

Informe pràctica

Estudi del camp magnètic com a protecció contra la radiació a l'espai

Mètodes Numèrics II

3r de Física

Universitat Autònoma de Barcelona

Autors:

Josep Rubí Bort
Marc Prades Alegre
Marc Pujol Ramon
Sara Fibla Salgado

Índex

1	Introducció	1
1.1	Presentació del problema	1
1.2	Model físic	1
1.3	Normalització	2
2	Mètode de resolució	3
2.1	Dades i procediment	3
2.2	Error numèric	4
3	Resultats i discussió	4
4	Conclusions	6
5	Annex	8
5.1	Esquema del model físic	8
5.2	Justificació dels paràmetres escollits	8
5.3	Equacions utilitzades en el mètode numèric	9
5.4	Trajectòries	9
5.5	Enllaços	10
6	Bibliografia	10

1 Introducció

1.1 Presentació del problema

Un dels principals inconvenients que tenen els viatges per l'espai és el perjudici en la salut dels astronautes causat per la radiació provinent del Sol. Aquest contratemps fa que els viatges interplanetaris tripulats siguin impossibles de realitzar a la pràctica. Per aquest motiu, durant els últims anys s'han realitzat diverses propostes per intentar minimitzar aquests efectes. Una d'aquestes propostes és utilitzar escuts magnètics, és a dir, dispositius que generin un camp magnètic suficientment potent per desviar les partícules de la radiació solar però alhora suficientment dèbil per no causar danys en la salut dels tripulants.

En aquesta pràctica s'analitzarà la viabilitat d'utilitzar un imant com a generador d'escut contra la radiació per un viatge entre la Terra i Mart. L'objectiu de l'estudi és determinar les característiques òptimes d'aquest dispositiu per tal de maximitzar la seguretat dels tripulants en aquest viatge.

1.2 Model físic

Tot i que encara no hi ha un consens absolut sobre la forma i la mida que tindria una nau tripulada amb destí a Mart, per fer l'estudi es modelitzarà la nau com un cilindre de longitud $l = 50$ m i radi $r = 5$ m¹. Aquest cilindre es centrarà a l'origen del sistema de coordenades escollit, que serà un sistema de referència movent-se a la velocitat de la nau. Es considerarà que la nau viatja amb una velocitat $v_n = 11$ km/s², i que avança en la direcció de l'eix del cilindre.

La radiació solar està composta majoritàriament per protons, electrons i partícules α ^[3], les quals tenen unes velocitats que poden anar des dels 300 km/s fins als 800 km/s^[4]. Així doncs, s'atribuirà una velocitat $v_p = 550$ km/s a les partícules de la radiació, com a valor representatiu. A més a més, per minimitzar la duració del viatge, la nau hauria de començar el trajecte aproximadament quan la Terra i Mart estan a la distància mínima possible. Per aquest motiu, es realitzarà la simplificació que el Sol, la Terra i Mart estan alineats en tot moment, el que provocarà que, en el sistema de coordenades utilitzat, les partícules avancin en la direcció de l'eix del cilindre amb velocitat $v = v_p \pm v_n$ (es considera l'addició no relativista de velocitats degut a que s'està tractant amb velocitats significativament menors que la de la llum), en funció de si el viatge és d'anada a Mart o de tornada a la Terra. A la Fig.5.1 de l'Annex 5.1 es mostra un esquema de la primera situació.

El moviment de les partícules carregades, considerades puntuals, ve determinat per la força de Lorentz, que s'expressa com

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1.1)$$

on \vec{F} és la força que experimenta la partícula, q és la seva càrrega, \vec{E} és el camp elèctric on es troba la partícula, \vec{v} és la seva velocitat i \vec{B} és la intensitat de camp magnètic on es troba la partícula. S'afegirà una simplificació més al model: es negligiran els camps elèctrics generats per les partícules i les seves respectives interaccions.

¹Aquests valors estan inspirats en la nau *STARSHIP* de la companyia SpaceX^[1].

²Aquest valor s'ha considerat oportú perquè és la velocitat a la qual viatjava la nau de la missió *Perseverance*, amb destí a Mart^[2].

Amb aquesta consideració, l'equació del moviment de cada partícula queda

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m_p} \vec{v} \times \vec{B}, \quad (1.2)$$

on m_p és la massa de la partícula. L'evolució de la trajectòria ve determinada per

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{v}, \quad (1.3)$$

on \vec{R} és la posició de la partícula, amb l'origen de coordenades al centre del cilindre.

