LEGGERE IL CIELO

lezioni del corso di aggiornamento per insegnanti
Bologna 1999-2000

a cura di: Fabrizio Bònoli, Gianluigi Parmeggiani, Marina Zuccoli

marzo 2000
volume 26° – n. 1 (suppl.)
ISSN: 0390-1106

Supplemento n. 1 a:
Giornale di Astronomia
rivista di informazione, cultura e didattica
della Società Astronomica Italiana

Le galassie oltre la Via Lattea

Luca Ciotti

Cosa sono le galassie

Guardando il cielo stellato in una notte serena potremmo avere l'impressione che l'Universo sia popolato di stelle, più o meno luminose e di colori diversi. Tale impressione è errata, infatti **tutte** le stelle che vediamo distintamente ad occhio nudo appartengono alla nostra Galassia, la Via Lattea. In realtà, le osservazioni astronomiche rivelano che i "mattoni" costituenti dell'Universo sono le *galassie,* immensi sistemi composti da gas, polveri e fino a diverse centinaia di miliardi di stelle, mantenuti uniti dalla forza di gravità. A loro volta, una grossa frazione del numero totale di galassie è raggruppata in strutture gravitanti ancora più grandi, composte anche da migliaia di galassie, gli *ammassi di galassie* (*galaxy clusters* in inglese). Il lavoro intellettuale necessario all'uomo per arrivare a questo quadro dell'Universo è stato ovviamente faticoso, non sempre le congetture formulate durante questo cammino si sono rivelate corrette e sono state quindi abbandonate in favore di altre più solide, attraverso il collaudato percorso scientifico di mutuo scambio e verifica tra teoria, modelli, ed osservazioni. Per ragioni di spazio non possiamo in questa sede neanche accennare alla stragrande maggioranza dei risultati teorici ed osservativi connessi all'astrofisica delle galassie: considereremo tuttavia raggiunto lo scopo di questa lezione se alla fine i concetti di base qui presentati risulteranno chiari ed assimilati.

Possiamo far iniziare la nostra storia (in maniera piuttosto arbitraria) nella seconda metà del 1700 (più esattamente nel 1748), quando l'astronomo francese Charles Messier, essendo molto interessato alla scoperta di nuove comete, compilò un catalogo degli oggetti astronomici dall'aspetto "nebuloso" che il telescopio in suo possesso era in grado di rivelare (circa un centinaio), e che rimanevano immobili rispetto alle stelle fisse. Con tale catalogo a disposizione gli era infatti più facile identificare le nuove comete: anche questi oggetti appaiono come macchie luminose dai contorni indefiniti, ma a differenza degli oggetti del suo catalogo si muovono molto velocemente sulla volta celeste. Pochi anni dopo, l'inglese William Herschel, con l'aiuto della sorella Caroline e di un telescopio più potente, compilò un elenco di circa 2500 nebulose. Nel 1888 J.L.E. Dreyer completò tre cataloghi ancora più grandi, il *New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (NGC), e i due *Index Catalogues* (IC): appariva ormai chiaro che il numero di oggetti astronomici dall'aspetto "nebuloso" era notevolmente superiore a quanto inizialmente trovato da Messier, e che aumentando la potenza dei telescopi disponibili tale numero sarebbe cresciuto ancora.

Cominciò così a porsi sempre più pressante il problema della *natura* di questi oggetti, che venivano allora raggruppati tutti sotto il nome generico di *nebulose*. Un passo importante verso la chiarificazione del problema fu compiuto verso il 1850, quando il grande telescopio costruito da Lord Rosse in Irlanda (il più grande telescopio al mondo dell'epoca) fu rivolto verso gli oggetti del catalogo di Messier e si vide che una frazione di tali oggetti manteneva l'aspetto nebuloso ed amorfo anche con questo strumento, mentre i rimanenti presentavano o un aspetto più o meno ellittico, senza mostrare segni particolari, oppure avevano una forma fortemente schiacciata, caratterizzata da un inconfondibile disegno a spirale. In particolare, questi ultimi oggetti furono chiamati *nebulose a spirale*. La questione originale, necessariamente generica, cominciò ad articolarsi in domande più specifiche: cosa sono le nebulose? Si tratta di oggetti appartenenti alla stessa famiglia oppure di oggetti fra loro completamente diversi che hanno aspetto telescopico nebuloso solo per l'inadeguatezza degli strumenti utilizzati per la loro osservazione? Quanto distanti da noi sono le nebulose? Quanto sono grandi? Di cosa sono composte?

