

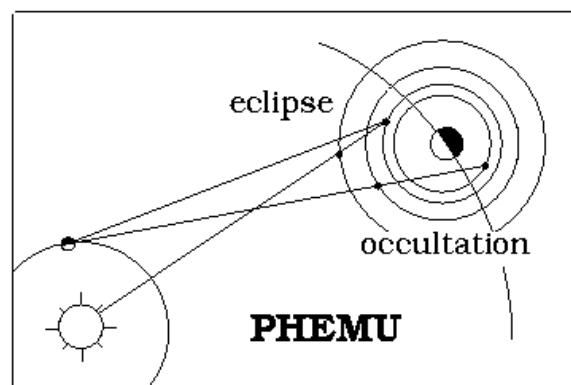
«Αμοιβαία Φαινόμενα (Αποκρύψεις και Εκλείψεις) μεταξύ των Δορυφόρων του Πλανήτη Κρόνου: Η Καταγραφή των Γεγονότων 4O5P (19/12/08) και 3O2P (24/12/08) στο Πλαίσιο της Παρατηρησιακής Εκστρατείας PHEMAT-09 (IMCCE)»

Βαγγέλης Τσάμης
vtsamis@aegean.gr
Εκπαιδευτικός

Απόστολος Χρήστου
aac@star.arm.ac.uk
Armagh Observatory
Northern Ireland, UK.

Εισαγωγή

Την περίοδο 2008 – 2010, μια σειρά από αποκρύψεις και εκλείψεις λαμβάνουν χώρα μεταξύ των δορυφόρων του πλανήτη Κρόνου, όπως και του Δία, καθώς το 2009 ο Ήλιος διασχίζει το Ισημερινό τους επίπεδο (Equinox). Ο Ήλιος, αλλά και η Γη, όντας πάνω στην εκλειπτική, διαβαίνουν από το ισημερινό επίπεδο του Κρόνου κάθε 15 χρόνια, χρόνος ίσος με την ημιπερίοδο της περιφοράς του Κρόνου γύρω από τον Ήλιο. Καθώς το τροχιακό επίπεδο περιφοράς των επτά από τους μεγάλους δορυφόρους του Κρόνου είναι σχεδόν παράλληλο με το ισημερινό επίπεδο του πλανήτη, για έναν παρατηρητή στη Γη, το επίπεδο των δακτυλίων του και της τροχιάς των δορυφόρων του εμφανίζεται σε προφίλ (σχεδόν μηδενική κλίση). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η φαινόμενη κίνηση των δορυφόρων να γίνεται αντιληπτή ως μια κατά το μάλλον ή ήττον γραμμική μετατόπιση εκατέρωθεν του δίσκου του πλανήτη, και έτσι είναι δυνατόν να παρατηρηθούν αμοιβαίες αποκρύψεις και εκλείψεις μεταξύ των δορυφόρων (σχήμα 1).



Σχήμα 1: Γεωμετρία αμοιβαίων αποκρύψεων και εκλείψεων στα αμοιβαία φαινόμενα
Πηγή: PHEMU Tech. Note #1, IMCCE, France

Οι ημερομηνίες των συνόδων με τον Ήλιο και των ισημεριών των πλανητών Δία και Κρόνου για το έτος 2009 φαίνονται στον πίνακα 1. Η πρώτη αναφορά στη βιβλιογραφία για την παρατήρηση αμοιβαίου φαινομένου προέρχεται από το Δελτίο του Αστεροσκοπείου του Λικ, όπου ο Αμερικανός αστρονόμος Robert Grand Aitken αναφέρει ότι στις 11 Νοεμβρίου 1907 παρατήρησε οπτικά απόκρυψη του Εγκέλαδου από την Τηθύ με το 36" διοπτρικό τηλεσκόπιο (Aitken 1909). Σήμερα, η μελέτη αυτών των αστρονομικών φαινομένων γίνεται με τη μέτρηση και καταγραφή της ποσότητας φωτός που συλλέγεται από οπτικούς αισθητήρες (Συσκευές Συζευγμένου Φορτίου, CCD, Charge-Coupled Devices). Η αυξομείωση της φαινόμενης λαμπρότητας του στόχου, προϊόντος του χρόνου, καταγράφεται και αναπαριστάται με ειδικό λογισμικό, με καμπύλες φωτός (φωτομετρία).

	Δίας	Κρόνος
Αντίθεση	14 Αυγούστου	9 Μαρτίου
Σύνοδος με τον Ήλιο	24 Ιανουαρίου	18 Σεπτεμβρίου
Διάβαση του Ήλιου από το Ισημερινό επίπεδο του πλανήτη (Equinox)	22 Ιουνίου	12 Αυγούστου
Διάβαση της Γης από το Ισημερινό επίπεδο του πλανήτη («εξαφάνιση» των δακτυλίων)	15 Απριλίου	4 Σεπτεμβρίου
<i>Πίνακας 1: Ημερομηνίες των συνόδων με τον Ήλιο και των ισημεριών των πλανητών Κρόνου και Δία το 2009.</i> <i>Πηγή: http://www.imcce.fr/fr/presentation/equipes/GAP/travaux/phemu09/index_en.html</i>		

