

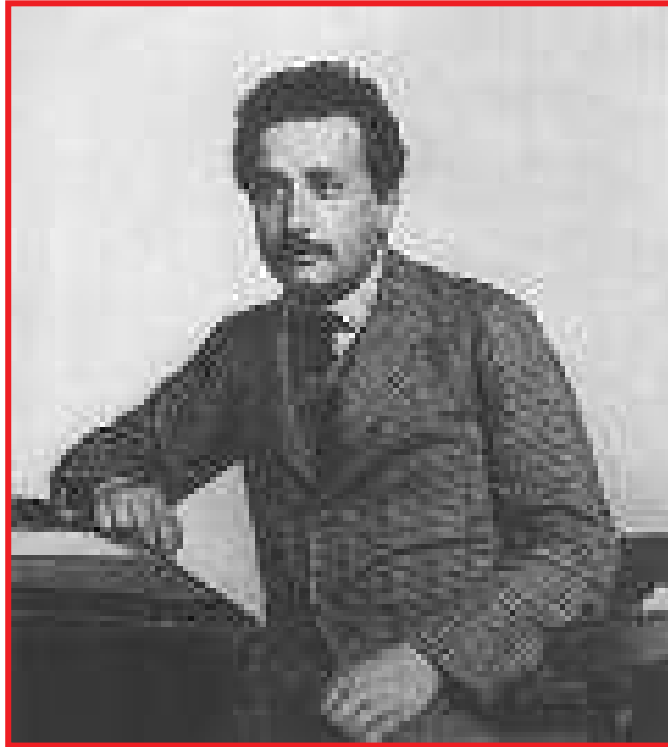


פרופסור צבי מזא"ה

עקרון היחסות של חוקי המכניקה

חוקי המכניקה הם אותם החוקים
בכל המערכות הנעות במהירות קבועה זו ביחס לזו.

**אין אפשרות למדוד מהירות
מוחלטת.**



**ON THE ELECTRODYNAMICS
OF MOVING BODIES**

By A. Einstein

June 30, 1905

It is known that Maxwell's electrodynamics--as usually understood at the present time--when applied to moving bodies, leads to asymmetries which do not appear to be inherent in the phenomena. Take, for example, the reciprocal electrodynamic action of a magnet and a conductor. The observable phenomenon here depends only on the relative motion of the conductor and the magnet, whereas the customary view draws a sharp distinction between the two cases in which either the one or the other of these bodies is in motion. For if the magnet is in motion and the conductor at rest, there arises in the neighbourhood of the magnet an electric field with a certain definite energy, producing a current at the places where parts of the conductor are situated. But if the magnet is stationary and the conductor in motion, no electric field arises in the neighbourhood of the magnet. In the conductor, however, we find an electromotive force, to which in itself there is no corresponding energy, but which gives rise--assuming equality of relative motion in the two cases discussed--to electric currents of the same path and intensity as those produced by the electric forces in the former case.

ידוע כי התורה האלקטרומגנטית של מקסוול, כפי שהיא מובנת בימינו, כשהיא מיושמת לגופים נעים, מובילה לא-סימטריות שאינן, כך נראה, חלק מהותי מן התופעה.

ניקח, למשל, את הפעולה ההדדית שבין מגנט ומוליך. במקרה כזה האפקט הנראה תלוי רק במהירות היחסית שבין המגנט ובין המוליך, בעוד שההבנה המקובלת מבדילה בצורה חדה בין המקרה שבו נע אחד מן הגופים לבין המקרה שבו נע הגוף השני.

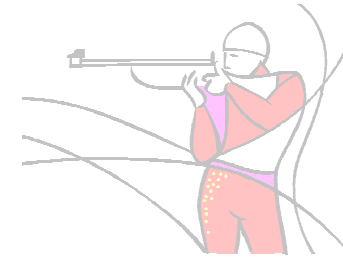
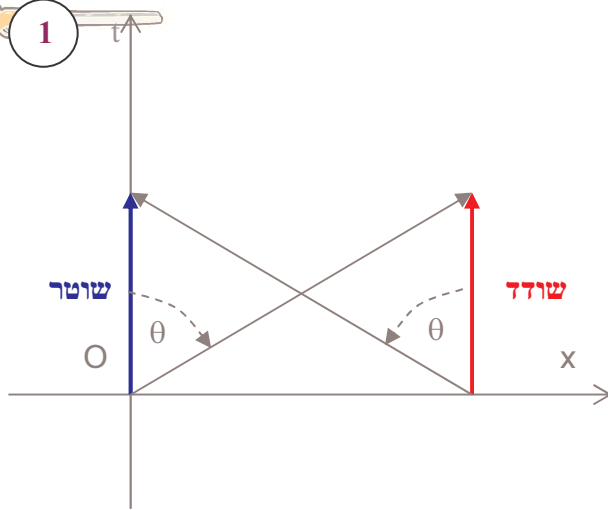
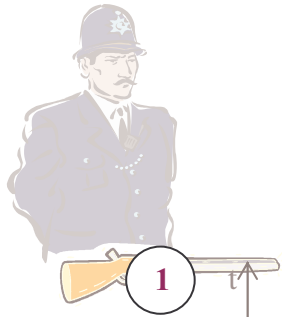
Examples of this sort, together with the unsuccessful attempts to discover any motion of the earth relatively to the "light medium," suggest that the phenomena of electrodynamics as well as of mechanics possess no properties corresponding to the idea of absolute rest. They suggest rather that, as has already been shown to the first order of small quantities, the same laws of electrodynamics and optics will be valid for all frames of reference for which the equations of mechanics hold good.¹ We will raise this conjecture the purport of which will hereafter be called the "Principle of Relativity" to the status of a postulate, and also introduce another postulate, which is only apparently irreconcilable with the former, namely, that light is always propagated in empty space with a definite velocity c which is independent of the state of motion of the emitting body. These two postulates suffice for the attainment of a simple and consistent theory of the electrodynamics of moving bodies based on Maxwell's theory for stationary bodies. The introduction of a "luminiferous ether" will prove to be superfluous inasmuch as the view here to be developed will not require an "absolutely stationary space" provided with special properties, nor assign a velocity-vector to a point of the empty space in which electromagnetic processes take place.

דוגמאות מעין אלה, יחד עם הניסיונות הלא מוצלחים לגלות תנועה של כדור הארץ ביחס ל"תווך האור", תומכים בהשערה כי לתופעה האלקטרן-מגנטית, כמו למכניקה, אין שום תכונה הקשורה למושג המרחב המוחלט.

להפך, תופעות אלה תומכות בהשערה, כפי שכבר הראו בקירוב לסדר ראשון, כי אותם חוקים של האלקטרומגנטיות תקפים בכל המערכות שבהם תקפים חוקי המכניקה.

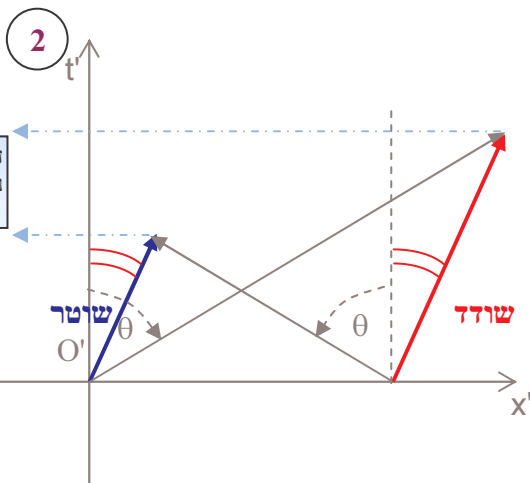
אנו נקדם השערה זו לדרגת הנחה שנקרא לה העיקרון היחסותי

וכן נוסיף עיקרון נוסף, שרק נראה כסותר את העיקרון הראשון, והוא כי מהירות האור בריק היא תמיד קבועה, ואינה תלויה במהירות של הגוף הפולט את האור



צופה הנמצא במערכת הקרון

"רב פקד אזולאי והשוודד גבריאל עמדו במנוחה בקרון כשהם מביטים זה בעיניו של זה. פתאום שלפו שניהם את האקדחים וירו ממש באותה השניה. גם לשודד וגם לשוטר היו את אותם האקדחים, ולכן מהירותם של שני הכדורים היתה שווה. המרחק שעברו שני הכדורים מרגע היריה עד הפגיעה היה שווה, ולכן רב פקד אזולאי וגבריאל נפגעו ממש באותו הרגע. מסכן השוטר, כפרה עליו."

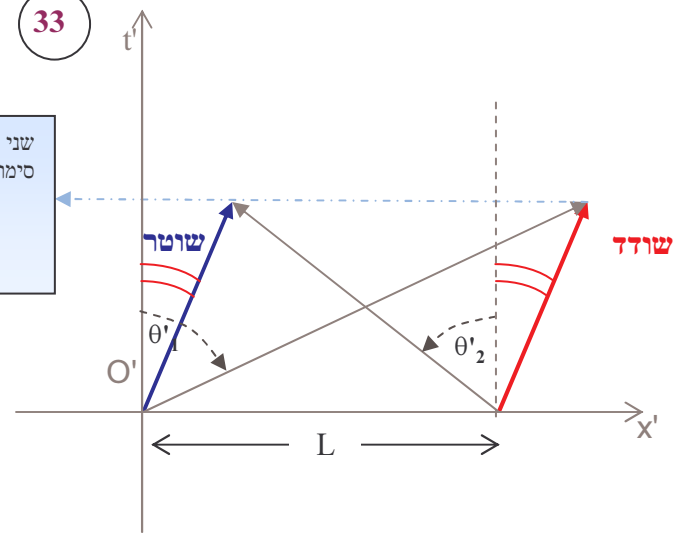


צופה הנמצא במערכת הרציף

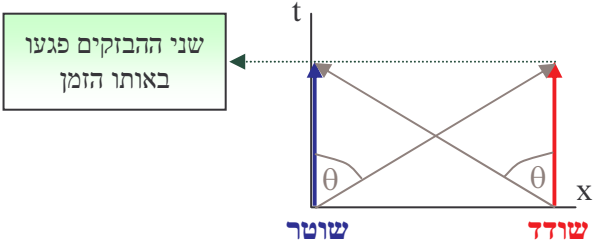
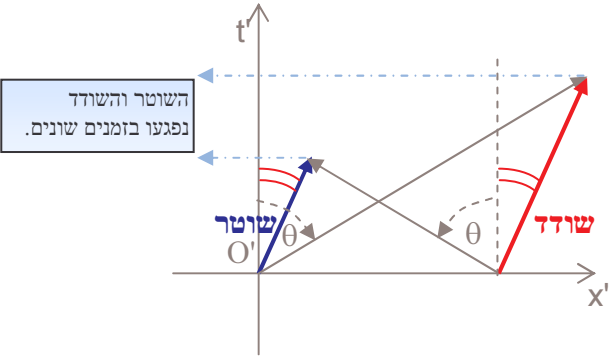
"רב פקד אזולאי ירה כדור לכיוונו של הפושע, אבל הפושע ברח מן הכדור, כי הפושע עמד על הרכבת שנסעה לכיוון תל אביב. למזלו, הכדור היה מהיר מן הפושע ולכן פגע בו. הפושע גם הוא ירה כדור לעברו של הרב פקד. אבל רב פקד אזולאי שהיה על הרכבת נע במהירות לכיוון הכדור ולכן נפגע ראשון. הדרך של הכדור שפגע בפושע הייתה ארוכה מזו של הכדור שפגע ברב פקד. לשניהם היא אקדח ברטה 22 מ"מ ולכן מהירות הכדורים היתה זהה. הרב פקד המסכן נפגע לפני הפושע המנוול."

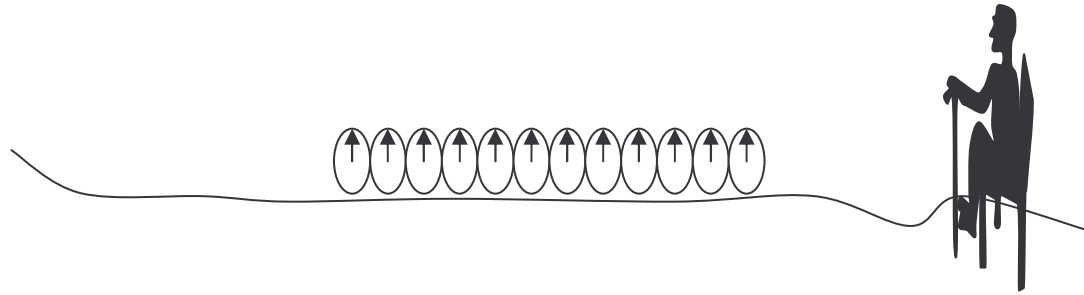
33

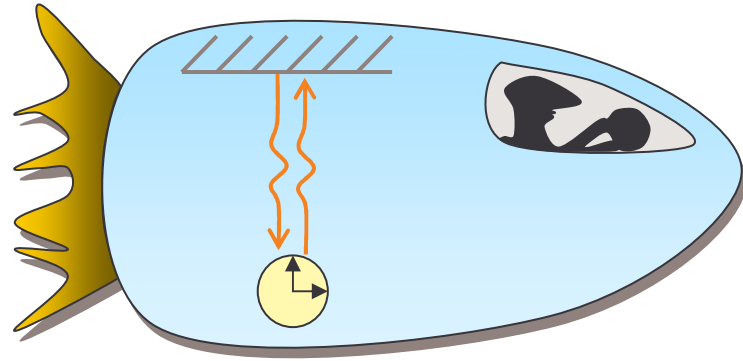
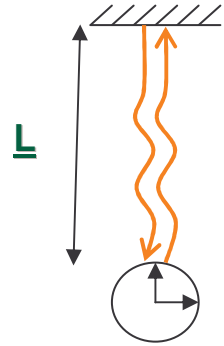
שני היורים נפגעו
סימולטנית

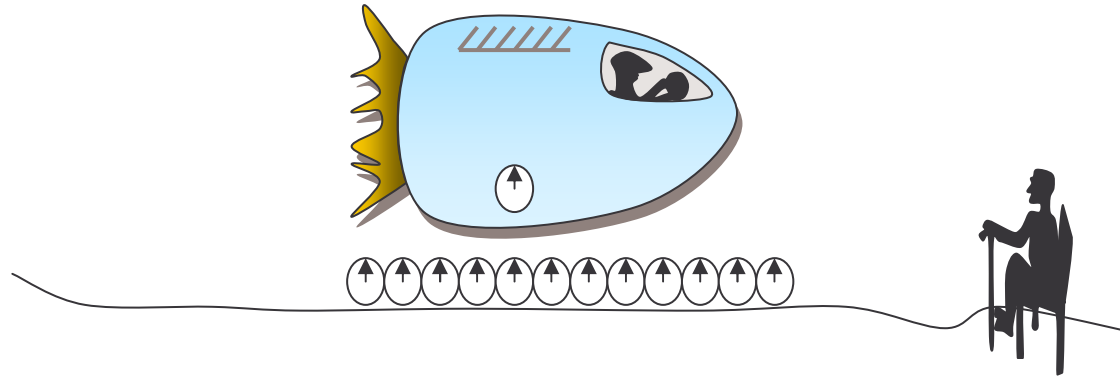


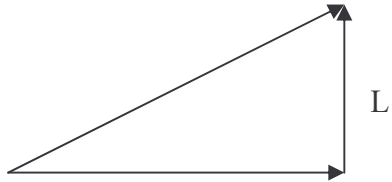
**מהירות האור היא אותה המהירות
בכל המערכות האינרציאליות,
ואינה תלויה במהירות המקור**











