

מבוא לתורת הקוואנטים וקשר ביני.

התערבות תנאים - היקף 81.

הקורס הנוכחי הינו מאחד הקורסים המרכזיים ביותר שכלול בשנת הלימודים הראשונה ועצמאות הינו קורס מאחד משני הבטאים: (1) ההגות התנסות - הקורס שאברהם התבנה השולט טיפוסיות שלם לעבו תולש המבוססת על העסקה הקלוסית וחושף אותנו בפני תפיסה חדשה לפיה התקופה מתממש כולש.

(2) הקורס דונים אמוש הכלים מתמטיים מתקדמים הכללים ויצר בהתמקן משואות דיפרנציאליות ויצר באמצעות אינטואיציה.

חובת הגשת תשעונים: 75% (9 מתוך 12) באשר 9 התשעונים האחרים ביותר יהיו 10% ציון מן המצויין הסופי. סיכום וסיפור מאוחר.

עקרונות

מבנת הקוואנטים היתה צורך בפזיקה הזוסק התואר התכונות הפזיקליות של מדרכות קלאמית (בהמשך נראה כי קטן משמחו קטן ביום עמוק הע האופייני לתפקיד המדרכות) הן התכונות העולות של תווים באות לוקו ביטוי. תורה צומת צבה מתק אולם הזיות ~~התכונות~~ פתוחות ~~התכונות~~ פתוחות הלת פתוחות ד"י הפזיקה הקלוסית.

הספוד התמון הטופודש 12 מה"י סביר" המסכמת הקלוסיות והאונטמטיות ובאת תורה חציה שט תפיסה האונטמטיות חציה

~~בסוף המאה ה-19 הפזיקה מתחילה לעבא מספר תורות מפתח אשר לאות המדרכות מתממשות והוא עלה הזיה פזיקלית ש~~

מטופית תורה הקודמת העבר הקלוסית. כמות רבת המשכה תורה "ככה"...

- בסוף המאה ה-19 הפזיקה כללה מספר תורות מפתח:
1. המכניקה הניוטונית.
  2. תורה העלש והאלקטרומגנטית של מקסוול.
  3. התמודיות מוקה הסטטסית.

הפזיקה העלש האמית כי באמצעות עלש אלו ניתן לפתור כל הזיה חציה מתמחז בפניהם ולהסביר כל ניסוי חציה שבו צד. למדשה הפזיקה העלש האמית כי הפזיקה סלקיה.

אפשר אצ תינו התפוד מספר נטונית שזיידו אור תפיסה חציה נטונית אלו הזינו הסופ של צבר להתבטאות תורה הקוואנטים. בעודם התחבטו נצטו על הזיות כולה אשר לעצמותו דיונות יוסד פתחת הקוואנטים.



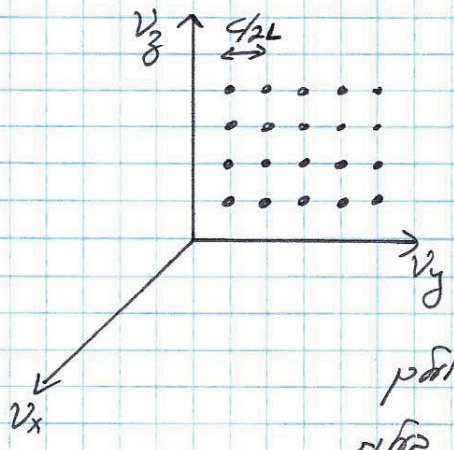






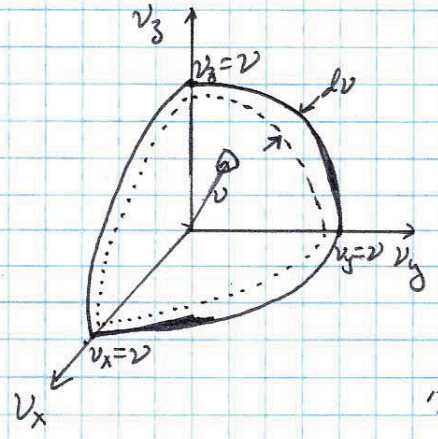


(4)



התבונשם צד, התקופות מייצגות את התבונשם  
 החופשי שמיצרים מתוך תנאי היסוד (קוונטיזציה).  
 אומאמזונישם למצבו כמה תקופות נמצאות מתוך  
 הופת של קלוסה כפונת הופת דוכי על סביב  
 התצד ע. המיוות בין כל שתי תקופות היוו  $c/2L$  ועמק  
 אמ וכולשם זהותק את מיתה התצד לווסל של טובות הופת

נפת  $(\frac{c}{2L})^3$  אשר מטלות כל אחת תקופה אחת (טאון תענה מותם מתצ)  $\frac{1}{8}$



נפת תקלוסה הכפונת היוו על  $\frac{1}{8} \cdot 4\pi v^3$  וכיוון  
 שהמספרשם השלמים  $v_x, v_y, v_z$  מקלושם דוכים  
 חוובושם לצד עמק לתיותם לאוקלטל החוכו  
 ערה צ של מיתה התצד אשרבו נפת תקלוסה היוו:

עמק  $\frac{1}{8} \cdot 4\pi v^3 = \frac{1}{2} \pi v^3$ . מכיון שמספר טאונ

התענה החופשי שמיצרים תקלוסה נותק בתוכה ע'ו  
 נפת תקלוסה מתוקק הופת האופיוט לעאון התצד:

$$N_v = 2 \times \frac{\frac{1}{2} \pi v^3}{(\frac{c}{2L})^3} = \frac{8\pi V}{c^3} v^3 \quad ; \quad V = L^3$$

כאשר התכפלת ה-2 לוקחת בחשבון את תקלוסה הכפול של האנרגיה  
 הזורים עמק  $g(v) = \frac{8\pi V}{c^3} v^2$  תקלו צפונת העשבים (density of states)  
 והטאמטאר את מספר העשבים ליתודת תצד סביב תצד מסוישם ע.

כפי שטאמרת, מאנשיות תקיותם בעל טאון תענה ע'פי תוכת הלשם תקלוסה  
 פרופורציונלית לריבוע אמפליטודת העל (השדה התענעצ)  
 $I \propto |E|^2$   
 כיוון שותק לשנת את אמפליטודת העל באופן רבוע נותק לשנת את אנשיות  
 העל באופן רבוע. במחצכת כצו, משיקולשם הובגשם מיתה  
 העמחודיתמיתה הסטטיסלית, תקבל כי בשוויו מסקל באופן תענה הוטבל  
 אנשיות של  $k_B T$  במחצצד. מכיון שהאנרגיה של המחצכת ליתודת תצד  
 ליתודת נפת (צפונת האנשיות) ניתנת ע'ו:

$$p(v) = \frac{g(v)}{V} \cdot k_B T = \frac{8\pi}{c^3} v^2 k_B T \Rightarrow p(v) dv = \frac{8\pi}{c^3} k_B T v^2 dv$$

וכיוון שמתקום  $v = \frac{c}{\lambda}$  נקבל כי:

$$p(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi}{c^3} \frac{k_B T}{\lambda^2} \cdot \left| \frac{c}{\lambda^2} d\lambda \right| = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} d\lambda$$

נתיי סגל

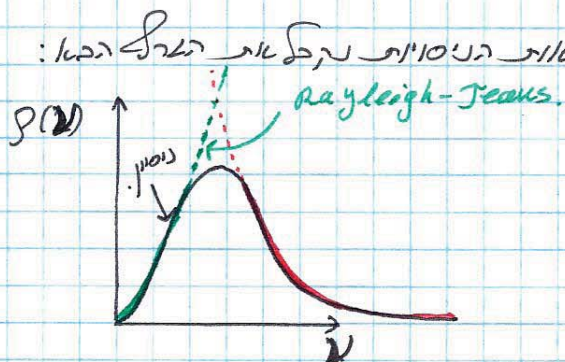
$$dv = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda = \frac{c}{\lambda^2} |d\lambda|$$



חשוב:

כפי שנתקל למרות, התאוריה של ריינולדס ולינס המבוססת על מכניקת גזים קלאסית, מובילה להיתרבות של האנרגיה כאשר  $\lambda \rightarrow 0$ . תוצאה זו אינה פיזיקלית ומכונה הקטאסטרופה של האולטרה-טל.