Ουράνια Μηχανική - Η Σημασία της Φωτομετρίας των Αμοιβαίων Φαινομένων

Οι τροχιές των δορυφόρων των μεγάλων πλανητών του Ηλιακού Συστήματος μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας βαρυτικών αλληλεπιδράσεων, είτε μεταξύ των ίδιων των δορυφόρων, είτε μεταξύ των δορυφόρων και του πλανήτη. Για παράδειγμα, ο δορυφόρος ενός πλανήτη ασκεί παλλιροϊκές δυνάμεις στον πλανήτη, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει την κίνηση του δορυφόρου τείνοντας να αυξήσει ή να μειώσει την ακτίνα της τροχιάς του. Αυτή η απειροελάχιστη συνιστώσα στην τροχιακή κίνηση του δορυφόρου, καλούμενη και παλλιροϊκή επιτάχυνση, δε μπορεί να παρατηρηθεί και να μετρηθεί παρά μόνο με την πάροδο δεκαετιών ή αιώνων. Η ανίχνευση αυτών των εξαιρετικά μικρών μεταβολών της τροχιάς του δορυφόρου απαιτεί αφενός πολύ υψηλής ακρίβειας αστρομετρία, αλλά και συστηματικές καταγραφές δεδομένων για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ακρίβεια που απαιτείται για τις μετρήσεις αυτές είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί, είτε με συμβατικές αστρομετρικές παρατηρήσεις, είτε από διαστημοσυσκευές, όπως οι αποστολές Voyager και Pioneer. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις των αμοιβαίων φαινομένων μεταξύ των φυσικών δορυφόρων των μεγάλων πλανητών του ηλιακού μας συστήματος αποδείχτηκε ότι είναι μια πολύ καλύτερη μέθοδος για συλλογή αστρομετρικών στοιχείων πολύ μεγάλης ακριβείας, αφενός λόγω χαμηλού κόστους, και αφετέρου χάρις στη δυνατότητα συστηματικής καταγραφής δεδομένων κάθε 6, 15 ή 42 έτη για τους δορυφόρους του Δία, του Κρόνου και του Ουρανού, αντίστοιχα. Τέτοιες καταγραφές και μετρήσεις έγιναν για πρώτη φορά το 1973 στο Δία (Aksnes & Franklin 1976), το 1980 στον Κρόνο (Aksnes *et al* 1984) και το 2007 στον πλανήτη Ουράνο (Christou *et al* 2009). Καθώς δεν υπάρχει πρακτικά ατμόσφαιρα γύρω από τους δορυφόρους, η αστρομετρική ακρίβεια μπορεί να είναι καλύτερη από 30 mas (milli-arc-seconds) όπως πχ έδειξαν μετρήσεις στους δορυφόρους του Δία (Arlot *et al* 1997) και από 5 mas στους δορυφόρους του Κρόνου (Noyelles *et al* 2003). Αυτές οι τιμές μεταφράζονται σε ακρίβεια 90 χλμ ως προς την ακριβή θέση των δορυφόρων του Δία στο χώρο και σε μόλις 30 χλμ για τους δορυφόρους του Κρόνου.

IMCCE

Το Ινστιτούτο Ουράνιας Μηχανικής και Υπολογισμού Εφημερίδων (IMCCE, πρώην Bureau des Longitudes) διοργανώνει παρατηρησιακές εκστρατείες για την παρατήρηση και καταγραφή αυτών των φαινομένων από το 1973, με σκοπό τη συλλογή δεδομένων σε μεγάλη κλίμακα χρόνου, αναγκαίων για να ανιχνευτούν και να μετρηθούν με ακρίβεια οι παλλιροϊκές αλληλεπιδράσεις, ώστε να εξαχθούν στοιχεία για την εσωτερική δομή και μηχανική των δορυφόρων. Με βάση δηλαδή δεδομένα φωτομετρίας και αστρομετρίας από επίγειες παρατηρήσεις, εξάγονται συμπεράσματα για τα εγγενή γεωφυσικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων των μεγάλων πλανητών. Η εκστρατεία για την παρατήρηση των αμοιβαίων φαινομένων στους δορυφόρους του Κρόνου για το 2009 έχει την ονομασία PHESAT09 (Arlot & Thuillot 2009) (βλ. http://www.imcce.fr/page.php?nav=en/observateur/campagnes_obs/index.php).

Στην ιστοσελίδα σημειώνεται ότι η καταγραφή αυτών των αστρονομικών γεγονότων είναι δυνατόν να γίνει ακόμα και από ερασιτέχνες αστρονόμους. Ωστόσο, προκειμένου οι πληροφορίες και τα στοιχεία καταγραφής να είναι αξιοποιήσιμα, πρέπει οι παρατηρήσεις να διεξαχθούν πολύ προσεκτικά, και προτείνεται να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη μεθοδολογία.

Επιλογή γεγονότων - Προετοιμασία

Στην ιστοσελίδα του IMMCE υπάρχει διαδραστικό λογισμικό όπου έχει κανείς τη δυνατότητα να εισαγάγει στοιχεία για οποιοδήποτε τόπο παρατήρησης (συντεταγμένες τόπου ή κωδικό αστεροσκοπείου), να ορίσει τιμές σε κάποια φίλτρα που επιλέγει, όπως την απόσταση του ζεύγους των δορυφόρων από το δίσκο του πλανήτη, το ποσοστό μείωσης λαμπρότητας, την ύψωση του Ήλιου και του Κρόνου στον ορίζοντα, κ.ά., έτσι ώστε να δημιουργήσει ένα πίνακα γεγονότων κατάλληλων για παρατήρηση, σύμφωνα με τα κριτήρια που έθεσε.

