

Origine ed evoluzione delle galassie

Nell'Universo accessibile ai nostri telescopi esistono almeno qualche miliardo di galassie, le quali si distinguono in un certo numero di classi, sia per la loro forma che per le proprietà fisiche delle stelle e materia diffusa di cui sono formate. Ancora oggi si usa, con qualche modificazione, la classificazione introdotta da Hubble una cinquantina di anni fa (Fig. 1). Però si scoprono sempre nuovi individui che non rientrano in nessuna di queste classi e rappresentano ciascuno un caso particolare.

Quando Hubble dispose i vari tipi di galassie secondo la sequenza indicata nella Fig. 1, intese soltanto indicare una certa regolare variazione di forma da una classe all'altra, ma non pensò di attribuirle un significato evolutivo. Questo lo fecero altri astronomi, i quali si chiesero se le galassie ellittiche, così regolari e compatte, non rappresentassero il primo gradino di una sequenza evolutiva, e poi seguirono nel corso della loro vita una specie di dissolvimento, per finire come galassie irregolari. Va aggiunto che alle differenze morfologiche si accompagnano anche delle differenze di natura fisica. Infatti, mentre le galassie ellittiche sono completamente prive di materia interstellare e di stelle giovani, le spirali e le irregolari, contengono invece materia interstellare e stelle formatesi da pochi milioni d'anni. Questo portò gli astronomi a modificare, anzi a capovolgere le loro ipotesi sulla evoluzione delle galassie: le irregolari avrebbero rappresentato il primo gradino evolutivo e le ellittiche l'ultima fase. Però, nemmeno questa supposizione si rivelò attendibile, in quanto non si riusciva a capire perché una galassia dovesse necessariamente trasformarsi da spirale in ellittica. Inoltre era un'ipotesi contraddetta anche dalla constatazione che in una galassia spirale, si trovano non soltanto stelle giovani, ma anche stelle di antichissima formazione, come ad esempio, le abitanti del nostro alone galattico: stelle, cioè, altrettanto vecchie, quanto quelle che popolano le galassie ellittiche. Una obiezione ancora più convincente è che le galassie ellittiche hanno generalmente masse anche 30 volte maggiori delle spirali. Poiché lo spazio intergalattico praticamente non assorbe la luce delle lonta-

Le ricerche astrofisiche, particolarmente intense e fruttuose negli ultimi anni, consentono di prospettare in modo più compiuto l'evolvere dei miliardi di galassie che popolano l'Universo accessibile ai nostri telescopi e di proporre su basi nuove l'origine stessa dell'Universo.

ne galassie, deve avere una densità bassissima. E allora veniva spontanea la domanda da dove mai una galassia spirale prendesse la materia necessaria per trasformarsi in una ellittica.

Le idee odierne sull'evoluzione delle galassie

Oggi si ritiene che galassie morfologicamente diverse siano tali in conseguenza di differenti condizioni iniziali, e cioè differenti velocità di rotazione e di turbolenza della protogalassia, diversa intensità dei campi magnetici. Secondo un recente lavoro degli astronomi giapponesi T. Hatanaka, S. Hayakawa, K. Ishida e M. Taketani una galassia ellittica compirebbe tutta la sua evoluzione sotto questa forma, e lo stesso accadrebbe per gli altri tipi. Come si vede dalla tabella 1, esistono due classi di ellittiche, caratterizzate dalla stessa forma e all'incirca dalle medesime caratteristiche fisiche, ma differenti di un fattore 1000 per la massa globale. Anche fra le irregolari si distinguono due tipi, a seconda della popolazione stellare. Ci sono le irregolari di tipo II, di colore rossastro, povere di materia interstellare e ricche di nane e giganti rosse, e le irregolari di tipo I di colore biancastro, contenenti stelle di recente formazione e nubi di gas. Una forma di transizione fra galassie ellittiche e spirali è rappresentata dalle cosiddette So, o galassie lenticolari, aventi un nucleo centrale denso e brillante circondato da un disco più diffuso e da un alone ancora più sfumato. Simili alle ellittiche, presentano però una distribuzione di luminosità come quella delle spirali.

Il rapporto fra massa e luminosità è un indice del tipo di popolazione. Quando esso è dell'ordine di 1 (prendendo come unità per la massa e la luminosità quelle solari) vuol dire che la densità di stelle è relativamente piccola, ma fra esse sono numerose quelle di più alto splendore:

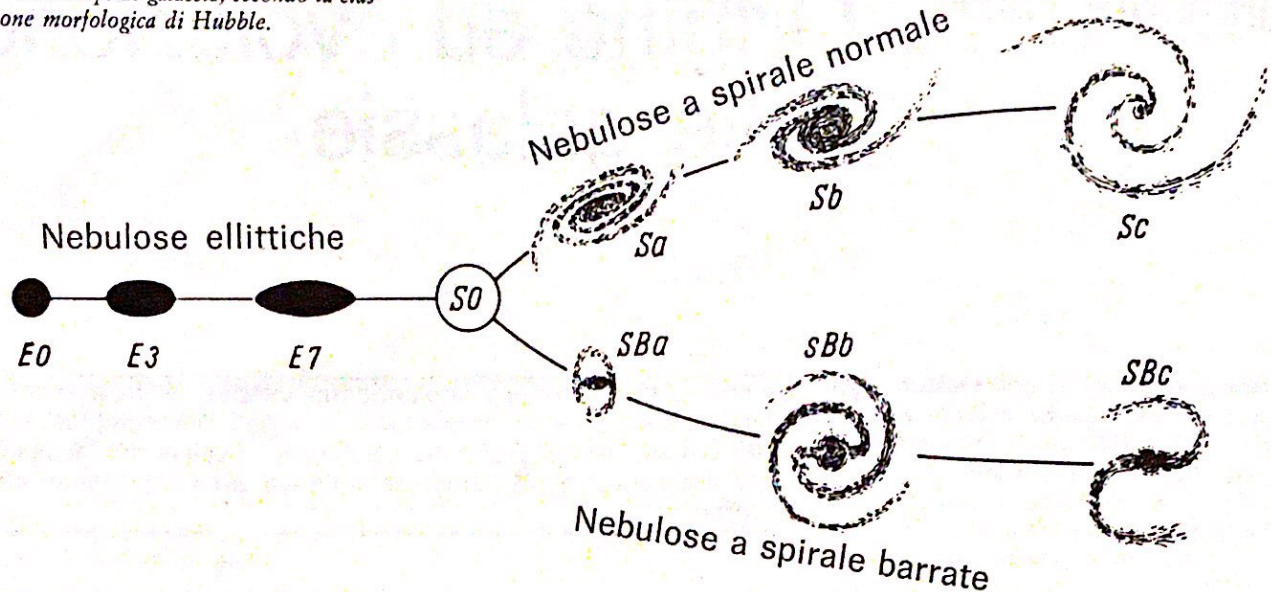
al contrario, un rapporto fra massa e luminosità eguale a 100 indica che c'è un grandissimo numero di stelle di basso splendore come le nane rosse, e forse anche di materia sotto una forma completamente inosservabile, quali potrebbero essere grossi meteoriti, pianeti e stelle irraggianti solo nell'infrarosso.

