

האור, הצבע והספקטרום

אור, קרינה וספקטרום

הפרק מיועד לתלמידים בכל הרמות ולמורים
הפרק כולל מספר ביטויים מתמטיים המיועדים לתלמידים מתקדמים ולמורים
המתקשים בפיתוחים המתמטיים יכולים לדלג עליהם

לקריאה משלימה ולתרגולים

פרק זה מבוסס על פרק ט' בספר
מדריך להכרת השמים, ד"ר יגאל פת-אל, הוצאת קוסמוס טלסקופים

<http://cosmos.co.il/wfile/catalog/books.htm>

מושגי יסוד - אור קרינה וספקטרום

הכוכבים המצויים בשמים כה רחוקים וכל המידע שיש לנו על תכונותיהם השונות מושג כתוצאה מניתוח הקרינה המגיעה מהם.

המידע המגיע מכוכבים יכול להגיע באופנים הבאים:

• קרינה אלקטרומגנטית

• קרינה קוסמית

הבנת העקרונות הבסיסיים של הקרינה האלקטרומגנטית וידיעת תכונותיהם החלקיקים האלמנטריים הנפלטים מגופים ביקום חיונית בכדי להבין את המסר שהקרינה והחלקיקים מביאים מהגופים ביקום

הקרינה האלקטרומגנטית

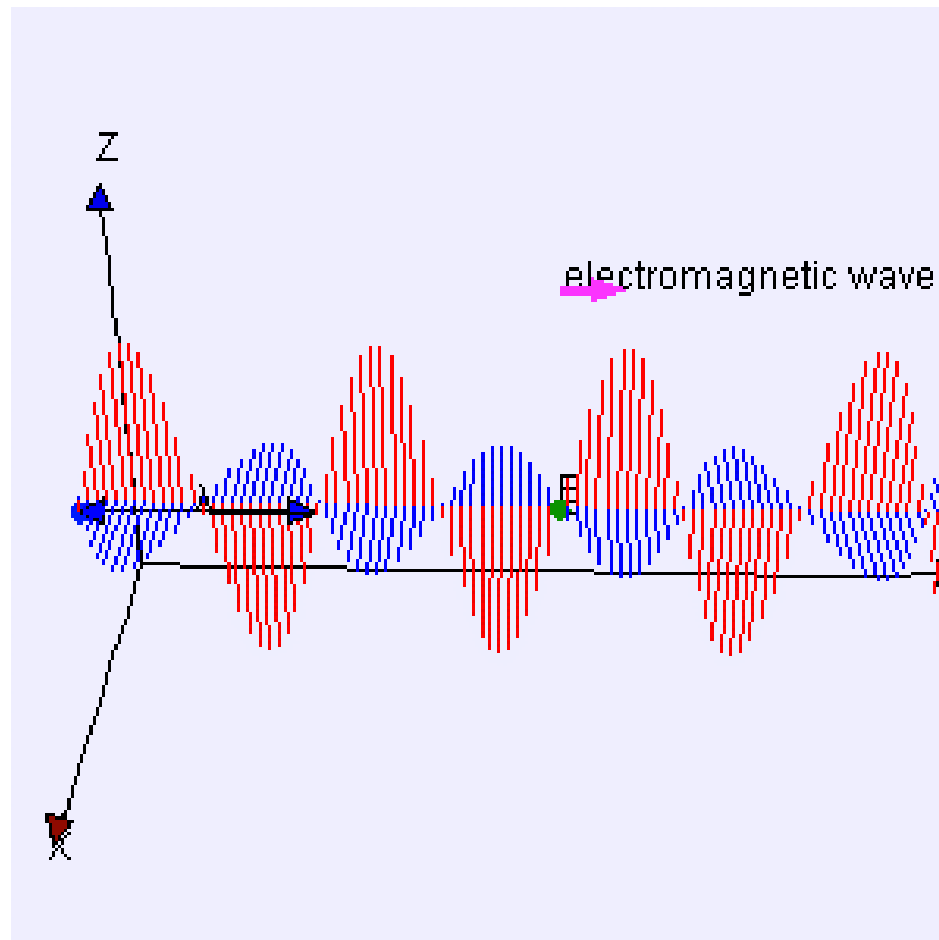
הקרינה האלקטרומגנטית היא תנודות בשדה החשמלי והמגנטי הנעות במרחב במהירות האור. התנודות בשדות החשמלי והמגנטי ניצבות זו לזו. הקרינה האלקטרומגנטית נפלטת על ידי חלקיקים טעונים והיא גם נבלעת על ידם.

מהירות הגל האלקטרומגנטי בריק היא 300 אלף ק"מ לשנייה ומסמנים אותה באות C. הואיל והאור הוא חלק מהספקטרום האלקטרומגנטי, אנו קוראים למהירות זו מהירות האור.

האור הלבן - מורכב מכל צבעי הקשת



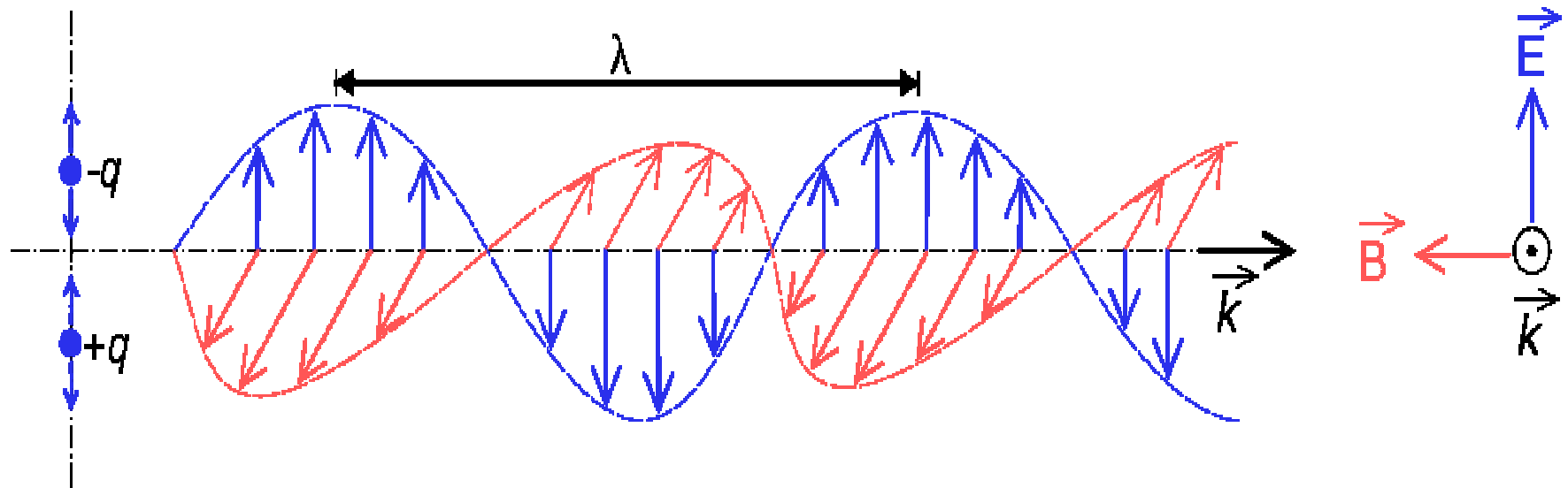
קרינה אלקטרו מגנטית – השדות ניצבים לכיוון התנועה (אור מקוטב)



