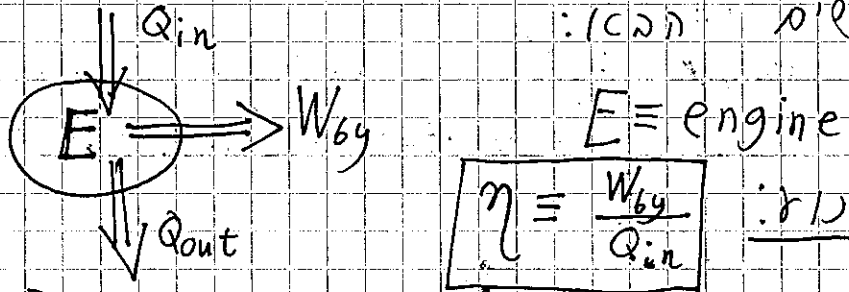


פיזיקה תרמית - תורת חום

I) מנועים וחברה והבהרות, יעילות מקסימלית

ק' ברטו השקיע שגבד עם מנועים. היצרנו מנוע "ג'יטר או'צ'ו'טה' מערכת תרמוק' (כאמ'י'ת) המקבלת חום כ- input ומפיקה עבודה כ- output, יעוק כז' שגב'ן עם פולטת חום לטביה. (במקרים רבים, יתום הטבגס מקורו המאוצר חום ת'בוני למצ' עצמה ולג'ה קורכאים external combustion, אך לברח'ים מקור החום הוא התהליך פנימי המערכת, כמו המנוע אולט' שרכאית בתהליך ה'ית' ג'טה קורכאים internal combustion). ג'בורה סכימטית, נ'ימן למתאר את התהליך "התרשום הבא:



$\eta \equiv \frac{W_{by}}{Q_{in}}$ יעילות המנוע:

ההנחה היא תחילת שהמנוע עצמו מקבלת תהליך מחזורי כלשהו ולכן הוא מוצר "לאותו מצב תרמוק' (כאמ'י'ת) הסוג כל מחזור. לכן, ע"ג מחזור אחת של המנוע:

$\Delta U_E = 0, \Delta S_E = 0$

$Q_{in} = W_{by} + Q_{out}$

$\Delta S_{tot} = \Delta S_H + \Delta S_C \geq 0$

$\Rightarrow \eta = \frac{W_{by}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$

שינוי אנטלפיה של המאוצר יקיר
שינוי אנטלפיה של מקור החום

אם נניח כ' מקור החום הוא אמאט חום בטמ' קבועה T_H ואילו מקור הטבגס המערכת (Q_{out}) נשפך למאוצר קר בטמ' קבועה T_C אזי נקבל:

$$\Delta S_H = - \frac{Q_{in}}{T_H}, \quad \Delta S_c = + \frac{Q_{out}}{T_c}$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_H + \Delta S_c = \frac{Q_{out}}{T_c} - \frac{Q_{in}}{T_H} \geq 0 \quad \leftarrow$$

מ"ס - מ"ס
מ"ס - מ"ס

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} \geq \frac{T_c}{T_H}$$

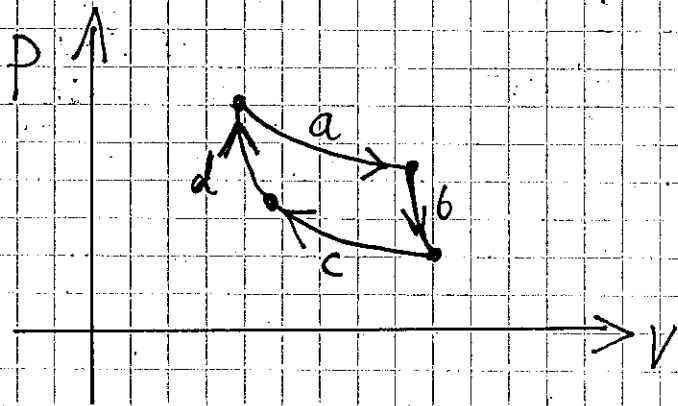
היחס בין שני מנועים (הפוסט בין 2 מנועים) הוא

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_c}{T_H} \equiv \eta_c$$

הכאן מראה שהמנוע הוא כזה

המנוע קטן, שמתחילתו קטן:

~~המנוע קטן, שמתחילתו קטן:~~



a: $T = T_H$ איזותרמית בטמפרטורה T_H

b: $T: T_H \rightarrow T_c$ אדיאבטית. בטמפרטורה יורדת

c: $T = T_c$ קאזיטרמית בטמפרטורה T_c

d: $T: T_c \rightarrow T_H$ אדיאבטית בטמפרטורה עולה

מכיוון שהמנוע הוא מנוע קטן הוא מקווק
 עם הא-שינויות בקווק למחלה מופכים לשינויים
 בטמפרטורה $\Delta S_{tot} = 0$ והם הם המנוע הקטן!

