O Meio Interestelar

Vitor Ferrari

DFI | UEM

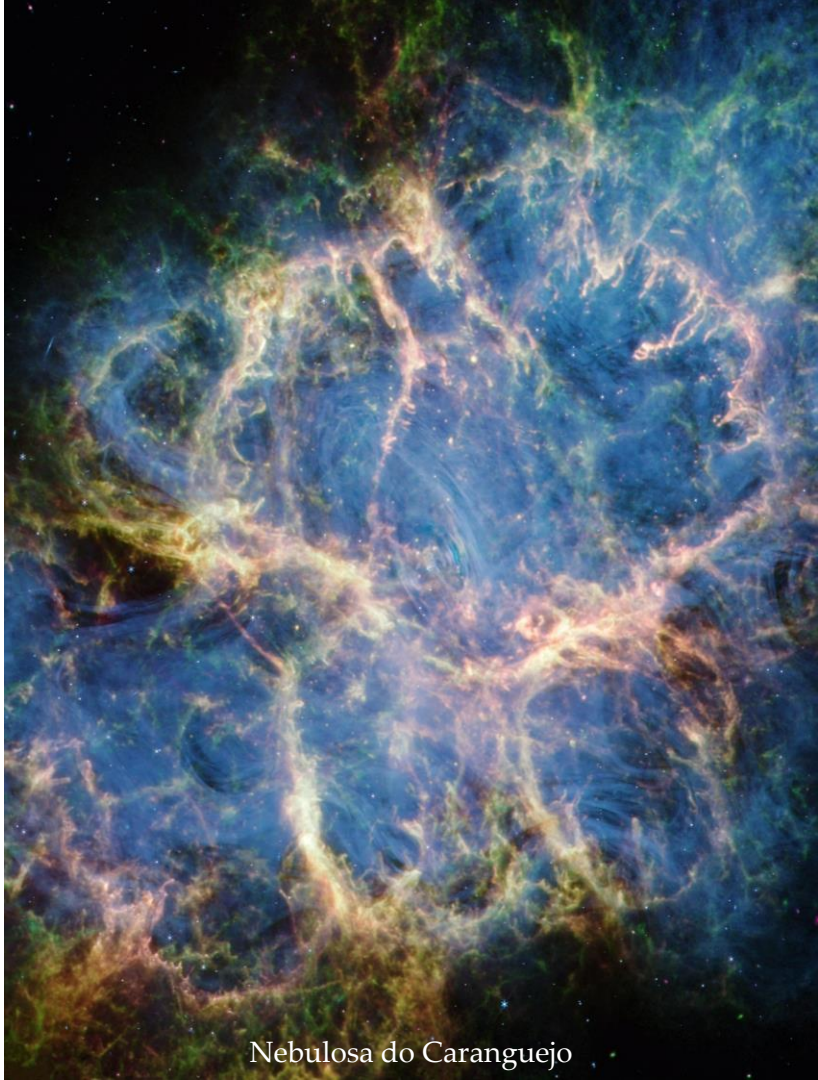
Departamento de Física

NGC 604

O Meio Interestelar

- Embora a maior parte da massa visível da Galáxia esteja concentrada em estrelas, o meio interestelar não é completamente vazio.
- Ele contém gás e poeira, na forma de nuvens individuais, e também em um meio difuso.

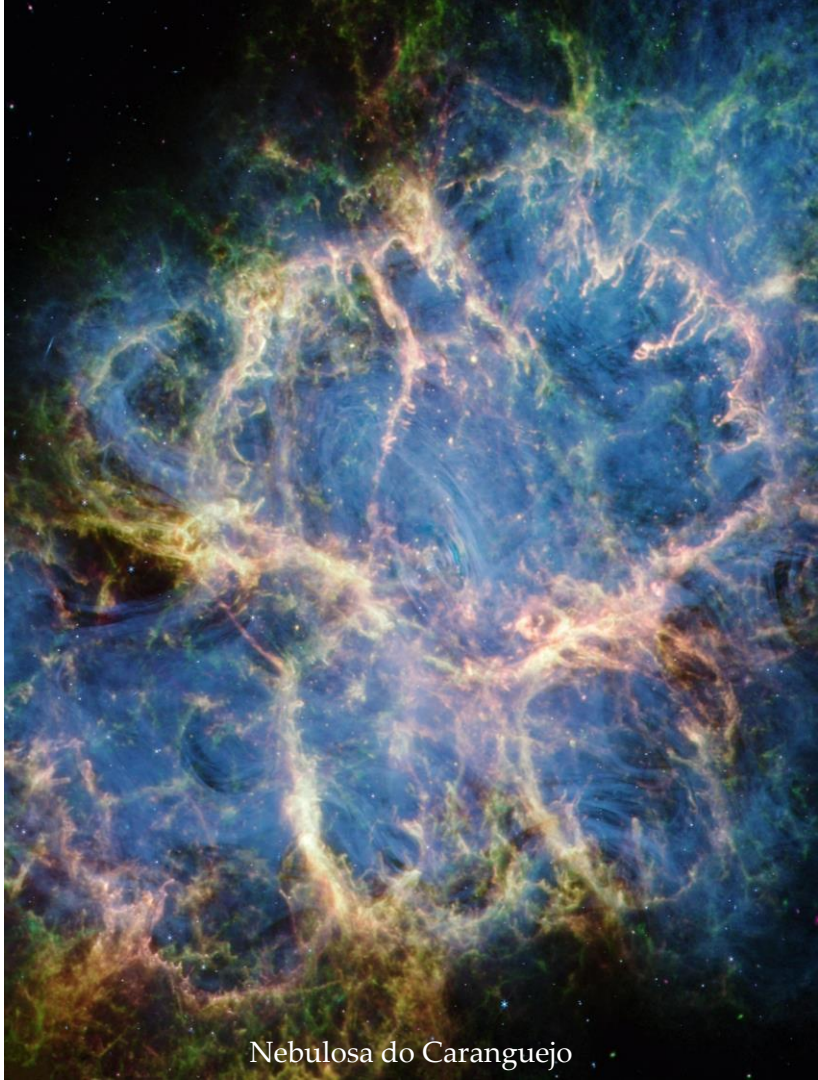
O meio entre as estrelas não é completamente vazio, mas sim é preenchido por gás e poeira em uma quantidade que chega a 10% da massa visível da Galáxia.



