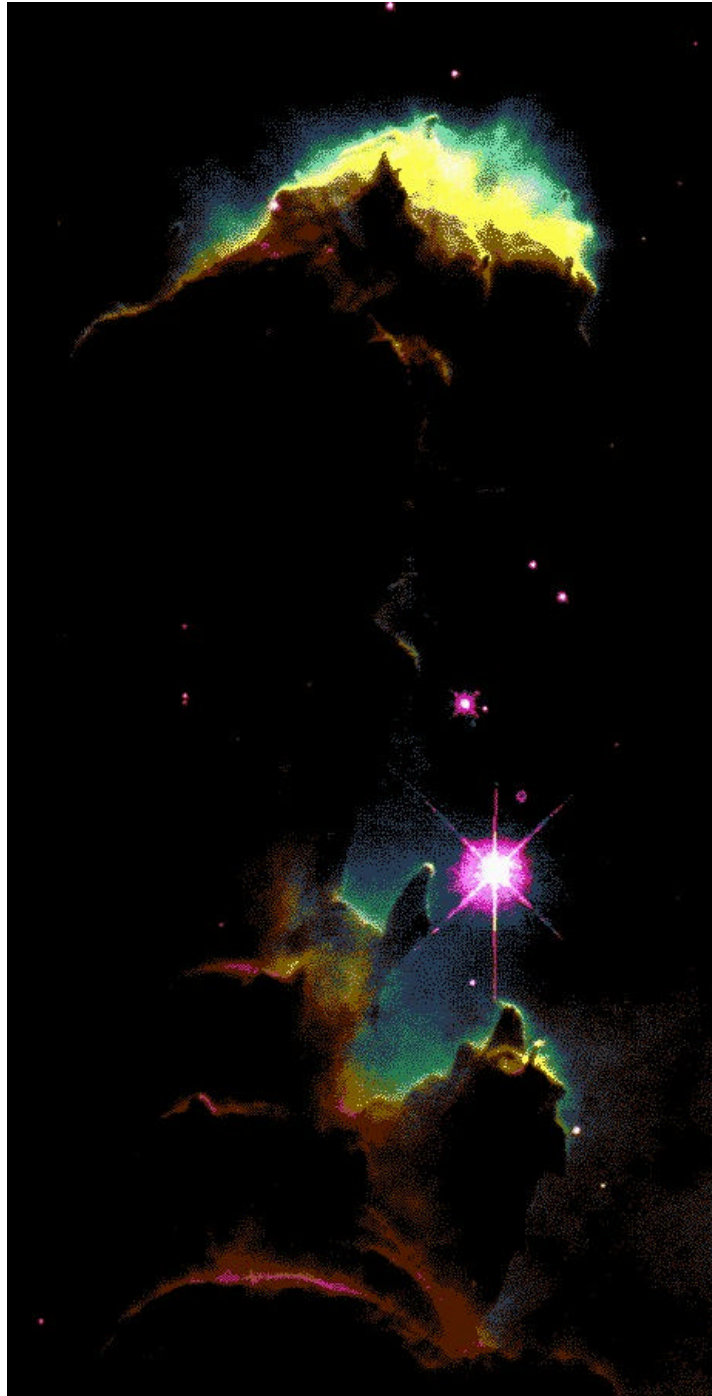


È NATA UNA STELLA

La gravità alla base della formazione delle stelle

di V. Surdin



Colonne di idrogeno e polveri interstellari freddi sono delle giganti incubatrici per nuove stelle. Queste fanno parte della Nebulosa dell'Aquila, una regione con molte stelle in formazione che si trova nelle vicinanze, cioè a 7000 anni-luce di distanza nella costellazione del Serpente.

La nostra storia inizia in Gran Bretagna, all'inizio del XX secolo. Alcuni anni dopo essersi brillantemente laureato all'Università di Cambridge, James Hopwood Jeans (1877 – 1946), eseguì una serie di studi in vari campi della fisica teorica: diede alle stampe una monografia sulla teoria cinetica dei gas e vari saggi sulla fisica molecolare e la teoria della radiazione. Sotto l'influenza di George Howard Darwin, professore di Fisica e Astronomia all'Università di Cambridge (il figlio del famoso biologo Sir Charles Darwin), portò a termine svariati studi nel campo dell'astrofisica teorica, tra cui il fondamentale *Stabilità di una nebulosa sferica*, pubblicato nel 1902 negli *Atti della Royal Society* (Londra).