L'imant, petit en comparació a la nau, es modelitzarà com un dipol puntual al seu centre. El camp magnètic d'un dipol centrat a l'origen de coordenades ve donat per

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3 (\vec{m} \cdot \vec{R}) \vec{R} - |\vec{R}|^2 \vec{m}}{|\vec{R}|^5}, \quad (1.4)$$

on μ_0 és la permeabilitat magnètica del buit ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$)^[6] i \vec{m} és el moment magnètic del dipol, que s'escull com $\vec{m} = m \vec{e}_z$, essent \vec{e}_z el vector normal en l'eix z i el valor de m serà el paràmetre que s'anirà variant per trobar-ne l'òptim. Cal destacar que l'aproximació dipolar del camp de l'imant és només vàlida per distàncies suficientment grans, però com l'imant es considera molt més petit que la nau, es farà ús d'aquesta aproximació en tot l'espai.

És important mencionar que es considera el valor òptim del moment magnètic com aquell que és suficientment gran per generar un camp que aconseguixi desviar la màxima quantitat de radiació de la nau, però suficientment petit perquè aquest camp no causi danys a la salut dels tripulants. S'estima que els valors de camp magnètic a partir dels quals es comença a posar en risc la salut humana estan al voltant^[5] d' 1.5 T. Per tant, perquè un imant sigui candidat a ser l'òptim, és condició necessària que el seu moment magnètic generi un camp inferior a aquests valors límit. A més a més, també interessa que el camp generat sigui el més dèbil possible per afectar el més mínim als instruments de la nau.

1.3 Normalització

Per normalitzar el sistema d'equacions definit per (1.2) i (1.3), on el camp magnètic és donat per l'expressió (1.4), es faran servir les variables $\hat{t} = \frac{t}{t_0}$ i $\hat{\vec{R}} = \frac{\vec{R}}{l_0}$, on t_0 i l_0 venen definits per

$$t_0 = \frac{10^4 \text{ m}}{v_p \pm v_n}, \quad (1.5)$$

$$l_0 = \left(\frac{\mu_0 q m t_0}{4\pi m_p} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.6)$$

Altra vegada, el signe negatiu en (1.5) s'utilitza en el cas del viatge d'anada ($t_0^- \approx 0.0186$ s) i el positiu en el viatge de tornada ($t_0^+ \approx 0.0178$ s). Els valors de l_0 variaran en funció

del moment magnètic³. Les causes per les quals s'ha escollit el paràmetre t_0 d'aquesta manera s'expliquen a l'Annex 5.2.

Introduint (1.4) en (1.2) i implementant aquest canvi de variables, l'Eq. (1.2) queda de la forma

$$\frac{d\hat{\vec{v}}}{d\hat{t}} = \hat{\vec{v}} \times \frac{3 \hat{z} \hat{\vec{R}} - |\hat{\vec{R}}|^2 \vec{e}_z}{|\hat{\vec{R}}|^5}, \quad (1.7)$$

on $\hat{\vec{v}} = \vec{v} \frac{t_0}{l_0}$ i $\hat{z} = \frac{z}{l_0}$. L'Eq. (1.3) resulta en

$$\frac{d\hat{\vec{R}}}{d\hat{t}} = \hat{\vec{v}}. \quad (1.8)$$

A l'Annex 5.3 es mostren aquestes equacions per cada component del sistema de referència utilitzat.

2 Mètode de resolució

2.1 Dades i procediment

Per valorar l'efectivitat de l'escut, es simularan $N = 100$ partícules que s'acosten a la nau seguint l'esquema de la Fig.5.1, i es determinarà el percentatge d'aquestes que xoquen amb ella en funció del moment magnètic de l'imant. D'aquesta manera, l'imant òptim serà aquell que generi el camp magnètic més dèbil possible (moment magnètic més baix) alhora que aconseguix desviar el màxim percentatge de partícules de la nau, sense arribar als valors perillosos per la salut humana.

