso si ritiene che i diversi tipi di galassie si siano formati dal lento raffreddamento di immense nubi di gas primordiale le quali per la conseguente contrazione e frammentazione in stelle hanno dato origine alle galassie così come le osserviamo oggi.

In questo scenario le galassie ellittiche si sarebbero formate per prime a seguito di un rapidissimo processo di formazione stellare, processo più rapido del successivo collasso.

Al contrario le spirali nascerebbero a seguito di processi di frammentazione molto più lenti nei quali prima la nube collasserebbe a formare un disco e poi si frazionerebbe a formare le stelle.

Nel secondo caso, poiché per vari motivi non è possibile che le galassie a spirale si formino dall'evoluzione di galassie ellittiche, si suppone che l'Universo inizialmente fosse formato da galassie a spirale che fondendosi a seguito di "scontri" o meglio "incontri ravvicinati" hanno dato origine alle galassie ellittiche.

Il problema dell'origine del materiale di cui sono costituite le galassie sembra invece risolto nei modelli che descrivono l'origine dell'Universo.

M51 - Tipo Sc

La Galassia Vortice (Whirlpool Galaxy) nella costellazione dei Cani da Caccia.
È l'oggetto principale di un piccolo gruppo di galassie ad una distanza di 37 milioni di a.l.

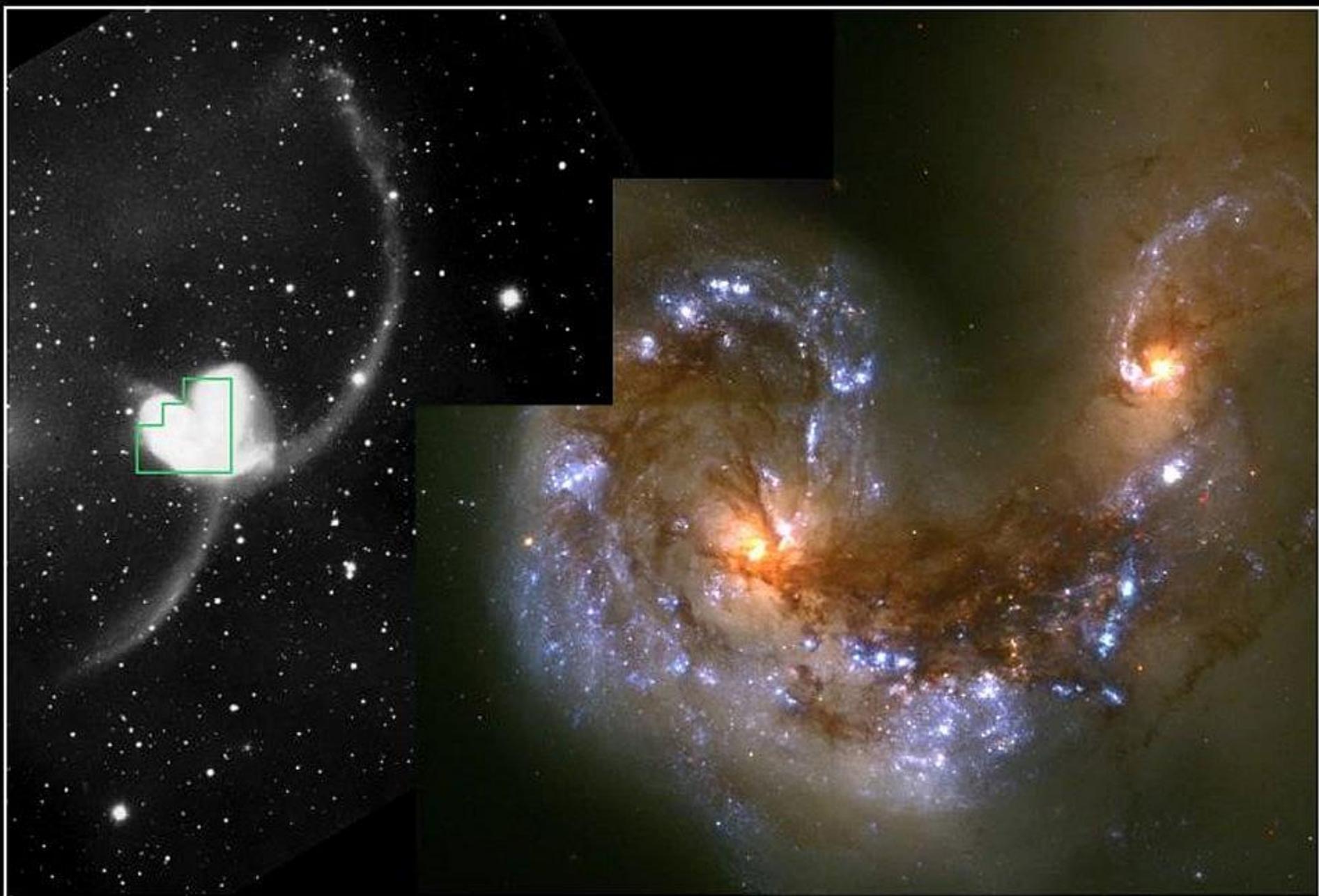
L'accentuata forma a spirale è stata causata da interazioni con la vicina NGC 5195.



Il nucleo è fortemente oscurato da polvere, ma la sorgente puntiforme di raggi X al suo interno suggerisce la presenza di un AGN.

