

פיזיקה תרמו-תרמודינמית ז

(ד) תהליכים תרמו-קינטיים קוואזי-סטטים, הפיכים ולאו הפיכים

קידום עק אנטרופיה של פונקציות מצב תרמו-קינטיים

<u>כחול עמל:</u>	א
	ק
	ד
	ו
	ס
	א

כל היקפים הנ"ל הם בגלל משמורת אנרגיה ופיק כחול
 המרכיב נמצא במצב שיווי משקל. אם המערכת
 מתחילה לשיווי משקל, אז, למשל, הטמפרטורה תישנה
 מתקנה לטקנה בצורה אקראית, ולכן ניתן יהיה לקבל
 את הטמפ' של המערכת.

כשאנו מקבלים את תהליך תרמו-קינטיים אנו מקבלים
 גם מעבר של מערכת ממצב שיווי משקל A למצב
 שיווי משקל אחר B. במצב ההתחלה A ובמצב הסוף B, כל היקפים
 ת"ת מופקדים הטמ, כי המערכת בשיווי משקל.
 אבל מה קורה לו בקרב?

כאן את המודק היסודי של תרמו-קינטיים

$$dU = \delta Q + \delta W$$

dU הוא קיברנטיאט שלם, ולכן ΔU (טו והפרט)

באנרגיה הפנימית (תלויה באקוויבליב) $U = U(T, V, N)$.
 $\Delta U = U_B - U_A$. לעומת זאת, dQ ו- dW הם קיבולות אנרגיה.

שלמים. סה"כ החום וסה"כ העבודה תלויים בהתהליך הספציפי שאני מבצע.

(הגדרה: הפוטנציאל הכימי נכנס בתוך dW של dU כגון קשור לעבודה כימית. $dW = PdV + \mu dN$ - אולם כל סוג של עבודה) מכאן שמשוואת ע"י PdV , אולם כל סוג של עבודה).

כאן יש לזכור קשרים בין לחץ, חום, עבודה, אנרגיה, קיבולות אנרגיה שלמים בצורה הבאה:

$$dU = dQ + dW = TdS - PdV + \mu dN$$

אבל, זה מניח שכל שלם בתהליך ניתן לשייך למערכת טמפרטורה T , לחץ P , ופוטנציאל כימי μ .

אנשים אחרים, זה מניח שכל שלם הקרוי המערכת נמצאת בשיווי משקל!

למה קוראים לתהליך קוואזי-סטטי? מערכות נמצאות בין מצב A למצב B מבלי לעבור דרך מצב ביניים.

משווי משקל. אנרגיה מכאנית זה לעומת

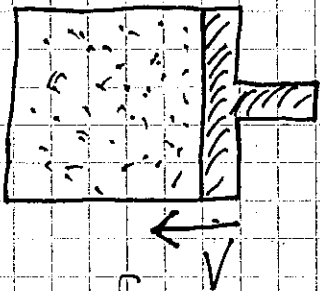
אם נחמה M מאסה m נמצאת על גובה z לאורך ציר z .

תהליך זה יכול להיות גם אינסופית איטית או מהירה.

בתחילת התהליך ובסופו התמורה יש למערכת מאנרגיה (בהתחלה, אני אודם לה להתחיל לעבוד ובסוף אני עוזר אחרת). תהליך קוואזי-סטטי זו איקויליבריום.

שתקפה כל גוף השיט"ם המתוכתת הם איט"ם מספיק.

כמה איט"ם? יתכן איט"ם מהצדן שלוקח למחשבת לפקד את עזמה מתקש ולגויש לשיט"ם משקלם.



למשל, אם אני קוקס שבזים בוכנה

ומצ"צ את הבוכנה מהיכוח V , אז כל

גוף V קטן מההיכוח הקודם בשב (לצו

המהיכוח המתוצע לשיט"ם מקסום גולצמן,

והמהיכוח שאינפורמציה נעה בגוף השב), אז טבל

לקנה את התהליך קוואנז-סטט, שבן קבצ מספיק להתאים

את עזמן למצב התקש לשיט"ם שלספקית' למחשבת לקחוס

אויט"ם.

