עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 1, אביב · 🧱 מחשבון מובנה

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 8 יחידות ו-8 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם סמסטר ראשון של פיזיקה אוניברסיטאית מבוססת חשבון אינפיניטסימלי (מכניקה קלאסית), הקורס שכל סטודנט להנדסה או לפיזיקה לומד ראשון. הוא בנוי לפי הנושאים והעומק של חומרים פתוחים כמו OpenStax University Physics Volume 1 ו-MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics, שאליהם אנו מקשרים לאורך הקורס. ארגונים אלה אינם ממליצים על דף זה.

מה שאנחנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית בתעופה וחלל ובתצפית על כדור הארץ, כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני הפרסום, ולכל מעבדה יש גרסה ביתית או וירטואלית כדי שכל אחד יוכל לבצע אותה.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

מכניקה היא הפיזיקה של שיגור, טיסה ומסלול. אותן משוואות מציבות במסלול לווייני תצפית כמו Landsat 9 ו-GRACE-FO, שומרות על הכיוון שלהם והופכות שינויים זעירים בתנועתם למפות של מים, קרח ויבשה.

על הקרקע, אותם רעיונות קובעים את גודלן של טורבינות רוח, גורמים למכוניות ולמטוסים לצרוך פחות אנרגיה ועוזרים למהנדסים לתכנן הסטה של אסטרואיד. כל יחידה מסתיימת בחלק קצר עם מקורות שמראה כיצד רעיונותיה עוזרים לאנשים ולטבע כאחד.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 8 יחידות ו-8 מעבדות (PHYS 110 + PHYS 110L).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.

- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- אלגברה וטריגונומטריה: פתרון משוואות, סינוס, קוסינוס וטנגנס, משפט פיתגורס.
- חשבון אינפיניטסימלי I, לפחות במקביל: נגזרות כקצבי שינוי ואינטגרלים כשטחים. הקורס משתמש ב-dv/dt וב-∫v dt כבר מיחידה 1.
- וקטורים בשני ממדים: רכיבים, גודל וכיוון.
- יחידות SI וכתיב מדעי.

איך ללמוד

- קראו את היחידה, סגרו אותה ונסו לפתור לבד את הדוגמאות הפתורות לפני שבודקים כל שלב.
- ציירו שרטוט לכל בעיה. בכל בעיית כוחות, ציירו תרשים גוף חופשי לפני שכותבים משוואה.
- פתרו קודם בסמלים והציבו מספרים בסוף. אחר כך בדקו את היחידות והאם גודל התשובה הגיוני.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שפותחים את התשובה. לטעות קודם ולתקן זה מה שמקבע את השיטה.
- השתמשו בסימולציות PhET כדי לבדוק את האינטואיציה: חזו מה יקרה ואז הריצו.
- עשו שוב את הבחנים כעבור כמה ימים. תרגול מרווח עדיף על מפגש ארוך אחד.
- השתמשו ב-$g = 9.81\ m/s^2$ אלא אם הבעיה אומרת אחרת, ושמרו על שלוש ספרות משמעותיות.

ציוד מעבדה (למעבדות הרטובות)

- סרגל מטר ומטר מתקפל; קליבר אם יש.
- שעון עצר (טלפון מתאים) ובאופן אידיאלי אפליקציה בטלפון או חיישן בית ספרי שמתעדים תנועה או תאוצה.
- עגלה ומסילה בעלות חיכוך נמוך (או לוח חלק), גלגלת וסט משקולות לתלייה.
- כדור קטן, משטח משופע ונייר פחם או נייר רגיל לסימון נקודות הנחיתה.
- חוט, משקולת צפופה (משקולת דיג מתאימה) ומד-זווית.
- גיליון אלקטרוני לממוצעים, סטיות תקן וגרפים.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	מדידה, וקטורים ותנועה בממד אחד	יחידות, אי-ודאות, וקטורים; מעבדה A	OpenStax 1.1–1.7, 2.1–2.2
2	מדידה, וקטורים ותנועה בממד אחד	מהירות ותאוצה כנגזרות; תאוצה קבועה; נפילה חופשית	OpenStax 3.1–3.5
3	תנועה בשני ממדים: קליעים ומעגלים	קליעים, תנועה יחסית, תנועה מעגלית; מעבדה B	OpenStax 4.1–4.5
4	חוקי ניוטון, חיכוך ודינמיקה מעגלית	חוקי ניוטון ותרשימי גוף חופשי	OpenStax 5.1–5.7
5	חוקי ניוטון, חיכוך ודינמיקה מעגלית	חיכוך, גופים מחוברים, דינמיקה מעגלית; מעבדות C ו-D	OpenStax 6.1–6.4
6	עבודה, אנרגיה והספק	עבודה, אנרגיה קינטית, הספק	OpenStax 7.1–7.4
7	עבודה, אנרגיה והספק	אנרגיה פוטנציאלית ושימור אנרגיה; מעבדה E	OpenStax 8.1–8.5
8	תנע, התנגשויות וטילים	תנע, מתקף, התנגשויות, מרכז מסה, טילים; מעבדה F; תרגול לבחינת אמצע	OpenStax 9.1–9.7
9	סיבוב, מומנט כוח ותנע זוויתי	קינמטיקה סיבובית, מומנט התמד	OpenStax 10.1–10.5
10	סיבוב, מומנט כוח ותנע זוויתי	מומנט כוח, גלגול, תנע זוויתי; מעבדה G	OpenStax 10.6–10.8, 11.1–11.3
11	כבידה ומסלולים	חוק הכבידה של ניוטון, g בגובה, לוויינים	OpenStax 13.1–13.4
12	כבידה ומסלולים	חוקי קפלר, מהירות מילוט, מעברי מסלול	OpenStax 13.5–13.6
13	תנודות ומבוא לזורמים	תנועה הרמונית פשוטה, מטוטלות, ריסון, תהודה; מעבדה H	OpenStax 15.1–15.6
14	תנודות ומבוא לזורמים	זורמים: לחץ, ציפה, רציפות, ברנולי	OpenStax 14.1–14.6
15	חזרה	חזרה וסדרת תרגול מסכמת	כל היחידות

ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

יחידות

מדידה, וקטורים ותנועה בממד אחד

איך פיזיקאים מודדים, איך וקטורים מתארים כיוון, ואיך מיקום, מהירות ותאוצה מקושרים בחשבון אינפיניטסימלי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש ביחידות SI, בספרות משמעותיות ובאי-ודאות מוצהרת לכל ערך מדוד.
- לחבר וקטורים לפי רכיבים ולמצוא גודל וכיוון.
- להגדיר מהירות כ-v = dx/dt ותאוצה כ-a = dv/dt, ולקרוא אותן מגרפים.
- לפתור בעיות של תאוצה קבועה, כולל נפילה חופשית, בעזרת ארבע משוואות הקינמטיקה.

מושגי מפתח

- לכל מדידה יש אי-ודאות. דווחו ערך כהערכה הטובה ביותר ± אי-ודאות, עם יחידות, ועגלו את אי-הוודאות לספרה משמעותית אחת או שתיים.
- לווקטור יש גודל וכיוון. חברו וקטורים על ידי חיבור רכיבי x ו-y שלהם, אף פעם לא את הגדלים.
- מהירות היא השיפוע של גרף מיקום–זמן; תאוצה היא השיפוע של גרף מהירות–זמן. השטח מתחת לגרף מהירות–זמן הוא ההעתק.
- בתאוצה קבועה, ארבע משוואות הקינמטיקה נובעות מאינטגרציה כפולה של a = קבוע.
- ליד פני כדור הארץ, כל גוף בנפילה חופשית (בלי התנגדות אוויר) מואץ כלפי מטה ב-g ≈ 9.81 m/s², ללא תלות במסתו.

משוואות מפתח

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}$$

`v=dx/dt, a=dv/dt`

מהירות ותאוצה כנגזרות

$$v = v_0 + at$$

`v=v_0+at`

מהירות אחרי זמן t בתאוצה קבועה

$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2} a t^2$$

`x=x_0+v_0t+12at^2`

מיקום אחרי זמן t בתאוצה קבועה

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

`v^2=v_0^2+2a(x-x_0)`

$$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(A_y / A_x)$$

| A|=_x^2+A_y^2, θ=^-1(A_y/A_x)

גודל וכיוון מתוך הרכיבים

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 מכונית יוצאת ממנוחה ומאיצה בקצב קבוע של 3.0 m/s² במשך 8.0 s. מה מהירותה, ואיזה מרחק עברה?

1. נתון: $v_0 = 0$, $a = 3.0\ \text{m/s}^2$, $t = 8.0\ \text{s}$.
2. $v = v_0 + at = 0 + 3.0 \times 8.0 = 24\ \text{m/s}$.
3. $x = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 = 0 + \tfrac{1}{2} \times 3.0 \times 8.0^2 = 96\ \text{m}$.

תשובה: 24 m/s (86 km/h) אחרי 96 m.

דוגמה 1.2 כדור נזרק אנכית כלפי מעלה במהירות 15 m/s. כמה זמן לוקח לו להגיע לשיא, ולאיזה גובה הוא מגיע?

1. בשיא, $v = 0$. נבחר למעלה כחיובי, ולכן $a = -9.81\ \text{m/s}^2$.
2. זמן: $0 = 15 - 9.81t$, ולכן $t = 15 \div 9.81 = 1.53\ \text{s}$.
3. גובה: $h \times 9.81 \times 2 = 15^2 - 0$, ולכן $h = 225 \div 19.62 = 11.5\ \text{m}$.

תשובה: 1.53 s עד השיא, 11.5 m מעל נקודת השחרור.

דוגמה 1.3 מטיילת הולכת 3.0 km מזרחה ואז 4.0 km צפונה. מהו ההעתק שלה?

1. רכיבים: $x = 3.0\ \text{km}$, $y = 4.0\ \text{km}$.
2. גודל: $\sqrt{(3.0^2 + 4.0^2)} = \sqrt{25} = 5.0\ \text{km}$.
3. כיוון: $\tan^{-1}(4.0/3.0) = 53.1°$ צפונית למזרח.

תשובה: 5.0 km בזווית 53.1° צפונית למזרח. היא הלכה 7.0 km, אבל ההעתק שלה הוא 5.0 km.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מכונית הנוסעת ב-27 m/s בולמת בקצב קבוע של 6.0 m/s². איזה מרחק היא עוברת עד שהיא נעצרת, וכמה זמן זה לוקח?

מרחק: $d \times 6.0 \times 2 - 27^2 = 0$, ולכן $d = 729 \div 12 = 60.8\ \text{m}$. זמן: $t = 27 \div 6.0 = 4.5\ \text{s}$.

2. אבן מופלת ממנוחה מגשר בגובה 20 m. בהזנחת התנגדות האוויר, כמה זמן עד שהיא פוגעת במים ומה מהירותה?

t = √(2h/g) = √(40 ÷ 9.81) = 2.02 s. v = gt = 9.81 × 2.02 = 19.8 m/s.

3. מיקומו של רחפן הוא x(t) = 2.0t³ − 3.0t (מטרים, שניות). מצאו את מהירותו ותאוצתו ב-t = 2.0 s.

v = dx/dt = 6.0t² − 3.0 = 6.0 × 4 − 3.0 = 21 m/s. a = dv/dt = 12t = 24 m/s².

4. מהירות במסלול נמוך סביב כדור הארץ היא בערך 7.8 km/s. המירו אותה ל-km/h.

7.8 km/s × 3,600 s/h = 28,080 km/h, בערך 28,000 km/h.

5. לוח סולארי במידות 2.50 ± 0.02 m על 1.20 ± 0.01 m. מצאו את שטחו ואת אי-הוודאות.

A = 2.50 × 1.20 = 3.00 m². אי-ודאויות יחסיות: 0.02/2.50 = 0.8% ו-0.01/1.20 = 0.83%. שלבו בריבועים: √(0.8² + 0.83²) = 1.16%. ΔA = 0.0116 × 3.00 = 0.035 m². A = 3.00 ± 0.03 m².

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: אם המהירות אפס, גם התאוצה חייבת להיות אפס.

בפועל: בשיא מעופו לכדור שנזרק יש v = 0 אבל a = −9.81 m/s². מהירותו עדיין משתנה.

מיתוס: גופים כבדים יותר נופלים מהר יותר.

בפועל: בלי התנגדות אוויר כל הגופים נופלים באותה תאוצה g. התנגדות האוויר, לא המשקל, היא שגורמת לנוצה ליפול לאט.

מיתוס: מרחק והעתק הם אותו דבר.

בפועל: העתק הוא וקטור מההתחלה לסוף. הקפה אחת של מסלול ריצה נותנת מרחק של 400 m והעתק אפס.

כרטיסיות

העתק

שינוי מיקום, וקטור: Δx = x_final − x_initial.

מהירות

קצב השינוי של המיקום, v = dx/dt (m/s).

תאוצה

קצב השינוי של המהירות, a = dv/dt (m/s²).

נפילה חופשית

תנועה תחת כבידה בלבד; a = g ≈ 9.81 m/s² כלפי מטה.

אי-ודאות

הטווח שבו כנראה נמצא הערך האמיתי, מדווח כ-± עם יחידות.

רכיבי וקטור

A_x = A cos θ, A_y = A sin θ.

בוחן לבדיקה עצמית

1. השיפוע של גרף מהירות–זמן נותן את…

המיקום

ההעתק

התאוצה

הטלטלה (jerk)

התאוצה. $a = dv/dt$, השיפוע של $v(t)$. השטח מתחת ל-$v(t)$ הוא ההעתק.

2. כדור שנזרק כלפי מעלה נמצא בדיוק בשיא מסלולו. מה נכון?

