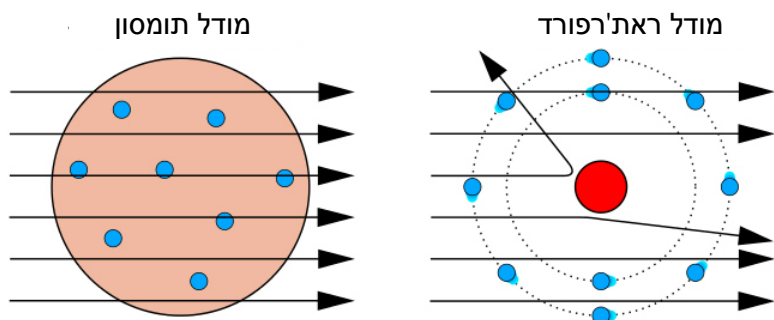


תומסון האנגלי, אשר ב-1897 גילה את האלקטרון, הציע ב-1904 מודל למבנה האטום. על פי מודל זה, המכונה "עוגת צימוקים", האטום הינו כדור בעל מטען חיובי שבתוכו פזורים אלקטרונים בעלי מטען שלילי, כאילו היו צימוקים בעוגה כדורית. לעומתו טען נגאוקה היפני, כי אין זה סביר שמטענים מנוגדים יחדרו זה לזה, והציע מודל אלטרנטיבי לתיאור האטום: המטען החיובי מרוכז בגרעין קטן, ואילו האלקטרונים השליליים נעים סביבו במסלולים טבעתיים, בדומה לטבעות כוכב הלכת שבתאי. מודל זה אושש עקרונית ב-1908, כשראת'רפורד ממנצ'סטר הפגיש רדיד זהב בחלקיקי אלפא (גרעינים של אטומי הליום). חלקיקים חיוביים ומסיביים אלה סטו בד"כ אך במעט ממסלולם, אבל מיעוטם סטה באופן קיצוני עד כדי רגיעה אחרנית (איור). לאור זאת הציע ראת'רפורד מודל, אשר מדמה את האטום למערכת השמש (מודל פלאנטרי): גרעין חיובי קטן ומסיבי במרכז, אשר סביבו נעים במרחק גדול יחסית אלקטרונים שליליים, קטנטנים בגודלם ובמסתם. רק מודל שכזה, טען ראת'רפורד, יכול להסביר את רגיעתם של חלקיקי האלפא: "הם התקרבו כ"כ לגרעין החיובי והמסיבי, שכוח הדחייה החשמלי (כוח קולון) שינה בקיצוניות את כיוונם". חלקיקי האלפא האחרים, אלה אשר המשיכו במסלולם מבלי לסטות, "פשוט חלפו דרך ה"אין" שבין הגרעין והאלקטרונים", או לכל היותר "פגעו באלקטרון מבלי להרגיש זאת" בשל היותם כה מסיביים ביחס אליו.

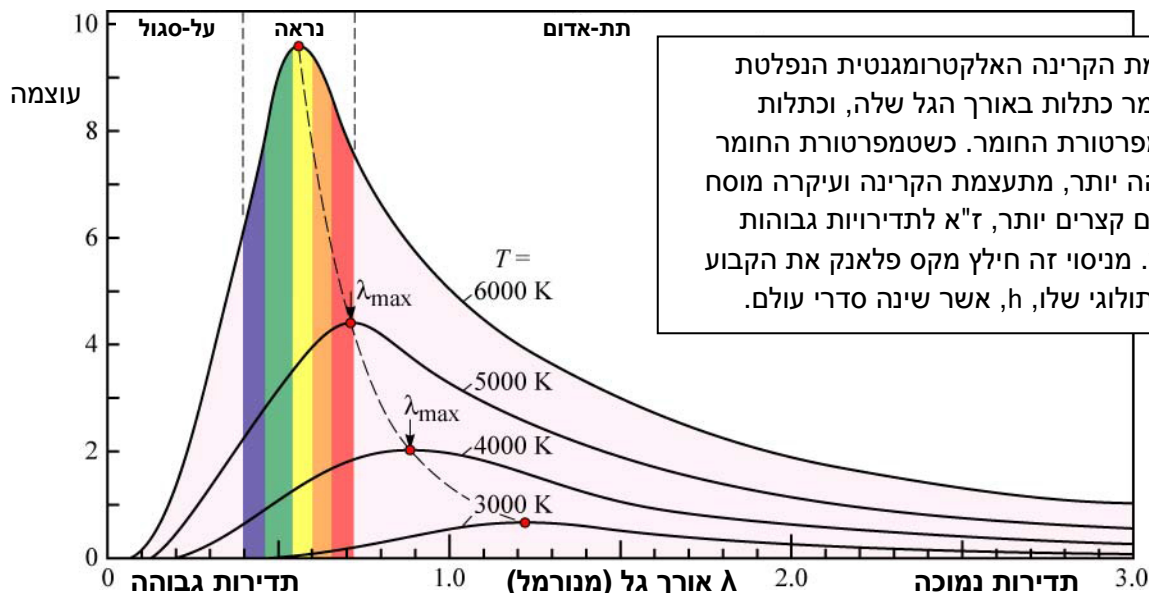


ע"פ מודל תומסון, חלקיקי האלפא המהירים והמסיביים אמורים לחדור דרך האטום הניטראלי ככדורי רובה. מודל ראת'רפורד מתאים לתוצאות הניסוי: רק אותם חלקיקי אלפא מעטים אשר גרעין האטום החיובי והמסיבי עומד בדרכם, סוטים משמעותית ממסלולם. השאר ממשיכים ישר ללא הפרעה.