Il tipo spettrale composto è una media dei tipi spettrali delle stelle contenute nella Galassia. Così, un tipo dK indica la predominanza di stelle K nane, con temperature superficiali di circa 4000 °K e splendore 5 volte più piccolo del Sole; gK indica invece la predominanza di giganti K, aventi ancora temperature di circa 4000 °K ma, splendore pari a 100 volte il Sole; A, F e G indicano rispettivamente il predominio delle stelle bianche di temperatura intorno ai 10.000 °K, delle stelle gialle con temperature di 7000 °K, e di quelle di tipo solare con temperature di circa 6000 °K.

Come mostra la tabella 1, la stragrande maggioranza delle galassie è raggruppata nelle quattro classi di grandi galassie: ellittiche giganti, lenticolari e spirali, sia normali che sbarrate. Le irregolari e le ellittiche nane sono una piccola minoranza. Però, questo può essere dovuto anche al fatto che essendo molto più piccole e meno luminose delle altre, anche la loro scoperta è più difficile e limitata a un volume di spazio relativamente ristretto. Ecco come si spiega la forma e le caratteristiche fisiche ad essa associate. Se la nube di gas da cui la galassia si condensa ha una piccola velocità di rotazione, si avrà una galassia sferica o ellittica; se, invece, la velocità di rotazione è forte, la nube si appiattisce rapidamente e avremo una galassia spirale. Se la velocità dei moti turbolenti, a caso, entro la protogalassia è piccola, poco gas sfugge all'attrazione gravitazionale della nube che si contrae, e ne risulta una galassia di grande massa; mentre una grande velocità di turbolenza porta ad una perdita di masse gassose,

Fig. 1 I vari tipi di galassie, secondo la classificazione morfologica di Hubble.

334



che dà luogo a una galassia di massa relativamente piccola. La poca turbolenza favorisce, d'altro canto, una rapida condensazione in stelle e quindi un rapido esaurimento della materia interstellare, mentre l'alta turbolenza rallenta il processo di formazione delle stelle, che può quindi durare per gran parte della vita della galassia stessa.

Le ellittiche nane e le irregolari di tipo II, potrebbero anche essere ciò che resta di una spirale che ha perso le sue braccia ed esaurito la materia interstellare con cui riformarle, mentre le irregolari di tipo I potrebbero essere galassie appena formate.

Tuttavia le varie combinazioni dei valori di v e w rendono conto discretamente bene della forma e delle caratteristiche fisiche, massa e popolazione delle galassie. Generalmente, la velocità di turbolenza del gas nelle galassie spirali è abbastanza grande, sì da rendere plausibile l'ipotesi fatta sopra, ed è stata scoperta anche una relazione statistica fra la densità media e il colore che la confermerebbe (Fig. 2). Si trova che la densità media di una galassia è tanto più grande quanto più è rossastra. Cioè, nelle galassie più dense le stelle vecchie, nane e giganti rosse, sono più numerose, ed è

esaurita la materia interstellare che permetterebbe la formazione di nuove stelle. Invece, nelle galassie di bassa densità, il processo di esaurimento della materia interstellare è più lento e quindi si stanno ancora formando altre stelle, fra cui le brillanti azzurre che danno il colore alla galassia. Non si conosce nessuna galassia di colore azzurro e grande densità: il che provverebbe che tutte le galassie sarebbero nate in tempi molto remoti, e che soltanto quelle dove la turbolenza era inizialmente molto alta conservano tuttora gas interstellare.

Se i valori della velocità di rotazione e di turbolenza possono spiegare l'aspetto generale e la massa di una galassia, nonché il tipo di popolazione, restano altri particolari da chiarire: per esempio, la presenza delle spirali e il perché queste si staccino dal nucleo, come nelle spirali normali; o invece dalle estremità di una specie di barra, come nelle SB. Andrebbe spiegata l'origine e la permanenza di un alone, e le caratteristiche del nucleo. Se poi, invece di limitarci a considerare le galassie normali che rientrano nelle classi tipiche, estendiamo la nostra indagine ai vari tipi di galassie peculiari sia per l'emissione ottica che radio, gli interrogativi si infittiscono. Infine ci si

dovrebbe anche domandare se queste galassie che per una ragione o per un'altra sono peculiari, rappresentino qualche stadio particolare nella vita di una galassia: uno stadio che tutte dovrebbero attraversare prima o poi, una o più volte.

