

Introdução

Carlos Alexandre Wuensche
Processos Radiativos II



GERAÇÃO E EMISSÃO DE ENERGIA NAS ESTRELAS

- ENERGIA E COMPOSIÇÃO ESPECTRAL determinadas a partir do estudo dos seguintes parâmetros estelares:
 - a) condições físicas no interior estelar;
 - b) composição química;
 - estrutura interna (não homogeneidade nas camadas);
 - escala de tempo (mudanças em a e b \Rightarrow pulsações, explosões).



OBSERVAÇÕES

- Como não podemos observar o interior das estrelas, a totalidade de nosso conhecimento e a base para os modelos de estrutura e evolução estelar vem dos seguintes parâmetros observáveis:
 - Brilho aparente e distância \Rightarrow luminosidade L total da estrela;
 - Aglomerados estelares \Rightarrow razões de luminosidade L/L' de estrelas em diferentes estados evolutivos sem exigir nenhum conhecimento a priori sobre a distância ao aglomerado;
 - Observação do espectro contínuo \Rightarrow temperatura superficial da estrela T_s . (usando a teoria de emissão de um corpo negro);
 - Temperatura superficial \Rightarrow emissão superficial por unidade de área F_s (lei de Stefan);



OBSERVAÇÕES

- Mais parâmetros...
 - $L/F_s \Rightarrow$ área superficial $\Rightarrow R_0$ (medido a partir de eclipses de estrelas binárias cuja v_{orb} é conhecida);
 - Do período de revolução P (estrelas binárias de órbita conhecida) \Rightarrow massa M (usando a 3a. lei de Kepler);
 - Estudos teóricos de atmosferas estelares x observações de espectros \Rightarrow gravidade superficial;
 - $g, R \Rightarrow$ determinação da massa M (independente de f);
 - Estudo quantitativo teórico do espectro de nebulosas, matéria interestelar e atmosferas estelares \Rightarrow composição química de objetos cósmicos e das camadas externas das estrelas;



Fontes de energia

- A estrutura aparentemente estável de uma estrela: delicado equilíbrio entre P_{rad} e P_{grav} . A luminosidade observada é decorrente de dois processos principais:
 - Contração gravitacional (principal fonte durante a formação ou colapso);
 - Reações TERMO nucleares (principal fonte durante a “vida adulta”).
 - Para que essas reações TERMO nucleares ocorram, é necessário que a energia cinética média dos prótons no interior estelar seja da ordem de $3/2 kT$

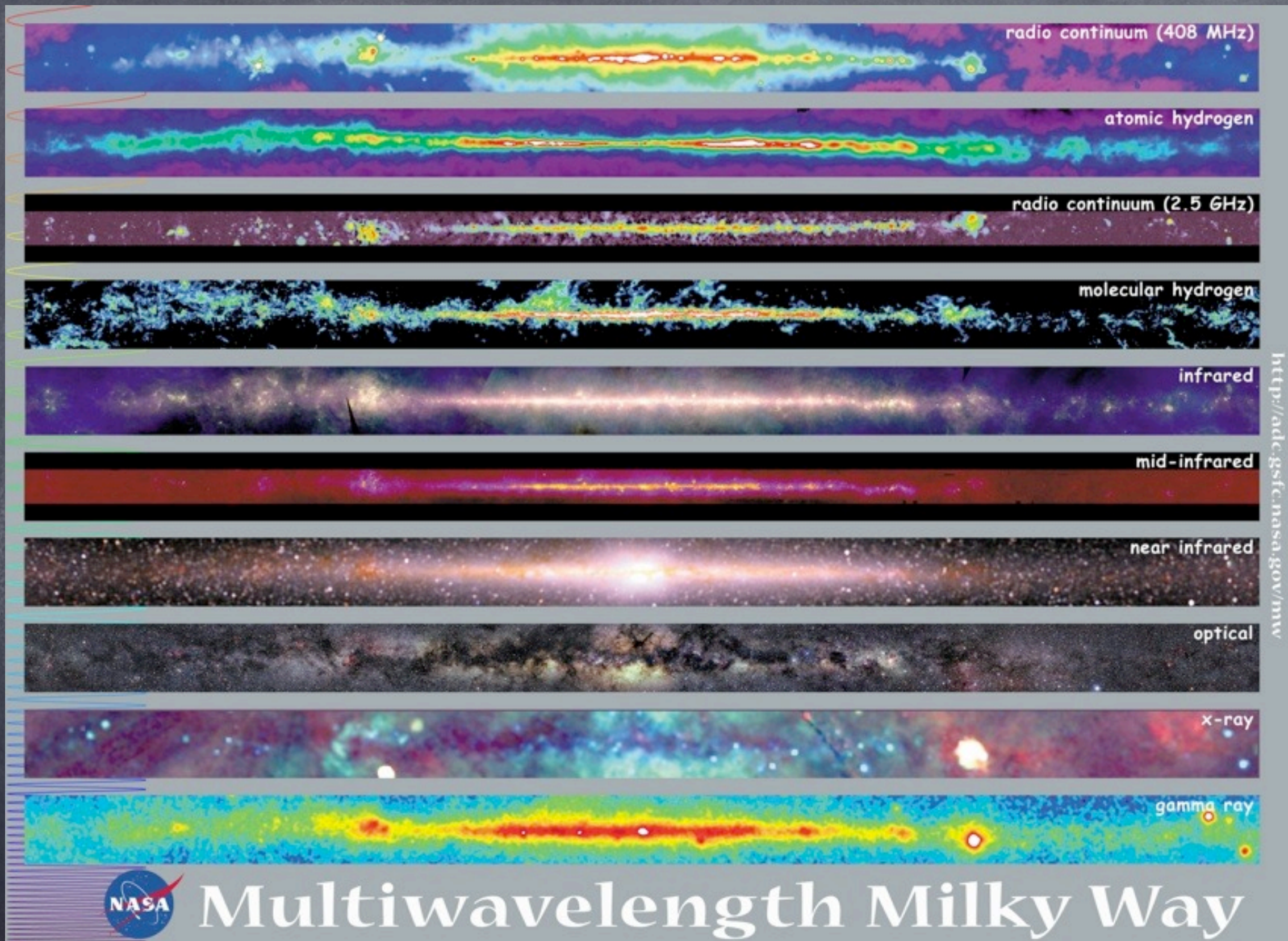


Fontes de energia

- Para superar, efetivamente, a barreira coulombiana entre prótons, a velocidade relativa entre os prótons deve ser da ordem de 20 keV. Para uma distribuição Maxwelliana de velocidades cuja energia cinética média é 2 keV, pode-se mostrar que uma fração suficientemente grande de partículas terá energias ≥ 20 keV, iniciando, assim, o ciclo auto-sustentado de reações **TERMO**nucleares que governará a vida da estrela até seus últimos estágios!



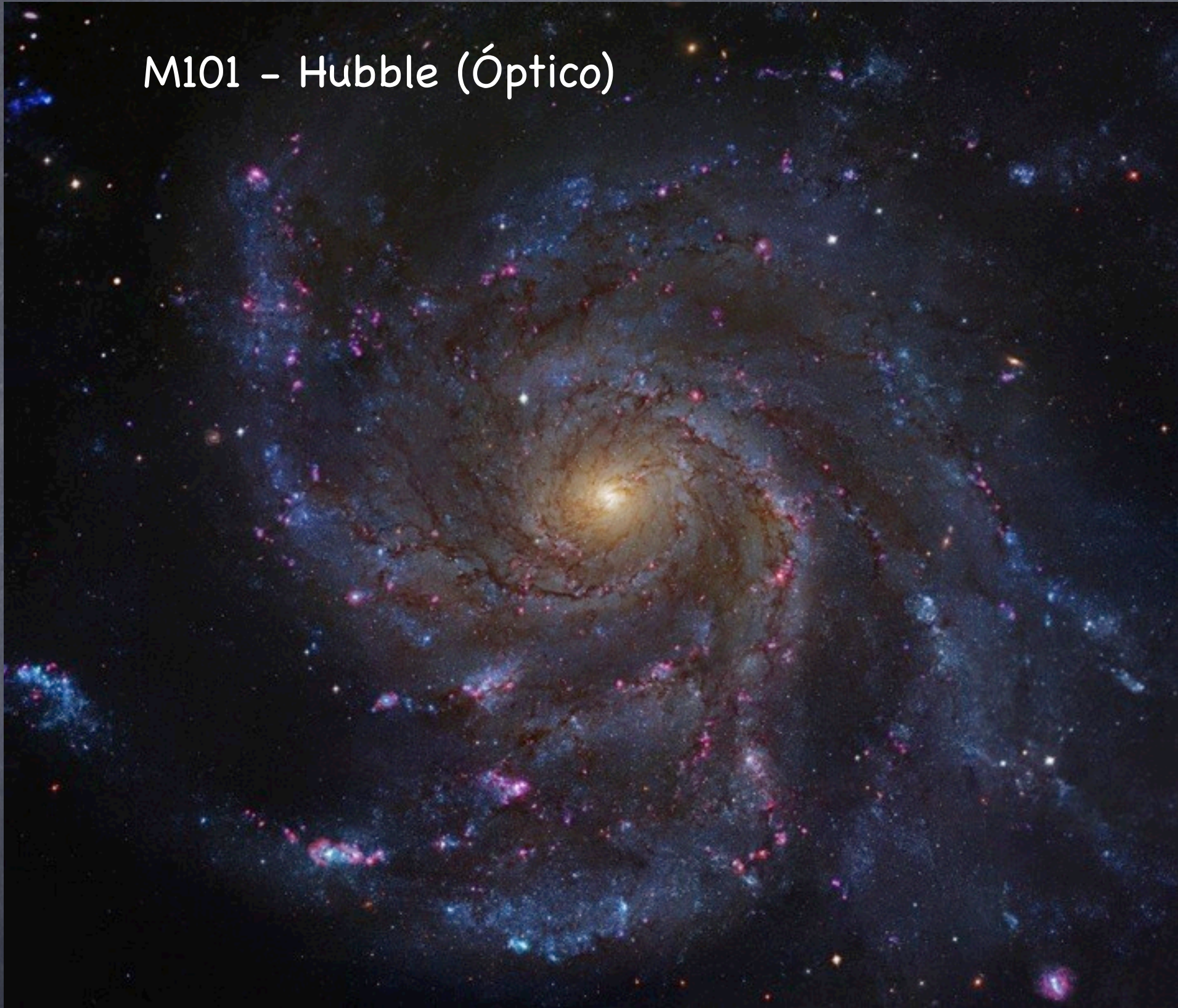
Astrofísica em diferentes bandas



Fonte: mwmw.gsfc.nasa.gov

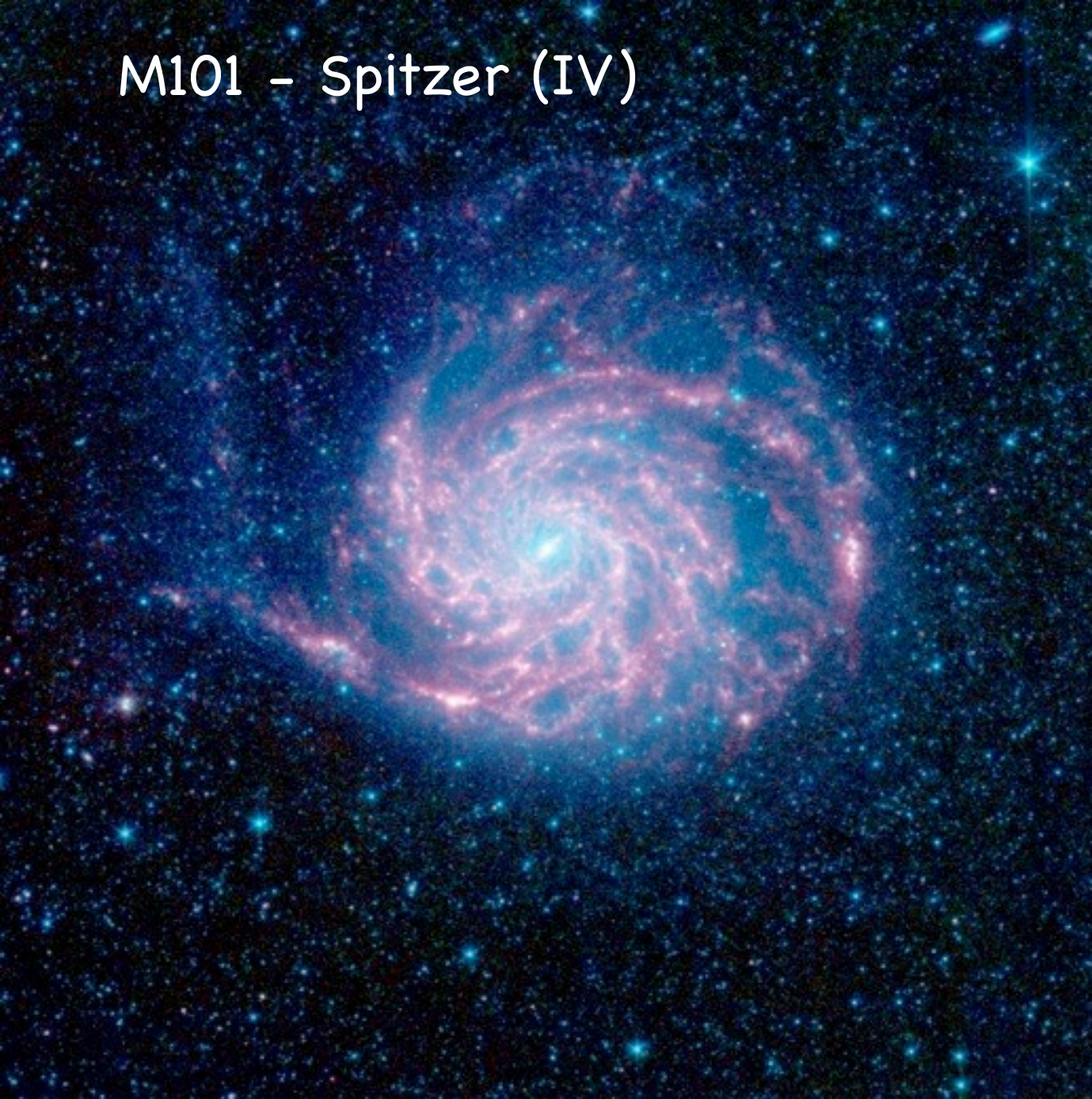
Type Of Radiation	Radiated By Objects At This Temperature	Typical Sources
Gamma-rays	more than 10^8 <u>Kelvin</u> (K)	accretion disks around black holes
X-rays	10^6 - 10^8 K	gas in clusters of <u>galaxies</u> ; <u>supernova</u> remnants; stellar <u>corona</u>
Ultraviolet	10^4 - 10^6 K	supernova remnants; very hot <u>stars</u>
Visible	10^3 - 10^4 K	planets, stars, some <u>satellites</u>
Infrared	10 - 10^3 K	cool clouds of <u>dust</u> and gas; planets
Microwave	1 - 10 K	cool clouds of gas, including those around newly formed stars; the <u>cosmic microwave background</u>
Radio	less than 1 K	radio emission produced by electrons moving in <u>magnetic fields</u>

M101 - Hubble (Óptico)



M101 - Spitzer (IV)