Nebulosa do Caranguejo

O Meio Interestelar

- O meio interestelar está sendo continuamente reciclado.
- Nuvens interestelares de hidrogênio atômico colidem e crescem; algumas colapsam dando origem a estrelas.
- Quando as estrelas morrem, devolvem ao meio, parte do gás; este material pode então formar novas nuvens e começar novamente o ciclo.


Nebulosa do Caranguejo

Gás Interestelar

O gás interestelar é composto principalmente de hidrogênio, que pode ser encontrado de três formas diferentes:

- Na forma de hidrogênio atômico (HI), espalhado em toda a Galáxia;
- Na forma ionizada (HII), em nebulosas brilhantes chamadas nebulosas de emissão (ou regiões HII);
- Na forma molecular (H_2), formando nuvens moleculares de diferentes tamanhos.

Números Quânticos

Os números quânticos são parâmetros que surgem da solução da equação de Schrödinger e que descrevem as propriedades dos elétrons em átomos.

Eles são fundamentais para entender a estrutura eletrônica dos átomos e como os elétrons ocupam diferentes níveis de energia. Existem quatro números quânticos:

- Número quântico principal (n);
- Número quântico azimutal (l);
- Número quântico magnético (m_l);
- Número quântico de spin (m_s).

Números Quântico Principal (n)

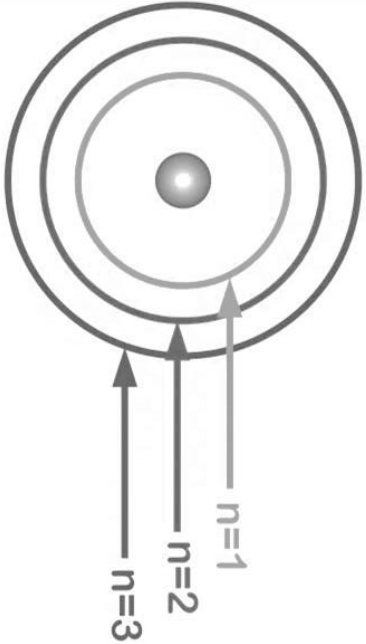
Determina o nível de energia em que o elétron está localizado e está relacionado ao tamanho do orbital.

Os valores de n são inteiros e positivos e variam de 1 até 7: ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ e 7).

Quanto maior o valor de n, maior a distância média do elétron ao núcleo e maior a energia desse elétron, maior se torna a região de máxima densidade de probabilidade de se encontrar o elétron;

Camada	k	l	m	n	o	p	q
n	1	2	3	4	5	6	7

Energia →



Números Quântico Azimutal ou Momento Angular (l)

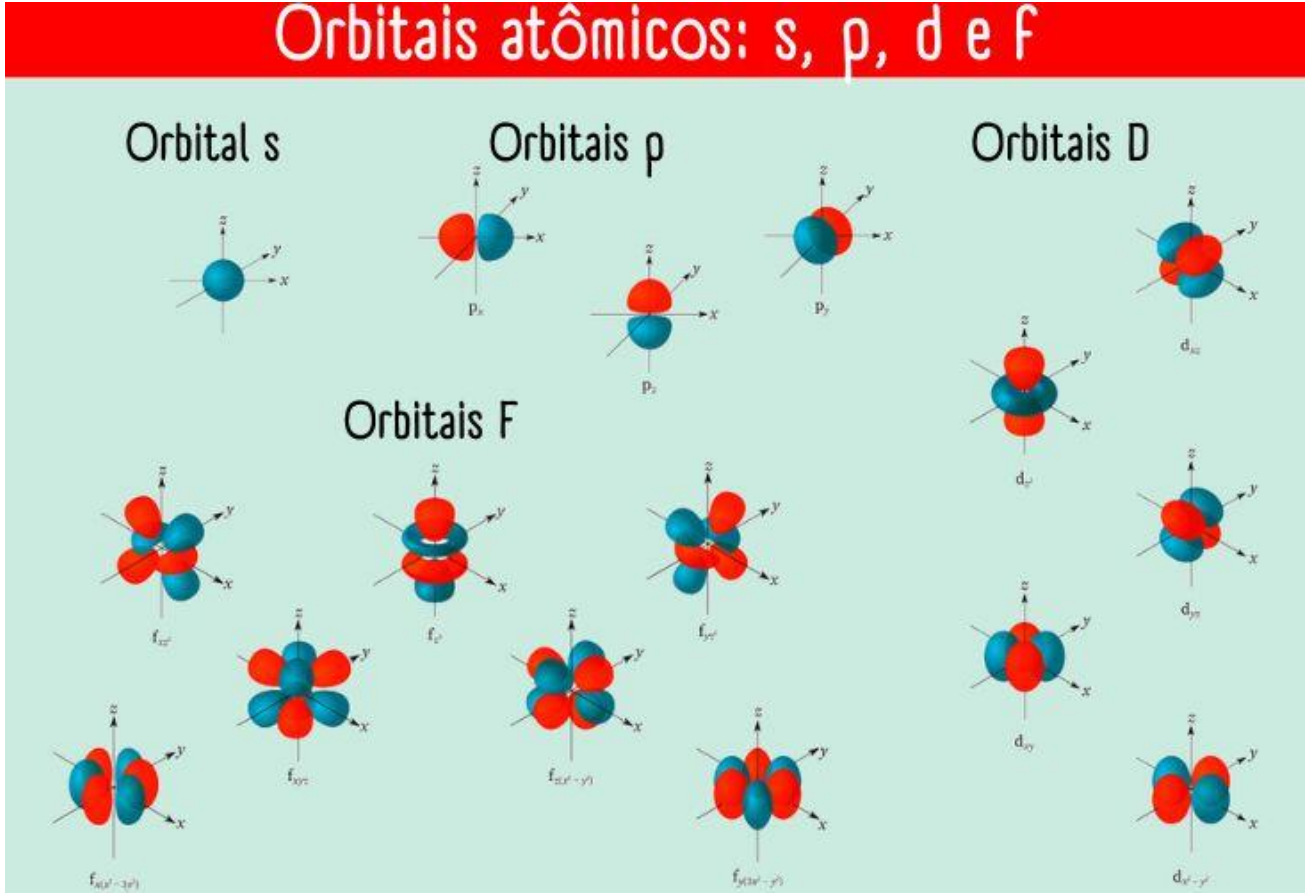
O número quântico secundário apresenta o conceito de subcamadas (ou subníveis), diferenciando orbitais atômicos de mesmo "n". Determina o sub nível de energia do elétron, está relacionado à forma do orbital.

