

## Μάθημα Ηλιακής Φυσικής Διαλέξεις 14 και 15 Οκτωβρίου

### Διαφάνεια 1

Το μάθημα Ηλιακής φυσικής θα διδαχθεί από τον Καθ. Γιάννη Δαγκλή και τους Δρ. Αλέξανδρο Χείλαρη και Κωστή Γοντικάκη.

Θα ξεκινήσουμε με μια ιστορική αναδρομή πάνω στις απόπειρες μέτρησης της **αστρονομικής μονάδας** από την αρχαιότητα έως τον 17ο αιώνα. Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στα γενικά χαρακτηριστικά του Ήλιου και πως μπορούμε να τα υπολογίσουμε.

### Διαφάνεια 2 Αρίσταρχος ο Σάμιος (310-230 π.Χ.)

Ο Αρίσταρχος ο Σάμιος που έζησε τον 3ο Αιώνα π.Χ. ήταν από τους πρώτους αρχαίους μαθηματικούς που χρησιμοποίησαν γεωμετρικές μεθόδους για την μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ ουράνιων σωμάτων. Το μόνο κείμενό του έχει διασωθεί είναι το Περί μεγεθών και Αποστημάτων Ηλίου και Σελήνης όπου παρουσιάζει την μέτρηση του λόγου της απόστασης Γης Ηλίου ως προς Γης-Σελήνης.

Στο σχήμα βλέπετε πως στην φάση της **Ημίσειας Σελήνης**, στο τρίγωνο που σχηματίζουν η Γη, η Σελήνη και ο Ήλιος, η γωνία με κορυφή την Σελήνη θα είναι 90 μοίρες.

Σκοπός του Αρίσταρχου ήταν να μετρήσει την γωνία με κορυφή τον Ήλιο, (γωνία  $c$  στο σχήμα). Η γωνία αυτή είναι η ίδια με αυτή που σχηματίζει η Σελήνη καθώς κινείται από την φάση Ημίσειας Σελήνης σε αυτήν όπου η γωνία που σχηματίζεται στο τρίγωνο Σελήνη-Γη-Ήλιος (στην κορυφή της Γης), είναι ορθή γωνία. (Αυτό το σχήμα προέρχεται από το βιβλίο Our Sun του Donald Menzel).

Ο Αρίσταρχος βρήκε πως το ημίτονο της γωνίας  $1/20 < \eta \mu c < 1/18$ , και πως η γωνία είναι μικρότερη από 3 μοίρες (με τα λόγια του το ένα τριακοστό του ενός τετάρτου του κύκλου).

Εδώ έχω γράψει την εφαπτομένη του  $b$ , την γωνία που βρίσκεται στην κορυφή της Γης.

Όταν η  $b$  είναι κοντά στις 90 μοίρες ένα μικρό σφάλμα στη γωνία θα προκαλέσει μια μεγάλη αλλαγή στον λόγο των αποστάσεων. Στην πραγματικότητα ο λόγος των αποστάσεων είναι 390.

Η γωνία  $c$  είναι 9 λεπτά του τόξου, δηλαδή  $9/60$  της μοίρας.

Πολύ συχνά στην επιστήμη η μέθοδος μπορεί να είναι σωστή αλλά στέκονται εμπόδιο τα σφάλματα.

Ο Αρίσταρχος όμως, γνωρίζοντας από τις ηλιακές εκλείψεις πως η Σελήνη έχει το

ίδιο φαινόμενο μέγεθος με τον Ήλιο κατάλαβε πως ο Ήλιος θα είναι 20 φορές μεγαλύτερος από αυτήν, και πρέπει να είναι μεγαλύτερος και από την Γη συνεπώς είναι το κεντρικό σώμα του ηλιακού συστήματος. Εικάζεται (δεν το έχουμε βρει σε δικό του κείμενο) πως αυτός ο συλλογισμός των οδήγησε στο ηλιοκεντρικό σύστημα.

Στο βιβλίο του **Ψαμμίτης** ο Αρχιμήδης υπολογίζει πόσοι κόκκοι άμμου χωρούν στον κόσμο (σκοπό του να παρουσιάσει υπολογισμούς με μεγάλους αριθμούς) και εκεί αναφέρεται στον Αρίσταρχο. Αναφέρει πως ο Αρίσταρχος πίστευε στο ηλιοκεντρικό σύστημα και μάλλον εξηγούσε την μη μέτρηση παράλλαξης λέγοντας πως οι αστέρες είναι πολύ πιο μακριά από ότι πίστευαν.

### **Διαφάνεια 3 Dominique Cassini**

Πάμε τώρα στον 17ο αιώνα, όπου ο **Dominique Cassini** σχεδίασε με τον **Jean Richer** την μέτρηση της απόστασης Γης Άρη. Είμαστε στο 1672 μερικές δεκαετίες μετά την δημοσίευση από τον J. Kepler των τριών νόμων του. Τότε ήταν γνωστές οι σχετικές αποστάσεις των πλανητών από τον Ήλιο. Αν οι Cassini, Richer καταφέρουν να μετρήσουν μια απόσταση μεταξύ πλανητών στην συνέχεια θα μπορεί να μετρηθεί η αστρονομική μονάδα μια και είναι γνωστές όλες οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ πλανητών και Ήλιου. Ο Άρης τον Σεπτέμβριο του 1672 ήταν σε **Αντίθεση**, που σημαίνει πως βρίσκονται στην ευθεία οι Ήλιος, Γη και Άρης, και θα είναι στην κοντινότερη απόσταση από την Γη, σε  $3/8$  της Αστρονομικής Μονάδας (μην ξεχνάμε πως οι τροχιές της Γης και του Άρη είναι ελλείψεις, έτσι η συγκεκριμένη απόσταση Γης Άρη δεν ισούται με την διαφορά μεταξύ των ημιαξόνων των τροχιών τους).

Μετρήθηκε η σχετική θέση του Άρη στον ουρανό από δυο διαφορετικές τοποθεσίες, στο Παρίσι και στην Καγιέννη της νοτίου Αμερικής που ήταν (και είναι ακόμα) Γαλλική αποικία.

Το σφάλμα των μετρήσεων προερχόταν κυρίως από την δυσκολία μέτρησης της διαφοράς γεωγραφικού μήκους μεταξύ των δύο περιοχών. Το γεωγραφικό μήκος δηλώνεται από την διαφορά ώρας μεταξύ δύο τόπων, και την εποχή εκείνη δεν μπορούσε να μεταφερθεί ένα ρολόι με πλοίο χωρίς αυτό να ξεκουρδιστεί, υπήρχε λοιπόν ασάφεια στην μέτρηση γεωγραφικού μήκους!