Fonte: apod.nasa.gov



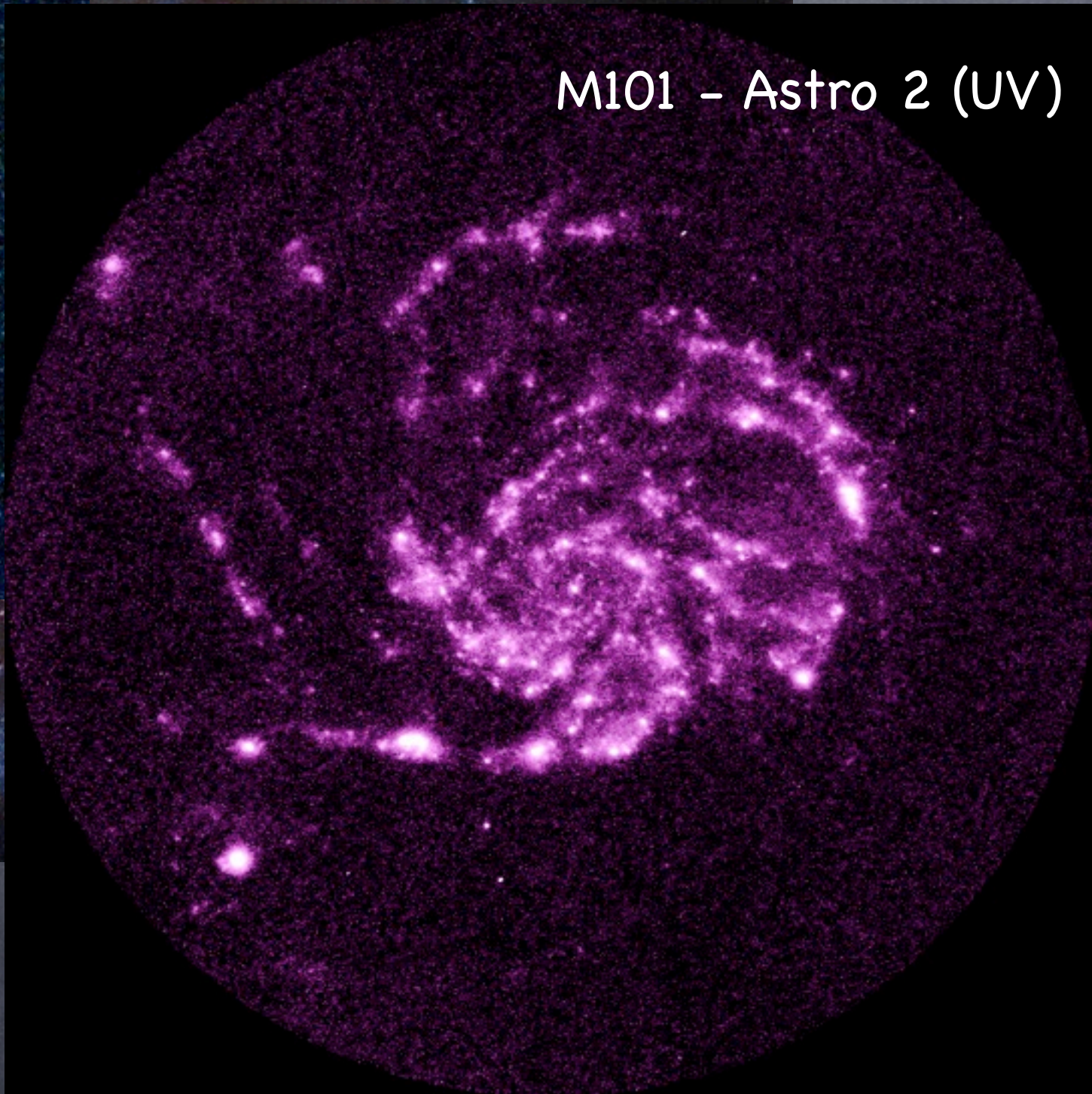
M101 - Spitzer (IV)



Fonte: apod.nasa.gov



M101 - Astro 2 (UV)



Barnard 68
(Ophiucus) no
óptico...





Trífida

Fonte: apod.nasa.gov



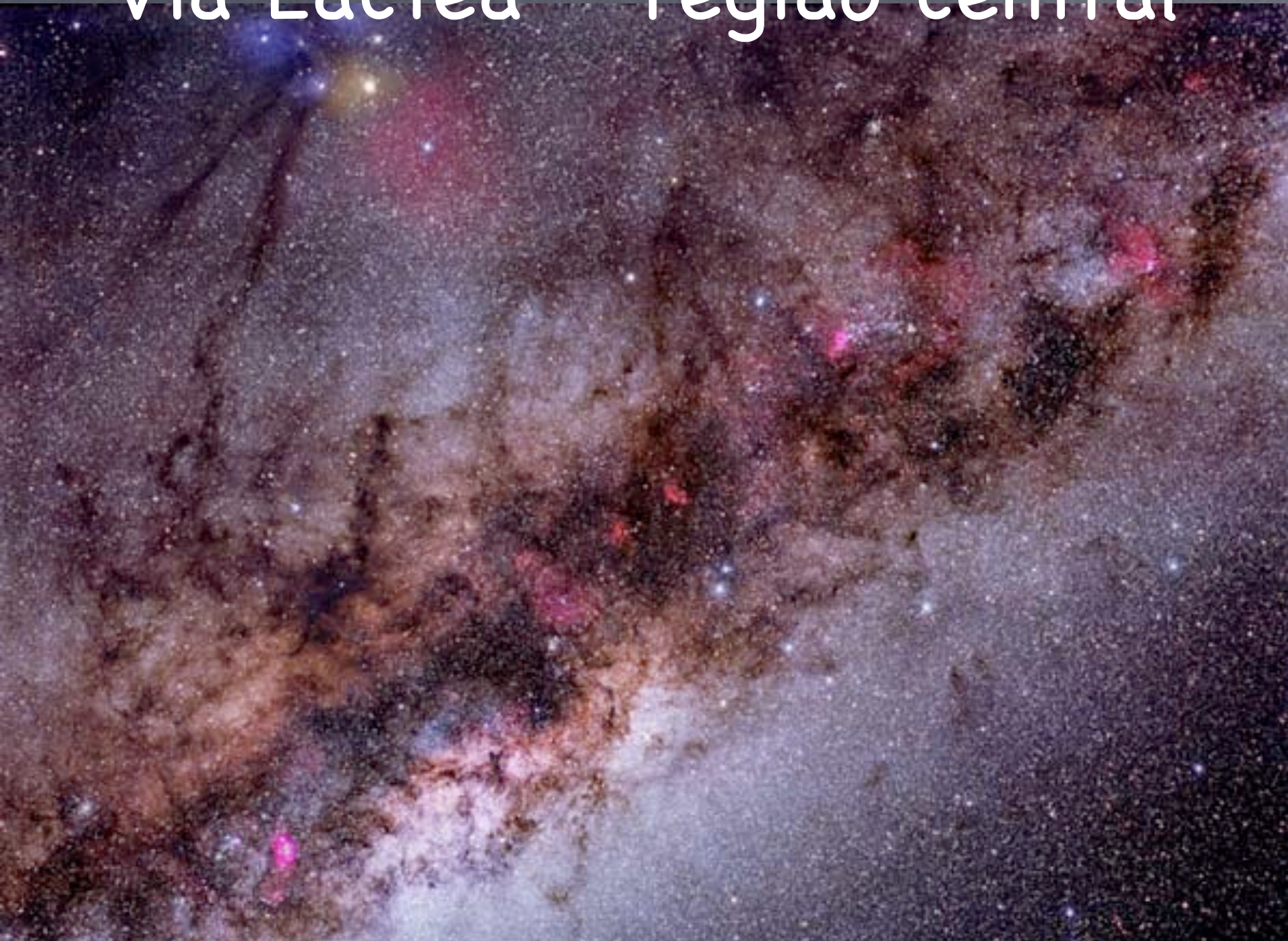


Plêiades (e o aglomerado de Fornax) – Chandra





Via Láctea – região central





NGC 281

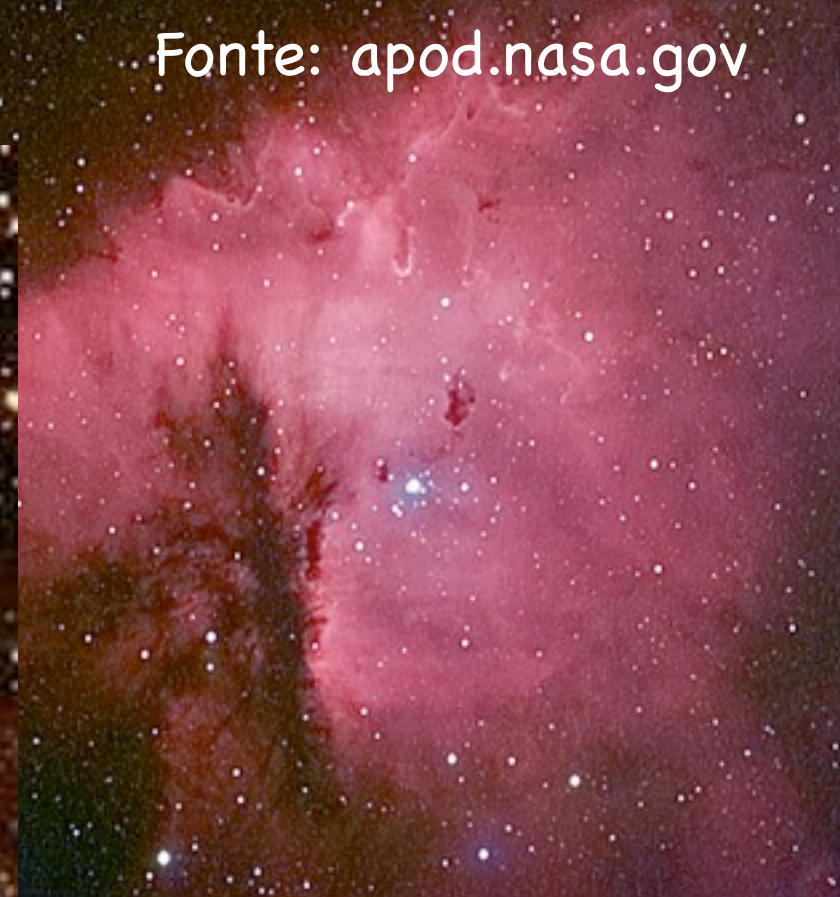
Fonte: apod.nasa.gov





NGC 281

Fonte: apod.nasa.gov





NGC 281





Cruzeiro do Sul e Carina



Nebulosa da Águia (Hubble)



Eta Carinae (Spitzer)

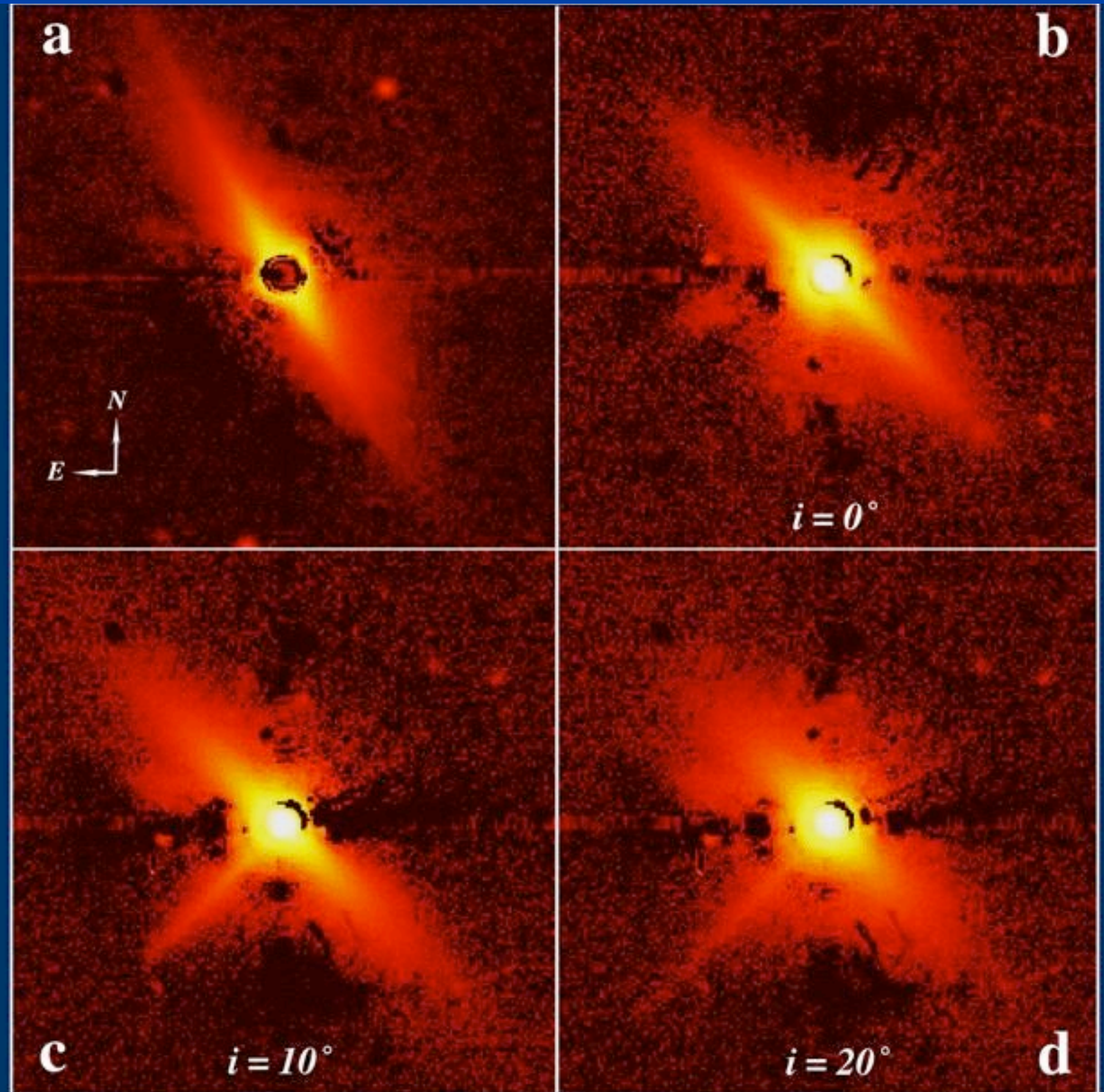


Disco protoplanetário em Órion



Silhouette Disk Orion 114-426 (J_s - band)
(VLT ANTU + ISAAC)

