

Subsídios para uma discussão da formação das estrelas na sala de aula

Elements for a discussion of star formation in the classroom

J. E. Horvath*¹

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas,
Departamento de Astronomia, São Paulo SP, Brasil.

Recebido em 23 de junho de 2021. Revisado em 07 de agosto de 2021. Aceito em 16 de agosto de 2021.

As novas diretrizes da Base Nacional Comum Curricular sugere Unidades Temáticas onde os temas de Estrutura e Evolução das Estrelas têm um lugar natural. Porém, um levantamento recente mostrou que o tema da Formação das Estrelas quase nem é abordado na literatura. Apresentamos neste trabalho um panorama completo deste assunto com a intenção de fornecer subsídios para seu tratamento em sala de aula, atualizado e acessível aos professores da Ciências.

Palavras-chave: Formação de estrelas, nuvens moleculares, função de massas inicial.

The new directions of the National Common Curricular Standards suggest Thematic Units in which the Structure and Evolution of Stars have a natural place. However, a recent survey showed that the Formation of Stars is almost not addressed in the literature. We present in this work a complete panoramic view of this subject with the intention of providing a base for its presentation in the classroom, updated and accessible to Science teachers.

Keywords: Stellar formation, molecular clouds, initial mass function.

1. Introdução e Motivação

É bastante evidente a recente intenção de atualizar e modernizar os conteúdos escolares no país, tarefa empreendida tanto a nível dos estados quanto federal. Embora o tratamento dos temas de Astronomia e Astrofísica, podem ser agrupados nas 3 Unidades Temáticas (Matéria e Energia, Vida e Evolução e Terra e Universo) [1] seja ainda fragmentado e que a estrutura pensada em ciclos conspire contra uma exposição e aprofundamento destes temas, existe um avanço quando comparado com as propostas anteriores, que simplesmente desconsideravam os assuntos. Dentre estes, a temática das Estrelas é particularmente interessante desde um ponto de vista pedagógico [2], já que é possível começar com uma abordagem empírica, de observação do céu, e desenvolver ideias da Física das estrelas conjuntamente com sua descrição [3, 4]. Mais ainda: sabemos que as estrelas têm um ciclo vital, nascem, evoluem e morrem. A escola detém vários temas apresentados com esta visão (a vida biológica, a água no planeta), mas a noção de finitude da vida das estrelas e ciclo estelar é ainda incipiente, embora poderia perfeitamente integrar um eixo similar aos já presentes.

O tema da interdisciplinaridade da Astrofísica Estelar é também bem conhecido e destacado há tempos (vide por exemplo Fraknoi [5]), já que existem possibilidades

de diálogo com várias disciplinas mesmo fora das Ciências, como a História, a Geografia, as Artes, a Música e a Literatura. Este potencial não parece ser aproveitado, mas sua presença é objeto de pesquisas e sua implementação caso a caso possível, com ganhos cognitivos e motivacionais.

Estes e outros temas têm sido abordados recentemente num trabalho a respeito do ensino das estrelas na sala de aula com coleta e discussão de abundante material para uso do professor [6]. Um dos problemas mais notórios detectados nesse trabalho foi a falta de material que aborde o nascimento e a morte das estrelas, principalmente, mas não unicamente, para o Ensino Fundamental. Estes temas são quase inexistentes na literatura quando comparados com trabalhos sobre os fatos básicos das estrelas (magnitudes, constelações, etc.) e sua significação socio-cultural (visões indígenas, ficção literária, etc.). Há um número muito limitado de exposições abrangentes e de qualidade (vide, por exemplo, Vilas-Boas [7] e Carciofi [8]) mas a formação das estrelas continua preterida e fora da sala de aula. Existem também algumas iniciativas de tipo relato ficcional para as primeiras séries, mas a antropomorfização dos fenômenos físicos é bastante questionável. Quando e como introduzir temas científicos deste teor na escola é um assunto debatido e complexo [9].

Com a intenção de contribuir principalmente ao preparo do professor, rara vez exposto a temáticas de Astronomia e Astrofísica, e se tanto de forma muito

* Endereço de correspondência: foton@iag.usp.br

superficial, apresentaremos a seguir o problema da formação das estrelas e a Física envolvida. Com adaptações razoáveis, este tema poderá ser trabalhado na sala de aula dependendo do tempo e as condições disponíveis.

2. Os Ingredientes Físicos da Formação das Estrelas

A pergunta fundamental que começa a discussão é a seguinte: se as estrelas têm um ciclo “vital”, como é que elas nascem? ou seja, qual é a seqüência de processos que acaba na formação de uma estrela nova? onde é que acontece todo isto, e como funciona?

Desde tempos de Herschel pelo menos (fim do século XVIII) foi ficando cada vez mais evidente que a “matéria prima” das estrelas é o gás, descoberto e identificado em nuvens no Meio Interestelar (ISM), às vezes misturado com poeira cósmica que também era uma novidade. Porém, não há muito gás disponível nas galáxias, o conteúdo de gás atual na Via Láctea é de $\sim 5\%$ em massa. Outras galáxias, tal como estudadas no século XX, têm menos gás ainda. Por exemplo, as galáxias elípticas quase não tem gás e contêm poucas estrelas jovens. Mas também existem galáxias mais antigas com grande formação de estrelas jovens (denominam-se galáxias *starburst*). Isto leva a pensar que a Via Láctea passou por surtos deste tipo no passado, mas hoje a formação de estrelas é moderada nela. O gás da galáxia reside no ISM, mas não de forma homogênea. Veremos que compreender o estado do gás no ISM é importante para entender a formação estelar.

