

# Física e a Química do Meio Interestelar

Mestrado e Doutorado em Física e Astronomia

Livro texto: Physics and chemistry of the interstellar medium – A. G. G. M. Tielens (2004)

Prof. Dr. Sergio Pilling

Aluno: Will Robson Monteiro Rocha

## 06 Ciclo de vida da poeira Interestelar

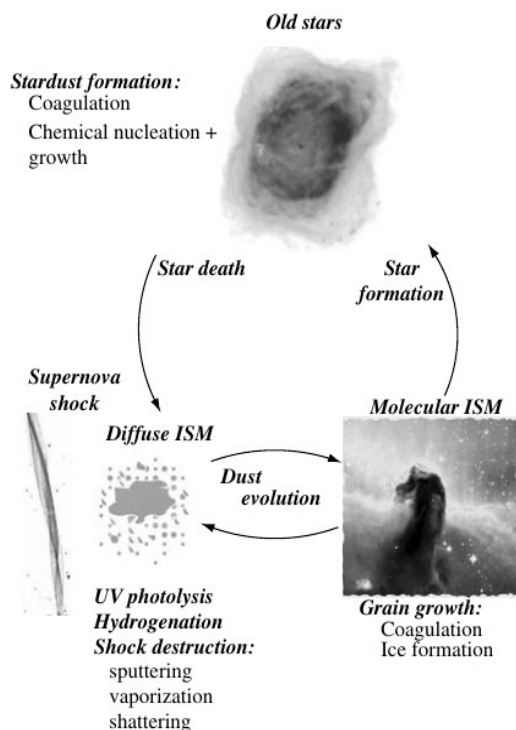
### 6.1 Introdução

O meio interestelar é bastante vasto e composto principalmente de gás e poeira. Do ponto de vista astrofísica a poeira interestelar é muito importante pois permite a a reação e formação de moléculas complexas em sua superfície, como também interage com a radiação electromagnética, absorvendo-a ou espalhando-a.

Neste capítulo vamos mostrar uma panorama sobre o ciclo de vida da poeira interestelar. Estudar seu processo de formação até sua destruição é importante para caracterizar o tempo de vida e em quais circunstâncias a poeira pode sobreviver no meio interestelar. Isto é importante do ponto de vista da panspermia, em astrobiologia.

### 6.2 Visão geral do ciclo da poeira interestelar

Vemos na Figura 6.1 uma representação esquemática dos processos físico-químicos que envolvem a poeira interestelar.



**Figura 6.1:** Diagrama esquemático da evolução da poeira interestelar indicando alguns processos relevantes. Destacamos os processos físico-químicos atuando sobre a poeira, tais como: coagulação, *sputtering*, e formação do manto de gelo. **Fonte:** Tielens 2004.

A formação da poeira ocorre no envelope de estrelas gigantes, a altas temperaturas e densidade. Destacam-se dois tipos de espécies de poeira: silicato e grafite, devida às suas temperaturas de condensação; cerca de 1350 K para o silicato e 150 K para o carbono.