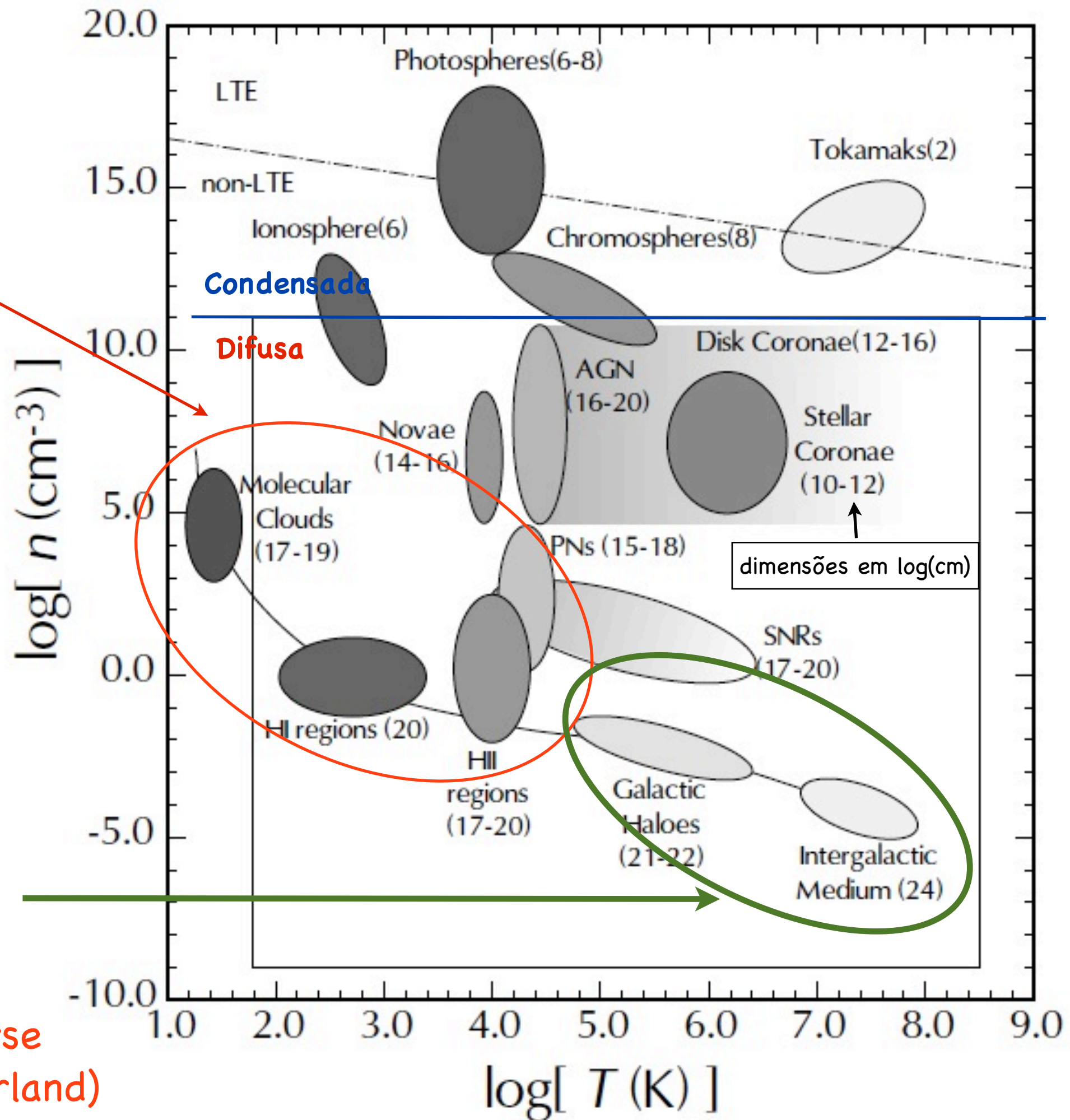
b) – (d) mostram modelos de disco que foram adicionados à imagem, de tal forma a incorporar todos os erros e nuances dos dados coronográficos reais

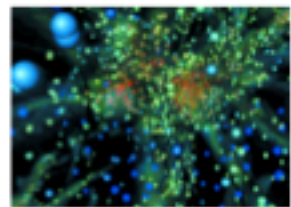


Meio interestelar

Meio intergaláctico/
intracluster

The Diffuse Universe
(M. Dopita e D. Sutherland)



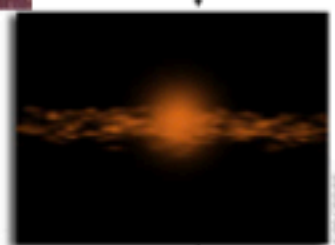


Meio interestelar

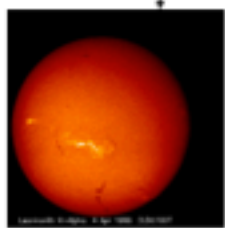
Queda?

Ejeções

Nuvens moleculares



Protoestrelas



ESTRELAS:

Supernovas

Restos de supernovas

Supergigantes e estrelas Wolf-Rayet

Estrelas O, B massivas

Estrelas de nêutrons, anãs brancas, buracos negros

Ejeções rápidas

Variáveis catastróficas

Algol, β -Lirae, etc.

Binárias

Vento

Gigantes

Estrelas de massa moderada

???

Vento

Estrelas AGB

Variáveis Mira

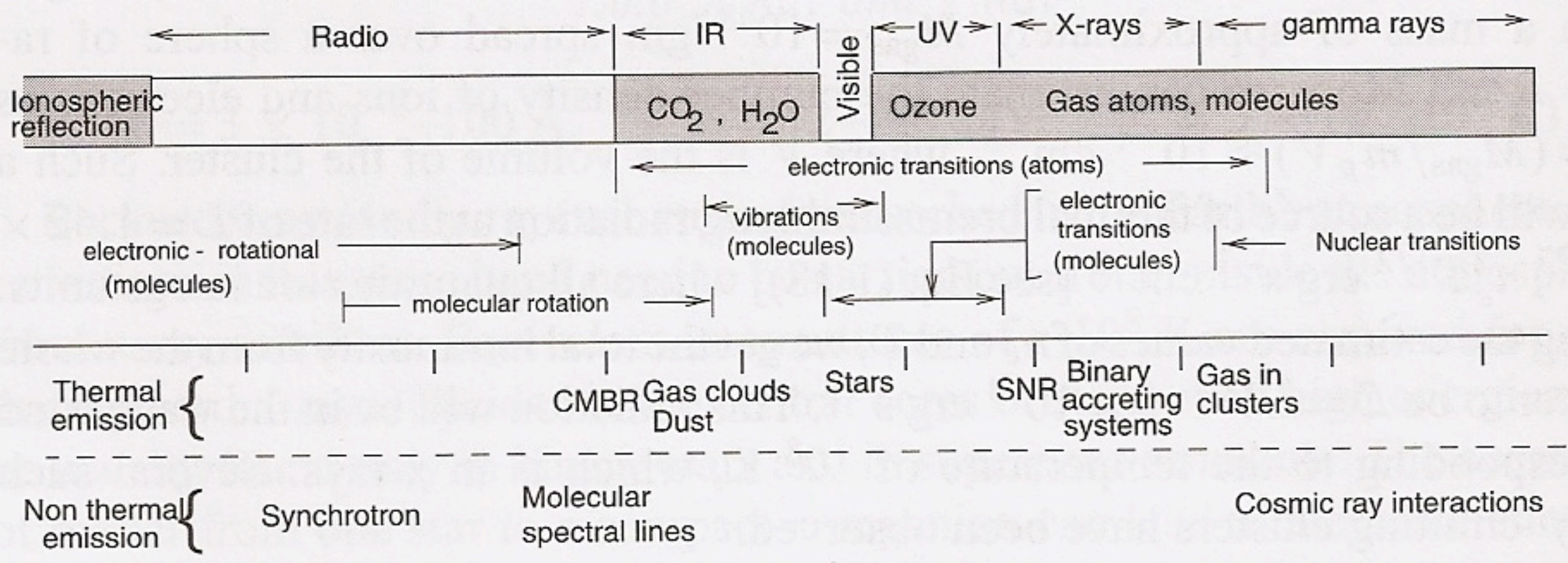
Nebulosas planetárias

Perdido permanentemente para o MIE

Anãs brancas

Composição de nebulosas planetárias comparadas ao Sol

	He	C	N	O	F	Ne	Na	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca
NP média	110000	780	182	435	0,03	107	1,5			10	0,17	2	0,09	0,11
NGC 7027	110000	540	120	350	0,032	84	2,1	5	0,35	8	0,18	2,0	0,17	0,4
NGC 6537	180000	40	890	170										
IC 2165	101000	870	95	275		86	4,2			31	0,13	2,3	0,06	0,10
Sol	98000	362	112	850	0,036	123	2,1	35	0,28	16	0,30	3,6	0,13	2,3





Meio interestelar

- Não há vácuo perfeito
- Constituição do meio interestelar
 - Estrelas comuns
 - Nuvens moleculares e de poeira
 - Explosões de SN aquecem o gás, formando novas estrelas
 - Gás no interior de aglomerados

Universo
difuso

Composição
química
variada

Plasma térmico
em diferentes
condições

Física de
plasmas



Interpretação das
observações

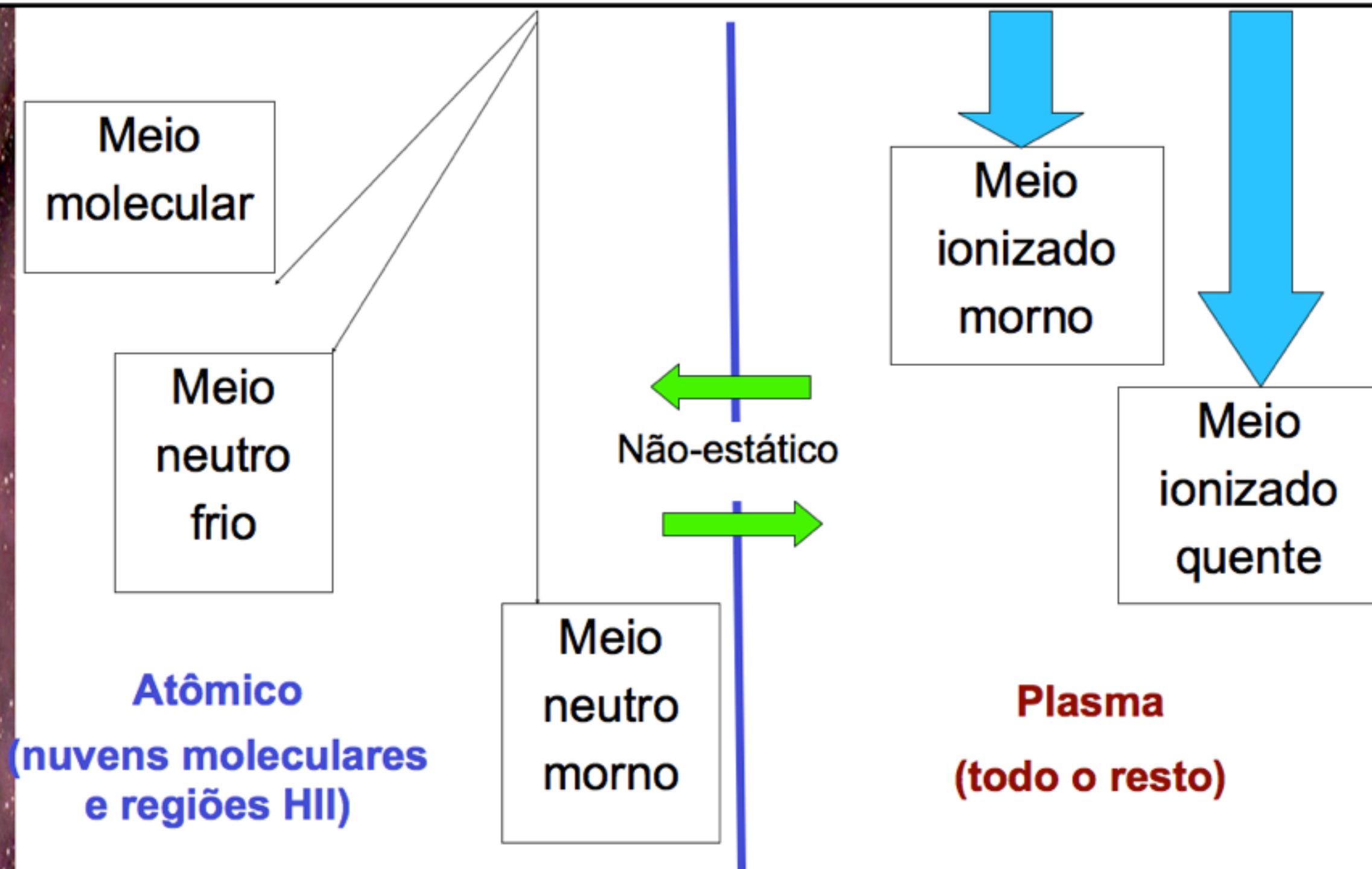


Estimativa de
parâmetros



Determinação da
composição
química

Meio interestelar





Essência do curso

- Observabilidade de:
 - Diferentes espécies (função do meio)
 - Transições
 - Propriedades de plasma

Essência do curso

- Emission measure (EM)

$$EM = \int n_e^2 dl \sim \langle n_e^2 \rangle l \text{ (pc.cm}^{-6}\text{)}$$

- Novas: $EM \sim 10^9 \text{ pc.cm}^{-6}$
- Neb. planetárias: $EM \sim 10^7 \text{ pc.cm}^{-6}$
- Regiões HII: $EM \sim 10^3\text{--}10^4 \text{ pc.cm}^{-6}$
- MIE difuso: $EM \sim 10 \text{ pc.cm}^{-6}$
- Absorção: solução para a absorção de nuvens moleculares tênues ($EM \sim 10\text{--}2 \text{ pc.cm}^{-6}$).
- Excitação por fonte intensa atrás da nuvem.



O que procuramos em processos radiativos, para caracterizar o MI?

- Condições de validade para a equação de equilíbrio de Boltzmann

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} e^{-\Delta E / \kappa T}$$

- E para a função de distribuição de energia, normalmente Maxwelliana

$$n(E)dE = \frac{2N}{\pi^2 (\kappa T)^{3/2}} E^{1/2} e^{-\Delta E / \kappa T} dE$$



Fases e observabilidade do MI

- Grandes variedades de fenômenos e médias escalas de tempo ($t_{\text{diff}} \ll t_{\text{Univ}}$) \Rightarrow fenômenos fisicamente idênticos em escalas de tempo e tamanho diferentes, p. ex., ejeções bipolares:
 - Estrelas jovens (10^5 anos; 10^{17} cm)
 - AGN (10^8 anos; 10^{24} cm)



Fases e observabilidade do MI

- Sistema em ED e auto-regulado, determinado pela taxa de formação estelar e mantido pelo balanço entre a taxa e o input Energia/Momentum devolvido ao MIS
- Galáxias: meio multifase em ET/D, com estrutura hierárquica. Balanceamento aquec./resfr. pode ser obtido em diferentes temperaturas



Fases e observabilidade do MI

Definidos por sua temperatura e densidade

Hot Ionized Medium (HIM) $[T = 10^6 \sim 10^7 \text{ K}]$:

Warm Ionized Medium (WIM) $[T \sim 10^4 \text{ K}]$:

Warm Neutral Medium (WNM) $[T = 100 \sim 10000 \text{ K}]$:

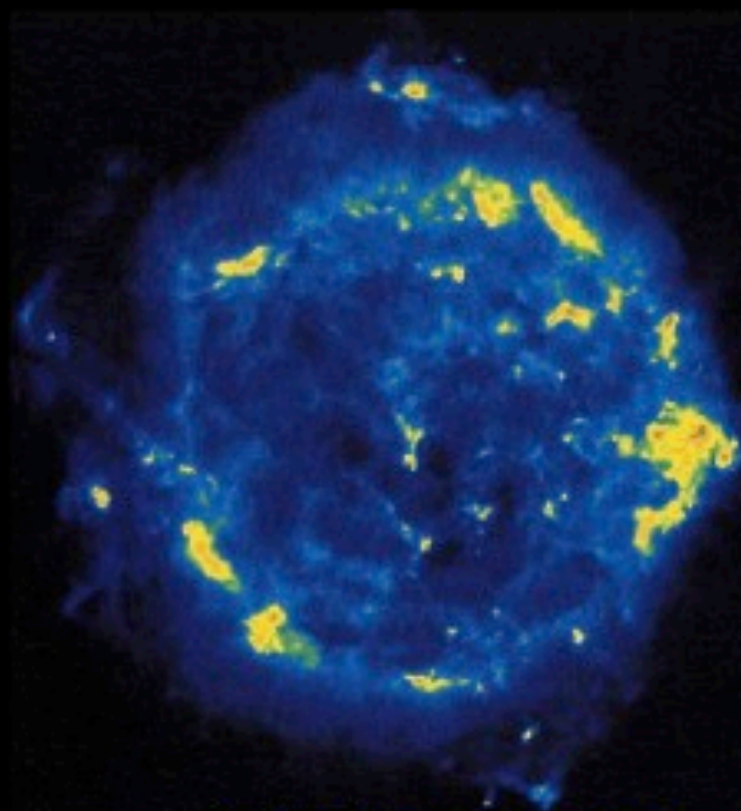
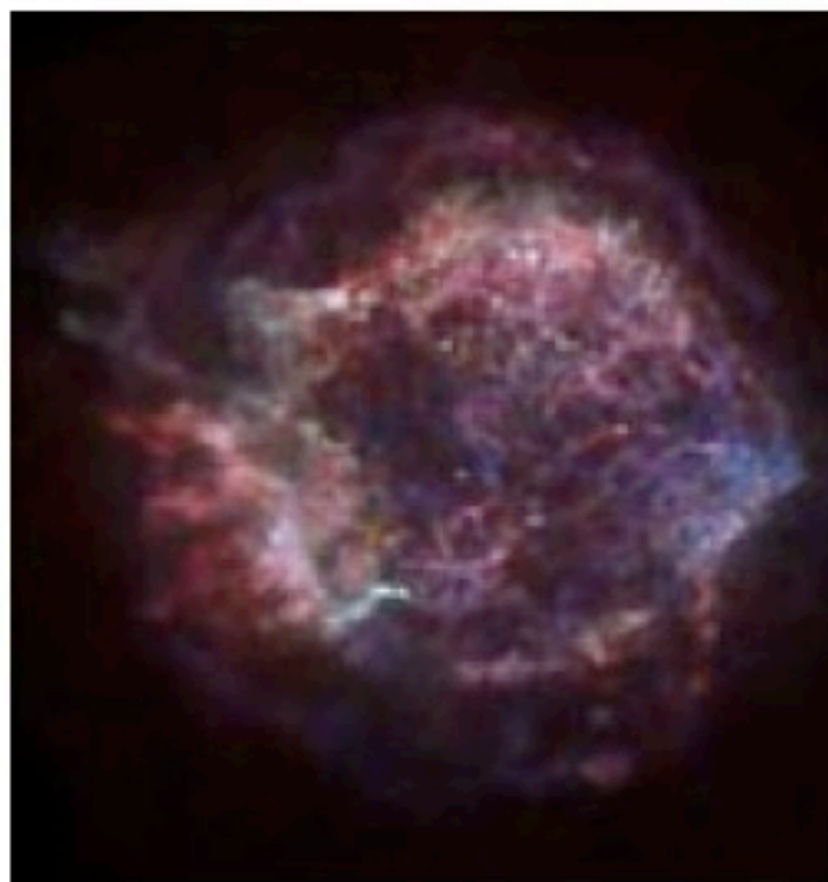
Cold Neutral Medium (CNM) $[T = 10 \sim 100 \text{ K}]$:

Hot Ionized Medium (HIM) [$T > 10^6$ to 10^7 K]:

ISM heated by shocks originated in SN explosions.

- Initial cooling mainly via bremsstrahlung.
- Secondary process (at a later epoch): recombination (line emission from free-bound transitions in the soft X-rays [C_{IV}, O_{VI}], bound-bound in the optical [H, He, C, O])

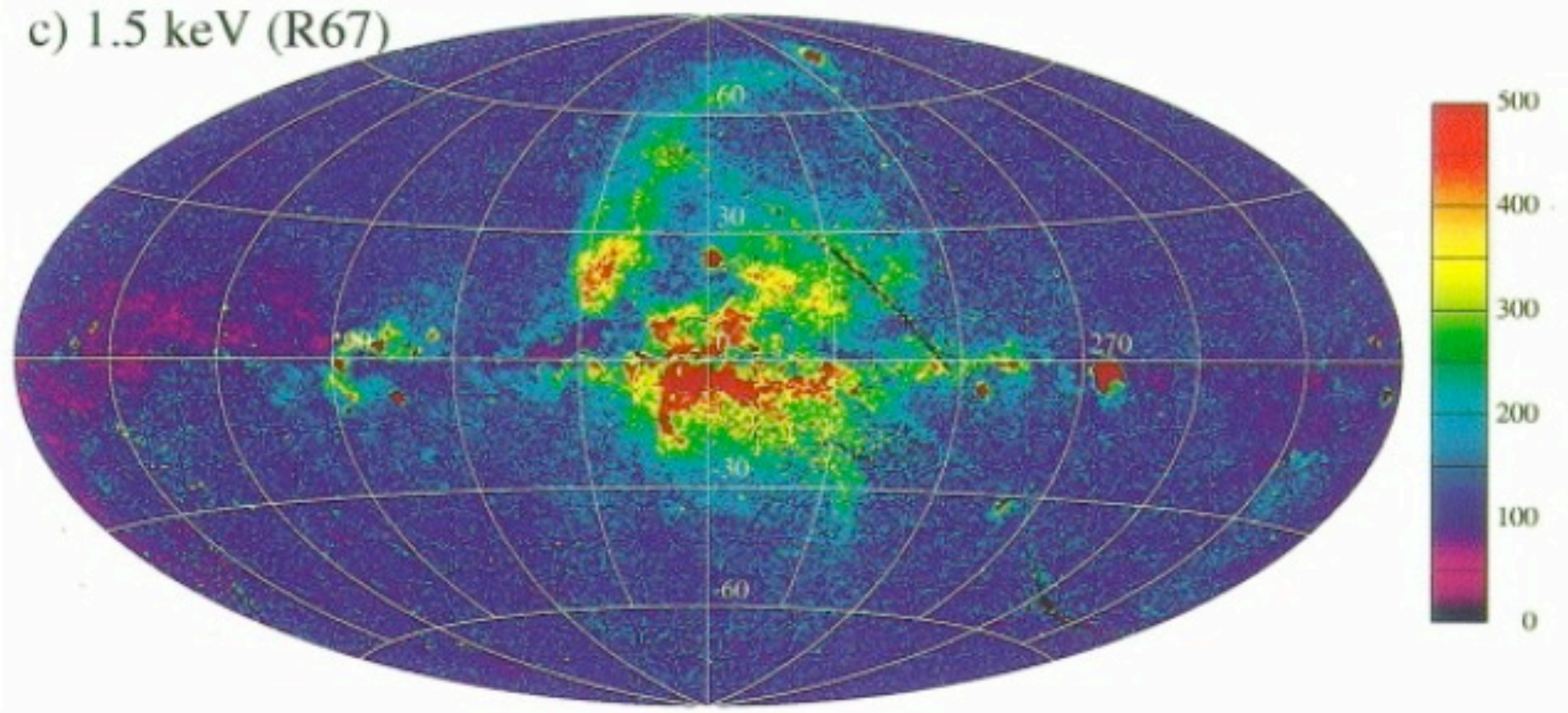
(in SNR also synchrotron radio emission from freshly accelerated electrons)



CassiopeaA resto di supernova

Hot Ionized Medium (HIM) [$T > 10^6$ to 10^7 K] in our galaxy:

c) 1.5 keV (R67)



ROSAT all-sky (soft) X-rays (0.1-2.2 keV), after removing point sources (from Snowden et al. 1997)



ISM phases(2):

Warm Ionized Medium (WIM) [T ~ 10⁴ K]

– Around massive and hot stars (OB) capable of strong UV emission (also around galactic centres, where the UV radiation field is strong). OB associations are very often found in SFR (e.g. Orion).

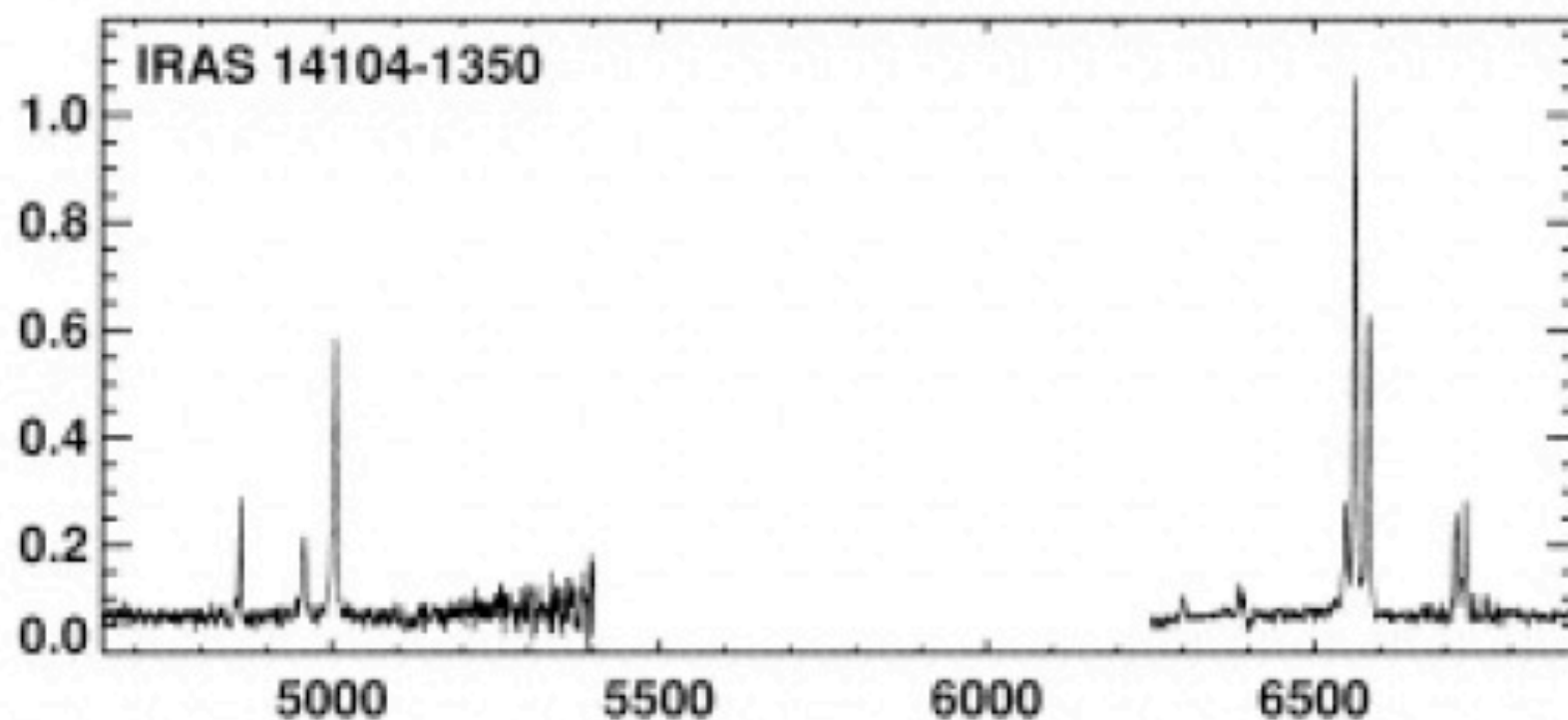
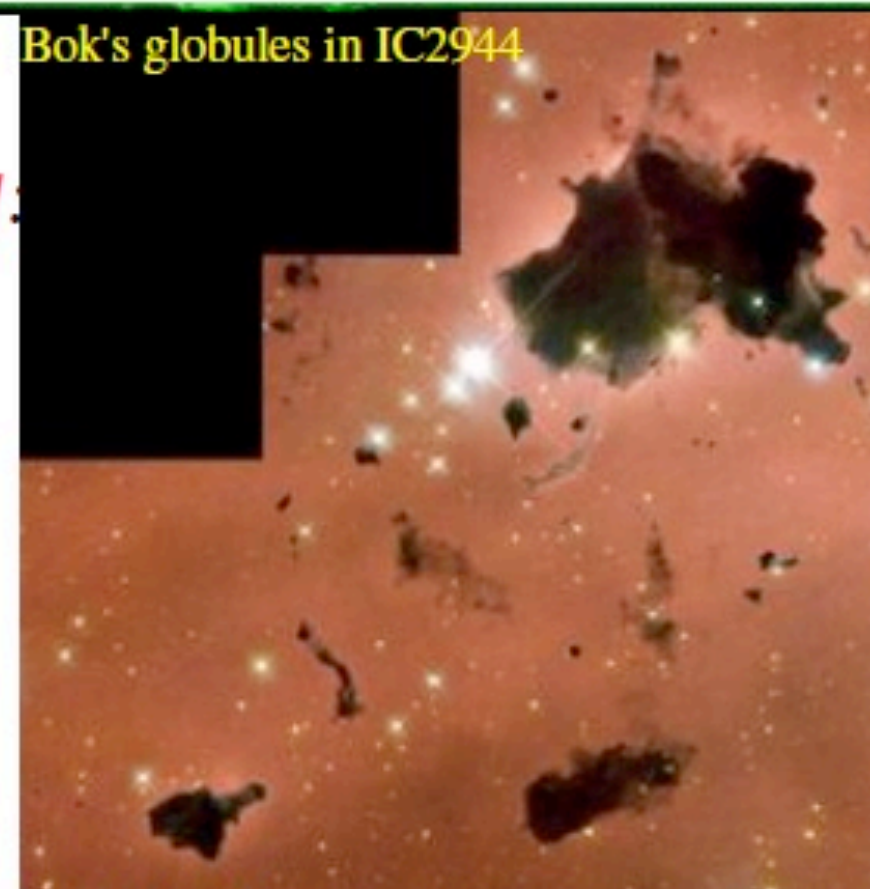
– Equilibrium between photo – ionization and recombination [T ~ 10⁴ K]

– Bremsstrahlung + line emission mainly of H and O [HII regions]

– detectable via

optical (line) and
radio/IR/submm
(bremsstrahlung continuum)

