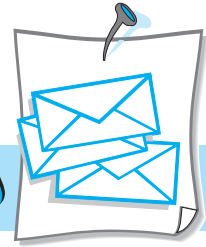


# מכתבים למערכת



## קשיי תלמידים

מספר הערות למאמרים של צבי גלר ועדי רוזן שהתפרסמו ב"תהודה"

דוד אגמון, המכינה הקדם אקדמית, הטכניון, חיפה

הצנטריפוגלי ולכן הגוף יוחזר לנקודת שווי המשקל. (ולחפץ כאשר מקטינים את  $\alpha$ )  
 ג) מכיוון שהמאמר טיפל בכוח כבידה מוכלל, היה ראוי להמשיך צעד נוסף ולדבר על אנרגיה פוטנציאלית מוכללת. במערכת קואורדינטות אופקית ואנכית נקבל שאנרגיות הכובד המוכללת היא:

$$(3) \quad U(x, y) = -\int m\vec{g} \cdot d\vec{r} = -\int m\vec{g} \cdot d\vec{y} - \int m\omega^2 \vec{x} \cdot d\vec{x} = mgy - \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 + C$$

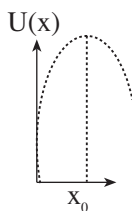
כאשר:  $\vec{g}^* = -g\hat{y} + m\omega^2 x\hat{x}$  ו-C הוא קבוע אינטגרציה שגודלו, בבחירה נאותה של מישור הייחוס, יהיה אפס. במצב שיווי משקל האנרגיה הפוטנציאלית היא אקסטרמיאלית. סוג שיווי המשקל יקבע על פי הקריטריון הידוע הבא:

כאשר האנרגיה היא מינימלית / מקסימלית / קבועה, שיווי המשקל יהיה יציב/רופף/ אדיש בהתאמה. נבדוק זאת לכל אחד מהמשטחים: מישור משופע, משטח כדורי ומשטח פרבולי.

משטח משופע מקיים את האילוץ:  $y = (\tan\alpha) \cdot x$ . נציב קשר זה במשוואת האנרגיה (3) ונקבל:

$$(4) \quad U(x) = (mg \tan \alpha)x - \left(\frac{1}{2}m\omega^2\right)x^2$$

זוהי משוואת פרבולה שיש לה נקודת מקסימום כמומחש בתרשים 2. לכן גוף שנמצא על מישור משופע מסתובב יהיה בשיווי המשקל רופף.



תרשים 2

ברצוני להגיב על מאמריהם של צבי גלר ועדי רוזן שפורסמו בעיתון תהודה<sup>1,2</sup>.

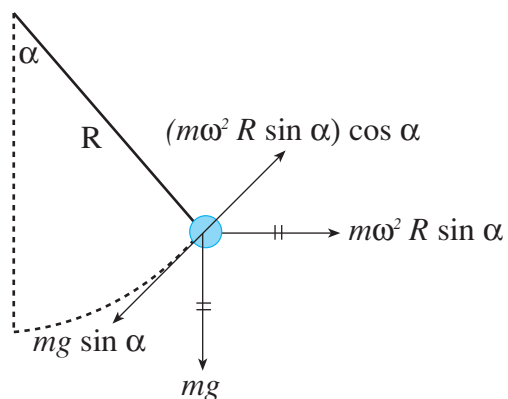
### 1. למאמרו המאלף של צבי גלר ברצוני להעיר ארבע הערות:

א) נראה לי שהדרך האינטואיטיבית בה ניתן להסביר מדוע נדרשת תדירות סף בכדי שהגוף הנע בתנועה קונית יתחיל להתרומם היא בהתמקדות בכוחות המשיקיים הפועלים על הגוף (הכוחות בכיוון הניצב ידאגו כבר לעצמם). הרכיב המשיקי של כוח הכובד מושך את הגוף מטה בעוד שהרכיב המשיקי של הכוח הצנטריפוגלי מושך אותו מעלה, כמוראה בתרשים 1. התנאי שהגוף יתחיל להתרומם הוא כמובן:

$$(1) \quad (m\omega^2 R \sin\alpha) \cos\alpha > mg \sin\alpha$$

אחרי צמצום וסידור נקבל:

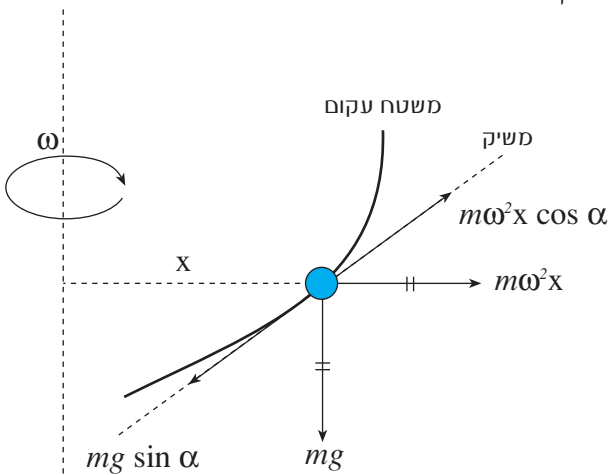
$$(2) \quad \omega^2 > \frac{g}{R \cos\alpha} > \frac{g}{R} \rightarrow \omega_0 \equiv \sqrt{\frac{g}{R}}$$



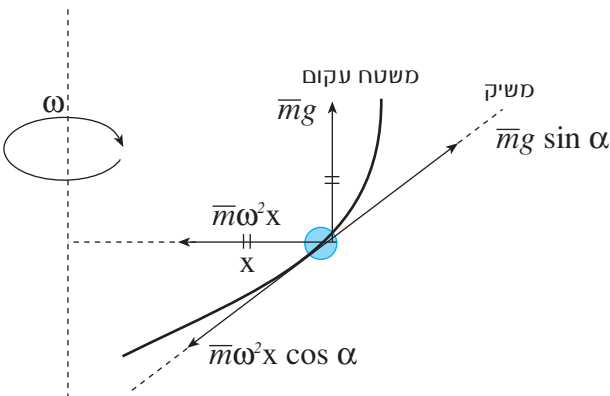
תרשים 1

ב) מתרשים 1 קל להיווכח שזהו שיווי משקל יציב. הגדלת הזווית  $\alpha$  גוררת הגדלת הרכיב המשיקי של כוח הכובד בשיעור גדול יותר מאשר הרכיב המשיקי של הכוח

האוויר הכלוא בבועה הוא זניח) ולכן בדומה למטען שלילי, שיווי המשקל של הבועה הפוך מזה של גולה מסיבית שהכוח הפועל עליה הוא בכיוון  $\vec{g}^*$ . כלומר הבועה תימצא בשיווי משקל יציב כאשר הגולה תהיה בשיווי משקל רופף על המישור המשופע, בשיווי משקל רופף על פני המשטח הכדורי ובשיווי משקל אדיש על פני המשטח הפרבולי. שווה לנסות ולבדוק! התרשים המצורף מראה את מערך הכוחות המשיקיים הפועלים על גולה ועל בועה. יש לשים לב להיפוך הרכיבים. זהו המנגנון האחראי להיפוך שיווי המשקל מיציב לרופף ומרופף ליציב.



תרשים 4א: הכוחות המשיקיים הפועלים על גולה;  $\alpha$  היא זווית השיפוע של המשיק עם הכיוון האופקי



תרשים 4ב: הכוחות המשיקיים הפועלים על בועה;  $\alpha$  היא זווית השיפוע של המשיק עם הכיוון האופקי

II משטח מעגלי מקיים את האילוץ:  $x^2 = R^2 - y^2$ ; נציב ונקבל:

$$(5) \quad U(y) = mgy + \left(\frac{1}{2} m\omega^2\right)y^2 - \left(\frac{1}{2} m\omega^2\right)R^2$$

וזהו משוואת פרבולה בעלת נקודת מינימום ולכן שיווי המשקל על משטח כדורי יהיה יציב.