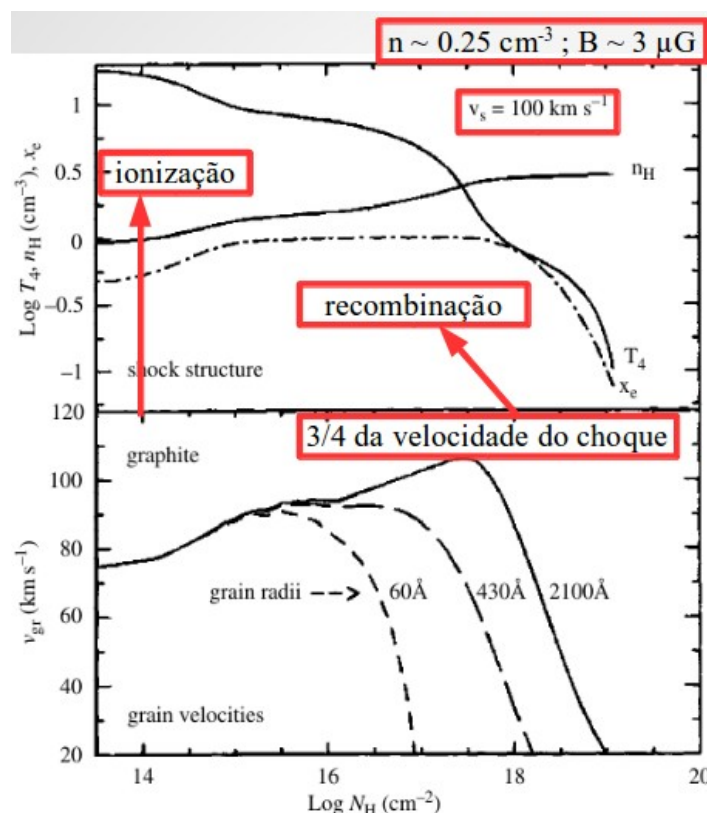
Após a formação dos pequenos grãos de poeira e devida às altas densidades dos locais de formação, tais grãos podem aumentar o tamanho por processos de coagulação, ou seja, pequenos grãos, se ligam quimicamente para formação grãos maiores. Na morte dessas estrelas, os grãos de poeira são lançados para o meio interestelar difuso ou são agregados a nuvens densas, onde ficam sujeitos a vários processos físicos. No meio interestelar difuso, devida às frentes de choque de supernovas, a poeira pode ser facilmente destruída. No entanto, a poeira que está a altas profundidades ópticas dentro de nuvens densas, e portanto protegida da quebra por meio de fótons UV, pode passar por novos processos de coagulação e até mesmo pela formação de um manto de gelo em sua superfície, composto principalmente de H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, e CH<sub>3</sub>OH, via processos de fisissorção ou quimissorção. Ocorre, entretanto, que nessas regiões densas, a formação de novas estrelas, que podem destruir a poeira interestelar, devida à sua radiação UV. Porém, se após todos esses processos, a poeira sobreviver, ela estará presente no disco protoestelar, e poderá finalmente fazer parte de um cometa, lua ou planeta de um novo Sistema Solar.

### 6.3 Destruição da poeira interestelar

A taxa de destruição da poeira interestelar é uma variável dependente da velocidade entre as partículas (gás-grão ou grão-grão) durante uma colisão. A baixas velocidades, a destruição é dominada pelo *sputtering* inercial, enquanto que a altas velocidades, predomina o *sputtering* térmico. Neste capítulo, vamos tratar dos dois regimes separadamente.

#### 6.3.1 Choques a baixas velocidades

Para tratar deste regime, é considerado uma frente de choque com as seguintes características:  $v_s = 100 \text{ km s}^{-1}$ ,  $n = 0.25 \text{ cm}^{-3}$ ,  $B = 3 \text{ } \mu\text{G}$ . As grandezas de densidade, temperatura e fração de elétrons como função da densidade colunar,  $N_H$ , atrás da frente de choque são mostradas na Figura 6.2.