מודל יפה, אמרו פיזיקאי העולם לראת'רפורד, אך אם האלקטרון אכן חג סביב הגרעין כפי שאתה טוען, הוא מואץ צנטריפטאלית ואמור לפלוט קרינה אלקטרומגנטית (פוטונים), כפי שעושה כל מטען חשמלי הנמצא בתאוצה. בעשותו כן, הוא אמור לאבד אנרגיה ולקרוס אל הגרעין, כך שהאטום שלך אינו יציב. בעיה זו אינה קיימת במודל תומסון, אשר בו האלקטרונים סטטיים. מעבר לכך, המודל שלך, כמו גם זה של תומסון, אינו מסביר את פשר ספקטרום הפליטה וספקטרום הבליעה של גז המימן (או של כל גז אחר לצורך העניין), אז כיצד הוא מקדם אותנו?

ספקטרום הפליטה של גוף חם

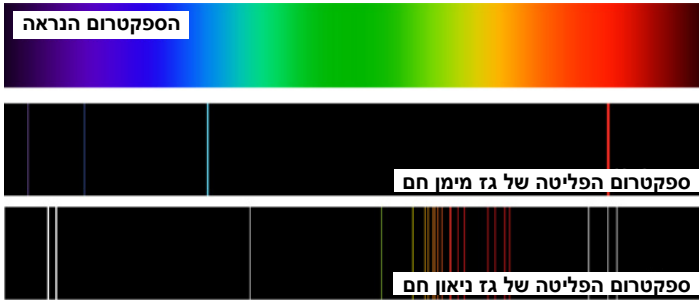
כל גוף פולט קרינה אלקטרומגנטית, ע"פ התפיסה הקלאסית - בשל היותו עשוי ממטענים חשמליים מתנוודים (מולקולות). כשטמפרטורת הגוף עולה, הקרינה מתעצמת ועיקרה מוסח לגלים קצרים יותר, ז"א לתדרים גבוהים יותר. חוט להט של נורה למשל, אם יחומם לטמפרטורה של 6000K (מעלות קלווין), יפלוט את עיקר הקרינה האלקטרומגנטית בתחום התדרים הנראה. בשל מגבלות הנדסיות הוא מחומם רק ל-3000K, כך שעיקר הקרינה שלו נפלט בתחום התת-אדום. חבל, מפני שהדבר הופכו למקור חום אשר פולט גם אור, במקום להיפך. בשל כך אסר משרד האנרגיה את השימוש בנורות ליבון החל משנת 2012. טמפרטורת השמש היא 5800K, כך שעיקר הקרינה שלה נמצא בתחום הנראה (צהוב שולט). האם זהו מקרה? ברור שלא. **הספקטרום האלקטרומגנטי אשר נפלט מגוף בשל היותו חם, הוא רציף, ז"א מכיל את כל אורכי הגל (תדריות, צבעים).**



עוצמת הקרינה האלקטרומגנטית הנפלטת מחומר כתלות באורך הגל שלה, וכתלות בטמפרטורת החומר. כשטמפרטורת החומר גבוהה יותר, מתעצמת הקרינה ועיקרה מוסח לגלים קצרים יותר, ז"א לתדריות גבוהות יותר. מניסוי זה חילץ מקס פלאנק את הקבוע המיתולוגי שלו, h , אשר שינה סדרי עולם.

ספקטרום הפליטה הרציף שתואר לעיל רלוונטי לכל גוף חם שהינו צפוף מספיק, וכאלה הם רוב הגופים שמסביבנו, אך לגז חם יש ספקטרום פליטה בלתי רציף - אורכי גל מסוימים בלבד.

לכל גז חם יש ספקטרום פליטה אופייני לו, ז"א צבעים מסוימים שרק אותם הוא פולט. התמונה מראה את אלה מתוכם אשר נמצאים בתחום הנראה, עבור הגזים מימן וניאון. מדוע מתקבל ספקטרום פליטה בדיד שכזה? ומדוע נפליטים מהגז אותם הצבעים בדיוק גם כאשר הוא קר ומופגז באלקטרונים, או מואר באור לבן (אור לבן מכיל את כל צבעי הקשת)? קירכהוף הגדול שאל כל זאת במהלך הניסויים שערך, אך לא מצא לכך הסבר מניח את הדעת. כפי שבוודאי מובן, גם בתחומים העל-סגול (שמאלה בתמונות שפרק זה) והתת-אדום (ימינה בתמונות שבפרק זה) נפליטים "צבעים", אך אלה אינם יכולים להיראות בתמונה, אלא רק בדיאגרמה.



ספקטרום הבליעה של גז

ספקטרום הבליעה (רק החלק הנראה) של גז מימן חם/לא דליל. ספקטרום הבליעה של גז מימן קר/דליל נמצא כולו בתחום העל-סגול.

