

Galassie e generi naturali: osservazioni sulla filosofia dell'astronomia (Mauro Murzi)

Classificare gli oggetti che hanno un'importanza pratica o che suscitano un interesse intellettuale è un'attività comune nella vita quotidiana e nella ricerca scientifica. Classifichiamo le entità di un dominio suddividendole in gruppi tramite regole affidabili, controllabili e riproducibili. I gruppi così delimitati sono contenitori logici nei quali mettiamo gli oggetti in modo ordinato. Alcuni gruppi sono palesemente convenzionali, altri sembrano rispondere a criteri oggettivi. Le costellazioni (→)¹ sono un esempio di gruppi convenzionali. I confini delle costellazioni sono stabiliti da una convenzione internazionale che trascura le caratteristiche fisiche delle stelle. Le stelle che appartengono alla stessa costellazione hanno proprietà differenti. Talvolta sono prospetticamente vicine le une alle altre, ma ciò non è sempre vero: alcune costellazioni s'insinuano in parti del cielo occupate da stelle di altre costellazioni. È sempre possibile determinare a quale costellazione appartenga una data stella, perché i confini delle costellazioni sono perfettamente noti, in quanto stabiliti per convenzione. Come esempio di gruppi che sembrano rispondere a criteri oggettivi (ossia, basati sulle proprietà fisiche degli oggetti) si possono considerare i tipi (→) spettrali. Le stelle che appartengono al medesimo tipo spettrale hanno caratteristiche fisiche comuni, come la temperatura (→) superficiale, l'indice (→) di colore e la luminosità (→) assoluta. La distinzione tra i tipi spettrali non è sempre chiara, perché le caratteristiche fisiche impiegate per distinguere i diversi tipi spettrali variano con continuità. Quindi, non sempre è possibile determinare a quale tipo spettrale appartenga una data stella. I filosofi chiamano *generi naturali* i gruppi che sembrano rispondere a criteri oggettivi come i tipi spettrali; chiamano *generi non-naturali* i gruppi palesemente convenzionali come le costellazioni.

1. I generi naturali

I filosofi non sono d'accordo sulle proprietà dei generi naturali. Le teorie filosofiche sui generi naturali possono essere raccolte in due grandi famiglie: il monismo e il pluralismo.

Il monismo afferma che esiste un'unica classificazione corretta in generi naturali. Ogni altra classificazione, per quanto utile dal punto di vista pratico, è imperfetta e lacunosa. Per esempio, l'unico modo corretto per classificare i composti chimici – secondo il monismo – si basa sulla formula chimica; dunque, l'acqua (definita dalla formula chimica H_2O) è quel liquido le cui molecole sono composte di due atomi d'idrogeno e uno di ossigeno. Il monismo afferma che esistono i generi naturali minimi² (*infimic species*), non suddivisibili in ulteriori generi naturali. I membri di un genere naturale minimo sono «essenzialmente identici»³. La classificazione basata sui generi naturali minimi è la classificazione ottimale e completa, perché non trascura alcuna differenza importante e non introduce distinzioni che non abbiano un fondamento nelle proprietà essenziali.

Il pluralismo afferma che esiste più di una classificazione corretta in generi naturali. Ogni classificazione risponde a interessi pratici e intellettuali diversi. La formula chimica – sostiene il pluralismo – è insufficiente per stabilire un'unica classificazione corretta dei composti chimici. Esistono contesti nei quali l'acqua (ossia, il composto chimico di formula H_2O) non forma un unico genere naturale, ma due generi naturali distinti, l'acqua ordinaria e l'acqua pesante (in quest'ultima l'idrogeno ordinario è sostituito dall'isotopo deuterio). Le molecole di acqua ordinaria e acqua pesante sono entrambe composte di due atomi di idrogeno e uno di ossigeno. Tuttavia, in alcuni contesti (come la produzione dell'energia atomica), l'acqua ordinaria e l'acqua pesante sono generi naturali distinti. La classificazione in generi naturali – sostiene il pluralismo – non è univoca, ma dipende da molteplici fattori, tra i quali le proprietà degli oggetti, l'obiettivo della classificazione, il contesto della ricerca e la successione storica dei fatti e delle teorie.

L'essenzialismo è la più nota versione del monismo. L'essenzialismo sostiene che i generi naturali devono essere identificati mediante le proprietà intrinseche ed essenziali degli oggetti. Ha una salda tradizione, che prende le mosse da Aristotele e, in tempi più recenti, da Locke, che ipotizzò l'esistenza di

1 Il simbolo (→) rinvia al glossario.

2 B. ELLIS, *Scientific essentialism*, Cambridge, Cambridge University Press, 2001, 3.

3 *ibid.*

una microstruttura inosservabile caratteristica di ogni genere naturale. La versione contemporanea dell'essenzialismo è dovuta a Saul Kripke e Hilary Putnam⁴. Brian Ellis, filosofo fautore dell'essenzialismo, ha formulato sei condizioni che caratterizzerebbero la corretta classificazione in generi naturali⁵. La classificazione deve essere:

- (1) oggettiva, ossia indipendente dai nostri interessi, dagli strumenti di osservazione e dalle convenzioni;
- (2) netta, ossia i confini tra i generi naturali devono essere esattamente tracciabili;
- (3) intrinseca, ossia basata sulle proprietà intrinseche degli oggetti, non sulle proprietà relazionali;
- (4) completa, ossia gli oggetti che hanno proprietà intrinseche diverse devono appartenere a generi naturali diversi;
- (5) disgiunta, ossia due generi naturali diversi non possono avere elementi in comune (in altre parole, un'entità non può appartenere a due generi naturali, salvo che essi siano sottogruppi dello stesso genere naturale);
- (6) essenziale, ossia deve individuare i generi naturali mediante le proprietà essenziali.

Il realismo promiscuo, proposto da John Dupré, è una nota versione del pluralismo. Sostiene che ogni classificazione dipende sia dalle proprietà degli oggetti sia degli obiettivi della classificazione. Afferma Dupré:

La mia tesi è che ci sono innumerevoli modi legittimi, oggettivamente fondati, per classificare gli oggetti nel mondo. [...] Quindi, mentre non nego che, in un certo senso, i generi naturali esistono, desidero inserirli in una metafisica di radicale pluralismo ontologico, alla quale mi riferisco come "realismo promiscuo".⁶

La mia posizione è realista, perché sostengo che esiste qualcosa che legittima una buona classificazione [...] Ma la mia posizione riconosce anche un ruolo ineliminabile al classificatore umano nel selezionare un particolare schema di classificazione [...] Questa selezione dipenderà naturalmente, in maniera cruciale, dallo scopo per il quale la classificazione è costruita.⁷

Il dibattito sui generi naturali si è alimentato di esempi ricavati dalla biologia (le specie viventi), fisica (particelle fondamentali), chimica (elementi e composti), psicologia (concetti ed emozioni) e scienze sociali (gruppi sociali). Salvo poche eccezioni, il dibattito sui generi naturali ha trascurato l'astronomia⁸. Si tratta di una grave lacuna, perché l'astronomia è ricca di classificazioni che sollevano interessanti domande scientifiche e filosofiche, quali la classificazione delle stelle, delle galassie e dei corpi del sistema solare. A proposito di quest'ultima, posso ricordare il dibattito sulla classificazione dei pianeti che ha prodotto una nuova definizione di "pianeta"⁹. L'esempio utilizzato in questo articolo è tratto proprio dall'astronomia: la classificazione delle galassie.

2. La classificazione delle galassie: una breve introduzione

Gli astronomi utilizzano diversi sistemi di classificazione delle galassie. Descriverò brevemente i sistemi di classificazione di Hubble, de Vaucouleurs, van den Bergh e Morgan, esponendo i principi che li animano, affinché il lettore possa comprendere la successiva discussione filosofica senza dovere cercare altrove la spiegazione dei concetti scientifici menzionati¹⁰.

