# תורת הקוונטים 1

## פרק 1 - תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום

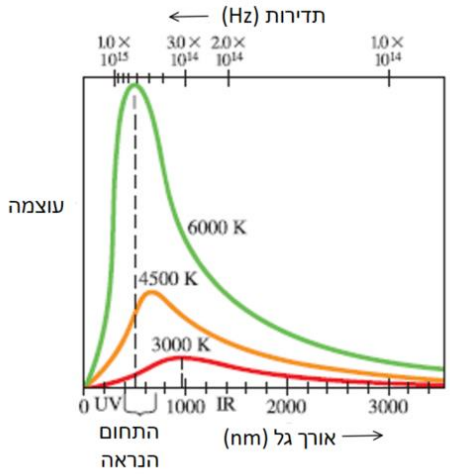
### תוכן העניינים


1. תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום ..... 1
2. התיאוריה הפוטנית של האור והאפקט הפוטואלקטרי ..... 4
3. אנרגיה מסה ותנע של פוטון ..... 8
4. אפקט קומפטון ..... 9
5. אינטראקציות של פוטונים ויצירת זוגות ..... 11
6. דואליות גל חלקיק והאופי הגלי של החומר ..... 13
7. סיכום ביניים התורה הפוטונית והשלכות ..... (ללא ספר)
8. מודלים מוקדמים של האטום ..... 15
9. מודל האטום של בוהר ..... 16
10. סיכום חלק שני מודלים מוקדמים ומודל בוהר ..... (ללא ספר)
11. שאלות ותרגילים נוספים ..... 20

# תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום:

## סיכום כללי:

ההנחה הקוונטית של פלאנק וקרינת גוף שחור.

| | | |
|---|---|---|
| גרף של קרינת גוף שחור כתלות באורך הגל ובטמפרטורות שונות |  | |
| חוק ווין - Wien law | $\lambda_p T = 2.90 \cdot 10^{-3} m \cdot K$ | $\lambda_p$ - אורך הגל בשיא<br>T - הטמפרטורה בקלווין |
| נוסחת פלאנק לקרינת גוף שחור | $I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$ | קבוע בולצמן<br>$k = 1.38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$<br>קבוע פלאנק<br>$h = 6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ |
| אנרגיה מינימלית של מטען בתנועה הרמונית באטום | $E_{min} = hf$ | <u>ההנחה הקוונטית של פלאנק</u> |
| אנרגיית המטען חייבת להיות כפולה שלמה של הערך המינימלי | $E = nhf$ | **המספר הקוונטי**<br>$n = 1,2,3,\ldots$ |

## שאלות:

**1) דוגמה - טמפרטורת השמש**

הראו באמצעות חוק ווין כי הטמפרטורה על פני השמש היא באמת 6,000K אם ידוע שאורך הגל של האור הנראה הוא בערך 500nm.

**2) דוגמה - טמפרטורת כוכב**

טלסקופ גדול בחלל מזהה כוכב חדש. הקרינה שפולט הכוכב נקלטת בטלסקופ כאשר השיא של הקרינה הוא באורך גל של 90nm.
מהי הטמפרטורה על פני הכוכב?

**3) טמפרטורה של מתכת**

מה הטמפרטורה של מתכת בשלב הריתוך אם שיא פליטת האור שלה באורך גל של 460nm.

**4) הפרש אנרגיות של מולקולה רוטטת**

מולקולת HCl רוטטת בתדירות של: $8.1 \cdot 10^{13}\text{Hz}$.
חשבו את ההפרש בין שני ערכים צמודים של האנרגיות האפשריות לפי ההנחה הקוונטית של פלאנק לערכי האנרגיה באוסילציות.
תנו תשובה בג׳אול ובאלקטרון וולט.

**5) חוק ווין וקבוע פלאנק מנוסחת הקרינה**

נוסחת פלאנק לקרינת גוף שחור היא: $I(\lambda,\mathrm{T}) = \frac{2\pi \mathrm{h}c^2\lambda^{-5}}{\mathrm{e}^{\mathrm{h}c/\lambda k T}-1}$.

א. * הראו, ללא שימוש בחוק ווין, כי קבוע $\lambda_{\mathrm{p}}\mathrm{T} =$, לעזרתכם פתרון המשוואה: $5\mathrm{e}^{-x} = 5 - x$ הוא: $x = 4.966$.

ב. השתמשו בחוק ווין וחשבו את קבוע פלאנק.

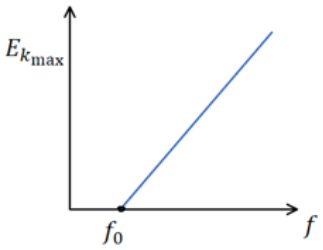
ג. ** הראו כי הקרינה הנפלטת מגוף שחור פרופורציונית לטמפרטורה ברביעית - חוק סטפן - בולצמן.
הדרכה: בשביל לחשב את הקרינה הכוללת הנפלטת יש לעשות אינטגרציה על כל אורכי הגל, אין צורך לפתור את האינטגרל עד הסוף.

## תשובות סופיות:

1) הוכחה.
2) $32,000K$.
3) $6,300K$.
4) $0.34eU$ , $5.4\cdot10^{-20}J$.
5) הוכחה.

