

9. ΝΕΦΗ ΜΟΡΙΑΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ

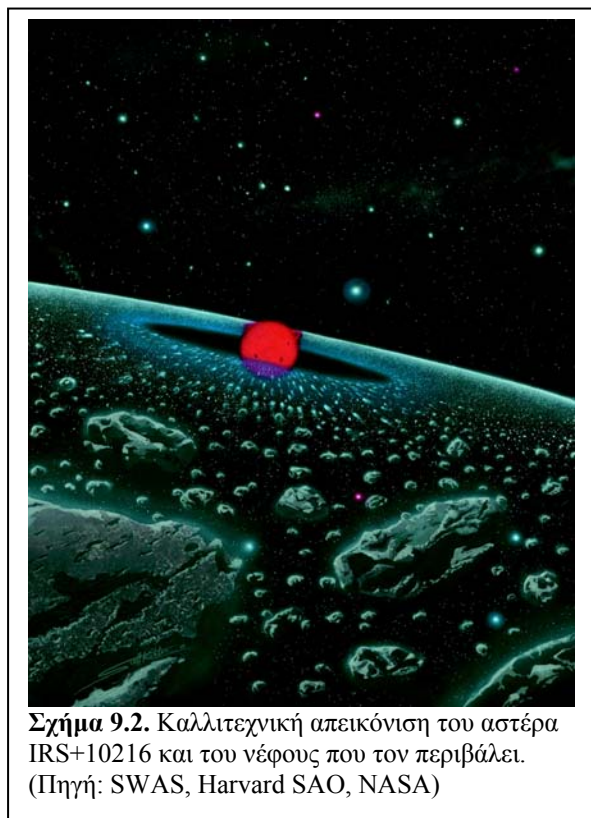
9.1 Εισαγωγή – Μέθοδοι παρατήρησης

Δύο χρόνια μετά την ανακάλυψη της γραμμής των 21 cm από τους **Ewen and Purcell**, ο **Shklovsky** πρότεινε τη διεξαγωγή ερευνών για τον εντοπισμό μοριακών ενώσεων στο μεσοαστρικό χώρο. Δυστυχώς η ακριβής συχνότητα εκπομπής (ή απορρόφησης) δεν ήταν γνωστή και οι πρώτες προσπάθειες δεν καρποφόρησαν. Με την εξέλιξη όμως των μεθόδων της **μοριακής φασματοσκοπίας** (molecular spectroscopy) οι συχνότητες εκπομπής πολλών μορίων μετρήθηκαν εργαστηριακά και το 1963 η αρνητική ρίζα υδροξυλίου (OH^-) ανιχνεύτηκε σε απορρόφηση στο φάσμα της ισχυρής ραδιοπηγής **Cas A**. Το 1968 ανιχνεύτηκε αμμωνία (NH_3) προς την διεύθυνση του κέντρου του Γαλαξία και το 1969 νερό (H_2O) και φορμαλδεύδη (H_2CO). Έκτοτε οι προσπάθειες εντάθηκαν. Το 1970, επτά νέες μοριακές ενώσεις ανακαλύφθηκαν στο μεσοαστρικό χώρο, ενώ σήμερα (2006) ο αριθμός τους πλησιάζει τις εκατόν πενήντα.



Σχήμα 9.1. Το νέφος του Ωρίωνα, στο οποίο έχει ανιχνευτεί πλήθος μοριακών ενώσεων (Πηγή: Russell Croman)

Οι μοριακές ενώσεις που έχουν ανιχνευθεί στο μεσοαστρικό χώρο του Γαλαξία μας δεν είναι ισοτροπικά κατανεμημένες. Οι περισσότερες έχουν εντοπισθεί σε ορισμένα **μοριακά νέφη** (molecular clouds) που περιέχουν μέχρι 10^6 ηλιακές μάζες με πυκνότητα από 10^3 έως 10^6 μόρια ανά κυβικό εκατοστό. Μερικά από τα πιο γνωστά μοριακά



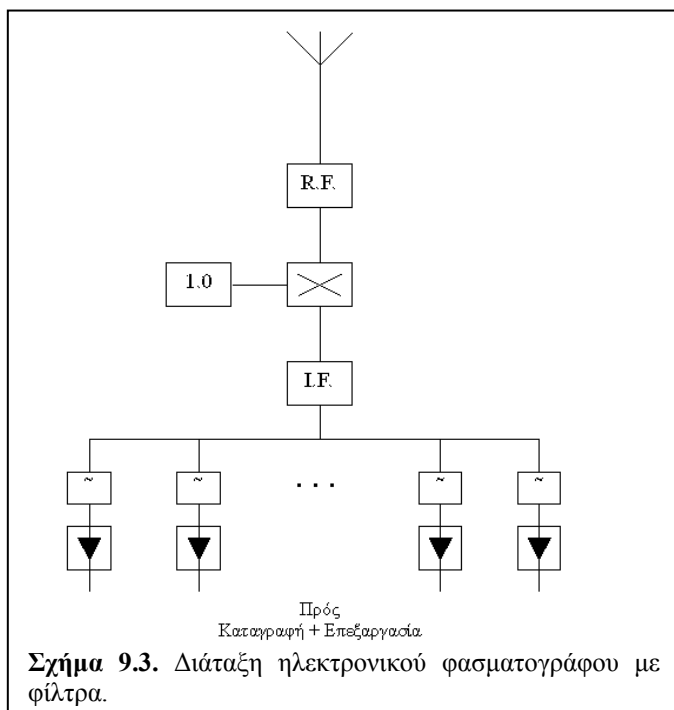
Σχήμα 9.2. Καλλιτεχνική απεικόνιση του αστέρα IRS+10216 και του νέφους που τον περιβάλλει. (Πηγή: SWAS, Harvard SAO, NASA)

νέφη είναι το νέφος **Ori-A MC-1** (Molecular Cloud 1) στο αστερισμό του Ωρίωνα (Σχήμα 9.1), το νέφος **Sgr B2** στο αστερισμό του Τοξότη, το **WS1** στον αστερισμό του Αετού, το **W3** στον αστερισμό του Περσέα, το μοριακό νέφος που περιβάλλει την πηγή Sgr A στο κέντρο του Γαλαξία, κ.α. Ένας σημαντικός αριθμός μοριακών ενώσεων έχει εντοπισθεί και πλησίον σε μία κατηγορία γιγάντων ή υπεργιγάντων αστέρων μεταγενέστερων φασματικών τύπων. Οι αστέρες αυτοί, είναι ψυχροί ($T \sim 2000 \text{ K}$) και περιβάλλονται από ένα πυκνό νέφος σκόνης, ακόμα χαμηλότερης θερμοκρασίας ($\sim 600 \text{ K}$), το οποίο απορροφά σχεδόν πλήρως το φως του αστέρα και το επανεκπέμπει στο υπέρυθρο. Το **περιβάλλον**

νέφος (circumstellar envelope) οφείλεται στον ισχυρό αστρικό άνεμο ($dM/dt \sim 10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot}/\text{έτος}$). Οι αστέρες αυτοί είναι πολύ αμυδροί σε οπτικά μήκη κύματος, αλλά πολύ λαμπροί στο υπέρυθρο. Τυπικό παράδειγμα είναι ο $18^{\text{ου}}$ μεγέθους αστέρας άνθρακος **IRC+10216** στον αστερισμό του Λέοντα (CW Leo), ο οποίος, στα $20 \mu\text{m}$ (υπέρυθρο), συγκαταλέγεται ανάμεσα στους δέκα λαμπρότερους αστέρες (Σχήμα 9.2).