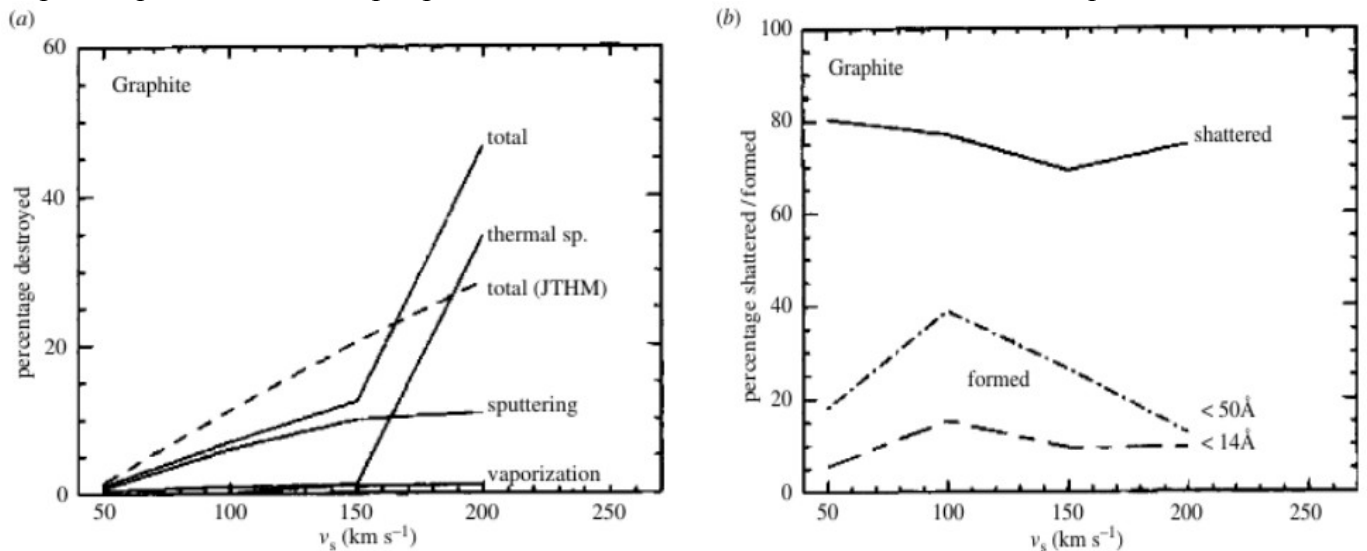


**Figura 6.2:** Estrutura de um choque a  $100 \text{ km s}^{-1}$ . (Cima) Variação da densidade  $n_H$ , temperatura  $T_4$ , em unidades de  $10^4 \text{ K}$  e fração de elétrons  $x_e$ , em função da densidade colunar atrás da frente de choque. (Baixo) Velocidade de grãos de grafite com diferentes tamanhos em função da densidade colunar atrás da frente de choque. **Fonte:** Tielens 2004.

Devida à transferência de energia entre a frente de choque e o gás de uma região específica, tal gás será ionizado a densidades colunares da ordem de  $N_H = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  e sua recombinação em  $N_H = 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ . A Figura 6.2 mostra também a velocidade de grãos de grafite com vários tamanhos. Por causa do seu momento de inércia, os grãos adquirirão velocidades próximas a  $3/4$  da velocidade da frente de choque.

Como os grãos estão carregados e o meio possui um campo magnético, eles são acelerados (aceleração betatron) antes de sofrerem o arrasto do gás. Os efeitos da aceleração betatron dependerão do tamanho do grão e da velocidade do choque. Como podemos observar na Figura 6.2, grãos pequenos logo são parados, enquanto que grãos maiores passam por mais uma aceleração em torno de  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Além disso, a aceleração betatron é válida nos regimes entre  $50 \text{ km/s} < v_{\text{choque}} < 250 \text{ km/s}$ .

Os efeitos da aceleração betatron também são vistos no *sputtering* inercial, mas a taxa de destruição é dependente do tamanho dos grãos. Somado a isso, o estilhaçamento (*shattering*), rapidamente quebra grãos maiores e os redistribui em grãos menores que  $300 \text{ \AA}$ . A Figura 6.3 mostra a fração de grãos de poeira que são destruídos por processos diferentes, alterando a velocidade do choque.



**Figura 6.3:** Processamento do grão de grafite em função da velocidade de choque. (a) A porcentagem da massa total destruída (retorna para a fase gasosa) em função da velocidade de choque com diferentes processos de destruição. (b) Porcentagem da massa de grafite fragmentada (*shattered* – curva sólida). As curvas tracejadas são os fragmentos formados, com dois tamanhos diferentes:  $< 50 \text{ \AA}$  e  $< 14 \text{ \AA}$ . **Fonte:** Tielens 2004.