# התיאוריה הפוטנית של האור והאפקט הפוטואלקטרי:

## סיכום כללי:

| | | |
|---|---|---|
| אנרגיה של פוטון יחיד | $E = \mathrm{h}f$ | $f$- תדירות האור |
| <u>הניסוי הפוטואלקטרי</u> | | |
| תדירות סף | $\mathrm{h}f_0 = W_0$ | $W_0$ - פונקציית העבודה של המתכת |
| אנרגיה קינטית מקסימאלית של האלקטרונים | $E_k = \mathrm{h}f - W_0$ |  |
| מתח עצירה | $\mathrm{e}V_0 = E_k$ | |
| השוואה לתורה הגלית | <u>לפי התורה הפוטונית</u><br>1.עוצמת האור קשורה למספר הפוטונים ולא לאנרגיה של כל אחד מהם. הגדלת העוצמה תגדיל את מספר האלקי הנפלטים אבל לא את האנרגיה הקינטית שלהם.<br>2. האנרגיה של הפוטון תלויה בתדירות.<br>3. רק פוטון אחד נותן את כל האנרגיה שלו ולכן קיימת תדירות סף. | <u>לפי התורה הגלית-אלקטרומגנטית</u><br>1. עוצמת האור קשורה לגודל השדה הגדלת העוצמה תגדיל את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים.<br>2. התדירות לא משפיעה על האנרגיה של האלקטרונים. |

## שאלות:

**1) דוגמה - חישוב אנרגית פוטון באור כחול**

חשבו את האנרגיה של פוטון באור כחול: $\lambda = 450\text{nm}$ באוויר (או וואקום).

**2) דוגמה - הערכה של מספר פוטונים מנורה**

נסו להעריך כמה פוטונים פולטת נורה בהספק 100W כל שניה.
הניחו שהנצילות של הנורה היא בערך 3% (כלומר רק 3% מהאנרגיה המושקעת בנורה כל שניה מנוצלת להפקה של אור). האור שיוצא מנורה לבנה הוא בכל אורכי הגל, ניתן לקחת לצורך ההערכה את אורך הגל באמצע הספקטרום של האור הנראה: $\lambda \approx 500\ nm$.

**3) דוגמה - חישוב אנרגיה של אלקטרונים נפלטים**

מהי האנרגיה הקינטית המקסימאלית ומהי המהירות המקסימאלית של אלקטרונים הנפלטים מחומר שפונקציית העבודה שלו היא: $W_0 = 2.8\text{eV}$
אם אורך הגל של האור הפוגע במשטח הוא:

א. $\lambda = 400\text{nm}$.

ב. $\lambda = 600\text{nm}$.

**4) עקיפה של קרינת גמא**

לפוטון בקרינת גמא יש אנרגיה של 380 keV.

א. מהו אורך הגל של הקרינה?

ב. האם לדעתך הקרינה עושה עקיפה דרך פתחים טיפוסיים שאנחנו נתקלים ביום יום כמו פתח של דלת?

**5) איזו מתכת לא תפלוט אלקטרונים**

פונקציות העבודה של סודיום, צסיום, נחושת וברזל הן: 2.3, 2.1, 4.7 ו-4.5 אלקטרון וולט בהתאמה. אלו מהמתכות לא תפלוט אלקטרונים כאשר פוגע בה אור מהתחום הנראה?

**6) פונקציית עבודה ומתח עצירה**

בניסוי של האפקט הפוטואלקטרי נצפה כי לא זורם זרם כאשר אורך גל של האור הוא מעל ל-540nm.

א. מהי פונקציית העבודה של המתכת?

ב. מהו מתח העצירה הדרושה אם מקרינים באור באורך גל של 450nm?

**7) ניסוי פוטואלקטרי**

בניסוי פוטואלקטרי הקרינו אור בתדירויות שונות ומדדו את מתח העצירה.
התוצאות של הניסוי מוצגות בטבלה הבאה:

| $f(10^{14}\text{Hz})$ | $V(V)$ |
|---|---|
| 6.50 | 0.6 |
| 7.25 | 0.91 |
| 8.00 | 1.23 |
| 8.75 | 1.54 |
| 9.50 | 1.85 |

א. מצאו את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים בפליטה ושרטטו גרף של אנרגיה זו כתלות בתדירות. השתמשו בנייר משבצות ורשמו נתונים בצורה מדויקת.

ב. חשבו מתוך הגרף את קבוע פלאנק.

ג. חשבו את פונקציית העבודה ותדירות הסף של המתכת.

## תשובות סופיות:

1) $2.8\text{eV}$.

2) $8\cdot10^{18}$ פוטונים.

3) א. $3.2\cdot10^{2}\ \frac{\text{m}}{\text{sec}}$. ב. לא תהיה פליטה של אלקטרונים.

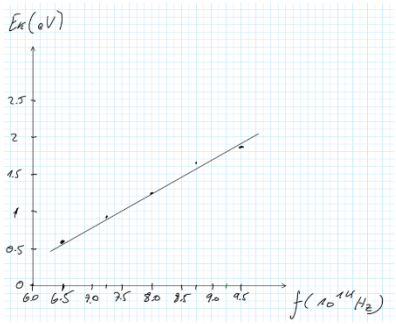
4) א. $3.3\cdot10^{-3}\text{nm}$. ב. לא.

