

8. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΤΩΝ 21 cm.

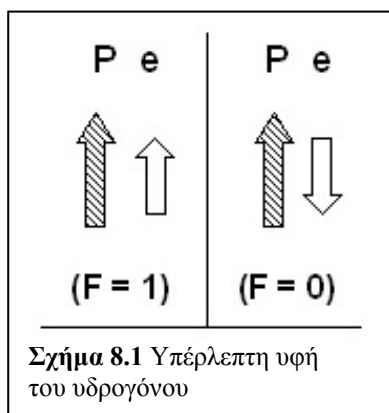
8.1 Γενικά

Η ανακάλυψη φασματικών γραμμών στο ραδιοφωνικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το Σεπτέμβριο 1951 από τους H.I. Ewen και E.M. Purcell στο Harvard, τους C.A. Muller και J.H. Oort στη Ολλανδία και τον J.L. Pawsey στην Αυστραλία σημαίνει πως έχουμε στα χέρια μας πλέον ένα εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο για την ανίχνευση της δομής του Γαλαξία μας αλλά και άλλων απομακρυσμένων γαλαξιών. Ο Ήλιος (και κατά συνέπεια και η Γη) βρίσκεται σε απόσταση 8.5 kpc (28 χιλιάδων περίπου ετών φωτός) από το κέντρο του Γαλαξία μας, ο οποίος, ως γνωστόν, είναι ένας σπειροειδής γαλαξίας, τύπου Sb. Οι σπειροειδείς γαλαξίες, όμως, περιέχουν σημαντική ποσότητα σκόνης και αερίων που απορροφούν ισχυρά σε οπτικά μήκη κύματος. Έτσι, η οπτική ακτινοβολία των αστερών και των άλλων αντικειμένων που βρίσκονται στο γαλαξιακό επίπεδο (γαλαξιακό πλάτος $\sim 0^\circ$) σε απόσταση μεγαλύτερη από 1-2 kpc (το πολύ μέχρι 5 ή 6 σε μερικές περιορισμένες περιοχές του γαλαξιακού επιπέδου) απορροφιάται από τη μεσοαστρική σκόνη και ποτέ δεν φθάνει μέχρι τη Γη. Πέραν αυτής της απόστασης οι παρατηρήσεις μας γίνονται σχεδόν αποκλειστικά σε υπέρυθρα μήκη κύματος και (κυρίως) σε ραδιοφωνικά.

8.2 Υπέρλεπτη υφή: Η γραμμή του υδρογόνου στα 21 cm

Η γραμμή απορρόφησης του υδρογόνου οφείλεται στην υπέρλεπτη υφή της βασικής (μη διεγερμένης) κατάστασης ($F = 1 \rightarrow F = 0$, Σχήμα 8.1). Η ενέργεια του υδρογόνου στην κατάσταση $F = 1$ (όταν η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι παράλληλη προς την στροφορμή του πρωτονίου) είναι κατά $\Delta E = 6 \times 10^{-6}$ eV μεγαλύτερη από την ενέργεια στη κατάσταση $F = 0$ (όταν η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι αντιπαράλληλη προς την στροφορμή του

πρωτονίου). Στη διαφορά ενέργειας οφείλεται η γραμμή του υδρογόνου, με συχνότητα $\nu = \Delta E/h = 1420.405752 \text{ MHz}$ ή μήκος κύματος $\lambda = c/\nu = 21.1061 \text{ cm}$.

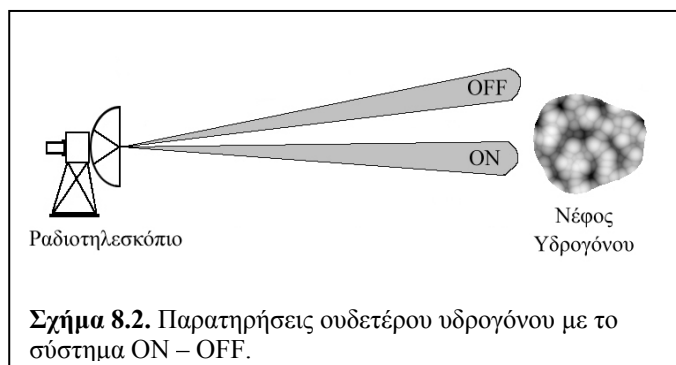


Την ύπαρξη της γραμμικής απορρόφησης του υδρογόνου είχε υπολογίσει θεωρητικά ο Ολλανδός H.C. van der Hulst το 1945. Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο της φύσης και γι' αυτό η ανακάλυψη της γραμμικής εκπομπής (και απορρόφησης) του στα 21 cm αποτελεί σταθμό στην ιστορία της ραδιοαστρονομίας

