סדרת באלמר וקבוע רידברג

תאריך הניסוי: 13/07/2026

איגור גיטלמן

מעבדה 4מח 114037 – מעבדה 331, מסלול 1

דן קצוב-פייגין
323002915
dan.k@campus.technion.ac.il

דו"ח זה נכתב ב-Typst, שפה לכתיבת מסמכים.

מדידת אורכי גל של ספקטרום המימן וקביעת קבוע רידברג בשיטות מנסרה וסריג עקיפה

תקציר

בניסוי זה נחקרו קווי ספקטרום הפליטה של אטומי מימן (H) בסדרת באלמר במטרה לקבוע באופן ניסיוני את קבוע רידברג (R) ולהשוותו לערך התיאורטי הצפוי ממודל בוהר ($R_\infty = 1.0974 \times 10^7 \mathrm{m}^{-1}$). המדידות בוצעו בשתי שיטות אופטיות שונות: באמצעות מנסרת פיזור ובאמצעות סריג עקיפה.

ראשית, כיילנו את מנסרת הפיזור באמצעות קווי פליטה ידועים של הליום (He) וחילצנו את פרמטרי קושי של זכוכית המנסרה: $A = 1.59692 \pm 0.00027$ ו־$B = 8394.9 \pm 72.0 \mathrm{nm}^2$. אימות הכיול בוצע על ידי מדידת הקו הירוק של כספית (Hg, ערך ספרותי $546.07\ \mathrm{nm}$), שהניב אורך גל חזוי של $(546.06 \pm 4.01)\ \mathrm{nm}$, התואם לערך הספרותי ברמת מובהקות גבוהה ובמרחק סטטיסטי זניח של 0.02σ.

לאחר מכן מדדנו את אורכי הגל של סדרת באלמר. בשיטת המנסרה מדדנו שלושה קווים (אדום, כחול-ירוק וכחול) וחילצנו את קבוע רידברג הממוצע: $R_p = (1.1120 \pm 0.0043) \times 10^7 \mathrm{m}^{-1}$ (סטייה יחסית קטנה ומרחק של 3.43σ מהתיאוריה). בשיטת סריג העקיפה ($500\ \mathrm{lines/mm}$) ביצענו מדידות בשני סדרי עקיפה, מהן קיבלנו את קבוע רידברג הממוצע: $R_g = (1.1030 \pm 0.0012) \times 10^7 \mathrm{m}^{-1}$ (מרחק סטטיסטי של 4.52σ מהתיאוריה). שתי השיטות מאששות את מודל בוהר ברמת דיוק טובה.