$v = 0$ ו- $a = 0$

$v = 0$ ו- $a = -9.81\ m/s^2$

מקסימלית v

מכוונת כלפי מעלה a

$v = 0$ ו-$a = -9.81\ m/s^2$. הכבידה מושכת כלפי מטה כל הזמן, ולכן $a = -g$ גם כאשר $v = 0$.

3. מחברים וקטורים של 3 N מזרחה ו-4 N צפונה. השקול הוא…

7 N

1 N

5 N

12 N

5 N. רכיבים מאונכים: $\sqrt{(3^2 + 4^2)} = 5$ N.

4. אם $x(t) = 5t^2$, המהירות ב-$t = 3$ s היא…

15 m/s

30 m/s

45 m/s

10 m/s

.30 m/s. v = dx/dt = 10t = 30 m/s

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לווייני תצפית על כדור הארץ מועילים רק אם יודעים בדיוק היכן היו כשכל תמונה צולמה. המיקומים שלהם מתקבלים מאינטגרציה של מהירות ותאוצה לאורך זמן, אותו חשבון כמו ביחידה הזו, עם בדיקה מול GPS.

Landsat 9 מקיף את כדור הארץ בגובה 705 km. ידיעת מיקומו ברמת מטרים מאפשרת למדענים להשוות תמונות שצולמו בהפרש של שנים ולמדוד אובדן יערות, נסיגת קרחונים ובריאות גידולים, וכך לעזור לנהל קרקעות ולהגן על בתי גידול.

אי-הוודאות חשובה לא פחות: שינוי מדוד נחשב רק אם הוא גדול מאי-הוודאות של המדידה.

ב־Saving Planets: Landsat 9 · מדריך פיזיקה

מקורות: נאס"א: Landsat 9 (באנגלית) (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/) · JCGM: מדריך לביטוי אי-ודאות (באנגלית) (https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 3.1 Position, Displacement and Average Velocity (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-1-position-displacement-and-average-velocity): פרק מספר חינמי עם דוגמאות פתורות.
- OpenStax University Physics 1, 3.4 Motion with Constant Acceleration (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-4-motion-with-constant-acceleration): גזירות ובעיות לתרגול.
- MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics (באנגלית) (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/): סרטוני הרצאות, סיכומים ודפי תרגילים חינמיים של MIT לכל הקורס.
- PhET: The Moving Man (https://phet.colorado.edu/en/simulations/moving-man): קשרו בין גרפי מיקום, מהירות ותאוצה.
- PhET: Vector Addition (https://phet.colorado.edu/en/simulations/vector-addition): חברו וקטורים לפי רכיבים.

צפו בהרצאה

Vectors in Multiple Dimensions (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-2) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

תנועה בשני ממדים: קליעים ומעגלים

לפצל תנועה לחלקים אופקי ואנכי בלתי תלויים, ואז להוסיף תנועה מעגלית, המפתח לכל מסלול.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לטפל בנפרד בתנועה האופקית והאנכית של קליע ולמצוא זמן טיסה, טווח וגובה מרבי.
- למצוא מהירות יחסית בחיבור וקטורי.
- לחשב תאוצה צנטריפטלית ולהסביר מדוע היא מכוונת למרכז.

מושגי מפתח

- בלי התנגדות אוויר, לקליע יש מהירות אופקית קבועה ותאוצה קבועה g כלפי מטה. שני הכיוונים בלתי תלויים ומשותף להם רק הזמן.
- על קרקע מישורית הטווח הוא R = v₀² sin 2θ / g, הגדול ביותר ב-45°.
- גוף שנע במעגל במהירות קבועה בגודלה נמצא בתאוצה, כי כיוונו משתנה. התאוצה a = v²/r מכוונת למרכז.
- מהירויות מתחברות כווקטורים: מהירות סירה ביחס לחוף היא מהירותה ביחס למים ועוד מהירות המים.

משוואות מפתח

$$x = v_0 \cos\theta \, t, \quad y = v_0 \sin\theta \, t - \tfrac{1}{2} g t^2$$

x=v_0θ t, y=v_0θ t-12gt^2

מיקום קליע

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

R=(v_0^22θ)/(g)

טווח על קרקע מישורית

$$H = \frac{(v_0 \sin\theta)^2}{2g}$$

H=((v_0θ)^2)/(2g)

גובה מרבי

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

a_c=(v^2)/(r)=ω^2r

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 כדור משוגר ב-20 m/s בזווית 30° מעל קרקע מישורית. מצאו זמן טיסה, טווח וגובה מרבי.

1. רכיבים: $v_x = 20\cos 30° = 17.3$ m/s; $v_y = 20\sin 30° = 10.0$ m/s.
2. זמן טיסה: $t = 2v_y/g = 20.0 \div 9.81 = 2.04$ s.
3. טווח: $R = v_x t = 17.3 \times 2.04 = 35.3$ m.
4. גובה: $H = v_y^2/2g = 100 \div 19.62 = 5.10$ m.

תשובה: 2.04 s, 35.3 m, 5.10 m.

דוגמה 2.2 חבילה נזרקת אופקית ב-12 m/s מצוק בגובה 45 m. היכן היא נוחתת?

1. אנכי: $45 = \tfrac{1}{2} \times 9.81 \times t^2$, ולכן $t = \sqrt{(90 \div 9.81)} = 3.03$ s.
2. אופקי: $x = 12 \times 3.03 = 36.3$ m.

תשובה: במרחק 36.3 m מבסיס הצוק, אחרי 3.03 s.

דוגמה 2.3 לוויין מקיף את כדור הארץ בגובה 420 km במהירות 7.66 km/s. מהי התאוצה הצנטריפטלית שלו? (רדיוס כדור הארץ 6,371 km.)

1. רדיוס המסלול $r = 6{,}371 + 420 = 6{,}791$ km $= 6.791 \times 10^6$ m.
2. $a = v^2/r = (7{,}660)^2 \div 6.791 \times 10^6 = 8.64$ m/s².

תשובה: 8.64 m/s², בערך 88% מ-g על פני הקרקע. התאוצה הזו היא הכבידה עצמה: הלוויין נמצא בנפילה חופשית סביב כדור הארץ.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. באיזו זווית קליע מגיע הכי רחוק על קרקע מישורית, ועד כמה רחוק יגיע אם ישוגר ב-20 m/s?

   45°. $R = v_0^2/g = 400 \div 9.81 = 40.8$ m.

2. סירה מכוונת ישר לרוחב נהר במהירות 4.0 m/s ביחס למים. הזרם זורם ב-3.0 m/s. מצאו את מהירות הסירה ביחס לחוף ואת כיוונה.

   $\sqrt{(4.0^2 + 3.0^2)} = 5.0$ m/s, בזווית $\tan^{-1}(3.0/4.0) = 36.9°$ במורד הזרם ביחס לחצייה ישרה.

3. מכונית עוברת עקומה ברדיוס 50 m במהירות 15 m/s. מהי התאוצה הצנטריפטלית שלה?

$a = 15^2 \div 50 = 4.5\ m/s^2$.

4. באיזו מהירות נעה נקודה על קו המשווה בגלל סיבוב כדור הארץ? (רדיוס משווני 6,378 km, סיבוב אחד ב-86,164 s.)

$v = 2\pi r/T = 2\pi \times 6.378 \times 10^6 \div 86{,}164 = 465\ m/s$. טילים ששוגרו מזרחה ליד קו המשווה מקבלים את המהירות הזו בחינם.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: קליע שנורה אופקית פוגע בקרקע מאוחר יותר מאחד שהופל מאותו גובה.

בפועל: התנועה האנכית אינה תלויה בתנועה האופקית. שניהם פוגעים באותו זמן (בהזנחת התנגדות האוויר ועקמומיות כדור הארץ).

מיתוס: גוף שנע במעגל במהירות קבועה אינו מואץ.

בפועל: כיוון המהירות שלו משתנה, ולכן הוא מואץ לכיוון המרכז ב-v^2/r.

מיתוס: בשיא מסלולו של קליע מהירותו אפס.

בפועל: רק הרכיב האנכי הוא אפס. הרכיב האופקי לא משתנה.

כרטיסיות

קליע

גוף שנע תחת כבידה בלבד אחרי השיגור.

טווח

מרחק אופקי על קרקע מישורית: $R = v_0^2 \sin 2\theta / g$.

תאוצה צנטריפטלית

$a = v^2/r$ לכיוון מרכז המעגל.

מהירות זוויתית ω

קצב הסיבוב ב-rad/s; $v = \omega r$.

מהירות יחסית

v_A ביחס לקרקע = v_A ביחס ל-v_B + B ביחס לקרקע.

זמן מחזור T

הזמן להקפה מלאה: $T = 2\pi r/v$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. לקליע ללא התנגדות אוויר, המהירות האופקית…

יורדת בהדרגה

נשארת קבועה

עולה

אפס בשיא

נשארת קבועה. אין כוח אופקי, ולכן אין תאוצה אופקית.

2. שתי זוויות שיגור נותנות אותו טווח על קרקע מישורית. איזה זוג?

30° ו- 60°

20° ו- 45°

10° ו- 50°

45° ו- 90°

30° ו-2θ sin 60°. זהה לזוויות משלימות: sin 120° = sin 60°.

3. אם המהירות במעגל מוכפלת באותו רדיוס, התאוצה הצנטריפטלית...

מוכפל

קטן בחצי

גדל פי ארבעה

נשאר אותו דבר

גדל פי ארבעה. a = v²/r, ולכן פי 4 = 2².

4. כיוון התאוצה הצנטריפטלית הוא...

לאורך המהירות

כלפי חוץ

לכיוון המרכז

ישר למטה

לכיוון המרכז. היא תמיד מכוונת למרכז המעגל.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מסלול הוא קליע שלעולם לא נוחת: אם משגרים אותו הצידה מהר מספיק, הוא נופל לעבר כדור הארץ באותו קצב שבו פני כדור הארץ מתעקמים הרחק ממנו. לכן הלוויין בדוגמה 2.3 מואץ ב-v^2/r בלי להתקרב.

אתרי שיגור מנצלים את סיבוב כדור הארץ. שיגור מזרחה ליד קו המשווה מוסיף עד כ-465 m/s, וחוסך דלק בכל שיגור של לוויין מזג אוויר או אקלים.

חשיבה על קליעים מגינה גם על אנשים על הקרקע: אותן משוואות, בתוספת גרר, משמשות לחיזוי היכן עלולים לנחות שלב טיל או פסולת שחוזרים לאטמוספרה.

ב־Saving Planets: מחשבון תנועת קליע עם גרר · מדריך מסלולים

מקורות: OpenStax University Physics 1, 4.4 Circular Motion (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion) · סוכנות החלל האירופית: פסולת חלל (באנגלית) (https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 4.3 Projectile Motion (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-3-projectile-motion): פרק מספר חינמי עם דוגמאות ובעיות.
- OpenStax University Physics 1, 4.4 Uniform and Nonuniform Circular Motion (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion): תאוצה צנטריפטלית לעומק.
- PhET: Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion): שנו זווית, מהירות והתנגדות אוויר.

צפו בהרצאה

3.4 Projectile Motion (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/3-3/) (באנגלית)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

חוקי ניוטון, חיכוך ודינמיקה מעגלית

כוחות גורמים לתאוצה. תרשימי גוף חופשי ו-ΣF = ma פותרים כמעט כל בעיה בקורס.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לנסח את שלושת חוקי ניוטון ולזהות זוגות פעולה–תגובה.
- לצייר תרשים גוף חופשי ולהחיל ΣF = ma לאורך צירים נבחרים.
- לפתור בעיות של מישור משופע, גלגלות וגופים מחוברים עם חיכוך סטטי וקינטי.
- להחיל את החוק השני של ניוטון על תנועה מעגלית.

מושגי מפתח

- החוק הראשון: גוף שומר על מהירותו כל עוד לא פועל עליו כוח שקול.
- החוק השני: ΣF = ma. הכוח השקול, ולא כוח בודד, קובע את התאוצה.
- החוק השלישי: כוחות באים בזוגות, שווים בגודלם והפוכים בכיוונם, הפועלים על גופים שונים.
- חיכוך סטטי יכול להיות כל ערך עד μsN; חיכוך קינטי הוא μkN ומתנגד להחלקה.
- בתנועה מעגלית, הכוח השקול פנימה הוא m v²/r. הוא מסופק על ידי כוחות אמיתיים כמו מתיחות, חיכוך, כוח נורמלי או כבידה.

