



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών: Τμήμα Φυσικής

Τομέας: Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής

Ηλιακά Ενεργητικά Σωματίδια:
Μελέτη των ιδιοτήτων τους με μετρήσεις του
ανιχνευτή SREM της ESA

Σάββας Ράπτης
200900143

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Α. Δαγκλής

Διπλωματική Εργασία
2016

Πρόλογος

Η Φυσική Διαστήματος είναι ένας κλάδος της φυσικής και ειδικότερα της αστροφυσικής. Αρχιετοί τομείς της φυσικής συνυπάρχουν ερευνητικά με τη διαστημική φυσική, όπως η Ηλιακή φυσική, η φυσική πλάσματος, η διαστημική τεχνολογία και ο διαστημικός καιρός.

Είναι πολύ δύσκολο κάποιος να αναπτύξει ένα θέμα που συμπεριλαμβάνει όλα τα παραπάνω αφού το κάθε ένα στη πορεία του χρόνου διαχωρίστηκε και συνέχισε ανεξάρτητα την ερευνητική του πορεία δημιουργώντας νέους τομείς.

Αν θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό για τη φυσική διαστήματος, θα μπορούσαμε να πούμε τα εξής:

Αρχικά ορίζουμε το Διάστημα ως το χώρο για τον οποίο έχουμε επιτόπιες παρατηρήσεις, το διαπλανητικό χώρο δηλαδή, που η σημερινή τεχνολογία μας επιτρέπει να γνωρίσουμε.

Έχοντας ορίσει το χώρο μας, μπορούμε να πούμε ότι η φυσική διαστήματος είναι η μελέτη των αλληλεπιδράσεων των στοιχείων που βρίσκονται σε αυτό το χώρο. Δηλαδή, η μελέτη μεταξύ Ήλιου, Ηλιακού ανέμου, πλανητών, κομητών, φορτισμένων σωματιδίων, ηλεκτρομαγνητικών πεδίων κλπ.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε τα δεδομένα του ανιχνευτή SREM από τρεις εξαιρετικά σημαντικές αποστολές. Τις Herschel, Planck και INTEGRAL. Η παρουσία του «μικρού» αυτού ανιχνευτή είναι ζωτικής σημασίας αφού προσφέρει σήμερα τεράστιο όγκο δεδομένων για το σωματιδιακό πληθυσμό που περιβάλλει τη Γη και μας επιτρέπει να αναλύουμε και να γνωρίζουμε καλύτερα το διαστημικό χώρο που ανήκουμε.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου Ιωάννη Α. Δαγκλή, ο οποίος πέρα από πολύτιμες συμβουλές, μου προσέφερε τη φανταστική εμπειρία να ασχοληθώ με ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα μαζί με την ομάδα διαστημικής φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω επίσης στον Dr. Ingmar Sandberg ο οποίος με βοήθησε και με στήριξε σε όλη την διάρκεια της εργασίας με χρήσιμες συμβουλές και πολύτιμη καθοδήγηση. Η βοήθεια του ήταν παραπάνω από καθοριστική για την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Σοφία Μυλωνά για τη πολύτιμη βοήθειά της στη διόρθωση και στην επιμέλεια του κειμένου και τους γονείς μου (Βασίλη & Ελευθερία) για την απέραντη υπομονή και υποστήριξη, που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η εργασία αυτή ανήκει στο τομέα της διαστημικής φυσικής και συγκεκριμένα στην ανάλυση των ηλιακών πρωτονικών επεισοδίων. Κίνητρο για την εκπόνηση της εργασίας αποτελεί η ανάγκη δημιουργίας ενός μοντέλου, που θα περιγράφει τους σωματιδιακούς πληθυσμούς στο σημείο L_2 της Γης, το οποίο αποτελεί εξαιρετικό μέρος για αστρονομική παρατήρηση στο υπέρυθρο μήκος κύματος αφού βρίσκεται στη σκιά της Γης. Το L_2 χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμοκρασία και σταθερές συνθήκες συνεπώς είναι ευκολότερη η προστασία και η βαθμονόμηση διαστημικών συστημάτων.

Για τη μελέτη αυτή έγιναν εκτενείς συγκρίσεις μεταξύ μετρήσεων κοντά στη Γη και του σημείου L_2 σε επίπεδο πρωτογενών δεδομένων (Count rates) και πρωτονικών ροών. Συγκεκριμένα αναλύθηκαν τα δεδομένα, που συσχετίζονται με τον 24^ο ηλιακό κύκλο του ανιχνευτή SREM της ESA που εξοπλίζει τις αποστολές INTEGRAL, Herschel και Planck.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελείται από μια σύντομη περιγραφή του Ήλιου και των ενεργητικών φαινομένων εντός της Ηλιόσφαιρας. Επιπλέον, παρουσιάζεται εκτενώς το φαινόμενο των Ηλιακών ενεργητικών επεισοδίων επιθεωρώντας πληθώρα από σύγχρονες ερευνητικές εργασίες. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας γίνεται μια ανάλυση των διαστημικών αποστολών, του διαστημικού καιρού και των επιπτώσεων που έχει η ακτινοβολία στους ανθρώπους και στις συσκευές που βρίσκονται στον διαπλανητικό χώρο.

Το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αποτελεί την ανάλυση των πρωτογενών μετρήσεων του SREM για τους δορυφόρους Herschel/Planck/INTEGRAL και των ροών ενεργητικών πρωτονίων που παράχθηκαν από τις μετρήσεις αυτές. Οι εκτενείς συγκρίσεις των δεδομένων του SREM έδωσαν τα εξής συμπεράσματα:

Οι μετρήσεις της μονάδας SREM του INTEGRAL παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ομοιότητα με τις μετρήσεις της αντίστοιχης μονάδας SREM των Herschel & Planck. Οι μετρήσεις του SREM στα πρωτονικά κανάλια (C2 & C3), που χαρακτηρίζονται από υψηλό ενεργειακό κατώφλι, παρουσιάζουν σταθερά μικρότερες μετρήσεις στους Herschel & Planck σε σύγκριση με τα αντίστοιχα κανάλια για τον INTEGRAL. Καταλήγουμε ότι, οι πολυάριθμες μετρήσεις του INTEGRAL μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τη μοντελοποίηση του σωματιδιακού πληθυσμού για το διαπλανητικό χώρο, ενώ τα υπάρχοντα μοντέλα (SEP, Xapsos κλπ.) φαίνεται να αποτελούν κατάλληλα εργαλεία για τον χαρακτηρισμό του υψηλό-ενεργειακού πληθυσμού σωματιδίων.

Τέλος, εμπεριέχονται 6 παραρτήματα με συνοδευτικό υλικό και ένα CD με όλο τον όγκο των γραφημάτων, που παράχθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Abstract

The following Thesis is in the field of Space Physics and specifically on the analysis of Solar Proton Events measurements. The Thesis is motivated by the need of creating a model to describe the solar proton radiation at the L_2 (Lagrangian 2) point of Earth's orbit around the Sun. This point is of great interest since it is a location used for infrared astronomical observations. An object around L_2 can maintain the same relative position with respect to the Sun and Earth while having low temperature and overall stable conditions. As a result, shielding and calibration are much simpler.

For this study, extensive comparisons have been made between near-Earth and L_2 solar proton flux measurements. In particular, I have analyzed data associated with Solar Proton Events that took place during the solar cycle 24 from ESA's SREM instruments on board the INTEGRAL, Herschel and Planck spacecraft.

The Thesis comprises two main parts; in the first part, I focus on providing a brief review of Sun's structure and our most recent views on energetic phenomena that occur throughout the Heliosphere. Furthermore, I analyze Solar Energetic Particle properties by reviewing numerous published papers. In the second part, I concentrate on space missions, radiation monitoring, space weather and hazardous effects of radiation on humans and spacecraft.

The last chapter is the analysis of SREM's countrates of Herschel/Planck/INTEGRAL and the proton energy fluxes that were unfolded from the raw data. The detailed comparisons between SREM data indicate that:

The SREM unit of INTEGRAL present remarkable similarity with those by measured by the SREM unit of Herschel & Planck. The measurements of SREM's proton channels (C2 & C3), that are characterized by relatively higher energy threshold, on Herschel & Planck missions at L_2 present consistently lower levels compared to those measured by the SREM unit on INTEGRAL. We conclude that the numerous data of INTEGRAL can be used for the creation of an extensive model that describe the particle population in space. Furthermore, Standard SEP environment models (e.g Xapsos, SEP-EM) provide a suitable toolbox for the characterization of high energy proton environment.

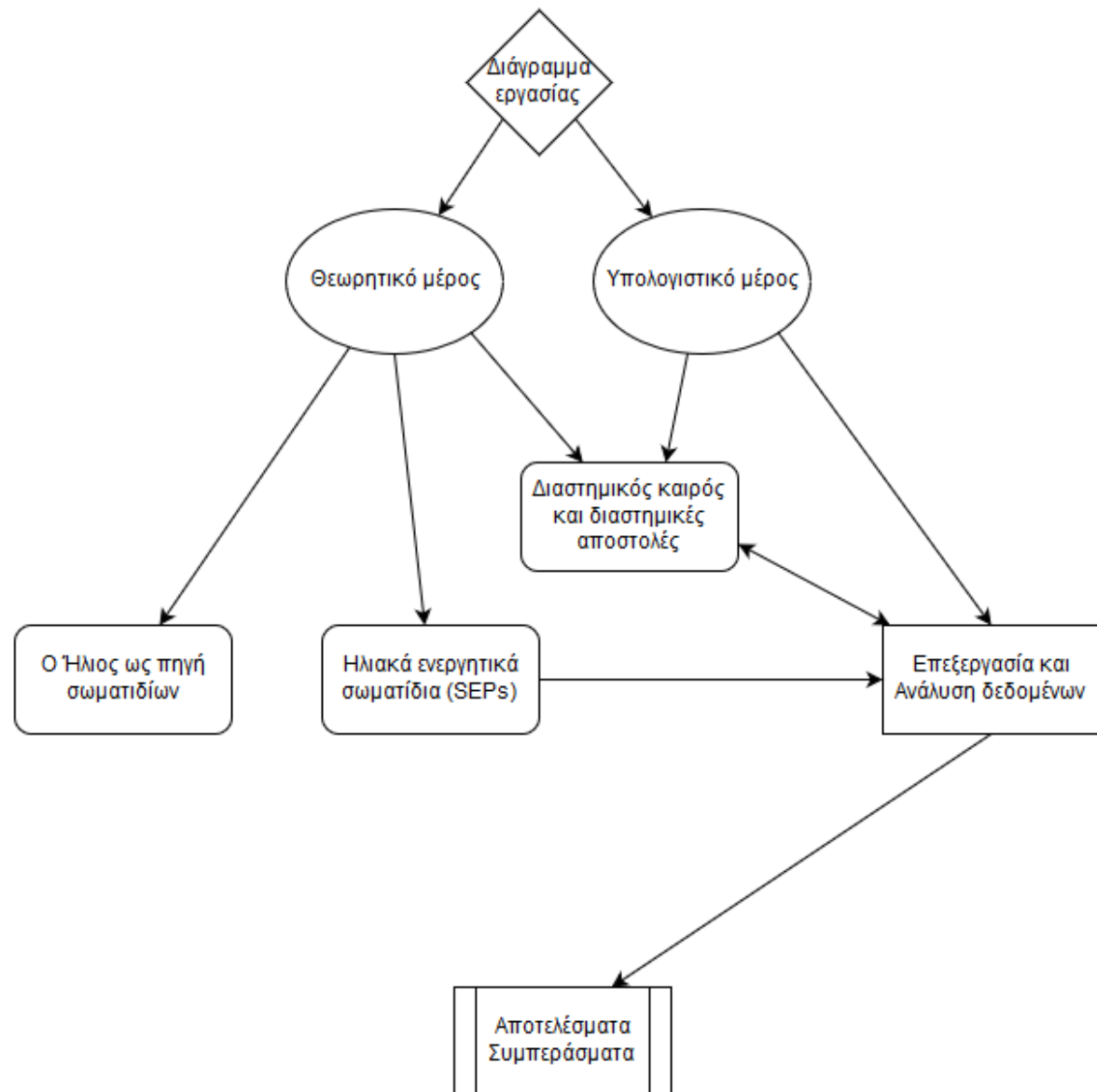
Finally, there are 6 appendices with supplementary material and a CD with all the plots that were created during the thesis.

Περιεχόμενα

<u>Εισαγωγή</u>	6
<u>Κεφάλαιο 1 - Ο Ήλιος ως πηγή σωματιδίων</u>	8
<u>Κεφάλαιο 2 - Ηλιακά ενεργητικά σωματίδια</u>	25
<u>Κεφάλαιο 3 - Διαστημικός καιρός και Διαστημικές αποστολές</u>	46
<u>Κεφάλαιο 4 - Υπολογιστικό μέρος</u>	77
<u>Παράρτημα Α' - Μαγνητικό πεδίο του Ήλιου & Κίνηση σωματιδίων</u>	125
<u>Παράρτημα Β' - Πλανήτες και Μαγνητόσφαιρες</u>	131
<u>Παράρτημα Γ' - Στοιχεία Πυρηνικής φυσικής και στοιχειωδών σωματιδίων</u>	134
<u>Παράρτημα Δ' - Κοσμική ακτινοβολία</u>	141
<u>Παράρτημα Ε' - Μηχανισμοί επιτάχυνσης</u>	144
<u>Παράρτημα Ζ' - Γραφήματα</u>	150
<u>Βιβλιογραφία</u>	151

Εισαγωγή

Στη συγκεκριμένη εργασία οι θεματικές ενότητες έχουν χωριστεί ως εξής:



Τα κεφάλαια 1 και 2 είναι καθαρά θεωρητικά και έχουν σκοπό την ανάπτυξη ενός θεωρητικού υποβάθρου. Το 3^ο μπορεί κατά κάποιο τρόπο να θεωρηθεί ως εισαγωγή στο υπολογιστικό μέρος, αλλά και συνέχεια του θεωρητικού μέρους.

Τέλος το 4^ο κεφάλαιο είναι το υπολογιστικό μέρος. Δηλαδή η ανάλυση που έχει γίνει και τα αντίστοιχα συμπεράσματα που βγήκαν από αυτή. Οτιδήποτε είτε έχει λίγη σχέση είτε είναι πολύ τεχνικό, βρίσκεται στο τέλος της εργασίας σε μορφή παραρτήματος.

Πίνακας 0-1: Πίνακας Συχνών Συντομογραφιών

Συντομογραφία - Αρχικά	Λέξη - Ορισμός
CCD	Charge-Coupled Device
CME	Coronal Mass Ejection
EIT	Extreme ultraviolet Image Telescope
ESA	European Space Agency
EUV	Extreme Ultraviolet Radiation
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
IDL	Interactive Data Language
IMD	InterMediate Drift
IMP	Interplanetary Monitoring Platform
INTEGRAL	INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory
LEMT	Low-Energy Matrix Telescope
MHD	Magnetohydrodynamic
MMS	Magnetospheric Multiscale Mission
NASA	National Aeronautic and Space Administration
OSO	Orbiting Solar Observatory
REM	Roentgen equivalent man
RF	Response Function
SDO	Solar Dynamics Observatory
SEE	Single Event Effect
SEL	Single Event Latchup
SEP	Solar Energetic Particle
SEU	Single Even Upset
SEPEM	Solar Energetic Particle Environment Modelling
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
SPE	Solar Proton/Particle Event
SREM	Standard Radiation Environment Monitor
STEREO	Solar Terrestrial Relations Observatory
SVD	Singular Value Decomposition
SXT	Soft X-ray Telescope

Κεφάλαιο 1 Ο Ήλιος ως πηγή σωματιδίων

1.1 Γενικά

Ο Ήλιος είναι το πιο κοντινό αστέρι στη Γη. Ακόμα και αν δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα είναι πολύ σημαντικός, γιατί είναι το μοναδικό αστέρι που μπορούμε να μελετήσουμε διεξοδικά. Χάρη σε αυτόν άλλωστε διατηρείται η ζωή επάνω στη Γη.

Ο Ήλιος είναι ένα κοινό αστέρι της Κύριας ακολουθίας. Είναι φασματικού τύπου G2V ενώ η απόσταση του από τη Γη είναι περίπου $150 \cdot 10^6 \text{ km}$. Συγκεκριμένα ορίζουμε στην αστροφυσική μια πιο «βολική» μονάδα μέτρησης αποστάσεων, την αστρονομική μονάδα η οποία ισούται ακριβώς με την απόσταση Γης-Ηλίου.

$$A. U. (\text{Astronomical Unit}) = 149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Η μάζα του Ήλιου είναι της τάξης των $2 \cdot 10^{33} \text{ gr}$ που σημαίνει ότι αποτελεί το 99.87% της μάζας του Ηλιακού μας συστήματος.

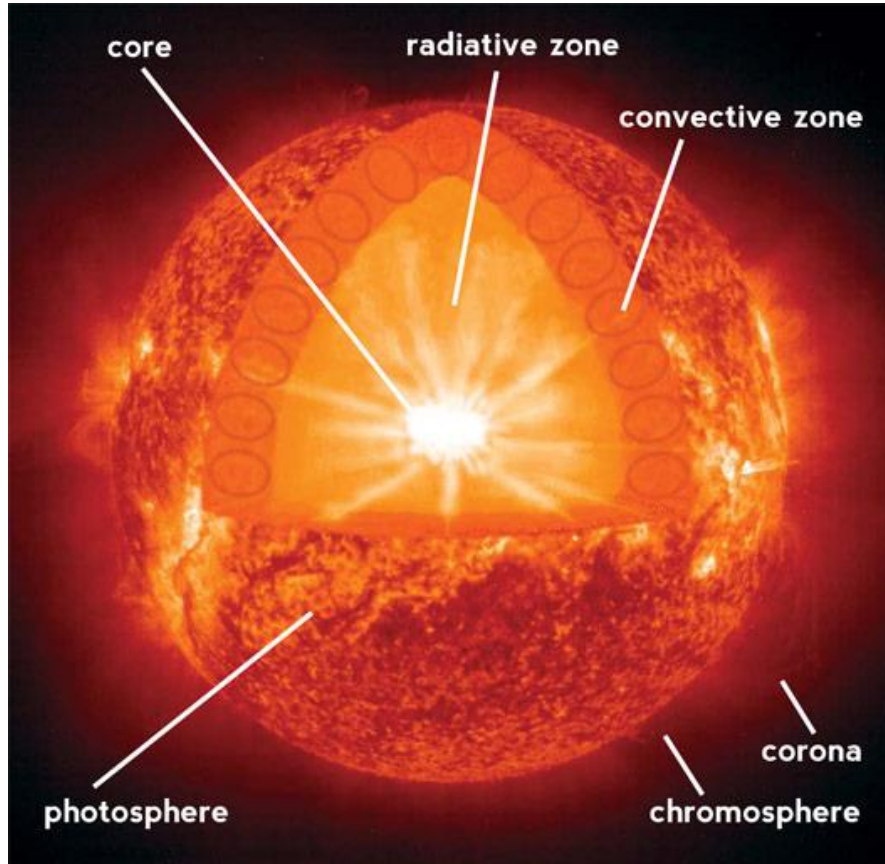
Πίνακας 1-1: Βασικά χαρακτηριστικά του Ήλιου

Χαρακτηριστικά του Ήλιου	
Μέση απόσταση	1 A. U. = $149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$
Διάμετρος	$D_{\odot} = 1392 \cdot 10^3 \text{ km}$
Ακτίνα	$R_{\odot} = 696 \cdot 10^3 \text{ km}$
Μάζα	$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ gr}$
Ηλικία	$t_{\odot} = 4.5 \cdot 10^9 \text{ years}$
Φωτεινότητα	$L_{\odot} = 3.82 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$
Επιφανειακή θερμοκρασία	$T_{\text{eff}} = 5.780 \text{ K}$
Ηλιακή σταθερά	$S = 1.36 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$
Σύσταση	74% H , 25% He , 1% άλλα στοιχεία

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο θα δούμε περιληπτικά τα στρώματα του Ήλιου και τη δραστηριότητα που υπάρχει στο καθένα. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε κάποια ενεργητικά φαινόμενα, όπως είναι οι εκλάμψεις, οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας κλπ. οι οποίες έχουν άμεση σχέση με τα Ηλιακά ενεργητικά σωματίδια που αναλύονται εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο. Τα φαινόμενα που δεν έχουν άμεση σχέση, παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα με τη συνοδεία συνοπτικής περιγραφής.

1.2 Τα στρώματα του Ήλιου

Ξεκινώντας από το κέντρο του ήλιου προς τα έξω, μπορούμε να χωρίσουμε τον ήλιο σε διάφορα στρώματα, τα οποία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους.



Εικόνα 1-1: Τα στρώματα του Ήλιου

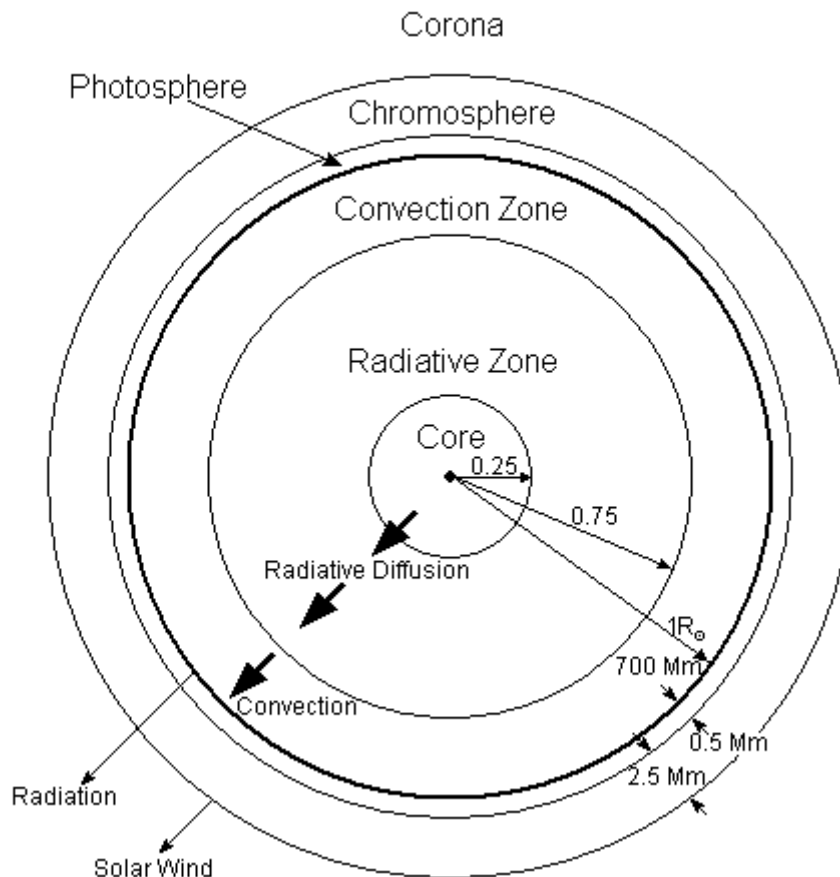
Ο Διαχωρισμός γίνεται για πρακτικούς λόγους. Δεν υπάρχει κάποιος σαφής καθορισμός της κάθε ζώνης, αλλά για να είναι πιο εύκολη η μελέτη του Ήλιου τον χωρίζουμε σε στρώματα ανάλογα με τη θερμοκρασία, τη σύσταση και τα διαφορετικά φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν.

Πίνακας 1-2: Βασικά χαρακτηριστικά των διάφορων στρωμάτων

Περιοχή	Χαρακτηριστικά
Πυρήνας (Core)	$0.25 R_{\odot}$, $P = 1.3 \cdot 10^9 \text{ atm}$, $10\% M_{\odot}$ $\rho = 160 \text{ gr/cm}^3$, $T = 15 \cdot 10^6 \text{ K}$
Ζώνη ακτινοβολίας (Radiation zone) ¹	$0.85 R_{\odot}$, $T = 8 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \text{ K}$ $\sim 2 \cdot 10^4 \text{ yrs}$ παραμονή για φωτόνια
Ζώνη μεταφοράς (Convection zone)	$1 R_{\odot}$, $T = 5 \cdot 10^5 - 6.6 \cdot 10^3 \text{ K}$, ~ 2 μήνες, Φαινόμενα μεταφοράς

¹ Στη ζώνη ακτινοβολίας έχουμε ένα αστροφυσικό παράδειγμα που εφαρμόζεται η θεωρία του **Brown motion** (Τυχαίος περίπατος) με αποτέλεσμα ο μέσος χρόνος παραμονής ενός φωτονίου να είναι ιδιαίτερα μεγάλος.

Φωτόσφαιρα (Photosphere)	~500km πάχος, ορατό φάσμα $T = 6.600 - 4.300 \text{ K}$
Χρωμόσφαιρα (Chromosphere)	~12.000km πάχος Ορατή μόνο στις εκλείψεις
Μεταβατική ζώνη (Transition zone)	Απότομη αύξηση θερμοκρασίας $T = 10^4 - 10^6 \text{ K}$
Στέμμα (Corona)	Εξωτερικό τμήμα μέχρι ~10 R_{\odot} $T = 1 - 2 \cdot 10^6 \text{ K}$



Εικόνα 1-2: Αναπαράσταση των στρωμάτων του Ήλιου

1.3 Ηλιακός κύκλος – Διαμόρφωση σωματιδίων

Έχει παρατηρηθεί ότι διάφορα φαινόμενα στον Ήλιο έχουν περιοδικότητα. Τόσο ο αριθμός των κηλίδων, όσο και η ύπαρξη εκρηκτικών φαινομένων επαναλαμβάνονται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η πρώτη σκέψη ήταν ότι υπάρχει μια συστηματική διαδικασία, η οποία προκαλεί αυτή την αλληλουχία. Η Θεωρία που είναι αποδεκτή σήμερα είναι ότι υπάρχει μια αναστροφή του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου, η οποία προκαλεί μαγνητικές αναταράξεις ικανές να τροφοδοτήσουν ενεργητικά φαινόμενα.

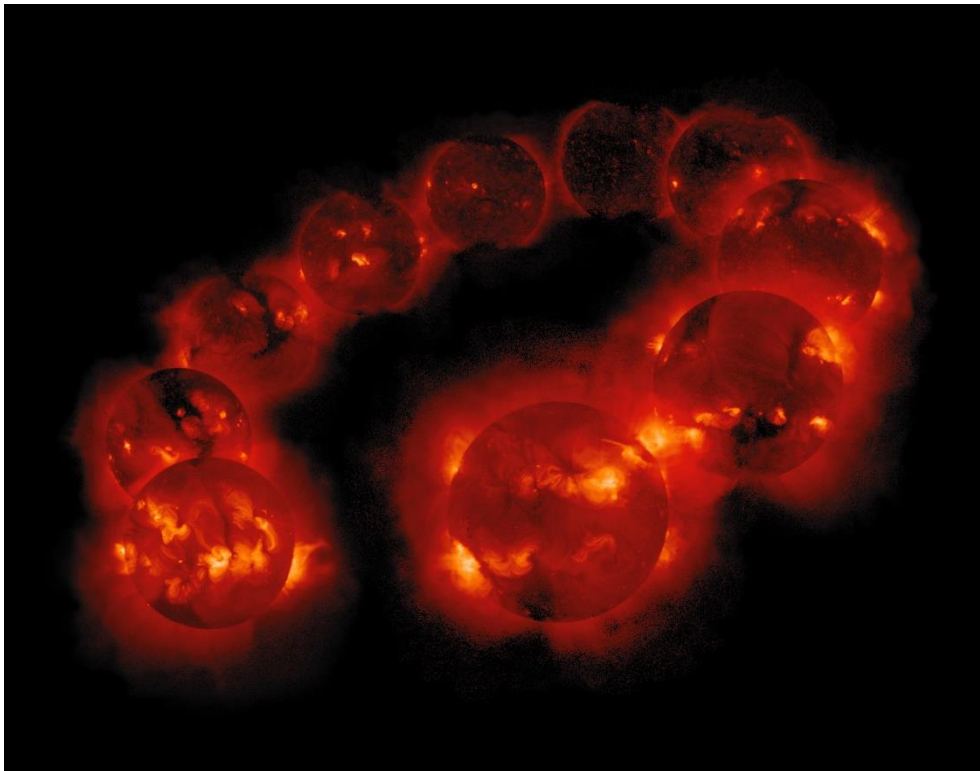
1.3.1 Ενδεκαετής διαμόρφωση

Η περιοδικότητα των φαινομένων του Ήλιου είναι κατά μέσο όρο 11.6 χρόνια (Ενδεκαετής κύκλος), ενώ τα φαινόμενα έχουν και άλλες περιοδικότητες εκτός από αυτή, άλλες μεγαλύτερες και άλλες μικρότερες. Ο ενδεκαετής κύκλος είναι αποτέλεσμα της μεταβολής του μαγνητικού του πεδίου¹.

Χωρίζουμε τη δραστηριότητα σε μία μέγιστη και μια ελάχιστη περίοδο. Αναφερόμαστε σε αυτές τις περιόδους ως «ήρεμο Ήλιο» και «ηλιακή δραστηριότητα». Η διαφοροποίηση έχει να κάνει κυρίως με την ύπαρξη ενεργητικών φαινομένων, αλλά και με την ένταση αυτών.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιοδικότητας παρατηρούμε διάφορες διακυμάνσεις, που οδηγούν σε εκρηκτικά φαινόμενα. Κάποια από αυτά είναι:

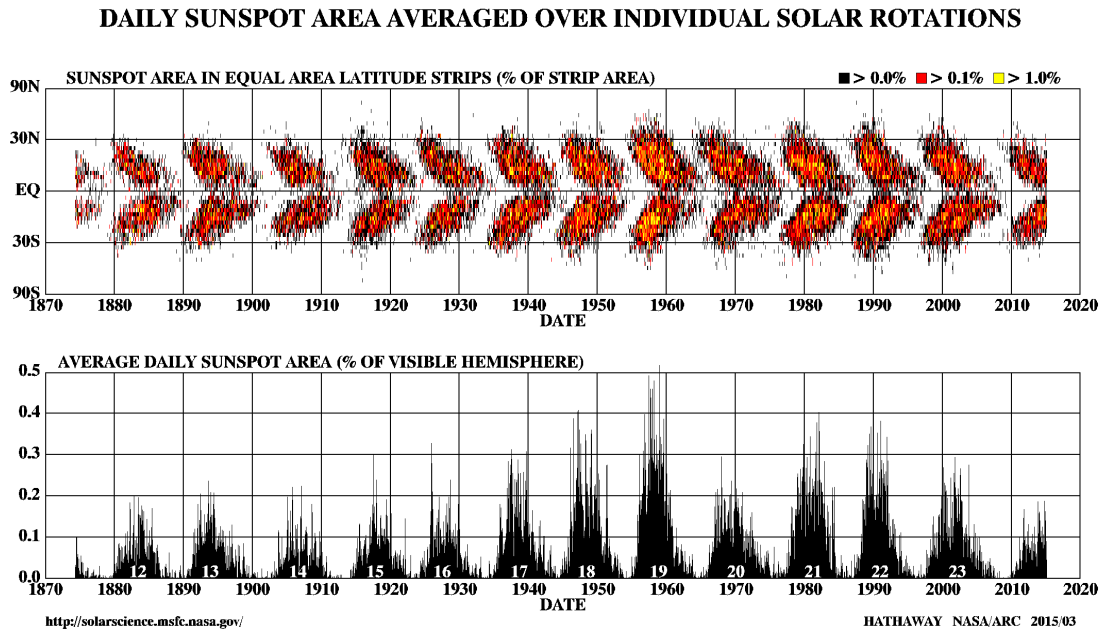
- Ο αριθμός, η έκταση και η θέση των ηλιακών κηλίδων, που παρουσιάζουν περιοδικότητα 11 ετών
- Η συχνότητα εμφάνισης εκρηκτικών φαινομένων (Εκλάμψεων, Στεμματικών εκτινάξεων μάζας).
- Ο αριθμός, η έκταση, η θέση και η μορφολογία των στρεμματικών οπών



Εικόνα 1-3: Ο 11^{ος} κύκλος. Yohkoh SXT images (30/8/1991 - 6/9/2001)

¹ Παράρτημα Α'

Χαρακτηριστικό παράδειγμα που δίνεται από την περιοδικότητα της Ηλιακής δραστηριότητας και του μαγνητικού πεδίου είναι το Butterfly Diagram. Δηλαδή το διάγραμμα της πεταλούδας.



Εικόνα 1-4 Διάγραμμα της πεταλούδας - Hathaway NASA/ARC

Το διάγραμμα της πεταλούδας είναι αποτέλεσμα του νόμου του Spöre και παρατηρήθηκε πρώτα από τον Richard Christopher Carrington¹, αλλά στην συνέχεια βελτιστοποιήθηκε από τον Γερμανό Gustav Spöre. Πρακτικά στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι οι κηλίδες στον Ήλιο αρχίζουν να εμφανίζονται σε ένα γεωγραφικό πλάτος 30 – 45 ° στην αρχή του Ηλιακού κύκλου ενώ στη συνέχεια καταλήγουν μέχρι και 7°. Στη συνέχεια εξαφανίζονται ενώ οι επόμενες κηλίδες εμφανίζονται πάλι σε μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, υποδηλώνοντας την έναρξη του νέου Ηλιακού Κύκλου.

1.3.2 Άλλες περιοδικότητες – Σχόλια

Πέρα από τον 11-ετή κύκλο υπάρχουν και άλλες περιοδικότητες. Η πρώτη και προφανέστερη είναι ο 22-ετής κύκλος, ο οποίος δεν είναι παρά ο ενδεκαετής κύκλος δύο φορές. Μέσα στα κατά μέσο όρο 22 χρόνια, έχουμε πλήρη επαναφορά του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου και δύο συνολικά «ήρεμες» και «δραστήριες» περιόδους.

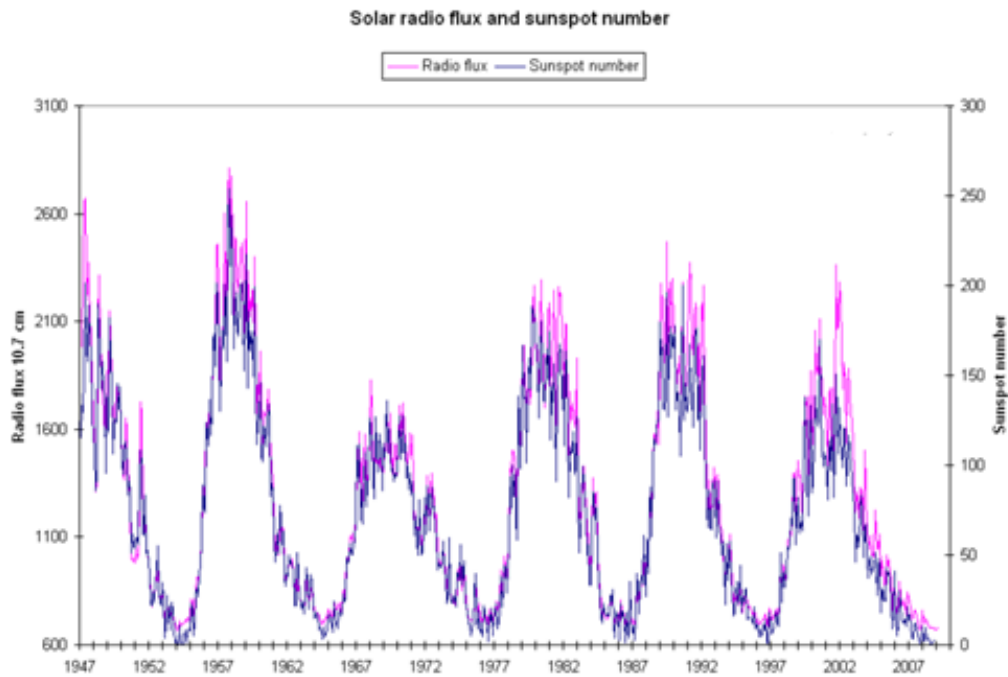
Ο Forbush² το 1958 έδειξε ότι υπάρχει αρνητική συσχέτιση της Κοσμικής Ακτινοβολίας με τη δραστηριότητα του Ήλιου με μια χρονική υστέρηση αρκετών μηνών, αν ληφθεί σαν μέτρο της ηλιακής δραστηριότητας ο αριθμός των ηλιακών Κηλίδων. Η περιοδικότητα αυτή οφείλεται στην ενίσχυση της Ηλιόσφαιρας, με αποτέλεσμα να είναι πιο «δύσκολο» να φτάσουν κοσμικές ακτίνες μέχρι τη Γη.

¹ Βρετανός Αστρονόμος [1826 - 1875]

² Αμερικανός Αστροφυσικός [1904 - 1984]

Αν και αναφέρθηκε ότι ο Ηλιακός κύκλος οφείλεται σε μεταβολές του Μαγνητικού πεδίου του Ήλιου, η εξήγηση αυτή αποτελεί την επικρατέστερη θεωρία. Κάποιες άλλες θεωρίες αποδίδουν ένα μικρό μέρος της περιοδικότητας σε άλλα φαινόμενα, όπως τις παλιρροιακές δυνάμεις από τους γίγαντες πλανήτες¹ ή και διάφορα φαινόμενα τα οποία μελετάει η ηλιοσεισμολογία.

Τέλος μπορούν να βρεθούν αρκετά μοτίβα στη «συμπεριφορά» του Ήλιου και να γίνουν στατιστικές προβλέψεις για τη μελλοντική του κατάσταση.



Εικόνα 1-5: Ροή σε ραδιοκύματα σε σχέση με τον αριθμό των κηλίδων (1947- 2007)

1.4 Φαινόμενα ήρεμου ήλιου

Θα παρουσιαστούν επιλεγμένα φαινόμενα του ήρεμου ήλιου, που θεωρούνται σημαντικά για τα πλαίσια τις εργασίες αυτής. Ασφαλώς δεν αναφέρονται όλα, ο Ήλιος σαν αστέρι έχει αναρίθμητα φαινόμενα, τα όποια δεν έχουν άμεση σχέση με το αντικείμενο της εργασίας

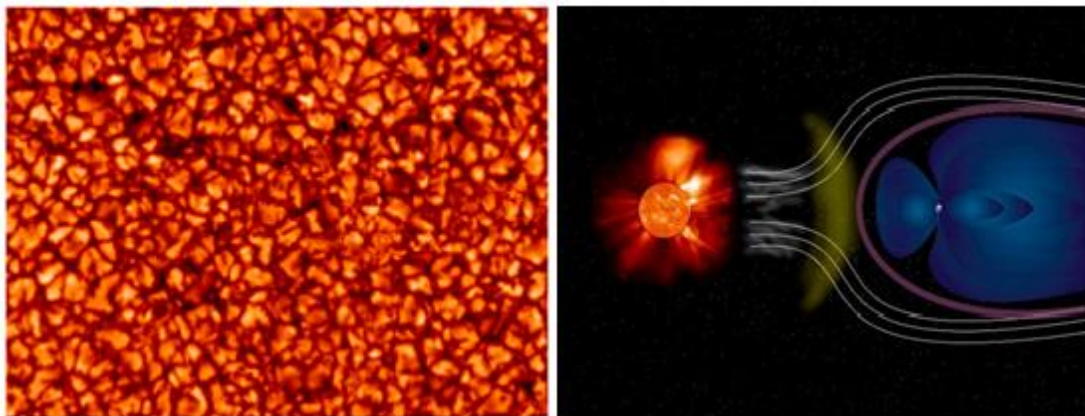
Τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται είναι κάποιες γενικά αποδεκτές τιμές που έχουν μεγάλο εύρος, διότι ο ορισμός του κάθε φαινομένου σε ένα τόσο χαοτικό σύστημα όπως ο Ήλιος είναι αρκετά δύσκολος να γίνει κάτω από σαφή και αντικειμενικά πλαίσια.

¹ Γίγαντες (Giants) πλανήτες: Δίας, Κρόνος, Ουρανός, Ποσειδώνας. Αέριοι γίγαντες (Gas Giants): Δίας, Κρόνος. Παγωμένοι γίγαντες (Ice Giants): Ουρανός, Ποσειδώνας

Πίνακας 1-3: Βασικά φαινόμενα του ήρεμου Ήλιου

	Φαινόμενο	Χαρακτηριστικά	Περιγραφή
ΦΩΤΟΣΦΑΙΡΑ	Κοκκίαση(Granulation)	$t = 8 - 20 \text{ min}$ $d = 1 - 2 \cdot 10^6 \text{ m}$ $\Delta T = +200^\circ\text{C}$	Αποτέλεσμα ανοδικών ρευμάτων που μεταφέρουν θερμό υλικό
	Μεσοκοκκίαση(Mesogranulation)	$d = 3 - 10 \cdot 10^6 \text{ m}$	Αποτέλεσμα ανοδικών ρευμάτων από κατώτερα στρώματα
	Υπερκοκκίαση (Supergranulation)	$t = 1 - 3 \text{ days}$ $d = 10 - 30 \cdot 10^6 \text{ m}$	Ακόμα θερμότερο υλικό από βαθύτερα στρώματα
ΣΤΕΜΜΑ	Ηλιακός άνεμος (Solar wind)	$v_{equ} = 400 \text{ km/sec}$ $v_{pole} = 800 \text{ km/sec}$	Ροή πλάσματος από τον Ήλιο (p^+ , e^- , etc.)

Αυτά τα φαινόμενα είναι πολύ σημαντικά. Η κοκκίαση και ειδικότερα οι γιγάντιοι κόκκοι, που είναι φαινόμενα ακόμα μεγαλύτερα και από την υπερκοκκίαση θεωρούνται ότι ευθύνονται για τις μαγνητικές διαταραχές (μαγνητικά κορδόνια). Οι μαγνητικές διαταραχές αυτές δημιουργούν στη συνέχεια πληθώρα ενεργητικών φαινομένων.



Εικόνα 1-6: Αριστερά : Κοκκίαση , Δεξιά: Αναπαράσταση Ηλιακού ανέμου.

Ο Ηλιακός άνεμος είναι πρακτικά πλάσμα, το οποίο με ταχύτητα $400 - 800 \text{ km/sec}$ φεύγει από τις ανοιχτές δυναμικές γραμμές¹ του ήλιου και μεταφέρει υψηλής ενέργειας σωματρία σε όλο το χώρο. Όπως φαίνεται οι «διαταραχές» του ηλιακού ανέμου είναι το σημαντικότερο φαινόμενο, αφού δημιουργεί διαταραχές στην ενέργεια και στη ποσότητα των ενεργειακών σωματιδίων που υπάρχουν στον διαστημικό χώρο.

Πίνακας 1-4: Βασικά χαρακτηριστικά του Ηλιακού ανέμου όταν βρισκόμαστε σε χαμηλή δραστηριότητα

Χαρακτηριστικά Ηλιακού ανέμου (Χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα)	
Σύσταση	Πρωτόνια ηλεκτρόνια και α σωματρία ²
Ταχύτητα σωματιδίων	$\sim 400 \text{ km/sec}$
Ροή σωματιδίων	$\sim 1.5 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-2}/\text{sec}$
Πυκνότητα σωματιδίων	$\sim 10^7 \text{ m}^{-3}$
Ενέργεια πρωτονίων	$\sim 500 \text{ eV}$
Ενεργειακή πυκνότητα πρωτονίων	$\sim 4 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3$
Θερμοκρασία	$\sim 10^6 \text{ K}$
Ένταση μαγνητικού πεδίου	$5 \cdot 10^{-9} \text{ T}$
Ενεργειακή πυκνότητα του Μαγνητικού Πεδίου	$u_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu_0} = 10^{-11} \text{ J/m}^3$
Ταχύτητα Alfvén	$v_A = B(4\pi m_p n_p)^{-1/2}$

1.5 Ηλιακή δραστηριότητα

Ο Ήλιος εμφανίζει ανά περιόδους κάποια ιδιαίτερα φαινόμενα. Κατά τη διάρκεια των φαινομένων αυτών υπάρχει έντονη και ενεργητική δραστηριότητα με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται τεράστιες ποσότητες ενέργειας.

Έχουν ήδη αναφερθεί κάποια από τα φαινόμενα που συμβαίνουν στον «ήρεμο» ήλιο ή αλλιώς στο ελάχιστο της ηλιακής δράσης. Στην υποενότητα αυτή θα δούμε μερικά από τα φαινόμενα, που έχουμε στο μέγιστο και τα οποία λόγω της ενεργητικής φύσης τους έχουν άμεσες συνέπειες τόσο στις μαγνητόσφαιρες των πλανητών που βρίσκονται γύρω από τον Ήλιο όσο και στους ανθρώπους.

Τα φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν άμεσα είναι αυτά που συμβαίνουν από τη χρωμόσφαιρα και πάνω, διότι αυτά μπορούμε και παρατηρούμε και εν τέλει αυτά θα μας απασχολήσουν όταν επικεντρωθούμε στα σωματρία που έρχονται από τον Ήλιο.

¹ Παράρτημα Α'

² Σε στοιχεία: 90% H – 8%He – 2% Heavy ions

Πίνακας 1-5: Βασικά χαρακτηριστικά του δραστήριου Ήλιου

	Φαινόμενο	Χαρακτηριστικά	Περιγραφή
ΦΩΤΟΣΦΑΙΡΑ	Πυρσοί (Faculae)	$t = 15 \text{ min}$ $B = 800 \text{ Gauss}$	Ανομοιογένεια μαγνητικού πεδίου. Κέντρο δράσης
	Πόροι (Pores)	$t = 1 \text{ day}$ $d < 1800 \text{ km}$ $B = 1500 \text{ Gauss}$	Εξέλιξη του Πυρσού. Πολύ ισχυρό πεδίο
	Κηλίδες (Sunspots)	$t = \text{days}$ $d = 10^4 \text{ km}$ $B = 3 - 4 \cdot 10^3 \text{ Gauss}$	Εξέλιξη του πόρου. Χαμηλότερη θερμοκρασία
ΧΡΩΜΟΣΦΑΙΡΑ	Κηλίδες (Sunspots)		Ορατό και στη χρωμόσφαιρα
	Νημάτια/Νήματα (Fibrils/Filaments)	$L = 11 - 200 \cdot 10^3 \text{ km}$ $D = 7 - 50 \cdot 10^2 \text{ km}$ Αλλαγή πολικότητας	Νηματοειδείς σχηματισμοί πάνω από ζεύγη κηλίδων
	Εκλάμψεις (Flares)	Έκταση: 10^{19} cm^2 $t = 20 \text{ min} - 3 \text{ hours}$ $E = 10^{30} \text{ erg}$	Εκρηκτικοί μηχανισμοί. Τεράστια ενέργεια
ΣΤΕΜΜΑ	Εκτόξευση Στρεμματικού Υλικού (CMEs)	$E = 10^{33} \text{ erg}$ Κρουστικά κύματα	Μαγνητισμένο πλάσμα που φεύγει από τον Ήλιο με μεγάλη ταχύτητα
	Στεμματικές οπές (Coronal Holes)	Σκοτεινές περιοχές στο στέμμα	Ανοιχτές δυναμικές γραμμές. Κυρίως από πόλους και από κέντρα δράσεις
	Ρεύματα Ηλιακού Ανέμου (Streamers)	$1.5 - 3 R_{\odot}$	Αψιδωτοί σχηματισμοί του ηλιακού ανέμου
	Διαταραχή Ηλιακού ανέμου	p^+, e^- , ιόντα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, Ηλιακά ενεργητικά σωματίδια	Αίτιο διαταραχής: Εκλάμψεις και στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Με τα μεγέθη του πίνακα να είναι : d : Διάμετρος , D : Πάχος , L : Μήκος , t : Χρόνος

Παρατηρούμε ότι από τα φαινόμενα που αναφέραμε συνοπτικά, αυτά που έχουν τη μεγαλύτερη αξία ενεργειακά είναι αυτά των Εκλάμψεων και των CMEs. Χάρη σ'αυτά

τα φαινόμενα έχουμε τη διαταραχή του Ηλιακού ανέμου ο οποίος στη συνέχεια μεταφέρει σωματίδια υψηλής ενέργειας στο διαπλανητικό χώρο, τα SEPs, τα οποία είναι και η βασική θεματολογία της εργασίας αυτής.

1.5.1 Ρεύματα Ηλιακού ανέμου (Streamers)

Ο Ηλιακός άνεμος πολλές φορές εμφανίζεται σαν ροή, η οποία προέρχεται από στεμματικές οπές (coronal holes) και είναι αποτέλεσμα της μαγνητικής δομής του στέμματος. Τα ρεύματα αυτά τα χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες, τα ήσυχα ρεύματα και τα διαταραγμένα.

Πίνακας 1-6: Βασικές παράμετροι (Ταχύτητα - Μαγνητικό πεδίο - Πυκνότητα πρωτονίων - Θερμοκρασία) των ρευμάτων του Ηλιακού ανέμου.

Γρήγορα ρεύματα Ηλιακού Ανέμου	
<u>Ήσυχα</u>	<u>Διαταραγμένα</u>
Προέρχονται από ήσυχες περιοχές του Ήλιου – Στεμματικές οπές	Προέρχονται από ενεργές περιοχές του Ήλιου – Ηλιακές εκλάμψεις
Παράμετροι – Χαρακτηριστικά (V,B,n,T)	
Το Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (B) μεταβάλλεται ανάλογα με τη ταχύτητα του Ηλιακού ανέμου (V) ενώ η πολικότητά του παραμένει σταθερή	Το Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (B) παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση όταν έχουμε μεγάλη ταχύτητα (V) ενώ η πολικότητα του Ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει ανωμαλίες που διαρκούν 3-4 ώρες
Η πυκνότητα των πρωτονίων (n) είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας (V)	Η πυκνότητα των πρωτονίων (n) εμφανίζει ταυτόχρονη αύξηση με την ταχύτητά του Η.Α. (V)
Η θερμοκρασία (T) ακολουθεί την συμπεριφορά της ταχύτητας (V)	Η Θερμοκρασία(T) φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα(V)

1.5.2 Ηλιακές Εκλάμψεις – Solar Flares

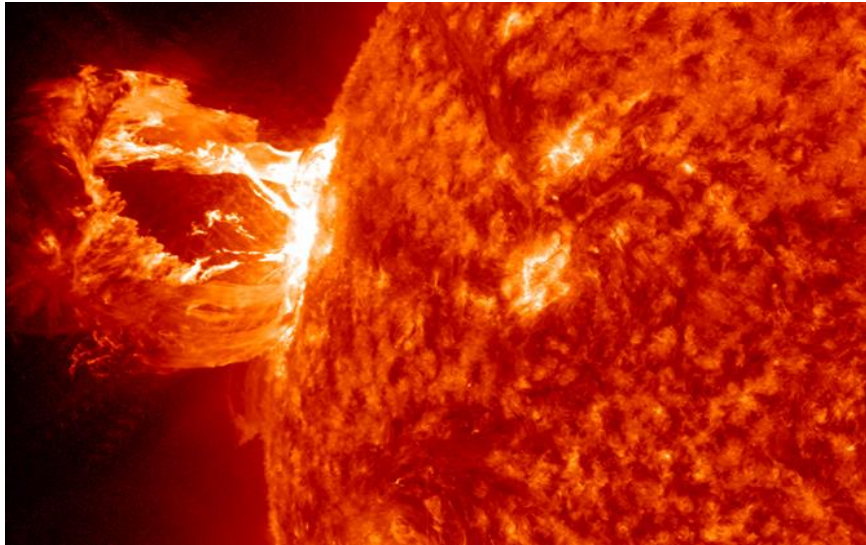
Το φαινόμενο της ηλιακής έκλαμψης είναι ένα εκρηκτικό φαινόμενο που συμβαίνει σε περιοχές που είναι κοντά σε δύο κηλίδες. Είναι ουσιαστικά μια απότομη απελευθέρωση ενέργειας ($10^{27} - 10^{32} \text{ erg}$), που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της λαμπρότητας και την επιτάχυνση των σωματιδίων που έρχονται από τον Ήλιο.

Αίτιο της δημιουργίας του φαινομένου είναι διάφορες ανωμαλίες στο μαγνητικό πεδίο της περιοχής¹. Μέσω των ηλιακών εκλάμψεων έχουμε ροή σωματιδίων υψηλής ενέργειας², αύξηση της θερμοκρασίας του πλάσματος και πιθανή δημιουργία CMEs και κρουστικών κυμάτων.

¹ Παράρτημα Α'

² Συνήθως αναφερόμαστε σε e^- , p^+ και ιόντα, που αναπτύσσουν σχετικιστικές ταχύτητες

Τέτοια ενεργητικά φαινόμενα προκαλούν πολλές φορές διαταράξεις στη μαγνητόσφαιρα της γης. Οι διαταραχές αυτές είναι γνωστές ως γεωμαγνητικές καταιγίδες.



Εικόνα 1-7: Ηλιακή έκλαμψη - 16 Απριλίου 2012 από το NASA's SDO ($L = 304\text{\AA}$)

Σε μια ηλιακή έκλαμψη μπορούμε να έχουμε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς ανάλογα με τον τύπο της έκλαμψης.

Πίνακας 1-7: Συχνότητα φαινομένων κατά τη διάρκεια μιας έκλαμψης

Πάντα	Μαλακές ακτίνες X - Soft X Rays, Φωτεινές λωρίδες Ha kernels
Σχεδόν πάντα	Σκληρές ακτίνες X - Hard X Rays
Σπάνια	Ακτινοβολία γ , Ραδιοεξάρσεις III
Πολύ Σπάνια	Ραδιοεξάρσεις II, IV

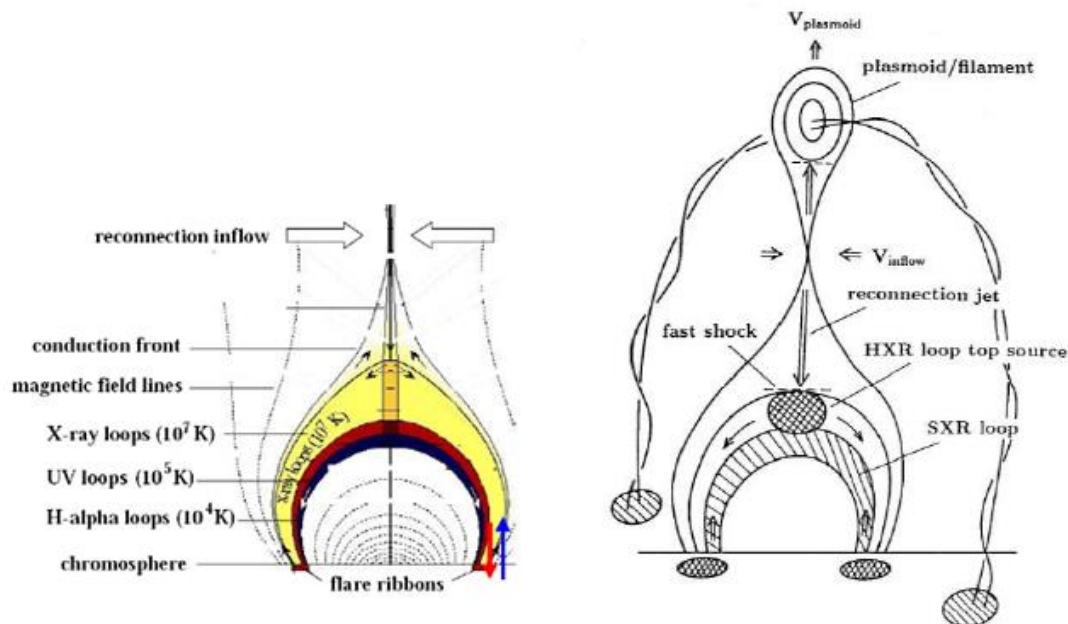
Το γεγονός ότι έχουμε πάντα μαλακές ακτίνες X οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για να κατηγοριοποιηθούν όλες οι ηλιακές εκλάμψεις, ένας βολικός τρόπος είναι με βάση τις μετρήσεις αυτών. Πολύ καλή άμεση κάλυψη και μέτρηση των ακτίνων έχουμε από τις αποστολές GOES¹ που είναι όπως λέει και το όνομά τους σε Γεωστατική τροχιά. Παλιότερα χρησιμοποιούσαν την έκταση των περιοχών, που φωτίζονται από τις λωρίδες Ha Kernels. Όπως και πριν ο λόγος είναι ότι υπάρχουν σε κάθε ηλιακή έκλαμψη. Μια τέτοια κατηγοριοποίηση όμως είναι ποιοτική και έχει μεγαλύτερο εύρος σφάλματος από την ακριβή μέτρηση των ακτίνων X.

¹ Περισσότερες πληροφορίες για τις τροχιές υπάρχουν στο κεφάλαιο 3 - GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite

Πίνακας 1-8: Κατηγοριοποίηση εκλάμψεων με βάση τη ροή ακτίνων X

Όνομα	Μέγιστη τιμή ροής σε $\frac{Watt}{m^2}$
A	$< 10^{-7}$
B	$10^{-7} - 10^{-6}$
C	$10^{-6} - 10^{-5}$
M	$10^{-5} - 10^{-4}$
X	$10^{-4} - 10^{-3}$
Z	$> 10^{-3}$

Για τη φυσική των ηλιακών εκλάμψεων υπάρχουν πολλά μοντέλα που εξηγούν τη δημιουργία τους. Κάθε μοντέλο και κατ' επένταση κάθε φυσικός μηχανισμός καλείται να εξηγήσει την μεγάλη απελευθέρωση μαγνητικής ενέργειας από μια ενεργή περιοχή¹. Τα περισσότερα μοντέλα που μπορούν να εξηγήσουν αυτά τα φαινόμενα βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητικής επανασύνδεσης. Ένα απλοϊκό μοντέλο που εξηγεί την ύπαρξη ενεργητικών σωματιδίων και τη διαφοροποίηση σε ακτίνες x και γ φαίνεται στη εικόνα 1-8 στα αριστερά. Στα δεξιά βλέπουμε ένα άλλο μοντέλο του Shibata²



Εικόνα 1-8: Μοντέλα αναπαράστασης μαγνητικής επανασύνδεσης. Αριστερά: απλό μοντέλο - Δεξιά: μοντέλο του Shibata.

Για να μελετήσει κανείς τα μοντέλα δημιουργίας των εκλάμψεων, θα πρέπει να μελετήσει τη Μαγνητοϋδροδυναμική. Η μελέτη των σχηματισμών αυτών είναι εξαιρετικά δύσκολη, λόγω των μεγάλων ασταθειών και ανώμαλων συνθηκών που υπάρχουν στον Ήλιο.

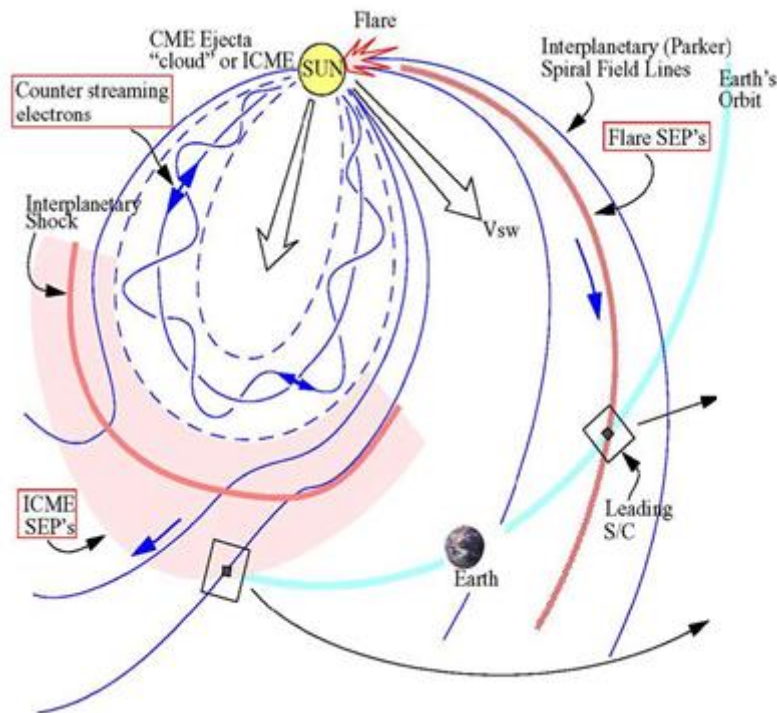
¹ Παράρτημα Α'

² Kwasan and Hida Observatories, Kyoto University

1.5.3 Στεμματικές Εκτινάξεις Μάζας – CMEs

Κάποιες φορές οι αλλαγές του μαγνητικού πεδίου μπορούν να δημιουργήσουν το φαινόμενο των CME. Δηλαδή την εκτίναξη υλικού από το στέμμα του Ήλιου με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Μπορούμε επίσης να ορίσουμε τα CMEs ως έναν σχηματισμό που εμφανίζεται σε ένα στεμματογράφο και απομακρύνεται από τον Ήλιο σε διάστημα λεπτών έως ωρών μεταφέροντας ύλη και μαγνητικό πεδίο από το στέμμα στον Ηλιακό άνεμο. Λόγω της μεγάλης τους ταχύτητας οι CMEs δημιουργούν οστικά κύματα, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως μηχανισμοί επιτάχυνσης για τα σωματίδια που προέρχονται από τον Ήλιο.

Η επιτάχυνση αυτή διαταράσσει τον Ηλιακό άνεμο και αποτελεί βασικό αίτιο που δημιουργεί σωματίδια πολύ υψηλής ταχύτητας και ενέργειας, τα οποία ικανά να φτάσουν μέχρι τη Γη και να έχουν άμεσα αποτελέσματα στους ανθρώπους και σε διαστημικές αποστολές.



Εικόνα 1-9: Αναπαράσταση του διαπλανητικού χώρου και κυρίως της διαδρομής που κάνουν τα SEP σε σχέση με τη Γη

Αρκετά πριν από την πρώτη παρατήρηση των CMEs¹ υπήρξαν πολλές θεωρίες, τόσο για τους μηχανισμούς δημιουργίας όσο και για κάποια στατιστική συσχέτιση με άλλα φαινόμενα του δραστήριου Ήλιου.

¹ 14/1/1971 NASA Orbiting Solar Observatory 7

Πίνακας 1-9: Βασικά χαρακτηριστικά των CMEs

Ταχύτητα [km/s]	300 – 3000
Μάζα [Kg]	$5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$
Κινητική ενέργεια [J]	$10^{23} - 10^{24}$
Στερεά γωνία [°]	~24 – 72
Συχνότητα εμφάνισης	~1 – 4 (Min – Max Ηλιακού κύκλου)

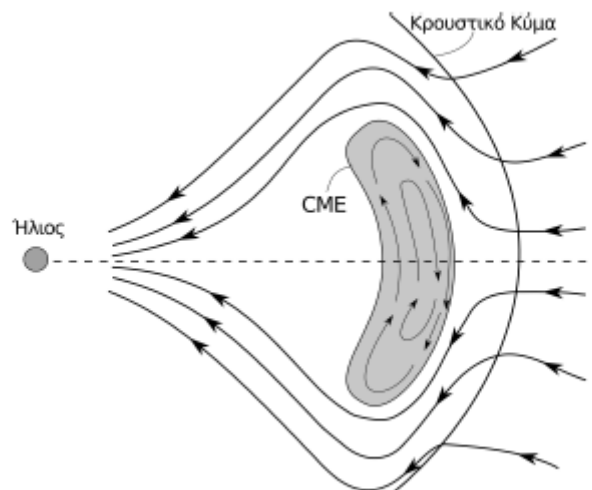
Υπάρχουν πολλά ερωτήματα ανοιχτά σε σχέση με τις CMEs. Κάποια από αυτά είναι:

- Πώς επιταχύνονται;
- Ποια είναι η σχέση τους με τις Ηλιακές εκλάμψεις;
- Πώς μπορούμε να τις προβλέψουμε;
- Πώς βοηθούν σαν μηχανισμοί επιτάχυνσης στα SEP;

1.5.4 CMEs - Κρουστικά κύματα - Μαγνητικά Σύννεφα

Γενικά όταν η ταχύτητα διάδοσης μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας περάσει την τοπική ταχύτητα Alfven σχηματίζεται κρουστικό κύμα. Τα φαινόμενα που προοιούνται από τη διάδοση CME στον μεσοπλανητικό χώρο συνοψίζονται ακολούθως:

- Αύξηση της έντασης του συνολικού μαγνητικού πεδίου στο χώρο που διαδίδεται.
- Αλλαγή της κινητικής θερμοκρασίας των σωματιδίων που συμπαρασύρονται.
- Δημιουργία ροών ενέργειας με αντιπαράλληλες διευθύνσεις.



