דו"ח מעבדה
השלמות להתאבכות ועקיפה:
הסבר אפשרי לאנומליות בזויות גדולות

דב פלדשטרן

1 רקע

דו"ח זה מהווה המשך לדו"ח המקורי על התאבכות ועקיפה. כזכור, במהלך ביצוע הניסויים בלייזר, נצפו כמה אנומליות ביחס לתיאוריה. הבעייתית ביותר מביניהם - שלא מצאנו עבורה הסבר מספק - היא העובדה שעבור מדידות בזויות גדולות מהאנך למסך, לא מתקבלות נקודות התאפסות או נקודות מקסימום כצפוי, אלא יש פשוט דעיכה מונוטונית של התבנית (או של המעטפת, במקרה של זוג סדקים). בדו"ח המקורי הצענו כמה אפשרויות להסבר התופעה, אך פסלנו את כולן במידה זו או אחרת של ודאות.

בדו"ח זה, אני מציג הסבר אפשרי אחר לתופעה, ואת הבדיקות שביצעתי על מנת לאשר או להפריך את ההסבר. מומלץ לחזור על הקטעים הרלוונטיים מהדו"ח המקורי, כדי להיזכר בתכונות שמצאנו עבור האנומ-ליה.

2 ההסבר המוצע: זמן קוהרנטיות

בניסויים שביצענו השתמשנו, כזכור, בלייזר, משום שנדרשנו לכך שהאור המתאבך יהיה קוהרנטי - כלומר: כל המקורות חייבים להיות בעלי אותה תדירות, והפרש הפאזה היחסי בין המקורות השונים חייב להיות קבוע בזמן. לולא קיום תנאי זה, נקודת מדידה מסויימת, שברגע אחד הקרניים המגיעות אליה יוצרות התאבכות בונה וכך מתקבלת בנקודה עוצמה מירבית, עלולה בזמן אחר - בגלל שינוי הפאזה היחסית בין המקורות - להיות בהתאבכות הורסת, והעוצמה שם תהיה אפסית; וממילא, נקבל תבנית שמשתנה בזמן, ובעצם זו בכלל לא תבנית קבועה! חשוב לשים לב לכך, שמה שאנו דורשים זה רק שהפרש הפאזה *היחסי* בין המקורות יישאר קבוע; עקרונית, אם באיזושהי נקודת זמן תהיה פתאום קפיצה בפאזה, אזי אם היא תהיה משותפת לכל המקורות יחד, זה לא אמור להשפיע - שכן הפרש הפאזה היחסי בין המקורות השונים עדיין נשאר קבוע.

מסתבר שבהרבה לייזרים, זה בדיוק מה שקורה: כל הקרניים היוצאות מהלייזר ברגע נתון, הן בעלות אותה פאזה; ואולם, מפעם לפעם יש קפיצות שרירותיות בפאזה המשותפת הזאת. ישנו פרק זמן אופייני בין הקפיצות בפאזה, וזהו "זמן הקוהרנטיות" של הלייזר.

כפי שהסברנו, לכאורה לא צריכה להיות השפעה על תבנית ההתאבכות, משום שהפאזה היחסית בין המקורות *אינה* משתנה. אבל ניזכר רגע מה בדיוק גורם להיווצרות התבנית: לפי עקרון הויגנס, אנו מניחים

שכל נקודה בסדק מהווה מקור בפני עצמו, וממנה האור מתפזר לכל הכיוונים. אנו מניחים, כזכור, שבסדק לכל הקרניים יש אותה פאזה. ואולם, בנקודת מדידה מסויימת, הקרניים המגיעות מכל נקודה ונקודה בסדק יהיו בעלות פאזות שונות, בגלל הפרשי הזמנים שלוקח לאור להגיע מנקודות שונות בסדק לנקודת המדידה. זה מה שיוצר את תבנית ההתאבכות - יש מקומות שבהן הפרשי הפאזות יוצרות התאבכות בונה, ויש מקומות שבהן הפרשי הפאזות יותרות התאבכות הורסת. כלומר, כל התבנית נובעת מכך שכל הקרניים שמגיעות ברגע מסויים לנקודת מדידה מסויימת, יצאו מהסדק בזמנים שונים. אבל אם בין הזמן שהקרן הראשונה יצאה מהסדק, לבין הזמן שיצאה הקרן האחרונה, היתה קפיצה בפאזה, הרי שכל החישובים שלנו לגבי התבנית אינם תקפים, ובאופן כללי, נצפה לראות באותה נקודה עוצמה שרירותית, שתהיה תלויה בקפיצה השרירותית בהפרש הפאזה; ובממוצע על פני הזמן[1], בנקודה שבה יש בכל רגע עוצמה שרירותית, איבר ההתאבכות יתאפס, ונצפה לראות עוצמה מסויימת, ללא התאבכות[2].

הדבר תלוי, אם כן, בהפרש הזמנים המקסימלי בין הזמנים שלוקח לקרניים השונות - המגיעות מכל הנ-קודות בסדק - להגיע אל נקודת מדידה מסויימת. ככל שהזמן הזה ארוך יותר, כך גדל הסיכוי שתהיה קפיצת פאזה בין הקרניים השונות, ושתבנית ההתאבכות באותה נקודה תיהרס. כפי שנראה באופן מדוייק בהמשך, הפרש הזמנים המקסימלי הזה גדל ככל שזוית המדידה גדלה, ולכן זה נראה כהסבר טוב לכך שבזויות קטנות התבנית טובה, וככל שהזוית גדלה - כך נהרסת התבנית.

