

Via – Láctea: constituintes

Parte 1

Histórico: Modelos da Galáxia

Constituintes

Meio Interestelar

Papel do Meio Interestelar – ciclo de vida das estrelas

Gás-linha de 21cm, linhas proibidas

Poeira- constituição, extinção, avermelhamento

Sandra dos Anjos

IAGUSP - 2022

Via-Láctea

Nesta aula vamos ver como se consolidou o conhecimento sobre a estrutura, forma e dimensões, bem como o conteúdo da Via-Láctea.

Veremos também que existe um meio que permeia as estrelas - o Meio Interestelar difuso e denso - MIS, bem como a distribuição do gás e poeira na galáxia.

No MIS ocorrem **fenômenos** que geram **nebulosas de emissão, reflexão e nebulosas escuras**, além de importantes fenômenos que só ocorrem no Meio Interestelar, como as **linhas proibidas e a produção da linha de 21 cm**. Esta **linha** é de extrema importância pois nos permitir mapear a estrutura de uma das componentes principais da Galáxia - os braços espirais.

Origem do nome - Galáxia

...aparência nebulosa, esbranquiçada...!

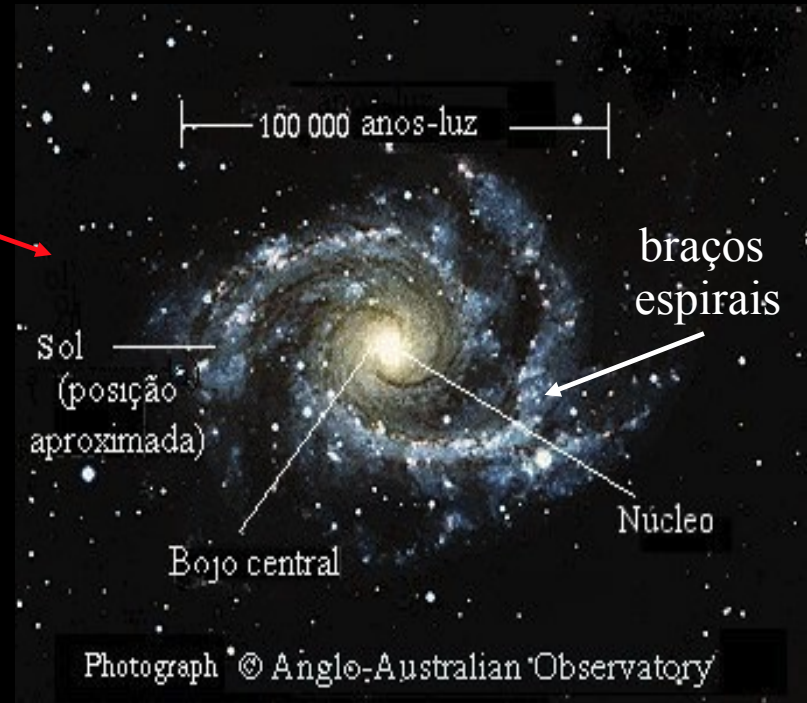
Romano, Via - Láctea (caminho de leite)

Grego, Galáxia (leite)



Desta visão...
chegamos a esta..!

Como ?

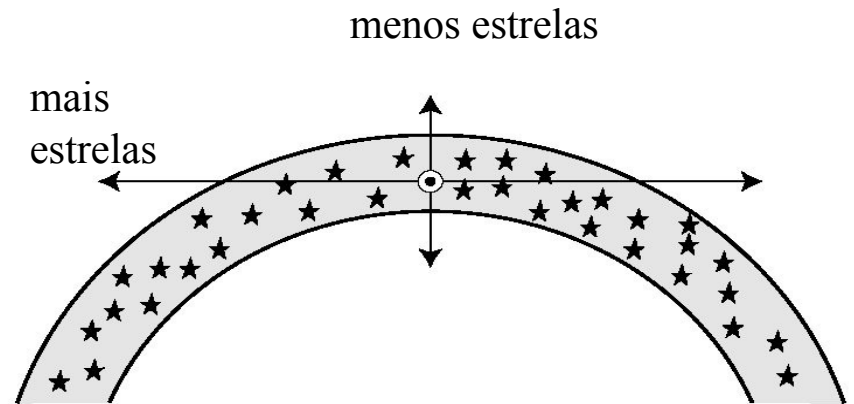
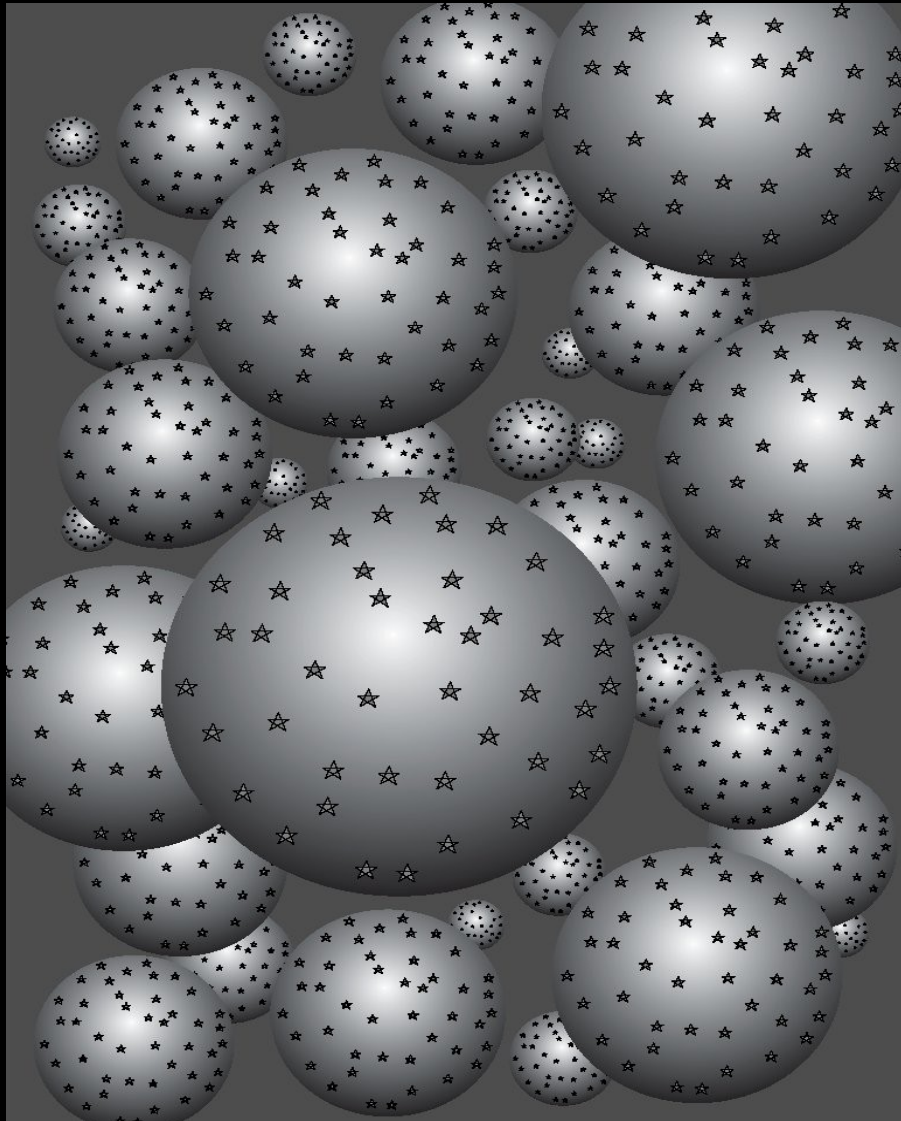


Os primeiros estudos foram realizados a partir de contagens e distribuição de estrelas e somente no século XX foi possível obter um modelo mais realista da forma e dimensão da **Galáxia**.

...historicamente, as primeiras idéias sobre a **Via-Láctea** aparecem de forma mais incisiva por volta de 1750, como veremos a seguir...

Primeiras Concepções sobre a Forma da Via-Láctea

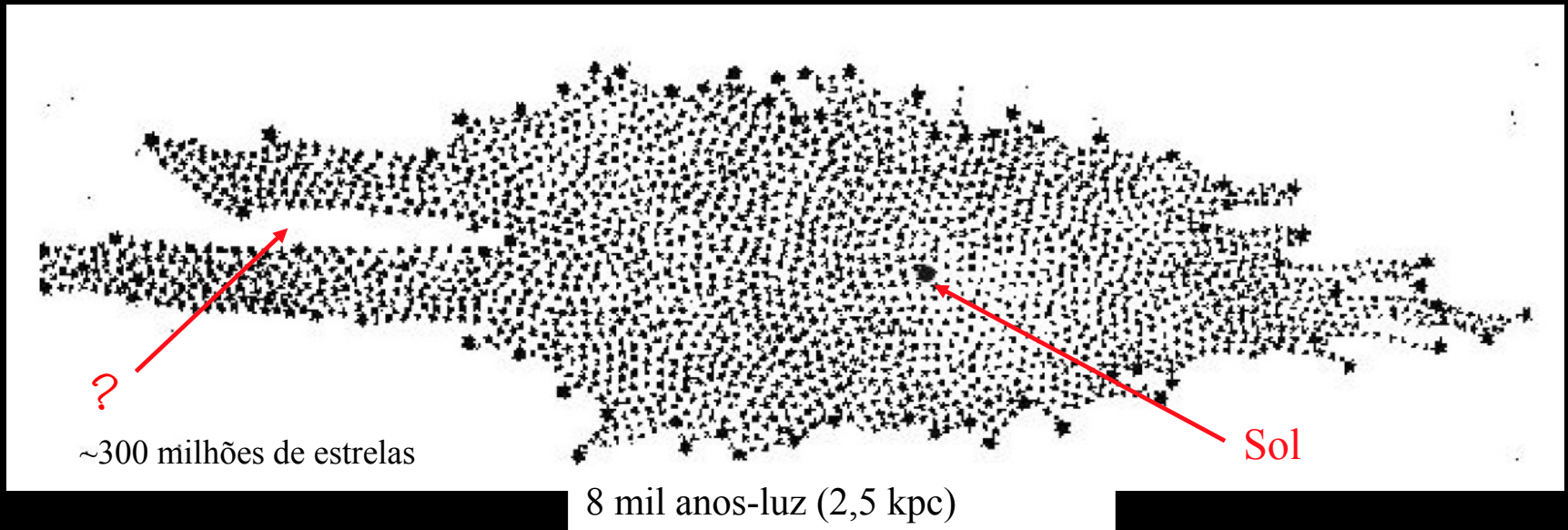
Os “Universos ilhas” de Immanuel Kant



Em 1750 Thomas Wright [sugere](#) que a Via Láctea seja uma casca esférica de estrelas.

Acreditavam que a Via-Láctea era um, entre outros, “Universos Ilhas”

Primeiras Concepções sobre a Forma da Via-Láctea

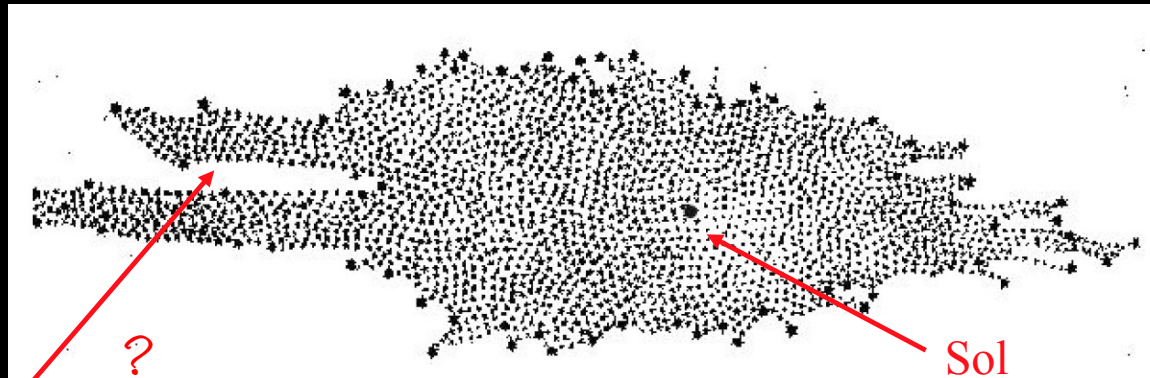


Em 1785, William Herschel inicia estudos quantitativos realizando **contagens** de estrelas supondo que a **luminosidade** era a mesma para todas, e portanto, a diferença na luminosidade observada seria devido a diferentes distâncias.