Observações intensivas do ISM mostra que existem pelo menos duas componentes ou fases nele, que mantêm suas próprias temperaturas (e muitos autores propõem uma terceira componente “quente” $> 10^6$ K, mas ela não participa da formação estelar): uma componente “morna” onde o gás tem uma temperatura de $\sim 10^4 - 10^5$ K, e outra componente “fria”, onde as temperaturas são de ≤ 1000 K. Como exemplo interessante sabemos que o Sol reside hoje em uma região rarefeita e relativamente quente, com $n \leq 0,1 \text{ cm}^{-3}$ e $T \sim 7000$ K e comprimento irregular com máximo de uns $80-100 \text{ pc}$, chamada de *Bolha Local* [10]. A Bolha Local foi escavada por várias explosões de supernova próximas, há uns 10^6 anos, das quais temos evidência importante pela deposição (“chuva”) de elementos como o ^{60}Fe e ^{244}Pu [11]. Assim, o ambiente no qual o Sol reside não é o ISM “típico” descrito nos livros de Astronomia, mas pertence antes à fase “morna” (Fig. 1).

Agora bem, se observarmos regiões próximas com gás esparsa, veremos dentro da fase “fria” complexos de gás contendo uma enorme variedade de *moléculas*, incluindo umas ~ 150 orgânicas incluindo cetonas, aminoácidos e açúcares. As moléculas se formam e mantêm quando a energia térmica associada à temperatura do ISM é baixa. Se a temperatura for alta, as moléculas são dissociadas. Os lugares preferenciais para encontrar as moléculas se

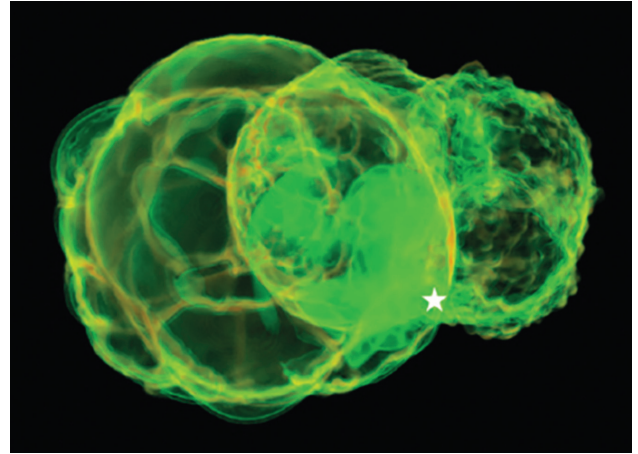


Figura 1: A Bolha Local simulada numericamente. O Sol encontra-se na posição da estrela, e as frentes de choque das supernovas depositaram elementos produzidos nas explosões há 2-3 milhões de anos.

denominam *Nuvens Moleculares Gigantes* (ou GMC). Alguns destes complexos na nossa galáxia contêm $\sim 10^4 - 10^7 M_{\odot}$, com escalas de comprimento de $\sim 10-100 \text{ pc}$, temperaturas $\sim 10-100 \text{ K}$ e densidades $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$. É nestes ambientes que se observam quase todas as estrelas jovens, e assim existe um consenso a respeito das GMC serem o “berço” estelar prioritário [12].

Como é observado que as GMC têm uma densidade típica de $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$, enquanto uma estrela tem uma densidade $n \sim 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ (densidade em massa por volta de $\sim 1 \text{ g cm}^{-3}$), deduzimos que durante a formação na GMC a densidade do gás precisou aumentar 22 ordens de grandeza até chegar ao valor estelar. Mais ainda: a questão do *momento angular* é também muito relevante: uma GMC tem uma velocidade angular típica devida à rotação diferencial que é muito pequena, de $\Omega \sim 10^{-15} \text{ s}^{-1}$, já que seu raio é enorme e $\Omega \propto R$. Mas se esse momento angular pequeno fosse conservado no processo de contração e adensamento, as estrelas teriam períodos de rotação $< 1 \text{ s}$, que levariam a sua ruptura e nunca são observados. Desta forma, resulta razoável pensar que o momento angular precisa ser *transportado* para fora durante o colapso (vide Conclusões). Agora bem, qual é a origem deste colapso? e como procede no tempo? O primeiro passo é saber como as próprias GMCs se mantêm antes de colapsar, e o que faz com que regiões delas comecem sua trajetória de contração.

2.1. Condições para o colapso das GMCs: gravitação vs. energia interna

Os estudos pioneiros do colapso de nuvens de gás se devem principalmente a J. Jeans, quem fundamentou, baseado na teoria Newtoniana, a existência de uma massa mínima para as nuvens começarem o colapsar, hoje conhecida como *massa de Jeans*.

O raciocínio de Jeans se baseia na condição do *Teorema do Virial*, ou seja, a partilha da energia que acontece em equilíbrio entre a energia da gravitação e energia interna da nuvem. Normalmente o Teorema do Virial é desconhecido, sendo não muito mais do que um tecnicismo de cursos de Mecânica para o professor. Mas a Astrofísica que lida com fluidos faz uso permanente desta relação fundamental, que precisa ser satisfeita para qualquer fluido em equilíbrio energético (tal como a nossa nuvem do ISM), antes mesmo do equilíbrio hidrostático [13]. O Teorema do Virial pode ser introduzido de forma heurística invocando a troca de energia pelas interações das partículas do gás, que tende a igualar estas se transcorre tempo suficiente. Se o gás está suficientemente denso quanto para que uma temperatura seja aplicável (nem sempre é o caso, e menos na Astrofísica), então para longos tempos $E_{int} \approx |E_{grav}|$. De fato, uma demonstração rigorosa (que está além do nosso escopo e não é necessária nas aulas), mostra que esta relação é simplesmente

$$2E_{int} = |E_{grav}|, \tag{1}$$

ou seja, um fator “2” diferente da igualdade exata. As barras do valor absoluto estão porque a energia gravitacional é sempre negativa, e que a energia total é *negativa* se a nuvem está ligada. Consideremos uma esfera de raio genérico λ (Fig. 2). A energia interna de origem térmica (das partículas do gás) é $E_{int} \sim k_B T \times M$. A massa da nuvem é $M \cong \rho \lambda^3$ (desconsiderando fatores como $4\pi/3$ que não fazem grande diferença no resultado final). Por outro lado, a energia gravitacional da nuvem é $E_{grav} \sim -\frac{GM^2}{\lambda} \sim -GM\rho\lambda^2$ (de novo, o fator $3/5$ da expressão completa foi ignorado). O quociente das duas energias é assim

$$\frac{|E_{grav}|}{E_{int}} \propto \lambda^2. \tag{2}$$

Desta forma, vemos que para pequenas nuvens (λ suficientemente pequeno) a energia interna é maior que