(Βλ. http://www.imcce.fr/page.php?nav=en/observateur/campagnes_obs/phesat09/prog_interactif.php)

Το σύνολο των θεωρητικά παρατηρήσιμων γεγονότων (πχ ακόμα και αυτά με ύψος του Κρόνου μεγαλύτερο από 0 μοίρες) ήταν 19 (πίνακας 2). Έτσι, εξετάσαμε προσεκτικά μια σειρά από αμοιβαία φαινόμενα μεταξύ των δορυφόρων του πλανήτη Κρόνου, και επιλέξαμε κατ'αρχήν δύο γεγονότα για το 2008, με κριτήριο την ευκολία παρατήρησής τους από την Ελλάδα και τις δυνατότητες του εξοπλισμού μας: τα γεγονότα 4O5P (απόκρυψη της Ρέας από τη Διώνη) στις 19 Δεκ. 2008 και 3O2P (απόκρυψη του Εγκέλαδου από την Τηθύ) στις 24 Δεκ. 2008. Στη συνέχεια μελετήσαμε την κινηματική των δορυφόρων στα γεγονότα αυτά με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Saturn Viewer, το οποίο είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

http://pds-rings.seti.org/tools/viewer2_sat.html.

Εξοπλισμός - Χαρακτηριστικά CCD και τηλεσκοπίου

Για να είναι οι καταγραφές των αμοιβαίων φαινομένων αξιοποιήσιμες, συνιστάται, στη σχετική βιβλιογραφία, η χρήση τηλεσκοπίου μεγάλης εστιακής απόστασης, έτσι ώστε η απεικόνιση του δορυφόρου στον ψηφιακό αισθητήρα να καταλαμβάνει αρκετά εικονοστοιχεία (pixels). Το τηλεσκόπιο που είχαμε στη διάθεσή μας είναι το καταδιопτρικό (SCT) τηλεσκόπιο MEADE LX-200R διαμέτρου 40 cm (16") και εστιακής απόστασης 400cm της Ελληνογερμανικής αγωγής, τοποθετημένο σε θόλο διαμέτρου 5 μέτρων.

Ο ψηφιακός αισθητήρας που χρησιμοποιήσαμε για τις δύο καταγραφές είναι η CCD κάμερα ATIK 16-HR, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Chip	Sony Chip ICX-285 AL
Resolution	1390 x 1040 pixels (1.445.600 pixels)
Chip size	10.2mm x 8.3mm - diagonal 13.15mm
Pixel size	6.45 x 6.45 um
BIT	16 BIT
Computer Port	USB 1.1 Download time max. 15s
Cooling	Peltier cooling (25° below ambient temp.)
Preview funtion	Only approx. 1 second download time
Power supply	12V DC - 0.8A power consumption
Protective glass	Optical glass - BK-7

DATE OF MAXIMUM (TT)				EVENT :		FLUX	DIST.		RIGHT ASC.			DECLINATION			HOUR	AZIMUT ELEV.		
YR	MT	DAY	H M S	S IN RJ	"		DUR.	TO IMPACT	H M S	DEG	'	"	AU	HR		DEG	DEG	DEG
2008	12	8	23 51 50.	3	OCC 2 P	0.214	116	3.7	0.044	11 31	4.39	+ 5 14	21.6	9.378398	-4.863	-83.6	16.6	-120.1 -64.8
2008	12	19	2 12 49.	4	OCC 5 P	0.439	935	5.9	0.042	11 32	20.85	+ 5 9	8.5	9.211219	-1.873	-45.0	48.4	-89.2 -39.2
2008	12	24	2 2 2.	3	OCC 2 P	0.064	75	3.5	0.088	11 32	43.76	+ 5 8	10.9	9.129323	-1.731	-42.2	49.5	-91.2 -41.8
2009	1	1	3 10 41.	1	OCC 3 P	0.074	121	3.1	0.077	11 32	59.33	+ 5 8	56.0	9.000449	-0.063	-1.7	57.2	-82.2 -28.8
2009	1	8	4 8 42.	3	OCC 2 T	0.218	103	3.4	0.020	11 32	51.23	+ 5 11	53.6	8.892803	1.368	34.8	52.3	-75.3 -17.8
2009	1	12	22 9 19.	2	OCC 3 P	0.217	124	3.7	0.045	11 32	34.63	+ 5 15	3.6	8.823802	-4.302	-78.0	23.2	160.6 -72.7
2009	1	24	4 26 23.	1	OCC 3 P	0.088	201	3.0	0.075	11 31	20.06	+ 5 26	9.5	8.675091	2.740	59.4	40.5	-76.2 -13.7
2009	1	26	1 46 39.	1	OCC 3 A	0.139	246	3.0	0.015	11 31	3.00	+ 5 28	28.8	8.652557	0.207	5.8	57.4	-101.6 -44.8
2009	1	27	23 6 28.	1	OCC 3 P	0.016	104	3.0	0.104	11 30	44.70	+ 5 30	55.6	8.630821	-2.332	-53.3	44.6	-160.6 -69.3
2009	2	2	5 26 19.	1	ECL 3 A	0.159	478	3.0	0.030	11 29	47.24	+ 5 38	20.9	8.574599	4.358	78.9	22.8	-69.6 -1.3
2009	5	11	17 45 49.	7	ECL 6	0.019	2935	19.9	0.158	11 7	55.29	+ 7 57	5.9	8.951940	-0.478	-14.0	59.3	117.1 -4.5
2009	6	24	18 15 42.	3	ECL 2 P	0.617	96	3.3	0.076	11 12	18.02	+ 7 21	29.9	9.667351	2.839	62.6	40.9	124.9 -4.8
2009	7	1	20 4 14.	2	ECL 3	0.045	99	4.0	0.102	11 14	2.92	+ 7 9	20.6	9.777646	5.081	87.2	15.2	144.6 -20.1
2009	7	7	19 7 51.	3	ECL 4 P	0.831	246	5.1	0.048	11 15	42.73	+ 6 57	57.2	9.866627	4.507	81.5	21.9	132.9 -13.1
2009	7	10	17 54 53.	2	OCC 3 A	0.218	612	3.6	0.034	11 16	35.72	+ 6 51	57.5	9.909104	3.471	70.3	33.7	120.2 -1.8
2009	7	26	18 46 3.	3	ECL 6	0.103	617	5.4	0.126	11 22	1.35	+ 6 15	35.710	118414	5.284	88.4	12.3	126.5 -12.0
2009	8	2	18 56 21.	6	ECL 5 P	4.779	592	3.7	0.153	11 24	41.01	+ 5 57	59.210	196316	5.867	93.6	5.1	127.3 -15.0
2009	9	4	17 1 29.	6	OCC 4 T	0.011	7320	5.3	0.173	11 38	46.10	+ 4 26	14.910	426234	5.879	92.5	4.0	101.2 -3.0
2010	6	5	23 32 7.	3	OCC 4 P	0.553	479	4.8	0.025	11 56	0.03	+ 3 3	27.8	9.247181	6.106	93.7	0.3	-162.2 -27.3

