

ISM



Milchstraße im dem Tal des Todes aufgenommen (Wikipedia)

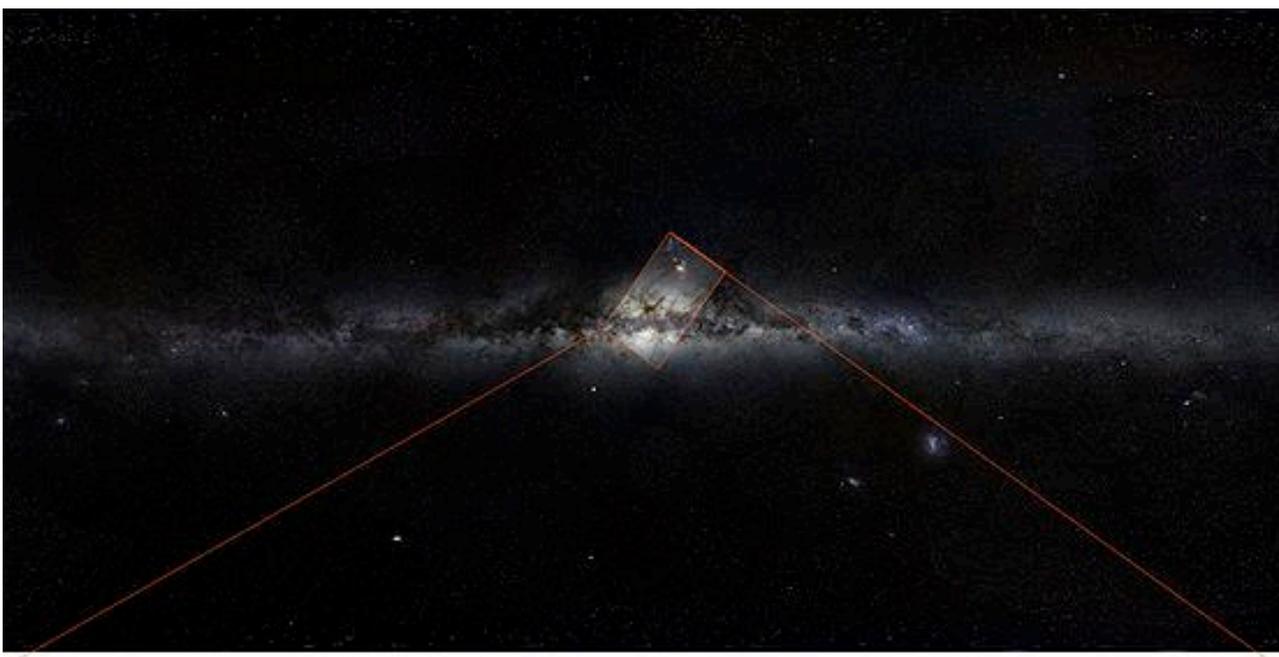
Ralf Klessen

Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg



10.01.2013
Ralf Klessen

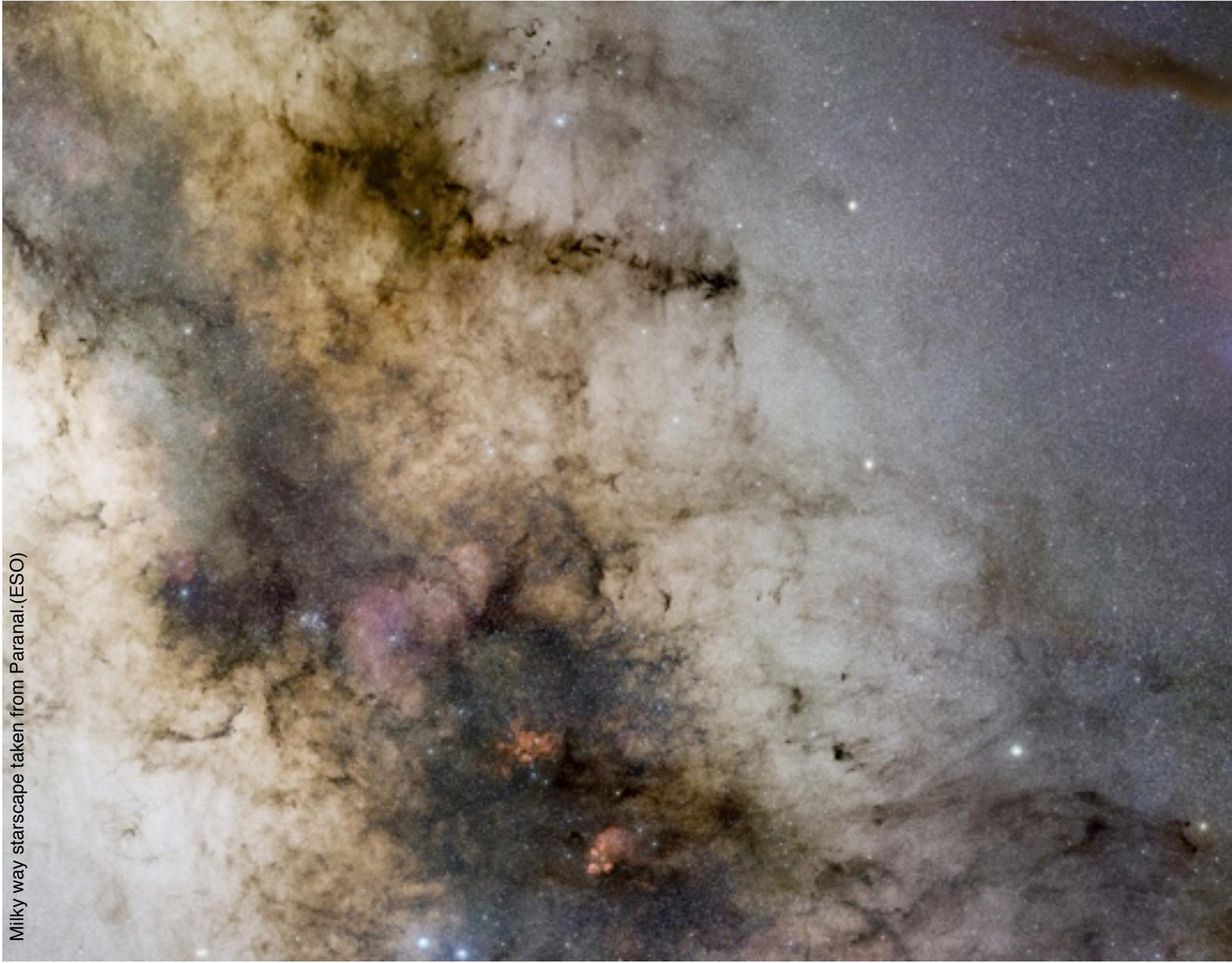
Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)



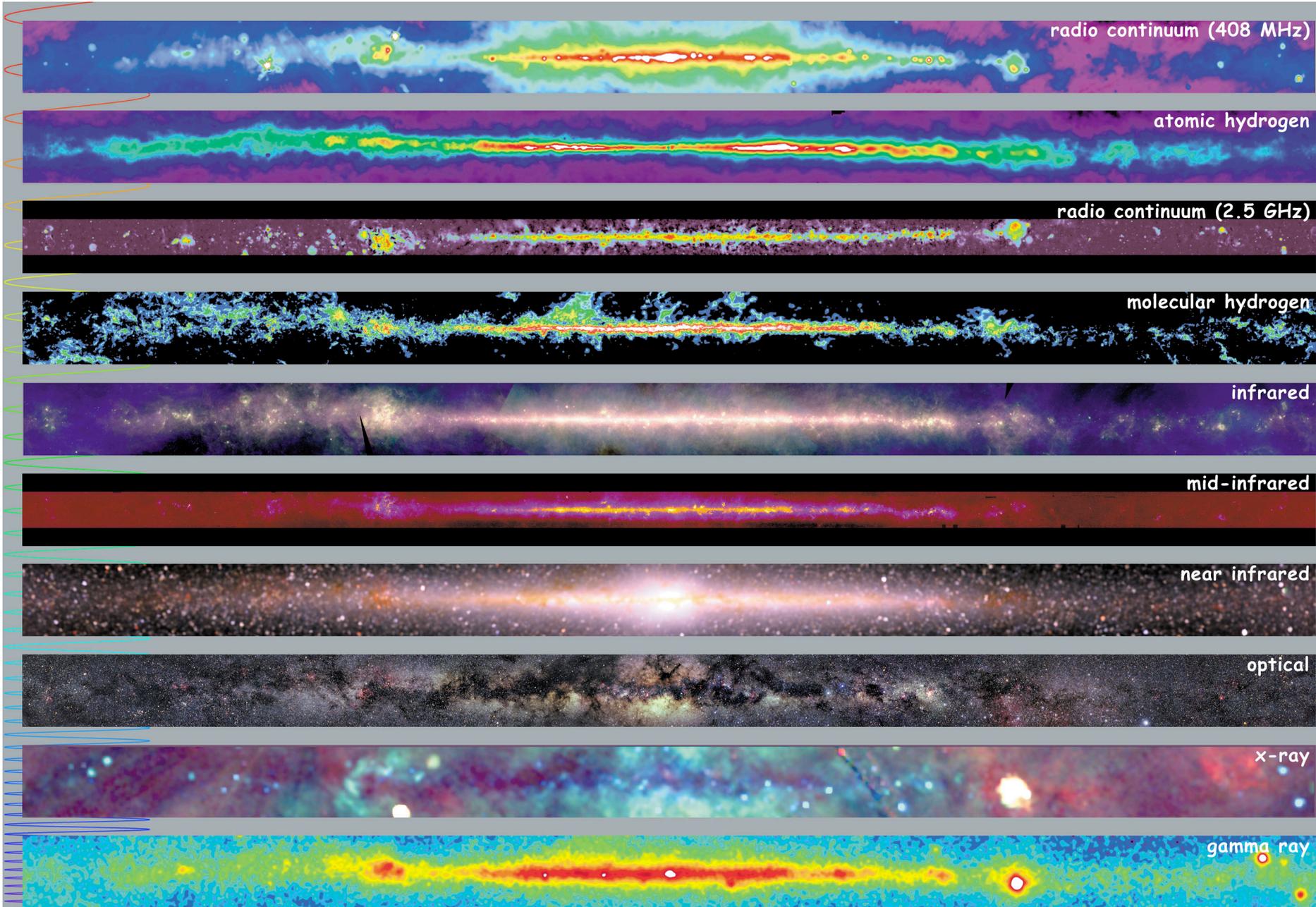


Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)

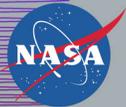
Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)



- **Inventar der Galaktischen Scheibe**
 - **Stellare Scheibe**
 - **Dicke Scheibe** (80% der Masse): Sterne jeden Alters 0-12Gyr
 - **Dicke Scheibe** (5% der Masse): ältere Sterne mit geringerer Metallizität
 - **Interstellares Medium (ISM)**
 - **Gas** (15% der Masse): drei Komponenten: heiß, warm, kalt (ionisiert, atomar und molekular)
 - **Staub** (<1% der Masse): gut durchmischt im kalten Gas
 - **Kosmische Strahlung**: relativistische Teilchen (Protonen, einige Elektronen)
 - **Magnetfelder**: Ideale MHD, Feldlinien im Material “eingefroren”, Energiedichte im Magnetfeld vergleichbar mit kinetischer Energie



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

10.01.2010
Ralf Klessen

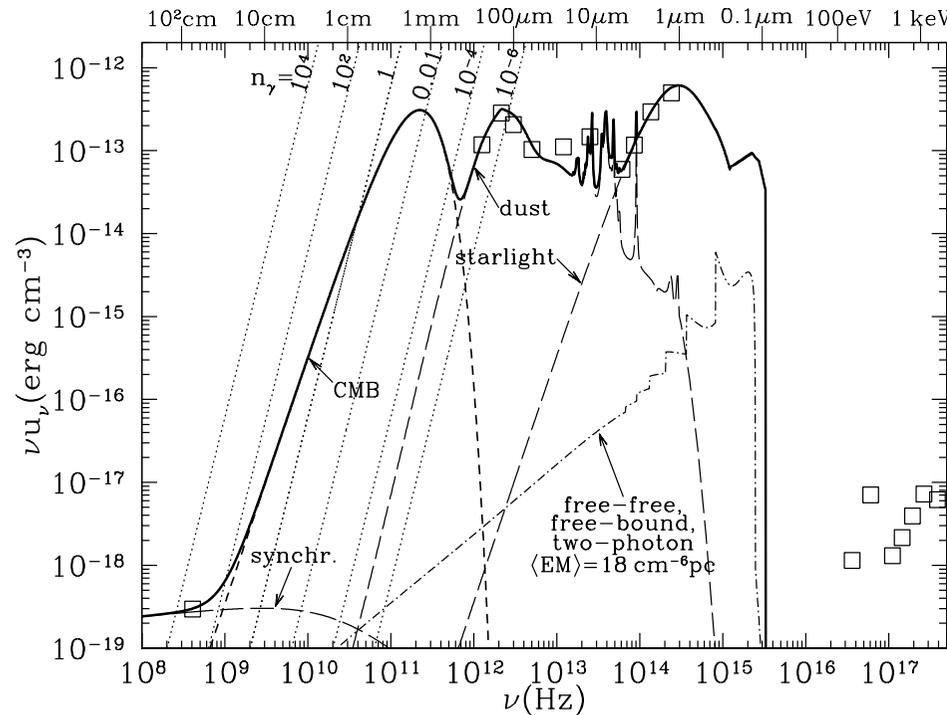
Interstellares Strahlungsfeld

Unterschiedliche Wellenlängen liefern unterschiedliche Informationen.

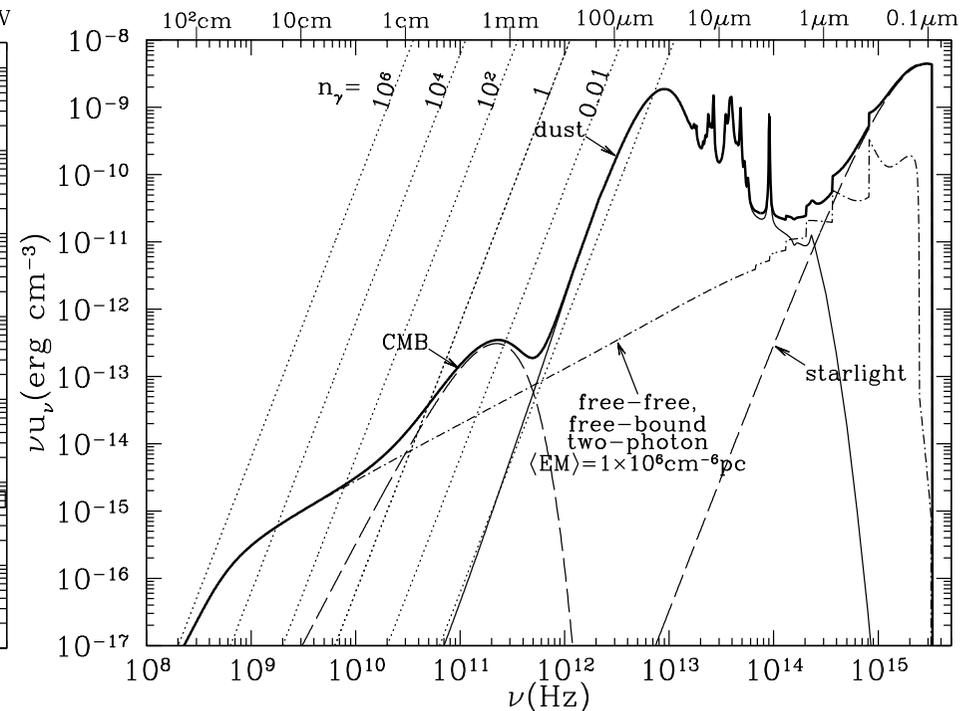
→ Astronomen beobachten das gesamte elektromagnetische Spektrum

- **Radiostrahlung:** interstellares Gas (Linienemission -> Geschwindigkeitsinformation)
- **sub-mm Bereich:** Staub (thermische Emission)
- **infrarot & optisch:** Sterne
- **Röntgen:** Sterne (Coronae), Supernovae Reste (sehr heißes Gas)
- **γ -Strahlung:** Supernovae Reste (radioaktiver Zerfall, z.B. ^{26}Al), kompakte Objekte, Verschmelzen von Neutronensternen (Gamma-Ray-Burst)

Interstellares Strahlungsfeld



Normale HI Wolke in Sonnenumgebung



In der Nähe eines massereichen Sterns

- Kosmische Hintergrundstrahlung bei kleinen Frequenzen (im mm-Bereich)
- Staub im μm -Bereich
- Sternlicht im Infraroten und Optischen (bis UV und naher Röntgen-Bereich)

Interstellare Materie (ISM)

Häufigkeit bezogen auf 1.000.000 Wasserstoff-Atome

Element Ordnungszahl kosmische Häufigkeit

Wasserstoff	H	1	1.000.000
Deuterium	1H^2	1	16
Helium	He	2	68.000
Kohlenstoff	C	6	420
Stickstoff	N	7	90
Sauerstoff	O	8	700
Neon	Ne	10	100
Natrium	Na	11	2
Magnesium	Mg	12	40
Aluminium	Al	13	3
Silicium	Si	14	38
Schwefel	S	16	20
Calcium	Ca	20	2
Eisen	Fe	26	34
Nickel	Ni	28	2

Wasserstoff ist das häufigste Element (mehr als 90% aller Atome). Im Vergleich zur kosmischen Häufigkeit sind manche Elemente im ISM seltener, d.h. abgereichert. Ein Teil ihrer Atome befinden sich nicht mehr in der Gasphase, sondern in Staubteilchen.

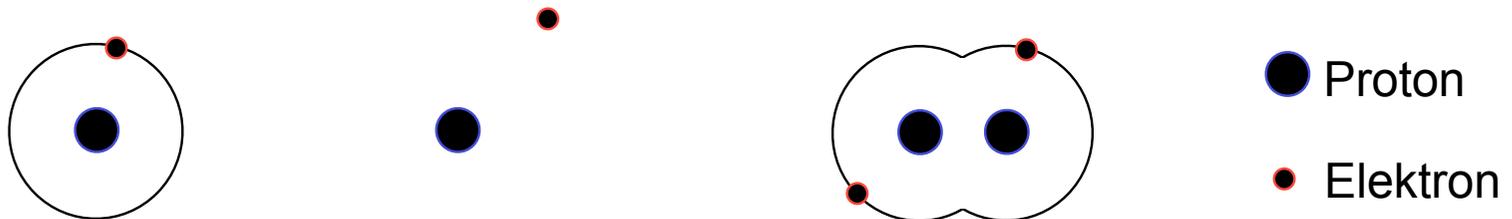
Phasen der ISM

Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)
Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
Molekularer Wasserstoff H₂

Ionisation
Phasenübergang

Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, HI und H₂ sehr dünn sind.



Phasen der ISM

Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)

Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)

Molekularer Wasserstoff H₂

Ionisation
Phasenübergang

Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und H₂ sehr dünn sind.



Phasen der ISM

Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

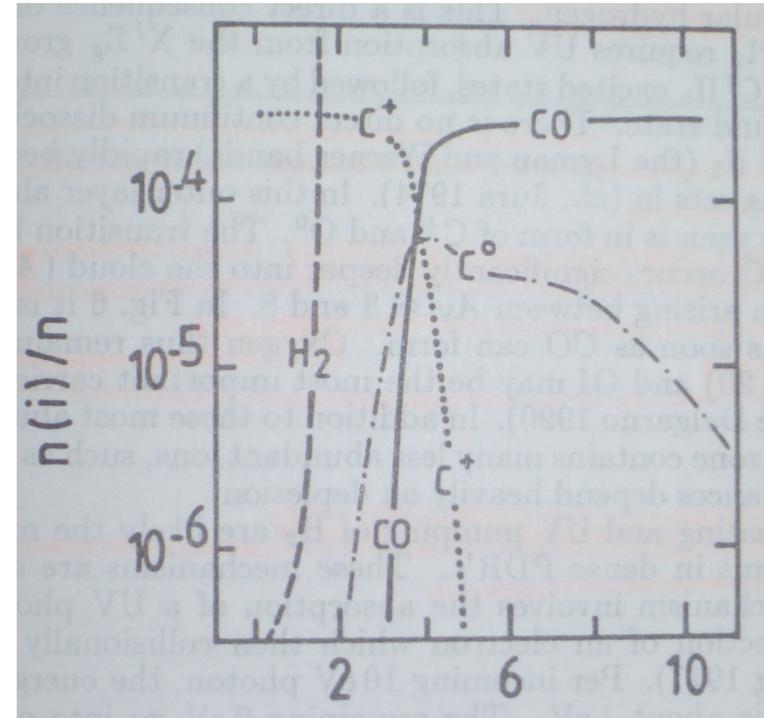
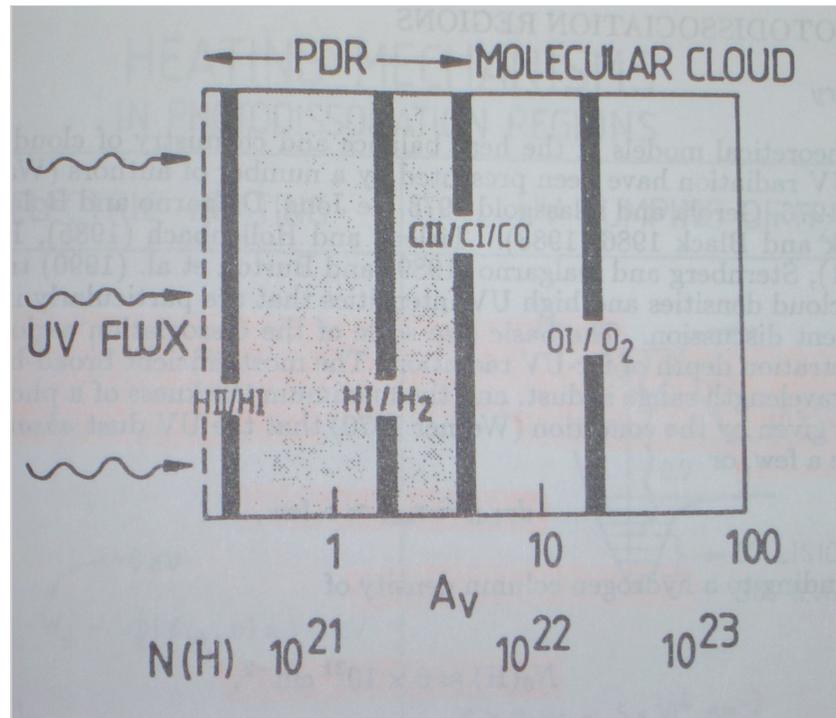
Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)
Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
Molekularer Wasserstoff H₂



Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und H₂ sehr dünn sind.