Quest'opera, che descrive il comportamento degli addensamenti di gas sotto l'azione di forze gravitazionali intrinseche, divenne la pietra miliare della moderna teoria dell'instabilità gravitazionale, che spiega virtualmente l'origine di tutti gli elementi strutturali dell'Universo, dalle galassie e dei loro ammassi alle stelle, pianeti e relativi satelliti.

Le dimensioni e le masse caratteristiche delle condensazioni gassose gravitazionalmente instabili oggi vengono chiamate "di Jeans", e sono indicate dalla lettera J . Per esempio, M_J è la massa di Jeans, e R_J è il raggio di Jeans.

George Howard Darwin poteva certo andar fiero di aver sollecitato l'interesse del giovane Jeans verso l'astronomia: il suo studente contribuì in modo sbalorditivo allo sviluppo della cosmogonia e delle dinamiche stellari. Tuttavia, Darwin, che nel 1899-1900 era il Presidente della Royal Astronomical Society, non poteva prevedere che Sir James avrebbe ricoperto la stessa carica un quarto di secolo più tardi, né che avrebbe istituito le Darwin Lectures, un ciclo di conferenze annuali intitolato al suo insegnante.

Il legame che univa i due astronomi era molto profondo. George Darwin era famoso per i suoi studi sulle maree e sulla forma dei corpi fluidi rotanti. Jeans proseguì gli studi sul ruolo cosmogonico dei fenomeni di marea e sulla teoria delle maree nell'origine del sistema solare, che era molto popolare nella prima metà del XX secolo. Secondo questa teoria, la nascita di un sistema planetario è un evento estremamente raro causato dal passaggio ravvicinato di una stella vicino a un sole, che "strappa" via parte della materia protoplanetaria condensata dallo shell del sole. Sebbene tale ipotesi abbia un interesse più che altro storico, il meccanismo di interazione delle maree indubbiamente gioca un ruolo importante nel mondo delle galassie, ammassi stellari, e probabilmente anche nella formazione delle stelle, cioè in quella fase detta di evoluzione protostellare.

Torniamo alla più importante opera di Jeans: la teoria dell'instabilità gravitazionale. Dopo che ne ebbe posto le basi, all'inizio del XX secolo, ci vollero altri 70 anni perché gli astronomi scoprissero il componente del mezzo interstellare che è direttamente coinvolto nella formazione delle stelle. Una volta applicata la teoria di Jeans a questo componente, è possibile anticipare i parametri delle stelle neonate. L'intervallo tra la previsione teorica e la verifica sperimentale è incredibilmente lungo per una scienza moderna e in rapida evoluzione. Ma vediamo su cosa si basa la teoria di Jeans.

L'origine è nell'opera del grande fisico Sir Isaac Newton (1643-1727). Cinque anni dopo che Newton pubblicò la sua legge gravitazionale, il suo giovane amico, il religioso Richard Bentley, il Master del Trinity College di Cambridge, gli chiese in una lettera di spiegare la nascita delle stelle. Gli premeva sapere se le moderne scoperte a proposito della gravità potevano essere la causa dell'origine delle stelle. (proprio per questa domanda lo consideriamo co-autore dell'idea della instabilità gravitazionale). Sir Isaac Newton nella sua prima lettera al Dott. R. Bentley (10 dicembre 1692) scrive:

“Mi sembra che, se la materia del nostro Sole e dei pianeti e di tutto l'Universo fosse sparsa uniformemente dappertutto nel firmamento, e ogni particella avesse un'innata gravità verso tutto il resto, e l'intero spazio in cui è sparsa tale materia fosse finito, la materia all'esterno di questo spazio, per la sua gravità, tenderebbe verso la materia all'interno, e di conseguenza cadere giù nel mezzo dell'intero spazio, e lì comporre una grande massa sferica. Ma, se la materia fosse disposta omogeneamente su un universo infinito, non potrebbe mai concentrarsi in un unico ammasso; una parte, infatti, andrebbe a formare una massa, un'altra parte ne formerebbe una seconda e così via, fino a formare un numero infinito di masse, disposte a grandi distanze le une dalle altre per tutto l'universo infinito. E così possono formarsi il Sole e le stelle fisse, ammettendo che la materia sia di natura lucida”.