Vemos que os processos de vaporização são menos importantes e que o *sputtering* é válido para velocidades menores que  $200 \text{ km/s}$ . O *sputtering* térmico ocorre para altas velocidades. Podemos observar também que a eficiência do *shattering* é de cerca de 80 %, para velocidades menores que  $200 \text{ km/s}$ . Nestas circunstâncias são formados grãos menores que  $50 \text{ \AA}$ .

O processamento dos grãos interestelares também depende das propriedades de cada material. Se for considerado grãos de tamanhos iguais, diamantes são mais *sputtered* que grãos de grafite devido à sua alta massa. Por outro lado, mantos de gelos sobre os grãos podem ser destruídos em todas as velocidades. Além disso, os gelos são completamente *sputtered* antes do *shattering* tomar efeito.

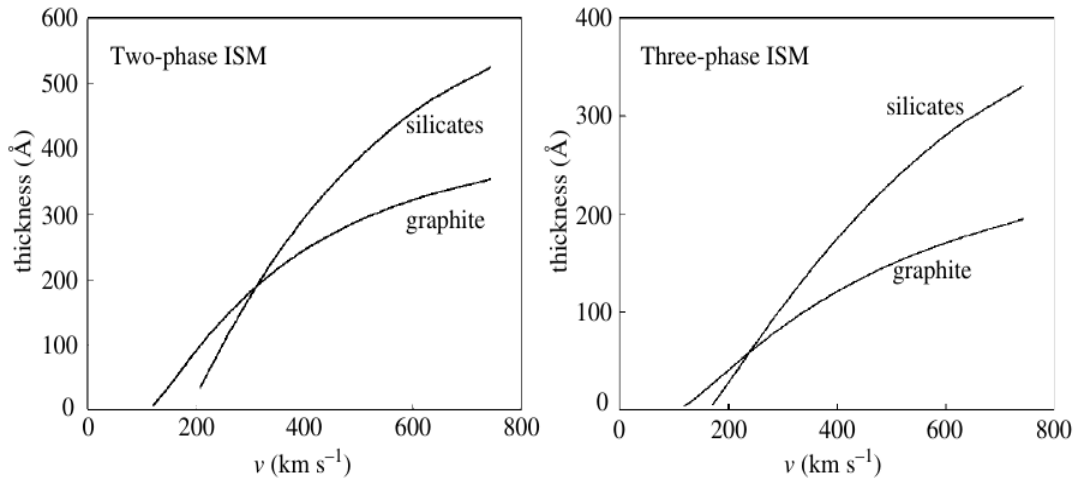
### 6.3.2 Choques adiabáticos

O *sputtering* térmico ocorre após choques adiabáticos, onde a frente de choque tem velocidades maiores que  $250 \text{ km/s}$ . Isso aquece o gás a temperaturas altas ( $T > 10^6 \text{ K}$ ), e o processo de resfriamento se torna ineficiente. Para avaliar os efeitos do *sputtering* térmico são necessários modelos com a expansão dos remanescentes de supernovas. Ao se considerar algumas aproximações, chega-se à espessura da camada removida devido ao *sputtering* térmico:

$$\Delta a = 1.1 \times 10^5 \left( \frac{100 \text{ km s}^{-1}}{v_s} \right)^{10/9} T_s^{-1/9} \int_0^{T_s} T^{-8/9} f(T) dT \text{ cm.} \quad (6.1)$$

onde  $T_s$  é a temperatura inicial do choque e  $f(T)$  é uma função associada com o rendimento do *sputtering*, que depende apenas da temperatura.

A Figura 6.4 mostra o resultado da Equação 6.1 para grãos de grafite e silicato em função da velocidade do choque, considerando dois modelos para a frente de choque associada ao remanescente de supernova.



