

Luce dal buio

La nascita delle prime stelle

di Raffaella Schneider

Nei primi 200 milioni di anni di evoluzione cosmica, stelle e galassie non esistevano. L'unica sorgente di energia era la radiazione di fondo cosmico, il calore residuo del Big Bang, che all'epoca aveva una temperatura media di circa 85 Kelvin, corrispondenti a -188 gradi Celsius. L'universo era quindi freddo, buio e relativamente noioso. Niente a che vedere con le immagini alle quali i moderni telescopi ci hanno abituati. Oggi vediamo stelle, pianeti, le suggestive regioni di formazione stellare nella nostra galassia e migliaia di galassie esterne alla nostra caratterizzate da una grande varietà di forme e colori.

È stata proprio la comparsa delle prime stelle a segnare una transizione fondamentale nella storia dell'universo. Le prime stelle attivano al loro interno la fusione termonucleare, per la prima volta dopo il Big Bang. L'energia liberata dalla loro superficie ed emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica illumina le regioni circostanti, riscaldando e ionizzando il gas. L'effetto di questa radiazione sugli atomi di idrogeno, che rappresentano il 75% della massa di gas nell'universo, potrebbe avere causato la leggera distorsione della radiazione di fondo cosmico recentemente misurata dall'esperimento Edges. Se confermata, questa sarebbe la prima prova osservativa, anche se indiretta, dell'esistenza delle prime stelle, datandola a 180 milioni di anni dopo il Big Bang. Attraverso i venti stellari e le esplosioni di supernova le prime stelle liberano nel gas circostante anche i prodotti della fusione termonucleare avvenuta al loro interno. L'universo inizia così ad arricchirsi degli elementi fondamentali per la vita, carbonio, ossigeno, azoto, fino ad arrivare a elementi più pesanti come il ferro. L'insieme di questi processi avvia



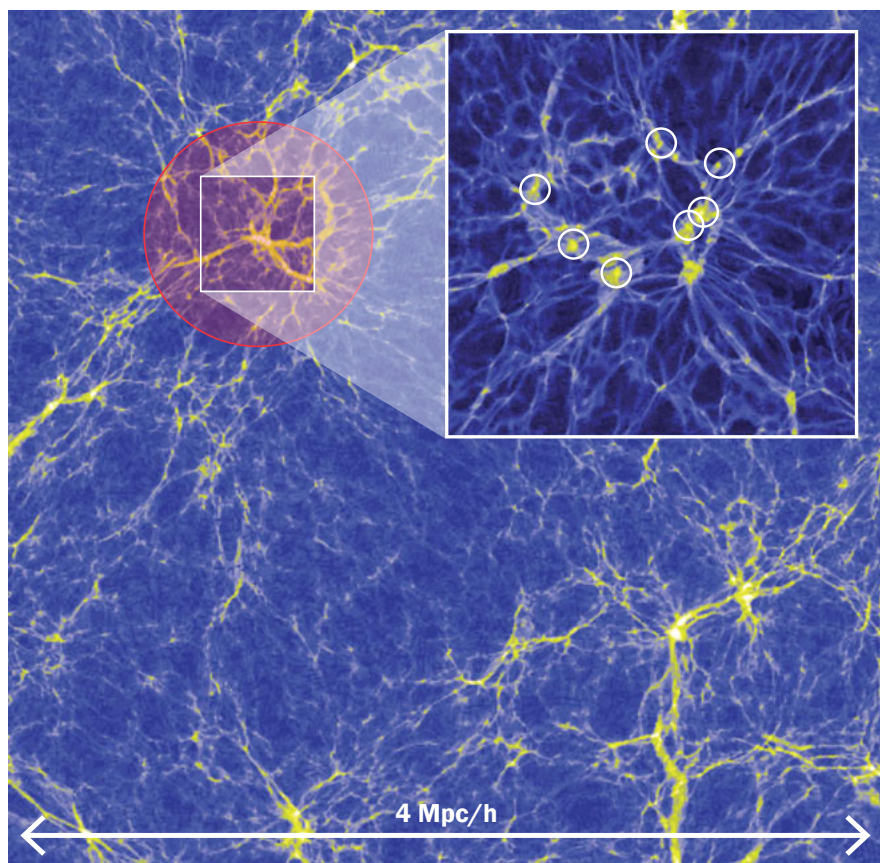
l'evoluzione delle strutture cosmiche, trasformando l'universo dallo stato di relativa semplicità che precede la formazione delle prime stelle allo stato di grande complessità che oggi osserviamo intorno a noi. L'impatto delle stelle sull'evoluzione delle galassie dipende fortemente dalle loro proprietà fisiche e in particolare dalla loro "metallicità" e dalla loro "funzione di massa iniziale". La metallicità di una stella è una grandezza che si indica con la lettera Z e che misura la concentrazione di elementi