Η γωνία αυτή μετρήθηκε και στην συνέχεια υπολογίστηκε η **Παράλλαξη του Άρη**, η γωνία του Άρη όπως αυτός φαίνεται από δύο θέσεις που απέχουν όσο η ακτίνα της Γης.

Στην συνέχεια, όπως βλέπεται στο τρίγωνο εδώ, μετρήθηκε η παράλλαξη του Ήλιου και με αυτόν τον τρόπο η **Αστρονομική μονάδα** η οποία υπολογίστηκε με σφάλμα 10% περίπου.

Αυτό που πρέπει να συγκρατήσετε είναι ο έμμεσος τρόπος μετρήσεως (απόσταση Γης Άρη και όχι απευθείας Γης Ηλίου). Ακόμη και σήμερα η μέτρηση της αστρονομικής μονάδας γίνεται έμμεσα με την μέτρηση της απόστασης κοντινών ουράνιων σωμάτων όπως των Αστεροειδών. Η απόσταση λοιπόν αυτή πήρε πολλούς

αιώνες για να μετρηθεί και είναι 150 εκατομμύρια χλμ.

#### **Διαφάνεια 4**

Ας περάσουμε τώρα στα υπόλοιπα γενικά χαρακτηριστικά του Ήλιου.

Το φαινόμενο μέγεθός του στον ουρανό είναι 32 λεπτά του τόξου (32/60 της μοίρας) από το οποίο προκύπτει η ακτίνα του. Μετατρέπονται τα 32 λεπτά σε ακτίνια  $\text{rad} = 32./60 * 3.14/180$ . και πολλαπλασιάζονται επί την αστρονομική μονάδα για να βρεθεί η ηλιακή διάμετρος ίση με  $1380 \times 10^6 \text{ km}$ . Και η ακτίνα είναι ίση με  $590\,000 \text{ km}$ .

Η μάζα του ήλιου υπολογίζεται επίσης χάρη στον τρίτο νόμο του Κέπλερ με την χρήση της γήινης περιόδου, την τιμή της Αστρονομικής μονάδας. Για να γίνει ο υπολογισμός έπρεπε να είναι γνωστή η τιμή της σταθεράς της βαρύτητας  $G$  άρα μετά το 1797 όπου έγινε το **πείραμα Cavendish**.

Η τιμή της ηλιακής μάζας είναι  $1.9 \times 10^{30} \text{ kg}$ .

#### **Διαφάνεια 5**

##### **Ηλιακή σταθερά και λαμπρότητα**

Η **ηλιακή φωτεινότητα (ή ροή ακτινοβολίας)**, δηλαδή η ισχύς της ακτινοβολίας, σε όλα τα μήκη κύματος, που φτάνει στην Γήινη επιφάνεια, είναι  $1.3 \text{ kW/m}^2$ , αυτή η τιμή λέγεται **ηλιακή σταθερά**. Για να βρεθεί αυτή η τιμή πρέπει η μέτρηση να γίνει έξω από την γήινη ατμόσφαιρα μια και αυτή απορροφά ένα 30% της ακτινοβολίας. Καταλαβαίνουμε πως η μέτρηση θα είναι η ίδια σε κάθε σημείο της επιφάνειας μιας σφαίρας με κέντρο τον Ήλιο και ακτίνα την αστρονομική μονάδα. Εάν θέλουμε λοιπόν να υπολογίσουμε την συνολική **λαμπρότητα** του Ήλιου θα πολλαπλασιάσουμε την ηλιακή σταθερά επί την επιφάνεια της σφαίρας. Έτσι βρίσκουμε πως η **Λαμπρότητα** ισούται με  $L_{\text{sun}} = 3.9 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ . Που είναι η συνολική ενέργεια που εγκαταλείπει τον Ήλιο στην μονάδα του χρόνου.

Μπορούμε επίσης να μετρήσουμε μια θερμοδυναμική ποσότητα.

Εάν θεωρήσουμε πως ο Ήλιος εκπέμπει ακτινοβολία σαν μέλαν σώμα, μπορούμε χρησιμοποιήσουμε τον νόμο του

**Stefan-Boltzmann**  $L = \sigma T^4$  όπου το  $\sigma = 5.6 \times 10^{-5} \text{ erg/K}^4/\text{cm}^2$

$L_{\text{sun}} = 4\pi R_{\text{sun}} \sigma T^4$  από το οποίο προκύπτει η ενεργός θερμοκρασία, Δηλαδή η θερμοκρασία της ηλιακής επιφάνειας αν ο Ήλιος ήταν ένα τέλειο μέλαν σώμα. Αυτό θα δούμε πως ισχύει σε μεγάλο βαθμό, η θερμοκρασία είναι  $T_{\text{en}} = 5700\text{K}$ .

Ένα μέγεθος που είναι καθαρά αστρονομικό είναι το **Φαινόμενο και η Απόλυτο μέγεθος**.

Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιήθηκαν από τον **Ίππαρχο** για την ταξινόμηση της φωτεινότητας των αστερών. Το ανθρώπινο μάτι έχει λογαριθμική ευαισθησία στο φως, έτσι η φαινόμενη φωτεινότητα ορίζεται ως  $-2.5\log_{10}(\text{φωτεινότητα})+c$ . C είναι μια εμπειρική σταθερά. Με αυτήν προκύπτει το **φαινόμενο μέγεθος του Ήλιου** να είναι **-26.73**. Γνωρίζοντας πως η πανσέληνος έχει 400000 μικρότερη φωτεινότητα από τον Ήλιο μπορείτε να υπολογίσετε το φαινόμενο μέγεθός της.

Για το **απόλυτο μέγεθος** του Ήλιου πρέπει να υπολογίσουμε την φωτεινότητά που θα είχε αν αυτός βρισκόταν σε απόσταση **10 παρσέκ**.