Der größte Teil (ca. 80%) des ISM machen HI und HII-Gebiete niedriger Dichte aus. H₂ befindet sich in *Molekülwolken*, die oft von HII-Gebieten hoher Dichte begleitet werden. In der Milchstraße entstehen Sterne immer in Molekülwolken!

Phasen der ISM



A_V bezeichnet die Extinktion, dh. die Abschwächung der einfallenden Strahlung.

Veil Nebula Details





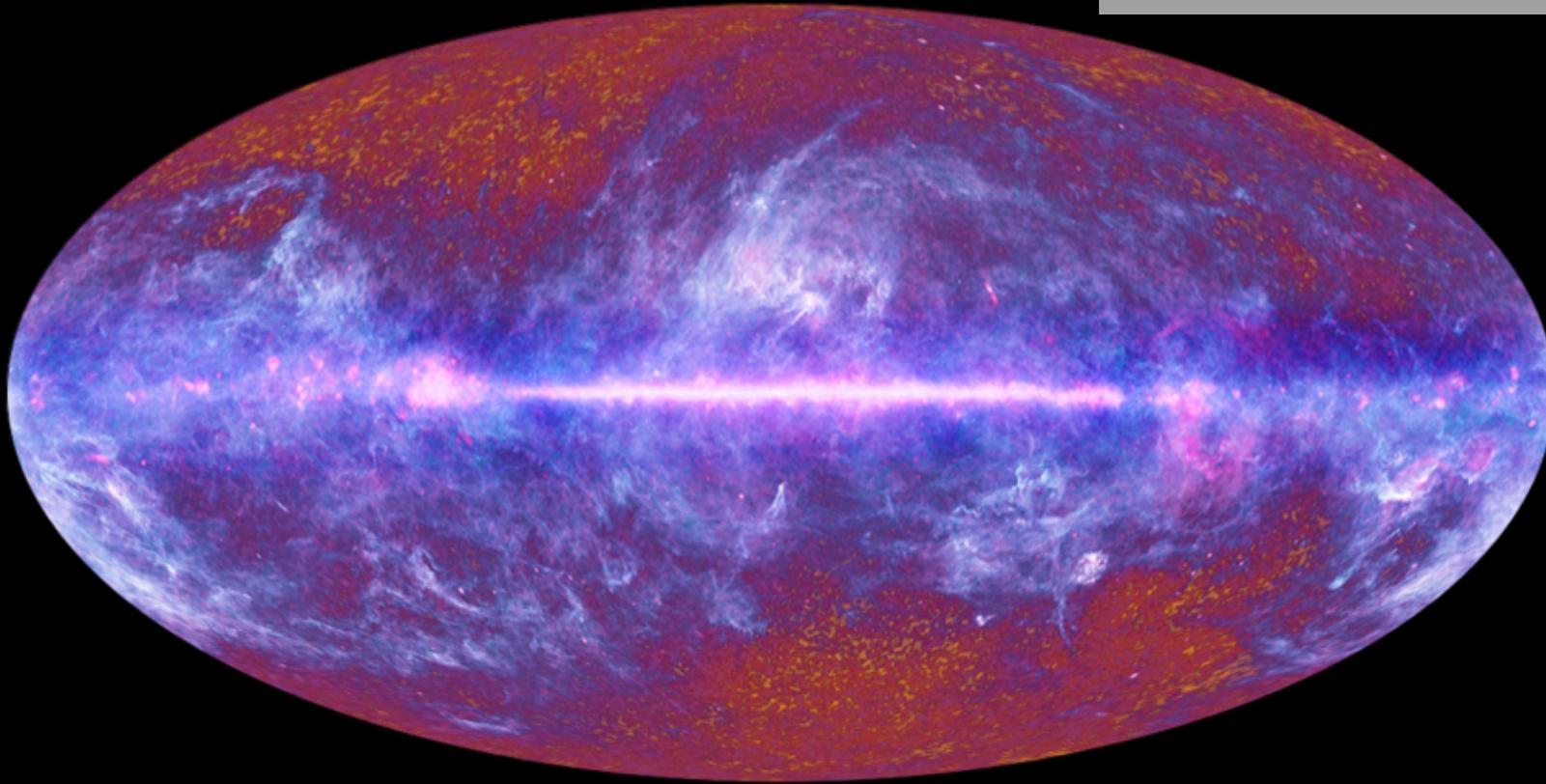
Carina mit HST und CTIO

Staub

Staub in Absorption



Staub in Emission

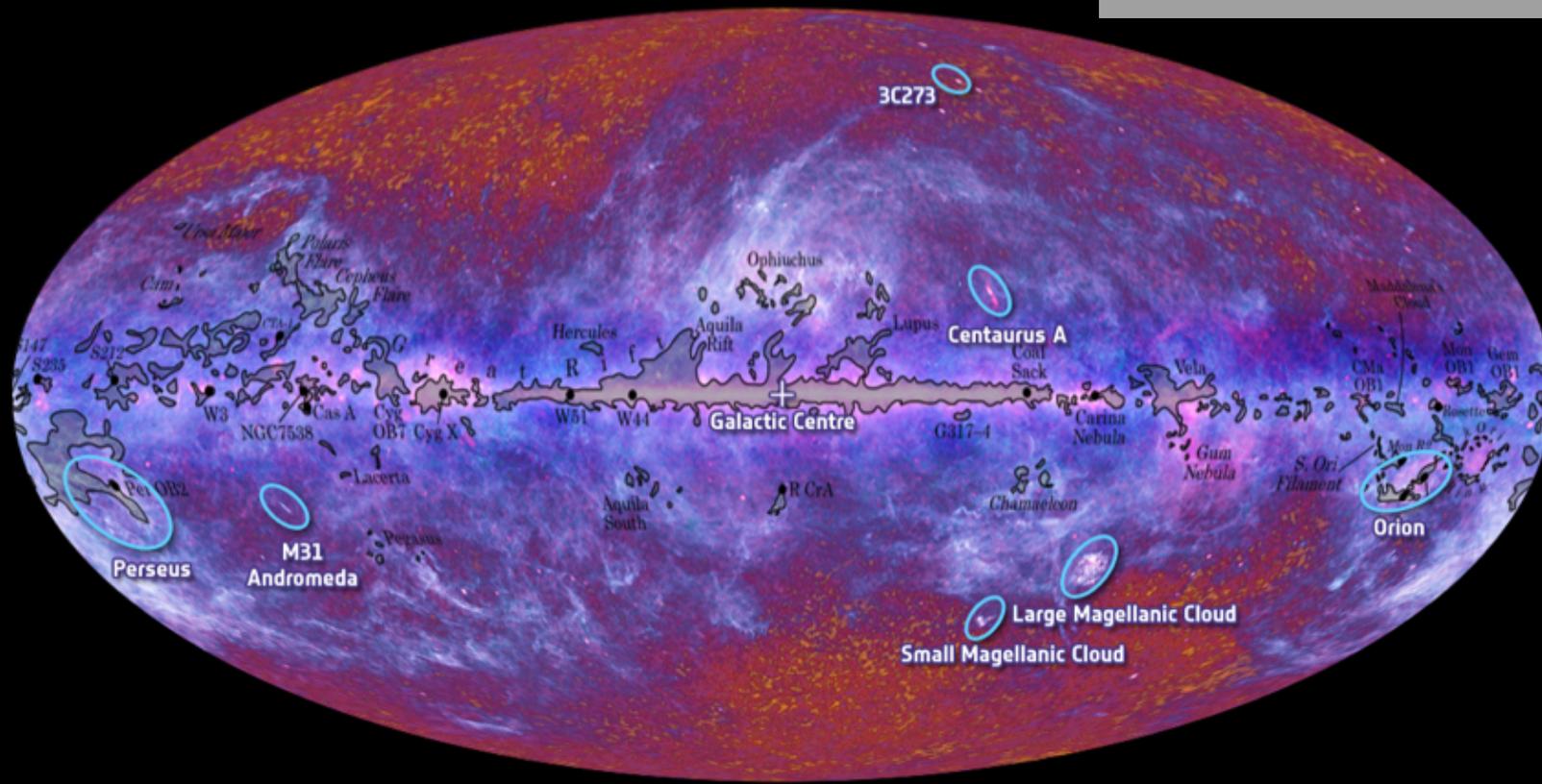


The Planck one-year all-sky survey

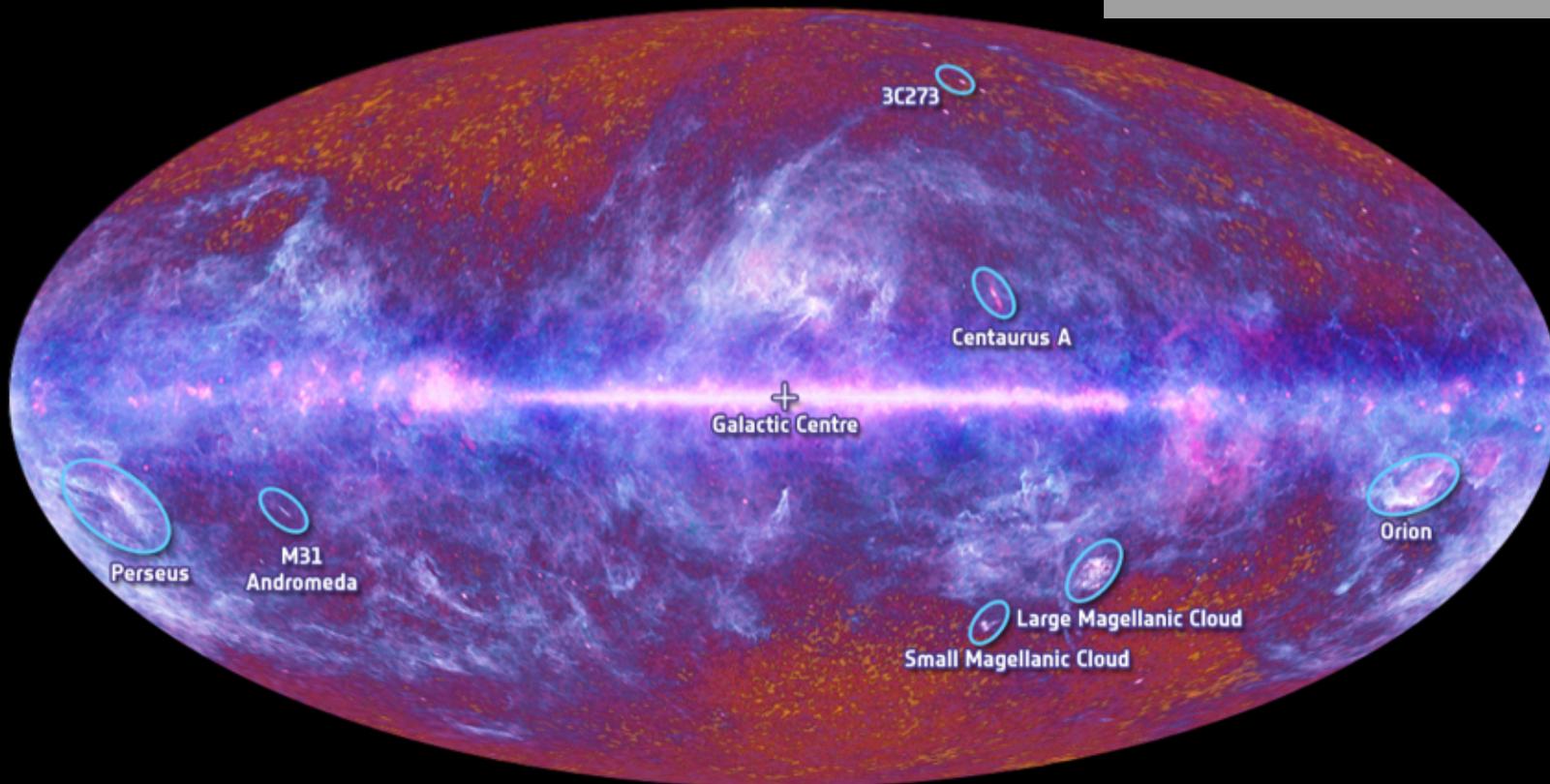


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

Staub in Emission



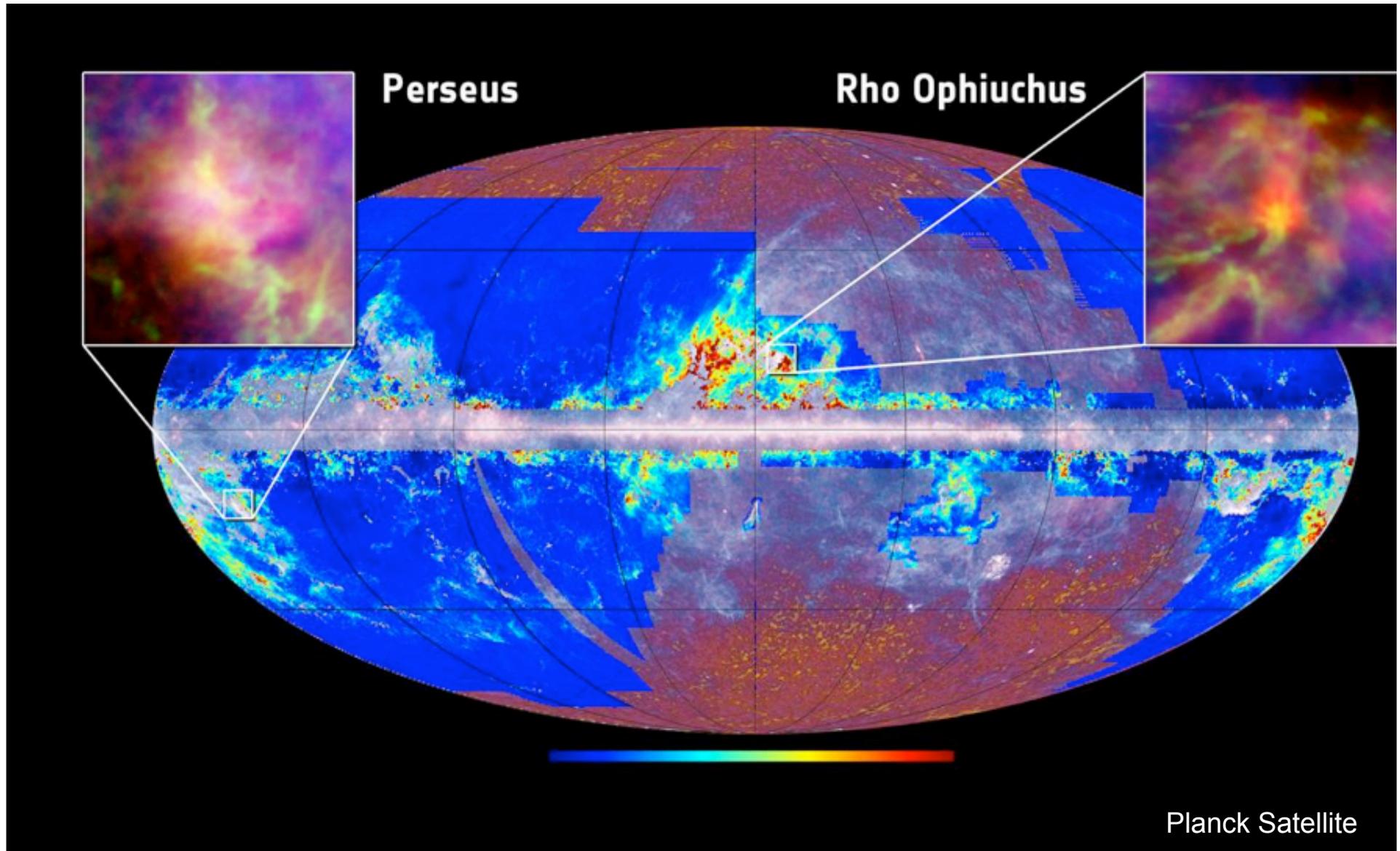
Staub in Emission



The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

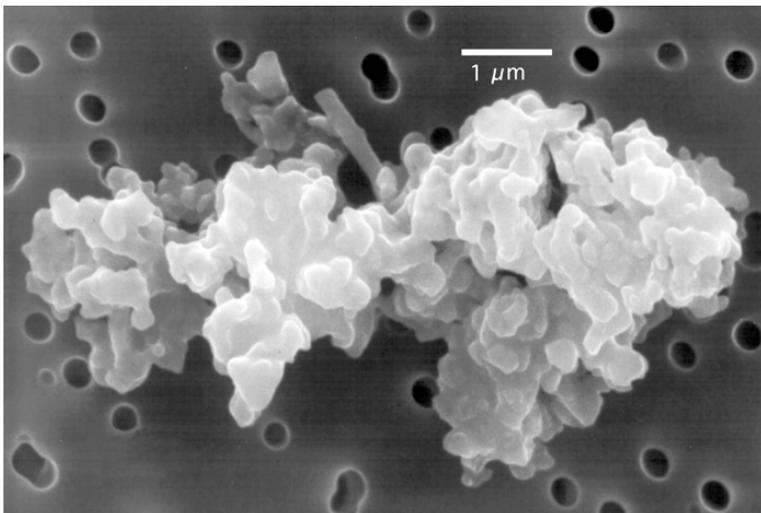


Quelle: Der Neue Kosmos

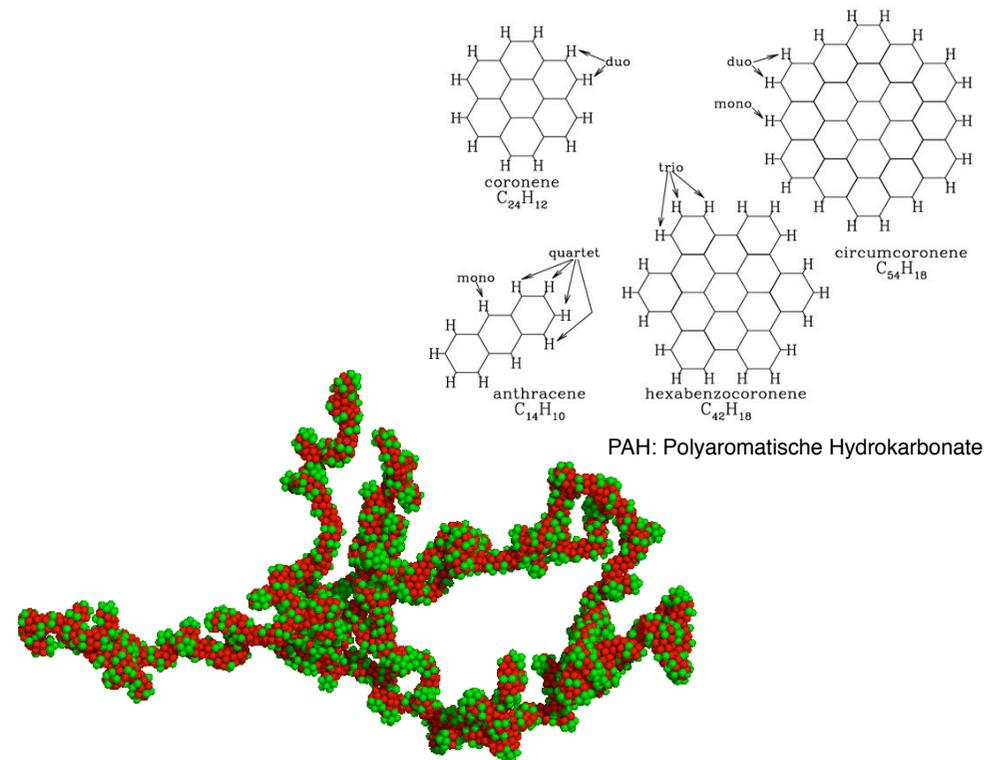
10.01.2013
Ralf Klessen

Interstellarer Staub

- Große Variation in Größe und Zusammensetzung: von einigen Dutzend Molekülen (PAHs) bis “Körnern” von einigen Mikrometern Durchmesser
- Meist komplexe, “fraktale” Struktur mit großen Oberfläche im Vergleich zum Volumen
- Staub ist wichtiger Katalysator für chemische Reaktionen im Interstellaren Medium (Beispiel: Bildung von H_2 an der Oberfläche von Staubkörnern)



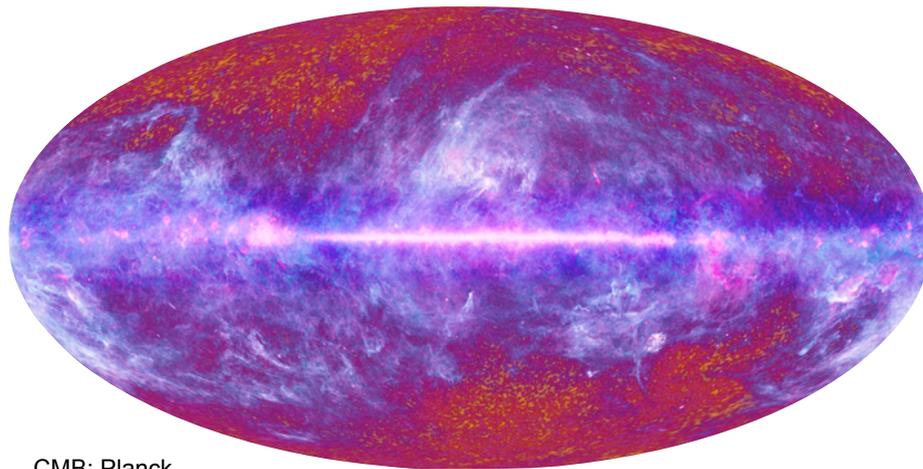
Quelle: Brownlee & Jessberger (in Jessberger et al, 2001, in Interstellar Dust), im Netz: Wikipedia