- $l = 0$: orbital s (esférico)
- $l = 1$: orbital p (lobular)
- $l = 2$: orbital d (complexo)
- $l = 3$: orbital f (mais complexo)

Momento angular do elétron no orbital – Pode ser entendido como a velocidade que o elétron "transita" em torno do núcleo atômico.

Subnível	s	p	d	f
l	0	1	2	3

Números Quântico Azimutal ou Momento Angular (*l*)



Números Quântico Magnético (m_l)

Esse número especifica a orientação do movimento orbital do elétron no espaço. Ele pode assumir valores inteiros que variam de -3 até $+3$.

Serve para distinguir os orbitais de uma mesma subcamada.

Esse número especifica qual orbital dentro de um subnível está ocupado pelo elétron, ajudando a determinar a distribuição espacial do elétron no átomo.

Energia

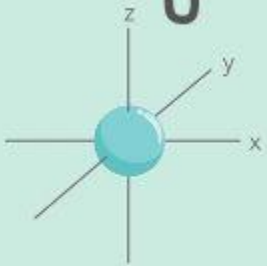
Para a mesma camada

s	0					
p	-1	0	1			
d	-2	-1	0	1	2	
f	-3	-2	-1	0	1	2	3

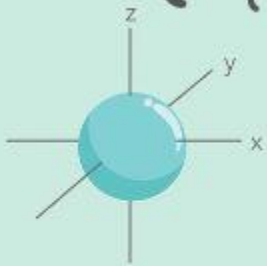
Números Quântico Magnético (m_l)

Número quântico magnético (m_l)

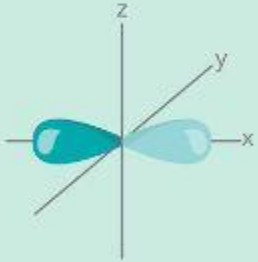
n	l	m_l	Notação dos subníveis
1	0	0	1s
2	0	0	2s
	1	-1, 0, +1	2p
3	0		3s
	1	-1, 0, +1	3p
	2	-2, -1, 0, +1, +2	3d
4	0	0	4s
	1	-1, 0, +1	4p
	2	-2, -1, 0, +1, +2	4d
	3	-3, -2, -1, 0, +1, +2,+3	4f
5	0	0	5s
	1	-1, 0, +1	5p
	2	-2, -1, 0, +1, +2	5d
	3	-3, -2, -1, 0, +1, +2,+3	5f
	4	-4, -3, -2, -1, 0, +1, +2,+3,+4	5g



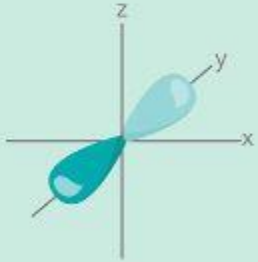
1s
$m_l = 0$



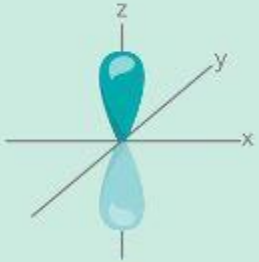
2s
$m_l = 0$



$2p_x$
$m_l = 0$



$2p_y$
$m_l = +1$



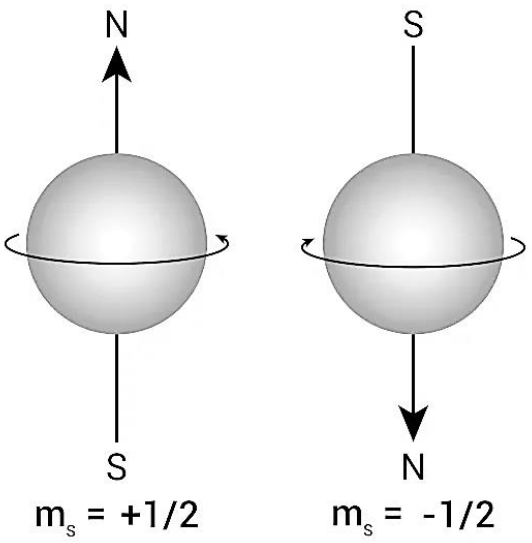
$2p_z$
$m_l = -1$

Números Quântico de Spin (m_s)

Está relacionado ao momento angular intrínseco do elétron, ou seja, à sua rotação em torno de si mesmo.

A mecânica quântica admite dois estados de spin para os elétrons, representados por uma seta para cima (↑) e uma seta para baixo (↓).

Indica que o elétron pode rotacionar no sentido horário de seu eixo ou no sentido anti-horário de seu eixo. Para distinguir tais estados, criou-se o número quântico spin, que pode assumir os valores +1/2 (↑) e – 1/2 (↓).



Hidrogênio Atômico – Regiões *HI*

Refere-se ao hidrogênio que se encontra em sua forma atômica neutra, ou seja, um átomo de hidrogênio composto de um próton e um elétron, sem estar ionizado, o que significa que ele existe como átomos individuais de hidrogênio.

