

הקדמה

בשנת 1905 פרסם אלברט אינשטיין סדרת מאמרים בכתב העט המדעי Annalen der Physik. מסמך זה הוא תרגום לעיברית של המאמר "האם ההתמד של גוף תלוי בתכולת האנרגיה שבו".

הערות תרגום:

1. במונח "מהירות" הכוונה תמיד למהירות-מכוונת (velocity).

המאמר תורגם ונערך ע"י יונתן זלפה.

האם ההתמדה של גוף תלוי בתכולת האנרגיה שבו

אלברט אינשטיין

לספטמבר, 1905

תוצאות המחקרים הקודמים הובילו אותנו למסקנות מעניינות מאוד, מסקנות אשר נסיק אותן כאן.

אני מבסס את המחקר על משוואות מקסוול-הרתיז עבור המרחב הריק, יחד עם ביטוי מקסוול עבור האנרגיה האלקטרומגנטית של המרחב, ובתוספת העיקרון הבא:

החוקים שעל פיהם משתנים המצבים של מערכות פיזיקליות אינם נתונים לשינוי. עבור שתי מערכות צירים הנעות באופן יחסי (אחת מהשניה) בתנועה טרנסלטורית מקבילית וקצובה, החוק הזה ידוע בשם עיקרון היחסות

בהתבסס על העיקרון הזה¹ נסיק, בין היתר, את המסקנה הבאה:

נניח שמערכת צירים (x, y, z) בעלת אנרגיה l^* מתייחסת למערכת של מישור גלים של אור; נניח שכיוון הקרן (הנורמל של הגל) יוצרת זווית ϕ עם ציר ה- X של המערכת. אם מכניסים מערכת צירים חדשה (ξ, η, ζ) הנעה בתנועה טרנסל-טורית מקבילית קצובה ביחס למערכת (x, y, z) , בצורה כזאת שראשית הצירים של המערכת (ξ, η, ζ) נע לאורך ציר ה- x במהירות v , אזי הגודל הזה של האור

¹עיקרון המהירות הקבועה של האור מוכל במשוואות מקסוול

שנמדד במערכת (ξ, η, ζ) מכיל את האנרגיה

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

כאשר מציין את מהירות האור. בתוצאה זו נשתמש בהמשך.

נניח שהמערכת (x, y, z) מכילה גוף שנמצא במנוחה (ביחס למערכת (x, y, z)) ונניח שהגוף נושא אנרגיה l_0 ביחס למערכת (x, y, z) , כמו כן, נניח שהאנרגיה של הגוף במערכת (ξ, η, ζ) שווה ל- l_0 (כאשר, כמובן, הגוף נע במהירות v ביחס למערכת (ξ, η, ζ)).

נניח שגוף זה שולח, בכיוון שיוצר זווית ϕ עם ציר ה- x , גלים של אור בצורת מישור בעלי אנרגיה $\frac{1}{2}$ שנמדדת ביחס למערכת (x, y, z) , כמו כן נניח שבאופן סימולטני, כמות שווה של אור נשלחת מהגוף בכיוון המנוגד. בינתיים הגוף נותר במנוחה ביחס למערכת (x, y, z) . עיקרון האנרגיה תקף לתהליך הזה, ולמעשה (לפי עיקרון היחסות) הוא תקף ביחס לשתי מערכות הצירים. אם האנרגיה הנמדדת של הגוף לאחר פליטת האור תסומן ב- l_1 ו- l_1 ביחס למדידות מהמערכות (x, y, z) ו- l_0

(ξ, η, ζ) בהתאמה, אז באמצעות שימוש ביחס הנתון נוכל לקבל

$$\begin{aligned} 0 &= l_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}, \\ 0 &= l_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{1}{2} \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ 1 &= \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned}$$

באמצעות חיסור המשוואות הללו אנו מקבלים

$$0 - 0 = (l_1 - l_1) \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

לשתי הפרשים המופיעים בביטוי זה (ההפרשים מהצורה $0 - 0$) יש משמעות פיזיקלית פשוטה. האותיות ו- l_1 שמופיעות בביטוי זה הם ערכי אנרגיה של אותו גוף המתייחסים לשתי מערכות צירים שנמצאות בתנועה יחסית אחת מהשנייה, הגוף עצמו נמצא במנוחה באחת ממערכות הצירים הללו (במערכת (x, y, z)).

לפיכך, ברור שההבדל בין $-$ ובין האנרגיה הקינטית של הגוף, ביחס למערכת (ξ, η, ζ) , הוא קבוע חיובי, שתלוי בבחירה השרירותית של קבועים עבור $-$ ו- $+$, לפיכך נוכל להציב

$$0 - 0 = 0, \quad ,$$

$$1 - 1 = 1, \quad ,$$

מאחר ובמהלך פליטת האור לא משתנה, אנו מקבלים

$$0 - 1 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} - 1 \right)$$

כתוצאה מפליטת האור חל פיחות בכמות האנרגיה הקינטית של הגוף, ביחס למערכת (ξ, η, ζ) , פיחות זה אינו תלוי בתכונותיו של הגוף. יתרה מזו, בדומה לאנרגיה הקינטית של האלקטרון, ההפרש $0 - 1$ תלוי במהירות. על ידי הזנחת הגדלים ממעלה רביעית ומעלה נוכל להציב

$$0 - 1 = \frac{1}{2}v^2$$

ממשוואה זו נובע ישירות:

אם גוף משחרר אנרגיה בצורה של קרינה, אז המסה שלו פוחתת בשיעור של 2 . העובדה שהאנרגיה שנפלטת מהגוף הופכת לאנרגיית קרינה איננה משנה, וזה מוביל אותנו למסקנה כללית יותר לפיה המסה של גוף נמדדת לפי תכולת האנרגיה שלו; אם האנרגיה משתנה ב- $-$, אז המסה תשתנה על ידי 9×10^{20} , האנרגיה נמדדת בארגים ואילו המסה נמדדת בגרמים.

אין זה בלתי אפשרי להראות שהתורה עובדת גם עבור גופים בעלי תכולת-אנרגיה גבוהה (כדוגמת מלח רדיום).

אם התורה מתאימה לעובדות, אז קרינה נושאת אינרציה (התמדה) בין גוף פולט לגוף סופג.