Como não se conhecia a distância das estrelas, Herschel obtem a distribuição delas sem ter a dimensão da Galáxia. Conclui que a Via-Láctea seria um disco, com o Sol próximo do centro, resultando na **concepção errada** desenhada acima.

Esta visão da Via-Láctea vai predominar até o início do Séc. XX

Primeiras Concepções sobre a Forma da Via-Láctea



A distribuição geral de estrelas neste modelo é relativamente simétrica, se contarmos o número de estrelas nos 2 planos – acima e abaixo da posição do Sol.

O resultado da distribuição de estrelas no plano onde se encontra o Sol exibe uma região onde aparentemente não existem estrelas

A conclusão lógica é de que o Sol estaria no centro da distribuição das estrelas.

A assimetria, onde “aparentemente” não existiriam estrelas, foi explicada posteriormente, no início da década de 1930, sendo devida a efeitos de absorção da luz pela poeira que se encontra no Meio Interestelar.

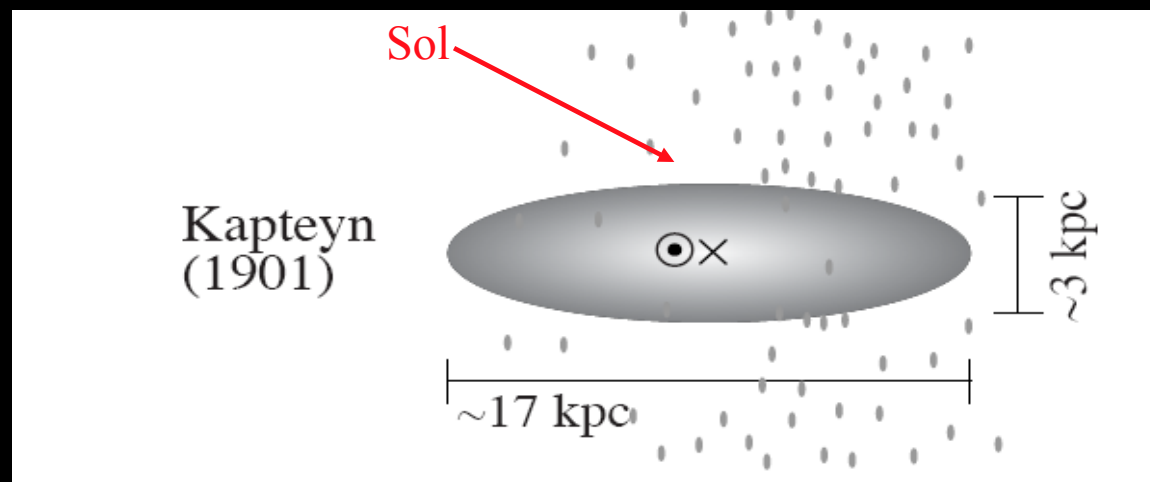
Um passo a mais....

Kapteyn (1901) propõe um modelo mais preciso

Aumenta a estatística do número de estrelas até então disponíveis, faz a contagem das estrelas próximas registradas em placas fotográficas, e **aplica métodos de determinação de distância** utilizando métodos de **paralaxe e movimentos próprios**.

Mas de fundamental importância.....,assume que as estrelas tem **L diferentes**, o que implica que a diferença de luminosidade não é somente devida a distância, é devida também a potência luminosa das estrelas.

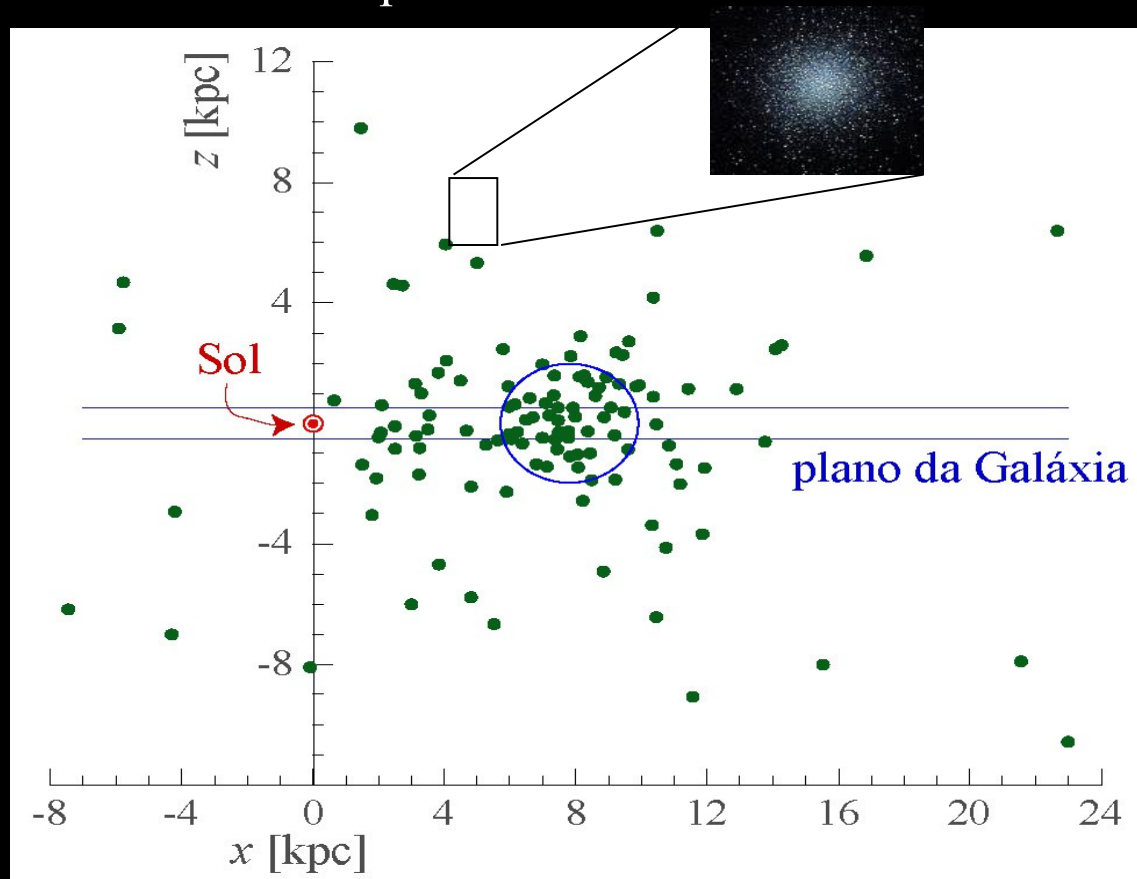
Encontra como resultado uma forma em disco onde o Sol está quase no centro e dimensões como indica a figura.



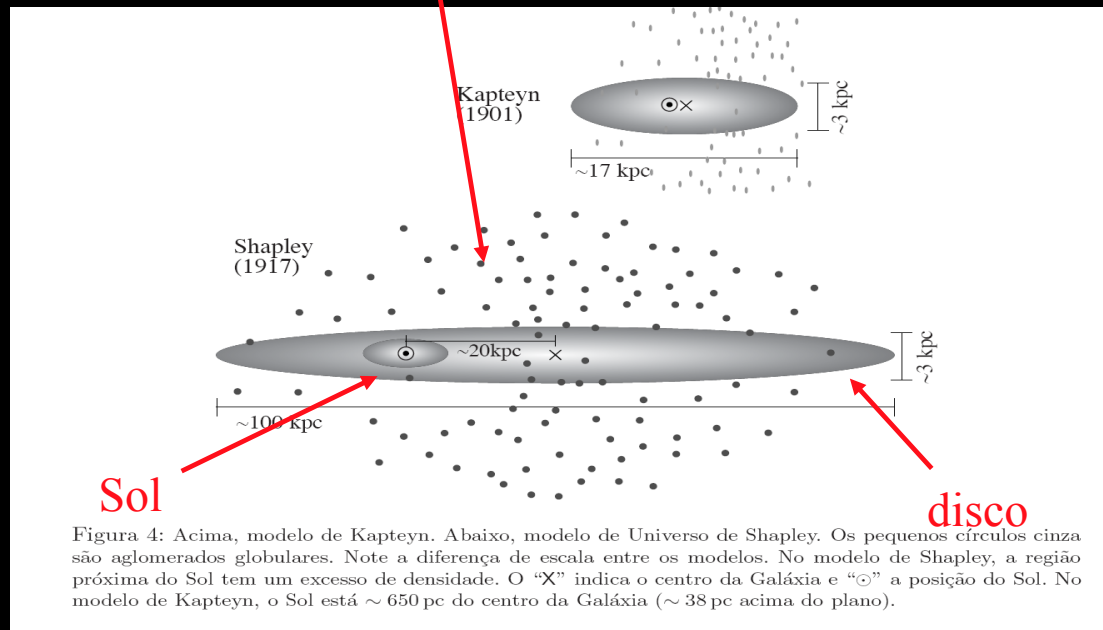
No início do Séc. XX **Harlow Shapley** utiliza aglomerados globulares de estrelas para estudar a distribuição e distância destes objetos. Percebe que estes estavam distribuídos de modo mais uniforme na Via-Láctea e propõe um modelo baseado nesta distribuição.

Ele nota que o Sol não está no centro da distribuição espacial e conclui, erroneamente, que estaria a uma distância da ordem de 15 Kpc do centro e que a Via Láctea teria uma extensão da ordem de 100 Kpc.

Estudos dinâmicos de Oort e Lindblad, também apontavam para o fato do Sol não estar no centro da VL.



Utiliza como traçadores de distância **estrelas variáveis** de tipo RR Lyra em aglomerados globulares, onde pode-se aplicar a Relação Período-Luminosidade e obter as distâncias. Estes **aglomerados** (representados pelos pontos da figura abaixo) tem uma distribuição espacial quase esférica, como pode ser observado na figura abaixo.



Obtem um modelo bem mais realista, mas ainda incorreto do ponto de vista das dimensões...

Hoje sabemos que o disco da nossa galáxia tem uma extensão de aproximadamente 30 kpc, e o Sol se encontra a aproximadamente 8,2 kpc do centro.

Onde ele errou?

Em 1930, **Trumpler** percebe que a dimensão de aglomerados abertos se alterava com a distância. Estes objetos tem característica de terem dimensões semelhantes.