הקירוב הנפולג  
מקורות הגוף  
השחרור נובע  
מזיכרון של  
הפרט.  
בלתי תלוי  
כי הקירוב  
אינה מקוואל  
ויכולה להפוך  
בצדק אנטי  
אלה הוורטיות  
של הפרט  
מקוואל  
ולכן הקירוב  
פוגע



אם נשווה את הביטוי התאורטי עם התוצאות הניסיוניות, נקבל את הערך הבא:  
כאשר גובה השטח תלוי בטמפרטורה.  
כפי שניתן לראות התוצאה התאורטית אינה מתאימה עם הניסיון.

הכדי ליישם את הסדרה החדשה הוציא פלאנק

שינוי תבוסת אשך היווה תקופת מבנה בפיזיקה.

אנו נשמנו במהלך הפיתוח כי ניתן לפתור את האנרגיה של כל אופן תנודת האופן רציף ע"י שינוי אמפליטודת העל ועל כל אופן תנודה מתקבל אנרגיה של  $k_B T$ .  
פלאנק הציג כי האנרגיה של כל אופן תנודה פרופורציונלית לעוצמת האופן ולכן לא אמפליטודה של האופן וכי הוא מקוואל כמות בדידה:

אלגוריתם  
המתקבל  
המתאריך  
על  $h = \dots$   
~~המתאריך~~  
~~המתאריך~~  
~~המתאריך~~  
~~המתאריך~~  
הוא זמן  
המתאריך  
כרטיס ...

$$\epsilon_n^v = n h \nu ; n = 0, 1, 2, \dots$$

כאשר  $h = 6.62606896 \cdot 10^{-34}$  ז"ש.  $h$  היא קבוע פלאנק, קבוע המאחד את המכניקה הקלאסית והמכניקה הקוואנטית.

~~המתאריך~~

מתאריך

עבור מצב בדידה האנרגיה מקוואלת הממוקדת מיקה הסטטיסטית מניבה את הביטוי הבא וצדד האנרגיה הממוקדת לאופן תנודה:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_n \epsilon_n e^{-\epsilon_n/k_B T}}{\sum_n e^{-\epsilon_n/k_B T}}$$

ניתן להימנע מביטוי זה במחצית משוקלל בו לכל אנרגיה  $\epsilon_n$  משקל  $e^{-\epsilon_n/k_B T}$  כאשר

המכנס, המכונה פונקציית התחלקה  $\sum_n e^{-\epsilon_n/k_B T}$ , מהווה גורם נורמלי (צדד הממוקדת משוקלל)

הצדד הממוקדת. בו המשקל  $e^{-\epsilon_n/k_B T}$ , באמצעות גורם סופי, ניתנת הסתברות לכל

אנרגיה אשר דווקא אינה סופית, כלומר  $T \rightarrow 0$  ההסתברות

לפגוע היא אנרגיה  $\epsilon_n \neq 0$  שכן המאפיין וההסתברות לפגוע את  $\epsilon_n = 0$  אינה אפס

כאשר  $T \rightarrow 0$  ההסתברות לפגוע אנרגיה פגועה צדד כל האנרגיות.



6.

כל פעולה אדומה כזו היא להחליף את האנרגיה הממוצעת  $k_B T$ , אשר היא צפונה במסגרת המודל הקלאסי, בקיטוני צהור  $\bar{\epsilon}$  שנתקבל מתוך התמחויות הקוונטיות המודל הקוונטי. תוצאה עולה לחשב את  $\bar{\epsilon}$ , פונקציות המלקה ניתנת לחישוב ע"י סכימת האור:

$$Z = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\epsilon_n/k_B T} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/k_B T} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = \frac{1}{1-e^{-x}} \quad ; \quad x \equiv \frac{h\nu}{k_B T}$$

את המכנה ניתן לחשב באופן הבא:

$$\sum_{n=0}^{\infty} n h\nu e^{-nx} = h\nu \sum_{n=0}^{\infty} n e^{-nx} = h\nu \left[ -\frac{d}{dx} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} \right] = h\nu \left[ -\frac{d}{dx} Z \right] = \frac{h\nu e^{-x}}{(1-e^{-x})^2}$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{h\nu e^{-x}}{(1-e^{-x})^2} (1-e^{-x}) = \frac{h\nu e^{-x}}{1-e^{-x}} = \frac{h\nu}{e^x - 1} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

וכאשר נצטרך את הקיטוני צהור (ערך במקום  $k_B T$  בקבלה):

$$P(\nu) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{e^{h\nu/k_B T} - 1} d\nu$$

באיטו צב תגיש להחליט את ההתנהות שמתבצעת בוסיין!

לבחון באיטו צב בשני מקורות:

1. המקור הקלאסי -  $k_B T \gg h\nu$ : המקור צב את האנרגיה (קוונטית) קטנה

שמתאמת את האנרגיה התמחה בה התמחויות של אופן תופה ולדבר ספקטרום יאנרציה של אופטי התמחה השונם נבנה רצוף. מתמחה נכלל לרשם

$$e^{h\nu/k_B T} \approx 1 + \frac{h\nu}{k_B T}$$

כי:

ותקבל כי:

$$P(\nu) \approx \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{1 + \frac{h\nu}{k_B T} - 1} = \frac{8\pi k_B T}{c^3} \nu^2$$

כמו בקיטוני הביטוי שפיתחם מתיקולשם קלאסיים (ריילי-גיינס), זוגי צולמא לזקרון

התמחה לפיו כאשר  $h$  הופך להיות קטן יותר לזכרם פוזיק אינרנוטיוס המזכרת

התנהות הופכת לקלאסית. נכביר כי וכלא לקבל אבול צב ע"י המצבת  $h \rightarrow 0$ .

2. המקור בו  $k_B T \ll h\nu$ :

$$e^{h\nu/k_B T} - 1 \approx e^{h\nu/k_B T} \quad \text{במקור צב ותקבל כי:}$$

$$P(\nu) \approx \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-h\nu/k_B T} d\nu$$

$\frac{h\nu}{k_B T} \gg 1$

וכיון שמתאמת צוזק למר יום מתמחה פול צב לקבל התמחה פוזיקיות

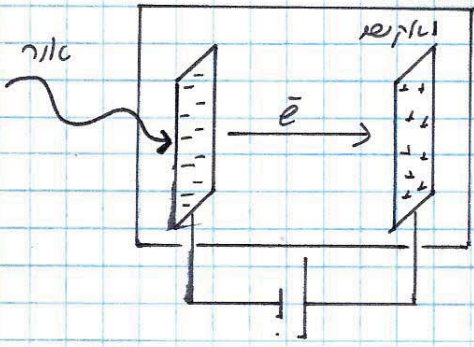
בתום תופים המקורם.