Το παρσέκ είναι η απόσταση στην οποία ένας αστέρας έχει παράλλαξη ίση με ένα δευτερόλεπτο του τόξου. Πρέπει λοιπόν να υπολογίσει κανείς την **Αστρονομική Μονάδα** σε παρσέκ. Το απόλυτο μέγεθος είναι  $M=m-2.5\log_{10}(AUpc/10)^2=4.84$

**Βλέπουμε λοιπόν πως η απόλυτη ηλιακή λαμπρότητα είναι συγκρίσιμη με αυτή των άλλων αστερών. Μια και το απόλυτο μέγεθός του δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο.**

### Διαφάνεια 6 Χημική σύσταση του Ήλιου

Η χημική σύσταση του ήλιου είναι

|          |        |
|----------|--------|
| υδρογόνο | 73.46% |
| ήλιο     | 24.85% |
| οξυγόνο  | 0.77%  |
| άνθρακας | 0.29%  |
| σίδηρο   | 0.16%  |

Η μεταλλικότητα είναι ένας άλλος τρόπος να παρουσιάσεις τις **αφθονίες** των στοιχείων.

$$X=0.73 \quad Y=0.2485 \quad Z=0.0134$$

Όπου X,Y,Z το κλάσμα μάζας του υδρογόνου, ήλιου και όλων των άλλων στοιχείων μαζί (στο Z).

Η μέτρηση της αφθονίας των στοιχείων γίνεται με μετρήσεις στις φασματικές γραμμές της φωτόσφαιρας και με μετρήσεις σε μετεωρίτες.

Το στοιχείο λίθιο παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς παρουσιάζει 2 τάξεις μεγέθους διαφορά μεταξύ μετρήσεων σε φάσματα και σε μετεωρίτες.

Η πρώτη που κατάλαβε την αφθονία του υδρογόνου και ήλιου στον Ήλιο ήταν η αστροφυσικός **Cecilia Payne** κατά την διάρκεια του διδακτορικού της το 1925,

### Διαφάνεια 7 Φασματική ταξινόμηση

Οι αστέρες ταξινομούνται σύμφωνα με το φάσμα τους στα οπτικά μήκη κύματος. Είναι γνωστή η σειρά με τα γράμματα O B A F G K M R N.

Εδώ σας δείχνω κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά. Οι O, B είναι θερμοί και πολύ λαμπροί αστέρες, έχουν φασματικές γραμμές του ιονισμένου και ουδέτερου Ηλίου, και επιφανειακή θερμοκρασία στους 30000K. Στην συνέχεια στα πιο ψυχρά άστρα εμφανίζονται γραμμές ιονισμένων μετάλλων όπως ο Ήλιος που έχει μια χαρακτηριστική γραμμή απορρόφησης στο Ιονισμένο Ασβέστιο.

Στα πιο ψυχρά αστέρια T=2500K εμφανίζονται γραμμές ουδέτερων μετάλλων και στην συνέχεια στα αστέρια τύπου M γραμμές μορίων.

### Διαφάνεια 8

Θα μιλήσουμε τώρα για το Ηλιακό εσωτερικό. Χωρίζεται στον κεντρικό πυρήνα, έως .25 R<sub>sun</sub> όπου παράγεται η ενέργεια, την ζώνη ακτινοβολίας που εκτείνεται από .25 έως .70 R<sub>sun</sub> και τέλος την ζώνη μεταφοράς.

### Διαφάνεια 9

Εδώ παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που διέπουν το ηλιακό εσωτερικό.

Ο Ήλιος είναι σε υδροστατική ισορροπία μεταξύ της βαρύτητας και της πίεσης του αερίου που προκύπτει λόγω της μεγάλης εσωτερικής θερμοκρασίας.

Έτσι η πρώτη εξίσωση περιλαμβάνει την βαθμίδα της πίεσης να εξισώνεται με την δύναμη της βαρύτητας. M(r) είναι η μάζα που βρίσκεται στο εσωτερικό σφαίρας με ακτίνα r, και ρ είναι η πυκνότητα.

Δεύτερη εξίσωση είναι η διατήρηση της μάζας. δM είναι η ποσότητα μάζας που βρίσκεται στον σφαιρικό φλοιό 4π r<sup>2</sup> dr.

Η Τρίτη εξίσωση μας δίνει την διάδοση της ροής ακτινοβολίας μέσα από τον κάθε σφαιρικό φλοιό.

Ισχύει και η εξίσωση των τελείων αερίων για όλες τις περιοχές του Ηλίου.

Η ποσότητα (μ) είναι το μέσο μοριακό βάρος. Αν θεωρήσουμε πως το πλάσμα αποτελείται μόνο από ιονισμένο υδρογόνο (ας αγνοήσουμε το ήλιο προς το παρών) θα έχουμε ίσο αριθμό ηλεκτρονίων και πρωτονίων. Η μάζα των ηλεκτρονίων είναι αμελητέα.

Έτσι το μέσο μοριακό βάρος είναι  $\mu = n_p / (n_p + n_e) = 0.5$  περίπου.

Το μ δίνει την πληροφορία πως κατά μέσο όρο η μάζα του κάθε σωματιδίου είναι η μισή της μάζας του πρωτονίου. Αν έχουμε και το ήλιο το μέσο μοριακό βάρος θα είναι:  $\mu = (n_H + 4 * n_He) / (n_H + n_He + n_e)$

Στο τέλος μπορούμε από την εξίσωση υδροστατικής ισορροπίας σε πρώτη προσέγγιση να θεωρήσουμε πως:

$$P/R_{sun} = g \rho \text{ απο όπου βρίσκουμε: } g R_{sun} = P/\rho$$

$$\text{και από την καταστατική εξίσωση : } T = \mu * m_H / k * P/\rho = \mu * m_H / k * g R_{sun}$$

Αυτό το αποτέλεσμα είναι  $1.15 \times 10^7$  K. Λίγο μικρότερο από τα  $1.6 \times 10^7$  K που είναι η πιο ακριβής τιμή.

### Διαφάνεια 11: Εξισώσεις για το εσωτερικό του Ήλιου

Χρειάζεται και μια άλλη εξίσωση που σου δίνει την μεταβολή της θερμοκρασίας με την ακτίνα λόγω της διάδοσης ακτινοβολίας.

Οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται αριθμητικά. Και σε αυτό το διάγραμμα φαίνονται οι μεταβολές από το κέντρο έως την επιφάνεια.

Σε αυτή τη διαφάνεια το διάγραμμα δείχνει την μεταβολή των φυσικών μεγεθών στο ηλιακό εσωτερικό: θερμοκρασία, λαμπρότητα, μεταλλικότητα υδρογόνου (το X), και πυκνότητα. Αυτές οι καμπύλες υπολογίζονται λύνοντας αριθμητικά τις εξισώσεις που παρουσιάσαμε.