משוואות מפתח

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

```
F=m a
```

החוק השני של ניוטון

$$W = mg$$

```
W=mg
```

משקל

$$f_s \le \mu_s N, \quad f_k = \mu_k N$$

```
f_sμ_sN, f_k=μ_kN
```

חיכוך סטטי וקינטי

$$\sum F_r = \frac{mv^2}{r}$$

```
F_r=(mv^2)/(r)
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 מכונית במסה 1,500 kg מאיצה מ-0 ל-25 m/s ב-10 s. איזה כוח שקול פועל עליה?

1. $a = \Delta v / \Delta t = 25 \div 10 = 2.5\ \text{m/s}^2$.
2. $\Sigma F = ma = 1{,}500 \times 2.5 = 3{,}750\ \text{N}$.

תשובה: 3,750 N קדימה.

דוגמה 3.2 ארגז במסה 5.0 kg מחליק במורד משטח בשיפוע 30° עם $\mu_k = 0.20$. מצאו את תאוצתו.

1. צירים לאורך המשטח ובניצב לו.
2. בניצב: $N = mg\cos 30°$.
3. לאורך: $ma = mg\sin 30° - \mu_k mg\cos 30°$.
4. $a = 9.81 \times (0.500 - 0.20 \times 0.866) = 3.21\ \text{m/s}^2$. המסה מצטמצמת.

תשובה: 3.21 m/s² במורד המשטח.

דוגמה 3.3 במכונת אטווד תלויות מסות של 3.0 kg ו-2.0 kg על גלגלת קלה וחסרת חיכוך. מצאו את התאוצה והמתיחות.

1. הצד הכבד יורד. עבור 3.0 kg: $3.0g - T = 3.0a$. עבור 2.0 kg: $T - 2.0g = 2.0a$.
2. מחברים: $1.0g = 5.0a$, ולכן $a = 9.81 \div 5 = 1.96\ \text{m/s}^2$.
3. $T = 2.0 \times (9.81 + 1.96) = 23.5\ \text{N}$.

תשובה: $a = 1.96\ \text{m/s}^2$, $T = 23.5\ \text{N}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אדם במסה 70 kg עומד על משקל במעלית שמאיצה כלפי מעלה ב-1.5 m/s². מה מראה המשקל?

   $N - mg = ma$, ולכן $N = 70 \times (9.81 + 1.5) = 792\ \text{N}$ (הוא מראה כאילו המסה היא 80.7 kg).

2. ארגז במסה 40 kg מונח על רצפה עם $\mu_s = 0.50$. איזו דחיפה אופקית בדיוק מתחילה להזיז אותו?

   $F = \mu_s mg = 0.50 \times 40 \times 9.81 = 196\ \text{N}$.

3. לטיל במסה 5.0×10^5 kg יש דחף של 7.6×10^6 N בהמראה. מצאו את התאוצה ההתחלתית שלו.

$a = (T - mg)/m = 7.6 \times 10^6 \div 5.0 \times 10^5 - 9.81 = 15.2 - 9.81 = 5.39\ m/s^2$ כלפי מעלה. יחס הדחף למשקל שלו הוא 1.55.

4. דחיפה של 10 N פועלת על גוש של 2.0 kg שדוחף גוש של 3.0 kg על רצפה חסרת חיכוך. מצאו את התאוצה ואת הכוח בין הגושים.

$a = 10 \div 5.0 = 2.0\ m/s^2$. הכוח על הגוש של 3.0 kg הוא $2.0 \times 3.0 = 6.0$ N.

5. מהי המהירות המרבית של מכונית בעקומה שטוחה ברדיוס 40 m אם $\mu_s = 0.60$?

החיכוך מספק את הכוח פנימה: $\mu_s mg = mv^2/r$, ולכן $v = \sqrt{(\mu_s g r)} = \sqrt{(0.60 \times 9.81 \times 40)} = 15.3$ m/s.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: גוף בתנועה צריך כוח כדי להמשיך לנוע.

בפועל: רק כדי להתגבר על חיכוך או גרר. בחלל, גשושית שטה שנים כשהמנועים כבויים.

מיתוס: פעולה ותגובה מבטלות זו את זו, ולכן שום דבר לא יכול להאיץ.

בפועל: הן פועלות על גופים שונים, ולכן לעולם אינן מתבטלות על גוף אחד.

מיתוס: הכוח הנורמלי תמיד שווה ל-mg.

בפועל: רק על משטח אופקי בלי תאוצה אנכית. על משטח משופע הוא $mg \cos\theta$; במעלית מואצת הוא משתנה.

כרטיסיות

החוק הראשון של ניוטון

המהירות נשארת קבועה כל עוד לא פועל כוח שקול.

החוק השני של ניוטון

$\Sigma F = ma$.

החוק השלישי של ניוטון

כוחות באים בזוגות שווים והפוכים על גופים שונים.

תרשים גוף חופשי

שרטוט של גוף אחד עם כל הכוחות הפועלים עליו.

מקדם חיכוך μ

היחס בין כוח החיכוך לכוח הנורמלי; ללא יחידות.

ניוטון (N)

$1\ N = 1\ kg{\cdot}m/s^2$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. חללית שטה כשמנועיה כבויים הרחק מכל כוכב לכת. המהירות שלה…

יורדת לאט

נשארת קבועה

עולה

יורדת לאפס

נשארת קבועה. אין כוח שקול, ולכן אין תאוצה (החוק הראשון).

2. טיל דוחף גזי פליטה לאחור. מה דוחף את הטיל קדימה?

האוויר שמאחוריו

הקרקע

גזי הפליטה שדוחפים אותו בחזרה

כלום; הוא לא נדחף

גזי הפליטה שדוחפים אותו בחזרה. החוק השלישי: הגז דוחף את הטיל בכוח שווה והפוך. לכן טילים פועלים בריק.

3. על משטח חסר חיכוך בזווית θ, גוש מואץ ב…

g

g cos θ

g sin θ

g tan θ

g sin θ. רק הרכיב של הכבידה לאורך המשטח, mg sin θ, אינו מאוזן.

4. מה מספק את הכוח הצנטריפטלי למכונית שפונה בכביש שטוח?

המנוע

החיכוך הסטטי מהכביש

הכבידה

הכוח הצנטריפוגלי

החיכוך הסטטי מהכביש. החיכוך הסטטי בין הצמיגים לכביש מכוון למרכז הפנייה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

החוק השלישי של ניוטון הוא האופן שבו כל טיל פועל: הוא דוחף פליטה לאחור והפליטה דוחפת אותו קדימה. השיגורים האלה נושאים את הלוויינים שמנטרים מזג אוויר, שריפות, גובה פני הים וגזי חממה.

חיכוך וגרר הם המקום שאליו הולכת חלק גדול מהאנרגיה שלנו. צמיגים ומיסבים עם פחות חיכוך, וכלי רכב אווירודינמיים יותר, דורשים פחות כוח באותה מהירות ולכן פחות דלק או סוללה.

יחס דחף למשקל הוא המספר הראשון שמהנדסים בודקים בכל משגר: מתחת ל-1 הוא לא יכול להמריא.

ב־Saving Planets: מחשבון יחס דחף למשקל · תצפית על כדור הארץ

מקורות: OpenStax University Physics 1, 5.3 Newton’s Second Law (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/5-3-newtons-second-law) · משרד האנרגיה האמריקאי: המשרד לטכנולוגיות רכב (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 5.3 Newton’s Second Law (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/5-3-newtons-second-law): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics 1, 6.2 Friction (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction): חיכוך סטטי וקינטי עם דוגמאות.
- OpenStax University Physics 1, 6.3 Centripetal Force (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-3-centripetal-force): עקומות משופעות ודינמיקה מעגלית.
- PhET: Forces and Motion: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/forces-and-motion-basics): כוח שקול, חיכוך ותאוצה.
- PhET: The Ramp (https://phet.colorado.edu/en/simulations/the-ramp): כוחות על מישור משופע עם חיכוך.

צפו בהרצאה

Newton's Laws of Motion (באנגלית) (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-3)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

עבודה, אנרגיה והספק

אנרגיה היא הנהלת החשבונות שהופכת בעיות כוחות קשות לקלות, והשפה של כל תחנת כוח, סוללה ומנוע.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב עבודה כ-W = ∫F·dx, כולל עבור קפיץ.
- להשתמש במשפט עבודה–אנרגיה ובשימור אנרגיה מכנית.
- להביא בחשבון אנרגיה שאבדה לחיכוך, ולחשב הספק ונצילות.
- להעריך את הספק הרוח בעזרת P = ½ρAv³.

מושגי מפתח

- עבודה היא כוח כפול העתק בכיוון הכוח: W = Fd cos θ לכוח קבוע.
- העבודה השקולה על גוף שווה לשינוי באנרגיה הקינטית שלו.
- כבידה וקפיצים הם כוחות משמרים: אפשר לאגור את העבודה שלהם כאנרגיה פוטנציאלית ולקבל אותה בחזרה.
- חיכוך הופך אנרגיה מכנית לאנרגיה תרמית; האנרגיה הכוללת עדיין נשמרת.
- הספק הוא הקצב שבו נעשית עבודה, בוואט (J/s).

משוואות מפתח

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

W= F· d x

עבודה של כוח

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2, \quad W_{net} = \Delta K$$

K=12mv^2, W_net=Δ K

אנרגיה קינטית ומשפט עבודה–אנרגיה

$$U_g = mgh, \quad U_s = \tfrac{1}{2}kx^2$$

U_g=mgh, U_s=12kx^2

אנרגיה פוטנציאלית כבידתית ואלסטית

$$K_i + U_i = K_f + U_f + E_{th}$$

K_i+U_i=K_f+U_f+E_th

$$P = \frac{dW}{dt} = Fv$$

P=dW/dt=Fv

הספק

$$P_{wind} = \tfrac{1}{2}\rho A v^3$$

P_wind=12ρ Av^3

ההספק שהרוח נושאת דרך שטח A

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 מכונית במסה 1,200 kg הנוסעת ב-20 m/s בולמת בכוח חיכוך קבוע של 6,000 N. איזה מרחק היא עוברת?

1. $K = \tfrac{1}{2} \times 1{,}200 \times 20^2 = 240{,}000$ J.
2. עבודת החיכוך מסלקת את כולה: $6{,}000 \times d = 240{,}000$.
3. $d = 40$ m.

תשובה: 40 m.

דוגמה 4.2 רכבת הרים יוצאת ממנוחה 30 m מעל תחתית שקע. בהזנחת חיכוך, מה מהירותה בתחתית?

1. $mgh = \tfrac{1}{2}mv^2$, ולכן המסה מצטמצמת.
2. $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 30} = 24.3$ m/s.

תשובה: 24.3 m/s, ללא תלות בצורת המסלול.

דוגמה 4.3 לטורבינת רוח יש להבים באורך 50 m. כמה הספק נושאת רוח של 10 m/s דרך השטח שהלהבים סורקים, ומה המרב שטורבינה כלשהי יכולה להפיק?

1. $A = \pi r^2 = \pi \times 50^2 = 7{,}854$ m².
2. $P = \tfrac{1}{2}\rho A v^3 = \tfrac{1}{2} \times 1.225 \times 7{,}854 \times 10^3 = 4.81 \times 10^6$ W.
3. גבול בץ אומר ששום טורבינה לא יכולה ללכוד יותר מ-$16/27$ (59.3%) מזה: $4.81 \text{ MW} \times 0.593 = 2.85$ MW.

תשובה: הרוח נושאת 4.81 MW; לכל היותר אפשר ללכוד 2.85 MW. טורבינות אמיתיות מקבלות פחות.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. קפיץ עם k = 200 N/m דחוס ב-0.10 m משגר כדור במסה 0.050 kg. באיזו מהירות הכדור עוזב?

   אנרגיה אגורה ½kx² = ½ × 200 × 0.01 = 1.0 J. v = √(2 × 1.0 ÷ 0.050) = 6.32 m/s.

2. כוח של 50 N מושך מזחלת 10 m בזווית 30° מעל האופק. כמה עבודה הוא עושה?

   W = Fd cos θ = 50 × 10 × 0.866 = 433 J.

3. כמה הספק נדרש כדי להרים 70 kg לגובה 3.0 m ב-2.0 s?

   P = mgh/t = 70 × 9.81 × 3.0 ÷ 2.0 = 1,030 W.

4. מכונית במסה 1,500 kg בולמת מ-25 m/s עד עצירה. כמה אנרגיה קינטית מוסרת? אם בלימה רגנרטיבית הייתה אוגרת 60% ממנה, כמה זה היה?

   K = ½ × 1,500 × 25² = 468,750 J ≈ 469 kJ. 60% מזה הם 281 kJ.

5. אם מהירות הרוח יורדת מ-10 m/s ל-7 m/s, באיזה חלק יורד הספק הרוח?

   ההספק תלוי ב-v³: (7/10)³ = 0.343, ולכן הוא יורד לכ-34% מהמקור.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: נשיאת ארגז כבד לרוחב חדר במהירות קבועה עושה עליו הרבה עבודה.
בפועל: הכבידה והכוח שלכם כלפי מעלה מאונכים לתנועה, ולכן אינם עושים עבודה על הארגז.

מיתוס: אנרגיה הולכת לאיבוד בגלל חיכוך.
בפועל: היא הופכת לאנרגיה תרמית, לא נהרסת. היא אובדת רק כאנרגיה מכנית שימושית.

מיתוס: טורבינה בקוטר כפול מקבלת הספק כפול.
בפועל: ההספק תלוי בשטח, ולכן הכפלת הקוטר נותנת פי ארבעה הספק.

כרטיסיות

עבודה

W = Fd cos θ; אנרגיה שמועברת על ידי כוח (J).

אנרגיה קינטית

K = ½mv².

אנרגיה פוטנציאלית

אנרגיה אגורה של מיקום: mgh, ½kx².

משפט עבודה–אנרגיה

W_net = ΔK.

הספק	גבול בץ
קצב העברת אנרגיה, $P = dW/dt$ (W).	שום טורבינת רוח לא יכולה ללכוד יותר מ-$16/27 \approx 59.3\%$ מהספק הרוח.

בוחן לבדיקה עצמית

1. אם מהירות מכונית מוכפלת, האנרגיה הקינטית שלה…

מוכפל

משתלשת

גדל פי ארבעה

נשאר אותו דבר

גדל פי ארבעה. $K = \tfrac{1}{2}mv^2$, ולכן $2^2 = 4$.

2. יחידת ה-SI של הספק היא…

ג׳אול

ואט

ניוטון

קילוואט-שעה

ואט. $1\ W = 1\ J/s$. קילוואט-שעה היא אנרגיה.

3. הספק הרוח דרך טורבינה תלוי במהירות הרוח כמו…

v

v^2

v^3

$\sqrt{v}$

v^3. ספיקת מסה $\propto v$ ואנרגיה קינטית לק״ג $\propto v^2$, ולכן $P \propto v^3$.

4. העבודה של חיכוך קינטי על גוש מחליק היא...

חיובי

אפס

שלילי

תלויה רק במסה

שלילי. החיכוך מתנגד לתנועה, ולכן מסלק אנרגיה קינטית.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

טורבינות רוח הופכות את האנרגיה הקינטית של אוויר נע לחשמל. מכיוון שהספק הרוח גדל עם החזקה השלישית של מהירותה ועם ריבוע אורך הלהב, מהנדסים בונים מגדלים גבוהים יותר ולהבים ארוכים יותר, ולכן טורבינות ימיות כה גדולות.

רכבים חשמליים והיברידיים משתמשים בבלימה רגנרטיבית: המנוע פועל כגנרטור והופך חלק מהאנרגיה הקינטית של המכונית לאנרגיה אגורה בסוללה במקום לחום.

הנהלת חשבונות של אנרגיה היא הדרך שבה מהנדסים משווים בהגינות אפשרויות של אנרגיה נקייה, בג'אולים ובוואטים ולא בהבטחות.

ב־Saving Planets: מחשבון הספק רוטור בריחוף · מחשבונים

מקורות: משרד האנרגיה האמריקאי: איך פועלות טורבינות רוח? (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · משרד האנרגיה האמריקאי: יסודות הרכב החשמלי (באנגלית) (https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-ev)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 7.3 Work–Energy Theorem (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/7-3-work-energy-theorem): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics 1, 8.3 Conservation of Energy (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-3-conservation-of-energy): דיאגרמות אנרגיה ודוגמאות.
- PhET: Energy Skate Park (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-skate-park): צפו באנרגיה קינטית, פוטנציאלית ותרמית מתחלפות.

צפו בהרצאה

Work-Energy Theorem and Law of Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-5) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה

זו ואינו נתמך על ידה.

- [ ] **סיימתי את היחידה הזו**

תנע, התנגשויות וטילים

התנע נשמר בכל התנגשות ופיצוץ. הוא מסביר טילים, ואיך חללית הזיזה אסטרואיד.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לקשר מתקף לשינוי בתנע, J = ∫F dt = Δp.
- להחיל שימור תנע על התנגשויות אלסטיות ולא-אלסטיות בממד אחד.
- למצוא את מרכז המסה של מערכת.
- להשתמש במשוואת הטיל Δv = v_e ln(m_0/m_f).

מושגי מפתח

- התנע p = mv הוא וקטור. בהיעדר כוח חיצוני שקול, התנע הכולל של מערכת נשאר קבוע.
- בהתנגשות אלסטית גם האנרגיה הקינטית נשמרת; בלא-אלסטית חלק ממנה הופך לחום, קול ועיוות. בהתנגשות פלסטית לחלוטין הגופים נדבקים.
- זמן התנגשות ארוך יותר פירושו כוח ממוצע קטן יותר לאותו שינוי בתנע. כך פועלים כריות אוויר ואזורי קריסה.
- טיל צובר מהירות על ידי השלכת מסה לאחור. שינוי המהירות שלו תלוי במהירות הפליטה וביחס בין המסה ההתחלתית לסופית, לא בקצב שריפת הדלק.

משוואות מפתח

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad \vec{J} = \int \vec{F}\,dt = \Delta\vec{p}$$

