

Pianeti orfani

L'AMMASSO GLOBULARE
47 TUCANAE
(nella pagina a fronte):
ospita diversi milioni
di stelle
e un numero sconosciuto
di pianeti.

Gli astrofisici che tentano
di simulare le interazioni
dinamiche in questi densi
ammassi stellari
si chiedono se un sistema
planetario stabile possa
sopravvivere nel tumulto
gravitazionale
di un ambiente dove 3000
stelle sono ammassate
in un anno luce cubo.

La ricerca di pianeti
delle dimensioni di Giove
in orbite stellari strette
nell'interno di 47 Tucanae
non ne ha rivelato traccia.

Che cosa è accaduto
a questi corpi? Non si sono
mai formati? Oppure sono
stati strappati
alla loro stella durante
un incontro ravvicinato
con un'altra stella?
Le risposte potrebbero
gettare nuova luce
sulla recente scoperta di
pianeti indipendenti
in ammassi di stelle
molto giovani.

In cerca di pianeti nei luoghi più strani, lontano dalle stelle
che hanno dato loro origine, nell'interno
di alcuni dei più densi ammassi stellari della Galassia

Cortesia ESO

di Jarrod R. Hurley e Michael M. Shara

e ammassi di stelle

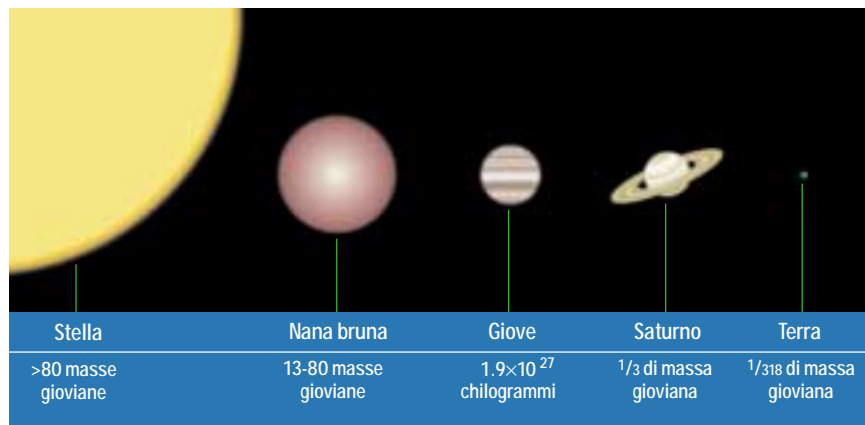
L'esistenza di pianeti al di fuori del sistema solare è un argomento delicato in astronomia, sin da quando Giordano Bruno, nel XVI secolo, fu arso vivo per avere (fra altre cose) sostenuto che l'universo contenesse un numero infinito di mondi. Oggi nessuno rischia di finire al rogo sulla pubblica piazza per aver proposto l'esistenza di pianeti extrasolari, ma questo settore di ricerca rimane controverso. A oggi, sono stati identificati oltre 70 pianeti in orbita intorno ad altre stelle, un risultato che ha suscitato grande entusiasmo nella comunità degli astronomi. La scoperta forse più interessante ed enigmatica è quella di un gruppetto di pianeti extrasolari che non sono legati ad alcuna stella. Questi pianeti «orfani», o indipendenti, sono fra gli oggetti più discussi mai scoperti nella ricerca di altri mondi. Il problema è che non vi è un completo accordo fra gli astronomi sul significato del termine pianeta. La maggior parte degli oggetti individuati in orbita intorno ad altre stelle ha massa inferiore a 3-4 masse di Giove, ma alcuni di essi sono molto più grandi dei pianeti giganti del sistema solare, avendo una massa oltre 10 volte superiore a quella di Giove.



AAO/David Main



LE REGIONI DI FORMAZIONE STELLARE IN ORIONE - che contengono migliaia di stelle giovanissime - sembrano essere ricche di pianeti indipendenti. Simili oggetti sono stati trovati in regioni di formazione stellare nell'interno del Trapezio della Nebulosa di Orione (M42) e presso la stella brillante Sigma Orionis; i corpi indipendenti di dimensioni planetarie finora scoperti sono quasi 40.



LA DEFINIZIONE DI PIANETA si basa in parte sulla massa. La scoperta di oggetti indipendenti di massa inferiore a 13 masse gioviane (il limite inferiore per le nane brune) ha scatenato una controversia sulla loro identità e origine. I più piccoli corpi indipendenti finora scoperti hanno circa 5 masse gioviane. I limiti delle attuali tecnologie di rilevamento possono spiegare l'apparente assenza di oggetti più piccoli, ma considerazioni teoriche indicano anche che essi debbano essere rari. Per ora la loro abbondanza è totalmente sconosciuta.

Questo valore è molto vicino alla soglia dimensionale di un altro tipo di corpo substellare: una nana bruna, oggetto che viene spesso descritto come una «stella mancata» perché non è abbastanza grande per avviare la fusione termonucleare dell'idrogeno. Le nane brune hanno taglia intermedia fra i pianeti e le stelle vere e proprie, e la linea di confine fra i tre gruppi di oggetti è ancora abbastanza indefinita (anche le nane brune, comunque, potrebbero possedere pianeti).