Βλέπουμε πως η λαμπρότητα L αυξάνεται από το εσωτερικό έως το 0.25 της ηλιακής ακτίνας, εκεί σταματά ο πυρήνας και οι πυρηνικές αντιδράσεις, στην συνέχεια παραμένει σταθερή έως την επιφάνεια. Η αφθονία του υδρογόνου αυξάνει από την τιμή 0.35 έως 0.73 από το κέντρο έως 0.25Rsun στο κέντρο αρκετό υδρογόνο έχει καεί σε ήλιο (το ήλιο είναι η στάχτη αυτής της πυρηνικής καύσης). Η θερμοκρασία και η πυκνότητα πέφτουν σταθερά προς την επιφάνεια.

### Διαφάνεια 12: Τυχαίος βηματισμός

Τα φωτόνια δεν ταξιδεύουν απευθείας από το κέντρο όπου δημιουργούνται μέχρι την επιφάνεια.

Μετά την δημιουργία τους απορροφώνται και επανεκπέμπονται πολλά εκατομμύρια φορές από το πλάσμα έως όσον φτάσουν στην επιφάνεια ακολουθώντας ένα τυχαίο βηματισμό. Μπορούμε να κάνουμε έναν υπολογισμό. Ας θεωρήσουμε ένα ...μονοδιάστατο αστέρι.

Στο κέντρο του αστεριού αυτού δημιουργούνται φωτόνια. Αυτά έχουν 50% πιθανότητα να κινηθούν αριστερά και 50% να κινηθούν δεξιά.

Αν πάρουμε τον μέσο όρο από N βήματα ενός φωτονίου ή από πολλά φωτόνια το  $\langle X_N \rangle$  αυτός θα είναι μηδέν.

Ας πάρουμε όμως το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης θα είναι

$$\sigma^2 = \langle X_N^2 \rangle - \langle X_N \rangle^2 = \langle X_N^2 \rangle \text{ πως μπορούμε να το υπολογίσουμε;}$$

Θα υπολογίσουμε ποια θα είναι η τυπική απόκλιση  $\langle X_N^2 \rangle$  μετά από N βήματα όταν γνωρίζουμε πια είναι τυπική απόκλιση  $\langle X_{N-1}^2 \rangle$  όταν έχουν γίνει N-1 βήματα. Μετά τα N-1 βήματα το φωτόνιο έχει πάλι 50% πιθανότητες να πάει ένα

βήμα αριστερά ή 50% πιθανότητες να πάει δεξιά. Αν το βήμα έχει μήκος L:

$$\begin{aligned} \text{Στην θέση } \langle X_N^2 \rangle &= \langle 0.5*(X_{N-1}-L)^2 + .5*(\langle X_{N-1}+L \rangle)^2 \rangle = \\ &= 0.5*(\langle X_{N-1}^2 \rangle + L^2 + 2*\langle X_{N-1} \rangle * L) + 0.5*(\langle X_{N-1}^2 \rangle + L^2 - 2*\langle X_{N-1} \rangle * L) = \langle X_{N-1}^2 \rangle \\ \text{Όπου το L είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή.} \\ \text{άρα } \langle X_N^2 \rangle &= \langle X_{N-1}^2 \rangle + L^2 \end{aligned}$$

**Μπορείτε εσείς με μέθοδο επαγωγής (ξεκινώντας από το πρώτο βήμα) να δείξετε πως  $\langle X_N^2 \rangle = N L^2$ .**

Άρα ο αριθμός των βημάτων που κάνουν τα φωτόνια είναι  $N = \langle X_N^2 \rangle / L^2$

Αν θεωρήσουμε ένα τριδιάστατο αστέρι, θα πρέπει να περιλάβουμε ένα παράγοντα 3.

Έτσι ο αριθμός σκεδάσεων που χρειάζονται τα φωτόνια για να φτάσουν στην ηλιακή επιφάνεια είναι  $N = 3 R_{\text{sun}}^2 / L^2$ , όπου το  $L = 0.5 \text{ cm}$  (σύμφωνα με το βιβλίο Frank Shu Αστροφυσική). **Ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταβεί ένα φωτόνιο στην επιφάνεια είναι  $t = N L / c = 3 R_{\text{sun}}^2 / Lc = 30000$  χρόνια.**

Αν θεωρήσουμε πως η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι  $L = 0.1 \text{ cm}$  ο χρόνος είναι  $T = 1.7E5$  χρόνια. Στο άρθρο των Mitala, Sills 1992 παρουσιάζεται η μεταβολή του L από το κέντρο στην επιφάνεια. Βλέπουμε πως αυτή αλλάζει πολύ συνεπώς ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Τέλος, αν για κάποιο μαγικό τρόπο κάποιος έσβηνε την πηγή ενέργειας του Ήλιου, θα το μαθαίναμε σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο από ότι χρειάζονται τα φωτόνια για να τον εγκαταλείψουν.

Θα έπρεπε όλη η θερμική ενέργεια που βρίσκεται στο κέντρο να το εγκαταλείψει επίσης. Άρα θα είναι το κλάσμα της θερμικής ενέργειας προς την ενέργεια ακτινοβολίας

Η θερμική ενέργεια ως προς την ενέργεια ακτινοβολίας δίνεται από

$$3/2P_c / (\alpha T_c^4) = 1000 \text{ όπου } P_c = nkT = \text{η πίεση στο ηλιακό πυρήνα και } \alpha T_c^4 \text{ η ενέργεια ακτινοβολίας με } (\alpha = 8\pi^5 k^4 / 15c^3 h^3 = 7.56 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4} \text{ την σταθερά ακτινοβολίας}$$

#### **Διαφάνεια 14 Μηχανισμός θέρμανσης Kelvin-Helmholtz (1854)**

το **θεώρημα Virial** είναι ένας νόμος που ισχύει για συστήματα σε ισορροπία. Θα το δείτε σε βιβλία μηχανικής για σώματα σε περιοδικές τροχιές και έχει στατιστική σημασία. Για την περίπτωση του Ήλιου έχει την εξής μορφή

$$E_{\odot} + E_{\Delta} = E_{\Delta}/2$$

Το άθροισμα της θερμικής και της βαρυτικής ενέργειας ισούται με το μισό της βαρυτικής ενέργειας. Αν λύσετε ως προς την θερμική ενέργεια βρίσκετε πως

$$E_{\odot} = -E_{\Delta}/2$$

Η βαρυτική ενέργεια δίνεται ως  $E_{\Delta} = -G M_{\text{sun}}/R_{\text{sun}}^2$

Αν ο Ήλιος συρρικνώνεται λόγω της μάζας του η βαρυτική ενέργεια θα γίνεται αρνητικότερη, λόγω της παραπάνω σχέσης η θερμική του ενέργεια αυξάνεται (το ίδιο και η θερμοκρασία).

