

## פיזיקה 2A

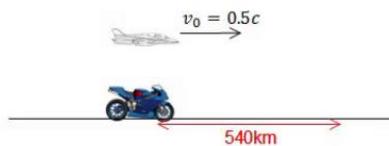
### פרק 25 - יחסות פרטית

#### תוכן העניינים

|    |                                  |
|----|----------------------------------|
| 1  | . טרנספרמציה לורנץ למיקום והזמן  |
| 3  | . טרנספורמציה לורנץ לזמן         |
| 4  | . תרגילים לטרנספרמציה מיקום וזמן |
| 7  | . דינמיקה יחסותית                |
| 10 | . תרגילים לדינמיקה יחסותית       |
| 12 | . כוחות ודינמיקה יחסותית         |
| 14 | . תרגילים נוספים                 |

## טרנספורמציה לורנץ למיקום והזמן:

שאלות:



### 1) מציאת מהירות ומיקום אופנווע

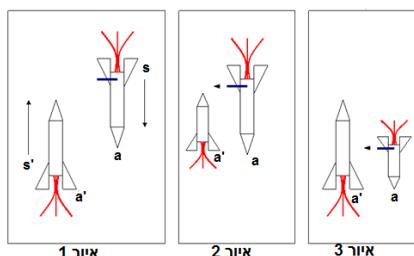
אופנווע נסע ב מהירות קבועה בקו ישר. צופה על הקרקע מודד כי האופנווע נסע מרחק של 540km.

צופה הנע ב מיטוס ממש מהיר  $v = 0.5c$ , בכיוון נסיעת האופנווע,

מודד כי משך זמן נסיעת האופנווע היה 0.01 שניות.

א. מצא את מהירות האופנווע ב מערכת כדיה"א.

ב. מצא את המרחק שעבר האופנווע כפי שמדד הצופה ב מיטוס.



### 2) בדיקת ירי

שתי חלליות בעלות אורק מנוחה זהה, עוברות זו במקביל זו ב מהירות גבואה.

בזבב החללית S מצוי תותח המכונן בניצב לכיוון תנועת החללית ולעבר מסלול התנועה של החללית 'S' (איור 1).

בחללית S מתבצעת בדיקת ירי בתותח ברגע

שהנקודה a בראש החללית מתלכדת עם הנקודה 'a' (זנב 'S').

מכיוון שאורק החללית 'S' קצר מהאורק העצמי בחללית ב-S מניחים כי הטיל יפספס את החללית השנייה (איור 2).

אולם ב מערכת 'S' אורק החללית S קצר מהאורק העצמי ולכן כאשר a ו-'a'

מתלכדות האסטרונואוט S יפגע (איור 3).

ישבי את הفرضוקס.

### 3) מוט פולט אור לשירוגין

מוט בעל אורק  $l_0$  נע ב מהירות  $v$  נתונה ביחס לכדיה"א.

נתון כי  $x = 0$  הנקודה השמאלי של המוט נמצא ב- $x = 0$ .

ברגע זה המוט פולט אור מקצהו הימני.

לאחר זמן  $\tau$  המוט פולט אור מקצהו הימני.

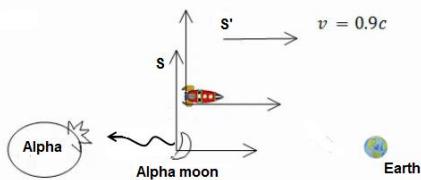
מצא את הפרש הזמןים כפי שראה אותם צופה מכדיה"א  
(הפרש הזמןים בין הגעת האור משני המאורעות בראשית).



**(4) פיצוץ בכוכב אלפה**

החללית אנטרייז יוצאת מכוכב אלפה חוזרת לכדה"א. בדרך היא עוברת ליד הירח של כוכב אלפה ורואה פולס אלקטרו מגנטי חזק יוצא לכיוון הכוכב. ידוע שבירח ישנה קבוצת חייזרים תוקפניים בשם "קליגונים". 1.3 שניות מאוחר יותר היא רואה פיצוץ בכוכב. המרחק בין הכוכב לירח שלו הוא 500 מיליון מטרים כפי שנמדד במערכת החללית. מהירות החללית ביחס לכוכב ולירח היא  $c = 0.9c$ .

- מהו מרוחץ הזמן בין גילוי הגל לפיצוץ במערכת הכוכב והירח?
- מה משמעות הסימן בהפרש הזמן?
- אם הפולס גורם לפיצוץ או להיפך?

