DURANTE LA PRIMA MISSIONE PER LA MANUTENZIONE DI HUBBLE, nel dicembre 1993, gli astronauti Story Musgrave (*sul braccio*), Jeffrey Hoffman (*nel boccaporto*) e i loro compagni di equipaggio ripararono il famigerato difetto nello specchio del telescopio, aprendo la via a una straordinaria successione di scoperte.

NASA

di Mario Livio

La top 10 di Hubble

In attesa che il telescopio spaziale sia sottoposto all'ultima revisione, ecco i risultati più avvincenti dei suoi 16 anni di carriera

Pochi telescopi hanno avuto un effetto così profondo sulla ricerca astronomica quanto lo Hubble Space Telescope. Tuttavia, la sua influenza si è esercitata in maniera diversa da quanto molti immaginano. Di per sé, non ha compiuto scoperte particolari, né ha il merito di alcun successo in esclusiva. Piuttosto, Hubble è partito da semplici indizi e ipotesi derivanti dalle osservazioni a terra e li ha tramutati in quasi certezze. Ha lavorato di concerto con altri osservatori per darci una visione del cosmo ricca di sfumature. Ha costretto i teorici a rivedere teorie troppo schematiche e a costruirne di nuove che spiegano i fenomeni astronomici in maniera molto più dettagliata. In poche parole, Hubble ha esercitato un'influenza enorme non distinguendosi dagli altri strumenti e tecniche, ma soprattutto integrandosi profondamente con essi.

Lo scorso aprile, il telescopio ha festeggiato il suo sedicesimo anniversario nello spazio. I suoi risultati, sia nel dare agli astronomi osservazioni con dettagli senza precedenti, sia nell'offrire al pubblico di tutto il mondo la possibilità di gettare uno sguardo sulle meraviglie dell'universo, di recente sono passati in secondo piano a causa del dibattito sul futuro del telescopio. La NASA stenta a riprendere la cadenza regolare dei voli dello space shuttle, e Hubble continua a deteriorarsi; se un gruppo di astronauti non riesce a raggiungerlo e a compiere la necessaria manutenzione, potrebbe giungere alla fine della sua vita operativa già a metà del 2008. L'imminenza di questo momento critico mi ha spinto a riconsiderare gli ultimi 15 anni di Hubble e dell'astronomia: un periodo che molti ricercatori considerano un'età dell'oro.

Presento qui la mia scelta (per nulla imparziale) dei dieci risultati più avvincenti di Hubble, dalle sue osservazioni di oggetti relativamente piccoli come i pianeti, fino alle galassie e all'universo nel suo insieme. È molto difficile rendere giustizia in un solo articolo a tutti i contributi del telescopio spaziale. Al momento in cui scrivo, il suo archivio contiene oltre 27 terabyte di dati e continua a crescere alla velocità di 390 gigabyte al mese, dati che hanno costituito la base per 6300 articoli scientifici.

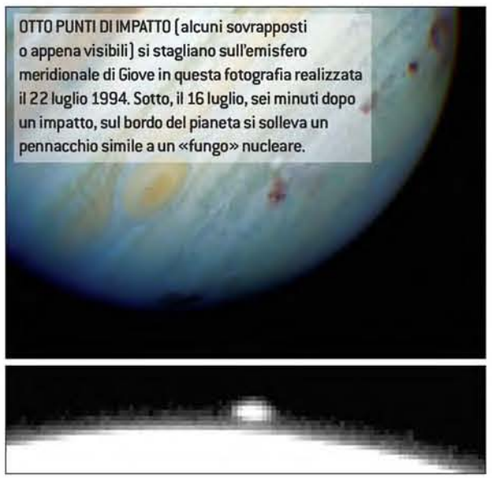
Hubble continua a fornire risultati di grande valore. In collaborazione con altri osservatori, lo scorso anno ha scoperto due nuovi satelliti di Plutone, una galassia inaspettatamente (e paradossalmente) massiccia nelle prime fasi dell'universo e una compagna di massa planetaria di una nana bruna, una stella di per sé non molto più grande di un pianeta. Dobbiamo quindi considerarci fortunati di vivere in un'era in cui abbiamo potuto vedere per la prima volta aspetti dell'universo che, finora, gli esseri umani avevano potuto esplorare solo con la fantasia.