Στο σημείο αυτό πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η δημιουργία αστέρων οφείλεται στη βαρυτική κατάρρευση μεσοαστρικών νεφών, η οποία πολλές φορές επιταχύνεται από κρουστικά μέτωπα που δημιουργούνται κατά τις εκρήξεις των υπερκαινοφανών (supernova). Οι πυρήνες των νεφών δημιουργούν νεαρούς αστέρες η ατμόσφαιρα των οποίων περιέχει αέρια και μοριακές ενώσεις, όπως αυτές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο αυτό.

Η κύρια συνιστώσα των μοριακών νεφών είναι το μοριακό υδρογόνο (H_2). Επίσης περιέχουν ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό ηλίου (He) και ατομικού υδρογόνου (HI – βλ. Κεφάλαιο 8). Έχουν όμως ανιχνευθεί και πολλές άλλες μοριακές ενώσεις. Στον Πίνακα 9.1 δίνονται στοιχεία για τις μοριακές ενώσεις που έχουν ανιχνευτεί στο μεσοαστρικό χώρο μέχρι τις αρχές του 2006. Στην πρώτη και δεύτερη δίνεται ο χημικός τύπος και η συνήθης ονομασία, στην τρίτη στήλη δίνονται μερικές αντιπροσωπευτικές συχνότητες στις οποίες έχει ανιχνευτεί η ένωση, στην τέταρτη στήλη δίνεται το έτος ανίχνευσης και στην πέμπτη στήλη



αναφέρονται στοιχεία για το μοριακό νέφος όπου ανιχνεύθηκαν και μερικές άλλες παρατηρήσεις. Για τις παρατηρήσεις ακτινοβολίας συνεχούς φάσματος στη Ραδιοαστρονομία χρησιμοποιούνται ειδικοί, ευαίσθητοι ενισχυτές, χαμηλού θορύβου και μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Οι ενισχυτές αυτοί δεν μας παρέχουν καμία πληροφορία για την κατανομή της ροής ακτινοβολίας κατά συχνότητα, πράγμα που είναι απαραίτητο για την μελέτη της γραμμικής εκπομπής των

μοριακών ενώσεων. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί φασματογράφοι. Οι πρώτοι φασματογράφοι που κατασκευάστηκαν για το σκοπό αυτό περιείχαν ένα μεγάλο αριθμό φίλτρων (Σχήμα 9.3) η κατασκευή των οποίων είναι ιδιαίτερα επίπονη. Σήμερα χρησιμοποιούνται **ψηφιακοί φασματογράφοι αυτοσυσχέτισης** (digital autocorrelators) των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο **μετασχηματισμό Fourier** (Fourier transform) της **συνάρτησης αυτοσυσχέτισης** (autocorrelator function) του χρονικά μεταβαλλόμενου σήματος πριν αυτό να ανιχνευθεί. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ενός χρονικά μεταβαλλόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση :

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} u(t)u(\tau+t)dt \quad (9.1)$$

όπου $u(t)$ είναι το χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα και $2T$ η διάρκεια του. Στη συνέχεια, ο μετασχηματισμός Fourier :

$$P(\nu) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-i2\pi\nu\tau} d\tau \quad (9.2)$$

μας δίνει το κατά συχνότητα αναλυμένο σήμα. Στην πράξη το αναλογικό σήμα εισόδου του φασματογράφου αυτοσυσχέτισης, καταρχήν ψαλιδίζεται και μετατρέπεται σε δυαδικό ψηφιακό (0, 1) όπου σαν (1) λαμβάνονται τα θετικά του τμήματα και σαν (0) τα αρνητικά. Κατά τη μετατροπή του σε ψηφιακό σήμα, σημαντικό ρόλο παίζει ο **ρυθμός**

δειγματοληψίας (Δt , sampling rate) από τον οποίο εξαρτάται το εύρος, B , του προς ανάλυση φάσματος. Σύμφωνα με το **θεώρημα του Nyquist** αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$B \leq \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (9.3)$$

όπου Δt είναι η διάρκεια του κάθε ψηφίου. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $R(T)$ που δίνεται από τη σχέση (9.1) υπολογίζεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στον ψηφιακό φασματογράφο αυτοσυσχέτισης ενώ ο μετασχηματισμός Fourier (σχέση 9.2) υπολογίζεται συνήθως με τη βοήθεια ενός υπολογιστή. Για διευκόλυνση του μετασχηματισμού Fourier ο αριθμός των καναλιών που χρησιμοποιούνται είναι δύναμη του 2 (π.χ. 256 ή 1024) και είναι σταθερός για το φασματογράφο από κατασκευής. Το μεγάλο πλεονέκτημα των ψηφιακών φασματογράφων αυτοσυσχέτισης είναι ότι μεταβάλλοντας το ρυθμό ψηφιοποίησης μπορούμε να αλλάξουμε το συνολικό εύρος του φάσματος της παρατήρησης και (εφόσον ο αριθμός των καναλιών είναι σταθερός) τη διακριτική ικανότητα του οργάνου.

Το εύρος των μοριακών γραμμών είναι συνήθως μικρό (≤ 100 kHz) και οφείλεται σε θερμική διεύρυνση της συχνότητας εκπομπής (ή απορρόφησης). Η ακριβής συχνότητα υπολογίζεται αφού πρώτα διορθωθεί η μετατόπιση (Doppler) που έχει υποστεί το σήμα λόγω α) της περιφοράς του Ήλιου γύρω από το κέντρο του Γαλαξία ($\sim 250 \text{ km s}^{-1}$), β) της περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο (εξαρτάται από την εποχή του έτους) και γ) της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της (εξαρτάται από την ώρα παρατήρησης). Αν μετά από αυτές τις διορθώσεις η συχνότητα, f , στην οποία παρατηρείται μια μοριακή γραμμή εξακολουθεί να είναι μετατοπισμένη ως προς τη συχνότητα ηρεμίας (f_0 , που μετρείται εργαστηριακά με μεθόδους της μοριακής φασματογραφίας) τότε αυτό οφείλεται σε φαινόμενο Doppler λόγω **απομάκρυνση** (red shift) ή **προσέγγιση** (blue shift) της πηγής. Η σχέση :

$$\mp \frac{|f - f_0|}{f_0} = \pm \frac{v}{c} \quad (9.4)$$

μας βοηθά να υπολογίσουμε την ταχύτητα, v , απομάκρυνσης (ή προσέγγισης). Για τη γραμμή των 21 cm (1420 MHz) του ουδετέρου υδρογόνου η σχέση (9.4) δίνει $4.2 \text{ kHz}/(\text{km s}^{-1})$, ενώ για τις τέσσερις γραμμές του υδροξυλίου στα 18 cm (1612, 1665, 1667 και 1720 MHz) δίνει $5.5 \text{ kHz}/(\text{km s}^{-1})$.