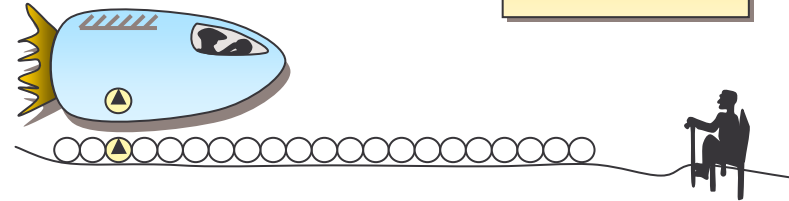
איור - : הדרך שעברה קרן האור
עד למראה

$$\Delta t = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

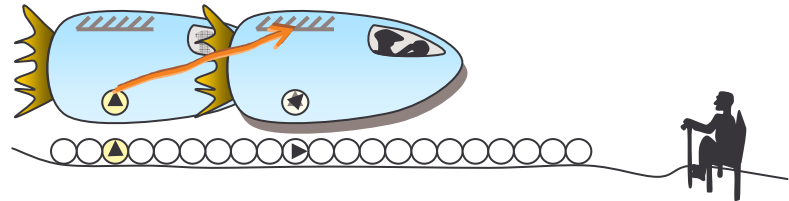
היחסיות של הזמן

הזמן הנמדד בין שני מאורעות יכול להיות שונה מצופה לצופה

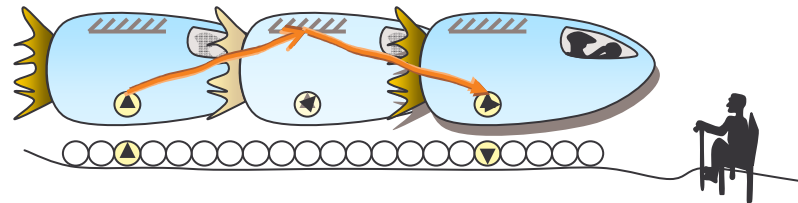
1. שלוח ההבזק



2. הבזק האור פוגע במראה



3. הבזק האור חוזר



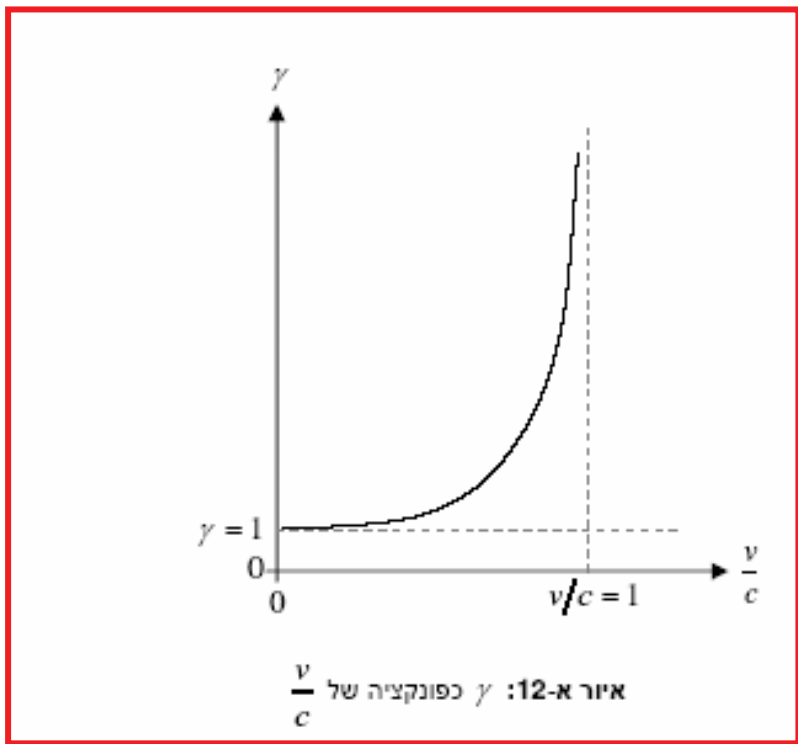
$$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

הזמן העצמי

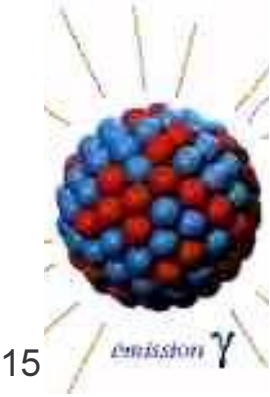
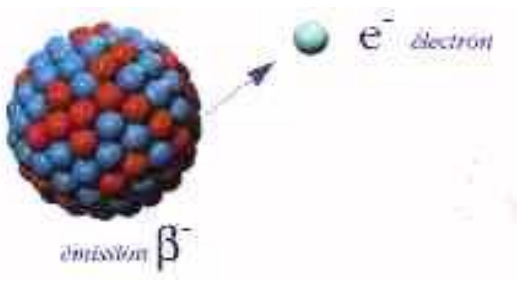
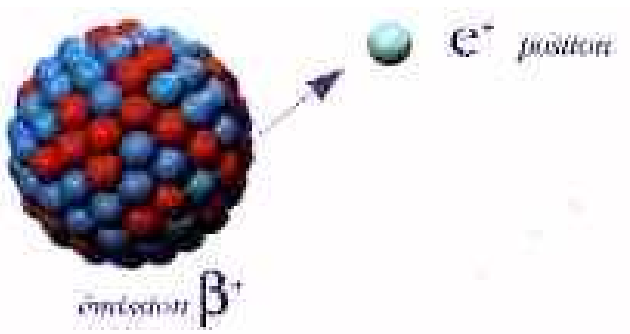
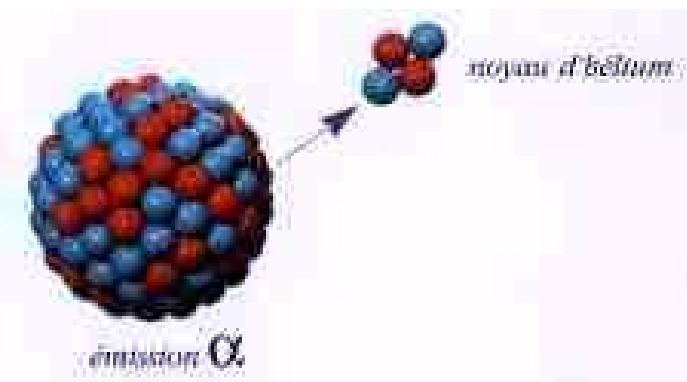
תהי O מערכת שבה שני מאורעות התרחשו באותו המקום. הפרש הזמנים בין שני המאורעות במערכת זו יקרא הזמן העצמי (Proper time). גודל זה יסומן ב- $\Delta\tau$.
הזמן העצמי בין שני מאורעות, $\Delta\tau$, קטן תמיד מהזמן הנמדד בין אותם שני המאורעות בכל מערכת O' אחרת (Improper time), ומתקיים:

$$\Delta t_{IM} = \Delta\tau \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \Delta\tau \cdot \gamma$$

כאשר v היא מהירותה של O' ביחס ל- O .



רדיואקטיביות



זמני מחצית החיים

| | |
|---------------|-------------------------|
| Polonium-214 | 0.164 second, |
| Oxygen-15 | 2 minutes, |
| Iodine-131 | 8 days, |
| Cobalt-60 | 5.3 years, |
| Carbon-14 | 5730 years, |
| Plutonium-239 | 24110 years, |
| Uranium-238 | $4.5 \cdot 10^9$ years. |

משפחת הלפטונים

Mass energy

0.000511 GeV

e



Electron

0.1066 GeV

μ



Muon

1.777 GeV

τ

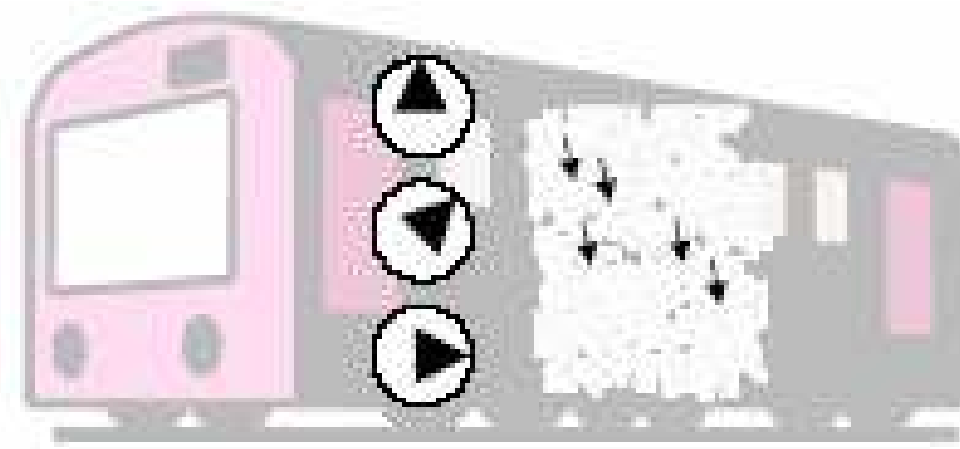


Tau

Properties of the Leptons

| Particle | Symbol | Anti-particle | Rest mass $2c^2/M\text{eV}$ | L(e) | L(muon) | L(tau) | Lifetime (seconds) |
|------------------------|------------|------------------|--------------------------------|------|---------|--------|------------------------|
| Electron | e^- | e^+ | 0.511 | +1 | 0 | 0 | Stable |
| Neutrino (Electron) | ν_e | $\bar{\nu}_e$ | $0(<7 \times 10^{-6})$ | +1 | 0 | 0 | Stable |
| Muon | μ^- | μ^+ | 105.7 | 0 | +1 | 0 | 2.20×10^{-6} |
| Neutrino (Muon) | ν_μ | $\bar{\nu}_\mu$ | $0(<0.27)$ | 0 | +1 | 0 | Stable |
| Tau | τ^- | τ^+ | 1777 | 0 | 0 | +1 | 2.96×10^{-13} |
| Neutrino (Tau) | ν_τ | $\bar{\nu}_\tau$ | $0(<31)$ | 0 | 0 | +1 | Stable |

Numerical data from Giancoli



איור א-13: כלי ובתוכו מיואונים הנמצא בתנועה



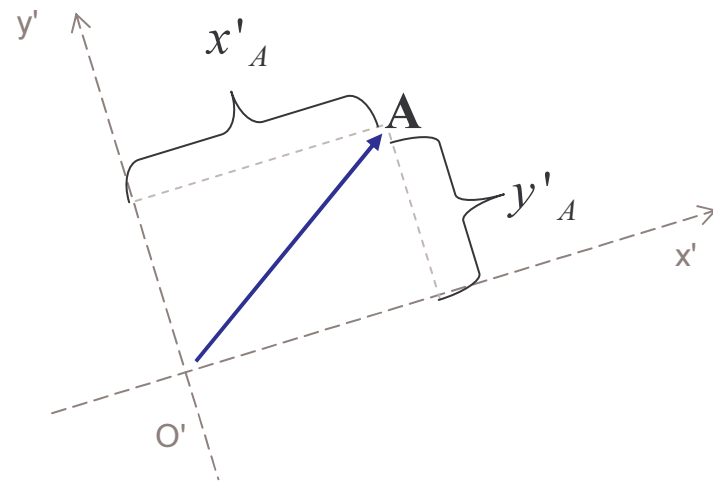
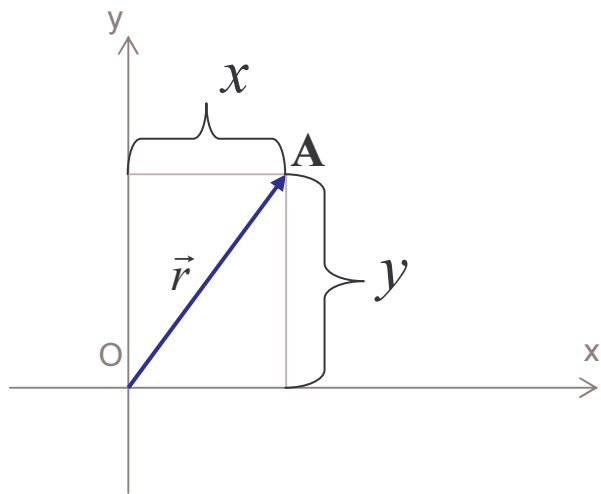
$$\Delta t = \Delta t_{proper} \cdot \gamma$$

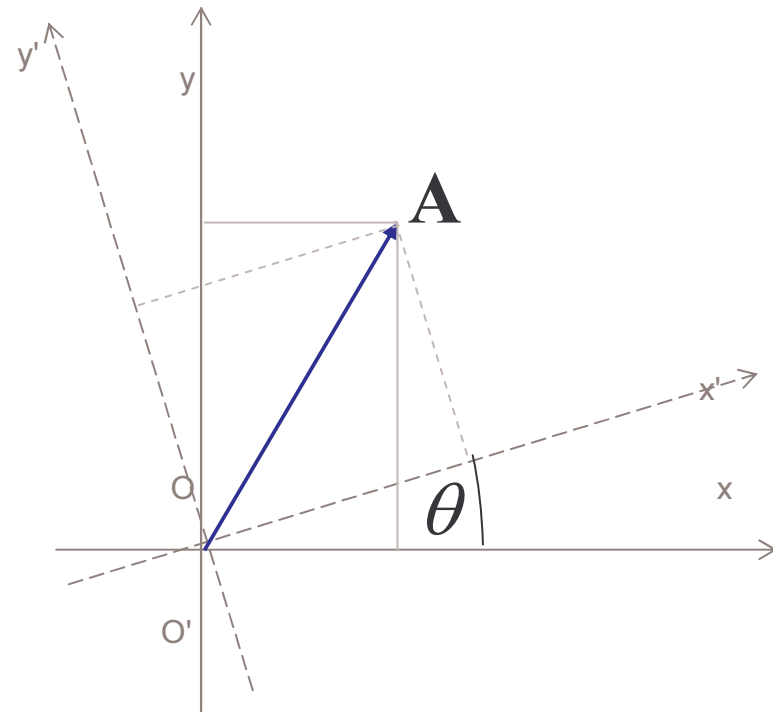
איור א-14: מיואונים במרחבי הר ושינגטון

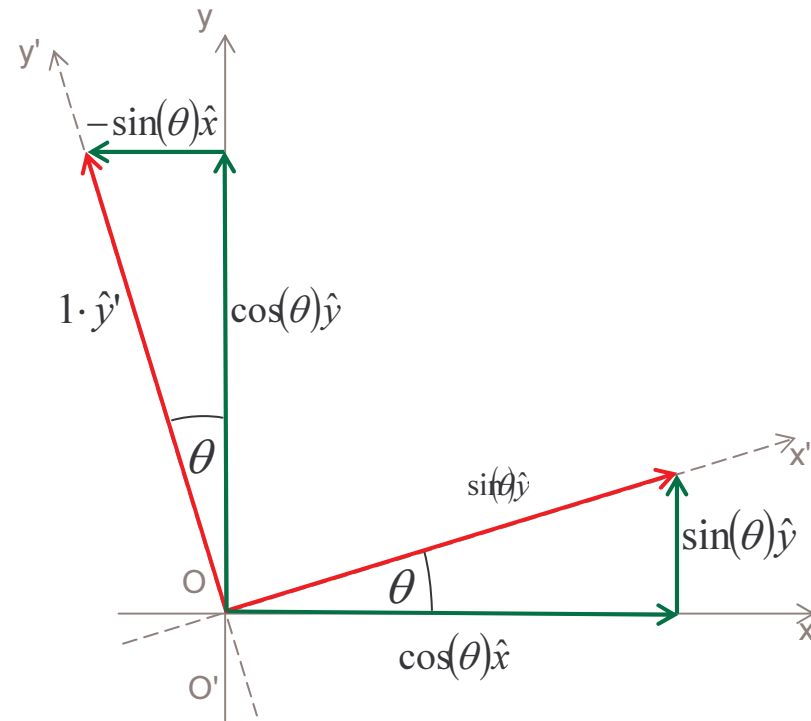
$$\Delta x = \Delta x_{proper} / \gamma$$