תהליך הפיק הינו תהליך קוואנז-סטט שהאנטרופיה

למחשבתה מתגבש. להצרכים, האנטרופיה (M, V, U) S

היא פונקציה תרמוקוסימית שמופקת יקו המצב שינוי

משקל כאשר הבעים התרמוקוסימית M, V, U מושקלים

אזכרת טבל למשל לפני הפרט האנטרופיה בין מצב

הסיום למצב היתרםיה $(\Delta S = S_B - S_A)$ אופל לאו

טבל לקנה את אנטרופית המתוכתת לאורך התהליך ולקנס

שבזי תהיה קבולה.

לכן, תהליך הפיק הוא הוכחה קוואנז-סטט!

אבל, תהליך קוואנז-סטט' למחשבת' עהיזר הפיק.

למשל, אם ניקח 2 לבנים עם הפרט למפ' קטנה ביניהן,

ונחבר ביניהן עם תכל נחשבת מחשבת קק, כן שהלכת החוס

היא איט"ם מאוק, נקבל שבפניה שקצת יותר חמה

מחמת את הלכנה שקצת יותר קרה בתהליך קוואזי סטטי, אבל זה לא הפיך, כי האנטרופיה יקלה (הגדלת חום בין הליבנים, תכונות היתר תכאון שבתהליך כזה האנטרופיה לא יקלה, כלומר הגע"ה האנטרופיה של השום הקד היא יותר מקיזיקה האנטרופיה של השום החם).

אופסד גם לחשוב גם צה בצורה הבאה: אם התמזכה

השינוי משקל במצב A, והוסרת אילוף מסויים, אז המערכת תנוג לעבר המצב B עק אום מצב זה הוא געם

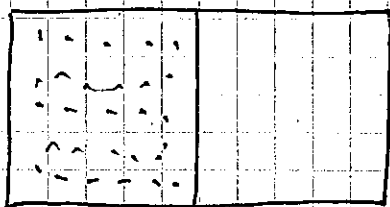
האנטרופיה הגבוהה ביותר מבין המצבים התרמנדינאמיים

הנטיים. אם צה המצב, אז המערכת לא תוכל

לחזור מצב A, כי תייה להתקיים $dS \geq 0$ (החוק השני).

שימו לב שלא כל תהליך שמסמך אנטרופיה הוא הפיך. יש תהליכים לא קוואזי-סטטיים, שהאנטרופיה במצב הסופי שווה לאנטרופיה במצב התחלתי, אבל התהליך לא הפיך.

למשל:



טפיל אור התחיקה

קרה אחת וניתן

לעצ לעת פשט לאקום

בתהליך הזה, האנטרופיה יקלה, לפי נוסחאות

$$S = S_0(N) + N k_B \left(n \left[\left(\frac{u}{N} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{V}{N} \right) \right] \right)$$

$$\Rightarrow \Delta S = N k_B \left(n \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) = S_2 - S_1 > 0$$

אבל, אם כעת נקרה אור השז, וכן נחליק את

האמפרטורה שלה, נקטין את u וכן נקטין את

האנטרופיה. אם נקרה אור השז בקיץ הכאור

הנכונה, נקבל שטא השינוי האנטרופיה של השז

הוא אפס.

מה קרה כאן? באיזה קירור את השני, פלטת' חום החוצה, וכך הג'ת' את האנטרופיה של הגזים.

~~אם אתה מוציא את החום מהגז, אתה מוציא את החום מהעולם, אז החום הכולל הוא אפס.~~

$$\Delta S_{tot} = \underbrace{\Delta S_{gas}}_{=0} + \underbrace{\Delta S_{world}}_{>0} > 0$$

ג' התחמם ג' התקרר

II התפשטות אקיאובטית קוואזי-סטטית של אקיא' ~~מחזור~~

ההליך אקיאובט' הוא כזה שמתחם פלט מחזר חום.

$$dQ = 0$$

$$dQ = T ds$$

אם התהליך הוא קוואזי-סטט, אז $ds = 0$ ולכן התהליך קוואזי-סטט אקיאובט' מתקיים $ds = 0$ כלומר התהליך הפיך (פדח'ם אומח'ם גם אינטרופ')

$$dU = -p dV$$

מתקיים, מתקיים אם מניחים שמספר החלקיקים קבוע $dN = 0$.

$$PV = Nk_B T$$

$$U = \frac{f}{2} Nk_B T$$

כאשר f זה מספר קצוות החופש הפנימיות של חלקיקי הגז.