Gli studi successivi hanno mostrato che la categoria di oggetti astronomici nota sotto il nome di nebulose è in realtà costituita da due classi distinte di oggetti, totalmente diversi nelle loro proprietà. Nella prima classe rientrano quelle che oggi sono conosciute come *nebulose gassose* (o nebulose propriamente dette), cioè immense nubi di gas e polveri, che appaiono luminose a causa di diversi fenomeni fisici. L'altra categoria di oggetti comprende sistemi formati dall'aggregazione gravitazionale di gas e polveri e da un numero enorme di stelle: questi sistemi furono chiamati *galassie.* Le nebulose gassose sono quindi *parte* delle galassie, e di queste in generale molto più piccole: purtroppo ancora oggi una letteratura divulgativa non sempre all'altezza del suo compito chiama in maniera del tutto impropria col nome di nebulose anche i sistemi stellari che dovrebbero essere chiamati galassie.

Per quanto riguarda le galassie, il dibattito di-

vampò feroce tra coloro che sostenevano trattarsi di agglomerati di stelle contenuti *dentro* la Via Lattea (e quindi notevolmente più piccoli di essa), e i sostenitori dell'audace ipotesi che potesse trattarsi di sistemi stellari grandi come o più della Via Lattea (e quindi enormemente lontani da essa). Da entrambe le parti della contesa si portarono argomenti di plausibilità anche molto profondi e, come spesso accade nello sviluppo delle conoscenze scientifiche, il problema fu infine risolto una volta per tutte soltanto da osservazioni incontrovertibili. Infatti, nel 1924 l'astronomo americano Edwin Hubble, riuscendo a misurare la distanza di tali oggetti con i telescopi di monte Wilson, risolse definitivamente la questione a favore della teoria extragalattica: la Via Lattea perdeva quindi il suo status privilegiato, diventando così una fra le innumerevoli galassie di cui l'Universo risultava popolato, fino ai suoi estremi confini osservabili.

Il compito che ha tenuto occupati gli astronomi e gli astrofisici negli anni a seguire (e che li impegna ancora oggi) è stato quello di tentare di "mettere ordine" all'interno del mondo delle galassie. Ciò comporta la definizione di vari criteri di classificazione, che possano consentire di mettere in evidenza le principali proprietà delle galassie, e possibilmente di classificarle in base a precise proprietà fisiche. Dall'epoca della scoperta di Hubble sono stati proposti molti (e validi) criteri di classificazione, basati sulla misura di proprietà dinamiche, fotometriche e strutturali delle galassie. Uno dei più famosi (anche per la sua semplicità) è rimasto senza dubbio quello di Hubble. Si tratta di un criterio tipicamente "morfologico", cioè basato essenzialmente sull'aspetto delle galassie. La classificazione delle galassie effettuata secondo questo criterio porta il nome di "classificazione di Hubble".

La classificazione di Hubble

Prima di passare ad una breve (ma ragionevolmente completa nelle sue linee essenziali) descrizione della classificazione di Hubble, ricordiamo alcuni fatti essenziali relativi alle galassie come classe di oggetti astronomici.

Il numero di stelle che usualmente compongono una galassia va da circa 10^8 (qualche centinaio di milioni) fino a più di 10^{11} (qualche centinaio di miliardi). Poiché risulta molto difficile determinare osservativamente le dimensioni delle galassie, sfumando le loro immagini fino a confondersi con lo spazio circostante, senza tagli "netti", le loro dimensioni caratteristiche sono usualmente definite considerando una circonferenza (con origine nel centro della galassia in questione) che contenga metà della sua luce totale: il raggio di tale circonferenza è dell'ordine di alcuni kiloparsec (ricordiamo che 1 kiloparsec, abbreviato kpc, equivale a 10^3 parsec, e 1pc = 3.08 10^{18} cm). Le velocità caratteristiche delle stelle all'interno delle galassie si possono misurare con tecniche opportune e sono dell'ordine di qualche decina di chilometri al secondo nelle galassie più piccole, potendo raggiungere qualche centinaio di chilometri al secondo in quelle più grandi.