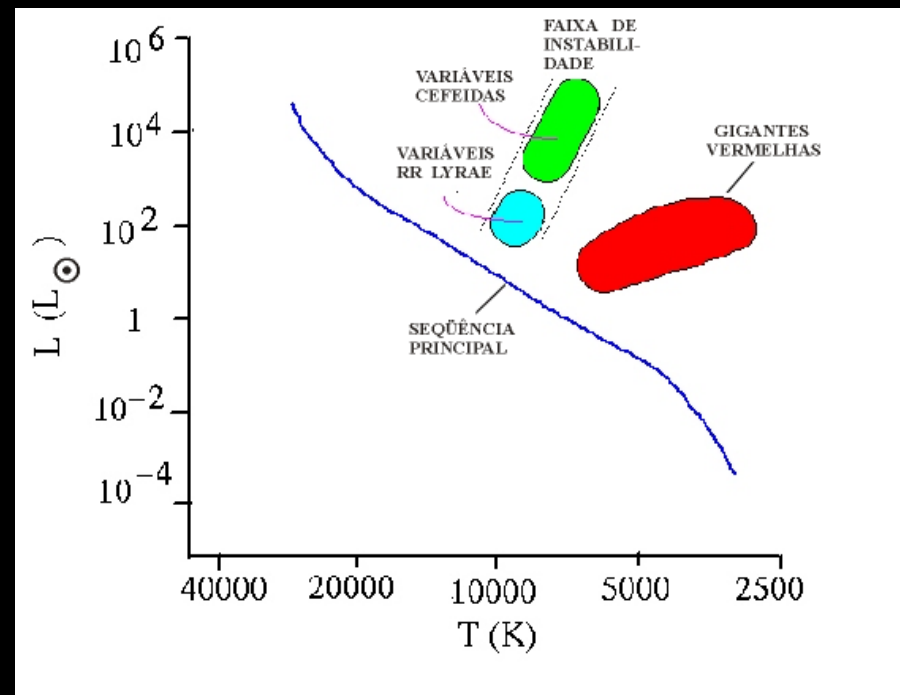
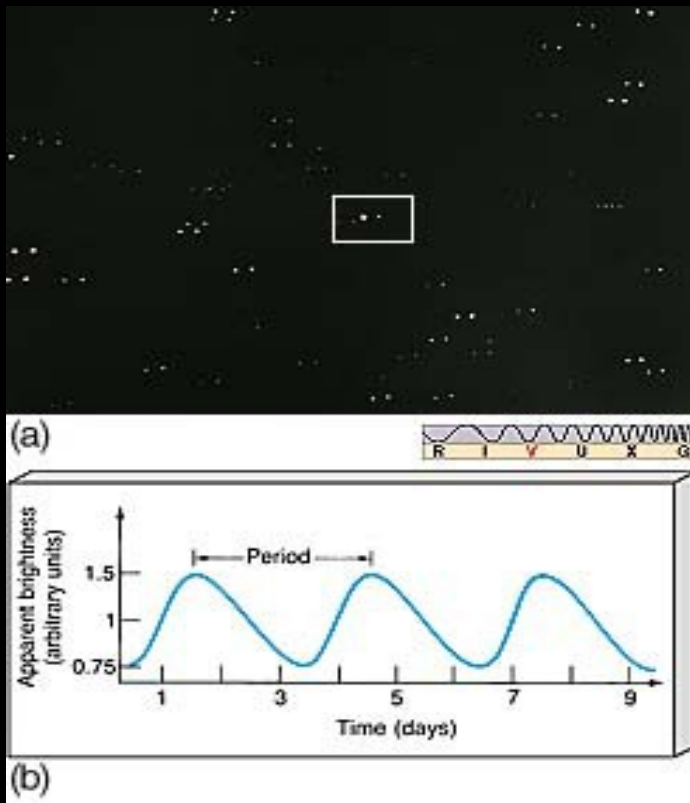
Descobriu que o **Meio Interestelar** era responsável pela absorção de luz estelar, causando um avermelhamento na cor das estrelas mais distantes e isto afetava também o cálculo das distâncias.

Sabemos hoje que na região visível do espectro esta **absorção é da ordem de 1,5 magnitudes por kpc** de matéria interestelar atravessada.

Estas descobertas vão ter impactos relevantes já que as distâncias podem ser obtidas utilizando o Módulo de Distância e que este método deve então ser **“corrigido” pela absorção.**

Como vimos, nas 3 primeiras décadas do século XX astrônomos gradualmente deduziram o tamanho e estrutura da Galáxia utilizando um método de **contagem do número de estrelas em função da distância**.

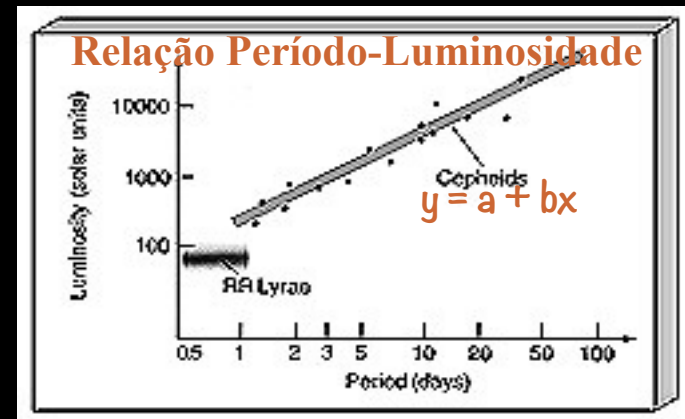
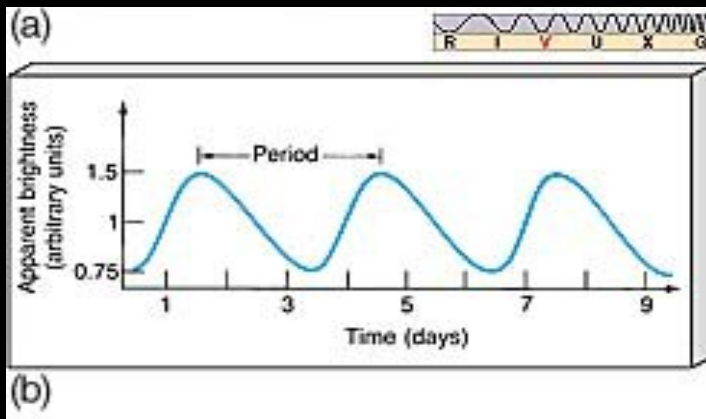
Um tipo de estrelas conveniente para estas medidas são as **estrelas variáveis do tipo Cefeida**, estrelas gigantes muito luminosas e que podem ser observadas a grandes distâncias, cuja variabilidade é da ordem de 50-100 dias. Vimos especificamente este tema na aula de Estrelas Variáveis.



Vimos na aula 18 que a causa da variabilidade deste tipo de estrela é devido a **contração e expansão física** das camadas externas do envelope, causada por **“oscilações de relaxação térmica”**

Neste tipo de estrela é possível utilizar a equação do **Módulo de Distância** para inferir a distância das estrelas, como descrito a seguir:

Se conheço o período **P** observando o comportamento da Curva de Luz de uma estrela variável, posso obter a luminosidade (**L**) ou magnitude absoluta (**M**) via relação Período-Luminosidade de estrelas Cefeidas (fig.). A **distância** pode ser então calculada **medindo-se o brilho aparente**, conforme eq. abaixo



$$m(\text{ap}) - M(\text{abs}) = 5 \log d (\text{pc}) - 5 \quad (\text{incompleta!})$$

observada e medida

Obtida via Relação Período-Luminosidade

P-L

Meio Interestelar – MIS

A descoberta do MIS foi relevante para explicar a questão suscitada por Thumpler relacionada com a mudança de dimensão dos aglomerados em função da distância e permitiu corrigir a **equação do Módulo de Distância**.

Descobriu-se que entre as estrelas existe um material, o Meio Interestelar-MIS, **constituído por gás e poeira, além de raios cósmicos, partículas de altas energias e fótons**. Este material é responsável pela alteração da intensidade da luz original, produzida na fonte, e que chega alterada ao observador onde será medida. O MIS modifica também a cor da luz e produz uma série de fenômenos que alteram a temperatura e atividade química dos objetos encontrados no MIS.

Neste meio ocorrem fenômenos de extrema relevância, como a produção de **linha de 21cm do hidrogenio**, linha esta que produz radiação na faixa do rádio e que nos permite inferir sobre a estrutura do disco e braços da Galáxia.

Outro fenômeno importante que ocorre somente no MIS é a produção de **“linhas proibidas”** que nos indica condições físicas locais do meio, não encontradas em nenhum lugar da Terra.

Meio Interestelar – MIS

Um importante papel do MIS é o **ciclo de nascimento, vida e morte das estrelas**.

É neste meio que encontramos também grande diversidade de estrelas nos mais variados estágios de evolução e objetos como nebulosas de emissão, reflexão e escuras, entre outros.

Apesar do MIS se constituir de gás, poeira, campo magnético, fótons, raios cósmicos ou de altas energias, vamos ver aqui somente o papel do gás e poeira, mais relevantes para os objetivos do curso. Entretanto, vale a pena ter alguma informação básica destes constituintes.

- **Raios cósmicos** $\sim 0.5 \text{ eV cm}^{-3}$ (não se sabe muito sobre sua origem e efeitos)
- **Campo magnético galáctico** $\sim 10^{-6}$ Gauss, com 0.2 eV cm^{-3}
- **Luz das Estrelas** $\sim 0.5 \text{ eV cm}^{-3}$

(afeta o estado de ionização do gás, temperatura, etc...)

Como o MIS se distribui ?

Quanto representa em termos de Massa na Galáxia ?

O espaço entre as estrelas é mais vazio que o melhor vácuo criado em laboratórios na Terra.

A maior parte do volume da Galáxia é ocupado por uma mistura de **gás e poeira difusos** com distribuição homogênea e, portanto, transparente a comprimentos de onda visíveis.

Gás e poeira, misturados e confinados ao disco de galáxias espirais, contribuem com da ordem de 10-15% da massa total (M_t) do disco, confinados em uma dimensão com espessura (e) de $e_{\text{MIS}} < 200 \text{ pc}$ ($e_{\text{estrelas}} \sim \text{centenas pc}$).

Composto também por regiões densas, inhomogêneas, como nuvens moleculares gigantes frias, e objetos como nebulosas de emissão, reflexão, etc...

Vamos ver inicialmente o papel do MIS no contexto da integração do nascimento, vida e morte das estrelas – **Ciclo de Evolução Estelar**, e posteriormente aprofundar as informações dadas até aqui.

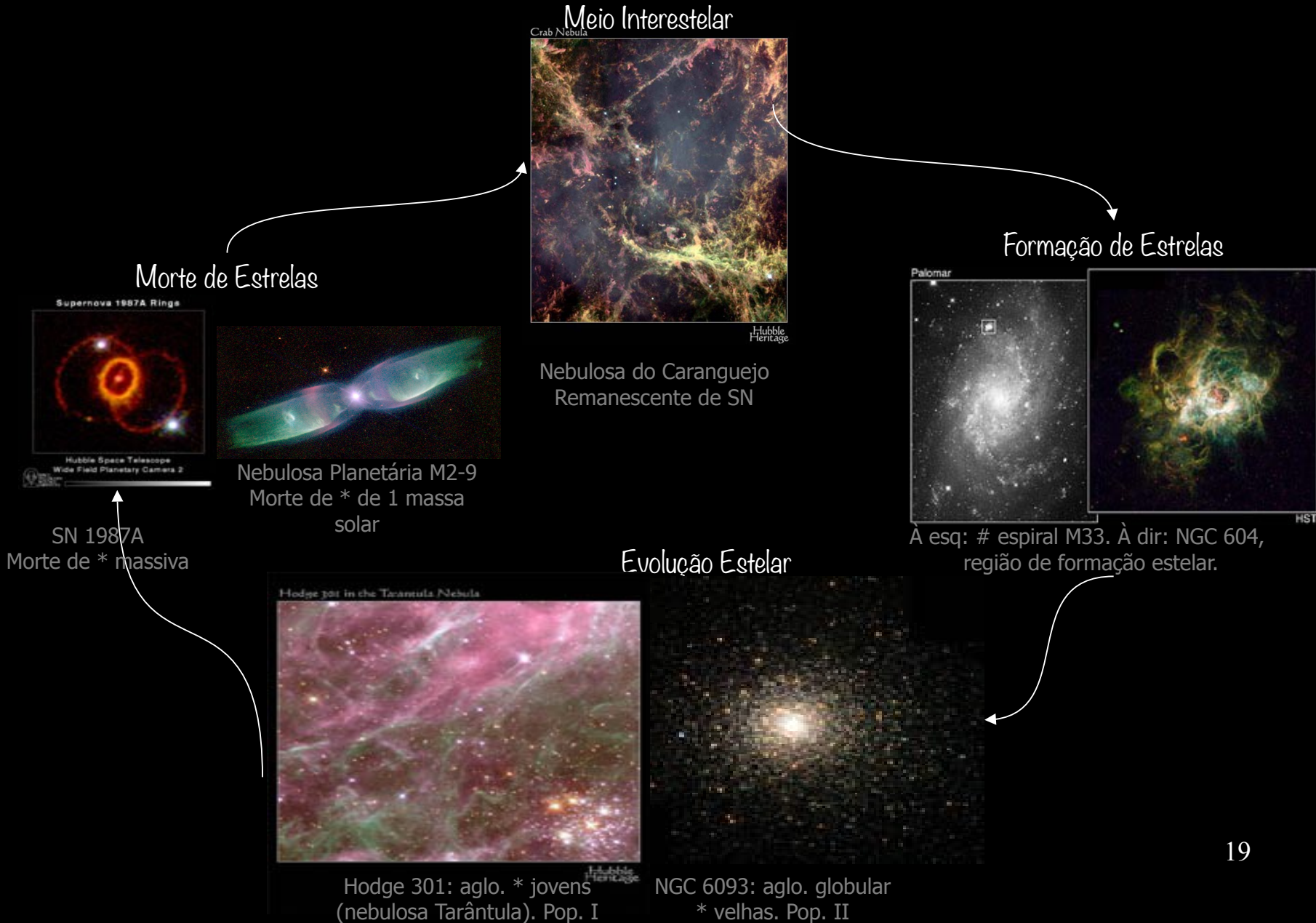
Qual a importância e papel do MIS no Ciclo de Evolução Estelar?