8. האפקט הפוטואלקטרי - 1905 - אולברט איינשטיין.

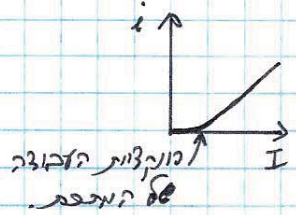


הנוסח בואמפור מכול שני עתות קבל טזונש.  
 תיקבל מצוי האקטש ומאויש האור של הלוח האזון שליית.  
 האור מצורה אלקטרוניש שפאלטיש מהיתודה, וזיש  
 זדרי האמרה וסוזניש מזל ליקיות זרם.  
 הזרם הטמרה אמור להיות פרופורציוני לזרמת האור.

עיקרון  
 שוני שנה  
 באותה השנה  
 5 מאי 1905  
 בגיל 26  
 המצאת  
 גרית היסטורית.  
 אף כי ב-1905 הוא  
 קיבל בוספר  
 על מאמריו וזדמת  
 גולדע לפוא-אפקט.

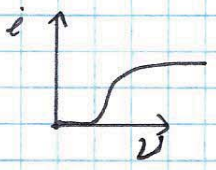
כיוון שהאפקטוניש קטוריש למעשה, נדרש ג אנרגיה מינומלית בכדי לתקן  
 מחנה-אנרגיה זו קראת פונקציות העבודה של המצע. על כן, היינו מצויניש

את זרמת הצרם  $i$  כפונקציה של זרמת האור  $I$  היינו מצפיש לקבל את  
 ההתנהלות הבאה:



כפועל, מהשתנה הוא שבאשר מודיש את הזרם

כפונקציה של מתדד האור (ולו זרמת האור) מקבליש תדד סלאסריתתו  
 אין צרם:



התנהלות זו סותרת לחלוטין את התמונה הקלאסית  
 לפיה כמות האנרגיה שמסרת הקרונה לאלקטרוניש

מבונתה לרובות אמפליטודת השדה המתנוצר  $I \propto |E|^2$

התבסס על זרונתו של אלקטרוניש היין כי אנרגיה האור מתנהל כאלו  
 תלקיטת צבלי אנרגיה עח כמאוד ולו כעל אצ הכזו שיופיד זרם במדרכה  
 על התלקיטת לשאת אנרגיה העבודה משל הקרונה של המצע  $W \propto \nu$ .  
 רק אז האלקטרוניש יתנתקו מן ~~המתחברת~~ הקרונה וימצוא זכר  
 האמרה. ולכן וסתר של אשר מתכוו אין צומה במדרכה.  
 זו הייתה הוכחה חותכת נוספת לאלו התלקיטת של האור.

חשוב: בזרם שבלאטק הניח כוילהיברציות של הפריון מקוולטת,  
 איינשטיין הכתוב הנחה זו עם לקוונטציה של האור!

איינשטיין  
 אינרניש-דעלג  
 הצעה-זמן הכוסה  
 של הים זמם  
 היסטוריה גולדע  
 בין 2 התנהלות  
 עם פואונש לזק  
 מווינה  
 2 פואונש כולש  
 זנבלז אמ בתדד  
 עכו שאטא ולקינו  $e$  מן היסטוריה.

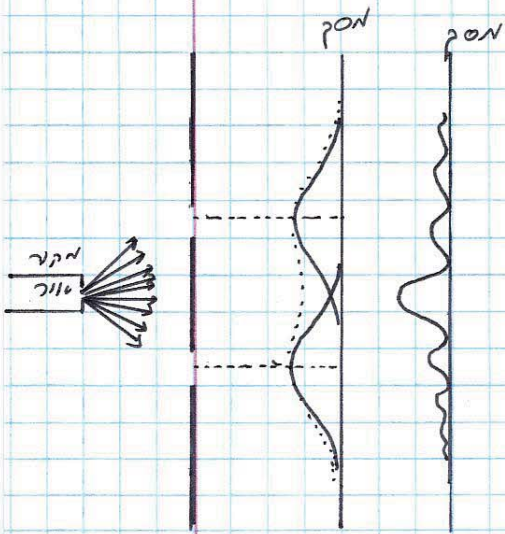
כזר האנרגיה של האור פרופורציונית לתדד שלו בזרם זרמת האור  
~~התנהלות~~ מייבצת את משל הפואונש לית' זמן ולית' סלח שיקין האור.

התנהלות



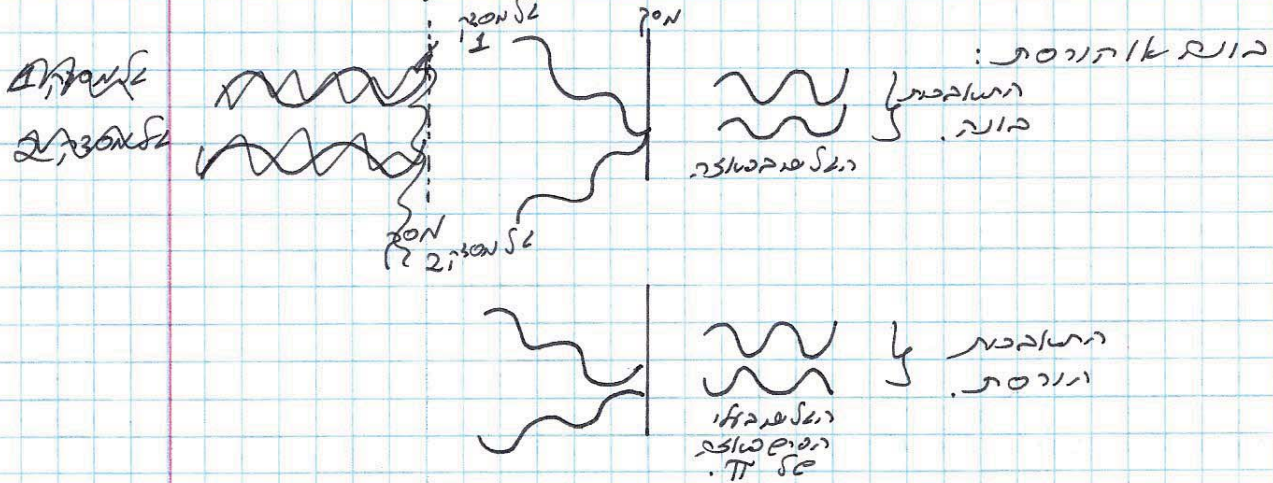
# ניסוי שני הספקים של Young

## הקואליטת על-התקוק של האור.

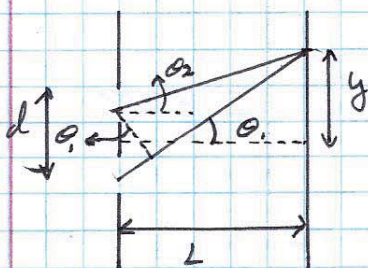


הניסוי מורכב ממקור אור קוהרנטי באורך גל  $\lambda$  (זווית) מוגדר, המקיין את מוצרם בגושי סגורים קטנים שמתורוה נמצא מסך. אש הספקים מלווה סדר, תקינות קטנים (בתוס' לזווית הגל) ונכתי רק סדר אור וצורה לקבל צורה אור חזקה אצל המסך הסדר שזורה כפי שהתקדם מהתקובה שמול הסדר. כאשר נבחר את שני הסדרים נצפה לקבל מדפסת שתייה סכום של שני צפוי הדקופה של סדר בוצר. הכולל מקבלים תמונה