Per dur a terme aquest estudi, es realitzarà una simulació per partícula. La seva posició inicial serà $(x_0, y_0, z_0) = (-90, 0, r \frac{k}{N})$ m, amb k fent referència a la partícula (anant des de 1 fins a N). Aquests valors no s'han escollit de forma totalment arbitrària, sinó que obeeixen unes certes raons que s'expliquen a l'Annex 5.2. A partir del que s'ha comentat prèviament, la velocitat inicial assignada a cada partícula serà $(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) = (v_p \pm v_n, 0, 0)$ m/s. El signe negatiu s'utilitzarà pel cas del viatge d'anada a Mart, mentre que el positiu es farà servir pel viatge de tornada.

Les partícules que es tindran en compte seran els protons, principals components de la radiació solar^[3], amb una massa $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg i una càrrega $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ c^[6].

Amb aquestes dades i condicions inicials, s'aplicarà el mètode de Runge-Kutta de quart ordre sobre els sistema d'equacions definit per (5.1), (5.2), (5.3), (5.4), (5.5) i (5.6). S'escollirà un paràmetre $d\hat{t} = 10^{-7}$, amb 10^5 iteracions de temps, i per tant el temps de simulació anirà des de $t = 0$ fins a $t = 10^5 d\hat{t} t_0^- \approx 1.86 \cdot 10^{-4}$ s pel viatge d'anada i des de $t = 0$ fins a $t = 10^5 d\hat{t} t_0^+ \approx 1.78 \cdot 10^{-4}$ s pel viatge de tornada.

³Pels valors estudiats de moment magnètic, l_0 estarà aproximadament entre 10 i 200 m, que són longituds de l'ordre de la llargada de la nau (50 m).

2.2 Error numèric

Com la força magnètica no realitza treball sobre una partícula puntual, l'energia cinètica de les partícules s'ha de conservar, en el model físic emprat. Gràcies a aquest fet, es pot definir un error numèric a partir dels canvis que apareguin en el mòdul de la velocitat de les partícules durant la simulació (en aquest cas, l'energia cinètica es conserva si i només si el mòdul de la velocitat es conserva). Com més canviï el mòdul, menys físicament realistes seran els resultats. D'aquesta manera, es defineix l'error com

$$Err = \left| \frac{|\vec{v}_0| - |\vec{v}|}{|\vec{v}_0|} \right| \cdot 100, \quad (2.1)$$

on Err és l'error, $|\vec{v}_0|$ és el mòdul de la velocitat inicial i $|\vec{v}|$ és el mòdul de la velocitat en l'instant de temps avaluat.

3 Resultats i discussió

A l'Annex 5.5 es troben els enllaços a les animacions del moviment de les partícules sota la influència del camp magnètic de l'imant de la nau, i a l'Annex 5.4 es mostren algunes representacions gràfiques de les seves trajectòries.

A la Fig.3.1 es mostra una representació gràfica del percentatge de partícules que han impactat amb la nau durant la simulació en funció del moment magnètic de l'imant protector, pel cas del viatge d'anada a Mart.

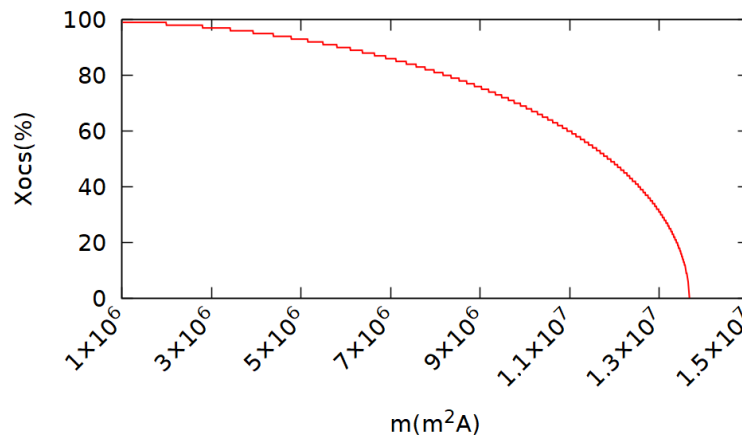


Fig. 3.1: Percentatge de partícules que han impactat amb la nau durant la simulació del viatge d'anada a Mart en funció del moment magnètic de l'imant protector.

Es pot observar, com era d'esperar, una clara tendència decreixent. No obstant, aquesta tendència no és uniforme, sinó que es va accentuant a mesura que augmenta el moment dipolar.

