

מפגש 2 – מעברי מצבי צבירה קלסיים ומיוחדים





בסוף השיעור הקודם ראינו את עיסת עמילן התירס במים

האם היא מוצקה או נוזלית?

מוצקה	נוזלית
שומרת על צורתה כאשר עושים עליה פעולות במהירות	זורמת כאשר בוחשים אותה או מזיזים אותה באיטיות
ניתן לגלגל ממנה כדור במהירות גבוהה	כאשר מפסיקים לעבד אותה במהירות היא נוזלת מהידיים

העיסה שבחנו היא נוזל מיוחד הנקרא נוזל "לא ניוטוני" –
הצמיגות שלו אינה אחידה, אלא נקבעת מצורת הפעולה עליו.

<http://www.youtube.com/watch?v=f2XQ97XHjVw&mode=related&search>

<http://www.youtube.com/watch?v=3zoTKXXNQUIU&NR=1>



קשר וטמפרטורה

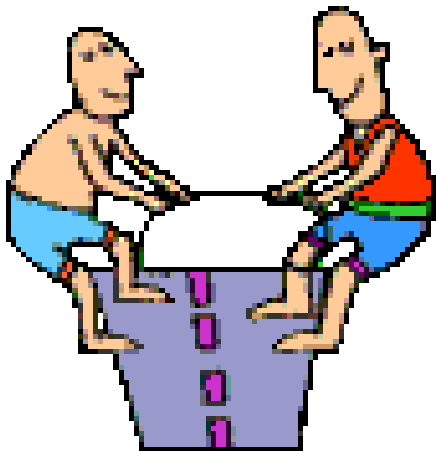
ראינו בשיעור הקודם שמצב הצבירה של חומר מתואר על ידי שני היבטים מתחרים:

- טמפרטורה - התנועה הלא מסודרת של החלקיקים
- קשר בין החלקיקים

מדוע מתחרים?

- תנועה אקראית של חלקיקים "מעדיפה" מצב של חוסר סדר ומרחק גדול בין החלקיקים.
- קשר בין חלקיקים "מעדיף" שהם יהיו קרובים זה לזה.

המערכת מתארגנת בהתאם לשני אלה





אותו חומר, טמפרטורות שונות

מצב	טמפ'	קשר	תאור ההתנהגות במיקרו
אדי מים	טמפרטורה גבוהה, לדוגמא 120°C	אותו קשר אפשרי: קשרים בין מולקולריים (קשרי מימן) מתקיימים רק בטווח קצר	החלקיקים נעים בתנועה אקראית לכל הכיוונים, מתנגשים בהתנגשויות אלסטיות (סכום אנרגיות התנועה של החלקיקים הפוגעים זהה לזה של החלקיקים המוחזרים).
מים	טמפרטורה "באמצע" לדוגמא 25°C		החלקיקים גם "מתנדדים" במקום וגם נעים ממקום למקום למרווחים פנויים תוך שהם מתנגשים זה בזה.
קרח	טמפרטורה נמוכה לדוגמא -20°C		החלקיקים "מתנדדים" במקום, "כלואים" במרחב מוגבל על ידי שכניהם



אותה טמפרטורת חדר, חומרים שונים

מצב	טמפ'	קשר	תאור ההתנהגות במיקרו
אוויר	טמפרטורת החדר 25°C	קשרי ון דר ולס חלשים (בין מולקולות לא מקוטבות)	החלקיקים נעים בתנועה אקראית לכל הכיוונים, מתנגשים בהתנגשויות אלסטיות (סכום אנרגיות התנועה של החלקיקים הפוגעים זהה לזה של החלקיקים המוחזרים).
מים		קשרים בין מולקולריים (קשרי מימן) מתקיימים רק בטווח קצר	החלקיקים גם "מתנודדים" במקום וגם נעים ממקום למקום למרווחים פנויים תוך שהם מתנגשים זה בזה.
מלח בישול		קשר כימי (יוני)	החלקיקים "מתנודדים" במקום, "כלואים" במרחב מוגבל על ידי שכניהם



בהמשך נלמד

כיצד שני ההיבטים

- הטמפרטורה
- גודל האינטראקציה בין החלקיקים

קובעים באופן כמותי את מצב הצבירה.



מי אמר למי?

המשפטים הבאים מתארים דו שיח בין מצבי צבירה
בתיאור מיקרו ובתיאור מאקרו. נסו לנחש מי הוא מי.

בוא'נה תגיד
לחלקיקים שלך
להפסיק להתרחק,
שיתפסו מקום ויהיו
מסודרים כמו אצלי.

אל תהיה כזה קשה
תתחיל לזרום קצת

את כזאת עצבנית
שבטמפרטורה שבה
אני הפכתי להיות
צמיג, את כבר
עברת את נקודת
הרתיחה שלך

החלקיקים שלך
ממש נמשכים אחד
אל השני, אצלי הם
לא שמים לב אחד
לשני בכלל עד שהם
מתנגשים

נכון שאתה משנה את
צורתך אבל אם תוכל
גם לשנות את הנפח
שלך כמוני, תהיה עוד
יותר מגניב



תהליכים בטבע

- עד כה דיברנו על אפיון חומרים המצויים במצב יציב כלשהו.
- דיברנו על כך שהמצב נגזר מסוגי האינטראקציות וממידת התנועתיות של החלקיקים, המתבטאת ברמת המאקרו כטמפרטורה.
- עתה נעבור לדבר על **תהליכים**.
- **תהליכים** הם התרחשויות המביאות לשינוי בצורת החומר ובתכונותיו.
- איזה סוגי תהליכים אנו מכירים?
- קוגניטיביים (למידה), ביולוגיים (אבולוציה), כימיים (שריפה), פיסיקליים (החזרה של אור ממראה).

יש המבדילים בין תהליך פיסיקלי של שינוי בחומר לתהליך כימי



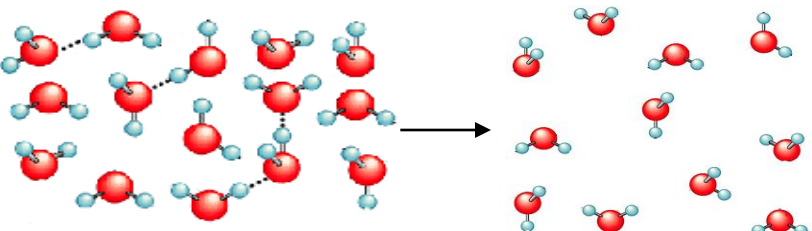
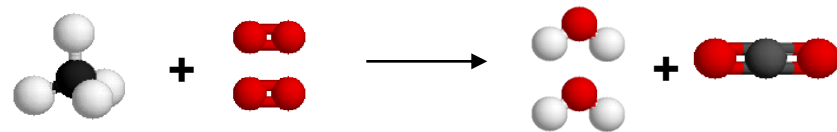
הציעו דוגמאות והגדרה

<u>תהליך פיסיקלי</u>	<u>תהליך כימי</u>
דוגמא:	דוגמא
הגדרה	הגדרה

מה ההבדל בין תהליך פיסיקלי לתהליך כימי?



דוגמא והגדרות

תהליך פיסיקלי	תהליך כימי
<p>דוגמאות: תהליך ערבוב של כוהל ומים, או תהליך רתיחה של מים</p> 	<p>דוגמא: תהליך שריפה של מתאן</p> 
<p>הגדרה: תהליך בו החומר עובר שינוי אך הקשרים הכימיים בין אטומי החומר אינם משתנים. לדוגמא: רתיחה, ערבוב, כיפוף (מוצק), דחיסה (גז)</p>	<p>הגדרה: תהליך בו חומר מסוים הופך לחומר אחר בעקבות שינויים בקשרים הכימיים בין האטומים. לדוגמא: שריפה של חומר דלק, החלדה של ברזל, תסיסה של יין</p>



קצת יותר על מעברים בין מצבי צבירה

- פעילות III
- בחלק זה נדגים תהליכים שונים המתרחשים כתוצאה משינויי הטמפרטורה ונדון בהבדל ביניהם.