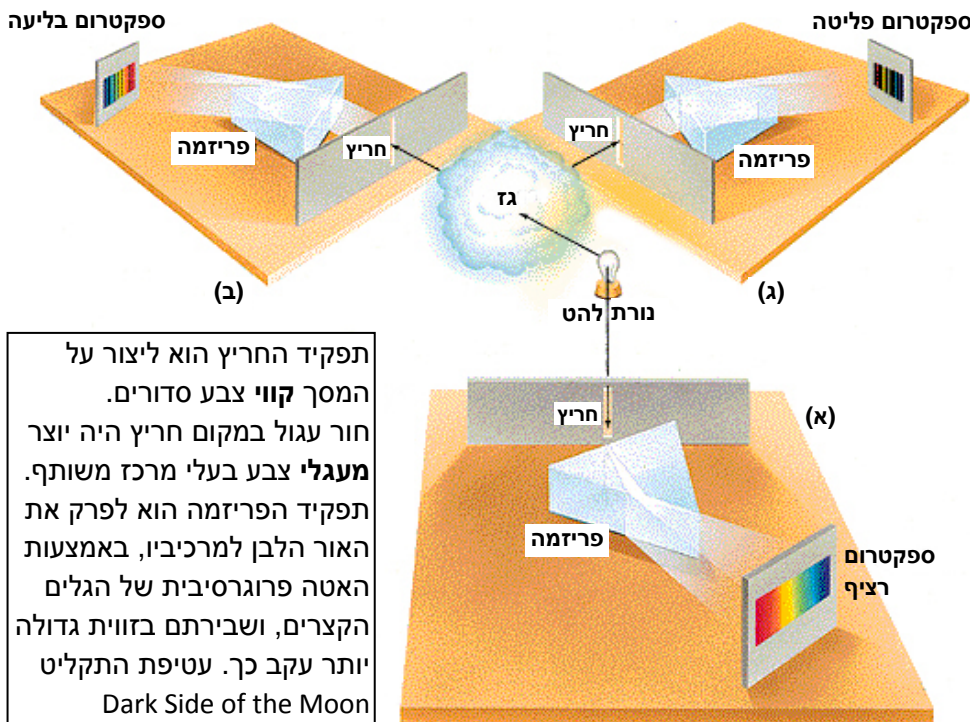


ספקטרום הפליטה (רק החלק הנראה) של גז מימן חם/לא דליל, או קר/דליל המואר באור לבן או מופגז באלקטרונים.



כאשר מאירים גז באור לבן, מתקבל על מסך הממוקם מאחורי הגז ספקטרום רציף חסר, ז"א ספקטרום רציף שחסרים בו צבעים מסוימים. הצבעים החסרים נקראים "ספקטרום הבליעה", משום שהם נבלעים בגז ואינם מגיעים למסך שמאחוריו. קירכהוף גילה שספקטרום הבליעה של כל גז מוכל תמיד בספקטרום הפליטה שלו, ז"א, הצבעים שגז בולע מופיעים תמיד ב"רשימת הצבעים" שהוא פולט. מדוע זה כך? גם על זאת לא ידע לענות. הוא מצא גם שספקטרום הבליעה של גז קר/דליל, שונה מזה של גז חם/לא דליל.

בתמונה מוצג ספקטרום הבליעה (רק החלק הנראה) של גז מימן חם/לא דליל. ספקטרום הבליעה של גז מימן קר/דליל נמצא כולו בתחום העל-סגול, ז"א אינו מכיל צבעים בתחום הנראה. מסיבה זו אי אפשר להציגו בתמונה אלא רק בדיאגרמה. **לסיכום, ספקטרום הבליעה של גז מוכל תמיד בספקטרום הפליטה שלו, וממש זהה לו כאשר הגז חם (ראו בתמונה).**



תפקיד החריץ הוא ליצור על המסך קווי צבע סדורים. חור עגול במקום חריץ היה יוצר מעגלי צבע בעלי מרכז משותף. תפקיד הפריזמה הוא לפרק את האור הלבן למרכיביו, באמצעות האטה פרוגרסיבית של הגלים הקצרים, ושבירתם בזווית גדולה יותר עקב כך. עטיפת התקליט Dark Side of the Moon של להקת Pink Floyd הוקדשה לחלק זה של הניסוי.

מערך רעיוני של ניסוי קירכהוף

נורת להט (אור לבן) מאירה דרך חריץ ופריזמה על מסך. מתקבל ספקטרום רציף של גוף חם. (א)

כשבין הנורה למסך נמצא גז, מתקבל על המסך ספקטרום רציף חסר. הצבעים החסרים נקראים "ספקטרום הבליעה", משום שהם נבלעו בגז ולא הגיעו למסך. (ב)

כשמצידו של הגז מוקם מערך זה שלישי של חריץ, פריזמה ומסך, מתקבל ספקטרום בדיד-ספקטרום הפליטה, אשר מכיל את ספקטרום הבליעה ועוד מספר צבעים אחרים. (ג)