באלון כללי, עבור מנוע לא הפיך, היפך,

$$\Delta S_{tot} = \frac{Q_{out}}{T_c} - \frac{Q_{in}}{T_H} = \frac{Q_{in} - W_{by}}{T_c} - \frac{Q_{in}}{T_H} > 0$$

$$\frac{W_{by}}{T_c} = \frac{Q_{in}}{T_c} - \frac{Q_{in}}{T_H} - \Delta S_{tot}$$

$$\eta = \frac{W_{by}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_c}{T_H} - \Delta S_{tot} \cdot \frac{T_c}{Q_{in}} < 1 - \frac{T_c}{T_H} = \eta_c$$

מסקנה: מכיל הקינן הנ"ל (הוא) שנוצרו טיסות חילופי
 עתק ובעיני היררכיה ניקוי:

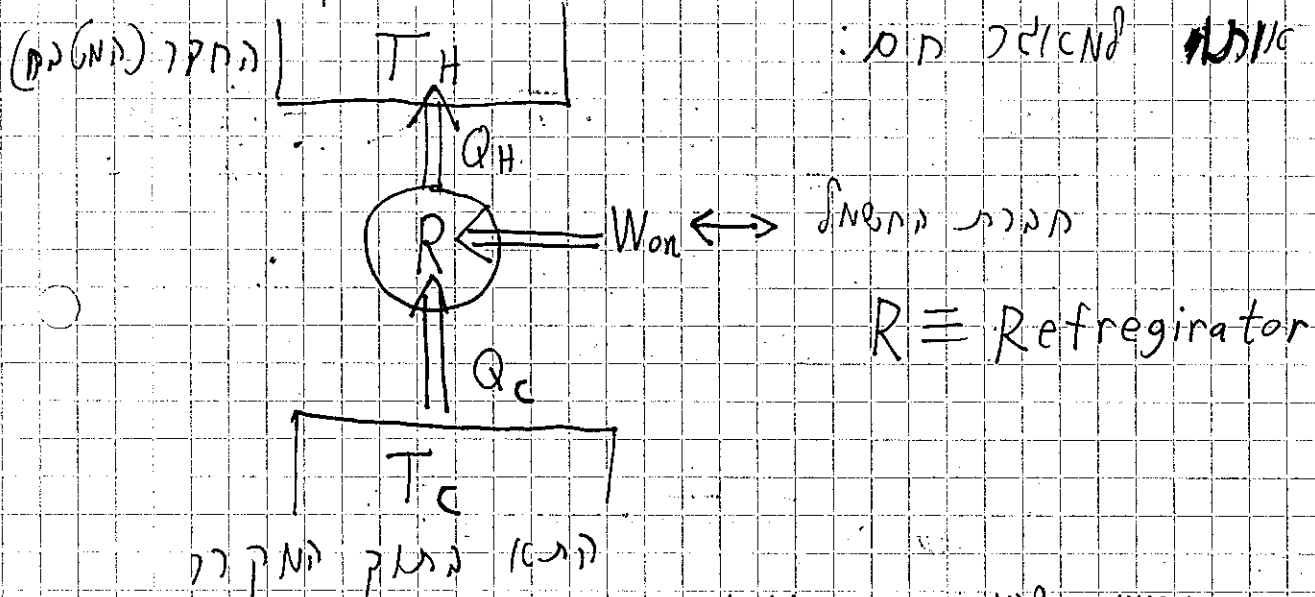
היפוך והקטנת האפסית
 מנוע הפועל בין T_c ו- T_H $\Leftrightarrow \Delta S_{tot} \geq 0$

מנוע קטן הוא המנוע
 היחיד ביותר האפשרי שפועל
 בין 2 אנטרופיות

נוסח חוק השני עיקרי:

II מקדמים:

המנוע, היקלט חום ונצטוו לפיק אקוזה ע"י כק
 שסכטו עוקף חום למאזר קר.
 במקרה, אנחנו מקצעים אקוזה עם המערכת (או
 מקבלים אקוזה ממקור חיצוני, כאן חברת החשמל)
 ובאמצעותה אנו שואבים חום ממאזר קר ושופכים