ניתוח פעילות:

מעברים בין מצבי צבירה

טיגון ביצה	ביצה בחנקן נוזלי	שריפת נייר	התכת קרח	גומי בחנקן נוזלי	
					מה גרם לשינוי?
					תהליך כימי או פיסיקלי?

- אילו מהתהליכים הייתם מגדירים כמעבר מצב צבירה?
- איך הייתם מגדירים מעבר מצב צבירה?



מעבר בין מצבי צבירה

- מעבר בין מצבי צבירה מאופיין כשינוי הפיך בתכונות החומר כתלות בשינוי הטמפרטורה (או לחץ), זהו תהליך פיסיקלי.
- **טיגון הביצה ושריפת הנייר הם תהליכים כימיים היוצרים שינויים בתכונות החומר כתלות בשינוי הטמפרטורה אך אינם נקראים שינוי במצב צבירה.**
- ישנם תהליכים פיסיקליים בהם מצב הצבירה הקלאסי של החומר אינו משתנה, אך תכונותיו משתנות. איך נסווג תהליכים אלה?

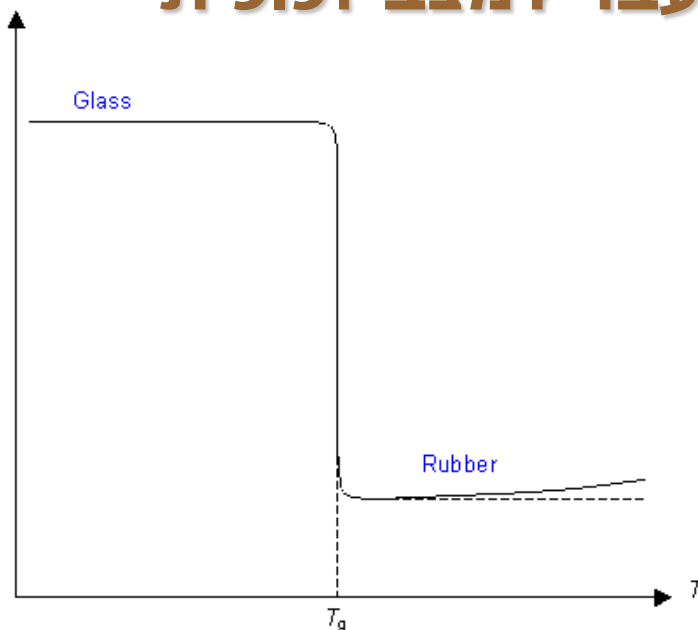


המעבר הזכוכיתי

- צינור הגומי שהינו מוצק גמיש הפך למוצק שביר.

- מצב הצבירה של צינור הגומי לאחר הטבילה בחנקן הנוזלי מכונה מצב זכוכיתי. המעבר למצב צבירה זה מכונה המעבר הזכוכיתי (Glass

Elastic Modulus



נקראת T_g (glass=g).

בגרף רואים את הירידה

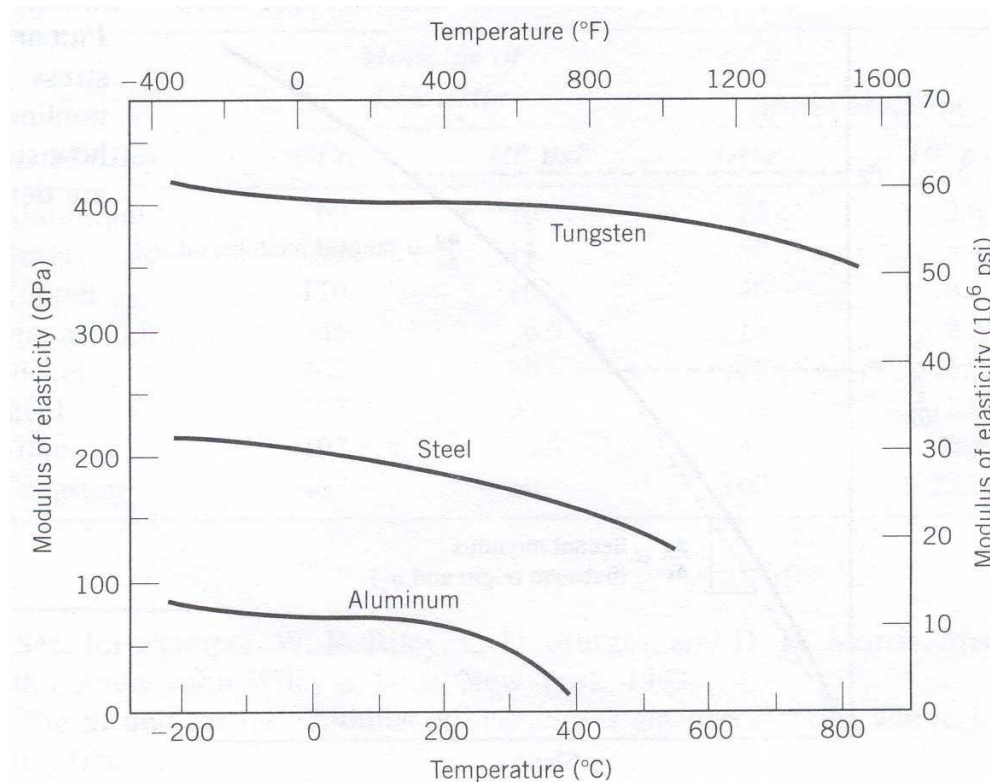
הפתאומית באלסטיות

(גמישות) החומר ב- T_g



האם קיים מעבר זכוכיתי גם במתכות?

הגרף הבא מציג את האלסטיות של מתכות שונות כתלות בטמפרטורה. האם מתכות אלה עוברות מעבר זכוכיתי?

