

PREMESSA A QUALSIASI "DISCORSO" SULL'ORIGINE DEL SISTEMA SOLARE

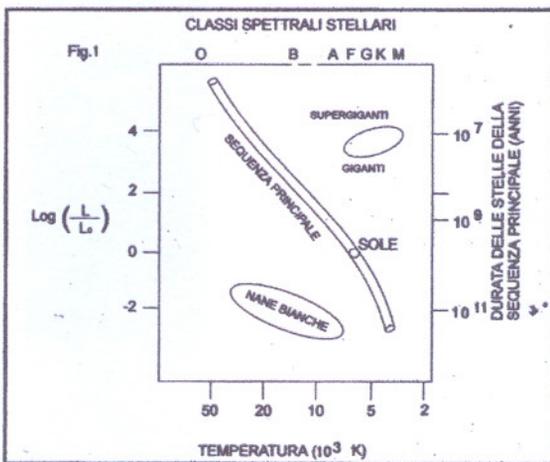
Una base per l'autoaggiornamento *del dott. Piero Pistoia*

È estremamente complesso ricostruire origini e sviluppo dei corpi celesti a partire da fatti e osservazioni, 1) per l'estrema lentezza del processo evolutivo dei sistemi in esame sia rispetto alla vita dell'uomo, sia all'intera epoca civile della terra; 2) per l'indeterminatezza delle diverse fasi in fenomeni complessi (numerosissime particelle), perchè ad ogni stadio basta pochissimo per avere un cambiamento di direzione evolutiva, quasi un atto di volontà che indebolisce le relazioni di causalità, e, infine, 3) perchè i "fatti" possibili sono in numero illimitato e la rilevanza di alcuni di essi è determinata dalla teoria che vogliamo costruire (*non ci sono "fatti" ma solo teorie*, J. P. Feyerabend). Se "leggiamo" infatti il Sistema Solare con il linguaggio delle teorie scientifiche che conosciamo (Meccanica, magnetoidrodinamica, chimica e fisica nucleari...), individuamo una serie di informazioni o caratteristiche osservabili, che si configurano come "fatti" all'interno di questo ambiente teorico. Tali fatti sono stati "previsti" e "calcolati" nell'ultima fase del divenire dell'area cosmica in cui sono sorti, considerata come il miglior calcolatore di se stessa. Quest'ultima affermazione è la conseguenza, non sempre esplicitata, del postulato che il mondo possa essere compreso e spiegato dalla mente umana e che il cosmo "calcoli" secondo le nostre concezioni. È di questo divenire che questi fatti rimangono come ultimo indizio (pensiamo che fatti diversi rimanderebbero probabilmente a origini e processi diversi).

Si considerano rilevanti - e la rilevanza, come accennato al punto 3), è funzione del percorso teorico per costruire la teoria - regolarità all'interno del Sistema Solare attuale del tipo: il 99.87% della massa totale è concentrata nel sole, ma solo lo 0.54% del momento angolare dell'intero sistema ⁽¹⁾, mentre i pianeti, specialmente Giove e Saturno, hanno solo lo 0.13% della massa e quasi tutto il momento angolare del sistema (99.46%), le rotazioni intorno al sole e intorno ai pianeti avvengono per lo più nello stesso verso e sullo stesso piano, le distanze dal sole dei pianeti non sono casuali ⁽²⁾, il gruppo dei pianeti così detti interni hanno caratteristiche chimico-fisiche diverse da quelli esterni...; e fatti più specifici come misure di grandezze fisiche particolari, (il periodo di rotazione del sole è 23.5 giorni, la massa solare è $1,989 \cdot 10^{30}$ Kg, il diametro attuale del sole è $1,39 \cdot 10^9$ m, la sua velocità periferica equatoriale è 2 Km/s ...); altri "fatti" verranno ricavati dall'osservazione del cielo lontano e dalle misure che su esso riusciamo a fare (vedere dopo); osservazioni e misure sempre all'interno di teorie. Consideriamo tutti questi fatti, diciamo di primo livello, come "orme fossili" di uno stesso processo evolutivo che coinvolge nebulose e stelle. Il processo di formazione di un sistema planetario infatti, se si verificano certe condizioni, è ripetibile all'infinito dovunque nasca una stella, perchè riteniamo che i sistemi planetari trovino la loro origine all'interno della storia evolutiva delle stelle stesse e questo è un ulteriore postulato della ragione. Sembra confermato sperimentalmente (A. Coradini et al., 1980) che pianeti e sole abbiano avuto origine dalla stessa materia e non che i primi derivino dal secondo; elementi pressochè assenti nel sole, perchè da esso in qualche modo precocemente utilizzati, come il D (deuterio) ⁽³⁾ e il Li (litio), sono presenti invece nel materiale interstellare e nei pianeti, mentre il ferro è ugualmente distribuito. Seguire così la vita di una stella può condurci ad un sistema planetario. Si tratta di un "racconto" plausibile all'interno di una delle due classi di teorie relative all'oggetto costruite dall'uomo nel corso della storia. L'una invoca una forza esterna al fine di formare i pianeti; l'altra trova invece l'energia per formare i pianeti all'interno di una nebulosa solare ancestrale. Ed è quest'ultima che alla fine sembra prevalere.