Vediamo che Newton aveva elaborato l'idea della condensazione gravitazionale della materia primordiale, che lui considerava totalmente inerte e fredda, che non opponeva alcuna resistenza alla compressione gravitazionale. Secondo Newton, quindi ogni regione ad alta densità è soggetta ad una compressione progressiva, e la sua densità aumenterà sempre di più a causa della gravità.

Verso la fine del XIX secolo, gli studiosi di fisica avevano capito che ogni materia, compresi i gas rarefatti, è elastica: è la proprietà che soggiace a fenomeni quali la propagazione

delle onde sonore. Quindi, Jeans concluse che la compressione gravitazionale inizia solo quando la gravità supera la pressione del gas.

Per trovare delle condizioni che rendano possibile tutto ciò, dovremo avere semplici valori. Vediamo quali processi sono coinvolti nella compressione di un volume gassoso con dimensioni caratteristiche l e densità ρ . Da un lato, la forza di gravità tende a prolungare la compressione. Se il gas non avesse pressione, la materia condensata cadrebbe verso il centro nel periodo di caduta libera,

$$t_c \propto (G\rho)^{-1/2}$$

che è indipendente dalle dimensioni della perturbazione.

Questa formula si spiega con la terza legge di Keplero: si ha caduta di ogni particella verso il centro della nube sotto l'influsso della forza d'attrazione generata dalla massa $M \propto r^3$, dove a è la distanza iniziale della particella dal centro. Il tempo di caduta è pari alla metà del periodo orbitale lungo un'ellisse molto stretta, in cui un fuoco coincide con il centro della nube. Secondo la terza legge di Keplero, il moto attorno ad un'ellisse con asse maggiore a è uguale al periodo di rivoluzione circolare ad un raggio $a/2$ intorno alla massa M (ricordiamo che si tratta dell'ellisse di Keplero se le particelle cadono verso il centro di gravità e la massa della nube si conserva ad ogni r). Il periodo di tale moto circolare può essere calcolato con la seconda legge di Newton.

D'altro canto, se la gravitazione fosse assente, la pressione del gas causerebbe l'espansione della nube durante il cosiddetto "tempo dinamico", valutato in

$$t_d \propto \frac{l}{v_s}$$

dove v_s è la velocità del suono nel gas, dello stesso ordine di grandezza della velocità del moto molecolare nel gas medesimo:

$$v_s \propto \sqrt{\frac{RT}{m}}$$

(R è la costante del gas, e m è la massa molare).

È evidente che se $t_d \ll t_c$, la pressione molecolare avrà tutto il tempo di ridistribuire la materia in modo da impedire un'ulteriore compressione gravitazionale. Al contrario, quando $t_c \ll t_d$, la compressione avviene più rapidamente che non l'espansione. Troviamo ora il rapporto tra t_d e t_c :

$$\frac{t_d}{t_c} \frac{\mathbf{I}}{(Gr)^{-1/2} v_s} = \frac{\mathbf{I}}{(RT/Gm)^{1/2}}$$

Vediamo che le perturbazioni su scala ridotta ($\mathbf{I} \ll (RT/Gm)^{1/2}$) sono stabili rispetto a compressioni stocastiche, ma quelle su larga scala ($\mathbf{I} \gg (RT/Gm)^{1/2}$) risultano instabili: una volta innescate, non possono essere fermate dall'espansione del gas.

Così, il nostro ragionamento porta alla seguente valutazione di \mathbf{I}_J :

$$\mathbf{I}_J \left(\frac{RT}{Gm} \right)^{1/2}$$

da cui otteniamo un valore della massa critica M_J

$$M_J \mathbf{r} \mathbf{I}_J^3 \left(\frac{RT}{Gm} \right)^{3/2} \mathbf{r}^{-1/2}$$

Senza tener conto dei coefficienti numerici, le ultime due formule sono le famose leggi di Jeans.