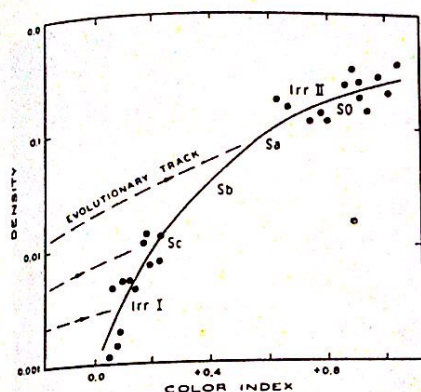
Le braccia spirali

Le osservazioni delle galassie esterne mostrano che le braccia spirali sono costituite e come disegnate dalle strisce di materia oscura, polveri e gas, e da nubi brillanti eccitate dalla radiazione di luminose stelle di alta temperatura, distribuite anch'esse lungo le braccia. Un problema non ancora completamente risolto, è se i cammini spirali disegnati dalle stelle, coincidono con quelli delle nubi di gas e polveri, oppure si abbiano due tracciati distinti. Le osservazioni della nostra Galassia indicano in modo abbastanza convincente che gas e stelle più giovani di 20 milioni d'anni sono praticamente distribuite lungo gli stessi bracci, mentre stelle più vecchie di un centinaio di milioni d'anni non presentano più alcuna distribuzione spirale. La causa del dubbio sull'unicità delle braccia di gas e stelle, risiede soprattutto nella difficoltà di valutare con precisione le distanze che ci

Tabella 1 CLASSIFICAZIONE MORFOLOGICA E CARATTERISTICHE RELATIVE

Tipo	Abbondanza percentuale	Massa M ($M_{\odot}=1$)	M/L ($M_{\odot}=1$) ($L_{\odot}=1$)	Contenuto di gas	Tipo spettrale composto	Alone	Rigonfiam. centrale	Nucleo semi stellare	Disco	Materia scura e stelle di alta luminosità
E giganti	22%	10^{12}	$\sim 10^2$	<0.001	d K	si o no	si	si	no	no
S O	20%	10^{12}	$\sim 10^2$	<0.001	d K	si o no	si	si	si	no
S a, b, c	23%	$3 \cdot 10^{10}$	~ 10	$0.01-0.04$	AF-F	si o no	si	si	si	si
SB a, b, c	25%	$3 \cdot 10^{10}$	~ 10	$0.01-0.04$	G-K	si o no	si	si	si	si
Galassia		$2 \cdot 10^{11}$	~ 10	0.02	A, AF	si	si	si	si	si
Irr. I	3%	$3 \cdot 10^9$	~ 1	>0.04	G, K	no	no	no	si	si
Irr. II		$3 \cdot 10^9$	~ 10	<0.001	g K	no	si	si	no	no
E nane	(2+ ϵ)%	$3 \cdot 10^9$	~ 10	<0.001	g K	no	si	si	no	no

Fig. 2 Relazione fra densità media di una galassia e il suo tipo morfologico e il suo colore (indice di colore 0.0 indica colore biancastro, e 0.8 colore rosso arancio). Una galassia di grande massa andrebbe condensandosi lungo il cammino evolutivo segnato con la linea tratteggiata più alta fino a raggiungere la curva, una galassia di piccola massa seguirebbe invece uno dei cammini evolutivi relativi a più basse densità medie.



separano dalle stelle e dalle nubi di gas. Le braccia spirali, sia che si stacchino dalla sbarra, come nelle SB, o dal nucleo, come nelle S, sono strutture giacenti su un disco molto appiattito. Dato che le galassie non ruotano come corpi rigidi, ma a velocità angolari diverse a seconda della distanza dal centro, le braccia spirali non restano immutate, ma verrebbero avvolte ripetutamente col procedere della rotazione. Per esempio, le spirali della nostra Galassia, possono essersi formate in qualche centinaio di milioni d'anni, un tempo circa 100 volte più breve di quella che è l'età delle stelle di più antica formazione. Se le stelle si condensano dal gas interstellare il fenomeno primario della struttura spirale è il gas. Per capire come questa struttura a spirale si formi, è necessario tener conto sia delle forze gravitazionali che dei campi magnetici agenti sul gas. Esistono molte teorie, ma nessuna è completamente soddisfacente, tanto che non sappiamo spiegare né la loro origine, né il loro continuo riformarsi. Si è osservata anche la sorprendente somiglianza fra galassie e l'occhio e la struttura dei tifoni, però è solo un'analogia.

Secondo gli astronomi giapponesi T. Oki, M. Fujimoto e Z. Hitotuyanagi, il formarsi di una spirale normale o sbarrata dipenderebbe essenzialmente dall'intensità del campo magnetico. Dai loro calcoli, risulterebbe che un campo debole (minore di $5 \cdot 10^{-6}$ gauss) ha il solo effetto di allungare le nubi di gas che costituiscono la protogalassia lungo le linee di forza

Fig. 3 La galassia peculiare NGC 5128 nel Centauro. Un tempo si pensava potesse trattarsi della collisione fra una galassia ellittica ed una spirale. Però la probabilità di uno scontro fra due galassie giganti come dovrebbero essere queste, è estremamente bassa. L'aspetto peculiare di quest'oggetto è probabilmente dovuto ad una esplosione avvenuta nel nucleo. Gas, campo magnetico ed elettroni relativistici si propagano nello spazio, dando origine alla radiosorgente (Fig. 4).



producendo appunto una specie di condensazione a forma di barra. All'estremità della sbarra, dove la densità del gas decresce, la materia allineata lungo le linee di forza ricorderebbe il fumo di una coppia di camini. Con la rotazione, il gas trascina con sé le linee di forza del campo e si curva assumendo quasi la forma di un anello. Se invece il campo è più forte, dell'ordine di 10^{-5} gauss, le linee di forza uscirebbero direttamente dal nucleo insieme al gas in cui sono come « incollate » e, a causa della rotazione, si disporrebbero ancora a formare le spirali. La mancanza di spirali, in una galassia di bassa densità media, e cioè ricca di gas, potrebbe essere dovuta all'assenza di campo, e in queste condizioni si troverebbero le galassie irregolari. Queste ultime sono radiosorgenti generalmente più deboli delle spirali, la qual cosa confermerebbe l'ipotesi di un campo magnetico molto più debole, oppure distribuito a caso, non ordinato.