La
regione
centrale
di M51

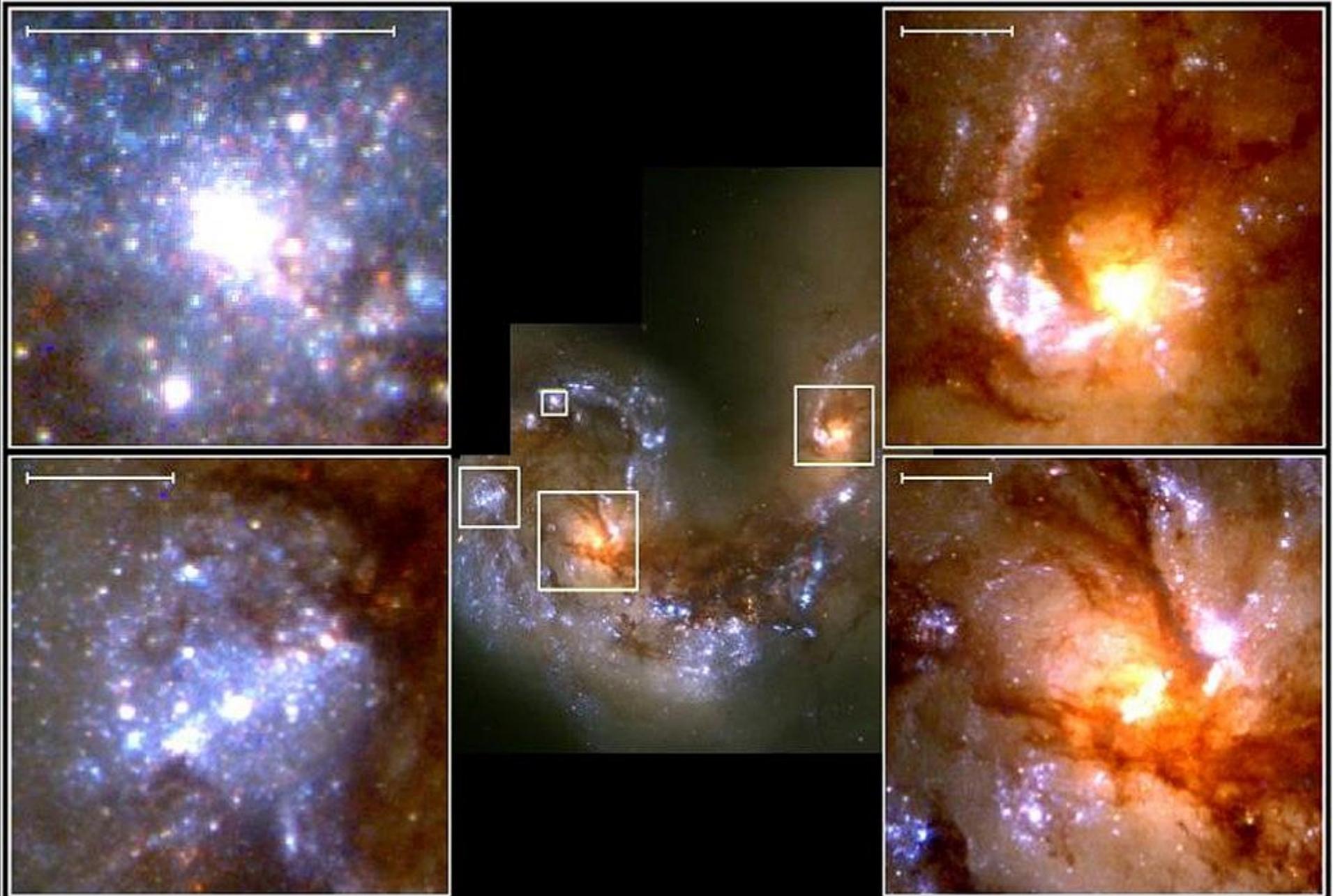




Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039

HST • WFPC2

PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST ScI) and NASA

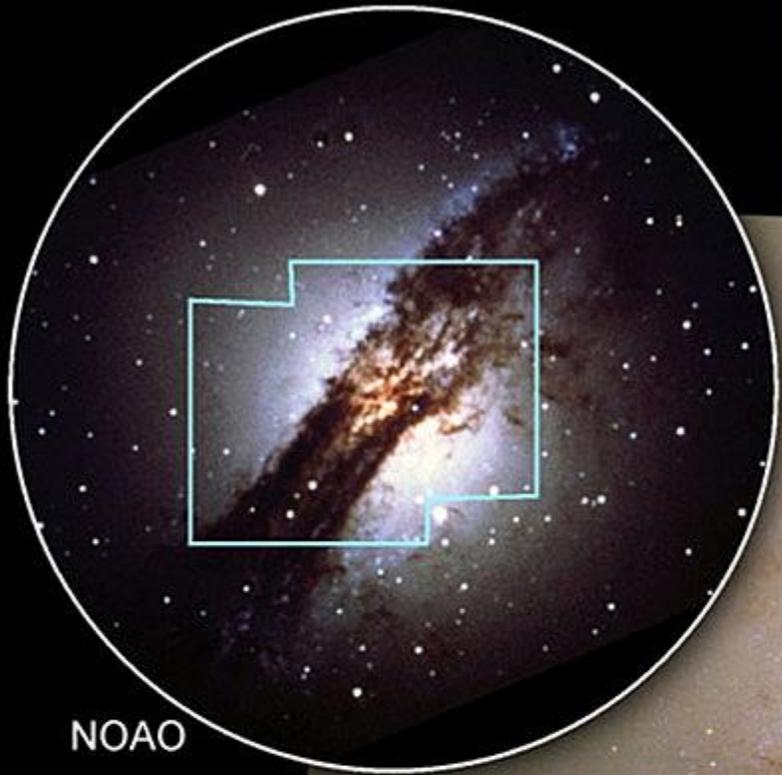


Galaxies NGC 4038 and NGC 4039 • Details

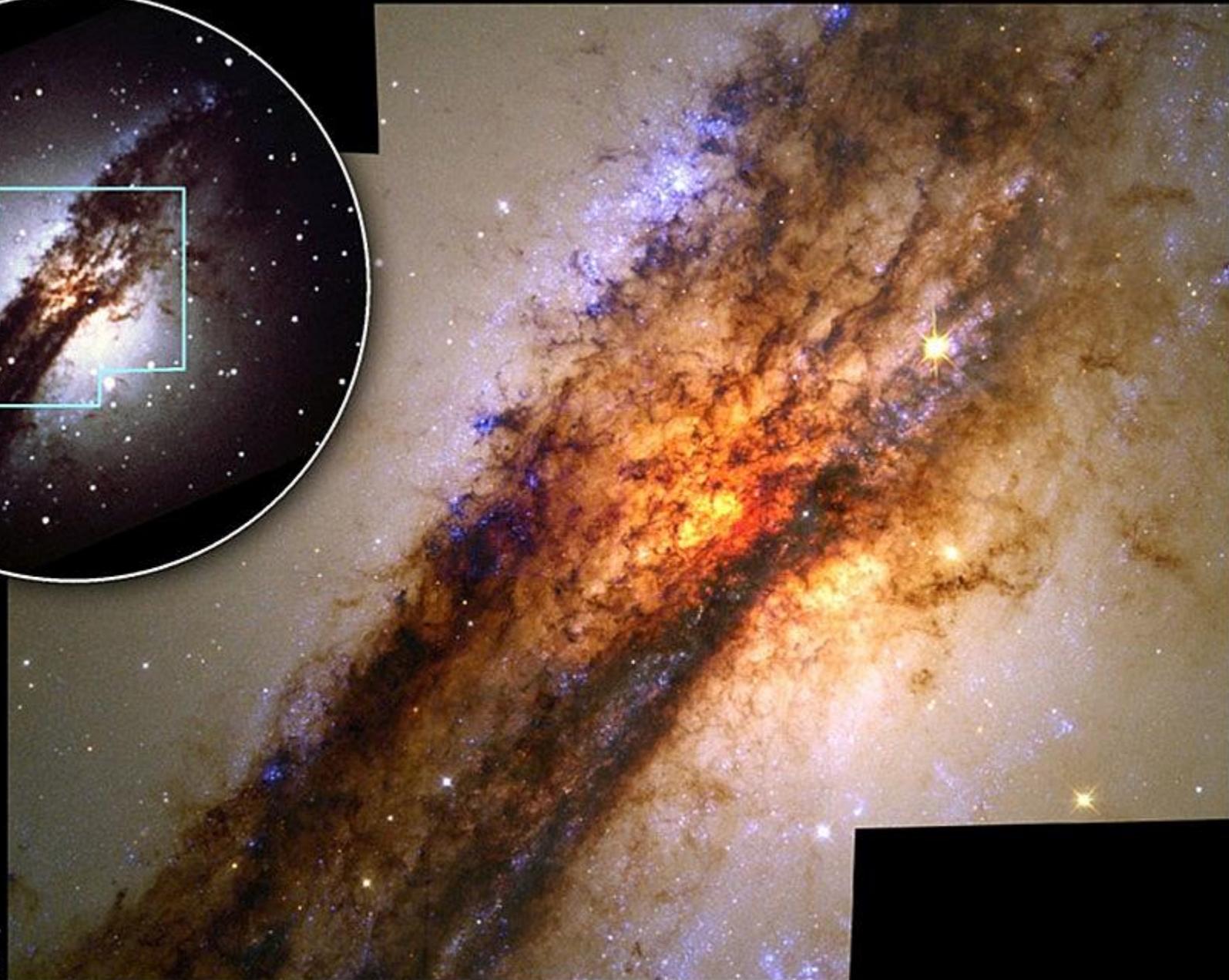
HST • WFPC2

PRC97-34b • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST ScI) and NASA

Active Galaxy Centaurus A

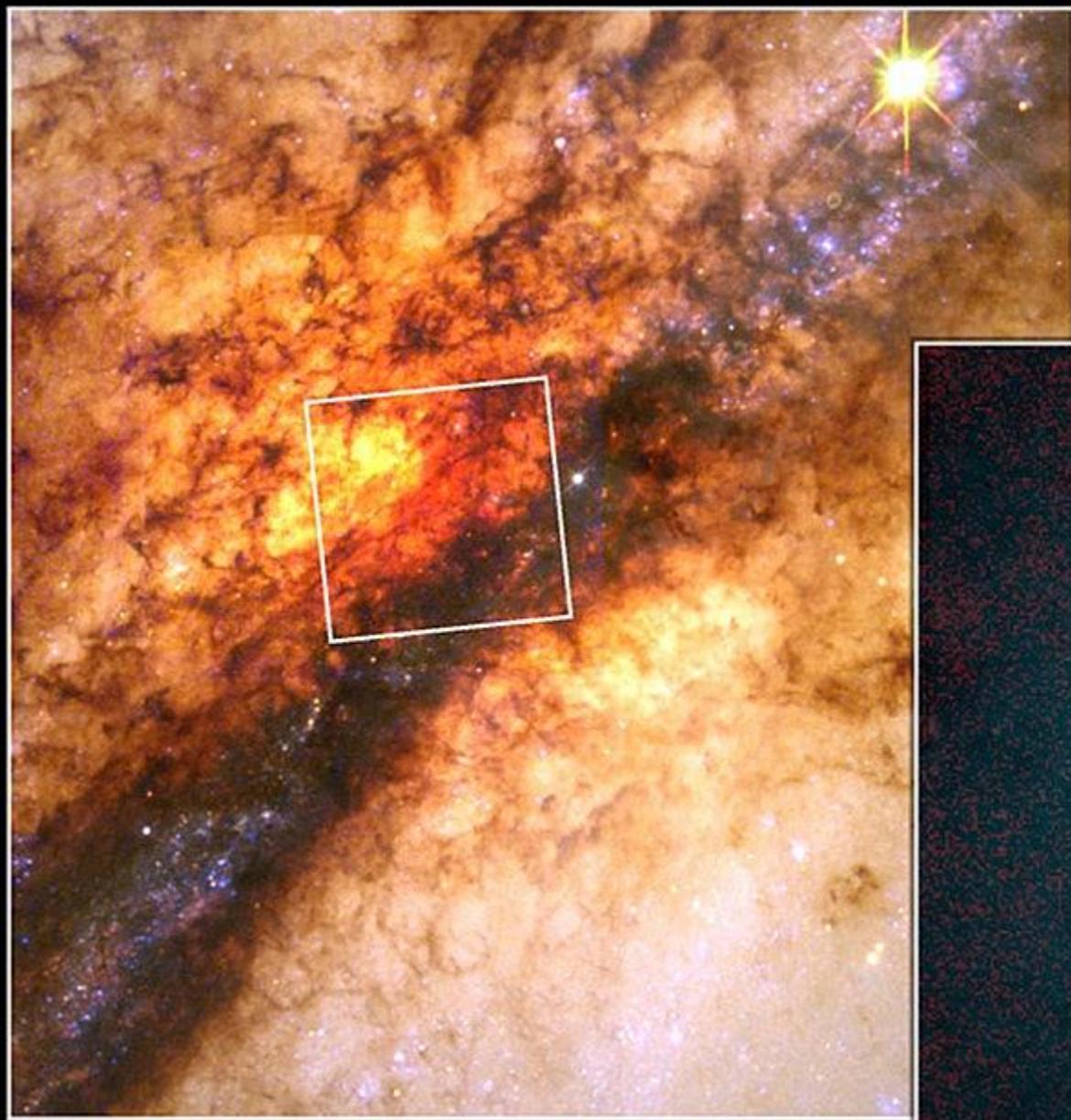


NOAO



HST
WFPC2

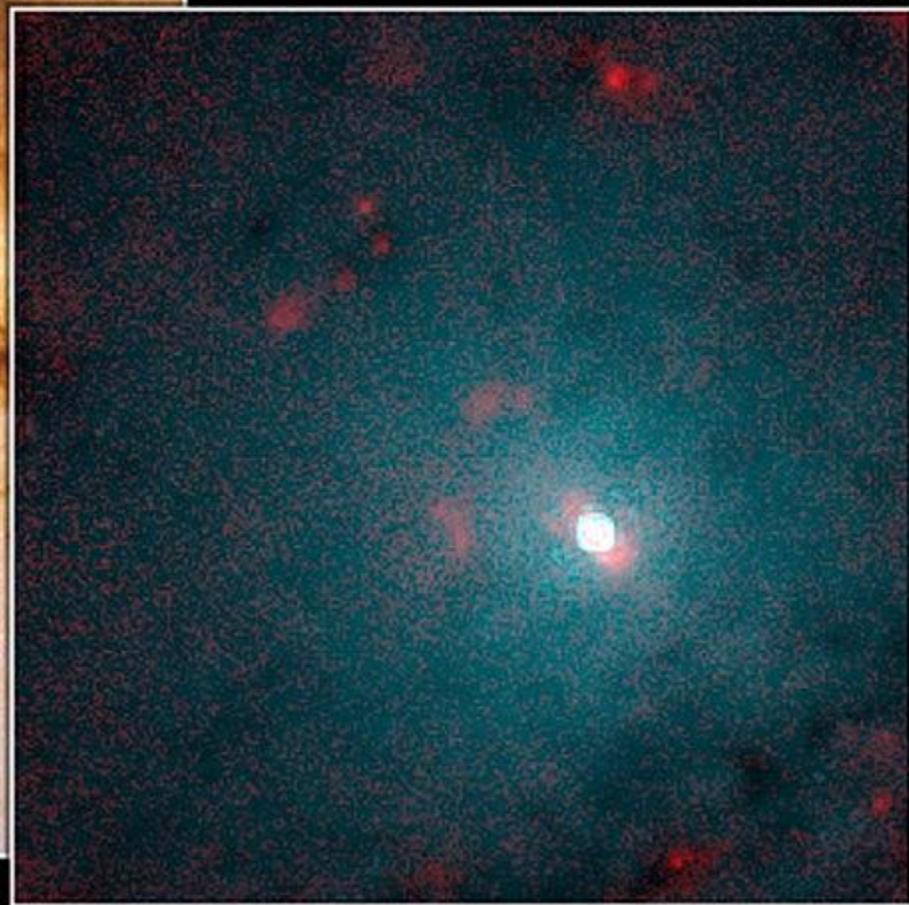
PRC98-14a • ST ScI OPO • May 14, 1998 • E. Schreier (ST ScI) and NASA



WFPC2

Centaurus A Nucleus
Hubble Space Telescope

NICMOS



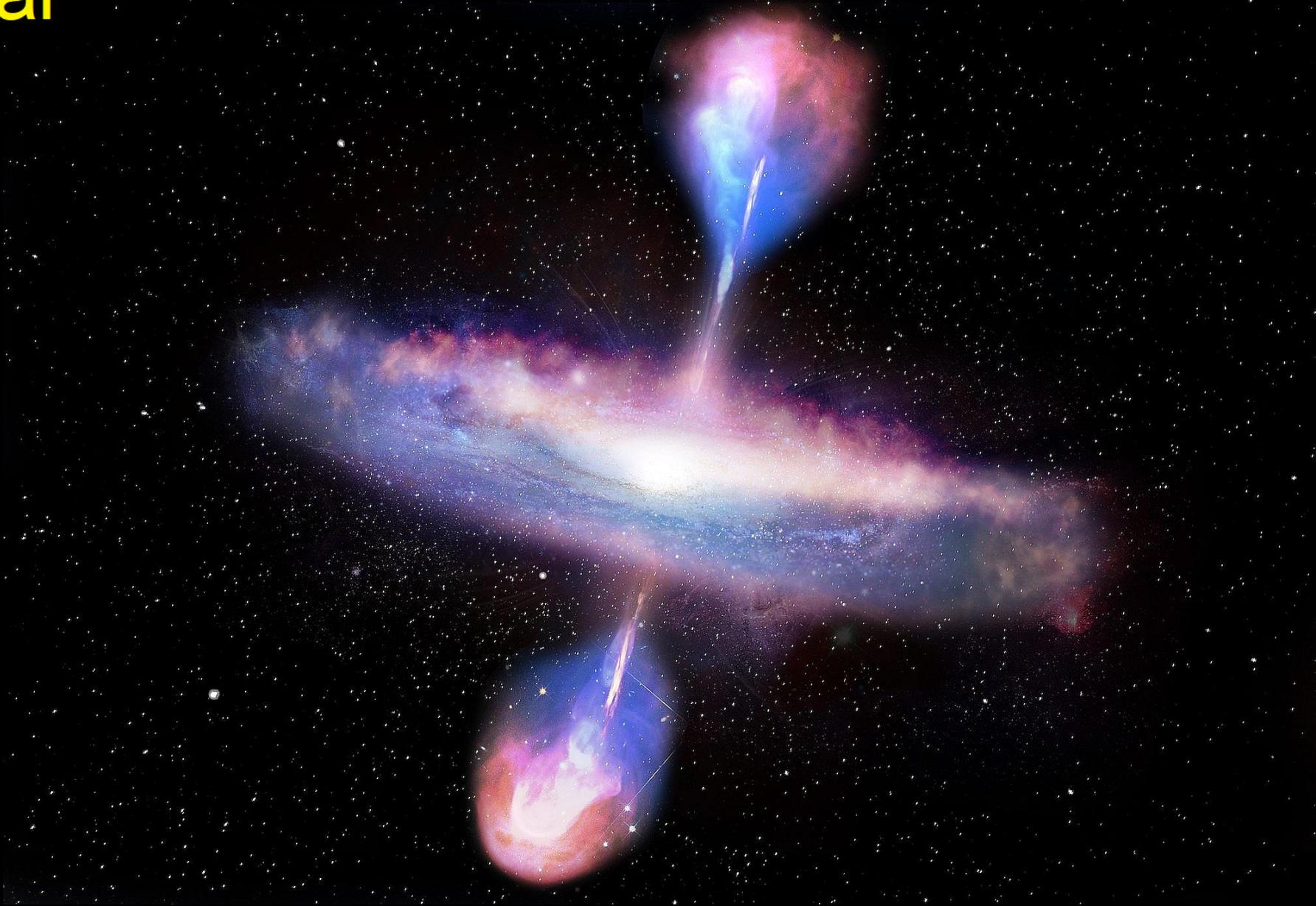
PRC98-14b • ST Sci OPO • May 14, 1998 • E. Schreier (ST Sci) and NASA