D'altra parte, alcuni dei pianeti indipendenti non paiono più grandi di Giove; la loro esistenza rappresenta però una sfida alla stessa definizione di pianeta: un oggetto substellare *in orbita* intorno alla stella presso la quale si è formato. Molti astronomi sono riluttanti a chiamare «pianeti» questi corpi, e per il momento usano semplicemente il nome «indipendenti».

Al di là delle complicazioni di nomenclatura, la difficoltà nel comprendere questi oggetti deriva in parte dal cercare una spiegazione della loro origine. Se essi si formarono dal collasso gravitazionale di una nube di gas e polvere, allora alcuni potrebbero essere nati accanto alle vere stelle in un ammasso o associazione stellare. Se invece gli indipendenti ebbero origine nel disco protoplanetario che circonda un astro nascente, sorge il problema di come il pianeta orfano sia venuto a trovarsi così lontano dalla stella genitrice.

Le ricerche da noi condotte vertono su questa seconda possibilità. La nostra specializzazione è lo studio degli ammassi globulari, nel tentativo di comprendere che cosa siano e come si evolvano. Sebbene questo possa apparire un settore di ricerche che ha poco a che fare con i pianeti extrasolari, in realtà gli ammassi stellari densi possono essere un luogo molto adatto per cercare questi oggetti a causa delle interazioni dinamiche delle stelle.

Arrivano gli indipendenti

Il numero e la varietà di corpi della nostra galassia più piccoli di una stella - ossia di massa possa a circa 0,08 masse solari (80 masse gioviane) - sono assolutamente ignoti. Si presume che le loro dimensioni possano essere molto diverse: da oggetti relativamente grandi come le nane brune e i pianeti giganti gassosi a pianeti rocciosi come la Terra e a corpi più piccoli, come satelliti e asteroidi.

Gruppi di astronomi hanno dato inizio alla ricerca di altri mondi agli inizi degli anni novanta; i loro lavori hanno prodotto una serie di scoperte sorprendenti, a partire dall'individuazione del primissimo pianeta extrasolare nel 1991. Questo oggetto aveva la particolarità di orbitare intorno a un tipo esotico di stella «morta»:



IL COMPUTER GRAPE-6 (GRAVity PipE) è progettato specificamente per gestire l'enorme massa di calcoli necessari per la simulazione delle interazioni dinamiche all'interno di un ammasso stellare denso. GRAPE-6 è assai meno costoso di un supercomputer equivalente, ma è meno flessibile nelle sue applicazioni perché nei chip è integrata parte della logica delle interazioni stellari. Il prototipo qui illustrato è stato usato per le ricerche descritte nell'articolo ed è capace di 500 miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo (teraflop). È questa la potenza di calcolo necessaria per seguire la vita di circa 10^4 particelle (stelle e pianeti) in una simulazione a N corpi di un ammasso aperto. La versione attuale di GRAPE-6 è capace di raggiungere 1 teraflop e di gestire circa 10^5 particelle. (La fotografia è stata fornita dagli autori.)

una pulsar, ossia una stella di neutroni in rapida rotazione che emette potenti onde radio. Nessuno aveva previsto che le pulsar potessero avere pianeti, dato che l'esplosione di supernova che genera una stella di neutroni si supponeva dovesse annientare eventuali pianeti vicini.

Nel 1995, finalmente, si scoprirono pianeti extrasolari in orbita intorno a stelle normali, ma anche in questo caso si trattava di sistemi peculiari: molti di essi contenevano pianeti delle dimensioni di Giove in orbite assai strette (inferiori a 5 giorni). Questi oggetti non rientravano nei modelli accettati della formazione di sistemi planetari, che collocano i giganti gassosi a grandi distanze dalla stella centrale, corrispondenti a periodi orbitali più simili a quelli di Giove (quasi 12 anni).

Date le sorprese che questi altri «sistemi solari» riservavano agli astronomi, era prevedibile che i corpi indipendenti avrebbero dato qualche scossone alle ipotesi più accreditate. Stranamente la prima osservazione di uno di essi, nel 1998, non fu accompagnata da particolare clamore. Seminascolta in un articolo sulle nane brune a firma di Motohide Tamura e colleghi dell'Osservatorio astronomico nazionale giapponese, vi era una nota che specificava come alcuni degli oggetti osservati fossero di massa inferiore alla soglia per una nana bruna (circa 13 masse

gioviane) e quindi ricadessero nell'intervallo di masse dei pianeti giganti. In effetti 13 masse gioviane è il limite in corrispondenza del quale nel nucleo di un oggetto può iniziare la fusione del deuterio; per questa ragione è talvolta considerato la linea divisoria fra stelle e pianeti.

Tamura e colleghi trovarono questi corpi di dimensioni planetarie mentre cercavano giovani oggetti stellari di piccola massa nelle nubi molecolari della regione Camaleonte I, dove si stanno formando numerose stelle. In retrospettiva, non sorprende che i primi corpi indipendenti siano stati scoperti in una regione di questo genere. Dato che i giovani «pianeti» conservano ancora parte del calore generato durante il processo di accrescimento, la loro luminescenza può essere individuata con gli stessi rivelatori per l'infrarosso che si impiegano per osservare le nane brune e le stelle molto giovani.