4 S. KRIPKE, *Identity and necessity*, in M. K. MUNITZ (a cura di) *Identity and individuation*, New York, New York University Press, 1971, 135-164; S. KRIPKE, *Naming and necessity*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1980; H. PUTNAM, *The meaning of 'Meaning'*, in K. GUNDERSON (a cura di), *Language, mind and knowledge*, Minneapolis, University of Minnesota Press, 1975, 131-193.

5 B. ELLIS, *Scientific essentialism*, cit., 19-21.

6 J. DUPRÉ, *The disorder of things*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1993, 18.

7 J. DUPRÉ, *Humans and others animals*, Oxford, Clarendon Press, 2002, 54.

8 Le poche eccezioni di mia conoscenza sono M. MURZI, *A defence of pluralism in the debate about natural kinds: case study from the classification of celestial objects*, in "Forum Philosophicum", 12 (2007), 359-377 e S. RUPHY, *Are stellar kinds natural kinds?*, 2008, in corso di stampa.

9 Il dibattito sulla definizione di "pianeta" è descritto, con taglio prevalentemente filosofico, in M. MURZI, *Changes in a scientific concept: what is a planet?* in "PhilSci Archive", 2007.

10 Il lettore interessato ad approfondire le tematiche scientifiche può consultare A. SANDAGE, *The classification of galaxies: early history and ongoing developments*, in "Annual Review of Astronomy and Astrophysics", 43 (2005),

Il sistema di classificazione di Hubble (\rightarrow) si basa sull'osservazione, tramite l'ispezione visuale delle lastre fotografiche, dell'aspetto del nucleo e dei bracci a spirale della galassia. La classificazione definisce cinque gruppi principali:

- galassie ellittiche, con forma regolare e prive di bracci;
- galassie spirali ordinarie, dal cui nucleo centrale si dipartono bracci avvolti a spirale;
- galassie spirali barrate, simili alle spirali ordinarie, caratterizzate dalla presenza di una struttura a forma di barra che attraversa il nucleo;
- galassie lenticolari, intermedie tra le ellittiche e le spirali;
- galassie irregolari, che non rientrano nei gruppi precedenti.

Le galassie ellittiche sono classificate in base alla loro eccentricità $e = 10(a - b) / a$, dove a e b sono rispettivamente il diametro maggiore e minore apparente (cioè, il diametro delle immagini fotografiche, non quello reale). Di fatto, e varia da 0 a 7. Esistono quindi otto classi di galassie ellittiche designate come E0, E1, ..., E7, dove E0 contiene le galassie che appaiono quasi perfettamente rotonde ed E7 quelle più allungate. Le galassie spirali ordinarie sono suddivise in gruppi designati Sa, Sb, Sc; le spirali barrate nei gruppi SBa, SBb, SBc. La suddivisione si basa sull'aspetto dei bracci: le galassie delle classi Sa ed SBa hanno il nucleo grande e i bracci ben definiti, ordinati e avvolti strettamente; quelle delle classi Sc ed SBc hanno il nucleo piccolo e bracci irregolari, disordinati e aperti; le galassie delle classi Sb ed SBb hanno caratteristiche intermedie. Si possono classificare le galassie in ulteriori classi intermedie; per esempio, Sab indica una galassia spirale ordinaria con aspetto intermedio tra quello delle classi Sa ed Sb. Il sistema di Hubble è rappresentato nella figura 1, nella quale ho ommesso le galassie irregolari, delle quali non parlerò nell'articolo. Il sistema di Hubble è bidimensionale. L'asse orizzontale distingue tra le galassie senza bracci (ellittiche e lenticolari) e le galassie con bracci sempre più aperti e disordinati (spirali). L'asse verticale distingue tra le galassie prive di barra (spirali ordinarie) e con barra (spirali barrate).

Il sistema di classificazione di de Vaucouleurs (\rightarrow) è tridimensionale. Due assi della classificazione sono gli stessi del sistema di Hubble. Il terzo asse distingue tra le galassie che ospitano una formazione ad anello e le galassie senza l'anello. Nella figura 2, la galassia NGC 4324 presenta un'evidente struttura ad anello. Nel sistema di de Vaucouleurs le spirali ordinarie sono indicate con la sigla SA e le spirali barrate con la sigla SB; a differenza del sistema di Hubble, è prevista l'esistenza di una classe intermedia tra SA ed SB, indicata con la sigla SAB, le cui galassie ospitano accenni del braccio. La presenza dell'anello è indicata dalla lettera r tra parentesi; l'assenza dell'anello è indicata dalla lettera s tra parentesi; i casi intermedi adottano la sigla rs tra parentesi. Un esempio dell'impiego del sistema di classificazione è presentato nella figura 3: la galassia NCG 2223 è classificata SBbc(r), ossia galassia spirale barrata, intermedia tra SBb ed SBc, che ospita una struttura ad anello. La rappresentazione grafica del sistema di de Vaucouleurs è presentata nella figura 4. L'asse orizzontale distingue tra galassie ellittiche, lenticolari, spirali e irregolari. L'asse verticale distingue tra galassie spirali ordinarie e barrate. Questi assi sono simili ai corrispondenti assi dello schema di Hubble. Tuttavia, la classificazione di de Vaucouleurs evidenzia l'esistenza di tipi intermedi, quali E⁺ (per indicare galassie ellittiche simili alle lenticolari), S0⁻ ed S0⁺ (rispettivamente, galassie lenticolari intermedie tra le ellittiche e le spirali). Il terzo asse della classificazione distingue le galassie che ospitano un anello (r) da quelle prive di anello (s), evidenziando la presenza di tipi intermedi. Lo spazio di classificazione nel sistema di de Vaucouleurs è continuo.

Il sistema di classificazione di van den Bergh (\rightarrow), noto anche come sistema DDO, è monodimensionale. Le galassie sono suddivise in cinque classi, numerate da I a V, in base alla loro luminosità assoluta. I nomi descrittivi assegnati alle cinque classi sono: supergiganti (classe I), giganti luminose (II), giganti (III), sub-giganti (IV) e nane (V). La luminosità assoluta è difficile da determinare, perché richiede la conoscenza della distanza. In luogo della luminosità assoluta si utilizza l'aspetto dei bracci, che è empiricamente correlato con la luminosità assoluta. Le galassie della classe I hanno bracci a spirale ben definiti e regolari. Quelle della classe II hanno bracci più irregolari ma facilmente riconoscibili. I bracci delle galassie della classe III sono difficili da riconoscere, mentre quelli delle galassie della classe IV possono essere riconosciuti solo con grande difficoltà. Nelle galassie della classe V i bracci sono assenti. La figura 5 mostra la variazione dell'aspetto dei bracci nelle classi di luminosità in cui è divisa la

classificazione di van den Bergh. Nella pratica, la classe di luminosità di van den Bergh è aggiunta alla classificazione secondo de Vaucouleurs. Lo schema di classificazione risultante è quadridimensionale. I quattro assi identificano:

- (1) la sequenza ellittiche, lenticolari, spirali e irregolari;
- (2) la presenza o assenza della barra;
- (3) la presenza o assenza dell'anello;
- (4) la riconoscibilità dei bracci, che indirettamente determina la luminosità assoluta della galassia.

Il sistema di classificazione di Morgan (\rightarrow), detto anche di Yerkes, è monodimensionale. E' basato sullo spettro (\rightarrow) integrato delle galassie. Le galassie sono suddivise in quattro classi indicate con le lettere *a*, *f*, *g*, *k*. Lo spettro integrato delle galassie di tipo *a* ricorda lo spettro delle stelle di classe spettrale A, quello delle galassie di tipo *f* assomiglia allo spettro delle stelle di classe F, e così via. Il confronto tra il sistema di Hubble e quello di Morgan mostra che le galassie della classe Sc di Hubble sono classificate nei tipi *a*, *f* e *g* di Morgan, e le galassie del tipo *k* di Morgan sono classificate nelle classi E, S0, Sa ed Sb di Hubble. Quindi, galassie che appartengono allo stesso tipo secondo un sistema di classificazione, appartengono a tipi diversi secondo un altro sistema di classificazione.