I Quasar

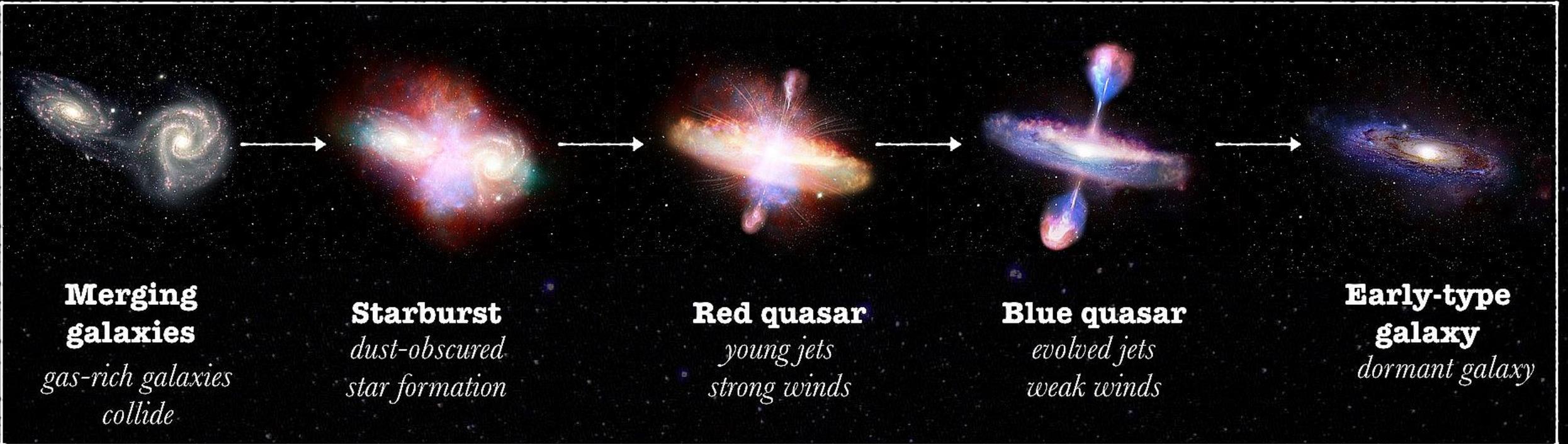
Quasar



Quasar

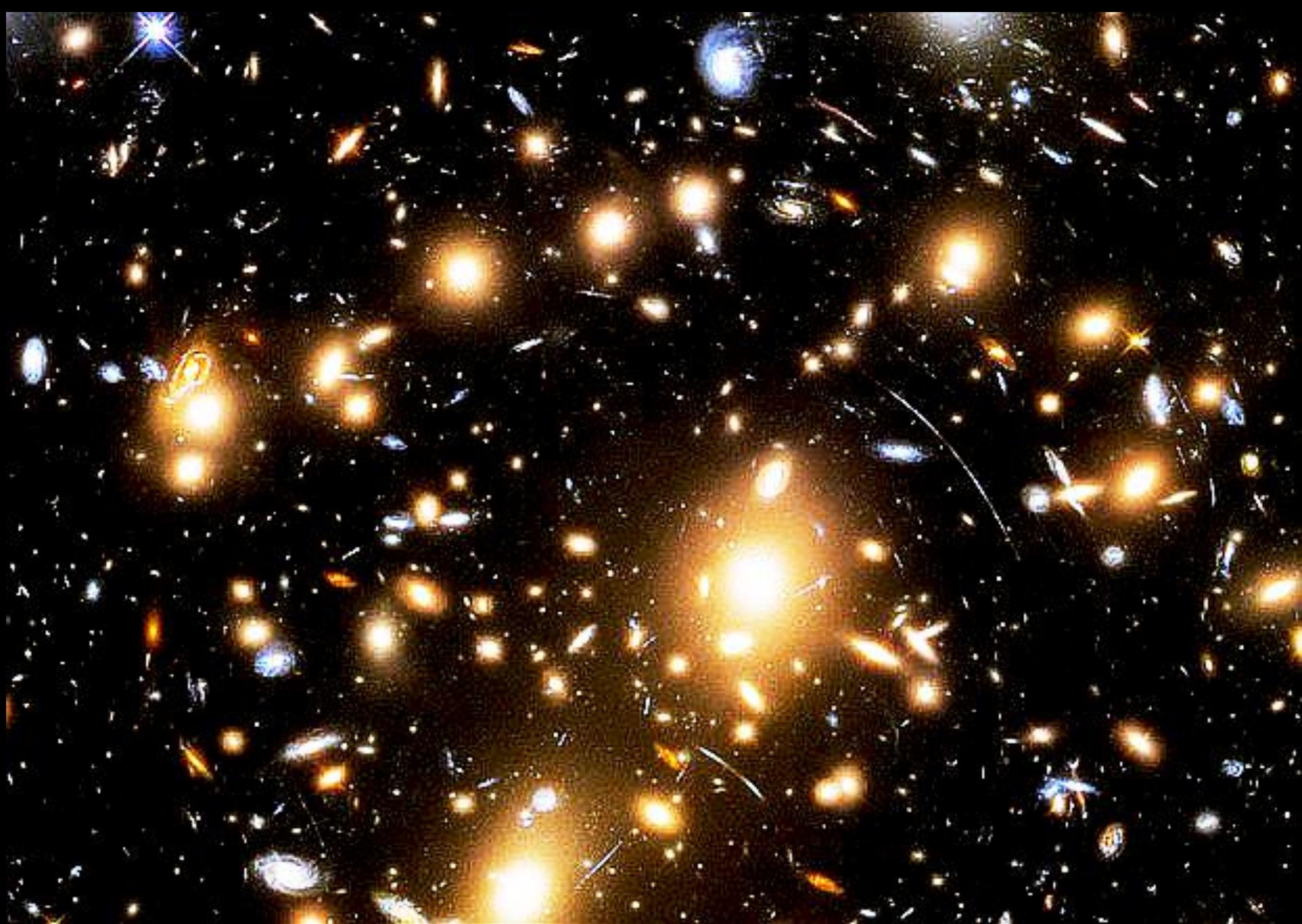


Possibile meccanismo di formazione di un Quasar

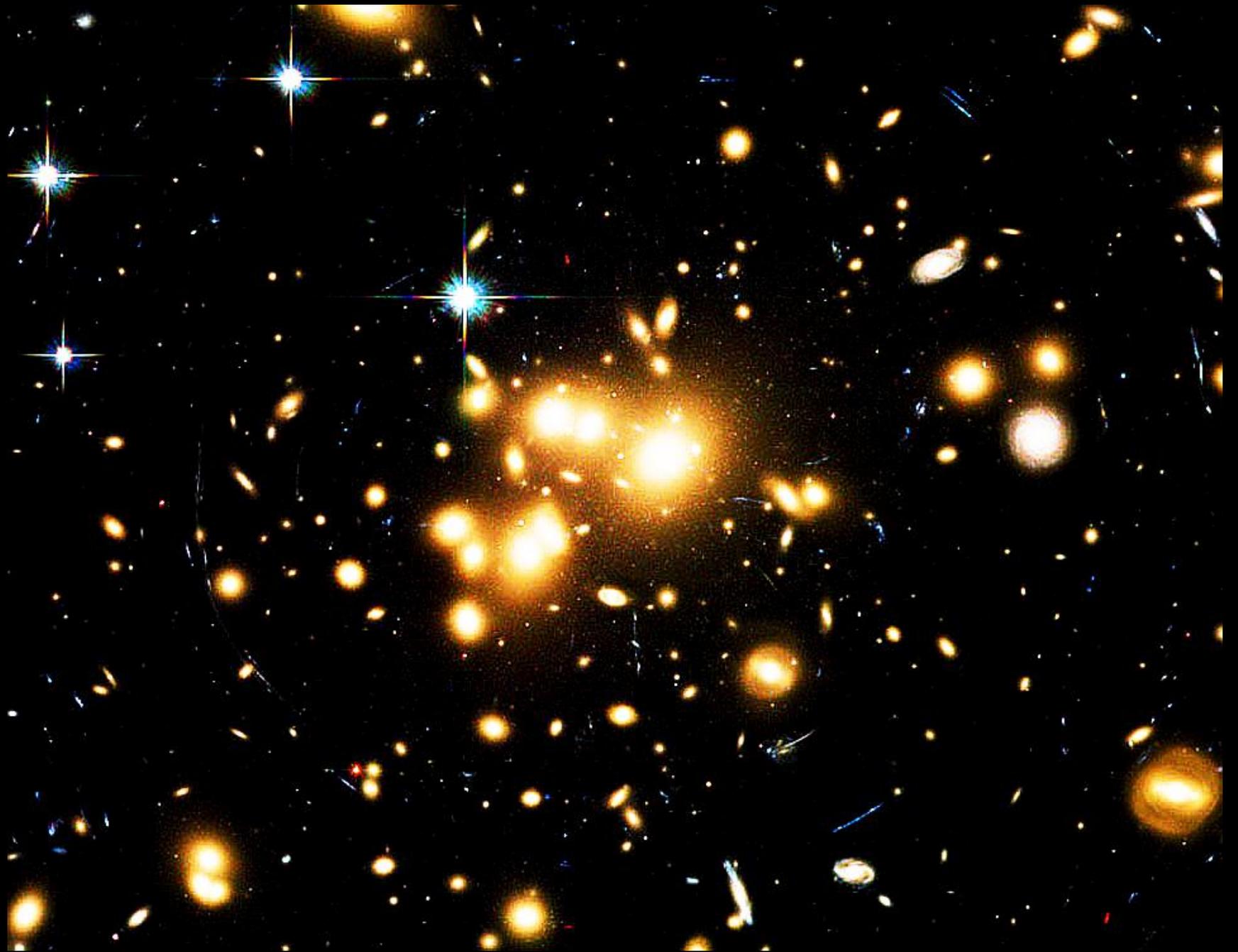


Strutture a grande scala

Abell 370



Abell 1689



Gruppi compatti

Sestetto di Seyfert



Quintetto di Stephan



La Materia Oscura

Materia oscura:

Si definisce materia oscura della materia che non emette radiazioni da noi misurabili (o che non ne emette affatto), ma che noi consideriamo parte della nostra teoria poiché, in quanto materia, ha un influsso gravitazionale sui corpi osservabili direttamente.

Va ricordato che il nostro studio dell'universo si fonda principalmente sull'osservazione dei corpi celesti: prima con i telescopi, e poi con i radiotelescopi abbiamo esaminato sempre corpi che emettono radiazioni di varia natura, *supponendo che questi compongano la maggior parte della massa dell'Universo* e dunque basando su questi i nostri modelli fisico-matematici.



Materia visibile

Materia oscura

Le origini: 1933, Fritz Zwicky

Il fisico di origine svizzera, misurando col metodo Doppler la velocità di rotazione dell'ammasso galattico della Chioma di Berenice e confrontandola con la sua massa visibile, nota che quest'ultima è meno del 5% di quella necessaria per contrastare la forza centrifuga con l'attrazione gravitazionale ed evitare il disgregamento.

Ipotizza quindi la presenza di **materia non visibile** che tuttavia manifesta i suoi influssi gravitazionali.

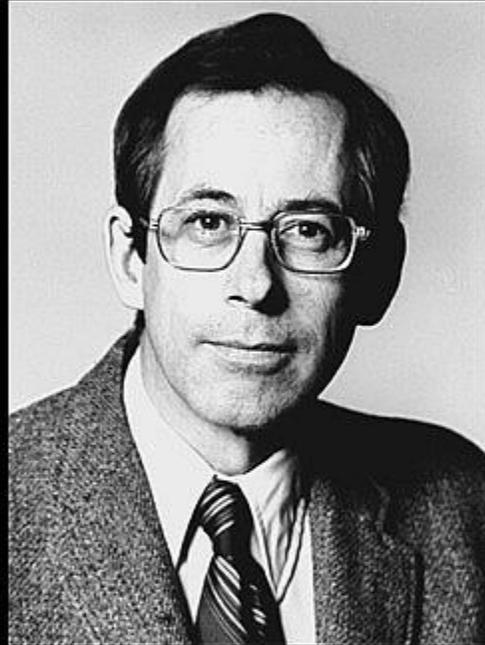


Sopra, Zwicky in una foto degli anni '50.

A sinistra, una foto dell'ammasso galattico della Chioma ottenuta dalla sovrapposizione di una rilevazione nel visibile della Sloan Digital Sky Survey (colore blu) e nell'infrarosso ad **onda lunga** (in rosso) e **corta** (in verde) del telescopio spaziale Spitzer della NASA.

Questa teoria non ha ricevuto molta attenzione, fino a quando, negli anni '70...

Jim Peebles della Princeton University scopre che la maggior parte delle galassie possiede un gigantesco alone invisibile, tanto esteso nello spazio da fondersi con quelli delle galassie vicine ...



... e **David Schramm**, all'Università di Chicago, prova che il rapporto tra la massa luminosa e quella gravitazionale della nostra Galassia è di 1 a 10, studiando le interazioni di quest'ultima con la Galassia di Andromeda.

Molto importante è stato il contributo di Vera Rubin:

Infatti il suo studio durato più di venti anni sulle velocità di rotazione nelle galassie giunge, poco dopo la pubblicazione dei due studi, a una conclusione, contrastante con la maggior parte delle osservazioni fino a quel momento fatte sul comportamento interno delle galassie.