<http://weelookang.blogspot.com/2011/10/ejs-open-source-propagation-of.html>

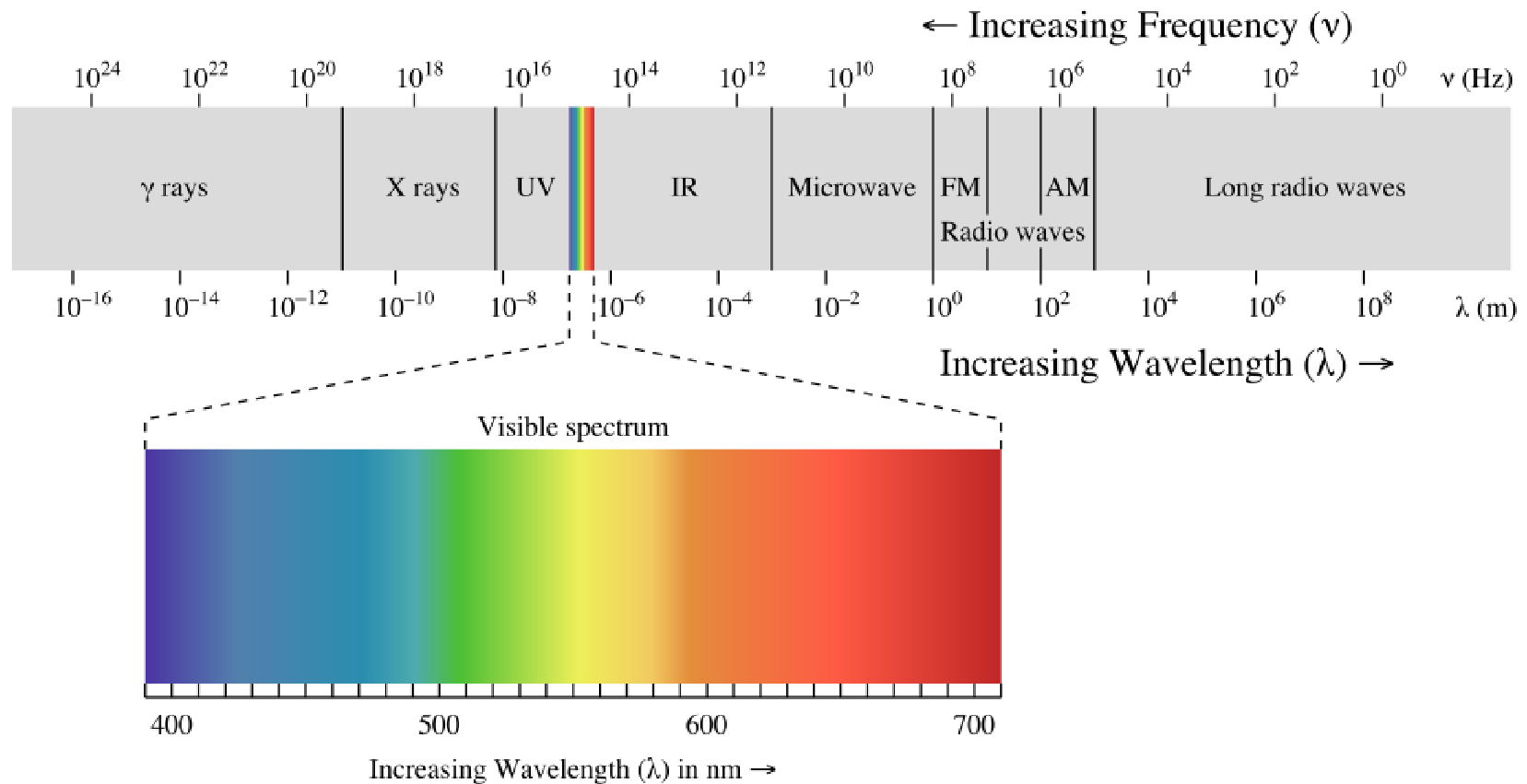
גל אלקטרומגנטי

באיור אפשר לראות את ההפרעה מתפשטת, כאשר קווי השדה המגנטי B , ניצבים לשדה החשמלי E , (הגל נע לכיוון ימין). משמאל, חתך בניצב לכיוון התנועה

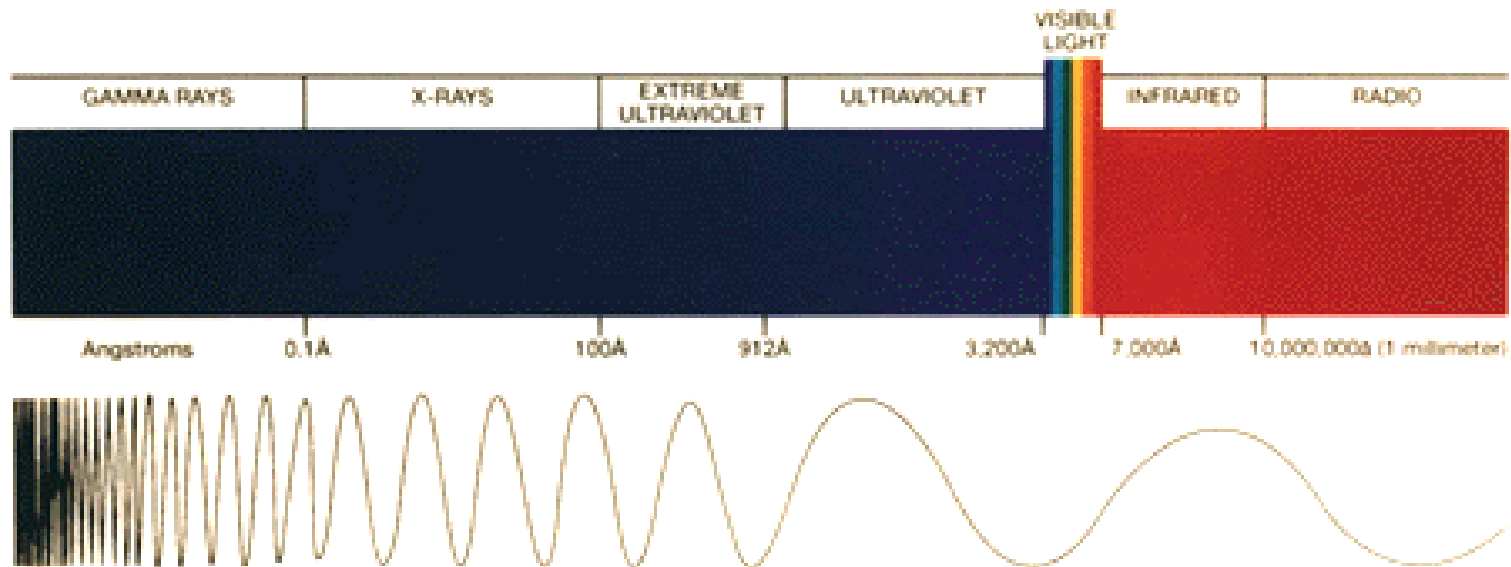


<http://weelookang.blogspot.com/2011/10/ejs-open-source-propagation-of.html>

מקטעי הספקטרום



האור - חלק מהקרינה האלקטרומגנטית באורכי גל שונים



האופי הדואלי של הקרינה האלקטרומגנטית

- הקרינה האלקטרומגנטית נעה במרחב בצורה גלית. מאפייניה הם:
- אורך הגל, מסומן כ- λ והיחידות הן במטרים (נאנו מטר או אנגסטרם – עשירית נאנו מטר)
 - מהירותו, שמסומנת באות C וערכיה בריק הן $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
 - התדירות היא מספר אורכי הגל העוברים בנקודה מסוימת בשנייה אחת. כיוון שמהירות האור היא קבועה, התדירות מתכונתית ביחס הפוך לאורך הגל, היא תסומן באות ν והיא שווה ל-

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

האופי החלקיקי של הקרינה האלקטרומגנטית

הקרינה האלקטרומגנטית יכולה להתקיים גם בצורה חלקיקית לחלקיק הנושא את הקרינה האלקטרומגנטית אנו קוראים פוטון.