Hidrogênio Atômico – Regiões *HI*

Uma característica importante do hidrogênio atômico é que ele emite radiação eletromagnética na frequência de 1.420 MHz, que corresponde a um comprimento de onda de 21 centímetros.

Essa emissão ocorre devido à transição hiperfina do átomo de hidrogênio, quando o spin do elétron e o do próton se alinham ou desalinhavam.

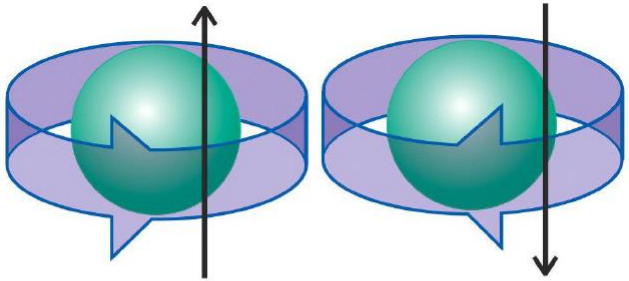
Essa radiação é um dos principais métodos usados para mapear a distribuição do hidrogênio no espaço.

Hidrogênio Atômico – Regiões *HI*

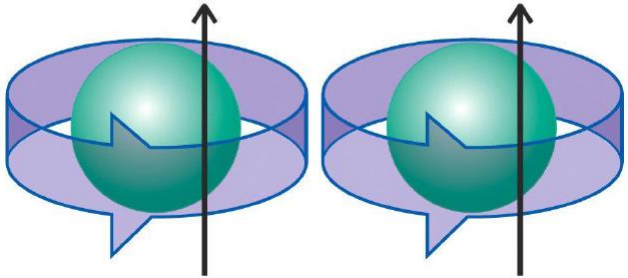
Como o elétron e o próton são cargas elétricas girando, eles criam campos magnéticos locais que interagem, de forma que o estado de menor energia é com spins antiparalelos, e o de maior energia com spins paralelos.

A diferença de energia destes dois níveis é de:

$$h\,\nu = 6 \times 10^{-6}\ eV$$



Alinhamento Anti-Paralelo



Alinhamento Paralelo

Hidrogênio Atômico – Regiões *HI*

- A linha foi detectada pela primeira vez por astrônomos americanos, em 1951.

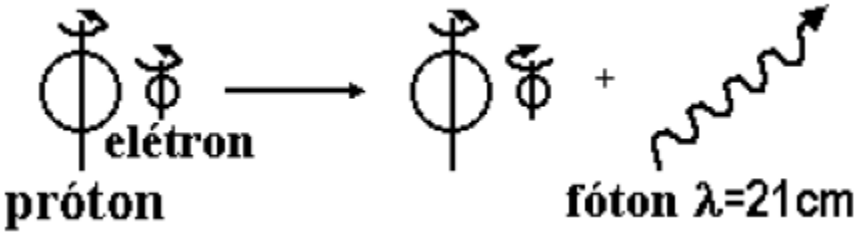
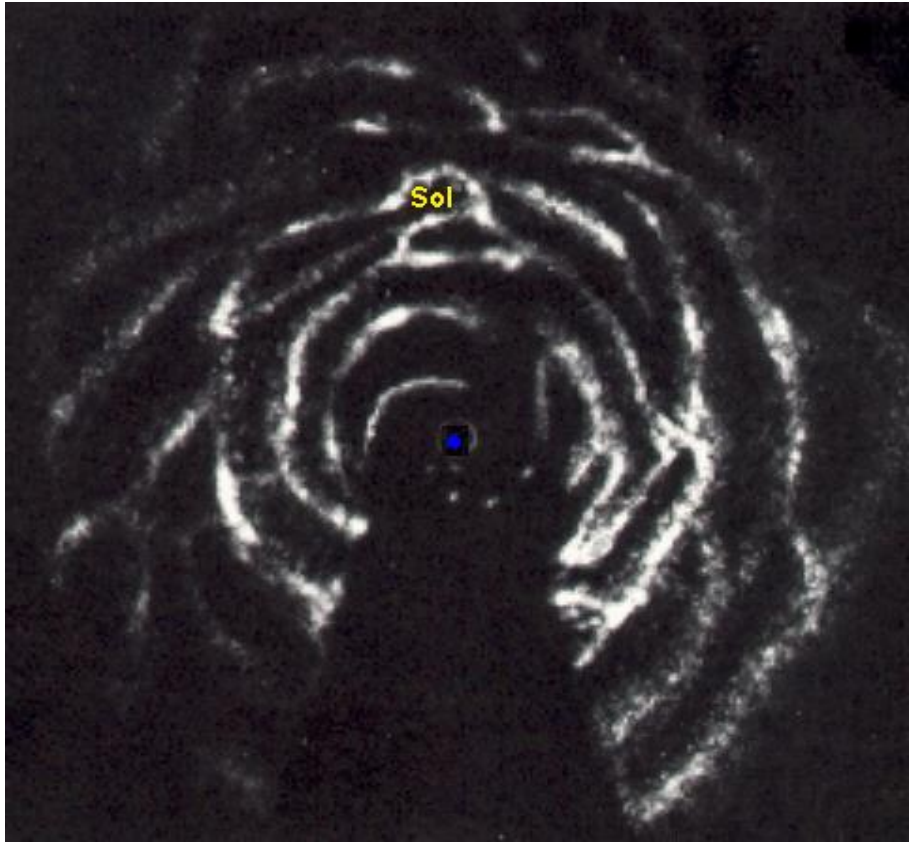


Diagrama de um átomo de hidrogênio no estado fundamental mudando de um estado de maior energia (elétron e próton com spin paralelos) para um estado de menor energia (elétron e próton com spin antiparalelos). O fóton emitido tem energia igual à diferença de energia entre os dois níveis, correspondendo a um comprimento de onda de 21 cm.

Hidrogênio Atômico – Regiões *HI*



Mapa da distribuição de hidrogênio na nossa Galáxia.

O centro da Galáxia está indicado por um pequeno círculo azul.

