Παρουσίαση Θέματος Διπλωματικής

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΜ&ΜΥ

Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φορτισμένων σωματιδίων με ηλεκτρομαγνητικά κύματα με χρήση παράλληλης επεξεργασίας

Φοιτητής:
Χαρίτων Βασίλειος - 57222

Υπεύθυνος:
Αν. Καθηγητής κ. Σαρρής Θεόδωρος

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:
Θ. Σαρρής, Δ.Σαραφόπουλος, Α. Αραμπατζής

Νοέμβριος 2022

Περιεχόμενα

1) Περίληψη προβλήματος
2) Περίληψη διπλωματικής πάνω στο πρόβλημα
3) Κατανομές σωματιδίων
4) Μαθηματική επίλυση
5) Αλγόριθμος
6) Παράλληλη επεξεργασία
7) Μετεπεξεργασία - Post processing
8) Αποτελέσματα

1)Περίληψη προβλήματος
Ενεργητικά σωματίδια

- Στην μαγνητόσφαιρα της Γης υπάρχουν πολλά **ενεργητικά σωματίδια** τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τους ανθρώπους με διάφορους τρόπους.
- Πέρα απο το εντυπωσιακό θέαμα που μας προσφέρουν, το λεγόμενο Βόρειο Σέλας μπορούν να επηρεάσουν τους ανθρώπους και **αρνητικά**.
- Συγκεκριμένα, τα σωματίδια αυτά μπορούν να προκαλέσουν ζημία σε επιβάτες αεροπλάνων, να προκαλέσουν διακοπές στην παροχή ρεύματος αλλά και φυσικά να προκαλέσουν ζημία στον ίδιο στον διαστημικό εξοπλισμό που ταξιδεύει σε περιοχές με υψηλή συγκέντρωση τέτοιων σωματιδίων.

[nasa.gov]

1)Περίληψη προβλήματος
Μία μέθοδος αποσυμφόρησης

- Επομένως υπάρχει η ανάγκη για “αποσυμφόρηση” των σωματιδίων από τις εν λόγω περιοχές.
- Αυτό έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να γίνει με “φυσικό τρόπο”, μέσω κυμάτων τα οποία δημιουργούνται από κεραυνούς και διαδίδονται στην ιονόσφαιρα.
- Τα κύματα αυτά αλληλεπιδρούν με τα παγιδευμένα σωματίδια και μπορούν να τα επηρεάσουν με καθοριστικό τρόπο.
- Επομένως υπάρχει ενδιαφέρον για την μελέτη της αλληλεπίδρασης αυτής
- Αρχικά θα να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά της περιοχής που μελετάται
- Και στην συνέχεια θα αναφερθεί πως ακριβώς κινούνται αυτά τα παγιδευμένα σωματίδια.

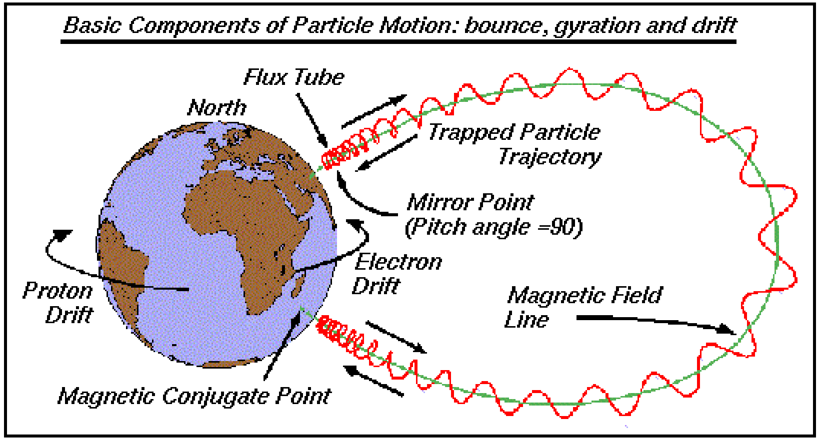
1)Περίληψη προβλήματος
Η περιοχή – Μαγνητόσφαιρα – Ζώνες Van Allen

- Τα σωματίδια αυτά επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης και η περιοχή αυτή ονομάζεται Μαγνητόσφαιρα
- Η μαγνητόσφαιρα χωρίζεται σε διάφορες περιοχές. Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, κύριο ενδιαφέρον έχουν οι ζώνες Van Allen.
- Στις ζώνες Van Allen βρίσκονται παγιδευμένα ενεργητικά σωματίδια(ηλεκτρόνια και πρωτόνια >100keV) που προέρχονται κυρίως από τον Ήλιο.
- Υπάρχουν 2 τέτοιες ζώνες γύρω από την Γη, σε ύψη 640-58.000km από την επιφάνειά της.

- Τα σωματίδια που βρίσκονται στις ζώνες αυτές ακολουθούν 3 περιοδικές κινήσεις

1)Περίληψη προβλήματος
Η αδιαβατική κίνηση των σωματιδίων

- Οι περιοδικές κινήσεις προκύπτουν μετά απο επίλυση της εξίσωσης Lorentz για φορτισμένα σωματίδια μέσα στο διπολικό μαγνητικό πεδίο της Γης: $\vec{F}=q(\vec{E}+\vec{v}\,x\,\vec{B})$
- **Γυροκίνηση(τάξης milliseconds).** Γύρω από τις μαγνητικές γραμμές
- **Κίνηση σε μαγνητικό ανακλαστήρα(ταξης seconds)**: ανάμεσα σε Βόρειο – Νότιο ημισφαίριο
- **Κίνηση Ολίσθησης (τάξης χιλιάδων seconds)**: γύρω από τον μαγνητικό άξονα`



[Nasa IMAGE Science center]

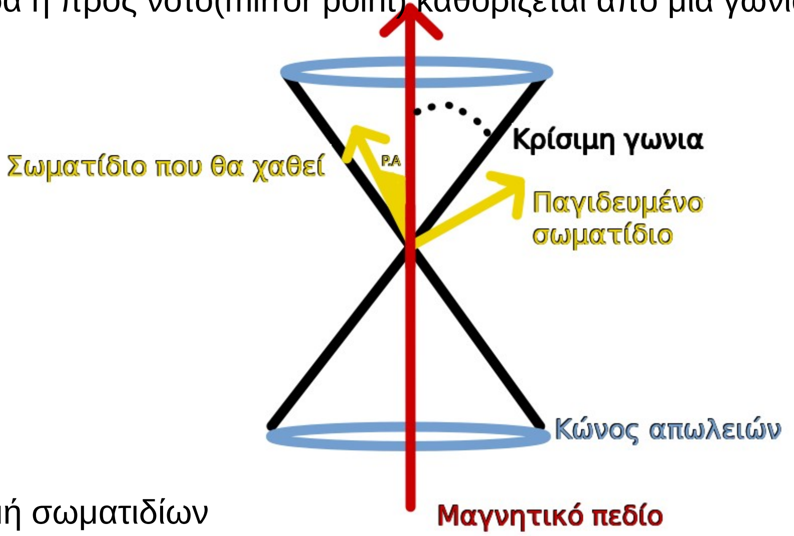
1)Περίληψη προβλήματος
Pitch angle

- Πρόκειται για την γωνία ανάμεσα στο διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου και το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου της Γης.
- Το σημείο που θα αλλάξει ένα σωματίδιο κατεύθυνση, προς βορά ή προς νοτο(mirror point) καθορίζεται από μια γωνία την λεγόμενη **pitch angle(P.A)**

- Εάν η γωνία αυτή ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή αυτό σηματοδοτεί την διαφυγή του από την ζώνη

- Ιδιαίτερη σημασία έχει η γωνία αυτή όταν το σωματίδιο βρίσκεται στον ισημερινό (equatorial pitch angle)

- Αφαιρόντας αυτά τα σωματίδια θα φανεί η αλλαγή στην κατανομή σωματιδίων



2)Περίληψη διπλωματικής πάνω στο πρόβλημα

- Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την **ανάπτυξη αποδοτικού αλγορίθμου** για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των ενεργητικών σωματιδίων με ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην μαγνητόσφαιρα της Γης.
- Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος έτρεξε πάνω σε κατάλληλες κατανομές σωματιδίων

  με σκοπό να παρατηρηθεί το πως επηρεάζεται η κάθε κατανομή απο διάφορα είδη κυμάτων.
- Επίσης έγινε περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων ώστε να ληφθούν συμπεράσματα

- Συνοπτικά η διαδικασία είναι η εξής:

  1)Δημιουργία κατανομής σωματιδίων

  2)”Εισοδος” της κατανομής στον κώδικα, όπου μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το κύμα

  3)Ανίχνευση των σωματιδίων και αποβολή αυτών που χάνονται

  4)Αποθήκευση των πρώτων δεδομένων

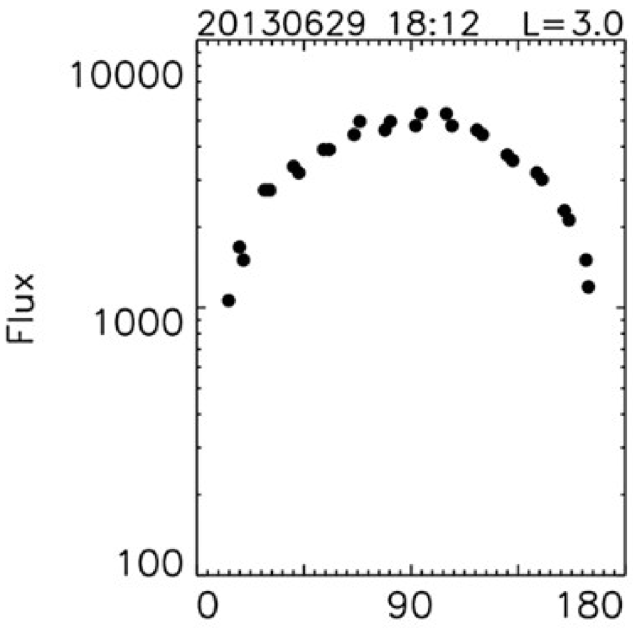
  5)Περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων(Post processing)

  6)Δημιουργία διαγραμμάτων απο τα δεδομένα – Plots

  7)Σχολιασμός αποτελεσμάτων

3)Κατανομές σωματιδίων Αρχικές κατανομές

- Για την προσομοίωση είναι πολύ σημαντική, η κατανομή σωματιδίων που θα επιλέξουμε και κατά πόσο είναι αυτή ρεαλιστική.
- Όπως συμβαίνει συχνά στην φύση, οι ρεαλιστικές κατανομές έχουν συνήθως μορφή κανονικής κατανομής.
- Έτσι και εδώ οι κανονικές κατανομές είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο.
- Φυσικά, οι πραγματικές κατανομές των σωματιδίων στις ζώνες αυτές εξαρτόνται από πολλούς παράγοντες, όπως ειναι ο χρόνος, η δεδομένη ζώνη και το L-shell(σετ μαγνητικών γραμμών) της περιοχής.