5) נחושת וברזל.

6) א. $2.3\text{eV}$. ב. $0.46\text{V}$.

7) א.

| $E_k =$ eV |
|---|
| 0.6eV |
| 0.91eV |
| 1.23eV |
| 1.54eV |
| 1.85eV |




ב. הוכחה.

ג. $W_0 = 2.42\text{eV}$ , $f = 5.84\cdot10^{14}\text{Hz}$.

# אנרגיה מסה ותנע של פוטון:

## סיכום כללי:

| | | |
|---|---|---|
| אנרגיה של פוטון יחיד | $E = \mathrm{h}f$ | $f$-תדירות האור |
| תנע של פוטון | $p = \frac{E}{c} = \mathrm{h}\frac{f}{c} = \frac{\mathrm{h}}{\lambda}$ | |
| מסת מנוחה של פוטון | $m = 0$ | |

## שאלות:

**1) דוגמה - כוח שמפעילה נורה על נייר שחור**

בדוגמה "הערכה של מספר הפוטונים מנורה" חישבנו את מספר הפוטונים שיוצאים מנורה של 100W כל שניה (בערך $10^{19}$). נניח כי כל הפוטונים האלו פוגעים בנייר שחור (ולא מוחזרים) חשבו את:

א. התנע של פוטון יחיד.

ב. הכוח שמפועל על הנייר.

**2) דוגמה - יעילות של תהליך פוטוסינטזי**

בתהליך פוטוסינטזי פיגמנטים בצמח כמו כלורופיל סופגים אור שמש ובאמצעותו הופכים פחמן דו חמצני ($CO_2$) לפחמימות (וחמצן שנפלט).

בשביל להפוך מולקולה אחת של $CO_2$ לפחממה הצמח משתמש ב-9 פוטונים. כלורופיל סופג אור בעיקר באורך גל של 670nm. אם ידוע שהאנרגיה המשתחררת בפירוק פחממה היא: $4.9\frac{\mathrm{eV}}{\mathrm{molecule}}$, מה היעילות (או נצילות) של התהליך הפוטוסינטזי?

## תשובות סופיות:

**1)** א. $1.3\cdot10^{-27}\frac{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}$. ב. $10^{-8}\mathrm{N}$.

**2)** 29%.

# אפקט קומפטון:

## סיכום כללי:

| | | |
|---|---|---|
| הסחת קומפטון | $\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c}(1-\cos\theta)$ | $\lambda$ - אורך הגל של הקרן הפוגעת<br>$\lambda'$ - אורך הגל של הקרן המפוזרת<br>$\theta$ - זווית ביחס לכיוון הקרן הפוגעת<br>$\frac{h}{m_e c}$ - אורך גל של האלקטרון החופשי |

## שאלות:

**1) דוגמה - פיזור בכמה זוויות**

קרני X באורך גל 0.162nm מפוזרות מסרט פחמן דק.
מה יהיו אורכי הגל של הקרניים המפוזרות בזוויות?

א. $0°$.

ב. $90°$.

ג. $180°$.

**2) הסחה יחסית מקסימאלית**

בפיזור קומפטון, מצאו את זווית הפיזור עבורה ההסחה (שינוי באורך הגל) היא מקסימאלית. מהי ההסחה היחסית המקסימאלית $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ עבור פוטון באורך גל: $\lambda = 500\text{nm}$ מהתחום הנראה ועבור פוטון באורך גל: $\lambda = 0.1\text{nm}$ מתחום קרינת X.

**3) פיזור רב פעמי**

קרני גמא שנוצרות קרוב למרכז השמש עוברות הרבה פיזורים בזוויות קטנות עד שהן מאבדות מספיק אנרגיה והופכות לקרניים בתחום הנראה.
הניחו שלפוטון בקרן גמא יש אנרגיה של 1.0MeV והפוטון עובר סדרה של התנגשויות בזוויות של $0.5°$ בכל התנגשות. כמה התנגשויות צריך הפוטון לעבור בשביל שאורך הגל שלו ישתנה ל- 555nm.

## תשובות סופיות:

**1)** א. 0.162nm . ב. 0.164nm . ג. 0.167 .

**2)** א. $\theta = \pi$ . ב. 0.00097% . ג. 4.9% .

**3)** $6 \cdot 10^9$ התנגשויות.

# אינטראקציות של פוטונים ויצירת זוגות:

## סיכום כללי:

תנאים ביצירת זוגות:

1. חייב להיווצר זוג בשביל שיתקיים שימור מטען
2. אנרגיית הפוטון שווה לאנרגית הזוג, יש להוסיף אנרגית מנוחה יחסותית לכל חלקיק $mc^2$.
3. בשביל ליצור זוג חייבת להיות אינטראקציה עם גוף נוסף (בד"כ גרעין) כדי שיהיה שימור תנע.
4. התהליך יכול גם לקרות הפוך ונקרא אינהלציה. לדוגמה פוזיטרון פוגש אלקטרון, הם נכחדים ויוצרים פוטון.