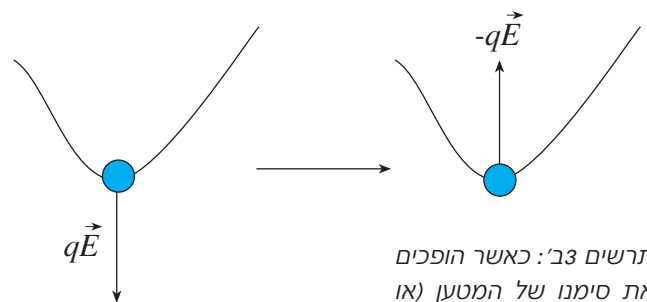
III בכדי שהגוף יהיה בשיווי משקל אדיש נדרוש שצורת המשטח תקיים את התנאי שהאנרגיה הפוטנציאלית המוכללת על פניו תהיה קבועה.

$$(6) \quad U(x, y) = mgy - \frac{1}{2} m\omega^2 x^2 =$$

$$= \text{Const} \rightarrow y = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} x^2 + \text{Const}$$

וזהו, כמובן, משטח פרבולי.

ד) אסיים בהערה על טיבו של שיווי המשקל של הבועה בכל אחד מהמשטחים הנ"ל ונבחן זאת בהקשר הכללי: נזכיר לעצמנו את הכלל הפשוט הבא: היפוך כיוונו של כוח משמר הפועל על גוף הנמצא בשיווי משקל, שקול להיפוך האנרגיה הפוטנציאלית שלו ממינימלית למקסימלית (או ממקסימלית למינימלית) במילים אחרות כשהכוח הופך את כיוונו גופים הנמצאים בשיווי משקל יציב יעברו לשיווי משקל רופף ולהיפך ואילו גופים הנמצאים בשיווי משקל אדיש יישארו בשיווי משקל זה. עיקרון זה מבהיר מדוע בנקודות שבהן מטענים חיוביים נמצאים בשיווי משקל יציב יהיו מטענים שליליים בשיווי רופף ולהיפך, כמומחש בתרשימים 3א ו-3ב.



תרשים 3ב: כאשר הופכים את סימנו של המטען (או

את כיוון השדה) שיווי תרשים 3א: חרוז טעון חיובית על המשקל הופך מיציב לרופף חוט מבודד בשיווי משקל יציב כוח העילוי שווה בגודלו למשקל המוכלל של הנוזל שנדחה על ידי הבועה וכיוונו הפוך לכיוונו של  $\vec{g}^*$ . ניתן, על כן, להסתכל על בועה כעל גוף בעל מסה שלילית (משקלו של

עובדה פשוטה זו יכולה לסייע לנו במציאת המקור של השדה המגנטי בעזרת הניסוי המחשבתי הבא: כידוע מגנט היוצר שדה מגנטי מפעיל כוח (מגנטי) על מטען נע. מעובדה זו נובע שהמטען הנע מפעיל על המגנט כוח שאף הוא **בהכרח כוח מגנטי**. כלומר המטען החשמלי הנע הוא, ולא אחר, המקור של השדה המגנטי. טיעון פשוט זה יכול לחסוך מאמץ נואל בחיפוש אחר מונופולים מגנטיים.

ראוי, לדעתי, להדגיש נקודה זו במסגרת הלימוד של החוק השלישי.



על מטען חשמלי חיובי הנע לקראת הקורא מפעיל המגנט כוח מגנטי שמאלה. המטען מפעיל על המגנט כוח מגנטי ימינה.

