

תוכן

מבוא	11
חלק ראשון: המשבר של הפיזיקה הקלאסית	13
א. טרנספורמציית גליליי	14
1. מערכות אינרציאליות	14
2. תנועה במערכות נעות	21
ב. האור בפיזיקה הקלאסית	33
1. מהירות האור	33
2. המהות הגלית של האור	38
3. אפקט דופלר	42
ג. התופעות האלקטרו-מגנטיות ומהירות האור	50
1. החיפוש אחר האתר	51
2. הניסוי של מייכלסון ומורלי	52
חלק שני: זמן ומרחב בתורת היחסות הפרטית	57
א. תפיסת הזמן והמרחב בתורת היחסות הפרטית	59
1. האינוריאנטיות של מהירות האור בתורת היחסות	59
2. הזמן בתורת היחסות	63
3. ניסוי המיואונים	70
4. התכווצות האורך	72
ב. טרנספורמציית לורנץ	75
1. שימור האינטרוול	75
2. מציאת נוסחת הטרנספורמציה	78
3. טרנספורמציית לורנץ ביחידות הרגילות	87
4. חיבור מהירויות	88
5. זווית המהירות	92
ג. הצגה גראפית של טרנספורמציית לורנץ	95
1. טרנספורמציית הצירים	95
2. האזורים השונים של מרחב מינקובסקי	98
3. הגיאומטריה ההיפרבולית של הטרנספורמציה	104
4. קונוס האור	107
ד. התכווצות האורך בתורת היחסות	112
1. התכווצות הסרגל	112
2. הפרדוקס של סופרמן	116
3. פרדוקס מלחמת החלליות	120
ה. התארכות הזמן בתורת היחסות	125
1. אפקט דופלר היחסותי	125
2. פרדוקס התאומים	129

140	ו. טרנספורמציות לורנץ בשלושה מימדים מרחביים
140	ו.1. תנועה יחסית בציר X
143	ו.2. תנועה יחסית במישור X-y
147	ז. סיכום
149	חלק שלישי: דינמיקה יחסותית
150	א. ארבע-וקטורים בתורת היחסות הפרטית
150	א.1. וקטורים מרחביים בפיזיקה הקלאסית
152	א.2. ארבע-וקטור המקום בתורת היחסות הפרטית
157	א.3. ארבע-וקטור התנע-אנרגיה
161	ב. התנע-אנרגיה של מערכת חלקיקים
161	ב.1. שימור התנע-אנרגיה של מערכת חלקיקים
164	ב.2. הקשר בין מסה ואנרגיה
169	ב.3. אנרגיית הקשר הגרעינית
172	ב.4. מערכת מרכז המסה
175	ג. הפוטונים
178	ג.2. הקוונטיזציה של הפוטונים
180	ג.3. אפקט קומפטון
183	ג.4. צמד פוטונים
184	ג.5. פוטונים וחלקיקים
186	ג.6. סיכום
188	ד. סוף דבר
193	נספחים
194	א. גלים על קצה המזלג
200	ב. טרנספורמציות סיבוב
204	ג. אורכו של מסלול במרחב אוקלידי
206	ביבליוגרפיה

מבוא

ב-30 ביוני 1905 פרסם איינשטיין מאמר שכותרתו "על האלקטרו-דינאמיות של גופים נעים", ובו הניח את היסודות הראשונים לתורת היחסות הפרטית. באותה שנה היה איינשטיין בן 26, ועבד למחייתו כרשם פטנטים בברן שבשווייץ, לאחר שכל מאמציו לקבל משרת הוראה בפיזיקה באחת האוניברסיטאות באירופה נכשלו. המאמר מיוני 1905 היה הראשון בסדרת מאמרים שבהם פיתח איינשטיין את הרעיונות שהרכיבו את התורה שנקראה לימים תורת היחסות הפרטית. רעיונות אלו חוללו שינוי עמוק במחשבה הפיזיקאלית של אותם ימים, והביאו למהפכה בהבנתם של מושגי המקום והזמן.

