

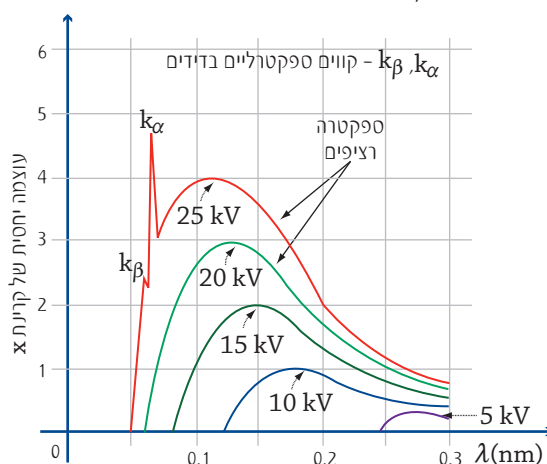
סעיף זה הוא תוספת לספר "קרניה וחומר כרך ג - מודלים של האטום והגרעין". הוא ישולב בעתיד כסעיף האחרון (סעיף 6) בפרק ה - מבנה הגרעין.

6. קרנית רנטגן (קרנית X)

6.1 הספקטרום הרציף של קרנית רנטגן

בספר "קרניה וחומר כרך ב - מודלים של האור", עסקנו בהיבטים מסוימים של קרנית רנטגן (קרנית X) (עמודים 257 - 262). עתה, לאחר שהרחבנו את ידיעותינו בנושאי קרניה וחומר, נרחיב את הנושא "קרנית רנטגן".

ציינו בספר "מודלים של האור" כי אלקטרונים מואצים בשפופרת ליצירת קרנית רנטגן במתח גבוה, פוגעים באנודה, ונבלמים בה. האנודה נקראת לעיתים גם "אנטי-קתודה" לעיתים גם "מטרה". רוב האלקטרונים הפוגעים במטרה אינם יוצרים קרנית X, אלא מחממים את המטרה. לכן המטרה בנויה ממתכת בעלת טמפרטורת היתוך גבוהה, ולרוב מקיפים אותה במערכת מקררת. בתרשים 7 מתוארים חמישה ספקטרה (ספקטרה - רבים של ספקטרום) המתאימים להאצת אלקטרונים בשפופרת מסוימת האלקטרונים הואצו בחמישה מתחים שונים. כפי שאפשר לראות בתרשים, באחד הניסויים שנכנה אותו הניסוי הראשון, האלקטרונים הואצו במתח מאיץ של 5 kV (5,000 V), בניסוי השני הם הואצו במתח של 10 kV, בשלישי ב- 15 kV, ברביעי ב- 20 kV ובחמישי במתח מאיץ של 25 kV.



תרשים 7: ספקטרה אופייניים של קרנית X הנפלטת משפופרת מסוימת בחמישה מתחי האצה שונים

ארבעת הספקטרה הראשונים התקבלו במתחי האצה נמוכים ממתח ההאצה בניסוי החמישי. כל אחד מארבעת הספקטרה הראשונים הוא רציף. הספקטרום החמישי, זה שמתאים להאצה במתח של 25 kV, מורכב משני חלקים: מחלק רציף, ומחלק שני שהוא קווים ספקטרוניים בדידים האופייניים למתכת שממנה עשויה האנודה. בסעיף זה (6.1) נעסוק בחלק הרציף בלבד.

תכונות הספקטרום הרציף, כפי שאפשר ללמוד מתוצאות ניסויים:

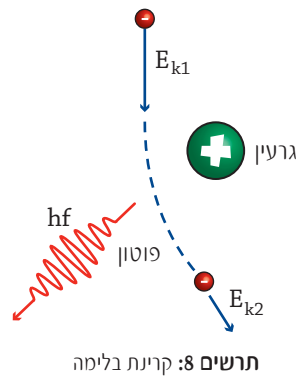
א. צורתו אינו תלויה בחומר שממנו עשויה הקתודה.

ב. הוא תחום מצידו האחד על ידי אורך גל מינימלי שנסמנו ב- λ_{\min} .

ג. λ_{\min} אינו תלוי בחומר שממנו עשויה הקתודה, והוא נמצא ביחס הפוך למתח המאיץ.