L'evidenza sperimentale per la formazione delle stelle è basata 1) sulla ben conosciuta correlazione fra stelle giovani e nubi di gas e 2) e

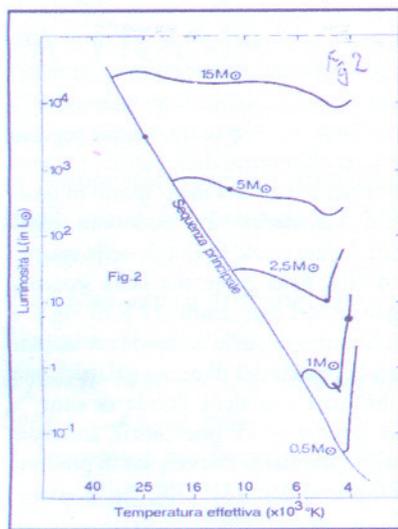
sul fatto che le stelle tendono a formarsi in clusters. Se escludiamo i brevi tempi in cui una stella è rapidamente variabile o esplosiva, non potremo mai "vedere" l'evoluzione di una stella. L'unica possibilità di indagine si riduce ad una sola istantanea dell'Universo visibile; tentando di stabilire da essa relazioni evolutive, se è vero che guardando sempre più lontano, vediamo situazioni del passato (per la finitezza della velocità della luce) e la formazione di stelle continua anche oggi, offrendo alla visione spaziale stelle in stadi diversi di evoluzione. Questo perchè la creazione dell'Universo non è terminata: i corpi celesti sono in continua nascita e altri stanno morendo. Nelle zone dove attualmente si formano stelle (es., nelle migliaia di nubi di gas e polveri all'interno della nostra galassia) si proietta continuamente il film dell'origine di un possibile sistema planetario. L'origine di una stella, tipo il nostro sole, avviene all'interno di una nube stellare da considerare come frammento (figura in basso della sequenza a fig.0) di una molto più massiva (10^3 masse solari) che nel collasso si frazionerà originando un migliaio di stelle (cluster). Tali nubi stellari in generale non sono costituite da materiali avanzati dalla condensazione in stelle durante la formazione della galassia in cui sono incluse (A. Coradini, 1980); una buona parte di tale materia doveva essersi formata all'interno delle fornaci nucleari di stelle preesistenti e successivamente lanciata nello spazio in qualche modo (per es., esplosioni di *supernovae*). Tali esplosioni, come vedremo dopo ⁽⁵⁾, rappresentano la fase finale di vita di stelle massicce, situate all'inizio della loro vita, nella parte alta della sequenza principale, che è la fascia diagonale del diagramma H-R di Fig.1, e nella zona delle super-giganti. Si tratta di stelle a rapida evoluzione (milioni di anni), più frequenti in prossimità di nuclei galattici, con distribuzione nel tempo sembra pari a qualche decina di anni ⁽⁵⁾. Esistono infatti, in aspetti del sistema solare (meteoriti), anomalie rispetto alle abbondanze cosmiche standard. La presenza di prodotti di decadimento di radionuclidi primordiali (Al^{26} , I^{129} , Pu^{244}), sim-



tizzati solo nelle esplosioni di *supernovae*, avvalorano questa ipotesi. Tenendo conto dei tempi di decadimento, si deduce anche che almeno due esplosioni di *supernovae* hanno inquinato per es., la nube protostellare; l'ultima potrebbe aver immesso in essa Al^{26} e contribuito ad innescare il suo collasso gravitazionale. Sembra infatti che per innescare la nascita di una nuova stella sia necessaria l'esplosione di una *supernova* (G. Alfieri, 1980). È interessante riflettere che la maggior parte degli atomi che costituiscono i nostri corpi

sono stati costruiti proprio all'interno di antiche stelle!

