

# Ancient Asteroids: Μία διεθνής εκστρατεία παρατήρησης για τον χαρακτηρισμό των αρχαιότερων οικογενειών αστεροειδών του Ηλιακού Συστήματος

Kosmas Gazeas<sup>1\*</sup>, Dimitrios Athanasopoulos<sup>1</sup>, Marco Delbo<sup>2</sup>, Chrysa Avdellidiou<sup>2</sup>, Matthieu Conjat<sup>2</sup>, Kleomenis Tsiganis<sup>3</sup>, Josef Hanus<sup>4</sup>, Josef Ďurech<sup>4</sup>, Roberto Bonamico<sup>5</sup>, Gerard Van Belle<sup>6</sup>, Nick Sioulas<sup>7</sup> και Ancient Asteroids team

- <sup>1</sup> Section of Astrophysics, Astronomy and Mechanics, Department of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, Zografos GR 15784, Athens, Greece  
<sup>2</sup> Université Côte d'Azur, CNRS–Lagrange, Observatoire de la Côte d'Azur, CS 34229 – F 06304 NICE Cedex 4, France  
<sup>3</sup> Section of Astrophysics Astronomy & Mechanics, Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki, GR 541 24 Thessaloniki, Greece  
<sup>4</sup> Charles University in Prague, Astronomical Institute, Faculty of Mathematics and Physics, Prague, V Holešovičkách 2, CZ 18000 Prague 8, Czech Republic  
<sup>5</sup> BSA Osservatorio (K76), Strada Collarelle 53, IT 12038 Savigliano, Cuneo, Italy  
<sup>6</sup> Lowell Observatory, 1400 West Mars Hill Road, Flagstaff, AZ 86001, USA  
<sup>7</sup> NOAK Observatory (L02), Stavraki Ioannina, Greece  
\* kgaze@phys.uoa.gr

## Περίληψη

Προσκαλούμε ερασιτέχνες αστρονόμους να συμμετάσχουν στην εκστρατεία παρατήρησης και να εκτελέσουν φωτομετρικές μετρήσεις των πιο αρχέγονων αστεροειδών. Κλειδί για την κατανόηση της δημιουργίας του Ηλιακού μας συστήματος αποτελούν τα αρχικά σώματα που δημιουργήθηκαν, οι «δομικοί λίθοι» των πλανητών, τα πλανητοειδή. Η πλειοψηφία των πλανητοειδών που δεν συνέβαλλαν στη δημιουργία των πλανητών εξοστρακίστηκαν από το Ηλιακό Σύστημα, ενώ αυτά που παρέμειναν υπέστη καταστροφικές συγκρούσεις δημιουργώντας μικρότερα σώματα, όπως τους αστεροειδείς. Στη Κύρια Ζώνη αστεροειδών, εξακολουθεί να υπάρχει ένας μικρός αριθμός πλανητοειδών, που έχουν παραμείνει αναλλοίωτα στο πέρασμα του χρόνου, από την αρχή του Ηλιακού Συστήματος, δηλαδή 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια πριν.

*Λέξεις-κλειδιά: Αρχέγονοι Αστεροειδείς, Κύρια Ζώνη Αστεροειδών, Πλανητικό Σύστημα, Φωτομετρία*

