

פיזיקה מולקולרית תופעות הקשורות בחום

§57 מדוע נלמדות תופעות הקשורות בחום בתחום הפיזיקה המולקולרית

מבוא זה מציג את חשיבותו של פרק זה ואת משמעותו.

גופים מקרוסקופיים

אנו חיים בעולם של גופים מקרוסקופיים. גם גוף האדם הוא גוף מקרוסקופי.

בפיזיקה גופים מקרוסקופיים הם גופים גדולים, המכילים מספר עצום של מולקולות. גז במכל, מים בכוס, גרגיר חול, אבן, מוט פלדה, כדור הארץ – כל אלה הם דוגמאות של גופים מקרוסקופיים. (ראו ציור 125).



ציור 125

מכניקה ותנועה מכנית

חוקי המכניקה של ניוטון עוסקים בתנועה מכנית של גופים מקרוסקופיים: העתקת גופים יחסית לגופים אחרים במהלך הזמן.

המכניקה לומדת את תנועת הגופים, אך אינה מסוגלת להסביר מדוע קיימים גופים מוצקים, נוזלים וגזים, ומדוע עשויים גופים אלה לעבור ממצב צבירה אחד לאחר. חקר התכונות הפנימיות של גופים אינו בתחום המכניקה.

במכניקה עוסקים בכוחות הגורמים לשינוי מהירות הגופים, אך טבעם של הכוחות האלה ומקורם אינם נחקרים. מדוע מופיעים כוחות אלסטיים כאשר גופים מתכווצים, ומדוע מופיע חיכוך – בזאת אין המכניקה עוסקת. לשאלות רבות מאוד אין המכניקה הניוטונית משיבה כלל.

את כל זאת הבין ניוטון עצמו וביטא זאת במילים רבות-משמעות: "אינני יודע איך אני נראה בעולמנו; נדמה לי שילד אני, המשחק על שפת הים, משתעשע עם

פיזיקה מולקולרית, תופעות של חום

חלוקי אבן וצדפים, ומוצא מדי פעם אבן יפה או צדף מיוחד – בעוד שלפני ים עצום של אמת בלתי מפוענחת".

תופעות הקשורות בחום

מלבד התנועה המכנית, התופעות הפיזיקליות הבולטות ביותר קשורות בחימום גופים או קירורם, כלומר בתופעות המתלוות בשינוי הטמפרטורה שלהם. אלה הן **תופעות של חום**.

אם לא מתרחשות התנגשויות קטלניות, אין התנועה המכנית גורמת להופעת שינויים משמעותיים בגוף; אך חימום הגוף או קירורו יכולים לשנותו עד לבלי הכר. חימום ניכר של מים – אומנם שקופים, אך מוחשיים מאוד – יהפוך אותם לאדים בלתי נראים, וקירור ניכר יהפוך מים לקרח. אם נתעמק בתופעות אלה, ניווכח שהן מסתוריות ומעוררות התפעלות, אף שהן תופעות יומיומיות.

מה הם החוקים, שיסבירו את השינויים המתרחשים בגופים כאשר הם נייחים, ומנקודת מבטה של המכניקה לא קורה בהם דבר? חוקים אלה מתארים סוג מיוחד של תנועה – **תנועה תרמית** – הקיימת בכל גוף מקרוסקופי ללא קשר במצב תנועתו במרחב.

תנועה תרמית של מולקולות

כל גוף בנוי מאטומים וממולקולות. תופעות של חום מתרחשות בתוך הגופים, והן מוכתבות במלואן על-ידי תנועתם של חלקיקים אלה. תנועת האטומים והמולקולות אינה תנועה מוסדרת; האטומים והמולקולות מתרוצצים באופן בלתי מסודר בכל הכיוונים, וקשה לגלות בתנועתם סימנים של סדר או חוקיות. **תנועה בלתי מסודרת של מולקולות מכונה תנועה תרמית**.

כאמור, תנועת המולקולות איננה מסודרת ומספרן עצום בגופים הסובבים אותנו. כל מולקולה משנה את כיוון תנועתה באופן בלתי פוסק עקב התנגשויות עם מולקולות אחרות. כתוצאה מכך נעשה מסלול המולקולה "מזוגזג" ביותר, ותנועתה מבולבלת לגמרי – מבולבלת יותר מתנועת הענף בזרם מפל המים ומתנועת נמלים נואשת בקן הרוס.

התנועה הבלתי מסודרת של מספר ענק של מולקולות שונה באופן מהותי מהתנועה המכנית המסודרת של גופים. התנועה התרמית מהווה סוג מיוחד של

תנועת חומר, ולה תכונות ייחודיות, שעליהן נלמד בהמשך.

חשיבותן של תופעות הקשורות בחום

המראה הרגיל של כדור הארץ יכול להתקיים בתחום טמפרטורות צר מאוד. אילו היתה הטמפרטורה עולה מעל 100°C , לא היו נותרים על האדמה, בתנאי לחץ אטמוספרי רגיל, נהרות, ימים ואוקיינוסים; לא היו מים בכלל, כי כל המים היו הופכים לאדים. התקררות של כמה עשרות מעלות בלבד היתה הופכת את האוקיינוסים לקרחוני ענק.

אפילו שינוי טמפרטורה בשיעור של 20 עד 30 מעלות בלבד, המתרחש בחילופי עונות השנה, משנה את פניו כדור הארץ: בבוא האביב מתעורר הטבע, היערות מתכסים בעלֵן, שדות נהיים לירוקים; ואילו בחורף הצמחים קופאים, ושכבת שלג עבה מכסה את האדמה.

גבולות טמפרטורה צרים עוד יותר נחוצים לקיום החיים של בעלי-חיים יונקים. טפרטורת הגוף של היונקים נשמרת במדויק על-ידי מנגנוני בקרה פנימיים. די שטמפרטורת הגוף תעלה בכמה עשיריות המעלה – וכבר נחוש חֵלִים, ושינוי הטמפרטורה בכמה מעלות גורם בדרך כלל למוות. לא פלא אפוא, שתופעות של חום משכו את תשומת לבם של בני-האדם מקדמת דנא. הידע והיכולת ליצור אש העניקו לבני-האדם את העצמאות היחסית מתלות בשינויי הטמפרטורה של הסביבה, ולכן נחשב גילוי האש כאחד הגילויים החשובים בתולדות האנושות.

שינוי טמפרטורה משפיע על כל תכונות הגופים. חימום או קירור גורמים לשינוי המידות הגיאומטריות של מוצקים ולשינוי הנפח של נוזלים. התכונות המכניות – למשל, האלסטיות – משתנות באופן משמעותי: צינור גומי לא יינזק אם נכה עליו בפטיש, אך אם נקררו מתחת ל- 100°C , יהיה הגומי שביר כזכוכית, והצינור יישבר לחתיכות קטנות ממכה קלה. רק לאחר חימום חוזר יקבל הגומי שוב את תכונותיו האלסטיות.

מלבד את התכונות המכניות משנה התחממות גם את התכונות האחרות של גופים: שיעור ההתנגדות למעבר זרם חשמלי, תכונות מגנטיות ועוד. לדוגמה: אם נחמם מגנט לטמפרטורה גבוהה, הוא יפסיק למשוך אליו גופי ברזל.

כל התופעות המתוארות מעלה, כמו גם רבות אחרות, הן השלכות של חוקים מסוימים. גילויים של חוקים אלה מאפשר להשתמש בתופעות החום ביעילות מרבית בחיי היומיום: מנועי חום, מקררים, מזגני אוויר ומכשירים רבים אחרים, המתבססים על חוקים אלה.

התורה המולקולרית-קינטית

עוד ביוון העתיקה ניחשו הפילוסופים, שחום הוא סוג של תנועה פנימית; אך רק במאה ה-18 החלה להתפתח תורה מולקולרית-קינטית עקבית, ומטרתה: מתן הסבר לתכונות הגופים המקרוסקופיים ולתופעות החום המתרחשות בהם, על סמך המודל של מבנה הגוף מחלקיקים בודדים, המתרוצצים בו באופן בלתי מסודר.

לתורה המולקולרית-קינטית תרמו רבות מדענים כדוגמת **לומנוסוב** הרוסי, שתיאר את החום כתנועה סיבובית של החלקיקים המרכיבים את הגופים; ו**מאייר** וג'אול האנגלים, שביססו את הרעיון שחום הוא צורה של אנרגיה מכנית של חלקיקי החומר.

פרק 8

יסודות התורה המולקולרית-קינטית

תחילה נסקור את ההנחות הבסיסיות של התורה המולקולרית-קינטית; הן ידועות לכם חלקית מלימודי הפיזיקה בעבר. לאחר מכן נכיר את התורה הכמותית של הגוף המקרוסקופי הפשוט ביותר: הגז.

§58 ההנחות הבסיסיות של התורה המולקולרית-קינטית גודל המולקולות

המולקולות קטנות מאוד, אך לא קשה להעריך את גודלן ואת מסתן. די בניסוי ויזואלי אחד ובכמה חישובים פשוטים – בתנאי שנלמד כיצד לעשות זאת...

בבסיס התורה המולקולרית-קינטית נמצאות שלוש הנחות: **החומר בנוי מחלקיקים; חלקיקים אלה נמצאים בתנועה מתמדת ובלתי מסודרת; החלקיקים פועלים באופן הדדי האחד על משנהו. לכל אחת מההשערות קיימת הוכחה מדויקת באמצעות ניסויים.**

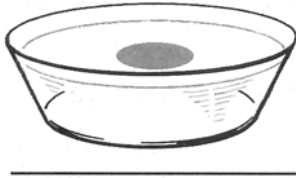
תכונות כל הגופים והתנהגותם – ללא יוצא מהכלל, מאמבה ועד לכוכב –

יסודות התורה המולקולרית

מוגדרות על-ידי תנועת החלקיקים המרכיבים אותם: מולקולות, אטומים או חלקיקים קטנים עוד יותר: חלקיקי יסוד.

הערכת גודל המולקולות

כדי להיות בטוחים בקיומן של מולקולות יש למדוד את גודלן. קל לעשות זאת על-ידי התבוננות בטיפת שמן – לדוגמה, שמן זית – הצפה ומתפשטת על פני המים. לעולם לא תכסה טיפת השמן את כל השטח, אם המכל גדול (ראו ציור 126). אי-אפשר לגרום לטיפה,



ציור 126

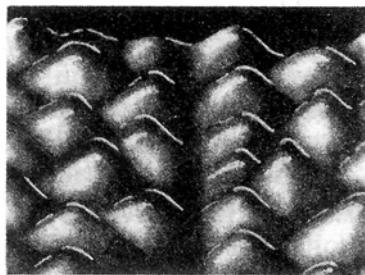
שנפחה 1 mm^3 , להתפרס ולתפוס שטח הגדול מ- 0.6 m^2 .

אפשר להניח, שתוך כדי התפרסות השמן לשטח פניו המרבי הוא יוצר שכבה בעובי של מולקולה אחת בלבד. את עובי השכבה הזאת ניתן לחשב, וכך להעריך את גודל מולקולת השמן, כדלקמן:

הנפח V של שכבת השמן שווה למכפלת שטחו S בעובי השכבה d , כלומר, $V = Sd$.
לכן גודל מולקולת שמן הזית שווה:

$$d = \frac{0.001 \text{ cm}^3}{6000 \text{ cm}^2} \approx 1.7 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$$

לא נמנה עתה את כל השיטות להוכחת קיומם של האטומים והמולקולות. המכשירים המודרניים מאפשרים אפילו לראות את דמותם של אטומים ומולקולות בודדים. בציור 127 אפשר לראות את תמונת המיקרו של שטח לוח צורן; הגבעות בה הם אטומים בודדים של צורן. תמונות אלה נצפו לראשונה ב-1981 באמצעות מיקרוסקופ אטומי מיוחד.



ציור 127

המולקולות – ביניהן גם המולקולה של שמן זית – גדולות יותר מהאטומים. קוטרו של כל אטום הוא בסדר גודל 10^{-8} cm – קטן כל כך, עד שקשה לדמיין אותו. במקרים אלה נעזרים בהשוואות, והנה אחת מהן: אילו היה אגרוף של יד אדם בגודל כדור הארץ, היה האטום בגודל של אגרוף...

מספר המולקולות

מכיוון שהמולקולות קטנות מאוד, מספרן בכל גוף מקרוסקופי עצום. נחשב את המספר המוערך של מולקולות בטיפת מים שמסתה 1 גרם, ובהתאם – בנפח של סנטימטר מעוקב אחד:

קוטר מולקולת המים שווה בערך ל- $3 \cdot 10^{-8}$ cm. בהנחה שכל מולקולת מים תופסת נפח של $(3 \cdot 10^{-8} \text{ cm})^3$, אפשר למצוא את מספר המולקולות בטיפה על-ידי חלוקת נפח הטיפה (1 cm^3) בנפח של מולקולה אחת:

$$N = \frac{1 \text{ cm}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3 \text{ cm}^3} \approx 3.7 \cdot 10^{22}$$

בכל שאיפה אתם מכניסים לריאותיכם מספר עצום של מולקולות. אם לאחר הנשיפה היו כולן מתפזרות באופן אחיד באטמוספירה של כדור הארץ, היה כל תושב בפלנטה מקבל משאיפה זו שתיים-שלוש מהן.

את גודל האטום יש להפנים: $D \approx 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$.
בהמשך יוזכרו ההשערות הבסיסיות של התורה המולקולרית-קינטית פעמים רבות.

?

1. אילו מדידות יש לבצע כדי להעריך את גודלה של מולקולת שמן הזית?
2. אילו היה האטום גדל לגודל הגרעין של פרג (0.1 מ"מ), לאיזה גודל היה מגיע הגרעין עצמו?
3. אילו עוד הוכחות לקיום האטומים, שאינן מוזכרות בספר, מוכרות לכם?

§59 מסת המולקולות כמות החומר

מסות האטומים והמולקולות זעירות בקנה-מידה ארצי. על-ידי אילו ערכים נוח לאפיין אותן? כיצד נגלה את מספר האטומים בכל גוף מקרוסקופי?
נכיר ערך חדש: **כמות החומר**. לצורך הגדרתו נלמד שלושה מושגים חדשים ושלוש נוסחאות חדשות.

יסודות התורה המולקולרית

המסה של מולקולת המים

המסות של מולקולות בודדות ואטומים הן קטנות מאוד. למשל: ב-1 גרם של מים יש 3.7×10^{22} מולקולות. לכן מסת מולקולה אחת של מים (H_2O) שווה:

$$(8.1) \quad m_{H_2O} \approx \frac{1g}{3.7 \cdot 10^{22}} \approx 2.7 \cdot 10^{-23} g$$

המסות של מולקולות של חומרים אחרים הן בסדר גודל דומה – מלבד מולקולות הענק של חומרים אורגניים. לדוגמה: למולקולות של חלבונים מסות הגדולות פי מאות אלפים מהמסה של אטום בודד. עם זאת, בקנה מידה מקרוסקופי (בגרמים וקילוגרמים) המסות שלהן קטנות מאוד.

מסה מולקולרית יחסית

מכיוון שמסות המולקולות קטנות מאוד, לא נוח להשתמש בחישובים בערכי מסות מוחלטים, אלא בערכי מסות יחסיים. על-פי הסכם בינלאומי משווים את המסות של כל האטומים והמולקולות עם $\frac{1}{12}$ של מסת אטום הפחמן. שיטה זו מכונה **סולם הפחמן של מסות האטומים**¹.

המסה המולקולרית (או האטומית) היחסית של החומר M_r היא היחס של מסת המולקולה (או האטום) m_0 של החומר הנתון ל- $\frac{1}{12}$ של מסת אטום הפחמן m_{0C} :

$$(8.2) \quad M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$$

המסות האטומיות היחסיות של היסודות הכימיים מדודות במדויק. את המסה המולקולרית היחסית של החומר אפשר לחשב על-ידי חיבור המסות האטומיות היחסיות של היסודות המרכיבים את המולקולה. לדוגמה: המסה המולקולרית היחסית של פחמן דו-חמצני CO_2 שווה בערך ל-44, מכיוון שהמסה האטומית

¹השוואת מסות האטומים והמולקולות עם $\frac{1}{12}$ ממסת אטום הפחמן התקבלה בשנת 1961. הסיבה העיקרית לבחירה זו היא היות הפחמן מרכיב של תרכובות כימיות רבות. הגורם $\frac{1}{12}$ מאפשר ייצוג המסות היחסיות בצורת מספרים שלמים. כך שווה ל-12 המסה היחסית של פחמן, ושל מימן קרובה מאוד ל-1.

היחסית של פחמן שווה בדיוק ל-12, וזו של חמצן – בערך ל-16: $12 + 2 \times 16 = 44$.

כמות החומר ומספר אבוגדרו

היה טבעי למדוד את כמות החומר על-ידי מספר המולקולות או האטומים; אך מספר המולקולות בכל גוף מקרוסקופי כה גדול, ולכן לא משתמשים בחישובים במספר המוחלט של המולקולות, אלא במספרן היחסי.

במערכת היחידות הבינלאומית מבטאים את כמות החומר במולים.

מול אחד הוא כמות החומר, שבו כלול אותו מספר מולקולות או אטומים, הכלול בפחמן בעל מסה של 0.012 ק"ג.

כלומר: במול אחד של כל חומר נמצא מספר שווה של אטומים או מולקולות. מספר זה מסומן ב- N_A ומכונה **מספר (או קבוע) אבוגדרו**, על שם המדען האיטלקי בן המאה ה-19.

כדי לחשב את מספר אבוגדרו צריך לדעת את שיעור המסה של אטום פחמן אחד. כאשר מסתפקים בהערכה בלבד, ניתן להעריך את שיעור המסה כפי שנהגנו קודם בהערכת מסתה של מולקולת המים. מדידות מדויקות יותר מבוססות על הטיית אלומות של יונים (אטומים טעונים) בשדה אלקטרומגנטי.

תוצאות המדידות עבור אטום הפחמן הן: $m_{0C} = 1.995 \times 10^{-26} \text{ kg}$.

את מספר אבוגדרו N_A ניתן לקבל בחלוקת מסת הפחמן, שפמותו מול אחד, במסת אטום הפחמן:

$$N_A = 0.012 \frac{\text{kg}}{\text{mole}} \cdot \frac{1}{m_{0C}} = 0.012 \frac{\text{kg}}{\text{mole}} \cdot \frac{1}{1.995 \cdot 10^{-26} \text{ kg}} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mole}^{-1}$$

$$(8.3) \quad N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ mole}^{-1}$$

שם היחידה - mole^{-1} – מציין ש- N_A הוא מספר האטומים במול אחד של כל חומר. אם כמות החומר היא $v = 2.5 \text{ mole}$, מספר המולקולות בגוף הוא: $N = vN_A \approx 1.5 \cdot 10^{24}$. מכאן שכמות החומר v במולים שווה ליחס שבין מספר

יסודות החורה המולקולרית

המולקולות N בגוף הנתון למספר אבוגדרו N_A , כלומר, למספר המולקולות במול אחד של החומר:

$$(8.4) \quad v = \frac{N}{N_A}$$

ערכו העצום של מספר אבוגדרו מראה עד כמה קטנות המידות המיקרוסקופיות לעומת אלה המקרוסקופיות. גוף בעל כמות חומר של 1 מול הוא בעל מסה בסדר גודל של כמה עשרות גרמים.

המסה המולרית

לצד המושג מסה מולקולרית M_r בפיזיקה ובכימיה רווח השימוש במושג מסה מולרית. המסה המולרית M היא מסת החומר בכמות של מול אחד. בהתאם להגדרה זו שווה המסה המולרית של חומר למכפלת מסת המולקולה במספר אבוגדרו:

$$(8.5) \quad M = m_0 N_A$$

המסה m של כמות כלשהי של החומר שווה למכפלת המסה של מולקולה אחת במספר המולקולות בגוף:

$$(8.6) \quad m = m_0 N$$

נציב במקום N_A ו- N בנוסחה (8.4) את הביטויים מ- (8.5) ו- (8.6), ונקבל:

$$(8.7) \quad v = \frac{m}{M}$$

כמות החומר במולים שווה ליחס בין מסת החומר לבין המסה המולרית. כך מוגדרת כמות החומר בלימודי הכימיה. מספר המולקולות של כמות חומר כלשהו, שמסתו m ומסתו המולרית M , שווה, על-פי הנוסחאות (8.7) ו- (8.8) ל:

$$(8.8) \quad N = v N_A = N_A \frac{m}{M}$$

זכרו את מספר אבוגדרו: די לזכור את הספרה הראשונה 6 ואת המעריך 10^{23} . מספר כזה של מולקולות כלול ב-2 גרם של מימן, ב-18 גרם של מים וכדומה. הנוסחאות (8.2), (8.4) ו- (8.5) מגדירות את הערכים הפיזיקליים החדשים: מסה מולקולרית יחסית; כמות החומר; ומסה מולרית; ויש לשנן ולזכרן. את הנוסחאות (8.7) ו- (8.8), אפשר לפתח.

?

1. מהי המסה המולקולרית היחסית של מים?
2. כמה מולקולות יש בשני מולים של מים?
3. מהי כמות החומר במולים בליטר אחד של מים?
4. נסו להוכיח שמסה מולרית M קשורה במסה מולקולרית יחסית על ידי הקשר:

$$M \approx 10^{-3} M_r \text{ kg}\cdot\text{mole}^{-1}$$

יש להשתמש בנוסחאות (8.5), (8.2), במסת אטום הפחמן ובמספר אבוגדרו. בנוסחה שימושית זו אפשר להיעזר בפתרון תרגילים.

§60 תנועת בראון

בפרק זה נתוודע להוכחה המרשימה ביותר של תנועת המולקולות בהשפעת חום (ההשערה השנייה של התורה המולקולרית-קינטית). באמצעות מיקרוסקופ ראו במו-עיניכם כיצד נעים חלקיקים בתנועת בראון.

מוכרת לכם תופעת הדיפוזיה (פעפוע): התערבבות של גזים בגזים, נוזלים בנוזלים וחדירת חלקיקי מוצקים אלה באלה, אם נמצאים הם במגע ישיר. תופעת הדיפוזיה מוסברת באמצעות התנועה הבלתי מסודרת של המולקולות. ניתן להיווכח בה באופן ישיר וברור ביותר בהתבוננות באמצעות מיקרוסקופ בחלקיקים זעירים של חומר מוצק כלשהו המרחפים במים. מדוע וכיצד מבצעים חלקיקים אלה תנועה בלתי מסודרת, המכונה תנועת בראון?

תנועת בראון היא תנועת חלקיקים בנוזל (או בגז) בהשפעת חום.

צפייה בתנועת בראון

הביולוג האנגלי רוברט בראון (1773–1858) גילה את התופעה לראשונה בשנת 1827, כאשר הבחין בגרגירי אבקת פרחים המרחפים במים. תחילה הופתע בראון כשגרגירי האבקה "גילו" סימני חיים.

לצורך בחינת תנועת בראון משתמשים בחלקיקי צבע אורגני שאינו נמס במים. חלקיקים אלה נמצאים בתנועה בלתי מסודרת. תנועה זו בלתי פוסקת, והיא

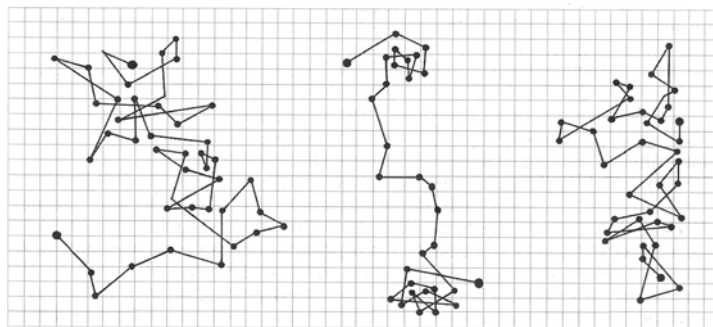
יסודות החזרה המולקולרית

מדהימה ביותר ולכאורה בלתי סבירה, שהרי התרגלנו לכך שכל גוף הנמצא בתנועה עוצר במוקדם או במאוחר.

תנועת בראון מוחשת בהשקעת חוס: עוצמתה של התנועה גוברת עם החימום והעלייה בטמפרטורה המתלווה לחימום. ציור 128 מתאר בפשטות את מסלולי תנועת בראון של החלקיקים.

מיקום החלקיקים המרחפים במים מסומן בכל פרק זמן קצוב. נקודות הסימון מחוברות בישרים. במציאות מורכבים מסלולי החלקיקים הרבה יותר. אפשר להבחין בתנועת בראון גם בגז: חלקיקי אבק או עשן המרחפים באוויר מתפזרים ונמוגים בכל נפח החדר.

המדען הגרמני ר' פול (1884–1976) תיאר את תנועת בראון באופן ציורי ביותר:



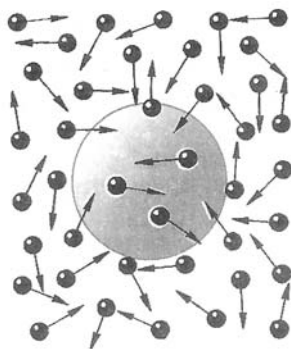
ציור 128

”...לא קיימות תופעות רבות, היכולות לרתק כל כך את הצופה, כמו תנועת בראון. כאן ניתנת לצופה הזדמנות לראות אל מאחורי הקלעים של המתרחש בטבע. נפתח לפניו עולם חדש: התרוצצות בלתי פוסקת של מספר עצום של חלקיקים. בשדה הראייה של המיקרוסקופ טסים במהירות חלקיקים מזעריים, המשנים בן-רגע את כיוון תנועתם. לאט יותר נעים חלקיקים גדולים יותר, אך גם הם משנים את כיוונם ללא הרף. חלקיקים גדולים סבים במקומם, אך ניתן לצפות בסיבובם סביב ציר, המשנה תדיר את כיוונו במרחב. בשום מקום אין ולו סימן כלשהו של סדר; שליטה מוחלטת של מקריות עיוורת. זה הרושם החזק ביותר שמותירה תמונה זו אצל הצופה. אין תיאור שיכול להמיר את התבוננות הצופה בתופעה מופלאה זו.”

בימינו יש למושג **תנועת בראון** מובן רחב יותר – לדוגמה: רעידת המחוגים של מכשירי מדידה רגישים במיוחד מתרחשת עקב תנועה בראונית של חלקי המכשירים ושל חלקיקי התווך שמסביבם.

ההסבר לתנועת בראון

אפשר להסביר את תנועת בראון על בסיס התורה המולקולרית בלבד. הסיבה לתנועה זו היא התנגשויות בכיוונים שונים בין מולקולות הנוזל לבין החלקיקים המרחפים, שאינן מתקזזות. ציור 129 מתאר חלקיק המרחף בתוך נוזל. כאשר תנועת מולקולות הנוזל בלתי מסודרת, שונים ערכי התנע, המועברים על-ידי המולקולות מכיוונים שונים לחלקיקים המרחפים, ומופיע מתקף שקול הגורם לתנועת החלקיק המרחף.



ציור 129

לחץ ממוצע קיים גם בגז וגם בנוזל, אך תמיד מתרחשת סטייה אקראית מהערך הממוצע. ככל ששטח פני החלקיק המרחף קטן יותר, כך בולט יותר השינוי מהערך הממוצע של כוח הלחץ. כך, לדוגמה, אם שטח פני החלקיק המרחף הוא בסדר גודל של כמה מולקולות בלבד, משתנה כוח הלחץ בקפיצות מאפס לערך מסוים, כאשר מולקולה של התווך פוגעת במשטח הזה.

התורה המולקולרית-קינטית של תנועת בראון פותחה בידי **אלברט איינשטיין** (1879–1955) בשנת 1905. התורה המלאה של תנועת בראון וההוכחה הניסויית נעשו בידי הפיזיקאי הצרפתי ז' פֶרְן.

?

1. האם היתה מתרחשת תנועת בראון, אילו היו המולקולות נדבקות

לחלקיקים המרחפים לאחר ההתנגשויות?

§61 כוחות פעולות הגומלין בין המולקולות

אם המולקולות קיימות ונעות, בהכרח פועלים ביניהן כוחות. ללא פעולת גומלין זו לא היו קיימים גופים מוצקים ונוזלים.

יסודות התורה המולקולרית

קל להוכיח את קיומם של כוחות פעולה משמעותיים בין האטומים או בין המולקולות: נסו לשבור מקל עבה, המורכב כמובן ממולקולות. אילו לא היו פועלים כוחות משיכה בין המולקולות, היו מתקיימים כל הגופים בכל תנאי סביבה במצב צבירה אחד בלבד: גז. אך **כוחות משיכה** בלבד אינם יכולים להבטיח את קיומם של מערכות יציבות של אטומים ומולקולות. במרחקים קטנים מאוד בין המולקולות פועלים **כוחות דחייה**. הודות להם המולקולות אינן חודרות זו לתוך זו, וגושי חומר לעולם אינם מתכווצים לגודל של מולקולה אחת.

כיצד נוצרת הפעולה ההדדית בין המולקולות?

המולקולה היא מערכת מורכבת, הבנויה מחלקיקים טעונים בודדים: מאלקטרונים, הסובבים בקליפות שמחוץ לגרעין האטום, ומפרוטונים בגרעיני האטומים. אף שהמולקולות מאוזנות מבחינה חשמלית, פועלים ביניהן כוחות חשמליים משמעותיים במרחקים קטנים: האלקטרונים והפרוטונים שבגרעיני האטומים של מולקולות שכנות פועלים האחד על משנהו.

כאשר המולקולות נמצאות במרחקים העולים על 2 עד 3 פעמים קוטר המולקולה, פועלים כוחות משיכה. תוך כדי התקרבות המולקולות זו לזו גדל תחילה כוח המשיכה, וכאשר המרחק בין המולקולות שווה לסכום הרדיוסים של המולקולות, פוחת כוח המשיכה עד לערך אפסי.

בהמשך ההתקרבות מתחילות קליפות האלקטרונים של המולקולות לחדור זו לתוך זו, ובין המולקולות נוצרים כוחות דחייה הולכים וגדלים.

אטומים ומולקולות מורכבים מחלקיקים זעירים, הטעונים מטען חשמלי. הודות לפעולתם של כוחות חשמליים במרחקים קטנים הם נמשכים זה לזה; אך מתחילים לפתח כוחות דחייה, כאשר קליפות האלקטרונים של אטומים ומולקולות שכנים חופפות.

?

1. מדוע "נדבקות" שתי מנסרות עופרת בעלות משטחים מלוטשים

ונקיים, כאשר מצמידים אותן זו לזו?

2. מדוע לא נדבקות שתי חתיכות גיר כאשר מצמידים אותן זו לזו?