Di questa indagine ne è esempio il diagramma di Hertzsprung-Russel (H-R), lo strumento più potente dell'odierna astrofisica, che riporta la distribuzione dei diversi tipi di corpi celesti, in vari stadi di evoluzione (Fig.1), in un piano cartesiano che ha, sulle ascisse "rovesciate", colore o temperatura superficiale, misurabile dall'analisi degli spettri; sulle ordinate, se le stelle in studio hanno tutte la stessa distanza (ammassi stellari), la *magnitudine*, misurabile dalla potenza in arrivo, o altre grandezze correlate; nel caso generale, la *magnitudine assoluta* (P. Galeotti-L. Nuvoli, 1978). Da questa immagine, guidati dalla teoria della struttura stellare, possiamo seguire i processi vitali delle stelle, in particolare quelle giovani (*tracce di Hayashi*), comparando così teoria ed osservazioni. La Fig.2 riporta i percorsi teorici seguiti dalle protostelle e dalle stelle giovani nella loro evoluzione (A. Braccisi, 1992). Oggetti molto utili per studiare sperimentalmente l'evoluzione delle stelle tramite i diagrammi H-R, sono gli Star Clusters o ammassi stellari, perchè si presume che le stelle che li compongono costituiscano un gruppo omogeneo, cioè abbiano distanza, origine ed età comune e la stessa composizione chimica iniziale (le diverse posizioni corrispondono allora a diverse masse). Nei cluster giovani (es., NGC2362 che ha meno di un milione di anni), le stelle del tipo T-Tauri, Herbig Ae e Be, le *flare stars* e le infrarosse non sono ancora arrivate alla sequenza principale e sono situate al di



sopra di essa, e quelle più massive (di colore blu) si trovano ancora nella parte alta della seq. principale. Mettendo a confronto diagrammi H-R di vari ammassi stellari di diversa età (a partire da appena 200000 anni, l'ammasso M16 del Serpente, fino a più di 10 miliardi di anni, l'ammasso globulare M3), si possono ricavare utili indicazioni sull'evoluzione delle stelle (M. Hack, 1979 e 1980). Man mano che un ammasso

diventa vecchio, poichè le stelle più massive sono le prime a lasciare la seq. principale, il diagramma H-R presenterà nella parte alta una lacuna di stelle che si estende con l'età, lasciando il segmento inferiore sempre più ridotto. Così la luminosità di uscita (ordinata del confine superiore dell'attuale seq. principale) sarà legata al tempo di vita dell'ammasso.

L'evoluzione iniziale procede da una fase di *proto-stella* fino alla fase di *stella di pre-sequenza principale*, mentre, in generale, si ha una contrazione con materia che cade verso un nucleo di attrazione che si scalda per l'energia gravitazionale liberata. Parlando in generale (G. O. Abell, 1974), la contrazione è più rapida nelle parti interne per cui qui la pressione diviene prima sufficiente a fermare l'ulteriore caduta di materia (equilibrio idrostatico), mentre la materia esterna sta ancora cadendo nella stella. All'equilibrio lo *stellar embryo* e la giovane stella sono in situazione di convezione completa, cioè l'energia è portata dal centro alla superficie da lente correnti convettive sotto forti gradienti termici. Se si irradia energia all'esterno, diminuiscono pressione e temperatura all'interno; prevale la forza gravitazionale, riprende la contrazione, aumenta pressione e temperatura riportando l'equilibrio. La nuova pressione e temperatura però sono un po' superiori a prima, perchè la stella si è contratta e più massa si è avvicinata al centro, così che la pressione deve sopportare un maggior peso di materiale sovrastante. Si irradia ancora energia all'esterno e il processo ricomincia. Gradualmente così si irradia energia nello spazio, mentre pressione e temperatura all'interno continuano ad aumentare, per riuscire a mantenere l'equilibrio idrostatico (*equilibrio instabile*).