לפוטון אין מסת מנוחה, אולם אפשר להגדיר את התנע של הפוטון כ: $p = h\nu/c = h/\lambda$
על פי עקרונות המכניקה הקוונטית, לקרינה האלקטרומגנטית אופי חלקיקי וגלי במקביל

הדואליות של החומר

כשם שלקרינה האלקטרומגנטית אופי חלקיקי וגלי במקביל, לכל חלקיק בטבע מתקיימת תכונת הדואליות, כלומר, יש לו אופי הן של חלקיק והן של גל במקביל. עקרון זה נקרא עקרון הדואליות של החומר.

לכן, אם לחלקיק ממשי יש גם אופי גלי, עלינו להגדיר את אורך הגל שלו. את אורך הגל של חלקיק אפשר למצוא לפי אורך הגל של הפוטון, החלקיק הנושא את הקרינה האלקטרומגנטית.

נניח פוטון בעל אורך גל λ . לפוטון זה יהיה תדר ν השווה ל: $\nu = c/\lambda$

האנרגיה של החלקיק תהיה $E = h\nu$ כאשר h הוא קבוע פלנק

אורך גל זה ברולי

אנו יודעים שמתקיימים גם הקשרים הבאים:

אפשר לבטא את האנרגיה של חלקיק גם כ: $E=mc^2$ ואת התנע כ- $p=mc$ כאשר c היא מהירות החלקיק

נרשום:

$$E = mc^2 = h \frac{c}{\lambda}$$

$$mc = \frac{h}{\lambda}$$

$$mc = p \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

לכן, אורך הגל שבו ינוע חלקיק בעל תנע p יהיה קבוע פלאנק מחולק בתנע. הערה – עבור פוטון וחלקיקים הנעים קרוב למהירות האור יש לבצע תיקון יחסותי

עקרון הדואליות עבור מהירויות יחסותיות

עבור חלקיק בעלת מסת מנוחה m_0 הנע במהירות v הקרובה למהירות האור יש לתקן את התנע לפי הטרנספורמציה של לורנץ

כאשר המסה היחסותית היא:

$$m = \gamma m_0$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\beta^2 = \frac{v^2}{c^2}$$

$$p = \gamma m_0 v = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \beta^2}$$

תיקון יחסותי עבור התדר

את אותו התיקון אפשר לעשות לגבי התדר

$$E = h\nu = mc^2$$

$$m = \gamma m_0 \Rightarrow E = \gamma m_0 c^2$$

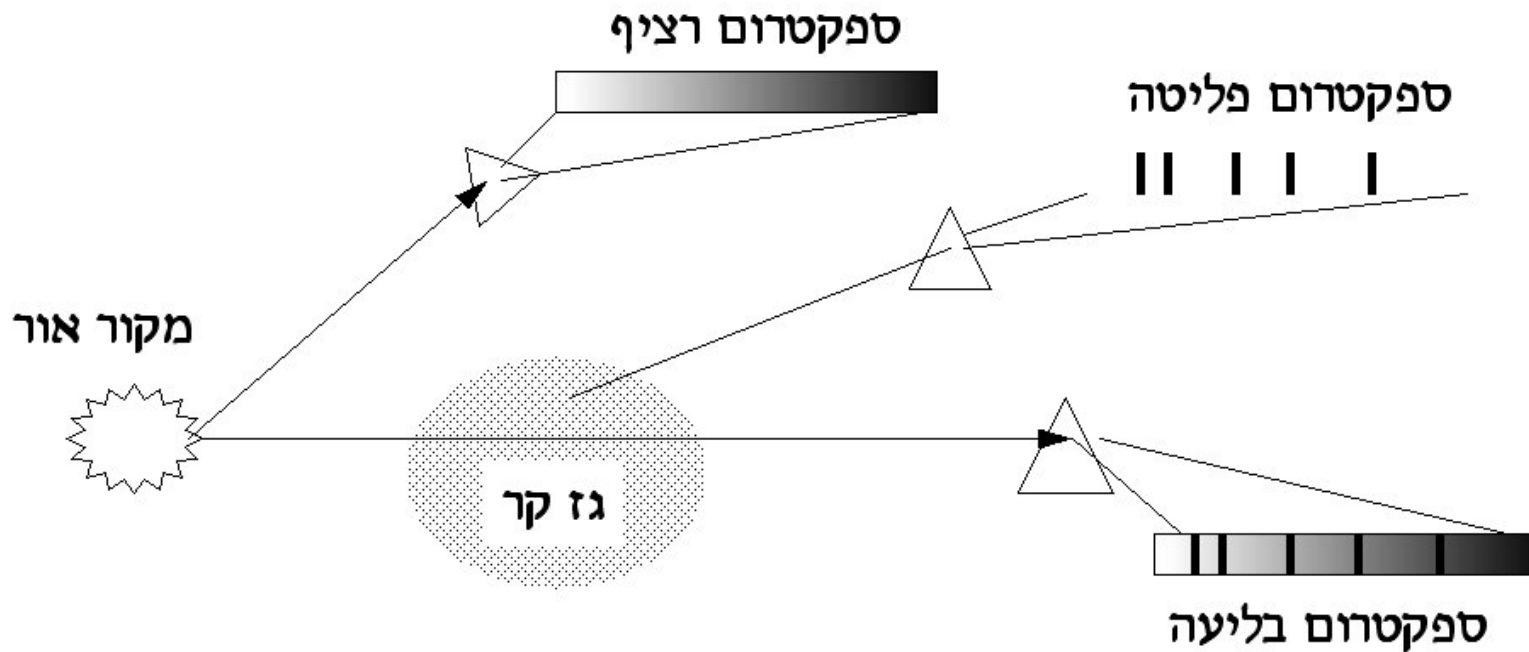
$$\gamma m_0 c^2 = h\nu$$

$$\nu = \frac{\gamma m_0 c^2}{h} = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1-\beta^2}}$$

הספקטרום האלקטרומגנטי

כאשר אור לבן עובר בתווך הוא נשבר ומתקבלת נפיצה לאורכי הגל המרכיבים את האור הלבן. הנפיצה היא מהכחול אל האדום. סדר הצבעים בנפיצה של האור הלבן הוא צבעי הקשת, מהכחול אל האדום. נפיצת האור הלבן קרויה – הספקטרום (תחזית) והיא גם הכינוי הכללי לנפיצה של כל הקרינה האלקטרומגנטית למעשה, האור הוא רק חלק קטן מתוך הספקטרום האלקטרומגנטי שעיננו רגישה אליו. רגישות העין לחלק זה של הספקטרום האלקטרומגנטי היא כתוצאה מכך שאטמוספירת כדור הארץ עבירה עבור חלק זה של הספקטרום.

ספקטרום רציף, פליטה ובליעה



γ	X	על סגול	אור נראה	תת אדום	רדיו
0.01	10	450	700		300,000
אורך גל nm					

ספקטרום רציף

כאשר אור לבן עובר בתווך הוא נשבר בהתאם לאורכי הגל שלו. הספקטרום המתקבל כתוצאה משבירה של אור לבן המגיע אלינו ממקור אור קרוי – ספקטרום רציף. סדר הצבעים בספקטרום הרציף הוא מכחול לאדום.