1 רקע תיאורטי

2 מערכת הניסוי

3 מהלך הניסוי

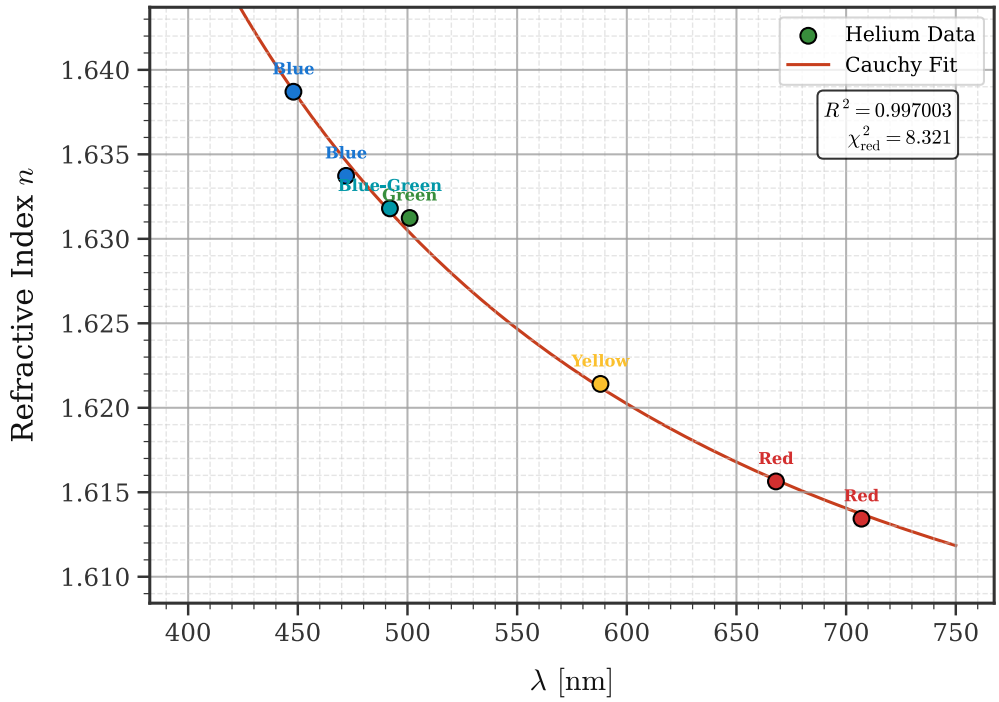
4 תוצאות וניתוח

4.1 חלק 1: כיול המנסרה (קווי הליום)

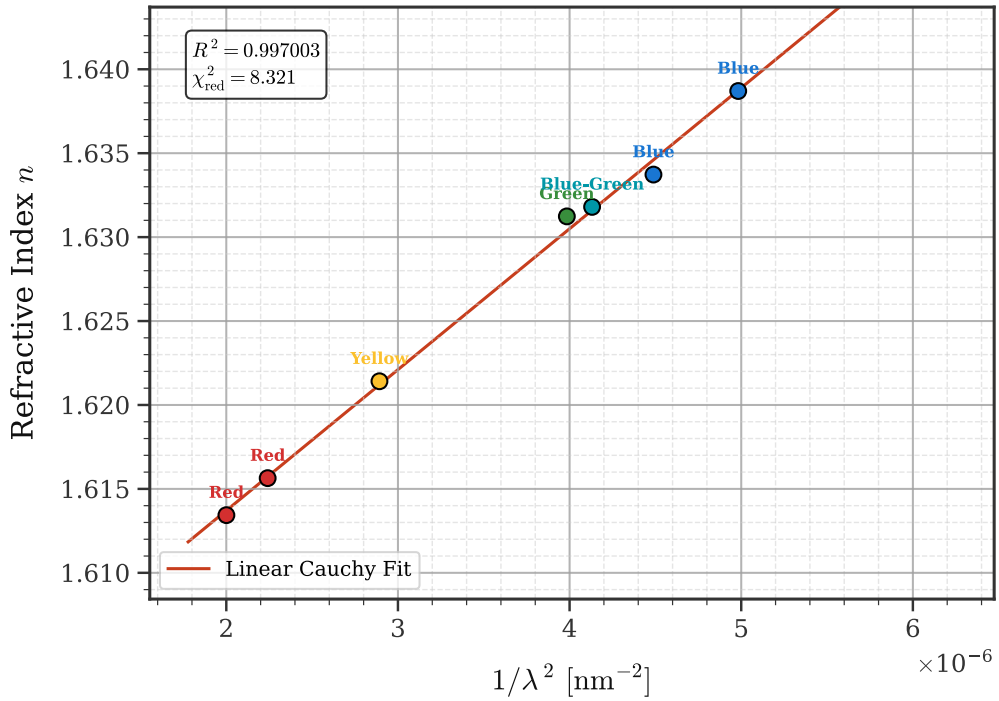
שגיאת המדידה בזוויות הסטייה של המנסרה היא $d\beta = 0.020°$.

טבלה 1: נתוני כיול של מנסרת הפיזור באמצעות קווי ספקטרום פליטה של הליום (He).