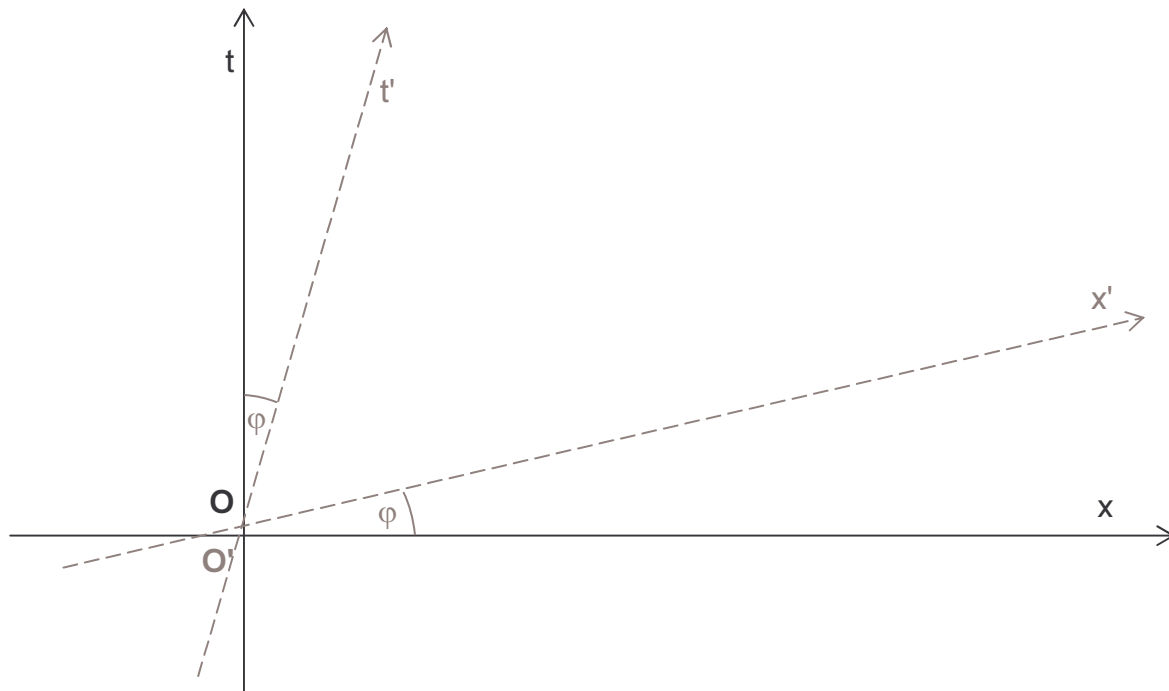


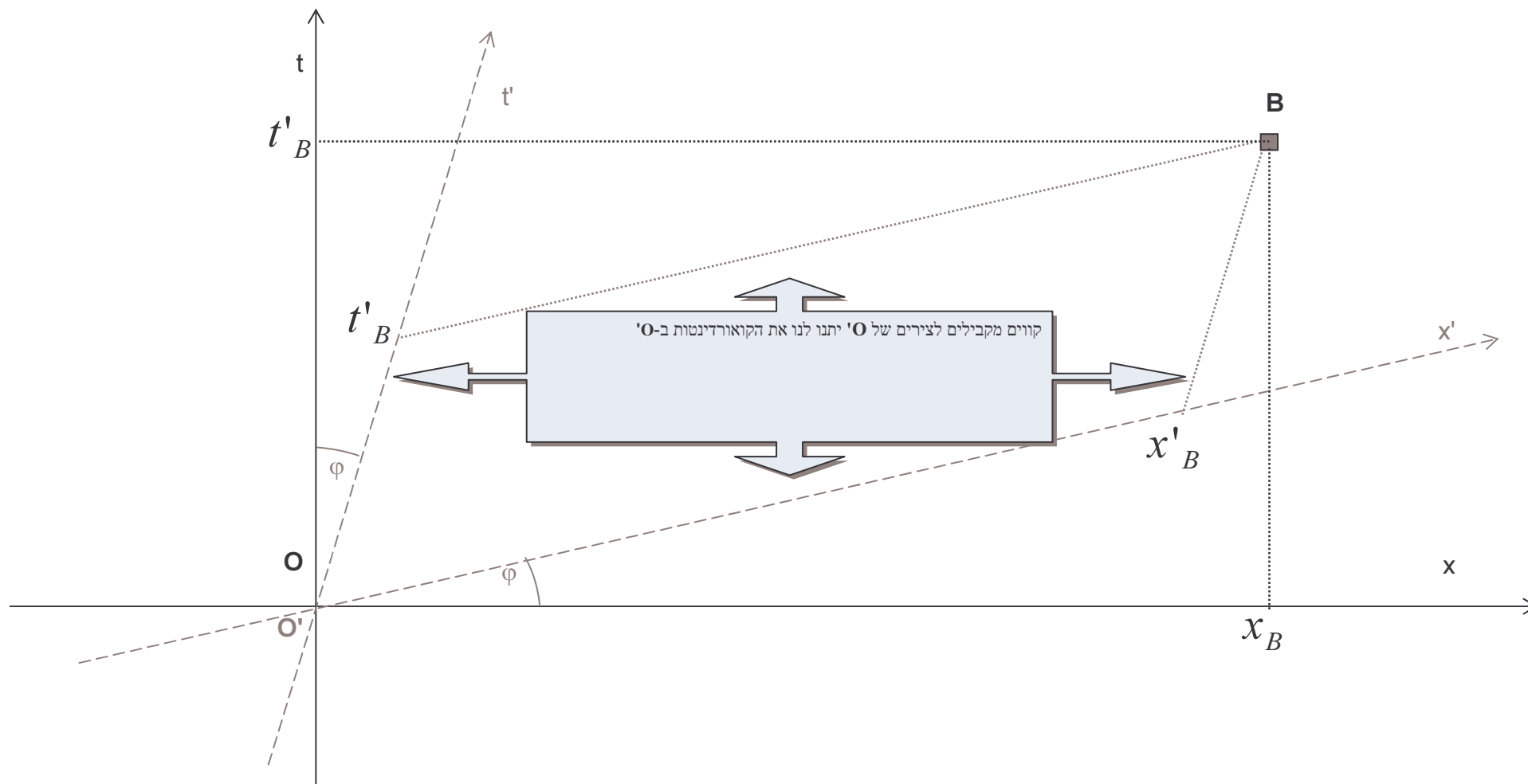
איור א-15: במערכת המיזאון –
אם המיזאון לא בא אל ההר, ההר בא
אל המיזאון