El més important d'aquesta representació és l'ordre de magnitud necessari de moment dipolar perquè les partícules comencin a no xocar. Aquest ordre és de $10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$. Per poder establir una comparació amb dispositius magnètics comuns, una espira d'un metre quadrat per on circula una intensitat $I = 1 \text{ A}$ té un moment dipolar magnètic $m = 1 \text{ A}$

$\cdot \text{m}^2$. Per igualar el moment de l'imat, l'espira hauria de tenir una secció de 10^7 m^2 o hauria de circular-hi una corrent de 10^7 A si la seva àrea fos d'un metre quadrat.

El valor a partir del qual totes les partícules simulades no xoquen amb la nau està entre $1.366 \cdot 10^7$ i $1.367 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$. Aquests valors donen un ordre de magnitud del camp magnètic (per distàncies a l'origen de l'ordre de la longitud de la nau) de 10^{-4} T , clarament per sota del límit perjudicial pels humans.

Per tant, pel viatge d'anada de la Terra a Mart, l'imat que actuaria de manera òptima com a escut protector de la radiació tindria, aproximadament, un moment dipolar de $1.37 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$. Degut a totes les aproximacions i simplificacions que s'han realitzat al llarg de l'estudi, aquest valor podria no ser exactament l'òptim a la pràctica, però l'ordre de magnitud es considera realista.

A la Fig.3.2 es mostra una representació gràfica del percentatge de partícules que han impactat amb la nau durant la simulació en funció del moment magnètic de l'imat protector, pel cas del viatge de tornada a la Terra.

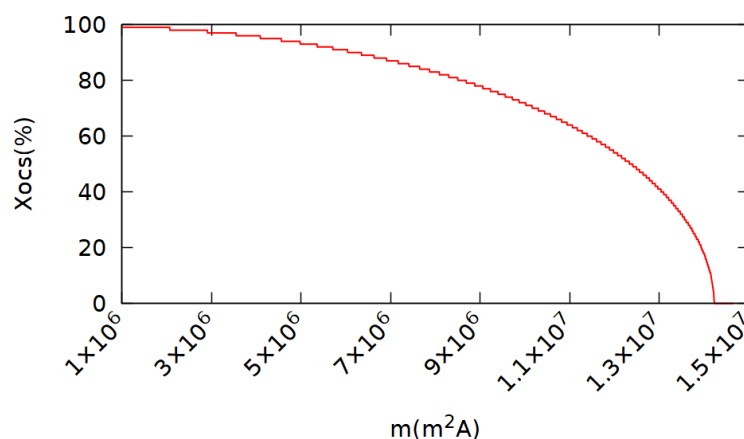


Fig. 3.2: Percentatge de partícules que han impactat amb la nau durant la simulació del viatge de tornada a la Terra en funció del moment magnètic de l'imat protector.

El primer tret per destacar és la similitud amb el cas del viatge d'anada, que era d'esperar, ja que l'única diferència és la velocitat relativa de les partícules respecte la nau. També s'observa que el moment magnètic necessari per reduir a zero el nombre de xocs és més gran que en el cas anterior, que és lògic perquè la velocitat relativa de les partícules és més gran i per tant es necessita un camp magnètic més intens per desviar-les.

La informació important que s'extreu en comparar els dos casos és que en variar la velocitat relativa 22000 m/s (ordre de 10^4 m/s), el moment dipolar òptim varia en uns $0.56 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ (ordre de $10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^2$). Altra vegada, cal remarcar que a causa de les simplificacions i aproximacions, aquesta variació no es considera tan fiable.

Per avaluar la fiabilitat dels resultats obtinguts, l'estudi de l'error definit prèviament és la manera més assequible de portar-ho a terme. Per fer-ho, s'ha escollit una mostra representativa de totes les simulacions, és a dir, s'ha fixat un moment magnètic, una partícula i el cas del viatge d'anada, i s'ha determinat l'error en funció del temps durant una simulació. Els resultats obtinguts es presenten a la Fig.3.3.