Una sorprendente constatazione che viene spontanea a chiunque si avvicini per la prima volta al mondo delle galassie è il fatto che, nonostante l'elevatissimo numero di questi oggetti che possiamo osservare nell'Universo attualmente accessibile attraverso i più grandi telescopi, la stragrande maggioranza di essi possa essere raggruppata in pochi tipi comuni. Questo risultato è alla base del successo della classificazione di Hubble. Ovviamente non ci è qui possibile scendere nei dettagli tecnici di come tale classificazione venga in pratica realizzata, è sufficiente ricordare che le galassie possono essere divise tra due tipi fondamentali, cioè galassie *early type* e galassie *late type*. A loro volta le galassie *early type* vengono suddivise in galassie *Ellittiche* ed *S0*, mentre le galassie *late type* in galassie *Spirali* ed *Irregolari*. I moti interni delle stelle che compongono le galassie possono essere molto "complicati" (come nel caso delle galassie Ellittiche, S0 ed Irregolari) o relativamente "semplici" (come nel caso delle galassie Spirali). Infatti, nel caso delle stelle che si trovano nei dischi galattici, i moti sono abbastanza ben descritti da orbite quasi circolari; al contrario, i moti delle stelle nelle galassie Ellittiche sono notevolmente complessi ed una descrizione semplificata ce li può far visualizzare come una "nuvola" di stelle che si muovono in tutte le direzioni, alcune più velocemente ed altre più lentamente. Poter misurare le velocità stellari all'interno delle galassie (cosa resa possibile dagli spettroscopi) è estremamente importante, in quanto utilizzando (ad esempio) il cosiddetto *Teorema del Viriale* è possibile misurare la massa delle galassie conoscendo le loro dimensioni e le velocità caratteristiche delle stelle al loro interno. Quando questo può essere fatto, si scopre che in molti casi la massa visibile (stelle e gas) è soltanto una frazione della massa totale del sistema in questione. La massa che ci deve essere (per produrre le velocità osservate) ma che non emette onde elettromagnetiche (e quindi che non è visibile) viene chiamata *materia oscura*. Le quantità di materia oscura presenti nelle galassie possono essere superiori di varie volte alla materia che gli astronomi riescono a vedere con i loro telescopi.

Prima di concludere questa breve rassegna delle più importanti proprietà delle galassie, ricordiamo che intorno alle galassie si trova un consistente numero di *ammassi globulari* (fino a qualche migliaio per le galassie più grandi!), sistemi stellari di forma sferica e molto compatti, contenenti da qualche centinaio di migliaia fino a vari milioni di stelle coeve, di età molto avanzata.