Nuclei galattici e loro esplosioni ricorrenti

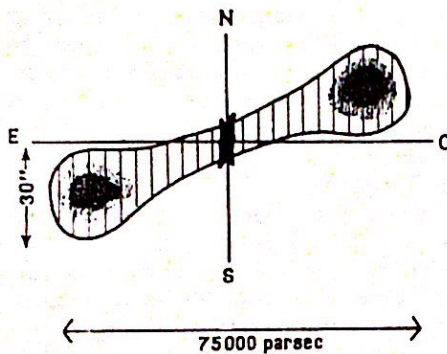
I nuclei galattici delle galassie esterne hanno l'apparenza di compatti noccioli brillanti non risolvibili in stelle singole, con aspetto e dimensioni indipendenti dal tipo e dalle dimensioni della galassia di cui fanno parte. Soltanto le galassie irregolari ne sono prive.

Dalla legge di rotazione delle parti centrali della nostra Galassia, si deducono

le principali caratteristiche del nucleo, e le consideriamo rappresentative di quelle che sono le condizioni dei nuclei galattici in generale. Tanto più che anche il nucleo della galassia di Andromeda ha caratteristiche molto simili. La massa contenuta entro un volume di raggio pari a una trentina di anni-luce, è in ambedue i casi di circa 30 milioni di masse solari, e il rapporto fra massa contenuta sotto forma di gas e massa condensata in stelle è di 1/250. Il gas è in stato di alta eccitazione, e poiché le stelle del nucleo sono tutte stelle rosse di bassa temperatura superficiale, esse non possono essere la causa dell'eccitazione. Se ne deduce che questa è dovuta ai moti turbolenti delle nubi di gas che si urtano a velocità comprese fra qualche centinaio e 1000 km/sec. L'alta velocità del gas impedisce che esso si condensi a formare stelle. Le esplosioni di nuclei galattici devono essere fenomeni non troppo rari, dato che si osservano in un numero abbastanza grande di oggetti. Per esempio, una su 100 galassie, ha un nucleo caratterizzato da condizioni di fortissima eccitazione del gas, indicante temperature di circa 10.000° , e velocità di turbolenza di 1000 e più km/sec. Questa classe di galassie appartiene al cosiddetto tipo Seyfert. Una su 10000 galassie è una radiogalassia, ossia una galassia che emette nel dominio radio da 10^3 a 16^6 volte più della nostra. Vedremo che queste intense radioemissioni sono interpretabili anch'esse come la conseguenza di un'esplosione del nucleo. Infine, limitandoci a considerare soltanto le 20 galassie più brillanti e vicine, si trova che almeno in due di queste (M 82 e NGC 5128), esiste traccia evidente di una colossale esplosione avvenuta di recente o ancora in corso (Figg. 3 e 4). Anzi, nel caso di NGC 5128, si nota il risultato di almeno due successive esplosioni avvenute a distanza di qualche miliardo d'anni. Così abbiamo la conferma che si tratta di un fenomeno ricorrente abbastanza comune.

La possibilità di queste esplosioni, aiuta a capire diverse particolarità delle regioni centrali della Galassia, anche se non è altrettanto chiara la loro causa. Per esempio, nella Via Lattea, un'ipotetica esplosione avvenuta qualche decina di

Fig. 4 La radiosorgente Centaurus A associata con la galassia NGC 5128. La macchia scura rappresenta la posizione occupata dalla galassia. Le due radiosorgenti più intense, simmetriche rispetto all'oggetto ottico si estendono complessivamente per due milioni di anni luce, un'estensione cioè 10 volte maggiore di quella complessiva delle due radiosorgenti Cygnus A. Se la velocità d'espansione del gas è dell'ordine di qualche migliaio di km/sec (come nel caso di M 82)



milioni d'anni fa avrebbe provocato il moto espansionale che riscontriamo nel braccio a 10000 anni-luce dal centro. Ammesso, infatti, che questo moto sia stato prodotto dalle nubi espulse dal centro durante l'esplosione, e ammesso che la velocità d'espansione sia rimasta all'incirca costante ed uguale a quella odierna, si trova che il tempo trascorso è dato dallo spazio percorso (10000 anni-luce, pari a 10^{17} km) diviso la velocità d'espansione (100 km/sec): $t = 10^{17} \text{ km} / 100 \text{ km sec}^{-1} = 10^{15} \text{ sec} = 30 \text{ milioni d'anni}$.

L'esplosione dei nuclei galattici potrebbe spiegare anche la presenza degli aloni. Nubi aventi alte velocità sarebbero state scagliate in tutte le direzioni al momento della catastrofe, trasportando con sé i propri campi magnetici. La radioastronomia ha già provato l'esistenza di queste nubi. Durante l'esplosione si deve essere generata una gran quantità di raggi cosmici, così come avviene su scala più piccola, nelle esplosioni di supernovae. Sono queste particelle, decelerate dal campo magnetico delle nubi dell'alone, a produrre le radioemissioni di tipo sincrotrone emesse da tutti gli aloni delle galassie esterne, come pure dalla nostra. È anche probabile, che cadendo sul disco galattico, le nubi dell'alone vengano a collidere con le nubi della braccia spirali, originando moti a caso, i quali, sovrapposti al moto regolare di rotazione galattica, finirebbero per dar luogo a una struttura discontinua e nodulosa delle braccia medesime.

Se l'alone ha un diametro pari a quello della galassia stessa, come spesso si veri-

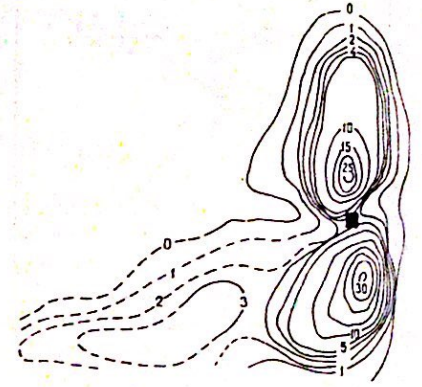
se ne può dedurre che l'esplosione di Cygnus A è avvenuta qualche decina di milioni di anni fa, mentre quella di Centaurus A è avvenuta qualche centinaio di milioni di anni fa.

