



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Lighting up dark exomoons: observational signatures of tidally induced volcanism in other worlds

Kleisioti, E.

Citation

Kleisioti, E. (2025, November 13). *Lighting up dark exomoons: observational signatures of tidally induced volcanism in other worlds*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4282613>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4282613>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Ελληνική περίληψη

Είμαστε μόνοι; Η αναζήτηση ζωής αλλού στο σύμπαν είναι ένα διαχρονικό ερώτημα της ανθρωπότητας. Σήμερα μπορούμε να αναζητήσουμε σημάδια ζωής σε άλλα σώματα του ηλιακού μας συστήματος, όπως στην επιφάνεια του Άρη και στους κρυμμένους, υπόγειους ωκεανούς δορυφόρων πλανητών, για παράδειγμα στους δορυφόρους του Δία και του Κρόνου.

Οι δορυφόροι του ηλιακού μας συστήματος παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στα φυσικά και τροχιακά τους χαρακτηριστικά, και μερικοί ξεχωρίζουν για τη γεωλογική τους δραστηριότητα. Η Ιώ, ο εσώτερος δορυφόρος του Δία, είναι το πιο ηφαιστειακά ενεργό σώμα στο ηλιακό σύστημα, με εκατοντάδες εστίες θερμότητας στην επιφάνειά της. Ο Εγκέλαδος, ένας παγωμένος δορυφόρος του Κρόνου, διαθέτει επιφανειακές ρωγμές, ενεργούς πίδακες υδρατμών και έναν υπόγειο ωκεανό. Ένας βασικός μηχανισμός πίσω από αυτή την ποικιλία φαινομένων είναι η παλιρροϊκή θερμότητα: καθώς ένας δορυφόρος κινείται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον πλανήτη του, οι μεταβαλλόμενες βαρυτικές δυνάμεις τον παραμορφώνουν και παράγουν εσωτερική θερμότητα. Σε μεγάλες χρονικές κλίμακες, αυτή η διαδικασία μπορεί να διατηρήσει το νερό σε υγρή μορφή κάτω από μια παγωμένη επιφάνεια και να συμβάλλει στην εκδήλωση ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η ύπαρξη υγρού νερού και γεωλογικής δραστηριότητας μπορεί να προσφέρει τα συστατικά και τις πηγές ενέργειας που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη ζωής, κάνοντας το φαινόμενο της παλιρροϊκής θερμότητας να παίζει καθοριστικό ρόλο για την αναζήτησή της. Το ηλιακό μας σύστημα μας δίνει την ευκαιρία να μελετήσουμε κοντινούς κόσμους, αλλά η αναζήτηση ζωής φτάνει πολύ πιο μακριά, έως τα εξωπλανητικά συστήματα άλλων άστρων.

Πέρα από το ηλιακό σύστημα, η ανακάλυψη πλανητών που περιφέρονται γύρω από τον πάσσαρ PSR 1257+12 και, λίγο αργότερα, του 51 Pegasi b, ενός πλανήτη γίγαντα με τροχιακή περίοδο μόλις λίγων ημερών, αποτέλεσε ορόσημο. Έκτοτε, οι ανακαλύψεις εξωπλανητών αυξήθηκαν ραγδαία, με αποτέλεσμα σήμερα να είναι γνωστοί χιλιάδες εξωπλανήτες. Πολλοί από αυτούς δεν μοιάζουν με τους πλανήτες του δικού μας συστήματος. Για παράδειγμα, οι «καυτοί Δίες - Hot Jupiters» είναι γιγαντιαίοι πλανήτες σε πολύ μικρές τροχιές. Οι «υπεργαίες - Super Earths» (πλανήτες με μέγεθος ανάμεσα στη Γη και τον Ποσειδώνα) απαντώνται πολύ συχνά στον γαλαξία μας, ενώ οι εξωπλανήτες στο μέγεθος της Γης είναι πιο σπάνιοι. Ανάλογα με την απόστασή τους από το άστρο τους, μερικοί από αυτούς μπορεί να μοιάζουν με τους παγωμένους δορυφόρους του ηλιακού μας συστήματος, με ψυχρές επιφάνειες από πάγο και πιθανόν εσωτερικούς ωκεανούς.