Πίνακας 9.Ι. Μοριακές ενώσεις που έχουν ανιχνευθεί στο μεσοαστρικό χώρο

Μοριακή ένωση ή ρίζα	Σύνηθες όνομα	Ενδεικτικές συχνότητες	Έτος ανίχνευσης	Παρατηρήσεις
Διατομικά				
CH	Ρίζα μεθυλιδύνης	Οπτικά και	1937	CasA

		3263.79 MHz 3335.48 MHz 3349.19 MHz		
CN	Κυανιούχος ρίζα	Οπτικά και 113492 MHz	1940	Orion A, W51
CH ⁺	Μεθυλιδύνη (μεθύλιο κατιόν)	Οπτικά και 4232.6 MHz 3957.7 MHz 3745.3 MHz	1941	
OH	Ρίζα υδροξυλίου		1963	Sgr A
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα	115271.2 MHz	1970	Orion A
H ₂	Μοριακό υδρογόνο	Σειρά Lyman H _α	1970	Περσέας
SiO	Μονοξείδιο του πυριτίου	86847 MHz 130246 MHz	1971	Sgr B2, Orion A
CS	Θειούχος άνθρακας	146969.2 MHz	1971	Orion A, W51
SO	Μονοξείδιο του θείου	99295.85 MHz 138178.6 MHz	1973	Orion A
NS	Θειούχο άζωτο Nitrogen Sulfide	115.16 GHz	1975	Sgr B2
SiS	Θειούχο πυρίτιο silicon sulfide	90771.85 MHz 108924.6 MHz		
C ₂	Δικαρβίδιο Dicarbide	Οπτικά	1977	Cygnus OB2
NO	Μονοξείδιο του αζώτου	150.2 GHz	1978	Sgr B2
HCl	Υδροχλώριο	625.9 GHz και Υπεριώδες	1985	OMC-1
NaCl	Χλωριούχο νάτριο Sodium chloride	91169.7 MHz 104189.8 MHz 130223.4 MHz 143237.0 MHz 156248.6 MHz 169258.3 MHz	1987	IRC+10216
AlCl	Χλωριούχο Αλουμίνιο	87457.9 MHz 101032.4 MHz 145744.2 MHz 160311.9 MHz	1987	IRC+10216
KCl	Χλωριούχο κάλιο	99928.5 MHz 107611.3 MHz 130650.2 MHz 146002.1 MHz 153678.7 MHz 161349.4 MHz	1987	IRC+10216
AlF	Φθοριούχο Αλουμίνιο	98926.6 MHz 131898.0 MHz 164867.7 MHz 230793.9 MHz 263749.3 MHz 329641.6 MHz	1987	IRC+10216
PN	Νιτρίδιο του φωσφόρου Phosphorus nitride	93979.78 MHz 140967.7 MHz 234935.7 MHz 281914.1 MHz	1987	Orion KL, W51M, Sgr B2
SiC	Καρβιδικό πυρίτιο ρίζα Silicon carbide radical	80988 MHz 81062 MHz 83842 MHz 157494 MHz 161977 MHz	1989	IRC+10216

		162121 MHz 236288 MHz		
CP	Φωσφορούχος άνθρακας Carbon monophosphide	??	1990	IRC+10216
SiN	Νιτρίδιο του πυριτίου Silicon mononitride	??	1992	IRC+10216
SO ⁺	Μονοξείδιο του θείου (κατιόν) Sulfur monoxide cation	115804.40 MHz 116179.95 MHz 208590.02 MHz	1992	IC 443G
CO ⁺	Μονοξείδιο του άνθρακα (κατιόν) Carbon monoxide cation	235789.64 MHz 236062.55 MHz 353741.26 MHz	1993	M17SW
HF	Υδροφθόριο Hydrogen Fluoride	Υπέρυθρο 121.6973 μm	1997	Sgr B2
SH	Υδρίδιο του θείου Sulfur hydride	2530-2780 cm^{-1}	2000	R Andromedae
FeO	Οξείδιο του σιδήρου Iron Oxide	153135.3 MHz	2002	Sgr B2
N ₂	Μοριακό άζωτο	Υπεριώδες 958.6 $\text{\AA}$	2004	HD 124314
Τριατομικά				
H ₂ O	Υδωρ		1968	Orion A, Orion KL
HCO ⁺	Φορμυλικό ιόν	89.19 GHz	1970	
HCN	Υδροκυάνιο	88.6 GHz	1971	W3(OH), Orion A
OCS	Θειούχο καρβονύλιο Carbonyl Sulfide	109462.8 MHz	1971	Sgr B2
H ₂ S	Υδρόθειο	168.7 GHz	1972	??
HNC	Υδροϊσοκυάνιο hydrogen isocyanide	90665.0 MHz	1973	Sgr B2
N ₂ H ⁺	Διαζενύλιο diazenylium	93.174 GHz	1974	
C ₂ H	Ρίζα εθινυλίου ethynyl radical	87284.4 MHz	1974	Orion A
SO ₂	Διοξείδιο του θείου	83688.07 MHz 86639.10 MHz 97702.35 MHz	1975	Orion A
HCO	Ρίζα φορμυλίου Formyl Radical	86670.65 MHz	1976	W3, NGC 2024, W51
HNO	Ρίζα νιτροξυλίου Nitroxyl radical	81477.49 MHz 162937.9 MHz 244364.0 MHz	1977	Sgr B2, NGC 2024
HCS ⁺	Ρίζα θειοφορμυλίου thioformyl radical	85347.90 MHz 128020.7 MHz 213360.5 MHz 256027.8 MHz	1981	Sgr B2, Orion A
HOc ⁺	Υδροξυμεθυλιδύνιο Hydroxy- methyldynium	89487.4 MHz 178972.0 MHz 268451.1 MHz	1983	Sgr B2
c-SiC ₂	Δικαρβιδικό πυρίτιο silicon dicarbide	93065 MHz 94245 MHz 95579 MHz 115383 MHz 137180 MHz 140918 MHz	1984	IRC+10216