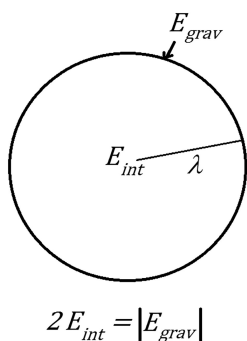


Figura 2: Uma nuvem esférica de raio $\sim \lambda$ onde a energia interna e a energia gravitacional satisfazem a relação Virial. Somente massas acima da massa de Jeans (ou suas análogas com outros ingredientes na E_{int}) podem colapsar já que a energia gravitacional domina.

a gravitacional. Portanto, quando a nuvem começa a colapsar, e detida pela energia interna. Existe porém um tamanho crítico λ_J onde o quociente é 1, e acima desse comprimento, ou de forma equivalente para massas maiores, a gravitação dominará e a nuvem poderá colapsar. Recolocando todos os fatores numéricos, esse λ_J é

$$\lambda_J = \left(\frac{15k_B T}{4\pi\mu m_H \rho G} \right)^{1/2}, \tag{3}$$

para um gás monoatômico com peso molecular μ (m_H é a massa do hidrogênio). A massa de Jeans, contida na esfera, é então

$$M_J \equiv \frac{4}{3}\pi\rho\lambda_J^3 = \left(\frac{5k_B T}{\mu m_H G} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2}. \tag{4}$$

Quando inseridas as temperaturas e densidades inferidas da observação, aparece um problema: a massa de Jeans é ordens de grandeza maior do que a massa do Sol. Isto quer dizer que as massas das estrelas não poderiam decorrer de um colapso simples. Como quando o colapso avança a massa de Jeans *decrece* (a densidade da nuvem aumenta, e ela também esquenta, de tal forma que $M_J \propto T^{3/2}/\rho^{1/2}$ sempre decresce), postulou-se uma fragmentação da massa inicial, mas invocar uma fragmentação resultou um pouco forçado e novos elementos físicos foram considerados.

Um destes “novos elementos físicos” foi o *campo magnético* no gás da nuvem. A ideia central era que em algum momento a energia interna dominante teria que ser predominantemente a magnética, não a térmica que ficava apequenada. De fato, até ~ 1980 o paradigma das GMC era que estavam sustentadas pela pressão magnética [12]. Lembremos que M. Faraday imaginava as linhas de campo como uma espécie de bandas elásticas, e assim a energia magnética $\propto B^2$ resistiria à gravitação quando o colapso adensasse as linhas do campo B conservando o fluxo. O cálculo é análogo, e a massa de Jeans correspondente se obtém igualando a energia gravitacional e a magnética, com o resultado

$$M_{crit} = 10^5 \left(\frac{n}{100 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-2} \left(\frac{B}{25 \mu\text{G}} \right)^3 M_\odot. \tag{5}$$

Somente massas maiores que este valor poderiam colapsar vencendo o efeito do campo magnético. As massas menores não poderiam fazê-lo. Os valores numéricos na Eq. (5) são típicos das regiões observadas nas GMCs.

Vemos que a mera consideração do campo magnético não resolveu nada: se somente massas de $\sim 10^5 M_\odot$ ou mais podem colapsar, como é que vão se formar estrelas de $\sim 1 M_\odot$? Mais uma vez, o estudo das condições nas quais a nuvem em colapso poderia *fragmentar*, e assim continuar o colapso promovendo a difusão do material *neutro* no campo magnético, mas todo ficou bastante improvável. Em contra deste cenário levantou-se que, no material em colapso, o campo magnético está congelado (atrelado à matéria) e assim o fluxo magnético $\Phi \propto R^2 B$

umenta a medida que o colapso procede. Isto que dizer que a nuvem *ganha* suporte, não o perde para continuar se contraindo. De fato os campos obtidos das observações das nuvens reais nem são tão intensos, indicando que as nuvens que os abrigam deveriam ter colapsado há tempo, mas não o fizeram. A observação direta da polarização da luz em nuvens moleculares mostrou que o colapso é favorecido na direção das linhas de campo magnéticas.

Desta forma, a procura pelo agente que dá suporte à nuvem sem impedir o processo do colapso continuou. E a análise das nuvens mostrou que o comportamento do gás dentro dela está longe de ser “ideal”, os movimentos medidos apontaram para um comportamento *turbulento*. A *turbulência* é um regime do movimento do gás bem conhecido, mas difícil de descrever de primeiros princípios matematicamente, já que constata-se a ocorrência de flutuações na velocidade do gás $\langle v \rangle$ em muitas escalas de comprimento, e que vai transferindo a energia das maiores escalas para as menores. Esta transferência se denomina *cascata turbulenta*, e resulta familiar e observada em um conjunto de sistemas (por exemplo, ondas no mar). A Fig. 3 mostra a turbulência atmosférica do gás de nuvens ordinárias, o qual deve ser bastante semelhante à do interior das nuvens do ISM.

