

Μάθημα 12ο Σεισμολογία της Σελήνης

- Το Πρώτο Δίκτυο Σεισμολογικών Σταθμών στη Σελήνη
- Ιδιότητες των Σεισμικών Αναγραφών στη Σελήνη
- Μέθοδοι Διάκρισης των Δονήσεων της Σελήνης
- Σεισμικότητα της Σελήνης
- Μηχανισμός και Αίτια Γένεσης των Σεισμών της Σελήνης
- Γεωφυσική Δομή του Εσωτερικού της Σελήνης

Σεισμολογία της Σελήνης

Αντικείμενο της Σεισμολογίας της Σελήνης είναι η μελέτη των εδαφικών ταλαντώσεων αυτής οι οποίες οφείλονται σε:

φυσικά αίτια, όπως είναι οι σεισμοί της Σελήνης που γεννιούνται στο εσωτερικό της, δονήσεις που γεννιούνται στην επιφάνεια της Σελήνης κατά την πτώση μετεωριτών, εδαφικός θόρυβος που προκαλείται από μεταβολές θερμοκρασίας, κλπ., και σε

τεχνητά αίτια, όπως είναι οι δονήσεις που προκαλούνται από πρόσκρουση διαστημοπλοίων στην επιφάνειά της, θόρυβος που οφείλεται στη λειτουργία μηχανημάτων που τοποθετήθηκαν πάνω στη Σελήνη, κλπ.

Το σεληνιακό έδαφος πραγματοποιεί και άλλες κινήσεις που είναι μη περιοδικές ή περιοδικές πολύ μεγάλων περιόδων. Τέτοιες είναι οι παλιρροιογενείς κινήσεις, οι τεκτονικές κινήσεις, κλπ.

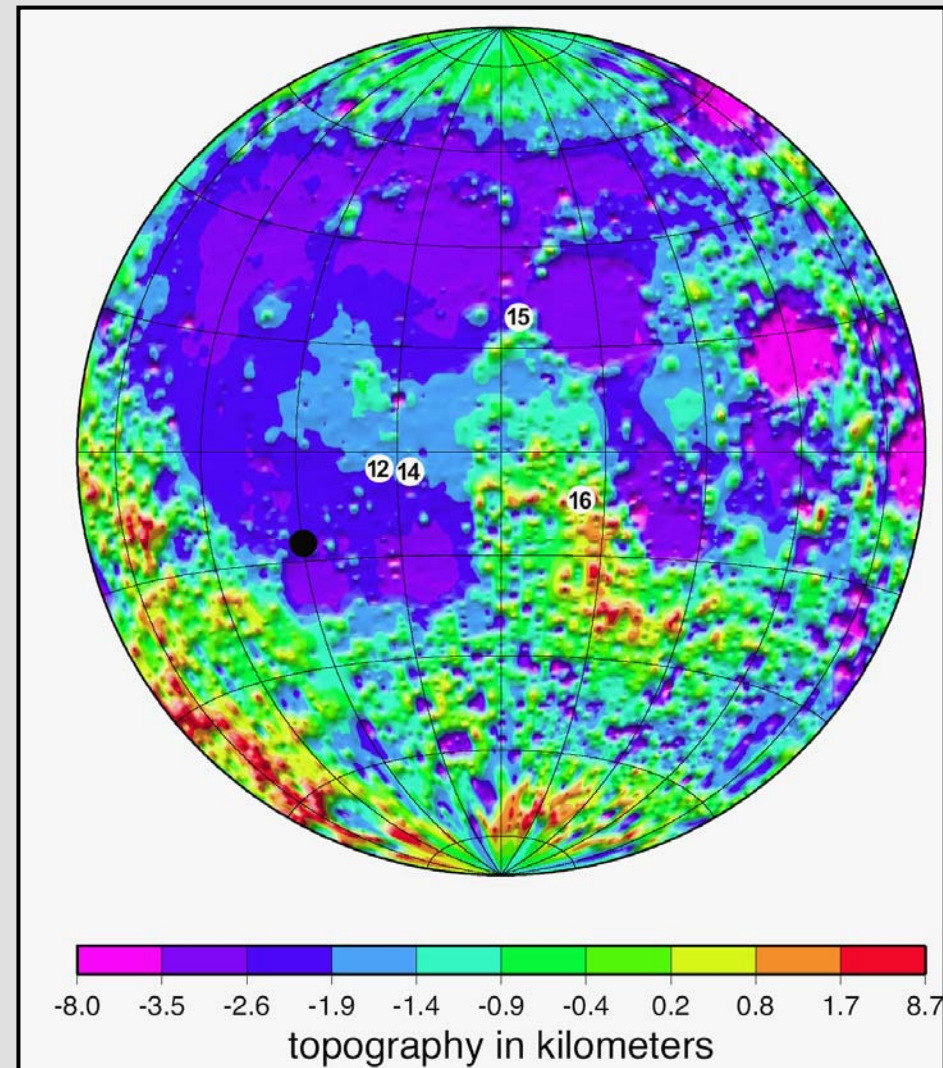
Το Πρώτο Δίκτυο Σεισμολογικών Σταθμών στη Σελήνη

Η πρώτη εγκατάσταση σειсмоγράφου στη Σελήνη έγινε από τους αστροναύτες του προγράμματος «Απόλλων 11». Ο σταθμός αυτός λειτούργησε για λίγες μόνο μέρες και γι' αυτό δεν έδωσε σημαντικές πληροφορίες.