1 Il grande impatto della cometa

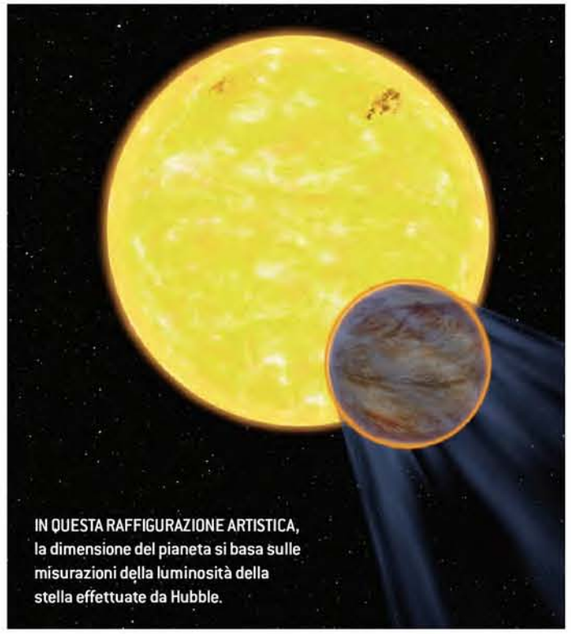
In una prospettiva cosmica, la collisione della cometa Shoemaker-Levy 9 con Giove è stata un evento irrilevante: le superfici cosparse di crateri dei pianeti e dei satelliti rocciosi testimoniano in maniera eloquente che nel sistema solare questo «tiro a segno» è praticato con notevole frequenza. Dal punto di vista umano, tuttavia, l'impatto è stato un evento che accade una volta nella vita: si ritiene che una cometa precipiti su un pianeta in media una volta ogni mille anni.

Un anno prima della catastrofe, le immagini di Hubble rivelarono che la Shoemaker-Levy 9 si era spezzata in una ventina di frammenti: il cosiddetto «filo di perle». Il primo frammento entrò in collisione con l'atmosfera di Giove il 16 luglio 1994, seguito dagli altri nel corso della settimana successiva. Le immagini mostrarono pennacchi simili ai «funghi» delle esplosioni nucleari sollevarsi sull'orizzonte di Giove, per poi ricadere e allargarsi nel giro di dieci minuti. Le cicatrici degli impatti restarono visibili per mesi.

La rarità delle immagini le rende di per sé preziose, ma esse hanno anche sollevato un interrogativo di grande interesse sulla composizione del gigante gassoso. In un sito di impatto, sono state osservate onde che si propagavano verso l'esterno alla velocità di 450 metri al secondo. La teoria più accreditata è che siano onde di gravità, nelle quali la forza che ripristina l'equilibrio iniziale è la spinta idrostatica, come quando si cerca di far affondare nell'acqua un pezzetto di legno che invece torna a galleggiare. Se questa interpretazione è corretta, le proprietà delle onde indicano che il rapporto ossigeno/idrogeno nelle nubi acquose dove si sono propagate le onde è dieci volte più elevato che nel Sole. Tuttavia, se Giove si è formato dal collasso gravitazionale di un disco primordiale di gas e polvere, come sostengono alcune teorie, dovrebbe avere la stessa composizione del disco: simile, quindi, a quella solare. La discrepanza è tuttora irrisolta.



OTTO PUNTI DI IMPATTO (alcuni sovrapposti o appena visibili) si stagliano sull'emisfero meridionale di Giove in questa fotografia realizzata il 22 luglio 1994. Sotto, il 16 luglio, sei minuti dopo un impatto, sul bordo del pianeta si solleva un pennacchio simile a un «fungo» nucleare.



IN QUESTA RAFFIGURAZIONE ARTISTICA, la dimensione del pianeta si basa sulle misurazioni della luminosità della stella effettuate da Hubble.

2 Pianeti extrasolari

Nel 2001 l'American Astronomical Society chiese ai planetologi di votare quale fosse stata, a loro parere, la scoperta più importante del decennio precedente. Al primo posto si piazzò la scoperta di pianeti all'esterno del sistema solare. Oggi si conoscono circa 180 di questi corpi; la maggior parte di essi è stata scoperta con telescopi terrestri, osservando le lievi oscillazioni che l'attrazione gravitazionale di un pianeta introduce nel moto della sua stella. Tuttavia queste osservazioni forniscono elementi davvero miseri: solo la grandezza e l'ellitticità dell'orbita planetaria, e un limite inferiore per la massa.