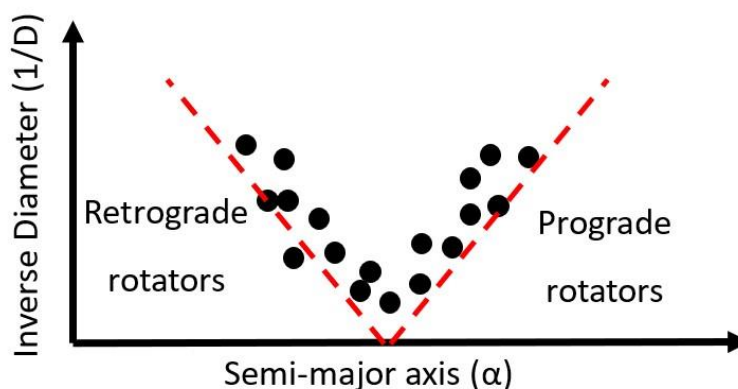
## 1. Εισαγωγή

Προσκαλούμε ερασιτέχνες αστρονόμους να συμμετάσχουν στην εκστρατεία παρατήρησης και να εκτελέσουν φωτομετρικές μετρήσεις των πιο αρχέγονων αστεροειδών. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων θα είναι σημαντική για την ανακατασκευή της αρχικής κατάστασης της Ζώνης των αστεροειδών αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα της Πλανητικής Επιστήμης.

Η αρχική κατάσταση της Ζώνης των αστεροειδών μπορεί να ανακατασκευαστεί μέσω της ανίχνευσης των αρχαιότερων οικογενειών αστεροειδών. Οι οικογένειες αστεροειδών αποτελούν θραύσματα από ένα αρχικό σώμα το οποίο υπέστη διάσπαση από μια σύγκρουση και η ηλικία τους καθορίζεται με βάση το πότε έγινε αυτή η σύγκρουση. Οι οικογένειες αυτές εντοπίζονται στην Κύρια Ζώνη των αστεροειδών χρησιμοποιώντας κλασικές μεθόδους

ομαδοποίησης (clustering methods) στον χώρο των τροχιακών παραμέτρων τους (μεγάλος ημιάξονας –  $a$ , εκκεντρότητα –  $e$ , κλίση –  $i$ ) [1, 2, 3].

Ωστόσο, αυτές οι κλασσικές μέθοδοι αποτυγχάνουν να αναγνωρίσουν οικογένειες αστεροειδών δισεκατομμυρίων ετών (Gyr), των οποίων τα μέλη είναι διασκορπισμένα από το θερμικό φαινόμενο Yarkovsky<sup>1</sup>. Μία εναλλακτική μέθοδος, αποκαλούμενη μέθοδος σχήματος “V” [4, 5], έχει αναπτυχθεί προκειμένου οι οικογένειες να αναγνωρίζονται από την συσχέτιση των μεγεθών των αστεροειδών και την απόσταση του μεγάλου ημι-άξονά τους από το κέντρο της οικογένειας. Η συσχέτιση αυτή αναπαριστά μία εικόνα σχήματος «V» στο αντίστοιχο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 1), όπου τα αριστερόστροφα (retrograde rotators) μέλη μετατοπίζονται προς τον Ήλιο (αριστερά) κατά την πάροδο του χρόνου, ενώ τα δεξιόστροφα (prograde rotators) προς τα έξω (δεξιά).



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση [11] μιας οικογένειας αστεροειδών που δημιουργεί ένα σχήμα “V” στο επίπεδο που ορίζεται από την αντίστροφη διάμετρο ( $1/D$ ) και τον μεγάλο ημι-άξονα ( $a$ ), εξαιτίας του φαινομένου Yarkovsky. Τα αριστερόστροφα (retrograde rotators) μέλη μετατοπίζονται προς τον Ήλιο (αριστερά) κατά την πάροδο του χρόνου, ενώ τα δεξιόστροφα (prograde rotators) προς τα έξω (δεξιά). Το πλάτος (ή αλλιώς η αντίστροφη κλίση) του σχήματος V είναι ανάλογο με την ηλικία της οικογένειας.

Με βάση αυτή τη μέθοδο, έχουν εντοπιστεί με επιτυχία δύο αρχέγονες (primordial) οικογένειες αστεροειδών που πιθανότατα σχηματίστηκαν πριν από την τροχιακή των γιγάντιων πλανητών (giant planet instability) [6] που πιθανόν να έχουν την ίδια ηλικία με αυτή του Ηλιακού μας Συστήματος (περίπου 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια,  $\sim 4.5$  Gyr) και μια αρχαία (ancient) οικογένεια που είναι περίπου 3 δισεκατομμύρια χρονών ( $\sim 3$  Gyr) [5, 7]. Στοιχεία από παρατηρήσεις και θεωρητικά μοντέλα εξέλιξης δείχνουν ότι πιθανόν υπάρχουν περισσότερες αρχέγονες οικογένειες που δεν έχουν ανιχνευθεί [5, 8]. Ωστόσο, η αξιοπιστία αυτών των οικογενειών σχήματος V θα πρέπει να επαληθευτούν με μία ανεξάρτητη μέθοδο.