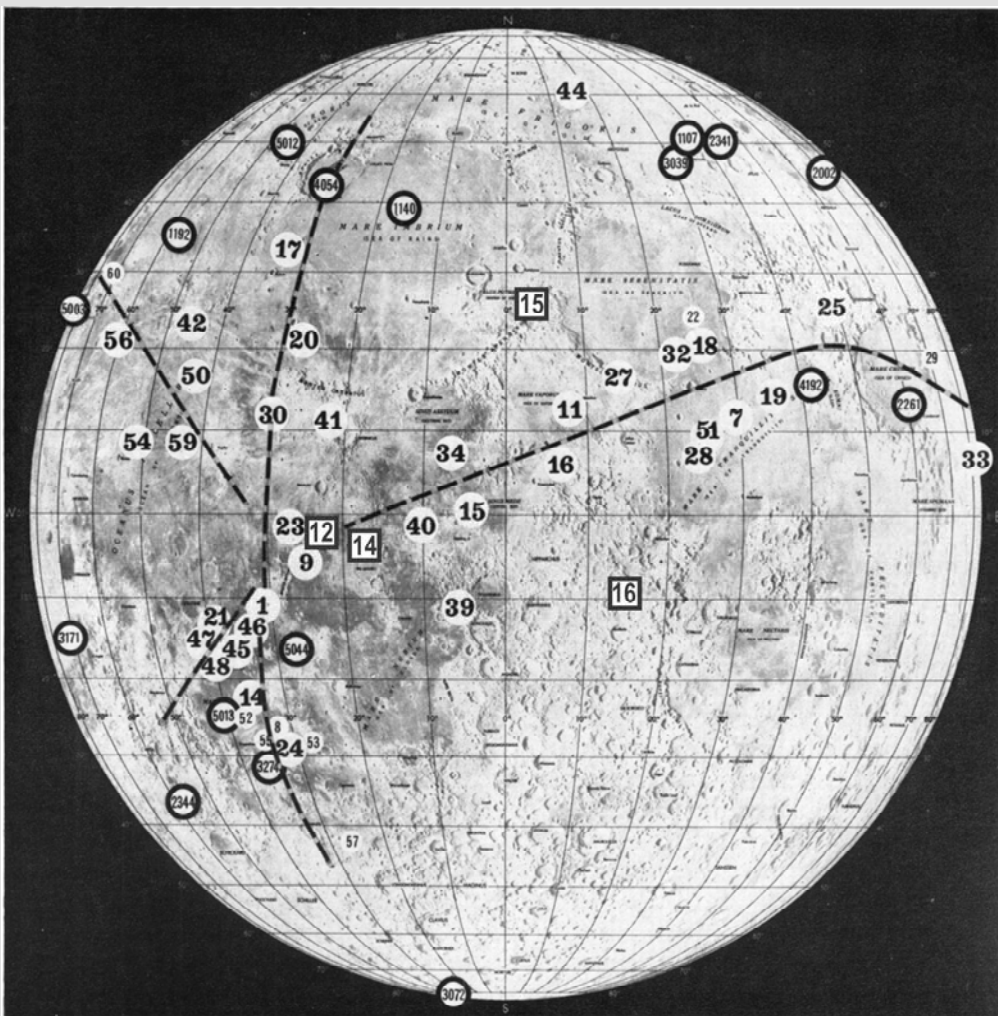
Το πρώτο σεισμικό δίκτυο αποτέλεσαν οι σεισμικοί σταθμοί που εγκαταστάθηκαν στη Σελήνη από τα πληρώματα των σεληνοπλοίων «Απόλλων 12», «14» και «15» όπως φαίνεται στο σχήμα (λευκοί κύκλοι).

Καθένας από τους σταθμούς αυτούς αποτελούνταν από ένα κατακόρυφο (SPZ) βραχείας περιόδου σεισμόμετρο ($T=1$ sec) και από τρία σεισμόμετρα μακράς περιόδου ($T=2.2$ sec ή 15 sec), που ήταν προσανατολισμένα κατά τις διευθύνσεις ενός τρισσορθογωνίου συστήματος αξόνων. Οι δύο άξονες ήταν οριζόντιοι (LPX και LPY) και ο τρίτος ήταν κατακόρυφος (LPZ).

Σχ. 1. Τοπογραφικός χάρτης της πλευράς της επιφάνειας της Σελήνης που φαίνεται από τη Γη, οι θέσεις εγκατάστασης των σεισμικών σταθμών (λευκοί κύκλοι) και η επικεντρική περιοχή της ομάδας σεισμών A1 (μαύρος κύκλος) (Bulow et al., 2005).