Bok's globules in IC2944



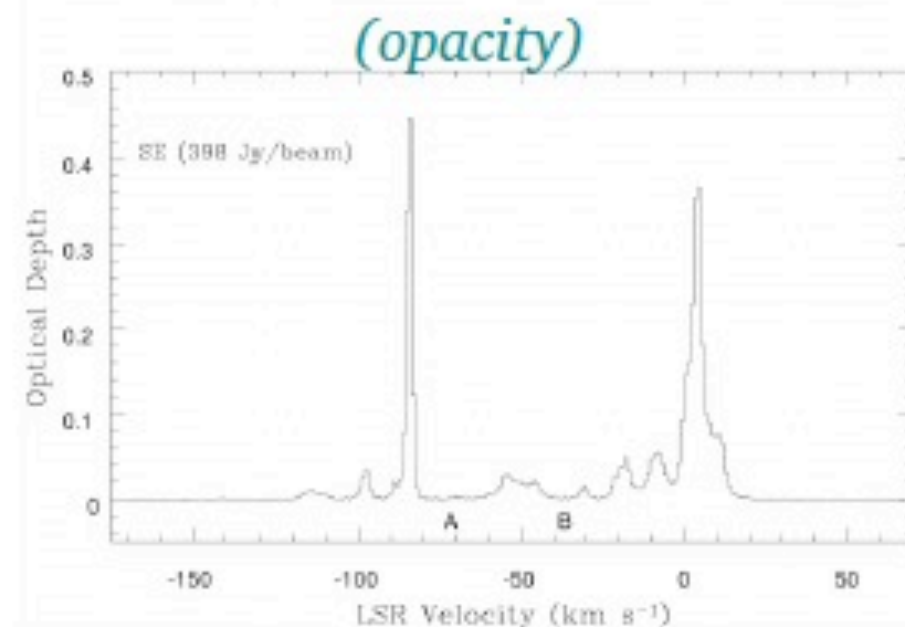
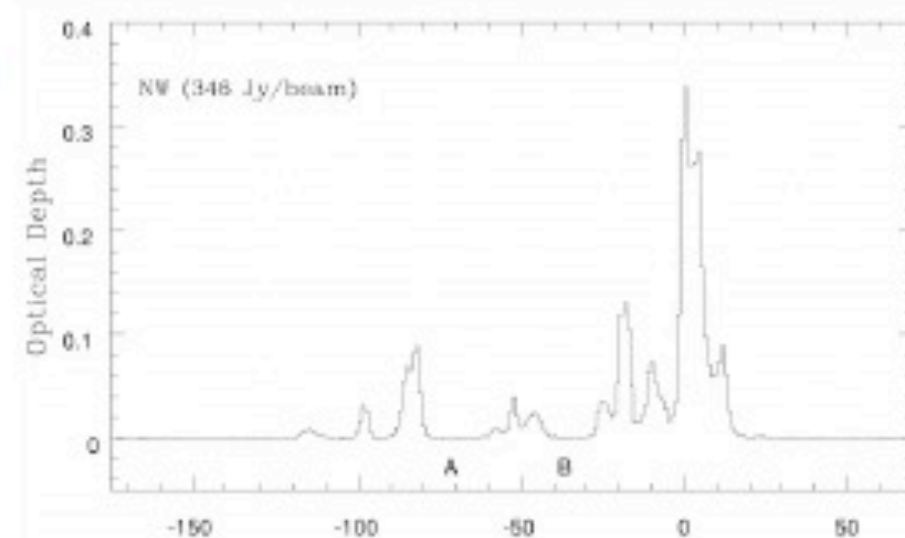
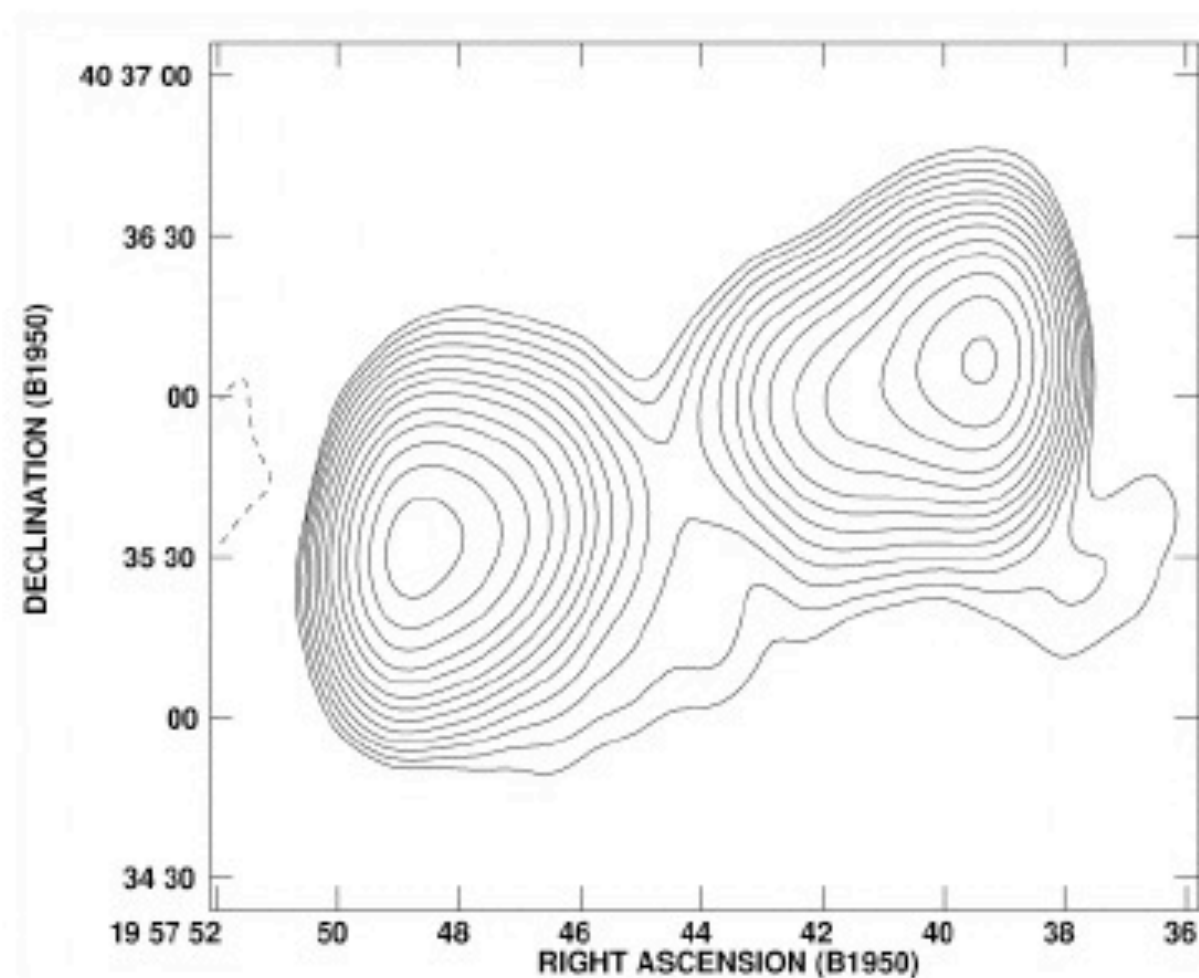


Warm Neutral Medium (WNM) [T ~ 10³ to 10⁴ K]:

low densities (0.1 cm⁻³), mainly atomic H (HI) heated by

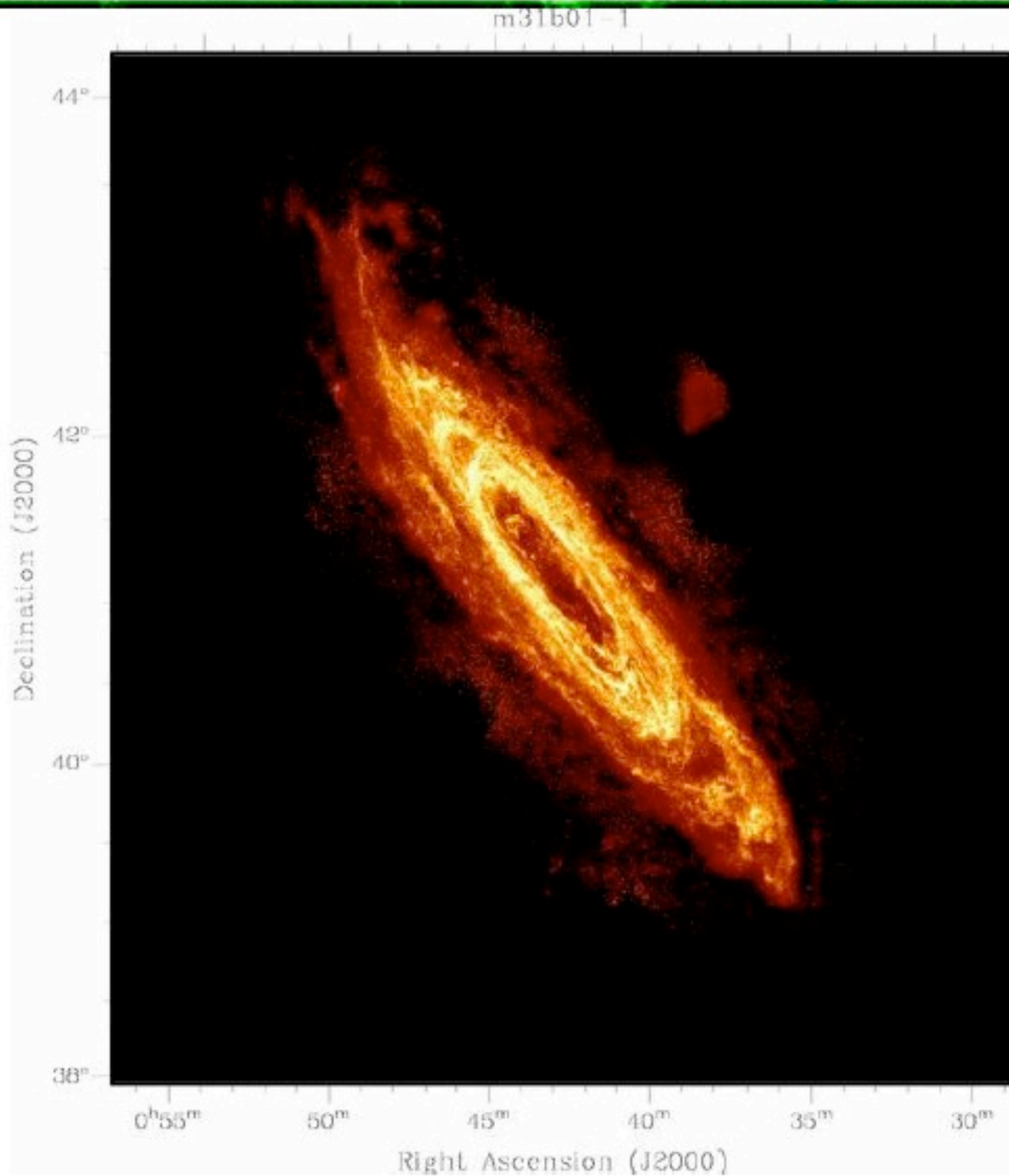
- diffuse UV and/or X-ray radiation
- interaction of low energy Cosmic Rays

detected via absorption of 21cm radiation (1)

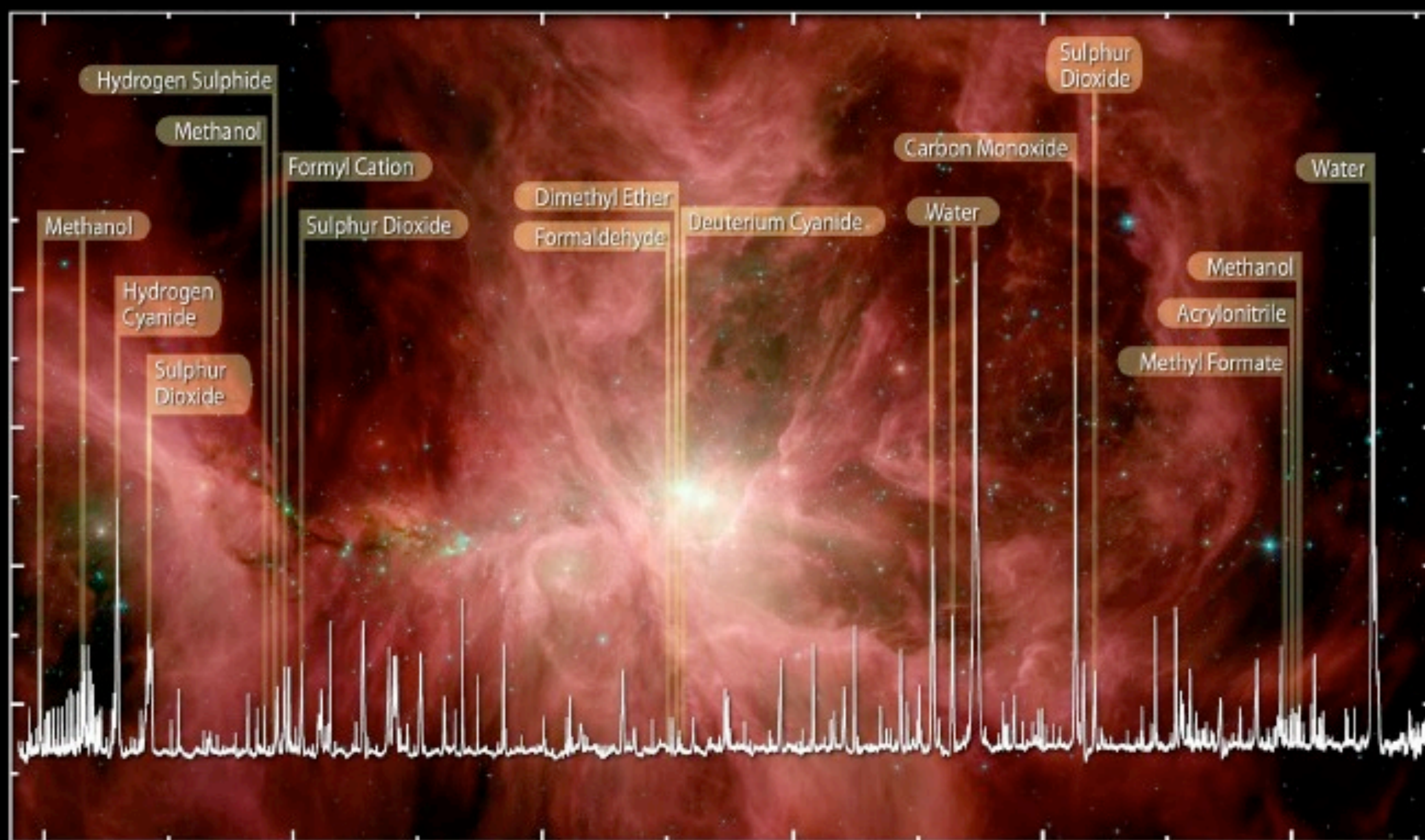




detected via emission
of 21cm radiation (2)



Herschel view of the Orion Nebula (FIR spectroscopy 160-630 μm)



HIFI Spectrum of Water and Organics in the Orion Nebula

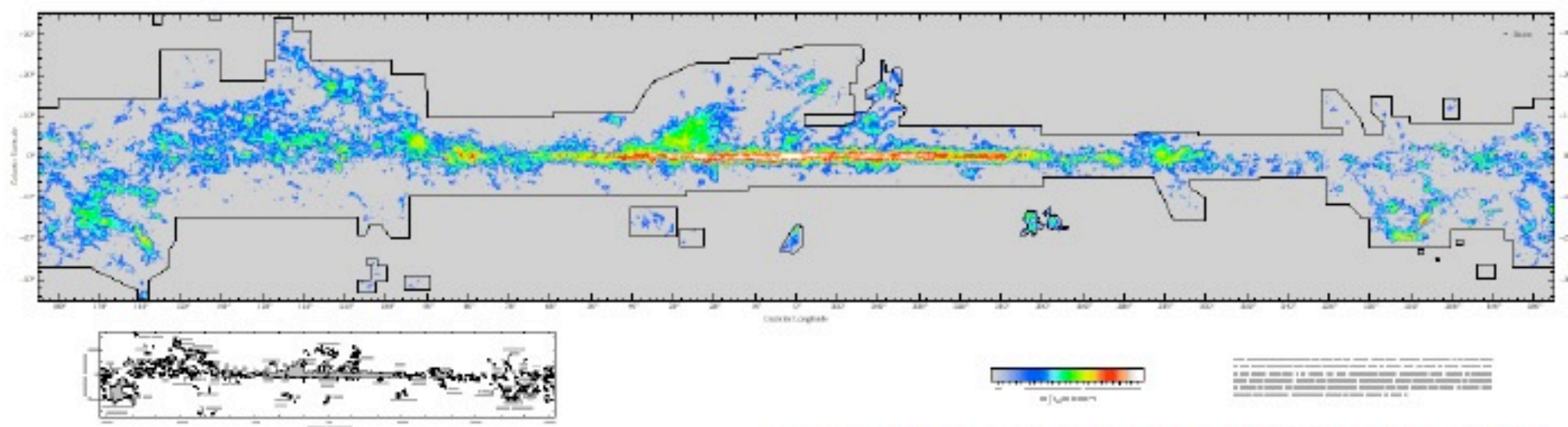
© ESA, HEXOS and the HIFI consortium
E. Bergin

Cold Neutral Medium (CNM) [T= 10 ~ 100 K]:

Neutral atomic hydrogen HI (densities 1 to 10 cm^{-3} , $T= 100 \text{ K}$), often distributed on regions larger than those with stars