הספקטרום - טביעת האצבע של הגז



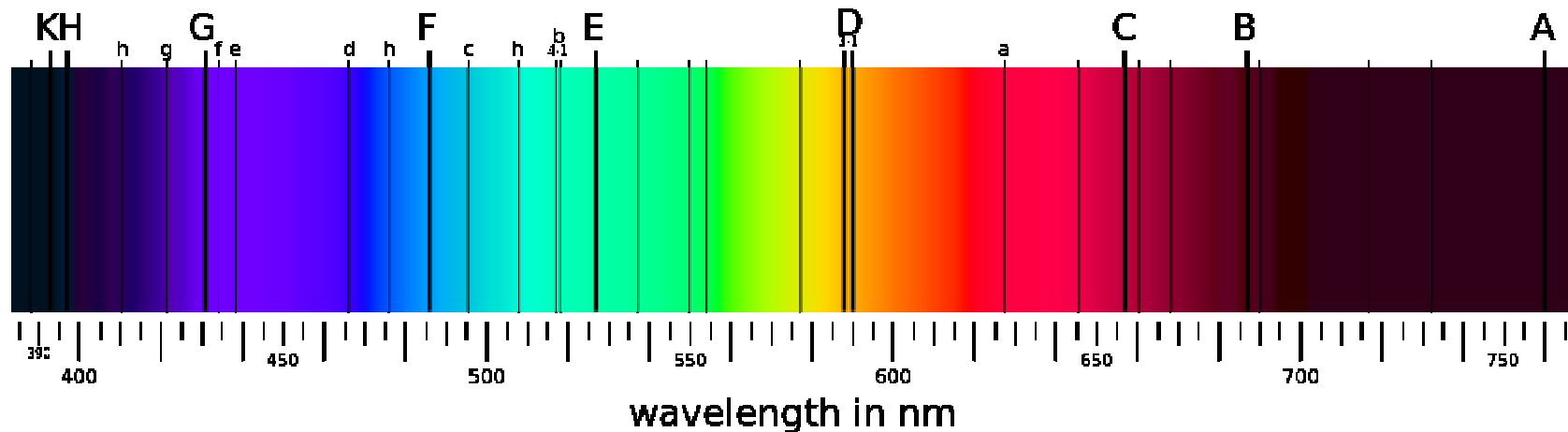
ספקטרום פליטה זה נגרם על ידי גז בתוך

ספקטרום בליעה

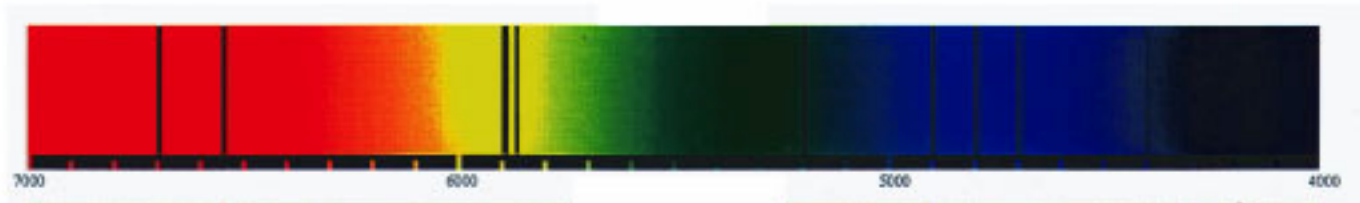
כאשר בין מקור האור למנסרה מצוי גז קר, אנו מקבלים קווים שחורים על הרקע של הספקטרום הרציף.

בתחילת המאה ה-19 הבחין יוסף פראונהופר שאור השמש העובר במנסרה מראה ספקטרום רציף כאשר עליו קווים שחורים באורכי גל קבועים

פראונהופר מיפה 570 קווים כאלה וציין את החזקים בהם באותיות: מהאות A בצד האדום הקיצוני של הספקטרום ועד ל-K בקצה הסגול. למטה, נראים קווי הבליעה של השמש על רקע הספקטרום הרציף עם חלק מאותיות פראונהופר



ספקטרום של גז ספקטרום בליעה



חלק מקרני האור נבלעות על ידי הגז
ובמקומם אנו רואים פסים כהים

קירכהוף ובונזן

במחצית המאה ה-19, בחנו קירכהוף ובונזן את קווי פראונהופר של השמש. הם ראו שלחלק מקווים אלה אורכי גל המתאימים בדיוק לאורכי גל שחורים המופיעים על רקע הספקטרום הרציף, כאשר מעבירים אור לבן מבעד לגזים קרים יותר ממקור האור.

המסקנה היתה שהפסים השחורים הם אורכי גל של פוטונים שנבלעו בגזים שביננו למקור האור

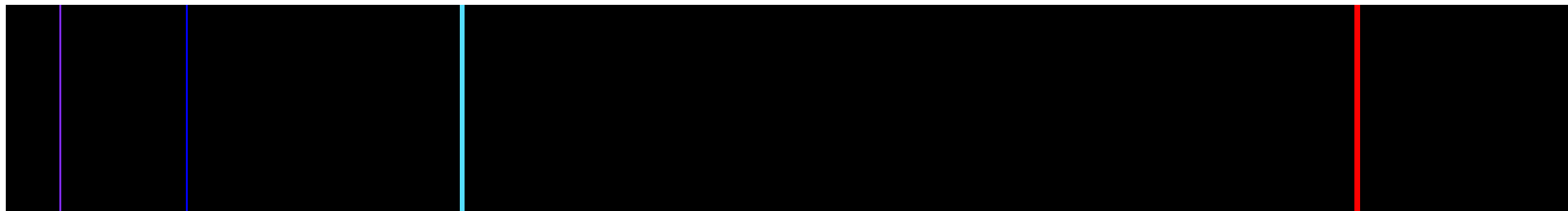
חלק מאורכי הגל שנבלעו התאימו לאורכי גל שנבלעו כאשר במעבדה הועבר אור לבן מבעד ליסודות שונים שהיו במצב גזי לכל יסוד ויסוד יש קווי בליעה באורכי גל אופייניים.

כיוון שהקווים השחורים מציינים אורכי גל שנבלעו ביסודות שהיו במצב גזי שבין מקור האור למנסרה, הם קרויים – קווי בליעה.

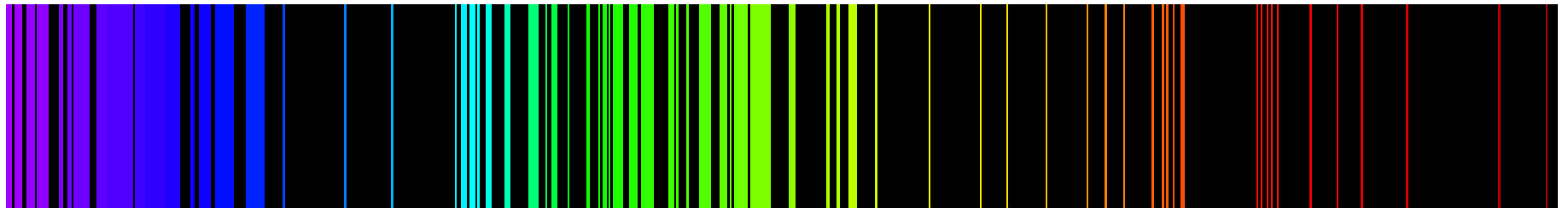
קווי פליטה

במקביל, נראה שאותו יסוד מסוים שבלע אורכי גל מסוימים פולט בדיוק את אותם אורכי הגל. אם נביט בגז שלא בקו הראיה עם מקור האור, אנו נראה רק את אורכי הגל שנפלטים ממנו, המהווים תמונת תשליל לאורכי הגל שהוא בלע.