Hubble ha proseguito le osservazioni concentrandosi sui pianeti il cui piano dell'orbita è allineato con la nostra visuale, cosicché essi passano periodicamente davanti alla loro stella e ne affievoliscono la luce: un simile evento è denominato transito. Le osservazioni di Hubble del primo di questi pianeti a essere scoperto, il compagno della stella HD 209458, hanno fornito le informazioni più dettagliate finora disponibili sui pianeti esterni al sistema solare. Il pianeta ha una massa inferiore del 30 per cento rispetto a Giove, ma il suo diametro è maggiore del 30 per cento, probabilmente a causa dell'espansione del gas prodotta dall'intensissima radiazione termica della stella compagna. I dati di Hubble sono così precisi che potrebbero rivelare l'eventuale presenza di ampi anelli e satelliti massicci, anche se questo specifico pianeta non ne ha. Un risultato particolarmente significativo è la prima misurazione della composizione di un corpo che orbita intorno a un'altra stella. La sua atmosfera contiene sodio, carbonio e ossigeno, e l'idrogeno sta evaporando nello spazio, tanto da formare una coda simile a quella di una cometa. Simili osservazioni aprono la possibilità di cercare tracce chimiche dell'esistenza di vita in altri luoghi della galassia.

Don Dixon (*illustrazione in alto*); NASA e Hubble Space Telescope Comet Team (*Giove sopra*); NASA e STScI (*Giove sotto*)

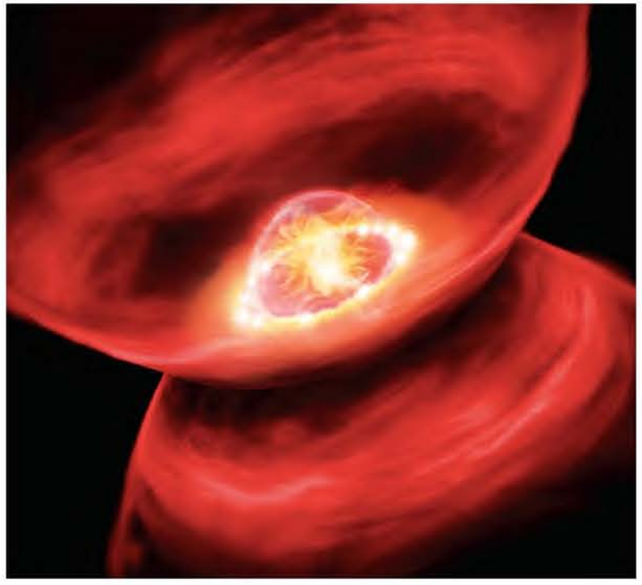
3 Agonia di una stella

Secondo la teoria, una stella di massa compresa tra 8 e 25 masse solari termina la propria esistenza con un'esplosione di supernova. Quando la stella esaurisce il combustibile utilizzabile per la fusione nucleare, viene improvvisamente meno un fattore cruciale che le permette di sostenere la propria massa. Il nucleo collassa e forma una stella di neutroni – residuo inerte e superdenso – e gli strati gassosi esterni sono espulsi a una velocità pari al cinque per cento di quella della luce.

Non è stato facile, però, mettere alla prova questa teoria, perché dal 1680 non esplodono supernove nella nostra galassia. Il 23 febbraio 1987 agli astronomi fu concessa la migliore alternativa possibile: una supernova in una delle galassie satelliti della Via Lattea, la Grande Nube di Magellano. Hubble non era ancora stato lanciato, ma tre anni dopo cominciò a seguire le fasi più tarde dell'evento, scoprendo un sistema di tre anelli intorno alla stella esplosa. Quello centrale sembra rappresentare la parte più stretta di una nube di gas a forma di clessidra, mentre i due più grandi sono i margini di altrettanti lobi a goccia, creati dalla stella alcune decine di migliaia di anni prima dell'esplosione. Nel 1994 Hubble cominciò a individuare chiazze che si illuminavano in sequenza lungo l'anello centrale, dovute al materiale espulso dalla supernova che collideva con l'anello. Le osservazioni proseguono, con l'intento di chiarire le fasi finali di vita della stella.

Al contrario delle stelle più massicce, si ritiene che le stelle di tipo solare abbiano una morte più tranquilla, che consiste nell'espulsione non violenta dei propri strati gassosi esterni, in un processo che richiede circa 10.000 anni. Quando il nucleo centrale della stella rimane allo scoperto, la sua radiazione ionizza il gas espulso, facendo sì che produca radiazione di colore verde brillante (emessa dall'ossigeno ionizzato) e rosso (emessa dall'idrogeno ionizzato). La struttura risultante è chiamata, in maniera fuorviante, nebulosa planetaria. Oggi se ne conoscono circa 2000, e Hubble ha rivelato forme straordinariamente complesse, con dettagli senza precedenti. Alcune nebulose presentano serie di anelli concentrici, che potrebbero indicare un processo di eiezione episodico anziché continuo. Stranamente, l'intervallo temporale calcolato tra gli episodi di espulsione, pari a circa 500 anni, è troppo lungo per essere spiegato dalle pulsazioni dinamiche (nelle quali la stella si contrae e si espande, in un delicato equilibrio tra gravità e pressione del gas) e troppo breve per rappresentare le pulsazioni termiche (in cui la stella esce momentaneamente dalla situazione di equilibrio). La natura degli anelli rimane incerta.

