

חלק ג: כוח כמשנה כיוון – תנועה בחלל

כוח כמשנה כיוון

רקע

על פי החוק הראשון של ניוטון, גוף ממשיך לנוע במהירות קבועה בקו ישר, אם אין פועלים עליו כוחות חיצוניים.

כוח חיצוני עשוי לשנות את גודל המהירות או את כיוון התנועה (או את שניהם כאחד). העובדה שכוח משנה כיוון תנועה אינה מפתיעה

מה יקרה למי שהולך ממערב למזרח, כאשר במשך זמן קצר מישוהו מנסה למשוך אותו דרומה בשולי הבגד. יש להניח שכיוון התנועה ישתנה ויהיה בין המזרח לבין הדרום.

דוגמה אחרת: מה יקרה אם ספינה קטנה שטה על המים ממערב למזרח, ולמשך זמן קצר נושבת רוח עזה מצפון לדרום. גם במקרה זה, הדעת של ההדיוט נותנת כי הסירה תיטה ימינה לכיוון שבין המזרח לבין הדרום. מה תהיה מידת ההטיה של המסלול? לא נעסוק בזה ברמה הכמותית. המפתח לדיון בזה כלול בחוק השני של ניוטון ($F=ma$)

נתבונן בדוגמה דומה לאלה שהזכרנו למעלה. נתבונן בכדור שנזרק אופקית. לאחר שהכדור עוזב את המשגר, הוא נע במהירות אופקית קבועה. אם הכדור נע על רצפה ללא חיכוך, הכוח השקול האופקי הוא אפס (כוח כובד כלפי מטה וכוח נורמלי כלפי מעלה מקזזים זה את זה). לעומת זאת, אם אין רצפה, פועל כוח בלתי מאוזן כלפי מטה (כוח הכובד), שמטה את כיוון התנועה (בדיוק כמו בדוגמאות שלמעלה). הדבר קורה לכל אורך המסלול (עד לפגיעה ברצפה), ולכן בשום שלב התנועה אינה בקו ישר. הכדור פונה "ימינה" (כלומר: מטה) בכל נקודה על המסלול. אנו מבינים את הטיית המסלול, גם אם איננו יכולים לתת הערכות כמותיות. אפשר לערוך ניסוי כזה כאשר זורקים את הכדור מראש התורן ועוקבים אחרי תנועתו עד לארץ. תוצאה זהה מתקבלת כאשר עוזבים את הכדור, ללא הענקת מהירות נוספת, מראש התורן של ספינה שנעה במהירות גדולה.

התמדה וכבידה מעצבות את התנועה של עצמים בחלל

באיור שלפנינו מתוארים המסלולים של מספר כוכבי לכת סביב השמש, ושל השביט אֶלֶן, שעורר דאגה ב-2011 כאשר חלף סמוך לפני הארץ.

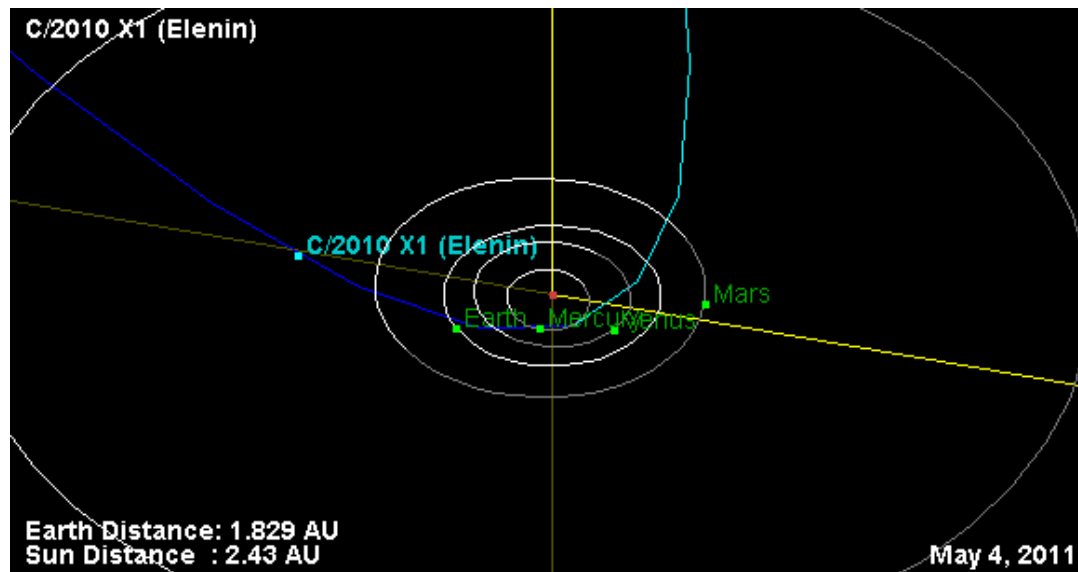
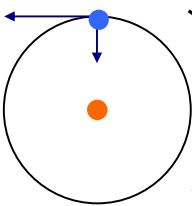


Image credit: NASA/JPL-Caltech

המסלולים של כוכבי הלכת הם בעלי צורת אליפסה, די קרובה לצורת מעגל. מסלולו של שביט אֵלֵנִין (המסלול הכחול) שונה. מה קובע את צורות המסלול השונות של גרמי השמים?