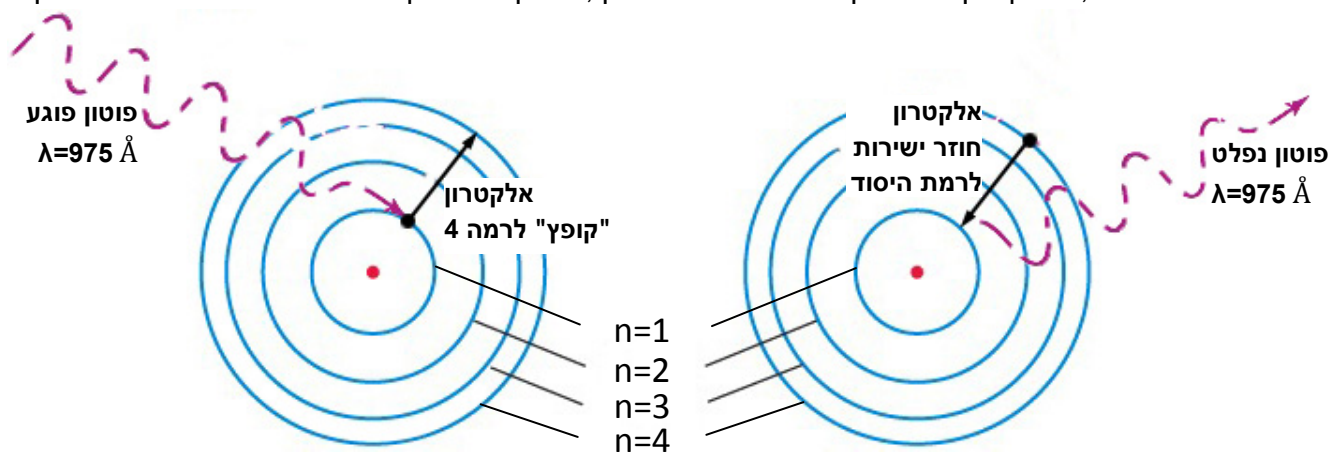
כעת אנו מבינים למה התכוונו הפיזיקאים, באומרם לראת'רפורד כי מודל האטום הפלנטארי שלו אינו מצליח להסביר את פשר ספקטרום הפליטה וספקטרום הבליעה של גז. נכון, גם מודל "עוגת הצימוקים" של תומסון אינו מצליח לעשות זאת, אך הוא מאפשר לפחות אטום יציב, בניגוד למודל הפלנטארי. כל שהצליח המודל הפלנטארי לעשות, הוא להסביר את רתיעת חלקיקי האלפא אשר שמשו להפגזת רדיד הזהב, ודבר לא מעבר לכך. דרוש היה "פיזיקאי על" אשר מסוגל לחשוב "מחוץ לקופסה", כפי שעשה איינשטיין בפתרו את התעלומה הפוטואלקטרית, ופיזיקאי שכזה אכן הגיע לבסוף בדמותו של נילס בוהר מדנמרק. בשנת 1913, הציע בוהר סייג למודל הפלנטארי: לאלקטרונים החגים סביב הגרעין מותר לנוע רק **ברדיוסים מסוימים**, ולא בכל רדיוס שיתאוו לו כפי שסבר ראת'רפורד. כשנשאל מדוע ענה: "מכפלת התנע של האלקטרון בהיקף מסלולו חייבת להוות כפולה שלמה של h ", והוסיף, "נובע מכך שיש לו רדיוס סיבוב מינימאלי שמתחתיו אסור לו להימצא, ולכן הוא אינו קורן אור תוך קריסה אל הגרעין". הוא פשוט אינו "רשאי" לקרן אור, **למרות היותו מטען חשמלי הנמצא בתאוצה**. נשמע מוזר הלא כן? גם את הכלת ספקטרום הבליעה של גז בספקטרום הפליטה שלו, ניתן להסביר על סמך הנחת "הרדיוסים המותרים לאלקטרון": כשאלקטרון של אטום גז נפגע מפוטון בעל **אנרגיה מתאימה**, הוא "**בולע**" את הפוטון ובתוך כך "קופץ" לרדיוס **מותר** גדול יותר, בהופכו את האנרגיה שקיבל מהפוטון לאנרגיה פוטנציאלית. מיד אח"כ הוא "נופל" בחזרה לרדיוס המקורי ו"נפטר" מהאנרגיה הפוטנציאלית באמצעות **פליטה** של פוטון. מדוע באמצעות פליטה של פוטון? כי לאלקטרון אין דרך אחרת להיפטר מהאנרגיה העודפת שלו. אם ה"נפילה" לרדיוס המקורי היא **ישירה**, ללא "תחנות ביניים" ברדיוסים מותרים שבדרך, חייבת אנרגיית הפוטון הנפלט מהאלקטרון להיות שווה לאנרגיית הפוטון אשר פגע בו קודם והקפיצו. מדוע? כי בנפילתו "נפטר" האלקטרון **מכל** האנרגיה הפוטנציאלית שהרוויח בקפיצתו, וזו הרי שווה בהכרח לאנרגיית הפוטון אשר נבלע בו והקפיצו. **לפוטון אשר נפלט עקב "נפילה ישירה" של אלקטרון לרדיוס המקורי שלו, ישנה בהכרח אנרגיה שהייתה לפוטון אשר הקפיץ את האלקטרון ונבלע בו, או במילים אחרות, לפוטון הנפלט יש בהכרח אותו הצבע שהיה לפוטון אשר נבלע.**

- את הרדיוסים המותרים לאלקטרון מסמנים $R_1, R_2, R_3, \dots, R_{n-1}, R_n, R_{n+1}, \dots, R_\infty$ הוא הרדיוס המותר המינימאלי, R_2 הוא הרדיוס המותר הבא שמעליו R_n הוא הרדיוס המותר ה-" n ". באטום מרובה אלקטרונים, מאוכלסים הרדיוסים המותרים החל מ- R_1 וכלה ב- R_n . אלקטרון שעובר מ- R_n לרדיוס מותר גדול יותר, R_{n+1} נניח, נקרא "אלקטרון מעורר". אטום אשר מכיל אלקטרון מעורר נקרא "אטום מעורר". בהמשך נעסוק בספקטרה של **גז דליל / קר**, ולכן נניח **שכברירת מחדל** האטומים אינם מעוררים.
- את האנרגיה המכאנית (פוטנציאלית + קינטית) של האלקטרון, נהוג לסמן $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n, \dots, E_\infty$ על פי הרדיוס שבו הוא חג. E_1 נקראת "רמת היסוד", E_2 נקראת "הרמה השנייה", ו- E_n נקראת "הרמה ה-" n ית". ברדיוס אינסופי, האלקטרון **משוחרר** מהאטום. הוא נמצא בקצה היקום, ולכן האנרגיה הפוט' שלו היא 0. גם אנרגיה קינטית אין הוא חייב לשאת, מפני שאינו חג סביב הגרעין. הוא יכול להימצא במנוחה. משתי סיבות אלה, הרמה האינסופית מוגדרת כ-0. בכל רדיוס קטן יותר, האנרגיה הפוט' היא שלילית וגדולה בערכה המוחלט מזו הקינטית (לא נוכיח זאת), כך שהאנרגיה המכאנית של האלקטרון היא שלילית. נגזר מכך שרמות האנרגיה הן שליליות, וגדלות **בערך המוחלט** כלפי מטה. מהי משמעות הדבר? **שערכה המוחלט של רמת אנרגיה, הוא בעצם האנרגיה שיש להשקיע בכדי לשחרר ממנה אלקטרון**. אכן, כדי לשחרר אלקטרון מרמה נמוכה יותר, נדרשת אנרגיה רבה יותר. האנרגיה הנדרשת לשחרורו של אלקטרון מהקליפה החיצונית, ז"א להקפצתו מרמה E_n אל הרמה האינסופית, היא **אנרגיית הקשר (היינון) של החומר**.
- כשרוצים לדון בכפיפה אחת ברדיוס ה-" n " וברמת האנרגיה ה-" n "ית המתאימה לו, פשוט כותבים **n** .
- בכל חומר **שאינו דליל** ישנם אלקטרונים מעוררים, ולו רק בשל אגיטציה חומנית (רטיטת מולקולות החומר בשל חומו). אלקטרון שעורר מחבטה של מולקולה שכנה פולט פוטון, נרגע, סופג שוב חבטה מעוררת, פולט פוטון נוסף, נרגע... ככל שחם יותר החומר, מתחזקות החבטות שסופגים האלקטרונים החגים באטומיו, והם מעוררים לרמות גבוהות יותר. התוצאה היא פליטתם של פוטונים בעלי מגוון רחב יותר של אנרגיות, והעשרתו של ספקטרום הפליטה עקב כך. ספקטרום הפליטה של **גז המחומם בהדרגה**, מוסבר כך בנקל ומתאים למודל בוהר: צבעים מסוימים בלבד מופיעים בו, ומדי פעם, בהגיע הגז לטמפרטורה מסוימת, מצטרפים כמה צבעים חדשים. אבל מה באשר **לספקטרום הפליטה הרציף של גז דחוס**? כיצד מתאים הוא למודל בוהר? ובכן, כאשר מולקולות הגז הופכות צפופות, הופכות גם **רמות האנרגיה** המותרות לצפופות, עד כדי שזירתן זו בזו והפיכתן ל**פס אנרגיה** רחב. בהתאמה, מתרבים גם הצבעים שבספקטרום הפליטה של הגז ונעשים צפופים יותר, עד שלבסוף, כשהגז דחוס מספיק, הם הופכים לספקטרום רציף המכיל את כל קשת הצבעים. כזה הוא ספקטרום הפליטה של כל גוף צפוף, לרבות גוף האדם, אשר פולט ספקטרום אלקטרומגנטי רציף שעיקרו בתחום התת-אדום. אמצעי ראיית לילה עושים בכך שימוש. באמצעים אלקטרוניים, הם ממירים אל התחום הנראה את המידע אשר נקלט בתחום התת-אדום.