19 PHENOMENA ARE OBSERVABLE AT Athens (SUN ELEVATION < 0.0 DEG.; PLANET ELEVATION > 0.0 DEG.)

Πίνακας 2: Το σύνολο των αμοιβαίων φαινομένων μεταξύ των δορυφόρων του Κρόνου, παρατηρήσιμων από την Αθήνα.
http://www.imcce.fr/page.php?nav=en/observateur/campagnes_obs/phesat09/prog_interactif.php

Φασματική περιοχή καταγραφής

Καθώς ο δίσκος του πλανήτη Κρόνου είναι ιδιαίτερα λαμπρός, σε αντίθεση με τους αμυδρούς δορυφόρους του, επιλέξαμε να καταγράψουμε τα γεγονότα στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, χρησιμοποιώντας υπέρυθρο φίλτρο I(s) (standard Bessel photometric filter). Στην περιοχή αυτή εξομαλύνεται αισθητά η μεγάλη διαφορά της φωτεινότητας του Κρόνου και των δορυφόρων που παρατηρείται σε άλλες περιοχές του φάσματος, πχ με φωτομετρικό φίλτρο V, όπως μας έχει δείξει στην πράξη η καταγραφή ανάλογου φαινομένου σε δορυφόρους του πλανήτη Ουρανού το 2007 (βλ. Christou et al 2009).

Χρονομέτρηση

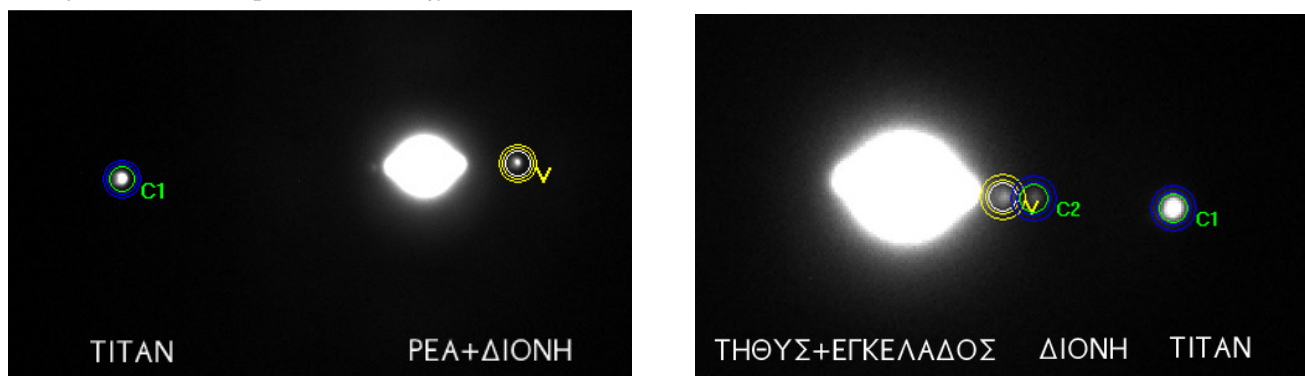
Καθώς έχει σημασία η αξιόπιστη βάση χρόνου στην καταγραφή των αμοιβαίων φαινομένων ώστε να είναι αξιοποιήσιμα τα αποτελέσματα, χρησιμοποιήσαμε το ωρολόγιο ακριβείας Oregon Scientific RMB 899P, λήψης σήματος DCF77, για το συγχρονισμό του ρολογιού του υπολογιστή μας με την ώρα UT. Είμασταν πεπεισμένοι για την αποδοτικότητα αυτής της συσκευής μετά από τη χρήση της στις παρατηρήσεις αποκρύψεων αστερών από αστεροειδείς (Τσάμης, 2007).