## שאלות:

**1) דוגמה - אנרגיה מינימלית ליצירת זוגות**

מצאו מהי האנרגיה המינימלית (ב-eV) ליצירת זוג אלקטרון פוזיטרון?
מה אורך הגל של הפוטון במקרה זה?

**2) חישוב אנרגיה קינטית ביצירת זוג**

חשבו כמה אנרגיה קינטית כוללת תהיה ביצירת זוג של אלקטרון פוזיטרון מתוך פוטון בעל אנרגיה של: $2.8\text{MeV}$.

**3) אורך גל מקסימאלי ליצירת זוג**

מהו אורך הגל המקסימאלי של פוטון היכול לייצר זוג של פרוטון ואנטי פרוטון (כל אחד במסה של: $1.67 \cdot 10^{-27}\text{kg}$).

**4) אלקטרון ופוזיטרון מייצרים שני פוטונים**

אלקטרון ופוזיטרון נעים אחד כלפי השני במהירות: $10^5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ כל אחד.
הם מתנגשים, נעלמים ויוצרים שני פוטונים שנעים בכיוונים מנוגדים.
מהן האנרגיה והתנע של כל פוטון?

## תשובות סופיות:

1) $1.02\text{MeV}$ ו- $1.2\text{pm}$.
2) $1.78\text{MeV}$.
3) $6.63\cdot10^{-16}\text{m}$.
4) $E=0.51\text{MeV}$ , $p=0.51\frac{\text{MeV}}{c}$.

# דואליות גל חלקיק והאופי הגלי של החומר:

## סיכום כללי:

| | | | |
|---|---|---|---|
| אורך גל דה ברולי של חלקיק | $\lambda = \frac{h}{p}$ | לא יחסותי<br>או<br>יחסותי | $p = mv$<br>$p = mv\gamma$ |

## שאלות:

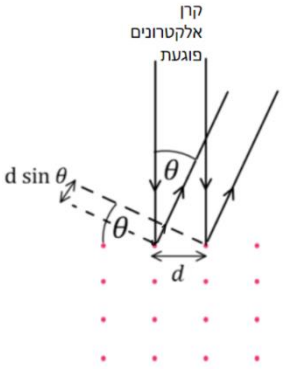
**1) דוגמה - אורך גל של כדורסל**

חשבו את אורך גל דה ברולי של כדורסל השוקל חצי קילוגרם ונזרק במהירות של 10 מטר לשנייה.

**2) דוגמה - אורך גל של אלקטרון ב-100 וולט**

חשבו את אורך הגל של אלקטרון המואץ תחת הפרש פוטנציאלים של $100\text{V}$.

**3) דוגמה - עקיפה של אלקטרונים**




מקרינים קרן אלקטרונים בניצב למשטח של חומר מוצק. האטומים בחומר מסודרים בצורת סריג ריבועי כאשר המרווח בין האטומים לא ידוע ומסומן ב-$d$, ראו איור. מצאו את המרחק $d$ אם האנרגיה הקינטית של האלקטרונים היא: $E_k = 80\text{eV}$ והזווית בה מתרחשת התאבכות בונה בפעם הראשונה היא $22°$.
הניחו שהאנרגיה של האלקטרונים נמוכה וכי האלקטרונים עושים אינטראקציה רק עם השכבה החיצונית של החומר.

**4) כמה מתח לאורך גל**

באיזה מתח צריך להאיץ אלקטרון כך שהוא יגיע לאורך גל של $0.6\text{nm}$.

**5) אנרגיה ותנע מאורך גל**

לאלקטרון אורך גל דה ברולי של: $\lambda = 3.2 \cdot 10^{-10}\text{m}$.

א. מהו התנע שלו?

ב. מהי מהירותו? האם היא יחסותית? רמת דיוק של 1% בגאמה.

ג. איזה מתח נדרש כדי להאיץ אותו למהירות כזו?

**6) רזולוציה של מיקרוסקופ אלקטרוני**

מהו הגבול התיאורטי של הרזולוציה של מיקרוסקופ אלקטרונים שבו האלקטרונים מואצים במתח של $80\text{kV}$. יש להשתמש בנוסחאות יחסותיות.

**7) אנרגיה יחסותית**

אלקטרון בשפופרת טלוויזיה (של פעם) מואץ במתח של $33\text{keV}$.

א. האם האנרגיה של האלקטרון יחסותית? לפי רמת דיוק של אחוז אחד בגמא.

ב. חשבו את אורך הגל של האלקטרון. האם צריך לדאוג מתופעות עקיפה? גודל פתח השפופרת הוא $5\text{cm}$.

