

תוכן העניינים

פרק 1 מהות הפיסיקה 1

- 1.1 הפיסיקה כמדע 2
- ההבדל בין תחושה למידע אובייקטיבי 2
- ההבדל בין מידע למדע 2
- השיטה המדעית 3
- האופי הרדוקציוניסטי של המדע 3
- אז מהי פיסיקה? 4
- 1.2 גדלים מדעיים 4
- יחידות 5
- נספח 1.1: ממדים (dimensions) 7
- נספח 1.2: עדכון יחידות 8

פרק 2 וקטורים 9

- 2.1 הצגה קרטזית והצגה כיוונית 10
- 2.2 חיבור וחסור וקטורים 11
- 2.3 מכפלה (או חילוק) וקטור בסקלר 11
- 2.4 מכפלה סקלרית 12
- 2.5 היטל של וקטור על וקטור אחר 13
- 2.6 מכפלה וקטורית 13
- 2.7 נגזרת של וקטור ביחס לפרמטר 14
- משפט 2.1 (משפט עזר לאפיון הנגזרת של וקטור כיוון) 14
- 2.8 הכיוון הרדיאלי והכיוון האזימוטלי 14
- דוגמה (המולקולה) 15

פרק 3 קינמטיקה 16

- 3.1 המיקום ונגזרותיו 17
- 3.2 מעבר מתאוצה למהירות וממהירות למיקום 17
- 3.3 מהירות התרחקות ומהירות חיגה 18
- 3.4 רכיבי התאוצה בכיוון המשיק למסלול ובכיוון המאונך לו 19
- 3.5 תנועה בקו ישר 19
- 3.6 תנועה מעגלית 20
- 3.7 וקטור המהירות הזוויתית 21
- משפט 3.1 (ביטוי וקטורי למהירות של נקודה בתנועה מעגלית) 21
- 3.8 עקמומיות של מסלול 22
- דוגמה 3.1 (החוט המתלפף) 23
- 3.9 תנועה יחסית 24
- דוגמה 3.2 (על קצה הלהב) 24
- דוגמה 3.3 (המטוס והטיל) 25
- נספח 3.1: מהי המהירות האמיתית של גוף? 27

פרק 4 חוקי ניוטון 28

- 4.1 החוקים 29
- החוק הראשון (חוק ההתמדה או האינרציה) 29
- החוק השני (הקשר בין תאוצה לכוח) 29
- החוק השלישי (חוק "פעולה-תגובה") 30
- 4.2 כוחות נפוצים 31