3 בדיקת ההשערה

3.1 הרעיון

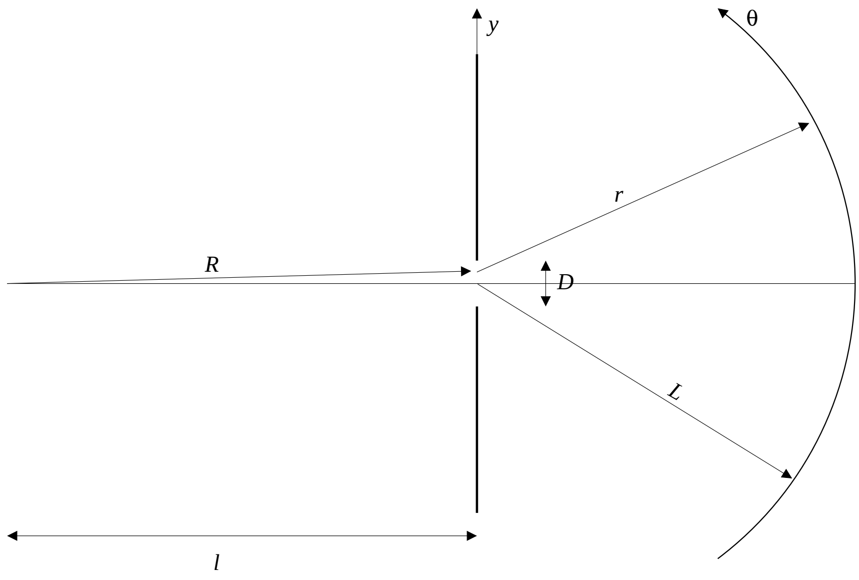
עוד פרמטר שמשפיע על הפרש הזמנים המקסימלי הנ"ל, הוא כמובן רוחב הסדק (שוב, בהמשך נראה זאת באופן מדוייק). זה מתאים למה שראינו, שהזוית שבה התבנית נהרסת אינה קבועה, אלא התבנית נהרסת בזוית שונה עבור כל סדק. זה גם יכול לתת לנו דרך לבדוק את ההשערה: אם נסתכל על סדק אחד, נוכל לבדוק באיזו זוית נהרסת התבנית. מצד שני, נוכל לחשב עבור אותו סדק ועבור הזוית שמצאנו, מהו הפרש המרחקים המקסימלי של הקרניים שמגיעות לאותה זוית. מכאן נקבל ערך של הפרש המרחקים המקסימלי שבו התבנית עדיין לא נהרסת - כלומר: לפי ההשערה נוכל לומר שבכל נקודה שבה הפרש המרחקים המקסימלי גדול יותר מהערך שמצאנו, נצפה לראות סטייה מהתבנית. כעת נוכל לחשב עבור סדק אחר, מהי הזוית שבה מתקבל אותו הפרש זמנים מקסימלי שמצאנו; אם אכן נראה שזו הזוית שבה מתחילה הסטייה מהתבנית התיאורטית, נוכל לקבל מכך אישור להשערה.

3.2 חישובים

אז בשלב ראשון, עלינו לחשב עבור סדק נתון, ועבור זוית נתונה, מהו הפרש הזמנים המקסימלי של הקרניים העוברות דרך נקודות שונות בסדק. ניזכר בגדלים הרלוונטיים במערכת שלנו (איור מספר 1). מדובר בסדק ברוחב D, כאשר המרחק בין המקור לסדק הוא l, ובין הסדק לנקודת המדידה - L. את המרחק מהמקור לנקודה מסויימת y בתוך הסדק נסמן ב-R, ומהנקודה בסדק לנקודת מדידה בזוית θ נסמן ב-r.

[1] זמן הקוהרנטיות הוא קטן מאד מאד ביחס לזמן המדידה - אפילו אם המכפילור מבצע מאות מדידות בשנייה - ולכן גם השינויים בעוצמה יהיו קצרים הרבה יותר מזמן המדידה; משום כך אפשר לדבר על מיצוע בזמן.

[2] בעייה אחת עם התיאוריה היא שלא ברור בכלל שהירידהה המונוטונית באמת משקפת את מה שהיינו מצפים לראות ללא התאבכות: לכאורה, ללא התאבכות, היינו מצפים לראות דווקא עוצמה שווה בכל הכיוונים, כמשתמע מעקרון הויגנס! זו נקודה שדורשת עיון נוסף.



איור 1: תיאור סכימטי של קרן אור העוברת דרך סדק

ראשית, נמצא את המרחק הכולל מהמקור לנקודת מדידה בזוית θ שעוברת הקרן העוברת דרך הנקודה y בסדק:

$$R = \sqrt{l^2 + y^2}$$

$$r = \sqrt{(y - L\sin\theta)^2 + (L\cos\theta)^2} = \sqrt{y^2 - 2yL\sin\theta + L^2\sin^2\theta + L^2\cos^2\theta} = \sqrt{y^2 - 2yL\sin\theta + L^2}$$

והמרחק הכולל הוא כמובן

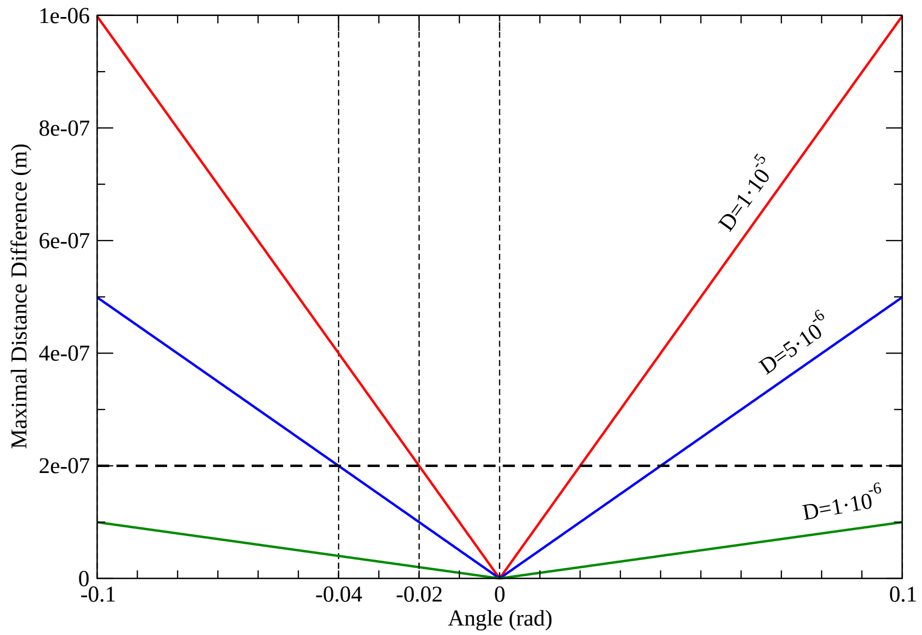
$$R_{tot} = R + r = \sqrt{l^2 + y^2} + \sqrt{y^2 - 2yL\sin\theta + L^2} \tag{1}$$

כעת כשבידינו נוסחה 1[3], נוכל לחשב מה המרחק אל נקודת מדידה בזוית נתונה, מכל נקודה ונקודה בסדק. הפרש המרחקים בין הנקודה הקרובה ביותר לנקודה הרחוקה ביותר[4] הוא הפרש המרחקים המקסימלי בין קרניים שעוברות דרך סדק ברוחב D אל נקודת מדידה בזוית θ:

$$Max\_Dist\_Diff(D,\theta) = \max_{y\in\left[-\frac{D}{2},\frac{D}{2}\right]}\{R_{tot}(y,\theta)\} - \min_{y\in\left[-\frac{D}{2},\frac{D}{2}\right]}\{R_{tot}(y,\theta)\} \tag{2}$$