Η πιθανότητα αυθόρμητης μετάβασης από τη μία ενεργειακή κατάσταση στην άλλη, δίνεται από τον συντελεστή A_{10} του Einstein: $A_{10} = 2.85 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$. Δηλαδή, η πιθανότητα να συμβεί μια τέτοια αυθόρμητη μεταβολή της ενεργειακής κατάστασης ενός ατόμου ουδέτερου υδρογόνου είναι μία στα 11 εκατομμύρια χρόνια ($t_{F=1} = 1/A_{10} = 3.5 \times 10^{14} \text{ s}$). Η υπεραφθονία, όμως, του υδρογόνου στο Σύμπαν, εξασφαλίζει την ύπαρξη γραμμικής απορρόφησης, στα 21 cm, της ακτινοβολίας των αστερών και άλλων λαμπρών αντικειμένων του Γαλαξία προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και αν στρέψουμε τα τηλεσκόπιά μας.

8.3 Μέθοδοι παρατήρησης

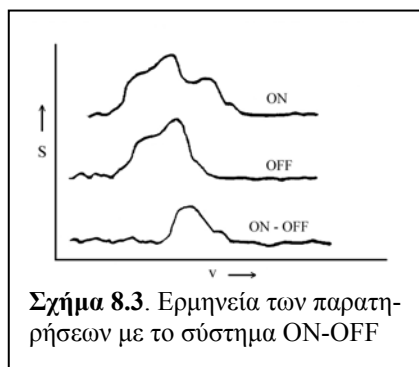
Η εξαιρετικά μεγάλη αφθονία του υδρογόνου, βέβαια, μπορεί να έχει και αρνητική επίδραση στις παρατηρήσεις μας με τη σύγχυση που προκαλεί το τοπικό υδρογόνο (ακόμα και το υδρογόνο της ατμόσφαιρας της Γης) στις παρατηρήσεις μακρινότερων περιοχών του Γαλαξία μας ή και άλλων γαλαξιών. Όπως γνωρίζουμε, λόγω της διαστολής του Σύμπαντος, όσο πιο απομακρυσμένο είναι ένα ουράνιο σώμα (π.χ. ένας γαλαξίας) από εμάς, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα απομάκρυνσής του. Επομένως οι φασματικές του γραμμές



θα παρουσιάζουν και ανάλογη μετατόπιση προς το ερυθρό και δεν θα συγχέονται με το τοπικό υδρογόνο. Όταν όμως επιχειρούμε να παρατηρήσουμε σχετικά κοντινές περιοχές του Γαλαξία μας το πρόβλημα του τοπικού υδρογόνου γίνεται ιδιαίτερα

οξύ. Σ' αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζουμε την μέθοδο "On-Off" που παραστατικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.2. Κατά το μισό χρόνο το ραδιοτηλεσκόπιο καταγράφει την ένταση της

ακτινοβολίας από την προς παρατήρηση περιοχή (π.χ. ένα νέφος υδρογόνου - *On*) και κατά



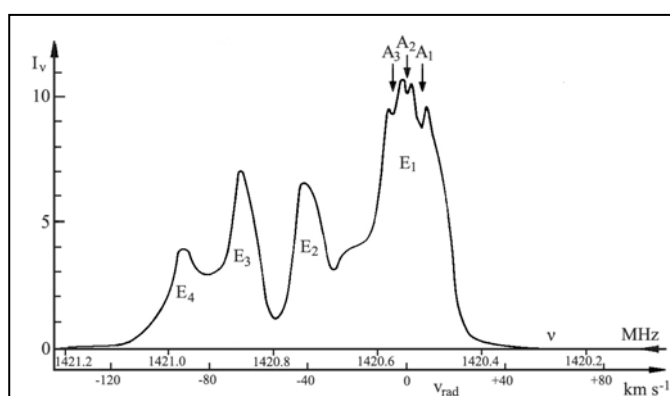
το άλλο μισό εκτός αυτής (*Off*). Προφανώς η αφαίρεση του φάσματος της δεύτερης παρατήρησης από την πρώτη (δηλαδή το σήμα *On - Off*) μας δίνει την ένταση ακτινοβολίας που προέρχεται αποκλειστικά από την προς παρατήρηση περιοχή ως συνάρτηση της συχνότητας (Σχήμα 8.3).