שוב, מכיוון שהמקרה מתזור, $\Delta u_R = 0$ תקבלו:
 אורגניזם כסיק
 $Q_C < W_{on} + Q_C = Q_H$

החום שנשפך למקר מהאחורה של המקרה יותר גדול מהנא חום שהוקצאנו מתוך המקרה

המנוע: הקדם הוא עם כמה אקוזה הצלחנו לבצע

המקרר: הקדם הוא עם כמה הצלחנו מקרה את המאזר הקר

המאזר חום (היתרתי): הקדם הוא עם כמה הצלחנו לחמם את המאזר החם. כמו מצפן בתורף ששאר אויז קר מתחם, מתחם איתנו ע"י אקוזה מחברת החשמל, ושופך איתנו למקרר החמים והנערים. אם כאן $Q_H = W_{on} + Q_C > Q_C$

האנלוגיה עושה את המנוע המקרה נקראת "מקדם"
 והביטויים הם באנגלית: $COP \equiv$ Coefficient of Performance

$$COP \equiv \frac{Q_c}{W_{on}} = \frac{Q_c}{Q_H - Q_c} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_c} - 1} \leq \frac{1}{\frac{T_H}{T_c} - 1}$$

ככל שיש יותר מקור, הבלתי-יכולת לקרר יותר עם אותה היסק זה של עבודה יותר טוב!

כמו מקומם:

$$\Delta S_{tot} = -\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_H}{T_H} \geq 0$$

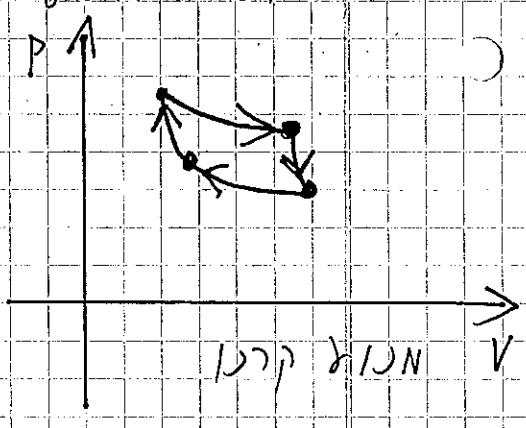
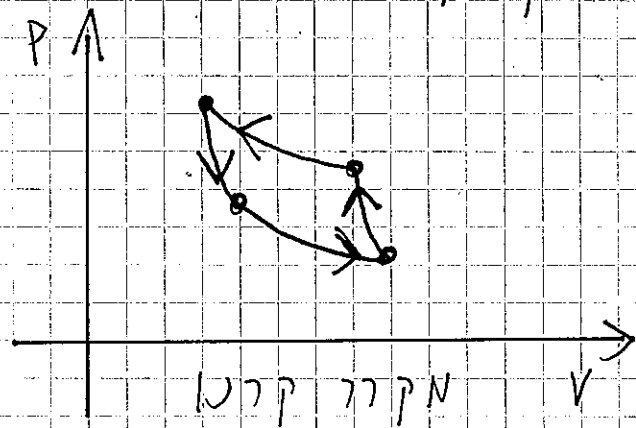
$$\frac{T_H}{T_c} \leq \frac{Q_H}{Q_c}$$

הפרטים מוצגים חום מהמאכל הקר ומכילים חום מהמאכל החם.

$$COP \leq \frac{1}{\frac{T_H}{T_c} - 1}$$

ורשימתו מתקיים התהליך הפיך שבו מקרה הפיך נקרא מקרה קר, הפיכה של מנוע קר.

$$\Delta S_{tot} = 0$$



המסגרת של מקדם הביצועים:

ביום קיץ חם, במקרה $T_H \approx 303 \text{ K} \approx 30^\circ \text{C}$. חברים באמצעות מקרה קר של $T_c \approx 277 \text{ K} \approx 4^\circ \text{C}$ לשמור על טמפרטורה.

$$C_{op} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} = \frac{1}{\frac{303}{277} - 1} \approx 10.65$$

כמות האנרגיה כל יום שבו מוציא מחבת התשתית (מחסום)
 (ע"פ) אנו יוקרע למוציא גז כגון 10.65 טון חום
 מהחוק לר. בסך הכל לר.
 ט"ח כי נרצה לקרר ${}^4\text{He}$ מ-300°K ל-4°K
 $T_H = 300^\circ\text{K}$, $T_C = 4^\circ\text{K}$ שטמפ' זו ${}^4\text{He}$ חופק לזרם-נוזל.

$$C_{op} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} = \frac{1}{\frac{300}{2} - 1} \approx 0.0067$$

כמות האנרגיה כל יום שבו מוציא מחבת התשתית, קררנו
 אור החומר של גז כגון: 6.7×10^{-3} טון חום
~~למחרת~~
 זכה ע"פ קרנו, הלייזר!
 שישי!