**תשובות סופיות:**

$$(1) \text{ א. } x'_2 = -10.32 \cdot 10^5 \text{ m} \quad \text{ב. } v = 5.65 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

(2) ראה סרטון.

$$(3) \Delta t = \gamma_0 (1 + \beta) \left( \tau - \frac{l_0}{c} \right)$$

$$(4) \text{ א. } t_3 = -3.525 \text{ sec} \quad \text{ב. הפיצוץ היה לפני הגעת הגל לכוכב וגם לפני ירי הגל.}$$

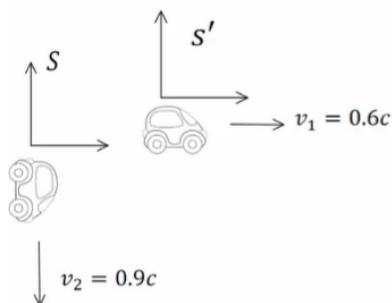
ג. לא יכול להיות שהפיצוץ גורם לירוי של הפולס,  $m \cdot 10^8 \cdot 10^8 \text{ m} > 10.575 \cdot 10^8 \text{ m}$

## טרנספורמציה לורנץ ל מהירות:

**שאלות:**

**1) מהירות יחסית בין מכוניות**

שתי מכוניות נסעות האחת במאונך לשנייה כך שמהירות המכונית הראשונה היא  $0.6c$  ומהירות המכונית השנייה היא  $0.9c$ .  
מצא את המהירות היחסית.

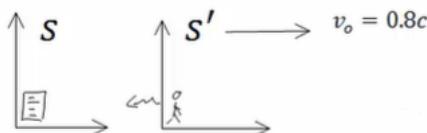


**תשובות סופיות:**

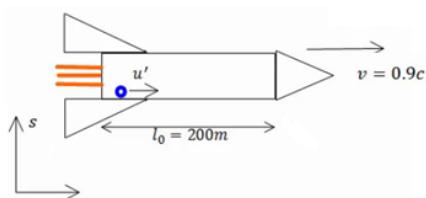
$$v'_{2_x} = -0.6c, v'_{2_y} = -0.72c \quad (1)$$

## תרגילים לתרנספרמציה מיקום ומהירות:

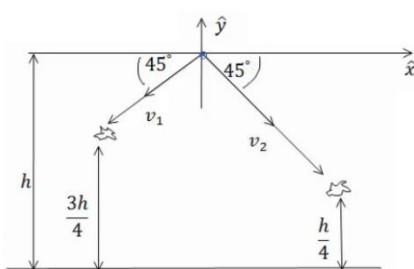
**שאלות:**



- 1) דודה יוצא לטיוול**  
 המבחן בפיזיקה התחיל בשעה 00:00 והמשגיחה  
 יצאה לטיוול ב מהירות  $c = 0.8c$  (דודה זריזה במיוחד).  
 לאחר שעה לפיה שעונה היא שולחת לסטודנטים  
 אותן רדיו לסייע את הבחינה.  
 כמה זמן ארכה הבחינה עבור הסטודנטים?



- 2) כדור מתגלגל בחללית**  
 חללית בעלת אורך עצמי של 200 מטר נעה  
 ב מהירות  $c = 0.9c$  ביחס למערכת אינרציאלית S.  
 כדור קטן מתגלגל לאורכה ב מהירות  $c = 0.04c$  ב  
 בכיוון ציר x, כפי שנמדד ע"י צופה ב החללית.  
 א. מהי מהירות הכדור כפי שנמדד ע"י צופה ב-S?  
 (הבא את התשובה ביחידות של c).  
 ב. מהו הזמן שייקח לכדור לעבור מקצתו לקצה של החללית כפי שנמדד ב-S?  
 (הבא את התשובה ב מיליוןיות שנייה).  
 ג. איזה מרחק עבר הכדור לפני צופה ב מערכת S? (ביחידות של ק"מ).



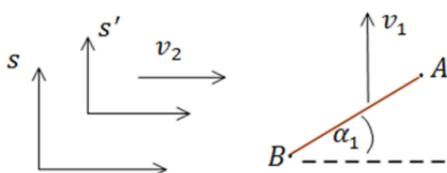
- 3) חלקיקים נוצרים בגובה ומתרפרקים**  
 שני חלקיקים נוצרים בגובה  $h$  מעל הקרקע.  
 אחד נפלט בזווית 225 מעלות עם ציר ה- $x$   
 והשני בזווית 45 – מעלות עם ציר ה- $x$ .