הקרנה המתאימה לספקטרום הרציף מוסברת בעיקרה על ידי הפיסיקה הקלסית:

אלקטרון הנע במהירות גבוהה פוגע במטרה ומגיע אל קרבת גרעין של אטום המטרה הטעון במטען חשמלי חיובי, ומוסח על ידי הגרעין (תרשים 8). הכוח שהאטום הכבד מפעיל על האלקטרון המתנגש בו גורם להאצת האלקטרון כתוצאה משינוי כיוון מהירות האלקטרון ושינוי גודל המהירות. על פי המודל האלקטרומגנטי הקלאסי, כאשר מטען חשמלי מואץ, הוא מקרין אנרגיה אלקטרומגנטית (ראה עמוד 235 בספר "קרנה וחומר כרך ב - מודלים של האור"). הקרינה המתקבלת מאלקטרון נבלם נקראת **קרינת בלימה** (ידועה בשמה הגרמני Bremsstrahlung). האלקטרון הפוגע יכול "לאבד" אנרגיה קינטית בכמה "צעדים" - בכל "צעד" האלקטרון "מאבד" אנרגיה, אולם, אי אפשר להסביר בעזרת המודל הגלי את צורתו של הספקטרום הרציף, ובמיוחד את העובדה שקיים אורך גל מינימלי λ_{\min} (ראה תרשים 9)



הסבר קיומו של אורך גל מינימלי, והקשר שלו למתח המאיץ, בעזרת המודל הדואלי של האור:

הערך המינימלי של אורך הגל המתאים למתח מאיץ מסוים מאשש את ההנחה שבאינטראקציה של קרינה עם חומר האור מתנהג כחלקיקים (ולא כגלים). הסיבה היא שלכל מתח האצה, כלומר לכל אנרגיה של האלקטרון מתאים אורך גל מינימלי אחר, ואילו במודל הגלי אין קשר בין אנרגיה של גל לבין תדירותו (או אורך הגל).

נמצא ביטוי ל- λ_{\min} : כאשר האלקטרון מגיע לאנודה, אחרי האצה במתח V , האנרגיה שלו היא eV . אם האלקטרון פולט את כל האנרגיה שלו כפוטון **יחיד**, תהיה האנרגיה של פוטון זה שווה לאנרגיית האלקטרון. לפוטון זה תהיה אנרגיה מקסימלית והוא יתאים לכן לתדירות המקסימלית של קרינת הרנטגן הנוצרת, כלומר לאורך הגל המינימלי:

$$hf_{\max} = eV \Rightarrow \frac{hc}{\lambda_{\min}} = eV \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$

6.2 קווים ספקטרוניים בדידים של קרינת X

החלק הקווי של ספקטרום קרינת X נובע מעירור אטומים במטרה, והוא אופייני לחומר שממנו עשויה האנודה. לכל חומר מתאים ספקטרום קווי אחר.