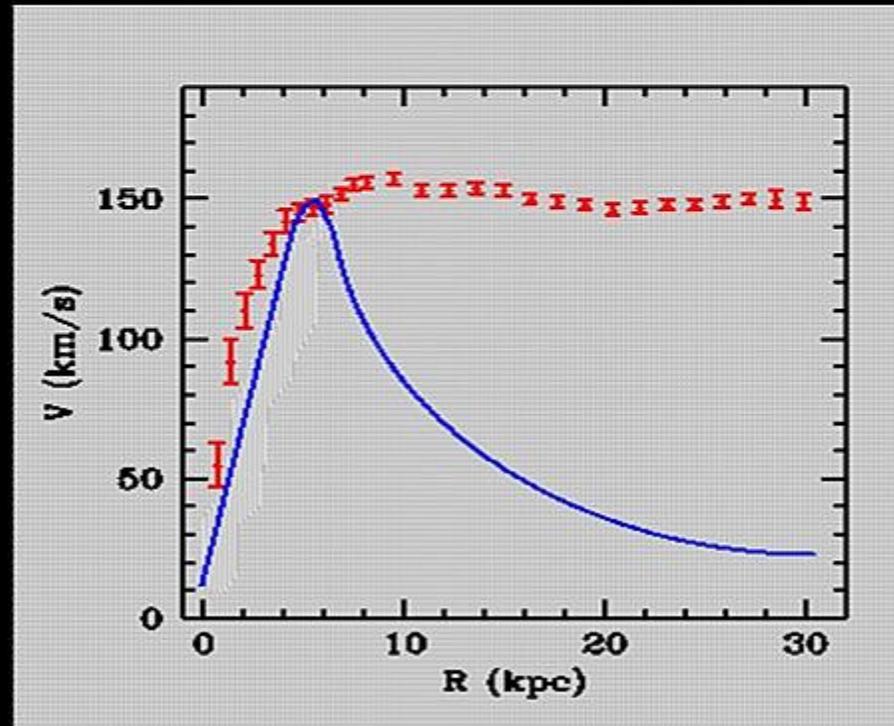
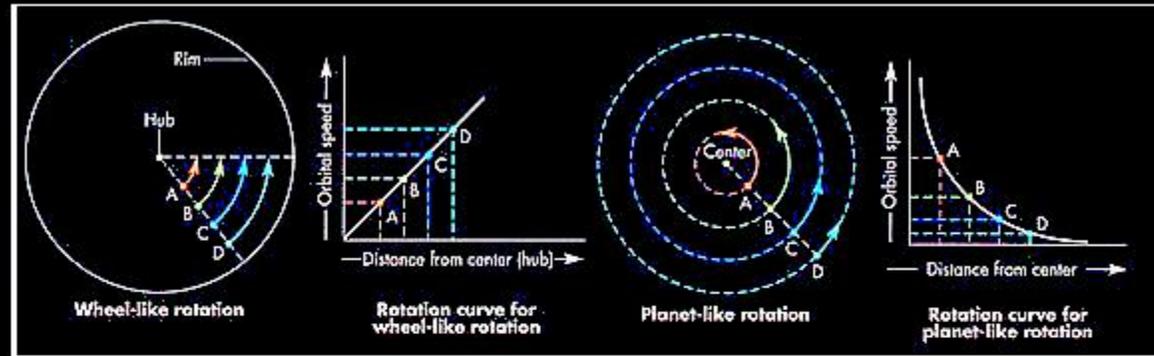
Poiché, osservando una galassia, si nota che la maggiore intensità di luce proviene dal centro, si è sempre pensato che questo avesse una concentrazione di massa tale da far ruotare i suoi componenti in modo simile ad un sistema planetario ...

Ma le misurazioni effettuate dalla Rubin su una consistente quantità di galassie fanno emergere un comportamento piuttosto differente ...

In **rosso** vediamo le velocità medie osservate in funzione della distanza dal centro, in **blu** le velocità ipotizzate considerando la massa osservabile.

Si nota facilmente che, allontanandosi dal centro, la velocità dovrebbe diminuire e invece tende a mantenersi costante.

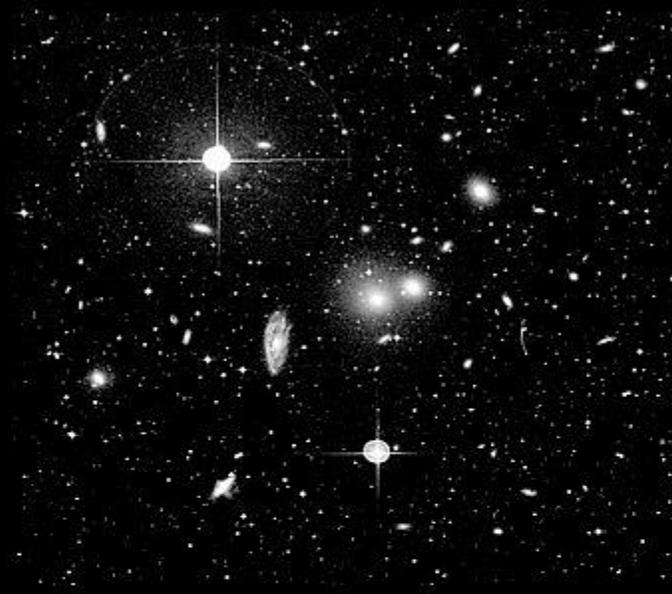
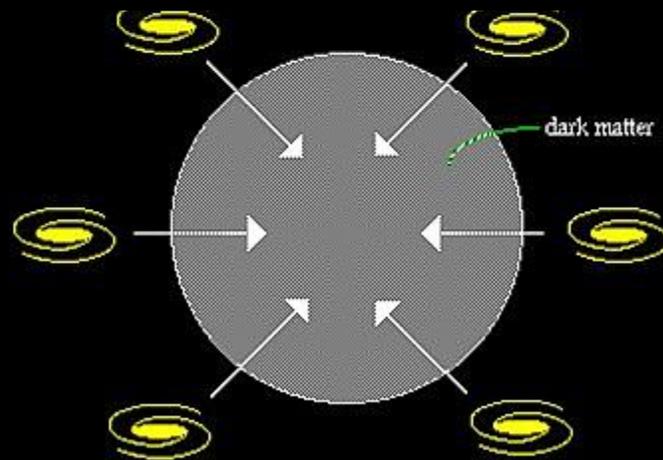
Un fenomeno simile si potrebbe spiegare con la presenza di un alone di materia non visibile che avvolge la galassia.



Altre prove ... Velocità di formazione degli ammassi galattici

Le galassie, grazie alla mutua interazione gravitazionale, tendono ad aggregarsi in sistemi chiamati ammassi galattici (immagini a lato).

Applicando le leggi di Newton possiamo determinare i moti relativi degli elementi dell'ammasso, ma osservazioni sperimentali hanno mostrato galassie che vanno a velocità anche 400 volte più grandi di quelle prospettate, il che ci lascerebbe concludere che queste galassie sono più pesanti di quanto sembri.



Confinamento di nubi di gas

Grazie alle particolari emissioni che vengono emesse dai gas in certe situazioni, si sono potuti osservare degli ammassi di gas in spazi relativamente definiti, anche se intorno a questi sembra prevalere il vuoto e la massa dei corpi luminosi circostanti non può generare un'attrazione gravitazionale sufficiente ad avere un simile fenomeno di contenimento.

Si può anche in questo caso pensare a della materia, a noi invisibile, che opera gravitazionalmente su questi gas.



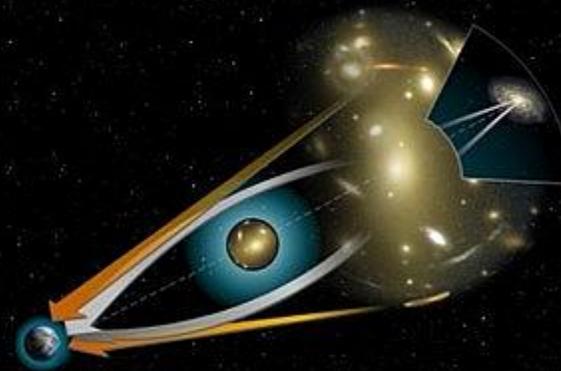
Immagine a raggi X presa dal satellite ROSAT sovrapposta ad una fotografia di un gruppo di galassie.

L'immagine mostra, in falso colore *rosa*, una gigantesca nube di gas "caldo" che emette una debole quantità di raggi X.

Lenti gravitazionali

Una massa sufficientemente grande può influire fortemente sul tragitto della luce e quindi sull'osservazione della fonte luminosa, sdoppiandone l'immagine o riducendola a dei piccoli archi. Misurando il grado di distorsione dell'immagine si può stimare la massa della lente.

Nella maggior parte dei casi si è trovato che questa massa è di gran lunga maggiore di quella associata alla sola materia visibile: da qui l'ipotesi della presenza di materia non visibile, la materia oscura.

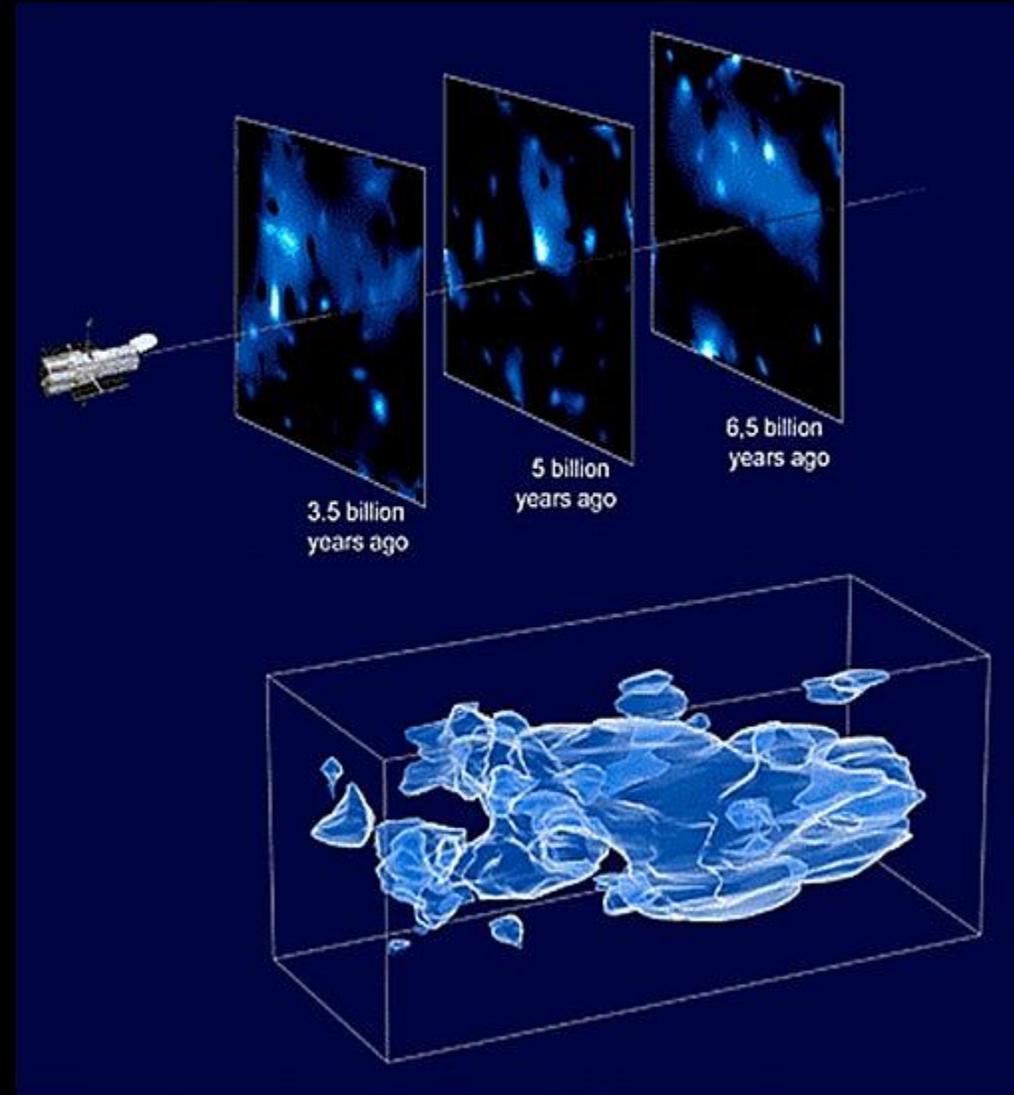


L'ammasso di galassie Abell 2218 è così denso e compatto che la luce proveniente da oggetti molto lontani situati oltre l'ammasso lungo la direzione di osservazione viene amplificata e distorta sotto forma di archi luminosi.

Ricostruire la materia oscura

Separando la luce sullo sfondo a seconda della provenienza, dalle popolazioni di galassie più prossime a quelle più lontane, le rilevazioni del telescopio Hubble hanno messo in risalto le distorsioni della materia oscura a distanze (misurate con il red-shift cosmologico) ed epoche temporali differenti.