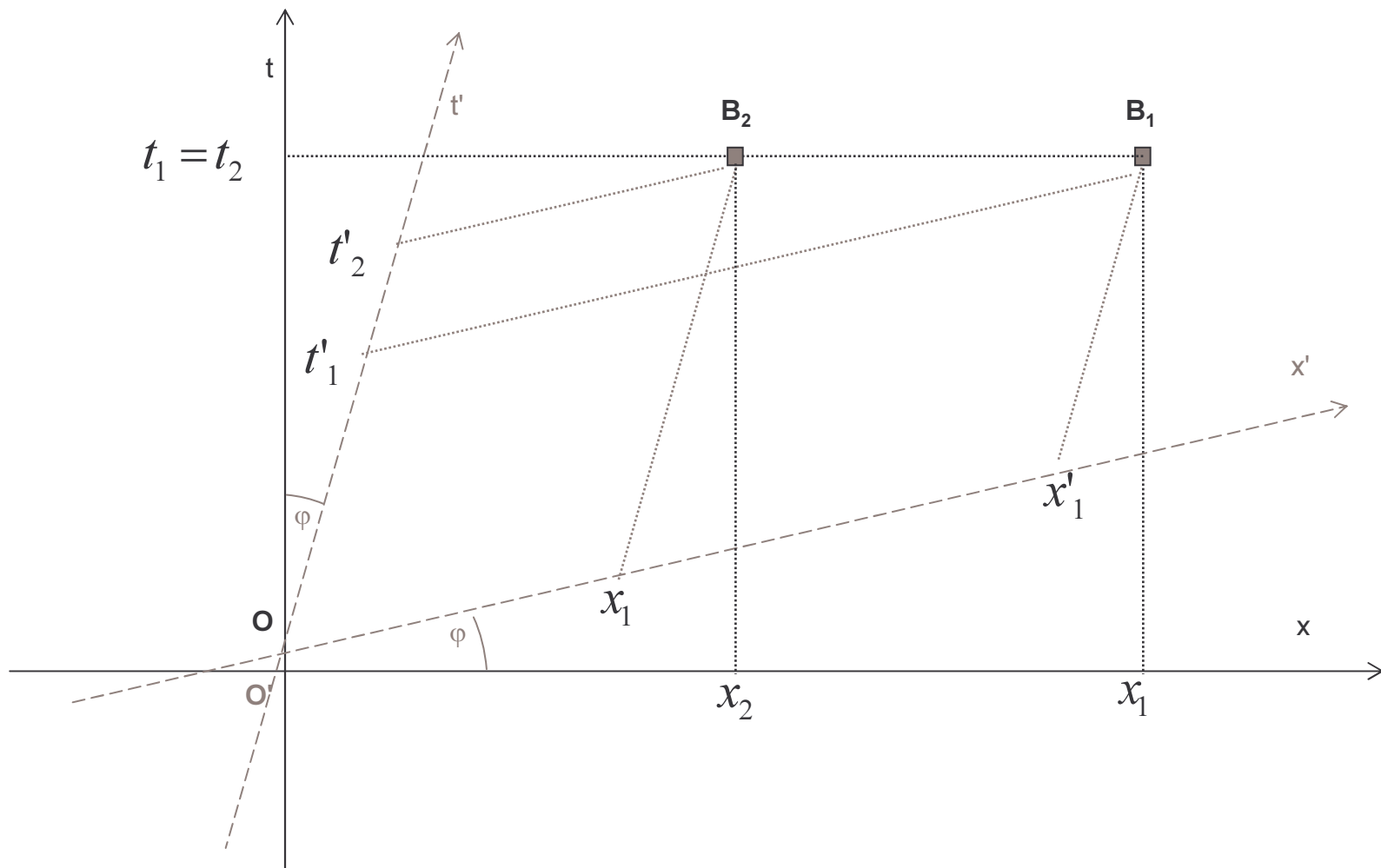










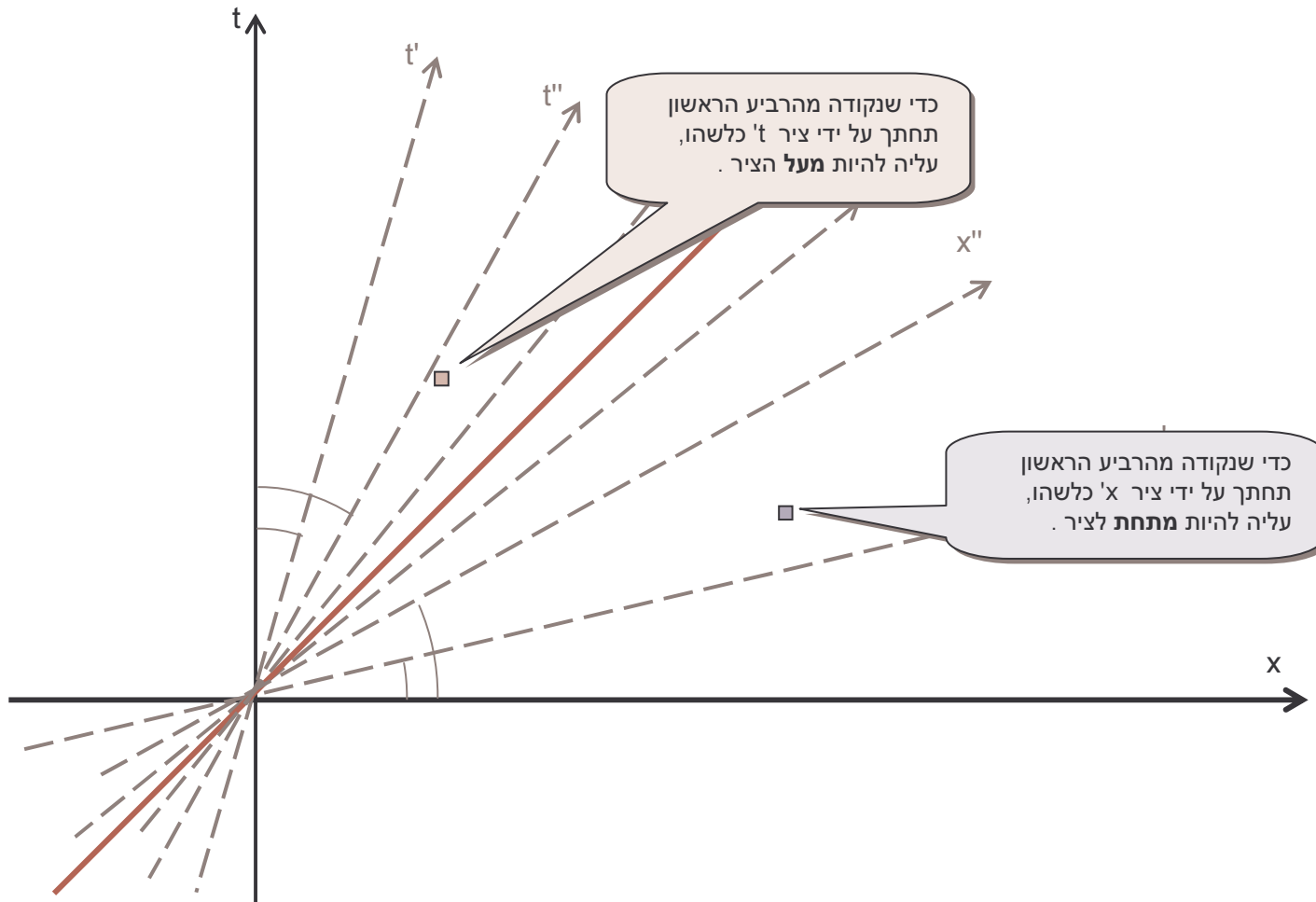


$$\sinh \theta = \frac{e^{\theta} - e^{-\theta}}{2}$$

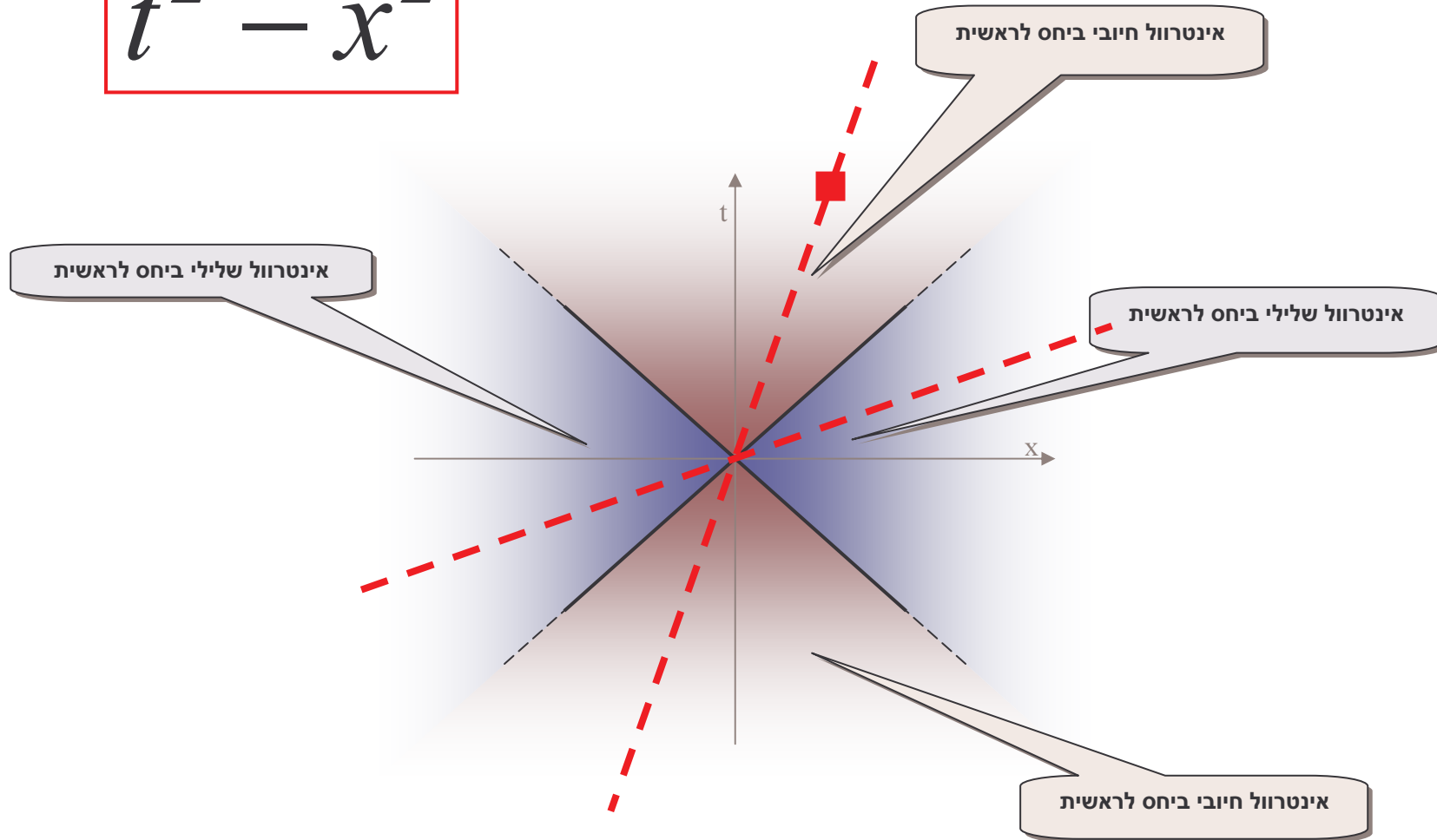
$$\cosh \theta = \frac{e^{\theta} + e^{-\theta}}{2}$$

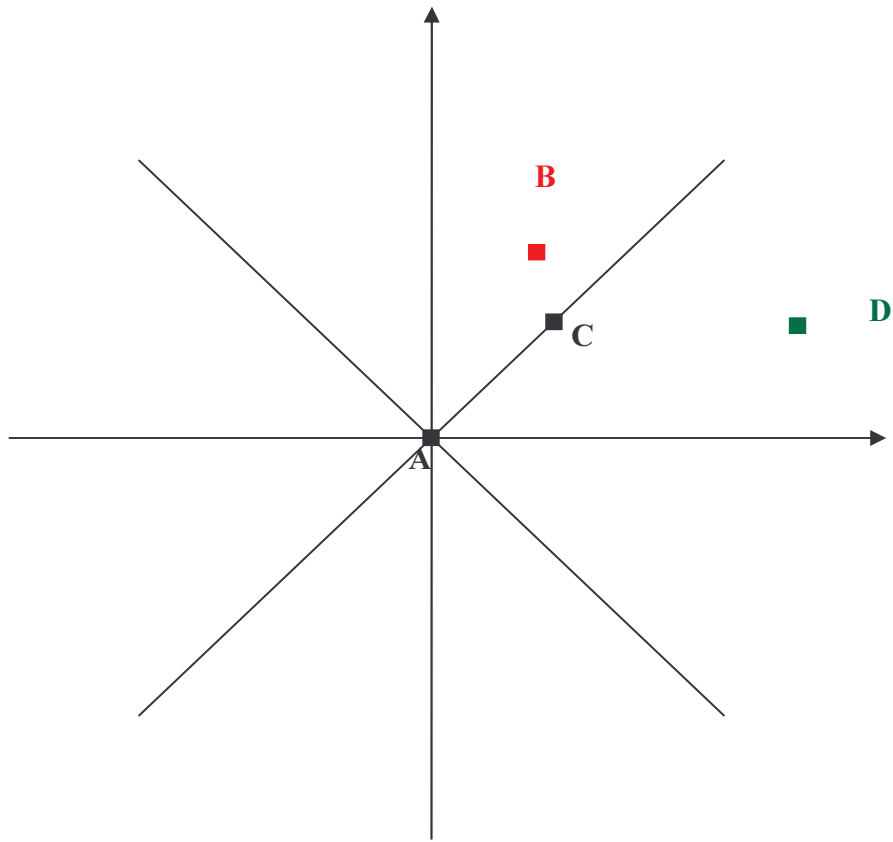
$$\cosh^2 \theta - \sinh^2 \theta = 1$$

$$\operatorname{tgh} \theta = \frac{\sinh \theta}{\cosh \theta} = \frac{e^{\theta} - e^{-\theta}}{e^{\theta} + e^{-\theta}} \quad \theta = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \operatorname{tgh} \theta}{1 - \operatorname{tgh} \theta}$$



$$t^2 - x^2$$





מאורעות מופרדים זמנית

1 האינטרוול חיובי:

2 קיימת מערכת בה שני המאורעות הם באותו המיקום בחלל.

3 בכל המערכות שני האירועים יתרחשו בזמנים שונים.

מאורעות מופרדים מרחבית

1 האינטרוול שלילי:

2 קיימת מערכת בה שני המאורעות נצפו באותו הזמן.

3 בכל המערכות שני האירועים יתרחשו במקומות שונים.

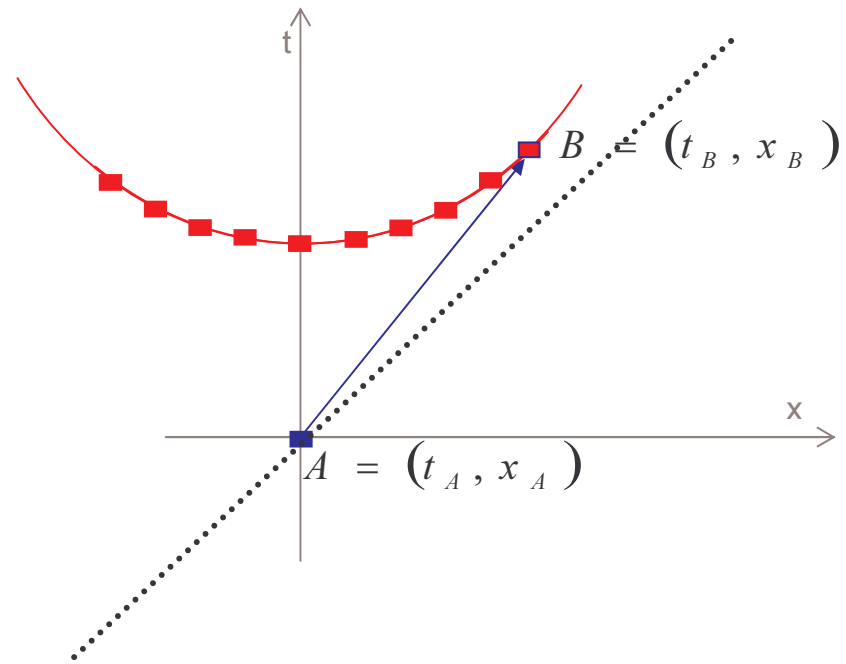
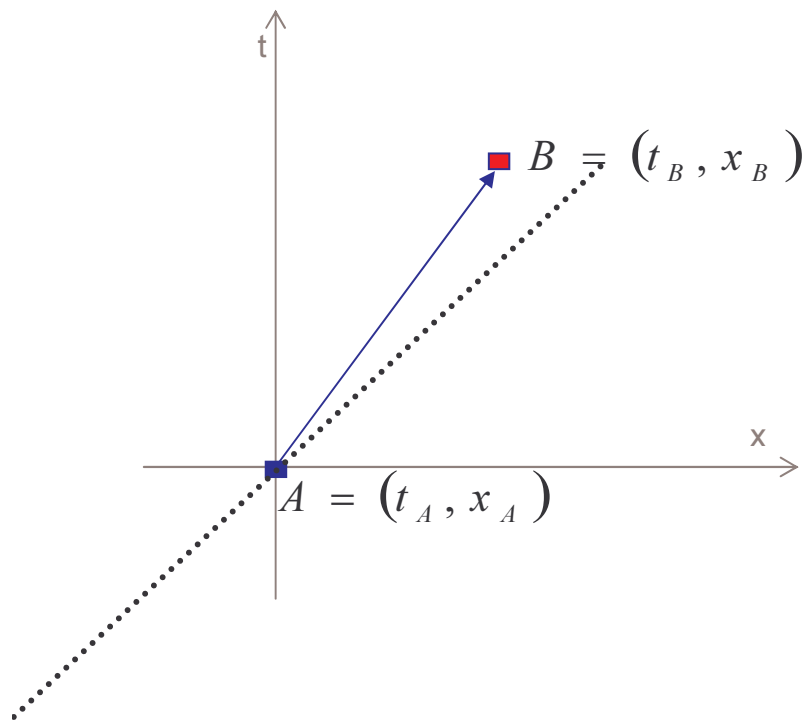
מאורעות מופרדים אורית

1 האינטרוול מתאפס:

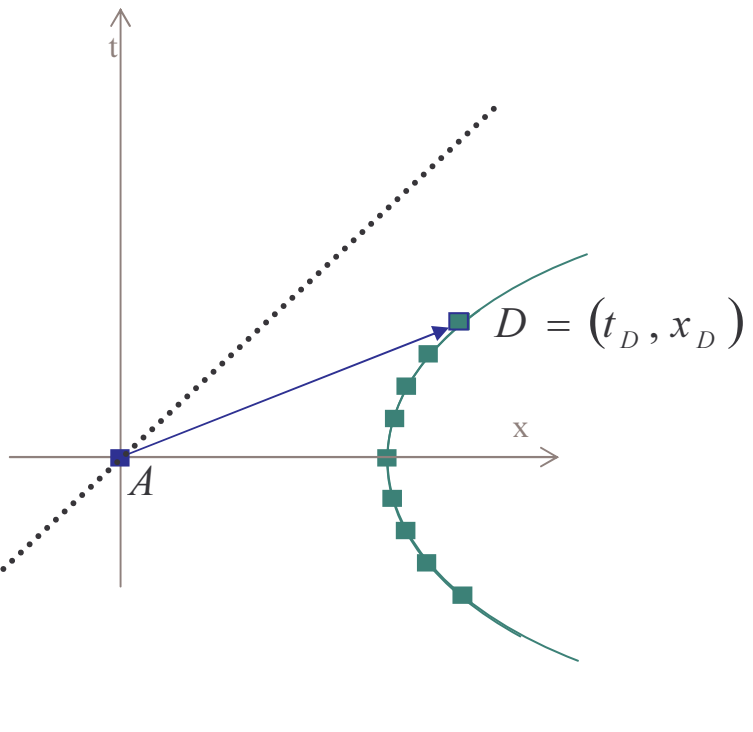
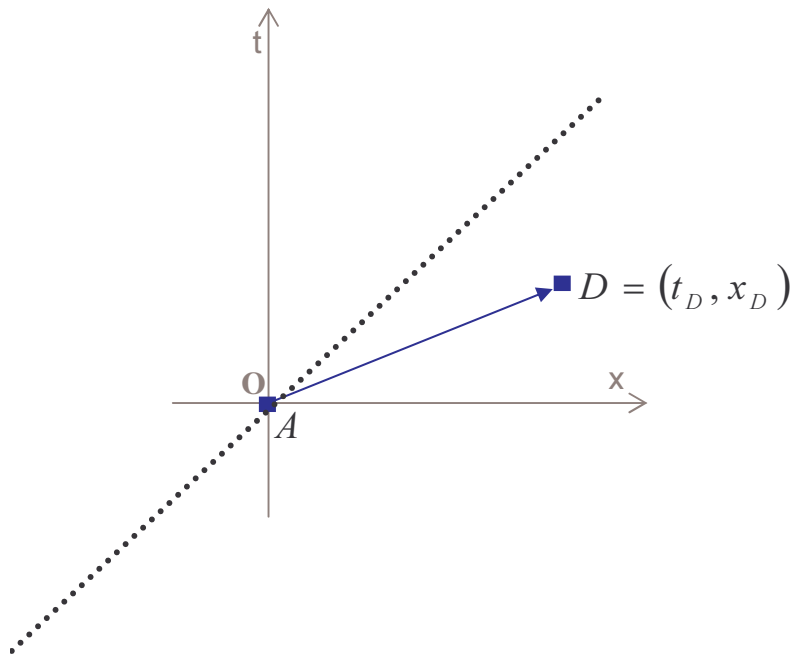
2 בכל המערכות שני האירועים יתרחשו בזמנים שונים.

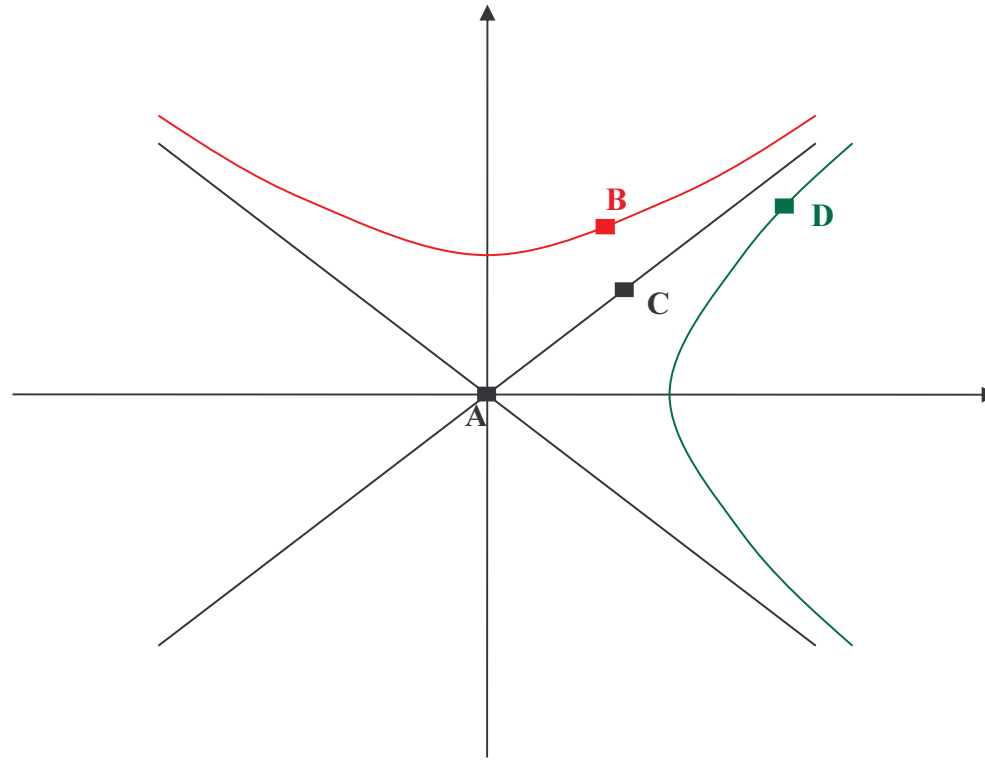
3 בכל המערכות שני האירועים יתרחשו במקומות שונים.