תורת היחסות הפרטית הופיעה על רקע משבר עמוק של הפיזיקה הקלאסית שהתפתח בסוף המאה ה-19. המשבר פרץ כאשר היה נראה כי שתי התיאוריות הגדולות של הפיזיקה – המכניקה והאלקטרו-מגנטיות, הגיעו לשיא כוחן, והצליחו להסביר כמעט את כל התופעות שנחקרו באותם ימים, כולל האור והתרמודינאמיקה. המשבר שעל רקעו צמחה תורת היחסות הפרטית עסק באחת השאלות היסודיות ביותר בפיזיקה, שהטרידה כבר את היוונים הקדמונים – מהי המשמעות של תנועה, וביחס למי יש למדוד אותה. הדיון של סוף המאה ה-19 התמקד במהירות האור ובמערכת הייחוס שביחס אליה יש למדוד את אותה מהירות. מצד אחד המשוואות האלקטרו-מגנטיות של מקסוול שפותחו במחצית השנייה של המאה ה-19 הראו כי מהירות האור היא גודל יסודי של הטבע הנקבע מתוך הקבועים של משוואות מקסוול, ומצד שני היה ברור לפיזיקאים של אותה תקופה כי מהירות של כל תנועה, כולל מהירות האור, תלויה במערכת שביחס אליה נמדדת אותה תנועה. מהירות אור קבועה מחייבת את קיומה של מערכת מיוחדת שרק ביחס אליה מהירות האור היא המהירות "הנכונה". השאלה מהי אותה מערכת מועדפת עמדה ביסוד המשבר של הפיזיקה.

המאמר של איינשטיין הניח כי קיימות אינסוף מערכות, הנעות זו ביחס לזו במהירות קבועה, שבהם מתקיימים כל חוקי הפיזיקה, כולל המשוואות של מקסוול. יוצא אפוא כי מהירות האור, הנגזרת ממשוואות מקסוול, היא אותה מהירות עבור כל צופה הנמצא באותן מערכות, הנקראות מערכות אינרציאליות. הנחה זו סותרת את האינטואיציה שלנו, האומרת כי שני צופים הנעים זה ביחס לזה מודדים לאותה תנועה מהירות שונה. כדי להסביר את ההנחה הבסיסית של תורת היחסות הפרטית הציע איינשטיין גישה חדשה ביחס למושגי הזמן והמרחב הגורסת כי הזמן והמרחק הם גדלים יחסיים, התלויים בצופה המודד אותם.

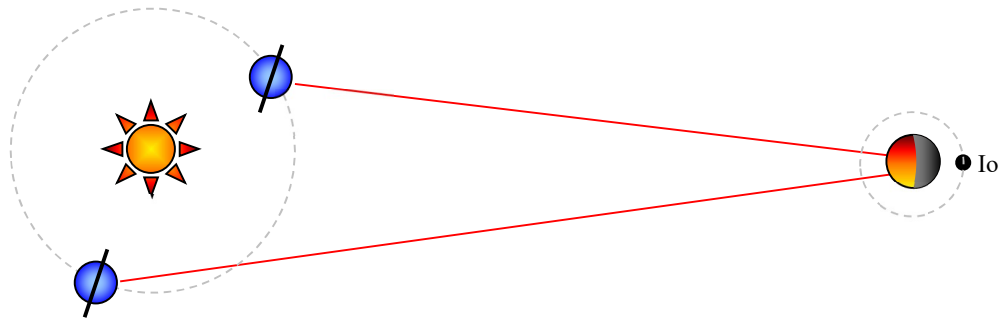
הספר שלפנינו ינתח בחלקו הראשון את המשבר של הפיזיקה הקלאסית, ויראה בחלקו השני כיצד תורת היחסות פתרה את אותו משבר בעזרת גישה חדשה למדידת הזמן והמרחק במערכות אינרציאליות שונות. המעבר של ערכי הזמן והמקום ממערכת אחת למערכת שנייה מתבצע על פי תורת היחסות הפרטית על ידי טרנספורמצית לורנץ, השונה מהותית מן הטרנספורמציה שאנו רגילים לה מן הפיזיקה הקלאסית. על פי טרנספורמצית לורנץ, חוק חיסור המהירויות הוא כזה שהבזק אור הנע במהירות האור במערכת אינרציאלית אחת ינוע באותה מהירות בכל המערכות האינרציאליות. המחיר שאנו משלמים הוא כבד, ונוגד את האינטואיציה שלנו – בעזרת