Indagini analoghe su oggetti di piccola massa nelle regioni di formazione stellare portarono a nuove scoperte nel 2000. Nella primavera di quell'anno due inglesi, Philip Lucas e Patrick Roche, annunciarono l'individuazione di forse 13 possibili corpi indipendenti nel cuore della Nebulosa di Orione (M42), una regione di formazione stellare che si trova a una distanza di 1500 anni luce. Secondo gli autori, diversi di questi oggetti erano più piccoli di

IN SINTESI

- A tutt'oggi, sono stati identificati oltre 70 pianeti extrasolari. La scoperta forse più interessante ed enigmatica è quella di un gruppetto di pianeti che non sono legati ad alcuna stella. Questi pianeti «orfani», o indipendenti, sono fra gli oggetti più discussi incontrati durante la ricerca di altri mondi.
- Si tratta di comprendere se questi pianeti si siano formati dal collasso gravitazionale di una nube di gas e polvere, oppure se abbiano avuto origine nel disco protoplanetario che circonda un astro nascente, ma qui sorge il problema di come il pianeta orfano sia finito così lontano dalla stella genitrice.
- Per dirimere il problema si fa ricorso a modellistica computerizzata che, per eseguire «simulazioni a N corpi», rende necessarie potenze di calcolo enormi, con hardware e software appositamente progettati. I nuovi strumenti recentemente messi a punto consentiranno di simulare circa 100.000 particelle in tempi ragionevoli.

13 masse gioviane. Come negli studi di Tamura, l'identità di simili corpi dipende in parte dalla loro età.

Alcuni astronomi misero in dubbio le scoperte di Lucas e Roche, sostenendo che questi oggetti sono intrinsecamente più brillanti di quanto non appaiano e che in realtà giacciono dietro la Nebulosa di Orione; sembrano pianeti giovani solo perché sono affievoliti dalla polvere della nebulosa. In questo caso, gli oggetti avrebbero in realtà la massa di nane brune. Altri si chiesero se questi corpi dovessero essere chiamati pianeti. Alan Boss della Carnegie Institution ritiene che la definizione di pianeta dovrebbe basarsi non sulla massa, ma sul fatto che si sia formato in un disco protoplanetario intorno a una giovane stella. Boss ha proposto un meccanismo nel quale oggetti di dimensioni planetarie nascono in maniera non dissimile dalle stelle; questi corpi non sarebbero pianeti, ma piuttosto «sotto-nane brune».

Poco dopo le scoperte di Lucas e Roche, un secondo gruppo di astronomi riferì l'individuazione di corpi indipendenti in un'altra regione della costellazione di Orione. Maria Rosa Zapatero Osorio, ora al California Institute of Technology a Pasadena, e colleghi scoprirono 18 di questi oggetti, deboli e rossi, in un ammasso vicino alla stella Sigma Orionis. La regione

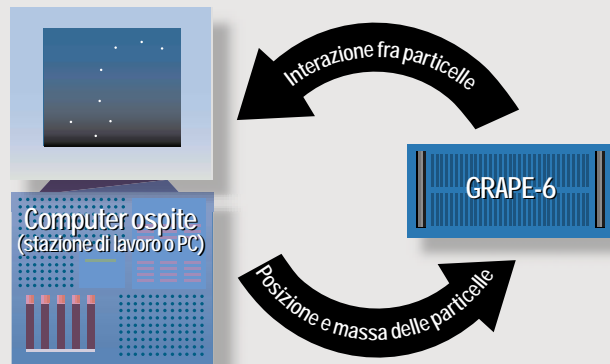
UN AMMASSO GLOBULARE IN SCATOLA

Una simulazione a N corpi di un ammasso globulare implica il dialogo fra un computer ospite - che conserva in memoria le posizioni e le masse delle particelle - e GRAPE-6, un computer dedicato che calcola le interazioni fra le particelle stesse. Il processo inizia con la definizione delle caratteristiche del sistema: le dimensioni relative e il numero delle stelle (funzione di massa iniziale), il numero di sistemi binari e di pianeti, le posizioni iniziali e le velocità delle stelle, le loro densità e distribuzione e l'equilibrio viriale (che definisce la quantità totale di energia nel sistema).

