

Πετώντας πάνω από τα θαλάσσια όρια της Ανταρκτικής για την παρατήρηση της Ολικής Έκλειψης Ηλίου της 4^{ης} Δεκεμβρίου 2021

Αριστείδης Βούλγαρης^{1*}, Αθανάσιος Οικονόμου²

¹ Icarus Optomechanics, Greece

² Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL, USA

* arisvoulgaris@gmail.com

Περίληψη

Στις 4 Δεκεμβρίου 2021, έλαβε χώρα μία ολική έκλειψη Ηλίου, ορατή μόνο από την Ανταρκτική και τα θαλάσσια όριά της. Λόγω της δύσκολης πρόσβασης στην Ανταρκτική, η ομάδα ηλιακών αστρονόμων *Eclipse Hunters* υπό τον καθηγητή Jay Pasachoff, μέλη της οποίας είναι ο Α. Βούλγαρης και ο καθηγητής Α. Οικονόμου, πέταξε με αεροσκάφος BOEING 787-Dreamliner πάνω από τα θαλάσσια όρια της Ανταρκτικής, κατά την αποστολή EFLIGHT 2021-SUNRISE, προκειμένου να καταγράψει με φασματογράφους κι άλλα οπτικά όργανα το φως του ηλιακού στέμματος κατά την ολική έκλειψη, η οποία είχε διάρκεια 107 δευτερόλεπτα. Για την εγκατάσταση των οπτομηχανικών οργάνων μέσα στο αεροσκάφος, προηγήθηκε δοκιμαστική πτήση με αεροσκάφος AIRBUS-A320, χορηγούμενη από την AEGEAN προκειμένου να ελεγχθούν κρίσιμα θέματα όπως η έδραση των βάσεων, έλεγχος ταλαντώσεων, και η διαπερατότητα του παραθύρου του αεροσκάφους. Παρουσιάζεται το "παρασκήνιο" της προετοιμασίας, καθώς και τα απρόσμενα προβλήματα που προέκυψαν κατά την αποστολή αυτή.

Λέξεις-κλειδιά: Ολική έκλειψη ηλίου, ηλιακός φασματογράφος, φάσμα εκπομπής στέμματος, χρωμόσφαιρα

1. Εισαγωγή

Στις 4 Δεκεμβρίου 2021 συνέβη μία ολική έκλειψη ηλίου, ορατή από την Ανταρκτική και τα εγγύς θαλάσσια σύνορά της [1],[2]. Κατά τη διάρκεια μίας ολικής έκλειψης ηλίου γίνεται ορατό το ηλιακό στέμμα του ηλίου, από τη μελέτη του οποίου μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για την ενεργειακή κατάσταση του ηλίου [3]. Η ηλιακή δραστηριότητα επηρεάζει άμεσα τη Γη και τη ζωή επάνω σε αυτή και διαμορφώνει τον Διαστημικό καιρό. Η μελέτη του ηλιακού στέμματος με τη χρήση φασματογράφων προσφέρει επιπλέον πληροφορίες για τη σύστασή του, τις θερμοκρασίες που κατανέμονται σε αυτό, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 1-2.5 MK στις σχετικά ήρεμες ή σχετικά δραστήριες περιοχές και έως και 6-7 MK σε ισχυρά δραστήριες περιοχές, συνήθως πάνω από την περιοχή μαγνητικά αντίθετων ηλιακών κηλίδων οι οποίες εμφανίζουν έντονη δραστηριότητα.

Στις φασματικές εικόνες μελετάται κυρίως η κατανομή των δύο λαμπρών γραμμών εκπομπής του πολλαπλώς ιονισμένου Σιδήρου στο ηλιακό Στέμμα, FeXIV 5303Å (με θερμοκρασία ιονισμού 2MK) και FeX 6374Å (με θερμοκρασία ιονισμού 1MK) από την οποία προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την ενεργειακή κατάσταση του Ηλίου [4], [5], [6].