		141751 MHz 170742 MHz		
MgNC	Ισοκυανιούχο μαγνήσιο Magnesium isocyanide	83538.0 MHz 95469.3 MHz 107399.8 MHz	1986	IRC+10216
C ₂ S	Θειούχο δικαρβίδιο ρίζα C ₂ S radical	??	1987	TMC-1, Sgr B2, IRC+10216
C ₃	Ρίζα τριμερούς άνθρακα C3 radical	Οπτικά 2025-2056 cm ⁻¹	1988	
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα	658 cm ⁻¹	1989	AFGL 961, 989, & 890
CH ₂	Μεθυλένιο Methylene	??	1989	Orion-KL, W51
C ₂ O	Μονοξείδιο του δικαρβιδίου Dicarbon monoxide	22258.181 MHz 45826.706 MHz	1991	TMC-1
NH ₂	Αμίνη ρίζα Aminyl radical	462.4 GHz 469.4 GHz 461.4 GHz	1993	Sgr B2
NaCN	Κυανιούχο νάτριο Sodium Cyanide	77836.7 MHz 93206.1 MHz) 108472.0 MHz 138652.1 MHz	1994	IRC+10216
N ₂ O	Νιτρώδες οξύ Nitrous oxide	75369.2 MHz 100491.7 MHz 125613.7 MHz 150735.0 MHz	1994	Sgr B2
MgCN	Ισοκυανιούχο μαγνήσιο Magnesium isocyanide	112063.4 MHz 101877.6 MHz 91690.9 MHz	1995	IRC+10216
H ₃ ⁺	? μοριακό υδρογόνο Protonated molecular hydrogen	Οπτικά ? 2725.898 cm ⁻¹ 2726.219 cm ⁻¹	1996	GL2136, W33A
SiCN	Κυανιούχο πυρίτιο Silicon cyanide	83.0 GHz 94.0 GHz 105.1 GHz	2000	IRC+10216, CW Leo
AlNC	Ισοκυανιούχο αλουμίνιο Aluminum isocyanide	131642.2 MHz 143605.4 MHz 155567.4 MHz 215357.4 MHz 251213.0 MHz	2002	IRC+10216
SiNC	Ισοκυανιούχο πυρίτιο Silicon isocyanide	??	2004	IRC+10216
Με 4 άτομα				
NH ₃	Αμμωνία		1968	Sgr A
H ₂ CO	Φορμαλδεύδη	4830 MHz	1968	
HNCO	Ισοκυανικό οξύ	87925 MHz 21982 MHz	1972	Sgr B2
H ₂ CS	Θειοφορμαλδεύδη	3139.38 MHz	1973	Sgr B2
C ₃ N	Ρίζα κυανοαιθυλινίου cyanoethynyl radical	89045.7 MHz 98939.9 MHz 29.7 GHz	1977	IRC+10216 TMC-1, TMC-2
HNCS	Ισοθειοκυανικό οξύ Isothiocyanic Acid	82101.67 MHz 93829.92 MHz 105557.9 MHz	1979	Sgr B2

		129013.2 MHz 140740.4 MHz		
HOCO ⁺	υδρογονούχο διοξείδιο του άνθρακα protonated carbon dioxide	85530.68 MHz 106913.3 MHz 128294.9 MHz	1981	Sgr B2, Orion A
C ₃ H	προπυνυλιδίνη propynylidyne	32627.25 MHz 76199.17 MHz 97995.51 MHz 141636.1 MHz 163597.6 MHz	1985	TMC-1, IRC+10216
C ₃ O	Τρικαρβονικό μονοξείδιο Tricarbon Monoxide	19243.52 MHz 48108.48 MHz 76972.59 MHz 86593.68 MHz	1985	TMC-1
HCNH ⁺	?? υδροκυάνιο Protonated hydrogen cyanide	74111.3 MHz 148221.4 MHz 222329.4 MHz	1986	Sgr B2
H ₃ O ⁺	Υδρόνιο (κατιόν) Hydronium cation	307192.4 MHz 364797.43 MHz	1986	Orion A, Sgr B2
C ₃ S	Θειούχο τρικαρβίδιο Tricarbon sulfide	23122.985 MHz 40465.017 MHz 46245.594 MHz	1987	TMC-1, IRC+10216
C ₂ H ₂	Ακετυλένιο	Υπέρυθρο 13.7 μm	1989	GL 2591, W3, IRS 5, OMC-1
HC ₂ N	?? ρίζα HCCN radical	87767.5 Mhz 88214.0 Mhz 109771.8 Mhz 110044.2 Mhz 131761.8 Mhz 153745.6 Mhz	1991	IRC+10216
H ₂ CN	?? μεθυλένιο Methylene amidogen	??	1994	TMC-1, Sgr B2
SiC ₃	??	80662.33 MHz 91844.83 MHz 93125.61 MHz 94634.66 MHz 102916.1 MHz	1999	IRC+10216
CH ₃		Υπέρυθρο 6.5 μm, 16.0 μm	2000	Sgr A
Με 5 άτομα				
HC ₃ N	Κυανοακετυλίνη	??	1971	Sgr B2
HCOOH	Μυρμηγκικό οξύ	4916 MHz	1971	Sgr B2
CH ₂ NH	Μεθανιμίνη Methanimine (Formaldimine)	??	1973	
NH ₂ CN	Κυαμίδιο Cyanamide	80504.5 MHz 100629.5 GHz	1975	Sgr B2
H ₂ CCO	Καιτένιο ?? ketene	81586.19 MHz 100094.5 MHz	1977	Sgr B2
C ₄ H	Ρίζα βουταδινυλίου butadiynyl radical	85633.9 MHz 95149.5 MHz 104667.3 MHz	1978	IRC+10216
SiH ₄	Υδρίδιο του πυριτίου (σιλάνιο) silane	Υπέρυθρο	1984	IRC+10216

$c\text{-C}_3\text{H}_2$	c-Κυκλο- προπυνυλιδίνη c-cyclopropynylidene	2 mm	1985	Sgr B2
CH_2CN	Ρίζα κυανομεθυλενίου cyanomethyl radical	??	1988	
C_5	?? ρίζα C5 radical	??	1989	IRC+10216
SiC_4	??	36810.1 MHz 39877.6 MHz 42945.0 MHz 46012.4 MHz 49079.8 MHz 85886.0 MHz	1989	IRC+1021
$l\text{-C}_3\text{H}_2$	l-Κυκλο- προπυνυλιδίνη c-cyclopropynylidene	20792.59 MHz 102992.38 MHz 104915.58 MHz 146876.06 MHz	1991	TMC-1
CH_4	μεθάνιο	Υπέρυθρο	1991	NGC 7538, IRS 9
HCCNC	Ισοκυανοακετυλένιο Isocyanoacetylene	39742.57 MHz 49677.90 MHz 89419.41 MHz	1992	TMC-1
H_2COH^+	?? φορμαλδεύδη Protonated formaldehyde	31914.6 MHz 36300.0 MHz 102065.8 MHz) 132219.7 MHz 168401.1 MHz 173766.9 MHz	1996	Sgr B2, Orion KL, W51
Με 6 άτομα				
CH_3OH	Μεθυλική αλκοόλη	834 MHz	1970	Sgr A, Sgr B2
CH_3CN	Κυανιούχο μεθύλιο Methyl Cyanide	110.3825 GHz	1971	Sgr A, Sgr B
NH_2CHO	Φορμαμίδιο Formamide	4620 MHz	1971	Sgr B2
CH_3SH	Μεθυλικό μερκαπτάν (θειαλκοόλη) methyl mercaptan	82101.67 MHz 93829.92 MHz 105557.9 MHz 129013.2 MHz 140740.4 MHz	1979	Sgr B2
C_2H_4	Αιθυλένιο	Υπέρυθρο	1980	IRC+10216
C_5H	Ρίζα πεντυνυλιδίνης Pentynylidyne radical	74497.17 MHz 84108.58 MHz 88914.14 MHz	1986	IRC+10216
CH_3NC	Ισοκυανιούχο μεθύλιο Methyl isocyanide	100525 MHz 140734 MHz	1988	Sgr B2, πιθανώς
HC_2CHO	?? Propynal	18650.3 MHz 18325.5 MHz 18978.8 MHz 37290.1 MHz	1988	TMC-1
HC_3NH^+	?? κυανοακετυλένιο Protonated cyanoacetylene	34631.914 MHz 43289.809 MHz	1994	TMC-1
C_5N	Κυανοβουταδινύλιο Cyanobutadiynyl Radical	25249.938 MHz 25260.649 MHz	1998	TMC-1
C_4H_2	Βουτατριενυλιδίνη	Υπέρυθρο	2001	CRL 618