NASA, ESA, STScI e Christopher Burrows (*in basso a sinistra*); Don Dixon (*in alto a sinistra*); NASA, ESA, HEIC e Hubble Heritage Team STScI/AURA (*a destra*)



Raffigurazione artistica

Immagine di Hubble

QUANDO L'ONDA D'URTO prodotta dall'esplosione della supernova 1987A ha colpito un anello di gas preesistente, hanno iniziato ad apparire chiazze luminose.

LA NEBULOSA «OCCHIO DI GATTO» è una delle più complesse nebulose planetarie conosciute. Si ritiene che queste strutture abbiano origine nelle ultime fasi di vita di stelle simili al Sole.

4 Lieto evento nel cosmo

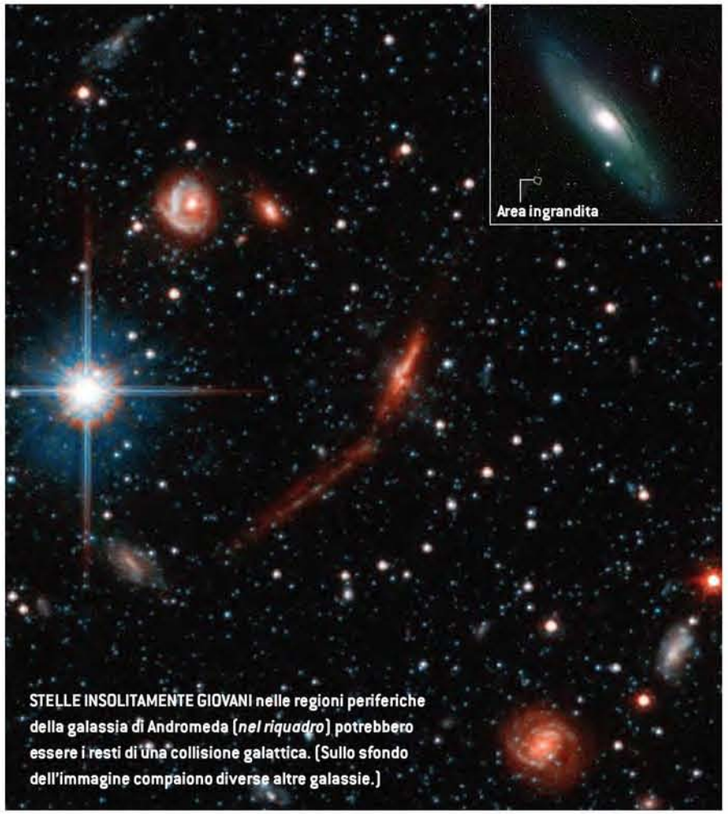
Gli astronomi sanno da tempo che getti di gas lunghi e sottili sono i segnali inequivocabili della nascita di una stella. Un astro in formazione può generare una coppia di getti collimati della lunghezza di parecchi anni luce, benché l'esatto meccanismo di formazione non sia chiaro. L'ipotesi più promettente chiama in causa un campo magnetico a grande scala che pervade il disco di gas e polvere intorno al giovane oggetto. La materia ionizzata, costretta a fluire lungo le linee di forza del campo magnetico, viene proiettata verso l'esterno, come perline su un filo che venga fatto ruotare. Hubble ha dato conferma a questa interpretazione teorica fornendo la prima prova diretta del fatto che questi getti hanno effettivamente origine nel centro del disco.

Un'altra previsione, che questa volta Hubble ha smentito, era che i dischi circumstellari dovessero essere situati in profondità nella nube progenitrice, e quindi fossero impossibili da osservare. In realtà, il telescopio spaziale ha rivelato decine di dischi protoplanetari, che spesso si stagliano in controluce sulle nebulose. Almeno metà delle giovani stelle osservate ha dischi di questo genere, a dimostrazione del fatto che la materia prima per la formazione di pianeti è presente ovunque nella galassia.

DISCHI DI POLVERE SIMILI AD AMEBE deformi e gigantesche circondano embrioni stellari nella Nebulosa di Orione. Il lato di ciascuna immagine è di 2040 unità astronomiche.