כל גרמי השמים שמתוארים במסלול נמשכים על ידי השמש, אך אף אחד מהם אינו נע ישר אל השמש. הכוח אינו קובע בלעדית את כיוון התנועה. נתבונן בדוגמה מוכרת על פני הארץ. בסרטוט שמשמאל מתוארים המסלולים של שני כדורים. האחד שוחרר ממנוחה ונפל אנכית. השני נזרק ימינה ונע במסלול עקום. לאורך כל הדרך, עד לפגיעה ברצפה, פעל על שני הכדורים אותו כוח, ובכל זאת הם לא נעו באותו מסלול, גם אחרי שעזבו את ידינו, ולא הפעלנו עליהם יותר כוח. לגוף שנזרק ימינה הייתה מהירות ימינה בתחילת הדרך. ברגע שהכדור עזב את ידינו, כוח הכובד היה הכוח הבלעדי שמושך אותו כלפי מטה. הכוח הזה מוסיף מהירות כלפי מטה, אך אינו מבטל את המהירות שהייתה בכיוון האופקי. כוח אינו מבטל מהירות שקיימת. זו נשארת בתוקף ההתמדה. כוח מכניס תוספת מהירות, במקרה הזה כלפי מטה. בסך הכל הגוף נע גם ימינה וגם מטה. כך נוצר המסלול העקום.



דברים דומים מתרחשים במערכת השמש. ברגע מסוים המרחק של אלנין מן השמש שווה למרחק של הארץ מן השמש. הארץ ממשיכה לנוע במסלול כמעט מעגלי ואינה נופלת על השמש, אף שהיא נמשכת אליה. זה מפני שבכל רגע מהירותה מורכבת מן המהירות שהייתה לה קודם, ומתוספת המהירות שנובעת מן הכוח שפועל אל השמש. צירוף שתי אלה מביא לתנועה המעגלית. הכוח מטה את הארץ מכיוון התנועה בכל רגע ורגע. כאשר אלנין עובר באותו מרחק מן השמש, יש לו מהירות אחרת וכיוון תנועה אחר. **הצירוף של המהירות הזאת עם תוספת המהירות שנובע מכוח הכבידה, מניב תנועה אחרת מזו של הארץ, הן במהירות והן בכיוון התנועה.**

לסיכום: תנועתם של גרמי שמים בחלל (כמו גם תנועתם של עצמים אחרים) מעוצבת על ידי שני גורמים: המהירות שהייתה, שאינה נעלמת (בתוקף ההתמדה), ושינוי במהירות שהוא תוצאה של פעולת כוח הכובד. השינוי במהירות מצטרף למהירות שהייתה.

התמדה, כבידה ומנוע רקטי מעצבים את התנועה של טילים ורכבי חלל

הגורמים שמעצבים את תנועתם של גרמי שמים טבעיים, מעצבים גם את התנועה של עצמים ששוגרו על ידי אדם. ובכל זאת, אפשר עדיין לעשות משהו, ולא להיות נתונים לחסדי ההתמדה והכבידה. אנו יכולים להפעיל מנועים רקטיים, שישנו את גודל המהירות ואת כיוון התנועה. אמנם, הדברים אינם בלתי מוגבלים, שהרי עלינו לקחת עמנו חומר מכביד שנוכל להיפרד ממנו בכל פעם שהדבר יידרש, ולא נוכל לעשות זאת בלי הגבלה, אך זה עדיין מותיר בידינו מידה מסוימת של שליטה. זה ממש הכרחי, מפני שסטייה קלה בכיוון עלולה להביא לכך שהתמדה וכבידה ייקחו אותנו למרחבי החלל, מבלי שנוכל לשוב ארצה. אפשר לתקן סטיות קטנות באמצעות מנוע רקטי. זה הכרחי כאשר אנו רוצים לתמרן לקראת נחיתה או היצמדות לחללית אחרת.

לוויינים מלאכותיים

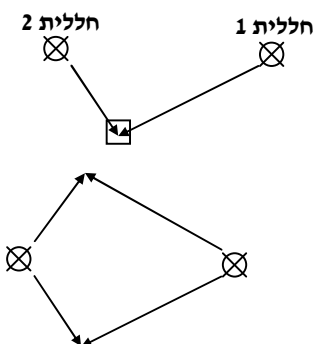
כדי להכניס לוויין למסלול סביב הארץ יש לשגר אותו באמצעות רקטה לעבר המסלול הרצוי. שימוש במנוע רקטי נדרש גם לשינויי כיוון של התנועה כדי להכניס את הלוויין למסלול המיועד. גובה המסלול (מעל פני הארץ) תלוי בשימוש של הלוויין. הנה כמה דוגמאות.

