

על חוקי ניוטון

ΕΙΝΟΣ ΗΡΑΚΛΗΣ, ΣΟΚΡΑΤΗΣ, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ, ΑΙΝΑΡΣΤΟΤΕΛΗΣ

החוק השלישי מהווה ניסוח כללי, המתאים גם למקרים הפרטיים בהם יש לנו נתונים נוספים שמהם ניתן להסיק את קיום החוק הזה ללא ניסוחו המפורש. המקרים האלה אכן משמשים הדגמה לתקפותו של החוק השלישי של ניוטון.

חשיבותו של החוק השלישי היא בכך שממנו ניתן להסיק את עקרון שימור התנע. במקרה בו גוף 1 פועל על גוף 2 בכוח f_2 והוא חופשי לנוע, נקבל לפי החוק השני:

$$(2) \quad \frac{dP_2}{dt_2} = f_2$$

כאשר P_2 הוא התנע של גוף 2 ו- dt_2 הוא משך הזמן בו פועל הכוח על הגוף. לפי החוק השלישי, גוף 2 פועל על גוף 1 בכוח f_1 , השווה ל- $-f_2$, ולכן, לפי החוק השני:

$$(3) \quad \frac{dP_1}{dt_1} = f_1 = -f_2 = \frac{dP_2}{dt_2}$$

מכיוון ש- $dt_1 = dt_2$ (משך הזמן בו פועלים הגופים האחד על השני שווה לשניהם), אנו מקבלים: $dP_1 = -dP_2$, ולכן **התנע**

הכולל נשמר במערכת בה אין פועלים כוחות חיצוניים. נראה לי שמיותר להסביר את חשיבותו של עקרון שימור התנע. אפשר אמנם לטעון שמעקרון שימור התנע אפשר להסיק את החוק השלישי, אבל זה כבר ענין של בחירה, ולבטח ניתן לעשות זאת רק במקרים בהם פעולת הכוחות יוצרת שינויים במצב התנועה.

ג. החוק השני

הטיעון של עדי לגבי אי תקפותו של החוק השני לגבי צופה הנמצא בתאוצה ביחס למעבדה נובע מכך שלפני כן הוא כבר הוציא אל מחוץ לחוק (כהנחה סמויה) את כוח ההתמדה. על חוקיות הפעולה הזו אפשר ללכת לבג"ץ, וקיימים עליה דיונים מעניינים מאד, בהם נוטלים חלק גדולי הפיסיקאים. כדי להמחיש את הבעיה נרשום את החוק השני בצורה שהוצעה על-ידי ד'אלמבר (d'Alembert):

$$(4) \quad f - ma = 0$$

מבחינה מתמטית, הניסוח הזה אינו שונה מזה המופיע במשוואה (1), אולם בניסוח הזה, הביטוי ma מבטא את הכוח בו מתנגדת המסה m להאצתה, שהוא כוח ההתמדה. אפשר לראות בניסוח כזה את החוק הראשון, בו סכום הכוחות מתאפס. אגף ימין של המשוואה ($=0$) מבטא את השינוי במצב התנועה של הגוף, הנוצר על-ידי סכום הכוחות המופיע באגף שמאל של המשוואה, לכן, מצב התנועה נשאר ללא שינוי, מצב התנועה הזה הוא מצב בו למסה יש תאוצה, והמצב הזה, בו קיימת תאוצה, נשאר קבוע מכיוון שהכוח הפועל על המסה

קראתי בענין את "קריאתו" של עדי רוזן להוציא את חוקי ניוטון אל מחוץ לחוק (הטבע). אני רואה בקריאה כזו אתגר לדין רציני על משמעותם של החוקים, ובכך היא תורמת תרומה חשובה להבנת הפיסיקה הנלמדת. אוסיף כאן את תרומתי הצנועה לדין זה:

א. החוק הראשון

מבחינה מתמטית אכן אפשר לראות את החוק הראשון במקרה פרטי של החוק השני. נרשום את החוק השני:

$$(1) \quad f = ma$$

ברור שאם אגף שמאל של המשוואה מתאפס, חייב גם אגף ימין שלה להתאפס, ומכיוון שאנו עוסקים במסה שאינה שווה לאפס, חייבת התאוצה להתאפס. אולם מבחינת המשמעות, נראה לי שהחוק הראשון של ניוטון אומר דבר חשוב מאד, והוא ששינוי במצב התנועה של גוף יתרחש רק אם יפעל כוח על הגוף הזה, כאשר הניסוח הוא - **ללא פעולת כוח על גוף, יישמר מצב התנועה של הגוף ללא שינוי.** בגישה כזו, החוק הראשון הוא בעצם יישום עיקרון הסיבתיות במכאניקה, והחוק השני הוא ניסוח כמותי של העיקרון הזה.