התמונה המתאבלת. ~~התמונה המתאבלת~~ תמונה צומת מתקבלת כאשר מתאבל שני התנודות האחדות (כיוון מ-שדה אור) והנו תופה קוסמית לתופה של התאבלת גלש. אם נסתכל על תקופה מסוימת צ"ה המסך הלקוח שמעורר את אור הסדרים וכולם נמצא סוגר אתה - התמונה הפופים הפוארפ תקיף שיש תפיה התאבלת



כיוון שהמקור קוהרנטי הפרים הפוארפ פרופורציונל לפרם הברכה שזורה בקרני האור הנותת:



ניתן להאמר כי הפרים בין הברכה שזורה שתי תקינות נתן צ"ה  $\Delta r = d \sin \theta$  כאשר התמונה כי  $L \gg d$  ולכן  $\theta_1 \approx \theta_2$



בכדי לקבל את הצוות הן ההתאבכות בונה עליו לצדדים כי העלש והיו  
הטואר כמורר שהפיס הצרכים והיה ~~מספרים~~ מספרים של אויבול:

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad g = m = \text{סמולד}$$

המלוא להתאבכות הורסת הונו שהפיס הטואר והיה  $\pi$  כך שהפיס הצרכים  
היה מספר חצוי של אויבול:

$$g = (m + 1/2) = \text{סמולד}; \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

ניסוי זג, כפי שהוצג עזרה, מהמלואו צדו בוטאוי אית האופיה של האור.

בדגמת לחצור של המסוי אק להוציא את צורת האור עזרה כצדכ  
טאון מחומס למחרת פואון הוצר ומתעל להבאז במסך בטויס  
מפנה מן החזרה פואון נוסף.

אשר להוצר ניסוי זג עם סצק אתר בקרב תקבל של פואון שמתרה ובלע  
מסקנתה, בקוצה אחרת של המסך (מוצגש גאון באמצות מסך  
פואון מסוי שצורה בכל פסג פואון פוער בו) ובאשר למתן זמן רב והוצר  
סטטיסטיקה של מקומו הפוערה של הפואונש <sup>(המוצגש)</sup> השונש תקבל התפלגות  
מתמטית לסצק ותיוז:



כאשר לבית את שני התרופש ושתרה פואונש בוצרש, נמתין זמן רב  
והוצר סטטיסטיקה של מקומו הפוערה של הפואונש המוצגש תקבל התפלגות  
מתמטית את תמוש ההתאבכות שמדת מהאופיה של האור!  
צבר זג מפתר בותש כיוון שמצורה בתקופש בוצרש, כוצר תקוק  
שבוצר מסולל צדק סצק מסונש יוצר על קוויש הסצק השני?!  
כאשר מתבונש במדידת הסקאלת זמנש של אוירוז בוצר אנו מתבונש  
בתמוש התקופת של האור שכן בכל פצת המסך הפלאורוסט \* יצוון  
פוערה של תקוק בוצר אק כאשר אנו מתבונש במדידת הסקאלת  
זמנש ארוכה בהבה מצו של אוירוז בוצר אנו חוצרש את התמוש העלוי.  
למצה תמוש הקלפוס של מסולל תקוקו כיון קודם לתלואין שכן פואון שגרה  
צדק סצק אתר יוצר ~~אם~~ הסצק השני פתח אנו סארה.

אשאל "וינש"  
את המסונש אוק  
אתר אציקל  
סצק פואון יוצר  
צדק סצק אתר  
(פואון אנו וכו')  
זמנש (זמנש) וזמנש  
בל פסג הטו  
והאר פצק בוצר  
ונצטי. לקבל  
סכנש של תמוש  
צקויש של פסג  
סצק בוצרש.  
בסקולת זמנש  
קצרה אוק תמוש  
פוערה אוקולת  
של הפואונש  
במסך אוק אק  
מתבונש ומסק  
ממן מסונש  
את תמוש  
ההתאבכות.



(11)

כבישנות לטווח, הטווח מתפשט הן כחלקיק והן כגל בתלות במהירות  
איתה אמ מקבוצה.

נקודת חשובה מספר 1: ישנו נרצח לצדד דיוק אולי ספק הטווח זהה  
לצדדק לשם זלמי אור מאותו הספק. אולם יש נשם זלמי מאותו הספק  
פזורה זו תספג את הספק וזלמן תהיה את תמונה התאבדות!  
מטווח אמ לתפשט שני דברים חשובים:

1. יש וי ביזיון מוצד זלמי צדד הספק דרכו עבר הטווח, תמונה  
התאבדות גרסת - היצד הזלמי כי הטווח עבר דרך ספק <sup>צדד</sup> מסוים  
מוצדק את התפשטת החלקיקות של האור.

2. צדד המקודק טווח מקבוצה מספידה של התפשטת! צדד צד  
אווה מוכר מן המחקר הקלוסית לפיה התבוננת במדעית אולם  
משה את התפשטת.

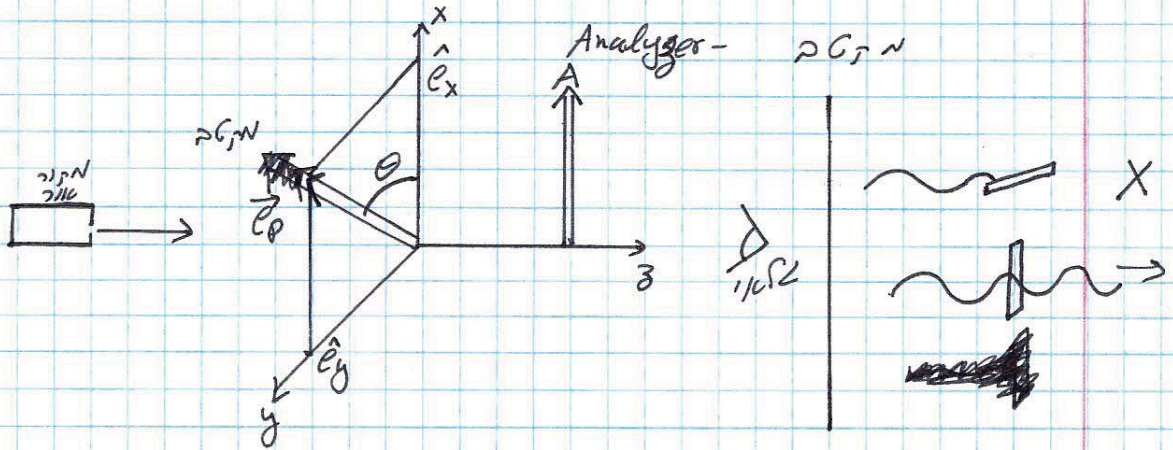


הצדד הישם: עובדה מפתידה היא כי ביזיונה למסוי שני הספקים עבור האור  
יש <sup>יש</sup> הוצדו ניסויים צוונש עבור אלקטרונים, מולקולות קטנות  
ואף מולקולות של (Nature 401, 680 (1999)) וגם במסויש את קובו  
תמונה התאבדות כך שהצולות לעדלקוק שמצו האור הוא  
לס צולות חלקוק-לכ שמצוש חלקוקיש!  
עזובה זו נמצר קהשק וקוצם כל הקורס מספ בתבוננת גליות של תמונה.

(\*) 1927 Greiner-Davissson קבלו נופל ה- 1937 על דיפיקציה של אלקטרונים.