Per familiarizzare meglio con i risultati ottenuti, proviamo a dedurli di nuovo dalla condizione di equilibrio per le nubi gassose sotto l'azione della pressione molecolare e della gravitazione, che, secondo le definizioni di \mathbf{I}_J e M_J , ha luogo esattamente quando $\mathbf{I} = \mathbf{I}_J$ e $M = M_J$. Il valore caratteristico dell'accelerazione di caduta libera nella nube è (ordine di grandezza)

$$g \approx G \frac{M}{\mathbf{I}^2} \approx Gr$$

La pressione del gas deve controbilanciare la forza di gravità; deve inoltre variare da zero - al confine esterno della nube - al valore:

$$P \approx \mathbf{r} g \mathbf{I} \approx Gr^2 \mathbf{I}^2$$

relativo al centro della nube (ricordiamo la formula per la pressione idrostatica $P = \mathbf{r}gh$).

Sostituendo qui il valore di P dall'equazione di stato del gas

$$P = \frac{\mathbf{r}RT}{m}$$

otteniamo gli stessi valori per \mathbf{I}_J e M_J , $\mathbf{r} \mathbf{I}_J^3$, di cui sopra.

Con calcoli più sofisticati, è possibile ottenere valori di \mathbf{I}_J e M_J più accurati (non lo proveremo in questa sede):

$$\mathbf{I}_J = \left(\frac{2RT}{Gm} \right)^{1/2}, M_J = \left(\frac{RT}{2Gm} \right)^{3/2} \mathbf{r}^{-1/2}$$

Queste semplici leggi sono le pietre miliari della teoria dell'instabilità gravitazionale; essa sostiene che se in un mezzo gassoso per qualsiasi ragione si verificano perturbazioni nella densità di varie dimensioni, quelle più vaste sono destinate a un processo irreversibile di compressione in materia densa. Tuttavia, variazioni di densità su larga scala sono fenomeni rari, e di solito nelle nubi gassose si verificano solo variazioni di piccola entità. E' quindi probabile che la compressione gravitazionale avvenga con perturbazioni che abbiano massa $M \cong M_J$.

Duecentoquarant'anni dopo la lettera di Newton a Bentley, Jeans scriveva nel suo *"Le stelle nel loro corso"* (1931): "Poniamo che all'inizio del tempo tutto lo spazio era riempito di gas... Si può provare che questo gas non poteva rimanere equamente sparso, ma iniziò subito a condensarsi in globi. Possiamo calcolare quanto gas serve per formare ogni globo."

Sfortunatamente Jeans sopravvalutava le sue possibilità: non poteva fornire prove sufficientemente corrette della validità delle sue formule, semplicemente perché all'epoca non si sapeva molto delle proprietà fisiche e della composizione del gas interstellare da cui traggono origine le stelle. In ogni caso, è un compito che possiamo portare avanti noi oggi, usando i dati sperimentali.