Η εικόνα δείχει μία κανονική PAD(Pitch Angle Distribution) κατανομή η οποία έχει παρατηρηθεί σε περιοχή χαμηλού L από το MagEIS(Magnetic Electron Ion Spectrimeter) του Van Allen Probe-A

3)Κατανομές σωματιδίων
Αρχικές κατανομές - Αλγόριθμος

- Ο αλγοριθμος που αναπτύχθηκε μπορεί να δημιουργήσει πολλών ειδών κατανομές.
- Συγκεκριμένα τα σωματίδια μπορούν να αρχικοποιηθούν ως προς
  - 1)την equatorial pitch angle τους
  - 2)το γεωγραφικό πλάτος τους(latitude)
  - 3)την γωνία eta(angle between Vperp and BwR)
  - 4)την ενέργεια τους
- Οι τιμές αυτές μπορούν να κατανεμηθούν με 4 τρόπους
  - 1)Σταθερού βήματος(linearly spaced)
  - 2)Σε ομοιόμορφη κατανομή
  - 3)Σε κανονική κατανομή
  - 4)Σταθερή τιμή

- Το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε C++ που τρέχει κατάλληλες παράμετρους γραμμής εντολών για δημιουργία της επιθυμητης κατανομής.

  distribution.cc→distribution.h5

4)Μαθηματική επίλυση

Runge Kutta 4

- Η εξίσωση Lorentz για την κίνηση των σωματιδίων μπορεί να επιλυθεί μαθηματικά με πολλούς τρόπους.
- Μεταξύ αυτών, είναι πολύ σύνηθες η χρήση της μεθόδου Runge Kutta.
- Πρόκειται για μία επαναληπτική μέθοδο αριθμιτικής ανάλυσης.
- Κάθε επόμενη εκτίμηση(yn+1) βασίζεται στην προηγούμενη(yn) σύν το σταθμισμένο άθροισμα των κλίσεων(k1,k2,k3,k4), οπου h το βήμα.
- Μικρότερο βήμα μας δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια, φυσικά εις βάρος στον χρόνο εκτέλεσης.

$$\begin{aligned}
k_1 &= f(t_n, y_n),\\
k_2 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + h\frac{k_1}{2}\right),\\
k_3 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + h\frac{k_2}{2}\right),\\
k_4 &= f(t_n + h, y_n + hk_3).
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\,h,\\
t_{n+1} &= t_n + h
\end{aligned}$$

k οι κλίσεις, t ο χρόνος, y(n) η τιμή του ρυθμού μεταβολής στο tn, [https://en.wikipedia.org/wiki/Runge%E2%80%93Kutta_methods]

- Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η “κλασική” Runge Kutta μέθοδος, η οποία είναι 4ης τάξης(RK4).
- Αυτό σημαίνει ότι ο υπολογισμός της κάθε επόμενης τιμής βασίζεται πάνω σε 4 κλίσεις.

4)Μαθηματική επίλυση
Αλληλεπίδραση με κύμα

- Δύο υλοποιήσεις

  1)Με τις εξίσώσεις του Bell όπου το κύμα υπάρχει πρακτικά παντού – συνεχή αλληλεπίδραση [bell_wpi.cc]

  2)Με τις εξισώσεις του Li και με κύμα που προέρχεται απο Ray Tracing + interpolation στο χρονικό βήμα(Περαιτέρω ανάλυση)
- Το κύμα διαδίδεται σε πακέτα.
- Συνθήκη για αλληλεπίδραση είναι το σωματίδιο να βρίσκεται μέσα στο εύρος του “πακέτου” του κύματος κατά γεωγραφικό πλάτος.
- Οι παράγοντες Fpar, Fper, Ftheta και είναι προαπαιτούμενοι για την λύση των διαφορικών εξισώσεων για αλληλεπίδραση με κύμα.

- Ε τα ηλεκτρικά πεδία
- Β τα μαγνητικά πεδία
- R, L δεξιά και αριστερά κυκλικά πόλωμένο αντίστοιχα
- p|| η παράλληλη ορμή(στο στατικό μαγν. Πεδίο Γης)
- p| η κάθετη ορμή
- γ παράγοντας Lorentz
- m μάζα
- η, το αντιστοιχο γυροφάσης
- e, το φορτίο του ηλεκτρονίου
- l η τάξη του cyclotron resonance(1)
- J1 η εξίσωση bessel πρωτου τύπου και παράμετρο το β
- Β το μέτρο μαγνητικού πεδίου
- κ| κάθετο κυματάνισμα, κ|| το παράλληλο κυματάνυσμα
- ωce μη σχετικιστική γυροσυχνότητα ηλεκτρονίου

$$F_{\parallel}^{w} = -e\left[E_z^w J_l + \frac{p_\perp}{\gamma m} B_R J_{l-1} - \frac{p_\perp}{\gamma m} B_L J_{l+1}\right],$$

$$F_{\perp}^{w} = -e\left[E_R J_{l-1} + E_L J_{l+1} - \frac{p_\parallel}{\gamma m} B_R J_{l-1} + \frac{p_\parallel}{\gamma m} B_L J_{l+1}\right],$$

$$F_{\theta}^{w} = -e\left[E_R J_{l-1} - E_L J_{l+1} - \frac{p_\parallel}{\gamma m} B_R J_{l-1} - \frac{p_\parallel}{\gamma m} B_L J_{l+1} + \frac{p_\perp}{\gamma m} B_z^w J_l\right].$$

$$\beta = k_\perp p_\perp / eB,$$

[Li, Jinxing & Bortnik, Jacob & Xie, Lun & Pu, Zuyin & Chen, Lunjin & Ni, Binbin & Tao, Xin & Thorne, Richard & Fu, Suiyan & Yao, Zhonghua & Guo, Ruilong. (2015). Comparison of formulas for resonant interactions between energetic electrons and oblique whistler-mode waves. Physics of Plasmas. 22. 052902. 10.1063/1.4914852.]

4)Μαθηματική επίλυση

Αλληλεπίδραση με κύμα – Εξίσωση Lorentz

Οι διαφορικές εξισώσεις που έχουμε να λύσουμε μέσα σε αυτήν την επαναλυπτική διαδικασία είναι οι εξής ρυθμοί μεταβολής(χρόνου) :

- Της κάθετης και παράλληλης ορμής(στο στατικό μαγνιτικό πεδίο της Γης).

$$\frac{dp_\perp}{dt} = F_\perp^w \sin\eta + \frac{1}{2B}\frac{p_\perp p_\parallel}{\gamma m}\frac{\partial B}{\partial z} \qquad \frac{dp_\parallel}{dt} = F_\parallel^w \sin\eta - \frac{1}{2B}\frac{p_\perp^2}{\gamma m}\frac{\partial B}{\partial z}$$

- Του αντίστοιχου της γυροφάσης(γωνία ανάμεσα στη γωνία του BwR και της κάθετης ταχύτητας).

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{l F_\theta^w}{p_\perp}\cos\eta - \omega - k_\parallel \frac{p_\parallel}{\gamma m_e} + \frac{m\omega_H}{\gamma}$$

- Του latitude(θέση σε γεωγραφικό πλάτος) .

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{L R_e (1 + 3\sin^2\lambda)^{1/2}\cos\lambda}\frac{p_z}{\gamma m_e}$$

- Της pitch angle.

$$\frac{d\alpha_{eq}}{dt} = \frac{eB_w}{p^2}\frac{\tan\alpha_{eq}}{\tan\alpha}\left[\left(\frac{\omega}{k} - \frac{p_\parallel}{\gamma m_e}\right)p_\parallel - \frac{p_\perp^2}{\gamma m_e}\right]\sin\eta$$

[Su et al. 2012]

Με αυτά τα στοιχεία μπορούμε να αποθηκεύσουμε την κατάσταση των σωματιδίων και να προχωρήσουμε την προσομοίωση για να βρούμε την αμέσως επόμενη κατάσταση

- E τα ηλεκτρικά πεδία
- B τα μαγνητικά πεδία
- R, L δεξιά και αριστερά
κυκλικά πόλωμένο αντίστοιχα
- p|| η παράλληλη ορμή(στο στατικό μαγν. Πεδίο Γης)
- p| η κάθετη ορμή
- γ παράγοντας Lorentz
- m μάζα
- η, το αντιστοιχο γυροφάσης
- e, το φορτίο του ηλεκτρονίου
- l η τάξη του cyclotron resonance(1)
- J1 η εξίσωση bessel πρωτου τύπου
και παράμετρο το β
- B το μέτρο μαγνητικού πεδίου
- κ| κάθετο κυματάνισμα, κ|| το παράλληλο κυματάνυσμα
- ωce μη σχετικιστική γυροσυχνότητα ηλεκτρονίου

4)Μαθηματική επίλυση
Προαπαιτούμενοι υπολογισμοί

- Για τον υπολογισμό αυτών των διαφορικών εξισώσεων, πέρα απο την “κατάσταση” του αμέσως προηγούμενου βήματος <u>απαιτούνται αρχικά οι παρακάτω υπολογισμοί:</u>

1)Το μαγνητικό διπολικό πεδίο $|B| = \frac{B_0}{R^3}\sqrt{1+3\sin^2\lambda}$ $\quad B_0 = 3.12 \times 10^{-5}\ \mathrm{T}$

Bo μέση τιμή πεδίου, λ γεωγραφικό πλάτος, R ακτίνα γής ~6370 km
[https://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_model_of_the_Earth%27s_magnetic_field

2)Γυροσυχνότητα $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}.$

υ η ταχύτητα, r η γυροακτίνα, m η μάζα, q το φορτίο ηλετρκονίου, B το μαγνητικό πεδίο
[https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclotron_resonance]

3)Παράγωγος γυροσυχνότητας $\frac{\partial\omega_H}{\partial s} = \frac{3\omega_H}{R_e L}\frac{\sin\lambda}{\sqrt{1+3\sin^2\lambda}}\left[\frac{1}{\sqrt{1+3\sin^2\lambda}^{\,2}} + \frac{2}{\cos^2\lambda}\right]$

[Tao et al, 2012]

4) Το μέτρο της ορμής

5)Ο παράγοντας Lorentz $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

c η ταχύτητα του φωτός
[https://en.wikipedia.org/wikiLorentz_factor]

5)Αλγόριθμος Διαδικάσία

- Ο αρχικός κώδικας είναι γραμμένος σε Python από τον υποψήφιο διδάκτορα Τουργαϊδη Στυλιανό.
- Στην εργασία αυτή, έγινε μετατροπή του αλγορίθμου απο Python σε C++ και στην συνέχεια αναπτύχθηκε ως αλγόριθμος διαμοιρασμένης μνήμης με το API της OpenMP.
- Η αποθήκευση των πρώτων δεδομένων έγινε σε format HDF5, μια κατάλληλη μορφη αποθήκευσης για μεγάλα, πολύπλοκα και ετερογενή δεδομένα
- Στην συνέχεια τα δεδομένα αυτά διαβάστηκαν σε Python, οπου εγίνε το Post processing και τα διαγράμματα με χρήση της βιβλιοθήκης matplotlib.