I sistemi di classificazione sin qui descritti si basano sull'ispezione visuale delle lastre fotografiche. Si tratta di un procedimento lento che permette di classificare un numero limitato di galassie. Uno dei più ampi cataloghi di galassie, il *Third reference catalogue of bright galaxies*, comprende circa 23 000 galassie classificate con metodi manuali. Dalla fine degli anni Novanta del secolo scorso, sono stati creati database contenenti una mole impressionante di dati. Ad esempio, lo *Sloan Digital Sky Survey* comprende 230 milioni di oggetti celesti e gli spettri di 930 000 galassie. È impossibile, per evidenti ragioni pratiche, analizzare e classificare manualmente una tale quantità di dati. La sola strada percorribile è la classificazione automatica assistita dal software. Sulla base del sistema di Morgan sono stati sviluppati alcuni sistemi di classificazione automatica¹¹. Due parametri frequentemente usati sono l'indice di concentrazione, che è uguale al rapporto tra la quantità di luce emessa dal centro della galassia e quella emessa da tutta la galassia, e l'asimmetria, che misura la differenza tra l'immagine fotografica della galassia e un'ideale figura simmetrica. Il software calcola i due parametri tramite un'elaborazione matematica delle immagini fotografiche.

3. La classificazione delle galassie: conseguenze per l'essentialismo

Ellis – come ricordato nel primo paragrafo – ha formulato sei condizioni che, secondo l'essentialismo, caratterizzerebbero la corretta classificazione in generi naturali. La *prima condizione* richiede che la classificazione sia oggettiva.

Le distinzioni tra i generi naturali sono basate su fatti concernenti le loro strutture o nature essenziali, non su come noi troviamo utile, conveniente o naturale classificarli. Quindi, l'appartenenza a un genere naturale è determinata dalla natura, non da noi [...] l'identità di un genere naturale non può mai dipendere solo dai nostri interessi, sentimenti, apparati percettivi, linguaggi, abitudini o scelte. Perché, se l'identità di un genere dipendesse da una qualsiasi di queste cose [...] allora sarebbe un genere di nostra costruzione, non uno che esiste nel mondo prima della nostra conoscenza, percezione o descrizione [...]¹²

Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, la classificazione delle galassie dipende dagli strumenti usati per osservarle. La spiegazione di questo fatto è relativamente semplice. La radiazione elettromagnetica emessa da una stella è assimilabile, in prima approssimazione, alla radiazione emessa da un corpo (\rightarrow) nero. L'intensità della radiazione emessa da un corpo nero varia in funzione della lunghezza d'onda. Quindi, anche l'intensità della radiazione elettromagnetica emessa dalla stella varia in funzione della lunghezza d'onda. La luce proveniente da una galassia è la sovrapposizione della luce emessa dalle stelle. Quindi, l'aspetto della galassia varia in funzione della lunghezza d'onda della luce osservata (la figura 6 è un esempio). Ne consegue che la classificazione di una galassia dipende dalla lunghezza d'onda della luce alla quale è sensibile lo strumento di osservazione. Non c'è alcuna ragione fisica per scegliere

11 R. ABRAHAM et al., *The morphologies of distant galaxies. I. An automated classification system*, in "The Astrophysical Journal", 432 (1994), 75-90.

12 B. ELLIS, *Scientific essentialism*, cit., 19.

una determinata lunghezza d'onda come quella privilegiata, alla quale riferire la classificazione. Al contrario, la fisica dimostra che non esiste alcuna lunghezza d'onda privilegiata. Per la fisica teorica, ogni lunghezza d'onda è buona come ogni altra. Le uniche limitazioni sono di tipo pratico. L'atmosfera terrestre è trasparente a poche lunghezze d'onda, quali la luce visibile, l'infrarosso, l'ultravioletto vicino e alcune onde radio. Per osservare le galassie ad altre lunghezze d'onda si devono usare rilevatori su satelliti artificiali. Di conseguenza, la maggiore parte delle osservazioni si riferisce a quelle lunghezze d'onda che attraversano l'atmosfera. Non esiste dunque alcuna classificazione delle galassie che sia oggettiva (ossia, indipendente dagli strumenti di osservazione). Desidero evidenziare che la dipendenza della classificazione dagli strumenti di osservazione è causata da ragioni fisiche fondamentali, insite nei meccanismi stessi dell'emissione della luce.

La *seconda condizione* richiede che la classificazione sia netta, ossia:

i generi naturali devono essere *distinti per categoria* l'uno dall'altro [...] non può esserci alcun graduale trapasso di un genere in un altro [...] perché se ci fosse un tale trapasso, noi dovremmo tracciare una linea da qualche parte per operare una distinzione. Ma se *noi* dobbiamo tracciare una linea in qualche luogo, allora la distinzione diventa *nostra*, non della natura.¹³

Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, c'è un graduale trapasso di un genere di galassie in un altro. La successione storica degli schemi di classificazione suggerisce che l'esistenza di questo graduale trapasso è dovuta alla natura stessa delle galassie e non sia un effetto apparente causato da scarse conoscenze. La classificazione di Hubble, la più anziana di quelle illustrate, impiega parametri di tipo qualitativo, basati sulla presenza o sull'assenza di alcune caratteristiche visibili. Secondo la classificazione di Hubble, a titolo di esempio, la distinzione tra le galassie spirali ordinarie e barrate è netta: la barra è osservabile (quindi la galassia è una spirale barrata) o non è osservabile (quindi la galassia è una spirale ordinaria). Lo spazio della classificazione di Hubble è discreto. La classificazione di de Vaucouleurs, posteriore a quella di Hubble, introduce forme intermedie caratterizzate dalla presenza di un accenno più o meno visibile della barra. Lo spazio della classificazione è continuo; ciò rende difficile una distinzione netta tra i diversi tipi. Tra la fine del ventesimo e l'inizio del ventunesimo secolo, per analizzare i dati osservativi disponibili in grande quantità, gli astronomi hanno ideato alcuni schemi di classificazione che impiegano strumenti automatici assistiti dal software. Questi schemi di classificazione sono basati su grandezze matematiche continue, quali l'indice di concentrazione e l'asimmetria. L'astronomia tende dunque, come le altre scienze fisiche, a sostituire i parametri qualitativi (quali l'aspetto e la presenza di determinate caratteristiche visibili) con parametri misurabili (quali l'indice di concentrazione, l'asimmetria e la luminosità). Questi parametri misurabili sono espressi tramite grandezze continue. Quindi, non può esistere una linea di demarcazione netta tra i diversi tipi di galassie. La figura 7 illustra questa situazione tramite un diagramma che riporta in ascissa il logaritmo dell'indice di concentrazione e in ordinata il logaritmo dell'asimmetria. Le galassie sono classificate in base alla posizione che i punti rappresentativi occupano nel piano. Osservando la figura 7, si vede chiaramente che le galassie spirali non sono separate da quelle ellittiche. Gli autori della ricerca hanno dovuto tracciare una linea di demarcazione per distinguere le galassie spirali dalle ellittiche. Si può chiedere se la distinzione sia opera nostra o della natura. Per rispondere, si deve innanzi tutto osservare che esiste una correlazione tra l'aspetto della galassia da un lato e l'indice di concentrazione e l'asimmetria dall'altro lato. Questa correlazione restringe lo spazio nel quale si può tracciare la linea di demarcazione, ma non lo definisce esattamente. Entro il margine di manovra lasciato dalla natura, i ricercatori hanno scelto dove porre il confine. La distinzione in generi naturali è opera sia nostra sia della natura: nell'ambito dei limiti imposti dalla natura, possiamo tracciare liberamente il confine che separa i diversi generi.