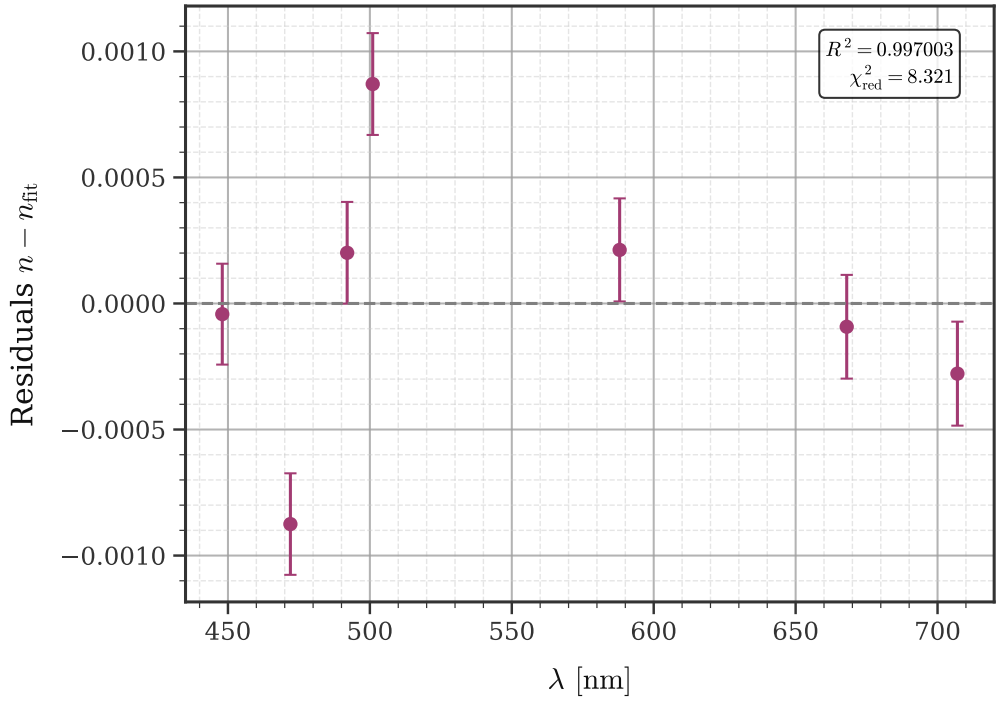
אורך גל ספרותי [nm]	זווית סטייה מינימלית (β) [°]
501.57	49.297
706.52	47.553
667.82	47.767
587.56	48.330
492.19	49.353
471.31	49.544
447.15	50.040



איור 1: עקומת כיול של מנסרת הפיזור בעזרת קווי הליום: מקדם השבירה n כפונקציה של אורך הגל λ וההתאמה למודל קושי.



איור 2: עקומה מיושרת של מקדם השבירה n כפונקציה של $\frac{1}{\lambda^2}$ יחד עם ההתאמה הלינארית.



איור 3: שאריות מקדם השבירה $n - n_{\rm fit}$ לכל קו כיול של הליום כתלות באורך הגל.

4.2 חלק 2: אימות הכיול (קו ירוק של כספית)

טבלה 2: אימות כיול המנסרה באמצעות קו הפליטה הירוק של כספית (Hg).

אורך גל ספרותי [nm]	זווית סטייה מדודה [°]	מקדם שבירה מחושב (n)	אורך גל חזוי [nm]	מרחק סטטיסטי
546.07	48.689	1.6251	546.06 ± 4.01	0.02σ

4.3 חלק 3: ספקטרום המימן – שיטת המנסרה

טבלה 3: תוצאות חישוב אורכי גל של ספקטרום המימן בשיטת מנסרת פיזור.

צבע קו	זווית סטייה [°]	מקדם שבירה n	אורך גל מחושב [nm]	ערך ספרותי [nm]	מרחק סטטיסטי
אדום	47.812	1.6161	661.52 ± 6.47	656.27	0.81σ
כחול-ירוק	49.488	1.6332	481.28 ± 3.03	486.13	1.60σ
כחול	50.534	1.6436	423.93 ± 2.36	434.05	4.28σ

4.4 חלק 4: ספקטרום המימן – שיטת סריג עקיפה

טבלה 4: תוצאות חישוב אורכי גל של ספקטרום המימן בשיטת סריג העקיפה (500 lines/mm).