המסקנה, היסודות השונים פולטים בדיוק את אורכי הגל שנבלעו. לכל יסוד ויסוד יש אורכי גל אופייניים שאותם הוא גם בולע וגם פולט. אורכי הגל קשורים למבנה היסוד שבולע ופולט אותם. למטה – קווי הפליטה של המימן בתחום האור הנראה



ספקטרום פליטה



נגרם על ידי פליטת פוטונים
על ידי ברזל חם מאוד

התנהגות גוף שחור

אנו יכולים להניח כי גוף מתנהג כגוף שחור או בקירוב לגוף שחור כאשר:
הוא מצוי בשווי משקל תרמודינמי (הקרינה שגוף פולט זהה לשטף הקרינה
הנבלע בו)
גופים אלה הם בעלי עומק אופטי גדול המאפשר להם להיות בשווי משקל
תרמודינמי

אנו יכולים להניח בקירוב טוב שבכוכבים קיימת שכבה חיצונית ממנה נפלת
הקרינה האלקטרומגנטית המתנהגת כגוף שחור. אנו מציינים את
הטמפרטורה של שכבה זו, הנגזרת מהתנהגות גוף שחור, כטמפרטורה
האפקטיבית של הכוכב

קרינת גוף שחור

במאה ה-19 הבחינו החוקרים שגופים חמים פולטים קרינה מגנטית. הגופים החמים פלטו קרינה בכל אורכי הגל וככל שהם היו חמים יותר, שטף הקרינה שנפלט מכל יחידת שטח מהם היה גדול יותר כדי למצוא את הקשר בין הטמפרטורה של הגוף לאופי הקרינה שהוא פולט, הציע קירכהוף במחצית המאה ה-19 מודל הקרוי – גוף שחור

תכונות הגוף השחור

הגוף השחור הוא מקרן אידיאלי. כלומר, הקרינה שהוא פולט תלויה אך ורק בטמפרטורה שלו, ושום חלק מהקרינה שהוא פולט אינה קרינה מוחזרת. לכן הוא קרוי – גוף שחור, כיוון שצבע שחור בולע את כל הקרינה הנופלת עליו.

הקרינה שהגוף השחור פולט תלויה רק בטמפרטורה שלו ואינה תלויה בהרכבו או בסוג החומר שלו.

בעת שיווי משקל תרמודינמי, אפשר לראות בגוף השחור אוסף מתנדים הרמוניים בעלי אנרגיה ממוצעת של kT

הקטסטרופה של העל-סגול

ההתנהגות של קרינת גוף שחור הותאמה לאורכי הגל הנפלטים ממנו. לפי המודל שהוצע, גוף שחור היה אמור לפלוט את הקרינה כך, שככל שאורכי הגל היו קצרים יותר, שטף הקרינה הנפלט באותם אורכי גל היה גדול יותר. כדי לקבל את סך הקרינה של גוף שחור בכל אורכי הגל, בוצעה אינטגרציה על המשוואה המתארת אם היחס בין שטף הקרינה לבין אורכי הגל

חוק – ראלי-ג'ינס

כדי להתאים מודל כמותי המתאר את קרינת גוף השחור, הוצע על ידי לורד ראלי וג'יימס ג'ינס בתחילת המאה ה-19 הקשר בין שטף I באורך גל מסוים λ הנפלט מגוף שחור בטמפרטורה T:

$$I_{\lambda}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

כאשר:

C = מהירות האור

K – קבוע בולצמן

בעוד שעבור אורכי גל ארוכים התקבלה התאמה, כדי לקבל התאמה באורכי גל קצרים מאוד השטף היה אמור לגדול בצורה מעריכית. בעיה זו נקראה – הקטסטרופה של העל-סגול

חוק פלאנק

כדי ליישב את הסתירה בין משוואת ראלי-ג'ינס להתנהגות בפועל של גוף שחור, הציע מקס פלאנק בשנת 1900 את הפתרון הבא, שהתבסס על העובדה שהקרינה המתקבלת מגוף שחור אינה רציפה אלה נפלטת במנות בדידות של אנרגיה.

למנות הבדידות של האנרגיה הוא קרא "קוונטות"
לפי הנחה זו, האנרגיה מגיעה במנות שהן כפולות של תדר הקרינה בקבוע. הקבוע נקרא – קבוע פלאנק, וסומן באות h . ערכו של קבוע פלאנק הוא

$$h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

משוואת פלאנק

משוואת פלאנק המתארת את שטף האנרגיה I , הנפלט באורך גל מסוים, λ מגוף שחור בטמפרטורה T תהיה:

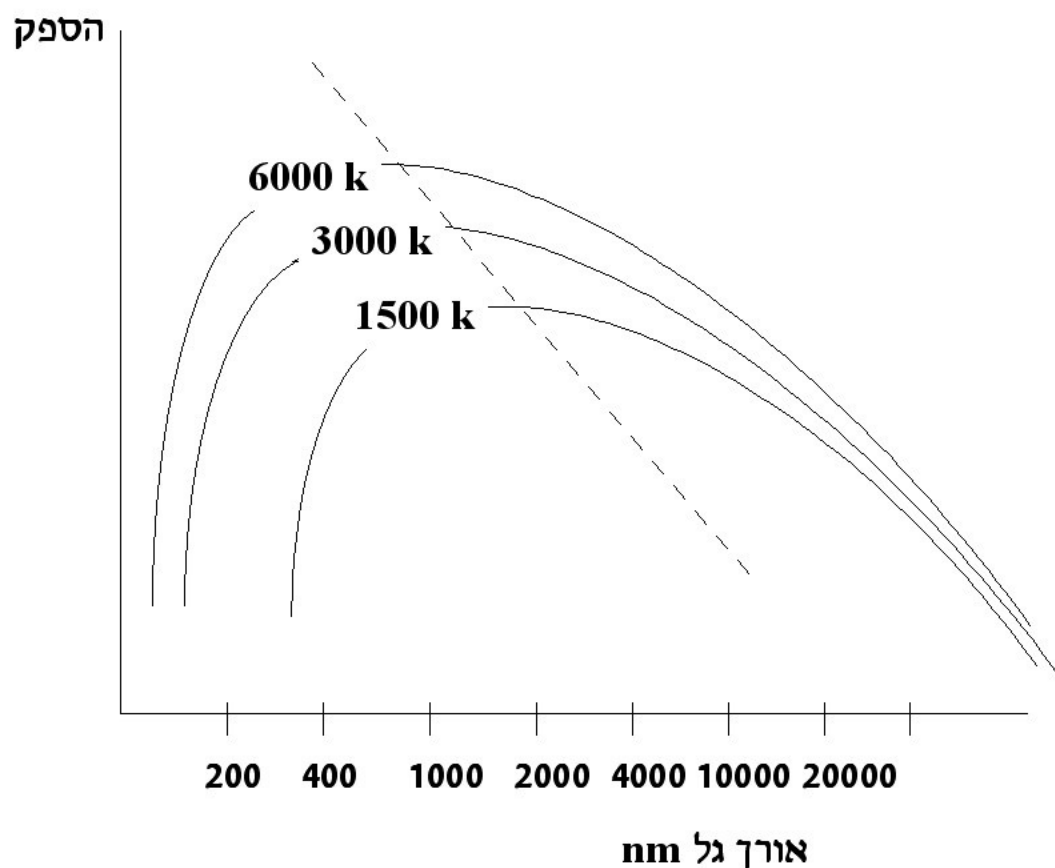
$$I_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