La *terza condizione* richiede che la classificazione si basi sulle proprietà intrinseche. Le proprietà relazionali, ossia quelle proprietà che pongono un'entità in relazione ad altre entità, non devono essere usate.

Se l'appartenenza di un oggetto a un genere naturale dipendesse dalle sue relazioni con altri oggetti, allora la sua appartenenza al genere sarebbe un fatto accidentale [...] che dipende da circostanze accidentali.

Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, la classificazione delle galassie si basa su proprietà relazionali. I parametri usati per la classificazione dipendono – come già spiegato – dalla lunghezza d'onda della luce ricevuta dallo strumento di osservazione. Quindi, questi parametri non sono intrinseci ma relativi a una specifica lunghezza d'onda. Ad esempio, la luminosità assoluta di una galassia non è una sua caratteristica intrinseca, ma è relativa a una specifica lunghezza d'onda. Un altro aspetto del carattere relativo della classificazione si manifesta nel fatto che la classificazione dipende dalla distanza della galassia dall'osservatore. La luce impiega tempo per arrivare all'osservatore; se la galassia è – poniamo – distante 10 miliardi di anni luce da noi, allora noi la osserviamo adesso com'era 10 miliardi di anni fa. La classificazione di Hubble è stata ideata osservando galassie relativamente vicine che hanno circa la stessa età della Galassia. Tornando indietro nel tempo, l'aspetto delle galassie non s'inquadra nello schema di Hubble. Per classificare le galassie lontane, nate prima della Galassia, è più utile usare l'indice di concentrazione e l'asimmetria. Dunque, la scelta dei parametri di classificazione di una data galassia dipende dalla distanza di quella galassia dalla Terra. Un ultimo esempio che evidenzia il carattere relativo delle proprietà delle galassie, ponendo in discussione l'esistenza stessa di proprietà genuinamente intrinseche, riguarda il raggio di una galassia che, per semplicità, supponiamo sferica. A prima vista, il valore del raggio sembrerebbe una proprietà intrinseca. Nella realtà, la situazione è più complessa. Esistono diversi tipi di raggio. Uno è il raggio effettivo, definito come il raggio della superficie che emette la metà della luce totale della galassia. Un altro è il raggio di Holmberg, pari alla distanza dal centro alla quale la luminosità raggiunge un determinato valore limite. Nella pratica sono usati valori limite diversi, dipendenti dalla sensibilità e dall'affidabilità degli strumenti di osservazione e dalla luminosità residua del cielo di notte. Un altro tipo è il raggio di Petrosian, la cui definizione richiede in primo luogo di introdurre il rapporto $R(r)$ tra la luminosità di un anello di raggio interno r e raggio esterno $r + \Delta r$ (per piccoli valori di Δr) e la luminosità della superficie di raggio r . Il raggio di Petrosian è il valore di r per il quale $R(r)$ raggiunge un determinato valore limite. Nella pratica sono usati valori limite diversi. Perché gli astronomi non usano un unico raggio? Perché la luminosità della galassia diminuisce in modo continuo via via che ci allontaniamo dal centro, senza che qualche discontinuità indichi il bordo esterno. La situazione è analoga a quella vista per la seconda condizione, quando abbiamo osservato che l'astronomo deve tracciare di propria iniziativa una linea di demarcazione, poiché i parametri usati per classificare le galassie sono grandezze continue. Nel caso del bordo della galassia, la natura non ha imposto un confine univoco, ma ha stabilito soltanto i limiti entro i quali porlo. Astronomi diversi hanno tracciato il confine in luoghi diversi usando metodi diversi, ciascuno dei quali è funzionale alla ricerca scientifica che interessa l'astronomo in quel momento. È compito dell'astronomo determinare quale definizione del raggio sia la più adatta per ciascuna ricerca specifica, ideando se necessario nuove definizioni.

La *quarta condizione* richiede che

se due membri di un dato genere naturale differiscono intrinsecamente l'uno dall'altro [...] allora devono essere membri di differenti specie del genere.¹⁴

Come esempio Ellis propone due isotopi dell'uranio che hanno le medesime proprietà essenziali (sono quindi membri del genere "uranio") ma hanno differenti proprietà intrinseche (sono quindi specie diverse del genere "uranio"). Il requisito può essere riassunto dicendo che la classificazione deve essere completa, ossia non deve trascurare le differenze intrinseche. Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, la classificazione delle galassie è incompleta. Per convincersi di ciò, è sufficiente confrontare il sistema di Morgan e quello di Hubble – il confronto è descritto nel secondo paragrafo. Galassie che appartengono allo stesso tipo in un sistema di classificazione, appartengono a tipi diversi in un altro sistema di classificazione. Ad esempio, le galassie della classe Sc di Hubble sono classificate nei tipi a , f e g di Morgan. Ciò mostra che il sistema di Hubble è incompleto, poiché trascura alcune proprietà che sono invece considerate dal sistema di Morgan. Vale anche il caso inverso: le galassie del tipo k di Morgan sono classificate nelle classi E, S0, Sa ed Sb di Hubble. Il sistema di Morgan trascura dunque alcune proprietà

14 *ibid.*

considerate dal sistema di Hubble. Quindi, entrambi i sistemi di classificazione trascurano alcune differenze tra le galassie: sono dunque incompleti. L'incompletezza, ossia il fatto di trascurare volutamente alcune differenze scientificamente significative, sembra essere una costante dei sistemi di classificazione impiegati dagli astronomi. Morgan ha detto, a proposito della classificazione degli oggetti celesti:

il processo di distinzione sembra che non sia mai portato così avanti da non essere ulteriormente perfezionabile; ossia, il processo di distinzione non può essere mai considerato completo.¹⁵

Gli oggetti celesti, anche se del medesimo tipo, sono diversi l'uno dall'altro. Non esistono due galassie uguali, non esistono due stelle uguali, non esistono due pianeti uguali. Dunque, la classificazione può essere sempre spinta un passo più avanti, individuando differenze significative tra le entità da classificare, fino al punto che ogni oggetto celeste può definire un genere a sé¹⁶. Una classificazione in cui ogni genere contiene un solo oggetto sarebbe, dal punto di vista della pratica scientifica, assolutamente inutile. Se un elenco di 10 000 galassie raggruppate in qualche decina di tipi distinti può essere un valido contributo alla conoscenza scientifica, un elenco di 10 000 galassie raggruppate in altrettanti generi è inutile. L'assenza di un limite alla suddivisione degli oggetti celesti in generi implica la non esistenza dei generi naturali minimi, ponendo quindi un serio problema per l'essenzialismo, per il quale i generi naturali minimi sono il fondamento di ogni corretta classificazione. Quindi, se si richiede che la classificazione sia completa, non solo ogni entità definirà un proprio specifico genere, ma non esisteranno neanche i generi naturali minimi; se si vuole difendere l'esistenza dei generi naturali minimi (o si desidera costruire una classificazione che raggruppi molte entità in pochi tipi), allora si deve abbandonare la richiesta della completezza della classificazione. L'astronomia percorre la seconda strada: trascura alcune differenze per raggruppare molte entità in pochi tipi, adottando una classificazione incompleta.

La *quinta condizione* è soddisfatta dalla classificazione delle galassie, che adotta una struttura gerarchica. Come osserva Ellis, la quinta condizione è «banalmente soddisfatta se uno dei due generi è una specie dell'altro. Questa è una caratteristica delle strutture gerarchiche in genere»¹⁷.