Es poden extreure diverses conclusions d'aquesta representació. Primerament, s'ha de

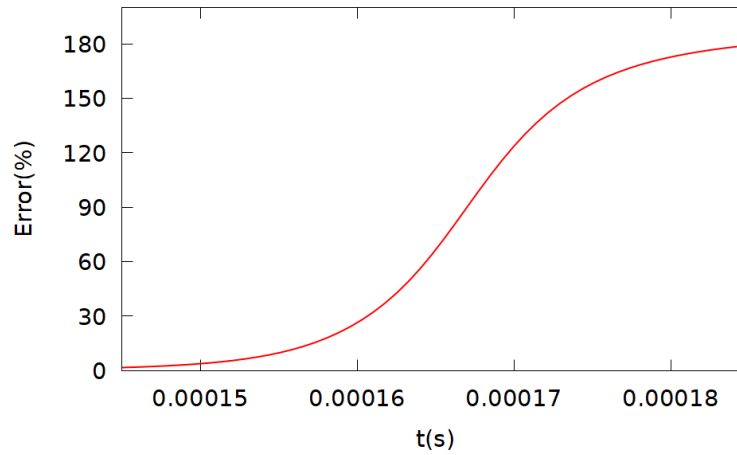


Fig. 3.3: Error en funció del temps per un moment magnètic $m = 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ i una partícula amb les condicions inicials donades a l'apartat *Dades i procediment* fixant $z = r$, en el cas del viatge d'anada.

comentar que només s'ha representat l'error en aquest interval de temps perquè fora d'aquesta regió temporal, aquest és constant. Això és degut a que durant l'interval de temps representat la partícula està suficientment propera a l'imant per tal que el camp magnètic tingui un efecte apreciable, i per tant el mètodes numèrics emprats comencin a introduir error. Es pot comprovar aquesta afirmació calculant el temps que triga una partícula lliure de forces a arribar a l'origen de coordenades partint de la posició inicial donada (veure apartat *Dades i procediment*), que és d'uns $1.67 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, i s'ajusta als valors on comença a créixer l'error.

Aquest resultat té molta importància, doncs permet establir una interval en l'espai on el camp magnètic és rellevant i un altre interval on es pot negligir, i això permet optimitzar les simulacions acostant la posició inicial de les partícules a l'origen per no haver de simular intervals de temps sense interès (partícules movent-se a velocitat constant)⁴.

Finalment, cal fixar-se en els valors numèrics de l'error. Es veu que aquest arriba fins a 180%. Aquest resultat és clarament no satisfactori perquè indica que no s'està complint la llei de la conservació de l'energia, ni tan sols aproximadament. Concretament, el mòdul de la velocitat relativa de la partícula arriba a quasi duplicar-se. Aquest fet provoca inevitablement que la confiança en els resultats disminueixi.

La principal causa de la gran magnitud de l'error és probablement que sigui necessària una discretització temporal més fina (sobretot en la regió propera a la nau).

4 Conclusions

S'ha pogut concloure que l'imant que actuaria de manera òptima com a escut protector de la radiació per un viatge entre la Terra i Mart hauria de tenir un moment magnètic de l'ordre de $10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$. Concretament, s'ha determinat que el valor òptim hauria d'estar al voltant dels $1.366 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ pel viatge de la Terra fins a Mart i $1.423 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$

⁴Cal dir que, per assegurar que el programa funciona correctament, s'ha buscat deixar anar les partícules des d'una mica més lluny que la zona d'influència del camp, per comprovar que l'error es mantenia a zero fora de la zona.

pel viatge de Mart a la Terra. No obstant, la gran magnitud de l'error del mètode i les nombroses simplificacions i aproximacions del model físic fan que aquests valors concrets no estiguin tan clars. En tot cas, l'ordre de magnitud hauria de ser el correcte, com a mínim aproximadament.

També s'ha arribat a la conclusió que per augmentar la seguretat dels resultats obtinguts (o millorar-los) s'hauria de fer servir una discretització temporal més fina, una condició complicada de complir degut a la necessitat d'ordinadors més potents.

Finalment, es considera important remarcar que, tot i que el camp magnètic generat per aquest imant no hauria de ser, en principi, perjudicial per la salut, la sensibilitat al camp dels instruments electrònics i metàl·lics necessaris en una nau d'aquestes característiques podria ser un inconvenient important a l'hora de portar aquest escut a la pràctica.