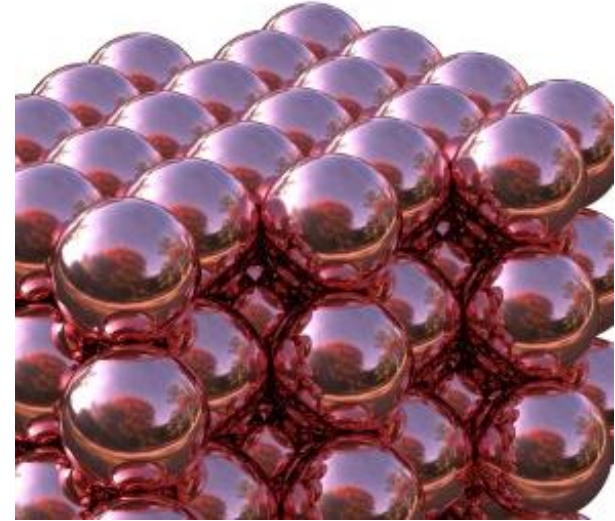




הסבר מיקרו- מוצק גבישי לעומת מוצק אמורפי



מוצק אמורפי

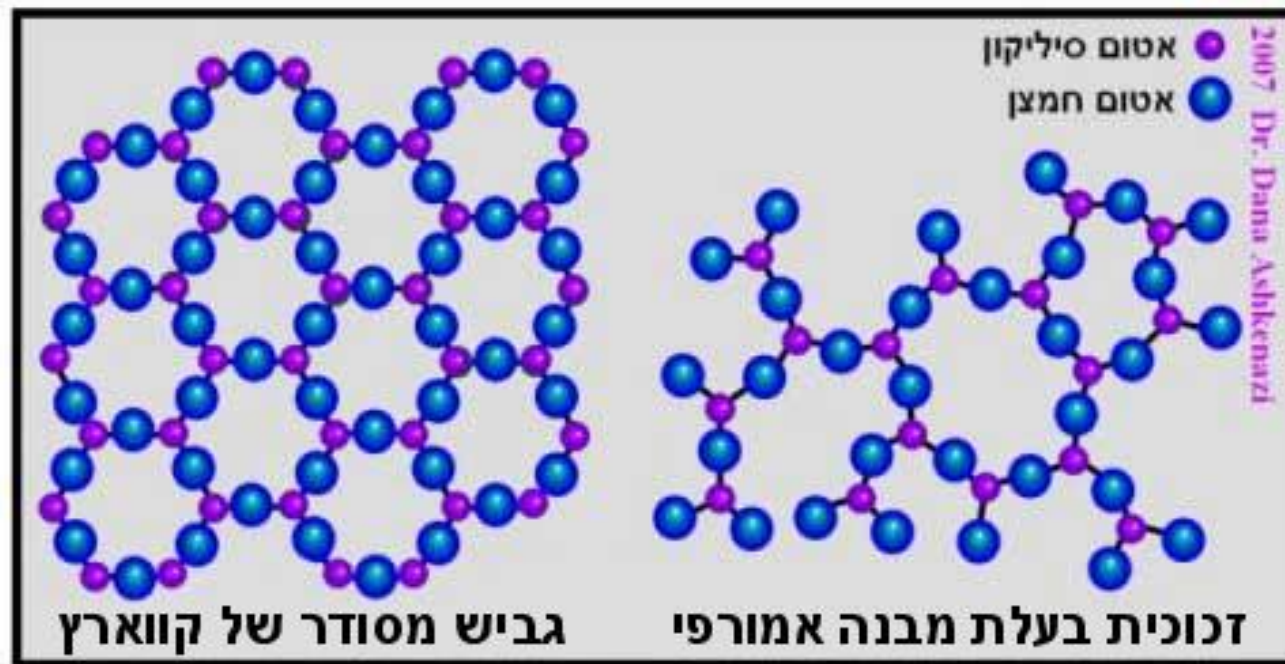


מתכת מסודרת

היווצרות מוצק אמורפי יכולה להתרחש בתהליך של קירור מהיר של נוזל. בדרך כלל, כאשר מקררים חומר המורכב ממולקולות קטנות, הזמן שלוקח להן להתארגן במבנה מסודר הוא קצר יותר מקצב הקירור. ולכן, התוצאה שמקבלים היא מוצק מסודר - גביש.



זכוכית – מוצק אמורפי SiO_2



זכוכית מאופיינת במצב לא מסודר. לכן, המצב המוצק הלא מסודר נקרא "מצב זכוכיתי". מצב זכוכיתי מתקבל כאשר קצב הקירור של נוזל הוא מהיר יותר מהקצב הנדרש למולקולות להסתדר בגביש.



זכוכית וקוורץ בתמונת מאקרו



קוורץ



מי זכוכית ומי קוורץ?

זכוכית



האם הזכוכית היא מוצק או נוזל?

**להלן ציטוט מתוך האנציקלופדיה הוירטואלית של
מט"ח ערך זכוכית:**

"...המבנה הגבישי של הזכוכית מיוחד בעיקר בשל היעדרו. במידה מסוימת הזכוכית היא אמורפית, שכן לאטומים המרכיבים אותה אין סידור קבוע.... כשמקררים זכוכית מותכת במהירות, אין מצב הצבירה משתנה בבת אחת, אלא בהדרגה, מנוזל צמיג המתמצק ככל שהוא מתקרר.

יש המגדירים את הזכוכית לפיכך, 'נוזל מוצק' – נוזל בעל צמיגות גבוהה".



מצב זכויותי גם במים

- נפח המים במצב מוצק גדול יותר מאשר במצב נוזלי וצפיפותם יורדת. זו הסיבה שהקפאה של רקמות חיות גורמת להרס תאים (הם מתפוצצים).
- אם מקררים כמות קטנה של מים במהירות גבוהה מאוד, גם מים יכולים לעבור למצב זכויותי.
- תהליך של הקפאה מהירה של דוגמא ביולוגית או כימית, (מיליוני מעלות בשנייה) גורם למים שבדוגמא לעבור למצב זכויותי משמע הם "קופאים" אך לא מספיקים להסתדר במבנה של קרח גבישי. הקפאה מהירה כזו משמרת את המבנה האמורפי של הדוגמא.
- משתמשים בטכניקת ההקפאה המהירה אם רוצים להתבונן בדוגמאות ביולוגיות או כימיות (המכילות מים) במיקרוסקופ אלקטרוני. במיקרוסקופ אלקטרוני אפשר להתבונן רק בדוגמאות מוצקות ואם הדוגמא מכילה מים, צריך להקפיאה בצורה כזו שלא ייווצרו גבישוני קרח היכולים לשבש את המדידה.



היווצרות מצב זכויותי בפולימרים

- במתכת ובמים, מגיעים למצב זכויותי **או** למצב מסודר, כתלות בקצב הקירור.
- ראינו בניסוי שפולימרים יכולים לעבור ממוצק בעל תכונות אלסטיות למוצק זכויותי, גם אם קצב הקירור לא מהיר במיוחד.
- מה במבנה הפולימר מסביר את ההבדל הזה בהתנהגות?



מהו פולימר?

**פולימרים הם מולקולות ארוכות
וגמישות הנמצאות בטבע בצמחים
וביצורים חיים, וכיום גם ניתנות להכנה
באופן מלאכותי.**

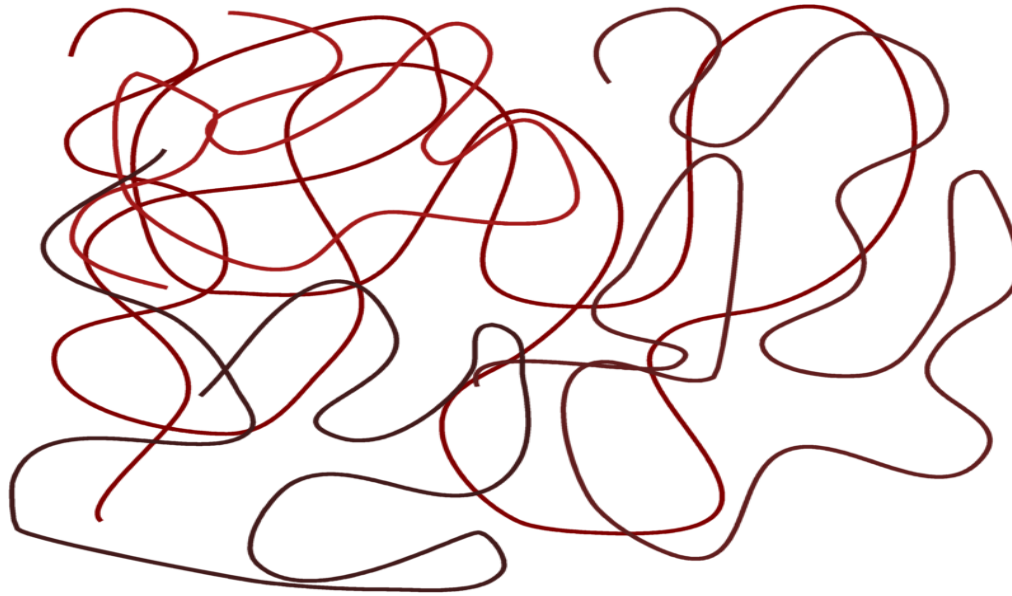
**שרשרת (מולקולה) של פולימר בנויה
מיחידות חוזרות (מונומרים)
המחוברות בקשר כימי.**

**בשקפים הבאים נתאר את מבנה
המיקרו של הרבה שרשרות פולימר
במספר מצבי צבירה.**



מצב נוזלי בפולימרים

שרשרות הפולימר מפותלות ומסובכות אלו באלו. השרשרות נמצאות בתנועה מתמדת אך תנועתן איטית.