**Figura 6.4:** A espessura retirada do grãos devido ao *sputtering* térmico em função da velocidade do choque para a expansão de um remanescente de supernova sobre um meio de duas e três fases do meio interestelar, respectivamente. **Fonte:** Tielens 2004.

A altas velocidades silicatos perdem mais material do que o grafite. Isto está relacionado com as diferentes eficiências de *sputtering* térmico a altas energias para cada material. Porém a baixas velocidades, o grafite perde mais material por causa do seu limiar (*threshold*) de energia. Vemos ainda que a uma dada velocidade há diferença entre a destruição causada pelo choque em um meio de duas e três fases do meio interestelar.

## 6.4 Tempo de vida da poeira interestelar

Para calcular o tempo de sobrevivência da poeira interestelar, é necessário antes determinar sua taxa de destruição  $k_{des}$ , que é dada por:

$$k_{des} M_{ISM} = \frac{1}{\tau_{SN}} \int \epsilon(v_s) dM_s(v_s) \quad (6.2)$$

onde  $M_{ISM}$  é a massa total do meio interestelar ( $4.5 \times 10^9 M_{SOLAR}$ ),  $\tau_{SN}$  é o intervalo entre explosões de supernovas,  $\epsilon(v_s)$  é a fração da poeira destruída por um choque de velocidade  $v_s$ , e  $M_s(v_s)$  é a massa atingida por um choque de velocidade mínima  $v_s$ .

A Equação 6.2 precisa de muitas considerações para ser calculada, portanto seu valor é apenas uma estimativa grosseira. O termo  $1/\tau_{SN} = 8 \times 10^{-3} \text{ anos}^{-1}$ , considerando que

- nem toda supernova interage efetivamente com o meio interestelar;
- metade das supernovas tipo Ia possuem progenitores de baixa massa;
- metade das supernovas tipo II ocorrem em associações e a primeira estrela a explodir será eficiente na destruição da poeira;
- a outra metade das supernovas do tipo II estão isoladas.

O fator  $\epsilon(v_s)$  é estimado ser de  $8 M_{SOLAR}$  para o grafite e  $12 M_{SOLAR}$  para o silicato. Então, fazendo essas considerações o tempo de vida da poeira formada por grafite e silicato é  $6 \times 10^8$  e  $4 \times 10^8$  anos, respectivamente. No entanto, um fator adicional que não está sendo levado em conta na Equação 6.2 é o tamanho do grão. Certamente, ela é válida para a maioria dos casos, pois a distribuição MRN mostra que existem mais grãos pequenos do que grandes.

## 6.5 Conclusões

A sobrevivência da poeira interestelar depende de muitos fatores, entre eles o seu tamanho. Mostramos que a eficiência da destruição dos grãos está diretamente relacionada a colisões energéticas. O principal agente nesse sentido são as ondas de choque, resultantes dos remanescentes de supernovas. Entre os processos, o *sputtering* inercial e térmico são os mais eficientes. O *shattering* também é importante, mas age alterando a distribuição de tamanho dos grãos, ao fragmentá-los. Isso altera a distribuição MNR por um fator pequeno, de  $n(a) \propto a^{-3.5}$ , para  $n(a) \propto a^{-3.3}$ . Além disso, vimos que os efeitos causados pelo *sputtering* térmico é diferente para grãos de silicato e grafite, como também se estes estão em meio de duas e três fases do meio interestelar. Isso tem consequência direta no tempo de vida da poeira interestelar.

Porém as escalas de tempo são praticamente iguais. Caso tais grãos sobrevivam a todos os processos de destruição eles podem ser agregados a corpos gelados, bem como planetas de uma dado Sistema Solar.

### **Referências**

Tielens, A. G. G. M. *Physics and chemistry of the interestelar medium*. 2004.

Whittet, D. C. B. *Dust in the Galactic Environment*. 2003.