## תשובות סופיות:

**1)** $1.3\cdot10^{-34}\text{m}$.

**2)** $1.2\cdot10^{-10}\text{m}$.

**3)** $3\text{A}$.

**4)** $4.17\text{V}$.

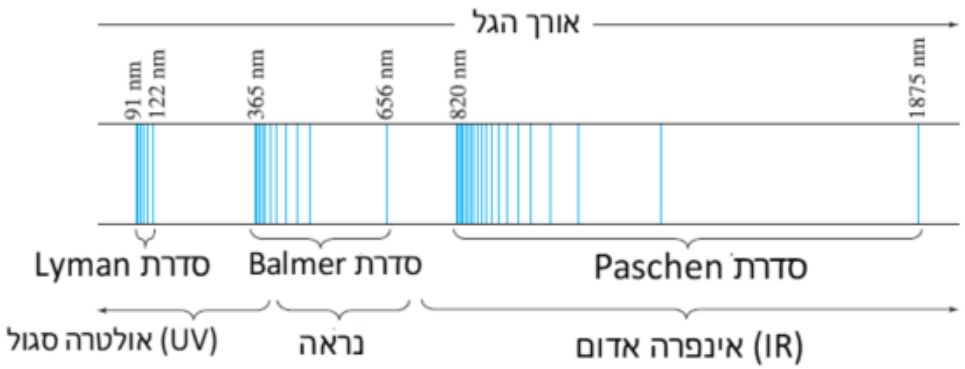
**5)** א. $2.1\cdot10^{-24}\text{kg}\cdot\text{sec}$. ב. $2.3\cdot10^{6}\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, לא יחסותי. ג. $15\text{V}$.

**6)** $4.2\cdot10^{-12}\text{m}$.

**7)** א. כן. ב. $6.6\cdot10^{-12}\text{m}$, אין צורך.

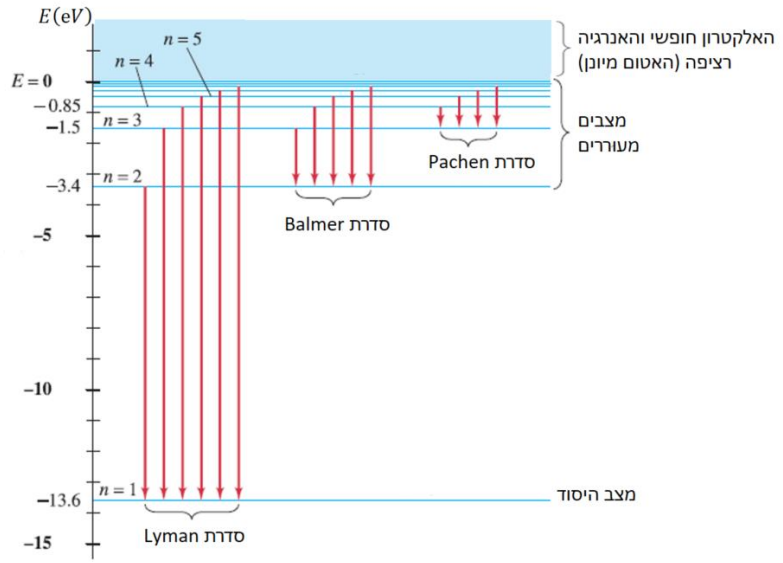
# מודלים מוקדמים של האטום:

## סיכום כללי:

| | | |
|---|---|---|
| נוסחה לאורכי הגל הנפלטים מאטום המימן | $\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{n'^2}-\frac{1}{n^2}\right)$ | קבוע Rydberg<br>$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{n'^2}-\frac{1}{n^2}\right)$ |
|  | | |
| בעיות במודל הפלנטארי של ראתפורד | 1.מדוע הקרינה שנפלטת היא באורכי גל מסוימים בלבד.<br>2. אם האלקטרון בתאוצה כל הזמן הוא צריך לאבד אנרגיה כל הזמן ולקרוס לגרעין. אטומים לא היו צריכים להיות יציבים. | |

# מודל האטום של בוהר:

## סיכום כללי:

| | | |
|---|---|---|
| הנחות המודל | 1. האלקטרונים יכולים לנוע רק במסלולים / רדיוסים ספציפיים מסביב לגרעין. המסלולים נקראים **אורביטלים.**<br><br>2. האלקטרונים לא מאבדים אנרגיה בתנועה המעגלית (למרות שהם בתאוצה). בגלל שהאלקטרון לא מאבד אנרגיה במצבים אלו הם נקראים **מצבים יציבים stationary states** | |
| אנרגיית הפוטון שווה להפרש האנרגיות בין שני מצבים | $hf = E_U - E_L$ | |
| הנחה על התנע הזוויתי | $L = mvr_n = \frac{nh}{2\pi}$ | n=1,2,3… |
| הרדיוסים האפשריים | $r_n = \frac{n^2}{Z} r_1$ | $Z$ - מספר הפוטונים<br>$r_1 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} \approx 0.529 \cdot 10^{-10}$ |
| האנרגיה של האלקטרון הנמצא במסלול ה-n | $E = -\frac{Z^2 \cdot 13.6eV}{n^2}$ | |
| טבלה של רמות האנרגיה באטום המימן |  | |

## שאלות:

**1) דוגמה - אורך הגל של הקו הראשון של Paschen**
השתמשו בטבלה שהוצגה בסרטון "קווי הספקטרום ממודל בוהר" ומצאו את אורך הגל של קו הספקטרום הראשון בסדרת Paschen.
באיזה תחום של אורכי גל נמצא קו זה? (UV, IR או אור נראה).