Επίκεντρα σεισμών στη Σελήνη



Σχ. 2. Θέσεις προσεδάφισης (τέσσερα τετράγωνα) διαστημοπλοίων του προγράμματος Apollo.

Οι μεγάλοι ανοικτοί κύκλοι αντιστοιχούν σε υποσύνολα επικέντρων σεισμών των οποίων το εστιακό βάθος έχει υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια ενώ οι μικροί ανοικτοί κύκλοι σε υποσύνολα επικέντρων σεισμών με αβέβαιο εστιακό βάθος (για τον υπολογισμό των επικέντρων των σεισμών αυτών θεωρήθηκε ένα εστιακό βάθος της τάξης των 900-1000 km).

Οι αριθμοί στους ανοικτούς κύκλους προσδιορίζουν τα υποσύνολα σεισμών που ανήκουν στην κατηγορία A.

Οι κύκλοι με μαύρη γραμμή αντιστοιχούν σε ομάδες επικέντρων επιφανειακών σεισμών. Οι στιγμένες γραμμές οριοθετούν τις τρεις μεγαλύτερες σεισμικές ζώνες (Lampléin, 1977, τροποποιημένο).

Χαρακτηριστικά των εδαφικών δονήσεων της Σελήνης

Όλες οι αναγραφές των δονήσεων του σεληνιακού εδάφους παρουσιάζουν βασικές ομοιότητες μεταξύ τους, αλλά διαφέρουν σημαντικά από τις αναγραφές των γήινων δονήσεων.

Χαρακτηριστικά των εδαφικών δονήσεων της Σελήνης είναι:

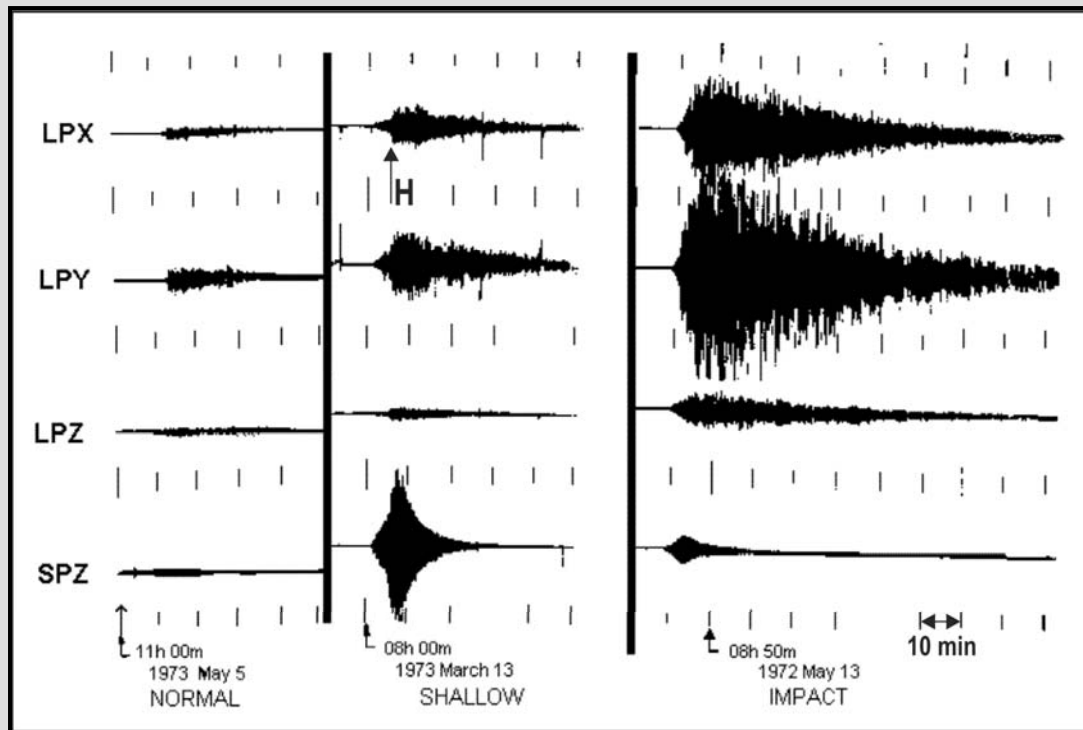
- η εξαιρετικά **μεγάλη διάρκεια** των αναγραφών αυτών
- **δεν παρατηρείται η γνωστή διαδοχή των επιμήκων, εγκαρσίων και επιφανειακών κυμάτων** που παρατηρείται στα σειсмоγράμματα των γήινων δονήσεων.

Οι τέτοιες ιδιότητες των σεισμικών αναγραφών των σεληνιακών δονήσεων αποδίδονται στην ύπαρξη ενός εξαιρετικά ανομοιογενούς στρώματος που καλύπτει ολόκληρο το δορυφόρο της Γης και απορροφάει ελάχιστα τη σεισμική ενέργεια. Το στρώμα αυτό δεν έχει νερό και το πάχος του είναι 10 km περίπου.