Μεθοδολογία Καταγραφής

Η παρατήρηση και καταγραφή των γεγονότων 4O5P και 3O2P έγινε με το διαμέτρου 40cm (16") καταδιοπτρικό τηλεσκόπιο MEADE LX200-R στο αστεροσκοπείο της Ελληνογερμανικής Αγωγής. Για κάθε ένα από τα δύο γεγονότα έγιναν λήψεις ψηφιακών απεικονίσεων CCD στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος με φωτομετρικό φίλτρο Bessell Johnson-Cousins I(s). Οι λήψεις έγιναν με τη χρήση του λογισμικού Artemis Capture CCD, το οποίο συνοδεύει την κάμερα ATIK 16-HR. Επιλέξαμε να γίνουν με ομαδοποίηση εικονοστοιχείων (pixel binning) 3X3. Ο συνδυασμός του τηλεσκοπίου και του αισθητήρα CCD μας έδωσαν τα εξής χαρακτηριστικά: κλίμακα (image scale) = 0.93 arcsec/pixel, οπτικό πεδίο 6,68 x 5,37 arcmin. Για το γεγονός 4O5P κάναμε 63 λήψεις διάρκειας 30 sec μεταξύ UT 01:51:20 και UT 2:25:26 ενώ για το γεγονός 3O2P κάναμε 51 λήψεις των 6 sec μεταξύ UT 01:57:12 και UT 02:04:42.

Επεξεργασία των ψηφιακών λήψεων με το λογισμικό AIP4WIN

Επεξεργαστήκαμε την ακολουθία των ψηφιακών απεικονίσεων για τα δύο γεγονότα με το πρόγραμμα λογισμικού AIP4WIN V2. Για κάθε λήψη εξαγάγαμε τη λαμπρότητα του ζεύγους των υπό απόκρυψη δορυφόρων σε σχέση με ένα τρίτο δορυφόρο (φωτεινή πηγή αναφοράς) με διαφορετική φωτομετρία (σχ. 1). Και στις δύο περιπτώσεις η φωτεινή πηγή αναφοράς ήταν ο δορυφόρος Τιτάνας. Στην περίπτωση του 3O2P χρησιμοποιήσαμε επιπλέον ως πηγή ελέγχου Διόνη. Για το γεγονός 4O5P χρησιμοποιήσαμε διάφραγμα (aperture) ακτίνας 9 pixel για τη φωτομέτρηση των πηγών και δακτύλιο εσωτερικής ακτίνας 12 και εξωτερικής 16 pixel για τη φωτομέτρηση του υποβάθρου και αφαίρεσή του από τις τιμές των πηγών. Στην περίπτωση του γεγονότος 3O2P, λόγω της εγγύτητας του πλανήτη Κρόνου στο στόχο, η φωτομέτρηση με τις πιο πάνω τιμές ακτίνων δεν ήταν δυνατό να αποδώσει αποτελέσματα αξιοποιήσιμα για την για την παραγωγή καμπύλης φωτός με σαφώς διακριτή μορφή, γι' αυτό και μετά από διάφορες δοκιμές χρησιμοποιήσαμε τελικά μικρότερες ακτίνες, των 5, 6 και 8 pixel, αντίστοιχα.