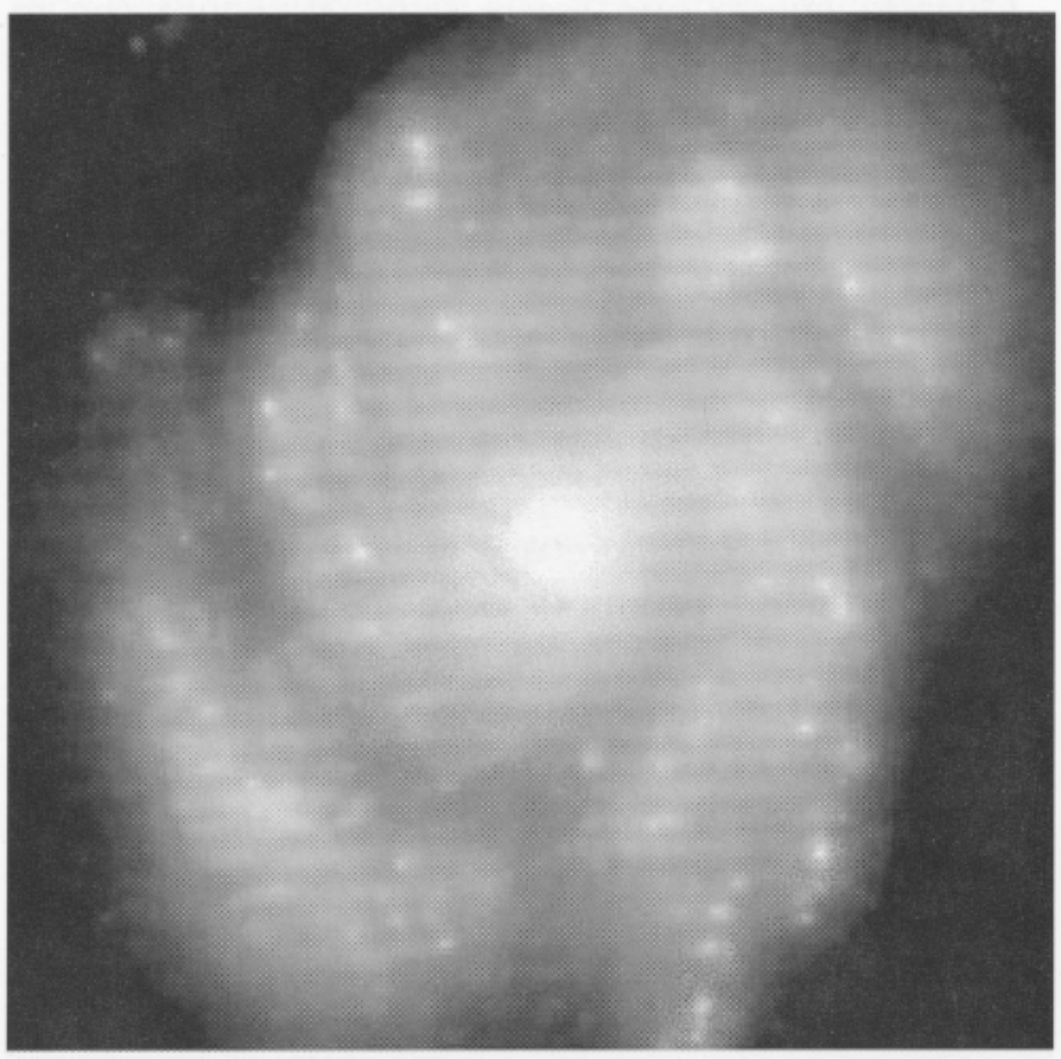
Le galassie *Early Type*

La caratteristica comune delle galassie *early type* è quella di presentare un colore rossastro, generalmen-

Fig. 1. La figura mostra un campo di galassie lontane, osservato dal Telescopio Spaziale "Hubble" il 4 marzo 1994. La galassia più grande in alto a sinistra è la galassia ellittica NGC 4881, nell'ammasso di galassie di Coma. Si possono notare anche molte galassie di dimensione minore, alcune delle quali sono Spirali.

te interpretato come sinonimo di "vecchiaia" per la popolazione stellare che compone queste galassie. Inoltre, in questi sistemi stellari la quantità di gas freddo e polveri è trascurabile o del tutto assente. Da un punto di vista morfologico le galassie *early type* non presentano particolari evidenti nella loro distribuzione di luce. Come abbiamo già detto, le galassie appartenenti a questa classe si dividono nelle due grandi famiglie delle Ellittiche e delle S0. La brillanza superficiale di questi sistemi (una misura della luminosità delle loro immagini punto per punto, come viste ad esempio al telescopio) decresce in genere senza discontinuità apprezzabili allontanandosi dal centro della galassia, sfumando al di sotto della soglia di rivelabilità e confondendosi con lo spazio circumgalattico (Figura 1). Le curve di uguale luminosità (isofote) delle galassie Ellittiche hanno una caratteristica forma ellittica (da cui il nome della famiglia), con rapporti assiali compresi tra 0 (galassie E0) e 3 (galassie E7).

In generale una particolare galassia ellittica viene indicata col simbolo En, dove n=10 (1-b/a), e b ed a sono rispettivamente l'asse minore e maggiore isofotale. Quindi, una galassia E0 presenta delle isofote perfettamente circolari. A differenza delle galassie Ellittiche, le galassie S0 sono caratterizzate dalla presenza di un grosso disco stellare, con un rigonfiamento centrale che viene chiamato *bulge,* che le fa assomigliare (quando viste di taglio) a delle gigantesche lenti da ingrandimento; il bulge a sua volta è molto simile ad una galassia ellittica "in miniatura". Finiamo questa breve descrizione ricordando che con l'avvento dei primi satelliti artificiali sensibili ai raggi X si è scoperto che le galassie *early type* possono contenere anche significative quantità di gas caldo (con temperature intorno



