

# תהודה מסלולית באסטרונומיה

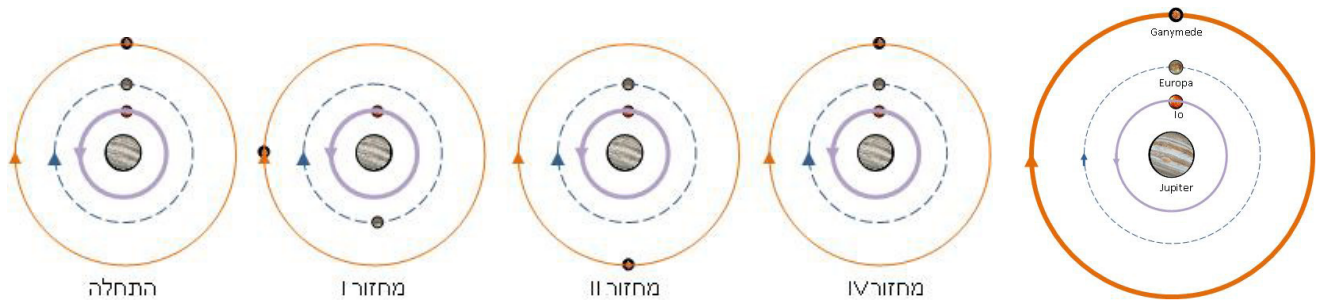


עידו פינקלמן<sup>1</sup>, ד"ר יואל רפאלי<sup>1</sup>, ד"ר מאיר מידב<sup>2</sup>

עולמנו נמצא בתנועה מתמדת. לא תמיד אנו עדים לכך בצורה ישירה, אך גם גופים הנראים לנו כעת דוממים משתנים לאורך זמן. למעשה, אפילו אטומים ומולקולות - אבני הבניין המרכיבים אותנו ואת החומר שסביבנו - חוטטים בתנודות מיקרוסקופיות במחזוריות של שברירי שנייה. אולם בסקלות הזמן והמרחב שאנו רגילים אליהן בשגרת חיינו, אין לתנודות אלה כל השפעה מצטברת שנוכל לחוש בה.

בעוד שתיאור פיזיקלי כללי של שינוי לאורך זמן במצב של מערכת נתונה עלול להיות סבוך ומורכב מאוד, תנודות מחזוריות ניתנות לתיאור באמצעות משוואה פשוטה. משוואת הגלים מתארת במדויק מגוון רחב של מערכות החל מתנודות גלים בים ועד תנודות מיתרי גיטרה. בנוסף מציגה המשוואה תחזית מסקרנת במקרה שבו מופעל כוח חיצוני שתדירותו שווה לתדירות "הטבעית" של המערכת. במקרה הזה האנרגיה העוברת למערכת מומרת לאנרגיה תנועתית בצורה יעילה ביותר, וכך מגבירה את משרעת התנודות. תופעה זו הנקראת תהודה, צפויה בתנודות מכניות, תנודות אקוסטיות, תנודות אלקטרומגנטיות, ולמעשה - בכל סוגי התנודות.

לתהודה ביטויים רבים בתופעות טבע מחד וביישומים טכנולוגיים מאידך, והיא בעלת תפקיד מכריע גם בתיאור תופעות מיקרוסקופיות בחומר וגם בתיאור תנועות גופים עצומים במערכת השמש שלנו.



איור 2: מקומם של שלושת הירחים לאורך ארבעה מחזורים של Io

איור 1: מסלולי ירחים סביב צדק

בסקלות אסטרונומיות, הכוח המשמעותי הפועל בין גופים הוא כוח הכבידה. כבר במאה ה-17, מיד לאחר ניסוח חוקי הכבידה האוניברסליים ע"י ניוטון, רבים בקהילה המדעית החלו לתהות על יציבותה של מערכת השמש לאור הכוחות ההדדיים שחשים הגופים השונים המרכיבים אותה. בעוד שפתרונה המדויק של בעיית שני גופים היה ידוע ומוכר, די היה בהוספת גוף נוסף לבעיה כדי להפוך את המשוואות לבלתי פתירות. עם זאת, בהנחה כי שני גופים סובבים גוף שלישי, מסיבי הרבה יותר, ובמקרה שבו היחס בין זמני ההקפה שלהם הוא של שני מספרים שלמים קטנים - פתרון המשוואות מראה כי ההשפעה הכבידתית ההדדית של שני הגופים הסובבים זה על מסלולו של זה מתגברת בצורה תהודתית. תהודה זו הנקראת תהודה מסלולית, אחראית במידה רבה

1 | ביה"ס לפיזיקה ואסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב

2 | בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב



איור 3 : טבעות שבתאי

לעיצובה של מערכת השמש ולמיקומם של כוכבי הלכת, הירחים ושאר הגופים בה.