```
p=m v, J= F dt=Δ p
```

תנע ומתקף

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

```
m_1v_1i+m_2v_2i=m_1v_1f+m_2v_2f
```

שימור תנע (1D)

$$x_{cm} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

```
x_cm=( m_ix_i)/( m_i)
```

מרכז מסה

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=v_e(m_0)/(m_f)`

משוואת הטיל של ציולקובסקי

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 כדור בייסבול במסה 0.145 kg מגיע ב-40 m/s ועוזב את המחבט ב-50 m/s בכיוון ההפוך. המגע נמשך 1.0 ms. מצאו את המתקף ואת הכוח הממוצע.

1. נבחר את כיוון היציאה כחיובי: $\Delta p = 0.145 \times (50 - (-40)) = 0.145 \times 90 = 13.1$ kg·m/s.
2. $F = \Delta p / \Delta t = 13.05 \div 0.0010 = 13{,}000$ N.

תשובה: מתקף 13.1 kg·m/s; כוח ממוצע בערך 13,000 N.

דוגמה 5.2 מכונית במסה 1,000 kg ב-20 m/s מתנגשת מאחור במכונית עומדת במסה 1,500 kg והן נצמדות. מצאו את מהירותן ואת האנרגיה הקינטית שאבדה.

1. תנע: $v \times 2{,}500 = 1{,}000 \times 20 = 2{,}500$, ולכן $v = 8.0$ m/s.
2. K לפני: $\tfrac{1}{2} \times 1{,}000 \times 20^2 = 200$ kJ. K אחרי: $\tfrac{1}{2} \times 2{,}500 \times 8.0^2 = 80$ kJ.
3. אבד: 120 kJ, 60% מהמקור.

תשובה: 8.0 m/s; 120 kJ הפכו לעיוות, חום וקול.

דוגמה 5.3 לשלב טיל יש מהירות פליטה של 3,000 m/s ויחס מסות $m_0/m_f = 5$. איזה שינוי מהירות הוא יכול לתת, בהזנחת כבידה וגרר?

1. $\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f) = 3{,}000 \times \ln 5$.
2. $\ln 5 = 1.609$, ולכן $\Delta v = 4{,}830$ m/s.

תשובה: בערך 4.83 km/s. הגעה למסלול בכ-7.8 km/s דורשת יותר, ולכן טילים משתמשים בשלבים.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. עגלה במסה 2.0 kg ב-3.0 m/s פוגעת בעגלה במסה 1.0 kg במנוחה בהתנגשות אלסטית לחלוטין. מצאו את שתי המהירויות הסופיות.

$v_1 = (m_1 - m_2)/(m_1 + m_2) \times 3.0 = 1.0$ m/s; $v_2 = 2m_1/(m_1 + m_2) \times 3.0 = 4.0$ m/s. בדיקה: K לפני 9.0 J, אחרי $1.0 + 8.0 = 9.0$ J.

2. רובה במסה 4.0 kg יורה קליע במסה 0.010 kg ב-400 m/s. מצאו את מהירות הרתע של הרובה.

4.0v − 400 × 0.010 = 0, ולכן v = 1.0 m/s לאחור.

3. מסה של 2.0 kg נמצאת ב-x = 0 ומסה של 3.0 kg ב-x = 5.0 m. היכן מרכז המסה?

x_cm = (2.0 × 0 + 3.0 × 5.0) ÷ 5.0 = 3.0 m.

4. שלב עם מהירות פליטה של 3.5 km/s צריך לספק לבדו Δv = 9.0 km/s. איזה יחס מסות נדרש?

$m_0/m_f = e^{(9.0/3.5)} = e^{2.571} = 13.1$. רק כ-7.6% מהמסה ההתחלתית יכולים להיות משהו שאינו דלק.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: טיל צריך אוויר כדי להידחף נגדו.

בפועל: הוא דוחף את הפליטה של עצמו. טילים פועלים הכי טוב בריק.

מיתוס: בהתנגשות לא-אלסטית התנע אובד.

בפועל: התנע נשמר בכל התנגשות ללא כוח חיצוני. מה שאובד הוא אנרגיה קינטית.

מיתוס: כוח גדול יותר תמיד פירושו שינוי גדול יותר בתנע.

בפועל: מתקף הוא כוח × זמן. כוח קטן לאורך זמן רב יכול לשנות תנע כמו כוח גדול לזמן קצר.

כרטיסיות

תנע

$p = mv$ (kg·m/s), וקטור.

מתקף

$J = \int F\,dt = \Delta p$.

התנגשות אלסטית

גם התנע וגם האנרגיה הקינטית נשמרים.

התנגשות פלסטית לחלוטין

הגופים נדבקים; אובדן מרבי של אנרגיה קינטית.

מרכז מסה

המיקום הממוצע של מערכת משוקלל לפי מסה.

משוואת הטיל

$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. מה תמיד נשמר בהתנגשות ללא כוח חיצוני?

אנרגיה קינטית

תנע

המהירות

גם אנרגיה קינטית וגם תנע

תנע. תנע תמיד; אנרגיה קינטית רק בהתנגשויות אלסטיות.

2. כריות אוויר מפחיתות פציעות בעיקר על ידי...

הקטנת השינוי בתנע

הארכת זמן העצירה

הגדלת הכוח

הקטנת המסה שלכם

הארכת זמן העצירה. אותו Δp לאורך זמן ארוך יותר פירושו כוח ממוצע קטן יותר.

3. במשוואת הטיל, הכפלת מהירות הפליטה...

מכפילה את Δv

מכפילה פי ארבעה את Δv

מחציתה את Δv

לא משנה את Δv

מכפילה את Δv. Δv יחסי ישר ל-v_e.

4. שני כדורי חימר בעלי מסה ומהירות שוות מתנגשים חזיתית ונדבקים. לאחר מכן הם...

נעים במהירות המקורית

במנוחה

נעים בחצי מהירות

ניתזים זה מזה

במנוחה. התנע הכולל היה אפס, ולכן הוא נשאר אפס.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ב-26 בספטמבר 2022 התנגשה החללית DART של נאס"א בכוונה בירח האסטרואידי דימורפוס. התנע שלה קיצר את מסלולו של דימורפוס סביב דידימוס, שאורכו 11 שעות ו-55 דקות, בכ-33 דקות, הרבה יותר מהמינימום של 73 שניות להצלחה, כי פסולת שניתזה מהאסטרואיד הוסיפה דחיפה נוספת.

זה היה הניסוי הראשון בהזזת אסטרואיד בפגיעה קינטית, דרך להגן על אנשים ועל כל יצור חי אחר על כדור הארץ מפגיעה עתידית. אף אחד משני האסטרואידים מעולם לא היווה איום על כדור הארץ.

משוואת הטיל מניעה גם תכנון שיגורים נקיים יותר: מהירות פליטה גבוהה יותר פירושה פחות דלק לאותה משימה.

ב־Saving Planets: הגנה פלנטרית · מחשבון delta-v

מקורות: נאס"א: משימת DART (באנגלית) (https://science.nasa.gov/mission/dart/) · נאס"א: מסלולו וצורתו של האסטרואיד השתנו אחרי פגיעת DART (באנגלית) (https://www.nasa.gov/missions/dart/nasa-study-asteroids-orbit-shape-changed-after-dart-impact/)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 9.3 Conservation of Linear Momentum (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physic s-volume-1/pages/9-3-conservation-of-linear-momentum): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics 1, 9.4 Types of Collisions (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/ 9-4-types-of-collisions): התנגשויות אלסטיות ולא-אלסטיות.
- OpenStax University Physics 1, 9.7 Rocket Propulsion (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9- 7-rocket-propulsion): גזירת משוואת הטיל.
- PhET: Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab): התנגשויות אלסטיות ולא-אלסטיות ב-1D וב-2D.

צפו בהרצאה

19.2 Rocket Problem 2 - Momentum Diagrams (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/19-1/) (באנגלית)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

סיבוב, מומנט כוח ותנע זוויתי

כל מה שמסתובב, מגלגלים וטורבינות ועד גלגלי תגובה שמכוונים לוויינים, פועל לפי גרסאות סיבוביות של חוקי ניוטון.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש במיקום, מהירות ותאוצה זוויתיים, ולקשר אותם לתנועה קווית בעזרת v = ωr.
- לחשב מומנטי התמד ולהשתמש ב-τ = Iα.
- לפתור בעיות גלגול בעזרת שימור אנרגיה.
- להחיל שימור תנע זוויתי.

מושגי מפתח

- גדלים סיבוביים מקבילים לגדלים קוויים: θ ↔ x, ω ↔ v, α ↔ a, I ↔ m, τ ↔ F, L ↔ p.
- מומנט ההתמד תלוי באופן פיזור המסה סביב הציר. מסה רחוקה מהציר קשה יותר לסובב.
- מומנט כוח הוא כוח כפול זרוע המנוף שלו: τ = rF sin θ.
- לגוף מתגלגל יש אנרגיה קינטית קווית וסיבובית, ולכן הוא מתגלגל במדרון לאט יותר מגוש שמחליק בלי חיכוך.
- בהיעדר מומנט חיצוני, התנע הזוויתי L = Iω נשאר קבוע.

משוואות מפתח

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}, \quad v = \omega r$$

```
ω=(dθ)/(dt), α=(dω)/(dt), v=ω r
```

מהירות ותאוצה זוויתיות

$$I = \sum m_i r_i^2, \quad I_{disk} = \tfrac{1}{2} M R^2$$

```
I= m_ir_i^2, I_disk=12MR^2
```

מומנט התמד

$$\tau = rF\sin\theta = I\alpha$$

```
τ=rFθ=Iα
```

מומנט כוח והחוק השני של ניוטון לסיבוב

$$K_{rot} = \tfrac{1}{2} I \omega^2$$