Η ύπαρξη του στρώματος οφείλεται, κατά πάσα πιθανότητα, στην ανασκαφή του εδάφους από μετεωρίτες. Συνεπώς, τα ελαστικά κύματα που παράγονται τεχνητά, διαδίδονται στο στρώμα και υφίστανται ισχυρή διάχυση αλλά μικρή απόσβεση με συνέπεια την πολύπλοκη μορφή και τη μεγάλη διάρκεια των σεισμικών αναγραφών.

Χαρακτηριστικά των εδαφικών δονήσεων της Σελήνης (συνέχεια)

Οι αναγραφές των δονήσεων που οφείλονται στην πτώση μετεωριτών μοιάζουν μεταξύ τους και γι' αυτό οι δονήσεις αυτές θεωρούνται ότι ανήκουν σε κοινή κατηγορία, την **κατηγορία C**. Οι αναγραφές των δονήσεων της κατηγορίας αυτής μοιάζουν εξαιρετικά με τις αναγραφές των δονήσεων που γεννιούνται κατά την πτώση πυραύλων στο έδαφος της Σελήνης.



Σχ. 3. Αναγραφές σε τρεις μακράς περιόδου σειсмоγράφους (LPX, LPY, LPZ) και σε έναν βραχείας περιόδου σειсмоγράφο που τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια της Σελήνης από τα μέλη της αποστολής Apollo 16. Η πρώτη στήλη αναγραφών προέρχεται από σεισμό βάθους, η δεύτερη από επιφανειακό σεισμό και η τρίτη από πτώση μετεωρίτη (κατηγορία C) (NASA).

Μέθοδοι διάκρισης των εδαφικών δονήσεων της Σελήνης

Οι αναγραφές των σεληνιακών σεισμών παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές από τις αναγραφές των δονήσεων της κατηγορίας C. Οι σεισμοί της Σελήνης διακρίνονται στις **κατηγορίες A και B** με βάση ορισμένες ιδιότητες:

α) Ομοιότητα της μορφής του κύματος. Από τη σύγκριση των σειсмоγραμμάτων προέκυψε ότι οι σεισμοί της **κατηγορίας A** μπορούν να χωριστούν σε ορισμένα **υποσύνολα** A_1, A_2, \dots, A_n . Τα σειсмоγράμματα κάθε υποσυνόλου, που έχουν ληφθεί από τον ίδιο σειсмоγράφο, μοιάζουν και στις λεπτομέρειες. Αυτό δείχνει ότι η **θέση της εστίας** κάθε υποσυνόλου είναι **κοινή**, γιατί η εξαιρετική ομοιότητα των σειсмоγραμμάτων δικαιολογείται μόνον αν δεχθούμε όμοιο μηχανισμό γένεσης και κοινό δρόμο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που γράφτηκαν. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο στους σεισμούς. Τέτοια υποδιαίρεση σε υποσύνολα των δονήσεων της κατηγορίας C δεν είναι δυνατή. Οι ομοιότητες μεταξύ των κυματομορφών των σεισμών της κατηγορίας B (οι οποίοι είναι περισσότεροι σε αριθμό και μικρότεροι σε μέγεθος από τους σεισμούς της κατηγορίας A) με αυτές των σεισμών της κατηγορίας A είναι πιθανό να εξηγούνται με την υπόθεση ότι οι πρώτοι γίνονται κοντά στις εστίες των δεύτερων ή ακόμα ότι προέρχονται από τις ίδιες εστίες (Lammlein, 1977).

β) Χρόνος μέγιστου πλάτους. Η διαφορά του χρόνου μεταξύ της αρχής της σεισμικής αναγραφής και του χρόνου του μέγιστου πλάτους είναι πολύ μικρότερη στις δονήσεις των κατηγοριών A και B από τη διαφορά στις δονήσεις της κατηγορίας C. Επιπλέον, η διαφορά αυτή είναι ανεξάρτητη της συχνότητας στους σεισμούς ενώ εξαρτάται από τη συχνότητα στις δονήσεις της κατηγορίας C.

γ) Φάσμα συχνοτήτων. Από τον προσδιορισμό του φάσματος πολλών σειсмоγραμμάτων προέκυψε ότι οι δονήσεις της κατηγορίας C καθώς και αυτές που οφείλονται σε τεχνητά αίτια, έχουν τα μέγιστα πλάτη σε περιόδους μικρότερες από ότι οι δονήσεις των κατηγοριών A και B.

δ) Φάση Η. Οι χαρακτηριστικές φάσεις των δονήσεων των κατηγοριών A και B είναι η φάση P και η φάση H (σχ. 3). Η φάση P είναι η πρώτη αναγραφόμενη σεισμική κίνηση και, κατά πάσα πιθανότητα, είναι το πρώτο απευθείας επίμηκες κύμα που διαδίδεται μεταξύ της εστίας και του σταθμού. Η φάση H αναγράφεται ως ισχυρή από τα οριζόντια σεισμόμετρα και είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε εγκάρσια κύματα. Η φάση H δεν εμφανίζεται στα σειсмоγράμματα των δονήσεων της κατηγορίας C και των δονήσεων που παράγονται κατά την πρόσκρουση διαστημοπλοίων στη Σελήνη.