Básicamente:

- Formação de novas estrelas
- Enriquecimento por material ejetado pelas estrelas evoluídas
- Movimento do padrão espiral no disco galáctico induz ondas choque e conseqüentemente o nascimento de novas estrelas.

...continuamente evoluindo...

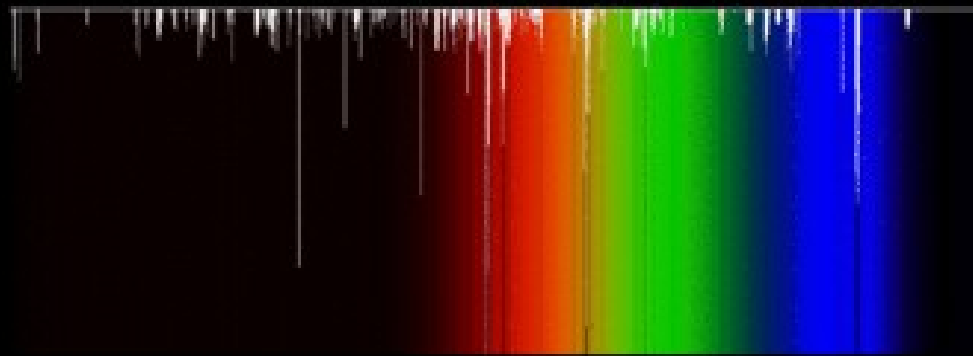
O Ciclo de Evolução Estelar



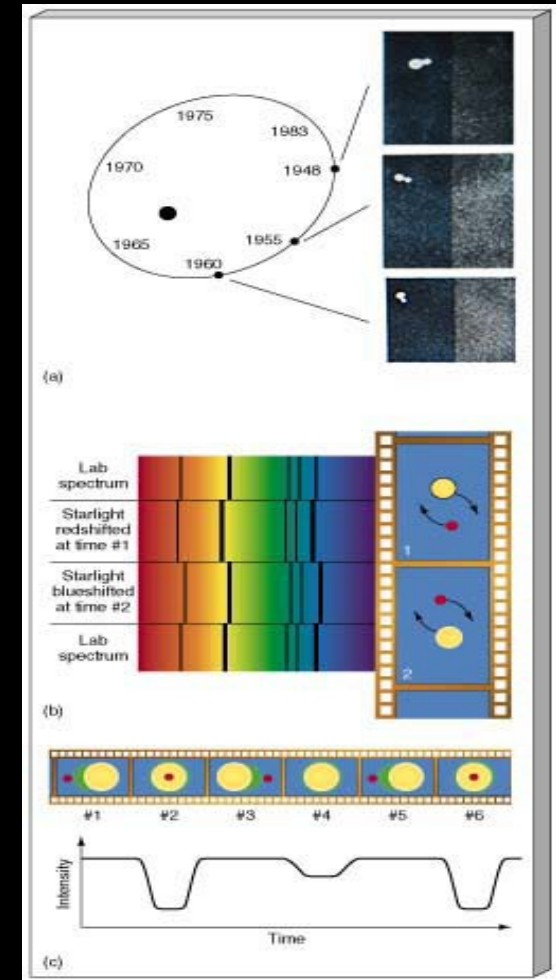
Como o MIS difuso foi descoberto ?

- Deduzido a partir da presença de **linhas de absorção** estacionárias em espectros de estrelas brilhantes em sistemas binários espectroscópicos
- São **linhas** de absorção muito estreitas e se agrupam em bandas, Como se observa no espectro abaixo (linhas brancas)

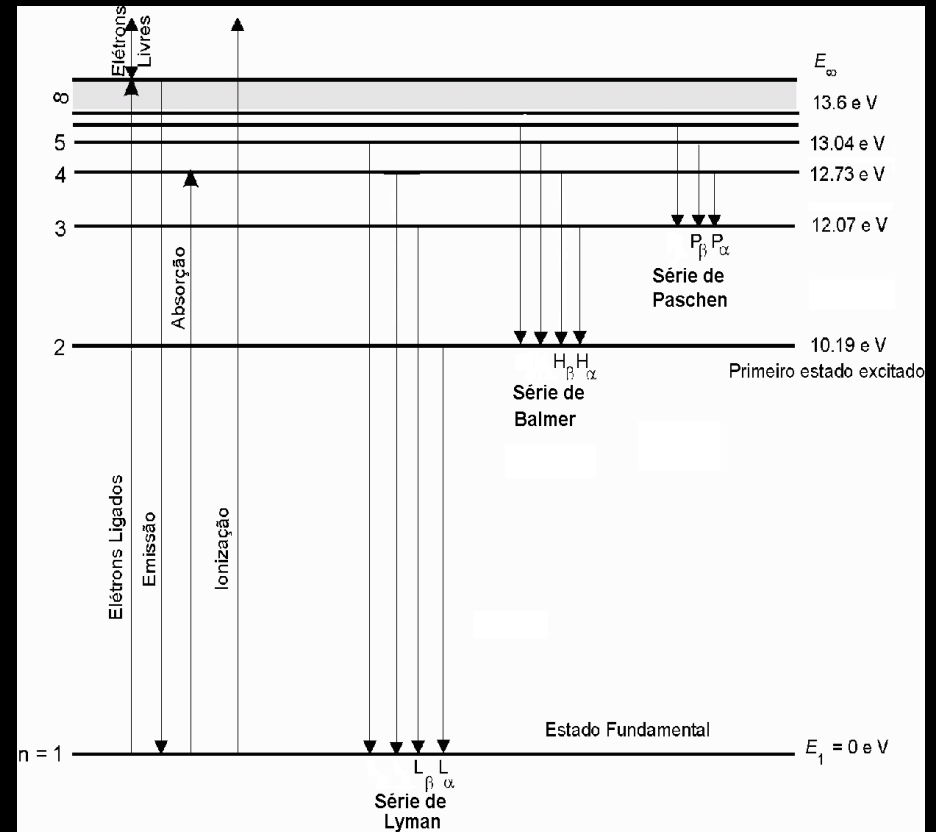
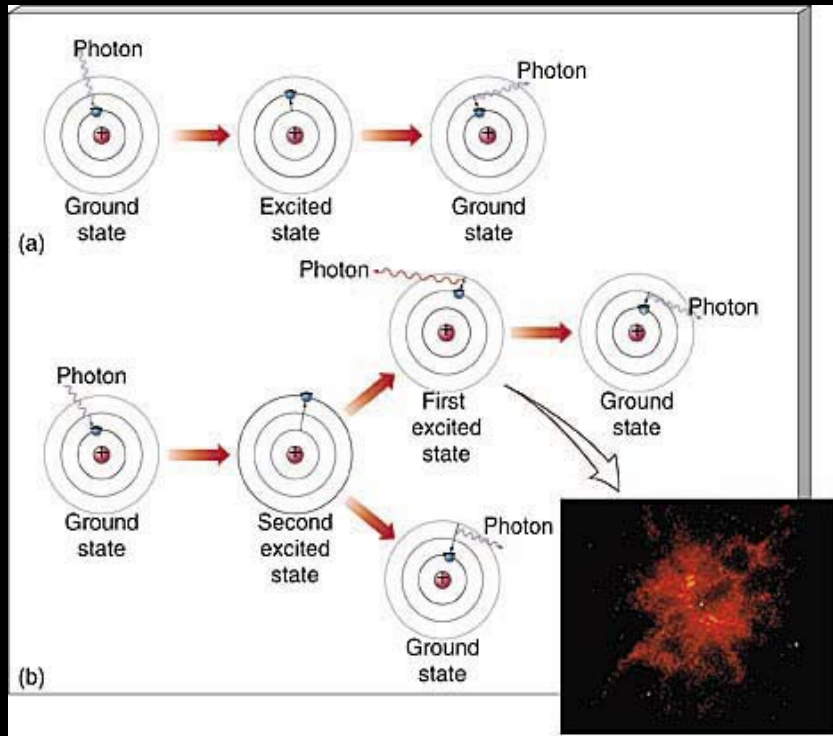
The Diffuse Interstellar Bands



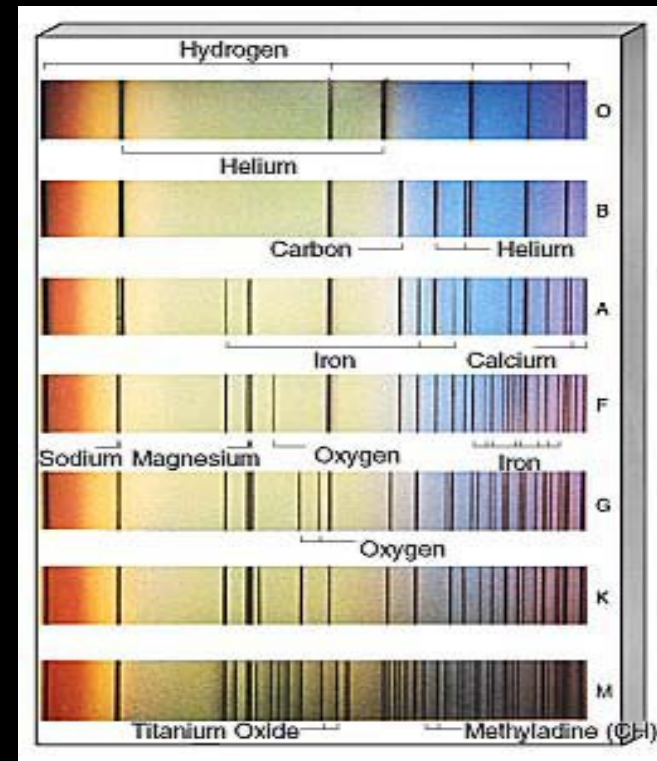
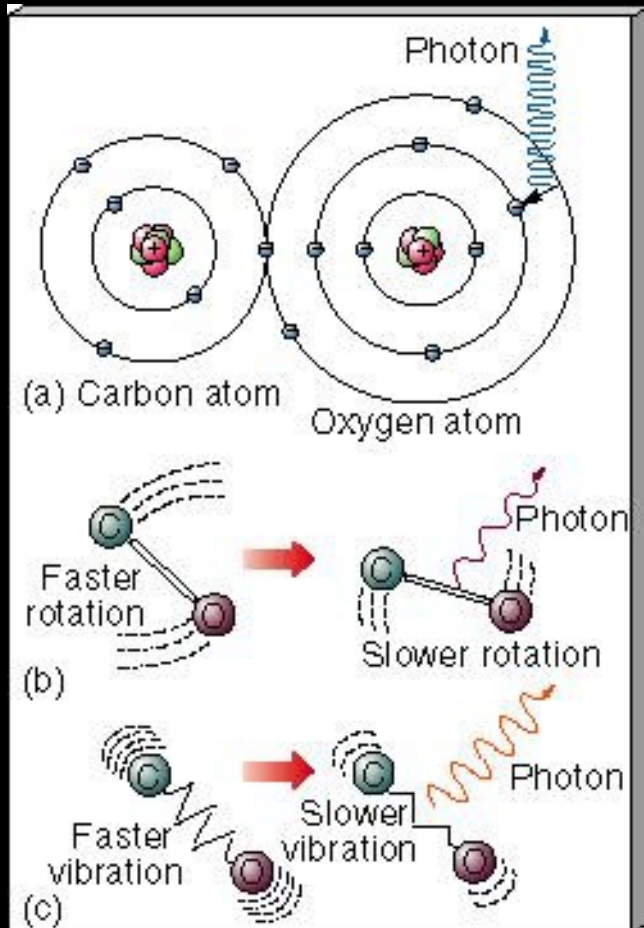
Courtesy: P. Jovanović, F. B. D'Amico



Emissão e absorção de linhas espectrais estão relacionadas ao povoamento e despovoamento eletrônico geram linhas espectrais de emissão e absorção...