Δεδομένης της σημασίας των δορυφόρων στο ηλιακό μας σύστημα, είναι φυσικό να αναρωτηθούμε αν και οι εξωπλανήτες έχουν δορυφόρους και αν αυτοί θα μπορούσαν να φιλοξενούν ζωή. Εφόσον όλοι οι αέριοι γίγαντες στο ηλιακό μας σύστημα έχουν φυσικούς δορυφόρους, είναι λογικό πολλοί από τους εξωπλανήτες-γίγαντες που έχουμε βρει να διαθέτουν επίσης δορυφόρους (εξωδορυφόρους). Ωστόσο, μέχρι σήμερα, δεν έχει επιβεβαιωθεί η ανίχνευση κανενός εξωδορυφόρου. Ένας βασικός λόγος είναι ότι τα σήματα των δορυφόρων είναι αμυδρά σε σύγκριση με εκείνα των μεγάλων πλανητών τους. Καθώς οι εξωπλανήτες που έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα

είναι διαφορετικοί μεταξύ τους είναι αναγκαίο να καθοριστεί ποιοι απο αυτούς προσφέρουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες ανίχνευσης εξωδορυφόρων, ποιες τεχνικές αποδεικνύονται πιο αποτελεσματικές και ποια χαρακτηριστικά δορυφόρων μπορούν να παρατηρηθούν.

Για να απαντήσουμε τα παραπάνω, θα πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε βασικές έννοιες σχετικά με τις τεχνικές ανίχνευσης εξωπλανητών. Η μέθοδος η οποία έχει αποδώσει περισσότερες ανακαλύψεις εξωπλανητών μέχρι σήμερα, είναι η μέθοδος της διέλευσης. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή γίνεται παρατήρηση των πλανητών όταν περνούν μπροστά από τα άστρα τους, οπότε προκαλούν μία μικρή περιοδική μείωση στη φωτεινότητά τους. Οι ίδιοι οι πλανήτες δεν είναι άμεσα ορατοί, είναι όμως οι διελεύσεις τους. Η τεχνική είναι πιο ευαίσθητη σε πλανήτες που κινούνται πολύ κοντά στα άστρα τους, επειδή η μικρή απόσταση από το άστρο αυξάνει την πιθανότητα διέλευσης. Αυτό όμως δυσκολεύει την ανίχνευση εξωδορυφόρων: σε πλανήτες που κινούνται πολύ κοντά στα άστρα τους, οι δορυφόροι μπορεί να μην επιβιώνουν για πολύ, αφού η ισχυρή βαρυτική έλξη του άστρου δεν επιτρέπει εύκολα σταθερές τροχιές. Επιπλέον, οι αναζητήσεις εξωδορυφόρων με τη μέθοδο της διέλευσης απαιτούν ευνοϊκή γεωμετρία, δηλαδή ο πλανήτης και ο δορυφόρος του να ευθυγραμμίζονται με τη δική μας οπτική γωνία ώστε να είναι ορατές οι διελεύσεις τους. Τέλος, για μια επιβεβαιωμένη ανίχνευση εξωδορυφόρου χρειάζονται μακροχρόνιες παρατηρήσεις για να καταγραφούν πολλαπλές διελεύσεις. Αυτό καθιστά ελκυστικούς στόχους τους εξωπλανήτες που έχουν ανιχνευθεί μέσω άμεσης απεικόνισης, καθώς βρίσκονται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από τα άστρα τους. Σε αυτές τις αποστάσεις μπορούμε να καταστείλουμε το φως του άστρου, επιτρέποντας την απευθείας μελέτη της ακτινοβολίας του πλανήτη.