Η βαρύτητα λοιπόν παρέχει ένα μηχανισμό αύξησης της θερμότητας το κέντρο και αύξησης (λόγω εξίσωσης αερίων) της πίεσης που εξισορροπεί την βαρύτητα.

Μπορεί κανείς να υπολογίσει την χρονική διάρκεια αυτού του μηχανισμού.

$$T_{\text{KH}} = E_{\Delta}/(2 L_{\text{sun}}) = G M_{\text{sun}}/R_{\text{sun}}^2/(2L_{\text{sun}}) = 3E7 \text{ χρόνια}$$

Άσκηση: Κάντε τις πράξεις για να βρείτε την τιμή του χρόνου Kelvin-Helmholtz

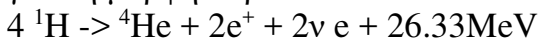
Αυτός ο μηχανισμός προτάθηκε από τον Kelvin αλλά επιστήμονες της γεωλογίας αλλά και ο Charles Darwin βρήκαν πως οι γεωλογικές διεργασίες όπως η διάβρωση χρειάζονται περισσότερο χρόνο. Ο Δαρβίνος στο βιβλίο του 'Η προέλευση των ειδών και η φυσική επιλογή' βρήκε πως η διάβρωση του εδάφους στα βουνά χρειάζεται 10 φορές περισσότερο χρόνο.

## Διαφάνεια 15 Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο

Στις αρχές του 20ου αιώνα έγινε κατανοητό από τον **Arthur Eddington** πως η ενέργεια του Ήλιου προέρχεται από πυρηνική καύση του υδρογόνου.

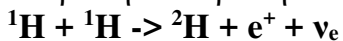
Η ποσοτική απόδειξη όμως έγινε από τους Bethe, και Critchfield το 1938.

Η βασικότερη αντίδραση είναι ο κύκλος του πρωτονίου την οποία παρουσιάζουμε σε γενική μορφή παρακάτω:



όπου ο αριθμός πριν το σύμβολο του στοιχείου είναι ο μαζικός αριθμός. Στην πραγματικότητα ο κύκλος του πρωτονίου διασπάται σε σειρά αντιδράσεων.

Η πρώτη αντίδραση είναι η:

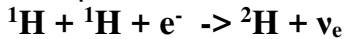


η αντίδραση 2 πρωτονίων για την δημιουργία δευτερίου, δηλαδή ενός πυρήνα που περιέχει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Η αντίδραση γίνεται χάρη στην ασθενή δύναμη και έχουμε δημιουργία νετρίνου). Η αντίδραση έχει χρόνο ημίσειας ζωής  $1.E10$  χρόνια, και καθορίζει την χρονική κλίμακα των πυρηνικών αντιδράσεων.

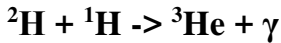
Το ποζιτρόνιο που παράγεται θα εξαϋλωθεί με ένα ηλεκτρόνιο.



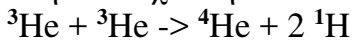
Άλλη πιο σπάνια (ποσοστό 0.25%) αντίδραση είναι η:



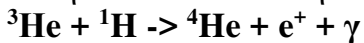
Στην συνέχεια το δευτέριο αλληλεπιδρά με ένα πρωτόνιο και παράγεται πυρήνας ηλίου=3 και μια ακτίνα γάμμα. Η ακτίνα γάμμα είναι μάρτυρας της δράσης της ισχυρής πυρηνικής δύναμης.



Στην συνέχεια η πιο πιθανή πορεία του κύκλου (κατά 85%) είναι:

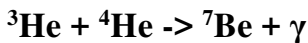


άλλη σπάνια δυνατότητα είναι:

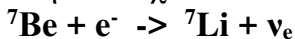


### Διαφάνεια 16 πυρηνικές αντιδράσεις

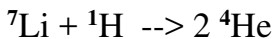
Υπάρχει και μια τρίτη δυνατότητα πυρηνικής αντίδρασης που περιλαμβάνει το ήλιο:



στην συνέχεια



και



Άλλος κλάδος περιλαμβάνει πυρήνες Be, B, και παράγει πυρήνες  ${}^4\text{He}$

Στον Ήλιο υπάρχει και ο κύκλος άνθρακα, αζώτου, οξυγόνου (CNO) αλλά σε ποσοστό 1.2%. Αυτός ο κύκλος, που είναι πολύ ευαίσθητος με την θερμοκρασία στο κέντρο απαντάται σε μαζικότερους αστέρες.

Η ενέργεια ανά μάζα ( $\epsilon$ ) στον πυρήνα του ήλιου είναι  $\epsilon \sim 1 \text{ mW/kg}$ . Για  $r < 1.E8 \text{ m}$ .

Μπορείτε να το υπολογίσετε; Βασιστείτε στην λαμπρότητα του Ήλιου και την μάζα στο κέντρο του. Η πυκνότητα στον πυρήνα είναι  $150 \text{ gm/cm}^3$ .

### Διαφάνεια 17

Η μάζα του πυρήνα ηλίου-4 είναι πιο ελαφρύς από τα 4 αρχικά πρωτόνια κατά

$$m_{\text{He}} = 3.97 m_p$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Einstein

$$E = 0.03 m_p c^2$$

Το κλάσμα της μάζας πρωτονίων που γίνεται ενέργεια είναι:

$$(4 m_p - m_{\text{He}}) / 4 m_p = 0.007$$

Με αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε για πόσο χρόνο μπορεί να καίει ο Ήλιος αν υποθέσουμε πως είναι όλος από υδρογόνο και πως μπορεί να κάψει όλη την ποσότητα.

$\text{Χρόνος} = 0.007 M_{\text{sun}} c^2 / L_{\text{sun}} 3.E7 = 9E10$  χρόνια  
3.E7 είναι το έτος σε δευτερόλεπτα (sec).

**Κάντε και σεις αυτό τον υπολογισμό.**

### **Διαφάνεια 18 Ο Ήλιος ως πρωτοαστέρας**

Ο Ήλιος δημιουργήθηκε από ένα νεφέλωμα το οποίο διαταράχθηκε, και άρχισε να καταρρέει. Σε αυτό το διάγραμμα Hertzsburg- Russell φαίνεται η πορεία του νεαρού Ήλιου προς την ZAMS (Zero Age Main Sequence). Ο χρόνος μηδέν είναι όταν στο κέντρο του συμπυκνώματος κατά την διάρκεια της κατάρρευσης αυξάνει η αδιαφάνεια (η ακτινοβολία παγιδεύεται) και επέρχεται υδροστατική ισορροπία, αναπτύσσεται πίεση. Η πορεία προς την ZAMS διαρκεί 4.E5 χρόνια.