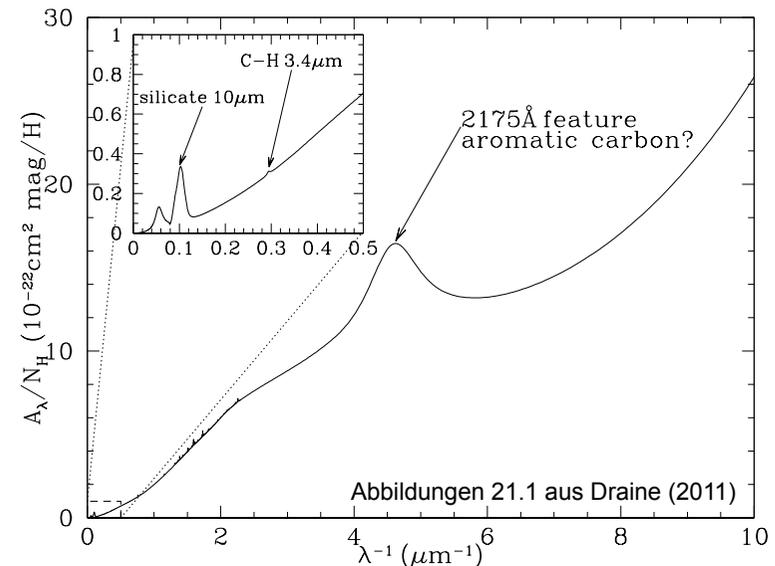
Quelle: E. L. Wright (UCLA), im Netz: Wikipedia

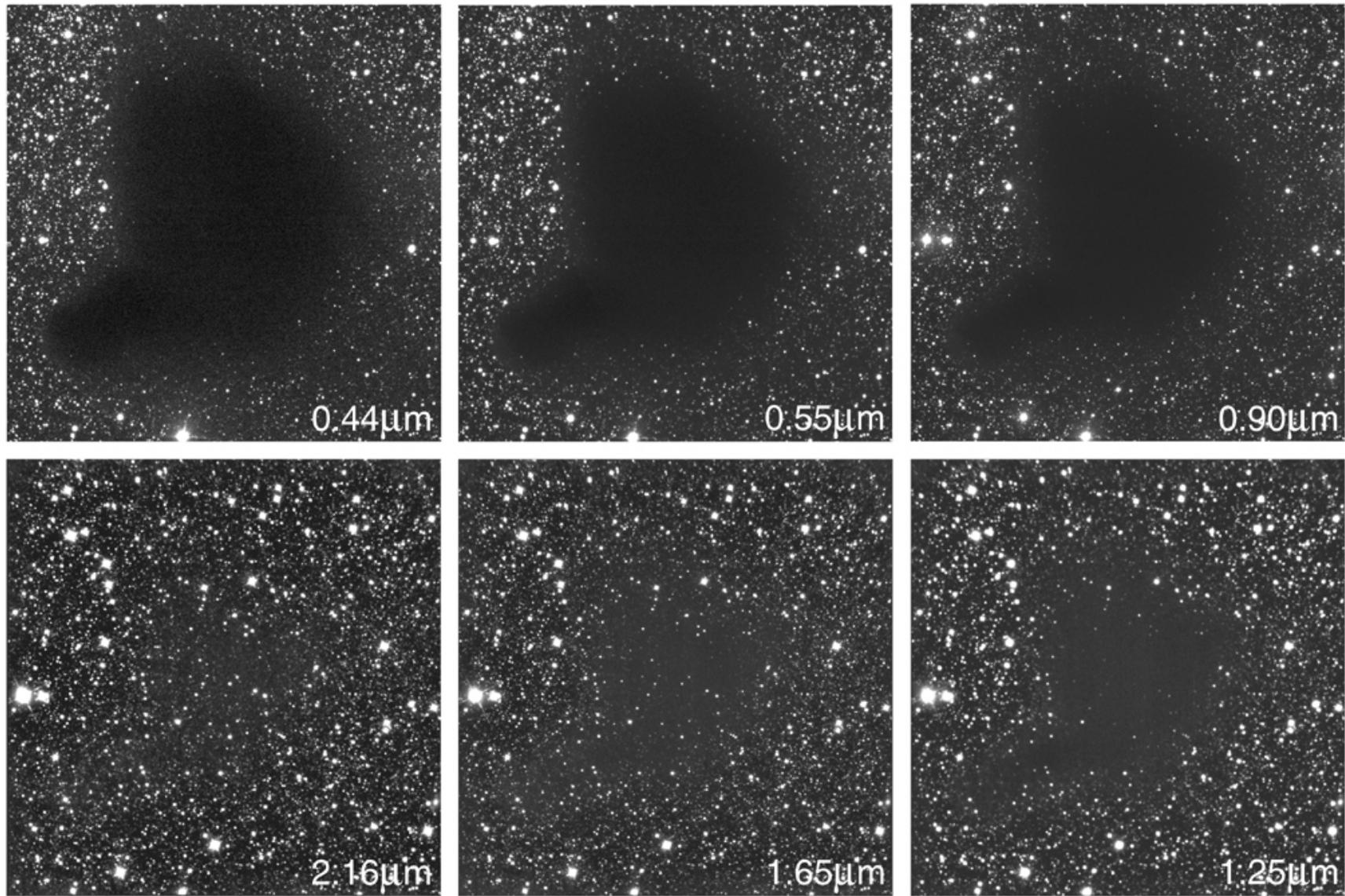
Interstellarer Staub

- Staub und Gas sind gut durchmischt (Staub $\sim 1\%$ in Masse)
- Staub absorbiert kurzwelliges Licht und emittiert diese Energie als thermisches Spektrum bei infraroten Wellenlängen
- Extinktion hängt von der Wellenlänge ab
- Relation zwischen Extinktion A_V und Rötung E_{B-V} : $A_V = R_V E_{B-V}$ (B=blau, V=visible)
mit $A_\lambda = 2.5 \log_{10} (F_{\lambda,0}/F_\lambda)$ und $E_{B-V} = A_B - A_V = (B-V) - (B-V)_0$ und $R_V = 3.1$
- Im Schnitt $A_V=0.3$ mag/kpc (viel höher in Dunkelwolken bis A_V von einigen 10^2)

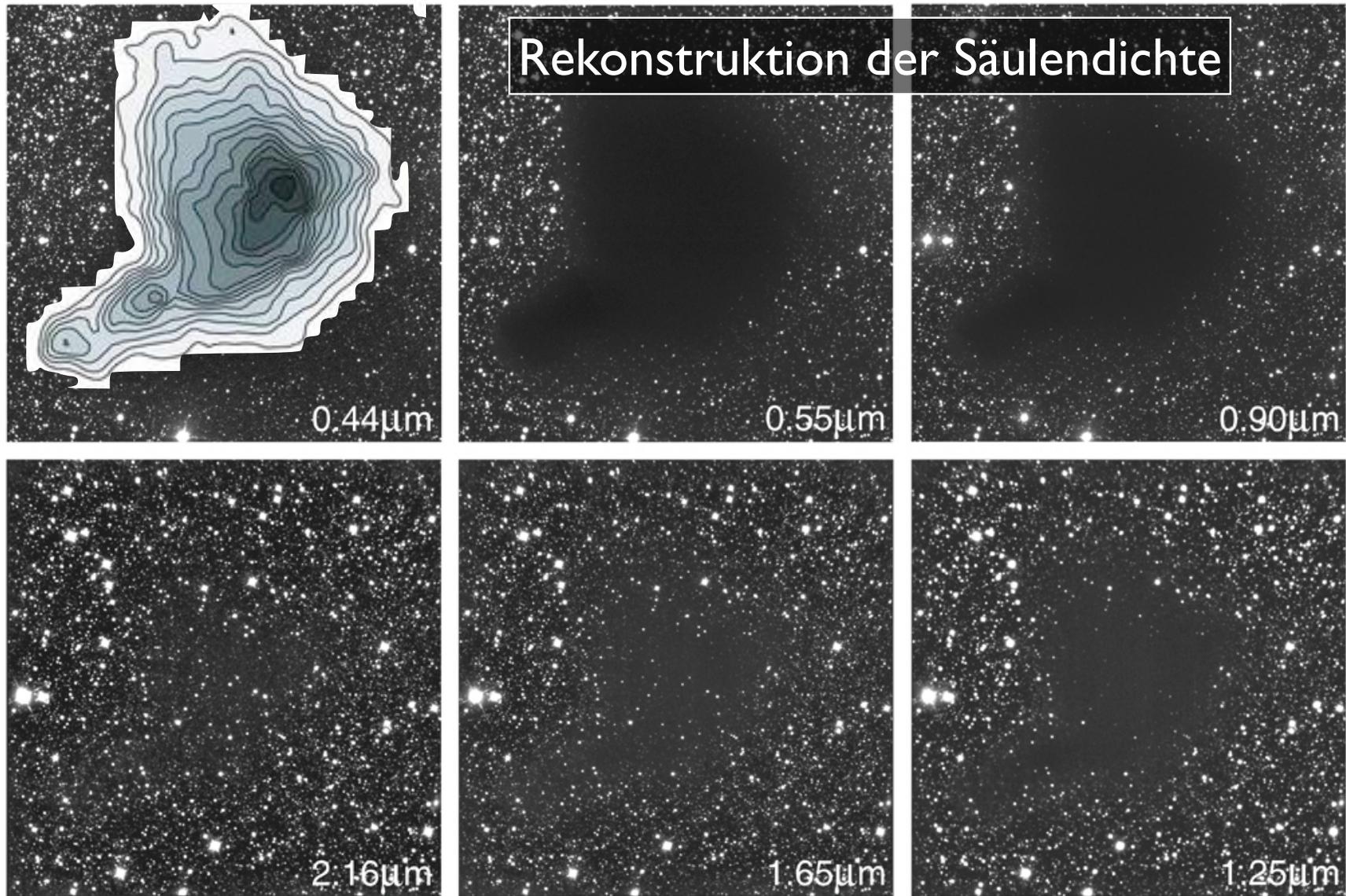


CMB: Planck





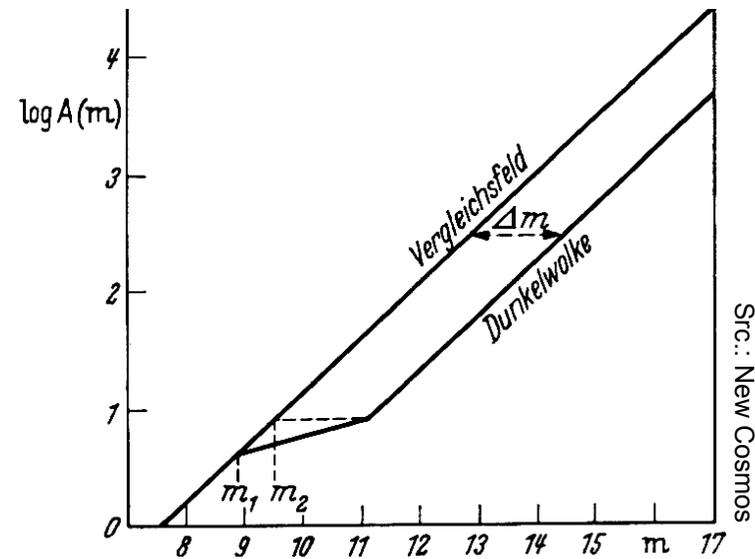
The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)



The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)

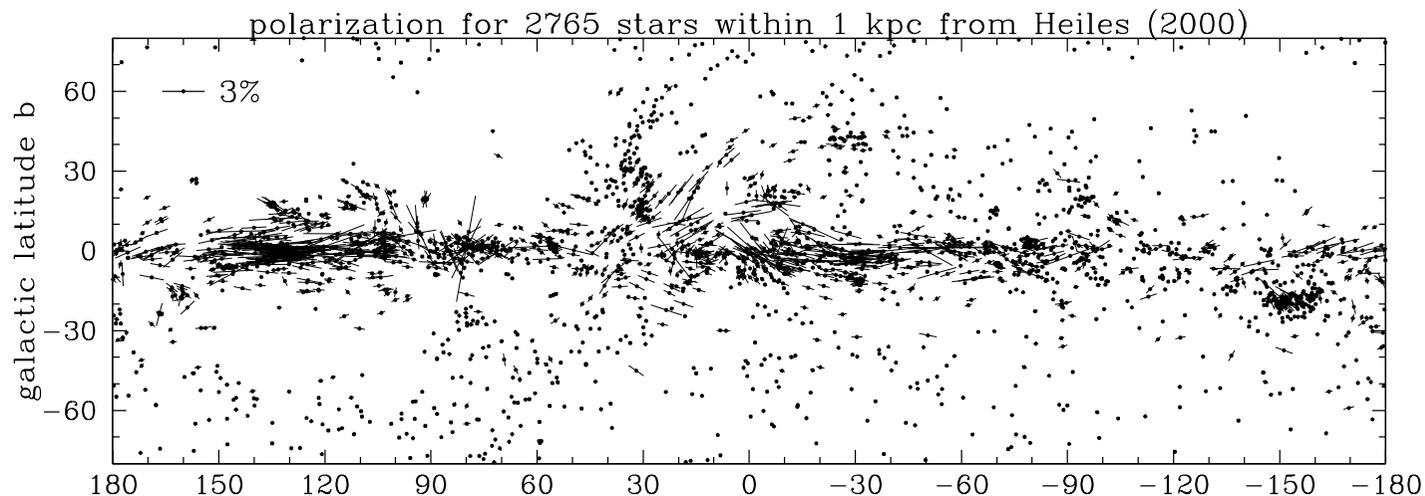
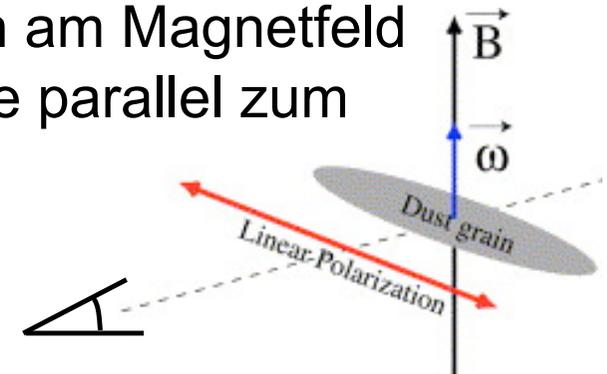
Interstellarer Staub

- Wolf-Diagramm zur groben Abschätzung der Entfernung
- Entfernung aus Δm (Vergleich mit Feld ohne Dunkelwolke)
- Tiefe aus $m_1 - m_2$
- Typische Werte: Entfernung einige 100 pc bei Extinktion $\Delta m = 1 - 3 \text{ mag}$
- Dunkelwolken in Galaktischer Scheibe konzentriert

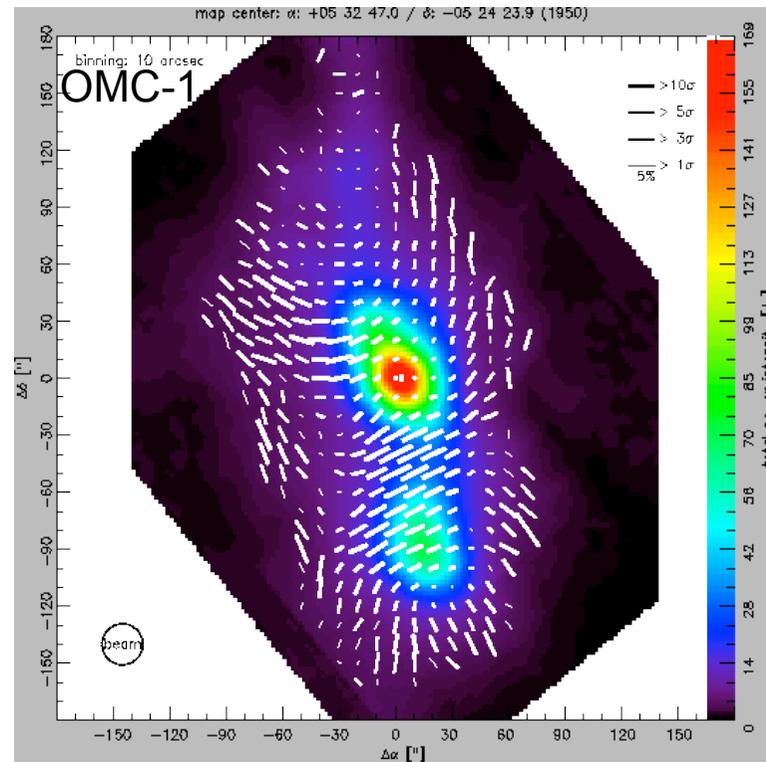
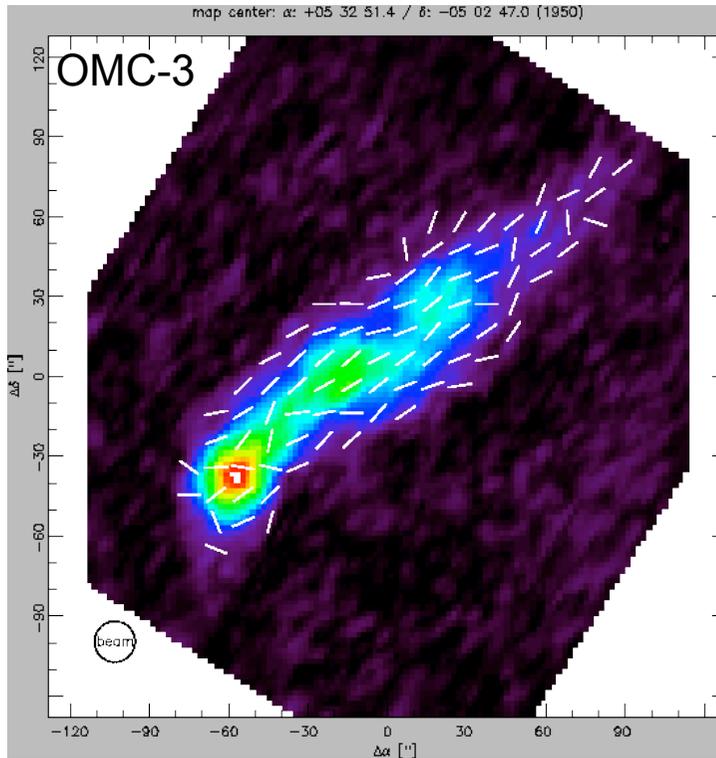


Staub und Magnetfelder

- Staub führt zur Polarisation des Sternlichts
- Polarisationsgrad bis zu 5%
- Grund: elongierte Staubpartikel richten sich am Magnetfeld aus (typischerweise ist die kurze Halbachse parallel zum Feld) und rotieren um die Feldlinien
- Information über Magnetfeldrichtung



Staub und Magnetfelder

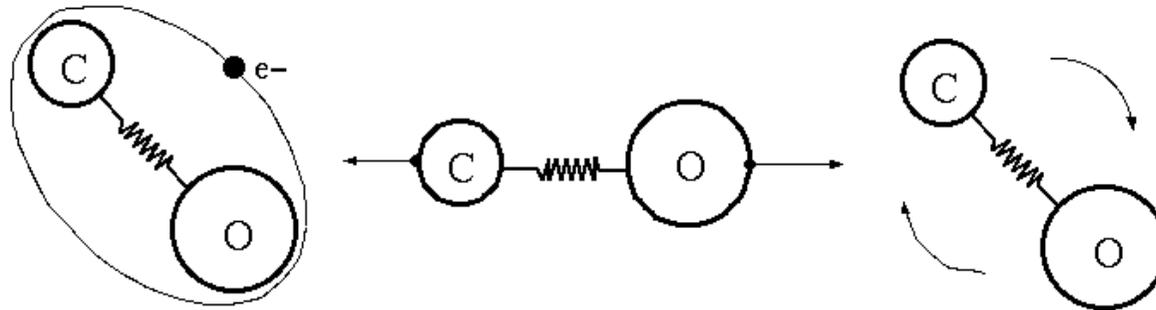


Staubpolarisationskarten nahegelegener Molekülwolkenkerne

(Quelle: Max Planck Institut für Radioastronomie, Bonn)

Molekülwolken

Molekülwolken

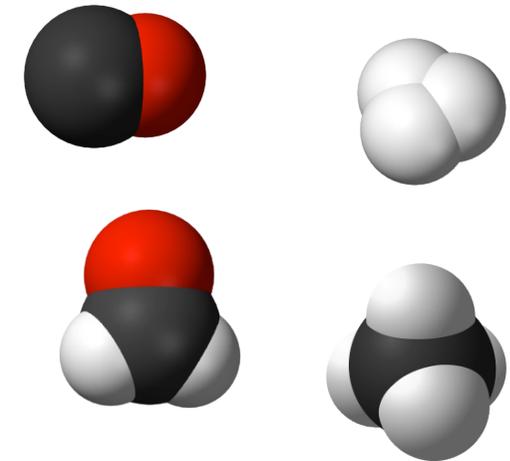


Übergänge in zweiatomigen Molekülen:

- Rotationsübergänge (Dipolmoment notwendig, sonst “verbotener” Quadrupol-Übergang)
Energie: $\sim 10^{-3}$ eV
- Vibrationsübergänge, Energie: $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$ eV
- Elektronische Übergänge, Energie: ~ 1 eV

Niedrigste Rotations- und Schwingungsübergänge

	J = 1 - 0			n = 1 - 0		
	Frequenz	Wellenlänge	T	Frequenz	Wellenlänge	T
H ₂	3,87 THz	77 μ m	185 K	131 THz	2,28 μ m	6300 K
¹² CO	115 GHz	2,6 mm	5,5 K	64 THz	4,63 μ m	3100 K



Meist sind im ISM nur die niedrigen Rotationszustände angeregt

Molekülwolken

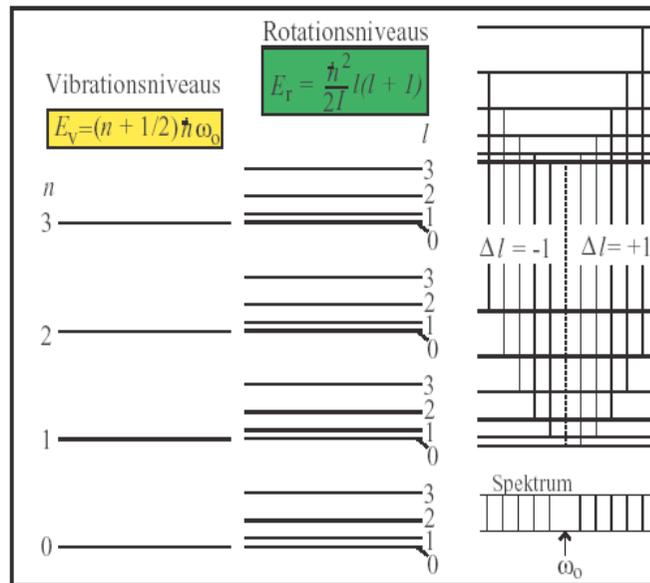


Abbildung 7.3: Rotations- und Vibrationsniveaus eines zweiatomigen Moleküls mit den nach den Auswahlregeln möglichen Übergängen.