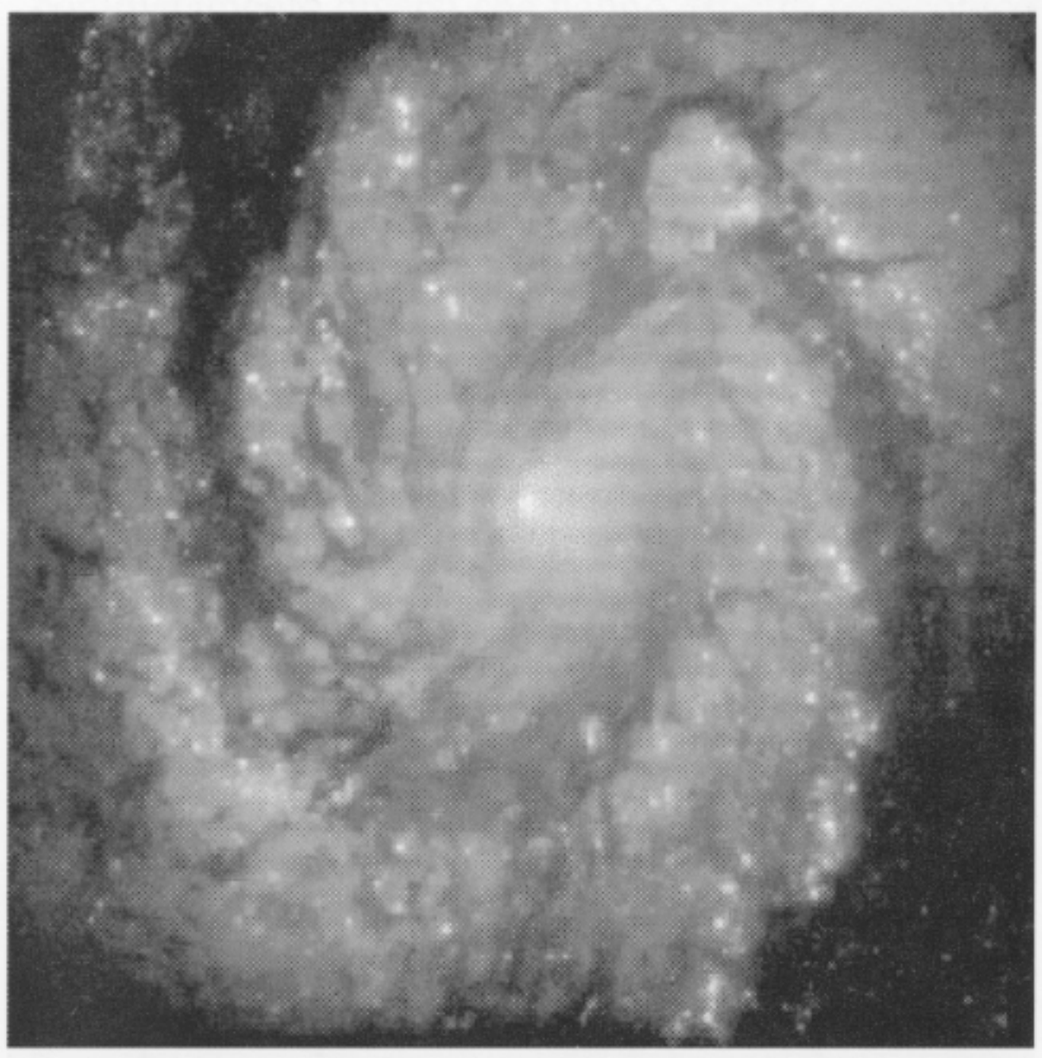


Fig. 2. La galassia Spirale M100, come osservata dal Telescopio Spaziale "Hubble" prima (a sinistra) e dopo (a destra) la riparazione in orbita. M100 è una delle galassie più grandi dell'ammasso di galassie della Vergine, e la sua struttura è molto simile a quella della nostra Via Lattea. La regione più fittamente popolata di stelle nella regione centrale è il bulge.

al milione di gradi), diffuso attorno ad esse in un'ampia corona di bassa densità.

Le galassie *Late Type*

A differenza delle galassie *early type*, le galassie *late type* hanno un colore tendente al blu, usualmente interpretato come sintomo di una popolazione stellare più giovane di quella delle galassie Ellittiche ed S0. Inoltre, la morfologia delle galassie *late type* è molto più complicata di quella delle galassie *early type*, poiché questi sistemi contengono anche una sostanziale quantità di gas freddo e polveri interstellari. Cominciamo col descrivere la categoria di gran lunga più rappresentativa dell'insieme delle galassie *late type*, ossia quella delle Spirali (ricordiamo qui per inciso che anche il nostro Sistema solare è situato nel disco di una galassia a spirale, la Via Lattea). Così come per le S0, anche la forma di questi sistemi è a disco e quando visti di taglio assomigliano anch'essi ad enormi lenti da ingrandimento, con un rigonfiamento più o meno accentuato nelle loro regioni centrali. Tale rigonfiamento (il bulge) è composto di stelle dal colore rossastro, analogo al bulge delle galassie S0.