עבור גז מונואטומי: $f = 3$ בתלת-מימד האם

3 קצוות חופש טרנסלציונליות

עבור גז דו-אטומי: $f \in \{3, 5, 7\}$ תלוי אם

הצלחת' לעורר את הרוטציות ואת הוויברציות של המולקולה, כמו שפאייט בלבד.

$$dU = \frac{f}{2} N k_B dT = \frac{f}{2} \frac{PV}{T} dT$$

מצד א

$$PV = N k_B T$$

$$dU = -P dV$$

מצד ב

$$\frac{f}{2} \frac{PV}{T} dT = -P dV \quad \Leftarrow$$

$$\boxed{\frac{f}{2} \frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V}} \quad \Leftarrow$$

שימו לב שזוהי משוואה דיפרנציאלית קוואזי-הומוגנית. ניתן להפריד משתנים ולקבל את המשוואה: $T \cdot V^{2/f} = \text{const}$.
 ניתן גם לכתוב את המשוואה בצורה: $T \propto V^{-2/f}$.

$$\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) = \ln\left[\left(\frac{V_0}{V}\right)^{2/f}\right]$$

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{2/f}$$

$$\boxed{T \cdot V^{2/f} = T_0 \cdot V_0^{2/f} = \text{const}}$$

זהו מצב של קומפרסיה אדיאבטית. ניתן לכתוב את המשוואה בצורה: $T \propto V^{-2/f}$.

$$\boxed{\gamma = 1 + \frac{2}{f} = \frac{f+2}{f}} \quad \text{מצד א}$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$PV = N k_B T$$

$$T \propto P \cdot V$$

מצד ב

מצד ג

מצד ד

$$pV^\sigma = \text{const}$$

והקשר בטור:

למשל איזוטיאלי, אדיאבטי + קוואזי-סטטי (תהליך איזוטרמי, תהליך הייבוק).

שימו לב שכל מה שהקדנטיה $0 \leq f \leq \infty$ ופס

$$1 \leq \sigma = \frac{2+f}{f} \leq 2$$

$\sigma = \frac{5}{3} \Leftrightarrow f = 3$ עבור מש אדיאבטי מוטיאטומי

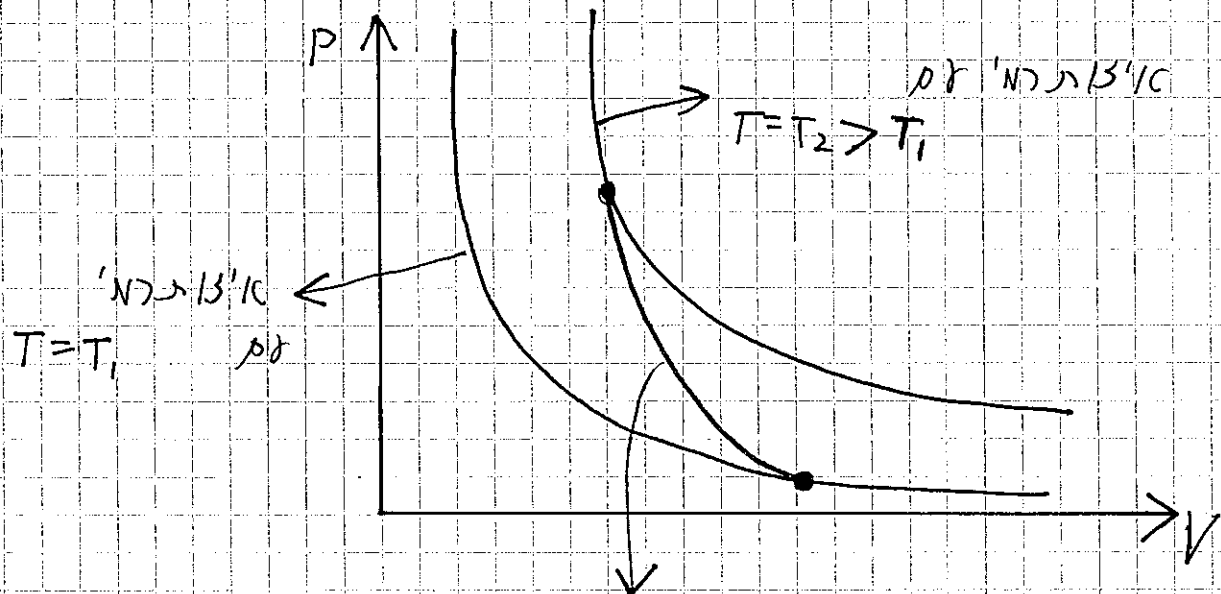
$\sigma = \frac{7}{5} \Leftrightarrow f = 5$ עבור מש אדיאבטי קו-אטומי עם רוטציות