Ένα πολύ σημαντικό τεστ την αναγνώριση των οικογενειών είναι η εύρεση μιας ανισότροπης κατανομής των φορών περιστροφής των μελών της οικογένειας, η οποία είναι απόρροια της εξέλιξης του φαινομένου Yarkovsky [9, 10]. Συγκεκριμένα, για να ελεγχθεί η υπόθεση εργασίας ότι σύμφωνα με τις θεωρίες της τροχιακής εξέλιξης αστεροειδών υπό το

<sup>1</sup> Για παραπάνω πληροφορίες σχετικά με το φαινόμενο Yarkovsky στα Ελληνικά μπορείτε να διαβάσετε το άρθρο «Το φαινόμενο Yarkovsky και η επίδρασή του στα σώματα μικρής μάζας του Ηλιακού Συστήματος» του 7<sup>ου</sup> τεύχους του περιοδικού Physics Time ([http://www.physicstime.gr/uploads/1/2/4/7/124787203/2021\\_7\\_physicstime.pdf](http://www.physicstime.gr/uploads/1/2/4/7/124787203/2021_7_physicstime.pdf)).

φαινόμενο Yarkovsky, τα μέλη της εσωτερικής (εξωτερικής) πλευράς του σχήματος «V» μιας οικογένειας έχουν στατιστική κυριαρχία των αριστερόστροφα (δεξιόστροφα) περιστρεφόμενων αντικειμένων (βλ. Εικόνα 1). Αυτή η υπόθεση έχει ήδη για γνωστές οικογένειες και είναι ένα αξιόπιστο τεστ για την ιδιότητα μέλους της οικογένειας [9, 10].

## 2. Η παρατηρησιακή εκστρατεία: Ancient Asteroids

Για το σκοπό αυτό, ξεκίνησε η διεθνής παρατηρησιακή εκστρατεία «Ancient Asteroids» [11, 12, 13], στην οποία συμμετέχουν τα παρακάτω ερευνητικά ινστιτούτα και αστεροσκοπεία:

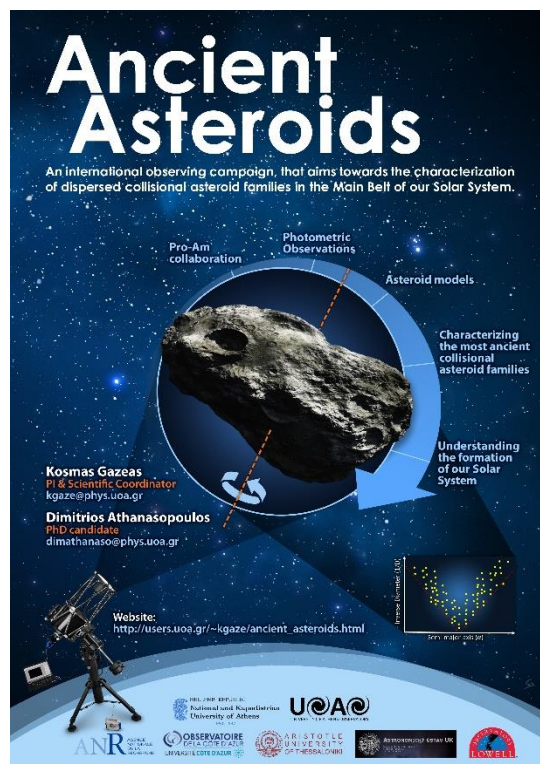
- Πανεπιστημιακό Αστεροσκοπείο Αθηνών (University of Athens Observatory – UOAO), Ελλάδα
- Bonamico Star Adventure Astronomical (BSA) Observatory, Ιταλία
- Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), Γαλλία
- Lowell Observatory, Αριζόνα, Η.Π.Α.
- Bigmuskie Observatory, Ιταλία
- Astronomical Institute of the Charles University, Τσεχία
- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης στη Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
- French National Research Agency, Γαλλία
- Belgrade Astronomical Observatory, Σερβία
- Αστεροσκοπείο Χελμού, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ελλάδα
- NOAK Observatory, Ελλάδα
- BlueEye 600 Observatory, Τσεχία
- Pic de Château-Renard Observatory, Γαλλία
- Observatoire du Bois de Bardon, Γαλλία
- Blue Mountains Observatory, Αυστραλία