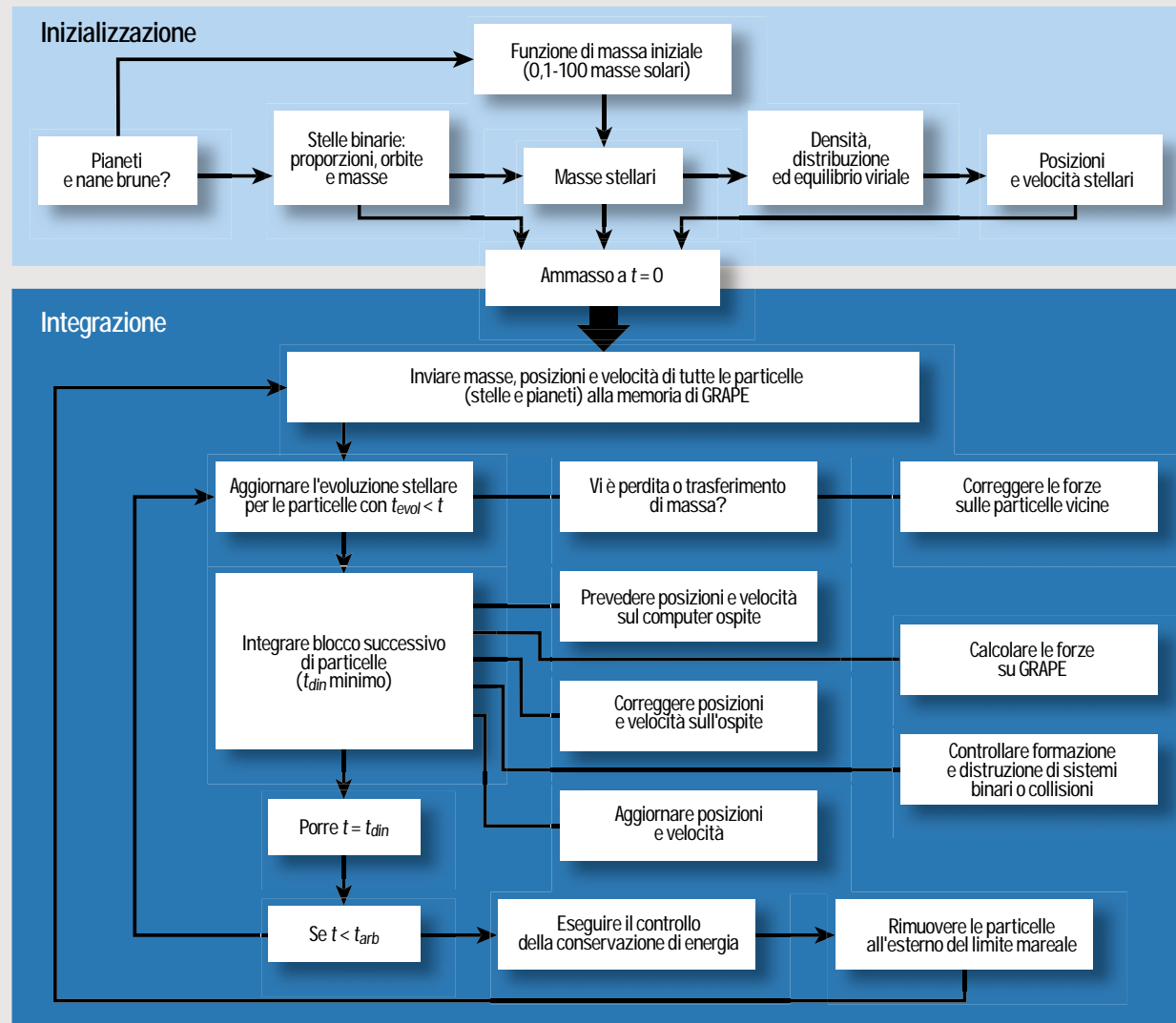
Durante l'integrazione, ciascuna stella viene seguita in due fasi temporali: una relativa all'evoluzione fisica (t_{evol}) e una alle interazioni dinamiche (t_{din}). Queste fasi sono differenti per ciascuna stella. Le stelle massicce evolvono rapidamente, e quindi hanno fasi t_{evol} brevi, mentre le stelle di piccola massa, la cui evoluzione è più lenta, hanno fasi t_{evol} lunghe.

Così pure, le stelle in moto veloce entro il denso nucleo dell'ammasso hanno fasi t_{din} brevi, mentre le stelle lente nelle regioni esterne le hanno più lunghe.

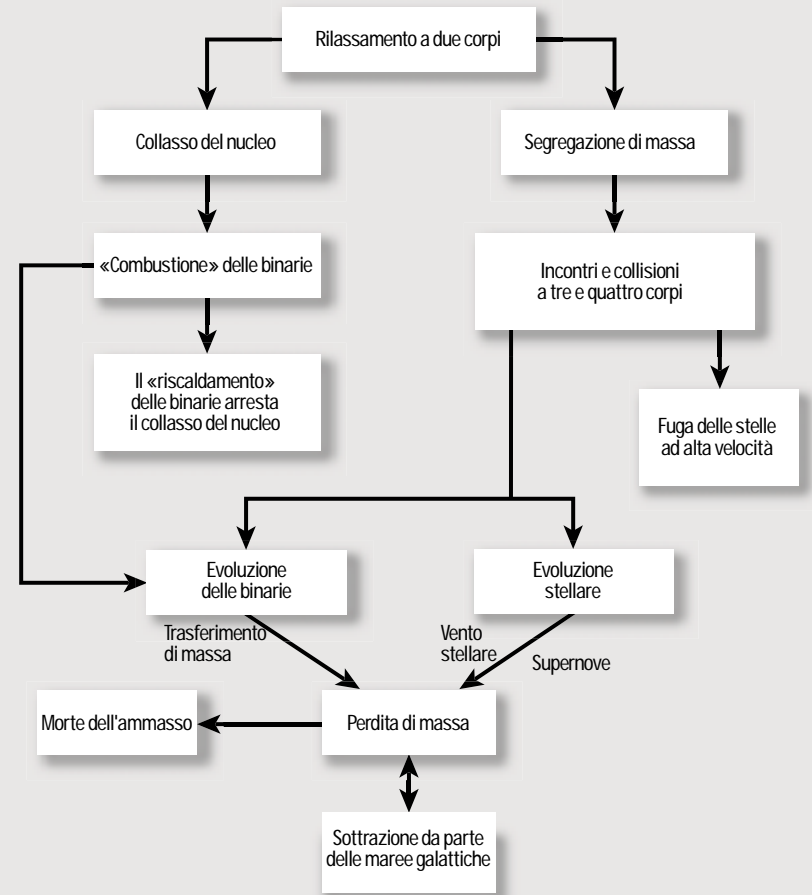
Il sistema viene aggiornato per blocchi di particelle aventi fasi t_{din} simili. L'evoluzione fisica di una stella massiccia può essere aggiornata più di una volta prima di passare a una successiva