# The principle of spectral decomposition



הנוסח המרכיבני מקטב (מקפולת ממש) לאור שהאור עובר דרך זיקה המקטב היטשון בהכרח כיוון הקוטב שלו הוא כיוון המקטב  $\vec{e}_\theta$ . כדמיון מציגים מקטבני (Analyzer) בזווית  $\theta$  מן המקטב היטשון. אם המקטב היטשון מקביל למקטב היטשני ( $\theta=0$ ) האור יצא דרך זיקה ה- Analyzer. אם המקטב היטשון ניצב למקטב היטשני ( $\theta=90$ ) האור לא יצא.

אם הזווית בין המקטבים היא  $90^\circ$  כל סניקטל שדוצבת האור שדוצבת את ה Analyzer מקומת  $I \rightarrow A \rightarrow I'$   $I' = I \cos^2 \theta$

כאשר  $I$  הוא דוצבת האור לפני ה Analyzer ו-  $I'$  היא דוצבת האור שדוצבת אחריו.

כדי לבחון מקור אור "יורה" פוטננש בוצנש. התוצאה של סניקה של פוטנן בוצנש היא אולי הפוטנן צהר את-  $A$  או שהיא אולי צהר את-  $A$  הפוטנן איתו נתן לפוצנש. אולש עם נתן זמנכה ונצבור פוטננש כנש (פוטננש בתוכו) ~~מחננה~~ נלכה כיום הפוטננש שדכו את  $A$  מקוש :

$$N' = N \cos^2 \theta$$

כאשר  $N$  - מני הפוטננש שנלכו ו-  $N'$  מני הפוטננש שניקטו בעליו.

אם הפוטנן עובר את  $A$  אזי הקוטב שלו הוא  $\hat{e}_x$  אם הפוטנן אדוצבה את  $A$  אזי הקוטב שלו הוא  $\hat{e}_y$ . ~~התוצאה~~ ניתן לבחון אולם ~~התוצאה~~ הקוטב  $\hat{e}_x$  ו-  $\hat{e}_y$  הים מצבים עצמם של מצוצת הקוטב. ~~התוצאה~~

אם כד "יורה" פוטנן עם פוליות  $\vec{e}_\theta$  בק  $\vec{e}_\theta \neq \hat{e}_x, \hat{e}_y$  במקרה כדמיון התפוצה אדוצבה מרש. אם הפוליות היתה  $\hat{e}_x$  הפוטנן היה עובר בוצנת



אם הפונקציה הייתה  $\hat{e}_y$  אזי הפוטננאל  $\vec{e}_p$  לא היה זוכה בזוגיות. אולם אם הפונקציה היום  $\vec{e}_p \neq \hat{e}_x, \hat{e}_y$  אזי יבוצע ~~הפוטננאל~~ הפוטננאל יצטרך להתפרק לפי  $\cos^2$ . מתוך אופציה נקטורה נוסף להעדר כי:

$$\vec{e}_p = \cos\theta \hat{e}_x + \sin\theta \hat{e}_y$$

כך  $\vec{e}_p$  היום קומבינציה לונארית של שני המשבשים האנכיים  $\hat{e}_x, \hat{e}_y$ .

אולם כבר אמרנו שגדת המצובה ה- Analyzer ~~הפוטננאל~~ קומבינציה

אז הפוטננאל זוכה  $(\hat{e}_x)$  או  $(\hat{e}_y)$ . מכאן עלינו להסוק כי

גדת המצובה הפוטננאל "קורס" למצב המשבשים הקצומים  $\hat{e}_x$  או  $\hat{e}_y$

אם הוא קורס ל-  $\hat{e}_x$  הוא יצטרך ונש-  $\hat{e}_y$  הוא לויזציה את A.

מתוך תוצאות המסויי האומר כי הסוכו "לקורס" לפתרון  $\hat{e}_x$  הוא  $\cos^2$

לנאם המקצב של  $\hat{e}_x$  הקומבינציה הלינארית הרובוד. ~~המסומן~~

ההנאמה, הסוכו "לקורס" לפתרון  $\hat{e}_y$  (לויזציה) היום  $\sin^2 = 1 - \cos^2$

שהוא המקצב של  $\hat{e}_y$  הקומבינציה הלינארית. מן הסתם סכום הסוכיים

תווה לפיות 1 שכן או הפוטננאל זכר או  $\hat{e}_x$  כק:  $\cos^2 + \sin^2 = 1$

וישנם לפי אפטי קובות:

1. עבור פוטננאל בזוג המעוד הפונקציות  $\vec{e}_p \neq \hat{e}_x, \hat{e}_y$  אין אנו ויצרם בזוגיות

אם הוא יצטרך או  $\hat{e}_x$ ! את הקיצום את ההסתברות של יצירה קמובן

שבאופן סטטיסטיקה של מש' גזול של פוטננאל <sup>בזוגי</sup> כהמתנה זכרו

וכמה לא. עם זאת אנו איינשטיין כי "אנשים לא חשק הקובות".

2. למצב המצובה ה- A אש הפוטננאל זכר אומר אנו ויצרם בזוגיות

כי הקוטוב שלו הוא  $\hat{e}_x$ . הפוטננאל העוד אש קוטבה  $\vec{e}_p$  ויצרם המצובה

זתה לויזציה "לקורס" למצב  $\hat{e}_x$  (אש הווצרה) - כך המצובה הספודת של

המשבשים ואנו ויצרם בזוגיות את הקוטוב שלו.



השדה (1924) de Broglie

דה-ברואי היה מציע ציפי שטח שיש לפי איינשטיין האור מתנהג כחלקיק אזי גודל שלו יתקיים שלפיו מתנהג כלום. את ההשערה הצו הוא כתם בהנחת דבורקאיטל שלו שאברה בנת מחזור ולפיה הוא קיבל סיסטמה ה-1929.

יש האור קטן  
צטולואי-אמי  
שתלוקים על  
יהיו צטולואים

את המשוואה שכתם דה-ברואי נתן לקבל משוואת המספר אונברט:

1. מנעה קלאסית:

במכניקה הקלאסית אנרגיית החלקיק נתנה ע"י  $E = T + V = \frac{p^2}{2m} + V$   
בשוויונות, קיבל כי  $\langle T \rangle = \langle V \rangle$  ולכן:

$$\langle E \rangle = 2\langle T \rangle = \langle \frac{p^2}{m} \rangle$$

כעת, אם החלקיק מתנהג כלל אזי לפי פרוק האנרגיה נתנה ע"י  $E = h\nu$

ולכן קיבל כי:

$$h\nu = \frac{h\nu}{\lambda} = \frac{p^2}{2m} = \frac{m^2 v^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}$$

באשר בחקיש מתונה האור כישמאית מתונה החלקיק,  $\nu$

$$\lambda = \frac{h\nu}{mv^2} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

מכאן קיבל כי:

2. מנעה היחסית:

על פי מנעה היחסית של איינשטיין  $E = mc^2 = (mc) \cdot c = pc$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

ודלכן דה-ברואי טען כי אם לחלקיק אונברטלי אזי אורך הגל שלו

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

נתן ע"י:

באשר  $\lambda_{dB}$  מכום אורך גל דה-ברואי.