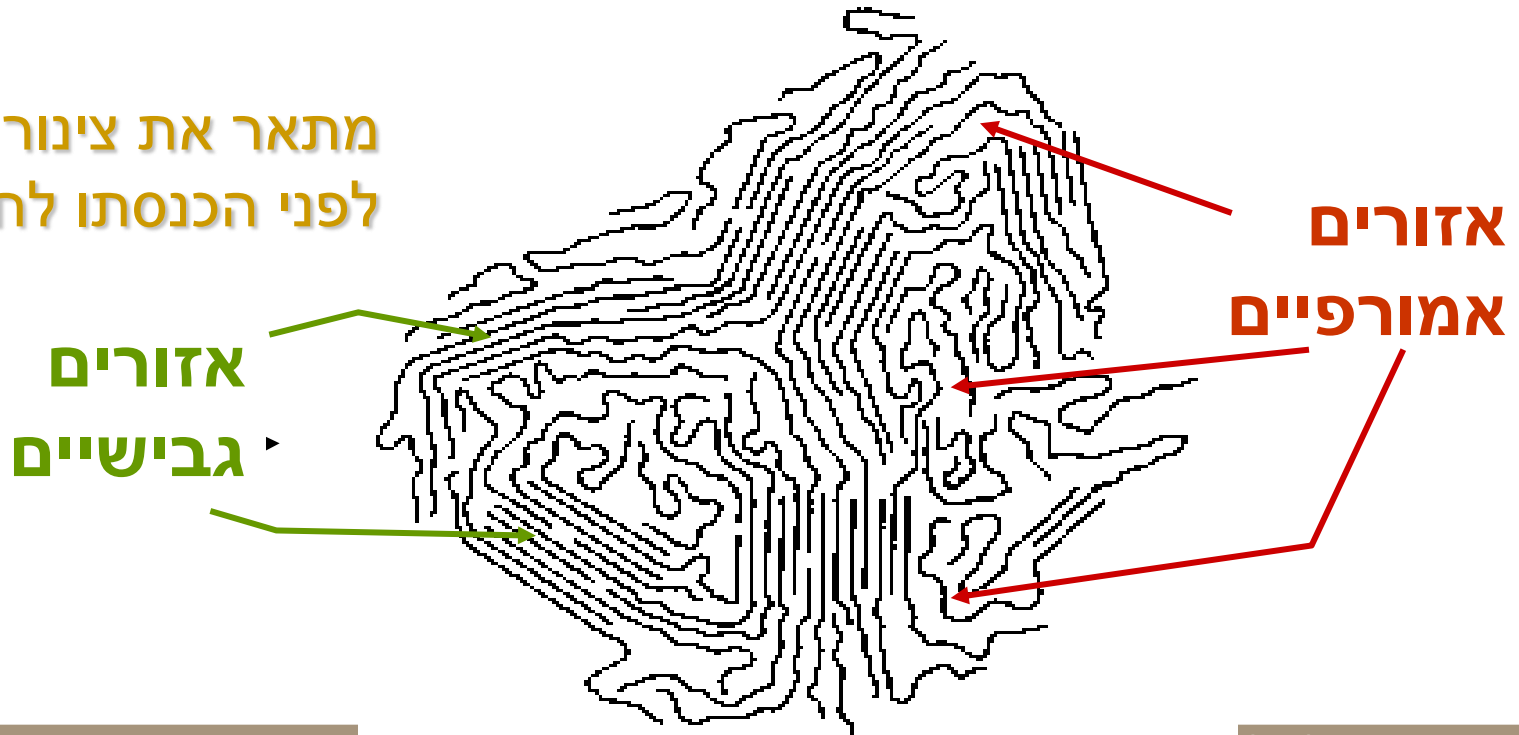
טמפרטורה שבה פולימר עובר ממצב נוזלי למוצק אלסטי נקראת T_m .



תיאור מיקרו של פולימר מוצק אלסטי

מתחת ל- T_m ברוב הפולימרים נוצרים אזורים גבישיים שבהם השרשרות מתוחות ומסודרות, אך עדיין קיימים אזורים אמורפיים ולא מסודרים שבהם לשרשרות יש חופש תנועה.
תחום זה נמצא בטווח טמפרטורות $T_g < T < T_m$

מתאר את צינור הגומי
לפני הכנסתו לחנקן נוזלי

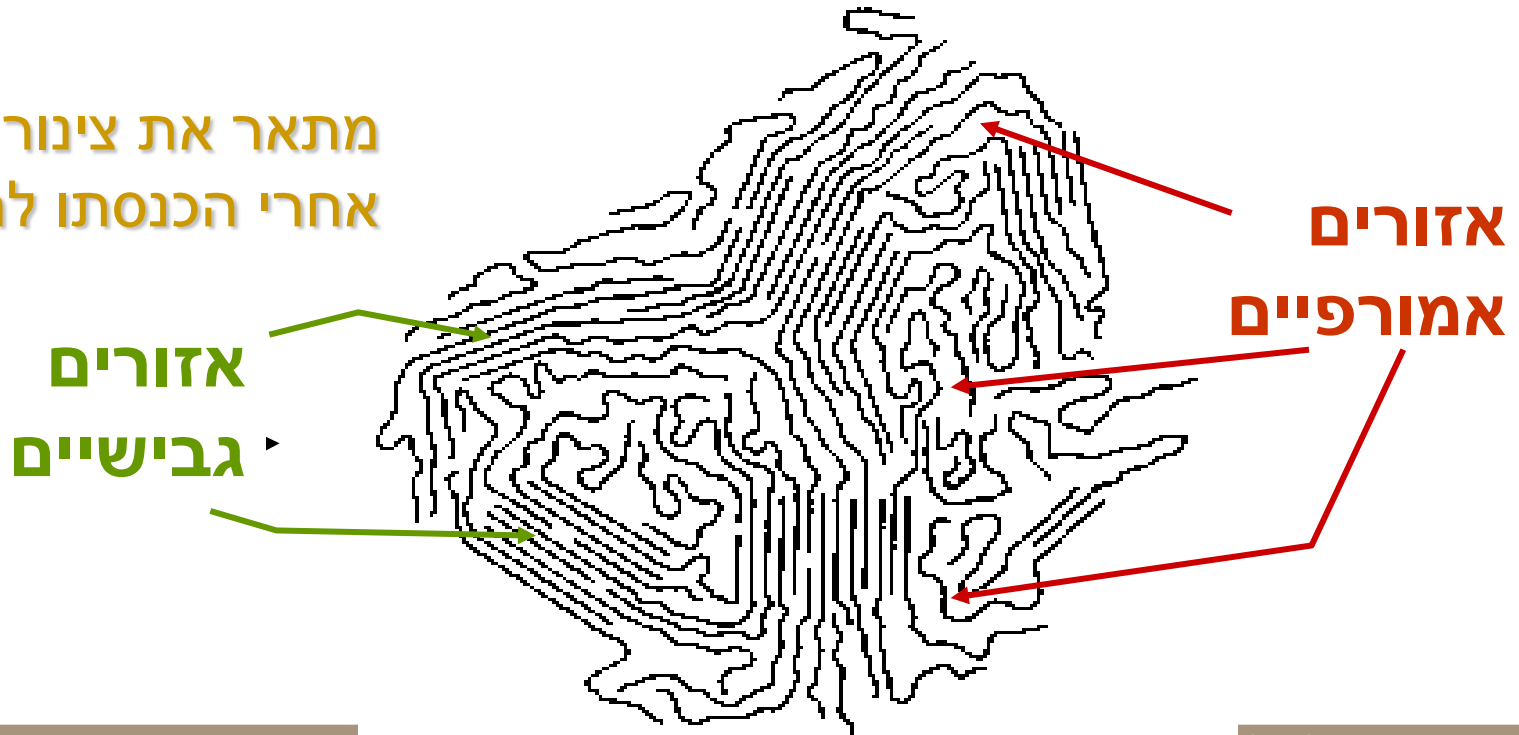




תיאור מיקרו של פולימר מוצק זכוכיתי

כאשר מקררים את החומר הפולימרי לטמפ' שמתחת ל- T_g , גם האזורים האמורפיים "קופאים" (אך לא מסתדרים) והשרשרות מאבדות את יכולת התנועה שלהן. זהו מעבר הפאזה הזכוכיתי.

מתאר את צינור הגומי אחרי הכנסתו לחנקן נוזלי





ניסוי עמילן תירס במים

נקודת ה- T_g היא תכונה אופיינית מאוד לפולימרים, והיא משתנה מפולימר לפולימר בהתאם למבנה הכימי שלו.