$\sigma = \frac{9}{7} \Leftrightarrow f = 7$ אם יש גם ויברציות

בתהליך אדיאבטי כשה: $\sigma \geq 1$, $p \propto \frac{1}{V^\sigma}$

בתהליך איזוטרמי, ושבו $T = \text{const}$, $p \propto \frac{1}{V}$

לפי: התהליך קוצק חזק יותר כאשר מחלים את הטמפרטורה בצורה אדיאבטיה מאשר בצורה איזוטרמית.



אדיאבטי, כאשר הטמפרטורה יורדת.

כיוון המפנה של האנרגיה לא משנה את המיליק כגון.

מכיוון שכל המיליקים, כל המיליקים, כל המיליקים

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T} = 0 \quad \leftarrow dQ=0$$

ולכן המיליקים לא משנים!

$$S = S_0(N) + N k_B \ln \left[\left(\frac{U}{N} \right)^{\frac{f}{2}} \cdot \frac{V}{N} \right] \quad \text{גורם המפנה}$$

\Downarrow

$$\Delta S = N k_B \left[\frac{f}{2} \ln \left(\frac{U_f}{U_i} \right) + \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \right]$$

$$\frac{U_f}{U_i} = \frac{T_f}{T_i} = \left(\frac{V_f}{V_i} \right)^{-2/f} \quad \text{הנחה}$$

$$\Rightarrow \Delta S = N k_B \left[\frac{f}{2} \cdot \ln \left[\left(\frac{V_f}{V_i} \right)^{-2/f} \right] + \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \right] = 0$$

(III) קיבול חום:

ק'כ'נו את תהליכים הפיכים בקיום לא היתה מחזורית
 התגרה של חום. אם כן יש מחזור חום, אבל ג'ניו
 לשאול את השאלה כמה חום נצטרך להכניס למערכת
 על מנת להגלות את הטמפרטורה שלה?
 השאלה היא (ולו מ'ק' השאלה בתכנון-אומ'קה)
 מה נשאר קבוע במערכת בהתקן התהליך ק
 (למשל, נפח / מסה / חלקיקים / וכו').

נשאר את C_x להיות קיבול החום של המערכת

כאשר x נשאר קבוע. לפי ההקדמה:

$$C_x = \left. \frac{dQ}{dT} \right|_x$$

(הקדמה זו נשכחה את ההקדמה של קיבול חום, שזה נקד
 לכמה מטען ג'ניו להכניס למערכת כדי לשנות את
 הרכב הפוטנציאלים: $C = \frac{dQ}{dT} = \frac{Q}{T}$)

בתהליך קוואזי-סט' מתקיים:

$$dQ = T ds$$

ולכן:

$$C_x = T \left. \frac{\partial s}{\partial T} \right|_x$$

למשל, קיבול החום הנפח קבוע (למשל חלקיקים קבוע)

$$C_v = \left. \frac{dQ}{dT} \right|_v = \left. \frac{du + Pdv}{dT} \right|_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v$$

ולו הקדמה שחיינו פהר בצורה.

בבית, תכאו שצוק לש אינ'אום מתקיים

$$C_p - C_v = N k_B \equiv n \cdot N_A \cdot k_B = n R \quad (n \equiv \text{מספר המולים})$$

לכן, הפדס קיבולי התום המולריים הוים:

$$\tilde{C}_P - \tilde{C}_V = \frac{C_P}{n} - \frac{C_V}{n} = R \approx 8.31 \frac{J}{K \cdot mol}$$

עבור $\frac{C_P}{C_V}$

נשתמש בתוצאה זו כדי לקבוע את ערכי $\frac{C_P}{C_V}$ עבור גזים אידיאליים.

$$C_V = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_V = \frac{3}{2} N K_B \quad \Leftarrow \quad u = \frac{3}{2} N K_B T$$

$$C_P = C_V + N K_B = \frac{5}{2} N K_B$$

$$\boxed{\frac{C_P}{C_V} = \frac{5}{3} \approx 1.67}$$

He, Ne, Ar, Kr, Xe

גזים חד-אטומיים

יש גזים חד-אטומיים המיושבים!