L'AUTORE

MARIO LIVIO ha un vasto campo di interessi di ricerca: si occupa di energia oscura, esplosioni di supernova, accrescimento di oggetti compatti e pianeti extrasolari; inoltre, ha una fortunata carriera di divulgatore. Attualmente lavora allo Space Telescope Science Institute di Baltimora.



STELLE INSOLITAMENTE GIOVANI nelle regioni periferiche della galassia di Andromeda (*nel riquadro*) potrebbero essere i resti di una collisione galattica. (Sullo sfondo dell'immagine compaiono diverse altre galassie.)

5 Archeologia galattica

Gli astronomi ritengono che le grandi galassie, come la Via Lattea e la nostra vicina, Andromeda, si accrescano assorbendo galassie più piccole. Testimonianze di questa storia complessa dovrebbero conservarsi nella configurazione, nell'età, nella composizione e nella velocità relativa delle loro stelle. Hubble ha avuto un ruolo fondamentale nel decifrare questa storia. Un esempio è rappresentato dalle sue osservazioni dell'«alone» stellare di Andromeda, la rarefatta nube sferica di stelle e ammassi stellari che circonda il disco galattico principale. Risulta che l'intervallo d'età delle stelle dell'alone è molto ampio: le più antiche hanno 11-13,5 miliardi di anni, mentre le più giovani ne hanno appena 6-8 miliardi, e appaiono fuori posto come bambini in una casa di riposo per anziani. Queste stelle devono provenire da una galassia meno antica (per esempio una galassia satellite che è stata assorbita) oppure da una regione di origine più recente nell'interno di Andromeda stessa (vale a dire il disco, se è stato perturbato dal passaggio o dall'impatto di un'altra galassia). L'alone della Via Lattea non contiene un numero significativo di stelle relativamente giovani. Perciò, anche se Andromeda e la Via Lattea hanno una forma analoga, le immagini di Hubble fanno pensare che la loro storia sia stata notevolmente diversa.

NASA, ESA e T. M. Brown STScI (*in alto*); Bill Schoening, Vanessa Harvey/REU program/NOAO/AURA/NSF (*inserto*); NASA, J. Bally, Università del Colorado, H. Throop, Southwest Research Institute e C.R. O'Dell, Vanderbilt University (*in basso*)

UN GETTO DI PLASMA, che si ritiene generato dalla caduta di materia in un buco nero di 3 miliardi di masse solari, si propaga dalla galassia M87.

6 Una profusione di buchi neri supermassicci

Fin dagli anni sessanta gli astronomi ritengono che i quasar e gli altri nuclei galattici attivi siano alimentati da buchi neri giganti che inghiottono quantità enormi di materia. Le osservazioni di Hubble hanno dato conferma a questo scenario generale. Quasi tutte le galassie che il telescopio ha scrutato in dettaglio hanno rivelato la presenza di un buco nero nel centro. Due scoperte appaiono particolarmente significative. In primo luogo, le immagini ad alta risoluzione dei quasar rivelano che si trovano in galassie ellittiche brillanti o in galassie interagenti, e ciò fa pensare che sia necessaria una determinata sequenza di eventi per alimentare il buco nero centrale. In secondo luogo, la massa di un buco nero gigante è strettamente correlata con quella del rigonfiamento sferico costituito da stelle che circonda il centro galattico. Questa correlazione porta a ipotizzare che la formazione e l'evoluzione di una galassia e del suo buco nero siano profondamente connesse.

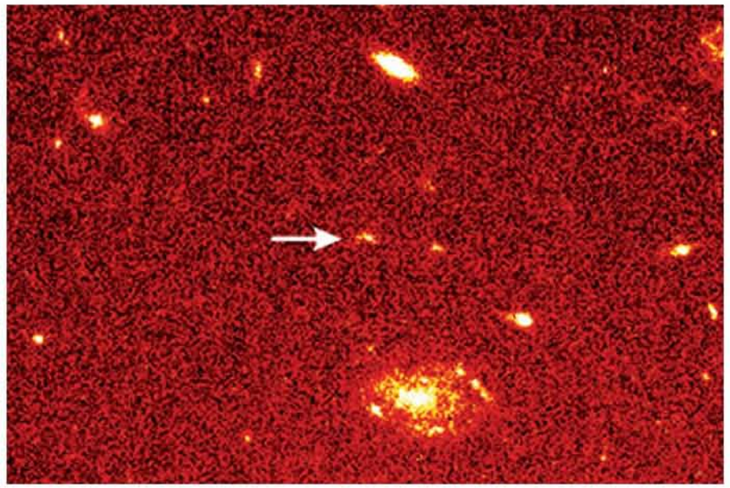
NASA e Hubble Heritage Team STScI/AURA (*in alto*); NASA, S.R. Kulkarni e S.G. Djorgovski, California Institute of Technology e Caltech GRB Team (*in basso*)