אם הגל המתואר ל- $\lambda_{dB}$  מוצר ע"י:

$$k_{dB} = \frac{2\pi}{\lambda_{dB}}$$

- דוגמא: אנו אורך הגל של החלקיק אברה בת מהמה  $m = 10^{-15} \text{ kg}$  וצבט  $10 \text{ m/s}$

$$\lambda_{dB} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{10^{-15} \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ m/s}} = 6.626 \cdot 10^{-16} \text{ m} = 6.626 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}$$

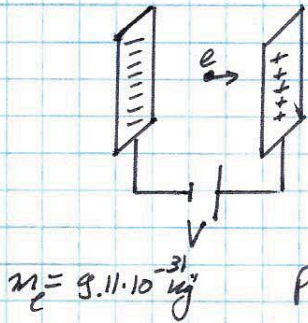
החלקיק קטן  
על-אורך גל  
שלו מתקרר  
למטה שלו



(15)

מתאן שאורך הגל של גרר הטורק בתאושש בהש צמ, קטן מאוד ביחס לגובה התלקות, צמחו - במשך צב בו התלקות, צמחו אינו "וצד" כי הוא של התלקות, ונתת צ"י תרן התמנה, התמנה.

צמחא נספח :



אלקטרון שנתנו בו שני נמוות קבל עליהם משפח כולל של  $V$ . אנגיות התלקות, נתת צ"י  $E = qV$

באשר  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  הוא מטון האלקטרון.

כד כיוון, שמקושג  $E = \frac{p^2}{2m_e}$  : נתפס כי  $P = \sqrt{2m_e E}$

ואתן מקושג :

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e q V}} = \frac{12.3}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$$

במת של 10V אורך הגל הוא מס' אנגסטרומס קוצנש - צב נשתנתה מוצב התלקות יונ. בנוש אורך צב כש הוא משפס גופל של התמנה, הבין טולומש העבוסש ולכן (בדומה לנסוי שני הספס של ממסל צריאוק) כשאר התלקותן טוגד לבוס הוא ונת תמות התמנה (קופיקצנת) כפיצוכ ממנו. כמות כשאר אורך צב צה צתוליות מספר הגופל של התמנה האופיוניש

---

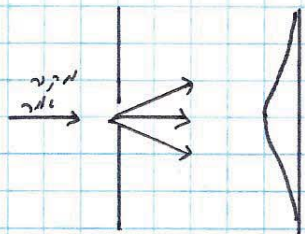
במחבת אזו התמנה העלות של התלקות תבואם ליצו בוטוו.

כל ש  $V$  גופל תפס אונכי צל קטעם ינת כק שאורך העלש התלקותן יהיה מספר גופל של התמנה של אולומש וכן נתן לתקור באמצעות אתמנה התמנה. נתן לצמח צ"י מוקושג.



הצגת זריקת או-הודאות

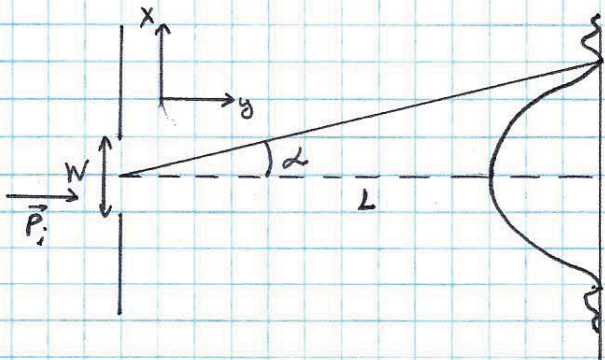
מתק נוסף ה- *Spectral decomposition* ראוינו כי, באופן כללי, בדת בויפוז מדידה אין את וכו' להגביל הודאות את תוצאות המדידה אלא רק באופן הסתברותי. כעת נרשם, בן נוסף של זריקת או-הודאות בדת בויפוז מדידה כפי שבאו לידי ביטוי במתקת הקוונטם.



באשר צמ בתו שני הספקים  $\Delta x$  כי תמונת הזקופת של ספק בוצר הונת מהעורה המופזת האורך השמאלי:

צורת כתם זו הונת נבונה רק בגבול של ספק נקודתי. אנש לספק כותב סופי ומספר עבר של אורך הגל של התקופת שדכתם

צרכו (אנליטיות / טואנש וכי...) אזו תמונת הזקופת של הספק תמונת תמונת בתאובנות:



נסמן את כוח התחלף  $W$  ואת העתק  $L$  העסק  $L$ . כמות נסמן  $L$  את הזווית שלקורה הראשונה בה נמצאת המאבנת הורסת. כוב התקופת ובלזו במקס בתחום הזווית שבין

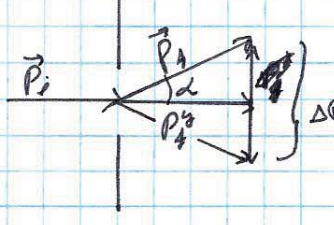
מממש נוסף זיממקי

$\alpha - \alpha$ . לפני הפזיה בספק התקופת מוזש עם תוצר בתוון צור  $y$ . אותר המזהר ציק הספק ודקב הסוזר מהצמנת ודקב האוס הגליש

התקופת, ~~מממש~~ הם צובינש תוצר בתוון  $x$  כק  $e$ .

אנ ממונינש לאפיון את תוצרת התקופת ואת מסוליס. כפי שנהג מייצ, איין את וכו'ש לאפיון עצמאלו בצוק אינמשי. זאת לן הגלל המפת המכשר המדידה אלא דקב האפי הגלי של התקופת.

אי-הודאות שמו במדידת המקוש אורך הספק צרכו זכה התקופת הונת מספר אצל של ניתב הספק:  $W \sim \Delta x$ . כיון שנה התקופת ינזו לאות הזווית שבין  $\alpha - \alpha$  ניתן לחשב את אי-הודאות במדידת התוצר מייצ אותר הסיצור:



אנ ממונינש כי המזהר ציק הספק הונת אלסטו כק שהתוצר לשאר בגודלו ויק משמאל טווח כק  $e$   $|\vec{p}_+| = |\vec{p}_i| = p$  וצלק אנ ממונינש כי  $\Delta p_+^x = 2p \sin \alpha$

$\Delta x \Delta p_x \approx 2Wp \sin \alpha$  מכאן מתקופת:



(17)

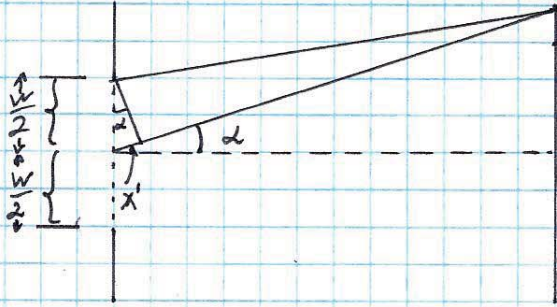
נתבונן בדרך של הספק בתקופה:

מסוקר של גאומטריה מתקופה:

$$\sin \alpha = \frac{x'}{w/\lambda} \Rightarrow x' = \frac{w}{2} \sin \alpha$$

כאשר  $x'$  הוא הפרש הרכיב האופייני והנמוך

$w \ll L$  כך שהקושת מתבואש כמעט מצוין.



לפיכך בכיוון הקרן את התאבכות הנורסת הנוסחה נצרים כי ונקודת

כיוון  $\lambda \sim w \sin \alpha$  כדור כיוון שר"י זה-במילי

$$\frac{h}{p} \sim w \sin \alpha$$

וקטן:

$$\Delta x \Delta p_x \sim 2p \cdot w \sin \alpha = 2p \cdot \frac{h}{p} = 2h$$

וכס'ת:

$$\Delta x \Delta p_x \sim h$$

הפוסט שבוצאו אוניו מצוין והעצמה המצוינת היום:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$$

צ'קוון או-הוצאות של הייצוגים:

המסודת הונו שלפלי או-הוצאות מתקופה והתא צ'קונו או שיש לקבוע קטן מאוד.  $\frac{h}{2}$  הונו או-הוצאות הממונית אם כנסו המופש בונו האופי האני של התקופה וכתוב או-הוצאות המצובה.