צבע קו	סדר	β_+ [°]	β_- [°]	זווית פגיעה i_0 [°]	אורך גל מחושב [nm]	ספרותי [nm]	מרחק
אדום	1	19.158	18.888	2.336	651.29 ± 1.77	656.27	2.82σ
אדום	2	41.040	40.500	0.843	652.90 ± 0.68	656.27	4.93σ
כחול-ירוק	1	14.062	13.848	3.514	481.36 ± 1.99	486.13	2.40σ
כחול-ירוק	2	29.103	28.721	1.341	483.29 ± 0.80	486.13	3.57σ
כחול	1	12.521	12.329	3.996	429.23 ± 2.13	434.05	2.27σ
כחול	2	25.683	25.413	1.245	431.14 ± 0.82	434.05	3.55σ

4.5 חלק 5: חישוב קבוע רידברג והשוואה לתיאוריה

טבלה 5: חישוב קבוע רידברג לכל קו ספקטרלי בשתי השיטות השונות בהשוואה לערך התיאורטי R_∞.

קו ספקטרלי	n	קבוע רידברג מנסרה [$\mu\mathrm{m}^{-1}$]	מרחק סטטיסטי	קבוע רידברג סריג [$\mu\mathrm{m}^{-1}$]	מרחק סטטיסטי
אדום (657) (סדר 1)	3	10.884 ± 1.064	0.84σ	11.055 ± 0.300	2.71σ
אדום (657) (סדר 2)	3	10.884 ± 1.064	0.84σ	11.028 ± 0.116	4.67σ
כחול-ירוק (486) (סדר 1)	4	11.082 ± 0.698	1.55σ	11.080 ± 0.458	2.31σ
כחול-ירוק (486) (סדר 2)	4	11.082 ± 0.698	1.55σ	11.035 ± 0.182	3.39σ
כחול (434) (סדר 1)	5	11.233 ± 0.626	4.14σ	11.094 ± 0.550	2.20σ
כחול (434) (סדר 2)	5	11.233 ± 0.626	4.14σ	11.045 ± 0.210	3.39σ

טבלה 6: פרמטרי קושי וקבועי רידברג הממוצעים שחושבו בניסוי יחד עם המרחקים הסטטיסטיים שלהם מהתיאוריה.

שם הקבוע	סימון	ערך מחושב
פרמטר קושי A	A	1.59692 ± 0.00027
פרמטר קושי B [nm^2]	B	8394.9 ± 72.0
קבוע רידברג (מנסרה) [m^{-1}]	R_p	$(1.1120 \pm 0.0043) \times 10^7$
קבוע רידברג (סריג) [m^{-1}]	R_g	$(1.1030 \pm 0.0012) \times 10^7$
מרחק סטטיסטי קבוע רידברג (מנסרה)	σ_{R_p}	3.43
מרחק סטטיסטי קבוע רידברג (סריג)	σ_{R_g}	4.52
מרחק סטטיסטי כספית	σ_{Hg}	0.02

5 דיון ומסקנות

בניסוי זה צפינו בספקטרום הפליטה של אטומי מימן והבחנו כי הוא איננו רציף, אלא מורכב מקווים בדידים, כל פוטון נפלט כתוצאה ממעבר של אלקטרון בין שני מצבים, כך שהפרש האנרגיות מוגדר על ידי $\Delta E = h\frac{c}{\lambda}$, עצם העובדה שצפינו רק באורכי גל ספציפיים מוכיחה כי האלקטרון באטום המימן אינו יכול להמצא בכל מצב אנרגטי, אלא מוגבל לרמות אנרגיה מקונטטות.

חישבנו את קבוע רידברג באמצעות הסריג ובאמצעות המנסרה על ידי ממוצע משוקלל, וקיבלנו:

טבלה 7: השוואת קבועי רידברג שהתקבלו מחישובי המנסרה והסריג לערך התיאורטי.

מקור / שיטה	מנסרה	סריג	תיאורטי
קבוע רידברג (R)	$(11.120 \pm 0.043)\mu\mathrm{m}^{-1}$	$(11.030 \pm 0.012)\mu\mathrm{m}^{-1}$	$10.974\mu\mathrm{m}^{-1}$
מרחק סטטיסטי (σ)	σ 3.43	σ 4.52	-

נבחין שקיבלנו מרחק סטטסיטי גבוה בשתי השיטות ובנוסף קיבלנו שהערך התיאורטי לא נופל בטווח השגיאה של אף אחת מהשיטות, מה שמעיד על קיומה של שגיאה שיטתית דומיננטית שאינה באה לידי ביטוי בחישוב השגיאה האקראית.