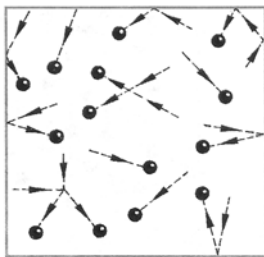
יסודות החזרה המולקולרית

S62 המבנה המולקולרי של גזים, נוזלים וגופים מוצקים

התורה המולקולרית מאפשרת להבין מדוע עשוי חומר להיות במצבי צבירה שונים: גז, נוזל או מוצק.

גזים

המרחק הממוצע בין האטומים או המולקולות בגזים גדול בהרבה מגודל המולקולות עצמן (ראו ציור 130). לדוגמה: נפח מכל גדול פי עשרות אלפי פעמים מנפח המולקולות שבו, הנתונות בתנאי לחץ אטמוספרי.

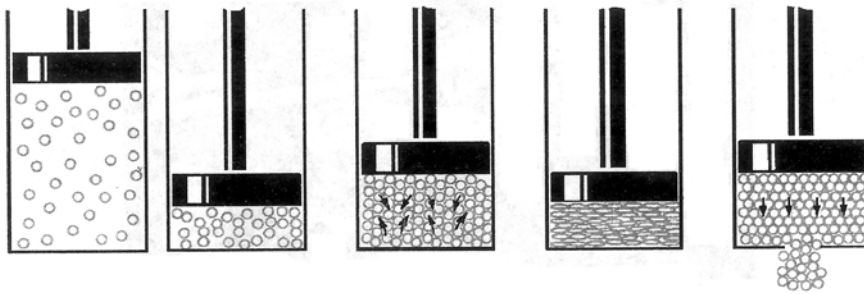


ציור 130

הגזים נדחסים בקלות, ועקב כך קטן המרחק הממוצע בין המולקולות, אך המולקולות אינן לוחצות זו את זו (ראו ציור 131).

המולקולות נעות במרחב במהירויות עצומות: מאות מטרים לשנייה. כאשר הן מתנגשות, הן מנתרות זו מזו לכיוונים שונים בדומה לכדורי

ביליארד. כוחות המשיכה החלשים הפועלים ביניהן אינם יכולים להחזיק את מולקולות הגז זו ליד זו, ולכן יכולים הגזים להתרווח ללא גבול. הגזים אינם שומרים על צורתם, אף לא על נפחם. ההתנגשויות הרבות של המולקולות בדופנות המכל יוצרות את לחץ הגז.



ציור 131

ציור 132

ציור 133

ציור 134

נוזלים

המולקולות של נוזל כמעט צמודות זו לזו (ראו ציור 132), ולכן הן מתנהגות באופן שונה ממולקולות הגז. מולקולות נוזל, הלחוצה כמו בְּכָלוּב על-ידי מולקולות אחרות, מבצעת "ריצה במקום" (מתנדנדת סביב מצב שיווי-המשקל) עקב

יסודות החזרה המולקולרית

ההתנגשויות עם המולקולות השכנות. רק מדי פעם היא "קופצת" ונמלטת מה"כלוב", אך עד מהרה נתפסת ונכלאת ב"כלוב" חדש שיוצרות מולקולות שכנות חדשות. זמן החיים של "ישיבת קבע" של מולקולת נוזל, כלומר זמן התנודות סביב מצב מסוים של שיווי-משקל בטמפרטורת החדר, שווה בממוצע ל- 10^{-11} sec.

הזמן של תנודה אחת בודדת קטן בהרבה: $10^{-13} - 10^{-12}$ sec. עם החימום, ועמו עליית הטמפרטורה, הולך וקטן "זמן החיים" במקום קבע אחד של המולקולות.

את חוקי תנועת המולקולות בנוזל גילה לראשונה הפיזיקאי הסובייטי **יעקב פרנקל**, והם מסייעים בהבנת התכונות הבסיסיות של הנוזלים.

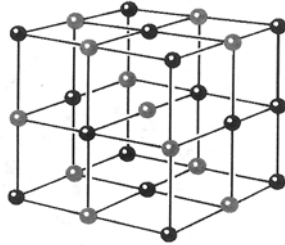
מולקולות הנוזל נמצאות קרוב מאוד זו לזו. אם מנסים להקטין בדחיסה את נפח הנוזל, ולו במעט, מתעוותות המולקולות (ראו ציור 133) ומתנגדות. כדי לדחוס נוזל יש להפעיל כוחות גדולים מאוד, שכן הנוזלים בעלי דחיסות קטנה מאוד.

כידוע, הנוזלים הם **ניזלים**, כלומר אינם שומרים על צורתם; אפשר להסביר זאת כך: אם הנוזל אינו זורם, מתרחשות קפיצות המולקולות ממצב קבע אחד למשנהו בתדירות שווה בכל הכיוונים (ראו ציור 132). הכוח החיצוני אינו משנה באופן משמעותי את מספר הקפיצות ביחידת זמן; אך בהפעלת כוח דחיסה מתרחשות קפיצות המולקולות ממצב קבע אחד למשנהו בעיקר בכיוון הפעולה של הכוח החיצוני (ראו ציור 134). משום כך הנוזל זורם ויקבל את צורת הכלי האחר, אליו יזרום.

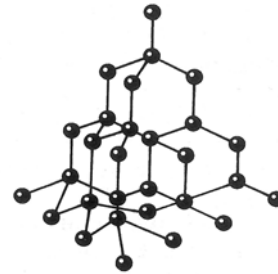
גופים מוצקים

להבדיל מהאטומים והמולקולות של הנוזלים, מתנדנדים האטומים או המולקולות של מוצקים סביב מצבי שיווי-משקל מוגדרים. אכן, לפעמים משנות המולקולות את מקומן, אך דבר זה מתרחש לעתים נדירות. לכן **המוצקים שומרים לא רק על נפחם, אלא גם על צורתם.**

קיים הבדל חשוב נוסף בין הנוזלים למוצקים: את הנוזל ניתן להשוות להמון אנשים, שכל אחד מהם מדשדש באי-שקט במקומו; ואילו המוצק דומה לשורות מסודרות של אותם אנשים, שאומנם אינם ניצבים דום, אך שומרים על מרחק

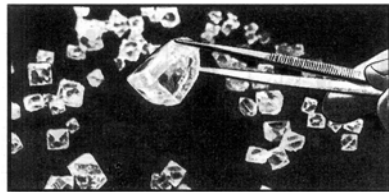


ציור 135



ציור 136

ממוצע בינם לבין שכניהם. אם נחבר את נקודות שיווי-המשקל של האטומים (או היונים) של מוצק, יתקבל סריג מרחבי מסודר המכונה **סריג גבישי**.



ציור 137

ציורים 135 ו-136 מתארים סריגים גבישיים של מלח בישול ושל יהלום, בהתאמה. הסדר הפנימי במיקום האטומים בגבישים מכתוב את הצורות החיצוניות המושלמות של אבני חן. ציור 137 מראה יהלומים טבעיים מסיביר.

יעקב פרנקל (1894–1952)



פיזיקאי סובייטי, שתרם רבות לתחומים השונים של הפיזיקה התיאורטית. פרנקל הוא מחבר תורת הנוזלים, כפי שהיא מקובלת כיום. הוא פיתח את יסודות תורת המגנטיות של חומרים פרומגנטיים. עבודותיו בנושאי החשמל האטמוספרי והשדה המגנטי של כדור הארץ ידועות לקהל רחב של פיזיקאים. **פרנקל** היה הראשון, שפיתח את תורת הביקוע של גרעין האורניום.

המרחק l בין מולקולות של גז גדול בהרבה מגודל המולקולות $r_0 : r_0 \gg l$. בנוזלים ובמוצקים: $l \approx r_0$. מולקולות הנוזל שרויות באי-סדר, ומדי פעם הן מנתרות ממקום קבע אחד למשנהו. בגופים מוצקים גבישיים המולקולות (או האטומים) ממוקמים באופן מסודר.

יסודות החזרה המולקולרית



1. גז מסוגל להתרווח ללא גבול. מדוע קיימת אפוא האטמוספירה של כדור הארץ?
2. התוו את מסלולי התנועה של המולקולות בגז, בנוזל ובמוצק.
3. מדוע קשה לדחוס נוזל כמעט באותה מידה כבדחיסת מוצק?

§63 הגז האידיאלי בתורה המולקולרית-קינטית

ניגש לנושא קשה יותר: **התורה הכמותית של הגז**. ראשית נגדיר את המודל הפיזיקלי של גז דליל.

ההסבר האיכותי של תכונות היסוד של החומר על בסיס התורה המולקולרית-קינטית אינו מסובך במיוחד. עם זאת התורה הכמותית, הקושרת בין הערכים הנמדדים בניסוי (לחץ, טמפרטורה ועוד) לבין תכונותיהן של המולקולות עצמן (מספרן ומהירות תנועתן), מורכבת מאוד. אנו נסתפק בהיכרות עם תורת הגזים הדלילים מאוד.

הגז האידיאלי

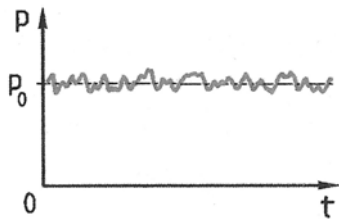
בגז דליל המרחק בין המולקולות גדול בהרבה מגודלן. לכן ההשפעה ההדדית של המולקולות חלשה למדי, והאנרגיה הקינטית שלהן גדולה בהרבה מהאנרגיה הפוטנציאלית של הכוחות הפועלים ביניהן. אפשר לתאר את מולקולות הגז ככדורים קשיחים קטנים מאוד. במקום **הגז האמיתי**, המתאפיין בכוחות מורכבים הפועלים בין המולקולות, נעסוק ב**מודל הפיזיקלי של הגז**. מודל זה מכונה **הגז האידיאלי**: בגז זה **חלשות ביותר פעולות הגומלין בין המולקולות שלו, עד כי אפשר לא להתחשב בהן כלל**. המודל הפיזיקלי מנסה להסביר את התכונות של המערכת האמיתית על סמך התופעות המתרחשות בה. אין בנמצא מודל היכול לתאר את כל התכונות של המערכת.

עתה ניצבת בפנינו בעיה: עלינו לחשב בעזרת התורה המולקולרית את הלחץ, שמפעיל גז דליל על דופנות המכל. מתברר שלצורך פתרון הבעיה מתאים השימוש במודל הגז האידיאלי; השימוש במודל נתמך בתוצאות הניסויים בגזים דלילים. אם כן, **הגזים הדלילים האמיתיים מתנהגים בדומה לגז אידיאלי**.

יסודות התורה המולקולרית

לחץ הגז בתורה המולקולרית

גז נמצא בתוך מכל אטום; מד-הלחץ מראה את לחץ הגז p_0 . כיצד נוצר לחץ זה?



ציור 138

כל מולקולת גז חובטת בדופן המכל בעת ההתנגשות בו. כתוצאה מהתנגשויות מרובות ובלתי מסודרות בדופן משתנה הלחץ תדיר, כמתואר בציור 138; אך שינויי הלחץ, הנגרמים על-ידי התנגשויות של מולקולות בודדות, קטנים עד מאוד, ולכן לא נרשמים במד-הלחץ כלל.

מד-הלחץ רושם רק את הכוח הממוצע, הפועל על כל יחידת שטח של הגלאי הרגיש ללחץ.

למרות שינויי הלחץ התדירים מוגדר היטב הערך הממוצע של הלחץ p_0 , מכיוון שההתנגשויות מרובות, ומסות המולקולות קטנות מאוד.

הגז האידיאלי הוא מודל של גז אמיתי. המולקולות של הגז האידיאלי הן ככדורים מזעריים שאינם פועלים זה על זה. התנגשויות המולקולות בדופן המכל – הן הסיבה ללחץ שהן מפעילות בכלי.

?

1. מהי משמעות המושג "אידיאלי" במודל הגז האמיתי?
2. גז מפעיל לחץ על דופנות הכלי. האם לוחצת שכבת גז אחת על אחרת?

§64 הערך הממוצע של ריבוע המהירות של המולקולות

לצורך חישוב הלחץ הממוצע יש לדעת את המהירות הממוצעת של המולקולות (ליתר דיוק: את הערך הממוצע של ריבוע המהירות). אין זו בעיה פשוטה, שכן כבר התרגלנו לכך, שלכל מולקולה יש מהירות; אך המהירות הממוצעת של המולקולות תלויה בתנועת כל המולקולות.

הערכים הממוצעים

מראש יש לשלול את הנסיונות לעקוב אחר תנועת כל המולקולות המרכיבות את הגז, כי מספרן גדול מדי ותנועתן מורכבת מדי. גם איננו חייבים לדעת כיצד נעה כל מולקולה; עלינו לברר מהי תולדת התנועה של כל המולקולות בגז.

יסודות התורה המולקולרית

אופי התנועה של כל מולקולות הגז ידוע על סמך ניסויי צפייה: המולקולות משתתפות בתנועה תרמית בלתי מסודרת; מהירות כל מולקולה עשויה להיות גדולה מאוד או קטנה מאוד; וכיוון תנועת המולקולות משתנה ללא הרף בזמן התנגשויות המולקולות בינן לבין עצמן.

מהירותה של מולקולה בודדת עשויה להיות כלשהי, אך הערך הממוצע של המהירות הוא גודל מוגדר. להלן דוגמה: גובהו של כל תלמיד בכיתה שונה, אך הגובה הממוצע הוא ערך מוגדר היטב. כדי לחשבו יש לחבר את ערכי הגובה של כל התלמידים ולחלק את הערך המתקבל במספר התלמידים.

הערך הממוצע של ריבוע המהירות

בהמשך נשתמש בערך הממוצע של **ריבוע** המהירות – ולא בממוצע המהירות. בערך הממוצע של **ריבוע** המהירות תלוי ערך האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות, החשובה מאוד בתורה המולקולרית. נסמן את הערכים המוחלטים של מהירויות המולקולות הבודדות באמצעות האותיות $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$. לפי הגדרת הממוצע יהיה הערך הממוצע של **ריבוע** המהירות:

$$(8.9) \quad \bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$$

כאשר: N – מספר המולקולות בגז.

אולם ריבוע הערך המוחלט של כל וקטור שווה לסכום ריבועי ההיטלים על צירי הקואורדינטות Ox, Oy, Oz ¹.
לכן:

$$(8.10) \quad v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

את הערכים הממוצעים v_x^2, v_y^2, v_z^2 אפשר למצוא בעזרת הנוסחאות מהסוג של (8.9). בין הערך הממוצע של ריבוע המהירות \bar{v}^2 לבין הערכים הממוצעים של ריבועי ההיטלים קיים קשר דומה:

$$(8.11) \quad \bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$$

¹ בקורס המכניקה למדנו, שעבור תנועה במישור מתקיים: $v^2 = v_x^2 + v_y^2$. הנוסחה (8.10) היא הרחבת ביטוי זה לגבי תנועה במרחב תלת-ממדי.

לגבי כל מולקולה מתקיים השוויון (8.10). נחבר שוויונים אלה לכל המולקולות, נחלק את שני האגפים של המשוואה שתתקבל במספר המולקולות N, ונגיע לנוסחה (8.11).

מכיוון שתנועת המולקולות בלתי מסודרת, היא דומה בכל אחד מכיווני הקואורדינטות Ox, Oy ו-Oz (לתנועת המולקולות במרחב אין כיוון מועדף). עקב כך שווים הערכים הממוצעים של ריבועי ההיטלים של המהירויות:

$$(8.12) \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

כלומר: בתופעה כאוטית מתגלה חוקיות מסוימת.

נביא בחשבון את הביטוי (8.12), ונציב בנוסחה (8.11) את $\overline{v_x^2}$ במקום של $\overline{v_y^2}$ ו- $\overline{v_z^2}$. הממוצע של ריבוע היטל המהירות, בכיוון Ox למשל, יהיה:

$$(8.13) \quad \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

כלומר: הממוצע של ריבוע היטל המהירות שווה ל- 1/3 הממוצע של ריבוע המהירות עצמה. הגורם 1/3 מופיע בגלל המרחב התלת-ממדי, ולכל וקטור קיימים שלושה היטלים.

מהירויות המולקולות משתנות באופן בלתי מסודר, אך הממוצע של ריבוע המהירות הוא ערך מוגדר היטב.

?

1. מצאו את האורך הממוצע של אצבעותיכם.
2. למה שווה הערך הממוצע של היטל מהירות המולקולות על הציר Ox?

יסודות החזרה המולקולרית

§65 המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית של הגז

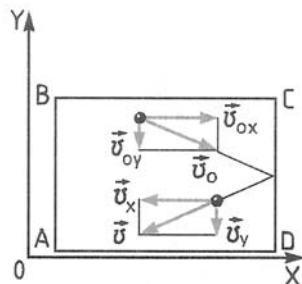
הגענו לרגע השיא של פרק 8: אנו ניגשים לפיתוח המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית של הגז.¹ במשוואה זו נקבעת התלות של לחץ הגז באנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות. לאחר פיתוח המשוואה במאה ה-19 וההוכחה הניסויית שלה החל הפיתוח המהיר של התורה הכמותית, והוא נמשך עד היום.

כמעט לכל תיאוריה בפיזיקה ניתנת הוכחה במידה שונה של דיוק ושכנוע: אפשר להוכיח בצורה פשטנית מאוד; או להקפיד במידה זו או אחרת על דיוק ההוכחות; או לעמוד על כל חומרת הדיוק המתמטי של פיתוח הדיון וההוכחה. ההוכחה המלאה והקפדנית של המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית היא מורכבת, ולא קל להבין ולהפנים אותה. לכן נסתפק בהוכחה פשטנית וסכמטית של המשוואה. התוצאה שתתקבל תהיה נכונה.

פיתוח המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית

נחשב את לחץ הגז על הדופן CD של המכל ABCD, ששטחו S והניצב לציר

הקואורדינטות Ox (ראו ציור 139).



ציור 139

כל מולקולה שמסתה m_0 , הפוגעת בדופן המכל במהירות \vec{v} , כאשר היטל המהירות על הציר Ox הוא v_x , מעבירה לקיר את התנע $m_0 v_x$ בעת הפגיעה. בניתור לאחור מהדופן באותה מהירות מעבירה המולקולה לדופן תנע זהה $m_0 v_x$. עקב התנגשות המולקולה בדופן מועבר אפוא לדופן תנע שגודלו $2m_0 v_x$.

במכל יש מולקולות רבות, וכל אחת מהן מעבירה לדופן בעת ההתנגשות את אותו שיעור של תנע. בשנייה אחת הן יעבירו לקיר תנע בגודל $2m_0 v_x Z$, כאשר Z – מספר התנגשויות המולקולות בדופן במשך שנייה אחת. המספר Z נמצא ביחס ישר

$$\text{לריכוז המולקולות, כלומר למספר המולקולות ביחידת נפח: } n = \frac{N}{V}.$$

¹ משוואה זו היא הביטוי הכמותי הראשון שהתקבל בתורה המולקולרית-קינטית. לכן לעתים היא מכונה **המשוואה היסודית או הבסיסית**.

הערך Z נמצא גם ביחס ישר למהירות המולקולות v_x : ככל שהמהירות הזו גבוהה יותר, כך תִּסְפָּקנה המולקולות להתנגש בדופן יותר פעמים בשנייה אחת.

אילו היו המולקולות "נעמדות", לא היו התנגשויות בדופן כלל. מספר ההתנגשויות של המולקולות בדופן נמצא ביחס ישר לשטח הקיר S : $Z \sim n v_x S$.

יש להביא בחשבון שבממוצע רק מחצית מכל המולקולות נעה לכיוון הדופן; החצי השני נע בכיוון ההפוך. לכן יש לחלק בשתיים את הכמות $n v_x S$:

$$Z = \frac{1}{2} n v_x S$$

והתנע הכולל שמועבר לדופן בשנייה אחת שווה:

$$2m_0 v_x Z = m_0 n v_x^2 S$$

על-פי החוק השני של ניוטון שווה שינוי התנע של כל גוף ביחידת זמן לכוח הפועל עליו:

$$F = m_0 n v_x^2 S$$

נביא בחשבון שלא לכל המולקולות אותה מהירות v_x . בפועל נמצא הכוח הממוצע, הפועל על הדופן בשנייה אחת, ביחס ישר לא ל- v_x^2 אלא לממוצע של ריבוע המהירות \bar{v}_x^2 : $\bar{F} = m_0 n \bar{v}_x^2 S$.

$$\bar{F} = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 S \quad : \bar{v}_x^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2 \quad \text{אזי,} \quad (8.13)$$

אם כן, לחץ הגז על דופן המכל שווה:

$$p = \frac{\bar{F}}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2 \quad (8.14)$$

זו המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית.

הנוסחה (8.14) קושרת את הגודל המקרוסקופי – הלחץ, הניתן למדידה באמצעות מד-לחץ – לגדלים מיקרוסקופיים המאפיינים את המולקולות, וכך מהווה את הגשר שבין שני העולמות: העולם המקרוסקופי והעולם המיקרוסקופי.

הקשר בין לחץ הגז לבין האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות

נסמן באמצעות \bar{E} את האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת ההעתקה של

המולקולות: $\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ ¹. לכן אפשר לרשום את המשוואה (8.14) כך:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E} \quad (8.15)$$

הלחץ של גז אידיאלי נמצא ביחס ישר למכפלת ריכוז המולקולות באנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת ההעתקה שלהן.

בפרק 9 נוכיח, שהאנרגיה הקינטית הממוצעת קשורה לטמפרטורת הגז.

לסיכום: הצלחנו לחשב את הלחץ של הגז האידיאלי על דופנות המכל: הוא תלוי בריכוז המולקולות, ונמצא ביחס ישר לאנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות.

?

1. תוך כדי התנגשות בקיר פועלת עליו המולקולה בכוח הנמצא ביחס ישר למהירות – אבל הלחץ על הדופן נמצא ביחס ישר לריבוע המהירות. מדוע?

2. מדוע הופיע הגורם 1/3 במשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית?

3. כיצד תלויה האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות בריכוז הגז?

דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון רוב התרגילים בפרק זה צריך לחשב את המסות המולריות של חומרים. כדי לעשות זאת יש לחשב את המסה המולקולרית היחסית בעזרת טבלת היסודות של מנדלייב, שבה נתונות המסות האטומיות היחסיות, ולאחר מכן לחשב את המסה המולרית לפי הנוסחה:

$$M = 10^{-3} M_r \frac{\text{kg}}{\text{mole}}$$

כאשר: M – מסה מולרית; M_r – מסה מולקולרית יחסית.

בתרגילים רבים נדרש לחשב את כמות החומר או את מספר המולקולות (האטומים) בגוף, אם ידועה מסתו. לשם כך יש להשתמש בנוסחאות:

¹ להבדיל מן התנועה הסיבובית הפנימית של המולקולות או מן התנודות הפנימיות שלהן (הערת העורך).

יסודות החורה המולקולרית

$$v = \frac{m}{M}, N = \frac{m}{M} N_A$$

יש לזכור את מספר אבוגדרו N_A . את המסות של מולקולות בודדות מחשבים על-פי הנוסחה: $m_0 = \frac{M}{N_A}$. בחלק מהתרגילים יש לבטא את מסת החומר באמצעות הצפיפות ρ והנפח V .

בעת פתרון התרגילים כדאי להיעזר בנוסחאות אלה ואחרות, הכתובות בסעיף

59.

בפתרון התרגילים הבאים משתמשים במשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית, בצורתה המופיעה ב- (8.14) או ב- (8.15).

1. מצאו את המסה המולרית של מים.

פתרון

המסה האטומית היחסית של מימן היא 1.00797, וזו של חמצן - 15.9994. הנוסחה של מים: H_2O . לכן המסה היחסית המולקולרית של מים שווה:

$$M_r = 2 \cdot 1.00797 + 15.9994 = 18.01534 \approx 18$$

והמסה המולרית של מים היא:

$$M \approx 10^{-3} \cdot 18 \frac{\text{kg}}{\text{mole}} \approx 0.018 \frac{\text{kg}}{\text{mole}}$$

2. מצאו את כמות המולים של החומר ואת מספר המולקולות הנמצאים ב-1 ק"ג של פחמן דו-חמצני.

פתרון

מכיוון שהמסה המולרית של פחמן דו-חמצני היא:

$$M = 0.044 \text{ kg/mole}$$

אזי כמות המולים של החומר היא:

$$v = \frac{m}{M} = \frac{1}{0.044} \text{ mole} \approx 23 \text{ mole}$$

ומספר המולקולות הוא:

$$N = \frac{m}{M} N_A = 23 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \approx 1.4 \cdot 10^{25}$$

3. צפיפות הגז במעטפת הזכוכית של נורת חשמל היא $\rho = 0.9 \text{ kg/m}^3$. תוך כדי פעילותה של הנורה גדל בה הלחץ מ- $p_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ל- $p_2 = 1.1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. בכמה גדלה המהירות הממוצעת $\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2}$ של מולקולות הגז?

פתרון

מכפלת המסה של מולקולה אחת m_0 בריכוז המולקולות (מספר המולקולות ביחידת נפח) n שווה למסת המולקולות ביחידת נפח, כלומר לצפיפות הגז $\rho = m_0 n$. לכן אפשר לרשום את המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית (8.14) כך:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$$

ועבור הפרש המהירויות נקבל:

$$\bar{v}_2 - \bar{v}_1 = \sqrt{\frac{3}{\rho}} (\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1}) \approx 90 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

מקבץ תרגילים 11

- איזה שטח עשויה לתפוס טיפת שמן זית, שנפחה 0.02 cm^3 , בעת התפרסותה על פני המים?
- מצאו את המסות המולריות של מימן והליום.
- פי כמה גדול מספר האטומים ב-12 ק"ג של פחמן ממספר המולקולות ב-16 ק"ג של חמצן?
- מהי כמות החומר (במולים) הנמצאת בגרם אחד של מים?
- מהו מספר המולקולות ב-10 גרם של חמצן?
- המסה המולרית של חנקן שווה ל- 0.028 kg/mole . מהי מסת מולקולה של חנקן?
- מצאו את מספר האטומים ב- 1 m^3 של נחושת. המסה המולרית של נחושת היא $M = 0.0635 \text{ kg/mole}$, והצפיפות: $\rho = 9000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.
- צפיפות יהלום היא $\rho = 3500 \text{ kg/m}^3$.
- איזה נפח יתפסו 10^{22} אטומים של החומר הזה?
- איך ישתנה לחץ הגז, אם ריכוז המולקולות יגדל פי 3, והמהירות הממוצעת תקטן פי 3?

10. מהו הלחץ של גז במכל, אם הממוצע של ריבוע המהירות של המולקולות שווה ל- $\bar{v}^2 = 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}^2$, ריכוז המולקולות הוא $n = 3 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$, ומסת המולקולה $m_0 = 5 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$?
11. בצנצנת שנפחה 1.2 ליטר נמצאים $3 \cdot 10^{22}$ אטומים של הליום. מהי האנרגיה הקינטית הממוצעת של כל אטום? ידוע שלחץ הגז בצנצנת הוא 10^5 Pa .
12. מצאו את ריבוע המהירות הממוצעת של תנועת מולקולות הגז, אם ידוע שמסתו $m = 6 \text{ kg}$, נפחו $V = 4.9 \text{ m}^3$, והלחץ $p = 200 \text{ kPa}$.

תקציר פרק 8

בהתאם להנחות הבסיסיות של התורה המולקולרית-קינטית, מורכבים כל הגופים ממולקולות (או אטומים), וביניהם פועלים כוחות משיכה (במרחקים הגדולים מגודל המולקולות) או כוחות דחייה (במרחקים הקטנים מגודלה של מולקולה אחת). המולקולות משתתפות בתנועה תרמית בלתי מסודרת. מסות המולקולות קטנות, ומספרן בגופים גדולים (מקרוסקופיים) עצום. לכן במקום להשתמש בערכים המוחלטים של מסות המולקולות ומספרן בגופים מקרוסקופיים, משתמשים בגדלים יחסיים.

מסה מולקולרית (או אטומית) יחסית היא היחס של מסת המולקולה (או

האטום) ל- $\frac{1}{12}$ ממסת אטום הפחמן:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$$

את כמות החומר מבטאים **במולים**. מול הוא כמות החומר, המכיל את מספר המולקולות או האטומים שמכיל 0.012 ק"ג של פחמן.

מספר המולקולות במול אחד של חומר מכונה **מספר אבוגדרו**:

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mole}}$$

כמות החומר במולים שווה ליחס של מספר המולקולות בגוף למספר אבוגדרו:

יסודות החורה המולקולרית

$$v = \frac{N}{N_A}$$

מסה מולרית היא מסת החומר בכמות של מול אחד: $M = m_0 N_A$.

המרחק בין המולקולות בגזים גדול בהרבה מגודל המולקולות. בנוזלים ובגופים מוצקים נמצאים המולקולות או האטומים קרוב זה לזה. במוצקים נמצאים האטומים או המולקולות בסדר נוקשה, והם מתנדנדים סביב מצבי שיווי-משקל קבועים. בנוזל המולקולות אינן מסודרות, ומפעם לפעם מנתרות ממצב שיווי-משקל אחד לאחר.

גז, המורכב ממולקולות שמידת הפעולה ההדדית שלהן חלשה, מכונה בתורה המולקולרית-קינטית **גז אידיאלי**.

בהתאם ל**משוואה הבסיסית של התורה המולקולרית**, נמצא לחץ הגז ביחס ישר למכפלה של ריכוז המולקולות באנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה אחת:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}, \quad \bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$$

פרק 9

טמפרטורה; אנרגיית התנועה התרמית של המולקולות

בפרק זה נלמד משהו חדש על המונח הפיזיקלי, המוזכר כל יום בתחזית מזג האוויר: הטמפרטורה. נלמד כיצד היא מוגדרת, ומה משמעותה הפיזיקלית האמיתית.

§66 הטמפרטורה ושיווי-משקל תרמי

הכול משתמשים ב"מד-חום", אף שלמעשה מודד הוא טמפרטורה, כמובן! מה משמעות המילים "מדדתי את טמפרטורת הגוף"? מה נודע לי? מה בדיוק מאפיינת הטמפרטורה? אין זה כה פשוט כפי שזה נשמע.

המאפיינים המקרוסקופיים

כדי לתאר תהליכים בגזים ובגופים מקרוסקופיים אחרים אין צורך לפנות תמיד לתורה המולקולרית. את התנהגותם של גופים מקרוסקופיים, ובפרט גזים, אפשר לאפיין על-ידי מספר קטן של גדלים פיזיקליים, שאינם שייכים למולקולות בודדות שמהן מורכבים הגופים, אלא לכל המולקולות יחד. לגדלים אלה שייכים הנפח V , הלחץ p , הטמפרטורה T ועוד.