Più in particolare nella fase di *proto-stella* sono stati evidenziati almeno quattro aspetti caratteristici (Stahler, 1991).

1) Il nucleo, ad un certo punto, raggiunge la temperatura di fusione nucleare del deuterio (circa un milione di gradi Kelvin) che, nonostante la bassa concentrazione dell'isotopo, viene ad alimentare la convezione interna ed il rifornimento di deuterio nel centro⁽⁴⁾. Se la *proto-stella* accumula una massa almeno due volte quella del sole, sembra che all'interno si instauri uno schermo radiativo, interrompendo la convezione e il rifornimento di deuterio al centro che diventa presto stabile per l'esaurimento rapido del combustibile. La fusione si sposta all'esterno dello schermo come pure la convezione, *con espansione della proto-stella*. Se la massa è minore tale fase radiativa avviene a livello di stella pre-sequenza principale (vedere dopo).

2) Gas e polveri, ad alto momento angolare, cadendo sulla protostella, la "mancano", orbitando intorno e costituendo un disco equatoriale (*disco circumstellare*). La materia per raggiungere la proto-stella deve poter perdere momento angolare (per attrito?). Comunque la materia che cade urta una superficie di discontinuità per la pressione (*fronte d'urto di accrescimento*), perdendo rapidamente energia sulla stesso fronte con aumenti di temperatura fino al milione di gradi, seguiti da rapido abbassamento con deposito strato su strato a costituire la proto-stella.

3) La protostella durante la sua evoluzione non è visibile con i telescopi ottici, perchè la radiazione emessa viene assorbita ed emessa di nuovo in onde lunghe dall'involucro di polvere opaco. Si tratterebbe di *stelle infrarosse*, le cui immagini sono riprese a migliaia da satelliti artificiali. Nell'ambito dell'emissione infrarossa, però, per distinguere una protostella da altre vere stelle, stiamo ancora cercando di osservare particolari spostamenti doppler indicativi di movimenti di gas verso il centro.

4) Al termine della sua evoluzione la protostella sprigiona un misterioso fortissimo vento protostellare che porta via dal nucleo denso la massa in eccesso rispetto a quella che alla fine costituirà la nuova stella, vento che sembra permanga, pur più debole, anche nella fase successiva di stella pre-sequenza principale. Sono stati osservati flussi di gas molecolari che si allontanano da sorgenti infrarosse (venti protostellari lungo gli assi di rotazione) e da precoci stelle della pre-sequenza principale (venti radiali, sembra di grande importanza per la formazione dei pianeti). Tali flussi di fotoni e radiazioni corpuscolari, nuclei ed elettroni, interagendo con gas e polveri, potrebbero spingerli fuori dal sistema o spostarli sul disco lontano, contribuendo a trasferire alla periferia la maggior parte del momento angolare della stella pre-sequenza principale, coadiuvati per es. da campi magnetici "congelati" su gas fortemente ionizzati (plasma). Dopo l'esaurimento del deuterio e la dispersione del nucleo denso, in un punto della linea che S. W. Stahler chiama "curva della nascita" (la cui traccia sul percorso del sole è il puntino riportato in Fig.2), la stella appare improvvisa, visibile e ben conformata agli strumenti ottici. In particolare, nella fase di stella pre-sequenza principale, la singola stella giovane, sotto la "curva di nascita", in equilibrio completamente convettivo, continua a contrarsi secondo la sua massa fino ad un certo raggio con diminuzione di magnitudine e luminosità al passare del tempo (per masse solari, ramo quasi verticale a destra del trattino di Fig.2), perchè la contrazione della protostella riduce l'area superficiale capace di emettere radiazioni. Ad un certo punto, per masse intorno a quella solare, nella zona centrale l'equilibrio diventa radiativo con espansione e aumento di temperatura (a sinistra del trattino sul percorso di Hayashi per una massa solare, Fig.2), mentre le correnti di convezione si estendono sempre meno profondamente oltre la superficie della stella. Si sposta così verso sinistra quasi orizzontalmente nel diagramma H-R, fino a raggiungere, sulla sequenza principale, una pressione e temperatura tali da innescare la fusione dell'idrogeno (temperature dell'ordine di 10 milioni di gradi).