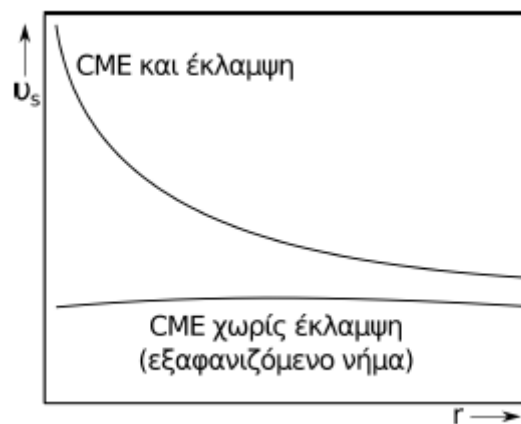
Εικόνα 1-10: Αναπαράσταση της δημιουργίας ενός κρουστικού κύματος λόγω της διάδοσης μιας CME

- Μεταβολή στη σύσταση του πλάσματος του Ηλιακού ανέμου, καθώς και στο βαθμό ιονισμού των σωματιδίων του.
- Μείωση του λόγου σύγκρισης της πίεσης του πλάσματος ως προς τη μαγνητική πίεση: $\beta = 8\pi P/B^2$.

- Μείωση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων.

Προσεγγιστικά θα έλεγε κανείς ότι μόλις το 1/3 των CMEs έχουν ικανοποιητική ταχύτητα για να δημιουργήσουν κρουστικό κύμα. Ασφαλώς αναφερόμαστε στα κρουστικά κύματα, που συμβαίνουν στο μεσοπλανητικό χώρο τα οποία στη πλειοψηφία εμφανίζονται στο μέγιστο του Ηλιακού κύκλου. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών είναι:

- Ενίσχυση της τύρβης και επιτάχυνση σωματιδίων¹.
- Η ταχύτητα διάδοσής τους είναι από 300 μέχρι 700 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο με μέση τιμή περίπου 600.
- Έχουν διαφορετική κινηματική συμπεριφορά ανάλογα με το αίτιο δημιουργίας τους.



Εικόνα 1-11: Διάγραμμα ταχύτητας της CME σε σχέση με την απόσταση (χωρίς/με τη παρουσία έκλαμψης)

Τέλος μπορούμε γενικά να πούμε ότι ταχύτερο κρουστικό κύμα αποτελεί και αποτελεσματικότερο επιταχυντή για τους σωματιδιακούς πληθυσμούς του μεσοαστρικού χώρου.

Μια ιδιαίτερη και σχετικά πρόσφατη² κατηγορία CME αποτελεί το μαγνητικό νέφος (Magnetic Cloud). Αποτελεί μια μαγνητική δομή με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το μαγνητικό πεδίο μέσα στη δομή αυτή είναι πιο ισχυρό από ότι αυτό του περιβάλλοντος χώρου.
- Το μαγνητικό πεδίο είναι συστραμμένο.
- Η θερμοκρασία των σωματιδίων είναι χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος πλάσματος.
- Η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου περιστρέφεται ομαλά με μεγάλη γωνία.

¹ Παράρτημα Ε'

² Προτάθηκε πρώτη φορά από τους Burlaga et al. το 1981

Η μοντελοποίηση του μαγνητικού σύννεφου μπορεί να υλοποιηθεί αν υποθέσουμε ότι τα ρεύματα που προκαλούν τη συστρόφη των δυναμικών γραμμών ρέουν παράλληλα στο μαγνητικό πεδίο και ως συνέπεια μηδενίζουν η δύναμη Lorentz.

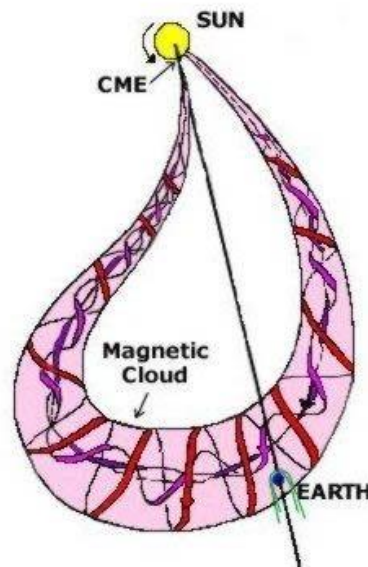
Από τον νόμο του Ampère και με τη προαναφερθείσα συνθήκη παραλληλίας έχουμε

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = a\vec{B}$$

Με a ποσότητα που είναι συνάρτηση της θέσης. Αν θεωρήσουμε στην από πάνω σχέση ότι έχουμε κυλινδρική συμμετρία, μπορούμε να βρούμε μια διανυσματική σχέση για το μαγνητικό πεδίο.

$$\vec{B} = B_0[J_1(ar)\hat{\phi} + J_0(ar)\hat{z}]$$

Με r η ακτινική απόσταση από τον άξονα του σύννεφου, B_0 η μέγιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου και J_0, J_1 συναρτήσεις Bessel μηδενικής και πρώτης τάξης αντίστοιχα.



Εικόνα 1-12: Αναπαράσταση μαγνητικού νέφους και CME σε σχέση με τη Γη.

Για να βρει κανείς τη συστρόφη των μαγνητικών γραμμών αρκεί να υποθέσει ότι είναι η μεταβολή της γωνίας ως προς την ακτινική μεταβολή. Δηλαδή:

$$\tau = \frac{d\phi}{dz} = \frac{B_\phi}{rB_z} \Rightarrow \tau(r) = \frac{J_1(ar)}{rJ_0(ar)}$$

Πειραματικά μπορεί κανείς να προσδιορίσει την ακτίνα του μαγνητικού σύννεφου. Έχουμε το πρώτο μηδενισμό της ακτινικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου στην ακτίνα αυτή. Από το μηδενισμό αυτόν μπορούμε να προσδιορίσουμε τη παράμετρο a μέσω της σχέσης $J_0(aR) = 0$.

1.5.5 Επιτάχυνση σωματιδίων από εκρηκτικούς μηχανισμούς

Οι δύο εκρηκτικοί μηχανισμοί που αναφέρθηκαν (Flare, CME) αποτελούν και τους κύριους μηχανισμούς επιτάχυνσης των σωματιδίων που έρχονται από τον Ήλιο. Η ροή του περιβάλλοντος Ηλιακού ανέμου είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των σωματιδίων υψηλής ενέργειας.

Συγκεκριμένα σε απόσταση 1 AU έχουμε ροή $10^7 [m^{-2}s^{-1}]$ ενώ η τυπική τιμή για τον Ηλιακό άνεμο είναι $5 \cdot 10^{12} [m^{-2}s^{-1}]$. Τα ενεργητικά σωματίδια από τον Ήλιο χωρίζονται απλοϊκά σε «απότομα» (Impulsive) και «βαθμιαία» (Gradual), με τα πρώτα να είναι αρκετά πιο συχνά από τα δεύτερα.

Γενικά θεωρείται ότι τα Impulsive είναι αποτέλεσμα της επιτάχυνσης, που αποκτούν από μια Ηλιακή έκλαμψη και είναι κυρίως ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Τα Gradual θεωρείται ότι είναι κυρίως αποτέλεσμα του Shock Wave, που δημιουργείται από τις CMEs. Αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια και ως εκ τούτου είναι μεγαλύτερης ενέργειας από τα προηγούμενα.

Πολλά μοντέλα προσπαθούν να εξηγήσουν τους μηχανισμούς αυτούς. Από τις παρατηρήσεις γνωρίζουμε ότι τα φαινόμενα είναι μαγνητικής προέλευσης, αλλά το να κατανοήσει κανείς τις συνθήκες μέχρι να βρει ακριβείς μηχανισμούς επιτάχυνσης είναι ιδιαίτερα απαιτητικό. Τέλος, στοχαστικά μοντέλα που συμπεριλαμβάνουν τυχαία φαινόμενα, διαταραχές σε μαγνητικά πεδία κλπ., αποτελούν έναν αρκετά ελπιδοφόρο τομέα έρευνας για την δημιουργία ενός πλήρους μοντέλου επιτάχυνσης των SEP.

Κεφάλαιο 2 Ηλιακά Ενεργητικά Σωματίδια

2.1 Γενικά

Με τον όρο Ηλιακά Ενεργητικά Σωματίδια ή Solar Energetic Particles (SEP) εννοούμε οποιοδήποτε σωματίδιο υψηλής ενέργειας, που προέρχεται από τον Ήλιο. Τα SEPs αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια, ηλεκτρόνια και ιόντα. Οι ενέργειες των σωματιδίων μπορούν να κυμαίνονται από μερικά KeV μέχρι GeV. Ένας διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στα επεισόδια αυτά, είναι αναλόγως τη πηγή που έχουν και κατ'επέκταση το μηχανισμό επιτάχυνσης. Θα δούμε αναλυτικά πρώτα τι πληθυσμούς σωματιδίων έχουμε στο μεσοαστρικό χώρο και μετά θα προσπαθήσουμε ξεκινώντας από παρατηρήσεις να καταλήξουμε σε σύγχρονες θεωρίες και στη μελέτη των χαρακτηριστικών των SEPs.

Γενικά στο διαπλανητικό χώρο έχουμε τους εξής πληθυσμούς ενεργητικών σωματιδίων:

- Κοσμικές ακτίνες που φθάνουν σε πολύ υψηλές ενέργειες. Προέρχονται από γαλαξιακές ή και εξωγαλαξιακές πηγές και παρουσιάζουν περιοδική διαμόρφωση αντίστροφη από αυτή της Ηλιακής δραστηριότητας. Δηλαδή η έντασή τους είναι ελάχιστη κατά το μέγιστο του ηλιακού κύκλου και μέγιστη στο ελάχιστο της δραστηριότητας του Ήλιου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη θωράκιση που δημιουργεί η Ηλιόσφαιρα κατά τη διάρκεια του μέγιστου ηλιακού κύκλου η οποία προστατεύει αποτελεσματικά το διαπλανητικό χώρο από την Κοσμική ακτινοβολία.
- Ηλιακά ενεργητικά σωματίδια είναι τα σωματίδια, τα οποία επιταχύνονται από τους εκρηκτικούς μηχανισμούς που συμβαίνουν στον Ήλιο (Εκλάμψεις, Κρουστικά κύματα, CMEs). Ο πληθυσμός αυτός και ειδικότερα αυτός των SPEs (Solar Proton Event) έχει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του διαστημικού καιρού.

Όπως κάθε φαινόμενο, έτσι και τα SEP πρέπει να οριστούν. Ο ορισμός που έχει δοθεί από τη NOAA¹ είναι: «Η χρονική περίοδος όπου το ολοκλήρωμα της ροής των πρωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 MeV ξεπερνά τα 10 particles/sec/cm²/sr.»

¹ NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

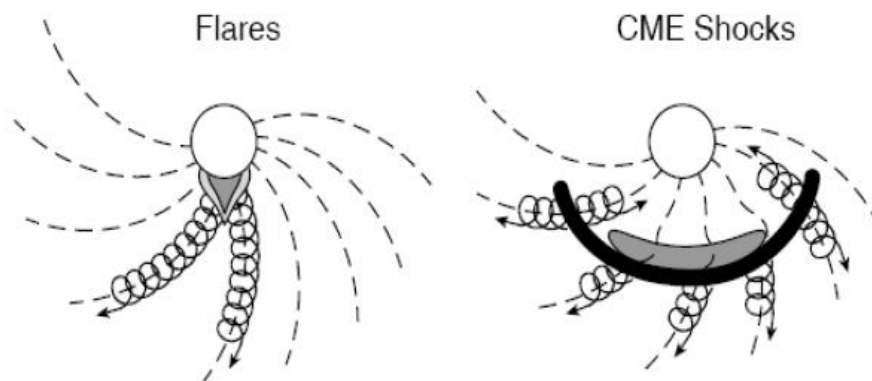
2.2 Βασική κατηγοριοποίηση των SEPs

Μια βασική κατηγοριοποίηση των ενεργητικών σωματιδίων είναι σε απότομα ή εκρηκτικά (Impulsive) και βαθμιαία (Gradual). Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 2-1: Βασικά χαρακτηριστικά του καθιερωμένου διαχωρισμού των SEP.

	Απότομο (Impulsive) ¹	Βαθμιαίο (Gradual)
Σωματίδια	Κυρίως ηλεκτρόνια	Κυρίως πρωτόνια
³ He/ ⁴ He	~1	~0.0005
Fe/O	~1	~0.1
H/He	~10	~100
Διάρκεια	Ώρες	Ημέρες
Ραδιοεκπομπή	Τύπου III,V(II)	Τύπου II,IV
Προφίλ ακτίνων x	Απότομο	Βαθμιαίο
CME	Όχι	Ναι (95%)
Κρουστικό κύμα	Όχι	Ναι
Φαινόμενα ανά έτος	~1000	~10
Πυκνότητα ροής	$< 10^{7-8} \frac{particles}{cm^2}$	$\sim 10^9 \frac{particles}{cm^2}$

Γενικά θεωρείται ότι τα απότομα επεισόδια είναι αποτελέσματα της επιτάχυνσης που προκαλείται από τις ηλιακές εκλάμψεις ενώ τα βαθμιαία έχουν ως πηγές τα CMEs.



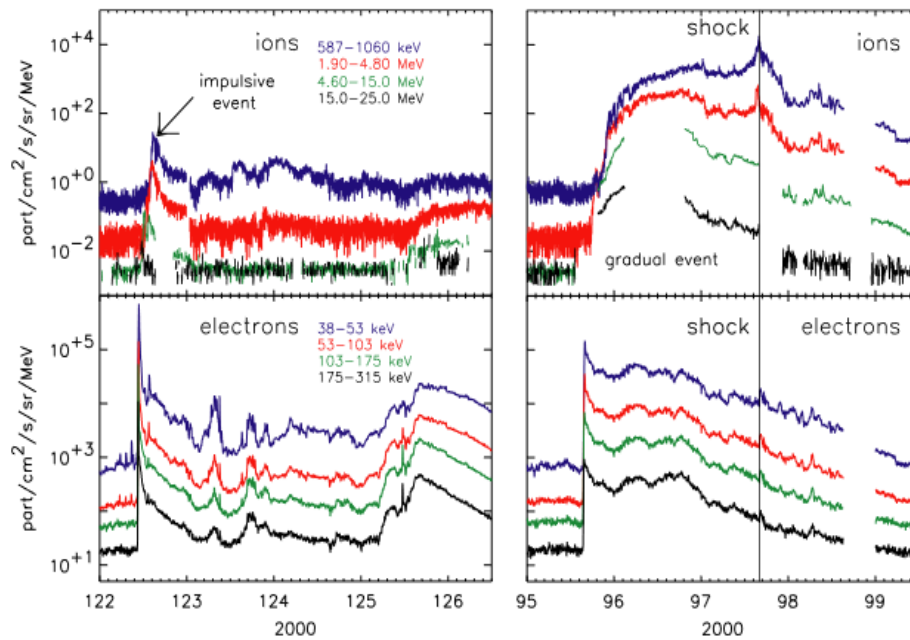
Εικόνα 2-1 Απλοϊκή αναπαράσταση των δύο ενεργητικών επεισοδίων

Η πλήρης κατηγοριοποίηση υπό αυτή τη μορφή μπορεί να βρεθεί από τη περίοδο 1984 - 1986² σε δημοσιευμένες έρευνες. Αν και αυτός ο διαχωρισμός δεν είναι 100%

¹ Τα Impulsive συχνά αναφέρονται ως He-rich SEP αφού είναι «πλούσια» σε ³He

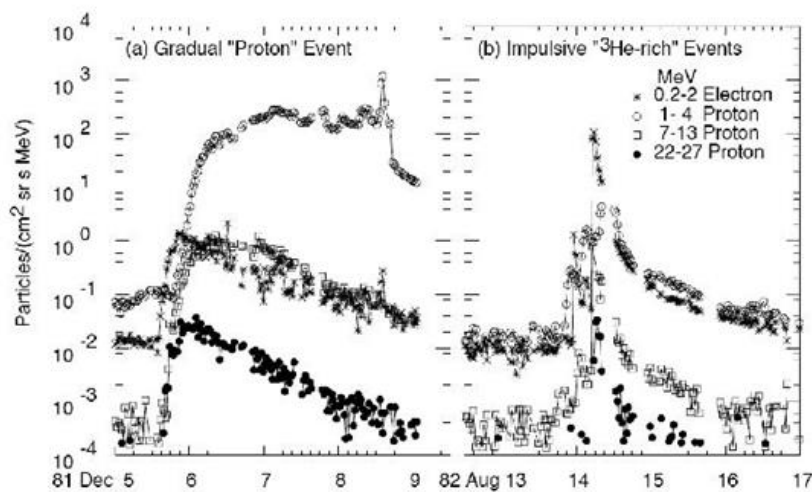
² Η πρώτη αναφορά σε 1984, Klecker et al.

ακριβής, δίνει μια ικανοποιητική εικόνα ώστε να μπορεί κανείς να βγάλει συμπεράσματα για τις ιδιότητες των σωματιδίων. Θα δούμε στη συνέχεια τις διαφορές που έχουν αυτές οι δύο κατηγορίες σωματιδίων στη χημική σύσταση της ύλης που μεταφέρουν και στους μηχανισμούς επιτάχυνσης που αποτελούν αίτιο της κίνησής τους στο διαπλανητικό χώρο.



Εικόνα 2-2: Ροή Ιόντων & ηλεκτρονίων για δύο SEPs. Impulsive (αριστερά), gradual (δεξιά)

2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

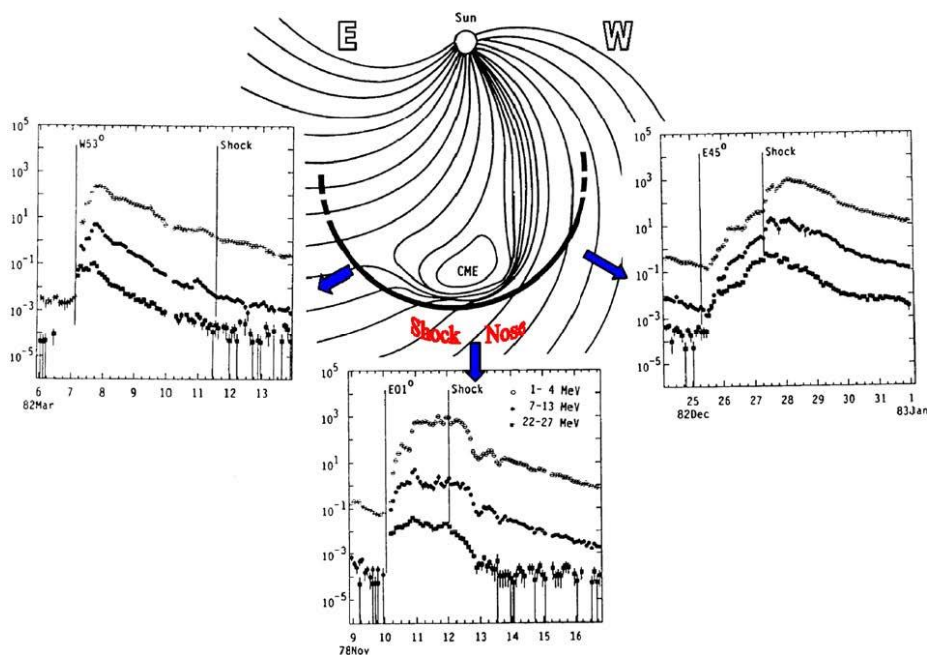


Εικόνα 2-3: Ενεργειακές ροές για ένα βαθμιαίο και ένα απότομο επεισόδιο.

2.2.1.1 Βαθμιαία επεισόδια

Τα Gradual επεισόδια αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια και θεωρείται ότι επιταχύνονται από τις CMEs και τα αντίστοιχα κρουστικά κύματα που τις συνοδεύουν. Είναι πρακτικά θερμό πλάσμα από το στέμμα του Ήλιου και τον Ηλιακό άνεμο. Το γεγονός ότι έχουν συνήθως υψηλότερες ενέργειες, μεγαλύτερη ροή και μεγαλύτερη διάρκεια τα κάνει εξαιρετικά σημαντικά και ταυτόχρονα επικίνδυνα. Στο διαπλανητικό χώρο μεταφέρονται μέσω του φαινομένου της διάχυσης.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που εμφανίζεται στα βαθμιαία επεισόδια είναι η διαφορετική εικόνα, που παίρνουμε ανάλογα το Ηλιακό μήκος σε σχέση με το κρουστικό κύμα και τη CME που συνοδεύουν το επεισόδιο.



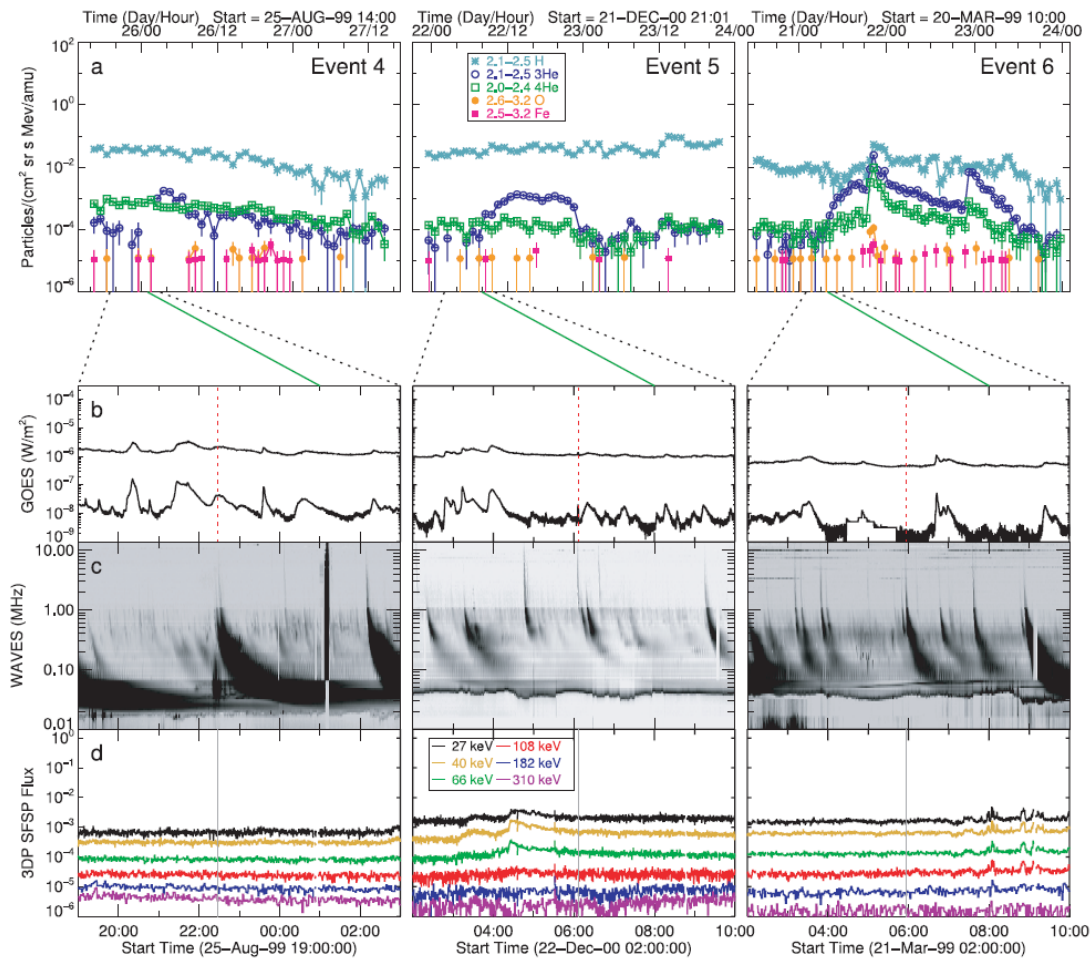
Εικόνα 2-4: Τυπική ένταση σε σχέση με χρόνο ενός βαθμιαίου επεισοδίου από τρία διαφορετικά ηλιακά μήκη.

Για έναν παρατηρητή που θα βρίσκεται στα ανατολικά της πηγής (Ήλιος), το μέγιστο της ενέργειας εμφανίζεται νωρίτερα από τους υπόλοιπους. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε μαγνητική σύνδεση με το κρουστικό κύμα καθώς αυτό φεύγει ακτινικά προς τα έξω, όπως παριστάνεται στην εικόνα 2-4. Αντίστοιχα αν κάποιος έβλεπε το φαινόμενο από τα δυτικά του Ήλιου, θα παρατηρούσε μια σταδιακή αύξηση διότι πρακτικά η ροή σωματιδίων περνάει μέσα από το κρουστικό κύμα, συναντάει τις μαγνητικές γραμμές του και «ακολουθεί» το κύμα, το οποίο όπως και πριν απομακρύνεται.

Να σημειωθεί ότι η περιγραφή αυτή δεν είναι παρόμοια και δεν αντιπροσωπεύει σε καμία περίπτωση την πολύπλοκη κίνηση, που κάνει ένα σύνολο φορτισμένων σωματιδίων μέσα στη δομή που περιγράψαμε.

2.2.1.2 Απότομα επεισόδια

Τα Impulsive επεισόδια αρχικά είχαν οριστεί ως «Ηλεκτρονιακά». Μετά το 1970 όμως βρέθηκαν τα «πλούσια σε Ήλιον-3», τα οποία συμπεριλαμβάνονται πλέον στα απότομα επεισόδια. Ο βασικός μηχανισμός επιτάχυνσης είναι οι εκλάμψεις και συνεπώς αναφέρονται περισσότερο σε ηλεκτρομαγνητικές διαδικασίες. Μεταφέρονται στο διαπλανητικό χώρο μέσω σιεδάσεων.



Εικόνα 2-5: Τρία παραδείγματα εκρηκτικών επεισοδίων. (a): Χρονοσειρά ιόντων από το LEMT, (b): Ακτίνες x σε 0.5 – 4Å και 1 – 8Å από το GOES, (c): φάσμα ραδιοκυμάτων από το wind, (d): ροή ηλεκτρονίων από το wind¹, με τη πράσινη γραμμή να αναπαριστά την έναρξη παρατήρησης των ιόντων

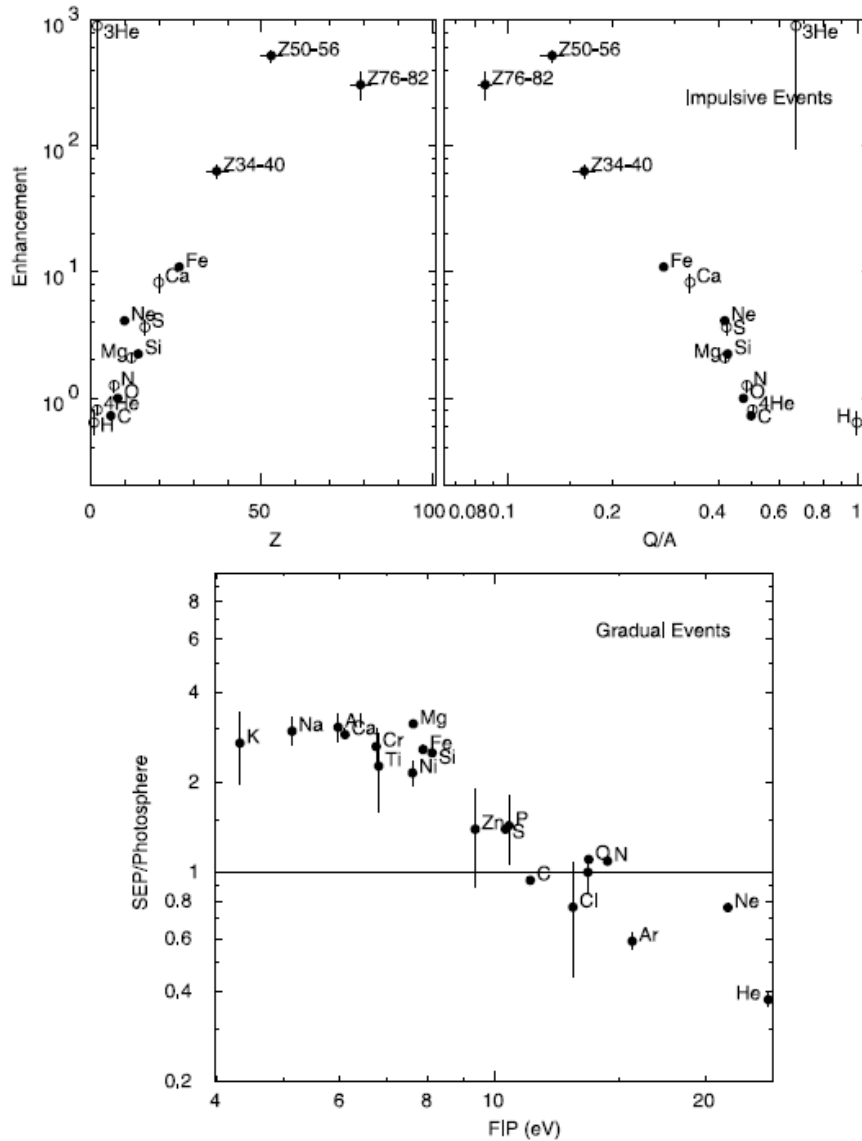
Σε αντίθεση με τα βαθμιαία επεισόδια δεν υπάρχει απόλυτη ερμηνεία των μηχανισμών, που συνοδεύουν τα απότομα. Ο διαχωρισμός που κάναμε αναφορικά με τους μηχανισμούς επιτάχυνσης και διάδοσης φαίνεται, να μην ισχύει καθολικά διότι έρευνες έχουν δείξει ότι σε κάποια Impulsive έχουμε CMEs από τον Ήλιο. Αν και ο υπάρχων διαχωρισμός είναι ικανοποιητικός, είναι αρκετά δύσκολο να αποφανθεί κανείς αν κάθε «απότομη» ηλιακή έκλαμψη αποτελεί πηγή ηλιακού ενεργητικού επεισοδίου, που μεταφέρεται στο διαπλανητικό χώρο.

¹ Comprehensive Solar Wind Laboratory for Long-Term Solar Wind Measurements

Τα απότομα επεισόδια αν και είναι πολύ λιγότερο ενεργητικά από τα βαθμιαία, έχουν μεγάλη συχνότητα εμφάνισης με αποτέλεσμα να είναι σημαντικά, τόσο για ερευνητικούς σκοπούς όσο και για λόγους ασφάλειας.

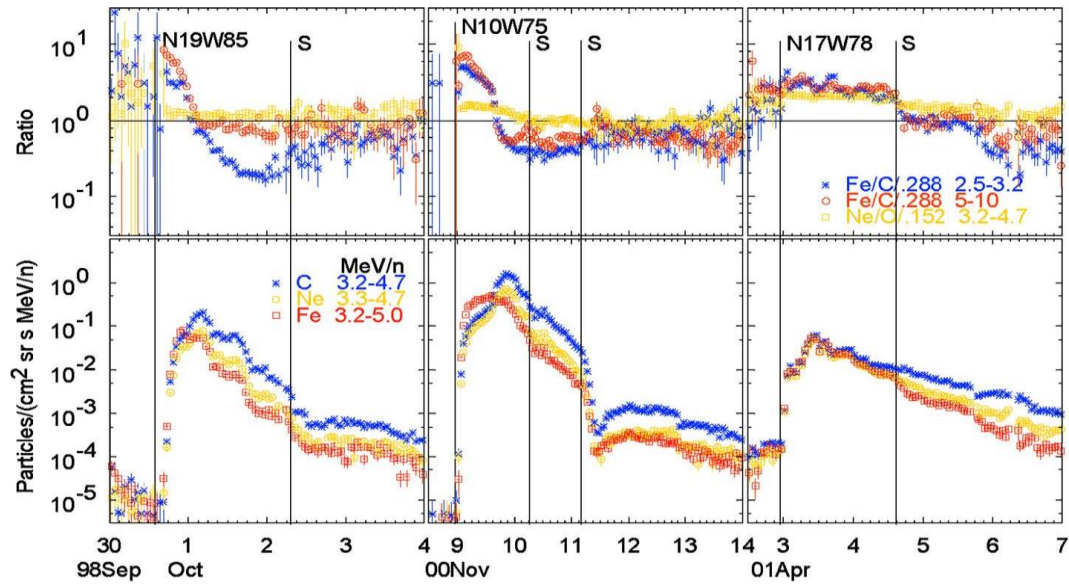
2.2.2 Χημική σύσταση

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό που διαφέρει μεταξύ των δύο αυτών φαινομένων, είναι η χημική σύσταση. Τόσο σε ποικιλομορφία όσο και σε αριθμό σωματιών οι δομές αυτές διαφέρουν ιδιαίτερα.



Εικόνα 2-6: Κάτω: μέση αφθονία σε στοιχεία των βαθμιαίων επεισοδίων σε σχέση με τη συγκέντρωση στη φωτόσφαιρα. Πάνω: μέση ενίσχυση στα απότομα επεισόδια σε σχέση με τα βαθμιαία.

2.2.2.1 Βαθμιαία επεισόδια

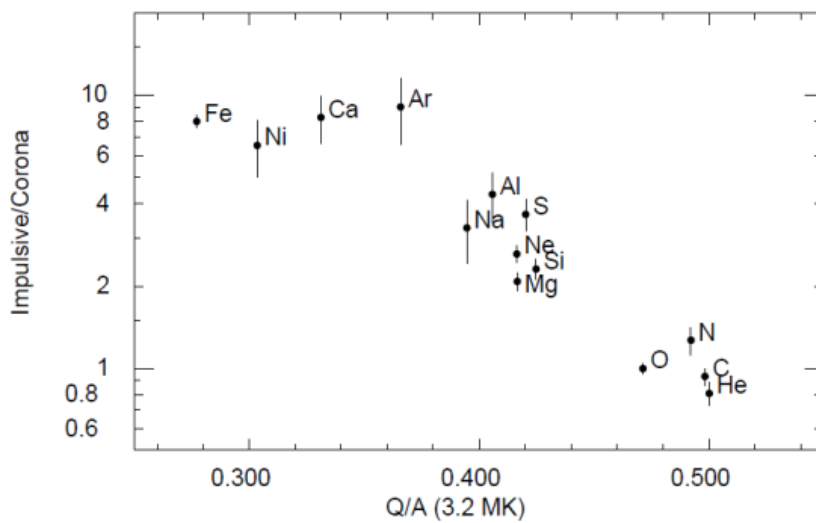


Εικόνα 2-7: Κάτω: Συγκέντρωση σε C, Ne, Fe για 3 βαθμιαία (Gradual) επεισόδια. Πάνω: λόγος αφθονίας κανονικοποιημένος σε σχέση με αυτόν στη κορόνα.

Πιο κοντά στη σύσταση του στέμματος έχουμε τα Gradual επεισόδια τα οποία καθώς απομακρύνονται από τον Ήλιο μέσω κρουστικών κυμάτων των CME, μεταφέρουν σωματίδια στον διαπλανητικό χώρο.

Σε αντίθεση με τα Impulsive, που θα δούμε παρακάτω, εδώ έχουμε μικρή διακύμανση στη κατανομή των σωματιών από επεισόδιο σε επεισόδιο.

2.2.2.2 Απότομα επεισόδια



Εικόνα 2-8: Η μέση αφθονία στοιχείων σε εκρηκτικά επεισόδια ως προς τη κορόνα σε σχέση με τον λόγο Q/A σε πλάσμα που έχει θερμοκρασία 3.2 MK

Πίνακας 2-2: Η Αφθονία των στοιχείων για τα εκρηκτικά επεισόδια συγκριτικά με του Ηλιακού Στέμματος

Στοιχείο / Άνθρακα	Αριθμητικό αποτέλεσμα του λόγου
${}^4\text{He}/\text{C}$	0.85 ± 0.17
N/C	1.52 ± 0.34
O/C	1.10 ± 0.12
Ne/C	3.51 ± 0.50
Mg/C	2.35 ± 0.32
Si/C	2.76 ± 0.38
Fe/C	6.67 ± 0.80

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των απότομων ή He-rich SEP είναι ότι το ποσοστό σιδήρου σε σχέση με άνθρακα είναι ασυνήθιστα υψηλό συγκριτικά με αυτό που παρατηρείται στο Ηλιακό στέμμα. Χαρακτηριστικό είναι ότι δεν υπάρχει κάποια στατιστική συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων αναλογιών από επεισόδιο σε επεισόδιο.

Αυτή η απουσία συσχέτισης είναι ένα εντελώς διαφορετικό χαρακτηριστικό σε σχέση με τη συστηματική διαμόρφωση των gradual SEP.

Σαν πρόταση δημιουργίας ενός συστηματικού μοτίβου υπάρχει ο εξής διαχωρισμός:

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^4\text{He}, \text{C}, \text{N}, \text{O} - \text{Group 1} \\ \text{Ne}, \text{Mg}, \text{Si} - \text{Group 2} \\ \text{Fe} - \text{Group 3} \end{array} \right\}$$

Ενώ κανείς μπορεί να δείξει ότι ο λόγος φορτίο/μάζα¹ έχει αντίστοιχα μια χαρακτηριστική τιμή (Reames et al. 1994):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q/A = 0.50 - \text{Group 1} \\ Q/A \approx 0.42 - \text{Group 2} \\ Q/A \approx 0.28 - \text{Group 3} \end{array} \right\}$$

Η διαφορά που παρατηρείται τόσο στη κάθε ομάδα όσο και σε σύγκριση με τη σύσταση των gradual, θεωρείται σημαντική ένδειξη ότι ο τρόπος επιτάχυνσης των impulsive και των gradual είναι διαφορετικός.

Μπορεί κανείς να πει ότι ο διαχωρισμός των επεισοδίων γίνεται με σχετική ευκολία, αφού τα απότομα επεισόδια έχουν ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα σε ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ και όπως είδαμε σε Fe/C .

¹ Ο λόγος Q/m αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέγεθος στα πλαίσια της ηλεκτροδυναμικής αφού σωματίδια με ίδιο λόγο έχουν ίδια τροχιά στο κενό αν υπόκειντο σε κοινό ηλεκτρικό πεδίο.

2.2.3 Εκπομπή ραδιοκυμάτων.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι η χαρακτηριστική εκπομπή στα ραδιοκύματα, που δίνουν και μεγάλο μέρος της «καυτότητας» του κάθε φαινομένου.

Γενικά, αρκετά φυσικά φαινόμενα έχουν μια χαρακτηριστική εκπομπή σήματος. Στην περίπτωση μας, έχουμε χαρακτηριστική εκπομπή συνοδευόμενη από πλήθος επιταχυνόμενων σωματιδίων.

Type - I

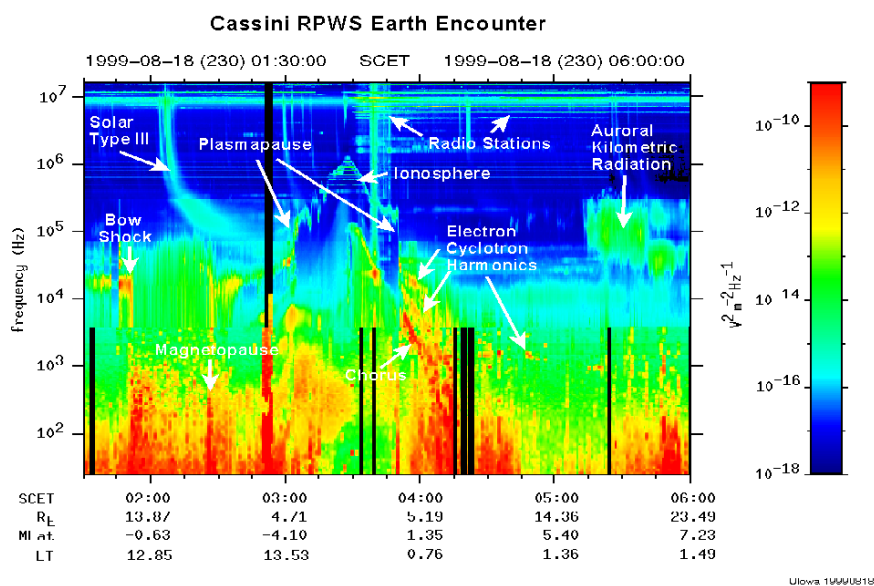
- Χαρακτηριστικό σήμα κατά τη διάρκεια Ηλιακών καταιγιδών.
- Πολύ υψηλή πόλωση ~100%

Type - II (Coronal Shock Waves)

- Μπορούν να παραχθούν από ηλιακές εκλάμψεις ή/και στεμματικές εκτινάξεις μάζας
- ~650 km/s ταχύτητα διάδοσης
- 90% των "ξεσπάσματος" συμπεριλαμβάνει χαρακτηριστική εκπομπή EIT
- Πρώτη παρατήρηση το 1947. (Payne-Scott, Yabskey & Bolton)

Type - III (Electron Beam Driven)

- Άμεση συσχέτιση με Ηλιακές εκλάμψεις
- Υψηλός ρυθμός στοχαστικής μετάπτωσης, $df/dt \sim 100 \text{ MHz/s}$
- Προέρχεται από τη κίνηση ηλεκτρονίων πάνω σε ανοιχτές μαγνητικές γραμμές
- Θεωρούνται χαρακτηριστικές εκπομπές Ηλεκτρονίων. (Wild, 1950)



Εικόνα 2-9: Φυσικές και τεχνητές ραδιοεκπομπές από το Cassini (18/8/1999)

Type - U(N)

- Όπως και στα type III, συσχετίζεται με τη κίνηση υπέρθερμων ηλεκτρονίων
- Άμεση συσχέτιση με Ηλιακές εκλάμψεις

Type - IV

- Χαρακτηριστικό σήμα που ονομάστηκε "Zebra pattern" (1992)
- Μέχρι και σήμερα υπάρχουν αρκετές θεωρίες για την ερμηνεία του σήματος αυτού. (Chernov et al. 1998)

Type - V

- Συχνή εμφάνιση μετά από τα type III
- Η εκπομπή είναι φαινομενικά συνεχής και διάχυτη.
- Έχουν συσχέτιση με τη φθίνουσα περίοδο των βαθμιαίων επεισοδίων

Στη περίπτωση μας, τα types II,III είναι τα πιο σημαντικά γιατί είναι η χαρακτηριστική εκπομπή των βαθμιαίων και των απότομων επεισοδίων αντίστοιχα.

2.3 Επιτάχυνση των SEP

Χωρίζουμε συνοπτικά τους μηχανισμούς επιτάχυνσης στις διαδικασίες, που συμβαίνουν στα CMEs δηλαδή στα Gradual SEP και σε αυτούς που λαμβάνουν μέρος στις Εκλάμψεις δηλαδή στα Impulsive SEP. Μια εκτενέστερη ανάλυση των μηχανισμών γίνεται στο παράρτημα Ε'.

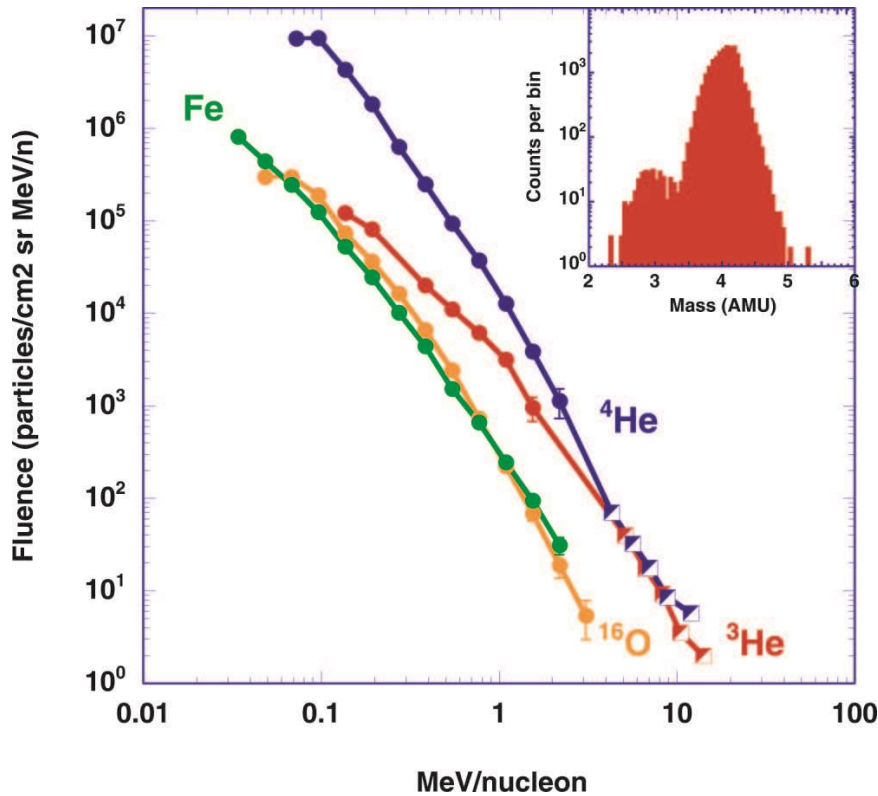
2.3.1 Απότομα επεισόδια

Η διαδικασία επιτάχυνσης των Impulsive είναι συνήθως απότομη και διαρκεί κάποιες ώρες. Χαρακτηριστική εκπομπή III, V.

Η κυρίαρχη αντίληψη ήταν ότι τα σωματίδια αυτών των συμβάντων επιταχύνονταν μόνο μέσω του φαινομένου της Ηλιακής έκλαμψης (Flare). Θεωρούμε ότι στο μηχανισμό της έκλαμψης δημιουργούνται μαγνητικές αστάθειες, που οδηγούν στο φαινόμενο της μαγνητικής επανασύνδεσης¹.

Σαν αρχή έχουμε ότι τα απότομα επεισόδια είναι Flare-Accelerated ή Flare-Driven. Δηλαδή, αν και αρκετά περιοριστικό θεωρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της επιτάχυνσης βρίσκεται στο φαινόμενο της έκλαμψης (Type III εκπομπή).

¹ Παράρτημα Ε'



Εικόνα 2-10: Ροή ως προς κινητική ενέργεια/νουκλεόνιο (Επεισόδιο - 27/9/2000). Ενθετό: ι-στόγραμμα μάζας ³He, ⁴He για περιοχή 160-220 KeV

Μέχρι τώρα η θεωρία της επιτάχυνσης από εκλάμψεις είναι σε συμφωνία με μεγάλο όγκο δεδομένων, όμως δεν είναι πλήρως κατανοητά όλα τα φαινόμενα που παρατηρούνται (Παράγραφος 2.5).

2.3.2 Βαθμιαία επεισόδια

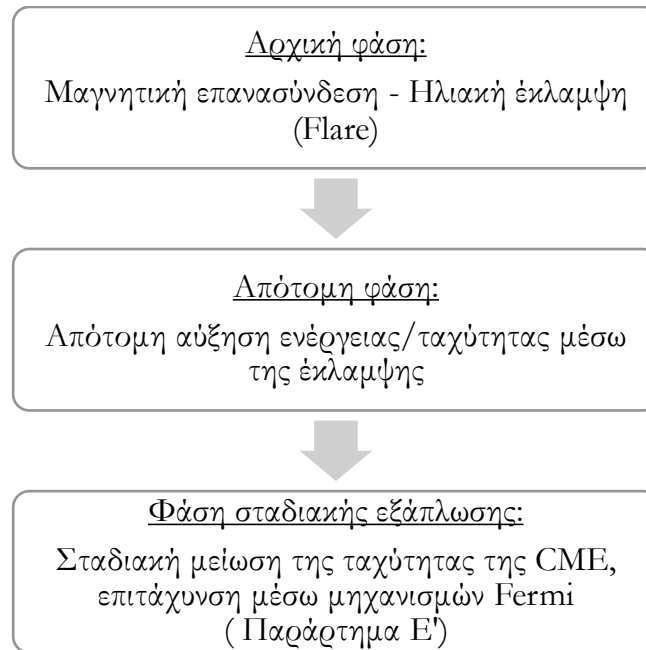
Τα βαθμιαία επεισόδια επιταχύνονται κυρίως μέσω των κρουστικών κυμάτων, που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας.

Επιταχύνονται κυρίως μέσω κρουστικών κυμάτων ενώ η διαδικασία παίρνει συνήθως μερικές ημέρες. Η χαρακτηριστική εκπομπή των επεισοδίων αυτών είναι τύπου Π,ΙV.

Εδώ και πολλά χρόνια η κυρίαρχη ερμηνεία είναι ότι τα βαθμιαία συμβάντα επιταχύνονται μέσω των CMEs. Η συσχέτιση είναι ιδιαίτερα υψηλή (97-99%) με αποτέλεσμα να θεωρούμε ότι βασικότερη αιτία της επιτάχυνσης των εντονότερων και πιο ενεργητικών επεισοδίων είναι τα κρουστικά κύματα, τα οποία οδηγούνται από τις εκρήξεις στεμματικού υλικού.

Η διαδικασία επιτάχυνσης για τα βαθμιαία επεισόδια είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από τα απότομα. Ο λόγος είναι κυρίως το γεγονός ότι ένα μεγαλύτερο επεισόδιο τόσο χρονικά όσο και σε ταχύτητα/ενέργεια, είναι συνήθως αποτέλεσμα πολλών φυσικών μηχανισμών που συμπληρωματικά δημιουργούν το παρατηρούμενο αποτέλεσμα.

Αν θέλαμε να παρουσιάσουμε ένα απλοϊκό μοντέλο της φυσικής διαδικασίας θα λέγαμε το εξής:



Η αδυναμία της εύκολης εξήγησης των μεγάλων ενεργειών και γενικότερα των ενεργειακών προφίλ των βαθμιαίων επεισοδίων είναι ένας από τους βασικότερους λόγους, που τα τελευταία χρόνια υπάρχουν πληθώρα εναλλακτικών μοντέλων για την ταξινόμηση και εξήγηση των ηλιακών ενεργειακών επεισοδίων.

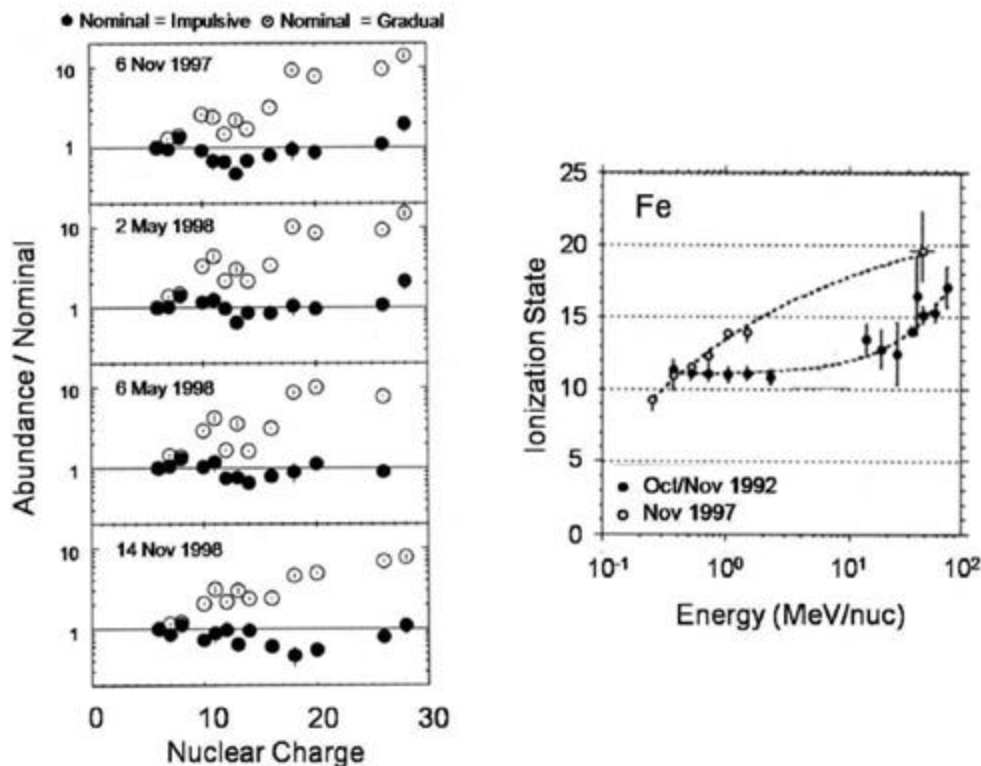
2.4 Προβλήματα και Εναλλακτικές προτάσεις

Το επικρατέστερο μοντέλο έχει όπως είδαμε ένα σαφή διαχωρισμό μεταξύ των δύο κατηγοριών των ενεργητικών σωματιδίων. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι τα Impulsive είναι αποτέλεσμα των ηλιακών εκλάμψεων, ενώ τα gradual των CMEs με την συνοδεία των αντίστοιχων μηχανισμών επιτάχυνσης. Το βασικό πρόβλημα που συναντά αυτό το θεωρητικό μοντέλο, είναι στις περιπτώσεις που έχουμε αλληλεπιδράσεις σωματιδιακών πληθυσμών και μεγάλες ταχύτητες/ενέργειες.

Θα δούμε αρχικά κάποια από τα προβλήματα του καθιερωμένου μοντέλου και θα αναπτύξουμε κάποιες διαφορετικές προτάσεις, που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια από διάφορους ερευνητές στην προσπάθεια να λυθούν αυτά τα προβλήματα με την παρουσία ενός πληρέστερου και ακριβέστερου μοντέλου.

2.4.1 Προσέγγιση του Cliver - Τρεις διαφορετικές ομάδες SEP

Το 1999 από τους Cohen et al. παρατηρήθηκαν ενεργειακές δομές μεγαλύτερες των 10 MeV να έχουν σύσταση και λόγο φορτίου/μάζας παρόμοια με Impulsive επεισόδια. Με βάση τον διαχωρισμό που έχουμε αναφέρει, τα πολύ ενεργητικά επεισόδια μπορούν να είναι αποκλειστικά και μόνο Gradual.



Εικόνα 2-11: Αριστερά: 4 επεισόδια με χαρακτηριστική σύσταση απότομων επεισοδίων (>10 MeV). (Cohen et al., 1999). Δεξιά: ένα από αυτά που έχει υψηλό φορτίο σε σίδηρο.

Αρχικά, προτάθηκαν διάφορες θεωρίες για να διατηρήσουμε το καθιερωμένο διαχωρισμό και να ενσωματώσουμε με κάποιο τρόπο τις νέες παρατηρήσεις στις υπάρχουσες κατηγορίες.

Πρώτοι οι Cane et al. (2002,2003,2006) αναφέρουν ότι οι ηλιακές εκλάμψεις κυριαρχούν στα βαθμιαία φαινόμενα για πολύ μεγάλες ενέργειες (>25 MeV), με αποτέλεσμα να δίνουν την εικόνα των εκρηκτικών επεισοδίων στη σωματιδιακή κατανομή διατηρώντας το ενεργειακό προφίλ των gradual.

Διαφορετική θεώρηση ακολούθησαν οι Tylka et al. (2005,2006); Tylka & Lee,(2006), οι οποίοι αποδίδουν τον ενισχυμένο λόγο Fe/O σε οιονεί κάθετα ωστικά κύματα, που δρουν σε υπέρθερμους πληθυσμούς σωματιών μέσα στην ηλιακή έκλαμψη.

Πρώτη θεωρητική προσέγγιση και μοντελοποίηση, που μπόρεσε να αναπαράγει τις πραγματικές μετρήσεις, έγινε από τους Tylka & Lee το 2006. Οι ερευνητές αυτοί μπόρεσαν να αναπαράγουν με βάση το θεωρητικό τους μοντέλο, τόσο την σωματιδιακή σύσταση όσο και τον λόγο μεταξύ φορτίου και μάζας που είχε παρατηρηθεί.

Η έρευνα πάνω στις παρατηρήσεις αυτές συνεχίζεται από τους παραπάνω ερευνητές και πολλούς άλλους μέχρι και σήμερα. Ο Cliver (2008) παρουσίασε μια εναλλακτική ταξινόμηση των SEP ακολουθώντας τη δουλειά του Tylka (2006). Η πρότασή του απαρτίζεται συνοπτικά στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-3: Βασικά χαρακτηριστικά της ταξινόμησης του Cliver.

	Flare (Έκλαμψη)	Shock (Κρουστικό κύμα)	
		Quasi - Perp	Quasi - Par
Ανώτατο όριο H	~3 pr	~10 ³ pr	~10 ⁴ pr
³ He/ ⁴ He	~10 ³ – 10 ⁴	~10 – 10 ²	~1
e/p	~10 ³ – 10 ⁴	~100	~50
Fe/O	~8	~3	< 1
Z(> 50)/O	~10 ² – 10 ³	~10 ⁻¹ – 10	~10 ⁻¹ – 10
Φάσμα Ιόντων	-	Νόμος δύναμης	Εκθετικό
QFe	~20	~20	~11
Διάρκεια	< 1 – 20 hr	~1 – 3 days	~1 – 3 days
Γεωγραφικό μήκος	< 30 – 70°	~100°	~180°
Πληθυσμός Σωματιδίων	N/A	Σωματίδια από εκλάμψεις	Σωματίδια του στέμματος
Ραδιοεκπομπή	III	II	II
Διάρκεια ακτίνων x	10 – 60 min	~1 hr	> 1 hr
Κορονογράφος	*1	CME	CME
Ηλιακός άνεμος	-	Διαπλανητικό κρουστικό κύμα	Διαπλανητικό κρουστικό κύμα

Οι απαραίτητες πληροφορίες για τη σωστή ανάγνωση του παραπάνω πίνακα είναι:

- Για τον λόγο μεταξύ πρωτονίων και ηλεκτρονίων, οι ενέργειες είναι >10 MeV και >5 MeV αντίστοιχα.
- Ο λόγος ³He/ ⁴He είναι σε σχέση με τη σύσταση του Ηλιακού ανέμου στα ~1 MeV/nucl.
- Ο λόγος Fe/O είναι σε σχέση με το στέμμα και τις ηλιακές εκλάμψεις στα 5-12 MeV/nucl. Ενώ αναφορικά με τα κρουστικά κύματα στα 30-40 MeV/nuc.
- Η ραδιοεκπομπή ορίζεται στις χαμηλές συχνότητες των 14-1 MHz

Συνοψίζοντας η δημιουργία μιας καλύτερης ταξινόμησης ήταν να υπάρχει ένα μοντέλο που εξηγεί και εμπεριέχει τα εξής:

¹ Τα πολύ ισχυρά Flare Event μπορούν να συσχετιστούν με ένα CME (Kahler, Reames, & Sheeley, 2001)

1. Η ομοιότητα του λόγου Fe/O μεταξύ των οιονει κάθετων ηλιακών και διαπλανητικών κρουστικών φαινομένων.
2. Η δικαιολόγηση του λόγου φορτίου μάζας Q/M που παρατηρήθηκε πρώτα από τους Brenman & Stone (1985)
3. Ισχυρές ενδείξεις ότι ισχυρά κύματα είναι πιο πιθανός μηχανισμός από ισχυρές εκλάμψεις για >25 MeV SEPs.
4. Αν η δεύτερη στήλη όπως παρουσιάστηκε στον πίνακα ήταν αποτέλεσμα Ηλιακών εκλάμψεων, τότε τα ισχυρά οστικά κύματα που παρατηρούνται θα ήταν αδύνατον να εξηγηθούν.

Στο σημείο αυτό είναι καλό να αναφερθεί ότι το μοντέλο αυτό σε καμία περίπτωση δεν είναι πλήρες. Χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση στους μηχανισμούς επιτάχυνσης, ενώ παράλληλα υπάρχουν ακόμα παρατηρήσεις όπως φαινόμενα μεγάλης διάρκειας πλούσια σε πόνια τα οποία δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποια κατηγορία (Kanbach, 1993; Ryan, 2000; Cliver 2006).

2.4.2 Εναλλακτικό μοντέλο βασισμένο στα αλληλοεπιδρώντα σωματίδια

Ο διαχωρισμός του καθιερωμένου μοντέλου γίνεται με βάση τα σωματίδια που διαφεύγουν στον διαπλανητικό χώρο. Μια εκτενής σύγκριση των πρωτονίων με ένταση ενέργειας ~ 10 MeV αποκαλύπτει ότι έχουμε σιεδάσεις με ελεύθερα σωματίδια πιο συχνά στα Impulsive απ' ότι στα Gradual επεισόδια. Επιπλέον ο λόγος n_{int}/n_{esc}^1 είναι πάντα μεγαλύτερος στις απότομες εκλάμψεις, ενώ σε κάθε περίπτωση είναι πάντα μικρότερος από τη μονάδα.

Μπορεί κανείς λοιπόν να υποθέσει ότι έχουμε επιτάχυνση στα σωματίδια που παγιδεύονται στις κλειστές δομές. Κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο, όμως σε κάθε περίπτωση τα σωματίδια που «ξεφεύγουν» είναι ένα μικρό κομμάτι των συνολικών σωματιδίων που επιταχύνθηκαν από την έκλαμψη.

Αν κανείς μελετήσει τα σωματίδια, που αλληλεπιδρούν σε όλα τα επεισόδια μπορεί να βρει τα εξής:

- Ο λόγος πρωτονίων και ηλεκτρονίων είναι ίδιος (Ramaty et al 1993), ενώ στο διαπλανητικό χώρο υπάρχει πολύ μεγαλύτερος λόγος στα Gradual απ' ότι στα Impulsive.
- Το φάσμα που προκύπτει είναι κοινό, ενώ στο διαπλανητικό χώρο που έχουμε ελεύθερα σωματίδια είναι διαφορετικό (Moses et al 1989).
- Η σύσταση είναι σχεδόν ίδια (Ramaty et al 1990, 1993, 1997, Cohen et al 1999, Share and Murphy 1999).

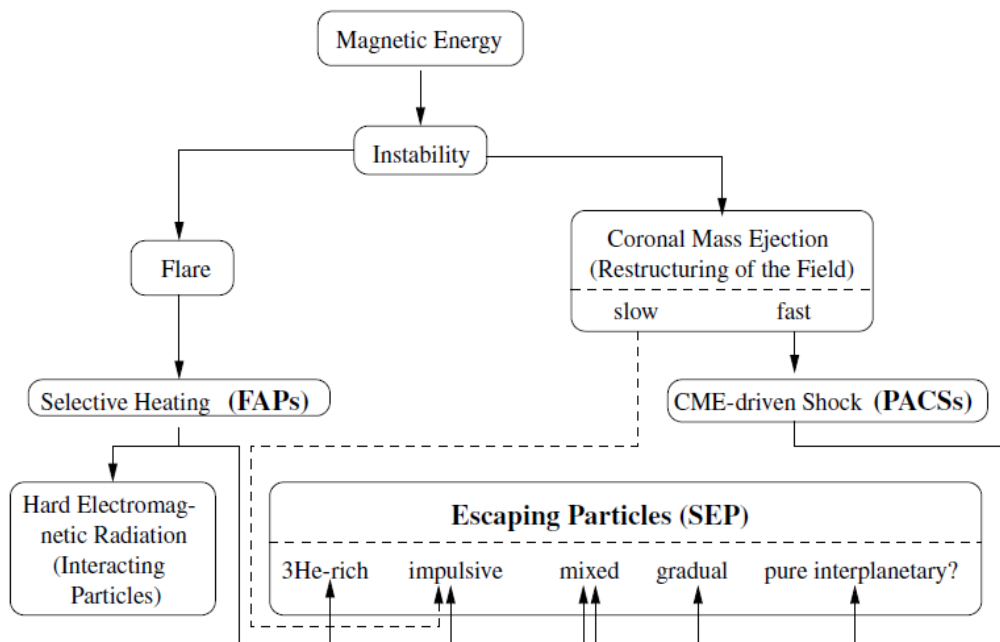
Τα παραπάνω καταδεικνύουν την ύπαρξη ενός κοινού μηχανισμού επιτάχυνσης για τα αλληλοεπιδρώντα σωματίδια. Συγκεκριμένα, αναφερόμαστε σε στοχαστική διαδικασία

¹ Int: Interacting, Esc: Escaping

μέσω γύρω-συντονισμένων αλληλεπιδράσεων μεταξύ κυμάτων και σωματιδίων (Mandzhavidze et al 1999).