```
K_rot=12Iω^2
```

$$L = I\omega, \quad \tau_{net} = \frac{dL}{dt}$$

L=Iω, τ_net=dL/dt

תנע זוויתי

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 רוטור של טורבינת רוח מאיץ ממנוחה ל-1.5 rad/s ב-30 s בקצב קבוע. מצאו את α ואת מספר הסיבובים.

1. $\alpha = 1.5 \div 30 = 0.050\ \text{rad/s}^2$.
2. $\theta = \tfrac{1}{2}\alpha t^2 = \tfrac{1}{2} \times 0.050 \times 30^2 = 22.5\ \text{rad}$.
3. סיבובים: $22.5 \div 2\pi = 3.58$.

תשובה: $\alpha = 0.050\ \text{rad/s}^2$; 3.58 סיבובים.

דוגמה 6.2 כדור מלא מתגלגל בלי להחליק במדרון מגובה 2.0 m. מה מהירותו בתחתית?

1. לכדור מלא, $I = (2/5)mr^2$ ו-$\omega = v/r$.
2. $mgh = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}(2/5)mr^2(v/r)^2 = (7/10)mv^2$.
3. $v = \sqrt{(10gh/7)} = \sqrt{(10 \times 9.81 \times 2.0 \div 7)} = 5.29\ \text{m/s}$.

תשובה: 5.29 m/s, פחות מ-6.26 m/s של גוש שמחליק בלי חיכוך.

דוגמה 6.3 מחליקה המסתובבת ב-2.0 סיבובים לשנייה מקרבת את זרועותיה ומקטינה את מומנט ההתמד מ-4.0 ל-1.6 kg·m². מצאו את קצב הסיבוב החדש.

1. L נשמר: $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$.
2. $\omega_2 = 4.0 \times 2.0 \div 1.6 = 5.0$ סיבובים לשנייה.
3. האנרגיה הקינטית שלה גדלה פי 2.5; התוספת מגיעה מהעבודה שעושות זרועותיה.

תשובה: 5.0 סיבובים לשנייה.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. כוח של 50 N מופעל בזווית ישרה בקצה מפתח ברגים באורך 0.30 m. מצאו את מומנט הכוח.

.τ = 0.30 × 50 = 15 N·m

2. ילד במסה 30 kg יושב 2.0 m מציר של נדנדה. היכן צריך לשבת ילד במסה 40 kg כדי לאזן?

x × 40 = 2.0 × 30, ולכן x = 1.5 m בצד השני.

3. גלגל תנופה מפלדה מלאה הוא דיסקה במסה 100 kg וברדיוס 0.50 m המסתובבת ב-300 rad/s. כמה אנרגיה הוא אוגר?

I = ½ × 100 × 0.50² = 12.5 kg·m². K = ½ × 12.5 × 300² = 562,500 J ≈ 0.563 MJ (0.156 kWh).

4. ללוויין יש I = 500 kg·m² סביב ציר אחד. גלגל תגובה על הסיפון עם I = 0.10 kg·m² מאיץ ממנוחה ל-600 rad/s. באיזו מהירות מסתובב הלוויין?

ה-L הכולל נשאר אפס: ω × 500 = 600 × 0.10, ולכן ω = 0.12 rad/s בכיוון ההפוך.

5. מומנט של 2.0 N·m פועל על דיסקה עם I = 0.50 kg·m². מצאו את α.

α = τ/I = 4.0 rad/s².

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מומנט הכוח תלוי רק בגודל הכוח.

בפועל: הוא תלוי גם במקום ובזווית הדחיפה. דחיפת דלת ליד הצירים בקושי מסובבת אותה.

מיתוס: כל הגופים העגולים מתגלגלים במדרון באותה מהירות.

בפועל: כדור מלא מנצח גליל מלא, שמנצח טבעת. פחות מהאנרגיה שלהם הולך לסיבוב.

מיתוס: קירוב הזרועות יוצר תנע זוויתי.

בפועל: התנע הזוויתי נשאר זהה; קצב הסיבוב עולה כי I קטן.

כרטיסיות

מהירות זוויתית ω

קצב סיבוב, rad/s.

מומנט התמד I

התנגדות לתאוצה זוויתית; I = Σmr².

מומנט כוח τ

השפעת הסיבוב של כוח; τ = rF sin θ (N·m).

τ = Iα

החוק השני של ניוטון לסיבוב.

תנע זוויתי L

L = Iω; נשמר בהיעדר מומנט חיצוני.

גלגול ללא החלקה

v = ωr בנקודת המגע; K כולל = ½mv² + ½Iω².

בוחן לבדיקה עצמית

1. מי מגיע ראשון לתחתית משטח משופע, כשהם מתגלגלים ממנוחה?

טבעת

דיסקה מלאה

תיקו

הכבד יותר

דיסקה מלאה. לדיסקה יש $I/(mr^2)$ קטן יותר, ולכן יותר מהאנרגיה שלה הולכת לתנועה קדימה.

2. המקבילה הסיבובית של מסה היא…

מומנט הכוח

התנע הזוויתי

מומנט ההתמד

המהירות הזוויתית

מומנט ההתמד. I מתנגד לתאוצה זוויתית כמו ש-m מתנגדת לתאוצה קווית.

3. לוויין מסתובב בלי להפעיל דחפים על ידי סיבוב גלגל בתוכו. זה מנצל…

שימור אנרגיה

שימור תנע זוויתי

רק החוק הראשון של ניוטון

כבידה

שימור תנע זוויתי. סיבוב הגלגל לכיוון אחד מסובב את הלוויין לכיוון השני; ה-L הכולל נשאר קבוע.

4. הכפלת הרדיוס של דיסקה באותה מסה מכפילה את I פי…

2

4

½

8

.2² = 4 ,ולכן 4. I = ½MR²

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

גלגלי תגובה הם דרך נפוצה לכוון את המכשירים של חללית: סיבוב גלגל לכיוון אחד מסובב את החללית לכיוון השני, כמו בתרגיל, בלי להשתמש בדלק.

טורבינות רוח הן מכונות סיבוביות. מומנט הרוח על הלהבים מסובב את הרוטור, והגנרטור הופך את הסיבוב לחשמל.

גלגלי תנופה אוגרים אנרגיה כסיבוב ויכולים לייצב את הרשת; הפיזיקה היא בדיוק K = ½Iω².

ב־GRACE-FO :Saving Planets · תצפית על כדור הארץ

מקורות: OpenStax University Physics 1, 11.3 Conservation of Angular Momentum (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-3-conservation-of-angular-momentum) · משרד האנרגיה האמריקאי: איך פועלות טורבינות רוח? (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 10.4 Moment of Inertia and Rotational Kinetic Energy (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-4-moment-of-inertia-and-rotational-kinetic-energy): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics 1, 10.6 Torque (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-6-torque): מומנט כוח עם דוגמאות.
- PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act): מומנט ואיזון על נדנדה.

צפו בהרצאה

34.1 Torque Causes Angular Momentum to Change - Point Particle (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/34/) (באנגלית)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

כבידה ומסלולים

חוק הכבידה של ניוטון מסביר מדוע לוויינים נשארים למעלה, כמה זמן נמשך מסלול, ואיך עוברים ממסלול למסלול.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש בחוק הכבידה העולמי של ניוטון ולמצוא את g בכל גובה.
- למצוא מהירות וזמן מחזור של מסלול מעגלי ואת רדיוס המסלול הגאוסטציונרי.
- להשתמש באנרגיה פוטנציאלית כבידתית כדי למצוא מהירות מילוט.
- להחיל את שלושת חוקי קפלר ולהעריך מעבר הוהמן.

מושגי מפתח

- כל מסה מושכת כל מסה אחרת בכוח $F = Gm_1m_2/r^2$. הכבידה נחלשת עם ריבוע המרחק מהמרכז.
- מסלול מעגלי מתקיים כשהכבידה מספקת בדיוק את הכוח הצנטריפטלי: $GMm/r^2 = mv^2/r$.
- חוקי קפלר: המסלולים הם אליפסות שכוכב הלכת באחד ממוקדיהן; קו אל כוכב הלכת סורק שטחים שווים בזמנים שווים; $T^2 \propto a^3$.
- הרחק מכדור הארץ, האנרגיה הפוטנציאלית הכבידתית היא $U = -GMm/r$. מהירות המילוט היא המהירות שהופכת את האנרגיה הכוללת לאפס.
- מעבר הוהמן עובר בין שני מסלולים מעגליים בשתי הבערות לאורך חצי אליפסה.

משוואות מפתח

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}, \quad g(r) = \frac{GM}{r^2}$$

F=(Gm_1m_2)/(r^2), g(r)=(GM)/(r^2)

כבידה עולמית

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

v=GM/r, T=2π(r^3)/(GM)

מהירות וזמן מחזור של מסלול מעגלי

$$U = -\frac{GMm}{r}, \quad v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

U=-GMm/r, v_esc=2GM/R

אנרגיה פוטנציאלית ומהירות מילוט

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

T^2=(4π^2)/(GM)a^3

החוק השלישי של קפלר

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 מצאו את g על פני כדור הארץ מתוך G, מסת כדור הארץ ורדיוסו.

1. $g = GM/R^2 = 6.674 \times 10^{-11} \times 5.972 \times 10^{24} \div (6.371 \times 10^{6})^2$.
2. $GM = 3.986 \times 10^{14}\ m^3/s^2$; $R^2 = 4.059 \times 10^{13}\ m^2$.
3. $g = 9.82\ m/s^2$.

תשובה: $9.82\ m/s^2$. ה-g הנמדד נע בין כ-$9.78\ m/s^2$ בקו המשווה ל-$9.83\ m/s^2$ בקטבים, כי כדור הארץ מסתובב ובולט בקו המשווה; $9.81\ m/s^2$ הוא ממוצע נוח.

דוגמה 7.2 Landsat 9 מקיף את כדור הארץ בגובה של כ-705 km. בהנחה שהמסלול מעגלי, מצאו את מהירותו וזמן המחזור.

1. $r = 6{,}371 + 705 = 7{,}076\ km = 7.076 \times 10^{6}\ m$.
2. $v = \sqrt{(GM/r)} = \sqrt{(3.986 \times 10^{14} \div 7.076 \times 10^{6})} = 7{,}505\ m/s$.
3. $T = 2\pi r/v = 2\pi \times 7.076 \times 10^{6} \div 7{,}505 = 5{,}924\ s = 98.7\ min$.

תשובה: 7.51 km/s וכ-99 דקות לכל הקפה, בהתאמה לנתון שפורסם.

דוגמה 7.3 באיזה רדיוס לוויין מקיף פעם אחת ביום כוכבי (86,164 s), כך שהוא נשאר מעל נקודה אחת בקו המשווה?

1. $r^3 = GM\,T^2/4\pi^2 = 3.986 \times 10^{14} \times 86{,}164^2 \div 39.48$.
2. $r^3 = 7.496 \times 10^{22}$.
3. $r = 4.216 \times 10^{7}\ m = 42{,}160\ km$ ממרכז כדור הארץ, בערך 35,790 km מעל קו המשווה.

תשובה: בערך 42,160 km ממרכז כדור הארץ: המסלול הגאוסטציונרי, שבו נמצאים לווייני מזג אוויר רבים.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את מהירות המילוט מפני כדור הארץ.

$v = \sqrt{(2GM/R)} = \sqrt{(2 \times 3.986 \times 10^{14} \div 6.371 \times 10^{6})} = 11.2\ km/s$.

2. בגובה תחנת החלל, כ-420 km, איזה חלק מהכבידה שעל פני הקרקע נשאר?

0.880 = ²(6,371 ÷ 6,791). אסטרונאוטים מרחפים כי הם בנפילה חופשית, לא כי הכבידה נעלמה.

3. מאדים מקיף את השמש בחצי ציר ראשי של 1.524 AU. כמה זמן נמשכת השנה שלו?

קפלר: T = a^1.5 שנים = 1.88 = 1.524^1.5 שנות כדור הארץ.

4. העריכו את ה-Δv הכולל למעבר הוהמן ממסלול מעגלי בגובה 300 km לרדיוס הגאוסטציונרי (42,164 km).

r_1 = 6,671 km, r_2 = 42,164 km. הבערה 1: $\sqrt{(GM/r_1)}(\sqrt{(2r_2/(r_1 + r_2))} - 1)$ = 2.43 km/s. הבערה 2: $\sqrt{(GM/r_2)}(1 - \sqrt{(2r_1/(r_1 + r_2))})$ = 1.47 km/s. סך הכול 3.90 km/s (ועוד שינוי מישור, אם יש).

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: אין כבידה במסלול.

בפועל: בגובה 420 km הכבידה עדיין 88% מערכה על פני הקרקע. האסטרונאוטים והתחנה נופלים יחד.

מיתוס: לוויין כבד יותר צריך לנוע מהר יותר כדי להישאר באותו מסלול.

בפועל: ב-$v = \sqrt{(GM/r)}$ אין את מסת הלוויין.

מיתוס: כדי להשיג חללית שלפניכם באותו מסלול, האיצו.

בפועל: האצה מגביהה את המסלול ומאריכה את זמן המחזור, ולכן אתם מפגרים. צריך להאט כדי לרדת למסלול נמוך ומהיר יותר.

כרטיסיות

חוק הכבידה של ניוטון

$F = Gm_1m_2/r^2$.

מהירות מסלולית

$v = \sqrt{(GM/r)}$ למעגל.

החוק השלישי של קפלר

$T^2 \propto a^3$.

מהירות מילוט

$v = \sqrt{(2GM/R)}$; 11.2 km/s מכדור הארץ.

מסלול גאוסטציונרי

זמן מחזור של יום כוכבי אחד, בערך 35,790 km מעל קו המשווה.

מעבר הוהמן

חצי אליפסה עם שתי הבערות בין מסלולים מעגליים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. אם מכפילים את המרחק ממרכז כדור הארץ, הכבידה נעשית…

½ מעוצמתה

¼ מעוצמתה

חזקה פי 2

ללא שינוי

¼ מעוצמתה. ריבוע הפוך: 1/4 = 1/2².

2. למסלול מעגלי נמוך יותר יש…

זמן מחזור ארוך יותר ומהירות נמוכה יותר

זמן מחזור קצר יותר ומהירות גבוהה יותר

זמן מחזור ארוך יותר ומהירות גבוהה יותר

אותו זמן מחזור

זמן מחזור קצר יותר ומהירות גבוהה יותר. v = √(GM/r) גדלה כש-r קטן, ו-T ∝ r^1.5 קטן.

3. החוק השני של קפלר פירושו שכוכב לכת נע הכי מהר…

כשהוא הכי רחוק מהשמש

כשהוא הכי קרוב לשמש

באותה מהירות בכל מקום

רק בנקודות השוויון

כשהוא הכי קרוב לשמש. שטחים שווים בזמנים שווים: ליד השמש הרדיוס קצר, ולכן הוא חייב לנוע מהר יותר.

4. מהירות המילוט מכדור הארץ היא בערך…

7.9 km/s

11.2 km/s

3.1 km/s

30 km/s

√(2GM/R) = 11.2 km/s. 11.2 km/s, פי √2 ממהירות המסלול הנמוך.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לווייני GRACE-FO התאומים טסים במרחק של כ-220 km זה מזה ומודדים את השינוי במרחק ביניהם בדיוק של כמיקרון. כשהלוויין המוביל עובר מעל מסה עודפת, כמו אקוויפר גדול או מעטה קרח, הכבידה מושכת אותו מעט קדימה. מיפוי המשיכות האלה חודש אחר חודש מראה היכן מי התהום מתרוקנים ובאיזה קצב מעטות הקרח מאבדים מסה.

נתוני הכבידה האלה עוזרים לנהל מים בזמן בצורת ומאפשרים למדענים לעקוב אחר עליית פני הים, שחשובה לקהילות חוף ולשטחי ביצות כאחד.

גם בחירת המסלול היא פיזיקה: מסלולים סינכרוניים לשמש כמו של Landsat 9 חוזרים על אותם תנאי תאורה כדי שאפשר יהיה להשוות שינויים על הקרקע בהגינות, ומסלולים גאוסטציונריים מאפשרים ללווייני מזג אוויר לעקוב אחר סופות ברציפות.

ב־GRACE-FO :Saving Planets · מחשבון מהירות מסלולית · מחשבון מעבר הוהמן

מקורות: NASA JPL: GRACE-FO (https://gracefo.jpl.nasa.gov/) · נאס"א: Landsat 9 (באנגלית) (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 13.4 Satellite Orbits and Energy (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-4-satellite-orbits-and-energy): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics 1, 13.5 Kepler’s Laws of Planetary Motion (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-5-keplers-laws-of-planetary-motion): חוקי קפלר: גזירה ויישום.
- PhET: Gravity and Orbits (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gravity-and-orbits): שנו מסות ומהירויות וצפו במסלולים נוצרים.
- PhET: Kepler’s Laws (https://phet.colorado.edu/en/simulations/keplers-laws): חקרו את שלושת החוקים.

סיימתי את היחידה הזו

תנודות ומבוא לזורמים

קפיצים ומטוטלות חוזרים בתנועה הרמונית פשוטה; זורמים דוחפים בלחץ ומרימים בציפה ובזרימה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לתאר תנועה הרמונית פשוטה ולמצוא זמן מחזור, תדירות ומהירות מרבית לקפיץ ולמטוטלת.
- להסביר ריסון ותהודה.
- לחשב לחץ בעומק וכוח ציפה.
- להשתמש במשוואת הרציפות ובמשוואת ברנולי לזרימה יציבה.

מושגי מפתח

- כוח מחזיר יחסי להעתק (F = −kx) נותן תנועה הרמונית פשוטה, x = A cos(ωt + φ).
- זמן המחזור של מסה על קפיץ אינו תלוי במשרעת; זמן המחזור של מטוטלת תלוי רק באורכה ובּ-g בתנודות קטנות.
- הלחץ בזורם עולה עם העומק: P = P₀ + ρgh.
- ארכימדס: כוח הציפה שווה למשקל הזורם שנדחק.
- בזרימה יציבה הזורם מאיץ היכן שהצינור מצטר (רציפות), וזרימה מהירה יותר היא בלחץ נמוך יותר (ברנולי).

משוואות מפתח

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

`x(t)=A(ω t+)`

תנועה הרמונית פשוטה

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

`ω=k/m, T=2πm/k`

מסה על קפיץ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

`T=2πL/g`

מטוטלת פשוטה (זוויות קטנות)

$$P = P_0 + \rho g h, \quad F_B = \rho_{fluid} V_{sub} g$$

`P=P_0+ρ gh, F_B=ρ_fluidV_subg`

לחץ בעומק וציפה

$$A_1 v_1 = A_2 v_2, \quad P + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{const}$$

`A_1v_1=A_2v_2, P+12ρ v^2+ρ gh=const`

רציפות וברנולי

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 מסה של 0.50 kg על קפיץ עם k = 200 N/m נמשכת 5.0 cm ומשוחררת. מצאו את ω, זמן המחזור, התדירות והמהירות המרבית.

1. ω = √(k/m) = √(200 ÷ 0.50) = 20 rad/s.
2. T = 2π/ω = 0.314 s; f = 1/T = 3.18 Hz.
3. v_max = Aω = 0.050 × 20 = 1.0 m/s.

תשובה: ω = 20 rad/s, T = 0.314 s, f = 3.18 Hz, v_max = 1.0 m/s.

דוגמה 8.2 מהו זמן המחזור של מטוטלת באורך 1.00 m בכדור הארץ, ובירח (g = 1.62 m/s²)?

1. כדור הארץ: T = 2π√(1.00 ÷ 9.81) = 2.01 s.
2. הירח: T = 2π√(1.00 ÷ 1.62) = 4.94 s.

תשובה: 2.01 s בכדור הארץ, 4.94 s בירח.

דוגמה 8.3 מים זורמים במהירות 2.0 m/s בצינור אופקי בקוטר 4.0 cm, שמצטר ל-2.0 cm. מצאו את המהירות החדשה ואת ירידת הלחץ.

1. השטח קטן פי ¼ = (2.0/4.0)², ולכן $v_2 = 4 \times 2.0 = 8.0$ m/s.
2. ברנולי, צינור אופקי: $\Delta P = \tfrac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = \tfrac{1}{2} \times 1{,}000 \times (64 - 4.0) = 30{,}000$ Pa.

תשובה: 8.0 m/s וירידת לחץ של 30 kPa.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מהו הלחץ הנוסף בעומק 10 m מתחת לפני מי הים (ρ = 1,025 kg/m³)?

ρgh = 1,025 × 9.81 × 10 = 100,600 Pa, בערך אטמוספרה נוספת אחת.

2. גוש עץ בצפיפות 600 kg/m³ צף במים מתוקים. איזה חלק ממנו שקוע?

ציפה: ρ_water V_sub g = ρ_wood V g, ולכן V_sub/V = 600/1,000 = 0.60.

3. למטוטלת צריך להיות זמן מחזור של בדיוק 2.00 s. מה אורכה?

L = g(T/2π)² = 9.81 × (2.00 ÷ 6.283)² = 0.994 m.

4. מדוע אומרים לחיילים לשבור צעד כשהם חוצים גשר?

צעידה בצעד אחיד דוחפת את הגשר בתדירות קבועה. אם היא תואמת תדירות טבעית של הגשר, תהודה עלולה לבנות תנודות גדולות.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: נדנוד גדול יותר גורם למטוטלת להתארך בזמן.

בפועל: בתנודות קטנות זמן המחזור אינו תלוי במשרעת, רק ב-L וב-g.

מיתוס: דברים כבדים שוקעים ודברים קלים צפים.

בפועל: הצפיפות קובעת. ספינת פלדה צפה כי צורתה דוחקת משקל מים השווה למשקלה.

מיתוס: לזורם מהיר יותר יש לחץ גבוה יותר.

בפועל: בזרימה יציבה ואופקית, לזרימה מהירה יותר יש לחץ נמוך יותר (ברנולי).

כרטיסיות

תנועה הרמונית פשוטה

תנודה עם כוח מחזיר ∝ העתק; x = A cos(ωt + φ).

זמן מחזור

זמן של מחזור אחד; T = 1/f.

תהודה

תגובה גדולה כשמפעילים בתדירות טבעית.

לחץ

כוח ליחידת שטח, P = F/A (Pa).

עקרון ארכימדס

כוח ציפה = משקל הזורם שנדחק.

משוואת ברנולי

P + ½ρv² + ρgh קבוע לאורך קו זרם בזרימה יציבה ואידאלית.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הכפלת המסה על קפיץ פי ארבעה מכפילה את זמן המחזור פי…

4

2

½

¼

2. $T \propto \sqrt{m}$, ו-$\sqrt{4} = 2$.

2. כוח הציפה על גוף שקוע שווה ל…

משקלו שלו

משקל הזורם שהוא דוחק

לחץ הזורם

אפס

משקל הזורם שהוא דוחק. עקרון ארכימדס.

3. מים מאיצים היכן שצינור מצטר בגלל…

רציפות ($A_1v_1 = A_2v_2$)

ציפה

תהודה

חיכוך

רציפות ($A_1v_1 = A_2v_2$). אותו נפח לשנייה חייב לעבור דרך שטח קטן יותר.

4. שעון מטוטלת נלקח לירח. הוא…

ממהר

מאחר

אותו דבר

אחורה

מאחר. g נמוך יותר נותן זמן מחזור ארוך יותר, ולכן הוא מתקתק לעתים רחוקות יותר.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

העילוי על כנף ועל להב של טורבינת רוח נובע מאוויר שזורם מהר יותר בצד אחד, מה שמוריד שם את הלחץ. משוואת ברנולי היא הצעד הראשון בתכנון להבים וכנפיים שמבזבזים פחות אנרגיה.

פיזיקת התנודות חשובה גם למכונות אנרגיה נקייה: כל מבנה גבוה שנדחף בקצב, כמו מגדל טורבינה על ידי הרוטור שלו, עלול לצבור רעידות גדולות אם הדחיפה תואמת אחת מתדירויותיו הטבעיות (תהודה).

לחץ זורמים וציפה עומדים גם מאחורי מדעי האוקיינוס, ממצופים שמודדים את מעמקי האוקיינוס ועד לווויינים כמו Sentinel-6 שמודדים את פני הים כדי לעזור לקהילות חוף לתכנן.

ב־Saving Planets: מחשבון זמן מחזור של מטוטלת · מחשבון משוואת העילוי · Sentinel-6B

מקורות: משרד האנרגיה האמריקאי: איך פועלות טורבינות רוח? (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · NASA: Sentinel-6 sea level mission (באנגלית) (https://sealevel.nasa.gov/missions/sentinel-6)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax University Physics 1, 15.1 Simple Harmonic Motion (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-1-simple-harmonic-motion): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics 1, 15.4 Pendulums (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-4-pendulums): מטוטלות פשוטות ופיזיקליות.
- OpenStax University Physics 1, 14.4 Archimedes’ Principle and Buoyancy (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-4-archimedes-principle-and-buoyancy): ציפה עם דוגמאות.
- OpenStax University Physics 1, 14.6 Bernoulli’s Equation (באנגלית) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): זרימה, לחץ ועילוי.
- PhET: Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab): זמן מחזור, אורך, מסה וכבידה.
- PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): קפיצים, אנרגיה וריסון.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): צפיפות וכוח ציפה.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): לחץ בעומק.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. מדידה, וקטורים ותנועה בממד אחד
   5 תרגילים
2. תנועה בשני ממדים: קליעים ומעגלים
   4 תרגילים
3. חוקי ניוטון, חיכוך ודינמיקה מעגלית
   5 תרגילים
4. עבודה, אנרגיה והספק
   5 תרגילים
5. תנע, התנגשויות וטילים
   4 תרגילים
6. סיבוב, מומנט כוח ותנע זוויתי
   5 תרגילים
7. כבידה ומסלולים
   4 תרגילים
8. תנודות ומבוא לזורמים
   4 תרגילים

המעבדה (PHYS 110L)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס, רכיב של נקודת זכות 1 בתוכנית לימודים טיפוסית במכללה. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד.

כל ניסוי בודק רעיון מההרצאה מול מדידות אמיתיות, וכל אחד מבקש לציין אי-ודאות. תוצאה בלי אי-ודאות אי אפשר להשוות לחיזוי. לכל ניסוי יש גם גרסה ביתית או גרסת PhET.

מקור בטיחות: OSHA: בטיחות במקום העבודה (באנגלית) (https://www.osha.gov/)

ניסוי A: מדידה ואי-ודאות (מדידת g)

שבוע 1

מטרה: מדדו זמן נפילה של כדור מגובה מדוד, מצאו את g וציינו אי-ודאות תקינה.

$$g = \frac{2h}{t^2}, \quad \frac{\delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

g=(2h)/(t^2), (g)/(g)=((h)/(h))^2+(2(t)/(t))^2

הפיצו אי-ודאויות יחסיות בריבוע; הזמן בריבוע, ולכן אי-הוודאות היחסית שלו נספרת פעמיים

מהלך הניסוי

1. מדדו את גובה הנפילה h מתחתית הכדור עד הרצפה; העריכו את δh (לסרט מדידה, כ-±2 mm).
2. שחררו כדור צפוף ממנוחה ומדדו את זמן הנפילה. סרטון הילוך איטי בטלפון או אפליקציה שמופעלת בקול עדיפים על סטופר ידני.
3. חזרו לפחות חמש פעמים.
4. מצאו את הזמן הממוצע, סטיית התקן של המדגם s ואת שגיאת התקן s/√N; השתמשו בשגיאת התקן בתור δt.
5. חשבו את g ואת δg והשוו ל-9.81 m/s².

טבלת נתונים

ניסיון	זמן נפילה (s)
1	0.55
2	0.56
3	0.54
4	0.55
5	0.56
ממוצע	0.552
סטיית תקן s	0.0084
שגיאת תקן s/√5	0.0037

נתוני דוגמה לתרגול בלבד. h = 1.500 ± 0.002 m.

חישוב לדוגמה

1. g = 2h/t² = 2 × 1.500 ÷ 0.552² = 9.85 m/s².
2. אי-ודאות יחסית מהזמן: 2 × 0.0037 ÷ 0.552 = 1.36%. מהגובה: 0.002 ÷ 1.500 = 0.13%.
3. משולב: √(1.36² + 0.13²) = 1.36%, ולכן δg = 0.0136 × 9.85 = 0.13 m/s².

4. תוצאה: $g = 9.85 \pm 0.13\ m/s^2$. הערך המקובל $9.81\ m/s^2$ נמצא בטווח, ולכן הם מתאימים. מדידת הזמן שולטת באי-הוודאות.

בטיחות

- שחררו את הכדור רק במקום שאין מתחתיו אף אחד, ופנו את הרצפה.
- עמדו על משטח יציב, לא על כיסא, כדי להגיע לגובה השחרור.

חלופה ביתית או וירטואלית

- עשו את זה בבית בדיוק כפי שכתוב עם סרטון הילוך איטי בטלפון.
- או השתמשו בסימולציית PhET Projectile Motion עם מהירות שיגור 0 כדי לבדוק את הזמן.

PhET: Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion) · מדריך JCGM לאי-ודאות (GUM) (באנגלית) (https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications)

הקשר לכדור הארץ: המדע של GRACE-FO עובד רק כי הצוות יודע את אי-הוודאות של כל מרחק שהוא מודד; שינוי נחשב רק אם הוא גדול מאי-הוודאות הזו. NASA JPL: GRACE-FO (https://gracefo.jpl.nasa.gov/)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי B: תנועה בליסטית

שבוע 3

מטרה: מדדו את מהירות המשגר מירייה אופקית, ואז חזו ובדקו היכן תנחת ירייה בזווית.

$$v_0 = \frac{x}{\sqrt{2h/g}}, \quad R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

`v_0=2h/g, R=(v_0^22θ)/(g)`

מהירות השיגור מירייה אופקית, ואז הטווח החזוי

מהלך הניסוי

1. ירו כדור אופקית ממשגר (או גלגלו אותו מרמפה) בגובה השולחן h.
2. הדביקו נייר פחם מעל נייר רגיל במקום הנחיתה; בצעו חמש יריות ומדדו כל מרחק x.
3. מצאו את ממוצע x וחשבו את v_0.
4. חזו את הטווח של שיגור ב-30° מגובה הרצפה, סמנו את הנקודה ובדקו בחמש יריות.
5. השוו בין החיזוי לתוצאה; פרטו מקורות שגיאה (גרר אוויר, גובה שיגור, קריאת הזווית).

טבלת נתונים

גודל	ערך
גובה השולחן h	1.00 m
מרחק נחיתה ממוצע x	2.26 m
זמן נפילה √(2h/g)	0.452 s
מהירות שיגור v_0	5.01 m/s
טווח חזוי ב-30°	2.21 m

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. $t = \sqrt{(2 \times 1.00 \div 9.81)} = 0.452$ s.
2. $v_0 = 2.26 \div 0.452 = 5.01$ m/s.
3. $R(30°) = 5.01^2 \times \sin 60° \div 9.81 = 25.1 \times 0.866 \div 9.81 = 2.21$ m.
4. הפרש באחוזים = |נמדד − חזוי| ÷ חזוי × 100%.

בטיחות

- הרכיבו מגן עיניים עם כל משגר קפיץ, ולעולם אל תכוונו אותו לעבר אדם.
- שמרו על אזור הנחיתה פנוי.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גלגלו גולה מקצה שולחן ומדדו את x; דלגו על החלק בזווית או השתמשו בסימולציית PhET.

PhET: Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion)

הקשר לכדור הארץ: אותה שיטה של חיזוי ואז בדיקה משמשת לחזות היכן עלול לנחות שלב טיל שחוזר לאטמוספרה.

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי C: החוק השני של ניוטון

שבוע 5

מטרה: להראות שהתאוצה יחסית לכוח השקול ויחסית הפוך למסה.

$$a = \frac{m_h g}{m_c + m_h}$$

`a=(m_hg)/(m_c+m_h)`

עגלה שנמשכת על ידי מסה תלויה דרך גלגלת, בהזנחת חיכוך

מהלך הניסוי

1. ישרו מסילה. חברו עגלה (מסה m_c) בחוט דרך גלגלת למסה תלויה m_h.
2. שחררו ממנוחה ותעדו את התנועה בחיישן, בסרטון או במדידת זמן על מרחק ידוע (a = 2d/t²).
3. חזרו עם חמש מסות תלויות, והעבירו מסה מהעגלה למתלה כך שהסכום יישאר קבוע.
4. שרטטו את a כפונקציה של m_h g. השיפוע צריך להיות 1/(m_c + m_h).
5. חזרו עם מסה נוספת על העגלה כדי לבדוק את התלות במסה.

טבלת נתונים

גודל	ערך
מסת העגלה m_c	0.500 kg
מסה תלויה m_h	0.050 kg
a חזויה	0.892 m/s²
a נמדדת	0.86 m/s²

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. a חזויה = 0.050 × 9.81 ÷ 0.550 = 0.892 m/s².
2. הערך הנמדד 0.86 m/s² נמוך ב-3.6%.
3. כוח החיכוך הדרוש כדי להסביר את הפער: 0.550 × (0.892 − 0.86) = 0.018 N, חיכוך גלגול סביר.

בטיחות

- שימו מעצור רך בסוף המסילה והרחיקו אצבעות מהגלגלת.

חלופה ביתית או וירטואלית

- השתמשו ב-PhET Forces and Motion: Basics (מסך Acceleration) כדי לשנות כוח ומסה.

PhET: Forces and Motion: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/forces-and-motion-basics)

הקשר לכדור הארץ: F = ma הוא הסיבה שכלי רכב קלים יותר צריכים פחות אנרגיה כדי להאיץ: כל קילוגרם שנחסך מקטין את הכוח, ואת הדלק, הדרושים.

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי D: חיכוך

שבוע 5

מטרה: מדדו את מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בעזרת רמפה מוטה.

$$\mu_s = \tan\theta_{slip}, \quad \mu_k = \tan\theta_{steady}$$