החלקיק הראשון מתרפרק לאחר זמן T בגובה  $\frac{3h}{4}$   
 והחלקיק השני מתרפרק לאחר זמן  $T_2$  בגובה  $\frac{h}{4}$ .  
 התעלם מהכבידה בבבואה.

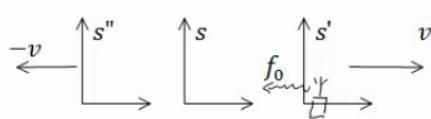
- א. הבע את מהירותיו החלקיים באמצעות  $h$  ו-  $T$ .  
 ב. מצא את זמן החיים העצמי של כל חלקיק (זמן החיים ב מערכת המנוחה).  
 ג. מצא מערכת 'S' הנעה בכיוון החיובי של ציר ה- $x$  בה התפרוקיות  
 מתרחשות באותו הזמן.  
 ד. מה המרחק בין ההתפרוקיות ב מערכת 'S'?

**4) מיוואו מתפרק ליד אלקטרון**

- מיוואו ( $\mu$ ) נוצר ברגע מסוים ונע ב מהירות  $c_0 = 0.7$  ביחס לקרקע. המיוואו מתפרק לאחר שגע 3 ק"מ ממקום היוצרו.
- כמה זמן חי המיוואו במערכת העצמית שלו?
  - אלקטרון נע במקביל למיוואו וב מהירות  $c_0 = 0.5$  ביחס למעבده.
  - מהי מהירות המיוואו ביחס לאלקטרון?
  - איזה מרחק נע המיוואו ביחס לאלקטרון.

**5) זווית של מוט נע**

מוט בעל אורך 1 (לא נתון) נע ב מהירות  $v_1$  בכיוון ציר ה- $y$  ביחס לצופה הנמצא במעבדה. הצופה במעבדה מודד זווית  $\alpha_1$  של המוט ביחס לציר ה- $x$ . איזו זווית ימודד צופה הנע ב מהירות  $\hat{v}_2$  ביחס למעבדה?

**6) תדר יחסי**

במערכת  $s'$  הנעה ב מהירות  $v$  ביחס למערכת המעבדה  $S$ , נמצא משדר רדיו הפולטאותות בתדרות  $f_0$ ?

- מה תהיה התדריות שתיקלט במעבדה?
- מה תהיה התדריות שתיקלט במערכת  $s'$  הנעה ב מהירות  $\hat{v} = -v$  ביחס למעבדה?

**תשובות סופיות:**

$$\Delta t = 1.08 \cdot 10^4 \text{ sec} \quad (1)$$

$$x_1 = 10.78 \text{ km} . \lambda \quad t_1 = 39.62 \mu\text{s} . \beth \quad v_x = 0.907c . \aleph \quad (2)$$

$$\tau_1 = T \sqrt{1 - \frac{h^2}{8T^2c^2}}, \quad \tau_2 = 2T \sqrt{1 - \frac{9h^2}{64T^2c^2}} . \beth \quad v_1 = \frac{h}{2\sqrt{2}T}, \quad v_2 = \frac{3h}{4\sqrt{2}T} . \aleph \quad (3)$$

$$d'^2 = \frac{\frac{5h^4}{4} - 3c^2T^2h^2 + c^4T^4}{h^2 - c^2T^2} . \beth \quad v_0 = \frac{c^2T}{h} . \lambda$$

$$\Delta x_{12} = 0.98 \text{ km} . \lambda \quad V_{12} = 0.31c . \beth \quad \tau = 10^{-5} \text{ sec} . \aleph \quad (4)$$

$$\tan \alpha' = \gamma_2 \left( \tan \alpha_1 + \frac{v_1 v_2}{c^2} \right) \quad (5)$$

$$f'' = \sqrt{\left( \frac{1-\beta}{1+\beta} \right)^2} f_0 . \beth \quad f_s = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} f_0 . \aleph \quad (6)$$

## динамיקה יחסותית:

**שאלות:**

**1) הגעת נויטרונו ממרחקים**

מצא את האנרגיה הדרישה לנויטרונו להגיע לכדור הארץ מרחק של 5 שנות אור בהינתן שזמן החיים של נויטרונו הוא 881 שנים והמסה שלו היא:  $M_n = 940MeV/c^2$ .