Ακολουθώντας τον παραπάνω συλλογισμό καταλαβαίνουμε ότι τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν επιταχύνονται με τον ίδιο μηχανισμό, τόσο στις βαθμιαίες όσο και στις απότομες ηλιακές εκλάμψεις. Η διαφορά υπάρχει στα Gradual event που επιταχύνονται και μέσω του κρουστικού κύματος, που προέρχεται από τη CME. Το ερώτημα παραμένει όμως σε σχέση με το ποια σωματίδια φτάνουν στο διαπλανητικό χώρο. Αυτά που προέρχονται αποκλειστικά από την επιτάχυνση του ωστικού κύματος ή αυτά που είναι αποτέλεσμα και των δύο μηχανισμών;

Ότι αναφέραμε ήδη μαζί με αριετὰ δεδομένα που αναφέρονται, τόσο στη σύσταση των σωματιδίων όσο και στις ενέργειες και στους χρόνους έναρξης των επεισοδίων ήταν έναυσμα για μια εναλλακτική πρόταση στην κατηγοριοποίηση των SEP.



Εικόνα 2-12: Διάγραμμα συσχέτισης μηχανισμών επιτάχυνσης, σωματιδιακών πληθυσμών και ηλιακών επεισοδίων

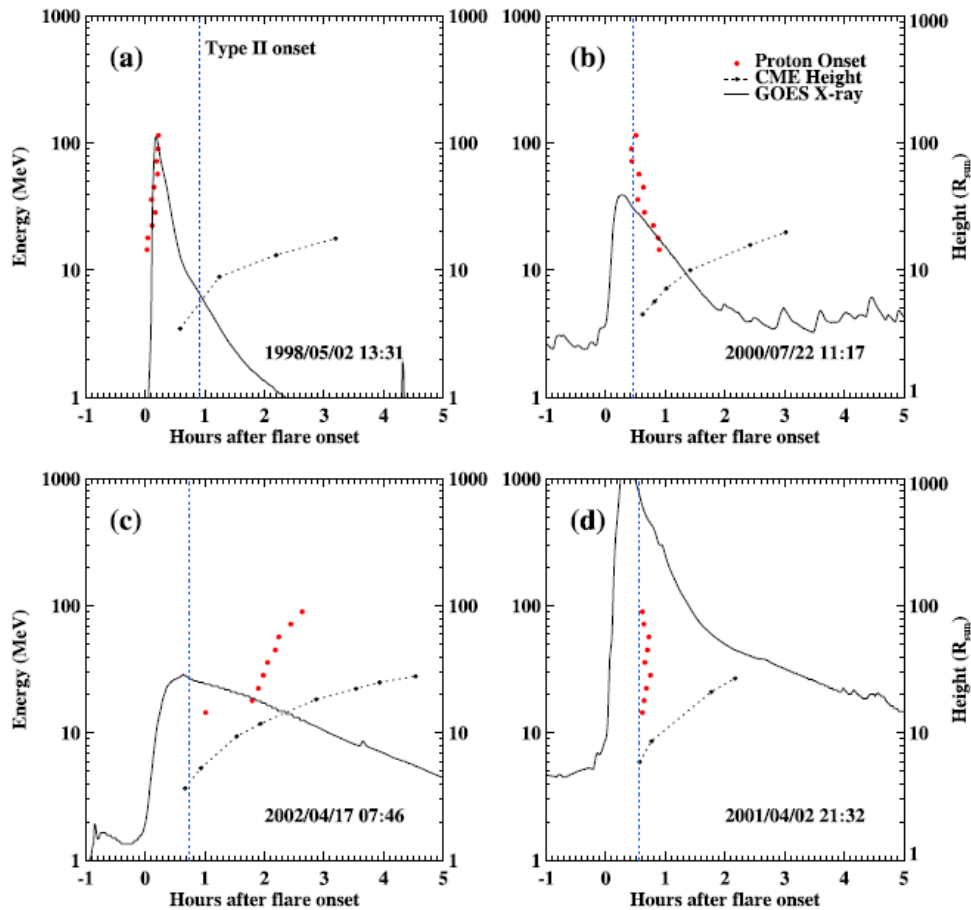
Τα βασικά συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί επιτάχυνσης, που παράγουν δύο σωματιδιακούς πληθυσμούς που θα τους ονομάσουμε FAPs και PACSSs.
- Το φαινόμενο της εκλάμψης αναφορικά με τα αλληλοεπιδρώντα σωματίδια είναι ακριβώς το ίδιο σε Gradual και Impulsive.
- Υπάρχουν “Mixed” επεισόδια κατά τα οποία το φαινόμενο ξεκινάει ως τυπικό Impulsive και καταλήγει με το προφίλ ενός Gradual επεισόδιο.
- Τα υψηλότερης ενέργειας σωματίδια δημιουργούνται στην αρχή του επεισοδίου όπου το ωστικό κύμα είναι κοντά στον Ήλιο.
- Το φορτίο των σωματιδίων έχει ανάλογη σχέση με την ενέργεια.

- Τα SEP επιταχύνονται από υπέρθερμα σωματίδια, από προηγούμενες CME και από διαπλανητικές διαταραχές. Άρα τα χαρακτηριστικά ενός ηλιακού σωματιδιακού επεισοδίου δεν καθορίζονται μόνο από τους μηχανισμούς επιτάχυνσης αλλά από τον συνδυασμό αυτών με προηγούμενες CME, εκλάμψεις και κρουστικά κύματα.

2.4.3 Εναλλακτική κατηγοριοποίηση των πρωτονικών επεισοδίων

Ένας εκτενέστερος διαχωρισμός προτάθηκε από τους Kim et al. το 2015. Οι παραπάνω μελέτησαν 42 SPEs¹ τα οποία παρατηρήθηκαν το 1997 - 2012. Η ταξινόμηση έγινε με βάση το χρόνο έναρξης και την ένταση της ενεργειακής ροής που ανιχνεύτηκε. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τόσο στοιχεία του SPE (Χρόνος, ροή), όσο και στοιχεία της συνοδευόμενης ηλιακής έκλαμψης, της ραδιοεκπομπής, της CME και του αντίστοιχου κρουστικού κύματος.



Εικόνα 2-13: Παραδείγματα των τεσσάρων ομάδων. Οι χρόνοι έναρξης αναπαρίστανται από τις κόκκινες τελείες για 10 ενέργειες (13 - 130MeV). Η Μαύρη γραμμή αποτελεί την ένταση σε ακτίνες X (GOES) και οι μαύρες τελείες δείχνουν την εμφάνιση CME.

¹ SPEs: Solar Proton/Particle Events. Αναφερόμαστε στα SEP που αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια και κατ' επέκταση έχουν μεγαλύτερες ενέργειες από το μέσο επεισόδιο.

Πίνακας 2-4: Βασικά χαρακτηριστικά από το μέσο όρο των SEPs

Χαρακτηριστικά		Group A	Group B	Group C	Group D
SPE	Ροή πρωτονίων (pfu ¹)	5824	788	5268	327
	$T_H - T_L$ (min)	17(0.33)	-27(-0.51)	35 (-0.56)	-2(0.65)
Flare	Ένταση ακτίνων x (10^4)	2.11(0.56)	1.61(0.24)	2.37(0.73)	3.77(0.33)
	Γεωγραφικό μήκος (W)	53(-0.30)	36(-0.32)	35(-0.57)	62(0.40)
CME	Γωνιακό πλάτος (°)	274(0.03)	350(0.41)	274(-0.05)	337(-0.41)
	Ταχύτητα (km/s)	1444(0.65)	1573(0.56)	1423(0.51)	1855(0.61)
Acceleration Height	H_p (R_s)	0.70(-0.47)	5.74(-0.16)	6.05(-0.26)	5.35(0.47)
	H_e (R_s)	3.85(-0.31)	2.95(0.42)	4.28(-0.22)	5.73(0.25)

Οι απαραίτητες πληροφορίες για τη σωστή ανάγνωση του παραπάνω πίνακα είναι:

- Οι τιμές στην παρένθεση είναι οι συντελεστές συσχέτισης.
- $H_{p,e}$ είναι το ύψος στο οποίο επιταχύνονται αντίστοιχα τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια.
- $T_H - T_L$ είναι η διαφορά στο χρόνο που παρατηρήθηκε μεταξύ του καναλιού που μετράει τη μεγαλύτερη (Highest) ενέργεια και του καναλιού με τη μικρότερη (Lowest).
- R_s ορίζεται ως Ηλιακή ακτίνα, και χρησιμοποιείται για να ορίσουμε το ύψος που επιταχύνεται το σωματίδιο παίρνοντας ως σύστημα αναφοράς τον Ήλιο.

Μια άμεση παρατήρηση που μπορεί να κάνει κανείς αν κοιτάξει τους συντελεστές συσχέτισης, είναι ότι η ένταση των πρωτονικών επεισοδίων παρουσιάζει διαφορετικές τιμές σε κάθε ομάδα, ενώ η ταχύτητα της αντίστοιχης CME είναι η πιο χαρακτηριστική και αποτελεσματική παράμετρος και για τις 4 ομάδες.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της κατηγοριοποίησης είναι τα εξής:

Για το Group A, έχουμε άμεση συσχέτιση με την ένταση της ηλιακής έκλαμψης. Κάτι το οποίο είναι λογικό, αφού η πρώτη αυτή ομάδα αντιπροσωπεύει τα “Flare Associated” επεισόδια.

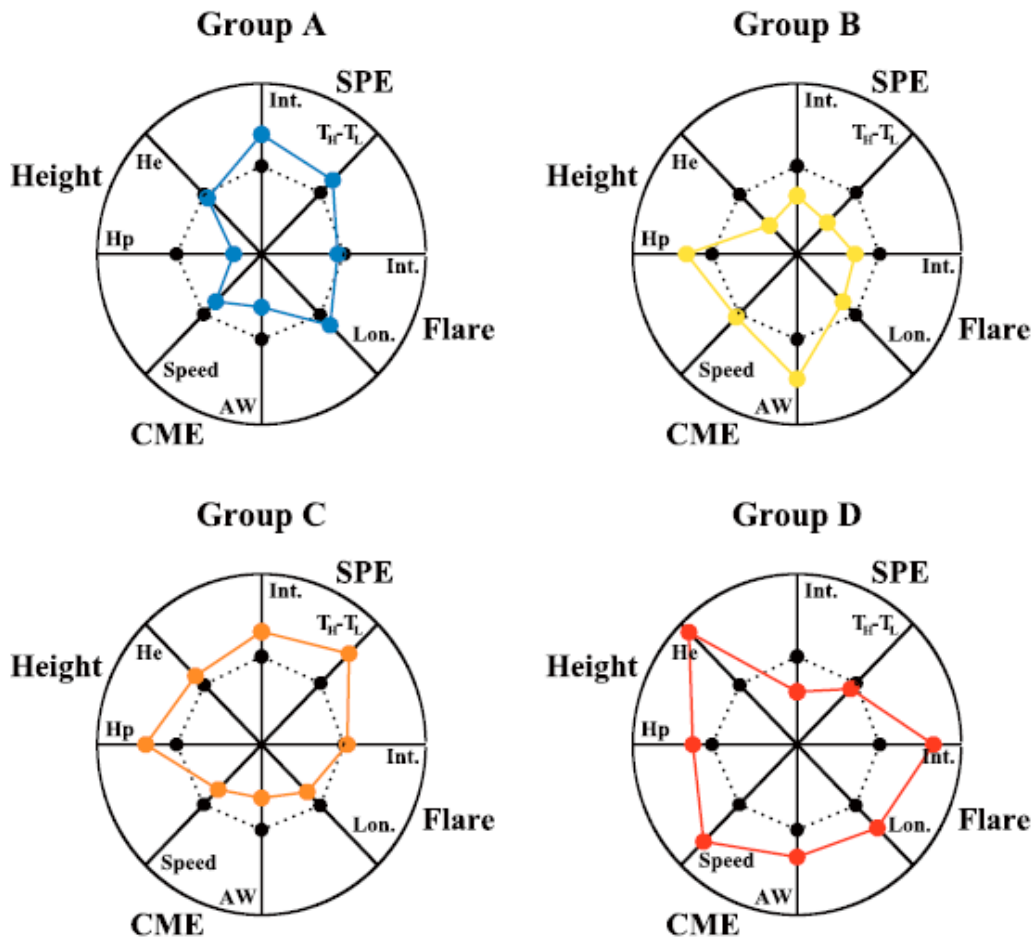
¹ Μονάδα έντασης ροής πρωτονίων. Ορίζεται ως $\left[\frac{\text{Particles}}{\text{sec}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{sr}} \right]$

Το Group B έχει μεγάλη παράμετρο $T_H - T_L$, η οποία έχει δραστικό ρόλο στην συνολική αύξηση της έντασης του επεισοδίου.

Το Group C έχει την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ της έντασης του φαινομένου και των ιδιοτήτων της έκλαμψης

Το Group D έχουν συνολικά αδύναμη ένταση προερχόμενη από τη μικρή διαφορά έναρξης μεταξύ υψηλών ενεργειών και χαμηλών ($T_H - T_L$).

Σε μορφή διαγράμματος μπορεί κανείς να αναπαραστήσει τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων αυτών κατηγοριών ακολούθως:



Στο παραπάνω διάγραμμα έχουμε τις μαύρες κουκίδες να είναι οι κανονικοποιημένες μέσες τιμές των 42 επεισοδίων, ενώ το κέντρο του κύκλου αντιπροσωπεύει την ελάχιστη τιμή και ο ίδιος ο κύκλος τις μέγιστες.

Μέσα από την εκτενή έρευνα των Kim et al. τα αποτελέσματα τους συνοψίζονται ως εξής:

- Τα 5 ισχυρότερα επεισόδια έχουν θετική παράμετρο $T_H - T_L$ και είναι κατηγοριοποιημένα στις ομάδες A,C. Αυτό σημαίνει ότι συμβάντα που αρχίζουν να επιταχύνονται από χαμηλότερες ενέργειες, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να

εξελιχθούν σε πολύ ισχυρά ακόμα και αν η συνοδευόμενη έκλαμψη ή στεμματική εκτίναξη μάζας δεν είναι τόσο ισχυρή.

- Αντίθετα, πρωτονικά επεισόδια που ξεκινούν να επιταχύνονται από υψηλές ενέργειες είναι συνήθως λιγότερο έντονα (<1000 rfu) ακόμα και αν έχουν ισχυρές συνοδευόμενες CMEs.
- Επιβεβαιώθηκε ότι τα πρωτονικά επεισόδια που συνδέονται με εκλάμψεις ταιριάζουν καλύτερα σε ύψος $\sim 1R_s$, δηλαδή στο σημείο που το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει μαγνητικούς βρόγχους. Το μαγνητικό πεδίο που αναφέρεται είναι το διαπλανητικό πεδίο, που οι δυναμικές τους γραμμές περνάνε κοντά από τη Γη. Αντίστοιχα τα επεισόδια που σχετίζονται καλύτερα με CME βρίσκονται σε μέσο ύψος $R_{s,mean} = 6.05$.
- Το μέσο ύψος επιτάχυνσης των πρωτονικών επεισοδίων που σχετίζονται με CME δεν διαφέρει ιδιαίτερα ανάμεσα στις 4 ομάδες, αφού η μέση τιμή τους κυμαίνεται μεταξύ $R_{s,mean} = \sim 5 - 6$.
- Σε όλα τα επεισόδια που σχετίζονται με εκλάμψεις τα πρωτόνια επιταχύνονται από μικρότερο ύψος σε σχέση με τα ηλεκτρόνια. Ενώ στα επεισόδια που αποδίδονται σε CME και συγκεκριμένα στα γκρουπ B, C έχουμε επιτάχυνση σε μεγαλύτερο ύψος για τα πρωτόνια.
- Η ομάδα A παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ροή πρωτονίων. Παράλληλα τα στοιχεία των αντίστοιχων CMEs είναι χαμηλότερα από τη μέση τιμή όλων των επεισοδίων. Η ομάδα B αποτελείται από επεισόδια, που συνοδεύονται από αδύναμες εκλάμψεις και ισχυρές CMEs. Για τη C έχουμε ισχυρή ένταση του πρωτονικού επεισοδίου ακόμα και αν έχουμε «αδύναμα» εκρηκτικά φαινόμενα συγκριτικά. Τέλος, για το γκρουπ D έχουμε πολύ ισχυρές εκλάμψεις και CMEs, που συνοδεύονται από επιταχύνσεις σε μεγαλύτερο ύψος. Παρόλα αυτά έχουμε αρκετά χαμηλή ένταση στη ροή πρωτονίων.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί κανείς να βγάλει αρκετά συμπεράσματα. Για παράδειγμα, το γεγονός ότι η επιτάχυνση στην ομάδα B των επεισοδίων επιταχύνεται αποδοτικότερα στις υψηλές ενέργειες σημαίνει ότι ένας μηχανισμός Fermi¹ μπορεί να εξηγήσει καλύτερα την επιτάχυνσή τους.

2.5 Προβλήματα - Έρευνα

Τα ενεργητικά επεισόδια από τον Ήλιο αποτελούν ένα ιδιαίτερο αντικείμενο μελέτης. Είναι πηγή τόσο θεωρητικής όσο και πειραματικής και υπολογιστικής έρευνας.

Οι δυσκολίες που υπάρχουν σε θεωρητικό επίπεδο προκύπτουν από τις προσεγγίσεις, που αναγκαστικά γίνονται από τους ανθρώπους αλλά και από την ίδια τη φύση που υποβάλλει το πλάσμα σε ενέργειες και θερμοκρασίες που προκύπτουν μόνο σε αστροφυσικό περιβάλλον.

¹ Παράρτημα Ε'

Ενδεικτικά μερικά από τα προβλήματα που ερευνώνται είναι τα εξής:

- Ποιός συνδυασμός φυσικών μηχανισμών μπορεί να επιταχύνει και να μεταφέρει σωματίδια, με τρόπο που να εξηγεί τα δεδομένα που παρατηρούνται;
- Σε ποιο ύψος της κορώνας μπορεί να δημιουργηθεί κρουστικό κύμα που επιταχύνει ιόντα;
- Μπορούν μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη στατιστικές διαδικασίες σε μακροσκοπική κλίμακα και στοχαστικές διεργασίες, να εξηγήσουν καλύτερα τα φαινόμενα που παρατηρούνται;

Κεφάλαιο 3 Διαστημικός καιρός & Διαστημικές αποστολές

3.1 Γενικά

Η γνώση του σωματιδιακού πληθυσμού στο διάστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη προβλεπτικής ικανότητας των φαινομένων που τον απαρτίζουν, είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό διαστημικών αποστολών. Οι αποστολές αυτές ποικίλουν τόσο στο τρόπο κατασκευής και υλοποίησης, όσο και στο σκοπό δημιουργίας τους. Μπορεί να έχουν σκοπό την ανάπτυξη της τηλεπικοινωνίας, την παρατήρηση, την εξερεύνηση πλανητών και πολλά άλλα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε κάποια χαρακτηριστικά των αποστολών αυτών και τι επιπτώσεις έχουν τα σωματίδια του διαπλανητικού χώρου τόσο στον εξοπλισμό όσο και στους ανθρώπους. Το κεφάλαιο αυτό μπορεί να θεωρηθεί μια σύντομη εισαγωγή στους κλάδους της διαστημικής τεχνολογίας και του διαστημικού καιρού. Παράλληλα αναπτύσσονται κάποιες βασικές αρχές ακτινοπροστασίας και βιολογικών επιδράσεων τις ακτινοβολίας. Τέλος θα κάνουμε μια εισαγωγή στο υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας, το οποίο θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 4.

3.2 Διαστημικός καιρός

Ο διαστημικός καιρός σαν γνωστικό αντικείμενο ορίζεται ως: Η παρακολούθηση και η πρόγνωση πιθανών επιδράσεων, που έχουν οι ροές σωματιδίων από το διαστημικό χώρο στον άνθρωπο.

Οι επιπτώσεις αυτές ποικίλουν και θα τις δούμε στη συνέχεια πιο αναλυτικά, αλλά για να καταλάβει κανείς τον λόγο που μελετάμε τα διάφορα φαινόμενα και τις δομές που σχηματίζονται στο διάστημα, πρέπει να γνωρίζει τι επιπτώσεις έχουν στον άνθρωπο. Συγκεκριμένα:

- Δημιουργία του Σέλαος (Aurora)
- Μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο της Γης (Μαγνητικές καταιγίδες)
- Αύξηση του ιονισμού της ατμόσφαιρας
- Θέρμανση της ατμόσφαιρας (Δυσλειτουργία δορυφόρων)
- Μεγαλύτερη έκθεση σε ακτινοβολία
- Πιθανή συσχέτιση με την υγεία των ανθρώπων

Αυτά τα φαινόμενα και πολλά άλλα δημιουργούν την αναγκαιότητα να αναπτύσσονται εργαλεία, τόσο για την κατανόηση των φυσικών διαδικασιών όσο και για την ανάπτυξη μοντέλων που δίνουν προβλεπτική ικανότητα. Η προβλεπτική ικανότητα αυτή βοηθάει στην αποτροπή των καταστροφικών συνεπειών, που μπορούν να επέλθουν αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

3.2.1 Γεωμαγνητικές καταιγίδες

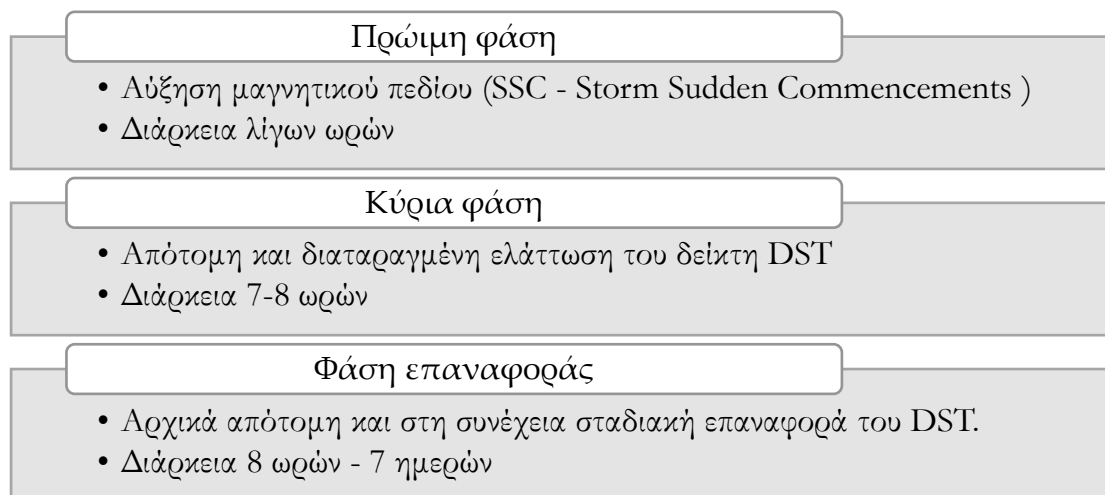
Με τον όρο μαγνητικές καταιγίδες θα αναφερόμαστε στις διαταραχές της μαγνητόσφαιρας¹ από τον Ηλιακό άνεμο εξαιτίας της έντονης Ηλιακής δραστηριότητας.

Για να μελετήσει κανείς τη διαταραχή αυτή, υπάρχουν διάφοροι μαγνητικοί δείκτες που καθορίζουν την ένταση του φαινομένου. Ο πιο γνωστός δείκτης είναι ο DST². Ουσιαστικά μας δίνει μια μέση τιμή της διαταραχής στη μαγνητόσφαιρα των μέσων πλατών και των ισημερινών σταθμών.

Πίνακας 3-1: Βασική κατηγοριοποίηση των μαγνητικών καταιγίδων.

Όνομα	nT	Συχνότητα
Moderate	50 - 150	~1/month
Intense	150-300	Αρκετές φορές το χρόνο
Super Storm	500+	Σπάνια ανά Ηλιακό κύκλο

Η τυπική διάρκεια μιας μαγνητικής καταιγίδας είναι 1-5 μέρες ενώ μια απλοϊκή αναπαράσταση των φάσεων που την απαρτίζουν είναι η εξής:



Ασφαλώς, τόσο για τη μελέτη όσο και για την κατηγοριοποίηση των μαγνητικών διαταραχών έχουμε και άλλες παραμέτρους, όπως τους χαρακτήρες CI , $C9$, τους δείκτες εύρους k , kp , A_k , A_p , τον πολιτικό δείκτη PC και τους δείκτες AE.

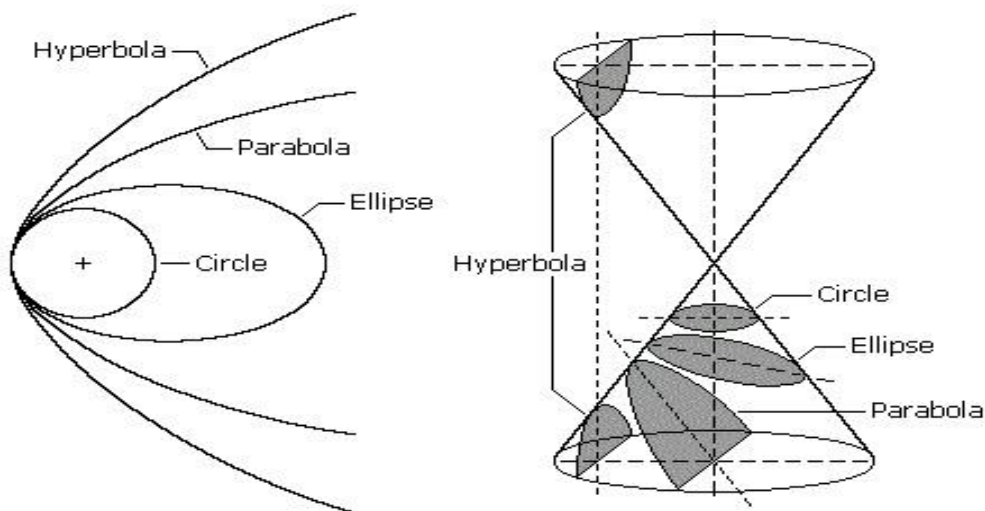
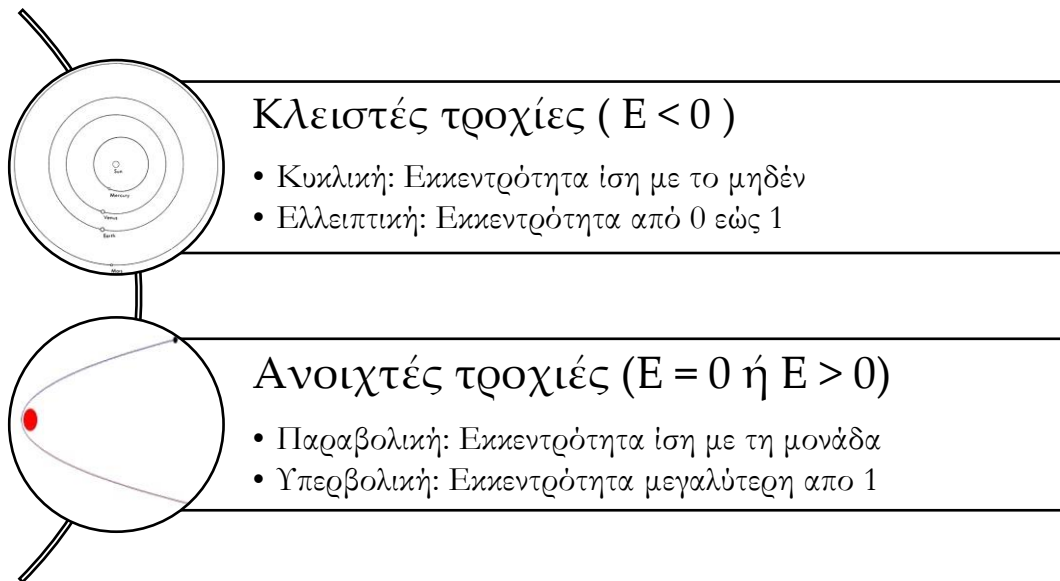
¹ Παράρτημα Β'

² Disturbance Storm Time index, Μέτρηση κάθε ώρα, τυπική μονάδα [nT]

3.3 Τροχιές αποστολών

Ένα σώμα στον διαπλανητικό χώρο μπορεί να ακολουθήσει διάφορες τροχιές. Εάν το σώμα αυτό είναι δέσμιο του βαρυτικού πεδίου θα κάνει κλειστή περιοδική τροχιά (Κυκλική, Ελλειπτική), ενώ αν μπορεί να ξεφύγει από αυτό θα κάνει ανοιχτή τροχιά (Υπερβολική, Παραβολική) και θα διαφύγει από το σώμα που ήταν δέσμιο, με χαρακτηριστική ταχύτητα διαφυγής η οποία εξαρτάται από τη μάζα του πλανήτη και την απόσταση από αυτόν.

Οι τροχιές και τα χαρακτηριστικά της κάθε μιας από αυτές είναι οι εξής:



Εικόνα 3-1: Βασικές πληροφορίες και γεωμετρική ερμηνεία των τροχιών (Κωνικές τομές)

Εμείς θα ασχοληθούμε με τη περίπτωση που έχουμε μια κλειστή τροχιά γύρω από έναν πλανήτη και συγκεκριμένα θα μιλάμε για τη Γη.

Για τις διαστημικές αποστολές καλούμαστε να διαλέξουμε μία κλειστή τροχιά. Κάθε μια από αυτές έχει τα θετικά και τα αρνητικά της και η επιλογή έχει να κάνει με το σκοπό που έχει η κάθε αποστολή.

Γενικά οι τροχιές των δορυφόρων χαρακτηρίζονται από 3 παραμέτρους:

1. Το ύψος που βρίσκονται
2. Την κλίση ως προς το ισημερινό επίπεδο
3. Την εκκεντρότητα

Προφανώς για έναν δορυφόρο θα έχουμε κυκλική τροχιά ή ελλειπτική.

Πίνακας 3-2: Κλειστές τροχιές των δορυφόρων της Γης.

Όνομα(Orbit)	Αρχικά	Ύψος	Παράδειγμα
Low Earth	LEO	160-2000	Globalstar
Medium Earth	MEO	2000-35790	Galileo
Geosynchronous	GSO	35790	SDO
Geostationary	GEO	35790	GOES
High Earth	HEO	>35790	Vela 1A

Η ύπαρξη πολλών κυκλικών τροχιών υπάρχει γιατί μπορούμε να προσδιορίσουμε ακριβώς την τροχιά σε αντίθεση με το παράδειγμα των πλανητών που είναι σε ελλειπτική. Όμως, υπάρχει και μια ελλειπτική τροχιά που επιλέγεται, η HEO (Highly Elliptical Orbit) ή αλλιώς Molniya¹ orbit.

Όνομα(Orbit)	Αρχικά	Ύψος	Παράδειγμα
Highly Elliptical	HEO	>35790	INTEGRAL

3.4 Planck & Herschel

Το βασικό χαρακτηριστικό των αποστολών αυτών είναι ότι βρίσκονταν και οι δύο στο L_2 point (Lagrangian 2) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

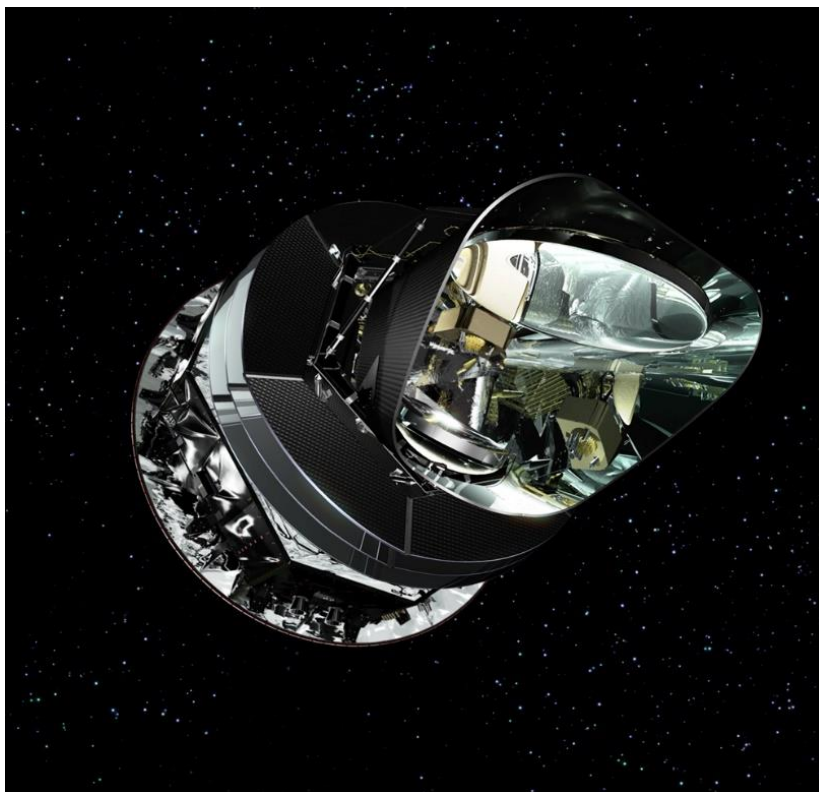
Ξεκίνησαν στις 14 Μαΐου 2009, το Herschel σταμάτησε πρώτο στις 17 Ιουνίου 2013 και ακολούθησε το Planck στις 23 Οκτωβρίου του ίδιου χρόνου.

Οι δύο αυτές αποστολές είχαν ίδιο σημείο εκκίνησης². Μετά από πολύ μικρό χρονικό διάστημα οι δύο αποστολές χωρίστηκαν και ακολούθησαν αυτόνομα την τροχιά που είχαν σχεδιαστεί να κάνουν.

¹ Η ονομασία προέρχεται από τους ρωσικούς δορυφόρους τηλεπικοινωνιών (1960s).

² Guiana Space Center στη περιοχή Guiana.

3.4.1 Planck



Εικόνα 3-2: Καλλιτεχνική απεικόνιση του δορυφόρου Planck

Η αποστολή Planck σχεδιάστηκε με σκοπό να απαντήσει σε κοσμολογικά ερωτήματα. Για να το πετύχει αυτό υπολόγισε την μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου η οποία χρονολογείται μόλις 400.000 χρόνια μετά την μεγάλη έκρηξη, δηλαδή πριν περίπου 13 δισεκατομμύρια χρόνια. Η μεγαλύτερη προσφορά της αποστολής αυτής ήταν η μεγάλης ακρίβειας μέτρηση που έγινε για το προσδιορισμό της σταθεράς Hubble και η μελέτη του αρχικού σύμπαντος και της σκοτεινής ύλης.

Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας του ήταν περίπου 4.5 χρόνια, ενώ η προσφορά του σε δεδομένα για ανάλυση θεωρείται από τις πιο σημαντικές που έχει η σύγχρονη επιστημονική κοινότητα.

Πίνακας 3-3: Βασικά χαρακτηριστικά του Planck

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Όργανα Μετρήσεων	Επιστημονικοί στόχοι	Άλλα στοιχεία
<u>Διαστάσεις:</u> 4.20 × 4.22 m	<u>LFI:</u> Low Frequency Instrument (27 – 77 GHz)	Μελέτη θεμελιωδών χαρακτηριστικών του σύμπαντος	<u>Κόστος:</u> ~ 700 εκατομμύρια ευρώ

<u>Μάζα:</u> $1.95 \cdot 10^3$ kg	<u>HFI:</u> High Frequency Instrument (83 – 1000 GHz)	Μελέτη του Inflation period (Κοσμολογία) Έρευνα για Defects (Cosmic Strings)	<u>Μπαταρίες:</u> Λιθίου φορτίου 39 Ah
<u>Διάρκεια ζωής:</u> ~15 μήνες (Τελικά 30 μήνες).	<u>SREM:</u> Standard radiation Environment Monitor	Η μεταβλητότητα του μικροκυματικού υποβάθρου που καταλήγει σε μεγαλύτερες δομές	<u>Τροχιά:</u> Lissajous orbit σε μέση απόσταση $\sim 4 \cdot 10^5$ kg από το σημείο L_2
<u>Καύσιμο:</u> Υδραζίνη 384kg(N_2H_4), 12 προωθητήρες από 20N ο καθένας. 4 από 1N		Μελέτη της ακτινοβολίας Σύγχροτρον και μετρήσεις μαγνητικών πεδίων	<u>Τηλεπικοινωνία:</u> 3 κεραίες χαμηλής απολαβής 1 μεσαίας απολαβής

3.4.2 Herschel



Εικόνα 3-3: Καλλιτεχνική αναπαράσταση του Herschel

Η αποστολή Herschel αποτελεί το μεγαλύτερο αστρονομικό τηλεσκόπιο, που έχει ποτέ υπάρξει στο διάστημα, με διάμετρο 3.5 μέτρα.

Ο σκοπός της αποστολής είναι η μελέτη της δομής των αστέρων και των γαλαξιών, αλλά και η σχέση των δύο αυτών αστροφυσικών σωμάτων.

Πίνακας 3-4: Βασικά χαρακτηριστικά του Herschel

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Όργανα Μετρήσεων	Επιστημονικοί στόχοι	Άλλα στοιχεία
<u>Διαστάσεις:</u> 7.5 × 4.0 m	<u>HFI:</u> High Resolution Spectrometer	Δομή και εξέλιξη ελλειπτικών γαλαξιών	<u>Κόστος:</u> ~ 1100 εκατομμύρια ευρώ
<u>Μάζα:</u> 3.4 · 10 ³ kg	<u>PACS:</u> Array camera and spectrometer	Φυσικές διεργασίες σε γαλαξίες	<u>Μπαταρίες:</u> Λιθίου φορτίου 39 Ah
<u>Διάρκεια ζωής:</u> ~3.5 χρόνια	<u>SPIRE:</u> Spectral and photometric imaging receiver	Μηχανισμοί παραγωγής ενέργειας σε γαλαξίες	<u>Τροχιά:</u> Lissajous orbit σε μέση απόσταση ~8 · 10 ⁵ kg από το σημείο L ₂
<u>Καύσιμο:</u> Υδροζίνη 384kg(N ₂ H ₄), 12 προωθητήρες 20N ο καθένας.	<u>SREM:</u> Standard radiation Environment Monitor	Φυσικές και χημικές διεργασίες σε αέρια και σκόνη	<u>Τηλεπικοινωνία:</u> 3 κεραιές χαμηλής απολαβής 1 μεσαίας απολαβής
		Παρατήρηση της ατμόσφαιρας των πλανητών και των κομητών	

3.5 INTEGRAL

Το INTEGRAL είναι μια διαστημική αποστολή, που λειτουργεί από το 2002 και έχει κύριο σκοπό την μελέτη των ακτινών γ και των σωματιδίων υψηλής ενέργειας, που υπάρχουν στον διαπλανητικό χώρο. Μετά το Fermi¹ αποτελεί το καλύτερο όργανο όσον αφορά τη διακριτική ικανότητα ακτινών γ, που έχουμε σε διαστημική αποστολή.

Η αποστολή αυτή έγινε από την ESA σε συνεργασία με την NASA και τη Russian Federal Space Agency.

Τα επιτεύγματα στα περίπου 13 χρόνια λειτουργίας του είναι αδιαμφησβήτητα. Κάποια από αυτά είναι η φασματική ανάλυση των πηγών ακτινών γ, η ανίχνευση Gamma-Ray Bursts και η χαρτογράφηση των ακτινών γ στον διαπλανητικό χώρο.

¹ Fermi Gamma-ray Space Telescope (2008)

Πίνακας 3-5: Βασικά χαρακτηριστικά του INTEGRAL

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Όργανα Μετρήσεων	Επιστημονικοί στόχοι	Άλλα στοιχεία
<u>Διαστάσεις:</u> 5 × 3.7 m	<u>SPI:</u> Spectrometer with cooled Ge Detectors	Μελέτη αστέρων (WD, NS, BH etc.) ¹	<u>Solar panels:</u> 16 m ισχύς: 2.4 kW
<u>Μάζα:</u> 4 · 10 ³ kg	<u>IBIS:</u> Imager with two detector layers	Νουκλεοσύνθεση αστέρων	<u>Κόστος:</u> ~ 330 Εκατομμύρια (ESA)
<u>Διάρκεια ζωής:</u> Ενεργή αποστολή. Υπολογίζεται ~16 χρόνια	<u>JEM-X:</u> X-ray monitor	Εξωγαλαξιακή αστρονομία (Galaxies, Clusters, AGN)	<u>Τροχιά:</u> HEO, 72h orbit Perigee: 9000 km Apogee: 153000 km Inclination: 51.6°
<u>Καύσιμο:</u> Υδροζίνη (N ₂ H ₄) 544 kg	<u>OMC:</u> Optical monitor with CCD and lens optics	Αναγνώριση πηγών υψηλής ενέργειας (Gamma-Ray Objects)	
	<u>IREM:</u> INTEGRAL radiation environment monitor	Μελέτη των διαδικασιών του πλάσματος και των μηχανισμών επιτάχυνσης	

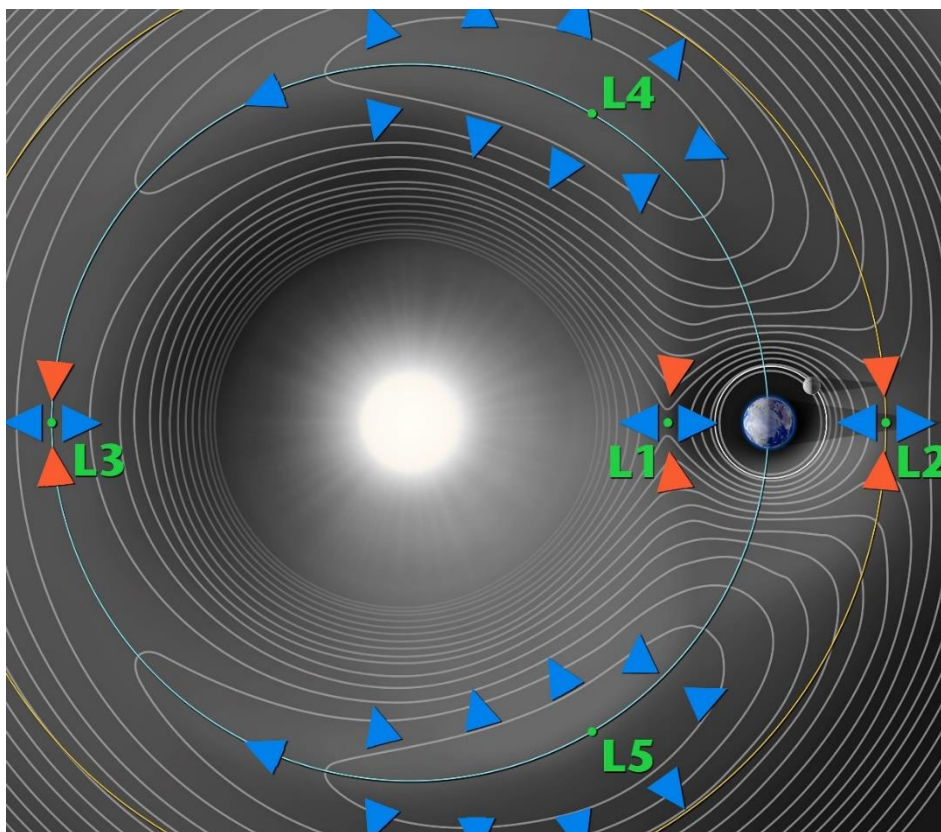
3.6 Lagrangian Points

Στην ουράνια μηχανική τα Lagrangian Points² είναι σημεία τοπικής ευστάθειας σε ένα σύστημα που περιέχει δύο μεγάλα σώματα, των οποίων η βαρυτική έλξη επιτρέπει σε ένα τρίτο μικρότερο αντικείμενο να διατηρήσει μια σταθερή θέση σχετικά με τα δύο μεγάλα αντικείμενα. Τα σημεία αυτά αποτελούν εξαιρετικές τοποθεσίες για διαστημικές αποστολές γιατί λόγω της ευστάθειας δεν χρειάζεται να καταναλωθεί μεγάλη ποσότητα έργου για να διατηρηθεί η αποστολή σε σταθερό σημείο.

Στη περίπτωση του συστήματος Γης-Ήλιου έχουμε 5 σημεία τοπικής ευστάθειας, τα L₁₋₅. Από αυτά τα σημεία έχουμε τα πρώτα 3 να χαρακτηρίζονται ως ασταθή σημεία ισορροπίας, ενώ τα 4,5 ως ευσταθή σημεία ισορροπίας.

¹ WD: White Dwarf, NS: Neutron Star, BH: Black Hole

² Τα σημεία αυτά ονομάστηκαν έτσι προς τιμή του γνωστού μαθηματικού και αστρονόμου Joseph – Louis Lagrange (1772) παρόλο που η ανακάλυψη των τριών πρώτων έγινε από τον Euler (1765).



Εικόνα 3-4: Αναπαράσταση των 5 σημείων Lagrange σε σχέση με Ήλιο-Γη-Φεγγάρι

Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι τα ευσταθή σημεία ισορροπίας είναι καλύτερες τοποθεσίες γιατί δεν χρειάζεται να δαπανήσουμε έργο για να διατηρήσουμε έναν δορυφόρο ή μια διαστημική αποστολή σε τροχιά. Υπάρχει όμως ένα βασικό πρόβλημα, τα ευσταθή σημεία ισορροπίας είναι τόπος που κατοικούν πολλά φυσικά αντικείμενα που βρίσκονται στο διάστημα, όπως σκόνη, κομμάτια αστεροειδών κλπ.



Spacecraft on L1

Spacecraft on L2

Spacecraft on L3

Εικόνα 3-5: Απεικόνιση της θέσης μιας διαστημικής αποστολής στα $L_{1,2,3}$

3.6.1 L_2 Point

Στη περίπτωση μας θα ασχοληθούμε με το σημείο L_2 αφού εκεί βρίσκονται οι αποστολές Herschel και Planck. Θα δούμε κάποιους απλούς τρόπους υπολογισμού της θέσης του και κάποια από τα χαρακτηριστικά που το κάνουν ιδιαίτερο.

3.6.1.1 Ένας εύκολος υπολογισμός και σχόλια

Ο υπολογισμός του L_2 είναι σχετικά απλός.

Έστω M_S η μάζα του ενός σώματος και M_L του άλλου, r η απόσταση του σημείου από τη μάζα M_S που αντικατοπτρίζει το μικρότερο από τα δύο σώματα (τη Γη στη περίπτωση μας) και τέλος R η απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων.

Εφόσον θέλουμε να υπολογίσουμε σημείο ευστάθειας, πρέπει να έχουμε ισορροπία δυνάμεων.

$$\frac{M_L}{(R+r)^2} + \frac{M_S}{r^2} = \frac{M_L}{R^2} + \frac{r(M_L + M_S)}{R^3}$$

Λύνοντας ως προς r για να βρούμε πόσο απέχει από τη Γη το σημείο L_2 έχουμε:

$$\boxed{r \cong 1.5 \cdot 10^6 \text{ km}}$$

Αν και το σημείο L_2 , όπως αναφέραμε ήδη, είναι σημείο ασταθούς ισορροπίας για ένα σώμα, μπορούμε να έχουμε μια περιοδική τροχιά γύρω από αυτό.

Το L_2 αποτελεί ένα εξαιρετικό σημείο για αστρονομική υπέρυθρη παρατήρηση. Μακριά από τη Γη και από τον Ήλιο έχουμε συνεχώς μετρήσεις, χωρίς να χρειάζεται να αποφύγουμε τη σκιά της Γης. Επιπλέον, το L_2 επιτρέπει να γίνει πιο εύκολα, τόσο η βαθμονόμηση όσο και η προστασία που χρειάζεται μία αποστολή.

Το αρνητικό βέβαια είναι ότι έχουμε ακτινοβολία από τον Ήλιο, αφού δεν βρισκόμαστε μέσα στη μαγνητόσφαιρα της Γης. Κάτι βέβαια που είναι αρκετά πιο εύκολο να υπολογιστεί από μια μη περιοδική διακύμανση της μαγνητόσφαιρας, που μπορεί να υπάρχει σε άλλα σημεία στον διαπλανητικό χώρο.

3.6.1.2 Ένας δυσκολότερος υπολογισμός

Θα μπορούσε κανείς να υπολογίσει τη θέση του L_2 με διαφορετικό τρόπο. Όπως και πριν θα πάρουμε ότι στα σημεία Lagrange έχουμε συνολική δύναμη ίση με το μηδέν, ενώ παράλληλα γνωρίζουμε ότι η περίοδος που θα έχει το αντικείμενο στα σημεία αυτά θα είναι ίδια με του πλανήτη. Επιπλέον, για λόγους πληρότητας αλλάζουμε τον συμβολισμό με τον εναλλακτικό, που χρησιμοποιείται συχνά στην ουράνια μηχανική και στην αστρονομία¹. Πρακτικά προκύπτουν δύο απλές εξισώσεις:

$$\frac{\mu_{\odot}}{R_{\odot}^2} + \frac{\mu_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = \omega_{\oplus}^2 R_{\odot} \quad (1)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r_{\oplus}^3}{\mu_{\odot}}} \Rightarrow \omega_{\oplus}^2 = \frac{\mu_{\odot}}{r_{\oplus}^3} \quad (2)$$

¹ $\odot = \text{Ήλιος}$, $\oplus = \text{Γη}$

Από τις (1), (2) αντικαθιστώντας την γωνιακή ταχύτητα (2) στη σχέση (1) που είναι ο νόμος του Νεύτωνα, μπορούμε να πάρουμε την ακόλουθη σχέση αφού πολλαπλασιάσουμε με R_{\odot}^2/μ_{\odot} :

$$1 + \frac{\mu_{\oplus}}{\mu_{\odot}} \left(\frac{R_{\odot}}{R_{\oplus}}\right)^2 = \left(\frac{R_{\odot}}{r_{\oplus}}\right)^3 \Rightarrow \left[1 + \frac{\mu_{\oplus}}{\mu_{\odot}} \left(\frac{R_{\odot}}{R_{\oplus}}\right)^2\right]^{1/3} = \left(\frac{R_{\odot}}{r_{\oplus}}\right)$$

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε το γεγονός ότι $\frac{\mu_{\oplus}}{\mu_{\odot}} \ll 1$ ώστε να κάνουμε ανάπτυγμα Taylor και να αντικαταστήσουμε τη σχέση $R_{\odot} = R_{\oplus} + r_{\oplus}$. Καταλήγουμε:

$$\frac{R_{\odot}}{r_{\oplus}} \approx 1 + \frac{\mu_{\oplus}}{3\mu_{\odot}} \left(\frac{R_{\odot}}{R_{\oplus}}\right)^2 = 1 + \frac{\mu_{\oplus}}{3\mu_{\odot}} \left(1 + \frac{r_{\oplus}}{R_{\oplus}}\right)^2 \approx 1 + \frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}}$$

Από εδώ αφαιρώντας με τη μονάδα και πολλαπλασιάζοντας με $\left(\frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}}\right)^2$ έχουμε:

$$\left(\frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}}\right)^3 = \frac{\mu_{\oplus}}{3\mu_{\odot}} \left(1 + \frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}}\right)^2 \Rightarrow \frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}} = \left[\frac{\mu_{\oplus}}{3\mu_{\odot}} \left(1 + \frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}}\right)^2\right]^{1/3} \approx \left(\frac{\mu_{\oplus}}{3\mu_{\odot}}\right)^{1/3}$$

Συνεπώς με καλή ακρίβεια:

$$\left(\frac{R_{\oplus}}{r_{\oplus}}\right)^3 \approx \left(\frac{\mu_{\oplus}}{3\mu_{\odot}}\right)^{1/3}$$

Το οποίο δίνει το ακόλουθο αριθμητικό αποτέλεσμα:

$$R_{\oplus} = r_{\oplus} \left(\frac{6 \cdot 10^{24}}{3 \cdot 2 \cdot 10^{30}}\right)^{1/3} = 0.01 \text{ AU} \cong 1.5 \cdot 10^6 \text{ km}$$

3.7 Επιδράσεις στα διαστημικά συστήματα

Ένας σημαντικός λόγος που χρειάζεται να γνωρίζουμε τι συμβαίνει στον διαστημικό χώρο είναι το γεγονός ότι το διάστημα είναι γεμάτο από πλάσμα, ηλεκτρομαγνητικά πεδία και σωματίδια υψηλής ενέργειας, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα σε μια διαστημική αποστολή.

Για τα σωματίδια υψηλής ενέργειας, που μπορούν να έχουν επιβλαβείς συνέπειες έχουμε τρεις βασικές πηγές:

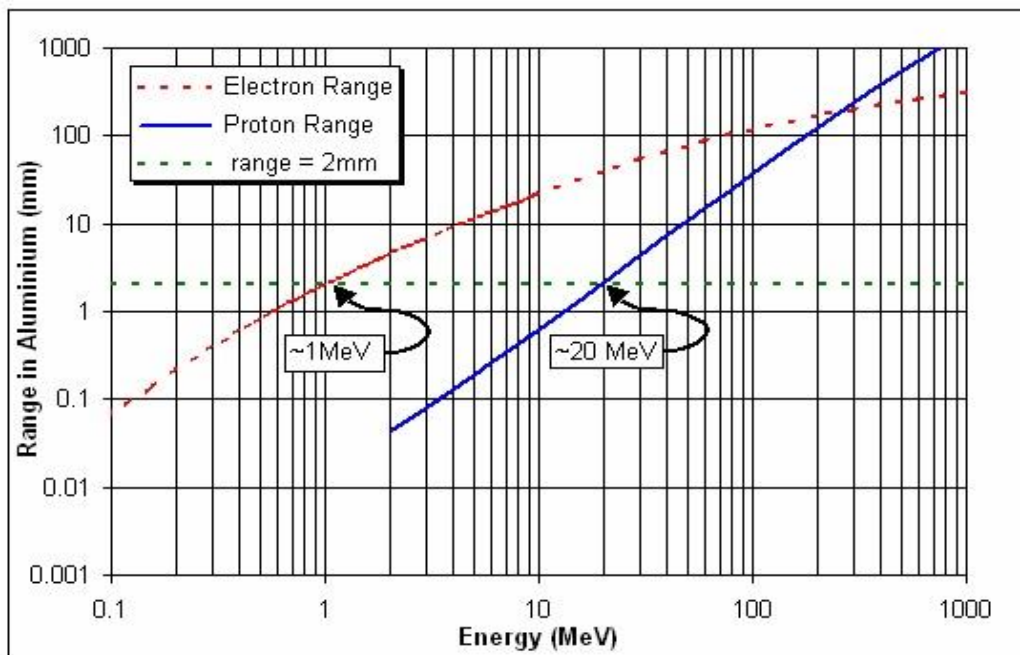
1. Υψηλής ενέργειας¹ Ηλεκτρόνια, Πρωτόνια και Ιόντα, που έχουν παγιδευτεί από τη μαγνητόσφαιρα της Γης ή και άλλων πλανητών.
2. Υψηλής ενέργειας Πρωτόνια και Ιόντα από τον Ήλιο (SEP²)

¹ Με τον όρο Υψηλής ενέργειας σωματίδια στα πλαίσια των επιπτώσεων στα διαστημικά συστήματα, αναφερόμαστε συνήθως σε ενέργειες μεγαλύτερες από [0.1 – 1] MeV

² SEP: Solar Energetic Particle. Συνήθως αναφερόμαστε σε αυτό τον όρο ακόμα και αν μιλάμε μόνο για πρωτόνια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο όρος SPE (Solar Proton Event)

3. Κοσμική ακτινοβολία, που προέρχεται έξω από το Ηλιακό μας σύστημα

Στην εικόνα 3-6 φαίνεται πόσο μπορούν τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια να περάσουν ένα τοίχωμα αλουμινίου ανάλογα με την ενέργειά τους. Μια τυπική τιμή για το πάχος του τοιχώματος για μια διαστημική αποστολή είναι: $\sim 1 - 5 \text{ mm}$. Παρατηρούμε ότι για να μπορούν τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια να περάσουν ένα τέτοιο στρώμα, θα πρέπει να έχουν ενέργειες $E_{e^-} \geq 500 \text{ KeV}$ και $E_{p^+} \geq 5 \text{ MeV}$ αντίστοιχα.

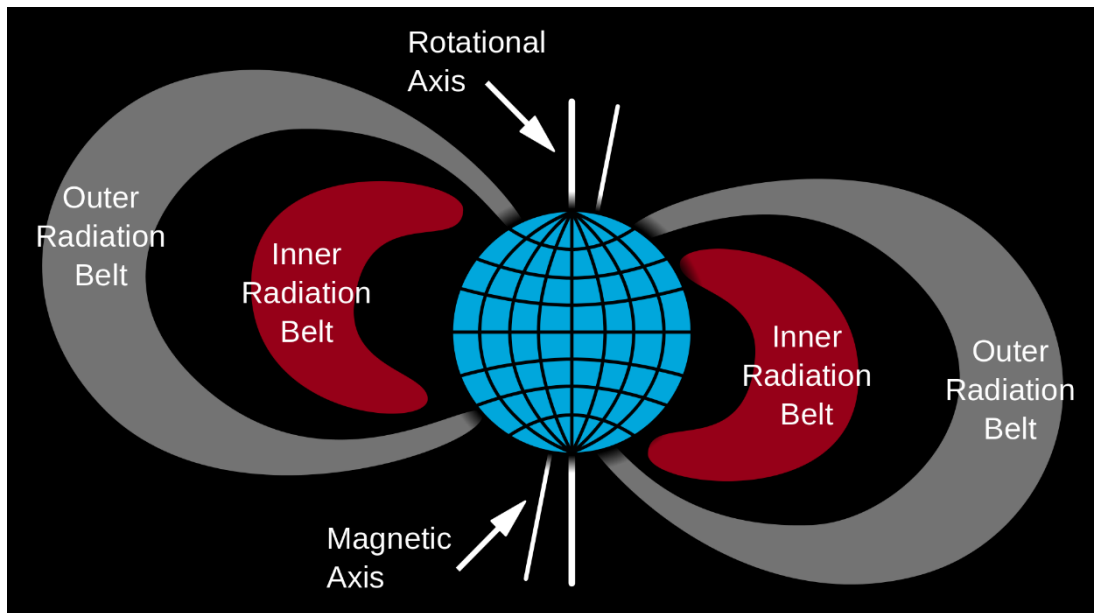


Εικόνα 3-6: Μέγιστη διέλευση πρωτονίων και ηλεκτρονίων σε τοίχωμα αλουμινίου ανάλογα με την ενέργεια (λογαριθμική κλίμακα).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι αποστολές, είναι όταν περνάνε από τις Radiation Belt (Ζώνες Van Allen). Οι ζώνες Van Allen¹ είναι ζώνες, στις οποίες υπάρχουν παγιδευμένα σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας. Συνεπώς μια διαστημική αποστολή που περνάει μέσα από αυτές τις ζώνες, πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα.

Ένα βασικό πρόβλημα, που αντιμετωπίζει ο εξοπλισμός μιας αποστολής, είναι τα “Single Event Effects” (SEE). Αιτία των SEE είναι συνήθως υψηλής ενέργειας πρωτόνια ή κοσμικές ακτίνες.

¹ Ονομάστηκαν προς τιμήν του James Van Allen (1914- 2006) που τις ανακάλυψε πρώτος



Εικόνα 3-7: Αναπαράσταση των ζωνών ακτινοβολίας

Τα SEE χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τις επιπτώσεις που έχουν.

Single Event Upsets (SEUs)	Single Event Latchup (SEL)
<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργούνται από ένα ιονισμένο σωματίο (ιόν, πρωτόνιο, ηλεκτρόνιο κλπ) • Δεν υπάρχουν μόνιμες καταστροφές στον εξοπλισμό • Εμφανίζονται περιοδικά σε κυκλώματα υποστήριξης ή ως bitflip στη μνήμη στο Register • Το αποτέλεσμα του φαινομένου ονομάζεται "Soft Error" 	<ul style="list-style-type: none"> • Είναι αποτέλεσμα των SEUs • Μπορούν να έχουν μόνιμες καταστροφές • Ουσιαστικά είναι βραχυκύκλωμα, υψηλότερη ένταση ρεύματος από αυτή για την οποία σχεδιάστηκε η συσκευή • Η συσκευή χρειάζεται επανεκκίνηση για να λειτουργήσει • Το αποτέλεσμα του φαινομένου ονομάζεται "Hard Error"

Παραδείγματα των Hard Errors είναι να καεί ένα τρανζίστορ MOSFET¹, ο θόρυβος στη CCD κάμερα, frozen bits κλπ.

Ασφαλώς υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον εξοπλισμό. Συγκεκριμένα: Πλάσμα, Ηλιακός άνεμος, Φωτόνια, μικροκύματα, μαγνητικά πεδία κλπ. Για να μην αναλύσουμε το κάθε ένα ξεχωριστά, έχουμε τον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα, με το ενεργειακό εύρος του καθενός αλλά και τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να έχει.

¹ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: κατηγορία των τρανζίστορ πεδίου

Πίνακας 3-6: Βασικοί παράγοντες και αποτελέσματα στον εξοπλισμό αποστολών

Παράγοντας	Κύριο αποτέλεσμα στον εξοπλισμό
Κοσμικές ακτίνες (~100 MeV μέχρι ~ 1 GeV)	Ιοντίζουσα και μη-ιοντίζουσα ακτινοβολία (Αποδόμηση υλικού, εξοπλισμού, βλάβες κυτταρικών δομών)
Υψηλής ενέργειας ηλιακά σωματάρια (~100 KeV to ~300 MeV)	Single Event Effects
Σωματάρια σε ζώνες Van Allen (e^- ~100 KeV to ~10 MeV) (p^+ ~1 MeV to ~1 GeV)	Ιοντίζουσα και μη-ιοντίζουσα ακτινοβολία Single Event Effects Deep Dielectric Charging
Ιονοσφαιρικό πλάσμα (~0.1 eV)	Ροή Σωματιδίων Θόρυβος από ηλεκτρικό ρεύμα
Πλασμόσφαιρα (~ 1 eV)	Διασκορπισμός/Τρεμόπαιγμα μετρήσεων (Erosion)
Ηλιακός άνεμος (e^- : ~ 1 eV, p^+ : ~ 0.1 to 1 KeV)	Μικρό ηλεκτροστατικό δυναμικό
Πλάσμα από Σέλας (~100 to 10 KeV)	Ροή Σωματιδίων Θόρυβος από ηλεκτρικό ρεύμα
Πλασμοφλοιός (~ 1 to 10 KeV)	Διασκορπισμός/Τρεμόπαιγμα μετρήσεων (Erosion) Μεγάλο Ηλεκτροστατικό δυναμικό
Φωτόνια (ορατό – Υπέρυθρο)	Θέρμανση
Φωτόνια (Υπεριώδες , X, γ)	Ιοντίζουσες επιπτώσεις
Ραδιοκύματα	Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος
Γεωμαγνητικό πεδίο	Μαγνητική ροπή και επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο στους αγωγούς
Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο	Μαγνητική ροπή και επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο στους αγωγούς

Η προστασία του εξοπλισμού είναι απαραίτητη διαδικασία, που γίνεται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μιας αποστολής. Πολλές φορές στο παρελθόν έχουν χαθεί χρήσιμα δεδομένα από αποστολές, διότι καταστράφηκαν λόγω κακού σχεδιασμού.