טרנספורמציית לורנץ נקבל כי הזמן החולף בין שני אירועים תלוי בצופה המודד אותם, וכך גם המרחק בין שתי נקודות, שגם הוא משתנה במעבר מצופה לצופה.

החלק השלישי של הספר שלפנינו יסקור את הדינאמיקה של הפיזיקה היחסותית, המחליפה את הדינאמיקה הניוטונית שמשלה בכיפה במשך 318 שנה, מאז פרסום ספרו של ניוטון "העקרונות המתמטיים של מדעי הטבע" בשנת 1687. הדינאמיקה היחסותית מפתיעה גם היא, במיוחד הקשר שבין מסה ואנרגיה הנחשף במסגרתה. מצד אחד הפוטונים – חלקיקי האור, נושאים איתם אנרגיה למרות שהם חסרי מסה, ומצד שני המסה של גופים כוללת יחד איתה אנרגיה עצומה, לפי הנוסחה המפורסמת $E = mc^2$. חוק שימור התנע-אנרגיה של תורת היחסות כולל גם את אנרגיית המנוחה, היכולה להפוך לאנרגיה קינטית במקרים מסוימים. הבנה זו את הקשר שבין מסה ואנרגיה סיפקה תשתית מושגית הכרחית לתיאוריה הפיזיקאלית של הגרעין שהופיעה כמה עשרות שנים אחר כך. הבנת מקור האנרגיה של השמש, הפיתוח של פצצות הגרעין והמימן והפעלתם של כורים גרעיניים, כולם בנויים על הקשר שבין מסה ואנרגיה שבסיסו בתורת היחסות הפרטית. מה שנראה היה כחשיבה תיאורטית לחלוטין, שאין לה ולעולם המעשי דבר וחצי דבר, התברר תוך עשרות שנים כמרכיב הכרחי בטכנולוגיות עתירות עוצמה.

החשיבה החדשה של תורת היחסות הפרטית, שנכפתה עלינו על ידי התצפיות והמדידות המודרניות, הכריחה אותנו לזנוח את אופני החשיבה הישנים, ולאמץ תפיסה חדשה של העולם, במיוחד בדבר מהות המקום, הזמן, החומר והאור. בסופו של דבר, תורת היחסות הצעידה אותנו עוד צעד קטן קדימה במסע המפותל של האדם בניסיון להגיע להבנה עמוקה יותר של היקום שמסביבו ושל החוקים השולטים בו.

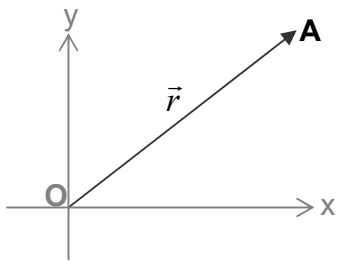
חלק ראשון: המשבר של הפיזיקה הקלאסית



חלק זה יתמקד בשני נושאים מרכזיים של הפיזיקה הקלאסית. הנושא הראשון עוסק בשאלה מהי המערכת הנכונה שביחס אליה אנו צריכים למדוד את המיקום, המהירות והתאוצה של הגופים שעבורם מתקיימים חוקי ניוטון. מתוך הדיון בשאלה זו יתברר לנו כי חוקי המעבר בין מערכות הנעות זו ביחס לזו במהירות קבועה מאפשרים לנסח את חוקי ניוטון ביחס לאינסוף מערכות – המערכות האינרציאליות. החלק השני עוסק באור ובמיוחד במהירותו. ניסויים שונים שבוצעו במהלך המאה ה-19 הובילו להכרה כי האור הוא תופעה גלית, המתקדמת במהירות קבועה הניתנת למדידה. מהירות האור התגלתה באופן מפתיע גם מתוך התיאוריה האלקטרו-מגנטית, כשהתברר שמשוואות מקסוול המתארות את השדות האלקטרו-מגנטיים מובילות למשוואות גלים המתקדמים בדיוק במהירות האור. הכישלון לזהות את המערכת שביחס אליה נמדדת מהירות ההתקדמות של האור בפרט, ושל הגלים האלקטרומגנטיים בכלל, ובמיוחד הניסיון של מייכלסון ומורלי, הוביל את הפיזיקה הקלאסית בסופה של המאה ה-19 למשבר עמוק שממנו הגיחה תורת היחסות.