Aus: Ryder: Quantenphysik und statistische Physik

Niedrigste Rotations- und Schwingungsübergänge

	J = 1 – 0			n = 1 - 0		
	Frequenz	Wellenlänge	T	Frequenz	Wellenlänge	T
H ₂	3,87 THz	77 μm	185 K	131 THz	2,28 μm	6300 K
¹² CO	115 GHz	2,6 mm	5,5 K	64 THz	4,63 μm	3100 K

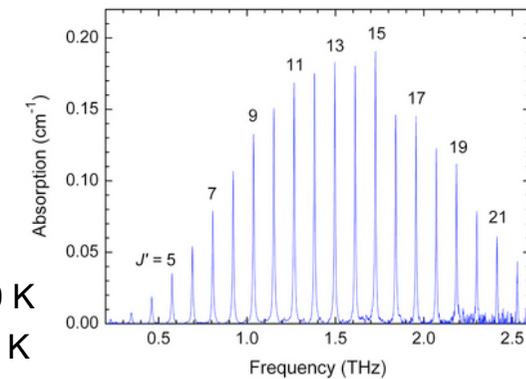
Meist sind im ISM nur die niedrigen Rotationszustände angeregt

Wegen $E_r = \frac{\hbar^2}{2I} l(l + 1)$

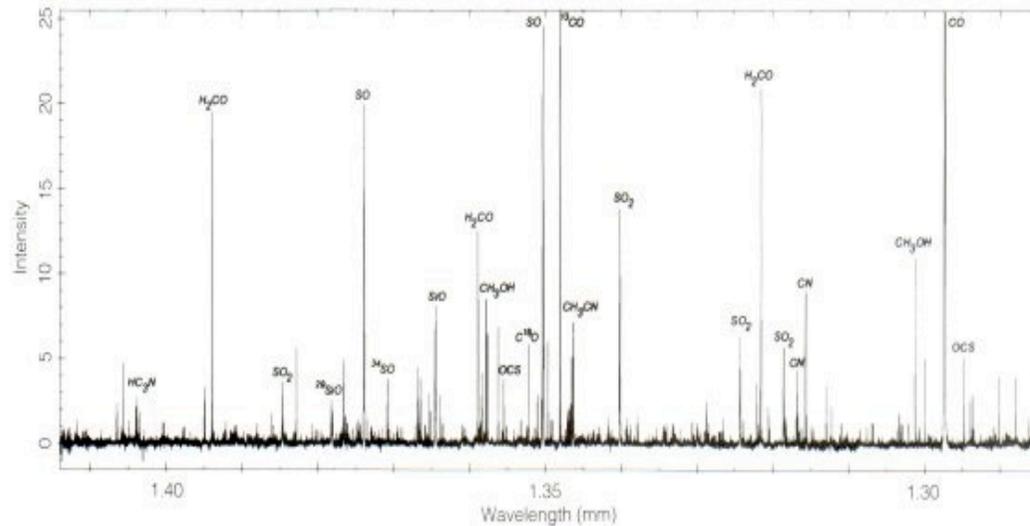
und $\Delta l = \pm 1$ erhalten wir für die Übergangsenergie:

$$\Delta E_{l+1 \rightarrow l} = \frac{\hbar^2}{I} l$$

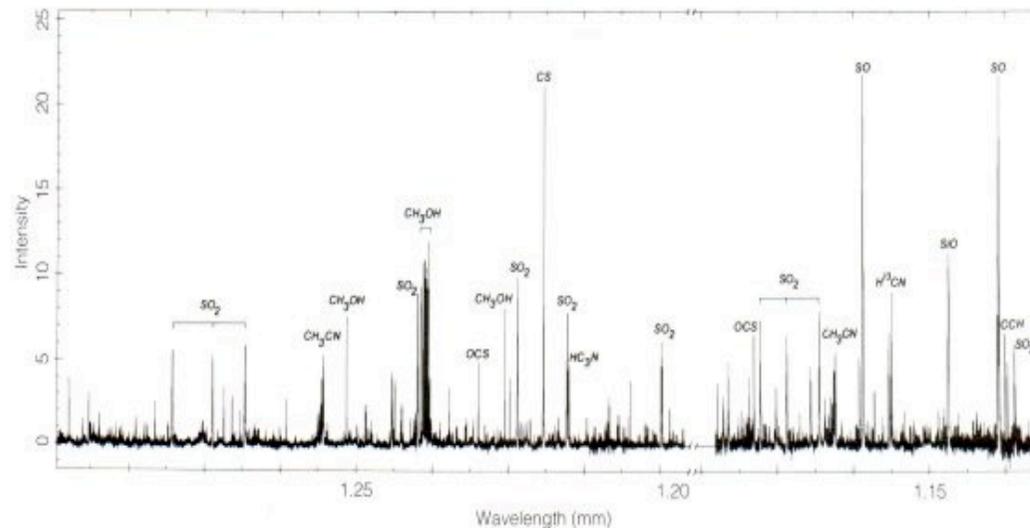
I ist das Trägheitsmoment.



Beispiel: Orion-Wolke



Spectrum of a hot core in the Orion molecular cloud observed around 1.3 mm (atmospheric window). More than 800 molecular lines can be identified.



Molecular clouds are highly dynamical. Individual structural elements (e.g. Clumps and core) are transient – and so is their chemical state (as inferred from time-dependent chemical network models)

Interstellare Moleküle

Bisher wurden mehr als 100 verschiedene Moleküle im ISM identifiziert.

Liste interstellarer Moleküle (2000)

Wasserstoff-Moleküle

H_2	HD	H_3^+	H_2D^+		
-------	------	---------	----------	--	--

Wasserstoff- und Kohlenstoff-Moleküle

CH	CH^+	C_2	CH_2	C_2H	$*C_3$
CH_3	C_2H_2	$C_3H(\text{lin})$	$c-C_3H$	$*CH_4$	$c-C_3H_2$
$H_2CCC(\text{lin})$	C_4H	$*C_5$	$*C_2H_4$	C_5H	$H_2C_4(\text{lin})$
CH_3C_2H	C_6H^*	H_2C_6	C_7H	CH_3C_4H	$*C_8H$

Wasserstoff-, Kohlenstoff- (möglich) und Sauerstoff-Moleküle

OH	CO	CO^+	H_2O	HCO	HCO^+
HOC^+	C_2O	CO_2	H_3O^+	$HOCO^+$	H_2CO
C_3O	CH_2CO	$HCOOH$	H_2COH^+	CH_3OH	HC_2CHO
C_4O	CH_3CHO	$c-C_2H_2O$	CH_3OCHO	CH_2OHCHO	$CH_3COOH?$
CH_3OCH_3	CH_3CH_2OH	$(CH_3)_2CO$			

Wasserstoff-, Kohlenstoff- (möglich) und Stickstoff-Moleküle

NH	CN	NH_2	HCN	HNC	N^+H^+
NH_3	$HCNH$	H_2CN	$HCCN$	C_2N	CH_2CN
CH_2NH	HC_2CN	HC_2NC	NH_2CN	C_3NH	CH_3CN
CH_3NC	HC_3NH^+	C_3N	CH_3NH_2	CH_2CHCN	HC_3N
CH_3C_2N	CH_3CH_2CN	HC_3N	$CH_3C_2N?$	HC_2N	$HC_{11}N$

Wasserstoff-, Kohlenstoff- (möglich), Stickstoff- und Sauerstoff-Moleküle

NO	HNO	N_2O	$HNCO$	NH_2CHO	
------	-------	--------	--------	-----------	--

Andere Moleküle

Siehe mehr dazu unter:
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_interstellar_and_circumstellar_molecules

what information do we get?

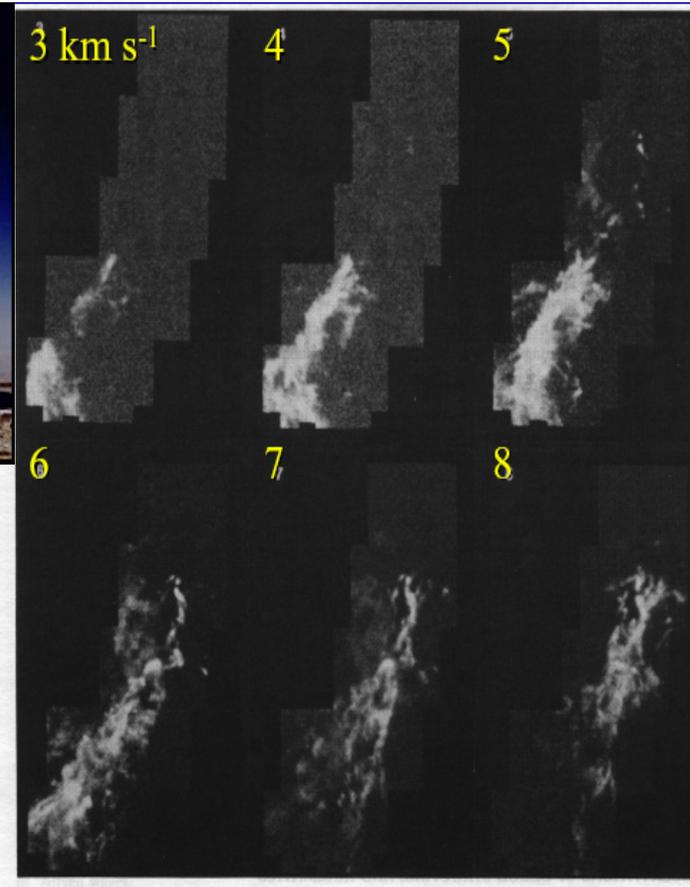
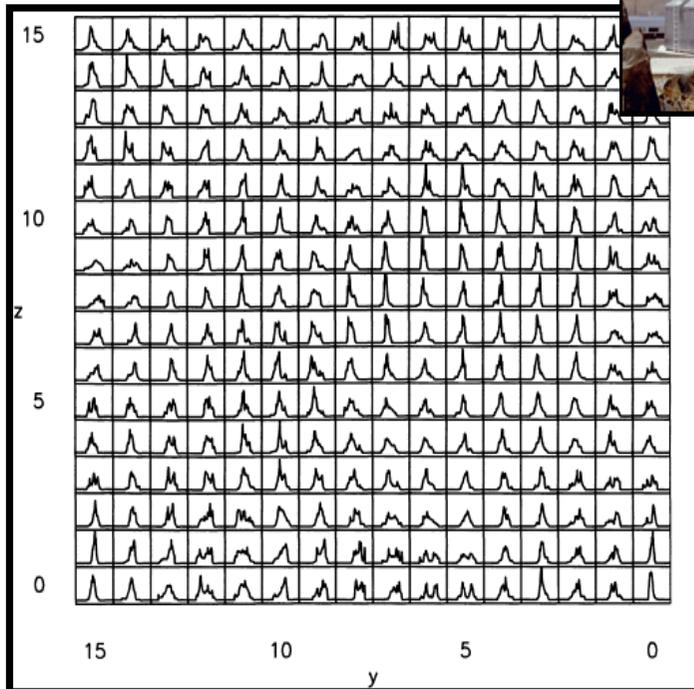
Molecular Gas

CO as tracer of molecular H₂

(analysis of density and velocity structure)

Observations in mm and sub-mm

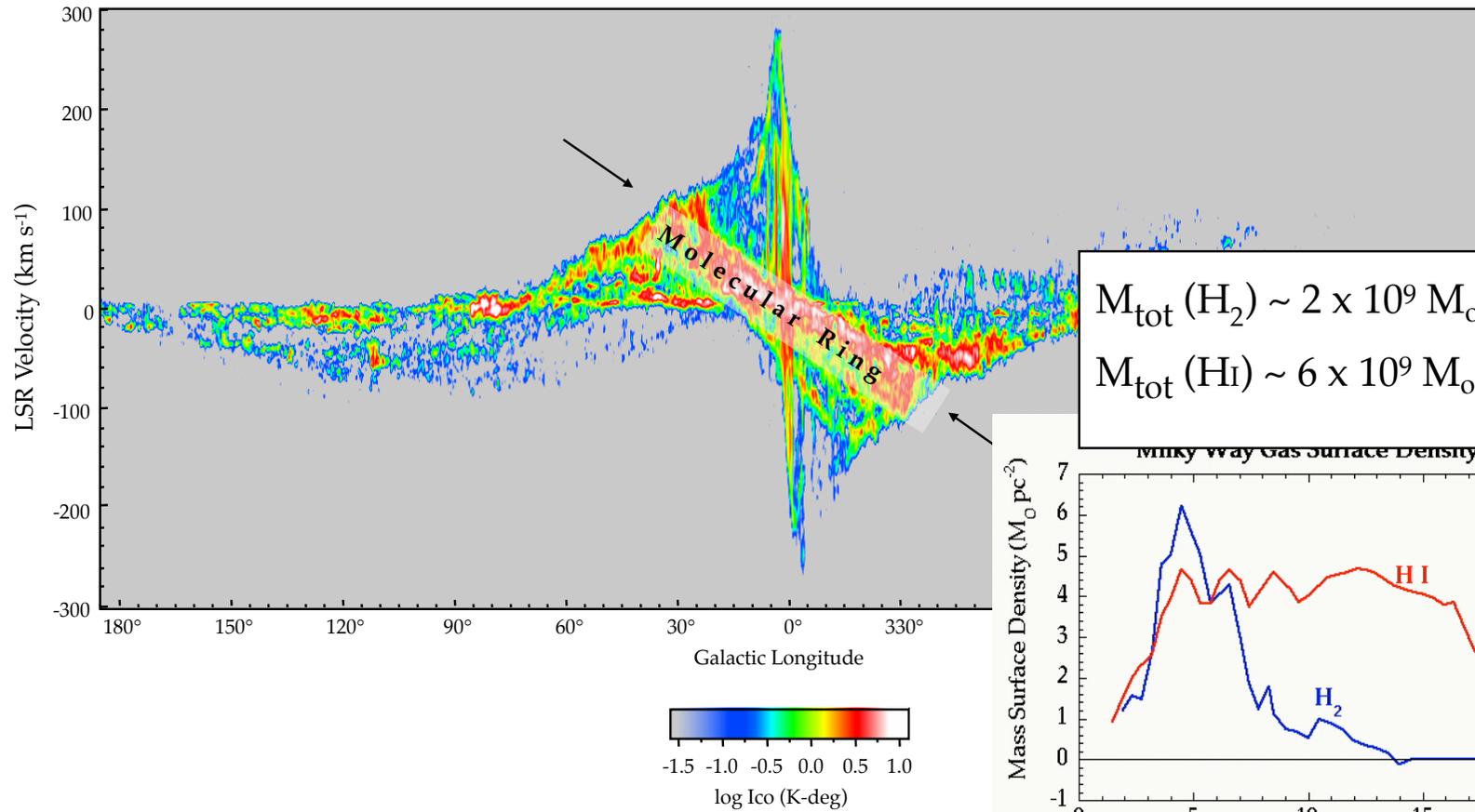
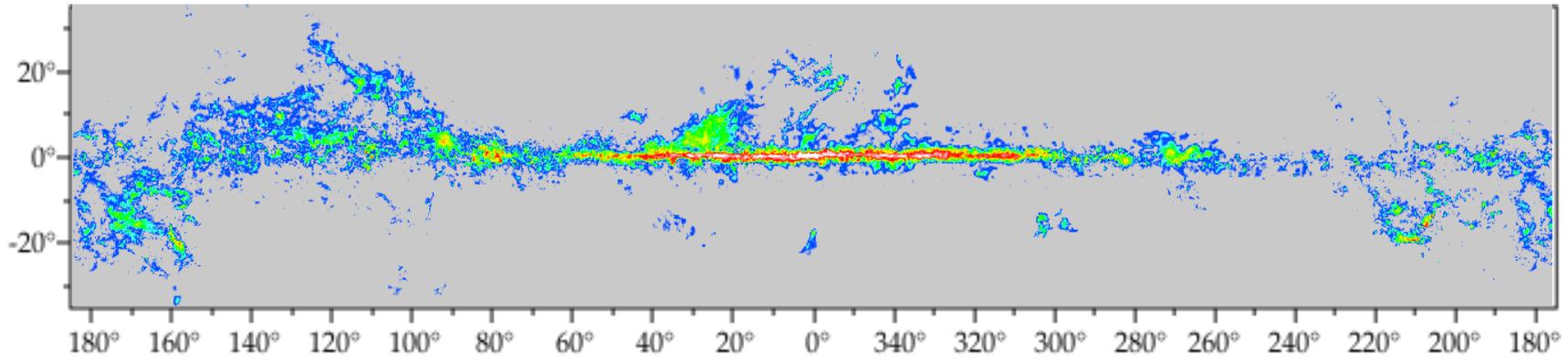
ESO Swedish European
Sub-mm Telescope SEST



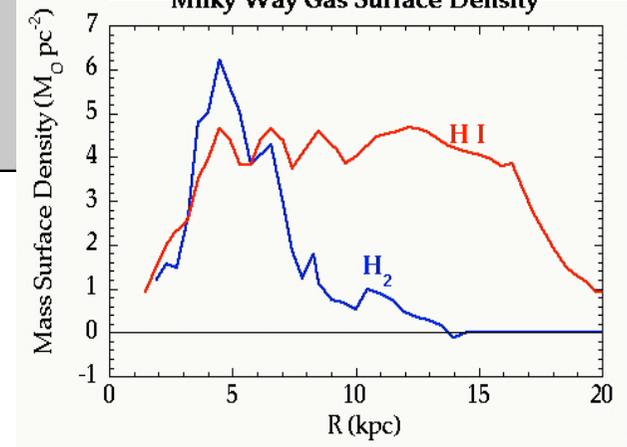
Surface density maps of emission from Orion A (in ¹³CO) at different velocities (velocity bandwidth is 1 km/s). The size of the region is ~2° x 5°.