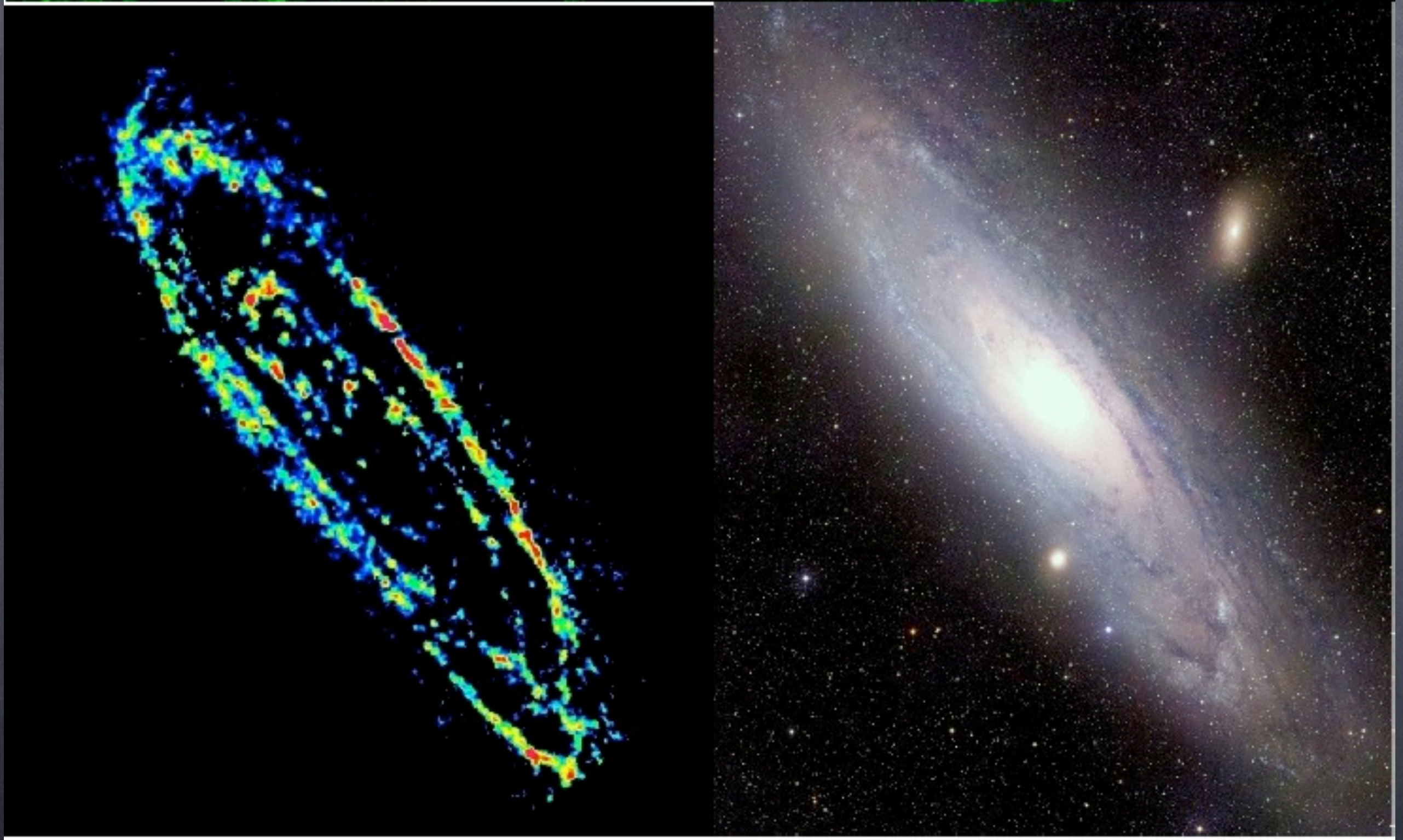
Molecular hydrogen H_2 (densities $> 10^3 \text{ cm}^{-3}$, $T= 10 \text{ K}$) CO, other molecules, in SFR (spiral arms and where interaction condensed matter)

Revealed by mm/submm/radio observations (generally line emission)



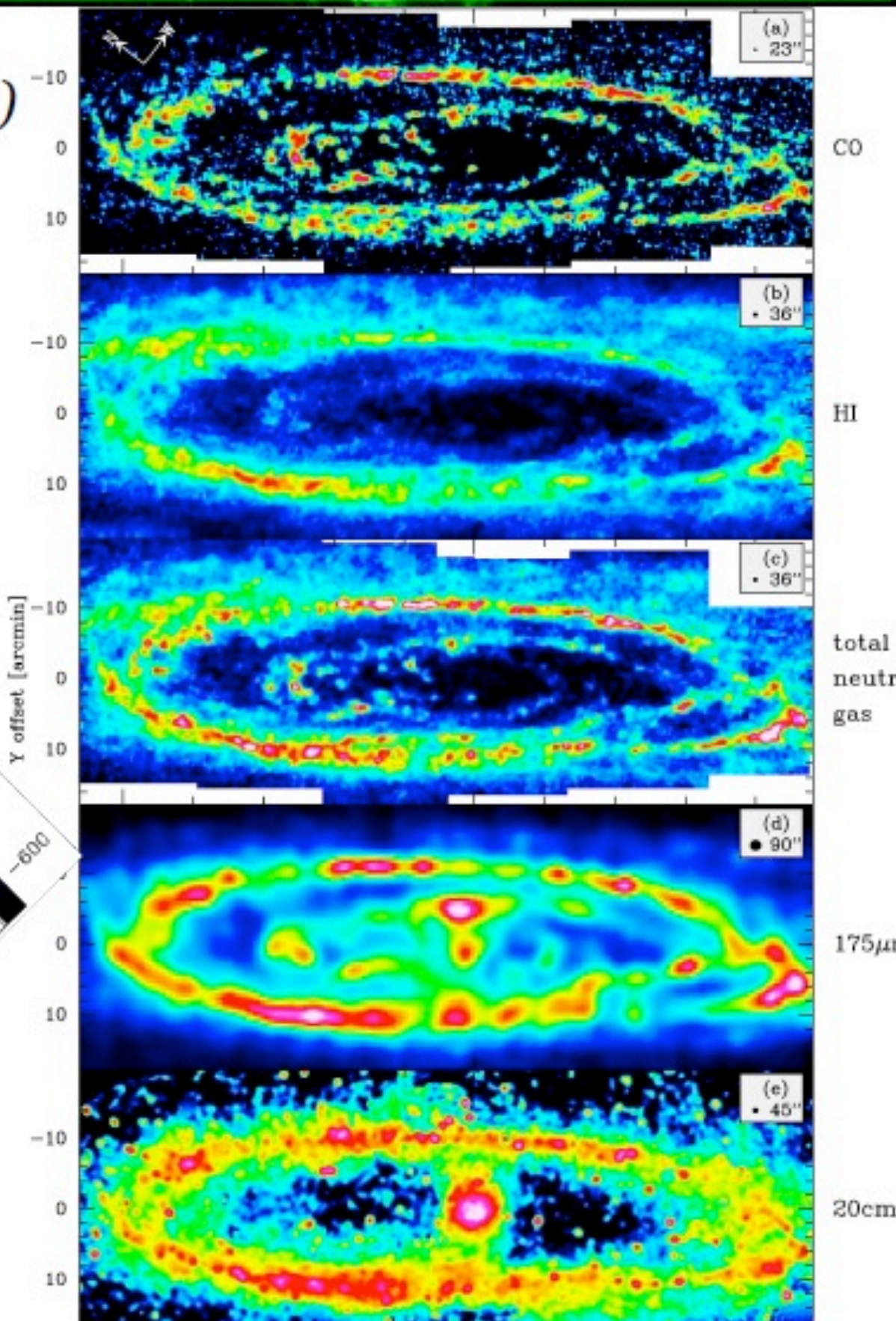
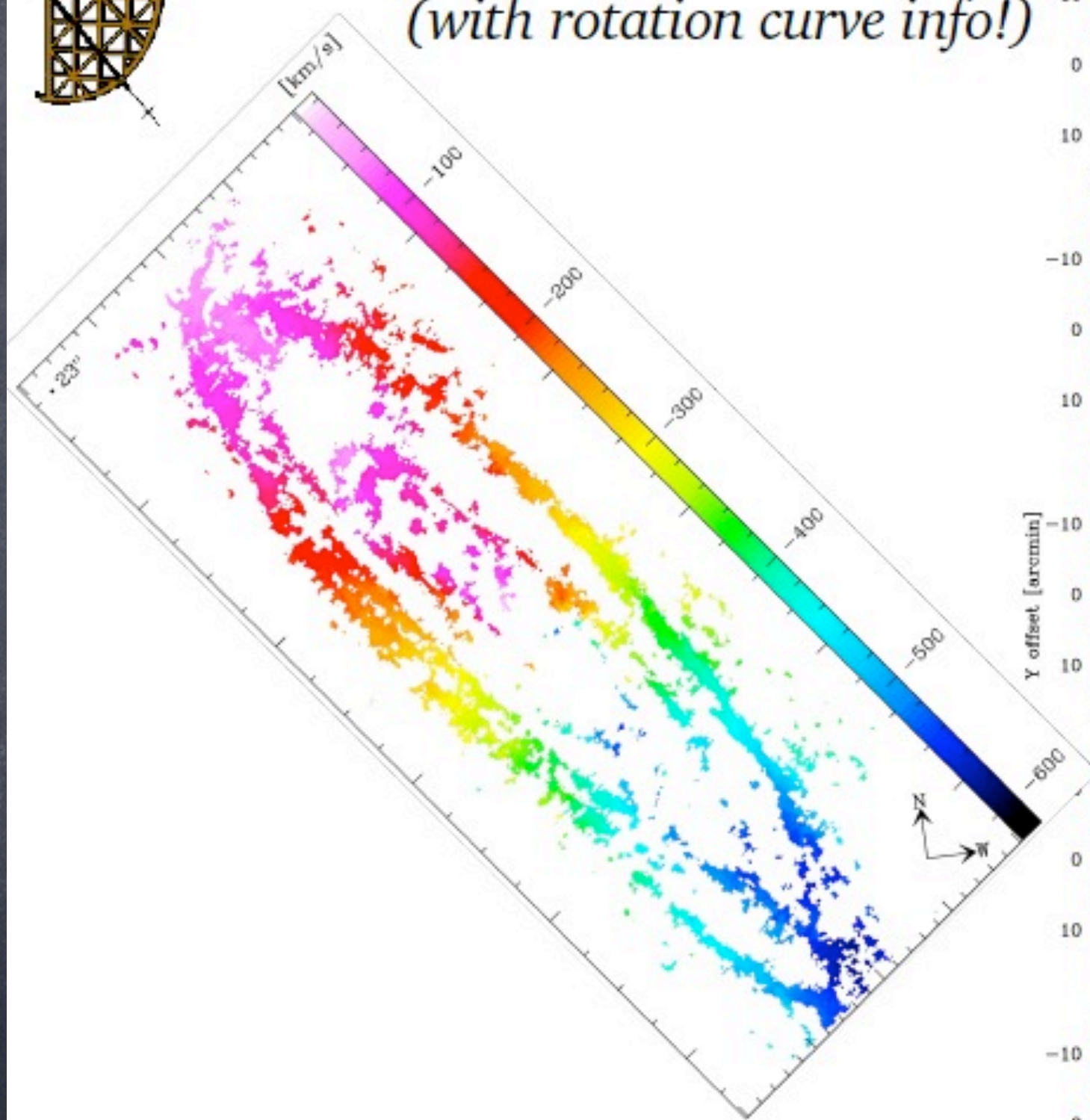
from Dame, Hartmann, & Thaddeus 2001

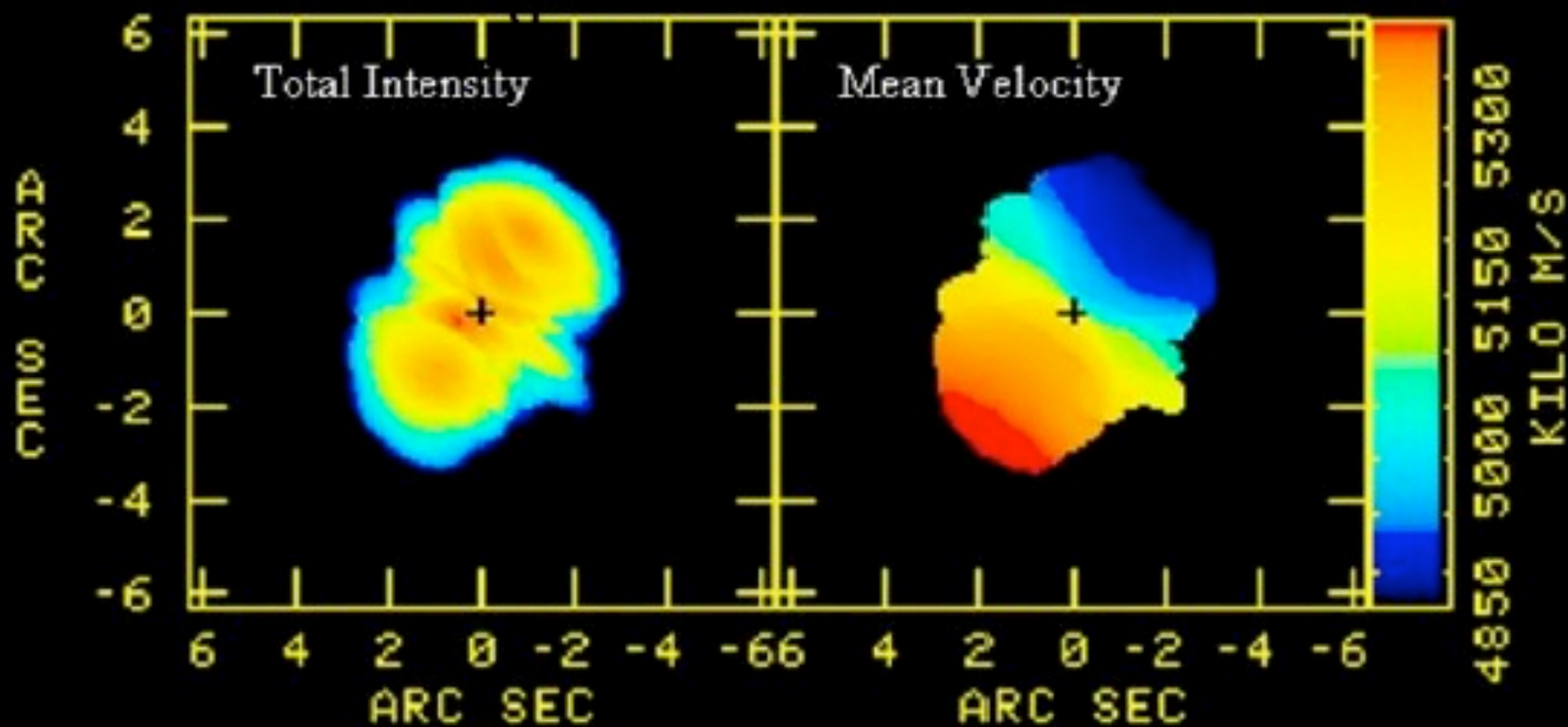
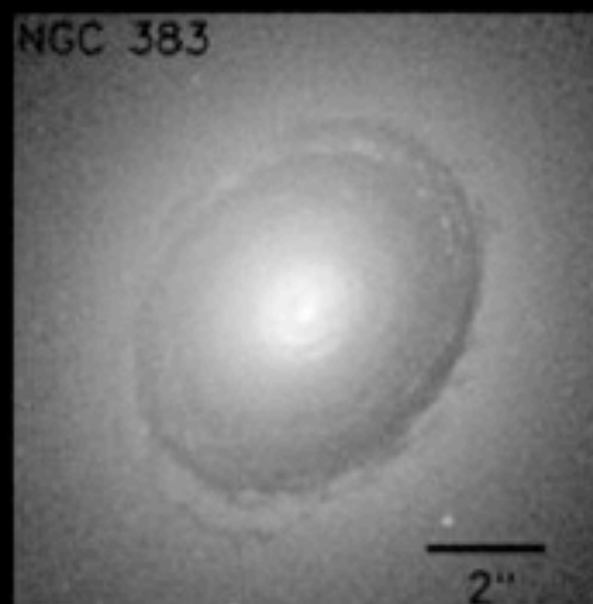
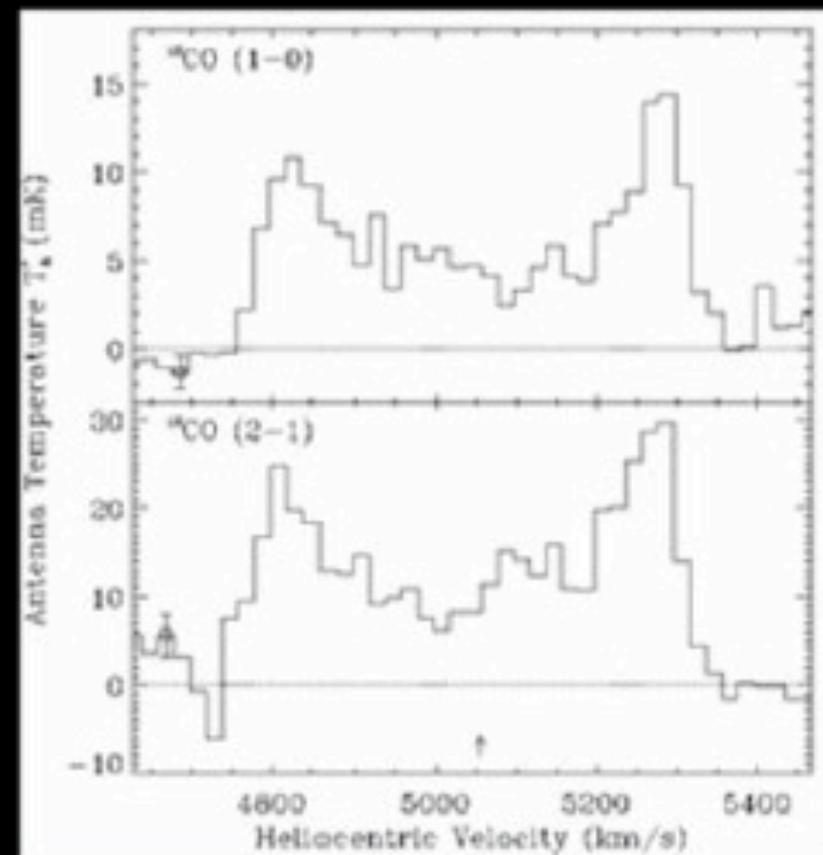
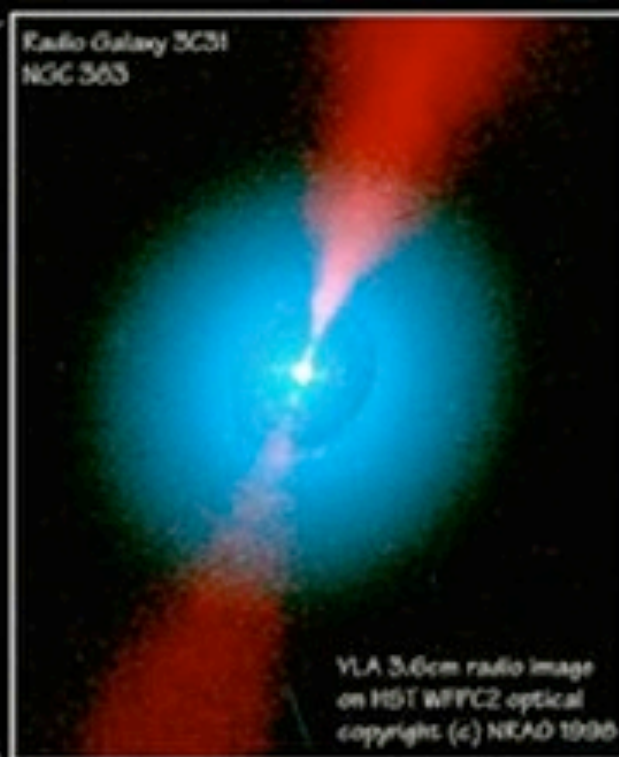
ISM phases: Cold Neutral Medium (CNM) in M31