א. טרנספורמציית גליליי

חוקי המכניקה עוסקים במהירות ותאוצה של גופים נקודתיים. המהירות והתאוצה נקבעים ביחס לצופה המתבונן בהם, או ביחס למערכת צירים המזוהה עם אותו צופה. ברור לכל, כי שני צופים הנעים זה ביחס לזה, למשל, והמתבוננים בתנועתו של גוף, יראו אותה בצורה שונה. למרות הראיה השונה, התנועה נשארת אותה תנועה, כמובן. פרק זה ידון בתיאורים השונים האפשריים של תנועתו של גוף, ובחוקי המעבר בין התיאורים השונים. בניסוח פורמאלי קצת יותר, פרק זה יעסוק בחוקי הטרנספורמציה ממערכת צירים אחת לשנייה. טרנספורמציה כזאת תקרא טרנספורמציית גליליי. ננסה לברר מה משותף לתיאורים השונים של אותה תנועה. ההבחנה בין אותן תכונות של התנועה המשותפות לכל הצופים ובין האפיונים של התנועה התלויים בצופה המתבונן תעזור לנו להגיע להבנה עמוקה יותר של חוקי הפיזיקה.

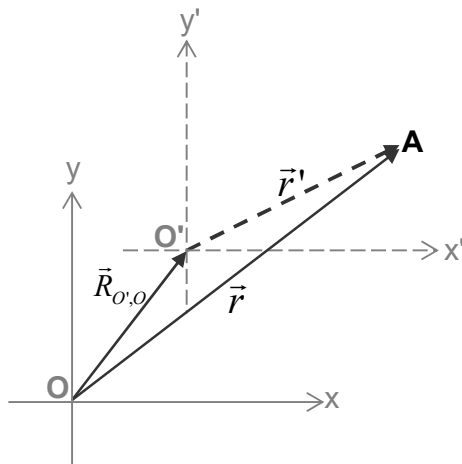


איור א-1: מערכת הקואורדינטות O

א.1. מערכות אינרציאליות

המעבר הפשוט ביותר בין שתי מערכות צירים (או בין שני צופים) הוא המעבר בין שתי מערכות צירים שלהן צירים מקבילים, הנעות זו ביחס לזו.

א.1. טרנספורמציית המעבר



איור א-2: מערכת O' ביחס למערכת O

תהי מערכת קואורדינטות O, שבה כל נקודה במרחב (לדוגמא, הנקודה A שבאיור א-2) מיוצגת על ידי וקטור המתאר את מיקומה של הנקודה ביחס לראשית הצירים של המערכת.

נסתכל על המערכת O' אשר ראשיתה ביחס למערכת O נתון באמצעות הווקטור $\vec{R}_{O',O}$.

הווקטור $\vec{r}$ מייצג את מיקומה של הנקודה A במערכת O, ו- $\vec{r}'$ את מיקומה במערכת O'. הקשר בין $\vec{r}$ ל- $\vec{r}'$ הוא:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{R}_{O',O} \quad (א-1)$$

זוהי, למעשה, טרנספורמציית המעבר

מקואורדינטות במערכת O' לקואורדינטות במערכת O. נשים לב כי הצירים של שתי המערכות מקבילים זה לזה. ההבדל ביניהם הוא במיקום הראשית בלבד.