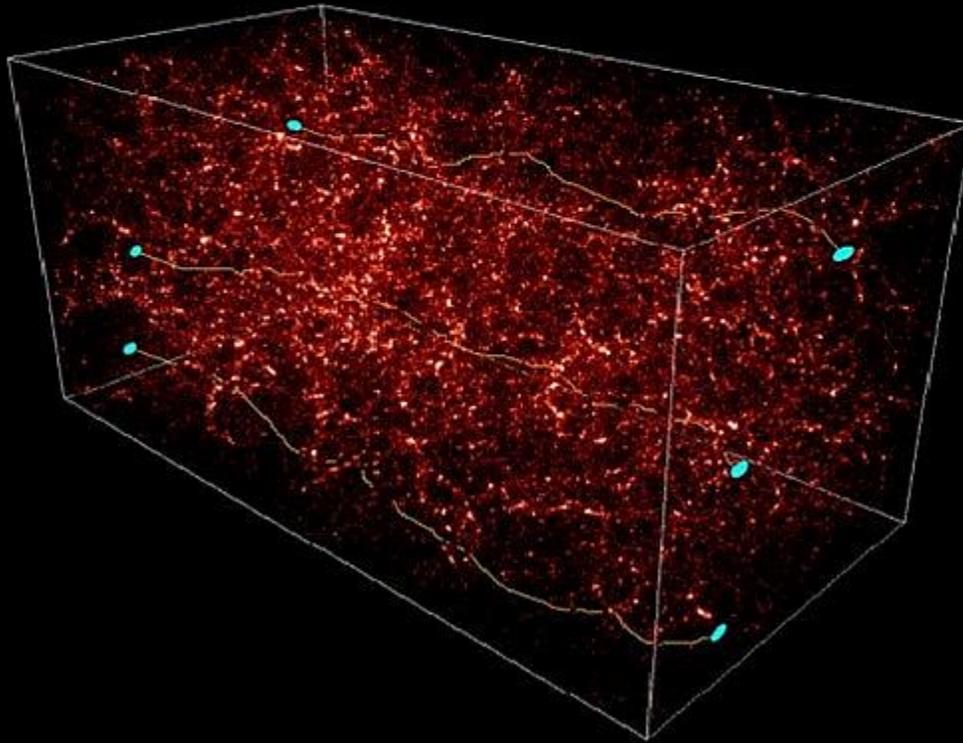
Quindi il modello tridimensionale ricostruisce come è cambiata la distribuzione di materia oscura nel passare dei miliardi di anni.



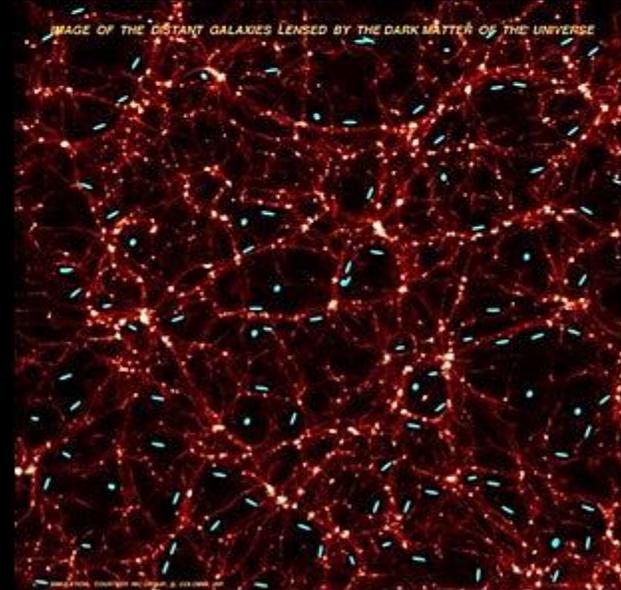
Materia oscura e lenti gravitazionali:

Deflessione subita dai raggi di luce emessi dalle galassie
distanti nell'attraversare l'Universo permeato di materia
oscura.

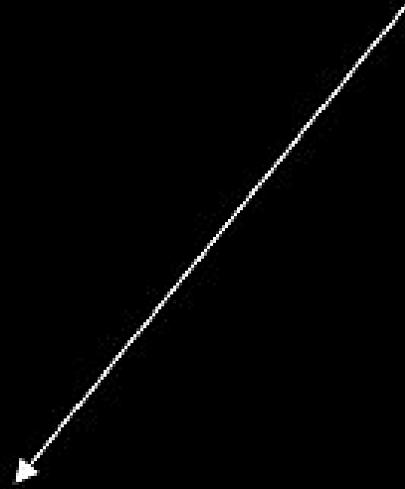
DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES



In celeste le galassie lontane
deformate dall'effetto-lente
gravitazionale generato dalla
materia oscura nell'Universo.

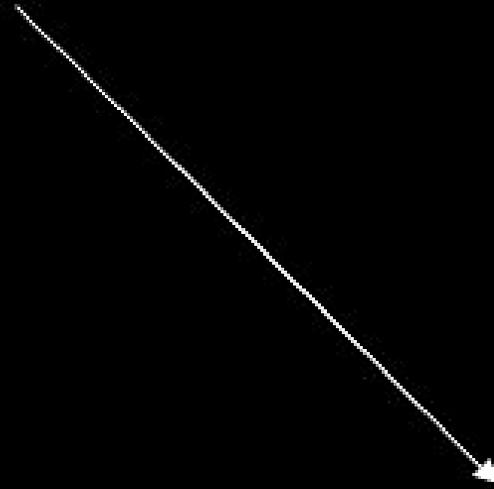


Assumendo la validità di questa ipotesi, c'è una grande quantità di materia oscura ... ma da cosa può essere composta?



Materia barionica:

Non tutta la materia ordinaria
emette luce!



Materia non barionica:

Delle nuove particelle “esotiche”
potrebbero spiegare la presenza della
materia oscura.

Materia oscura barionica:

- Rocce e pianeti
- Stelle poco luminose, nane brune e bianche, stelle di neutroni
- Buchi neri



Siamo certi che ce ne siano ma, supponendo che la distribuzione di questi sia ovunque simile a quella nelle nostre vicinanze, la quantità che risulta è praticamente trascurabile.

L'Universo è troppo giovane per avere così tante stelle spente o trasformate in stelle di neutroni e buchi neri! (Si è calcolato che il 90% delle attuali stelle dovrebbe aver raggiunto lo stato di supernova per spiegare tutta la materia oscura)

Materia non barionica:

- Neutrini
- Weakly Interacting Massive Particles (WIMPS)
- Assioni
- Monopoli magnetici

Queste particelle ci sono ancora piuttosto oscure, infatti è difficile sia valutare la loro massa (che sembra essere molto piccola) sia la loro distribuzione nello spazio: quindi è difficile dire quanto possano pesare sulla quantità complessiva di materia oscura.

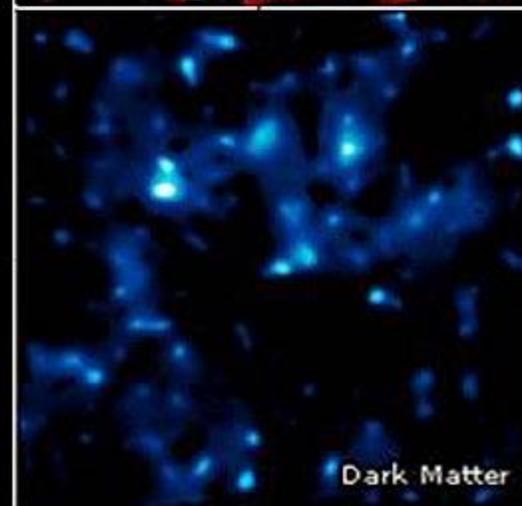
Sono particelle utili per giustificare la materia oscura, ma per ora appartengono alla teoria, senza alcuna evidenza sperimentale della loro esistenza.

Stima delle proporzioni di materia-energia nell'Universo:

Materia barionica visibile	0.5%
Materia barionica invisibile	4%
Neutrini	0.5%
Altra materia non barionica	30%

Per motivi che saranno illustrati più avanti, si ha motivo di credere che la materia sia, come si può notare, solo un 35% del totale: per il restante 65% si parlerà di **energia oscura**.

Le due immagini in falsi colori comparano la distribuzione della materia ordinaria (in rosso, a sinistra) con quella della materia oscura (in blu, a destra) nell'Universo. La brillantezza degli ammassi corrisponde alla densità di massa. Si mostra così che la materia ordinaria (incluse stelle, galassie e gas interstellari) è assemblata all'interno di un'impalcatura fondamentale di materia oscura.

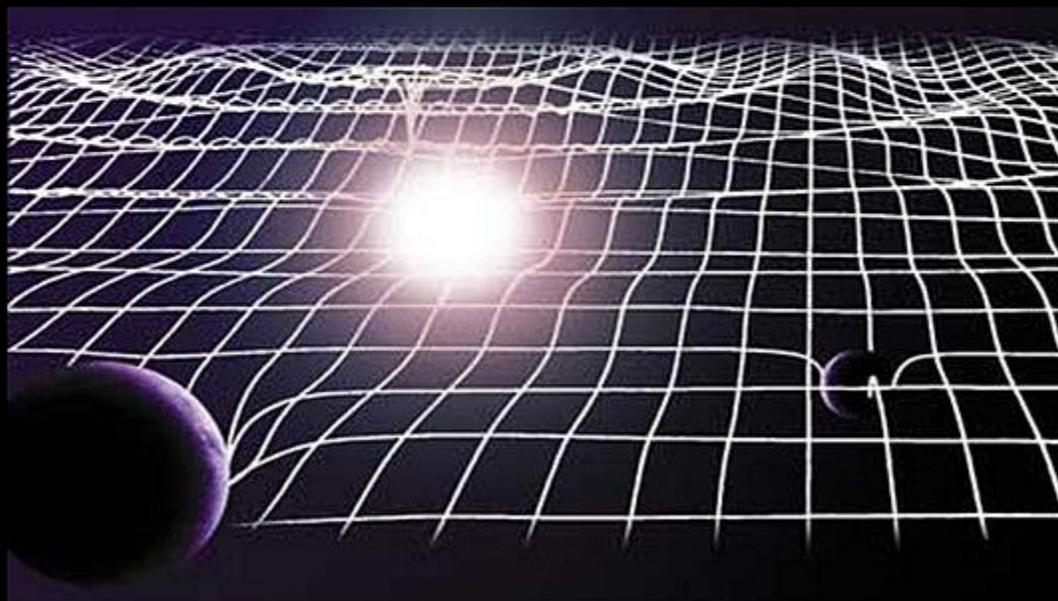


Ma possiamo parlare con sicurezza di materia oscura?

Come abbiamo notato, il solo tipo di valutazione che ci porta a considerarla è strettamente legato ai comportamenti gravitazionali: quindi la chiave di questa immensa discrepanza tra osservazioni e stime teoriche potrebbe avere origine in una errata concezione della gravità.

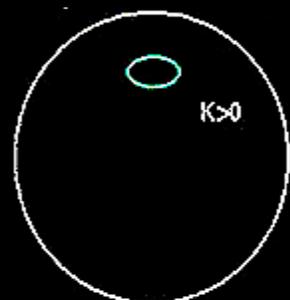
Partendo dalla teoria delle stringhe, si è considerata l'ipotesi che per grandi distanze (o per basse accelerazioni) tra i corpi interagenti la forza sia differente da quella prospettata dalla relatività.

Dato che non si hanno prove sperimentali nemmeno a favore di questa teoria anche questa ipotesi è attualmente ad uno stallo.



La quantità di massa presente nell'Universo non è solo un argomento importante per conoscere meglio da cosa è composto il cosmo, ma anche per capire di più sul suo destino!

Modelli di Friedmann:



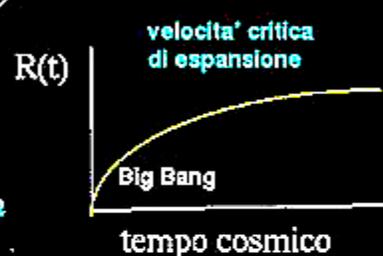
Geometria sferica
 Area cerchio $< \pi r^2$
 Circonferenza cerchio $< 2\pi r$



$R(t)$ =fattore di scala



Spazio Euclideo
 Geometria piana
 Area cerchio $= \pi r^2$
 Circonferenza cerchio $= 2\pi r$



$R(t)$ =fattore di scala



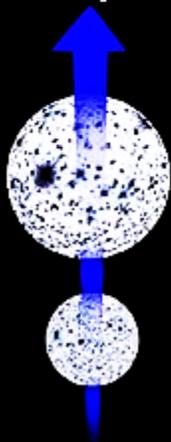
Spazio Iperbolico
 Geometria iperbolica
 Area cerchio $> \pi r^2$
 Circonferenza cerchio $> 2\pi r$