[3] מן הראוי להעיר, שאמנם הנוסחה שפיתחנו תלויה לכאורה גם במרחקים בין רכיבי המערכת L ו- l , אולם במקרה של far field אין לגדלים אלה למעשה השפעה. ניתן להראות זאת מתמטית על ידי קירובים, ולהגיע לנוסחאות שלא תהיינה תלויות בפרמטרים אלו. אבל מכיוון שאנו מכניסים הכל למחשב, אין כל סיבה לא להשאיר את הפרמטרים בנוסחאות ופשוט להתייחס אליהם כאל קבועים. המחשה של העובדה שלגדלים האלה אין השפעה מעשית, קיבלתי כשחשבתי שאולי על ידי הקטנת המרחק בין רכיבי המערכת, נוכל להשפיע על הפרשי המרחקים ועל ידי כך לשנות את הזוית שבה נהרסת התבנית. אבל כשחישבתי מה יהיו הפרשי המרחקים אפילו עבור l ו-L מסדר גודל של מילימטרים (במדידות המקוריות $L \approx l \approx 70\,\mathrm{cm}$), קיבלתי את אותם ערכים בדיוק שקיבלתי עבור l ו-L המקוריים; כך שאכן, כל עוד מתקיים קירוב far field, ההשפעה של גדלים אלה על הפרש המרחקים היא זניחה לחלוטין.

[4] עקרונית, ניתן למצוא את הנקודה הקרובה ביותר והרחוקה ביותר בצורה אנליטית, ע"י גזירת הביטוי שקיבלנו בנוסחה 1 לפי y; אולם בפועל, פשוט נתתי למחשב לחשב את המרחק עבור הרבה מאד נקודות צפופות בסדק, ולקחת את המינימום והמקסימום מכל הנקודות שהוא בדק.



איור 2: דוגמא לדרך שבה ננסה לאשש את ההשערה שלנו

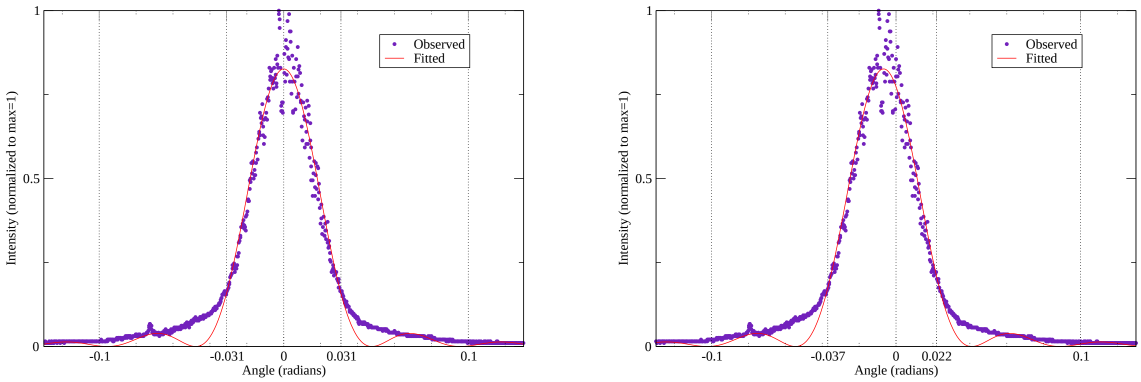
$Max\_Dist\_Diff(D,\theta)$ מתכונתי כמובן להפרש הזמנים המקסימלי שלוקח לקרניים להגיע לשם, וזהו הגודל שרצינו להשוות לזמן הקוהרנטיות.

כדי להבין בצורה טובה יותר מה בדיוק נותן לנו הגודל המחושב בנוסחה 2, נשרטט גרף של Max_Dist_Diff כפונקציה של θ, עבור כמה סדקים שונים (איור מספר 2). נניח לצורך הדוגמא, שזמן הקוהרנטיות הוא כזה, שעבור הפרש מרחקים של יותר מ-$2 \cdot 10^{-7}$ m, ההתאבכות נהרסת. אזי, כפי שניתן לראות בגרף, מהסדק שרוחבו $D = 1 \cdot 10^{-6}$ היינו מצפים לקבל תבנית התאבכות שתתאים לגמרי לתיאוריה בתחום הזויות של ± 0.1 rad, מהסדק שרוחבו $D = 5 \cdot 10^{-6}$ היינו מצפים לראות סטייה מהתיאוריה סביב הזוית ± 0.04, ומהסדק שרוחבו $D = 1 \cdot 10^{-5}$ - סביב הזוית ± 0.02.

3.3 ניתוח ראשוני של התוצאות

כעת כל התשתית התיאורטית מוכנה, ואנו מגיעים לשלב של בדיקת המדידות עצמן. בשלב ראשון, יש לבצע התאמה עבור כל אחד מהסדקים, כדי לדעת מה רוחב הסדק, וכדי לזהות את הזוית שבה מתרחשת הסטייה מהתבנית התיאורטית. בשלב ראשון התמקדתי בסדקים הבודדים הבינוני והצר, שבהם מתרחשת התופעה אותה אנו חוקרים, ובזוג הסדקים, שגם שם - מתרחשת אותה תופעה, עבור המעטפת של תבנית ההתאבכות.[5]

[5]בכלל לא ברור שעבור זוג הסדקים התיאוריה המוצעת אמורה להתאים: כאשר מדובר בזוג, יש גם את ההתאבכויות מהסדק שני, ולכאורה גם זה אמור להשפיע על הפרשי הזמנים של קרניים מנקודות שונות. מצד שני, כבר בתיאור התופעה הדגשנו את העובדה שמה שנהרס זו רק המעטפת (שהיא מושפעת מרוחב כל אחד מהסדקים) ולא התבנית הפנימית (שהיא מושפעת מהמרחק בין הסדקים), כך שיש הגיון מסויים בהתמקדות דווקא ברוחב הסדקים ולא במרחק ביניהם. מכל מקום, זו אחת מהחוליות החלשות בהשערה המוצעת. מכל מקום, לא מזיק לבדוק את הנתונים גם עבור הזוג, ובמקרה הגרוע - להתעלם מהם בהמשך, או להסביר למה זה כן בכל זאת מתאים לתיאוריה...



