

## סיכום – אפקט דופלר

אפקט דופלר הוא שינוי בתדירות כתוצאה מתנועה יחסית בין המקור לצופה. נטפל במקרה בו המקור נע והצופה נח. כך יהיה לנו צופה אחד שהוא **צופה נע** הנמצא על המקור, והוא בעל אותה מהירות כמו המקור, וצופה שני שהוא **צופה נח**. המהירויות הן ביחס לתווך שבו עובר הגל, ועל פי המוסכמה הרגילה שלנו שלפיה תנועה ימינה היא חיובית ותנועה שמאלה היא שלילית. זה יראה למשל כך:



המקור פולט גל (או כדורים, או כל דבר מחזורי אחר) בתדירות המקורית אותה נסמן  $f_0$  (ביחידות הרץ Hz). נניח כאן כי תדירות זו ידועה והמקור קובע אותה. המקור יכול לנוע ביחס לצופה הנח (כלומר גם ביחס לתווך). נסמן  $v_{\text{מקור}}$  מהירות המקור הנע ביחס לצופה הנח וביחס לתווך. נניח כאן כי מהירות זו ידועה והמקור קובע אותה. הגל, או כל אובייקט אחר שנפלט מהמקור (למשל כדורים), נע במהירות  $v_{\text{אובייקט ביחס לנח}}$  או בקיצור  $v_{\text{אובייקט}}$  ביחס לצופה הנח וביחס לתווך. אם הוא גל, נסמן את מהירותו  $v_{\text{גל}}$ . נניח כאן כי מהירות זו ידועה. אם מדובר בגל קול המתקדם באוויר, מהירותו  $330 [m/s]$ . הצופה הנח קולט תדירות שונה מזו שפולט המקור. נסמן את התדירות הזו  $f'$ . תדירות זו אינה ידועה לנו כאן, ואנו נחפש קשר בין כל הגדלים הקודמים, שידועים לנו, שממנו נוכל לחשב את התדירות  $f'$ . כדי לחפש קשר בין שתי התדירויות, נשתמש בשני ביטויים שמצאנו בעבר:

1. הדבר הראשון שנסתמש בו הוא **מהירות יחסית**: כל צופה רואה את הגל (או הכדורים, או כל אובייקט אחר) נע במהירות אחרת. נגדיר את המהירויות:

מהירות האובייקט ביחס לצופה הנח (למשל מהירות הקול במקרה של גל קול)  $v_{\text{אובייקט ביחס לנח}}$   
מהירות הצופה הנע ביחס לצופה הנח  $v_{\text{נע ביחס לנח}}$

צופה נע, הנמצא על המקור ונע יחד איתו, יראה את מהירות האובייקט כך:

$$v_{\text{נע ביחס לנח}} - v_{\text{אובייקט ביחס לנח}} = v_{\text{אובייקט ביחס לנע}}$$

זהו ביטוי **כללי לתנועה יחסית**. ראינו דוגמאות עבורו לכל מיני חיות שרודפות אחת אחרי השנייה. נזהה כי במקרה של גל שנפלט על ידי מקור, נע ביחס לנח, היא מהירות המקור ביחס לצופה הנח, ובקיצור  $v_{\text{מקור}}$ . למשל, מהירות הרמקול או האמבולנס או מכונה שפולטת כדורים.

כאשר מדובר בגל נוכל לכתוב בקיצור פשוט  $v_{\text{גל}} = v_{\text{אובייקט}} = v_{\text{אובייקט ביחס לנח}} \cdot v_{\text{במקרה של קול}}$  .  
 מדובר במהירות של 330 מטרים בשנייה.

כך נכתוב את המהירות של הגל כפי שרואה אותה הצופה הנע עם המקור:

$$(1) v_{\text{מקור}} - v_{\text{גל}} = v_{\text{גל ביחס לנע}} \quad (1)$$

המשוואה מסומנת (1) כדי שנוכל להתייחס אליה בהמשך. נוח יותר לעקוב אחר הפיתוח כאשר המשוואות ממוספרות.