a.
La nebulosa di Orione è la regione di formazione stellare più vicina a noi (si trova a circa 1500 anni luce) e per questo motivo una delle più studiate. Nell'immagine del telescopio spaziale Hubble (in realtà una composizione di 520 immagini diverse che coprono una regione simile alla dimensione apparente della luna piena) si osservano più di 3000 stelle con masse ed età diverse.

chimici più pesanti dell'idrogeno e dell'elio presenti nel gas dal quale la stella si è formata. Gli astrofisici chiamano impropriamente "metalli" tutti gli elementi più pesanti dell'elio, anche se sulla tavola periodica i metalli sono una classe di elementi chimici ben definita, che comprende l'argento, l'alluminio, il ferro, ecc. La metallicità del Sole Z_{sun} è pari a 0,0142, ovvero circa l'1,4% della massa del Sole (che si indica con M_{sun}). La restante parte del gas del Sole è composta per circa il 72% d'idrogeno e per circa il 27% di elio. La massa di una stella che si formi dal gas primordiale, arricchito solo degli elementi chimici leggeri prodotti nel Big Bang, sarà composta per circa il 75% da idrogeno, per circa il 25% da elio e, trascurando una concentrazione molto piccola di deuterio e di litio, si può dire che abbia metallicità zero (ovvero $Z = 0$). La funzione di massa iniziale delle stelle descrive invece la probabilità che si formino stelle di una certa massa. Secondo le attuali conoscenze, solo il 10-15% delle stelle ha una massa maggiore di una massa solare ($1 M_{\text{sun}}$), e questa frazione diventa minore del 3-5% per masse maggiori di $10 M_{\text{sun}}$: la stragrande maggioranza delle stelle, quindi, ha una massa leggermente più piccola o confrontabile con quella del Sole! Cosa si può dire sulla funzione di massa iniziale delle stelle primordiali? Non avendo mai osservato una stella primordiale possiamo basarci solo sui risultati di modelli teorici che, partendo dalle condizioni fisiche che pensiamo caratterizzassero le prime regioni di formazione stellare, provano a predire le masse delle stelle risultanti. Questi

modelli suggeriscono che la stragrande maggioranza delle prime stelle dovesse avere una massa da qualche decina a qualche centinaia di volte maggiore della massa del Sole. Molto più grande di quella della maggioranza delle stelle che oggi osserviamo intorno a noi.

Per rimanere in equilibrio, stelle di masse così grandi hanno nuclei molto caldi e le reazioni termonucleari che avvengono al loro interno sono molto efficienti. Per questo motivo, nel giro di pochi milioni di anni, si esaurisce il combustibile nucleare e le stelle terminano la propria vita esplodendo come supernovae o collassando e trasformandosi in un buco nero. La prima reazione termonucleare che si attiva nel nucleo delle stelle primordiali è quella che trasforma l'idrogeno in elio attraverso la cosiddetta "catena protone-protone" (o "catena pp", vd. fig. c a p. 22) mediante la quale quattro nuclei d'idrogeno (quattro protoni) sono trasformati in un nucleo di elio composto di due protoni e due neutroni. La trasformazione di un protone in un neutrone prende il nome di "decadimento β^+ " ed è una reazione molto inefficiente, perché mediata dalle interazioni deboli (vd. p. 24, ndr). Nelle stelle come il Sole, la catena pp si attiva quando la temperatura nel nucleo raggiunge 4-5 milioni di gradi e la combustione dell'idrogeno in elio nel nucleo della stella richiede circa 10 miliardi di anni. Questo intervallo temporale è quello che determina la durata della vita della stella, perché le fasi evolutive successive avvengono molto più rapidamente. Nelle stelle di massa maggiore, che raggiungono temperature nucleari di almeno 15 milioni di gradi, se sono presenti anche