Το βασικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει κανείς στη στατιστική μελέτη και κατ'επέκταση στην πρόβλεψη πιθανών καταστροφών, είναι ότι ο υπολογισμός των συχνοτήτων που συμβαίνει σε κάθε φαινόμενο, είναι από δύσκολος μέχρι και αδύνατος. Τόσο η περιοδικότητα των φαινομένων όσο και η διάρκεια ποικίλει.

Πίνακας 3-7: Βασικά χαρακτηριστικά των παραγόντων

Παράγοντας	Λόγοι μεταβολής	Συχνότητα	Διάρκεια
Κοσμικές ακτίνες	Διασπορά λόγω Ηλιακού ανέμου	Σποραδική με 11-ετή διαμόρφωση	Μερικές ώρες ενώ η διαμόρφωση 11 χρόνια
Ηλιακά πρωτόνια	Από Εκλάμψεις	-	Ώρα
	Από CME's	~6/έτος	Μέρα
Διαμόρφωση Μαγνητικών Ζωνών	Άμεση έγχυση(inner belt)	~2/Ηλιακό κύκλο	Ώρα
	Λόγω καταιγίδων (Outer belt)	~1-7/μήνα	Ώρα
	Σφαιρική απορρόφηση θερμότητας	~6/Μέρα	Ώρα
Ηλιακός Άνεμος	Ηλιακή περιστροφή	27-ήμερη διαμόρφωση	-
	Δυναμική στεμματικής οπής	Ανάλογα τον Ηλιακό κύκλο	Μήνας/Χρόνος

Για μια διαστημική αποστολή και αναλόγως την τροχιά, την κατασκευή και τη σκοπιμότητα, χρειάζονται κάποια από τα εξής:

- Εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων για το περιβάλλον που θα βρίσκεται η αποστολή από μια καλή στατιστική βάση
- Μακροπρόθεσμη πρόβλεψη για το σχεδιασμό του σκάφους
- Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη για το σχεδιασμό της αποστολής
- Αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο της ακρίβειας του σχεδιασμού για να υπολογιστεί αν χρειάζεται αλλαγή κατά τη διάρκεια της αποστολής
- Ο εκ των υστέρων προσδιορισμός της κατάστασης που βρίσκεται η αποστολή αναλύοντας κάθε δεδομένο που υπάρχει, από ανωμαλία του διαστημικού σκάφους μέχρι τη λήψη επιστημονικής μέτρησης

Η επίτευξη των τελευταίων τριών στόχων θεωρείται πολύ δύσκολη. Ο λόγος είναι ότι η διάρκεια αρκετών φαινομένων, είναι τόσο μικρή και η συχνότητά τους τόσο απρόβλεπτη, που δεν γίνεται κανείς να υπολογίσει με ακρίβεια, εκτός και αν έχει σε πραγματικό χρόνο μετρήσεις του περιβάλλοντα χώρου.

3.8 Επιπτώσεις στη βιολογική ύλη

Έχοντας αναφέρει ήδη τις επιπτώσεις, που έχουν οι διαστημικές αποστολές στον εξοπλισμό από τα υψηλής ενέργειας σωματίδια, δεν έχουμε παρά να πούμε τι συμβαίνει με

τους ανθρώπους, όταν έρχονται σε επαφή με τους κινδύνους του διαστήματος. Οι κίνδυνοι αυτοί αναφέρονται, τόσο σε επανδρωμένες διαστημικές αποστολές όσο και σε μετακινήσεις αεροπλάνων, που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο.

Ως μονάδα μέτρησης για την ακτινοβολία στην ύλη χρησιμοποιούνται τα Gray (Gy¹), που είναι ενέργεια ανά μάζα. Λιόμα χρησιμοποιούνται τα Sieverts (Sv²) ή τα REMs ως μονάδα μέτρησης που λαμβάνει υπόψη τη διαφορετική επίδραση, που έχει κάθε ακτινοβολία στον ανθρώπινο ιστό, δηλαδή την «ενεργό δόση» όπως συχνά αναφέρεται.

Όλες οι πηγές ακτινοβολίας, που αναφέραμε προηγουμένως είναι επιβλαβείς για τους ανθρώπους. Ένα απλό παράδειγμα για να σκεφτεί κανείς πόση ακτινοβολία δέχεται ένας αστροναύτης είναι το εξής:

Σε μια Low-Earth τροχιά κάποιος θα δεχόταν περίπου 0.1 rem/day. Αυτό μεταφράζεται σαν το 1/4 της προτεινόμενης μέγιστης ετήσιας δόσης ή σαν δέκα ακτινογραφίες θώρακος κάθε μέρα!

Πίνακας 3-8: Αποτελέσματα σε ανθρώπους ανάλογα την δόση ραδιενέργειας που δέχονται.

Δόση(Sv)	Πιθανά συμπτώματα
0 - 0.5	Δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα συμπτώματα.
0.5 - 1	Ελαφρές αλλαγές στο αίμα.
1 - 2	Εμετός μέσα σε λίγες ώρες, κόπωση, απώλεια όρεξης. Η ανάρρωση από τα συμπτώματα επέρχεται σε μερικές εβδομάδες.
2 - 6	Σοβαρές μεταβολές στο αίμα, αιμορραγία και απώλεια μαλλιών. Η ανάρρωση από τα συμπτώματα έρχεται μέχρι και διάστημα ενός χρόνου. Στις περιπτώσεις κοντά στο όριο (6 Sv) επιβιώνει περίπου το 20%.
6 - 10	Εμετός, αιμορραγίες, μολύνσεις, απώλεια μαλλιών. Θάνατος επέρχεται στο 80-100% των περιπτώσεων μέσα σε 2 μήνες. Στις σπάνιες περιπτώσεις ανάρρωσης αυτή έρχεται μετά από αρκετά χρόνια.

3.8.1 Ιονισμός από ακτινοβολία

Κάθε μορφή ακτινοβολίας μπορεί να είναι επιβλαβής για τον άνθρωπο. Όμως στα πλαίσια της προστασίας των ανθρώπων έχουμε κατηγοριοποιήσει την ακτινοβολία σε αυτή, που μπορεί να προκαλέσει ιονισμούς και σε αυτή η οποία δεν είναι ικανή. Ο λόγος του διαχωρισμού είναι για να έχουμε καλύτερη γνώση της ποσότητας, που μπορεί να δεχτεί σχεδόν άφοβα ένας άνθρωπος και ποια μορφή ακτινοβολίας είναι αξιoσημείωτα επικίνδυνη.

Η ιονιζουσα ακτινοβολία είναι αυτή που έχει ικανή ενέργεια να προκαλέσει ιονισμό. Να δημιουργήσει δηλαδή ιόντα μέσω της «αφαίρεσης» ηλεκτρονίων από τα άτομα της ύλης. Θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη για τους βιολογικούς ιστούς, καθώς μπορεί να

¹ Gray, Louis Harold (1905–1965), Άγγλος φυσικός. $[Gy] = \left[\frac{Joule}{kg} \right]$

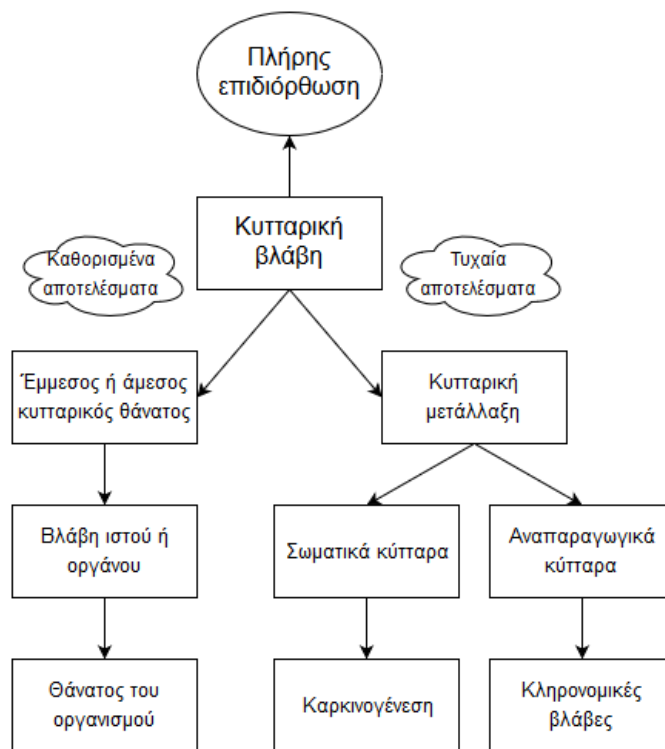
² Rolf Maximilian Sievert (1896 – 1966), Σουηδός φυσικός. $[Sv] = \left[\frac{Joule}{kg} \right] = 100 rem$

προκαλέσει μεταλλάξεις και καρκινογενέσεις, που είναι θανατηφόρα φαινόμενα για τον άνθρωπο.

Από τις μορφές ακτινοβολίας, θεωρούμε ότι ιονισμούς μπορούν να προκαλέσουν:

- Υπεριώδης
- Ακτίνες x, γ
- Ακτινοβολία άλφα, βήτα
- Ακτινοβολία νετρονίων υψηλής ενέργειας

Υπάρχουν επιδράσεις που μπορούν να σκοτώσουν ένα κύτταρο, με αποτέλεσμα οι συνέπειες να είναι πλήρως καθορισμένες. Υπάρχει ένα κατώφλι ενεργούς δόσης πάνω από το οποίο η κυτταρική βλάβη είναι μόνιμη και η επιδιόρθωση είναι πλήρως ατελής. Για μερική επιδιόρθωση έχουμε στοχαστικές (πιθανοκρατικές) επιδράσεις, όπου η πιθανότητα βλάβης έχει γραμμική σχέση με τη δόση που δέχεται κάποιος.

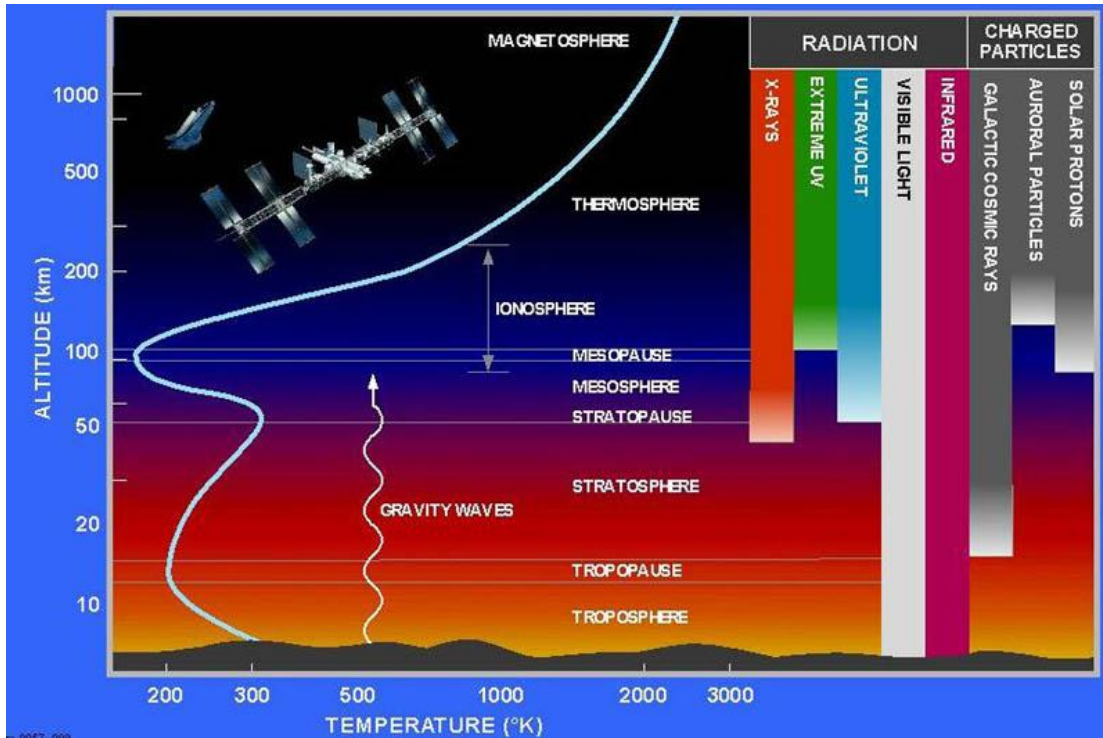


Εικόνα 3-8: Διάγραμμα εξέλιξης κυτταρικής βλάβης από τον οργανισμό

3.8.2 Ακτινοβολία και ακτινοπροστασία στο διάστημα

Στο διαπλανητικό χώρο υπάρχει πληθώρα από πηγές υψηλής ενεργειακά ακτινοβολίας. Μπορούμε διαισθητικά να φανταστούμε ότι δίχως την ατμόσφαιρα της γης, ο άνθρωπος θα αντιμετώπιζε μεγάλο πρόβλημα να προστατευτεί από τις προαναφερθείσες επιδράσεις.

Πριν εξετάσουμε το διάστημα, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ακόμα και τα αεροσκάφη έχουν πρόβλημα με την υψηλή δόση, που δέχονται οι επιβάτες και το προσωπικό. Μέχρι και ένας άνθρωπος που μένει στο Θιβέτ, δέχεται περίπου μια τάξη μεγέθους παραπάνω δόση ακτινοβολίας από κάποιον που είναι κοντά στο επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 3-9: Διάγραμμα με την διαπερατότητα της κάθε μορφής ακτινοβολίας ανάλογα το ύψος.

Όσο πάμε προς τα έξω στο διάστημα τα πράγματα γίνονται όλο και πιο επικίνδυνα. Υπάρχουν τρόποι να προστατεύσει κανείς μια επανδρωμένη αποστολή αν και μια μακροχρόνια παραμονή έξω από την ιονόσφαιρα, είναι σίγουρο ότι θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα στην υγεία ενός ανθρώπου, ακόμα και με την καλύτερη δυνατή ακτινοπροστασία που υπάρχει.

3.8.2.1 Ακτινοπροστασία σκάφους

Ας δούμε ένα παράδειγμα ενός σκάφους που βρίσκεται σε Low Earth Orbit (LEO). Θα υποθέσουμε ότι αρχικά η κύρια πηγή ακτινοβολίας, που έρχεται στο διαστημόπλοιο είναι από τον Ήλιο και θα βάλουμε μια τυπική τιμή της ηλιακής σταθεράς 1.368 W/m^2 . Παράλληλα είναι καλό να αναφέρουμε ότι η ανακλώμενη από την Γη ακτινοβολία του Ήλιου (~30%) γυρνάει πίσω στο διαστημόπλοιο, ενώ έχουμε και εκπεμπόμενη από τη Γη υπεριώδης ακτινοβολία ($237 \pm 21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$).

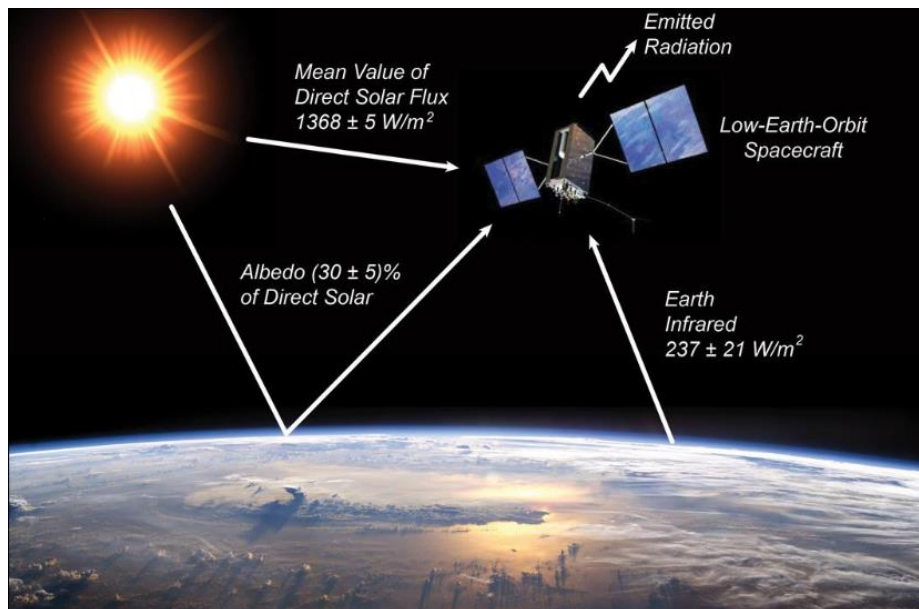
Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική ισχύς που απορροφάται από το διαστημόπλοιο θα πρέπει να ισούται με τη συνολική ισχύ που εκπέμπεται.

$$P_a = P_e \quad (1)$$

Μπορούμε προσεγγιστικά να χρησιμοποιήσουμε τον νόμο των Stefan-Boltzmann και να πούμε ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι:

$$P_e = \sigma T^4$$

Όπου σ είναι η σταθερά του Boltzmann¹ και T η θερμοκρασία σε Kelvin.



Εικόνα 3-10: Αναπαράσταση της ακτινοβολίας που δέχεται ένα σκάφος σε LEO

Ας πούμε για παράδειγμα ότι έχουμε μόνο την ακτινοβολία του Ήλιου, που άλλωστε είναι και ο κυρίαρχος παράγοντας. Οι δύο ακτινοβολίες που μελετάμε, η απορροφούμενη και η εκπεμπόμενη εκφράζονται ως εξής:

$$\begin{cases} P_a = a \cdot S \cdot A_n \\ P_e = \varepsilon \cdot \sigma T^4 \cdot A_{tot} \end{cases}$$

Με τα ακόλουθα μεγέθη:

a : Σταθερά απορρόφησης της Ηλιακής ακτινοβολίας

ε : Σταθερά υπέρυθρης εκπομπής

S : Ηλιακή σταθερά

A : Επιφάνεια με συνιστώσες n : κάθετη προς τον Ήλιο & tot : ολική

Προφανώς στην περίπτωση του μελανού σώματος θα έχουμε συντελεστές:

$$\varepsilon = a = 1$$

Από την (1) μπορούμε εύκολα να λύσουμε ως προς T και να βρούμε τη σχέση:

¹ Ludwig Eduard Boltzmann (1844 - 1906), $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$T = \left(\frac{a \cdot S \cdot A_n}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{tot}} \right)^{1/4} = \left(\frac{a}{\varepsilon} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{S \cdot A_n}{\sigma \cdot A_{tot}} \right)^{1/4}$$

Αυτή η προσέγγιση δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε διαστημόπλοια όπως το SOHO, για τον απλούστατο λόγο ότι υπάρχει πάντα ένα μέρος του διαστημοπλοίου να κοιτάει το Ήλιο, ενώ το υπόλοιπο είναι διαρκώς στη σιά. Οπότε θα λέγαμε ότι η θερμοκρασία T του διαστημόπλοιού είναι μια μέση θερμοκρασία για κάποιο «περιστρεφόμενο» διαστημόπλοιο ή καλύτερα για κάποιο σκάφος, που η θερμοκρασία κατανέμεται σε όλη την επιφάνεια ομοιόμορφα.

Πρακτικά το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε είναι να επιλέξουμε σωστά το υλικό, που έχει κατάλληλο λόγο a/ε για τη κατασκευή του διαστημοπλοίου.

Material	Measurement Temperature (K)	Surface Condition	Solar Absorption α	Infrared Emissivity ε	Absorptivity/Emissivity ratio	Equilibrium Temperature (°C)
Aluminium (6061-T6)	294	As Received	0.379	0.0346	10.95	450
Aluminium (6061-T6)	422	As Received	0.379	0.0393	9.64	428
Aluminium (6061-T6)	294	Polished	0.2	0.031	6.45	361
Aluminium (6061-T6)	422	Polished	0.2	0.034	5.88	346
Gold	294	As Rolled	0.299	0.023	13.00	482
Steel (AM 350)	294	As Received	0.567	0.267	2.12	207
Steel (AM 350)	422	As Received	0.567	0.317	1.79	187
Steel (AM 350)	611	As Received	0.567	0.353	1.61	175
Steel (AM 350)	811	As Received	0.567	0.375	1.51	168
Steel (AM 350)	294	Polished	0.357	0.095	3.76	281
Steel (AM 350)	422	Polished	0.357	0.111	3.22	259
Steel (AM 350)	611	Polished	0.357	0.135	2.64	234
Steel (AM 350)	811	Polished	0.357	0.155	2.30	217
Titanium (6AL-4V)	294	As Received	0.766	0.472	1.62	176
Titanium (6AL-4V)	422	As Received	0.766	0.513	1.49	166
Titanium (6AL-4V)	294	Polished	0.448	0.129	3.47	270
Titanium (6AL-4V)	422	Polished	0.448	0.148	3.03	251
White Enamel	294	Al. Substrate	0.252	0.853	0.30	20
White Epoxy	294	Al. Substrate	0.248	0.924	0.27	13
White Epoxy	422	Al. Substrate	0.248	0.888	0.28	16

Εικόνα 3-11: Βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή ενός διαστημοπλοίου

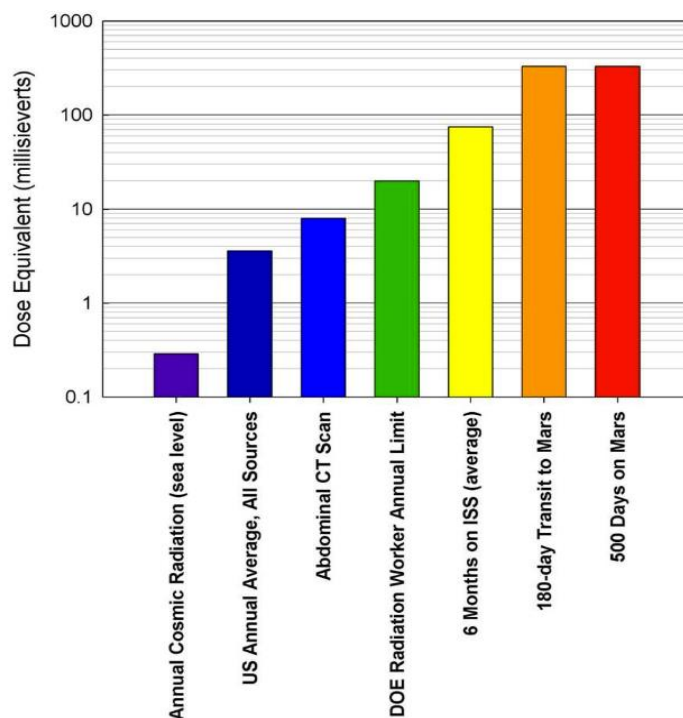
Παρατηρούμε για παράδειγμα ότι ο χρυσός (Gold) έχει μια ικανοποιητική μέση τιμή για τον παράγοντα a , ενώ έχει πολύ μικρή εκπομπή στο υπέρυθρο. Συνεπώς, ο λόγος των δύο είναι αρκετά μεγάλος, άρα και η θερμοκρασία ισορροπίας είναι πολύ υψηλή. Από την άλλη έχουμε White Epoxy με πολύ μεγάλο συντελεστή εκπομπής, που θα δώσει πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Έτσι, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει κάποιο από τα παραπάνω υλικά, για να πετύχει τη θερμοκρασία που θέλει στις κατάλληλες επιφάνειες του διαστημοπλοίου, αναλόγως φυσικά το επιθυμητό αποτέλεσμα.

3.8.2.2 Ακτινοπροστασία αστροναύτη

Ένας γενικός κανόνας που υπάρχει είναι ότι όσο ένας αστροναύτης μένει κάτω από τα 100 REM (1 Sv), είναι κάτω από το ενεργό όριο που έχουμε αξιοσημείωτα συμπτώματα. Τα σοβαρά προβλήματα εμφανίζονται από τα 500 REM και πάνω. Αν βρίσκεται

κανείς μέσα στα όρια της μαγνητόσφαιρας, τότε προστατεύεται αρκετά καλά. Συγκεκριμένα σε LEO (όπως για παράδειγμα στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό) η ακτινοβολία που έρχεται από τον Ήλιο και από ενεργές πηγές του γαλαξία είναι περίπου 100 mSv για συνολική παραμονή 6 μηνών.



Εικόνα 3-12: Δόση σε mSv σε διάφορες περιπτώσεις.

Για παράδειγμα (Εικόνα 3-12), η παραμονή στον Άρη και το ταξίδι σε αυτόν είναι αρκετά επικίνδυνο, οπότε χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή τόσο στη διαδρομή όσο και σε μια πιθανή αποβίβαση.

Ακόμα δεν έχουμε βρει τρόπο να προστατεύσουμε τους αστροναύτες από την ακτινοβολία που δέχονται στο διάστημα. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες για την ειδική κατασκευή στολών και μικρών σκαφών, που έχουν προβλήματα τόσο στην κατασκευή όσο δυστυχώς και στη χρηματοδότηση.

Η μελέτη γίνεται τόσο στο τομέα ανάπτυξης υλικών όσο και στη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ικανών να προστατεύσουν από ένα μέρος της ακτινοβολίας τον αστροναύτη.

Οι μέρες ασφαλούς παραμονής¹ ενός αστροναύτη στο μακρινό διαστημικό χώρο είναι περιορισμένες, ακόμα και αν βρίσκεται κάτω από τη βέλτιστη δυνατή προστασία.

¹ Ασφαλείς μέρες θεωρούνται το μέγιστο των ημερών που παραμένει ένας άνθρωπος κάτω από το όριο 3% REID που έχει ορίσει η NASA. Το μέγεθος αυτό αντιπροσωπεύει τη πιθανότητα να έχει κανείς θανατηφόρα ασθένεια από ακτινοβολία στο διαστημικό χώρο.

Πίνακας 3-9: Μέρες ασφαλούς παραμονής στο διάστημα για κάθε φύλο και σε διάφορες ηλικιακές ομάδες

Age, yrs.	Females		Males	
	Estimated in 2001	Estimated in 2016	Estimated in 2001	Estimated in 2016
30	54	112	91	142
35	62	132	104	166
40	73	150	122	186
45	89	182	148	224
50	15	224	191	273

Πιο σύγχρονες έρευνες έχουν δοκιμάσει αρκετές παραμέτρους όπως φύλλο, ηλικία, κάπνισμα, Ηλιακή δραστηριότητα κλπ., ώστε να βρεθούν πιθανοί συνδυασμοί που θα επιτρέψουν στον άνθρωπο να αντέξει τις συνθήκες του διαστημικού χώρου και να υπάρξουν επανδρωμένες αποστολές, που θα οδηγήσουν στην περαιτέρω εξερεύνηση και ανάλυση άλλων πλανητών.

Πίνακας 3-10: Μέρες ασφαλούς παραμονής αν λάβουμε υπόψη διαφορετικές πιθανές παθήσεις. Οι τιμές στη παρένθεση αναφέρονται στο Deep Solar Minimum (2009).

	Age, yrs.	Cancer risk		Cancer & Circulatory Disease Risk	
		US Avg. Population	Never-Smoker	US Avg. Population	Never - Smoker
Male	35	209 (205)	271 (256)	173 (163)	208 (193)
	45	232 (227)	308 (291)	187 (173)	222 (214)
	55	274 (256)	351 (335)	206 (194)	256 (235)
Female	35	106 (95)	187 (180)	115 (107)	159 (149)
	45	139 (125)	227 (212)	123 (118)	183 (171)
	55	161 (159)	277 (246)	142 (129)	201 (191)

3.9 SREM (Standard Radiation Environment Monitor)

Η ESA σε αρκετές αποστολές της, μαζί με τον κύριο εξοπλισμό της εκάστοτε αποστολής, ενσωματώνει και ένα μικρό ανιχνευτή για την καταμέτρηση των σωματιδίων, με σκοπό οι μετρήσεις του να χρησιμοποιηθούν για διαστημικές έρευνες και εφαρμογές.

Το SREM είναι ένας ανιχνευτής που χρησιμοποιείται για εφαρμογές διαστημικού καιρού και άλλες επιστημονικές έρευνες. Είναι σε θέση να ανιχνεύσει πρωτόνια και ηλεκτρόνια υψηλών ενεργειών και να αποθηκεύσει τις μετρήσεις σε 15 διαφορετικά ενεργειακά κανάλια. Ο σχεδιασμός του έγινε για να ανιχνεύει ηλεκτρόνια και πρωτόνια με ενέργειες: $E_e > 500 \text{ keV}$ και $E_p > 10 \text{ MeV}$



Εικόνα 3-13: Ο ανιχνευτής SREM

Ο στόχος που είχε το πρόγραμμα SREM είναι:

- Δημιουργία όσον το δυνατόν λιγότερο παρεμβατικών ανιχνευτών ακτινοβολίας ως προς το βασικό πείραμα για διαστημικές εφαρμογές.
- Λειτουργία ως συναγερμός σε περίπτωση ανίχνευσης ακτινοβολίας που μπορεί να είναι επιβλαβής για τα υπόλοιπα όργανα στη διαστημική αποστολή. Αν ξεπεραστεί κάποιο όριο, απενεργοποιούνται αυτόματα οι υπόλοιπες συσκευές.
- Ερευνητική λειτουργία για την παρατήρηση ανωμαλιών ακτινοβολικής φύσης.

Η λειτουργία του βασίζεται σε Solid-State Si¹-Crystal Detector (ημιαγωγός).

Η βασική διαδικασία ενός ανιχνευτή στερεάς κατάστασης βασίζεται στη μετακίνηση σωματιδίων που μπορεί να γίνει μέσα σε έναν ημιαγωγό. Αποτέλεσμα της κίνησης αυτής είναι να δημιουργούνται ζευγάρια Ηλεκτρονίων - Ελευθέρων Οπών. Το συνολικό φορτίο είναι ανάλογο με την ενέργεια που χάθηκε από τα φορτισμένα σωματίδια

$$Q \propto \Delta E$$

Στο SREM γίνεται η ίδια διαδικασία. Έχουμε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο γνωρίζοντάς το μπορούμε να υπολογίσουμε το Q, που δημιουργείται από την κίνηση των σωματιδίων.

Στη συνέχεια, έχουμε προ ενισχυμένους παλμούς, που δίνουν την πληροφορία για την ενέργεια που έχουν τα σωματίδια που περνάνε. Οι παλμοί αυτοί που δείχνουν διαφορετική ανταπόκριση αναλόγως το σωματίδιο, ονομάζονται «Βαθμονόμηση» του οργάνου, η οποία γίνεται στο εργαστήριο πριν τη χρήση του.

Οι αποστολές που περιέχουν μονάδες SREM αυτή τη στιγμή είναι οι εξής:

1. PROBA – I (2001)
2. INTEGRAL (2002)
3. Rosetta (2004)
4. GIOVE – B (2008)

¹ Si: Silicon, Πυρίτιο [Z = 14 , A_r = 28.0855 amu]

5. Herschel (2009)
6. Planck (2009)

Πίνακας 3-11: Βασικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή SREM

Μάζα	2.5 kg
Διαστάσεις	96 × 122 × 227 mm
Ισχύς	Κατανάλωση < 2 W , Τάση Διαύλου: [20 – 50] V
TM/TC¹	Συμβατό με τις περισσότερες διαστημικές αποστολές
Αισθητήρες	Σφάλμα μέτρησης <1 %, Μέτρηση θερμοκρασίας
Λειτουργία(1)	Μικροεπεξεργαστής, Μνήμη, Αποθηκευτικός χώρος
Λειτουργία(2)	Monitoring / Downloading μέσω Host Spacecraft
Περιβάλλον	[-20° , 50°]C (Operational) & [-55° , 80°]C (Off)
Χρόνος ζωής	10 χρόνια σε τροχιά και 3 χρόνια στο έδαφος
Reliability	0.85
Σχεδιασμός	Ευελιξία επιλογών για τη κάθε αποστολή

Τα ενεργειακά κανάλια του SREM μαζί με την ευαισθησία που έχουν αναλόγως τη μέτρηση παρουσιάζονται στον πίνακα (3-12). Κάθε κανάλι έχει το δικό του χαρακτηριστικό Response Function².

Πίνακας 3-12: Τα κανάλια του SREM με το ανάλογο ενεργειακό εύρος που ανιχνεύουν.

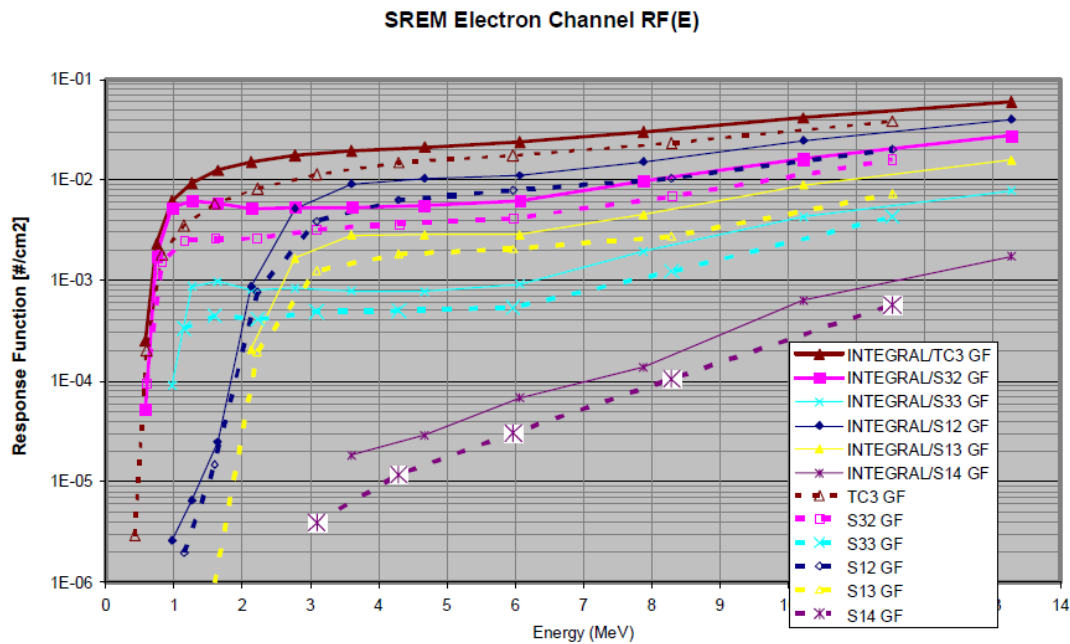
	Όνομα	LOGIC	Proton Energy [MeV]	Electron Energy [MeV]
1	TC1	D1	27 – ∞	2.00 – ∞
2	S12	D1	26 – ∞	2.08 – ∞
3	S13	D1	27 – ∞	2.23 – ∞
4	S14	D1	24 – 542	3.20 – ∞
5	S15	D1	23 – 434	8.18 – ∞
6	TC2	D2	49 – ∞	2.80 – ∞
7	S25	D2	48 – 270	-
8	C1	D1 × D2	43 – 86	-
9	C2	D1 × D2	52 – 278	-
10	C3	D1 × D2	76 – 450	-
11	C4	D1 × D2	164 – ∞	8.10 – ∞
12	TC3	D3	12 – ∞	0.80 – ∞
13	S32	D3	12 – ∞	0.75 – ∞
14	S33	D3	12 – ∞	1.05 – ∞
15	S34	D3	12 – ∞	2.08 – ∞

¹TM/TC: acronym για Telemetry/Telecomand. Δηλαδή, Τηλεμετρία/Τηλεχειρισμός

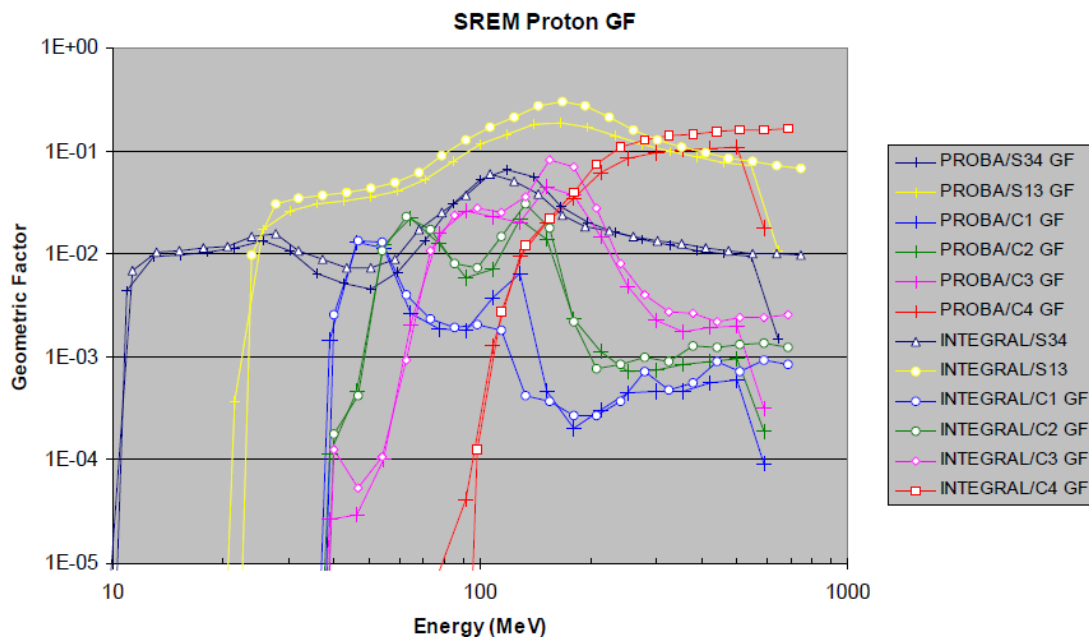
² $RF_{i,q}(E)$: [cm²] είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση απόκρισης του κάθε channel (i) για κάθε σωματίο (q) ενέργειας [MeV], [3.9.1.1](#)

3.9.1 Response Function

Η χαρακτηριστική συνάρτηση ή αλλιώς response function του κάθε καναλιού του SREM μας δίνει πρακτικά την ευαισθησία, που έχει το κάθε κανάλι σε κάθε ενεργειακή περιοχή. Είναι μια συνάρτηση που προσδιορίζεται είτε με ακτινοβόληση στο εργαστήριο είτε με προσομοιώσεις, ώστε να γνωρίζουμε στη συνέχεια την ακριβή απόκριση του κάθε καναλιού.



Εικόνα 3-14: Η χαρακτηριστική συνάρτηση των Ηλεκτρονίων ανάλογα την ενέργεια



Εικόνα 3-15: Λογαριθμικό γράφημα γεωμετρικού παράγοντα συναρτήσει ενεργειών για τα πρωτόνια

Μόνο αν γνωρίζουμε τη χαρακτηριστική συνάρτηση μπορούμε να μετατρέψουμε τα Countrates σε ενεργειακές ροές, όπως αναφέραμε προηγουμένως. Επιπλέον, δεν είναι δυνατόν κανείς να βγάλει συμπεράσματα για τη φυσική σημασία των μετρήσεων αν δεν γνωρίζει «τι» μετράει. Η χαρακτηριστική συνάρτηση δίνει πρακτικά ένα σημείο αναφοράς για να μπορούμε να συγκρίνουμε μετρήσεις και να βγάζουμε συμπεράσματα. Είναι προφανές ότι κάθε ανιχνευτής, κάθε κανάλι και κάθε υλικό έχει τη δική του RF και πειραματικά είναι ο ασφαλέστερος τρόπος να υπολογιστεί.

3.9.1.1 Λεπτομερέστερη ανάλυση του γεωμετρικού παράγοντα

Σε πρακτικό επίπεδο ο γεωμετρικός παράγοντας, που στην περίπτωση μας ταυτίζεται με την έννοια της χαρακτηριστικής συνάρτησης απόκρισης, μας δείχνει πως να κατανοήσουμε σωστά τα δεδομένα που παράγονται. Ας δούμε όμως αναλυτικότερα πως υπολογίζεται.

Στη γενικότερη περίπτωση ο γεωμετρικός παράγοντας είναι:

$$G_n(u) = \iiint T_n(u, \theta, \varphi) dA, \sin\theta \, d\theta d\varphi$$

Με n να συμβολίζει το είδος του σωματιδίου που μετράμε και Γ να είναι ουσιαστικά η ευαισθησία του οργάνου. Αν κάποιος θέλει να ασχοληθεί αποκλειστικά με το γεωμετρικό παράγοντα, τότε θα πρέπει να υπολογίσει το

$$\bar{G}_n(u) = \iiint dA, \sin\theta \, d\theta d\varphi$$

Στην περίπτωσή μας, δηλαδή σε αυτή του SREM, έχουμε ξεχωριστό παράγοντα για το κάθε ένα από τα κανάλια τα οποία έχουν διαφορετικό ενεργειακό εύρος. Συνεπώς, για κάθε ένα από τα ενεργειακά ανεξάρτητα κανάλια έχουμε:

$$G_i(E) = 2\pi \int A_i(\theta, E) \sin(\theta) \, d\theta = 2\pi R_i(E) \int H_i(\theta) \sin(\theta) \, d\theta$$

Πρακτικά χωρίσαμε τον παράγοντα που εξαρτάται από την ενέργεια, αφού η ολοκλήρωση γίνεται ως προς τις δυνατές γωνίες $d\theta$. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να εκφράσουμε ένα ολικό γεωμετρικό παράγοντα για το όργανο

$$G_{tot} = \sum_{i=1}^N G_i(E)$$

Στη περίπτωση μας έχουμε $N=15$, αφού αντικατοπτρίζει το πλήθος των καναλιών.

Είναι σημαντικό να πούμε ότι ο διαχωρισμός $A(E, \theta) = R(E), H(\theta)$, αποτελεί μια πολύ καλή πρακτική στις περισσότερες ενέργειες. Για παράδειγμα, όταν αναφερόμαστε σε ηλεκτρόνια με μεγάλη σκέδαση σε όλες τις ενέργειες η υπόθεση αυτή είναι σωστή. Σε σωματίδια μεγάλης ενέργειας όμως, μπορούμε να έχουμε κατανομή στις γωνίες που σκεδάζονται. Η κατανομή αυτή διευρύνεται σε πολύ υψηλές ενέργειες, κάνοντας το διαχωρισμό αυτόν άστοχο.

3.9.2 Μετατροπή μετρήσεων σε ροές¹

Ένα συχνό πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε, όταν αναλύουμε δεδομένα από ανιχνευτές/μετρητές, είναι η μετατροπή των μετρήσεων αυτών σε ροές (fluxes).

Η διαδικασία αυτή δεν είναι τετριμμένη και αρκετές φορές είναι εξαιρετικά δύσκολη. Θα μελετήσουμε συνοπτικά τη διαδικασία, που γίνεται για να παραχθούν οι ενεργειακές ροές από τον μετρητή SREM.

Αρχικά οι μετρήσεις του SREM στα 15 channels που έχει, υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_i = \sum_{q=p,e} \int_{E_{min}}^{E_{max}} f_q(E) \cdot RF_{i,q}(E) dE, \quad [\#/sec]$$

Με:

f_q : Διαφορική ροή σωματιδίων [$\#/cm^2/MeV/s$]

$RF_{i,q}$: Χαρακτηριστική συνάρτηση του μετρητή [cm^2]

Η Βαθμονόμηση (Calibration) του SREM έγινε τόσο με ακτινοβολήση από τα στοιχεία ^{90}Sr , ^{60}Co ² όσο και με προσομοιώσεις (Simulations).

Για τον υπολογισμό των ροών πρέπει τα 15 συνολικά κανάλια του SREM να υπολογιστούν με την αντίστοιχη συνάρτηση απόκρισης του κάθε καναλιού.

$$c_i = \sum_{q=p,e} \int_{E_{min}}^{E_{max}} f_q(E) \cdot RF_{i,q}(E) dE = \int_{E_{min}}^{E_{max}} f_p(E) \cdot RF_{i,p}(E) dE + \int_{E_{min}}^{E_{max}} f_e(E) \cdot RF_{i,e}(E) dE$$

Πρακτικά, για κάθε σωματίο q που μπορεί να είναι ηλεκτρόνιο και πρωτόνιο αντίστοιχα έχουμε ξεχωριστά τις ροές $f_p(E)$ και $f_e(E)$. Η επίλυση της από πάνω εξίσωσης δεν δίνει μοναδική λύση. Συγκεκριμένα δίνει μια οικογένεια λύσεων που ονομάζεται ολοκληρωτικές εξισώσεις Fredholm³ πρώτης τάξης.

Για να έχουμε λοιπόν κάποια τιμή για τις ενεργειακές ροές έχουμε διάφορες προσεγγιστικές τεχνικές. Θα δούμε αναλυτικά δύο βασικές μεθόδους, που είναι γνωστές για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων.

3.9.2.1 Η παραμετρική μέθοδος

Η πιο κλασική μέθοδος είναι να υποθέσουμε ότι υπάρχει αναλυτική παραμετρική μορφή στις ροές f_q και να υπολογίσουμε τις σταθερές $a = [a_1, a_2, \dots]$. Οι φασματικές

¹ Συχνά ονομάζεται και “unfolding - αποσυνέλιξη” των μετρήσεων

² Sr: Strontium, Στρόντιο. Co: Cobaltum, Κοβάλτιο

³ Σουηδός μαθηματικός [1866 - 1927]

συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι νόμος δύναμης για τα πρωτόνια και εκθετική συνάρτηση για τα ηλεκτρόνια. Συγκεκριμένα:

$$f_p(E; f_{p,0}, E_0, \gamma_p) = f_{p,0} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\gamma_p}$$

$$f_e(E; f_{e,0}, E_0, \gamma_e) = f_{e,0} \exp[\gamma_e(E - E_0)]$$

Υπάρχουν διαθέσιμοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και τον αριθμητικό υπολογισμό των παραπάνω. Βέβαια το αρνητικό που έχει η παραμετρική μέθοδος, είναι ότι η συνάρτηση του ενεργειακού φάσματος είναι προκαθορισμένη, οπότε δεν γίνεται να την αλλάξουμε αν έχουμε ένα ειδικό φάσμα. Επομένως, αν το πραγματικό φάσμα αποκλίνει από αυτό που διαλέξαμε, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι λανθασμένα και παραπλανητικά.

3.9.2.2 Η απλή μέθοδος μετατροπής¹

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή και βασίζεται στη μέση τιμή του ολοκληρώματος της συνάρτησης απόκρισης του κάθε καναλιού. Το πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο είναι ότι χρειάζεται να γνωρίζουμε εκ των προτέρων το επίπεδο της συστηματικής επιμόλυνσης που μπορεί να έχει το κάθε κανάλι κατά τη μέτρηση σωματιδίων.

Η γνώση αυτή δεν μπορεί να υπάρχει για τεχνικούς λόγους σε μετρητές ηλεκτρονίων, αλλά μπορούμε να την έχουμε στα κανάλια $C_1 - C_4$ που είναι καθαρά πρωτονικά. Η ιδέα της μεθόδου αυτής είναι η ύπαρξη του παράγοντα SCF, ο οποίος συνδέει μετρήσεις με την διαφορική ροή μέσα στα πλαίσια της ευαισθησίας που έχει το κάθε κανάλι. Η σχέση αυτή είναι:

$$SCF_{i,q} = \int_{E_{min,i,q}}^{E_{max,i,q}} f(E) dE \left(\int_0^{+\infty} f(E) \cdot RF_{i,q}(E) dE \right)^{-1}$$

Βέβαια μπορεί η μορφή του ενεργειακού φάσματος να επιτρέψει την προσέγγιση της $RF_{i,q}$ σαν ορθογώνιο παλμό και κατ' επέκταση να δώσει την απλή σχέση:

$$SCF \approx (RF_i)^{-1}$$

Αν και η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή, έχει αρκετά αρνητικά στοιχεία. Έχουμε ήδη αναφέρει ότι πρέπει να γνωρίζουμε το πόσο «μολυσμένα» είναι τα ενεργειακά κανάλια από πιθανές μετρήσεις άλλων σωματιδίων εκτός των επιθυμητών. Πέρα από αυτό έχουμε επίσης:

- Μεγάλη πιθανότητα σφάλματος και λανθασμένων αποτελεσμάτων αν το φάσμα των ενεργειών παρουσιάζει σταθερότητα.

¹ The simple conversion factor (SCF) method [Bühler, 2007]

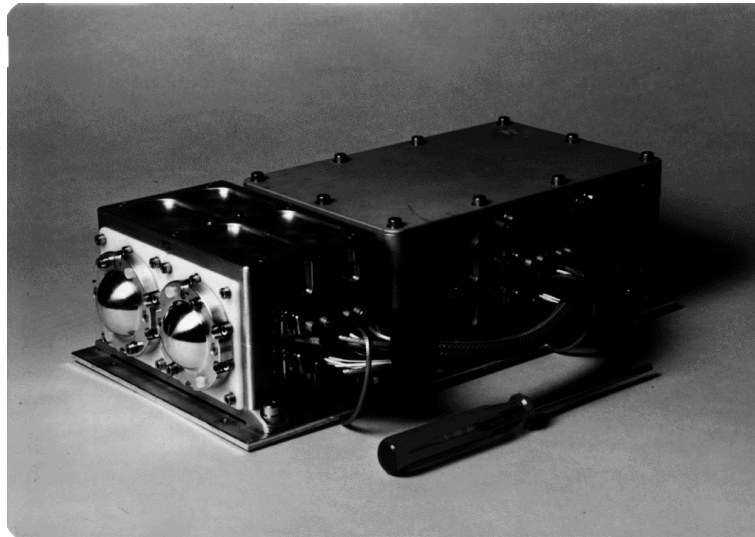
- Η ανάλυση του φάσματος είναι χαμηλή αφού είναι άμεσα συνδεδεμένη με την διακριτική ικανότητα και το εύρος του κάθε ενεργειακού καναλιού.

Δεν υπάρχει κάποια βέλτιστη μέθοδος. Υπάρχουν αριετές πιο πολύπλοκες και συνδυαστικές μέθοδοι για διαδικασίες, όπως αυτή που αναλύσαμε. Η βελτιστοποίηση αυτών των υπολογισμών είναι μια χρονοβόρα και ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία η οποία αποτελεί μέρος ερευνητικής μελέτης για πολλούς ερευνητές, που εργάζονται σε διαφορετικούς κλάδους (φυσικούς, μαθηματικούς, προγραμματιστές κλπ.).

3.9.3 Προκάτοχοι και απόγονοι

Το SREM δεν ήταν η πρώτη ούτε η τελευταία προσπάθεια της ESA να συμπεριλάβει έναν «μικρό» ανιχνευτή στις διαστημικές της αποστολές.

Από τις πρώτες προσπάθειες ήταν η δημιουργία του REM (Radiation Environment Monitor) το οποίο υπήρξε σε 2 αποστολές μεταξύ 1994 - 1998 παρέχοντας πληθώρα δεδομένων.



Εικόνα 3-16: Ο ανιχνευτής REM

Οι επόμενες γενιές είναι το NGRM (Next Generation Radiation Monitor) το 2014 το οποίο ζυγίζει μόλις 1 κιλό και έχει ισχύς 1 Watt. Ενώ ο πιο σύγχρονος απόγονος είναι ο HMRM (Highly Miniaturized Radiation Monitor) το 2015 που ζυγίζει 52gr και το εμβαδόν του είναι μόλις 15 τετραγωνικά εκατοστά



Εικόνα 3-17: Ο ανιχνευτής NGRM

Γενικότερος στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί όσο περισσότερο γίνεται το κόστος, η κατανάλωση ρεύματος και οι διαστάσεις, κρατώντας τη ποιότητα των δεδομένων σε ικανοποιητικό επίπεδο, ώστε να μπορούν να αναλυθούν τα δεδομένα και να μπορεί κανείς να βγάλει ασφαλή συμπεράσματα.



Εικόνα 3-18: Ο ανιχνευτής HMRM

3.10 Σχόλια & Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό είδαμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά των διαστημικών αποστολών και πόσο απαραίτητη είναι η γνώση του σωματιδιακού πληθυσμού για τον άνθρωπο. Υπάρχουν αρκετές αποστολές που έχουν μοναδικό σκοπό τη μελέτη των σω-

ματιδικιών πληθυσμών, όπως είναι τα ενεργητικά σωματίδια από τον Ήλιο και οι Κοσμικές ακτίνες. Όμως συχνά πρέπει να βγάλει κανείς συμπεράσματα με ανιχνευτές που δεν έχουν την καλύτερη δυνατή ανάλυση και φτιάχτηκαν με γνώμονα την ελαχιστοποίηση χώρου και κόστους.

Ο ανιχνευτής της ESA, SREM αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Όμως, ότι χάνει σε ποιότητα ο SREM το κερδίζει με το παραπάνω σε ποσότητα. Ο Ανιχνευτής αυτός όπως είδαμε, βρίσκεται σε αρκετές αποστολές της ESA και παρέχει ένα τεράστιο όγκο δεδομένων, που βοηθάει στη καλύτερη κατανόηση και μοντελοποίηση του διαστημικού χώρου.

Η ύπαρξη του ίδιου ανιχνευτή σε διαφορετικές αποστολές και ειδικότερα σε αποστολές, που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία, δίνει την δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των δεδομένων τους. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα του SREM επιτρέπουν να μελετηθεί το ίδιο φαινόμενο από διαφορετικά σημεία στον διαπλανητικό χώρο (Multipoint Observation).

Θα δούμε στο τελευταίο κεφάλαιο τι συμπεράσματα μπορούμε να βγάλουμε για τα δεδομένα που μέτρησε ο INTEGRAL ο οποίος κάνει Highly Elliptical τροχιά σε σχέση με τους Planck και Herschel, που βρίσκονται στο σημείο L_2 . Οι μετρήσεις αυτές έχουν ιδιαίτερη ιδιομορφία λόγω της τροχιάς του INTEGRAL, σε σχέση με τους άλλους. Επιπλέον, ο INTEGRAL περνάει από διαφορετικά σημεία μαγνητικής θωράκισης από τη μαγνητόσφαιρα της Γης και από ενεργειακές ζώνες, που έχουν σωματιδιακούς πληθυσμούς που δεν θα συναντήσει κανείς στο σημείο L_2 .

Κεφάλαιο 4 Υπολογιστικό μέρος

4.1 Γενικά

Αναλύσαμε τα εξής δεδομένα:

1. Πρωτογενείς μετρήσεις (Countrates) από τη συσκευή SREM των αποστολών Planck, Herschel και INTEGRAL.
2. Διαφορικές ροές πρωτονίων υψηλής ενέργειας που λάβαμε από την αποσυνέλιξη των Countrates [SVD].

Πίνακας 4-1: Τα τελικά δεδομένα προς ανάλυση

Τύπος Αρχείου	Δορυφόρος	Δεδομένο
Μετρήσεις-Countrates	Herschel / Planck	Countrates - 15 κανάλια
		Epoch
	Integral	Countrates - 15 κανάλια
		Epoch LSHELL ¹
Ροές-Fluxes	Herschel / Planck	FPDO - ενέργειες
		Epoch
	Integral	FPDO - ενέργειες
		Epoch LSHELL

Για την ανάλυση δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πακέτο της IDL (Interactive Data Language), που είναι κατάλληλο για ανάλυση δεδομένων και επεξεργασία εικόνας. Χρησιμοποιείται ευρέως στη αστρονομία, στη αστροφυσική, στη φυσική της ατμόσφαιρας και στην απεικόνιση ιατρικών εικόνων. Η IDL είναι κατασκευασμένη όμοια με ένα ευρύτερο σύνολο γλωσσών (Matlab, Fortran, R κλπ.), οι οποίες είναι εύχρηστες στην επεξεργασία μεγάλων δεδομένων και εικόνων.

Σημειώνεται ότι η IDL δεν είναι Case-Sensitive, δηλαδή τόσο οι μεταβλητές όσο και οι αλγόριθμοι μπορούν να γραφτούν με κεφαλαία ή με μικρά και να αναπαριστούν το ίδιο πράγμα.

¹ Παράμετρος που περιγράφει τις μαγνητικές γραμμές ενός πεδίου. Οι τιμές που παίρνει εξαρτώνται από το πλανήτη και τη μορφή του μαγνητικού πεδίου που έχουμε θεωρήσει. Π.χ. Οι ζώνες Van Allen βρίσκονται περίπου στις θέσεις $L = 1.5 - 2.5$ και $L = 4 - 6$

4.2 Τύποι αρχείων - μεταβλητών

Οι τύποι αρχείων με δεδομένα διαστημικών μετρήσεων που συναντάει κανείς, ανήκουν συνήθως σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες:

Πίνακας 4-2: Τύποι αρχείων όπου αποθηκεύονται δεδομένα

ASCII	(+) Διαβάζονται από ανθρώπους και μεταφέρονται εύκολα (-) Αργή επεξεργασία και χάνεται μέρος της πληροφορίας κατά τη μετατροπή τους σε Binary
Binary	(+) Γρηγορότερα για επεξεργασία, μικρό μέγεθος (-) Χρειάζονται περιγραφή για να καταλάβει κανείς το περιεχόμενο και η μεταφορά τους είναι περιορισμένη/δύσκολη
CDF	Προσπάθεια να ξεπεράσουμε τα προβλήματα και τους περιορισμούς που υπάρχουν στη μεταφορά και την ανάγνωση των Binary αρχείων. Επέκτασή τους αποτελούν τα NetCDF.
NetCDF	(+) Δεδομένα και Περιγραφή (Metadata ¹) μπορεί κανείς τόσο να τα διαβάσει όσο και να τα παράγει με πολλές διαφορετικές γλώσσες όπως C , Fortran , IDL κλπ.

Οι μεταβλητές στην IDL, όπως και σε κάθε γλώσσα προγραμματισμού, έχουν διάφορες μορφές. Αναλόγως τα bits που δεσμεύουν κατηγοριοποιούνται διαφορετικά και έχουν και διαφορετικό εύρος δυνατών τιμών.

Πίνακας 4-3: Τύποι μεταβλητών στην IDL

Null	κενή μεταβλητή. Χρησιμοποιείται σε πίνακες που θέλουμε να αφαιρέσουμε κάποιες μετρήσεις ή για την ταξινόμησή τους. Ονομάζεται «UNDEFINED»
Byte	8-bit , ακέραιος, προσημασμένος, κυμαίνεται από 0 έως 255. Συνήθως αναπαριστά Pixels σε μια εικόνα. Ονομάζεται «BYTE»
Integer	16-bit , ακέραιος, κυμαίνεται από -32,768 έως 32,768. Ονομάζεται «INT»
Unsigned Integer	16-bit , ακέραιος, προσημασμένος, κυμαίνεται από 0 έως 65535. Ονομάζεται «UINT»
64-bit Long	64-bit , ακέραιος, κυμαίνεται από -9223372036854775808 ως 9223372036854775807. Ονομάζεται «LONG64»
64-bit Unsigned Long	64-bit , ακέραιος, προσημασμένος, κυμαίνεται από 0 ως 18446744073709551615. Ονομάζεται «ULONG64»

¹ Μεταδεδομένα: Είναι δεδομένα τα οποία περιγράφουν άλλα δεδομένα .Χρησιμοποιούνται σαν Description προς ανάγνωση ή/και επεξεργασία.

Floating-point	32-bit, κινητής υποδιαστολής, μονής ακρίβειας, με περίπου έξι με εφτά σημαντικά ψηφία και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\pm 10^{-38}$. Ονομάζεται «FLOAT»
Double - Precision	64-bit, κινητής υποδιαστολής, διπλής ακρίβειας, με περίπου 15 με 16 σημαντικά ψηφία και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\pm 10^{-308}$. Ονομάζεται «DOUBLE»
Complex	Ένα ζευγάρι φανταστικού και πραγματικού αριθμού, κινητής υποδιαστολής, μονής ακρίβειας. Χρήσιμο σε ανάλυση σήματος και φιλτράρισμα συχνοτήτων. Ονομάζεται «COMPLEX»
Double-precision Complex	Ένα ζευγάρι φανταστικού και πραγματικού αριθμού, κινητής υποδιαστολής, διπλής ακρίβειας. Χρησιμοποιείται όπως και ο Complex. Ονομάζεται «DCOMPLEX»
String (Συμβολοσειρά)	Μια αλληλουχία από χαρακτήρες με συνολική έκταση από το 0 ως το 2147483647. Εμφανίζεται σε μορφή κειμένου. Ονομάζεται «STRING»
Structure (Δομή)	Τύπος δεδομένων που περιέχει ζευγάρια από τίτλους και τιμές οποιουδήποτε τύπου από τους προηγούμενους που αναφέραμε. Μόλις μια δομή δημιουργηθεί παραμένει στατική και δεν μπορεί να αλλάξει ούτε η τιμή, ούτε ο τύπος, ούτε η «ετικέτα».
List (Λίστα)	Τύπος δεδομένων που περιέχει αναφορά σε ένα σύνολο από τιμές. Η κάθε τιμή μπορεί να είναι οπουδήποτε τύπου (Float, double κλπ.) και είναι δυναμική, δηλαδή μπορεί κανείς να αλλάξει τόσο τον τύπο όσο και τη τιμή.

Συνηθίζεται για ευκολία να αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε double μεταβλητές διότι δεν ασχολούμαστε με “big data¹”, ώστε να έχουμε προβλήματα χρόνου στην ανάλυση.

4.3 Αλγόριθμοι

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αλγορίθμων/συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Παράλληλα περιγράφονται κάποιες από τις βασικές συναρτήσεις που προϋπάρχουν εγκατεστημένες στην IDL και χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των αλγορίθμων. Στην IDL έχουμε:

1. Συναρτήσεις (Functions) που για συγκεκριμένο όρισμα κάνουν μια σειρά από πράξεις και επιστρέφουν ένα δεδομένο.
2. Διαδικασίες (Procedures) οι οποίες μπορούν να έχουν μέσα συναρτήσεις και διαβάζονται σειριακά από την αρχή προς το τέλος με σκοπό την ολοκλήρωση μιας πράξης.

¹ Big data: Δεδομένα πολύ μεγάλα ή/και πολύπλοκα για να μπορούν να αναλυθούν με απλές και καθιερωμένες μεθόδους

Προτιμήσαμε την κατασκευή διαδικασιών γιατί αποτελούν ευκολότερο μέσο για τη παραγωγή μαζικών γραφημάτων, αφού με διαδικασίες επανάληψης και ελέγχου μπορεί κανείς να παράγει ότι χρειάζεται απλώς τρέχοντας τη διαδικασία που κατασκεύασε.

Η γενική κατηγοριοποίηση είναι

- Αλγόριθμοι που προϋπάρχουν εγκατεστημένες στην IDL
- Αλγόριθμοι που έχουν στόχο την οργάνωση και την ανάλυση των δεδομένων
- Αλγόριθμοι που έχουν στόχο τη παραγωγή γραφημάτων

Κατ' αντιστοιχία έχουν φτιαχτεί οι παρακάτω πίνακες οι οποίοι περιγράφουν το input/output μαζί με κάποια σχόλια. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν λέξεις κλειδιά που παράγουν διαφορετικό output ή και αλλάζουν εντελώς τη διαδικασία που γίνεται.

Πίνακας 4-4: Βασικοί αλγόριθμοι εγκαταστημένοι στην IDL που χρησιμοποιούνται ευρέως

Όνομα	Input	Output	Παρατηρήσεις
Cdf_epoch	Epoch ή Time Variable	Time ή Epoch Variable	Ανάλογα αν δοθεί η λέξη κλειδί /break ή /compute κάνει την αντίστροφη διαδικασία
Uniq	Πίνακα N πλήθους στοιχείων	Πίνακα K πλήθους στοιχείων	Όπου K είναι ο αριθμός των ξεχωριστών N
Str_replace	String, Pattern, Substring	String	Αλλάζει μέρος της συμβολοσειράς είτε με βάση κάποιο μοτίβο είτε ορίζοντας τους χαρακτηριστές
Label_date	Format - Pattern	Axes Label	Ορίζει τον τρόπο αναπαράστασης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ονομασία σε άξονες
Save	Μεταβλητές και δεδομένα	Αρχείο.sav	Αποθηκεύει στο default φάκελο (εκτός και αν οριστεί διαφορετικά) ένα πλήθος δεδομένων
Restore	Αρχείο .sav	Προσθήκη μεταβλητών	Εξάγει το πλήθος των μεταβλητών που υπάρχει στο αρχείο για να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο

Where	Πίνακας & Συνθήκη	Διάνυσμα	Για δοσμένη συνθήκη παράγεται διάνυσμα με τους δείκτες του πίνακα που την ικανοποιούν
Min/Max	Πίνακας	Τιμή	Παίρνουμε τη μικρότερη/μεγαλύτερη τιμή ενός πίνακα
Smooth	Πίνακας	Πίνακας*	$\left\{ \frac{1}{w} \sum_{j=0}^{w-1} A_{i+j-w/e} \right\}$ Τεχνητή μείωση του θορύβου σε ένα σήμα

Για την ανάλυση της προετοιμασίας και την οργάνωση των δεδομένων κρίθηκε σκόπιμο αντί για το όνομα της εκάστοτε διαδικασίας να αναφερθεί ο στόχος.