- Επίσης πρέπει να προσομοιωθεί ένας **ανιχνευτή**, ώστε να παρατηρηθεί η εξέληξη της κατανομής.

5)Αλγόριθμος Ανίχνευση

- Για την ανίχνευση της κατάστασης των σωματιδίων, έχει δημιουργηθεί μία δομή η οποία θα αποθηκεύει τις καταστάσεις των σωματιδίων όταν αυτά περνάνε από μία συγκεκριμένη θέση.
- Ουσιαστικά πρόκειται για προσομοιωμένο δορυφόρο ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις και να αποθηκεύσει στην μνήμη του τα ανιχνευμένα σωματίδια.
- Μπορούμε να αποθηκεύσουμε όποια κατάσταση θέλουμε, είτε αυτή είναι ενέργεια, ταχύτητα, ορμή κ.α και φυσικά την χρονική στιγμή ανίχνευσης
- Η συνθήκη διαπέρασης σωματιδίου από τον ανιχνευτή είναι περιορισμένη σε latitude. Συγκεκριμένα:

```
if( (latitude-p1_lamda)*(latitude-p2_lamda) < 0 )
{ //e.g if particle was below satellite and then above, product would be negative.
    crossed = true;
}
```

5)Αλγόριθμος
Δομές Ανιχνευτή και Σωματιδίων

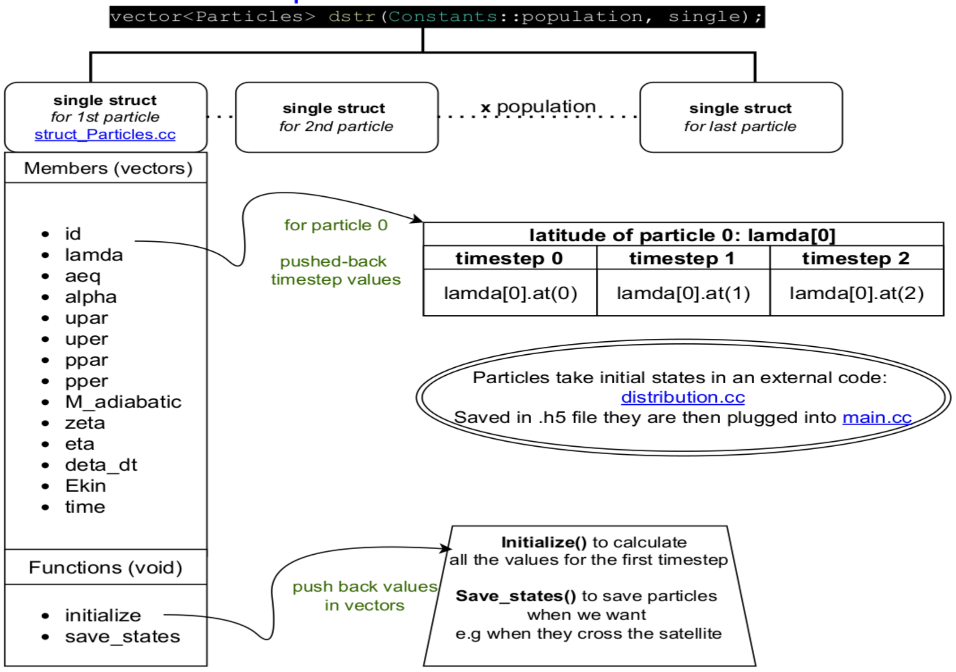
```
//Position of the Particle Telescope
Telescope ODPT(Constants::telescope_lamda, Constants::L_shell);
//Single particle struct
Particles single;
//Vector of structs for particle distribution
std::vector<Particles> eql_dstr(Constants::test_pop, single);
```

STRUCTS USED

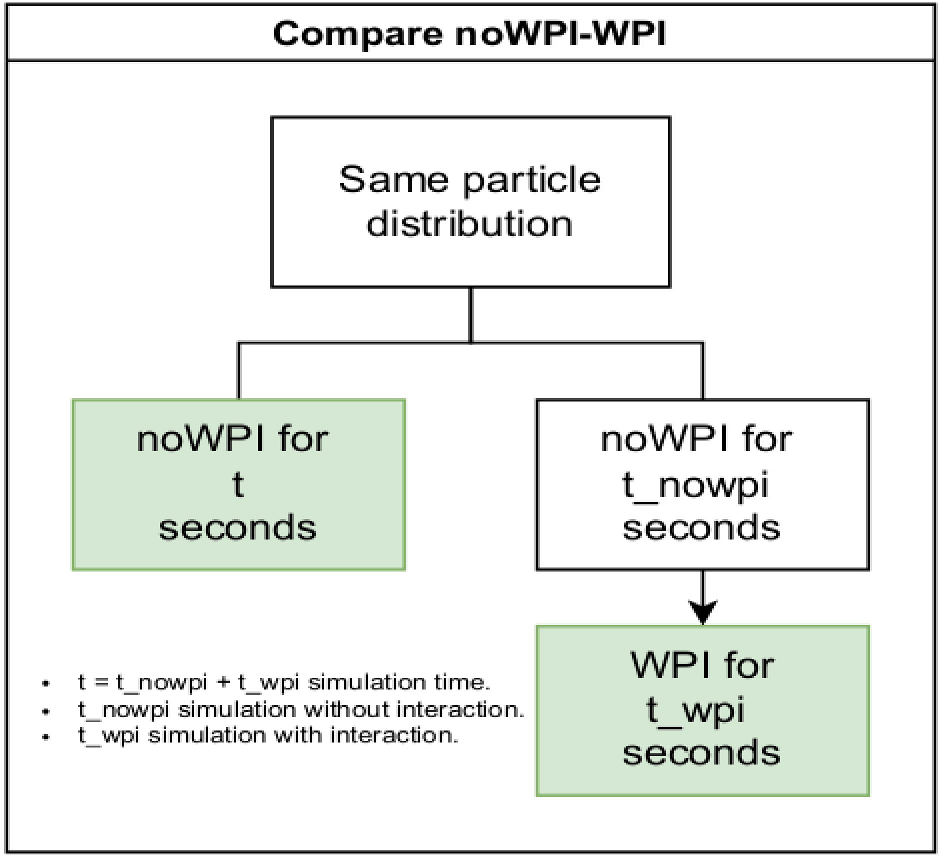
Telescope	**Particles**

struct Telescope
{
Telescope(real lat, real L_parameter);
//Constructor. Initialize position of satellite.
bool crossing(real p1_lamda, real p2_lamda, real p_L_shell); //True if particle crosses
//Function to push back detected particles.
void store(int id, real lamda, real alpha, real aeq, real time);
//Satellite's position parameters
real L_shell, latitude;
//Vectors to store detected particles.
std::vector<real> lamda , uper , upar, alpha, aeq, eta, time;
std::vector<int> id; };
	struct Particles
	{
	//Member function to initialize particle population.
	void initialize(real eta0, real aeq0, real alpha0, real lamda0, real Ekev0, real Blam0, real zeta0, real deta_dt0, real time0);
	//Member function to push_back new state if needed.
	void save_state(real new_aeq, real new_alpha, real new_lamda, real new_deta_dt, real new_time);
	//Member variables.
	std::vector<real> lamda , zeta, uper , upar, ppar, pper, alpha, aeq, eta, M_adiabatic, deta_dt, Ekin, time;
	};

A vector of structs make up the particle distribution



5)Αλγόριθμος
Αδιαβατική vs Αλληλεπίδραση με κύμα



WPI: Wave Particle Interaction

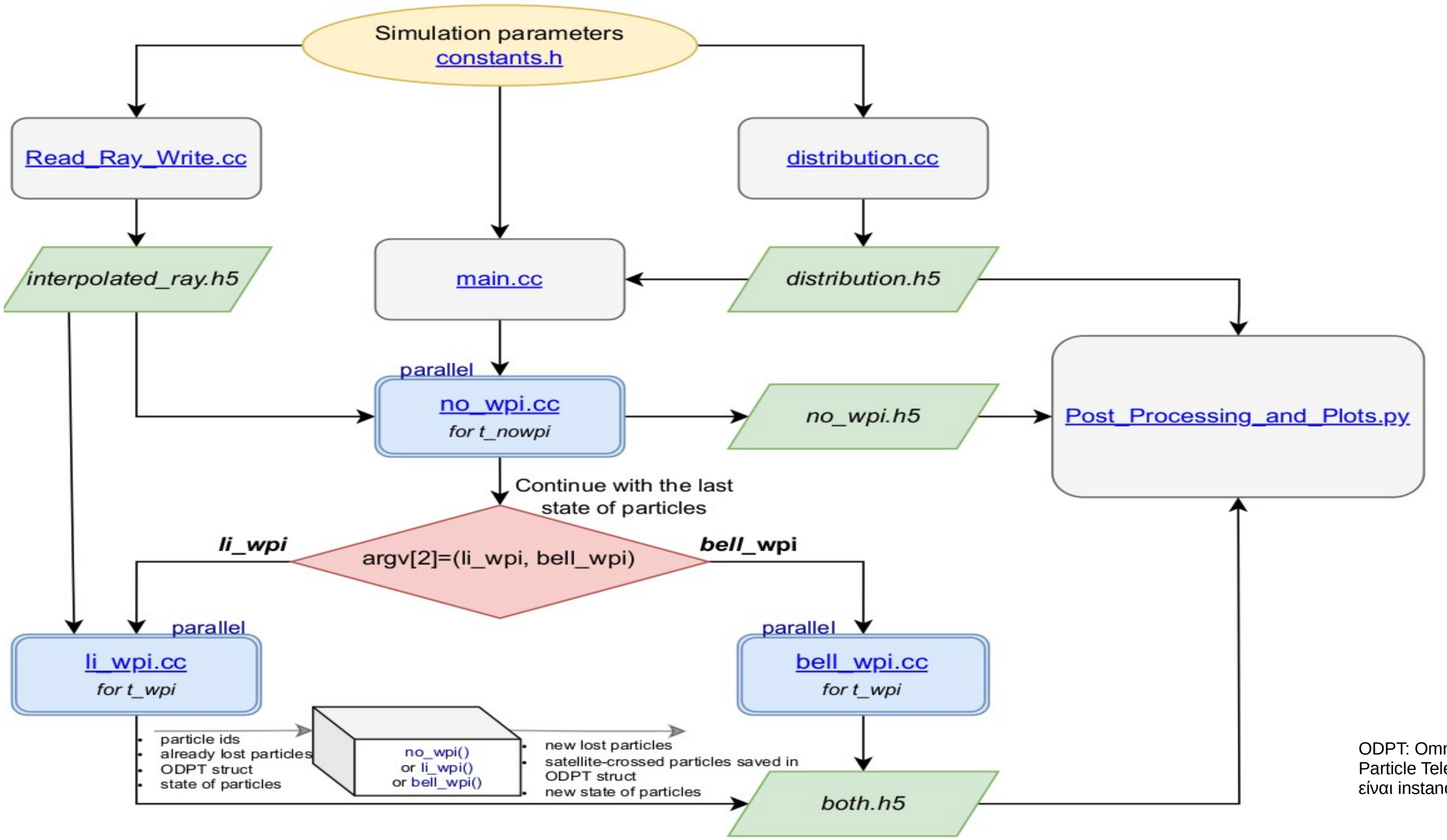
Πρέπει να γίνει σύγκριση μιας προσομοίωσης αδιαβατικής κίνησης με μία όπου τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με το κύμα.