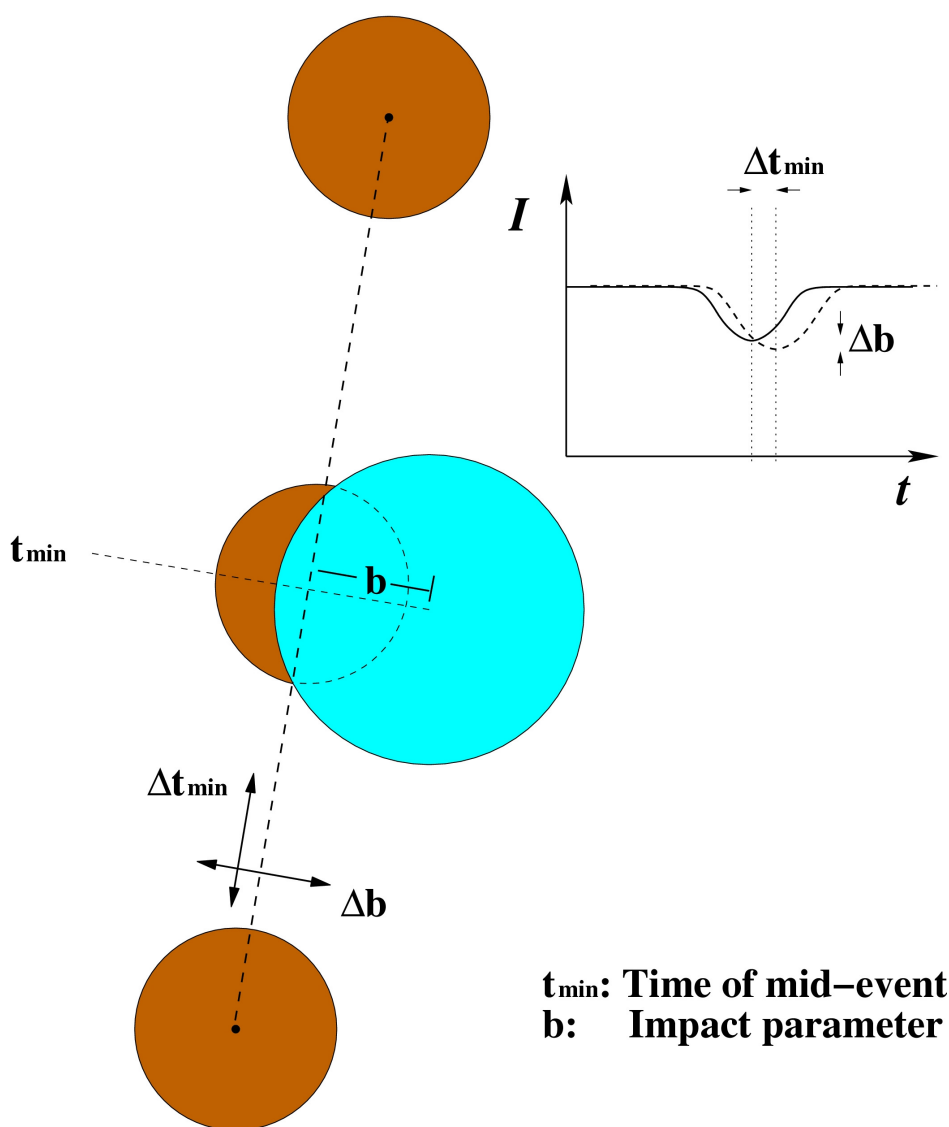


Σχήμα 2: Διαφορική φωτομετρία με το AIP4WINV.

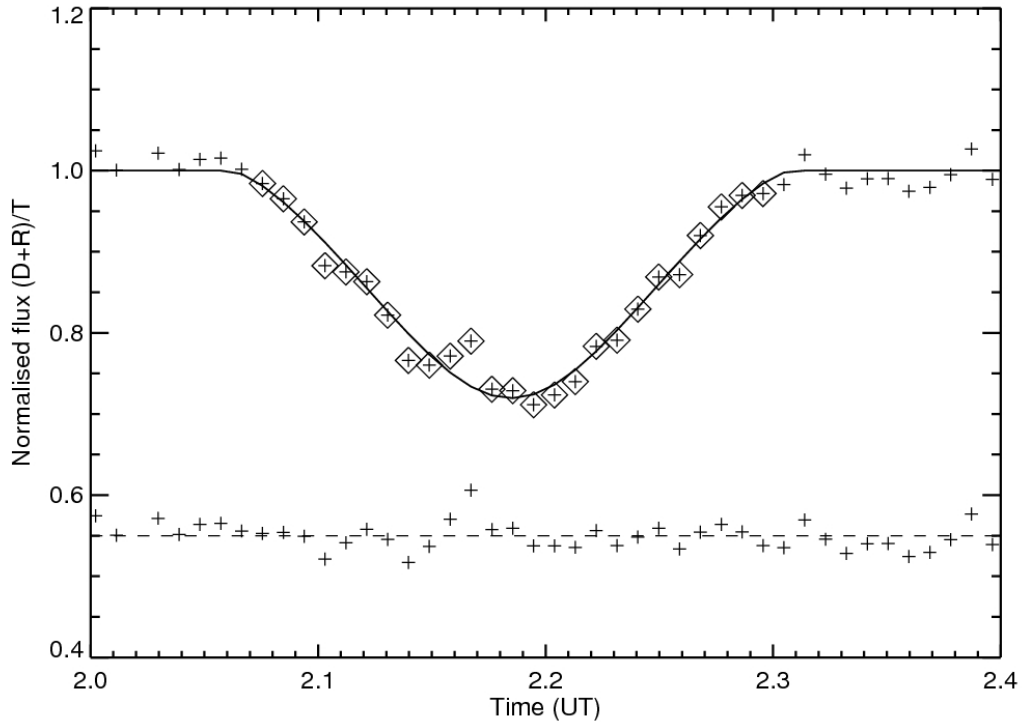
Αριστερά: Γεγονός 4O5P. Η κύρια πηγή (V) είναι το ζεύγος Διόνη – Ρέα και η πηγή αναφοράς (C1) είναι ο Τιτάνας. Δεξιά: Γεγονός 3O2P. Η κύρια πηγή (V) είναι το ζεύγος Εγκέλαδος-Τηθύς και η πηγή αναφοράς (C1) είναι επίσης ο Τιτάνας. Η πηγή ελέγχου είναι η Διόνη (C2).