```
μ_s=θ_slip, μ_k=θ_steady
```

על רמפה החיכוך מאזן את mg sin θ כאשר N = mg cos θ

מהלך הניסוי

1. הניחו גוש על לוח והרימו לאט קצה אחד עד שהגוש בדיוק מתחיל להחליק; רשמו את הזווית θ_slip. חזרו חמש פעמים.
2. מצאו את הזווית שבה הגוש, אחרי טפיחה, מחליק במהירות קבועה: θ_steady.
3. חשבו את μ_s ואת μ_k. חזרו על משטח שני (לבד, גומי).

טבלת נתונים

גודל	ערך
מסת הגוש	0.250 kg
זווית החלקה ממוצעת	31°
זווית החלקה אחידה ממוצעת	24°
μ_s	0.60
μ_k	0.45

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. $\mu_s = \tan 31° = 0.601$.
2. $\mu_k = \tan 24° = 0.445$.
3. כצפוי, $\mu_s > \mu_k$. המסה אינה מופיעה: היא מצטמצמת.

בטיחות

- שמרו על הרמפה נמוכה ויציבה; תפסו את הגוש בתחתית.

חלופה ביתית או וירטואלית

- ספר, אפליקציית מד שיפוע בטלפון וכריכה קשה מספיקים.
- PhET The Ramp מאפשר לקבוע חיכוך ולראות את הכוחות.

PhET: The Ramp (https://phet.colorado.edu/en/simulations/the-ramp)

הקשר לכדור הארץ: חיכוך הגלגול בצמיגים הוא אחד הכוחות שנגדם רכב שורף אנרגיה בכל מהירות; תכנונים עם חיכוך נמוך חוסכים דלק. משרד האנרגיה האמריקאי: המשרד לטכנולוגיות רכב (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי E: שימור אנרגיה

שבוע 7

מטרה: השוו את המהירות הנמדדת של עגלה בתחתית רמפה למהירות ששימור האנרגיה חוזה.

$$v = \sqrt{2gh}, \quad \text{fraction kept} = \frac{v_{meas}^2}{2gh}$$