מהיותו בעל מסה תופס הגז נפח כלשהו, ושוררים בו לחץ וטמפרטורה כלשהם. נפח ולחץ הם גדלים מכניים, המתארים את מצב הגז. הטמפרטורה איננה נלמדת במכניקה, מכיוון שהיא מאפיינת את המצב הפנימי של הגז.

הגדלים (T, p, V) , המאפיינים את מצבם של הגופים המקרוסקופיים ללא קשר לפרטי המבנה המולקולרי שלהם, מכונים פרמטרים מקרוסקופיים. הפרמטרים המקרוסקופיים אינם אך ורק נפח, לחץ וטמפרטורה; בתערובת של גזים, למשל, חשוב לדעת את ריכוזיהם של הגזים המרכיבים את התערובת; גם ריכוזים אלה הם מרכיב מקרוסקופי. האוויר האטמוספרי הרגיל, למשל, הוא תערובת של גזים.

גופים קרים וגופים חמים

טמפרטורה היא מושג מרכזי בתורת החום. הכול יודעים היטב את ההבדל בין

גופים קרים לגופים חמים: אנו חשים במגע איזה גוף חם יותר, ואומרים שלגוף זה טמפרטורה גבוהה יותר. הטמפרטורה מאפיינת אפוא את מידת החימום של גוף (קר, פושר, חם). לצורך מדידת הטמפרטורה פותח מכשיר המכונה "מד-חום", המתבסס על תכונת הגופים לשנות את הנפח כתוצאה מחימום או מקירור.

שיווי-משקל תרמי

כדי למדוד את "חומו" של גוף האדם, יש להחזיק "מד-חום" רפואי (ראו ציור 140) במגע עם הגוף במשך שהות קצרה. במשך זמן זה מתחממת הכספית, הנמצאת בגולת ה"מד-חום", נפחה גדל, והכספית עולה לאורך צינורית שחתכה קטן. על-פי מידת העלייה של עמודת הכספית לאורך השנתות המכוילות קובעים את הטמפרטורה של הגוף. תהליך דומה מתרחש במדידת הטמפרטורה של גוף כלשהו באמצעות "מד-חום" כלשהו. ה"מד-חום" לא יראה את טמפרטורת הגוף מיד לאחר המגע אתו; דרוש משך זמן כדי שטמפרטורות הגוף וה"מד-חום" ישתוו, ואז תפסיק זרימת החום מהגוף ל"מד-חום" ויתייצב שיווי-משקל תרמי.

כל מערכת של גופים בעלי טמפרטורה שונה תגיע לבסוף למצב של שיווי-משקל תרמי. שימו קוביית קרח בכוס מים פושרים. הקרח יתחיל להינתך, והמים – להתקרר. כאשר הקרח יינתך כליל, יתחילו המים להתחמם; ולאחר שיגיעו לטמפרטורת האוויר שמסביב, לא יחולו שינויים נוספים בכוס.

מתצפיות מסוג זה אפשר להסיק מסקנה לגבי קיומה של תכונה משותפת חשובה מאוד לכל תופעות החום: כל גוף מקרוסקופי או קבוצת גופים מקרוסקופיים, הנמצאים בתנאים חיצוניים קבועים, מגיעים למצב של שיווי-משקל תרמי. **שיווי-משקל התרמי הוא המצב, שבו כל הפרמטרים המקרוסקופיים אינם משתנים עוד.** משמעות הדבר היא, שבמערכת לא משתנים הנפח והלחץ, לא מתרחשים מעברי חום, לא שינוי במצבי צבירה ולא משתנה אורך עמודת הכספית בצינורית ה"מד-חום". משמע: **טמפרטורת המערכת נשארת קבועה.**

אך התהליכים המיקרוסקופיים בתוך הגוף אינם פוסקים גם במצב של שיווי משקל: שינויים במיקום המולקולות, במהירותן לאחר ההתנגשויות וכו'.

הטמפרטורה

מערכת של גופים מקרוסקופיים עשויה להימצא במצבים שונים, ובכל אחד

מהם יש לטמפרטורה ערך מוגדר היטב. הערכים של הגדלים הפיזיקליים האחרים אינם משתנים עם הזמן במצב של שיווי-משקל תרמי. כך, לדוגמה, עשויים להיות שונים הנפחים של חלקי המערכת השונים או הלחצים בתוך חלקי המערכת המבודדים זה מזה על-ידי מחיצות. אם תכניסו לביתכם כדור המנופח באוויר, ישתוו לאחר זמן-מה טמפרטורות האוויר בתוך הכדור ובחדר, אך לחץ האוויר בתוך הכדור יהיה גדול יותר מהלחץ בחדר.

הטמפרטורה מאפיינת את מצב שיווי-המשקל התרמי של מערכת גופים: לכל גופי המערכת, הנמצאים בשיווי-משקל תרמי האחד עם משנהו, טמפרטורות שוות.

כאשר הטמפרטורה של שני גופים שווה, לא מתרחש ביניהם מעבר חום. אם טמפרטורות הגופים שונות, וקיים ביניהם מגע תרמי, יתרחש מעבר של אנרגיית חום מהגוף בעל הטמפרטורה הגבוהה יותר לגוף בעל הטמפרטורה הנמוכה יותר. הפרש הטמפרטורות מצביע על מגמת זרימת החום ביניהם.

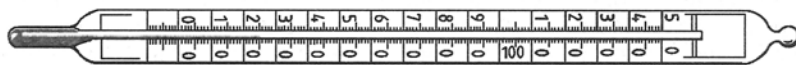
מדידת הטמפרטורה ו"מדי-חום"

כדי למדוד טמפרטורה אפשר לנצל שינוי של כל גודל מקרוסקופי התלוי בטמפרטורה: נפח, לחץ, התנגדות חשמלית ועוד.

בעיקר משתמשים בתלות נפח הנוזל (כספית או כוהל) בטמפרטורה. לצורך הכיול קובעים כראשית הסקלה (0) את הטמפרטורה שבה ניתך הקרח (בלחץ של אטמוספירה אחת); הנקודה הקבועה השנייה (100) היא הטמפרטורה שבה רותחים המים (בלחץ של אטמוספירה אחת). בסולמו של צלזיוס חולקים המרחק בין הנקודות 0 ו-100 ל-100 חלקים שווים, המכונים **מעלות** (ראו ציור 140). שינוי המקום של רמת הנוזל בצינורית בחלוקה אחת מתאים לשינוי הטמפרטורה במעלה אחת.

מכיוון שנוזלים שונים מתרווחים תוך כדי התחממותם באופן שונה, תלויה הסקלה שנבנתה בצורה זו בתכונות הנוזל הנבחר. נקודות הקצה של 0 ו-100 °C זהות לכל **מדי הטמפרטורה** (נכון שהמושג האחרון מוצלח יותר מהמושג "מד-חום"?), אבל הנקודה בסקלה המתאימה, למשל, ל-50 °C, עשויה להיות שונה.

איזה חומר יש לבחור כדי להימנע מתלות זו? שימו לב: בניגוד לנוזלים, מתרווחים כל הגזים הדלילים – מימן, הליום, חמצן – בחימום באופן זהה, ובאופן דומה הם משנים את הלחץ כאשר הטמפרטורה משתנה. סולם כזה מכונה **סולם הטמפרטורה האידיאלי המבוסס על גז**. לסולם זה יתרון נוסף על פני סולם צלזיוס: הבחירה השרירותית של נקודת הראשית, כלומר נקודת האפס. הרי בתור נקודת הראשית היה אפשר לבחור לא את נקודת ההיתוך של הקרח – אלא, למשל, את נקודת הרתיחה של המים.



ציור 140

בפסקה הבאה נפרט כיצד אפשר להשתמש בגז דליל לצורך מדידת הטמפרטורה.

סביר שאין זאת הפעם הראשונה שמתואר בפניכם אופן בניית מד-טמפרטורה ופעולתו, אך הפעם הכרתם את המושג **שיווי-משקל תרמי**, שגם בו פגשתם ודאי פעמים רבות. הטמפרטורה מאפשרת להבחין בין מצב אחד של שיווי-משקל תרמי למשנהו. אף אם אין הנושא ברור לכם עדיין לחלוטין, דעו שהוא חשוב מאוד בפיזיקה. שיחתנו בנושא הטמפרטורה טרם הגיעה לסיומה.

?

1. אילו גדלים מאפיינים את מצבם של גופים מקרוסקופיים?
2. מה מאפיין מצב של שיווי-משקל תרמי?
3. תנו דוגמאות של התייצבות והגעה למצב של שיווי-משקל תרמי.
4. מהם היתרונות בשימוש בגז דליל לצורך מדידת טמפרטורה?

§67 הגדרת הטמפרטורה

במצב של שיווי-משקל תרמי בין שני גזים שווה האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת ההעתקה של המולקולות בשניהם. בהוכחה תוכלו להיווכח בהמשך.

האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז במצב שיווי-משקל תרמי במצב שיווי-משקל תרמי אין טמפרטורת הגז תלויה בסוג הגז. כדי להגדיר את הטמפרטורה נבדוק נעמיק ונחקור בתחום המולקולרי של הגז.

הטמפרטורה

בעבר למדתם, שככל שמולקולות זזות מהר יותר – טמפרטורת הגוף הנמדדת גבוהה יותר. כאשר מחממים גז במכל סגור, לחצו גדל. על-פי המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית (8.15), נמצא הלחץ p ביחס ישר לאנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת המולקולות: $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$. במצב שיווי-משקל תרמי, כאשר קבועים לחצו ונפחו של גז שמסתו נתונה, מוגדרת היטב האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז, כמו גם הטמפרטורה.

אפשר להניח, שבמצב של שיווי-משקל תרמי שווה האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות כל הגזים; בינתיים זו רק הנחה, ויש לאמת אותה בניסוי. באופן מעשי אי-אפשר לבצע את הבדיקה הזאת במישרין, מכיוון שקשה מאוד למדוד את האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות; אולם באמצעות המשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית אפשר לבטא אנרגיה זו באמצעות הפרמטרים המקרוסקופיים.

$$\text{מכיוון שריכוז המולקולות של גז הוא } n = \frac{N}{V} \text{ , נובע מהמשוואה (8.15):}$$

$$(9.1) \quad p = \frac{2N}{3V} \bar{E} \quad \text{או} \quad p \frac{V}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$$

לחץ ונפח נמדדים במישרין. את מספר המולקולות אפשר לחשב, אם ידועה מסת הגז m , מספר אבוגדרו N_A והמסה המולרית M . בהתאם לנוסחה (8.8):

$$N = \frac{m}{M} N_A$$

אם האנרגיה הקינטית \bar{E} אכן שווה בכל הגזים במצב שיווי-משקל תרמי, חייב גם הגודל $p \frac{V}{N}$ להיות שווה בכל הגזים. רק ניסוי יכול להוכיח או לסתור הנחה זו.

גזים במצב של שיווי-משקל תרמי

את הניסוי אפשר לערוך כך: נמלא כמה מכלים בגזים שונים – לדוגמה, במימן, בהליום או בחמצן. למכלים נפחים ידועים, והם מחוברים למדי-לחץ, המאפשרים למדוד את הלחץ בכל מכל. מכיוון שמסות הגזים ידועות, ידוע גם מספר המולקולות בכל מכל.

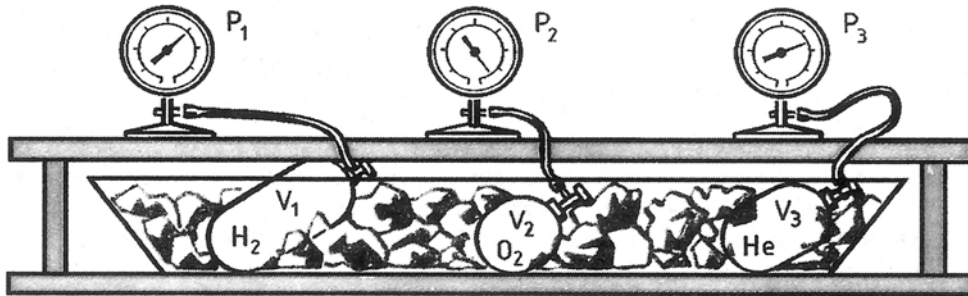
נביא את הגזים למצב של שיווי-משקל תרמי. לשם כך נטבול את המכלים באמבט קרח, הנמצא בטמפרטורת ההיתוך שלו (מי קרח), ונמתין עד שייוצר

שיווי-משקל תרמי ולחצי הגזים יתייצבו (ראו ציור 141). אז נוכל לטעון שלכל הגזים טמפרטורה שווה שערכה 0°C .

לחצי הגזים p , נפחם V ומספרי המולקולות N הם שונים. נמצא את הערך $\frac{pV}{N}$ עבור המימן. אם, לדוגמה, מול אחד של מימן תופס נפח של $V_{\text{H}_2} = 0.1 \text{ m}^3$, שווה הלחץ בטמפרטורה של 0°C - $p_{\text{H}_2} = 2.265 \cdot 10^4 \text{ Pa}$.

מכאן:

$$(9.2) \quad \frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{H}_2}} = \frac{2.265 \cdot 10^4 \cdot 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^3}{6.02 \cdot 10^{23} \text{ m}^2} = 3.76 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$



ציור 141

אותו יחס בין מכפלת לחץ הגז בנפח לבין מספר המולקולות מתקבל לגבי כל הגזים האחרים, הנמצאים בטמפרטורה של מי קרח. נסמן יחס זה ב- Θ_0 . אזי:

$$(9.3) \quad \frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{H}_2}} = \frac{p_{\text{He}} V_{\text{He}}}{N_{\text{He}}} = \frac{p_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}{N_{\text{O}_2}} = \Theta_0$$

הביטוי (9.3) אינו מדויק, כי כאשר מגיע הלחץ למאות אטמוספרות, והגזים מצטופפים יותר ויותר, כבר אין היחס $\frac{pV}{N}$ מוגדר היטב. הביטוי מתקיים רק לגבי גזים בצפיפות נמוכה מאוד, כאשר אפשר לתאר אותם כאידיאליים.

אם נכניס את המכלים למים רותחים בתנאי לחץ אטמוספרי רגיל, יהיה גם היחס $\frac{pV}{N} = \Theta_{100}$ שווה לכל הגזים, אך ערכו יהיה גדול יותר.

מן הניסוי מתקבל הערך:

$$(9.4) \quad \frac{pV}{N} = \Theta_{100} = 5.14 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

הגדרת הטמפרטורה

אפשר אפוא לטעון, שהערך \ominus גדל עם הטמפרטורה. יתרה מזאת; \ominus אינו תלוי אלא בטמפרטורה, שהרי עבור הגזים שאינם צפופים אין \ominus תלוי בסוג הגז, בנפחו ובלחצו, וגם לא במספר החלקיקים בכלי או בצורת הכלי עצמו. עובדה ניסויית זו מאפשרת להציג את \ominus כמידה טבעית של הטמפרטורה, המוגדרת באמצעות הפרמטרים המקרוסקופיים האחרים של הגז. כך אפשר לכנות את הגודל \ominus בעצמו כטמפרטורה, ולמדוד אותה ביחידות האנרגיה – בג'אולים. אבל אין זה נוח מבחינה מעשית (ל- 100°C מתאים ערך קטן מאוד, בסדר גודל של 10^{-21} J), וכן זה עשרות שנים מקובל לבטא את הטמפרטורה במעלות.

למדנו על שיטה למדוד ערכי טמפרטורה בלא תלות בתכונות הגזים שבהם משתמשים.

?

1. על סמך מה אפשר להניח את קיומו של הקשר בין הטמפרטורה לאנרגיה הקינטית של המולקולות?
2. כיצד קשורים הנפח, הלחץ ומספר המולקולות של גזים שונים, הנמצאים במצב של שיווי-משקל תרמי?

§68 הטמפרטורה המוחלטת הטמפרטורה כמידת האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות

לא הכול בעולם יחסי; כך, למשל, קיים האפס המוחלט של הטמפרטורה; קיים גם הסולם המוחלט של הטמפרטורה. בסעיף זה תלמדו על כך וגם על הקשר המדויק בין הטמפרטורה לבין האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות; אך לפני כן יש להתגבר על קיבוע הרגלי. במכניקה התרגלתם להמיר קילומטרים למטרים, שעות לשניות וכדומה – ואילו כאן נצטרך להמיר את האנרגיה מיחידות פיזיקליות של ג'אולים ליחידות פיזיקליות אחרות: מעלות של טמפרטורה.

במקום הטמפרטורה \ominus , המבוטאת ביחידות של אנרגיה, נגדיר טמפרטורה ביחידות רגילות של מעלות.

הטמפרטורה

נניח שהקשר בין הגודל החדש Θ לבין הטמפרטורה T , הנמדדת במעלות, הוא יחס ישר:

$$\Theta = kT \quad (9.5)$$

כאשר: k – מקדם. הטמפרטורה T , המוגדרת על-ידי הביטוי (9.5), מכונה **הטמפרטורה המוחלטת**, פְּנָאָה לה, כפי שתיווכחו בהמשך. נציב את הביטוי החדש

$$\frac{pV}{N} = kT \quad (9.6) \quad \text{ב- (9.3):}$$

לפי נוסחה זו מגדירים סולם טמפרטורה במעלות.

האפס המוחלט של הטמפרטורה

ברור שהטמפרטורה, המוגדרת על-פי הנוסחה (9.6), אינה יכולה להיות שלילית, מכיוון שכל הערכים באגף השמאלי של הנוסחה חיוביים. לכן הערך הקטן ביותר האפשרי של הטמפרטורה T הוא: $T = 0$, כאשר p או V שווים לאפס.

הטמפרטורה הגבולית – שעבורה לחץ הגז האידיאלי, הנמצא בנפח קבוע, הופך לאפס, או נפח הגז האידיאלי, הנמצא בלחץ קבוע, שואף לאפס, מכונה: האפס המוחלט של הטמפרטורה. זוהי הטמפרטורה הנמוכה ביותר בטבע.

סולם הטמפרטורה המוחלטת

המדען האנגלי לורד קלווין (1824–1907) הגדיר את הסולם המוחלט של הטמפרטורה. טמפרטורת האפס לפי סולם זה (המכונה גם "הסולם של קלווין") מתאימה לאפס המוחלט; וכל יחידת טמפרטורה לפי סולם זה נקבעה כשווה למעלה אחת לפי סולם צלזיוס. יחידת הטמפרטורה המוחלטת במערכת היחידות SI נקראת קלווין, והיא מסומנת באות K .

הקבוע של בולצמן

נגדיר את המקדם k בנוסחה (9.6), כך שקלווין אחד ($1 K$) יהיה שווה למעלה אחת לפי סולם צלזיוס ($1^\circ C$).

אנו יודעים את הערכים של Θ עבור $0^\circ C$ ועבור $100^\circ C$ (הנוסחאות 9.2 ו-9.4). נסמן את הטמפרטורה המוחלטת ב- $0^\circ C$ באמצעות T_1 , וב- $100^\circ C$ באמצעות T_2 . בהתאם ל- (9.5):

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k(T_2 - T_1)$$

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k \cdot 100 \text{ K} = (5.14 - 3.76) \cdot 10^{-21} \quad \text{או:}$$

מכאן:

$$k = \frac{5.14 - 3.76}{100} \cdot 10^{-21} \frac{\text{J}}{\text{K}} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

והמקדם הקבוע:

$$(9.7) \quad k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

מקדם זה מכונה **קבוע בולצמן** על שם **לודוויג בולצמן**, אחד מאבות התורה המולקולרית של הגזים.

קבוע בולצמן מקשר בין הטמפרטורה Θ ביחידות אנרגיה לטמפרטורה T במעלות קלווין. זהו אחד הקבועים החשובים ביותר בתורה המולקולרית של הגזים.

לודוויג בולצמן (1844–1906)



פיזיקאי אוסטרי, אחד מאבות התורה המולקולרית של הגזים. בעבודותיו הוצגה לראשונה התורה המולקולרית כתורה פיזיקלית שלמה ומסודרת, המבוססת על עקרונות לוגיים מוצקים. בולצמן תרם רבות לפופולריזציה של תורת השדה האלקטרומגנטי של מקסוול, ונלחם במדענים ששללו את קיומן של המולקולות.

הקשר בין הסולם המוחלט של קלווין לסולם של צלזיוס

כאשר ידוע קבוע בולצמן, ניתן למצוא את ערכו של האפס המוחלט לפי סולם צלזיוס. תחילה נמצא את הערך של הטמפרטורה המוחלטת המתאים ל- 0°C .

$$kT_1 = 3.76 \cdot 10^{-21} \text{ J} \quad \text{מכיוון שב- } 0^\circ \text{C:}$$

$$T_1 = \frac{3.76 \cdot 10^{-21}}{1.38 \cdot 10^{-23}} \text{ K} \approx 273 \text{ K} \quad \text{אזי:}$$

מעלת קלווין אחת שווה למעלת צלזיוס אחת. לכן כל ערך של הטמפרטורה המוחלטת T גדול ב- 273 מעלות מערכה המתאים של טמפרטורת צלזיוס:

הטמפרטורה

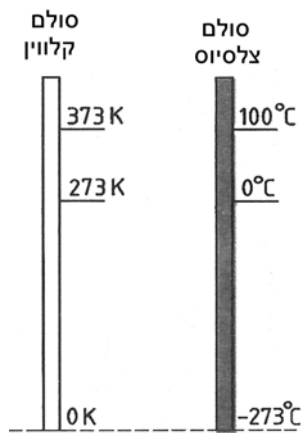
$$(9.8) \quad T(K) = T(^{\circ}C) + 273$$

שינוי הטמפרטורה המוחלטת $\Delta T (K)$ שווה לשינוי הטמפרטורה לפי סולם צלזיוס $\Delta T(^{\circ}C)$:

$$\Delta T(K) = \Delta T(^{\circ}C)$$

בציור 142 מוצגים להשוואה שני הסולמות: קלווין וצלזיוס. לאפס המוחלט מתאימה הטמפרטורה $T = -273^{\circ}C$ ¹.

הטמפרטורה כמידת האנרגיה הקינטית הממוצעת



ציור 142

מהמשוואה הבסיסית של התורה המולקולרית (9.1) ומהגדרת הטמפרטורה (9.6) נובעת מסקנה חשובה ביותר: **הטמפרטורה המוחלטת היא מידת האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות.** נוכיח זאת.

אגפי שמאל של המשוואות $\frac{pV}{N} = kT$ ו- $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$ זהים. לכן שווים גם אגפי הימין של המשוואות.

מכאן נובע הקשר בין האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת המולקולות לבין הטמפרטורה:

(9.9)

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT$$

האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועה בלתי מסודרת של מולקולות הגז פרופורציונלית לטמפרטורה המוחלטת. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, נעות המולקולות מהר יותר. ההשערה בדבר הקשר בין הטמפרטורה לבין המהירות הממוצעת של המולקולות היא אפוא נכונה.

קשר זה שבין הטמפרטורה לבין האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות (9.9) נקבע עבור גזים שאינם צפופים; אך התברר שהוא מתקיים לגבי כל החומרים,

¹ הערך המדויק יותר של האפס המוחלט הוא: $-273.15^{\circ}C$

שבהם מתרחשת תנועת האטומים או המולקולות לפי חוקי המכניקה של ניוטון. קשר זה נכון לגבי נוזלים וגם לגבי מוצקים, שבהם האטומים יכולים להתנדנד סביב מצבי שיווי-המשקל בצמתים של סריג גבישי.

כאשר הטמפרטורה שואפת לאפס המוחלט, שואפת אנרגיית התנועה התרמית של המולקולות לאפס.

התלות של לחץ גז בריכוז המולקולות ובטמפרטורה

נתחשב בהגדרה $\frac{N}{V} = n$, ומהנוסחה (9.6) נקבל ביטוי, המציג את התלות של לחץ הגז בריכוז המולקולות ובטמפרטורה:

$$P = n k T \quad (9.10)$$

מהנוסחה (9.10) ניתן להסיק, שבתנאי לחץ וטמפרטורה שווים יש לכלל הגזים אותו ריכוז של מולקולות.

מכאן נובע חוק אבוגדרו הידוע מלימודי הכימיה:

בתנאי לחץ וטמפרטורה שווים נמצא בנפחים שווים של גזים מספר שווה של מולקולות.

קיימת טמפרטורה מזערית, שעבורה הלחץ או הנפח של גז אידיאלי שווים לאפס. זהו **האפס המוחלט של הטמפרטורה**: -273°C . נוח למדוד את הטמפרטורה ביחס לאפס המוחלט, וכך בנוי סולם הטמפרטורה המוחלטת של קלווין. האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת המולקולות נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת. יש לזכור את הקבוע של בולצמן:

$$k \approx 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

?

1. מה ערכו של האפס המוחלט לפי סולם צלזיוס?
2. מהם היתרונות של סולם קלווין על פני סולם צלזיוס?
3. מהי המשמעות הפיזיקלית של קבוע בולצמן? האם אפשר לחשב אותו בהתבסס על התורה המולקולרית בלבד, ללא עריכת ניסוי?
4. כיצד תלויה האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת המולקולות בטמפרטורה?

הטמפרטורה

5. מדוע שווה ריכוז המולקולות של כל הגזים בתנאי לחץ וטמפרטורה זהים?

6. מהי המשמעות הפיזיקלית של האפס המוחלט של הטמפרטורה?

§69 מדידת המהירות של מולקולות הגז

כאשר הטמפרטורה ידועה, לא מסובך לחשב את האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות, ובעקבות זאת – לחשב את המהירות הממוצעת של המולקולות. אך האם אפשר למדוד את מהירותה של מולקולה? הרי המולקולות קטנות כל כך!

המהירות הממוצעת של התנועה התרמית של המולקולות

המשוואה (9.9) מאפשרת לחשב את הממוצע של ריבוע המהירות של המולקולות. נציב במשוואה את הביטוי:

$$\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$$

ונקבל ביטוי לממוצע של ריבוע המהירות:

$$(9.11) \quad \bar{v}^2 = 3 \frac{kT}{m_0}$$

השורש הריבועי של גודל זה מכונה המהירות הריבועית הממוצעת:

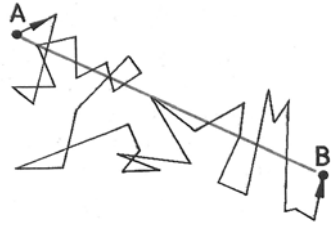
$$(9.12) \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

אם נחשב לפי נוסחה זו את מהירות המולקולות של חנקן בטמפרטורה $T = 0^\circ\text{C}$, נקבל: $\bar{v} \approx 500 \text{ m/sec}$. המהירות הממוצעת של מולקולת מימן באותה טמפרטורה היא $\bar{v} \approx 1800 \text{ m/sec}$.

כאשר התקבלו ערכים אלה לראשונה (במחצית השנייה של המאה ה-19), הגיבו פיזיקאים רבים בהשתאות: לפי חישובים אלה גדולות מהירות המולקולות של גז ממהירות פגזי תותחים! תוצאה זו ערערה את אמונם בתורה הקינטית. הרי ריחות מתפשטים לאט: דרושות עשרות שניות כדי שריח הבושם, שנשפך בקצה אחד של החדר, יגיע לקצהו האחר.¹

¹ זמן זה יכול להתקצר עד לשנייה אחת, אם יש בחדר זרימות אוויר.

קל להסביר עובדה זו: עקב ההתנגשויות בין המולקולות נעה כל אחת מהן במסלול שבור ומפותל (ראו ציור 143).



ציור 143

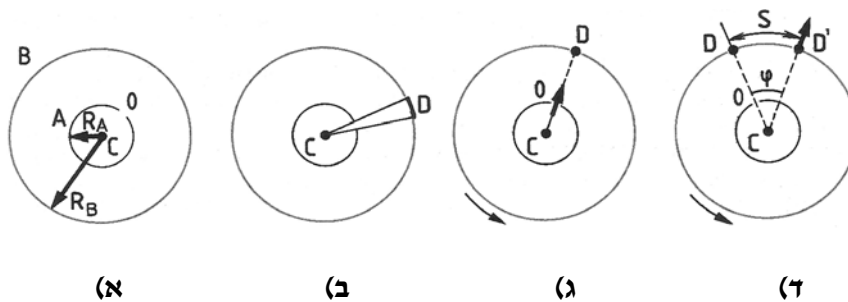
מהירותה של מולקולה אכן גבוהה בקטעים ישרים, אך ההעתק הממוצע של המולקולה בכיוון מסוים קטן אפילו במשך דקות ספורות. הדרך, שעברה המולקולה מנקודה A לנקודה B, גדולה בהרבה מהמרחק AB.

המדידה הניסויית של מהירות המולקולות

הניסויים במדידת המהירות של מולקולות הוכיחו את הנוסחה (9.12). אחד מהניסויים בוצע בידי אוטו שטרן ב-1920. המערכת של שטרן כוללת שני גלילים, A ו-B, הקשורים יחד (ראו ציור 144א). הגלילים עשויים להסתובב במהירות זוויתית קבועה סביב ציר משותף. לאורך הציר של הגליל הפנימי מתוח תיל דק C, העשוי פלטינה ומצופה כסף, ודרכו מעבירים זרם חשמלי. במעטפת הפנימית חריץ צר O. הגלילים רוקנו מהאוויר. הגליל B נמצא בטמפרטורת החדר.

בתחילת הניסוי נמצאת המערכת במנוחה. כאשר זרם בתיל זרם, מתנדפת שכבת הכסף, והגליל הפנימי מתמלא בגז של אטומי כסף. כמה מהאטומים עוברים דרך החריץ O, וכאשר הם מגיעים למשטח הפנימי של הגליל B, הם "מתיישבים" עליו. כתוצאה מכך נוצר מול החריץ, על פנימו של המשטח החיצוני, פס צר מכסף D (ראו ציור 144ב).

לאחר מכן מסובבים את הגלילים במהירות גבוהה (מספר הסיבובים בשנייה n מגיע עד 1,500). עתה, בזמן t , הדרוש לאטום כדי לעבור מרחק השווה להפרש הרדיוסים של הגלילים $R_B - R_A$, יסתובבו הגלילים בזווית מסוימת ϕ . כתוצאה מכך יגיעו האטומים, הנעים במהירות קבועה ובקו ישר, אל המשטח הפנימי של גליל B לא אל מול החריץ O (ראו ציור 144ג) – אלא למרחק מסוים s מקצה הרדיוס, העובר דרך אמצעו של החריץ (ראו ציור 144ד).