- 4.3 משוואות תנועה 36
- תרשימי כוחות 36
- דוגמה 4.1 (איזה חיכוך גדול יותר) 37
- דוגמה 4.2 (מעברים בין חיכוך קינטי וסטטי) 38
- 4.4 אילוצים 40
- דוגמה 4.3 (גולש על גולש פטור) 43
- דוגמה 4.4 (איך הכדור מסתובב) 45
- נספח 4.1:** מדוע המתיחות של קפיץ אידאלי פרופורציונית להתארכותו 46
- פרק 5 פתרון משוואות התנועה 47**
- 5.1 פתרון נומרי של משוואות דיפרנציאליות 48
- דוגמה 5.1 (מתיחה הולכת וגוברת) 49
- דוגמה 5.2 (מסלול הפרדה) 49
- 5.2 פתרון משוואה דיפרנציאלית באמצעות הצבה 51
- 5.3 תנועה בהשפעת כוח קבוע וכוח מתכונתי למהירות 52
- פרק 6 מערכות ייחוס מאיצות 55**
- 6.1 איך לבחור מערכת ייחוס? 56
- דוגמה 6.1 (החלקה על סרט) 56
- 6.2 צופה הנע בתאוצה 58
- דוגמה 6.2 (תלוי בקרון) 60
- דוגמה 6.3 (העגלה שנסוגה) 60
- 6.3 משקל אפקטיבי ותאוצת כובד אפקטיבית 62
- דוגמה 6.4 (מהו הכיוון האנכי?) 62
- דוגמה 6.5 (האם הדופן מעל או מתחת?) 63
- פרק 7 מערכות ייחוס מסתובבות 65**
- 7.1 הכוח הצנטריפוגלי 68
- דוגמה 7.1 (חיפושי נעה על תקליט מסתובב) 69
- דוגמה 7.2 (השפעת סיבוב כדור הארץ על המשקל) 70
- דוגמה 7.3 (השפעת כוח קוריוליס על מסלול של קליע) 71
- דוגמה 7.4 (סיבוב על סיבוב) 75
- דוגמה 7.5 (ריצה על הקיר) 77
- נספח 7.1:** מנין בא כוח קוריוליס 79
- פרק 8 עבודה ואנרגיה 81**
- 8.1 אינטגרלים של תנועה 82
- 8.1.1 מתקף ותנע 83
- 8.1.2 עבודה ואנרגיה 83
- חישוב העבודה 85
- דוגמה 8.1 (הכוח ושלושת המסלולים) 85
- 8.2 כוחות משמרים וכוחות לא משמרים 87
- 8.3 עבודות המבוצעות על ידי כוחות נפוצים 87
- 8.4 האנרגיה הפוטנציאלית 92
- 8.5 האנרגיה המכנית 93
- דוגמה 8.2 (מסוע גורר קופסה) 95
- דוגמה 8.3 (עצירה בשלבים) 96
- דוגמה 8.4 (קליע חודר לבול עץ) 97
- דוגמה 8.5 (מנסרה דוחפת) 98
- דוגמה 8.6 (עבודת פועל הבמה) 99
- קושיה 8.1 (אדם מטפס על חבל) 101
- קושיה 8.2 (הגולש והמסוק) 101
- ההספק 101
- 8.6 ביטוי עבור כוח משמר כאשר האנרגיה הפוטנציאלית ידועה כפונקציה של המיקום 102
- בור פוטנציאל 102
- דוגמה 8.7 (גוף רתום לשני קפיצים) 103
- נספח 8.1:** פירוט נוסף לקשר (8.11) 105
- נספח 8.2:** הגדרת כוח משמר כאשר הגוף שמפעיל את הכוח נמצא בתנועה 105
- נספח 8.3:** האם העבודה הכוללת שכוח מבצע תלויה במערכת הייחוס? 106