b. Simulazione al computer di regioni di formazione stellare primordiale. La figura mostra come la materia si distribuisca lungo una rete di filamenti. I filamenti di colore più chiaro sono quelli nei quali il gas riesce a raffreddarsi e a raggiungere le densità necessarie a formare le prime stelle. La figura più piccola è un ingrandimento della regione circolare colorata. La simulazione mostra che le prime stelle si formano all'interno di regioni d'intersezione di filamenti diversi (cerchiate in bianco). A causa dell'assenza di metalli e polveri, il raffreddamento del gas primordiale è poco efficiente e le masse delle prime stelle sono molto maggiori delle masse delle stelle che si formano oggi nella nostra galassia e hanno masse di decine o centinaia di masse solari.

piccole concentrazioni di carbonio e ossigeno, la trasformazione dei quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio avviene attraverso la mediazione del carbonio mediante il “ciclo del carbonio-azoto-ossigeno” (vd. in Asimmetrie n. 9 p. 12, ndr).

Il tempo di vita di una stella di $10 M_{\text{sun}}$ è di circa 30 milioni di anni. Una stella primordiale di $100 M_{\text{sun}}$ raggiunge temperature centrali di 100 milioni di gradi ma, essendo del tutto priva di carbonio, la combustione dell'idrogeno in elio si attiva solo attraverso la catena pp. A causa delle elevate temperature, la combustione avviene però anche in modi non convenzionali. Infatti, si può innescare contemporaneamente la combustione dell'elio, che porta alla produzione di carbonio, che rende possibile l'attivazione del ciclo del carbonio-azoto-ossigeno: in appena un milione di anni la stella completa la combustione nucleare dell'idrogeno in elio.

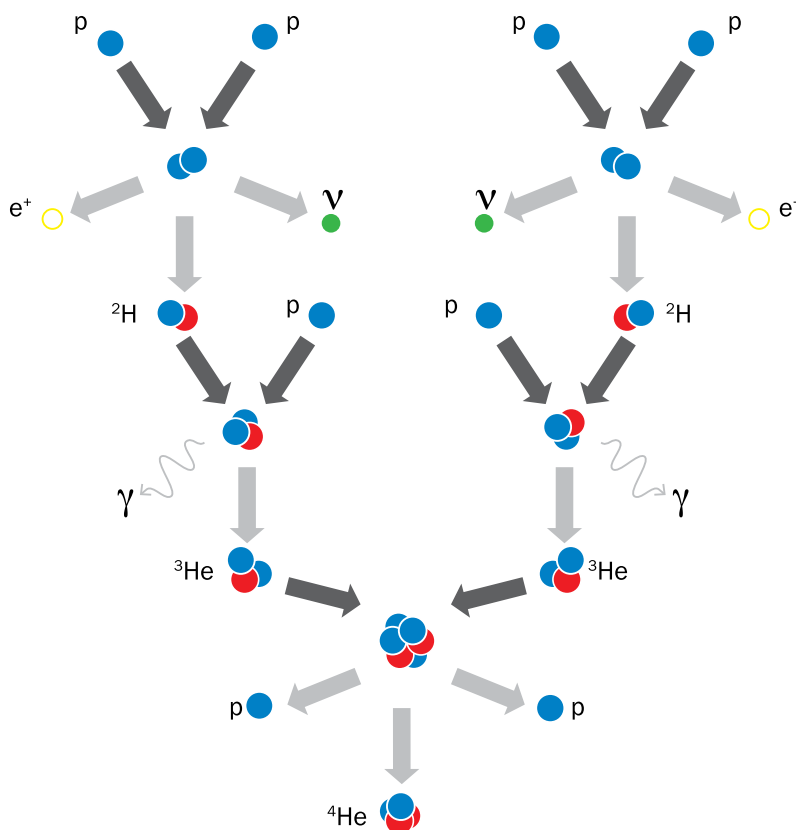
La rapida successione di eventi che accompagna la fase di combustione