5 Annex

5.1 Esquema del model físic

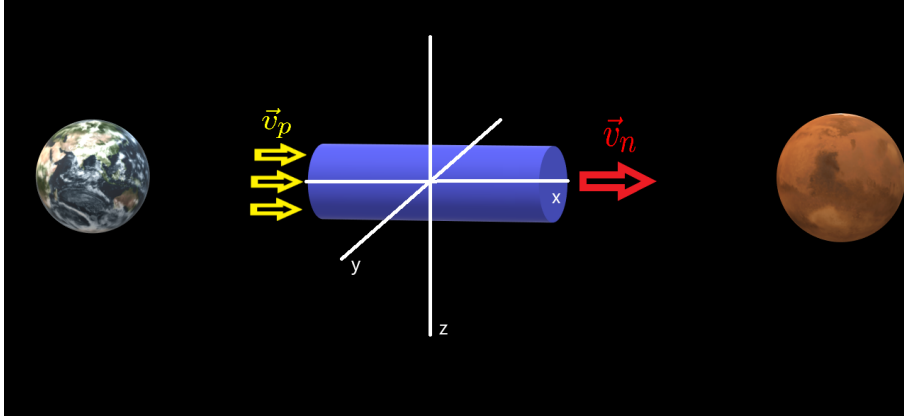


Fig. 5.1: Esquema del model físic pel viatge d'anada a Mart.

5.2 Justificació dels paràmetres escollits

Per escollir el valor de x_0 , s'han fet diverses simulacions de prova per veure a partir de quina distància de la nau començava a tenir un efecte apreciable el camp magnètic de l'imant, pels moments magnètics utilitzats. Per estimar aquesta distància, ha estat d'ajuda l'estudi de l'error en funció del temps. Per tant, s'ha fet coincidir x_0 amb un valor lleugerament major (en valor absolut) que l'estimació d'aquesta distància, per poder comprovar que l'error es manté a zero fora de la regió d'influència del camp, com s'explica a la secció *Resultats i discussió*.

Per escollir el valor de z_0 , s'ha buscat distribuir uniformement les N partícules des de $z = 0$ fins a $z = r$. No s'han implementat valors més grans de perquè, gràcies a les simulacions de prova, s'ha vist que les partícules més llunyanes en z que $z = r$ no impactaven mai amb la nau.

El valor de y_0 s'ha fixat a 0 perquè a causa de la simetria cilíndrica del camp magnètic generat pel dipol, estudiar les partícules distribuïdes en $z < r$ és el mateix que estudiar les partícules en l'àrea $\sqrt{y^2 + z^2} < r$.

El temps característic t_0 s'ha escollit amb varies intencions. Primerament, s'ha fet suficientment petit perquè les partícules estiguin en la regió propera a la nau durant un nombre suficientment gran d'iteracions, tenint en compte el valor escollit per l'interval de la discretització temporal ($d\hat{t} = 10^{-7}$) i la velocitat relativa de les partícules. A cada iteració del mètode numèric, la partícula avança una distància $d = d\hat{t} t_0 (v_p \pm v_n) = 10^{-3}$ m, que permet unes $5 \cdot 10^4$ iteracions en la zona de la nau. En segon lloc, s'ha buscat fer t_0 suficientment gran perquè en el temps que dura la simulació la partícula tingui temps d'arribar a la zona d'interès (regió propera a la nau). La determinació concreta del valor de t_0 s'ha fet a costa d'anar provant diferents valors i veure quin compleix les condicions mencionades de forma més satisfactòria.

5.3 Equacions utilitzades en el mètode numèric

Nomenclatura utilitzada: $\hat{\vec{R}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$, $\hat{\vec{v}} = (\hat{v}_x, \hat{v}_y, \hat{v}_z)$, $\hat{x} = \frac{x}{l_0}$, $\hat{y} = \frac{y}{l_0}$, $\hat{z} = \frac{z}{l_0}$, $\hat{v}_x = v_x \frac{t_0}{l_0}$, $\hat{v}_y = v_y \frac{t_0}{l_0}$, $\hat{v}_z = v_z \frac{t_0}{l_0}$, $\hat{R} = |\hat{\vec{R}}|$.

$$\frac{d\hat{v}_x}{d\hat{t}} = \frac{\hat{v}_y}{\hat{R}^3} \left(\frac{3\hat{z}^2}{\hat{R}^2} - 1 \right) - \hat{v}_z \frac{3\hat{z}\hat{y}}{\hat{R}^5} \quad (5.1)$$

$$\frac{d\hat{v}_y}{d\hat{t}} = \hat{v}_z \frac{3\hat{z}\hat{x}}{\hat{R}^5} - \frac{\hat{v}_x}{\hat{R}^3} \left(\frac{3\hat{z}^2}{\hat{R}^2} - 1 \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{d\hat{v}_z}{d\hat{t}} = \hat{v}_x \frac{3\hat{z}\hat{y}}{\hat{R}^5} - \hat{v}_y \frac{3\hat{z}\hat{x}}{\hat{R}^5} \quad (5.3)$$