15 W. W. MORGAN, *A morphological life*, in "Annual Review of Astronomy and Astrophysics", 26 (1988), 1-9, 8.

16 Ho analizzato questa proprietà delle classificazioni impiegate dall'astronomia, nel caso della classificazione dei pianeti, in M. MURZI, *A defence of pluralism in the debate about natural kinds: case study from the classification of celestial objects*, in "Forum Philosophicum", 12 (2007), 359-377. L'assenza di un limite naturale alle possibili distinzioni tra i pianeti è un problema per il monismo, in quanto implica che i generi naturali minimi, previsti dal monismo, non esistono. La classificazione dei pianeti più completa possibile è quella in cui ogni pianeta forma un genere separato. Gli otto pianeti (ricordo che, in base all'attuale definizione, Plutone non è un pianeta) possono essere suddivisi in due distinti gruppi: i pianeti rocciosi (Mercurio, Venere, Terra e Marte) e i pianeti gassosi (Giove, Saturno, Urano e Nettuno). I quattro pianeti rocciosi possono essere ulteriormente suddivisi in diversi modi per formare generi differenti, usando le proprietà fisiche riportate nella tavola 1. Se si usa la densità come parametro di classificazione, si possono dividere i pianeti rocciosi in due gruppi, uno che include i primi tre pianeti, l'altro che include solo Marte. Se si usa la gravità, si possono formare due gruppi, uno con la Terra e Venere, l'altro con Mercurio e Marte. Se si usa l'inclinazione, la Terra e Marte formano un gruppo diverso da quello di Mercurio e Venere. Se si usa il periodo di rotazione, la Terra e Marte appartengono allo stesso gruppo, mentre la sorte di Mercurio e Venere è incerta (il loro periodo di rotazione è sufficientemente diverso da giustificare la classificazione in due gruppi distinti? Oppure, poiché l'ordine di grandezza è simile, si possono classificare nel medesimo gruppo?) Quindi, esistono modi diversi per suddividere i pianeti rocciosi in generi diversi. La completezza della classificazione, richiesta dall'essenzialismo, è ottenibile solo se ogni pianeta forma un genere a sé, il che preclude l'esistenza dei generi naturali minimi.

Tavola 1, da L. SOSIO (a cura di), *Enciclopedia di astronomia e cosmologia*, Garzanti, 1998, 378.

Pianeta	Densità	Gravità	Inclinazione	Periodo di rotazione
Mercurio	5,4	0,4	0	59
Venere	5,2	0,9	2	243
Terra	5,5	1,0	23	1
Marte	3,9	0,4	24	1

17 B. ELLIS, *Scientific essentialism*, cit., 20.

La *sesta condizione* richiede che i generi naturali siano identificati mediante le proprietà essenziali, «indipendenti dalle storie, dai luoghi in cui si trovano e da ciò che le circonda»¹⁸. La conoscenza astronomica attuale mostra che le proprietà scientificamente rilevanti delle galassie dipendono dalla storia della galassia, dal luogo in cui si trova e da ciò che la circonda. Per fare un solo esempio, la composizione chimica delle galassie dipende dagli elementi chimici presenti nel mezzo interstellare, che si è arricchito con gli elementi chimici rilasciati nello spazio circostante dalle stelle delle precedenti generazioni. Dunque, contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, la classificazione delle galassie si basa su proprietà dipendenti dalla storia delle galassie, dal luogo in cui si trova e da ciò che la circonda.

4. Come riconoscere una buona classificazione

L'analisi filosofica della classificazione delle galassie suggerisce che il realismo promiscuo è nel giusto, ossia che «ci sono innumerevoli modi legittimi, oggettivamente fondati, per classificare gli oggetti nel mondo»¹⁹ e, se è vero che «esiste qualcosa che legittima una buona classificazione»²⁰, è anche vero che si deve riconoscere «un ruolo ineliminabile al classificatore umano nel selezionare un particolare schema di classificazione»²¹ in vista dello «scopo per il quale la classificazione è costruita»²². L'analisi filosofica degli schemi di classificazione delle galassie suggerisce anche la formulazione di alcuni criteri che, pur non essendo necessari né sufficienti, aiutano a riconoscere una buona classificazione. Il *primo criterio* è che la classificazione dipende dagli strumenti, dalle tecniche e dai metodi di osservazione, per ragioni fisiche fondamentali. Nel nostro caso di studio riguardante la classificazione delle galassie, la dipendenza dagli strumenti di osservazione è causata dal meccanismo dell'emissione della luce. La classificazione convenzionale delle costellazioni è invece indipendente dagli strumenti di osservazione e dalle tecniche di misura impiegate, perché non ha legami con le proprietà fisiche delle stelle. Quindi, formulando il criterio in negativo, il fatto che una classificazione sia indipendente dagli strumenti, dalle tecniche e dai metodi di osservazione sembra indicare la presenza di elementi convenzionali, indipendenti dalla struttura fisica delle entità da classificare. Il *secondo criterio* è che esiste un trapasso graduale di un genere in un altro. Ruphy²³ spiega molto bene il perché di questa situazione: la scienza contemporanea usa parametri quantitativi rappresentati da grandezze fisiche continue; non può quindi esistere una netta linea di demarcazione tra generi diversi. L'assenza di un trapasso graduale sembra indicare la presenza di convenzioni, che tracciano i confini esattamente ma arbitrariamente. Il *terzo criterio* afferma che le proprietà usate per classificare le entità sono relazionali, ossia l'appartenenza di un'entità a un genere naturale dipende dalle sue relazioni con altre entità. Oltre a quanto detto a proposito della classificazione delle galassie, voglio portare l'esempio della definizione di "pianeta", più sintetico e chiaro. Un "pianeta" è un corpo celeste che (a) è in orbita intorno al Sole, (b) ha una massa sufficiente affinché la propria gravità vinca le forze di corpo rigido, cosicché assume una forma (approssimativamente sferica) di equilibrio idrostatico, e (c) ha eliminato gli altri corpi nelle vicinanze della propria orbita. Il carattere relazionale della definizione è evidente nella clausola (c) che fa riferimento all'assenza di altri corpi nelle vicinanze dell'orbita. La classificazione convenzionale delle costellazioni, al contrario, non dipende da proprietà relative: i rapporti reciproci tra le stelle sono irrilevanti. Il *quarto criterio* è l'incompletezza della classificazione. Per evitare che ogni entità produca un genere a sé, si devono trascurare alcune proprietà scientificamente rilevanti. Si possono così raggruppare molte entità in pochi generi. Poiché le proprietà da trascurare sono scientificamente rilevanti, queste proprietà sono trascurate in alcuni contesti, ma non in altri contesti nei quali hanno un ruolo significativo. Le classificazioni convenzionali sono ancora più incomplete: la classificazione delle costellazioni trascura tutte le proprietà scientificamente rilevanti. Il *quinto criterio* afferma che due generi naturali diversi possono avere elementi comuni. Non abbiamo incontrato quest'evenienza nella classificazione delle galassie. Tuttavia, casi di questo genere sono presenti nella classificazione degli oggetti del sistema solare. Il più noto è il caso di Chiron, classificato come

18 *ivi*, 26.

19 J. DUPRÉ, *The disorder of things*, cit., 18.

20 J. DUPRÉ, *Humans and others animals*, cit., 54.

21 *ibid.*

22 *ibid.*

23 S. RUPHY, *Are stellar kinds natural kinds?*, cit.

asteroide e come cometa. Chiron appartiene a due generi che, prima della sua scoperta, non avevano elementi comuni. La doppia classificazione di Chiron ha suggerito l'esistenza di una connessione tra gli asteroidi e le comete. Una doppia classificazione è stata anche proposta – ma non accettata – per Plutone: «Come per Chiron [...], dove la scelta tra la designazione di “pianeta minore” o “cometa” dipende dal contesto, noi proponiamo che Plutone abbia un doppio status come corpo “maggiore” e “minore”»²⁴. Non esistono casi di doppia classificazione nelle costellazioni: le classificazioni convenzionali tendono a evitare i casi di classificazione doppia o incerta, mentre le classificazioni naturali si scontrano con queste situazioni. Il *sesto criterio* afferma che la classificazione dipende dalla storia degli elementi da classificare, dai luoghi in cui si trovano e da ciò che li circonda. La classificazione di un qualsiasi corpo celeste dipende dalla sua storia (è una stella appena nata? è nel pieno della maturità? è una gigante rossa alla fine della propria storia evolutiva?), dal luogo in cui si trova (luogo che determina non solo la distanza spaziale, ma anche la distanza temporale) e da ciò che lo circonda (un pianeta è tale se non ci sono corpi vicini alla propria orbita, una stella è doppia perché orbita insieme a una compagna). Nel caso delle costellazioni, la loro classificazione convenzionale è indipendente dalla storia delle stelle che le compongono, dal luogo in cui si trovano (si ricordi che le stelle appaiono vicine solo per un effetto di prospettiva) e da ciò che le circonda.