Η παρατήρηση του φωτός ενός πλανήτη και η ανίχνευση αμυδρών σημάτων από τους δορυφόρους του, παρουσιάζουν επίσης σημαντικές δυσκολίες, καθώς η εκτυφλωτική λάμψη του άστρου πρέπει πρώτα να περιοριστεί. Ακόμη και όταν αυτό επιτευχθεί, το ίδιο το φως του πλανήτη μπορεί να υπερκαλύπτει εκείνο των δορυφόρων του. Ωστόσο, στο υπέρυθρο φάσμα, όπου η θερμική ακτινοβολία του ίδιου του αντικειμένου αποτελεί την κύρια πηγή εκπομπής, αναδυσκνείται μια ιδιαίτερη κατηγορία σωμάτων, οι παλιρροϊκά θερμαινόμενοι εξωδορυφόροι (Tidally Heated Exomoons, THEMs). Αυτοί είναι ανάλογοι με την Ιώ, τον ηφαιστειακά ενεργό δορυφόρο του Δία, και προσφέρουν μια μοναδική ευκαιρία: κινούμενοι από έντονες παλιρροϊκές δυνάμεις, μπορούν να φτάσουν σε πολύ υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες, και σε ορισμένα υπέρυθρα μήκη κύματος, να ξεπερνούν σε φωτεινότητα τον πλανήτη τους. Σε αντίθεση με τις διελεύσεις, η άμεση θερμική απεικόνιση δεν εξαρτάται από μια συγκεκριμένη φάση της τροχιάς του πλανήτη. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια νέα δυνατότητα για την ανίχνευση δορυφόρων γύρω από γιγάντιους πλανήτες σε μεγάλες αποστάσεις από τα άστρα τους, περιοχές όπου οι υπόλοιπες μέθοδοι ανίχνευσης εξωπλανητών παρουσιάζουν περιορισμούς.

Η ποσότητα παλιρροϊκής θερμότητας που παράγεται στο εσωτερικό ενός δορυφόρου επηρεάζεται, μεταξύ άλλων, από την τροχιά του και τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά στο εσωτερικό του παραμορφώνονται και διαχέουν ενέργεια. Επειδή λοιπόν η παλιρροϊκή θερμότητα συνδέεται άμεσα με τις εσωτερικές ιδιότητες ενός σώματος, η μελέτη των THEMs προσφέρει όχι μόνο μια μέθοδο ανίχνευσης δορυφόρων, αλλά

και ένα πολύτιμο εργαλείο για την εξερεύνηση της εσωτερικής τους δομής και των φυσικών τους ιδιοτήτων. Παρόμοιες προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί και στο δικό μας ηλιακό σύστημα. Για παράδειγμα, η ηφαιστειακή δραστηριότητα της Ιούς εγείρει εδώ και δεκαετίες ερωτήματα για το αν διαθέτει έναν παγκόσμιο ωκεανό μάγματος ή ένα μερικώς λωμένο μανδύα. Οι μετρήσεις της παραμόρφωσής της από τις παλιρροϊκές δυνάμεις υπήρξαν καθοριστικές για τη διερεύνηση της πιθανότητας των δύο σεναρίων. Επεκτείνοντας αυτό το σκεπτικό σε εξωπλανήτες και τους δορυφόρους τους, η παλιρροϊκή θερμότητα μπορεί να μας βοηθήσει να αντλήσουμε πληροφορίες για τις εσωτερικές τους ιδιότητες και τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό τους. Αυτές οι διεργασίες είναι σημαντικές για την αστροβιολογία και καθιστούν την μελέτη των παλιρροϊκά θερμαινόμενων κόσμων ιδιαίτερα πολύτιμη για την αναζήτηση ζωής στο σύμπαν.