Πίνακας 4-5: Βασικές διαδικασίες προετοιμασίας και οργάνωσης των δεδομένων

Στόχος	Input	Output	Παρατηρήσεις
Δημιουργία πινάκων με τους αρχικούς και τελικούς χρόνους των SEP	ASCII αρχείο με τους χρόνους των SEP (Πίνακας 4-7)	Δύο πίνακες με 25 τιμές.	Κατάλληλη επιλογή του Substring από το Txt αρχείο.
Η μετατροπή των μετρήσεων που δεν χρησιμοποιούνται σε Null.	Δεδομένα του ανιχνευτή SREM	Δεδομένα* του ανιχνευτή SREM	Αλλαγή των μηδενικών, των Spikes ¹ και των μετρήσεων που βρίσκονται σε ζώνη ακτινοβολίας (Lshell) σε Nan ² .
Δημιουργία μεταβλητής με τις αντίστοιχες ημερομηνίες των epoch	Epoch	Χρόνος / Ημερομηνίες	Συνδυασμός της CDF_Epoch με τη Julday ³

¹ Στις μετρήσεις του INTEGRAL υπήρχαν μεμονωμένες μετρήσεις που ονομάζονται Spikes (αιχμές) και είναι λανθασμένες μετρήσεις που προέρχονται είτε από αστοχία υλικού είτε από άλλες επιδράσεις που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3

² Null, πίνακας 4-3.

³ <http://www.harrisgeospatial.com/docs/JULDAY.html>

Εύρεση δεικτών των αρχικών και τελικών χρόνων των SEP	Δεδομένα του ανιχνευτή SREM + Χρόνοι SEP	Δείκτες για την έναρξη και λήξη των 25 επεισοδίων για κάθε αποστολή	Συγκρίνοντας τους χρόνους των SEP με το epoch βρίσκουμε τους δείκτες
Interpolation των μετρήσεων για τη παραγωγή των crossplot	Δεδομένα του ανιχνευτή SREM + Χρόνοι SEP	Interpolated δεδομένα των Herschel/Planck σε χρόνους του Integral	Έγινε χρήση της συνάρτησης Finterpol του NASA IDL library ¹

Για την παραγωγή γραφημάτων χρησιμοποιήσαμε ως επί το πλείστον τη βιβλιοθήκη της IDL που κατασκευάστηκε από τον David W. Fanning, η οποία διατίθεται δωρεάν στην ιστοσελίδα² του.

Η βιβλιοθήκη χρησιμοποιεί ένα πρόθημα (prefix), το -cg στις υπάρχουσες συναρτήσεις της IDL. Για παράδειγμα, αντικατάσταση της συνάρτησης plot, με βάση την βιβλιοθήκη αυτή είναι η συνάρτηση cgplot.

Η επιλογή της βιβλιοθήκης αυτής έγινε καθαρά για αισθητικούς λόγους και για να έχουμε περισσότερες επιλογές στην απεικόνιση των μετρήσεων. Δεν προσφέρει κάποια διαφορά σε επίπεδο ανάλυσης και ίδια διαδικασία μπορεί να ακολουθήσει κανείς με τις βασικές συναρτήσεις της IDL ή οποιασδήποτε άλλης γλώσσας παρόμοιου συντακτικού.

Τέλος, για τη παραγωγή των plots χρησιμοποιήθηκαν 2 λογισμικά. Τα ImageMagick και Ghostscript τα οποία είναι δωρεάν. Σε συνδυασμό τα παραπάνω αντικαθιστούν τις βασικές διαδικασίες της IDL και παράγουν γραφήματα υψηλότερης ανάλυσης και ποιότητας.

Πίνακας 4-6: Βασικές διαδικασίες δημιουργίας και παραγωγής γραφημάτων

Όνομα	Input	Output	Παρατηρήσεις
Cgplot	x,y μεταβλητές	Γραμμικό γράφημα	Επιλογές όπως ονόματα αξόνων, λογαριθμική κλίμακα κλπ. είναι προαιρετικά
Cgwindow	-	Δημιουργία παραθύρου με μεταβλητό μέγεθος	Στο παράθυρο που δημιουργείτε μπορείτε κανείς να χρησιμοποιήσει κάθε άλλη συνάρτηση (cgplot κλπ.)

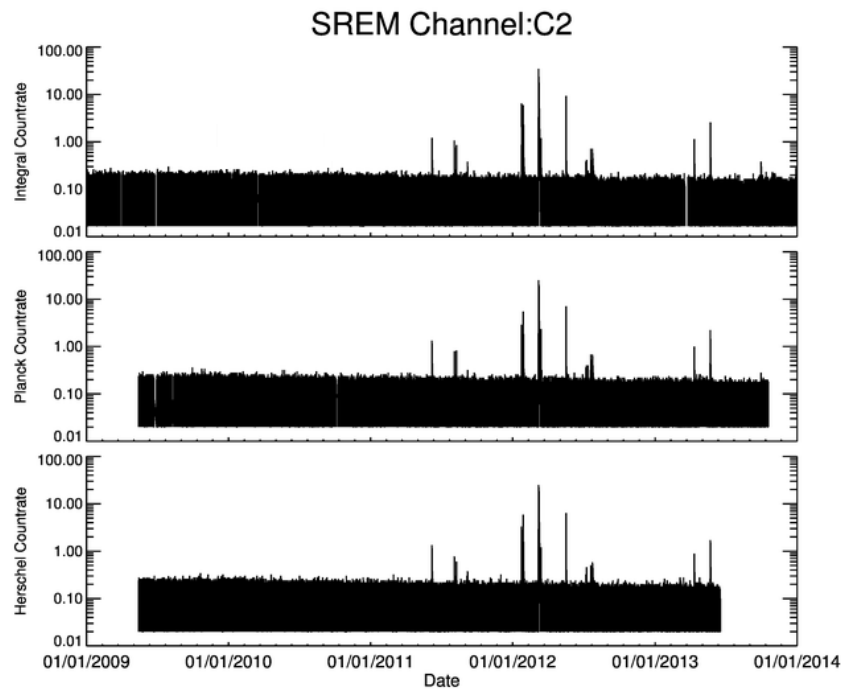
¹ <http://idlastro.gsfc.nasa.gov>

² <http://www.idlcoyote.com>

Cgcontrol	Cgwindow	Περισσότερες επιλογές για τη συνάρτηση Cgwindow	Απαραίτητη συνάρτηση για τη δημιουργία .png αρχείων των γραφημάτων
Cglegend /Al_legend	-	Δημιουργία υπομνήματος σε παράθυρο γραφικών.	Οι επιλογές της Al_legend(NASA library) είναι περισσότερες όμως στη περίπτωση μας όχι αναγκαίες.
Cghistogram	x μεταβλητή	Ιστόγραμμα	Ο καθορισμός του αριθμού κελιών ορίζεται με λέξη κλειδί "NBINS"
Cghistoplot	x μεταβλητή	Ιστόγραμμα	Εναλλακτική συνάρτηση με περισσότερες επιλογές
CgText	Θέση (x,y) στο παράθυρο	Κείμενο	Προσθήκη κειμένου σε ένα υπάρχον γραφικό στοιχείο.
Cgoplot	x, y μεταβλητές	Γράφημα πάνω σε ήδη υπάρχον	Απαραίτητη συνάρτηση για το σχεδιασμό παραπάνω από ενός dataset σε κοινό γράφημα.

4.4 Ανάλυση δεδομένων - Countrates

Για την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους δορυφόρους Herschel, Planck και INTEGRAL. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζουμε τις συνολικές μετρήσεις που ανίχνευσαν οι SREM για ένα ενδεικτικό κανάλι το C_2 , σε λογαριθμική κλίμακα. Οι μετρήσεις των Herschel, Planck είναι κενές στα διαστήματα που φαίνονται αφού κατά τη διάρκεια 1/2009 - 8/2010 δεν έχουμε κάποιο παρατηρούμενο επεισόδιο.



4.4.1 Λίστα επεισοδίων

Για την επιβεβαίωση των χρόνων έναρξης και λήξης των SEP χρησιμοποιήσαμε το SEP-EM Reference list¹. Στο παρακάτω πίνακα περιγράφεται το κάθε επεισόδιο με κάποια βασικά χαρακτηριστικά. Ο ορισμός που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του παρακάτω πίνακα είναι ο εξής: επεισόδιο θα ονομάζουμε το φαινόμενο όπου η ροή στις ενέργειες $7.23 - 10.46 \text{ MeV}$ ξεπερνάει το $0.01 [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}]$. Λήξη του επεισοδίου θεωρούμε το χρόνο για τον οποίο η ροή επανήλθε στο παραπάνω κατώφλι. Επιπλέον το επεισόδιο οφείλει να έχει ελάχιστη διάρκεια 24 ώρες ενώ η ελάχιστη τιμή του μεγίστου πρέπει να είναι 0.5.

Πίνακας 4-7: Βασικά χαρακτηριστικά των επεισοδίων για τα έτη 2010 - 2013

#	Start time	End time	Duration	Event Fluence	Peak Flux
1	2010-08-14 11:35:00	2010-08-15 11:50:00	1.010	5.66237e+4	2.7295e+0
2	2010-08-18 08:50:00	2010-08-19 11:55:00	1.128	3.34340e+4	1.2867e+0
3	2011-03-07 23:15:00	2011-03-12 07:20:00	4.337	1.73738e+6	1.3146e+1
4	2011-03-21 05:55:00	2011-03-22 16:30:00	1.441	1.13156e+5	3.0314e+0

¹ <http://dev.sepem.oma.be>

5	2011-06-05 20:05:00	2011-06-18 15:10:00	12.795	1.07654e+6	1.1285e+1
6	2011-08-04 04:35:00	2011-08-07 11:30:00	3.288	2.39742e+6	5.1347e+1
7	2011-08-09 08:00:00	2011-08-10 16:20:00	1.347	1.19568e+5	3.9489e+0
8	2011-09-06 23:45:00	2011-09-08 13:35:00	1.576	4.91641e+4	9.4600e-1
9	2011-09-23 03:30:00	2011-09-30 06:05:00	7.108	2.09413e+6	1.7399e+1
10	2011-10-22 16:20:00	2011-10-25 18:45:00	3.101	7.54910e+5	1.2586e+1
11	2011-11-04 06:20:00	2011-11-05 07:05:00	1.031	1.55609e+4	5.0587e-1
12	2011-11-26 09:00:00	2011-11-30 00:20:00	3.639	2.87240e+6	3.5451e+1
13	2012-01-20 11:25:00	2012-02-03 03:55:00	13.688	8.10725e+7	1.6389e+3
14	2012-02-25 02:20:00	2012-02-27 21:25:00	2.795	5.61843e+5	7.2967e+0
15	2012-03-05 00:30:00	2012-03-17 02:25:00	12.080	6.26949e+7	1.9843e+3
16	2012-05-17 02:05:00	2012-05-20 15:15:00	3.549	1.67961e+6	4.6146e+1
17	2012-05-26 23:55:00	2012-05-29 04:55:00	2.208	2.75000e+5	6.4849e+0
18	2012-06-16 09:45:00	2012-06-17 18:20:00	1.358	2.18827e+5	1.1105e+1
19	2012-07-07 00:40:00	2012-07-10 22:05:00	3.892	4.83742e+5	4.2694e+0
20	2012-07-12 18:05:00	2012-07-15 20:40:00	3.108	2.75239e+6	6.2101e+1
21	2012-07-17 15:50:00	2012-07-26 18:00:00	9.090	3.53160e+6	3.6735e+1
22	2012-09-01 04:25:00	2012-09-05 07:40:00	4.135	3.57951e+6	4.2803e+1
23	2012-09-28 01:20:00	2012-10-01 03:35:00	3.094	1.98198e+5	4.5055e+0
24	2012-12-14 16:00:00	2012-12-16 03:45:00	1.490	3.46923e+5	1.4463e+1
25	2013-03-15 19:45:00	2013-03-18 12:55:00	2.715	6.65688e+5	1.5569e+1

Duration → [Days]

Event Fluence → [$cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot MeV^{-1}$]

Peak Flux → [$cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot MeV^{-1}$]

4.4.2 Γραφήματα - Αναπαράσταση των μετρήσεων

Στα παρακάτω γραφήματα έχει γίνει επιλογή τέτοια ώστε να:

- Συμπεριλάβουμε τα πιο χαρακτηριστικά SEP τόσο σε διάρκεια όσο και σε ενέργεια.
- Παρουσιάσουμε κανάλια με διαφορετικές χαρακτηριστικές συναρτήσεις και διαφορετικό ενεργειακό εύρος ανίχνευσης.

Από τα κανάλια του SREM θα υπάρχουν 1-2 από τα κανάλια C1, C2, C3 που είναι σχεδόν καθαρά πρωτονικά κανάλια και ανιχνεύουν πρωτόνια από υψηλότερες ενέργειες. Ακόμα θα συμπεριλάβουμε 1-2 μικτά κανάλια με χαμηλό ενεργειακό κατώφλι και συνεπώς μεγάλο ενεργειακό εύρος που θα είναι κάποια από τα S12 – S15, S25, S32 – S35 και TC1 – TC3.

Τα υπόλοιπα γραφήματα βρίσκονται στο τέλος της εργασίας στο παράρτημα Ζ' για λόγους πληρότητας.

Ως πιο σημαντικά από τα 25 επεισόδια του πίνακα 4-7 θεωρούμε τα εξής:

3, 5, 6, 7, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 23

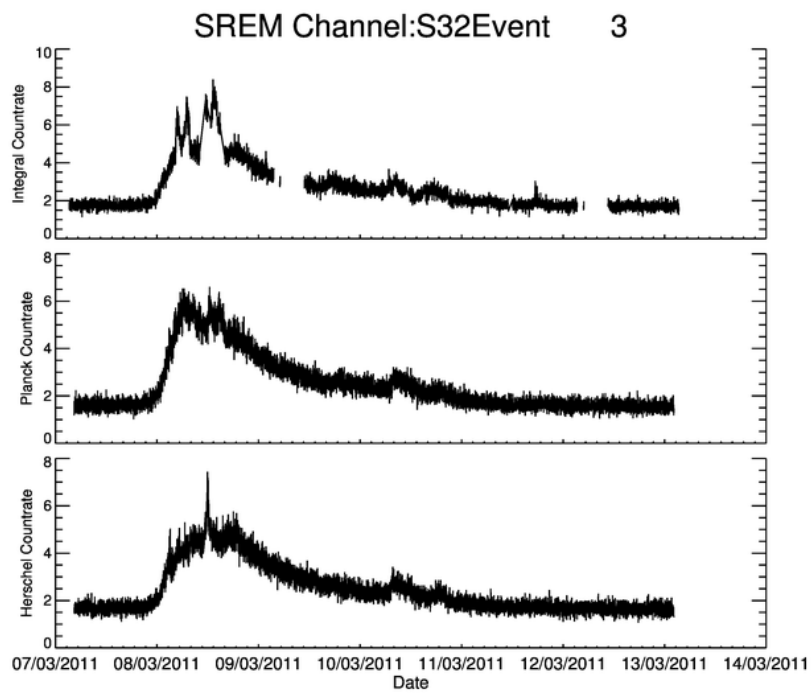
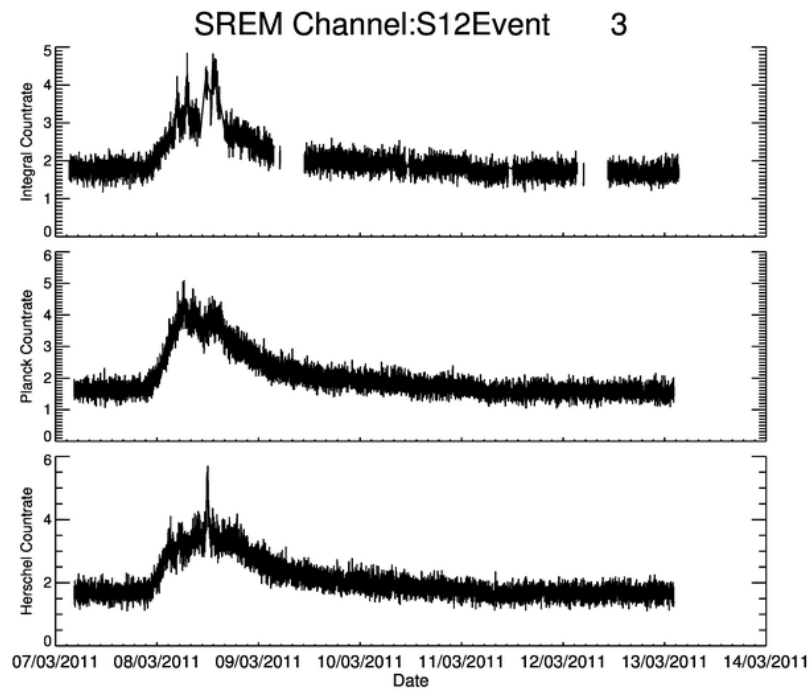
Με **κόκκινο** είναι αυτά που έχουν εντονότερο σήμα τόσο στα πρωτονικά όσο και στα μικτά κανάλια. Παρακάτω θα συμπεριλάβουμε τα 7 σημαντικότερα μαζί με τη συνοδεία του #3 που αποτελεί ένα χαμηλό-ενεργειακό SEP για λόγους σύγκρισης.

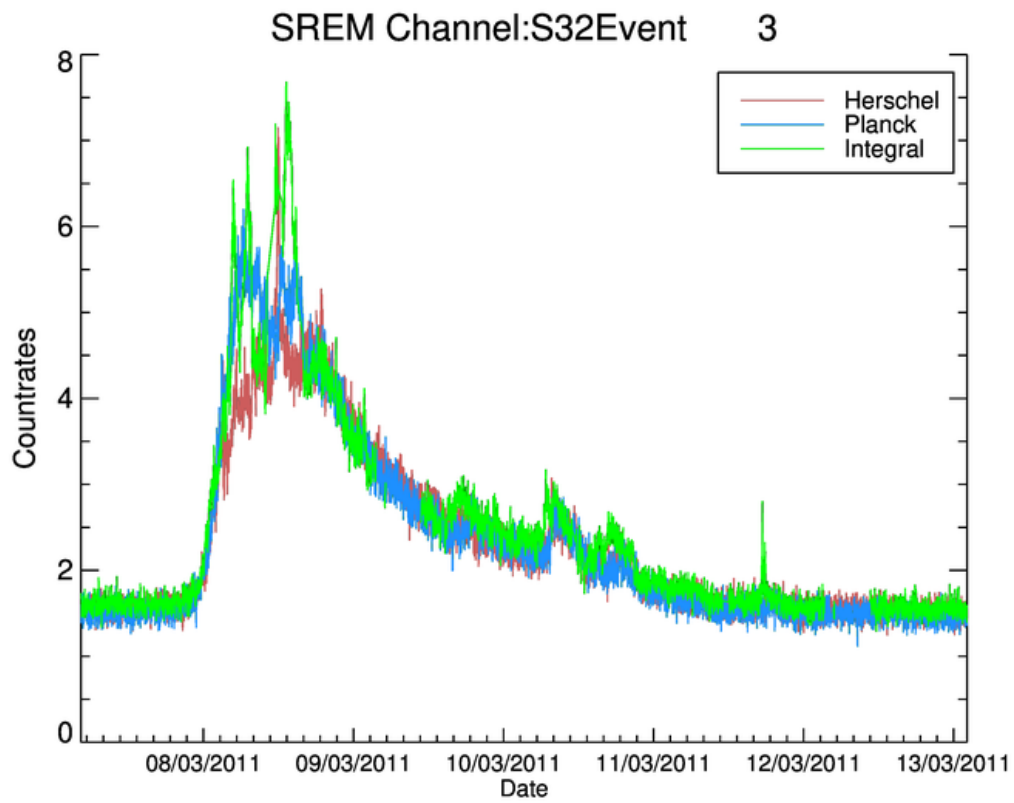
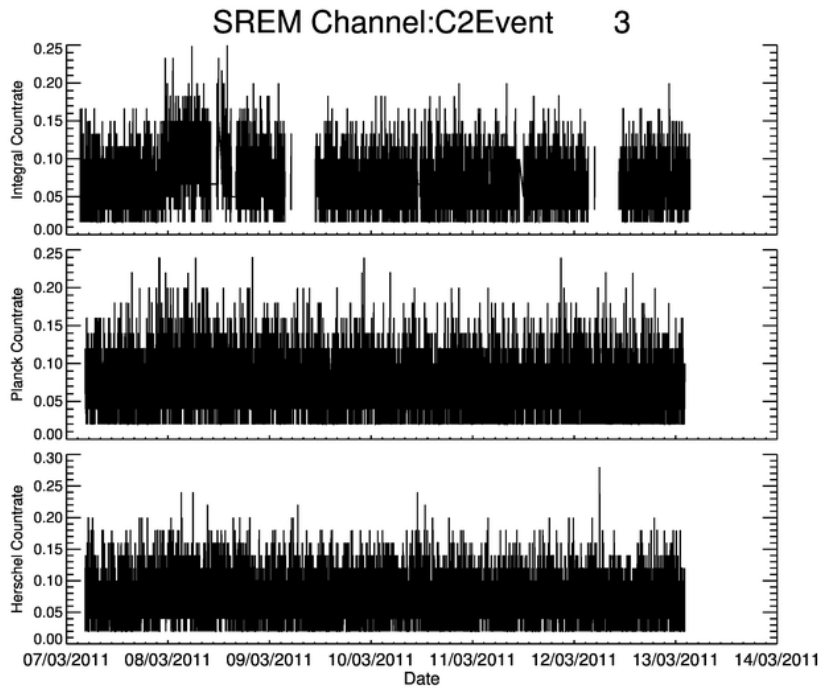
Τα χαρακτηριστικά του κάθε επεισοδίου βρίσκονται στον πίνακα 4-7, ενώ κάποιες πληροφορίες άμεσης παρατήρησης είναι σε πλαίσιο κάτω από τα γραφήματα.

Τέλος, για λόγους διευκόλυνσης στην παρακάτω ανάλυση θα αναφερόμαστε στους Herschel, Planck και INTEGRAL αλλά θα εννοούμε τον ανιχνευτή SREM που επανδρώνει τις παραπάνω αποστολές.

Τα Countrates (Πρωτογενείς μετρήσεις) έχουν τη μονάδα μέτρησης [sec^{-1}].

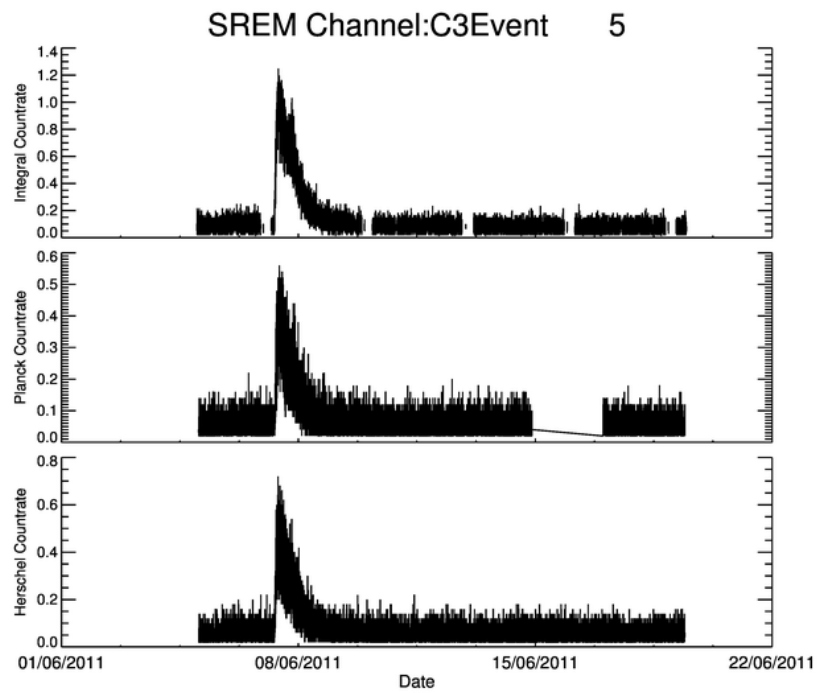
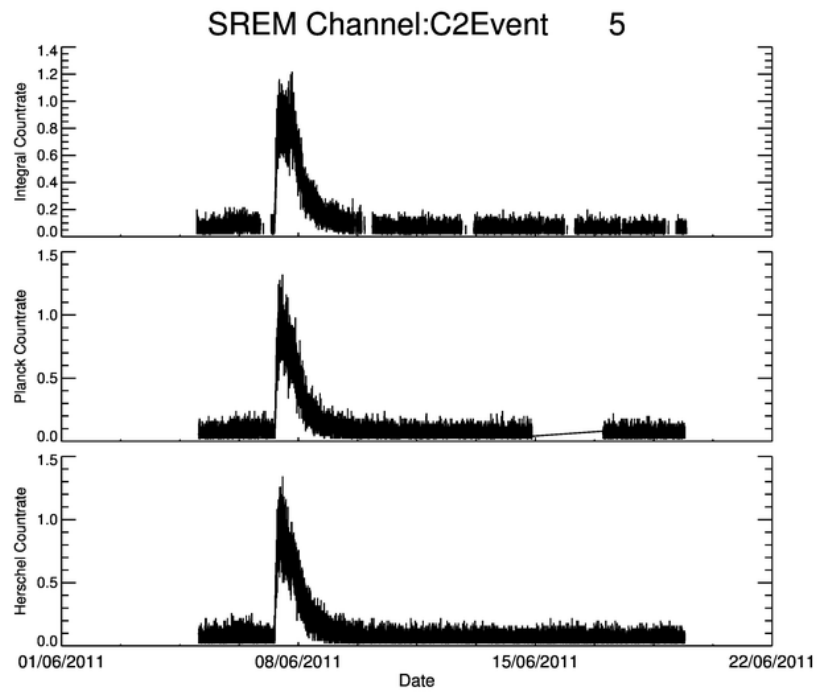
4.4.2.1 Επεισόδιο #3

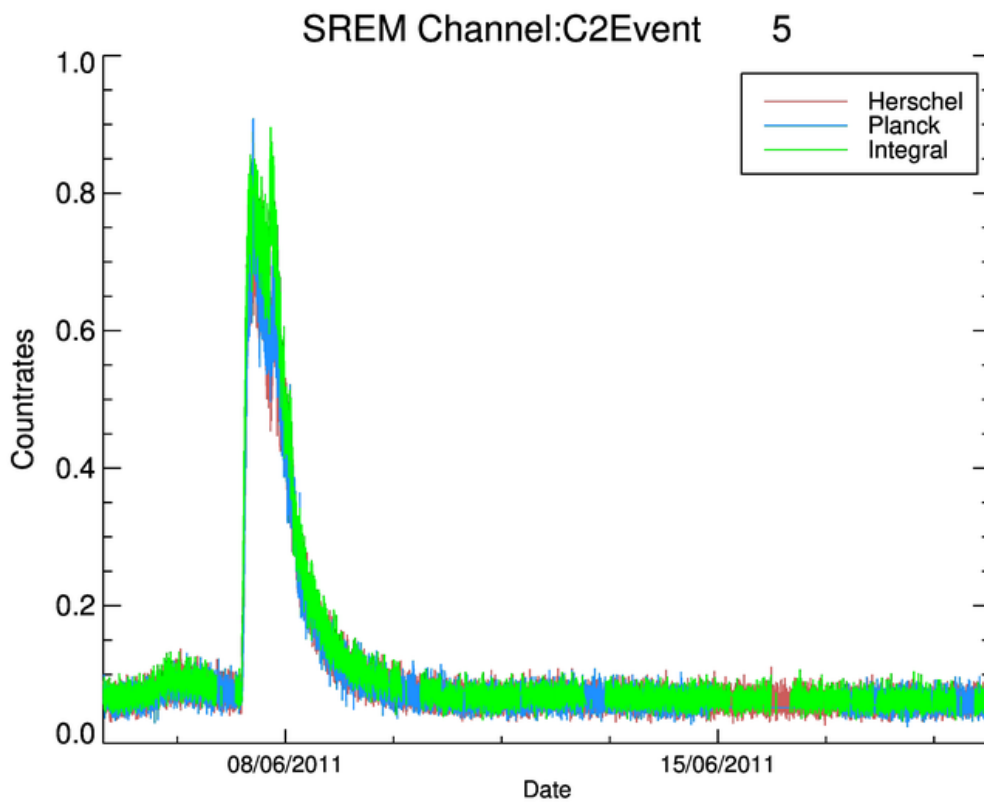
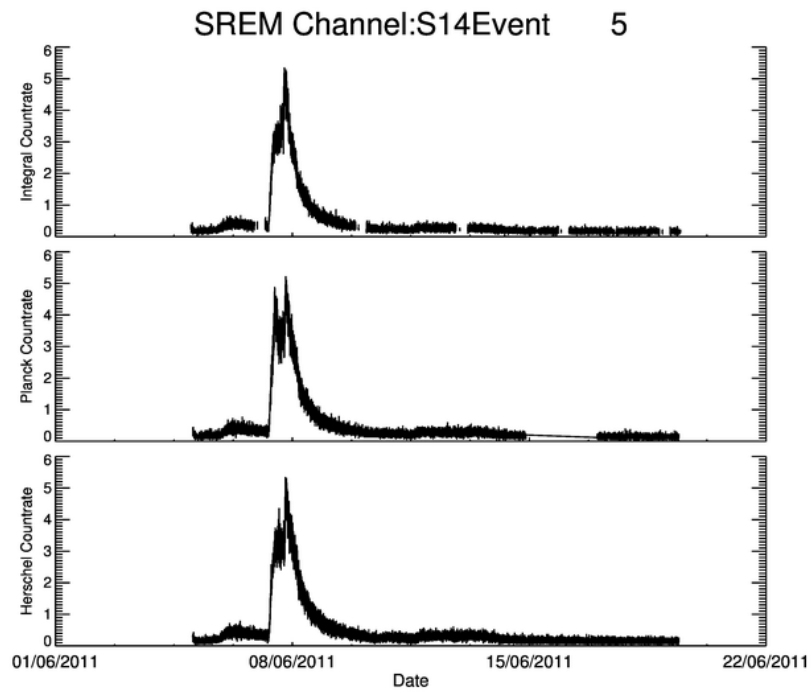




Το #3 επεισόδιο είναι μέτριας έντασης και διάρκειας, ενώ παρουσιάζει παρόμοια δομή στα περισσότερα από τα κανάλια του SREM.

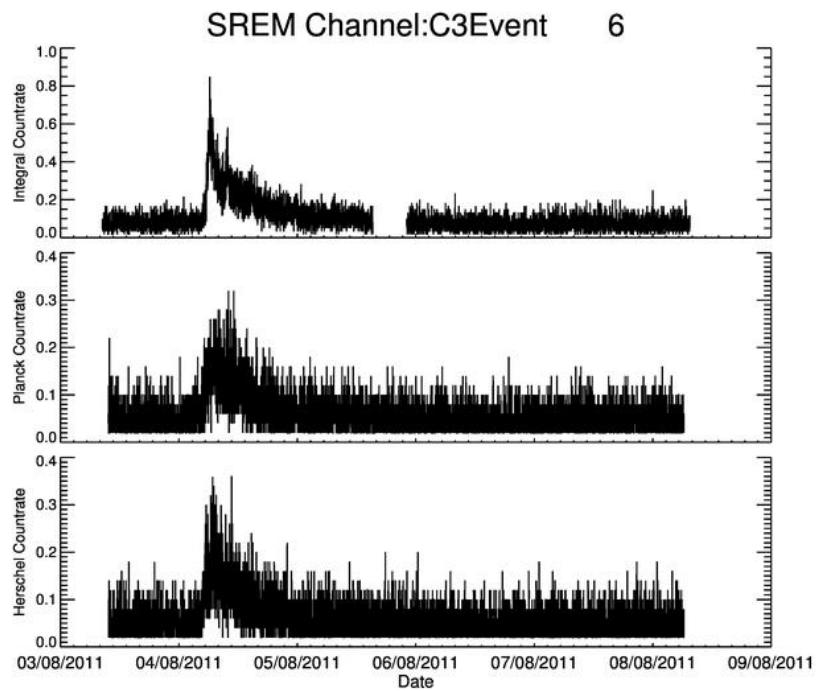
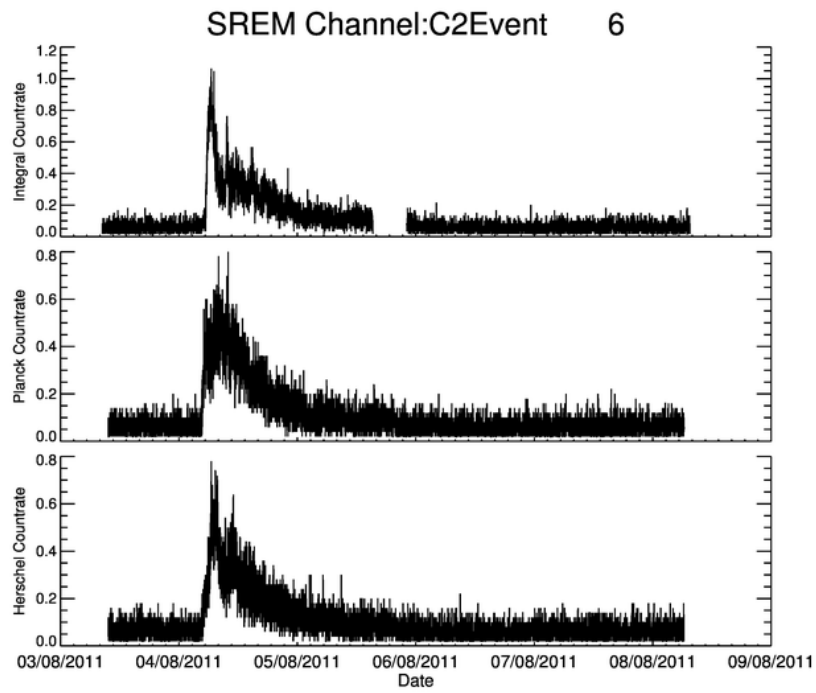
4.4.2.2 Επεισόδιο #5

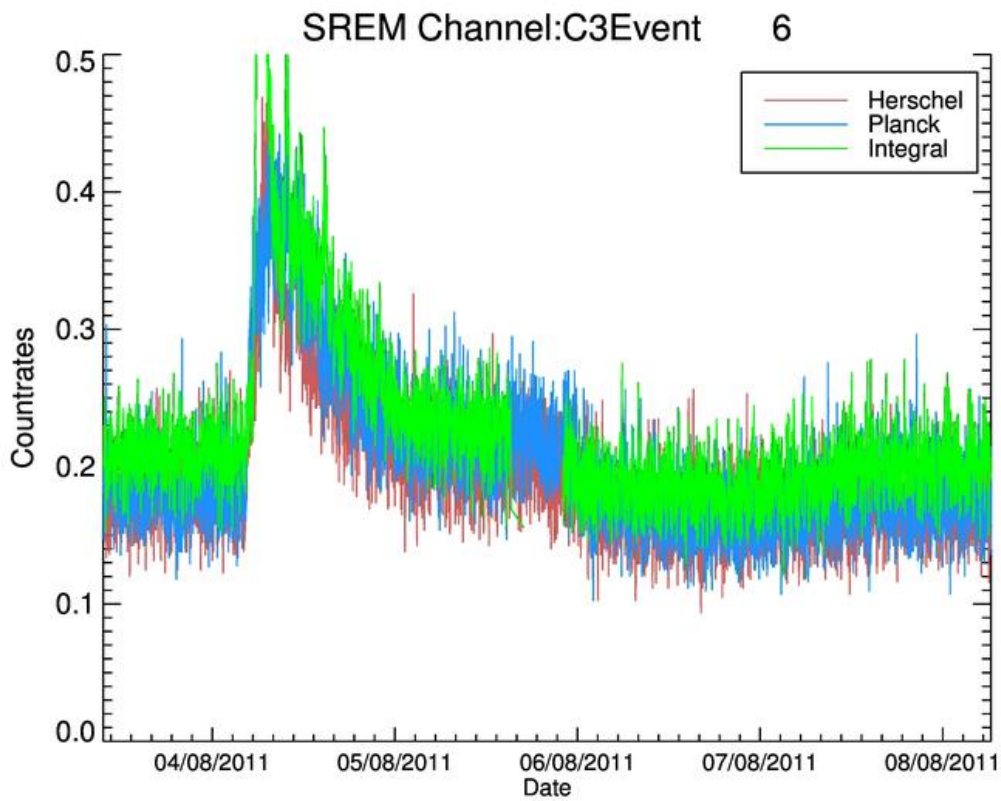
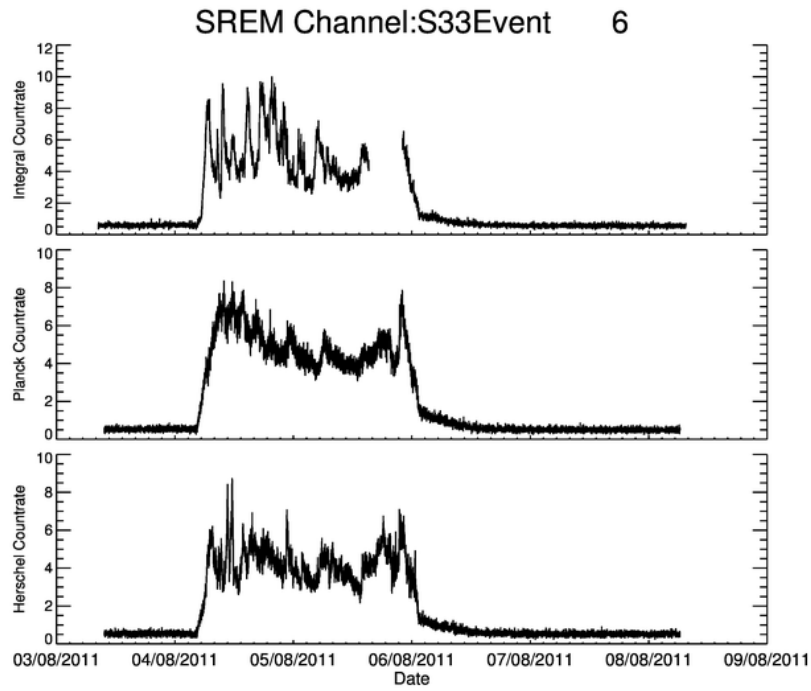




Το επεισόδιο #5 είναι μικρής έντασης και μεγάλης διάρκειας. Σε αντίθεση με το #3 παρατηρούμε ότι έχει έντονο σήμα στα πρωτονικά κανάλια C1 – C3

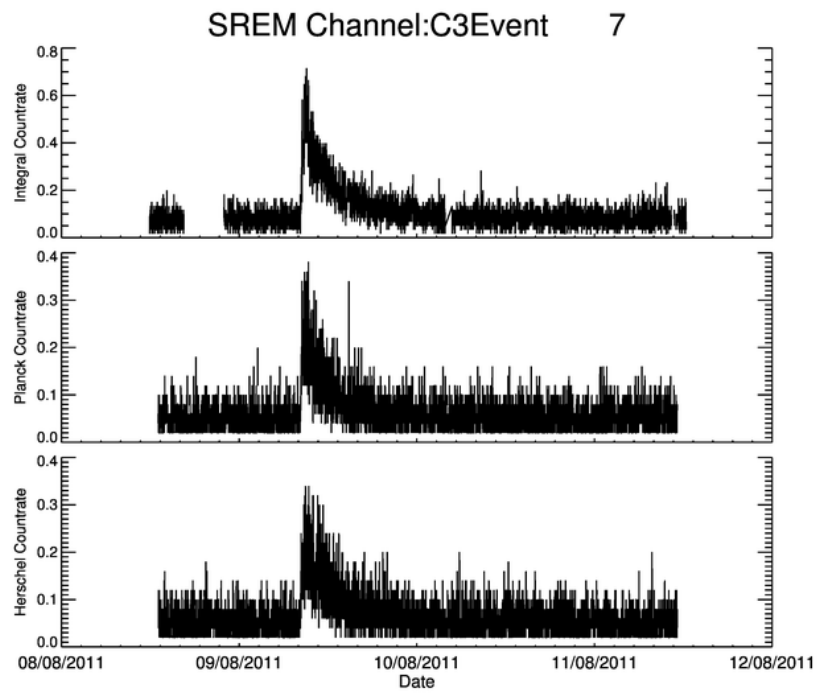
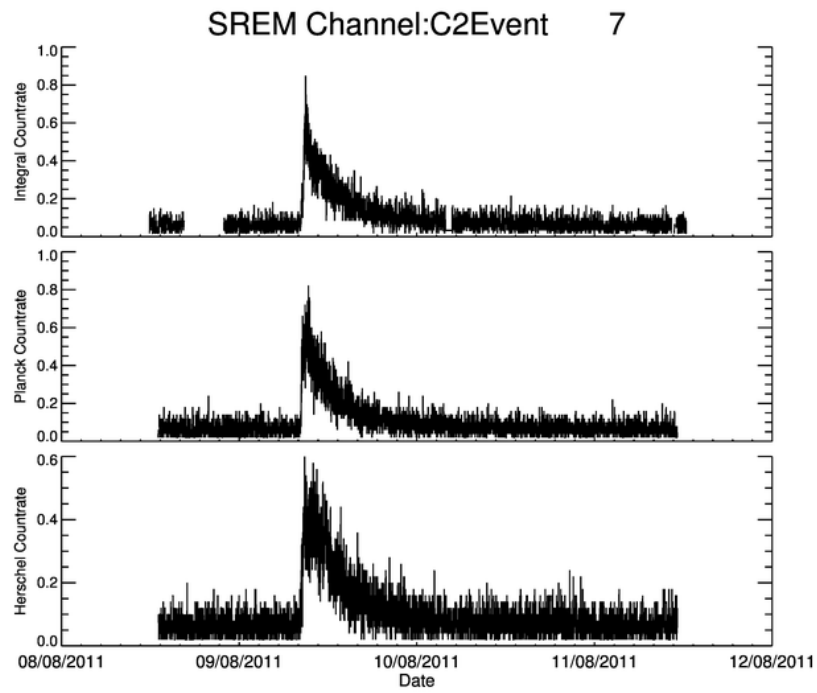
4.4.2.3 Επεισόδιο #6

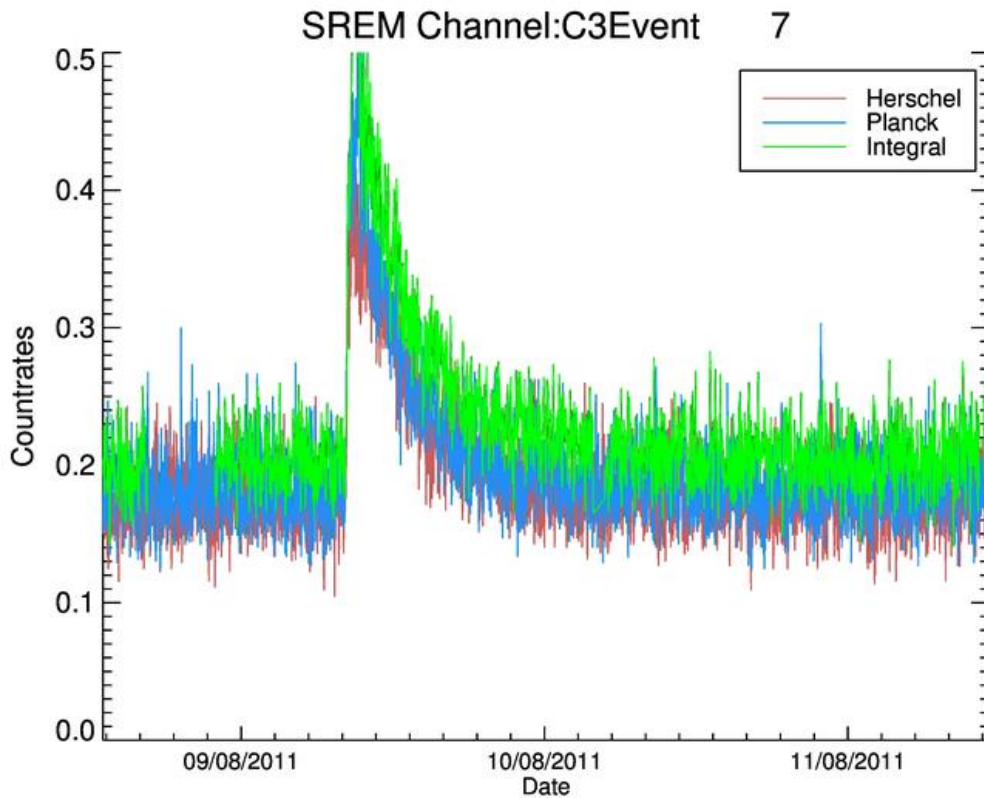
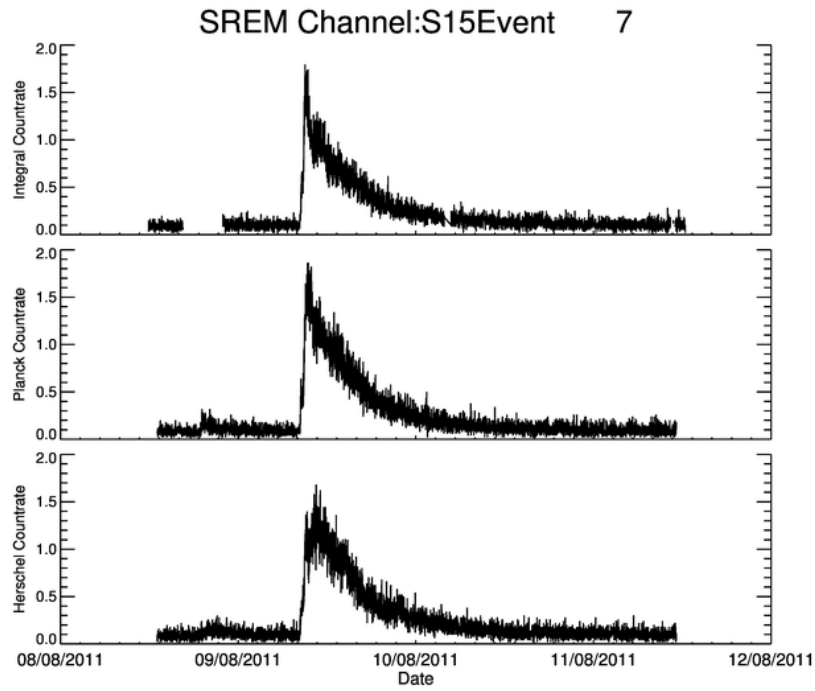




Το επεισόδιο #6 είναι μέσης έντασης και μικρής διάρκειας. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς τη διαφορά στα μέγιστα που εμφανίζονται στα C2, C3 τα οποία είναι σχεδόν διπλάσια για τον INTEGRAL.

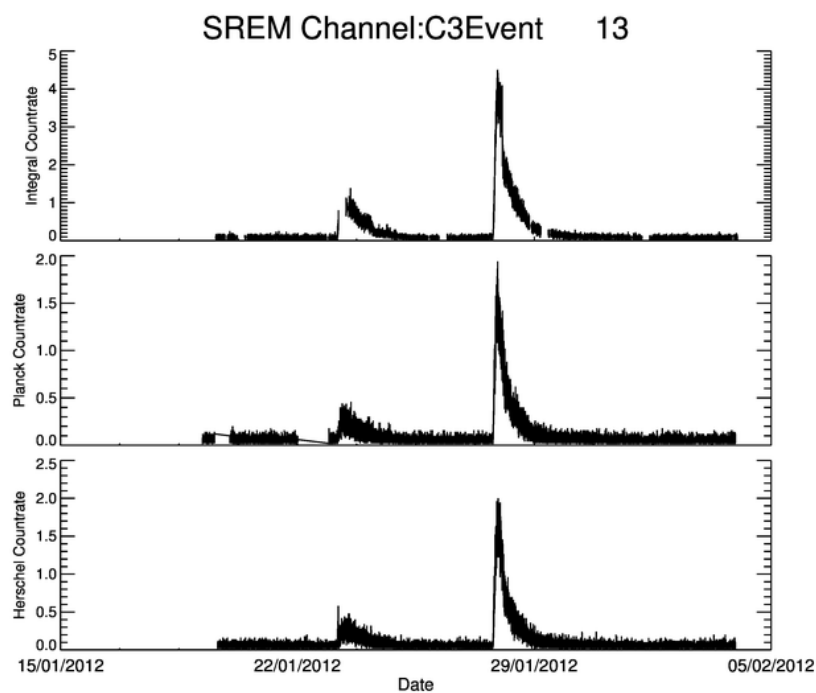
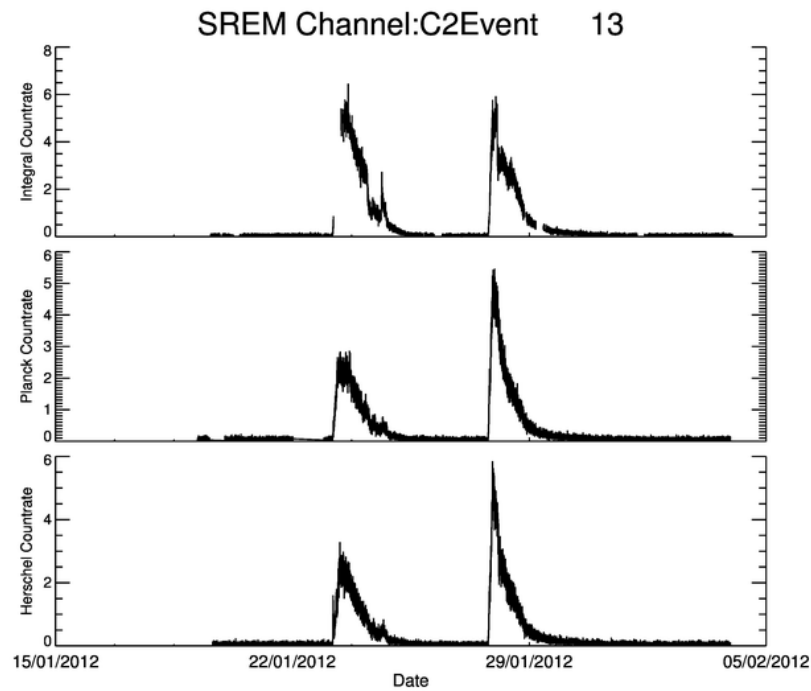
4.4.2.4 Επεισόδιο #7



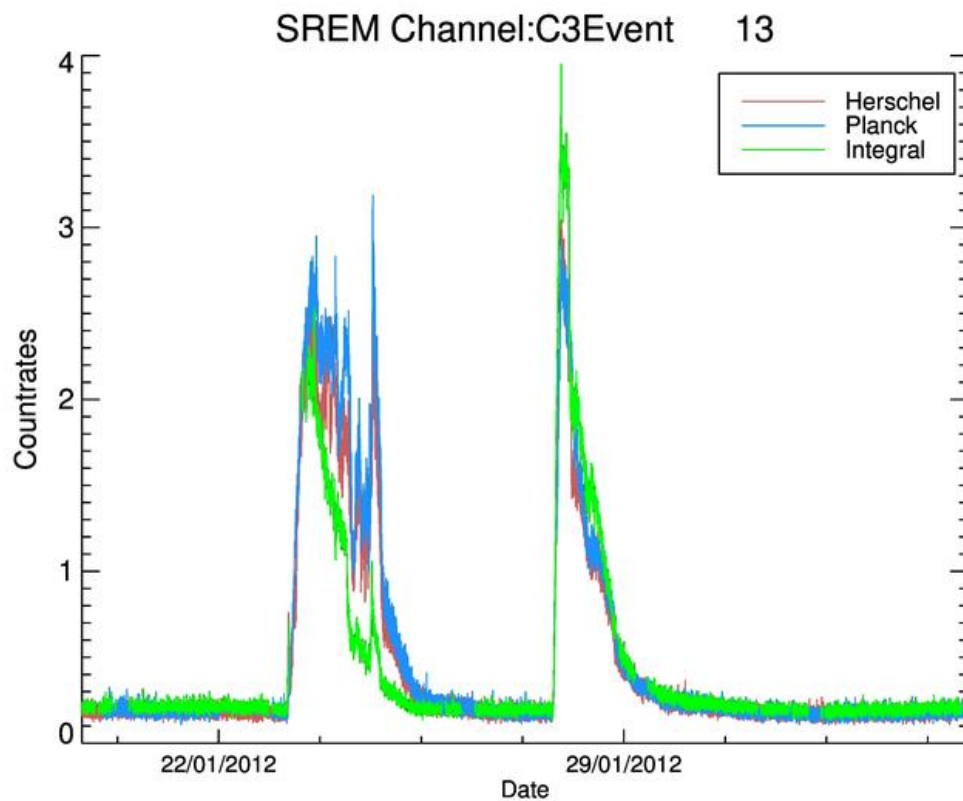
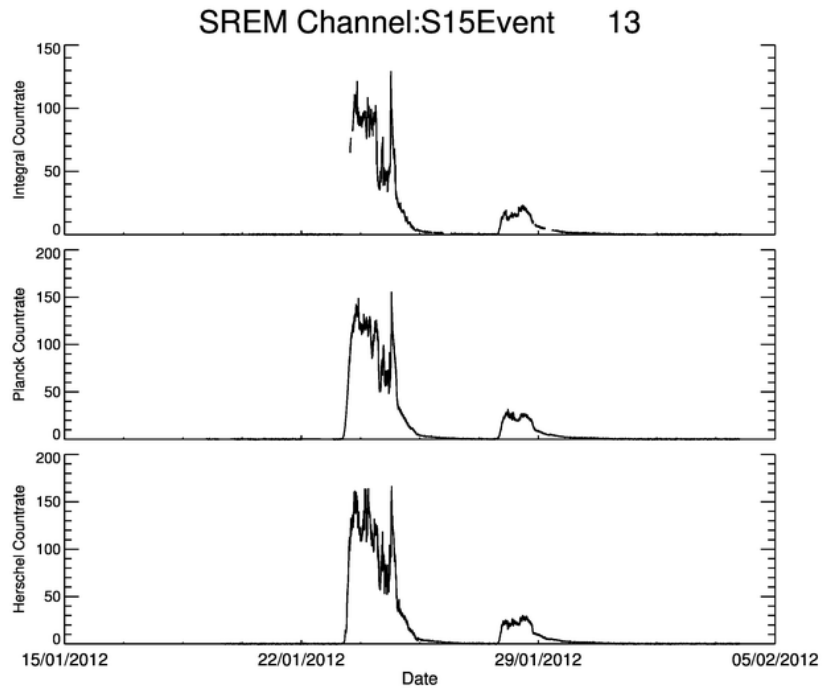


Το επεισόδιο #7 είναι μικρής έντασης και διάρκειας. Σε αντίθεση με το επεισόδιο #6 που ήταν μεγαλύτερης έντασης, οι διαφορές δεν είναι τόσο ευδιάκριτες στα μέγιστα των τιμών για τα C2, C3.

4.4.2.5 Επεισόδιο #13

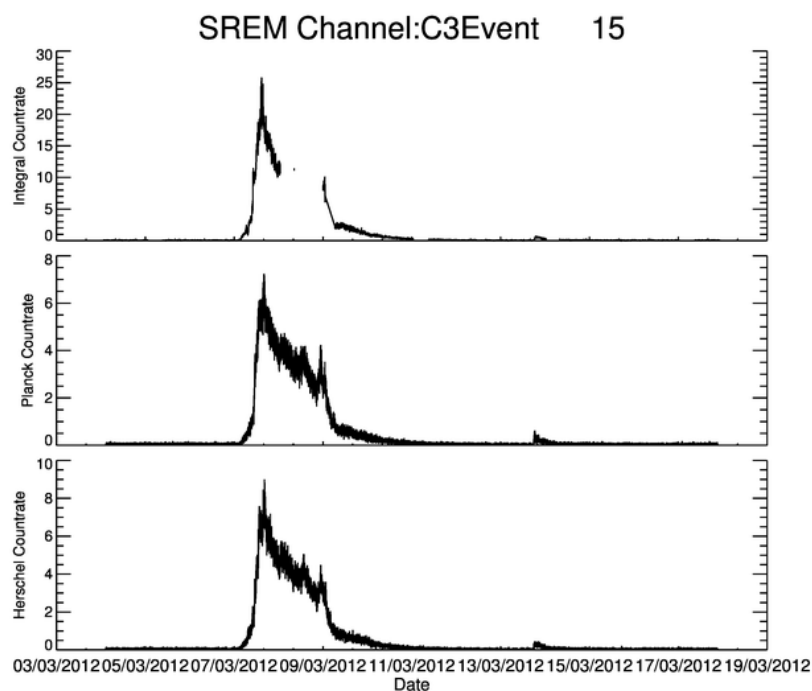
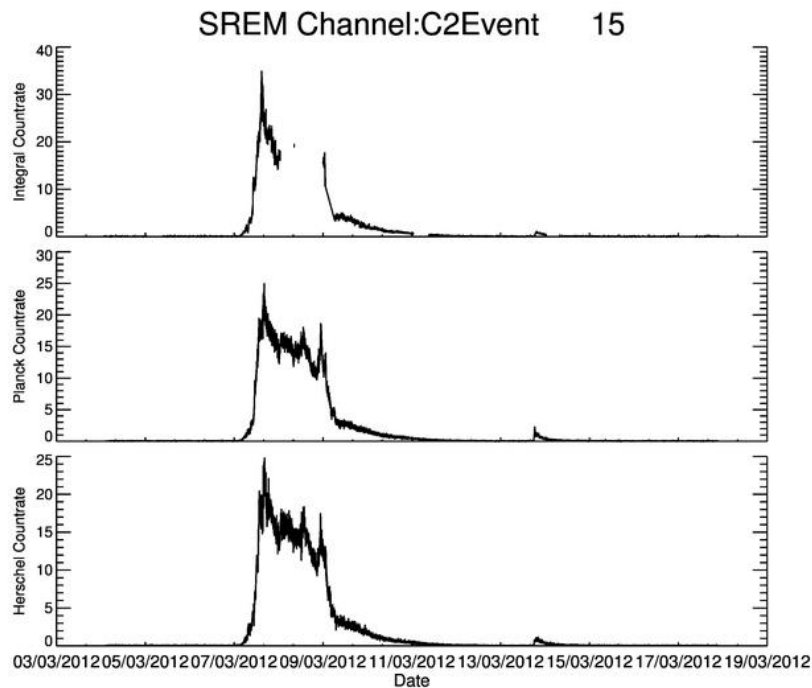


Το επεισόδιο #13 είναι **πολύ μεγάλης έντασης και διάρκειας**. Η διαφορά του μεγίστου των Countrates για τους τρεις δορυφόρους είναι εμφανής στο κανάλι C_3 . Ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει το διαφορετικό προφίλ που φαίνεται στα δύο πρωτογενικά κανάλια (C_2 & C_3).

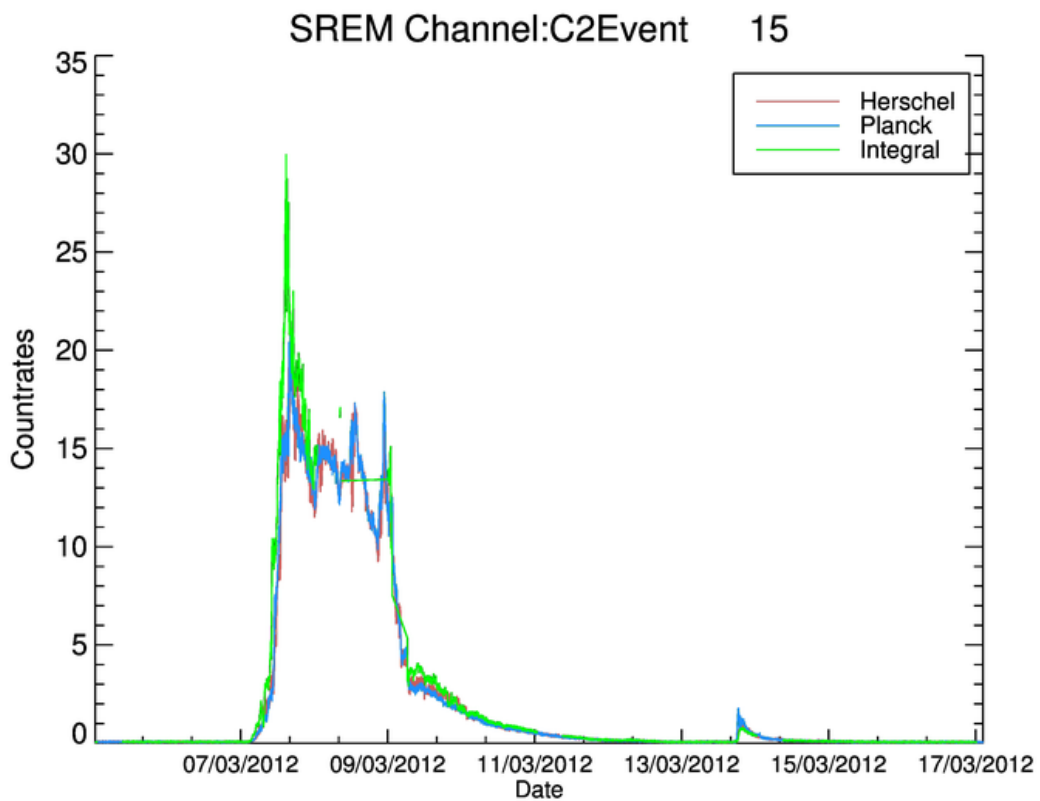
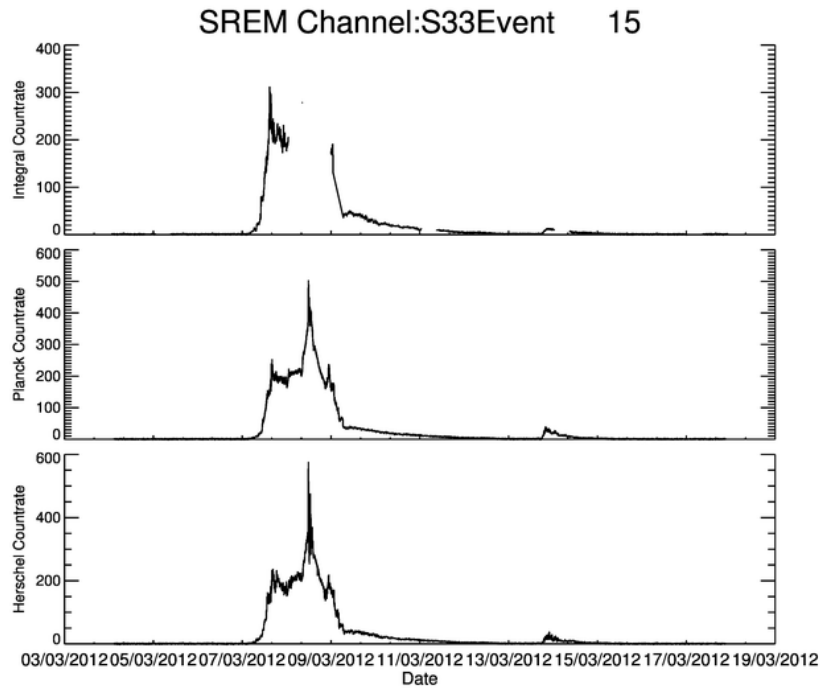


Παρατηρούμε στη πρώτη χαρακτηριστική κορυφή του επεισοδίου ότι υπάρχουν πολλά σωματίδια χαμηλής ενέργειας, ενώ στη δεύτερη λίγα σωματίδια υψηλής ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί τη παραπάνω μορφολογία στα γραφήματα.