**2) התנגשויות בסיסית**

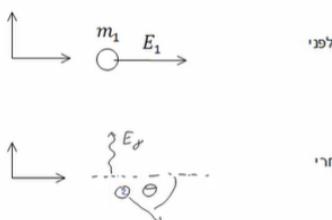
חלקיק בעל מסה  $m$  מתנגש בחלקיק בעל מסה  $3m$ .  
לחקליק הראשון אנרגיה כוללת לפני ההתנגשיות  $5mc^2$  ונתון כי התנע הכלול שלהם במערכת המעבדה הוא אפס. כהוצאה מההתנגשויות שני החלקיקים מושמדים ונוצר חלקיק חדש הנמצא במנוחה.

א. מצאו את האנרגיה הקינטית של החלקיק הראשון.

ב. מצאו את פקטורי לורנץ של החלקיקים לפני ההתנגשויות ואת האנרגיה הקינטית של החלקיק השני.

ג. מצאו את מסת החלקיק הנוצר לאחר ההתנגשויות.

**3) חלקיק מתפרק לפוטון וחלקיק נוסף**



חלקיק בעל אנרגיה כוללת  $E_1$  ומסת מנוחה  $m_1$  נע במעבדה בכיוון החיוויי של ציר ה- $x$ .

ברגע מסוים מתפרק החלקיק לפוטון וחלקיק נוסף.  
אנרגיה הפוטון נתונה  $E_y$  וידוע כי הפוטון נע בציר  $-y$ , בכיוון החיוויי.

א. מהו התנע של החלקיק הראשון לפני ההתפרקות?

ב. מהי הזווית של התנע של חלקיק 2 ביחס לציר ה- $x$ ?

ג. מצא מערכת ייחוס חדשה י' שבה הפוטון יפלט בכיוון נגדי לכיוון תנועתו של חלקיק מס' 2.

מה מהירותה של מערכת זו ביחס למערכת המעבדה?

**4) פוטון פוגע בפרוטון ויוצר פיאו**

פוטון פוגע בפרוטון הנמצא במנוחה במערכת המעבדה.  
נתונות מסת הפרוטון והפיאו  $M_p$ ,  $M_\pi$ .

מהי האנרגיה המינימלית הדרישה לפוטון על מנת שלאחר ההתנגשויות ייווצרו פרוטון ופיאו ( $\pi$ )?

5) דוגמה - חישוב תנע ואנרגיה קינטית של אלקטרון ופרוטון  
חשבו את התנע והאנרגיה הקינטית של פרוטון ואלקטרון בעלי אנרגיה של  $1\text{GeV}$  במערכת המעבדה.

6) דוגמה - גמה וביטה של אלקטרון  
מסת האלקטרון היא:  $9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$  ומהירות האור היא:  $299792458 \text{ m/sec}$ .  
מצאו בדיק ש 6 ספירות את  $\gamma$  ו- $\beta$  של אלקטרון שהאנרגיה הקינטית שלו היא:  $K = 100.000\text{MeV}$  במערכת המעבדה.

7) בטיח של מיליאונים מתפרקים  
מסת מיליאון היא פי 207 מסת האלקטרון.  
זמן מחצית החיים הממוצע של מיליאון הוא  $2.20 \mu\text{s}$ .  
מיליאונים נעים ביחס למעבדה בניסוי קלשו.  
זמן החיים הנמדד של המיליאונים ביחס למערכת המעבדה הוא:  $6.90 \mu\text{s}$ .  
מהם  $\beta$ , התנע והאנרגיה הקינטית של המיליאונים ביחידות  $\frac{\text{MeV}}{\text{c}}$ ?

**תשובות סופיות:**

$$E_n = 1.69 \cdot 10^8 \text{ MeV} \quad (1)$$

$$m_3 = 6.91m_e \quad \gamma_1 = 5, \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{11}{3}}, \quad E_{k_2} = 3mc \left( \sqrt{\frac{11}{3}} - 1 \right) \cdot v \quad E_{k_1=4mc^2} \cdot v \quad (2)$$

$$\tan \theta = -\frac{E_\gamma}{\sqrt{E_1^2 - m_1^2 c^4}} \cdot v \quad \vec{p}_1 = \sqrt{\left(\frac{E_1}{c}\right)^2 - m_1^2 c^2} \cdot \hat{x} \cdot v \quad (3)$$