ציור 144

אם נסמן את ערך המהירות המשיקית של הנקודות שעל משטח הגליל החיצוני

באמצעות v_B , אזי:

$$(9.13) \quad S = v_B t = 2\pi n R_B t$$

למעשה אין לכל אטומי הכסף מהירות שווה. לכן עבור אטומים שונים יהיו הבדלים לא גדולים במרחקים s , הנמדדים בין אזורים בעלי ריכוז גבוה של אטומים של כסף על הרצועות D ו- D' . למרחק זה מתאימה המהירות הממוצעת של האטומים, והיא שווה ל:

$$\bar{v} = \frac{R_B - R_A}{t}$$

נציב בנוסחה זו את הערך של t מהביטוי (9.13), ונקבל:

$$\bar{v} = \frac{2\pi n (R_B - R_A)}{s} R_B$$

כאשר ידועים n , R_A ו- R_B , ומודדים את המרחק שבו זו פס הכסף, ניתן למצוא את המהירות של אטומי הכסף.

ערך המהירות, המתקבל מהניסוי, שווה לערך המחושב של המהירות הריבועית הממוצעת, ומאשרר את נוסחה (9.12) וגם את נוסחה (9.9), הטוענת שהאנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולה נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת.

המהירות הממוצעת של המולקולות גבוהה ממהירות הקול, ומגיעה למאות

מטרים בשנייה.

?

1. מדוע עובי שכבת הכסף על המשטח הפנימי של הגליל החיצוני

בניסוי של שטרן אינו אחיד בכל רוחב הרצועה?

הטמפרטורה

2. כיצד תשתנה המהירות הריבועית הממוצעת של תנועת המולקולות,

אם הטמפרטורה תעלה פי 4?

3. אילו מולקולות נעות מהר יותר באטמוספירה: מולקולות של חנקן או

של חמצן?

דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון תרגילים בפרק זה יש להשתמש בנוסחה (9.6), המגדירה את הטמפרטורה המוחלטת, ובנוסחאות (9.9) ו-(9.12), הקושרות את האנרגיה של תנועה בלתי מסודרת עם הטמפרטורה ועם המהירות הריבועית הממוצעת של המולקולות. חלק מהתרגילים אפשר לפתור בעזרת הנוסחה (9.10). מן הראוי לזכור את הערך של קבוע בולצמן.

1. מהו היחס בין מכפלת לחץ הגז בנפחו לבין מספר המולקולות בטמפרטורה

$$T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C} ?$$

פתרון

בהתאם לנוסחה (9.6): $\frac{pV}{N} = kT$ כאשר $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ - הקבוע של בולצמן. מכיוון שהטמפרטורה המוחלטת היא $T = t + 273 = 573 \text{ K}$, אזי:

$$\frac{pV}{N} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 573 \text{ K} = 7.9 \cdot 10^{-23} \text{ J}$$

2. מצאו את המהירות הריבועית הממוצעת של מולקולת גז ב- $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

המסה המולרית של הגז היא $M = 0.019 \text{ kg/mole}$.

פתרון

המהירות הריבועית הממוצעת של המולקולות מחושבת על-פי הנוסחה (9.12). בהתחשב בעובדה ש- $m_0 = \frac{M}{N_A}$ ו- $T = 273 \text{ K}$, מקבלים:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{M}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 273}{0.019}} \frac{\text{m}}{\text{sec}} \approx 600 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

3. כמות מסוימת של מימן נמצאת בטמפרטורה $T_1 = 200 \text{ K}$ ובלחץ של

$p_1 = 400 \text{ Pa}$. מחממים את הגז לטמפרטורה $T_2 = 10,000 \text{ K}$, בה מתפרקות

מולקולות המימן לאטומים. מצאו את הערך החדש של לחץ הגז p_2 , אם נפחו

ומסתו לא השתנו.

פתרון

בהתאם לנוסחה (9.10), לחץ הגז בטמפרטורה T_1 שווה: $p_1 = n_1 k T_1$, כאשר n_1 - ריכוז המולקולות של המימן.
כאשר מולקולות המימן מתפרקות ל-2, גדל מספר החלקיקים בכלי פי 2.
לכן ריכוז האטומים של המימן שווה ל- $n_2 = 2n_1$. הלחץ של מימן אטומי הוא
 $P_2 = n_2 k T_2 = 2n_1 k T_2$. נחלק את המשוואה השנייה בראשונה, ונקבל:

$$p_2 = p_1 \frac{2T_2}{T_1} = 40 \text{ kPa}$$

מקבץ תרגילים 12

1. מה היה הערך של קבוע בולצמן, אילו יחידת הטמפרטורה במערכת היחידות SI (קלווין) לא היתה שווה ל- 1°C , אלא ל- 2°C ?
2. מהי האנרגיה הקינטית הממוצעת של אטום ארגון, כאשר טמפרטורת הגז 17°C ?
3. משאבות ריק מודרניות מסוגלות להוריד לחץ עד ל- $1.3 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}$. כמה מולקולות של גז נמצאות ב- 1 cm^3 בטמפרטורה של 27°C ובריק חלקי זה?
4. היכן יש יותר מולקולות: בחדר שנפחו 50 m^3 בלחץ אטמוספרי ובטמפרטורה של 20°C או בכוס מים שנפחה 200 cm^3 ?
5. המהירות הריבועית הממוצעת של מולקולת גז, הנמצאת בטמפרטורה 100°C , שווה ל- 540 m/sec . מהי מסת המולקולה?
6. בכמה אחוזים גדלה המהירות הריבועית הממוצעת של מולקולות מים בתאי גופנו, כאשר חום הגוף עולה מ- 37°C עד 40°C ?

תקציר פרק 9

המצב הפנימי של גופים מקרוסקופיים נקבע על-פי הפרמטרים המקרוסקופיים, וביניהם לחץ, נפח וטמפרטורה. הטמפרטורה מהווה את מידת העוצמה של התנועה התרמית של המולקולות, והיא מאפיינת את מצב שיווי-המשקל התרמי של מערכת גופים מקרוסקופיים.

בדרך כלל מודדים את הטמפרטורה באמצעות ה"מד-חום" (מד טמפרטורה). כל "מד-חום" מתבסס על תלות השינוי של פרמטר מקרוסקופי כלשהו בטמפרטורה. להבדיל מנוזלים וממוצקים, כל הגזים בעלי צפיפות נמוכה משנים את נפחם באופן דומה תוך כדי חימום בתנאי לחץ קבוע, או משנים באופן דומה את לחצם בתנאי נפח קבוע. מסיבה זאת משתמשים בגזים אלה לצורך קביעת סולם הטמפרטורה.

הניסויים מראים, שהיחס pV/N שווה לכל הגזים בתנאי שיווי-משקל תרמי, ותלוי בטמפרטורה בלבד. לכן אפשר להשתמש ביחס זה לצורך הגדרת הטמפרטורה המוחלטת T לפי הנוסחה: $pV/N = kT$ כאשר $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ – קבוע בולצמן; והטמפרטורה המוחלטת $T(\text{K}) = T(\text{C}) + 273$, כאשר $T(\text{C})$ – טמפרטורה לפי סולם צלזיוס. הטמפרטורה המזערית היא אפס לפי הסולם המוחלט. יחידת הטמפרטורה במערכת היחידות SI היא קלווין. האנרגיה הקינטית הממוצעת של תנועת המולקולות פרופורציונלית לטמפרטורה המוחלטת:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT$$

המהירות הריבועית הממוצעת מחושבת לפי הנוסחה:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

וערכה מגיע לכמה מאות מטרים לשנייה בטמפרטורה של 0°C .

פרק 10

משוואת המצב של הגז האידיאלי; חוקי הגזים

בפרק זה לא תתוודעו לעובדות חדשות לגבי הגזים. כאן נדון בהשלכות, הנובעות מהמושג **טמפרטורה** ומהפרמטרים המקרוסקופיים האחרים. המשוואה הבסיסית של התורה הקינטית מקרבת אותנו לקביעת הקשרים בין הפרמטרים הללו.

§70 משוואת המצב של הגז האידיאלי

מצב מסה נתונה של גז מתאפיין על-ידי שלושת הפרמטרים המקרוסקופיים: לחץ p , נפח V וטמפרטורה T . עתה נמצא את הקשר ביניהם ונבדוק מה אפשר ללמוד ממנו.

משוואת המצב

בפרקים הקודמים ניתחנו בפירוט את התנהגות הגז האידיאלי מהיבט התורה הקינטית. גילינו את התלות של לחץ הגז בריכוז המולקולות ובטמפרטורה [נוסחה (8.10)]. בהתבסס על תלות זו אפשר להפיק את המשוואה, המקשרת בין כל שלושת הפרמטרים p , V ו- T , המאפיינים את מצב הגז הנתון. משוואה זאת נקראת **משוואת הגז האידיאלי**.

נציב במשוואה $p = nkT$ את הביטוי לריכוז מולקולות הגז. נתחשב בנוסחה (8.8), ונרשום את ריכוז הגז כך:

$$(10.1) \quad n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \frac{m}{M} N_A$$

כאשר: N_A – מספר אבוגדרו; m – מסת הגז; M – המסה המולרית. לאחר ההצבה של (10.1) ב- (9.10) נקבל:

$$(10.2) \quad pV = \frac{m}{M} k N_A T$$

מכפלת קבוע בולצמן k במספר אבוגדרו N_A נקראת **קבוע הגזים האוניברסלי**

(**המולרי**), והיא מסומנת באות R :

$$(10.3) R = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mole}} = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot \text{K}}$$

נציב במשוואה (10.2) במקום kN_A את קבוע הגזים האוניברסלי R , ונקבל את

משוואת המצב לכל כמות גז שהיא:

$$(10.4) pV = \frac{m}{M} RT$$

הגודל היחיד במשוואה זו, התלוי בסוג הגז, הוא המסה המולרית. במשוואת המצב נוצר הקשר בין ערכי הלחץ, הנפח והטמפרטורה של הגז האידיאלי במעבר הגז ממצב אחד לאחר.

נסמן באינדקס תחתון 1 את הערכים השייכים למצב אחד, וב-2 – את הערכים

השייכים למצב האחר. אזי בהתאם למשוואה (10.4) נקבל עבור כמות גז נתונה:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R, \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R$$

אגפי ימין של משוואות אלה שווים, לכן חייבים להיות שווים גם אגפי השמאל:

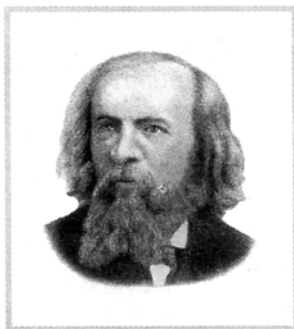
$$(10.5) \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const}$$

משוואת המצב בצורה (10.4) נקראת **משוואת קלפיירון**¹, והיא מהווה את אחת

הצורות של משוואת המצב.

משוואת המצב הרשומה בצורה (10.4) הוצגה לראשונה בידי המדען הרוסי

מנדלייב, ולכן היא מכונה **המשוואה של מנדלייב-קלפיירון**.



דמיטרי מנדלייב (1834 – 1907)

מדען רוסי שהתווה את המערכה המחזורית של היסודות – אחת ההכללות העמוקות במדע. **מנדלייב** פרסם עבודות רבות בתורת הגזים בעניין המעברים בין מצבי צבירה שונים ובעניין הטמפרטורה הקריטית, שמעבר לה אי-אפשר להפוך גז לנוזל. מנדלייב תרם רבות לפיתוח התעשייה והחינוך ברוסיה, בכלל, וקידם מאוד את התעשייה הכימית, בפרט.

¹ ב' קלפיירון (1799 – 1864) היה פיזיקאי צרפתי, שעבד במשך עשור ברוסיה.

לשם מה זקוקים אנו למשוואת המצב?

לא רק הגז האידיאלי, אלא כל מערכת – גז, נוזל או מוצק – מאופיינת באמצעות משוואת המצב שלה. משוואות אלה מורכבות מאוד לעומת משוואת מנדלייב-קלפירון לגז האידיאלי (שאינו צפוף).

משוואת המצב חיונית לחקר תופעות החום; היא מאפשרת לענות באופן מלא או חלקי על שלוש קבוצות של שאלות:

משוואת המצב מאפשרת למצוא את אחד הערכים המגדירים את המצב – לדוגמה הטמפרטורה – כאשר שני האחרים ידועים. בתכונה זאת משתמשים ב"מדי-חום".

כאשר ידועה משוואת המצב, אפשר לחזות את התנהגותם של תהליכים שונים כאשר ישתנו התנאים החיצוניים. לדוגמה: עד כמה ישתנה לחץ הגז, אם נגדיל את נפחו בטמפרטורה קבועה? על כך נלמד בסעיף הבא. ולבסוף, אם ידועה משוואת המצב, אפשר להגדיר כיצד ישתנה מצב המערכת, לאחר שתבצע עבודה או תקבל כמות חום מגופים חיצוניים. בכך נדון בסוף הפרק.

אין צורך לפתח בכל פעם את משוואת המצב, אלא יש להפנים אותה ולזכרה.

$$R \approx 8 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot \text{K}}$$

חשוב גם לזכור את ערכו של קבוע הגזים האוניברסלי:

?

1. מהי משוואת המצב?
2. איזו ממשוואת המצב – משוואת קלפירון או משוואת מנדלייב-קלפירון – מכילה יותר מידע?
3. מדוע מכונה קבוע הגזים R "הקבוע האוניברסלי"?

§71 חוקי הגזים

משוואת המצב של גז אידיאלי מסייעת בחקר תהליכים, שבהם מסת הגז ואחד משלושת הפרמטרים – לחץ, נפח או טמפרטורה – אינם משתנים. התלות הכמותית בין שני פרמטרים של הגז, כאשר הפרמטר השלישי קבוע, מכונה חוק הגזים.

חוקי הגזים

התהליך, שבמהלכו נשאר אחד הפרמטרים קבוע, נקרא **איזו-תהליך**.¹ אולם במציאות אין תהליך, העשוי להתרחש כאשר אחד הפרמטרים נשמר ללא שינוי, שהרי תמיד קיימות השפעות כאלה או אחרות, המפירות את מצב הקביעות של הטמפרטורה, הלחץ או הנפח. רק בתנאי המעבדה מצליחים לשמור על ערכם של הפרמטרים באופן מדויק למדי, אך לא כך הוא במערכות תעשייתיות ובטבע. **איזו-תהליך** הוא מודל אידיאלי של תהליך אמיתי, המתאר את המציאות באופן מקורב בלבד.

תהליך קבוע-טמפרטורה (איזותרמי)

תהליך של שינוי מצב המערכת, הכוללת גופים מקרוסקופיים הנמצאים בטמפרטורה קבועה, מכונה תהליך איזותרמי. כדי לשמור על טמפרטורת הגז קבועה, יש לאפשר החלפת חום בין הגז לבין מערכת בעלת קיבול חום גדול, שאם לא כן תשתנה טמפרטורת הגז במהלך דחיסתו או התרווחותו. בתור מערכת בעלת קיבול חום גדול יכולה לשמש האטמוספירה, אם הטמפרטורה שלה אינה משתנה באופן משמעותי במשך כל התהליך.

בהתאם למשוואת המצב של גז אידיאלי (10.4), בכל מצב, שבו הטמפרטורה נשמרת קבועה, מכפלת לחץ הגז בנפח נשארת קבועה:

$$pV = \text{const} \quad \text{כאשר} \quad T = \text{const} \quad (10.6)$$

עבור גז, שמסתו נתונה, מכפלת לחץ הגז בנפח קבועה, אם טמפרטורת הגז אינה משתנה.

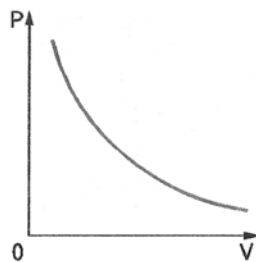
חוק זה הוכח בניסויים, שערכו המדען האנגלי **רוברט בויל** (1627–1691) והמדען הצרפתי **אדם מריוט** (1620–1684). משום כך קרוי החוק על שםם: **חוק בויל-מריוט**.

חוק זה מתקיים בכל הגזים וגם בתערובות של גזים – למשל, אוויר. רק בלחצים, הגדולים פי כמה מאות מהלחץ האטמוספרי, גדלות הסטיות מהחוק הזה באופן משמעותי. התלות של לחץ הגז בנפח בתהליך קבוע-טמפרטורה (איזותרמי)

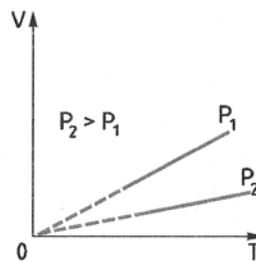
¹ מהמילה היוונית "איזוס", שמשמעותה: שווה.

מתוארת באופן גרפי על-ידי עקומה המכונה **איזותרמה**, והיא משקפת את היחס ההפוך שבין לחץ הגז לנפחו. במתמטיקה מכונה עקומה מסוג זה **היפרבולה** (ראו ציור 145).

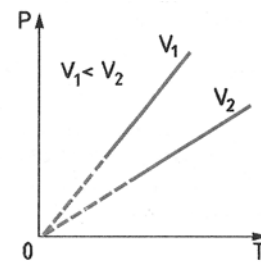
איזותרמות שונות מתאימות לתהליכים המתרחשים בטמפרטורות שונות. כאשר $V = \text{const}$, גדל הלחץ עם העלאת הטמפרטורה בהתאם למשוואה (10.4). לכן האיזותרמה, המתאימה לטמפרטורה גבוהה יותר T_2 , נמצאת מעל האיזותרמה המתאימה לטמפרטורה נמוכה יותר T_1 . דוגמאות לתהליכים איזותרמיים הם דחיסה אטית של אוויר או התרווחות גז, הנמצא מתחת לבוכנת המשאבה. אף שטמפרטורת הגז משתנה בזמן התהליך, מאפשר התהליך האטי לסביבה לשלול חום מן המערכת או לספקו למערכת, וכך לשמור על טמפרטורה קבועה בה. בקירוב ראשון אפשר להזניח בתהליך שכזה את שינויי הטמפרטורה.



ציור 145



ציור 146



ציור 147

תהליך קבוע-לחץ (איזוברי)

תהליך שינוי מצב של מערכת תרמודינמית, המתרחש בתנאי לחץ קבוע, מכונה **תהליך איזוברי**.¹

בהתאם למשוואה (10.4), בכל מצב, שבו לחץ הגז נשמר קבוע, התלות של נפח הגז בטמפרטורה נשארת קבועה:

$$(10.7) \quad p = \text{const} \quad \text{כאשר} \quad \frac{V}{T} = \text{const}$$

עבור גז, שמסתו נתונה, היחס של נפח הגז לטמפרטורה נשאר קבוע, אם לחץ הגז אינו משתנה.

חוק זה נקבע בהסתמך על ניסויים, שנערכו בשנת 1802 בידי המדען הצרפתי

¹ מהמילה היוונית "בארוס", שמשמעותה: משקל (כובד).

ג' גיי-לוסאק (1778–1850). משום כך נושא החוק את שמו. בהתאם למשוואה (10.7), נמצא נפח הגז ביחס ישר לטמפרטורה בתנאי לחץ קבוע:

$$(10.8) \quad V = \text{const} \cdot T$$

תלות זו מתוארת גרפית על-ידי קו ישר הקרוי **איזובר** (ראו ציור 146). לערכי לחץ שונים מתאימים איזוברים שונים. עם הגברת הלחץ בטמפרטורה קבועה קטן נפח הגז בהתאם לחוק בויל-מריוט. לכן האיזובר, המתאים ללחץ גבוה יותר p_2 , נמצא מתחת לאיזובר, המתאים ללחץ נמוך יותר p_1 .

עבור טמפרטורות נמוכות מתכנסים כל האיזוברים של גז אידיאלי בנקודה $T = 0$, אך מכך לא נובע שנפח הגז האמיתי שווה לאפס. כל הגזים הופכים לנוזלים בעקבות קירור עמוק, והרי משוואת המצב (10.4) איננה מתקיימת עבור נוזלים! דוגמה לתהליך איזוברי היא התרווחות הגז, הנמצא בגליל מתחת לבוכנה נעה. תנאי הלחץ הקבוע מובטח על-ידי הלחץ האטמוספרי, הפועל על המשטח החיצוני של הבוכנה.

תהליך קבוע-נפח (איזוכורי)
תהליך שינוי המצב של מערכת תרמודינמית, המתרחש בתנאי נפח קבוע, מכונה תהליך איזוכורי.¹

ממשוואת המצב (10.4) מתקבל שבכל מצב, בו נפח הגז נשאר קבוע, היחס של לחץ הגז לטמפרטורה נשמר קבוע:

$$(10.9) \quad V = \text{const} \quad \text{כאשר} \quad \frac{p}{T} = \text{const}$$

עבור גז, שמסתו נתונה, היחס בין לחץ הגז לטמפרטורה נשאר קבוע, אם נפח הגז אינו משתנה.

חוק גז זה נקבע בשנת 1787 בידי המדען הצרפתי ז'אק שארל (1746–1823), ולכן נושא החוק את שמו. בהתאם למשוואה (10.9) נמצא לחץ הגז ביחס ישר לטמפרטורה בתנאי נפח קבוע:

$$(10.10) \quad p = \text{const} \cdot T$$

¹ מהמילה היוונית "כורמה", שמשמעותה: קיבול.

תלות זו מתוארת גרפית על-ידי קו ישר הקרוי **איזוכור** (ראו ציור 147). לערכי נפח שונים מתאימים איזוכורים שונים. עם הגדלת הנפח בטמפרטורה קבועה קטן לחץ הגז בהתאם לחוק בוייל-מריוט. לכן איזוכור, המתאים לנפח גבוה יותר V_2 , נמצא מתחת לאיזוכור, המתאים לנפח נמוך יותר V_1 (ראו ציור 147). בהתאם למשוואה (10.10) מתחילים כל האיזוכורים בנקודה $T = 0$. לכן לחץ של גז אידיאלי בטמפרטורת האפס המוחלט שווה לאפס. העלאת לחץ הגז בכל כלי או בנורת חשמל במהלך התחממות היא תהליך איזוכורי. בתהליך איזוכורי משתמשים ב"מדי-חום" המבוססים על גז בנפח קבוע.

שלושת חוקי הגזים הם, למעשה, אחד, שהרי כל חוק מתקבל ממשוואת המצב של הגז האידיאלי.



1. כאשר אנו מנפחים בנשיפה את חלל פינו, גדלים נפח האוויר ולחצו בפה. כיצד מתיישב הדבר עם חוק בוייל-מריוט?
2. שרטטו שלוש איזותרמות של גז אידיאלי עבור שלוש טמפרטורות שונות; דרגו אותן על-גבי הגרף.
3. מהם התנאים לקיום התהליכים האיזותרמי, האיזוברי והאיזוכורי?
4. הסבירו את חוקי הגזים על בסיס התורה המולקולרית.

דוגמאות לפתרון תרגילים

על-פי-רוב דורשים התרגילים שימוש במשוואת המצב ובחוקי הגזים כאשר:

1. ידועים הפרמטרים המקרוסקופיים במצב הגז ההתחלתי, וכמה מהפרמטרים במצב הסופי.

אם במעבר מהמצב ההתחלתי למצב הסופי לא משתנה אחד הפרמטרים, אפשר להשתמש בתהליך איזותרמי בחוק בוייל-מריוט בצורה (10.6) או בצורה השקולה $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$ הנובעת מהמשוואה (10.6). בתהליך איזוברי יש להשתמש בחוק גיי-לוסאק בצורה (10.7) או בצורה השקולה: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

במקרה של תהליך איזוכורי יש להשתמש בחוק שארל בצורה (10.9) או בצורה

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

אם משתנים כל שלושת הפרמטרים, יש להשתמש במשוואת המצב (10.4) או (10.5).

2. ידועים חלק מהפרמטרים המקרוסקופיים במצב מסוים של הגז, וצריך למצוא את הערכים האחרים. במקרים אלה נוח ביותר להשתמש במשוואה של מנדלייב-קלפירון.

3. בשאלות רבות צריך לשרטט את הגרפים המתארים תהליכים שונים. לשם כך חיוני לדעת את התלות של הפרמטרים זה בזה. במקרה הכללי ניתנת תלות זו על-ידי משוואת המצב, ולעתים – על-ידי חוקי הגזים. בפתרון כל תרגיל יש להבין באופן ודאי מהו המצב ההתחלתי של המערכת, ואיזה תהליך מעביר אותה למצבה הסופי.

1. במכל בעל קיבולת $V_1 = 0.02 \text{ m}^3$ סגור אוויר בלחץ $p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. מחברים את המכל למכל אחר בעל קיבולת $V_2 = 0.06 \text{ m}^3$, שממנו הוצא האוויר. מצאו את לחץ האוויר בשני המכלים p לאחר שהלחץ יתייצב.

פתרון

האוויר מהמכל הראשון יתפוס את כל הנפח האפשרי: $V_1 + V_2$. לפי חוק בוייל-מריוט:

$$\frac{p}{p_1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2}$$

מכאן נמצא את הלחץ:

$$p = \frac{p_1 V_1}{V_1 + V_2} = 10^5 \text{ Pa}$$

2. בתנאים רגילים ($t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$) ולחץ אטמוספרי ($p_0 = 101,325 \text{ Pa}$) צפיפות

האוויר ρ היא 1.29 kg/m^3 .

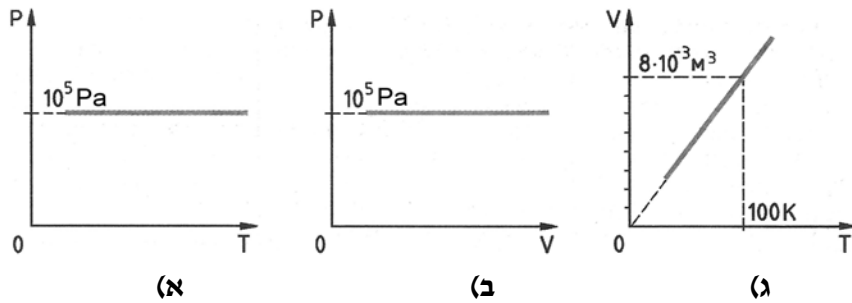
מצאו את המסה המולרית הממוצעת M של האוויר.

פתרון

בתנאים רגילים משוואת המצב של גז אידיאלי היא $p_0 V_0 = \frac{m}{M} RT_0$, כאשר $R = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot \text{K}}$; $T_0 = 273 \text{ K}$. מכאן:

$$M = \frac{mRT_0}{V_0 p_0} = \frac{\rho_0 T_0}{p_0} R \approx 0.029 \frac{\text{kg}}{\text{mole}}$$

3. שרטטו בצירים p, V ; p, T ; V, T איזותרים עבור 2 גרם של מימן, הנמצא בלחץ אטמוספרי רגיל p_0 .



ציור 148

פתרון

צורת האיזובר בצירים (p, T) ו- (p, V) היא ישר, המקביל או לציר T או לציר V (ראו ציור 148 א ו-ב).

מכיוון ש: $V = \frac{mR}{Mp_0} T$, גרף התלות של V ב- T הוא ישר, העובר דרך ראשית הצירים. בהתחשב בנתונים: $m = 0.002 \text{ kg}$, $M = 0.002 \text{ kg/mole}$,

$$R = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot \text{K}} \text{ ו- } p_0 = 10^5 \text{ Pa}, \text{ אפשר לרשום: } V = BT, \text{ כאשר:}$$

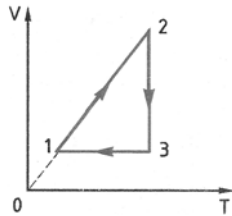
$$B = \frac{mR}{Mp_0} \approx 8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{K}}$$

כאשר $T = 100 \text{ K}$, יהיה: $V \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. את הגרף של תלות V ב- T אפשר לראות בציור 148 ג.

מקבץ תרגילים 13

1. גז נדחס איזותרמית מנפח $V_1 = 8 \text{ litre}$ לנפח $V_2 = 6 \text{ litre}$. בתהליך זה גדל הלחץ ב- $\Delta p = 4 \text{ kPa}$. מה היה הלחץ ההתחלתי?
2. מדחס מספק אוויר דחוס לפטיש אוויר, ושואב מהאטמוספירה את האוויר בנפח $V = 100 \text{ liters}$ בשנייה אחת. כמה פטישי אוויר יכולים לעבוד באמצעות האוויר שמספק הקומפרסור, אם כל אחד מהם זקוק ל- $V_1 = 100 \text{ cm}^3$ של אוויר בשנייה אחת בלחץ $p = 5 \text{ MPa}$? הלחץ האטמוספרי $p_0 = 100 \text{ KPa}$.
3. שרטטו בקואורדינטות (p, V) , (V, T) , (p, T) את האיזותרמים ל- 2 גרם של מימן, הנמצא בטמפרטורה 0°C .
4. מצאו את טמפרטורת גז הנמצא במכל סגור, אם בהתחממות ל- 1K גדל לחץ הגז ב- 0.4% מהלחץ ההתחלתי.
5. תוך כדי מעבר של גז ממצב אחד לאחר יורד לחצו, והטמפרטורה שלו עולה. כיצד משתנה נפח הגז?
6. למה שווה נפחו של מול אחד של גז אידיאלי בתנאים רגילים?
7. מצאו את מסת האוויר בכיתת הלימוד בטמפרטורה 20°C ובלחץ אטמוספרי רגיל. המסה המולרית של האוויר היא 0.029 kg/mole .
8. צפיפותו של גז כלשהו, הנמצא בטמפרטורה 10°C ובלחץ אטמוספרי רגיל, היא 2.5 kg/m^3 . מצאו את המסה המולרית של הגז.
9. במכל בעל קיבולת 0.03 m^3 נמצא גז בלחץ $1.35 \times 10^6 \text{ Pa}$ ובטמפרטורה 455°C . איזה נפח ימלא הגז הזה בתנאים רגילים ($t_0 = 0^\circ \text{C}$, $p_0 = 101,325 \text{ Pa}$)?
10. גובה פסגת הר 7134 m . הלחץ האטמוספרי בגובה זה $3.8 \times 10^4 \text{ Pa}$. מצאו את צפיפות האוויר בפסגה בטמפרטורה של 0°C , אם ידוע שצפיפות האוויר בתנאים רגילים 1.29 kg/m^3 .
11. בציור 149 מופיע גרף של שינוי מצב של גז אידיאלי בקואורדינטות (V, T) . שרטטו את התהליך בגרף בקואורדינטות (p, V) ו- (p, T) .

12. הביעו את המהירות הריבועית הממוצעת של מולקולה באמצעות קבוע הגזים האוניברסלי והמסה המולרית.



ציור 149

13. במכל נמצא גז בטמפרטורה 15°C . פי כמה יקטן לחץ הגז, אם 40% מהגז ייצא מהמכל, והטמפרטורה תרד ב- 8°C ?