ואפשר לרשום את משוואת פלאנק גם במונחים של התדר, ν

$$I_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)}$$

עקומת הקרינה של גוף שחור

עקומת הקרינה של גוף שחור מראה את הקשר בין הטמפרטורה של הגוף ולשטף הקרינה בכל אורך גל. מצורת העקומה אפשר לנסח ניסוח כללי את שלושת חוקי הקרינה של גוף שחור (ראו בהמע



חוק התזוזה של ויין

עבור גוף שחור בטמפרטורה T , שיא הקרינה ייפלט באורך גל $\lambda_{\max}(T)$. אפשר למצוא מהו אורך הגל שבו תפלט שיא הקרינה, כאשר גוזרים את משוואת פלאנק ומחפשים את נקודת המקסימום

$$\lambda_{\max}(T) = \frac{b}{T}$$

כאשר T נמדד במעלות קלווין, λ במטרים ואילו b הינו קבוע השווה ל:
 $2.9 \times 10^{-3} \text{ m K}$

חוק סטפן בולצמן

כדי לקבל את סך הקרינה הנפלטת מיחידת שטח של גוף שחור בטמפרטורה T , מבצעים אינטגרציה על משוואת פלאנק. התוצאה היא:

$$E = \sigma T^4$$

כאשר σ הוא קבוע סטפן-בולצמן שערכו: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Joule m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$

קבוע סטפן-בולצמן נמדד אמפירית עוד לפני שמקס פלאנק ניסח את משוואת הגוף השחור

שלושת חוקי הקרינה של גוף שחור

לסיכום, שלושת חוקי הקרינה של גוף שחור הם:

1. גוף שחור פולט בכל אורכי הגל
2. ככל שטמפרטורת הגוף השחור גבוהה יותר, שיא הקרינה יפלט באורך גל קצר יותר (חוק וין)
3. ככל שהטמפרטורה של הגוף השחור גבוהה יותר, סך הקרינה שהוא יפלוט (מיחידת שטח ליחידת זמן) יהיה גדול יותר (חוק סטפן-בולצמן).

שלושת חוקי הקרינה של גוף שחור מאפשרים לנו לדעת באופן מיידי את היחס של שטף הקרינה הנפלט משני גופים המצויים בטמפרטורות שונות (ומתנהגים כגופים שחורים)

לחץ קרינה

בהינתן צפיפות אנרגיה u , לחץ הקרינה $P(I)$ יהיה שליש מצפיפות האנרגיה ותלוי בטמפרטורה בחזקה הרביעית:

$$P(I) = \frac{1}{3} u$$

$$u = \frac{4\sigma T^4}{c} \Rightarrow P(I) = \frac{1}{3} \frac{4\sigma T^4}{c}$$

מודל האטום

המבנה הבסיסי של החומר העסיק את המדענים מאז ומתמיד. כבר היוונים הביעו השערות שונות באשר למהות החלקיקים היסודיים. דמוקריטוס טבע את המונח – א-טומוס (בלתי ניתן לחלוקה) למרכיב היסודי של החומר שאינו מורכב מגופים שקטנים יותר. לאור ההתפתחות המדעית בענפי הכימיה, הפיזיקה וגילוי התכונות החשמליות של החומר, הובעו במאה ה-19 כמה רעיונות באשר למבנה הבסיסי של החומר. בתחילת המאה ה-19 הוצע קיומו של חומר בעל מטען שלילי

גילוי האלקטרון

כבר במאה ה-18 הובע רעיון שהזרם החשמלי מורכב מזרם של מטען שלילי. במחצית המאה ה-18 הציע ריצ'רד למינג מודל לפיו האטום מורכב מגרעין המוקף חומר טעון במטען חשמלי בשנת 1851 הציע וויליאם וובר שהחשמל הוא למעשה זרם של מטענים חיוביים ושלייליים המושכים זה את זה ביחס הפוך לריבוע המרחק בינם. האלקטרון התגלה בשנת 1897 על ידי ג'וסף ג'והן תומפסון. תומפסון הראה שקרן בעלת מטען שלילי הנפלטת מקתודה ועוברת דרך האנודה, מוסחת על ידי מגנט, ללא קשר למהות החומר הפולט את הקרן. תומפסון הציע שהקרן מורכבת מחלקיקים הנפלטים ממולקולות של גז בקתודה הנושאים מטען שלילי והם זהים בלי קשר ליסוד ממנו נפלטו. החלקיקים בעלי המטען השלילי נקראו – אלקטרונים (על ידי ג'ורג' פיצג'רלד).

חיזוי המטען החיובי של הגרעין

בשנת 1900 הראה הנרי בקרל כי בקרינה רדיואקטיבית נפלטים חלקיקים בעלי מטענים שליליים וחיוביים. למטענן החיובי הוא קרא חלקיקי אלפא ולמטען השלילי חלקיקי ביתא. לחלקיקי הביתא היתה מסה זהה לזו של החלקיקים הנפלטים מהקתודה. הבנה זו הביאה לרעיון כי האלקטרונים נפלטים מגרעין האטום והם חלק ממנו.

מודל פודינג השזיפים 1904

לאחר גילוי האלקטרון, היה צורך להראות כיצד האלקטרונים משתלבים בגרעין האטום. בשנת 1904 הציע ת'ומפסון את מודל הפודינג לפיו גרעין האטום מורכב מאלקטרונים המצויים בתוך ענן של מטען חיובי כדי לאזן את המטען השלילי של הענן כשם ששזיפים מצויים בתוך פודינג.

מודל הטבעות 1904

מודל זה הוצע על ידי הנטארו נגאקואה בשנת 1904 מיד לאחר הצעת מודל הפודינג על ידי תומפסון. לפיו מודל הטבעת, האלקטרונים נעים סביב גרעין האטום בצורה של טבעת המקנה למסלולים שלהם יציבות, ממש כמו שטבעות שבתאי מקיפות את שבתאי עצמו.

הנימוק לרעיון הטבעות היה שמטענים חיוביים ושלייליים אינם יכולים לדור בכפיפה אחת כיוון שאז יוצר חומר בלתי חדיר ולא יהיה אפשר לשחרר ממנו אלקטרונים שיסבירו את פליטת האלקטרונים מגרעין האטום.

האטום של רת'רפורד

מבנה האטום של רת'רפורד מניח גרעין בעל מטען חיובי המוקף באלקטרונים במבנה הדומה לזה של מערכת השמש בה כוכבי הלכת מקיפים את השמש. המודל הוצע בשנת 1911 לאחר המודלים של תומפסון ושל נגקוואה.

המספר האטומי ומטען הגרעין

בשנת 1911 הציע אנטוניוס ואן דן ברוק כי המספר האטומי של היסודות כפי שמופיע בטבלה המחזורית זהה למעשה למטען החיובי של גרעיני היסודות. בכך הונח הבסיס לכך שגרעין האטום הוא בעל מספר מטענים חיוביים.

שנתיים לאחר מכן הראה הנרי מוזלי שהמטען החיובי של הגרעין קרוב מאוד למספר האטומי של החלקיקים על ידי ניסוי.