$R(t)$ =fattore di scala

Densità critica

Ω = densità di materia / densità critica

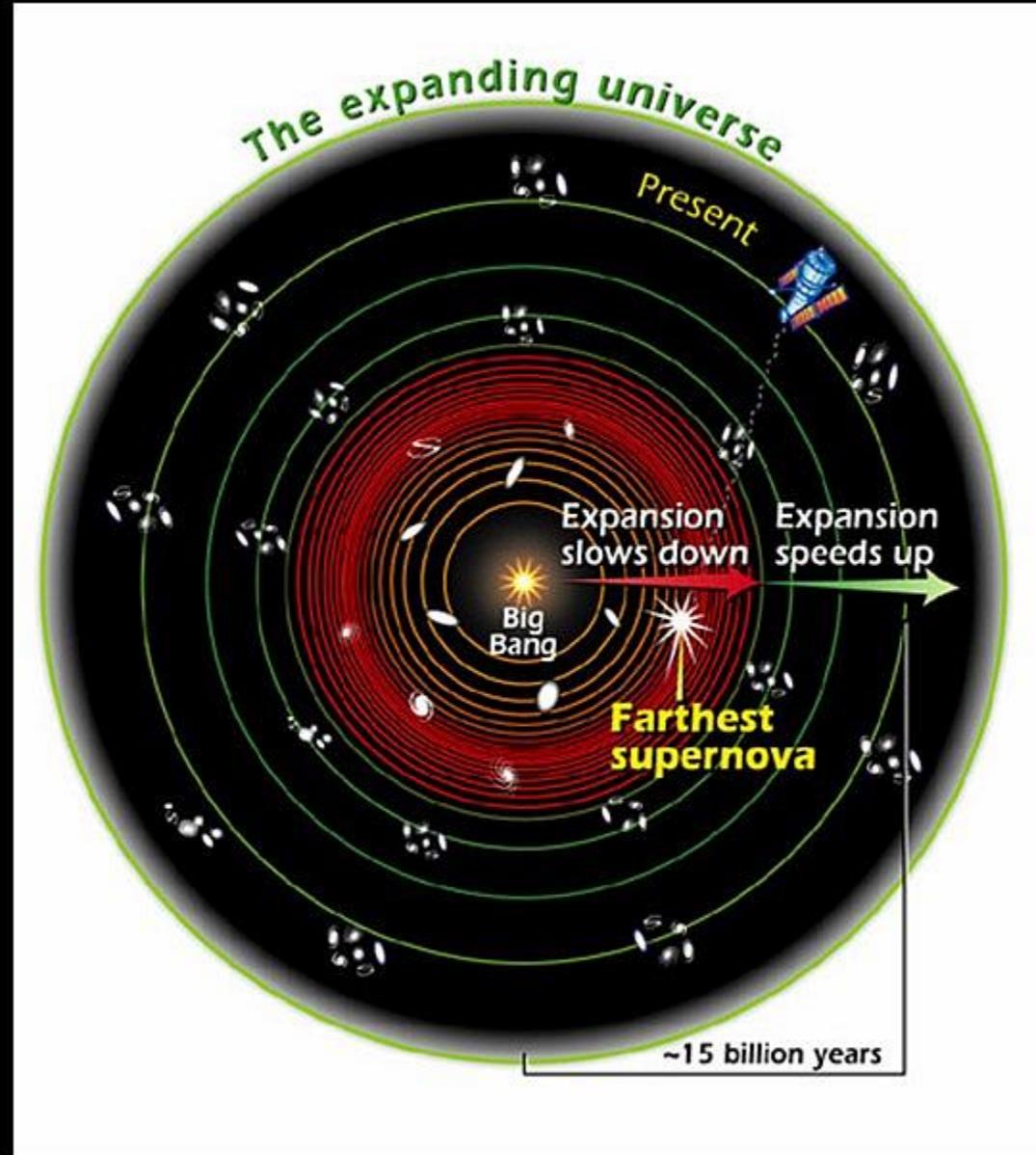
$\Omega > 1$	$\Omega = 1$	$\Omega < 1$
<p data-bbox="537 386 1011 686">La geometria dello spazio è sferica ($k > 0$), l'Universo raggiungerà un massimo di espansione dopo il quale si ricontrarrà, si dice Universo chiuso.</p> 	<p data-bbox="1047 386 1531 629">Lo spazio è euclideo ($k = 0$), l'Universo si espanderà per sempre (anche se la velocità tenderà a 0), si dice Universo piatto.</p> 	<p data-bbox="1574 386 2015 629">La geometria dello spazio è iperbolica ($k < 0$), l'Universo si espanderà per sempre, si dice Universo aperto.</p> 

L'Universo sta accelerando:

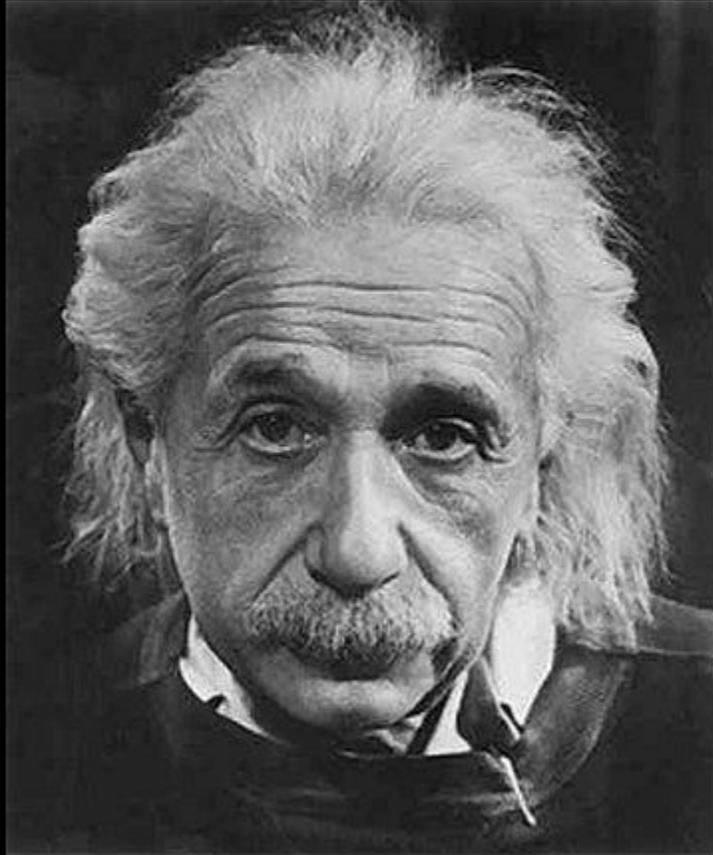
Grazie alle misurazioni effettuate sulle supernove abbiamo scoperto che l'universo non solo è in espansione, ma la sua velocità è in aumento.

Nei primi momenti dopo il Big Bang, la gravità prevalse tanto da far rallentare l'espansione, ma ora sta prendendo il sopravvento una forma di **energia oscura** che sembra alterare l'espansione del nostro universo.

Uno degli obiettivi dell'astrofisica moderna è sviluppare un modello verificabile sperimentalmente che giustifichi questo fenomeno.



La costante cosmologica:



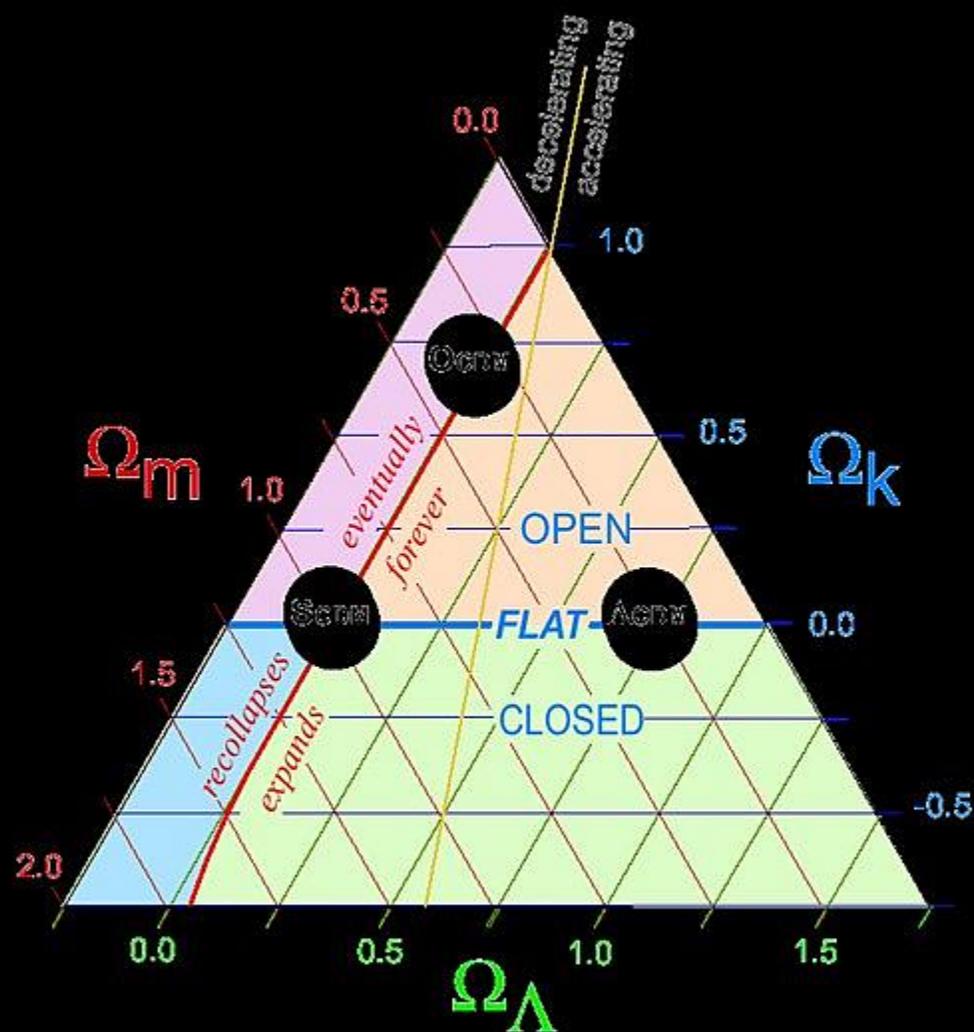
Già ipotizzata da Einstein per rendere stazionario il modello dell'Universo derivante dalla Relatività Generale e poi rinnegata come il suo "più grande errore", per costante cosmologica si intende una forma di energia connaturata allo spazio stesso (tanto da essere chiamata anche "energia del vuoto"), dotata di pressione negativa (quindi di gravità repulsiva), tanto debole da non essere affatto percepibile sulle corte distanze, ma importante su scala cosmica.

I nuovi modelli di universo alla luce di Λ :

Aggiungendo ai giochi la costante cosmologica non esiste più una relazione diretta tra massa e curvatura e quindi non si potrà considerare un solo Ω come fattore decisionale: ci saranno infatti anche una curvatura e un'energia del vuoto critica (con i loro relativi Ω) a decidere il comportamento del modello di universo in esame.

Nel grafico a fianco i modelli vengono classificati e associati ai rispettivi valori di Ω .

Le più recenti osservazioni di supernove ci portano a considerare un $\Omega_\Lambda=0,7$ e un $\Omega_m=0,3$ che ci farebbe concludere che $\Omega_k=0$, e che quindi l'universo sarebbe euclideo, confermando ciò che viene affermato da gran parte degli scienziati.



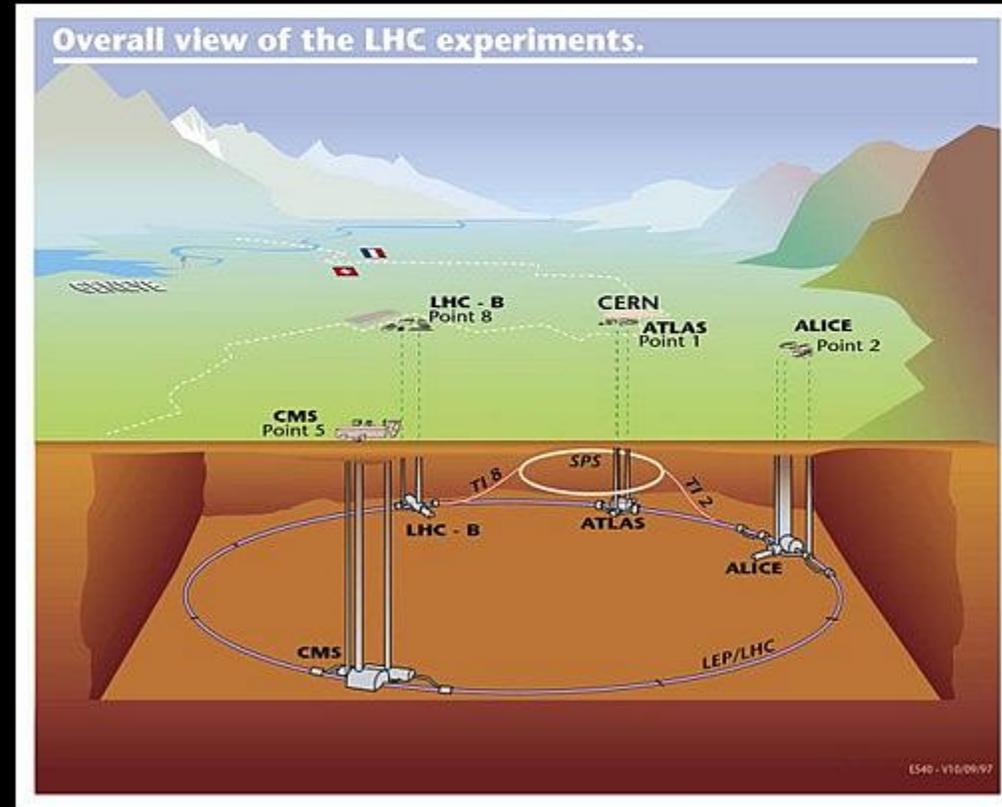
$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

A che punto siamo arrivati?

-Quintessenza;

-L'LHC e il DAMA cercano nuove particelle candidate per la materia oscura;

-Se la teoria delle stringhe fosse verificata, i modelli che ridescrivono la gravità potrebbero essere meglio sviluppati.