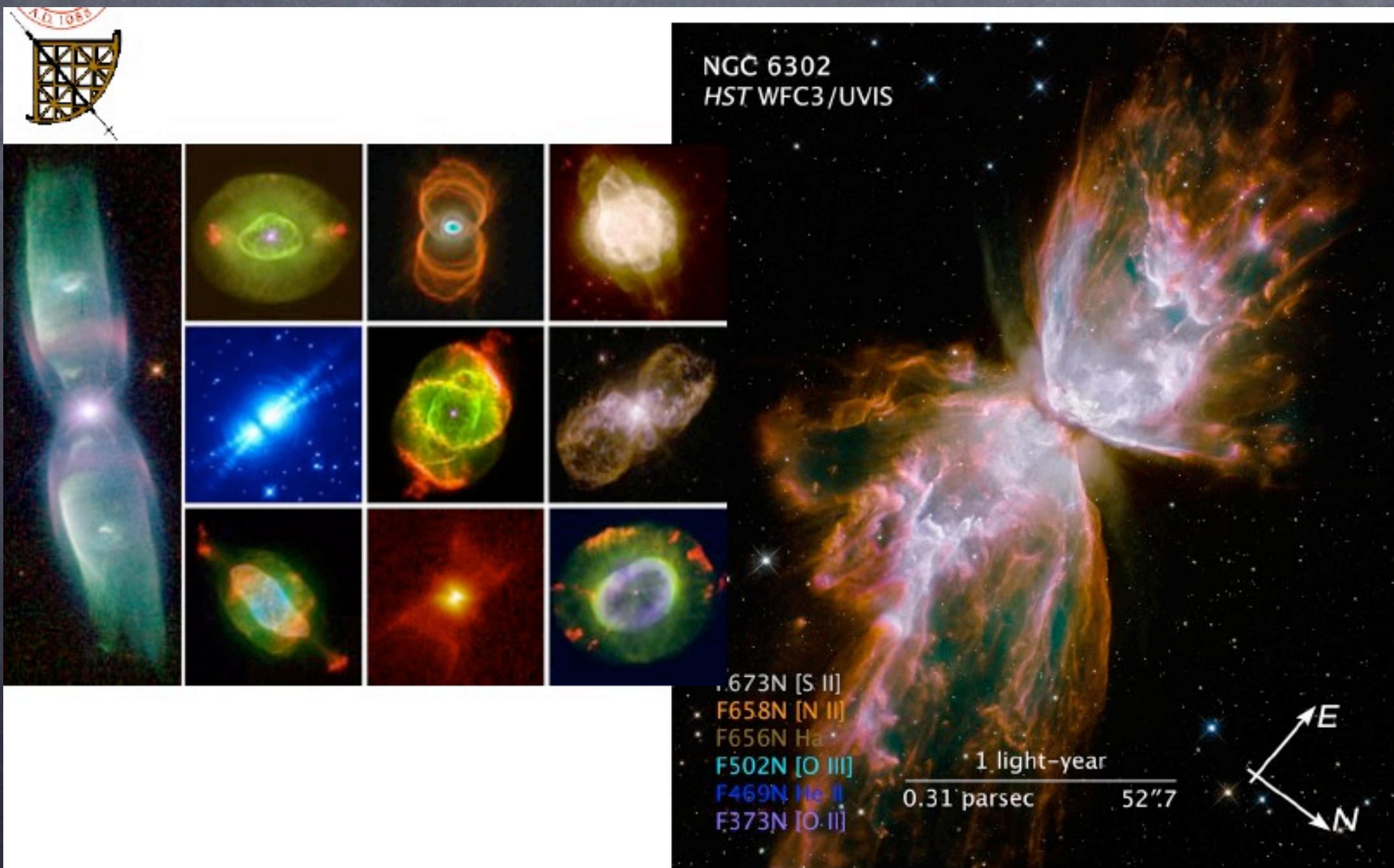
ISM phases: Cold Neutral Medium (CNM) in M31

(with rotation curve info!)





Nebulosas planetárias no MI





ISM in elliptical and irregular galaxies

- Early-types** (elliptical galaxies) are known to possess much less gas and dust than late-types (spiral galaxies)
- result of formation process (?)
 - low star formation rates
 - different origin of ISM matter (from stellar mass loss: i.e. winds and SN explosions)
 - metal enrichment via stellar evolution

In **Irregulars** the fraction of total mass in gas is higher than in spirals and ellipticals and the SFR is high (per unit mass).

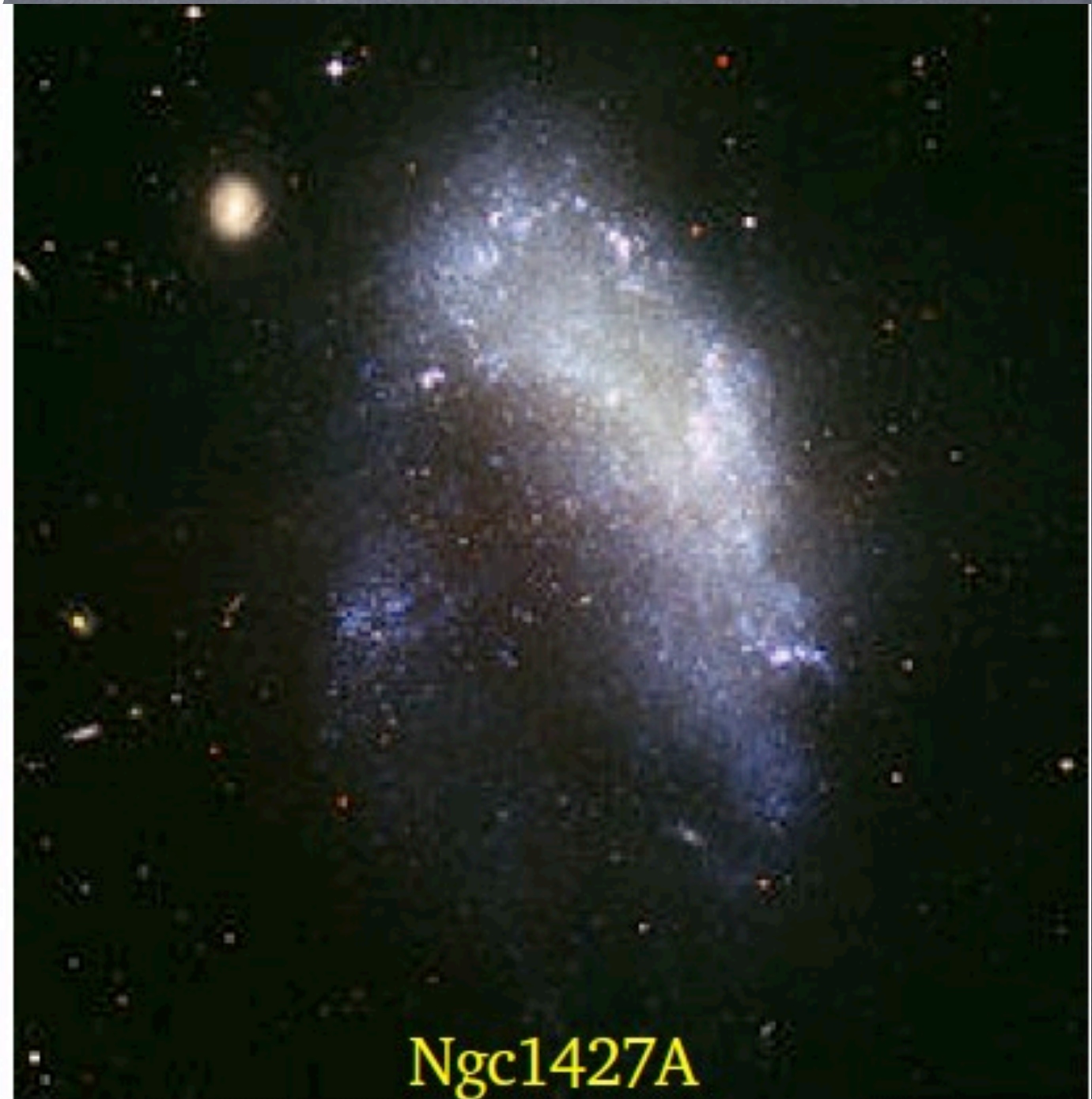
General consequence on “colors”:

Ellipticals are generally **redder** than spirals

Irregulars (and dwarfs) are **bluer** than spirals

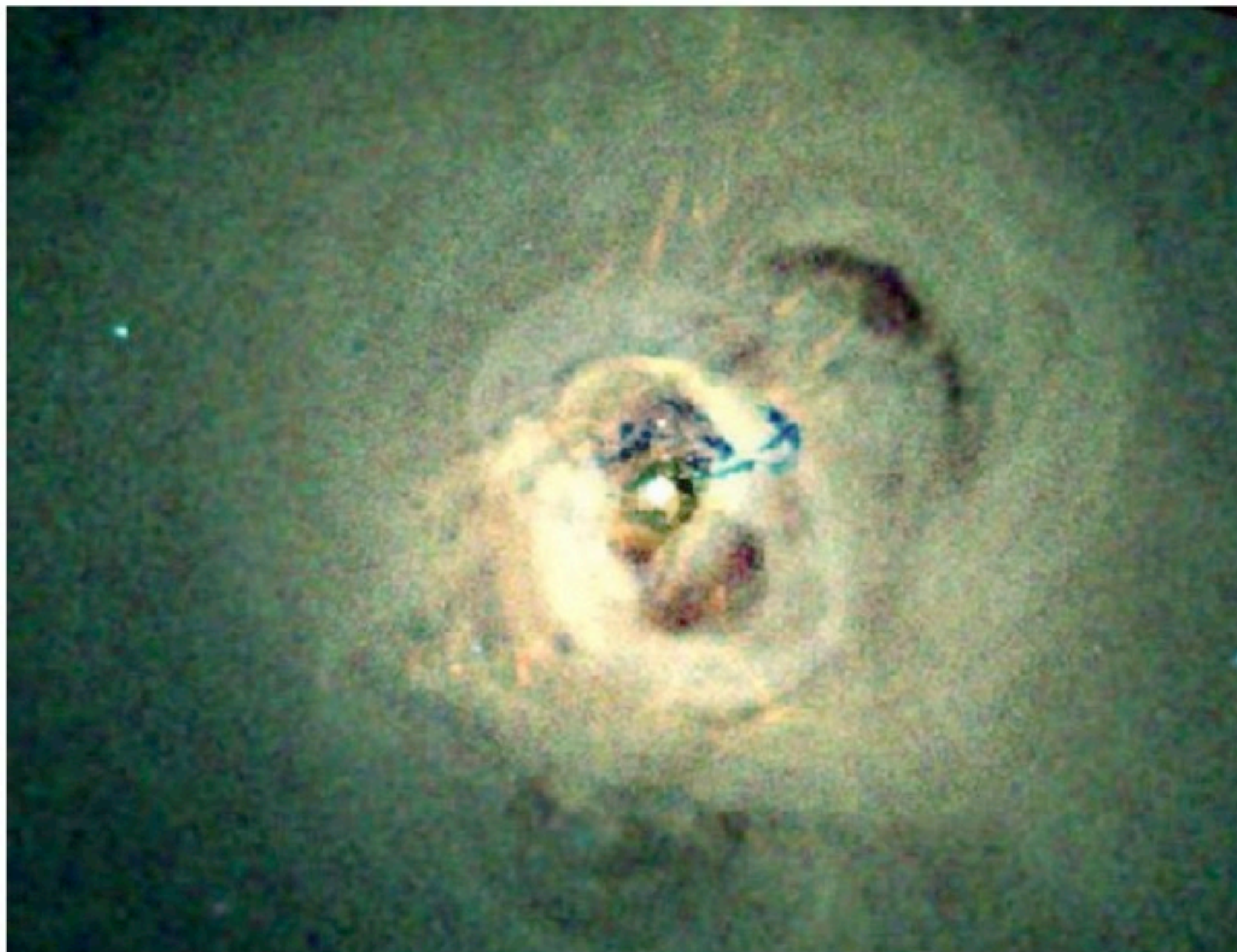
Large scale environment have strong influence on gas/dust content in galaxies (e.g. isolated – groups – clusters)