תקציר פרק 10

בין הפרמטרים המקרוסקופיים של מערכת קיים קשר, והוא מתבטא במשוואת המצב. כל הגזים בעלי צפיפות נמוכה (הגזים האידיאליים) מקיימים את המשוואה של מנדלייב-קלפירון:

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

כאשר: p – לחץ; V – נפח; m – מסת הגז; M – המסה המולרית;

T – הטמפרטורה המוחלטת; $R = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mole}\cdot\text{K}}$ – קבוע הגזים האוניברסלי.

משוואת המצב כוללת בתוכה גם את חוקי הגזים, הקושרים את שינויי שניים מהפרמטרים כאשר השלישי קבוע.

עבור מסת הגז הנתונה:

(א) $pV = \text{const}$ כאשר $T = \text{const}$ (חוק בויל-מריוט)

(ב) $\frac{V}{T} = \text{const}$ כאשר $p = \text{const}$ (חוק גיי-לוסאק)

(ג) $\frac{p}{T} = \text{const}$ כאשר $V = \text{const}$ (חוק שארל)

פרק 11

המעברים בין מצבי הצבירה נוזל וגז

התורה המולקולרית מסבירה מדוע יכול חומר להימצא במצבי הצבירה גז, נוזל או מוצק; וגם מסבירה את תהליך המעבר ממצב צבירה אחד לאחר.

§72 האדים הרוויים

את הגז האידיאלי לא ניתן להפוך לנוזל; רק גז אמיתי עשוי להפוך לנוזל. כיצד מתרחש תהליך זה? במה שונה גז מאיד?

התנדפות לאדי-נוזל והתעבות

מי-בושם בבקבוק אטום היטב יכולים לשמור על איכותם ועל כמותם לזמן רב מאוד. לעומת זאת אם יהיה הבקבוק פתוח, ניווכח לאחר זמן ממושך שאין בו עוד נוזל: הנוזל, שבו היו מומסים חומרי הריח, התנדף. הרבה יותר מהר מכך מתנדפת (מתייבשת) שלולית מים על הכביש, ועוד מהר יותר, אם טמפרטורת האוויר גבוהה ונושבת רוח.

תופעה זו ניתן להסביר באופן הבא:

המולקולות של נוזל נעות בצורה בלתי מסודרת. טמפרטורה גבוהה יותר מעידה, שגדלה האנרגיה הקינטית של המולקולות. בטמפרטורה נתונה יש לאנרגיה הקינטית של המולקולות ערך ממוצע מסוים, אך לגבי כל מולקולה עשוי ערך זה להיות בכל רגע נתון גדול או קטן יותר מהערך הממוצע. ייתכן שברגע מסוים תהיה האנרגיה הקינטית של מולקולה בודדת כה גדולה, שתגבר על כוחות המשיכה של המולקולות האחרות ותתנשא אל מחוץ לנוזל. זוהי המהות של תהליך ההתנדפות. המולקולה שהתנדפה משתתפת בתנועה תרמית בלתי מסודרת של הגז. היא יכולה להתרחק מפני הנוזל הנמצא בכלי פתוח לנצח – או לחלופין לחזור לנוזל. תהליך חזרה זה מכונה **התעבות**.

אם זרם אוויר שמעל פני הנוזל סוחף אתו את אדי הנוזל שנוצרו, מתנדף הנוזל מהר יותר, מכיוון שהסיכויים של מולקולת האדים לחזור שוב לנוזל פחותים. ככל שטמפרטורת הנוזל גבוהה יותר, תהיה למספר גדול יותר של מולקולות אנרגיה קינטית מספקת ליציאה מהנוזל, ותהליך התנדפות יהיה מהיר יותר.

תוך כדי התנדפות יוצאות מהנוזל מולקולות מהירות יותר, ולכן הולכת וקטנה האנרגיה הקינטית הממוצעת של הנוזל. התוצאה ניכרת בירידת הטמפרטורה של הנוזל. אם נרטיב את היד בנוזל המתנדף מהר (כמו דלק או אצטון), נחוש מיד התקררות במקום הרטוב; והתחושה תגבר אם ננשוף על המקום.

אם נמנע מנוזל להתנדף, תהיה ההתקררות אטית הרבה יותר. חשבו על הקצב האטי שבו מתקרר מרק שָׁמֶן: שכבת השמן שעל פני המרק מונעת מהמולקולות המהירות של המים להתנדף. לכן הנוזל כמעט אינו מתנדף, והטמפרטורה שלו צונחת לאט (השמן עצמו מתנדף בקצב אטי ביותר, מכיוון שהמולקולות שלו גדולות וקשורות זו לזו חזק יותר מהקשר שבין מולקולות המים).

אדים רוויים

כאשר אוטמים נוזל בכלי, נפסקת במהרה ירידת מפלס הנוזל. בתנאי טמפרטורה קבועה מגיעה המערכת נוזל-אדים למצב של שיווי-משקל תרמי, ונשארת בו זמן בלתי מוגבל. עם תהליך ההתנדפות מתרחשת בו-זמנית התעבות, ושני התהליכים מקוזזים זה את זה.

מיד לאחר שמוזגים את הנוזל לכלי ואוטמים אותו, מתחיל הנוזל להתנדף. כך גדלה צפיפות האדים מעל פני הנוזל, ובמקביל גדל מספר המולקולות החוזרות לנוזל. ככל שצפיפות האדים גדולה יותר, כך גדל מספר המולקולות החוזרות. כתוצאה מכך מתייצב בכלי האטום שיווי-משקל דינמי בין הנוזל לאדים, כלומר: מספר המולקולות, העוזבות את הנוזל, שווה בממוצע למספר המולקולות, החוזרות אליו באותו פרק זמן. עבור מים, הנמצאים בטמפרטורת חדר, שווה מספר זה בערך ל- 10^{22} מולקולות בשטח של 1 cm^2 בשנייה אחת.

האדים, הנמצאים בשיווי-משקל עם הנוזל, מכונים אדים רוויים. הגדרה זו

מדגישה, שבנפח נתון ובטמפרטורה נתונה תימצא כמות אדים מסוימת בכלי. אם נשאב את האוויר מכלי, שנמצא בו נוזל, יימצאו מעל פני הנוזל אדים רוויים בלבד.

הלחץ של אדים רוויים

מה יקרה לאדים הרוויים, אם נקטין את הנפח שהם תופסים? למשל: אם נדחס אדים, הנמצאים בגליל תחת בוכנה בשיווי-משקל עם נוזל ובטמפרטורה קבועה?

תוך כדי הדחיסה יופר שיווי-המשקל. ברגע הראשון תגדל מעט צפיפות האדים, ויותר מולקולות תעבורנה מהגז לנוזל מאשר בכיוון ההפוך. הרי על מספר המולקולות, העוזבות את הנוזל ביחידת הזמן, מעידה טמפרטורת הנוזל בלבד – ואין דחיסת האדים בטמפרטורה קבועה משנה את המספר הזה! התהליך יימשך עד שיתייצב שיווי-משקל חדש, וצפיפות האדים וריכוזם יהיו כפי שהיו קודם. מכאן שריכוז המולקולות של אדים רוויים בטמפרטורה קבועה אינו תלוי בנפח האדים. מכיוון שהלחץ נמצא ביחס ישר לריכוז המולקולות ($p = nkT$), מתקבל שלחץ האדים הרוויים אינו תלוי בנפח האדים.

לחץ האדים p_0 , שבו נמצא הנוזל בשיווי-משקל עם האדים, מכונה לחץ האדים הרוויים.

בעקבות דחיסת האדים הרוויים הופכות כמויות הולכות וגדלות של אדים לנוזל.

אדים לא רוויים

פעמים רבות השתמשנו במושגים גז ואדים. בין שני המושגים אין הבדל עקרוני, ומשמעות המילים זהה; אך אם אפשר בטמפרטורה קבועה להפוך גז לנוזל באמצעות דחיסה פשוטה, אנו מכנים את הגז "אד", או ליתר דיוק: אד לא רווי. כאשר האד נמצא בשיווי-משקל עם הנוזל ומתחיל להפוך לנוזל, הוא מכונה אד רווי.

תמונת התנדפות הנוזל והתעבות האדים פשוטה. המצב המעניין ביותר של גז הוא האד הרווי. הוא נמצא בשיווי-משקל עם הנוזל, והלחץ והצפיפות שלו אינם תלויים בנפחו.

?

1. במזג אוויר חם משרבב הכלב את לשונו. מדוע?
2. מדוע אין לחץ האד הרווי תלוי בנפחו?
3. הביאו דוגמאות נוספות של שיווי-משקל דינמי, בדומה למצב המתקיים בין נוזל לאדים רוויים.

מצבי הצבידה

§73 תלות לחץ האדים הרוויים בטמפרטורה; רתיחה

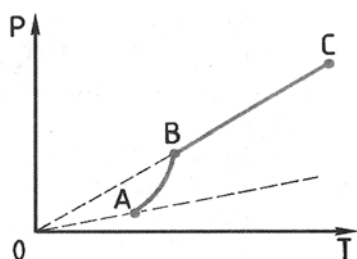
הנוזל לא רק מתנדף; בטמפרטורה מסוימת הוא רותח ומתאדה. מה קובע את הטמפרטורה הזאת?

תלות לחץ האדים הרוויים בטמפרטורה

כפי שמוכיח הניסוי, מצב האד הרווי מתואר בקירוב על-ידי משוואת המצב של גז אידיאלי (10.4), והלחץ שלו מוגדר על-ידי הנוסחה:

$$p_0 = nkT \quad (11.1)$$

הלחץ גדל עם עליית הטמפרטורה. מכיוון שלחץ האד הרווי אינו תלוי בנפחו, הוא תלוי בטמפרטורה בלבד.



ציור 150

אולם תלות זו $p_0(T)$, שנמצאה באופן ניסויי, איננה יחס ישר כמו של גז אידיאלי, הנמצא בנפח קבוע. עם החימום ועליית הטמפרטורה גדל לחץ האדים הרוויים מהר יותר מלחץ הגז האידיאלי (ראו ציור 150, הקטע העקום AB). עובדה זאת מתבהרת במיוחד, אם מעבירים איזוכור דרך הנקודה A (הקו המרוסק). מדוע קורה הדבר?

חימום הנוזל בכלי אטום מלווה במעבר של חלק מהנוזל לאדים. כתוצאה מכך, בהתאם לנוסחה (11.1), לחץ האדים הרוויים גדל לא רק בעקבות החימום והעלאת טמפרטורת הנוזל, אלא גם עקב הגדלת ריכוז המולקולות (הצפיפות) של האדים. הגדלת הלחץ, המתלווה לחימום ולהעלאת הטמפרטורה, מתרחשת בעיקר עקב הגדלת ריכוז המולקולות של האדים.

ההבדל העיקרי בין ההתנהגות של גז לבין ההתנהגות של אדים רוויים הוא באופן שינוי מסת האדים בכלי סגור כאשר הטמפרטורה משתנה, או תוך כדי שינוי הנפח בטמפרטורה קבועה: הנוזל הופך חלקית לאדים, או להפך, והאדים מתעבים חלקית לנוזל. תהליך כזה אינו קורה בגז אידיאלי.

כאשר כל הנוזל מתאדה ברתיחה, לא יהיו עוד האדים רוויים בהמשך החימום,

רתיחה

והלחץ של הגז, הנמצא בתנאי נפח קבוע, יגדל ביחס ישר לטמפרטורה (ראו ציור 150, הקטע BC).

רתיחה

במהלך ההתחממות של נוזל גוברת עוצמת ההתאדות והנוזל מתחיל לרתוח. **ברתיחה נוצרות בכל נפח הנוזל בועות אדים (בועות גז), והן גדלות ועולות אל פני הנוזל. במהלך הרתיחה נשארת טמפרטורת הנוזל קבועה, כי כל אנרגיית החום המסופקת לנוזל מושקעת בהפיכתו לאדים.**

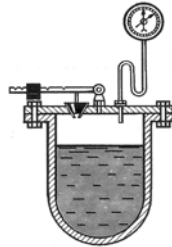
באילו תנאים מתחילה הרתיחה?

תמיד נמצאות בנוזל בועות של גזים מומסים, ואלה מתרכזות בדופנות הכלי ודבוקות גם לחלקיקים זעירים המרחפים בתוך הנוזל. אדי הנוזל, הנמצאים בתוך הבועות, רוויים. עם עליית הטמפרטורה גדל לחץ האדים הרוויים, הבועות מתנפחות, ובהשפעת כוח העילוי הן עולות לפני הנוזל. אם טמפרטורת השכבות העליונות של הנוזל נמוכה יותר, מתרחשת בשכבות אלה התעבות האדים שבתוך הבועות. לחץ האד בבועה יורד אז באופן ניכר, והבועות קטנות ונעלמות. תהליך הקטנת הבועות מתרחש כה מהר, שההתנגשויות בין חלקי מעטפת הבועות הנעלמות יוצרות פיצוצים זעירים. זו הסיבה לרחש האופייני, המלווה את תהליך הרתיחה.¹ כאשר מתחמם הנוזל בכל נפחו, נפסקים ההתעבות בתוך הבועה וצמצום נפחו, והבועות עולות אל פני הנוזל: הנוזל רותח. הסתכלו והקשיבו היטב לקומקום במהלך רתיחת המים: רגע לפני הרתיחה נפסק כמעט הרחש, ועתה ניכר געש הרתיחה המבעבעת.

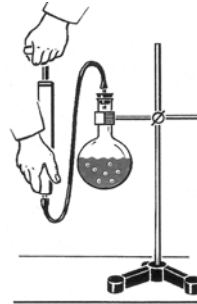
התלות המתמטית של לחצו של אד רווי בטמפרטורה מסבירה מדוע תלויה טמפרטורת הרתיחה של נוזל בלחץ על פניו: בועת אוויר יכולה לגדול, אם לחץ האדים הרוויים בתוכה גדול יותר מלחץ הנוזל שמסביבה. לחץ חיצוני זה מורכב מהלחץ שעל פני הנוזל (הלחץ החיצוני) ומהלחץ ההידרוסטטי של עמוד הנוזל שמעל לבועה.

הרתיחה מתחילה בטמפרטורה, שעבורה לחץ האדים הרוויים בבועות משתווה ללחץ שבתוך הנוזל בסמוך לבועה.

¹ מלבד הרחש של היעלמות הבועות נוצר רחש נוסף בזמן ההתנתקות של הבועות מדופנות הכלי.



ציור 151



ציור 152

ככל שהלחץ החיצוני גדול יותר, טמפרטורת הרתיחה גבוהה יותר. כך, למשל, במכל קיטור: הלחץ בו מגיע ל- 1.6×10^6 Pa, והמים לא רותחים בו גם בטמפרטורה 200°C . בבתי חולים הכלי המיועד לחיטוי כלים (ראו ציור 151) הוא מכל סגור הרמטית, ובו רותחים מים בטמפרטורה גבוהה מאוד.

ולחפך: בהורדת הלחץ החיצוני יורדת טמפרטורת הרתיחה. כך בשאיבת האוויר ואדי המים מצנצנת ניתן להביא את המים לרתיחה בטמפרטורת החדר (ראו ציור 152). בעלייה לפסגות ההרים יורד הלחץ האטמוספרי, ובהתאם יורדת טמפרטורת הרתיחה. בגובה 7,134 מטר (הפסגה המפורסמת בהרי פמיר) שווה הלחץ בערך ל- $4 \cdot 10^4$ Pa (300 מ"מ של כספית), וטמפרטורת רתיחת המים היא 70°C . בתנאים כאלה קשה יהיה לבשל מרק.

לכל נוזל טמפרטורת רתיחה ייחודית משלו, התלויה בלחץ האדים הרוויים שלו. ככל שלחץ האדים הרוויים גבוה יותר, כן טמפרטורת הרתיחה של הנוזל נמוכה יותר. כבר בטמפרטורות נמוכות משתווה לחץ האדים הרוויים ללחץ האטמוספרי.

לדוגמה: לחץ האדים הרוויים של מים בטמפרטורת הרתיחה, 100°C , הוא $101,325$ Pa (760 מ"מ כספית). באותה טמפרטורה לחץ אדי כספית הוא 117 Pa (0.88 מ"מ כספית) בלבד. כספית רותחת בטמפרטורה 357°C בלחץ אטמוספרי.

נוזל רותח, כאשר לחץ האדים הרוויים משתווה ללחץ שבתוכו.

רתיחה



1. מדוע עולה טמפרטורת הרתיחה עם עליית הלחץ?
2. מדוע עליית לחץ האדים הרוויים בתוך הבועות חיונית לרתיחה – ואילו עליית לחץ האוויר הנמצא בהן אינה חיונית לרתיחה?
3. כיצד אפשר לאלץ נוזל לרתוח תוך כדי קירור הכלי?
(השאלה לא פשוטה!)

§74 לחות האוויר; התנדפות

המים מתפרסים על כ- 70.8% מפני השטח של כדור הארץ. היצורים החיים מכילים מ-50% עד 99.7% מים. לא נגזים אם נאמר שיצורים חיים הם "מים מונפשים". באטמוספירה נמצאים 13-15 אלף קילומטרים מעוקבים של מים בצורת טיפות, גבישי שלג ואדי מים. אדי המים שבאטמוספירה משפיעים על מזג האוויר ועל האקלים של כדור הארץ.

אדי מים באטמוספירה

למרות השטחים העצומים שמכסים האוקיינוסים, הימים, האגמים והנהרות, אין אדי המים שבאוויר רוויים. תזוזת מסות האוויר גורמת לכך, שברגע נתון במקומות מסוימים של כדור הארץ ההתנדפות רבה מההתעבות – ובאחרים להפך: ההתעבות רבה מההתנדפות; אולם באוויר תימצא תמיד כמות מסוימת של אדי מים. **תכולת אדי המים באוויר מכונה לחות**, והיא מאופיינת בכמה פרמטרים:

לחץ חלקי של אדי מים

האוויר האטמוספרי מהווה תערובת של גזים שונים ואדי מים. כל אחד מהגזים תורם את תרומתו ללחץ הכללי, שמפעיל האוויר על הגופים הנמצאים בו. **הלחץ שאדי המים היו יוצרים, אילו כל הגזים האחרים היו נעדרים, מכונה הלחץ החלקי של אדי המים**, והוא אחד הפרמטרים המשפיעים על הלחות באוויר. הוא נמדד ביחידות של לחץ: ביחידות פסקל או ביחידות מ"מ כספית.

לחות יחסית

הלחץ החלקי של אדי מים עדיין אינו מאפשר לקבוע את מידת הרוויה של אדי

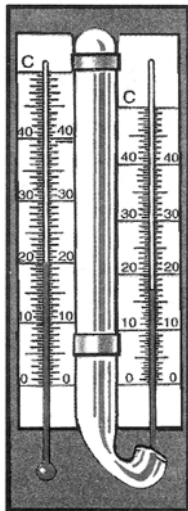
המים בתנאים נתונים; אך דווקא בה תלויה עוצמת התנדפות המים ואיבודם אצל יצורים חיים. זאת הסיבה שמגדירים גודל מיוחד, המכונה **לחות יחסית**, המגדיר עד כמה אדי המים בטמפרטורה נתונה קרובים לרוויה.

הלחות היחסית של האוויר, φ , היא היחס בין הלחץ החלקי של אדי המים, p , הנמצאים באוויר בטמפרטורה נתונה, לבין לחץ אדי המים הרוויים, p_0 , הנמצאים באותה טמפרטורה; והיא מבוטאת באחוזים:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

מד-לחות

הלחות באוויר נמדדת בעזרת מכשירים מיוחדים. אחד מהם הוא ה**פסיכרומטר**.¹



ציור 153

פסיכרומטר מורכב משני "מד-חום" (ראו ציור 153). גולת הנוזל של אחד מהם יבשה, והיא מציגה את טמפרטורת האוויר. הגולה של "מד-החום" השני מכוסה בפיסת בד, שקצה השני טבול במים. המים מתנדפים, ועקב כך מתקררת גולת "מד-החום". ככל שהלחות היחסית גבוהה יותר, כך קטנה עוצמת ההתנדפות, וגבוהה יותר טמפרטורת גולת "מד-החום" המכוסה בבד הרטוב.

כאשר הלחות היחסית שווה ל-100%, לא יתנדפו המים כלל, וקריאות שני "מד-החום" תהיינה זהות. על-פי הפרש הטמפרטורות של "מד-החום", ובסיוע טבלאות מיוחדות, ניתן לחשב את הלחות באוויר.

משמעות הלחות

בלחות תלויה עוצמת התנדפות הנוזלים מעור האדם. להתנדפות הנוזלים חשיבות רבה בייצוב טמפרטורת הגוף. חשוב לשמור את הלחות היחסית הנוחה ביותר לאדם – בעיקר בתא הטייס במטוס ובחללית. לשיעור הלחות היחסית יש משמעות רבה בחיזוי מזג האוויר. אף שכמות אדי

¹ מהמילה היוונית "פסיכרוס", שמשמעותה: קר.

המים באטמוספירה קטנה (קרוב ל- 1% בלבד), תפקידם מכריע בתופעות הטבע: התעבות של אדי מים גורמת ליצירת עננים, לירידת משקעים ולפליטת חום התעבות רב; ולהפך: התנדפות המים מתלווה בספיגת חום. בתעשיית הבדים, האפייה ובתחומים אחרים נדרשת שמירת רמת לחות מסוימת. במקומות אלה ואחרים, כדוגמת מוזיאונים וספריות, אפשר להבחין בשימוש בפסיכרומטרים באולמות מרכזיים.

זכרו: לא חשובה ידיעת הכמות המוחלטת של אדי מים באטמוספירה – אלא הכמות היחסית, והיא נמדדת באמצעות הפסיכרומטר.

?

1. מהי הלחות היחסית של האוויר?
2. האם ההפרש בקריאות שני "מדי-החום" בפסיכרומטר תלוי בלחות היחסית בלבד, או גם במבנה המכשיר? הסבירו.

דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון תרגילים יש לזכור: הלחץ והצפיפות של האד הרווי אינם תלויים בנפחו – אלא בטמפרטורה בלבד. משוואת המצב של גז אידיאלי מתאימה בקירוב גם לתיאור של האד הרווי, אך בתהליך הדחיסה או החימום שלו מסתו אינה נשארת קבועה.

1. מכל סגור שנפחו $V_1 = 0.5 \text{ m}^3$ מכיל מים שמסתם $m = 0.5 \text{ kg}$. המכל חומם לטמפרטורה $t = 147 \text{ }^\circ\text{C}$. בכמה יש לשנות את נפח המכל, כדי שיישאר בו אד רווי בלבד? לחץ האד הרווי p_0 בטמפרטורה $t = 147 \text{ }^\circ\text{C}$ הוא $4.7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

פתרון

האדים הרוויים, הנמצאים בלחץ P_0 , ממלאים נפח השווה ל:

$$V = \frac{mRT}{p_0M} = 0.2 \text{ m}^3$$

כאשר: $M = 0.018 \text{ kg/mole}$ – המסה המולרית של מים. נפח הכלי $V < V_1$ והאד אינו רווי. כדי שהאדים יהפכו לרוויים יש להקטין את נפח הכלי ב-

$$\Delta V = V_1 - V = V_1 - \frac{mRT}{p_0M} = 0.3 \text{ m}^3$$

לחות האוויר

2. הלחות היחסית של אוויר במכל סגור בטמפרטורה $t_1 = 5^\circ\text{C}$ שווה ל- $\varphi_1 = 84\%$, ובטמפרטורה של $t_2 = 22^\circ\text{C}$ שווה ל- $\varphi_2 = 30\%$. פי כמה גובה לחץ אדי המים הרוויים בטמפרטורה t_2 מן הלחץ שבטמפרטורה t_1 ?

פתרון

לחץ אדי המים בכלי בטמפרטורה $T_1 = 278\text{ K}$ שווה: $p_1 = \varphi_1 p_{01}$, כאשר: p_{01} – לחץ האד הרווי בטמפרטורה T_1 . בטמפרטורה $T_2 = 295\text{ K}$ יהיה:

$$P_2 = \varphi_2 p_{02}$$

מכיוון שהנפח קבוע, מקבלים לפי חוק שארל:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{\varphi_1 T_2}{\varphi_2 T_1} \approx 3 \quad \text{מכאן:}$$

מקבץ תרגילים 14

1. בשתי הזרועות של צינור U אטום נמצא מפלס המים בגובה שונה. האם אפשר להסיק מכך, שבנוסף לאדים הרוויים שמעל המים נמצא אוויר? הסבירו.
2. כיצד תשתנה טמפרטורת רתיחת המים, אם נוריד את מכל המים למכרה עמוק?
3. למה שווה צפיפות האדים בתוך הבועות, העולות אל פני המים הרותחים בלחץ אטמוספרי?
4. ברחוב יורד גשם סתווי קר, ובחדר תלויים כבסים רטובים. האם יתייבשו מהר יותר אם נפתח את החלון? הסבירו.
5. משאבה מעלה מים קרים עד לגובה 10.3 m . לאיזה גובה מרבי תעלה המשאבה מים רותחים בטמפרטורה 100°C , אם בוכנת המשאבה זזה לאט מאוד?
6. בחדר שנפחו $V = 120\text{ m}^3$ הטמפרטורה $t = 15^\circ\text{C}$, והלחות היחסית של האוויר שווה ל- $\varphi = 60\%$. מצאו את מסת אדי המים באוויר החדר. לחץ

האדים הרוויים p_0 בטמפרטורה של $t = 15^\circ\text{C}$ הוא 12.8 מ"מ כספית.
 7. הלחות היחסית בחדר בטמפרטורה של $t = 20^\circ\text{C}$ היא $\varphi_1 = 20\%$. איזו מסת
 מים יש לאדות כדי להעלות את הלחות ל- $\varphi_2 = 50\%$, אם נפח החדר
 הוא $V = 40 \text{ m}^3$? צפיפות אדי המים הרוויים בטמפרטורה $t = 20^\circ\text{C}$ היא

$$\rho_0 = 1.73 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

תקציר פרק 11

בין נוזל לבין האדים הנמצאים מעליו עשוי להתקיים שיווי-משקל דינמי, כאשר
 מספר המולקולות, העוזבות את הנוזל בזמן מסוים, ישווה למספר המולקולות,
 החוזרות מהאדים לנוזל במשך אותו זמן. האד, הנמצא בשיווי-משקל עם הנוזל,
 מכונה **אד רווי**. לחץ האד הרווי אינו תלוי בנפחו, ונקבע על-ידי הטמפרטורה בלבד.

נוזל רותח בטמפרטורה, שבה לחץ האדים הרוויים בבועותיו שווה ללחץ בנוזל.
 ככל שהלחץ החיצוני גדול, כן גבוהה יותר טמפרטורת הרתיחה.

האוויר האטמוספרי מהווה תערובת גזים שונים ואדי מים. תכולת אדי המים
 באוויר מכונה **לחות האוויר**. הלחץ שהיו יוצרים אדי המים, אילו כל יתר הגזים היו
 נעדרים, מכונה **הלחץ החלקי של אדי המים**.

הלחות היחסית של האוויר היא היחס בין הלחץ החלקי של אדי המים
 בטמפרטורה נתונה לבין לחץ האדים הרוויים באותה טמפרטורה, והיא מבוטאת
 באחוזים. ידיעת הלחות היחסית חשובה ביותר בחיזוי מזג האוויר.

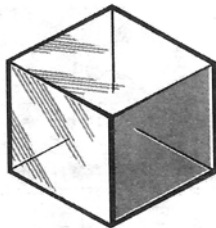
פרק 12 מוצקים

אנו חיים בתוך בניינים מוצקים על פני כדור הארץ שהוא גוף מוצק. גופנו, אף שהוא מכיל קרוב ל- 65% מים (במוח 80% מים...) – גם גופנו מוצק. כלי עבודה ומכונות – גם הם מוצקים. הכרחי אפוא לדעת את תכונותיהם של גופים מוצקים.

§75 הגופים הגבישיים

הגופים המוצקים שומרים לא רק על נפחם, כנוזלים – אלא גם על צורתם. לרוב נמצאים הם במבנה גבישי. מהי משמעות מבנה זה?

גבישים הם גופים מוצקים, שהאטומים או המולקולות שלהם נמצאים במקומות מסוימים ומסודרים במרחב, ולכן פאותיהם מישוריות. לדוגמה: לגרגיר מלח שולחני רגיל מבנה קובייה שפאותיה מישוריות, והן יוצרות ביניהן זוויות ישרות (ציור 154).

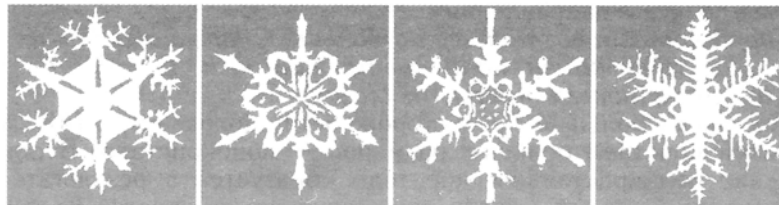


ציור 154

בזאת ניתן להבחין, אם נסתכל על גרגיר זה מבעד לזכוכית מגדלת. נתבונן גם בצורות היפהפיות של פתיתי השלג; גם בהם משתקפת הצורה הגיאומטרית של המבנה הפנימי של גוף גבישי: הקרח (ציור 155).

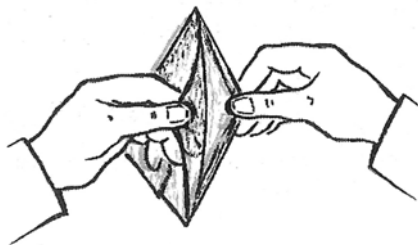
אניזוטרופיה של גבישים

הצורה החיצונית היפה היא לא התוצאה היחידה – ואפילו לא החשובה ביותר – של מבנהו המסודר של הגביש. התכונה החשובה שלו היא תלותן של התכונות הפיזיקליות שלו בכיוון ההטרחה עליו. בכיווני הטרחה שונים יהיה לגביש חוזק מכני שונה.