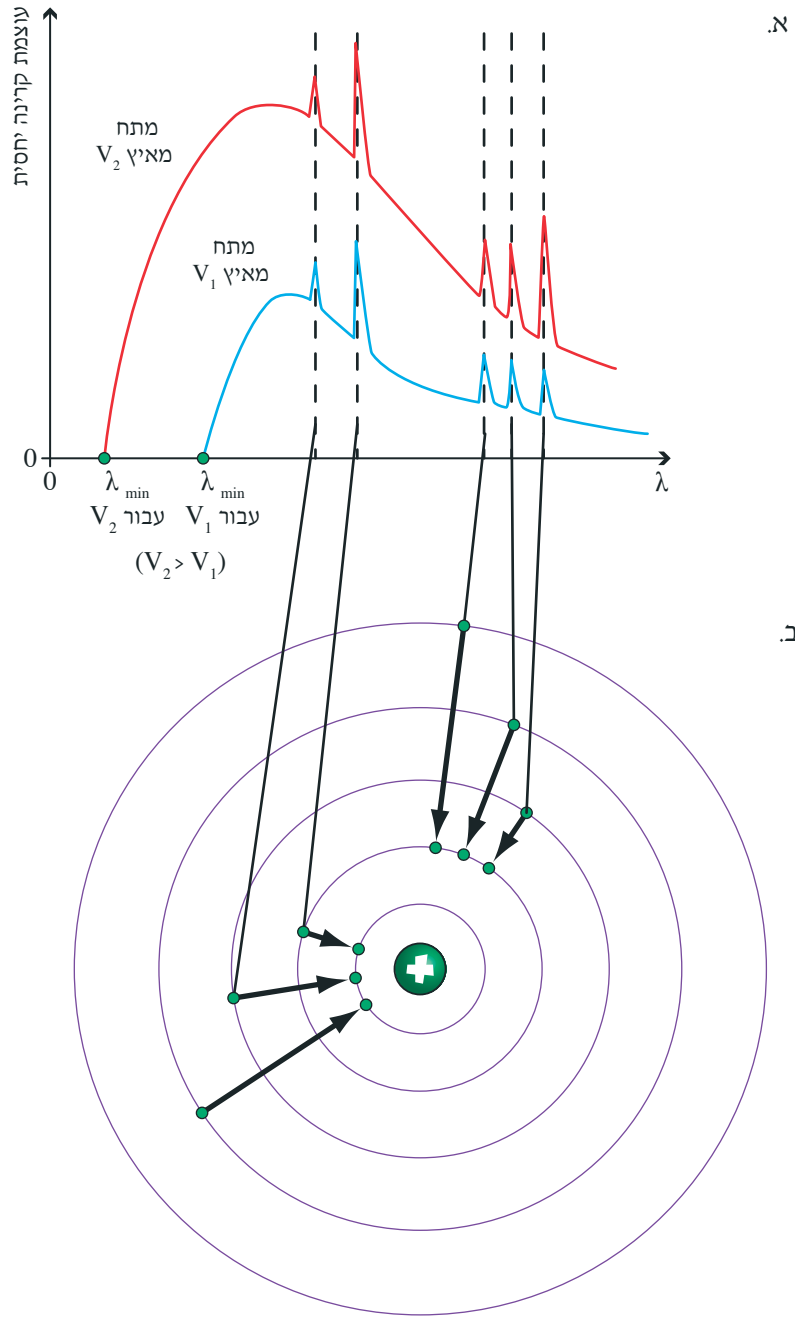
באיור 9 מוצגים שני ספקטרום שהתקבלו משני מתחי האצה גבוהים, כך שמופיע בהם, בנוסף לחלק הרציף, גם חלק קווי.

החלק הקווי נוצר כך:

אלקטרון מואץ שהוא בעל אנרגיה קינטית גבוהה יכול "לחדור" לתוך האטום ו"להעיף" מתוכו אלקטרון פנימי אל מחוץ לאטום. נכנה אלקטרון זה לצורך ההסבר בשם אלקטרון א. באטום נוצר מעין "חור" (חוסר אלקטרון). מצב כזה של האטום אינו יציב, והוא "שואף" לחזור למצב היסוד שלו.

אלקטרון שנמצא באחת מרמות האנרגיה הסמוכות והגבוהות יותר, נכנה אותו אלקטרון ב, "קופץ" לתוך ה"חור", וכתוצאה מכך נפלט פוטון שהאנרגיה שלו שווה להפרש האנרגיות של שתי הרמות. באטומים כבדים, אנרגיה זו גבוהה בשלושה או ארבעה סדרי גודל מהאנרגיות הקשורות לעירור האלקטרונים החיצוניים של האטום. התהליך עדיין לא הסתיים בהכרח; כתוצאה מקפיצת אלקטרון נוצר עתה "חור" ברמת המוצא שלו. אלקטרון מרמה גבוהה יותר (אלקטרון ג), "קופץ" וממלא אותה. בתהליך שרשרת כזה מועתק ה"חור" עד לרמה הקיצונית ביותר, ואז הוא מתמלא על ידי אלקטרון חיצוני.

הקווים הספקטרליים הבדידים של קרינת הרנטגן מאפשר למדוד את הפרשי האנרגיות בין רמות שונות באטומים מרובי אלקטרונים.