ε) Χρόνοι γένεσης. Η συχνότητα των δονήσεων των κατηγοριών A και B παρουσιάζει **μηνιαία περιοδικότητα**. Το μέγιστο της συχνότητας συμβαίνει όταν η Σελήνη βρίσκεται κοντά στο περίγειο και στο απόγειο. Οι δονήσεις της κατηγορίας C δε σχετίζονται με τον τροχιακό κύκλο της Σελήνης.

Σεισμικότητα της Σελήνης

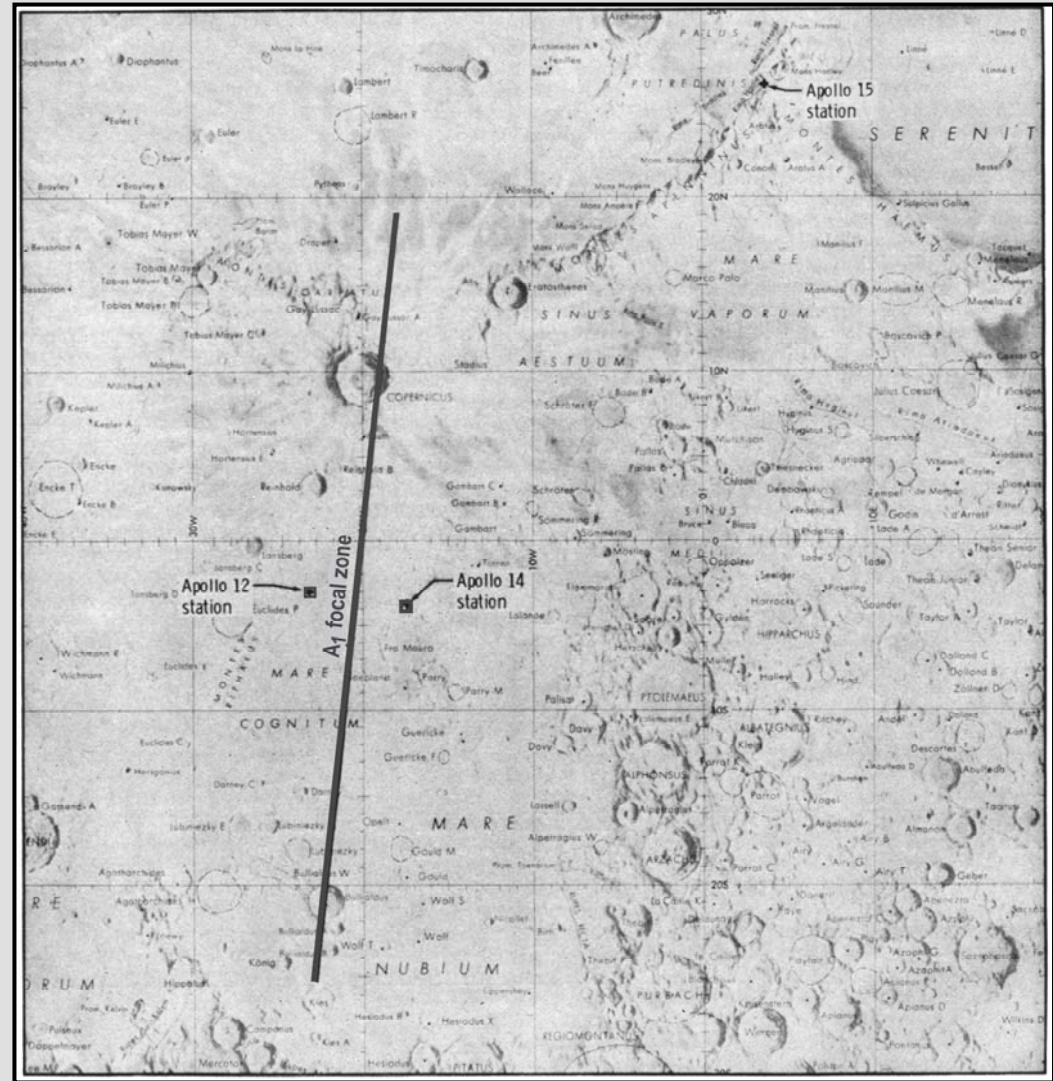
- Από τις σεισμικές αναγραφές προέκυψε ότι ο αριθμός των σεισμών της Σελήνης των κατηγοριών A και B είναι κατά μέσο όρο 600 και 1800 σεισμοί ανά έτος στους σταθμούς 12 και 14, αντίστοιχα.
- Όλοι οι σεισμοί της Σελήνης είναι μικροί. Οι μεγαλύτεροι απ' αυτούς έχουν μεγέθη μεταξύ 2 και 3 ενώ οι μεγαλύτεροι σεισμοί της Γης έχουν μέγεθος 9.5.
- Πρώτη εκτίμηση της ολικής σεισμικής ενέργειας που κατά μέσο όρο απελευθερώνεται ανά έτος στην επιφάνεια της Σελήνης, με βάση τα μέχρι σήμερα υπάρχοντα στοιχεία, δείχνει ότι αυτή δεν είναι μεγαλύτερη από 10^{15} ergs. Η αντίστοιχη τιμή της γήινης σεισμικής ενέργειας είναι 10^{25} ergs.
- Από τη σύγκριση των σειсмоγραμμάτων των σεισμών της κατηγορίας A προκύπτει ότι υπάρχουν τουλάχιστον τριάντα υποσύνολα αυτής, δηλαδή, τουλάχιστον τριάντα διαφορετικές εστίες των σεισμών της κατηγορίας αυτής (σχ. 2). Τα σειсмоγράμματα κάθε υποσυνόλου σεισμών που γράφονται από ορισμένο σεισμόμετρο μοιάζουν και στις λεπτομέρειες. Αυτό δείχνει ότι ο εστιακός χώρος κάθε υποσυνόλου έχει διαστάσεις όχι μεγαλύτερες από 10 km και ότι ο χώρος αυτός παραμένει αμετάθετος για ορισμένα χρόνια τουλάχιστον.