Βεβαίως, εάν το **τροφοδοτικό σύστημα** (feed) του τηλεσκοπίου είναι διπλής δέσμης, τότε η παρατήρηση “*On*” γίνεται με τη μία δέσμη και η παρατήρηση “*Off*” με την άλλη, πράγμα το οποίο επισπεύδει σημαντικά τις παρατηρήσεις.

8.4 Η σπειροειδής μορφή του Γαλαξία

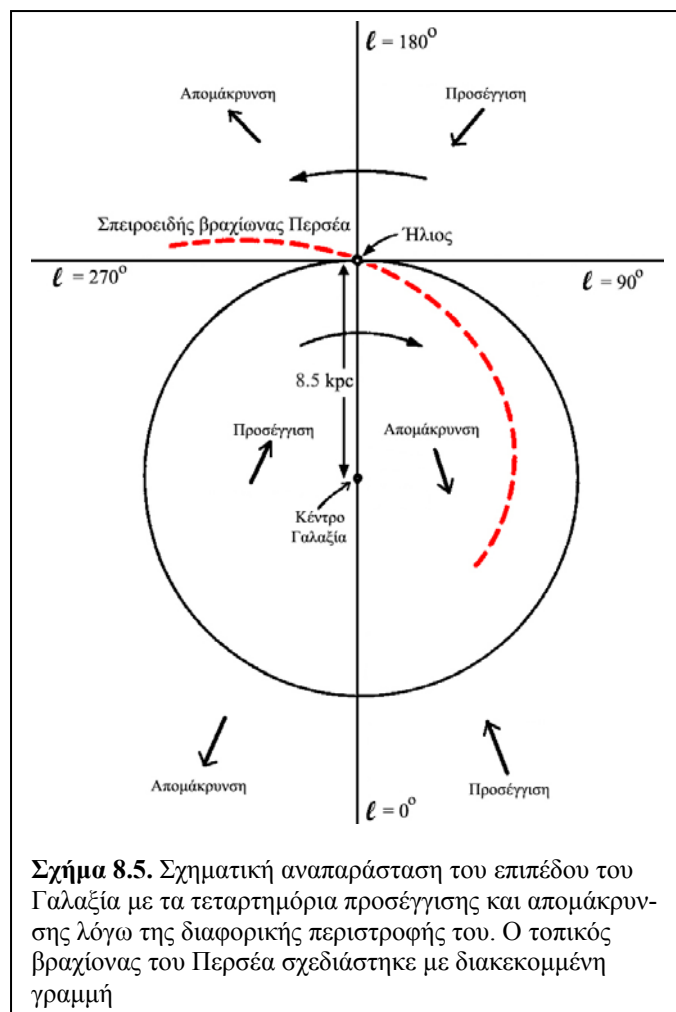
Αμέσως μετά την ανίχνευση της φασματικής γραμμής του υδρογόνου στα 21 cm, έγινε σαφές, ότι οι αστρονόμοι διέθεταν πλέον ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της δομής του Γαλαξία, δεδομένου ότι υπάρχει άφθονο υδρογόνο (συνήθως συγκεντρωμένο σε νέφη) σε αυτόν και ότι, σε αντίθεση προς την οπτική ακτινοβολία, τα ραδιοκύματα δεν απορροφώνται από τη μεσοαστρική σκόνη. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Doppler ($\Delta\lambda/\lambda_0 = v/c$), οι μετατοπίσεις, $\Delta\lambda$, της φασματικής γραμμής των 21 cm του υδρογόνου, μετατρέπονται εύκολα σε ταχύτητα προσέγγισης ή απομάκρυνσης των νεφών.

Συνήθως, στη διεύθυνση της ευθείας οράσεως υπάρχουν περισσότερα από ένα νέφη υδρογόνου, τα οποία μπορεί να βρίσκονται σε κάποιον σπειροειδή βραχίονα του Γαλαξία.