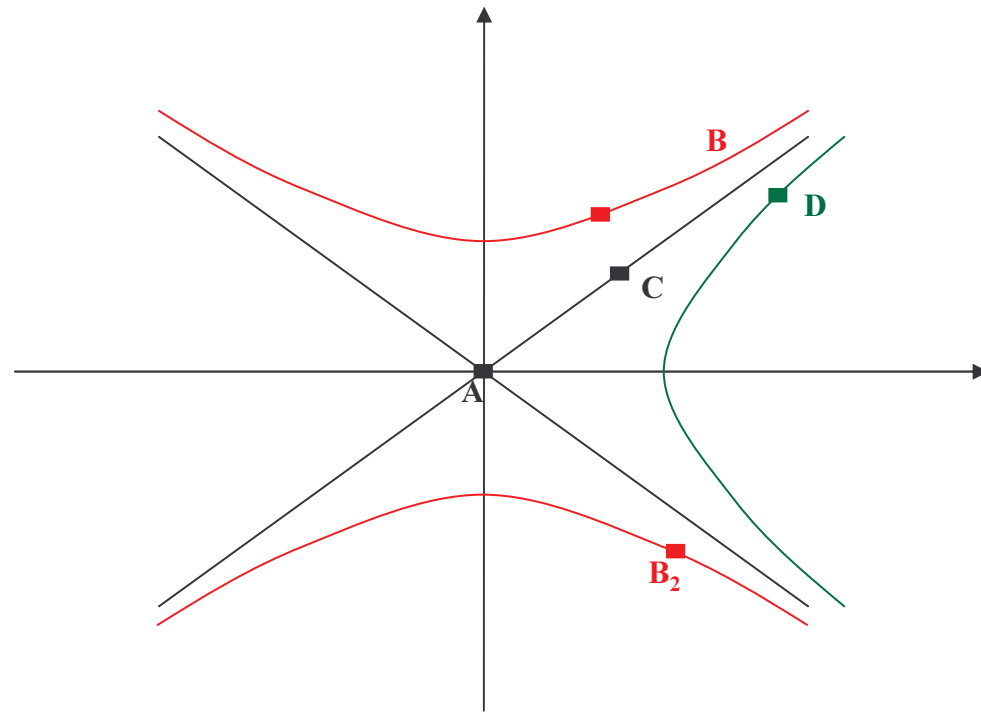
$$t^2 - x^2 = c > 0$$



$$t^2 - x^2 = c < 0$$

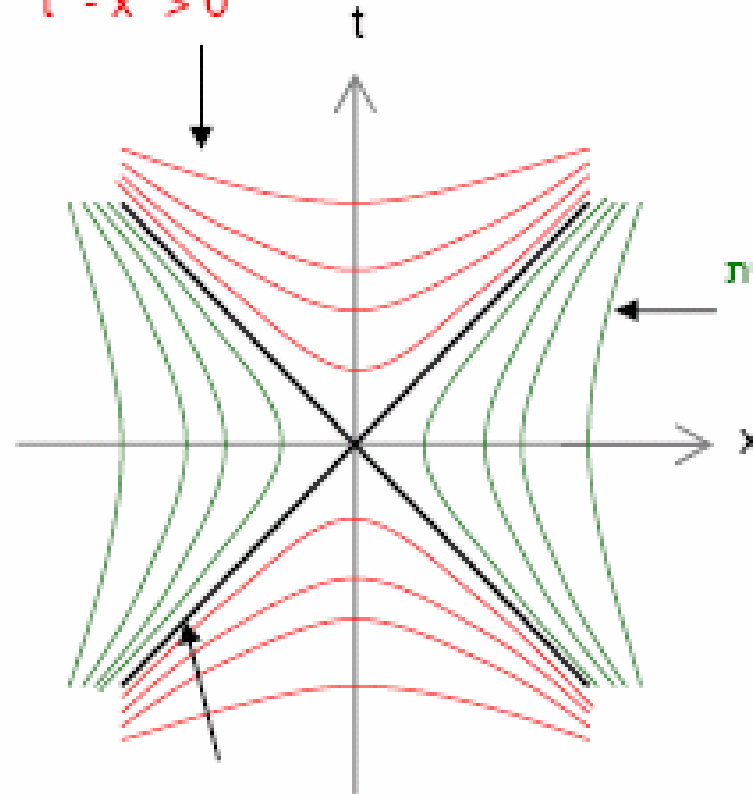






מארעות מופרדים זמנית

$$t^2 - x^2 > 0$$



מארעות

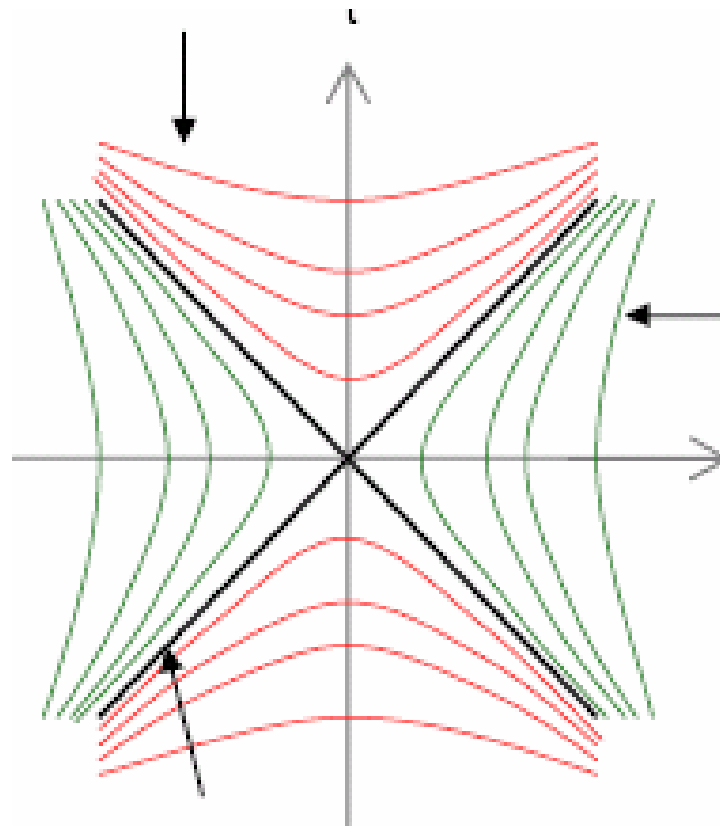
מופרדים מרחבית

$$t^2 - x^2 < 0$$

מארעות מופרדים אורית

$$t^2 - x^2 = 0$$

איור ג-17: אוסף הטרוספורמציות



מאורעות מופרדים זמנית

1. האינטרוול חיובי: $(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 > 0$
2. קיימת מערכת בה שני המאורעות הם באותו המיקום בחלל.
3. בכל המערכות שני האירועים יתרחשו בזמנים שונים.
4. מאורע אחד יכול היה להיות הסיבה של המאורע השני.

מאורעות מופרדים מרחבית

1. האינטרוול שלילי: $(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 < 0$
2. קיימת מערכת בה שני המאורעות נצפו באותו הזמן.
3. בכל המערכות שני האירועים יתרחשו במקומות שונים.
4. מאורע אחד לא יכול היה להיות הסיבה של המאורע השני.

מאורעות מופרדים אורית

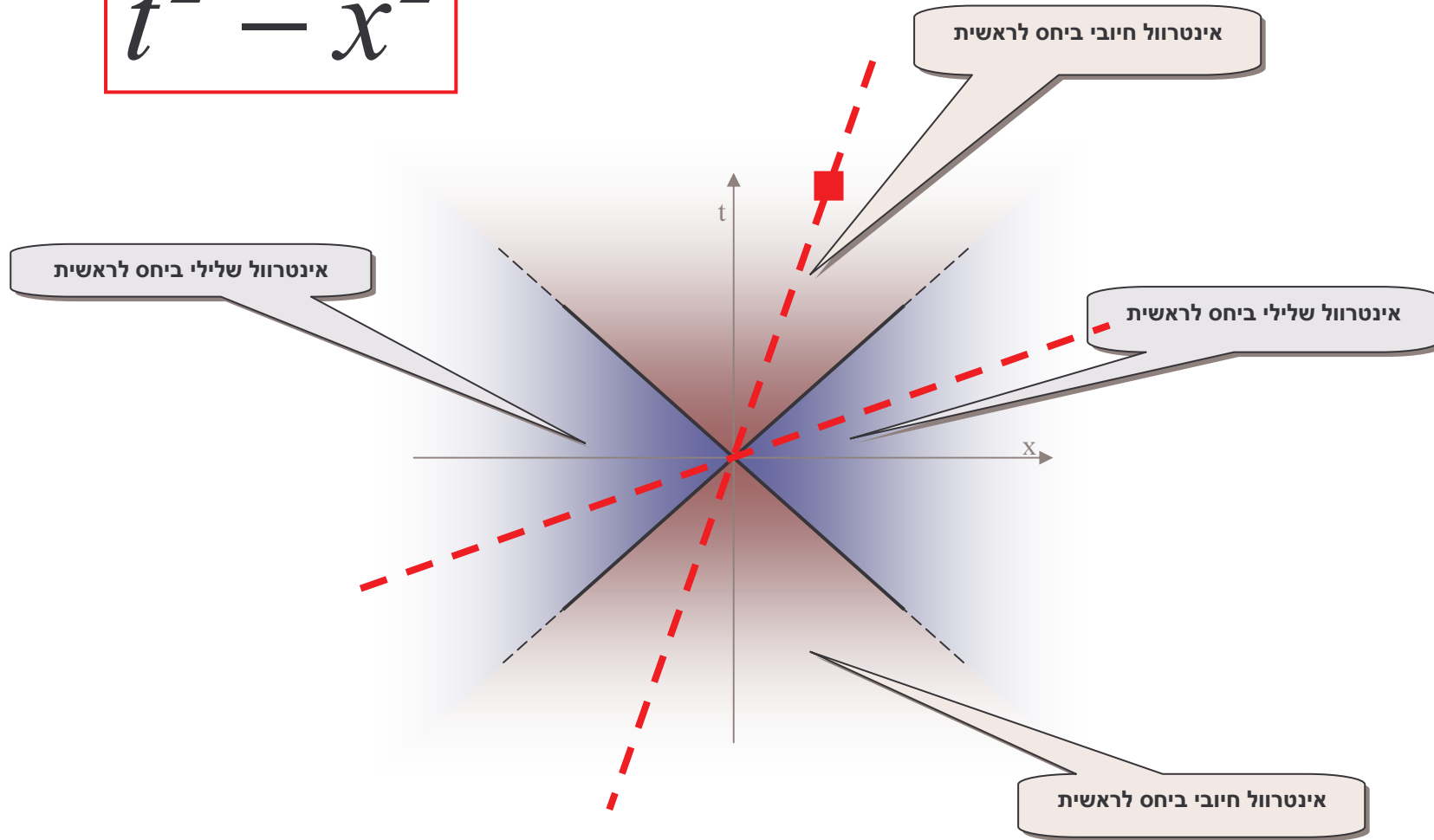
1. האינטרוול מתאפס: $(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 = 0$
2. בכל המערכות שני האירועים יתרחשו בזמנים שונים.
3. בכל המערכות שני האירועים יתרחשו במקומות שונים.
4. מאורע אחד יכול לגרום למאורע שני רק ע"י מעבר של אור.