4.4.2.6 Επεισόδιο #15

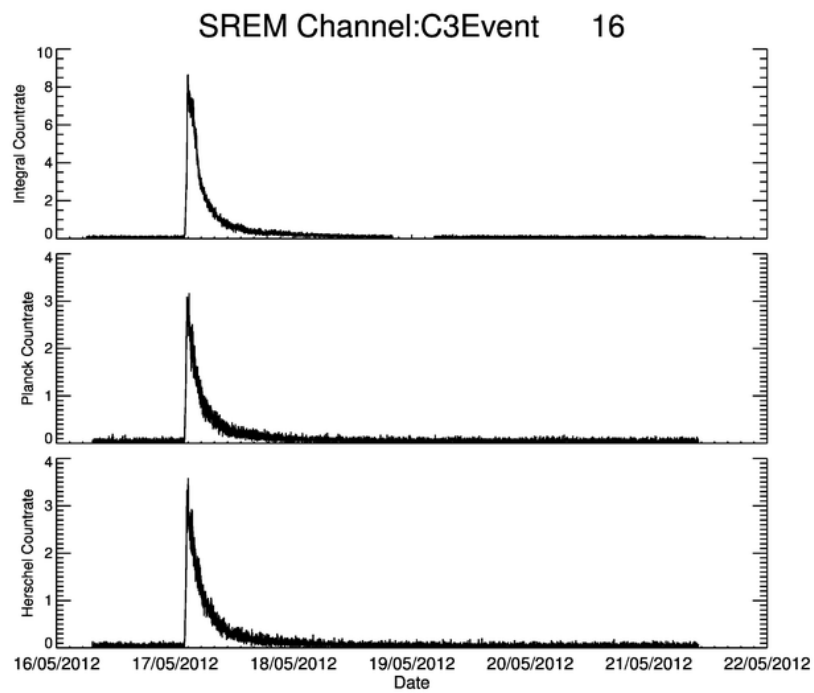
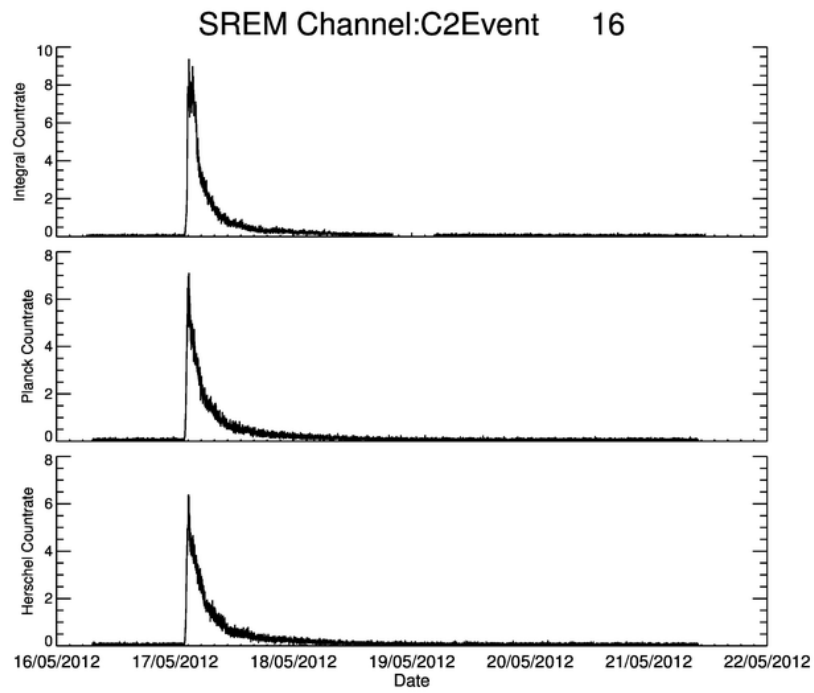


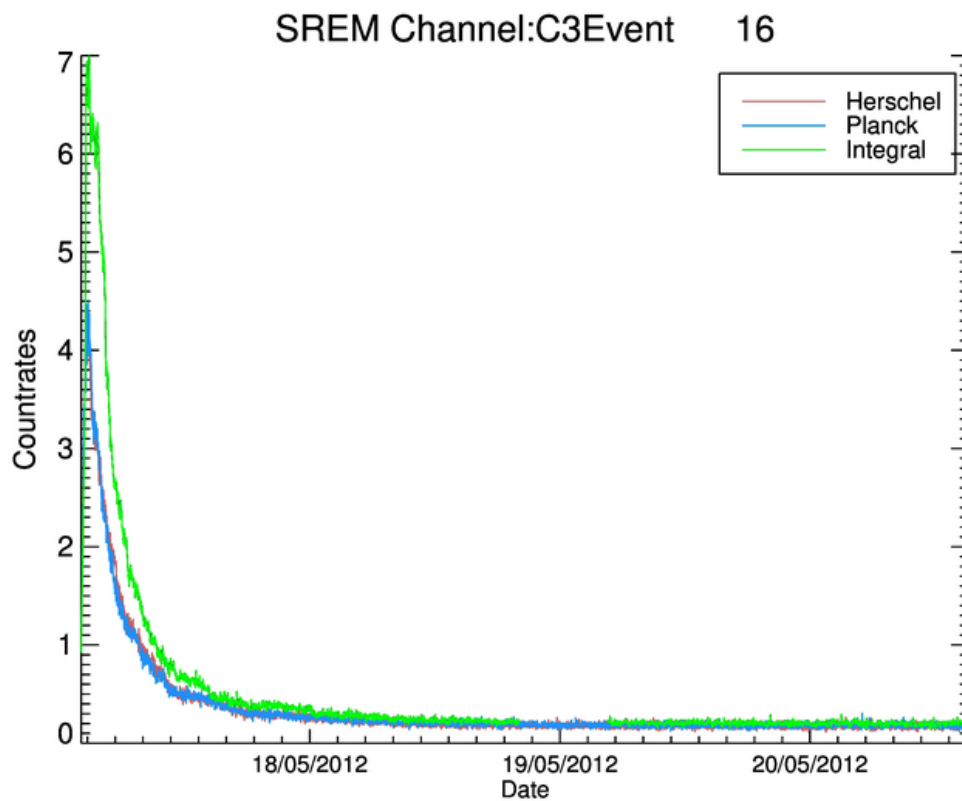
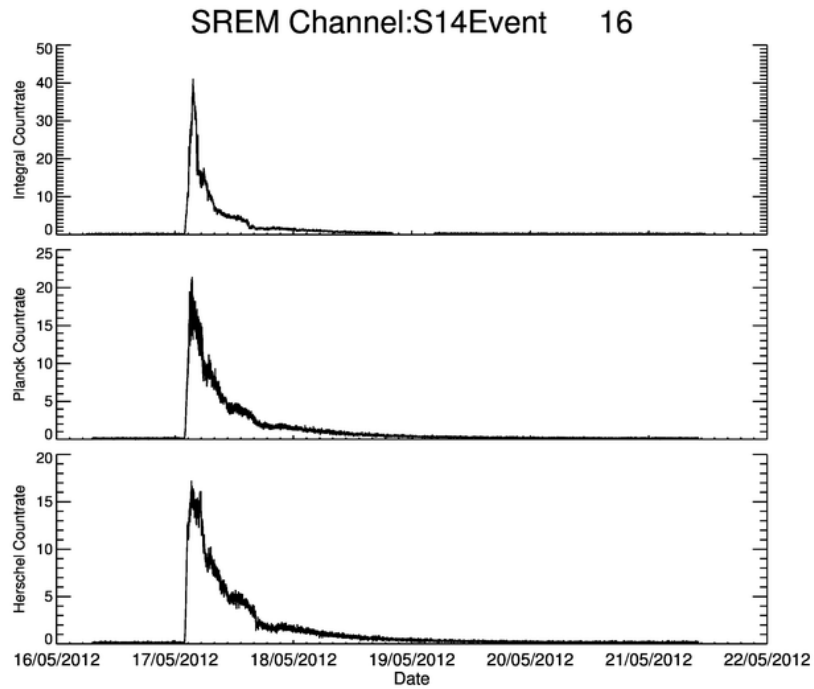
Το επεισόδιο #15 είναι πολύ μεγάλης έντασης και διάρκειας. Είναι από τα πιο χαρακτηριστικά επεισόδια που ανιχνεύτηκαν, ενώ αναδεικνύει ιδιαίτερα την αύξηση των μετρήσεων στο INTEGRAL σε μικρότερο βαθμό στο C2 και σε μεγαλύτερο στο C3.



Μέρος της πληροφορίας χάνεται γιατί έχουμε “Κενά - Gaps” στις μετρήσεις του INTEGRAL. Είναι προφανές ότι στις υψηλές ενέργειες ο INTEGRAL έχει παραπάνω μετρήσεις από τους υπόλοιπους δύο δορυφόρους.

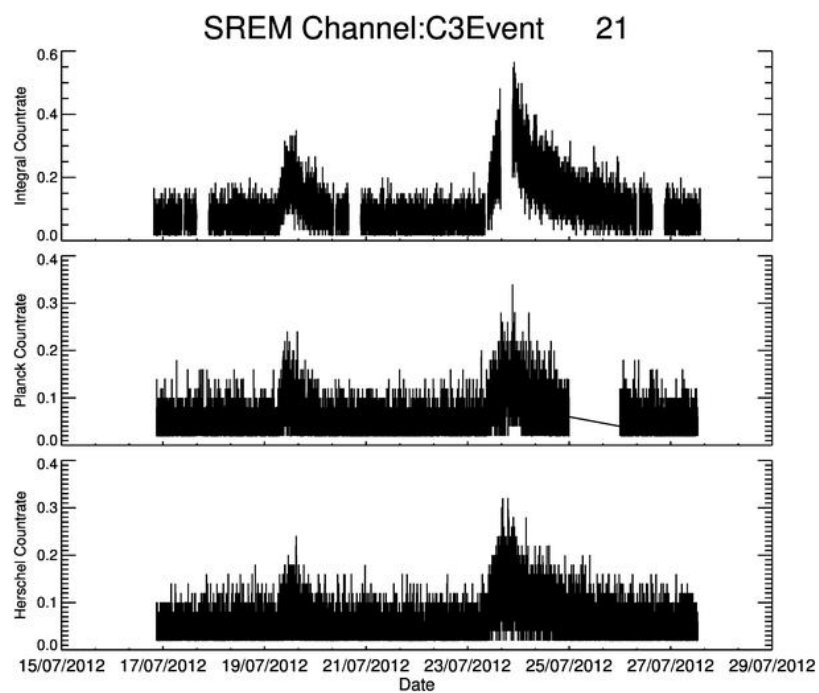
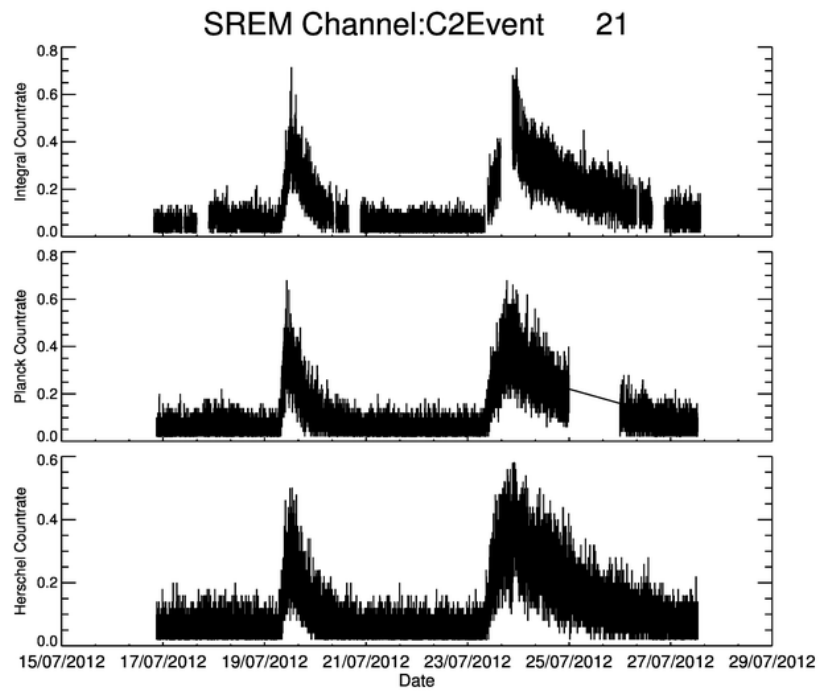
4.4.2.7 Επεισόδιο #16



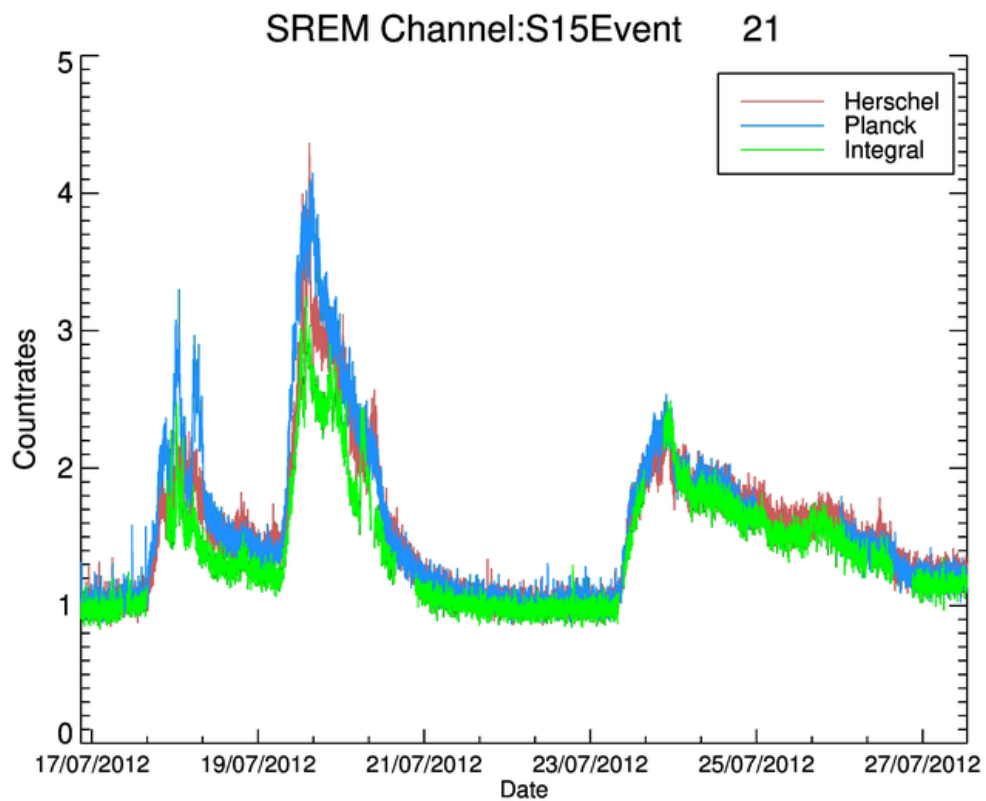
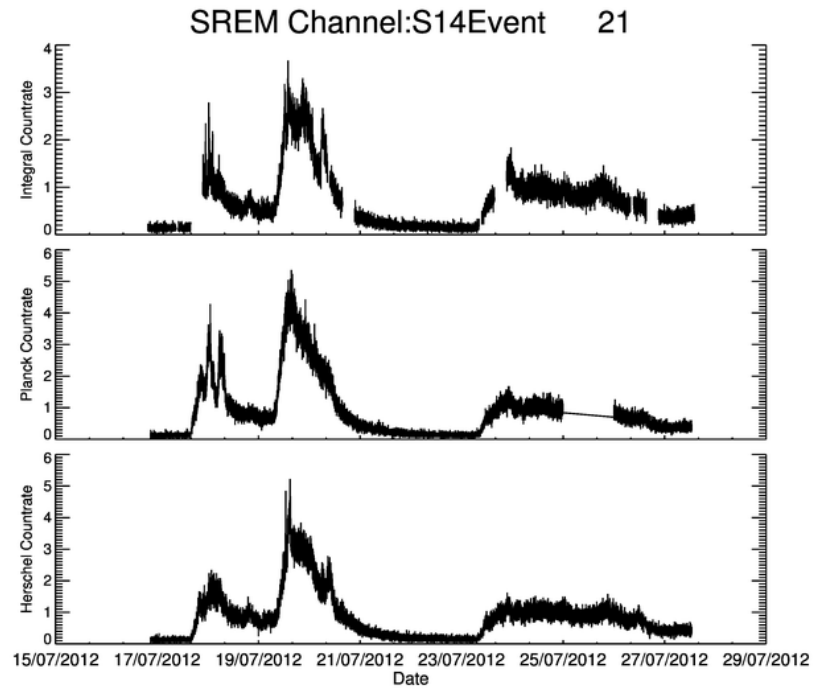


Το #16 επεισόδιο είναι μέσης έντασης και διάρκειας. Όπως και με τα προηγούμενα επεισόδια, η χαρακτηριστική κορυφή στο C3 παρουσιάζει ενδιαφέρον αφού ακολουθεί το ίδιο μοτίβο, που έχουμε παρατηρήσει ως τώρα στα προηγούμενα.

4.4.2.8 Επεισόδιο #21

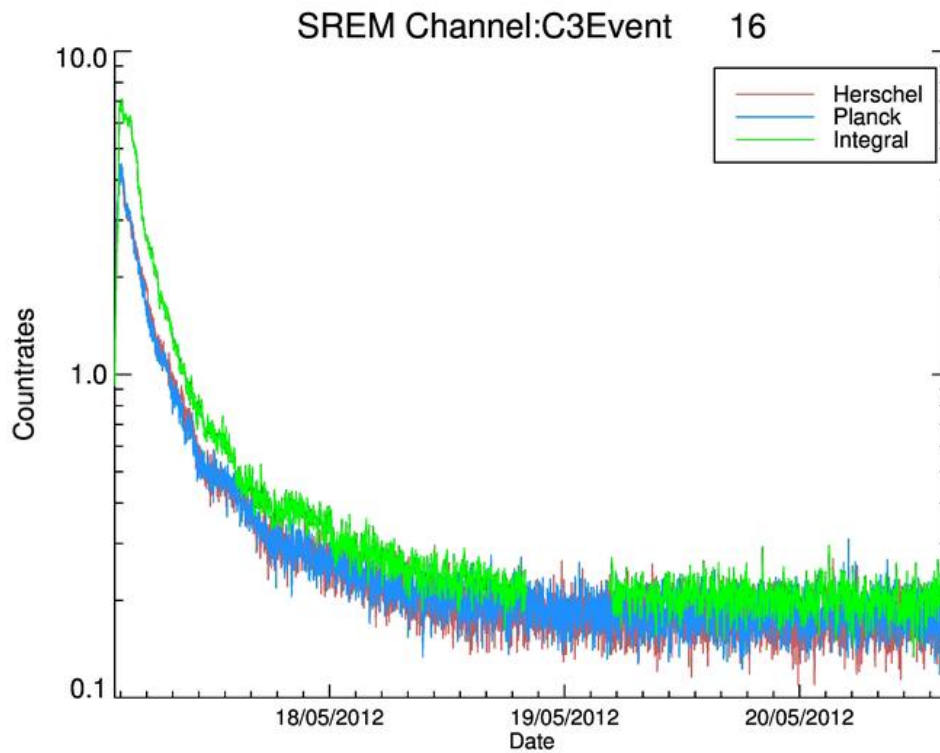
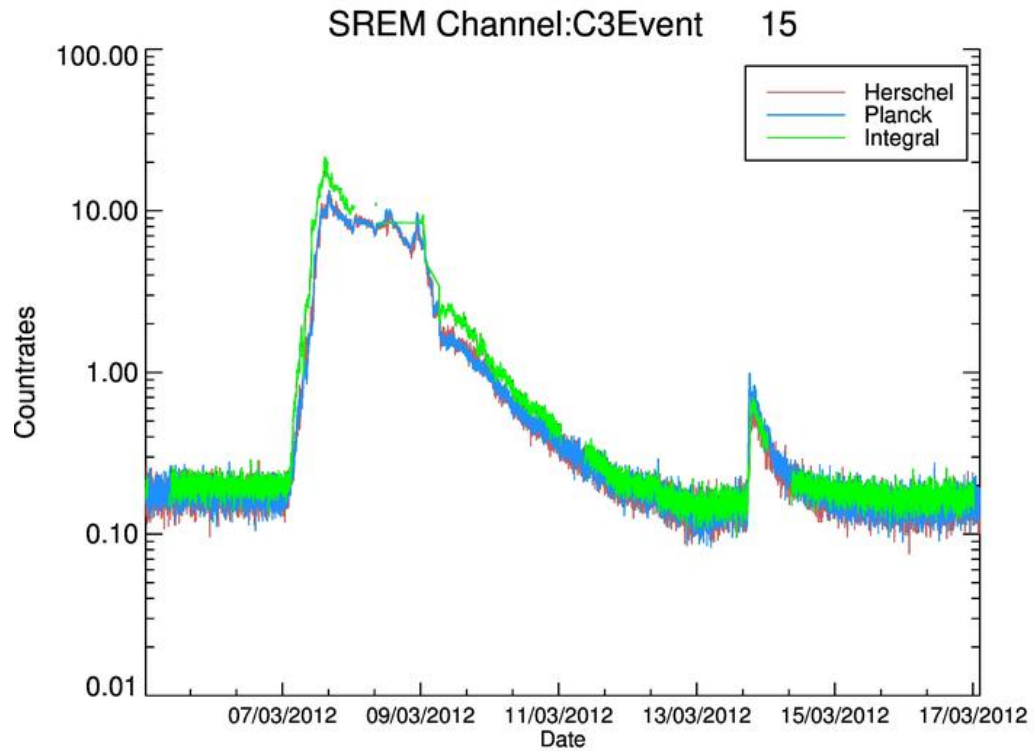


Το #21 επεισόδιο είναι μέσης έντασης και διάρκειας. Λόγω των ελάχιστων μετρήσεων στα κανάλια C2, C3 δεν μπορούμε να δούμε το ίδιο χαρακτηριστικό, που φάνηκε στα προηγούμενα ισχυρότερα επεισόδια.



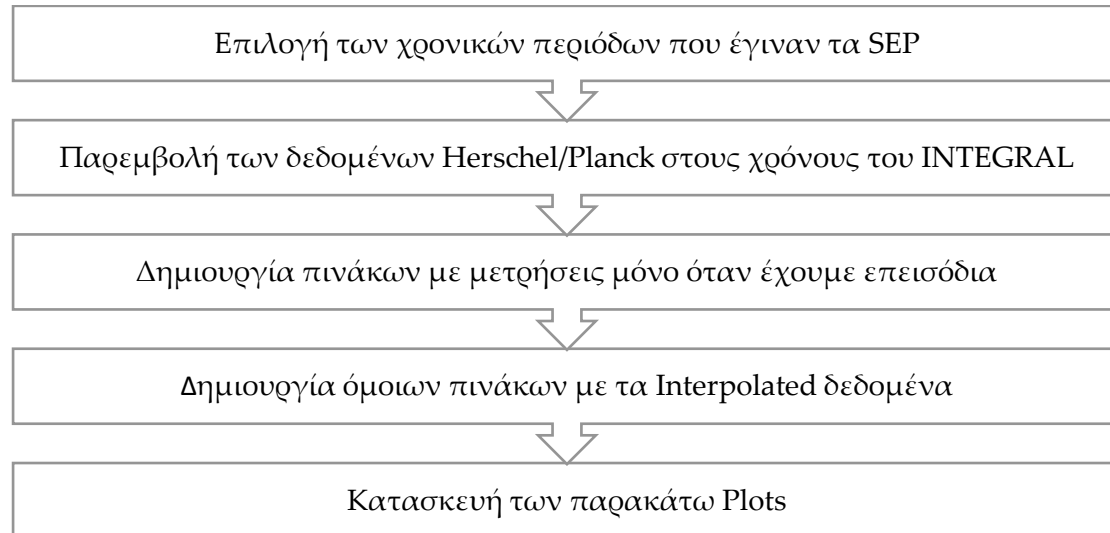
Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, έχει ενδιαφέρον να δει κανείς ότι σε κανάλια όπως το S15 έχουμε περισσότερες μετρήσεις για τα Herschel/Planck σε σχέση με τον INTEGRAL.

Τέλος, παρουσιάζουμε κάποια λογαριθμικά γραφήματα για τα επεισόδια 15 και 16, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της μεγάλης διάρκειας και συνολικής ενέργειας που τα χαρακτηρίζει.



4.4.3 Παρεμβολή δεδομένων (Interpolation)

Για τη σύγκρισή των παραπάνω επεισοδίων αρχικά ενοποιήσαμε τις μετρήσεις και τους αντίστοιχους χρόνους σε ενιαίες μεταβλητές, ώστε να έχουμε τις μετρήσεις ενδιαφέροντος μαζί. Στη συνέχεια, κάναμε Interpolation των δεδομένων του Herschel/Planck στους χρόνους του INTEGRAL. Σχηματικά κάναμε τα εξής:



Για λόγους πληρότητας και για έλεγχο της διαδικασίας παρεμβάλλαμε τις μετρήσεις του Planck στους χρόνους του Herschel, καθώς μας επιτρέπει να ελέγξουμε αν προκύπτει γραμμική η σχέση όπως θα περιμέναμε για δύο σετ δεδομένων που έρχονται από τον ίδιο ανιχνευτή και το ίδιο σημείο (L_2).

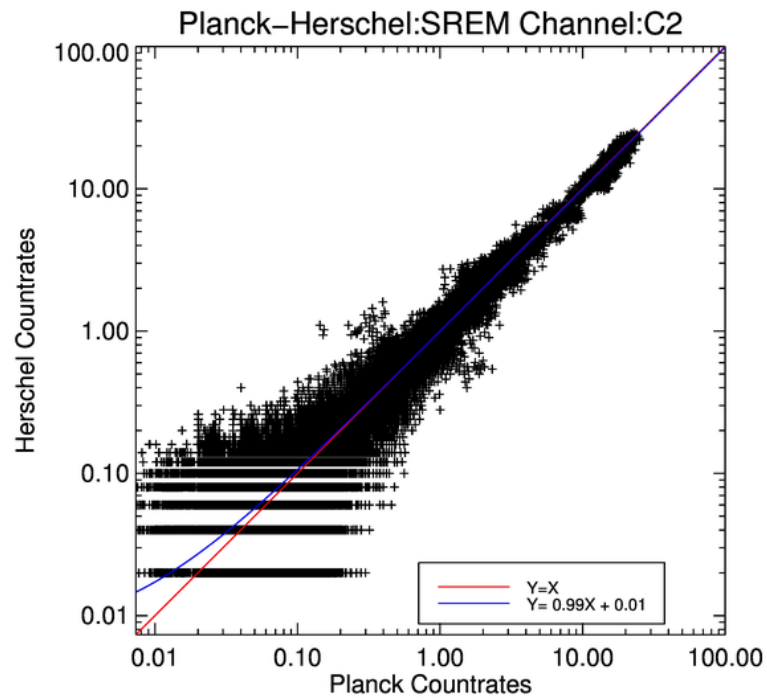
Τα παρακάτω γραφήματα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Η μπλε γραμμή αποτελεί μια γραμμική προσαρμογή και μας δείχνει την συνολική τάση των μετρήσεων. Είναι δηλαδή η αριθμητική προσέγγιση των μετρήσεων σε συνάρτηση $\psi = ax + \beta$.

Η κόκκινη γραμμή είναι η ευθεία $\psi = \chi$ και βρίσκεται για λόγους σύγκρισης με την μπλε που έχει σχεδιαστεί προηγουμένως, αλλά και ως άξονας συμμετρίας για τα δεδομένα που παρεμβάλλαμε.

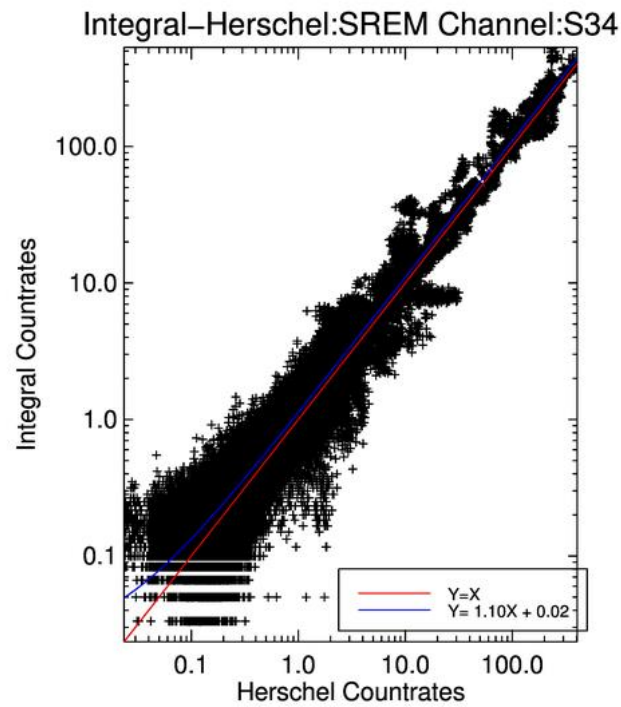
Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση του συντελεστή α της μπλε ευθείας αφού προκύπτει ως ολικός συντελεστής. Κατά τη δημιουργία του, συνυπολογίζει το μεγάλο όγκο δεδομένων, που υπάρχει από το θόρυβο υποβάθρου που έχουν οι μετρήσεις μας. Ειδικότερα στις περιπτώσεις όπου το β δεν είναι ακριβώς κοντά στη τιμή μηδέν, ο συντελεστής α έχει πολύ μεγάλο σφάλμα.

4.4.3.1 Herschel - Planck

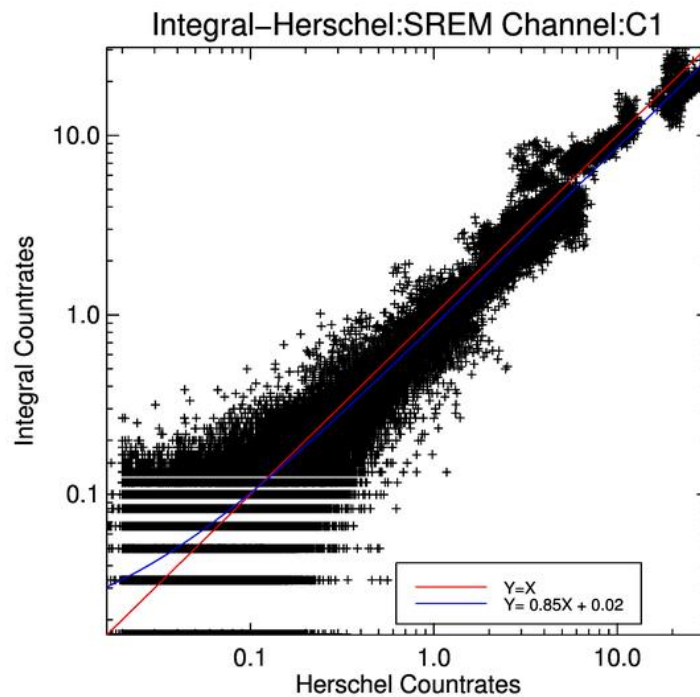


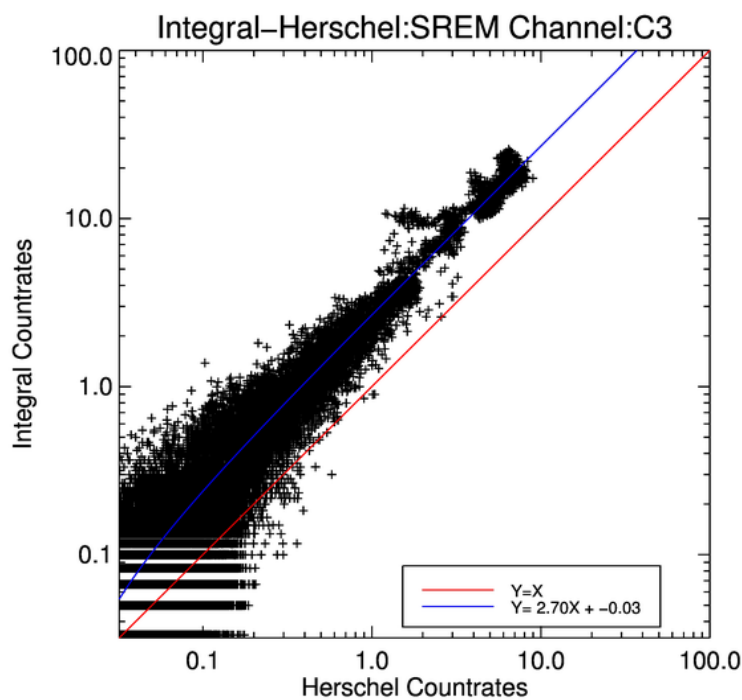
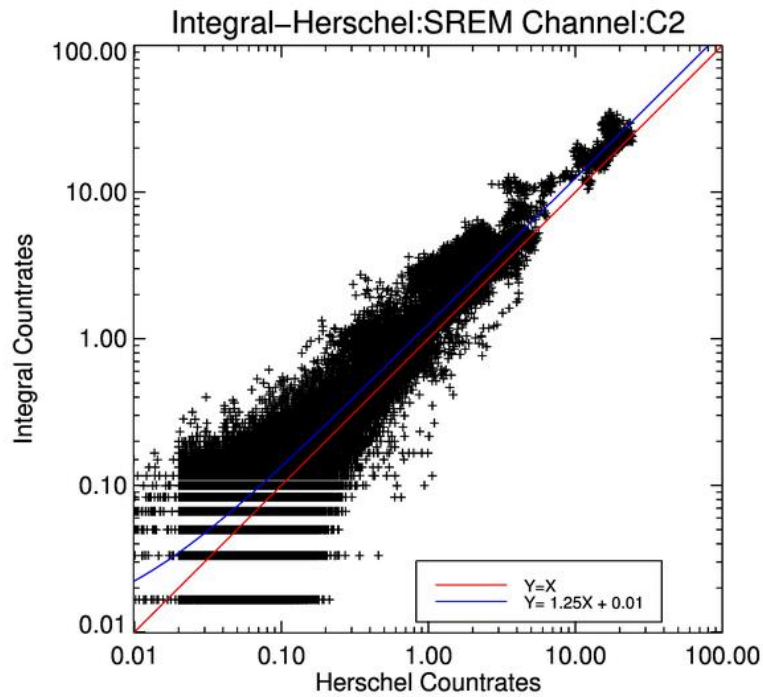
Παρατηρούμε ότι η γραμμική σχέση που προκύπτει για τους Herschel - Planck αποτελεί την επιβεβαίωση ότι το Interpolation που κάναμε είναι σωστό. Περιμέναμε μια συμφωνία των μετρήσεων μεταξύ των δύο αυτών αποστολών αφού βρίσκονται και οι δύο γύρω από το σημείο L_2 .

4.4.3.2 Herschel - INTEGRAL



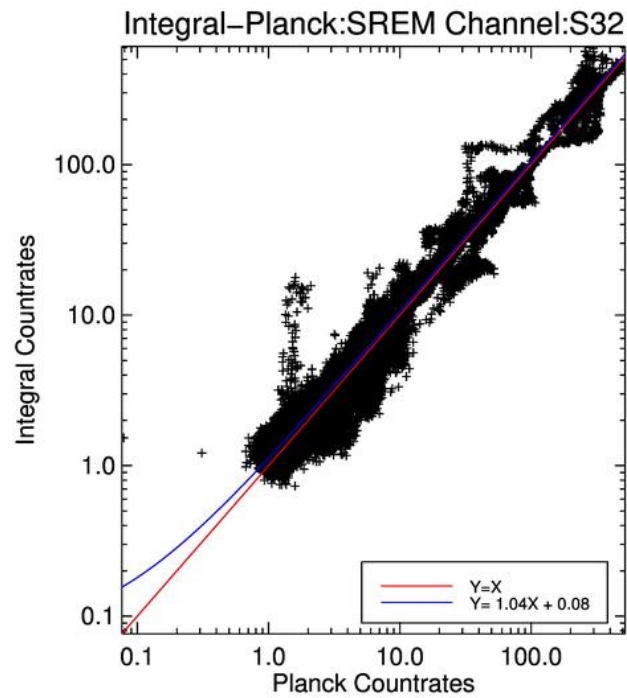
Όπως περιμέναμε από τα χαρακτηριστικά επεισόδια που έχουμε δει στην παράγραφο 4.4.2, στα χαμηλό-ενεργειακά κανάλια όπως το S34, έχουμε γραμμική σχέση ($\alpha \sim 1.1$). Επιπλέον, οι μετρήσεις φαίνονται να είναι ίσο-κατανεμημένες πάνω και κάτω από τη $\psi = \chi$.



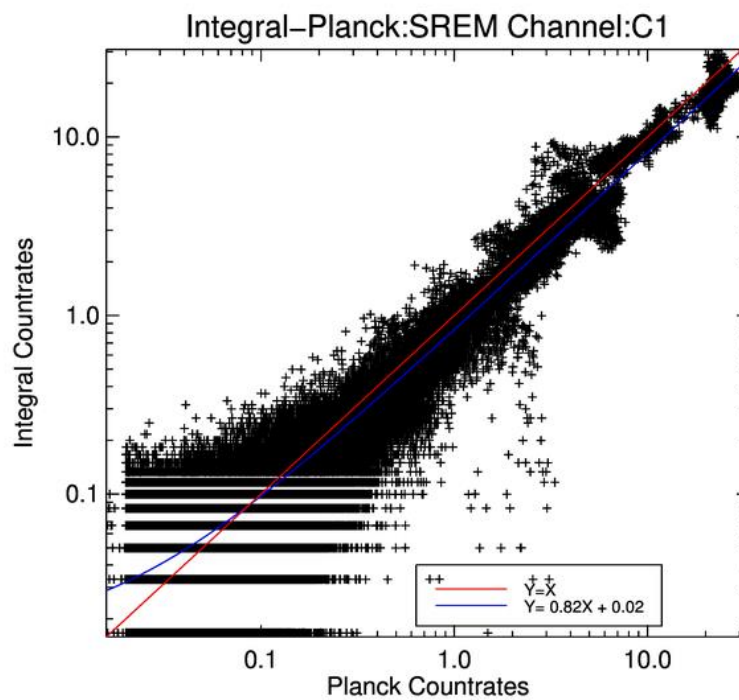


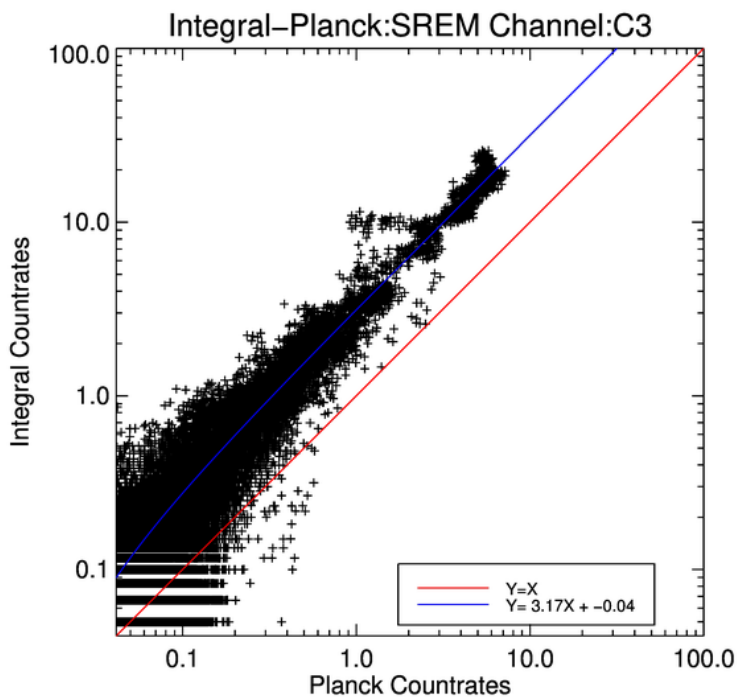
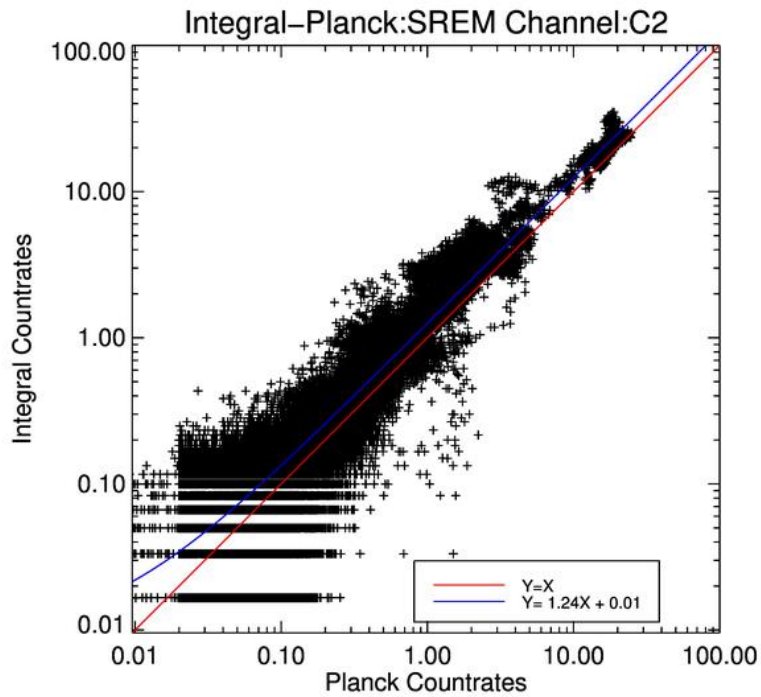
Πηγαίνοντας στα πρωτονικά κανάλια που μετρώνε όλο και από μεγαλύτερες ενέργειες, παρατηρούμε ότι η γραμμική σχέση που έχουμε παράγει φτάνει ένα συντελεστή της τάξης του 2.7 στο C3. Οι μετρήσεις είναι σαφώς μετατοπισμένες στην άνω πλευρά της $\psi = x$, υποδηλώνοντας ότι η ροή υψηλό-ενεργειακών πρωτονίων είναι εντονότερη στο INTEGRAL.

4.4.3.3 Planck - INTEGRAL



Όπως περιμέναμε με βάση τη συμπεριφορά που είχε το ζευγάρι INTEGRAL - Herschel στα χαμηλό-ενεργειακά κανάλια, έχουμε παρόμοια συμπεριφορά στη συνολική κατανομή των μετρήσεων.





Πηγαίνοντας στα πρωτονικά κανάλια που μετράνε όλο και από μεγαλύτερες ενέργειες, παρατηρούμε ότι η γραμμική σχέση που έχουμε κατασκευάσει έχει συντελεστή 3.17 στο C3. Όμοια δηλαδή συμπεριφορά με το ζευγάρι INTEGRAL - Herschel.

4.4.4 Ιστογράμματα - Μικρό πλήθος κελιών

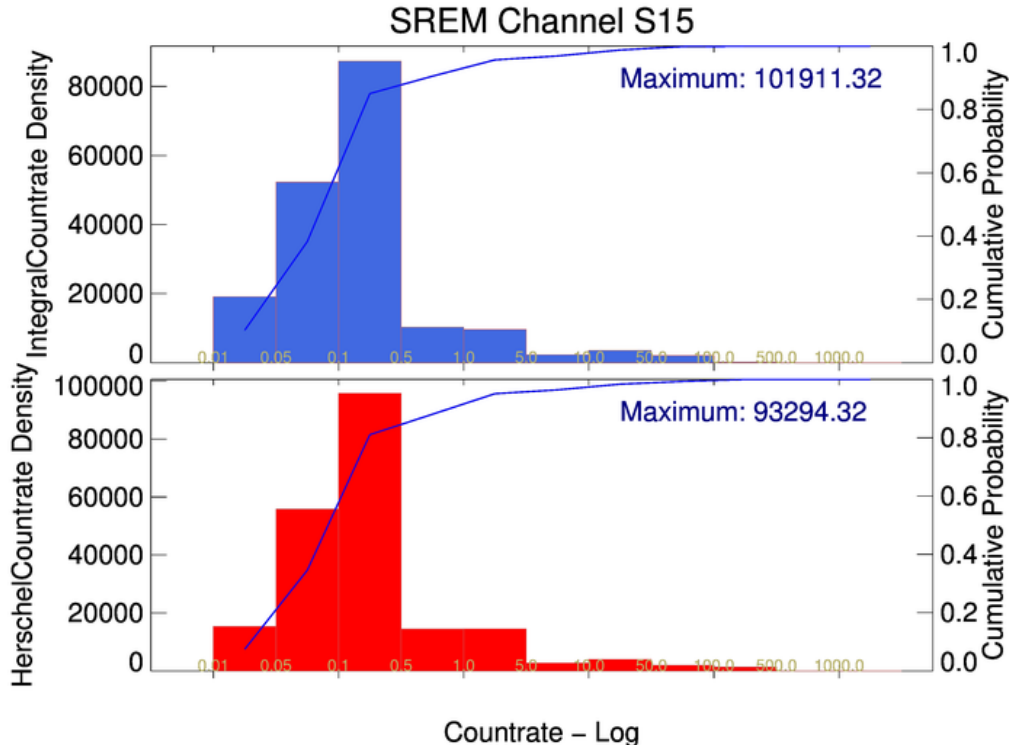
Αν χωρίσουμε τα δεδομένα μας σε ομάδες και κατασκευάσουμε ιστογράμματα, μπορούμε να μελετήσουμε καλύτερα τη κατανομή τους και να επιβεβαιώσουμε τα γραφήματα, που έγιναν μέσω της παρεμβολής των μετρήσεων στη παράγραφο 4.4.3. Επιλέξαμε και κάναμε μια διαμέριση σε 10 κελιά. Συγκεκριμένα στα:

$$0.01 - 0.05 - 0.1 - 0.5 - 1 - 5 - 10 - 50 - 100 - 500 - 1000$$

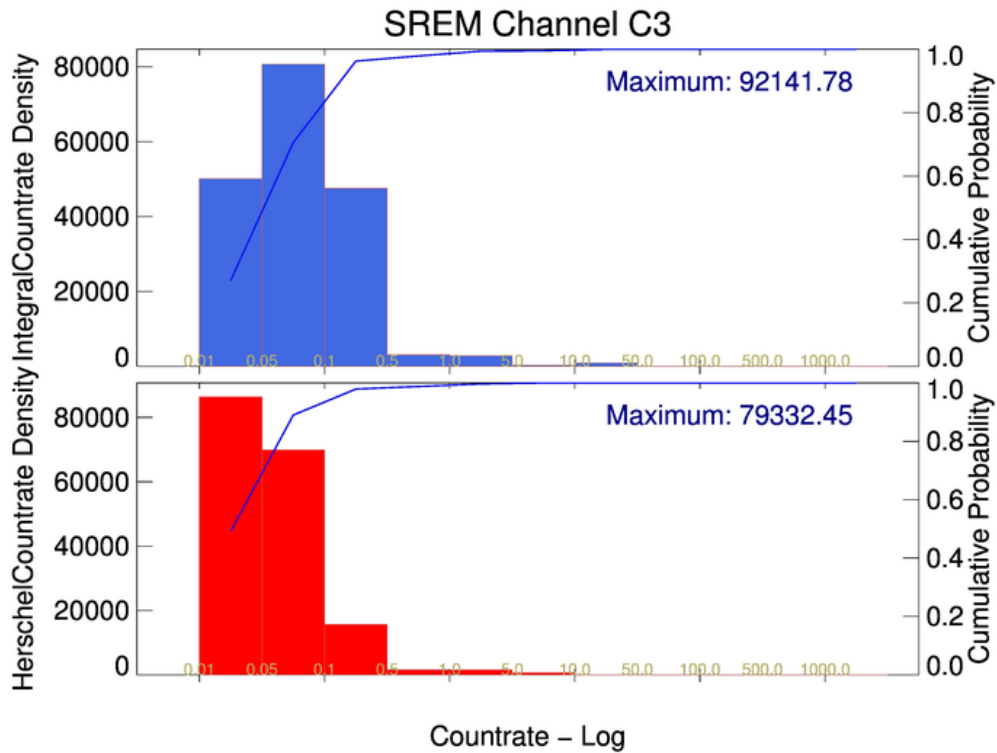
Στα παρακάτω ιστογράμματα έχουμε τα εξής:

- Στον αριστερό άξονα έχουμε τον αριθμό των μετρήσεων ανά κελί.
- Στο δεξί άξονα έχουμε την αθροιστική πιθανότητα, η οποία έχει γίνει και σε γραμμική αναπαράσταση (CDF¹) ως μια μπλε τεθλασμένη ευθεία.
- Στον κάτω άξονα έχουμε τις μετρήσεις (Countrates) σε λογαριθμική κλίμακα, που μας δείχνουν τις ακραίες τιμές των κελιών που κατασκευάσαμε.

Σημαντική λεπτομέρεια είναι ότι η ευθεία που έχουμε κατασκευάσει προκύπτει από σημεία που ορίζονται στο κέντρο του κάθε κελιού. Συνεπώς πληροφορίες όπως η κλίση της ή το σημείο στο κάθε κελί έχουν μεγάλο σφάλμα όταν έχουμε μικρό πλήθος κελιών. Η μόνη πληροφορία που είναι άμεσα χρήσιμη είναι το κελί στο οποίο τείνει στη μονάδα η παραγόμενη CDF.



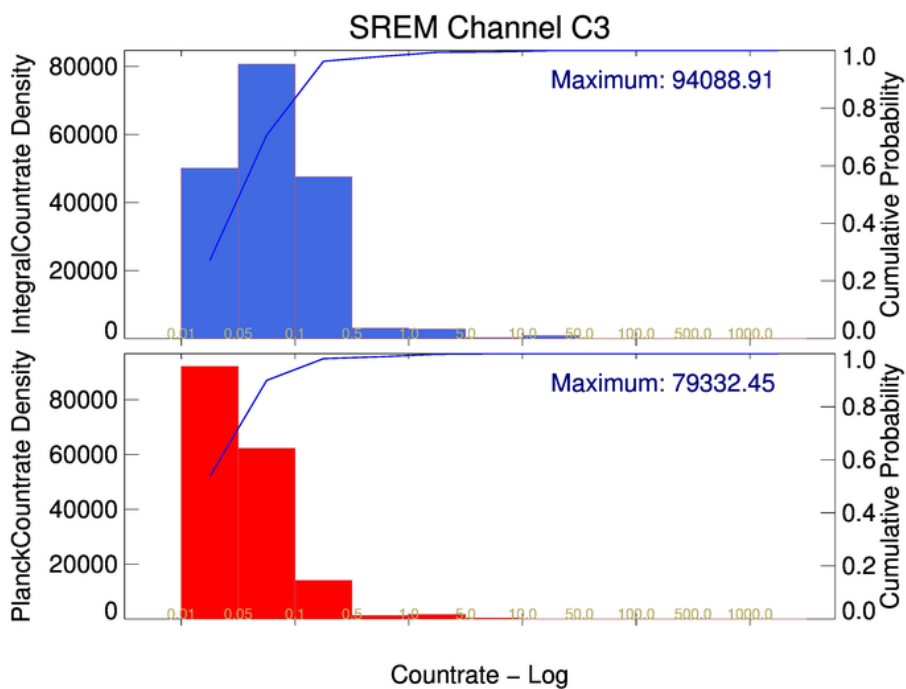
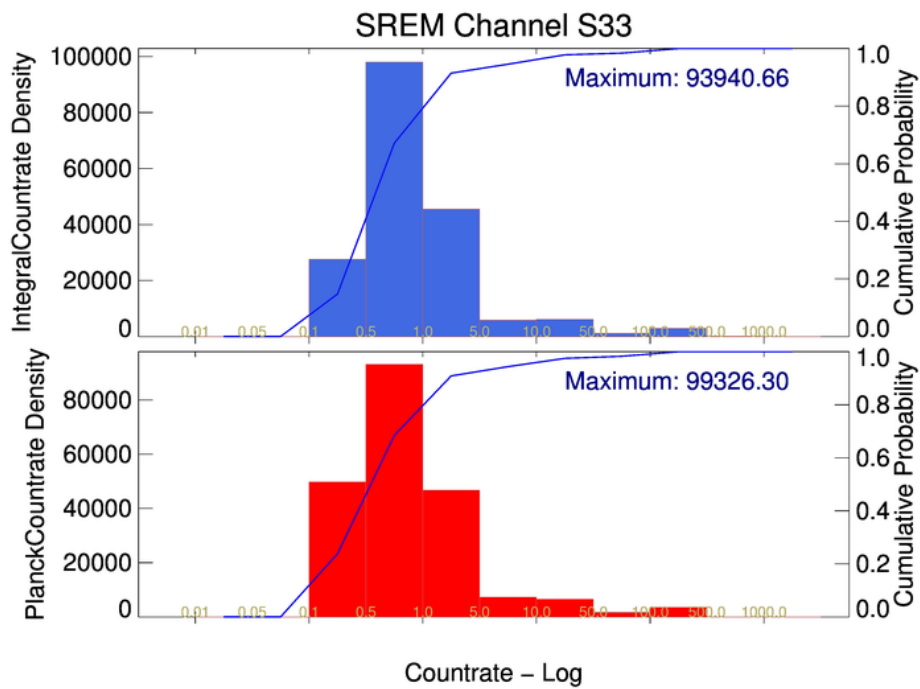
¹ Cumulative Distribution Function.



Στο κανάλι C3 παρατηρούμε ότι έχουμε περισσότερες ενέργειες σε μεγαλύτερα κελιά. Επίσης, η αθροιστική πιθανότητα τείνει στην μονάδα σε πιο υψηλά Count rates στον INTEGRAL απ' ό τι στον Herschel.

Παρατηρούμε επιπλέον, ότι στα κανάλια όπως το S15 έχουμε περίπου ίδιες μετρήσεις, κάτι που φάνηκε στα απλά γραφήματα και στα Interpolated.

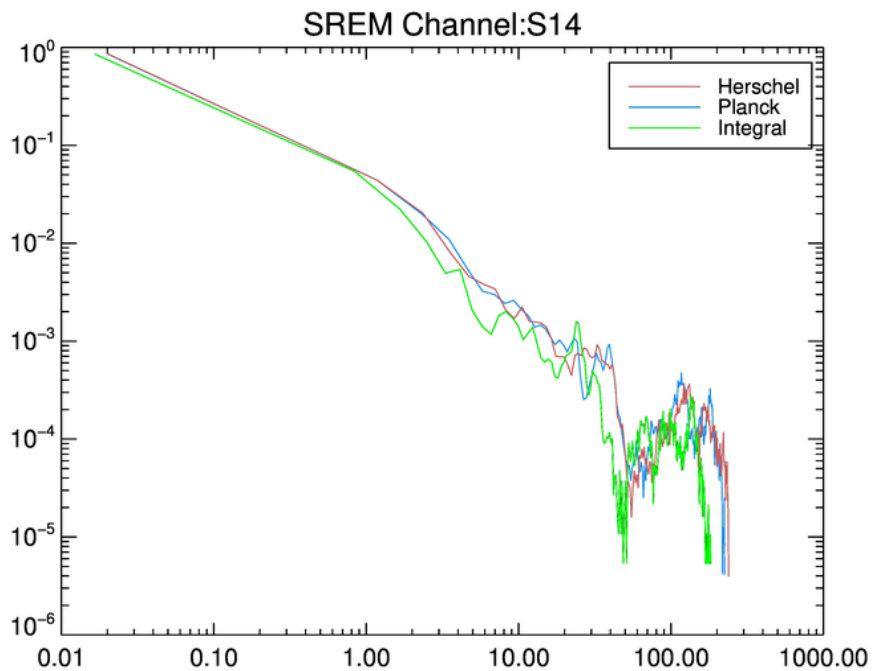
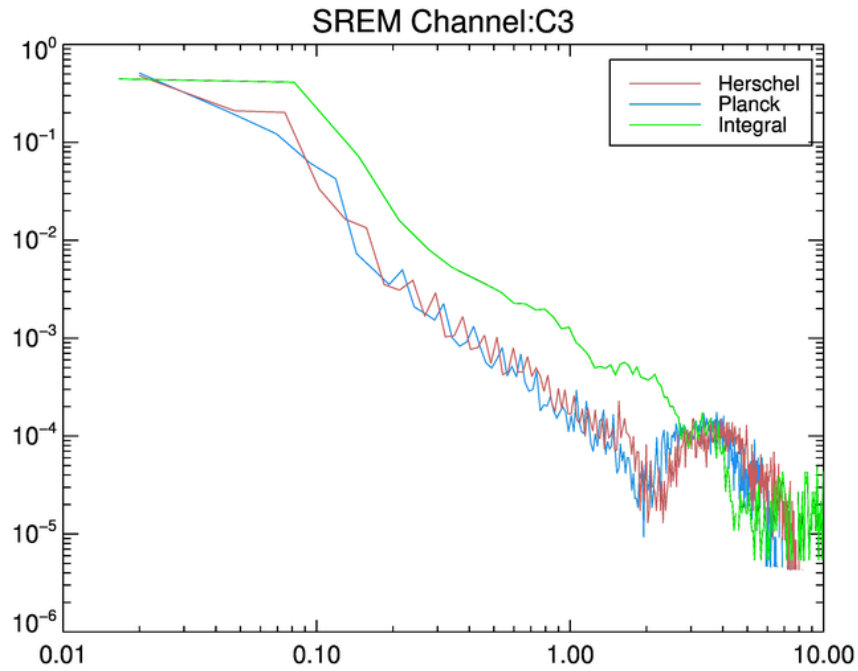
4.4.4.1 Planck - Integral



Ομοίως με πριν βλέπουμε ότι σε κανάλια όπως λόγω χάρη το S33 έχουμε μια κοινή μορφολογία στο πλήθος των μετρήσεων σε κάθε κελί. Επιπλέον, παρατηρούμε τα ιστογράμματα του C3 στο οποίο ο INTEGRAL φαίνεται να έχει περισσότερες τιμές σε υψηλότερα κελιά από τον Planck.

4.4.5 Ιστογράμματα - Μεγάλο πλήθος κελιών

Στη συνέχεια κατασκευάσαμε ιστογράμματα για τα οποία η παραγόμενη ευθεία αθροίζεται στη μονάδα όπως και πριν. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα γραφήματα της παραγράφου 4.4.4, ξεκινάμε την άθροιση από τις υψηλές ενέργειες, ώστε να φανεί η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των τριών δορυφόρων και να μη χαθεί η πληροφορία λόγω του υποβάθρου που υπάρχει στις μετρήσεις.

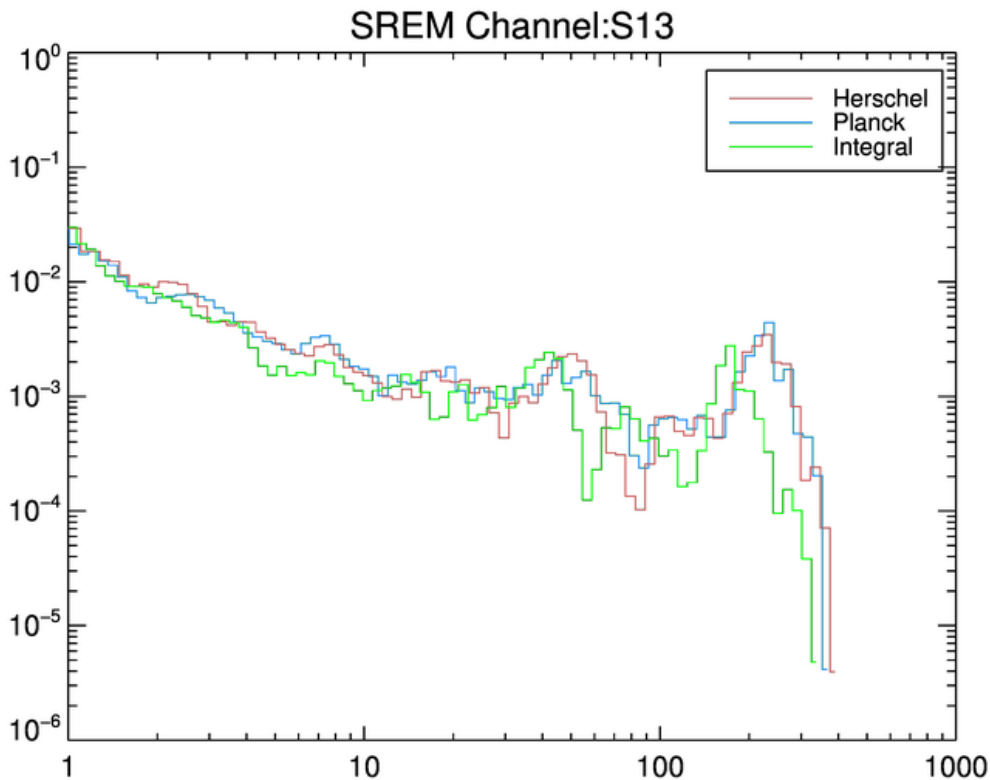


Ασφαλώς, όπως και στα προηγούμενα ιστογράμματα που φτιάξαμε, βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο πλήθος των μετρήσεων υπάρχει στα πολύ χαμηλά Countrates. Δηλαδή στο εύρος 0.01 - 0.1 σε λογαριθμική κλίμακα.

Για να δει κανείς καλύτερα τι συμβαίνει στα μεγαλύτερα κελιά που έχουμε και μεγαλύτερες ενέργειες, κάναμε επιμέρους γραφήματα για τα οποία παρουσιάζονται δεδομένα μόνο από κάποια τάξη μεγέθους και μετά, ώστε να είμαστε μακριά από το υπόβαθρο.