O efeito da turbulência no colapso resulta que, na presença das flutuações (turbilhões) da velocidade do gás $\langle v \rangle$, esta deve ser adicionada a velocidade ordinária do gás. Assim, a componente turbulenta nas grandes escalas (aquelas onde $\langle v \rangle \gg c_{som}$) faz aumentar a pressão (é a denominada *pressão turbulenta*) e *impede* que a nuvem colapse globalmente, explicando a sustentação observada. Mas nas pequenas escalas, $\langle v \rangle < c_{som}$ a turbulência *promove* o colapso da massa de Jeans, permitindo a formação de associações estelares de $\sim 40 M_{\odot}$ ou mais, e estrelas individuais depois da fragmentação desta última quando a massa de Jeans decresce com o tempo [14]. Isto é consistente com a observação que mostra que a maior parte das estrelas nasce em associações de vários



Figura 3: As nuvens ordinárias e a turbulência, desenhando os *turbilhões* (flutuações) em diversas escalas de comprimento. Um panorama similar é aplicável às nuvens proto-estelares dentro das GMC.

Tabela 1: Agentes externos e internos que geram turbulência.

Processo (externo)	Processo (interno)
Formação dos braços espirais	Ventos estelares
Supernovas	Radiação ionizante estelar
Instabilidades (várias)	Fluxos proto-estelares

tamanhos, desde um número pequeno até \sim dezenas ou mais (grupos, aglomerados abertos, etc.) [3]. Desde este ponto de vista o nosso Sol pode ser considerado “excepcional”, embora não é nada impossível que tenha formado parte de uma associação estelar que se dissipou, dado que sua idade de 4.5 *Ganos* é maior que o tempo estimado para esta dispersão de um possível grupo progenitor, até de muitos membros, mas do qual não temos evidência.

Aparece então a pergunta a respeito das *fontes* dessa turbulência. A Tabela 1 lista alguns dos agentes candidatos para fonte da turbulência. Os processos listados contribuem à formação da GMC (externos) e à sua manutenção (internos). A importância relativa deles está em discussão, mas não há falta de candidatas.

Agora que termos tentativamente identificado o que provoca o colapso da nuvem, passaremos a discutir os estágios sucessivos desde o começo do colapso até a formação da estrela, quando as reações nucleares começam no caroço central e a proto-estrela entra na Sequência Principal.

3. Os Sucessivos Estágios da Formação Estelar

Ao longo do colapso, as moléculas e os elétrons participam de um processo muito importante de *troca de energia* por meio de colisões. Com o nome “colisões” não devemos entender somente os choques diretos (que são raríssimos), mas troca de energia através das interações eletromagnéticas entre partículas carregadas a distância. Sem esta troca de energia o colapso não poderia avançar, e como dissemos antes o momento angular deve também ser transferido. O resultado é uma equipartição da energia: todas as componentes do gás acabam com energias similares, e as componentes interna E_{int} e gravitacional E_g da energia satisfazem a partir de algum momento a relação Virial $E_g + 2E_{int} = 0$, embora seja bastante difícil saber quando é exatamente que uma nuvem entra no equilíbrio Virial. Os primeiros estágios não devem conseguir ainda distribuir assim a energia, mas certamente haverá um restabelecimento do equilíbrio Virial bem antes da nuvem formar efetivamente uma estrela.

3.1. Estágio a): condensações iniciais

Observacionalmente o primeiro estágio do colapso leva à presença de *condensações* na GMC. Estas condensações

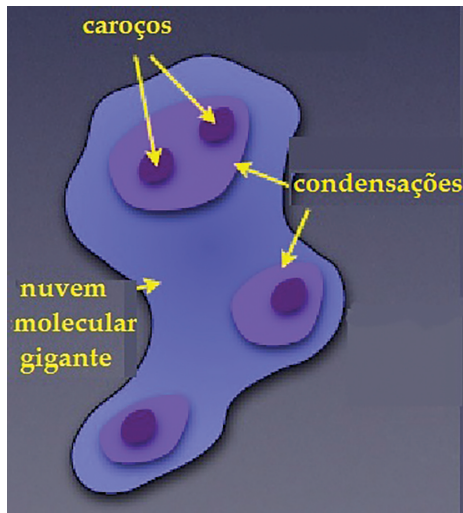


Figura 4: Uma GMC mostrando algumas aglomerações com caroços no interior, no começo do processo de colapso gravitacional induzido pela turbulência.

contém no seu interior uns caroços mais densos. Este é o estágio mais primordial da região que ficou instável e contém uma massa $\sim M_J$ que formará estrelas. Os glóbulos de Bok resultam uma “mini” Nuvem Molecular, nem sempre existe formação estelar no seu interior (ou seja, podem estar “vazios”), mas em outros casos o seu papel na formação estelar é comprovado. O esquema geral deste estágio está na Fig. 4.

Estas condensações nos interiores das GMC são detectadas com facilidade utilizando ondas sub-milimétricas e telescópios com detectores no infravermelho longínquo. Como a transparência do material no óptico é baixa, e as regiões estão cheias de poeira cósmica é somente nos maiores comprimentos de onda (sub-mm) que estas inhomogeneidades ficam evidentes.

É muito interessante comentar que estas condensações crescem dentro de pequenas estruturas opacas, cheias de poeira, descobertas e estudadas pelo astrônomo Bart Bok na década de 1940. Bok descreveu estes *glóbulos* (hoje conhecidos como *glóbulos de Bok*) como os “equivalentes estelares dos caroços dos insetos”, hipótese que provou-se correta. Existem na literatura muitas imagens dos glóbulos de Bok, como a da Fig. 5.