Chart of CO spectra at different locations in a MC. With this type of survey one obtains **position-position-velocity cubes** (i.e. surface density at different velocity bands). Velocity information allows for separation of different clouds or cloud components (which are thought to have different relative velocities. BUT: **problems with deprojection** (i.e. solutions are not unique and interpretation often misled)

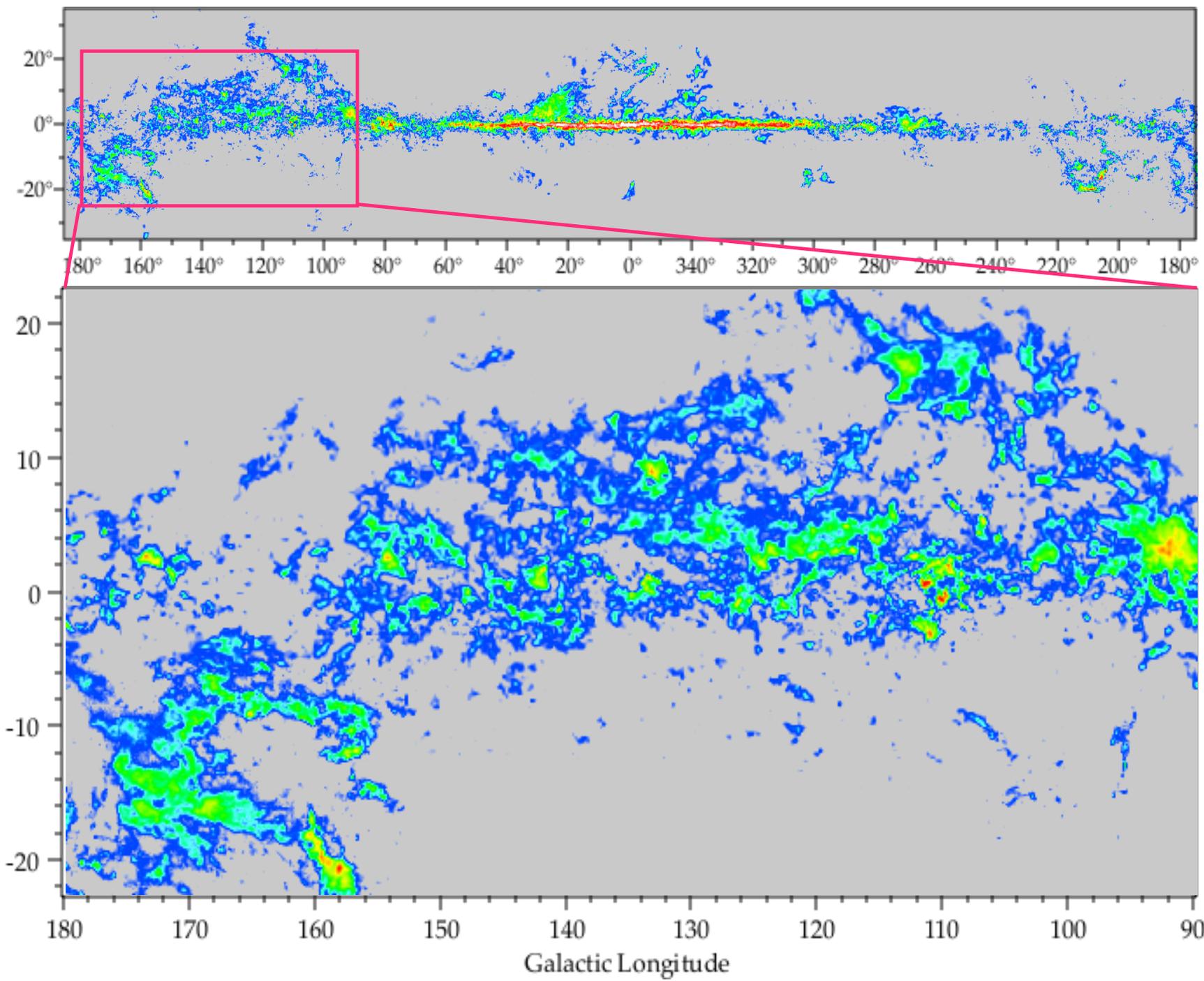
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



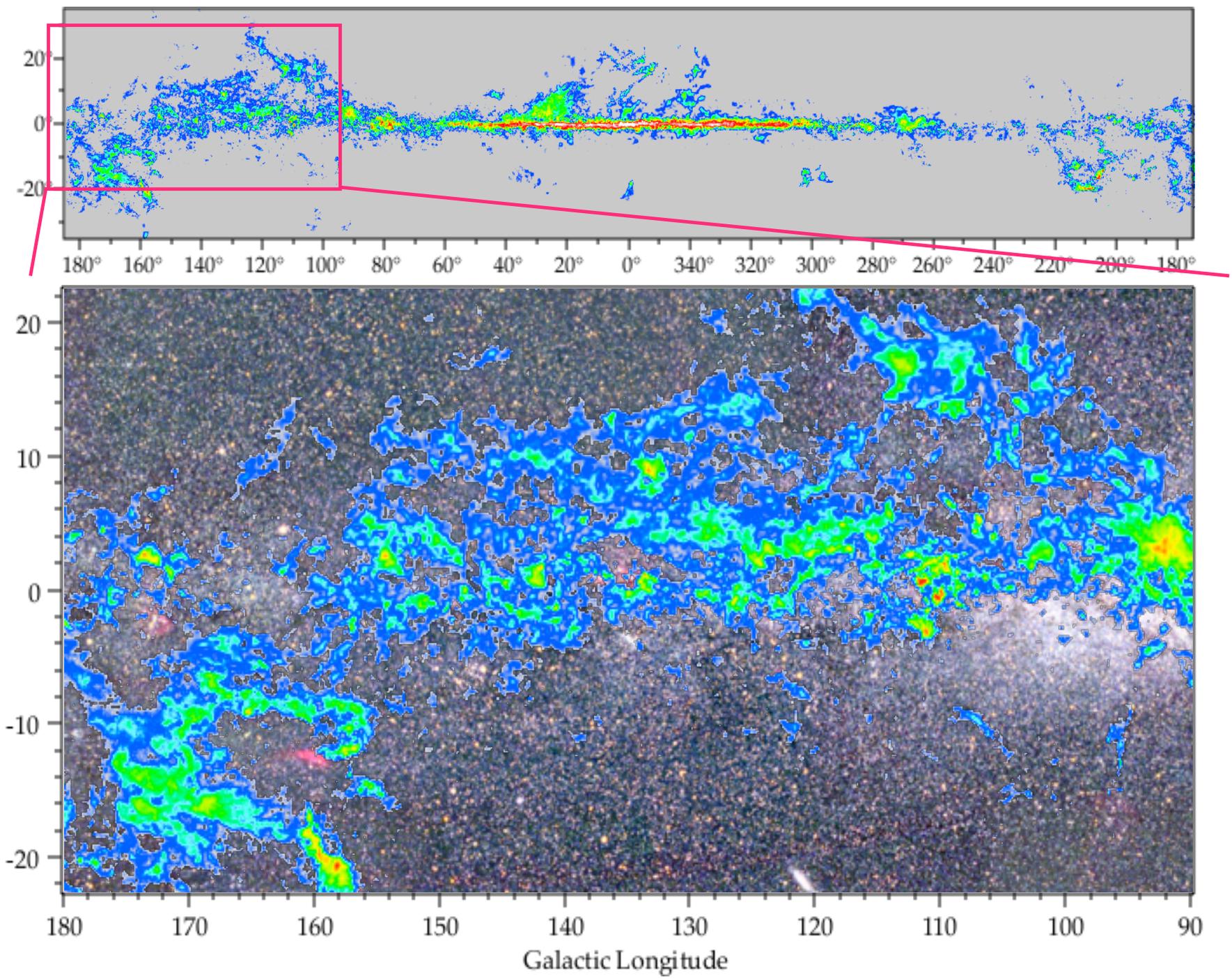
$M_{\text{tot}} (\text{H}_2) \sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$
 $M_{\text{tot}} (\text{HI}) \sim 6 \times 10^9 M_{\odot}$



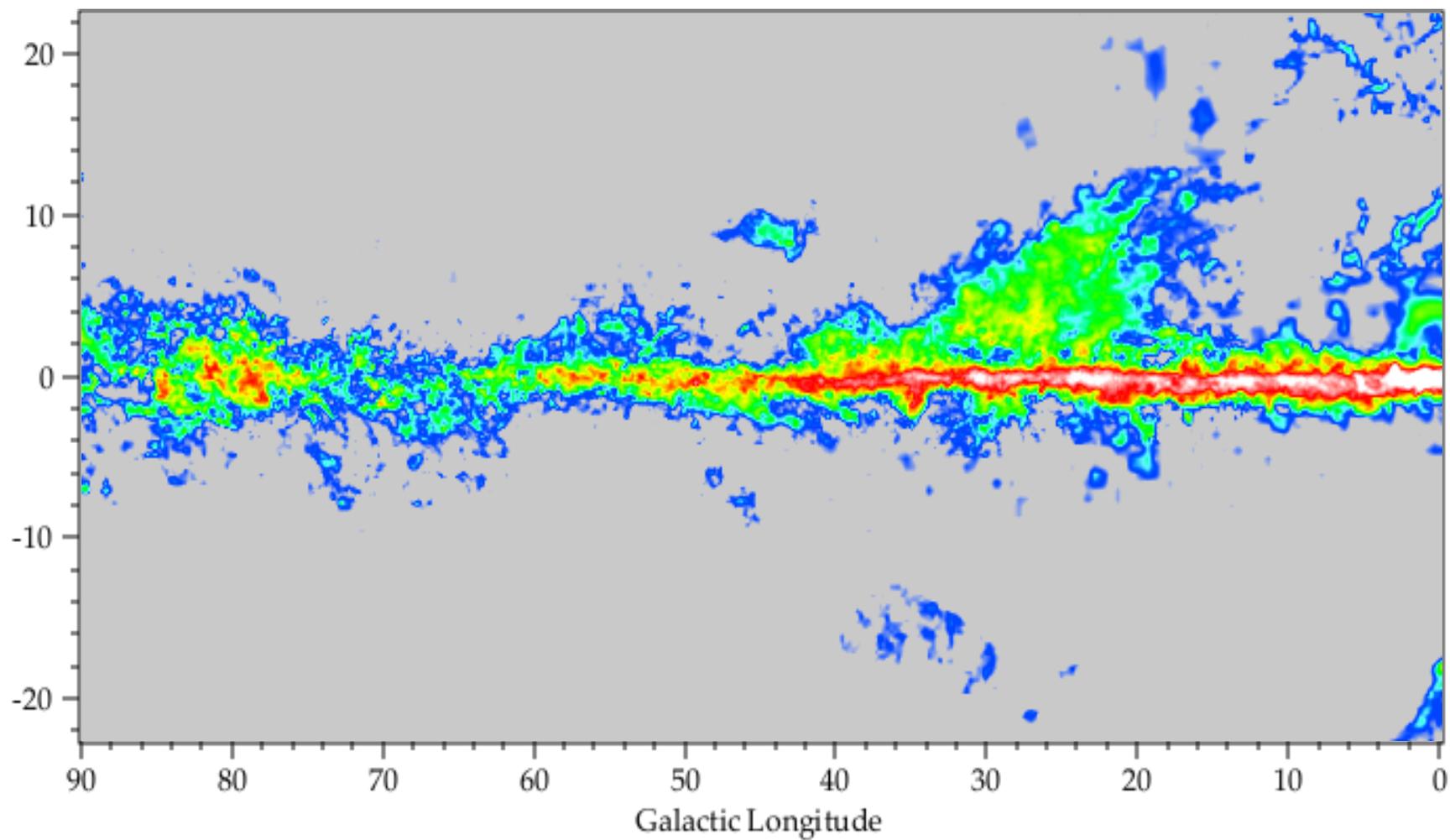
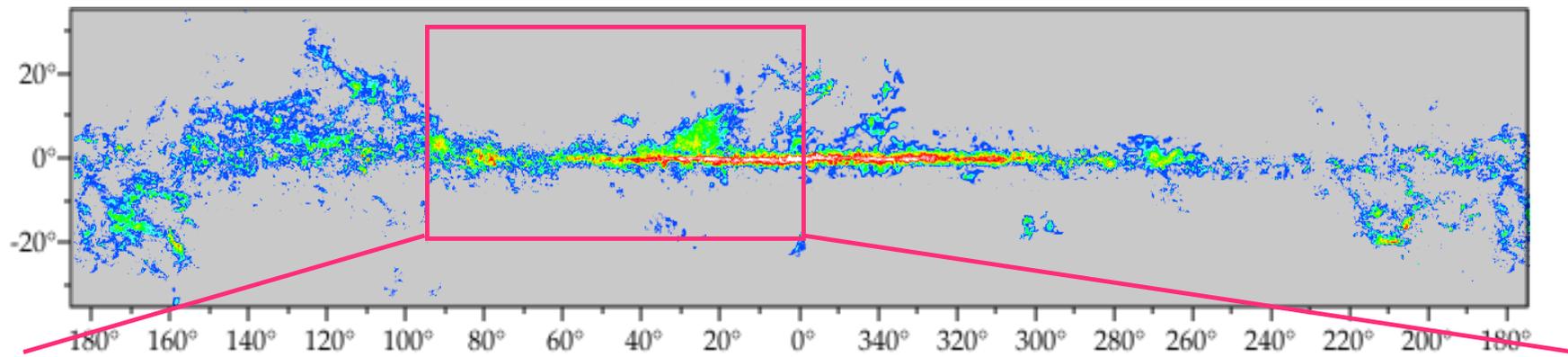
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



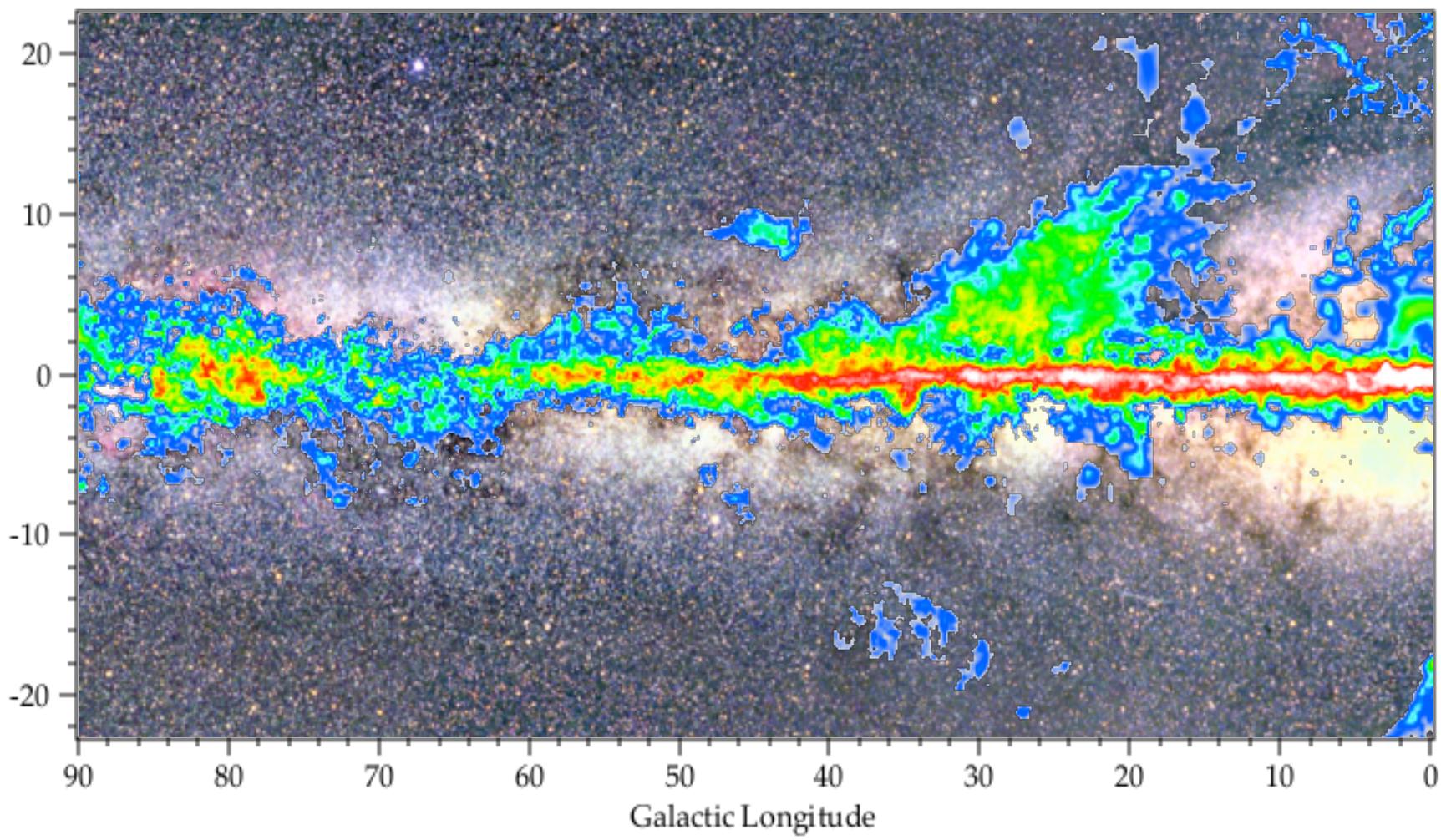
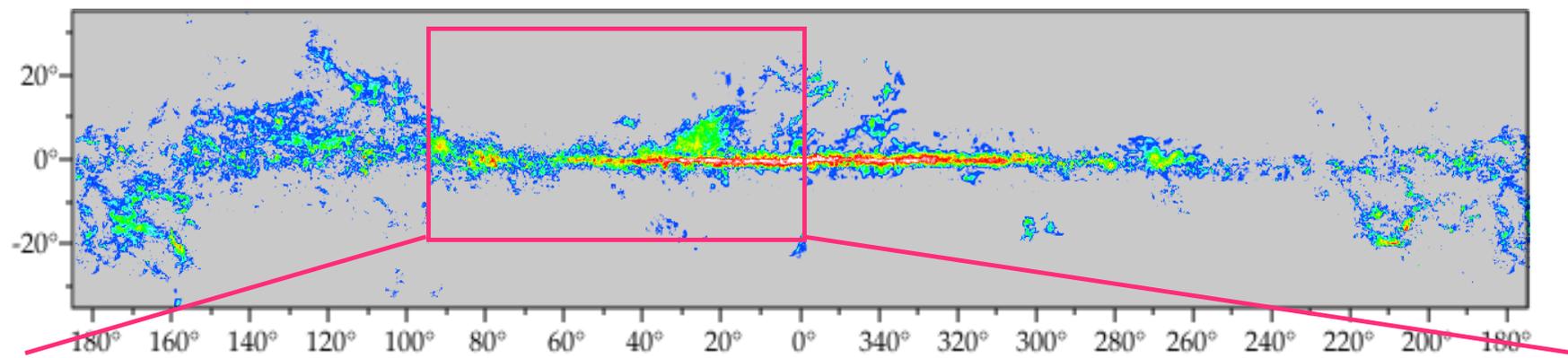
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



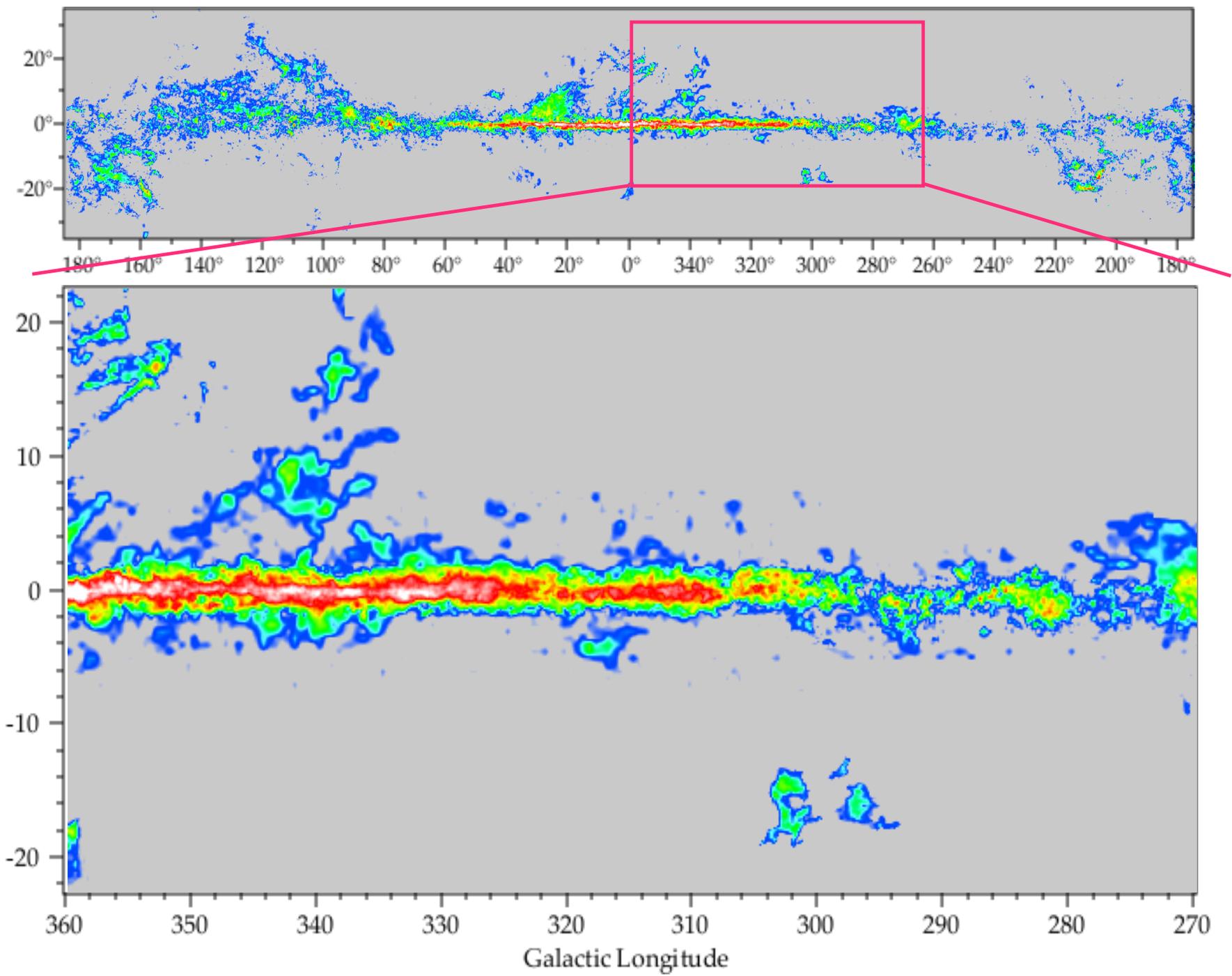
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



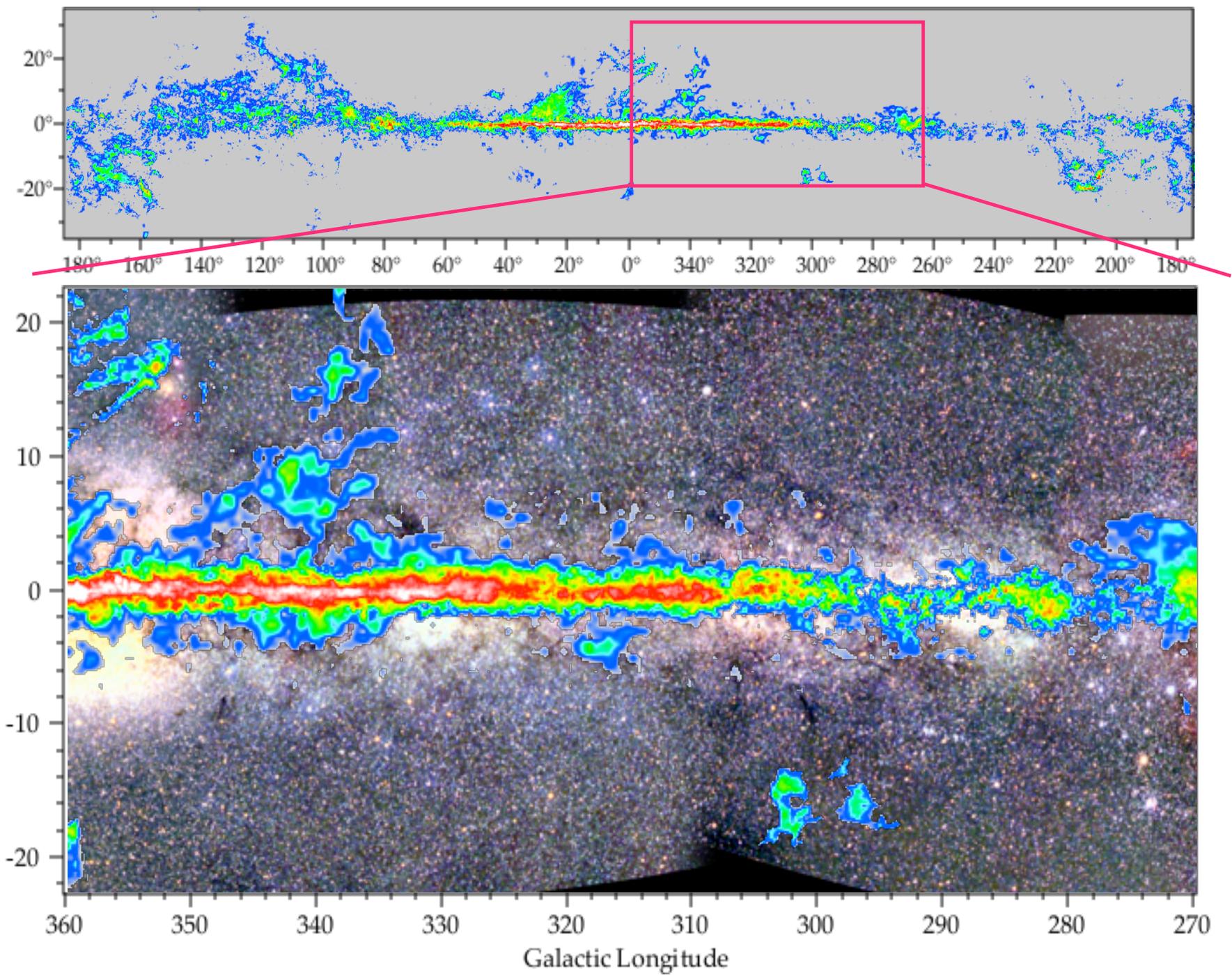
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