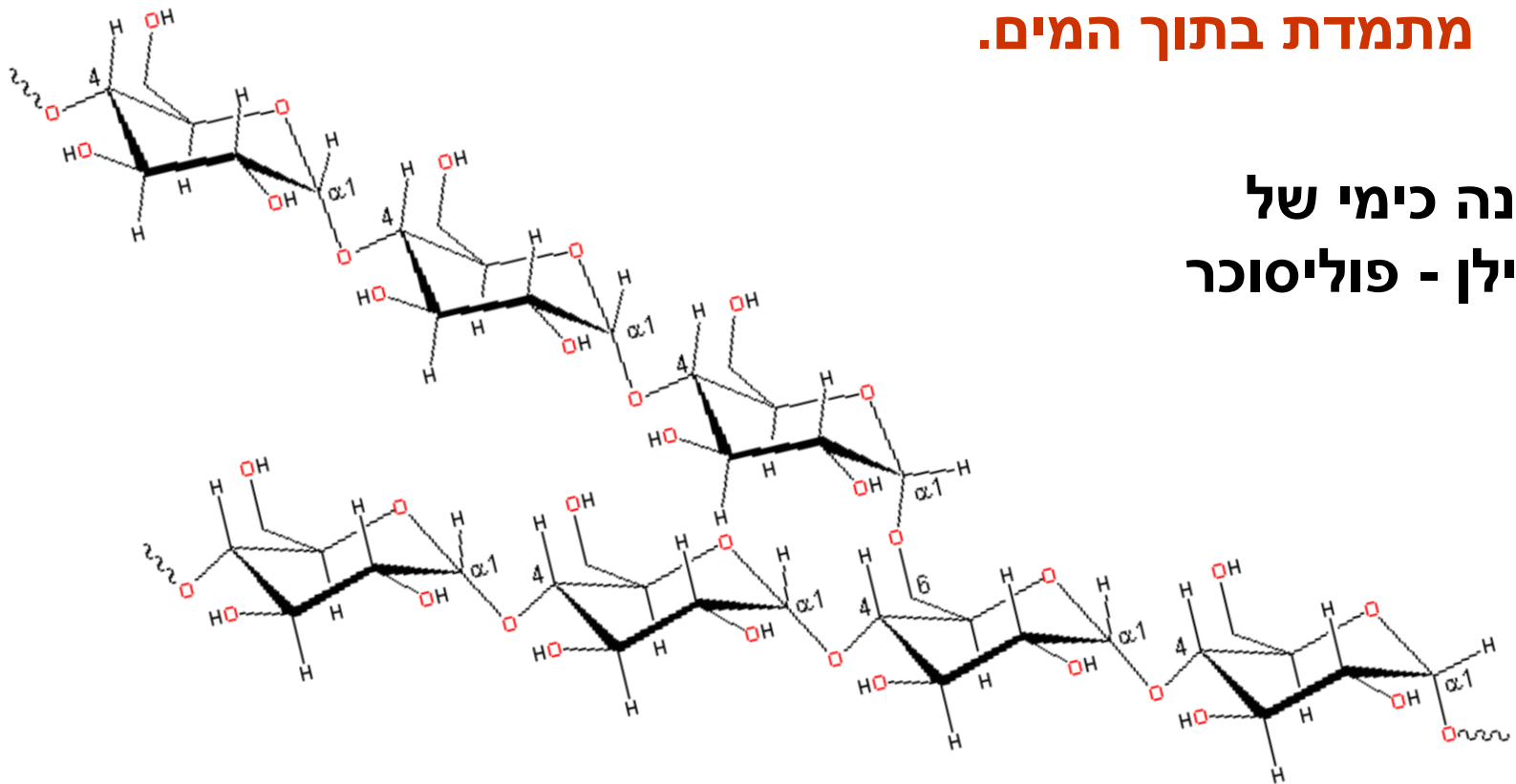
זאת מכיוון שלפולימר לוקח זמן רב להתארגן, בגלל המבנה השרשרתי שלו.

תכונה זו, משפיעה גם על התנהגותם במצב הנוזלי. נסביר את ההתנהגות המוזרה של עיסת עמילן תירס מתוך התבוננות בתיאור המיקרו שלה.



מבנה מיקרו של עיסת עמילן תירס

ראינו את הביטוי לתנועה האיטית של השרשראות בניסוי של עמילן התירס במים. עמילן הוא פולימר המורכב ממולקולות הארוכות המלופפות זו בזו ונמצאות בתנועה מתמדת בתוך המים.

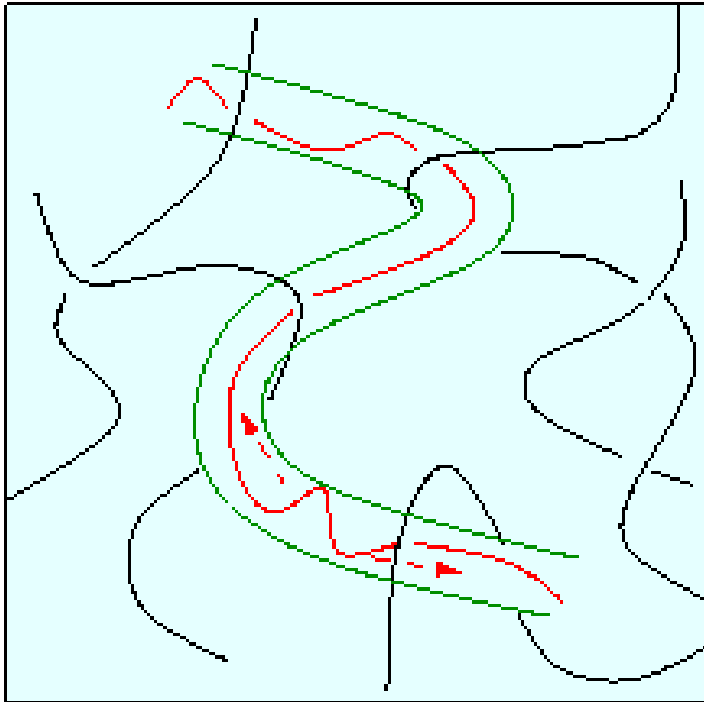


מבנה כימי של
עמילן - פוליסוכר



מה במבנה עיסת העמילן מסביר את ההתנהגות המוזרה שלה?

כאשר עושים פעולה מהירה על עיסת העמילן, השרשרות של העמילן לא מספיקות להגיב, כי הן מלופפות אחת בשנייה, ומתנהגת כיחידה אחת – בדומה למוצק.



כאשר נותנים לעיסה מספיק זמן כדי להגיב, מגלים התנהגות של נוזל – שרשרות המולקולות שאינן ממש קשורות אלו לאלו, מסוגלות להחליק אחת על גבי השנייה, בתנועת זחילה Reptation

האם אתם מכירים חומר נוסף המתנהג בצורה דומה?



סוגים נוספים של נוזלים לא ניוטוניים

- בטבע ניתן למצוא מספר דוגמאות לנוזלים לא ניוטוניים:

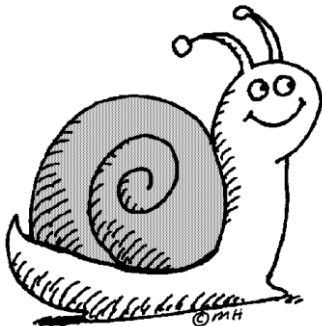
- הנוזל בתוך הבמיה הופך תבשילים לסמיכים:

<http://web.mit.edu/nnf/research/phenomena/natural.html>

- הנוזל שמפריש החילזון עוזר לו לטפס על קירות:

<http://web.mit.edu/nnf/research/phenomena/slug.html>

הפרשת החילזון מתנהגת כמוצק דביק כאשר לא מפעילים עליה לחץ, ובהפעלת לחץ הופכת לנוזל.