Hidrogênio Ionizado – Regiões *HII*

Refere-se ao hidrogênio que perdeu seu único elétron, ficando em estado ionizado (H^+).

Essas regiões são formadas quando a radiação ultravioleta emitida por estrelas jovens e quentes ioniza o gás de hidrogênio ao redor – criando assim as nebulosas de emissão (são nuvens brilhantes de gás hidrogênio ionizado).

As regiões HII são encontradas em torno de estrelas jovens e massivas que ainda estão no estágio inicial de suas vidas.

Hidrogênio Ionizado – Regiões HII

Os átomos de hidrogênio perdem elétrons devido à intensa radiação emitida pelas estrelas jovens. O processo de ionização ocorre quando um fóton com energia suficiente ($13{,}6\ eV$ - geralmente ultravioleta) colide com o átomo de hidrogênio, removendo o elétron e deixando apenas o próton (H^+).

Hidrogênio Ionizado – Regiões HII

Após a ionização, quando os elétrons são recapturados pelos prótons, eles liberam energia na forma de luz visível, o que faz com que as regiões HII brilhem, muitas vezes com uma coloração avermelhada, devido à emissão da linha $H\alpha$ (hidrogênio alfa), uma linha de emissão muito característica do espectro do hidrogênio ionizado.

As regiões HII indicam áreas de intensa formação estelar.

Hidrogênio Ionizado – Regiões *HII*

Exemplo de Região HII:

Nebulosa de Emissão Orion.

Hidrogênio Ionizado – Regiões *HII*

Exemplo de Região HII:

Nebulosa da tarântula.

Hidrogênio Molecular – Regiões H_2

As regiões H_2 são áreas no meio interestelar onde o hidrogênio está na forma molecular, ou seja, dois átomos de hidrogênio (H) se combinam para formar uma molécula de hidrogênio (H_2).

- Essas regiões são conhecidas como nuvens moleculares e são as áreas mais frias e densas do meio interestelar.

Nuvens moleculares
Contém moléculas de H_2, CH, CO, e outras. Dão origem a novas estrelas. Geralmente encontram-se imersas em regiões HII.

Nuvens Moleculares

O hidrogênio molecular (H_2) foi descoberto no início dos anos 1970, junto com monóxido de carbono CO.

Como o H_2 não emite ondas de rádio, o CO (que emite em rádio) é usado para mapeá-lo.

Muitos outros tipos de moléculas têm sido encontradas desde então, desde amônia NH_3, até as mais complexas como benzeno C_6H_6 e acetona $(CH_3)_2CO$.

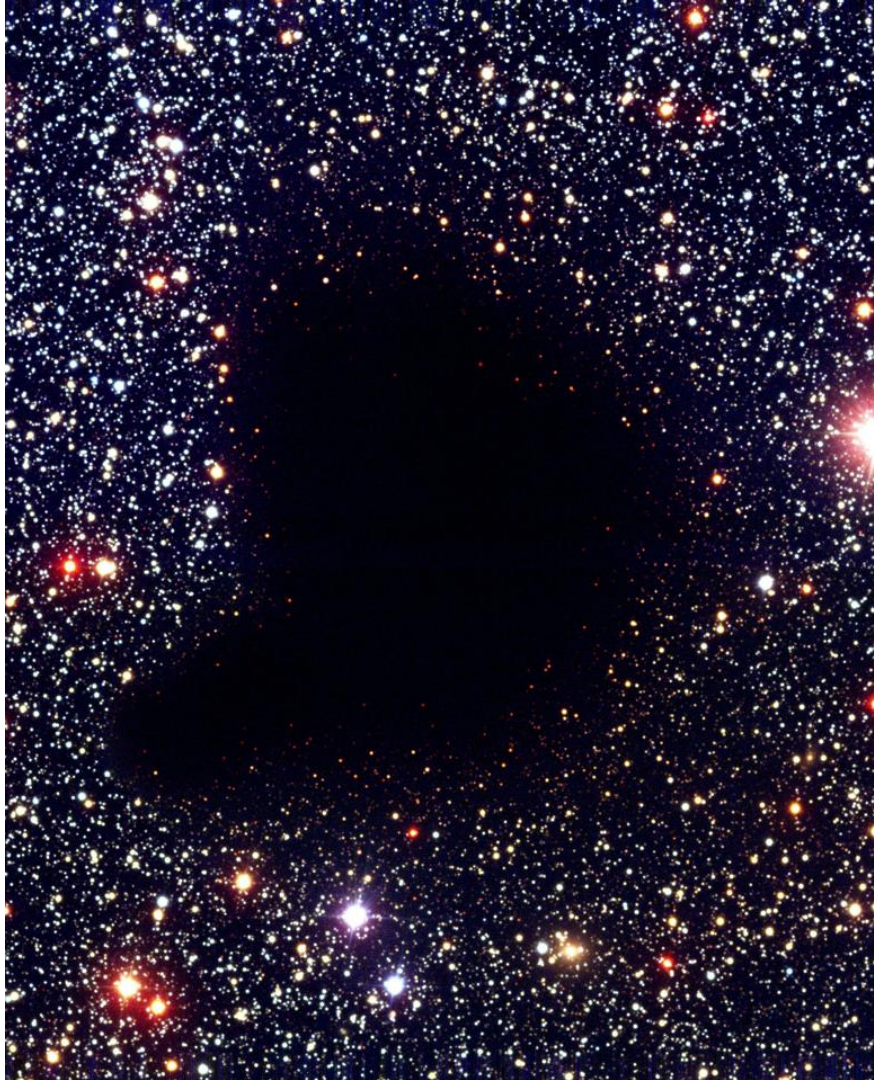
As estrelas se formam nas partes mais densas destas nuvens moleculares, que aparecem como regiões escuras no céu.

Nuvens Moleculares

Nuvem Molecular Barnard 68

Está a 500 anos-luz da Terra, na direção da constelação de Ofiúco, com cerca de meio ano-luz de diâmetro e com uma temperatura de $-263\,°C$ e está colapsando.