MI em galáxias irregulares



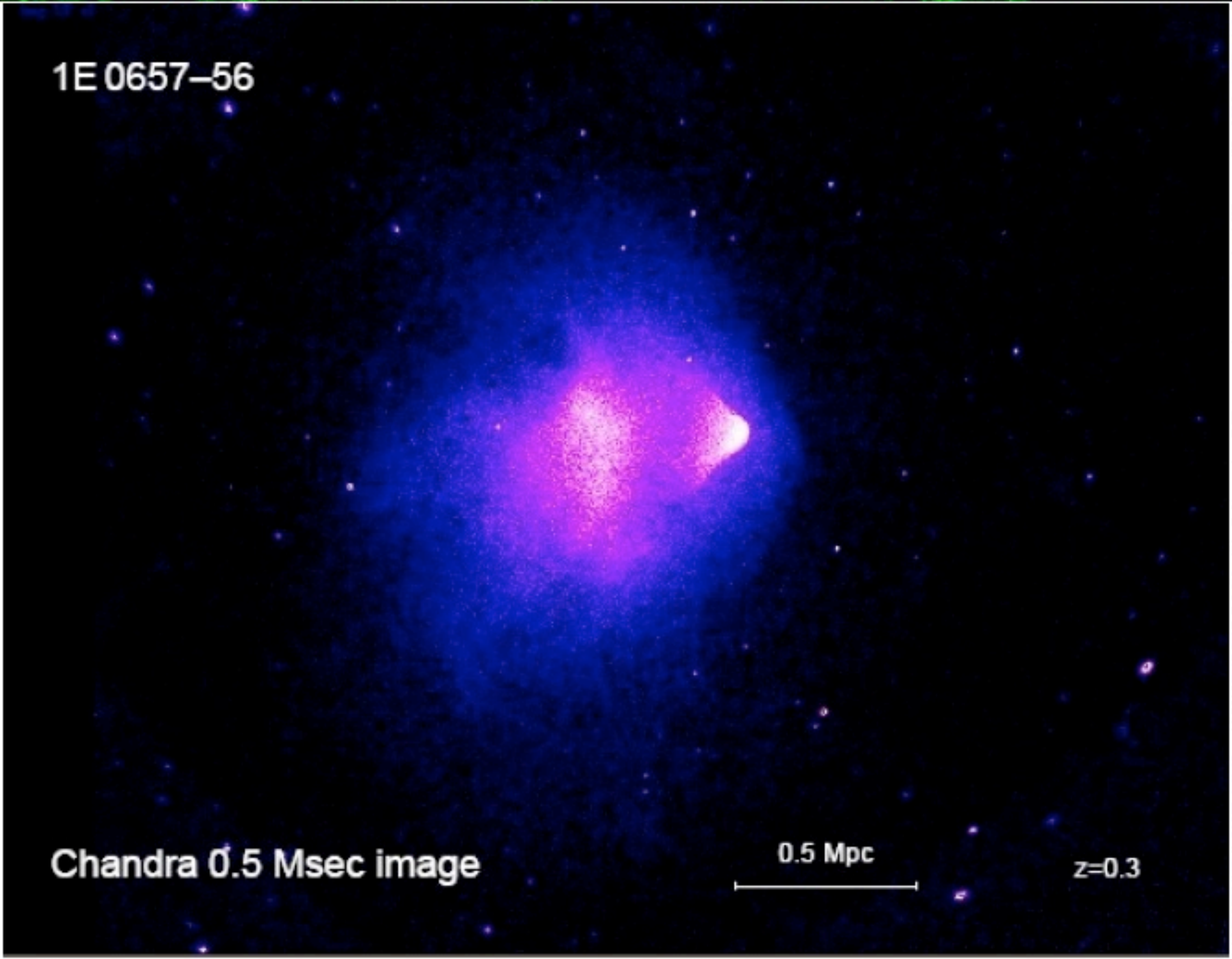


The intergalactic medium(IGM / ICM): very hot (10^7 - 10^8) and sparse





The intergalactic medium(IGM / ICM): very hot (10^7 - 10^8) and sparse



The intergalactic medium (IGM / ICM): very hot (10^7 - 10^8) and sparse

non-thermal plasma (contours)

synchrotron emission

cluster wide H field

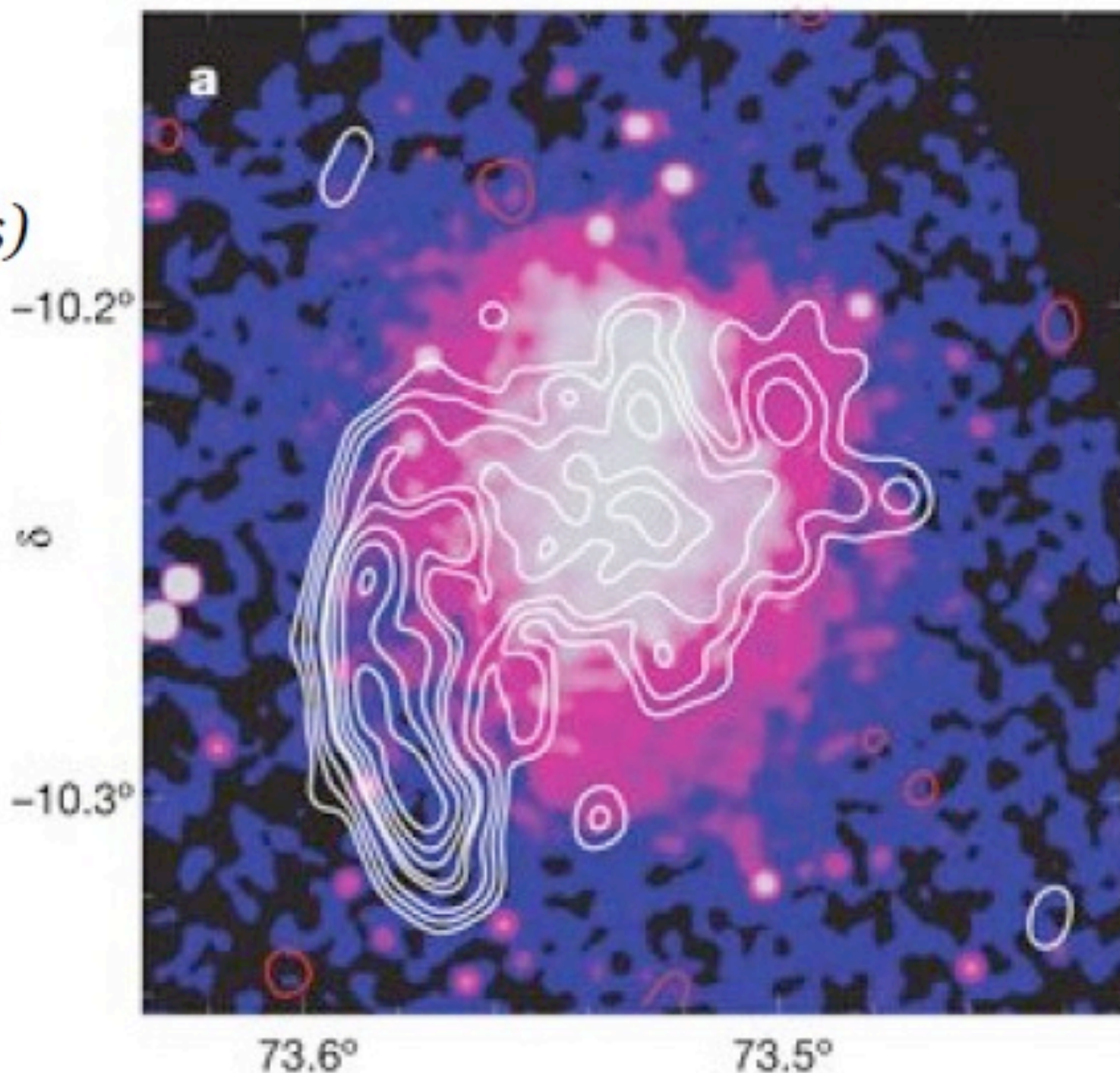
shock acceleration at cluster periphery

thermal plasma (colors)

elliptical shape \Rightarrow unrelaxed

no counterpart to the SE extended

radio emission



Brunetti et al. 2009, Nature α



Composição química do MIE

- Do espectro de linhas de emissão obtemos as abundâncias de He, C, N, O, Ne e outros elementos na fase gasosa.
- Linhas de absorção de metais indicam uma forte depleção de elementos refratários; mesmo, C, N e O são um pouco consumidos
- Em nuvens moleculares frias (isoladas da luz estelar) podem existir diversas espécies moleculares, frequentemente fragmentos muito reativos não encontrados na Terra.
- Moléculas são excelentes para estimar razões de isótopos.
- O MIE é bastante homogêneo em toda a Galáxia: a composição química de gás e poeira não varia de um fator > 2 em qualquer ponto.

Composição química do MIE

- Identificação de transições permite a estimativa da composição
- Transições não identificadas permitiram a estimativa das condições peculiares do MIE (transições proibidas...)
- Densidades pequenas, mas dimensões enormes permite a produção de transições proibidas com amplitudes detectáveis
 - Em NP: emissão UV e "proibidas"
 - Em nuvens moleculares: emissão molecular e C+



Importância da composição química

- Evolução química \Leftrightarrow taxa de formação estelar
- Estudo de NP \Leftrightarrow produção de metais
- Fase gasosa não contém 100% dos metais; % razoável sob a forma de grãos
- Processos:
 - Fotoionização
 - Recombinação
 - Excitação colisional



Moléculas no MIE

- Moléculas são traçadoras das condições físicas do ambiente em que se formam e do processo de formação de estrelas a partir de nuvens moleculares densas.
- No MIE, reações freqüentemente não são completadas devido a mudanças nas condições físico-químicas do meio. Muitas moléculas encontradas são fragmentos de tipos mais complexos encontrados na Terra.
- Reações químicas devem ser acompanhadas evento a evento.
- Reações e interações com grãos (normalmente agindo como catalisadores, aumentando enormemente a chance de uma reação ocorrer) devem ser consideradas.
- Certas transições moleculares são fortemente estimuladas ao longo de algumas direções específicas (MASERS).



Masers

- Microwave amplification of stimulated emission of radiation (semelhante ao laser)
- Baixa probabilidade de emissão espontânea, emissão estimulada imediatamente após a excitação.
- Condição facilmente satisfeita no MIE, na faixa de radio e IV, mas não no óptico.
- Principais masers: H_2O , OH e SiO
- Fontes: regiões de formação estelar e estrelas em estágios finais.



Grãos no MIE

- Principal componente absorvedor da luz visível na Galáxia
- Quais são suas propriedades ópticas?
- Quais são seus tamanhos e formas?
- De que são feitos? Como são feitos?
- Qual é sua história após a formação?
- Que papel desempenham na física do MIE?



Campos magnéticos no MIE

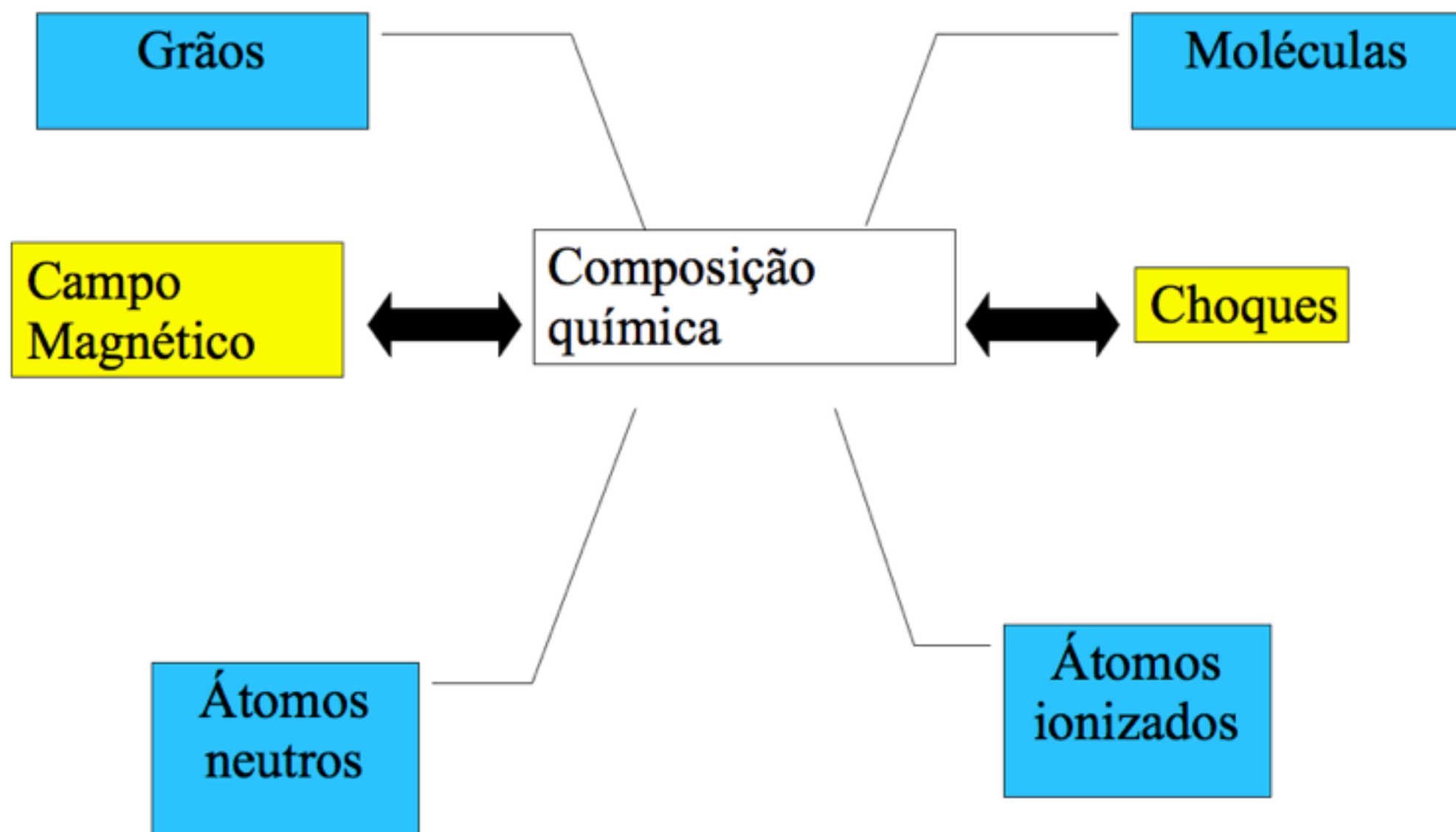
- Afeta o movimento de partículas carregadas
- Limita a atuação de raios cósmicos na Galáxia, podendo ser responsável por sua aceleração
- Pode ser responsável pela manutenção de um halo de gás atenuado e extenso em volta da Galáxia
- A energia armazenada no campo magnético Galáctico é comparável à energia cinética das partículas no MIE.
- A intensidade do campo magnético Galáctico depende fortemente da posição.



Nuvens moleculares

- Caracterização:
 - Tamanhos: 1 ~ 200 pc
 - Massas: 1000 a 1.000.000 de massas solares
 - Densidades: 30 até 10^5 cm^{-3}
 - Composição química: vários compostos de H, C, N e O
- **Locais por excelência para a formação estelar**
- Nuvens moleculares gigantes: além de formar estrelas, sua gravidade é tanta que pode alterar a dinâmica da vizinhança
- Exemplos: ρ -Ophiuchi e Sagittarius B-2

A dinâmica do meio interestelar



PR I x PR II

- Interações livre-livre x interação livre - ligado e ligado-ligado
- Processos "per se" x aplicação dos processos em situações astrofísicas
- Estudo de cargas em movimento (Eletromagnetismo) x estudo de física atômica/molecular (Mec. Quântica)