Η χρονική κλίμακα είναι αυτή που προβλέπει η κλίμακα Kelvin-Helmholtz.

### **Διαφάνεια 19 Ο Εξέλιξη του Ήλιου από όταν ήταν στην κύρια ακολουθία έως σήμερα**

Σε αυτό το σχεδιάγραμμα βλέπεται την χρονική εξέλιξη των φυσικών παραμέτρων του Ήλιου με τον χρόνο. Βλέπουμε πως κατά τα 4.6 δισεκατομμύρια χρόνια που ο Ήλιος βρίσκεται στην κύρια ακολουθία η λαμπρότητα, κεντρική θερμοκρασία και η ακτίνα του αυξάνονται. Η αρχική λαμπρότητα ήταν 0.7 φορές την σημερινή ενώ η αρχική ακτίνα 0.86 της σημερινής ακτίνας.

Αυτό δημιούργησε το εξής παράδοξο. Αν η Γη δεχόταν φως ίσο με 0.7 $L_{\text{sun}}$  θα ήταν καλυμμένη με πάγο και αν σταδιακά αυξανόταν η ηλιακή λαμπρότητα από 0.7 $L_{\text{sun}}$  σε  $L_{\text{sun}}$ , ο πάγος δεν θα έλειωνε λόγω της μεγάλης ανακλαστικότητάς του (albedo) πως λοιπόν σήμερα η Γη καλύπτεται από νερό σε υγρή μορφή; Η απάντηση προέρχεται από την χημική εξέλιξη της γήινης ατμόσφαιρας η οποία δημιουργούσε ισχυρότερο φαινόμενο θερμοκηπίου από ότι σήμερα.

Ο λόγος για τον οποίο αλλάζουν με τον χρόνο οι παράμετροι του Ήλιου είναι πως αυξάνεται ο ρυθμός των πυρηνικών αντιδράσεων στον πυρήνα του.

#### **Γιατί αυξάνονται οι αντιδράσεις στον πυρήνα;**

Η συγκέντρωση του στοιχείου ήλιου, που είναι το προϊόν των πυρηνικών αντιδράσεων του υδρογόνου αυξάνει το μέσο μοριακό βάρος ( $\mu$ ) του αερίου. Συνεπώς, μέσω της καταστατικής εξίσωσης των αερίων  $P = \rho kT / (\mu m_H)$  η πίεση μειώνεται λόγω της αύξησης του  $\mu$ . Για να διατηρηθεί ισορροπία πίεσης βαρύτητας, αυξάνεται η πίεση με αύξηση της θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του ρυθμού των πυρηνικών αντιδράσεων.

## Διαφάνεια 20 Ηλιακά νετρίνα

Από την δεκαετία του 60 έχει γίνει δυνατό να μετρηθούν τα ηλιακά νετρίνα. Τα νετρίνα απελευθερώνονται από τον ηλιακό πυρήνα και ταξιδεύουν ελεύθερα προς τη Γη δίνοντας σημαντικές πληροφορίες για μια περιοχή από όπου δεν έχουμε μετρήσεις.

Όμως τα νετρίνα είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν από ανιχνευτές στην Γη καθώς αλληλεπιδρούν ελάχιστα με την ύλη.

Ο Davies και η ομάδα του έστησαν ένα πείραμα με μια δεξαμενή γεμάτη Χλώριο στην σήραγγα ενός ορυχείου κάτω από τη Γη. Ο λόγος που τοποθετείται κάτω από τη Γη είναι για να περιοριστεί η αλληλεπίδραση του χλωρίου με κοσμικές ακτίνες οι οποίες δεν μπορούν να διεισδύσουν κάτω από τη Γη.

Το χλώριο  $^{37}\text{Cl}$  αντιδρά με ένα νετρίνο και παράγει ένα πυρήνα αργού  $^{37}\text{Ar}$  και ένα ηλεκτρόνιο.

Η αντίδραση του πειράματος Davies μπορούσε να εντοπίσει μόνο τα νετρίνα με ενέργεια μεγαλύτερη από **814keV** δηλαδή τα νετρίνα που παράγονται από την αντίδραση του κύκλου του βηρυλίου. Το διάγραμμα δείχνει την ροή ηλιακών νετρίνων συναρτήσει της ενέργειάς τους και την πυρηνική αντίδραση από την οποία προέρχονται (εικόνα από το Αλυσσανδράκης, Νίντος Πατσουράκος). Βλέπεται πως η κύρια αντίδραση παραγωγής νετρίνων είναι η αντίδραση πρωτονίου πρωτονίου (pp) που παράγει πάνω από  $10^{11}$  νετρίνα/cm<sup>2</sup>/s.

Η μονάδα ηλιακού νετρίνου είναι από το πείραμα Davies είναι

**1 Solar Neutrino Unit (SNU) = 1αντίδραση/1.E36 άτομα Cl ανά δευτερόλεπτο.**

**Στο πείραμα Davies η πειραματική τιμή μέτρησης ήταν 2SNU +/-0.3 ενώ η θεωρητική τιμή είναι 7.9 SNU**

Υπήρχε λοιπόν διαφορά ενός παράγοντα 3 – 4 μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής τιμής.

Το πείραμα **Kamiokande** στην Ιαπωνία περιλάμβανε μια δεξαμενή νερού.

Η μέτρηση νετρίνων βασιζόταν στην εξής αλληλεπίδραση. Αν ένα νετρίνο αλληλεπιδράσει (ασθενής δύναμη) με ηλεκτρόνιο αυτό σκεδάζεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο νερό (η ταχύτητα του φωτός στο νερό είναι μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό). Κατά την κίνησή του ο ηλεκτρόνιο εκπέμπει **ακτινοβολία Cerenkov**. Στο πείραμα Kamiokande υπήρχαν φωτοπολλαπλασιαστές που κατέγραφαν αυτή την ακτινοβολία. Το αποτέλεσμα και αυτού του πειράματος υπολειπόταν από την θεωρητική τιμή κατά ένα παράγοντα της τάξης του 3.