**2) דוגמה - אורך גל מקסימלי בבליעה**
גז מימן נמצא בשפופרת בלחץ נמוך ובטמפרטורת החדר (האלקטרונים במצב היסוד). מקרינים את הגז בקרינה עם ספקטרום רציף של אורכי גל.
מהו אורך הגל הכי גבוה בספקטרום הבליעה ומהו אורך הגל אחריו?
השתמשו בטבלה של רמות האנרגיה באטום המימן.

**3) דוגמה - אנרגיית ינון של יון הליום**
$He^+$ הוא יון של הליום המכיל שני פרוטונים ואלקטרון אחד. השתמשו במודל בוהר וחשבו את אנרגיית היינון של $He^+$, כלומר, כמה אנרגיה דרושה בשביל לנתק גם את האלקטרון היחיד שנשאר.
מהו אורך הגל המקסימאלי של פוטון הגורם ליינון?
הניחו שהאלקטרון במצב היסוד.

**4) דוגמה - אנרגיה של אטומים בטמפרטורת חדר**
לפי התיאוריה הקינטית (תיאוריה בתרמודינמיקה), האנרגיה הקינטית הממוצעת של אטום בגז (אידיאלי) היא: $\bar{E}_k = \frac{3}{2}\mathrm{kT}$ כאשר $k = 1.38 \cdot 10^{-23}\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$.
הוא קבוע בולצמן ו-T היא הטמפרטורה בקלווין. הסבירו מדוע בטמפרטורת החדר כמעט כל האטומים צריכים להיות במצב היסוד. (טמפרטורת החדר היא בערך 20 מעלות צלזיוס והטמפרטורה בקלווין שווה לטמפרטורה בצלזיוס פלוס 273).

**5) השוואה בין מעברים**
נתונים שלושה מעברים בין רמות אנרגיה של אטום המימן לפי מודל בוהר כאשר $n$ הוא המצב ההתחלתי ו-$n'$ הוא המצב הסופי.

I. $n = 1\ n' = 3$.
II. $n = 6\ n' = 2$.
III. $n = 4\ n' = 5$.

א. קבעו אילו מן המעברים הם בליעה ואילו פליטה.
ב. באיזה מעבר מעורב הפוטון הכי אנרגטי?

**6) יינון אטום מעורר**
כמה אנרגיה דרושה על מנת ליין אטום מימן מעורר הנמצא במצב אנרגיה החמישי?

**7) אורך גל של הקו השני**
מצאו את אורך הגל של הקו השני בסדרת בלמר.

**8) מימן בולע פוטון של הליום מיונן**
בשמש ישנם יונים של הליום - $He^+$. יון של ההליום פולט פוטון במעבר מרמה 5 לרמה 2. האם אטום מימן הנמצא בשמש יוכל לבלוע את הפוטון בלי לבצע יינון? אם כן בין איזה רמות אנרגיה תתבצע הבליעה?

**9) אנרגיית יינון של ליתיום פלוס שתיים**
חשבו את אנרגיית היינון (ממצב הייסוד) של אטום ליתיום החסר שני אלקטרונים $Li^{2+}$ בעל $Z = 3$ לפי מודל בוהר.

**10) אנרגיה קינטית של אלקטרון במצב יסוד**
מהי האנרגיה הפוטנציאלית והקינטית של אלקטרון במצב היסוד של אטום המימן?

**11) האם אטום המימן יחסותי**
השתמשו בתוצאה של התרגיל הקודם "אנרגיה קינטית של אלקטרון במצב ייסוד" ובדקו האם יש צורך להשתמש בנוסחאות יחסותיות במודל בוהר.

**12) רדיוס אטום מעורר**
אטום מימן מעורר יכול להיות תיאורטית בקוטר של 0.10mm.
באיזה רמת אנרגיה נמצא אטום זה? ומהי האנרגיה של מצב זה?

**13) אנרגיה ותנז**
מצאו את התנע הזוויתי של אלקטרון באטום המימן אם האנרגיה שלו היא $-1.5\text{eV}$.

**14) אלקטרונים פוגעים בגז מימן**
קרן אלקטרונים בעלי אנרגיה של 12.1eV פוגעת בגז מימן הנמצא בטמפרטורת החדר (רוב האטומים במצב היסוד).
מהו ספקטרום הפליטה שנצפה לראות מן הגז בעקבות פגיעת הקרן?

## תשובות סופיות:

1) 300nm בתחום העל סגול (UV).
2) $\lambda_{max}=122nm$ , $\lambda_2=103nm$ .
3) 22.8nm .
4) ראה סרטון.
5) א. בליעה : I , פליטה : II , בליעה : III. ב. מעבר I.
6) 0.544eV .
7) 490nm .
8) לא יוכל לקלוט.
9) 122.4eV .
10) $K=13.6eV, U=-27.2eV$ .
11) אין צורך.
12) ברמה ה-972 , האנרגיה היא : $-1.4\cdot10^{-J}eV$ .
13) $3.17\cdot10^{-34}kg\cdot\frac{m^2}{sec}$ .
14) אורכי הגל הנצפים הם : 103nm , 656nm , 122nm .