dell'elio in carbonio e le fasi di combustione più avanzate dipendono dalla massa della stella. Se le stelle hanno una massa tra 10 e $40 M_{\text{sun}}$ e tra 140 e $260 M_{\text{sun}}$, nelle fasi avanzate di combustione si incontra un'instabilità che sottrae energia alla stella, portandola prima a collassare e poi ad esplodere. Per stelle di massa compresa tra 40 e 120 masse solari l'onda d'urto associata al collasso è troppo debole per indurre un'esplosione di supernova e l'intera stella collassa a buco nero. Per stelle di massa maggiore di $260 M_{\text{sun}}$, durante il collasso le temperature all'interno del nucleo diventano così elevate da indurre la foto-disintegrazione dei nuclei. L'energia della stella viene così dispersa e il collasso non può essere arrestato, portando alla formazione di un buco nero con una massa confrontabile a quella originaria della stella.

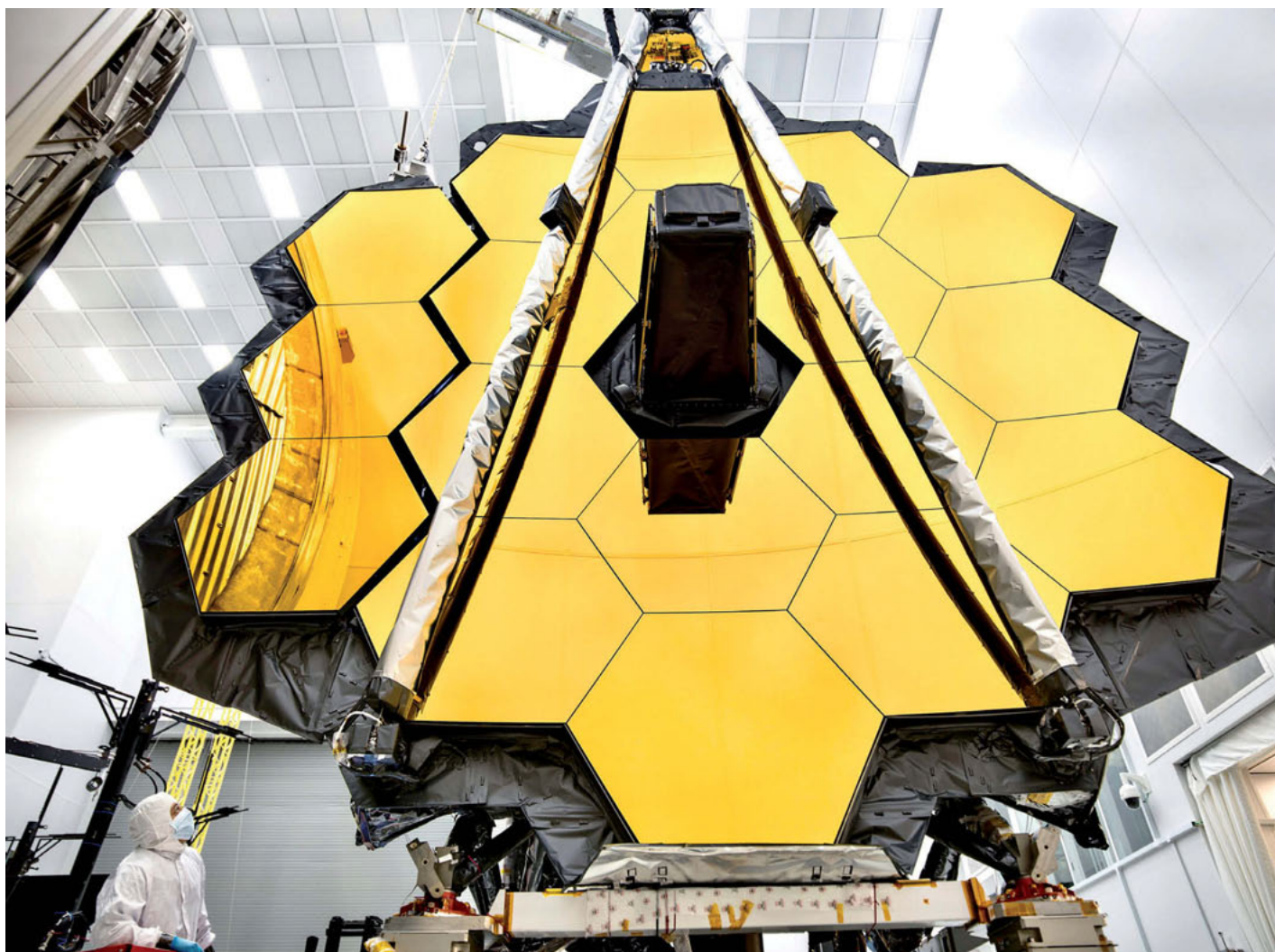
Che esplodano come supernovae o che collassino a buco nero, le prime stelle hanno un ruolo importantissimo nella catena di eventi che porterà alla