מודל האטום של בוהר

מודל האטום של בוהר הוצע כדי להסביר את קווי הבליעה של אטום המימן בספקטרום. הנחות היסוד היו:

- באטום המימן גרעין המכיל פרוטון בעל מטען חיובי
- סביב הפרוטון סובב אלקטרון בעל מטען זהה אך בסימן הפוך לפרוטון (שלילי).
- אלקטרון הנע בתנועה מעגלית מצוי בתאוצה מתמדת, לכן בעיקרון הוא אמור לפלוט פוטון, לאבד אנרגיה וליפול על הפרוטון
- המסלול היציב שבו האלקטרון אינו פולט פוטון קרוי רמת המנוחה
- אולם, האלקטרון יכול לעלות לרמות אנרגיה גבוהות יותר (מסלולים רחוקים יותר), אך אלה הן רמות קבועות, במרחקים קבועים מהגרעין שרק בהן הוא יכול להימצא במסלול יציב ללא פליטה של פוטון
- כדי לעבור למסלול מרוחק יותר האלקטרון חייב להשקיע אנרגיה כדי להתגבר על כוח המשיכה החשמלי
- כאשר האלקטרון עובר לרמת אנרגיה גבוהה יותר, הוא מיד יפלוט פוטון כדי לרדת לרמת המנוחה או לרמה נמוכה יותר

יינון ואנרגיית סף

כדי לגרום לאלקטרון לברוח מגרעין האטום, יש להעניק לו אנרגיה. אפשר להעניק לאלקטרון אנרגיה על ידי קרינה אולם, האנרגיה הדרושה אינה תלויה בשטף הקרינה אלא באורכי הגל של הקרינה.

עקרון זה, שהאנרגיה של הקרינה האלקטרומגנטית תלויה בתדר (או באורך הגל), פותחה בהמשך על ידי איינשטיין והיא מוכרת גם כבסיס של העיקרון הפוטואלקטרי הביטוי הקושר בין האנרגיה לתדר הוא: $E = h\nu$ כאשר h הוא קבוע פלנאק.

האנרגיה המינימלית הדרושה כדי לגרום לאלקטרון לברוח מהאטום קרויה אנרגיית סף.

רמות האנרגיה – רמות עירור

כיוון שרמות האנרגיה (מסלולי האלקטרון) בגרעין הן קבועות, האנרגיה הנדרשת לאלקטרון כדי לעבור בינן היא קבועה, ולכן אפשר להמירה לתדירות הקרינה האלקטרומגנטית המספקת את האנרגיה למעבר לפי:

$$E=h\nu$$

מכאן, שכדי לעבור מרמת אנרגיה מסוימת לרמת אנרגיה אחרת, האלקטרון תמיד יבלע פוטון בעל התדר המדויק הנדרש למעבר בין הרמות.

כיוון שהאלקטרון תמיד ירצה לחזור לרמת המנוחה, הוא יפלוט בירידה ברמות האנרגיה פוטון בעל אורך גל זהה לזה שנבלע.

כיוון שהאלקטרון לא יימצא באותו המקום בו הוא בלע את הפוטון אל יהיה במקום אחר, הפוטון ייפלט לכל כיוון אפשרי

הרמות שמעל רמת המנוחה קרויות – רמות עירור ואטום שאלקטרון אחד או יותר שלו מצוי ברמה מעל רמת המנוחה הוא אטום מעורר.

סדרות באטום המימן

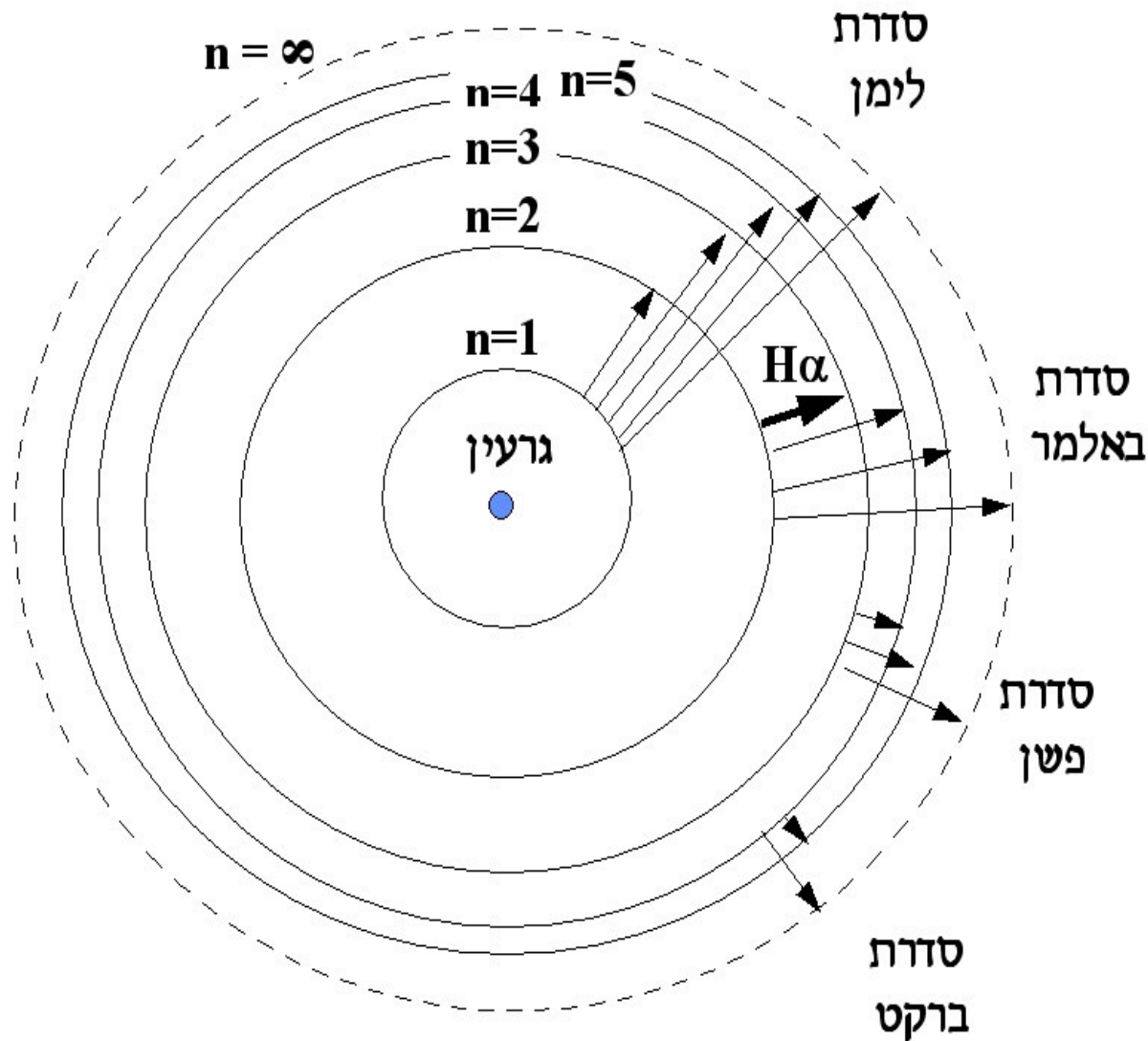
כיוון שהביטוי בנוסחת רידברג מראה מעברים ברמות בעלות אינדקסים שונים, אנו מקבלים סדרות של מעברים (מרמת המנוחה ליתר הרמות, מהרמה הראשונה ליתר הרמות וכדומה). לסדרות האלה יש שמות:

סדרת לימן – מעברים מרמת המנוחה

סדרת באלמר – מרמת העירור הראשונה ליתר הרמות

סדרת פשן – מרמת העירור השנייה ליתר הרמות

סדרות המימן



סדרת באלמר

זו הסדרה הבולטת ביותר של אטום המימן כיוון שאורכי הגל הנדרשים למעברים מרמת העירור הראשונה ליתר הרמות הן בתחום הנראה. הקווים הבולטים בסדרת באלמר הם:

$$H\alpha=656.3\text{nm}$$

$$H\beta=486.1\text{nm}$$

$$H\gamma=434.1\text{nm}$$

$$H\delta=410.2\text{nm}$$

סימון רמות יינון של יסודות

בשיטת הסימון המקובלת עבור סיווג ספקטרלי של יסודות באסטרופיזיקה, מקובל לציין אטום שאינו מיונן בספרה הלטינית I, כאשר כל עבור כל אלקטרון מיונן מתווספת ספרה. כך, למשל, חמצן נייטרלי יסומן כ-OI, חמצן מיונן פעם אחת יסומן כ-OII, חמצן מיונן פעמיים יסומן כ-OIII וכן הלאה.