# שאלות ותרגילים נוספים:

## שאלות:

**1) טמפרטורה של כוכב**
איזה כוכב נמצא בטמפרטורה גבוהה יותר, כוכב הנראה כחול, אדום או צהוב?

**2) גופים שחורים בחושך**
אם קרינה נפלטת מכל גוף, למה אנחנו לא רואים אותם בחושך?

**3) צבע אור של נורה**
האם האור של נורה בטמפרטורה של 3000K יראה לבן כמו האור של השמש הנמצאת ב-6000K?

**4) חדר חושך**
למה בחדרי חושך מאירים בנורה אדומה כשמפתחים תמונה של שחור לבן?
האם ניתן להשתמש באור אדום גם בפיתוח של תמונה בצבע?

**5) תדירות סף מעדיפה תיאוריה פוטונית**
הסבירו למה העובדה שיש תדירות סף באפקט הפוטואלקטרי מסתדרת עם התורה הפוטונית ולא עם התורה הגלית של האור?

**6) אנרגיה של אינפרה אדום לעומת על סגול**
א. האם לפוטון יחיד של קרן בתחום העל סגול יש תמיד יותר אנרגיה מפוטון יחיד של קרן בתחום האינפרה אדום?
ב. האם לקרן בתחום העל סגול יש תמיד יותר אנרגיה מקרן בתחום האינפרה אדום?

**7) האם נפלטים יותר אלקטרונים באורך גל נמוך**
מקרינים מתכת באמצעות אור באורך גל מסוים ומודדים את האנרגיה של האלקטרונים הנפלטים. מחליפים את הקרן האור לקרן אחרת, באותה העוצמה אך עם אורך גל גדול יותר. בהנחה שבשני המקרים נפלטים אלקטרונים מן המתכת:
א. האם מספר האלקטרונים הנפלט גדל / קטן או נשאר ללא שינוי?
ב. האם האנרגיה של האלקטרונים גדלה / קטנה או נשארת ללא שינוי?

**8) אורך גל של פוטון בפיזור**
האם אורך הגל של פוטון בקרינת X המפוזר מאלקטרון גדל / קטן או לא משתנה?

**9) הבדל בין הפוטואלקטרי לקומפטון**
באפקט קומפטון הפגיעה של הפוטון יכולה לגרום ליציאה של אלקטרון מהמתכת, במקרה כזה מה ההבדל בינו לאפקט הפוטואלקטרי?

**10) איך העוצמה יורדת עם המרחק לפי כל מודל**
נניח כי ישנו מקור אור נקודתי, כיצד צריכה לרדת העוצמה של האור כתלות במרחק מהמקור לפי המודל הפוטוני וכיצד לפי המודל הגלי.
האם ניתן להבחין בין המודלים בדרך זו?

**11) מהם ההבדלים בין פוטון לאלקטרון**
ציינו את כל ההבדלים בין פוטון לאלקטרון.

**12) האם יש חמצן על כוכב**
כיצד ניתן לדעת האם יש חמצן על פני השמש או על כוכבים בכלל?

**13) נכונות הנוסחה של אנרגיית הפוטון**
השתמשו בשימור תנע והראו כי לפוטון הנפלט מאטום המימן יש קצת פחות אנרגיה מאשר החישוב שבנוסחה: $\mathrm{h}f = E_U - E_L$.

**14) ספקטרום בליעה ופליטה בטמפרטורות שונות**
נניח שניקח את ספקטרום הפליטה של גז מימן הנמצא בטמפרטורה מאוד גבוהה כך שחלק מהאטומים נמצאים במצב מעורר ונעביר אותו דרך גז מימן הנמצא בטמפרטורה החדר (האטומים לא מעוררים) כך שתתבצע בליעה.
האם קווי הבליעה יהיו זהים לקווי הפליטה?

**15) אנרגיה מקסימלית להתנגשות אלסטית**
מהי האנרגיה המקסימאלית עבורה יתנגשו שני אטומי מימן הנמצאים במצב היסוד התנגשות אלסטית?

**16) כמה פוטונים נכנסים לעין מנורה**

נורה של 40W פולטת בערך 3% מהאנרגיה המושקעת בה כאור נראה באורך גל ממוצע של 550nm. האור נפלט בצורה אחידה לכל הכיוונים.

העריכו כמה פוטונים פוגעים בעין של אדם הנמצא במרחק 10m מהנורה בכל שניה. קוטר האישון הוא 4.0mm.

**17) כמה פוטונים מגיעים מהשמש**

עוצמת האור המגיע מן השמש היא: $I = 1350\ \frac{W}{m^2}$.

חשבו כמה פוטונים למטר מרובע לשנייה יש פוגעים בפני כדור הארץ מן השמש? קחו אורך גל ממוצע של 550nm.

**18) כוח של קרן לייזר**

קרן לייזר באורך גל של: $\lambda = 633nm$ פוגעת בחיישן כוח. החיישן מודד כוח של: $F = 3.0nN$. כמה פוטונים פוגעים בחיישן כל שניה אם נניח שהפוטונים אינם מוחזרים?

**19) חלקיקי אלפא מתקרבים לגרעין**

בחלק מהניסויים של רתפורד הוא השתמש בחלקיקי אלפא בעלי מטען $+2e$ עם אנרגיה של 3.6MeV. כמה קרוב יכלו החלקיקים להגיע למרכז גרעין של כסף המכיל מטען של 47e+. התעלמו מהרתע של הגרעין.