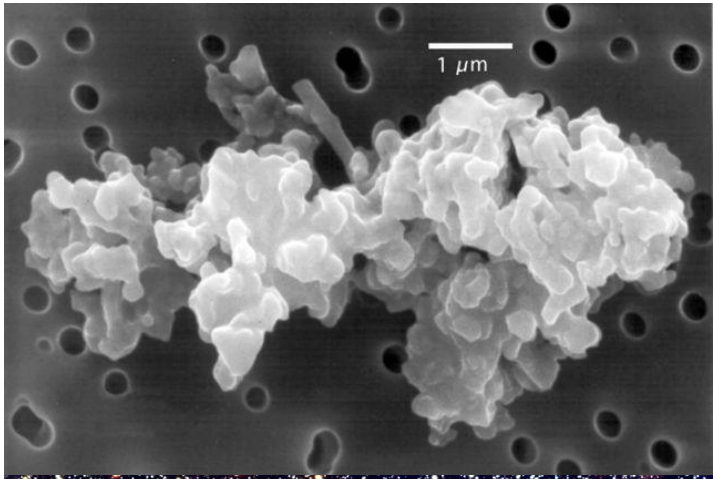
Alta concentração de poeira e gás molecular, absorve praticamente toda a luz visível emitida pelas estrelas que estão no background.



Poeira Interestelar

A poeira é composta principalmente de grafite, silicatos e gelo de água, são grãos sólidos com tamanhos de no máximo um micrômetro, muito menores do que a poeira aqui na Terra.

Tanto que podem formar nebulosas escuras - quando escondem a luz das estrelas por detrás.



Poeira Interestelar

Interação da Luz com a Poeira Interestelar

As partículas de poeira no meio interestelar interagem com a luz das estrelas de duas maneiras:

- Absorvendo parte dela e espalhando a outra parte.

O espalhamento é mais eficiente para luz de comprimentos de onda curtos (luz azul) do que para comprimentos de onda longos (luz vermelha).

Poeira Interestelar

Absorção e Espalhamento de Luz Azul

Devido ao pequeno tamanho dos grãos de poeira, a luz azul é mais afetada. A poeira interestelar absorve e espalha preferencialmente a luz azul, desviando-a de sua trajetória em direção à Terra.

O resultado desse processo é que a luz das estrelas que atravessa regiões de poeira interestelar chega à Terra mais fraca e mais avermelhada, já que os fótons vermelhos sofrem menos espalhamento.

Poeira Interestelar

Comparação com o Pôr do Sol Terrestre

Esse efeito é semelhante ao observado no pôr do sol na Terra, onde moléculas de oxigênio, partículas de poeira e poluição espalham a luz azul, fazendo com que o Sol pareça mais vermelho no horizonte.

Raios Cósmicos

Os raios cósmicos são partículas carregadas altamente energéticas, principalmente prótons, mas podem ser:

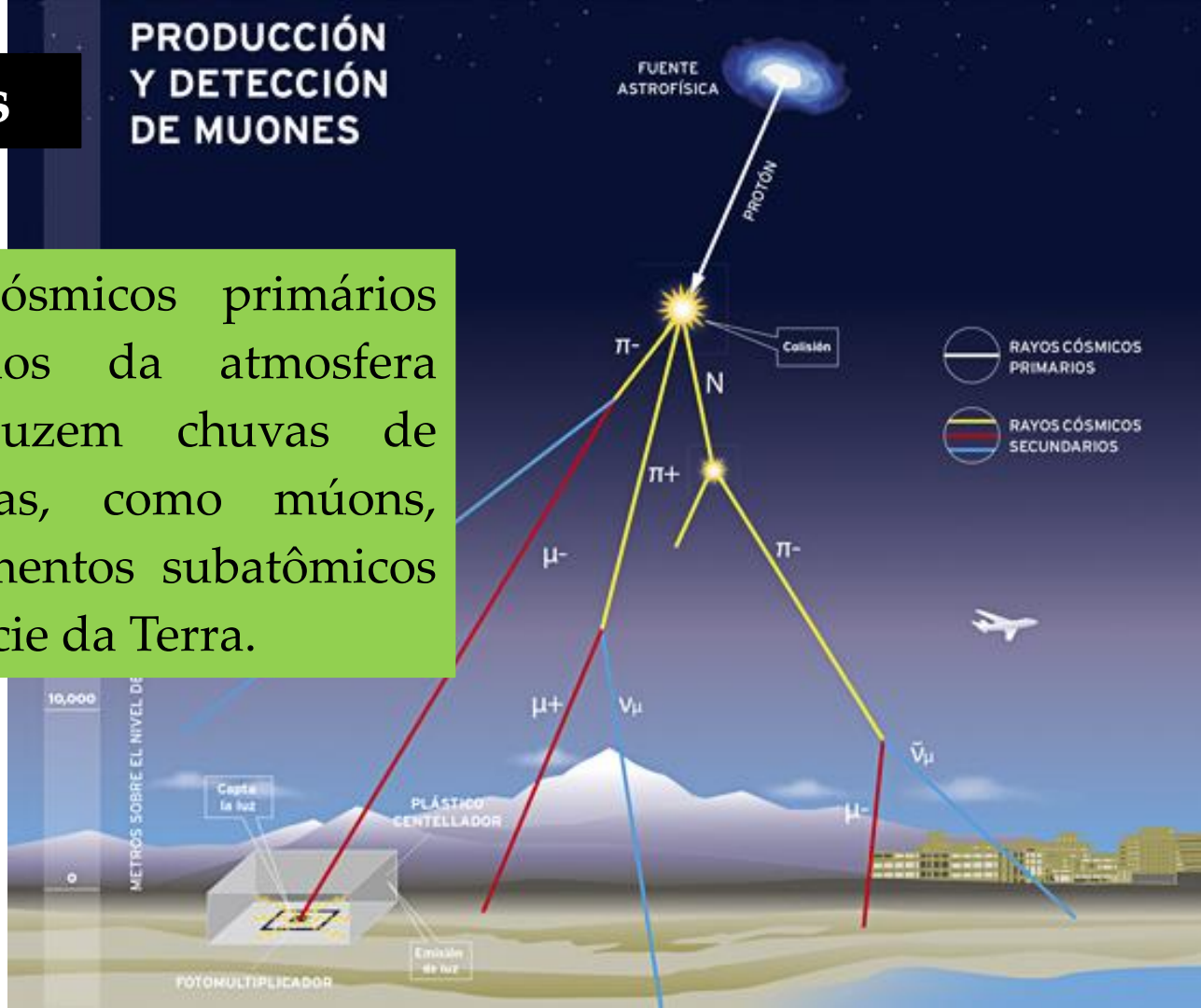
- Núcleos atômicos.
- Partículas alfa.
- Elétrons.
- Partículas mais complexas.