4.4.5.1 Αρχικά δεδομένα

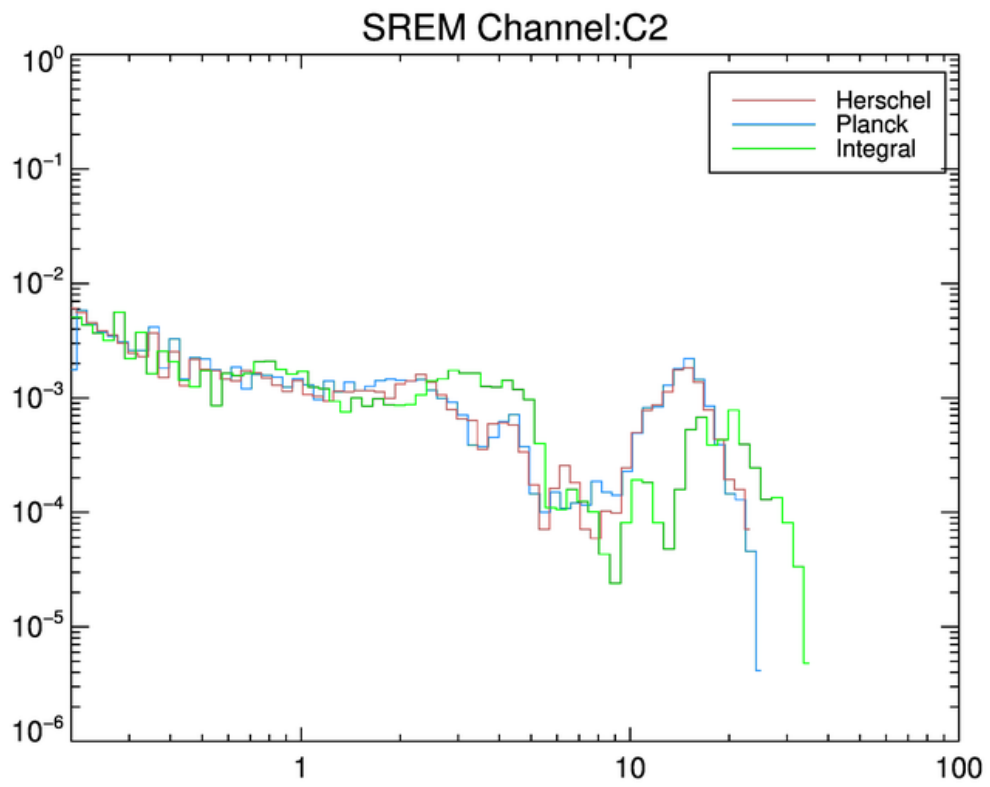
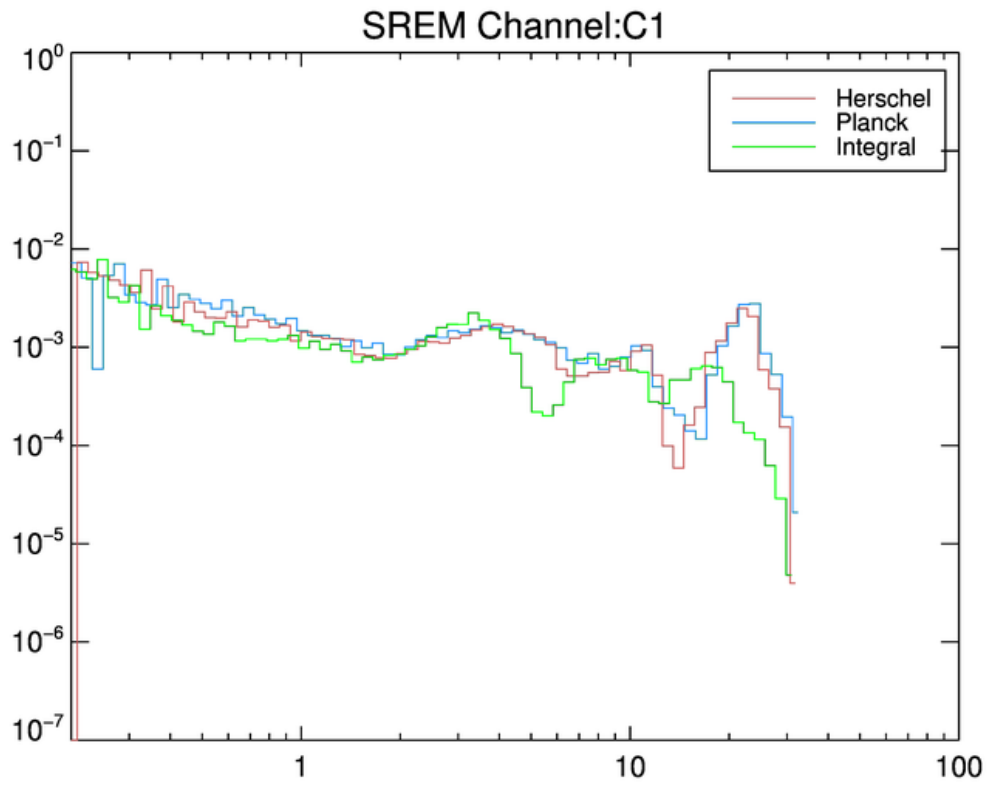
Αν πάρει κανείς τα αρχικά¹ δεδομένα και κατασκευάσει ιστογράμματα στην αρχή της άθροισης, δηλαδή στη περιοχή μακριά από το υπόβαθρο θα παρατηρήσει τα εξής:

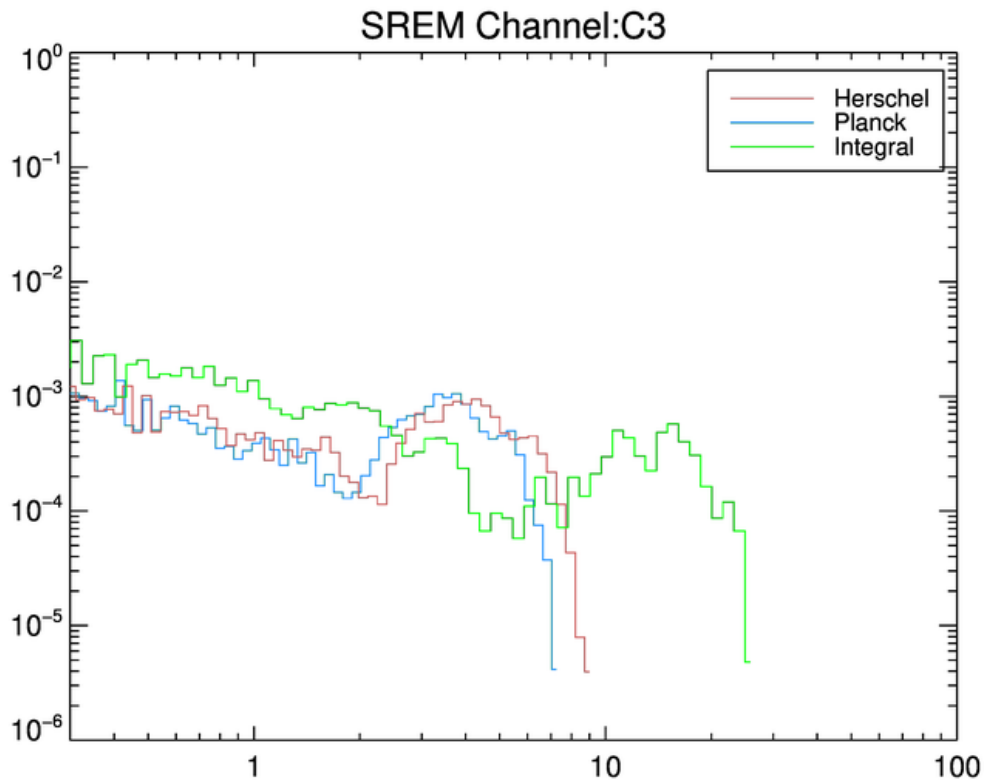


Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και στα άλλα κανάλια, *S12 – 15*, *S25*, *S32 – 35* και *TC1 – TC3*. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται συμφωνία με όσα έχουμε πει ως τώρα για τη συμπεριφορά των καναλιών.

Αν δούμε όμως τα κανάλια *C1 – C3* με όσα έχουν αναφερθεί ως τώρα, θα πρέπει να παρατηρηθεί η μετατόπιση των μετρήσεων για τον INTEGRAL στα υψηλότερα countrates, δηλαδή σε μετατοπισμένα προς τα δεξιά κελιά.

¹ Αρχικά ονομάζουμε τα δεδομένα που δεν έχει γίνει Interpolation.



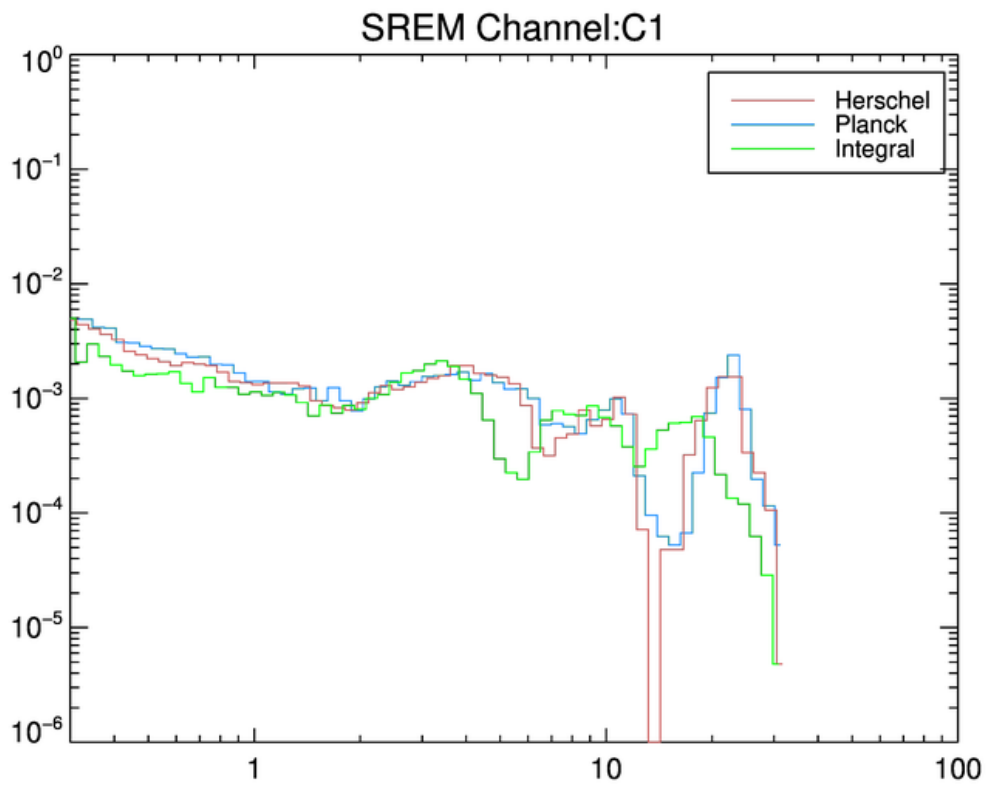
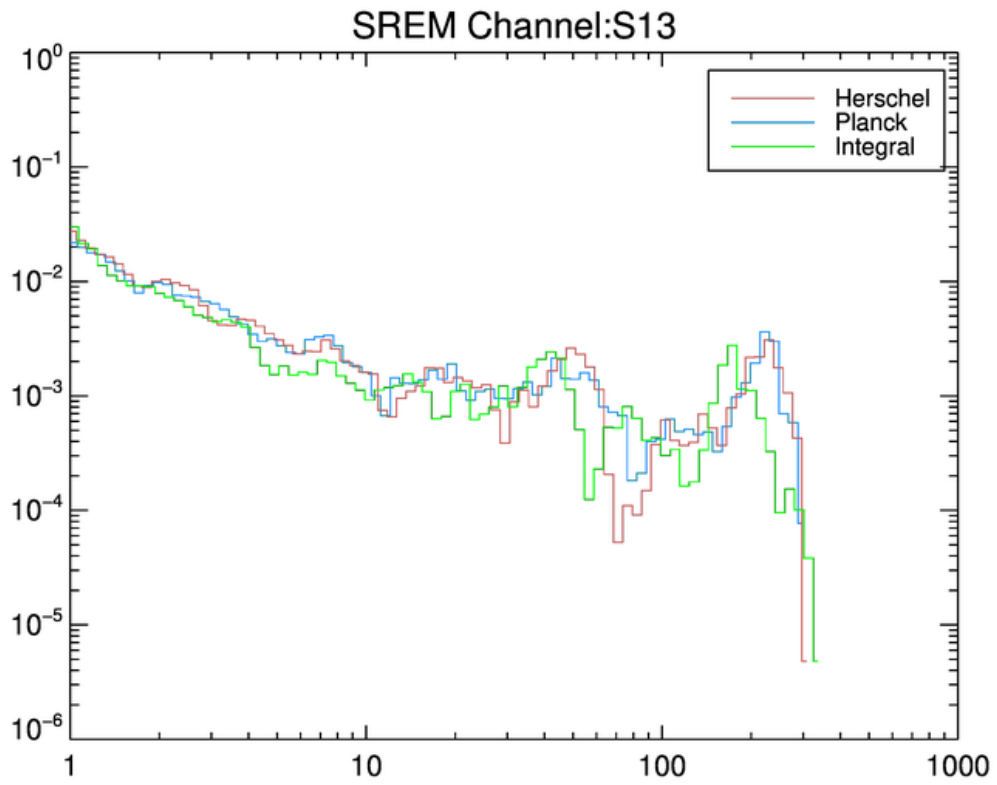


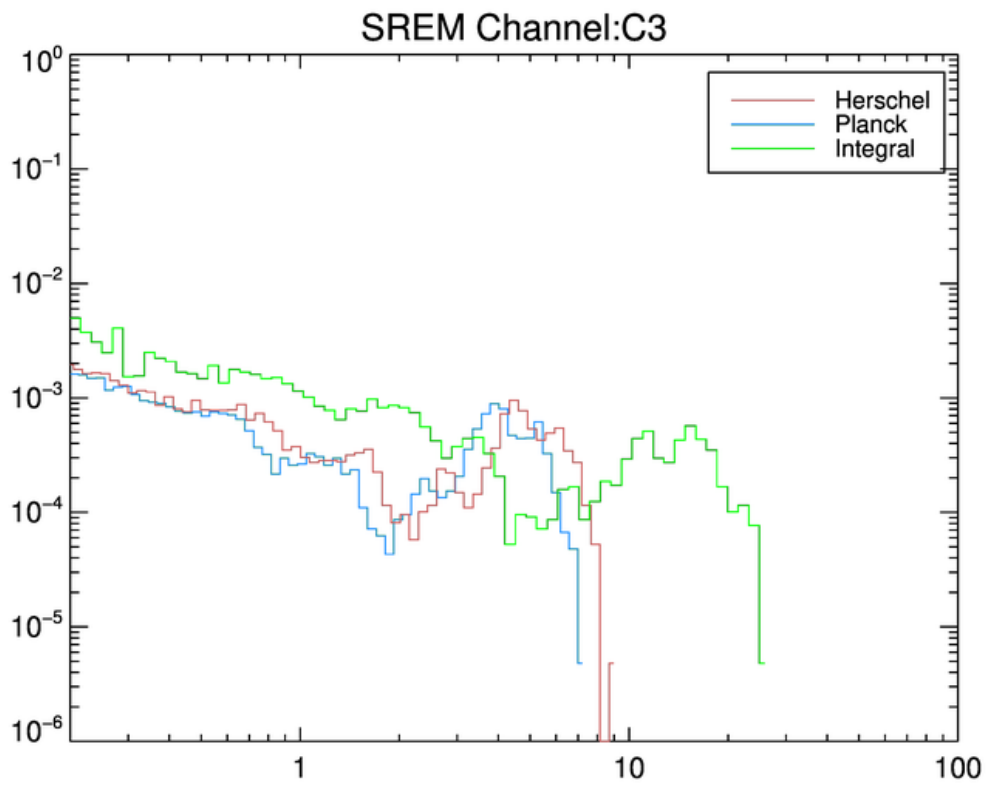
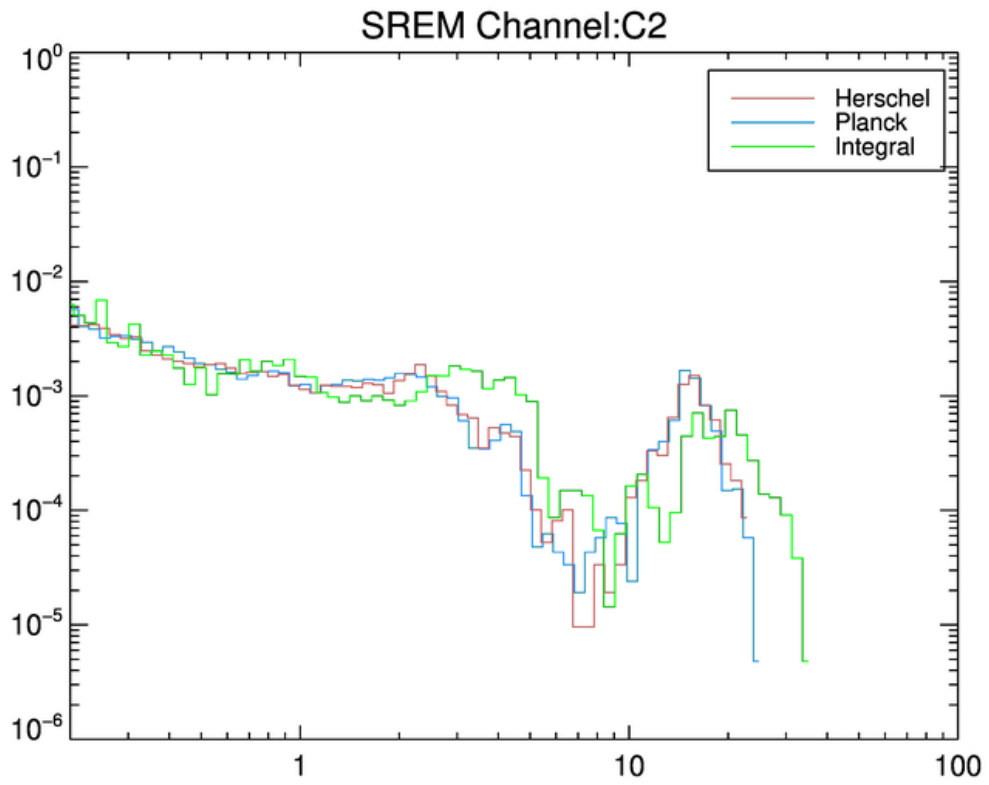
4.4.5.2 Interpolated δεδομένα

Για να δούμε αν τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι σωστά, κάναμε την ίδια ανάλυση με τα δεδομένα που κάναμε Interpolation στην προηγούμενη ενότητα.

Τα αποτελέσματα συμπίπτουν, γεγονός που σημαίνει ότι κανείς μπορεί να βγάλει ασφαλής συμπεράσματα και με τις δύο μεθόδους.

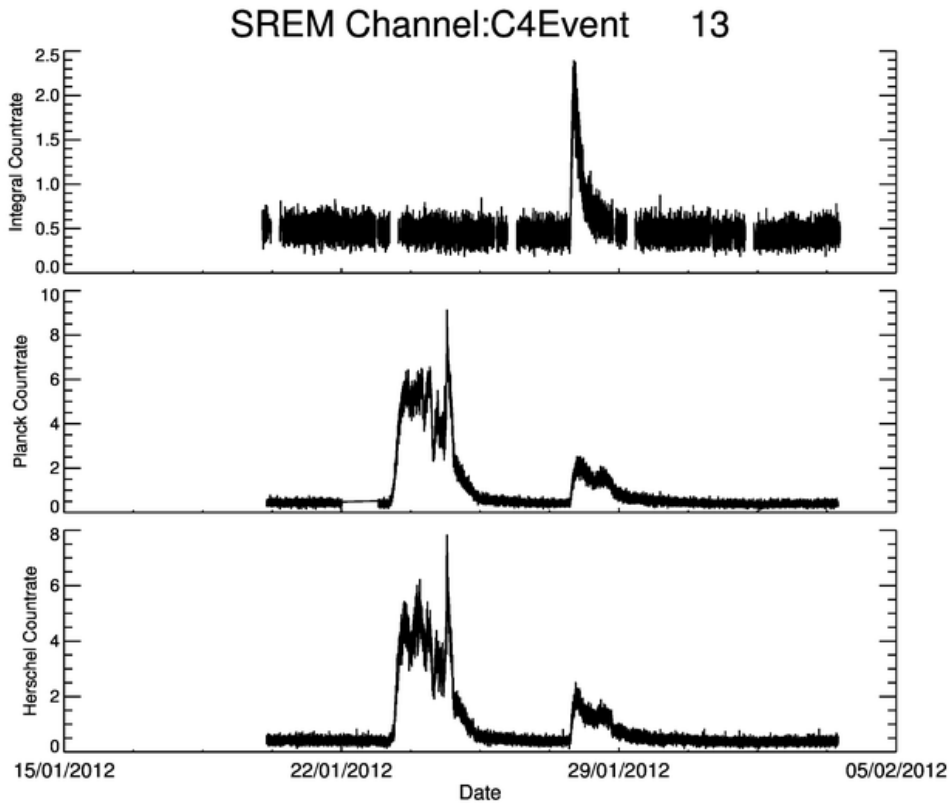
Πέρα από την ισοδυναμία των διαδικασιών, καταλαβαίνουμε επίσης ότι η διαδικασία του Interpolation έγινε σωστά. Δεν έχουμε δηλαδή κάποιο πρόβλημα με λανθασμένες μετρήσεις, που θα μπορούσαν να είχαν δημιουργηθεί από τα Gaps που υπάρχουν στις μετρήσεις των 3 δορυφόρων.





4.5 Σχόλια για το κανάλι C4

Το κανάλι C4 είναι αδύνατον να ληφθεί υπόψη σε οποιαδήποτε ανάλυση αν μελετήσουμε όλο το πλήθος των μετρήσεων. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί το επεισόδιο #13 απουσιάζει από τις μετρήσεις του INTEGRAL και το επεισόδιο #15 έχει κενό στις μετρήσεις του INTEGRAL σε χρονική περίοδο που ανταποκρίνεται στο μέγιστο του επεισοδίου.



Αυτό δημιουργεί εντελώς λανθασμένα Interpolated δεδομένα και γραφήματα. Συνεπώς, δεν γινόταν να το λάβουμε υπόψη σε οποιαδήποτε ανάλυση, όπως κάναμε για τα κανάλια C1 – C3.

4.6 Ροές ενεργητικών πρωτονίων

Για να επιβεβαιώσουμε τα παραπάνω και να βγάλουμε κάποιο συνολικό συμπέρασμα κάναμε ως τελευταίο βήμα της ανάλυσης ότι κάναμε και πριν αλλά τώρα με δεδομένα παραγόμενες ροές ενεργητικών πρωτονίων.

Έχει συζητηθεί στη προηγούμενη ενότητα (3.9.2) πως γίνεται η διαδικασία της αποσυνέλιξης των ενεργειακών ροών από τις μετρήσεις ανιχνευτών και συγκεκριμένα του SREM.

Η ανάλυση των ροών δεν θα γίνει τόσο εκτενώς όσο η προηγούμενη, αφού η πληροφορία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν διαφέρει σημαντικά.

Οι χαρακτηριστικές ενέργειες [MeV] για τις οποίες παράχθηκαν οι ροές είναι:

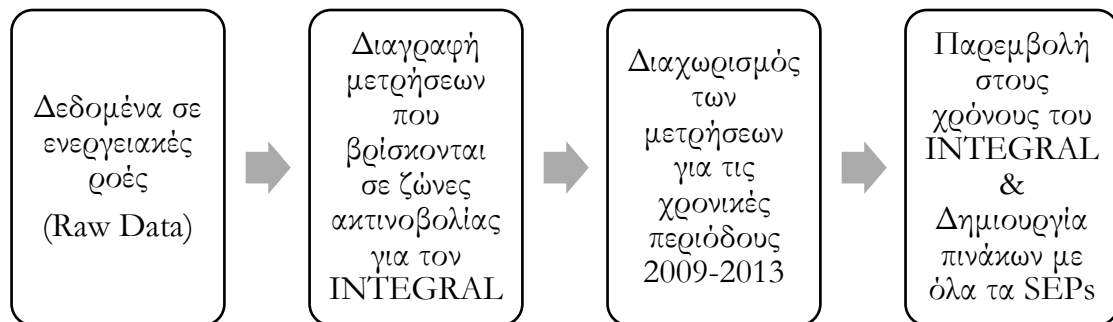
11 – 14 – 18 – 23 – 29 – 36 – 46 – 59 – 75 – 95 – 120 – 153 – 195 – 248 – 315

Με κόκκινο χρώμα έχουν σημειωθεί οι ενέργειες που θεωρούμε ότι η μέθοδος αποσυνέλιξης είναι αξιόπιστη.

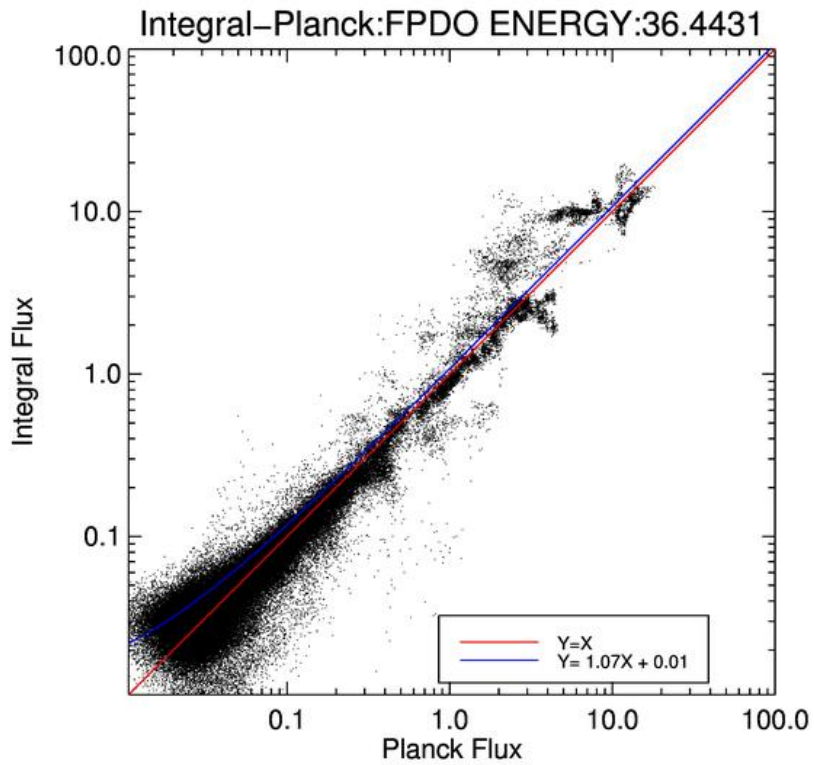
Τα αντίστοιχα γραφήματα των ροών όπως είχαμε για τα countrates στη παράγραφο 4.4.2 βρίσκονται στο παράρτημα Ζ' και στο συνοδευτικό CD της εργασίας.

4.6.1 Interpolation

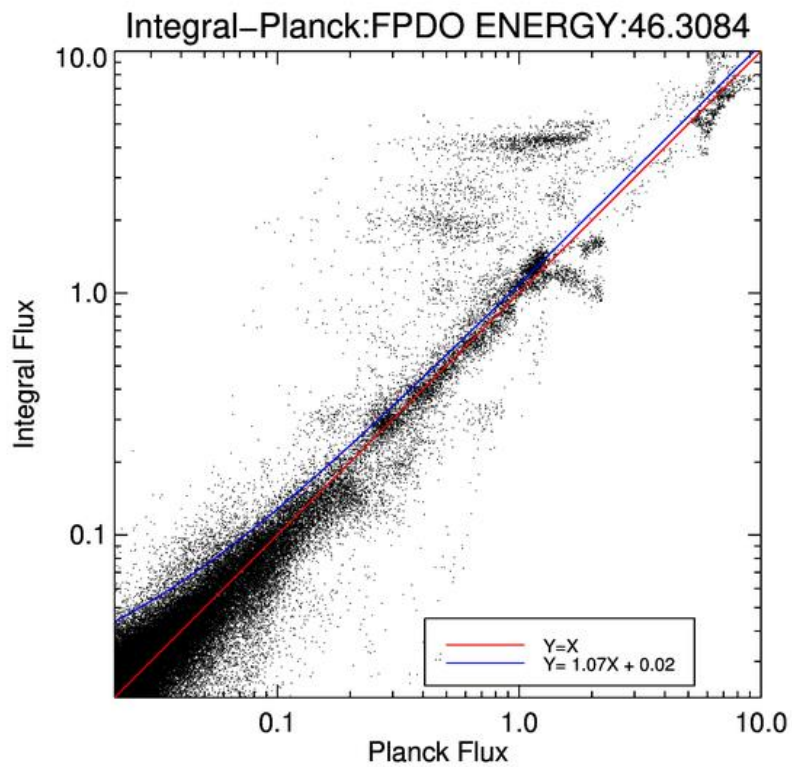
Όπως και στη περίπτωση των Countrates, η διαδικασία που ακολουθήσαμε ήταν η εξής:

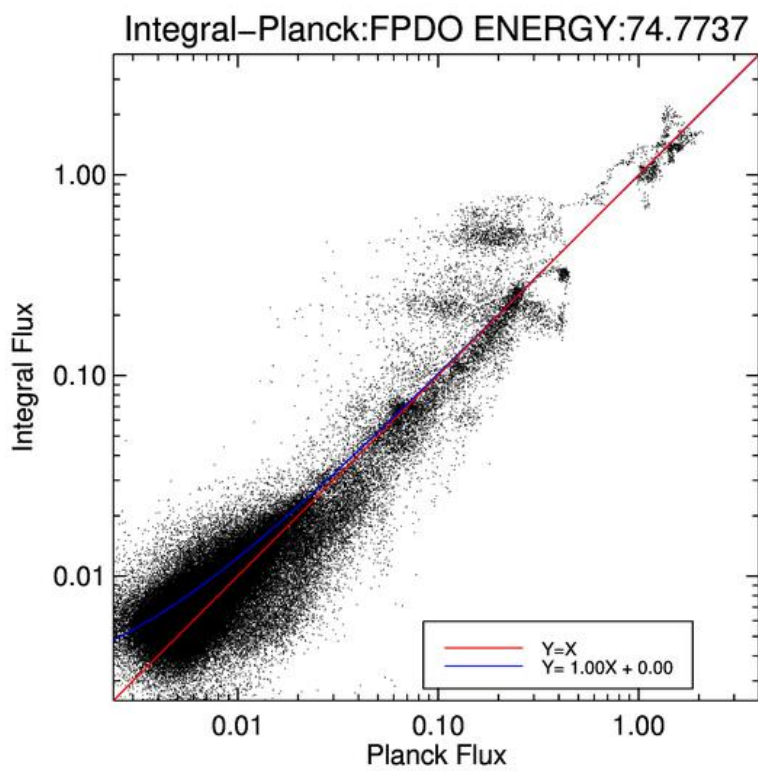
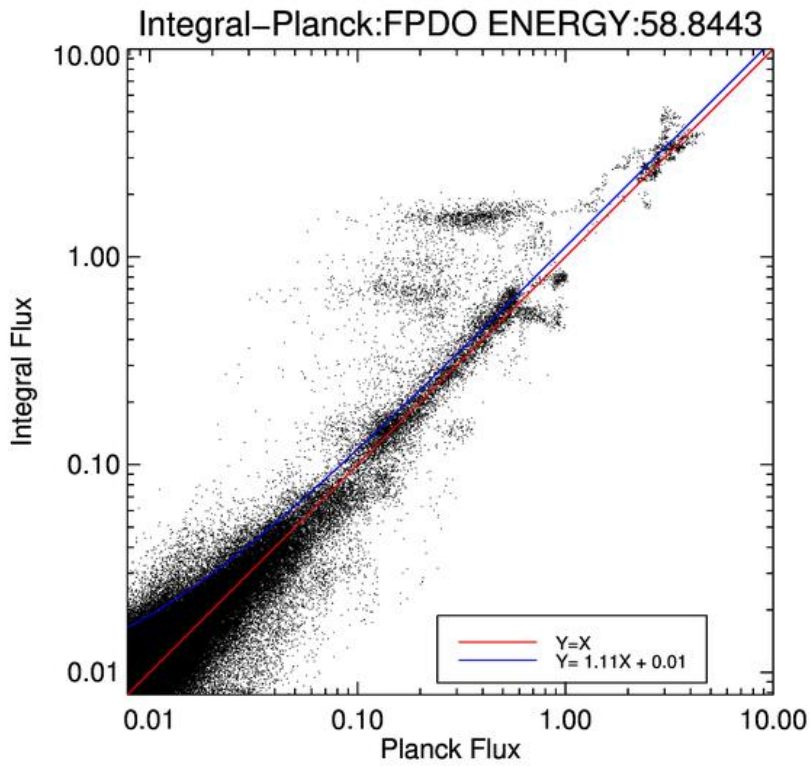


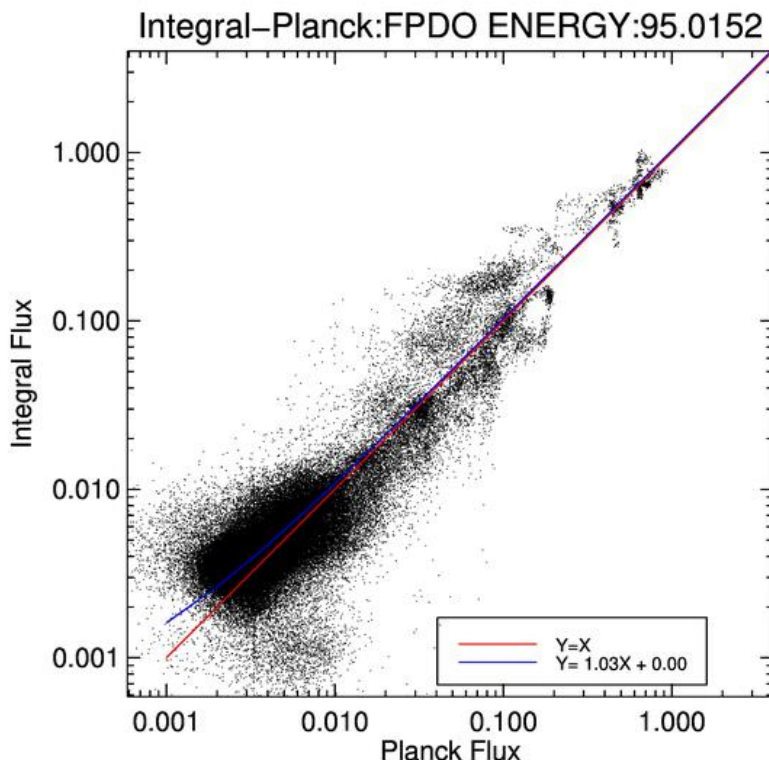
Για λόγους συντομίας παρουσιάζεται μόνο το ζευγάρι Planck- INTEGRAL. Είναι προφανές ότι το Herschel-INTEGRAL έχει παρόμοια συμπεριφορά, ενώ τέλος οι Herschel - Planck δεν παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον αφού έχουν παρόμοιες μετρήσεις όπως διαπιστώθηκε στη παράγραφο 4.4.3.1.



Όσο μεγαλώνει η χαρακτηριστική ενέργεια, η μέγιστη ροή είναι μικρότερη συνολικά. Αυτό είναι λογικό αφού αθροιστικά τα επεισόδια των χαμηλών ενεργειών είναι περισσότερα από τα καθαρά υψηλο ενεργειακά.







Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι φαίνεται να υπάρχει μια τάση να έχουμε στον INTEGRAL παραπάνω ροή όσο ανεβαίνουμε σε χαρακτηριστική ενέργεια. Θα μπορούσαμε ίσως να παρατηρήσουμε κάτι σε ακόμα μεγαλύτερες χαρακτηριστικές ενέργειες όμως η μέθοδος που γίνεται το unfolding των δεδομένων του SREM δεν μας δίνει τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε κάποια διαφορά, αφού έχει μεγάλο σφάλμα κατά τη δημιουργία των ροών.

4.7 Συμπεράσματα

Δεδομένου ότι οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις για τους ανιχνευτές SREM των αποστολών Planck/Herschel/INTEGRAL είναι σχεδόν ταυτόσημες, μπορούμε να πούμε ότι:

Βασιζόμενοι στην παραπάνω ανάλυση του κεφαλαίου 4, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι μετρήσεις του ανιχνευτή SREM και για τις τρεις αποστολές στα κανάλια, που έχουν χαμηλό ενεργειακό κατώφλι έχουν αξιοσημείωτη ομοιότητα.
- Σε επίπεδο πρωτογενών μετρήσεων (Countrates) έχουμε χαρακτηριστικά αυξημένες τιμές για τη μονάδα SREM του INTEGRAL στα κανάλια C1 – C3.
- Η σχετική προσαύξηση δείχνει να μεγαλώνει με το ενεργειακό κατώφλι των καναλιών.

- Χαρακτηριστικά στα επεισόδια #13, #15, #16 τα οποία εμφανίζουν μεγάλο πληθυσμό υψηλό-ενεργειακών σωματιδίων, παρατηρούμε έντονο το παραπάνω φαινόμενο. Γεγονός που ενισχύει την υπόθεση ότι ο INTEGRAL μετράει μεγαλύτερο πλήθος υψηλό-ενεργειακών σωματιδίων από τους Herschel/Planck, καθώς βρίσκεται σε απόσταση εγγύτερη στον Ήλιο.
- Από τα Interpolated δεδομένα και από τα ιστογράμματα ενισχύονται τα παραπάνω. Συγκεκριμένα, η κατανομή των μετρήσεων στα C1 – C3 για το INTEGRAL είναι μετατοπισμένη σε σχέση με τους άλλους δύο στα κανάλια με υψηλότερα κατώφλια ενέργειας.
- Το κανάλι C4 κρίνεται ακατάλληλο για τέτοιας μορφής ανάλυση διότι εμφανίζει ασυσχέτιστες μετρήσεις μεταξύ των τριών δορυφόρων καθώς έχει ιδιαίτερα υψηλό-ενεργειακό κατώφλι και πολύ χαμηλή χαρακτηριστική συνάρτηση απόκρισης.
- Σε επίπεδο ροών τα αποτελέσματα είναι συνεπή με τα παραπάνω συμπεράσματα. Η σχετική αύξηση των μετρήσεων δεν είναι τόσο εμφανής όσο σε επίπεδο πρωτογενών μετρήσεων, γεγονός που αποδίδεται στην διαδικασία παραγωγής των ροών.
- Το σφάλμα που υπεισέρχεται στη διαδικασία μετατροπής των Countrates σε ροές δεν μας επιτρέπει να εξετάσουμε ενέργειες μεγαλύτερες από ~120 MeV.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε ότι:

Υπάρχει μια διακριτή μετατόπιση της υψηλό-ενεργειακής κατανομής πρωτονίων προς χαμηλότερες ενέργειες κατά τη διάδοση των SEPs από τη Γη στο σημείο L_2 .

Η δημιουργία ενός μοντέλου για τους σωματιδιακούς πληθυσμούς του σημείου L_2 δείχνει εφικτή καθώς οι αβεβαιότητες των ροών στα πρωτονικά κανάλια C1, C2, C3 του INTEGRAL δεν υπερβαίνουν διαφορές μεγαλύτερες της τάξης του 3.

Συνεπώς, οι πολυπληθείς μετρήσεις του INTEGRAL μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τη μοντελοποίηση αυτών των πληθυσμών δεδομένων των ομοιοτήτων και συσχετισμών που παρατηρήθηκαν. Επιπλέον, τα παραπάνω ευρήματα επιδεικνύουν ότι τα υπάρχοντα μοντέλα για τα SEP (π.χ. Xapsos, SEPEM) τα οποία βασίζονται σε μετρήσεις δορυφόρων που βρίσκονται κοντά στη Γη (GOES, IMP8, κλπ.) αποτελούν κατάλληλα εργαλεία για τον χαρακτηρισμό του υψηλό ενεργειακού πληθυσμού σωματιδίων στον διαπλανητικό χώρο.

Παράρτημα Α'

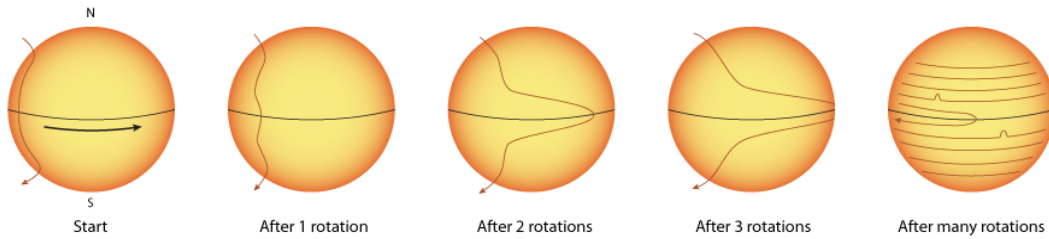
Μαγνητικό πεδίο Ήλιου

Για το μαγνητικό πεδίο του Ήλιου έχουμε μια βασική θεωρία που μας εξηγεί την ύπαρξη περιοδικότητας των διάφορων φαινομένων, τον 11ετή κύκλο. Η θεωρία που έχουμε είναι γνωστή ως θεωρία του Babcock, και προτάθηκε αρχικά από τον Parker, ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκε από τον Babcock. Θα δούμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά της θεωρίας αυτής χωρίζοντάς την σε πέντε στάδια.

Πίνακας 8: Σύνοψη της θεωρίας του Babcock

Μοντέλο του Babcock	
1 ^ο (min)	Δημιουργία ενός ασθενούς μαγνητικού πεδίου έντασης 1 Gauss. Δεχόμαστε τον Ήλιο σαν ένα μεγάλο δίπολο. Έχουμε την έναρξη του Ηλιακού κύκλου.
2 ^ο	Πύκνωση δυναμικών γραμμών στα μεγάλα ηλιογραφικά πλάτη εξαιτίας της διαφορικής περιστροφής του Ήλιου. $\sim 10^2$ Gauss Αύξηση της μαγνητικής έντασης λόγω αύξησης των δυναμικών γραμμών $B \sim 10^3$ Gauss Δημιουργία συνιστώσας B_x προς τον ισημερινό στα σημεία πύκνωσης με αντίθετη διεύθυνση στα δύο ημισφαίρια
3 ^ο (max)	Συστροφή μαγνητικών γραμμών στα σημεία πύκνωσης $B \sim 10^4$ Gauss Ανάδυση βρόγχων (Αστάθεια Rayleigh – Taylor) Μετατόπιση των κέντρων δράσης προς τον ισημερινό (Διάγραμμα πεταλούδας)
4 ^ο	Αλληλεξουδετέρωση των μαγνητικών πεδίων ενώ πλησιάζουν στον ισημερινό με αντίθετη πολικότητα Ακύρωση των μαγνητικών γραμμών του Ήλιου στους πόλους Καταστροφή κέντρων δράσης
5 ^ο (min)	Αναστροφή μαγνητικού πεδίου του ήλιου – Τέλος 11ετή κύκλου

Με βάση την θεωρία του Babcock μπορούμε να εξηγήσουμε πληθώρα φαινομένων όπως μαγνητικά κορδόνια, πυρσοί, κηλίδες κλπ. Ενώ έχουμε και μια θεωρία για το λόγο που αλλάζει η πολικότητα του Ήλιου όπως και γιατί επανέρχεται μετά από 22 χρόνια (αφού το φαινόμενο επαναλαμβάνεται κάθε 11 έτη).



Εικόνα 19: Απεικόνιση της συστρόφης του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου

Το μαγνητικό πεδίο του Ήλιου απαρτίζεται από 3 βασικές συνιστώσες.

Πίνακας 9: Βασικές συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου

Συνιστώσες μαγνητικού πεδίου		
1η	2η	3η
Κλειστές μαγνητικές γραμμές του γενικού διπολικού πεδίου (Ηρεμος Ήλιος)	Ανοιχτές δυναμικές γραμμές είτε από πόλους (Ηρεμος Ήλιος), είτε από κέντρα δράσης (Δραστήριος Ήλιος)	Κλειστοί μαγνητικοί βρόχοι (Coronal loops) σχηματισμοί πάνω από ζεύγη κηλίδων (Δραστήριος Ήλιος)
11ετή διαμόρφωση $B \approx 1Gauss$ Κάθε 22 έτη η πολικότητα επανέρχεται	Στη πραγματικότητα κλείνουν σε πολύ μεγάλη απόσταση οπότε πρακτικά θεωρούνται ανοιχτές	Μαγνητικά πολύπολα τα οποία εξουδετερώνονται σε κοντινή απόστασή από τον Ήλιο

Κίνηση Φορτισμένων Σωματιδίων σε Μαγνητικό Πεδίο

Γενικά τα φορτισμένα σωματίδια, όταν συναντούν μαγνητικό πεδίο, διαμορφώνουν τη κίνησή τους κάτω από κάποιους κανόνες ανάλογα με τη μορφή και την ένταση του πεδίου αυτού. Θα δούμε κάποιες βασικές κινήσεις, που κάνουν τα σωματίδια μέσα σε κάποιες μαγνητικές τοπολογίες.

Ομογενές πεδίο (κύκλοτρο):

Έστω σωματίδιο μάζας m και φορτίου q εισέρχεται με ταχύτητα u σε περιοχή που έχει ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (E, B) . Η κίνηση που θα ακολουθήσει δίνεται από τη λύση της εξίσωσης κίνησης:

$$m \frac{du}{dt} = q (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B})$$

Εάν τώρα κάνουμε την υπόθεση ότι δεν έχουμε ηλεκτρικό πεδίο, μπορούμε να απλοποιήσουμε την παραπάνω σχέση και να καταλήξουμε:

$$m \frac{du}{dt} = q (\vec{u} \times \vec{B}) = \vec{F} = F \hat{x}$$

Βλέπουμε κατευθείαν ότι ανάλογα με τη κίνηση του σωματιδίου έχουμε διαφορετικό αποτέλεσμα. Συνεπώς θα κοιτάζουμε ξεχωριστά τις συνιστώσες.

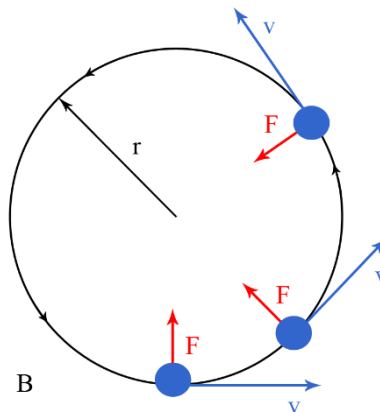
A) Κίνηση κάθετα στο B

Η δύναμη λειτουργεί ως κεντρομόλος και βρίσκουμε τα μεγέθη της γυροακτίνας και γυροσυχνότητας

$$r = \frac{mu_{\perp}}{qB} \text{ και } \omega = \frac{q}{m} B$$

Ενώ τέλος καταλήγουμε στην εξίσωση κίνησης:

$$\vec{\omega} = -\frac{q}{m} \vec{B}$$



B) Κίνηση παράλληλα στο B

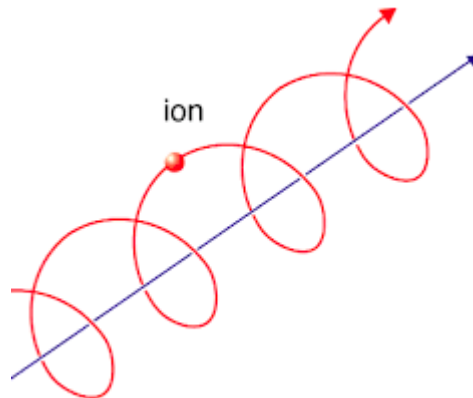
Σε περίπτωση παράλληλης κίνησης το εξωτερικό γινόμενο της σχέσης δεν μας δίνει μεταβολή ούτε στο μέτρο, ούτε στη φορά της κίνησης. Συνεπώς, έχουμε σταθερή ταχύτητα, δηλαδή κίνηση παράλληλα στις δυναμικές γραμμές ευθύγραμμα και ομαλά.

$$u_{\parallel} = \text{const.}$$

Πλέον έχοντας δει τις δύο συνιστώσες (κάθετη και παράλληλη) μπορούμε να κοιτάξουμε τη συνισταμένη κίνηση που έχει ένα σωματίδιο σε ομογενές πεδίο.

Γ) Συνισταμένη κίνηση σωματιδίων (Gyromotion)

Η συνολική κίνηση λοιπόν που θα έχουμε είναι γνωστή ως κίνηση κύκλωτρου. Είναι μια ελικοειδής κίνηση γύρω από μια δυναμική γραμμή με σταθερό βήμα, της οποίας η φορά εξαρτάται από το πρόσημο του φορτίου.



Θα δούμε τώρα κάποιες περιπτώσεις, όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών.

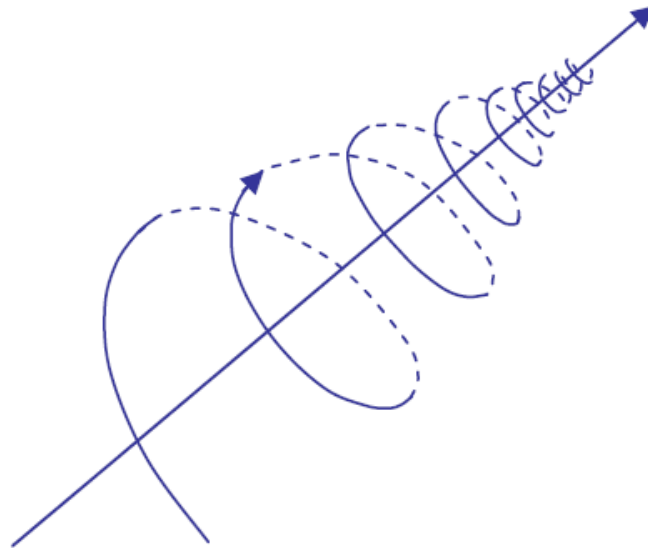
Ανομοιογενές πεδίο (Μαγνητικός καθρέπτης):

Αρχικά θα δούμε τη περίπτωση που αυξάνεται. Τότε και οι δύο συνιστώσες μεταβάλλονται ακολούθως:

- Αφού αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο, μειώνεται η γυροακτίνα και συνεπώς έχουμε μια σπειροειδή κίνηση εγγύρσια προς τις δυναμικές γραμμές.
- Η παράλληλη προς το μαγνητικό πεδίο συνιστώσα δεν μένει σταθερή όπως στη περίπτωση του ομογενούς πεδίου. Συγκεκριμένα το μέτρο της μειώνεται και η σχέση βρίσκεται άμεσα από τον ορισμό της \vec{F} . Δηλαδή:

$$v = \frac{F}{qbsin\theta}$$

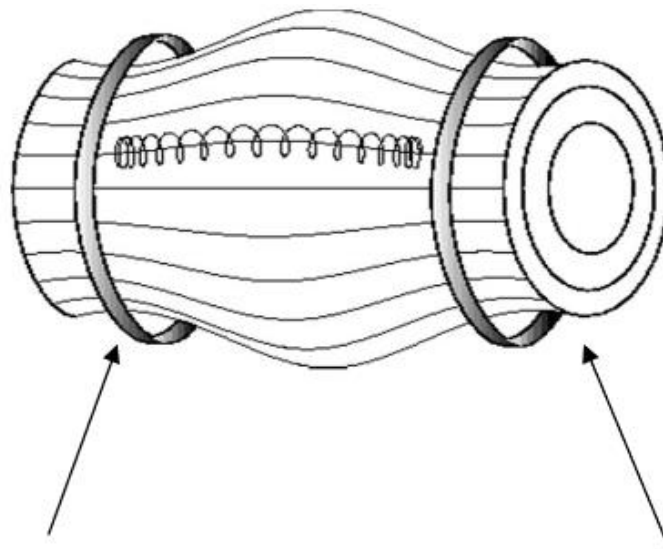
Η κίνηση λοιπόν είναι επιβραδυνόμενη αυτή τη φορά, ενώ αν συνδυάσουμε τις παραπάνω κινήσεις παίρνουμε την ακόλουθη κίνηση:



Η κίνηση αυτή ονομάζεται μαγνητικός καθρέπτης (magnetic mirror) γιατί αποδεικνύεται ότι υπάρχει οριακό σημείο, όπου το μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, ώστε το σωματίο ανακλάται προς τα πίσω και ακολουθεί την αντίθετη πορεία.

Ανομοιογενές πεδίο (Αναπήδηση):

Έστω τώρα ότι έχουμε ένα πεδίο το οποίο έχει κυλινδρική συμμετρία, ενώ ταυτόχρονα έχει μέγιστη τιμή στα άκρα του κυλίνδρου και ελάχιστη κάπου στο κεντρικό μέρος του. Τέλος, ας θεωρήσουμε ότι η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου προς τον άξονα συμμετρίας είναι αμελητέα.



Θα πάρουμε ότι πήραμε πριν, δηλαδή το φαινόμενο του μαγνητικού καθρέπτη, απλώς θα έχουμε δύο σημεία ανάκλασης, που θα δημιουργήσουν μια «ταλαντωτική» κίνηση

η όποια παγιδεύει το σωματίο μέσα σε αυτή τη μαγνητική δομή. Η κίνηση αυτή ονομάζεται Bounce Motion ενώ συχνά τη λέμε και «Μαγνητική Φιάλη», λόγω του σχήματος που έχουν οι δυναμικές γραμμές ανάμεσα στις δύο ανακλαστικές επιφάνειες.

Εγκάρσιες ολισθήσεις στις μαγνητικές γραμμές (Drifts):

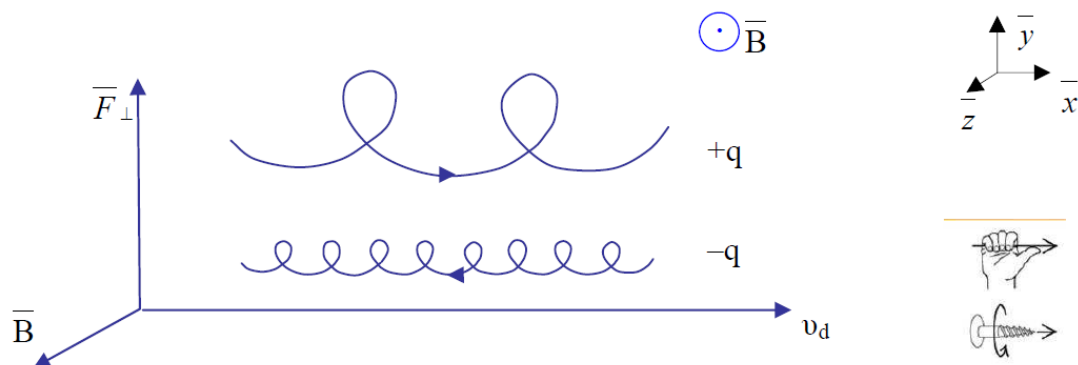
Στη γενικότερη περίπτωση έχουμε μια εξωτερική δύναμη \vec{F} που δρα πάνω στο σωματίδιο το οποίο βρίσκεται στο μαγνητικό πεδίο. Η διαφορική εξίσωση κίνησης προκύπτει να είναι της μορφής:

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = q \left[(\vec{u} \times \vec{B}) + \frac{\vec{F}}{q} \right]$$

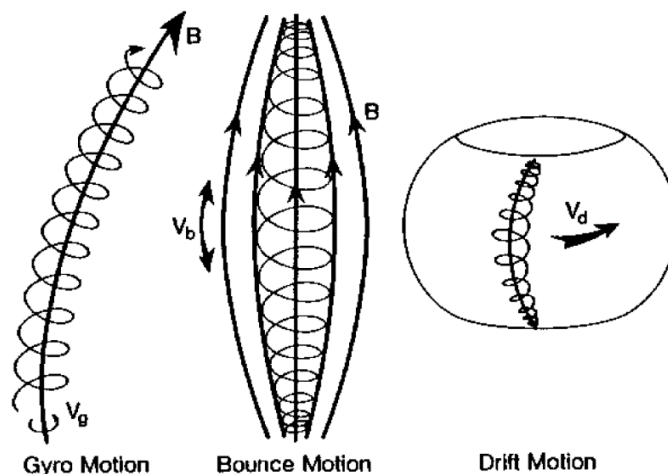
Μπορούμε άμεσα να βρούμε την ταχύτητα ολισθησης.

$$\vec{u}_{\vec{F}} = \frac{\vec{F}_{\perp} \times \vec{B}}{qB^2}$$

Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια θα κινούνται κυκλικά γύρω από τις μαγνητικές γραμμές (άξονας z), ενώ θα ολισθαίνουν στον άξονα x. Από το αποτέλεσμα φαίνεται επίσης η εξάρτηση της φοράς της ταχύτητας από το φορτίο του σωματιδίου.



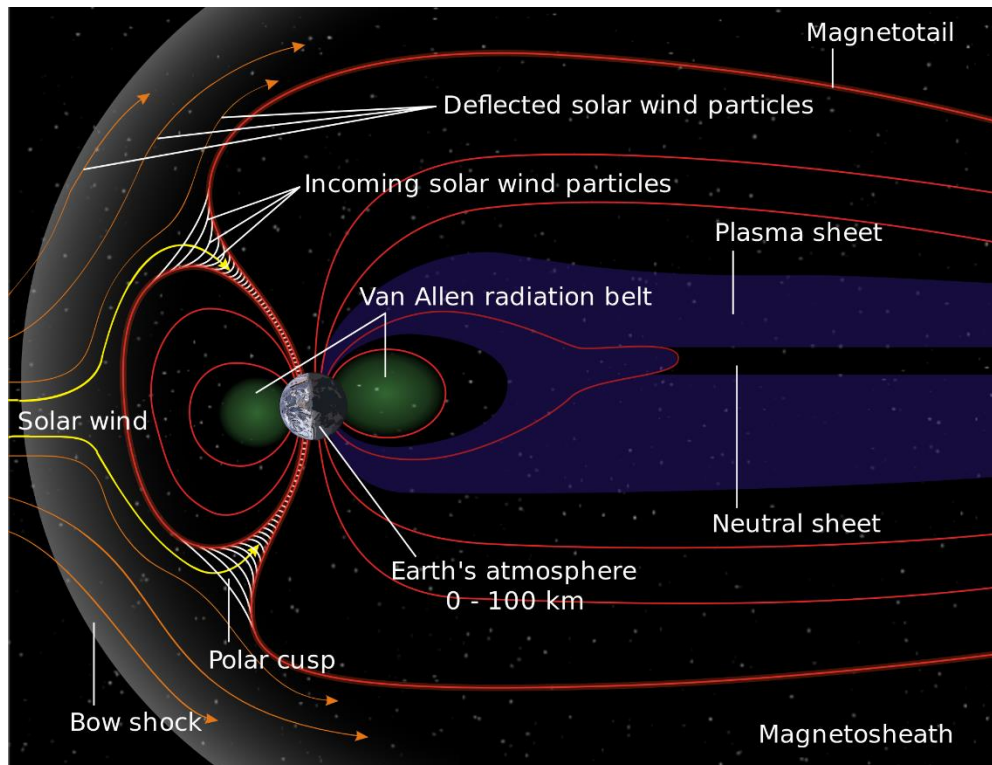
Τελικά η κίνηση που θα κάνει ένα σωματίδιο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, αποτελεί τον συνδυασμό των κινήσεων που αναφέραμε προηγουμένως.



Παράρτημα Β'

Πλανήτες και Μαγνητόσφαιρες

Με τον όρο μαγνητόσφαιρα αναφερόμαστε στην περιοχή στην οποία φορτισμένα σωματίδια του διαπλανητικού χώρου κάνουν μια συγκεκριμένη τροχιά λόγω του μαγνητικού πεδίου ενός πλανήτη.



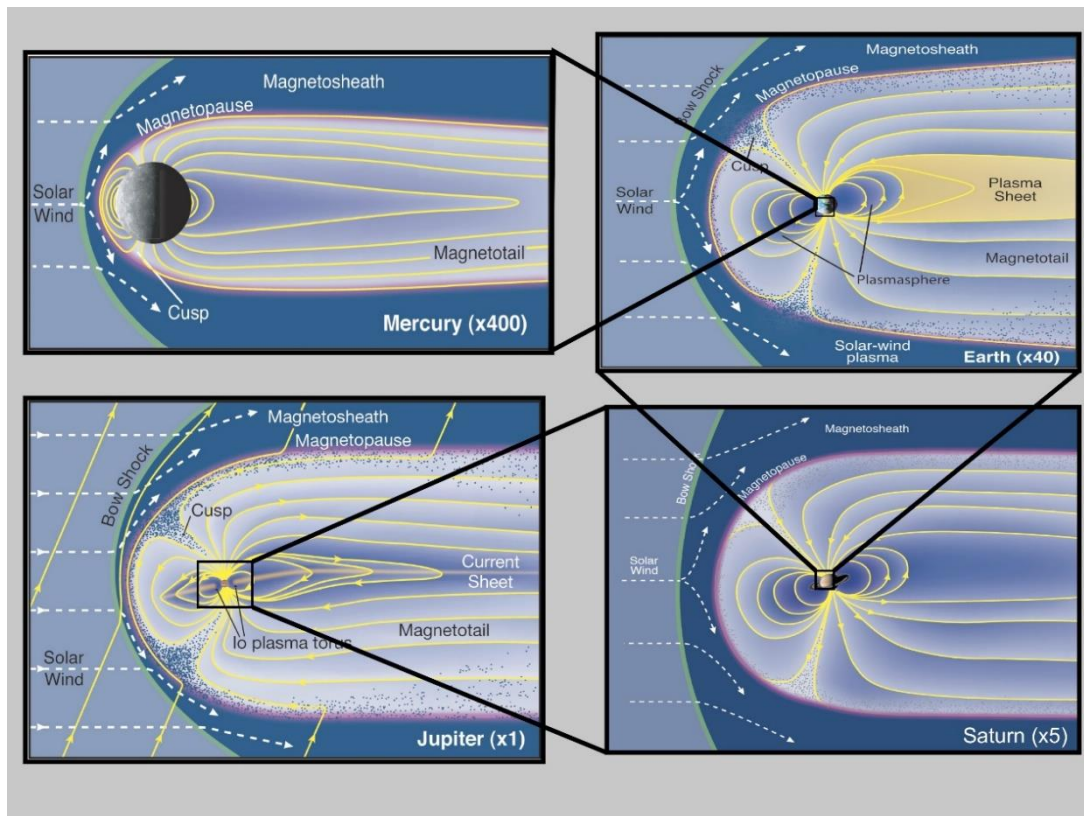
Εικόνα 20: Αναπαράσταση της μαγνητόσφαιρας της Γης

Η μαγνητόσφαιρα δεν αποτελεί αποκλειστικά Γήινο φαινόμενο, αφού σχεδόν όλοι οι πλανήτες (εκτός από τον Άρη και την Αφροδίτη) έχουν μαγνητόσφαιρα. Ασφαλώς, η κάθε μαγνητόσφαιρα διαφέρει, τόσο στη δομή και στο μέγεθος, όσο και στη δυναμική που επιβάλλει στα φορτισμένα σωματίδια που την περιβάλλουν.

Πίνακας 10: Βασικά χαρακτηριστικά των πλανητών του Ηλιακού συστήματος.

	Από- σταση από Ή- λιο (AU)	Περίοδος περιφο- ράς	Περίοδος περι- στροφής (Days)	Μέση πυκνό- τητα ($\frac{gm}{cm^3}$)	Βαρύ- τητα στην επι- φάνεια (N/Kg)
Ερμής	0.39	88d	56.8	5.4	3.6
Αφροδίτη	0.72	225d	243	5.1	8.7
Γη	1	36d	1	5.5	9.8
Αρης	1.52	1yr 322d	1.03	4.0	3.7
Δίας	5.20	11yr 315d	0.41	1.3	26
Κρόνος	9.55	29yr 167d	0.44	0.7	11.2
Ουρανός	19.22	84yr 7d	0.72	1.18	9.4
Ποσειδώνας	30.11	164yr 280d	0.67	1.56	15.0

Το μέγεθος της μαγνητικής ροπής σε συνδυασμό με την πίεση του Ηλιακού ανέμου φαίνεται να καθορίζει το τυπικό μέγεθος της μαγνητόσφαιρας. Η δομή καθορίζεται από τη μετάπτωση του άξονα, που έχει το δίπολο του κάθε πλανήτη σε σχέση με τον άξονα περιστροφής.



Εικόνα 21: Αναπαράσταση της μαγνητόσφαιρας του Ερμή, της Γης, του Δία και του Κρόνου

Πίνακας 11: Βασικά χαρακτηριστικά των πλανητών τα οποία διαμορφώνουν τις μαγνητόσφαιρές τους

	Ισημερινό πεδίο (Gauss)	Διπολική ροπή (Gauss cm ³)	Γωνία μεταξύ αξόνων
Ερμής	0.002	3×10^{22}	$< 10^\circ$
Αφροδίτη	< 0.0003	$< 10^{21}$	-
Γη	0.305	$< 7.9 \times 10^{25}$	11.5°
Άρης	0.0004	1.4×10^{22}	-
Δίας	4.2	1.5×10^{30}	9.5°
Κρόνος	0.2	4.3×10^{28}	$< 1^\circ$
Ουρανός	0.23	3.8×10^{27}	58.6°
Ποσειδώνας	0.06 - 1.2	2×10^{27}	46.8°

Παράρτημα Γ'

Στοιχεία πυρηνικής φυσικής και στοιχειωδών σωματιδίων

Άτομα και πυρήνας:

Το μικρότερο κομμάτι ύλης που μπορούμε να διακρίνουμε με χημικές μεθόδους ονομάζεται **άτομο**. Κάθε άτομο αποτελείται από έναν θετικά φορτισμένο **πυρήνα**, που αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια και γύρω από αυτόν βρίσκονται τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια.

Ο αριθμός **Z** ονομάζεται **ατομικός αριθμός** και καθορίζει τις χημικές ιδιότητες του πυρήνα. Ισούται με τον αριθμό των πρωτονίων, ενώ τα άτομα που έχουν ίδιο ατομικό αριθμό αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων ονομάζονται **ισότοπα**.