La MOND
Modified Newtonian
Dynamics

Newton's Gravity

Gravitation: $F_g = \frac{GMm}{R^2} = g \cdot m$

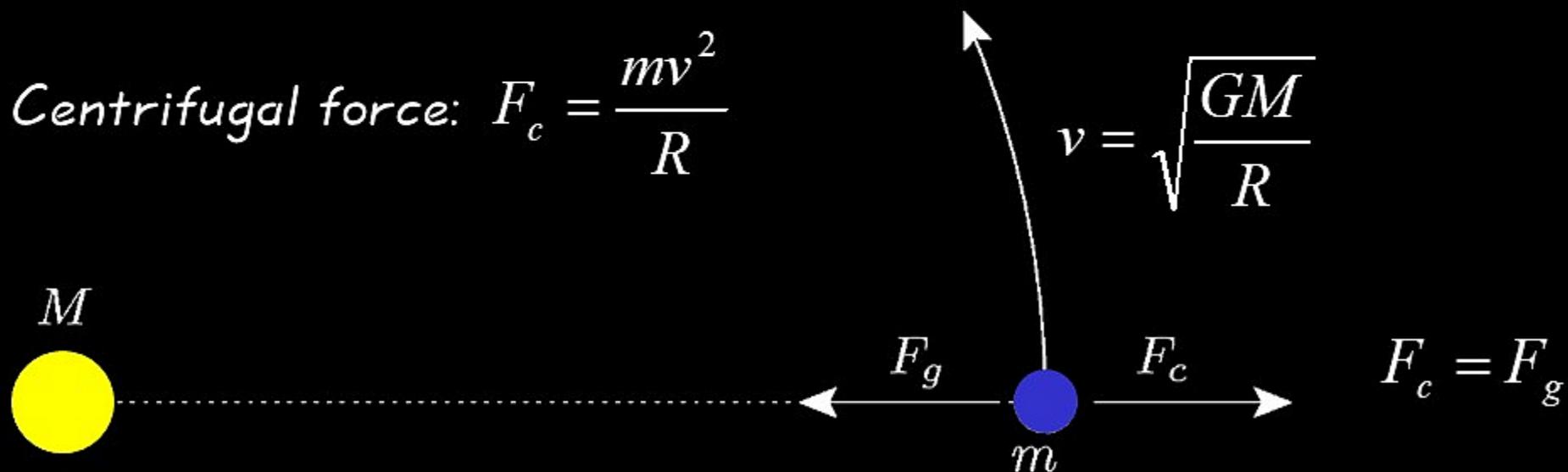
m free \downarrow weight of *m* is zero, *accelerated* with *a*

$$m \cdot g = m \cdot a$$

m fixed \downarrow *g* assigns a *weight* to *m*

$$m \cdot g \neq m \cdot a$$

Centrifugal force: $F_c = \frac{mv^2}{R}$



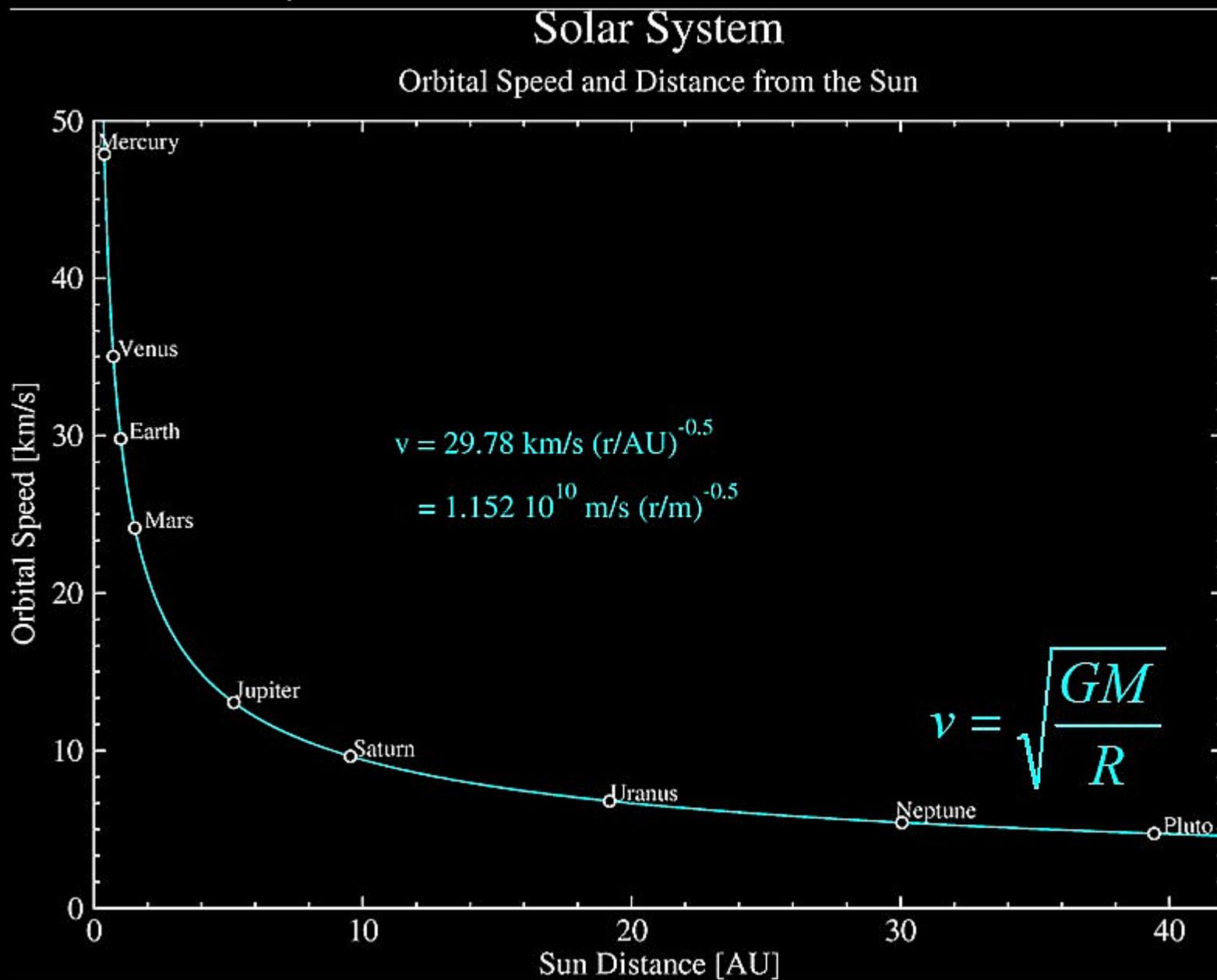
$$v = \frac{2\pi R}{P}$$

\Rightarrow

$$R^3 = \frac{GM}{4\pi^2} P^2$$

3. Keplerian Law

Solar System Rotation Curve



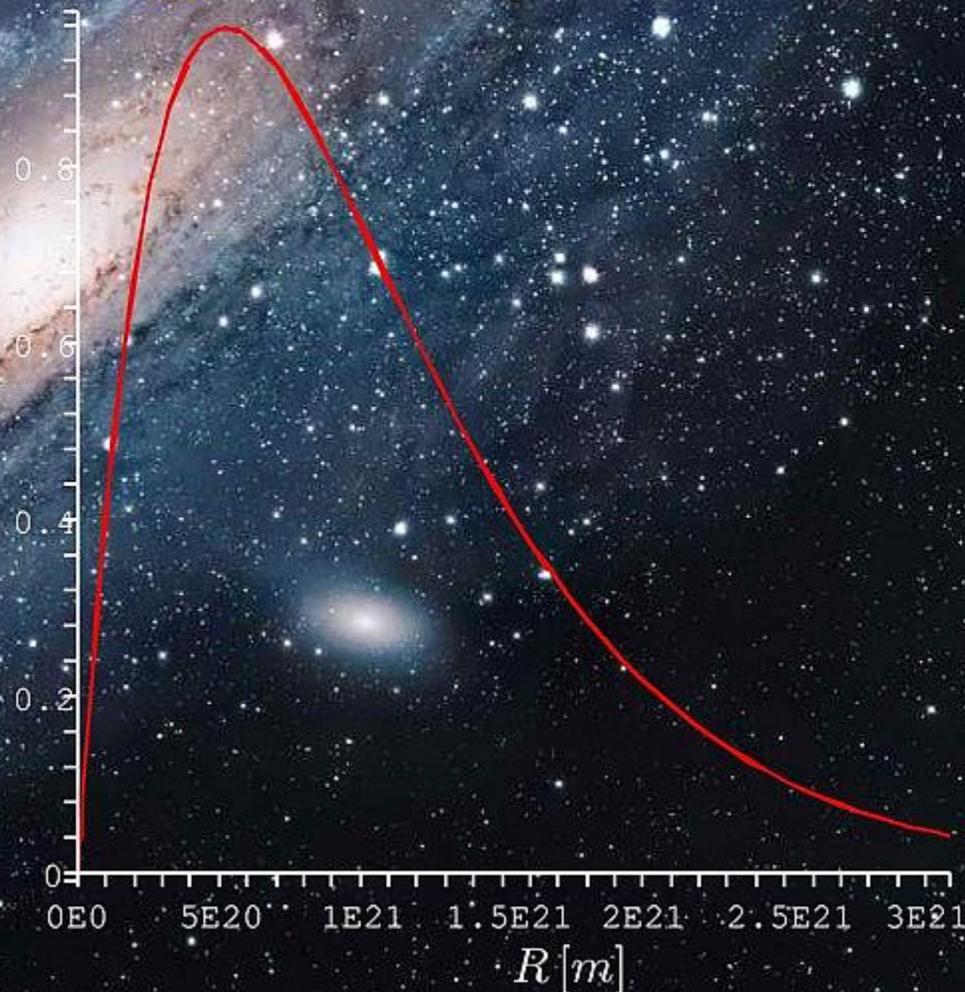
Galaxies

The *laws of physics* concerning (Newtonian) gravitation seem to be *transferrable* from laboratory scales to the solar system.

We are confident, they are valid even on *larger scales* like galaxies.

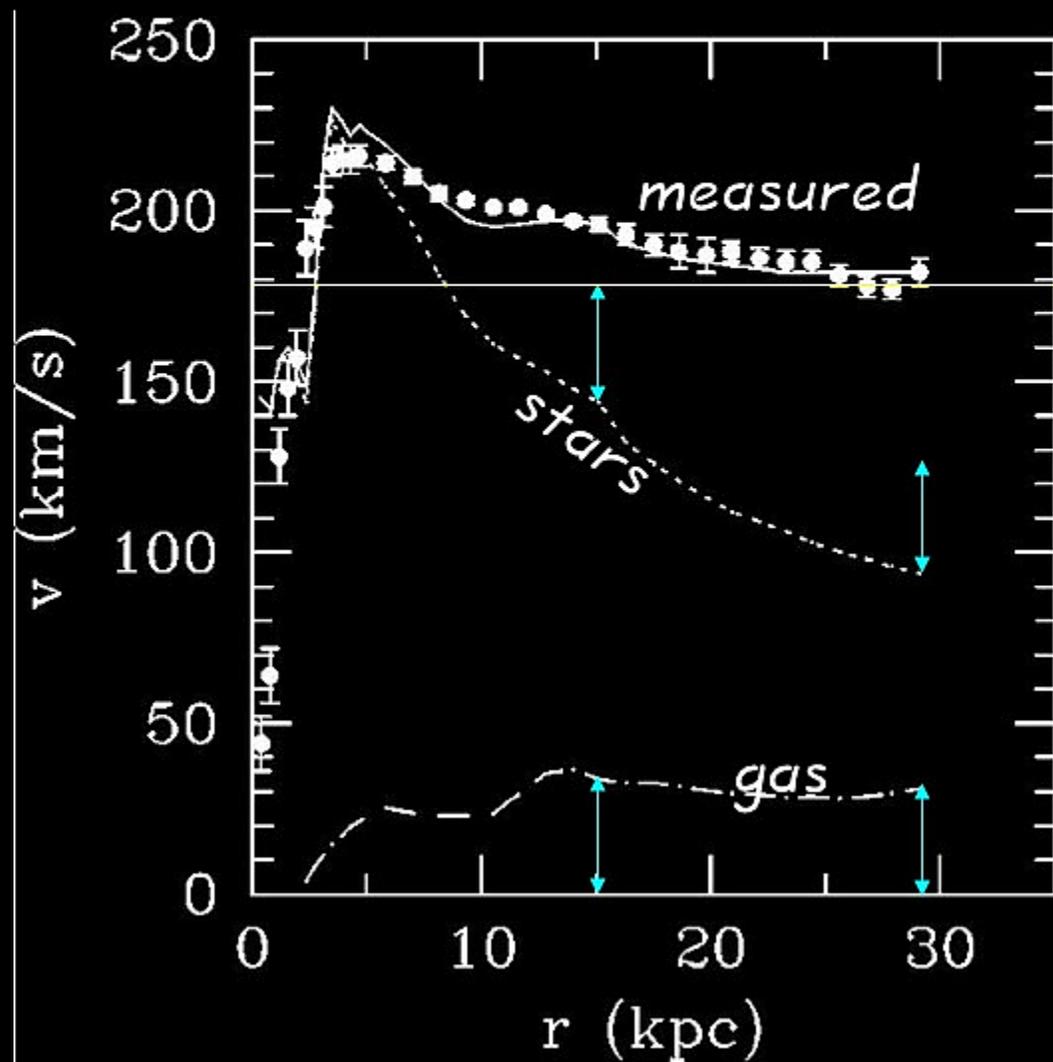
Rotation curve:

$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$



Rotation Curves of Galaxies

Observations **contradict** theoretical predictions.