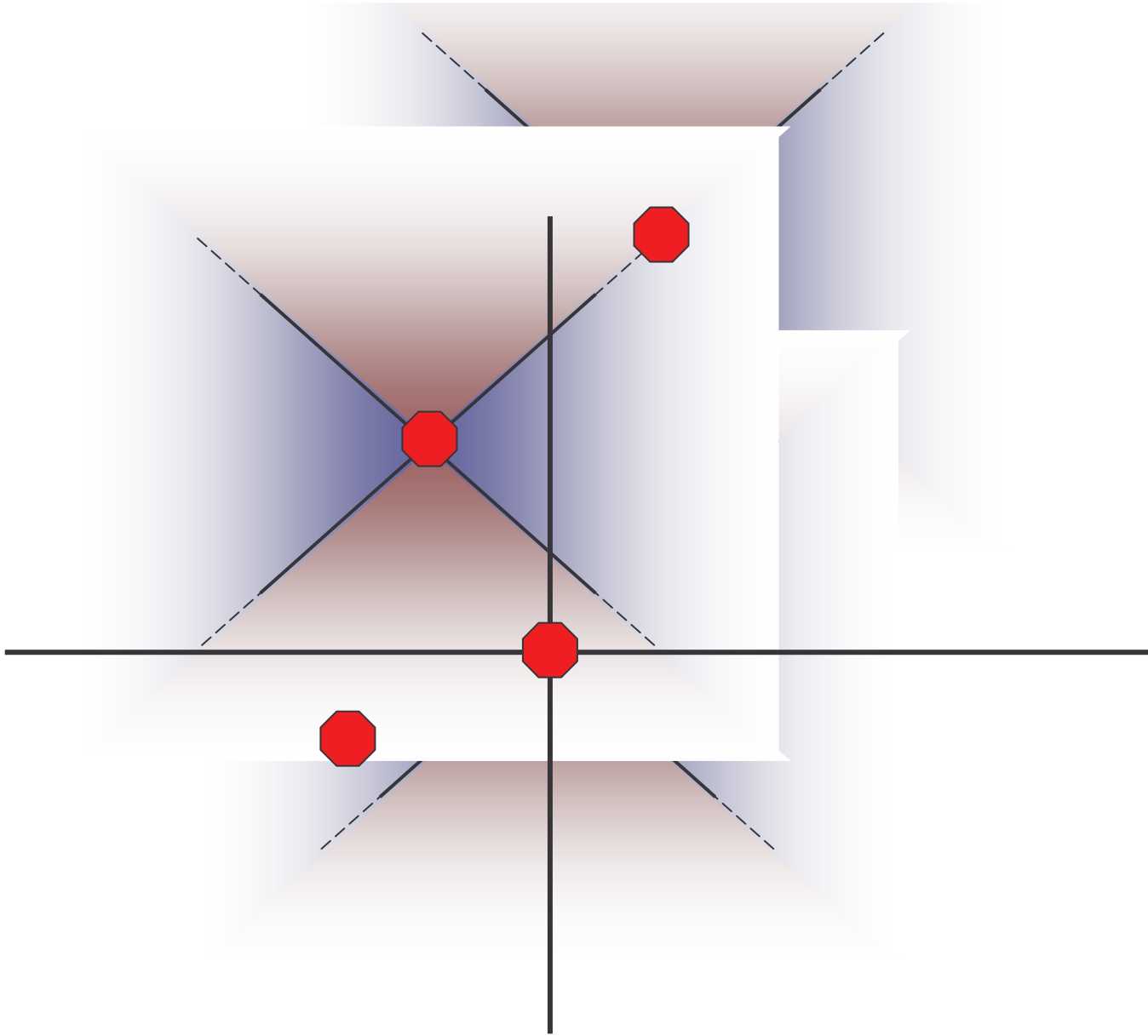
פרופסור יובל נאמן

תלמוד בבלי מסכת מועד קטן פרק ג - ואלו מגלחין דף יג עמוד ב

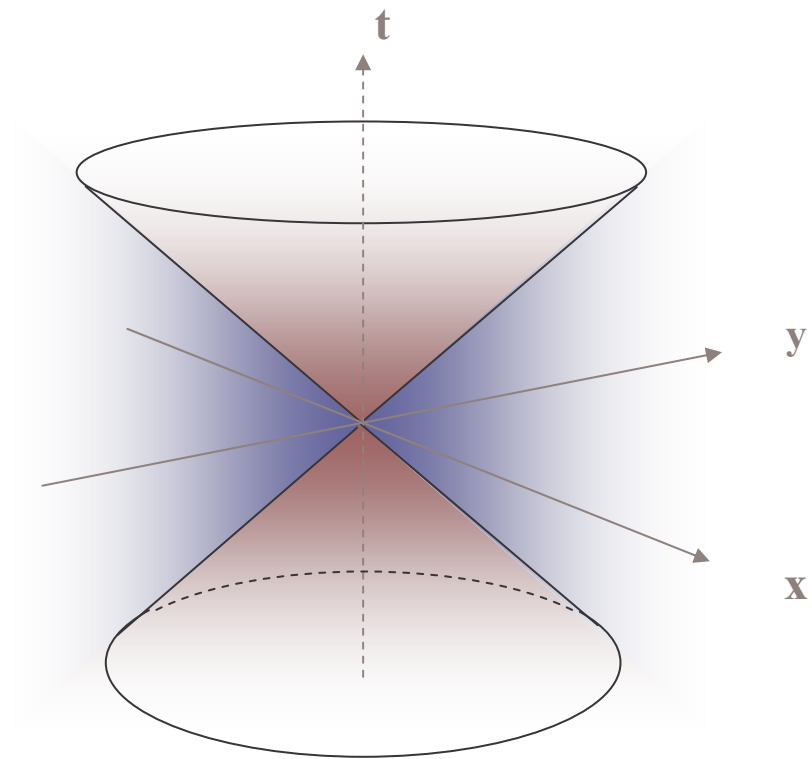
תנו רבנן: חכם שמת - בית מדרשו בטל,
אב בית דין שמת - כל בתי מדרשות שבעירו בטילין,
ונכנסין לבית הכנסת, ומשנין את מקומן;
היושבין בצפון - יושבין בדרום, היושבין בדרום - יושבין בצפון.
נשיא שמת - בתי מדרשות כולן בטילין,
ובני הכנסת נכנסין לבית הכנסת, [דף כג עמוד א] וקורין שבעה ויוצאין.
רבי יהושע בן קרחה אומר: **לא שילכו ויטיילו בשוק, אלא יושבין ודומין.**

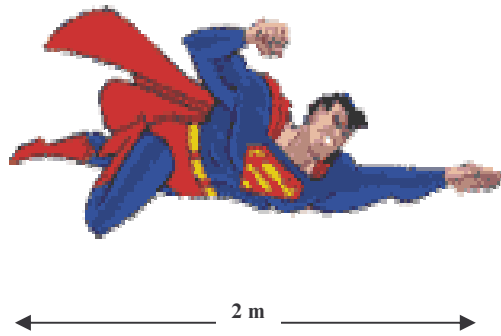
$$t^2 - x^2$$



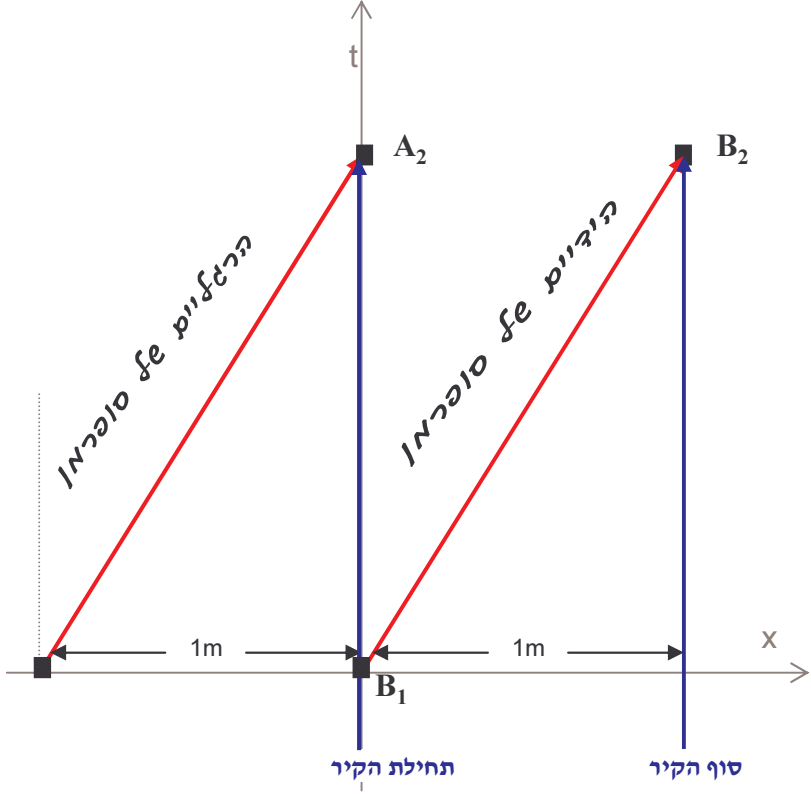


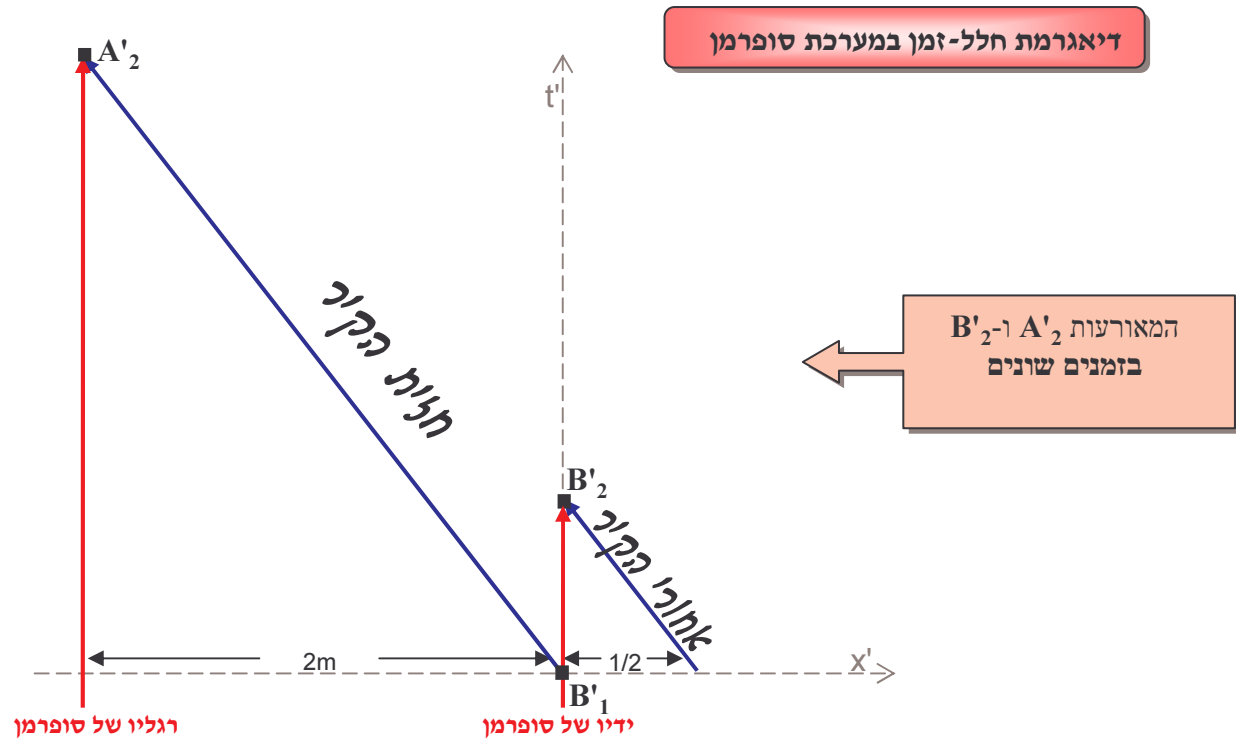
קונוס האור

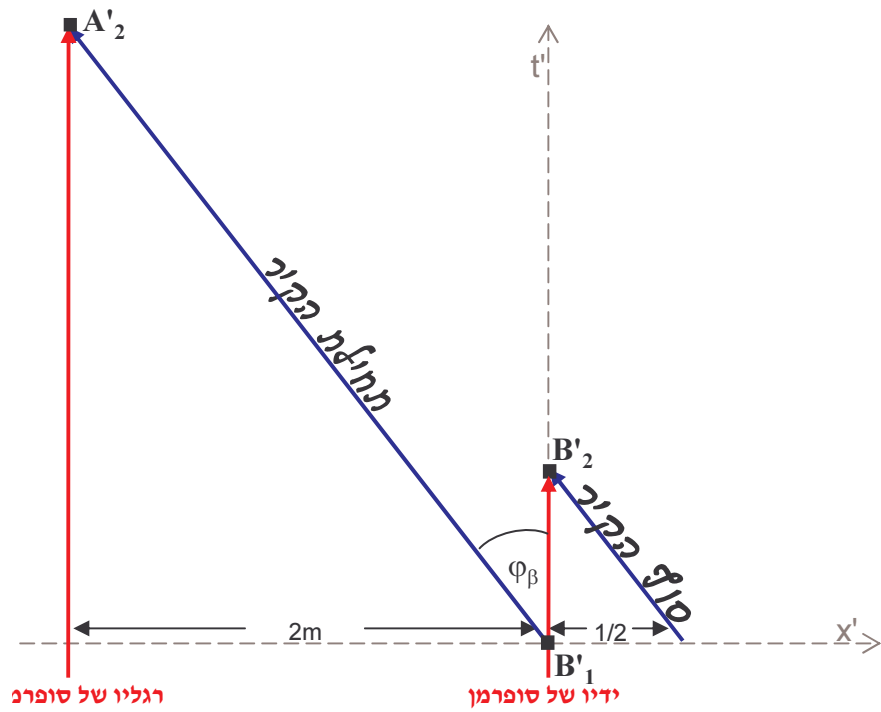




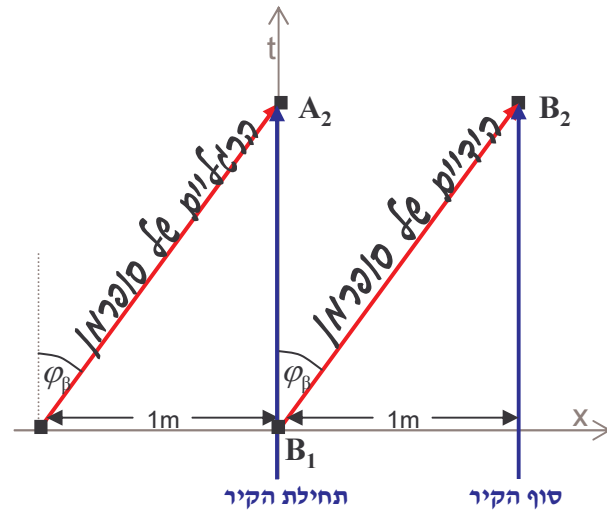
דיאגרמת חלל-זמן במערכת המפטי-דמפטי





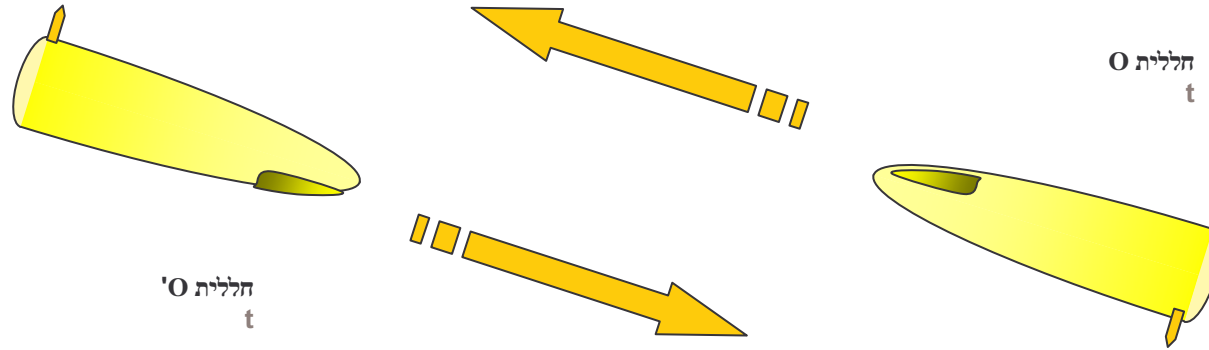


דיאגרמת חלל-זמן במערכת סופרמן

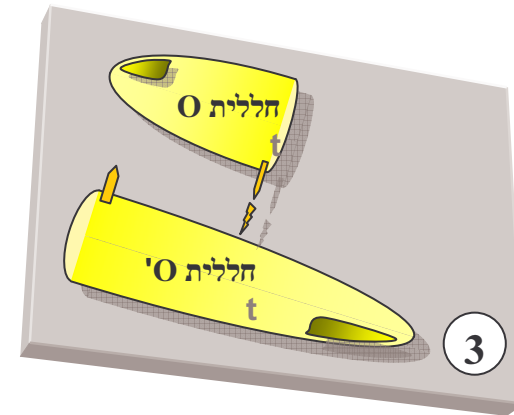
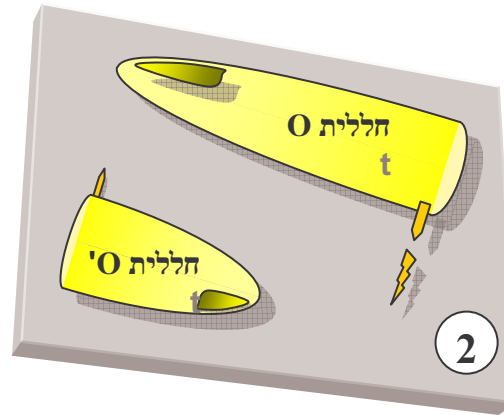
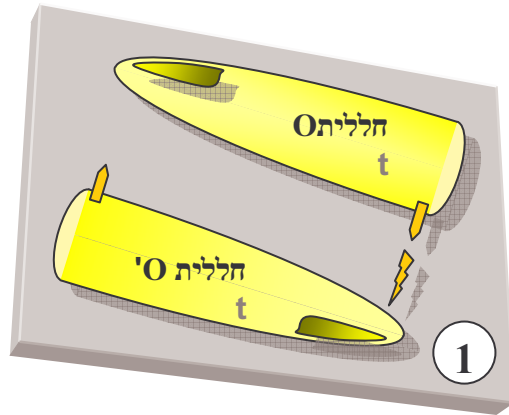