2. הביטוי השני שקיבלנו בעבר הוא הקשר בין אורך הגל  $\lambda$ , התדירות  $f$  ומהירות הגל  $v$ . ראינו בעבר את הקשר הבא:

$$(2) f = \frac{v}{\lambda}$$

כאשר  $\lambda$  (למבדא) אורך הגל. אורך הגל אינו תלוי בצופה, והוא פשוט המרחק בין שתי פאזות זהות של הגל. אם מדובר בכדורים, אז אין לנו ממש "אורך גל", ובמקומו יש פשוט את המרחק בין כדור לכדור.

המהירות של הגל  $v$  תלויה במהירות הצופה. לכן עבור כל צופה – אחד נח, ושני נע עם המקור – תהיה מהירות אחרת וגם תדירות אחרת.

באמצעות הצבת המהירות המתאימה לכל צופה במשוואה מספר (2) נוכל לקבל שתי משוואות חדשות:

עבור הצופה הנח:

$$(3) f_0 = \frac{v_{\text{גל}}}{\lambda}$$

עבור הצופה הנע נכתוב משוואה דומה:

$$(4) f' = \frac{v_{\text{גל ביחס לנע}}}{\lambda}$$

כעת נקשר בין הביטויים עבור הגלים לביטוי עבור המהירות היחסית:

במשוואה מספר (4) נרצה להציב כעת את הביטוי למהירות יחסית, הכתוב במשוואה מספר (1).

נרצה לעשות זאת משום שמהירות הגל ביחס לצופה הנע אינה נתונה לנו. לעומת זאת, מהירות הגל בתווך ידועה, ומהירות המקור (והצופה הנע איתו) ידועה. כך נקבל את הצורה הבאה:

$$(5) f' = \frac{v_{\text{גל}} - v_{\text{מקור}}}{\lambda}$$

כדי לקבל קשר בין התדירויות, נרצה לחלק את משוואה (5) במשוואה (3), ונקבל משוואה מגושמת במיוחד (אבל רק לרגע. תכף נסדר אותה). המשוואה נראית כך:

$$\frac{f'}{f_0} = \frac{(v_{\lambda} - v_{\text{מקור}}) / \lambda}{v_{\lambda} / \lambda}$$

אפשר לראות כי גם במונה וגם במכנה אנו מחלקים ב  $\lambda$ . כל פעולת כפל או חילוק הנעשית גם במונה וגם במכנה מצטמצמת. לכן נישאר עם הביטוי הבא:

$$\frac{f'}{f_0} = \frac{v_{\lambda} - v_{\text{מקור}}}{v_{\lambda}}$$

אם נרצה כעת לקבל ביטוי לתדירות  $f'$  עצמה, נכפול את שני האגפים ב  $f_0$ .

$$f' = f_0 \times \frac{v_{\lambda}}{v_{\lambda} - v_{\text{מקור}}}$$

הקשר הזה בין התדירויות הוא אפקט דופלר עבור **מקור נע וצופה נח**.

חשוב לציין כי קיים גם אפקט דופלר במקרה שהמקור נח והצופה נע, או ששני הצופים נעים, אבל בזה לא נטפל כרגע.

נזכור כי במקום גל יכולים להיות גם כדורים או כל אובייקט אחר שנפלט מהמקור בתדירות המקורית.

נבדוק את התוצאה שקיבלנו. למשל, מה קורה אם המקור אינו נע? במקרה זה,  $v_{\text{מקור}} = 0$  והתדירות הנקלטת שווה לתדירות הנפלטת (ודאי שהבנת מדוע).

מה קורה אם הגל נע ימינה, אבל המקור נע שמאלה? במקרה כזה מהירות המקור שלילית, ואז נצטרך לחסר במכנה מספר שלילי ("מינוס מינוס"). חשוב לדעת איך לעשות זאת. למשל,

$$5 - (-3) = 5 + 3 = 8$$

שימו לב: הפיתוח הזה מדגים כיצד מקבלים בפיסיקה תוצאה חדשה על בסיס תוצאות קודמות שקיבלנו בעבר. חשוב להבין מה קורה בו, משום שבהמשך לימודי הפיסיקה תיתקלו בפיתוחים דומים.

לצורך המבחן חשוב לדעת כיצד להשתמש בתוצאה הסופית שקיבלנו

$$f' = f_0 \times \frac{v_{\lambda}}{v_{\lambda} - v_{\text{מקור}}}$$