Linhas estreitas hiperfinas, em bandas, podem ocorrer na rotação e vibração de moléculas



a) – H molecular; (b) – H atômico

MIS: gás + poeira

O que sabemos sobre o gás...?

...estudado a partir da análise dos efeitos da luz sobre o material difuso e de espectros

1- **Composição:** 60% **H**, 30% **He**, traços de elementos + pesados com abundância solar (**C, O, Mg, Fe**).

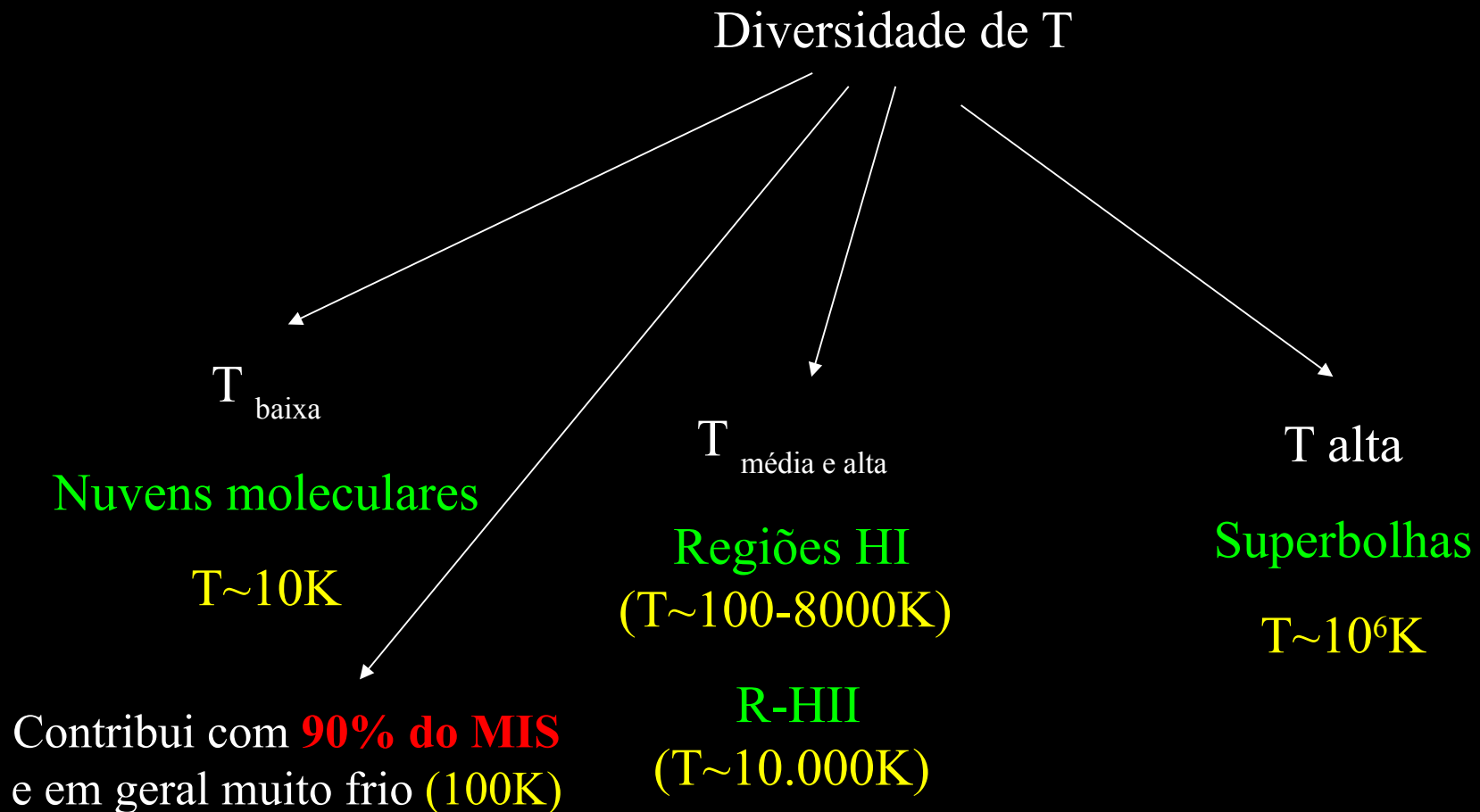
2- **Dimensão:**

- **Átomos individuais** com dimensão $\rightarrow d \sim 10^{-10} \text{ m}$ (1 \AA)
- Moléculas com dimensão $\rightarrow d \sim 10^{-9} \text{ m}$.
- Como a **dimensão é** pequena, comparada aos comprimentos de onda visível, vai produzir efeito importante no MIS, ou seja, o gás é **transparente** a qualquer tipo de radiação.

3- **Temperatura:**

- Grande amplitude de valores, $10 < T \text{ (K)} < 1.000.000$, o que vai gerar diferentes regimes e diferentes fenômenos

Gás ... Se apresenta de formas diferentes, dependendo do **Regime de Temperatura**



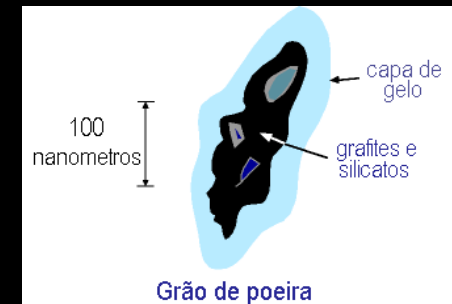
No caso da Poeira ?

Grãos são formados na atmosfera externa de estrelas gigantes vermelhas e supergigantes e em explosões de SN

Estas estrelas produzem ventos densos e lentos e como consequência resfria o gás condensando-o e formando pequenas partículas sólidas.

Representam ~ **10% MIS**

Densidade → 100 grãos de poeira/km³



Difícil serem observados no óptico....melhor no infra-vermelho e rádio

Composição depende da história das reações nucleares ocorridas durante a evolução da estrela, da composição do vento estelar e da facilidade da condensação do material.

Encontra-se com certa frequência silicatos, C, Fe, gelo sujo água congelada + amônia + metano e outras moléculas)

Processos Físicos Importantes que ocorrem no MIS

- Alterações da luz sob os efeitos do MIS
 - absorção, avermelhamento, intensidade
- Processos Atômicos :
 - Formação de linhas proibidas
 - A linha de 21 cm
- Processos Moleculares
 - Formação de bandas de linhas estreitas

A informação que a luz carrega é alterada quando atravessa o MIS... Pq?

A explicação pode ser dada por diversas leis físicas complexas, porém podem ser agrupadas em 2 princípios gerais:

1. Princípio Seletivo: seleção da luz que consegue atravessar o MIS devido a competição relativa da dimensão das partículas constituintes do MIS (átomos, moléculas, grãos) com os comprimentos de onda da luz (fótons). Vai ocorrer então uma interação que seleciona os comprimentos de onda que conseguem atravessar o MIS.

2. Princípio da Linha de Visada ou Dependência da linha de visada do observador em relação a fonte observada. A aparência da luz se altera, dependendo da direção do observador.

Veremos a seguir em maiores detalhes como ocorrem estes efeitos nos 3 casos de interação e a aparência da luz observada

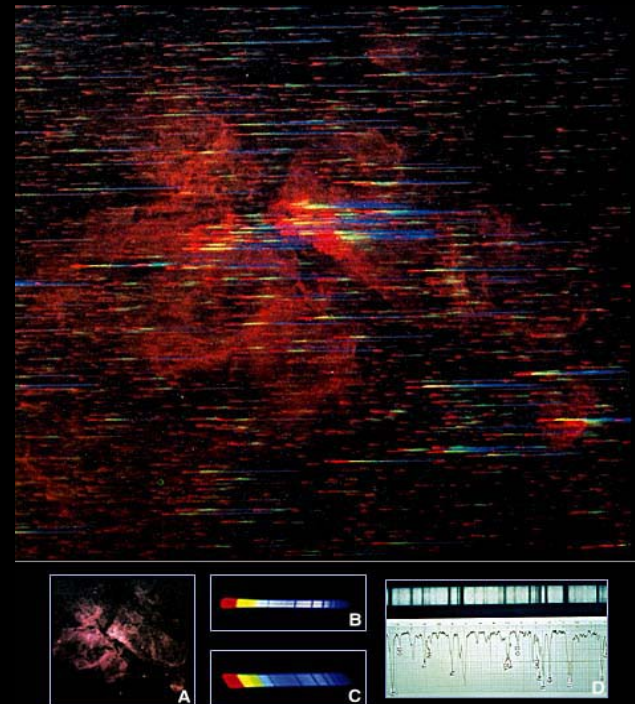
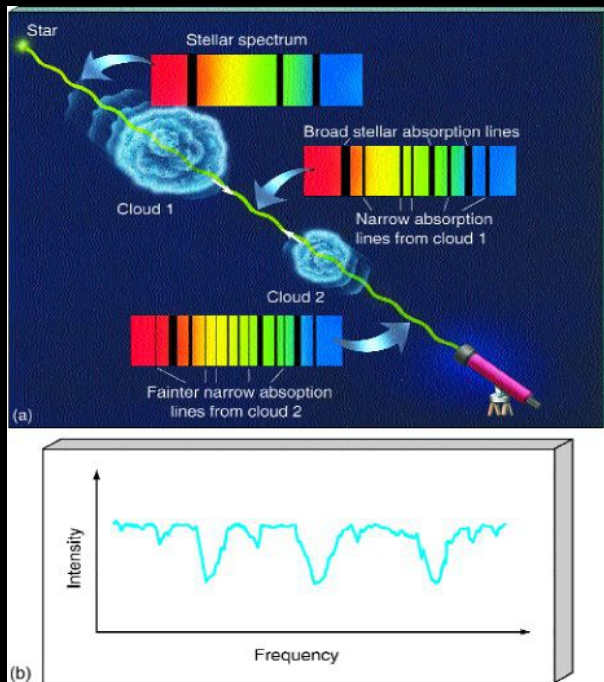
- 1- Interação com átomos
- 2- Interação com moléculas
- 3- Interação com grãos