- פוטון יעורר אלקטרון רק אם יש לו **בדיוק** האנרגיה הדרושה לכך. **הפוטון פועל על עיקרון "הכל או לא כלום"**. אחת מן השתיים, או שיש לו **בדיוק** האנרגיה הדרושה להקפצת אלקטרון מרמה n לרמה גבוהה יותר ואז הוא מוסר אותה לאלקטרון ונבלע בו, או שלא, ואז הוא עובר דרך ענן הגז ללא כל אינטראקציה עימו ויוצא מצידו השני. אם לפוטון ישנה אנרגיה מספיקה בשביל **לייבן** את האטום, הוא יעשה זאת, ואז **אין הוא מחויב** לאנרגיה "מדויקת".
- חבטה מעוררת אינה חייבת לנבוע מאגיטציה חומנית, אלא יכולה להיגרם גם מפגיעת יון כלשהו. אלקטרון המגיע במהירות ומתנגש באלקטרון של אטום, הוא מעורר נפוץ, בשל מסתו הזזה לזו של האלקטרון המיועד ל"הקפצה". בשונה מעירור האלקטרון ע"י פוטון, האלקטרון **הפוגע** אינו חייב לשאת אנרגיה "מדויקת" בכדי לעורר את האלקטרון של האטום. עליו לשאת **לפחות** את האנרגיה הדרושה, ואם הוא נושא יותר מכך, אין בעיה, הוא "ישמור את העודף לעצמו" לאחר שמסר לאלקטרון שבאטום את שנדרש לעירורו.
- בוהר חישב את הרדיוסים המותרים לאלקטרון **היחיד** של אטום המימן, וכן את האנרגיה שלו ("הרמה") כאשר הוא חג בכל אחד מהם. בשל כך נעסוק בעיקר בגז המימן, אשר האלקטרון שבאטומו, כל עוד הוא אינו מעורר, חג ב- R_1 .
- לעיתים נשתמש כאן במילה "צבע" כתחליף ל"אורך גל", גם אם הוא מחוץ לתחום הנראה לעין.

ספקטרום הבליעה וספקטרום הפליטה של גז מימן דליל / קר

נניח שכל טריליוני הפוטונים אשר פוגעים בגז מימן דליל הם בעלי אותו הצבע (אור מונוכרומטי של לייזר), שיש להם בדיוק האנרגיה הדרושה בשביל לעורר את האלקטרון לרמה הרביעית ($n=4$), ושכל טריליוני האטומים שבהם עורר האלקטרון, הוא חוזר **ישירות** לרמת היסוד (איור מתחת). במקרה זה יהיה ספקטרום הפליטה מונוכרומטי אף הוא, ז"א מורכב מצבע אחד בלבד - צבע הלייזר. משעמם, אך לעולם אין זה כך במציאות, מפני שרק **בחלק** מהאטומים יחזור האלקטרון **ישירות** לרמת היסוד. במרבית האטומים, האלקטרון יחזור דרך רמות מותרות שברך, ויהפוך את ספקטרום הפליטה להרבה יותר מעניין.