Ο κύριος στόχος της εκστρατείας είναι η δημιουργία ενός διεθνούς κόμβου μεταξύ επαγγελματιών και ερασιτεχνών αστρονόμων (Pro-Am collaboration), προκειμένου να πραγματοποιηθούν φωτομετρικές παρατηρήσεις ενός πολύ συγκεκριμένου δείγματος των αρχαιότερων αστεροειδών. Για τους σκοπούς της εκστρατείας αναπτύχθηκε η ιστοσελίδα<sup>2</sup> της εκστρατείας που περιλαμβάνει οδηγίες για τη συμμετοχή, τις παρατηρήσεις και την αξιολόγηση και συλλογή δεδομένων εικόνας.

Οι φωτεινές καμπύλες που συλλέγονται συνδυάζονται με δεδομένα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, καθώς και με αραιά δεδομένα από διαστημικές αποστολές (Gaia, TESS, κ.λπ.) αλλά και παρατηρήσεις όλου του ουρανού (PTF, LSST, ATLAS, κ.λπ.). Με αυτό τον τρόπο, παρατηρήσεις από διαφορετικές θέσεις της τροχιάς του αστεροειδή μπορούν να αποκαλύψουν την κατάσταση περιστροφής του. Τα αποτελέσματα θα καταγράφονται στο πρόγραμμα Minor Planet Physical Properties Catalog (MP<sup>3</sup>C), τη μεγαλύτερη βάση δεδομένων φυσικών ιδιοτήτων αστεροειδών, η οποία συνάδει με το όραμα της E.E. για ανοιχτά δεδομένα.

---

<sup>2</sup> [http://users.uoa.gr/~kgaze/ancient\\_asteroids.html](http://users.uoa.gr/~kgaze/ancient_asteroids.html)



Εικόνα 2: Αφίσα της παρατηρησιακής εκστρατείας “Ancient Asteroids”

### 3. Τα πρώτα αποτελέσματα

Οι πρώτες παρατηρήσεις αφορούσαν μία αρχέγονη (primordial) οικογένεια της οποίας μόνο η αριστερή πλευρά του σχήματος «V» έχει ανιχνευτεί. Στο πλαίσιο της εκστρατείας, πραγματοποιήθηκαν φωτομετρικές παρατηρήσεις από 12 αστεροσκοπεία για τους αστεροειδείς που είχαν αναγνωριστεί ως μέλη αυτής της οικογένειας [12].