Caso 1. Interação da luz com átomos

...os efeitos

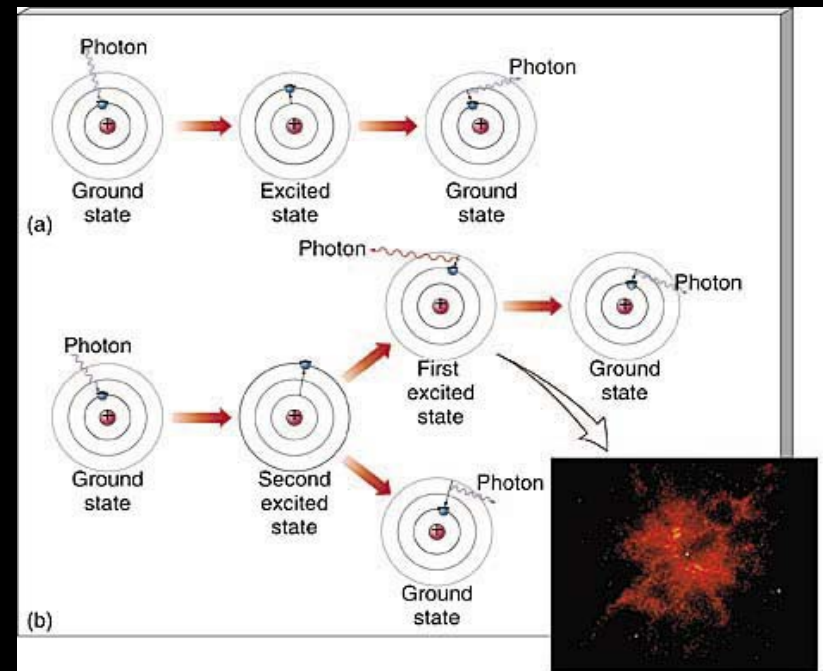
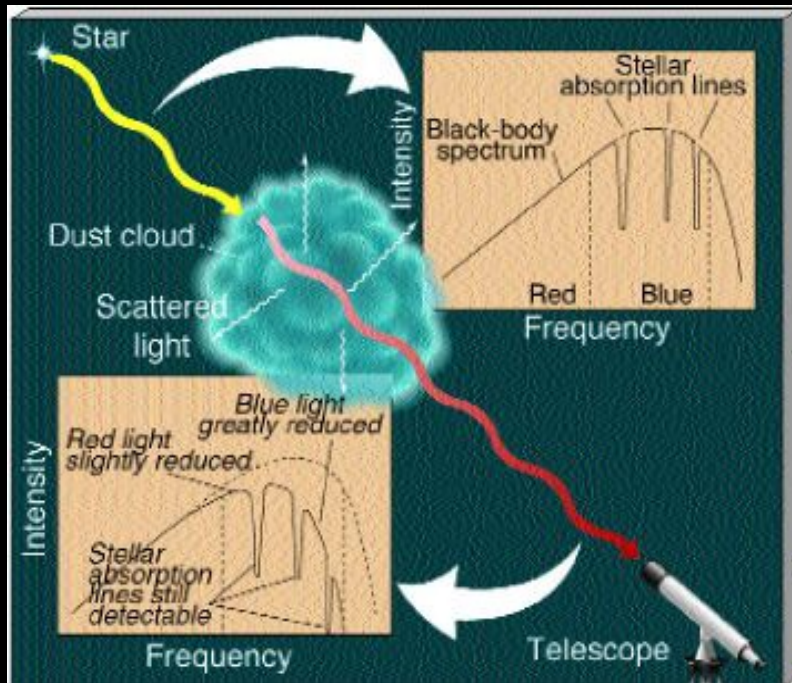
Luz não monocromática atravessa nuvem de gás e poeira e gera...

1. Espectros com linhas de absorção (Fig.1)
2. Aumento da temperatura e enriquecimento químico da nuvem
3. Avermelhamento (Fig.2)



Como? Pq?...as causas

- 1- Os fótons consumidos ou degradados pela passagem da luz pela nuvem, devido a seleção de fótons pelos constituintes da nuvem, deixam o registro no espectro observado através das linhas de absorção (Fig.1).
- 2- Fótons absorvidos excitam o meio, **ionizam e aquecem** o gás contribuindo também para a **atividade química** do gás.
- 3- A maioria da energia é re-irradiada via cascadeamento eletrônico produzindo linhas de emissão, **sendo H α** a mais comum e responsável pela **cor avermelhada**

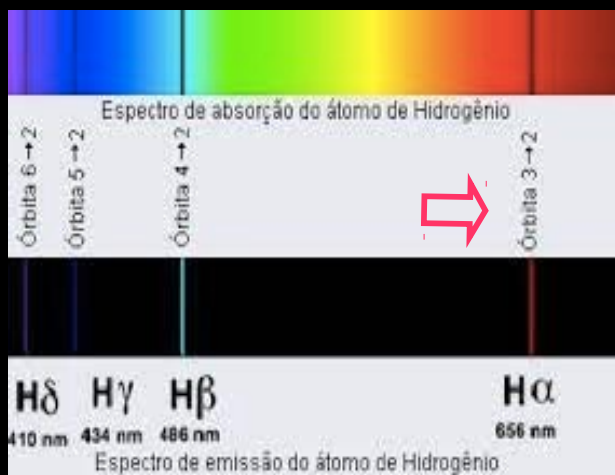


Um observador fora da direção estrela-nuvem...

Vai observar nuvem incandescente em várias cores correspondentes a estas emissões e a **cor efetiva da nebulosa** vai depender da **Intensidade dos fótons resultantes do cascadeamento** ou dos níveis de **excitação** dos átomos

Importância deste efeito: fótons de “diferentes” cores revelam diferentes estruturas

Como o H é o mais abundante, e a linha de **emissão H α** é uma das mais fortes, muitas nuvens de gás excitado incandescente tem **cor avermelhada**

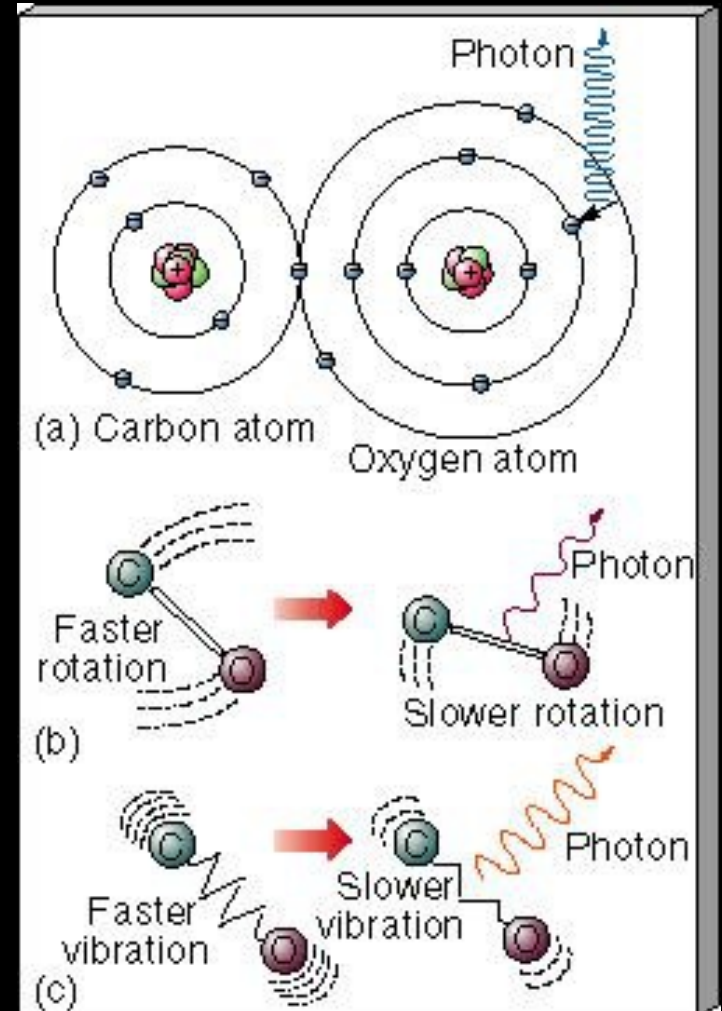


Caso 2. Interação da luz com Moléculas

Semelhante aos átomos, moléculas têm espectro característico relacionado com a estrutura dos níveis internos de energia.

Complicador adicional -> **rotações e vibrações** criam estados energéticos muito próximos gerando linhas de emissão e absorção muito próximas.

Pequenas quantidades de E excitam vigorosas rotações em moléculas, o que explica pq muitos padrões de **absorção e emissão em moléculas** aparecem no IV ou submilimétrico.



Caso 3 – Interação da luz com grãos

...consequencia sobre estimativa da distancia

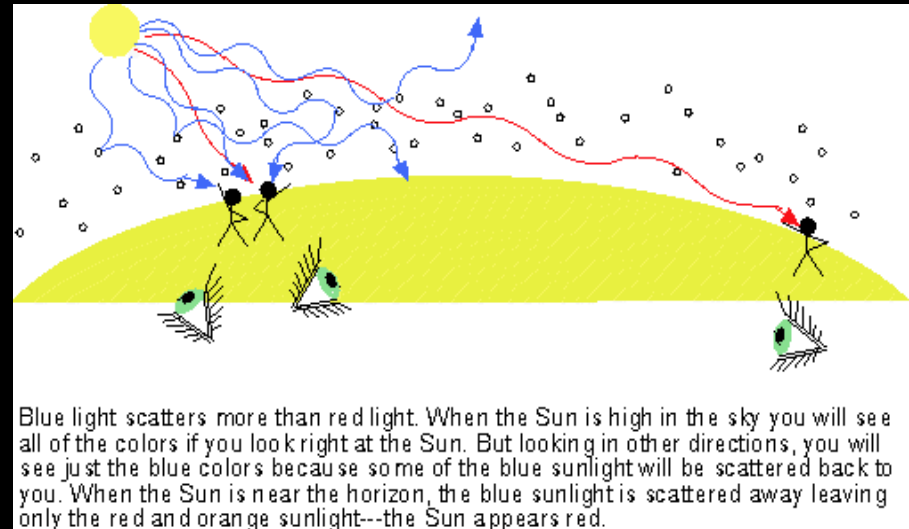
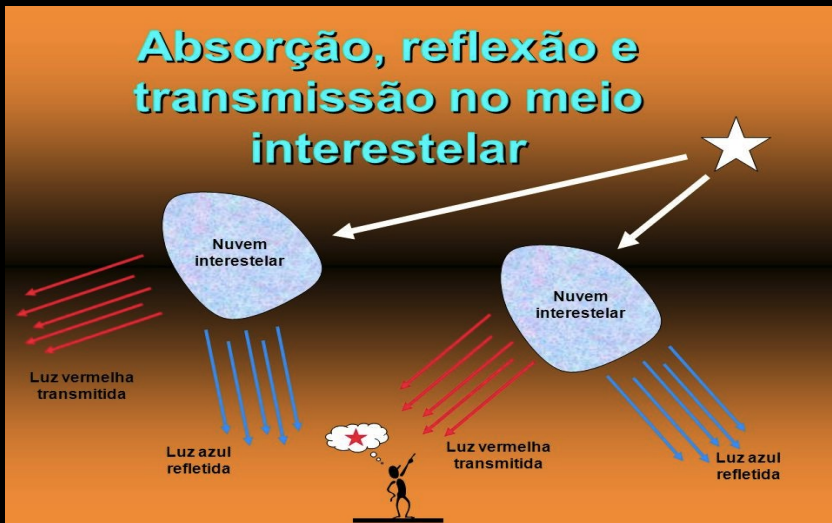
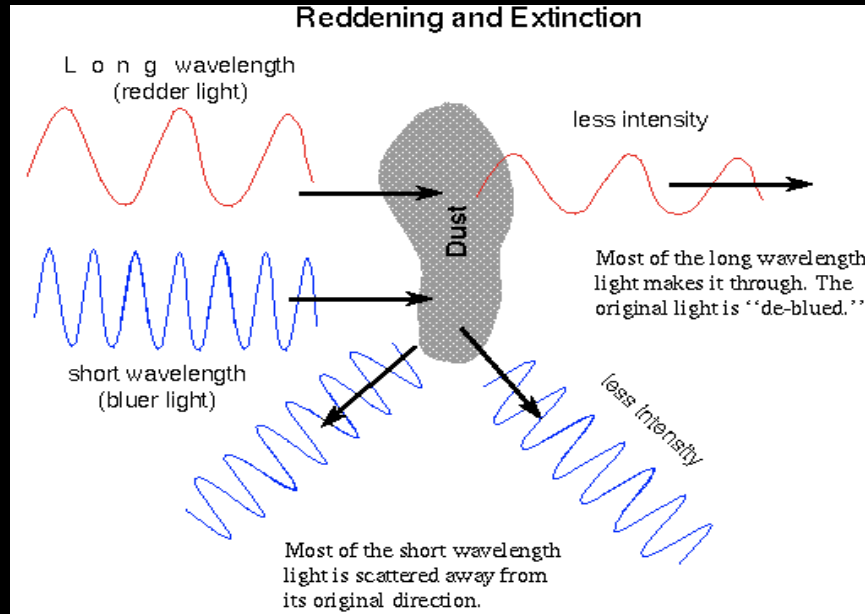
Diferente do que ocorre com átomos e moléculas, a dimensão dos grãos ($d_{\text{grãos}}$) $d_{\text{grãos}} \gg \gg 10^{-7} \text{ m}$, e portanto, comparável em dimensão ao comprimento de onda da luz visível.