דיאגרמת חלל-זמן במערכת המפטי-דמפטי

פרדוקס החלליות

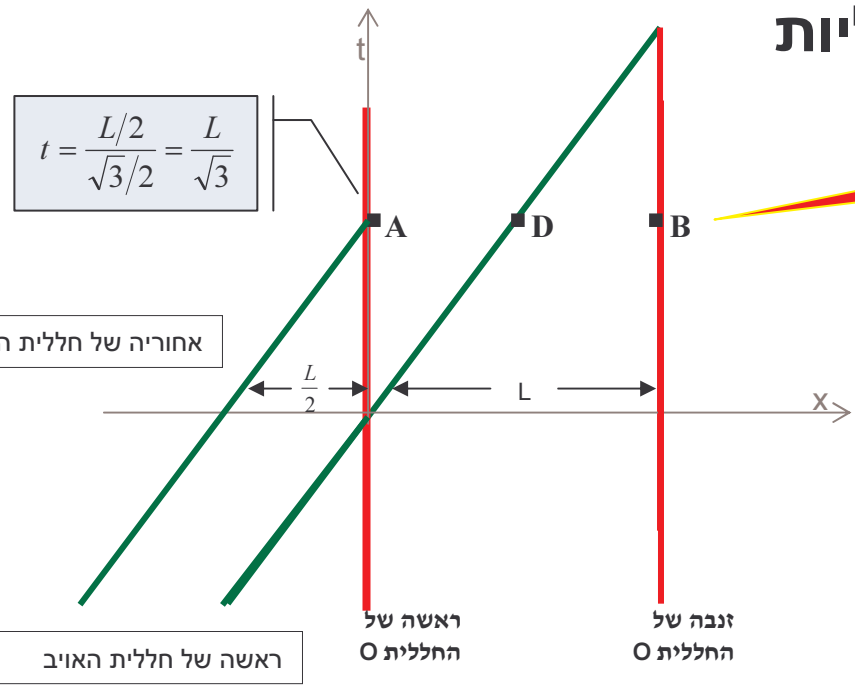


פרדוקס החלליות



פרדוקס החלליות

יריה

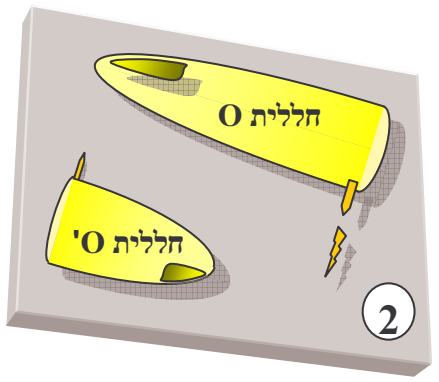


אחוריה של חללית האויב

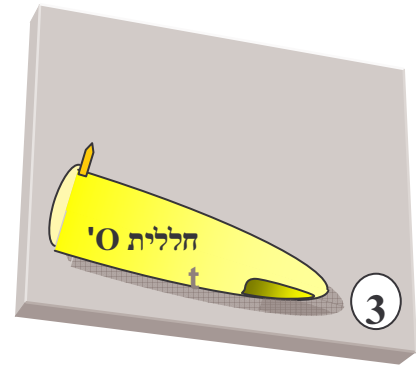
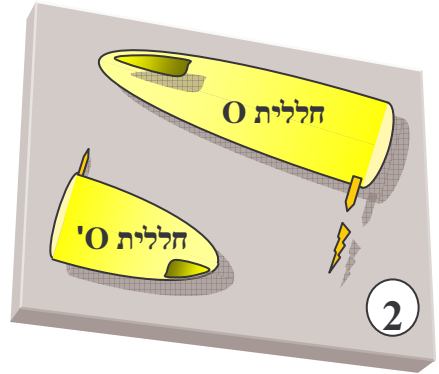
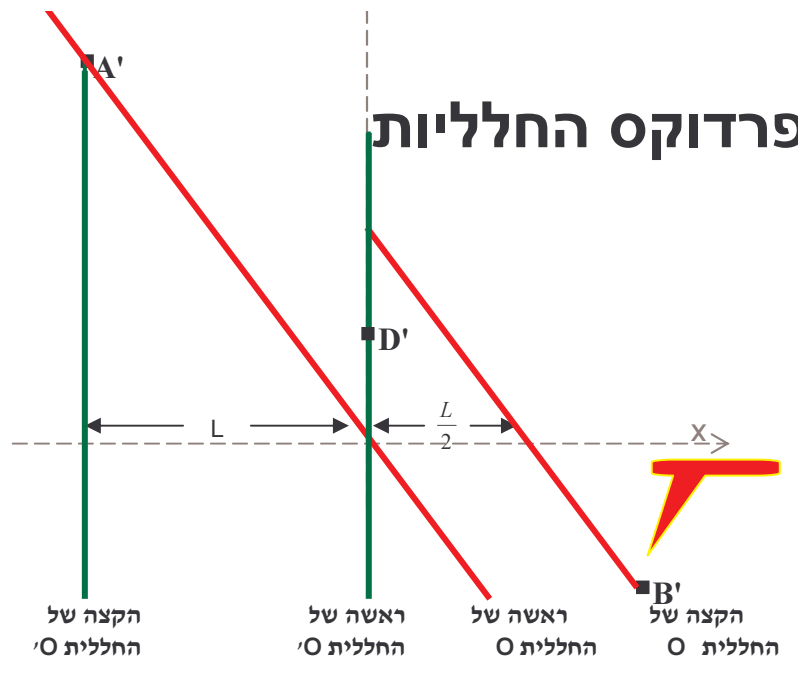
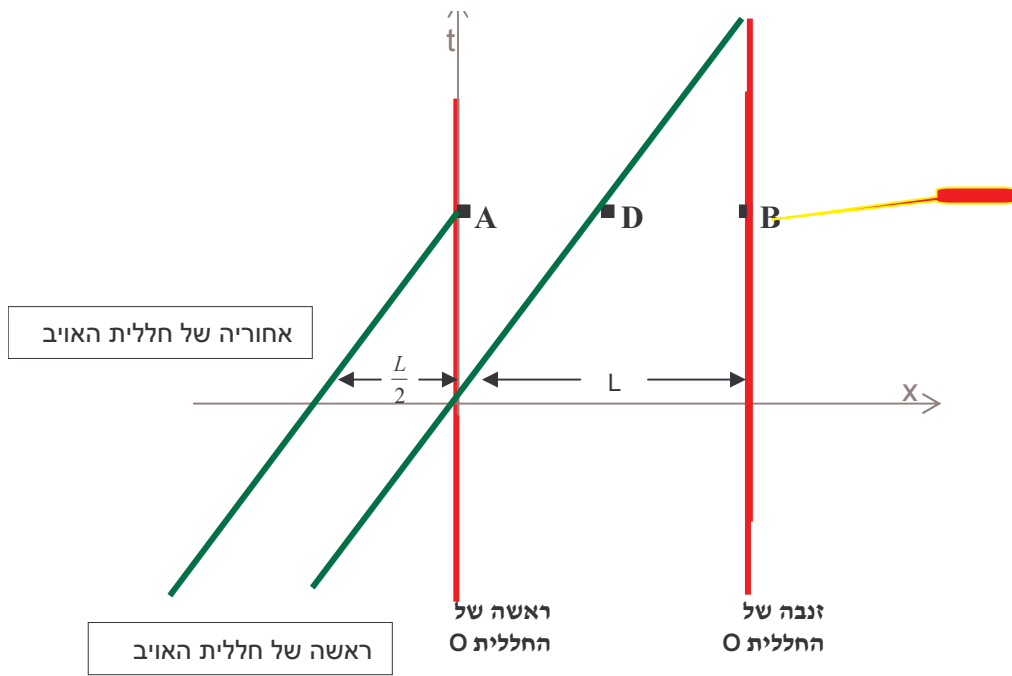
ראשה של חללית האויב