עיקרון הסיבתיות הוא עקרון יסוד בהשקפת עולם מדעית, ונראה לי שאי אפשר לוותר עליו. בהרבה מקרים איננו מזכירים אותו מכיוון שהוא קיים כהנחת רקע (או הנחה סמויה) בשיקולינו. אולם כאשר עולה בעייה עקרונית, יש לו תפקיד חשוב בקביעת קווים מנחים, לדוגמה - קביעת סדר אירועים לאורך ציר הזמן של מאורעות הקשורים באופן סיבתי. קביעה כזו מגדירה עתיד מוחלט ועבר מוחלט בתורת היחסות הפרטית.

ב. החוק השלישי

בדוגמה המובאת על-ידי עדי רוזן אכן ניתן להסיק את החוק השלישי מן החוק השני, אולם לא תמיד ניתן לעשות זאת. בדוגמה הנדונה, הכוח הפועל והכוח הנגדי השפיעו באופן ישיר על תנועת הגופים, ולכן, ניתן להסיק על הכוחות מניתוח תנועת הגופים, לפי החוק השני. אולם במקרים בהם הכוחות אינם יוצרים שינויים במצב התנועה של גופים, לא ניתן להשתמש בחוק השני, יש דוגמאות שבהן ניתן להסיק מסקנות על הכוחות וגודלם גם ללא תנועה. למשל, כאשר שני קפיצים מתכווצים כתוצאה מפעולה הדדית ביניהם, ניתן להשתמש בחוק הוק ובקבועי הכוח של הקפיצים ושיעור התכווצותם, כדי להסיק את החוק השלישי של ניוטון, גם ללא שימוש בחוק השני. אולם גם זה מקרה פרטי אשר לא תמיד מתקיים. בפעולה הדדית בין שני גופים בה לא נוצר כל שינוי מכאני - לא שינוי בתנועה ולא עיוות בצורה - אין לנו כל דרך להסיק מסקנות על הכוחות. אמנם סכום הכוחות בנקודת המגע בין הגופים מתאפס, אולם פעולתם תהיה בהחלט משמעותית לגבי כל גוף אחר שאיתרע מזלו להיקלע אל בין הגופים. לכן,

מאפס את כוח ההתמדה.

הרעיון שמצב של תנועה מואצת הוא לגיטימי כמו מצב של תנועה במהירות קבועה, היה הבסיס לפיתוח תורת היחסות הכללית, כאשר תמיכה לכך שימש עקרון מאך, הרואה גם בכוח ההתמדה אינטראקציה של המסה המואצת עם כל שאר המסות ביקום. **לפי עקרון מאך**, האינטראקציה של מסה מסויימת עם מסות אחרות כוללת את האינטראקציה הסטאטית, המתבטאת בכוח הגרביטציה המופיע בניסוח הקלסי של ניוטון, ואינטראקציה נוספת, דינאמית, המופיעה כאשר המסה המסויימת מואצת ביחס למסות האחרות.

האינטראקציה הזאת מתבטאת בכוח ההתמדה. (במקביל, אנו מכירים באלקטרודינמיקה את האינטראקציה הסטאטית, המתבטאת בכוח קולון בין מטענים, ואת האינטראקציה הדינאמית, המתבטאת בכוח שמפעיל שדה מגנטי על מטען הנמצא בתנועה).

לסיכום - במקום להוציא את חוקי ניוטון אל מחוץ לחוק ולהראות מתי ניתן להסתדר בלעדיהם, כדאי להעמיק לחקור בהם ולהראות כיצד החקירה הזו מעמיקה את הבנתנו את הטבע, וכיצד יש להרחיב את החוקים האלה בהתאם להתפתחויות של המדע בימינו.