מניחה:

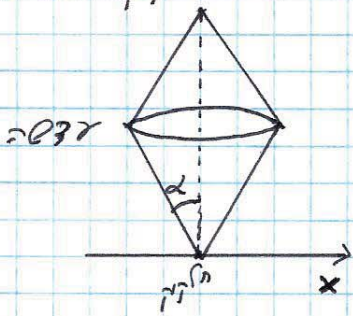
המניחה אנוני של הספקי המו כי הונו של המונוצ'ר לתקופה או קרוב במנותק, הקונו, כנוס' קונו כ'אמצובה מסודת של העצמה למונו מצ' (אם  $\Delta x \rightarrow 0$ ). מסוקרת אוו מכונת אוו-הוצאות. אם נוסי למצוב את מיקוס התקופה האופן מצוין אוי או של המצוב את המצ' האופן מצ'  $\Delta x \rightarrow 0$  תייב להתקופה -  $\Delta p \rightarrow \infty$  כפ' המוד של צ'קונו אוו הוצאות ובאופן קונו, אם נרצב למצוב המצוין את המצ' של תקופה  $\Delta p \rightarrow 0$  אוטל לקבוע את מיקומו האופן מצוין  $\Delta x \rightarrow \infty$ .

~~באופן קונו, אם נרצב למצוב את המצ' של תקופה אצ'ריון במצובה~~  
~~המניחה נפתח במסודת  $\Delta x = \Delta p \cdot \lambda$  כך ע:~~  
~~אך כיוון  $\Delta p = \Delta(mv) = mv$  ובנון שיתקופה~~  
 ~~$\Delta x \geq \frac{h}{2m(\Delta v)^2} = \frac{h}{2m v^2} \Delta v$~~



צדק נוספת להסתכל על צדקון או-הווצאות היא הצדק הכתוב:

אם מתבוננים בחלקוק המקסימום והקטנס לקרוץ את מניש החלקוק הזפת  
המיקרוסקופ.



מתק הפלש פלאוסות הלישיות קטנסות, צדק  
מבנה הזפת אם תמוך נקב טיפוס התמות החלקוק  
כאשר אצל הטיפוס הוא:

$$\Delta x \sim \frac{\lambda}{\sin(\alpha)}$$

כמות בקבי לחצף את התמות איתו ליתרון את אורך הצד ג של האור הפוער.

אופס כוון שמקויש  $v = \frac{c}{\lambda}$  אזי בקבי לחצף את התמות איתו להבדיל את

צדק הפוטנש. כוון  $\epsilon$  - ~~אוינטטי~~ היא כי אנשית פוטנש נעתי  $\epsilon = h \nu$

משתד הצבר הוא כי בקבי לחצף את התמות איתו להסתם פוטנש איתו ויתו

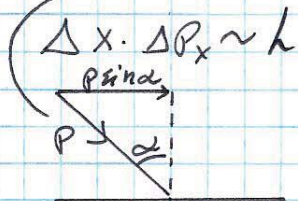
אנשית. על-כן כוונת לחצף את התמות החלקוק מנש פוטנש אנשית

וכוון ~~משתד~~ החלקוק האן ~~משתד~~ התשיות אלו ~~משתד~~ מדידות או תג ואמות

להבדיל של  $\Delta p_x$ . או הוצאת התג כוון x נעתי:

$$\Delta p_x \sim p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{h}{\Delta x}$$

ולכן:



ישנו התג הוא:

$$\Delta p = p \sin \alpha - 0 = p \sin \alpha$$

תשוב להבין שכאשר אנו מוצפים את  $\Delta x$  נקב או-הוצאת עם  $\Delta p_x$  אק כתיש

שלו כוון y ו- z יסור מוצרשן לומצנת אולו.

צדקון או הוצאות אים כי לונות לחצף בו למנות את x ואת  $p_x$ .

אק בזמן החצופהש-x אי הוצאות ה-  $p_y$  ו-  $p_z$  ~~מבנה~~ שן אן אנו מוצפם

את y או את z.



פיזיקס אטום המוח

\* בסדרת ניסויים חשובים בשנת 1897 הצליח Thomson לחשוף את היתוס

בין מטען האלקטרון לבין המסה שלו. תוך כדי כך הוטל גם המצאה את ה-

cathode ray - טכנולוגיה שמשלה למסבי טלויזיה <sup>תחילה</sup> וקרדז הגשור הערמון.

בשנת 1906 הוטל צפה בקריסטל על עקבותיו.

\* בשנת 1909 Millikan ניצח באופן יסודי את מטען האלקטרון ע"י כך

שהוא מציב את עוצמת השדה החשמלי הנדרש בכדי לעצור טיפת שמן אדומה

הנפלת עקב הכובדות. הממצא שהשדה המאזן את כוח המשיכה ~~המשיכה~~

המאזן ~~המשיכה~~ בעצם גודלם של ~~המשיכה~~ כך שצורת הטיפות הייתה בעלת

גודל קבוע. מטען האלקטרון. בשנת 1923 הוא קבע פרסמבל על עקבותיו

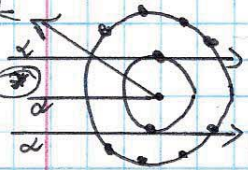
15.

~~\* התקנה נוסף עבודת בשנת 1909 Geiger Marsden~~

~~1911 Rutherford הניח מדעני התלם~~

~~צבם עובדת קושי במאומים היתר וצבם צבם גב לפי מאומים פורסם~~

~~מגדלה העליון~~



\* צבם עובדת קושי המאומים הייתה וצבם צבם גב לפי מאומים פורסם

והתקנה בטבלה המוצגת של מנצ'סטר (1869). אולם מהם האטום לא

היה וצבם Thomson הטת כי האטום בנוי בצורת מטען חיובי מסוג אקר

סביבו סבב מטען שלילי כמו צורת צומקושי:



אולם בשנת 1909 Geiger-Marsden ביצעו ניסוי של פיזור הקוקו אל

(He<sup>2+</sup>) מזהה צבם. באופן מפתיע הם נאלו כי חלקיקי מלקוקוה - מתפזרים

בצורת לקולות למחר. מוצל "צולף בצומקושי" לויכוח היה להסביר

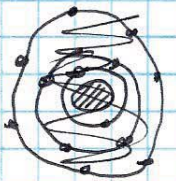
תופדה לו שכן המטען החיובי הפצור בעריון לויכוח היה לספק צו "רעז"

עוצמת הקוקוה - למחר. Rutherford בשנת 1911 הביע מוצל

הניסוי עבור מהם האטום לפיו המטען החיובי המצב את הקוקוה - היתוס

מרכב כולו בעריון ~~המטען~~ האלקטרוני סובבם את העריון (המאמרו הוא המצור

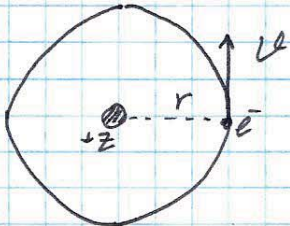
מוצל מוקדם וות של Hansaro Nagaoaka לפו האלקטרוני מסובבים המעלעת אומים  
(בקווי. למעשה.)