Για πολλά χρόνια η διαφορά πειράματος και θεωρητικής τιμής αποτέλεσε μυστήριο. Πολύ επιστήμονες πρότειναν διαφορετικά μοντέλα του ηλιακού εσωτερικού, όπως πως ο ηλιακός πυρήνας περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από την επιφάνεια

χωρίς όμως να μπορούν να εξηγήσουν όλες τις παρατηρήσεις.

Τελικά έγινε κατανοητό πως το ηλεκτρονικό νεutrino μπορεί να μετατρέπεται στους άλλους δύο τύπους νεutrίνων το μεσονικό νεutrino και το ταυ νεutrino ( $\nu_e, \nu_\mu$ ).

$\nu_\tau$

Καθώς μετρήθηκε πως έχει μη μηδενική μάζα, αποδείχτηκε πως οι τρεις τύποι νεutrίνων ταλαντώνονται μεταξύ τους. Οι πειραματικές διατάξεις μπορούν να μετρήσουν μόνο τα ηλεκτρονικά νεutrino ενώ δεν μπορούν ανιχνεύσουν τα νεutrino που μετασχηματίστηκαν στους άλλους δύο τύπους νεutrίνων.

### Διαφάνεια 21 - 22

Θα μιλήσουμε τώρα για την **συνθήκη του Schwarzschild** (1906) για την δημιουργία ρευμάτων μεταφοράς στο εσωτερικό του Ήλιου. Φανταστείτε λοιπόν έναν όγκο πλάσματος στο ηλιακό εσωτερικό με δεδομένη πίεση, θερμοκρασία και πυκνότητα ( $P, T, \rho$ ) η οποία είναι κοινή με τις τιμές αυτές ( $P, T, \rho$ ) στο περιβάλλον. Θερμαίνουμε το αέριο όγκο και η πυκνότητά του ( $\rho$ ) μειώνεται κατά  $d\rho$ .

Λόγω της μείωσης της πυκνότητας ο όγκος θα υποστεί την δύναμη της άνωσης και θα μετακινηθεί κατά ένα μικρό μήκος  $dr$  κατά μήκος της ηλιακής ακτίνας.

Θεωρούμε πως η μετακίνηση του όγκου έγινε αρκετά γρήγορα ώστε να μην προλάβει να γίνει μεταφορά θερμότητας μεταξύ του όγκου και του περιβάλλοντος, όμως υπήρξε αρκετός χρόνος ώστε να υπάρχει πάντα ισορροπία πιέσεων μεταξύ όγκου και περιβάλλοντος.

Θεωρούμε πως οι μεταβολές είναι απειροστές, έτσι στο εσωτερικό του όγκου η μεταβολές είναι ( $P+dP, T+dT, \rho+d\rho$ ), με τονούμενο δηλώνουμε τις απειροστές τιμές που προστίθενται στο αέριο μέσα στον όγκο. Το περιβάλλον σε ύψος  $r+dr$  έχει επίσης αλλαγή στις τιμές ( $P+dP, T+dT, \rho+d\rho$ ). Βλέπουμε πως η πίεση μέσα και έξω από τον όγκο είναι  $P+dP$ .

Ο όγκος θα συνεχίζει να κινείται προς την ηλιακή επιφάνεια όσο η πυκνότητά του είναι χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος.

Αυτό σημαίνει πως  $d\rho' < d\rho$ . Όσο το διαφορικό  $d\rho'$  είναι αρνητικότερο από το  $d\rho$ .

Μπορούμε αυτή τη διαφορά να την εκφράσουμε σαν την διαφορά μεταξύ θερμοκρασιών αν διαφορίσουμε την καταστατική εξίσωση των αερίων.

$$T = \frac{\mu m_H}{k} \frac{P}{\rho}$$

όπου  $\mu$  το μέσο μοριακό βάρος,  $k$  η σταθερά του Boltzmann και  $m_H$  η μάζα του

υδρογόνου. Αν διαφορίσουμε την εξίσωση και την διαιρέσουμε με τον εαυτό της παίρνουμε, για το περιβάλλον  $dP/P = d\rho/\rho + dT/T$

Ενώ για το εσωτερικό του όγκου ισχύει  $dP'/P = d\rho'/\rho + dT'/T$

Οι μεταβολή της πίεσης είναι ίση μέσα και έξω από τον όγκο συνεπώς

$$d\rho'/\rho + dT'/T = d\rho/\rho + dT/T$$

Εφόσον  $dp' < dp$  συνεπάγεται πως  $dT' > dT$  δηλαδή η μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του όγκου πρέπει να είναι μικρότερη από ότι στο εξωτερικό ώστε ο όγκος να συνεχίσει την ανοδική του πορεία (μην ξεχνάτε πως τα διαφορικά  $dT$  έχουν αρνητικές τιμές μια και η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος).

Σχηματίζουμε την αρνητική παράγωγο της θερμοκρασίας με την ακτίνα και η ανίσωση γίνεται  $-dT'/dr < -dT/dr$ . Να θυμίσουμε πως η μεταβολή της θερμοκρασίας μέσα στον όγκο γίνεται με αδιαβατικές συνθήκες ενώ στο περιβάλλον από συνθήκες που επιβάλλει η μεταφορά ακτινοβολίας γι'αυτό θέτουμε στις παραγώγους  $(-dT'/dr)_{\text{adiab}} < (-dT/dr)_{\text{Radiative}}$

### Διαφάνεια 23

Ας δούμε πως υπολογίζεται η αδιαβατική βαθμίδα της θερμοκρασίας. Ας ξεκινήσουμε από την σχέση πίεσης και πυκνότητας σε αδιαβατικό αέριο:

$P \sim \rho^\gamma$  όπου  $\gamma$  είναι η αδιαβατική σταθερά των αερίων. Διαφορίζουμε αυτή την σχέση

και έχουμε  $dP/P = \gamma d\rho/\rho$ .

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε την διαφορική μορφή της καταστατικής εξίσωσης των αερίων  $dP/P = d\rho/\rho + dT/T$  και αντικαθιστούμε το  $d\rho/\rho$  από την προηγούμενη σχέση των αδιαβατικών αερίων και βρίσκουμε:

$(dT/T)_{\text{ad}} = ((\gamma-1)/\gamma) dP/P$ . Και εισάγουμε τις βαθμίδες  $dT/dr$ ,  $dP/dr$  στην τελευταία σχέση και έχουμε  $(dT/dr)_{\text{ad}} = ((\gamma-1)/\gamma) (T/P) dP/dr$

Θεωρούμε πως το αέριο είναι σε υδροστατική ισορροπία  $dP/dr = -\rho g$  και αντικαθιστούμε:

$$(dT/dr)_{\text{ad}} = -((\gamma-1)/\gamma) \mu m_{\text{H}} g/k$$

Στο τελευταίο βήμα αντικαταστάθηκε η μαζική πυκνότητα ( $\rho$ ) μέσω της καταστατικής εξίσωσης των αερίων και έτσι δεν υπάρχει ο όρος  $T/P$  στην εξίσωση.