$$\frac{d\hat{x}}{d\hat{t}} = \hat{v}_x \quad (5.4)$$

$$\frac{d\hat{y}}{d\hat{t}} = \hat{v}_y \quad (5.5)$$

$$\frac{d\hat{z}}{d\hat{t}} = \hat{v}_z \quad (5.6)$$

5.4 Trajectòries

A la Figura 5.2 es mostren les trajectòries d'algunes partícules quan s'acosten a la nau, pel cas del viatge cap a Mart, amb un imant protector de $1.4 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$.

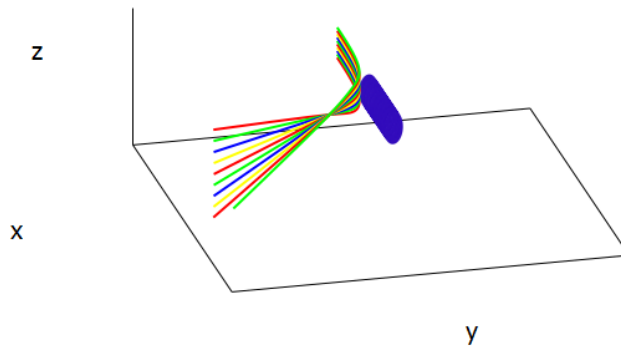


Fig. 5.2: Trajectòria d'algunes partícules en acostar-se a la nau amb un imant protector de $1.4 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, en el cas del viatge d'anada a Mart.

Es pot veure com les partícules passen a prop de la nau (cilindre blau) sense arribar a entrar-hi. En aquest cas no hi ha cap impacte, i per tant l'escut està actuant de forma eficient.

A la Figura 5.3 es mostren les trajectòries d'algunes partícules quan s'acosten a la nau, pel cas del viatge cap a Mart, amb un imant protector de $7 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$.

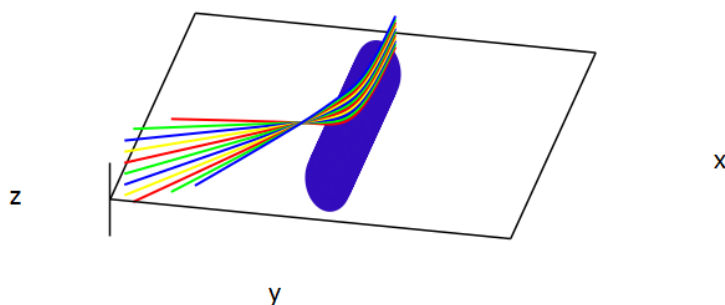


Fig. 5.3: Trajectòria d'algunes partícules en acostar-se a la nau amb un imant protector de $7 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, en el cas del viatge d'anada a Mart.

En aquest cas les partícules xoquen clarament amb la nau, i per tant l'iman no és suficientment potent per desviar-les a temps.

5.5 Enllaços

- [Codi de l'estudi del percentatge de xocs en funció del moment magnètic.](#)
- [Codi de l'error del mètode utilitzat.](#)
- [Codi de l'estudi del percentatge de xocs per un moment magnètic fixat.](#)
- [Animació de les trajectòries de les partícules per \$m = 7 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{A}\$.](#)
- [Animació de les trajectòries de les partícules per \$m = 1.4 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{A}\$.](#)

6 Bibliografia

Referències

- [1] [HTTPS://WWW.SPACEX.COM/VEHICLES/STARSHIP/](https://www.spacex.com/vehicles/starship/)
- [2] [HTTPS://MARS.NASA.GOV/MARS2020/TIMELINE/CRUISE/](https://mars.nasa.gov/mars2020/timeline/cruise/)
- [3] K.W. OGILVIE, M.A. COPLAN. *Solar wind composition* U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics, United States of America. (DOI:10.1029/95RG00122)
- [4] [HTTPS://SOLARSCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SOLARWIND.SHTML](https://solarscience.msfc.nasa.gov/solarwind.shtml)
- [5] DONALD W. CHAKERES, FRANK DE VOCHT. *Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems.*
- [6] [HTTPS://WWW.CODATA.ORG/UPLOADS/RMP.88.035009.PDF](https://www.codata.org/uploads/RMP.88.035009.PDF).