3.2. Estágio b): contração e queda do material ambiente

As proto-estrelas continuam se condensando e o material do ambiente local da condensação acaba caindo acima do caroço interno. Ainda ocorre uma acreção adicional do ambiente, mas não sua magnitude é incerta. No processo de adensamento e queda de material, o momento angular transferido promove a formação de um disco de acreção magnetizado (lembramos da amplificação do campo magnético antes mencionada), que se acredita será o responsável pela massa definitiva da estrela e a

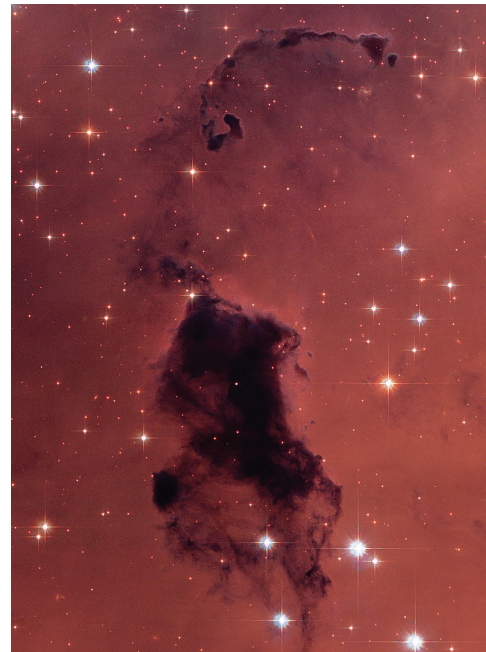


Figura 5: Glóbulos de Bok em NGC 281. Vários destes “caçulos” podem ser observados, por exemplo, o último à esquerda no arco superior de poeira, abrigando proto-estrelas entre os estágios b) e c). Algumas das proto-estrelas e estrelas jovens podem ser vistas apesar da forte extinção pela poeira. (Imagem do arquivo do HST).

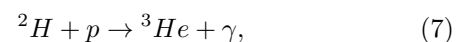
formação do seu sistema planetário, de longa duração (vide abaixo). As considerações a respeito da necessidade de transportar “para fora” o momento angular ganham força quando conferimos, por exemplo, que quase todo o momento angular do Sistema Solar reside em Júpiter e os planetas exteriores, enquanto $>99\%$ da massa está concentrada no Sol.

3.3. Estágio c) proto-estrela com disco

A proto-estrela segue neste ponto no diagrama HR o chamado *caminho de Hayashi*, uma trajetória quase-vertical com $T_{ef} = cte$ onde 1) se estabelece o equilíbrio Virial e 2) a estrutura interna fica totalmente convectiva[13] tal como a água numa panela fervendo. Assim que o gás fica opaco, a luminosidade do objeto atinge o valor

$$L = 4\pi R_*^2 \sigma T_{ef}^4, \quad (6)$$

onde a temperatura é tipicamente baixa, na região do infravermelho, e o raio R_* bem maior que o raio estelar final. É importante onde a energia é obtida da contração gravitacional, já que *não há ainda* reações nucleares. Ao longo desta descida, a temperatura interior atinge um valor suficiente, por volta de 10^6 K, suficiente para fundir o deutério original existente, na reação



(este processo é freqüentemente mencionado em conexão com o Big Bang, onde é repetidos textos que o todo

o deutério é primordial, já que as estrelas não produzem deutério e tão somente o destroem nos interiores...). Porém, esta fusão do deutério é pouco exotérmica e aumenta muito pouco a energia no interior [13].

3.4. Estágio d): o caminho das T Tauri

Uma classe inteira de proto-estrelas é conhecida como *estrelas T Tauri*, nomeadas assim pela primeira desta classe identificada. As T Tauri ainda não começaram a fusão do hidrogênio, mas mostram claros sinais da emissão infravermelha associada ao disco, já presente nos objetos Herbig-Haro. A classificação das T Tauri se baseia fortemente em este excesso infravermelho, e como o disco deve durar uns 10 *Manos*, a ausência progressiva do infravermelho leva a considerar uma sucessão evolutiva de T Tauri, em uma hierarquia de idades. Note-se que isto é o que deve ter acontecido no Sistema Solar.

3.5. Estágio e): a entrada na Sequência Principal de Idade Zero

A descida pelo caminho de Hayashi se detém quando no centro o caroço fica radiativo, e as trajetórias estelares viram à esquerda, para luminosidade quase constante. Assim, esse *caminho de Henyey* é quase horizontal, com $L \approx cte$ até a proto-estrela finalmente chegar na Sequência Principal de Idade Zero (ZAMS em inglês, correspondente a Sequência Principal de Idade Zero), onde as reações nucleares do hidrogênio começam no caroço. A Fig. 6 mostra os caminhos de Hayashi, Henyey, e a ZAMS no Diagrama H-R, e os estágios prévios descritos anteriormente.

3.6. A linha de nascimento estelar

Embora um cenário completo “clássico” já existia há décadas, ele foi questionado porque *nunca foram observadas* proto-estrelas de luminosidades enormes muito

acima da ZAMS, tal como previsto para o topo do caminho de Hayashi (embora todos os livros de texto mais antigos o mostrem...). As observações diretas dos glóbulos de Bok também discordaram com a teoria, mostrando que os tamanhos eram bem menores e as luminosidades também. Assim, na virada do século 21 uma proposta de Palla e Stahler [15] veio a colocar que as proto-estrelas somente ficam opacas (visíveis no óptico) quando seu raio $R_* \approx R_{ZAMS}$, no lugar geométrico chamado de *linha de nascimento*. Esta linha é o envoltório superior da região onde as estrelas ficam opacas, e acima delas nada seria observado. Na teoria de Palla-Stahler, dependendo da massa o caminho de Hayashi encurta muito, ou até some depois de $\approx 3 M_{\odot}$, e somente sobra o caminho de Henyey para entrarem na ZAMS. Um teste com a região de formação de Orion, bem estudada e próxima da Terra, mostrou que as proto-estrelas observadas delimitam a linha de nascimento, e nunca estão muito por cima desta, em acordo com a nova proposta.

Esta sucessão de eventos é observada para todos os estágios dos objetos proto-estelares identificados e estudados. Há ainda evidência de discos proto-planetários detectados quando a estrela jovem já se formou, antes da sua dissipação total, e no ato de formar planetas [16]. Para cada estágio mostramos na Fig. 7 as distribuições espectrais λF_{λ} e uma imagem o esquema da situação da proto-estrela.