איור 3: הצורך למרכז את הגרפים לפני ניתוח התוצאות

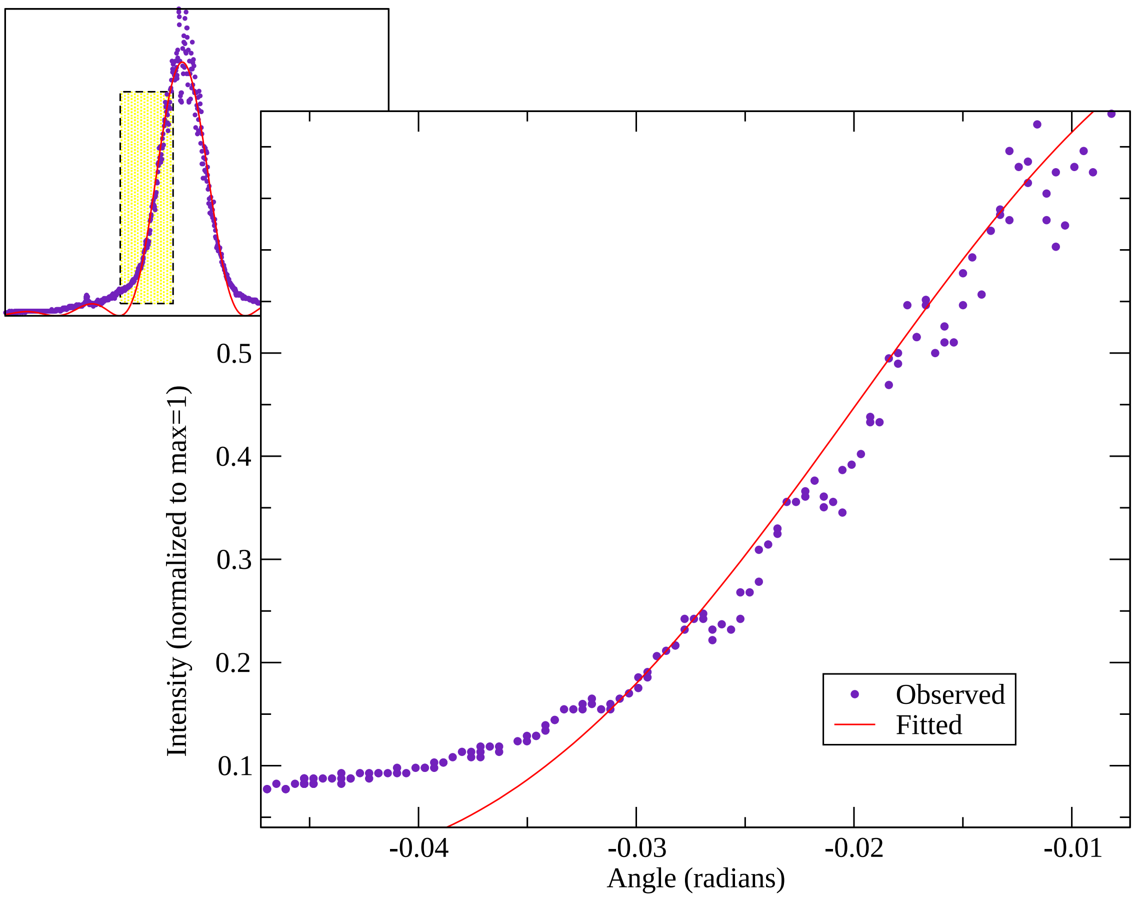
הגרפים המוצגים הם מדידות של הסדק הבינוני, וההתאמה לתיאוריה. בגרף מימין ניתן לראות את ההתאמה המקורית, כאשר מרכז התבנית אינו מתאים בדיוק לזוית 0. בשל כך, הסטיות של המדידות מהתבנית התיאורטית מתחילות בזוית שונה בכל צד. לעומת זאת, לאחר מרכוז התבנית (בעזרת פרמטר ה-shift שהתקבל מההתאמה), ניתן לראות שהסטיות מהתבנית הן אכן סימטריות, וקל עכשיו לזהות מהי הזוית שבה מתרחשת הסטייה.

כזכור מהחלק הקודם של הניסוי, מצאנו שתמיד הייתה סטייה קטנה של מרכז התבנית מהזוית 0. בניסויים הקודמים, סטייה זו לא הפריעה לנו. אבל כעת, כדי להקל על זיהוי הזוית שבה מתחילה הסטייה מהתבנית, עלינו למרכז את המדידות בדיוק (אחרת, מגלים שהסטייה מהתבנית מתחילה בצד אחד בזוית מסויימת, ובצד שני של התבנית - בזוית אחרת - בעוד שהתופעה היא באמת סימטרית לחלוטין!). המחשה לכך ניתן לראות באיור 3.

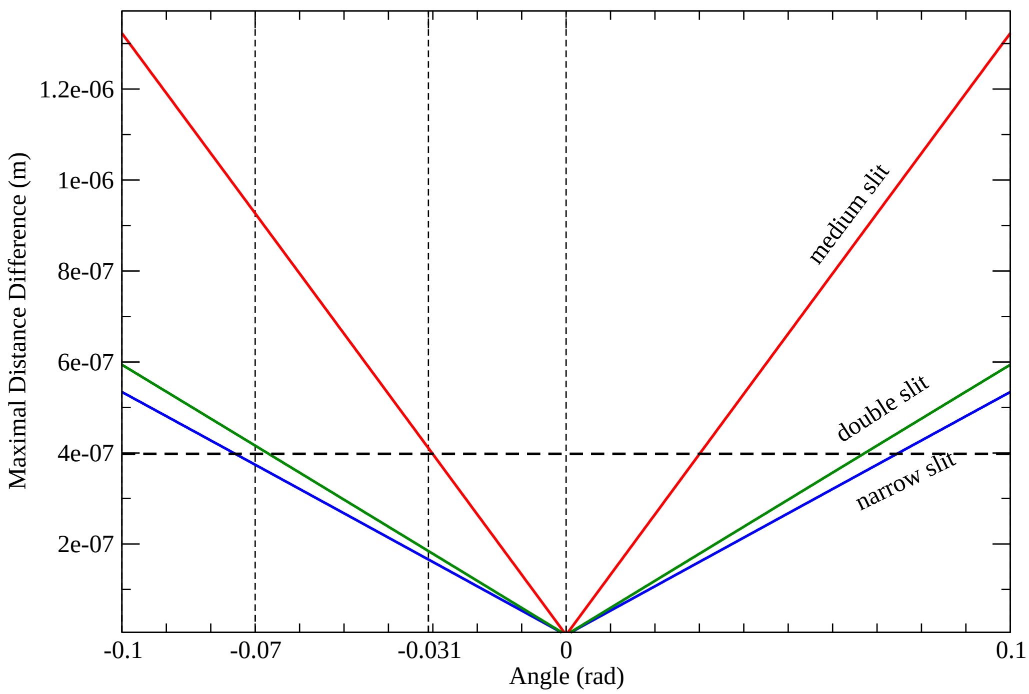
לאחר מרכוז המדידות, ביצעתי התאמה, וממנה נסיתי לחלץ שני פרטים: ראשית, רוחב הסדק - שהוא פשוט אחד מהפרמטרים המתקבלים בהתאמה. הדבר השני שצריך לחלץ, הוא את הזוית שבה מתרחשת הסטייה מהתבנית. לשם כך התמקדתי (עשיתי zoom) באיזור בגרף שסביבו מתחילה הסטייה מהתבנית (איור מספר 4). מתוך הגרף וההתאמה, ניתן לראות שהסטייה מהתבנית מתרחשת סביב הזוית $\theta = 0.031$ (כזכור, הסטיות סימטריות, ולכן אין חשיבות לסימן). את אותו תהליך אפשר לבצע גם עבור הסדק הצר, ועבור זוג הסדקים (שם זה קצת יותר מסובך, כי אין קו שמתאר את המעטפת, אלא צריך לנחש אותו, אבל אפשר לעשות זאת; בהמשך נראה זאת במפורט). הנתונים המתקבלים מהבדיקות האלה הם:

סדק	רוחב הסדק המותאם (m)	הזוית בה מתחילה הסטייה (rad)
בינוני	$1.325 \cdot 10^{-5}$	0.031
צר	$5.35 \cdot 10^{-6}$	0.07
זוג	$5.95 \cdot 10^{-6}$	0.07

כעת, נוכל לשרטט גרף דומה לזה שהבאנו כדוגמא באיור 2, ונראה אם באמת נוכל להעביר קו המתאים לזמן הקוהרנטיות, שיתאים לכל הסדקים. התוצאות מוצגות באיור 5. הגרף הזה נראה מאד מעודד! ברור שהתוצאות אינן מתאימות במדוייק, שכן עבור הסדק הצר ועבור זוג הסדקים קיבלנו את אותה זוית סטייה, בעוד שרוחבי הסדקים קצת שונים, אבל בסך הכל, הישר שהעברנו דווקא עובר קרוב מאד לנקודות הרלוונטיות.



איור 4: הזוית שבה מתחילה הסטייה של המדידות מהתבנית התיאורטית - סדק בינוני



איור 5: הזויות בהן מתחילות הסטיות מהתבנית עבור הסדקים שנבדקו

הקוים המקווקווים המאונכים מתארים את הזויות שבהם ראינו סטייה מהתיאוריה עבור הסדקים השונים. החיתוך של קוים אלה עם הקו של כל סדק, מראה מהו הפרש המרחקים המקסימלי המתאים לרוחב הסדק ולזוית הסטייה הנצפית; הקו המקווקוו המאוזן מדגים בערך מהו הפרש המרחקים ה"אמיתי" שגורם לסטיות מהתיאוריה, וניתן לראות שהצלחנו להעביר קו כזה שבאמת עובר קרוב לנקודות החיתוך הנכונות.

בעייה אחת היא, שהמרחק שקיבלנו - שהוא המרחק המתאים לזמן הקוהרנטיות - הוא בערך $4 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$. אורך זה מקביל - במהירות האור - לזמן של $1.33 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{s}$. זמני קוהרנטיות אופייניים הם מסדר גודל של פיקו-שניות (10^{-12}); ומבדיקה באינטרנט, ללייזרי He-Ne דוגמת זה שהשתמשנו בו בניסויים האלה, יש זמן קוהרנטיות ארוך הרבה יותר. מכיוון שאיני מבין את התיאוריה מאחורי דרך הפעולה של הלייזר לעומק, איני יודע אם הגיוני לומר שאולי מכיוון שהלייזר בו השתמשנו כבר התיישן, אולי זמן הקוהרנטיות שלו הושפע לרעה.

מכל מקום, לאור התוצאות המעודדות של הגרף, נצטרך לעשות בדיקה מעמיקה יותר.

3.4 בדיקות מעמיקות יותר

מכיוון שהתוצאות שקיבלנו בגרף נראות "קרובות" למה שהיינו מצפים, נצטרך לנסות למדוד את זוית הסטייה בצורה מדוייקת יותר, ולתת הערכות עבור תחומי השגיאה, כדי לראות אם ה"קירבה" היא באמת מספיק קרובה או לא. לשם כך נחזור להתאמות הבסיסיות.

ראשית, מהסתכלות באיור 4 ניתן לראות שאפילו באיזורים שבהם המדידות מתאימות לתאוריה, ההתאמה אינה מדוייקת (וזה מולט עוד יותר עבור הסדק הצר, כפי שנראה באיור 7). יכול להיות שזה משום שה-התאמה שביצענו ניסתה להתאים את הגרף גם לאיזורים שבכלל לא אמורים להתאים, בדיוק בגלל התופעה אותה אנחנו מנסים לחקור! לכן, כשלב ראשון בזיהוי זוית הסטייה המדוייקת, ננסה לעשות התאמות חדשות, ואולם הפעם נעשה את ההתאמה רק באיזור שאמור להתאים לתיאוריה.

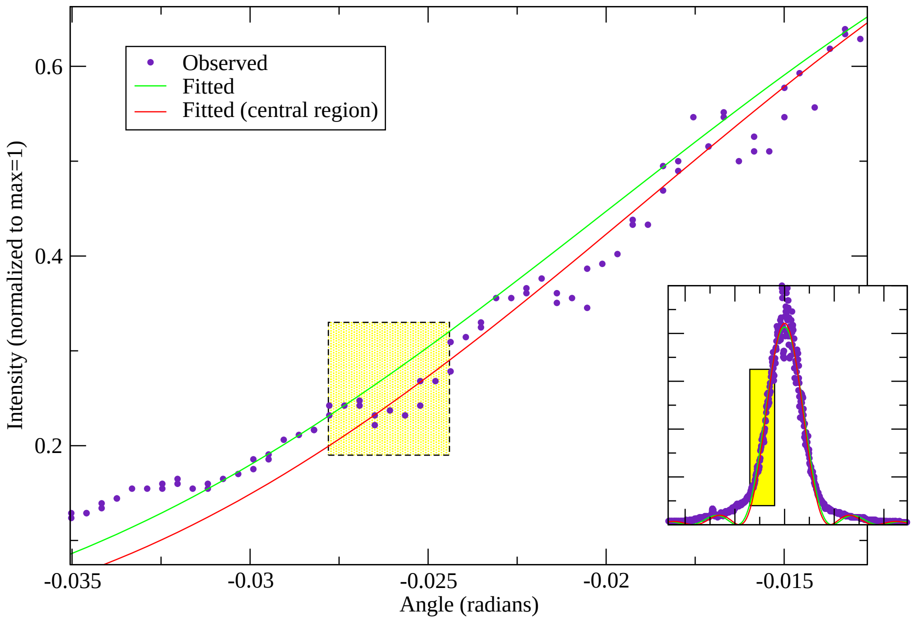
ההתאמה החדשה לסדק הבינוני מובאת באיור מספר 6. מההתאמה החדשה אנו מקבלים הערכה מחודשת הן לרוחב הסדק, והן לזוית הסטייה מהתבנית. הפעם, כאמור, אנו מעוניינים לקבל גם טווח שגיאה, ולשם כך נעריך בעין באיזו זוית בבירור יש עדיין התאמה, ובאיזו זוית בבירור כבר אין התאמה. הגרפים המתארים את התהליך מובאים באיורים 6, 7 ו-8, והנתונים שחולצו מהם מסוכמים בטבלה להלן:

סדק	רוחב מותאם	זוית הסטייה	מינימום	מקסימום
בינוני	$1.39 \cdot 10^{-5}$	0.0263	0.0244	0.0278
צר	$5.94 \cdot 10^{-6}$	0.0568	0.0497	0.065
זוג	$6.6 \cdot 10^{-6}$	0.048	0.037	0.062

כמו שעשינו בפעם הקודמת, נציג את הנתונים בגרף (איור 9) כדי לראות מה בדיוק קורה פה. ניתן לראות מהגרף שישנו בבירור איזור של חפיפה בין טווחי השגיאה של כל שלושת הסדקים שנבדקו! כלומר, על סמך שלושת הסדקים שנבדקו, נראה שההשערה שלנו מתאימה לממצאים. מהגרף ניתן לחלץ את הפרש המרח-קים המקסימלי שהחל ממנו נהרסת התבנית, הערך המתקבל הוא בערך $3.7 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$, וזמן הקוהרנטיות המתאים לזה הוא $1.23 \cdot 10^{15}\ \mathrm{s}$, וכבר ציינו את הבעייתיות שבערך הזה.

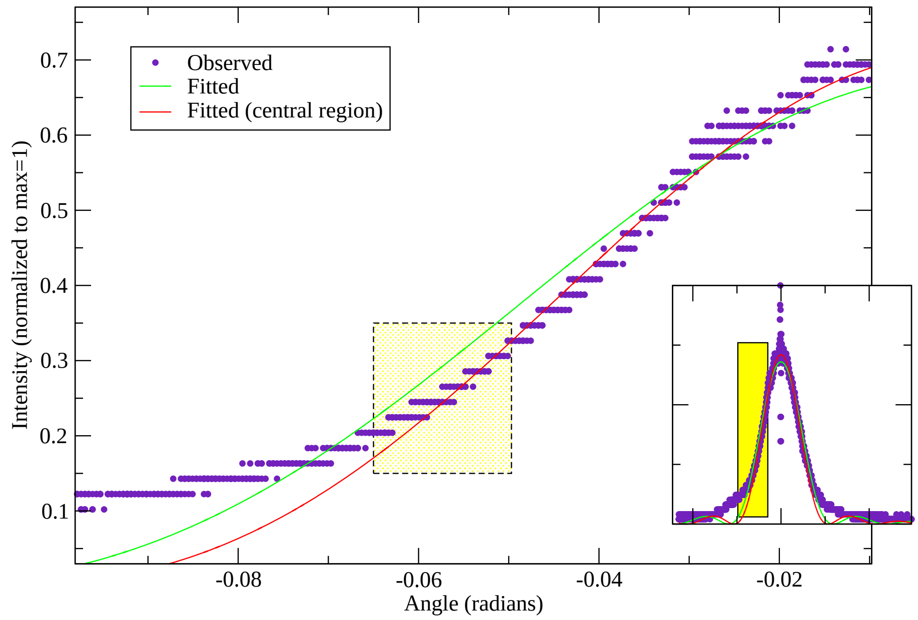
3.5 הבעייה הגדולה

כדי להמשיך ולנסות לאשש את ההשערה, אנו זקוקים ליותר נתונים. הדבר הטוב ביותר היה אילו יכולנו לבצע מדידות עבור הרבה סדקים, בעלי רוחבים שונים במרווחים כרצוננו. ואולם, אין ברשותנו הרבה סדקים כאלה, ולכן נצטרך לעשות משהו אחר. רעיון אחר שרציתי לבדוק, הוא לבצע את המדידות עבור לייזרים שונים - הן לייזרי He-Ne שונים, והן לייזרים בעלי אורכי גל נוספים. ההנחה שלי היא שאם באמת



איור 6: תהליך זיהוי זוית הסטייה מהתבנית - סדק בינוני

הריבוע הצהוב בגרף הקטן מראה את האיזור המוגדל בגרף הראשי; הריבוע הצהבהב בגרף הראשי מראה את האיזור שזיהינו כטווח השגיאה: ניתן לראות בבירור שמימין לריבוע המדידות עדיין מתאימות לגרף התיאורטי, ומשמאלו - המדידות בהחלט לא מתאימות לתיאוריה. בגרף ניתן לראות גם שההתאמה המקורית (ירוק) אכן פחות מוצלחת מההתאמה החדשה (אדום), שהיא מנסה להתאים רק את החלק של הגרף שבאמת אמור להתאים לתיאוריה.



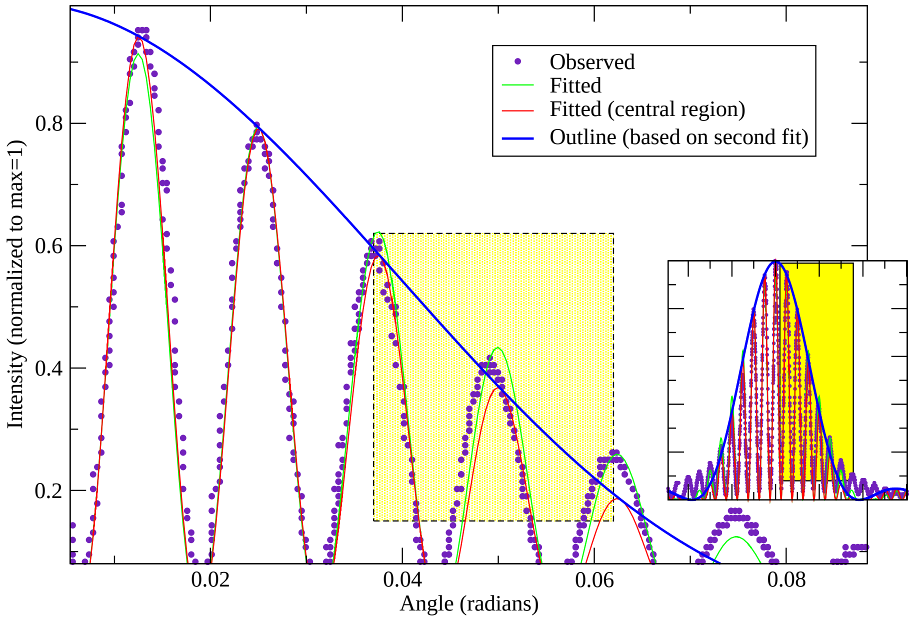
איור 7: תהליך זיהוי זוית הסטייה מהתבנית - סדק צר

כאן השיפור של ההתאמה החדשה (אדום) ביחס להתאמה המקורית (ירוק) בולטת עוד יותר.