1. Orbital velocities are too high.

2. Rotation curves stay flat.

$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

„Dark Matter“

MOND

Milgrom (1983)

Modified Newtonian Dynamics

based on Newtonian, *non-relativistic* gravitational theory

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

modification of inertia

$$\mu(x) = \begin{cases} x & \text{if } 0 < x \ll 1 \\ 1 & \text{if } x \gg 1 \end{cases}$$

$$g_N = g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right)$$

modification of gravity

$$F = m \cdot \frac{a^2}{a_0} \quad \text{if } a \ll a_0$$

$$g = \sqrt{g_N a_0} \quad \text{if } g \ll a_0$$

New *fundamental constant*: $a_0 \approx 1 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s^2}$ (empirical)

$$a_0 \approx \frac{cH_0}{2\pi} = 1.1 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s^2}$$

Might be a coincidence.

MOND

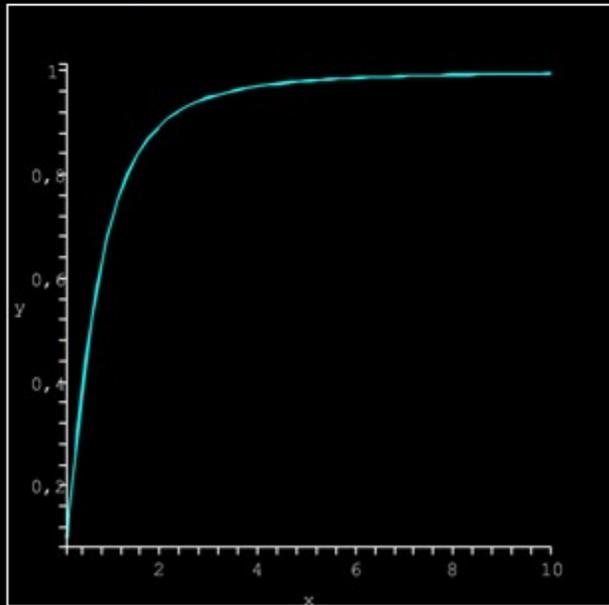
Modified Newtonian Dynamics

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

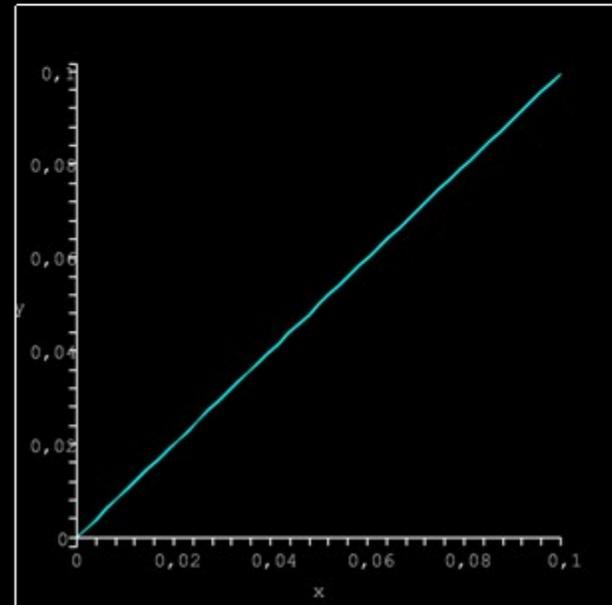
$$g_N = g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} x & \text{if } 0 < x \ll 1 \\ 1 & \text{if } x \gg 1 \end{cases}$$

analytic form of μ unknown, often assumed to be like:



$$\mu(x) = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$$



MOND

Modified Newtonian Dynamics

$$F_g = m \cdot \frac{a^2}{a_0} \quad \text{if} \quad a \ll a_0$$

Gravitational forces in bound systems *mostly Newtonian*.

$$R_{\text{Mond}} = \sqrt{\frac{GM}{a_0}}$$

Only at *large distances* from the central mass (e.g. in galaxies), the acceleration declines *below* a_0 ($R = 11.8$ kpc for $M = 10^{11} M_{\odot}$).

In our *solar system*, the gravitational acceleration of *all planets* lies well *above* a_0 .

But: $a = a_0$ for $R = 7700$ AU \Downarrow *Oort Cloud*

Rotation Curves with MOND

What is the rotation velocity with MOND, where $g \ll a_0$?

Gravitational acceleration: $g = \sqrt{g_N a_0} = \sqrt{\frac{GMa_0}{R^2}}$

Centrifugal force: $F_c = \frac{mv^2}{R} = m \cdot a$

$$\frac{\sqrt{GMa_0}}{R} = \frac{v^2}{R}$$

$$a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{R}$$

$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$v = (GMa_0)^{1/4}$$

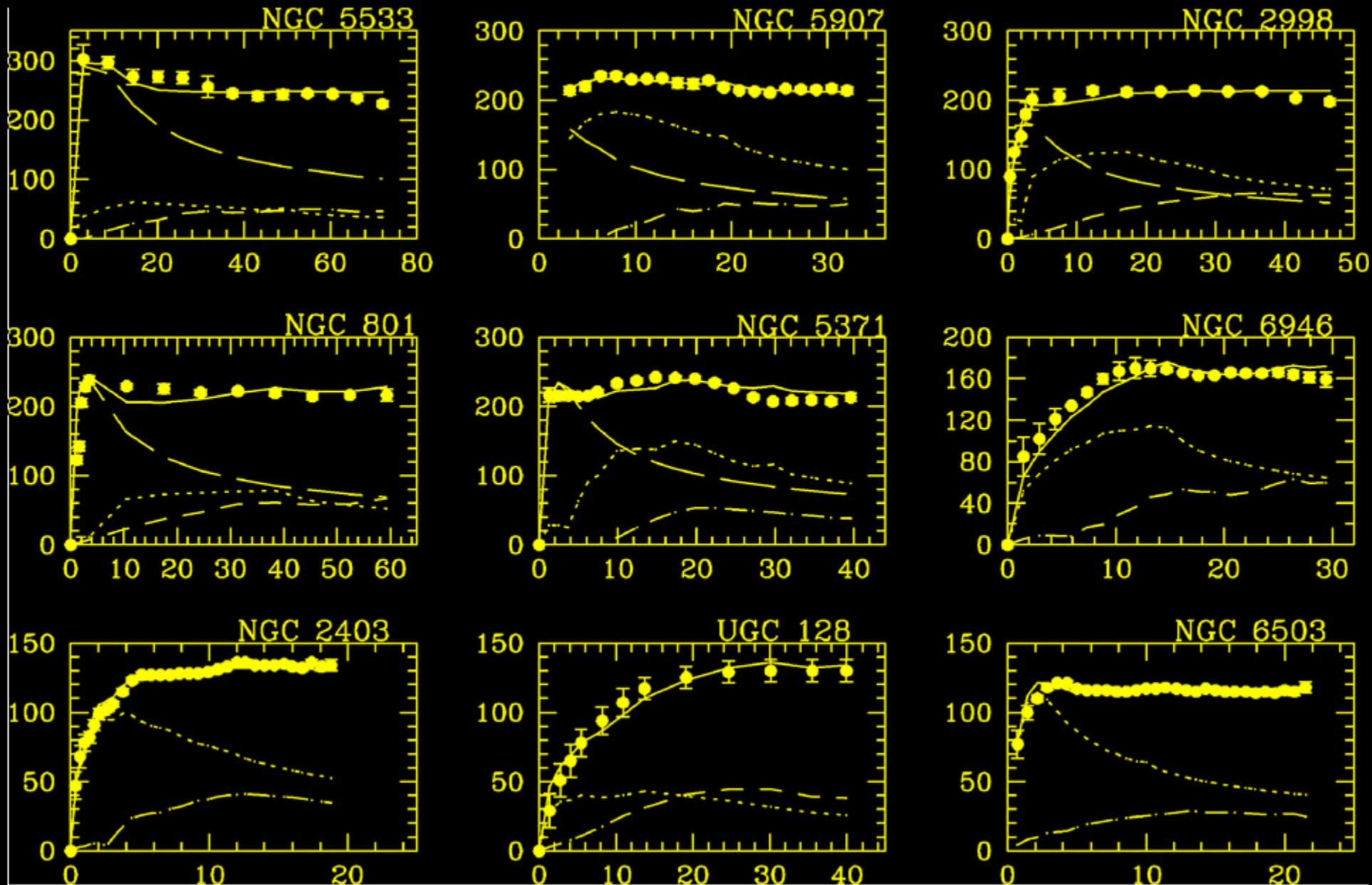
For a given mass, the rotation velocity converges to a constant value.

This is in accord with observations.

$$\Rightarrow v^4 \sim L$$

Tully-Fisher

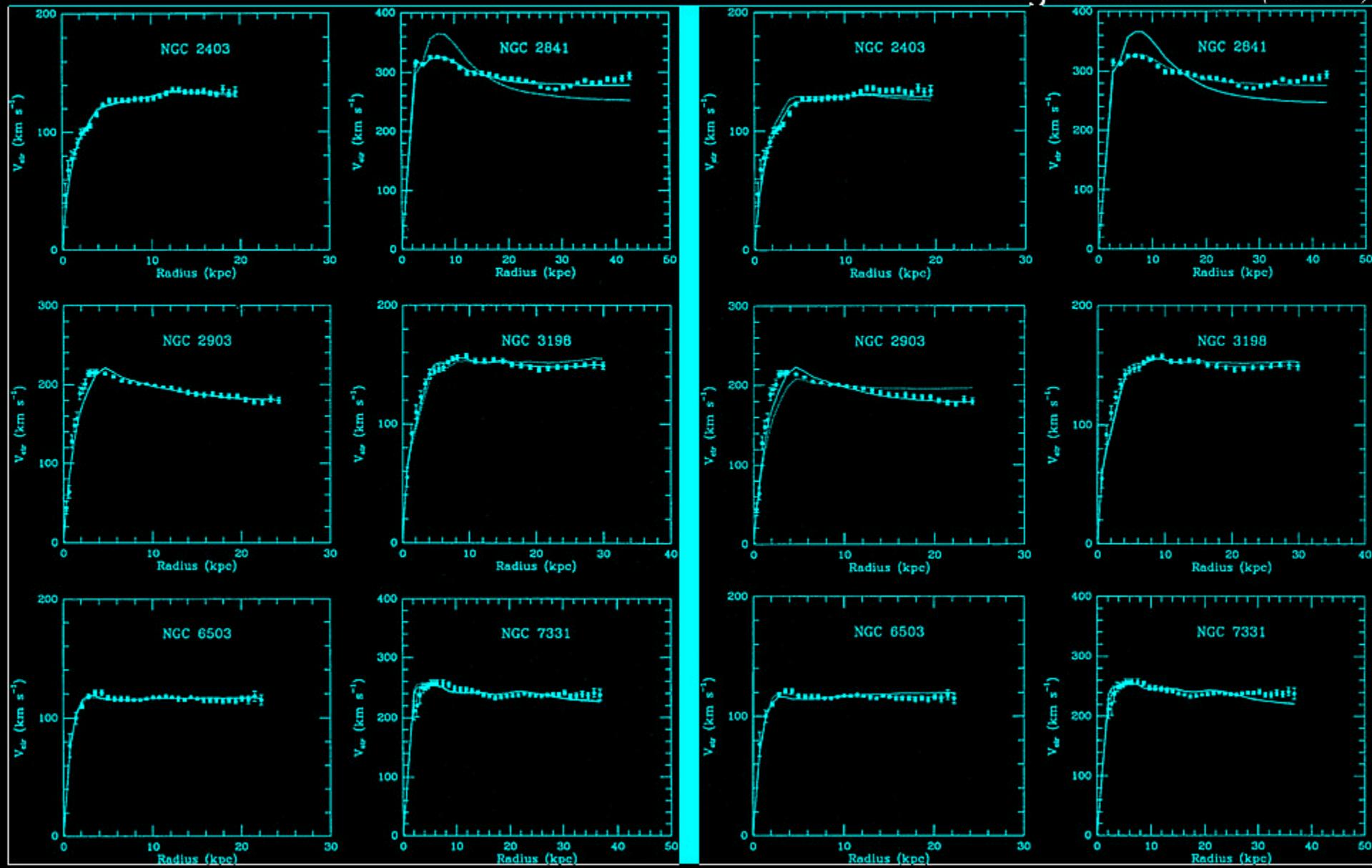
Rotation Curves with MOND



Comparison: MOND vs. Dark Matter

HSB galaxies

Beegeman et al. (1991)



The Equivalence Principle

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

$$g_N = g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right)$$

$$\begin{aligned} m \cdot g_N &= m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \\ &= m \cdot a' \\ &\neq m \cdot a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m \cdot a &= m \cdot g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right) = m \cdot g_N \\ &= m \cdot g' \\ &\neq m \cdot g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m \cdot g_N &= m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \\ &= m' \cdot a \\ &\neq m \cdot a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m \cdot a &= m \cdot g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right) = m \cdot g_N \\ &= m' \cdot g \\ &\neq m \cdot g \end{aligned}$$

Inertia and weight are **not equivalent**. Mass of weight and mass of inertia are **not the same**, but depend on the state of acceleration.

Theory of Relativity?

Difficulties and Problems with MOND

MOND is derived from *classical Newtonian Gravitational Theory*, and therefore is *incompatible with General Relativity*.

Just like Newton's Gravity, MOND cannot give reliable answers to:

- *Cosmology*
- *Relativistic Phenomena*