Existe por último farta evidência observacional em favor da emergência de jatos e ventos no estágio proto-estelar, associados à formação de discos de acreção. O protótipo disto são os chamados *objetos Herbig-Haro*, onde jatos e discos são muito bem observados da fonte central (Fig. 9). Na verdade, a denominação original Herbig-Harose refere às condensações na ponta dos jatos, embora a fonte central é quem os produz, onde está a estrela em formação. Este fenômeno deve ser determinante para truncar a acreção e definir assim a massa final da estrela.

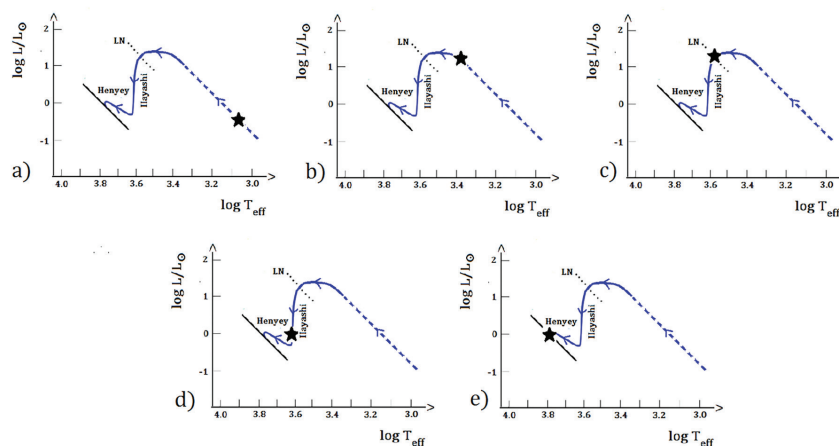


Figura 6: A posição dos objetos proto-estelares no Diagrama HR para cada estágio em uma proto-estrela de $1 M_{\odot}$. As letras a)–e) correspondem às descrições do texto.

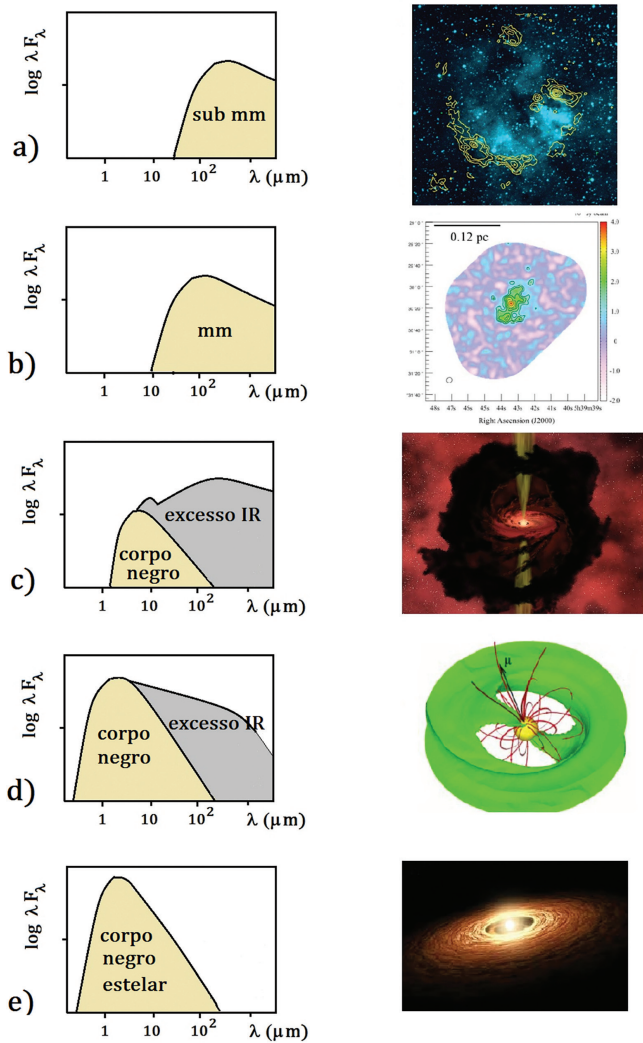


Figura 7: Evolução das distribuições espectrais de energia (isto é, do fluxo multiplicado por λ) das proto-estrelas antes de entrar na Sequência Principal de Idade Zero (ZAMS), e nosso entendimento da evolução visual do sistema. De cima para baixo temos a) estágio de condensações b) estágio de contração e queda do ambiente acima dos caroços c) proto-estrela IR, onde o “excesso” é atribuído ao disco d) estágio T Tauri onde esse excesso IR é cada vez menor pela consumação do disco, até sumir totalmente e) estrela jovem com massa total definida, o disco proto-planetário é todo o que restou da acreção e formou um ou vários “Júpiteres” e “planetas rochosos” (vide também Fig. 8).

Embora exista consenso a respeito da sequência dos processos, a *duração* dos mesmos está em dúvida. Desde um ponto de vista teórico, existe uma diferença importante entre a proposta do colapso induzido puramente pela instabilidade gravitacional (favorecida até ~1980) e a turbulência como agente principal: a primeira leva a uma formação “lenta” que dura uns $\sim 10^7$ anos, enquanto a segunda sugere um tempo ao menos 10 vezes mais curto, já que a dissipação da turbulência é rápida, e não dura mais de $\sim 10^6$ anos. Esta é uma questão

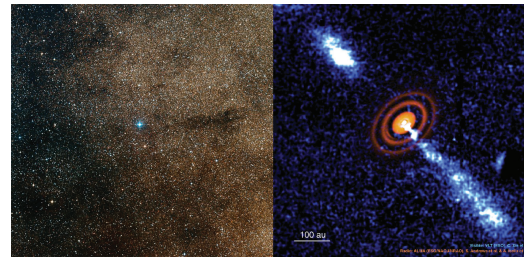


Figura 8: Esquerda: a estrela jovem HD 163296 nos telescópios ópticos (centro da imagem, créditos ESO). Sua massa é de $2.3 M_{\odot}$ e as cores são reais. Direita: um “zoom” feito pelo observatório ALMA e o VLT (ESO), onde é possível ver sulcos onde a poeira está em falta, interpretados como as órbitas de 3 planetas em formação, e os jatos proto-estelares que persistem ainda.