תוצאות חישובי בוהר לאטום המימן

להלן התוצאות לארבע הרמות הראשונות ונוסחה לאיבר הכללי, שעל פיה קל לראות כי $E_\infty = 0$, $R_\infty = \infty$

$$R_1=0.53 \text{ \AA} \quad R_2=2^2 \cdot R_1=2.12 \text{ \AA} \quad R_3=3^2 \cdot R_1=4.77 \text{ \AA} \quad R_4=4^2 \cdot R_1=8.48 \text{ \AA} \quad \dots \quad R_n=n^2 \cdot R_1$$

$$E_1 = -13.6 \text{ eV} \quad E_2 = \frac{E_1}{2^2} = -3.4 \text{ eV} \quad E_3 = \frac{E_1}{3^2} = -1.51 \text{ eV} \quad E_4 = \frac{E_1}{4^2} = -0.85 \text{ eV} \quad \dots \quad E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

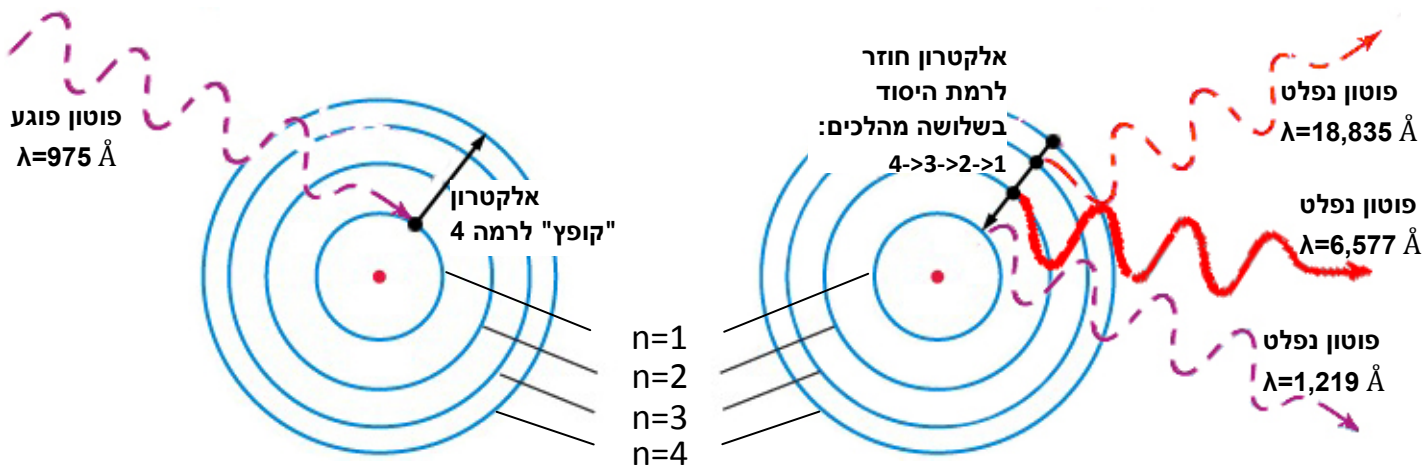
- הפרש האנרגיה שבין שתי רמות** שווה לאנרגיית הפוטון אשר נפלט מהאלקטרון בנפלו ביניהן, או לחילופין, לאנרגיית הפוטון אשר נבלע באלקטרון בקפצו ביניהן: $\Delta E = E_{ph} = \frac{12431}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{12431}{\Delta E}$

$$\lambda_{1 \rightarrow 4} = \frac{12431}{\Delta E_{1 \rightarrow 4}} \quad \text{כשנדבר על פוטון אשר נבלע באלקטרון והקפיצו, מרמה 1 לרמה 4 נניח, נביע זאת כך:}$$

$$\lambda_{4 \rightarrow 1} = \frac{12431}{\Delta E_{1 \rightarrow 4}} \quad \text{כשנדבר על פוטון אשר נפלט מאלקטרון שנפל, מרמה 4 לרמה 1 נניח, נביע זאת כך:}$$

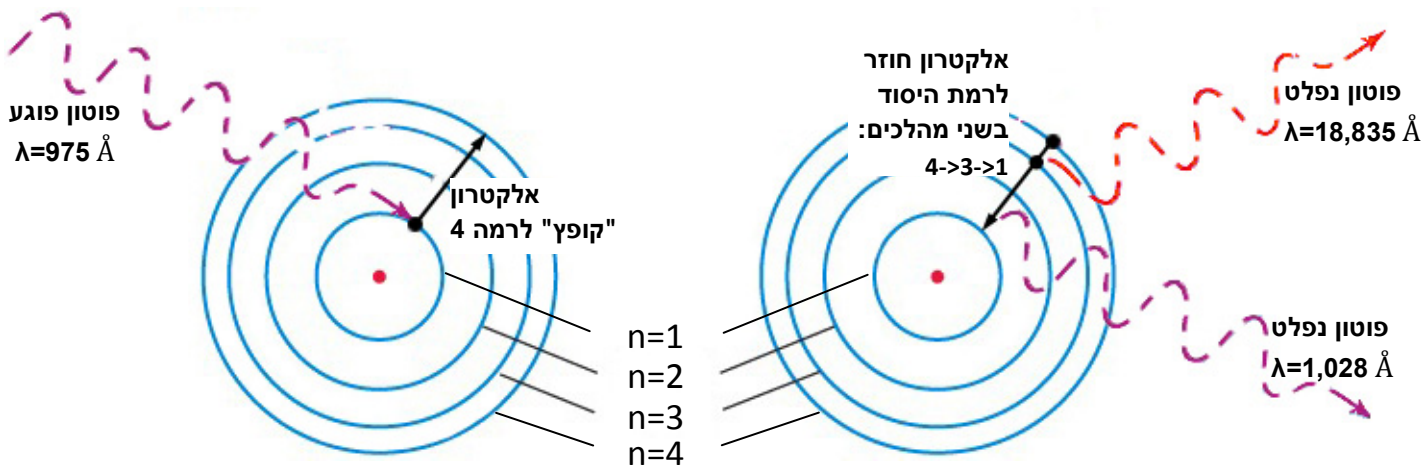
- באיורים, **חץ גלי סגול מקווקוו** מייצג פוטון בתחום העל-סגול, **חץ גלי אדום מקווקוו** מייצג פוטון בתחום התת-אדום. **חץ גלי מלא בצבע כלשהו, מייצג פוטון בתחום הנראה שהינו בעל צבע זה.**

נבחן כעת אפשרות שנייה, בת שלושה מהלכים, לאופן חזרתו של האלקטרון אל רמת היסוד: "נפילה" מ- $n=4$ ל- $n=3$, אח"כ מ- $n=3$ ל- $n=2$, ולבסוף מ- $n=2$ ל- $n=1$.