Η παρούσα διατριβή κάνει βήματα στην αναζήτηση εξωδορυφόρων και επικεντρώνεται στην ανιχνευσιμότητα των THEMs μέσω ποικίλων μεθόδων, ενώ εξετάζει τις εσωτερικές και τροχιακές ιδιότητες που τα καθιστούν παρατηρήσιμα. Παράλληλα, διερευνάται κατά πόσο η φωτεινότητά των THEMs ή οι διακυμάνσεις της μπορούν να μετρηθούν με τα τρέχοντα και τα μελλοντικά τηλεσκόπια. Συνδυάζοντας υποθετικές παρατηρήσεις με μοντέλα παλιρροϊκής θερμότητας, η διατριβή διερευνά περαιτέρω τους περιορισμούς που μπορούν να τεθούν στις εσωτερικές δομές πλανητών και δορυφόρων. Τα μοντέλα παλιρροϊκής θερμότητας αξιοποιούνται, επίσης, για τη μελέτη του εσωτερικού παγωμένων εξωπλανητών, οι οποίοι θεωρείται ότι παρουσιάζουν αναλογίες με τους παγωμένους δορυφόρους του ηλιακού μας συστήματος. Ειδικότερα, εξετάζεται κατά πόσο η θερμότητα θα μπορούσε να διατηρήσει υπόγειους ωκεανούς, καθώς και αν ενδείξεις ηφαιστειακής δραστηριότητας θα ήταν δυνατόν να ανιχνευθούν στο πλανητικό σύστημα Trappist-1. Συνολικά, οι μελέτες αυτές αναδεικνύουν τον ρόλο της παλιρροϊκής θερμότητας τόσο ως μέσο ανίχνευσης όσο και ως εργαλείο κατανόησης των εσωτερικών διεργασιών σε εξωπλανητικά συστήματα.

Κεφάλαιο 2. Διερευνώντας την ανιχνευσιμότητα και τις ιδιότητες των THEMs γύρω από τον εξωπλανήτη ϵ Eridani b

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνούμε αν οι παλιρροϊκά θερμαινόμενοι εξωδορυφόροι μπορούν να είναι αρκετά φωτεινοί στο υπέρυθρο ώστε να ανιχνευθούν με το διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb Space Telescope (JWST) γύρω από κοντινούς γίγαντες πλανήτες. Χρησιμοποιούμε τον πλανήτη Eridani b σαν case study. Αναπτύσσουμε μοντέλα που συνδέουν την τροχιά και τις φυσικές ιδιότητες ενός δορυφόρου με τη θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό του μέσω παλιρροϊκών δυνάμεων. Επιπλέον, μοντελοποιούμε τον τρόπο με τον οποίο η θερμότητα μεταφέρεται στα εσωτερικά στρώματα του δορυφόρου, μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ παραγωγής και απώλειας θερμότητας. Εξετάζουμε πολλά πιθανά σενάρια δορυφόρων, μεταβάλλοντας το μέγεθος, την τροχιά τους και ενσωματώνοντας αβεβαιότητες στις ιδιότητες των υλικών τους. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι ένας δορυφόρος περίπου διπλάσιος σε μέγεθος από την Ιώ, που περιφέρεται γύρω από τον ϵ Eridani b, μπορεί να είναι ανιχνεύσιμος αν έχει τροχιακές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των δορυφόρων του ηλιακού μας συστήματος. Ένα από τα βασικά συμπεράσματα του κεφαλαίου

είναι ότι, εφόσον το μέγεθος και η τροχιακή απόσταση ενός δορυφόρου ήταν ήδη γνωστά από άλλη μέθοδο, όπως η μέθοδος της διέλευσης, η υπέρυθη φωτεινότητά του θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό της εκκεντρότητας της τροχιάς και των εσωτερικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα την παρουσία στρωμάτων λιωμένων πετρωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι μια επιτυχής ανίχνευση δορυφόρου στο υπέρθυρο γύρω από τον ϵ Eridani b θα μπορούσε να μας δώσει άμεσες πληροφορίες για το εσωτερικό του, καθιστώντας τα THEMs πολύτιμα πεδία μελέτης για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης εσωτερικού και τροχιάς.