$$v_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{m_1 c^2}{E_1}\right)^2} \cdot c \cdot v$$

$$E_\gamma = \frac{1}{2m_p} (m_\pi^2 + 2m_\pi m_p) c^2 \quad (4)$$

$$K = 0.999 \text{ GeV}, P = 1 \frac{\text{GeV}}{c} : \text{אלקטرون} \quad (5)$$

$$K = 0.062 \text{ GeV}, P = 0.347 \frac{\text{GeV}}{c} : \text{פרוטון}$$

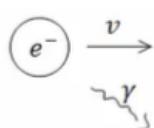
$$\gamma = 196.695, \beta = 0.999987 \quad (6)$$

$$\beta = 0.898, P = 314 \frac{\text{MeV}}{c}, K = 226 \text{ MeV} \quad (7)$$

## תרגילים לדינמיקה יחסותית:

**שאלות:**

- 1) חלקיק מתפרק לשני חלקיקים**  
 חלקיק בעל מסה  $m$  הנמצא במנוחה מתפרק לשני חלקיקים בעלי מסות מנוחה  $m_1$ ,  $m_2$ .  
 מה יהיו האנרגיה והתנע של החלקיקים שנוצרו? (כל המסות נתונות).



- 2) אלקטرون חופשי פולט פוטון**  
 הראו כי אלקטרון חופשי הנע בזווית אינו יכול לפולט פוטון בודד.

- 3) התנגשות חלקיקים זהים ויצירת חלקיקים**  
 חלקיק בעל מסת מנוחה  $m$  פוגע בחלקיק זהה לו הנמצא במנוחה. כתוצאה מההתנגשות נוצרים שני חלקיקים בעלי מסות מנוחה  $m_1$  ו-  $m_2$ .  
 מצא את אנרגיית הסף לייצור ריאקציה זו. (הנש ש:  $(m_1 + m_2) > 2m$ ).

- 4) פיוון מתפרק**  
 פיוון ( $\pi^+$ ) מתפרק למיאוון חיובי ( $M_\mu = 160Me \frac{c}{c^2}$ ) לפני ההתרפרקות  
 וניטרינו חסר מסה.  
 מצא את מסת המנוחה של הפיוון אם למיאוון אנרגיה קינטית של  $5MeV$ .

- 5) פוטון מתנגש אלסטי באלקטרון**  
 אלקטרון נע במהירות  $v$  ומתנגש בפוטון בעל אנרגיה  $E_\gamma$  הנע ל夸רכתו.  
 מצא את הערך של  $v$  אם ידוע כי הפוטון מוחזר באותו אנרגיה בה פגע.  
 הנש כי מסת האלקטרון ידועה.

### תשובות סופיות:

$$, E_1 = m_1 c^2 \gamma_1 = \frac{c^2}{2m} (m^2 + m_1^2 - m_2^2) , p_1 = c \sqrt{\frac{1}{2m} (m^2 + m_1^2 - m_2^2)^2 - 1} \quad (1)$$

$$E_2 = m_2 c^2 \gamma_2 = \frac{c^2}{2m} (m^2 + m_2^2 - m_1^2) , p_2 = m_2 c \sqrt{\gamma_2^2 - 1} = c \sqrt{\frac{1}{2m} (m^2 + m_2^2 - m_1^2)^2 - 1} \quad (2)$$

שאלת הוכחה.

$$E_{\min} = \frac{1}{2m} c^2 ((m_1 + m_2)^2 - 2m^2) \quad (3)$$

$$M_\pi = 144 \frac{MeV}{c^2} \quad (4)$$

$$v = c \left| 1 - \left( \left( \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \right)^2 + 1 \right)^{-1} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

## כוחות ודינמיקה יחסותית:

**שאלות:**

**1) דוגמה-כוח קבוע בזמן**

כוח קבוע  $F$  פועל על חלקיק בעל מסה  $m$  הנמצא במנוחה.  
מצא את מהירות החלקיק כתלות בזמן.

**2) כוח קבוע**

כוח קבוע  $F$  פועל על חלקיק יחסותי בעל מסה  $m$  המתחיל תנועתו ממנוחה.