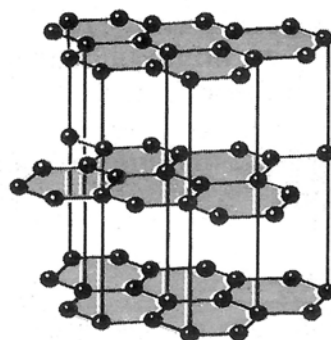


ציור 155

לדוגמה: חתיכת נציץ (מיקה) נפרדת בקלות לשכבות בכיוון אחד (ציור 156); אולם ניסיון לקרוע אותה בכיוון הניצב לשכבות יהיה קשה ביותר. כך גם מתפצל בקלות בכיוון אחד גביש של גרפיט: כאשר אתם כותבים בעפרון, מתרחש פיצול כזה באופן מתמיד, ושכבות דקות של גרפיט נותרות על הנייר, מפני שלסריג הגבישי של גרפיט מבנה של שכבות. שכבות אלה בנויות משורה של סריגים מקבילים, העשויים מאטומים של פחמן (ציור 157), ואלה נמצאים בקודקודים של משושים. המרחק בין השכבות יחסית גדול – בערך פי 2 גדול מאורך הצלע של המשושה – ולכן הקשרים בין השכבות חלשים יותר מאשר הקשרים שבתוך השכבות.



ציור 156



ציור 157

גבישים רבים מוליכים חום וזרם חשמלי באופן שונה בכיוונים שונים. בכיוון תלויות גם התכונות האופטיות של הגבישים: גביש של קוורץ שובר אור, הפוגע בו בכיוונים שונים, בצורה שונה.

תלות התכונות הפיזיקליות בכיוון בתוך הגביש מכונה **אניזוטרופיה**¹. כל הגופים הגבישיים הם אניזוטרופיים.

מונו-גבישים ופולי-גבישים

למתכות מבנה גבישי, ולכן הן משמשות לבניית כלי עבודה, מכונות ומכשירים שונים.

אם מתבוננים בפיסת מתכת גדולה, אין מבנה הגבישי מתבטא בצורתה החיצונית או בתכונותיה הפיזיקליות. במצב רגיל המתכות אינן מגלות אניזוטרופיה.

¹ מהמילים היווניות "אניזוס" – אינו שווה, "טרופוס" – כיוון.

בדרך כלל מורכבת המתכת ממספר גדול מאוד של גבישונים קטנים. קל לראותם באמצעות המיקרוסקופ או אפילו מבעד לזכוכית מגדלת – בעיקר על פני שבר טרי של מתכת (ציור 158). תכונותיו המכניות של כל גבישון מתכת שכזה תלויות בכיוון ההטרחה עליו. מאחר שהגבישונים מכוונים באופן בלתי מסודר זה יחסית לזה, בנפח הגדול בהרבה מנפחו של גבישון בודד, זהים כל הכיוונים בתוך המתכת, והתכונות המכניות של גוש המתכת שוות לכל הכיוונים.



ציור 158

גוף מוצק, הבנוי ממספר גדול של גבישונים זעירים, מכונה פולי-גביש (רב-גביש). כל גביש בודד מכונה מונו-גביש (גביש בודד).

בתנאים מבוקרים היטב ובזהירות רבה אפשר "לגדל" גביש בודד גדול של המתכת. בתנאי "גידול" רגילים נוצר "פולי-גביש" כתוצאה מגידול בו-זמנית של גבישונים רבים: הם גדלים, באים במגע זה עם זה, נדבקים זה לזה, וכך יוצרים גוש אחד. גם לסוכרים, למשל, מבנה פולי-גבישי.

רוב הגופים המוצקים הם פולי-גבישים, מכיוון שהם מורכבים ממספר רב של גבישונים מודבקים. הגבישים הבודדים – מונו-גבישים – הם בעלי צורה גיאומטרית מסודרת, ותכונותיהם שונות בכיווני הטרחה שונים (אניזוטרופיה).

?

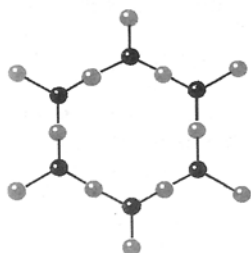
1. האם כל הגופים הגבישיים הם אניזוטרופיים? הסבירו.
2. עץ הוא אניזוטרופי. האם מבנהו גבישי?
3. מנו דוגמאות נוספות של מונו-גבישים ופולי-גבישים.

§76 גופים אמורפיים

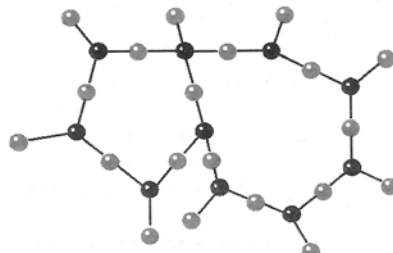
לא כל הגופים המוצקים הם גבישיים. קיימים גופים רבים, המכונים אמורפיים.¹
במה נבדלים הם מהגבישיים?

בגופים אמורפיים לא קיים סדר נוקשה במיקום האטומים. המחזוריות המדויקת בכל כיווני המבנה, המאפיינת את הגבישים, איננה קיימת בגופים אמורפיים.

במקרים רבים עשוי חומר להתקיים הן במצב הגבישי והן כגוף אמורפי. לדוגמה: קוורץ (SiO_2). את המבנה הגבישי של קוורץ אפשר לתאר כסריג, שבבסיסו משושה משוכלל (ציור 159א). אומנם למבנה האמורפי של קוורץ מבנה סריגי, אולם צורתו משובשת: בנוסף למשושים נמצאים בה מצולעים בעלי חמש ושבע צלעות (ציור 159ב).



ציור 159א



ציור 159ב

תכונות הגופים האמורפיים

כל הגופים האמורפיים הם **איזוטרופיים**, כלומר תכונותיהם הפיזיקליות זהות בכל כיווני ההטחה. לגופים אמורפיים שייכים: זכוכית, זפת ועוד. כאשר מופעל כוח חיצוני על גופים אמורפיים, הם מגלים בו-זמנית תכונות אלסטיות כשל מוצקים, ותכונות נזילות כשל נוזלים: בהטחה מכנית מהירה (מכה) הם מתנהגים כמוצקים ונשברים לרסיסים – אולם בפעולה ממושכת מאוד הגופים האמורפיים זורמים: התאזרו בסבלנות ועקבו אחר גוש זפת המונח על משטח קשה, ותראו איך הזפת תתפרס בהדרגה על פני המשטח. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, ההתרחשות מהירה יותר.

¹ מהמילים היווניות "מורפה" – צורה, ו-"א" – שלילה.

בדומה למולקולות של נוזל, גם לאטומים או למולקולות של גוף אמורפי יש זמן מסוים של "חיי תושב": המולקולות מבצעות תנודות סביב מצב שיווי-המשקל. אולם להבדיל מהנוזלים, זמן "חיי התושב" של מולקולות המבנה האמורפי ארוך מאוד.

כך, למשל, זמן "חיי התושב" של הדונג ב- $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ הוא 0.1 sec . במובן זה קרובים הגופים האמורפיים לגבישים, מכיוון שהקפיצות ממקום אחד של שיווי-משקל למשנהו נדירות.

בטמפרטורות נמוכות דומים הגופים האמורפיים לגוף קשיח: הם כמעט אינם נוזלים; אולם עם עליית הטמפרטורה הם מתרככים בהדרגה, ותכונותיהם מתקרבות לתכונות הנוזלים, משום שעם עליית הטמפרטורה נעשות קפיצות האטומים ממצב שיווי-משקל אחד למשנהו תכופות יותר. להבדיל מגבישים, לגופים אמורפיים אין טמפרטורת התכה מסוימת.

פיזיקה של מצב מוצק

בני-אדם השתמשו – וימשיכו להשתמש – בגופים מוצקים. המחקר הפיזיקלי והמטלורגי של המצב המוצק דשדש מאחור בשנים רבות, והטכנולוגיה התבססה על ניסיון; אבל בזמן האחרון המצב השתנה: על בסיס המחקר התיאורטי פותחו ונוצרו חומרים מוצקים חדשים בעלי תכונות מופלאות.

הטרנזיסטור (שאליו עוד נשוב) הוא דוגמה בולטת לפיתוח, המבוסס על הבנה ברורה של מבנה הגבישים. פיתוח הזה הביא לאנושות את מהפכת הרדיו וטכנולוגיות התקשורת.

פיתוח חומרים בעלי תכונות מכניות, מגנטיות, חשמליות ואחרות הוא אחד הכיוונים העיקריים במחקר הפיזיקה של המצב המוצק. כמחצית מכל הפיזיקאים בעולם כיום עובדים בתחום זה.

הגופים האמורפיים תופסים את מקום הביניים בין הגבישים לבין הנוזלים. הבנת המבנה של גופים מוצקים (גבישיים ואמורפיים) מאפשרת לפתח חומרים בעלי תכונות נדרשות.



1. במה נבדלים גופים אמורפיים מגופים גבישיים?
2. מנו דוגמאות של גופים אמורפיים.
3. האם היה קיים המקצוע נפחות זכוכית, אילו היתה הזכוכית גביש – ולא חומר אמורפי? הסבירו.

תקציר פרק 12

בדרך כלל נמצאים המוצקים במצב גבישי. הגבישים הם אניזוטרופיים, דהיינו תכונותיהם הפיזיקליות תלויות בכיוון ההטרחה הנבחרת.

להבדיל מן הגופים הגבישיים, בגופים אמורפיים לא קיים סדר נוקשה במיקום האטומים. בטמפרטורות נמוכות דומות תכונות הגופים האמורפיים לאלה של מוצקים, ובטמפרטורות גבוהות הן דומות יותר לתכונות הנוזלים בעלי צמיגות גבוהה.

פרק 13 יסודות התרמודינמיקה

את התופעות הקשורות בחום אפשר לתאר באמצעות הערכים (הפרמטרים המקרוסקופיים), הנרשמים באמצעות המכשירים כמד-לחץ וכ"מד-חום". מכשירים אלה אינם רגישים לפעולות של מולקולות בודדות. תורת התהליכים הקשורים בחום, ללא התייחסות למבנה המולקולרי של הגופים, נקראת **תרמודינמיקה**.

§77 אנרגיה פנימית

תורת התרמודינמיקה באה לעולם באמצע המאה ה-19, לאחר גילוי חוק שימור האנרגיה. ביסודה הוגדר המושג **אנרגיה פנימית**, וממנו נתחיל אנו. לפני כן נעסוק בקיצור בקשר בין התרמודינמיקה לבין התורה המולקולרית-קינטית.

תרמודינמיקה ומכניקה סטטיסטית

התורה המדעית הראשונה, הקשורה לתהליכי חום, לא היתה התורה המולקולרית-קינטית, אלא התרמודינמיקה. היא נולדה מחקירת התנאים

יסודות התרמודינמיקה

האופטימליים בניצול חוס לביצוע עבודה; לידתה באמצע המאה ה-19, זמן רב לפני שהתורה המולקולרית-קינטית התקבלה בקרב המדענים.

עתה, כאשר חוקרים תופעות הקשורות בחוס, משלבים במדע ובטכנולוגיה את תורת התרמודינמיקה בתורה המולקולרית-קינטית. בפיזיקה תיאורטית מכנים את התורה המולקולרית-קינטית **פיזיקה סטטיסטית**. התרמודינמיקה והתורה המולקולרית-קינטית עוסקות בחקירת אותן תופעות, אולם באמצעים שונים.

התוכן העיקרי של התרמודינמיקה כולל שני חוקים בסיסיים, הנוגעים לאנרגיה האצורה בכל חומר, בלא קשר למבנהו הפנימי.

המכניקה הסטטיסטית היא מדע עמוק ומדויק יותר מתרמודינמיקה, גם מורכב יותר. עושים בה שימוש במקרים, שבהם הביטויים הפשוטים של התרמודינמיקה אינם מספקים.

אנרגיה פנימית בתורה המולקולרית-קינטית

באמצע המאה ה-19 הוכח, שבנוסף לאנרגיה המכנית שיש לגופים מקרוסקופיים (גדולים), טמונה אנרגיה גם בתוכם. **אנרגיה פנימית** זו נשקלת אף היא במאזן כל התמרות האנרגיה בטבע. לאחר גילוי האנרגיה הפנימית ניסחו את **חוק שימור האנרגיה**. מהי האנרגיה הפנימית?

כאשר דסקית גולשת על פני הקרח ונבלמת בהשפעת כוח החיכוך, האנרגיה המכנית שלה (האנרגיה הקינטית) לא נעלמת, אלא מועברת למולקולות של הדסקית ושל הקרח, ואלה נעות בתוך הגופים המתחככים באופן בלתי מסודר (ובלתי נראה). החספוסים המיקרוסקופיים של המשטחים המשתפשים מתעוותים תוך כדי תנועה, ועוצמת התנועה הבלתי מסודרת של המולקולות גדלה. שני הגופים מתחממים – סימן לגידול האנרגיה הפנימית של הגופים.

קל לצפות בתהליך ההפוך – התמרת אנרגיה פנימית לאנרגיה מכנית: אם נחמם מים במבחנת זכוכית הסגורה בפקק, תגדל האנרגיה הפנימית של המים, ולחץ האדים יהיה די גדול כדי להעיף את הפקק: האנרגיה הקינטית של הפקק גדלה על חשבון האנרגיה הפנימית של האדים. תוך כדי התרווחות מבצעים אדי המים עבודה ומתקררים, והאנרגיה הפנימית שלהם הולכת וקטנה.

מנקודת מבטה של התורה המולקולרית-קינטית שווה האנרגיה הפנימית של גוף

מקרוסקופי לסכום האנרגיות הקינטיות של כל המולקולות או האטומים של הגוף (הנמצאים בתנועה מתמדת ובלתי מסודרת) והאנרגיות הפוטנציאליות של הקשרים האלסטיים של כל המולקולות עם מולקולות אחרות של אותו גוף (אולם לא עם מולקולות של גופים אחרים).

באופן מעשי אי-אפשר לחשב את האנרגיה הפנימית של הגוף (או את שינוייה) על-ידי חישוב האנרגיות הקינטיות והפוטנציאליות של כל המולקולות הבודדות עקב מספרן העצום בגופים מקרוסקופיים. לכן נחוץ לדעת לחשב אנרגיה פנימית (או את שינוייה) על-פי ערכים הניתנים למדידה ישירה.

אנרגיה פנימית של גז חד-אטומי אידיאלי

תכונותיו של גז המורכב מאטומים בודדים – ולא ממולקולות – פשוטות יותר מתכונותיהם של גזים אחרים. דוגמאות לגזים חד-אטומיים הן הגזים האצילים: הליום, ניאון, ארגון ועוד. נחשב את האנרגיה הפנימית של גז חד-אטומי אידיאלי.

מכיוון שמולקולות של גז אידיאלי אינן משפיעות זו על זו, שווה האנרגיה הפוטנציאלית שלהן לאפס. כל האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי מהווה אפוא סכום של האנרגיות הקינטיות של תנועותיהן הבלתי מסודרות של המולקולות המרכיבות את הגז.

כדי לחשב את האנרגיה הפנימית של גז חד-אטומי אידיאלי, שמסתו m , צריך לכפול את האנרגיה הקינטית הממוצעת של אטום אחד $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ במספר האטומים $N = \frac{m}{M} N_A$. נביא בחשבון ש- $kN_A = R$, נציב ונקבל את ערך האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי:

$$(13.1) \quad U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

האנרגיה הפנימית של גז חד-אטומי אידיאלי נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה

המוחלטת.

היא אינה תלויה בנפח ובערכים מקרוסקופיים אחרים של המערכת. האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי, שאינו חד-אטומי, אלא מורכב ממולקולות, נמצאת גם היא ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת, אולם מקדם הפרופורציונליות בין U ל- T יהיה אחר, מכיוון שמולקולות מורכבות לא רק נעות כגוף אחד, אלא

גם מסתובבות. האנרגיה הפנימית האצורה בגז כזה שווה לסכום האנרגיות של שתי התנועות.

תלות האנרגיה הפנימית בערכים מקרוסקופיים

עד כה גילינו שהאנרגיה הפנימית של גז אידיאלי תלויה בפרמטר אחד: בטמפרטורה. אנרגיה זו אינה תלויה בנפח, מכיוון שהאנרגיה הפוטנציאלית של המולקולות, שאינן משפיעות זו על זו, שווה לאפס.

האנרגיה הפוטנציאלית הממוצעת של מולקולות בגזים שאינן אידיאליים, בנוזלים ובמוצקים, אינה שווה לאפס. בגזים קטנה בהרבה האנרגיה הפוטנציאלית הממוצעת לעומת האנרגיה הקינטית הממוצעת, אולם בגופים מוצקים ונוזליים היא משתווה לה.

האנרגיה הפוטנציאלית הממוצעת של המולקולות, המשפיעות זו על זו, תלויה בנפח החומר, מכיוון ששינוי הנפח גורם לשינוי המרחק הממוצע בין המולקולות.

לכן באופן כללי תלויה האנרגיה הפנימית גם בטמפרטורה T וגם בנפח V .

הערכים של הפרמטרים המקרוסקופיים – טמפרטורה T ונפח V – מגדירים את האנרגיה הפנימית של הגופים המקרוסקופיים.

האנרגיה הפנימית U של גופים מקרוסקופיים מוגדרת על-ידי הפרמטרים המאפיינים את מצבם: הטמפרטורה והנפח.

מושג האנרגיה הפנימית הוא המושג הבסיסי בתרמודינמיקה. אנרגיה זאת תלויה בפרמטרים מקרוסקופיים: טמפרטורה ונפח. האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת.

?

1. תנו דוגמאות של התמרות אנרגיה מכנית לאנרגיה פנימית, ולהפך, בטכנולוגיה ובחיי יומיום.
2. באילו ערכים פיזיקליים תלויה האנרגיה הפנימית של גז?
3. מהו ערכה של האנרגיה הפנימית של גז חד-אטומי אידיאלי?

יסודות התרמודינמיקה

§78 העבודה בתרמודינמיקה

כתוצאה של אילו תהליכים יכולה להשתנות האנרגיה הפנימית? בפרקים הקודמים למדנו שיש שני סוגים של תהליכים כאלה: ביצוע עבודה ומעבר חום. נתחיל בעבודה; מה גודלה של העבודה בדחיסה ובהתרווחות של גז?

העבודה במכניקה ובתרמודינמיקה

במכניקה מוגדרת העבודה כמכפלת גודלו של הכוח בהעתק ובקוסינוס הזווית שביניהם. העבודה מתבצעת תוך כדי פעולת כוח על הגוף הנע, והיא שווה לשינוי האנרגיה הקינטית של הגוף.

בתרמודינמיקה לא נלמדת תנועת הגוף כשלם – אלא תנועת חלקי הגוף המקרוסקופי זה יחסית לזה. כתוצאה מכך משתנה נפח הגוף, אבל מהירותו נשארת שווה לאפס. בתרמודינמיקה מוגדרת העבודה באופן הדומה למכניקה – אולם אינה שווה לשינוי האנרגיה הקינטית, אלא לשינוי האנרגיה הפנימית.

שינוי האנרגיה הפנימית תוך כדי ביצוע העבודה

מדוע משתנה האנרגיה הפנימית של הגוף בדחיסה או בהתרווחות? מדוע, לדוגמה, מתחמם אוויר במשאבה כשמנפחים גלגל?

הסיבה לשינוי טמפרטורת הגז בתהליך הדחיסה היא זו: ההתנגשויות האלסטיות בין מולקולות הגז לבין הבוכנה הנעה משנות את האנרגיה הקינטית של המולקולות, כי בתנועתה לקראת המולקולות מעבירה להן הבוכנה חלק מהאנרגיה המכנית שלה, וכתוצאה מכך עולה טמפרטורת הגז. למעשה פועלת הבוכנה בדומה לכדורגלן הבוטע בכדור המתגלגל לקראתו: הרגל מקנה לכדור מהירות גבוהה ממהירותו לפני הבעיטה.

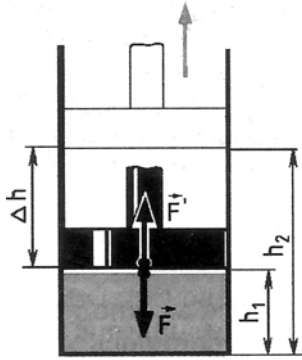
ולהפך: כאשר הגז מתרווח, המהירויות של המולקולות קטנות לאחר ההתנגשות עם הבוכנה המתרחקת, וכתוצאה מכך צונחת טמפרטורת הגז. כך גם פועל כדורגלן כדי להאט את הכדור המתגלגל לקראתו או כדי לעוצרו: רגלו של כדורגלן נעה עם הכדור בכיוון תנועתו, כאילו מפלסת לו את הדרך.

בדחיסה או בהתרווחות של הגז משתנה גם האנרגיה הפוטנציאלית של פעולות הגומלין בין המולקולות, מכיוון שבתהליכים אלה משתנה המרחק הממוצע ביניהן.

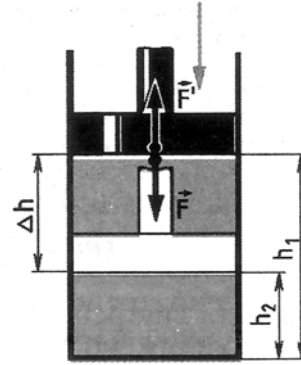
עבודה בתרמודינמיקה

חישוב העבודה

נחשב את העבודה בתהליך שינוי נפחו של גז, הנמצא בגליל שמתחת לבוכנה (ציור 160). לא נחשב את עבודת הכוח \vec{F} על הגז מצדו של גוף חיצוני (הבוכנה)



ציור 160



ציור 161

אלא את העבודה שמבצע הגז בהפעלת כוח \vec{F}' על הבוכנה. לפי החוק השלישי של ניוטון: $\vec{F} = \vec{F}'$.

גודל הכוח הפועל על הבוכנה מצדו של הגז שווה ל- $F' = pS$, כאשר p – לחץ הגז; S – שטח פני הבוכנה. נניח שהגז מתרווח ושהבוכנה זזה במגמת הכוח \vec{F}' למרחק קטן: $\Delta h = h_1 - h_2$. אם התזוזה קטנה, אפשר להניח שלחץ הגז נותר קבוע.

עבודת הגז שווה:

$$(13.2) \quad A' = F' \Delta h = pS(h_1 - h_2) = p(S h_2 - S h_1)$$

אפשר לבטא עבודה זו באמצעות שינוי נפח הגז. הנפח ההתחלתי הוא $V_1 = S h_1$, והנפח הסופי: $V_2 = S h_2$. לכן:

$$(13.3) \quad A' = p(V_2 - V_1) = p \Delta V$$

כאשר: $\Delta V = V_2 - V_1$ – שינוי נפח הגז.

תוך כדי ההתרווחות העבודה חיובית, מכיוון שמגמות הכוח ותנועת הבוכנה זהות; בזמן ההתרווחות מוסר הגז אנרגיה לבוכנה שמעליו.

גם כאשר נדחס הגז, תקפה הנוסחה (13.3) לחישוב העבודה, אולם הפעם

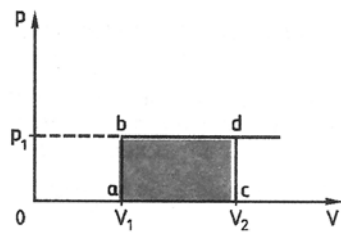
$V_2 < V_1$, ולכן $A' < 0$ (ציור 161).

עבודה בתרמודינמיקה

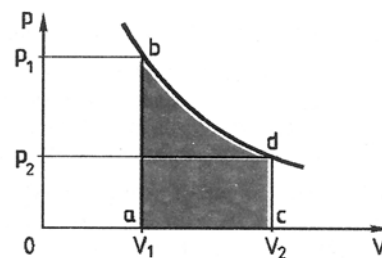
העבודה A , שמבצעים על הגז גופים חיצוניים, שונה מעבודת הגז A' בסימן בלבד: $A = -A'$, מכיוון שהכוח \vec{F} , הפועל על הגז, מכיון כנגד מגמת הכוח \vec{F}' , ומגמת תנועת הבוכנה אינה משתנה. לכן עבודת הכוחות החיצוניים הפועלים על הגז שווה:

$$(13.4) \quad A = -A' = -p\Delta V$$

בדחיסת הגז, כאשר $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$, עבודת הכוח החיצוני חיובית. הדבר הגיוני, מכיוון שבדחיסה זהות מגמות הכוח והתנועה.



ציור 162



ציור 163

כאשר גופים חיצוניים מבצעים על הגז עבודה חיובית, הם מוסרים לו חלק מאנרגיה שאצורה בהם. בהתרווחות הגז עבודת הכוחות החיצוניים שלילית ($A < 0$) מכיוון ש- $\Delta V = V_2 - V_1 > 0$, והפעם מגמות הכוח והתנועה מנוגדות זו לזו.

הביטוי הגיאומטרי של עבודה

לעבודה A' של גז בלחץ קבוע אפשר לתת ביטוי גיאומטרי פשוט.

- נשרטט גרף של תלות הלחץ של הגז בנפח (ציור 162). שטח המלבן $abcd$
- הכלוא בין הגרף $p_1 = \text{const}$, ציר V והקטעים ab ו- cd , השווים ללחץ הגז – שווה מספרית לעבודה (13.3):

$$A' = p_1(V_2 - V_1) = |ab| \cdot |ac|$$

במקרה הכללי לחץ הגז אינו נשאר קבוע. לדוגמה: בתהליך איזותרמי הוא קטן ביחס הפוך לנפח (ציור 163). כדי לחשב את העבודה במקרה זה יש לחלק את שינוי הנפח הכולל לחלקים קטנים, לחשב את העבודות האלמנטריות (הקטנות) ולסכם את כולן.

כבמקרה הקודם שווה עבודת הגז לשטח הצורה המוגבלת על-ידי הגרף $p(V)$, ציר V והקטעים ab ו- cd , השווים ללחצים p_1, p_2 במצבים ההתחלתי והסופי.

עבודת הכוח החיצוני, המשנה את נפח הגז ב- ΔV , שווה: $A = -p\Delta V$. עבודת הגז עצמו שווה: $A' = -A = p\Delta V$, כאשר: p – לחץ הגז.

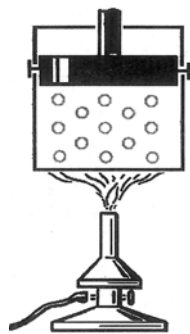
?

1. מדוע מתחממים הגזים כאשר דוחסים אותם?
2. איזו עבודה, חיובית או שלילית, מבצעים כוחות חיצוניים בתהליך האיזותרמי, המתואר בציור 163? הסבירו.
3. בדקו את היחידות הפיזיקליות של השטח, הכלוא בגרפים שבציורים 162 ו-163.

§79 כמות החום

אפשר לשנות את האנרגיה הפנימית של גז בגליל לא רק על-ידי ביצוע עבודה על הגז, אלא גם על-ידי חימומו.

אם נקבע את הבוכנה (ציור 164) ונחמם את המכל, לא ישתנה נפח הגז, ולא תתבצע עבודה תוך כדי החימום. האנרגיה הפנימית תעלה, ועמה תעלה הטמפרטורה.



ציור 164

תהליך העברת אנרגיה מגוף אחד לאחר ללא ביצוע עבודה מכונה החלפת חום או העברת חום.

הכמות של שינוי האנרגיה הפנימית בתהליך של החלפת חום מכונה כמות חום. זו האנרגיה שמוסר גוף אחד לאחר בתהליך החלפת חום.

התמונה המולקולרית של החלפת חום

בתהליך החלפת חום מתרחשות על גבול משטחי הגופים פעולות גומלין בין המולקולות האטיות של הגוף הקר לבין המולקולות הנעות מהר יותר של הגוף החם. כתוצאה מכך משתוות האנרגיות הקינטיות של המולקולות: המהירות של מולקולות הגוף הקר הולכת וגדלה, והמהירות של מולקולות הגוף החם הולכת וקטנה.

במהלך החלפת החום לא מתרחש היפוך אנרגיה מצורה אחת לאחרת, אלא חלק מהאנרגיה הפנימית של הגוף החם מועבר לגוף הקר.

כמות החום וקיבול החום

מקורס הפיזיקה ידוע לנו, שכדי לחמם גוף שמסתו m מטמפרטורה t_1 לטמפרטורה t_2 , יש למסור לו כמות חום:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t \quad (13.5)$$

בהתקררות הגוף נמוכה יותר הטמפרטורה הסופית t_2 מהטמפרטורה ההתחלתית t_1 , וכמות החום נהיית שלילית (הגוף מחזיר אנרגיה).

המקדם c בנוסחה (13.5) מכונה **קיבול חום סגולי** (או **חום סגולי**). זו כמות החום שמקבל או מחזיר קילוגרם אחד של חומר תוך כדי שינוי הטמפרטורה במעלת קלווין אחת.

החום הסגולי תלוי בתכונות החומר – אך גם בתהליך שבו מתרחש מעבר החום. אם נחמם גז בלחץ קבוע, יתרווח הגז ויבצע עבודה. כדי לחמם גז ב- 1°C בלחץ קבוע, יש להעביר לו כמות חום גדולה יותר מאשר בחימומו ב- 1°C בנפח קבוע. נוזלים ומוצקים מתרווחים בהתחממות באופן לא משמעותי, ולכן עבורם נבדלים ערכי החום הסגולי בתהליך קבוע-לחץ וקבוע-נפח מעט זה מזה.

חום התאדות סגולי

על מנת להפוך נוזל לאדים יש להעביר לו כמות מסוימת של חום. במעבר זה אין טמפרטורת הנוזל משתנה. המעבר מנוזל לאדים בטמפרטורה קבועה אינו גורם להעלאת האנרגיה הקינטית של המולקולות, אולם הוא מלווה בהגדלת האנרגיה הפוטנציאלית שלהן: הרי המרחק הממוצע שבין המולקולות של גז גדול בהרבה מאשר בין מולקולות הנוזל!

כמות החום, הדרושה כדי להפוך קילוגרם אחד של נוזל לאדים בטמפרטורה קבועה, מכונה חום ההתאדות הסגולי. מסמנים גודל זה באות r , ויחידותיו הפיזיקליות הן ג'אולים לקילוגרם (J/kg).

חום ההתאדות הסגולי של מים בטמפרטורה של 100°C גבוה מאוד: $r_{\text{H}_2\text{O}} = 2.26 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. לגבי נוזלים אחרים – ככוחל, אתר, כספית וקרוסין – חום ההתאדות הסגולי קטן פי 3 עד 10 מזה של המים.

כדי להפוך נוזל שמסתו m לאדים נדרשת כמות חום השווה ל:

$$Q_B = rm \quad (13.6)$$

אותה כמות חום משתחררת כאשר האדים מתעבים לנוזל:

$$Q_K = -rm \quad (13.7)$$

חום היתוך סגולי

כאשר ניתך גוף גבישי, מוקצה כל החום שסופק לו להעלאת האנרגיה הפוטנציאלית של מולקולות הגביש. האנרגיה הקינטית של המולקולות אינה משתנה, מכיוון שהתהליך מתרחש בטמפרטורה קבועה.

