

"ואף על פי כן - נוע תנוע..."* - תשובה שונה לשאלה מוכרת

אורי גניאל, המחלקה להוראת המדעים



ציור הומוריסטי כזה, או דומה לו, מוכר לכל מורה לפיסיקה. כאשר יביא מורה דוגמה זו לתלמידיו, וישאל "האם יוכל היושב בסירה להניעה קדימה בדרך זו?", תהיה תשובתם של רוב התלמידים הטובים, אלה ש"הבינו את החומר", - "לא", וכשיתבקשו לנמק, הם יסתמכו בדרך זו או אחרת על חוק שימור התנע.

נבדוק את העניין. לשם פשטות דיון, נניח תחילה כי המפרש מוחלף בקיר קשיח המחובר לסירה, שמישורו ניצב לצירה האורכי. נניח כי הסירה נמצאת במנוחה והנוסע זורק כדור פלדה הפוגע בקיר וניתז ממנו לאחור. התנוע הסירה קדימה?

נניח תחילה כי התנגשות הכדור בקיר היא אלסטית לחלוטין. הזורק הקנה לכדור תנע \vec{p} . בגלל שימור התנע, קיבלה הסירה (כלומר: המערכת המורכבת מן הזורק, הסירה, הקיר וכו') תנע $-\vec{p}$. הכדור פוגע בקיר, ניתז לאחור, והתנע שלו לאחר ההתנגשות הוא $-\vec{p}$ (בכך

* גליליאו גליליי (1564-1642), בהקשר שונה לגמרי ...

קל להיווכח בחישוב ישיר). שינוי התנע $\Delta \vec{p}$ של הכדור עקב ההתנגשות הוא:

$$\Delta p = (\vec{p}_f) - (\vec{p}_i) = -p - p = -2p$$

כאשר סימנו ב- p_i את תנע הכדור לפני ההתנגשות וב- p_f את התנע שלו אחרי ההתנגשות. שינוי התנע של המערכת הוא על כן $+2p$, ובסך הכל התנע של הסירה הוא עכשיו $\vec{p} - \vec{p} + 2\vec{p} = \vec{p}$.

אם הכדור נופל מחוץ לסירה, יוצא כי בסך הכל נוסף לסירה תנע p , לגבי מצבה התחילתי, ולכן היא תנוע קדימה! אם הכדור נופל בתוך הסירה, ברור כי התנע שלו $(-\vec{p})$ מוחזר למערכת והתנע שלה מתאפס ($+\vec{p} - \vec{p} = 0$), דהיינו: במקרה זה הסירה תישאר במנוחה. ההנחה שלנו בדבר האלסטיות של ההתנגשות משפיעה על הדיון רק מבחינה כמותית.

הגבול האחר הוא של התנגשות פלסטית, דהיינו: לאחר ההתנגשות הכדור נעצר ביחס לסירה. מקרה זה זהה למקרה בו הכדור נופל לתוך הסירה (התנע \vec{p} של הכדור נמסר למערכת, ולכן היא נותרת במנוחה). בכל מקרי הביניים, שבין התנגשות אלסטית לחלוטין להתנגשות פלסטית לחלוטין, יהיה שינוי התנע של הסירה: $\Delta \vec{p} \neq 0$: $0 \leq \Delta p \leq p$ (הוא הרכיב של התנע בכיוון ניצב לקיר).

נחזור אל הנוסע הנושף. כדור הפלדה בדיון הקודם מוחלף במולקולות הגז (חמצן, חנקן...), והקיר מוחלף במפרש. אם נניח שמולקולה שהיתה במנוחה (הנחה בלתי ריאליסטית זו אינה פוגעת בכלליות הדיון) נדחפה על-ידי הנוסע, בנשיפה, בעזרת מפוח, או בכל דרך אחרת, היא תקבל תנע כלשהו. המשך הדיון זהה לדיון שערכנו לעיל. מאחר ומולקולות האוויר אינן נשארות בתוך הסירה, ברור כי הסירה תרכוש תנע בכיוון הנשיפה. אכן, "בכל זאת, נוע תנוע...".

השגיאה בתשובה השלילית שנותנים רוב הנשאלים לשאלה זו, נובעת מן השימוש בחוק שימור התנע, הנכון עבור מערכת סגורה. מאחר ובתהליך משתתפות מולקולות אוויר העוזבות את המערכת, אין המערכת סגורה. תפקיד המפרש הוא להפוך את כיוון התנע של המולקולות הפוגעות בו (במקרה האלסטי מ: $\vec{p} + \vec{p}$ ל: $-\vec{p}$). אילמלא ניצלנו את המפרש, והאוויר היה נדחף לאחור מלכתחילה, היה כל נשאל מבין כי הסירה אכן תנוע בכיוון מנוגד לכיוון הנשיפה. ברור כי המפרש נעשה אז מיותר, והוא רק מפריע לסירה לנוע ...



באופן עקרוני, שני המקרים דומים, אך הנסיון לנצל את המפרש גורר טעות בשיקול אצל רוב הנשאלים. ולבסוף: האם מוכן מישהו לערוך את הניסוי?