```
v=2gh, fraction kept=_meas^22gh
```

המהירות האידאלית לירידה h, וכמה אנרגיה מכנית נשמרה

מהלך הניסוי

1. מדדו את הירידה האנכית h של הרמפה.
2. שחררו עגלה בעלת חיכוך נמוך ממנוחה ומדדו את מהירותה בתחתית (שער אופטי, או סרטון על מרחק קצר וידוע).
3. חזרו חמש פעמים וחשבו ממוצע.
4. חשבו את המהירות החזויה ואת חלק האנרגיה שנשמר; הסבירו לאן הלך השאר.

טבלת נתונים

גודל	ערך
גובה ירידה h	0.300 m
מהירות חזויה	2.43 m/s
מהירות נמדדת (ממוצע)	2.35 m/s
אנרגיה שנשמרה	93.8%

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. v = √(2 × 9.81 × 0.300) = 2.43 m/s.
2. החלק שנשמר = 5.52 ÷ 5.89 = 0.938 = 2.35² ÷ (2 × 9.81 × 0.300).
3. כ-6.2% מהאנרגיה המכנית הפכו לחום ולקול בגלל חיכוך וגרר.

בטיחות

- הדקו את הרמפה ועצרו את העגלה בתחתית.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גלגלו כדור במורד רמפת ספרים ומדדו את זמנו על מסלול שטוח מדוד.
- PhET Energy Skate Park מציג את אותם תרשימי עמודות של אנרגיה.

PhET: Energy Skate Park (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-skate-park)

הקשר לכדור הארץ: מעקב אחר לאן הולכת האנרגיה הוא הדרך שבה מהנדסים מוצאים חיסכון, מבלימה רגנרטיבית ועד אגירה שאובה. משרד האנרגיה האמריקאי: יסודות הרכב החשמלי (באנגלית) (https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-ev)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי F: תנע והתנגשויות

שבוע 8

מטרה: בדקו שימור תנע בהתנגשויות אלסטיות ודביקות, ומדדו כמה אנרגיה קינטית אובדת.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_f$$