Σχήμα 8.4. Τυπικό φάσμα της γραμμής των 21 cm του μεσοαστρικού υδρογόνου (ένταση ακτινοβολίας ως συνάρτηση της συχνότητας). Διακρίνονται τέσσερις συνιστώσες εκπομπής (E_1 έως E_4). Στη συνιστώσα E_1 υπάρχουν τρεις γραμμές απορρόφησης (A_1 έως A_3). Κατά τη μετατροπή της συχνότητας σε ακτινική ταχύτητα (v_{rad}) έχει ληφθεί υπ' όψη η διεύθυνση κίνησης της Γης και του Ήλιου, τη στιγμή της παρατήρησης.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φάσμα να περιέχει περισσότερες από μία συνιστώσες οι οποίες αντιστοιχούν σε νέφη υδρογόνου τα οποία έχουν διαφορετικές ταχύτητες απομάκρυνσης ή προσέγγισης. Στο Σχήμα 8.4 παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα γραμμής υδρογόνου στο οποίο διακρίνουμε τέσσερις συνιστώσες εκπομπής (E) υδρογόνου και τρεις γραμμές απορρόφησης (A). Οι

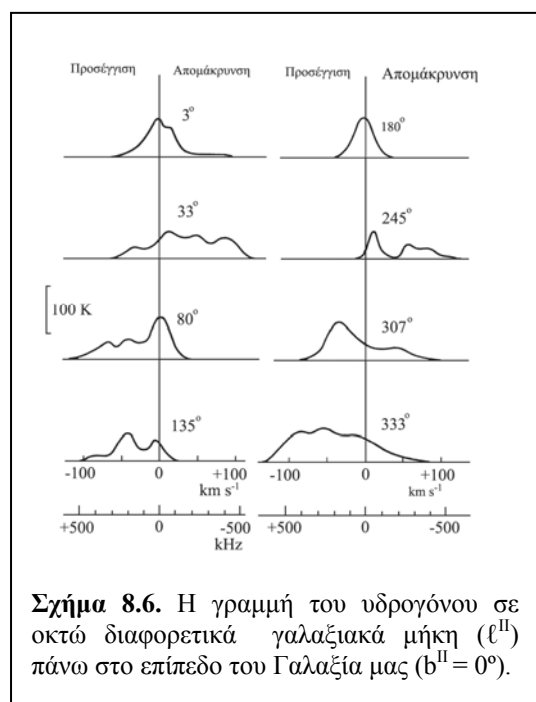


Σχήμα 8.5. Σχηματική αναπαράσταση του επιπέδου του Γαλαξία με τα τεταρτημόρια προσέγγισης και απομάκρυνσης λόγω της διαφορικής περιστροφής του. Ο τοπικός βραχίονας του Περσέα σχεδιάστηκε με διακεκομμένη γραμμή

συνιστώσες αυτές αντιστοιχούν σε επτά διακριτές περιοχές του Γαλαξία. Οι πρώτες τέσσερις οφείλονται σε πυκνά νέφη υδρογόνου (ευρισκόμενα, κατά πάσα πιθανότητα σε τέσσερις διαφορετικούς σπειροειδείς βραχίονες) ενώ οι τρεις τελευταίες αντιστοιχούν σε νέφη σκόνης, τα οποία απορροφούν την εκπομπή του υδρογόνου. Όπως θα δούμε παρακάτω με τέτοιου είδους παρατηρήσεις μελετούμε τη δομή του Γαλαξία.

Η σπειροειδής μορφή του Γαλαξία μας απεδείχθη για πρώτη φορά πέραν κάθε αμφιβολίας με παρατηρήσεις στη φασματική γραμμή των 21 cm. Από την μελέτη διαγραμμάτων έντασης ακτινοβολίας-συχνότητας (ή ακτινικής ταχύτητας).

Βρέθηκε κατ' αρχήν ότι προς ορισμένες διευθύνσεις το ουδέτερο υδρογόνο απομακρύνεται



Σχήμα 8.6. Η γραμμή του υδρογόνου σε οκτώ διαφορετικά γαλαξιακά μήκη (ℓ^{II}) πάνω στο επίπεδο του Γαλαξία μας ($b^{\text{II}} = 0^\circ$).

από εμάς και προς άλλες διευθύνσεις πλησιάζει με ταχύτητες μάλιστα που ξεπερνούν πολλές φορές μερικές εκατοντάδες km s^{-1} . Στη συνέχεια παραδεχόμενοι την ύπαρξη κάποιας σχέσης ταχύτητας-απόστασης (π.χ. πρότυπο του Oort) είναι δυνατό να μελετήσουμε την κατανομή του υδρογόνου στο Γαλαξία μας.