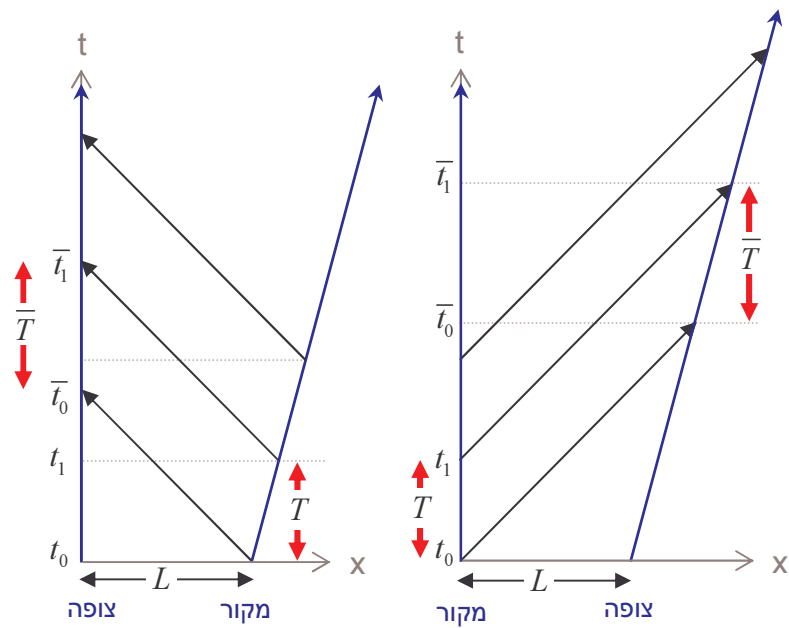
ראשה של החללית O

זנבה של החללית O

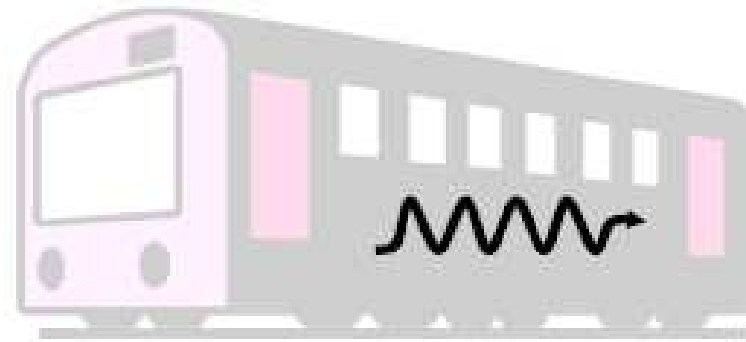


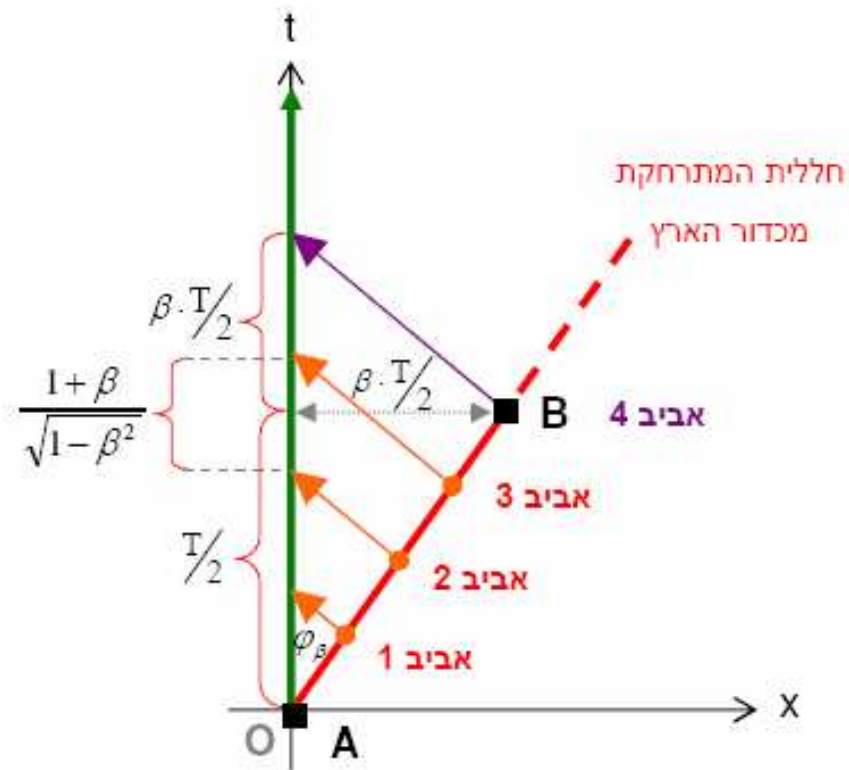
פרדוקס החלליות



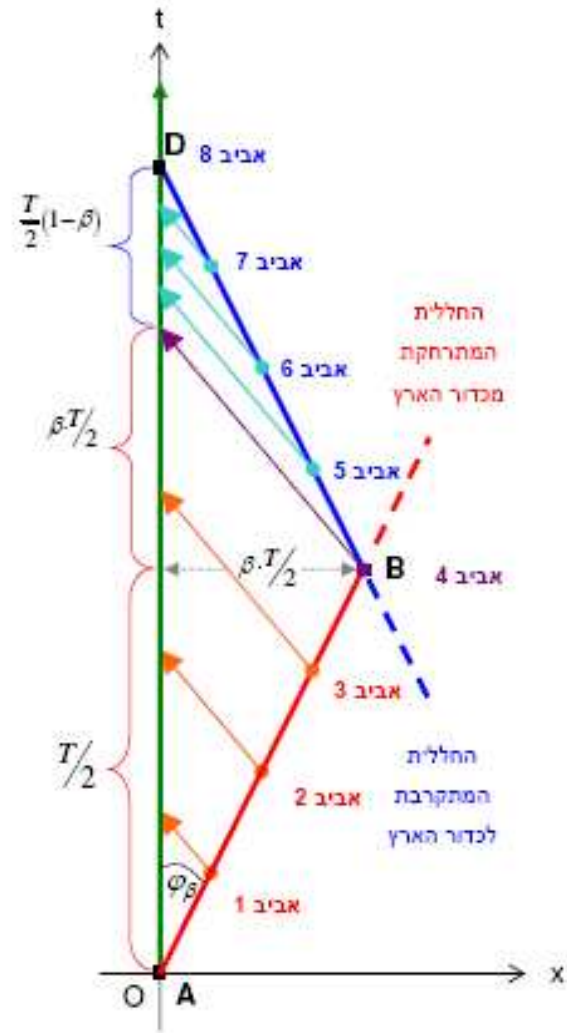


איור - : אפקט דופלר. מימין: מקור נייח וצופה מתרחק, משמאל: צופה נייח ומקור מתרחק

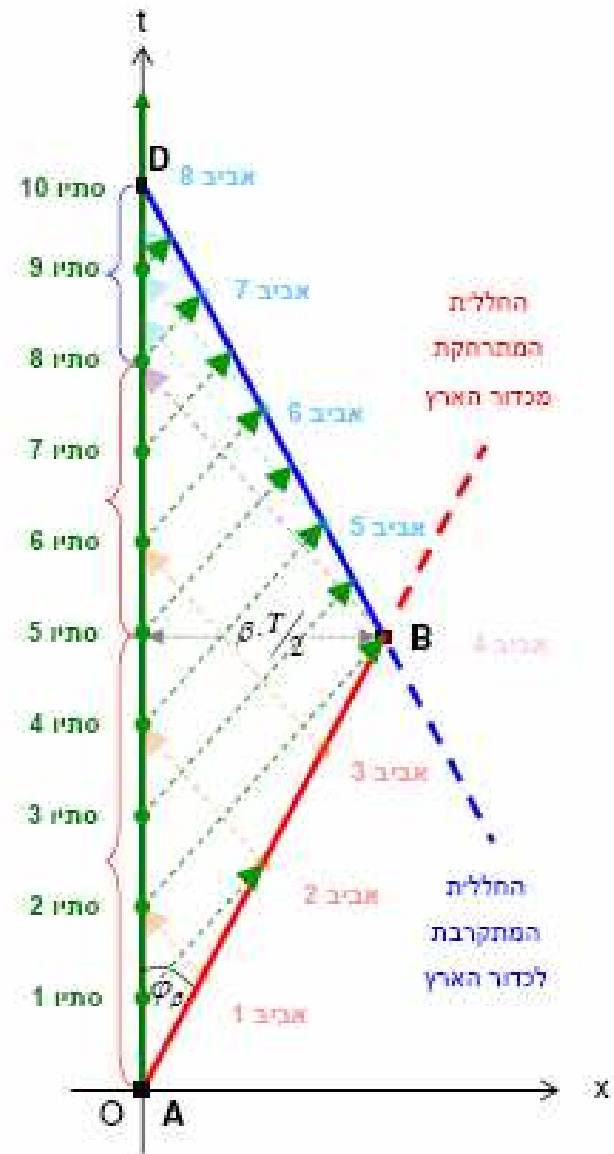




איור ה-8: האיחולים של אביב בדרך הלוך, כפי שהם נראים במערכת של סתיו

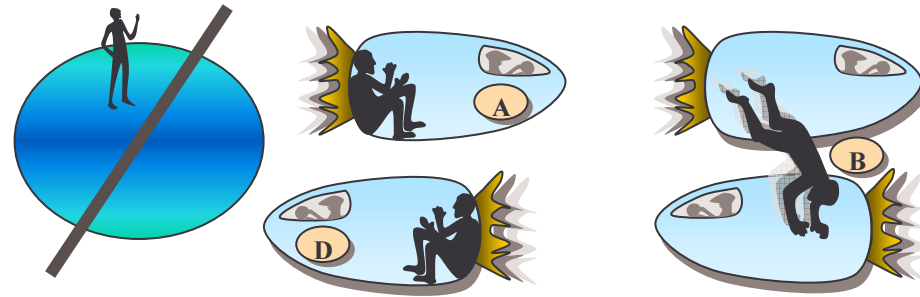
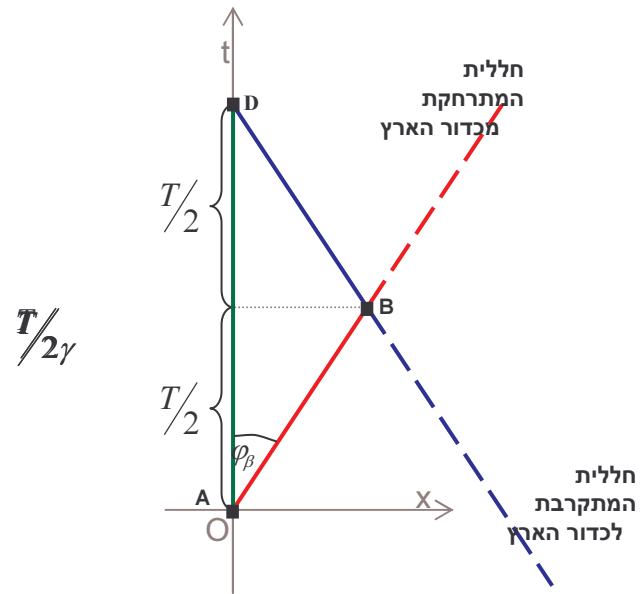


איור ה-9: כל האיחולים של אביב



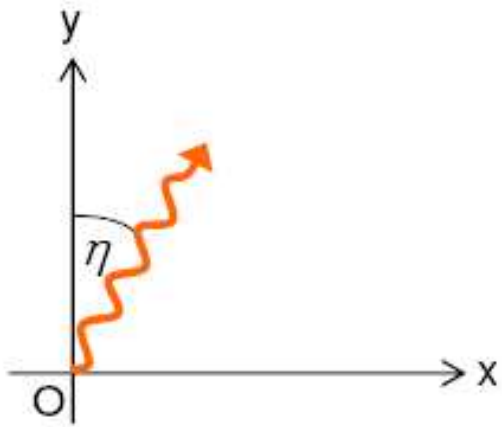
איור ה-10: האיחולים של סתיו

פרדוקס התאומים

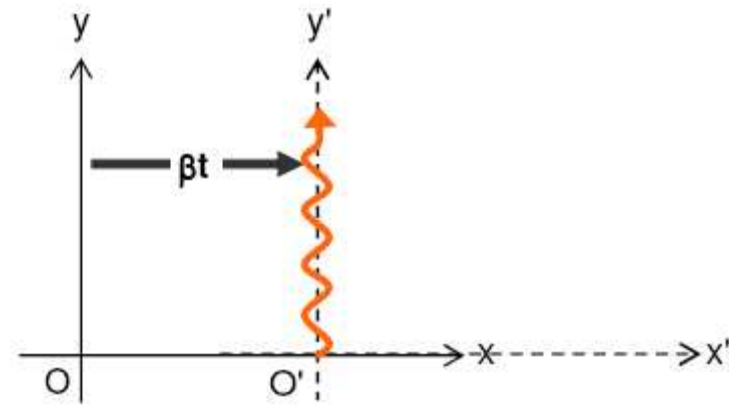


| T_{AB} (הנסיעה הלך) | T_{BD} (הנסיעה חזור) | T_{AD} (הנסיעה כולה) | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 5 | 5 | 10 | התאום הארץ שבכדור |
| 4 | | | החללית המתרחקת |
| | 4 | | החללית המתקרבת |

האברציה של האור

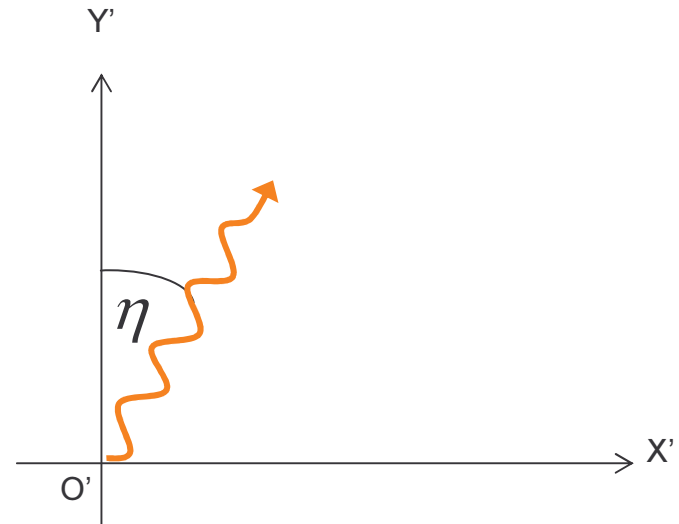
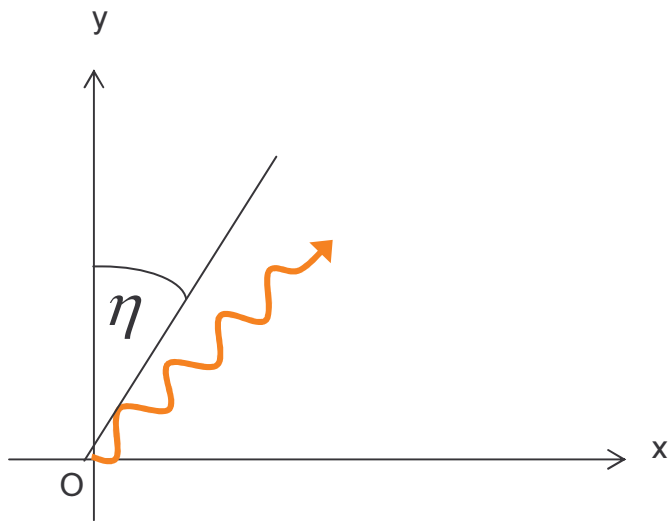


איור ו-2: הבזק האור במערכת O



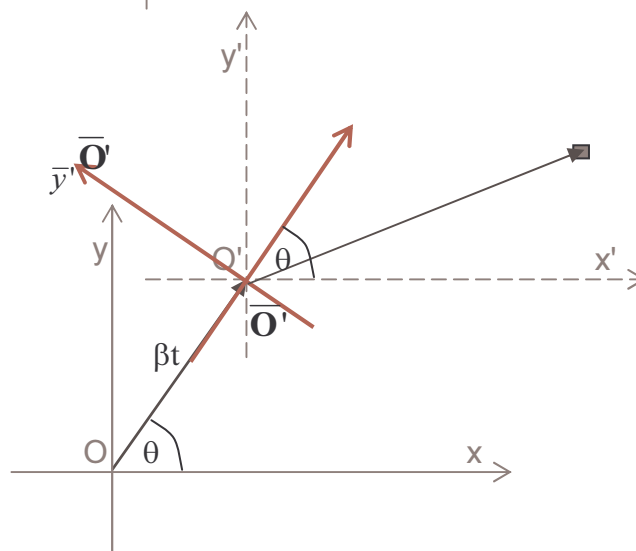
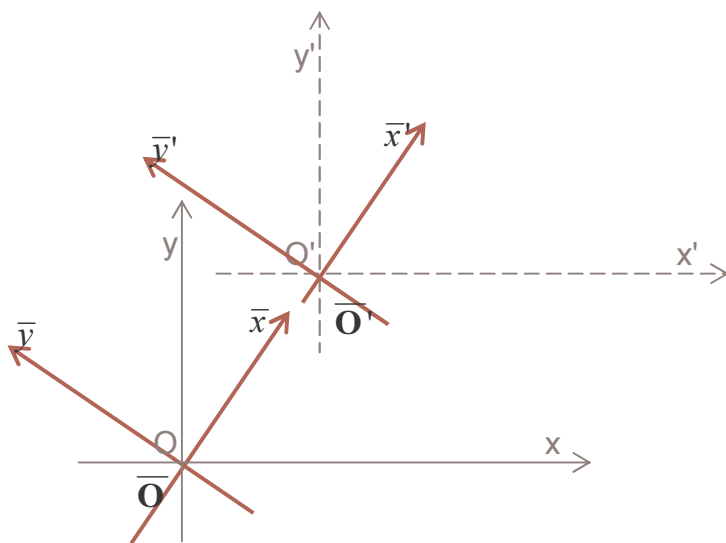
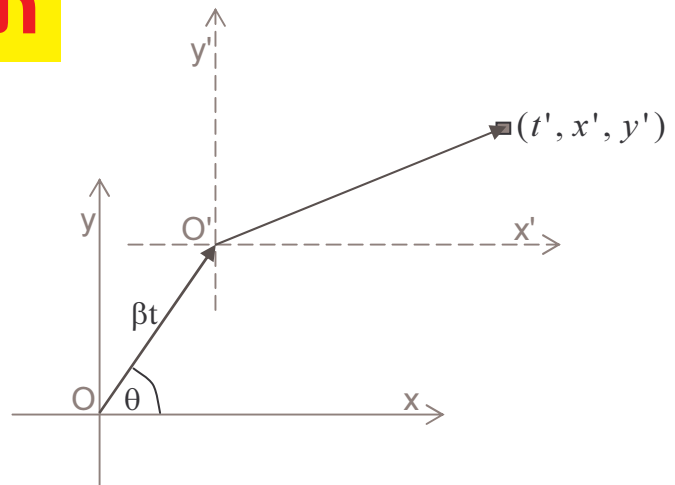
איור ו-1: הבזק אור הנשלח במערכת O' לאורך ציר y'

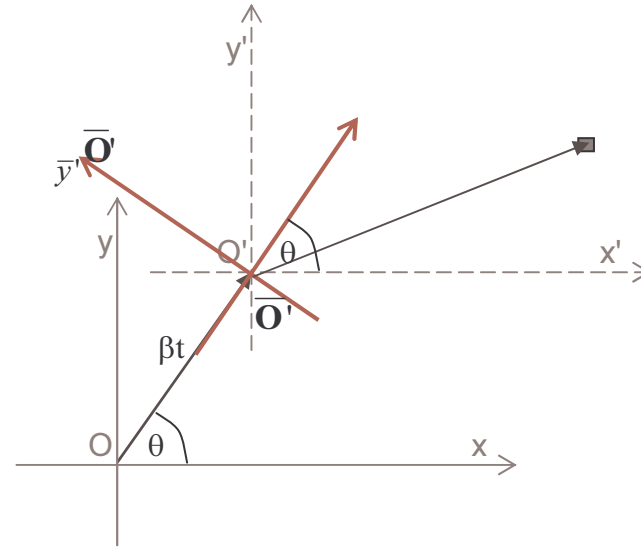
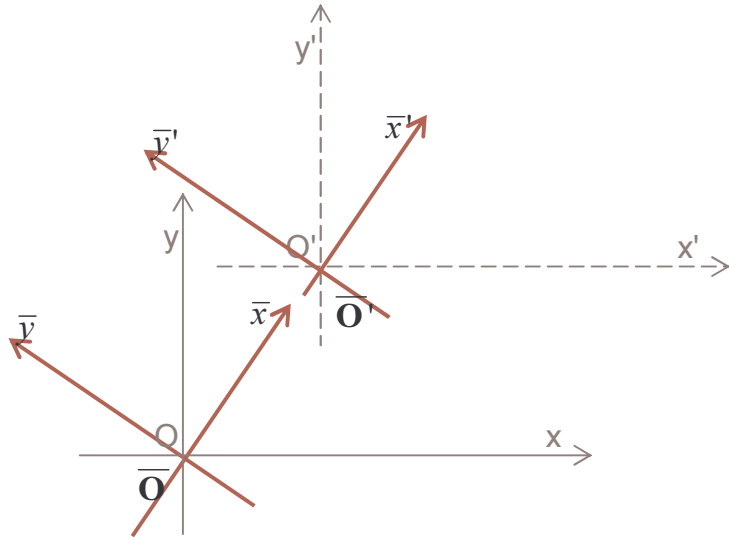
האברציה של האור (2)



תנועה יחסית במישור Y-X

$$O' \rightarrow \bar{O}' \rightarrow \bar{O} \rightarrow O$$





$$\begin{pmatrix} \bar{t} \\ \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma & 0 \\ \beta\gamma & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{t}' \\ \bar{x}' \\ \bar{y}' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{t}' \\ \bar{x}' \\ \bar{y}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t \\ x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{t} \\ \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix}$$

$$T : \mathbf{O}' \rightarrow \overline{\mathbf{O}'} \rightarrow \overline{\mathbf{O}} \rightarrow \mathbf{O}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma & 0 \\ \beta\gamma & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \cos \theta & \beta\gamma \sin \theta \\ \beta\gamma \cos \theta & (\gamma - 1)\cos^2 \theta + 1 & (\gamma - 1)\sin \theta \cos \theta \\ \beta\gamma \sin \theta & (\gamma - 1)\sin \theta \cos \theta & (\gamma - 1)\sin^2 \theta + 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \cos \theta & \beta\gamma \sin \theta \\ \beta\gamma \cos \theta & (\gamma - 1)\cos^2 \theta + 1 & (\gamma - 1)\sin \theta \cos \theta \\ \beta\gamma \sin \theta & (\gamma - 1)\sin \theta \cos \theta & (\gamma - 1)\sin^2 \theta + 1 \end{pmatrix}$$

$$\theta = 0$$

מקרים מיוחדים:

$$\begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \\ \beta\gamma & \gamma \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \cos \theta & \beta\gamma \sin \theta \\ \beta\gamma \cos \theta & (\gamma - 1)\cos^2 \theta + 1 & (\gamma - 1)\sin \theta \cos \theta \\ \beta\gamma \sin \theta & (\gamma - 1)\sin \theta \cos \theta & (\gamma - 1)\sin^2 \theta + 1 \end{pmatrix}$$

$$\theta = \pi / 2$$

מקרים מיוחדים:

$$\begin{pmatrix} \gamma & & \beta\gamma \\ & 1 & \\ \beta\gamma & & \gamma \end{pmatrix}$$