Έτσι μπορεί να φανεί ποια είναι η διαφορά στην ροή των σωματιδίων στον ανιχνευτή.

Πρέπει να τυχαιοποιηθούν τα σωματίδια
που σημαίνει ότι αφου τους πάρουν αρχικές τιμές,
θα ταλαντωθούν αρχικά για κάποια δευτερόλεπτα.
Στην συνέχεια θα εισαχθεί το κύμα μετά από t_nowpi sec.

Συνολικά τρέχουν 2 προσομοιώσεις.
Μια χωρίς κύμα για t χρόνο
Μια χωρίς κύμα για t_nowpi<t,

5)Αλγόριθμος
Διαγραμμα Ροής



ODPT: Omni-Directional
Particle Telescope
είναι instance δομής struct_Telescope

6)Παράλληλη επεξεργασία Work sharing OpenMP

- Ο αλγόριθμος οργανώθηκε με 2 βασικές δομές και μία βασική συνάρτηση(ανάλογα την προσομοίωση) η οποία μπορούσε να κληθεί από πολλούς πυρήνες, διαμοιράζοντας τα δεδομένα των δομών.
- Η βασική συνάρτηση είναι ουσιαστικά η επαναλυπτική μέθοδος της Runge Kutta για ένα σωματίδιο.
- Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος παραλληλισμού ονομάζεται work sharing και ουσιαστικά μοιράζει στα threads (εδώ με δυναμικό τρόπο) σωματίδια προς προσωμοίωση.
- Η συνάρτηση αυτή παίρνει παράμετρους τα βήματα της RK4 ‘Nsteps’, την ταυτότητα-νούμερο του σωματιδίου ‘p’, την κατασταση του ‘dstr[p]’, και την διαμοιρασμένη δομή του ανιχνευτή ‘ODPT’ όπου θα αποθηκευτούν τα σωματίδια που διαπερνούν τον ανιχνευτή.

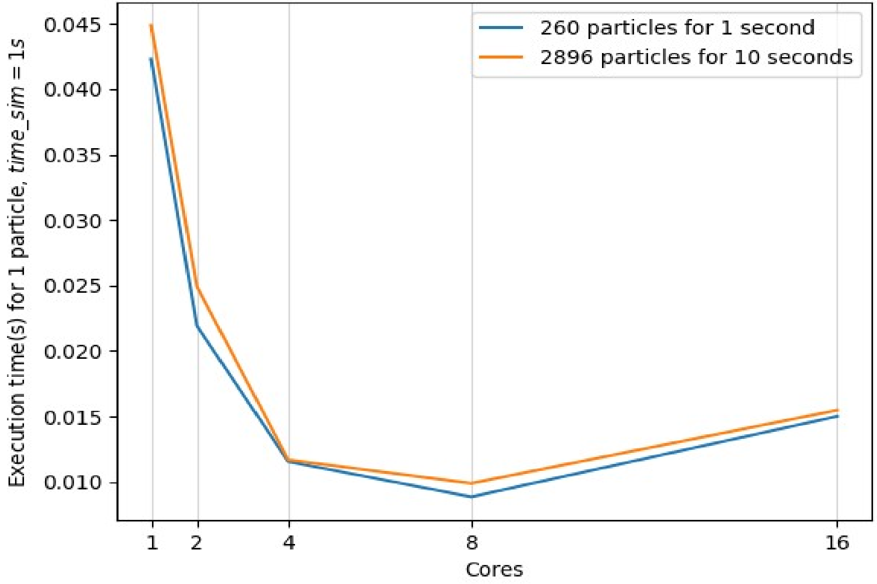
```
#pragma omp parallel
{
	int id = omp_get_thread_num();
	if(id==0) { realthreads = omp_get_num_threads(); std::cout<<"\nRunning threads: "<<realthreads<<std::endl; }
	#pragma omp for schedule(dynamic)
		for(int p=0; p<Population; p++)	//dynamic because some chunks may have less workload.(particles can precipitate and break out of loop)
		{
			//Void Function for particle's motion. Involves RK4 for Nsteps. Detected particles are saved in ODPT object, which is passed here by reference.
			no_wpi(Nsteps_nowpi, p, dstr[p], ODPT);
		}
}
```

6)Παράλληλη επεξεργασία Κρίσιμη περιοχή

- Ένα βασικό σημείο που πρέπει να προσέξουμε όταν υλοποιούμε αλγόριθμους διαμοιρασμένης μνήμης, είναι να εντοπίσουμε τα σημεία που ίσως χρειάζεται να επιτυγχανεται συντονισμός. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται κρίσιμες περιοχές(omp critical).
- Οφείλουμε όμως να μην δημιουργούμε τέτοιες περιοχές συχνά, όταν δεν χρειάζονται καθώς αποτελούν **bottleneck** του κώδικα.
- Στον κώδικα αυτό, κάθε φορά που ένα σωματίδιο περνάει απο τον ανιχνευτή, μιας και αυτος έχει κοινη μνήμη, πρέπει να αποθηκεύει ένα σωματίδιο την φορά. Δεν πρέπει να αφήσουμε ανοικτή την πιθανότητα να γραφτούν σε μία χρονική στιγμή, στην ίδια θέση, 2 ή παραπάνω σωματίδια.
- Η πιθανότητα βέβαια να περάσουν 2 σωματίδια την ίδια ακριβώς στιγμή, είναι μικρή, και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η τυχαιοποίηση του πληθυσμού, η απόσταση που έχουν μεταξύ τους όταν τα εισάγουμε στην προσομοίωση, την ταχύτητα επεξεργασίας, κ.α. Πρακτικά όμως συμβαίνει στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

```
//Critical Region to push back values in shared memory ODPT object:
#pragma omp critical //Only one processor should write at a time. Otherwise there is a chance of 2 processors writing in the same spot.
 { //Check Crossing:
        if( ODPT.crossing(new_lamda*Constants::R2D, lamda*Constants::R2D, Constants::L_shell) )
        {
                ODPT.store( p, lamda, aeq, alpha, time); //Store its state(it's before crossing the satellite!).
          }
  }
```

6)Παράλληλη επεξεργασία Απόδοση



7)Post Processing
Τα πρώτα δεδομένα

- Τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται μετά την προσομοίωση θα χρειαστεί να οργανωθούν.
- Κατά την προσομοίωση τα σωματίδια αλλάζουν κατάσταση(ταχύτητα, ορμή, γεωγραφική θέση κ.α) σε κάθε βήμα(h) της αριθμιτικής μεθόδου RK4

- Ο δορυφόρος θα αποθηκεύσει τις καταστάσεις των σωματιδίων την στιγμή που διαπερνούν το γεωγραφικό του πλάτος
- Επίσης αποθηκεύονται τα σωματίδια τα οποία διέφυγαν απο την περιοδική ταλάντωση, μέσω της συνθήκης του κώνου απώλειας που προαναφέρθηκε.

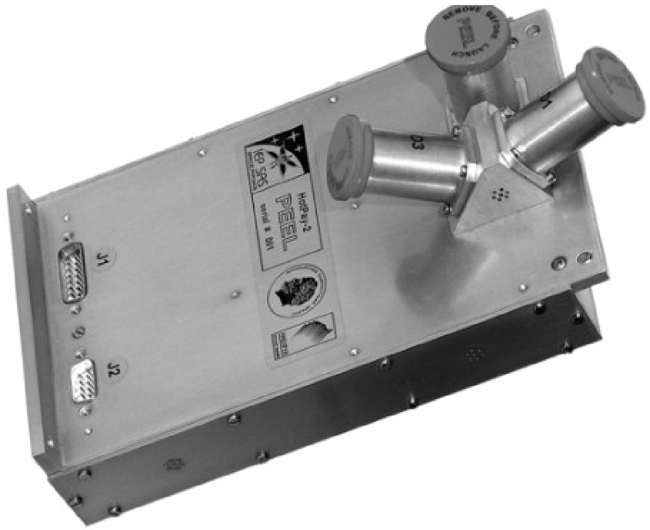
- Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται ως ένα οργανωμένο αρχείο HDF5
- Το αρχείο αυτό θα διαβαστεί σε Python η οποία είναι μία γλωσσα εύχρηστη για την διαχείριση δεδομένων

7)Post Processing
Τα πρώτα δεδομένα - Διαχειριση

- Στην προσομοίωση έχει γίνει απλοποίηση στην αποθήκευση των σωματιδίων σε μία μόνο λίστα, ανεξάρτητα της κατάστασης τους.

- Οι πραγματικοί ανιχνευτές όμως έχουν χρονικά, χωρικά και ενεργειακά “καλάθια”.