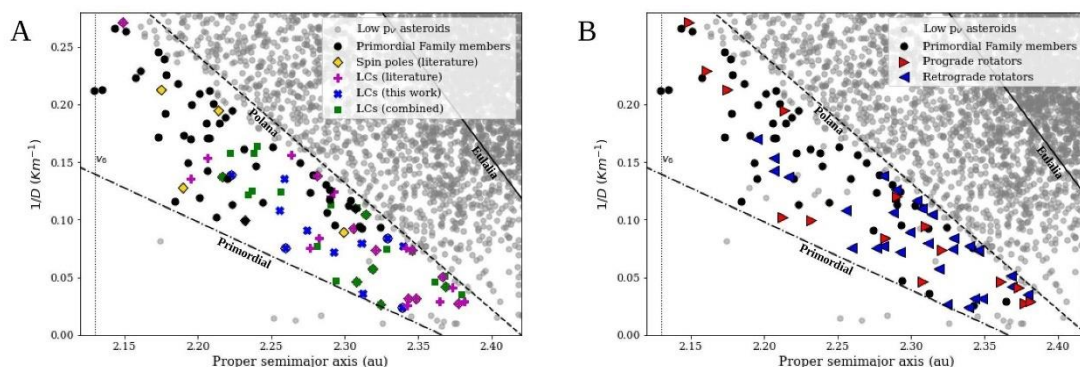
Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν συνδυάστηκαν με άλλα δεδομένα από τη βιβλιογραφία ενώ λήφθηκαν υπόψη και τυχόν προηγούμενα μοντέλα αστεροειδών. Τα φωτομετρικά δεδομένα περιλαμβάνουν πυκνές χρονικά μετρήσεις από επίγειες εγκαταστάσεις, όσο και αραιές χρονικά μετρήσεις από διάφορες επισκοπήσεις όλου του ουρανού και διαστημικές αποστολές. Χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες τεχνικές ανάλυσης για κάθε τύπο δεδομένων για την εξαγωγή της καμπύλης φωτός του αστεροειδούς και έγινε χρήση της μεθόδου της «Κυρτής Αναστροφής» (Convex Inversion – CI) [14, 15]. Μέχρι στιγμής, η CI έχει χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή μοντέλων αστεροειδών για περισσότερους από 3.460 αστεροειδείς που είναι αποθηκευμένοι στη βάση δεδομένων DAMIT<sup>3</sup> [16].

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα προσδιορίστηκε η περιστροφική κατάσταση για 54 μέλη της οικογένειας και επιπλέον μετρήθηκε, για πρώτη φορά, η περίοδος περιστροφής για 8 [12]. Αυτό αντιστοιχεί στο 50% του πληθυσμού στη ζώνη μεταξύ του αριστερού ορίου της Polana και της αρχέγονης (primordial) οικογένειας (βλ. Εικόνα 3). Συγκεκριμένα, υπολογίσαμε 23 νέα πλήρη μοντέλα αστεροειδών, 16 αναθεωρημένα και 8 νέα «μερικά» μοντέλα<sup>4</sup>, όπου 32 αστεροειδείς έχουν αριστερόστροφη περιστροφή και 22 δεξιόστροφη. Με βάση την ανάλυσή μας [12], υποδείξαμε 9 αστεροειδείς δεν αποτελούν μέλη της οικογένειας στο δείγμα των 54 αντικειμένων που μελετήθηκαν. Από αυτά τα 45 επιβεβαιωμένα μέλη της οικογένειας αστεροειδών, 29 μοντέλα αστεροειδών (65%) έχουν αριστερόστροφη

<sup>3</sup> <https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/>

<sup>4</sup> Μοντέλα για τα οποία έχει βρεθεί μερική λύση του προβλήματος, κάποιες παράμετροι είναι ακόμα αβέβαιες.

περιστροφή και 16 δεξιόστροφη, συμπεριλαμβανομένων και των μερικών λύσεων.



Εικόνα 3: Πάνελ Α: Τα αρχέγονα μέλη της οικογένειας παρουσιάζονται στο επίπεδο που ορίζεται από τον μεγάλο ημι- άξονα και της αντίστροφης διαμέτρου, μαζί με τους αστεροειδείς χαμηλού albedo. Οι κίτρινοι ρόμβοι παρουσιάζουν μέλη με γνωστό άξονα περιστροφής από τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, τα σύμβολα «+», «x» και τετραγώνου δείχνουν τις πηγές πυκνών καμπυλών φωτός για αυτά τα μέλη. Πάνελ Β: Η αριστερή πλευρά του σχήματος «V» της αρχέγονης οικογένειας, όπου οι κόκκινοι δείκτες δείχνουν τους δεξιόστρους και οι μπλε δείκτες τους αριστερόστρους αστεροειδείς αντίστοιχα.