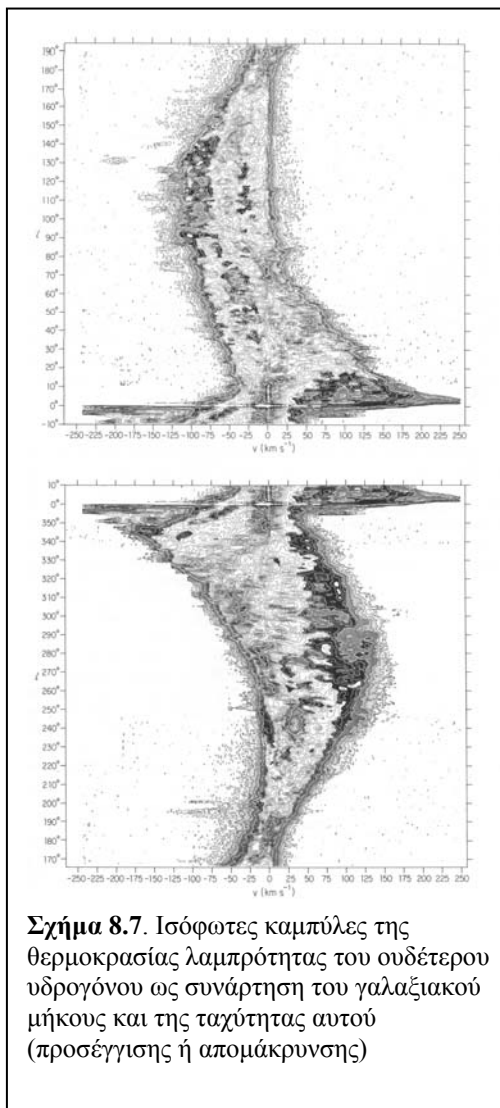
Οι ταχύτητες που μετράμε είναι θετικές (απομάκρυνση) ή αρνητικές (προσέγγιση) ανάλογα με το τεταρτημόριο του Γαλαξία μας που παρατηρούμε όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα Σχήματα 8.5, 8.6 και 8.7. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 8.5 η ταχύτητα που αναμένουμε από

τις παρατηρήσεις της γραμμής του υδρογόνου είναι κατά κύριο λόγο ταχύτητα απομάκρυνσης στο πρώτο ($0^\circ \leq \ell < 90^\circ$) και το τρίτο ($180^\circ \leq \ell < 270^\circ$) και προσέγγισης στο δεύτερο και το τέταρτο τεταρτημόριο. Στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο, βέβαια, όταν παρατηρούμε νέφη ουδέτερου υδρογόνου τα οποία βρίσκονται πέραν του κέντρου του Γαλαξία και σε γαλακτοκεντρική απόσταση μεγαλύτερη από 8.5 kpc, η διεύθυνση της ταχύτητας αντιστρέφεται (Σχ. 8.5). Το απλό πρότυπο του σχήματος αυτού επιβεβαιώνεται άμεσα με τις φασματικές παρατηρήσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.6. Στα φάσματα παρουσιάζεται η θερμοκρασία λαμπρότητας που παρατηρήθηκε σε οκτώ περιοχές διαφορετικού γαλαξιακού μήκους, πάνω στο επίπεδο του Γαλαξία ($b = 0^\circ$). Οι διάφορες κορυφές που εμφανίζονται στα φάσματα του Σχήματος 8.6 αντικατοπτρίζουν περιοχές αυξημένης συγκέντρωσης ουδέτερου υδρογόνου, οι οποίες προσεγγίζουν ή απομακρύνονται από τη Γη και μπορούν να

αποδοθούν στη σπειροειδή μορφή του Γαλαξία μας. Στο Σχήμα 8.7 παρουσιάζονται αντίστοιχα φάσματα, υπό μορφή ισοφώτων θερμοκρασίας λαμπρότητας σε συντεταγμένες γαλαξιακού μήκους και ταχύτητας (προσέγγισης ή απομάκρυνσης). Τα φάσματα του Σχήματος 8.6 αποτελούν, προφανώς, υποσύνολο των φασμάτων του Σχήματος 8.7.