	Butatrienylidene	15.9 μm 8 μm		
HC ₄ N	??		2004	IRC+10216
Με 7 άτομα				
CH ₃ CHO	Ακεταλδεύδη	1065 MHz, 3195 MHz, 112250 MHz	1973	Sgr B2
CH ₃ CCH	Μεθυλική ακετυλίνη Methlacetylene	85.45729 GHz	1973	Sgr B2
CH ₃ NH ₂	Μεθυλαμίνη Methylamine	73.0 GHz, 86.1 GHz	1974	Sgr B2, Orion A
CH ₂ CHCN	Κυανιούχο βινύλιο vinyl cyanide	1372 MHz	1975	Sgr B2
HC ₅ N	Κυανοδιακετυλίνη cyanodiacetylene	23963.88 MHz	1978	TMC2, IRC+10216
C ₆ H	Ρίζα εξατρινυλίου hexatriynyl radical	??	1986	IRC+10216
c-C ₂ H ₄ O	Οξείδιο του Αιθυλενίου Ethylene Oxide	39581.60 MHz 41579.43 MHz 47556.90 MHz 219512.82 MHz 235106.08 MHz 249623.57 MHz 254231.79 MHz	1997	Sgr B2
CH ₂ CHOH	Βινυλική αλκοόλη Vinyl alcohol	71830.39 MHz 89757.11 MHz 106949.49 MHz 139315.20 MHz 154460.95 MHz	2001	Sgr B2
Με 8 άτομα				
HCOOCH ₃	Μυρμηκικός μεθυλεστέρας Methyle formate	1610.249 MHz 1610.906 MHz	1975	Sgr B2
CH ₃ C ₃ N	Μεθυλική κυανοακετυλίνη methyl cyanoacetylene	20657.33 MHz 24788.78 MHz 28920.20 MHz 33051.62 MHz	1984	TMC-1
C ₇ H	?? ρίζα C ₇ H radical	83072.9 MHz 83261.0 MHz 84819.5 MHz 85013.0 MHz 86571.5 MHz	1997	IRC+10216
CH ₃ COOH	Οξικό οξύ Acetic acid	90203.35 MHz 100855.02 MHz	1997	Sgr B2, Orion KL, W51
CH ₂ OHCHO	Γλυκολική αλδεύδη Glycolaldehyde	71542.7 MHz 73347.3 MHz 82471.2 MHz 93053.2 MHz 103392.0 MHz 103667.4 MHz	2000	Sgr B2
C ₆ H ₂	Εξαπεντανυλιδίνη Hexapentaenylidene	Υπέρυθρο 16.1 μm 8.11 μm	2001	CRL 618
CH ₂ CHCHO	?? Propenal; Acrolein	18221.164 MHz 26079.449 MHz	2004	Sgr B2
CH ₂ CCHCN	?? Cyanoallene	20.2 GHz 20.6 GHz	2006	TMC-1

		25.2 GHz 25.7 GHz		
Με 9 άτομα				
CH ₃ OCH ₃	Διμεθυλικός αιθέρας	90.9 GHz	1974	Orion A
CH ₃ CH ₂ OH	αιθανόλη	85265.46 MHz 90117.51 MHz 104808.5 MHz	1975	Sgr B2
CH ₃ CH ₂ CN	Κυανιούχο αιθυλένιο ethyl cyanide		1977	OMC-1
HC ₇ N	Κυανο-τρίακετυλίνη cyanotriacetylene	10152.00 MHz 23687.89 MHz 24815.87 MHz	1978	IRC+10216, Heiles 2, TMC2
CH ₃ C ₄ H	Διακετυλαινικό μεθύλιο methyl diacetylene	20357.42 MHz 20357.23 MHz 24428.89 MHz	1984	TMC-1
C ₈ H	??	??	1996	IRC+10216
Με 10 άτομα				
(CH ₃) ₂ CO	Ακετόνη	82.9 GHz 112.4 GHz	1987	Sgr B2
HOCH ₂ CH ₂ OH	Αιθυλική γλυκόλη (αντιψυκτικό) Ethylene Glycol	75151.4 MHz 75186.1 MHz 75186.1 MHz 75299.9 MHz 92975.9 MHz	2002	
NH ₂ CH ₂ COOH*	Γλυκίνη	??	2003	Sgr B2, Orion KL, W51αμφοισβητείται
CH ₃ CH ₂ CHO	?? Propanal, propionaldehyde	21268.611 MHz 20875.059 MHz 19690.426 MHz 22279.346 MHz 21451.572 MHz 19182.445 MHz	2004	Sgr B2
Με 11 άτομα				
HC ₉ N	Κυανοοκτατετραύνη cyano-octatetra-yne	10458.63 MHz 14525.86 MHz 23963.90 MHz	1978	Heiles 2
Με 12 άτομα				
C ₆ H ₆	Βενζένιο Benzene	Υπεριώδεις 14.8374 μm	2001	CRL 618
CO(CH ₂ OH) ₂	1,3-Διυδροξυακετόνη 1,3-Dihydroxyacetone	??	2005	TMC-1
Με 13 άτομα				
HC ₁₁ N	?? Cyanodecapentayne	12848.728 MHz 13186.853 MHz	1997	TMC-1

9.2 Αρχές της ατομικής και μοριακής φασματοσκοπίας.

Στην παράγραφο αυτή θα δώσουμε μια πολύ συνοπτική εικόνα των αρχών της ατομικής και μοριακής φασματοσκοπίας. Η πλήρης ανάπτυξη τους ξεφεύγει από τους στόχους αυτών των σημειώσεων και συνήθως διδάσκεται αναλυτικά σε άλλα κεφάλαια της Φυσικής.

Στη ραδιοαστρονομία μας ενδιαφέρουν μεταπτώσεις χαμηλής ενέργειας, οι οποίες δίνουν μικρής συχνότητας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ($E = h \times f$) που εμπίπτει στο ραδιοφωνικό φάσμα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι παρακάτω μεταπτώσεις :

- α) Ατομική και μοριακή λεπτή υφή.
- β) Ατομική και μοριακή υπέρλεπτη υφή.
- γ) Μοριακή περιστροφή.

Οι μοριακές ταλαντώσεις εμπίπτουν στην περιοχή του υπερύθρου.