2. Χρήση του Icarus Slitless Spectrograph για την ανάλυση του ηλιακού Στέμματος

Το πρώτο μοντέλο του Φασματογράφου *Icarus* σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τον

A.B. με σκοπό την καταγραφή του στιγμιαίου φάσματος (flash spectrum) και του φάσματος του Στέμματος, κατά τη διάρκεια της ολικής έκλειψης Ηλίου της 29^{ης} Μαρτίου 2006, η οποία παρατηρήθηκε από το Καστελλόριζο. Ακολούθησαν αρκετές αλλαγές και βελτιώσεις, έτσι ώστε να εξαιλεφθούν μηχανικά και οπτικά σφάλματα, καταλήγοντας στα μοντέλα φασματογράφων *Icarus II* (2015) και *Icarus III* (2017) ο οποίος πέταξε και με το αεροσκάφος G-III, της NASA κατά την ολική έκλειψη ηλίου της 21^{ης} Αυγούστου 2017 στις ΗΠΑ [7]. Ακολούθησε η κατασκευή του φασματογράφου *Icarus IV* για χρήση στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή-*Icarus Near Infrared Slitless Spectrograph*, ο οποίος πέταξε με αεροσκάφος Boeing 787-Dreamliner κατά την ολική έκλειψη Ηλίου του 2019, πάνω από το νησί του Πάσχα [8].

Οι φασματογράφοι *Icarus* έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε 11 αποστολές εκλείψεων: Ελλάδα 2006, Ρωσία 2008, Κίνα 2009, Νησί του Πάσχα-Χιλή 2010, Αυστραλία 2012, Γκαμπόν-Αφρική 2013, Svalbard-B. Πόλος 2015, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής 2017 [9], Χιλή 2019, Ομάν 2019 και πτήση πάνω από την Ανταρκτική 2021.

3. Δοκιμαστική πτήση των φασματογράφων *Icarus* με αεροσκάφη της AEGEAN Airlines

Τον Μάιο του 2019, είχε προηγηθεί η πρώτη δοκιμαστική πτήση του *Icarus*, χορηγούμενη από την AEGEAN, με πολύ απλή έδρασή του μέσα στο αεροσκάφος. Χρησιμοποιώντας την εμπειρία της πρώτης δοκιμαστικής πτήσης του *Icarus*, ο A.B. κατασκεύασε δύο ειδικές βάσεις έδρασης των φασματογράφων προκειμένου να τοποθετηθούν στο αεροσκάφος που θα πετούσε κατά την ολική έκλειψη Ηλίου της 4^{ης} Δεκεμβρίου 2021, Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Εξομοίωση των διαστάσεων και της θέσης ενός παραθύρου αεροσκάφους Airbus A-321 κατά τη σχεδίαση των βάσεων των φασματογράφων

Η πτήση πάνω από την Ανταρκτική θα πραγματοποιούνταν με αεροσκάφος AIRBUS A-321 Neo, παρόμοιο με τα αεροσκάφη της εταιρίας AEGEAN. Αυτή η ευτυχής (αρχικά) συγκυρία οδήγησε στην δεύτερη δοκιμαστική πτήση των φασματογράφων *Icarus* με αεροσκάφος της AEGEAN η οποία ήταν χορηγία της AEGEAN. Κατά την τρίωρη περίπου πτήση Θεσσαλονίκη-Μόναχο και κατόπιν επιστροφή στη Θεσσαλονίκη έγινε συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση των βάσεων των φασματογράφων, καθώς και χρήση αυτών, Εικόνα 2. Επίσης πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι πιθανών ταλαντώσεων των βάσεων κατά x-y-z. Αμέσως μετά την εγκατάσταση των βάσεων πραγματοποιήθηκαν λήψεις μέσω των φασματογράφων σε 5m ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, καθώς και στα 9200m,

Εικόνα 3 και 4.

