

Astronomia Osservativa C

Mezzo interstellare

Pianeti

Astrobiologia

Introduzione allo studio del Mezzo Interstellare

Lezione ISM 1

G. Vladilo

Bibliografia essenziale

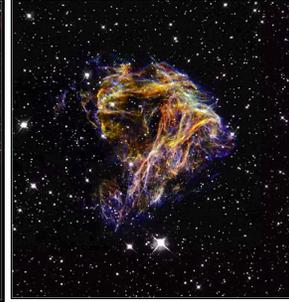
- **Alcuni testi classici**
 - L. Spitzer
Physical processes in the Interstellar Medium
Testo generale e fondamentale, sebbene datato dal punto di vista osservativo
 - D. Osterbrok
Astrophysics of Gaseous Nebulae
Testo specializzato sulle proprietà fisiche del mezzo circumstellare
- **Un testo recente**
 - J. Lequeux
The Interstellar Medium
- **Altri corsi**
 - E. F. van Dishoeck
Master course: Interstellar Medium

Cenni storici

- **Principali scoperte osservative**
 - Ottenute da una grande varietà di tecniche osservative
 - Evidenziano diversi tipi di meccanismi di emissione e di assorbimento della radiazione elettromagnetica
 - Nebulose in emissione
 - Nubi oscure
 - Mezzo interstellare diffuso
 - Raggi cosmici
 - Estinzione interstellare
 - Righe molecolari
 - Riga in emissione di HI a 21 cm
 - Righe in emissione di CO nella banda sub-mm
 - Spettroscopia di righe in assorbimento UV (H_2 , OVI, ...)
 - Emissione di gas coronale nella banda X
 - Emissione di sincrotrone
 - Emissione nei raggi γ

Nebulose in emissione

- **W. Herschel, ~1800, e altri cataloghi del XIX secolo**
 - cataloghi di “nebulae” in emissione
- **Oggi sappiamo che tali cataloghi includevano oggetti estremamente eterogenei**
 - nebulose Galattiche
 - oggetti extragalattici (galassie)
- **Le nebulose Galattiche scoperte erano essenzialmente regioni circumstellari**
 - Nebulose a riflessione
Scattering di fotoni stellari non ionizzanti
 - Nubi ionizzate
Radiativamente o collisionalmente



Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

5

Nubi oscure

- **Barnard, 1919**
 - catalogo delle “dark nebulae”
Al momento della scoperta l’interpretazione era dubbia:
“Buchi” nella distribuzione di stelle o materia che oscura le stelle retrostanti?

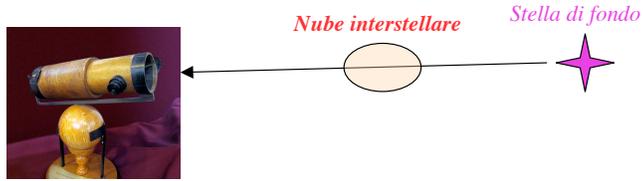
Dark cloud B68 ESO-VLT Alves et al. (2001)



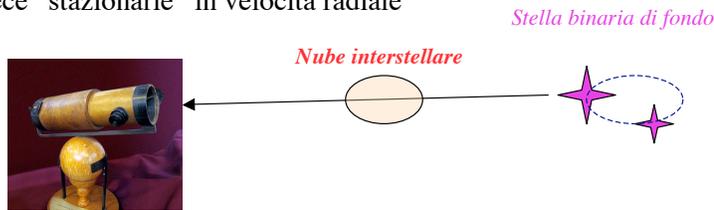
Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