9.2.1 Ατομική φασματοσκοπία

Οι ατομικές μεταπτώσεις μπορούν να μελετηθούν με τη βοήθεια των τεσσάρων κβαντικών αριθμών (n, l, m, s):

- n : Ο κύριος κβαντικός αριθμός [$n = 1, 2, 3, \dots$]. Καθορίζει την ενέργεια του ηλεκτρονίου και την μέση απόσταση από τον πυρήνα.
- l : Ο δευτερεύων κβαντικός αριθμός [$l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$]. Καθορίζει το σχήμα της τροχιάς και τη στροφορμή του ηλεκτρονίου, $L = \sqrt{l(l+1)} \hbar$. Ηλεκτρόνια των οποίων ο δευτερεύων κβαντικός αριθμός είναι $l = 0$ ονομάζονται s ηλεκτρόνια, αν $l = 1$ ονομάζονται p ηλεκτρόνια, αν $l = 2$ ονομάζονται d ηλεκτρόνια, κ.τ.λ.
- m_l : Ο μαγνητικός κβαντικός αριθμός [$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$]. Καθορίζει τον προσανατολισμό του διανύσματος L ως προς τη διεύθυνση εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου.
- s : Η στροφορμή (spin) του ηλεκτρονίου λόγω περιστροφής γύρω από τον άξονα του [$s = \pm 1/2$]. Επίσης καθορίζει τον προσανατολισμό της στροφορμής ως προς τη διεύθυνση εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αριθμοί m_l και s έχουν υπόσταση μόνο όταν το άτομο βρίσκεται υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου (π.χ. **φαινόμενο Zeeman**).

Στην πράξη χρησιμοποιούμε συχνά και συνδυασμούς των παραπάνω κβαντικών αριθμών, π.χ. $J = |l + s|$ είναι η ολική στροφορμή του ατόμου που οφείλεται στα ηλεκτρόνια του και F

$= |I + J|$ είναι η συνολική στροφορμή του ατόμου, συμπεριλαμβανομένης και της στροφορμής I του πυρήνα.

Από την Κβαντομηχανική είναι γνωστό ότι για το υδρογόνο, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προέρχεται από μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από τη στοιβάδα που έχει κύριο κβαντικό αριθμό n_2 στη στοιβάδα με κύριο κβαντικό αριθμό n_1 δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{1}{\lambda} = z^2 R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad n_1 < n_2 \quad (9.5)$$

όπου z είναι ο ατομικός αριθμός και R η **σταθερή του Rydberg** :

$$R = \frac{2\pi^2 \mu e^4}{ch^3} \quad (9.6)$$

$\mu = \frac{M m_e}{M + m_e}$ είναι η **ανοιγμένη μάζα** όπου M = μάζα του πυρήνα και m_e = μάζα του

ηλεκτρονίου (συνήθως αγνοούμε το m_e στον παρονομαστή διότι $M \gg m_e$). Η ενέργεια που αντιστοιχεί σε μια στοιβάδα είναι ανάλογη προς το n^{-2} και επομένως είναι μεγαλύτερη όταν το n είναι μικρό. Για $n_1 = 1, 2, 3$ και 4 η σχέση (9.5) μας δίνει τις «οικογένειες» φασματικών γραμμών Lyman, Balmer, Paschen και Brackett αντίστοιχα που εμπίπτουν στο υπεριώδες μέχρι υπέρυθρο φάσμα. Όταν τα n_1 και n_2 είναι της τάξης του 100, τότε η διαφορά $\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ της σχέσης (9.5) είναι μικρή και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας εμπίπτει

στη ραδιοφωνική περιοχή του φάσματος. Για παράδειγμα όταν $n_1 = 109$ και $n_2 = 110$ τότε το μήκος κύματος, λ , είναι 5.99 cm (=5009 MHz). Οι φασματικές αυτές γραμμές, ονομάζονται **γραμμές επανασύνδεσης** (recombination lines) και ανάλογα αν η διαφορά $(n_1 - n_2)$ είναι 1, 2, 3 κτλ ονομάζονται α , β , γ κτλ. Για παράδειγμα η γραμμή που αντιστοιχεί στη μετάπτωση $(n_1 = 109, n_2 = 110)$ ονομάζεται 109 α ενώ η γραμμή που αντιστοιχεί στη μετάπτωση $(n_1 = 109, n_2 = 111)$ ονομάζεται γραμμή 109 β .

Η διάσπαση μιας ενεργειακής στάθμης (που χαρακτηρίζεται από τον κύριο κβαντικό αριθμό n) σε υποστάθμες λόγω των διαφορετικών τιμών που μπορεί να πάρει ο δευτερεύων κβαντικός αριθμός l ονομάζεται **λεπτή υφή** (fine structure). Οι πέντε πρώτες ενεργειακές στάθμες ονομάζονται s, p, d, f, g (βλέπε Πίνακα 9.Π).

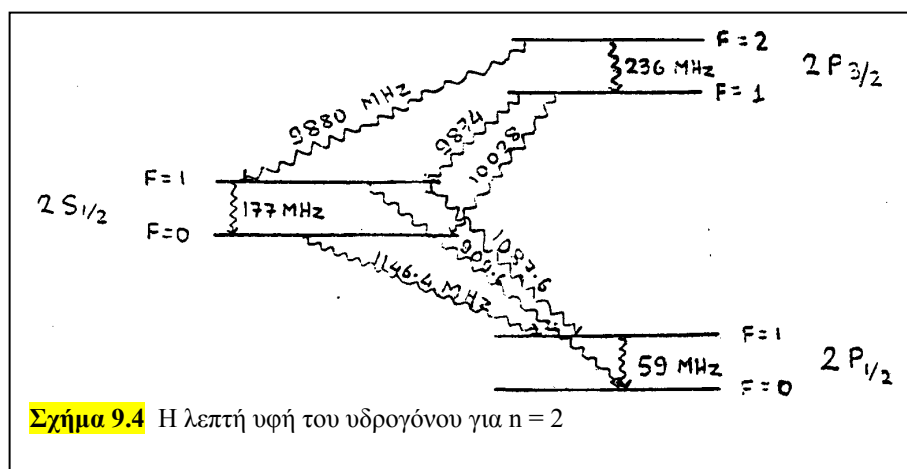
Όταν, για παράδειγμα, το $n = 2$, τότε το l μπορεί να πάρει τις τιμές $l_1 = 0$ ή $l_2 = 1$. Άρα ($J = |l_i + s_j|$) $J_1 = \frac{1}{2}$ ή $J_2 = \frac{3}{2}$ και αν πρόκειται για υδρογόνο με $I = \frac{1}{2}$, τότε το $F (= |I + J|)$ παίρνει τις τιμές $F_1 = 0$, $F_2 = 1$, $F_3 = 2$. Σχηματικά το πλήρες διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του υδρογόνου για $n = 2$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.4.

Πίνακας 9.Π. Λεπτή υφή για τις τέσσερις πρώτες ενεργειακές στοιβάδες.

(n, l)	$l = 0, s$	$l = 1, p$	$l = 2, d$	$l = 3, f$
$n = 1$	1s	—	—	—
$n = 2$	2s	2p	—	—
$n = 3$	3s	3p	3d	—
$n = 4$	4s	4p	4d	4f

Παρατηρούμε ότι επιτρέπονται όλες οι μεταπτώσεις για τις οποίες $\Delta F = 0$ ή 1 εκτός από τη μετάπτωση $F = 0 \rightarrow F = 0$.