**20) פוטנציאל עצירה בניסוי פוטואלקטרי**

בניסוי פוטואלקטרי מקרינים מתכת באור באורך גל 440nm ומודדים כי פוטנציאל העצירה הוא 1.2V. מה יהיה פוטנציאל העצירה אם יחליפו את האור לאורך גל של 550nm.

**21) שינוי תדירות בפוטואלקטרי**

בניסוי פוטואלקטרי פוטונים באנרגיה של 9.0eV פוגעים במתכת ומתח העצירה הנמדד הוא 5.0V.

א. מה תהיה האנרגיה המקסימאלית של האלקטרונים הנפלטים אם תדירות הפוטונים תקטן לחצי מהתדירות המקורית?

ב. חזרו על סעיף א אם התדירות תקטן לשליש מהתדירות המקורית.

**22) מודל בוהר לשמש וכדור הארץ**

נסו ליישם את המודל של בוהר לכדור הארץ והשמש.

א. מהם הרדיוסים ורמות האנרגיה? יש להשתמש ב:

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{sec}^2 \mathrm{kg}} \ , \ M_E = 5.97 \cdot 10^{24} \mathrm{kg} \ , Ms = 2 \cdot 10^{30} \mathrm{kg}$$

ב. חשבו את רמת האנרגיה שבה נמצא כדור הארץ אם המרחק מהשמש הוא: $r = 1.50 \cdot 10^{11} \mathrm{m}$.

ג. * הראו כי ההבדל בין רמות האנרגיה זניח עבור מודל זה וניתן להתייחס לאנרגיה כרציפה.

**23) כוח על פנס**

פנס קטן עובד בהספק של 5W כאשר כ-3% מנוצל לאור נראה.
העריכו את הכוח המופעל על הפנס אם האור יוצא בכיוון אחד.

**24) זמן ואורך פלאנק**

נסתכל על שלושה קבועים בסיסיים בטבע קבוע הגרביטציה:

$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{sec}^2}$, קבוע פלאנק: $\mathrm{h} = 6.63 \cdot 10^{-34} \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{sec}}$

ומהירות האור: $c = 3 \cdot 10^{8} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}$.

א. מצאו קומבינציה מתמטית של הקבועים האלו שתהיה ביחידות של זמן.
זמן זה נקרא זמן פלאנק $t_p$ והוא נחשב לזמן המוקדם ביותר מרגע תחילת הייקום שבו ניתן להפעיל את חוקי הפיזיקה כפי שאנחנו מבינים כיום.
חשבו את זמן זה.

ב. מצאו קומבינציה מתמטית של הקבועים האלו שתהיה ביחידות של אורך.
אורך זה נקרא אורך פלאנק $\lambda_p$ והוא נחשב לאורך הקטן ביותר שבו ניתן להפעיל את חוקי הפיזיקה כפי שאנחנו מבינים כיום. חשבו את אורך זה.

## תשובות סופיות:

**1)** כחול.

**2)** כי הקרינה הנפלטת היא לא בתחום הנראה.

**3)** לא, הוא יראה יותר צהוב אדום.

**4)** כי סרט שחור לבן לא מגיב לאור אדום, לא ניתן להשתמש באור אדום לפיתוח תמונה צבעונית.

**5)** לפי התורה הגלית האנרגיה של האור קשורה לעוצמת האור ולפי התורה הפוטונית לתדירות.

**6)** א. כן. ב. לא.

**7)** א. ללא שינוי. ב. קטנה.

**8)** גדל.

**9)** באפקט קומפטון הפוטון מפוזר באנרגיה יותר נמוכה לעומת הפוטואלקטרי שם תמיד כל הפוטון נבלע וכל האנרגיה שלו הולכת לאלקטרון.

**10)** לפי אחד חלקי המרחק בריבוע בשניהם ואי אפשר להבחין ביניהם.

**11)** משותף: תנע - לשניהם יש, דואליות גל חלקיק לשניהם (לשניהם יש אורך גל).
שונה: פוטון נע רק במהירות האור, לפוטון אין מסת מנוחה, לפוטון אין מטען חשמלי.

**12)** לפי ספקטרום הפליטה.

**13)** ראה סרטון.

**14)** לא.

**15)** $10.2\text{eV}$.

**16)** $10^{10}$.

**17)** $3.7\cdot10^{21}$ פוטונים.

**18)** $2.9\cdot10^{8}$ פוטונים לשנייה.

**19)** $3.76\cdot10^{-14}\text{m}$.

**20)** $0.64\text{V}$.

**21)** א. $0.5\text{eV}$. ב. לא תהיה פליטת אלקטרונים.

**22)** א. $r_n = 2.34\cdot10^{-138}_{\text{m}}\cdot n^2$ , $E_n = -1.68\cdot10^{182}_{\text{J}}\cdot\frac{1}{n^2}$. ב. $n = 2.53\cdot10^{74}$.
ג.ראה סרטון.

**23)** $5\cdot10^{-10}\text{N}$.

**24)** א. $t_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 1.35\cdot10^{-43}\,\text{sec}$. ב. $\lambda_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 4.05\cdot10^{-35}\text{m}$.