Σεισμικότητα της Σελήνης (συνέχεια)

Από τα πρώτα στοιχεία που είχαν συλλεχθεί στο διάστημα 1969-1972 παρατηρήθηκε ότι το 80% των σεισμών της κατηγορίας A ανήκει στο υποσύνολο A1 (σχ. 2). Οι σεληνογραφικές συντεταγμένες του επικέντρου των σεισμών του υποσυνόλου αυτού είναι 21°S , 28°W (σχ. 4). Τα βάθος της εστίας των σεισμών αυτών είναι 800 km περίπου ενώ τα μεγαλύτερα εστιακά βάθη στη Γη είναι της τάξης των 700 km.

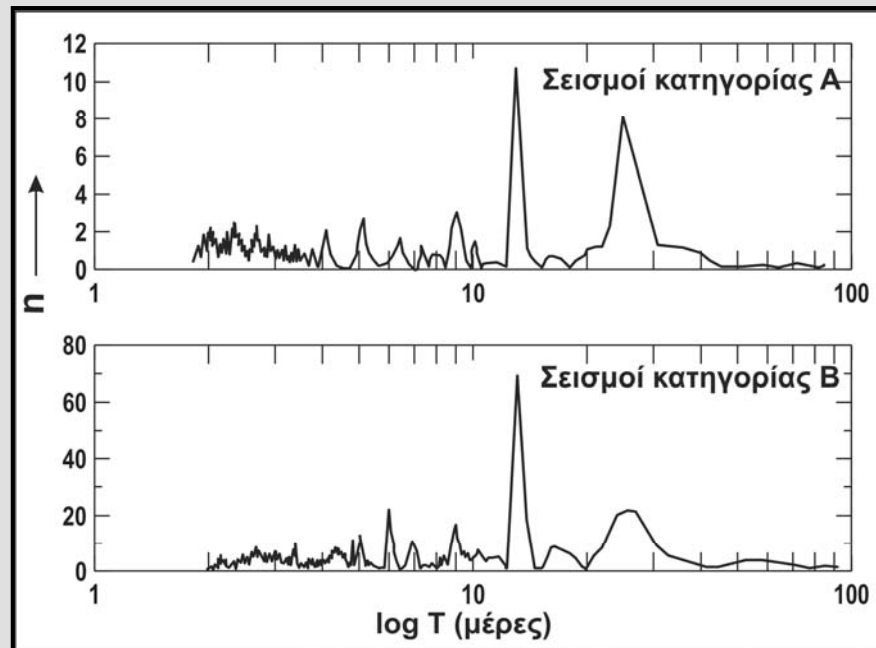
Οι σεισμοί της κατηγορίας B δεν μπορούν να διαιρεθούν σε υποσύνολα με βάση τις σεισμικές αναγραφές. Αυτό δείχνει ότι οι εστίες των σεισμών αυτών παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση. Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι εστίες αυτές βρίσκονται σε ορισμένες σεισμικές ζώνες, όπως συμβαίνει και στη Γη.

Σχ. 4. Η μαύρη γραμμή δείχνει τη θέση της ζώνης που γίνονται οι σεισμοί του υποσυνόλου A1 στη Σελήνη. Φαίνονται οι θέσεις εγκατάστασης των σταθμών Apollo 12 και 14 (Latham et al., 1971).