Κεφάλαιο 3. Σπεκτροαστρομετρία: μια υποσχόμενη μέθοδος για την ανίχνευση εξωδορυφόρων

Αν και το προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ότι τα THEMs (διπλάσια σε μέγεθος από την Ιώ) μπορούν να ανιχνευθούν στην υπέρυθη ακτινοβολία, οι τρέχουσες μέθοδοι δεν είναι ακόμη αρκετά ευαίσθητες για να βρουν δορυφόρους σαν αυτούς που γνωρίζουμε στο ηλιακό μας σύστημα. Οι δορυφόροι που βρίσκονται σήμερα στα όρια ανίχνευσης των μεθόδων είναι είτε μεγαλύτεροι, είτε θερμότεροι, είτε και τα δύο. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα, εξερευνήσαμε μια μέθοδο που ονομάζεται σπεκτροαστρομετρία. Η τεχνική αυτή μετράει μικρές μετατοπίσεις στη φαινομενική θέση ενός πλανήτη σε διαφορετικά μήκη κύματος. Οι μετατοπίσεις αυτές προκαλούνται όταν ένας δορυφόρος, το φως του οποίου δεν μπορεί να ανιχνευθεί από μόνο του, συνεισφέρει στο συνολικό σήμα. Αναπτύσσουμε μια μαθηματική περιγραφή του σπεκτροαστρομετρικού σήματος που παράγει ένας δορυφόρος σε τροχιά, και εκτιμάμε τις πηγές θορύβου που μπορούν να επηρεάσουν μία τέτοια μέτρηση, όπως μικρές αποκλίσεις στη στόχευση του τηλεσκοπίου, τον θόρυβο υποβάθρου και λειτουργικούς περιορισμούς του ανιχνευτή. Εφαρμόζουμε τα παραπάνω μοντέλα σε υποθετικούς δορυφόρους γύρω από κοντινούς γίγαντες πλανήτες, με παράδειγμα τον ϵ Indi Ab, για να δούμε τι είδους δορυφόροι μπορούν να ανιχνευθούν με τη μέθοδο της σπεκτροαστρομετρίας. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι η ανίχνευση είναι δυνατή με τα τηλεσκόπια νέας γενιάς όπως το ELT, για δορυφόρους παρόμοιους σε μέγεθος με εκείνους του ηλιακού μας συστήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα όρια ανίχνευσης έρχονται πιο κοντά σε εκείνα των ήδη γνωστών δορυφόρων. Τέλος, δείχνουμε ότι μεγάλοι παγωμένοι δορυφόροι, σε μέγεθος συγκρίσιμο με τον Άρη, θα μπορούσαν να ανιχνευθούν στα πλησιέστερα πλανητικά συστήματα.

Κεφάλαιο 4. Προσθέτοντας θερμές εστίες και ηφαίστεια: μια νέα μέθοδος για την ανίχνευση THEMs

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζουμε αν δορυφόροι, με θερμές εστίες και ηφαίστεια στην επιφάνειά τους, μπορούν να ανιχνευθούν μέσω αλλαγών στη φωτεινότητά τους καθώς κινούνται γύρω από τους πλανήτες τους. Αν ένα THEM έχει ενεργά ηφαίστεια ή θερμές περιοχές διάσπαρτες στην επιφάνειά του, όπως η Ιώ, τότε η υπέρυθη φωτεινότητά του θα μεταβάλλεται καθώς διαφορετικές περιοχές στρέφονται προς ή μακριά από εμάς. Για να το δοκιμάσουμε αυτό, προσομοιώνουμε δορυφόρους διαφορετικών μεγεθών γύρω από έναν μεμονωμένο πλανήτη και μελετούμε πώς αλλάζουν