7 Le esplosioni più potenti

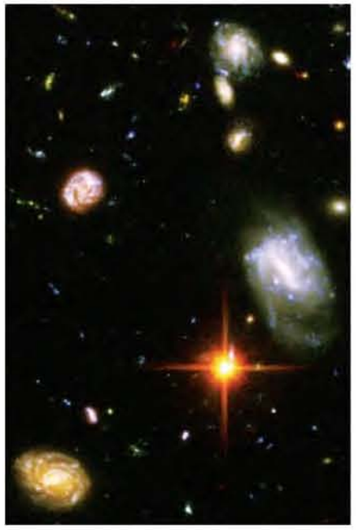
I lampi di raggi gamma (GRB, da *gamma-ray burst*) sono brevi impulsi di radiazione che durano da pochi millisecondi ad alcune decine di minuti. Vengono suddivisi in due classi distinte, a seconda che abbiano durata inferiore o superiore a circa due secondi; i più lunghi producono fotoni di minore energia rispetto a quelli brevi. Le osservazioni effettuate dal Compton Gamma Ray Observatory, dal satellite italiano per raggi X BeppoSAX e da strumenti terrestri hanno associato gli impulsi di lunga durata al collasso del nucleo di stelle massicce a breve vita: in altri termini, a un tipo di supernova. Il quesito è perché solo una piccola frazione di supernove produca lampi gamma.

Hubble ha scoperto che, mentre le supernove si manifestano in tutte le regioni galattiche dove ha luogo la formazione di stelle, i lampi gamma di lunga durata sono concentrati nelle zone più luminose, dove si trovano le stelle di massa maggiore. Per di più, in confronto alle galassie che ospitano supernove, quelle dove si osservano lampi lunghi sono significativamente più deboli, più irregolari e con un contenuto inferiore di elementi pesanti. Quest'ultimo è un punto importante perché le stelle massicce povere di elementi pesanti generano un vento stellare più debole rispetto alle stelle più ricche di questi elementi. Nel corso della loro vita, esse conservano una frazione più elevata della propria massa, e quindi quando giungono al termine del ciclo vitale sono più pesanti. Il collasso del loro nucleo tende a produrre non una stella di neutroni, ma un buco nero. In effetti gli astronomi attribuiscono i lampi gamma lunghi a getti collimati generati da buchi neri in rapida rotazione. Il fattore decisivo per determinare se il collasso di un nucleo produrrà un GRB sembra essere la massa e la velocità di rotazione della stella progenitrice al momento della sua fine.

Identificare gli impulsi di breve durata si è rivelato più difficile: soltanto lo scorso anno i satelliti HETE 2 e Swift sono riusciti a localizzarne alcuni. Hubble e il Chandra X-ray Observatory, anch'esso un telescopio orbitante, hanno rivelato che questi impulsi hanno un'energia complessiva inferiore a quella degli impulsi di lunga durata e che tendono a manifestarsi in una tipologia più ampia di galassie, comprese quelle ellittiche che non sono più sede di formazione stellare. A quanto sembra, gli impulsi brevi non sono associati a stelle massicce e poco longeve, ma a resti stellari. L'ipotesi più plausibile è che gli impulsi di breve durata siano generati dalla fusione di due stelle di neutroni.



LA GALASSIA NELLA QUALE È COMPARSO L'IMPULSO di raggi gamma 971214 appare nel cielo come una macchiolina insignificante (*indicata dalla freccia*).



GALASSIE LONTANE, miliardi di volte più deboli di qualsiasi oggetto visibile a occhio nudo, appaiono distribuite in tutto lo Hubble Ultra Deep Field.

8 Il limite dello spazio

Uno degli obiettivi più ambiziosi della ricerca astronomica è quello di ricostruire la storia della nostra galassia e di quelle che l'hanno preceduta fino ad avvicinarsi il più possibile al momento del big bang. Per avere un'idea di quale fosse un tempo l'aspetto della Via Lattea gli astronomi hanno cercato di ottenere immagini di galassie di ogni età, dall'infanzia alla vecchiaia. A questo scopo Hubble, in cooperazione con altri osservatori, ha effettuato lunghe esposizioni di piccole zone di cielo – i programmi Hubble Deep Field, Hubble Ultra Deep Field e Great Observatories Origins Deep Survey – per individuare le galassie più lontane (e dunque più antiche).