תרשים 9: שני ספקטרה שהתקבלו בשפופרת ליצירת קרינת X בשני מתחי האצה גבוהים

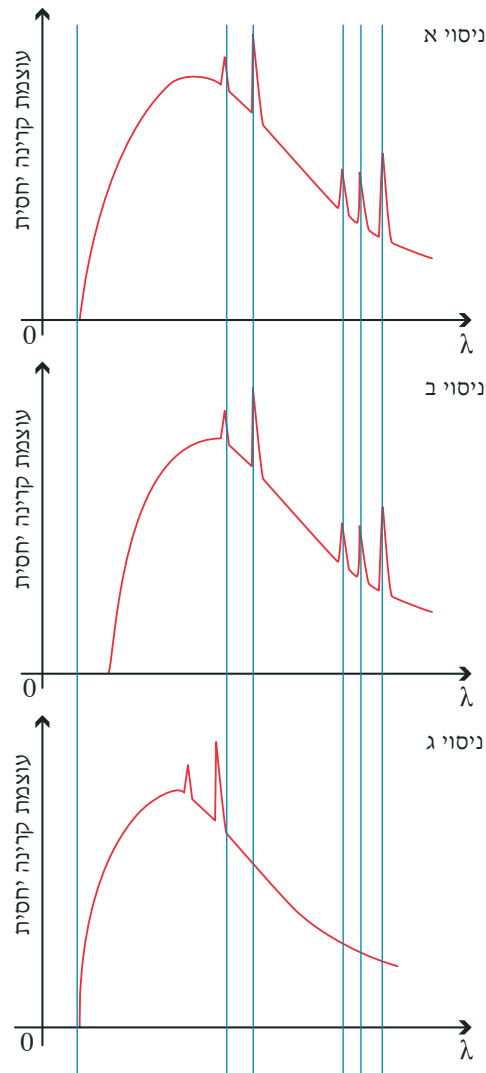
תרגילים

1. המתח המאיץ בשפופרת מסוימת ליצירת קרינת X הוא $2,000 \text{ V}$.
 - א. חשב את אורך הגל המינימלי של קרינת ה-X הנפלטות מהשפופרת.
 - ב. הספקטרום הוא רציף בלבד, כלומר אינו כולל קווים האופייניים למתכת שממנה עשויה המטרה. ציין סיבה אפשרית לכך.

2. א. (1) לקרינת X הנפלטת משפופרת יש אורך גל מינימלי. הסבר מדוע תופעה זו מעידה על האופי החלקיקי של קרינת X.
 - (2) ציין תופעה אחת שבה מתבטא האופי הגלי של קרינת X.
 - ב. נתון מקור קרינת X, הפולט אלומת פוטונים בעלי אנרגיה של 30 keV ($3 \cdot 10^4 \text{ eV}$) לכל פוטון. חשב את אורך הגל של הקרינה.
 - ג. הספק האלומה של קרינת ה-X שבסעיף ב' הוא $5 \cdot 10^{-3} \text{ W}$. חשב את מספר הפוטונים הנפלטים מן המקור בכל שנייה.
 - ד. ציין תכונה אחת של האלקטרונים המאפשרת תבנית התאבכות, וציין תכונה אחת של הגביש המאפשרת תבנית כזו.
 - ה. חשב את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים באלומה, אם ידוע שאורך הגל שלהם שווה לאורך הגל של קרינת ה-X שחישבת בסעיף ב'.

3. א. מה קובע את צורתו של הספקטרום הרציף המתקבל משפופרת של קרני X?
 - ב. מדוע הספקטרום הקווי המתקבל בשפופרת קרינת X אופייני לחומר שממנו עשויה האנודה?

4. לפניך תרשימים של שלושה ספקטרה שהתקבלו בשלושה ניסויים א, ב ו-ג שכל אחד נערך בשפופרת אחרת ליצירת קרינת X. הגרפים סורטטו במערכות צירים בעלות אותן יחידות.
 - א. באילו ניסויים היו מתחי ההאצה שווים? נמק.
 - ב. באילו שפופרות עשויות האנודות מאותו חומר? נמק.



תשובות

1. א. 0.62 nm

2. א. (2) תופעת התאבכות

ב. 0.041 nm

ג. $1.04 \cdot 10^{12}$ פוטונים בשנייה

ד. תכונה של האלקטרונים: אופי גלי. תכונה של גביש: מרווח בין שכבות היונים הוא מסדר גודל של אורך הגל של האלקטרונים.

ה. $\approx 905 \text{ eV}$

3. א. המתח המאין.

ב. אורכי הגל של הקווים הספקטראליים הבדידים נקבעים על פי רמות האנרגיה, ואלה אופייניים לחומר שממנו עשויה האנודה.

4. א. בנסויים א ו-ג.

ב. בשפופרות א ו-ב.