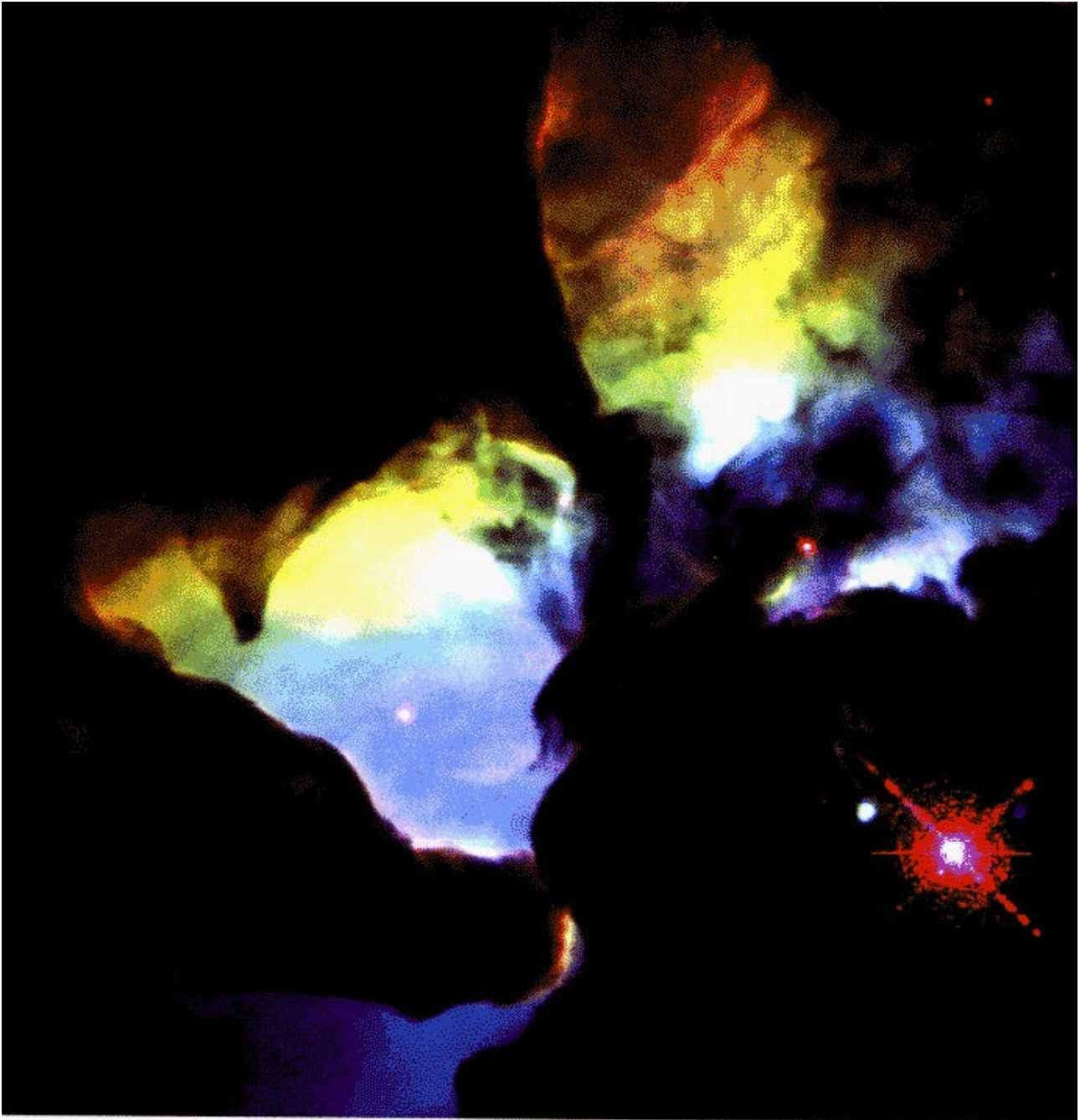
Gli astronomi hanno dimostrato che la composizione chimica delle stelle e del gas interstellare è piuttosto stabile: ogni 1000 atomi di idrogeno ce ne sono 100 di elio e 2-3 di altri elementi (più pesanti). Nelle dense e fredde nubi che generano le stelle, l'idrogeno esiste nella forma molecolare H_2 con massa molare $m(H_2) = 2 \text{ g/mol}$. Tenendo conto per gli altri elementi chimici, la massa molare media del gas interstellare è $m_{media} = 2.3 \text{ g/mol}$.

In astronomia, la densità del gas interstellare $\rho = (m_{media} / N_A) n$ è espresso in termini di concentrazione dell'idrogeno molecolare, $n(H_2)$. Tenendo conto della composizione del gas interstellare, otteniamo $n = 1.1 n(H_2)$. Sostituendo ρ ed n nelle formule di Jeans, otteniamo la loro forma "moderna"

$$I_J = 3.2 \cdot 10^4 \text{ AU} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \frac{10^4 \text{ cm}^{-3}}{n(H_2)} \right)^{1/2}$$

$$M_J = 0.3 M \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{3/2} \left(\frac{10^4 \text{ cm}^{-3}}{n(H_2)} \right)^{1/2}$$

Qui $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ è la massa del Sole, e AU (l'unità astronomica) è la distanza media tra la Terra e il Sole ($1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}$).



E' stato recentemente scoperto che le regioni tipiche per la formazione di stelle sono le condensazioni di piccola entità nelle nubi molecolari interstellari, dove la temperatura è $T=5-20$ K e la concentrazione di idrogeno è $n(\text{H}_2) \cong 10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$. Rispettivamente, in tali regioni, $M_j = (0.02 - 2) M_\odot$. Osservazioni astronomiche hanno rivelato che la massa della maggior parte delle stelle rientra in questa gamma. Dunque, la teoria di Jeans funziona! Un altro pilastro della teoria, è la dimensione della nube di stelle "ancestrale". Per il nostro Sole le stime parlano di 10^4 AU : è il valore del raggio dell'interno denso della Nube di Oort, che contiene la maggior parte della massa dei nuclei delle comete. In che modo questo valore è collegato con le previsioni della teoria di Jeans?

