

Bloco 16

Turbulência no MI

• Referências

- ❖ Lequeux – Cap. 12
- ❖ MacLow & Klessen, REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 76, JANUARY 2004

16-1

Larguras das linhas tem componente não térmica

- A temperatura de diferentes as regiões do MI pode ser obtida através de em razões de linha, como visto em aulas anteriores
- Essas determinações baseiam-se que as populações dos níveis envolvidos nas transições estejam populadas de acordo com o equação de Boltzmann, que é função da temperatura (de excitação)
- A temperatura assim obtida não é suficiente para explicar o alargamento das linhas como um efeito puramente térmico.
- Exemplo – linhas do ^{12}CO (em nuvens moleculares)
 - ❖ $T_{\text{exc}} \sim < 10 \text{ K}$
 - ❖ velocidade térmica: $\sim 0.07 \text{ km/s}$
 - ❖ largura observada $\sim 1-10 \text{ km/s}$

16-2

- Assim, algum alargamento adicional precisa ser considerado. A explicação mais aceita atualmente é a existência de turbulência no meio interestelar.

- Além disso, as velocidades parecem obedecer a um lei de escala do tipo
 - ❖ $[v(x) - v(x+r)]^2 \propto r^\beta$
 - ❖ onde $0.8 < \beta < 1.0$
- ❖ o que também é consistente com um cenário de turbulência

16-3

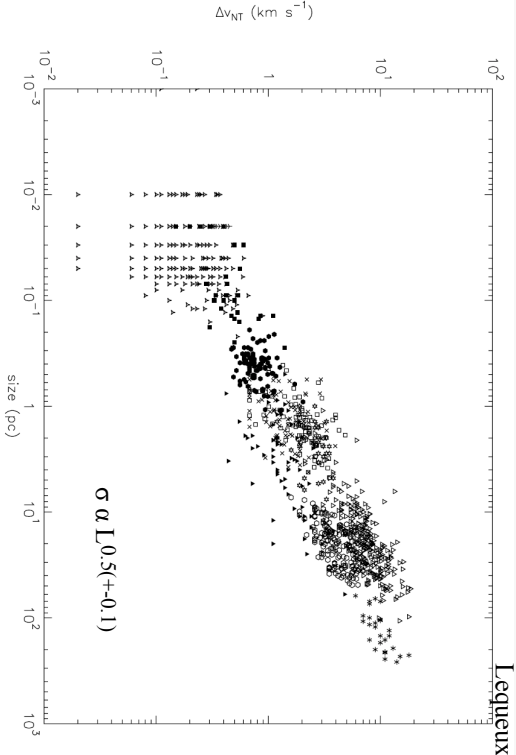
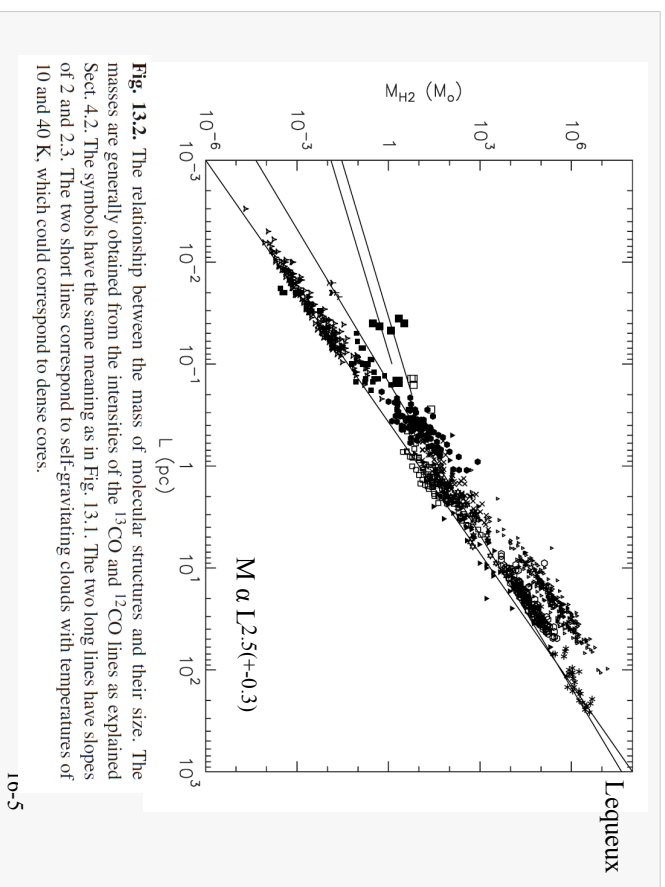


Fig. 13.1. The dispersion of the non-thermal component of interstellar velocities as a function of the size of molecular structures identified in the central region of the Galaxy (stars, empty triangles), in the third quadrant (hexagons), in the Rosette nebula (crosses), in the Madgalena cloud (small empty squares) and in other nearby clouds (other symbols). The small and large filled squares correspond to dense molecular cores in the solar neighbourhood.