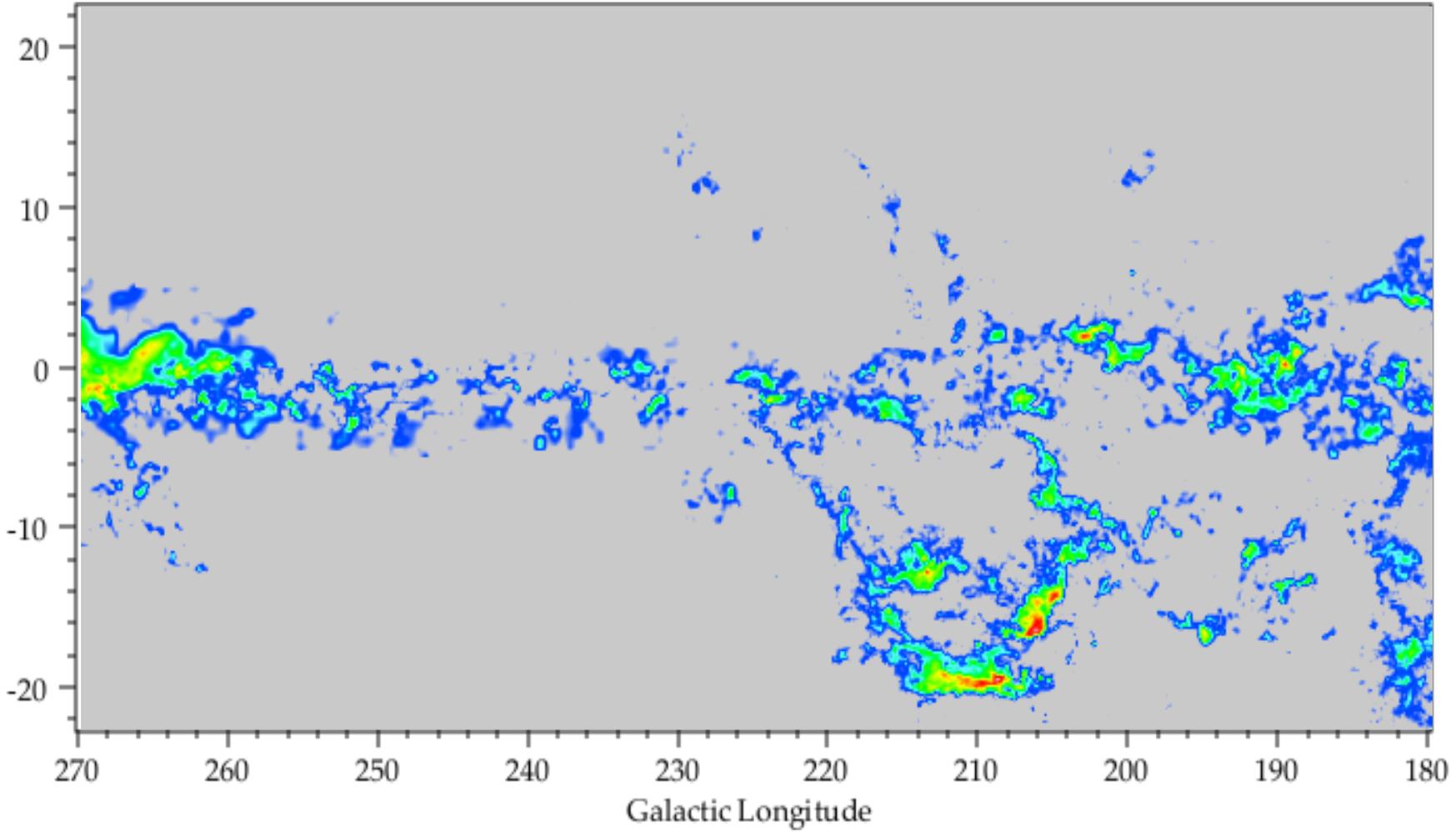
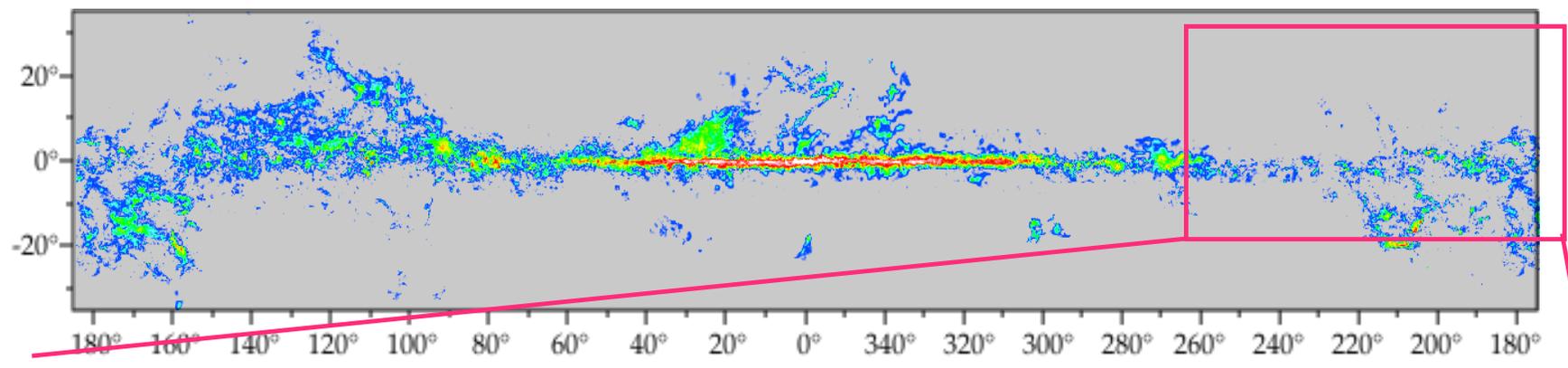
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



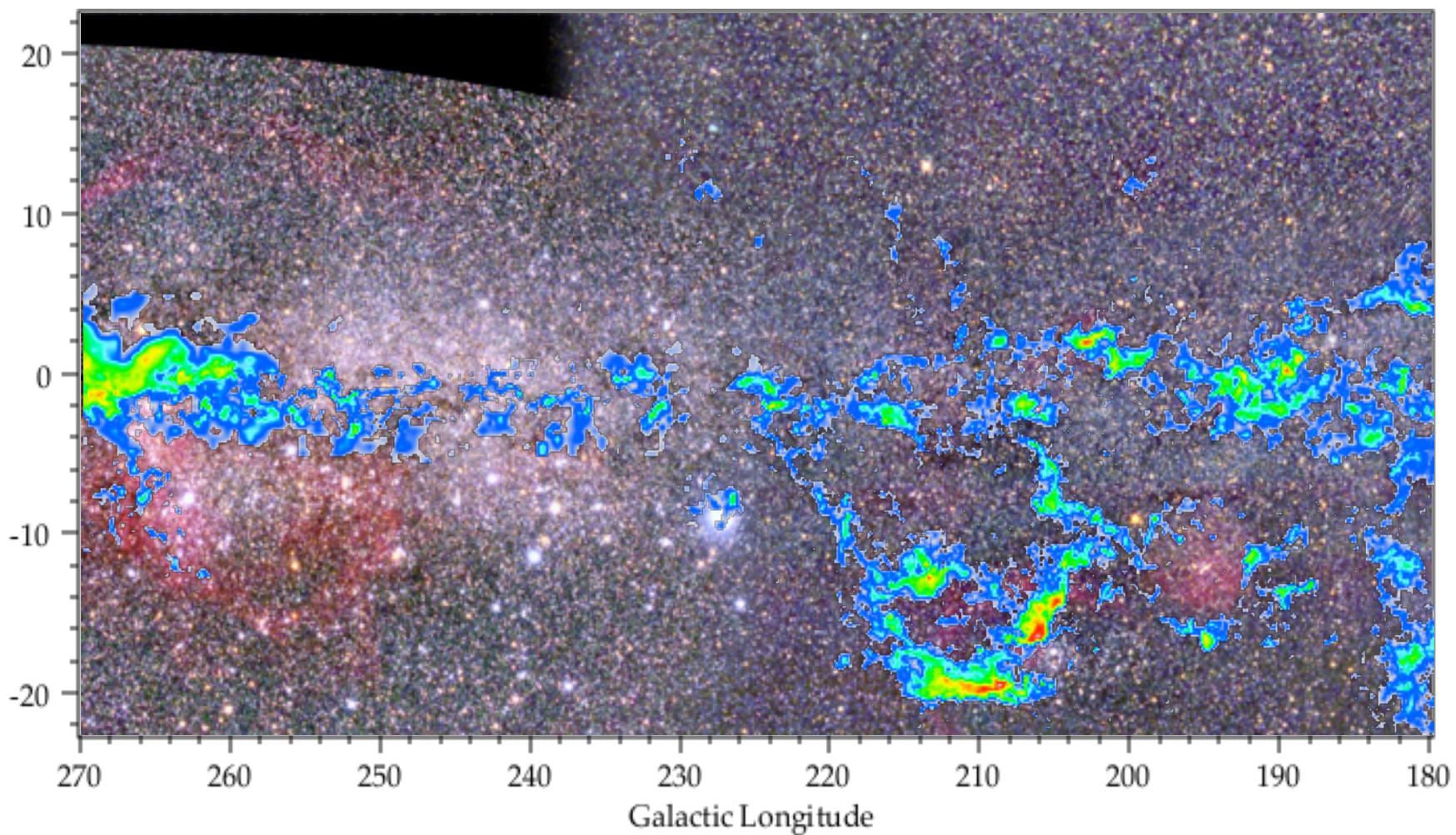
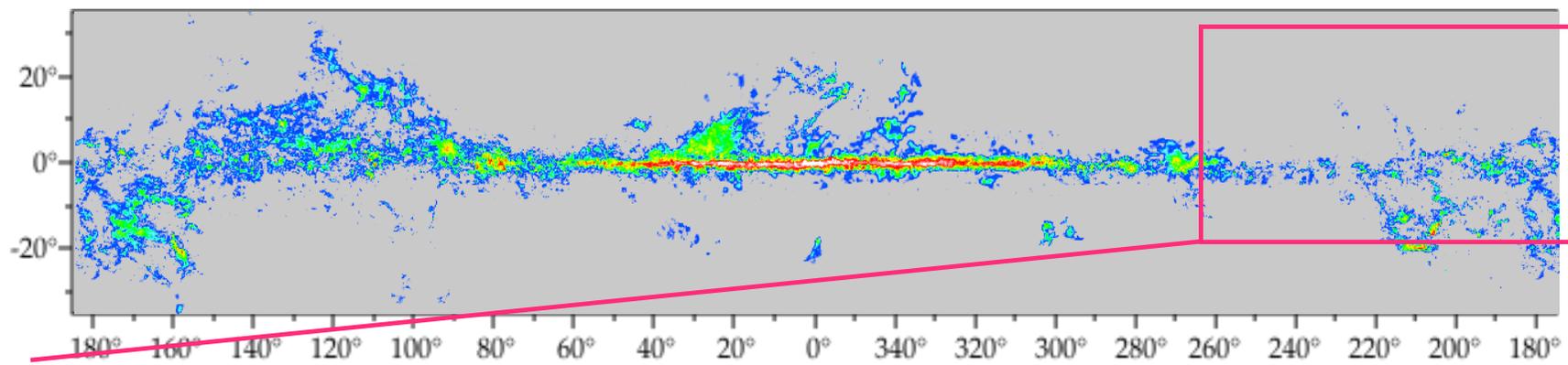
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



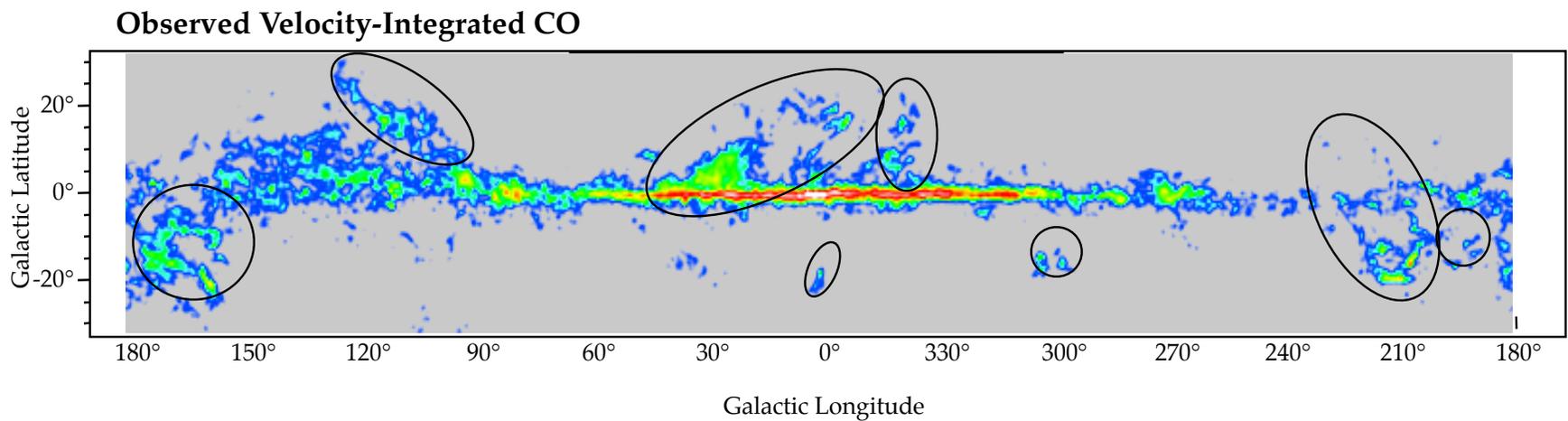
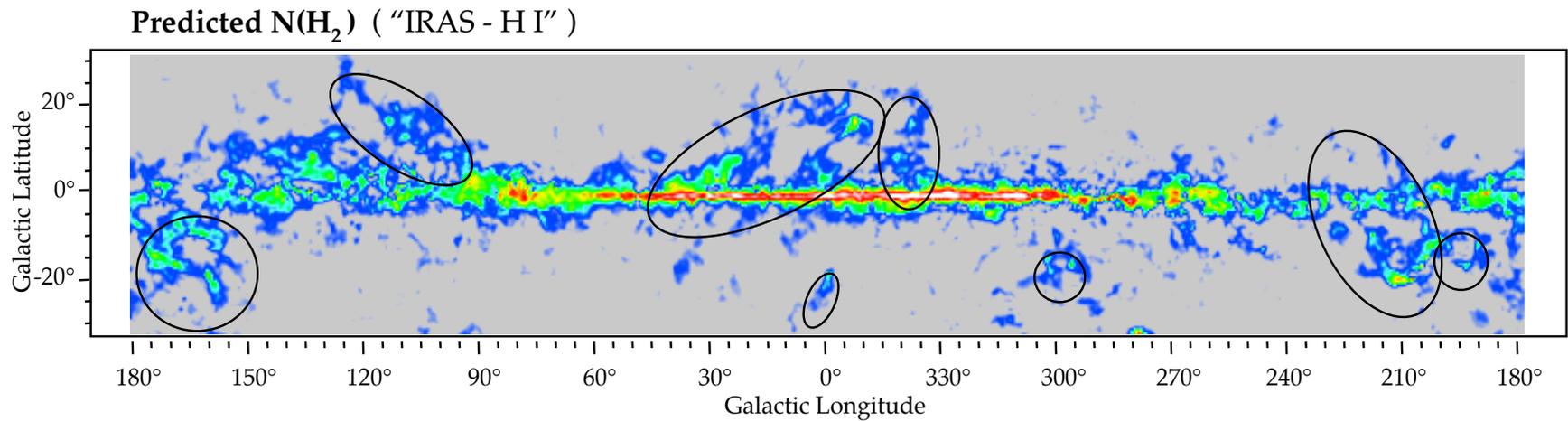
Data from Thomas Dame, CfA Harvard



Data from Thomas Dame, CfA Harvard

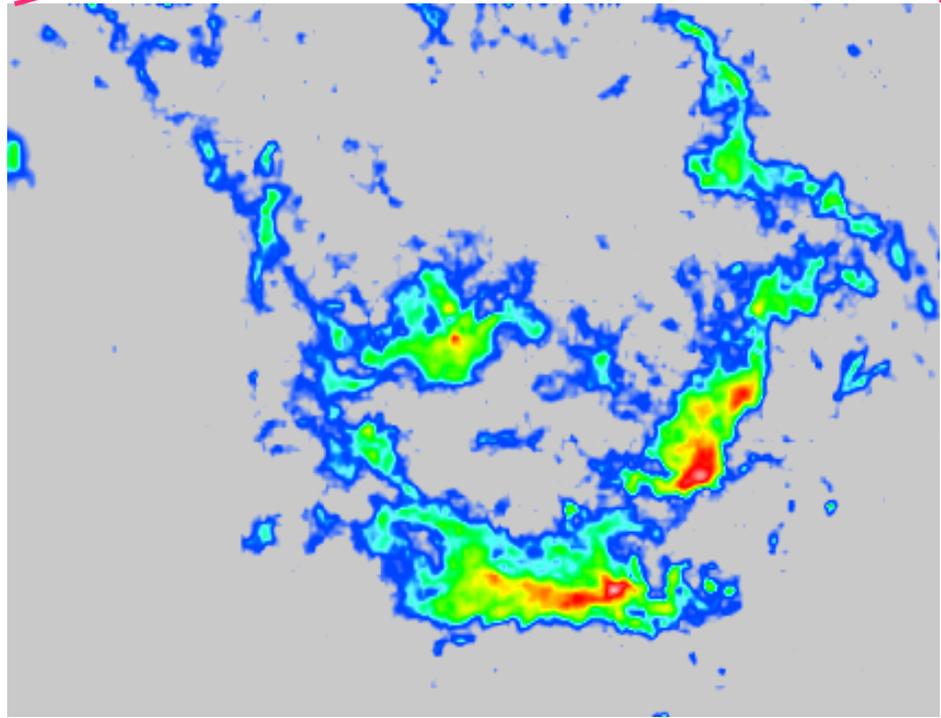
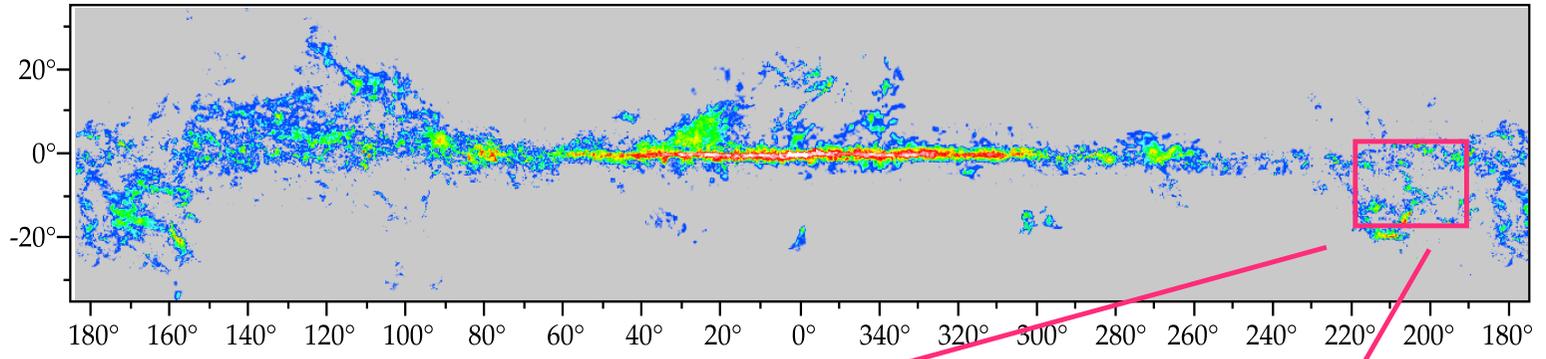