I criteri che ho formulato si applicano alle classificazioni usate nell'astronomia contemporanea. Il programma di ricerca che vorrei sviluppare è verificare se questi criteri si applicano anche alle altre scienze naturali, quali la fisica, la biologia, la biofisica e la chimica, lavorando sulle classificazioni usate nella reale pratica scientifica.

5. Glossario

corpo nero Oggetto che assorbe tutta l'energia che riceve, senza rifletterne neanche la minima parte (da cui il nome). Il corpo nero è un emettitore ideale, poiché emette tutta l'energia ricevuta sotto forma di radiazione elettromagnetica, in modo indipendente dalla forma e dalla materia di cui è fatto. L'intensità della radiazione emessa varia al variare della lunghezza d'onda, seguendo una legge ben precisa, in cui il solo parametro rilevante è la temperatura.

costellazione Raggruppamento convenzionale di stelle che appaiono vicine per un effetto di prospettiva. I confini delle moderne costellazioni sono stati fissati da una commissione dell'Unione Astronomica Internazionale. Il compito principale fu affidato all'astronomo belga Eugène Joseph Delporte che presentò la relazione conclusiva al congresso del 1928. La relazione fu pubblicata nel 1930 con il titolo *Délimitation scientifique des constellations*.

Hubble, Edwin Powell (1889-1953) Astronomo statunitense, ha dimostrato che le galassie sono esterne alla Galassia e che la loro velocità di recessione aumenta proporzionalmente con la distanza dalla Terra (legge di Hubble). Ha ideato il più noto sistema di classificazione delle galassie.

indice di colore Le differenze $M_U - M_B$ e $M_B - M_V$ ove M_U , M_B e M_V sono rispettivamente la magnitudine ultravioletta, blu e visuale (\rightarrow luminosità), si chiamano indice di colore. L'indice di colore, la luminosità e il tipo spettrale di una stella sono tra loro correlati.

luminosità Misura la quantità di luce emessa da una stella (luminosità assoluta) o ricevuta dall'osservatore (luminosità apparente). Per ragioni storiche, derivanti dall'astronomia greca ed ellenistica, si utilizza una scala particolare, la cui unità di misura si chiama magnitudine. Le stelle di prima magnitudine sono quelle che appaiono più luminose; quelle di sesta magnitudine sono le ultime visibili senza l'ausilio di strumenti ottici quali il binocolo e il telescopio. Se la misura della luminosità si riferisce a tutta la radiazione elettromagnetica, si utilizzano le espressioni luminosità (o magnitudine) bolometrica assoluta (ossia, la quantità totale di radiazione elettromagnetica emessa dalla stella) e luminosità (o magnitudine) bolometrica apparente (ossia, la quantità totale di radiazione elettromagnetica ricevuta). La misura della luminosità può essere limitata a una zona specifica dello spettro elettromagnetico, quale la luce blu, quella gialla o l'ultravioletto; si parla rispettivamente di magnitudine blu (simbolo M_B), visuale (simbolo M_V) e ultravioletta (simbolo M_U).

Morgan, William Wilson (1906-1994) Astronomo statunitense, si è dedicato alla spettroscopia delle stelle

24 B. MARDSEN, *Editorial notice. Minor planet electronic circular 1999-C03*,
< cfa-www.harvard.edu/iau/mpec/J99/J99C03.html > .

e delle galassie. Ha ideato il sistema di classificazione che porta il suo nome. Questo sistema è noto anche come sistema Yerkes, perché Morgan lavorava presso l'osservatorio di Yerkes, Wisconsin.

spettro La luce proveniente dalle stelle può essere scomposta nelle frequenze che la compongono tramite lo spettroscopio. L'immagine risultante presenta, su un continuo di diversi colori, alcune linee scure, chiamate linee di assorbimento. La posizione di queste linee dipende dalla composizione chimica della stella, che può così essere determinata. Lo spettro integrato della galassia è dovuto alla sovrapposizione della luce delle singole stelle. Semplificando molto, si può dire che lo spettro integrato di una galassia è la composizione degli spettri delle singole stelle.

temperatura Si misura in gradi Kelvin (simbolo K); zero gradi Kelvin corrispondono a - 273,15 gradi ordinari (gradi Celsius, simbolo C). La differenza di temperatura di un grado Kelvin corrisponde a quella di un grado Celsius; quindi, se TC è la temperatura in gradi Celsius e TK quella in gradi Kelvin, allora $TK = TC + 273,15$. Per la temperatura delle stelle, che è molto elevata e conosciuta con incertezza, la scala Kelvin coincide in pratica con quella Celsius. La temperatura superficiale di una stella è quella del suo strato esterno; l'ordine di grandezza è alcune migliaia di gradi. La temperatura interna è quella del suo nucleo e raggiunge i milioni di gradi. La temperatura superficiale del Sole è circa 6000 gradi, quella interna circa 16 milioni di gradi.

tipo spettrale Le stelle sono classificate in base alle caratteristiche osservabili dello spettro (\rightarrow). La moderna classificazione distingue i tipi spettrali identificati con le lettere O, B, A, F, G, K, M, L, T, S e C. Il tipo spettrale dipende dalla temperatura superficiale della stella. Ad esempio, le stelle di tipo spettrale O hanno una temperatura superficiale di 30 000 - 60 000 gradi; quelle di tipo spettrale B hanno una temperatura superficiale di 10 000 - 30 000 gradi; quelle di tipo spettrale M hanno una temperatura superficiale minore di 3500 gradi. Le galassie possono essere classificate in tipi spettrali osservando lo spettro integrato. Il tipo spettrale della galassia è indicato con la lettera minuscola corrispondente al tipo spettrale prevalente delle sue stelle. Ad esempio, in una galassia di tipo spettrale *f* prevalgono le stelle di tipo spettrale F.

van den Bergh, Sidney (1929-) Astronomo canadese di origine olandese, si è occupato di astronomia extragalattica. Ha ideato il sistema di classificazione delle galassie che porta il suo nome. Questo sistema è noto anche come sistema DDO, perché van den Bergh lavorava presso il David Dunlop Observatory dell'università di Toronto.

Vaucouleurs, Gérard de (1918-1995) Astronomo francese, si è dedicato allo studio delle galassie. È autore di un sistema di classificazione delle galassie che porta il suo nome.

6. Immagini

La figura 1 è adattata da D. HUBBLE, *The realm of the nebulae*, New Haven, Yale University Press, 1936. Le foto delle galassie nelle figure 2, 3 e 5 provengono dal *NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)*, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, <nedwww.ipac.caltech.edu>. La figura 4 è adattata da G. DE VAUCOULEURS, *Classification and morphology of external galaxies*, in "Handbuch der Physik", 53 (1959), 275-310. La figura 6 è adattata da L. E. KUCHINSKI et al., *Comparing galaxy morphology at ultraviolet and optical wavelengths*, in "The Astrophysical Journal Supplement", 131 (2000), 441-463. La figura 7 è adattata da R. G. ABRAHAM et al., *The morphologies of distant galaxies. II. Classifications from the Hubble space telescope medium deep survey*, in "Astrophysical Journal Supplement", 107 (1996), 1-17. La classificazione delle galassie è di A. SANDAGE e G. TAMMANN, *A revised Shapley-Ames catalogue*, Washington, Carnegie Institution, 1981. La sigla NGC è l'acronimo di *New General Catalogue*, il più noto catalogo di oggetti celesti, pubblicato nel 1888, ristampato in occasione del centenario: R. W. SINNOTT (a cura di), *NGC 2000.0, The complete New General Catalogue and Index Catalogue of nebulae and star clusters* by J. L. E. Dreyer, Sky Publishing Corporation, 1988.