יש פה תופעה שקשורה במכשיר (וזמן הקוהרנטיות הוא אכן מאפיין כזה), נצפה לראות שינויים בתופעה כאשר נשתמש במכשירים שונים. בפרט, אם עבור מכשיר אחר בעל אותו אורך גל, נקבל תבניות שבהן הסטיות מהתבנית קורות בזויות אחרות אך עקביות, זה כבר יהיה סימן חזק מאד לכך שההשערה שלנו אכן נכונה. ואולם, לא הספקתי לבצע מדידות נוספות.

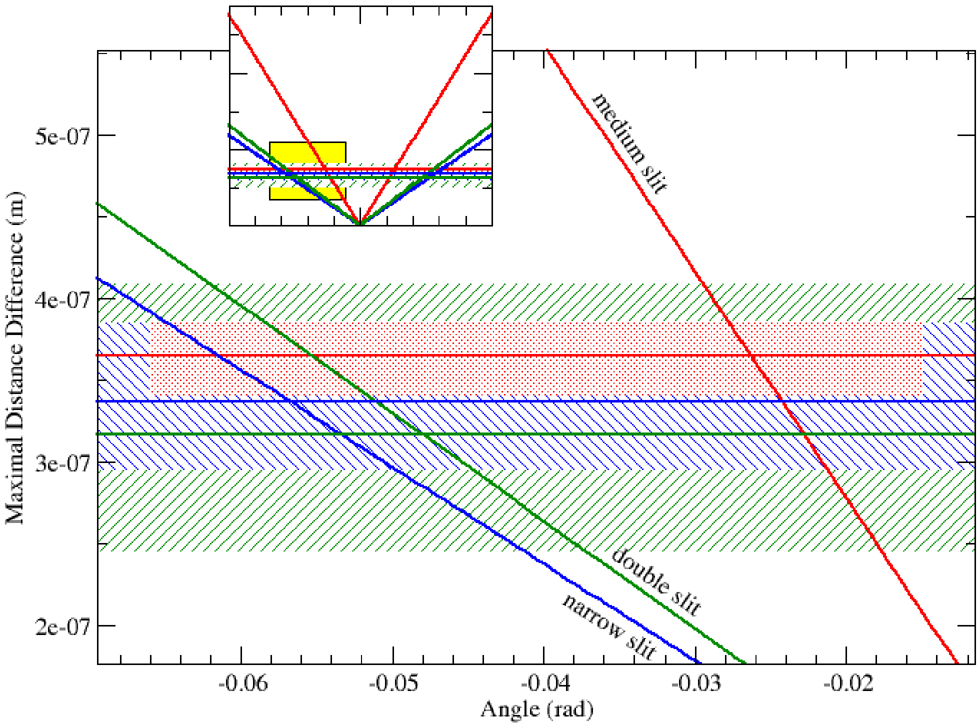
לכן, עברתי שוב על הנתונים שכבר יש בידי, ונזכרתי שישנו גם הסדק הרחב; כזכור, עבור הסדק הרחב דווקא לא נצפתה התופעה אותה אנו מנסים לחקור: בתבנית המתקבלת מסדק זה, ניתן לראות בבירור נקודות התאפסות ושיאים משניים. על פניו, זה נראה מתאים להשערה שלנו, שכן אמנם עבור סדק רחב יותר, נצפה לראות את התבנית נהרסת בזוית קטנה יחסית, אולם מצד שני - התבנית עצמה המתקבלת מסדק רחב היא הרבה יותר צרה, ולכן ייתכן שחלק יותר גדול מהתבנית יספיק להיכנס באיזור שבו ההתאבכות לא נהרסת. אז כעת, נוכל לבדוק זאת באופן כמותי: התהליך הוא בדיוק זה שעשינו עבור הסדקים האחרים: מתאימים את המדידות לגרף תיאורטי; מוצאים את הזוית שבה מתחילה הסטייה - או הפעם, מכיוון שאין כל כך סטייה, אפשר לתת חסם תחתון לזוית זו, לפי זוית שבה אנו עדיין רואים התאמה לתבנית. ההתאמה לגרף מובאת באיור מספר 10. כפי שניתן לראות, מצד אחד, ההתאמה עצמה אינה כל כך טובה - יש סטיות גדולות יחסית מהתבנית; אך מצד שני, אפילו בזויות די גדולות (0.04) עדיין ניתן לראות בבירור את התנודות הגליות של המדידות - מה שאנו לא רואים בכלל בסדקים הצרים יותר.

רוחב הסדק המתקבל מההתאמה הוא $3.35 \cdot 10^{-5}$ m. עבור רוחב סדק כזה, זמן קוהרנטיות כמו זה שמצאנו מתוך המדידות הקודמות נותן זוית סטייה של בערך $0.01\,\mathrm{rad}$ (הגרף הקטן באיור 10) - ומגרף ההתאמה ניתן לראות בבירור שאפילו בזויות גדולות הרבה יותר יש התאמה מצויינת של הנתונים לגרף! הזוית הקטנה ביותר שניתן לומר שיש בה סטייה מהתבנית, היא 0.0175, והמרחק המתאים לזוית זו הוא $5.85 \cdot 10^{-7}$ m -