כמות החום, הנדרשת כדי להתיך 1 ק"ג של חומר גבישי, הנמצא בטמפרטורת

ההיתוך, לנוזל באותה טמפרטורה, מכונה החום הסגולי של ההיתוך λ .

כאשר 1 ק"ג של חומר מתמצק, נפלטת אותה כמות חום בדיוק. חום ההיתוך הסגולי של קרח הוא גדול: $3.34 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$.

"אילו לא היה לקרח חום היתוך גדול", כתב ר' בלאק במאה ה-18, "היתה כל כמות השלג והקרח ניתכת באביב בכמה דקות בגלל החום שעובר מהאוויר לקרח, והתוצאות עלולות להיות נוראות; הרי גם במצב הקיים מתרחשים שטפונות, כאשר זרמי מים איתנים שוטפים במורד ההרים מהיתוך הקרח והשלג שבפסגותיהם".¹

על מנת להתיך גביש שמסתו m דרושה כמות חום השווה ל-

$$Q_L = \lambda m \quad (13.8)$$

¹ ר' בלאק (1728 – 1792) – מדען אנגלי. גילה את קיומו של חום ההתאדות וחום ההיתוך.

כמות החום הנפלטת בהתמצקות הגוף שווה:

$$Q_C = - \lambda m \quad (13.9)$$

האנרגיה הפנימית של גוף משתנה בחימום או בקירור, בהתאדות ובהתעבות, בהיתוך ובהתמצקות. בכל המקרים מספקים לגוף או נוטלים ממנו כמות חום מסוימת.

?

1. מה מכונה "כמות חום"?
2. במה תלוי קיבול החום הסגולי של חומר?
3. מהו "חום התאדות סגולי"?
4. מהו "חום היתוך סגולי"?

§80 החוק הראשון של התרמודינמיקה

החוק הראשון של התרמודינמיקה הוא חוק שימור האנרגיה המורחב לתופעות של מעברי חום. הוא מראה במה תלוי שינוי האנרגיה הפנימית.

חוק שימור האנרגיה

הניסויים הרבים שבוצעו עד לאמצע המאה ה-19 הראו, שאנרגיה מכנית לעולם איננה אובדת: פטיש מכה על גוש עופרת, וזו מתחממת במידה מסוימת; כוחות חיכוך בולמים גופים, ואלה מתחממים תוך כדי האטה.

על סמך תצפיות והכללות ממחקרים נוסח חוק שימור האנרגיה:

האנרגיה בטבע איננה נוצרת מאין ואינה נעלמת: כמות האנרגיה קבועה, והיא

רק מותמרת מצורה אחת לאחרת.

חוק שימור האנרגיה שולט בכל תופעות הטבע ומאגד אותן יחדיו. הוא מתקיים תמיד, ובאופן מדויק. לא ידוע, ולו מקרה אחד, שחוק זה הופר.

החוק התגלה באמצע המאה ה-19 על-ידי המדען הגרמני, הרופא ר' מייאר (1889-1818); ונוסח בצורה מדויקת על-ידי מדען גרמני אחר, ה' הלמהולץ (1894-1821).

כמות החום

החוק הראשון של התרמודינמיקה

חוק שימור האנרגיה המורחב לתופעות החום מכונה החוק הראשון של

התרמודינמיקה.

בתרמודינמיקה חוקרים את הגופים, שמיקום מרכז הכובד שלהם איננו משתנה. האנרגיה המכנית של גופים האלה נשארת קבועה, ועשויה להשתנות רק האנרגיה הפנימית של הגוף.

עד כה למדנו על תהליכים, שבהם השתנתה האנרגיה הפנימית של המערכת עקב ביצוע עבודה או עקב החלפת חום עם גופים חיצוניים.

במקרה הכללי, בעת מעבר המערכת ממצב אחד לאחר עשויה האנרגיה הפנימית להשתנות בה עקב ביצוע עבודה וגם עקב מעברי חום. החוק הראשון של התרמודינמיקה מתייחס למקרים הכלליים האלה:

שינוי האנרגיה הפנימית של המערכת במעבר ממצב אחד לאחר שווה לסכום עבודת הכוחות החיצוניים וכמות החום המועברת למערכת:

$$\Delta U = A + Q \quad (13.10)$$

אם המערכת מבודדת, לא מתבצעת עליה עבודה ($A = 0$), והיא לא תחליף חום עם גופים חיצוניים ($Q = 0$). במקרה זה, לפי החוק הראשון של תרמודינמיקה:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0 \quad \text{או} \quad U_2 = U_1$$

האנרגיה הפנימית של מערכת מבודדת נשארת קבועה (נשמרת).

לעתים קרובות אין מבטאים את עבודת הכוחות החיצוניים A על המערכת, אלא מבטאים את עבודת המערכת על הכוחות החיצוניים, A' . מכיוון ש- $A' = -A$, אפשר לרשום את החוק הראשון של התרמודינמיקה (13.10) כך:

$$Q = \Delta U + A' \quad (13.11)$$

כמות החום המועברת למערכת מותמרת לשינוי האנרגיה הפנימית ולעבודת המערכת על גופים חיצוניים.

לא תיתכן בניית מנוע נצחי

מהחוק הראשון של התרמודינמיקה נובעת אי-היתכנות של בניית מנוע נצחי –

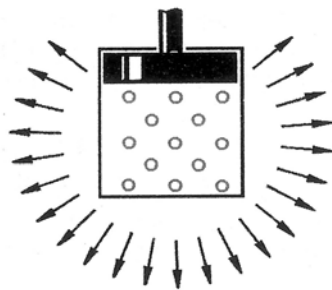
מתקן שיכול לבצע כמות אינסופית של עבודה ללא השקעת דלק או חומרים אחרים כלשהם. אם לא מספקים חום למערכת ($Q = 0$), יכולה העבודה A' להתבצע בהתאם למשוואה (13.11) על חשבון הפחתת האנרגיה הפנימית: $A' = -\Delta U$. מאחר שמאגר האנרגיה יתרוקן, יפסיק המנוע לעבוד.

העבודה וכמות החום: מאפייני תהליך השינוי של האנרגיה הפנימית

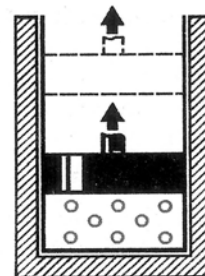
במצב נתון אצורה במערכת אנרגיה פנימית; **אולם אי-אפשר לומר, שמערכת מכילה כמות מסוימת של חום או עבודה.** הן העבודה הן כמות החום הן ערכים המאפיינים את **שינוי האנרגיה הפנימית** של המערכת כתוצאה מתהליך זה או אחר.

האנרגיה הפנימית של המערכת יכולה להשתנות בביצוע עבודה על-ידי המערכת עצמה או עקב מעבר כמות חום לגופים חיצוניים. לדוגמה: גז חם בגליל עשוי להפחית את האנרגיה הפנימית שבו בתהליך התקררות ללא ביצוע עבודה (ציור 165); והוא עשוי לאבד את אותה כמות של אנרגיה פנימית בתהליך הנעת הבוכנה ללא מסירת חום לגופים שמסביב, כאשר מעטפת הגליל אטומה למעבר חום (ציור 166).

בהמשך נכיר צורות אנרגיה חדשות ואת אפשרויות המרתן ההדדיות.



החום הנפלט
ציור 165



מעטפת בידוד
ציור 166

תוך כדי ביצוע עבודה ומעבר חום משתנה האנרגיה הפנימית של המערכת. בכל מצב אצורה במערכת אנרגיה פנימית. העבודה וכמות החום אינן כלולות בערך האנרגיה הפנימית של הגוף, אלא מאפיינות את תהליך השינוי של האנרגיה הפנימית.

?

1. כיצד מנסחים את החוק הראשון של התרמודינמיקה?
2. באיזה מקרה יהיה השינוי באנרגיה הפנימית שלילי?
3. מדוע נכון לומר שבמערכת אצורה אנרגיה פנימית, אולם אי-אפשר לומר שבמערכת מצוי מאגר של כמות חום או של עבודה?

§81 יישומי החוק הראשון של התרמודינמיקה בתהליכים שונים

בעזרת החוק הראשון של התרמודינמיקה ניתן להסיק לגבי אופנים של תהליכים שונים. ננתח תהליכים שונים, שבהם נשאר קבוע אחד מהערכים הפיזיקליים (תהליכי-איזו). נניח שהמערכת היא גז אידיאלי, משום שזה המקרה הפשוט ביותר.

תהליך איזוכורי

בתהליך איזוכורי אין נפח הגז משתנה, ולכן העבודה שהגז מבצע שווה לאפס. שינוי האנרגיה הפנימית בהתאם למשוואה (13.11) שווה לכמות החום המועבר:

$$\Delta U = Q \quad (13.12)$$

אם הגז מתחמם, אזי $Q > 0$ ו- $\Delta U > 0$: האנרגיה הפנימית הולכת וגדלה. אם הגז מתקרר, אזי $Q < 0$, $U = U_2 - U_1 < 0$: שינוי האנרגיה הפנימית שלילי, וערכה הולך וקטן.

תהליך איזותרמי

בתהליך איזותרמי ($T = \text{const}$) אין האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי משתנה [ראו נוסחה (13.1)]. בהתאם לנוסחה זו מוקדשת כל כמות החום המועברת לגז לביצוע העבודה:

$$Q = A' \quad (13.13)$$

אם הגז מקבל חום ($Q > 0$), הוא מבצע עבודה חיובית ($A' > 0$); ואם מוסר הגז חום לסביבה, $Q < 0$ ו- $A' < 0$. במקרה האחרון עבודת הכוחות החיצוניים על הגז היא חיובית.

יישומי החוק הראשון של התרמודינמיקה

תהליך איזוברי

בתהליך איזוברי, בהתאם לנוסחה (13.11), כמות החום המסופקת לגז מוקדשת לשינוי האנרגיה הפנימית של הגז ולביצוע עבודה תחת לחץ קבוע.

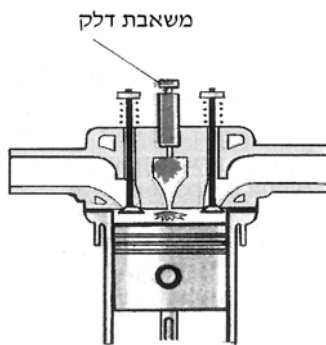
תהליך אדיאבטי

כעת נתבונן בתהליך המתרחש במערכת, שאינה מחליפה חום עם הסביבה. **תהליך במערכת, המבודדת מבחינה תרמית מהסביבה, מכונה תהליך אדיאבטי.** בתהליך אדיאבטי $Q = 0$, ובהתאם למשוואה (13.10) מתרחש שינוי האנרגיה הפנימית על חשבון ביצוע העבודה בלבד:

$$\Delta U = A \quad (13.14)$$

לא ניתן לעטוף את המערכת בעטיפה, המונעת לחלוטין את העברת החום; אולם בשורה של מקרים אפשר לתאר את התהליכים האמיתיים כקרובים מאוד לאדיאבטיים. דבר זה אפשרי כאשר התהליך מתבצע מהר, כלומר שבמהלכו לא מתרחשת החלפת חום משמעותית בין המערכת לבין הסביבה.

בהתאם למשוואה (13.14), כאשר מבצעים עבודה על המערכת, כדחיסת גז, הולכת האנרגיה הפנימית של הגז וגדלה, ומתלווה אליה עליית טמפרטורת הגז. ולהפך: במהלך ההתרווחות מבצע הגז עצמו עבודה חיובית ($A' > 0$), האנרגיה הפנימית שלו הולכת וקטנה, ומתלווה אליה ירידה בטמפרטורה שלו.



ציור 167

לחימום האוויר בדחיסה מהירה נמצא שימוש במנועי דיזל. במנועים אלה לא קיימת מערכת הצתה של תערובת השריפה, שבה משתמשים במנועי השריפה הפנימית מבוססי מאייד. במקום תערובת דלק-אוויר, הנשאבת לצילינדר במנועי שריפה פנימית, נשאב לצילינדר מנוע הדיזל אוויר אטמוספרי רגיל, ולקראת סוף מחזור הדחיסה ניתז לתוך הצילינדר דלק נוזלי (סולר) (ציור 167).

ברגע זה טמפרטורת האוויר גבוהה מאוד, והסולר ניצת. למנועי דיזל נצילות גבוהה יותר מאשר למנועי הבעירה הפנימית, אולם הם כבדים ומורכבים יותר. כעת יותר ויותר רכבים עוברים למנועי דיזל.

עבודת מדחסי האוויר מלווה בעליית טמפרטורה כה גבוהה, שנאלצים להשתמש במערכת מיוחדת לקירור הצילינדרים.

קירור הגז בהתרווחות אדיאבטית מתרחש בקנה מידה ענקי באטמוספירת כדור הארץ: האוויר החם עולה למעלה ומתרווח, מכיוון שהלחץ האטמוספרי קטן עם עלייה בגובה. התרווחות זו מלווה בהתקררות משמעותית, וכתוצאה מכך מתעבים אדי המים ויוצרים עננים.

החלפת חום במערכת מבודדת

נתבונן בהחלפת חום בתוך מערכת, הכוללת כמה גופים בטמפרטורות התחלתיות שונות. לדוגמה: החלפת חום בין מים קרים בכלי לבין כדור ברזל חם שהוכנס לכלי זה. נניח שהמערכת מבודדת דיה מהגופים שמסביבה, ושהאנרגיה הפנימית הכוללת שלה אינה משתנה (מערכת סגורה). שום עבודה איננה מתבצעת בתוך המערכת, ולכן לפי החוק הראשון של התרמודינמיקה [ראו את המשוואה (13.10)] שווה שינוי האנרגיה הפנימית של כל גוף במערכת לכמות החום, שהועבר אל הגוף או נמסר על-ידיו לגוף אחר. בתום מעברי החום ובהתייבב המצב התרמי בתוך המערכת: $\Delta U_i = Q_i$. נחבר את הביטויים מסוג זה עבור כל גופי המערכת, ונזכור שהאנרגיה הפנימית הכוללת אינה משתנה:

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots = 0$$

ונקבל את המשוואה הבאה:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0 \quad (13.15)$$

זו המשוואה של שיווי משקל תרמי. Q_1, Q_2, Q_3, \dots הן כמויות החום, שהתקבלו או שנמסרו על-ידי הגופים. כמויות חום אלה מחושבות על-ידי הנוסחה (13.5) או על-ידי הנוסחאות (13.6), (13.7), (13.8), (13.9) – גם אם במהלך מעבר החום מתרחשים שינויי מצב צבירה מנוזל לגז או למוצק (או להפך: מגז או ממוצק – לנוזל).

בתהליך איזותרמי אין האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי משתנה; בתהליך איזוכורי היא משתנה עקב מעבר חום; ובתהליך איזוברי היא משתנה הן עקב מעבר החום הן בעקבות ביצוע העבודה. במערכת מבודדת מתרחש תהליך אדיאבטי, ושינוי האנרגיה הפנימית שווה לעבודת הכוחות החיצוניים.

יישומי החוק הראשון של התרמודינמיקה

?

1. באיזה מקרה עבודת הגז גדולה יותר: בהתרווחות איזותרמית מנפח V_1 לנפח V_2 או בהתרווחות איזוברית מ- V_1 ל- V_2 ?
2. הביאו דוגמאות של תהליכים אדיאבטיים נוספים.
3. כיצד תירשם משוואת שיווי-המשקל התרמי עבור מערכת בת שלושה גופים?

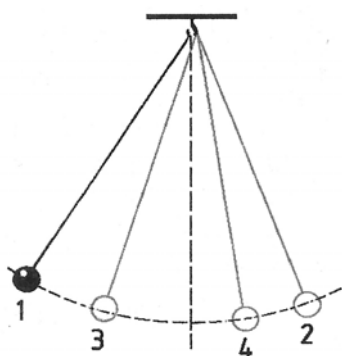
§82 תהליכים בלתי הפיכים בטבע

חוק שימור האנרגיה טוען, שכמות האנרגיה – בכל התמרותיה – נשארת קבועה, אולם אינו מפרט אילו התמרות אנרגטיות אפשריות. רבים התהליכים האפשריים מבחינת חוק שימור האנרגיה, שלעולם אינם מתרחשים במציאות מאליהם.

דוגמאות של תהליכים בלתי הפיכים

גופים חמים מתקררים בהדרגה תוך מסירת אנרגיה לגופים קרים יותר שמסביבם. התהליך ההפוך – מעבר אנרגיה מגוף קר לגוף חם – אינו מנוגד לחוק שימור האנרגיה, אולם לא מתרחש לעולם מעצמו, אלא באופן מאולץ.

דוגמה אחרת: תנודות מטוטלת, שהוצאה ממצב שיווי-משקלה, דועכות (ציור 168; 1, 2, 3, 4 הם מצבי המטוטלת העוקבים בסטיות המרביות ממצב שיווי-המשקל). מפאת עבודת כוחות החיכוך פוחתת האנרגיה המכנית, וטמפרטורת המטוטלת והאוויר שמסביבה (ולכן האנרגיות הפנימיות שלהם) גדלות מעט.



ציור 168

מבחינת המאזן האנרגטי אפשרי גם התהליך ההפוך: משרעת תנודות המטוטלת תגדל על-חשבון קירור המטוטלת עצמה וסביבתה; אולם תהליך כזה לא נצפה מעולם. האנרגיה המכנית הופכת אפוא באופן בלתי מאולץ לאנרגיה הפנימית, אולם לא להפך. תהליך זה מלווה בהתמרת אנרגיה של תנועה מסודרת של גוף שלם לאנרגיה של תנועה תרמית בלתי מסודרת של המולקולות המרכיבות את הגוף.

תהליכים בלתי הפיכים

מסקנה כללית לגבי אופי הבלתי הפיך של תהליכי הטבע

דוגמאות אופייניות לתהליכים בלתי הפיכים הן מעבר חום מגוף חם לקר ומעבר אנרגיה מכנית לאנרגיה פנימית. ניתן למנות אינסוף דוגמאות שכאלה, וכולן מצינות שלתהליכים בטבע יש כיווניות מסוימת, שאינה מוזכרת בחוק הראשון של התרמודינמיקה. כל התהליכים המקרוסקופיים בטבע מתרחשים במגמה אחת בלבד; הם לא יתרחשו במגמה ההפוכה, אלא באופן מאולץ. כל התהליכים בטבע הם בלתי הפיכים, וביניהם ההזדקנות ומותם של יצורים חיים.

הניסוח המדויק של המושג תהליך בלתי הפיך

להבנה עמוקה יותר של מהות התהליכים הבלתי הפיכים נדרשת ההבהרה הבאה: תהליכים בלתי הפיכים הם אלה, היכולים להתרחש במגמה אחת בלבד; במגמה ההפוכה הם יכולים להתרחש אך ורק כאחד משלבי תהליך מורכב יותר.

כך אפשר להגדיל שוב את משרעת תנודות המטוטלת על-ידי מתן דחיפה ביד; אולם הגדלת המשרעת לא התרחשה בעצמה, אלא בעקבות תהליך מורכב יותר, הכולל תנועת יד.

מבחינה מתמטית מתוארת תכונת אי-ההפיכות של התהליך המכני על-ידי שינוי משוואות התנועה של גופים מקרוסקופיים בעקבות שינוי סימן הזמן: התאוצה אינה משנה סימן בעקבות ההיפוך $t \rightarrow -t$; גם הכוחות התלויים במרחקים לא משנים את סימנם. היפוך הזמן $t \rightarrow -t$ (השקול להיפוך התהליך) משנה את סימן המהירות. לכן העבודה, המתבצעת על-ידי כוחות החיכוך התלויים במהירות, מלווה במעבר בלתי הפיך של האנרגיה הקינטית לאנרגיה פנימית.

סרט "הפוך"

הדגמה מרשימה של אי-ההפיכות תהליכים היא צפייה בסרט קולנוע במגמתו ההפוכה, כלומר מסופו לתחילתו. לדוגמה: קפיצה למים תיראה באופן הבא: המים השקטים בבריכה מתחילים לגעוש, אחר כך מופיעות רגליים הנעות במהירות הבזק למעלה, בעקבותיהן מופיע הצוללן כולו, פני המים נרגעים במהירות, מהירות הקופץ פוחתת בהדרגה – והנה הוא עומד רגוע על קרש הקפיצה. מה שראינו על המרקע יכול היה להתרחש במציאות, אילו אפשר היה להפוך את התהליכים.

למדנו את "הגיונו" של המתרחש בטבע לאחר שהתרגלנו למגמתיות של תהליכים, ולכן איננו מעלים ספק באי-יכולתם לזרום במגמה הפוכה. עם זאת אין תהליך העלאת הקופץ מהמים לקרש הקפיצה נוגד לא את חוק שימור האנרגיה ולא כל חוק טבע אחר – מלבד **החוק השני של התרמודינמיקה**.

החוק השני של התרמודינמיקה.

החוק השני של התרמודינמיקה מתווה את המגמה של התמרות האנרגיה האפשריות, וכיוצא מזה מבטא את אי-ההפיכות של התהליכים בטבע. חוק זה נקבע בדרך של הכללה מבחינה ישירה של תוצאות ניסויים. קיימים כמה ניסוחים לחוק השני של התרמודינמיקה; למרות ההבדלים בניסוחיהם מבטאים הם את אותה מהות, ולכן שקולים הם זה לזה. המדען הגרמני ר' קלאוזיוס (1822 – 1888) ניסח את החוק הזה כך: **אי-אפשר להעביר חום ממערכת קרה יותר למערכת חמה יותר בהעדר שינויים אחרים, המתרחשים בו-זמנית בשתי המערכות או בגופים שמסביבם**.

כאן מנוסחת תוצאה ניסויית לגבי המגמתיות במעבר חום: מעצמו עובר החום תמיד מגופים חמים לקרים. אכן, במערכות קירור מתבצע מעבר החום מגוף קר יותר לחם יותר – אבל תהליך זה מלווה בשינויים בגופים הסובבים: הקירור נעשה באמצעות עבודה חיצונית.

חשיבותו של חוק זה במסקנה לגבי אי-ההפיכות של תהליך מעבר חום ושל תהליכי טבע אחרים. אילו יכול היה החום לעבור מעצמו מגוף קר לגוף חם במקרה כלשהו, ניתן היה להפוך גם תהליכים בלתי הפיכים אחרים.

כל התהליכים זורמים מעצמם במגמה אחת מסוימת; הם בלתי הפיכים. חום עובר תמיד מגוף חם לגוף קר, ואנרגיה מכנית – אם אינה נשמרת שכזו – הופכת תמיד לאנרגיה פנימית. על מגמת התהליכים בטבע מצביע החוק השני של התרמודינמיקה.

?

1. אילו תהליכים מכונים בלתי הפיכים? מנו כמה תהליכים בלתי הפיכים האופייניים ביותר.

תהליכים בלתי הפיכים

2. הביאו דוגמאות של תהליכים בלתי הפיכים שלא הוזכרו בספר.
3. נסחו את החוק השני של התרמודינמיקה.
4. אילו היו הנהרות זורמים לאחור, האם היתה בכך סתירה לחוק שימור האנרגיה?

§83 הפירוש הסטטיסטי של תהליכים בלתי הפיכים בטבע

החוק השני של התרמודינמיקה קובע את עובדת אי-ההפיכות של התהליכים בטבע, אולם אינו מסביר אותה כלל. את ההסבר ניתן לקבל על בסיס התורה המולקולרית בלבד, והוא ממש לא פשוט.

הסתירה בין ההפיכות של תהליכי המיקרו לבין אי-ההפיכות של תהליכי המקרו

אי-ההפיכות של תהליכים מקרוסקופיים נראית פרדוקסלית וסתורה במהותה, מכיוון שכל תהליכי המיקרו הפיכים בזמן. משוואות התנועה הקלאסיות של חלקיקים בודדים, כמו גם משוואות התנועה הקוונטיות, הפיכות בזמן, מכיוון שאינן מכילות כוחות חיכוך התלויים במהירות. כוח החיכוך הוא תופעה מקרוסקופית של פעולות הדדיות בין גוף גדול לבין מספר עצום של מולקולות התווך, והופעת הכוח הזה דורשת הסבר נפרד. כוחות הפעולה ההדדית בין חלקיקי יסוד (בראש ובראשונה אלה הם כוחות אלקטרומגנטיים) הפיכים בזמן; משוואות מקסוול, המתארות שדות אלקטרומגנטיים, אינן משתנות בהחלפת הזמן t ל- $-t$. במודל הפשוט ביותר של הגז – אוסף כדורים אלסטיים – יגלה הגז בהתנהגותו מגמתיות מסוימת. לדוגמה: אם נדחס את הגז והוא ימלא רק חצי מכל, ואחר כך נבטל את הדחיסה – הגז יתרווח וימלא את כל המכל; הוא לא יידחס בחזרה בעצמו. משוואות התנועה של כל מולקולה הפיכות בזמן, מכיוון שהן מכילות את הכוחות התלויים במרחקים בלבד, המתגלים בהתנגשויות שבין המולקולות. הקושי אינו נעוץ רק בהסבר אי-ההפיכות, אלא גם בסתירה לכאורה בין ההפיכות של תהליכי המיקרו לבין אי-ההפיכות של תהליכי המקרו. את הפתרון העקרוני הנכון של הבעיה מצא **בולצמן** – אף שכמה היבטים של בעיית אי-ההפיכות לא הובהרו לגמרי עד היום.

דוגמה של אי-ההפיכות מחיי היומיום

הרי דוגמה פשוטה מחיי היומיום, המרמזת לפתרון בעיית אי-ההפיכות של בולצמן.

נניח שהחלטתם להתחיל בסדרים חדשים. בדרך כלל מתחילים בסידור שולחן העבודה בצורה הקרובה לאידיאלית. אתם מניחים את כל החפצים והספרים במקומותיהם המוגדרים, ואז שורר על השולחן מצב שאפשר לקרוא לו "סדר".

אבל מה שקורה במהלך הזמן ידוע היטב: אתם שוכחים לשים חפצים במקומם, ושוב ישתרר על השולחן כאוס, שלא קשה להבין את התהוותו.

במצב של "סדר" מוגדר מקום חד-משמעי ויחיד של כל החפצים – ובמצב של "כאוס" מספר המקומות גדול בהרבה. כשיתחילו החפצים להימצא במקומות שרירותיים שיצאו משליטתכם, ישרור על שולחן העבודה בהסתברות גבוהה למדי מצב של כאוס עקב מספר רב יותר של מצבים אפשריים להנחת חפצים.

שיקולים דומים לאלה שקל **בולצמן** כדי להסביר את אי-ההפיכות של תהליכי-המקרו.

מצבים מקרוסקופי ומיקרוסקופי

ראשית כול יש להבדיל בין המצב המיקרוסקופי לבין המצב המיקרוסקופי של המערכת.

המצב המיקרוסקופי מתאפיין במספר לא רב של פרמטרים תרמודינמיים (לחץ, נפח, טמפרטורה). דווקא הגדלים המיקרוסקופיים, המגדירים את מצב המערכת בשלמותה, בעלי ערך מעשי הם.

במקרה הכללי מתאפיין המצב המיקרוסקופי על-ידי הגדרת הקואורדינטות והמהירויות (או ערכי התנע) של כל חלקיקי המערכת (הגוף המיקרוסקופי). זו הגדרת מערכת, המפורטת הרבה יותר מן הדרוש לתיאור התהליכים בגופים מיקרוסקופיים. יתרה מזאת; באופן מעשי אין ידיעת מצב המיקרו של המערכת בת-השגה עקב המספר העצום של החלקיקים המרכיבים אותה.

בסיוע דוגמת החפצים שעל השולחן אפשר להגדיר את מושגי המצב מיקרו ומקרו: למצב המיקרו מתאים סידור אחד מסוים של החפצים, ולמצב המקרו

תהליכים בלתי הפיכים

מתאימה הערכת המצב בגדול, "סדר" או "כאוס". מובן שמצב מקרו מסוים יכול לכלול בתוכו מספר גדול מאוד של מצבי מיקרו: כך העתקת מולקולה אחת מנקודת מרחב נתונה לנקודה אחרת, או שינוי ערך מהירותה כתוצאה מהתנגשות, משנים את מצב המיקרו – אולם בוודאי אינם משנים את ערכי הפרמטרים התרמודינמיים, כלומר את מצב המקרו של המערכת.

כל מצבי המיקרו של מערכת סגורה הם בעלי הסתברות שווה; אף אחד מהם איננו מועדף. המשפט הזה שקול להשערה על האופי הכאוטי של התנועה התרמית של המולקולות.

הסתברות המצב

מצבי המיקרו של המערכת מחליפים זה את זה באופן מתמיד. זמן שהיית המערכת במצב מקרוסקופי מסוים נמצא, ככל הנראה, ביחס ישר למספר מצבי המיקרו Z_1 , המהווים את המצב הנתון. אם נסמן באמצעות Z את המספר הכולל של מצבי המיקרו של המערכת, תוגדר הסתברות המצב W כך:

$$W = \frac{Z_1}{Z}$$

הסתברות המצב המקרוסקופי של המערכת שווה ליחס בין מספר מצבי המיקרו, המהווים את מצב המקרו, לבין המספר הכולל של מצבי המיקרו האפשריים.

מעבר המערכת למצב בעל ההסתברות הגבוהה ביותר

ככל שהמספר Z_1 גדול יותר, כך גדולה ההסתברות לקיום המצב המקרוסקופי הנתון, וזמן רב יותר תשהה המערכת במצב זה. התפתחות המערכת מתרחשת במגמת המעבר ממצבים בעלי הסתברות נמוכה למצבים בעלי הסתברות גבוהה יותר.

זאת הסיבה לאי-ההפיכות של תהליכי המקרו – למרות ההפיכות של חוקי המיקרו, השולטים בתנועות החלקיקים הבודדים. התהליך ההפוך איננו בלתי אפשרי; הוא רק בלתי סביר. מכיוון שכל תהליכי המיקרו בעלי סבירות שווה, עשוי עקרונית להיווצר מצב מקרוסקופי על-ידי מספר קטן של מצבי מיקרו; אולם מצב זה נדיר במיוחד, ואל לנו להתפלא אם לעולם לא נפגוש מצבים אלה. המצב הסביר

תהליכים בלתי הפיכים

ביותר הוא מצב של שיווי-משקל תרמי, כלומר מצב שבו המספר הגדול ביותר של מצבי המיקרו.

ברור פחות התהליך של מעבר החום מגוף חם לגוף קר, אולם גם כאן מדובר באותה מהות של אי-ההפיכות. טרם מעבר החום יש שתי קבוצות של מולקולות: בגוף החם – אלה בעלות אנרגיה קינטית ממוצעת גבוהה יותר, ובגוף הקר – מולקולות בעלות אנרגיה קינטית ממוצעת קטנה. בסוף התהליך, כאשר מתייצב שיווי-המשקל התרמי, שייכות כל המולקולות לקבוצת מולקולות אחת, שבה לכולן אותה אנרגיה קינטית ממוצעת. המצב המסודר יותר, שבו מופרדות המולקולות לשתי הקבוצות, חדל מלהתקיים.