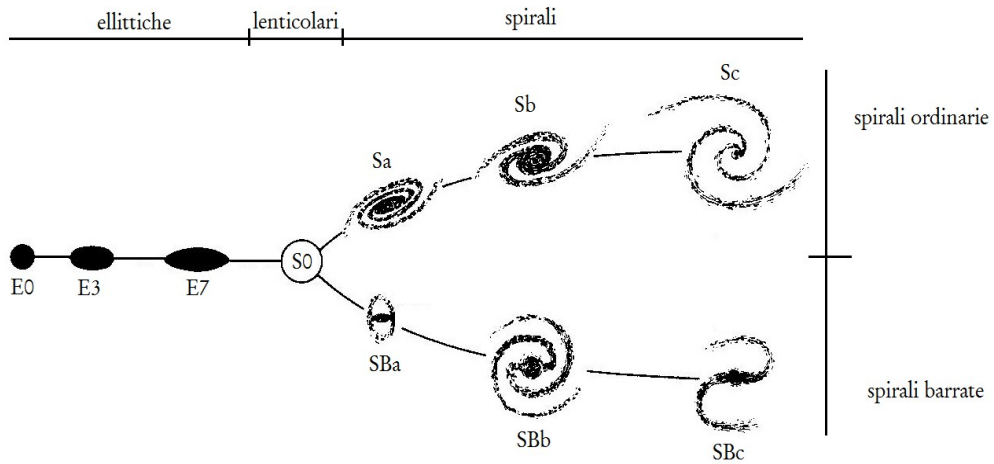


Figura 1: il sistema di classificazione di Hubble

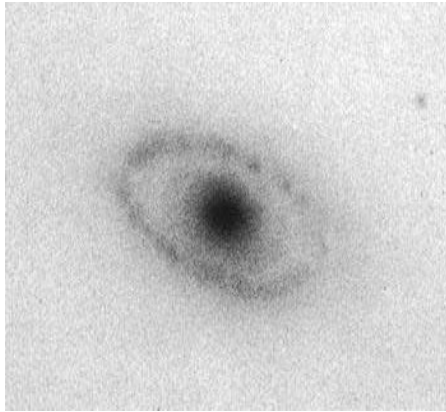


Figura 2: la struttura ad anello visibile nella galassia NGC 4324

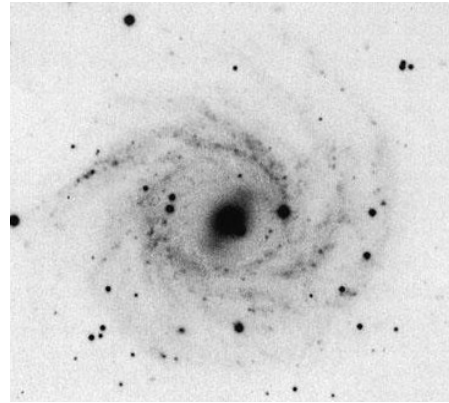


Figura 3: la galassia NGC 2223, classificata Sbc(r)

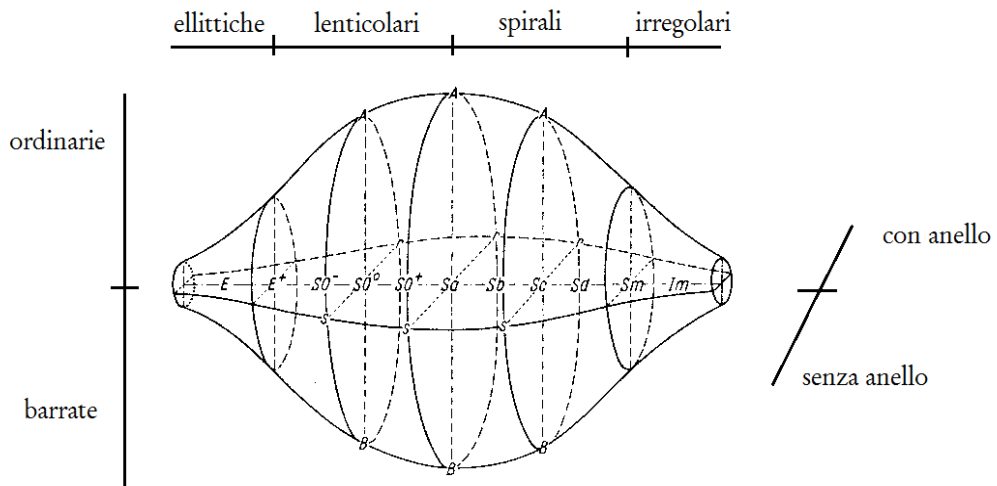


Figura 4: il sistema di classificazione di de Vaucouleurs

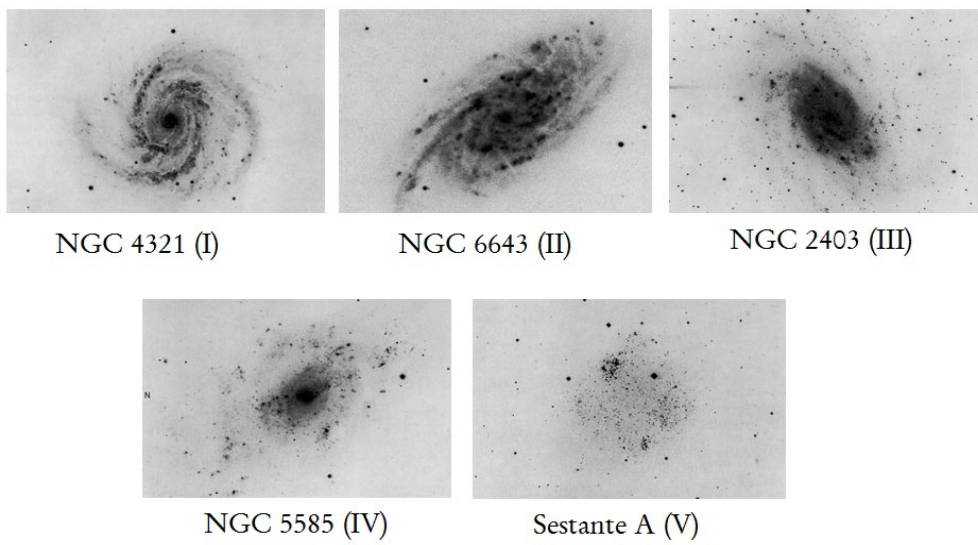


Figura 5: variazioni dei bracci nelle cinque classi di van den Bergh

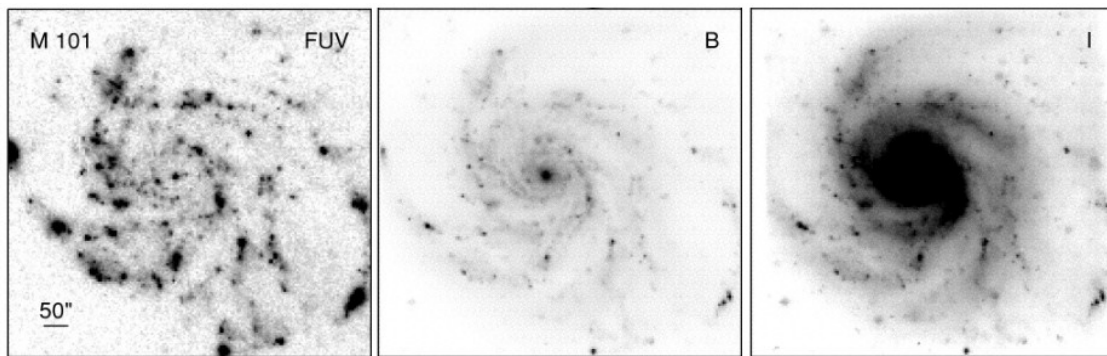


Figura 6: la galassia M 101 osservata nell'ultravioletto (FUV), in luce blu (B) e nell'infrarosso (I)