Le numerose stelle variabili irregolari, azzurre o rossastre, (della classe T-Tauri a cui ha appartenuto anche il sole e altre, come già accennato, situabili al di sopra della sequenza principale), immerse nelle

nebulose diffuse della nostra galassia, presentano, oltre alle normali righe scure di assorbimento, righe luminose di emissione da parte dell'esteso involucro di gas forse eccitato da luce ultravioletta o da onde d'urto meccaniche. Loro caratteristica rilevante è la particolare abbondanza di litio, di regola precocemente "bruciato" in elio. La variabilità può essere associata alla loro instabilità funzionale e la composizione chimica è simile a quella della materia diffusa da cui presero origine, come le meteoriti petrose (condriti carboniose). Non è da escludere così l'ipotesi che tali variabili nebulari siano *stelle neonate* (P. Tempesti, 1980).

La stella, raggiunta la seq. principale, si trova in uno stato di equilibrio a lungo termine (fase stabile), e vi permarrà fino all'esaurimento del combustibile idrogeno, mentre il tempo di permanenza dipenderà dalla massa: $\tau = 10^{10} (M/M_{\odot})^{-2.5}$ anni (M. Hack, 1981; P. Maltese, 1995); per stelle massive (es., $M/M_{\odot} = 20$) si calcola in milioni di anni ⁽⁵⁾; per il sole, $M/M_{\odot} = 1$, in miliardi di anni. Mentre l'intero percorso di una stella giovane, ben definito e uguale per tutte le stelle di una certa massa (tracce di Hayashi), dura un tempo dell'ordine di qualche decina di milioni di anni per una stella di massa solare e molto meno per masse maggiori. Il nostro sole starà sulla sequenza complessivamente circa 10 miliardi di anni dei quali 5 già trascorsi e alla fine di questo periodo si trasformerà in una gigante rossa che inghiottirà i pianeti interni, compresa la terra e infine in una *nana bianca* ⁽⁵⁾, stella ad altissima densità, un "diamante stellare" per la cristallizzazione del suo nucleo di carbonio-ossigeno (I. Mazzitelli, 1997). Comunque sia, è durante questo percorso pre-sequenza principale (fase di protostella o fase iniziale di stella) che probabilmente si creano le condizioni per la formazione dei sistemi planetari.

Altra caratteristica essenziale delle stelle di classe T-Tauri, che, come già accennato, ci offrono un'idea del sole durante le prime fasi della sua evoluzione, è che più del 50% di esse (A. P. Boss, 1995) sembrano possedere una compagna (stelle binarie). Ciò ha portato a presumere da ben cinque autori (*Nature*, 308, 1984), anche per il sole, una compagna invisibile in orbita con periodo di circa 30 milioni di anni. Tale stella potrebbe perturbare gravitazionalmente la materia che orbita oltre il nostro sistema solare (nebulosa di Oort), provocando sciami di comete verso i pianeti interni ogni volta che si avvicina al sole. Fu considerata così la responsabile delle estinzioni di massa che sembrano avvenire con lo stesso periodo (per questo fu detta Nemesis, la personificazione greca della giusta collera). Ma se le estinzioni colpiscono secondo regole che trascendono piani e finalità di qualunque vittima, il nome più appropriato sarebbe Shiva, il neutrale, il dio della distruzione, ma anche della creazione (G. J. Gould, 1985). Oggi siamo alla ricerca anche di un'altra compagna ancora più difficile da individuare, la *nana bruna*. Si tratta di una stella per cui $M/M_{\odot} =$ da 0.01 a 0.05; all'inizio brucia solo deuterio e finisce fredda.

Le stelle della zona convettiva e in generale le stelle giovani, mostrano una rotazione equatoriale rapida (da 50 a 500 Km/s); in particolare al loro interno è stata individuata una correlazione significativa fra rotazione ed età (A. Unsöld, 1969): sembrano avere la caratteristica di perdere momento angolare col tempo. Le stelle vecchie ruotano molto più lentamente con velocità equatoriali non superiori