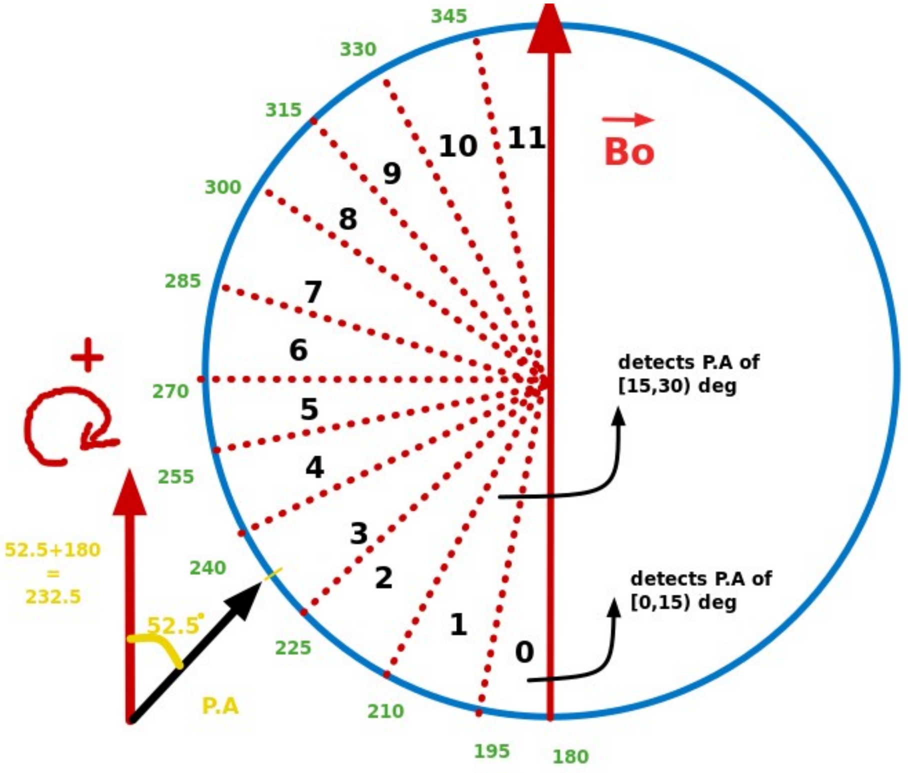
- Συνεπώς τα δεδομένα πρέπει να περάσουν από μία διεργασία όπου τα χωρίζουμε σε αυτά τα καλάθια(bins)



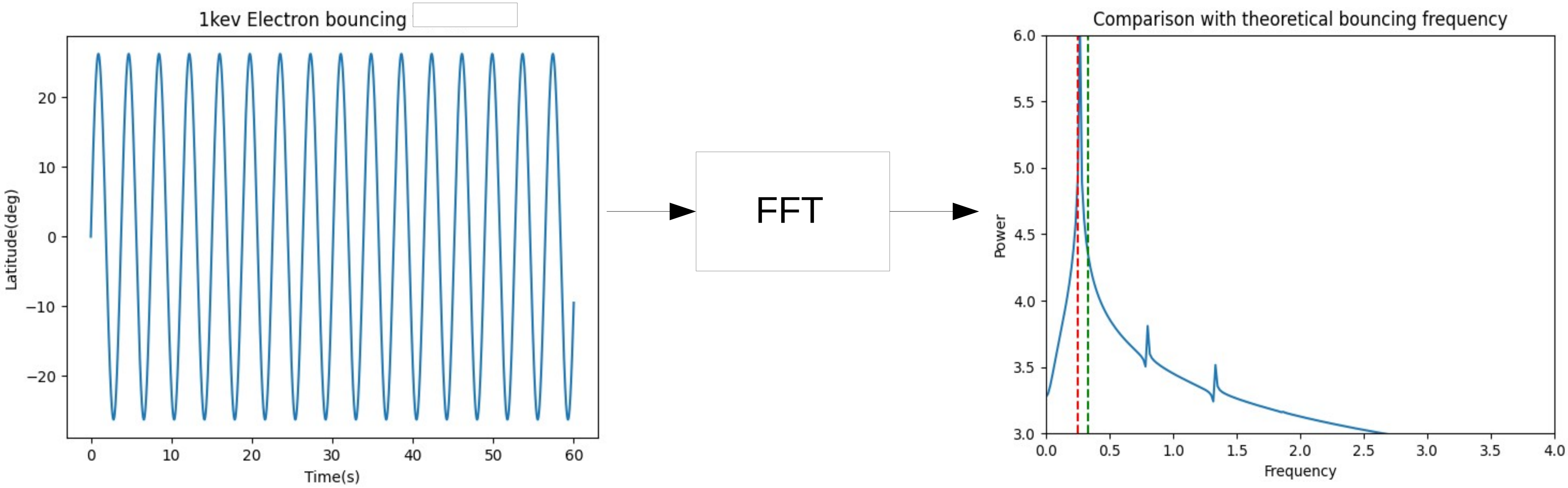
*Energetic Electrons Precipitating at High Latitudes: PEEL Data from HotPay-2 Mission [J. Balá 1 , K. Kudela *,1 , T. Sarris 2 and I. Strhársk 1]*

7)Post Processing
Τα δεδομένα μετά - Ανιχνευτής

- Χρονική διακριτότητα(Time bins)
- Τομείς γωνιών(Angle sectors)
- **Είναι και οι δύο μεταβλητές**, που δίνει την δυνατότητα τροποποιηθεί ο τύπος του ανιχνευτή χωρίς να χρειάζεται να τρέξει ξανά η προσομοίωση.
- Ως σημείο αναφοράς για τις γωνίες χρησιμοποιήθηκε το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου της Γης.
- Ένα σωματίδιο με P.A = 52.5 μοίρες αντιστοιχεί στον τομέα 3
- Συνεπώς προκύπτουν λίστες για κάθε χρονικό εύρος της προσομοίωσης και για κάθε εύρος της pitch angle.



8)Αποτελέσματα
Διαγράμματα – Περίοδος Αναπήδησης

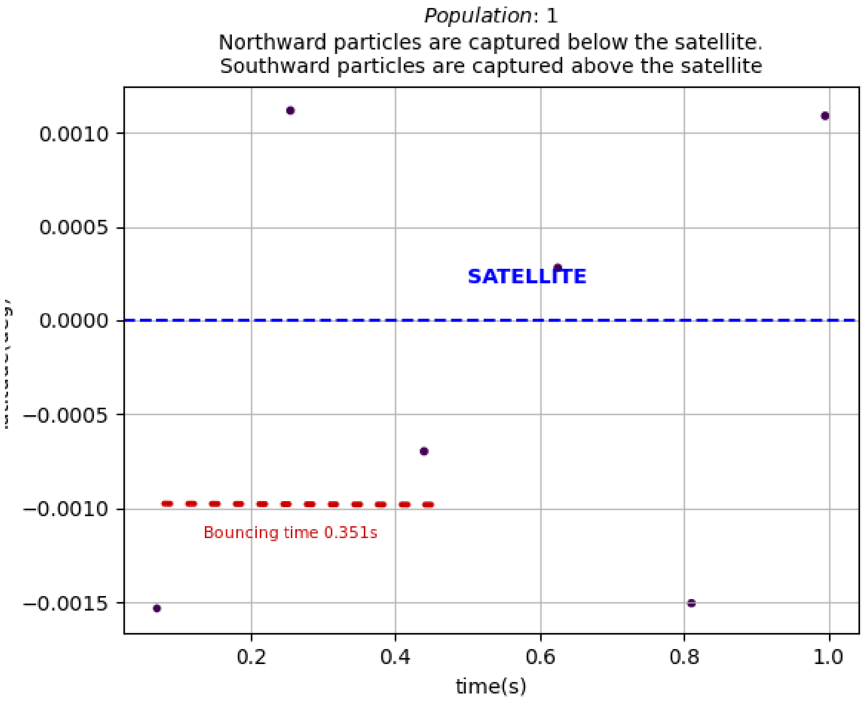


Ηλεκτρόνιο 1kev ταλαντώνεται,
χωρίς να αλληλεπιδράει με κύμα και για μία ώρα, μεταξύ –25 και 25 μοιρών.

Ο Fast Fourier Transform μας δίνει την συχνότητα ταλάντωσης
Την οποία μπορούμε να συγκρίνουμε με τις διακεκομένες

(Κόκκινη διακεκομμένη) The theoretical [Orlova1,Shprits2,2011] oscillation frequency
(Πράσινη διακεκομμένη) Με χρήση του calculator [https://solenelejosne.com/bounce/]

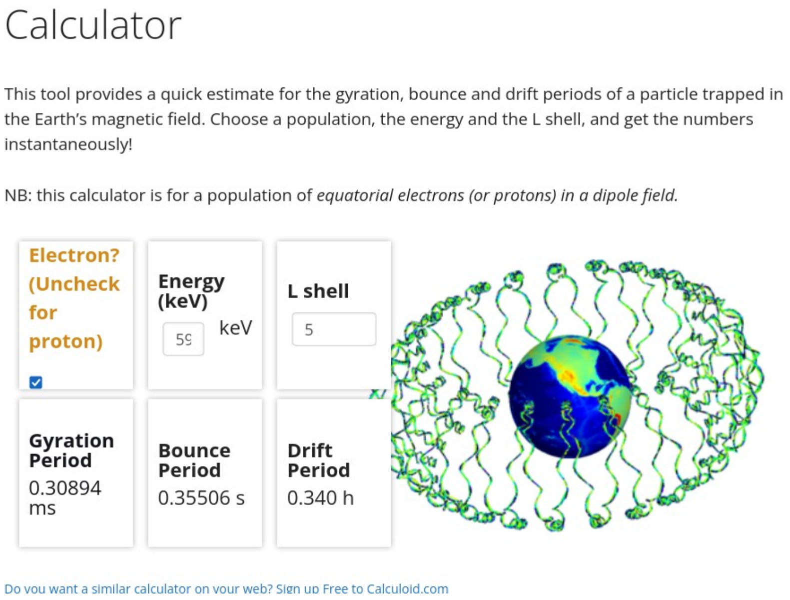
8)Αποτελέσματα
Διαγράμματα – Περίοδος Αναπήδησης



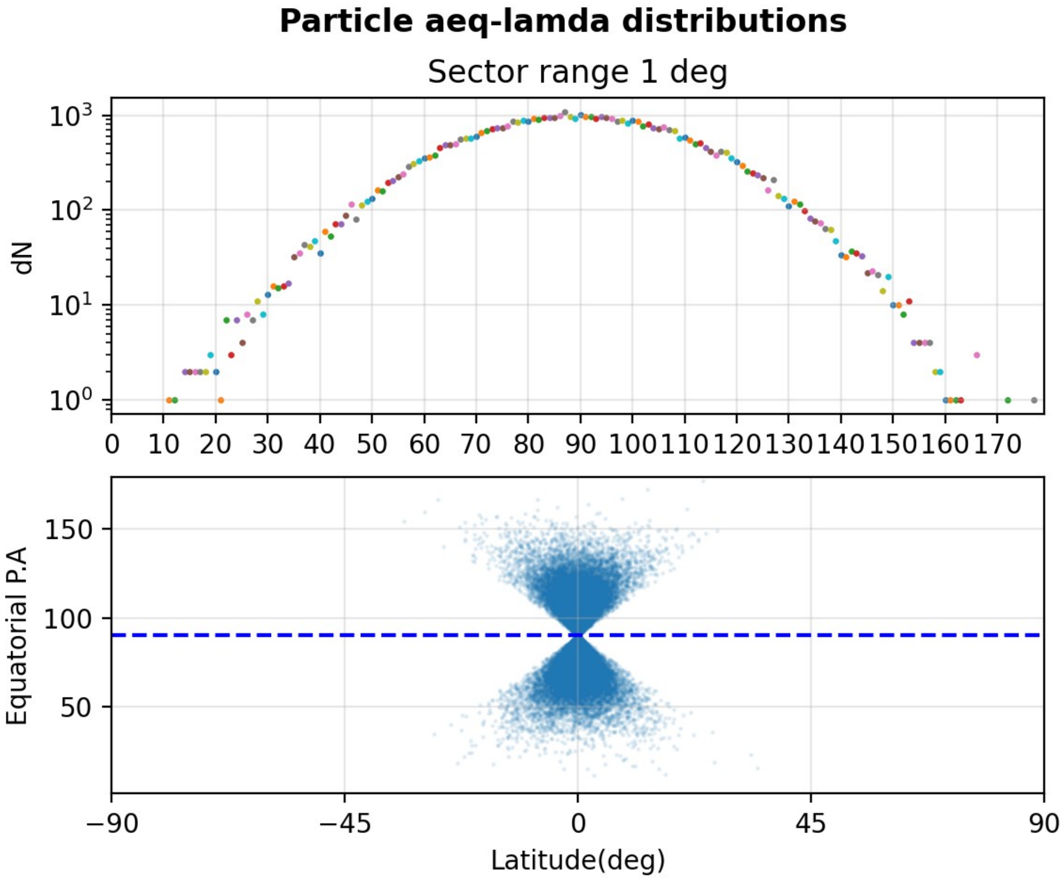
Σωματίδιο με
aeq0: 69.844, lamda0: -9 eta0: 30, Ekin0: 589.999 L-shell = 5