כאשר כוח המשיכה בין שני הגופים הסובבים חזק מספיק כדי לאפשר תיקון של שינויים במסלוליהם הנגרמים מהשפעתם של גופים חיצוניים קטנים, אזי התהודה המסלולית היא יציבה. כך למשל, כוכב הלכת הננסי פלוטו וכוכב הלכת נפטון סובבים במסלולים יציבים סביב השמש, והיחס בין זמני ההקפה שלהם הוא 3 ל-2. מקרים שכוחים יותר הם של גופים קטנים במערכת השמש הנטים להיכנס לתהודה מסלולית עם כוכבי הלכת הסמוכים להם. כך למשל, בחגורת האסטרואידים שבין מאדים וצדק ישנן קבוצות אסטרואידים בתהודה מסלולית עם צדק, ובחגורת קויפר נמצאים גופים רבים בתהודה מסלולית עם נפטון. תהודה מסלולית מתקיימת גם בין צדק ובין שלושה מירחיו הגדולים: איו, אירופה וגנימד. התהודה הזו הנקראת על שמו של המתמטיקאי הצרפתי

פייר סימון לפלס שהבחין בה לראשונה, נגרמת כתוצאה מהשפעה של כוחות גאות הפועלים בין הגופים השונים. מצב שבו הסיבוב של ירח סביב ציח מסונכרן עם הקפתו סביב כוכב הלכת שלו מוכר גם לנו, תושבי כדור הארץ. זמן ההקפה של הירח שלנו סביב כדור הארץ שווה לזמן סיבובו העצמי, ולכן רק צד אחד שלו פונה תמיד אל כדור הארץ.

במקרים שבהם מערכת הגופים נתונה לכוחות חיצוניים משמעותיים מצד גופים נוספים במערכת השמש, התהודה המסלולית איננה בהכרח יציבה, וכתוצאה מכך עלולים הגופים לסטות ממסלולם המקורי. בחגורת האסטרואידים שבין מאדים וצדק ניתן אף לזהות מסלולים נקיים מאסטרואידים הנקראים "מרווחי קירקווד" על שם האסטרונום האמריקני דניאל קירקווד שהבחין בהם לראשונה. אסטרואידים הנקלעים למסלולים אלה מופרעים בצורה תדירה ע"י כוכבי הלכת או ע"י גופים גדולים אחרים במערכת השמש. כך למשל, אסטרואיד המקיף את השמש במחצית מזמן ההקפה של צדק ירגיש השפעה מחזורית מצד צדק שתגרום למסלולו להיות אליפטי עם כל הקפה. בסופו של דבר אסטרואיד שכזה יסטה לחלוטין ממסלולו המקורי סביב השמש ועלול להתנגש באחד מכוכבי הלכת.

מרווחים דומים ניתן לזהות גם במערכת הטבעות של כוכב הלכת שבתאי. מרווחים אלה תואמים תהודות מסלוליות בין חלקיקים בטבעות לבין הירחים השונים המקיפים את שבתאי. השפעת ירחי שבתאי על הטבעות באה לידי ביטוי בדרך מסקרנת נוספת. מסלולים של חלקיקים בטבעות שזמן ההקפה שלהם הוא כפולה שלמה של זמן המחזור של אחד הירחים סביב שבתאי, הופכים אליפטיים ועקב כך יוצרים גלי צפיפות לולייניים (ספירליים) בטבעות. מסתבר כי תהודה מסלולית מסוג זה, הנקראת גם תהודת לינדבלאד על שמו של האסטרונום השבדי ברטיל לינדבלאד, מתרחשת גם בסקלות גדולות הרבה יותר ממערכת השמש שלנו, בגלקסיות דסקיות. ההשפעה ההדדית של כוכבים במיקומים שונים ביחס למרכז גלקסיה מסוג זה היא שגורמת למסלוליהם לסטות מעיגולים ולהיות אליפטיים. הפוטנציאל הכבידתי הכולל המתקבל מתרומותיהם של כל הכוכבים הללו הוא בעל תבנית לוליינית. עקב כך הכוכבים מואטים ומצטופפים בקרבת גלי הצפיפות הנוצרים וע"י כך מנציחים למעשה את התבנית הלוליינית. במסלולים שבהם תדירות המעבר של כוכב דרך התבנית הלוליינית מסונכרנת עם תדירות הסיבוב של הפוטנציאל הכבידתי הכולל, תיתכן יצירת טבעת כוכבית סביב הגלקסיה.