סיכום תחומי מצבי הצבירה של פולימר ליניארי

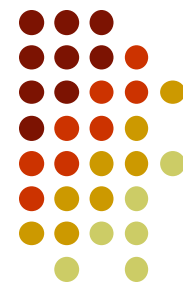
תחום טמפרטורות	היבט מאקרו	היבט מיקרו
$T > T_m$	חומר המתנהג כנוזל אם נותנים לו מספיק זמן, או כמוצק אם פועלים עליו במהירות.	שרשרות פולימריות מפותלות אלו באלו בדומה ל-silly putty או לעמילן תירס במים.
$T_m > T > T_g$	חומר מוצק הניתן לעוות. גמיש כמו צינור הגומי	אזורים גבישיים של מקטעים של פולימר, ביניהם אזורים אמורפיים של שרשרות המסוגלות לנוע.
$T < T_g$	החומר מתנהג כזכוכית. נשבר כאשר מפעילים עליו כוח במהירות.	"תמונה קפואה" של המצב הקודם. אין יותר תנועה של האזורים האמורפיים.



תערובת של איזופרופנול + שמן

- הוסיפו לוייל כ-1 ס"מ שמן
- לאותו וייל הוסיפו אותה כמות של איזופרופנול.
- סידרו את הוייל היטב וערבבו.
- האם התערובת אחידה?
- מלאו באחת הכוסות מים חמים וטיבלו בה את הוייל.
האם התערובת אחידה?
- מלאו בכוס השנייה מי קרח וטיבלו בה את הוייל.
מה קרה לתערובת?

האם מעבר בין ערבוב להפרדה גם הוא מעבר מצב צבירה?



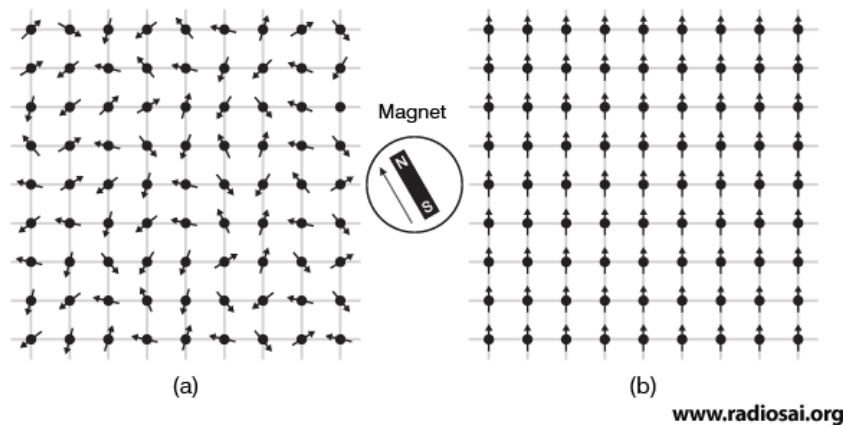
- בניסוי ראיתם שאיזופרופנול ושמן אינם מתערבבים אך כאשר מחממים אותם מעט, הם מתערבבים והופכים לנוזל אחיד. האם זהו מעבר מצב צבירה לדעתכם?
- מכיוון שאיננו מגדירים מצב מעורבב כמצב צבירה, נעדיף לקרוא תהליך **מעבר פאזה**
- **מעבר פאזה** שינוי דרסטי בחלק מתכונות החומר כתלות בשינוי טמפרטורה בדר"כ*.
- כמובן שגם מעברי מצבי צבירה קלסיים הם **מעברי פאזה**.

* גם פרמטרים פיסיקליים אחרים יכולים להביא למעבר פאזה



דוגמה נוספת למעבר פאזה

- בחזל יכול להתמגנט, אך מעבר לטמפרטורה של 770°C הוא אינו יכול להתמגנט. מדוע?
- ברמת המיקרו אנו מתייחסים אל כל אטום ברזל כאל מגנט קטן. כאשר כל חלקיקי הברזל מכוונים לכיוון אחד הברזל יהיה ממוגנט.



- בתמונה הבאה רואים ברזל ממוגנט מימין וברזל שאינו ממוגנט משמאל.
- בסרט ניתן לראות ניקל שמאבד את המיגנט שלו בחימום.
- בסרט הבא, ממגנטים מתכת ע"י קירור: <http://www.youtube.com/watch?v=Ku-pRN31QTc>



האם ניתן לשנות מצב צבירה ללא שינוי בטמפרטורה?

המיכל שלפנינו מכיל גז.

- איך מצליחים להכניס את הגז למיכל?
- מה מצב הצבירה של גז הדחוס במיכל?
- מה זה אומר לגבי מצבי צבירה של חומרים?

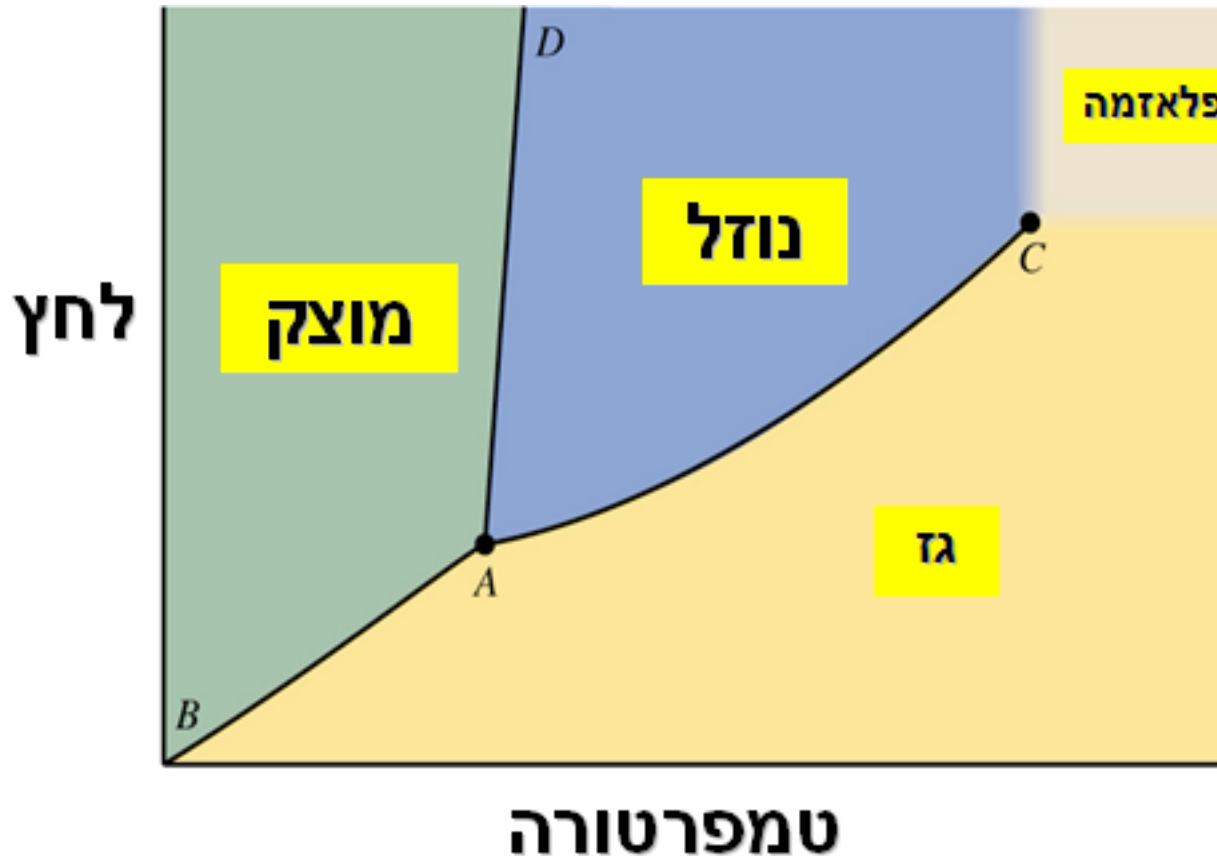
אפשר לתאר תחומים של ערכי לחץ וטמפרטורה שבהם מתקיים מצב צבירה של חומר.