Queste immagini ad altissima risoluzione hanno rivelato galassie che esistevano quando l'universo aveva solo alcune centinaia di milioni di anni, ovvero circa il 5 per cento dell'età attuale. Esse avevano dimensioni più piccole e una forma più irregolare di quelle esistenti oggi, come sarebbe prevedibile se le galassie attuali si fossero formate per aggregazione di oggetti più piccoli (e non per suddivisione di strutture più grandi). Risalire ancora più indietro nel tempo è l'obiettivo principale del successore di Hubble, il James Webb Space Telescope, ora in costruzione.

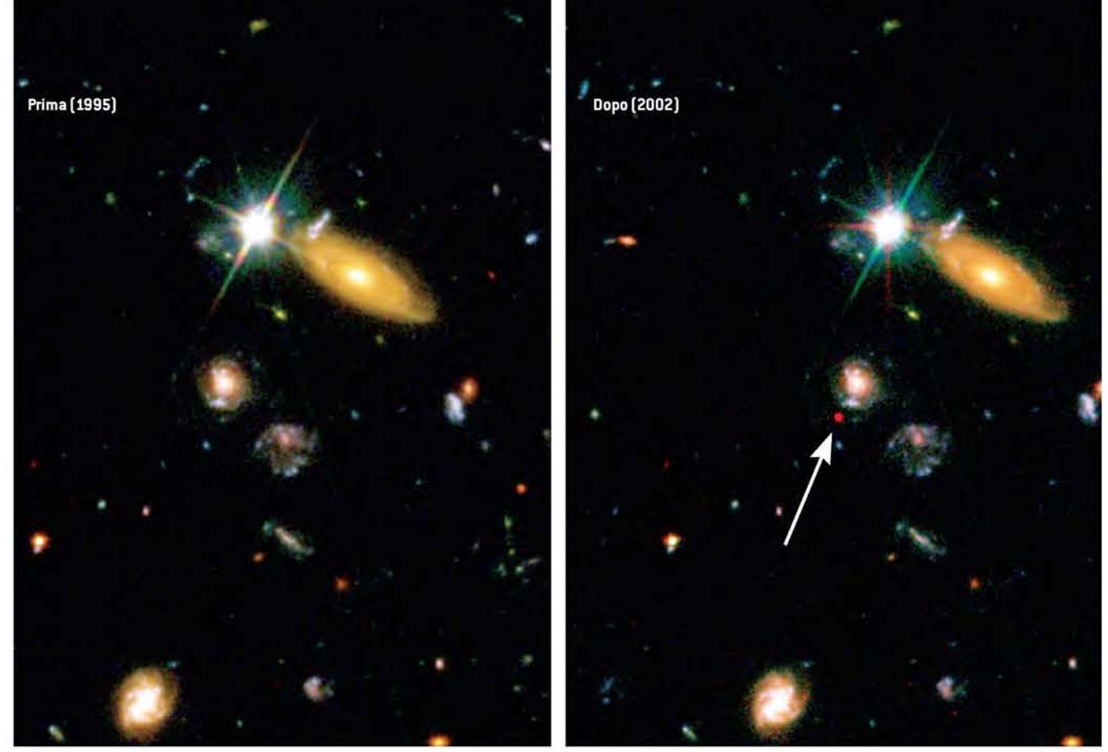
Le osservazioni a grandi distanze hanno anche consentito di ricostruire le variazioni della velocità di formazione stellare in tutto l'universo nel corso del tempo cosmico. Sembra che questo processo abbia raggiunto il culmine circa sette miliardi di anni fa e che da allora la sua velocità si sia ridotta di dieci volte. Quando l'universo era relativamente giovane (un miliardo di anni), la velocità di formazione stellare era già elevata, pari a circa un terzo del suo valore di picco.