την υπέρυθρη φωτεινότητα του συστήματος. Στη συνέχεια εξετάζουμε αν αυτές οι περιοδικές αλλαγές είναι ευδιάκριτες στα δεδομένα. Βρίσκουμε ότι ηφαιστειακοί δορυφόροι με θερμές περιοχές σε θερμοκρασίες παρόμοιες με εκείνες της Ιούς μπορούν να αφήσουν ανιχνεύσιμο αποτύπωμα σε μικρότερα υπέρυθρα μήκη κύματος. Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος το σήμα εξασθενεί, αλλά συγκρίνοντας παρατηρήσεις σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος μπορούμε να ξεχωρίσουμε τη συνεισφορά του δορυφόρου από εκείνη του πλανήτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει δορυφόρους με το μέγεθος του Άρη σε αποστάσεις έως 10 parsecs, και μεγέθους Γης σε πιο απομακρυσμένα συστήματα. Η προσέγγιση αυτή διευρύνει τις δυνατότητες αναζήτησης εξωδορυφόρων, ιδιαίτερα γύρω από μεμονωμένους πλανήτες ή πλανήτες που έχουν απεικονιστεί άμεσα, καθώς μπορεί να ανιχνεύσει δορυφόρους ακόμη και αν οι τροχιές τους δεν ευθυγραμμίζονται ώστε να παραρητηθούν διελεύσεις.

Κεφάλαιο 5. Μοντελοποίηση των εσωτερικών και της κρυοηφαιστειακής δραστηριότητας των εξωπλανητών Trappist-1 f, g, h

Σε αυτό το κεφάλαιο εξερευνούμε τα εσωτερικά τριών εξωπλανητών στο σύστημα Trappist-1, των πλανητών f, g, h, των οποίων οι θερμοκρασίες και οι πυκνότητες δείχνουν ότι μπορεί να μοιάζουν με τους παγωμένους δορυφόρους του ηλιακού μας συστήματος. Στόχος μας είναι να δούμε αν η εσωτερική θερμότητά του μπορεί να επιτρέψει την ύπαρξη υπόγειων ωκεανών και να τροφοδοτήσει παγωμένα ηφαίστεια, γνωστά ως κρυοηφαίστεια. Μοντελοποιούμε πώς παράγεται θερμότητα στο εσωτερικό αυτών των πλανητών από δύο κύριες πηγές: την παλιρροϊκή και τη ραδιογενή θερμότητα από τη διάσπαση ραδιενεργών στοιχείων στο εσωτερικό του. Συνδέοντας αυτές τις πηγές θερμότητας με εσωτερικές ιδιότητες των πλανητών, όπως το πάχος των ωκεανών, εντοπίζουμε ποιες εσωτερικές δομές μπορούν να διατηρήσουν ισορροπία παραγωγής και απώλειας θερμότητας. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι για τους Trappist-1 f, g η ισορροπία αυτή είναι δυνατή μόνο αν το εξωτερικό παγωμένο κέλυφος είναι σχετικά λεπτό, περίπου 4–10 χιλιομέτρων, με υπόγειους ωκεανούς πάχους 90–120 χιλιομέτρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι υπόγειοι ωκεανοί θα μπορούσαν να συνδέονται άμεσα με την επιφάνεια. Ο Trappist-1 h αντίθετα, θα χρειαζόταν παχύτερο κέλυφος για να διατηρηθεί σε θερμική ισορροπία. Δοκιμάσαμε επίσης αν η κρυοηφαιστειακή εκπομπή νερού, από πίδακες ατμών θα μπορούσε να ανιχνευθεί με το διαστημικό τηλεσκόπιο JWST. Ακόμη και στα πιο αισιόδοξα σενάρια, η ανίχνευση θα απαιτούσε καμπάνια άνω της δεκαετίας, κάτι που καθιστά απίθανη την παρατήρηση με σημερινά όργανα. Μελλοντικές προσπάθειες μπορεί να έχουν περισσότερες πιθανότητες εστιάζοντας σε εξωπλανήτες με πιο ελλειπτικές τροχιές, όπου η μεγαλύτερα παλιρροϊκή θερμότητα μπορεί να αυξήσει τους ρυθμούς εκπομπής νερού σε ανιχνεύσιμα επίπεδα.