10.3.2 ריסון חלש (תת-קריטי) - $\gamma > \omega_0$ 135

10.3.3 ריסון קריטי - $\gamma = \omega_0$ 136

דוגמה 10.3 (אוסילטור הרמוני מרוסן) 137

10.4 תנועה הרמונית מאולצת 139

10.4.1 תהודה 141

פרק 11 דינמיקה של גדלים זוויתיים 143

11.1 תנועה סביב ציר 145

11.2 מומנט כוח 145

11.2.1 מומנט כוח ביחס לציר 145

11.2.2 מומנט כוח ביחס לנקודה 146

משפט 11.1 (קשר בין מומנט כוח ביחס לציר למומנט

כוח ביחס לנקודה) 146

11.3 תנע זוויתי של חלקיק 146

משפט 11.2 (הקשר בין תנע זוויתי למומנט כוח) 147

משפט 11.3 (מומנט שהמשקל מפעיל) 149

11.4 גופים קשיחים 149

11.4.1 תנע זוויתי של גוף קשיח ביחס לציר סיבוב 150

11.4.2 משוואת המומנטים עבור גוף קשיח 150

11.4.3 אנרגיה קינטית של גוף קשיח 150

11.4.4 אנלוגיה בין תנועת גוף נקודתי לאורך קו ישר לבין

תנועת גוף קשיח סביב ציר 151

11.5 מומנטי התמד של גופים אחידים בעלי גאומטריה

פשוטה 152

מומנט התמד של מוט אחיד ביחס לציר שמאונך למוט

וממוקם באחד מקצותיו 152

מומנט התמד של שכבה גלילית דקה ואחידה ביחס לציר

הסימטריה שלה 152

מומנט התמד של שכבה גלילית עבה ואחידה ביחס לציר

הסימטריה שלה 153

מומנט התמד של כדור אחיד ביחס לציר שעובר דרך

מרכזו 153

11.6 דוגמאות ומשפטים 154

נספח 8.4: האם קיימים כוחות לא משמרים בטבע? 107

נספח 8.5: בור פוטנציאל כובדי 109

פרק 9 מערכות חלקיקים 111

כוחות פנימיים וחיצוניים 112

9.1 השינוי בתנע של מערכת 112

דוגמה 9.1 (תיבה על מנסרה) 113

9.1.1 כוחות מתקפיים 115

דוגמה 9.2 (תיבה מתנגשת) 115

9.1.2 עצמים שמסתם לא נשארת קבועה בזמן 116

דוגמה 9.3 (מזרן נופל בגשם) 117

9.2 מרכז המסה 118

משפט 9.1 (חלוקה לתת-מערכות) 119

9.2.1 תנועת מרכז המסה 120

דוגמה 9.4 (להטוטן על המשקל) 120

דוגמה 9.5 (תיבה על מנסרה II) 122

9.2.2 אנרגיה שמיוחסת למרכז המסה 123

משפט 9.2 (אנרגיה קינטית המיוחסת למרכז המסה) 123

משפט 9.3 (אנרגיה כובדית של גוף לא נקודתי) 123

נספח 9.1: מרכז מסה של מערכת רציפה 124

פרק 10 תנועה הרמונית 125

10.1 תנועה הרמונית פשוטה 126

10.1.1 תנאי התחלה 128

דוגמה 10.1 (תנועת גוף רתום לקפיץ) 128

10.1.2 משרעת ומופע 129

10.1.3 מדוע לומדים על תנועה הרמונית? 131

10.2 תנועה תחת השפעה של כוח הרמוני וכוח קבוע 132

דוגמה 10.2 (קפיץ, בול, חוט, ומשקולת) 133

10.3 תנועה הרמונית מרוסנת 134

10.3.1 ריסון חזק (היפרקריטי) - $\gamma > \omega_0$ 135



נספח 11.2: סקלרים, וקטורים, וטנזורים 175

נספח 11.3: קואורדינטות מוכללות 176

נספח 11.4: הספין 178

פרק 12 תנועה בהשפעת כוח מרכזי 179

12.1 כוח שמקורו בראשית הצירים 180

דוגמה 12.1 (מסלול של גוף הנע בהשפעת כוח הרמוני) 181

דוגמה 12.2 (בעיית קפלר) 184

חוקי קפלר 186

דוגמה 12.3 (פיזור רתרפורד) 187

12.2 מערכת הבנויה משני גופים 188

דוגמה 12.4 (צמד כדורים מחוברים בקפיץ) 190

נספח 12.1: הווקטור LRL 194

מונחים 195

משוואות עיקריות 197

משפט 11.4 (רציפות גודל המתיחות) 154

דוגמה 11.1 (הציר בעיני המתבונן) 155

דוגמה 11.2 (גלגול על מישור משופע) 155

דוגמה 11.3 (משקולת, חוט וגלגילה) 157

דוגמה 11.4 (ילד הולך על חבית) 159

דוגמה 11.5 (החוט המתלפף II) 160

דוגמה 11.6 (כדור נופל בין שני קירות) 161

קשרים בין ציר סיבוב שרירותי לציר סיבוב שעובר דרך

מרכז המסה 162

משפט 11.5 (פירוק התנע הזוויתי באמצעות מרכז

המסה) 162

משפט 11.6 [משפט הציר המקביל (משפט שטיינר)] 163

דוגמה 11.7 (הגלגל והתותח) 164

דוגמה 11.8 (נחום תקום) 166

11.7 האופי הווקטורי של התנע הזוויתי 168

משפט 11.7 (וקטור תנע זוויתי של גוף שטוח) 168

משפט 11.8 (וקטור תנע זוויתי של גוף סימטרי) 169

דוגמה 11.9 (הקליע המסובב) 169

דוגמה 11.10 (חישוק נע במעגל) 171

נספח 11.1: ציר סיבוב שלא שומר על כיוון קבוע 173

משפט 11.9 (וקטור תנע זוויתי כאשר ציר הסיבוב

מסתובב) 173

מהות הפיסיקה

1

בפרק זה, הפותח את הספר, נעסוק במהות הפיסיקה. תחילה נדון במדע בכלל ובתחומי העניין של הפיסיקה בפרט, ובהמשך נעסוק בגדלים מדעיים וביחידות המעניקות משמעות לגדלים אלה.