מתוך גזירות הנסוי הנפורז חיסב כי מצב לרדיון אטום היציב צריך להיות  $3.4 \cdot 10^{-14}$  מ (פי 5 בקירוב מהמבצע המקובל כיום). גזירה זו היא מפתיעה ביותר בהתחשב בהיקף שטח האטום הוא  $10^{-10}$  מ (גודל שהיה מקובל למאז) וכן עורר הזדקרה שהמטען החיובי המרוכז באמצע היה קטן בהרבה מאזורי החומר דחוסים קולומביאיים.

התפרז השתמש בתקווה של ההיבטציה הקלאסית בכך להגות מודל אטומי



לפניו הולקטורוס חגש בהנצנים סביב העריון:

$$F_c = \frac{m_e v^2}{r} \quad \text{הכוח הצנטריפטלי הוא:}$$

$$F_{coul} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{המשיכה הקולומביאית היא:}$$

ובכך לקבל מסוזה וצרכים <sup>לפי קוויס לרדיון</sup> הכוחות להתאזן כך ש:

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \Rightarrow r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v^2}$$

~~$E = T + V = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$~~

$$E = T + V = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{Ze^2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} < 0$$

ולכן המצב הקשורה וצובה יתר מן התקנים הבוצרים.

אולם מוצב שם אינה לוקה בחשבון את קרונת Larmor! ער-פי תוקו <sup>המכונה תאוריה</sup> התקין <sup>המכונה תאוריה</sup> פולט קרונה. ער כן, כשהולקטורוס הסובב את העריון, חוש ממוצע בתנועתו גאוטרית ואמוריס לפלוט קרונה



ולקובד אנרגיה צבה שערש ערש לקרוס אול חק העריון:

חשבון פולט המוסס של מסות Larmor מתאיכומן חוש

המקטוריסל אולם המוחן לפומוצב שם היא  $10^{-10}$  מ, אנס, ככל שרצונם

הסיבוב של האלקטרון סביב העריון קטן מהרובו לפנה וכן האוריס גאוטרית לפל

ובאופן רצוף. מתן שאלש המוחן אמור היה לפלוט אנרגיה בכל הרצות לפסקתום

רצוף. צבה שם סרס את מצופות ספקטרוס אטום המוחן של Rydberg

שהוא כי הספקטרוס היה בקיר וצורם להסתוא:

$$\bar{\nu} (\text{cm}^{-1}) = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right); \quad n_1 = 1, 2, 3, \dots; \quad n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, n_1 + 3, \dots; \quad R = 1.097 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-1}$$

(קוד מצב)



מוצא האטום של ריבסטרוד היה המוצא התיאורי שבו היה להסביר את הנוסחה לייצור ומספרן אולם הוא ככל מספר בזוית אומת הוא לא פתח:

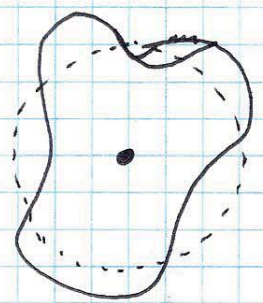
1. הצטייה הקולומבית של הפרוטונים בקרוין.
2. יציבות אטום המוח (פליטת למורל).
3. הסטיקרוס הקרוין של המוח ומסתגל Rydberg.

את דמיון הצטייה הקולומבית בקרוין פתחו הפיזיקאים בצורת הכיח התצק והכית התלש. יציבות אטום המוח והסטיקרוס הקרוין פתחו מבנים וסדרת מהאופי העלי של האלקטרונים.

### מוצא האטום של Bohr

בוהר פתח את 2 הבזות של יציבות האטום והסטיקרוס (אנרגיה) ע"י מוצא שליקת בזמבון את האופי העלי של האלקטרונים. ע"י צה-הרולי לאלקטרונים (במרחב התיק) אופי עלי ואורך גל שלהם מקוש קו/ג = ג. היה הנתיב האלקטרונים נמש במעגל סביב המרוין המסילת אשר מקבילת המרוין

העבר:



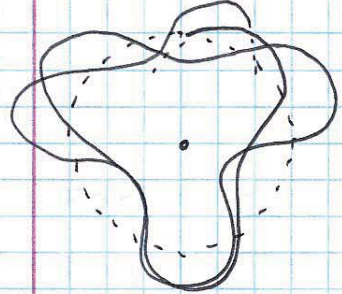
כאום אורך המסילה צפוק להיות מספרים של ארכובל של האלקטרון:

$$2\pi r = n\lambda ; n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\Rightarrow r_n = n^2 \lambda / 2\pi ; n = 1, 2, 3, \dots$$

כאום האלקטרון יכול למצו הקבועות המקוונות את המסות המ-לכאום המסילות מומות! אם לא מומות מס' של מס' ארכובל לא ארכובל תהאכנה

בוכסת:





$$2\pi r_n = n\lambda = n \frac{h}{p} = n \frac{h}{mv_n}$$

ורגל:

$$\Rightarrow \underbrace{mv_n r_n}_{\text{תנע זוויתי}} = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar \quad ; n=1,2,\dots$$

קוואנטיזציה של התנע!

מכאן התנע הזוויתי מקוונטת לזריכטעם  $n\hbar$ !

הכוח הצנטריפוגלי תמיד להיות מאוזן למשיכה הקולומבית בלוח:

(מינימום טוטאלי)

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{r_n^2} \Rightarrow mv_n^2 r_n^2 = e^2 r_n$$

לכפול ב-m ונקבל:

$$me^2 r_n = m^2 v_n^2 r_n^2 = n^2 \hbar^2$$

$$\Rightarrow r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} n^2 = a_0 n^2 \quad ; n=1,2,3,\dots \quad a_0 = 0.529 \text{ \AA}$$

מכאן שבמסלול  $n=1$  (הרמה הנמוכה) הקרן כ"י  $r_1 = a_0$   
בהידידום אורגן החומן. בהידידום המינימום. האלקטרון לא יכול להתקרב  
מזהר לדידום כי אלא הברדון ע"פ מוצל בוקר ולפי האלוכל לדידום  
אין הדידון.

\* בהמשך נבחר את משוואת שרדינגר עבור אטום המינימום ונראה כי אמת שמוצא  
שי. מוצל מוצלית להפיק, אם מיקולת שמפיקות תפסות, התופסאני אפי  
ולוחצות.

תבואת כחץ של האטומה של ה"רמת" השונות היתריות:

האטומה נחתה ע"י:

$$E_n = T + V = \frac{1}{2} m_e v_n^2 - \frac{e^2}{r_n}$$

$$mv_n^2 = \frac{e^2}{r_n}$$

למה? האטומה כואתקום:

$$E_n = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{a_0 n^2}$$

ורגל:

בלוחסם מוצל בוקר

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{a_0} \cdot \frac{1}{n^2}$$



(23)

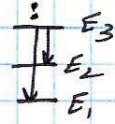
האנרגיה של האלקטרון במצב היסודי של אטום מימן

מכיוון שהאנרגיה של האלקטרון במצב היסודי היא  $-13.6$  eV:

$E_1 = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{a_0} = -13.6 \text{ eV}$

בנוסף הסתקת רשם של האנרגיה נותן דו מדבר האנרגיה בין הרמות השונות:

$\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1} = +\frac{1}{2} \frac{e^2}{a_0} \left[ \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right]$



כאשר  $n_1 = 1, 2, 3, \dots$  -  $n_2$  הנומרים אקרוני יוגו א-  $n_2$  בכדי לפלוט

אנרגיה בק ע:  $n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, n_1 + 3, \dots$

ואתו בקווק לנסתואו כו צברל עבר ספקרש אנרגיה היותו.