Ο αριθμός **A** ονομάζεται **μαζικός αριθμός** και ισούται με τον αριθμό των νουκλεονίων¹. Πυρήνες με ίδιο A και διαφορετικό Z ονομάζονται **ισοβαρείς**, ενώ πυρήνες με το ίδιο αριθμό νετρονίων ονομάζονται **ισότονοι**.

Ο καθιερωμένος συμβολισμός είναι A_ZX με X να συμβολίζει το ελάχιστο στοιχείο.

Ραδιενεργές διασπάσεις:

Η ραδιενεργή διάσπαση είναι μια πυρηνική αντίδραση στην οποία έχουμε αρχή διατήρησης: ενέργειας, ορμής στροφορμής, φορτίου, αριθμού νουκλεονίων και λεπτονικού αριθμού.

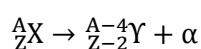
Γενικά, η μετατροπή ενός ασταθής πυρήνα σε έναν άλλον ή η μετάβαση από μια διεγερμένη στάθμη σε μια άλλη ονομάζεται ραδιενεργή διάσπαση.

Ο διασπώμενος πυρήνας ονομάζεται **μητρικός** και ο πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση ονομάζεται **θυγατρικός**.

Συνολικά θα αναφερθούμε σε 5 τύπους ραδιενεργών διασπάσεων:

Διάσπαση α:

Κατά τη διάσπαση α ένας πατρικός πυρήνας A_ZX διασπάται αυθόρμητα σε έναν θυγατρικό ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ και σε ένα σωματίο α^2 , αντίδραση η οποία συνοδεύεται από απελευθέρωση ενέργειας.



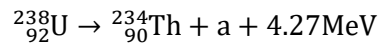
¹ Νουκλεόνια ονομάζονται τα σωματίδια του πυρήνα δηλαδή n, p^+

² Υπενθυμίζουμε ότι σωματίο α ονομάζουμε τον πυρήνα Ηλίου 4_2He

Αν χρησιμοποιήσουμε τώρα διατήρηση της ενέργειας & ορμής, βρίσκουμε ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται έστω Q_a θα ισούται με τη διαφορά της μάζας ηρεμίας του αρχικού πυρήνα και των προϊόντων του (Θυγατρικός και σωματίο α).

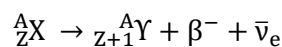
$$Q_a = M_x - (M_Y + M_a)$$

Ένα τυπικό παράδειγμα είναι:



Διάσπαση β^- :

Κατά τη διάσπαση β^- έχουμε διάσπαση ενός πυρήνα ${}^A_Z\text{X}$ με παραγωγή ενός θυγατρικού πυρήνα ${}^A_{Z+1}\text{Y}$, ενός σωματίου β^- και ενός αντινετρίνου του ηλεκτρονίου $\bar{\nu}_e$, με απελευθέρωση ενέργειας.

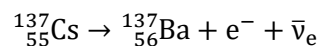


Χρησιμοποιούμε τις διατηρήσεις ενέργειας, ορμής, φορτίου, λεπτονικού αριθμού κλπ. ώστε να δούμε τι ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση αυτή.

$$Q_{\beta^-} = K_Y + K_{\beta^-} + K_{\bar{\nu}_e}$$

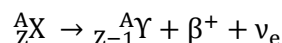
Λόγω της μεγάλης μάζας του θυγατρικού πυρήνα σε σχέση με το ηλεκτρόνιο και το νεutrino, τα δύο τελευταία θα μοιραστούν σχεδόν το σύνολο της ενέργειας και θα παρουσιάζουν συνεχές φάσμα τιμών από $0 - Q_{\beta^+}$.

Ένα τυπικό παράδειγμα μια β^- διάσπασης είναι:



Διάσπαση β^+ :

Κατά τη διάσπαση β^+ έχουμε διάσπαση ενός πυρήνα ${}^A_Z\text{X}$ με παραγωγή ενός θυγατρικού πυρήνα ${}^A_{Z-1}\text{Y}$, ενός σωματίου β^+ και ενός νετρίνου του ηλεκτρονίου ν_e , με απελευθέρωση ενέργειας.



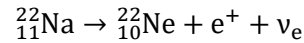
Χρησιμοποιούμε όπως και πριν τις διατηρήσεις ενέργειας, ορμής, φορτίου, λεπτονικού αριθμού κλπ., ώστε να δούμε τι ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση αυτή.

Σε αντίθεση με τη β^- διάσπαση ο πατρικός πυρήνας δεν αρκεί να έχει μεγαλύτερη ατομική μάζα για να γίνει η β^+ . Πρέπει να έχει τουλάχιστον 1.02 MeV περισσότερα. Όπως και πριν, λόγω της μεγάλης μάζας του θυγατρικού πυρήνα σε σχέση με το ποζιτρόνιο και το νεutrino, τα δύο τελευταία θα μοιραστούν σχεδόν το σύνολο της ενέργειας και θα παρουσιάζουν συνεχές φάσμα τιμών από $0 - Q_{\beta^+}$.

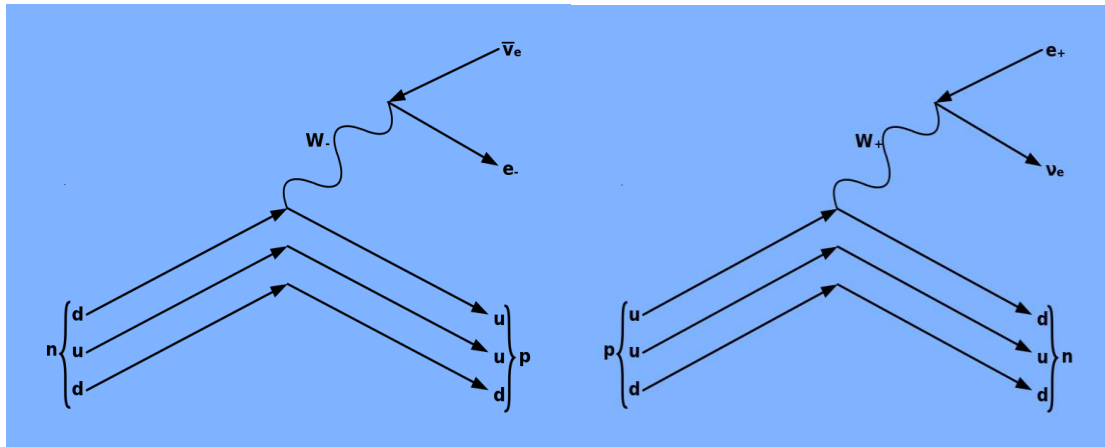
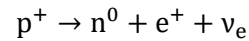
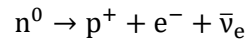
Ένα τυπικό παράδειγμα μιας β^+ διάσπασης είναι:

¹ Υπενθυμίζουμε ότι σωματίο β^- ονομάζουμε το ηλεκτρόνιο

² Υπενθυμίζουμε ότι σωματίο β^+ ονομάζουμε το πρωτόνιο



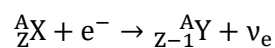
Είναι λάθος κανείς να υποθέσει ότι τα σωματίδια που παράγονται από τις β^- , β^+ διασπάσεις υπήρχαν μέσα στο πυρήνα από πριν. Για να καταλάβει την ουσία των διασπάσεων αυτών πρέπει να δει την πραγματική φύση της διάσπασης, που πρακτικά είναι στη πρώτη περίπτωση διάσπαση νετρονίου σε πρωτόνιο και μετά διάσπαση πρωτονίου σε νετρόνιο.



Εικόνα 22: Διαγράμματα Feynman των διασπάσεων β^- και β^+

Διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίου:

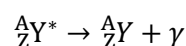
Ανταγωνιστική διαδικασία της β^+ είναι η σύλληψη ηλεκτρονίου, κατά την οποία ο πυρήνας συλλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου και ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο. Κατά την μεταστοιχείωση αυτή εκπέμπεται ένα νεutrino του ηλεκτρονίου.



Η διάσπαση αυτή πέρα από ανταγωνιστική της β^+ αποτελεί και εναλλακτικό μονοπάτι διάσπασης σε γειτονικούς ισοβαρείς πυρήνες, που έχουν θετική αλλά μικρότερη των 1.02 MeV διαφορά ατομικής μάζας.

Διάσπαση γ και εσωτερική μετατροπή:

Σε όλες τις προηγούμενες αντιδράσεις ο θυγατρικός πυρήνας που σχηματίζεται μπορεί να είναι σε ενέργεια μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται διεγερμένη και συμβολίζεται ${}^A_Z\text{Y}^*$. Η διάσπαση που κάνει ο ραδιενεργός πυρήνας αυτός ονομάζεται γ και περιλαμβάνει την εκπομπή ενός φωτονίου με απελευθέρωση ενέργειας,



Πρακτικά το φωτόνιο μεταφέρει όλη την ενέργεια της διάσπασης.

Ακτινοβολία:

Γενικά με τον όρο ακτινοβολία εννοούμε τη διάδοση ενέργειας. Με άλλα λόγια μπορεί κανείς να δει τον όρο ακτινοβολία να χρησιμοποιείται, τόσο για υπέρηχους όσο και για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή για μια δέσμη πρωτονίων.

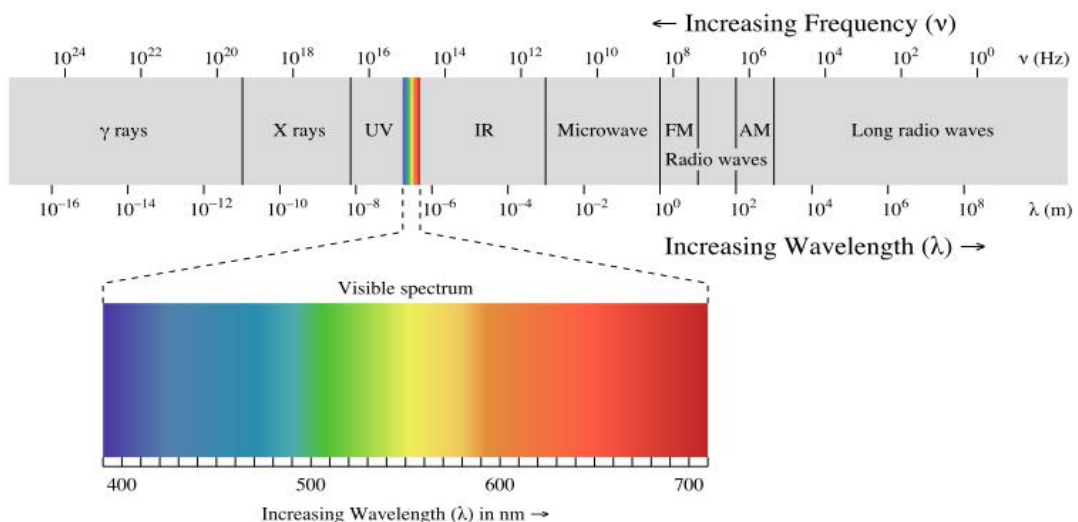
Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία:

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι στην ουσία ηλεκτρομαγνητικά κύματα που έχουν σωματίο (κβάντο) το φωτόνιο, το οποίο πρακτικά τη μεταφέρει. Όσον αφορά την επίδραση της στην ύλη, πολλές φορές χρησιμοποιούμε τον διαχωρισμό σε ιοντίζουσα και μη-ιοντίζουσα ακτινοβολία. Με την ιοντίζουσα ακτινοβολία να είναι αυτή, που λόγω της μεγάλης ενέργειας που έχει, μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο του ιονισμού.

Χωρίς την ύπαρξη σαφή διαχωρισμού, το όριο της ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι της τάξεως του ενός KeV. Οπότε όταν αναφερόμαστε σε ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αναφερόμαστε σε ακτίνες x και γ.

Νετρόνια και φορτισμένα σωματίδια:

Τα σωματίδια αποτελούν έμμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία. Μέσω αλληλεπιδράσεων γίνονται περαιτέρω ιονισμοί και διεγέρσεις, οι οποίοι παράγουν δευτερογενή ακτινοβολία. Αξίζει να σημειωθεί ότι φορτισμένα σωματίδια μπορούν να είναι και άμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία, αφού αλληλεπιδρούν λόγω του φορτίου τους με άλλα σωματίδια προκαλώντας διεγέρσεις και ιονισμούς.



Εικόνα 22: Απεικόνιση του Ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και αναλυτικότερα της ορατής περιοχής

Πίνακας 12: Συχνότητα, μήκος κύματος και ενέργεια της κάθε περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

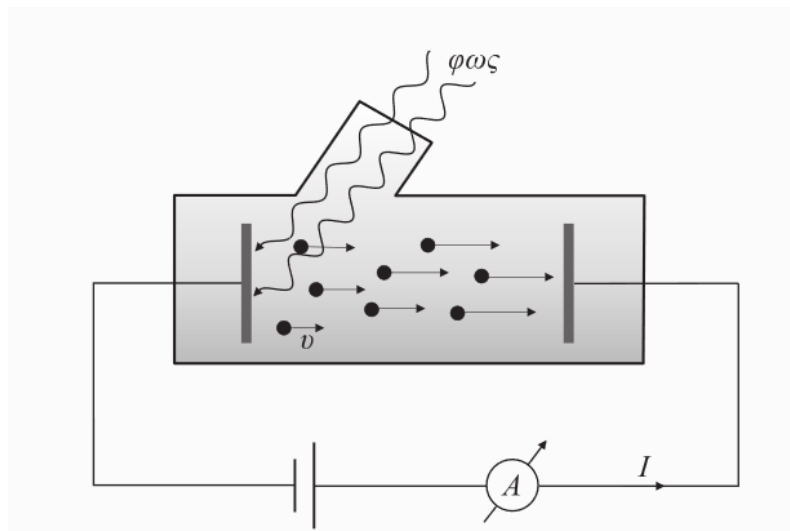
Συχνότητα (f)[s^{-1}]	Μήκος κύματος (λ)	Ενέργεια (E)	Περιοχή (Ονομασία)
$10^5 - 3 \cdot 10^{10}$	3km – 0.01m	413peV – 123μεV	Ραδιοκύματα
$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{14}$	100μm – 1μm	12.4meV – 1.24eV	Υπέρουθρο
$4.3 \cdot 10^{14} - 7.5 \cdot 10^{14}$	700nm – 400nm	1.77eV – 3.1eV	Ορατό
$7.5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	400nm – 10nm	3.1eV – 124eV	Υπεριώδες
$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{18}$	10nm – 100pm	124eV – 12.4keV	Μαλακές – x
$3 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{19}$	100pm – 10pm	12.4KeV – 124keV	Σκληρές – x
$> 3 \cdot 10^{19}$	< 10 pm	> 124 eV	Ακτίνες - γ
$> 3 \cdot 10^{21}$	< 100 fm	> 12.4 MeV	Σύγχροτρον

Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη:

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει τρεις τρόπους με τους οποίους αλληλεπιδρά.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:

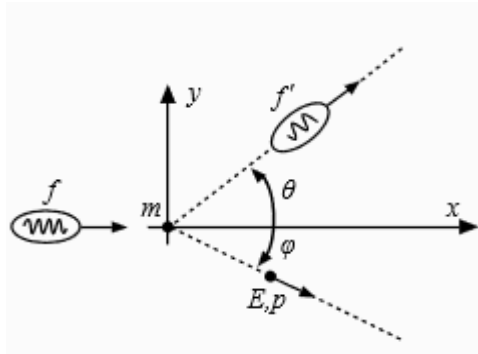
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζουμε την εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο, η οποία προκαλείται από την πρόσπτωση ορατής ή υπεριώδους ακτινοβολίας στην επιφάνειά του. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ο κύριος τρόπος αλληλεπίδρασης ακτίνων γ και x χαμηλής ενέργειας και συμβαίνει κυρίως σε υλικά μεγάλου ατομικού αριθμού Z.



Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Φαινόμενο (Σκέδαση) Compton:

Φαινόμενο Compton ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο και σκεδάζεται δίνοντας ένα φωτόνιο μικρότερης ενέργειας και ένα κινούμενο υπό γωνία ηλεκτρόνιο. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ακίνητο ηλεκτρόνιο μπορούμε να βρούμε ότι η μέγιστη δυνατή ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου είναι:



$E = h\nu$ για γωνία $\theta = 0$ ενώ αντίστοιχα η ελάχιστη είναι για γωνία $\theta = \pi$.

Το σκεδαζόμενο ηλεκτρόνιο έχει συνήθως μεγάλη ταχύτητα και αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνια των ατόμων που συναντάει, προκαλώντας μεγάλο αριθμό ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων μέχρι να επιβραδυνθεί αρκετά και να σταματήσει.

Δίδυμη γένεση ή σχηματισμός ζεύγους:

Δίδυμη γένεση ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο ένα φωτόνιο εξαφανίζεται και στη θέση του δημιουργούνται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Πρόκειται με άλλα λόγια για τη μετατροπή της ενέργειας του φωτονίου σε μάζα των e^-, e^+ . Τόσο το ηλεκτρόνιο όσο και το ποζιτρόνιο έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια και αλληλεπιδρούν όπως και πριν δημιουργώντας ιονισμού.

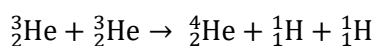
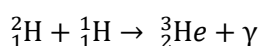
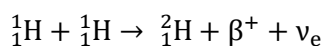
Το ποζιτρόνιο όταν επιβραδυνθεί και συναντήσει ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με το φαινόμενο της εξαΰλωσης και παράγει 2 φωτόνια καθένα με τη χαρακτηριστική ενέργεια των 0.501 MeV .

Πυρηνικές αντιδράσεις στον Ήλιο

Στον πυρήνα του Ήλιου συμβαίνει πυρηνική σύντηξη, η οποία είναι υπεύθυνη για τη παραγωγή ενέργειας που μας επιτρέπει να ζούμε αυτή τη στιγμή στη Γη. Ένας ορισμός της πυρηνικής σύντηξης είναι:

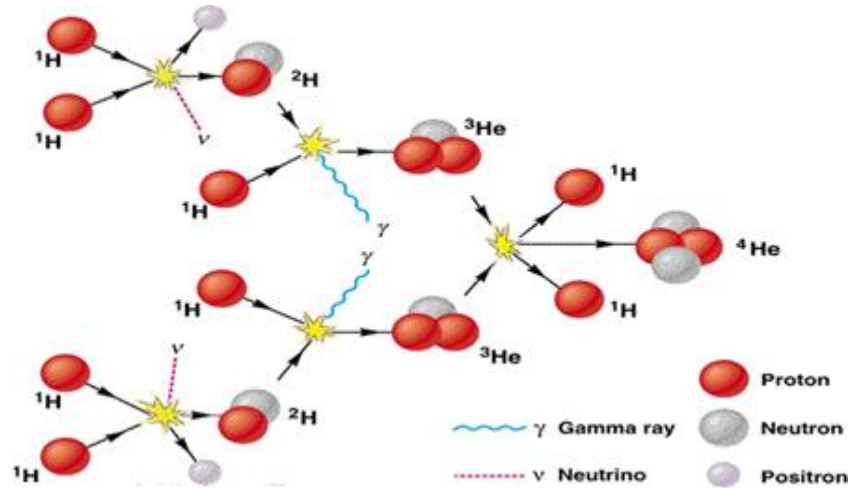
Η συνένωση ελαφρών πυρήνων σε βαρύτερους με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας. Συγκεκριμένα για τον Ήλιο έχουμε καύση υδρογόνου προς παραγωγή ηλίου με τον κύκλο $p^+ - p^+$

Οι πυρηνικές αντιδράσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:



Η μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο έχει έκλυση ενέργειας 26.73 MeV ανά σχηματιζόμενο πυρήνα ηλίου.

Το κάθε νεutrino που εκπέμπεται στις $p^+ - p^+$ αντιδράσεις λαμβάνει κατά μέσο όρο ενέργεια 0.26MeV. Η ενέργεια αυτή χάνεται στο διάστημα, ενώ για κάθε άτομο υδρογόνου που «καίγεται» εκπέμπεται 6.55 MeV ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.



Εικόνα 24: Αναπαράσταση της δημιουργίας Ηλίου μέσω θερμοπυρηνικής σύντηξης στο εσωτερικού του Ηλίου

Παράρτημα Δ'

Κοσμική ακτινοβολία

Γενικά:

Με τον όρο κοσμική ακτινοβολία εννοούμε μια ειδική κατηγορία ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας, που προέρχεται από εξωγήινες πηγές. Οι κοσμικές ακτίνες αποτελούνται κυρίως από ατομικούς πυρήνες και ιόντα. Ένα πολύ μικρό ποσοστό είναι ακτίνες γ και νετρίνα. Οι παρατηρήσεις που έχουμε για την κοσμική ακτινοβολία είναι ουσιαστικά τα πόνια και τα μόνια που παράγονται από τις αντιδράσεις των αρχικών σωματιδίων με τα άτομα της ατμόσφαιρας της Γης. Οι ενέργειες στις οποίες παρατηρούμε τις κοσμικές ακτίνες βρίσκονται σε μια ευρεία περιοχή: $10^6 - 10^{21}$ *Ev*.

Προέλευση των κοσμικών ακτίνων:

Η προέλευση της κοσμικής ακτινοβολίας δεν είναι γνωστή. Σχεδόν όλα τα σωματίδια προέρχονται έξω από το Ηλιακό μας σύστημα, ενώ ελάχιστα έχουν Ηλιακή προέλευση. Τα πολύ μεγάλης ενέργειας σωματίδια όμως έχουν γυροακτίνα μεγαλύτερη από τη διάμετρο του Γαλαξία, οπότε αυτά λέμε ότι έχουν εξωγαλαξιακή προέλευση.

Αυτό που γνωρίζουμε είναι ότι το ενεργειακό φάσμα των Κ.Α. ταιριάζει με το τυπικό φάσμα διάφορων αστροφυσικών αντικειμένων. Συγκεκριμένα, οι κυριότερες πηγές θεωρούνται ότι είναι:

- Αστέρες
- Καινοφανείς – Υπερκαινοφανείς (*Novae – Supernovae*)
- Αστέρες εκλάμψεων – παλλόμενοι αστέρες (*Flare Stars – Pulsars*)
- Διαστρική ύλη

Πίνακας 13: Βασικός διαχωρισμός μεταξύ των θεωριών και των προτύπων προέλευσης των κοσμικών ακτίνων

Γαλαξιακές θεωρίες	Εξωγαλαξιακές θεωρίες
Γαλαξιακού δίσκου	Εξωγαλαξιακό ομογενές πρότυπο
Γαλαξιακής ύλης	Εξωγαλαξιακό τοπικό πρότυπο

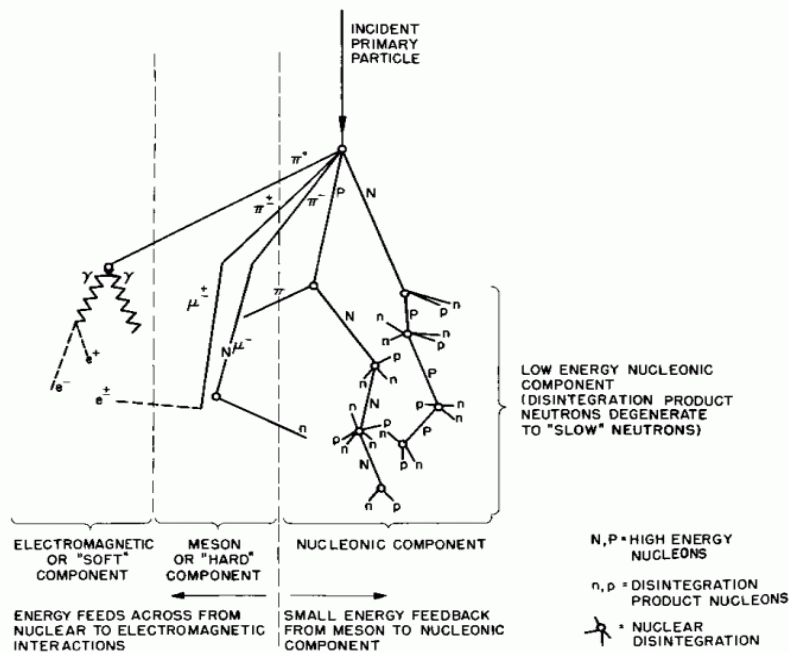
Σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας:

Ένας διαχωρισμός της κοσμικής ακτινοβολίας είναι αυτός μεταξύ της πρωτογενούς και της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Πρωτογενή ονομάζουμε την ακτινοβολία, που έρχεται από το έξω διάστημα και εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα. Η γνώση αυτής είναι απαραίτητη, τόσο για την ανάπτυξη των θεωριών προέλευσης, όσο και για

την κατανόηση των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν στη συνέχεια στην ατμόσφαιρα.

Δευτερογενή ονομάζουμε ουσιαστικά το αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων. Αποτελείται κυρίως από ελαφρότερα θραύσματα όπως πρωτόνια, νετρόνια, μεσόνια, ηλεκτρόνια, κλπ. Κάθε σωματίδιο πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας παράγει μια αλυσιδωτή αντίδραση, που αποτελείται από μίονια και νουκλεόνια. Φωτόνια μεγάλης ενέργειας συμμετέχουν σε αυτές τις αντιδράσεις, προκαλώντας ηλεκτρομαγνητικούς καταγισμούς γνωστούς ως Cosmic Shower/ Electromagnetic Shower.

Πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία	Δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία
<ul style="list-style-type: none"> • 85% πρωτόνια • 5% σωματρία-α • 0.1% στοιχεία Li,BeB • 0.1% στοιχεία C,N,O,F • 0.42% Fe • 1-2% Ακτίνες-γ,νετρόνια και ηλεκτρόνια 	<ul style="list-style-type: none"> • 1-2% νουκλεονική συνιστώσα (πρωτόνια & νετρόνια) • 80% μεσονική συνιστώσα (μίονια) • 18% φωτονική συνιστώσα (ηλεκτρόνια & φωτόνια)



Schematic Diagram of Cosmic Ray Shower

Εικόνα 25: Αναπαράσταση των ηλεκτρομαγνητικών καταγισμών

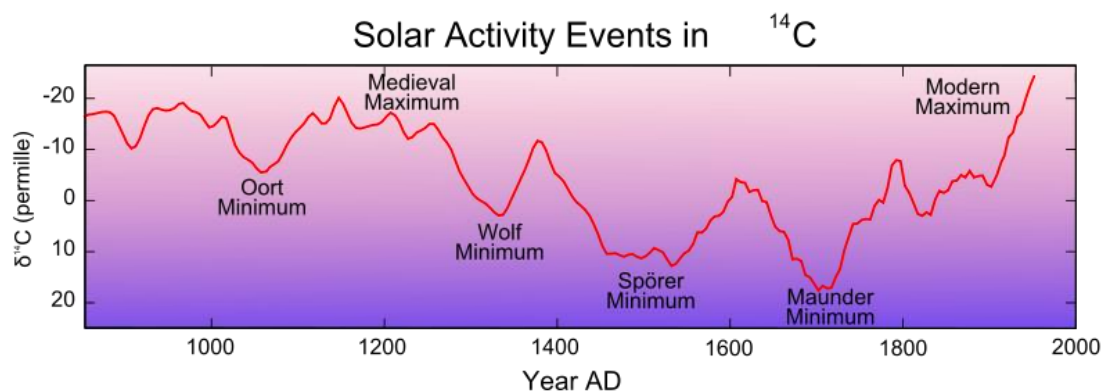
Επίδραση κοσμικών ακτίνων στη Γήινη ατμόσφαιρα:

Τα αίτια της μεταβολής του κλίματος της Γης δεν είναι γνωστά με λεπτομέρειες. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που θεωρούμε ότι επηρεάζουν το κλίμα. Συγκεκριμένα:

- Τροχιακές μεταβολές της γης γύρω από τον Ήλιο
- Εσωτερικές μεταβολές, όπως αλλαγή στη κυκλοφορία του αέρα
- Ηφαιστειακές εκροές αερίων
- Μεταβολές σε συγκέντρωση διάφορων στοιχείων
- Μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας

Εμάς μας ενδιαφέρει ο τελευταίος, δηλαδή η μεταβολή της ηλιακής δραστηριότητας.

Συγκεκριμένα μπορεί ναδειχθεί ότι η ηλιακή δραστηριότητα έχει συσχέτιση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας αν και δεν εξηγεί πλήρως το φαινόμενο, αφού οι δορυφορικές μετρήσεις που έχουμε δείχνουν ότι οι μεταβολές αυτές είναι αρκετά πιο μικρές από τις μεταβολές στη μέση τιμή της θερμοκρασίας. Οι κοσμικές ακτίνες όμως αποτελούν τον κύριο μηχανισμό ιονισμού της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, ο ιονισμός της ατμόσφαιρας κάτω των 35 km οφείλεται αποκλειστικά στη κοσμική ακτινοβολία. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι περίοδοι πολύ χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας έχουν συνοδευτεί από περίοδο ψύξης του πλανήτη¹



Εικόνα 26: Διαφορά μέσης συγκέντρωσης άνθρακα 14 για το διάστημα 900 - 2000 μ.Χ.

¹ Maunder Minimum (1645 – 1715), Dalton minimum (1790 – 1830)

Παράρτημα Ε'

Μηχανισμοί επιτάχυνσης

Γενικά στον αστροφυσικό χώρο έχουμε κάποιες προτεινόμενες φυσικές διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να επιταχύνουν σωματίδια προερχόμενα τόσο από τον Ήλιο (SEP), όσο και από απομακρυσμένες πηγές (Κοσμική ακτινοβολία). Επιγραμματικά αυτές μαζί με τους πιο γνωστούς μηχανισμούς τους είναι:

- Ηλεκτρομαγνητικές διαδικασίες (Magnetic Reconnection)
- Στοχαστικές διαδικασίες (2^{ης} τάξης Fermi)
- Shock Acceleration (1^{ης} Τάξης Fermi)

Ηλεκτρομαγνητικές διαδικασίες

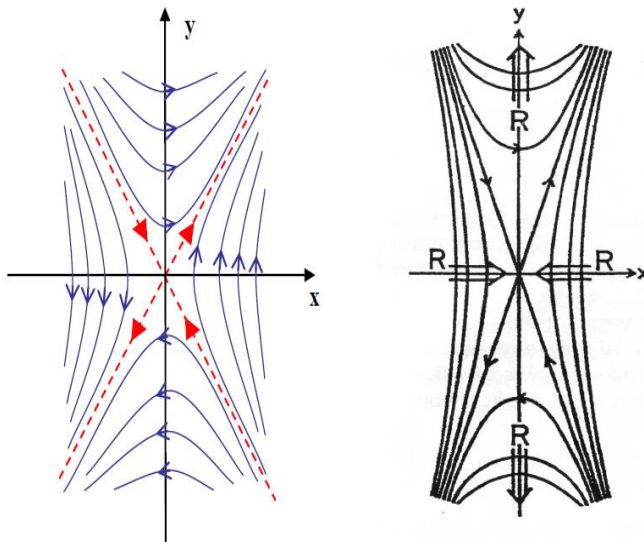
Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να προσφέρει έργο και κατ' επέκταση να μεταβάλει το μέτρο της ταχύτητας που έχει ένα σωματίδιο. Όμως, ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο όπως γνωρίζουμε και συνεπώς αυτό μπορεί να δώσει επιτάχυνση στο σωματίδιο που αναφερόμαστε.

Παραδείγματα ηλεκτρομαγνητικών φυσικών διαδικασιών έχουμε στις ηλιακές εκλάμψεις και στις μαγνητόσφαιρες των πλανητών.

Μαγνητική επανασύνδεση (Magnetic Reconnection):

Χαρακτηριστικό φαινόμενο, που παραβιάζει την αρχική μας σκέψη ότι ένα μαγνητικό φαινόμενο δεν μπορεί να προκαλέσει επιτάχυνση στα σωματίδια του αστροφυσικού χώρου, είναι αυτό της μαγνητικής επανασύνδεσης.

Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό φαινόμενο που παρατηρείται στον ήλιο. Η τοπολογία των μαγνητικών γραμμών ονομάζεται X-point και έχει την ακόλουθη δομή:



Εδώ έχουμε υπερβολική τοπολογία δυναμικών γραμμών και ένταση της μορφής

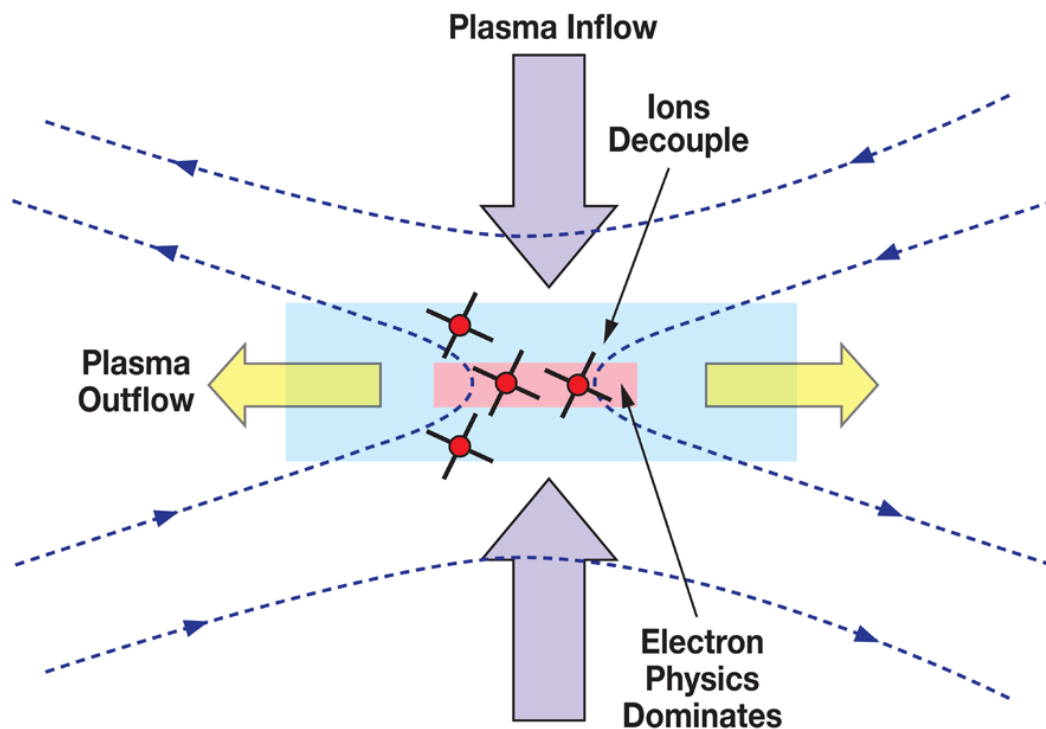
$$\vec{B} = y\hat{x} + a^2x\hat{y}$$

από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη Lorentz αφού πρώτα έχουμε ορίσει το ρεύμα ως:

$$\frac{\vec{J}}{c} = \frac{\vec{V} \times \vec{B}}{4\pi}$$

$$\vec{F} = \frac{\vec{J} \times \vec{B}}{c} = \dots \Leftrightarrow \vec{F} = -\frac{a^2(a^2-1)}{4\pi} x\hat{x} + \frac{a^2-1}{4\pi} y\hat{y}$$

Αν η δύναμη Lorentz δεν εξουδετερωθεί από τη βαθμίδα πίεσης του αερίου τότε δημιουργείται η τοπολογία που ονομάζεται φύλλο ρεύματος (Current Sheet) όπου πρακτικά έχουμε εισροή πλάσματος από τα πλάγια και παράλληλη εκροή.



Εικόνα 27: Αναπαράσταση του φύλλου ρεύματος και της χαρακτηριστικής εκροής πλάσματος που το συνοδεύει

Κατά το φαινόμενο αυτό παρατηρείται μια διαταραχή μαγνητικών δυναμικών γραμμών που οδηγεί σε δημιουργία κρουστικού κύματος το οποίο κινείται με ταχύτητα

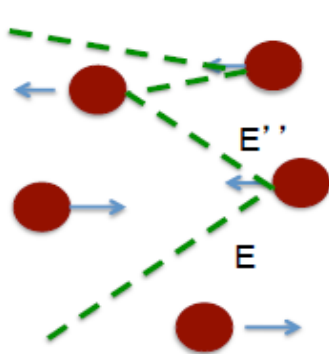
Alfven¹. Συνεπώς, μέσω εκρηκτικών φαινομένων όπως εκλάμψεις και στεμματικές εκτινάξεις μάζας έχουμε μετατροπή της Μαγνητικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια του πλάσματος. Άρα, και επιτάχυνση του πλάσματος και των σωματιδίων που συμπεριλαμβάνει.

Στοχαστικές διαδικασίες

Θεωρούμε ότι υπάρχει ένα έλλειμα ή πλεόνασμα ενέργειας, που όμως σε μεγάλους χρόνους δίνει ένα ολικό πλεόνασμα ενεργειακά στο σωματίο αυξάνοντας έτσι την ταχύτητά του.

Παραδείγματα έχουμε στις ηλιακές εκλάμψεις, στον διαπλανητικό χώρο και κοντά σε κρουστικά κύματα.

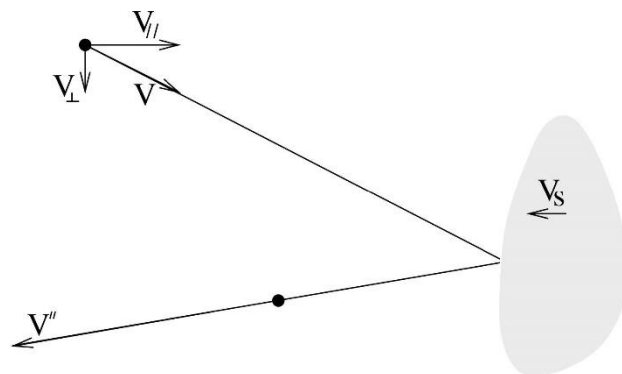
Γενικά, το βασικό σκεπτικό είναι ότι ενώ η ορμή διατηρείται για το σύστημα αναφοράς του κύματος που μελετάμε, στο σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου (παρατηρητή) έχουμε μια μεταβολή της συνολικής ορμής της τάξης:



$$\Delta p \sim p \frac{U}{c}$$

Και η αλλαγή της ορμής είναι όπως λέμε «Φαινόμενο δεύτερης τάξης», από όπου βγήκε και η ονομασία του μηχανισμού Fermi που θα δούμε συνοπτικά.

Δεύτερης τάξης μηχανισμός Fermi:



Ο καλύτερος τρόπος περιγραφής του μηχανισμού είναι ένα μηχανικό ανάλογο. Έστω σωματίο μάζας m κινείται σε χώρο που υπάρχουν διάφορα κινούμενα σώματα («νέφη») με μεγάλη μάζα και μικρή ταχύτητα σε σχέση με το σωματίο που μελετάμε.

Ως αποτέλεσμα έχουμε ελαστική ανάκλαση του σωματιδίου.

Έστω V_s ταχύτητα των νεφών και V ταχύτητα που έχει το σωματίδιο μας. Μετά από κάθε κρούση το σωματίδιο θα κερδίζει ή θα χάνει ενέργεια αναλόγως με τη κατεύθυνση

¹ Νομπελίστας Σουηδός φυσικός και μηχανικός [1908 - 1995]

της ταχύτητας που έχουν τα σωμάτια με τα οποία συμβαίνει η κρούση. Στη μη σχετικιστική περίπτωση θα έχουμε $\Delta E_k = 2mV_s(V_{||} \pm V_s)$ ανάλογα με το αν έχουμε μετωπική ή ακόλουθη κρούση.

Στη σχετικιστική περίπτωση όμως πρέπει να πάρουμε τους μετασχηματισμούς Lorentz και να κάνουμε τις απαραίτητες διορθώσεις. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι:

$$\gamma'' = \gamma \left(1 + \frac{\frac{2V_s^2}{c^2} - 2\vec{V} \cdot \frac{\vec{V}_s}{c^2}}{1 - \frac{V_s^2}{c^2}} \right)$$

Αναπτύσσοντας κατά Taylor ως προς V_s/c και παίρνοντας μέχρι δεύτερης τάξης όρους έχουμε για τη περίπτωση μετωπικής κρούσης (δηλαδή πλεόνασμα ενέργειας)

$$\Delta E_+ = (\gamma'' - \gamma)mc^2 = \left(-2 \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}_s}{c^2} + 2 \frac{V_s^2}{c^2} \right) \gamma mc^2$$

Λόγω του ότι οι μετωπικές κρούσεις είναι περισσότερες από τις ακόλουθες, έχουμε ένα ολικό στατιστικό πλεόνασμα ενέργειας το οποίο προκύπτει

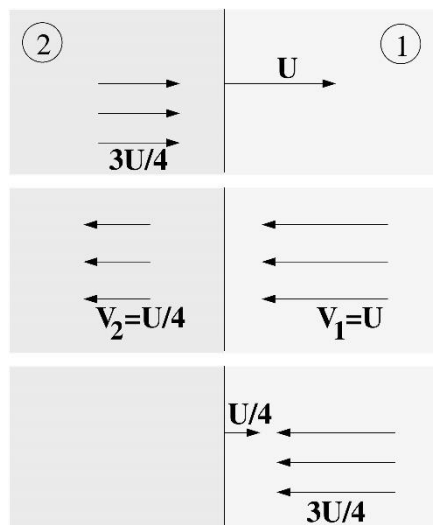
$$\Delta E = 8 \left(\frac{V_s}{V} \right)^2 E_k$$

Στο 3D προκύπτει παρόμοιο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, βρίσκουμε μια αναλογία δεύτερης τάξης, όπως αναμένεται από το όνομα του μηχανισμού $\sim V_s/c$.

Shock accelerations

Πρώτης τάξης μηχανισμός Fermi:

Ο 1^{ης} τάξης μηχανισμός αποτελεί πρακτικά «βελτίωση» του προηγούμενου. Θέλουμε να βρούμε ένα μηχανισμό να είναι πρώτης τάξης και όχι δεύτερης, δηλαδή πρακτικά να εξασφαλίσουμε μόνο μετωπικές κρούσεις.



- (a) Το μηχανικό ανάλογο αυτού του μηχανισμού είναι πρακτικά ένα σωματίδιο που κινείται μεταξύ δύο νεφών, τα οποία πλησιάζουν μεταξύ τους. Υπάρχει τέτοιος μηχανισμός στα αστροφυσικά συστήματα που μας ενδιαφέρουν. Είναι ισοδύναμος με κινήσεις σωματίων που περνούν ασυνέχειες ροής πλάσματος δηλαδή τα ωστικά κύματα (Shocks). Το φαινόμενο μπορεί κανείς να το φανταστεί σαν ένα σώμα που συγκρούεται συνεχώς σε δύο καθρέπτες, που πλησιάζουν ο ένας τον άλλον με αποτέλεσμα να έχουμε πάντα μετωπική κρούση άρα και συνεχώς κέρδος ενέργειας.

Συγκεκριμένα έχουμε:

Μετά από ένα πλήρη κύκλο (2 περάσματα μέσα από την ασυνέχεια)

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{U}{2c} + \frac{U}{2c} = \frac{U}{c}$$

Συνεπώς μετά από K κύκλους ($K/2$ περάσματα) αν έστω αρχική ενέργεια E_0 θα έχουμε συνολική ενέργεια:

$$E = E_0 \left(1 + \frac{U}{c}\right)^K$$

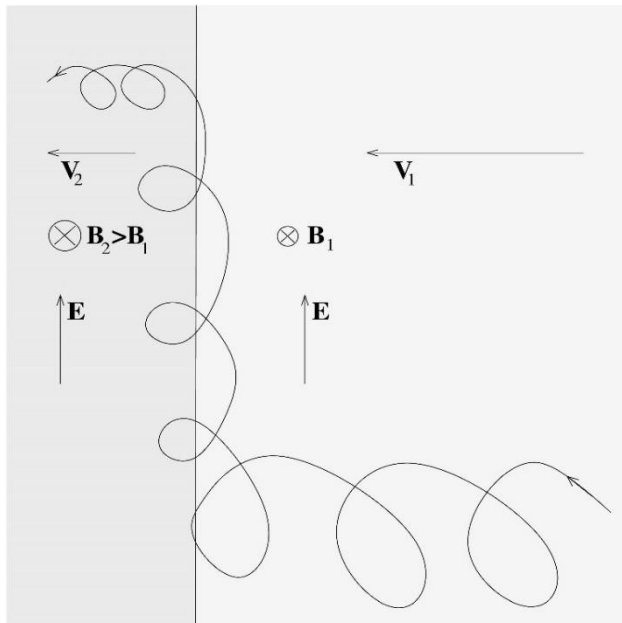
Επιπλέον, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι υπάρχει πάντα μια πιθανότητα να σωματίδιο να διαφύγει από την «παγίδευση» που έχει. Η πιθανότητα αυτή είναι ο λόγος U/c . Άρα, αρχίζοντας με πληθυσμό N_0 θα έχουμε:

$$N = N_0 \left(1 - \frac{U}{c}\right)^K$$

Απαλείφοντας τον αριθμό των «κύκλων» προκύπτει η σχέση:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\frac{\ln(1-\frac{U}{c})}{\ln(1+\frac{U}{c})}} \approx \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-1} \Rightarrow \boxed{N(E)dE \propto E^{-2}dE}$$

Αποτέλεσμα που μπορεί κανείς να χαρακτηρίσει ενθαρρυντικό αν αναλογιστεί τον νόμο δύναμης, που ακολουθεί η κατανομή σωματιδίων υψηλής ενέργειας κοσμικής ακτινοβολίας



Μια παραλλαγή του μηχανισμού αυτού είναι η περίπτωση ολίσθησης πάνω σε επιφάνεια ασυνέχειας, η οποία κινείται κάθετα σε μαγνητικό πεδίο.

Ουσιαστικά αναφέρεται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο μάζας m και φορτίου q που κάνει αυτή την κίνηση μέσω της ασυνέχειας, που δημιουργείται από τα διαφορετικά μαγνητικά πεδία.

Το ηλεκτρικό πεδίο έχει ολίσθηση με ταχύτητα

$$\vec{V}_E = c \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

Η ταχύτητα είναι τέτοια που οδηγεί τα φορτία προς την ασυνέχεια. Όταν το σωματίο περάσει την ασυνέχεια θα πάει στο μέρος με το μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο και ίδιο ηλεκτρικό πεδίο. Η γυροακτίνα συνεπώς θα γίνει μικρότερη, οπότε το σωματίο θα έχει ολίσθηση πάνω στο επίπεδο ασυνέχειας και πάλι. Μπορούμε να δούμε από τη γεωμετρία του προβλήματος ότι η ολίσθηση είναι παράλληλη με το E σε περίπτωση θετικού φορτίου και αντίθετη του E σε περίπτωση αρνητικού. Άρα, σε κάθε περίπτωση έχουμε επιτάχυνση και πλεόνασμα ενέργειας για το σωματίδιο που μελετάμε.

Ασφαλώς, αυτές είναι κάποιες απλές ερμηνείες. Περαιτέρω έρευνα γίνεται σε μη γραμμικές θεωρίες για την επιτάχυνση σωματιδίων. Κυρίως για τη μελέτη δυναμικών καταστάσεων και την αλληλεπίδραση των σωματίων με κάθε πιθανή μαγνητική δομή.

Παράρτημα Ζ'

Επειδή το πλήθος των γραφημάτων είναι πολύ μεγάλο και με τη διάταξη που ακολουθήσαμε στο υπολογιστικό μέρος θα έφτανε προσεγγιστικά τις 500 σελίδες, θεωρήσαμε ορθότερο να συμπεριλάβουμε υπερσυνδέσμους, που οδηγούν σε όλα τα γραφήματα τα οποία είναι σε μορφή .png. Παράλληλα στην εργασία συμπεριλαμβάνεται ένα CD με τα γραφήματα, που βρίσκονται στους παρακάτω υπερσυνδέσμους.

4.4.2:

Combined/Ladder plots:

<https://goo.gl/Q6dx0J>

Combined Color plots:

<https://goo.gl/fgpQ82>

4.4.3:

Interpolated Plots:

<https://goo.gl/8laL2y>

Interpolated Plots (Καλύτερη απεικόνιση των $C_1 - C_3$)

<https://goo.gl/V2Oobc>

4.4.4:

Histograms - (Μικρό πλήθος κελίων):

<https://goo.gl/3fRHBr>

4.4.5:

Histograms (Interpolated - Non Interpolated) (50 /100 Bins):

<https://goo.gl/2qrLsN>

4.6 / 4.6.2:

Combined Color plots:

<https://goo.gl/DE3aNO>

4.6.1:

<https://goo.gl/zmBE6q>

Βιβλιογραφία

Βιβλία - Ελληνικά

Αντωνόπουλος - Ντόμης Μ. (2005), Εισαγωγή στην Πυρηνική τεχνολογία, *Εκδόσεις ΖΗΤΗ*, Θεσσαλονίκη, ISBN: 960-431-961-2

Γεωργίου Ευάγγελος (2008), Ιατρική Φυσική: Διαγνωστικές & θεραπευτικές εφαρμογές των ακτινοβολιών, Τόμος: I, II, *Εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης*, Αθήνα, ISBN:978-960-399-907-2

Κανάρης Τσίγκανος (2004), Φυσική Πλάσματος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

Μαυρομιχαλάκη Ελένη Χριστοπούλου (2009), Κοσμική Ακτινοβολία, *Εκδόσεις συμμετρία*, Αθήνα, ISBN: 978-60-266-251-9

Πρέκα - Παπαδήμα Παναγιώτα, Δανέζης Μ., Θεοδοσίου Σ., Καργιολάκη Δ. (2009), Στα μονοπάτια του Ήλιου, Εισαγωγή στην Ηλιακή Φυσική, *Εκδόσεις Δίαυλος*, Αθήνα, ISBN: 978-960-531-243-5

Τραχανάς Στέφανος, (2009), Κβαντομηχανική I: Μια βασική εισαγωγή για φυσικούς, χημικούς και μηχανικούς, *Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης*, Ηράκλειο, ISBN: 978-960-524-206-0

Shu H. Frank (2010), Αστροφυσική, δομή και εξέλιξη του σύμπαντος, Τόμος I: Αστέρρες, *Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης*, Επιμέλεια: Ιωσήφ Βεντούρα, ISBN: 978-960-7309-16-7

Shu H. Frank (2010), Αστροφυσική, δομή και εξέλιξη του σύμπαντος, Τόμος II: Γαλαξίες - Ηλιακό σύστημα, *Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης*, Επιμέλεια: Ιωσήφ Βεντούρα, ISBN: 978-960-7309-17-4

Βιβλία - Αγγλικά

Bellan, P. M. (2006), Fundamentals of Plasma Physics, *Cambridge University Press*, New York, ISBN: 978-0-521-82116-2

Brown D. Charles (2002), Elements of spacecraft design, ISBN: 978-1-56347-524-5, DOI: 10.2514/4.861796

Daglis, I.A. (2004), Effects on Space Weather on Technology infrastructure, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, Boston, London

Daglis, I.A. and Daniel, N. B. (2007) 'Radiations Belts and Ring Current', Space Weather: Physics and Effects, edited by Volker Bothmer and Ioannis A. Daglis, 1st ed. Chichester, UK: *Springer Praxis Books*, 173-202.

Foukal, P. V. (2004), *Solar Astrophysics*, 2nd edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim, Federal Republic of Germany

Hilgers, A., Glover, A. and Daly, E. (2007), 'Effects on Spacecraft Hardware and Operations', *Space Weather: Physics and Effects*, edited by Volker Bothmer and Ioannis A. Daglis, 1st ed. Chichester, UK: *Springer Praxis Books*, 353 - 384.

Kallenrode, M.-B. (2004), *Space Physics: An Introduction to Plasmas and Particles in the Heliosphere and Magnetospheres*, Springer, ISBN: 978-3540206170

Longair, M. S. (1992), *High Energy Astrophysics, I, II*, *Cambridge University Press*, New York

Miyamoto, K. (2005), *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, *Springer - Verlag*, Germany, Berlin, Heidenberg

Murdin, P. (2001), *Encyclopedia of astronomy and astrophysics*. *Nature, Publishing Group: UK*.

Piper Mark. (2008), *Introduction to IDL*, ITT Visual Information Solutions,

Schwenn, Rainer (2001), *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics: Solar Wind: Global properties*, *Nature Publishing Group*

Wüest M., D. S. Evans, R. von Steiger(Eds) (2007), *Calibration of Particle Instruments in Space Physics*, *ESA Publications Division Keplerlaan 1, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands*

Δημοσιεύσεις - Διπλωματικές

Bale, S. D., Balikhin, M.A., et al. (2005), *Quasi-perpendicular Shock Structure and Processes*, *Space Science Reviews* 118: 161-203, doi: 10.1007/s11214-005-3827-0

Barth, J. L., C. S. Dyer, and E. G. Stassinopoulos (2003), *Space, Atmospheric, and Terrestrial Radiation Environments*, *IEEE Transactions of Nucl. Sci.*, 50, doi: 10.1109/TNS.2003.813131

Behlke Rico (2001), *Solar radio bursts and low frequency emissions from space [Diploma Thesis]*, *IRF Scientific Report 275*, ISSN 0284-1703, Swedish Institute of Space Physics.

Charvátová, I. (2000), *Can origin of the 2400-year cycle of solar activity be caused by solar inertial motion?*, *Ann. Geophysicae* 18, 399-405, doi:10.1007/s00585-000-0399-x, 2000.

Cliver, Edward W. (2008), *History of research on solar energetic particle (SEP) events: the evolving paradigm*. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 4, pp 401-412. doi:10.1017/S1743921309029639.

Daglis, I.A., Tsurutani, B.T., Gonzalez, W.D., Kozyra, J.U., et al. (2007), *Key Features of Intense Geospace Storms — A Comparative Study of a Solar Maximum*

- and a Solar Minimum Storm, *Planet. Space Sci.*, vol. 55, pp. 32–52, doi:10.1016/j.pss.2006.04.007
- Daglis, I. A., et al. (2003), Intense space storms: Critical issues and open disputes, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2002JA009722
- Delp, D. M., Charvat, M. J., Limoli, L.C., Globus, K.R., Ghosh, P. (2016), Apollo Lunar Astronauts Show Higher Cardiovascular Disease Mortality: Possible Deep Space Radiation Effects on the Vascular Endothelium. *Scientific Reports*, 6:29901, doi:10.1038/srep29901
- Desorgher, L., Paul Scherrer Inst., Villigen, Switzerland, et al. (2013), The Next Generation Radiation Monitor-NGRM, (*2013 NSS/MIC*), IEEE, doi:10.1109/NSSMIC.2013.6829497
- Gonzalez, W.D., J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani and V.M. Vasyliunas (1994), What is a geomagnetic storm, *Journal of Geophysical research*, vol 99, pp 5771-5792, doi:10.1029/93JA02867
- Grandpierre Attila (1996), On the origin of Solar cycle periodicity, *Astrophysics and Space Science*, Vol. 243, Issue 2, pp 393-400, doi:10.1007/BF00644709
- Hajdas w., et al (2003)., Radiation environment along the INTEGRAL orbit measured with the IREM monitor, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L43-L47
- Hajdas w., A. Zehnder, L. Adams, and B. Nickson (1996) The proton irradiation-facility at the Paul Scherrer Institute. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 113, pp. 54–54
- Kahler, S. W., and A. Ling (2015), Dynamic SEP event probability forecasts, *Space Weather*, 13, doi:10.1002/2015SW001222.
- Kallenrode, M-B. (2003), Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, Volume 29, Number 5, pp. 965-981, doi:10.1088/0954-3899/29/5/316
- Kim, R.-S., K.-S. Cho, J. Lee, S.-C. Bong, A. D. Joshi, and Y.-D. Park (2015), Characteristics of four SPE groups with different origins and acceleration processes, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 7083–7093, doi:10.1002/2015JA021280.
- Király, Pèter (2004), Solar energetic particles, *International Journal of Modern Physics A*, Vol.20, No. 29(2005) 6634-6641
- Lario, D. (2005), Advanced in modeling gradual solar energetic particle events, *Advances in Space Research*, Vol. 36, Issue 12:2279-2288, doi:10.1016/j.asr.2005.07.081
- Mason, G. M. et al. (2002), Spectral properties of He and Heavy ions in ³He-rich Solar Flares, *The Astrophysical Journal*, Volume 574: 1039-1058,

- Mitchell, E. F., H. M. Araújo, E. Daly, N. Guerrini, S. Gunes-Lasnet, et al (2014), The Highly Miniaturised Radiation Monitor, *Journal of Instrumentation*, Volume 9, doi: 10.1088/1748-0221/9/07/P07010
- Nariaki V. Nitta, Reames, D. V., DeRosa, M. L., Liu Yang (2006), Solar Sources of Impulsive Solar energetic particle events and their magnetic field connection to the Earth, *The Astrophysical Journal*, 650: 438-450, doi: 10.1086/507442
- Petris, S., M-I Chrysafeli, Papaioannoy, et al. (2013), An Overview of the ground level enhancement of cosmic rays on May 17, 2012, *11th Hel.A.S Conference*, Athens, 8-12 September, 2013
- Rainer Schwenn, (2006), Space Weather: The Solar Perspective, *Living Rev. Solar Phys.* 3 doi: 10.12942/lrsp-2006-2
- Reames, D. V. (1995), Solar energetic particles: A paradigm shift, *Rev. Geophys.*, 33(S1), 585–589, doi:10.1029/95RG00188.
- Reames, D. V. (1998), Solar energetic particles: Is there time to hide?, *Radiation Measurements* 30 297-308, doi:10.1016/S1350-4487(99)00066-9
- Reames, D. V. (1999) Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere, *Space Sci Rev*, 90: 413–491, doi:10.1023/A:1005105831781
- Reames, D. V. (2004), Solar energetic particle variations, *Advances in Space Research*, Volume 34: 381-390, doi: 10.1016/j.asr.2003.02.046.
- Reames, D. V. and C. K. Ng (2004), Heavy-Element abundances in solar energetic particle events, *The Astrophysical Journal*, 610: 510-522
- Reames, D. V. (2013), The Two Sources of Solar Energetic Particles, *Space Sci Rev*, 175:53–92, doi:10.1007/s11214-013-9958-9
- Reames, D. V. (2015), What are the Sources of Solar Energetic Particles? Element Abundances and Source Plasma Temperatures, *Space Sci Rev*, 194:303-327, doi: 10.1007/s11214-015-0210-7
- Rice WKM, Zank GP, Li G (2003), Particle acceleration and coronal mass ejection driven shocks: Shocks of arbitrary strength. *J Geophys Res* 108(A10): 1369, doi 10.1029/2002JA009756
- Ryan, M. J., Lockwood, A. J. and Debrunner, H. (2000), Solar Energetic Particles, *Space Science Reviews* 93: 35–53, doi:10.1023/A:1026580008909
- Sandberg, I., P. Jiggins, D. Heynderickx, and I. A. Daglis (2014), Cross calibration of NOAA GOES solar proton detectors using corrected NASA IMP-8/GME data, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL060469.
- Sandberg, I., I. A. Daglis, A. Anastasiadis, P. Bühler, P. Nieminen, and H. Evans (2012), Unfolding and Validation of SREM Fluxes, *IEEE Transactions of Nucl. Sci.*, doi: 10.1109/TNS.2012.2187216

Sandberg, I., I. A. Daglis, D. Heynderickx, P. Truscott, A. Hands, H. Evans, and P. Nieminen (2014), Development and Validation of the Electron Slot Region Radiation Environment Model, *IEEE Transactions of Nucl. Sci.*, 61, doi: 10.1109/TNS.2014.2304982

Schmelz J. T., Reames D. V., R. von Steiger and S. Basu (2012), Composition of the solar corona, solar wind and solar energetic particles, *The Astrophysical Journal*, 755:33 (7pp), 2012 August 10, doi: 10.1088/0004-637X/755/1/33

Sussingham Christopher J., Seth A. Watkins and Hardley cocks (1999), Forty Years of Development of Active Systems for Radiation Protection of Spacecraft, *The journal of the Astronautical Sciences*, Vol. 47, Nos. 3 and 4, pp. 165-175

Usoskin, G. Ilya, (2013), A History of Solar Activity over Millennia, *Living Rev. Solar Phys*, 10, doi:10.12942/lrsp-2013-1

White, M. Stephen, (2007), Solar Radio Bursts and Space Weather, *Asian Journal of Physics*,

Wolfgang Dröge, (2003), Acceleration and Propagation of Solar Energetic Particles, *Astrophys. J.*, 589, pp. 1027–1039

Lectures - Workshops

Cohen, C.M.S. (2006), SEP Acceleration, *High Energy Solar Physics Summer school*, 14-24 June 2006, University of New Hampshire, USA, Durham.

Desai, M. I., (2007), Energetic Particles from Solar Explosions, *Heliophysics Summer School 2007*, July, 30 - August 07 2007, Boulder, CO. Lecture

Hajdas, W., K. Egli, S. Scherrer, et al. (2012), Next Generation Radiation Monitor NGRM, *ESA Space Radiation Workshop 3*, 9-10 May 2012,

Nicollier, Claude (2016), Orbital maneuvers, special orbits and rendezvous, *Space Mission Design and Operations*, EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), Online Lecture

Townsend L. W. (2000), Overview of active methods for shielding spacecraft from energetic space radiation, *1st International Workshop on Space Radiation Research and 11th Annual NASA Space Radiation Health Investigators' Workshop*, Arona (Italy), May 27-31, 2000

Tylka, J. Allan. (2015), Insights on Shock Acceleration from Solar Energetic Particles, “Shock Acceleration: from the Solar System to Cosmology”, The Lorentz Institute, Leiden, The Netherlands, 4-10 January 2015

Ιστοσελίδες (Πληροφορίες ή/και γραφήματα)

http://srem.web.psi.ch/html/srem_home.shtml : Η επίσημη σελίδα του SREM

<http://dev.sepem.oma.be/> : ESA's Solar Energetic Particle Environment Modeling (SEPTEM) application server

http://proteus.space.noa.gr/sep_f_tool/ : Solar Energetic Proton Flux using ESA SREM data

<https://www.nasa.gov/> : Η επίσημη σελίδα της NASA

http://solar.physics.montana.edu/sol_phys/ : Η σελίδα Ηλιακής φυσικής του πανεπιστημίου της Montana

<http://soho.nascom.nasa.gov/> : Η σελίδα του προγράμματος SOHO

<http://sci.esa.int/home/> : Η σελίδα της ESA για τα επιστημονικά δρόμενα

<http://www.solarnovus.com/> : Διαδικτυακό περιοδικό με θέματα που αφορούν τον Ήλιο

<http://history.nasa.gov/> : Η σελίδα της NASA που διατηρούνται ιστορικά δεδομένα

<http://ibex.swri.edu/> : Σελίδα διαπλανητικής έρευνας του ινστιτούτου «Southwest Research Institute» του San Antonio, Texas

<http://mms.gsfc.nasa.gov> : Η σελίδα της Nasa για το πρόγραμμα MMS

<http://farside.ph.utexas.edu/> Η σελίδα του καθηγητή Richard Fitzpatrick, Πανεπιστήμιο Texas

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science : Η σελίδα της ESA για τη διαστημική επιστήμη

<http://www.braeunig.us/space/index.htm> : Η σελίδα διαστημικής τεχνολογίας και επιστήμης του Robert A. Braeunig

<https://engineering.dartmouth.edu/~d76205x/research/Shielding/> : Η βάση δεδομένων για θέματα ακτινοπροστασίας διαστημικών αποστολών του τμήμα μηχανικών του Dartmouth college

<https://www.harrisgeospatial.com/docs/home.html> : Το επίσημο site της IDL με εκτενείς οδηγίες.

<http://idlcoyote.com> : Το Site του David W. Fanning, με τη βιβλιοθήκη Coyote Library για IDL.

<http://idlastro.gsfc.nasa.gov> : Η βιβλιοθήκη που παρέχει η NASA για βοήθεια σε αστρονομική μελέτη μέσω της IDL.