### מראי מקום

1. גלר, צ., תנועה של גופים על מסילות המסתובבות במעגל. תהודה (3)20 עמ' 17-32, ינואר 2000.
2. רוזן, ע., החוק השלישי של ניוטון: קשיי תלמידים ודידקטיקה. תהודה (3)20 עמ' 33-38, ינואר 2000.

## 2. הערה למאמרו המצוין של עדי רוזן הדן בחוק השלישי של ניוטון

ההצעה להחליף את צמד המושגים "כוח פעולה" ו"כוח תגובה" במונח כוחות אינטראקציה היא נכונה ומועילה. ראוי להרחיב בנקודה זאת ולציין שצמד כוחות האינטראקציה מתאפיין גם בכך ששני הכוחות הם תמיד **מאותו סוג**. זוהי קביעה אמפירית שתוקפה אינו נופל מהקביעה (האמפירית) המתמייחסת לגודלם וכיוונם של כוחות אלו. (יתכן שקביעה זו לא נכללה בטקסט המקורי של ניוטון נובעת מהעובדה שלא הכירו בשעתו את הכוחות הידועים לנו היום) פרוש הדבר שאם גוף 1 מפעיל, למשל, כוח כבידה על גוף 2 אזי גוף 2 יפעיל כוח כבידה על גוף 1. ולא כוח חשמלי או מגנטי!

כשירודים לשורשיהם של כוחות האינטראקציה במכניקה: הכוחות הנורמליים, החיכוך והמתחיות, מתברר שהם כוחות משיכה ודחייה חשמליים. כשמשתח מפעיל כוח חיכוך (שהוא כוח של משיכה חשמלית) על בול מפעיל עליו הבול כוח חיכוך זהה בגודלו והפוך בכיוונו.

וכאשר המשטח מפעיל על הבול כוח נורמלי (כוח דחייה חשמלי) מפעיל עליו הבול כוח נורמלי זהה בגודלו והפוך בכיוונו.

הכשל הנפוץ הגורס שהכוח הנורמלי הוא כוח התגובה למשקל (או כוח הכובד) ניתן בנקל להפרכה מהטעם הפשוט שצמד כוחות זה איננו מאותו הסוג.

## מחדל גשר המילניום

גשר המילניום החדש להולכי רגל על התמזה בלונדון, שאורכו 320 מ' ועלותו 18 מיליון לירות סטירלינג, נסגר באותו סוף-השבוע בו נפתח, כאשר התגלה שהוא מתנודד בתנודות רוחביות חזקות מאוד עד כדי סיכון ההולכים. המהנדסים המתכננים הודו לאחרונה שהדמיית המחשב בה השתמשו כמודל להתנהגות הגשר לא היתה מסוגלת להתמודד עם ההשפעה של אנשים ההולכים עליו. המהנדסים שחקרו את המקרה קיבלו תוצאה דומה כאשר הפעילו על הגשר כוח רוחבי מחזורי בתדירות של 1 Hz. לפיכך משערים שסיבת התנודות הרוחביות החזקות מקורן בתנועה סינכרונית של האנשים העוברים על הגשר. ידוע כי צעידה בסך על גשר מפעילה כוח אנכי בתדירות של כ-2 Hz. אבל צריך להביא בחשבון את העברת המשקל מרגל לרגל - שמאלה וימינה; על ידי כך נוצרת תנודה רוחבית בתדירות של 1 Hz. אנשים ההולכים באופן אקראי על גשר ומרגישים תנודה רוחבית, לדוגמה על ידי רוח, מנסים ליצב את הליכתם על ידי העברת משקלם מצד אל צד, ונמצאים צועדים באופן מסונכרן כמו צועדים בסך ומתקבלת תנודה רוחבית גדלה והולכת.

תקציר חופשי ממאמר שהופיע בעיתון הבריטי *New Scientist* ב-7. 2000. 8. המאמר המלא מופיע באתר האינטרנט בכתובת: <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns224639>