Η στατιστική υπεροχή των μελών με αριστερόστροφη περιστροφή οφείλεται στη φυσική διαδικασία [5], κατά την οποία τα θραύσματα προερχόμενα από μία σύγκρουση ενός αρχικού σώματος, ακολουθούν τη δυναμική εξέλιξη που επηρεάζεται από το φαινόμενο Yarkovsky. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας αποτελούν απόδειξη ότι οι αστεροειδείς, μέλη μιας οικογένειας, ηλικίας 4 δισεκατομμυρίων ετών (4 Gyr) έχουν κοινή προέλευση.

## 4. Πρόσκληση προς ερασιτέχνες αστρονόμους

Στη παρατηρησιακή εκστρατεία «Ancient Asteroids» συμμετέχουν ήδη ερασιτέχνες αστρονόμοι από την Ιταλία, τη Γαλλία, την Ελλάδα και την Αυστραλία. Οι συμμετέχοντες σε συνεργασία με τους ερευνητές δημοσιεύουν τα ευρήματά τους σε επιστημονικά περιοδικά υψηλού αντίκτυπου και διεθνή συνέδρια. Προσκαλούμε ερασιτέχνες αστρονόμους να συμμετάσχουν στην εκστρατεία παρατήρησης και να εκτελέσουν φωτομετρικές μετρήσεις των πιο αρχέγονων αστεροειδών.

Οι παρατηρήσεις θα αποκαλύψουν την κατάσταση περιστροφής των μελών, η οποία είναι κρίσιμη παράμετρος για τον έλεγχο της υπόθεσης των αρχέγονων οικογενειών. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων θα είναι σημαντική για την ανακατασκευή της αρχικής κατάστασης της Ζώνης των αστεροειδών αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα της Πλανητικής Επιστήμης. Αυτή η έρευνα θα οδηγήσει ενδεχομένως σε μια καλύτερη κατανόηση των πρώτων σταδίων της εξέλιξης του Ηλιακού Συστήματος, του μηχανισμού στην αρχή του σχηματισμού των αστεροειδών και των διαδικασιών σχηματισμού πλανητών.

## Ευχαριστίες

Οι ευχαριστίες για νομικούς λόγους ακολουθούν στα αγγλικά:

MD and CA acknowledge support from ANR “ORIGINS” (ANR-18-CE31-0014). This work is based on data provided by the Minor Planet Physical Properties Catalogue (MP<sup>3</sup>C) of the Observatoire de la

Côte d'Azur. The research of JH has been supported by the Czech Science Foundation through grant 20-08218S. The work of OP has been supported by INTER-EXCELLENCE grant LTAUSA18093 from the Ministry of Education, Youth, and Sports. Support for T.W.-S.H. was provided by NASA through the NASA Hubble Fellowship grant HST-HF2-51458.001-A awarded by the Space Telescope Science Institute (STScI), which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., for NASA, under contract NAS5-26555.

We thank the Las Cumbres Observatory and their staff for its continuing support of the ASAS-SN project, supported by the Gordon and Betty Moore Foundation through grant GBMF5490 to the Ohio State University and funded in part by the Alfred P. Sloan Foundation grant G-2021-14192 and NSF grant AST-1908570. Development of ASAS-SN has been supported by NSF grant AST-0908816, the Mt. Cuba Astronomical Foundation, the Center for Cosmology and AstroParticle Physics at the Ohio State University, the Chinese Academy of Sciences South America Center for Astronomy (CAS-SACA), the Villum Foundation, and George Skestos.