גזים חד-אטומיים הם גזים חד-אטומיים, כו הם לא יטלים (כימית) יפה יותר למולקולות.

$$\frac{C_P}{C_V} \approx 1.4 = \frac{7}{5}$$

גזים חד-אטומיים, מולקולות

שתיים לשני איקיווי קו-אטומיים.

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma \quad \text{מתקיים}$$

באופן כללי, עבור גזים חד-אטומיים.

$$T_c = \frac{T_1 + T_2 + T_3 - T_h}{2}$$

נצטרף את:

$$\Rightarrow T_h \cdot \left(\frac{T_1 + T_2 + T_3 - T_h}{2} \right)^2 \geq T_1 \cdot T_2 \cdot T_3$$

$$\Rightarrow T_h \left(\frac{1050 - T_h}{2} \right)^2 \geq 4.2 \times 10^7 \text{ [K}^3\text{]}$$

אילוץ שני של T_h

סימום של T_h גבוה מדי לא יתאים. האילוץ הראשון של T_h הוא $T_h \geq 350$.

$$f(x) = x \cdot \left(\frac{1050 - x}{2} \right)^2$$

מבואר הפונקציה

לפונקציה יש מקסימום ב- $x = 350$

מינימום ב- $x = 0, 1050$ כי $f = 0$

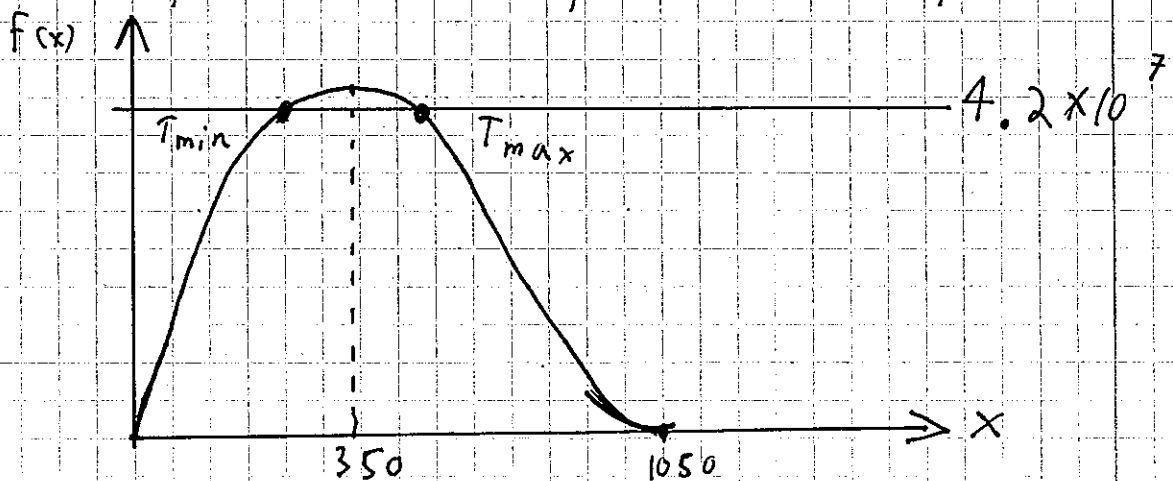
כאשר $x \rightarrow \infty$, $f(x) \rightarrow \infty$

כאשר $x \rightarrow -\infty$, $f(x) \rightarrow -\infty$

אם נסתכל על הפונקציה, היא איננה מוגבלת למעלה

$$0 \leq x \leq 1050$$

נראה שיש פונקציה אחת המאפשרת לנו לקבל:



כלומר, טימם לקיים את שני האינצ'ים שקיבלנו כפי
 אם הטמפרטורה יסופית של הארץ והים הוא:

$$294 \cdot K \approx T_{min} \leq T_h \leq T_{max} \approx 409.5 \cdot K$$

אבל שימו לב לגודל אילוף, וזהו שמתקיים
 (אוקרית, איין משתחרר עם אוקר).

$$T_h \geq \frac{1050 - T_h}{2} \Rightarrow 3T_h \geq 1050$$

$$\boxed{T_h \geq 350}$$

כלומר הטווח האפשרי לטמפר' הסופית של הארץ והים
 הוא: $350 \leq T_h \leq 409.5$

הטמפרטורה המקסימלית האפשרית היא עכ"ל $409.5 \cdot K$

זה אומר שאם נבחר את הארץ עם 300 מעלות לפחות
 עם 350 מעלות, ועצב עננים או האטמוספירה שצורתה

גיטיהם כפי לחמם את הארץ עם 400 מעלות,
 לא נוכח לחמם אותה ב- 50 מעלות, כמו שהיית
 אולי נאיבית מתחילים מתקופת הטמפר' ההתחלתית,
 אז עכ"ל כן ב- 9.5 מעלות.
למאן נגלמה, ישאר האטמוספירה?