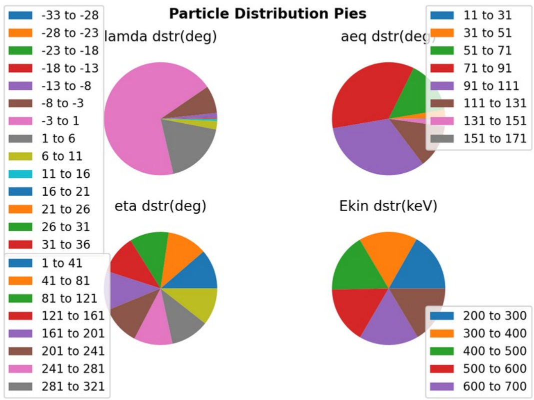
[Orlova1,Shprits2,2011] Bouncing period estimation: 0.399008s

[https://solenelejosne.com/bounce/]



8)Αποτελέσματα
Διαγράμματα – Αρχικές κατανομές σωματιδίων





- Κανονική κατανομή ως προς equatorial pitch angle(stdev=20, mean=90)
- Κανονική κατανομή ως προς latitude(stdev=20, mean 0)
- Ομοιόμορφη κατανομή ως προς eta και Ekin
- Πληθυσμός: 50.000 σωματίδια

8)Αποτελέσματα
Παράμετροι Προσομοίωσης και Διαδικασία

```
//--Universal parameters--//
Re = 6378137;                       //Earth mean radius in m.
c = 2.9979563769321363e8;           //Speed of light in m/s.
m_e = 9.10938291e-31;               //Electron mass in kg.
q_e = 1.602176565e-19;              //Electron charge in C.
q_i = 1.602176565e-19;              //Electron charge in C.
m_O = 2.67616E-026;                 //Oxygen mass in kg.
m_H = 1.6726E-027;                  //Hydrogen mass in kg.
m_He = 6.6904E-027;                 //Helium mass in kg.
e_el = 5.105396765648739e5;
eps0 = 8.854187817e-12;
mu_0 = M_PI*4*pow(10,-7);
D2R = M_PI/180;
R2D = 1/D2R;


B0 = 3.12*pow(10,-5);               //Mean value of the field on the equator at the Earth's
surface.
ne_0 = 3*pow(10,6);                 // 10/cm-3  = > 10*10^6m/m-3
```

```
//--Constant parameters--//
L_shell = 5;
//wave initials
f_wave = 2000;                      //Wave frequency in Hz. 2kHz
w_wave = 2*M_PI*f_wave;             //Wave angular frequency.
m_res = 1;                          //WPI resonance number (0 = Landau resonance, 1 =  normal, counter-streaming resonance.)
theta0_deg = 0.001;                 //Initial wave normal angle.
theta0 = theta0_deg*D2R;
pwr  =  pow(10,0);                  //From the power we get the intensity of the ray. Poynting flux [W/m 2].
pulse_duration = 0.1;               //Wave pulse duration in seconds.

//--Simulation parameters--//
h = 0.00001;                        //Runge kutta stepsize. Has to be much less than the particle'sgyroperiod
puls_dur = int(pulse_duration/h);   //Wave pulse duration in stepsize.

//--Satellite parameters--//
telescope_lamda  =  0;
```

Makefile

	make directories	make dstr	make ray	make tracer
nowpi	✓	✓		✓
bell	✓	✓		✓
li	✓	✓	✓	✓

- make: builds everything
- make dstr: builds to distribute particles, exec file: dstr, run to produce distribution.h5
- make ray: builds to interpolate ray, exec file: ray, run to produce interpolated_ray.h5
- make tracer: builds to simulate noWPI / WPI, exec file: tracer, run to produce nowpi.h5 / both.h5

e.g terminal commands in linux system

```
make && ./dstr && ./ray_int && ./tracer no_wpi li_wpi
python3 Post_Processing_and_Plots
```

Ο χρόνος που θα τρέξει η προσομοίωση με κύμα και χωρίς κύμα, είναι παράμετροι γραμμής εντολών argv[1], argv[2] αντίστοιχα.
Για την προσομοίωση χωρις κύμα οι χρόνοι είναι 56 και 0 seconds αντίστοιχα.
Για την προσομοίωση με κύμα οι χρόνοι είναι 50 και 6 seconds αντίστοιχα.

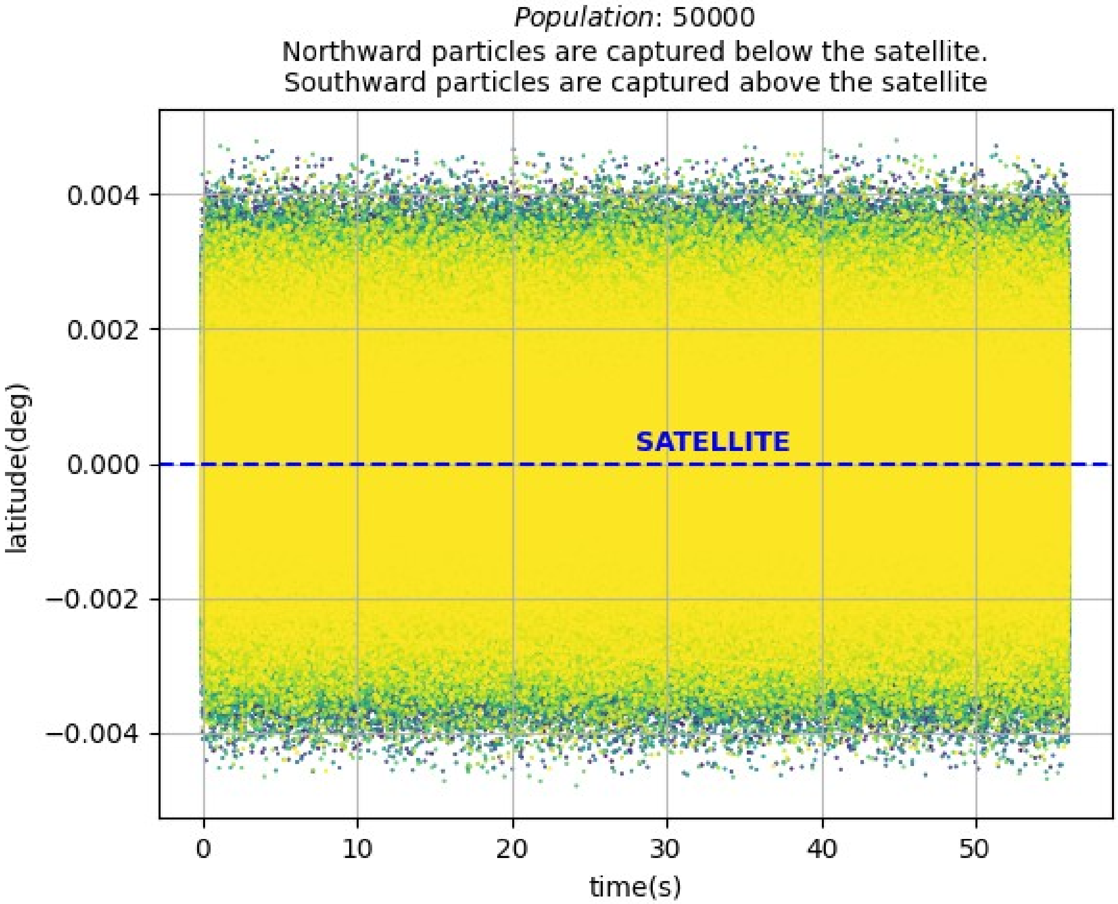
Διαδικασία:

- Building με make
- Καθορισμός παραμέτρων → **distribution.cc**(δημιουργία κατανομής) → **distribution.h5**
- Κύμα απο Ray Tracing → **Read_Ray_Write.cc**(ευρεση τιμών κύματος και interpolation στο ορισμένο stepsize h → **interpolated_ray.h5**
- Διαβασμα κατανομής και κύματος → **main.cc** → **no_wpi.h5**
- Διαβασμα κατανομής και κύματος → **main.cc** → **both.h5**
- Post processing των **no_wpi** και **both.h5**