Fig. 5 La lontana galassia nel Cigno, identificata con la forte radiosorgente Cygnus A.

Fig. 6 La radiosorgente Cygnus A: al centro è riportata la sorgente visibile. La radiosorgente è 200 volte quella ottica. Il mas-



simo di radiazione proviene da due zone disposte simmetricamente rispetto all'oggetto ottico. Esse potrebbero essere state originate dalla esplosione del nucleo, ed il gas si sarebbe propagato soprattutto nelle due direzioni perpendicolari al piano galattico, dove la densità della materia interstellare era minore. Gli elettroni relativistici originati dall'esplosione, muovendosi nel campo magnetico che il gas ha trascinato con sé, danno luogo a radiazione di tipo sincrotrone.



fica nelle galassie esterne, si calcola che il tempo trascorso dall'esplosione sia di qualche centinaio di milioni d'anni, e quindi incompatibile con il tempo indicato dall'espansione del braccio a 10000 anni-luce dal centro. Questo fatto è stato ritenuto un possibile indizio che il nucleo galattico è esploso due volte in 500 milioni d'anni.

Radiogalassie e fenomeni esplosivi

Una migliore comprensione di questi fenomeni esplosivi la si potrà ottenere esaminando alcune caratteristiche delle loro emissioni radio e ottiche. Per quanto riguarda le radioemissioni, le galassie si dividono in due grandi classi: galassie normali e radiogalassie. Quelle normali emettono nel dominio ottico (ossia fra 3000 e 8000 Å circa) un numero di erg per secondo un milione di volte più grande che nel dominio radio (fra 3 cm e 30 m circa). Lo spettro dell'emissione radio indica che esso è di natura sincrotrone dovuto, cioè, all'irraggiamento da parte di elettroni di alta energia quando vengono frenati dal campo magnetico galattico. La radiazione proviene tanto dal disco che dall'alone, ma sia nell'uno che nell'altro, si notano delle zone di discontinuità, le quali emettono di più o di meno di quelle adiacenti. Comunque la caratteristica di tale emissione è di provenire da regioni vaste quanto l'intera galassia. Le radioemissioni di questa classe

di galassie sono misurabili soltanto per quelle poche relativamente vicine a noi, e quindi da un numero relativamente piccolo di oggetti: appare che l'intensità della radioemissione dipende dal tipo di galassia, le spirali essendo sorgenti radio più forti delle ellittiche e delle irregolari. Le radiogalassie sono caratterizzate da una radioemissione da 1000 a 1 milione di volte più forte che nelle galassie normali. Esse sono tanto intense, che è possibile osservare oggetti posti anche a 5 e forse più miliardi di anni-luce da noi. Anzi, la maggioranza di questi lontanissimi oggetti emette abbastanza nel dominio radio da essere registrabili, mentre nel dominio ottico sono al di sotto del limite di sensibilità dei più grandi telescopi. A differenza di quanto trovato per le galassie normali, le radiogalassie sono in maggioranza ellittiche giganti, o SO. Esse sono tutte di grande splendore, compreso fra grandezza assoluta -20 e -23 , con in media una grandezza assoluta di -21 (pari, cioè, alla luminosità di 10 miliardi di soli); mentre le galassie normali hanno grandezze assolute comprese fra -13 (10 milioni di volte la luminosità del Sole) e -23 , con un massimo di frequenza intorno a -20 . Inoltre, una metà delle radiogalassie è rappresentata da galassie doppie, o coppie di galassie legate gravitazionalmente. Si direbbe che la duplicità favorisca la radioemissione. I problemi posti dalle radiogalassie sono essenzialmente due, strettamente connessi fra loro: qual è il meccanismo che provoca la liberazione di così formidabili

Fig. 7/8 La nebulosa del Granchio, resto di una supernova esplosa nel 1054. Sopra: fotografia in luce di $H\alpha$; si vedono i filamenti di gas, soprattutto idrogeno. La misura dei loro spostamenti Doppler indica che stanno espandendo a 1300 km/sec. Sotto: fotografia presa con un filtro che lascia passare solo la regione 5400-6400 che non contiene forti righe di emissione. Essa perciò ci mostra

l'aspetto di quella parte della nebulosa che emette uno spettro continuo, che è risultato essere di natura sincrotrone. In questa regione che ha un diametro di circa 4 anni luce, la densità del gas deve essere di poco superiore a quella del gas interstellare, mentre la densità degli elettroni relativistici generati durante l'esplosione è parecchi ordini di grandezza superiore a quella nello spazio

interstellare. Anche il campo magnetico si valuta sia uno o due ordini di grandezza più grande del campo magnetico galattico.

Fig. 9 La nebulosa Veil Nebula. Il cerchio indica la regione radio emittente. Se la velocità d'espansione del gas è di circa 1000 km/sec come nel caso della nebulosa del Granchio, l'esplosione deve essere avvenuta fra 10 000 e 20 000 anni fa.



337

energie, e qual è la loro posizione nel cammino evolutivo di una galassia.

Sono state proposte varie ipotesi per spiegare la causa delle radioemissioni. Da principio si pensò che si trattasse della collisione di due galassie, ma poi è stata abbandonata perché quella della collisione sarebbe un'eventualità estremamente rara, ed inoltre l'energia cinetica del gas collidente non si sarebbe trasformata che in minima parte in energia elettromagnetica. Invece ci sono parecchie prove in favore di una esplosione entro la galassia, anche se (come abbiamo più volte ripetuto) non sia affatto chiara la natura e la causa di questa esplosione.