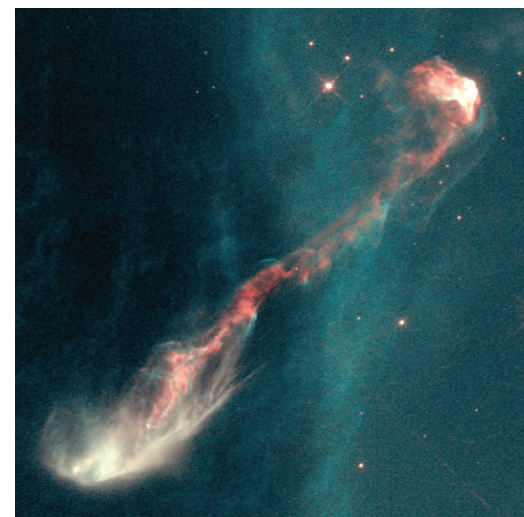


Figura 9: Os jatos do objeto Herbig-Haro 47 (Image Credit: J. Morse/STScI, and NASA/ESA). O disco que alimenta a proto-estrela é visível mas muito pequeno na escala desta imagem.

importante a ser totalmente esclarecida para confirmar qual é o agente físico mais relevante no problema.

4. A Função Inicial de Massas das Estrelas

A chamada Função Inicial de Massas (número de estrelas por intervalo de massa, IMF em inglês) é o desfecho do processo de formação estelar. A soma de processo físicos deve ser capaz de produzir a distribuição de massas observada das estrelas, onde as mais massivas são raras e as menores muito mais comuns. Verifica-se que há *centenas* de estrelas como o Sol para cada uma das gigantes do tipo das “Três Marias” em Orion. Matematicamente a IMF é definida como número de estrelas formadas no intervalo de massas $\xi(m)dm$, onde o número de estrelas é expressado como sendo proporcional a $(m/m_{\odot})^{-\alpha}$. O trabalho pioneiro de E. Salpeter [17] estabeleceu esta forma e o valor do expoente apropriado

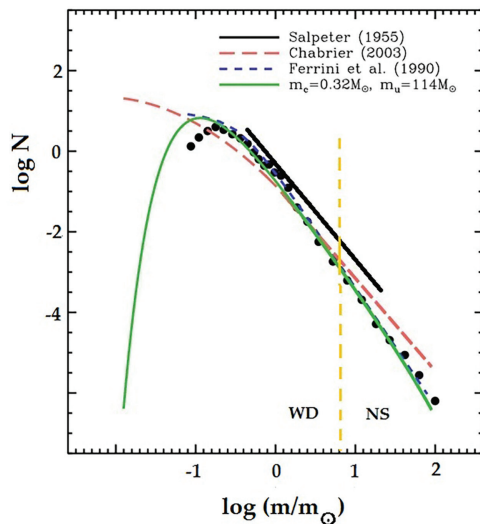


Figura 10: A IMF observada (pontos pretos) vs. as várias expressões propostas por Salpeter (linha preta) e desenvolvimentos posteriores (demais curvas). O ponto do máximo e o limite superior são duas características investigadas com intensidade. Já a inclinação não é muito disputada, e esta em acordo com as observações como pode ser conferido na figura.

na faixa intermediária de massas de $\alpha \sim 2.3$. Sabemos que existe uma "virada" para massas menores, enquanto as estrelas de massa muito baixa são minoritárias.

Se esta forma da IMF é correta, ela prediz que nas massas maiores, o número de estrelas será menor até um valor máximo da ordem de $\sim 100 M_{\odot}$ [18]. Uma compilação da função de massas observadas, junto com alguns refinamentos à proposta de Salpeter, pode ser apreciada na Fig. 10.

Hoje é possível contar estrelas individualmente em aglomerados longínquos, até em outras galáxias próximas. Isto é importante porque a IMF parece ser *muito robusta*, embora dependa da metalicidade. É consenso que, se as estrelas se formam em regiões mais enriquecidas em "metais" Z (no jargão da Astronomia, qualquer elemento além do hélio é um "metal"...), a IMF contém estrelas de menor massa, ou seja, o expoente é *maior*. A IMF reflete em última instância a *eficiência para converter gás em estrelas*, que é bastante baixa por sinal. As causas físicas do expoente determinado, o papel da turbulência, a massa de Jeans e outros fatores precisam ser totalmente esclarecidos.

5. Orion, um Berçário Estelar. Atividade para a Sala de Aula

A Astronomia tem como diferencial educacional as atividades de observação, muito motivadoras para os alunos e que servem para reforçar os conteúdos e conceitos fundamentais. No caso da formação das estrelas, é possível observar com certo detalhe associações interessantes de estrelas, como por exemplo a região de Orion (o Caçador mitológico grego). Boa parte das estrelas de

Orion encontra-se também fisicamente associadas, não resulta somente pelo efeito da projeção. Num lugar escuro longe da luz artificial podem-se ver a olho nu 8 estrelas com magnitude visual $m_V < 3$, e obviamente muitas mais com o auxílio de uns binoculares ou telescópio. Orion é um zoológico de estrelas de vários tipos, incluídas variáveis e duplas, além de outros objetos bem interessantes como algumas nebulosas muito conhecidas pelos amadores e profissionais onde a formação estelar acontece.

A localização de Orion, visível no Hemisfério Sul de Janeiro a Novembro, que aparece antes da meia-noite até o mês de Junho, é bastante simples. Popularmente, o chamado *cinturão* é conhecido no Sul como as *Três Marias*, facilmente reconhecíveis no céu. É comum utilizar os nomes árabes *Mintaka*, *Alnilame* *Alnitak* para as "Três Marias". Para nossos propósitos, o importante é que elas são estrelas gigantes azuis muito jovens de aproximadamente $20 M_{\odot}$ cada uma. Assim, constituem um exemplo de formação estelar completa na faixa de alta massa. Próxima delas (vide Fig. 11) encontramos a célebre *Nebulosa da Cabeça do Cavalo* (indicada com "CC" na figura), visível em noite clara com binóculos de qualidade, e que representa um notável exemplo de poeira que obscurece o gás brilhante de fundo.