- כתוב את משוואת התנועה של החלקיק.
- מצא את מהירות החלקיק כתלות בזמן.
- מצא את מיקום החלקיק כתלות בזמן.
- רשום תנאי ומהירות נוכחות והראה שהביוטי שקיבלה למהירות ולמיקום מתכנס לפתרון הקליני ב מהירות נוכחות.

$$\text{ה. ציר גוף של מהירות היחסותית והקליני כתלות בזמן עד זמן } t = \frac{mc}{F}.$$

$$\text{ו. ציר גוף של המיקום היחסותי והקליני כתלות בזמן עד זמן } t = \frac{mc}{F}$$

**3) כוח גורר מתכונתי לתנועה היחסותי**

כוח קבוע  $F$  פועל על מסה  $m$  המתחילה תנועתה במערכת המעבדה.  
בנוסף פועל על המסה כוח גורר המתכונתי לתנועה היחסותי  $f = -\lambda v$  כאשר  $\lambda$  קבוע נתון.

א. רשום משוואת תנועה לתנועה היחסותי.

ב. פטור את המשוואת ומצא מהו קבוע הזמן האופייני להתייכבות התנועה על ערך קבוע.

ג. מצא את מהירות הגוף כתלות בזמן.

ד. מהי מהירות בגבול של זמנים קצרים וזמן ארכויים ביחס ל קבוע הזמן שמצויה בסעיף ב? להזכיר הפתרון של המקרה הקליני בו פועל כוח קבוע  $F$  על גוף וכוח גורר  $f = -\lambda v$ .

$$\text{ קבוע } F \text{ על גוף וכוח גורר } f = -\lambda v \text{ הוא: } v(t) = \frac{F}{\lambda m} (1 - e^{-\lambda t}).$$

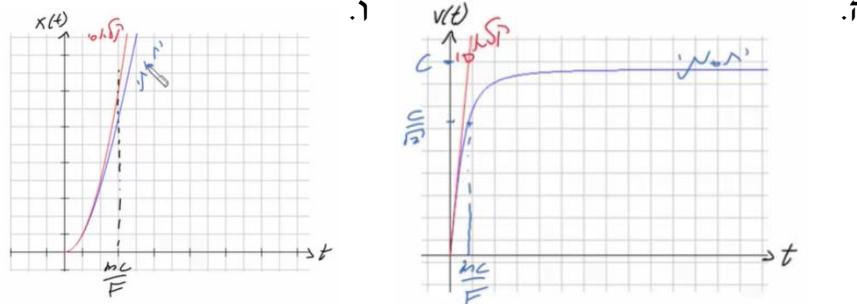
**תשובות סופיות:**

$$v(t) = \frac{\frac{F \cdot t}{m}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F \cdot t}{mc}\right)^2}} \quad (1)$$

$$v = \frac{\frac{Ft}{m}}{\left(1 + \left(\frac{Ft}{mc}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

ד. ראה סרטון.

$$x(t) = \frac{mc^2}{F} \left( \left(1 + \left(\frac{Ft}{mc}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \quad (2)$$



$$p(t) = \frac{F}{\lambda} \left(1 - e^{-\lambda t}\right), \quad \tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

$$F - \lambda p = \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

ד. זמן קצר

$$v(t) \approx \frac{F}{\lambda m} \left(1 - e^{-\lambda t}\right) = v(t) \quad (4)$$

$$v(t) = \frac{\frac{F}{\lambda m} \left(1 - e^{-\lambda t}\right)}{\left(1 + \left(\frac{F}{\lambda mc} \left(1 - e^{-\lambda t}\right)\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

זמן ארוך:

$$v(t) \approx \frac{\frac{F}{\lambda m}}{\left(1 + \left(\frac{F}{\lambda mc}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \neq v(t) = \frac{F}{\lambda m} \quad (6)$$

## תרגילים נוספים:

**שאלות:**

**1) פוטון מתנגש ומעבר למרכו מסה**



פוטון עם אנרגיה  $E_0$  מתנגש אלסטית עם חלקיק בעל מסה  $m$  הנמצא במנוחה (במערכת המעבדה).

- מצא את מהירות מערכת מרכז המסה של המערכת פוטון פלוס חלקיק.
- מצא את התנוע והאנרגיה של החלקיק והפוטון לפני ההתנגשות במערכת מרכז המסה.
- מצא את התנוע והאנרגיה של הפוטון והחלקיק אחרי ההתנגשות אם ידוע שהפוטון מפוזר בזווית  $\theta$  ביחס לכיוון בפגיעה במערכת מרכז המסה (ראה איור).
- מהם האנרגיה והערך המוחלט של התנוע של הפוטון והחלקיק לאחר ההתנגשות במערכת המעבדה?
- מצא את הזווית  $\theta$  עבורה האנרגיה של הפוטון במערכת המעבדה תהיה מינימלית.