```
m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)v_f
```

התנגשות פלסטית לחלוטין

מהלך הניסוי

1. על מסילה אופקית, שלחו את עגלה 1 אל עגלה 2 שבמנוחה כשהסקוץ' פונה זה לזה כדי שיידבקו.
2. מדדו מהירויות ממש לפני ואחרי (חיישן או סרטון).
3. חזרו עם מגנטים או קפיצים פונים זה לזה להקפצה כמעט אלסטית.
4. בכל ניסיון, השוו את התנע הכולל ואת האנרגיה הקינטית הכוללת לפני ואחרי.

טבלת נתונים

גודל	ערך
$m_1 = m_2$	0.50 kg
v_1 לפני	0.80 m/s
v אחרי חזויה (דבוקות)	0.40 m/s
v אחרי נמדדת	0.39 m/s

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. p לפני = 0.50 × 0.80 = 0.40 kg·m/s. p אחרי = 0.39 kg·m/s, הפרש של 2.5% (חיכוך במהלך התנועה).
2. K לפני = ½ × 0.50 × 0.80² = 0.160 J. K אחרי = ½ × 1.00 × 0.39² = 0.076 J.
3. כמחצית מהאנרגיה הקינטית אבדה, כפי שהתאוריה חוזה למסות שוות שנדבקות (בדיוק 50% במקרה האידאלי).

בטיחות

- שמרו על מהירויות נמוכות ועצרו את העגלות לפני סוף המסילה.

חלופה ביתית או וירטואלית

- PhET Collision Lab מאפשר לקבוע אלסטיות מ-0% עד 100%.

PhET: Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab)

הקשר לכדור הארץ: DART השתמשה בדיוק בפיזיקה הזו על אסטרואיד: התנגשות מתוכננת ומדודה כדי לשנות מסלול של ירח קטן. נאס"א: משימת DART (באנגלית) (https://science.nasa.gov/mission/dart/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי G: התמד סיבובי

שבוע 10

מטרה: מדדו את מומנט ההתמד של דיסקה בעזרת מסה נופלת והשוו ל-½MR².

$$I = mr^2\left(\frac{g}{a} - 1\right), \quad a = \frac{2d}{t^2}$$

`I=mr^2(g/a-1), a=(2d)/(t^2)`

מסה תלויה m על חוט שכרוך סביב ציר ברדיוס r

מהלך הניסוי

1. כרכו חוט סביב ציר הדיסקה (רדיוס r) ותלו עליו מסה m.
2. שחררו ממנוחה ומדדו את זמן הנפילה לאורך גובה d; חזרו חמש פעמים.
3. חשבו את a ואז את I. מדדו את מסת הדיסקה M ואת רדיוסה R וחשבו ½MR².
4. השוו. אחר כך הוסיפו טבעת וראו בכמה I גדל.

טבלת נתונים

גודל	ערך
מסה תלויה m	0.050 kg
רדיוס הציר r	0.025 m
מרחק נפילה d	0.800 m
זמן נפילה ממוצע t	4.00 s
דיסקה M, R	1.50 kg, 0.064 m

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. a = 2 × 0.800 ÷ 4.00² = 0.100 m/s².
2. I = 0.050 × 0.025² × (9.81 ÷ 0.100 − 1) = 0.050 × 0.000625 × 97.1 = 3.03 × 10⁻³ kg·m².
3. ½MR² = ½ × 1.50 × 0.064² = 3.07 × 10⁻³ kg·m².
4. הפרש של 1.2%, בתוך אי-הוודאות של הרדיוס ומדידת הזמן.

בטיחות

- שמרו על המסה התלויה נמוכה מעל משטח נחיתה רך.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גלגלו פחית מרק מלאה ופחית ריקה באותה רמפה והשוו זמנים; הסבירו את התוצאה בעזרת $K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$.

OpenStax 10.4 Moment of Inertia (באנגלית) https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-4-moment-of-inertia)
(-and-rotational-kinetic-energy

הקשר לכדור הארץ: גלגלי התגובה שמכוונים לווייני תצפית על כדור הארץ מתוכננים בדיוק סביב הגודל הזה.

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

ניסוי H: מטוטלת ותנועה הרמונית פשוטה

שבוע 13

מטרה: בדקו את T = 2π√(L/g), הראו שזמן המחזור אינו תלוי במסה או במשרעת קטנה, ומדדו את g בדרך שנייה.

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

g=(4π^2L)/(T^2)

משוואת המטוטלת בסידור מחדש

מהלך הניסוי

1. תלו משקולת צפופה על חוט; מדדו את L מנקודת התלייה עד מרכז המשקולת.
2. הסיטו אותה בפחות מ-10° ומדדו 20 תנודות שלמות; חלקו ב-20 כדי לקבל T.
3. חזרו לחמישה אורכים. שרטטו T² כפונקציה של L: השיפוע הוא 4π²/g.
4. שנו את מסת המשקולת ואת המשרעת (עדיין קטנה) ובדקו ש-T נשאר זהה.
5. רשות: מדדו זמן של מסה שמקפצת על קפיץ ובדקו את T = 2π√(m/k).

טבלת נתונים

גודל	ערך
אורך L	0.800 m
זמן ל-20 תנודות	35.9 s
זמן מחזור T	1.795 s
g	9.80 m/s²

נתונים לדוגמה לתרגול בלבד.

חישוב לדוגמה

1. T = 35.9 ÷ 20 = 1.795 s. מדידת 20 תנודות מחלקת את שגיאת זמן התגובה ב-20.
2. g = 4π² × 0.800 ÷ 1.795² = 31.58 ÷ 3.222 = 9.80 m/s².
3. השוו לניסוי A: שתי שיטות בלתי תלויות, והמטוטלת מדויקת הרבה יותר.

בטיחות

- השתמשו בנקודת תלייה יציבה והניפו את המשקולת הרחק מפנים.

חלופה ביתית או וירטואלית

- מפתח על שרוך נעל עובד; מדדו זמן בטלפון.

PhET: Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab) · PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs)

הקשר לכדור הארץ: ידיעה מדויקת של g, ושל שינוייו הזעירים ממקום למקום, היא מה שמשימות כבידה כמו GRACE-FO הופכות למפות של מים וקרח. NASA JPL: GRACE-FO (https://gracefo.jpl.nasa.gov/)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

תרגול לבחינת אמצע (יחידות 1–4)

1. טיל מאיץ ישר למעלה ממנוחה ב-5.0 m/s² במשך 20 s, ואז המנוע כבה. לאיזה גובה מרבי הוא מגיע?

   1. בכיבוי המנוע: $v = 5.0 \times 20 = 100$ m/s; גובה $= \tfrac{1}{2} \times 5.0 \times 20^2 = 1{,}000$ m.
   2. עלייה באינרציה: גובה נוסף $= v^2/2g = 100^2 \div 19.62 = 510$ m.

   תשובה: 1,510 m, בהזנחת גרר.

2. כדור נבעט במהירות 25 m/s בזווית 40° מעל קרקע מישורית. מצאו את הטווח ואת זמן המעוף.

   1. $v_y = 25 \sin 40° = 16.1$ m/s; $t = 2 \times 16.1 \div 9.81 = 3.28$ s.
   2. $R = 25^2 \times \sin 80° \div 9.81 = 625 \times 0.985 \div 9.81 = 62.7$ m.

   תשובה: 62.7 m ב-3.28 s.

3. מזחלת של 20 kg נגררת במהירות קבועה על שלג ($\mu_k = 0.10$) בחבל אופקי. מצאו את המתיחות בחבל ואת העבודה על פני 50 m.

   1. מהירות קבועה: $T = \mu_k mg = 0.10 \times 20 \times 9.81 = 19.6$ N.
   2. $W = 19.6 \times 50 = 981$ J.

   תשובה: 19.6 N; 981 J, שכולם הופכים לחום בחיכוך.

4. גוש של 2.0 kg מחליק ממנוחה במסלול מעוקל ללא חיכוך מגובה 5.0 m ואז דוחס קפיץ ($k = 400$ N/m) על קרקע מישורית. מצאו את הדחיסה המרבית.

   1. $mgh = \tfrac{1}{2}kx^2$.
   2. $x = \sqrt{(2 \times 2.0 \times 9.81 \times 5.0 \div 400)} = \sqrt{0.4905} = 0.700$ m.

   תשובה: 0.700 m.

מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. עגלה של 3.0 kg במהירות 4.0 m/s מתנגשת בעגלה של 1.0 kg במנוחה והן נדבקות. מצאו את המהירות הסופית ואת חלק האנרגיה הקינטית שאבד.

1. $v = 3.0 \times 4.0 \div 4.0 = 3.0$ m/s.
2. K לפני $= 24$ J; אחרי $= \tfrac{1}{2} \times 4.0 \times 9.0 = 18$ J.

תשובה: 3.0 m/s; 25% מהאנרגיה הקינטית אובדים.

2. טבעת חלולה ודיסקה מלאה בעלות מסה ורדיוס שווים מתגלגלות ממנוחה ברמפה בגובה 1.0 m. מצאו את מהירות כל אחת בתחתית.

1. טבעת ($I = mr^2$): $mgh = mv^2$, ולכן $v = \sqrt{(gh)} = 3.13$ m/s.
2. דיסקה ($I = \tfrac{1}{2}mr^2$): $mgh = \tfrac{3}{4}mv^2$, ולכן $v = \sqrt{(4gh/3)} = 3.62$ m/s.

תשובה: טבעת 3.13 m/s, דיסקה 3.62 m/s; הדיסקה מנצחת.

3. מצאו את זמן המחזור של לוויין במסלול מעגלי בגובה 1,336 km מעל כדור הארץ.

1. $r = 6{,}371 + 1{,}336 = 7{,}707$ km.
2. $T = 2\pi\sqrt{(r^3/GM)} = 2\pi\sqrt{((7.707 \times 10^{6})^3 \div 3.986 \times 10^{14})} = 6{,}733$ s.

תשובה: כ-112 דקות.

4. מסה של 0.20 kg על קפיץ מתנודדת בזמן מחזור 0.50 s ובמשרעת 0.10 m. מצאו את k ואת המהירות המרבית.

1. $\omega = 2\pi \div 0.50 = 12.57$ rad/s.
2. $k = m\omega^2 = 0.20 \times 158.0 = 31.6$ N/m.
3. $v_{max} = A\omega = 0.10 \times 12.57 = 1.26$ m/s.

תשובה: $k = 31.6$ N/m; $v_{max} = 1.26$ m/s.

5. מצוף בנפח 1.0 m³ ובמסה 400 kg מוחזק שקוע לגמרי במי ים ($\rho = 1{,}025$ kg/m³) בכבל לקרקעית. מצאו את המתיחות בכבל.

1. כוח ציפה $= 1{,}025 \times 1.0 \times 9.81 = 10{,}060$ N.
2. משקל $= 400 \times 9.81 = 3{,}920$ N.
3. מתיחות $= 10{,}060 - 3{,}920 = 6{,}130$ N.

תשובה: כ-6,130 N.

דף נוסחאות

$$v = dx/dt,\ a = dv/dt$$

$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

$$R = v_0^2 \sin 2\theta / g$$

$$a_c = v^2/r = \omega^2 r$$

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$f_k = \mu_k N$$

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2,\ U_g = mgh,\ U_s = \tfrac{1}{2}kx^2$$

$$P = dW/dt = Fv$$

$$\vec{p} = m\vec{v},\ \vec{J} = \Delta\vec{p}$$

$$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$$

$$\tau = rF\sin\theta = I\alpha$$

$$L = I\omega,\ K_{rot} = \tfrac{1}{2}I\omega^2$$

$$F = Gm_1m_2/r^2$$

$$v_{orb} = \sqrt{GM/r},\ v_{esc} = \sqrt{2GM/R}$$

$$T^2 = 4\pi^2 a^3/GM$$

$$T_{spring} = 2\pi\sqrt{m/k},\ T_{pend} = 2\pi\sqrt{L/g}$$

$$P = P_0 + \rho gh,\ F_B = \rho V g$$

$$A_1v_1 = A_2v_2,\ P + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{const}$$

קבועים

קבוע	ערך
קבוע הכבידה, G	6.674 × 10⁻¹¹ N·m²/kg²
כבידה תקנית, g	9.81 m/s² (9.80665 m/s² לפי הגדרה)
מסת כדור הארץ	5.972 × 10²⁴ kg (גיליון הנתונים של NASA על כדור הארץ)
רדיוס ממוצע של כדור הארץ	6,371 km (גיליון הנתונים של NASA על כדור הארץ)
GM של כדור הארץ	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
יום כוכבי	86,164 s
צפיפות מים מתוקים	1,000 kg/m³; מי ים בערך 1,025 kg/m³
צפיפות האוויר בגובה פני הים, 15 °C	1.225 kg/m³

מקור: NIST: קבועים פיזיקליים יסודיים (באנגלית) (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/)

נתוני ייחוס

השתמשו במקורות הנתונים הרשמיים והחינמיים האלה לצד הקורס.

- גיליון הנתונים של NASA על כדור הארץ (באנגלית) (https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html): נתוני מסה, רדיוס, כבידה ומסלול של כדור הארץ (וקישורים לכוכבי לכת אחרים).

- יחידות SI של NIST (באנגלית) (https://www.nist.gov/pml/owm/metric-si/si-units): שבע יחידות היסוד של SI ואיך הן מוגדרות.
- פרסומי JCGM (GUM) (באנגלית) (https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications): המדריך הבינלאומי לביטוי אי-ודאות במדידה.

מילון מונחים

תאוצה
קצב השינוי של המהירות, dv/dt.

משרעת
העתק מרבי מנקודת שיווי המשקל בתנודה.

תנע זוויתי
L = Iω; נשמר בהיעדר מומנט חיצוני.

כוח ציפה
כוח כלפי מעלה מזורם, השווה למשקל הזורם שנדחק.

מרכז מסה
המיקום הממוצע של מערכת משוקלל לפי מסה.

כוח משמר
כוח שהעבודה שלו אינה תלויה במסלול, כמו כבידה או קפיץ.

העתק
שינוי מקום, וקטור.

התנגשות אלסטית
התנגשות שמשמרת אנרגיה קינטית.

מהירות מילוט
המהירות המינימלית לעזוב את כבידת גוף בלי דחף נוסף.

תרשים גוף חופשי
תרשים של כל הכוחות על גוף אחד.

תדירות
מחזורים בשנייה (Hz); f = 1/T.

מסלול גאוסטציונרי
מסלול משווני עם זמן מחזור של יום כוכבי אחד.

מתקף
כוח שעבר אינטגרציה על הזמן; שווה לשינוי בתנע.

התמד
התנגדות לשינוי בתנועה; נמדדת במסה.

אנרגיה קינטית
אנרגיית תנועה, ½mv².

מומנט התמד
התמד סיבובי, Σmr².

תנע

$p = mv$.

ניוטון

יחידת SI של כוח, $kg \cdot m/s^2$.

זמן מחזור

זמן של מחזור אחד או הקפה אחת.

הספק

קצב העברת אנרגיה, בוואט.

לחץ

כוח ליחידת שטח, בפסקל.

תהודה

תנודה גדולה כשמפעילים בתדירות טבעית.

שגיאת תקן

סטיית התקן של הממוצע, $s/\sqrt{N}$.

מסלול סינכרוני לשמש

מסלול כמעט קוטבי שעובר מעל כל מקום בערך באותה שעה סולארית מקומית.

מומנט כוח

השפעת הסיבוב של כוח, $rF \sin\theta$.

אי-ודאות

טווח מוערך סביב ערך נמדד שכנראה מכיל את הערך האמיתי.

וקטור

גודל בעל גודל וכיוון.

משקל

כוח הכבידה על מסה, mg.

עבודה

אנרגיה שמועברת על ידי כוח לאורך העתק.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	פותר נכון בעיות חדשות שלא ראה, מתחיל מתרשים ומעיקרון (ניוטון, אנרגיה או תנע), ובודק יחידות ומקרי קצה.
3 · מיומן	פותר את תרגילי התרגול ביחידות נכונות ובספרות משמעותיות סבירות; טעויות קטנות מדי פעם.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אבל מתקשה לבחור שיטה לבעיות חדשות, או מבלבל בין וקטורים לסקלרים.
1 · מתחיל	מציב מספרים בנוסחאות בלי תרשים; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

חלק	משקל
תרגילים	30%
דוחות מעבדה (או מעבדות וירטואליות)	20%
מערך תרגול לאמצע הקורס	20%
מערך תרגול מסכם	30%

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- כימיה כללית + 1 מעבדה CHEM 110 + CHEM 110L
- חשבון אינפיניטסימלי 1 MATH 110
- חשבון אינפיניטסימלי 2 MATH 111
- כל הקורסים