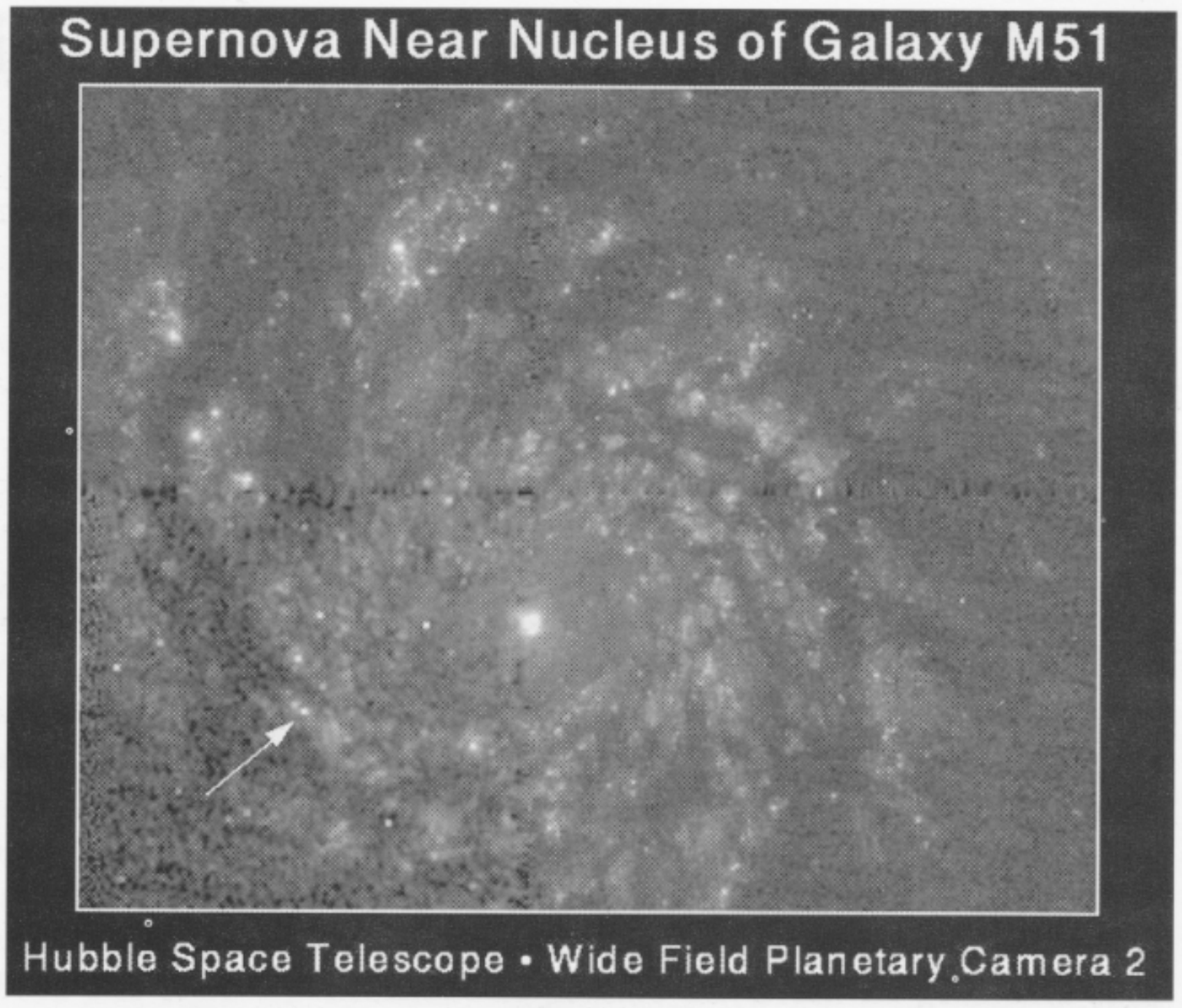


Fig. 3. La galassia Spirale M51, come osservata dal Telescopio Spaziale "Hubble". La freccia indica la posizione della supernova 1994I. Una supernova è una violentissima esplosione stellare che distrugge una stella e che espelle i prodotti delle reazioni nucleari stellari nel gas interstellare. Gli elementi di cui è formata la Terra (e anche il nostro corpo!) hanno avuto origine in un'esplosione simile avvenuta nella nostra Via Lattea miliardi di anni fa.