Como a dimensão varia de $0.3 < d_{\text{grãos}} < 300 \text{ nm}$ ($1 \text{ n} = 10^{-9} \text{ m}$), vai ocorrer **absorção**, conseqüentemente, **diminuição da luz** já que estes fótons serão absorvidos pelos grãos, e portanto, vai afetar a determinação de **distância (D)**. Vai também ocorrer o **espalhamento da luz azul** (já que os λ s são menores) e a mudança de cor da nuvem - **avermelhamento interestelar**.

O termo comumente utilizado em astronomia que caracteriza a absorção mais o avermelhamento é denominado **EXTINÇÃO**.

Um obs olhando esta nuvem em outra **direção diferente** daquela entre ele e a nuvem vai enxergar a nuvem na cor da luz espalhada, ou seja, mais **azulada**, o conhecido **espalhamento Rayleigh**

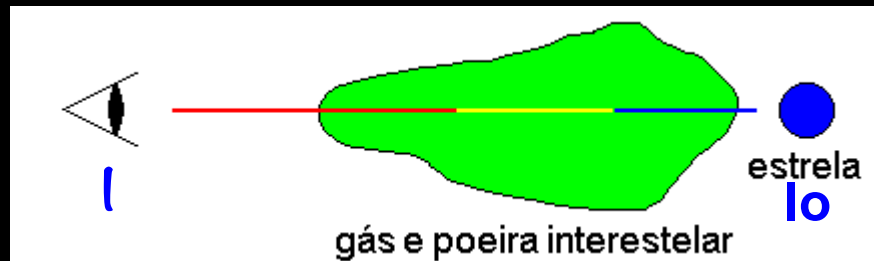
Influência dos grãos na luz



É preciso então fazer uma correção da magnitude observada, já que a intensidade da luz que chega ao observador (I) é reduzida em relação a originada (I₀) na estrela.....

Luz atravessa nuvens (gás + poeira) → muda a cor e a intensidade

O que gera como consequência uma alteração no Módulo de Distância



$$m - M = 5 \log d \text{ (pc)} - 5 + A(\lambda)$$

$m = -2.5 \log F + \text{correção (A)}$ em magnitudes

Onde $A(\lambda) \approx I_0 \cdot \lambda^{-4}$, no óptico!

E as regiões densas do MIS ?

Se apresentam de forma irregular, inhomogênea, e em diferentes regimes de densidade e temperatura.

A diversidade na aparência das nebulosas reflete natureza diferentes:

sítios de formação estelar ativa, vestígios de erupções de novas e SN além de outras que se apresentam na forma de regiões escuras e brilhantes, como Nebulosas Brilhantes ou Regiões HII: emissão e reflexão e Nebulosas Escuras.

30⁰



Nebulosas Brilhantes ou Nebulosas de Emissão

São nuvens do MIS aquecidas pela **presença de estrelas muito quentes e massivas**, ionizando o hidrogênio pela ação de fótons ultra violeta e brilham por fluorescência. Também conhecidas como **regiões HII**

O termo região HII vem do fato de que trata-se do H uma vez ionizado (II diz respeito ao grau de ionização; HI é o H neutro)

A coloração é avermelhada devido a emissão da linha $H\alpha$

Se a nuvem é aquecida por uma estrela embebida na nuvem, a radiação emitida gera uma **NEBULOSA DE EMISSÃO**

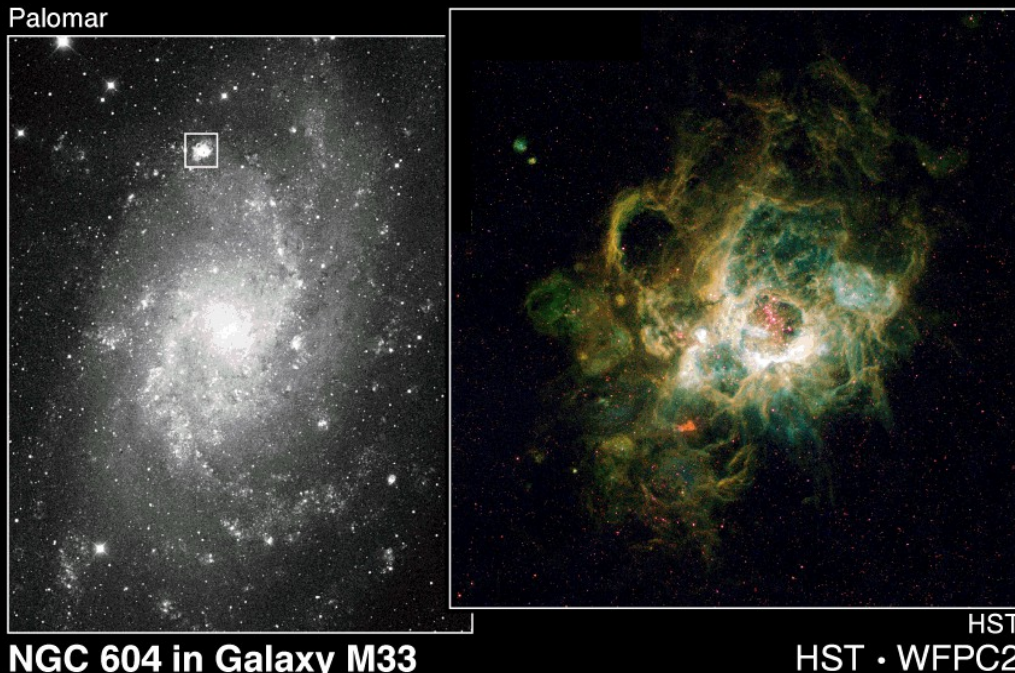


Regiões HII

Estrelas tipo O e B com espectro de corpo negro com temperatura $> 10.000\text{K}$.

Ionizam o hidrogênio que está nas proximidades e...

Criam as chamadas regiões HII



PRC96-27 · ST ScI OPO · August 7, 1996 · Hui Yang (U.I.L) and NASA

Nomenclatura Espectroscópica

hidrogênio neutro $\rightarrow \text{HI}$

hidrogênio 1 vez ionizado $\rightarrow \text{HII}$

hélio neutro $\rightarrow \text{HeI}$

hélio 1 vez ionizado $\rightarrow \text{HeII}$

hélio 2 vezes ionizado $\rightarrow \text{HeIII}$

Fe que perdeu 13 elétrons $\rightarrow \text{Fe}^{\text{XIV}}$

Nebulosas de Reflexão

Se a nuvem está **situada atrás de uma estrela quente** então a luz é espalhada ou refletida em direção ao observador devido aos grãos de poeira.

Ex: **NGC 1999 (orion)**



A cor refletida parece azul pq os grãos de poeira refletem radiação de curto comprimento de onda mais eficientemente do que os de longo comprimento (ver slides 33 e 34).

Nuvens Escuras ou Nuvens Moleculares

Regiões interestelares mais densas são opacas a comprimentos de onda do visível e aparecem como **regiões escuras** já que não se observa nenhuma estrela através delas.

Contem a maioria da massa no MIS e está, na maior parte, na forma molecular (H_2), seguido por CO_2 .

Só podem ser **observadas via infra-vermelho ou rádio**.

É onde ocorre a formação de novas estrelas.

Nuvens frias $\rightarrow T \sim 10\text{ K}$

Identificadas através das linhas de emissão em **rádio**
(21cm)



Superbolhas (SB)

Grandes bolhas de gás interestelar infladas por ventos gerados por estrelas quentes, massivas, como estrelas O, B ou por explosões de SuperNovas.

Aquecidas por violenta *expansão de gás*

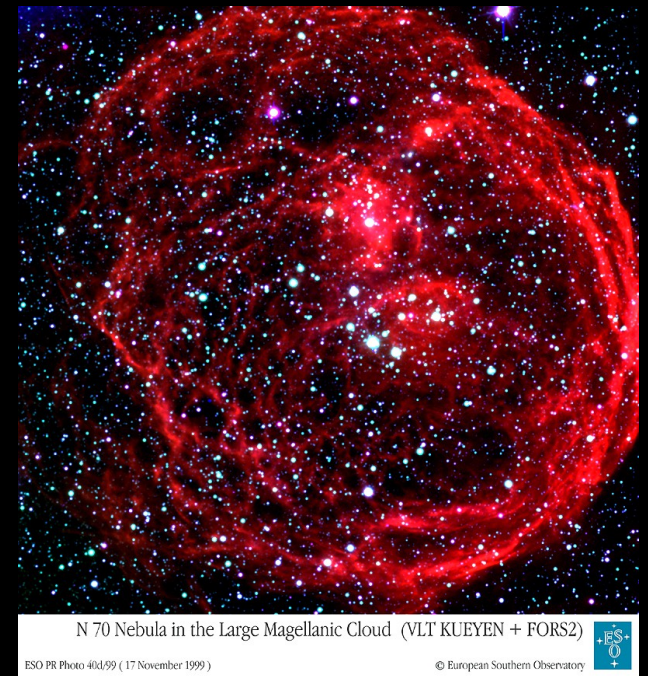
$T \sim 1.000.000 \text{ K}$

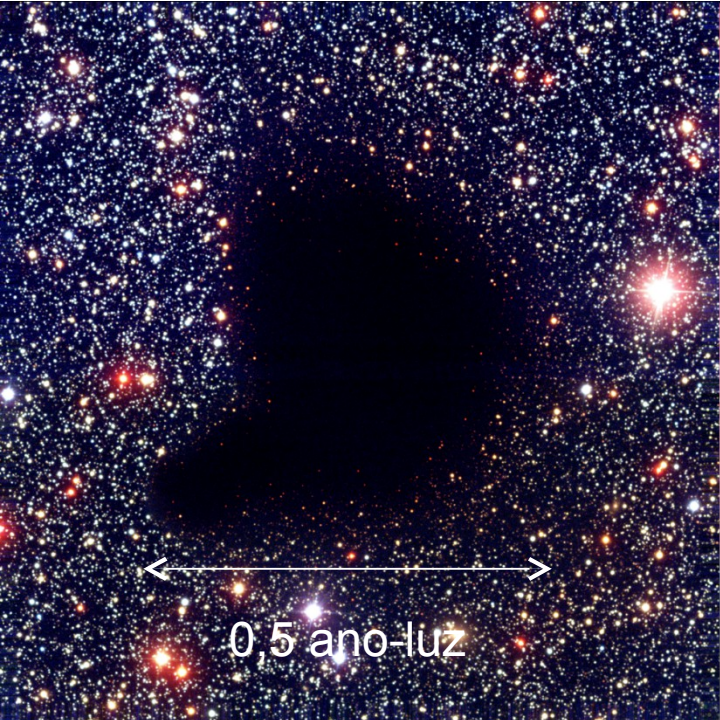
Exs: - Cygnus, $d \sim 500 \text{ pc}$

Henize 70

"Superbolha" de gás em expansão com aproximadamente 300 mil anos-luz de diâmetro, inflada por ventos de estrelas massivas e quentes e explosões de Supernovas.

Estas SB oferecem a possibilidade de explorar a conexão entre os ciclos de vida das estrelas e a evolução de galáxias.