Data from Thomas Dame, CfA Harvard

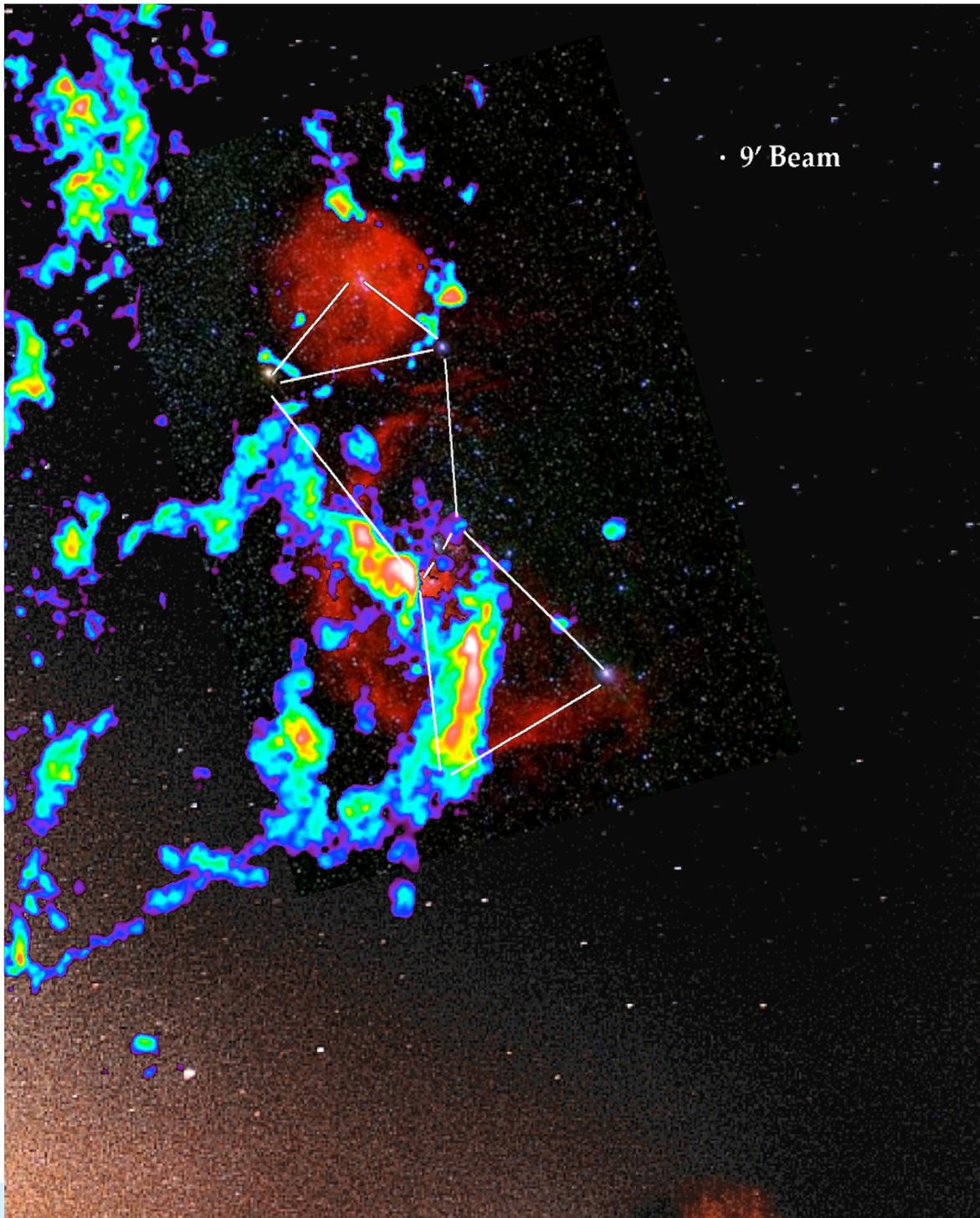


Taurus Polaris Flare
Cepheus Ophiuchus | Lupus Orion
RCrA Chamaeleon λ -Ori

Data from Thomas Dame, CfA Harvard



Orion in radio wavelengths

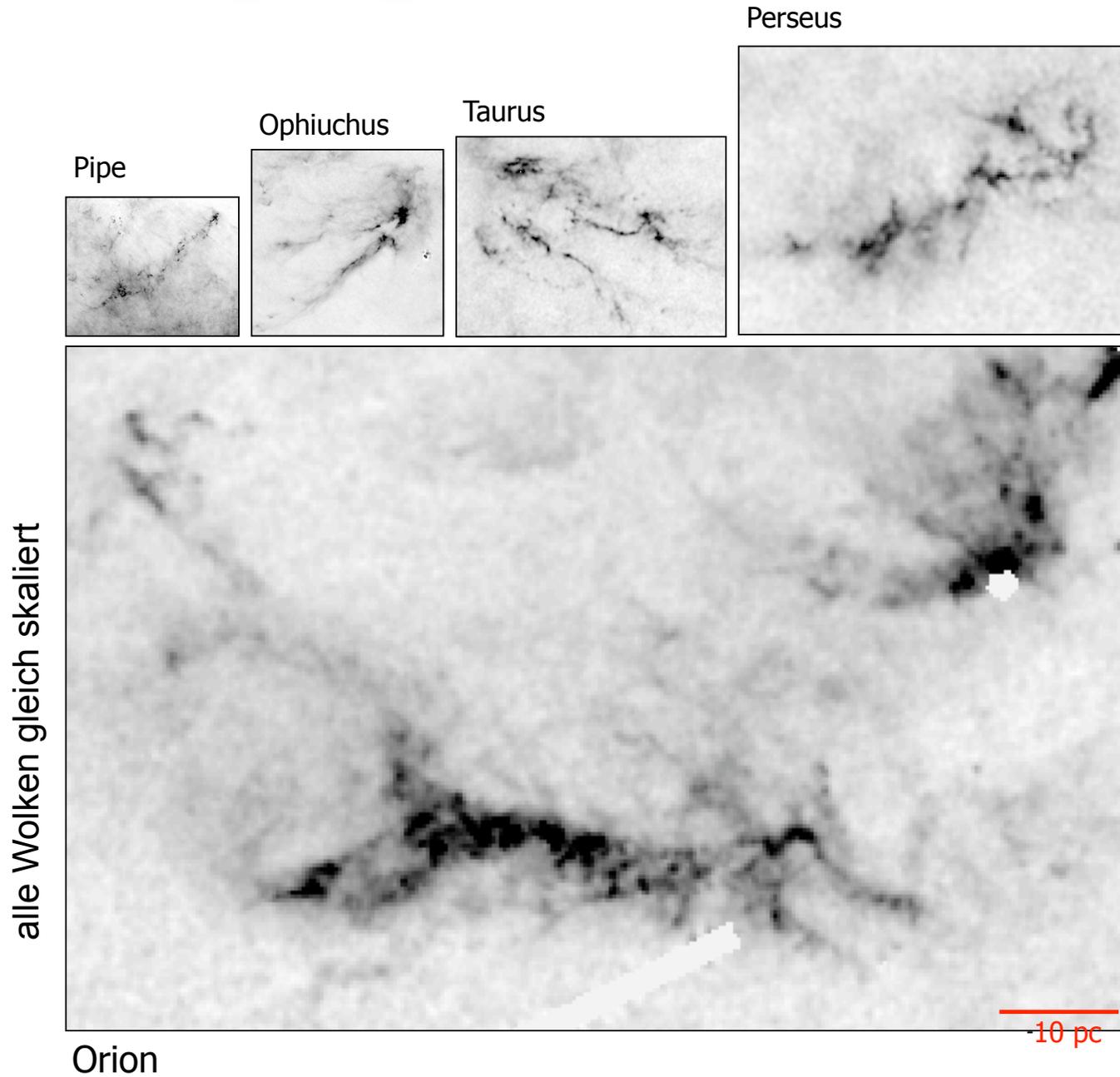


We see

- *stars* (in optical light)
- *atomic hydrogen* (in $H\alpha$ -- red)
- *molecular hydrogen H_2* (radio -- color coded)



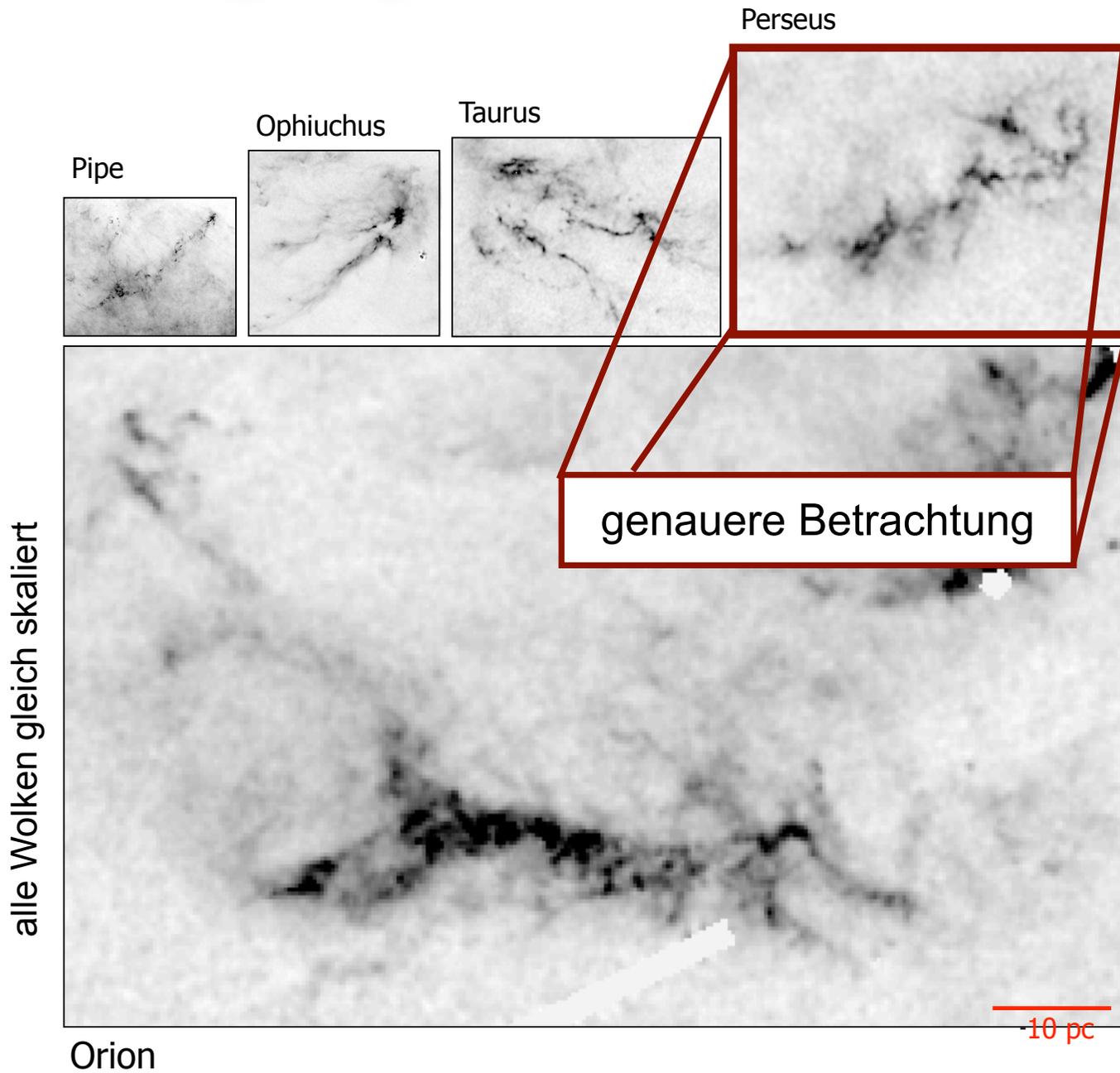
nahegelegene Wolken



(from A. Goodman)



nahegelegene Wolken



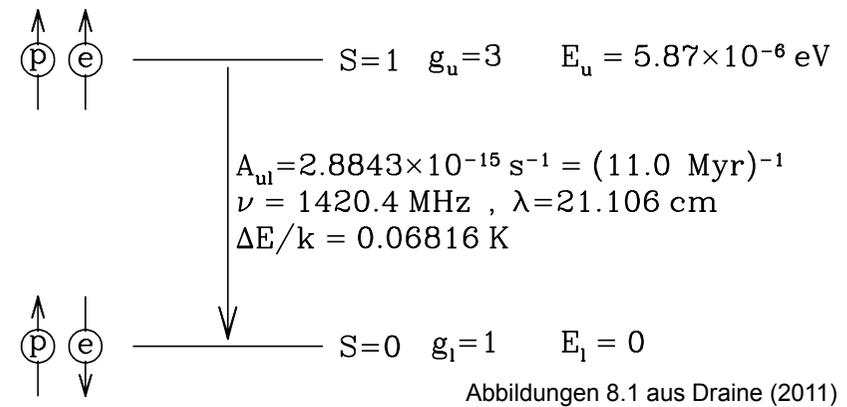
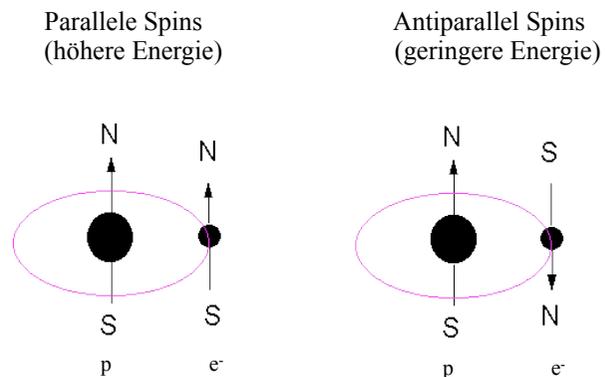
(from A. Goodman)

Atomares Gas

Atomares Gas

Atomarer Wasserstoff: **HI**

- wichtigster Nachweis: über 21 cm Linie (1420 MHz, 6×10^{-6} eV)
- Hyperfeinstruktur-Übergang

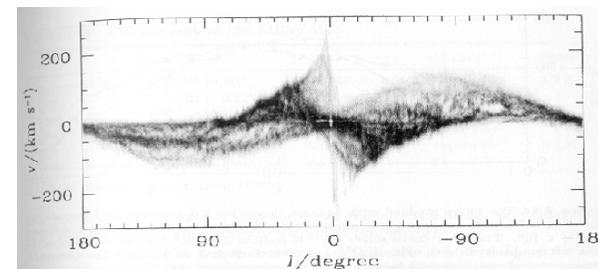


Typische Zeitskalen:

- Anregung durch Kollisionen ($t_c \sim 500$ Jahre)
- Abregung durch Strahlung ($t_r \sim 1 \times 10^7$ Jahre)

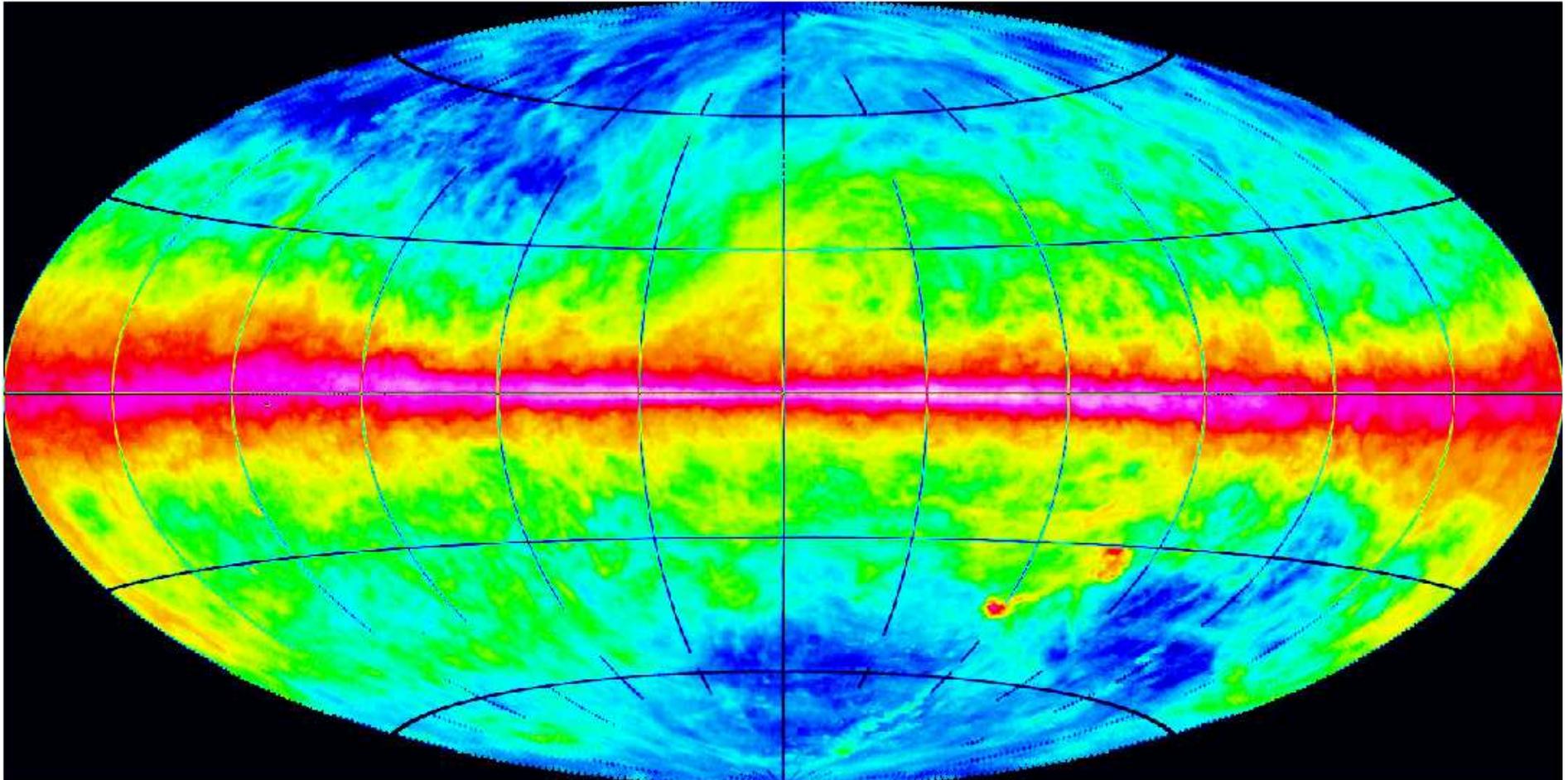
Optische dünne Strahlung, d.h. man kann sie gut zur Vermessung der Galaktischen Struktur verwenden.

Gut beschrieben über 2-Niveau-Modell



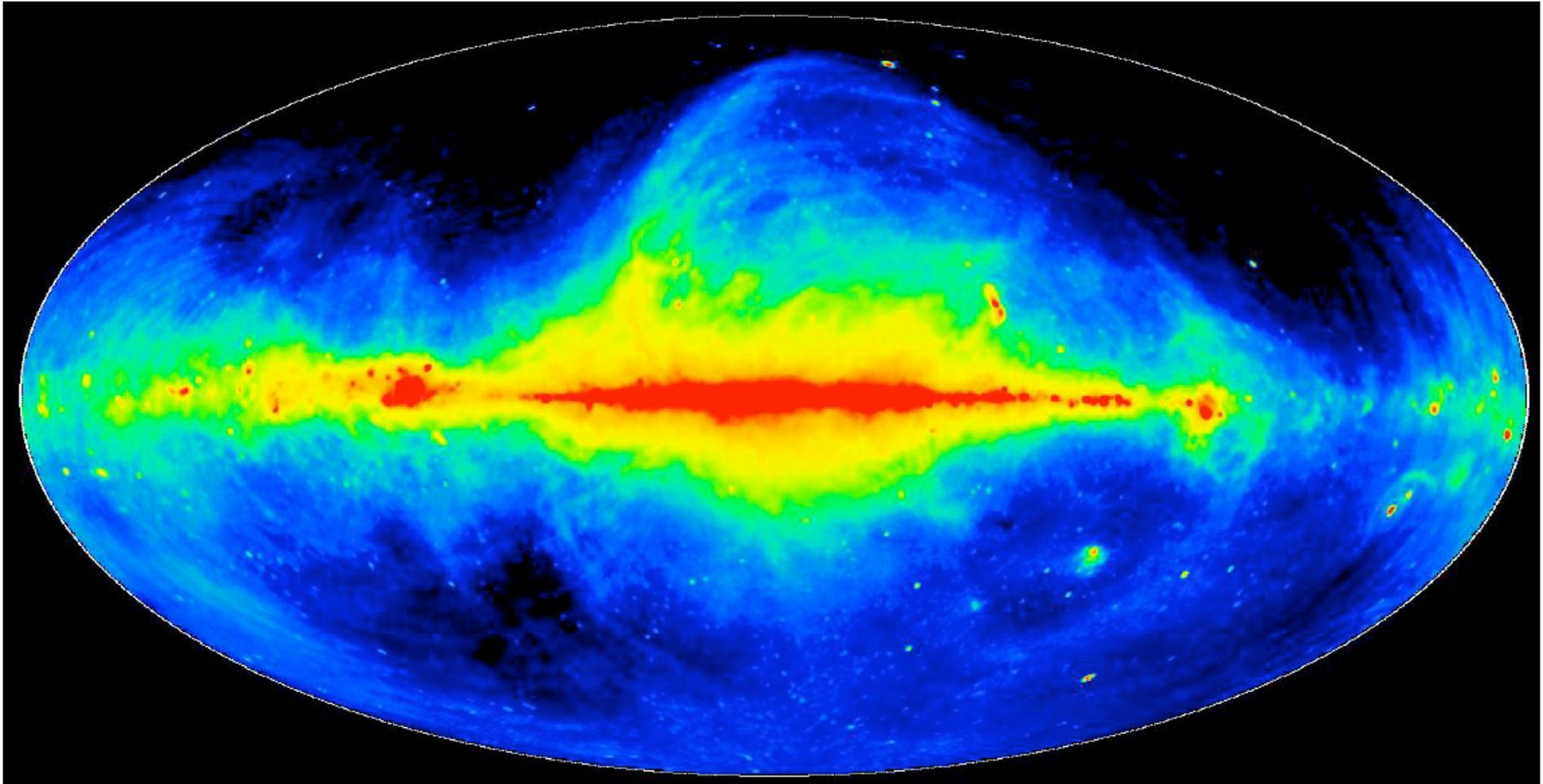
21 cm Durchmusterung der Milchstraße
(Leiden/Dwingeloo Survey)

HI-Himmel



Quelle: P. Kalberla et al. (Leiden/Argentine/Bonn (LAB) HI Survey)

Radiohimmel bei 21 cm Wellenlänge



Quelle: Max-Planck-Institut für Radioastronomie
P. Reich et al. 2001, A&A 376, 861 (Fachartikel in "[Astronomy & Astrophysics](#)")

Korrigiert für HI Emission in der Galaktischen Scheibe.