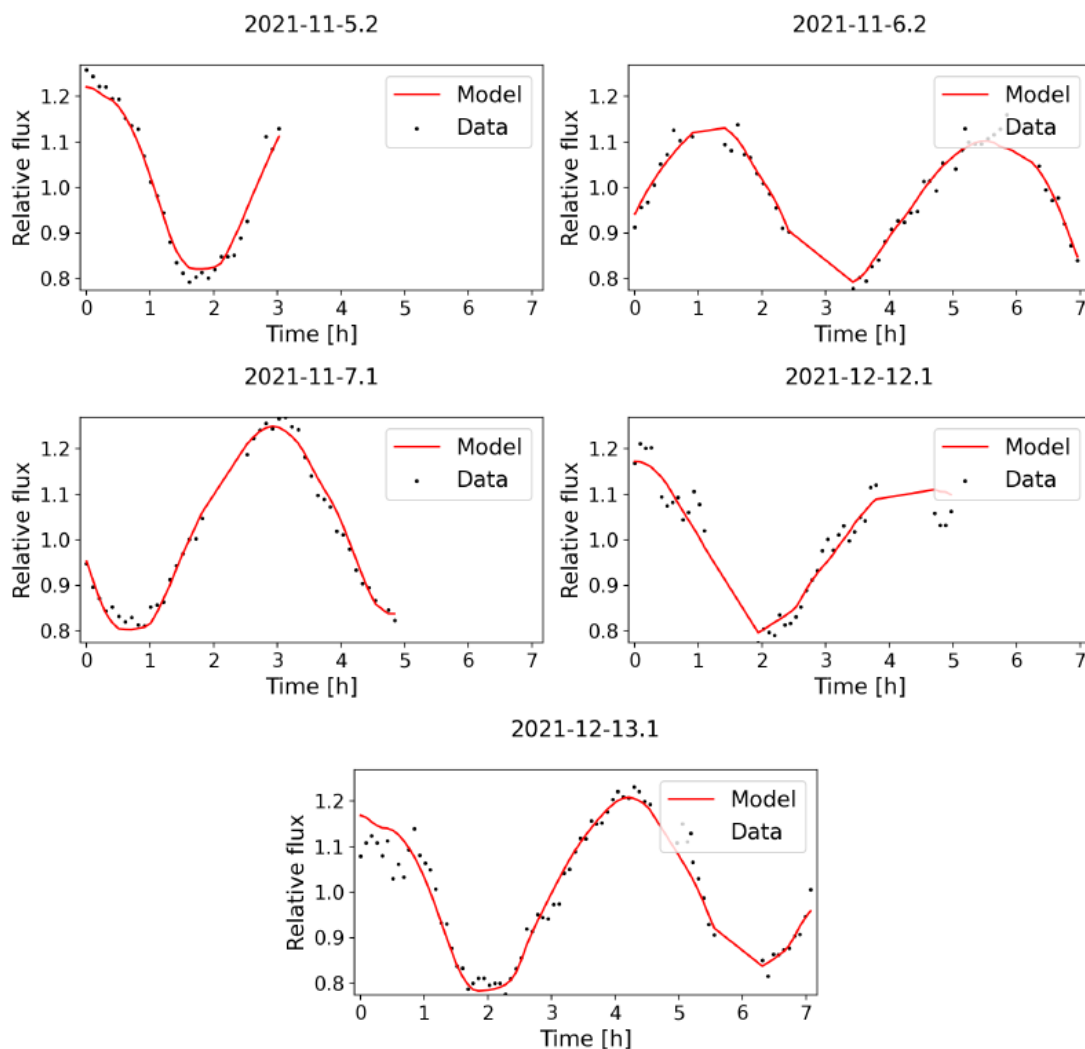
## Αναφορές

- [1] Brož, M. & Morbidelli, A. (2013). The Eos family halo. *Icarus*, 223(2), 844-849.
- [2] Tsirvoulis, G. et al. (2018). Reconstructing the size distribution of the primordial Main Belt. *Icarus*, 304, 14-23.
- [3] Dermott, S. F. (2021). Dynamical evolution of the inner asteroid belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505(2), 1917-1939.
- [4] Bolin, B. T. et al. (2017). Yarkovsky V-shape identification of asteroid families. *Icarus*, 282, 290-312.
- [5] Delbo', M. et al. (2017). Identification of a primordial asteroid family constrains the original planetesimal population. *Science*, 357(6355), 1026-1029.
- [6] Tsiganis, K. et al. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435(7041), 459-461.
- [7] Delbo', M. et al. (2019). Ancient and primordial collisional families as the main sources of X-type asteroids of the inner main belt. *Astronomy & Astrophysics*, 624, A69.
- [8] Dermott, S. F. et al. (2018). The common origin of family and non-family asteroids. *Nature Astronomy*, 2(7), 549-554.
- [9] Hanuš, J. et al. (2013). An anisotropic distribution of spin vectors in asteroid families. *Astronomy & Astrophysics*, 559, A134.
- [10] Hanuš, J. et al. (2013). Asteroids' physical models from combined dense and sparse photometry and scaling of the YORP effect by the observed obliquity distribution. *Astronomy & Astrophysics*, 551, A67.