היא היתה תיבה מגדלת את האטמוספירה של
 הסביבה (של הגזים). גרם חימום עם אוסילציה
 זה מקנה כוח של העיקרון שאומר שאין כזה דבר
 מותר שמחמם חום לרבותה היעילות של 100%

IV תהליכים אופטיים ולאו אופטיים

כאשר נכזה למצוא את המצב הסופי של מערכת תרמוקינמית הקרובה שהאנטרופיה לא תקטן. מהווה אילוץ שמסביר את

הכוונת

התוצאות הסופיות האופטיות. כלומר, ישנם תהליכים שלא אופטיים כלל, רק משום ~~שהאנטרופיה~~ שהאנטרופיה הכללית לא יכולה לקטון. כראה זאת בקורס:

מטרה מערכת המקוקרת מהסביבה, המכילה גזים לבנים צהובים. קיבול החום של כל לבנה הוא C , והיא קבוע (נניח כי הניפה קבוע). נניח שהלבנים נמצאות בטמפ'

$T_1 = 300 \text{ א}, T_2 = 350 \text{ א}, T_3 = 400 \text{ א}$

אנו מיוננים למחם את אחת הלבנים בטמפ' מקסימלית בתהליך תרמוקינמטי כלשהו. מה הטמפ' המקסימלית שיגיד להשיג אולי? מה ניתן למצוא על התהליך המקרה זה?

מה בעצם קורה כאן?

נכזה להקדים בין 2 מהלבנים. בשל שיט הפכס אמפירית גי'הון, אנרגיה מצדדים מהלבנה הקטנה ללבנה הגדולה. חרשים לאסור את האנרגיה הזו ולשפוק אותה עם הלבנה הישלישית וכך למחם אותה.

בסוף התהליך, יהיה לנו לבנה אחת חמה בטמפ' T_h ושתי לבנות קרות בטמפ' T_c (כל זקוקי הפדטמפ', אנרגיה ממשיק מצדדים וטכל להפיק עוק צבוקה).

המערכת המקוקרת ולכן יש שימוד אנרגיה כללית:

$C = \frac{\partial u}{\partial T} \Rightarrow \boxed{u = CT + u_0}$ לכל לבנה:

$$u_1^i + u_2^i + u_3^i = u_1^f + u_2^f + u_3^f$$

רשימת אנרגיה:

$$T_1 + T_2 + T_3 = T_h + 2T_c$$

$$T_c \geq 0$$

כמות חום שאינה יכולה להיות שלילית

$$T_h \leq T_1 + T_2 + T_3 = 1050 \cdot K$$

אילוץ כושר

עם כוון הגומלין בחוק הכושר, הריכמוקי'אנטי'קה, כלומר קשיחות אנטי'קה

$$ds = \frac{1}{T} du$$

כגון, גומלין בחוק הכושר:

$$\left. \begin{array}{l} dv=0 \\ dn=0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{נח ונספר} \\ \text{התקיים קבוע} \end{array}$$

$$ds = \frac{1}{T} \cdot c dT = c \frac{dT}{T}$$

האנטרופיה של גז לבנה

$$S = C \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + S_0$$

כאשר T_0 ו- S_0 הם הערכים התחילתיים.

$$\Delta S_{tot} = S_{tot}^f - S_{tot}^i \geq 0$$

החוק השני של תרמודינמיקה:

$$(S_1^f - S_1^i) + (S_2^f - S_2^i) + (S_3^f - S_3^i) = C \cdot \ln\left(\frac{T_c \cdot T_c \cdot T_h}{T_1 \cdot T_2 \cdot T_3}\right) \geq 0$$

$$\Rightarrow \frac{T_c^2 \cdot T_h}{T_1 \cdot T_2 \cdot T_3} \geq 1$$

$$\Rightarrow T_c^2 T_h \geq T_1 T_2 T_3$$

אם הקינק הגזטו פלמפ' המקסימלית האופטימלית

כלומר $T_h = 409.5 \text{ K}$, אז כל סימני ה- \Rightarrow

הפיגור מתקוקם יופכו לסימני =

הפלט, $\Delta S = 0 \Leftarrow$ תהליך הפינק!