9 L'età dell'universo

Negli anni venti, le osservazioni di Edwin Hubble e di altri dimostrarono che l'universo è in espansione. Le galassie si allontanano sistematicamente l'una dall'altra, e l'implicazione del fenomeno è che la stessa struttura dello spazio si stia «stirando». La costante di Hubble (H_0) misura l'attuale velocità di espansione, che è il parametro chiave per determinare l'età dell'universo. Il ragionamento è semplice: H_0 è la velocità a cui le galassie si separano l'una dall'altra; perciò, escludendo qualsiasi accelerazione o decelerazione, il reciproco di H_0 individua il momento in cui dovevano essere tutte riunite. Il valore di H_0 è rilevante anche per l'accrescimento delle galassie, la sintesi degli elementi leggeri e la cronologia dell'evoluzione cosmica. Non sorprende quindi che la misurazione precisa della costante di Hubble sia stata un obiettivo importante per lo strumento con lo stesso nome. In pratica, trovare questo valore significa determinare la distanza delle galassie vicine: un compito notoriamente difficile, che nel XX secolo suscitò accese polemiche. Il telescopio spaziale ha effettuato lo studio definitivo delle variabili Cefeidi – stelle con pulsazioni caratteristiche che ne rivelano la luminosità intrinseca e quindi la distanza – in 31 galassie. Il valore risultante di H_0 ha una precisione del 10 per cento circa. Insieme alle misurazioni della radiazione di fondo a microonde, il valore della costante di Hubble indica un'età dell'universo di circa 13,7 miliardi di anni.

LE STELLE PULSANTI DENOMINATE CEFEIDI, come quella mostrata nella raffigurazione artistica qui sopra, sono un riferimento fondamentale nella valutazione delle distanze intergalattiche.

NASA, ESA, S. Beckwith STScI e Hubble Ultra Deep Field Team (*in alto*); Don Dixon (*in basso*)



NASA e J. Blakeslee, Johns Hopkins University

QUESTA SUPERNOVA LONTANA, scoperta grazie al confronto di immagini realizzate in tempi diversi, testimonia una transizione fondamentale dalla decelerazione all'accelerazione cosmica.

10 L'universo in accelerazione

Nel 1998 due team di astronomi presentarono indipendentemente una scoperta rivoluzionaria: l'espansione dell'universo sta accelerando. In genere si riteneva che dovesse rallentare perché le galassie sono soggette alla reciproca attrazione gravitazionale, che dovrebbe ritardarne l'allontanamento. Che cosa produca l'accelerazione è da molti considerato il mistero più profondo che si presenta oggi alla fisica. L'ipotesi di lavoro è che l'universo contenga una componente finora sconosciuta, la cosiddetta energia oscura. Combinando le osservazioni di Hubble con quelle degli strumenti a terra e con informazioni fornite dallo studio della radiazione di fondo, si conclude che questa energia oscura costituisca circa tre quarti della densità totale dell'universo.

L'accelerazione ebbe inizio circa cinque miliardi di anni fa; prima di quel momento l'espansione stava rallentando. Nel 2004 Hubble scoprì 16 supernove lontane le cui età coprono tutta la fase cruciale di transizione. Queste osservazioni hanno permesso di porre vincoli più logici alle teorie che cercano di descrivere l'energia oscura. La possibilità più semplice (ma anche, per certi versi, la più misteriosa) è che si tratti di una forma di energia connaturata allo spazio stesso, presente anche quando esso è vuoto. Per il momento nessuno strumento, a parte Hubble, può assumere un ruolo così fondamentale nella ricerca di supernove lontane che aiutino a definire meglio l'energia oscura: questo ruolo è forse la motivazione più forte per cui gli astronomi hanno chiesto con tanta insistenza alla NASA di mantenere operativo il telescopio spaziale. LS

PER APPROFONDIRE

Gli articoli pubblicati da «Le Scienze» sugli argomenti affrontati in queste pagine:

1 *La cometa Shoemaker-Levy 9 incontra Giove*, di David H. Levy, Eugene M. Shoemaker e Carolyn S. Shoemaker, n. 326, ottobre 1995.

2 *In cerca dell'ombra di altre Terre*, di Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg e Timothy M. Brown, n. 387, novembre 2000.

3 *Morte straordinaria di una stella qualunque*, di Bruce Balick e Adam Frank, n. 431, luglio 2004.

4 *È nata una stella*, di Thomas P. Ray, n. 386, ottobre 2000.

5 *Il respiro della Via Lattea*, di Bart P. Wakker e Philipp Richter, n. 426, febbraio 2004.

6 *La strana coppia galattica*, di Kimberly Weaver, n. 420, agosto 2003.

7 *Le più luminose esplosioni dell'universo*, di Neil Gehrels, Luigi Piro e Peter J.T. Leonard, n. 418, giugno 2003.

8 *Le prime galassie dell'universo*, di F. Duccio Macchetto e Mark Dickinson, n. 357, luglio 1997.

9 *Velocità di espansione e dimensioni dell'universo*, di Wendy L. Freedman, n. 293, gennaio 1993.

10 *E l'universo accelerò*, di Adam G. Riess e Michael S. Turner, n. 427, marzo 2004.