Si conoscono parecchi tipi di radiogalassie, che potrebbero costituire una sequenza evolutiva: dalle galassie quasi stellari (le famose quasar) piccole ed intensissime, alle radiogalassie tipo Cygnus A (Fig. 5-6), alle radiogalassie meno intense ma più estese, come Centaurus A (Fig. 4), fino alle galassie normali con un nucleo radioemittente come Sagittarius A, nella nostra Via Lattea. Appare plausibile che esistano oggetti in cui l'esplosione è ancora in corso con maggiore o minor grado di violenza, od altri dove è avvenuta 100 000 o un milione o 10 milioni d'anni fa. Abbiamo anche detto che ci sono prove che tali esplosioni siano fenomeni ricorrenti entro una medesima galassia. Questi argomenti a proposito delle galassie esterne, confermerebbero quindi l'interpretazione data per il braccio in espansione e per l'alone della Via Lattea. Sem-

bra anche che esistano due tipi di fenomeni esplosivi: uno di estrema violenza, tipico delle sorgenti quasi stellari (quasar), ed uno su scala più ridotta che potrebbe essere tipico delle galassie Seyfert. Ecco due possibili sequenze di oggetti extragalattici in cui stanno avvenendo o sono avvenuti fenomeni esplosivi:

Esplosioni violente: Quasar → radiogalassie « forti », tipo Cygnus A → estensissime radiogalassie tipo Centaurus A.

Esplosioni su scala minore: M 82, oppure galassie di Seyfert → radioemissioni di nuclei galattici, tipo Sagittarius A → radioemissioni da aloni delle galassie normali.

Per analogia è interessante esaminare pure alcuni fenomeni esplosivi su scala stellare, come avviene nelle esplosioni delle supernovae, seguite da radioemissioni di intensità decrescente nel tempo, ma abbraccianti regioni di volume crescente nel tempo. Si ha questa sequenza:

I Fase: Esplosione della supernova. Lo splendore della stella aumenta in poche ore di migliaia di volte (Fig. 7/8).

II Fase: Resto di supernova, come, ad esempio, quello della nebulosa del Granchio, esplosa circa 1000 anni fa, ed oggi occupante un volume di diametro pari a circa 3 anni-luce, sede di emissioni sincrotrone sia nel dominio ottico che radio. Oppure, l'esempio della Veil Nebula (Fig. 9), esplosa qualche decina di migliaia di anni fa, ed oggi visibile come una nebulosa a forma d'arco, radioemittente radiazione sincrotrone, ed occupante un vo-

lume di diametro pari a 60 anni-luce. Se la sua espansione è avvenuta alla velocità costante di 1000 km/sec, un 10000 anni fa essa doveva essere addensata nell'attuale centro della nebulosa, e perciò è a quell'epoca che si fa risalire l'esplosione. Tutti questi fenomeni esplosivi, sia su scala galattica che stellare, sono caratterizzati da una fase di forte emissione ottica seguita da una radioemissione, aventi ambedue le medesime caratteristiche.

Fase ottica. Per qualche ragione non ben compresa, nel nucleo galattico ha luogo un'esplosione con liberazione d'energia, che non sappiamo se sia di natura nucleare o gravitazionale, oppure ambedue. Una gran quantità di gas viene espulsa dal nucleo a velocità di qualche migliaio di km/sec. Infatti noi osserviamo lo spettro del nucleo che mostra righe in emissione di gas in stato di alta eccitazione. Dallo spostamento Doppler, ricaviamo la velocità di espansione, e dall'allargamento delle righe, il moto turbolento a caso di queste masse, ammontante a parecchie centinaia di km/sec. Dalla distanza di alcune nubi dal nucleo, possiamo anche ricavare il tempo trascorso dall'esplosione, ammettendo al solito che la velocità d'espansione sia rimasta più o meno costante. Un esempio tipico è offerto da M 82 (Fig. 11), e in scala stellare dalla nebulosa del Granchio (Fig. 7/8). L'esplosione produce onde d'urto e una certa quantità di particelle ad alta energia. Gli elettroni ad alta energia traversando il campo magnetico del gas, emettono radiazione sin-

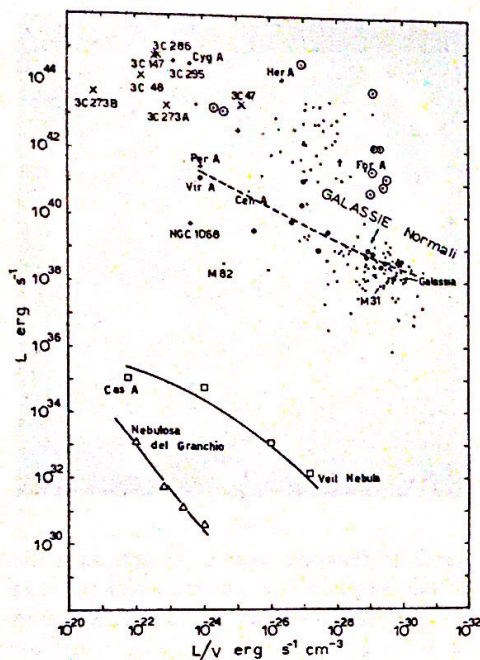


Fig. 10 Relazione fra emissività (energia emessa nel dominio radio per secondo e per unità di volume) L/V e luminosità radio (energia emessa per secondo dalla radiosorgente) L , per le galassie normali, le radiogalassie e le sorgenti galattiche resti di supernovae.

x quasar; + radiogalassie con forti righe di emissione nello spettro ottico; o galassie dell'ammasso della Vergine; • altre galassie; o galassie con alone; □ resti di supernovae di tipo II (popolazione del disco galattico) Δ resti di supernovae di tipo I (popolazione dell'alone galattico).