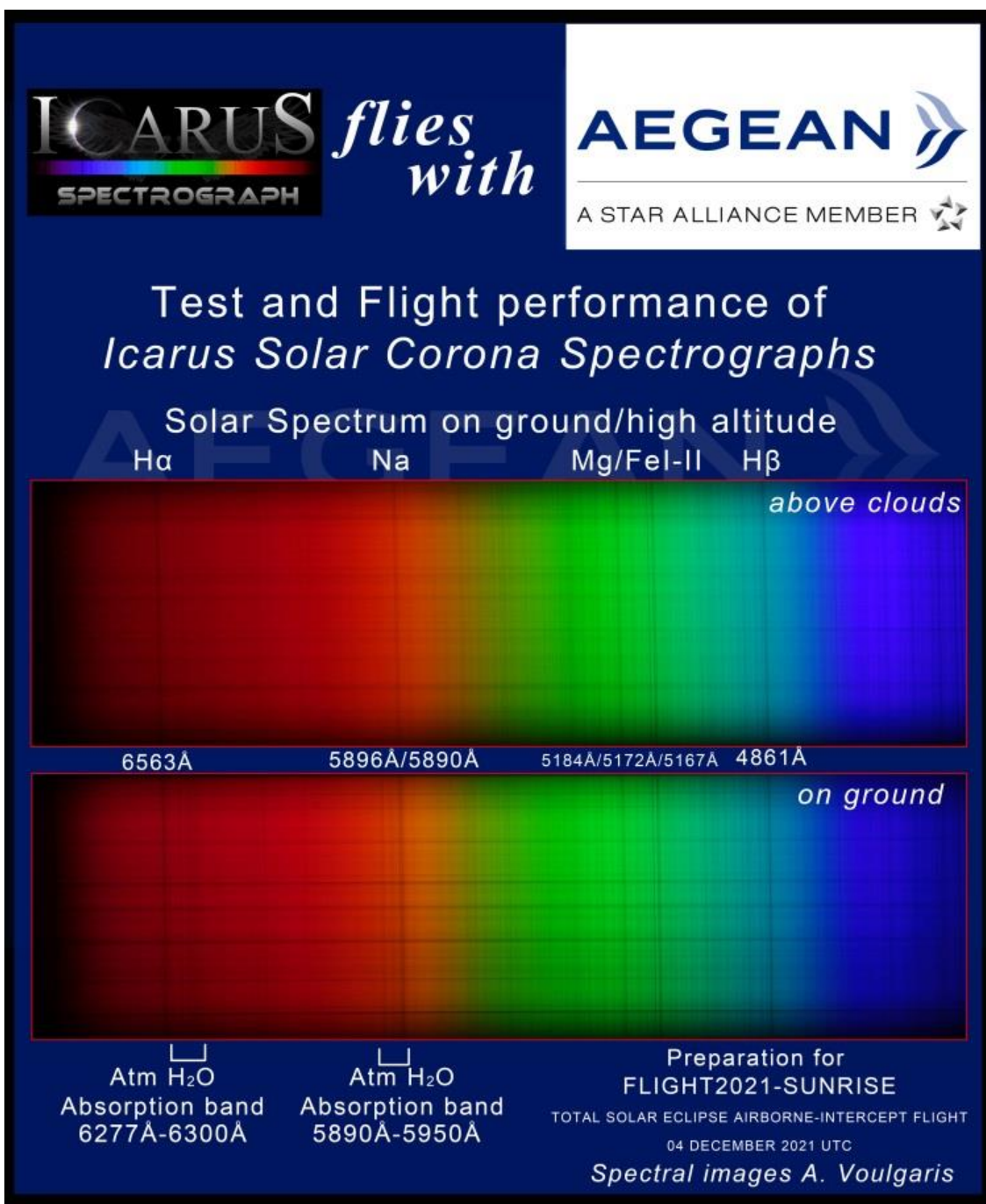


Εικόνα 2: Η ανάπτυξη της διάταξης μαζί με τον φασματογράφο και ένα μικρό αποχρωματικό τηλεσκόπιο στο αεροσκάφος Airbus A-320 της AEGEAN

Στα φάσματα που ελήφθησαν σε χαμηλό ύψος, καταγράφηκαν οι γραμμές απορρόφησης Fraunhofer, καθώς και οι γραμμές απορρόφησης της ατμόσφαιρας O₂ και H₂O (υδρατμών), ενώ στο μέγιστο ύψος υπήρξε απουσία των γραμμών απορρόφησης υδρατμών, Εικόνα 4.