In base alla grandezza relativa del bulge rispetto al disco galattico (in ordine di importanza decrescente), le galassie a Spirale vengono indicate come *Sa*, *Sb*, ed *Sc*. A differenza delle S0 però, dove in genere non è riscontrabile traccia di gas freddi né strutture che risaltino in maniera evidente, sui dischi delle Spirali, quando visti di fronte, si nota immediatamente una chiara struttura a spirale (da qui il loro nome), una delle strutture più belle e maestose che sia dato osservare nel cielo (Figura 2 e Figura 3). Il disco delle galassie a spirale è in realtà costituito da varie componenti di gas e di stelle. Per quanto riguarda la parte stellare, si ha un *disco sottile* ed una *componente di alone*, con le stelle di alone considerevolmente più vecchie delle stelle del disco. Anche il gas è distribuito in un disco sottile ed un disco spesso. È inoltre importante ricordare che la struttura dei bracci di spirale (lungo i quali è presente formazione stellare e quindi una popolazione stellare blu) risulta (in media) fortemente correlata alla dimensione (relativa) del bulge, per cui in genere galassie Sa hanno un bulge grande, poco gas, bracci molto avvolti e generalmente ben definiti, mentre galassie di tipo Sc a volte non presentano quasi traccia del bulge, hanno bracci molto aperti, ed una notevole frazione della materia è in fase di gas. Esistono poi tre classi "parallele" di galassie a spirale, le cosiddette *Spirali Barrate*. In questi sistemi il bulge è sostituito da una struttura marcatamente asimmetrica rispetto al loro centro della galassia, a forma di barra (Figura 4). Di conseguenza, si parla di galassie *SBa, SBb, SBc*, ed anche *SB0*, ovvero galassie S0 (vedi sopra) barrate.

Al contrario delle Spirali, che possono essere anche sistemi di massa e dimensioni enormi, le galassie Irregolari sono in genere galassie di piccola massa, senza una struttura ben definita, molto ricche di gas e con una popolazione stellare relativamente giovane: il loro colore è quindi fortemente blu.

La formazione delle galassie

Le regolarità riscontrate nelle classificazione di Hubble, e la stretta relazione fra le varie proprietà strutturali e dinamiche all'interno dei vari tipi morfologici (quantità di gas e polveri, dimensione relativa del bulge e del disco, importanza e grado di avvolgimento dei bracci per le spirali, luminosità totale e velocità medie delle stelle all'interno delle galassie Ellittiche e Spirali), ci porta a ritenere che tali regolarità possano fornire preziose indicazioni sulla possibile formazione delle galassie.

Una delle domande più pressanti a questo riguardo, sulla quale lavorano attivamente ricercatori di tutto il mondo, è la seguente: le galassie *early type* e *late type* "nascono" come tipi diversi, oppure nell'Universo si forma soltanto un tipo di galassie e l'altra classe si origina per "evoluzione" di questa prima generazio-