Μηχανισμός και αίτια γένεσης των σεισμών της Σελήνης

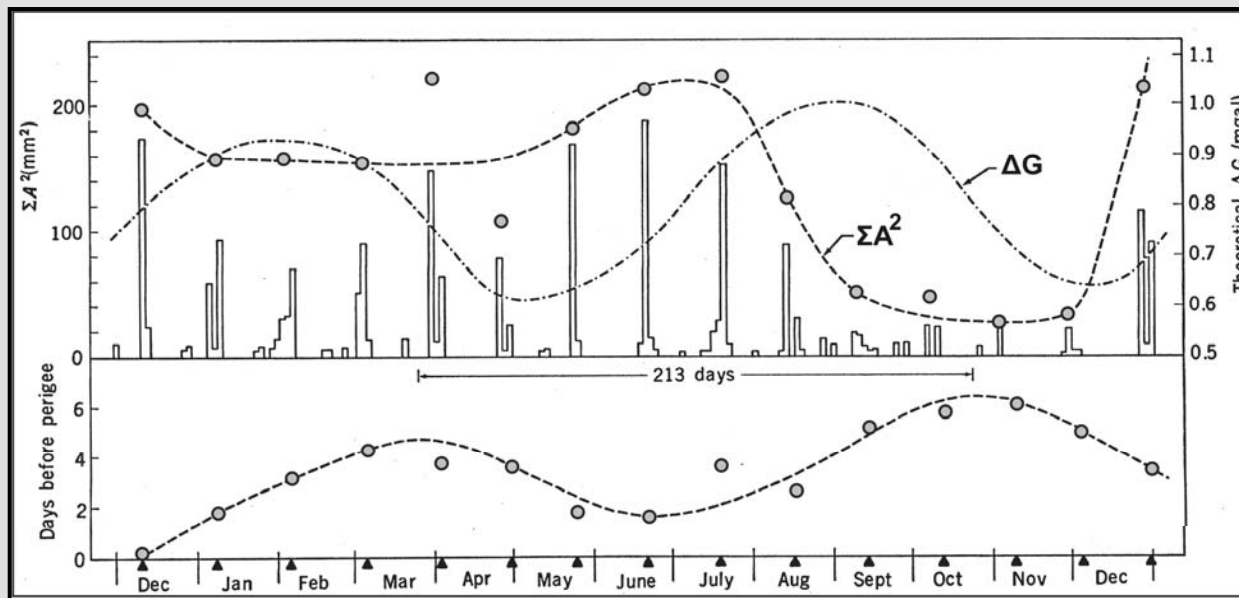
Η συχνότητα των σεισμών της Σελήνης παρουσιάζει περιοδικότητα και τα μέγιστα της συχνότητας αυτής συμβαίνουν κατά τους χρόνους κατά τους οποίους η Σελήνη βρίσκεται κοντά στο περίγειο και το απόγειο. Η περιοδικότητα των σεισμών της Σελήνης, που αναφέρθηκε παραπάνω, οδηγεί στην υπόθεση ότι οι σεισμοί αυτοί διεγείρονται από παλίρροιες, οι οποίες δημιουργούνται στη Σελήνη λόγω της νευτώνειας έλξης που εξασκείται από τη Γη.



Σχ. 5. Το πάνω μέρος του σχήματος παριστάνει το φάσμα της χρονικής μεταβολής της συχνότητας (ημερήσιου αριθμού) των σεισμών της κατηγορίας A ενώ το κάτω μέρος του σχήματος παριστάνει το ίδιο φάσμα για τους σεισμούς της κατηγορίας B. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η μεγαλύτερη συχνότητα συμβαίνει για περίοδο 13.5 ημερών ενώ το δεύτερο μέγιστο της συχνότητας συμβαίνει για περίοδο 27 ημερών.

Μηχανισμός και αίτια γένεσης των σεισμών της Σελήνης (συνέχεια)

Εκτός από την περιοδικότητα που αναφέραμε, η συχνότητα των σεισμών της Σελήνης και η σεισμική ενέργεια που απελευθερώνεται παρουσιάζουν και μια μικρότερη περιοδική μεταβολή. Η περίοδος της μεταβολής αυτής είναι 213 μέρες.

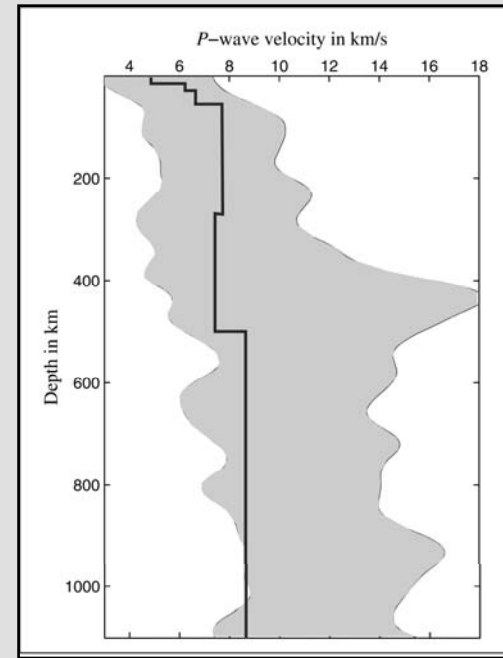
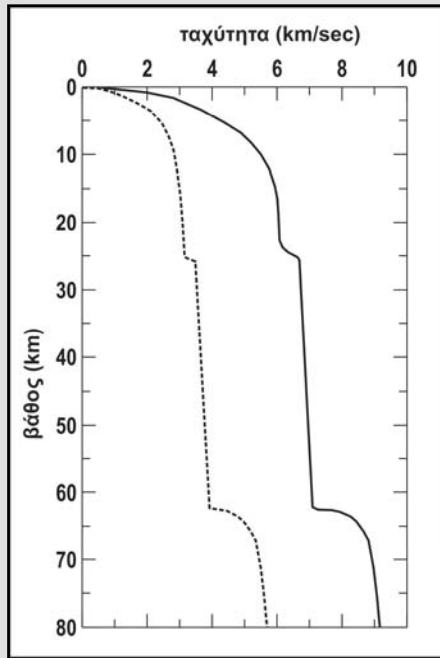