Βλέπουμε πως η ζώνη μεταφοράς εμφανίζεται λόγω της μεταβολής της ποσότητας  $\gamma$  επειδή σχετίζεται με τον βαθμό ελευθερίας των σωματιδίων ως  $\gamma = N+2/N$ . Για μονοατομικά σωματίδια  $N=3$  και  $\gamma=5/3$ . Αν όμως έχουμε επανασυνδέσεις ή ιονισμό αλλάζει. Στο τέλος της ζώνης ακτινοβολίας έχουμε επανασύνδεση του υδρογόνου και του ήλιου και μεταβάλλονται οι βαθμίδες  $(dT/dr)_{\text{ad}}$ ,  $(dT/dr)_{\text{r}}$

έτσι ώστε να σχηματίζονται **δινορεύματα ή ζώνη μεταφοράς**.

Τέλος να πούμε πως σε αστέρια μεγαλύτερα από τον Ήλιο, όπου η πυρηνική καύση γίνεται με τον κύκλο CNO στον πυρήνα των αστερών παρουσιάζεται ζώνη

μεταφοράς.

### Διαφάνειες 24,25,26 Ηλιοσεισμολογία

Το 1960 ο Leighton και οι συνεργάτες του Noyes και Simon παρατήρησαν στην ηλιακή επιφάνεια ταλαντώσεις περιόδου περίπου 5 λεπτών. Τα επόμενα χρόνια έγινε κατανοητό πως πρόκειται για στάσιμα κύματα τα οποία διαδίδονται σε όλο τον όγκο του Ήλιου. Λόγω του σφαιρικού σχήματος του Ήλιου επιζούν στάσιμα κύματα σε κάποιες ιδιοκαταστάσεις modes με συγκεκριμένη συχνότητα και μήκος κύματος. Τα κύματα αυτά αποτελούν **σφαιρικές αρμονικές** οι οποίες περιγράφονται από τρεις ακέραιους αριθμούς  $n, l, m$ . Οι αριθμοί αυτοί εκφράζουν τον αριθμό των δεσμών του κύματος (δηλαδή τον αριθμό των σημείων όπου δεν παρατηρείται κίνηση εξ αιτίας του κύματος). Οι σφαιρικές αρμονικές είναι και λύσεις στο κβαντικό πρόβλημα του υδρογόνου όπου εκεί όμως λύνεται η εξίσωση του Schroedinger ενώ εδώ λύνεται μια κλασική κυματική εξίσωση και οι οριακές συνθήκες έχουν χαρακτηριστικά σφαιρικής συμμετρίας.

Ο αριθμός  $n$  δηλώνει πόσους δεσμούς παρουσιάζει το κύμα στο εσωτερικό, κατά μήκος της ηλιακής ακτίνας. Ο αριθμός  $l$  πόσους δεσμούς έχει το κύμα επάνω στην επιφάνεια ενώ ο αριθμός  $m$  (τον αριθμό δεσμών κατά την αζιμουθιακή κατεύθυνση παράλληλα με τον ισημερινό), και ο αριθμός  $m$  είναι μικρότερος ή ίσος με το  $l$ . Όταν  $l=m$  οι δεσμοί βρίσκονται μόνο παράλληλα με τον ισημερινό. Για  $l=0$  έχουμε τον πρώτο τρόπο ταλάντωσης όπου ολόκληρος ο Ήλιος ταλαντώνεται σε φάση παράλληλα με την ακτίνα του.

Τα κύματα αυτά είναι κύματα πυκνότητας, η δύναμη επαναφοράς είναι η πίεση είναι ακουστικά κύματα (λέγονται  $p$ -modes). Υπάρχουν και κύματα βαρύτητας ( $g$ -modes), όπου η δύναμη επαναφοράς είναι η άνωση λόγω του βάρους. Αυτά τα κύματα υπάρχουν στην ζώνη ακτινοβολίας εκεί όπου η βαθμίδα ακτινοβολίας δεν είναι πιο απότομη από την αδιαβατική βαθμίδα. Αντίθετα δεν υπάρχουν  $g$ -modes στην ζώνη μεταφοράς.

Τα ακουστικά κύματα μεταφέρονται με την ταχύτητα του ήχου. Η ταχύτητα του ήχου αυξάνει καθώς κινούμαστε σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στον Ήλιο (αυξάνεται η θερμοκρασία) τα κύματα ανακλώνται σε διαφορετικά βάθη ανάλογα με το μήκος κύματός τους καθώς συναντούν υλικό με διαφορετικό δείκτη διάθλασης.

Η μελέτη των κυμάτων μας έχει δώσει σημαντικές πληροφορίες για την δομή του ηλιακού εσωτερικού. Η συχνότητα  $\omega$  των κυμάτων εξαρτάται θεωρητικά από τους αριθμούς  $n, l$  αλλά λόγω σφαιρικής συμμετρίας του ακίνητου Ήλιου δεν εξαρτάται από τον αριθμό  $m$ , λέμε πως στο  $m$  το πρόβλημα είναι εκφυλισμένο. Όμως καθώς ο Ήλιος περιστρέφεται ο εκφυλισμός χάνεται και εμφανίζεται μετρήσιμη εξάρτηση του  $\omega$  και από το  $m$ . Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μέτρηση της περιστροφής των εσωτερικών ηλιακών στρωμάτων.

Έτσι έγινε δυνατό να μετρηθεί πως η διαφορική περιστροφή ισχύει μόνο στην ζώνη μεταφοράς το Ηλίου ενώ η ζώνη ακτινοβολίας περιστρέφεται σαν στερεό σώμα. Με την ηλιοσεισμολογία δεν είναι δυνατό να μετρήσουμε τον πυρήνα του Ηλίου μια και τα ακουστικά κύματα ανακλώνται σε αυτόν.

Τα βαρυτικά κύματα θα μπορούσαν να μας δώσουν επιπλέον πληροφορίες όμως δεν έχουν μετρηθεί ακόμη μια και δεν φτάνουν στην επιφάνεια.