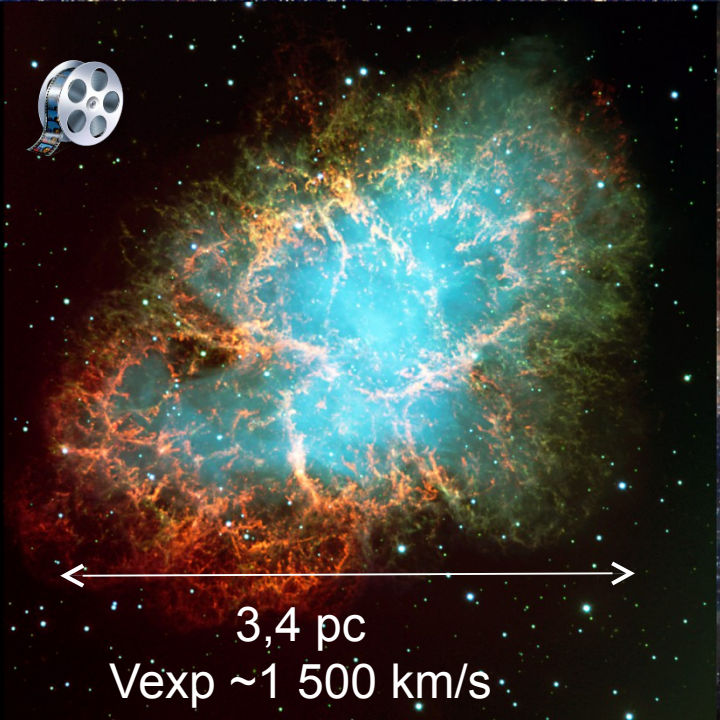




0,5 ano-luz

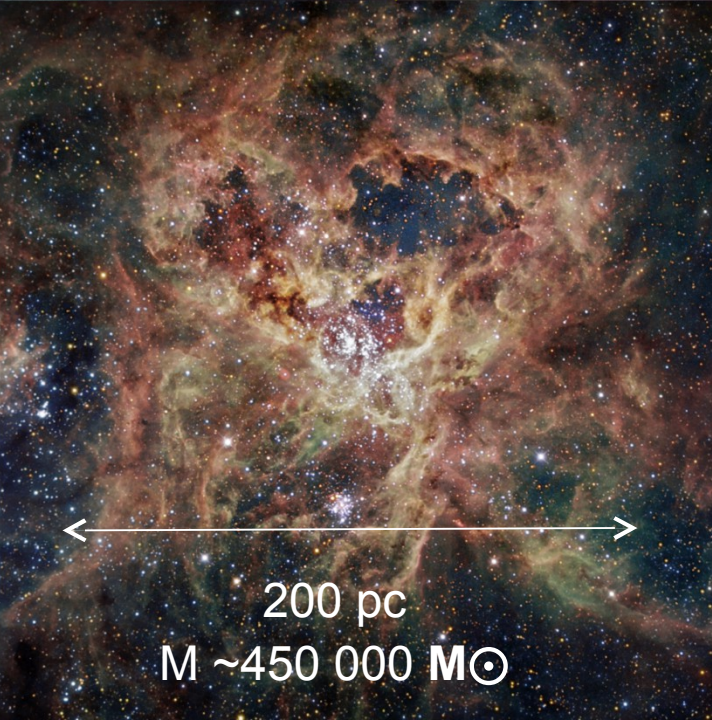


500 pc



3,4 pc

$V_{\text{exp}} \sim 1\,500 \text{ km/s}$



200 pc

$M \sim 450\,000 M_{\odot}$

- (A) **Nebulosa Barnard 68;** nuvem molecular fria no limite de contração gravitacional.
- (B) **Nebulosa da cabeça de cavalo;** nuvem fria iluminada pela radiação de estrelas jovens.
- (C) **Nebulosa do Caranguejo;** resto da supernova 1054 AD.
- (D) **Nebulosa da Tarântula;** região de formação estelar intensa na LMC.



fenômenos físicos ocorrem no MIS, alguns que não se pode observar em laboratórios aqui na Terra...e que nos dão condições de compreender melhor a “matéria”, a física....

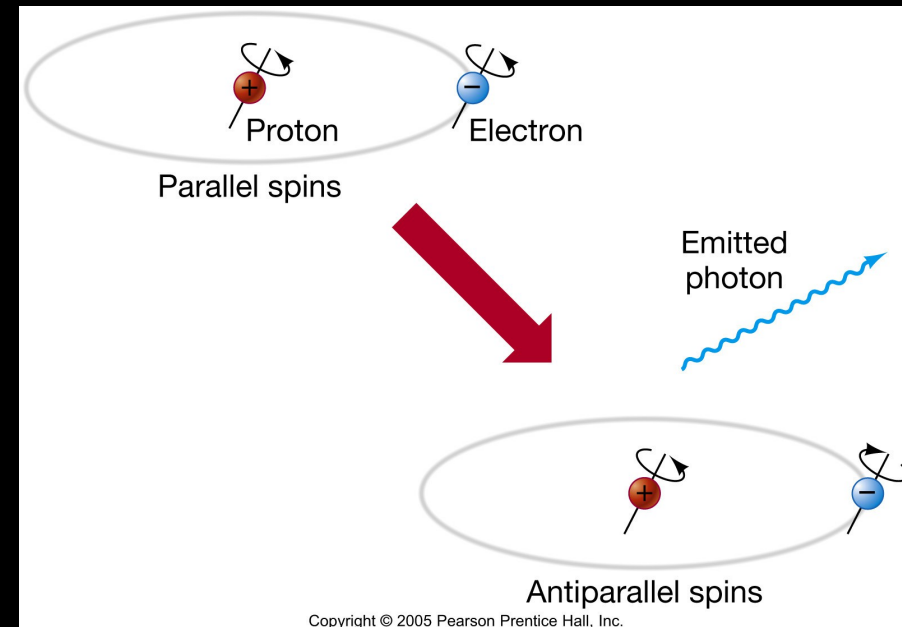
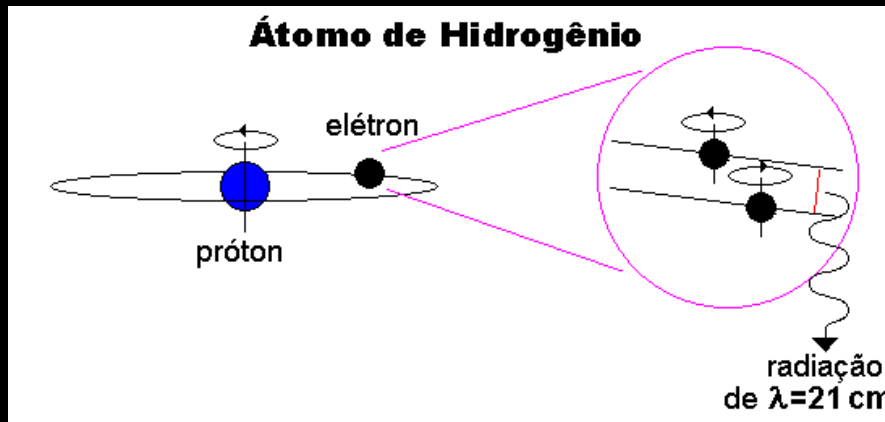
Linha de 21 cm

Linhas Proibidas

Radiação de 21 cm

1944 -> Hulst previu que uma linha de emissão com comprimento de onda de 21 cm rádio seria a mais importante no MIS, já que o H é muito abundante

Mecanismo de emissão da linha → desalinhamento na direção do “spin” do elétron em relação ao do próton



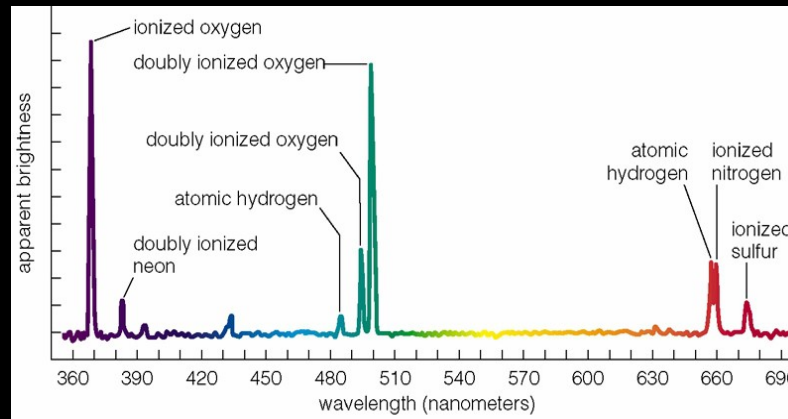
1951: astrônomos de Harvard usando equipamento rádio detetaram a *linha* do H atômico e confirmam também que o H atômico é o principal constituinte do MIS.

Importante pq permite traçar nuvens de gás, e portanto, a estrutura dos braços espirais da Galáxia

Linhas Proibidas (1)

...um fenômeno possível somente no MIS

1864: Huggins observa no espectro 3 linhas de emissão esverdeadas e azuladas, desconhecidas, que denomina de Nebulium.



1920: Não havia espaço (explicação) para novos elementos químicos na Tabela periódica.

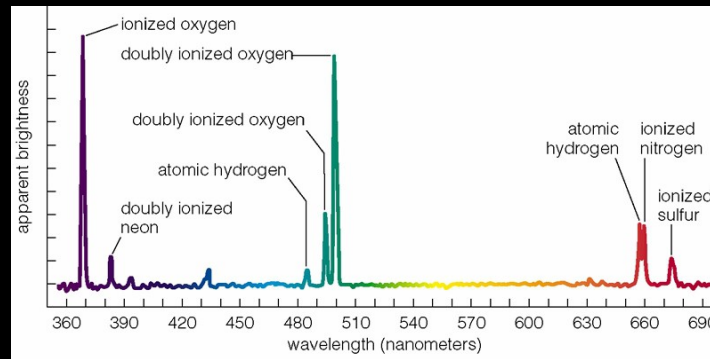
1927: Bowers mostra a possibilidade de existir átomos ionizados no MIS no **estado meta-estável**, ou seja, **átomos no estado excitado com longa vida**

Linhas Proibidas (2)

...um fenômeno possível somente no MIS

Linhas que surgem devido a **baixíssima densidade** do meio onde a ocorrência de colisões é rara → nestas condições vai ocorrer emissão espontânea

Muito comum encontrar linhas que estão associadas a uma transição eletrônica particular do Oxigênio, 2 vezes ionizado [OII], que produz cor esverdeada

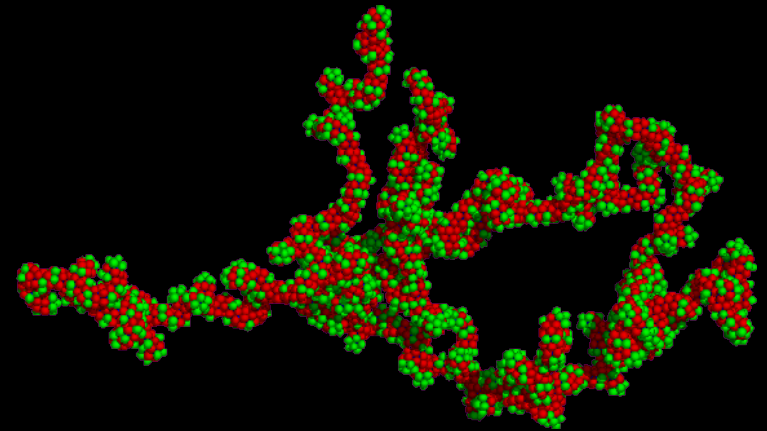


Linhas que resultam deste estado são chamadas de linhas proibidas, pq sob condições terrestres, de alta densidade, os átomos são usualmente desexcitados por colisões antes de emitirem naturalmente.

Detecção de Moléculas do MIS via Rádio e Infra Vermelho

Detetadas em IR e rádio ~ 100 variedades, exs:

- Hidroxil – OH
- Água – H₂O
- Amônia – NH₃



...complexas como: HC₁₃N, CH₃NH₂, HCOOH

- Combinadas com glycine produz NH₂CH₂COOH **um aminoácido..!!**

Na próxima aula veremos as principais propriedades das componentes principais da Galáxia: bojo, disco, halo e barra.