Η διάσπαση μιας ενεργειακής στάθμης σε υποστάθμες λόγω των διαφορετικών τιμών που μπορεί να πάρει το $F (= |I + J|)$ ονομάζεται **υπέρλεπτη υφή** (hyperfine structure). Οι



μεταπτώσεις υπέρλεπτης υφής που παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.4 δεν είναι σημαντικές και δεν έχουν παρατηρηθεί. Η γραμμή που οφείλεται στην υπέρλεπτη υφή $F = 1 \rightarrow 0$

της ενεργειακής στάθμης $n = 1$ (για την οποία $l = 0$, $s = \pm \frac{1}{2}$, $J = \frac{1}{2}$, $I = \frac{1}{2}$) έχει σαφώς παρατηρηθεί και είναι η γνωστή γραμμή των 21 cm (1420 MHz) που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 8. Η πιθανότητα αυθόρμητης μετάπτωσης από τη στάθμη $F = 1$ στην στάθμη $F = 0$ είναι πολύ μικρή (χρειάζεται κατά μέσο όρο 11×10^6 έτη), εντούτοις, λόγω της αφθονίας του υδρογόνου στη φύση, μας δίνει την ισχυρότερη φασματική γραμμή που παρατηρείται σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Η αντίστοιχη γραμμή ($F = \frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$) του δευτερίου (για το οποίο $I = 1$) στα 327.4 MHz δεν έχει ανιχνευθεί ακόμα.

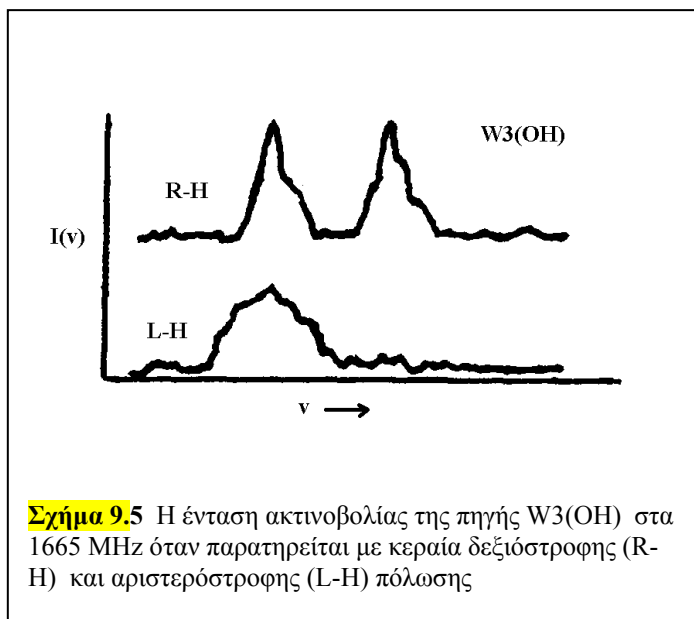
9.2.2 Μοριακή φασματοσκοπία..

Η θεωρητική μελέτη των ενεργειακών σταθμών των μορίων είναι πολύπλοκη δεδομένου πως εκτός από τις μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων των ατόμων, υπάρχουν και άλλες μεταβολές της ενέργειας που οφείλονται είτε στις ταλαντώσεις των ατόμων, είτε στην περιστροφή τους γύρω από κάποιο άξονα, είτε σε όλους τους παραπάνω μηχανισμούς. Τη μεγαλύτερη ενέργεια, βέβαια, έχουν οι μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων, έπονται οι ταλαντώσεις και μετά η περιστροφή. Μεταβολές της ενέργειας των μορίων που οφείλονται στην περιστροφή των ατόμων τους εμπίπτουν σχεδόν αποκλειστικά στο ραδιοφωνικό φάσμα. Τέλος υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί μεταβολής της ενέργειας των μορίων που αντιστοιχούν σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Χαρακτηριστικά αξίζει να αναφερθεί η **μετάπτωση αντιστροφής** (inversion transition) της αμμωνίας και η **αναδίπλωση – Λ** (Λ - doubling) του υδροξυλίου.

Κατά τη μελέτη των μεταβολών ενέργειας των μορίων λόγω περιστροφής των ατόμων τους, θεωρούμε ότι δε υφίστανται ηλεκτρονικές μεταπτώσεις και ταλαντώσεις. Παρ' όλες αυτές τις απλοποιήσεις η θεωρητική εύρεση των συχνοτήτων εκπομπής (ή απορρόφησης) είναι εξαιρετικά πολύπλοκη δεδομένου ότι δεν υπάρχει πλέον συμμετρία κατανομής της ύλης και του ηλεκτρονικού πεδίου ως προς ένα σημείο. Στην ατομική φασματοσκοπία, ο κβαντικός αριθμός J εκφράζει την ενεργειακή κατάσταση του ατόμου λόγω περιστροφής των ηλεκτρονίων του γύρω από τον πυρήνα. Στη μοριακή φασματοσκοπία υποχρεούμαστε να εισάγουμε δύο ακόμα κβαντικούς αριθμούς, τον J και τον K για την περιγραφή της στροφορμής του συμμετρικού μορίου. Η πλήρης ανάπτυξη της έννοιας των αριθμών αυτών ξεφεύγει από τους στόχους αυτών των σημειώσεων. Τέλος είναι δυνατόν να μελετηθεί και το φαινόμενο της υπέρλεπτης υφής (κβαντικός αριθμός F) με την εισαγωγή στις εξισώσεις μας της στροφορμής των πυρήνων.

9.3 Παρατηρήσεις μοριακών ενώσεων στο μεσοαστρικό χώρο.

Το **υδροξύλιο (OH^-)** παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε απορρόφηση στην ισχυρή ραδιοπηγή Cas A το 1963. Λίγο αργότερα οι τέσσερις γραμμές του στα 18 cm (1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz και 1720 MHz) ανιχνεύθηκαν και σε εκπομπή στα μοριακά νέφη W3 (OH) και W49. Όταν υπάρχει θερμοδυναμική ισορροπία, τότε λόγος των εντάσεων των τεσσάρων γραμμών στις παραπάνω συχνότητες είναι 1:5:9:1. Στο νέφος W3 η ένταση της



γραμμής στα 1665 MHz ήταν πολύ ισχυρή. Ο λόγος των εντάσεων των τεσσάρων γραμμών στις παραπάνω συχνότητες δεν είναι 1:5:9:1 (όπως θα έπρεπε αν επικρατούσε τοπική θερμοδυναμική ισορροπία). Επί πλέον έχει βρεθεί ότι η ακτινοβολία είναι ισχυρά κυκλικά πολωμένη (βλ. Σχήμα 9.5). Οι παρατηρήσεις αυτές σύντομα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για συντονισμένη ακτινοβολία και μάλιστα για