Il raggio del frammento gassoso all'inizio della sua instabilità gravitazionale è considerato $R_J = I_J/4$. Poiché la massa del frammento dev'essere uguale a quella del Sole, e ponendo che $T \cong 20 \text{ K}$, otteniamo $n(\text{H}_2) = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ e $R_J = 10^4 \text{ AU}$. Questo valore è identico al raggio iniziale della Nube di Oort. Dobbiamo ancora cercare prove della validità della teoria di Jeans?

Naturalmente, le formule di Jeans non tengono conto di molti processi fisici che avvengono nel mezzo interstellare. Vanno bene per un gas omogeneo ideale, in stato di riposo, che in Natura non esiste. Il vero mezzo interstellare è in costante movimento, spesso a velocità superiori a quelle del suono. Inoltre, il movimento avviene sotto l'influenza di potenti campi magnetici, l'attrazione gravitazionale delle stelle vicine nella Galassia, e la pressione di radiazione dalle più luminose. Non c'è da stupirsi se, dopo Jeans, molti fisici hanno sviluppato e delineato la teoria dell'instabilità gravitazionale. Tra loro figurano E.M. Lifshits, S. Chandrasekhar, Y.B. Zeldovich e J. Silk.

Oggi la teoria ha raggiunto livelli di sviluppo molto evoluti: tiene conto dell'espansione e della rotazione del mezzo gassoso nonché della sua interazione con i campi magnetici e con le sorgenti di gravità esterne. Tuttavia, l'analisi di questi ulteriori fenomeni non ha cambiato le conclusioni fondamentali della teoria: negli studi più moderni i valori della massa e del raggio di Jeans sono usati per valutare gli effetti prodotti dall'instabilità gravitazionale. Una delle ragioni per tanta longevità scientifica è la limitata capacità dei moderni dispositivi astronomici. Solo in rare occasioni, infatti, è possibile ottenere parametri del mezzo protostellare diversi da densità e temperatura.

Lo stesso Sir James era pieno d'entusiasmo per i risultati dei suoi studi, e soprattutto per la loro natura semplice e chiara. Scriveva: "E' evidente perché tutte le stelle hanno massa simile: si sono formate tutte dallo stesso processo. Proprio come gli oggetti prodotti da uno stesso macchinario."

Attualmente sappiamo che le masse di stelle diverse possono variare anche di migliaia di volte. Ed esistono variazioni ancora più grandi nei parametri del mezzo interstellare. L'entusiasmo di Jeans, quindi, era prematuro. Tutto questo era chiaro anche a Jeans, che aveva capito di aver saltato solo il primo ostacolo nel lungo percorso che porta *per aspera ad astra*. In previsione di futuri problemi nella descrizione della formazione di galassie e stelle, scrisse un'avvertenza: "Allo stato attuale delle nostre conoscenze, ogni tentativo di

formulare la soluzione finale dei principali problemi cosmogonici non produrrebbe che dogmatismi”.

E' passato quasi un secolo dalla cautela di Sir James, durante il quale siamo stati bombardati di dati sulla formazione delle stelle; e durante il quale la teoria di Jeans sull'instabilità gravitazionale ha affrontato la sfida più ardua – quella del tempo. Non è straordinario che ciò avvenga nel secolo della fisica quantistica e relativistica, che ha reso obsolete così tante teorie classiche?

Quantum su cosmologia e astrofisica:

Y.Zeldovich, “Un Universo di domande”, Gennaio/febbraio 1992, pp. 6-1

Y. Solovyov, “L'Universo svelato”, Maggio/giugno 1992, pp. 12-18

W.A. Hiscock, “L'inevitabilità dei buchi neri”, Marzo/aprile 1993, pp. 26-29

A. Sakharov “Esiste la lunghezza elementare?” Maggio/giugno 1997, pp. 14-20

S. Silich, “Bolle interstellari”, Novembre/dicembre 1997, pp. 14-19

I.D. Novikov “L'Universo termodinamico”, Marzo/aprile 1998, pp. 10-14

A. Kuzin, “Il principio antropico”, Gennaio/febbraio 1999, pp. 4-9