התיאור הנוח ביותר הוא בעזרת **דיאגרמת פאזות!**



דיאגרמת פאזות

מתארת את "תחומי המחיה" של פאזות שונות כתלות בטמפרטורה ולחץ. לפניכם דיאגרמת פאזות טיפוסית של חומר.



חומרים שונים נבדלים אלו מאלו בערכים שעל צירי הטמפרטורה והלחץ.

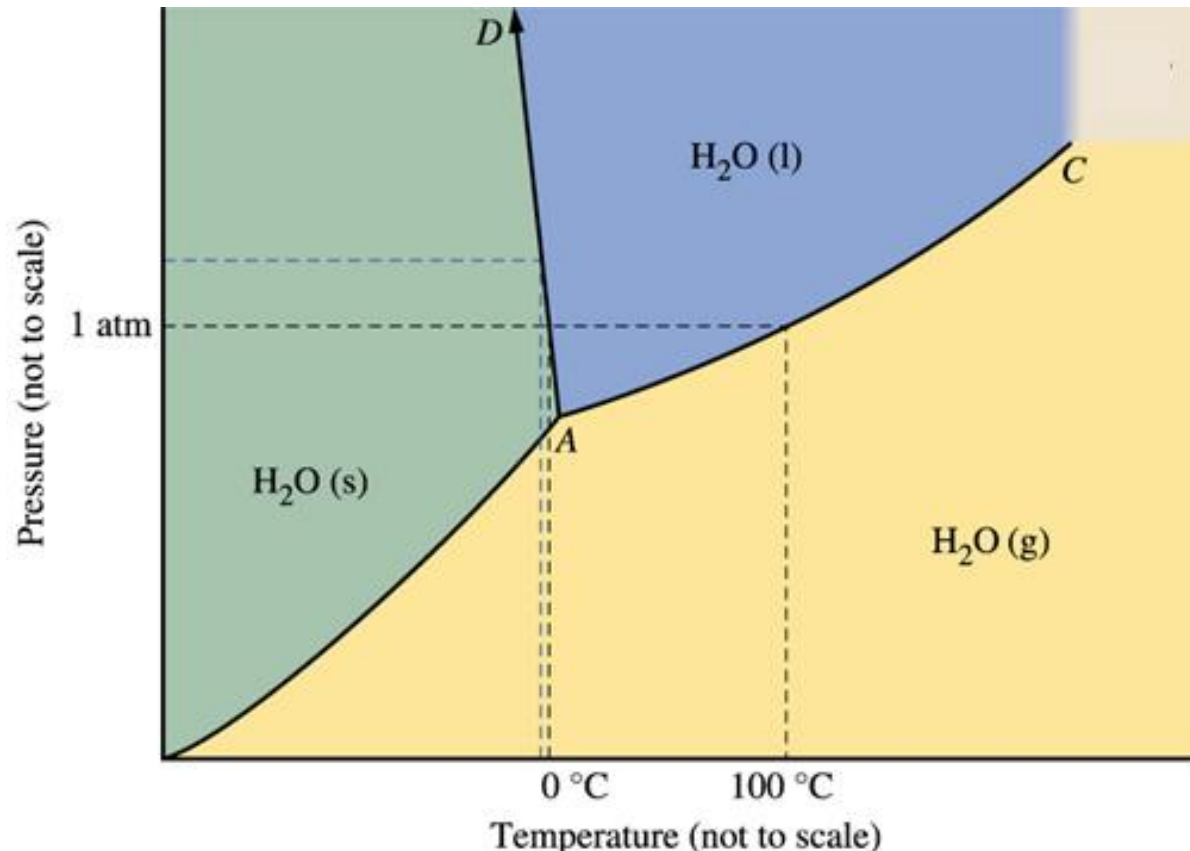
A – נקודה משולשת – שווי משקל בין 3 מצבי צבירה
C – נקראת טמפרטורה קריטית T_c נתייחס לכך בהמשך.

מה קורה כאשר דוחסים נוזל ללא שינוי בטמפ' שלו?



דיאגרמת פאזות של מים

בלחץ של 1 אטמ' ובטמפרטורה שבין 20°C - ל- 120°C המים יעברו מקרח, דרך מים נוזליים לאדים.



חומרים שונים נבדלים אלו מאלו בערכים שעל צירי הטמפרטורה והלחץ.

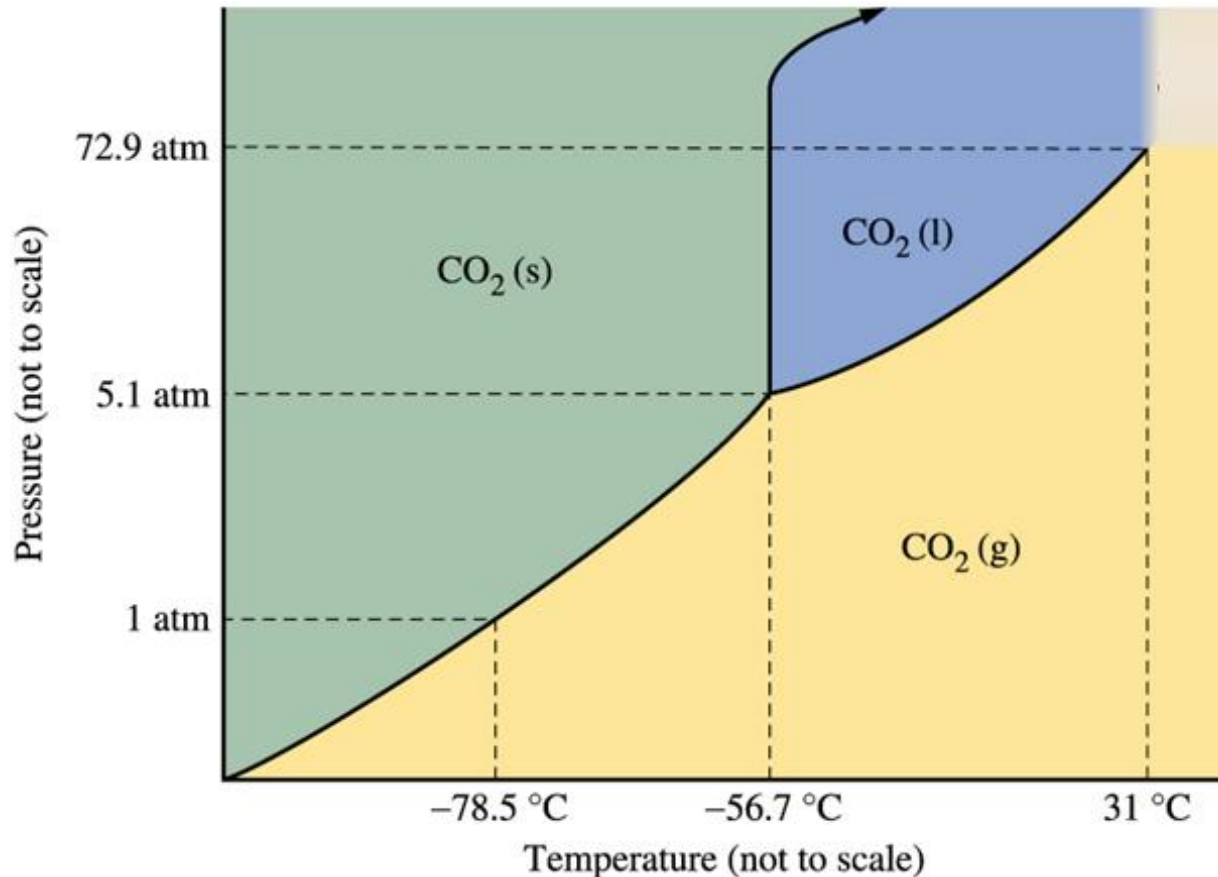
- מה קורה למים כאשר דוחסים אותם?
- מה יקרה לקרח כאשר נדחוס אותו?

תופעה זו נקראת ה"אנומליה של המים" והיא נובעת מהמבנה ה"נפוח" של הקרח, המוכב מקשרי המימן.