8)Αποτελέσματα

Σύγκριση προσομοίωσεων – Διάβαση από τον Ανιχνευτή

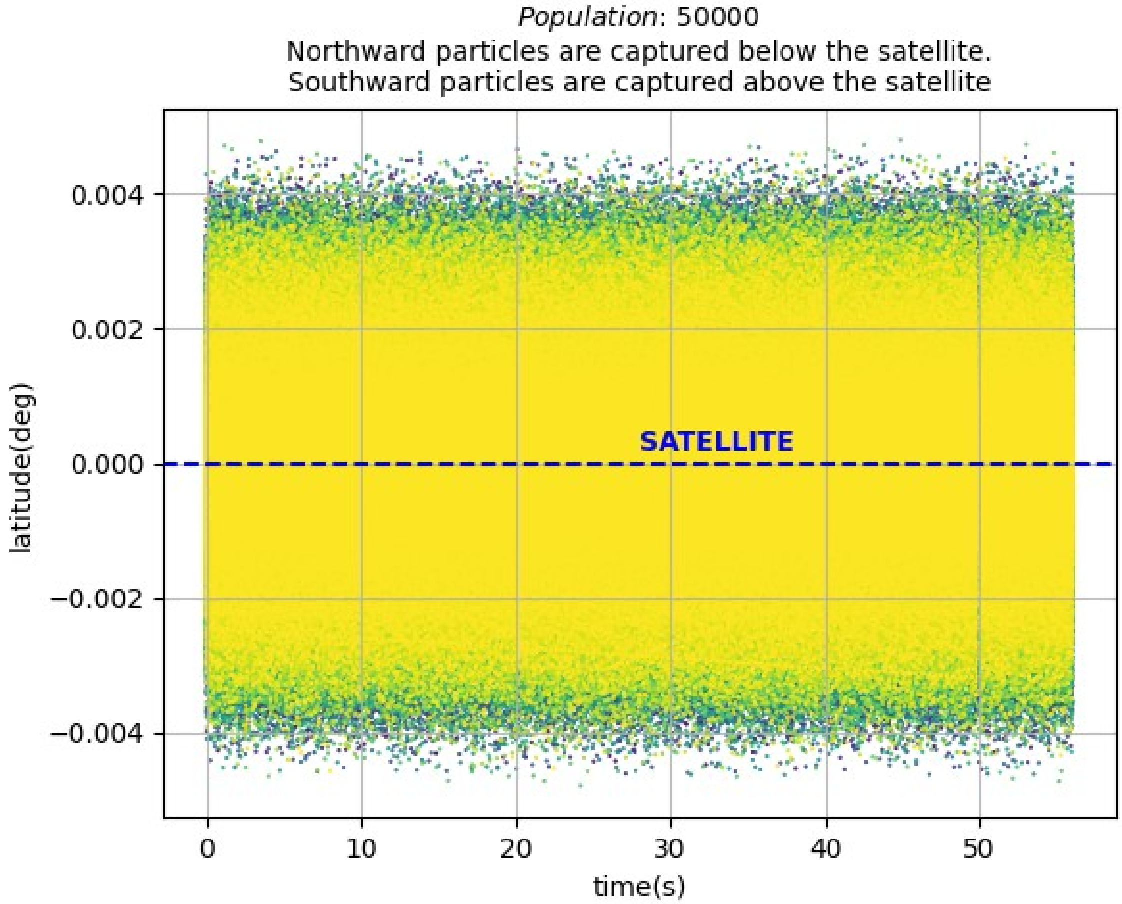
ταλαντώσεις χωρίς κύμα για ένα λεπτό



8)Αποτελέσματα

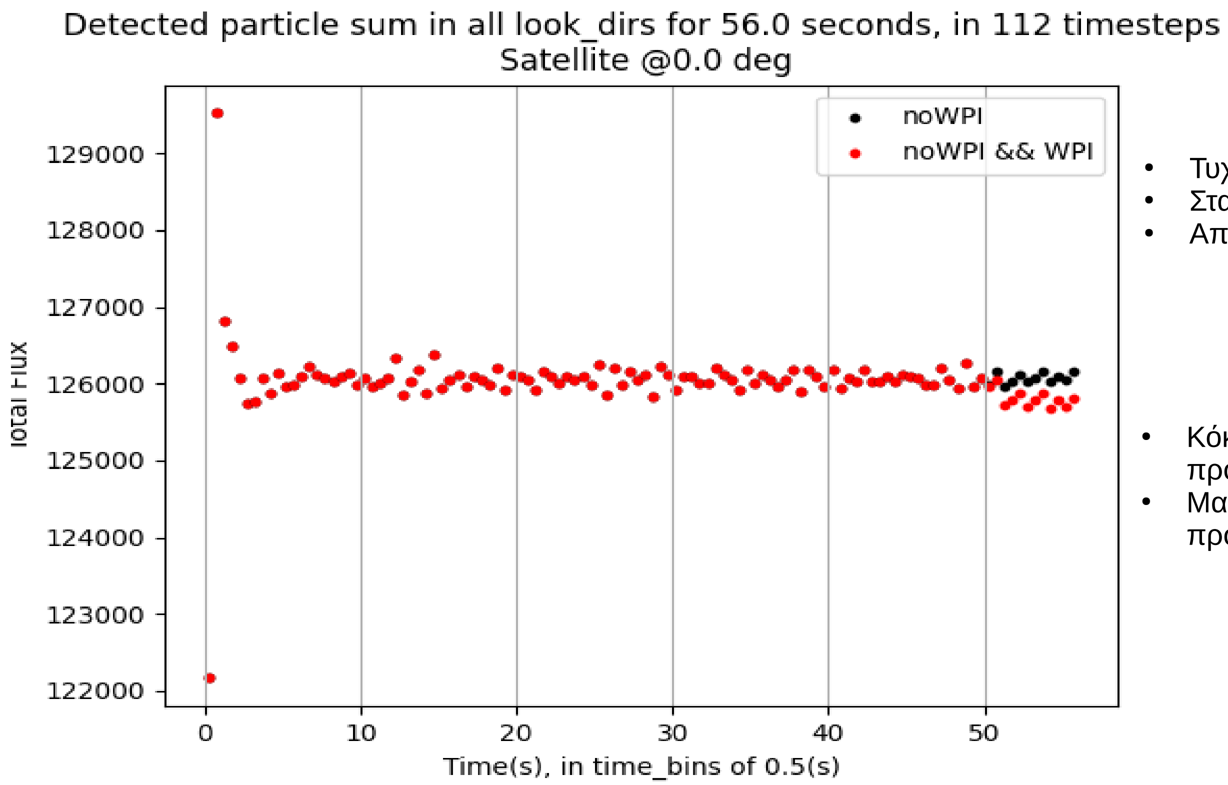
Σύγκριση προσομοίωσεων – Διάβαση από τον Ανιχνευτή

κύμα εισέρχεται σε 50 δευτερόλεπτα



8)Αποτελέσματα

Σύγκριση προσομοίωσεων – Διάβαση από τον Ανιχνευτή
Συνολική ροή σωματιδίων



- Τυχαιοποίηση σωματιδίων
- Σταθερή ροή
- Απώλεια πληθισμού

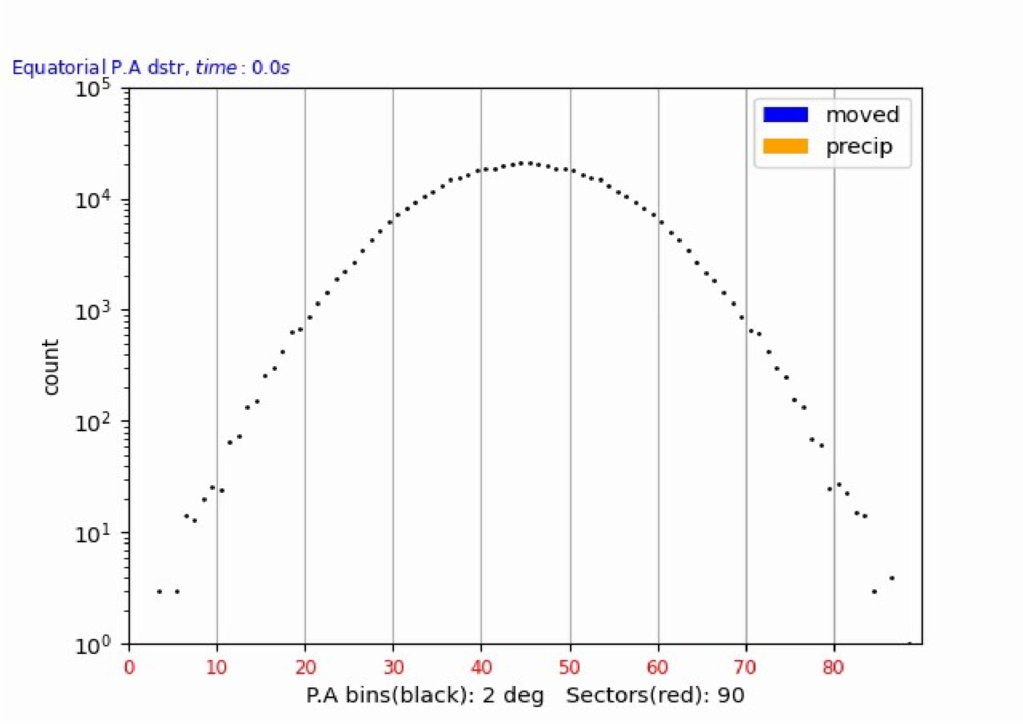
- Κόκκινες κουκίδες
  προσομοίωση με εισαγωγή κύματος στα 50 δευτερόλεπτα
- Μαύρες κουκίδες
  προσομοίωση που δεν έχουμε αλληλεπίδραση με κύμα