6

Scoperta del mezzo interstellare diffuso



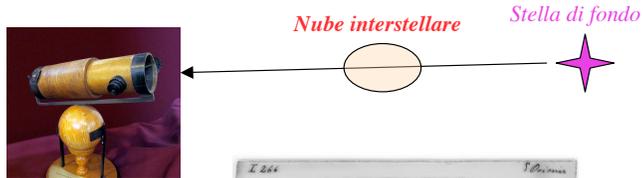
- **Nascita della spettroscopia interstellare**
 - Discriminazione delle righe interstellari, rispetto a quelle stellari, dall'analisi delle velocità radiali
 - Componente del vettore velocità lungo la direzione tra l'osservatore e la sorgente astronomica
 - Le nubi interstellari avranno, in generale, una velocità radiale diversa rispetto a quella della stella
 - Se la stella è una binaria spettroscopica, le sue righe di assorbimento oscilleranno in velocità radiale con un periodo uguale a quello orbitale; le righe interstellari saranno invece "stazionarie" in velocità radiale



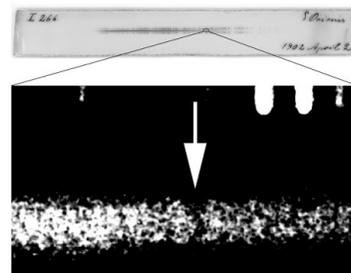
Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

7

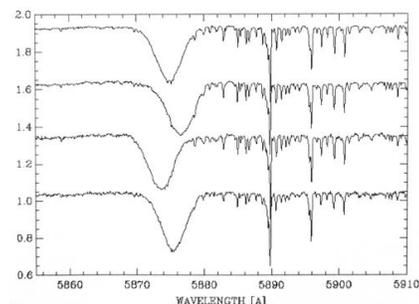
Scoperta del mezzo interstellare diffuso



- **Nascita della spettroscopia interstellare**
- **Hartmann, 1904**
 - Righe in assorbimento "stazionarie" di CaII nello spettro della binaria spettroscopica δ Ori
 - Origine circumstellare o interstellare?
- **Plaskett & Pearce, 1933**
 - L'assorbimento di CaII diventa più intenso all'aumentare della distanza delle stelle di fondo
 - Dimostrata l'origine interstellare



Esempio nella figura a destra:
Righe stazionarie di NaI nello spettro di δ Ori



Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

8

Scoperta dei raggi cosmici

- **Componente di particelle di alta energia nel mezzo interstellare**
 - Non si rivela con i classici metodi di astronomia osservativa
 - Ne accenniamo l'esistenza per completezza
 - Indicatrice della presenza di processi di alta energia diffusi su scala Galattica

Scoperta dei raggi cosmici

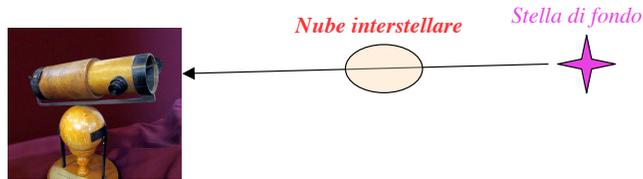
- **Hess, 1912**
 - “Radiazione” di natura sconosciuta scoperta nell'alta atmosfera mediante voli su pallone
 - Origine non solare
- **Clay, 1927**
 - Dimostrato che si tratta di particelle cariche di alta energia: “raggi cosmici”
- **~1950**
 - Dimostrato che si tratta principalmente di protoni e particelle α
 - Oggi si ritiene siano per la maggior parte emessi in eventi esplosivi Galattici e siano accelerati dal campo magnetico Galattico

Victor Hess before his 1912 balloon flight in Austria, during which he discovered cosmic rays



Scoperta dell'estinzione interstellare

- Il mezzo interstellare interposto tra l'osservatore e la stella indebolisce la luce della stella
 - L'estinzione diminuisce con la lunghezza d'onda
 - Profonderemo questo aspetto in una prossima lezione



Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

11

Scoperta dell'estinzione interstellare

TABLE 10

DEPENDENCE OF LINEAR DIAMETER ON DISTANCE

Observed distance in parsecs				Cl. with app. diam. 10'-20'			Cl. with app. diam. 20'-40'			True distance in parsecs	Eff. of abs. A	Residual $v'-A$	Second approx. Average v''
Interval	Mean	Average residual v'	Weight	Mean d'	Average v''	Weight	Mean d	Average v''	Weight				
<500	294	-.09	20	20'	-.17	1	31'	-.14	5	266	-.09	.00	-.01
500-1000	730	-.05	26.5	16	-.10	8.5	29	-.02	15.5	594	-.04	-.01	-.02
1000-1500	1200	+.01	13.5	15	-.01	5.5	29	+.03	6	870	.00	+.01	+.01
1500-2000	1620	+.08	6	15	+.07	4.5	22	+.26	1	1050	+.03	+.05	+.05
2000-3000	2460	+.06	13.5	13	+.11	3.5	27	+.05	4	1500	+.10	-.04	-.03
>3000	3850	+.19	8.5	15	+.13	3	25	+.33	0.5	1890	+.16	+.03	+.04

- **Trumpler (1930)**

- Analisi statistica di ammassi aperti
- Il diametro lineare di ammassi simili sembra decrescere con la distanza
 - Se la nostra posizione nella Galassia non è privilegiata, il risultato implica l'esistenza di qualche forma di assorbimento della luce che aumenta con la distanza
- Dimostrata l'esistenza dell'estinzione interstellare
 - Distanza di ammassi aperti è sovrastimata: diametro lineare sottostimato

5. The assumption that clusters of the same constitution have everywhere the same linear diameters leads to the conclusion that within the Milky Way system light is subject to an absorption of 0^m67 (photographic) per 1000 parsecs.

6. The discrepancy between color-indices and spectral types observed in open clusters increases with the distance of the cluster and shows that this absorption of light is selective, the photographic absorption coefficient being about twice the visual.

7. The absorption is effective in all galactic longitudes but seems to take place mainly in a thin layer extending along the galactic plane.

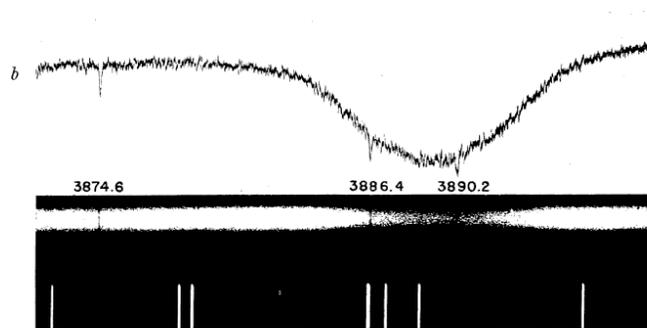
Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

12

Prime molecole interstellari

- Swings & Rosenfeld, McKellar, 1937-1940
- Adams, 1941
 - Molecole molto semplici
CH, CH⁺, CN

Esempio
CH e CN in ζ Oph



INTERSTELLAR LINES
a) α Cygni showing interstellar H and K superposed upon stellar lines; b) ζ Ophiuchi, positive reproduction of stellar and comparison spectra, with photometric tracings. Two lines of CH are shown, λ 3886 and λ 3890; also λ 3874.6 and a trace of λ 3874.6, both probably CN.

Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

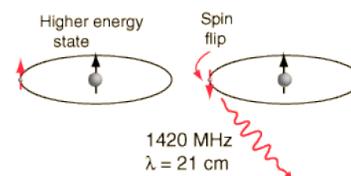
13

Riga di emissione a 21 cm

- Van de Hulst, 1945
 - Predizione dell'esistenza della riga di HI a 21 cm

Transizione tra due possibili stati di accoppiamento degli spin del protone e dell'elettrone

spin paralleli (energia del sistema più alta)
antiparalleli (energia più bassa)