crotrone che può cadere sia nel dominio ottico che in quello radio. La frequenza di emissione dipende infatti sia dall'intensità del campo H che dall'energia dell'elettrone E secondo la relazione

$$f = 1072 \cdot 10^{-5} H E^2$$

(H in gauss, ed E in elettron volt) Cioè per una data intensità del campo l'emissione nel dominio ottico (ossia ad altissima frequenza) potrà aver luogo solo se c'è un sufficiente numero di elettroni di altissima energia. Per $H = 10^{-5}$ gauss, E deve essere dell'ordine di 10^{12} o 10^{13} eV. Però, quanto maggiore è l'energia dell'elettrone, tanto più rapidamente esso viene decelerato, secondo la relazione

$$\frac{dE}{dt} = - 3793 \cdot 10^{-24} H^2 E^2$$

Quindi, dopo un tempo, che sempre per

$H = 10^{-5}$ è dell'ordine di 100000 anni, l'energia degli elettroni « ottici » sarà dimezzata, e in breve tempo essi saranno in grado di emettere solo nel dominio radio. Segue così la

Fase radioemittente. Elettroni di alta energia superiore a 10^9 eV si sparpagliano entro la nube di gas in espansione, emettendo un radiospettro continuo. Le radiogalassie rappresentano questa fase, e, su scala stellare, le nebulose resti di supernovae, come Cassiopeia A o la Veil Nebula (Fig. 9).

Col procedere dell'espansione che è seguita all'esplosione, l'interazione del gas espulso dal nucleo con il gas delle parti più esterne della galassia, diventa tanto forte che l'energia cinetica del gas espandente viene dissipata in moti turbolenti dalle nubi che incontra. Anche l'intensità dei raggi cosmici e del campo magnetico decrescono in seguito al procedere della espansione. Così la radiogalassia si va trasformando nel corso di un centinaio di milioni d'anni in galassia normale, circondata da un alone debolmente radioemittente; mentre la radiosorgente resto di supernova, si espande e si indebolisce fino a confondersi con la radiazione dello sfondo galattico, in un tempo di qualche decina di migliaia d'anni.

È molto probabile che le misteriose quasar di cui tanto si parla in questi ultimi 3 o 4 anni, rappresentino la prima fase di una gigantesca esplosione. Infatti, sono caratterizzate da una luminosità pari a 10 o 100 volte quella delle galassie più luminose, pur avendo un diametro di poche migliaia di anni-luce, cioè circa 1/100 di quello delle grandi galassie. Anche l'intensità della loro radioemissione è uguale a quella delle più forti radiogalassie. Lo spettro ottico è caratterizzato dalla presenza di righe in emissione di gas altamente eccitati, nonché da emissione sincrotrone. Le quasar sono anche variabili in splendore, ed è soprattutto questa caratteristica che rende difficile capire come possa trattarsi di galassie, in quanto è inspiegabile come un grande insieme di stelle e gas possa subire tanto rapide variazioni, dato che quelle dei singoli oggetti si integrano e compensano a vicenda. Di qui l'idea che possa trattarsi di un tutto unico, per esempio una enor-

me superstella di massa pari a 100 milioni di volte quella solare. Se però si ammette che le quasar siano soltanto i piccoli nuclei esplodenti di una galassia che resta invisibile per la sua lontananza (è infatti da notare che, secondo gli spostamenti verso il rosso misurati nei loro spettri, le quasar sarebbero fra i più lontani oggetti conosciuti), tutte le loro caratteristiche diventano un po' più comprensibili.

Il meccanismo dell'esplosione

Come già accennato, molte ipotesi sono state avanzate, ma nessuna del tutto soddisfacente. Lo stretto parallelismo osservato fra le fasi dell'esplosione di una supernova e di una galassia ha fatto pensare che anche l'esplosione dei nuclei galattici si possa ricondurre a un fenomeno analogo. G. Burbidge ha suggerito che una supernova, esplodendo in una regione densamente popolata di stelle come il nucleo galattico, possa provocare una specie di reazione a catena di esplosioni con le stelle vicine. Ma come si propagherebbe l'esplosione da una stella a un'altra? Secondo i giapponesi K. Aizu, Y. Fujimoto, H. Hasegawa, K. Kawabata e M. Taketani il gas caldo e denso che sarebbe presente nel nucleo galattico potrebbe interagire con le stelle sia accelerando la evoluzione di quelle in fase instabile, sia favorendo la propagazione di esplosioni suggerita da Burbidge. Da parte sua, A. G. W. Cameron ha suggerito che, data la grande densità di materia nel nucleo, si possano formare simultaneamente numerose stelle di grande massa, le quali arriverebbero tutte alla stessa epoca alla fase instabile di supernova. Questo, però, non spiegherebbe, il fenomeno ricorrente delle esplosioni. Infatti, in galassie già formate, il gas del nucleo è in stato di alta turbolenza, il che impedisce la formazione di altre stelle. Fowler e Hoyle hanno supposto che il nucleo sia un oggetto unico di massa pari a 10^7 o 10^8 masse solari, che libera energia gravitazionale. Tuttavia, è del tutto problematico che un simile oggetto esista e che possa formarsi senza frammentazione del gas.

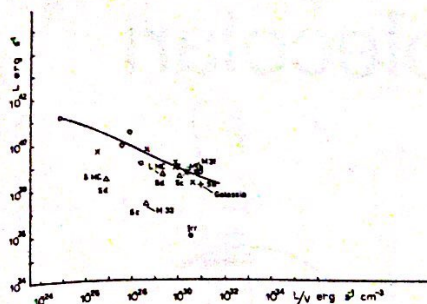


Fig. 11 Un dettaglio della figura precedente, che mostra la relazione per le galassie appartenenti all'ammasso della Vergine e per quelle del nostro ammasso locale.

o galassie ellittiche nell'ammasso della vergine; x galassie spirali nell'ammasso della vergine; + galassie Sb nell'ammasso locale; Δ galassie Sc e Sd nell'ammasso locale; • galassie Irregolari nell'ammasso locale.

Relazione statica fra splendore e energia emessa per unità di volume nel dominio radio

All'inizio del presente articolo abbiamo ricordato l'importanza che ha avuto la scoperta delle relazioni statistiche luminosità-temperatura superficiale (o diagramma Hertzsprung-Russell) e massa-luminosità nel farci capire la costituzione e evoluzione delle stelle. Gli astronomi sono alla ricerca di relazioni statistiche fra le grandezze fisiche fondamentali delle galassie, nella speranza che anch'esse possano adempiere alla stessa funzione nei riguardi della loro formazione, costituzione fisica e evoluzione.