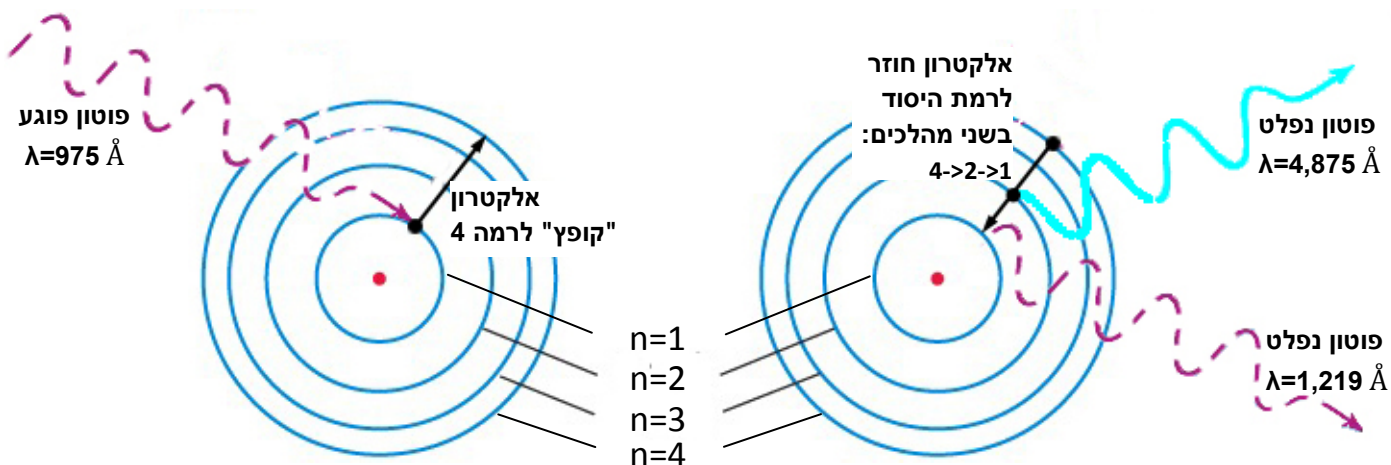
האנרגיות שמאבד האלקטרון בנפילותיו הן: מרמה 4 ל- 0.66 eV , מרמה 3 ל- 1.89 eV , ומרמה 2 ל- 10.2 eV . אנרגיית הפוטון הנפלט בכל נפילה, שווה לאנרגיה שאיבד האלקטרון באותה נפילה: בנפילה הראשונה נפלט פוטון דל אנרגיה (0.66 eV) וארך גל, הנמצא בתחום התת-אדום. בנפילה השנייה נפלט פוטון אנרגטי פי שלושה כמעט (1.89 eV), שהינו בתחום הנראה וצבעו אדום. לבסוף, בנפילה השלישית, נפלט פוטון עתיר אנרגיה (10.2 eV) וקצר גל, הנמצא בתחום העל-סגול. האנרגיה של שלושתם יחדיו, שווה כמובן לזו של הפוטון הפוגע.

נבחן אפשרות שלישית, בת שני מהלכים: "נפילה" מ- $n=4$ ל- $n=3$, ואז מ- $n=3$ ל- $n=1$.



הפרש האנרגיה שבין רמה 4 לרמה 3 הוא 0.66 eV , והפוטון הנפלט בנפילה זו נמצא בתחום התת-אדום, כפי שהוסבר קודם. הפרש האנרגיה שבין רמה 3 לרמה 1 הוא 12.09 eV , ולכן בנפילה השנייה ייפלט פוטון אנרגטי מאוד, הנמצא בתחום העל-סגול. האנרגיה של שניהם יחדיו שווה לזו של הפוטון הפוגע, מן הסתם.

וכעת לאפשרות הרביעית והאחרונה, אף היא בת שני מהלכים: "נפילה" מ- $n=4$ ל- $n=2$, ואז מ- $n=2$ ל- $n=1$.



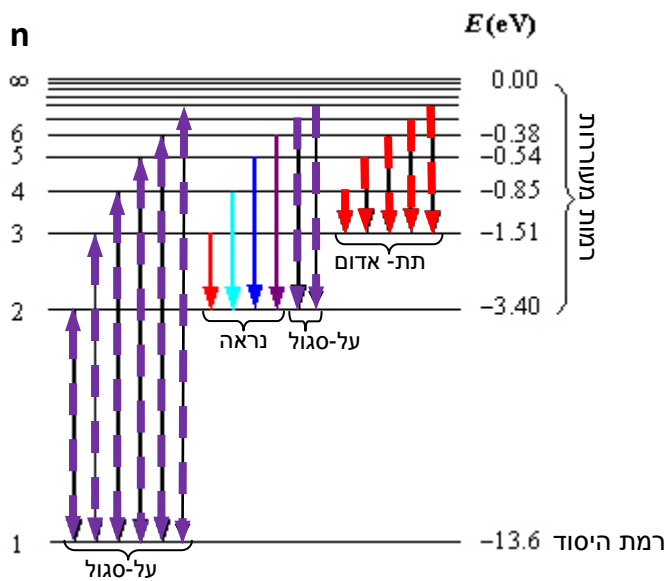
הפרש האנרגיה שבין רמה 4 לרמה 2 הוא 2.55 eV , ושוב אנו זוכים לפוטון בתחום הנראה - הפעם בצבע טורקיז. הפרש האנרגיה שבין רמה 2 לרמה 1 הוא 10.2 eV , וכפי שהוסבר קודם, הפוטון הנפלט בנפילה זו הוא בתחום העל-סגול. שוב, האנרגיה של שניהם יחדיו שווה לזו של הפוטון הפוגע.