fase dinamica (se $t_{evol} < t_{din}$). Dopo un tempo arbitrario (t_{arb}) si esegue una verifica del sistema per essere certi di non aver introdotto alcuna «mostruosità». Le particelle che migrano verso le zone esterne dell'ammasso globulare possono essere rimosse dal sistema: ciò corrisponde alla cosiddetta evaporazione dell'ammasso causata dalle maree galattiche. Nel processo di integrazione si tiene conto di molti altri processi astrofisici (si veda la finestra nella pagina a fronte).



SIMULARE L'EVOLUZIONE DI UN AMMASSO



Nel simulare l'evoluzione di un ammasso globulare si tiene conto di svariati processi astrofisici. Il rilassamento a due corpi consiste in uno scambio di energia fra stelle, tale che tutte tendano ad averne la stessa quantità: le stelle massicce rallentano e si spostano verso il nucleo, mentre quelle leggere accelerano e migrano verso l'esterno. Questa segregazione influisce sulla frequenza degli incontri fra stelle e tende ad accelerare le più leggere fino alla velocità di fuga. Via via che le stelle massicce migrano verso di esso, il nucleo aumenta la propria densità; ciò moltiplica il numero di collisioni e quindi ritarda il collasso del nucleo. La «combustione» delle binarie è un processo per cui i sistemi binari stretti diventano ancora più compatti, mentre quelli allargati si scindono. A loro volta, questi processi influenzano l'evoluzione dei sistemi binari e delle stelle singole. L'inefficiente trasferimento di massa fra stelle binarie provoca perdita di materia dal sistema. Anche le stelle singole possono perdere massa: quelle massicce esplodono come supernove, mentre le più piccole rilasciano costantemente massa nel vento stellare. Le maree gravitazionali della Galassia finiscono per asportare questa materia dall'ammasso insieme con le stelle leggere che si sono spostate ai margini esterni. Infine un ammasso muore quando tutte le sue stelle sono state disperse, per sottrazione mareale o per espulsione. In un ambiente così frenetico, la creazione di pianeti indipendenti potrebbe essere abbastanza comune.

L'AUTORE

JARROD R. HURLEY è ricercatore presso l'American Museum of Natural History. Le sue ricerche si concentrano sullo studio dell'evoluzione degli ammassi stellari mediante simulazioni complesse. Di recente ha cominciato a occuparsi del comportamento di sistemi planetari negli ammassi stellari. MICHAEL M. SHARA è curatore e direttore del Dipartimento di astrofisica dell'American Museum of Natural History. Si occupa di struttura ed evoluzione di nove e supernove, di collisioni stellari e della natura delle popolazioni stellari in ammassi e galassie.

si trova a soli 1000 anni luce dalla Terra e ospita un folto gruppo di stelle neonate, che forse hanno solo 1-5 milioni di anni. Situati fra le giovani stelle vi sono numerosi oggetti di temperatura assai bassa, intorno a 1700-2200 kelvin. Date le caratteristiche, i ricercatori calcolarono che questi oggetti dovessero essere «piccoli»: 5-15 masse gioviane. E furono molto cauti nell'identificarli, indicandoli come «giovani oggetti isolati di massa planetaria».

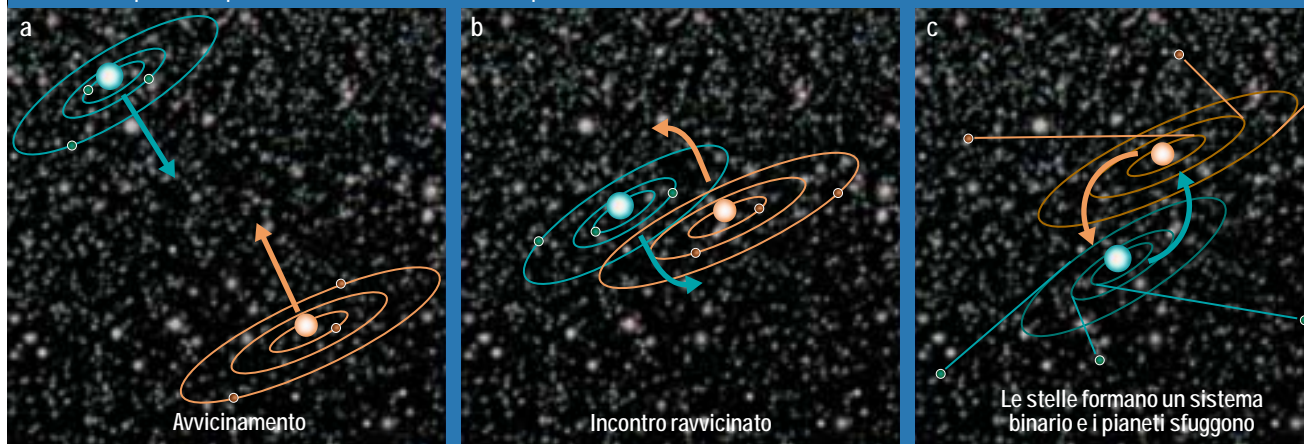
Più di recente, Lucas, Roche e colleghi hanno pubblicato risultati che confermerebbero le precedenti osservazioni di corpi indipendenti appartenenti alla Nebulosa di Orione. I loro studi spettroscopici degli oggetti in Orione indicano la presenza di acqua; ciò fa pensare che i corpi in questione siano giovani (circa 1 milione di anni) e di piccola massa. Al momento i ricercatori ritengono di aver identificato circa 15 corpi indipendenti di massa planetaria. Per sfuggire alle prevedibili controversie di nomenclatura, essi hanno coniato un nuovo termine, «planetar», per gli oggetti di taglia planetaria che non orbitano intorno a una stella.