Εικόνα 3: Λήψη φασματικών δεδομένων κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής πτήσης με το αεροσκάφος της AEGEAN σε ύψος 9200m.



Εικόνα 4: Φασματικά δεδομένα από τη δοκιμαστική πτήση του φασματογράφου Icarus με το αεροσκάφος της AEGEAN. Το επάνω φάσμα φωτογραφήθηκε σε ύψος 9200m και το κάτω αμέσως μετά την απογείωση του αεροσκάφους από το αεροδρόμιο Μακεδονία της Θεσσαλονίκης. Οι γραμμές απορρόφησης υδρατμών της γήινης ατμόσφαιρας είναι αντιληπτές στο κάτω φάσμα στην κόκκινη περιοχή του φάσματος (μπάντα 6300Å), καθώς και στην κίτρινη περιοχή (μπάντα 5900Å). Οι μαύρες οριζόντιες γραμμές οφείλονται στους κόκκους σκόνης που παγιδεύτηκαν στη σχισμή του φασματογράφου και μπλοκάρουν το φως να εισέλθει στο εσωτερικό του φασματογράφου.

Επίσης στα παράθυρα του αεροσκάφους A-321 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φασματικής διαπερατότητας καθώς και φωτοελαστικότητας με τη χρήση πολωτών μεγάλων διαστάσεων, με σκοπό τον εντοπισμό της οπτικής ενεργότητας του υλικού του παραθύρου,

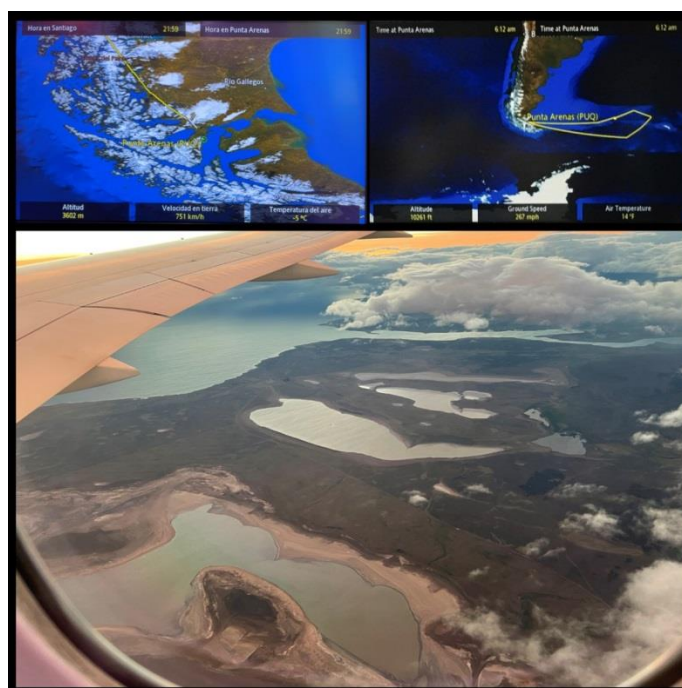
Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Έλεγχος Φωτοελαστικότητας σε παράθυρο του αεροσκάφους. Η οπτική ενεργότητα ενός παραθύρου αεροσκάφους Airbus A-320 το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο διασταυρωμένων πολωτών (Πολωτής έξω από το παράθυρο του αεροσκάφους, Αναλύτης μέσα στην καμπίνα). Η λήψη έγινε με φυσικό διάχυτο και ομογενή φωτισμό, μακριά από περιοχές του ουρανού με μερικώς γραμμικά πολωμένο φως.