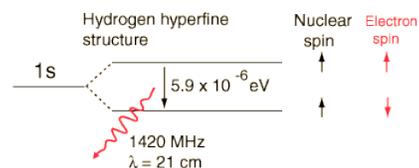


- Transizione proibita
- Coefficiente di Einstein di emissione spontanea

$$A_{ul} = 2.87 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$$

Tempo di vita del livello superiore

$$t = 1/A_{ul} = 1.1 \times 10^7 \text{ yr}$$



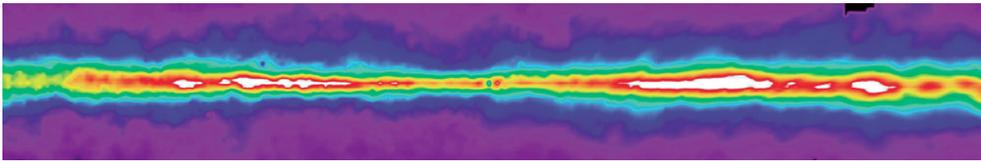
- Ewen & Purcell, Oort & Muller, 1951
 - Scoperta della riga a 21 cm

Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

14

Riga di emissione a 21 cm

- Prime mappe Galattiche: anni '50 e '60
- Principali caratteristiche
 - Idrogeno neutro concentrato nel piano Galattico
Altezza di scala del gas freddo ~ 210 pc (Malhotra, 1995)
 - Il disco di HI contiene $5 \times 10^9 M_{\text{sun}}$ di gas
 $\sim 10\%$ della massa totale del disco
 - La densità media è $\langle n \rangle \sim 1$ atomo cm^{-3}

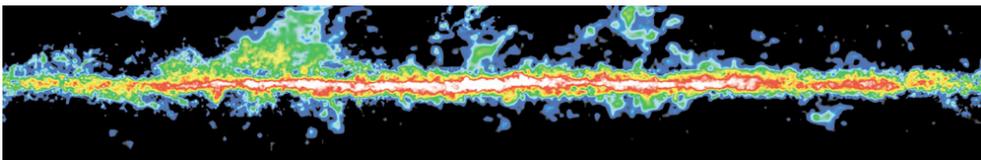


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

15

Righe di emissione molecolari

- 1965
 - OH, NH_3 , H_2O
Nella banda radio
- 1970
 - Scoperta dell'emissione CO
 $J=1-0$ a 2.6 mm
- Anni '70 e '80
 - Mappe della distribuzione Galattica del CO
Traccianti dell'idrogeno molecolare
 H_2 non ha transizioni nella banda radio

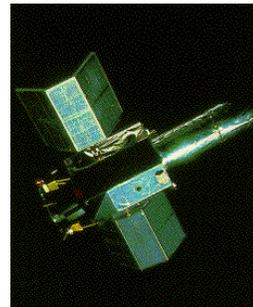
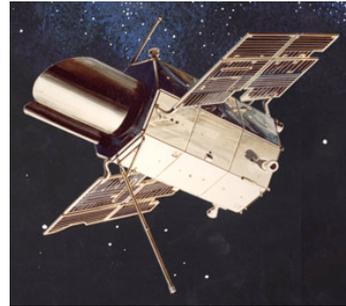


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

16

Spettroscopia ultravioletta ad alta risoluzione

- Le righe interstellari degli elementi più abbondanti cadono nell'UV
 - Solo con l'avvento dell'astronomia UV è stato possibile misurare le densità colonnari degli elementi chimici nel gas interstellare
- 1973-1980: satellite Copernicus
- 1978-1996 (!): satellite IUE
- HST
 - all'origine pensato proprio per il mezzo interstellare
- FUSE

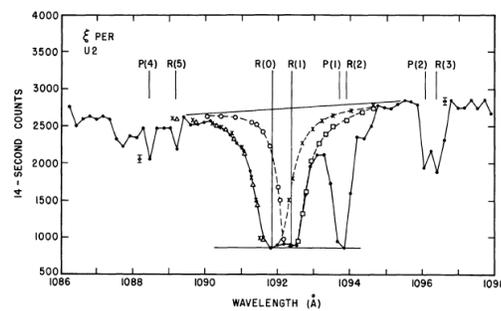


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

17

Righe in assorbimento nell'UV Righe di H₂

- Prime misure dell'idrogeno molecolare
 - Transizioni elettroniche di H₂ nell'estremo UV