Que atingem a Terra vindas do espaço.

Os raios cósmicos têm origem em uma variedade de fontes astrofísicas, como supernovas, buracos negros e até eventos que ocorrem fora da nossa galáxia.

Raios Cósmicos

Quando os raios cósmicos primários colidem com átomos da atmosfera terrestre, eles produzem chuvas de partículas secundárias, como múons, píons, e outros fragmentos subatômicos que atingem a superfície da Terra.



Condição Necessária para a Formação de Uma Estrela

Uma nuvem molecular está sujeita à atração gravitacional de suas partes, o que, em teoria, levaria ao seu colapso.

No entanto, há fatores que evitam esse colapso. Neste contexto, será considerado apenas o efeito da pressão do gás presente na nuvem molecular. Para que a formação estelar ocorra, a energia potencial gravitacional da nuvem deve superar a energia cinética, provocando sua contração.

- Outros fatores que também influenciam, mas não serão considerados neste estudo, incluem a energia cinética de rotação, a turbulência e os campos magnéticos.

$$\left|E_{gravitacional}\right| > E_{termica}$$

Condição Necessária para a Formação de Uma Estrela

A expressão para a energia potencial gravitacional da distribuição é dada por:

$$E_{gravitacional} = -C_{gravitacional} \frac{G\ M^2}{R}$$

Em que G é a constante gravitacional, M é a massa da nuvem molecular, R é o raio da nuvem e $C_{gravitacional}$ representa uma constante que depende da distribuição de massa da nuvem (suposta, por simplicidade, esférica e com densidade uniforme) cujo valor, neste caso, vale 2/5.

Condição Necessária para a Formação de Uma Estrela

Para a expressão da energia térmica devemos considerar o gás como sendo ideal (isso é bastante razoável pois a densidade das nuvens moleculares são incrivelmente baixas). Assim, a equação para a energia térmica é dada por:

$$E_{termica} = \frac{3}{2}\frac{M}{\mu} R_g \, T$$

Em que T é a temperatura absoluta, μ a massa atômica e R_g a constante universal dos gases.

Igualando as equações e isolando R, temos:

Condição Necessária para a Formação de Uma Estrela

$$-\frac{2}{5}\frac{G\,M^2}{R} = \frac{3}{2}\frac{M}{\mu}R_g\,T \;\;\Rightarrow\;\; R_J = \frac{2}{5}\frac{G\,M\,\mu}{R_G\,T}$$

Em que R_J representa o raio de Jeans. Logo, em uma determinada região da nuvem molecular com uma massa $M(R)$ e uma temperatura T, devemos ter um raio menor que R_J para que ela possa sucumbir ao colapso gravitacional.

Metalicidade

Sabemos que as estrelas são constituídas principalmente de hidrogênio e hélio

A metalicidade refere-se à proporção de elementos químicos mais pesados que o hélio em uma estrela. Esses elementos são frequentemente chamados de "metais" em astrofísica, mesmo que incluam elementos leves como carbono, oxigênio e nitrogênio.

Metalicidade

A proporção dos outros elementos é muito menor, sendo da ordem de 1 átomo de oxigênio para 10 000 átomos de hidrogênio.

Os astrônomos chamam de metais todos os elementos químicos, com exceção do hidrogênio e do hélio.

Diz-se que uma estrela tem metalicidade alta se for "rica" em elementos como C, O, que não são metais no vocabulário da Química. Mas, claro, os verdadeiros metais como Ca, Fe, Ni, etc; também contribuem para a metalicidade.

Metalicidade

A metalicidade de uma estrela é a proporção de elementos químicos diferentes do hidrogênio e hélio que a compõem.

A metalicidade varia de estrela para estrela e pode influenciar:

- O tempo que a estrela gasta para queimar o seu combustível
- A formação de campos magnéticos
- A força do vento estelar

Metalicidade

A teoria cosmológica de evolução do Universo a partir da explosão inicial ou “Big Bang” mostra que apenas o hidrogênio e o hélio, e um pouco de lítio, foram sintetizados nas primeiras horas, quando o universo era bem mais denso e quente do que hoje.

Os elementos mais pesados, ou “metais”, só foram sintetizados depois, no interior de estrelas massivas;

Metalicidade

O material enriquecido em metais foi restituído ao meio interestelar seja por meio da explosão das estrelas (supernovas) ou da expulsão de suas camadas externas na forma de um vento estelar (dois processos que ocorrem no final da vida das estrelas).

Ou seja, a metalicidade do meio interestelar foi crescendo lentamente, alimentada pela morte de estrelas massivas.

O Cálculo da Metalicidade

A metalicidade é frequentemente expressada como "$[Fe/H]$", representa o logaritmo da razão entre a abundância de ferro da estrela e a do Sol (**o ferro não é o elemento pesado mais abundante, mas é um dos mais fáceis de medir com dados espectrais no espectro visível)**.