Σχ. 6. Χρονική μεταβολή της σεισμικής ενέργειας από σεισμούς που έχουν καταγραφεί από τη συνιστώσα LPZ του σειсмоγράφου του Apollo 12. Στο πάνω σχήμα η ποσότητα A για ένα σεισμό είναι το μέγιστο πλάτος καταγραφής του (σε mm), τα ιστογράμματα παριστάνουν το άθροισμα της ενέργειας, ΣA^2 , όλων των σεισμών (σε διαδοχικά διαστήματα δύο ημερών) και η αντίστοιχη καμπύλη δείχνει την ολική σεισμική ενέργεια που παρατηρήθηκε σε κάθε περιγείο (κύκλοι). Η καμπύλη ΔG παριστάνει τη θεωρητικώς υπολογισθείσα χρονική μεταβολή της βαρύτητας στη θέση του σειсмоγράφου από την έλξη της Γης. Η καμπύλη στο κάτω σχήμα δείχνει το χρονικό διάστημα μεταξύ του περιγείου (μαύρα τρίγωνα) και του χρόνου γένεσης του πρώτου σεισμού της κατηγορίας A που έγινε στη ζώνη A1 κάθε μήνα. Φαίνεται ότι υπάρχει περιοδική μεταβολή με περίοδο 213 ημερών (Latham et al., 1971).

Ενώ υπάρχουν μάλλον σαφείς ενδείξεις ότι το **αίτιο απελευθέρωσης** της σεληνιακής σεισμικής ενέργειας είναι οι **παλίρροιες που οφείλονται στην έλξη της Γης**, τα υπάρχοντα στοιχεία για τα αίτια γένεσης των σεισμών αυτών είναι ανεπαρκή για την εξαγωγή βέβαιων συμπερασμάτων. Δηλαδή, οι γνώσεις που έχουμε σχετικά με τα αίτια αύξησης των τάσεων στο εσωτερικό της Σελήνης και παραμόρφωσης των πετρωμάτων αυτής είναι προς το παρόν πολύ περιορισμένες.

Ως **πιθανά αίτια γένεσης των σεισμών της Σελήνης** θεωρούνται η μικρή διαστολή της Σελήνης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας αυτής που οφείλεται σε ραδιενεργές διασπάσεις, η μικρή συστολή της Σελήνης λόγω ψύξης, η βαθμιαία μεταβολή του σχήματος αυτής από ελλειψοειδές σε σφαιρικό καθώς η Σελήνη απομακρύνεται από τη Γη, τοπικές παραμορφώσεις των σεληνιακών πετρωμάτων που οφείλονται στο ότι δεν πραγματοποιήθηκε ακόμη βαρυτική ισοστάθμιση και ασθενή ρεύματα μεταφοράς στο εσωτερικό της Σελήνης (Latham et al., 1972).

Γεωφυσική δομή του εσωτερικού της Σελήνης



Αριστερά: μεταβολή των ταχυτήτων των επιμήκων κυμάτων (συνεχής καμπύλη) και των εγκαρσίων κυμάτων (διακεκομμένη καμπύλη) με το βάθος, στην περιοχή Fra Mauro της Σελήνης μέχρι το βάθος των 80 km (Toksoz et al., 1972, τροποποιημένο). Οι ταχύτητες αυξάνονται γρήγορα από την επιφάνεια της Σελήνης μέχρι το βάθος των 10 km και μετά ομαλά μέχρι τα 25 km. Στο βάθος των 25 km υπάρχει ασυνέχεια όπου οι ταχύτητες αυξάνονται απότομα. Οι ταχύτητες των κυμάτων παραμένουν σταθερές από το βάθος των 25 km μέχρι το βάθος των 65 km. Στο βάθος των 65 km υπάρχει δεύτερη ασυνέχεια, όπου η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων αυξάνει από 7 km/sec σε 9 km/sec. Αυτό δείχνει ότι η Σελήνη έχει φλοιό και ότι το πάχος αυτού φθάνει τα 65 km. Κάτω από το φλοιό οι ταχύτητες των κυμάτων έχουν μεγάλες τιμές.

Δεξιά: μεταβολή της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων με το βάθος μέσα στη Σελήνη, μέχρι το βάθος των 1000 km. Το εύρος της γκρίζας περιοχής (99% διάστημα εμπιστοσύνης) είναι ενδεικτικό των αβεβαιοτήτων του υπολογισμού της ταχύτητας (Khan and Mosegaard, 2002). Η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο μοντέλο ταχύτητας που πρότειναν οι Nakamura et al. (1982).