Αν όμως επιθυμούμε μια πιο λεπτομερή μελέτη της δομής και κίνησης του Γαλαξία μας, τότε βέβαια απαιτείται η ύπαρξη ενός (απλού) προτύπου όπως αυτό που εμφανίζεται στο Σχήμα 8.8. Στο πρότυπο αυτό θεωρούμε ότι οι αστέρες, η σκόνη και επομένως και το ουδέτερο υδρογόνο του Γαλαξία κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από το κέντρο με σταθερή γωνιακή ταχύτητα $\omega(R)$. Τότε η ταχύτητα (απομάκρυνσης) του σημείου P από τον Ήλιο (S) δίνεται από τη διαφορά των ταχυτήτων στα σημεία P και S . Δηλαδή :

$$u = \omega R \sin \delta - \omega_0 R_0 \sin \ell \quad (8.1)$$



Σχήμα 8.7. Ισόφωτες καμπύλες της θερμοκρασίας λαμπρότητας του ουδέτερου υδρογόνου ως συνάρτηση του γαλαξιακού μήκους και της ταχύτητας αυτού (προσέγγισης ή απομάκρυνσης)

Όπου : ω_0 είναι η γωνιακή ταχύτητα του υδρογόνου στην απόσταση R_0 περιφοράς του Ήλιου γύρω από το Κέντρο του Γαλαξία (8.5 kpc), ℓ το γαλαξιακό μήκος του σημείου P και δ η γωνία CPP'. Βέβαια από τη σχέση του ημιτόνου παίρνουμε :

$$\frac{\sin \ell}{R} = \frac{\sin(180 - \delta)}{R_0} = \frac{\sin \delta}{R_0} \quad (8.2)$$

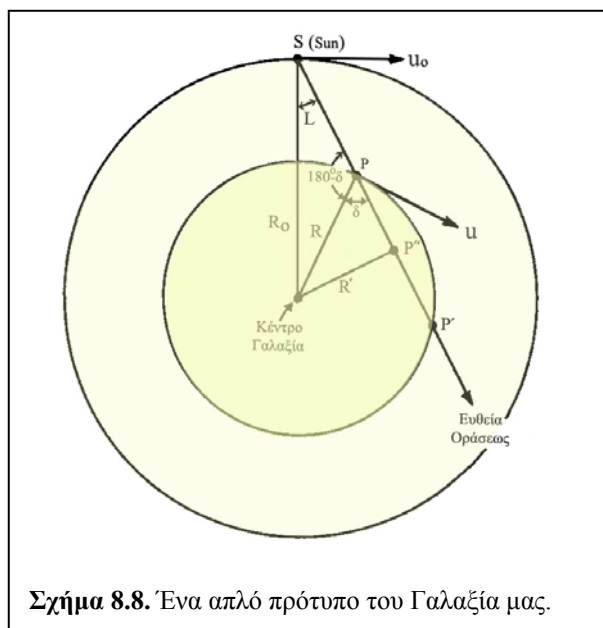
ή

$$R \sin \delta = R_0 \sin \ell \quad (8.3)$$

Από τις σχέσεις (8.1) και (8.3) παίρνουμε :

$$u = (\omega - \omega_0) R_0 \sin \ell \quad (8.4)$$

Η σχέση (8.4) είναι η θεμελιώδης σχέση που μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τη δομή του Γαλαξία με τη βοήθεια της φασματικής γραμμής των 21 cm του ουδέτερου υδρογόνου. Με