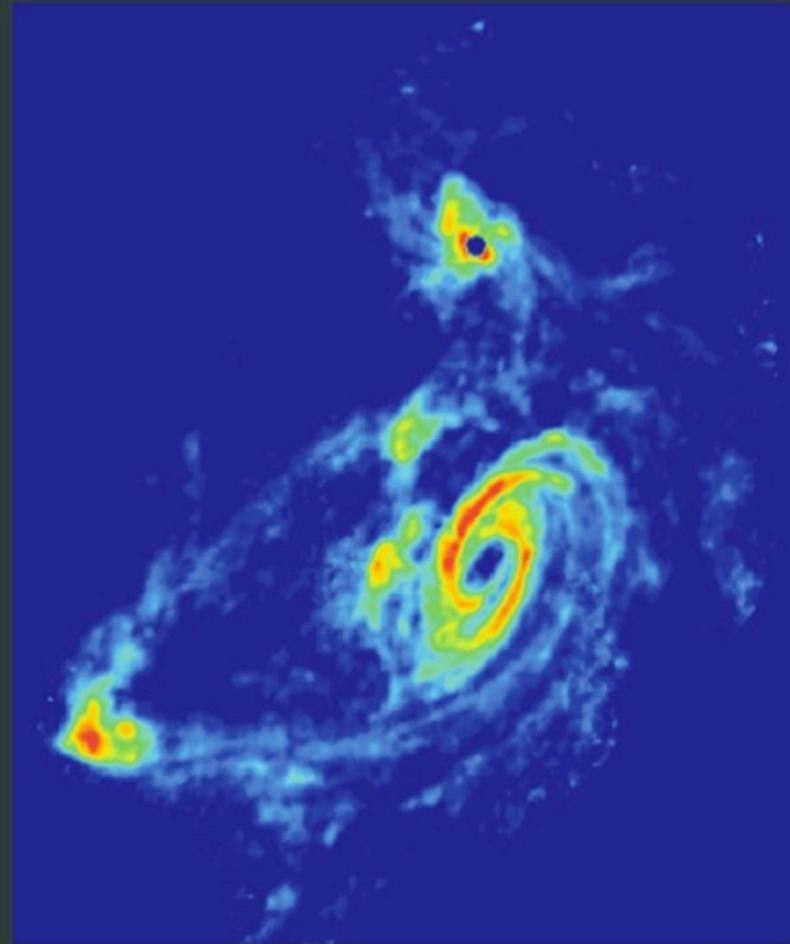
10.01.2013
Ralf Klessen

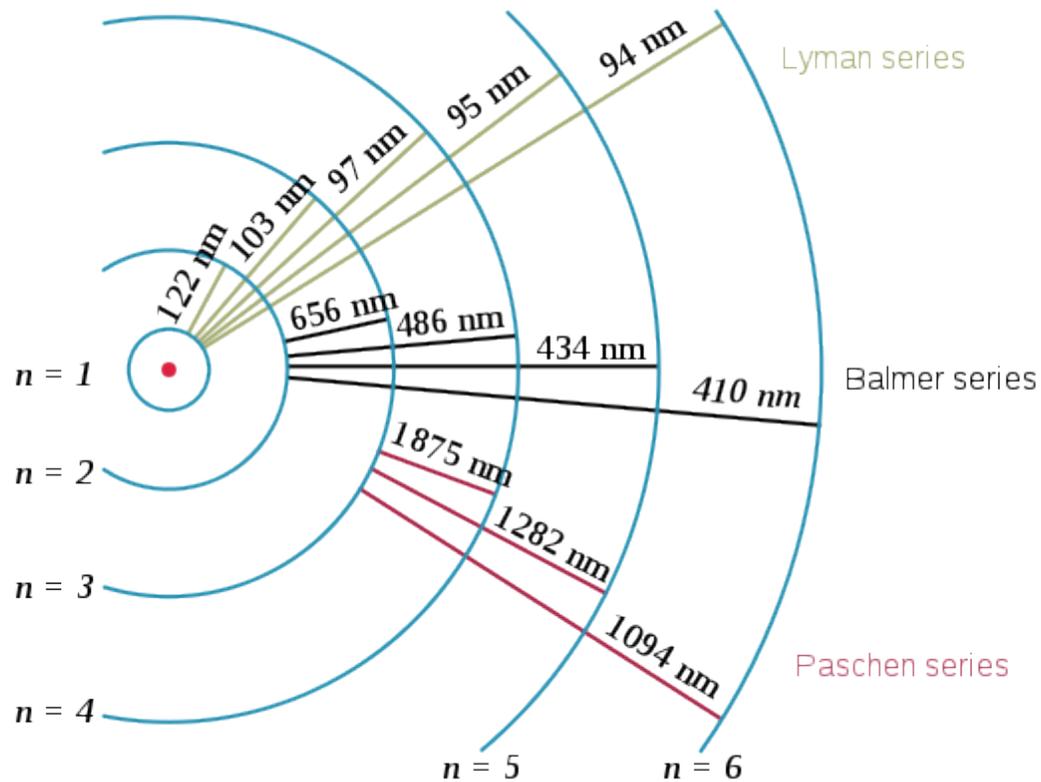
TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



21 cm HI Distribution





Rekombinationslinien des Wasserstoffs:

Lyman: in Grundzustand $n'=1$

Balmer: nach $n'=2$

Paschen: nach $n'=3$

Brackett: nach $n'=4$

Pfund: nach $n'=5$

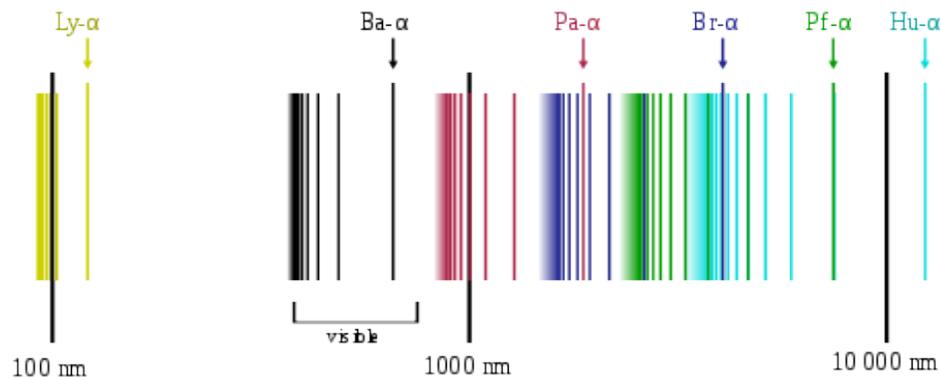
u.s.w.

Wellenlänge:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{(n')^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

mit

$$R = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$



Ionisiertes Gas





Carina with HST



Orion Nebula Cluster (ESO, VLT, M. McCaughrean)

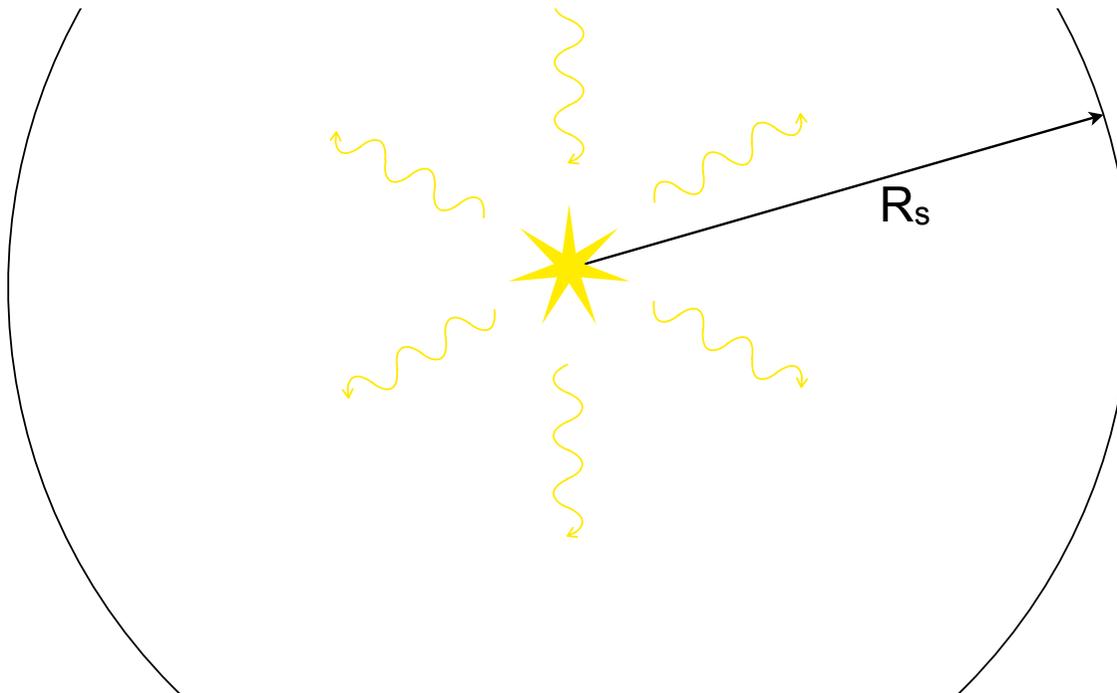
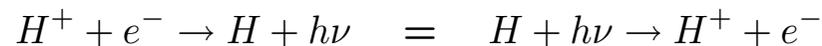
Photoionisiertes Gas 1

Hier betrachten wir Gas, das durch Strahlung mit $h\nu > 13.6 \text{ eV}$ ionisiert wird.

- Beispiel: Der Strahlungsenergie eines O8-Sterns mit $T \sim 35.000 \text{ K}$ liegt zu 32% über der Ionisationsgrenze von Wasserstoff.

Strömgren-Sphere:

- Massereicher Stern in homogener Gaswolke
- Rate Q_0 von UV Photonen = Zahl der Photonen mit $h\nu > 13.6 \text{ eV}$ pro Sekunde
- Im Gleichgewicht: Anzahl der Rekombinationen = Anzahl der Ionisationen im Volumen



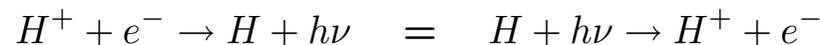
Photoionisiertes Gas 1

Hier betrachten wir Gas, das durch Strahlung mit $h\nu > 13.6 \text{ eV}$ ionisiert wird.

- Beispiel: Der Strahlungsenergie eines O8-Sterns mit $T \sim 35.000 \text{ K}$ liegt zu 32% über der Ionisationsgrenze von Wasserstoff.

Strömgren-Sphere:

- Massereicher Stern in homogener Gaswolke
- Rate Q_0 von UV Photonen = Zahl der Photonen mit $h\nu > 13.6 \text{ eV}$ pro Sekunde
- Im Gleichgewicht: Anzahl der Rekombinationen = Anzahl der Ionisationen im Volumen



- Mit der Rekombinationsrate α folgt für die Anzahl der Rekombinationen: $\frac{4\pi}{3} R_S^3 \alpha n_{H^+} n_{e^-}$

- Damit: $Q_0 = \frac{4\pi}{3} R_S^3 \alpha n_{H^+} n_{e^-}$

- Der Stern ionisiert eine Sphäre mit dem Radius:

$$R_S = \left(\frac{3Q_0}{4\pi \alpha n_{H^+} n_{e^-}} \right)^{1/3}$$

- Der Übergang von ionisiertem zu neutralem Wasserstoff ist sehr scharf (die Mittlere Freie Weglänge der Photonen ist viel kleiner als der Radius der Strömgren-Sphere)

Photoionisiertes Gas 2

Wie lange dauert es, bis das Strömgren-Volumen ionisiert ist?

- Wir kennen die Rate Q_0 und die Anzahl der H -Atome.

Damit ist

$$\tau_{\text{ion}} = \frac{(4\pi/3)R_S^3 n_H}{Q_0} = \frac{1}{\alpha n_H} \approx \frac{10^3 \text{ Jahre}}{n_H/100\text{cm}^{-3}}$$

- Wenn wir den Stern “abschalten”, dann gilt genau dasselbe: $\tau_{\text{rec}} = \frac{1}{\alpha n_H} \approx \frac{10^3 \text{ Jahre}}{n_H/100\text{cm}^{-3}}$
- Die Temperatur des ionisierten Gases ist sehr hoch, etwa 10^4 K. Der Druck in der Strömgren-Sphäre ist größer als im umgebenden atomaren Gas. Das heißt, die Sphäre beginnt sich auszudehnen. Auf welchen Zeitskalen passiert dies?
- Als Abschätzung berechnen wir die Schalllaufzeit durch die Sphäre:

Schallgeschwindigkeit: $c_s = (2kT/m_H)^{1/2} \approx 12.8 \text{ km/s}$ bei 10^4 K

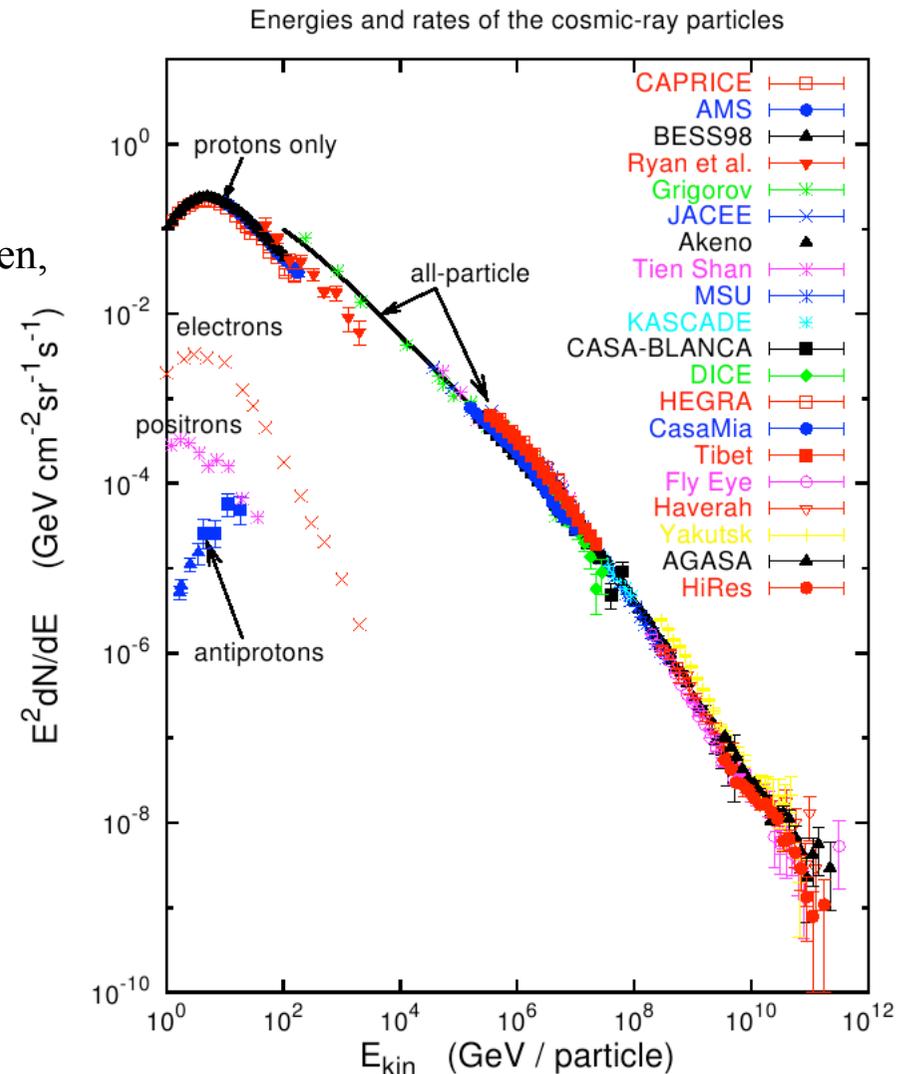
Damit: $\tau_{\text{dyn}} = \frac{R_S}{c_s} \ll \tau_{\text{ion}}$ Typische Werte liegen bei $\sim 10^5$ Jahren

- Das heißt, die Strömgren-Sphäre ist “sofort” ionisiert, und beginnt dann auf Zeitskalen von einigen 10^5 Jahren zu expandieren.

Kosmische Strahlung

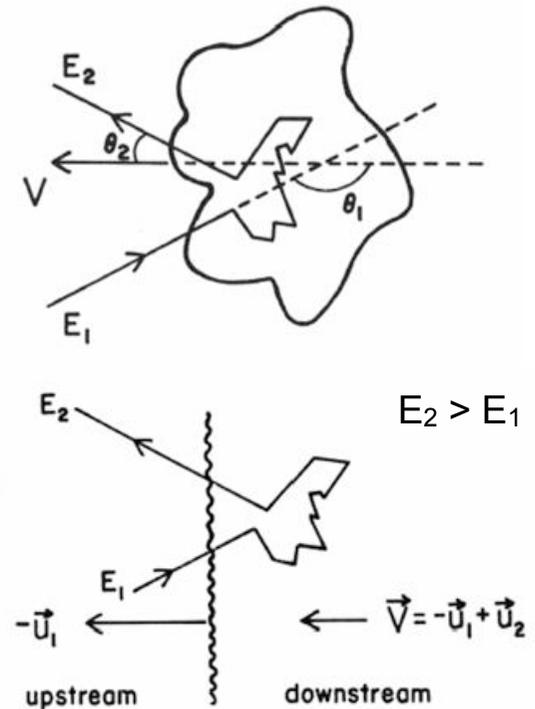
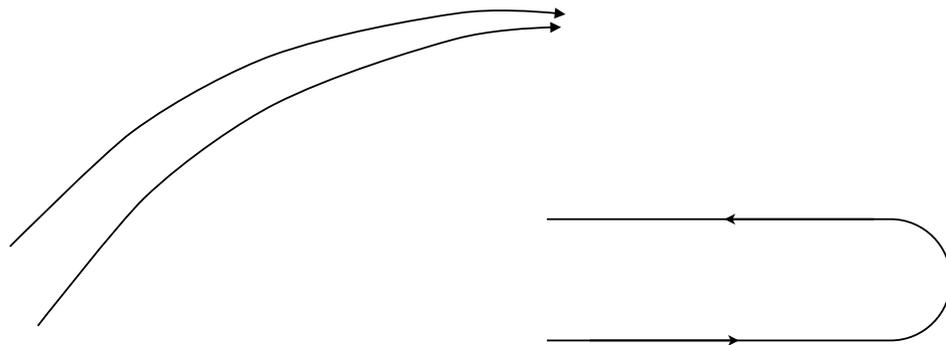
Kosmische Strahlung

- Die Kosmische Strahlung besteht aus geladenen Teilchen, die sich mit hoch-relativistischer Geschwindigkeit bewegen.
- Meist Protonen, auch Elektronen
- Beschleunigung in expandierenden Supernova Schalen (vielfache “Streuung” an Magnetfeldlinien, Fermi-Effekt)
- Energiebereich $E = 10^8 - 10^{20}$ eV
- Bewegen sich entlang von Magnetfeldlinien (auch auch leichte Diffusion \perp dazu)



Kosmische Strahlung

- Die Kosmische Strahlung besteht aus geladenen Teilchen, die sich mit hoch-relativistischer Geschwindigkeit bewegen.
- Meist Protonen, auch Elektronen
- Beschleunigung in expandierenden Supernova Schalen (vielfache “Streuung” an Magnetfeldlinien)
- Fermi-Mechanismus: Beschleunigung von geladenen Teilchen in magnetisierten Schockfronten
- Teilchen können an Inhomogenitäten im Magnetfeld reflektiert werden. Dabei geht können sie kinetische Energie gewinnen.



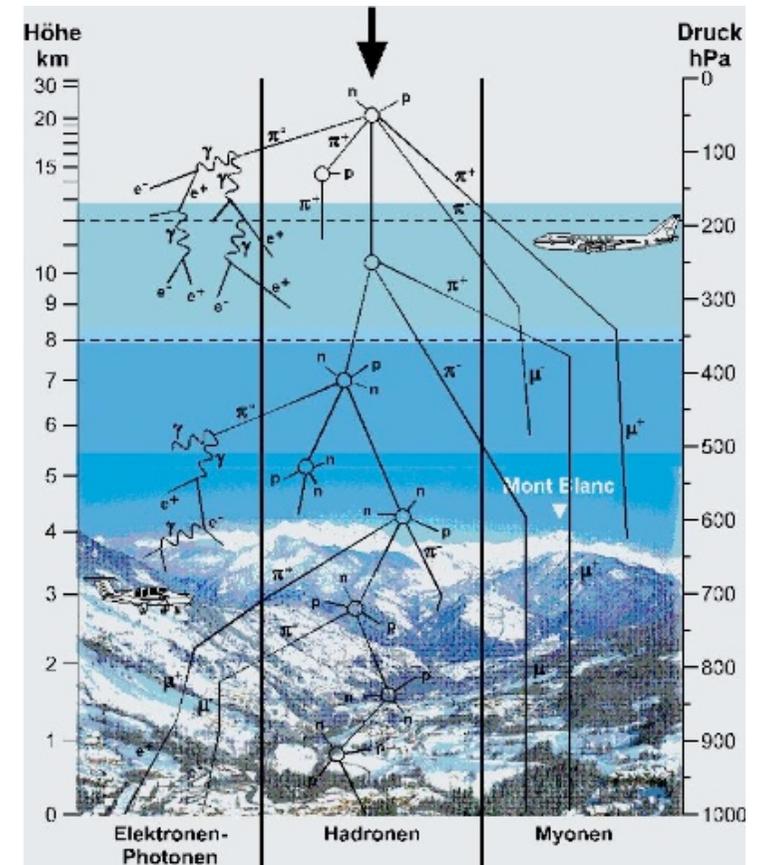
Gaisser, T. (1990, COSMIC RAY AND PARTICLE PHYSICS (CAMBRIDGE UNIV. PRESS 1990)

Kosmische Strahlung

- Nachweis auf der Erde zum Beispiel durch Teilchenschauer-Experimente



H.E.S.S. Teleskope in Namibia (PI: W. Hofmann, MPI-K)



Roland Kotte, Forschungszentrum Rossendorf