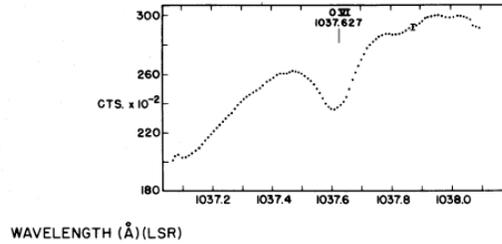
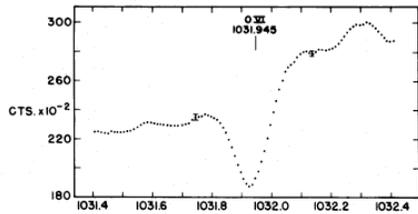


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

18

Righe in assorbimento nell'UV Specie atomiche altamente ionizzate

- Evidenza osservativa di gas interstellare di alta temperatura
 - Esempi di specie altamente ionizzate
OVI, NV, CIV

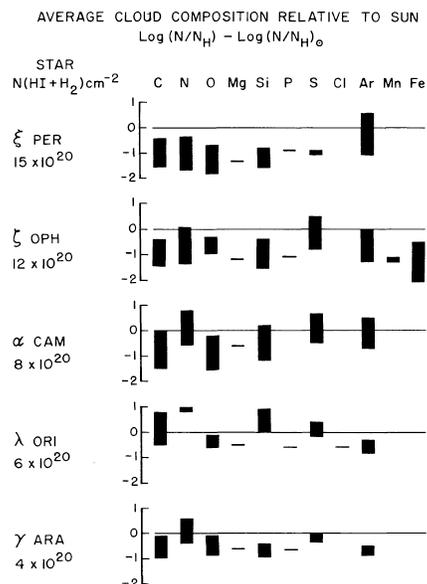


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

19

Righe in assorbimento nell'UV Abbondanze chimiche del gas interstellare

- Prime misure di abbondanze interstellari
 - Grazie al fatto che nella banda UV si riescono a misurare le righe dei principali stati di ionizzazione degli elementi abbondanti
 - Per molti elementi chimici le abbondanze nel gas risultano essere inferiori a quelle solari
Deplezioni interstellari

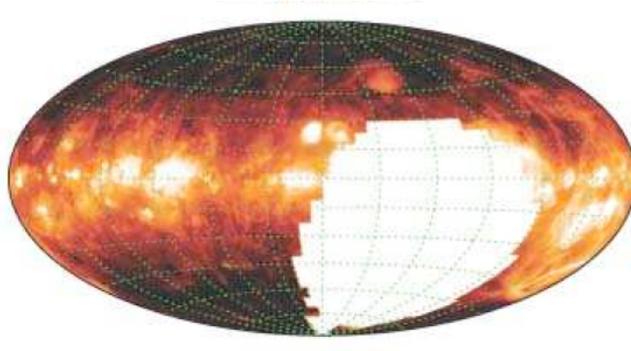


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

20

Emissione diffusa di H α

- Reynolds, 1980
- Mappe ad alta risoluzione di H α
 - Evidenza di una componente diffusa di idrogeno ionizzato
Da non confondere con le regioni HII classiche (circumstellari)
Emissione molto debole
Si estende molto fuori dal piano Galattico (altezza di scala: 1 kpc)



Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

21

Emissione infrarossa

- 1983, satellite IRAS
 - Mappa di tutto il cielo a 12, 25, 60 e 100 μm
 - Evidenza di emissione termica di polvere interstellare
 - La polvere si riscalda a causa dell'assorbimento di radiazione di origine stellare
 - L'emissione è concentrata sul piano Galattico
 - Scoperti anche "cirri" (nubi IR) fuori dal piano Galattico