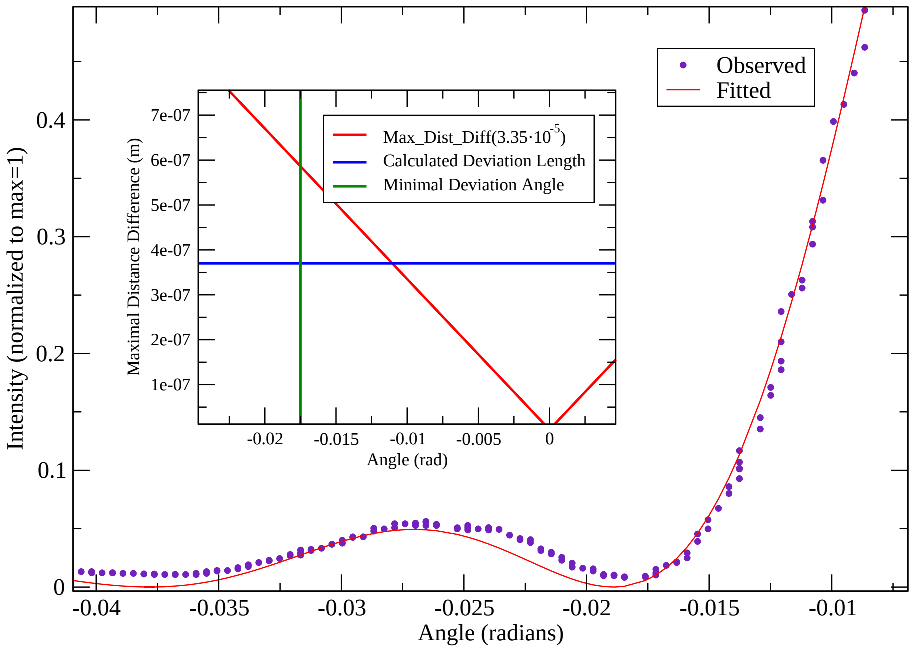
איור 8: תהליך זיהוי זוית הסטייה מהתבנית - זוג סדקים

ההתאמה כאן קצת יותר קשה, מכיוון שאיננו רואים, כמובן, את המעטפת של המדידות, אלא צריך לנחש היכן היא עוברת. כדי להקל על התהליך, שרטטנו בנוסף להתאמות גם את המעטפת התיאורטית (כחול עבה), לפי הנתונים (רוחב הסדקים) המתקבל מההתאמה החדשה.



איור 9: הזויות בהן מתחילות הסטיות מהתבנית, עם טווחי שגיאה

הקוים המקבילים לציר x הם הניחוש הטוב ביותר להפרש המרחקים המתאים לזוית הסטייה עבור כל אחד מהסדקים (ההתאמה בין הסדק לזוית הסטייה המוצעת היא לפי הצבעים). טווחי השגיאה הם האיזורים הצבועים שסביב כל אחד מהקוים האלה.



איור 10: בדיקת ההשערה עבור הסדק הרחב

הגרף הגדול מראה את ההתאמה של המדידות מהסדק הרחב לתיאוריה. בגרף הפנימי חישוב הפרשי המרחקים המקסימליים עבור סדק מהרוחב שהתקבל מההתאמה; הקו הכחול מראה את המרחק שמצאנו מהנתונים הקודמים, והחיתוך עם הגרף מראה את הזוית זבה היינו מצפים לראות סטייה מהתבנית; הקו הירוק מראה את הזוית הקטנה ביותר שעבורה ניתן לומר שאולי יש סטיות מהזוית - והחיתוך עם הגרף נותן את הפרש המרחקים המינימלי המתאים לזוית זו.

וכפי שניתן לראות מאיור מספר 9, מרחק זה הוא הרחק מחוץ לכל טווחי השגיאה שמצאנו! וכאמור, אפילו בזויות הרבה יותר גדולות, לא נראה שהתבנית שלנו באמת נהרסה! לכן, אלא אם כן בסדק הרחב יש תופעה אחרת, נראה שזה מפריך את ההשערה שלנו.

4 סיכום

העלינו השערה מסויימת להסבר האנומליה שראינו במדידות של תבניות ההתאבכות בלייזר. חלק מה-נתונים נראים מתאימים מאד להשערה, אבל יש רק מעט נתונים. מצד שני, יש נתון אחד שנראה כמפריך את ההשערה. מלבד הנתון הסותר, יש גם בעיות נוספות בהסבר המוצע: זמן הקוהרנטיות שמצאנו קטן מאד מאד יחסית למה שהיינו מצפים לראות; ואף מבחינה תיאורטית, לא לגמרי ברור שההסבר אכן מספק - במיוחד לא ברור מה יקרה עבור זוג סדקים.

על כן, נראה שאין בסיס לומר שההשערה שהעלינו היא אכן הגורם לתופעה, אם כי הנתונים שכן מתאימים אולי מרמזים על כך כי יש בהסבר הזה משהו.

בהחלט כדאי לבצע עוד ניסויים, בכיוון אלה שציינתי לעיל, פיסקה 3.5.

הבנה עמוקה יותר של התיאוריה שמאחורי "זמן הקוהרנטיות" היתה יכולה לעזור. כשחיפשתי באינטרנט חומר רקע לגבי התופעה, נראה שיש לפחות שתי תופעות קשורות - אך קצת שונות - "זמן קוהרנטיות" ו"מרחק קוהרנטיות". חלק מהמקורות מתארים את שתי התופעות, וחלקם - כאילו מדובר בשתי תופעות שונות: אחת היא זו שתיארתי כאן, ואחרת היא תופעה שקשורה בעובדה שהלייזר אינו מונוכרומטי לחלוטין, אלא יש התפלגות מסויימת סביב אורך הגל הראשי. ושוב, ייתכן ושתי הופעות הן בעצם אותה תופעה. הרבה מהמקורות שמצאתי מדברים על מדידת זמן הקוהרנטיות בעזרת אינטרפרומטר, אבל לא מצאתי אזכורים ברורים לתופעה אותה אני מנסה לחקור. בקיצור - הבנה עמוקה יותר של התיאוריה בהחלט היתה יכולה לעזור.

וכמובן, סביר מאד שהתופעה נובעת ממשהו אחר לחלוטין. שתי הצעות מעניינות ששמעתי מאנשים - והם אומרים שבדיקות ראשוניות נראות מעודדות - הן שאולי התופעה נובעת מהעובדה שלסדקים שלנו יש עובי (וזה יכול אולי להתאים אפילו לחלק מהמדידות שביצעתי כאן: מהמדידות שלי נראה שיש קורלציה בין רוחב הסדק לזוית שבה קורית התופעה - וזה יכול בהחלט להתאים להסבר שתלוי בגיאומטריה של הסדקים), או מאיזשהו מיצוע מסובך שנעשה בתוך המכפילור (לי אישית זה נשמע פחות סביר: קשה לחשוב איך דבר כזה היה יכול לשמור על התבנית הפנימית של זוג סדקים, או למה זה היה משפיע בזויות שונות עבור סדקים שונים).

נקודה צדדית מעניינת שעלתה מתוך מהלך העבודה: ראינו שלפעמים אין צורך לסגור הכל לחלוטין מבחינה תיאורטית, להגיע לנוסחאות אנליטיות וכו', אלא ניתן להסתפק בחישובים "מסובכים" יותר, אך פשוטים לפיתוח - ובמיוחד כשעובדים עם המחשב, אין הרבה פעמים צורך לפתח את הנוסחאות מעבר לכך.