ri a 5 Km/s (per il nostro sole: $v_{\text{eq}} = 2$ Km/s). Questo significa che la protostella o la stella giovane ad un certo punto del loro processo di contrazione dalla nebulosa planetaria non rispettano più la conservazione del momento angolare in un sistema isolato, che prevede un continuo aumento di velocità di rotazione con la contrazione? ⁽⁶⁾ Ma forse quando il valore della velocità di rotazione del protosole fu del tipo caratteristico di una stella giovane e sviluppò forze di rotazione tali da prevalere sull'attrazione gravitazionale, deve essere sopravvenuto un fenomeno di trasferimento del momento angolare, come già accennato, dall'interno verso l'esterno fin dove oggi si trovano i maggiori pianeti (Giove e Saturno), tanto da spiegare una rotazione attuale del sole di soli 2 Km/s, creando i presupposti per la formazione del sistema solare all'interno della interazione dei due dischi di gas e polvere in entrata ed in uscita. "L'associazione tra vento stellare e campo magnetico produce, come già accennato, perdita di momento angolare specifico con notevole rendimento" (A. Coradini et al., 1981). La bibliografia di massima verrà riportata alla fine del prossimo articolo "LA NEBULOSA SOLARE - caratteristiche e tendenze evolutive".

⁽¹⁾ $\Sigma m_{\text{visibile}} = 1.7 \cdot 10^{48} \text{ g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, o $1.7 \cdot 10^{41} u_1$ nel sistema MKS; $\Sigma m_{\text{visibile}} = 3.167 \cdot 10^{50} u_1$, o, nel sistema MKS, $3.167 \cdot 10^{43} u_1$.

⁽²⁾ I semiassi maggiori dei pianeti, *a*, compresi i Pianetini ed escluso Plutone, formano quasi una serie geometrica del tipo: $\Delta a/a$ circa = 1, cioè la differenza fra i semiassi maggiori di pianeti contigui, misurata in unità dei medesimi, è costante e circa uguale a uno.

⁽³⁾ ¹H¹, isotopo dell'idrogeno con un protone ed un neutrone nel nucleo; nel cosmo, due nuclei di idrogeno su centomila sono di deuterio.

⁽⁴⁾ Il deuterio (²H¹; $E_{\text{legame}} = 2.22$ Mev; per nucleone 1.11 Mev), come si vede dalla Tabella e dalla Fig.3, è meno stabile dell'elio (particella alfa, ⁴He²; $E_{\text{legame}} = 28.3$; per nucleone, 7.07). L'energia di legame è l'energia che si libera durante la formazione del nucleo dal sistema disperso dei suoi componenti; ovvero è l'energia che ci vuole per disperdere i componenti di un dato nucleo (lavoro per allontanarli all'infinito). Così i nucleoni legati sono in uno stato di energia potenziale attrattiva, di tipo negativo, di valore pari all'energia di legame cambiata di segno. Così i nuclei a bassa energia di legame (alta energia potenziale), se ci sono le possibilità, potrebbero trasformarsi per fusione nucleare in nuclei a più alta energia di legame, nel verso della diminuzione dell'energia potenziale. L'energia liberata nella trasformazione, differenza fra le energie potenziali, è calcolabile anche tramite la misura del difetto di massa ΔM nel processo, usando la relazione $\Delta M \cdot c^2 = \Delta E$ (Il Sillabario N.4-1995). Per i calcoli (da utilizzare la Tabella N.1) si deve tener conto che 1 Mev = $1.6 \cdot 10^{13}$ Joule; che le masse atomiche si misurano in u.m.a. (unità di massa atomica), ricavate definendo la unità di massa atomica del ¹²C¹² pari a 12.0000000 u.m.a. e che 1 u.m.a. $\cdot c^2 = 931.5$ Mev e 1 u.m.a. = $1.6605 \cdot 10^{-27}$ Kg. Così se conosciamo le masse dei 4 nucleoni del nucleo dell'elio (due protoni, $2 \cdot 1.0078252$, e due neutroni, $2 \cdot 1.0086654$) e la massa del nucleo di elio, 4.0026033, $\Delta M = 0.0303779$ u.m.a., che moltiplicato per 931.5 Mev si ottiene 28.3 Mev, l'energia di legame della particella alfa. Allo stesso risultato si perviene facendo la differenza delle due energie potenziali, quella di partenza - quella di arrivo: $0 - (-28.3)$. In generale, nel primo tratto della Fig.3, gli elementi fondono, in un ventaglio di reazioni nucleari per raggiungere i primi tre picchi della curva, He, C, O, ad alta energia di legame.