4. Πετώντας πάνω από τα θαλάσσια όρια της Ανταρκτικής στα 41000ft/12500m

Η αποστολή EFLIGHT 2021-SUNRISE είχε αρχικά προγραμματιστεί να πραγματοποιηθεί με αεροσκάφος AIRBUS A-321 NEO, το οποίο θα απογειωνόταν από το Punta Arenas, το νοτιότερο ακρωτήριο της Χιλής. Κατόπιν το αεροσκάφος θα πραγματοποιούσε μία πτήση πάνω από τα θαλάσσια όρια της Ανταρκτικής και θα επέστρεφε πίσω, Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Αριστερά, Η πτήση Santiago-Punta Arenas, και δεξιά η διαδρομή του αεροσκάφους για την παρατήρηση της ολικής έκλειψης Ηλίου πλησίον της Ανταρκτικής. Κάτω, η εικόνα του εδάφους πλησιάζοντας στο Punta Arenas.

Εντούτοις κάποια γεγονότα που προέκυψαν την τελευταία στιγμή, οδήγησαν στην αιφνίδια αλλαγή του αεροσκάφους σε BOEING 787-Dreamliner, το οποίο είναι μεγαλύτερο αεροσκάφος και με εντελώς διαφορετική σχεδίαση και ρυμοτομία παραθύρων. Αυτή η αλλαγή της τελευταίας στιγμής, ευτυχώς δεν επηρέασε τη λειτουργικότητα των βάσεων των φασματογράφων (κατασκευάστηκαν δύο βάσεις, μία για κάθε χειριστή), αλλά απαιτήθηκε αλλαγή και τροποποίηση του σχεδιασμού τους έτσι ώστε να εδραστούν στα καθίσματα του νέου αεροσκάφους. Η τροποποίηση και η νέα εφαρμογή των δύο βάσεων έγιναν κατά τη διάρκεια της 6ωρης (3+3 ώρες) πτήσης και διήρκεσε 2 ώρες και 40 λεπτά. Οι διατάξεις ήταν έτοιμες 20 λεπτά πριν την έναρξη της ολικής έκλειψης του ηλίου, Εικόνα 7 και 8.



Εικόνα 7: Οι συγγραφείς επανασυναρμολογούν τις βάσεις των φασματογράφων μέσα στο αεροσκάφος BOEING 787-Dreamliner, εν πτήσει προς το σημείο συνάντησης με τον “κρυμμένο Ήλιο”.

Έγινε λήψη φασμάτων τα οποία είναι υπό ανάλυση από τον Α.Β. σε συνεργασία με τον επίκουρο καθηγητή Χριστόφορο Μουρατίδη (Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Σύρου-Σχολή Πλοιάρχων). Από το «πρώτο φως» των φασμάτων παρατηρήθηκε απότομη άνοδος στην ένταση των γραμμών του FeX και FeXIV (συγκριτικά με τα φάσματα που ελήφθησαν το 2019- η αποστολή στην Αργεντινή/Χιλή για την παρατήρηση της ολικής έκλειψης του 2020 ακυρώθηκε λόγω του παγκόσμιου εγκλεισμού ως αποτέλεσμα του Covid-19), γεγονός που σχετίζεται με την αύξηση της ηλιακής δραστηριότητας, μια και ο ήλιος βρίσκεται σε πορεία προς το μέγιστό του το οποίο εκτιμάται να είναι το 2024-2025. Πριν, μετά και κατά τη διάρκεια της ολικής έκλειψης καταγράφηκε επίσης με ευρυγώνιο φακό το πέρασμα της σιάς καθώς το αεροπλάνο ήταν σε πτήση, Εικόνα 9.

Κατά την επιστροφή του αεροσκάφους στο Punta Arenas, έγινε παρουσίαση από τον Α.Β. του λειτουργικού μοντέλου του Μηχανισμού των Αντικυθήρων της ομάδας *The Functional Reconstruction of Antikythera Mechanism-The FRAME Project* καθώς και το πώς προέβλεπε τις ηλιακές εκλείψεις.