5.1 שיטת מנסרת הפיזור:

ניתן להתרשם שהכיול בעזרת קווי ההליום והאימות בעזרת הכספית הניבו תוצאה קונסיסטנטית לתוצאה התיאורטית, וקיבלנו מרחק סטטיסטי קטן מאוד של 0.02σ .

כאשר השתמשנו בשיטה זו לחישוב אורכי הגל של ספקטרום המימן קיבלנו עבור הצבע האדום מרחק סטטיסטי קטן והתאמה בין אורך הגל המחושב לערך הספרותי, אך ככל שעלינו באורך הגל לכחול-ירוק ולאחר מכן לאדום קיבלנו מרחק סטטיסטי גדול יותר מהערכים הספרותיים.

הסטייה הסטטיסטית של הקו הכחול 4.28σ נובעת מכך שאורך גל זה $434.05\ \mathrm{nm}$ נמצא מחוץ לטווח הכיול של המנסרה(שהסתיים ב$447.15\ \mathrm{nm}$), חישוב אורך גל זה דורש אקסטרפולציה של נוסחת קושי. כפי שניתן לראות מאיור 3, מודל קושי מציג שגיאות שיטתיות(ניתן להתרשם שהשגיאות יוצרות תבנית גלית עם מקס' חיובי באיזור $500\mathrm{nm}$ שאינן מפוזרות בצורה אקראית), על פי [1] שגיאות אלה הולכות ומתעצמות משמעותית ככל שחורגים מתחום האינטרפולציה.

5.2 שיטת סריג העקיפה:

בסריג העקיפה ניתן להתרשם שהתקבלו מרחקים סטטסטים גדולים עבור כל המדידות הנעים בין $2.31\sigma - 4.67\sigma$, ובנוסף נוכל להבחין שאורכי הגל שהתקבלו כולם נמוכים יותר באופן שיטתי מהערך התיאורטי.

דבר זה מרמז על שגיאה שיטתית שהיתה קיימת בניסוי, ננסה לייחס אותה לסיבה עיקרית, בשלב מאוחר של הניסוי במהלך המדידות של סריג העקיפה הבחנו שהחזרה של הטלסקופ לנקודת האיפוס לא הובילה לחזרה לזווית אפס, בעקבות כך קיבענו שוב את המערכת וביצענו שוב את המדידות, אך הקיבוע לא היה מושלם והופיעה סטיה בחזרה לזווית האפס, ולכן המעבר בין הזוויות יצר חוסר דיוק שלא השתקף מהמדידה של הזווית, ניתן להבחין בכך גם מערכי i_0 שקיבלנו, ניתן להתרשם בטבלה 4 שערכי זווית הפגיעה משתנים לאורך המדידות ונעים בין $0 - 4°$, סיבה זו יכולה להוות את השגיאה השיטתית בניסוי זה.

5.3 השוואה בין השיטות

הסריג - מאפשר למדוד בסדרים גבוהים, מה שמקטין את השגיאה האקראית, אך דורש ידיעה מדוייקת של קבוע הסריג על מנת להימנע משגיאות שיטתיות, בסריג גם הדיספרסיה הליניארית טובה יותר.

המנסרה - הרזולוציה במנסרה משתנה,(מרווחים שונים בין צבעים שונים) ותלויה בכיול אמפירי, אבל אם היא מכויילת היטב אין לה הטיות קבועות שנובעות מפרמטר חיצוני כמו בסריג.

לסיכום, שתי המערכות סיפקו ערכים דומים לקבוע רידברג, מה שמעיד על עקביות המודל הקוונטי.

רשימת מקורות

[1] Dr. Evgeny Kolonsky and Dr. Yulia Preesant, "Measuring Visible Lines in the Hydrogen Spectrum, 2025, v.0.0.1.7". 2025.