Επεξεργασία των φωτομετρικών σημείων με το λογισμικό IDL

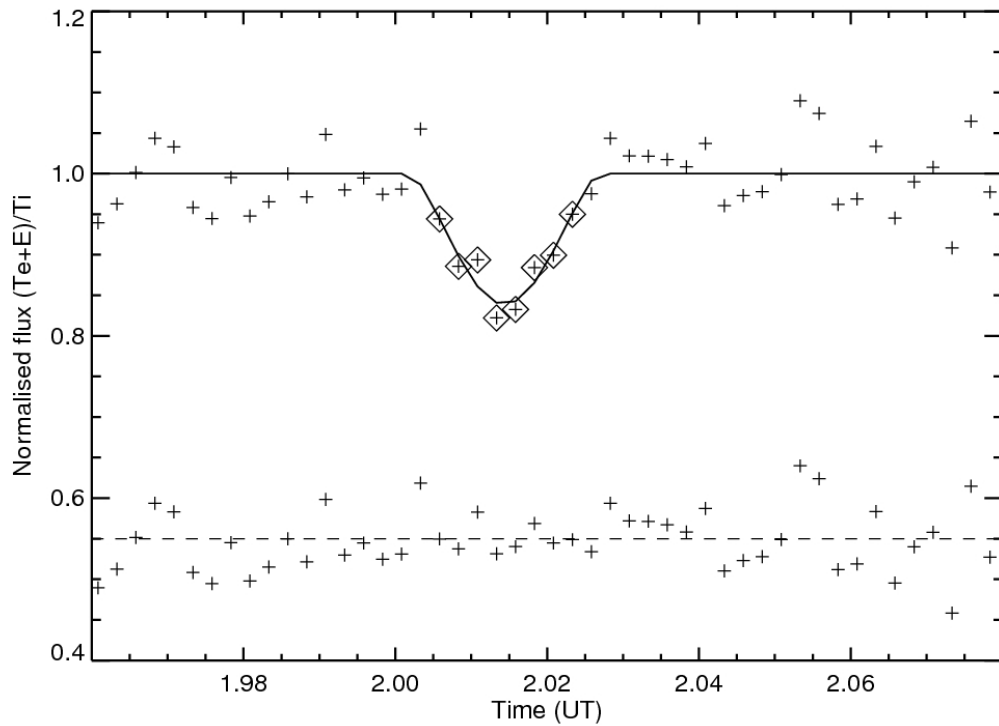
Η προσαρμογή (model fitting) έγινε με χρήση του ίδιου προγράμματος λογισμικού που χρησιμοποιήσαμε και για τη μελέτη του φαινομένου 2O4P μεταξύ των δορυφόρων του πλανήτη Ουρανού στις 14/08/2007, το Interactive Data Language (IDL) (Christou et al 2009). Σκοπός μας ήταν η μέτρηση των τιμών χρόνου ελαχίστου $t_{\min}$ και impact parameter b (Σχ. 3), δεδομένης της καμπύλης φωτός που εξαγάγαμε μέσω του λογισμικού AIP4WIN V2 (Σχ. 2). Το αποτέλεσμα δίνεται στον πίνακα 4 και μπορεί να συγκριθεί με τις προβλέψεις των εφημερίδων TASS και D93 του πίνακα 3. Τα σχήματα 4 και 5 αποδίδουν γραφικά το μοντέλο βέλτιστης προσαρμογής (best fit) έναντι των παρατηρήσεων. Ως impact parameter b ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο δορυφόρων κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Η τιμή του b επηρεάζει τόσο το βάθος της καμπύλης φωτεινότητας, όσο και τη χρονική διάρκεια του υπό εξέταση γεγονότος.



Σχήμα 3: Αναπαράσταση της αναγωγής των παρατηρήσεων (καμπύλη φωτεινότητας στο ένθετο) στα αστρομετρικά στοιχεία στοιχεία $t_{\min}$ και b . Το δεύτερο επηρεάζει και τη διάρκεια αλλά και το βάθος της καμπύλης.



Σχήμα 4: Το μοντέλο βέλτιστης προσαρμογής (*best-fit model*, συνεχής γραμμή) για το γεγονός 405P έναντι των παρατηρήσεων (σημεία +). Οι ρόμβοι (σημεία ◇) υποδεικνύουν τις παρατηρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσέγγιση (*fit*). Τα σημεία + εκατέρωθεν της διακεκομμένης γραμμής υποδεικνύουν τα υπόλοιπα (*residuals*) μετά την προσαρμογή (*fit*).



Σχήμα 5: Το μοντέλο βέλτιστης προσαρμογής (*best-fit model*, συνεχής γραμμή) για το γεγονός 302P έναντι των παρατηρήσεων (σημεία +). Οι ρόμβοι (σημεία ◇) υποδεικνύουν τις παρατηρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσέγγιση (*fit*). Τα σημεία + εκατέρωθεν της διακεκομμένης γραμμής υποδεικνύουν τα υπόλοιπα (*residuals*) μετά την προσαρμογή (*fit*).

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΓΙΣΤΟΥ EEEE/MM/HH	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	ΩΡΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ TASS	(UT) D93	ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΠΤΩΣΗ ΛΑΜΠΡ. TASS	D93	IMPACT TASS	PARAMETER (KM) D93
2008/12/19	4OCC5P	02:11:10	02:11:44	0.271	0.311	530	281
2008/12/24	3OCC2P	02:00:47	02:00:57	0.130	0.063	483	583

Πίνακας 3: Η πρόβλεψη των μοντέλων TASS και D93 για το χρόνο (UTC) του ελαχίστου, το ποσοστό μείωσης λαμπρότητας και το impact parameter για τα δύο γεγονότα. Το ποσοστό μείωσης λαμπρότητας δίνεται για το V-band.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	ΩΡΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ (UT)	ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΠΤΩΣΗ ΛΑΜΠΡ. (I-band)	IMPACT PARAM. (KM)
4 OCC 5 P	02:11:08 +- 13sec	0.28	429 (1.0)
3 OCC 2 P	02:00:55 +- 04sec	0.16	403 (0.84)

Πίνακας 4: Το αποτέλεσμα της παρατήρησης για τα δύο γεγονότα. Οι τιμές σε παρένθεση στην 3^η στήλη δείχνουν τους λόγους λευκαύγειας (albedo) που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του impact parameter.

Συμπεράσματα

Στην πρώτη περίπτωση (4O5P), ο χρόνος του ελαχίστου συμφωνεί σαφώς καλύτερα με την πρόβλεψη TASS, ενώ στη δεύτερη (3O2P) η συμφωνία είναι και με τις δύο προβλέψεις δεδομένου ότι το σφάλμα (4 sec, 3-σ 12 sec) είναι εφάμιλλο της διαφοράς μεταξύ των προβλεπόμενων χρόνων (10 sec). Για το impact parameter, η συμφωνία είναι ελαφρώς καλύτερη, και για τα δύο γεγονότα, με την πρόβλεψη TASS (βλ. <ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/satel/phesat09/ts-phesat-D93-TASS>).