5. Συζήτηση

Οι εικόνες που είδαμε και οι εμπειρίες που βιώσαμε κατά την προετοιμασία και την πτήση για την παρατήρηση της ολικής έκλειψης Ηλίου της 4^{ης} Δεκεμβρίου 2021, ήταν μοναδικές παρά τις απρόσμενες τροπές και δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε. Τα προβλήματα υπερκεράστηκαν και οι φασματογράφοι επέστρεψαν στην Ελλάδα με δεδομένα, τα οποία αναλύονται. Η παρατήρηση του κρυμμένου Ήλιου κατά την πτήση με το αεροσκάφος είναι μία μοναδική εμπειρία, αλλά το ερώτημα του *πώς αντιλαμβάνεται καλύτερα κανείς την παρατήρηση μιας ολικής έκλειψης, στο έδαφος ή στο αεροσκάφος*, είναι ένα ζητούμενο...



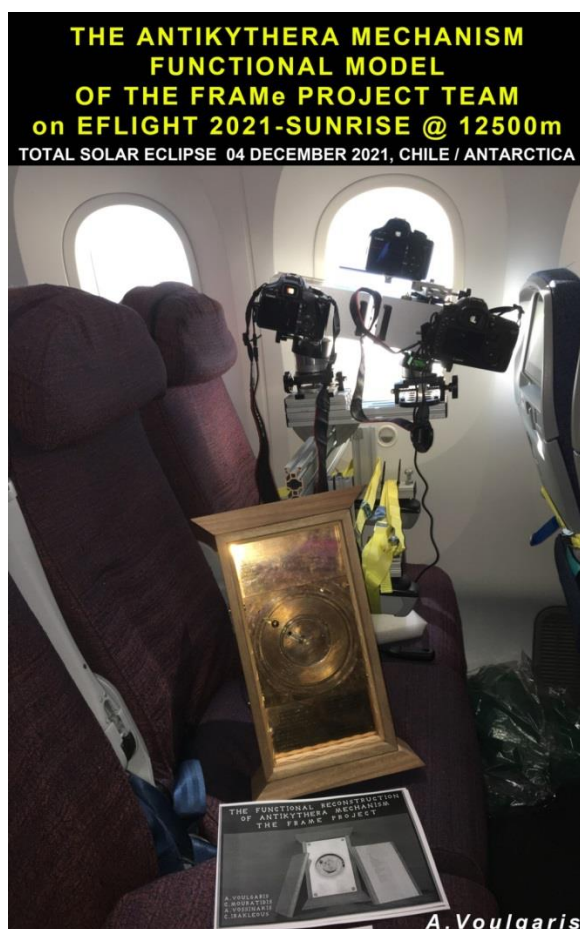
Εικόνα 8: 20 λεπτά πριν την έναρξη της ολικής έκλειψης τοποθετήθηκαν οι τρεις φασματογράφοι Icarus στις βάσεις τους.

Το αεροσκάφος προσφέρει σχετικά μεγάλο ποσοστό σίγουρης παρατήρησης της έκλειψης συγκριτικά με το έδαφος, αλλά ο αριθμός των πειραματικών διατάξεων είναι αρκετά περιορισμένος και το κόστος αρκετά υψηλό. Η επίδραση των παραθύρων του αεροσκάφους στην ποιότητα των εικόνων είναι σχετικά ισχυρή (όμως λιγότερο στα φάσματα των φασματογράφων). Βέβαια η συγκεκριμένη πτήση με το αεροσκάφος ήταν και μία λύση ανάγκης, δεδομένου πως μία αποστολή στην Ανταρκτική θα παρουσίαζε ακόμα μεγαλύτερες δυσκολίες και αβεβαιότητες.

Μάλιστα «θύμα» αυτής της αβεβαιότητας έπεσε και ένας φασματογράφος Icarus ο οποίος κατασκευάστηκε για την αποστολή του Πανεπιστημίου του Santiago-Chile: η τελευταία πτήση του μεταφορικού αεροπλάνου cargo που μετέφερε τον φασματογράφο Icarus στη βάση *Union Glacier Camp* της Ανταρκτικής, δεν κατάφερε να προσγειωθεί στον αεροδιάδρομο, λόγω των ισχυρών ανέμων και το αεροπλάνο επέστρεψε στο Punta Arenas.