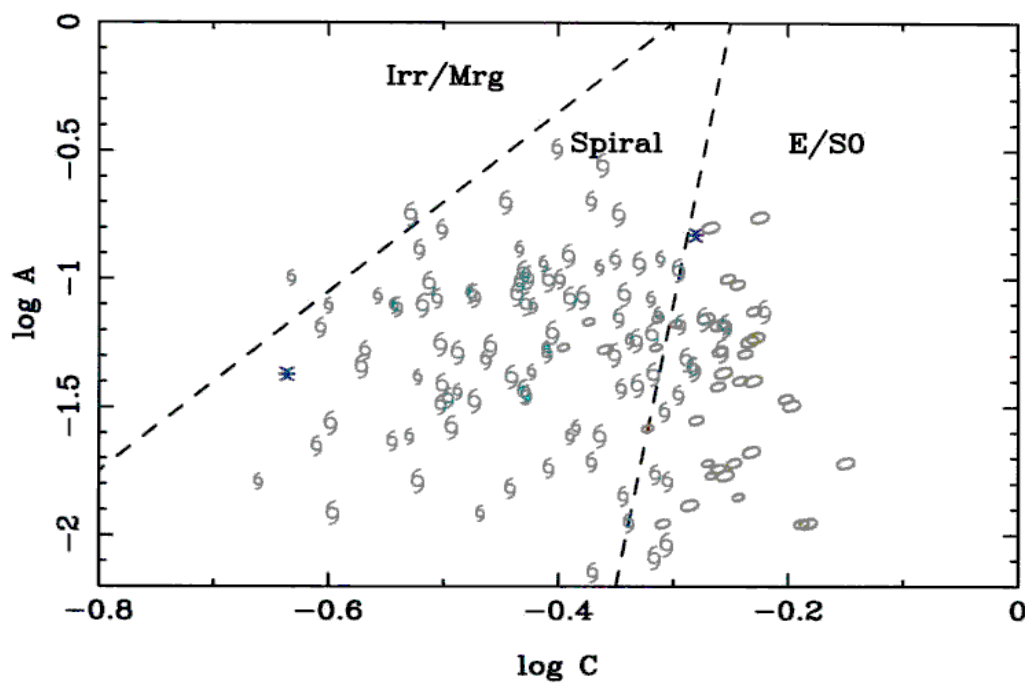


Figura 7: l'assenza di un confine netto tra galassie spirali ed ellittiche

7. Bibliografia

- R. G. ABRAHAM et al., *The morphologies of distant galaxies. I. An automated classification system*, in "The Astrophysical Journal", 432 (1994), 75-90.
- R. G. ABRAHAM et al., *The morphologies of distant galaxies. II. Classifications from the Hubble space telescope medium deep survey*, in "Astrophysical Journal Supplement", 107 (1996), 1-17.
- A. BIRD e E. TOBIN, *Natural kinds*, in E. N. ZALTA (a cura di), "The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2009 Edition)", <plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/natural-kinds/>.
- E. DELPORTE, *Délimitation scientifique des constellations*, Cambridge, Cambridge University Press, 1930.
- J. DUPRÉ, *The disorder of things: metaphysical foundations of the disunity of science*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1993.
- J. DUPRÉ, *Humans and others animals*, Oxford, Clarendon Press, 2002.
- B. ELLIS, *Scientific essentialism*, Cambridge, Cambridge University Press, 2001.
- I. HACKING, *A tradition of natural kinds*, in "Philosophical Studies", 61 (1991), 109-126.
- D. HUBBLE, *The realm of the nebulae*, New Haven, Yale University Press, 1936.
- S. KRIPKE, *Identity and necessity*, in M. K. MUNITZ (a cura di) *Identity and individuation*, New York, New York University Press, 1971, 135-164, trad. it. *Identità e necessità*, in A. BONOMI (a cura di), *La struttura logica del linguaggio*, Milano, Bompiani, 2001, 259-294.
- S. KRIPKE, *Naming and necessity*, in D. DAVIDSON e G. HARMAN (a cura di), *Semantics of natural language*, Dordrecht, Reidel, 1972, 253-355, ristampato come S. KRIPKE, *Naming and necessity*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1980, trad. it. *Nome e necessità*, Torino, Boringhieri, 1999.
- L. E. KUCHINSKI et al., *Comparing galaxy morphology at ultraviolet and optical wavelengths*, in "The Astrophysical Journal Supplement", 131 (2000), 441-463.
- J. LAPORTE, *Natural kinds and conceptual change*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
- E. MACHERY, *Concepts are not a natural kind*, in "Philosophy of Science", 72 (2005), 444-467.
- B. MARDSEN, *Editorial notice. Minor planet electronic circular 1999-C03*, <cfa-www.harvard.edu/iau/mpec/J99/J99C03.html>.
- W. MORGAN, *A morphological life*, in "Annual Review of Astronomy and Astrophysics", 26 (1988), 1-9.
- M. MURZI, *A defence of pluralism in the debate about natural kinds: case study from the classification of celestial objects*, in "Forum Philosophicum", 12 (2007), 359-377.
- M. MURZI, *Changes in a scientific concept: what is a planet?* in "PhilSci Archive", 2007, <philsci-archive.pitt.edu/archive/00003418/>.
- H. PUTNAM, *The meaning of 'Meaning'*, in K. GUNDERSON (a cura di), *Language, mind and knowledge. Minnesota studies in the philosophy of science vol. 7*, Minneapolis, University of Minnesota Press, 1975, 131-193, ristampato in H. PUTNAM, *Mind, language and reality*, Cambridge, Cambridge University Press, 215-271, trad. it. *Mente, linguaggio e realtà*, Milano, Adelphi, 2004.
- S. RUPHY, *Are stellar kinds natural kinds? A challenging newcomer in the monism/pluralism and realism/antirealism debates*, presentato al 21° congresso della Philosophy of Science Association, Pittsburgh, 2008 (in corso di stampa).
- A. SANDAGE, *The classification of galaxies: early history and ongoing developments*, in "Annual Review of Astronomy and Astrophysics", 43 (2005), 581-624.
- A. SANDAGE, M. SANDAGE e J. KRISTIAN (a cura di), *Galaxies and the universe*, Chicago, Chicago University Press, 1975.
- A. SANDAGE e G. TAMMANN, *A revised Shapley-Ames catalogue*, Washington, Carnegie Institution, 1981.
- R. W. SINNOTT (a cura di), *NGC 2000.0, The complete New General Catalogue and Index Catalogue of nebulae and star clusters by J. L. E. Dreyer*, Sky Publishing Corporation, 1988.
- M. H. SLATER, *Monism on the one hand, pluralism on the other*, in "Philosophy of Science", 72 (2005), 22-42.
- L. SOSIO (a cura di), *Enciclopedia di astronomia e cosmologia*, Garzanti, 1998.
- G. DE VAUCOULEURS, *Classification and morphology of external galaxies*, in "Handbuch der Physik", 53 (1959), 275-310.
- G. DE VAUCOULEURS et al., *Third reference catalogue of bright galaxies*, Berlino, Springer, 1991.
- S. VAN DEN BERGH, *Galaxy morphology and classification*, Cambridge, Cambridge University Press, 1998.