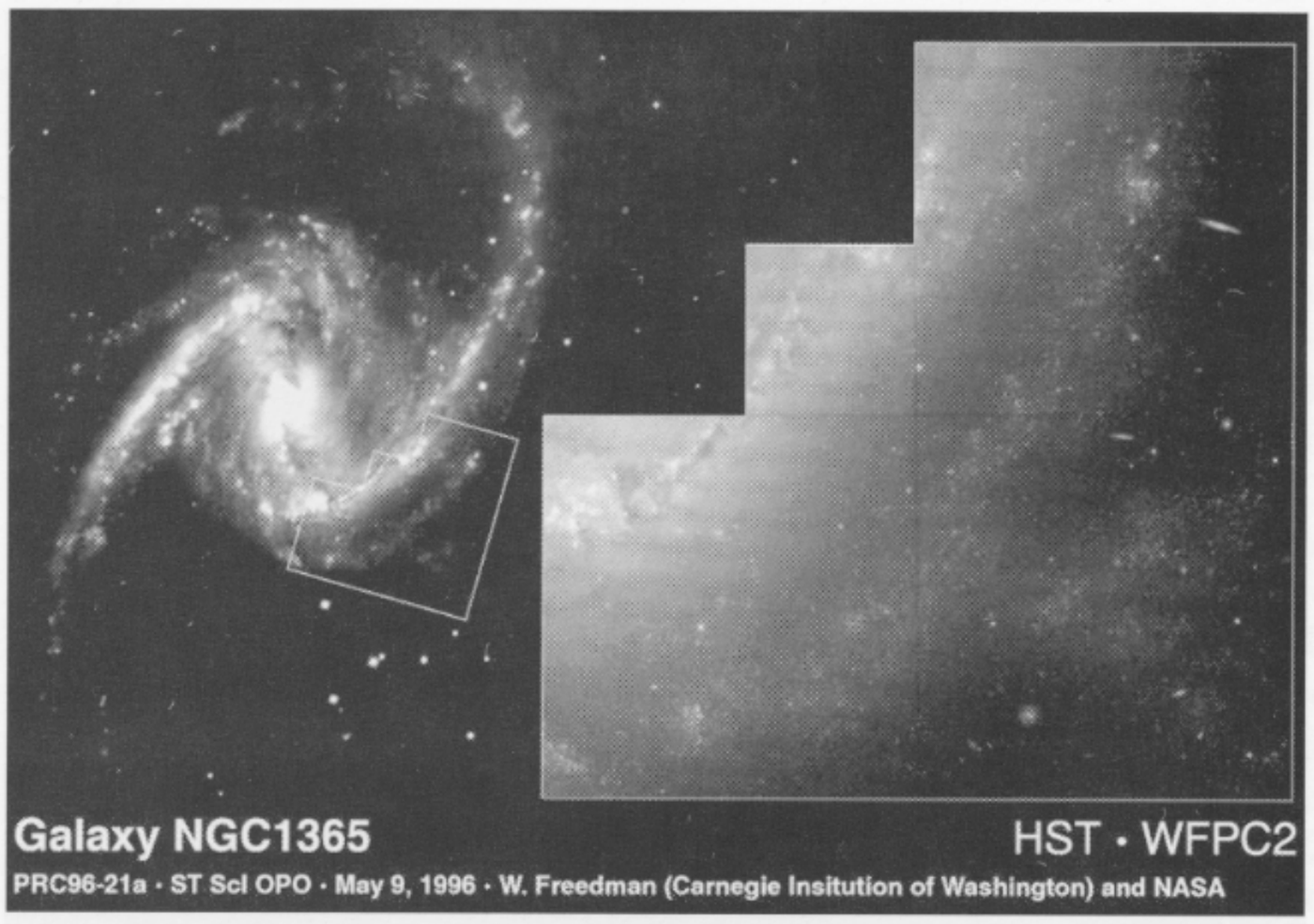


Fig. 4. La galassia Spirale barrata NGC1365 osservata dal Telescopio Spaziale "Hubble" il 9 maggio 1996. La galassia appartiene all'ammasso di galassie della Fornace. Si confronti questa immagine con quella delle due galassie a Spirale (non barrate) mostrate in Figura 2 e 3: la barra di stelle nella regione centrale è perfettamente visibile.

ne? Purtroppo una risposta definitiva all'interrogativo sopra formulato, nonostante l'immensa mole di conoscenze sia teoriche che osservative, è attualmente mancante. Accenniamo qui soltanto brevemente ai due scenari. Nel primo caso (quello cioè in cui le galassie *early type* e *late type* si formano per processi fisici fra loro diversi), si ritiene che in entrambi i casi la formazione sia stata determinata da un lento raffreddamento di immense nubi di gas primordiale, le quali per progressivo raffreddamento e conseguente contrazione e frammentazione si trasformano nelle galassie come oggi le vediamo. In questo scenario le galassie Ellittiche si sarebbero formate a seguito di un rapidissimo (rispetto ai tempi cosmologici!) processo di frammentazione, processo più rapido del successivo collasso. Al contrario, le galassie che presentano dischi (come le Spirali) nascerebbero a seguito di processi di frammentazione molto più lenti, nei quali prima la nube di gas collasserebbe in un disco, e solo successivamente si formerebbe la maggioranza delle stelle. Nel secondo scenario, poiché risulta per vari motivi (che non possiamo qui discutere) impossibile sostenere che le galassie *late type* si formino per evoluzione delle galassie *early type*, si suppone che nell'Universo primordiale si formino soltanto galassie *late type* (essenzialmente Spirali), le quali poi "fondendosi" a seguito di interazioni gravitazionali darebbero origine alle galassie *late type* (essenzialmente Ellittiche).

Inutile dire che entrambi gli scenari di formazione hanno i loro pregi e difetti, punti di forza e debolezze, sia osservativi che teorici. Forse, come già successo nel 1924 per la disputa sulla natura delle galassie, sarà necessario attendere la costruzione (già in corso presso vari istituti di ricerca internazionali) di strumenti ancora più potenti di quelli attualmente disponibili, che ci possano permettere di osservare "in diretta" la formazione delle galassie. È ragionevole ritenere che nei prossimi dieci anni tale domanda abbia risposta.