formazione di galassie, stelle e sistemi planetari. Saremo mai in grado di osservarle? L'epoca remota in cui si formano e la breve durata della loro vita rendono molto difficile la loro osservazione diretta, anche con il James Webb Space Telescope (Jwst), il telescopio spaziale che verrà messo in orbita nel 2019. È probabile, però, che il telescopio Jwst sarà in grado di osservare le rare ma potenti esplosioni di supernovae con masse tra 140 e $260 M_{\text{sun}}$. Infine, le prime stelle che terminano la loro vita in modo meno appariscente e collassano formando un buco nero potrebbero rappresentare i piccoli semi da cui si formano i buchi neri supermassicci che sappiamo esistere nei nuclei di quasi tutte le galassie, compresa la Via Lattea.

Buchi neri con masse fino a 10 miliardi di volte la massa del Sole sono stati osservati anche nei nuclei delle galassie antiche, quando l'universo aveva meno di 1 miliardo di anni e comprenderne il meccanismo di formazione rappresenta una delle grandi frontiere dell'astrofisica.



c. La “catena protone-protone”, il primo ciclo di combustione che si sviluppa in una stella, è ancora il processo dominante nella combustione del Sole: nell'interazione tra due protoni con sufficiente energia cinetica, uno di essi può trasformarsi per interazione debole in un neutrone, un positrone e un neutrino, permettendo la formazione di uno stato legato p-n, ossia un nucleo di deuterio (^2H). Il deuterio può successivamente assorbire un altro protone, trasformandosi nel nucleo di elio-3 (^3He) con emissione di un fotone. Due nuclei di elio-3 possono ora fondersi in un nucleo di elio-4 (^4He), liberando due protoni. L'energia cinetica di tutti gli oggetti prodotti è maggiore di quella dei sei protoni di partenza: la catena produce complessivamente oltre 26 MeV di energia cinetica, che contribuiscono all'energia termica della stella.



La speranza è di riuscire a osservare questi buchi neri quando si “attivano”, ovvero quando aumentano la loro massa accrescendo la materia che gli orbita vicina che, scaldata, emette radiazione. Alcuni di questi buchi neri potrebbero trovarsi in sistemi binari e, alla loro coalescenza, emettere segnali gravitazionali del tutto simili a quelli recentemente scoperti, ma a frequenze molto più basse, che non potrebbero

essere rivelati dagli strumenti Ligo/Virgo (vd. in *Asimmetrie* n. 21 p. 10, ndr) a causa dell'interferenza dovuta a tante fonti di rumore presenti sulla Terra. Per la loro misura dovremmo attendere il 2034, quando inizierà la missione Lisa, la prima antenna gravitazionale nello spazio. Ci avviciniamo sempre di più a comprendere come l'universo sia passato dal buio alla luce e il futuro di questa ricerca è luminoso.

d.
Lo specchio del James Webb Space Telescope (Jwst) a Goddard durante la sua costruzione nel Johnson Space Center.

Biografia

Raffaella Schneider è professore presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma. Autrice di più di 100 pubblicazioni scientifiche, si occupa della formazione ed evoluzione di stelle, buchi neri e galassie nell'universo primordiale. Nel 2012 ha vinto uno Starting Grant dello European Research Council per il progetto “FIRST: the first stars and galaxies”. Svolge una intensa attività divulgativa rivolta alle scuole, ai bambini e al grande pubblico.

Link sul web

<http://www.eso.org/public/outreach/>
<http://www.esa.int/Education>
<http://www.oa-roma.inaf.it/FIRST/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.5