Poiché le radioemissioni sembrano essere sempre strettamente associate a quei fenomeni esplosivi che probabilmente caratterizzano le fasi evolutive delle galassie, sarà particolarmente interessante considerare la relazione proposta dal gruppo di astronomi giapponesi già citati, K. Aizu e altri, fra la luminosità radio L_r delle galassie (ossia il numero di erg per secondo emessi da tutta la galassia nel suo insieme, fra 3 cm e 30 m di lunghezza d'onda) e l'emissività radio L_r/V , o erg/sec emessi dall'unità di volume (Fig. 9). Una relazione di questo tipo è strettamente simile al diagramma HR. Esso ci dà, infatti, la relazione fra la luminosità stellare (erg/sec emessi da tutta la superficie della stella fra $\lambda = 0$ e $\lambda = \infty$) e la temperatura superficiale (che è legata al numero di erg per sec, emessi dall'unità di superficie della stella, dalla relazione

$$T \text{ proporzionale a } \sqrt{\frac{L}{4\pi R^2}}$$

In altre parole, nel caso delle stelle si considera la relazione fra luminosità ed emissione per unità di superficie, dato che le stelle sono opache alla radiazione e ciò che ne esce è solo la radiazione emessa dagli strati superficiali. Nel caso delle galassie, le quali sono trasparenti alle radioonde, di modo che noi possiamo osservare l'emissione dall'intero volume, si considera invece la relazione fra radio-luminosità e emissione per unità di volume. La relazione trovata è data nella

Fig. 10 e mostra la posizione sia delle quasar che delle intense radiogalassie, nonché quella delle galassie normali. Per confronto si dà anche l'analoga relazione per le radiosorgenti resti di supernovae. Si vede che alcune classi di oggetti occupano una propria sequenza ben definita. Per esempio, le supernovae esplose nell'alone galattico, e perciò ritenute esemplari della vecchia popolazione galattica (supernovae di tipo I), sono allineate lungo la sequenza più bassa, mentre le supernovae esplose nelle braccia, e quindi ritenute stelle di grande massa di recente formazione (supernovae di tipo II), occupano la sequenza più alta. Nella zona galassie, le cui luminosità sono da 10^6 a 10^{11} volte maggiori che per le supernovae, all'estremo in alto, a sinistra (alta luminosità e alta emissività), troviamo le quasar, e poi, verso le emissività minori, le radiogalassie. Ci sembra estremamente importante notare che l'energia emessa nell'unità di tempo dall'unità di volume dalle misteriose quasar è comparabile a quella emessa dai resti di supernovae. Sembra quindi probabile che i fenomeni esplosivi che avvengono nelle quasar siano della stessa natura di quelli che hanno luogo nelle supernovae, ma estesi ad un volume di diametro eguale a qualche migliaio di anni luce, invece che a qualche anno luce come è il caso per la nebulosa del Granchio.

Però, se si toglie il fatto già noto che le quasar e le forti radiogalassie sono gli oggetti di maggior radiosplendore nettamente distinti dalle altre galassie, non appare evidente l'esistenza di una sequenza ben definita per queste ultime. È probabile che esistano parecchie sequenze per diverse classi di galassie, a seconda della loro forma, massa, campo magnetico, spettro d'energia degli elettroni relativistici, tipo di esplosione avvenuta nel nucleo... ecc., che non sappiamo come distinguere. Un modo di districare questo ingarbugliato diagramma, potrebbe essere quello di determinarlo per singoli ammassi di galassie (così per le stelle si studiano gli ammassi HR dei vari ammassi galattici e globulari). Per esempio la Fig. 11 ci mostra lo stesso diagramma per le galassie ellittiche e spirali dell'ammasso della Vergine: è evidente la

esistenza di una sequenza, e forse di due, per ellittiche e spirali, con un andamento simile a quella per i resti di supernovae. Anche per l'ammasso locale si nota il diverso comportamento della Via Lattea e della galassia di Andromeda, spirali Sb, in confronto alle spirali Sc e Sd del Triangolo e delle Nubi di Magellano. In conclusione, oggi è importante studiare meglio le caratteristiche sia ottiche che radio delle galassie facenti parte di ammassi, per cercare di sbrogliare la matassa dell'evoluzione.

Vien voglia di estendere questa analogia fra galassie esplodenti e supernovae anche all'Universo nel suo insieme, formulando la seguente ipotesi: ogni volta che la materia si trova in condizioni di altissima temperatura e densità, si ha una esplosione con emissione di energia sia gravitazionale che nucleare. Segue una prima fase post-esplosiva, caratterizzata dal moto espansionale ad alta velocità del gas eccitato e in moto turbolento; c'è produzione di particelle relativistiche in gran quantità, ed emissione sincrotrone sia ottica che radio. Le condensazioni di gas che ne risultano, possono dar luogo ad ammassi di galassie, a galassie, ad ammassi di stelle e a stelle..., ed in queste condizioni, quando la densità e la temperatura diventano di nuovo sufficientemente alte, si può ripetere il fenomeno esplosivo, sia che si tratti del nucleo di una galassia o di una stella, accompagnato da emissione sincrotrone. Tanto nelle stelle, che nelle galassie e nell'Universo l'esplosione può essere un fenomeno ricorrente. Abbiamo l'esempio di stelle novae ricorrenti, delle galassie avviluppate in più radiosorgenti di volume crescente e intensità decrescente; abbiamo, infine, la possibilità di un Universo oscillante, attualmente nella fase espansiva susseguente la esplosione, ma che forse un giorno comincerà ad implodere. Almeno questo sembrano suggerire le ricerche cosmologiche basate sulla distribuzione nello spazio delle lontane galassie e delle quasar. Vista sotto questo aspetto, anche la teoria dell'esplosione da cui si sarebbe originato il nostro Universo, sembra risultare meno straordinaria e più comprensibile.