דיאגרמת פאזות של פחמן דו חמצני

פחמן דו-חמצני יוצא דופן בכך שבלחץ של 1 אטמוספירה הוא עובר ישירות ממצב צבירה מוצק לגז.



מה יקרה ל"קרח יבש"
בלחץ אטמוספירי בטמפ'
החדר?

דוגמה נוספת למעבר פאזה מעבר גרפיט - יהלום

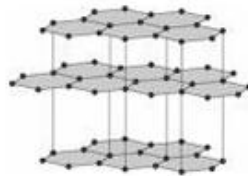


- היהלום והגרפיט הינם שני מופעים של מצב צבירה מוצק של היסוד

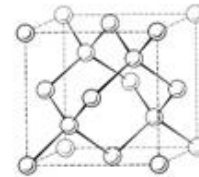
פחמן – C



גרפיט



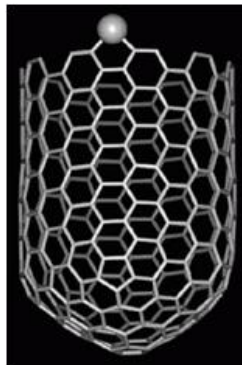
יהלום



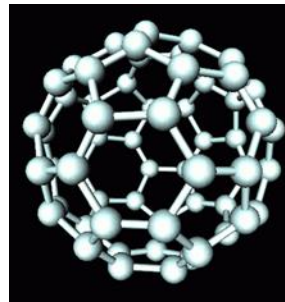
- בטבע, בלחצים גבוהים מאוד, הגרפיט יכול ל"הידחס" ליהלום.

- לפחמן ישנן עוד צורות רבות שחלקן התגלה במעבדות וכיום

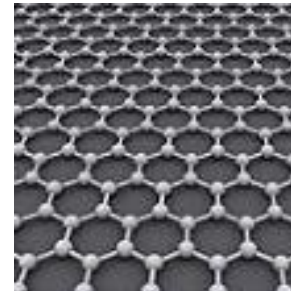
משמשות בתעשיות מתקדמות:



ננו צינורית



פולרן

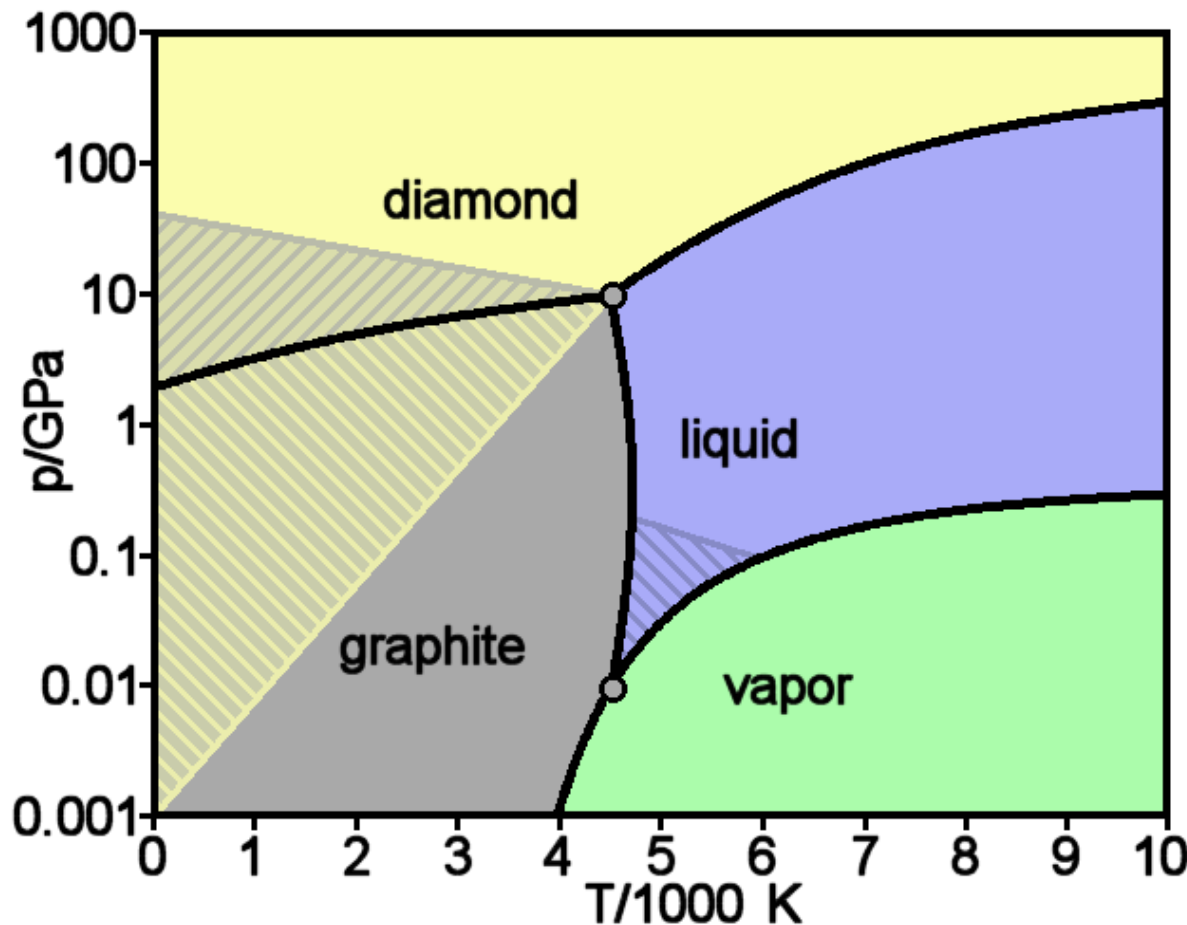


גרפן, יריעה בודדת של גרפיט – גליוי זיכה את החוקרים בפרס נובל בפיסיקה לשנת 2010



דיאגרמת פאזות של פחמן

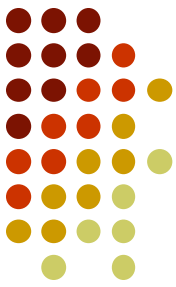
מתארת את "תחומי המחייה" של פאזות שונות כתלות בטמפרטורה ולחץ



1atm ~ 0.0001 GPa
בלחץ אטמוספירי ובטמפ' של 3900K בערך, הגרפיט עובר המראה.

מה הלחץ המינימלי שצריך להפעיל על גרפיט להפוך אותו לנוזל?

כדי ל"נזל" גרפיט צריך להגיע ללחץ גבוה פי 1000 מהלחץ האטמוספירי.



סיכום

- לא כל שינוי בחומר הוא שינוי מצב צבירה – ערבוב של פטל ומים
- כאשר השינוי בחומר הוא הפיך ומתרחש כתוצאה משינוי בטמפ' או לחץ מדובר על **מעבר פאזה**.
- יש מעבר פאזה גם בין שני מצבי צבירה מוצקים דוגמאות: מעבר זכוכיתי של גומי, גרפיט-יהלום
- **יש חשיבות לקצב ההקפאה** - אותו חומר, באותו שינוי טמפרטורה, יכול לעבור מעבר פאזה שונה למצבי צבירה שונים. לדוגמא הקפאה של מים לקרח או למוצק אמורפי.
- הזמן שאנו נותנים למערכת להתארגן קובע את התנהגותה בדרכים נוספות דוגמא: עמילן תירס וסילי פטי מתנהגים כמוצק או כנוזל כתלות במהירות שבה מפעילים עליהם כוח.



האם התיאור שנתנו עד כאן מספק אותנו?

אנחנו יכולים לתת הסבר איכותי למעבר הפאזה. אך לא נוכל להסביר מדוע זה קורה דוקא בטמפרטורה מסויימת.

אנו מחפשים מודל שיקשר **באופן כמותי** בין מידת הסדר והתנועה של החלקיקים והאינטראקציה שביניהם, לתכונות המאקרו של החומר.

מה המודל צריך להכיל?

1. אפיון כמותי של חוזק האינטראקציה
2. דרך למדוד את התנועתיות
3. דרך לקשר בין האינטראקציה והתנועתיות.