Composite mid-and far-infrared intensity observed by the in 12, 60, and 100 μm wavelength bands

The display here is a mosaic of IRAS Sky Survey Atlas images.
Emission from interplanetary dust in the solar system, the "zodiacal emission,"
was modeled and subtracted in the production of the Atlas

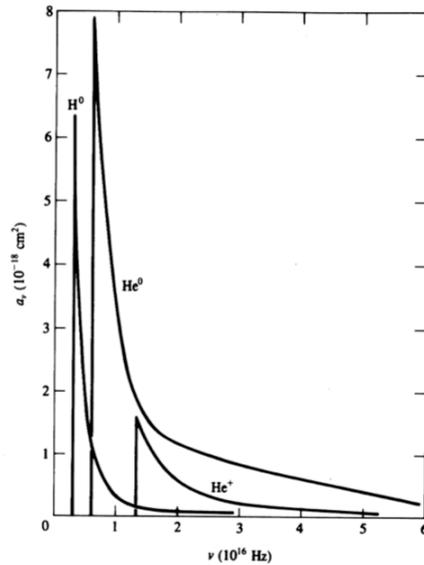


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

22

Trasparenza del gas interstellare nelle bande dell'estremo UV e X

- Dominata dallo stato di ionizzazione dell'idrogeno
 - Idrogeno neutro
 - Gas fortemente opaco a fotoni con energia > 13.6 eV (potenziale di ionizzazione dell'idrogeno)
 - Totalmente opaco nel lontano ultravioletto (Far UV)
 - La sezione d'urto di fotoionizzazione va come ν^{-3}
 - Il gas diventa trasparente nel soft-X e a energie maggiori
 - Idrogeno totalmente ionizzato
 - Gas interstellare trasparente
 - Concetto importante non solo per lo studio del mezzo interstellare ma, più in generale, anche per quello del mezzo intergalattico

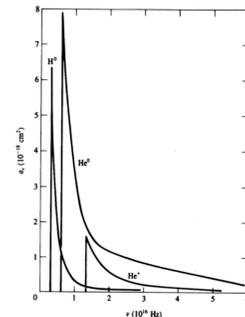


Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

23

Emissione diffusa nel soft X

- Satellite ROSAT
 - Tre bande soft X-ray centrate a 0.25 , 0.75, and 1.5 keV
- Emissione diffusa
 - Evidenza di gas coronale scaldato collisionalmente
- Zone di assorbimento
 - Alle energie più basse il mezzo interstellare assorbe fortemente i raggi X
 - Si vedono nubi fredde di gas interstellare come ombre sullo sfondo dell'emissione X di fondo



Soft X-ray bands centered at 0.25 , 0.75, and 1.5 keV are encoded in the red, green, and blue color ranges, respectively
 Color variations indicate variations of absorption or of the temperatures of the emitting regions
 The black regions indicate gaps in the ROSAT survey



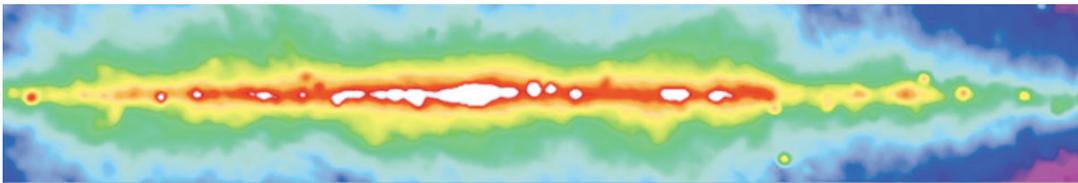
Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