1.1 הפיסיקה כמדע

ההבדל בין תחושה למידע אובייקטיבי

ההבדל בין מידע למדע

השיטה המדעית

האופי הרדוקציוניסטי של המדע

אז מהי פיסיקה?

1.2 גדלים מדעיים

יחידות

נספח 1.1: ממדים (dimensions)

נספח 1.2: עדכון יחידות

דגשים ללומד



הבדל בין תחושה למידע אובייקטיבי

נרצה לבטוח במידע שבידינו, נברור ממנו רק את הנתונים שהתקבלו בדרך אמינה. כל נתון אחר יהיה חלקת סברה הטעונה אימות.

של, אם אדם מספר לנו שנכח במסיבה והיה חם ורועש מהרגיל והיו יותר מוזמנים מאשר ברוב המסיבות כונה, זה עדיין לא מידע אובייקטיבי. מידע אובייקטיבי נקבל אם נתקין מדי טמפרטורה ומדי קול בחדרים, פור את המוזמנים שנכנסים, ונשווה את התוצאות למסיבות אחרות.

וע שנסמוך על מד טמפרטורה או על ספירה יותר מאשר על אדם שהיה שם? הסיבה היא שאנשים שונים רשמו באופן שונה מהטמפרטורה או ממספר הנוכחים. לעומת זאת, אם נציב מספר מדי טמפרטורה ימים, כולם יראו את אותה הטמפרטורה בתחום דיוקם, וכל ספירה נכונה תביא לאותה התוצאה.

הבדל בין מידע למדע^[1]

חשבמהלך חודש אפריל בעל מסעדה קונה בכמה הזדמנויות שקיות קמח מצות ומנהל רישום של הוצאותיו:

טבלה 1-1: דוגמה למידע			
תאריך	סוג שקיות	כמות	עלות (ש"ח)
2	200 גרם	2	6
3	200 גרם	3	9
7	200 גרם	7	21
11	500 גרם	2	15
22	500 גרם	4	30

שום זה הוא אמנם מידע, אך הוא איננו מדע. הוא מתאר את המחיר ששולם, אך לא מאפשר לנבא כמה ליה הרכישה הבאה של קמח מצות. מה יקרה, למשל, אם נרצה לקנות 4 שקיות של 200 גרם?

מדע מחפש חוקיות בתוך המידע ומעלה השערות באשר לאותה חוקיות. למשל, על סמך הרישום הנ"ל שר לשער ש-

(א) המחיר בשקלים של n שקיות של 200 גרם הוא $3n$.

(ב) המחיר בשקלים של n שקיות של 500 גרם הוא $7.5n$.

לל, המדע לא מתרכז באירועים בודדים, אלא בתוצאות הניתנות לשחזור. תנאי הכרחי (אך לא מספיק) שיהיגד יהיה מדעי הוא שניתן להציע הליך עקרוני לאישושו ו/או הפרכתו.

לדברי אנרי פואנקרה, מדע בנוי מעובדות כשם שבית בנוי מלבנים, אך אסופת עובדות איננה מדע, ממש כשם שערימת לבנים איננה . לדיון בנושא "פירמידת המידע" עיין בערך "DIKW" בוויקיפדיה.