⁽⁵⁾ In generale, senza entrare nel merito, per stelle massive (per es., $M/M_{\odot} = 20$), finito di bruciare, sulla sequenza principale, l'idrogeno con formazione di elio, il nucleo della stella si contrae e si scalda fino a bruciare l'elio in ¹²C (*supergiganti rosse*, Fig.1). Esaurito l'elio, il nucleo della stella si contrae di nuovo bruciando elementi sempre più pesanti (*supergiganti blu*, ¹²C¹² in ¹⁶O ecc., fino a formare il ferro, il cui nucleo atomico (Fe-59) ha legami molto forti (vicino al massimo della curva di Fig.3) e quindi una ulteriore fusione assorbirebbe energia, invece di liberarla. Quest'ultimo collasso sbilanciato scatena un'esplosione per "rimbalzo" (*supernova*) producendo un'onda d'urto che scaglia nello spazio la maggior parte della materia della stella (H. Bethe et al., 1985; S. Woosley et al., 1989). In stelle come il sole il collasso è bloccato dalla pressione di elettroni degeneri, quando il

nucleo contiene C e O (*Nana bianca*). Se $M/M_{\odot} =$ da 1.4 (limite di Chandrasekhar) a 8 esplodono, una ogni 450 anni (P. Maffei, 1973), strane supernovae di Tipo I (esplosione e distruzione di nane bianche che in qualche modo hanno accumulato più massa o giovani stelle di grande massa o altro?), altrimenti di Tipo II, già descritto, ogni 50 anni (I. Shklovsky). In quest'ultimo caso, rimarrebbe come residuo una stella di neutroni o un buco nero. (F. D. Seward et al., 1985)

⁽⁶⁾ Si pensi alla ballerina che ruota più velocemente abbassando le braccia ($\Sigma m v = \text{cost}$; $\Sigma r^2 m \omega = \text{cost}$; $\omega = \text{cost}$, dove l è il momento inerzia).

Dr. Piero Pistoia

| Z | A | Mass in <i>a</i> | Binding energy in Mev | |
|---------------------------------|----|------------------|------------------------|-------------------------------|
| | | | Total (ΔE) | Per nucleone ($\Delta E/A$) |
| ¹ H ¹ | 0 | 1 | 1.0086654 (± 4) | — |
| ¹ H ² | 1 | 1 | 1.0078252 (± 1) | — |
| ² H ² | 1 | 2 | 2.0141022 (± 1) | 2.22 |
| ³ H ³ | 1 | 3 | 3.0160500 (± 10) | 8.47 |
| ³ He ³ | 2 | 3 | 3.0160299 (± 2) | 7.72 |
| ⁴ He ⁴ | 2 | 4 | 4.0026033 (± 4) | 28.3 |
| ⁴ Be ⁸ | 4 | 9 | 9.0121858 (± 9) | 58.0 |
| ⁶ C ¹² | 6 | 12 | 12.0000000 (± 0) | 92.2 |
| ⁸ O ¹⁶ | 8 | 16 | 15.994915 (± 1) | 127.5 |
| ¹² Cu ⁶³ | 29 | 63 | 62.929594 (± 6) | 552 |
| ¹⁶ Sn ¹²⁰ | 50 | 120 | 119.9021 (± 1) | 1020 |
| ²⁴ W ¹⁸⁴ | 74 | 184 | 183.9510 (± 4) | 1476 |
| ⁹² U ²³⁸ | 92 | 238 | 238.05076 (± 8) | 1803 |

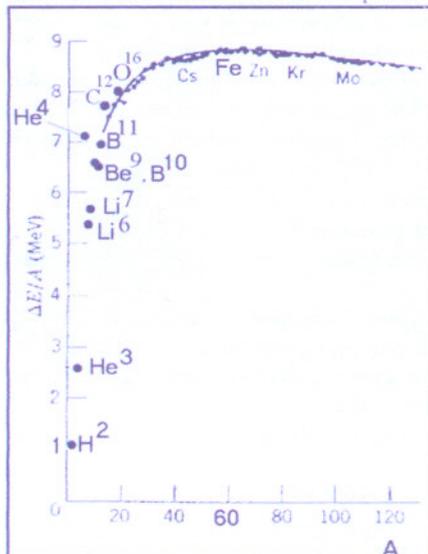


Fig. 3