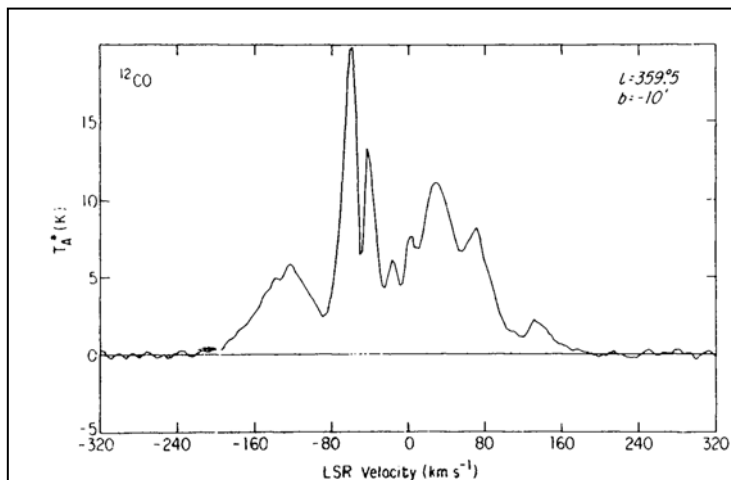
φαινόμενο maser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*). Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώθηκε όταν με τη βοήθεια συμβολομετρικών μετρήσεων και ευαίσθητων οργάνων βρέθηκε πως η πηγή W3 (και όλες οι πηγές που παρουσιάζουν ανάλογες πολωσιμετρικές ιδιότητες) έχει πολύ μικρές διαστάσεις (της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου της μοίρας) και είναι επίσης εξαιρετικά μεταβλητή. Αξίζει να σημειωθεί ότι πάντοτε, όταν η πηγή βρίσκεται κοντά σε αστέρες που εκπέμπουν έντονη υπέρυθη ακτινοβολία, τότε η γραμμή των 1612 MHz παρουσιάζεται ιδιαίτερα ισχυρή. Ο Turner ταξινόμησε τις πηγές υδροξυλίου σε τρεις κατηγορίες :

- **Κατηγορία I** : Στην κατηγορία αυτή ανοίκουν όλες οι πηγές στην περιοχή των οποίων βρίσκεται κάποια περιοχή ιονισμένου υδρογόνου. Στην κατηγορία αυτή η εκπομπή στα 1665 MHz και στα 1667 MHz είναι ιδιαίτερα ισχυρή.
- **Κατηγορία II** : Στην κατηγορία αυτή ανοίκουν οι πηγές που εμφανίζουν ισχυρές πλευρικές γραμμές, στα 1612 MHz και/ή 1720 MHz.
- **Κατηγορία III** : Στην κατηγορία αυτή ανοίκουν οι πηγές που παρουσιάζουν γραμμές απορρόφησης και κανονικές γραμμές εκπομπής (όχι maser).

Η συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των πηγών υδροξυλίου και περιοχών ιονισμένου υδρογόνου ή ψυχρών και εξελιγμένων αστερών (υπέρυθη ακτινοβολία) εξηγείται εύκολα δεδομένου πως τέτοιες περιοχές περιέχουν α) σημαντικό αριθμό ατόμων (10^8 cm^{-3}) και β) σωματίδια σκόνης τα οποία δρουν σαν καταλύτης κατά τη δημιουργία των μοριακών ενώσεων και βέβαια και του υδροξυλίου (OH^-).

Από τις υπόλοιπες μοριακές ενώσεις που αναφέρονται στον πίνακα 9.I σημαντική είναι η **φορμαλδεύδη** (H_2CO) η οποία έχει εντοπισθεί με γραμμές απορρόφησης μπροστά

από μερικά σκοτεινά νέφη, πράγμα που σημαίνει πως η θερμοκρασία της είναι < 3 K. Οι παρατηρήσεις εξηγούνται μόνο με **αντίστροφο φαινόμενο maser** (inverse maser) κατά το



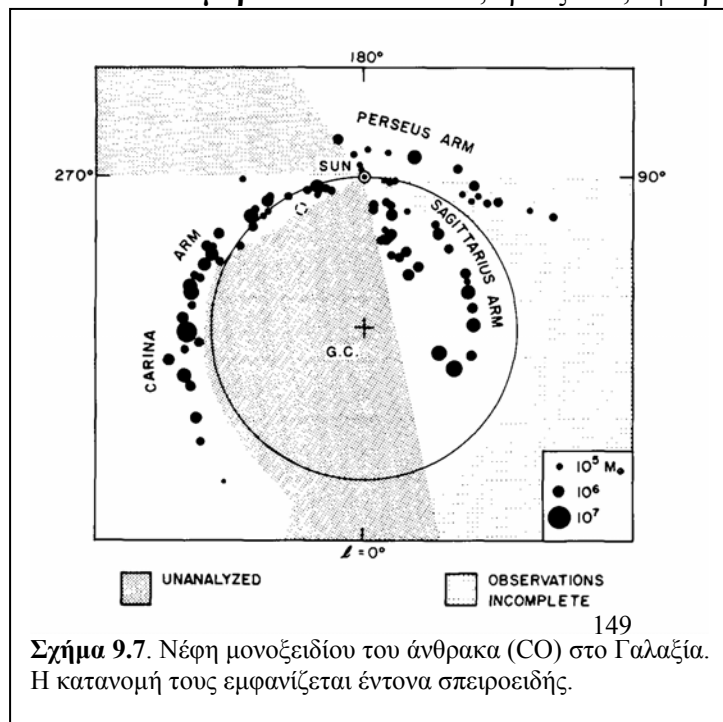
Σχήμα 9.6. Τυπικό φάσμα εκπομπής από μεσοαστρικό μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η τεταγμένη δίνει την ταχύτητα απομάκρυνσης ή προσέγγισης σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler. Η τετημένη δίνει τη θερμοκρασία κεραίας. Οι διάφορες κορυφές αντιπροσωπεύουν μεμονωμένα μεσοαστρικά νέφη.

οποίο η ανώτερη ενεργειακή στάθμη «ψύχεται» και απογυμνώνεται από ηλεκτρόνια κατά τη διάρκεια διαδικασιών αντίστροφων προς το φαινόμενο maser.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) (Σχήμα 9.6) αποτελεί μαζί με το υδροξύλιο, ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των ραδιοαστρονόμων γαι τρεις κυρίως λόγους α) είναι

σχετικά άφθονο στο μεσοαστρικό χώρο, β) παρατηρείται σε υψηλές συχνότητες και επομένως τα ραδιοτηλεσκόπια έχουν υψηλή διακριτική ικανότητα και γ) έχει ανακαλυφθεί και σε ενώσεις που περιέχουν και ισότοπα του άνθρακα και του οξυγόνου ($^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$) και έτσι μας δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το ρυθμό σύνθεσης των χημικών στοιχείων στον Γαλαξία. Εξαιτίας της υψηλής διακριτικής ικανότητας που μας παρέχουν οι παρατηρήσεις του μονοξειδίου του άνθρακα και της αφθονίας του, το μόριο αυτό χρησιμεύει γαι να καταγραφεί η σπειροειδής μορφή του Γαλαξία (Σχήμα 9.7).

Τέλος δεν πρέπει να παραλείψουμε να αναφέρουμε τις προσπάθειες ανακάλυψης **πολύπλοκων μοριακών ενώσεων**, βενζόλιο, φουράνιο ακόμα και απλών αμινοξέων,



Σχήμα 9.7. Νέφη μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο Γαλαξία. Η κατανομή τους εμφανίζεται έντονα σπειροειδής.

ενώσεων που αποτελούν τους δομικούς λίθους του γενετησιακού υλικού (DNA, RNA). Οι μέχρι σήμερα προσπάθειες δεν έχουν αποδώσει θετικά αποτελέσματα, παρ'όλο που μερικοί γνωστοί επιστήμονες (π.χ. ο F. Hoyle) ισχυρίζονται ότι εργαστηριακές μετρήσεις σε αμινοξέα παρουσιάζουν παρόμοια

χαρακτηριστικά στο φάσμα τους όπως και ορισμένες μοριακές πηγές του Γαλαξία μας.