Ciò che tutti questi risultati hanno in comune è la scoperta di oggetti indipendenti all'interno di gruppi di stelle neonate. Simili raggruppamenti sono destinati a disperdersi, o perché non sono gravitazionalmente legati, o perché sono abbastanza piccoli per essere decimati dalle maree galattiche su scale temporali di alcuni miliardi di anni. Con l'eccezione di quelle che fanno parte di sistemi stellari multipli, queste «stelle di campo» un giorno vagheranno in solitudine per la Galassia, esattamente come fa il Sole. Sembra ragionevole supporre che eventuali corpi indipendenti di taglia planetaria formati in un ammasso aperto si disperdano anch'essi a causa delle maree. Questi vagabondi devono essere corpi molto freddi e scuri, e quindi assai difficili da rivelare.

Corpi indipendenti negli ammassi globulari?

C'è un altro luogo dove si può pensare di trovare corpi indipendenti: l'ambiente stellare molto denso di un ammasso globulare. Al contrario delle associazioni di stelle neonate, gli ammassi globulari consistono di stelle che sono gravitazionalmente legate l'una all'altra; e anziché avere solo qualche milione di anni, sono oggetti antichi, alcuni di età superiore ai 10 miliardi di anni. Date le diverse proprietà dei due ambienti, può sembrare strano che entrambi siano un terreno adatto per andare a caccia di corpi indipendenti. Eppure è probabile che sia così. I primi studiosi che cercarono pianeti

Pianeti indipendenti prodotti da incontri fra sistemi planetari in ammassi stellari densi



in un ammasso globulare non pensavano affatto ai corpi indipendenti. Nel luglio 1999 Ronald Gilliland e colleghi osservarono quasi 34.000 stelle nell'ammasso globulare 47 Tucanae (Tuc) utilizzando la Wide Field Planetary Camera 2 dello Hubble Space Telescope. L'ammasso globulare 47 Tuc è uno dei più grandi e densi della nostra galassia. Il nucleo è così compatto che in un anno luce cubo risiedono quasi 3000 stelle. (E ci sono ammassi globulari nel cui nucleo la densità si avvicina a 3 milioni di stelle per anno luce cubo!) Per confronto, in un cubo di un anno luce centrato sul Sole vi è una singola stella, e l'astro più vicino è a oltre 4 anni luce di distanza. Dato che 47 Tuc è molto antico, il gruppo di Gilliland sperava che la ricerca facesse luce sui sistemi planetari di stelle assai evolute.

Hubble fu impiegato per rivelare il transito di pianeti caldi di dimensioni gioviane di fronte alle loro stelle. Si possono individuare simili transiti perché la luce della stella si affievolisce quando il pianeta passa davanti a essa. Considerazioni teoriche basate sulla frequenza di pianeti caldi delle dimensioni di Giove nelle vicinanze del Sole portavano a prevedere che in 47 Tuc si dovesse osservare una ventina di questi corpi, ossia circa 1 per 1700 stelle. Alla fine del lavoro, tuttavia, i pianeti individuati erano zero.

Qual è la spiegazione? Se ne possono proporre un paio. Una dipende dall'apparente relazione fra la composizione chimica di una stella e la sua preferenza per pianeti giganti caldi. Nella ricerca di pianeti extrasolari in prossimità del Sole, si è scoperto che le stelle ricche di «metalli» (con relativa abbondanza di elementi più pesanti dell'elio) hanno una probabilità di possedere pianeti con periodi orbitali brevi almeno 10 volte maggiore rispetto alle stelle povere di metalli. Le cause di questa relazione sono in corso di studio, ma qui ci interessa solo far notare che le stelle molto vecchie di 47 Tuc sono in genere

povere di metalli perché si formarono in una fase precoce della storia della Galassia, prima che gli elementi più pesanti venissero sintetizzati. È interessante, però, il fatto che un pianeta orbitante intorno a una pulsar sia stato individuato in un ammasso globulare a bassa metallicità: M4.

Un'ulteriore possibilità è che il denso ambiente degli ammassi in qualche modo inibisca la formazione di pianeti, o forse limiti la migrazione delle orbite dei giganti gassosi verso la stella genitrice. Può anche darsi che i sistemi planetari si formino negli ammassi globulari, ma vengano rapidamente distrutti nelle collisioni fra stelle favorite dalla densità stessa dell'ammasso. Se è così, i pianeti di questi sistemi collidenti potrebbero venire separati dalle loro stelle. Poiché il gruppo di Gilliland cercava solo eventi di transito relativi a pianeti giganti caldi, non poteva individuare questi pianeti orfani.