**2) שאלת 1**

נתונים שני גופים הנעים בניצב זה לזה. ידוע כי מסת הגוף זהה ושווה ל-  $M$ , וכן כי התנעים של הגוף הם :  $p_1, p_2$ .

ברגע מסוים, הגוף מתנגשים ומופיעים ארבעה גופים חדשים. מסות הגוף החדש שנוצרו הן :  $m, 2m, 3m, 4m$ . מהו  $m$  המקסימלי האפשרי?

$$\text{נתון : } p_1 = 6Mc, p_2 = 17Mc$$

**3) שאלת 2**

נתונים שני חלקיקים בעלי מסה  $m$ , וכן נתונות האנרגיות שלהם  $E_1, E_2$ . החלקיקים נעים זה אל עבר זה, ומתנגשים.

חשבו את מסת החלקיק  $M$  הנוצר כתוצאה מההתנגשות החלקיקים. נתון :  $E_1 = 4mc^2, E_2 = 7mc^2$ .

**4) שאלה 3**

שתי חלליות יוצאות מאותה נקודת, בכיוון ניצב אחת לשנייה.

חללית א' טסה ב מהירות  $v_1$ , וחללית ב' טסה ב מהירות  $v_2$ .

חשבו את וקטור המהירות של חללית ב' ביחס לחללית א'.

$$\text{נתון : } v_1 = 0.8c(+\hat{x}), v_2 = 0.9c(-\hat{y})$$

**5) שאלה 4**

חלקיקים 1,2 נוצרים במעבדה ונמצאים במנוחה.

ידוע לגבי זמני החיים שלהם כי:  $t_2 = 0.75t_1$  (במצב מנוחה חלקיק 2 נעלם

לפני חלקיק 1).

מהי המהירות אליה יש להאיץ את חלקיק 2, כדי שלא ידעך לפני חלקיק 1?

**6) זריקה אופקית יחסותית**

מסלולו של חלקיק במערכת S נתון ע"י:  $y = \frac{1}{2}at^2$ ,  $y = vt$ ,  $x = at$  כאשר  $a$ ,  $v$  קבועים ידועים.

מצא את תאוצת החלקיק במערכת S הנעה ב מהירות  $v$  בכיוון ציר ה- $x$  ביחס ל- $S$ .

תאר את צורת המסלול בשתי המערכות ( $v$  אינה זיניה ביחס ל מהירות האור).

### תשובות סופיות:

$$v_{c.m} = \frac{E_0 \cdot c}{mc^2 + E_0} . \quad (1)$$

$E'_{pH} = E_0 \sqrt{\frac{mc^2}{2E_0 + mc^2}}$  ,  $P'_{pH} = \frac{E_0}{c} \sqrt{\frac{mc^2}{2E_0 + mc^2}}$  : ב. פוטון לפני ההתנגשות :

$E'_m = mc^2 \left( \frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{m^2 c^4 + 2E_0 mc^2}} \right)$  ,  $P'_{m_x} = \frac{-mE_0 c}{\sqrt{m^2 c^4 + 2E_0 mc^2}}$  : חלקיק לפני ההתנגשות :

פוטון אחרי ההתנגשות : אותו דבר כמו לפני ההתנגשות.

חלקיק אחרי ההתנגשות : אותו דבר כמו לפני ההתנגשות.

כיוון התנוע :  $\vec{P}_{pH} = (P(-\cos \theta), P \sin(\theta), 0)$  ,  $\vec{P}_m = -\vec{P}_{pH} = (P \cos \theta, P \sin \theta, 0)$

$$E'_m = mc^2 \left( \frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{m^2 c^4 + 2E_0 mc^2}} \right) , |P_m| = \sqrt{\left( \frac{E_m}{c} \right)^2 - m^2 c^2} . \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} . \quad (3)$$

$$m_{max} \approx 1.45M \quad (4)$$

$$M \approx \sqrt{112}m \quad (5)$$

$$\vec{v} = (-0.8c, -0.54c, 0) \quad (6)$$

$$v \approx 0.66c \quad (7)$$

$$x' = 0 , y' = \frac{1}{2} a \gamma_0^2 t'^2 \quad (8)$$