8)Αποτελέσματα

Σύγκριση προσομοίωσεων - Movies
Time resolution 0.5s - Sectors 2 deg

8)Αποτελέσματα

Σύγκριση προσομοίωσεων - Movies
Time resolution 2s - Sectors 2 ged

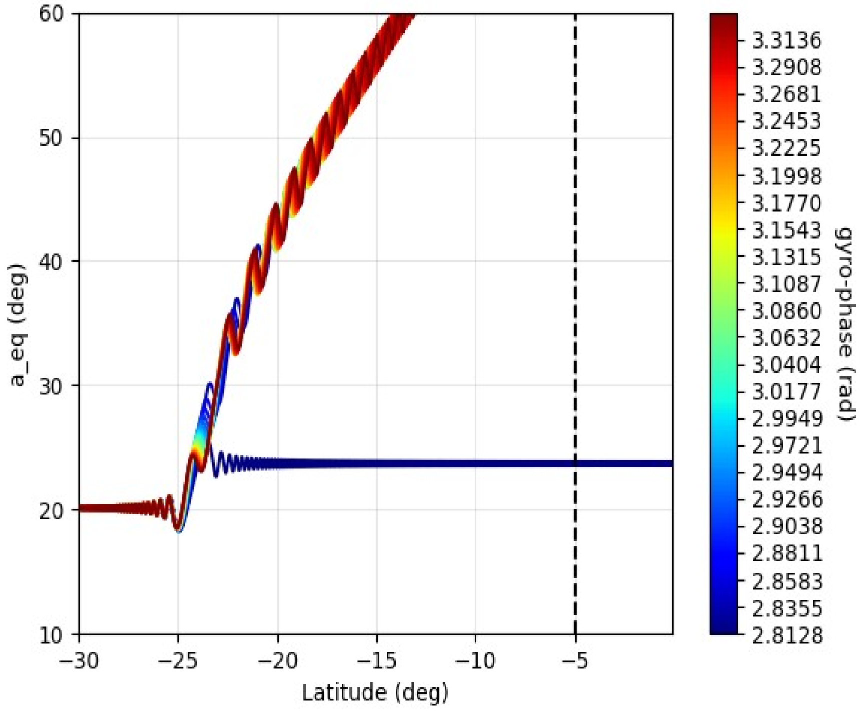


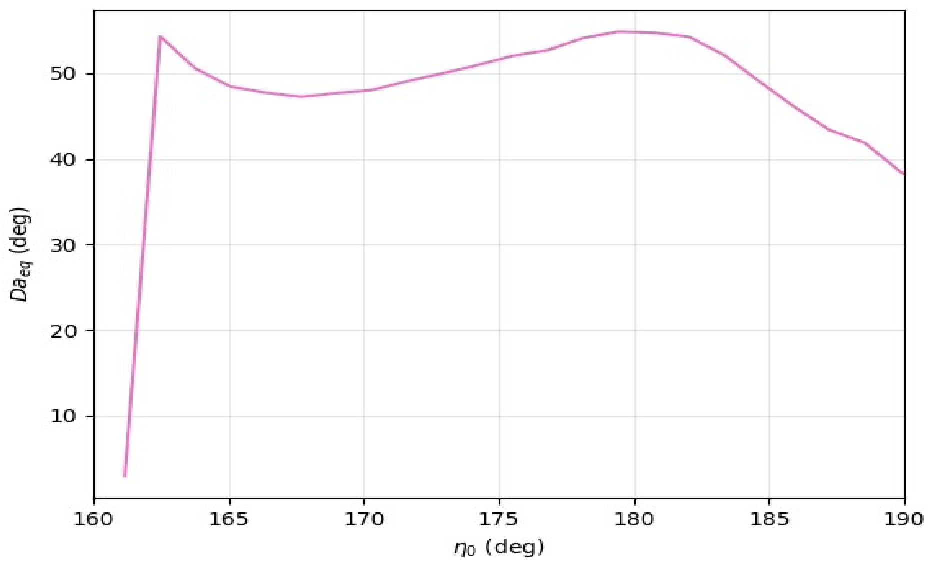
8)Αποτελέσματα
Συντονισμός με το κύμα – Εύρεση αποδοτικών eta
Γύρω από τις 176.16 deg

Eta0_deg @ 161-191
Max is @ **179.42 deg**
Σχεδόν όλα παγιδεύονται

Μετά απο ακολουθείες προσομοιώσεων, επικεντρωνόμαστε περισσότερο στα αρχικά eta με τα οποία τα σωματίδια εκτρέπονται παραπάνω

Simulation Parameters:
-L_shell= 5
-theta0_deg = 0.001
-aeq0_deg=20
-lamda0_deg=-30
-Ekev0=500**(LARGE)**
-By_wave = 1nT **(LARGE)**
-ne0 = 3cm ^-3**(low density plasma)**
=> *resonance (dh/dt = 0) @ lamda = 23 deg* ***(HIGH)***



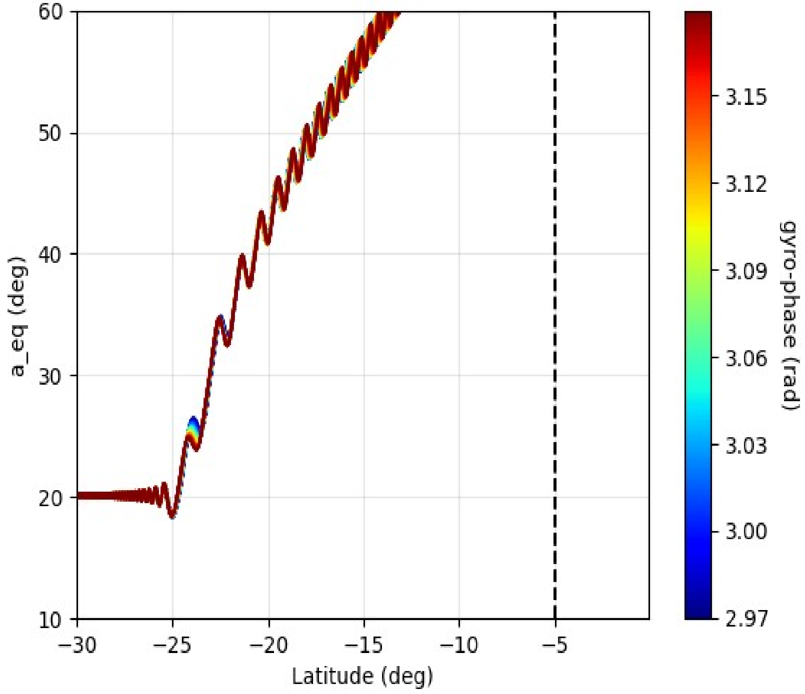


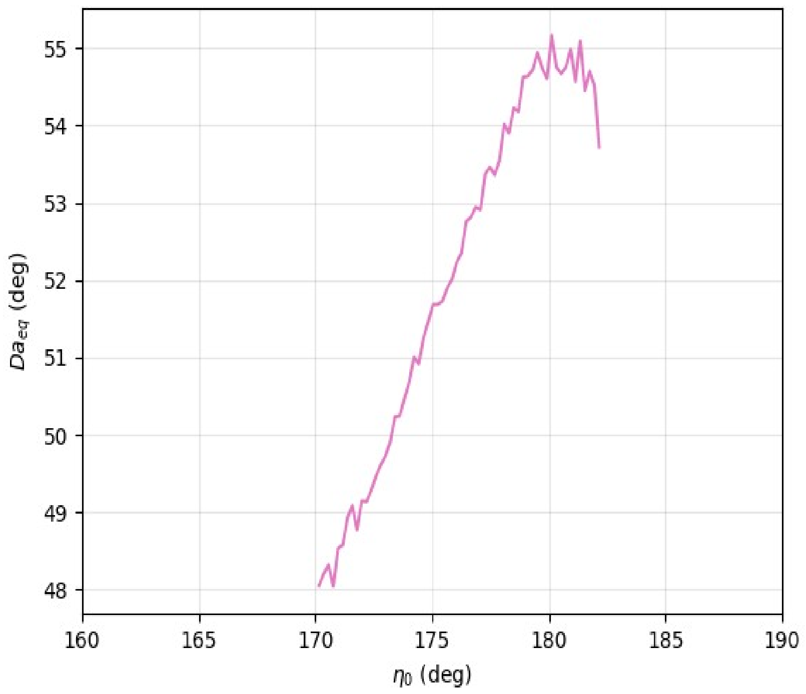
8)Αποτελέσματα

Συντονισμός με το κύμα – Εύρεση αποδοτικών eta

Γύρω από τις 179.42 μοίρες

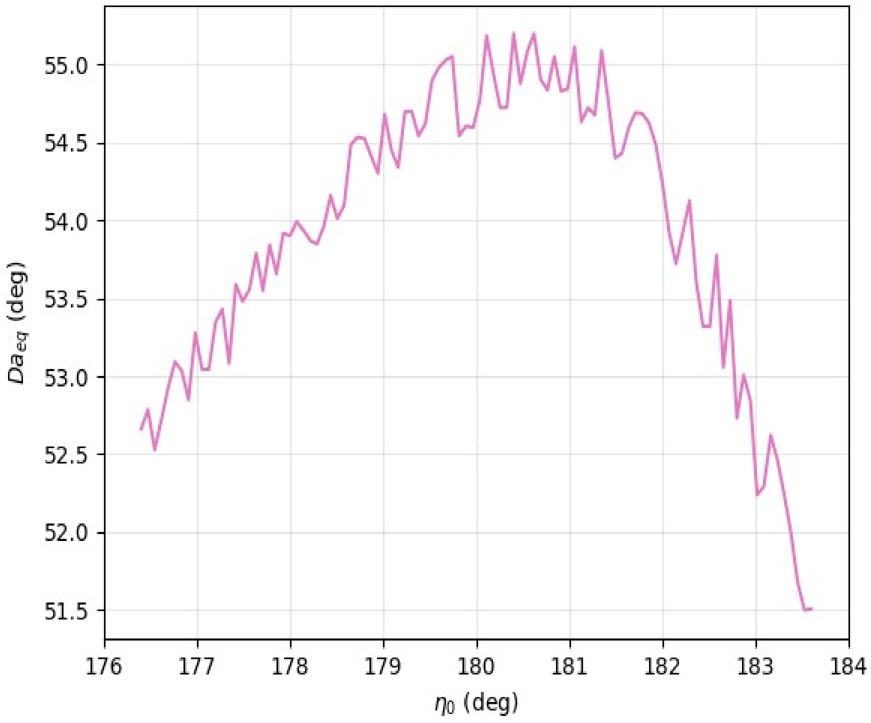
Eta0_deg @170-182
Max is @ 180.126 deg
Ολα παγιδεύονται



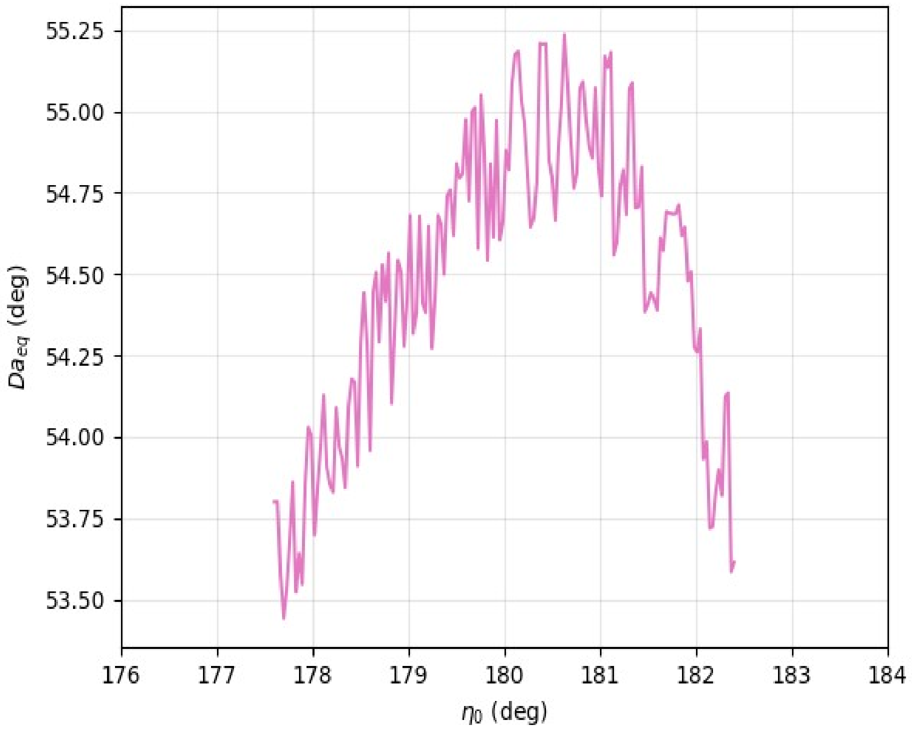


8)Αποτελέσματα
Συντονισμός με το κύμα – Εύρεση αποδοτικών eta
Γύρω από τις 180 μοίρες

100 σωματίδια
Eta0_deg@~176-184
Max is @ 180.4 deg



150 σωματίδια
Eta0_deg @ 178-182
Max is @ 180.63



Ευχαριστώ πολύ για τον χρόνο σας!

Βασίλειος Χαρίτων