Un lavoro dell'estate 2001 aveva descritto alcuni possibili pianeti indipendenti nell'ammasso globulare M22 individuati sfruttando l'effetto di microlente gravitazionale. Si è poi appurato che la scoperta era un artefatto dovuto a raggi cosmici che avevano colpito la videocamera.

Dove sono finiti i pianeti?

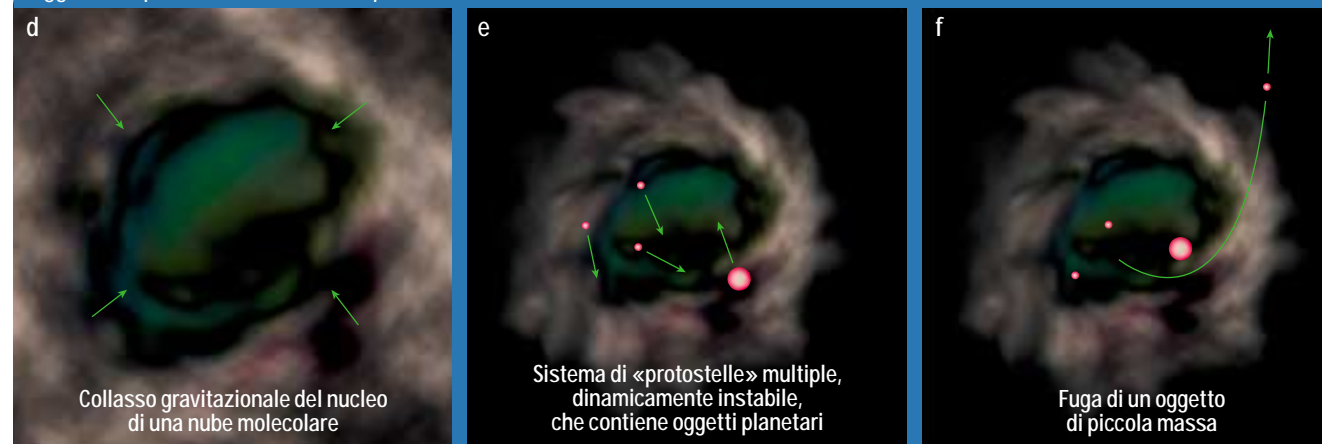
Che cosa dovremmo concludere dalla mancata individuazione di pianeti nell'ammasso globulare 47 Tuc? In primo luogo, occorre considerare che la vita di un pianeta in un ammasso globulare deve essere molto diversa da quella di uno che orbita intorno a una stella in una regione galattica meno affollata. Gli incontri e le vere e proprie collisioni fra stelle nelle regioni più densamente popolate devono avere profonde conseguenze sull'integrità dei sistemi planetari. Tenendo presenti i risultati riguardanti 47 Tuc, diversi astrofisici, noi compresi, hanno tentato di costruire modelli del destino dei sistemi planetari in questi ambienti.

Per prima cosa, occorre creare un ragionevole facsimile di un ammasso globulare. Sebbene vi siano vari modi per costruire un modello, il nostro metodo tenta di considerare il comportamento di ciascuna stella in una cosiddetta «simulazione a N corpi». L'enorme numero di stelle in un ammasso globulare rende estremamente gravoso questo compito. In pratica non si può neanche pensare di considerare le interazioni di milioni di stelle, e le nostre simulazioni attuali includono all'incirca 10^4 stelle. Anche un numero così ridotto richiede comunque un hardware specificamente progettato. La più recente versione di questi computer è GRAPE-6 (GRAVity PipE), una potente macchina (capace di 1,0 teraflop, ossia 1000 miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo) realizzata dal gruppo di Jun Makino dell'Università di Tokyo.

Oltre all'hardware, è ovviamente necessario un software altamente sofisticato. Negli ultimi 30 anni gli algoritmi di punta per una simulazione a N corpi sono stati realizzati da Sverre Aarseth dell'Institute of Astronomy a Cambridge. Il software NBODY4, che abbiamo usato per le nostre simulazioni, è stato ideato specificamente per le macchine GRAPE.

Il primo passo è quello di stabilire le condizioni iniziali nell'ammasso globulare. Bisogna quindi specificare variabili come la funzione di massa iniziale, la metallicità delle stelle, il numero di sistemi binari e le loro caratteristiche, il numero di pianeti e la distribuzione di densità stellare. Masse, posizioni e velocità delle stelle sono pure vincolate dalla condizione che l'ammasso inizi in equilibrio viriale: si tratta di una proprietà generale dei sistemi legati gravitazionalmente, la quale impone che il valore assoluto dell'energia potenziale sia doppio di quello dell'energia cinetica nel sistema. Queste considerazioni definiscono un ammasso di «età zero», nel quale la formazione stellare è cessata e tutto il gas residuo è stato rimosso.

Oggetti indipendenti di dimensioni planetarie nati allo stesso modo di stelle



DUE MECCANISMI IPOTETICI possono produrre oggetti indipendenti di dimensioni planetarie. In un ammasso stellare denso (a) un incontro fra due sistemi planetari (b) può liberare alcuni pianeti (c). Nel caso illustrato, dall'incontro nasce un sistema binario: un evento molto raro. Nella maggior parte dei casi la debole attrazione di una stella di passaggio può bastare per liberare alcuni dei pianeti del sistema. E anche possibile che oggetti di dimensioni planetarie si formino in una nube molecolare (d), più o meno allo stesso modo di una stella normale. Se simili corpi vengono generati in un sistema dinamicamente instabile (e), possono diventare indipendenti (f) anziché essere legati a una stella.