Εικόνα 9: Ο κώνος σκιάς της Σελήνης καθώς αυτή σαρώνει τη γήινη επιφάνεια. Η σκίαση του ουρανού ήταν ορατή με γυμνό οφθαλμό όπως και επίσης η προσέγγισή της προς το αεροσκάφος. Σύνθεση 40 φωτογραφιών.



Εικόνα 10: Μετά τη λήξη της ολικής έκλειψης Ηλίου της 4^{ης} Δεκεμβρίου 2021, το αεροπλάνο έστριψε για να επιστρέψει στο Punta Arenas. Κατά τη διάρκεια της επιστροφής έγινε μέσα στο αεροσκάφος παρουσίαση του λειτουργικού μοντέλου του Μηχανισμού των Αντικυθήρων, της ομάδας *The Functional Reconstruction of Antikythera Mechanism- The FRAMe Project*, την οποία επικεφαλής είναι ο Αριστείδης Βούλγαρης, με συνεργάτες τους Δρ. Χριστόφορο Μουρατίδη, Αντρέα Βοσινάκη, και Χριστίνα Ηρακλέους.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούνε θερμά την εταιρία AEGEAN airlines για την υποστήριξη και την χορηγία των δοκιμαστικών πτήσεων, προκειμένου να ελεγχθούν οι πειραματικές διατάξεις των οπτικών συστημάτων. Ευχαριστούν επίσης τον Βασίλη Νάθενα, τεχνικό ηλεκτρονικών υπολογιστών για την αμέριστη και άμεση υποστήριξή του.

Αναφορές

- [1] X. Jubier Eclipse page
http://xjubier.free.fr/en/site_pages/solar_eclipses/TSE_2021_GoogleMapFull.html
- [2] EFLIGHT 2021-SUNRISE: A Unique Horizon-Venue “Sunrise” Totality
http://nicmosis.as.arizona.edu:8000/ECLIPSE_WEB/TSE2021/TSE2021WEB/EFLIGHT2021.html
- [3] J.M. Pasachoff, V. Rušin, M. Saniga, B.A. Babcock, M. Lu, A.B. Davis, R. Dantowitz, P. Gaintatzis, J.H. Seiradakis, A. Voulgaris, D.B. Seaton, K. Shiota, (2015). Structure and Dynamics of the 2012 November 13/14 Eclipse White-Light Corona, *Astrophysical Journal*, 2015, 800(2).
- [4] A.Voulgaris, T.Athanasiadis, J.H. Seiradakis, J.M. Pasachoff, (2010). A Comparison of the Red and Green Coronal Line Intensities at the 29 March 2006 and the 1 August 2008 Total Solar Eclipses: Considerations of the Temperature of the Solar Corona, *Solar Physics*, 2010, 264(1), pp 45–55.
- [5] A.G. Voulgaris, P.S. Gaintatzis, J.H. Seiradakis, J.M. Pasachoff, T.E. Economou, (2012). Spectroscopic Coronal Observations During the Total Solar Eclipse of 11 July 2010, *Solar Physics*, 2012, 278(1), pp 187–202.
- [6] Voulgaris Aristeidis G., Mouratidis C., Tziotziou K., Seiradakis J. H., Pasachoff J. M., (2022). A Diligent Analysis of the Flash and Coronal Spectrum of the Total Solar Eclipse of 20 March 2015 *Solar Physics*, Volume 297, Issue 4, article id.49
- [7] On Aircraft, Armstrong Kicks off NASA TV Coverage of Solar Eclipse
<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/armstrong-kicks-off-solar-eclipse-coverage.html>
- [8] EFLIGHT 2019-MAX 2 JULY 2019 TOTAL SOLAR ECLIPSE FLIGHT
http://nicmosis.as.arizona.edu:8000/ECLIPSE_WEB/TSE2019/TSE2019_EFLIGHTMAX.html
- [9] J.M. Pasachoff, C. Lockwood, E. Meadors, R. Yu, C. Perez, M. A. Peñaloza-Murillo, D. B. Seaton, A. Voulgaris, R. Dantowitz, V. Rušin, T. Economou, (2018). Images and Spectra of the 2017 Total Solar Eclipse Corona from Our Oregon Site, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2018, 5(37).