שיטה המדעית

מור, המדע מחפש חוקיות בתוך המידע ומעלה השערות לגביה. אחרי ההשערה, השלב הבא הוא עריכת ניסוי שבו בודקים אם ההשערה אכן מתקיימת. למשל, כדי לבדוק אם השערה (א) נכונה, אפשר לקנות 5 יריות של 200 גרם ולבדוק אם הן אכן עולות 15 ש. כאשר השערה מאוששת במגוון רחב של ניסויים, האמון בשערה גדל והקהילה המדעית משנה את שמה מ"השערה" ל"חוק". למשל, לאחר שמספר קונים אישרו את הערה (א), אפשר לקרוא לה "חוק השקיות הקטנות", ולאחר שמספר קונים אישרו את השערה (ב), אפשר לקרוא לה "חוק השקיות הגדולות".

לס, אם ניסוי מהימן אחד יראה שהשערה (אפילו השערה שנחשבה לחוק) איננה מתקיימת, אותה השערה סלית, וצריכים לחפש חוקיות אחרת.

אלת השאלה מתי השערה מופרכת בעקבות ניסוי. נניח שמועלית השערה חדשה, השערה (ג), שלפיה מחיר של השקיות עולה בכל חודש ב-0.1%. לפי השערה זו, בעוד חודש מחירה של שקית קטנה לא יהיה 3 ש, אלא 3.003 ש. אך אם המוכר מעגל את המחירים למידת דיוק של 0.01 ש, השקית עדיין תעלה 3 ש.

טיבו של כל ניסוי. ניסוי כרוך במדידות, ולמדידות דיוק מוגבל. ניסוי מצליח להפריך השערה רק כאשר בדל בין תוצאות הניסוי לתוצאות שניבאה ההשערה חורג מתחום האי-ודאות הנובעת ממערכות המדידה.^[2]

רה מעניין במיוחד הוא זה שבו יש יותר מהשערה אחת שמסוגלת לתאר את כל המידע שברשותנו. במקרה החוכמה היא לתכנן ניסוי מכריע, כלומר ניסוי שבו כל אחת מההשערות תנבא תוצאה שונה, ולפי התוצאה תקבלת מחליטים איזו מבין ההשערות עדיין מתאימה להפוך לחוק.

תים, ניסוי לא מסוגל להכריע בין השערות שונות. הדבר יכול לנבוע מכך שהאי-ודאות בתוצאות גדולה י, או מכך שההבדלים בין ההשערות השונות נהיים מהותיים רק בתנאים קיצוניים (כגון במהירויות גבוהות למהירות האור או טמפרטורות קרובות לאפס המוחלט). במקרים אלה נאלצים להשאיר את כל השערות על כנן עד שיתאפשר ניסוי שיש לו היכולת להכריע ביניהן.

מופיי הרדוקציוניסטי של המדע

שי המדע הם ספקנים וחשדנים, אך אינם חסרי אמונה. ראשית, הם מאמינים שאפשר למצוא חוקיות בע. שנית, הם מאמינים שגם תופעות המתאפיינות בהתנהגות מסובכת, כגון מזג האוויר או פעילות בעלי חיים, ניתנות לפירוק שבו כל רכיב מתנהג לפי חוק פשוט.

ו כן, המדע שואף להסביר מגוון תופעות רחב ככל שניתן באמצעות מספר חוקים קטן ככל שניתן. ד ההישגים המרשימים של הפיסיקה הוא התיאור המאוחד של תופעות חשמליות, מגנטיות ואופטיות מצעות אותה מערכת חוקים. לעומת זאת, יעד שהפיסיקה עדיין שואפת אליו אך טרם הושג הוא מציאת גרת חוקים משותפת לגרביטציה ולכוחות נוספים, כגון הכוח החשמלי. אם נחזור לדוגמת שקיות הקמח, קום חוקים נפרדים לשקיות גדולות ולשקיות קטנות, מבחינה מדעית עדיף חוק משותף לשתיהן, למשל, ק האומר שמחיר קמח המצות הוא 0.015 ש לגרם.

יש מספר השערות שמאוששות בניסויים הקיימים, ואם אין הבדל ביכולת החיזוי שלהן, אנשי המדע יעדיפו

דוגמה טובה לספר בנושא:

J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis* (University Science Books, 1997)