BIBLIOGRAFIA

- GILLILAND R. L. e altri, *A Lack of Planets in 47 Tucanae from a Hubble Space Telescope Search*, in «The Astrophysical Journal», 545, pp. L47-L51, 2000.
 ZAPATERO OSORIO M. R., BÉJAR V. J. S. e altri, *Discovery of Young, Isolated Planetary Mass Objects in the σ Orionis Star Cluster*, in «Science», 290, pp. 103-107, 2000.
 DAVIES M. B. e SIGURDSSON S., *Planets in 47 Tuc*, in «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 324, pp. 612-616, 2001.
 HURLEY J. R. e SHARA M. M., *Free-Floating Planets: Not So Surprising*, in «The Astrophysical Journal» (in stampa).
 HEGGIE D. C. e HUT P., *The Gravitational Million-Body Problem*, Cambridge University Press, in stampa.

Una volta descritto il sistema, si tratta «solo» di lasciare che le particelle (stelle e pianeti) interagiscano secondo la fisica newtoniana - calcolare la forza che si esercita su ciascuna particella e aggiornarne la posizione e la velocità a ogni incremento di tempo - e nello stesso tempo di tener conto dell'evoluzione delle stelle e dei sistemi binari.

Tutto ciò avviene nel contesto di diversi processi astrofisici, che sono inclusi nell'elaborazione durante l'integrazione, o evoluzione del sistema. Per esempio, noi prendiamo in considerazione anche l'evoluzione dell'ammasso stesso, che comporta il collasso del nucleo e la perdita di stelle (evaporazione) a causa delle forze mareali della Galassia. Riteniamo che questo metodo di integrazione ci dia un'idea corretta di come possano comportarsi i veri ammassi globulari contenenti centinaia di migliaia o milioni di stelle.

Abbiamo eseguito tre simulazioni, nelle quali è stata considerata l'evoluzione di 22.000 stelle dell'ammasso (il 10 per cen-

to delle quali binarie) nonché di 2000-3000 pianeti delle dimensioni di Giove. Le simulazioni differivano leggermente per la metallicità e la separazione orbitale fra i pianeti e le loro stelle. Ogni simulazione è stata fatta evolvere fino a 4,5 miliardi di anni, ossia la stessa età del sistema solare.

I pianeti, che all'inizio della simulazione erano tutti in orbita intorno a una stella, sono andati incontro a svariati destini. Dopo 4 miliardi di anni - quando rimaneva solo il 25 per cento della massa iniziale dell'ammasso - circa il 10 per cento dei pianeti era stato separato dalla propria stella, e circa il 13 per cento di questi rimaneva ancora nell'ammasso. Quasi il 66 per cento dei pianeti era sfuggito dall'ammasso ancora vincolato alla stella genitrice; circa l'1 per cento era stato inghiottito dalla stella e quasi il 4 per cento era passato a orbitare intorno a un'altra stella.

I risultati mostrano anche che i pianeti in orbite ampie - circa 50 unità astronomiche (UA) dalla stella genitrice (l'UA è pari alla distanza media fra la Terra e il

Sole) - hanno una probabilità di diventare indipendenti 10 volte maggiore di quelli posti a una distanza di 1 UA. Sebbene i pianeti che vengono strappati dalle orbite iniziali siano preferenzialmente quelli che si trovano nella densa regione centrale dell'ammasso, quasi metà di essi, quando è liberata, ha velocità inferiore alla velocità di fuga dall'ammasso. Ciò significa che gran parte dei corpi indipendenti diventa orfana presso il centro dell'ammasso e poi migra lentamente in periferia. Nell'ammasso la posizione media dei pianeti indipendenti è appena all'esterno del raggio entro il quale giace metà della massa totale; essi impiegano circa 200 milioni di anni per spostarsi dal nucleo dell'ammasso fino a questa posizione.

Gran parte dei sistemi planetari che sfuggono all'ammasso può allontanarsi perché il campo mareale galattico sottrae stelle alle regioni esterne dell'ammasso stesso. Un numero inferiore di stelle e pianeti viene espulso per aver raggiunto la velocità di fuga tramite un incontro ravvicinato con un'altra stella, ma la maggior parte degli incontri ha maggiori probabilità di produrre la liberazione di un pianeta che non l'espulsione dall'ammasso.

È ancora troppo presto per valutare il significato dei risultati di 47 Tuc. È stato proposto che le future ricognizioni in cerca di sistemi planetari debbano essere condotte in ammassi meno densi di questo, come per esempio un ammasso aperto ricco di metalli. Al momento non è chiaro se la mancanza di pianeti giganti caldi in 47 Tuc sia dovuta alla bassa metallicità dell'ammasso oppure alle interazioni dinamiche nel suo interno.

Inoltre, espandendo il numero di parametri nelle nostre simulazioni a N corpi, dovremmo riuscire a creare modelli più realistici. L'hardware GRAPE-6 da 1,0 teraflop è ora disponibile: esso ci consentirà di simulare circa 100.000 particelle in un tempo ragionevole, e di avvicinarci così a riprodurre un vero ammasso globulare.