השפעות היצוניות על הקרינה הנפלטת

יש כמה השפעות המשנות את הקרינה הנפלטת מהאטום המצוי בכוכב.

נדון בכמה מהן:

• אפקט דופלר

• הכחדה

• הסחה

• פיזור

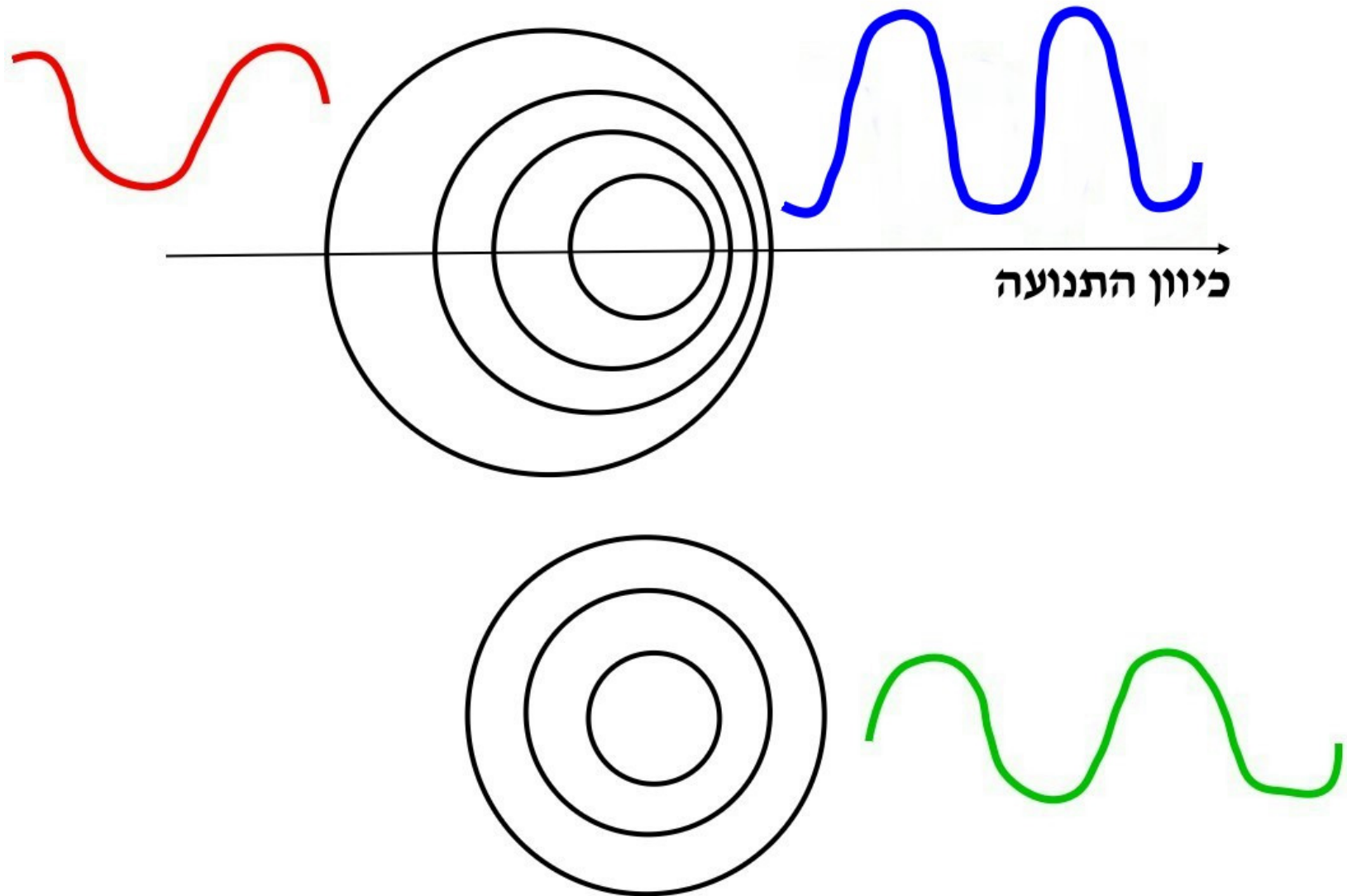
אפקט דופלר

אורך הגל הנפלט מאטום מעורר נמדד כאשר האטום מצוי במנוחה ביחס לצופה.

כאשר מקור הקרינה נע ביחס לצופה כאשר לתנועה יש רכיב הנע על קו הראייה, אורך הגל יוסח

ההסחה תהיה לכוון האדום כאשר מקור האור מתרחק ולכוון הכחול כאשר מקור האור מתקרב

אפקט דופלר



מקרה כללי עבור אפקט דופלר

כאשר:

C = מהירות הגל בתווך (עשוי להיות גם גל קול)

λ_0 = אורך הגל הנפלט

λ_r = אורך הגל המתקבל

v_0 = מהירות מקור הגל

V_r = מהירות הצופה

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \left(\frac{c + v_0}{c + v_r} \right)$$

עבור קרינה אלקטרומגנטית כאשר $v \ll c$

לשם הפשטות, נניח שהמהירות היחסית של מקור האור ביחס לצופה היא v

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \left(1 + \frac{v}{c} \right)$$

$$\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

מידת ההסחה לאדום

מכאן, במהירויות קטנות שאינן יחסותיות, מידת ההסחה בין אורך הגל הנפלט לזה המתקבל, תלויה במהירות מקור האור v (מהירות רדיאלית) ביחס לצופה כך ש:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$$v \ll c$$

השפעת התווך הבין כוכבי על הקרינה

המידע המגיע אלינו בצורה של קרינה אלקטרומגנטית וקרינה קוסמית תלוי ב:

- תכונות הגוף הפולט

- התווך ביננו לבין הגוף הפולט

השפעת התווך הבינכוכבי היא:

- בליעה של חלק מהקרינה או כולה

- פיזור הקרינה

- הסטה של הקרינה (דוגמת עידוש כבידתי)

- הסחה של הקרינה (הסחה לאדום כבידתית או קוסמולוגית)

- קיטוב של הקרינה

הרחבה של פסים ספקטורליים

הרחבה של פסים ספקטורליים נובעת מכמה סיבות:

ברמת האטום הפולט את הקרינה:

- רוחב של רמת העירור
- תנועה של אטומים

ברמת הכוכב:

- סיבוב הכוכב סביב צירו
- תנועת החומר עצמו (הסעה וכדומה)