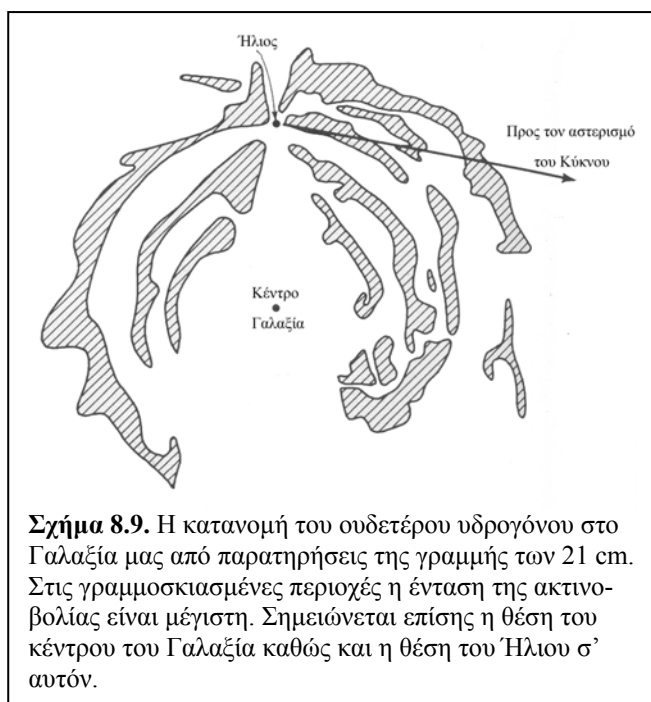
αυτήν μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη γωνιακή ταχύτητα ενός νέφους υδρογόνου όταν γνωρίζουμε τις συντεταγμένες του (ειδικά το γαλαξιακό μήκος ℓ) και την ταχύτητα απομάκρυνσης (ή προσέγγισης) του. Η απόσταση R_0 του Ήλιου από το κέντρο του Γαλαξία καθώς και η γωνιακή του ταχύτητα ω_0 θεωρούνται γνωστές: $R_0 = 8.5$ kpc και $\omega_0 = u_0/R_0$, όπου u_0 είναι η εφαπτομενική ταχύτητα περιστροφής του Γαλαξία στην απόσταση του Ηλίου. Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται ότι είναι $u_0 =$

220 km s⁻¹. Από εδώ και πέρα με απλούς υπολογισμούς, όπως στη περίπτωση του προτύπου του Σχήματος 8.8 (ή πολύπλοκους εφόσον το πρότυπο μας το απαιτεί), μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση του νέφους. Επαναλαμβάνοντας τη μέθοδο για διαφορετικά νέφη υδρογόνου, (σε διάφορα γαλαξιακά μήκη) και μετρώντας κάθε φορά και την πυκνότητα ροής τους είναι δυνατόν να χαρτογραφήσουμε τον Γαλαξία μας στη γραμμή των 21 cm του υδρογόνου. Μια τέτοια είναι και η χαρτογράφηση που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.9.

Στην πράξη η μέθοδος αυτή παρουσιάζει την εξής δυσκολία: Δεδομένου πως και τα δύο σημεία P και P' (Σχήμα 8.8) έχουν την ίδια απόσταση από το κέντρο του Γαλαξία και,

επομένως, την ίδια γωνιακή ταχύτητα ω , με μια μόνο παρατήρηση δεν είναι δυνατό να διαχωρίσουμε εάν το νέφος βρίσκεται στη απόσταση P ή P' . Η ασάφεια αυτή αίρεται μόνο για το σημείο P'' (Σχήμα 8.8), όπου, κατ' ανάγκην παρατηρείται η *μεγίστη ακτινική ταχύτητα* στο φάσμα του ουδέτερου υδρογόνου για το συγκεκριμένο γαλαξιακό μήκος. Η απόσταση R' του σημείου P'' από το κέντρο του Γαλαξία ονομάζεται **γαλακτοκεντρική απόσταση** (galactocentric distance).

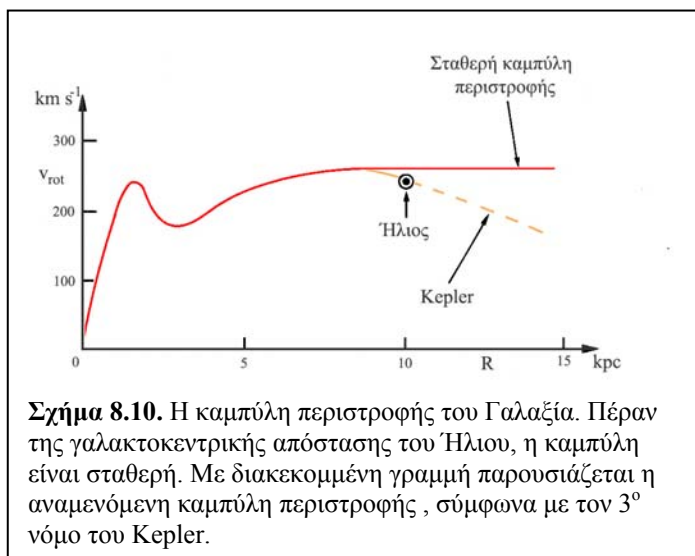
Η παραπάνω ανάλυση προϋποθέτει ότι η ταχύτητα περιστροφής του Γαλαξία είναι κυκλική και ομαλή.