24

Emissione nel continuo radio

- **Emissione di sincrotrone**
 - Prodotta da elettroni che si muovono a velocità relativistiche spiralandolo nel campo magnetico galattico
- La radiazione è linearmente polarizzata
- Gli elettroni sono accelerati dalle onde d'urto generate dalle esplosioni di supernovae

Radio Continuum (408 MHz)
Intensity of radio continuum emission from high-energy charged particles in the Milky Way
from surveys with ground-based radio telescopes
(Jodrell Bank Mark I and Mark IA, Bonn 100-meter, and Parkes 64-meter)



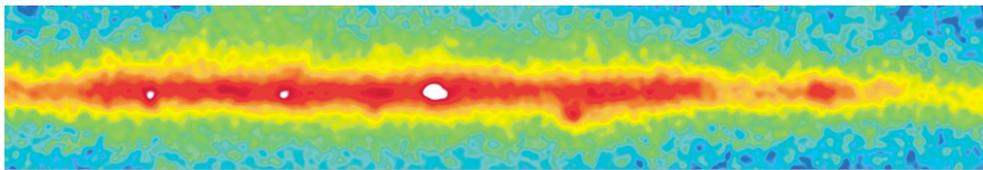
Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

25

Mapa di emissione nei raggi γ

- **Esempio: strumento EGRET su CGRO**
 - Mappa dei fotoni con energie > 300 MeV
 - A queste energie estreme la maggior parte di eventi si origina in collisioni di raggi cosmici con nuclei di idrogeno in nubi interstellari

The bright, compact sources near Galactic longitudes 185° , 195° , and 265° indicate high-energy phenomena associated with the Crab, Geminga, and Vela pulsars, respectively.



Astronomia Osservativa C, ISM 1, Vladilo (2011)

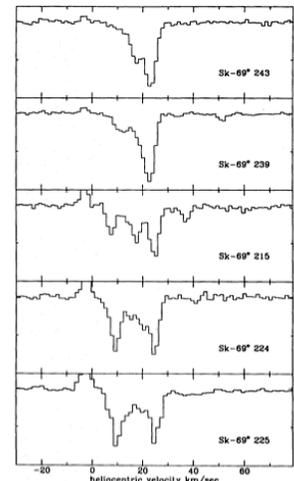
26

Distribuzione della materia interstellare su piccola scala

- **Omogeneità/disomogeneità del mezzo interstellare**
 - Diversi tipo di osservazioni dimostrano che il mezzo interstellare è fortemente disomogeneo
 - Risultato di processi di turbolenza
 - Descrizione teorica molto complessa
- Vediamo un esempio di tecnica osservativa atta a rilevare la disomogeneità del gas interstellare

Disomogeneità del gas interstellare Confronto di spettri interstellari di stelle angularmente vicine

- **Campi stellari affollati**
 - Ammassi stellari, galassie vicine
- **Esempio**
 - Studio effettuato usando come stelle di fondo supergiganti brillanti delle Nubi di Magellano
 - Le stelle si trovano a distanze angolari di pochi arcminuti
 - Le nubi interstellari di bassa velocità LSR si trovano a meno di 100 pc
 - La forte variabilità dell'intensità degli assorbimenti indica pertanto l'esistenza di disomogeneità delle nubi su scale inferiori a 0.2 pc
 - Esempio da Molaro et al. (1993)
- **Esiste evidenza osservativa per disomogeneità anche su scale minori a 0.1 pc**



Riassunto

Costituenti del mezzo interstellare

- **Regioni circumstellari**
 - Nebulose di vario tipo
 - Nebulose a riflessione, Regioni HII, Nebulose Planetarie, Resti di Supernova, etc.
- **Mezzo interstellare diffuso**
 - Gas ($\approx 99\%$ in massa)
 - Atomico, ionizzato, molecolare
 - Enormi intervalli di temperatura e densità
 - Polvere ($\approx 1\%$ in massa)
 - Altre componenti
 - raggi cosmici, campi magnetici, ...
 - Laboratorio di fisica particolarmente interessante