כמה צבעים שונים מכיל אם כן ספקטרום הפליטה של גז מימן, אשר האלקטרונים שלו עוררו לרמה הרביעית? שישה מסתבר.
 $\lambda=18,835 \text{ \AA}$ (תת-אדום), $\lambda=6,577 \text{ \AA}$ (אדום), $\lambda=4,875 \text{ \AA}$ (טורקיז), $\lambda=1,219 \text{ \AA}$ (על-סגול), $\lambda=1,028 \text{ \AA}$ (ע"ס), $\lambda=975 \text{ \AA}$ (ע"ס).
 מופיעים ברשימה זו רק שני צבעים **בתחום הנראה** (אדום וטורקיז), מתוך הארבעה שבתמונת ספקטרום הפליטה. מדוע?



כל ארבעת הצבעים שבתמונה, מתקבלים מנפילת האלקטרון לרמה 2.
 $3 \rightarrow 2$ מניב אדום, $4 \rightarrow 2$ מניב טורקיז, $5 \rightarrow 2$ מניב סגול. רצף זה, אגב, התגלה ע"י הפיזיקאי בלמר.
 אנו עוררנו את טריליוני האלקטרונים שבענן גז המימן שלנו לרמה הרביעית בלבד, ולכן לא קיבלנו כחול וסגול. חבל.
 בפעם הבאה נעוררם לרמה השישית.

את רמות האנרגיה ומעברי האלקטרון ביניהן, נהוג לתאר סכמתית כפי שמודגם בדיאגרמה הבאה:



הדוגמה שמשמאל מתארת גז מימן דליל/קר, שבו האלקטרון מעורר לרמה השמינית. מניין לנו שהמימן דליל/קר? אנו רואים שהאלקטרון "קופץ" רק מרמת היסוד, משמע הוא לא היה מעורר מלכתחילה בשל אגיטיה חומנית.
 החיצים הדו-כיווניים שבקבוצה השמאלית מייצגים הן את ספקטרום הבליעה (ראש חץ כלפי מעלה), והן **חלק** מספקטרום הפליטה (ראש חץ כלפי מטה).
 שאר החיצים מייצגים את ייתרת ספקטרום הפליטה. מטעמי מקום, לא מופיעים כאן כל חיצו ספקטרום הפליטה. אם המימן לא היה דליל/קר, היה האלקטרון באטומים רבים מעורר מלכתחילה, ז"א חג ברמה גבוהה מרמת היסוד. פגיעת פוטון הייתה מקפיצה אותו מהרמה שבה הוא חג לרמה גבוהה עוד יותר, כך ש"שאר החיצים" היו הופכים **אף הם** לדו כיווניים. ספקטרום הבליעה היה מכיל אז הרבה יותר צבעים, והופך דומה יותר לספקטרום הפליטה.

דיאגרמה מסוג זה מהווה תחליף לסרטוט המעגלי שבו עשינו שימוש קודם לכן. השרטוט המעגלי עוזר אמנם לשמור על קשר עם המתרחש במציאות – אלקטרון אשר חג סביב הגרעין - אך הוא מטעה באשר לפרופורציות שבין הרדיוסים המותרים. במציאות, **ההפרשים** שבין הרדיוסים המותרים הולכים וגדלים, ואילו בשרטוט המעגלי כפי שנהוג לעשותו, הם הולכים וקטנים. מדוע זה כך? מפני שהדגש מושם על **הפרשי האנרגיה שבין הרדיוסים**, שאכן הולכים וקטנים, ולא על הרדיוסים עצמם.

שהיית האלקטרון ברמה מעוררת

ברוב רמות האנרגיה המעוררות, שוהה האלקטרון כעשר נאנו-שניות (10^{-8} sec), אך ישנן רמות "כמעט יציבות" (Metastable) שבהן שוהה האלקטרון כאלפית השנייה (10^{-3} sec). לא נסביר כאן מדוע זה כך, אך נציין כי ב-1917 גילה איינשטיין שאלקטרון אשר נפגע מפוטון **בעודו נמצא ברמה מעוררת**, יכול גם "ליפול" **כתוצאה מכך**, ולא רק "לקפוץ" מעלה.
 נפילה כזו של האלקטרון איננה נפילה ספונטנית כפי שהכרנו בעבר, אלא מתוזמנת ע"י הפוטון הפוגע, ז"א מאולצת. היות שהוא נופל, האלקטרון **אינו בולע** את הפוטון שפגע בו, וכתמיד, הוא גם **פולט** פוטון. פליטה כזו נקראת "פליטה מאולצת", ועליה מושתת הלייזר שמשמעו "הגברת אור באמצעות פליטה מאולצת של קרינה (אלקטרומגנטית)".
 פולס אור מונוכרומאטי מוקרן על אטומי גז שעוררו מראש לרמה "כמעט יציבה". צבע האור נבחר כך, שאנרגיית הפוטון שלו שווה בדיוק להפרש שבין הרמה ה"כמעט יציבה" ורמת היסוד. הפוטונים הפוגעים אינם נבלעים, ובעצם מספרם מוכפל, מפני שמיליארדי האלקטרונים המאולצים לנפול לרמת היסוד עושים זאת בו זמנית, כשכ"א מהם פולט פוטון זהה לזה שפגע בו. התוצאה היא אור מונוכרומאטי ממוקד וקוהרנטי (אחיד מופע), אשר גליו מתאבכים באופן בונה ומספקים עוצמת אור אדירה.

שיפוץ מודל בוהר

עיקרון אי הוודאות שניסח וורנר הייזנברג ב-1927, שולל את האפשרות שאלקטרון ינוע במהירות קצובה במסלול מעגלי מדויק. על פי עיקרון זה, מיקומו של האלקטרון הינו הימור סטטיסטי, אשר סיכויו רבים יותר באזורים מסוימים ופחותים באחרים. לאור זאת, מתואר האלקטרון בפיזיקה המודרנית כ"ענן של הסתברות", במקום כחלקיק הנע בתוואי מסוים.