Στο Σχήμα 8.9 παρουσιάζονται παρατηρήσεις συνεργασίας που έγιναν στην Αυστραλία και την Ολλανδία, από τις οποίες επιβεβαιώνεται η κατανομή του ουδέτερου υδρογόνου σε βραχίονες. Η ταχύτητα απομάκρυνσης ή προσέγγισης σε μια στενή περιοχή 20° προς το κέντρο του Γαλαξία και προς το αντίκεντρο είναι πρακτικά μηδέν και επομένως δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο του Oort. Έτσι εξηγείται η έλλειψη παρατηρήσεων σ' ένα κώνο 20° προς το κέντρο του Γαλαξία.

8.5 Η καμπύλη περιστροφής του Γαλαξία

Αν σχεδιάσουμε τη μέγιστη ακτινική ταχύτητα που παρατηρείται στο φάσμα του ουδέτερου υδρογόνου για διάφορες γαλακτοκεντρικές αποστάσεις, παίρνουμε την **καμπύλη περιστροφής** (rotation curve) του Γαλαξία που δίνεται στο Σχήμα 8.10. Είναι προφανές ότι πέραν της απόστασης του Ήλιου δεν είναι δυνατόν να βρεθεί μέγιστη ακτινική ταχύτητα στα φάσματα που παρατηρούμε. Για το λόγο αυτό η καμπύλη του Σχήματος 8.10 είναι ασαφής πέραν των 8.5 kpc. Από σειρά, πάντως, παρατηρήσεων έχει βρεθεί ότι η καμπύλη περιστροφής δεν ακολουθεί το νόμο του Kepler. Δηλαδή στο Γαλαξία δεν υπάρχει μια κεντρική μεγάλη μάζα στο κέντρο του, περί την οποία περιφέρονται οι αστέρες και το ουδέτερο υδρογόνο. Πέραν της γαλακτοκεντρικής απόστασης του Ήλιου η ταχύτητα περιστροφής του Γαλαξία



είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή της μάζας του Γαλαξία δεν έχει ομαλή ακτινική συμμετρία, αλλά υπάρχει άφθονη μάζα μακριά του Κέντρου, η οποία δεν έχει παρατηρηθεί ακόμα. Αυτή είναι μία ακόμα ένδειξη ύπαρξης **σκοτεινής ύλης** (dark matter) στο Γαλαξία.

Η εσωτερική περιοχή του Γαλαξία ($R < 2$ kpc) παρουσιάζει μια αυξημένη ταχύτητα περιστρο-

φής. Παρόμοια κατανομή ταχυτήτων έχει παρατηρηθεί και σε άλλους γαλαξίες.

8.6 Η σύσταση του μεσοαστρικού χώρου

Πριν κλείσουμε αυτό το Κεφάλαιο αξίζει να αναφέρουμε μερικά βασικά συγκριτικά στοιχεία για τη ύλη από την οποία απαρτίζεται ο μεσοαστρικός χώρος του Γαλαξία.

Το πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν είναι το υδρογόνο (H), το οποίο συναντούμε είτε ως μοριακό υδρογόνο (H_2), είτε ως ατομικό (ουδέτερο) υδρογόνο (HI). Στα μοριακά νέφη (βλ. Κεφ. 9) η αριθμητική πυκνότητα του μοριακού υδρογόνου μπορεί να ξεπεράσει τα 10^4 σωματίδια /cm³. Η θερμοκρασία τους, όμως, είναι πολύ χαμηλή, της τάξης των 10 K. Αντίθετα στο μεσοαστρικό χώρο, στις περιοχές που η ύλη είναι σχετικά διάχυτη, το πιο άφθονο στοιχείο είναι το ατομικό υδρογόνο (HI) με μέση πυκνότητα $10 - 10^3$ σωματίδια /cm³ και πολύ υψηλότερη μέση θερμοκρασία, T_k της τάξης των 50 – 150 K.

Βιβλιογραφία

- Hartmann D. and Burton W.B. (1997): “Atlas of galactic neutral hydrogen” Cambridge University Press.
- Butler B.W. (1988): " The structure of our Galaxy derived from observations of neutral hydrogen ", in Galactic and extragalactic radio astronomy (eds. G.L. Verschuur and K.I. Keller mann), Springer Verlag.
- Oort J.H. “Problems of Galactic Structure,” Ap.J. 116, 233-250 (1952) [Henry Norris Russell Lecture, 1951].