בבואה, ככל שנוצר לקרר יותר נצרך פסאוק, האופן יחסית,
 יותר אנרגיה מהחוקר החיצוני!

כפי שרוביא חומר לטמפ' 0, נצטק $C_{op} = 0$
 וזה לא אפשרי. (חוק השלישי של התרמודינאמיקה).
 כבואה, בק' לקראת לטמפ' טמפ' מאד, מקררים
 נשלבים.

III התוק הטה באמצעות מנוחים ומקדמים

כאילו מוקדם יותר היום את הניסוח של קרנו לתוק הטה של התרמוקליטאמ'קה:

$$dS_{tot} \geq 0 \iff \eta_E \leq \eta_C = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

מנוח קרנו הוא היעיל ביותר האפשרי שבודל בין 2 אמצעי חום.

(אם מוספים לכך את התוק השלישי של התרמוקליטאמ'קה, שלבולם לא ניתן להגיע למחם אפס, אז מסיקים $\eta < 1$ כלומר לא ניתן להגיע ליעילות של 1.)

ישנם 2 ניסוחים נוספים לתוק הטה:

① קלווין: אין מנוח שבו חום הופק לעבודה היעילה של יחידה כלומר $Q_C > 0$, ו $\eta < 0$ לעולם

② קלאוזיוס: אין אפשר להעביר חום ממאגר קר למאגר חם ללא עבודה. כלומר $\infty > Q_C$.

זה ברור שהניסוח של קרנו + התוק השלישי אינה את הניסוח של קלווין.

כעת נראה שמתיקיים: ① קלווין \iff ② קלאוזיוס

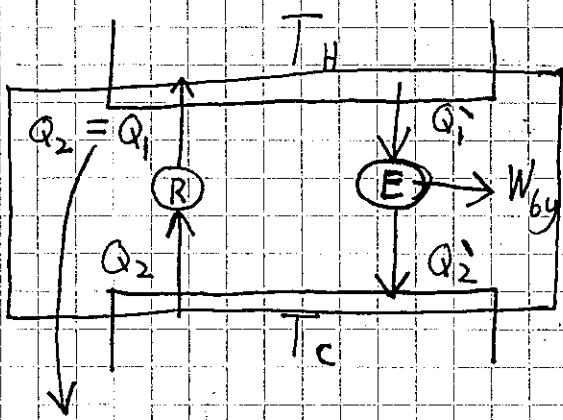
② קלאוזיוס \iff קלווין

③ קלאוזיוס \iff קרנו

לזה מוכיח את שקילות כל הניסוחים הקלאסיים לתוק.

10 קלווין \Leftarrow קלווין: טמפרטורות של קלווין מתקיים

נניח בשלילה שקלווין אחד, וניתן להגדיר קום ממאכלד
 קל למאכלד הם לא עבודה.



נניח מקרה, ונראה קום Q_2
 מהמאכלד הקד, ונגדיר אותו
 קום המאכלד הקום. עכ"ל:

$$Q_1 = Q_2$$

שימוש אנרגיה

כעת, נשים חנוך בין אותם אמבלי חום, ונניח

קום $Q_{in} = Q_1'$ מהמאכלד הקום. והחום מפיץ
 W_{by} ופולט $Q_2' = Q_{out}$ חזרה אל המאכלד הקד.

"המאכלד התחיליים התרחקו קצת מהחום, תחיליים
 מנסה את התחיליים כך שהחום הנפלט י"י החום הווא
 הוקוין $Q_2' = Q_2$, קה"ל החום שהמקרה הוציאו