Duas outras estrelas muito brilhantes podem também ser observadas em Orion, perto das Três Marias: a supergigante vermelha Betelgeuse e a gigante azul Rigel (Fig. 11). Mas é a *Grande Nebulosa de Orion*, visível na posição indicada e marcada como "GN" que constitui um dos mais interessantes objetos visíveis no céu de boa qualidade de observação com binóculos ou pequenos telescópios. Mais de 700 proto-estrelas já foram identificadas dentro dela, incluindo umas 150 com discos proto-planetários (estágios "c", d, e)" na Fig. 7) que são podem ser vistos no infravermelho. Contudo, a observação de uma região onde a formação estelar é intensa tem uma grande relevância pedagógica. Na sala de aula imagens com os glóbulos de Bok e outros podem ser ligadas a Orion e outras regiões de formação estelar, além de observar diretamente o desfecho do

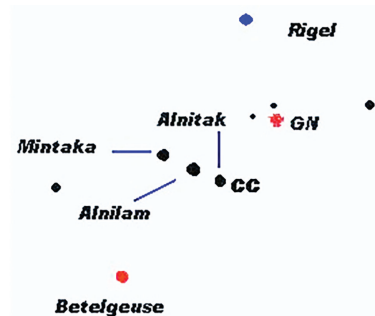


Figura 11: Um esquema da região de Orion. Além de observar diretamente várias estrelas jovens de grande massa, a Grande Nebulosa contém um grande número de proto-estrelas nos vários estágios mostrados na Fig. 7.

processo na forma das estrelas jovens de grande massa já mencionadas (próximas da GN).

6. Conclusões

Depois de revisitar o argumento clássico da instabilidade Jeans (Eq. 4) e constatar que a *pressão térmica* do gás não é suficiente para explicar por que grandes nuvens de $10^4 M_{\odot}$ ou mais se mantêm sem colapsar e ao mesmo tempo como é que estrelas de massas variadas são formadas, passamos a considerar a *pressão magnética* como elemento de sustentação, o qual levou a resultados igualmente insatisfatórios. A visão moderna é que a *turbulência* é o agente fundamental que explica tanto o sustento global da nuvem quanto seu colapso mais local para formar as condensações iniciais no processo. Evidentemente todos estes elementos estão misturados nas nuvens reais, mas parece ser que a turbulência antes negligenciada é chave nos estágios iniciais.

Posteriormente descrevemos os estágios sucessivos da evolução da proto-estrela até ela entrar na ZAMS. Embora várias questões importantes estejam sob escrutínio permanente (como corresponde à pesquisa científica), é importante destacar que existem observações diretas e cálculos que fundamentam e confirmam este quadro básico. A moderna instrumentação em rádio, ondas milimétricas e infravermelho enxergam as estrelas em formação em Orion e outras regiões próximas com grande resolução espacial.

A forma da IMF total observada em uma variedade de casos (aglomerados por exemplo) resulta da combinação destes efeitos, mas o fato de ser praticamente a mesma em todo sistema (embora o conteúdo de elementos pesados é influente) faz pensar que a soma dos mecanismos é robusta, pouco depende de outros fatores.

Por último, e antes de propor uma Sequência Didática com estes temas, a recomendação é a de motivar os alunos com uma observação da região de Orion como proposto na Seção 5. Não tão somente é simples de fazer (somente precisa céu claro e binóculos), mas também altamente formativo e quebra a rotina expositiva da escola com ganhos motivacionais e cognitivos, preparando o terreno para um estudo posterior.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer o apoio financeiro do CNPq e a Fapesp (São Paulo) através de bolsas e auxílios vários. O(A) referee anônimo(a) deste trabalho contribuiu com uma cuidadosa leitura e críticas que levaram a uma melhora em várias passagens do texto original.

Referências

- [1] <http://portal.mec.gov.br/conselho-nacional-de-educacao/base-nacional-comum-curricular-bncc>

- [2] J.E. Horvath, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **35**, 1 (2013).
 [3] J.E. Horvath, *As estrelas na sala de aula* (Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2019).
 [4] J.E. Horvath, *O ABCD da Astronomia e Astrofísica* (Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2008).
 [5] <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED399149.pdf>
 [6] L. Paulucci, J.F. Fornazari, K. Brasil Neves e J.E. Horvath. *Rev. Bras. Ens. Fis.* (2021), unpublished.
 [7] www.inpe.br/ciaa2018/arquivos/aulas_pdfs/formacao_estrelas.
 [8] www.astro.iag.usp.br/~{carciofi/aulas_aga0210.
 [9] J.M. Pasachoff, *Astronomy Education Review* **1**, 124 (2002).
 [10] http://cse.ssl.berkeley.edu/chips_epo/bubble.pdf
 [11] D. Koll, G. Korschinek, T. Faestermann, J.M. Gómez-Guzmán, S. Kipfstuhl, S. Merchel e J.M. Welch, *Phys Rev Lett.* **123**, 072701 (2019).
 [12] <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/M/Molecular+Cloud>
 [13] J.E. Horvath, *Fundamentos de Evolução Estelar, Supernovas e Objetos Compactos* (Livraria da Física, São Paulo, 2011).
 [14] C. Federrath, *Physics Today* **71**, 38 (2018).
 [15] F. Palla e S. W. Stahler, *Astrophys. J.* **525**, 772 (1999).
 [16] <https://apod.nasa.gov/apod/ap210622.html>
 [17] E.E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955).
 [18] M. Bandecchi, J.E. Horvath e P.S. Bretones, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **41**, 0031 (2019).