- [11] Athanasopoulos, D. et al. (2021). Ancient Asteroids: An international observing campaign for the characterisation of the oldest asteroid collisional families (No. EPSC2021-355). *Copernicus Meetings*.
- [12] Athanasopoulos, D. et al. (accepted July 2022). Asteroid spin-states of a 4 Gyr-old collisional family. *Astronomy & Astrophysics*.
- [13] Ancient Asteroids' website: [http://users.uoa.gr/~kgaze/ancient\\_asteroids.html](http://users.uoa.gr/~kgaze/ancient_asteroids.html)
- [14] Kaasalainen, M., & Torppa, J. (2001). Optimization methods for asteroid lightcurve inversion: I. shape determination. *Icarus*, 153(1), 24-36.
- [15] Kaasalainen, M., Torppa, J., & Muinonen, K. (2001). Optimization methods for asteroid

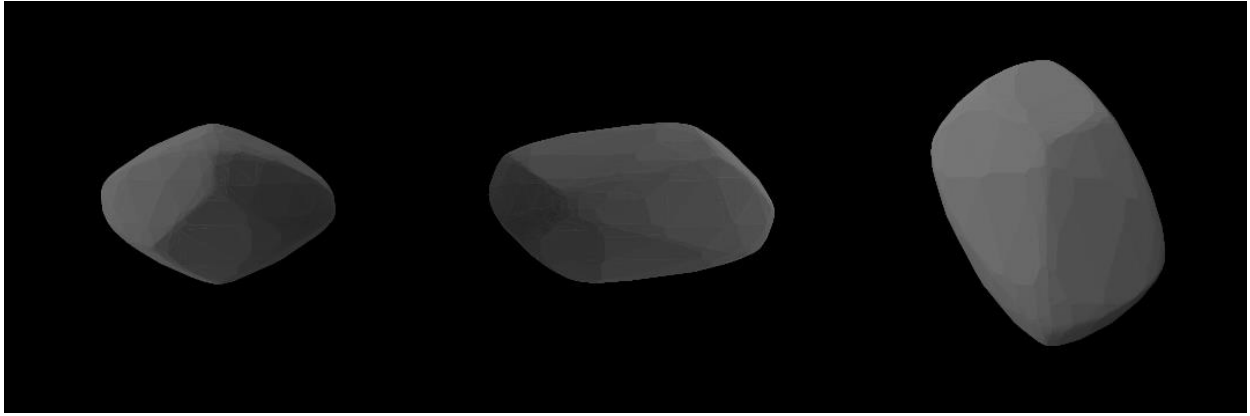
lightcurve inversion: II. The complete inverse problem. *Icarus*, 153(1), 37-51.

[16] Āurech, J., Sidorin, V., & Kaasalainen, M. (2010). DAMIT: a database of asteroid models. *Astronomy & Astrophysics*, 513, A46.

## Παράρτημα



Εικόνα 4: Παράδειγμα προσαρμογής του μοντέλου στις καμπύλες φωτός για τον αστεροειδή (2575) Bulgaria. Και οι πέντε καμπύλες φωτός ελήφθησαν στο πλαίσιο της εκστρατείας «Ancient Asteroids» [12].



Εικόνα 5: Το μοντέλο σχήματος του αστεροειδή (2575) Bulgaria [12].