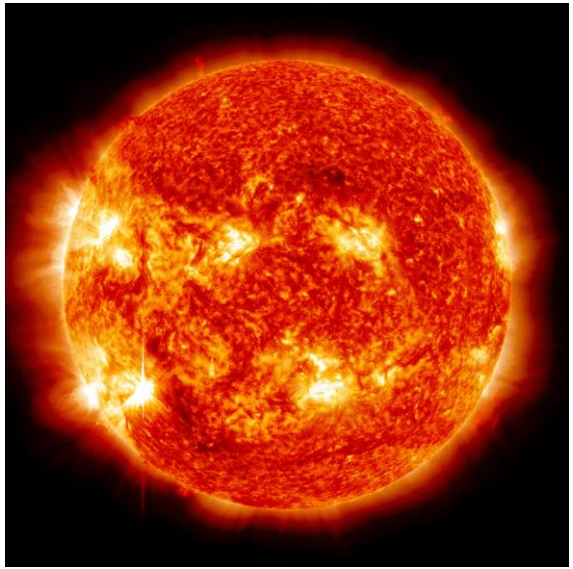
$$[Fe/H] = \log_{10}\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_{estrela} - \log_{10}\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_{Sol}$$

Em que N_{Fe} e N_H são o número de átomos de ferro e hidrogênio por unidade de volume, respectivamente.

Estrelas da População I

São estrelas jovens com **alta metalicidade**. Elas se formaram em uma época mais recente da história do universo, após várias gerações de estrelas terem enriquecido o meio interestelar com elementos pesados.

- **Metalicidade:** Alta $[Fe/H] \geq 0$.
- **Localização:** Predominantemente no disco galáctico das galáxias espirais, como a Via Láctea.
- **Exemplos:** O Sol.



Estrelas da População I

As estrelas da População I são frequentemente associadas à formação de sistemas planetários. A presença de elementos pesados é crucial para a formação de planetas, especialmente planetas rochosos como a Terra.

Estrelas da População II

São estrelas antigas, pobres em metais, que se formaram antes que o universo tivesse tempo suficiente para se enriquecer em elementos pesados.

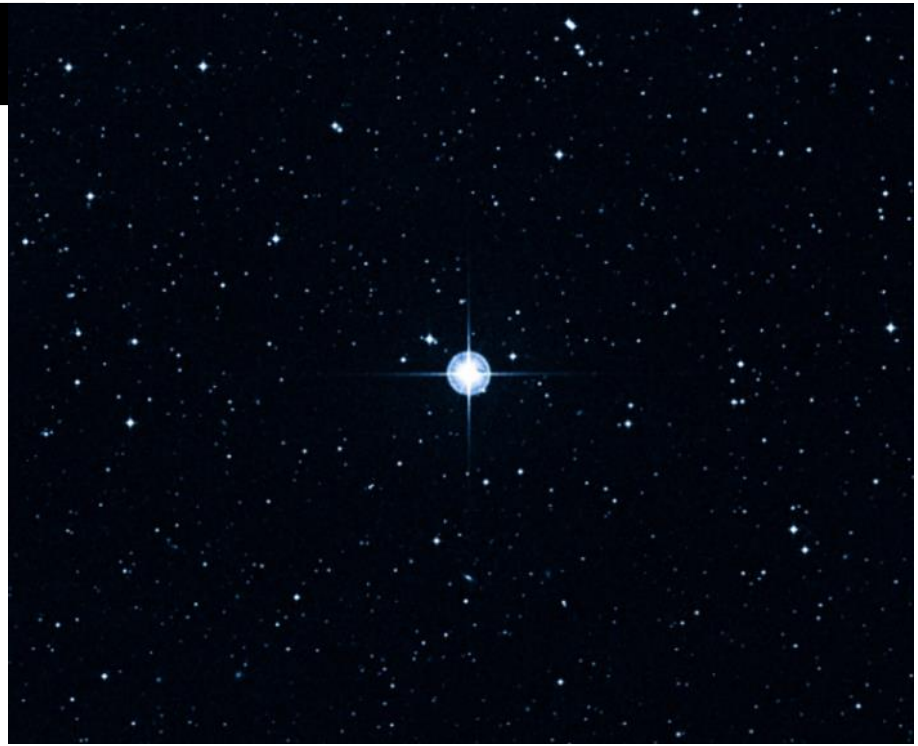
- **Metalicidade:** Baixa $[-2 \leq Fe/H < 0]$.
- **Localização:** Encontradas no halo galáctico e no bojo das galáxias, além de aglomerados globulares.
- **Idade:** As estrelas da População II são algumas das mais antigas no universo, com idades que podem alcançar 12 a 13 bilhões de anos.

Estrelas da População II

Estrela Matusalém HD 140283

Localizada na Via Láctea a apenas 190 anos-luz de distância da Terra.

Idade: 14,46 ± 0,8 bilhões de anos.



Estudar essas estrelas nos dá uma janela para o início do universo e para as condições que prevaleciam logo após o Big Bang. Elas fornecem pistas sobre a nucleossíntese primordial e a formação inicial das galáxias.

Estrelas da População III

São teóricas e representam as primeiras estrelas que se formaram no universo, logo após o Big Bang, a partir de gás primordial composto quase que inteiramente de hidrogênio e hélio.

Metalicidade: Extremamente baixa ou ausente $[Fe/H] \approx -\infty$, uma vez que esses astros se formaram antes da produção de qualquer elemento pesado.

Massa: Acredita-se que as estrelas da População III eram extremamente massivas (várias centenas de vezes a massa do Sol) e muito brilhantes, mas com vidas muito curtas, colapsando em buracos negros ou explodindo como supernovas de grande intensidade.

Estrelas da População III

Nenhuma estrela da População III foi observada diretamente até hoje, mas seus efeitos podem ser inferidos por observações da distribuição de elementos no universo primitivo e pelo impacto de suas supernovas na formação das primeiras galáxias.

As estrelas da População III foram as primeiras a sintetizar elementos pesados, dando início ao processo de enriquecimento do meio interestelar, essencial para a formação das estrelas da População II e I.

Nucleossíntese Estelar: As estrelas sintetizam elementos mais pesados que o hélio em seus núcleos e os dispersam no meio interestelar, alimentando novas gerações de estrelas.