התהליך היעיל ביותר האפשרי הוא תהליך של אדמסנה

אור האנטרופיה של המערכת. אהל עם תהליך כזה

אינו יעילי ה- 100% כי תמיד ~~הוא~~ האנטרופיה של הסביבה

תגלה כאשר אנטרו מחילים אור החום לעבודה.

VI) התפסאור של איקסאלי אול מול ואקום (תהליך גאול)

זה קולמא לתהליך לא הפינק. נטנה מערכת המקוקנת

מיוסביה, קה הצק אול יש מיכל עם של איקסאלי גלמף

ק ופנפה V_i . הצק השני יש מיכל כיק (ואקום) באול

נפח.

הכזה מסויים שוקרים אור המקוקנת, ונתנים למערכת

להת"צת ולתמיד לטייוי משקל הנפח. $V_f = 2V_i$.

התהליך הביכור אינו קוואזי-סטל. בכל מקרה, מכיוון

שההתפסאור גלמף אול מול ואקום, לא מקוקנת עקוקה ע"י

השל המתפסל (הוא לא קוקף כלום). בנוסף, התהליך

איקסאלי ולכן אין צמיחת חום (המערכת מקוקנת)

כלומר: $dU = dQ + dW = 0 + 0 = 0$

\Leftarrow אין שינוי באנטרופיה הפנימית!

לכן, עם אין שינוי בטמפרטורה (מקוקנת של איקסאלי)

נתפס אג הטינו' באטחופיה ז' שימוש קמטואר

$$\Delta S = N k_B \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) = N k_B \ln(2)$$

לכן, התהליך אינו הפיך.

יש כאן מקרה לדוגמה: הרואו ש: dS מצד אחד, אך מצד שני $dQ = 0$. זה בקיור אומר שלאו נהיה

להשקיר תהליך כזה באופן קוואנטי-סטטי גם אם נגזר אותו בצדדים קטנים מאד (כלומר כל פעם נשקול את הנפח ב- V עם קטן, נחמין להתייבאר ונשקול שוב).
הרי אם זה היה אפשרי, אז היה מתקיים $dS = \frac{1}{T} dQ$.

מכל כזה לשאול כמה עבודה צריך להשקיע על מנת להתזיב את המערכת למצב הרואונו? אומנו צרכים להשקיע עבודה ולקחוס את השז בתזרה לרפס המקור. מה יהיה התהליך היעיל ביותר?

האינטואיציה מהשאלה הקודמת אומרת שהתהליך היעיל ביותר יהיה תהליך קוואנטי-סטטי הפיך.

ערכה שבסוף התהליך השז יחזור בקיור למצב התחלתי, כלומר גם אם אורתה טמפ' T (שעז עכשו לא קשרתה). אם נקחם לשז איקואציה, בצורה אקוואבאלית, אז $PV^{\gamma} = \text{const}$ ועכ הטמפ' תעלה.

כדי למנוע את זה, נצמיק את המערכת לאומבט חום בטמפ' T שהיא אורתה טמפ' שיש לשז. בשלל שהטמפ'

$$\Delta S_{\text{Heat-Bath}} = \frac{dQ_{\text{HB}}}{T} = -\frac{dQ_{\text{sys}}}{T} = -\Delta S_{\text{sys}}$$

$$\Delta S_{\text{HB}} + \Delta S_{\text{sys}} = 0$$



תהליך הפיך

התבוננו שניתן גם לחזור במתהליך הזה (היא):

$$W_{\text{on the system}} = \int_i^f dW = \int_{2V_i}^{V_i} -P dV = - \int_{2V_i}^{V_i} \frac{Nk_B T}{V} dV =$$

$$= Nk_B T (\ln(2)) = T \Delta S$$

בסיכום התהליך, (התבטאו) לראות וקניסה איזוהמית) חזרנו לאותו מצב, אך הקיץ היכנו עבודה לחום \Leftarrow השקענו עבודה הישוה באוקלה פטמפ' העז כפול השוני' המקורי באטלופיה, שזה החום "שכאית" הכנסנו למערכת מכתתלה. בסופן של קבר, השקענו את האטלופיה של היקום אם התבוננו שבו צ'חנו.