לוויינים במסלול נמוך

לוויינים אלה נעים ברדיוס של מאות ק"מ מעל פני הארץ. תחנת החלל הבינלאומית היא לוויין כזה. לוויינים למטרות צילום, ריגול, חיזוי מזג אוויר וחיפוש אחרי משאבי טבע, נעים במסלולים נמוכים, מפני שהקרבה לארץ מאפשרת רזולוציה טובה יותר של התמונה המתקבלת. החיסרון של לוויין במסלול נמוך הוא בכך שבכל רגע הוא צופה רק בחלק קטן מפני הארץ (בגלל הקרבה הגדולה לפני הארץ). לוויינים כאלה מקיפים את הארץ במשך כשעה וחצי עד שעתיים.

מערכות ניווט לווייניות

לוויינים אלה נעים בגובה של כ-20,000 ק"מ. מערכת הלוויינים המוכרת ביותר היא ה-GPS (מערכת איכון עולמית – Global Positioning System). הלוויינים האלה משגרים אותות שנקלטים על פני הארץ. האות הנקלט כולל מידע על רגע יציאתו מן הלוויין ועל מקומו של הלוויין. מקלט של GPS קולט מידע כזה ממספר לוויינים.



כדי להבין כיצד נעשה זיהוי המקום נתבונן בעולם דו ממדי, שאותו אפשר להציג היטב על דף הנייר (או צג המחשב). אם המקלט מצויד בשעון מדויק, אפשר לחשב את המרחק של המקלט מכל אחת משתי הלוויינים כמכפלה של מהירות האור במשך הזמן שעבר מרגע השידור עד לרגע הקליטה. אמנם יש במישור עוד נקודה עם אותם מרחקים משתי החלליות, אך רק אחת משתי הנקודות נמצאת על פני הארץ. מבחינה מתמטית, מדובר בפתרון של שתי משוואות בשני נעלמים, כדי למצוא את שתי הקואורדינטות של המקלט במישור (x, y) .

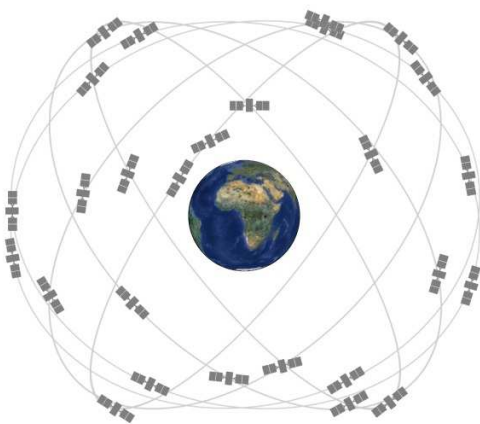
בעולם התלת ממדי ניזקק למידע משלוש חלליות כדי לקבוע את המיקום של המקלט. הפעם נפתור שלוש משוואות כדי למצוא את שלוש הקואורדינטות במרחב (x, y, z) .

נקודת תורפה בשיטה הזאת היא בכך שאנו תלויים ברמת הדיוק של השעון של המקלט. המערכת מכוונת להגיע לדיוק גבוה במיוחד. איננו רוצים שהשעון שלנו יחבל בכוונות הטובות. כדי להתגבר על כך אפשר להשתמש במידע מלוויין נוסף. עתה עלינו לפתור 4 משוואות ב-4 נעלמים (x, y, z, t) .

להתגבר על בעיות דיוק, אפשר להכניס מידע מלוויינים נוספים, שיצמצם את אי הוודאות בתוצאה. בפועל, רמת הדיוק של המערכת מגיעה למטרים בודדים, כפי שקל לראות בזמן נסיעה במכונית שיש בה מקלט GPS.

האיור משמאל מציג את מערך לווייני GPS.

כך נראית חללית GPS:



לווייני תקשורת

לוויין תקשורת אמור להיות ממוקם בנקודה קבועה ביחס לתחנות השידור והקליטה. כיוון שהארץ מסתובבת, גם לוויין התקשורת אמור לנוע סביב הארץ כך שהוא נשאר באותו מקום ביחס לתחנות השידור והקליטה. זה מחייב שהלוויין ישלים את הקפת הארץ ביממה אחת (לוויין גיאוסינכרוני). לשם כך על הלוויין להימצא בגובה של כ-36,000 ק"מ.

מבלי להיכנס להסברים, אפשר לגלות כי זמן המחזור במרחק r ממרכז הארץ הוא $T=2\pi(r/g)^{1/2}$ (כאשר g היא תאוצת הנפילה החופשית על פני הארץ), והוא הולך וגדל ככל שמתרחקים מן הארץ. זמן המחזור של לוויין שהיה נע צמוד לפני הארץ (ברדיוס של כ-6,400 ק"מ), הוא כ-5,000 שניות (כ-1.4 שעה), בהנחה שהתנגדות האוויר זניחה (זהו אכן בקירוב זמן ההקפה של מעבורת החלל, אשר גובהה מעל לכדור הארץ נמוך יחסית, ושל הלוויינים במסלולים הנמוכים). כדי שזמן המחזור יהיה יממה, יש צורך להתרחק מאוד מן הארץ (לרדיוס של כ-42,000 ק"מ).