10-5

Turbulência

- Podemos considerar que um fluido propaga-se de modo
 - ❖ laminar ou
 - ❖ turbulento
- ❖ vide youtube!
- ❖ fluido laminar
 - ↳ https://www.youtube.com/watch?v=p08_KITKP50
- ❖ laminar e turbulento
 - ↳ <https://www.youtube.com/watch?v=NpIrDarMDF8>
- ❖ turbulento
 - ↳ <https://www.youtube.com/watch?v=RhVu8GRVd5k>

16-6

- No movimento laminar, um ponto define uma trajetória, isto é, todas as partículas que passam por um dado ponto terão a mesma trajetória
- O movimento turbulento é caótico com velocidades/movimentos aleatórios
 - ❖ no movimento turbulento formam-se turbilhões de diferentes tamanhos, que definem as diferentes escalas de turbulência

16-7

Número de Reynolds

- O número de Reynolds, Re , mede a importância do transporte do momento por advecção com relação à difusão
- Advecção: $\rho V^2/l$
- Difusão: $\rho \nu V/l^2$
- $Re = \text{advecção}/\text{difusão}$
 - ❖ $Re = l V/\nu$
- Se $Re \gg 1$
 - ❖ podemos ter turbulência
 - ❖ a viscosidade não consegue alterar a velocidade do fluido no crossing timescale
- Turbulência associada a altas velocidades ou baixa viscosidade
- No MI , Re é sempre $\gg 1$

16-8

Turbulência incompressível

- A densidade não varia
- As velocidades são sub-sônicas
- A dissipação de energia somente nas escalas menores, quando a viscosidade (=aquecimento) passa a ser importante

16-9

Escalas

- Suponha que um turbilhão (eddy) se forma em um fluido turbulento. Esse movimento irá produzir turbilhões de tamanhos menores até que o tamanho atinja o limite para que o movimento seja laminar
- Assim, define-se as diferentes escalas do movimento turbulento
 - ❖ escala integral (a maior)
 - ❖ escalas inerciais (intermediárias)
 - ❖ escala dissipativa (a menor), quando a turbulência deixa de existir
- De fato, a energia cascateia das escalas maiores para menores até atingir a escala dissipativa

16-10

Energia

- Quando a viscosidade é alta, o movimento é atenuado e a energia cinética é transformada em calor
- No movimento turbulento, a energia cinética é transferida entre os movimentos de diferentes escalas
- Vamos definir o comprimento de onda de uma escala como
 - ❖ $k = 2\pi/l$
- Podemos mostrar que em alguns casos, a energia cinética por unidade de massa associada a escala k é
 - ❖ $E(k) \propto k^{-5/3}$
 - ✓ que é a chamada Lei de Kolmogorov

16-11

Turbulência no MI

- Não é incompressível
 - ❖ densidade varia
 - ❖ velocidades supersônicas

16-12

Table 13.1. Characteristic quantities for turbulence in the three components of the cold interstellar medium: the diffuse neutral medium, molecular clouds without star formation, and dense molecular cores. Explanations are given in the text.

Quantity	Unit	cold atomic medium	molecular clouds	dense molecular cores
$\langle n \rangle$	cm^{-3}	30	200	10^4
T_K	K	100	40	10
B	μG	10	20	100
l	pc	10	3	0.1
σ_l	km s^{-1}	≈ 3.5	1	0.1
$\lambda = l/(v_l)\sigma$	AU	2	0.03	6×10^{-4}
$c_s = \sqrt{kT/m_{\text{H}}}$	km s^{-1}	0.8	0.5	0.2
$v_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$	km s^{-1}	3.4	2.0	1.4
$v = \frac{1}{3}\lambda v_{\text{th}}$	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	2.8×10^{17}	1.8×10^{17}	9×10^{16}
$P_{\text{th}} = (n)kT_K$	erg cm^{-3}	4×10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}
$Re = lv_l/\nu$		5.7×10^7	8.1×10^6	5.4×10^4
$\frac{1}{2}\rho(v_l)^3/l$	$\text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1}$	2×10^{-25}	1.7×10^{-25}	2.5×10^{-25}
A	$\text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1}$	5×10^{-24}	4×10^{-24}	3.5×10^{-24}
$\epsilon = \frac{1}{2}(v_l)^3/l$	$\text{L}_{\odot}/\text{M}_{\odot}$	1.5×10^{-3}	1.1×10^{-4}	3.2×10^{-6}
l_d	AU	2.9	4.0	5.7
$\lambda_T = l_d^{1/3} L^{2/3}$	pc	0.34	0.38	0.42
$v_l = l(v_l)$	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	2×10^{25}	5×10^{23}	5×10^{21}
$P_l = \frac{1}{3}(\rho v_l^2)$	erg cm^{-3}	3×10^{-11}	2×10^{-11}	10^{-11}

Origem da turbulência

- Possíveis origens
 - ❖ rotação diferencial da Galáxia, $\sim \text{kpc}$
 - ❖ explosão de SNs, $\sim 100\text{pc}$
 - ❖ expansão de HII, $\sim 10\text{pc}$
 - ❖ ejeções de estrelas jovens, $\sim 0.1 \text{ pc}$
- A quantidade total de injeção de energia nos 4 casos é similar. Assim, argumentos energéticos não ajudam a discriminar.

Taxa de formação estelar

- Pode ser mostrado que a taxa de formação estelar deveria ser maior que a observada, caso não exista um processo que contrabalance a força gravitacional
- A turbulência é um dos mecanismos sugeridos para diminuir a taxa de formação estelar