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η πιο πρόσφατη εφημερίδα TASS αναπαράγει τις διαφορικές θέσεις των δορυφόρων με καλύτερη ακρίβεια από την D93. Ελπίζεται ότι η σύγκριση αυτών και άλλων αμοιβαίων γεγονότων με αυτά του 1980 και του 1995 θα θέσει περιορισμούς στις παλιρροϊκές επιταχύνσεις των δορυφόρων, και κυρίως της εσωτερικής τετράδας Μίμας – Εγκέλαδος – Τηθύς – Διώνη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

Aitken, R. G.: “Observations of the satellites of Mars, Saturn and Uranus”, Lick Observatory Bulletin 172, 5, pp.169-173, Berkeley : The University Press, 1909.

Aksnes, K. and Franklin, F. A.: “Mutual Phenomena of the Galilean Satellites in 1973. Final Results from 91 Light Curves”, Astronomical Journal, 81, 464-481, 1976.

Aksnes, K.; Franklin, F.; Millis, R.; Birch, P.; Blanco, C.; Catalano, S.; Piironen, J.: “Mutual phenomena of the Galilean and Saturnian satellites in 1973 and 1979/1980”, Astronomical Journal, 89, 280-288, 1984.

Arlot, J. E., Thuillot, W.: “Predictions of the events of the satellites of Saturn during the 2009 equinox”, Astronomy and Astrophysics, 485, 293-298, 2008.

Arlot, J. E.: “Astrometry through photometry: mutual events”, Beijing Astrometry Spring School, April 2008.

Christou, A.A., and 15 co-authors: “Observational Detection of eight Mutual Eclipses and Occultations between the Satellites of Uranus”, Astronomy & Astrophysics 497, 589-594, 2009.

Emelianov, N. V. et al: “Photometry and position observations of Saturnian satellites during their mutual eclipses and occultations in 1995 performed at the Observatories in Russia and Kazakhstan”, Astronomy and Astrophysics Supplement, 139, 47-56, 1999.

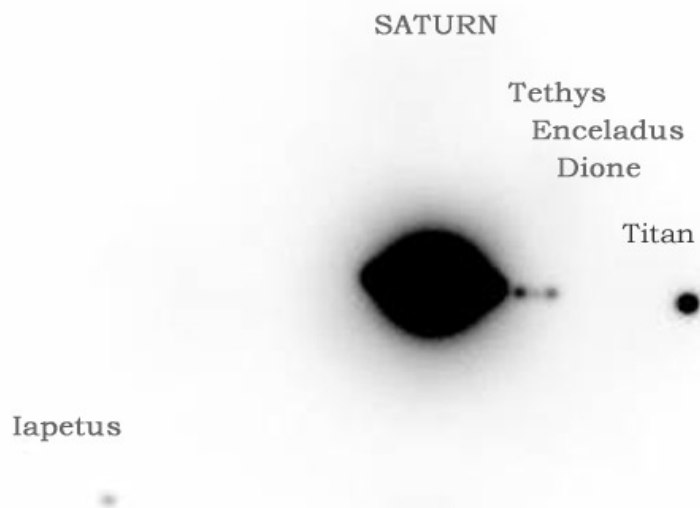
Emel'Yanov, N. V.: “Special Program of Observations of Jovian and Saturnian Satellites for 2009”, Solar System Research, 42, 5, 448-450, 2008. Original Russian Text published in Astronomicheskii Vestnik, 42, 5, 479-482, 2008.

Noyelles, B.; Vienne, A.; Descamps, P.: “Astrometric reduction of lightcurves observed during the PHESAT95 campaign of Saturnian satellites”, Astronomy and Astrophysics, 401, 1159-1175, 2003.

Seidelmann, P. K., Harrington, R. S., Pascu, D., Baum, W. A., Currie, D. G., Westphal, J. A., Danielson, G. E.: “Saturn satellite observations and orbits from the 1980 ring plane crossing” Icarus, 47, 282-287, 1981.

Τσάμης, Β.: “Μεθοδολογία, Εξοπλισμός, Προετοιμασία και Αποτελέσματα της Προσπάθειας Καταγραφής Συγκεκριμένων Γεγονότων Αποκρύψεων Αστέρων από Αστεροειδείς σε Βίντεο, κατά την περίοδο 2005-2007”, Τόμος Πρακτικών 5ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Ερασιτεχνικής Αστρονομίας, σελ. 185 – 209, 2007.

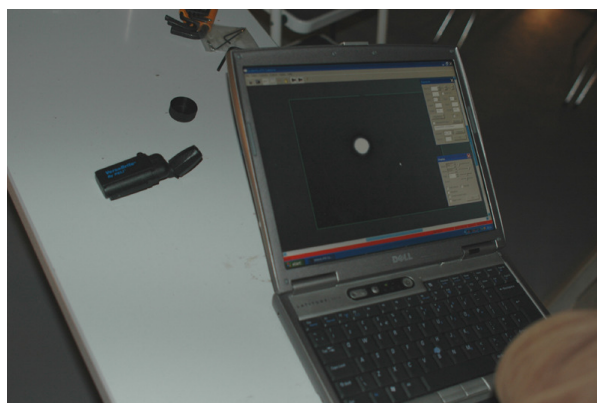
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Φωτογραφική αναφορά στις παρατηρήσεις



Ο Κρόνος και η διάταξη των δορυφόρων του 40' πριν την καταγραφή του γεγονότος 3O2P – 24 Δεκ. 2008



Το τηλεσκόπιο SCT 40 cm και η κάμερα ATIK-16HR



Καταγραφή με το πρόγραμμα Artemis Capture



Ο θόλος του τηλεσκοπίου της Ε.Α.