אי-ההפיכות של התהליכים קשורה בעובדה, שמצבים מקרוסקופיים בלתי יציבים הם בעלי סבירות נמוכה. מצבים אלה נוצרים באופן טבעי כתוצאה מאבולוציה של היקום – או באופן מלאכותי על-ידי אדם. לדוגמה: מתקבלים מצבים בלתי יציבים במיוחד, כאשר מחממים גוף של מנוע שריפה פנימית עד לטמפרטורות, הגבוהות במאות מעלות מטמפרטורת הסביבה.

התרווחות ודחיסה של ארבע מולקולות גז

נסתכל בדוגמה, המאפשרת לחשב הסתברויות של מצבים שונים, והמראה בבירור כיצד הגדלת מספר החלקיקים במערכת גורמת לתהליכים להיעשות בלתי הפיכים – למרות ההפיכות של חוקי התנועה של חלקיקי המיקרו.

בכלי נמצא גז, המכיל ארבע מולקולות בלבד. בתחילה נמצאות כל המולקולות בחצי השמאלי של הכלי, המופרד על-ידי המחיצה מהחצי הימני (ציור 169א). נסיר את המחיצה – והגז יתרווח וימלא את כל הכלי. נחשב את הסתברות המצב, שבו יידחס הגז שוב, דהיינו, המולקולות יתקבצו במחצית האחת של הכלי.

בדוגמה זו מתאפיין מצב המיקרו בציון מספר המולקולות, הנמצאות במחצית האחת של הכלי, ללא התייחסות לזהותן הפרטנית של המולקולות שנמצאות בו. מצבי המיקרו מוגדרים על-ידי פילוג המולקולות לפי חצאי הכלי עם ציון "שמות" המולקולות הנמצאות בכל תא. נמספר את המולקולות על-ידי הספרות 1, 2, 3, 4. בסך הכול אפשריים 16 מצבי מיקרו שונים, וכולם מתוארים בציור 169א – ה.

הסתברות המצב, שבו יתכנסו כל המולקולות בחצי אחד (למשל השמאלי) של הכלי, היא:

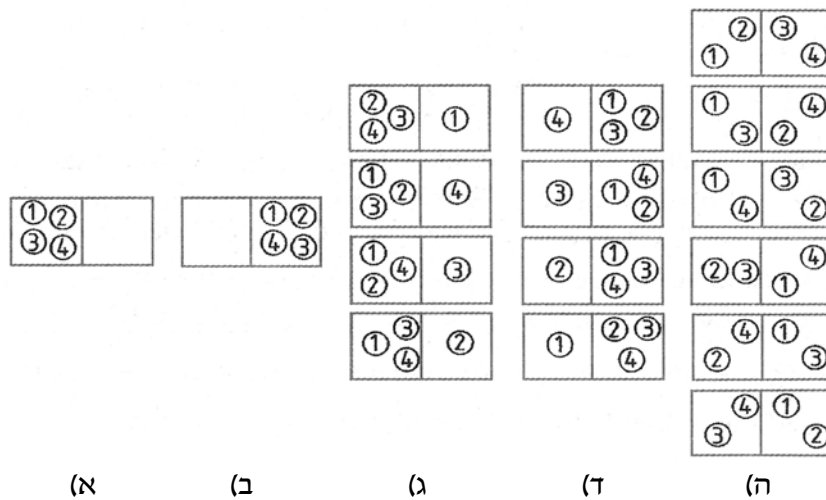
תהליכים בלתי הפיכים

$$W_1 = \frac{Z_1}{Z} = \frac{1}{16}$$

מכיוון שלמצב המקרוסקופי הנתון מתאים מצב מיקרו אחד (ציור 169א או ציור 169ב).

הסתברות המצב, שבו יתפלגו המולקולות באופן שווה בשני צידי הכלי, יהיה פי

$$W_2 = \frac{6}{16} = \frac{3}{8} \quad \text{6 גבוה יותר:}$$



ציור 169

מכיוון שלמצב המקרו הנתון מתאימים שישה מצבי מיקרו (ציור 169ה).

הסתברות המצב, שבחצי אחד של הכלי – לדוגמה בחצי השמאלי – יהיו שלוש

מולקולות, ובחצי השני, בהתאמה, מולקולה אחת, היא (ציור 169 ג-ו-ד):

$$W_3 = \frac{4}{16} = \frac{1}{4}$$

רוב הזמן תהיינה המולקולות מפוזרות בין שני החצאים שווה בשווה – זה

המצב הסביר ביותר; אולם בערך במשך $\frac{1}{16}$ מכל זמן הצפייה תהיינה המולקולות

במחצית האחת של הכלי. אם כך, תהליך ההתרווחות הוא הפיך, והגז יידחס שוב

לאחר פרק זמן קצר יחסית.

התרווחות גז המורכב ממולקולות רבות

היפוך תהליך ההתרווחות אפשרי עבור מספר קטן של מולקולות. אם מספר המולקולות גדול, תהיה התוצאה שונה לגמרי. נחשב את הסתברות המצב, שבו תתכנסנה המולקולות במחצית האחת של הכלי, כאשר מספרן רב.

מולקולות של גז אידיאלי נעות באופן בלתי תלוי זו בזו. ההסתברות שמולקולה אחת מסוימת תימצא במחצית השמאלית של הכלי שווה ל- $\frac{1}{2}$. זו גם ההסתברות עבור מולקולה אחרת. האירועים בלתי תלויים, וההסתברות ששתי המולקולות תימצאנה במחצית השמאלית של הכלי שווה למכפלת ההסתברויות:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4} = \frac{1}{2^2}$$

ההסתברות להימצאות שלוש מולקולות במחצית האחת של הכלי שווה ל- $\frac{1}{2^3}$, ושל ארבע: $\frac{1}{2^4}$. ערכי הסתברות אלה התקבלו כאשר ניתחנו התפלגות של מספר מועט של מולקולות בכלי.

אולם אם ניקח את המספר האמיתי של מולקולות הגז ב- 1 cm^3 בתנאים רגילים ($n = 3 \cdot 10^{19}$), ההסתברות שכל המולקולות תימצאנה במחצית האחת

$$\text{של הכלי, שנפחו } 1 \text{ cm}^3, \text{ תהיה מזערית: } \frac{1}{2^{3 \cdot 10^{19}}}$$

לכן עקב המספר העצום של המולקולות במערכות המקרו התהליכים בטבע באופן מעשי בלתי הפיכים. עקרונית התהליכים ההפוכים אפשריים, אולם הסתברותם קרובה לאפס. כך, למשל, הימצאות כל מולקולות האוויר במחצית האחת של חדר הלימוד, כאשר התלמידים היושבים במחצית האחרת של החדר וצפויים לחנק, אינו מנוגד לחוקי הטבע – אולם אירוע כזה לא קרה לעולם, וכנראה לא יקרה בעתיד. קטנה מדי ההסתברות, שאירוע מעין זה התרחש אי-פעם בכל משך קיומו של היקום – כמה מיליארדי שנים. בהערכה מקורבת זהה הסתברות זו להסתברות ש-20,000 קופים יקלידו ללא שגיאה אחת את היצירה "מלחמה ושלום" של טולסטוי.

וקטור הזמן

בכל התהליכים קיימת מגמה מועדפת, שבה מתרחשים תהליכים מעצמם ממצב

תהליכים בלתי הפיכים

מסודר יותר למצב מסודר פחות. ככל שמצב המערכת מסודר יותר, כן קשה לשחזרו מהמצב הלא מסודר. כך, למשל, הרבה יותר קל לשבור זכוכית מאשר לייצרה ולהתקינה במשקוף; הרבה יותר קל להרוג יצור חי מאשר להחיותו – אם זה אפשרי בכלל. "אלוהים יצר נמלה; אם תמעך אותה, היא תמות", כתב הביוכימאי האמריקאי **סנט דיינדי** בשורותיו הראשונות של ספרו "ביואנרגטיקה".

הכיוון המועדף של הזמן - וקטור הזמן - המורגש על-ידינו, מודרך על-ידי מגמת התהליכים בטבע.

גבולות השימוש של החוק השני של התרמודינמיקה

ההסתברות של התהליכים ההפוכים – מעבר מערכות המְקרו ממצבי שיווי-משקל למצבים בלתי יציבים – נמוכה מאוד; אולם לגבי נפחים קטנים, המכילים מספר קטן של מולקולות, מתחילה הסתברות הסטייה ממצב יציב להיות משמעותית. הסטיות האקראיות האלה משיווי-המשקל מכונות **פלוקטואציות**. כך פלוקטואציות של צפיפות הגז באזורים, שגודלם כסדר הגודל של אורך הגל של האור הנראה, גורמות לפיזור האור באטמוספירה של כדור הארץ ולצבע התכלת של הרקיע; ופלוקטואציות של לחץ בנפח קטן גורמות לתנועת בראון.

הפלוקטואציות משמשות הוכחה חשובה ביותר לתורת תהליכי המְקרו הבלתי יציבים של **בולצמן**. החוק השני של התרמודינמיקה מתקיים אך ורק במערכת, שבה מספר עצום של חלקיקים. בנפח קטן מתחילות הסטיות מחוק זה להיות משמעותיות.

אי-ההפיכות של תהליכי הטבע נעוצה בנטיית המערכות לעבור למצב בעל הסבירות הגבוהה ביותר, מצב של אי-סדר מרבי.

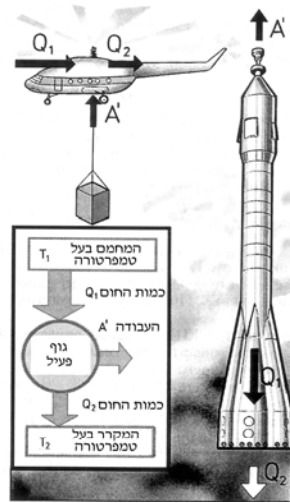
§84 עקרונות הפעולה של מנועי חום הנצילות של מנועי חום

מאגרי האנרגיה הפנימית בקרקע ובאוקיינוסים הם למעשה אינסופיים, אולם אין זה מספיק להיות הבעלים של המאגרים הללו; יש לדעת להפעיל באמצעות מאגרי האנרגיה את המכונות בבתי חרושת, את אמצעי התחבורה, הטרקטורים ומכונות אחרות, לסובב ליבות של מחוללי חשמל ועוד. האנושות זקוקה למכונות לביצוע עבודה. רוב המכונות הן מנועי חום, דהיינו מכונות ההופכות את האנרגיה הפנימית האצורה בדלק לאנרגיה מכנית.

תהליכים בלתי הפיכים

עקרונות הפעולה של מנועי חום

כדי שמנוע יבצע עבודה, חייב להיות הפרש לחצים משני צדי בוכנת המנוע או משני צדי להבי הטורבינה. בכל מנועי החום נוצר הפרש לחצים זה על חשבון העלאת טמפרטורה של גוף פעיל למאות או לאלפי מעלות מעל לטמפרטורת הסביבה. העלאת הטמפרטורה הזאת מתרחשת בשריפת הדלק (ציור 170).



ציור 170

בכל מנועי החום הגוף הפעיל הוא גז המבצע עבודה בהתרווחותו. נסמן את הטמפרטורה ההתחלתית של הגוף הפעיל (הגז) באמצעות T_1 . זוהי טמפרטורת הקיטור בטורבינות או במכונות הקיטור. במנועי בעירה פנימית ובטורבינות גז מתרחשת העלאת הטמפרטורה עקב שריפת דלק בתוך המנוע עצמו. טמפרטורה T_1 מכונה **טמפרטורת המחמם**.

תפקיד המקרר

במהלך ביצוע העבודה מאבד הגז אנרגיה, ובהכרח מתקרר לטמפרטורה T_2 . בדרך כלל

טמפרטורה T_2 מעט יותר גבוהה מטמפרטורת הסביבה ומכונה **טמפרטורת המקרר**. כמקרר תשמש האטמוספירה או אמצעי קירור מיוחדים לעיבויים של האדים העובדים, והם מכונים **מעבים**. במקרה האחרון עשויה טמפרטורת המקרר להיות נמוכה יותר מטמפרטורת האטמוספירה.

בהתרווחותו לא יכול הגוף הפעיל של המנוע להפוך את כל האנרגיה הפנימית שבו לעבודה, כי חלק מהחום נמסר למקרר (לאטמוספירה, למשל) עם האד המעובה או עם גזי פליטה של מנועי הבעירה הפנימית ושל הטורבינות הפועלות באמצעות גז. חלק זה של האנרגיה הפנימית אובד.

מנוע החום מבצע עבודה על חשבון האנרגיה הפנימית של גוף פעיל, ובתהליך זה עובר החום מגופים חמים (המחמם) לקרים יותר (המקרר).

המבנה הכללי של מנוע החום מתואר בציור 170: עקב שריפת הדלק מקבל הגוף

ההליכים בלתי הפיכים

הפעיל של המנוע את כמות החום Q_1 , מבצע עבודה A' , ומוסר למקרר את כמות החום $Q_2 < Q_1$.

הנצילות של מנוע החום

ההתמרה החלקית של האנרגיה הפנימית של הגז לעבודת מנועי החום היא תוצאת אי-ההפיכות של התהליכים בטבע. אילו יכול היה החום לחזור ולזרום מעצמו מהמקרר למחמם, אפשר היה להפוך את כל האנרגיה הפנימית לעבודה מועילה בעזרת כל מנוע חום.

לפי חוק שימור האנרגיה, העבודה המתבצעת על-ידי מנוע שווה:

$$(13.17) \quad A' = |Q_1| - |Q_2|$$

כאשר: Q_1 – כמות החום שהתקבלה מהמחמם; Q_2 – כמות החום שהועברה למקרר.

נצילות מנוע החום היא היחס שבין העבודה A' , המתבצעת על-ידי המנוע, לבין כמות החום שהתקבלה מהמחמם:

$$(13.18) \quad \eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

מכיוון שבכל המנועים עוברת כמות מסוימת של חום למקרר, אזי: $\eta < 1$. הנצילות של מנוע חום נמצאת ביחס ישר להפרש הטמפרטורות של המחמם והמקרר. אם $T_1 - T_2 = 0$, לא יוכל המנוע לעבוד.

הערך המרבי של נצילות מנועי החום

חוקי התרמודינמיקה מאפשרים לחשב את הנצילות המרבית של מנוע החום, הפועל עם המחמם בטמפרטורה T_1 ועם המקרר בטמפרטורה T_2 . לראשונה עסק בכך המהנדס והמדען הצרפתי **סזי קרנו** (1796 – 1832) בעבודתו "המחשבות על הכוח המניע של האש ועל המכונות היכולות לפתח את הכוח הזה" (1824). קרנו פיתח את רעיון מכונת החום האידיאלית, הפועלת באמצעות גז אידיאלי כגוף הפעיל. נצילות מכונה זו:

$$(13.19) \quad \eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

כצפוי, נמצאת נצילות המכונה של קרנו ביחס ישיר להפרש של ערכי הטמפרטורה המוחלטת בין המחמם למקרר.

חשיבותה העיקרית של נוסחה זו נעוצה בקביעתו של קרנו: **נצילותה של כל מכונת חום אמיתית, הפועלת באמצעות מחמם הנמצא בטמפרטורה T_1 ועם מקרר הנמצא בטמפרטורה T_2 , לא יכולה להיות גבוהה יותר מנצילות מכונת החום האידיאלית.**

הנוסחה (13.19) מציבה גבול תיאורטי לערך המרבי של נצילות מנועי חום. היא מראה שמנוע חום יעיל יותר ככל שטמפרטורת המחמם גבוהה וטמפרטורת המקרר נמוכה. הנצילות $\eta = 1$ מותנית בטמפרטורת מקרר, שערכה האפס מוחלט.

אולם בפועל לא יכולה טמפרטורת המקרר להיות נמוכה מטמפרטורת אוויר הסביבה. לעומת זאת אפשר להעלות את טמפרטורת המחמם, אולם כל חומר שהוא (מוצק, למשל) – מוגבלת עמידותו לחום; תוך כדי חימום הוא מאבד בהדרגה את תכונותיו האלסטיות, ובטמפרטורה גבוהה דִּיֵּה הוא ניתך.

המאמצים העיקריים של מהנדסי המכונות מכוונים להגדלת נצילותם של מנועים על-ידי הקטנת החיכוך שבין החלקים, הקטנת איבודי דלק בעקבות שריפה לא מלאה ועוד. האפשרויות להגדלת הנצילות באמצעים אלה עדיין רבות. לדוגמה: טמפרטורת האדים בטורבינת קיטור בתחילת התהליך ובסופו הן, בהתאמה: $T_1 = 800 \text{ K}$ ו- $T_2 = 300 \text{ K}$. עבור טמפרטורות אלה הערך המרבי של הנצילות שווה:

$$\eta_{\max} = 62\% \quad \text{או} \quad \eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 0.62$$

עקב כל הסוגים של איבודי האנרגיה ערך הנצילות שווה בפועל ל-40%. הנצילות המרבית של מנועי דיזל מגיעה לכ-44%.

העלאת הנצילות של מנועי חום וקירובה לערך המרבי האפשרי הן משימה טכנולוגית רבת-חשיבות.

מנועי חום מבצעים עבודה הודות להפרש לחץ הגז על משטחי הבוכנה או על להבי הטורבינה. הפרש לחצים זה נוצר באמצעות הפרש האנרגיות הפנימיות של הגז משני צדי הבוכנה או הלהב. הנצילות המרבית האפשרית נמצאת ביחס ישר להפרש הטמפרטורות בין המחמם והמקרר, וביחס הפוך לטמפרטורה המוחלטת של המחמם.

מנוע החום לא יכול לעבוד ללא מקרר; תפקיד זה מבצעת בדרך כלל האטמוספירה.

?

1. איזו מכונה מכונה מנוע חום?
2. מה תפקידם של המחמם, המקרר והגוף הפעיל במנוע חום?
3. מדוע לא ניתן להשתמש במנועי חום באנרגיה הפנימית של מי האוקיינוס?
4. מהי הנצילות של מנוע חום?
5. מהו הערך המרבי של נצילות מנוע החום?

דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון התרגילים של פרק זה משתמשים בחוק הראשון של התרמודינמיקה בצורה (13.10) או (13.11).

כדי לפתור תרגילים צריך לדעת כיצד לחשב את העבודה בעזרת הנוסחה (13.4), ואת כמות החום באמצעות הנוסחאות (13.5), (13.6), (13.7), (13.8), (13.9). יש לזכור שהערכים ΔU , Q , A עשויים להיות חיוביים וגם שליליים.

בפתרון רוב התרגילים לא משתמשים בצורה הכללית של החוק הראשון של התרמודינמיקה, אלא בניסוחים המיוחדים המתאימים לתהליכים מסוימים. את התרגילים במעבר חום במערכת מבודדת פותרים בעזרת משוואת שיווי-המשקל התרמי (13.15).

כמו בפתרון התרגילים בחוקי הגזים, יש לקבוע בתרגילים של פרק זה את המצב ההתחלתי של המערכת, את המצב הסופי, ואת הפרמטרים האופייניים שלה.

תהליכים בלתי הפיכים

1. כדור פורח שנפחו $V = 500 \text{ m}^3$ מלא בגז הליום בלחץ $p = 10^5 \text{ Pa}$. כתוצאה מחום קרינת השמש עלתה טמפרטורת הגז מ- $t_1 = 10^\circ \text{C}$ ל- $t_2 = 25^\circ \text{C}$. בכמה גדלה האנרגיה הפנימית של הגז?

פתרון

הליום הוא גז חד-אטומי, ולכן האנרגיה הפנימית שלו מחושבת לפי הנוסחה (13.1). בטמפרטורה T_1 שווה האנרגיה הזאת $U_1 = \frac{3m}{2M} RT_1$; בטמפרטורה T_2 שווה האנרגיה ל- $U_2 = \frac{3m}{2M} RT_2$. הפרש האנרגיות שווה:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3m}{2M} R(T_2 - T_1)$$

מסת ההליום אינה ידועה, אולם אפשר לבטא אותה בעזרת המשוואה של מנדלייב-קלפיירון, ובאמצעות הטמפרטורה, הלחץ ונפח הגז ההתחלתיים:

$$\frac{mR}{M} = \frac{pV}{T_1}$$

נציב את הערך של $\frac{mR}{M}$ במשוואת שינוי האנרגיה, ונקבל:

$$\Delta U = \frac{3}{2} pV \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \approx 4 \cdot 10^6 \text{ J}$$

2. בתוך צילינדר, תחת בוכנה כבדה, נמצא פחמן דו-חמצני ($M = 0.044 \text{ kg/mole}$) שמסתו $m = 0.2 \text{ kg}$. הגז מחומם ל- $\Delta T = 88 \text{ K}$. איזו עבודה מבצע הגז?

פתרון

הגז מתרווח בלחץ קבוע מסוים p , שנוצר על-ידי האטמוספירה והבוכנה. במקרה זה שווה עבודת הגז: $A' = p(V_2 - V_1)$, כאשר V_1, V_2 הנפח ההתחלתי והנפח

הסופי של הגז. נשתמש במשוואת מנדלייב-קלפיירון $pV = \frac{m}{M} RT$, ונבטא את המכפלות pV_1 ו- pV_2 באמצעות $\frac{m}{M} RT_1$ ו- $\frac{m}{M} RT_2$. אזי:

$$A' = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) \approx 3.3 \text{ J}$$

3. גז נמצא בצילינדר, שחתכו $S = 200 \text{ cm}^2$, ומתרווח כשמועברת אליו כמות חום $Q = 1.5 \cdot 10^5 \text{ J}$. לחץ הגז נשאר קבוע ושווה ל- $p = 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}$.

בכמה השתנתה האנרגיה הפנימית של הגז, אם ידוע שהבוכנה זזה למרחק

$$? \Delta h = 30 \text{ cm}$$

פתרון

בהתאם לחוק הראשון של התרמודינמיקה בצורה (13.11):

$$Q = \Delta U + A'$$

כאשר: $A' = p\Delta V = pS\Delta h$ – העבודה שבוצעה על-ידי הגז. מכאן מקבלים:

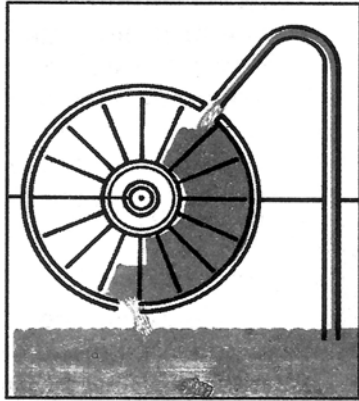
$$\Delta U = Q - pS\Delta h = 30 \text{ kJ}$$

מקבץ תרגילים 15

1. כיצד תשתנה האנרגיה הפנימית של גז אידיאלי חד-אטומי, אם לחץ הגז יגדל פי 3 ונפחו יקטן פי 2?
2. גז, הנמצא בלחץ $p = 10^5 \text{ Pa}$, התרווח בתהליך איזוברי וביצע עבודה ששיעורה $A = 25 \text{ J}$. בכמה גדל נפח הגז?
3. למערכת תרמודינמית הועברה כמות חום של 200 J . כיצד השתנתה האנרגיה הפנימית של המערכת, אם תוך כדי המעבר ביצעה המערכת עבודה של 400 J ?
4. מוט של פטיש אוויר מונע על-ידי אוויר דחוס. מסת האוויר הנמצא בתוך הצילינדר משתנה בזמן מהלך הבוכנה מ- 0.1 g ל- 0.5 g . בהנחה שלחץ אוויר בצילינדר וטמפרטורת האוויר קבועים (27°C), מצאו את עבודת הגז במהלך בוכנה אחד. המסה המולרית של האוויר היא $M = 0.029 \text{ kg/mole}$.
5. שני כלים אטומים זהים, בעלי נפח של ליטר אחד, הועמדו על שני מקורות חום זהים. בכלי אחד נמצאים מים, ובכלי האחר – אוויר. איזה כלי יתחמם עד 50°C מהר יותר? מדוע?
6. להלן רעיון למנוע נצחי (ציור 171): כלי סגור מחולק לשני חצאים באמצעות מחיצה אטומה, דרכה עוברים צינור וגלגל מים, הנמצא במעטפת שבה שני פתחים. מגדילים את הלחץ בחלקו התחתון של הכלי מעל ללחץ שבחלק העליון, ואז עולים המים בצינור ונשפכים על להבי גלגל המים. גלגל המים טובב, והמים נשפכים מהמעטפת מהפתח התחתון. מדוע לא יסתובב גלגל הכפות לנצח?

תהליכים בלתי הפיכים

7. האם עבודת הגז בתהליכים 1-2, 2-3 ו-3-1, המתוארים בציור, 149 חיובית או שלילית? האם הגז מקבל – או מוסר – חום בכל אחד מהתהליכים? הסבירו.



ציור 171

8. טמפרטורת גז בעל מסה m ומסה מולרית M עולה ב- ΔT פעם אחת תוך כדי לחץ קבוע p , ופעם שנייה – תוך כדי נפח קבוע V . בכמה שונים ערכי כמויות החום המועברות לגז בשני המקרים?

9. מה כמות החום, הדרושה לחימום איזוכורי של הליום בעל מסה 4 kg

ב- 100 K ?

10. תוך כדי התפשטות איזותרמית ביצע הגז עבודה שערכה 20 J . מהי כמות החום שסופקה לגז?

11. מה התוספת לאנרגיה הפנימית של מימן, שמסתו 2 g , לאחר חימום איזוברי ב- 10 K ? החום הסגולי של מימן בלחץ קבוע הוא $14 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

12. בצילינדר המדחס דוחסים גז חד-אטומי אידיאלי, שכמות החומר שלו היא 4 mole . מצאו בכמה עלתה טמפרטורת הגז במהלך בוכנה אחד, אם ידוע שבתהליך זה בוצעה עבודה של 500 J . התהליך אדיאבטי.

13. לתוך מד-קלוריות, המכיל 0.25 kg של מים בטמפרטורה 25°C , מכניסים אדי מים שמסתם 10 g בטמפרטורה 100°C . איזו טמפרטורה תתייצב במד-קלוריות, אם קיבול החום הסגולי שלו 1000 J/K ?

14. בתוך מד-קלוריות נמצאים 0.4 kg של מים בטמפרטורה 10°C . לתוך המים הכניסו 0.6 kg קרח, שהטמפרטורה שלו -40°C . איזו טמפרטורה תתייצב בתוך מד-קלוריות, אם קיבול החום הסגולי שלו זניח?

15. מה צריכה להיות טמפרטורת המחמם, כדי שניתן יהיה, עקרונית, להשיג נצילות של 80% במכונת החום, שטמפרטורת המקרר שלה 27°C ?

16. במהלך עבודתה של מכונת חום בפרק זמן מסוים קיבל הגוף הפעיל מהמחמם

תהליכים בלתי הפיכים

כמות חום $Q_1 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ J}$, והעביר למקרר $Q_2 = -1.2 \cdot 10^6 \text{ J}$.
 מה הנצילות של המכונה יחסית לנצילות המרבית האפשרית, אם
 הטמפרטורות של המחמם ושל המקרר הן 250°C ו- 30°C , בהתאמה?

תקציר פרק 13

בגופים מקרוסקופיים אצורה אנרגיה פנימית, השווה לסכום האנרגיות
 הקינטיות של התנועה הבלתי מסודרת של המולקולות, המרכיבות את הגוף;
 ואנרגיה פוטנציאלית של פעולות הגומלין שבין המולקולות. האנרגיה הפנימית היא
 פונקציה של הפרמטרים התרמודינמיים טמפרטורה ונפח.

בגז חד-אטומי אידיאלי תלויה האנרגיה הפנימית בטמפרטורה בלבד:

$$U = \frac{3m}{2M} RT$$

בהתאם לחוק הראשון של התרמודינמיקה, שינוי האנרגיה הפנימית של
 המערכת, המתרחש במעבר ממצב אחד לאחר, שווה לסכום עבודת הכוחות
 החיצוניים וכמות החום המועברת למערכת:

$$\Delta U = A + Q$$

העבודה המתבצעת על המערכת שווה: $A = -p\Delta V$, כאשר: p – לחץ; ΔV –
 שינוי הנפח. המערכת עצמה מבצעת את העבודה $A' = -A = p\Delta V$. כמות החום
 בחימום ובקירור שווה ל- $Q = cm\Delta T$, כאשר: c – חום סגולי; ΔT – הפרש
 הטמפרטורה. חום נבלע בהתאדות ובהיתוך, ונפלט בהתעבות ובהתמצקות
 [הנוסחאות (13.6) – (13.9)].

העבודה וכמות החום הם מאפייני התהליכים, שבהם משתנה האנרגיה
 הפנימית.

במהלך תהליך איזוכורי ($V = \text{const}$) שווה העבודה לאפס ו- $\Delta U = Q$.

בתהליך איזותרמי ($T = \text{const}$) אין האנרגיה הפנימית של הגז האידיאלי

משתנה, ו- $Q = A'$.

בתהליך איזוברי ($p = \text{const}$) מושקע החום שמועבר למערכת בשינוי האנרגיה

הפנימית של המערכת ובביצוע עבודה:

תהליכים בלתי הפיכים

$$Q = \Delta U + A'$$

בתהליך אדיאבטי (במערכת מבודדת):

$$Q = 0, \Delta U = A$$

תהליך החלפת החום במערכת מבודדת ללא ביצוע העבודה מתואר על-ידי משוואת שיווי המשקל התרמי:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0$$

כאשר: Q_1, Q_2, Q_3 – כמויות החום שהגופים קיבלו או החזירו.

התהליכים שמתרחשים בטבע בגופים מקרוסקופיים בלתי הפיכים; לדוגמה: בלא גורם זר ומניע עובר חום מגוף חם לגוף קר, ולא להפך; אנרגיה מכנית עשויה להפוך לאנרגיה פנימית.

לאחר איסוף מידע ניסויי רב לגבי התהליכים הבלתי הפיכים נוסח החוק השני של התרמודינמיקה.

מחוקי התרמודינמיקה נובע, שמנועי חום יכולים לבצע עבודה במהלך מעבר חום ממחמם למקרר. הערך המרבי של נצילות מנוע החום הוא:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

כאשר: T_1 – טמפרטורת המחמם; T_2 – טמפרטורת המקרר.

העלאת הנצילות של מנועי חום וקירובה לערך המרבי האפשרי הן משימות טכנולוגיות בעלות חשיבות עליונה.

תהליכים בלתי הפיכים