$$Q_1' = Q_2' + W_{by} = Q_2 + W_{by} = Q_1 + W_{by} > Q_1 \quad \text{עכ"ל}$$

\Leftarrow נשים את כל החומר של המקרה החום הקופסא

שימונה. כל מה שנראה זה שהקואו ממאכלד הם נא חום

$$Q_{in} = Q_1' - Q_1$$

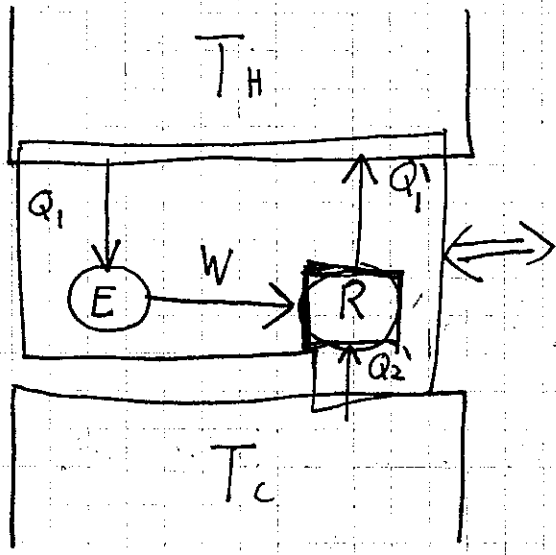
$$W_{by} = Q_1' - Q_1 = Q_{in} \quad \text{הפקט עבודה:}$$

$$Q_{out} = Q_2' - Q_2 = Q_2 - Q_2 = 0$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1$$

לכן, נא, יצאו חנוך עם יעילות של
 גיבוי לפינת קלווין.

Ⓒ קלאוויס \Leftarrow קלאוויס: מתיים שהיטות של קלאוויס מתקיים. נניח השלימה שקלאוויס אציה, וניתן לבנות מנוע עם יעילות של $\eta = 1$.



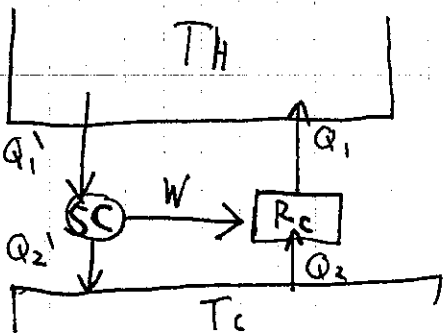
נבחר חום Q_1 מהמאגר
 יתם למנוע הזה, ונפיק
 מנוע עבודה $W = Q_1$
 מנוע העבודה הזה נכנס למקרר,
 ובאמצעותה נשאר חום Q_2'
 ממאגר קר ונשפוק חום Q_1' למאגר החם.

$$Q_1' = W + Q_2' = Q_1 + Q_2' > Q_1 \quad \Leftarrow$$

כעת, נשים את כל המערכת של מנוע + מקרר בקופסא שחורה. אין שם עבודה חיצונית של הקופסא הזו. אבל, תוצאת חום Q_2' ממאגר קר והעברנו חום נטו של $Q_1' - Q_1 = Q_2'$ למאגר החם.

\Leftarrow יצרנו מקרר שמגביח חום ממאגר קר למאגר חם ללא צורך חיצוני. בניגוד להנחת קלאוויס.

Ⓓ קלאוויס \Leftarrow קרנו: מתיים שהיטות של קלאוויס מתקיים. (Super-Carnot) SC



נניח שקרנו אציה, וישנו מנוע עם יעילות הגבוהה מנו של קרנו. נחבר מנוע SC כזה בין T_C ל- T_H וכמו כן נחבר מקרר קרנו RC בין אלה מאגרים.

ה'עילות של המטע SC היא

$$\eta_{sc} = \frac{W}{Q_1'}$$

יעילות זו גבוהה מהיעילות של מטע קרנו הפועל בין אורות אמבלי חוס. אבל מכיוון שחוקרה קרנו אינו אלא מטע קרנו הפוך, יעילות זו היא פשוט:

$$\eta_c = \frac{W}{Q_1}$$



$$\eta_{sc} > \eta_c \Rightarrow \boxed{Q_1 > Q_1'}$$

חוס מצבה: שימור אנרגיה במטע:

שימור אנרגיה בחוקרה:

$$\begin{cases} Q_1' = W + Q_2' \\ Q_1 = W + Q_2 \end{cases}$$



$$Q_1' - Q_1 = Q_2' - Q_2 < 0 \Rightarrow \boxed{Q_2 > Q_2'}$$

כשנשים את הכל בקופסא שמורה, נקבל שללא שום גבולות חיצונית, מוצאו של חוס

$$Q_2 - Q_2' > 0$$

ממאז קר והקרנו אותו למאז חוס

$$(Q_1 - Q_1' = Q_2 - Q_2')$$

וצה בטיאוק להנחת קלאוזיוס.

← הוכחנו את שקילות כל ניסוחי החוק השני!